

この事業はモーターボート競走公益資金による財團法人
日本船舶振興会の補助金の交付を受けて実施したものである

研究資料 No. 393

SR210

新世代造船システムに関する調査研究

報 告 書

平成元年3月

社団法人 日本造船研究協会

はしがき

わが国の造船業が今後とも魅力のある基幹産業として社会的責務を果し続けて行くためには、現在の造船業の体質を抜本的に改善して効率的に高品質の船舶を建造する近代的産業へと脱皮を図ることが必要である。

また、造船において日本は国際的に先導的な立場にあり、日本が率先して造船業活性化のための技術開発に早急に着手すべきである。

このためには、従来の労働集約的体質を情報の統合化・高度化によって知識集約的な体質に変革して産業の魅力化を図ると共に国際的なコスト競争力を強化することと、経験工学である造船技術の飛躍的な高度化によって国際的な技術競争力を強化することとを、同時に実現する21世紀を目指した新世代の造船システムを構築することが必要である。

幸い、AI技術を中心とする最近のコンピュータ利用技術の急速な進展、情報の高度化を可能とする通信ネットワークの基盤整備等高度なシステム化を可能とする環境も整備されつつある。

本調査研究は、このような背景の下に、次世代にふさわしい造船システムのあり方、システム構築に必要な技術的課題を検討するために、日本船舶振興会の補助事業として新世代造船システムに関して第210研究部会を設けて調査研究を行った。

調査研究は、昭和62年度及び63年度の2ヶ年に亘り実施された。初年度においては、新世代造船システムのイメージ、現状の技術レベル及びその将来動向、更に内外のコンピュータ関連技術の動向等について広汎な調査研究を、2年度目においては、新世代造船システムを実現するための鍵となる重要なブレークスル技術について調査研究し、問題点の抽出と開発・実用化のための技術的課題を明らかにした。

本調査研究における課題は、

- ① 新世代造船システムに関する新技術動向及び利用環境の調査研究
- ② 造船CIMSに関する調査研究
- ③ 新船体構造設計法に関する調査研究
- ④ 数値水槽に関する調査研究

である。

これらは、新船舶の開発から設計、生産、経営管理にまたがる造船の基幹部分の課題であり、多岐にわたる技術的、学術的課題が多く、産学官の造船関係者の総力を結集した研究体制で取り組まれた。本調査研究は次頁に示すように第210研究部会を中心に運営幹事会、統括ワーキンググループ、調査ワーキンググループ及び3分科会により実施された。

第210研究部会委員名簿

(敬称略、順不同)

◎：部会長、幹事長、主査、分科会長、

☆：副幹事長、★：幹事、●：オブザーバー

部 会（昭和62～63年度）

- ◎藤田 譲（東理大）(62～63), 元良 誠三（造振財団）(62～63), 小山 健夫（東大）(62～63),
渡辺 幸生（船研）(62), 菅井 和夫（船研）(62～63), 宇都宮達男（N.K.）(62～63),
石井 信夫（郵船）(62), 村上 幹彌（商船三井）(62～63), 中曾 敬（造工）(62～63),
新藤 卓治（造工）(63), 小野 政雄（造工将来技術検討部会）(62～63),
大西 重雄（海技局）(62), 佐々木博通（海技局）(62～63)
●小笠原 璞（三菱）(63), ●藤野 宏（第1分科会）(62～63), ●永元 隆一（第2分科会）(62～63),
●杉村 泰（第3分科会）(62～63), ●白居 純（船協）(62～63), ●石丸 周象（海技局）(62～63)

運営幹事会（昭和62～63年度）

- ◎小野 政雄（三菱）(62～63), ☆小山 健夫（東大）(62～63), 藤野 宏（石播）(62～63),
永元 隆一（三菱）(62～63), 杉村 泰（三井昭研）(62～63), 菅井 和夫（船研）(62),
片岡 栄夫（船研）(62～63), 新田 豊（N.K.）(62～63), 嶋田 武夫（郵船）(62～63),
山名 俊茂（商船三井）(62～63), 横尾 雅俊（商船三井）(63), 藤田 実（川重）(62～63),
村岡 守（住重）(62), 平尾 幹彦（住重）(62～63), 尾川 宣之（鋼管）(62),
三浦 光利（鋼管）(62～63), 城野 隆史（日立）(62～63), 綾 日天彦（三井）(62～63),
宮崎 晃（三菱）(62～63), 元綱 数道（石播）(63), 小笠原 璞（三菱）(63),
島田 嘉彦（三井）(63), 宮本 武（造研）(63)
●藤田 譲（部会長）(62～63), ●白居 純（船協）(62～63), ●石丸 周象（海技局）(62～63)

運営幹事会統括WG（昭和62～63年度）

- ◎小山 健夫（東大）(62～63), 萩原亮太郎（川重）(62～63), 村岡 守（住重）(62),
平尾 幹彦（住重）(63), 尾川 宣之（鋼管）(62), 三浦 光利（钢管）(62～63),
城野 隆史（日立）(62～63), 宮崎 晃（三菱）(62), 小笠原 璞（三菱）(62～63),
元綱 数道（石播）(62～63), 島田 嘉彦（三井）(62～63)
●小野 政雄（幹事長）(62～63), ●藤野 宏（第1分科会）(62～63), ●永元 隆一（第2分科会）(62～63),
●杉村 泰（第3分科会）(62～63), ●石丸 周象（海技局）(62～63)

運営幹事会調査WG（昭和62年度）

- ◎小山 健夫（東大）, 小幡 哲彦（钢管）, 米里 徹也（三菱）, 中村 光政（石播）,
福田 柳生（川重）, 西村 真司（住重）, 楠原泰四郎（エヌケ-エクサ）, 伊藤 隆規（日立設計所）,
渡辺 佳昭（三井）, 伏見 彰（三菱）, 国武 吉邦（三井）
●小野 政雄（幹事長）

第1分科会（昭和62～63年度）

◎藤野 宏(石 播)(62～63), ★中村 光政(石 播)(62～63), ★小幡 哲彦(鋼 管)(62～63),
★小山 健夫(東 大)(62～63), ★野本 敏治(東 大)(62～63), 赤木 新介(阪 大)(62～63),
長谷川和彦(阪 大)(62～63), 小瀬 邦治(広 大)(62～63), 翁長 一彦(船 研)(62～63),
西村 允男(N K)(62～63), ★覚野 博幸(川 重)(62～63), ★西村 真司(住 重)(62～63),
★伊藤 隆規(日立設計所)(62～63), ★吉識 恒夫(三 井)(62～63), ★渡辺 佳昭(三 井)(62～63),
★市川 明夫(三 井)(63), ★戸野本義直(三 菱)(62～63), ★米里 徹也(三 菱)(62),
★船岡宏一郎(三 菱)(63), ★伊藤 健(三 菱)(62～63), 宮本 武(造 研)(63)
・小野 政雄(運営幹事会)(62～63), ・石丸 周象(海 技 局)(62～63)

第1分科会WG 1（昭和62～63年度）

◎野本 敏治(東 大)(62～63), ★渡辺 佳昭(三 井)(62), ★市川 明夫(三 井)(63),
沼野 正義(船 研)(62～63), 金湖富士夫(船 研)(62～63), 永井 泊(石 播)(62～63),
田畠 光敏(石 播)(62～63), 覚野 博幸(川 重)(62), 中井 裕司(川 重)(62～63),
斎藤 政男(住 重)(62～63), 杉山 鏡太(エヌケ-エクサ)(62), 山脇 義朗(日 立)(62),
小川 泰史(日 立)(62), 安武 伸也(日 立)(62), 乾 泰司(三 井)(62),
長瀬 裕(三 井)(62～63), 深堀 修一(三 菱)(62), 北村 欧(三 菱)(62),
西村 真司(住 重)(63), 菊池 浩平(エヌケ-エクサ)(63), 近藤 公雄(日 立)(63),
米里 徹也(三 菱)(63), 船岡宏一郎(三 菱)(63), 宮本 武(造 研)(63)

第1分科会WG 2（昭和62～63年度）

◎小山 健夫(東 大)(62～63), ★伊藤 健(三 菱)(62), ★覚野 博幸(川 重)(63),
不破 健(船 研)(62～63), 日野 孝則(船 研)(62～63), 中村 光政(石 播)(62～63),
椎野 正元(石 播)(62～63), 福田 柳生(川 重)(62), 田辺 知良(川 重)(62～63),
鈴木 博之(住 重)(62～63), 佃 洋孝(鋼 管)(62), 楠原泰四郎(エヌケ-エクサ)(63),
植村 卓司(日立設計所)(62～63), 清水 健(三 井)(62～63), 中川 善博(三 菱)(62),
吉村 隆(三 菱)(62), 北村 欧(三 菱)(63), 長谷川和彦(阪 大)(63),
宮本 武(造 研)(63)

第1分科会WG 3（昭和63年度）

◎小山 健夫(東 大), ★伊藤 健(三 菱), 中村 光政(石 播), 田畠 光敏(石 播),
楠原泰四郎(エヌケ-エクサ), 杉山 鏡太(エヌケ-エクサ), 覚野 博幸(川 重), 福田 柳生(川 重),
藤原 俊一(川 重), 西村 真司(住 重), 斎藤 政男(住 重), 竹内 信(日 立),
伊藤 隆規(日立設計所), 清水 健(三 井), 市川 明夫(三井システム技研),
戸野本義直(三 菱), 船岡宏一郎(三 菱), 北村 欧(三 菱)

第1分科会WG 3 SC1（昭和62～63年度, 昭和62年度はWG 3として実施）

◎戸野本義直(三 菱)(62～63), ★原 泰徳(三 菱)(62～63), 村山雄二郎(船 研)(62～63),

今清水義紀(石 播)(62~63), 山内 喜隆(石 播)(62), 坂田 安利(石 播)(62~63),
 山川 宣夫(川 重)(62~63), 荒堀 芳正(川 重)(62~63), 滝口 知義(住 重)(62~63),
 柳原 恒二(住 重)(62~63), 柴山 和宏(鋼 管)(62), 福岡 昇二(鋼 管)(62~63),
 鈴木 潤(日本マリン)(62~63), 山田 克昌(日 立)(62~63), 萩野 弘幸(日立設計所)(62~63),
 渡辺 佳昭(三 井)(62~63), 山口 秀夫(三 井)(62~63), 八塚 繁(新興金属)(62~63),
 菱沼 常夫(ダイハツ)(62~63), 沢田 磐雄(鎌倉機械)(62), 高橋 貞雄(鎌倉機械)(62~63),
 山本 敏明(三 井)(63)

第1分科会WG3SC2(昭和63年度)

◎小山 健夫(東 大), ★伊藤 健(三 菱), 中村 光政(石 播), 杉山 鏡太(エヌケーエクサ),
 福田 柳生(川 重), 藤原 俊一(川 重), 島本 英史(住 重), 竹内 信(日 立),
 土井 憲治(日 立), 長瀬 裕(三 井)

第1分科会WG3SC3(昭和63年度)

◎小山 健夫(東 大), ★伊藤 健(三 菱), 中村 光政(石 播), 田畠 光敏(石 播),
 楠原泰四郎(エヌケーエクサ), 杉山 鏡太(エヌケーエクサ), 覚野 博幸(川 重), 福田 柳生(川 重),
 藤原 俊一(川 重), 西村 真司(住 重), 斎藤 政男(住 重), 竹内 信(日 立),
 伊藤 隆規(日立設計所), 植村 卓司(日立設計所), 清水 健(三 井),
 市川 明夫(三井システム技研), 船岡宏一郎(三 菱), 北村 欧(三 菱)

第2分科会(昭和62~63年度)

◎永元 隆一(三 菱)(62~63), 藤田 讓(東 理 大)(62~63), 真能 創(防 大)(62~63),
 上田 幸雄(阪 大)(62~63), 辻 勇(九 大)(62~63), ★藤野 正隆(東 大)(62~63),
 ★大坪 英臣(東 大)(62~63), ★町田 進(東 大)(62~63), ★板垣 浩(横 大)(62~63),
 井上 肇(船 研)(62~63), ★有田喜久雄(船 研)(62~63), 寺田 泰治(N K)(62~63),
 ★筒井 康治(N K)(62~63), ★前田 恒(石 播)(62~63), ★後川 理(石 播)(62~63),
 ★鴨井 紀之(川 重)(62~63), ★山口 雄三(住 重)(62~63), ★酒戸 恒男(住 重)(62~63),
 ★田中 稔(鋼 管)(62), ★佐藤 博一(鋼 管)(62~63), ★小野木 宏(鋼 管)(62~63),
 ★村田征一郎(日 立)(62~63), ★堀 徹(日立技研)(62~63), ★大石 剛(三 井)(62~63),
 ★仁保 治(三 井)(62~63), ★伏見 彰(三 菱)(62~63), ★矢島 浩(三 菱)(62~63),
 ★川上 肇(川 重)(62), ★山下 寛(川 重)(63), 宮本 武(造 研)(63)
 • 小野 政雄(運営幹事会)(62~63), • 石丸 周象(海 技 局)(62~63)

第2分科会WG1(昭和62~63年度)

◎藤野 正隆(東 大)(62~63), ★小野木 宏(鋼 管)(62~63), 河辺 寛(防 大)(62~63),
 大坪 英臣(東 大)(62~63), 深沢 塔一(東 大)(62~63), 桑島 進(東 船 大)(62~63),
 新開 明二(九 大)(62~63), 竹本 博安(船 研)(62~63), 渡辺 巍(船 研)(62~63),
 日笠 則明(N K)(62~63), 熊野 厚(N K)(63), 荒井 誠(石 播)(62~63),

岩崎 泰典(川重)(62~63), 小林顕太郎(住重)(62~63), 小段 範久(鋼管)(62~63),
近藤 公雄(日立)(62~63), 小林 正典(三井昭研)(62), 日根野元裕(三井昭研)(63),
橋本 州史(三菱)(62~63), 宮本 武(造研)(63)

第2分科会WG2(昭和62~63年度)

◎大坪 英臣(東大)(62~63), ★川上 肇(川重)(62), ★山下 寛(川重)(63),
船木 俊彦(阪大)(62~63), 矢尾 哲也(広大)(62~63), 渡部 修(筑波大)(62~63),
村川 英一(阪大)(62~63), 遠藤 久芳(船研)(62~63), 湯浅 通史(NK)(62~63),
渋江 唯司(石播)(62~63), 岡本 耕一(川重)(62), 川上 肇(川重)(63),
見上 孝一(住重)(62~63), 飯島 正明(住重)(63), 伊藤 久(鋼管)(62~63),
稻葉 芳樹(日立設計所)(62), 永浜 信一(日立設計所)(63), 摩嶋 祥規(日立技研)(63),
坪川 毅彦(三井)(62~63), 湯原 哲夫(三菱)(62~63), 宮本 武(造研)(63),
・都井 裕(東大)(62)

第2分科会WG3(昭和62~63年度)

◎町田 進(東大)(62~63), ★矢島 浩(三菱)(62~63), 富田 康光(阪大)(62~63),
豊貞 雅宏(九大)(62~63), 岩田 光正(広大)(62~63), 吉成 仁志(東大)(62~63),
前中 浩(船研)(62~63), 井上 肇(船研)(63), 岡 実(NK)(62~63),
飯野 暢(石播)(62), 安部 昭則(石播)(63), 尾野 英夫(川重)(62~63),
和田 正行(住重)(62~63), 石川 邦照(钢管)(62~63), 岡本 太郎(日立技研)(62~63),
永浜 信一(日立設計所)(63), 福岡 哲二(三井)(62~63), 的場 正明(三菱)(62~63),
川崎 哲郎(三菱)(63), 宮本 武(造研)(63)
・井上 肇(船研)(62)

第2分科会WG4(昭和62~63年度)

◎板垣 浩(横大)(62~63), ★大石 剛(三井)(62~63), 吉田宏一郎(東大)(62~63),
野本 敏治(東大)(62~63), 室津 義定(大府大)(62~63), 岡田 博雄(大府大)(62~63),
朝田 洋雄(航技研)(62~63), 青木 元也(船研)(62~63), 松岡 一祥(船研)(63),
竹本 博安(船研)(63), 山本 規雄(NK)(62~63), 安東 明俊(石播)(62~63),
杉本 広憲(川重)(62~63), 岩橋 嘉生(住重)(62~63), 山口 雄三(住重)(63),
近藤 潔(钢管)(62), 山本 聰(钢管)(63), 堀 徹(日立技研)(62~63),
仁保 治(三井)(62~63), 坪川 毅彦(三井)(63), 渡辺 栄一(三菱)(62~63),
宮本 武(造研)(63)

第2分科会WG5(昭和62~63年度)

◎前田 恵(石播)(62~63), ★後川 理(石播)(62~63), 末岡 英利(三菱)(62),
倉本 美男(三菱)(63), 山下 寛(川重)(62), 東 健士郎(川重)(63),
村川 治(住重)(62~63), 松元 正志(钢管)(62~63), 坂部 慎一(日立設計所)(62),

近藤 公雄(日立)(63), 堀 徹(日立技研)(63), 西畠 彰(三井)(62~63),
仁保 治(三井)(63), 新納 義昭(石播)(62~63), 宮本 武(造研)(63)

第2分科会WG6(昭和62~63年度)

◎伏見 彰(三菱)(62~63), ★青木 正生(三菱)(62~63), 後川 理(石播)(62~63),
鴨井 紀之(川重)(62~63), 阿部 孝三(住重)(62~63), 酒戸 恒男(住重)(63),
田中 稔(鋼管)(62), 佐藤 博一(鋼管)(62~63), 堀 徹(日立技研)(62~63),
仁保 治(三井)(62~63), 宮本 武(造研)(63)

第2分科会荷重連絡会(昭和63年度)

◎佐藤 博一(鋼管), 藤野 正隆(東大), 大坪 英臣(東大), 富田 康光(阪大),
渡辺 嶽(船研), 後川 理(石播), 山下 寛(川重), 小段 范久(鋼管),
山本 聰(鋼管), 堀 徹(日立技研), 福岡 哲二(三井), 橋本 州史(三菱),
川崎 哲郎(三菱)

第2分科会部材重要度連絡会(昭和63年度)

◎大石 剛(三井), 町田 進(東大), 野本 敏治(東大), 板垣 浩(横大),
飯島 正明(住重), 仁保 治(三井), 坪川 敏彦(三井), 日根野元裕(三井昭研),
的場 正明(三菱), 渡辺 栄一(三菱)

第2分科会実船計測連絡会(昭和63年度)

◎山口 雄三(住重), 豊貞 雅宏(九大), 吉田宏一郎(東大), 吉成 仁志(東大),
竹本 博安(船研), 熊野 厚(NK), 湯浅 通史(NK), 岩橋 嘉生(住重),
小林頭太郎(住重), 堀 徹(日立技研), 橋本 州史(三菱)

第3分科会(昭和62~63年度)

◎杉村 泰(三井昭研)(62~63), ★国武 吉邦(三井)(62~63), ★川口 昇(三菱)(62~63),
★梶谷 尚(東大)(62~63), ★加藤 洋治(東大)(62~63), 藤野 正隆(東大)(62~63),
宮田 秀明(東大)(62~63), ★大楠 丹(九大)(62~63), ★中武 一明(九大)(62~63),
貴島 勝郎(九大)(62~63), 田中 一朗(阪大)(62~63), ★内藤 林(阪大)(62~63),
田中 拓(船研)(62), 北川 弘光(船研)(63), ★右近 良孝(船研)(62~63),
佐藤 和範(造技七)(62), 田中 拓(造技七)(63), ★馬場 栄一(三菱)(62~63),
須藤 正信(鋼管)(62~63), ★山本 邦夫(鋼管)(62), ★白木 東(鋼管)(62~63),
★宮本 雅史(日立設計所)(62~63), 黒井 昌明(日立技研)(62~63), 田中 稔(石播)(62~63),
★堤 孝行(石播)(62~63), 田中 陽(川重)(62~63), ★野沢 和男(川重)(62~63),
★竹川 正夫(住重)(62~63), 小保方 準(住重)(62~63)
・小野 政雄(運営幹事会)(62~63), •石丸 周象(海技局)

第3分科会WG1(昭和62~63年度)

◎梶谷 尚(東大)(62~63), ★中武 一明(九大)(62~63), ★堤 孝行(石大)(62~63), 播)(62~63),
★馬場 栄一(三菱)(62~63), 宮田 秀明(東大)(62~63), 馬場 信弘(東大)(62~63),
鈴木 敏夫(阪大)(62~63), 茂里 一紘(広大)(62~63), 土井 康明(広大)(62~63),
姫野 洋司(大府大)(62~63), 奥野 武俊(大府大)(63), 池畠 光尚(横大)(62~63),
鈴木 勝雄(防大)(62~63), 児玉 良明(船研)(62~63), 日野 孝則(船研)(62~63),
角川 明(船研)(63), 川島 敏彦(水工研)(62~63), 佐藤 和範(造技七)(62~63),
日下 祐三(三井昭研)(62~63), 永松 哲郎(三菱)(62~63), 笠原 良和(鋼管)(62~63),
長浜 光泰(日立技研)(62~63), 白勢 康(石播)(62~63), 野沢 和男(川重)(62~63),
高井 通雄(住重)(62~63),

第3分科会WG2(昭和62~63年度)

◎大楠 丹(九大)(62~63), ◎内藤 林(阪大)(63, ★62~63), ★竹川 正夫(住重)(62~63),
★宮本 雅史(日立設計所)(62~63), 藤野 正隆(東大)(62~63), 柏木 正(九大)(62~63),
細田 龍介(大府大)(62~63), 平山 次清(横大)(62~63), 高木 幹雄(広大)(63),
菅 信(船研)(62~63), 山越 康行(水工研)(62~63), 小林 正典(三井昭研)(62~63),
高橋 雄(三菱)(62~63), 山本 修(鋼管)(62~63), 山口 栄三(日立技術)(62~63),
溝口 純敏(石播)(62~63), 岩崎 泰典(川重)(62~63), 井上 隆一(住重)(62~63)

第3分科会WG3(昭和62~63年度)

◎加藤 洋治(東大)(62~63), ★右近 良孝(船研)(62~63), ★野沢 和男(川重)(62~63),
★白木 東(鋼管)(62~63), 山口 一(東大)(62~63), 小村 隆士(東大)(62~63),
鈴木 敏夫(阪大)(62~63), 仲渡 道夫(広大)(62~63), 池畠 光尚(横大)(62~63),
高橋 肇(東船大)(62~63), 武井 幸雄(船研)(62), 凌 志浩(NK)(62~63),
佐藤 和範(造技七)(62~63), 湯浅 肇(三井昭研)(62~63), 坂本 利伸(三菱)(62~63),
泉田 泰弘(钢管)(62), 笠原 良和(钢管)(63), 田中 寿夫(日立技研)(62~63),
藤野 良亮(石播)(62~63), 佐藤 隆一(石播)(62~63), 高須 順三(川重)(62~63),
渡辺 茂雄(住重)(62~63)

目 次

〔1〕 総 論

1. 新世代造船システムの基本構想	1
1.1 基本認識	1
1.1.1 国内の一般的製造業の動向	1
1.1.2 日本の造船業存続のための必要条件	1
1.2 新世代造船システムの概念	2
1.2.1 新世代造船システムの概念と狙うべき効果	2
1.2.2 新世代造船システム構築の展望	4
2. 調査研究の概要	6
2.1 新世代造船システムに関する新技術動向及び利用環境の調査研究	6
2.1.1 新世代造船システムに関する新技術動向調査	6
2.1.2 船舶における新技術の利用環境とその変化の検討	8
2.1.3 海外における新技術研究機関等の実状調査	9
2.1.4 調査結果のまとめ	11
2.2 造船CIMS	12
2.2.1 造船CIMSの概念	12
2.2.2 造船CIMS実現のために内包する問題点把握	12
2.2.3 調査研究成果の概要	12
2.2.4 システム開発の進め方	19
2.3 新船体構造設計法	21
2.3.1 船体構造設計法について	21
2.3.2 新船体構造設計法の概念	23
2.3.3 ADDA研究開発課題の総括	25
2.4 数値水槽	25
2.4.1 数値水槽の概念	25
2.4.2 船体周囲流場の数値解析法	27
2.4.3 波浪中抵抗増加理論の高度化	28
2.4.4 プロペラ周囲流場の数値解析法	28
2.4.5 研究開発課題の総括	29
3. 研究開発の進め方	31

〔2〕 各 論

第一章 造船CIMSに関する調査研究	33
1. 造船CIMSの全体構想	33
1.1 基本認識	33
1.1.1 現状の造船業の業務における問題点	33
(1) 設計の現状と問題点	33
(2) 工作の現状と問題点	33
1.1.2 生産用情報の一元化と造船CIMS	34
1.2 造船CIMSの概念	34
1.2.1 造船CIMSのプロダクトモデリング、統合データベースの重要性	34
1.2.2 造船CIMSの全体像	35
1.3 造船CIMS開発の概要	36
1.4 造船CIMS開発の効果と波及効果	36
2. 調査研究の概要	37
2.1 3次元モデリング手法の研究	37
2.1.1 現状と問題点	37
(1) 調査研究の目的	37
(2) モデリングに関する現状調査	38
(a) モデリング理論	38
(b) 現状 CAD/CAMの評価	40
(c) 造船におけるモデリングの現状	43
2.1.2 調査検討結果	44
(1) 造船におけるモデリングのあり方	44
(a) モデリングへの要求事項	44
(b) モデリングのイメージ	44
(2) モデリングシステム試作研究	46
(a) 機関室配置システム	46
(b) 構造部材配置システム	47
(c) 構造部材工作情報付加システム	50
(3) 結果に対する評価と問題点の抽出	55
2.1.3 研究開発課題と解決策	55
2.2 エキスパートシステム開発手法の研究	56
2.2.1 現状と問題点	56
(1) 調査研究の目的	56
(2) AI技術の現状と動向	56
(a) エキスパートシステム	57

(b) ヒューマンインターフェース	57
(c) 画像認識	58
2.2.2 調査検討結果	58
(1) AIの造船への導入方法検討結果	58
(a) エキスパートシステム	58
(b) ヒューマンインターフェース	59
(c) 画像認識	60
(2) エキスパートシステム試作結果	61
(a) 船体主要目決定AIシステム	61
(b) 機器配置決定AIシステム	64
(c) 構造部材情報決定AIシステム	68
(d) 工程管理支援システム	71
(3) 結果に対する評価と問題点の抽出	73
2.2.3 研究開発課題と解決策	74
2.3 造船広域情報通信システム開発課題の検討	74
2.3.1 現状と問題点	74
(1) 調査研究の目的	74
(2) 調査研究の範囲及び内容	76
2.3.2 調査検討結果	76
(1) アンケート調査	76
(2) 概念設計	77
(3) システム計画書	78
2.3.3 研究開発課題と解決策	81
(1) 技術面	81
(2) 運用面	81
2.4 造船所内情報通信システムの研究と通信システムへの機能要件及び開発課題の検討	82
2.4.1 現状と問題点	82
2.4.2 調査検討結果	82
(1) 造船所内情報の調査	82
(2) 通信プロトコルの標準化動向調査	83
(3) 造船所内情報通信システムのあり方	83
2.4.3 研究開発課題と解決策	87
2.5 造船データベース統合化のための調査研究	87
2.5.1 現状と問題点	87
(1) 調査の目的	87
(2) DBMSの現状と動向	88
2.5.2 調査検討結果	89
(1) データの分類とデータベース構造の検討	89

(2) 部材関連データ	90
(3) RDB を用いた試作結果	90
(4) 処理速度の調査	92
(5) まとめ	93
2. 5.3 研究開発課題と解決策	93
3. 研究開発の進め方	94
3.1 調査研究結果より得られた注目すべき技術	94
3.2 造船 CIMS 要件のまとめ	96
3.2.1 業務要件概略	97
3.2.2 システム要件	97
3.2.3 ハード構成	99
3.3 開発の進め方	101
第二章 新船体構造設計法に関する調査研究	103
1. 新船体構造設計法 (ADDA) の全体構想	103
1.1 基本認識	103
1.1.1 船体構造における技術競争力	103
1.1.2 船体構造設計の現状と問題点	103
1.2 新船体構造設計法の概念	104
1.2.1 ADDA の理念	104
1.2.2 設計法としてのADDA	104
1.3 ADDA システムの開発構想	105
1.3.1 ADDA システム構想	105
1.3.2 各システムの役割	105
1.4 開発の効果と波及効果	106
1.4.1 造船業における効果	106
1.4.2 関連業界に与える効果	107
2. 調査研究の概要	111
2.1 船体構造解析のための荷重解析手法	111
2.1.1 現状と問題点	111
2.1.2 調査検討の概要と検討結果	112
(1) 波浪情報データベース	112
(2) 設計荷重算定のための海象設定	113
(3) 高精度船体運動・波浪荷重解析法	114
(4) 強度評価のための荷重設定法	117
2.1.3 研究開発課題と解決策	119
(1) 波浪情報データベース	119
(2) 設計荷重算定のための海象設定	120

(3) 高精度船体運動・波浪荷重解析法	120
(4) 強度評価のための荷重設定法	121
2.2 座屈・崩壊強度の高精度解析手法	122
2.2.1 現状と問題点	122
2.2.2 調査検討の概要と検討結果	123
(1) 座屈設計法の基本構想	123
(2) 崩壊検討手法	126
(3) 座屈・崩壊強度高精度解析法	130
2.2.3 研究開発課題と解決策	132
(1) 座屈設計法の基本構想	132
(2) 崩壊検討手法	132
(3) 座屈・崩壊強度高精度解析法	133
2.3 疲労・破壊強度の高精度解析手法	134
2.3.1 現状と問題点	134
2.3.2 調査検討の概要と検討結果	134
(1) 疲労・破壊強度実用設計手法の基本構想	134
(2) 疲労・破壊強度検討部材の選定法	135
(3) 疲労・破壊強度判定手法	137
(4) 疲労・破壊強度高精度解析手法	140
2.3.3 研究開発課題と解決策	143
(1) 疲労・破壊強度実用設計手法の基本構想	143
(2) 疲労・破壊強度検討部材の選定法	144
(3) 疲労・破壊強度判定手法	144
(4) 疲労・破壊強度高精度解析手法	145
2.4 信頼性評価手法	146
2.4.1 現状と問題点	146
2.4.2 調査検討の概要と検討結果	147
(1) 船体構造強度評価法への信頼性工学の導入	148
(2) 部材重要度評価法	151
(3) 船体構造強度総合評価法	154
2.4.3 研究開発課題と解決策	157
(1) 船体構造強度評価法への信頼性工学の導入	157
(2) 部材重要度評価法	159
(3) 船体構造強度総合評価法	159
2.5 迅速・高精度応力解析手法	161
2.5.1 現状と問題点	161
2.5.2 調査検討の概要と検討結果	161
(1) 全船一体試解析	161

(2) 解析アルゴリズム	165
(3) 解析システム	165
2.5.3 研究開発課題と解決策	167
(1) 解析アルゴリズム	167
(2) 解析システム	167
2.6 システム化に関する調査・研究	168
2.6.1 現状と問題点	168
2.6.2 構造解析システム調査	168
2.6.3 調査検討の概要と検討結果	170
(1) 全体システム	170
(2) 高精度船体荷重解析システム	173
(3) 迅速・高精度構造解析システム	173
(4) 船体構造強度算定システム（最終強度）	174
(5) 船体構造強度算定システム（疲労強度）	175
(6) 船体構造強度総合評価システム	175
(7) 構造設計支援インテリジェントシステム	176
(8) 構造解析モデリングシステム	177
2.6.4 研究開発課題と解決策	178
(1) 全体システム	178
(2) 高精度船体荷重解析システム	178
(3) 迅速・高精度構造解析システム	178
(4) 船体構造強度算定システム	178
(5) 船体構造強度総合評価システム	179
(6) 構造設計支援インテリジェントシステム	179
(7) 構造解析モデリングシステム	180
2.7 大型実験／実船計測による検証	180
2.7.1 現状と問題点	180
2.7.2 調査検討の概要と検討結果	184
(1) 波浪荷重の検証	184
(2) 座屈・崩壊強度の検証	185
(3) 疲労・破壊強度の検証	185
(4) 信頼性解析の検証	185
2.7.3 研究開発課題と解決策	185
(1) 波浪荷重の検証	185
(2) 座屈・崩壊強度の検証	186
(3) 疲労・破壊強度の検証	186
(4) 信頼性解析の検証	187
(5) 実船計測の統一的手法について	187

(6) まとめ	188
3. 研究開発課題とその進め方	190
3.1 研究開発課題	190
3.2 研究開発の進め方	190
 第三章 数値水槽に関する調査研究	193
1. 数値水槽の全体構想	193
1.1 基本認識	193
1.2 数値水槽の概念	193
1.3 数値水槽の開発構想	194
1.4 開発の効果と波及効果	197
2. 調査研究の概要	197
2.1 船体周囲流場の数値解析法の調査研究	198
2.1.1 現状と問題点	198
2.1.2 調査検討結果	199
(1) NS方程式の差分解法による計算法	199
(2) 境界要素法による水波計算法	211
(3) その他の計算法	213
(4) 流場計測手法の調査	214
(5) 海外調査	216
2.1.3 研究開発課題と解決策	217
(1) NS方程式の差分解法	217
(2) 境界要素法による水波計算法	219
(3) 流場計測手法	219
2.2 波浪中抵抗増加理論の高度化に関する調査研究	220
2.2.1 現状と問題点	220
(1) 波浪中抵抗増加に関する現状調査	220
(2) 波浪中推進性能評価法に関する現状調査	223
2.2.2 調査検討結果	226
(1) 波浪中抵抗増加理論の高度化検討	226
(2) 計測手法の高度化検討	230
2.2.3 研究開発課題と解決策	232
(1) 波浪中推進性能シミュレータ構想	232
(2) 波浪中定常力及び非定常流場の数値計算	232
(3) 波浪中自航推進性能の理論的推定法	235
2.3 プロペラ周囲流場の調査研究	235
2.3.1 現状と問題点	235
(1) プロペラ性能の予測	235

(2) プロペラ流入流場の予測	236
2.3.2 調査検討結果	238
(1) NS方程式の差分解析法による調査	238
(2) 現状理論の調査	245
(3) 高精度計測法の調査	248
(4) 数値解析応用の調査	252
2.3.3 研究開発課題と解決策	256
(1) NS方程式の解法の高精度化	256
(2) 現状理論の実用化	256
(3) 高精度評価データの蓄積と拡充	257
2.4 調査検討結果のまとめ	257
3. 研究開発課題とその進め方	259
3.1 研究開発課題	260
3.2 開発の進め方	262

[1] 總論

1. 新世代造船システムの基本構想

1.1 基本認識

1.1.1 国内の一般的製造業の動向

- (a) 国内の製造業は、価値観の多様化を反映し、多品種少量生産への対応能力がその製造業の存続の絶対条件となる。
- (b) 具体的には受注から納品までのあらゆる工程の JIT (Just in Time) が追求され、開発・受注の納期を徹底的に短縮し、不要の在庫を排除することでこれに対応する。
- (c) そのための基盤として、CIMS 化は製造業にとって必然となり、これにより次の各機能の実現を図る。
- 事務情報と技術情報を統合し、元来大量生産であった商品を実質的に受注生産に近付けることにより、在庫を減少させ客先のニーズに応えること。
 - そのために生産ラインは単純労働化し、ロボットも多用して大量生産の効率の維持を図ること。（これらの典型が乗用車の多品種少量生産であり、図 1.1.1 にその一例を示す。）
 - 設計と製造ラインを直結し、新規商品の生産日程を早め、新製品競争に打ち勝つこと。
 - 同じく新製品開発のリードタイム短縮のため、電算システムにより設計自身の効率化を図ること。
 - (d) 製造工程のシステム化により、作業は単純化され、一般労働者の体质が変化することが予想される。関連する多くの分野で熟練技能者の存在を前提とする体质の製造業は、技能者確保の面からも存続が苦しくなり、技能力のシステム化が追求される。
 - (e) 一般的な製造業では、上記のフレキシビリティ追求と同時に、導入された CIMS をベースとして、大幅な生産性向上が実現される。

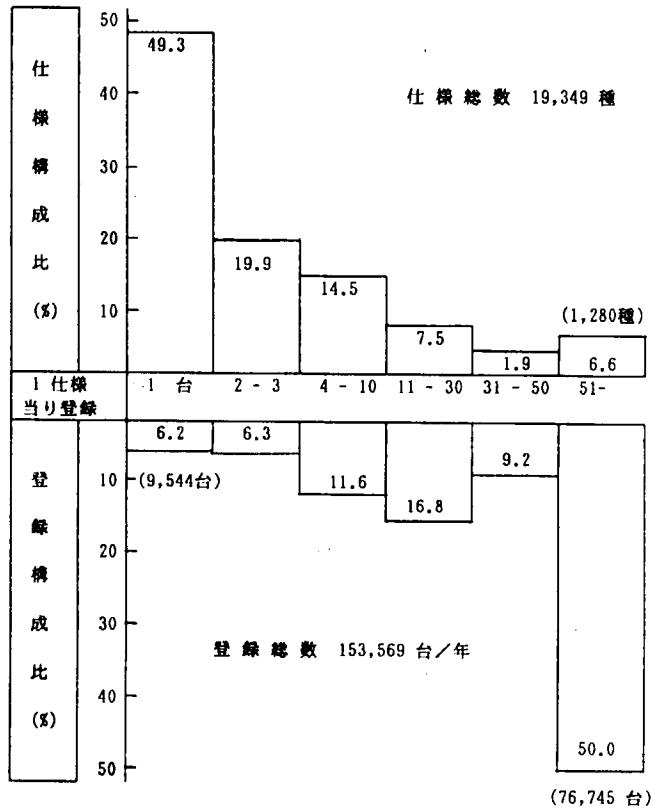


図 1.1.1 乗用車の仕様の拡散状況

1.1.2 日本の造船業存続のための必要条件

- (a) 十分な国際コスト競争力および技術競争力を持つこと。
- (b) 海造審の示す船舶建造量の予測における日本の果たすべき役割を担いつつ、高技術船も指向すること。
- (c) これにより世界の造船界での影響力を維持し、海運界へ安定して国際的に優秀な船舶を供給することを可能とすること。又、この建造量の維持により、国内関連工業の存続に寄与し、船舶トータルの性能・コスト両面の高いレベルを確保すること。
- (d) この為に在来船に対しては技術格差を維持し、新機種に対してはそれを開発の出来る高度な技術力を確保すること。

(e) 1. 1. 1 節に述べた一般的製造業の動向の中で他の業界との比較で劣後化しないために、優秀な人材を確保し続けられるような魅力的な事業の体質を確保すること、及び他産業がCIMSによって実現する生産性向上に匹敵する生産性向上を実現すること。

1.2 新世代造船システムの概念

1.2.1 新世代造船システムの概念と狙うべき効果

造船が将来においても現在同様ほとんど完全な受注生産体制にあり、その製品の巨大さも不変とすると、1節に示した大量生産体制から多品種少量生産への変革実現を目指とする一般のCIMSの概念をそのまま導入することはできない。

しかし情報の統合化・高度化は、他の産業とは重点を異にするとはいえ、造船においても後述する効果を生み出し、1.1.2節に示した造船存続の必要条件を実現するための大きな武器となると期待される。

新世代造船システムの概念とは、

- ・今後に予想される計算機技術の急速な進歩を徹底的に利用した、
- ・また、造船の特殊性を配慮しつつ一般製造業のねらっているCIMSの良さを取り込んだ、
- ・受注から設計・建造迄を一貫して統合した情報化システム（造船CIMS）と、
- ・これと緊密に連動して、これの有効な活用を支える、高度にシステム化された基幹技術群とから成る将来システムである。その概念図を図1.2.1に示す。（参考にBoeing社のCIMの概念図を図1.2.2に示す。）

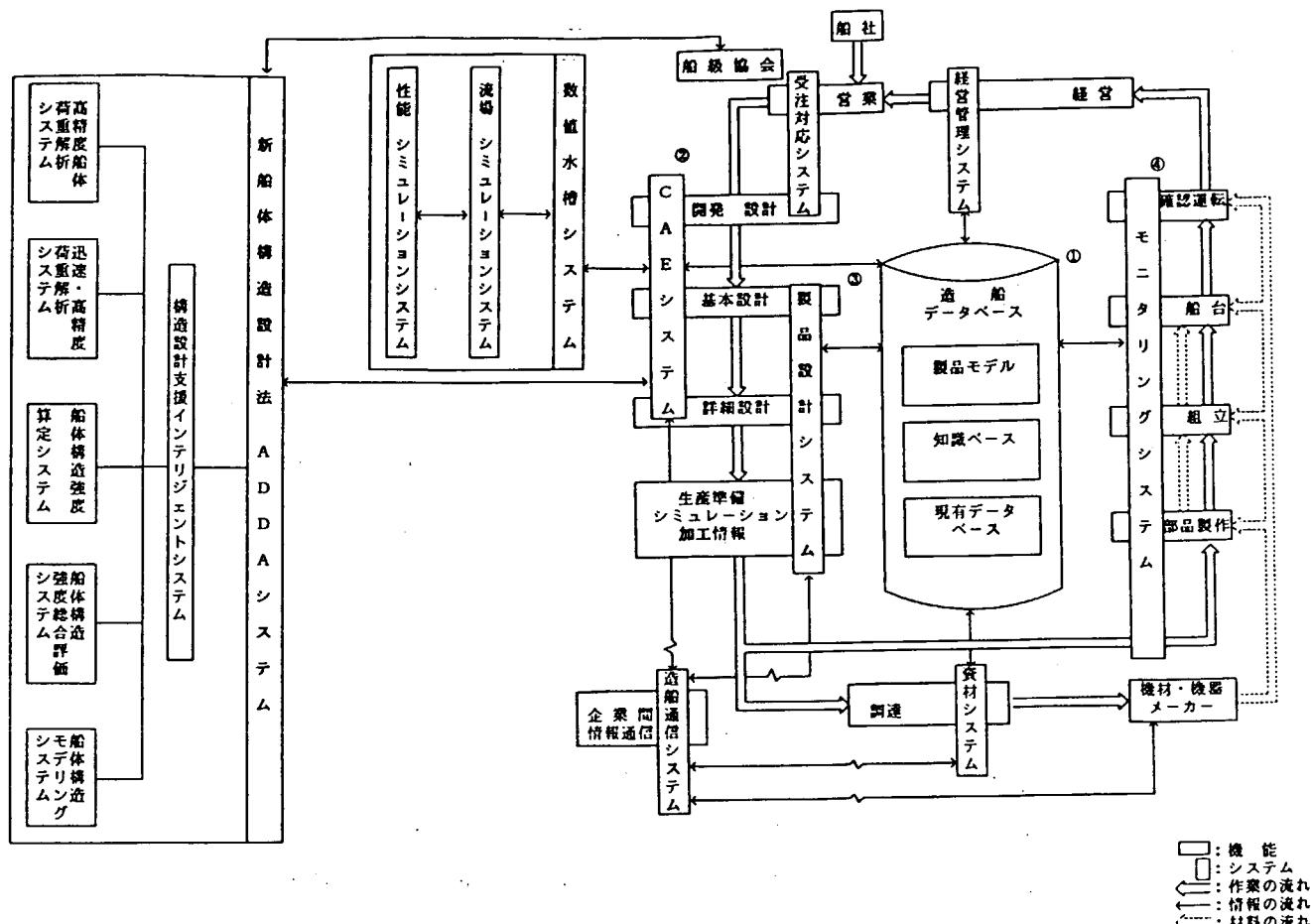


図1.2.1 新世代造船システムの概念図

また、ねらうべき効果としては、

- ・造船業の体質変革による産業としての魅力の復活と
- ・開発及び建造の質の向上によるコスト競争力、技術競争力の飛躍的な強化を実現するものである。

尚、造船の特徴の一つに作業者の技能力の高さに頼っている面があり、これが技術移転を相対的に難しくし、海外現地生産の効果を弱めているが、一方で雇用の硬直性を招いていると言われている。

ところが、1.1節で述べた環境の変化は技能力に甘えた現状の体質を許さず、なんらかの対応を迫っている。

技能力の高い国内生産のよい面を發揮させつつ、この技能力をも次第に

CIMSに組み込み、生産性の向上を実現して厳しい環境に対応しようとするのも、新世代造船システムの重要な一断面である。

以下にこれらのねらうべき効果を詳述する。

(a) 造船の労働集約的体質を変革し、産業全体としての魅力を復活すること。

先ず、現状では情報の量と質の不備（例えば設計情報、管理情報の不足、不整合）のために必然的にもたらされている造船の労働集約的体質を、情報の統合化・高度化によって抜本的に変革し、開発・受注・建造の各ステージを通じて、より知識集約的な体質に近付けることが必要である。

即ち、情報の統合及び数値化は、次の(b)項に示す労務費比率の減少を実現することのみでなく、従来困難とされた多くの人工作業のメカトロ化を将来的に可能とし、作業環境の抜本的改善の為の基盤となり、又、情報の高度化は(c)項に示す基幹要素技術の発展を促し、開発・設計の高度化・迅速化の実現を可能とする。

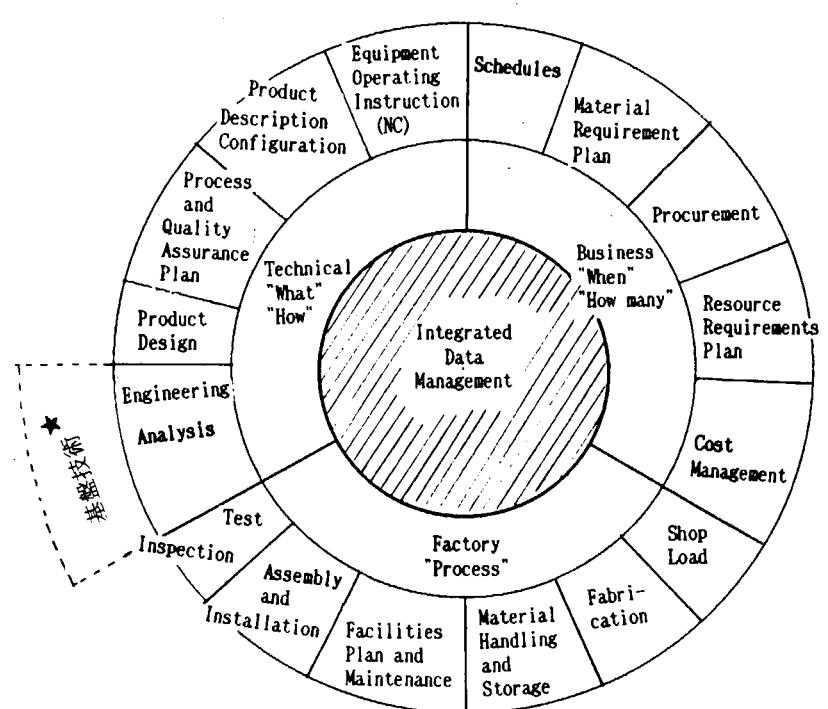
1.1.2節で述べたように、製造業全体がCIMS化する中では、優秀な労働者はそうした近代産業に集中することが予想され、古い体質のままでは人材の面からも造船業の将来が危惧される。

造船が魅力的で、永続的な産業であり続けるためには、同じくCIMSの概念を導入することによって下記の経営的メリットを追求しつつ、安定かつ将来性を実感できる、産業としての健全さと魅力を実現しなければならない。

又新造船システムによって造船に係わる技術的 innovation の可能性を増加させ、新形式の船舶の開発などの船舶の利用者、開発者双方にとっての魅力復活も重要な要素といえる。

(b) 国際コスト競争力を強化すること。

造船各社一船当たりのコストの中で労務費の占める割合は、現在25乃至30%である。一般に輸出商品として競争力のある業種でのそれは10%前後であり、この程度であれば商品の魅力、性能、品質等で充分賃金格差と対抗可能である。



★ 新世代造船システムにおいては ADDA 及び数値水槽

図 1.2.2 Boeing 社の CIM 概念図

造船業が国際競争力を維持するためには、少なくとも労務費比率を10%程度にまで下げるこことをめざすべきである。

船舶は巨大かつ膨大な部品点数からなる製品であり、そのうえ、製造工程が極めて複雑であって、従来の延長線上での単なる装置化の追求ではこれ以上生産性向上は難しい段階にある。

一方限界まで合理化された現在の建造工程においてもまだ手待ち、手直しに代表される非実作業の比率は大きい。

これは、造船の受注生産体制から生じる頻繁な情報変更と情報量の膨大さのために、建造工程で必要とする全ての情報を正確に生成することが従来の体制、方法では限界にあるからである。

もし計算機の力をを利用して抜本的にきめ細かく正確な情報を提供出来れば、連続建造船が、次第に情報を完全なものにすることによって実現しているのと同様の効果を期待でき、まだ労務費比率を大幅に減少させる可能性を残している。

先ず建造工程での非実作業を減少させること、及び設計・工作準備段階での情報生成の作業効率を上げることの2点を主たる目的とした造船用CIMSを構築し、造船業の体質の抜本的改革を図ることが可能であり、必要である。

この造船CIMSで得られる情報の数値化は、必ずや従来困難であった装置化実現の可能性を増加させ、双方の効果で大幅な労務費比率減少をもたらすものとなる。

(c) 國際技術競争力を強化すること。

現在、船型開発・船体構造設計等の基幹技術面に関し、NIESが技術強化に努めていることが報告されている。このような状況下に於て、今後の激しい国際競争に打ち勝つためには、(b)で述べたコスト競争力の強化とともに、最近発達の著しい計算機を最大限に利用して基幹技術の革新的高度化を図り、開発の迅速化と設計の高度化により技術競争力を向上させることが必須条件である。

上記目的を最も効率的に達成するためには、開発・受注・設計を通じての最上流に位置する基幹技術である船型開発の迅速化、高度化のための武器「数値水槽」、及び設計展開での基幹技術である「新船体構造設計法」を開発することが必要であり、これらの技術の核となる理論を早急に確立すること、及びそれらが可能となった暁には直ちにトータルシステムとして利用可能とするべく、システムとしての検討を行なっておくことが緊急の課題である。

新世代造船システムはこのように計算機を徹底的に利用する基幹技術と前記の造船CIMSとを一体化し、その緊密な連動により、受注から設計、建造までを一貫してカバーし、開発のリードタイムの短縮と、その開発及び建造の質の向上を同時に追求するものであり、換言すれば、新しい物流に要請される新形式の船舶を、そのニーズに最適化され、しかも高度な信頼性を維持するものとして開発し、着実に建造するためのシステムとして位置付けられる。

1.2.2 新世代造船システム構築の展望

新世代造船システムは上記の通り、造船の開発・設計から現場までの情報を統合、高度化して種々の効果を得ようとするもので、主として設計の図面情報作成に力を入れた従来のCADの概念を上流・下流双方に拡張し、工作情報を含む造船全体の膨大な情報を対象にするものである。

しかも、その情報の質（設計・工作法の最適化の程度、情報間の整合性）を問題とするために、情報生成及び修正の支援に従来に無い多くの工夫が必要となる。

この情報の多さと、その質に対する要請により、本システムの開発は技術面は勿論、関連する多くの課題を含むがその実現性は下記の通りである。

(a) 技術的実現性

従来困難とされた多くの情報処理が、昨今のエレクトロニクスのハード面での発展、およびそれに支えられたソフト開発技術の飛躍的向上により実現可能となっている。

後述する本研究部会の調査結果でも、造船の膨大な情報を、多くの変更作業の中でもきめ細かく整合性を保って管理すること、及び「数値水槽」、「新船体構造設計法」の膨大な数値計算を実行することが、この最先端のコンピュータのハード、ソフト技術を駆使すれば、実現可能との見通しを得ている。

ただし、造船の特徴を捉え十分に実用化するためには、これらの技術を他産業の動きを通してフォローするばかりでなく、造船独自の技術としての開発がどうしても必要であることが示されている。

(b) 経済的実現性

システムによって得られる機能と、それにかかる投資額、つまり費用対効果の評価がシステム構築実現には重要な要素であることは言を待たない。

上記のハード、ソフトの技術向上は同一機能を実現するに要する費用を急速に低下させつつあり、他産業で多くのCIMSが実現の方向で検討されている。特に最近のシステム開発では約8割がソフト開発の費用と言われるが、それが新しい開発法によって急速に改善していることは注目に値する。

厳しい環境下にある造船がこの巨大システムの開発を実現するためにはあらゆる困難を克服し、現有の技術・人材を本格的に投入するならば、その実現は経済的見地からも可能な範囲にあると予想される。

(c) 時期的要素

造船業が未曾有の危機にあり、現在を如何に乗り切るかが当面の最大の課題であることは明らかである。しかしながら1.1節で示したように製造業を取り巻く環境が激変しつつあり、将来を見通した造船の変革をも含む長期的施策が並行して行なわなければ、その生き残りの対策すらが不毛のものとなる恐れがある。端的に言えば一般の製造業がCIMS化へ向けて着実に前進しつつあることを実感し、造船業も独自のCIMSを検討すべき時期にあること、それ無しには製造業全体の中で劣後化せざるを得ないことを認識する必要があるということである。

また、62年度の本研究部会の調査で、CIMS実現に向けて日本及び欧米の各種の製造業が検討を続けており、造船に関してアジアNIESにおいても検討を開始していることが明らかになった。新世代造船システム開発の時期に鑑み、日本の造船業が安閑としていられない状況の一つを示している。

新世代造船システムは将来の造船を存続させる武器として大きな威力を秘めていると予想される。また、上記の通り技術的、経済的実現性の評価においても、ここ数年の先端技術の飛躍的向上により、現在ならばその実現の可能性も高いと認識されている。しかも造船自らが行なわなければ誰も開発してくれないと現実がある。新世代造船システムの構築の具体化を造船独自で早急に検討することの必要性は明白と言えよう。

2. 調査研究の概要

本研究部会の課題である下記の①～④の課題について実施した調査研究の内容及び検討結果についてその概要を述べる。

- ① 新世代造船システムに関する新技術動向及び利用環境の調査研究
- ② 造船CIMSに関する調査研究
- ③ 新船体構造設計法に関する調査研究
- ④ 数値水槽に関する調査研究

2.1 新世代造船システムに関する新技術動向及び利用環境の調査研究

新世代造船システムを開発するに当たって、その鍵となるコンピュータ及びその周辺技術の現状と将来の動向について国内及び海外の実情を調査し、これと並行して造船の立場から見て関連先端技術に関する造船固有の問題点の抽出及びその解決のための方策を明らかにするための調査研究を行うことを目的として、調査ワーキンググループにおいて下記の調査を実施した。

即ち、

- a. 新技術の動向調査（三菱総合研究所へ委託調査）
- b. 船舶における新技術の利用環境とその変化の検討
- c. 海外における新技術研究機関等の実情調査（海外調査）

の項目について実施した。

2.1.1 新世代造船システムに関する新技術動向調査

(1) 調査の目的

新世代の造船システムに関する調査研究の一環として、内外の新世代コンピュータ関連技術等について、ソフト面及びハード面の新技術動向を調査しておくことは、本研究部会の調査研究全体にとって不可欠である。

今回の調査では、概ね今後10年程度までに実用化が予測される技術を対象とした。

なお、1章に述べた通り、CIMSの概念には業種によっても異なるなど、幅広いものがあるが、新世代造船システムでは、建造の高度な自動化よりも情報の統合化に重点を置いていることを念頭に置いて調査を実施した。

(2) 調査方法

キーワードによるコンピュータ検索が可能な技術文献データベースのうち、主要なもの4種についてCIMSを指向した事例や技術予測の文献を検索した。また、CIMS及びコンピュータ技術に関連が深いと思われる学会誌4種、商業誌7種について最近の2年間を対象に参考となる論文、記事等を抽出した。さらに学識経験者、メーカ等へのヒヤリングを適宜行って、参考となる情報の聞き取り及び文献入手を行った。

(3) 調査の対象分野

調査の対象は、まず参考とすべき他の業界、例えば航空機製造、自動車製造等における事例を取り上げ、次に関連する国家プロジェクト、即ち第五世代コンピュータ、Σ計画、欧州のESPRITについて概観している。

コンピュータのハードウェア技術では、CIMSの中核になると考えられるメインフレーム、スーパーコンピュータとCIMSの中に分散して配置され、部分的な処理を行うと共にネットワークを構成すると考えられるミニコンピュータ、ワークステーション、パーソナルコンピュータについて、能力・価格・開発動向等を調査した。

また、CIMSのデータベース構築に必要と考えられる大容量メモリ、各種の入出力装置、専用のハードウェア、たとえば

データベースマシン、画像処理マシン、A I マシン等の動向についても調査している。

コンピュータのソフトウェア技術では、まずCIMS用ソフトウェアの開発を能率よく行うためのソフトウェア生産技術について調査した。次に大容量データベースの構築に必要なデータベース・マネージメント・システム等について調査を行った。人工知能技術については、エキスパートシステムとともに、音声認識、自然言語処理、画像認識などのCIMSの基礎的な構成要素となる可能性のある技術について動向を調査している。また、CAD/CAM用ソフトウェアについてはプロダクトモデル、FA用シミュレータを中心とし調査を行っている。情報通信用ソフトウェアでは、主として造船所内のLAN構築を対象に想定して、基本ソフトウェア、ネットワーク・アーキテクチャ、分散処理技術について調査した。最後に、MAP、OSI、IGES等の関連する各種標準について概観し、その動向を調査している。

(4) 調査結果

調査結果およびそれを検討して得られた結論として次のようなものをあげている。

- ① 他の業界における事例を参考に考慮すると、建造の機械化、自動化は限定された範囲内の寸法、重量の対象物について計画するのが得策と考えられる。また、コンピュータによる情報の生成・伝達・管理の高度化は、データベースの統合と徹底したシミュレーションによる実作業の支援を基本方針とすべきである。
- ② 関連する国家プロジェクトでは、わが国の「第五世代コンピュータ開発」および「E計画」に引き続き注目すべきである。この種のプロジェクトは適用対象が一般的であるというくらいはあるが、それだけに環境を一新するような大きな影響を及ぼす可能性があるので、遅滞なく成果を取り込むように努めるべきである。
- ③ コンピュータのハードウェア技術

は引き続き目ざましい進歩が期待される。スーパーコンピュータの演算速度向上、ワークステーションの性能向上等によって、部品等の形状および属性データを実用的な速度で処理することが可能となり、CAE(Computer Aided Engineering)を強力に推進できるものと考えられる。(例として、スーパーコンピュータの処理速度向上の動向を図2.1.1に示す) また、大容量記憶装置の画期的高密度化も期待され、大規模データベースの構築が可能になろう。

さらに、専用のハードウェアではデータベース構築と関連してデータベースマシンの進歩に注目すべきである。画像処理やA I マシンではワンボード化、ワンチップ化の動向に注意して利用を計画すべきである。

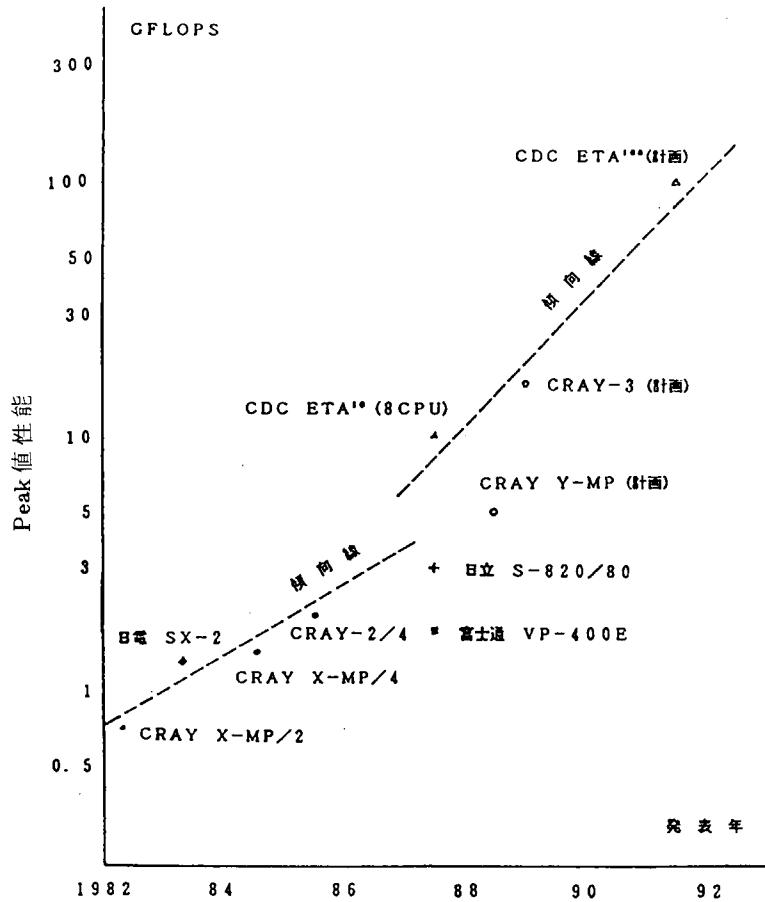


図2.1.1 処理速度向上の動向

- ④ 入出力装置は多様な原理が用いられ、価格競争が激しいことから、製品の明確な開発動向は察知しにくい。新製品の優秀さとともに、各種製品の普及状況も勘案しつつCIMSへの利用可能性を検討していくべきであろう。
- ⑤ ロボティックス関連では特にセンサー類の耐環境性に注目して、開発成果の利用を検討すべきである。また、造船など大型・重量物を扱うロボットの開発を促すため、要件をとりまとめて明示しておくことは有意義と思われる。
- ⑥ コンピュータのソフトウェア技術は比較的ゆるやかに進歩するものと思われるが、その中でもソフトウェア生産技術はZ計画による開発でかなりの進歩を見せるものと期待される。データベースについてはリレーショナルデータベースと第四世代言語との関連分野などで今後の発展が注目される。人工知能では当面はエキスパートシステム技術の利用が期待されるが、知識獲得方法などの進歩に注目すべきである。
- ⑦ 情報通信ネットワークの普及にはソフトウェアの標準化が大きな影響を与えるので、CIMSの構想はOSI、MAP等に最初から準拠して進めるのが得策と思われる。
- ⑧ CAD/CAM関連のソフトウェアは顕著な進歩が期待されるが、特にロボットや現場レイアウトのシミュレーション等も含めた広い範囲のソフトウェアが整備されよう。これらを活用して実作業前のシミュレーションを徹底し、総合的な能率を上げることができる。
- そして最後に、「おおむね10年後までのコンピュータ技術の進歩を予測したが、新世代造船CIMSの期待する環境は全般に相当整備されており、ハード面、ソフト面において日進月歩の急速な進歩が予測される。従って、CIMS開発にあたっては今後の5年程度の期間で考えることも現実性が高いと思われ、最新のコンピュータ技術を効果的に利用して、造船固有の問題も解決しつつ開発に着手する機が熟していると言えよう。」と結論している。

2.1.2 船舶における新技術の利用環境とその変化の検討

(1) 調査の目的

2.1.1節では新技術動向の調査として専門機関に委託し、広く内外の新世代コンピュータ等についてのソフト面及びハード面の調査が行われたが、ここでは特に下記の項目に絞り、ユーザである造船所からみた新技術利用環境の変化を検討した。これらは新世代造船システム構築に際し、単に一般的な新技術動向としてだけではなく、造船所の業務の視点に立った検討もしておくべき項目と考えられるものである。

- ① 大型コンピュータ、スーパーコンピュータ
- ② 端末機、周辺機器
- ③ 通信機器、規約ソフト
- ④ センサー技術
- ⑤ ソフトウェア生産技術

尚、調査の方法としては文献調査に加えて国内のコンピュータ関連メーカーの調査、学識経験者による講演依頼等を行った。又、ネットワークのより具体的な理解のために実際にコンピュータによる通信をテストし、その性能を確認した。更に将来の新世代造船システムとほぼ同規模と考えられる米国のプロジェクトIPAD（ボーイングによる航空機の設計に関するプロジェクト）のマネージャ、ミラー博士のセミナーに参加し、技術動向に関する情報の他に、大規模システムのプロジェクトマネジメントの方法論、機能、体制について多くの示唆を受けた。

(2) 調査結果の概要

上記の各項目につきユーザの目で新技術の現状と動向調査を行い、各々の技術の造船業務への適用の評価を行ったが、上記のすべての分野でエレクトロニクスを中心とする技術の向上は目ざましく、新世代造船システム構築の

技術的環境は整いつつあることを実感した。

すなわち、①大型コンピュータの処理速度を中心とした性能向上、②周辺機器の豊富な機能の実現、③通信規約の標準化の進展、通信能力の向上、④センサ技術の向上による工作現場での環境の変化の可能性、⑤従来の概念を変えるソフトウェア開発の手法の台頭など、注目すべき多くの新技術が確認された。

この62年度の調査結果は63年度の本研究部会の調査検討、特に第一分科会の造船CIMS実現性検討において反映されている。

2.1.3 海外における新技術研究機関等の実状調査

(1) 調査の目的

造船CIMSの研究開発を効率良く行なうためには、コンピュータ関連のハード・ソフトの新技術を最大限に有効利用することが不可欠であり、そのためにはそれら情報システム環境の今後の動向を正確に把握・予測し、利用すべきもの、できないもの及びこの面でのブレークスルとなる技術課題を明確にする必要がある。

当調査は上記目的のため開運する海外の先進技術に関して、

- 先端技術についての展望
- 他業種、CAD/CAM/CAEの動向
- 造船CIMSプロジェクトの技術課題

等を主眼としたものである。

調査方法と項目は以下の通りである。

- データベースマネジメントシステム、プロダクトモデルの研究をしている大学、研究所を訪問し、学問的な研究の課題と解決を要する問題点の明確化
- コンピュータと情報通信の先進企業を訪問し、VLSI技術の発展とともにシス템のネットワーク化と対応策の調査
- CAD/CAMベンダーを訪問し、提供中の製品の将来計画と標準化への対応策の調査
- AUTOFACT '87に参加しCIMS関連技術の動向調査

(2) 調査結果の概要

(a) 先端技術についての展望

半導体の進歩により、コンピュータと通信に関する様々な分野の情報システム技術が今大きな転換期にあり、半導体技術革新はこれから約10年ますます加速していくものと予想されている。

① 現在のコンピュータは、30年前ハードウェアが高価であった時代、経済性を追及するために生まれたメインフレームの考え方方がベースになっている。VLSIの進歩でハードウェアは最近高性能低価格化をつづけ、小型で強力なEWS(Engineering Work Station)をネットワークで使うという考え方方が生まれ育ち、エンジニアリングの世界で勢力を増してきた。

特に、AUTOFACTでは、EWSメーカー(SUN, Silicon Graphics, Apollo, Hewlett Packard)はその高速能力(10 MIPS程度)とグラフィック表示能力(ソリッドモデルのリアルタイム表示)の競争中であった。また、LAN(Local Area Network)の業界標準として、MAPをはじめとするOSIの実現が着実に進展しつつある。

② 機械の設計・製造分野では、CAD/CAM商品としてのソリッドモデルは実用可能な状況にある。次世代CADとして、製品のイメージをつくりあげていく等の製品そのものの表現が核となり、基本設計・概念設計

段階を対象とする知識ベースCADが発表されている。AUTOFAC'T '87では、機械の設計を対象とした知識ベースCADが商品として出展されていた（ICAD, WISDOM）。いずれも最近の情報科学の研究の成果であるオブジェクト指向ソフトウェア技術を用いて、プロダクトモデルを構築しようとしている。

(b) 他業種、CAD/CAM/CAEシステムの動向

① 他業種（ボーアイング、GM、クライスラー）

CIMSを目指す先端企業として訪問した、これら巨大企業においてもCIMS化への意欲は強く、我々の造船CIMSと同じ方向を歩んでいるとの感触を強く持った。

さらにそれらは単なる計画だけにとどまらず部分的にはあってもすでに具体的にスタートしており、多くの点で示唆されるところがあった。特に技術データと事務データの統合に大きな重点を置いている。

データベースでは、関係データベースを試行しつつあり、そのデータの持ち方はEWSに分散させることを考えていることが明らかになった。

またプロダクトモデル（形状モデル+属性モデル）の概念はすでに一般化しており、なんらかの形で製造面の情報を取り扱うことを目指している。

AIについては、将来必ずキーになる技術として重視しているが、まだ研究室的な段階にあるようであった。ただし、出来る部分はすぐにでも実用化しようというきわめて現実的な目で見ているように感じられた。

② CAD/CAM/CAEシステム

CATIA, CADAM, I-DEAS (SDRC)といった汎用CAD/CAMシステムでは、既存機能の改良と共に新しい機能の拡充が精力的に続けられており、機械系を主な対象としてCIMS対応がとられつつある。

造船専用システムとして実績のあるAUTOKON SYSTEMでは、最先端の米国のEWSの技術を活用し、韓国の現代造船とCAD/CAMの高度化共同プロジェクトを実施中である。また、基礎技術面でSI (Royal Norwegian Council for Scientific and Industrial Research)の支援を受け、CIMS化への構想（現状のシステムの拡充として考えているようであるが）も持っている。

(c) 技術課題

① データベース

大学・研究機関、企業を問わず、データベースシステムをCIMS構築の最重要課題の一つに挙げている。今後はプロダクトモデルとあわせ、設計・生産に必要な技術情報を組織的・体系的にモデル化することが必要となる。そのため、オブジェクト指向とデータベース技術を組み合わせることが技術的なポイントであることが明らかになってきている。この面では2, 3のベンダーが既にオブジェクト指向データベースを開発している。また、EWSの発展から分散型データベースシステムへの関心が高まっていくであろう。これらの技術はシステムの統合化に有効なツールとなるので、今後引き続き着目していく必要がある。

② プロダクトモデル

プロダクトモデルの考え方とは、CIMS化に際しての中核的技術課題として位置付けられており、その考え方そのものはかなり一般化しているが、対象物、アプローチの方法により詳細な定義は異なっているように感じられた。

最近、知識工学的アプローチからプロダクトモデルの構築実現を支援するシステムが開発されているが、まだ萌芽期にあり総合的能力、特に複雑で巨大な構造物を扱うには問題があると考えられる。しかしながら将来かなり有力な解決法の一つになるものとして期待されている。

③ A I

CIMSにおけるAI(人工知能)の重要性は、各訪問先で等しく認められた。

従来のエキスパートシステムは、AI専用機上の単独システムが多かったが、CIMSにおいては大規模システムの内に一つのサブシステムとして組み込まれるため、外部データベースとの接続を実現する技術が開発されつつある。

また、オブジェクト指向プログラム言語が広範囲な使用を可能とするオープンシステム化を目指していることが明らかになった。

画像認識、ヒューマンインターフェイスの分野でも開発は進められており、一部実用化されているものもあった。また、言葉ではなくパターンによる知識獲得を可能にする新しいAI技術として、日本ではなじみの薄い「神経回路(Neural Net)」に米国の関係者が注目していた。

(3) 造船CIMSへの展望

(a) プロジェクトの方向

CIMSの必要性については、ボーイング、GM等にみられるように、労務費削減の他技術開発力の強化という面からも重要であることが再認識された。

また、システム開発の方法については、オブジェクト指向ツール、CASE(コンピュータ支援ソフトウェア開発環境)等の実用化に向けての研究が着実に行われており、ソフトウェア開発環境は整備されつつあると実感された。

従って、それらツールの評価を早急に行い、新世代造船システム構築に適用しうるかどうかの判断をおこない、システム開発をスタートさせるべきであると考える。

(b) 開発体制

欧米におけるシステムの開発、統合化等急速な技術の発展は、トロンハイム、リーズ、MIT、UCバークレー、スタンフォード、カーネギーメロン大学に見られるような産・学・官の国際的な共同開発体制と、実用化につながる数多くのベンダー、ソフトハウスの競争原理が大きく寄与していることが明らかになった。

このことは、造船界以外の能力・人材の活用法等、造船CIMSプロジェクトの開発体制に参考になると考える。以上述べたように、CIMSへの我々のアプローチは、欧米の最先端を行く大学、研究所、及び先進企業の考え方と一致しており、目標すべき技術的方向の正しいことが確認出来た。また、開発に当たっては、世界の先端技術を有効に活用して行うことがプロジェクト成功のための必須条件であることが再認識できた。

2.1.4 調査結果のまとめ

2.1.1～2.1.3に述べた調査結果をまとめると、以下のようになる。

我々の目指している造船CIMSの技術的方向の正しいことが、欧米の最先端を行く大学・研究所及び先進企業を訪問調査した結果確認できた。

造船CIMSの期待する技術環境は相当整備されており、今後も急速な進歩が予測される。また、システム開発の方法についても、オブジェクト指向ツール、CASE(コンピュータ支援ソフトウェア開発環境)等ソフトウェア開発環境の整備が期待できる。従って、造船CIMS開発にあたっては、最新のコンピュータ技術を有効に利用し、造船固有の問題も解決しつつ開発に着手する技術的条件は整ったと考えられる。

新船体構造設計法及び数値水槽については、大規模且つ大容量の計算が必要であり、上記以外に容易な画像処理、高速性及び大容量なコンピュータ環境が必須である。最新のコンピュータ技術を有効に利用し、造船固有の理論的・

解析的手法の高度化を図りつつ、開発に着手するコンピュータ環境は整ったと考えられる。

2.2 造船CIMS

2.2.1 造船CIMSの概念

一般製造業のCIMSは製造部門のFMS化を完了させて、製造と経営管理、営業との連携を密にし、経営全般を統合させることを目指している。これに対し、造船は、その製品自体の巨大さに起因する製造部門の装置化の困難さゆえ、FA化が進行していないこと、管理すべき情報量が膨大なこと及び一品受注生産体制に起因する一船毎の新規設計、設計変更の多発等多くの要因により、過去に完成した人間系による情報管理から変貌を図ることが出来ないでいるのが現状である。

従って、今最も求められている造船CIMSとは、情報の管理に着目し、受注から引渡しに至るすべての企業活動の計画・実行・管理の情報をコンピュータネットワークで統合し、作業・物の流れと情報の流れを同期化することにより、生産性向上を実現するものと定義でき、これを全体的に描いたものはすでに前節の図1.2.1に示されている。

さらにここでは造船CIMSを設計から工作に至る全工程の情報を統合化する情報システムと位置づけ、CIMS実現時のイメージを造船管理者、設計者、工作計画者を含め概略的に図2.2.1にまとめた。

2.2.2 造船CIMS実現のために内包する問題点把握

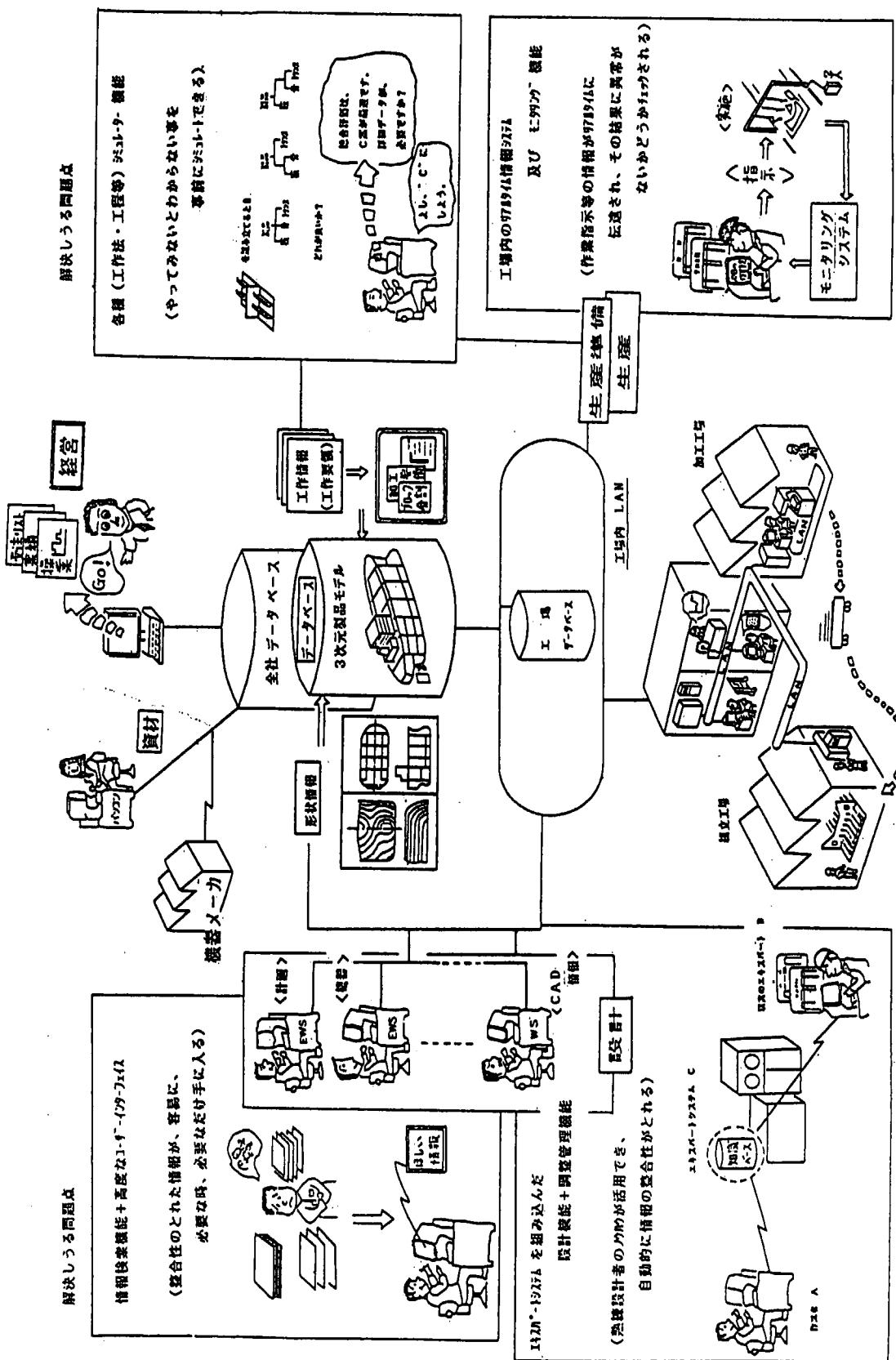
先に現状の造船の業務の中には多くの情報上の問題点が内包されていることを述べた。これらはそれぞれの業務に精通した熟練者の手によって補われてきているが、造船CIMSではこれらの問題点を具体的に挙げ、いかにして解決して行くかという点についてさらに広く且つ深く掘り下げる事が必要である。我々は本調査研究において現状の造船における設計、工作等の問題点を種々の角度から抽出しまとめ、それらを解決するために取るべき方法を相互に関連付け、統合化された枠組みとして図2.2.2にまとめた。この中で各システムは相互に関連をもって構成されており、従来のように個々のシステムを対象とするのではなく、統合されたトータルの枠組み全体を対象として解決してゆくことがすなわち造船CIMSを実現させる過程そのものと理解できる。

2.2.3 調査研究成果の概要

造船CIMSを実現するための解決策の枠組について述べた。本調査研究では、この枠組に基づき各ワーキンググループによって、ブレークスルー技術とこれを支える環境についての研究を進めた結果、次の様な項目に成果を集約することができた。（図2.2.3）

- (1) プロダクトモデル
- (2) AIを組み込んだアプリケーションソフト
- (3) オブジェクト指向システム
- (4) 造船広域情報通信システム（VAN）
- (5) 造船所内通信システム（LAN）
- (6) データベース
- (7) 造船CIMSハード構成の具体化
- (8) 開発手法としてのプロトタイピング

以下に、それぞれの項目について調査研究の概要を述べる。



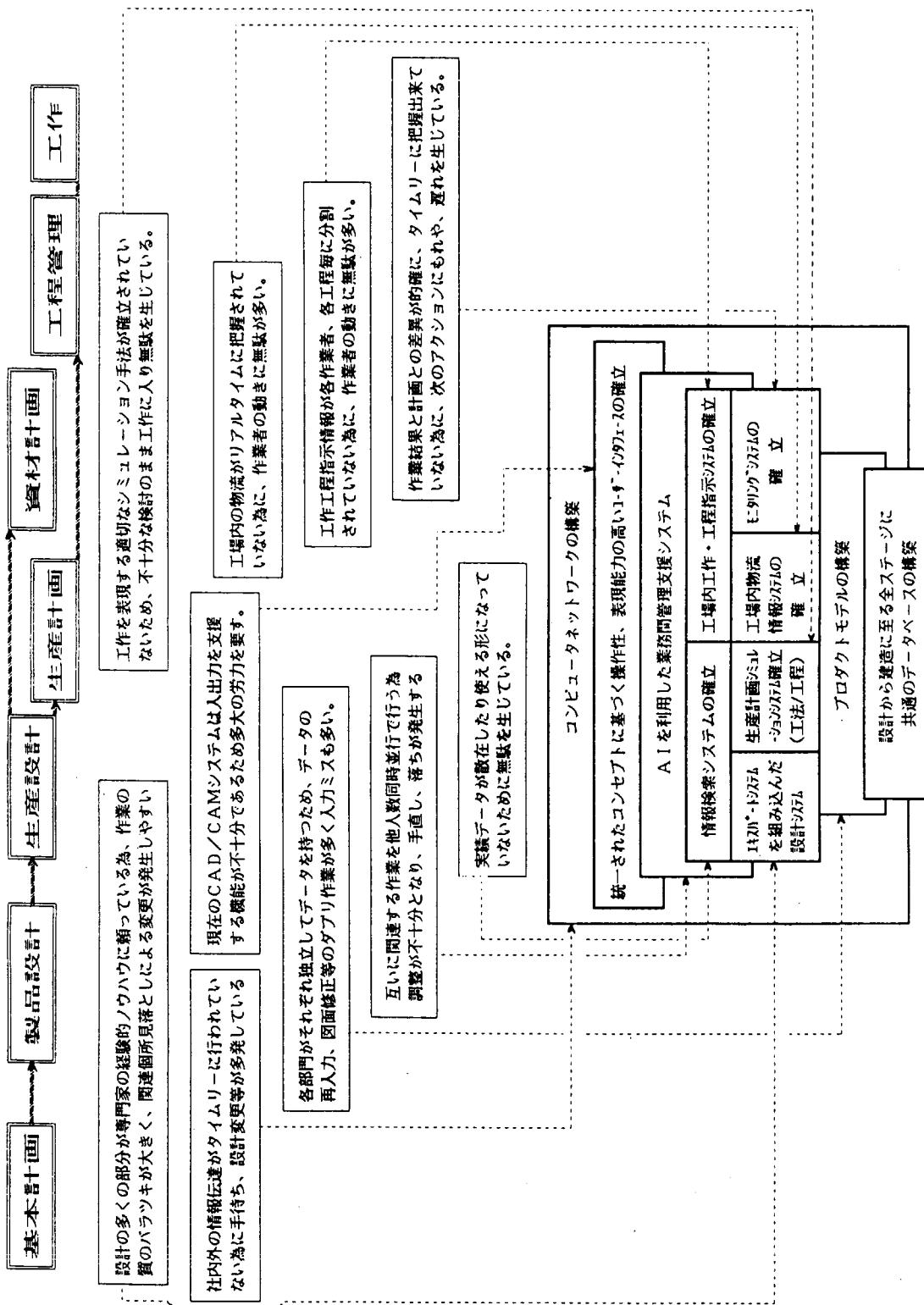


図2.2.2 工程上での解決すべき問題点と解決し得るシステム

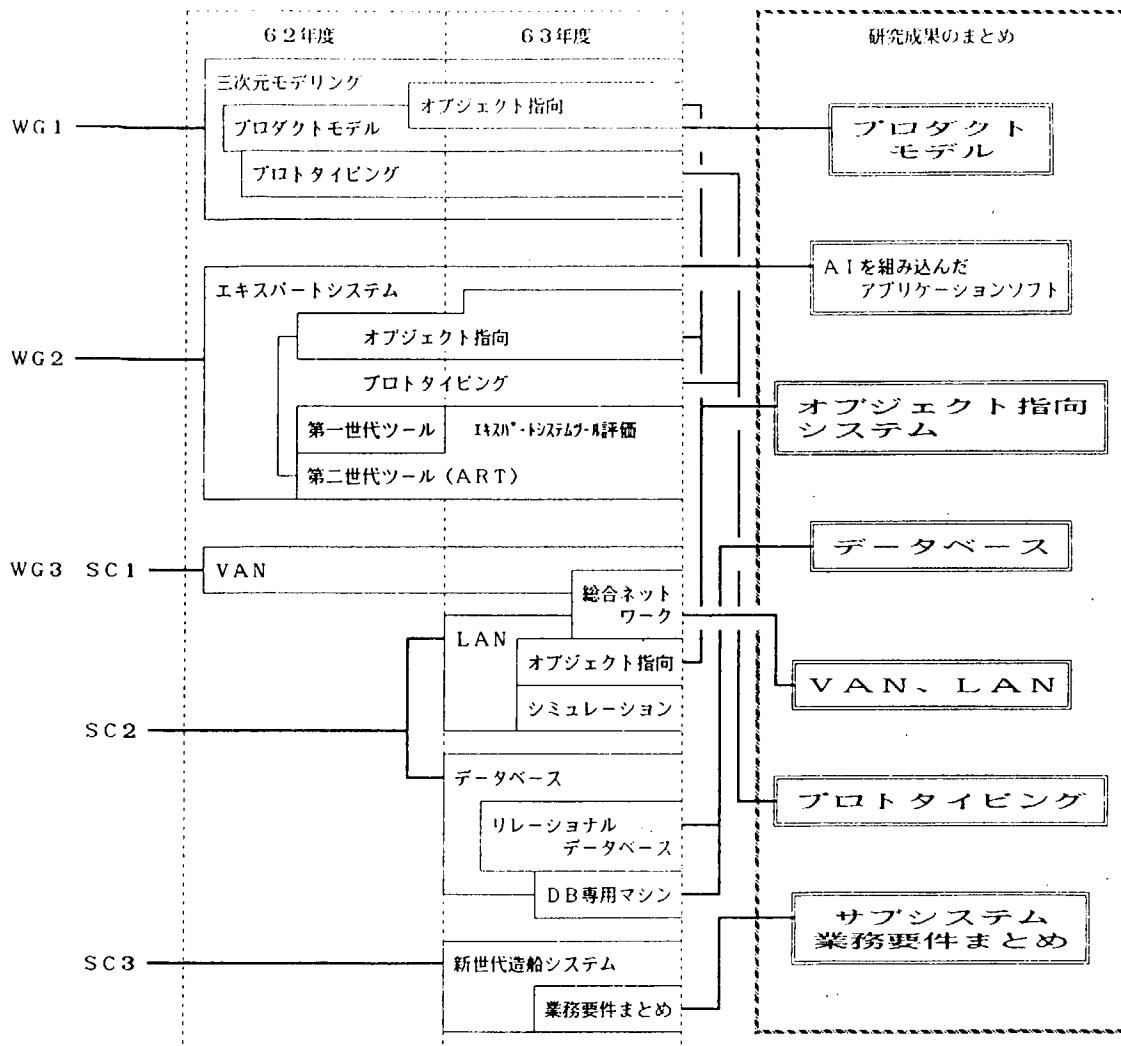


図 2.2.3 調査研究成果までの経緯

(1) プロダクトモデル

造船CIMSでは、個々の業務に対応するサブシステムによって、後述の巨大な造船データベースを基に、プロダクトモデルを生成、評価、修正のプロセスを繰り返して、コンピュータ上で最適なモデルが作り込まれていく。

このデータは各々の業務の断面で要請される「船」を的確に表現できなければならない。しかし、概念設計業務から現場での部品一つの取り付け業務に至る、非常に幅広く多様な船の認識全てに的確に対応することは難しく、ひとえに船そのものをどのような概念で、計算機内に表現するかにかかっている。

又、従来の多くのCADが扱っていた形状に関する情報は「船」全体の情報の一部分に過ぎず、造船CIMSにおけるモデルではそれに膨大で複雑な工作や管理に関する属性情報を付加する必要があることは明らかである。

以上の点を陽に示すために、従来の設計図及び部品図に対応する「形状モデル」に対して、造船CIMSにおいて多様な業務に対応する「形状+属性データモデル」を「プロダクトモデル」と称する。これは造船CIMS構築に当たっての最大の開発課題の一つである。

今回の研究により部材の形状及び部材間の関係の表現方法、工作に関する情報の捉え方に関して概念を示し、新しい造船のプロダクトモデルの方向を提案した。

(2) AIを組み込んだアプリケーションソフト

現在、AIの応用分野は大きく分けて、エキスパートシステム、知識型の画像理解、ロボティックス、自然言語理解等があるが、ここではアプリケーションソフトに対して最も影響が大きいと思われるエキスパートシステムについて述べる。

エキスパートシステムは造船CIMSを構成する各サブシステムにおいて、アルゴリズムとして書き下すのが困難な専門家の経験的知識に基づく処理を実現するために用いられ、各サブシステムの中で、対象モデルや手続き型プログラムと利用者との仲立ちとして、利用者の助手的な役割を担うものである。

エキスパートシステム用のソフトウェアとしては、ルールとフレーム（またはオブジェクト）を基本機能として備え、グラフィックを含むユーザインタフェースが優れた、ワークステーション上のエキスパートシステム構築ツールを利用するものが現時点では最も適切であり、推論手法等AIの要素技術という意味では、言語レベルから造船固有のエキスパートシステムを開発する必要はないと思われる。またエキスパートシステムは専門家の経験的知識を利用するものであるから、各サブシステムの専門領域毎にそれぞれの特徴に応じたシステム化アプローチが必要となるであろう。

(3) オブジェクト指向システム

造船システム特有の課題として、その機能設計の段階においては、「船」を全体或は特定の区画、プラント等の機能実現の為の単位で対象物を考慮するが、建造段階では船全体を工作上の単位である「ブロック」に分割するということがある。このことは他産業で対象物をボルトナットなどの最小部品の組合せとして全体を表現することは本質的に異なる対応を要求する。すなわち造船特有の機能ともいえるブロック分割では、分割とともに親の性格を引継ながら子の部品が生成され、その部品に多くの情報が付加されるが、必要に応じて元の親の姿に戻して検討をする必要が生ずる。従来型のシステムではこの処理は煩雑を極め、実現困難とされているが、オブジェクト指向言語及びそのシステムはその実現の可能性を持つ事が分かった。

更にシステム開発の生産性の面からも、人間の思考を自然に表現できること、過去のソフトを部品化して再利用できることにより効果が大きいとの報告もあり、エキスパートシステムや後述のプロトタイピングを指向する環境としても適していると考えられる。

(4) 造船広域情報通信システム(VAN)

造船所には、本社と工場やメーカー、他の造船所との間で通信される情報もある。これら的情報を取り扱う為には、造船所の外に構築するネットワーク(VAN)が必要となる。VANには、同一企業で地理的に離れた LANを相互にゲートウェイを通じて情報のやりとりを行う同一企業内 VANや関連企業間に構築された VAN等がある。関連企業 VANでは企業間でのデータ交換と業界関連データベースからのサービスが中心である。上記はいずれも技術的には問題なく規模に応じた設置が可能であることが分かった。

(5) 造船所内通信システム(LAN)

造船所内 LANにおいては、敷地面積が広く、各部門の業務内容も異なる為、小規模 LANを幹線系 LANに結んで行くような形態となる。また設計・管理のための LANと生産の LANも分離されている。さらに、これらの LANには、EWSやFA機器が多数導入されるため、マルチベンダー製品による組合せになり、異機種間通信が必要となる。LANによる異機種間通信に関しては ISOにより通信プロトコルの標準化作業が進められており、造船所内 LANもこの標準に準拠した LANにする必要がある。この OSIに準拠した LANについても、アクセス方式や伝送媒体、配線方法、変調方式などによって多くの形態が考えられる。これらをまとめると、造船所内通信ネットワークを構築するためには種々ある業務内容や、造船所特有の環境をよく検討し、効率がよくコストパフォーマンス

ンスの優れた、使い勝手のよい LAN を構築することが可能であると考える。またこのために国際的なプロトコル標準化作業の動向と、ベンダーから供給される製品の技術動向や特徴に注目しておく必要がある。

(6) データベース

次世代造船システムに要請されるデータベースは、概念的に一元化され、巨大であるが充分に迅速に機能することと、システムの拡張に関して柔軟に対応するべく応用プログラムからの独立を確保していることが要求される。

こうした要請に応えるものとして、将来のハード面の発展も期待して、RDB(リレーショナルデータベース)を技術分野に適用することが考えられるが、従来と同様の汎用機にこれを装備したのでは、CPUに負荷がかかり、処理効率が悪くなるという問題があった。その対策として、昨今のEWSの急速な性能向上を考え、データベースを物理的に多くのCPU上に分散させて処理能力を上げることが考えられる。その際、データベースを論理的に一元化するため、データ修正に対する種々のレベルの変更履歴の管理、データ間の関連チェックの実現、物理的及び機密保持の面でのデータの安全性確保等々、分散形のデータベースが持つ多くの問題を解決する必要がある。さらにもう一つの対策として近年最も注目されているのがRDB専用機を導入して集中型のデータベースとすることも考えられる。これは現在も汎用のコンピュータのバックエンドマシンまたは、LANのデータベースサーバとして用いられ、数倍の処理効率の向上が得られている。本方式を、通信機能の向上を前提として検討することによりシステム全体としての要件を満たすことも考えられる。

(7) 造船CIMSのハード構成の具体化

上記のシステムを実際に稼動させてゆくシステムアーキテクチャーのイメージについての明確化を行った。その概要について述べる。

造船CIMS実現時、設計には多数の設計支援サブシステムが稼動しており、又製造部門には生産の為のFA装置・機器が工場内に分散配置されている。これらを結びシステムの効率を上げる為には、造船所内をコンピュータネットワークで結ぶことが情報統合化の必要条件となる。また、造船所で扱う情報には造船所だけで通信する情報の他、本社と工場やメーカー、他の造船所との間で通信される情報もある。このような造船所外との情報を取り扱うコンピュータネットワークも同様である。図2.2.4にコンピュータネットワークイメージの一例を示す。

さらにこのネットワークにつながる個々のハードウェアは従来の大型汎用コンピュータを中心とした端末群ではなく、近年急速な進歩の途上にある高度の専用機能を有するものとなる。ここでその主なものについて説明を加え、イメージを明確にする。

• EWS(エンジニアリング・ワークステーション)

近年の急速なコンピュータ技術の進歩はEWSについて顕著であり、以前の大型汎用コンピュータ並の処理速度(数十MIPS)、仮想記憶容量(1~4Gバイト)を有するものが現れてきており、この進展はまだまだ続くと予想されている。これらが周辺の最新通信システムに支援されてネットワークの要所要所に配置することによって、分散処理を可能とするアーキテクチャーが構成されることになる。

• データベース専用機

現在の汎用大型コンピュータに代わって、造船CIMSの必要とする巨大なシステムに対するデータの供給はデータベース専用機が担う事になると予想されている。これは近年ビジネス分野で非常に大量のデータを急速に処理する必要から広まってきたものであり、CIMS規模に対してまたCAD情報の扱いに対しても充分応え得るものとして期待がもたれている。

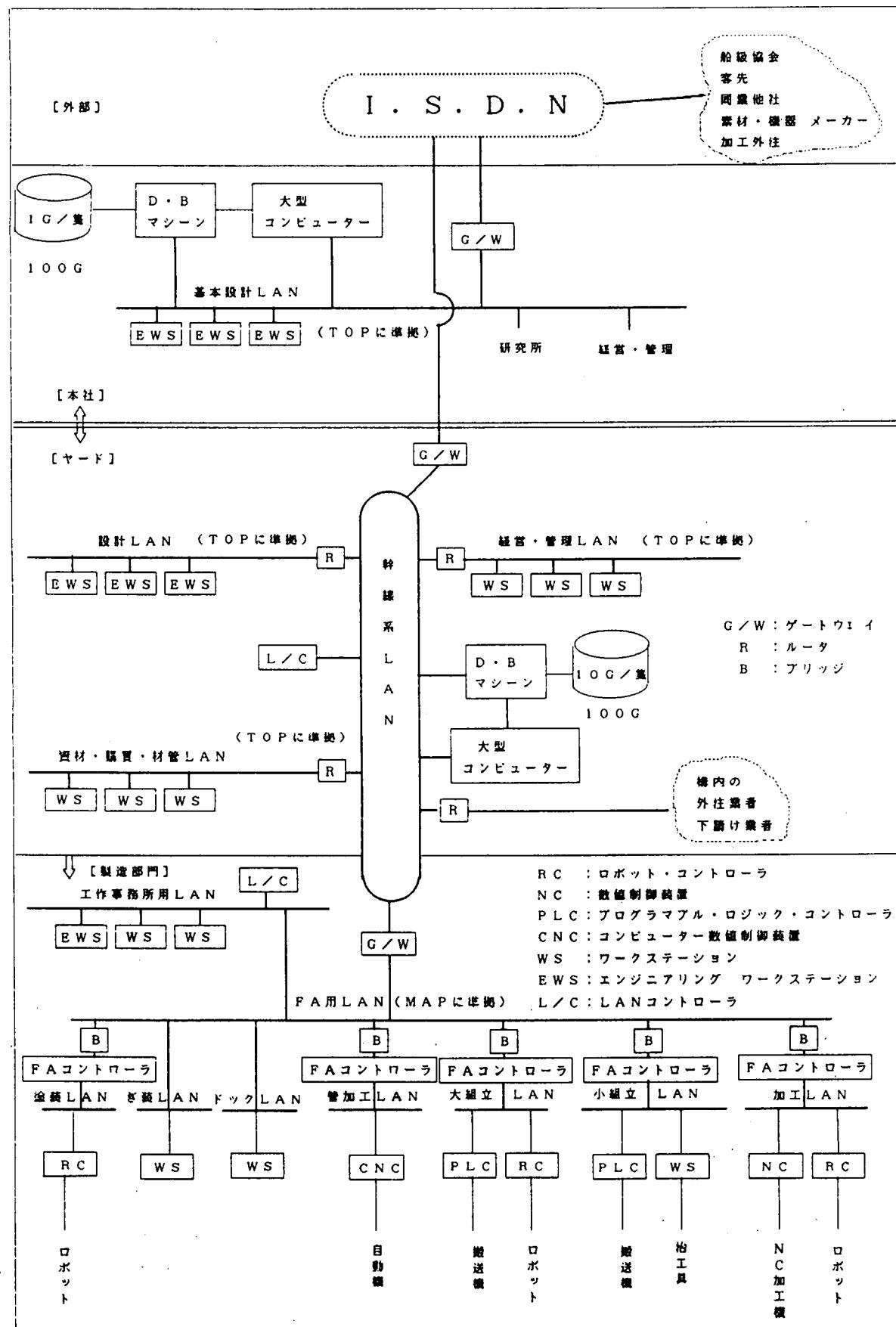


図 2.2.4 造船所内 LAN のイメージ図

- FA コントローラ

生産現場においては、今まで以上に FA 機器に対するリアルタイム制御が必要となり多くの台数が配置されることが予想される。これらは工場の LAN につながり情報の伝送がなされる。

- LAN 構成品

光ファイバー、同軸ケーブル及びその接続機器等多種のものが実用化されており、品質的にも問題はなく、伝送速度についても、光 LAN で 100Mbps の標準化が進められる実用化が間近い等、造船 CIMS に対する技術的な問題はほとんどないといつても過言ではない。

(8) 開発手法としてのプロトタイピング

コンピュータシステムはそのハードウェアの進歩に支援されながらますます巨大化し、そのシステムの開発時は勿論、運用時の保守にも多くのシステム技術者の労力を必要としている。過去に於てはシステム開発費の 8 割がハード、2 割がソフト開発費と言われたが、現在では 2 割がハード、8 割がソフトと、開発費比率は全く逆転しており、このままではソフトウェア開発技術者の絶対量が不足するばかりではなく、大規模システムになるほど開発費用は莫大となるおそれもあると言われる。

現在に至って、従来大型システム開発に用いられてきた手法のウォーターフォールモデルでは限界があるのではないかとの指摘がなされている。しかし、一方ではハードの向上により従来人間が処理しなければならなかった業務をハード側で分担できるようになって来た。すなわち、EWS の発達は業務担当者のシステムへの関わりをより強くし、特にヒューマンインターフェースが重要となったことから、従来の業務要件を確定してからのシステム開発のみを対象としたアプローチが現実的ではなくなっていることがある。

また、造船 CIMS のような統合化を目指すシステムでは、業務の幅が非常に広く、その全てを見渡すことの難しさがある。すなわち、統合化システムの開発は必然的にその開発自体が業務の形態を変える要素が大きいが、部外者の想像だけでは業務担当者の要件と、その後の組織のあるべき姿をまとめることが難しくなっているという現実がある。システム開発へ業務担当者が深く係わることを含んだ開発モデルの模索が必要となったのである。例えば記号処理により業務要件をシステム上に自由に表現し、システム稼働時の様子を手軽にシミュレートし、業務要件の洗い出しを助ける、所謂プロトタイピング手法などが、ハード・ソフト両面の発達により可能になろうとしていることである。このプロトタイピングこそが従来のウォーターフォールモデルの不備を補うものとして注目されているのである。

造船 CIMS という、規模の面でも要求機能のレベルの面でも最高度といえるシステムの開発に於ては、従来の手法ではもはや対応が難しく、上記の未来型のシステム開発手法を駆使することがあらゆる面から必要であることが分かった。

2.2.4 システム開発の進め方

造船 CIMS という巨大で複雑しかも頻繁な変更に耐える柔軟なシステムを実現するためには従来の大型システムの延長線上では開発・保守のあらゆる面からの困難が予想されるため、多くの斬新な先端的計算機利用技術を駆使する必要がある。これらを念頭におきシステム開発の進め方について述べる。

造船 CIMS は、従来の単機能のシステム開発と異なり、経営、設計、製造の広範囲の業務が行えまた初期仕様設定から引渡しまでの長時間にわたる情報が矛盾や重複なく、整合性をもって表現されるプロダクトモデルをもつことが条件となる。このことから本研究でまとめられた代表的なサブシステムの業務要件から必要な情報の種類、機能を抽出し、それらが共通に表現できる統合化されたプロダクトモデルを構築することに注力することが重要である。本研

究において提案された煩雑かつ複雑な変更に対して柔軟に表現でき、また複雑な部品およびその関係さらには周辺環境まで含めた表現ができるプロダクトモデルを他の要件にたいしても満足するようなモデルに発展させてゆく方向で開発を進めることが必要である。この際、開発時の周辺技術レベル・規模で行うことになるが次段階での拡張を考慮しておくことは言うまでもない。

これらの情報は実質的にはデータベースの中に収納され運用されることになる。この基盤となるハードウェアとしては、仮想記憶容量や処理速度の面で進歩しつつあるEWSやデータベースマシンを採用することによって従来に比較して高い効率が得られることが明らかになったことから、これらのハードウェアを用いて開発が行われることになる。具体的対応としては、当面RDB専用機の機能を確認してその実現性を検討することを中心にして進めることとし、世の中の分散型のデータベース管理に関する技術が実用的になつた時点で最終的なシステム構成を検討すれば、全体的なシステム開発に支障をきたすことはないとの判断される。

CIMSを構成するLANやVANの通信システムについては、近年急速な進歩が見られ、実用に際してユーザーとして使い易くまたコストパフォーマンスの優れたシステムを構築するためには今後国際的なプロトコルの標準化や製品技術動向に注目しておく必要がある。

さらに造船業務はブロック分割に代表されるような全体から個へという手順を踏んで行く手法をとることが多い。また受注生産からくる多数の業務の同時進行により変更、修正の繰り返しという特徴があげられる。本研究ではこれらに対して、オブジェクト指向の言語やシステムが有効であることを述べた。この思想をプロダクトモデル、データベースさらにAIに適用し、開発時にその実証をおこなうことも大きな狙いの一つである。

以上のような基盤的技術開発と並行してその上に位置する個々の業務を支援するためのシステム開発がなされなければならない。ここでは、近年研究が急激に進められているエキスパートシステムを有効に活用して行くことになる。造船業務には汎用エキスパートシステム構築ツールを適用することによって効果が期待出来る分野が数多くあり、開発ステップとしてはまず典型的な業務を選択し、その開発ツール、手法などを極力共通化して開発効率を高めるとともに、次のステップではさらに高度な判断を要する業務への適用をめざして、汎用高級ツールの技術動向を注意深く見守る必要がある。

造船業界で開発した現状のCAD・CAMシステムは、これまでに多大の労力と期間を要している。来たるべき造船CIMSは、これに比べその期待される機能においては極めて高く、規模は広範囲にわたり、全体として大きく且つ複雑なシステムとなることが予想される。この実現のためには本研究で明らかになつた多くの先端的技術を適用するとともに、システムの開発手法に関しても従来の延長線上では規模・信頼性の面で困難が予想され、新しいシステム開発手法が要請される。本研究において提案されたプロトタイピング手法はこれらの条件を満たしており有望である。今後は、大規模システムへの適用を含めた検証を重ねることによって充分効果を上げる事が期待できる。

また、造船CIMSの対象領域は（技術面、業務面共に）多岐にわたっている。この為、開発期間や開発費用は長期化・大規模化することが予想される。また開発期間中にも計算機利用技術の革新や国際標準の進展等がおこることもあり得、それらを取り込むことが開発効率上有効である。従って、開発に際してはシステムの狙いを明確にし、その狙いに合わせた段階的開発を行うことが必要である。

以上から、造船CIMSを開発するにはまずプロトタイピング手法を用いたパイロットモデル開発を先行して行い、今回提案した先端的技術や手法を充分に検証した後、次の段階へ移行すべきであると考えられる。

2.3 新船体構造設計法

船体構造は船全体の中で最も基幹をなす部分であり、大型かつ複雑であるため、その設計には長年の経験と高い技術力が必要である。造船業としての将来を考えると図2.3.1に示すように、船体構造の開発力の強化がのぞまれており、その強化には設計法の改革が必須条件であることが第一線設計者の共通認識である。

このような認識に基づき、SR 210 第二分科会では現状の設計法の分析を行い、一部試行解析を実施し、また周辺の異業界の構造設計法、関連技術の研究動向の調査を行い、将来の設計法のあるべき姿として新船体構造設計法（ADDA = ADvanced Design by Analysis）の構想とその開発課題を調査研究し、取りまとめた。

2.3.1 船体構造設計法について

(1) 構造設計の基本

構造設計の基本は一般に、図2.3.2の左側の設計のプロセスに対し、その重要な部分として強度評価プロセスが図の右側のようなかかわり合いを持っている。今回の第二分科会の検討の範囲は図示するように設計のプロセスを考慮した信頼性評価手法である。図2.3.2の太線で示すD→E→F→B→Dの「強度の四角形」は設計の修正に応じ繰り返され、基本構造の確定にいたることである。この段階で主要構造の配置寸法、代表的詳細構造は確定される。また設計の最適化の追求には、経済性の評価（図示はしていない）と合わせ上記のサイクルを迅速にまわすことが重要である。

(2) 各種の現状手法と問題点

前述の「強度の四角形」の手法は造船の場合一義的でなく、三通りの手法が使われている。第一の手法はルール算式による方法と言われており、構造の要素毎に各々簡単な算式で与えられ、それらを組合せて評価を行っていく方法である。この手法によれば迅速に設計が可能である反面、前述の「強度の四角形」の三要素D, E, Fに見合う要素が明らかにされていないため、新規性の強い構造ほどその適用には限界がある。最近では国際的に船級協会等の要求もあり、一部構造に次の第二法を用いる傾向になりつつある。

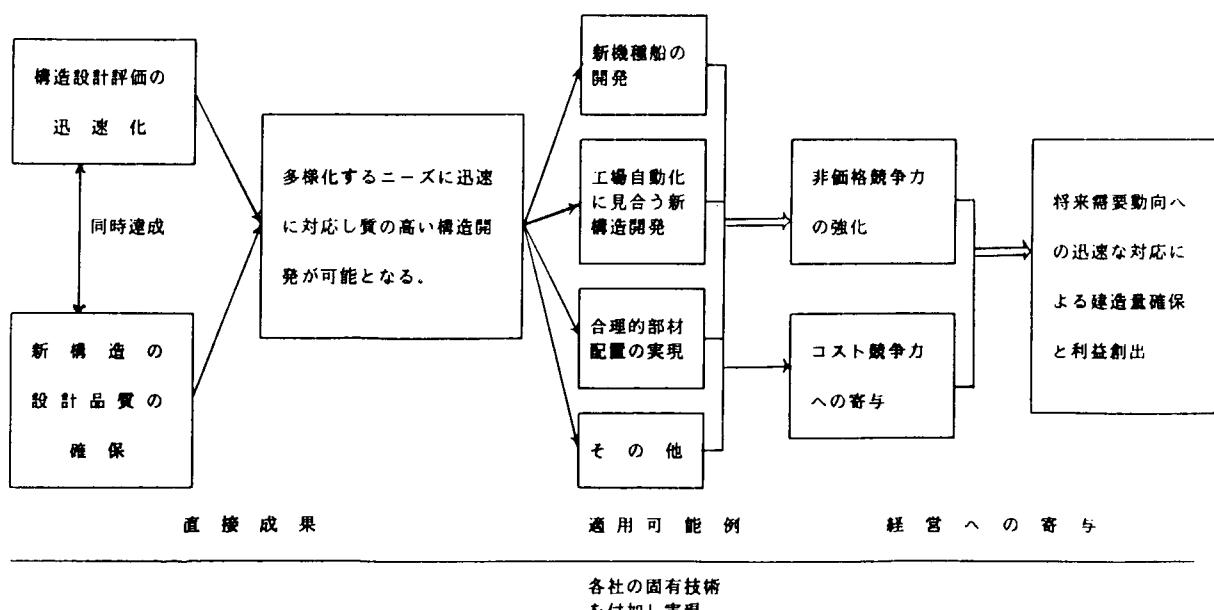


図2.3.1 新船体構造設計システムへの期待

第二法は「直接強度計算法」であり、応力を計算し許容応力で判定のうえ構造寸法を決める方式で、現在大型船の中央部構造への利用が主流となってきている。しかしながら、前記三要素の手法条件の与え方については船の種類に応じてばらばらであり、また広い範囲の一般的手法が確立されていない。そのため、その解析実行については多くの時間を要しており、在来型大型船で2ヶ月も必要としている。

第三の方法は「詳細直接計算法」であり、ガスキャリアの一部等に限定的に利用されているもので、強度評価項目と評価の基本方針を明確にし、設計者の提案を審査する方式であるが、それを裏づける長期間を要する解析や一部実験がその構造に応じ必要になっている。

以上3種類の手法の適用性と解析の難度を模式的に図2.3.3、図2.3.4に示す。同図にはターゲットとしてのADDAを第四の方法として示し、その差異を明らかにする。

(3) 試行調査

構造解析上の問題点を検討するため8万トンタンカーを供試船とし、全船一体として波浪中の荷重解析を行い、その荷重に基づく全船一体のFEMモデル(4,000節点、6,000要素)で応力解析等を試行してみた。

その結果を検討し、ADDAの構築のために解決されるべき主な課題は次のとおりである。

- ① 全体として、モデリングの問題に具体的構造問題と解析のための近似化の問題があり両者とも更にコンピュータ上での具体的処理法が研究されるべきである。
- ② 大型の計算を実施するには、荷重／応力解析／強度／評価のプロセスの一貫性が必要であることがクローズアップしており、複合荷重の扱いなどそのプロセス自身の研究が更に進められるべきである。
- ③ ADDAでの解析は応力解析で5万節点クラスであり、また多数の強度算定解析を必要とするため、コンピュータの所要速度は25GFLOPS、同時に多量データを高速で処理する画像処理等が必要となろう。

(4) 関連技術動向

ADDAの構想／開発に関連した調査事項の内、とくに下記の点に留意すべきである。

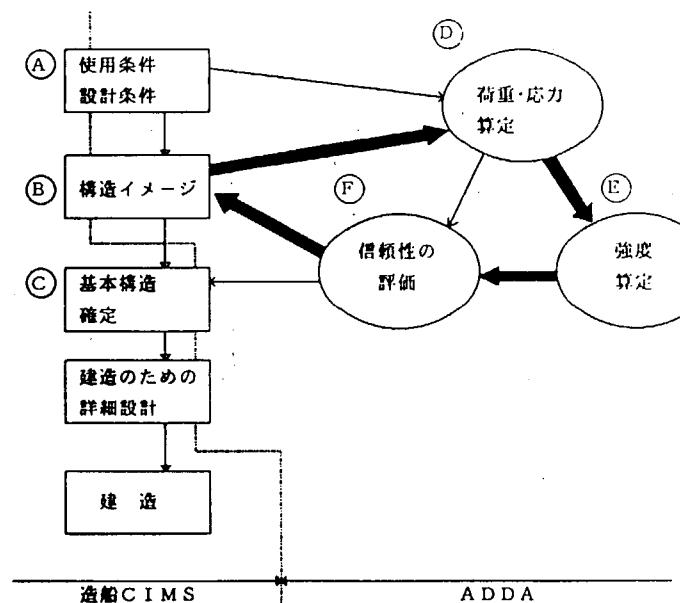


図2.3.2 構造設計の基本プロセス

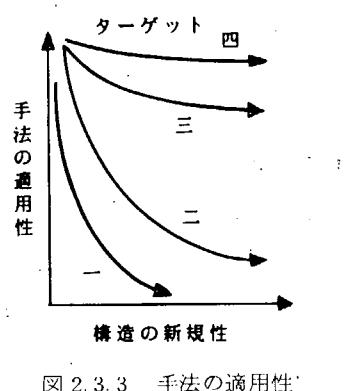


図2.3.3 手法の適用性

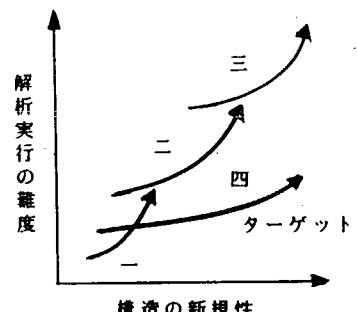


図2.3.4 解析実行の難度

① 他構造における信頼性評価手法の動向

構造、その使用環境が異なるものの、自動車、航空機、海洋構造物、原子力等の大型構造の信頼性評価手法は近年著しく進展してきており、船舶がこのまま取り残されれば相対的な地盤沈下を更に加速することが懸念される。それらの構造での主な動向を示すと

- (イ) 実物大スケールの検証実験から数値実験への努力。………例：自動車の衝突強度予測。
- (ロ) Redundancyのある構造を的確に評価する努力。…………例：航空機における damage tolerant design。
- (ハ) 異種構造、異種現象を統一的尺度で評価する努力。………例：各方面での信頼性工学による評価。

などを挙げることが出来、船舶の新しい設計法の構築に船舶としての固有の検証を行って利用できる可能性が認められる。

② 関連するコンピュータ技術の進歩

構造解析は膨大なデータを高速で処理し、かつ入出力データの迅速なる判断を支援するシステムが必要であり、コンピュータ技術の進歩とともに、採用される理論も大幅に変化しうる可能性をもつ。

40年代に開発された船舶用FEM応力解析コードの「PASSAGE」は、FEM解析の範囲に限定されたものだが、造船業界のFEMの実用利用に大いに寄与し、直接強度計算の普及に役立っている。しかしながら前述したように解析ニーズは高まっており、そのためには「PASSAGE」の範囲をはるかに超えた荷重／応力／強度／評価の一貫した広い範囲のシステムを作るべきである。

構造解析には、コンピュータの高速性が求められるが、「PASSAGE」開発時の超大型汎用機も今や机上のSUPER EWSで実現できる可能性が確実視される時代になっており、所要のコンピュータは得られる見通しである。

2.3.2 新船体構造設計法の概念

(1) ADDAの理念と成果目標

ADDAの理念は日本造船学会の将来技術検討委員会(昭和60年)で取り上げられており、図2.3.5にその概要を示す。同図は最終ターゲットの理念を示すものである。図2.3.5の太線のように開発構想としては、まず設計手法に重点が置かれるべきである。

設計法としてのADDAの開発の技術目標は次のように設定し、その構想が具体的に検討された。

- ① 将来出現するあらゆる船種に共通する信頼性手法であること。
(船種別の固有の部分は別途考慮する)

- ② 開発・設計期間の大幅短縮が可能なるようシステム化を計る。

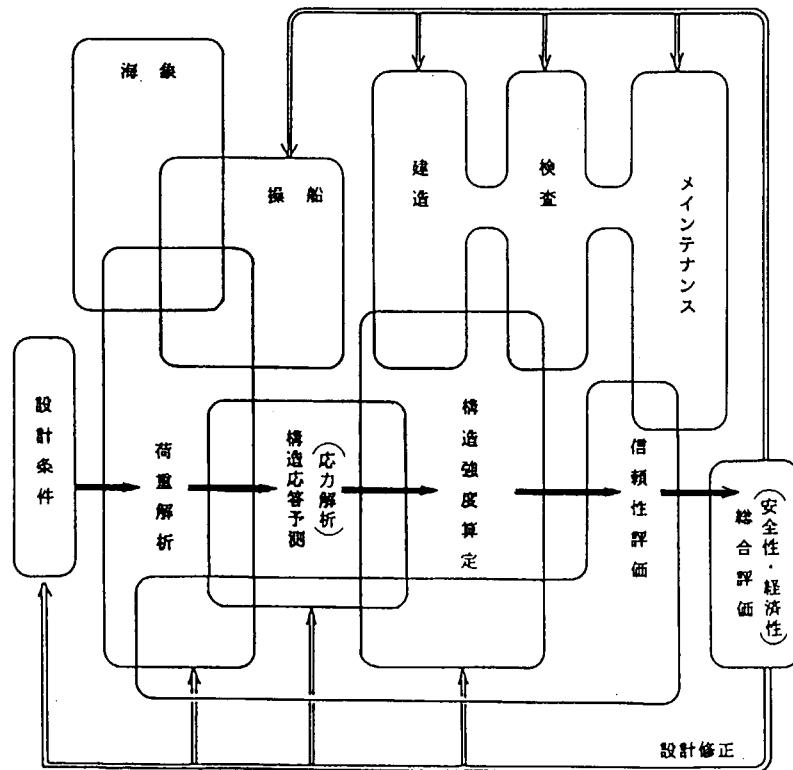


図2.3.5 新船体構造設計法の理念と周辺

(高技術船開発 5年→1年，在来船 2ヶ月→2週間）

この両者が実現すると図 2.3.3，図 2.3.4 に示す第四法となり現状手法との差異が理解できる。

(2) ADDA システムの概要

ADDAは図 2.3.2 に示す荷重応力算定，強度算定及び信頼性の評価を一貫して行え，かつその前提として同図の A, B と関係し設計修正が容易に行えるようとする設計手法であり，またそのシステム化である。

完成時の設計のフローは各論で示すが，要点は既に前述の第四法として述べた通りである。

前項の目標を達成するためには手法を設計の場で利用できるシステムとしてまとめることが必要であり，その概要を各サブシステムに分けて以下に示す。

① 構造解析モデリングシステム

造船 CIMS 全体のモデリングでの構造の具体的表現は設計の進展に応じ時系列的に変化する。ADDA のモデリングはその内，解析のステージに応じた近似的な構造のモデリング及びその属性（剛性表現，荷重負担表現等）が与える基本機能を持ち，造船 CIMS 全体のモデリングと密接な関係を持つ。以下のサブシステム②～⑤に関係し，運動計算，平面格子，変断面梁，局部構造，部分構造，全船一体構造の各々のサブモジュールで構成される。

② 高精度船体荷重解析システム

波浪に関する各種の統計資料をデータベースとして常備しており，波浪中を航行する船舶の船体運動をシミュレーションすると共に，船体に働く加速度，変動圧力，曲げモーメント等の変動荷重をはじめ，スロッシングやスラミング等の衝撃圧を含むすべての荷重の短期・長期の予測を行って，ADDA システムの構造解析ならびに強度評価に必要な高い精度の荷重情報を提供する。

③ 迅速・高精度構造解析システム

高精度・大規模直接計算による船体構造設計を可能とするため，波浪中を航行する船舶に発生する応力や応答値を，迅速かつ高精度で計算する。

即ち，高精度船体荷重解析システムの出力結果を使用して，全船一体解析，必要個所の船体構造部材の詳細解析を行い，船体構造強度算定システムや船体構造総合評価システムへその結果を受け渡す。

④ 船体構造強度算定システム

全船一体解析により得られた応力に対し，船体構造の座屈崩壊強度および疲労強度，不安定破壊強度を算定する。即ち，高精度構造解析システムより得られた各構造の応力場に対し，必要な部位について，座屈強度解析，崩壊強度解析および疲労亀裂発生・伝播解析，不安定破壊解析等を行い，その結果を船体構造総合評価システムへ受け渡す。船全体の折損，船側構造の崩壊などの大事故につながるような損傷と，そうでない損傷が区別でき，精度良く強度算定できる。

⑤ 船体構造強度総合評価システム

本サブシステムは，迅速・高精度構造解析システムにより計算された応力および変位が，船体構造強度算定システムによって求められる構造の座屈・崩壊・疲労強度のある一定値以下になる信頼度の評価を目的とする。

本サブシステムは，一次判定および二次判定の各サブモジュールから構成されており，一次判定サブモジュールは精査解析必要箇所の選定，二次判定サブモジュールは信頼性工学に基づく船体構造部材の評価が主な機能である。

⑥ 構造設計支援インテリジェントシステム

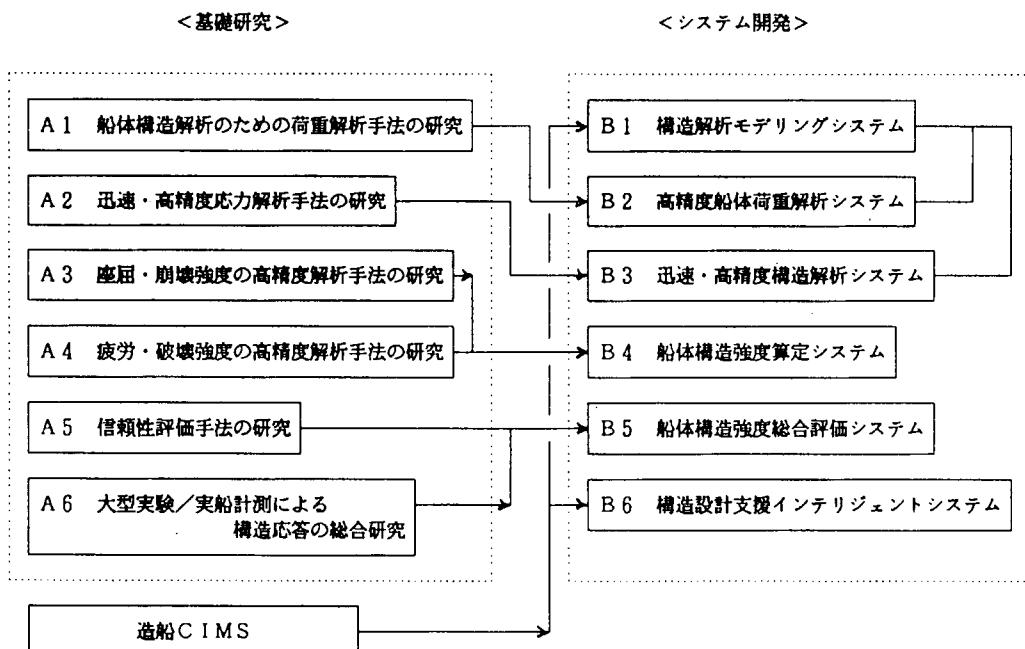
ADDA システムのデータベースを構築・管理し，必要情報の一元管理を計ると共に，ADDA 及び周辺の各システムを統合し，各システム間の円滑なコミュニケーションと効率よい運用環境を提供するマネーマシンインター

フェースである。更に、ADDAシステムの高度システム化を可能とする各種支援システムを提供する。

2.3.3 ADDA研究開発課題の総括

2.3.2(1)に述べた成果目標①、②は本来矛盾する要素を持ち、両者を同時達成するには現状技術の延長線上では困難である。①を達成するには強度評価の精密化が必須であり、そのための新しい理論課題の基礎研究が重要であり、その結果得られる手法によってシステム化が行われ、②の迅速化が達成されなければならない。ADDA開発のための基礎研究課題及びシステム課題の概要を表2.3.1に示す。

表2.3.1 新船体構造設計法の研究開発課題



2.4 数値水槽

2.4.1 数値水槽の概念

船型設計は船舶の引合い、受注から建造に至る流れの中で技術面では最上流に位置し、船舶の有する固有性能（例えば推進性能など）は船型設計段階において決定されると言って差し支えない。しかしながら船型設計や船型開発は、現状では主として水槽試験による実験工学的なアプローチであるため船型の最適化は部分的に留まっている。一方、数値流体力学は航空機産業を始め諸産業において着実な学問的進展を見せており、将来スーパーコンピュータの利用が一層容易になるにつれて数値解析技術は飛躍的に進展するであろうと予想されている。

このような技術環境において水槽試験の限界等による諸問題を解決し、船型開発や船型設計力を革新的に進歩させ今後の日本造船業の国際競争力を増し、常に高性能の船舶を提供することにより海運界に寄与するためには、航空機分野で行われているように、数値シミュレーションにより船舶の流体力学的性能を評価する技術、即ち「数値水槽」が不可欠であり、特に船型設計の基本となる推進性能を評価するための「推進性能数値水槽」の開発は是非とも実施すべきであると理解されている。（図2.4.1及び図2.4.2）

数値水槽とは、船体周りの流れとそれに基づく船舶の推進性能特性を数値計算により求めるものである。具体的には、コンピュータ内に各種の流体力学的物理現象に対応した理論モデルを構築し、船型やプロペラ形状あるいは波浪

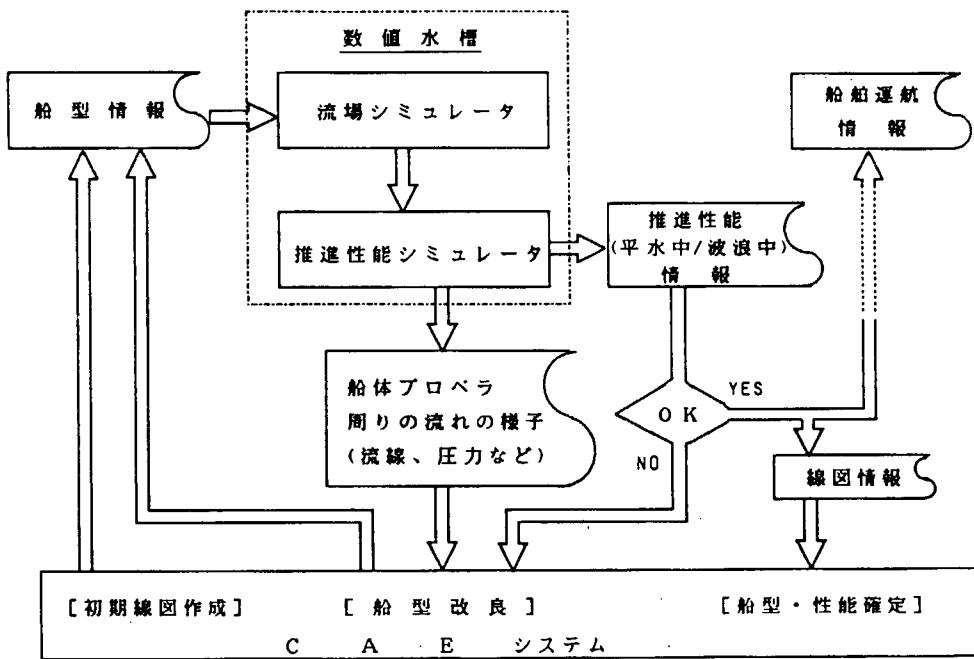


図 2.4.1 数値水槽 CAE システム

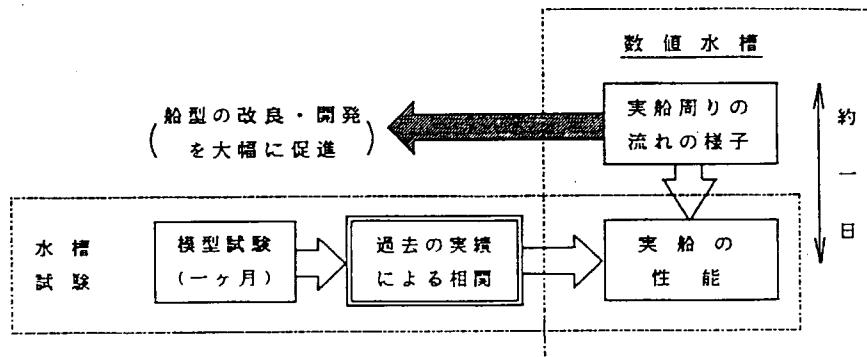


図 2.4.2 数値水槽と水槽試験

等を入力することによって船体表面および周囲の微細な流れ場、圧力、抵抗等更には速力／馬力の関係等を出力する推進性能解析システムである。数値水槽のシステム基本構想として下記のシミュレータから構成されると考える。
(図 2.4.3)

(イ) 流場シミュレータとして： 造波流場シミュレータ、粘性流場シミュレータ

船体近傍乱流場シミュレータ、プロペラ流場シミュレータ

波浪中流場シミュレータ

(ロ) 性能シミュレータとして： 平水中推進性能シミュレータ、波浪中推進性能シミュレータ

このような認識に基づき、SR 210 第三分科会では数値水槽システムの中核技術となる船体及びプロペラ周囲流場の数値解析法に関する調査研究を行い、数値水槽システムの構築に向かって、実施すべき研究開発課題を取りまとめた。

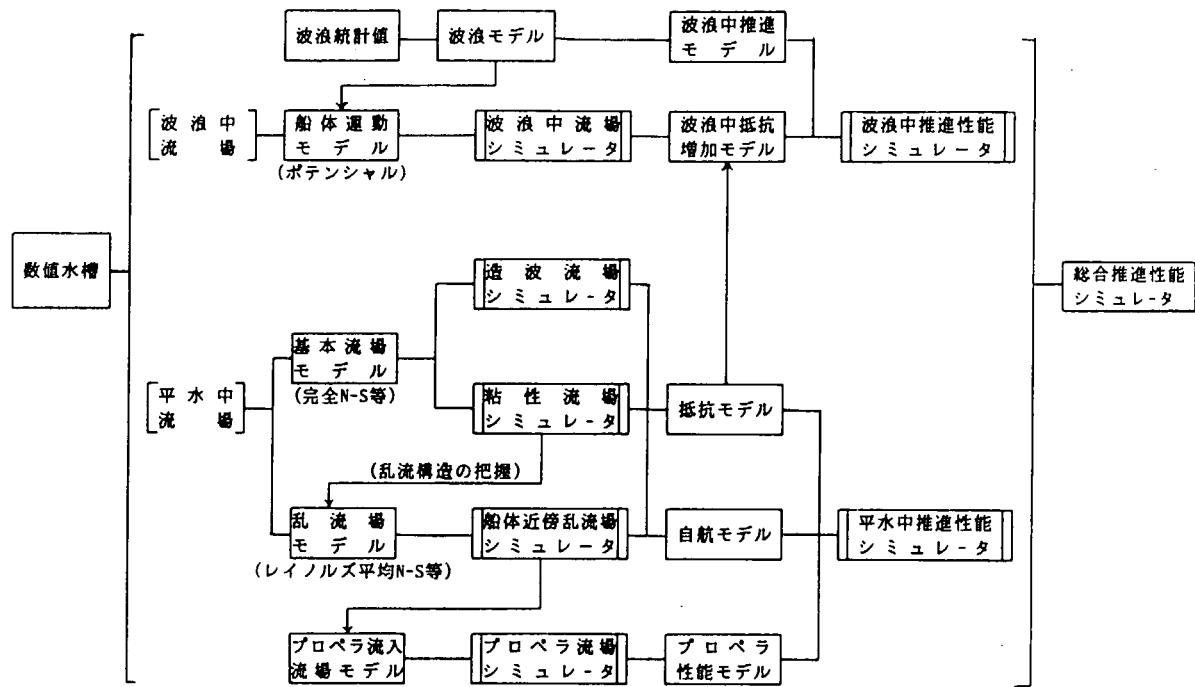


図 2.4.3 数値水槽要素シミュレータの構成

2.4.2 船体周囲流場の数値解析法

平水中の流場や性能を取り扱う場合に、流体運動現象を表す支配方程式としての Navier Stokes (NS) 方程式を近似なしにあるいはより少ない近似化の範囲で解くことが究極の目標である。しかしながら現在の船体周囲流場の数値解法の技術レベルは、文献調査から得られた結果からみると船体周りの流場の基礎特性の把握には役立つが船型性能評価に必須の抵抗値の定量的算出が可能な技術レベルには至っていない。本調査研究において数値解析技術の現状を更に具体的に把握するために、現在利用できる解析手法や基礎調査のために新たに作成した解析手法を用いて NS 方程式の解法に関する共通的な要素技術である差分スキーム、格子生成法、乱流モデル等について調査した。今回検討の対象とした解析手法は大きく次の 3 種に分類できる。

- NS 方程式の差分解法

Full NS 方程式の差分解法 (2 次元及び 3 次元船体)

3 次元船体周りのレイノルズ平均 NS 方程式の差分解法 (方程式の近似化による実用的解法)

- 境界要素法による水波計算

- 理論解析との組合せ

これらの調査検討の結果判明した主要な点は、次の通りである。

- (1) Full NS 方程式の解法において現状で扱いうるレイノルズ数は 10^5 程度迄である。粘性流れの基礎的研究として利用できるが、模型船対応のレイノルズ数 10^6 や実船対応のレイノルズ数 10^9 を対象とするためには、さらに基礎的な研究を進めいかなければならない。船体周囲の自由表面水波の計算に関しては差分解法あるいは境界要素法による解法により粘性を考慮しない範囲では利用されつつあるが、今後は水波／粘性の干渉を更に明らかにする研究が必要である。

2 次元 Full NS 解法については、水波問題に応用したときの効率のよい計算スキームの開発や、高レイノルズ数

化、計算時間の短縮のための適切な乱流モデルの開発を行う必要がある。3次元Full NS解法に関しては、水波問題については直交格子系の枠内で粘性現象の解像度を高める手法の開発と、格子生成に関して領域分割法、多重格子法を取り入れることが重要となる。

- (2) レイノルズ平均NS解法においてはレイノルズ数 10^6 程度までの計算は試みられているが、現状では船体抵抗の推定精度が低く、改良のための研究を続けねばならない。このために汎用性の高い乱流モデルの開発および格子生成法の改良を行うことが必要である。
- (3) 一方、これら数値解析の評価に必要な流場データ収集には計測精度の向上と、微妙な流れの状況把握のための非接触計測法、たとえばレーザー流速計の利用法の開発が必要である。
- (4) 数値解析手法と同程度の重要性をもつ計算システムの前後処理手法に関し、先駆的な研究を行っている米国の研究機関を訪問調査し、数値水槽システム開発の際に考慮すべき諸問題を把握した。

2.4.3 波浪中抵抗増加理論の高度化

波浪中の流場、抵抗増加およびこれらを包括する波浪中推進性能に関する推定法は、現在主として線形理論に基づく数値計算と模型実験に頼っている。本調査研究では波浪中抵抗増加および波浪中推進性能の推定、評価技術に関し、現在利用可能な推定理論並びにその検証に必要な計測手法について広範囲に亘る文献調査と試計算の結果、主要な結論として以下の点が明らかになった。

- (1) 抵抗増加の推定に関して、現在用いられている数値計算法は大部分が細長体の仮定に基づく計算法であり、やせ型から肥大船までの各種船型に対して実用的に必要な波長、波方向、船速範囲で必ずしも十分な推定精度を有しているとは言い難い。

任意の船体形状に適用し得る計算法として3次元特異点分布法による抵抗増加計算法の実用化が期待される。斜波中の船体挙動の推定に関しては、実際の航走状態に即した斜波中の前後、左右、ヨー方向の波浪による定常力の理論計算法が確立される必要がある。また、現状の計算法は線形理論を基礎にしているため水面上の船型の影響までは評価できない難点がある。このため、波浪中を航走する船体周りの非線形な波動現象に対する数値計算法の開発が特に要請される。

- (2) 波浪中推進性能評価に関しては、波浪中自航要素の特性について理論的考察が加えられつつあるものの、推定法としては全面的に実験結果に依存していること、また波高が高くプロペラの一部が水面上に露出するような状態に対しては極く近似的な推定法しかないために、波浪中における船体、舵、プロペラを含む統一的理論による船尾流場の数値計算法の開発が必要である。

また、波浪中推進性能シミュレータの構築に際しては、前述の要素課題の解決と併せて評価手法の確立および海象データや航海実績データも整備されねばならない。

2.4.4 プロペラ周囲流場の数値解析法

シミュレータ構築の基礎となるプロペラ周囲流場の数値解析法および計測法の調査のために、プロペラ性能の予測およびプロペラ流入流場の予測に関して文献調査と試計算を行い、NS方程式の差分法などによる数値計算上の観点、流場や力の計測など模型試験上の観点、およびプロペラスラストなど実船性能上の観点から、下記の主要な検討結果を得た。

- (1) プロペラ性能予測に関して、現在利用できる各種の理論計算法は一部実験データを加味して実用に供せられているが、プロペラ荷重や計算条件の変化による追従性等から理論の限界が指摘されている。一方、現状ではNS解法

をプロペラに直接適用できる段階ではないため、本調査研究では現状理論の評価を行うとともに、レイノルズ平均NS解法を用いてプロペラの基本要素である2次元翼や3次元翼まわりの流場の計算を行い、差分スキーム、乱流モデルや計算グリッドなど差分計算上の条件や翼形状が計算精度に及ぼす影響を調査した。この結果、圧力分布(C_p)や揚力係数(C_L)については精度よく計算できたが、抗力係数(C_D)については計算精度の向上が必要あることなどが分かった。

今後は、NS解法のプロペラへの適用を試みるとともに現状の理論と併せてハイブリッド化を図る新しい計算法の開発が必要である。

- (2) プロペラ流入流場については、現状理論に基づいてプロペラによる誘起速度、伴流の変形、境界層の変形などを検討した。また、NS解法の適用を図るために翼や実用船型とプロペラを表すMomentum Sourceとの干渉計算を行い計算手法の可能性が確認できたが、今後格子生成の最適化や計算精度の向上が必要あることが分かった。
- (3) 高精度計測法

数値計算結果を評価できる高精度のデータを得るために、青雲丸の大型・中型模型プロペラを用いた試験を行い、プロペラ特性や翼圧力分布を得た。CCD-TVカメラを使用した流場の可視化や画像処理法を模型船レベルで調査し計測精度を把握した。新しいスラスト計測法を調査し、従来法と比較した。これらの計測法の開発や、それによって得られる高精度データの蓄積は数値解析法の検証データとして不可欠である。

2.4.5 研究開発課題の総括

数値水槽システムのような解析技術システムの開発を効果的かつ効率的に実施するためには、開発目標を達成するために必要な関連する解析技術の完成度とハードウェアを含むシステム技術利用環境の成熟度に応じて開発の全体計画を立案しなければならない。

前節で述べたように、船体周囲流場の数値解析に関してはNS方程式の種々の解法が提案され計算対象や流体現象を限定すれば部分的には利用可能な状況にあるが、全体として未だ模型実験を代替するもしくは模型実験と同程度の精度レベルには至っていない。また、プロペラ周囲流場に関しては現状理論解析によって限定的には実用に供せられているものの精度向上の点で解決すべき課題がある。これらの点から判断し、平水中の推進性能の数値解析法の確立に向けてNS解法の研究、特にその実用化のための研究が続けられねばならない。

一方、波浪中の抵抗増加理論の高度化に関しては現状の細長体理論に基づく計算法から、次のステップとしての3次元特異点分布法による計算法の実用化および非線形現象を説明し得る理論構築に向けて研究を続ける必要がある。

本調査研究でも明らかになったように、数値水槽開発は高度な計算流体力学に基づく理論モデルの構築と高精度かつ大規模な模型実証試験による理論モデルの検証、更には模型試験では実現不可能な高レイノルズ数域での実船スケール精密計測などが必要であることが認識されている。従って、その開発目標の高さと研究開発規模の大きさの双方からみて未だ世界に先例を見ない規模の開発であり、かつ革新的な設計技術の開発となるのでシステムに組み込むべき理論モデルの検討を進め、その過程に於て実用的設計手段としての目途を得つつコンピュータ技術の進展を取り込んでシステム開発に進むことが妥当であると考えられる。

数値水槽システム開発のための研究開発課題としては、

① 数値シミュレーション技術研究

流場・波モデル、船体抵抗モデル、船体自航モデル、プロペラ流場・性能モデル

波浪中流場・抵抗増加モデル、平水中推進性能モデル、波浪中推進性能モデル、評価検証試験

などに関する研究

(2) プロトタイプシステムの開発研究

- 統合システムのあり方の研究
- 要素シミュレーションの開発研究

がある。

これらの研究開発課題の内、当面基礎的研究課題として取り上げるべき課題としては、NS解法の共通課題である計算スキーム、乱流モデル及び格子生成法についての研究、水波／粘性の一体計算のための手法の研究、およびレイノルズ平均NS方程式をベースとするNS solverの基礎開発などがあり、これらの研究成果は流場・波モデル、プロペラ流場・性能モデル開発の基礎となる。また、3次元特異点分布法による波浪中抵抗増加計算法の研究、波浪中非線形流場の理論開発研究、波浪中船尾流場の数値計算法の研究及び波浪中推進性能評価手法の研究などの研究成果は、波浪中流場・抵抗増加モデル、波浪中推進性能モデル開発の基礎となる。

これらの基礎研究を実施することにより、少なくとも通常船型の模型試験レベルでの船型性能の比較評価が可能になる理論解析レベルに到達することが数値水槽システムの実現へ向けての第一歩であると考えられる。

3. 研究開発の進め方

以上述べた通り、本調査研究の成果として、新世代造船システムが造船業存続のための必要条件を整えるために有効であり、外部環境の激変に対応して変化せざるを得ない造船業が実現を図るべき重要な施策であること、しかも造船自らが開発しなければならないものであることを示した。

また、電算機等の周辺技術が急速に進展しているなかで、他産業がこれらの成果を積極的に取り入れてCIMS化を図っていること、及び諸外国においても造船業のCIMS化の検討が開始されつつあることが報告されるなど、製造業のCIMS化が時代の趨勢であることを示した。

これらのこと考慮するならば、わが国において造船業が他産業に対し劣後化しないためにも、また優秀な船舶を供給するというわが国の国際的責務を考える上でも、今この時期に造船業のCIMS化、即ち新世代造船システム開発のための施策を早急に推進することが重要である。

本調査研究の結果得られた新世代造船システム開発のために実施すべき研究開発課題の概要を要約すると下記の通りである。

即ち、造船CIMSに関しては、本研究成果に基づいて提案された多くの先端的計算機利用技術を用い、またプロトotyping等の未来型の開発手法を駆使することがあらゆる面から必要である。従ってまずパイロットモデルの開発による下記先端技術項目の検証を行い、効率のよい言語・環境・手法を準備して本格開発に移行することが最も有効であろう。

- ① プロダクトモデル
- ② エキスパートシステム
- ③ オブジェクト指向システム
- ④ エンジニアリングデータベース
- ⑤ システム開発手法としてのプロトotyping

新船体構造設計法に関しては、広い適用範囲の確保と迅速性を達成するために、手法の精密化、一貫性が必要であり新しい理論、手法に関する基礎研究課題①～⑥と、システム化課題⑦～⑫が推進されるべきである。

- ① 船体構造解析のための荷重解析手法の研究
- ② 迅速・高精度応力解析手法の研究
- ③ 座屈・崩壊強度の高精度解析手法の研究
- ④ 疲労・破壊強度の高精度解析手法の研究
- ⑤ 信頼性評価手法の研究
- ⑥ 大型実験／実船計測による構造応答の総合研究
- ⑦ 構造解析モデリングシステム
- ⑧ 高精度船体荷重解析システム
- ⑨ 迅速・高精度構造解析システム
- ⑩ 船体構造強度算定システム
- ⑪ 船体構造強度総合評価システム
- ⑫ 構造設計支援インテリジェントシステム

数値水槽に関しては、波浪中を含む推進性能を実用的な精度で推定する技術研究が必要である。このために数値シミュレーション技術研究課題①～③が推進されるべきであり、更にこれらの研究の成果を踏まえてプロトタイプシステム開発課題④～⑤が推進されるべきである。

- ① 流場解析モデルの研究
- ② 推進性能解析モデルの研究
- ③ 高密度模型試験による理論モデルの評価検証
- ④ 統合システムのあり方の研究
- ⑤ 要素シミュレータ開発研究

造船CIMSと、新船体構造設計法及び数値水槽とは、最終的に新世代造船システムとして統合されるべきものではあるが、それぞれ課題の性格・内容が異なるために開発の取り進め方もそれぞれ若干の違いがある。

即ち、造船CIMSの開発に関して言えば、業務要件を実現するためのシステム構築に必要なモデリング等の各要素技術は、それぞれに研究室レベルでは実現の可能性が期待されるので、それらの要素技術を的確に評価し、大規模システムとして如何に統合するかが主要な課題である。その実現のためには、前もってこれらの要素技術が我々のシステムで統合し利用することが可能であり、期待通りの効果を發揮できることと、複数の候補者がある場合はどのように採用することが最適なのかを技術的に検証しておくことが、その後の本格開発を効率的に進めるために重要である。

新船体構造設計法の開発は基礎的課題とシステム化課題の両面に大別されるが、システム化の基幹をなすモデリングの部分は造船CIMSと共通化を図るのが必須であり、一方、基礎的課題については前記とは無関係に早急に着手することが可能である。また、数値水槽の開発はシステム化開発の前に基礎理論の研究を大きく前進させることが必要である。

従って、新船体構造設計法及び数値水槽の開発に関しては、システム化技術と基礎技術の各々の研究開発の手順について、開発の全体の進め方との関連で検討することが必要となる。

以上を勘案し、下記の方針で開発を進めることを提案する。

- (1) 造船CIMSの開発に関しては、技術面検証のための小規模システムを開発し、本格開発の計画策定を行い、効率的な開発を目指す。
- (2) 新船体構造設計法については、システム開発は造船CIMSの進捗状況を参考にして進めることとし、基礎研究については早急に推進する。
- (3) 数値水槽については、理論向上のため及びこれらをシステムに適用するための技術についての基礎研究を推進する。

終わりに、造船業を巡る環境が益々厳しさを加える現下の情勢においては、新世代造船システムの研究開発に期待する所大なるものがある。産官学の総意を結集して行われた本調査研究の成果を受けて、タイムリに新世代造船システムの研究開発が産官学の有機的な連携のもとに推進されるよう提案するものである。

[2] 各論

第一章 造船CIMSに関する調査研究

1. 造船CIMSの全体構想

1.1 基本認識

総論で述べたように造船CIMSの目的は設計、工作準備段階での情報生成の作業効率を上げ、生産用の膨大な情報の統合化、高度化を可能にすることにあるが、その前提として現状の設計及び工作の問題点を基本的に認識することが必要であり以下にその概要を示す。

1.1.1 現状の造船業の業務における問題点

(1) 設計の現状と問題点

船は大きなプラントでありこれを設計する造船設計は技術の高度化と共に専門の分化が進み、これらを管理、統合化することにより船の設計をまとめてきた。

- 設計ノウハウの個人への分散とその管理の困難さ

しかしながら設計ノウハウは個人の中に保持されており個人を管理することによりノウハウの管理がなされる形となっているが、それぞれに個人差があり質的なバラツキを持っている為、ミス・落ちなどを常に包含しており、全体を把握・管理することはかなり困難である。また個人から出る情報の不整合は各々の個人の伝達の中で調整されているが矛盾が無いという保証はない。

以上のような状況から設計情報として必要な情報が常に整理されたかたちで活用が可能な状況にあるとはいえない。

- 現在のCAD/CAMの限界

設計の作業は上記のような不整合を持った情報を用いまたそのハンドリングに多くの時間を費やしながら行うことになる。

又それらの設計者を支援する現在のCAD/CAMシステムは入出力を支援する機能が不十分であるため多大の労力を要する。この結果真に創造的、知的な設計作業そのものの比率が少なくならざるをえない。

- 工作部門への影響

設計の作業は上記のような不整合を保持したままの情報が下流である工作側へ流れることになりその影響が拡大してゆくことになる。以上のように個人や各部門の情報が広く分布することにより、情報の集中化が難しくなり、データの再入力や、図面の書き直し等のダブリ作業が必要になり、情報の伝達もタイムリーに行われず手待ち、後戻り、重複、変更作業等もあって、リードタイムも長期化することは避けられない。

(2) 工作の現状と問題点

造船は基本的に一品受注生産であり、その工作には設計による図面と共に作業者の長年にわたる技能の積み重ねによるノウハウが主要な要素である。

作業そのものについては、作業者の労力がどの程度効率的に仕事に転換されているかをワークサンプリング等で分析すれば約半分程度が非実作業であるという結果がでている。

- 生産情報の不備と調整技能力

その大きな原因として、作業指示の不明確、間違いを含んでいる等情報の不備、不足によるものが考えられる。それらは作業者のノウハウによって補われ、その調整作業が全作業の中にとりこまれることになる。

またそれらのノウハウは個人によっておおきくばらついており作業の速度、密度、完成度に大きな影響を与えている。

・工程／作業計画の粗さ

工程の計画についても、事前の、正確な仕事量の把握が難しく作業指示も余裕を含んだ粗いスケジュール、且複数人員単位のように大きなくくりにならざるをえない。この結果、作業の実績と計画との差異が的確にタイムリーに把握できず次のアクションに反映できない。

又工場内の物流についても刻々の変化がリアルタイムに把握されておらず、物探し、重複などの作業を生む原因ともなっている。

・コスト削減に対する障害

このことは作業の中の無駄、製品のバラツキ、期日の遅延を生じている。これらの管理、調整の為に多くの間接人員が必要となりトータルとしてコスト上昇をまねく要因ともなっている。

1.1.2 生産用情報の一元化と造船CIMS

前項の造船設計及び工作の諸問題を解決するためには、客先のニーズ、設計、資材、加工、組立と云った全情報、全工程をコンピュータで統合、一元化し、変更に柔軟に対応できる生産システム（CIMS：Computer Integrated Manufacturing System）が必要である。幸い、AI技術を中心とする最近のコンピュータ利用技術の急速な進展、情報通信の高度化を可能とする法制面及び通信ネットワークの基盤整備、知的センサーシステムの進歩等、CIMS化を支援する環境も整備されつつある等、情報の伝達面、保守が整ってきているので、設計、工作を通じて使える船のモデル（プロダクトモデル）をコンピュータ上に作ることが出来るならば、造船業においても情報の一元化が可能になるであろう。現在CIMが進展しつつある他分野においては製品となるモデルをコンピュータの中にデータ化し、一元化することが必須、当然のこととなっている。しかしながら、造船においてはそれらの産業に比べて船を構成する部品が膨大であり、そのための人力作業量が多いこと、入出力所要期間が長くかかること、しかもそれが一品受注生産であるために繰り返し使用することが出来ないことから、機械、電気、自動車、航空機などの産業で可能であるモデル化が、現段階では、造船では実用的に成り立たない。造船の生産用情報一元化のためには、他産業のCIM化技術やFA技術のみでは不十分であり、まず、船のモデルをつくるプロダクトモデルやデータベース、そして造船固有の知識ベースを組み込んだ設計、工作的ための技術が必要となる。

1.2 造船CIMSの概念

1.2.1 造船CIMSのプロダクトモデリング、統合データベースの重要性

現状の造船業の日常業務が抱える問題点を解決するためのシステムは、大規模で、多くの解決すべき技術課題を含むが、中でも生産用情報を如何に上手く計算機上に記述できるかと言うモデリングの技法と、その情報を一元管理して造船の全業務が如何に有機的に共通のデータとして使うかという技術が特に重要である。

造船に於ける多くの問題が、元来情報量が膨大で、きめ細かい管理が困難な中にあって、更に同時並行に行う作業と建造途中に発生する仕様変更のため各部門の調整が不完全となり、多くの手直し、無駄作業が発生している。これを一気に解決する道具として、統合化されたデータベースの機能が要請されている。

一隻の船の部品数は約50万に及ぶと言われ、従来の方法のままで建造時の問題が発生しないような高度な情報管理を行うことは困難であるが、昨今のエレクトロニクスの飛躍的技術向上がこれを可能にしようとしている。すなわち、多くの部品が持つ形状データと、多様な建造上の情報をすべて一つのデータベースとして計算機上に格納し、前もってわかっているデータ間の関係で問題があれば警告を発し、技術者の判断を要しない部分は自動で修正を行うシステムがあれば、多くの設計、現場の無駄が排除されることは明かであろう。造船CIMSはこのような造船側の要請と、エレクトロニクス技術の高度な機能を結びつけ、従来の限界を突破しようとするものである。

造船業が必要とするデータベースは現場で問題を起こさない、きめ細かな工作情報を持つものであり、これを通常の形状モデルに対してプロダクトモデルというが、その構成と構造はシステム全体の機能を決定する重要な開発課題であろう事は容易に推察される。

なお、これらは従来の造船所の作業をそのまま電算化するだけで実現出来ることではなく、生産計画システムそのものの再構築を要することは言うまでもない。

1.2.2 造船CIMSの全体像

CIMSとは、受注から引渡しに至るすべての企業活動の計画・実行・管理の情報をコンピュータネットワークで統合し、作業／物の流れと情報の流れを同期化することにより、企業活動の生産性向上を実現するものと言える。

図1.2.1 に造船におけるCIMSの概念図を示す。

設計から生産への作業・情報の流れは従来とは異なり、生産に対する情報（NC、ロボット、搬送用の諸データ等）は、製品設計システムの生産準備段階で、工作のシミュレーションを行って全て作成することになる。設計部門は生産の為の情報センターとしての役割を果たすことになる。

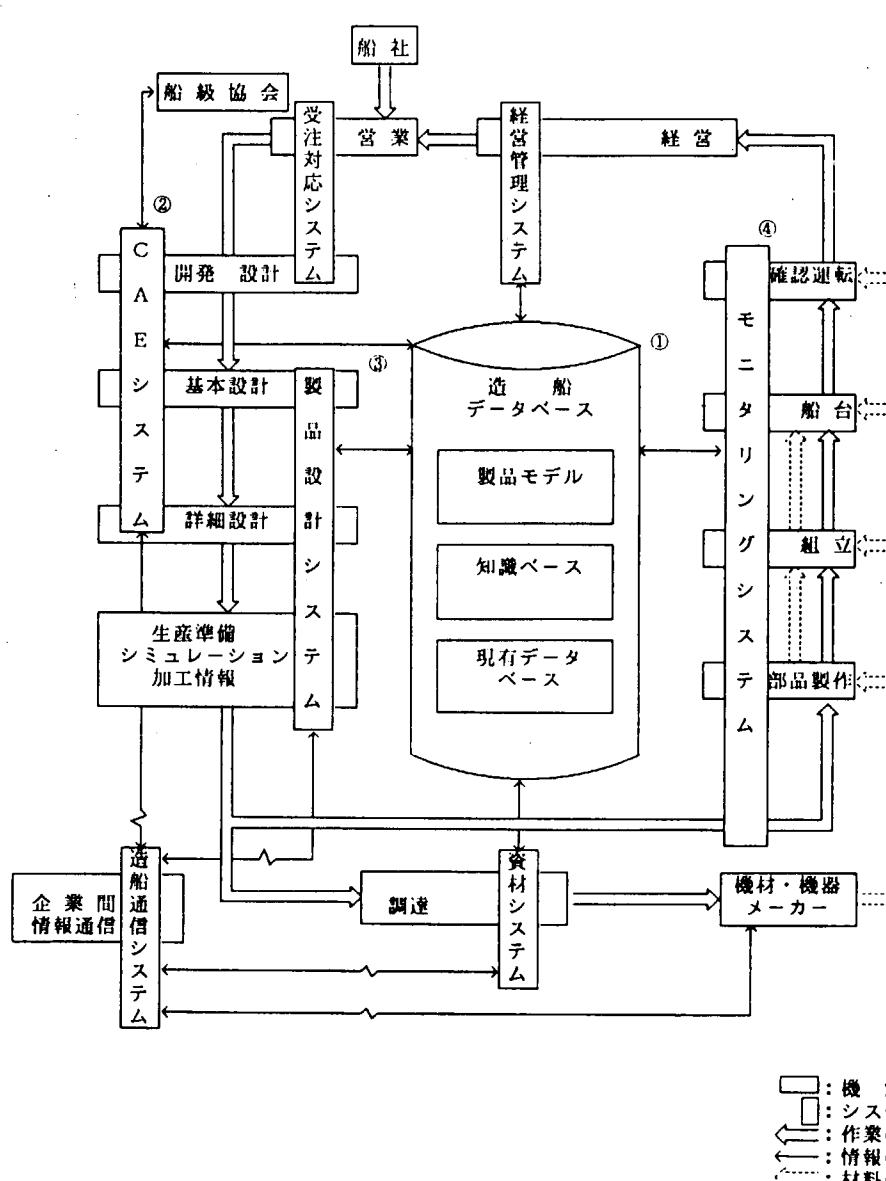


図1.2.1 造船CIMSの概念図

生産段階では、これら情報をもとに監視とエマージェンシー対応を行うモニタリングシステムによって、工作的実行が行われる。素材・機器メーカーへの対応も資材システムを通じて、国内外を問わずコンピュータ・ネットワークに組み込まれる。開発及び客先の要求機能を満たす設計の最上流部分では、高度技術開発を担うCAEシステムを設ける。

1.3 造船CIMS開発の概要

造船CIMSは主要部分として、造船用モデリングシステム、データベース、各種アプリケーション等があり、図1.3.1にあるように階層的、且つサブシステム毎に構成することができる。この開発にあたっては、3.2節に述べる造船の業務要件に従い、全体の関連付けを行いながら、この構成に基づいて開発を進めることが必要である。

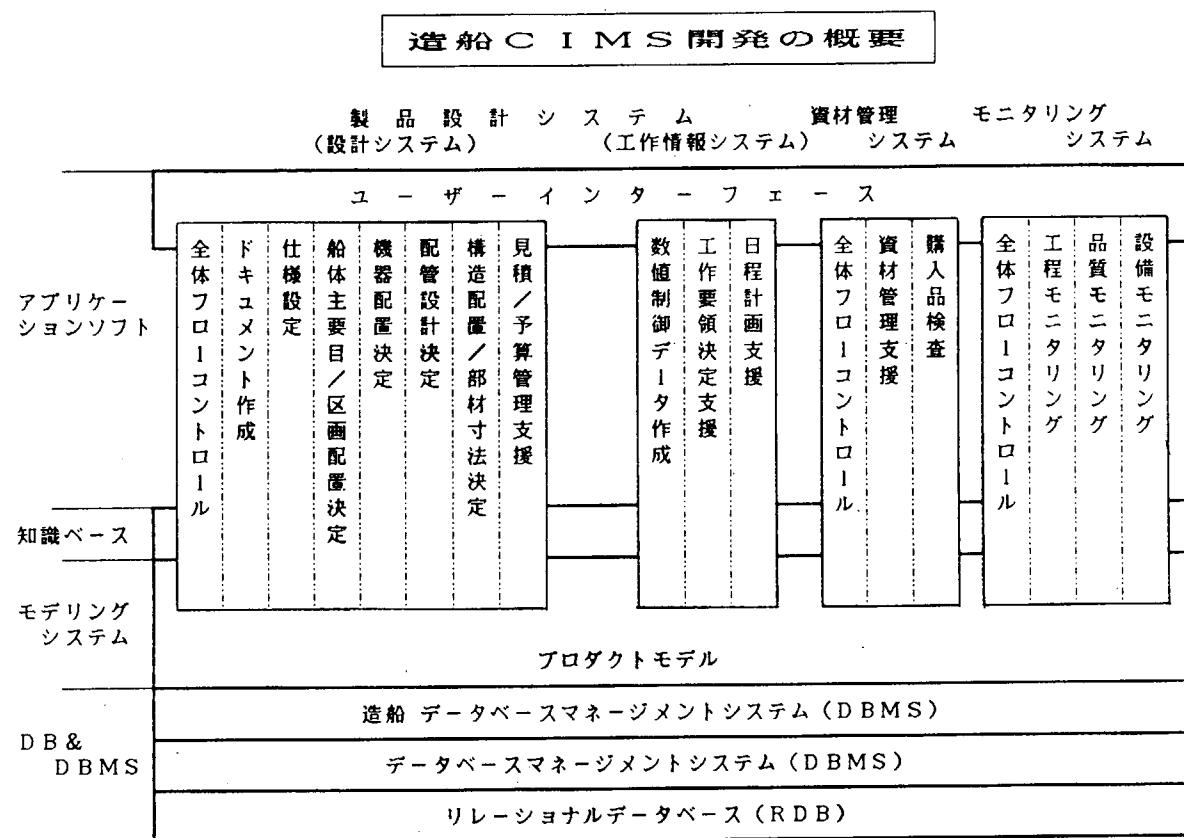


図1.3.1 造船CIMS開発の概要

1.4 造船CIMS開発の効果と波及効果

これまで述べてきたように、造船CIMS開発によって得られる効果としては、

- ・造船業の体质改善による産業の魅力の復活と
- ・開発及び建造の質の向上によるコスト競争力、技術競争力の飛躍的な効果を実現するものである。

以下にシステムによって得られる効果を述べる。

- (a) 造船の労働集約的体質を変革し、産業全体としての魅力を復活すること

先ず、現状の体制では情報の品質（例えば設計情報、管理情報等の整合性）の不備のために必然的にもたらされている造船の労働集約的体質を、情報の統合化・高度化によって知識集約的体質に変革することにある。これは(b)

に示す労務費比率の減少を実現することのみでなく、造船CIMSを、従来困難とされた多くの人力作業のメカトロ化を将来において可能とし、作業環境の抜本的改善の為の基盤とするための位置付としての意味も含んでいる。

(b) 国際コスト競争力を強化すること

造船大手各社一船当たりのコストの中で労務費の占める割合は、現在25乃至30%であるが、一般に輸出商品として競争力のある業種でのそれは10%前後である。この程度であれば商品の魅力、性能、品質等で充分賃金格差と対抗可能である。造船業が国際競争力を維持するためには、少なくとも労務費比率を10%程度にまで下げるこことをめざすべきである。

船舶は巨大かつ膨大な部品点数からなる製品であり、そのうえ、製造工程が極めて複雑であって、従来の延長線上での単なる装置化の追求ではこれ以上生産性向上は難しい段階にある。

一方長年にわたり合理化された現在の建造工程に於いてもまだ手待ち、手直しに代表される非生産作業の比率は大きい。これは造船の受注生産体制から生じる頻繁な情報変更と情報量の膨大さのために、建造工程で必要とする全ての情報を正確に生成することが従来の体制、方法では限界にあるからである。もし計算機の力をを利用して抜本的にきめ細かく正確な情報を提供出来れば、連続建造船が、次第に情報を完全なものにすることによってコスト低減を実現しているのと同様の効果を期待でき、まだ労務費比率を大幅に減少させる可能性を残している。

先ず建造工程の非生産作業を減少させること、及びそのための情報生成業務、即ち設計、工作準備の作業効率を上げることの二つを主たる目的とした造船用CIMSを構築し、造船業の体質の抜本的改革を図ることが可能であり、必要である。

この造船CIMSの当面の効果は上記の2点であるが、ここで得られる情報の数値化により、必ずや従来困難であった装置化実現の可能性を増加させ、双方の効果で大幅な労務費比率減少をもたらすものとなる。

次に本研究によって得られた成果を、調査研究の概要として述べる。

2. 調査研究の概要

本研究はSR210部会第1分科会において、造船CIMS開発のための主要要素技術の検討、問題点の抽出及びその解決策を見出すことを主目的として調査研究を行った。

昭和62年4月発足以来、全体方針の確認・調整・検討を分科会及び幹事会にて行うとともに、その方針に沿った具体的な研究作業は下記WG、SCが課題を分担して実施した。

WG1 : 3次元モデリング手法の研究

WG2 : エキスパートシステム開発手法の研究

WG3(SC1) : 造船広域情報通信システム開発課題の検討

(SC2) : 造船所内情報通信システムの研究と通信システムへの機能要件及び開発課題の検討

(SC3) : 新世代造船システムに要求される機能に関する研究

本節は2ヶ年に亘る調査研究の概要を述べるものであり、2.1節はWG1、2.2節はWG2、2.3節はWG3(SC1)、2.4節、2.5節はWG3(SC2)、又、3節はWG3(SC3)が担当した。

2.1 3次元モデリング手法の研究

2.1.1 現状と問題点

(1) 調査研究の目的

これまで作業ごとの自動化システムが個別に開発されても各システム相互の情報の受渡しがスムーズにできな

いため、自動化により期待した成果を達成できないケースがあった。広く設計から生産活動全体を統合的に情報化し、大巾な業務の効率化を図るCIMS化を実現するためには、従来の図面に代る情報伝達の媒体として設計・生産の対象となる製品の情報をプロダクトモデルとしてデータベース内に構築し、これを設計・生産の過程を体系的に扱える一元化した情報としてどこからでも自由にアクセスできる様にする必要がある。

以上の要請から本調査研究ではCIMS化の基盤技術であるモデリングについて文献による調査と試作研究を合わせて行い、先端のモデリング理論の考え方を参考に造船に於けるモデリングのあり方をまとめ、これを実現するためのモデリング手法の開発へとつないでいくのを目的とした。

尚、試作研究に当ってはモデルの形状表現についてはこれまで色々と研究が進められ実用化されているにも拘らず形状以外の属性表現、関係表現の面では未だ多くの課題が残されているので特に後者にウエイトを置いて研究を進めた。

(2) モデリングに関する現状調査

(a) モデリング理論

現在研究されているモデリング関連の理論から造船CIMSのプロダクトモデルに有用と考えられるものについて調査した。

対象物（製品）の情報を表現する手法として、述語論理表現、階層抽象構造、オブジェクト指向について調査し、形状表現手法としてソリッドモデルを調査した。またより基礎的な理論としてグラフ理論を調査した。

(i) 述語論理表現（図2.1.1）

「船幅は35mである」「バラストポンプは機関室後隔壁から8m前方に位置している」の様に情報を「文」の形式（述語論理式）で表す手法である。この方法により設計の矛盾点の有無のチェックや寸法変更に従った自動設計変更などが可能となるとの研究がなされている。また述語論理表現はエキスパートシステムの知識表現にも利用されているので述語論理表現によるモデリングはエキスパートシステムとの親和性が良くエキスパートシステムによる自動設計システムへの発展の可能性を持っている。しかし一方ではごく単純な形状を表現するにも多数の述語論理式が必要であり、また構造の表現に不向きなどの弱点もあるため造船CIMS用の全ての製品情報を述語論理表現のみで表すのは現実的ではないと考えられる。

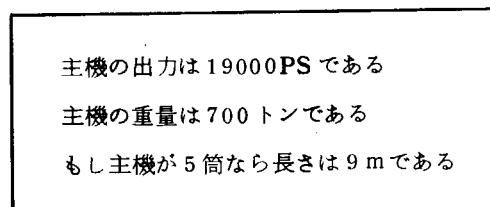
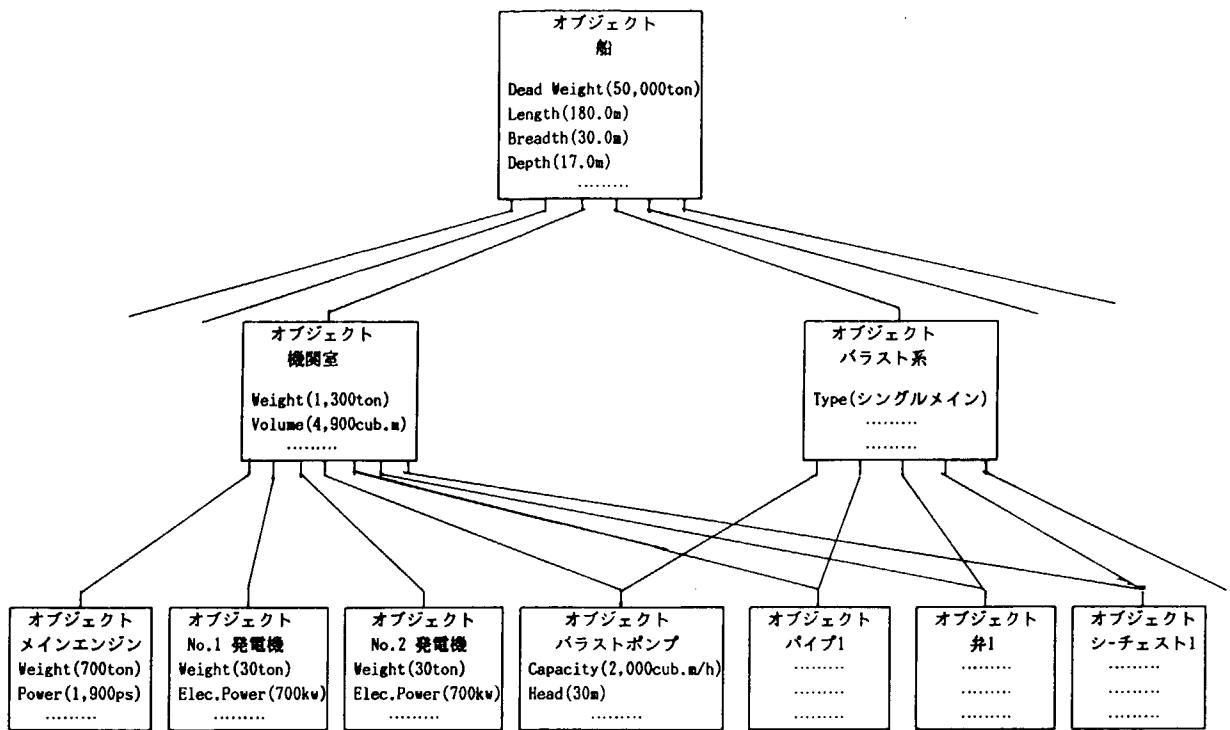


図2.1.1　述語論理による主機の表現例

(ii) 階層抽象構造（図2.1.2）

この表現方法は(i)の構造表現についての弱点を補おうとするものである。物の構造は「船>バラスト系>バラストポンプ」などの様に階層構造となっている場合が多いので階層抽象構造では対象物の全体および部分（船、バラスト系、バラストポンプ、船殻構造、船殻部材等）を節とし上位下位関係で結んだ階層構造で対象物の構造を表現する。さらに各節に対応する物についての属性情報は述語論理表現で節内に記述される。



(iii) オブジェクト指向(図 2.1.3)

(ii)における「情報を物(節)ごとにまとめる」との考え方を更に進めたものと考えられる。オブジェクト指向とは元々はコンピュータプログラミングの分野から出てきた考え方でデータとそれを処理するプログラムを併せて一単位(オブジェクト)とし、複数のオブジェクトが互いにメッセージをやりとりしながら情報処理が進められていく方法である。これは実在の対象物をオブジェクトと見なすとそれらが互いに影響しながら動作し、変化していくことに対応する。例えばポンプをオブジェクトとするとその持つ重量・能力・形状などはオブジェクト内のデータとなり、さらにポンプの動作などはオブジェクト内のプログラムによりシミュレートさせることができる。CIMSの様な現実の物体(製品)に対応するプロダクトモデルに対し概念設計から生産までの様々な処理を行うにはオブジェクト指向の考えを応用するのが有効と考えられる。

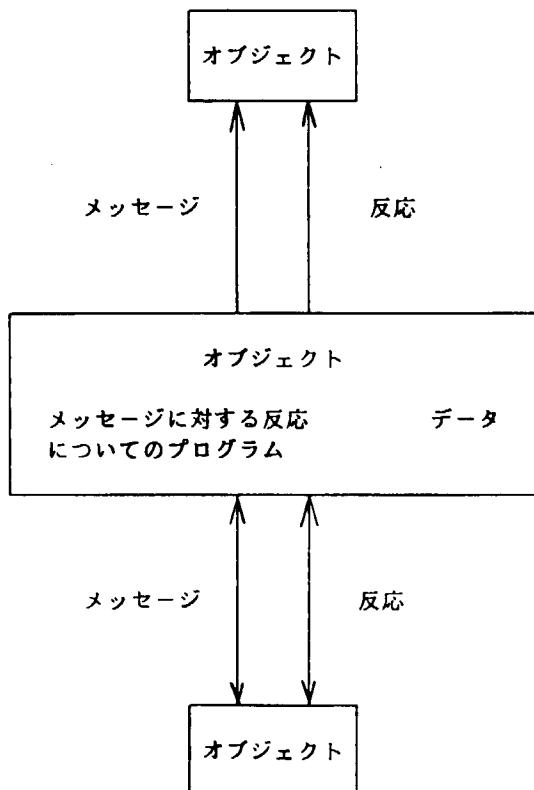


図 2.1.3 オブジェクト間のメッセージのやりとり例

(iv) ソリッドモデル(図2.1.4)

3次元形状としての情報をほぼ完全に備えた形状モデルであり、モデルの表面積、体積、重心等の計算および干渉チェックが容易に行える。しかしながらソリッドモデルを記述するためのデータ量が多くまた計算処理も複雑であるために処理速度、特に作画速度が遅いという欠点がある。また比較的新しい技術なのでCAD/CAM分野でのアプリケーションプログラムや、シミュレーションプログラムの開発がまだ十分ではない。

(v) グラフ理論(図2.1.5)

グラフ構造(節点とそれらを結ぶ枝より構成される図形)の諸性質に関する理論であり、グラフ構造で表現できる対象であれば分野を問わず強力な解析手段を提供する。例えば組み立て作業において部材および中間段階の製品を節点に、それらの組み立てにおける関係を枝に対応させたグラフを構成し、それに効果的な探索手法を適用することにより可能な組み立て作業の工程を短時間で渋れなく表現することができる。最小コストで実施できる組み立て作業の工程等を求めることが容易にすると思われる。

(i)～(iv)の各理論よりなお基礎的な理論であり、モデリングシステム開発の様々な段階で必要に応じて適用可能であるが、実用に際しては今後の研究によるところが大きい。

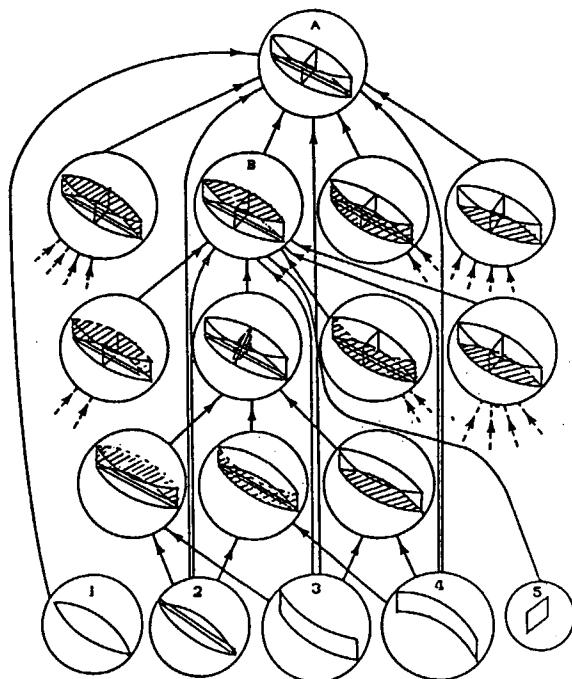


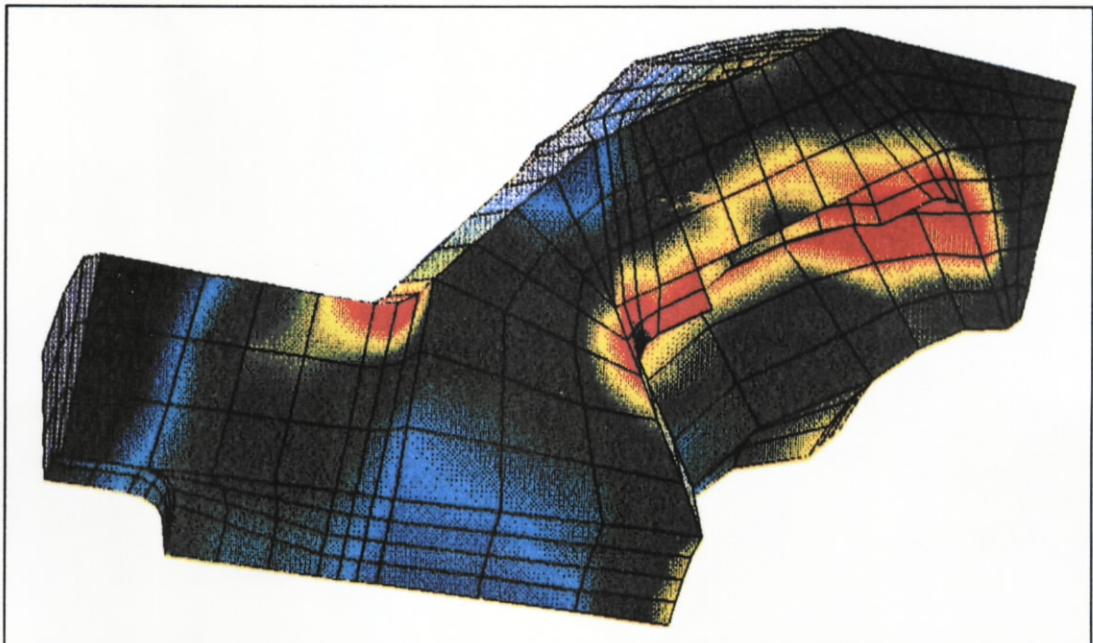
図2.1.5 グラフ構造による組み立て関係の表現例

(b) 現状CAD/CAMの評価

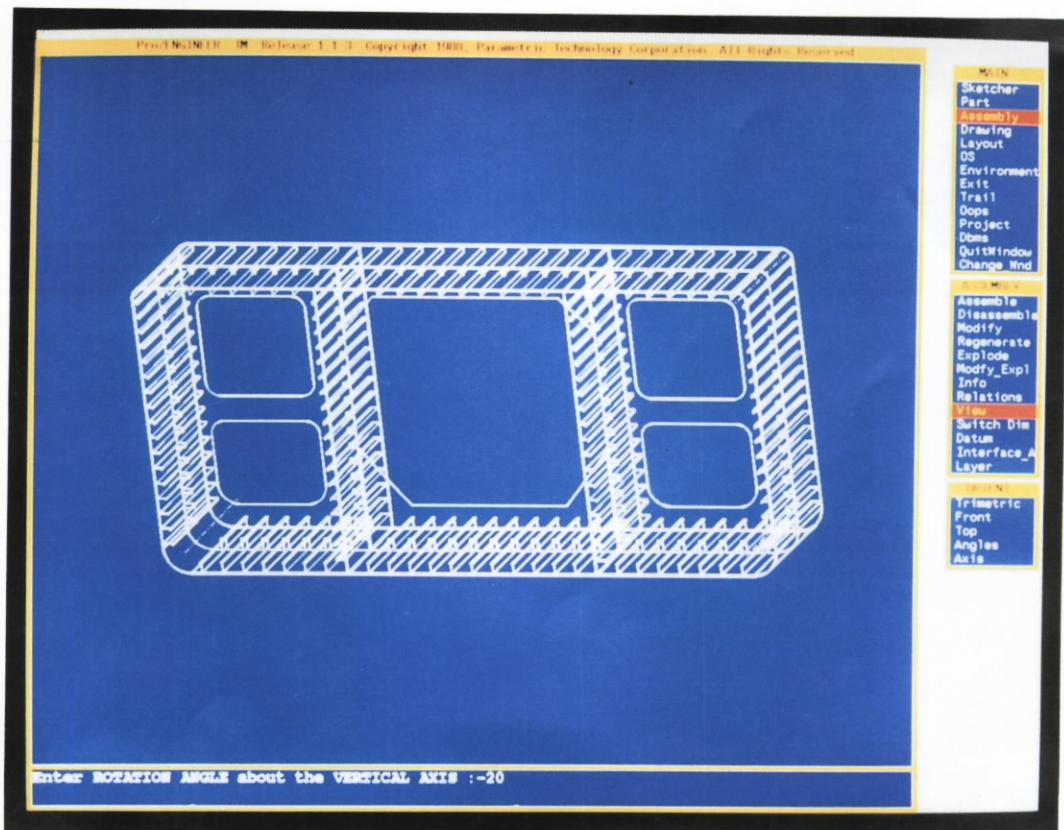
現状CAD/CAMシステムを評価するために30種類の汎用CAD/CAMシステムについてモデリング、ユーザインターフェースなどの機能調査と他業界(航空・自動車・建築・精密機械)におけるCAD/CAMシステムの適用状況の調査を実施した。また、先進AI技術を利用した知的CADシステム『ICAD(日本名:IMP AKT)』については試行調査も行った。更に、CAD/CAMシステム間のデータ交換の標準化の動向についても調査した。

これらの調査の結果、以下のことが明らかになった。

- (i) 汎用CAD/CAMシステムでは、ソリッドモデルを中心として解析機能・モデル表現機能の強化、CIM指向として汎用データベースとの統合などの動きがみられる。しかし、現状のシステムは形状表現が中心であり、技術情報等の属性表現能力が弱い。このため製品モデルとしてモデル表現レベルの高度化が望まれる。
- (ii) 『ICAD』などのプロダクトモデルの考えに基づく知的CADシステムが商品化されつつある。しかし、船舶のような複雑かつ巨大な製品全体を現状の知的CADシステムを用いて表現するのは難しく、今後の進展が待たれる。
- (iii) データ交換の標準化に関しては、形状データ、図面データのデータ交換を目的としてIGESが制定されている。しかし、IGESは図面の意味情報が取り扱えないなどの問題がありPDES・STEPが開発中である。



(1) ソリッドモデルによる応力解析例



(2) タンカ一船体中央部

図 2.1.4 ソリッドモデルの例

PDES・STEPはプロダクトモデルとして必要な全てのデータの交換を対象としている点により造船CIMS構築の立場からも大いに注目すべきである。

(c) 造船におけるモデリングの現状

造船の設計や生産部門でコンピュータが使用されるようになってから20年以上経過し、現在では種々の分野で活用されている。モデリング手法は、船殻部材のN/C切断に対するニーズに対応するため、船体形状を正確に表現する必要性から始まった。

初期の原始的な直接座標入力方式からコーディング方式へ、さらにCADへと変化し、入力単位も一品毎から断面一括入力へと改善され、現在ではモデリングというイメージに近いものになっている。

形状データの表現法も、一部には、図形定義言語をデータの形式で利用し、関係する部分の変更に伴って、形状が自動的に修正されるモデリング手法も現れ注目される。

この様に、モデリング技術のレベル向上、適用分野拡大はめざましいが、造船CIMSという最終の概念から見ると、未だ多くの問題点を抱えている。これらの問題点は、

- (i) 個々のモデルが単独に存在していること。
- (ii) 設計・生産の情報が一元化されていないこと。
- (iii) 形状定義が理論的に不完全であること。
- (iv) ユーザインターフェースが不備であること。

の4点に集約される。次に、各々に関連する問題点を述べる。

(i) 個々のモデルが単独に存在していること

各々のモデルが相互につながりをもっていない。データの共有化はある程度行われているが、意味的なつながりのない記号化された形態として存在している。従って、データの変更が生じると、ユーザが自己の管轄する関連データの修正を行わねばならない。

データベースの範囲も拡大されているが、メンテナンス体制の問題や、汎用コンピュータの端末、ディスクの確保等、コストや即応性に関する問題が生じている。

処理プロセスも統合化されていないため、類似のデータ処理でも、必要なデータの内容、形態が統一されてしまう、データ共有化を阻む要因となっている。

(ii) 設計・生産の情報が一元化されていないこと

現状の設計システムも、部品名称、加工、取付ステージ、物流情報等の生産情報が付加され、生産段階で利用されている例は多い。しかし、情報の大半は、ユーザが直接入力したもので、システムは単に分かりやすく編集、出力しているに過ぎない。

工作ステージで必要な、設計モデルに基づく工程計画シミュレーションを行うには、モデルが不適当であり、また、ツールも用意されていない。

また、設計の過程は本質的にはシミュレーションであり、モデルの修正の必要性が頻繁に発生するが、修正を繰り返していくことが現実的には困難なため、現状のCADは決定データを入力し図面化するために使われている。これらは、下流での情報利用等の効果はあげているが、本当に使いたい検討段階での利用効果は少ない。

(iii) 形状定義が理論的に不完全であること

現状のCADは、図面作成を主目的とする2次元モデルが大半であり、3次元的整合性はユーザがとらねばならない。3次元モデルの場合も、ほとんどがワイヤーフレームモデルで、例えば、“板”という認識のた

めには、別途定義が必要であり、直接、平面や曲面を定義したり、それらを分割、接合したりといった機能を持つものは見られない。

また、位相幾何学的に厳密な処理がなされていないために、板間のつながりの誤りや抜けのチェックも人手に頼ることになり、ミスを生じ易い。

(iv) ユーザインターフェースが不備であること

あるシステムでモデリング手法を覚えても、一般に他のシステムは使えず、別の訓練を必要とする。即ち、ユーザにとって設計なり工作なりの本質的な知識とは全く関係のない知識を要求されることになる。

データベースについては専門化されたメンテナンス要員が必要である。また、トラブルの復旧のため業務が中断する事態もしばしば発生する。

グラフィックディスプレーは有力なツールであるが、画面表現のレベルや图形のハンドリング等、十分とはいえない。応答スピードも、思考の妨げにならない程度の応答性を確保しようとすると、一般的にはコストパフォーマンスが問題となる。

2.1.2 調査検討結果

(1) 造船におけるモデリングのあり方

(a) モデリングへの要求事項

モデリングシステムへの要求事項の調査として、①造船設計におけるモデリングへの要求と②造船工作情報を表現するためのモデリングへの要求の2つにわけて実施した。

前者については、主要設計作業項目の抽出をおこない代表的な設計作業に使用される情報の整理分析およびその情報の処理の追跡等を通じてモデリングへの要求事項をとりまとめた。

その結果、「モデリングへの要求事項として、現在のCADシステムにない高度な幾何形状情報の処理、および誤謬の排除と自動化率を飛躍的に向上させるための各種情報のコンピュータ内での意味的認識が不可欠である。それとともにユーザインターフェースの機能拡充も特に重要である。」ことがわかった。

後者については、造船工作中用いられている情報を抽出・整理することにより、「造船工作中においては多種多様な情報が錯綜している事が判明した。又現在の情報は情報を解読する側に一定の知識を要求している。現在のCAD/CAMシステムでは、これら情報の限られた一部しかサポートしていない。その為に全ての情報が見渡せるモデリングが必要である。」ということがわかった。

即ち、モデリングへの要求事項として

- (i) 整合性のある統一したモデルに基くデータベースを有する。
- (ii) 設計から工作におけるある程度の知識をもち、造船特有な意味的認識が可能なアプリケーションソフトを有する。
- (iii) 高度な幾何形状情報の処理機能を有する。
- (iv) 充分なユーザインターフェース機能を有する。

ことなどが挙げられる。また現実的なシステムとしては、これらの機能をもつために高速の処理スピード・大規模なデータベースが必要となり、それに応えるハードウェアも不可欠である。

(b) モデリングのイメージ

(a)で述べた要求事項を実現するモデリングの具体的イメージは、下記の様に考えられる。

(i) プロダクトモデルの構築及び利用

各種の応用プログラムに於て情報の意味的認識を行うためには、実際の製品や製造の情報をできるだけ自

然なかたちでコンピュータ内に表現する必要がある。これをプロダクトモデルと称する。プロダクトモデルの内容は、まず第一に製品(船)や部品そして製造途中段階での製品状態を表わす“物”についての情報がある。形状・重量や機器の要目などは“物”についての情報である。又、製造段階の“物”であれば置き方や加工収縮を考慮した伸ばし量なども情報となる。“物”についての情報はプロダクトモデルの中核となるが、それだけでは充分に製品・製造情報を表現するのは困難である。例えば部材Aと部材Bが接合している場合は、接合している情報を部材Aに含ませるとBはAに従属してしまう。部材AとBの両方に含ませれば冗長になる。いずれも現実の状態を過不足なく表わしていない為である。よって、接合情報を独立させる必要がある。

これら“関係”は“物”情報とは独立し、“物”同志を“関係”させる情報として表現する。製造の場合は更に、設備等の周辺状態も同様にこの“物”と“関係”で表現し、さらに製品と関係付ける。また“物”や“関係”は階層をもっている。階層は見方が変われば異なり、その種類は一定ではない。よって階層も1つの“関係”と考える事が適当であろう。

(ii) 情報の定義について

“物”や“関係”についての情報は初期段階では、完全に定義されない場合が多い。例えば機器設計作業において「機器Aは機器Bの10m船首に置く」等で定義され、又製造であれば「AブロックはBブロックの後に搭載される」等で表現される。機器の船座標系での位置や、ブロックの搭載日時に関しては、更に情報が追加されて決定される。プロダクトモデルではこの定義された情報を保管して、他の情報を考慮して値を決定する。この様にする事により、変更にも柔軟に対応でき、矛盾や冗長さを減らせる。

(iii) 情報の取扱および表現について

情報は様々な表現形式が必要となると考えられる。すなわち、高度な幾何形状処理が可能な3次元ソリッドモデルなどの形状モデル、数値・文字・数式などの属性を表現するもの、そして「もしxxならばooである」などの述語論理式も必要となる。これらの情報を、アプリケーションプログラムやユーザにとって使いやすくする必要がある。その為にはAI等を利用した情報の選択や、“物”・“関係”を1つ1つ独立したオブジェクトとして表現するとともに、操作方式を統一する必要性がある。

この様にしてプロダクトモデルを核として、周辺にアプリケーションプログラムが存在する形でシステムが構築されると考えられる。

表2.1.1にモデリングの要求事項と機能との対応関係を示す。

表2.1.1 モデリングへの要求事項と必要機能

要求事項	モデリングの機能	
	プロダクトモデル	情報の取扱
高度な形状処理	“物”的情報	3次元ソリッドモデル
意味的認識	“関係”表現	述語論理式 AIによる情報の選択
統合データベース	“物”と“関係”的情報格納	多様な表現を管理する オブジェクトとしての管理
ユーザインターフェース		操作の統一化 AIによる操作の支援

(2) モデリングシステム試作研究

2.1.2(1)で述べた様に造船CIMSのためのモデリングに対しては、統合化されたデータベース、意味的認識可能な情報、高度幾何形状処理、高度ユーザインターフェース等の機能が要求されているが、これらを実現するには現状で実用化されているモデリング技術では対応できない面が多くある。そのためには2.1.1で述べた述語論理表現、階層抽象構造、オブジェクト指向、ソリッドモデル、グラフ理論等の各理論をはじめ新しい考え方を取り入れた「モデリングのイメージ」を前項で提案した。しかしながらこれらの理論や考え方は現在研究途上のものであり、これらを組合せて実用システムを構築することについては未知な部分が多く、また机上検討のみではより具体的なイメージを得ることができない。従って前項の「イメージ」に基づいた試作システムを作成・試用することにより、実現可能性についての全体的な見通しを得ると同時に問題点・今後の検討課題等の抽出を行った。ただし今回は特にモデリングの核となると考えられるオブジェクト指向と階層抽象構造を利用した製品情報の表現、及び加工・組立工程を対象とした工作情報の表現についてのみ試作を行った。

(a) 機関室配置システム

機関室配置のプロダクトモデルをオブジェクト指向の考え方に基づき構築し、オブジェクト指向の有効性と問題点について調査研究を行った。

(i) 試作システム概要

使用言語: Smalltalk-80

モデリング対象: 船の機関室部分及びバラスト系を単純化し、2次元形状及び配置として扱った。

(図2.1.6)

機能: 機器、部材等の設置、移動、除去、干渉 check

表現方法: エンジン、発電機、T型鋼、板鋼などを部品オブジェクトとし更に部品オブジェクトを組み合わせた機関室、バラスト系、バルクヘッド等を中間製品オブジェクトとした。各オブジェクト同士の構造関係は階層抽象構造と同様の階層、ネットワーク構造で表した。

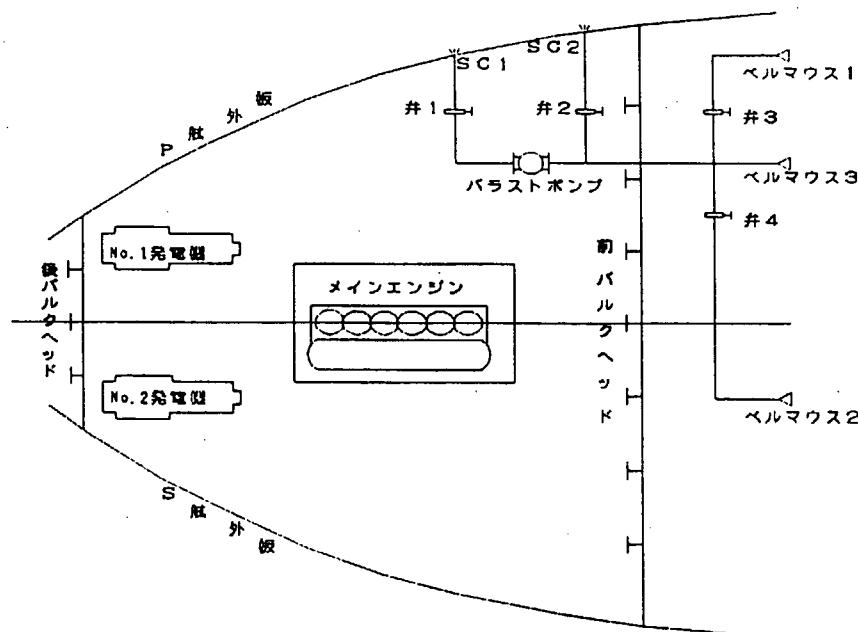


図2.1.6 モデリング対象

(iii) 試作システム試用結果

試作システムを作成・使用した結果、以下の知見が得られた。

- (1) “物”（オブジェクト）についての情報が一か所に集中しているので、その物についての整合性のチェックがしやすい。しかし他のオブジェクトとの間の整合性についてのチェックはオブジェクト間でメッセージを交わして行わねばならない。
- (2) オブジェクト同士の構造関係については、ひとつのオブジェクトに着目すれば、他のオブジェクトとの関係は扱いやすい。しかし全体的な構造を扱うには、オブジェクトをたどっていく必要がある。
- (3) システムに新しい機能を追加、もしくは機能の変更を行う時、その作業は“物”（オブジェクト）ごとにデータとプログラムを追加、変更する形で行われる。そのため一時に注意をはらうべき対象がオブジェクト内に限られ、追加、変更が比較的容易に行える。
- (4) 繙承機能に依り、既存のオブジェクトに性質が似ている新規のオブジェクトの定義が容易に行えるが、同時に或るオブジェクトの性質がどこで記述され、継承されて来たものかが判り難い場合がある。従ってシステムの開発時には継承関係を追跡できる開発ツールが必要である。

(b) 構造部材配置システム

オブジェクト指向の考え方に基づいて構造部材の形状、配置に関する情報の表現方法を検討し、更に試作により機能の確認及び問題点の抽出を行った。特に「(a)機関室配置システム」では“物”のみをオブジェクトとしていたのに対しここでは“物”と“物”との間の“関係”をもオブジェクト（“関係”オブジェクト）として扱った。

(i) 試作システム概要

使　用　言　語：Smalltalk-80

モデリング対象：オイルタンカータンクパートの船殻構造（3次元）

機能：隔壁、トランスリング、ロンジ、スチフナ等の形状・配置の定義及び変更操作、

重量、溶接長等の情報の取り出し及び集計操作、

ブロック分割操作

表現方法：ブロック、隔壁、トランスリング、ロンジ、スチフナ等の部材及びその合成品を“物”オブジェクトとする。また、ある“物”がその端部を他の“物”に「仕切られている」、ある“物”が他の“物”に「取り付けられている」、ある“物”は他の“物”的「部分品である」、ある“物”がブロック分割されて“物1”と“物2”に「分かれた」等の関係を“関係”オブジェクトとする。オブジェクトはネットワーク構造を構成している。

(ii) 試作システムによるプロダクトモデル構築例

試用のため次のようなプロダクトモデルを構築した。外板形状は既に定義済みとし、その上で船底板、ロンジ、縦隔壁、横隔壁、隔壁付きスチフナ、トランスリング等を定義し、更に「ロンジは横隔壁にぶつかったところで止まっている」「トランスリングはロンジに貫通されている」「スチフナは横隔壁に取り付けられ、その横方向の位置はロンジが横隔壁とぶつかっている位置である」「横隔壁とトランスリングのセントータンク部分は上下を外板に、左右を縦隔壁に仕切られており、ウイングタンク部分は片側を縦隔壁に、他を外板に仕切られている」等の関係づけを行っている。図2.1.7にモデルの形状を示す（外板形状、船底板は表示していない）。システム機能検証のためロンジは大きく斜めに配置した。

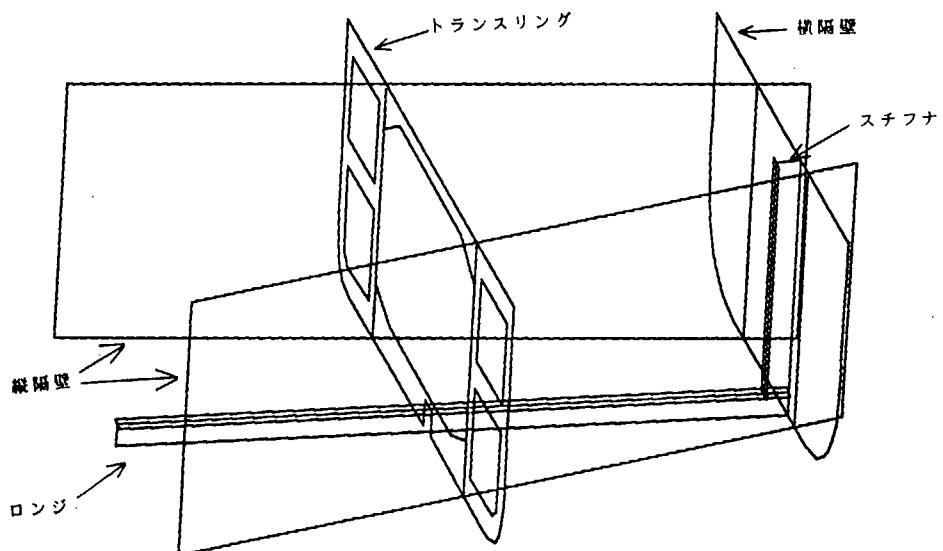


図 2.1.7 モデル構築例

構築したモデルに対して横隔壁とトランスリングの船長方向移動を指示した例が図 2.1.8 である。船長方向位置での外板形状と縦隔壁の間隔が変化するに従って横隔壁とトランスリングの形状(ビルジ部分等)が自動的に変化する。またロンジとぶつかる位置も変わるのでスチフナとトランスリングのスロットの横方向位置及びロンジの長さも自動的に変化する。

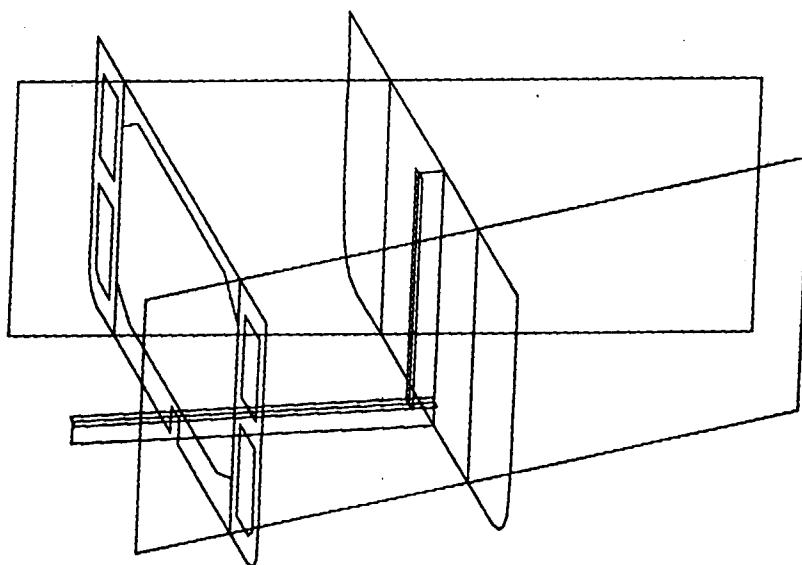


図 2.1.8 横隔壁、トランスリングの移動例

図 2.1.9 はブロック分割を行った例であり、まず前後のブロックに分割し、更に後側のブロックを中心線で左右に分割している。分割後のブロックもプロダクトモデルとしての機能を持っているので例えば各構成部材に展開するなどの処理ができる。

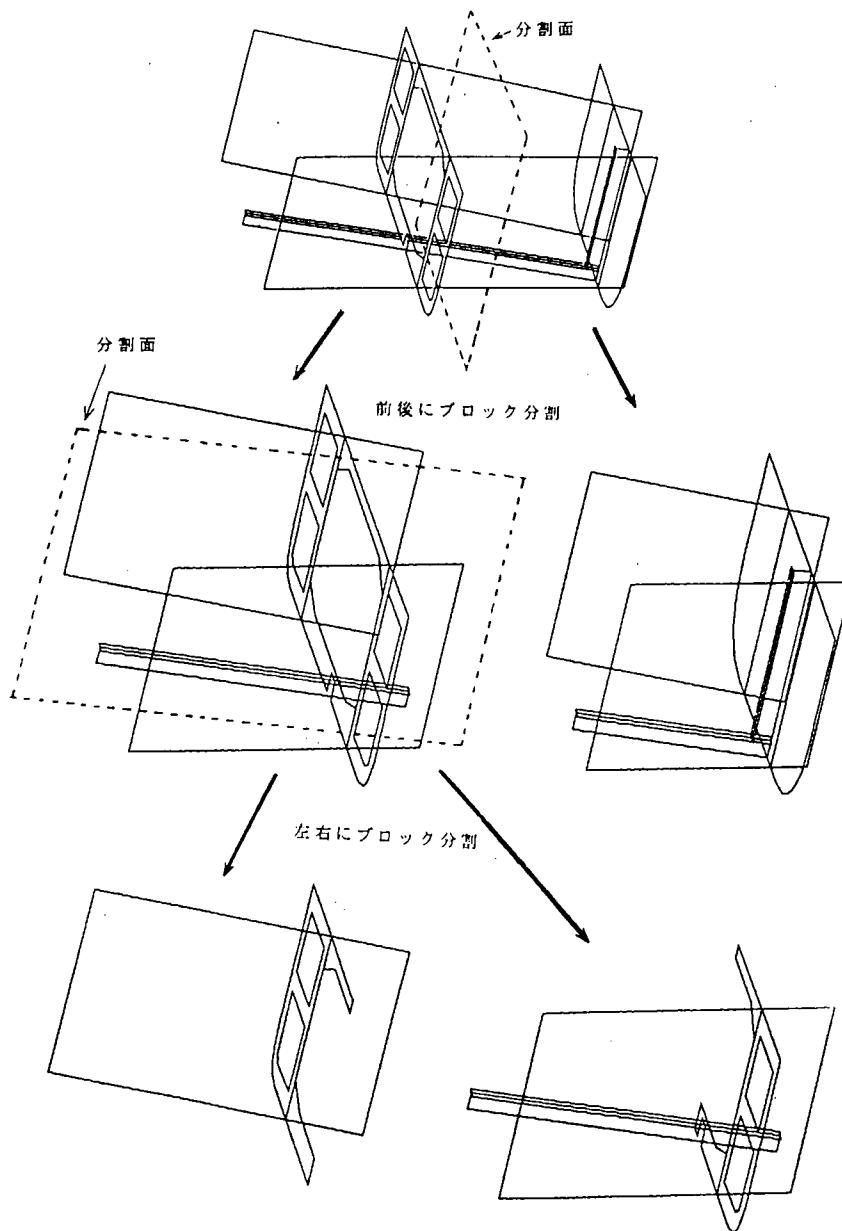


図 2.1.9 ブロック分割例

(iii) 試作システム試用結果

試作システムを作成・試用した結果、以下の知見が得られた。

- (イ) 試作対象の範囲内でプロダクトモデルを構築し、操作することができ、“物”オブジェクト，“関係”オブジェクトによるプロダクトモデル構築の有効性が確認できた。
- (ロ) 今回の試作対象に関しては“物”オブジェクト7種，“関係”オブジェクト5種と比較的少数の種類のオブジェクトで構成できた。船殻構造は基本的には板材及び型鋼材の切断と溶接のみから成り立っているとみなせるため、実用レベルでもこの延長での実現が可能と考えられる。
しかしながら艤装関連についてはどのような“物”オブジェクト及び“関係”オブジェクトが必要となるかは今後の検討が必要である。

- (a) システムを動作させるために多種のメッセージがオブジェクト間及びオブジェクトとユーザ・アプリケーションシステムとの間で交わされる。実用システムではさらに様々な種類のメッセージが必要になると考えられる。
- (b) 簡単な構造にもかかわらず処理時間はかなりかかる。このままでは実用的な構造を扱うのは不可能と考えられ、処理時間短縮のためのなんらかの対策が必要である。

(c) 構造部材工作情報付加システム

船艤の加工及び組立工程を対象として、工作情報を取り扱えるプロダクトモデルの表現についての検討を行った。まず、モデルの具体的な仕様案を作成した。その仕様の一部を具体的にプログラム化し、EWS上で実行してみた。その結果より、仕様案の不具合点等について検討を行った。

(i) モデル仕様と試作による検証

(1) モデル仕様

工作情報を取り扱える為には、物・工程・作業・設備の4つのモデルを持つ必要がある。この関係の概念図を図2.1.10に示す。又、表2.1.2にモデル一覧を示す。図に示す様に、これらのモデルは関係を持ちながら互いに独立な階層関係を形成している。

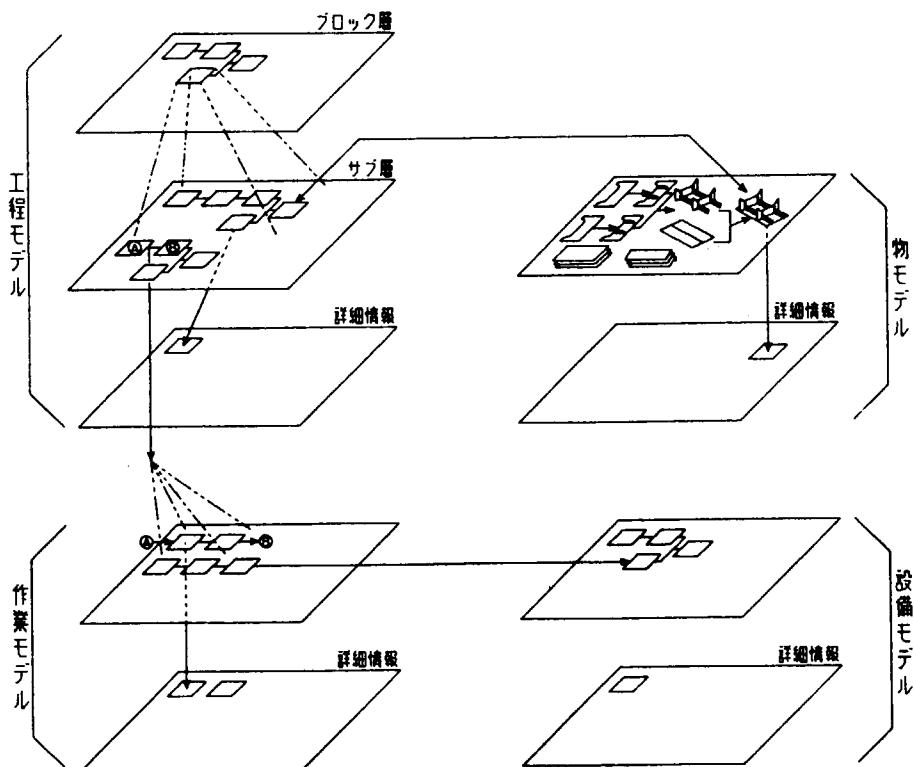


図2.1.10 モデル概念図

表2.1.2 モデル一覧

物モデル	製品や材料(状態を含む)を表す
工程モデル	プロセスの流れを示す
作業モデル	工程を実現する作業を示す
設備モデル	機械・場所・人などの生産資源を示す

各モデルの概要を以下に述べる。

- ・物モデルとは、ある時点での置き方も含めた製品や材料などの“物”的状態を示す。
部品の伸び等の情報もここで示される。
- ・工程モデルとは、物モデルの状態が j から $j + 1$ の状態に変化する為の方法を示す。(図 2.1.11)
よって、工程モデルは時間を含まない流れ(プロセス)として表現する。
工程モデルの流れについてはグラフ理論を用いて、表現の簡略化や情報の整合性検証の処理を理論的に取り扱う事が可能である。

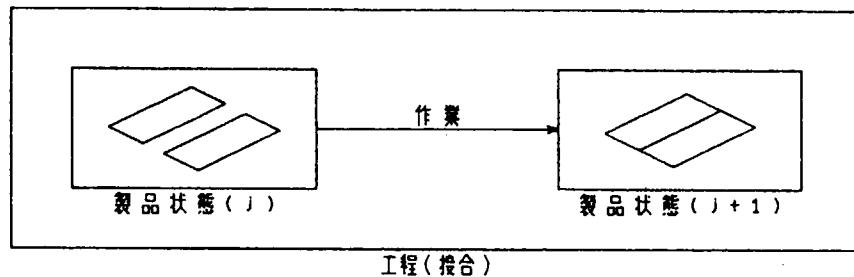


図 2.1.11 工程モデル

- ・作業モデルとは、工程を実現させる為の手段の表現を示す。作業モデルは各々が独立したものとして位置付けられるが、製品を通して見た場合にはその製品の条件を考慮して、あたかも製品に従属したものとしての振舞いを行う。

又、作業は製品によりその結果(例えば作業時間等)が変化することにより、工程モデルや物モデルを参照する処理式も記述される必要がある。

- ・設備モデルとは、機械や建屋ばかりでなく人間も含む生産資源の全てを示す。設備モデルも作業モデル同様に、製品に依存せずに各々が独立したものとして位置付けられるが、製品を通して見た場合には設備が製品に作用すると考えられる。

物モデル及び工程モデルは1つの製品(船)に対して、いくつかの組合せが考えられる。これらの中から、人間もしくはある評価式を介して最適な組合せを決定する。

同様に、作業モデルや設備モデル自身は製品に依存しないモデルであるが、これらも1つの工程に対していくつかの選択が行われる。(例えば、溶接作業は自動溶接の他に手溶接も選択できる。)この選択も、人間もしくはある評価式を用いて行われる。

又、物モデルや工程モデルの選択段階では、設備や作業の制約からこれらの選択を左右される場合も出

てくるので、作業モデルや設備モデルはその場合にも対応する必要がある。

(b) プログラム試作について

上記の仕様の一部を具体的に検討する為に、プログラムを試作した。プログラム試作は、船殻の加工工場と組立工場を対象とした。

加工工程は、鋼板を置き場から移動して切断加工をおこなった後、小組立工場に送る迄を対象とした。

一方、組立工程はタンカーのミッドシップ船底ブロックを対象として、小組立から大組立迄を対象とした。

いずれの試作も、実際の製品や工場設備を大幅に簡略化して検討している。

プログラムの開発環境は、ハードウェアはSUN3(OSはUNIX)を用い、プログラム言語については、加工工程はFortran・組立工程はC言語で行った。

(c) 加工工程と加工モデル

加工工程とは、鋼材置き場から鋼材を加工工場へ運び込み、これを切断機で切断し、曲げ装置で曲げ加工した後、小組立工場へ運び込むことである。

今回は、図2.1.12に示す様に加工をモデル化して、属性データや関係データの定義付けを行った。

又、上記の加工モデルから情報を抽出する為の機能を、次の様に作成した。

- ・切断作業における鋼板から各部品を切り出す切断時間の算出（切断作業が関係データでとりあっている物モデル（鋼板や板部品）及び設備モデル（切断機）の属性データより求める）する機能。
- ・設備モデルの予定表の出力（物モデル自体は時間データを持たないが物モデルを取り扱う作業モデルからの時間データを取り出して求める）の機能。
- ・物モデルの属性データである形状からその外周辺長を算出する機能。

等

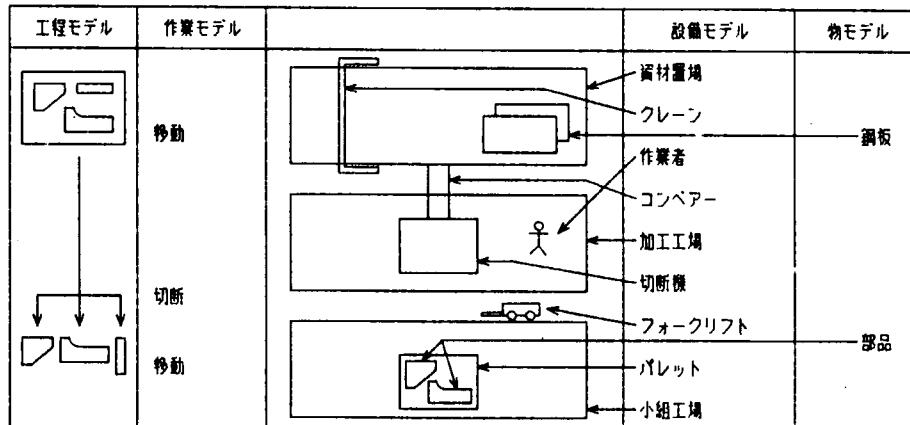


図2.1.12 加工モデル概念図

(d) 組立工程と組立モデル

組立工程でのモデル関係の概念図を図2.1.13に示す。設計等の情報は、全て物モデルの中にあるものとした。物モデルから解る事（部品名称・追加部品数・溶接長（方向も含む）・重量・投影面積）もデータとして入力した。但し、仕様では物モデルからこれらのデータを判別できる表現記述について提案をした。これらを物モデルから類推する機構については今後検討していく必要がある。又、作業モデル及び設備モデルは、今回最小限のものにとどめた。

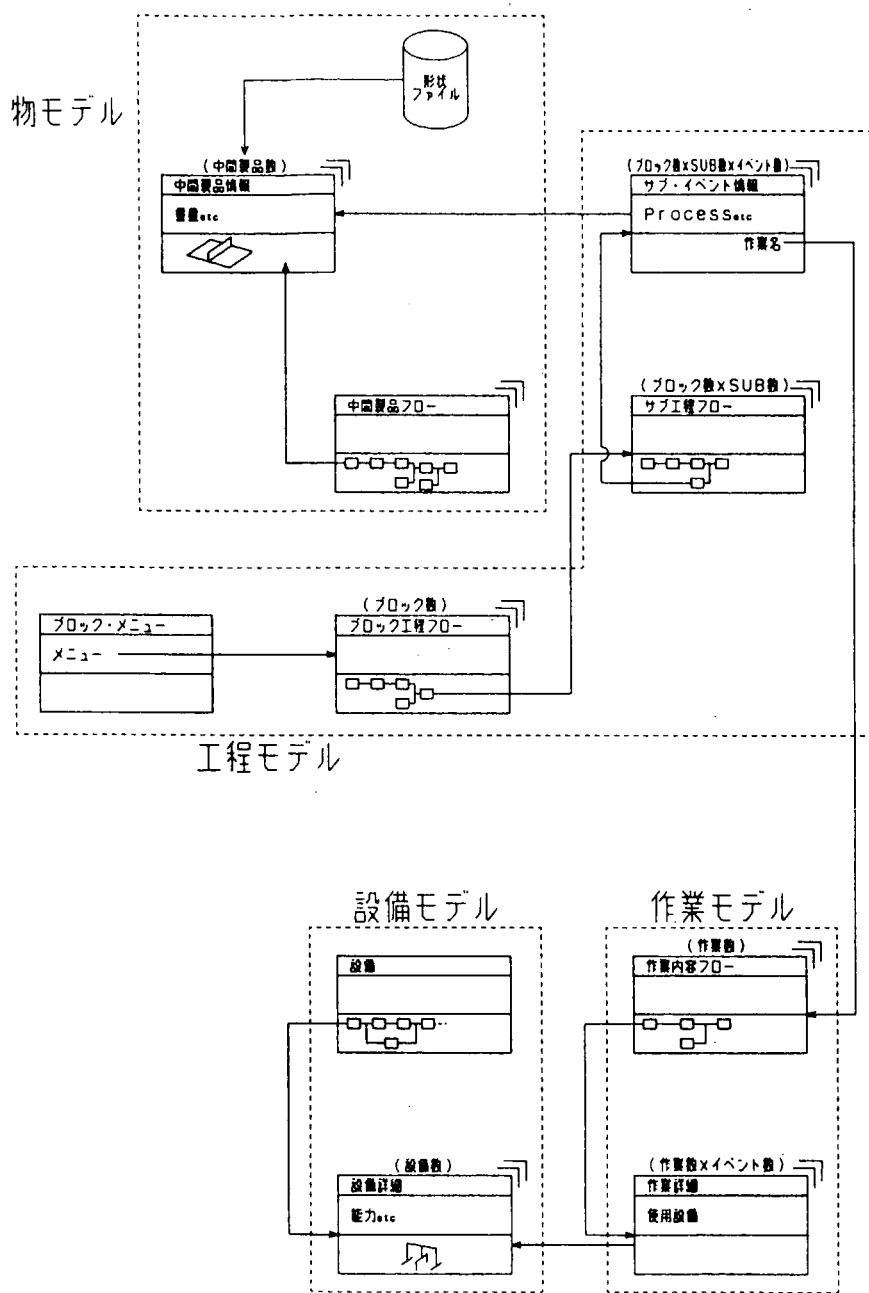


図 2.1.13 組立モデル概念図

図 2.1.14 に工程モデルの出力例、図 2.1.15 に物モデルの出力例を示す。

(ii) 試作システム試用結果

試作システムを作成・試用した結果、以下の知見が得られた。

- モデルについては、以下のモデルを関係づければ、検討範囲内に関しては工作情報の表現ができる事がわかった。
 - 物モデル（製品や部品の形状、その他“物”からわかる情報を含んだモデル。工作の場合は置き方や、製品の状態も表現する）
 - 工程モデル（物モデルの製品状態の変化を実現するための流れ）

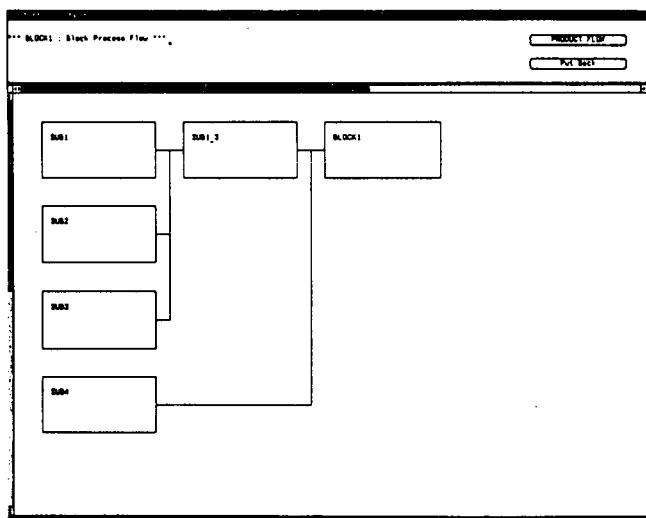


図 2.1.14 工程 モ デ ル 出 力 例

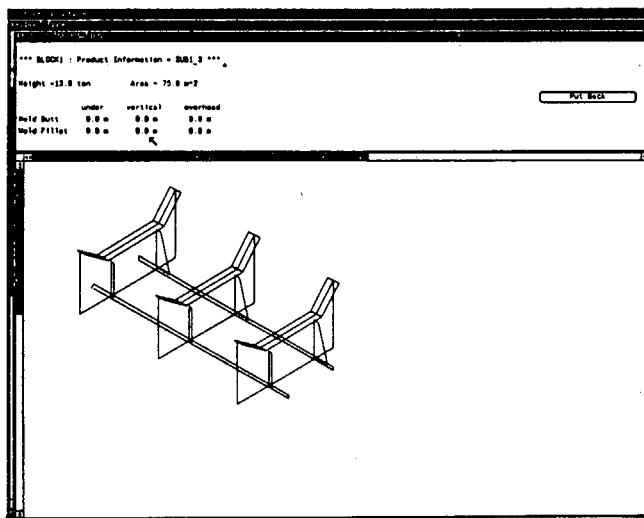


図 2.1.15 物 モ デ ル 出 力 例

・作業モデル（工程を実現する為の手段）

・設備モデル（機械・建屋・人間等の作業を行う為の生産資源）

但し、今後データ量が多くなった場合に各モデル間またモデル内の関係の整合性についてチェックする為にグラフ理論等を用いた処理が必要となろう。

(口) 物モデルについては、適当な製品状態記述を定めれば色々な情報（姿勢を含んだ接長、重量、追加部品の数等）を抽出する事ができる事がわかった。但し、各種情報の抽出は限られた範囲でしか行われなかった。

(ア) 作業・設備各モデルの記述内容については、データばかりでなく処理手順も記述する必要がある事がわかった。但し、内容については利用方法を含めて更に検討する必要がある。

(イ) データの変更・追加・削除処理のインターフェースについて、今回は研究対象外であるが実用化を考える上では重要な研究項目となろう。

(ii) 紙装品の取扱は、本モデル構成の拡張で対応が可能と考えられるが、詳細な検討はおこなっていないので、研究を進める必要がある。

(iv) 組立モデルのプログラムはC言語を用いた。その為にウィンドウやグラフィク処理は容易であったが、情報の継承処理には苦労した。

(3) 結果に対する評価と問題点の抽出

設計モデルと工作モデル（加工および組立）の試作研究を行ったが設計モデルの試作では構造物の形状と材質、接合関係等の属性を表現するだけでなく、工作モデルに必要なデータを提供できることも前提条件とした。そのため構造物を構成部材に展開できる様構造物を物オブジェクトと関係オブジェクトのネットワーク構造で表現する新しいモデリング技法を開発した。比較的簡単な構造物への適用ではあったが期待通りの成果が得られた。新しく試みた技法なのでどの様な複雑な構造でもうまくいか更に検討を続ける必要があるが従来のモデリング技法では対応できないと考えられていたブロック分割、ブロックの組立手順の検討等造船固有の工作法に対しても十分対応できる見通しがついた。

試作した設計モデルは定義情報をそのままの形で保持している。設計変更に対し一貫した情報を持ち整合性がとり易いと言うメリットはあるがその反面必要なデータはその都度計算するので処理速度が遅い。使用言語（Smalltalk-80）が数値計算、幾何計算向きでないことも原因している。モデリングに使用する言語としては幾何処理機能が是非必要である。他の言語を接続することにより欠けている幾何処理機能を補完する必要があるが、現状では他言語の接続は容易でなく今後のインターフェース機能の拡張に期待する。

工作モデルは対象とする内容が抽象的でモデルのイメージ作りが難しい。試作研究では物モデル、工程モデル、作業モデル、設備モデルの4種のモデルを作り、これ等の関係づけで工作のプロセスを表現した。絶えず変化していく過程をとらえていかなければならない点モデル化が難しいと思われたが工作の対象を性格の異なる4種のモデルにうまく整理ができこれを組み合せて工作のプロセスを表現すると言う方式を考案したことにより、工作的モデル化と言う所期の目的は達成した。

物・工程・作業・設備の各モデルについて体系的に整理分析する作業が残っており、工作モデルの試作適用例も少く、また未だ工作全般をカバーしていないことも配慮しなければならないが試作研究の成果から工作のモデリングの取り組み方について十分見通しがたった。

試作では部分的に加工と組立の工程でシミュレーションを実施したが工作全般にわたって工程検討のためのシミュレーションを実施する必要がある。そのためには入力データを対話で追加・修正する機能の付与、各工程モデルの接合など尚残されている作業も多い。

2.1.3 研究開発課題と解決策

前項(3)結果に対する評価と問題点の抽出で触れた様に構造部材配置システムの試作研究では比較的簡単な構造を対象にモデル化を実施し、構造部材工作情報付加システムの試作研究では加工と組立でそれぞれ単独に工程のモデル化と工程検討のシミュレーションを実施した。CIMS化実現の基礎となるモデリング技術について大きな指針が得られたことは満足すべき成果であったが、実際の複雑な構造に適用して全く問題がないか工作全般を通して、更に紙装工程にまで拡大しても試作で使用したモデリング手法でうまくいか確認しておきたい。

これまでモデリングの基本要件として、設計対象および工作のプロセスをコンピュータ内により実体に近く正確に表現することに重点を置いて試作研究をしてきた。新しいモデリング手法を検討するに当ってはモデルの対象をどう表現するかだけでなく入力が容易で必要なデータが正しく迅速に取り出せることも合わせて確認する必要がある。データの検索機能については2.5 造船データベース統合化のための調査研究で扱っているのでここでは入力の

省力化について考案したい。

設計モデルを構築するための情報は設計システムで出力した設計情報である。これに手を入れて後工程のアプリケーションシステムがアクセスし易い形にどう組みえるか変換用のインターフェースの開発が重要な研究開発課題であり、使い易いプロダクトモデルをデータベース内に構築できるか否かの鍵となる。

設計モデルでは構造解析その他設計の最適化を検討するシステムとの情報の授受があり、工作モデルでは工作中かかわる資源最適化を検討するシミュレーションシステムとの情報の授受がある。設計モデルにアクセスするアプリケーションシステムの要求する情報として何が必要か調査し、これを整理分析して初めて変換用のインターフェースシステムの仕様が決まる。

工作モデルの入力の省力化も同様の手順が要求される。設計と工作の間に生産設計がある様に設計モデルから情報を取り出し工作モデルに必要な情報に変換或は必要な情報を付加するには生産設計的な機能を持ったインターフェースが必要であろう。

2.2 エキスパートシステム開発手法の研究

2.2.1 現状と問題点

AI技術は「人間が用いる知識や判断力を分析し、コンピュータ上に生かそうとする技術」であり、コンピュータ技術の進展を背景に、ここ数年来急速な発展を遂げつつあり、大学・研究所等を中心とした基礎技術面の研究・開発とともに、産業界においてもこの技術を利用しそれぞれの分野の発展を図ろうとする商用化・実用化の試みが活発に進められつつあるのが現状である。このAI技術の応用分野としては代表格のエキスパートシステムをはじめとして自然言語処理、音声理解、画像認識等があり広範な領域での応用が期待されている。

造船においては、設計や製造に携わる人間の個人的技量、ノウハウに依存するところの多い労働集約的特質から、CAEやCAD/CAMシステムが普及しているとはいえ、既存のソフトウェア技術でシステム化が困難であった領域も多く、システムの統合化、処理機能の高度化、効率化を図る上で、また更にプログラム開発や保守・拡充の容易さといった面からもAI技術に期待するところ大であり、造船CIMSの構築に当っての重要なキーテクノロジーの一つである。

しかしながら、現在のところAI技術は発展途上にあるいわば未成熟技術であり、多種多様な分野で開発・実用化が進められてはいるが、完全に実用の域に到達しているのはまだ少なく、その利用技術についても一般的な手法はまだ確立されていない。従って、AI技術の導入に当っては、技術の現状と動向を充分把握し、その可能性と限界を明らかにし、より実用的なシステムの構築を図るべくその利用技術を確立することが重要である。

(1) 調査研究の目的

上記背景のもとに、造船CIMSにおけるAI技術の位置づけ・役割を明らかにすると共に、造船への導入に際しての利用分野、利用方法、開発手法と実現に当っての技術開発課題等の具体的な指針を得ることを目的として、AI技術の現状と動向調査、造船における業務要件とシステム化要件調査及びAI技術の中でも特に適用対象領域が広く、造船の固有性があり、かつ実現性も高いと期待されるエキスパートシステムの試作研究等を行ったので以下に報告する。

(2) AI技術の現状と動向

AI技術の内特に造船CIMSにおいて有用であると思われるエキスパートシステム、ヒューマンインターフェース及び画像認識を対象に、どの様な分野にどの程度のことが期待できるかを明らかにする目的で、これらの技術の現状と動向を調査した。

(a) エキスパートシステム

・開発事例の調査・分析

エキスパートシステムの開発事例を、文献調査（約80件）及び内外の研究機関、企業の訪問調査を実施した。

調査した開発事例を、診断型、監視・制御型、計画・設計型に分類し利用分野の特徴の抽出を行った。病気診断や機器の故障診断を対象とした診断型、発電所・プラントや高炉等の運転制御を対象にした監視・制御型に適用例が多くみられた。計画・設計型にも多くの適用例がみられたが、回路等の小物、単品の例がほとんどである。

エキスパートシステムは研究段階からすでに実用化段階に移行しており、実用化環境が整いつつある。初期には診断やコンサルテーション中心であったが、現在では計画、設計、制御の分野でも盛んに研究・開発が進められている。ただ、全体としては周辺技術も含みまだ発展途上にあり、これからも急速に変化・進歩して行くであろう。

・開発ツールの調査比較

文献・カタログ等の調査及び販売元・開発元への訪問調査を実施し、代表的な8ツール（ART, ESHELL/FM, EXSYS, KBMS, KEE, OPS83, Smalltalk-80, SUPER-BRAINS）について知識表現、推論機能、開発言語、他言語とのリンク、ユーザインタフェース機能等の調査・比較を行った。

複数の知識表現方法（プロダクション、フレーム、オブジェクト等）が扱えるマルチパラダイム型が主流である。フレーム、オブジェクト等は、複雑な構造を持つ知識の表現に有用であり、設計型問題の解決に役立つと思われる。また、ウィンドウシステム、マウス等を用いた強力なユーザインタフェースを備えたものが多い。さらに、汎用のデータベースとインターフェースを持つエキスパートシステムが出現しつつある。

大規模かつ複雑な問題に高い問題解決能力を持つ分散協調型推論方式の計画・設計問題への適用や、診断・制御分野へのファジー理論との関わりに注目する必要がある。

(b) ヒューマンインタフェース

以下に記す項目について文献調査、内外の研究機関、企業の訪問調査を実施し、原理、特徴、現状レベル、応用例、問題点等について調査した。

- ・自然言語理解 患者との対話システム、科学分析データの検索システム、ロボット操作シミュレーションシステム等の開発事例のほか、インターフェースとしての自然言語応用の研究が進められている。しかし、まだ意味解析技術として洗練された一般的手法が開発されておらず、今後の研究が待たれる。
- ・機械翻訳 日英翻訳等種々のシステムが開発されているが、現状ではかなりの前後処理が必要でかつ広い意味の翻訳は無理である。
- ・音声認識 種々のシステムが開発されているが、大半が限定語音声認識である。任意音声認識の実用化はかなり先であると予想される。
- ・図形認識 図面読み取り装置として実用化が進んでいるが、図形精度の向上が今後の課題である。
- ・文字認識 英数字、カナ文字については97%の高認識率である。今後は、かな、漢字についての開発が進められるであろう。
- ・ユーザインタフェース マルチウィンドウやグラフィックアイコンの定着とともに、将来メディアの総合化が進み、映像、画像、図形、音声がEWS上で自在に扱えるようになるであろう。なお、現在EWSではウ

ィンドウシステムとして、MITの開発したX-WINDOWがほぼ標準となることが予想され、パソコンではOS/2PM (Presentation Manager)が出現した。共に、マシンと出力デバイスから独立した、グラフィックインターフェースを実現する。

(c) 画像認識

下記の項目を対象に文献調査を実施した。

画像認識研究の当初は、文字などを認識するための特徴抽出や決定理論が中心であったが、人工知能の一分野として研究が進むにつれ、3次元シーンや動画像の認識が試みられるようになった。現状レベルでは、認識対象物体に制限があり、精度も十分でない。

- 画像入力装置 工学的な画像情報を収集するものとしてイメージセンサーがある。画像入力装置は、現在カラー対応、高解像度化が進められている。
- 画像処理装置 処理は遅いが、高い精度、安定性、融通性をもつデジタル画像処理を中心に実用化が進められている。処理速度向上のため、VLSIを利用した専用処理装置の開発も進められている。
- 画像処理アルゴリズム パターンマッチングを行う単純なものから、知的手法を用いて対象の内容を推測するものまで幅広い。知識工学的な手法を加えて能力を向上させるため、知識表現の方法、知識の整合性の確保の研究が待たれる。また、この分野に優れたパターン認識能力を持つニューラルコンピュータの応用が期待されている。

2. 2. 2 調査検討結果

(1) AIの造船への導入方法検討結果

前章のAI技術の現状と動向調査を基に、造船のどのような業務にどのような形でAI技術が利用できるかのイメージアップと導入方法について検討を行った。

(a) エキスパートシステム

(i) 造船への導入イメージの調査

造船業務の全般についてアンケート形式で調査を行った結果、経営管理、計画、設計、見積、工作、資材管理等多くの分野に渡ってエキスパートシステム化のニーズがあることが判った。またこれらのニーズについてシステム化の概略評価を行った結果、現状の電算化レベルが低く、エキスパートシステム化の難度が高いと評価されたものが多いが、業界共通性のあるものも多く、また経済的效果もかなり期待できることが判った。

また、造船固有の業務ではないと指摘されたものもあり、これらについては他業界の動向を注目しておくべきであろう。一方造船の固有の問題については業務要件の明確化とエキスパートシステム化の具体的な方法論の確立等重点を置いた取組みが必要である。

(ii) 造船への導入方法の検討

設計／工作等の造船固有の問題に絞って業務要件の抽出を行い、これらに対し試作研究等から得られた技術の現状と動向の評価、予測に照らし、造船へのエキスパートシステム導入の方法について検討を行った。

(イ) 業務要件

設計での主要なエキスパートシステムの対象タスクとしては、船体主要部・区画配置の決定、機器配置の決定、構造配置／部材寸法決定、配管系統・装置の決定等が挙げられる。これらのシステムの機能要件としては、要目・ルール等の数値的パラメータをはじめとして、線図、機器、構造部材、配管等の幾何学的・位相的情報、更に用途、機能等の情報を対象に、類似船の選定・利用、配置・配管、構造部材配置・

形状・寸法等の決定、機能・性能・コストの評価、設計手順、等の知識を用い、満足化や最適化の処理を自動的に行うと共に、設計者による試行錯誤的処理や結果の確認・修正等を効果的に支援できる機能が求められる。

また工作ではブロック分割や組立順序等工作要領の決定、部品加工や組立用データの作成、物流用データの作成、工程計画、工程・品質・設備診断等が主要なエキスパートシステムの対象タスクとして挙げられる。これらのシステムの機能要件としては、上流の設計段階で決定された製品情報に加え、素材や設備に関する情報、生産管理情報等を対象とし、工作手順や工作法、日程計画や調整、結果の診断や評価、等の知識を用い、工作指示や制御データ、物流や日程等の生産管理データの生成、実績データのフィードバック等を自動的に行うと共に、作業者による確認・修正等も容易に行える機能が求められる。

(a) エキスパートシステム化の指針

エキスパートシステムは、専門家の経験的知識に基づく処理を実現しようとするものであり、各専門領域毎に個別のシステムが必要となる。

エキスパートシステムの応用対象は、一般的に解析型（解釈・診断・制御）と合成型（計画・設計）に分類される。造船の各業務分野をこれらに対応させると、工程・品質・設備診断等のモニタリングが典型的な解析型となるが、この他に計画・設計においても検討の見落としや関連項目との不整合を指摘するなどの作業支援を行う部分は解析型に属し、その他は概ね合成型に属する。

解析型は開発事例も多く、ツール・開発手法とも整備されつつあり、開発は比較的容易であると考えられる。一方合成型は探索空間／解空間が広く、方法論も未確立でシステム化は容易でない。

合成型は、構成要素の特性を最適化しつつ、システムの構造を最適化する問題（初期計画、構造設計問題等）と、構成要素の特性が与えられてシステムの構造を最適化する（配置、配管、工作要領、工程計画等）、またはその逆（主要目、構造部材寸法決定等）の問題とに分類される。前者はまだ基礎的研究の段階であるが、後者では配置・スケジューリングや、単純な機械を対象とした事例が出つつある。従って、エキスパートシステム化の対象としては、解析型と上記合成型の後者の問題領域のものから手がけていくことが適切である。

開発環境としては、グラフィックを含むユーザインタフェースが優れた汎用性のあるEWS上で、自主開発ツールではなく、技術的・開発効率面で優れている汎用ツールを利用するのが適切である。現時点での汎用ツールとしては、ルールとフレーム（またはオブジェクト）を基本機能として備え、既存システムとの結合が容易であることが必要である。

システムの開発にあたっては、知識の抽出／整理、ユーザに真に便利なインタフェースの構築等の面から造船業務経験者が主体となって取組むことが重要である。

(b) ヒューマンインターフェース

造船CIMSでは、必要な時に必要なだけの情報を必要な人間に判り易く、又使い易く、提供されることが必要である。これに対し、ヒューマンインターフェースの適用をパターン理解技術とユーザインターフェースに大別し、検討を行った。

パターン理解技術の利用として、音声理解、自然言語理解、機械翻訳システムはかなり制限された範囲で実用化されており、造船業に利用する場合も造船用語等の知識を組込むことにより、利用し易いものとなる。音声・図形及び文字理解は参照データのデータベースへの格納に効力を發揮するものとみられ、特に認識率の向上に伴い、音声ワープロや日英翻訳システムが普及するとみられる。また音声理解はボイスクレーンの例に

みられる様に、機器への指示方法としても普及するとみられる。

ユーザインタフェースの高度化として、本来、人間は画像・図形・文字・音声などを自由に扱い作業を行っており、これらに関するメディアが統合化されることにより、文字のみ、図形のみが扱える装置の多い現状よりはるかに効率の良い作業環境が出来上がると考えられる。特に造船で取扱う情報に関し、造船の業務分類毎に情報の取込み、生成、伝達、検索・参照、編集・変換、認識・理解、判断支援、教育、機器への指示といった面からも整理を行い、例えば造船用の統合化オフィスシステムを作るなど、情報を取扱う環境を整備することも重要である。

造船CIMSでは、モデリング及びデータベースを意識したユーザインタフェースの考慮が必要であり、作業者が判り易く、使い易いように設計部門では3次元の構造部材や装置の入力・表示方法が、また製造部門では各ステージに沿った3次元の部材ブロック、装置等の表示やコントロール状況の表示等が特に重要と思われる。

これらのヒューマンインタフェース技術の実際の業務への適用に関しては、業務の種類、作業者のレベル、環境、システムの運用方法等が各々異なる為、CIMSの具体案を検討する際に個々に操作し易い入出力方法、理解し易い表示方法などを明確にしていく必要がある。

(c) 画像認識

画像認識の造船への導入について調査研究を行った。

(i) 業務分析による調査（造船工作業務と画像認識とのつながりについて）

調査方法：作業ステージ毎に情報の入手手段を調査し、人の五感に対応させて分類した。

調査結果：見る、聞く、触ることにより入手。中でも見るが全てにかかわる。

まとめ：将来の造船工場には視覚、画像認識技術への期待が大きい。

概略的には以上の様にまとめられ、さらにこれを受けて、生産性向上の一手段をCIMS化に求めたときの画像認識技術への具体的な期待を各社へのアンケートを行い調査した。

(ii) CIMS化工場に対するアンケート調査

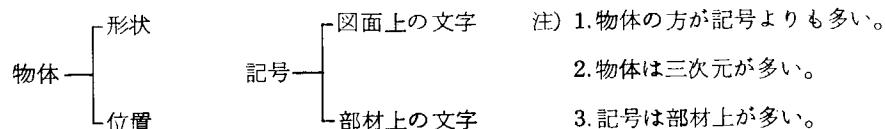
調査結果：(1) 作業工程別期待度は 小組立>大組立>加工の順で大きい。

(2) 作業業種別期待度は 配材>位置決め、溶接、曲げ、形状>寸法、検査の順で大きい。

また倉庫、機械にも見られる。

(3) 運用目的としては自動化と検査に大別される。

考 察：(1) 画像認識技術で期待される適用対象は次の2点に集約される。



(2) 現状の技術レベルが以下に比較するように造船の要求を満たさない。

造船の対象	他産業の対象
1～数十mまで(1mm以下もあり)	小物(1m以下)が多い
重なりが多く複雑	単純物
多様な形状	平面、曲面
多種類を対象	限定された対象
場所は不定(移動もあり)	固定

(i) 次の3点からみてまだ画像認識適用の条件は整っていない。

- a) 技術レベル
- b) 適用対象
- c) 適用環境

以上から言えることは今後造船のCIMS化に対して画像認識の基本技術の推移を注意深く見守ると共に造船への適用対象を今以上に絞り込み単純化する事を試みる等の努力することが重要である。

(2) エキスパートシステム試作結果

エキスパートシステムは、専門家の経験的知識に基づく処理を実現しようとするものであり、各専門領域毎に個別のシステムが必要となる。そこで、造船の業務の中から、船体主要目的決定、機器配置の決定、構造部材形状と寸法の決定、及び工程管理を選び、より具体的なシステム化の指針を得るために以下の通り試作を行った。

(a) 船体主要目決定AIシステム

2年間の調査研究を通じ、船舶設計の最上流工程である船体主要目決定を支援するエキスパートシステム実現の可能性を探るため、ソフトウェア工学的に効率的といわれるオブジェクト指向言語を用い、設計に適したAI技術として注目される制約指向の考え方を取り入れたシステムを試作した。初年度は、システムの基本的な考え方の妥当性を確認し、第2年度は、これを基により複雑なシステムに対応するための設計対象階層化技術や分散開発環境について検討した。

(i) システムの機能要件

一般的な機能要件としては、類似船の検索、類似船主要目から本船主要目の推定、船種・船型に応じたチェックポイントの把握、チェックに基づく変更、決定理由説明、パラメトリック・スタディがあり、これらの過程で推進性能や載貨性能に関する各種の解析・評価を行う機能も必要である。

(ii) 試作システムの概要

オブジェクト指向言語Smalltalk-80を用いてシステムを試作した。システムの概略構成を図2.2.1に示す。ひとつの設計プロジェクトの中で複数の設計案を生成することができる。各設計案は「設計対象オブジェクト」であって、その内部には「設計要素集合」(船長・船幅・吃水etc.)と「制約集合」(排水量=軽荷重量+載貨重量etc.)がある。設計対象が満たすべき条件(設計対象に関する知識)が制約として記述される。設計の目的は、全ての制約を満たす最適の設計要素の値を決めることがある。設計対象と制約は階層構成とすることができる。設計の手順やノウハウ(設計過程に関する知識)はプロダクションルール(IF~THEN~)として記述する。「設計主体オブジェクト」がプロダクションシステムの推論機構に相当する。利用者は、設計案・設計主体などシステム中の任意のオブジェクトに対してウィンドウシステムを通じて対話的にアクセスすることができる。

本試作システムでは制約指向の考え方を探りいたが、その特徴は以下のようである。

- (i) 設計要素の状態変化に応じて、関連する制約の状態(満足・違反・起動可・適用不能)を自動的に調べ直し、要求に応じて分かりやすく表示できる。
- (ii) 関連する既定要素の値を用いて、未定要素の値を決める(制約伝播)ことが、多方向的にできる。例えば、「容積=長さ×幅×高さ」という制約では、右辺の3要素の値が決まったとき容積を計算することはもちろん、容積と長さと幅が与えられたとき、高さを求める。
- (iii) 制約が満足されていない(違反)とき、満足するように関連する設計要素の値を変えることができる。

(iii) 調査研究結果

試作システムを用いて主要目概略決定をシミュレートすることができた。図2.2.2には階層的に表現された設計対象を検索・操作するウィンドウの例を、図2.2.3には複数の設計案を比較するウィンドウの例を示

す。

(iv) 考 察

- (イ) 設計問題においては、設計対象に関する知識と、設計過程に関する知識があり；システムの上でもこれらを分けて考えた方がよい。本試作では、設計対象に関する知識を制約指向システムで、設計過程に関する知識をプロダクションシステムで扱ったが、これは有効だった。
- (ロ) 設計対象をいろいろな角度からみるため、マルチウィンドウによるユーザインターフェースは有効である。
- (ハ) 大規模で複雑な設計対象を扱うには、階層的に表現することが有効である。
- (ニ) 設計対象に関する知識は、便覧などにより比較的容易に獲得できる。
- (ホ) 設計過程に関する知識は、プロダクションルールとして記述できる。ただし、かなりの部分は手続き的に書くことができる。
- (ヘ) 設計過程に関する知識は、獲得が困難である。その理由の一つは、専門家は状況に会って初めて知識を思い起こすためである。制約指向システムのように設計対象を良くシミュレートすることが、知識獲得の良いツールの条件だと思われるが、本年度の試作ではツールの検討が中心となり、設計過程に関する知識について十分な検討は行っていない。
- (ト) 制約指向システムは注目されるAI技術であるが、具体的なシステム構築法は確立されておらず、AIの専門家による一般的・基礎的な研究の段階である。現時点で制約指向に基づくシステムを開発するのは適切でないと思われる。専門家による研究成果が一般的なツールとして利用できるようになるまでには、まだ数年を要すると予想される。
- (ヘ) 主要目決定にあたっては区画配置が重要だが、本試作ではバラメータ設計問題にとどまり、区画配置まで手をつけることができなかった。区画配置にあたっては、幾何学的・位相的な制約をどのように扱うかが重要な問題となる。これは造船の固有性が比較的強い問題であり、エキスパートシステムと言うより設計対象に関するモデリングの問題として、重点的な研究が必要である。

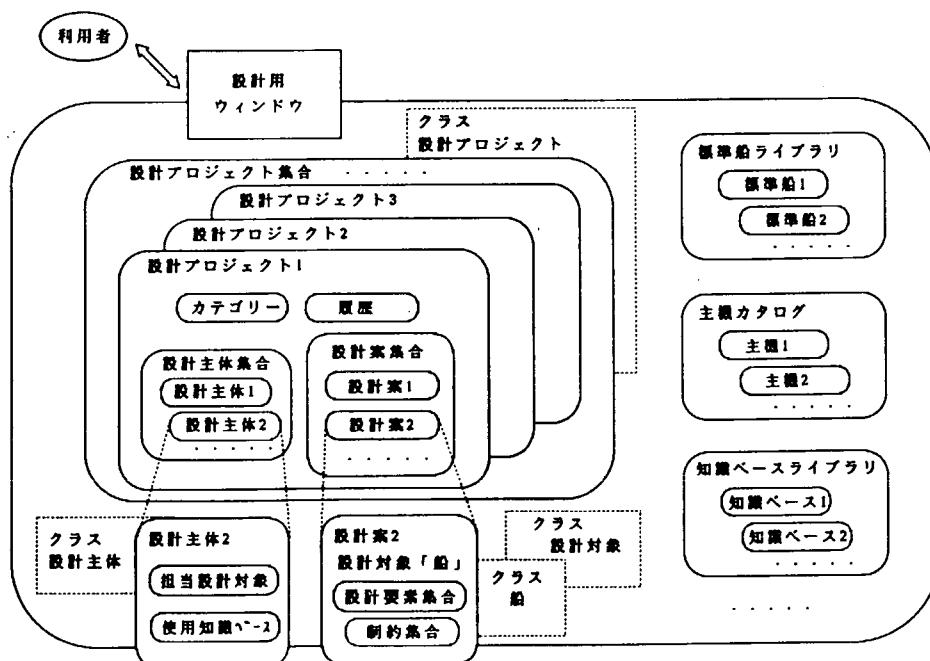


図 2.2.1 試作システムにおけるオブジェクトの概略構成

(ii) Smalltalk-80 は、オブジェクト指向によるモジュール性の高さ・差分プログラミング、優れたユーザインターフェースなどを持ち、FORTRANやCなどと比べれば開発環境として優れている。また、異なるハードウェア上でもソースレベルで一応の互換性があり、分散開発は可能である。しかし、オブジェクト指向やユーザインターフェースの良さは今や Smalltalk-80 固有のものではなく、LISP 等の言語や ART,

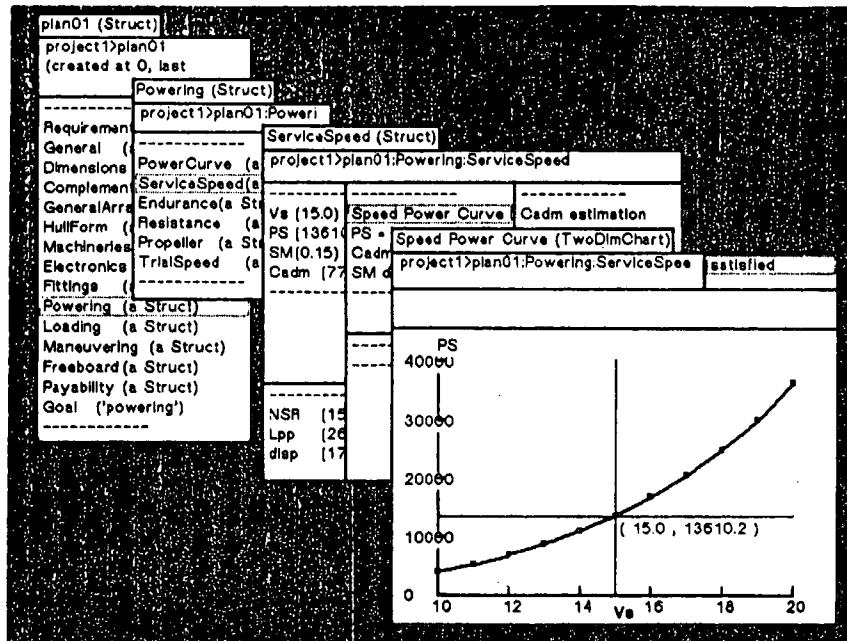


図 2.2.2 階層的な設計対象の検索・操作

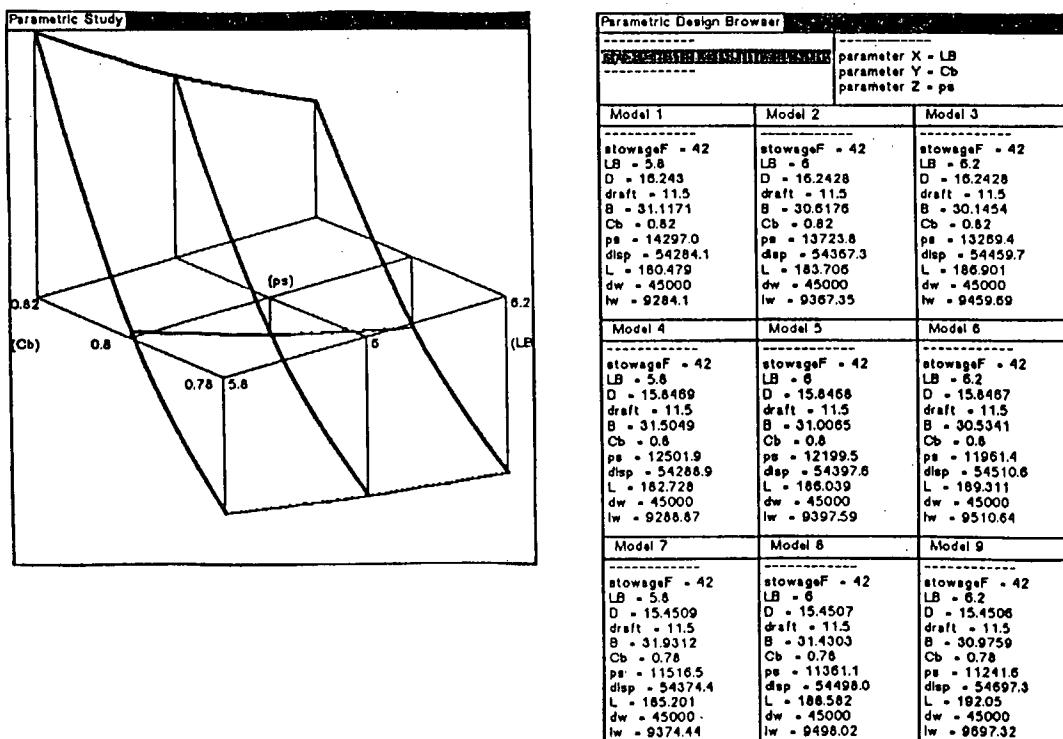


図 2.2.3 複数の設計案の比較

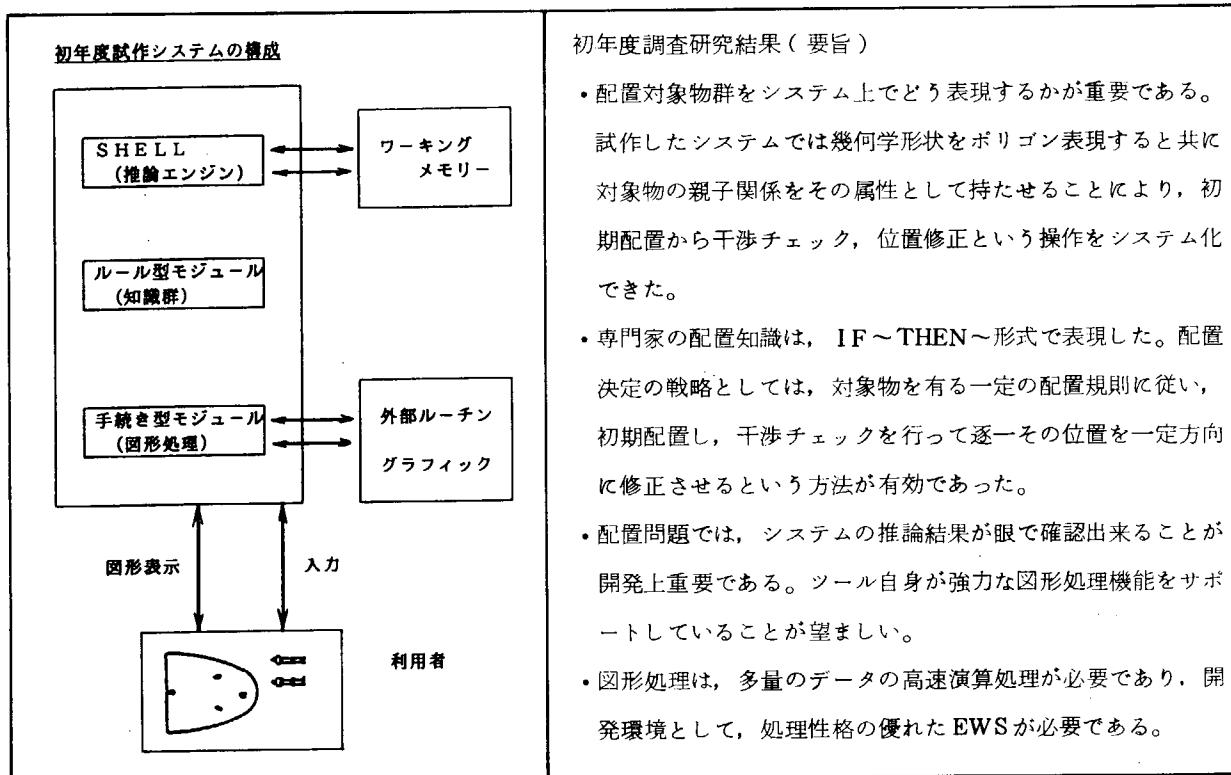
KEE等のエキスパートシステム構築ツールでも取り入れられている。本試作の経験から言って、システムの基本メカニズムの部分からすべて開発するというのは大変なので、プロトタイピングにはできるだけ汎用ツールを用い、足りない機能をツールの開発言語(例えばLISP)で書き加えるという方針が推奨される。

(b) 機器配置決定AIシステム

初年度は、人工知能用言語OPS83を用いて、タンカーの上甲板上船首部に係船機器を物理的な干渉を避けつつ有限の配置区域内に配置するシステムを試作し、配置業務システム化の問題点を洗い出した。

システムの構成、及び試作を通して得た知見を纏めると下表の通りである。

表2.2.1 初年度試作結果



第2年度は、前年の成果を受け、第2世代のエキスパートシステム構築用ツールARTを用いて、商船の上甲板上係船機器を対象に、機器仕様設定及び機器配置検討を支援するシステムを試作し、その有効性の確認、配置問題に於けるエキスパートシステムのあり方及び開発手法の検討を行った。以下にその成果を報告する。

(i) システムの機能要件

機器の仕様設定とは配置検討の前段に位置するもので、上流の設計ステージより賦与された設計条件に基づき、機器の機能、性能、物量を設定し、機器配置検討に必要な幾何学情報、関係情報を定めるものである。

機器の配置検討とは、与えられた配置スペース内に、機器の使用時の要求機能実現のための位置関係、機器設置／運転／保守のためのスペースを考慮しつつ、機器類を初期配置(仮配置)し、それらの配置状態(物理的干渉、機能的干渉)をチェックして、干渉解消を図るべく機器再配置を行うものである。このような機器配置支援システムには以下の機能が要求される。

(1) 機器仕様設定

- ・造船所標準、或は既設計／建造の類似船の設計資料を基に設計対象船の持るべき機器の仕様を決定し得る

こと。

- ・仕様設定に至る諸検討の要旨（仕様決定の理由）が設計者に提示されること。
- ・設定仕様に対して機器の幾何学情報、構造情報、配置決定構造上の関係情報を定め得ること。
- ・設計者の割り込みにより、機器仕様の変更が任意に行い得ること。

(iv) 機器配置検討

- ・配置検討図の画面表示により、設計者が機器配置状態を視認出来ること。
- ・機器の概略位置決定から配置状態チェック、干渉解消の為の位置修正という一連の配置検討プロセスをシステム側が主体的に行い得ること。位置修正は仮説展開／棄却により、機器配置位置の満足解を効率良く得ることが出来ること。更に、複数の満足解の中から最適解を選定し得ること。または、数例の最適解候補を設計者に提示出来ること。
- ・設計者の割り込みにより、機器配置位置の変更が任意に行い得ること。

(ii) 試作システムの概要

試作を計画したシステムの概略構成を図 2.2.4 に示す。ここでは、船体主要目、上甲板形状、区画配置等の船体データは上流の設計ステージより与えられるものとし、まず機器仕様決定サブシステムで機器の仕様を決定する。機器配置検討サブシステムは、その機器仕様に対応する機器の配置検討を行わせ、配置上の不都合が機器の位置修正のみでは解消し得ない場合は仕様変更に遡及するものである。（但し、開発期間内では上記の 2 つのサブシステムを結合するには至らず、各々別個に稼働するものとなっている。）

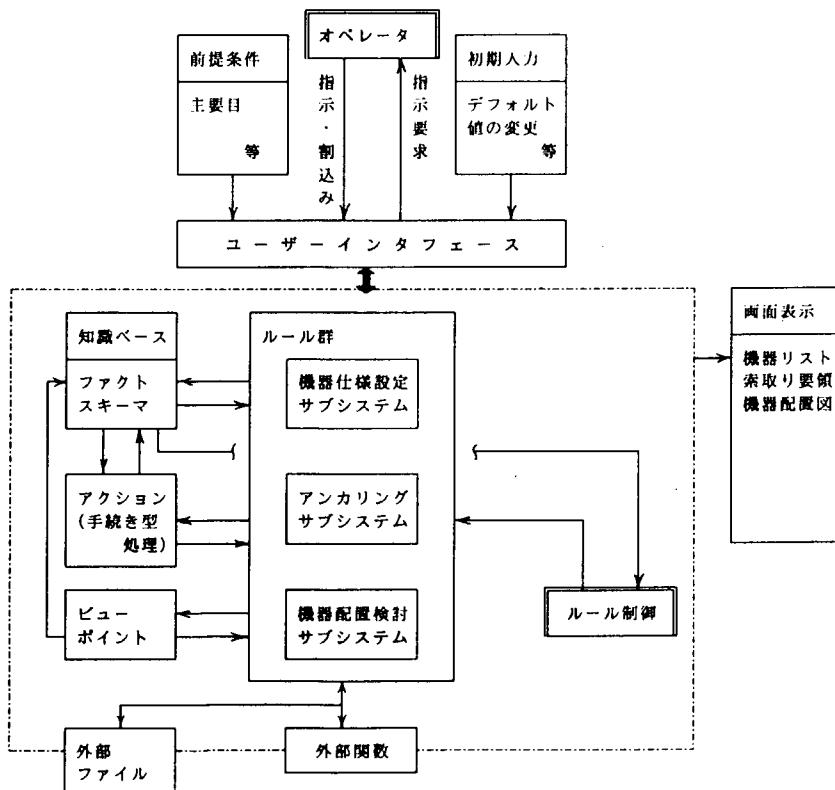


図 2.2.4 システムの概略構成

仕様設定と合わせた機器の総合配置検討の支援という点で本システムの特徴を纏めると、以下の通りである。

- 対象物の操作知識（仕様を設定する、対象物を配置する、干渉チェックする等）は、IF～THEN～形式のプロダクションルールで表現している。
- 対象物の静的な知識、関係情報は、『対象モデル』の考え方を応用し、ARTのスキーマを用いて階層構造化したデータ表現をとった。即ち、機器類の一般情報は、スキーマの属性継承を有効に利用し、ツリー構造の構造化データにより表現した。一方、関係情報については、図2.2.5に例示するように、係船機をその機能を代表している主要部品（ドラム、ワーピングエンド、エンジン）の集合体として表現し、係船金物については金物同志及び係船機主要部品との配置決定構造上の主従関係を表現する。これにより、機器仕様設定と同時に機器配置検討に必要な情報をもつた対象物（機器）をシステム内に生成してあたかも設計者が製品カタログから配置検討に必要な機器（部品）を取り出し、配置検討図上で試行錯誤的に配置検討を行うがごとき配置検討をシステム上で行わせることが出来る。
- 機器の配置は、配置決定構造上の上位にある係船機を第一に位置決めし、その後、下位の係船金物を順に配置していくというトップダウン精密化戦略を取っている。ここで、機器の位置修正の際の試行錯誤的配置検討行為はARTの特徴的機能であるビュー・ポイントを利用し、仮説展開／棄却という形で実現し、配置位置の満足解を得ている。

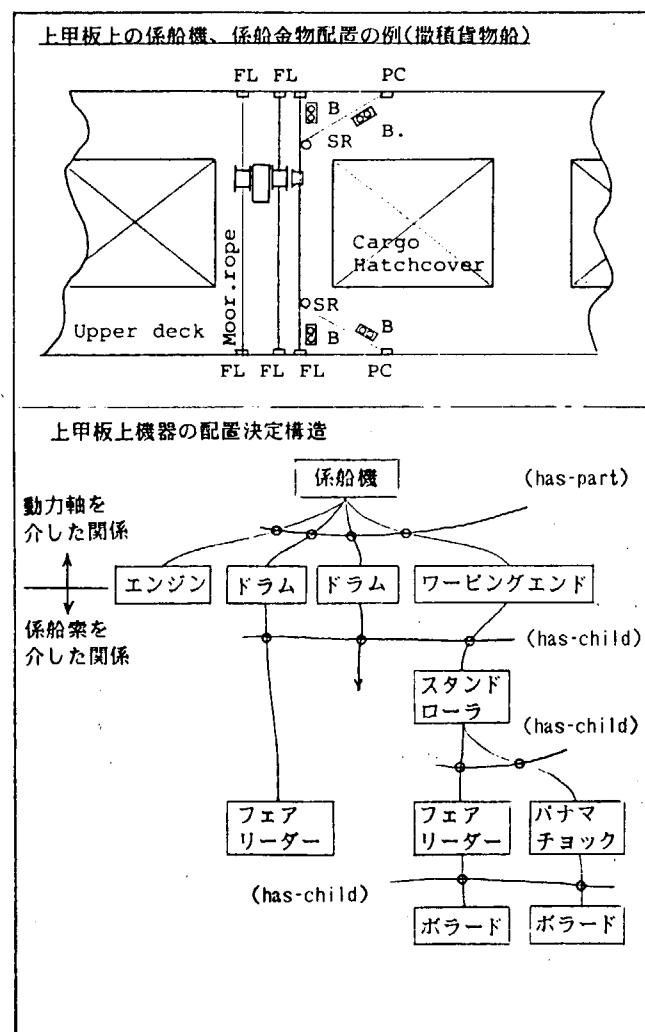


図2.2.5 上甲板上機器の配置決定上の関係

(iii) 調査研究結果

図 2.2.6 に機器配置検討サブシステムの画面出力例を示す。調査研究結果を実施項目毎に纏めると以下の通りである。

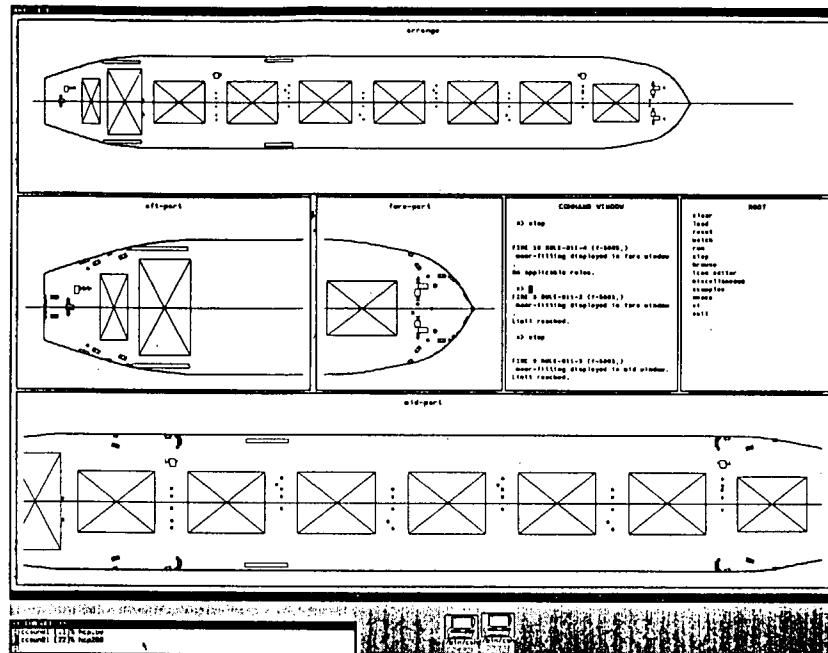


図 2.2.6 画 面 出 力 の 例

- (1) ART機能の調査：試行錯誤的な配置検討行為の実現、知識表現、图形処理について、各々ビューポイント、スキーマ及びプロダクションルール、ARTISTが利用出来る。又、インクリメンタルコンパイル、プラウザ等のユーザ指向の開発環境が提供されている。
- (2) 専門知識の調査：インタビュー等で得た設計者の専門知識は断片的であり、システム開発者側でシステム化対象業務を掘り下げる等の展開が必要である。
- (3) システム仕様設定：システムの仕様設定には、対象業務の現状フロー分析が必要である。更に、業務のどの部分にAIを用いるのかをツールの機能と併せて考慮する必要がある。
- (4) システム詳細設計：設定されたシステム仕様の展開には業務分析によるシステム上の処理の具体化が必要である。又、業務分析結果に対して専門知識をどう表現し、どう利用するか等、ツール機能の利用戦略を固める必要がある。
- (5) 機器表現法の検討：システム上の知識操作を念頭において対象物のデータ表現を固める必要がある。
- (6) コーディング／デバッグ：システム化対象業務の一塊毎に開発が可能であり、モジュール性に富むので基本仕様を押さえておけば、分割分散開発・結合は容易である。
- (7) 考 察
 - ・試作したシステムは、専門知識を深い知識のレベルに掘り下げたことにより、実設計の過程をより忠実に表現したものとなったが、下流での設計変更に対する推論制御（知的バックトラッキング等）のレベルに達し得ていない。今後の重要な検討課題である。
 - ・試行錯誤的な配置行為は、ARTのビューポイントによりうまく表現することが出来る。

- ・対象業務で使用されている専門知識の抽出整理には IPO 手法 (Input Process Output) が有効な場合があるが、判断や経験がより多く必要な業務に対しては有効な手法は不明であり、知識獲得は困難であると予想される。この様な業務をエキスパートシステム化しようとする場合、システム開発の初期から開発者として業務の専門家が主体的に参加するのが効率的である。
- ・ART は、豊富な機能（特に図形処理）とユーザ指向の開発環境を提供しており、2 次元の配置問題には十分であるが 3 次元のそれには図形処理に工夫が必要である。又、設計者が、ART 自身を使いこなすにはかなり長期間が必要である。
- ・システムの仕様設定に於いては、ツールの機能熟知が必須である。更に、初期の詳細設計の段階では不正確な部分が不可避的に含まれているため、プロトタイピングによるシステム開発手法を取るべきである。
- ・『対象モデル』の考え方を応用した対象物表現は、有効である。各々の業務に適した各々の対象物表現があると考えられ、表現指針確立が必要である。

(c) 構造部材情報決定 AI システム

(i) システムの機能要件

構造設計の主業務は、構造部材配置決定と構造部材寸法決定にある。両者の AI システム化にあたっての機能要件は基本的には、(a)船体主要目決定問題、(b)機器配置決定問題で示されたものと同種であり、異なる概念の機能要件は特には存在しない。しかし構造（船殻）部材の数量が膨大であり且つ、部材の大多数は造船所が素材から組み立てるものである為本質的に多品種である点、及び個々の部材配置／寸法決定に際しては強度性能チェックの為の数値計算を頻繁に必要とする点、等には留意する必要がある。これらの機能的特徴は、問題空間の広さ／データ探索領域の広さ／手続き的解析処理の多用（要すれば既存システムとの結合で対処）という面からシステム要件として重要な因子となる可能性が大きい。

本研究では、第 2 世代の代表的エキスパートシステム構築用汎用ツールである『 ART 』を用いて、上記の懸案項目を検証する目的でエキスパートシステムの試作を 3 件行った。初年度の試作は『 ART 』の提供する AI 的プログラミング環境を把握する事を主眼において比較的に範囲の小さい問題、『 撤積貨物船のミッドシップ縦通構造部材配置設計支援 』を扱った。第 2 年度の試作では、実用面での有効性把握を主眼において相対的に範囲の広い問題、『 油槽船のミッドシップトランシング初期設計支援 』及び『 油槽船の前後部トランシング倣い設計支援 』を扱った。3 件とも緻密な局所的最適化よりも、経験的知識に基づいた全体構造バランスの創造／調整作業が主体となる問題であり、エキスパートシステム化が期待される業務分野である。以下にシステムの概要と得られた知見とを紹介する。

(ii) 試作システム概要

(a) 撤積貨物船ミッドシップ縦通構造部材配置設計支援システム

本システムは基本計画に於けるミッドシップのタンク配置、容積／構造に関する検討支援を想定し、①主要部材配置決定と②二重底最適化のサブシステムに分けて試作を行った。①は船体主要目等の前提条件と適当な初期条件の下で実績／工作性／船級規則要件を満足し、容積調整を行い、主要部材配置を求めるシステムである。②は縦通部材の中の二重底部に限り最適化し、内底板板厚／ロンジ型鋼寸法／材料費／溶接工数をパラメータとしてコストが最小になる最適解を求めるシステムである。

(b) 油槽船ミッドシップトランシング初期設計支援システム

本システムは現在の設計手順をトレースする方針で、初期構造配置／寸法案生成、不具合点抽出、不具合点解消方針の立案、構造配置／寸法変更、設計案のコスト評価、の各ステージ毎に設計者を支援する機

能を持つものである。又、既存手続型システムとの頻繁な結合を念頭において簡易強度計算外部プログラムとのオンラインリンクを取り入れた。但し、他の機能は全て閉じた『ART』の世界内で実現する方針を採った。尚、設計対象規模の影響を把握する為に、設計対象の構成要素数、属性情報量は少ないもので試した後、段階的に実際の設計で必要な数に近いものに拡張した。

(i) 油槽船前後部トランスリング倣い設計支援システム

線図フェアリング及びランディング後の既存CADシステムのデータベースから各フレーム断面位置での縦通部材データを取り、上部ミッドシップトランスリング寸法データを参照して船型に合った各フレーム断面のトランスリングを自動的に倣い設計するシステムである。試作の範囲はトランスリングのみとし、スチフナ／プラケット等は対象としていない。ユーザがミッドシップのトランスリング形状を確認後フレーム番号を入力すると、システムは縦通部材断面の表示／船体形状のチェック／形状に倣ったトランスタイルの選定を行い、トランスリング設計案を表示する。

(ii) 調査研究結果

(i) 散積貨物船ミッドシップ縦通構造部材配置設計支援システム

開発者が抽出した約30の設計知識を、各部の主要部材配置及び全体の容積調整に関する知識に大別した約150のルールに展開して、一応稼働するシステムができた。（実用システムでは数百の知識を要すると考えられる）二重底の最適化にはビュー

ポイント機構（仮説型推論）を用いて複数の仮説を展開／破棄し、最適案に絞り込む手法を試みた。

『ART』の持つプロダクションルール／フレーム表現及びビューポイント機構の動作／適用方法が把握できた。又、仮説型推論が最適化の方法として非常に有効である事が確認できた。但し、ルール間の関係を余り考慮せずシステム設計を行い、ルール追加による競合解消を重ねてゆくとルール間の依存関係が複雑になり、拡張性に乏しくなる事も判った。

(ii) 油槽船ミッドシップトランスリング初期設計支援システム

今回の試作は、『ART』の提供する種々の機能を多用するには至らなかった。

AI的システム化が達成できたのは、初期構造配置／寸法案生成、不具合点抽出ステージの支援部分であり、構造配置／寸法変更、設計案のコスト評価ステージはパラメータの演算／表示機能の整備に止まった。又、不具合点解消方針の立案ス

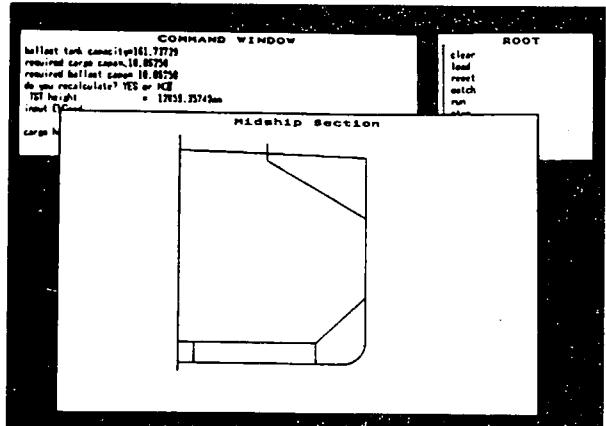


図2.2.7 出力図の例

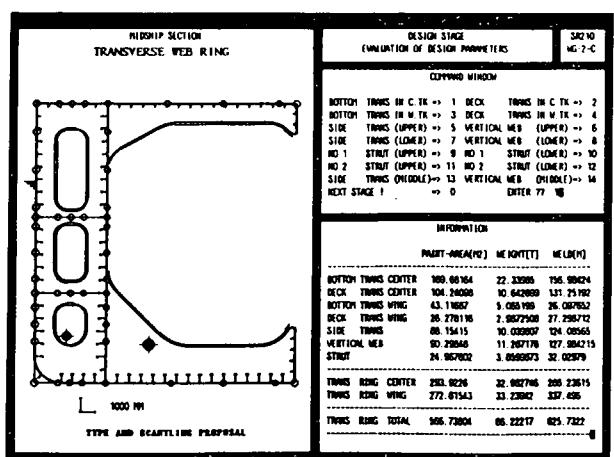


図2.2.8 出力図の例

テージは充分な検討ができなかった。手続型外部プログラムとのリンクは、データをファイル渡しで行う方法（引数渡しに比較して大規模向きであり、より一般的）を使って達成できた。

システム化が実現できた範囲内からAI的アプローチの利点は種々確認されたが、反面、システム化が充分にできなかつた範囲からは、現在のエキスパートシステム構築環境の問題点（特に、大規模問題を扱う場合のパターンマッチ型推論機構の問題）も把握された。

(iv) 油槽船前後部トランスリング倣い設計支援システム

システム化を行ったのは、入出力画面設定、主要目等入力設定、ホスト/EWS間データ変換、縦通部材データ読み込み、構造部材のフレーム表現、船体形状チェック／トランスタイプ変更、船体形状に倣った幾何計算、構造部材の図形表示部である。倣い設計に於いて特にAI的な部分は、設計者の無意識的な船体形状の認識とこれに適するトランス部材の配置／形状選択作業であるが、図形処理ルーチンと『ART』のプロダクションルール及びフレーム表現で実現する事ができた。本システムでは枠組みの整備の為に、データ変換／読み込み／幾何計算等で70%がFORTRANとなりAI的な部分は少なくなったが、一旦枠組みが整備されればAI要素を種々取り込む事により、システムの更新／拡張が可能である。

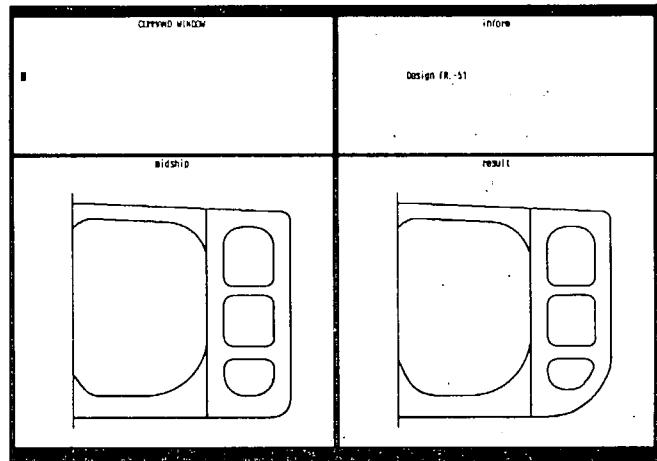


図 2.2.9 出力図の例

(v) 考 察

3件のシステム試作を通じて、現時点の代表的エキスパートシステム構築支援ツールの概要を把握する事ができた。以下に考察を述べる。

- ・プロダクション型／フレーム型知識表現言語、前向き／後ろ向き推論機構、オブジェクト指向型プログラミング環境、拡張型黒板モデル、論理従属機能、等、現時点で存在するAI的ソフトウェア技術の大半が統合的に実現された汎用ツールであり、個々の知識表現に際しては自由な組合せで利用できる為、適用業務範囲が広い。
- ・設計対象、及びその不定長の属性情報を任意の時点で容易に参照／定義／抹消できる環境が実現されており、柔軟さが求められる設計業務のシステム化に適している。
- ・FORTRAN/C言語、等、で記述された外部プログラムとのリンクも、データの引数渡し／ファイル渡しの各手段で行える様に配慮されている。FEM強度／振動解析等、"大規模な手続型処理による評価"を多用する構造設計分野での基本的要件を一応満たしている状況にある。
但し、以上は小規模な問題を扱うシステム、或いは大規模システムの雛型を開発する場合に言える事であり、扱う設計対象／属性情報量が大きくなると下記問題があるので実用化に際しては特別な準備、プログラミング技術／支援環境（ソフト、ハードのメモリー容量／実行速度）の改善、が必要である。
- ・知識の事前整理と、知識相互間の関係を明確化し初期段階に於ける充分なシステム設計と対象のモデリングを行っていないと、知識の追加に伴う拡張が困難になる。
- ・小規模問題に便利な現在の方法論を不用意に大規模問題に適用すると、パターンマッチ型推論機構の特性

上級数的に拡大するメモリー容量を必要とし又、動作が遅くなる場合がある。他業界の実用化例では、運用システム向けには更新性を犠牲にしてルール／属性の記述方法を書き改め、実行効率を改善している事も判った。

- ・エキスパートツールでシステム化する範囲は効果的な部分に限定し、既存のシステムで効率的に実用化されている部分には、無理な適用を避けるのが望ましい。
『ART』ではLISPを記述できるので、LISP関数の積極的利用も考えられる。
- ・但し、大量の入出力データを扱う強度計算等の外部プログラムの実行に際しては、ツール内部での前／後処理が煩雑であり、高度なプログラミング技術を必要とする。

(d) 工程管理支援システム

造船における船殻の製造工程を対象として、エキスパートシステムツール(OPS83)を用い工程管理システムの試作を行った。

(i) システムの機能要件

工程管理(日程計画)は製造部門において最も重要な業務の一つであって、ベテランのノウハウを最も必要とするこの分野へのAIの適用については今までいくつかの産業分野で試みられ研究がなされてはいるが、未だ決定的なものが示されていないのが実情である。以下に工程管理に対する一般的な機能要件を上げたが本試作システムではこの内イ、ロ、ハ及びニに絞って作成した。

- (イ) 種々の条件に基づくシミュレーションが可能
- (ロ) 制約条件、優先度入力及び変更の容易性
- (ハ) 製造対象と仕事量、所要日数等管理量の確実な裏付け
- (ニ) 変更、環境変化の規模に応じた影響範囲の提示
- (ホ) 大量のデータの取扱が容易
- (ヘ) シミュレーション結果に基づく問題点、解決策の提示

(ii) 試作システムの概要

まず試作システムのデータとする為現在造船所で使われているスケジュールの一例について調査を行った。その中でスケジュール作成時の根拠となる仕事量の算出方法、さらに計画者の知識(どのような条件に基づいて計画の作成を行っているか)についても概略的な調査を行い、本試作システムの条件設定の基礎とした。さらにPERT手法に基づき個々の工程の仕事量設定、実行順序確定の為のデータ作成用プログラムを作成した。これらの準備の後、比較の為手続き言語(□)とエキスパートシステムツール(OPS83)の両方で山積み山崩しプログラムを作成した。先に作成したデータを用い、両プログラムにて山積み、山崩しを種々の条件を変えて実行した。その際最適スケジュールについても出力を行った。システムの概略構成を図2.2.10にまとめた。

(iii) 調査研究結果

現状のスケジュールについて、各工程のリードタイムにはかなりの余裕を含んでおり、粗い計画精度の調整を行っていることがわかった。また仕事量算出についても設計データから自動的に供給されるようになつておらずマニアルにて算出することから精度的にもかなり曖昧なものとなつてている。計画者の知識については未だ確定された手段もなく充分に獲得されたとは言えないが本システムでは基本的な制約条件として人員の制限と定盤の制限を選択することとした。システムの範囲としては加工から組立までとして実行した。手続き型言語とOPS83との比較について、山崩し処理では条件が簡単、規模が小さいこともあって大きな

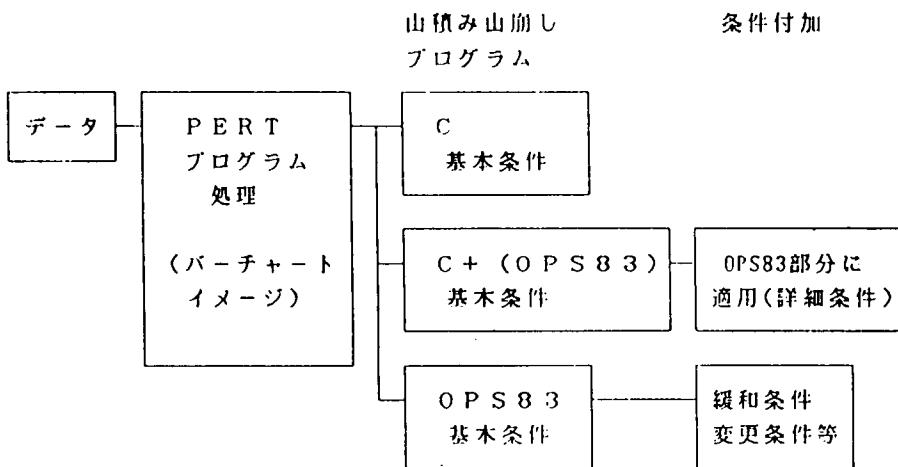


図 2.2.10 システム概略構成

差はなかった。しかしこの点でOPS83の利点が確認できた。

- (イ) ルールの再構成が簡単に行えた。
- (ロ) 1つのルールで多くの条件を重ねる評価が可能であった。
- (ハ) 場合分けを意識せず1つのルールを用いることができた。

出力の一例として図2.2.11に山崩しの例を示す。

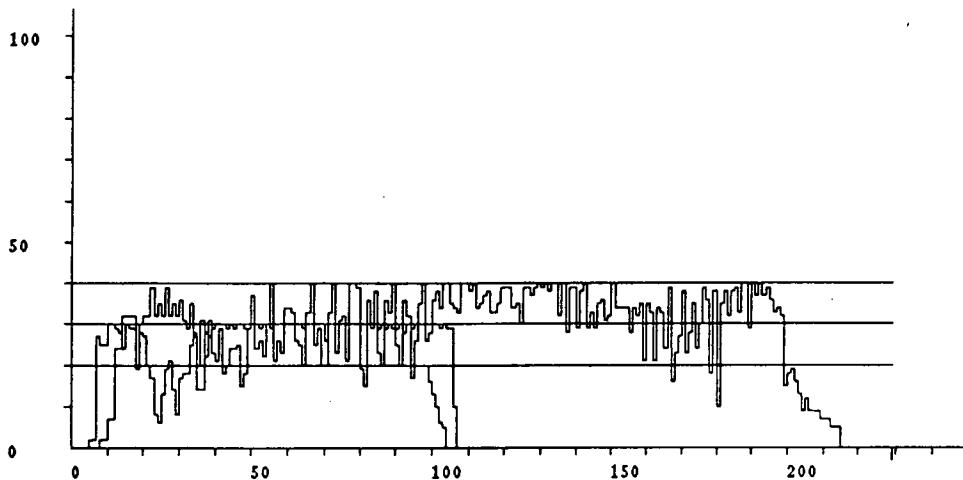


図 2.2.11 (出力例) 山崩しの例

(IV) 考 察

・現状について

現状では管理量や仕事量の算出が詳細に行えないために（データの不備、仕事量の根拠が曖昧、システム化されていない等）スケジュールのメッシュを粗くし、余裕をもたせる事によって対処している。このことから将来の工程管理システムには管理量や仕事量の詳細且つ的確な提供が不可欠である。

・知識獲得について

計画の専門家が計画時無意識に用いる環境設定条件（制約を含む、シミュレーション結果の評価等）の抽出及び設定は非常に多様化しており複雑である。従って知識獲得にあたっては充分なモデル化を行い優

先度を加味した詳細な条件設定を行う必要がある。また制約条件は時期や周辺環境によってめまぐるしく変わるために計画者がその都度自由に簡便に換えられるようなユーザインタフェースが必要である。

- ・エキスパートシステムツールについて

ツールを使いこなすまでに相当の時間を要したが、より複雑なシステムとなった場合、ルール間の無矛盾性のチェックが充分に必要であり、開発を支援するためにはデバッグ機能の充実が望まれる。さらにこのツールにはグラフィック機能が無くバーチャート等のプログラム作成やOPS83とのリンクに時間を要したこともあるってこれらを完備した、あるいは接続の容易なツールの採用が望ましい。

仕事量算出プログラム、グラフィック作成プログラム（いずれも手続き型プログラムによる）とエキスパートシステムツールとの結合が行える点は必要な機能であり、造船CIMSという巨大なシステムの中に位置づけられるサブシステムとしては不可欠であろう。

(3) 結果に対する評価と問題点の抽出

AI技術の応用分野であるエキスパートシステム、ヒューマンインタフェース及び画像認識について今回の調査の結果、下記問題点が確認された。

(a) エキスパートシステム

(i) 現在のエキスパートシステム構築ツールは種々な支援機能が備わっているが、システム化の方法論が整備されていないため、開発に当っては相当量の試行錯誤的作業が必要となる。殊に、ルールや対象モデルが小規模な場合はさほど問題にはならなくとも、システムの規模が大きくなると、開発効率、知識ベースの管理、プログラミング技法等において問題が生じるため、これらについての具体的な方法論が必要である。

また設計用システム等では大規模な知識ベース、既存の大型技術計算とのリンクが必要であるが、現在の汎用ツールでは充分な機能を有していない。

(ii) 設計過程に関する知識の獲得は困難である。その理由の一つは、専門家は状況に会って初めて知識を思い起こすためである。設計対象を良くシミュレートできるツールの開発が必要である。またデータ構造／ルール記述法を決定するに当っては、システム化業務／設計対象について熟知している必要があるので、システム開発者は該当業務の専門家とすることが効率的であるが、高度なツールほどその機能理解に時間がかかる。

(iii) 設計問題では対象が構造、機器、配管といった物理的なモデルであることが多く、これらをエキスパートシステムの枠組の中で、その幾何学的・位相的制約、データをどう取扱うべきかが不明確である。

(iv) Smalltalk-80は開発環境としては優れている。それでもシステムの基本メカニズムの部分からすべて開発するというのは大変である。

将来の拡張性や開発効率の点で開発には汎用ツールを利用するのが適切である。但し、造船固有の特徴が生かされるように推論機構等基本部分にもある程度の改造が加えられるものである事が望ましい。

(v) 大規模な対象を扱う問題のエキスパートシステム化は現状では容易ではない。エキスパートシステム化に向いた業務の選別について、効果を含めた充分な吟味が必要である。

(vi) 知識表現については、知識間の関係を整理／明確化し、ルールに展開する際には将来の拡張性を念頭に置いて構造化を図っておくことが重要である。特に単純知識と、知識間の関係に関する知識及び知識の制御に関する知識とは分離するのが望ましい。

(vii) 工作では、管理量、作業量に関する情報が著しく欠如しており、この情報の充実がエキスパートシステム化以前の問題として重要である。

(b) ヒューマンインターフェース

パターン理解システムやマルチメディア対応システムが機能的な制約はあるが徐々に整備されてきている。造船に於いてもその機能レベル、特徴を十分に把握し、各業務分野に応じた具体的な利用方法を検討し、情報を容易に取扱う環境を整備することが重要である。

(c) 画像認識

現状では認識の対象が小型の部品レベルのものが多く、また形状も簡単であり、造船の必要とする要件を満たしていない。造船への適用に当っては対象を更に絞り込み単純化する等の検討が必要である。

2.2.3 研究開発課題と解決策

現在の我々が用いることの出来るエキスパートシステムの要素技術のもとでは開発対象とする領域の選択が極めて重要である。

エキスパートシステムの応用対象は、解析型（解釈、診断、制御）と合成型（計画、設計）に分けられる。解析型は開発事例も多く、ツール・開発手法とも整備されつつあり、開発は比較的容易である。一方合成型は探索空間／解空間が広く、方法論も未確立であることからシステム化は難しい。従って、開発対象としては、一気に高度な領域を目指すのではなく、解析型問題（工作的モニタリングや計画・設計での結果の評価、問題点の指摘など）と比較的実現性の高い合成型問題（主要目等のバラメトリック設計、各種配置設計、スケジューリングなど）から取組み、高次推論等の基礎技術の進展につれ、順次高度化を図っていくことが適切である。開発に当っては知識表現、推論制御及び問題解決の各要素技術の機能的特徴と、開発対象となる業務の各タスクの特徴を分析し、これらを併せて類型化しておくことが必要である。特に、専門家の知識、ノウハウの分類・整理といった業務寄りの作業が重要である。

推論制御などAIの要素技術について言語レベルから造船固有のエキスパートシステムを開発する必要はないと思われる。ユーザのカスタマイズ機能を柔軟に取り込める機能を持つ汎用ツールを選択し、造船向けのシステム開発環境を整備することが必要である。

造船の固有の課題としては

- 造船に適した計算機内における対象モデルの表現法の確立
- 造船関係者が受け入れ易いヒューマンインターフェースの検討
- 造船で既に用いられているシステムとのインターフェースの明確化

などの関連技術が、造船エキスパートシステムを構築するにあたって重要な役割を果す。

2.3 造船広域情報通信システム開発課題の検討

2.3.1 現状と問題点

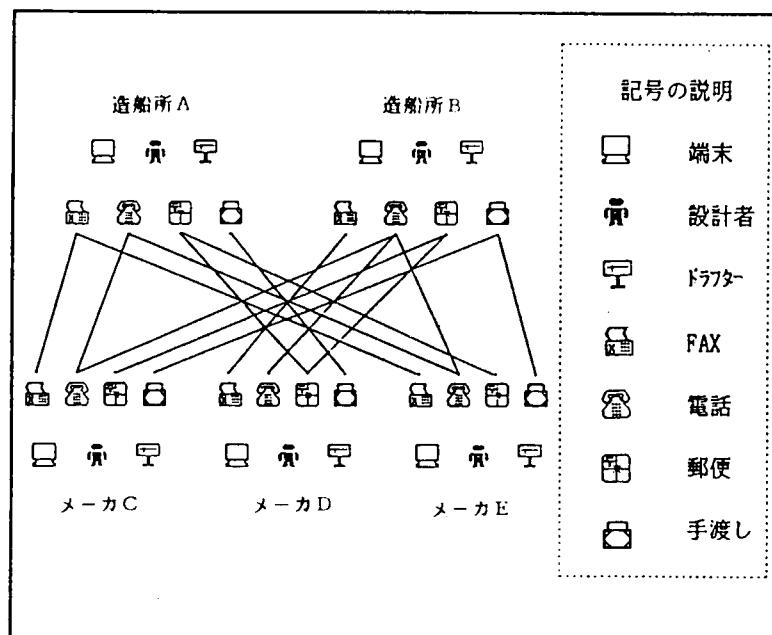
(1) 調査研究の目的

近年の通信の自由化を背景として、高度情報化社会が到来しつつあり、造船／造船関連業界としても積極的に情報通信システムを導入して、競争力強化を図る必要がある。そのためには利用体制を検討し、さらに、具体的な造船情報通信システム構築のための実行計画を立案し、総合的な投資対効果の検討を行うことが必要である。

造船業は極めて膨大な情報を処理する業種であり、これらの情報量の大部分は造船所と関連企業間で伝送・処理される。既に、各企業内では電算化、CAD/CAM化等のシステム化が推進されつつあり各々効果を上げてきていている。しかしながら、企業外との情報交換・処理の分野では未着手であり、この分野での労力・時間の低減が大きな課題となっている。

造船関連企業各社と造船各社間の通信手段を例に取って調べてみると、電話、テレックス、ファックス、郵便、或いは面談など様々であるが、情報の内容は特定企業間の情報よりも共通の情報の方が遙かに多く、そのため同じ情報を繰り返し伝達しているのが現状である。そこで図2.3.1に示すように情報サービスセンター（仮称）を設置し、VAN（付加価値ネットワーク）を介して情報交換を行うオンライン情報通信システムを導入すれば、情報交換をスムーズにまた効率よく行え、多大なメリットが得られると予想される。

情報伝達の現状



情報伝達手段の統一

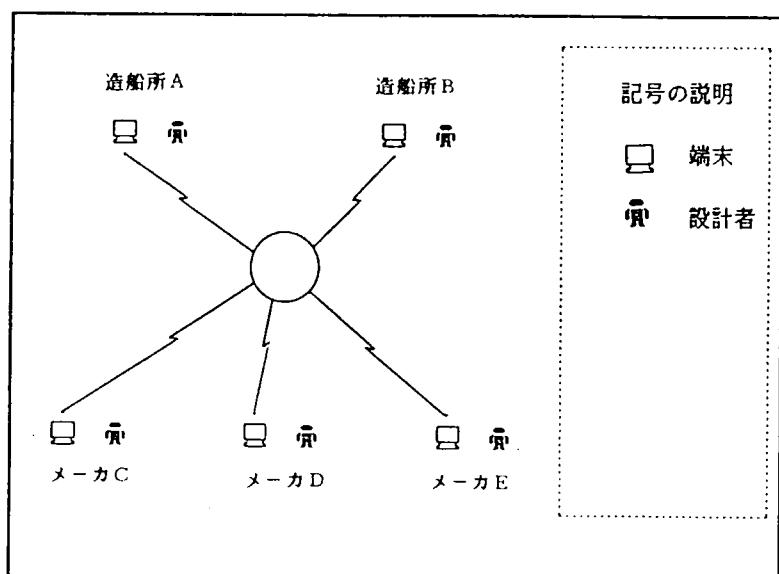


図2.3.1 造船広域情報通信システムの基本構想

一方、新世代造船システムとして客先ニーズ、設計、加工、組立といった造船に関する全情報、全工程をコンピュータで統合し、種々の要求に柔軟に対応できる生産システムを開発検討中であるが、造船業はアセンブル産

業と言われ、多量の機器が造船関連企業より購入される。これら機器に関する極めて膨大な情報が存在し、これらを効率よく新世代造船システムに取り入れることが課題である。従って、新世代造船システムでは造船所と関連企業間のネットワークが重要な柱の一つである。

このように造船／造船関連業界をカバーする造船広域情報通信システム（造船VAN）の構築には、運営体制の確立や、伝送フォーマットの標準化や、データベースの作成など実用に供するまでには多大な費用と時間が掛かるが、新世代造船システムの外部情報通信環境の整備の立場からも重要であり、また造船VAN単独で考えても情報交換の効率化という観点から十分効果が期待される。

以上の立場から造船関連企業各社と造船各社との情報通信システムのあり方について検討し問題点の抽出と開発、実用化のための技術的課題を明らかにすることを目的に調査研究を実施した。

(2) 調査研究の範囲及び内容

将来の造船VANに対する開発課題を明らかにするために、まず、ニーズ・問題点の調査を実施し、この調査結果から造船VANに要求される機能、情報の範囲、運用効果等、造船VAN構築のための具体的要件を整理し、概念設計を行った。更に、概念設計に基づき具体的システムの構築について費用見積、及び実行スケジュールの検討などを実施し、システム計画書としてまとめた。

最後に、実際にシステム構築をする際の規模、範囲等を明確にし、総合的な投資対効果の検討を行い、造船VANの実現性・実現時期について評価した。

ニーズ・問題点の調査はアンケート調査で行うこととし、5年後程度を想定したVANの構築に対して、企業の範囲、情報の範囲、情報の一元化、生産コスト面の効果、運営方針、秘密情報漏洩防止、開発方法等について調査した。調査は造船所と機器メーカー間で特に情報のやり取りの多い新造船の機関関係の設計作業を取り上げ、造船所と機器メーカー合計99社を調査対象としてアンケートを実施した。

概念設計では、アンケート調査及び文献調査結果を総合して、情報通信システムの目的、主要機能構成、入出力、運用形態、開発手順について取りまとめた。

造船VANの投資効果を検討するために概念設計をベースに、実際のシステム構築について検討し、システム計画書としてまとめた。システム体系、開発方式、概算費用、所要開発期間等についてシステム計画書に照らし合わせて新業務形態を検討し造船VAN利用による造船所及びメーカーの所要工数の減少から投資対効果について評価し、造船VANの実現方法について検討した。

2.3.2 調査検討結果

(1) アンケート調査

アンケート調査は造船VANのニーズ・問題点を中心に行った。調査結果は以下の通りであった。

(a) 対象企業の範囲

造船VANの加入範囲は、メリットの大きい造船所と関連機器メーカーを中心とすることが望まれ、更に関係の深い船級協会や工業会の加入に対するニーズが強かった。

アンケート調査はネットワークの秘密保持を前提としていたが、メーカーと造船所は守秘に対する具体的保証を加入の条件として要求している。ともあれ、造船VAN構築に対するニーズの確認が出来た。

(b) 対象とする情報の範囲

基本設計から完成引渡し迄全ての情報についてネットワークに乗せて、利用したいと考えており、その中で基本設計段階での利用ニーズがやや高い。また情報の機密保持に対しては不安を持っており、見積りや引合い情報についてはニーズが低い結果となっている。また、承認図など、契約に関係のある図書は、ネットワーク

上でも認められることを希望している。また、完成図についてはその性格上印刷が望まれるのでニーズが低かった。

(c) 情報の一元化の可能性

造船VANによる情報交換の統一のために、情報を一元化／標準化するべきものと、一元化／標準化するべきでないものがある。一般的にメーカから造船所に配布される製品情報については一元化の要求が強い。建造船毎の見積りなどは第三者には見せないものであり、一元化すべきでないとの意向が強い。また、造船所側では図面情報を一元化することを望んでいる。一方、一元化のための基礎として製品情報の標準化、所掌範囲の統一、情報の記載項目の統一、情報のコード体系化等が上げられているが、業界全体として標準化は遅れている。

(d) 生産コスト面の効果

造船VANの導入による生産コストに対する効果については、伝達の簡略化、迅速化、正確化等による効率向上が考えられるが、アンケート調査結果では造船所に比べてメーカ側は少ない効果しか期待しない傾向がみられる。これはメーカでは情報作成そのものは造船VANの有無に拘らず必要であるためと考えられる。造船VANによる効果は工数減など直接的効果の他に、短納期化や開発余力の創出など波及効果も期待できるが具体的にはまだ明らかでない。

(e) 運営方針

造船VANの運営方法は、VANの規模、形態により色々考えられるが、選択は運用性、経済性がポイントである。現在既に多くのVANが稼働しているのでそれらを参考にすれば良い。

システムの保守については物理的な品質維持だけでなく、情報のアップデートなどソフト面での保守も大切である。データベースの鮮度を保ち利用者を確保し続けるために、情報提供者は常に最新のデータを準備しておく事が重要である。造船VANでは大半の情報はメーカがメインテナンスする事になる。

また、保守費用を抑えるために専用の保守要員は置かず、既存のVAN業者等にメインテナンス委託するのが良い。その他システムの信頼性の確保のためにデータファイルの二重化などの対策も考慮する必要がある。

費用分担は受益者負担が原則であるが、課金については文字情報だけではなく、イメージ情報を多く取り扱い、ピット課金方式では膨大な費用が発生することになるので、料金の設定には配慮が必要である。

(f) 秘密情報漏洩防止

秘密情報漏洩防止はネットワーク加入条件であり、十分検討する必要がある。現在一般的に採用されているID、パスワード方式はまだその信頼性について確認されていないが、十分実用的な機密保持が可能である。今後この分野については他のVANの動向を注目しておく必要がある。

(g) 開発方法

開発方式についてはシステムの規模、構成で大きく相違するが、データベースサービスと蓄積交換サービスを中心と考えれば、既存のVANを利用すれば簡単に実現できそうである。しかしながら、造船VANには業務の標準化やデータの標準化等の基盤整備が重要であり、業界として遅れているこの分野での前進が必要である。その意味で早急に造船工業会や船用工業会の中で造船VAN構築に対する検討を行い、業界として標準化などをを行う運営母体の組織化が望まれる。

(2) 概念設計

ニーズ・問題点の調査を基にして造船VANに要求される具体的要件について整理し、以下の通りまとめた。

(a) システムの目的

造船VANは造船所と関連メーカとの情報の伝達効率化を狙うものとし、将来は参加対象企業を段階的に他の

団体にも拡大して行くものとする。

対象情報は引合い問い合わせ業務から完成図書に至る設計情報の全般とする。なお本システムの特徴は文字、グラフ、図形が混在した複合文書情報あるいはCAD化された図形情報の通信授受を可能とさせることにある。

造船VANの構築計画は第一ステップとして既存VANを使って機能を実現させることとし、通信回線の構築費発生の回避及びシステムのソフトウェア開発費を最小に抑制するなど廉価、省力、短納期化を目指したシステムを計画する。

(b) 主要機能構成

造船VANは共通データベース及び企業間データ交換サービスによる設計情報の授受を中心とする。データベースサービスは効率的運用を行うために造船情報サービスセンター（仮称）内に常時所有しておき要求時に迅速に対応できるようとする。また、企業間データ交換サービスについては相手先の状況を気に掛けることなく通信を実行できる利点を持つ、造船VANを経由した電子メールとする。

また、伝送される情報の内容は文字数値データの他に図形情報（イメージ、CAD）を扱えるようにする。情報は一度、情報サービスセンターに書き込んでから相手先へ転送する。通信処理機能として同報通信や親展プロトコル変換及びデータコード変換を可能とし、情報処理機能としてCAD図交換処理、ベクトル／ラスターコード変換処理などを可能とする。

システムの構成要素としてはセンターシステム、全国規模の通信回線網及びアクセスポイント、入出力端末とする。また加入各社の保有するコンピュータの通信仕様が異なることが予想されるので造船業界としてニーズにあった標準的な通信手順を採用するものとする。

(c) 入出力

入出力端末については利用するサービス形態により異なるが、技術情報等のデータベースを利用するためには、文字数値データを扱う一般のデータ端末の他に、複合文書等イメージ情報の混在するデータの入出力処理機能を有する多機能端末を考慮する。各々の設備台数については加入各社の運用形態により決定される。

(d) 運用形態

造船VANを業界に定着させ発展させて行くためには、正しい評価としっかりした運営体制が重要であり、広報活動を積極的に行うと共に、情報に対する責任の所在などについても明確にして行く。

一方、造船VANでは情報の共通化がシステムの発展につながるので、標準化を強力に推進するものとし、秘密情報についても少なくとも書式の統一までは進める。また、将来は手続きやフォームの標準化だけでなく、製品自体の標準化をも目指した標準管理委員会等を設置し、そこで標準化の推進及びメインテナス管理を行う。システムの安全性、信頼性についてはシステムの故障／停止により影響が甚大となる恐れがあるのでバックアップ機能を強化し機器の複数設置と保安システムの導入等を考慮する。

(e) 開発手順

造船VANの構築のための開発手順は、まず、準備委員会を設置し、開発実施計画の策定及び運営の母体となる造船情報サービスセンターの運営要領を制定する。造船情報サービスセンターでは開発実施計画に基づき、各種サービスソフトの開発、データフォーマットの標準化、データベースの作成等具体的な作業を行う。開発期間は運用テストを含めて概ね2カ年とする。各サービスの実施は運用体制が整ったものから順次段階的に開始する。

(3) システム計画書

造船VANの評価ための見積には概念設計の具体化が必要であり、システム計画を以下の通りまとめた。

(a) 造船VANの概要

造船VANではカタログ／一般技術情報、及びその他の業務共有化可能な情報を業界全体で一元管理するものとし、電子メール、CADデータについては標準フォーマットを制定し、設計情報の蓄積交換を可能とする。また、業界内で流通する標準図のやり取りの手順を構築する。

実現方法としてはVANシステム側で開発解決するもの、業界としての運用標準化によって解決するものがあり、順次段階的に進めていくものとする。造船VANの主要機能とその対象業務は表2.3.1に示す通りとする。

表2.3.1 造船VANの主要機能とその対象業務

主 要 機能	対 象 業 務
業界データベース	カタログ／技術情報の登録検索処理
電子メール	オンラインによる設計情報交換 (見積書送付／承認図等に対するコメントやり取り)
電子掲示板	新製品ニュース／業界ニュース
CADデータ変換	異なるCADデータ間のフォーマット変換処理
そ の 他	CADライブラリー検索処理 メーカプログラムの利用

システム構成を図2.3.2システム全体構成図に示す。VANセンターのホスト機にネットワークを通じて各端末またはユーザホスト機からアクセスする方式とする。この際通信プロトコル等の統一のために業界標準手順を定めその仕様にあったものを採用する。このVANシステムの利用方法を図2.3.3システム利用イメージ図に示す。

(b) システムの構築と運営

造船VANに乗せる対象情報が設計データであり、従来の業界VANでは考えられないほどのボリュームを扱い、また複合文書による業界電子メールといった先進的なアプリケーションであり、先例も少ないとから慎重なステップを踏む必要がある。従って、対象メーカ、対象機器を絞りテスト運用によるノウハウの蓄積等を経て全体システムの構築に進む必要がある。

VANのシステム運営機能には業務運用、システム開発／メインテナンス、システム運用、ネットワーク運用がある。これらのシステム運営をVAN会社が全て行うケースもあるが、業務運用については、ユーザニーズを的確に把握し、標準化作業等におけるユーザ間の調整等を円滑に行うためにユーザが集まって運用会社を設立し、他の機能をVAN会社に委託する形態が一般的である。造船VANにおいても業務運用は造船会社、メーカの出資による造船VAN情報センターを設立し(協会または会社)そこで行うこと前提とする。

(c) 費用及び開発体制

システム構築のための費用見積と予想工数削減効果から造船VANの費用対効果をみると、参加企業を業界全体とすれば工数削減効果は費用を上回ることを確認した。

また、テスト運用ではスタート時において開発の必要な項目を避け、設計担当者の操作容易性を高める仕組みを開発するだけですぐにも取り掛かれるサービスを中心とし、本格的システムの構築ではCADデータやフォーマットの変換機能を開発追加して行くこととし、データベースについては有益な情報を最小の労力で登録できる仕組みを開発する。これには検索／登録項目の標準化なども必要である。

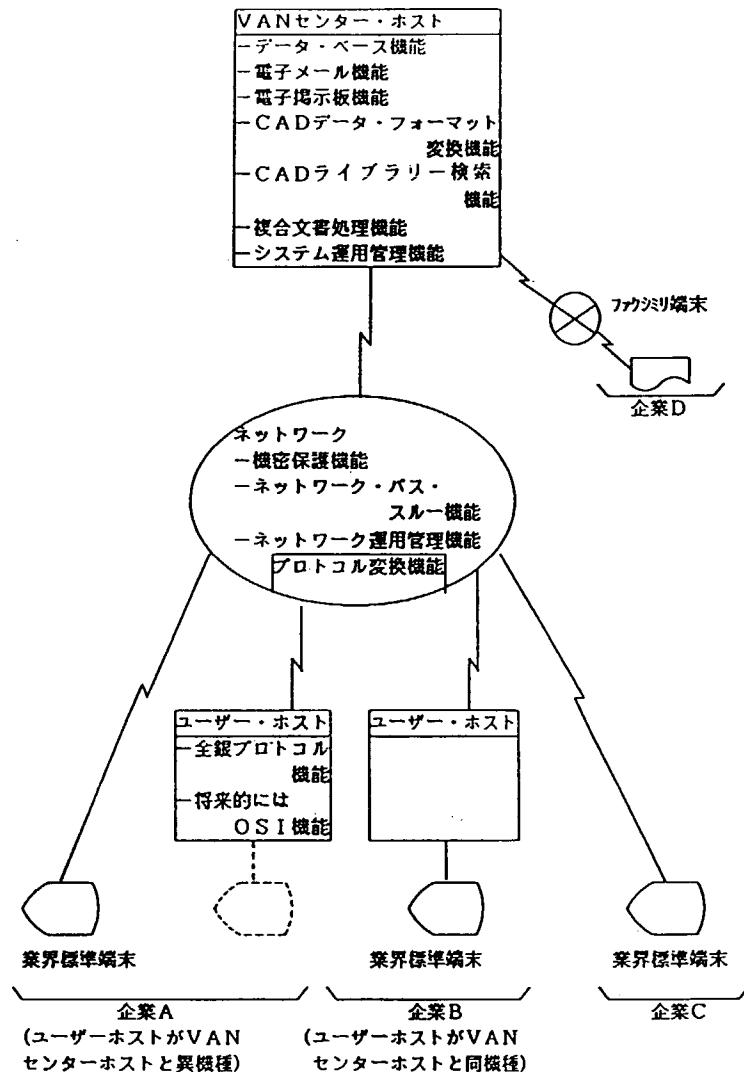


図 2.3.2 システム全体構成図

ネットワーク技術では異機種ホスト間の電子メール及びデータベースでの複合文書のやり取りがデータフォーマットの面で難しいが、当面は業界標準端末を決めて対応する。

CADデータの異機種間の転送については全銀プロトコルの様な標準的なプロトコルをサポートすれば問題はないので、造船VANでもこのプロトコルを第一候補として採用する。将来、OSIに準拠したソフトウェア群が実現されれば異機種間ホストでの高度な通信が可能となるため、その際は積極的に採用する。

当面の開発体制としては運営母体である造船VAN情報センター内に業務運営部隊の他にシステム開発/メインテナンス部隊を設置し、VAN業者の選定、システム設計の実施、CAD調査委員会及びデータベース標準化委員会の設置、スタート時のシステム開発メインテナンスの実施等の業務に当たる。

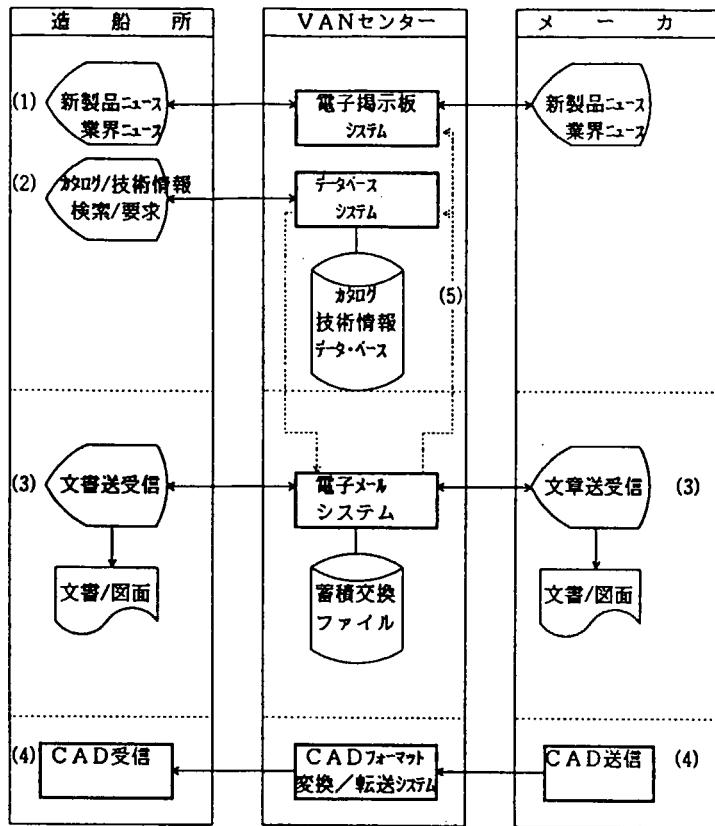


図 2.3.3 システム利用イメージ図

2.3.3 研究開発課題と解決策

(1) 技術面

今回の調査研究で造船VANのあり方について調査し、その概念を取りまとめた。更に、実システム構築の際の技術事項について検討を加えてきた。その中の問題は、主として標準化であり、開発課題としては通信プロトコルの統一、データフォーマットの統一、更にはCADシステムの統一(CADデータフォーマット)である。

通信プロトコルについてはOSIやISDNの普及により統一が進んでおり、当面の問題として造船VANとして何か標準を決めておき、それらの進展にしたがって順次移行すれば良いと考える。

データフォーマットについては複合文書伝送の要求が高く、業界として統一が必要であるが、イメージデータの扱いについては様々な方法が各メーカ等で採用されているので統一は現状では難しいが、イメージ伝送の拡大に連れて淘汰されやがて統一が図られると思うのでスタート時点としては業界として仮の標準方式を決めておけば良いと考える。

CADデータについては各社のCADシステムを統一することが簡単な解決法であるがこれは不可能な要求であり、業界としてIGESの様な中間的な共通のデータフォーマットを持つか、各CADシステムに合わせて直接データ変換を行うか、その併用とするかであるが、これは加入企業のCADシステムの導入状況によるべきである。従って、本調査では問題点として上げるのみとし、具体的には運営母体で決定するものとする。

以上のように技術面での開発課題は運営母体の業務として扱われるもので技術開発的要素は少ない。

(2) 運用面

造船VANの構築に関する開発課題はなんと云っても投資対効果を明確にすることである。VAN化の方向は世の

流れとして疑う余地のないことであるが、造船VANの普及には投資面での負担を軽くせねばならず、負担を軽くするには加入社を増やさねばならずと云う「鶏が先か卵が先か」と云った論議になりがちである。しかし、一方では、造船VANのメリットは現在の業務形態の置き換えだけでも期待できそうであり、更にVAN導入による新たな業務形態が引き起こす効率アップなども合わせ期待できそうである。

また、今回の調査研究では機関部関係の設計作業を中心に検討が進められており、実際の業務では船装関係や電装関係など関連機器メーカーも沢山あり、今回の調査では出なかったメリットやデメリットも有るかも知れない。また、取り扱う情報についても設計情報に限定して検討を進めてきたが、受発注業務など設計情報以外のニーズに対してもネットワークの利用が考えられる。

結論として、今回の研究を通じて造船VANの一応の採算性についても目処を付け、VAN構築に取り組むことに対する意義があると判断するが、やはり今後は業界全体または主要企業による具体的な施策実施の決断を仰ぐ必要がある。

2.4 造船所内情報通信システムの研究と通信システムへの機能要件および開発課題の検討

2.4.1 現状と問題点

造船所内には、建造すべき船の膨大な図面情報、管理情報が走り廻っている。

新世代造船システムでは、これらの情報を効率よく伝達するために造船所内通信システムを構築することが必要と考えられる。

本研究では、造船所内通信システムの問題点として、そのあり方について調査し、開発課題の検討を行った。

2.4.2 調査検討結果

(1) 造船所内情報の調査

(a) 種類および流れの調査

造船所で扱っている情報は、設計による技術情報、生産情報による生産計画情報、工作による生産管理情報に分類できる。

これらの情報は、図面／書面／電話／会話／紙テープ／フロッピーディスクなどによって複雑な経路をたどって流れ、加えて情報の授受は殆どが人の介在により行われている。

このため、次のような問題がある。

- ・情報伝達が不正確
- ・情報訂正が迅速に行われない
- ・必要なところに直接情報が届かない
- ・情報の不備を特定の人の経験や知識で補っている

(b) CAD情報の調査

現状のCADシステムが持つ情報量は、プロダクトモデルにはほど遠い構造情報だけで一隻約2Gバイトあり、それから推測して、次のことがわかった。

- ・現状1隻あたりの全情報量は10Gバイトと推定され、将来はもっと増えると予測される

また、CAD端末とホストコンピュータの通信状態から、次のことがわかった。

- ・通信応答時間は、ホストコンピュータの処理時間が占める割合の方がはるかに大きく、通信時間はすくない
- ・回線効率は低く、回線アクセス時の待ち時間は、極めて少ない

(2) 通信プロトコルの標準化動向調査

通信プロトコルは、公的機関／ユーザ・グループ／実用化実績などにより種々のものが決められているが、それらから標準化動向にかかるものを以下に示す。

(a) OSI (Open Systems Interconnection)

ISOでは、通信プロトコルの国際標準体系として、OSI参照モデルを規定している。これは通信制御には多様な機能が含まれ、その技術進歩や応用分野の拡大に伴って変化する可能性があるので、その多様性と可変性に柔軟に対処し、しかも不必要的までの変更を生じないようにするために通信制御機能を階層に区分し、プロトコル設計の独立性や機能条件の明確化を図るためである。

このモデルは、通信プロトコルの機能を通信網に近い方を下位層とし、アプリケーションに近い方を上位層とした7階層に分け、各階層の役割すなわち、サービスと機能を定義している。

LANに関しては、OSI参照モデルを適用することになっており、現在、ISO/TC97部会で標準案の作成作業が進められている。

(b) MAP (Manufacturing Automation Protocol)

GM社が中心となって推進しているOSI準拠の工場用LANプロトコルである。

アキテクチャは、OSI参照モデルに従った7階層をもち、各層共基本的にISOのプロトコルを採用しているため、多くのユーザにより国際標準として期待されている。また、FAメーカーもMAP仕様の製品開発を進めている。

MAPの特徴は、工場業務では応答の実時間性、および配線の容易さから、トークン・バス方式を採用した点にある。

(c) TOP (Technical and Office Protocol)

ボーイング社により推進されてきたOSI準拠のオフィス用LANプロトコルである。

TOPの特徴は、オフィス業務ではトラヒックが比較的少なく、実時間性も少ないので、CSMA/CD方式を採用している点を除いて、MAP仕様とはほぼ同じである。

このようにMAPとTOPは共通部分が多いため、現在はMAP/TOPとなり、お互いにグループ間で連携をとりながら開発が進められている。

1988年6月、米国・ボルチモアでMAP/TOP(Ver.3.0)の実証試験が、COS、MAP/TOPユーザ・グループ、SME主催により行われ成功した。

(d) TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol)

米国国防総省(DOD)が開発したARPANET(広域パケットネットワーク)等の標準通信プロトコルである。

TOPは、OSI参照モデルの第4層、IPは、第3層に該当し、現在では、LAN、WANを含め異機種間接続を行うための事実上の標準となっている。特に、UNIXが標準サポートしたことから、EWSをはじめスーパコンピュータを用いたネットワークでは必須の通信プロトコルとなっている。

(e) FDDI (Fiber Distribution Data Interface)

大量の情報データを通信したり、データ／音声／画像情報を統合するマルチメディア通信のニーズに応える光LANの標準として期待されているもので、実用化が間近いところまで来ている。

(3) 造船所内情報通信システムのあり方

造船所内情報通信システムを構築するには、情報の内容とその流れをきめ細かく整理し、システム体系を明確

にする必要がある。

また、造船所内 LAN の全体イメージと、その中における実用例の一つとして研究した工作モニタリングシステムにおける工程シミュレータについて述べる。

(a) 造船所内情報通信システムの全体イメージ

造船所内は、一般に敷地面積が広く、各部門で業務内容が異なるため、業務別に小規模 LAN を構築し、これを幹線系 LAN で統合するのが良い。

小規模 LAN を業務別に見ると、次のようになる。

(i) 設計／管理／研究所部門

- 〔特徴〕
 - ・図形処理／技術計算／文章処理／事務処理が多い
 - ・応答速度は、必ずしも実時間性を必要としない
 - ・雑音にたいする周囲環境は良い

〔ネットワーク仕様〕

- ・TOP に準拠
 - (伝送媒体) 同軸ケーブル／より対線
 - (アクセス方式) CSMA/CD
 - (伝送方式) ベースバンド

(ii) 生産部門

- 〔特徴〕
 - ・FA 装置／機器を制御することが多い
 - ・応答速度は、実時間性を必要とする
 - ・電磁誘導の発生源が多く、周囲環境が悪い
 - ・生産ラインは、変更や拡張のため柔軟性が必要
 - ・伝送媒体は、屋外にも敷設する

〔ネットワーク仕様〕

- ・MAP に準拠
 - (伝送媒体) 同軸ケーブル／光ファイバ
 - (アクセス方式) トーカンパッシング
 - (伝送方式) ブロードバンド

幹線系 LAN は、高速性／安全性／恒久性／拡張性が要求されるので、導設時には、仕様の決定に格別の配慮が必要である。

また、本社と工場のように地理的に離れている場合には、ISDN のような公衆通信回線網を利用することも必要である。

造船所内情報通信システムの全体イメージを図 2.4.1 に示す。

(b) 工程シミュレータ

LAN 導入により、情報収集が実時間でできることと、シミュレーションに必要なデータベースが利用できるといった特徴を生かしたシミュレーションの実用化に関する検討として、工程シミュレータを試作した。

これは、開発言語として、オブジェクト指向言語 Smalltalk/V を用い、船殻ブロック組立工程をモデルとしたものである。

試作の結果、次のことが分かった。

- ・シミュレータと対話形式により、仕事の投入順序／設備利用計画／人員山積み／搬送計画などの生産計画を迅速に立案できる

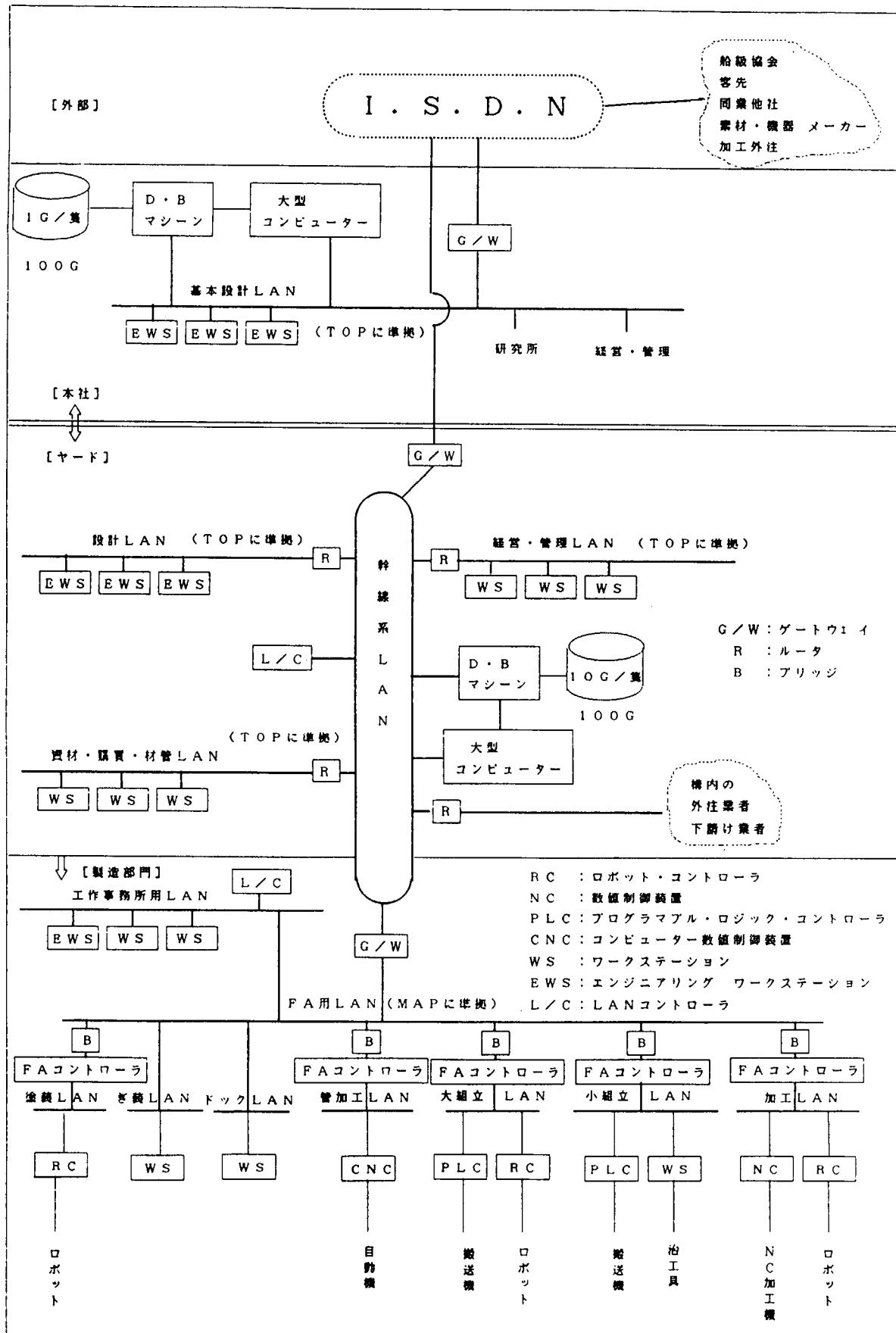
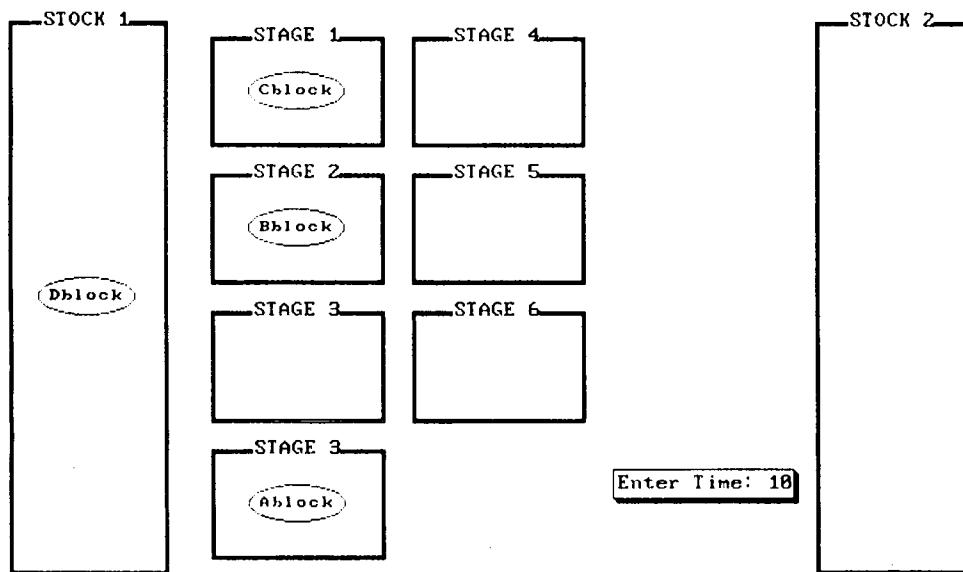


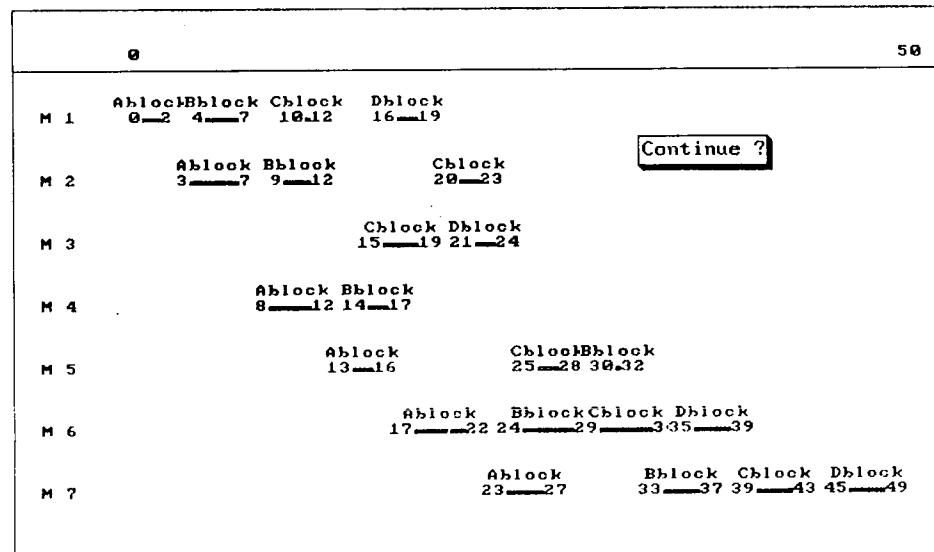
図 2.4.1 造船所内 LAN のイメージ図

- ・機械の故障や設計変更などのエマージェンシ事態が、生産計画に及ぼす影響の評価が容易にできる
- ・オブジェクト指向言語は、手続き型言語に比べてシステムの変更や拡張に柔軟に対応できるので、システム開発に便利である
- ・シミュレーション結果の評価や代替案を作成するための条件決定には、その業務に精通したエキスパートの知識を必要とする
- ・シミュレータを有効に活用するためには、モニタリング情報を直接取り込む必要があり、これには情報通信システム技術が必須である

なお、シミュレーション結果の出力例を図 2.4.2 に示す。



(1) ステージのアニメーション



(2) パーチャート

図 2.4.2 工程シミュレーション出力例

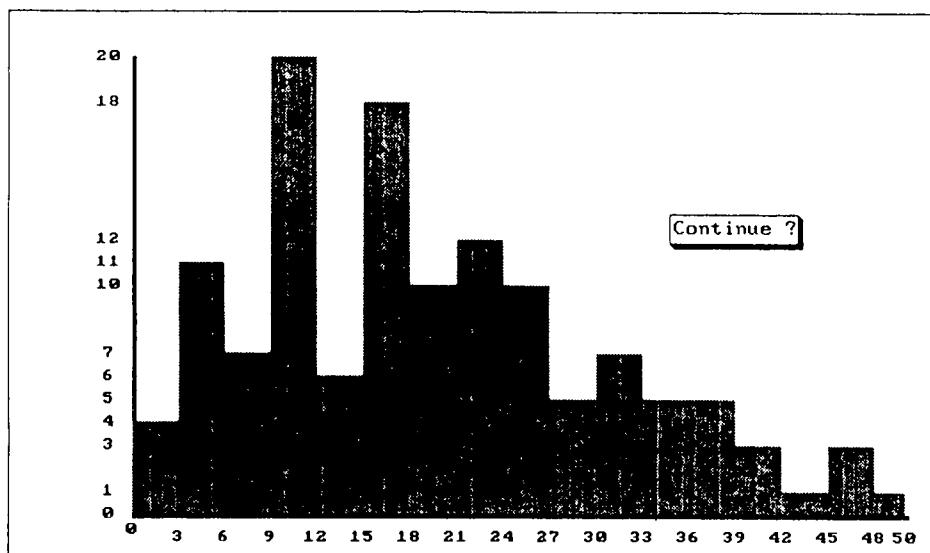


図 2.4.2 工程シミュレーション出力例

2.4.3 研究開発課題と解決策

(1) 造船所内情報通信システムについて

造船所内情報通信システム（LAN）に関する技術動向とシステムのイメージに関する調査検討の結果、LAN構築に関する技術は、ここ数年急速に発展してきており、今後とも進展することが分かった。このような状況下でユーザとして使いがってがよく、コストパフォーマンスに優れたLANを構築するためには国際的なプロトコルの標準化動向とベンダから供給される製品の技術動向や特徴に注目しておく必要がある。特に造船所特有の環境である屋外配線やノイズなどの問題対策として、光ファイバケーブルを利用したLANの技術動向には注意すべきである。

(2) モニタリングシステム

情報の分析と工程シミュレータ試作により、現状ではほとんど電算システム化されていない生産管理に関して、ネットワークにより統合化された情報とエキスパートの知識を有効利用したモニタリングシステム開発の重要性が明確になった。このためにはユーザ側で現在の情報の流れの不明確な部分や人の知識や経験に頼っている情報を整理した後、LANの存在を前提とした業務体系の構築とアプリケーションソフトの開発が必要である。また、担当者の直感にうつたえる出力表示（大画面、3次元形状など）や簡単な入力方式（音声、バーコードなど）を備えたマンマシンインターフェースが望まれる。

2.5 造船データベース統合化のための調査研究

2.5.1 現状と問題点

(1) 調査の目的

造船CIMSのように大規模且つエンジニアリングを主体とするシステムでは、エンジニアリング的に正確で、高速の情報伝達を実現するために関連する人々が一元化されたデータベースにアクセスすることが最良である（デ

ータの共有化）。また、データベースは単につくられたファイルの集合ではなく、全体が完全につじつまが合っている必要がある（データの無矛盾性）。このような要求を達成するためには、データベースを管理するデータベースマネジメントシステム（以下「DBMS」と略す）の存在は不可欠なものと考えられる。

さらに、船舶という対象物を考えた場合、表現対象が複雑で、どの様な構造をとるにせよデータの構造は複雑になる。また、最初から全てのことを考慮ていって、完全な構造をつくっておくことは将来の技術革新などを考えるととてもできないため、データベース構造の追加・変更は避けられない。それ故、データベース構造の追加・変更が容易でかつその際応用プログラムに影響を与えないものが要求される。

以上のように、DBMSはモデリング、システムの開発の能率、システムの拡張性、運用さらには外部とのデータ交換等と深く関わっており、より業務に適した物を使用しなければならない。

現在市販されているデータベースの中で、これらの要求に、最も適しているものはリレーションナル型データベース（関係型データベース）であると考え、造船システムとしての要求事項と照合するために関係型データベースを中心に代表的なDBMSの機能の調査を行った。

また、現在商品化が進められている分散データベース、研究途上にあるマルチメディアデータベースやオブジェクト指向データベースなどの動向についても調査した。

(2) DBMSの現状と動向

現在一般に利用されているDBMSは、階層モデル、ネットワークモデルに基づくものが多い。関係型データベースはこの数年多くの製品が発表され、改良も進められている。関係型データベースは以下に示す特徴から、現在ではDBMSの主流となりつつある。

- ・データベース構造（スキーマ）自身が動的に定義できるため、非定型アクセスが可能となり、様々な作業に柔軟に対応できる。
- ・SQL（Structured Query Language）に代表される使いやすく機能の高い操作言語を持っている。
- ・システムの変更が容易である。一つにはデータの独立性を達成し易いことによる。もう一つの理由はスキーマ変換の容易さで、関係の追加や消去が簡単に出来る。
- ・一様性が高い。データベース操作後に得られた関係集合に対し、関係言語で操作できる。
- ・理論的基礎がしっかりしており、かつ単純である。他のモデルとの変換が容易で、理論的に扱うことが出来る。

今回調査した市販DBMSはいずれも広く流通しているもので、基本的な機能は満たされており、ビジネス分野では多くの使用実績があるが、エンジニアリング分野での利用は少ない。この理由として、複雑な設計対象を2次元の表では素直に扱えないことや、可変長・不定個数のデータをそのままの形で表現できること、処理効率が悪いこと等が指摘されている。また調査したDBMSの中でも、日本語の処理、扱えるデータ量、履歴データの保存やデータ管理機能に違いがみられ、使用目的にあった選択が必要になる。

造船システムの要求事項と現状のDBMSの持つ機能を比較したところ、問題点として、

- ・数百Gバイトに及ぶと予想される膨大なデータ量を一括して扱えるものは少ない。
- ・本格的なバージョン管理機能を持つものはない。
- ・部材の変更時に発生する関連部材の検索等DB内の論理的矛盾をチェックする機能が限られている。
- ・外部とのデータ変換のための異機種環境での直接的な処理が出来ない。

等が挙げられており、現在市販されているDBMSそのままでは造船CIMSの要求を満足させるには至らない。しかしDBMSの開発を造船CIMSの範囲内で行うことには大きな困難が予想されるため、市販のDBMSの不足

した面を補うため、市販のDBMSとアプリケーションプログラムの間に「造船DBMS」を備えることを提案する。

また、処理効率の低さに関しては今後のデータベース技術やその周辺技術の性能向上に期待すると同時に、現状の汎用DBMSの数倍の性能を持つといわれるデータベース専用機の採用を考慮する必要がある。

昨今分散データベースの商品化が進められ、同機種環境でのデータベースの分散化はほぼ可能となってきたが、異機種環境ではまだ機能的に不十分な面も多く分散データベース本来の目的を達しているとは言えない。現在分散データベースの開発は、データベースが集中型か分散型かを意識しないでユーザが利用できることを第一の目標として進められており、またその多くは関係型データベース技術に立脚している。この意味で当面は集中型で開発を進め、将来望ましい分散データベースが出現した時点で組み込むことが現状では最も望ましいと考えられる。

また一方、画像、音声データなどのマルチメディアデータの取り扱いや、知識ベースとの融合などの関係型データベースを含む現在のDBMSの問題点を克服するために「意味データモデル」「オブジェクト指向データモデル」に基づくデータベースシステムが研究・開発途上にある。それらの一部にはすでに商品化されたものもあるが、それらの有効性については今後の検討を待ちたい。

2.5.2 調査検討結果

本調査では、造船の船殻構造の部材操作を行うプログラムを作成し、関係型データベースを造船CIMSへ応用した際の機能について調査する。さらに、関係型データベースの問題点として指摘されている処理性能についても調査する。

システムの概略構成を図2.5.1に示す。

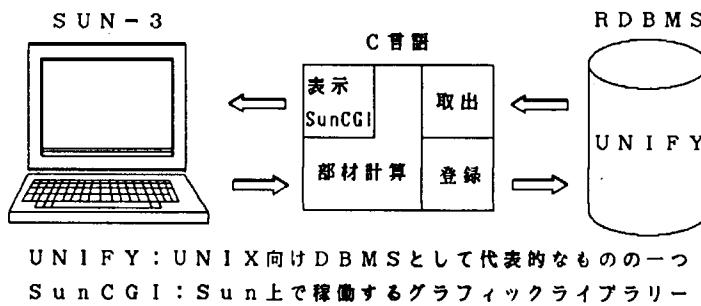


図2.5.1 システムの概略構成

(1) データの分類とデータベース構造の検討

タンカーの中央部センタータンクのボトムトランス及びその上に付く防撓材、継手、穴を対象とした。これらの部材を表現するための情報の一部を以下に示す。

- 共一通：部材名、部材タイプ、(板)板逃げ方向／(骨)フェースの向き、存在面、部材間親子関係(部材名、方向、関係状態)、部材一部品の対応、ブロック(部品、部材、ブロック名)
- ボトムトランス：取付線(溶接箇所)、フリーエッヂ線、板厚
- 防撓材：取付線(溶接箇所)、型鋼番号、取付角度
- 継手、穴：継手、穴形状
- 幾何要素：点(点番号、三次元座標)、線(線番号、点、点間の状態)、面(面番号、方向余弦、原点)

これらのデータを二次元の表形式にまとめた例を、図2.5.2に示す。この二次元の表を元に、UNIFYに用意されているメニュー画面に従ってスキーマ定義を行った。定義されたスキーマ構造を出力した例を図2.5.3に示す。

す。

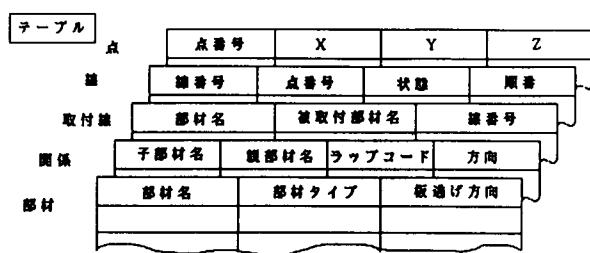


図 2.5.2 データの表形式表現

RECORD/FIELD	REF	TYPE	LEN	LONG NAME
ELEM	50	Element Table		
*ELMName	STRING	8	Element_name	
TYPE	STRING	4	Element_type	
NICE	STRING	1	Ita_nice_code	
RELA	100	Element Relation		
*RAID	NUMERIC	8	Relation_ID	
ELMNr0	STRING	8	Elem_name_Son	
ELMNrl	STRING	8	Elem_name_Mother	
LAP	NUMERIC	2	Lap_code	
DIR	STRING	1	Direction_MtoS	

図 2.5.3 スキーマ構造定義例

(2) 部材関連データ

船舶を構成する要素は、お互いに関連している（…は…にぶつかっている等）。変更や削除が必要になった場合、関連する部材を探しだし、影響の範囲・程度に応じてデータの操作を行わなければデータ間の整合性を保つことはできない。

そのため、自らを定義する際に参照した部材全てを関係部材としてとらえ、部材定義時に(1)に示した関係テーブルに一対一の関係として、子部材名—親部材名と関係を示すラップコードと方向を登録する事とした。変更・削除時の影響範囲は、親子の関係テーブルを基に、親子関係をときほぐす事により求められる。またその際部材間の定義順序が問題となる。これは新規定義時と同じ順序で再計算されなければ、修正前の親部材を参照して自らの形状を計算してしまう可能性があるためである。再実行時の処理順を求める事は、部材関連データを求める際に必要な機能である。

本調査では、修正・削除対象とした部材の直接の親部材と、子・孫部材の全ての部材をリストアップし、その各々にレベルを付けることによって、関連部材名と処理順を決定した。処理結果を図 2.5.4 に示す。

INPUT ELEM_NAME = WEB01 入力部材名	
子供	親
LBH01	SHEL
LBH01	UPDK
WEB01	SHEL
WEB01	LBH01
BL0010	SHEL
BL0020	SHEL
BL0030	SHEL
BL0040	SHEL
BL0050	SHEL
BL0060	SHEL
FAC01	WEB01
STF01	WEB01
STF01	BL0010
子供	親
STF01	FAC01
STF02	WEB01
STF02	BL0050
STF05	WEB01
STF05	BL0030
STF05	STF04
STF06	WEB01
STF06	BL0040
STF06	STF04
STF07	WEB01
STF07	STF04
STF07	FAC01
STF04	WEB01
WS01	WEB01
WS01	WEB01
WS02	WEB01
WS02	LBH01
WS02	FAC01
STF02	FAC01
STF03	WEB01
STF03	BL0060
STF03	FAC01
STF04	WEB01
STF04	STF01
STF04	STF01
STF04	STF02
WS01	WEB01
LEVEL=8 SHEL	
LEVEL=9 LBH01	
LEVEL=10 WEB01	
LEVEL=11 FAC01	
LEVEL=12 STF01 STF02 STF03 WS01 WS02	
LEVEL=13 STF04	
LEVEL=14 STF05 STF06 STF07	
NUM_SHORI = 11 ... 入力部材の影響を受ける部材数	
WEB01 の修正要求時再計算が必要となる	
部材名のリストと処理の順序（以下）	
SHORI_JUN[0]=WEB01	SHORI_JUN[1]=FAC01
SHORI_JUN[2]=STF01	SHORI_JUN[3]=STF02
SHORI_JUN[4]=STF03	SHORI_JUN[5]=WS01
SHORI_JUN[6]=WS02	SHORI_JUN[7]=STF04
SHORI_JUN[8]=STF05	SHORI_JUN[9]=STF06
SHORI_JUN[10]=STF07	

図 2.5.4 関連部材名と処理順の決定

(3) RDB を用いた試作結果

造船の船殻部材の新規定義（追加）、修正、削除を実行するプログラムを図 2.5.1 の環境で、C 言語、Sun

CGI, 関係型データベース(UNIFY)を用いて作成した。対象範囲は、(1)で述べたように、タンカー中央部センタータンクのボトムトランク及びその上に付く防撓材、継手、穴である。概略のシステム機能を図2.5.5に示す。

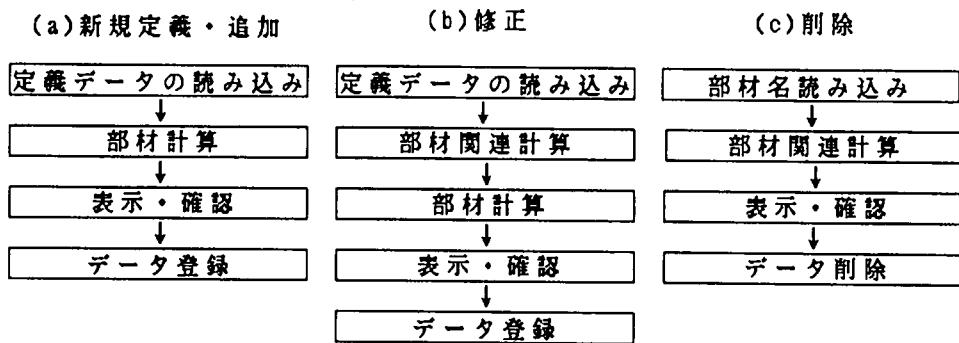


図2.5.5 概略システム機能図

これらの機能を満たすためのベーシックルーチンとして、

- データ取出関数 (11種)
- データ登録関数 (10種)
- 図形操作(幾何計算)関数 (17種)

を備えた。データ取出・登録関数は、造船用データ操作言語と呼べるもので、アプリケーションプログラムに組み込まれ、処理単位別に構成されている。こうすることにより、アプリケーションプログラム内でRDBスキーマのテーブル名やフィールド名を直接扱わなくてもよいようになるため、アプリケーションプログラムはまったくデータベースを意識する必要はなくなり、そのアプリケーションに最も適した構成をとることが可能となる。

修正時の画面表示例を図2.5.6に示す。実線で示されているのが元形状で、点線で示されたものが修正後の形

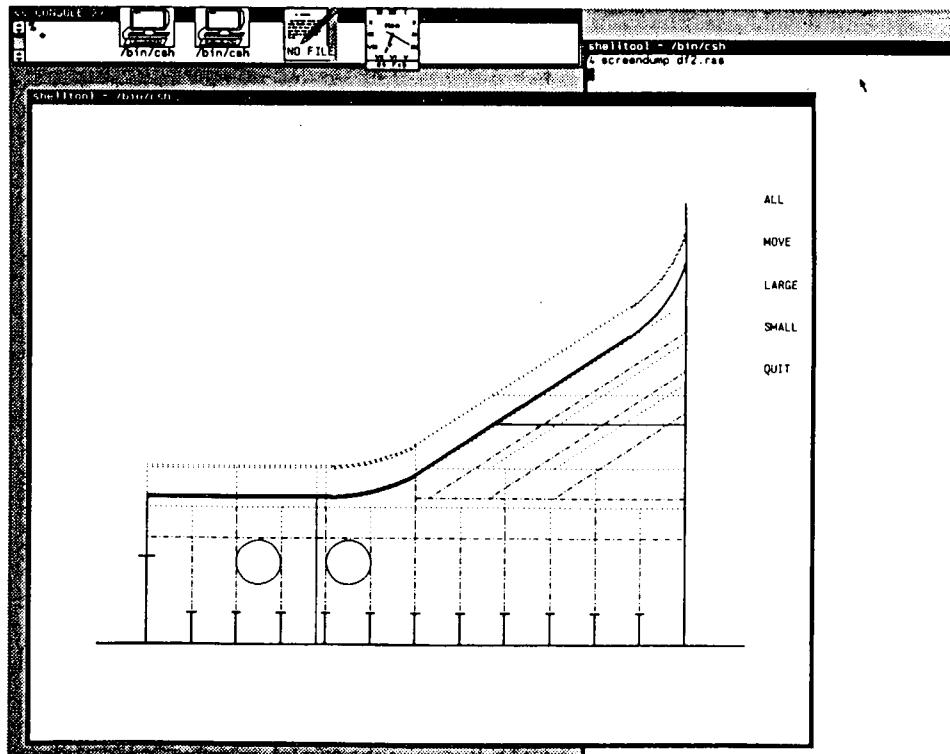


図2.5.6 修正画面例

状を表している。1部材(ボトムトランス)の修正操作(深くした)を実行したもので、変更を受ける部材(ボトムトランスのフェースから寸法をおさえてある防撓材)が複数あることがわかる。

(4) 处理速度の調査

関係型データベースは、処理速度の悪さが問題点として指摘されている。本調査では図2.5.1に示した環境で最大約一万件のレコードを持つテーブルを含むデータベースをテスト的に作成し、その処理速度の計測を行う。この計測からCIMS構築時予想される十万件のレコードの検索時間を推定し、実用上問題が無いかどうかを考察する。

3種類のテーブルとその各々にレコード数の異なる3組のデータベースを作成し6種類の質問を与えて、データ量を変化させ質問内容毎に検索・実行時間の両方を計測した。実行時間と検索時間の差は、ほとんどが画面表示に使われていた。また、非常に単純な検索では、検索時間が非常に短く計測不可能であったため、誤差を見込んで1秒程度とした。

データベースの構造を図2.5.7に示す。3ケースのレコード数を表2.5.1に示す。質問内容とレコード数のケース毎の計測結果を、レコード数10万件での予想時間と共に表2.5.2に示す。レコード数10万件での予想時間は、CASE-A, B, Cの結果から外挿で求めた。図2.5.8に質問番号6でのものを示した。

図2.5.7 データ構造

テーブル			
部品	プロック名 搭載月日		
	(*)	(*)	(*)
	部品名	部材名	プロック名 重量
部材	(*)	(*)	(*)
	部材名	部材タイプ	
	(*)		

表2.5.1 レコード数

	部材	部品	プロック
CASE-A	2068	3328	26
CASE-B	4096	6656	52
CASE-C	6124	9984	78

(*)はキーを示す。(#)は参照キーを示す。

図2.5.7 データ構造

表2.5.2 計測結果

NO	質問	検索時間(秒)			10万件の 予想時間
		CASE-A	CASE-B	CASE-C	
1	ある部材名の部材タイプを得る	1	1	1	1
2	ある部材タイプを持つ部材名のリスト (#)	11	20	30	300
3	あるプロックの部品をリスト (#) し数を合計	1	1	1	1
4	あるプロックの重量を計算	1	1	1	1
5	搭載月日順にプロック名を並べる	1	2	2	20
6	ある部材タイプの総重量を求める(stif)	27	53	82	827

キー及び参照キーを用いたものは非常に速く、かつデータ量の影響を受けない。それ以外のものは極端に検索時間がかかりデータ量の影響を受ける。従って検索の頻度や方法に沿い検索効率の高いスキーマ構造が要求される。しかし、スキーマ構造を最適化しても質問内容によってキーや参照キーからの検索実行が不可能な場合が存在する。このような場合、現環境のデータベースの性能では、10万件のレコードを検索することは実用上問題であり、今後のデータベース技術や周辺技術の性能向上が期待される。従って、現状ではデータベース専用機の採用が処理速度の面からは妥当であると考える。

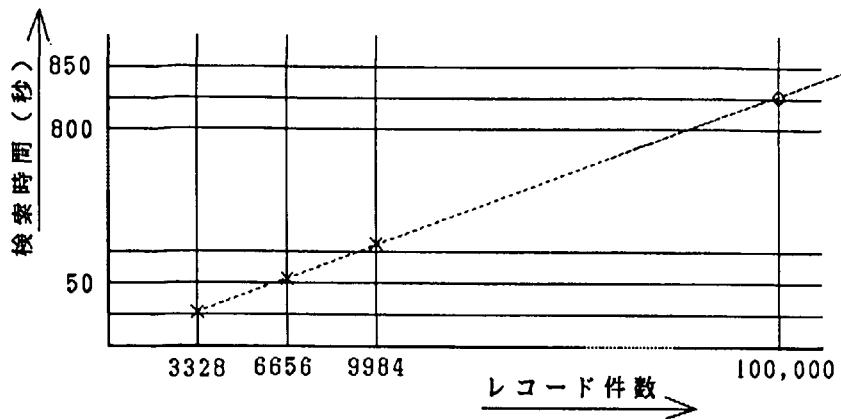


図 2.5.8 レコード件数による検索時間の変化

(5) まとめ

簡単な船殻構造とはいって、C言語、UNIX、RDBを用いて、部材の定義、修正、削除を画面を見ながら実行できるシステムを作成できた。データは一応3次元で表現したが操作はすべて2次元で行っていること、簡単な構造のみを扱っていること等から実際の構造表現という面からは不十分なものである。エンジニアリング分野にRDBを使用する際の問題点として当初から予想されていた、可変長・不定個数のデータの扱いに冗長度は残る。

しかし、従来のアプリケーションプログラム開発で作成していたファイル管理機能の開発は必要なく、豊富な問い合わせ機能もありデータの管理が容易であることなどから従来のシステム開発並びに他のデータモデルを使用した開発に比べ開発効率は向上している。今後はRDBの機能をより熟知しRDBの特徴を生かした開発を行えば更に開発効率の向上が期待できる。また、データベーススキーマの設計方法は処理効率に大きな影響を及ぼす。より良いスキーマの設計を行うためには使われ方を知る必要があり、その意味においてもデータ操作言語の仕様が重要になる。

2.5.3 研究開発課題と解決策

造船データベースについて残されている大きな問題は、

- 従来型のデータベースと知識ベースつまりエキスパートシステムとの統合
- アプリケーションプログラムに組み込まれデータベースとの切口となるデータ操作言語の仕様とその実現方法
- 処理効率

である。

エキスパートシステムの推論実行時にデータベース内のデータを参照して変数の値を設定したり、推論の結果をデータとして書き込めば推論に必要な大量のデータの管理／更新が容易である。多くのエキスパートシステムは特定のプロセッサ上の単一の利用者を対象とし、データは主記憶上にある等の問題から、他のシステムと一つのデータベースを共有することは困難である。現在データベースとの統合が可能となるエキスパートシステムの開発が急速に進められているため、このような動向に常に注目し続け、試用等を通じて評価・採用の必要がある。

データ操作言語については、本試作でその一例を作成したがこれは非常に狭い範囲の簡単な構造についてのものである。今後は広い業務範囲で要件と照合しながらデータの処理単位を調査し、その仕様を設定していく必要がある。

処理効率については、前項で述べた通り、現在の環境ではキーを用いない検索では処理効率が著しく低下し、実用上問題がある。今後のデータベース技術や周辺技術の性能向上が期待される。このため、現状では汎用DBMSの数倍の効率を持つといわれるデータベース専用機の採用が処理速度の面からは妥当であると考える。

3. 研究開発の進め方

昭和62年より2年間にわたって、造船CIMSの構築を目的とする調査研究を行った。造船CIMSについては本研究の成果をふまえ、今後の研究開発の進め方について次のような提言を行うものである。

3.1 調査研究結果より得られた注目すべき技術

2節で述べられたそれぞれの調査研究結果を総括して以下に注目すべき技術として項目にまとめた。これらは造船CIMS構築に際して基本となるべき重要な要素であり、従来にない新しい概念が述べられている。

(1) プロダクトモデル

造船CIMSでは、個々の業務に対応するサブシステムによって、後述の巨大な造船データベースを基に、プロダクトモデルを生成、評価、修正のプロセスを繰り返して、コンピュータ上で最適なモデルがつくり込まれていく。

このデータは各々の業務の断面で要請される「船」を的確に表現できなければならない。しかし、概念設計業務から現場でのプラケット一つの取り付け業務に至る、非常に幅広く多様な船の認識全てに的確に対応することは難しく、ひとえに船そのものをどのような概念で、計算機内に表現するかにかかっている。

又従来の多くのCADが扱っていた形状に関する情報は「船」全体の情報の一部分に過ぎず、造船CIMSにおけるモデルではそれに膨大で複雑な属性を付加する必要があることは明かである。

以上の点を陽に示すために、従来の設計図及び部品図に対応する「形状モデル」に対して、造船CIMSにおいて多様な業務に対応する「形状+属性データモデル」を「プロダクトモデル」と称する。これは造船CIMS構築に当たっての最大の開発課題の一つである。

プロダクトモデルに要請される機能は例えば次のようなものである。

- モデル構成部品の関係、所属に関する情報を持つこと。
- システム内に多数散在するエキスパートシステムが機能できる形で情報を持つこと。
- 一部分の修正に対応できること。（関連する部分のみの修正が行え、余分な再定義を必要としないこと）
- 頻繁な形状変更に対応できること。しかもなるべく大幅な変更に耐えること。
- 工作部門が使用するに充分な工作情報をを持つこと。管理物量が早期に把握できること。

(2) AIを組み込んだアプリケーションソフト

現在、AIの応用分野は大きく分けて、エキスパートシステム、知識型の画像理解、ロボティクス、自然言語理解等があるがここではアプリケーションソフトに対して最も影響が大きいと思われるエキスパートシステムについて述べる。

エキスパートシステムは造船CIMSを構成する各サブシステムにおいて、アルゴリズムとして書き下すのが困難な専門家の経験的知識に基づく処理を実現するために用いられ、各サブシステムの中で、対象モデルや手続き型プログラムと利用者との仲立ちとして、利用者の助手的な役割を果たす。

エキスパートシステム用のソフトウェアとしては、ルールとフレーム（またはオブジェクト）を基本機能として備え、グラフィックを含むユーザインターフェースが優れた、ワークステーション上のエキスパートシステム構築ツールを利用するものが現時点では最も適切であり、推論手法等AIの要素技術という意味では、言語レベルから造船固有のエキスパートシステムを開発する必要は無いと思われる。またエキスパートシステムは専門家の経験的知識を利用するものであるから、各サブシステムの専門領域毎に多くのエキスパートシステムを個別に開発する必要がある。以上のような視点にたって設計用及び生産計画シミュレーション用のそれぞれについて課題を述べる。

- 設計用アプリケーションソフト

従来専門家が有している知識、ノウハウを知識ベース化し、単純な情報生成作業から高度な設計的判断まで幅広く適用可能なエキスパートシステムが、情報生成の生産性を上げ、その質を向上させるために不可欠である。その知識ベースは造船固有の物であり、その使い方が前述のプロダクトモデルにも大きく影響することを考えると重要な開発課題と言える。

・生産計画シミュレーション用ソフト

工作情報として何が必要か、またどのような生成プロセスを要するかを決定するには、従来現場管理者が経験的知識として有している生産計画のノウハウを整理する必要がある。また、その整理された知識ベースを基に、どの様なシミュレーションを通じて最適工程、最適工法を決定していくかを明らかにすることも重要で、これ無しにはプロダクトモデルを規定できない。

(3) オブジェクト指向システム

造船システム特有の課題として、その機能設計の段階においては、「船」を全体或は特定の区画、プラント等の機能実現の為の単位で対象物を考慮するが、建造段階では船全体を工作上の単位である「ブロック」に分割するということがある。このことは他産業で対象物をボルトナットなどの最小部品の組合せとして全体を表現することとは本質的に異なった対応を要求する。すなわち造船特有の機能ともいえるブロック分割では、分割とともに親の性格を引継ながら子供の部品が生成され、その部品に多くの情報が付加されるが、必要に応じて元の親の姿に戻して検討をする必要が生ずる。従来型のシステムではこの処理は煩雑を極め、実現困難とされているが、オブジェクト指向言語及びそのシステムはその実現の可能性を持つ事が分かった。

更にシステム開発の生産性の面からも、人間の思考を自然に表現できること、過去のソフトを部品化して再利用できることにより効果が大きいとの報告もあり、エキスパートシステムや後述のプロトタイピングを指向する環境としても適していると考えられる。

一方実績の面では大型システムに大々的に適用した例は無く、システム全体の効率、多人数が同時並行に設計、建造を進めるときの管理のあり方、生産／保守に対する効果、等々その実現性を検討する必要がある。

(4) データベース

次世代造船システムに要請されるデータベースは、概念的に一元化され、巨大であるが充分に迅速に機能することと、システムの拡張に関して柔軟に対応するべく応用プログラムからの独立を確保していることが要求される。

こうした要請に応えるものとして、将来のハード面の発展も期待して、RDB（リレーションナルデータベース）を技術分野に適用することが考えられるが、従来と同様の汎用機にこれを装備したのでは、CPUに負荷がかかり、処理効率が悪くなるという問題があった。その対策として、昨今のEWSの急速な性能向上を考え、データベースを物理的に多くのCPU上に分散させて処理能力を上げることが考えられる。その際、データベースを論理的に一元化するため、データ修正に対する種々のレベルの変更履歴の管理、データ間の関連チェックの実現、物理的及び機密保持の面でのデータの安全性確保等々、分散型のデータベースが持つ多くの問題を解決する必要がある。さらにもう一つの対策として近年最も注目されているのがRDB専用機を導入して集中型のデータベースとすることも考えられる。これは現在も汎用のコンピュータのバックエンドマシンまたは、LANのデータベースサーバーとして用いられ、数倍の処理効率の向上が得られている。本方式を、通信機能の向上を前提として検討することによりシステム全体としての要件を満たすことも考えられる。

(5) 開発手法としてのプロトタイピング

コンピュータシステムはそのハードウェアの進歩に支援されながらますます巨大化し、そのシステムの開発時は勿論、運用時の保守にも多くのシステム技術者の労力を必要としている。過去においてはシステム開発費の8割が

ハード、2割がソフト開発費と言わされたが、現在では2割がハード、8割がソフトと、開発費比率は全く逆転しており、このままではソフトウェア開発技術者の絶対量が不足すると言われる。

既に数多くの大規模システムが開発され、その中で主として大型汎用計算機メーカーによって、ソフトウェアの生産性、信頼性の向上の重要性が叫ばれ、それに応える形で1960年代末、ソフトウェア工学が形成された。その成果の典型的なものがシステム開発のウォーターフォールモデルであって、開発すべきシステムの利用者の業務要件が固まった時点で、そのシステム化の手順をトップダウン的に要件分析、概念設計、詳細設計、プログラミング、単体テスト、結合テスト、システムテスト、運用テストと、順次作業の消し込みを図りながら行うという開発のモデル化である。S/Eがフィールドで感じるものを適宜マニュアル化した形のものであるが、この手法によって、多くの巨大なシステムが開発され、それなりに成果を挙げてきたと言える。

しかしながら現在に至って、このウォーターフォールモデルでは限界があるのではないかとの指摘がなされているのは、ハードの進歩に従ってシステムの性格が変化しつつあることと、同じくハードの向上により従来人間が処理しなければならなかった業務をハード側で分担できるようになってきたことによる。

すなわち、EWSの発達は業務担当者のシステムへの関わりをより強くし、特にヒューマンインターフェースが重要なことから、従来の業務要件を確定してからのシステム開発のみを対象としたアプローチが現実的ではなくになっていることがある。

また、統合化を目指すシステムでは、業務の巾が大変に広く、その全てを見渡すことの難しさがある。すなわち、統合化システムの開発は必然的にその開発自体が業務の形態を変える要素が大きいが、部外者の想像だけでは業務担当者の要件と、その後の組織のあるべき姿をまとめることが難しくなっているという現実がある。システム開発へ業務担当者が深く係わることを含んだ開発モデルの模索が必要となってきた。

一方コンピュータ分野のハードウェアの目覚しい進歩は、人間とコンピュータの関係を変え、かつてのコンピュータを主とした主従関係から、資源的には多少の無駄をしながらも人間の自由な要求を人間らしい表現のまま実現しようと言う動きを可能としている。例えば過去何度もあった人工知能ブームは今日初めて何等かの現実的成果を生み出すであろうと思われるが、専らハードの向上により従来とても非能率で実現出来なかつた多くの新しいソフトウェア概念が現実的になったからである。これと同様の事が、実はソフトウェア開発の手法に於いても言えるわけである。例えば前述の通り、オブジェクト指向型の言語はCPUの消費が激しく従来とても使用不可能であったが、昨今のハードが、安価で高速な処理を可能とし、その人間的な表現のおかげで、後述の通りソフトウェアの生産性は3～10倍に向上すると謂われている。関係データベースを技術分野で使おうとする試みも又ハードの発展に負うところが大きいが、その汎用性により開発、保守の両面で得る効果は大きい。

ここで重要なのは上述の通り業務担当者がシステムの開発、保守に深く関わる必要に対し、例えば記号処理により業務要件をシステム上に自由に表現し、システム稼働時の様子を手軽にシミュレートし、業務要件の洗い出しを助ける、所謂プロトタイピング手法などが、ハード、ソフト両面の発達により可能になろうとしていることである。このプロトタイピングこそが従来のウォーターフォールモデルの不備を補うものとして注目されているのである。

造船CIMSという、規模の面でも要求機能のレベルの面でも最高度といえるシステムの開発に於ては、従来の手法ではもはや対応が難しく、上記の未来型のシステム開発手法を駆使することがあらゆる面から必要であることは明かであろう。

3.2 造船CIMS要件のまとめ

造船CIMSの要件については、本研究のなかでまとめられ、現状のシステムに対して多くの先端的な考え方が盛り

込まれているが、次期段階の開発に際してはさらに検討を加えて要件の明確化を行う必要があるが、これまでに述べたシステムの基本構想を大枠として、順次詳細化を行ってゆくことによって、互いのシステム同士が整合性を持ち統合化されたシステムとする事が可能になる。

以下に本研究においてまとめられた造船CIMS要件の主要部分を列挙する。現状のシステムに比較して高い機能要求を含んでおり、且つ広い範囲をカバーするものである。

3.2.1 業務要件概略

造船の業務要件について、現状の設計、生産準備、工作の全業務を概観し、システム全体のサブシステムの果たすべき機能についてまとめたが、本研究では膨大な造船業務の中で典型的な一部分を抽出したが、システムの実現性検討の対象としては充分対応できている。以下にその概要を述べる。

(1) 造船用プロダクトモデル

造船の各種アプリケーションプログラムの指示に基づき、データベース内にデータモデルを構築するツールと考えられ、特に造船用モデルとして以下の要件を満足する必要がある。

- a) 船殻、機器（船、機、電装）に適したモデル選定及び相互のデータ交換が容易
- b) 自由曲面の表現が容易
- c) 造船特有の表現が可能（舷表現、部材及び部材集合の表現）
- d) 類似構造の自動生成が可能（倣い設計）
- e) 形状、属性データの自動変更が容易
- f) 異なる各社標準（設計、工作）、NC情報等の扱いが可能
- g) メーカー等外部データモデルとの整合性
- h) 造船CAEシステムとの整合性

これらデータモデルを分類、分析し共通的に使用出来る汎用のモデルが必要となる。

(2) データベース

造船CIMSのように大規模且つエンジニアリングを主体とするシステムではデータベースの変更追加が避けられない。それ故データベースの変更作業がシステム開発のネックにならないよう、追加・変更・拡張が容易なりレーショナルデータベースを採用する必要があろう。その主要な機能を列挙する。

- a) 大容量データの格納が可能
- b) 高速処理が可能（対話式の場合は特に重視する必要あり）
- c) 複数且つ同時のアクセスを制御できるようなマルチユーザー対応が可能
- d) 堅牢で安定し且つデータの増加にも柔軟に対応が可能
- e) 各種モニター機能をもちデータ管理が容易
- f) 将来の発展性を考慮した拡張、メインテナンスが容易

これらを満足するデータベースはすでに市販されているものを極力活用することが効率的であり望ましいが、その適用については、造船独自の前処理機能を加え、併用のデータベースとすることが最も現実的である。

続いて主要な各種アプリケーションプログラムについて機能要件を記述する。

(3) アプリケーションシステム

実際の業務において設計及び工作システム上必要な要件を以下に記述する。

（設計）

- a) 設計作業が知識ベースの支援をうけてなされ、必要に応じて対話式の確認修正作業が可能

- b) 従来のシステムを越える高度なユーザインタフェースを備え、高度なグラフィック機能を保有
 - c) 必要情報の検索システムや技術計算用の解析システムとつながりが容易
 - d) エキスパートシステムによる支援を受け工作の条件を取り込んだ設計が可能
 - e) 基本設計から詳細設計までを広範囲にカバー
- (工 作)
- a) 最適工作法選択のための高度なシミュレーション機能
 - b) 快適なユーザインタフェースによって対話的に行える評価機能
 - c) 機器類に必要な工作用データは人を介さず作成が可能
 - d) 設計システムとの密接な連携による詳細な管理量の提供
 - e) 工作要領、日程管理、モニタリング、資材管理等のシステムが互いに連動
 - f) 工場全体の工程、品質、設備状況が常時監視でき必要なデータを蓄えられ、状況の変化に対して適切な指示が可能

3.2.2 システム要件

先に造船CIMSを構成する業務分野での要件をあげた。これらの業務要件を個々に満足し且つ全体としても満足するようなシステムの構築に対しては、システムとしての要件を明確にしておく必要がある。以下にその概要を述べる。

- (1) システムの目的
 - (a) 設計から生産に渡る全プロセスの統合
 - (b) 大量情報の高度且つ効率的な生成、伝達、検証が可能
 - (c) 情報は技術に偏らず管理、物流等幅広い業務への活用が可能
 - (d) 設計、生産の自動化、高度化、業務形態の変化、ハード・ソフトウェアの進歩に対応して成長できる柔軟性、発展性を保有
- (2) システム設計思想
 - (a) システム適用範囲の拡大に対応

設計、生産にわたるプロセス全体の主要業務に対応したプロダクトモデルを設定する。その際将来の適用範囲の拡大、用途の多様化に備えて極力実体に近い表現が可能なものとする。
 - (b) 最新の計算機利用技術の活用

最新のEWSやデータベースマシン等のハードウェアさらにデータベースマネージメントシステム、データベース、エキスパートシステム等の汎用ソフトウェアを最大限に生かすことを指向する。さらにLAN,VAN等の通信技術、MAP/TOP等の標準化の進展を見守り時期に応じた最適方法を選択する。特に造船CIMSとしての大きな課題である大量データの処理や設計者、計画者への知的支援さらにユーザインタフェースの充実などの要件を満たす為には外部からの導入がもっとも効率的でありまた品質面でも有利である。
 - (c) 基本システムの共通化

システムの操作習熟、各業務分野毎の個別エキスパートシステムの開発、サブシステム間の情報交換、メインテナンス／バージョンアップ等が容易に行えるよう、下記の基本システムについては将来の発展性も考慮し、極力共通化を行う。これは開発の効率化の面でも重要である。

 - (1) オペレーティングシステム
 - (2) データベースマネージメントシステム

- (3) 図形処理／入出力の基本的な部分(ユーザインターフェース)
- (4) エキスパートシステムの基本的な部分
- (5) 通信制御システム

3.2.3 ハード構成

システムを実際に稼働させてゆくシステムアーキテクチャーのイメージについてもシステム(ソフトウェア)と同様に明確化しておく必要があり、それは将来のハードウェア環境を考慮しつつ、造船所としてのるべき姿を想定し、総合的に進めるべきである。以下にその方針に沿ってこれまでに検討されてきた概要について述べる。

(1) ネットワーク及びハード構成

造船CIMS実現時、設計には多数の設計支援サブシステムが稼働しており製造部門には生産の為のFA装置・機器が工場内に分散配置されている。これらを結びシステムの効率を上げる為には、造船所内をコンピュータネットワークで結ぶことが情報統合化の必要条件となる。また、造船所で扱う情報には造船所だけで通信する情報の他、本社と工場やメーカー、他の造船所との間で通信される情報もある。このような造船所外との情報を取り扱うコンピュータネットワークも必要である。図3.2.1にコンピュータネットワークイメージの一例を示す。

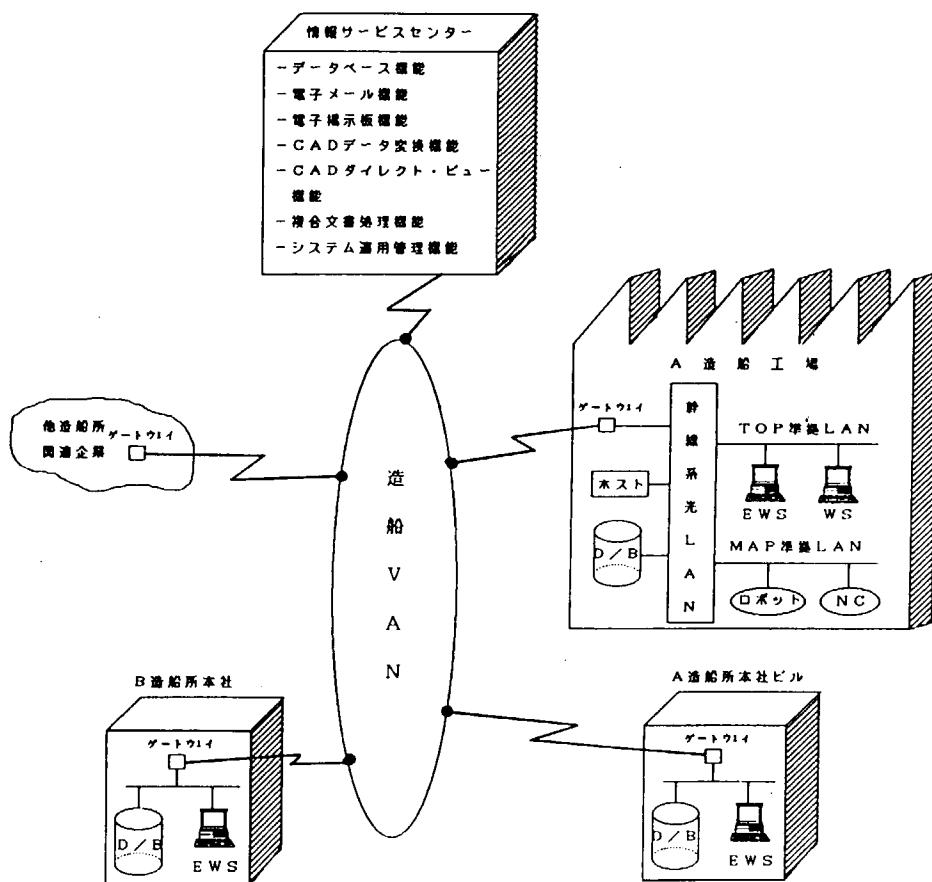


図3.2.1 造船CIMSコンピュータネットワークのイメージ図

さらにこのネットワークにつながる個々のハードウェアは従来の大型汎用コンピュータを中心とした端末群ではなく、近年急速な進歩の途上にある高度の専用機能を有するものである。ここでその主なものについて説明を加えイメージを明確にする。

- EWS (エンジニアリング・ワークステーション)

近年の急速なコンピュータ技術の進歩はEWSについて顕著であり、以前の大型汎用コンピュータ並の処理速度(数十MIPS), 仮想記憶容量(1~4Gバイト)を有するものが現れてきており、この進展はまだまだ続くと予想されている。これらが周辺の最新通信システムに支援されてネットワークの要所要所に配置することによって、分散処理を可能とするアーキテクチャーが構成されることになる。

- データベース専用機

現在の汎用大型コンピュータに代わって、造船CIMSの必要とする巨大なシステムに対するデータの供給はデータベース専用機が担う事になると予想されている。これは近年ビジネス分野で非常に大量のデータを急速に処理する必要から広まってきたものであり、造船CIMS規模に対してまたCAD情報の扱いに対しても充分応え得るものとして期待がもたれている。

- FAコントローラ

生産現場においては、今まで以上にFA機器に対するリアルタイム制御が必要となり多くの台数が配置されることが予想される。これらは工場のLANにつながり情報の伝送がなされる。

- LAN構成品

光ファイバー、同軸ケーブル及びその接続機器等多種のものが実用化されており、品質的に問題はなく、伝送速度についても、100Mbps程度が得られ造船CIMSに対する技術的な問題はほとんど無いといえる。

(2) 造船所内通信システム(LAN)

造船所内通信は限られた範囲内の固有のネットワークであり一般的にLANと呼ばれる。図3.2.1に示すように造船所内LANにおいては、敷地面積が広く、各部門の業務内容も異なる為、小規模LANを幹線系LANに結んで行くような形態が考えられる。また設計・管理のためのLANと生産のLANも分離されている。さらに、これらのLANには、EWSやFA機器が多数導入されるため、マルチベンダー製品による組合せになり、異機種間通信が必要となる。LANによる異機種間通信に関してはISOにより通信プロトコルの標準化作業が進められており、造船所内LANもこの標準に準拠したLANにする必要がある。このOSIに準拠したLANについても、アクセス方式や伝送媒体、配線方法、変調方式などによって多くの形態が考えられる。

これらをまとめると、造船所内通信ネットワークを構築するためには種々ある業務内容や、造船所特有の環境をよく検討し、効率がよくコストパフォーマンスの優れた、使い勝手のよいLANを構築することが重要と考えられる。またこのために国際的なプロトコル標準化作業の動向と、ベンダーから供給される製品の技術動向や特徴に注目しておく必要がある。

(3) 造船広域情報通信システム(VAN)

造船所には、本社と工場やメーカー、他の造船所との間で通信される多くの情報がある。これらの情報を取り扱う為には、造船所の外に構築するネットワーク(VAN)が必要となる。VANには、同一企業で地理的に離れたLANを相互にゲートウェイを通じて情報のやりとりを行う同一企業内VANや関連企業に構築されたVAN等がある。関連企業VANでは企業間でのデータ交換と業界関連データベースからのサービスが中心である。共通データベースには、情報通信サービスセンターに造船関連データベースとして、主にメーカーのカタログ、図面、技術データ、仕様等の製品情報や法規、規格等の技術資料を準備保管しておき各企業からいつでもアクセスできるシステムである。

LANとVANは、それぞれが船に関する情報の統合化に欠かせない基盤となる。

3.3 開発の進め方

造船CIMSという巨大で複雑しかも頻繁な変更に耐える柔軟なシステムを実現するためには従来の大型システムの延長線上では開発、保守のあらゆる面からの困難が予想されるため、多くの斬新な先端的計算機利用技術を駆使する必要がある。これらを念頭におきシステム開発の進め方について述べる。

造船CIMSは、従来の単機能システム開発と異なり、経営、設計、製造の広範囲の業務が行えまた初期仕様設定から引渡しまでの長期間にわたる情報が矛盾や重複なく、整合性をもって表現されるプロダクトモデルをもつことが条件となる。このことから本研究でまとめられた代表的なサブシステムの業務要件から必要な情報の種類、機能を抽出しそれらが共通に表現できる統合化されたプロダクトモデルを構築することに注力することが重要である。本研究において提案された煩雑かつ複雑な変更に対して柔軟に表現でき、また複雑な部品およびその関係さらには周辺環境まで含めた表現ができるプロダクトモデルを他の要件にたいしても満足するようなモデルに発展させてゆく方向で開発を進めることが必要である。この際、開発時の周辺技術レベル、規模で行うことになるが次段階での拡張を考慮しておくことは言うまでもない。

これらの情報は実質的にはデータベースの中に収納され運用されることになる。この基盤となるハードウェアとしては、仮想記憶容量や処理速度の面で進歩しつつあるEWSやデータベースマシンを採用することによって従来に比較して高い効率が得られることが明らかになったことから、これらのハードウェアを用いて開発が行われることになる。具体的対応としては、当面RDB専用機の機能を確認してその実現性を検討することを中心にして進めることとし、世の中の分散型のDB管理に関する技術が実用的となつた時点で最終的なシステム構成を検討すれば、全体的なシステム開発に支障をきたすことではないと判断される。

CIMSを構成するLANやVANの通信システムについては、近年急速な進歩が見られ、実用に際してユーザとして使い易くまたコストパフォーマンスの優れたシステムを構築するためには今後国際的なプロトコルの標準化や製品技術動向に注目しておく必要がある。

さらに造船業務はブロック分割に代表されるような全体から個へという手順を踏んで行く手法をとることが多い。また受注生産からくる多数の業務の同時進行により変更、修正の繰り返しという特徴があげられる。本研究ではこれらに対して、オブジェクト指向の言語やシステムが有効で有ることを述べた。この思想をプロダクトモデル、データベースさらにAIに適用し、開発時にその実証をおこなうことも大きな狙いの一つである。

以上のような基盤的技術開発と並行してその上に位置する個々の業務を支援するためのシステム開発がなされなければならない。ここでは近年研究が激しく進められているエキスパートシステムを有効に活用して行くことになる。造船業務には汎用エキスパートシステム構築ツールを適用することによって効果が期待出来る分野が数多くあり、開発ステップとしてはまず典型的な業務を選択し、その開発ツール、手法などを極力共通化して開発効率を高めるとともに、次のステップではさらに高度な判断を要する業務への適用をめざして、汎用高級ツールの技術動向を注意深く見守る必要がある。

造船業界で開発した現状のCAD・CAMシステムは、これまでに多大の労力と期間を要している。次に来たるべき造船CIMSは、これに比べその期待される機能においては極めて高く、規模は広範囲にわたり、全体として大きく且つ複雑なシステムとなることが予想される。この実現のためには本研究で明らかになった多くの先端的技術を適用するとともに、システムの開発手法に関しても従来の延長線上では規模、信頼性の面で困難が予想され、新しいシステム開発手法が要請される。本研究において提案されたプロトタイプ手法はこれらの条件を満たしており有望である。今後は大規模システムへの適用を含めた検証を重ねることによって充分効果を上げる事が期待できる。

また造船CIMSの対象領域は（技術面、業務面共に）多岐にわたっている。この為開発期間や開発費用は長期化、

大規模化することが予想される。また開発期間中にも計算機利用技術の革新や国際標準の進展等がおこることもあり得、それらを柔軟に取り込むことが開発効率上有効である。従って、開発に際してはシステムの狙いを明確にし、その狙いに合わせた段階的開発を行うことが必要である。

以上から造船CIMSを開発するにはまずプロトタイピング手法を用いたパイロットモデル開発を先行して行い、今回提案した先端的技術や手法を充分に検証した後次の段階へ移行すべきであると考えられる。

第二章 新船体構造設計法に関する調査研究

1. 新船体構造設計法（ADDA）の全体構想

1.1 基本認識

1.1.1 船体構造における技術競争力

(1) 構造設計の上流段階の重要性

総論の項に述べた日本造船業存続のための必要条件を満たすためには、船の重要な部分である船体構造に関する技術競争力の強化が重要な要件の一つである。

将来の船舶は現状の在来船種の改良型だけでなく、新技術船／新機種の出現が期待されている。

その需要動向に見合った優秀な船体構造の供給を可能とするには、「設計の上流段階」でニーズに見合った船を企画、開発する強い設計力が必要である。それによって受注が確保され、次に造船CIMSによる円滑な建造が実現されなければならない。その段階では個船毎にニーズに見合った最適化された「構造計画案」が求められる。その中の「構造設計情報」は、造船CIMSの入力情報として、その良否は後工程に大きな影響を与えるものである。

(2) 上流段階における中心課題

上流段階で最も重要なマンパワーを要する工程は構造の強さを総合的に評価するステップ（以下、信頼性の評価という。）であり、その手段は高技術船／新機種の開発にとって重要であるばかりでなく、在来船の設計にとっても共通の部分が多い。また「構造計画案」の最適化のために、信頼性の評価を確実にかつ迅速に行うこと必要とされる。このように「信頼性の評価」と「その手法」は構造設計の技術競争力強化を計る上で中心課題とされるべきものである。

(3) 将来構想としてのADDA

以上の基本認識のもとに、いずれの船種でも柔軟にその船体構造の最適化を可能とする総合的な設計手法が確立されるべきであり、その将来構想として新船体構造設計法（ADDA = ADvanced Design by Analysis）が位置づけられる。これにより広い範囲の設計に柔軟かつ迅速に対応でき、強い競争力が実現する。

1.1.2 船体構造設計の現状と問題点

(1) 直接強度計算の普及

総論で述べた「強度の四角形」の手法は構造の場合一義的でなく、大別すると、「ルール算式方式」、「直接計算方式」、「詳細直接計算方式」、の三通りの手法が使われている。各々の方式の特徴を表1.1.1に示す。

第一のルール算式による方法は、構造の要素毎に各々簡単な算式が与えられ、それらを組合せて評価を行っていく方法である。この手法によれば迅速に設計が可能である反面、「強度の四角形」の三要素である「荷重・応力算定」、「強度算定」、「信頼性の評価」に見合う要素が明らかにされていないため、新規性の強い構造ほどその適用には限界がある。最近では国際的に船級協会等の要求もあり、一部構造に第二法を用いる傾向になりつつある。

第二の直接計算による方法は、応力を計算し許容応力で判定のうえ構造寸法を決める方式で、現在大型船の中央部構造への利用が主流となってきている。しかしながら、上記「強度の四角形」の三要素の手法条件の与え方については船の種類に応じてばらばらであり、応力算定以外はまだ第一の方法に近い。とくに新構造を必要とする複合的な目的をもった船の場合には問題が多い。また、その解析実行については多くの時間を要しており、在来型大型船で2カ月も必要としている。

第三法の詳細直接計算による方法は、ガスキャリアの一部等に限定的に利用されているが、設計者が強度評価項目と評価の基本方針について提案し審査が行われるもので、これを裏付ける長期間を要する解析や実験がその構造に応じ必要になっている。

(2) 開発・設計の加速ニーズ

前述のように、在来船、高技術船ともに設計・開発に長期間を要する現状であり、それによって社会のニーズに対応できなくなる危険性が常にある。開発・設計の加速は本プロジェクト全体の必要性からも極めて肝要であり、広い範囲の船種で迅速にかつ確実に評価されるような手法が強く望まれる。

(3) 現状の強度解析システムの陳腐化

昭和40年代には「PASSAGE」の開発などにより、造船業界はFEMを先端的に利用してきた。これはADDAの一部を構成する応力解析に対応するものであるが、現在、このシステムもその後の構造様式の変化や評価の精密化にマッチせず、最新のコンピューター技術に沿った革新が必要な時期にきている。

(4) 上級設計者の負担増大

この種の信頼性評価作業は上級設計者のマンパワーを多く費やしている。その解消は労働集約的体質の変革と優秀な次世代の上級設計者の確保のために、ぜひ実現せねばならない。

1.2 新船体構造設計法の概念

1.2.1 ADDAの理念

日本造船学会の将来技術検討委員会（昭和60年5月～21世紀へ向けて造船関連技術開発課題）で取り上げられたADDAの理念（総論の図2.3.5）は最終ターゲットの理念を示すものである。開発構想としては、1.1基本認識でも述べた如く、まず日本造船業の設計段階における手法に重点が置かれるべきである。

1.2.2 設計法としてのADDA

設計法としてのADDAを、現状との比較で見たものを図1.2.1に示す。最終的な構想を示すものであり、高技術船の開発に有用なものとするために、現状より精密化されたものでなければならない。また従来の強度判定の経験的部分をより理論的扱いを行うことで、その適用範囲の拡大をはかれる。

図1.2.2は、設計の展開過程に主眼を置いた流れを示す。まず、1つのphaseは1.の概念設計から、9の主要部構造決定までである。ここでは、1.の概念設計（基本計画）の段階で、はじめに船主要求性能を満すいくつかの計画案（主寸法、一般配置、中央部構造で代表される主要部構造、など）が、これまで蓄積された設計データをもとに絞り込まれる。この主要部構造をもとに、2～8でその強度評価が行われることになる。

2～3は、設計条件の設定と構造解析モデルを準備するところであり、主要部を対象とした解析用モデリングや、船体運動・波浪荷重解析を基本とした設計波の設定をはじめとする荷重条件の選定／設定が行われる。

4～5は、応力解析と強度評価をするところであり、先に設定された複数個の荷重条件に対する解析結果のvisibleな同時表示により、DeckやBulkheadなどの主要配置とTrans Ringなどの大骨構造の強度評価が、使用材料の評価とともに行われる。ここでの評価は、主要構造部材配置に大きく影響する座屈・崩壊解析が主となり、疲労解析については、概念設計における代表詳細構造を定め、かつ後段における詳細解析への条件設定がなされることになる。

6～8は、強度評価結果に対するactionをするところであり、強度評価により不具合箇所があれば、部材寸法、配置、材料を変更した場合の強度上の参考情報を提供するための条件変更再解析を行い、概念設計原案に対する変更情報提供（部分的な最適化解析）がなされる。

以上のサイクルが概念設計の展開に追従（従来の延長手法では難しい）して繰返され、いくつかの計画案の比較検討がなされ、主要部構造が決定される。

次の phase は、主要部構造決定のあとを継ぐ 10.～16. の詳細部構造検討である。基本的なプロセスは上記 phase と同じであるが、この段階では詳細構造の評価と、詳細構造の設計が主構造へ影響を与える部分の詳細評価が中心であり、トータルとしての構造決定支援情報が提供される。すなわち 11. で精査必要箇所が選定され、12.～15. の詳細解析過程で Zooming モデルを適宜使用した詳細応力解析／強度評価ができるものとする。ここでの評価には詳細構造の評価のために疲労・不安定破壊解析が主となり、要求性能に見合った設計品質の具体化が実現される。

1.3 ADDA システムの開発構想

1.3.1 ADDA システム構想

ADDA は、前にも述べた通り、荷重／応力算定、強度算定および信頼性の評価を一貫して行える設計手法である。それを実現するシステムは、図 1.3.1 に全体構成を示す通り、構造解析のためのモデリング全般を担う「構造解析モデリングシステム」、構造解析のための荷重解析を担う「高精度船体荷重解析システム」、応力解析を担う「迅速・高精度構造解析システム」、座屈・疲労などの構造強度算定を担う「船体構造強度算定システム」、応力解析や構造強度算定結果などを用い、船体構造強度の信頼度の評価を担う「船体構造強度総合評価システム」の 5 つのシステムと、ADDA としての目的・目標に向って、この各システムを有機的に働かせるための「構造設計支援インテリジェントシステム」より構成される。

システム全般に対する要求機能は新構造方式を含む船体構造の強度に対する信頼性の評価が迅速かつ高精度でできることである。このためには MAN-MACHINE INTERFACE が良好であり、充実した GRAPHIC 機能が設計者との対話を容易にするような利用形態となることが必要である。また将来の技術進歩に応じ得る柔軟かつ拡張性のあるシステムでなければならない。更に、実際の設計の場面では様々な拘束条件により設計変更を余儀なくされることが多々あるため再解析あるいは最適化（部分）が効率的に実施できることも肝要である。

本システムの特徴の 1 つは過去の経験を将来の設計にうまく役立てることであり、そのために損傷データや保守点検等の運航実績のフィードバックが可能であることも必要である。また工作精度等の建造上の情報もとり込まれなければならない。

更に本システムは各社共通の内容となっているので各社の CAD システム等との INTERFACE が容易にされ、図面情報との直接的結合が可能であることも要求される。

1.3.2 各システムの役割

ADDA システムを構成する各システムの役割を以下に述べる。

1) 構造解析モデリングシステム

造船 CIMS 全体のモデリングでの構造の具体的表現は時系列的に変化する。ADDA のモデリングはその内の解析のステージに応じた近似的な構造のモデリング及びその属性（剛性表現、荷重負担表現等）を与える。以下のサブシステム 2)～5) に関係し、運動計算、平面格子、変断面梁、局部構造、部分構造、全船一体構造の各々のサブモジュールで構成される。

2) 高精度船体荷重解析システム

波浪に関する各種の統計資料をデータベースとして常備しておき、波浪中を航行する船舶の船体運動をシミュレートすると共に、船体に働く加速度、変動圧力、曲げモーメント等の変動荷重をはじめ、スロッキングやスラ

ミング等の衝撃圧を含むすべての荷重の短期・長期の予測を行って、ADDAシステムの構造解析ならびに強度評価に必要な高い精度の荷重情報を提供する。

3) 迅速・高精度構造解析システム

高精度・大規模直接計算による船体構造設計を可能とするため、波浪中を航行する船舶に発生する応力や応答値を、迅速かつ高精度で計算する。即ち、高精度船体荷重解析システムの出力結果を使用して、全船一体解析、船体構造部材の詳細解析を行い、船体構造強度算定システムや船体構造強度総合評価システムへその結果を受け渡す。

4) 船体構造強度算定システム

全船一体解析により得られた応力に対し、船体構造の座屈・崩壊強度及び疲労強度、不安定破壊強度を算定する。即ち、迅速・高精度構造解析システムより得られた各構造の応力場に対し、必要な部位について、座屈強度解析、崩壊強度解析及び疲労亀裂発生・伝播解析、不安定破壊解析等を行い、その結果を船体構造強度総合評価システムへ受け渡す。船全体の折損、船側構造の崩壊などの大事故につながるような損傷と、そうでない損傷が区別でき、精度良く強度算定できる。

5) 船体構造強度総合評価システム

迅速・高精度構造解析システムによって計算された応力および変位が、船体構造強度算定システムによって求められる構造の座屈・崩壊・疲労強度の、ある一定値以下になる信頼度の評価を目的とする。

本サブシステムは、一次判定および二次判定の各サブモジュールから構成されており、一次判定サブモジュールは精査解析必要箇所の選定、二次判定サブモジュールは信頼性工学に基づく船体構造部材の評価が主な機能である。

6) 構造設計支援インテリジェントシステム

ADDAシステムのデータベースを構築・管理し、必要情報の一元管理を図ると共に、ADDA及び周辺の各システムを統合し、各システム間の円滑なコミュニケーションと効率よい運用環境を提供するマネーマシンインターフェイスである。更に、ADDAシステムの高度システム化を可能とする各種支援システムを提供する。

1.4 開発の効果と波及効果

1.4.1 造船業における効果

設計法として完成した時点でのADDA及び造船業における効果は次のようなイメージとなる。

(1) 適用対象船種

- 将来出現するあらゆる船種の信頼性評価手法として有用なものとなる。
- 船種毎の固有な手法は別途考慮されるとして、船種に共通の基盤手法として有用なものとなり、新構造の強度信頼性が迅速に確保される。

(2) 開発・設計期間

- 現在5年を要する高技術船開発を1年とする。
- 在来船の2カ月を要する期間は2週間に短縮される。
- これにより需要変化に鋭敏に対応し、最適化を迅速に行うことにより、客先の信頼を得て、受注を確保できるようになる。

(3) 造船業としての利用／効果

- 設計者が各自、設計対象に応じ、利用する。独自にノウハウ等を付加して利用する。

- ・最適化は ADDA を利用し設計者の利用法で実現される。構造様式の異なる複数の試設計案を迅速に検討できるようになる。(自動設計ではない。)
- ・高技術船等で検証実験が要求されるケースがあるが、それを数値実験で代替できる可能性が増える。
- ・建造工程への入力情報である構造情報の確定度を高めることができる。(初期段階における設計修正検討の充実)
- ・建造船トラブル等への対応、対船主コンサルテーションが容易になる。
- ・継続的に利用すれば、一定の評価手法で評価しているため、各種船種の相対的強度比較が容易になる。
- ・ニーズへの対応迅速化が図れ、技術力が日本造船業の需要維持に役立つ。
- ・日本造船技術の評価が高まり優秀な人材を確保するのに役立つ。

1.4.2 関連業界に与える効果

(1) 海運業への寄与

- ・海運業は物流の将来動向に応じた目的に見合う船の迅速入手が容易になる。
- ・運航や操船の制限を指向するものではない。それらの合理化のために必要なデータ提供がなされる可能性があるが、設計法としての ADDA の確立後検討されるべき問題である。

表1.1.1 船体構造設計の現状手法の特徴

	対象船種	計算法の明確さ	強度基準	適用例
① ル ー ル 算 式	全船種。 但し、協会によ っては制限 あり。	・算式は明確。 ・計算も容易。	・実績を簡単な算式 で表現するので類似例への適用は容 易。 ・新構造への適用は 難しい。	小型貨物船では全面採用 大型船では直接計算が要 求される場合もある。
② 直 接 計 算	全船種。 但し、選択自 由、リコメン ド、及び強制 の3種あり。	・標準的手法を与え る場合と提案を受け入れる場合の二 通りあり。	・①より明確だが荷 重規定、座屈基準 など、簡潔な表現 で与えており、應 用の広さでは問題 あり。 ・疲労については明 確でない。	O/T, B/C, PCC P/Cなど、本方法によ って中央部寸法を決定し ているケースが多い。
③ 詳 細 直 接 計 算	ガスキャリア ータイプB	・計算法は設計者の 提案による。 ・荷重も直接計算要 求あり。	・基本方針を明確に 示している。 ・設計船の特徴に応 じ、解析可能。 ・実験検証も要求あ り。	LNGC, LPGCで実 例あり。新機種の場合に 必要となる。

(注) ① ルール算式方式 : 構造部材の寸法を簡単な算式で与える方式。

② 直接計算方式 : 直接強度計算方式で荷重、応力を計算し、許容応力等で判
定のうえ構造寸法を決める方式。

③ 詳細直接計算方式 : ガスキャリアのTYPE Bのように、強度評価項目と評
価の基本方針を明確にし、設計者の提案を審査する方式。

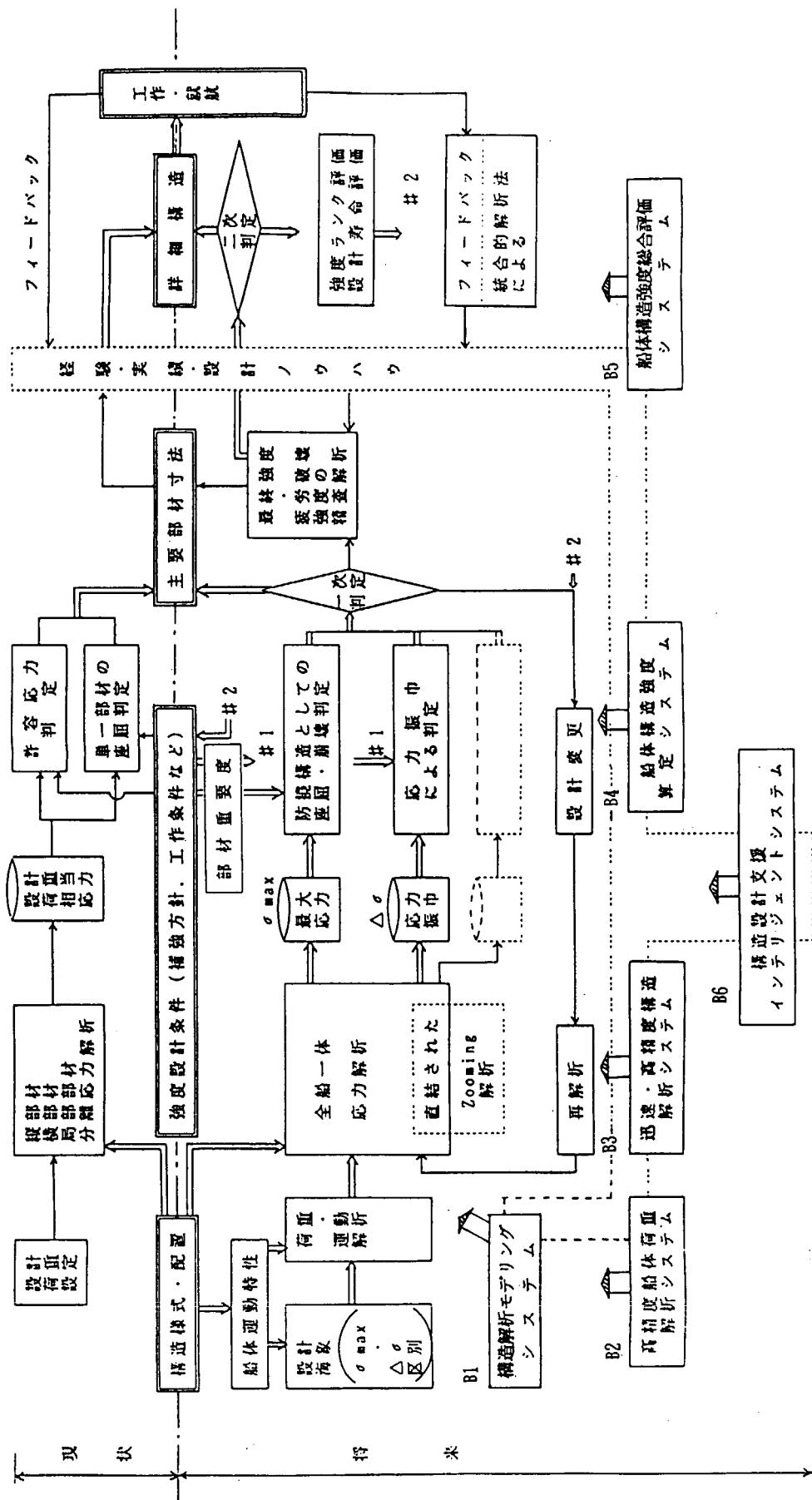


図1.2.1 新船体構造設計法の概念

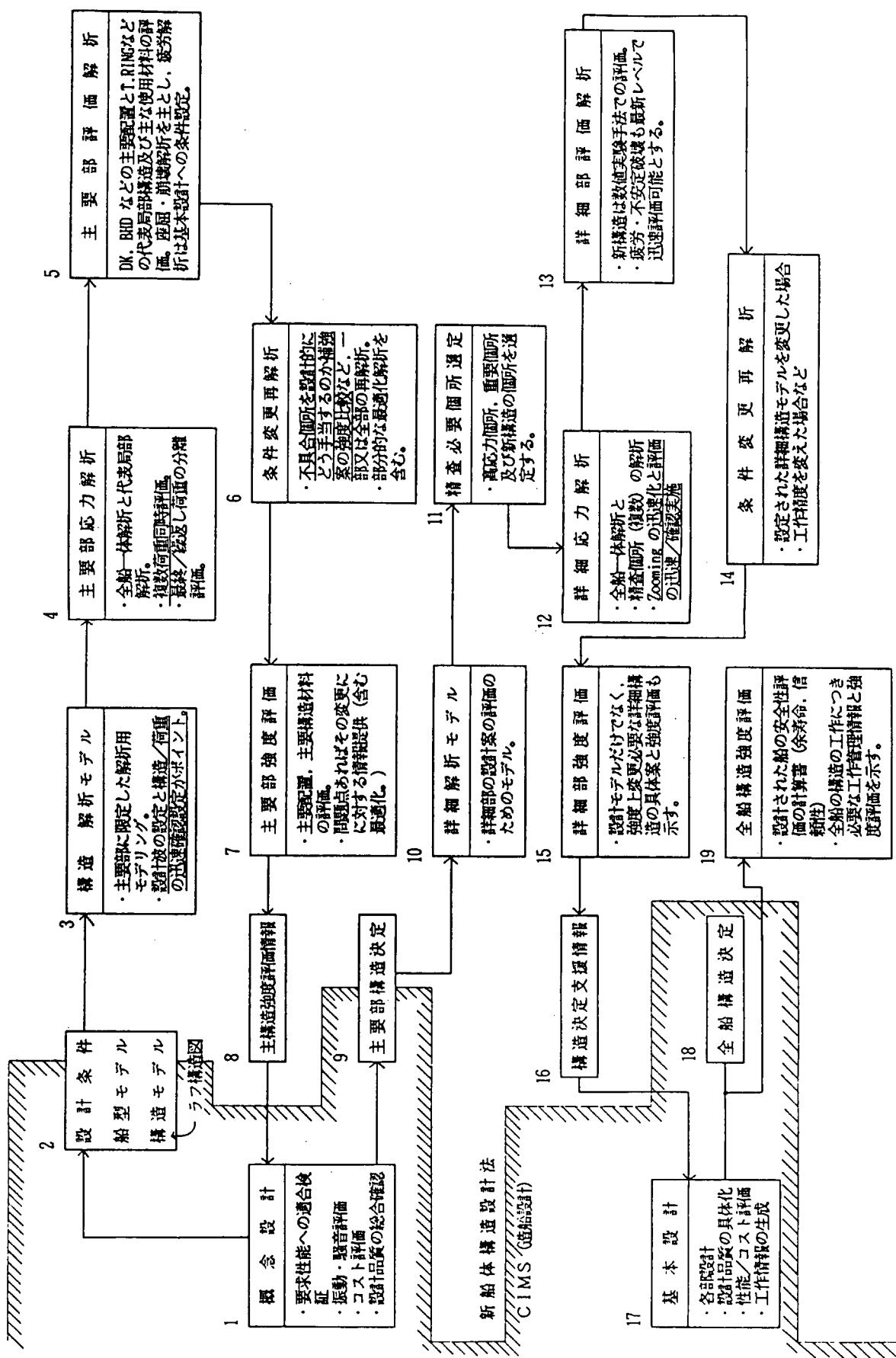


図 1.2.2 新船体構造設計法の設計の流れ

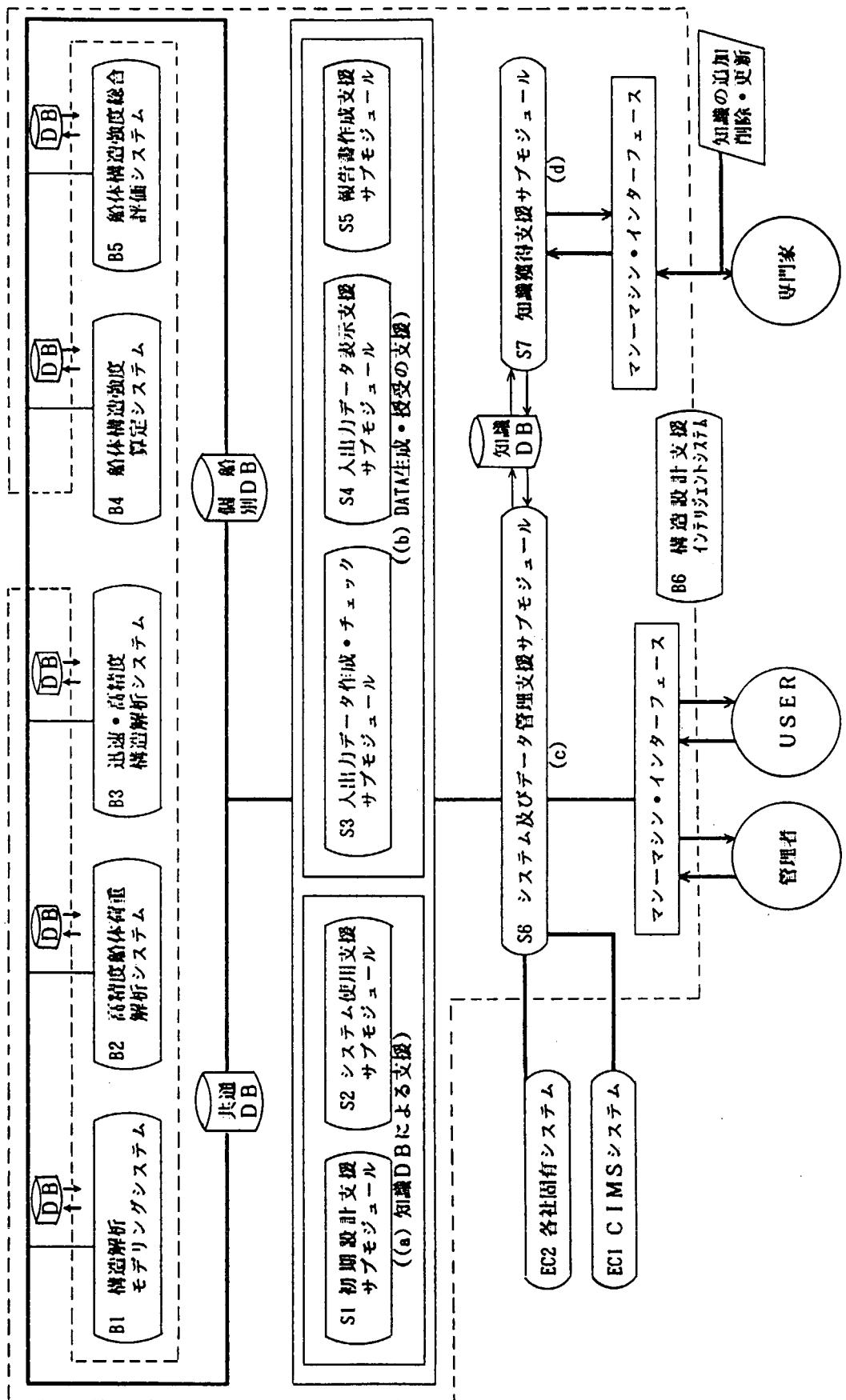


図 1.3.1 ADDA システムの構成

2. 調査研究の概要

船体構造は船全体の中で最も基幹をなす部分であり、大型かつ複雑であるため、その設計には長年の経験と高い技術が必要である。造船業としての将来を考えると船体構造の開発力の強化が望まれており、その強化には設計法の改革が必須条件であることが第一線設計者の共通認識である。

このような認識に基づき、SR210第二分科会では現状の設計法の分析を行い、一部試行解析を実施し、また周辺の異業界の構造設計法、関連技術の研究動向の調査を行い、将来の設計法のあるべき姿として新船体構造設計法（ADDA = ADvanced Design by Analysis）の構想とその開発課題を調査研究し、取りまとめた。

研究は2年計画で、6つのワーキンググループ（WG 1（荷重）、WG 2（座屈）、WG 3（疲労）、WG 4（信頼性工学）、WG 5（応力解析）、WG 6（全体構想））による各WG独自の研究の他に、さらに6・3年度は複数のWGに関する特定テーマを効率よく調査研究、取りまとめてゆくために、関係WGの代表者より構成される3つの連絡会（荷重、部材重要度、実船計測）を設け、横断的な活動を展開した。

2.1 船体構造解析のための荷重解析手法

2.1.1 現状と問題点

現在の設計法は船級協会に規定された荷重を用いて設計するのが通常であるが、これら荷重は簡易な算式で模式化されているため、個々の船舶の運航条件や性能が考慮されず、船舶が実際に遭遇する荷重に厳密には対応していない。しかし、最近は設計対象船を直接モデル化して解析する直接計算法による設計法を探ることが多い。この場合も、主として、縦・横及び局部強度別の分離モデルでの解析であり、各々のモデルに設定される荷重間の整合性がなく、又海象データは個々の船の運航条件に関係なく画一的に用いられている。

新船体構造設計法は船が実際に遭遇する海象の把握から構造モデルのための荷重設定に到るまで論理一貫した高精度の荷重解析法を持つ必要がある。

このような荷重設定の基本的な流れを図2.1.1に示す。

このためには、

- (1) 船が遭遇する海象を把握するための航路に沿った海域の気象・海象観測データと設計に用いるために波浪力学的に処理されたデータから成る波浪情報データベースの構築
- (2) 波浪データを基に船体に作用する最大荷重及び変動荷重頻度分布を高精度且つ的確に表現する設計海象の設定
- (3) このように合理的に設定された海象下での船体運動・波浪荷重の高精度解析法の確立が必要である。
- (4) 更に、荷重解析－構造応答解析－強度評価の設計プロセス一環としての荷重設定のあり方について総合的に検討しておく必要がある。

この観点から、以上の項目毎に調査検討し、荷重解析法確立の為の問題点及び開発課題の抽出を行った。

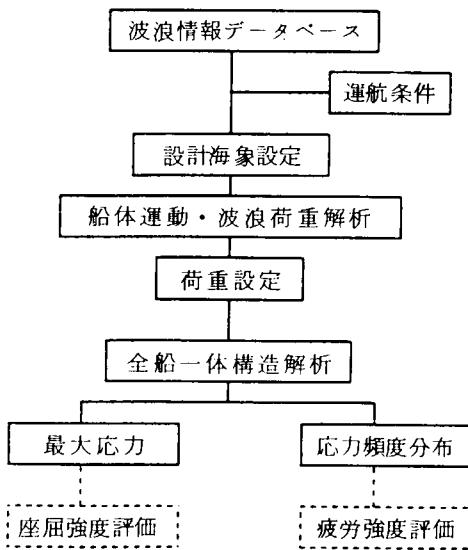


図2.1.1 荷重設定の基本フロー

2.1.2 調査検討の概要と検討結果

(1) 波浪情報データベース

具体的な調査を開始するに当たって想定したデータベース像の概略は以下の通りである。

- ① 既存のデータを基に海象の長期分布を波高、波周期(H_s , T_v)の結合発現頻度の形で表すことが最も重要である。同時に波向き、風の情報も必要である。
- ② 全世界の海域を対象とする。海域、季節毎に分類して整理する。海域のサイズはSR 163で使われた程度の大きさが望ましい。
- ③ データの信頼性を高める必要がある。しかし、データは生の形と、補正を施したもの両方が利用可能であることが望ましい。
- ④ 波スペクトル、波の時系列データもデータベースに含めるものとするが、どこまで含めるかは調査の後とする。

このようなデータベースを実現するために必要な事項等について調査・検討した結果について述べる。

(a) 波浪情報源

従来の波浪データは多くが船舶からの海象情報を基に作られている。現在も気象庁だけで年間十数万件のデータが集められており、全世界海域について見れば膨大なデータが利用可能な形で存在する。しかし問題点として、荒天回避、海域的な偏りの傾向があることが挙げられている。

一方、Hindcastの手法が近年積極的に利用されるようになってきた。これは気象データを入力して、図2.1.2に示すように海洋上の各点における波浪の生成・発達の様子を時間的に推定する手法である。米国などでは既に実用に供されている。このHindcastで求めた波浪推算値を含めれば、船舶通報データの欠点を補うことが期待できる。

この外に定点観測船・定点波浪観測ブイによる波浪観測データがある。この計測結果は計器計測で精度が最も高い。しかし計測海域が太平洋上で最大、十数点と非常に限定された点の値しか入手できない。従ってこのデータは前二者の精度検定用と位置づけることが適当と思われる。

またリモートセンシングによる波浪観測も近年行われつつあるが、まだ実験的計測の状態から脱しているとは言い難い。しかし、今後の発展には十分注意を払う必要がある。

波スペクトル、波浪時系列データについては限られた計測例しかない。本データベースに不可欠なものであるならば、新たな計測を計画すべきである。

(b) データベースの機能

波浪情報を利用する際の形は波浪発現頻度の形が最も多いと思われるが、新船体構造設計法ではより詳細な波浪に関する情報が、容易に検索・抽出可能である必要が出てくるであろう。例えば、海域あるいは航路別のデータの特徴を必要とすることもある。また、波周期と波高の相関だけではない、新しい項目間の相関が必要となるかもしれない。この様な多様な要望に対応できるようにするには波浪関連情報の計算機上でのデータベース化が最適な手段である。

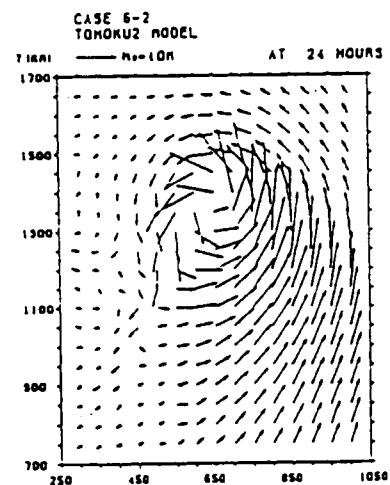


図2.1.2 Hindcast手法による
推算例(波高・波向分布)

(2) 設計荷重算定のための海象設定

船舶は本来、確率過程である海洋を航行しており、船体に作用する波浪荷重は確率論的取扱いを基本にして評価されねばならないが、必要とする荷重の表現法が強度評価によって異なるので、各強度評価に適合した海象の設定が肝要である。既に実用化されている線形重ね合わせの原理に基づいた統計的予測は変動応力の頻度分布が求まり、疲労強度の評価に適している。又、座屈・崩壊や不安定破壊は最大荷重で評価されるが、この最大荷重を高精度に推定するためには荷重・応答の非線形性が考慮できる設計海象の設定が必要である。これを極限海象と呼ぶことにする。一方、部材寸法の初期設定や強度評価の一次精査の段階では、簡便な設計海象の設定が必要である。ここでは、これを代表海象と呼ぶことにする。これらの設計海象の設定の流れを図2.1.3に示す。

何れの設定法に於いても、船が遭遇する海象が海象設定の基本であり、設計上の船の運航条件の設定を含めた検討が必要である。これらについて検討した結果を以下に述べる。

(a) 統計的予測

本手法は1953年St.DenisとPiersonが線形重ね合わせ法を導入して以来、各種の応答の統計的予測手法として広く用いられている。前述したように、変動応力の頻度分布が求るので疲労強度の評価に適しているが、線形重ね合わせ原理に基づく限り荷重・応答の非線形性が考慮できないので、最大荷重を必要とする座屈・崩壊や不安定破壊の評価のためには精度上の問題がある。

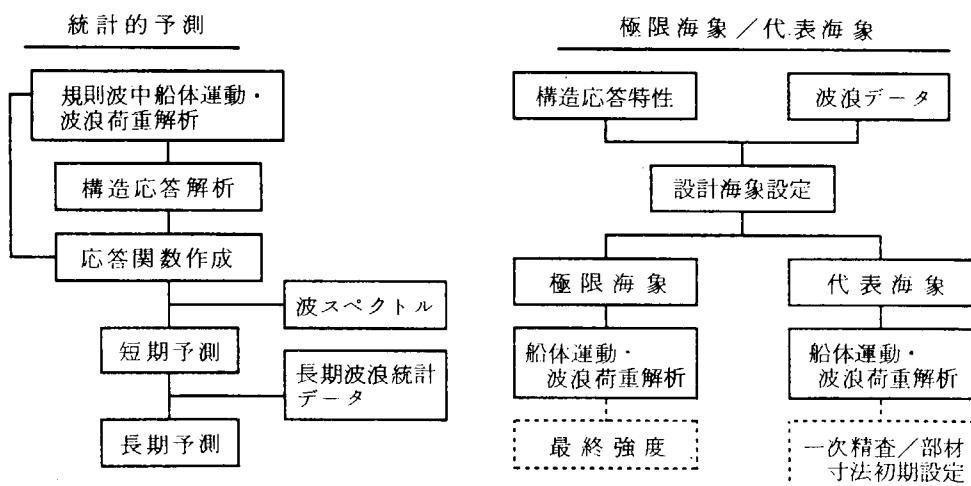


図2.1.3 設計海象設定法の基本フロー

線形応答系を扱う手法としては一応確立しているので、推定精度の向上と本手法の適用範囲の拡大を目的として、

- ・各種データの精度が応答の長期予測に与える影響
- ・波-荷重-応答-強度評価の各過程に含まれる非線形性と統計的予測法の適用性
- ・荷重の同時性を考慮した確率論的計算法

について検討した。その結果は(3)(d)項に述べる。

(b) 極限海象

統計的予測では取扱いが困難な荷重応答の非線形性を考慮し、最終強度解析を行うためには極限波浪を設定する必要がある。極限波浪には、最大応答が発生する波浪特性を明確にした波浪モデルと、構造応答特性と波浪データから最大応答が発生する短期海象を求め、その波スペクトルから発生させた時系列波が考えられる。

前者は応答と波浪特性の関係を明確にして初めて設定できる設計海象であるが、最大応答発生の根拠が明確である。因に、8万トンタンカーを供試船としてエネルギー等価の条件の下で規則波と変形波それぞれの場合の波浪荷重の試解析を行った結果、垂直波浪荷重にスラミングの影響が現れ荷重が増大すること、又、その発生は波の形状に依存していることが示された。しかし、この設計海象を使用する場合の最大の問題はそのような波浪の発現確率の裏付けである。一方、後者の波浪は確率的な意味で実際の海象との対応が明確であるが、得られた応答の極値の確率的意味は必ずしも明確でなく、現状では設計のための実用的手法とはみなし難い。

(c) 代表海象

確率論的手法による線形応答の長期予測を合理的な仮定の基に展開すると、最大応答が発生する短期海象の簡便な設定が可能である。このことから応答別に等価規則波が設定できる。この代表海象を用いると、構造応答解析が容易であるため初期設計段階の部材寸法設定や強度評価の一次精査のための簡便な設計海象として有用である。この場合は対象部材、荷重要素によって対応する等価規則波が異なるので、主要な構造強度を漏れなく精査するための等価パラメーターをどの様に選択するかの問題がある。

(d) 運航条件

運航条件としては航路、操船、貨物の積み付け条件等がある。

設計対象船の航路が限定されていれば波浪情報データベースから海象条件を設定するのは問題ないが、一般にはワールドワイド条件であろう。この場合、その船が遭遇する最大海象を含めたワールドワイド航路をどのように設定するかの問題がある。

遭遇海象を設定するためには、「荒天域回避運航」と荒天海域に突入したときの操船の実態を踏まえる必要がある。まず、船が遭遇する最大海象は「荒天域回避運航」のため海域最大海象より小さいとの想定の基に二、三の特定海域における固定ブイと通航船舶の報告風速データの比較を試みたがこの調査ではその傾向は顕著には認められなかった。

次の問題は、設定された航路に沿った海象に於ける操船を設計上どのように考慮するかである。文献調査や北太平洋に就航しているコンテナ船(17,000トン)の13年間にわたるアブストラクトログ記録を解析した結果、荒天における減速・変針の実態は千差万別であり、その時の状況に応じて最適な運航条件を摸索していることが判明した。設計上、これらの操船の影響は無視できないので、波浪中の自然減速・変針を含めた合理的なモデルの検討が必要である。

積み付け条件には満載、半載、バラスト状態等があり、各構造部材にとって最も厳しい条件や荷重の頻度分布を求める場合の各積み付け状態の発現確率の設定が必要である。

(3) 高精度船体運動・波浪荷重解析法

従来の設計法では、船体の運動応答特性、荷重応答特性に拘らず模式化された荷重設定式から波浪荷重を求めるのが通常である。新船体構造設計法では、時々刻々変化する船体応答、荷重応答及びその他の特殊荷重を高精度に解析することを基本とし、問題点を調査検討した。

(a) 線形／非線形船体運動・波浪荷重解析法

先ず、線形解析法については、通常のストリップ法の適用性を補足調査した。従来、ストリップ法は、コンテナ船を供試船とした SR200 部会第12分科会の詳細な検討結果などを踏まえ、実用的に確立した線形解析法として船体運動・波浪荷重の解析に広く用いられているが、これを補足する意味でストリップ法のタンカー船型に対する適用性について試解析した。この結果、

- ① タンカーのような低速船では、追波中の計算に特別な工夫をしなくても各種ストリップ法による波浪

荷重の結果に差がない。

- ② 一方、斜波中の荷重は、図 2.1.4 に示すように計算法の種類 (NSM, STF 等) によって結果が大きく異なるため、適用する解析法の種類を慎重に選択する必要がある。

ことが判明した。

さらに、特にタンカー船型のとき問題となることが予想される、倉内荷油の運動の船体運動に及ぼす影響についても調査した。この結果、荷油の水線面積が船体の水線面積の $1/4$ 程度でも横揺れ、左右揺れ応答に大きな影響を及ぼすことが判明した。従

って、タンカーの荷重解析では、内荷重としての荷油の影響以前に、船体応答に対する影響を正しく把握する必要がある。

一方、非線形解析法については、水線面下の形状変化に伴う非線形性やスラミング衝撃力を考慮した非線形船体応答計算プログラムを用いて同じくタンカー船型について試解析を実施し、次の事が判明した。

- ① 垂直波浪荷重については、スラミングを生じない場合には非線形性の影響は余り大きくなないが、スラミングが発生すると波浪荷重は急激に増大する。
- ② 水平波浪荷重については、横揺れが小さいときには非線形性の影響は余り現れないが、横揺れの大きい斜め追い波の場合には非線形性の影響が現れる。
- ③ 斜波中では、復元力が存在しない運動モードに数値ドリフトが生じるが、このドリフトの影響は運動計算には余り顕著に現れないものの、波浪荷重には敏感に現れ、これによって著しい精度の低下や計算不能が生ずる。

但し、非線形荷重を時系列シミュレーション法により求める場合、統計的解析結果の信頼性は時系列の長さに依存するため、計算する時間の長さの選定は慎重に行わねばならない。

(b) 特殊荷重解析法

局部強度検討において特に必要な、波浪衝撃荷重、スロッシング荷重、鉱石荷重、コンテナ荷重推定の現状と問題点について調査検討した。

① 波浪衝撃荷重

通常、局部荷重としての波浪衝撃荷重推定は、(船体運動推定) → (衝撃時の海面と船体の相対速度推定) → (圧力推定) のステップによっている。最近、西部造船会が簡易推定法を提案し、この方法で推定した高圧域は実船の損傷箇所とよい一致を示す。しかし、この方法は損傷逆解析ベースの推定法であるため、実績のない新型式船への適用に限界があるので、別途数値解析法を用意しておく必要がある。

② スロッシング荷重

通常は、船級協会規則に従って設計時の検討がなされている。一方、近年急速に発達した数値流体力学の手法を応用したシミュレーション解析の研究も進められ、差分法、境界要素法、有限要素法などの計算手法が試されている。内構部材がある場合やタンク天井との衝突も計算できるようになってきているが、表面波

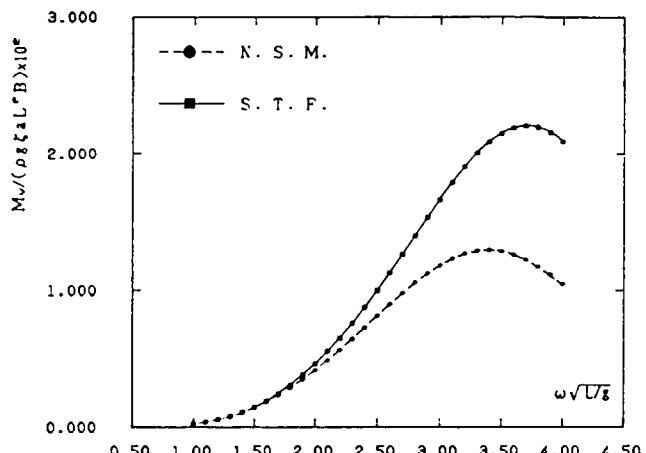


図 2.1.4 斜め追波中の
縦曲げモーメント

の巻き込みやタンクコーナーでの空気閉じ込めなどの処理はまだ解決されていない。

③ 鉱石荷重

静的荷重に関しては、鉱石と側壁との摩擦の影響や載荷の荷姿の影響を考慮した荷重推定が可能な実験式が得られている。3次元有限要素法による解析も可能である。鉱石が締め固まる現象や、荷崩れの影響も含む変動荷重成分については十分解明されていない。

④ コンテナ荷重

二重底ガーダや、セル構造のピラーおよび船側構造に加わる集中荷重は、船体運動による加速度として評価され、構造応答計算に使用されている。マトリックス法を用いて、コンテナ剛性を考慮した船倉内コンテナの動的応答を計算する方法も研究されているが、新規に研究すべき重要な課題はない。

(c) 複合荷重解析法

- ・船体構造には、複数の波浪荷重が位相差をもって作用し、構造応答はこの荷重位相差に大きく依存する。
- ・複数の波浪荷重の位相差に注目した研究は、以前から行われており、「縦強度トータルシステム」、「横強度トータルシステム」等の提案があるが、計算規模がかなり大きなものとなること及び結果の評価基準が確立されていない等の理由で定性的なものにとどまっているのが実情である。
- ・構造設計に用いる汎用性のある手法としてFEMによる全船一体解析があり、検討すべき海象条件がいくつかに特定できれば、かなり詳細な検討が可能である。
- ・全船一体解析を用いて構造強度を判定するために統計処理まで行う場合には膨大な荷重ケースとなる。そこで図2.1.5に示すように単位荷重に対する応答を求めておき、これを線形重ね合わせることにより最終応答を求める手法（離散化解析法）が試みられている。この手法を用いることにより、線形重ね合わせが成り立つ範囲内においては、複合荷重下における応答推定及び設計荷重の検討等を比較的容易に行える。
- ・但し、下記のような荷重推定上の問題が残されている。
 - ① 各荷重の位相差の推定精度確認
 - ② 加速度による内圧変動分布設定法
 - ③ 動的鉱石圧の設定法
 - ④ 水線面上の変動圧力分布設定法

(d) 確率論的手法による荷重応答予測法

船は確率過程と見なされる海洋波中を航行するので、船体構造設計において荷重評価のみでなく応力、強度評価にいたる全ての過程で確率論的予測が基本となる。

座屈設計で必要な最大荷重、疲労設計において必要な荷重の頻度分布とともに確率論的手法で精度良く解析するには荷重の正

確な短期及び長期分布を求めなければならない。また、強度の最終的な評価を信頼性解析のレベル2で行おうとすれば、例えば座屈解析では最大荷重の平均値、標準偏差が必要となる。これらの値は元の母集団の形、すなわち長期分布のパラメーターと密接な関係があり、この意味からも長期分布の分布形を正しく求めておかなければならぬ。また長期分布特性を精度良く推定するためには、複数荷重の同時性、荷重の非線形性及び波浪や船体の積載条件などの統計的特性を正確に把握しておくことが必要となる。ここでは線形、非線形応答・荷重の短期、長期予測を対象に以下の項目について調査、検討した。

- ・想定海象と波浪荷重の長期分布のバラツキについては、同一海域を同一期間航海した35隻の船舶の遭遇海

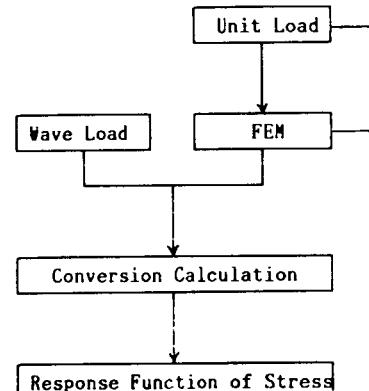


図2.1.5 縮小化手法の計算フロー

象を調べた結果、船毎の遭遇海象のバラツキが大きいことが分かった。また、これらの海象に基づいて計算された波浪荷重の長期分布のバラツキも大きいことが分かった。

- ・長期分布のパラメーターと海象の波高分布のパラメーターの関係については、長期分布及び波周期別波高頻度分布とともにワイブル分布で近似した場合のそれぞれのパラメーターの関係について検討した。
- ・荷重の同時性、非線形性を考慮した解析を行う場合の短期及び長期予測法について検討し、解析フローを作成した。
- ・複数荷重の同時性を考慮した場合の荷重の短期応答を求める方法について検討し、荷重間の相関係数を用いて合成応力の予測値を求めることが出来ることを示した。
- ・弱非線形応答の短期予測を汎関数展開法によって行う場合について検討すると共に、現状の研究例について文献調査に基づき検討した。コンテナー船の縦曲げモーメントの計算例を図 2.1.6 に示す。その結果、弱非線形の仮定を用いた確率論的手法の実用化を計るために、相当な検討作業が必要であることが確認された。

(4) 強度評価のための荷重設定法

これまでの荷重解析法の基本機能に関する検討をもとに、荷重-構造応答-強度評価のプロセスから成る船体構造設計法のための荷重解析の基本フローを図 2.1.7 に示す。

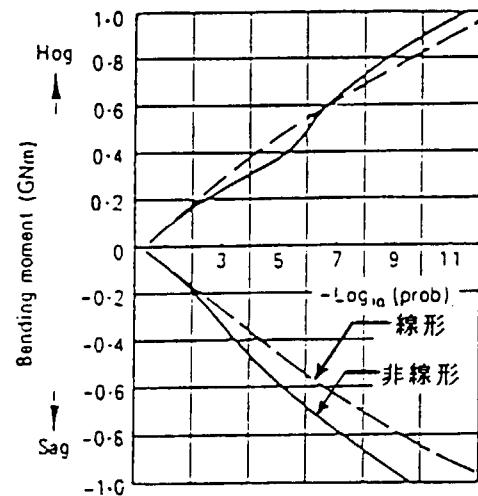
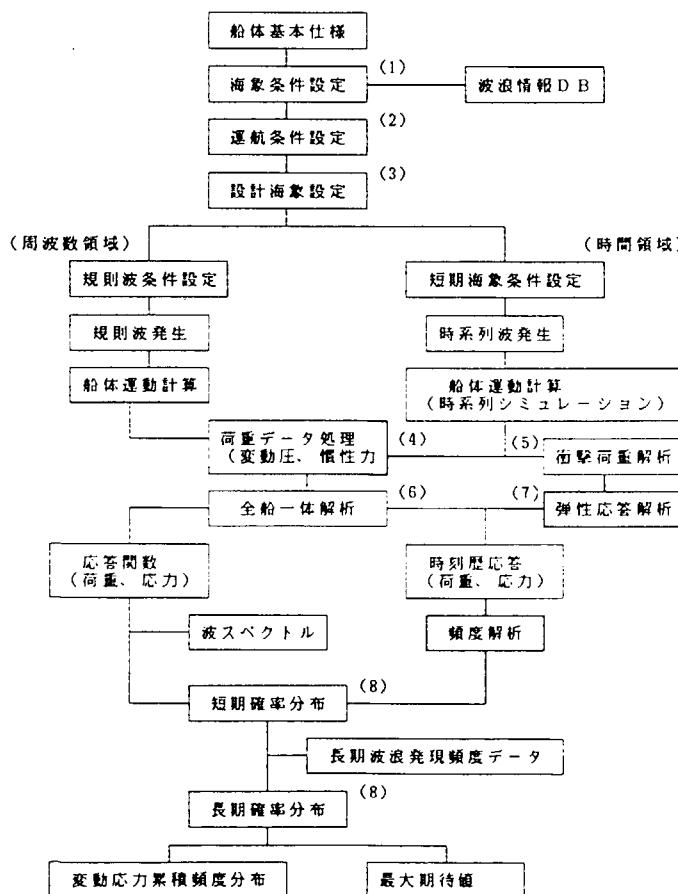


図 2.1.6 縦曲げモーメントの長期分布計算例
(コンテナー船, $F_n = 0.24$)



(補足 説明)

- (1) 標準航路又は指定された航路に従って海象条件を設定する。
- (2) 積み付け条件、運航モデル（荒天中の減速、変針）設定する。
- (3) 各強度評価に適合した海象を設定する。
- (4) 内／外荷重の同時性、荷重のバランスを考慮する。
- (5) スラミング、スロッシング、局部波浪衝撃圧を解析する。
- (6) 離散化手法により迅速解析する。
- (7) 別途、弾性モデルを作成する。
- (8) 弱非線形応答を仮定した確率論的予測法も持つ。

図 2.1.7 荷重解析基本フロー

この基本フローに従って、各強度評価の荷重設定法に適合した荷重が解析されねばならない。そこで、各プロセスに跨って横断的に荷重設定法を検討した。

(a) 座屈・崩壊強度評価のための荷重設定法

(i) 座屈設計法の構成と荷重条件

座屈設計法の基本構成は、従来の設計法にはほぼ等しい、通常航行時に働く荷重条件である通常リスク条件による、信頼性評価手法を用いた「座屈検討」と、船体の安全性を評価する、船齢に相当する期間に一度遭遇するような荷重条件である最大リスク条件による、レベル2を用いた「崩壊検討」の2段階となっている。「崩壊検討」では、荷重に起因する船体の崩壊モードを抽出し、次いで、全体構造、部分構造、構造要素の3段階に階層化された船体構造を、上位構造から下位構造へと解析・評価を行う流れとしている（2.2 座屈・崩壊強度の高精度解析法参照）。従って、座屈設計法では、「座屈検討」と「崩壊検討」における及び座屈・崩壊強度の解析・評価の各段階毎に、荷重を設定する必要がある。

(ii) 座屈設計法における荷重条件の特徴

- ・座屈・崩壊強度を評価するために、静的荷重と主に波浪に起因する動的荷重を組み合わせた、発現頻度の稀な極めて大きな荷重を対象とする。
- ・「崩壊検討」はレベル2による信頼性手法によるため、任意の発現確率に対する正確な荷重値が必要である。
- ・「崩壊検討」では、階層的に応答・強度解析と評価を行う為、応力解析も膨大になることが予想され、解析効率の向上を図ることが重要である。
- ・複合応力状態を評価する必要があるので、構造応答解析後に各応力の同時性を考慮できることが必要である。

(iii) 波浪荷重の取り扱い手法

線形波浪荷重の取り扱い方としては、統計的予測による荷重推定と等価規則波を用いる代表海象の推定の2種類の方法が考えられる。

上述した座屈設計法における荷重条件の特徴から見て、それらの手法には一長一短があり、その選択は今後の課題である。

大波高による縦曲げモーメント、あるいはスラミングに代表される衝撃荷重などの非線形波浪荷重は、船体の崩壊に直接的に影響する荷重である。従って、座屈設計法として高精度の極限海象を設定する手法と時刻歴荷重解析法の確立が期待される。

(b) 疲労・破壊強度評価のための荷重設定法

- ・疲労設計は統計的予測手法を基本とするので、線形荷重・応答解析を実施する。
- ・非線形応答を考慮する必要がある対象については、応力応答の長期予測結果に重ね合わせて取り扱う等の簡略化を計る。
- ・又、不安定破壊解析を行う場合には、船舶が遭遇する可能性のある最も厳しい応力状態を考慮する。
- ・疲労・破壊強度解析における荷重設定は解析の各ステップに対応して、次のようになる。

① 精査必要箇所の選定対応（一次判定）

代表海象設定法により、一次判定用の等価規則波を設定して荷重解析を実施する。

② 詳細解析対応（二次判定）

統計的予測手法により、構造部材に作用する応力の統計量（短期、長期）をもとめる。このため、船体

全体に作用する圧力と加速度の応答関数を、積み付け、波長、出会い角、船速等をパラメーターとして準備する。

非線形荷重については、代表的な短期海象について非線形時刻歴解析を行い、線形解析結果と比較して、線形解析結果を修正するなどの簡易手法を導入する。

(c) 構造応答解析のための荷重設定における留意点

構造応答解析のための荷重設定法として重要なことは、船体内外に作用する各種荷重の同時性を考慮して解析すること、膨大な荷重ケースについての構造解析を迅速に解析する手法（離散化手法等）の開発である。

(d) 信頼性評価のための荷重設定における留意点

新船体構造設計法ではレベル2の信頼性評価法が想定されている。レベル2で必要となる荷重の統計量は荷重の平均値と分散である。これらの統計量によって信頼性が決まるのでその推定精度の向上が必須なものとなる。このためには、信頼性手法を適用する場合に問題となる応答の長期分布特性の精度に影響を与える要素について検討した。

これら要素としては、船速、積み付け状態等の船体状態、波との出会い角、波スペクトルの形状及び長期波浪統計量が考えられる。又、非線形時刻歴解析によって荷重の最大値を求める場合には、得られた荷重の最大値の統計的特性をどの様に推定するかが重要である。

2.1.3 研究開発課題と解決策

(1) 波浪情報データベース

新船体構造設計法で必要とされる精度の高い波浪情報データベースの構築は以下のような開発手順で進めて行くべきである。波浪情報源としては、世界各国の気象機関で所有している船舶通報データと、Hindcastによる波浪推算値の結果並びに沖合波浪ゾイのデータを対象とする。これらを基に、波浪情報の「基本情報データベース」を構築する。次に、基本情報データの補正法、データ処理法や表示法の基盤技術を開発し、それらの技術を駆使して、基本情報データベースから波浪発現頻度表、波向・波高結合分布等の「代表値データベース」を構築する。これらのデータベースの概要を図2.1.8に示す。又、このデータベース拡充のためには将来の関連分野の進歩に対応して、データの追加更新を行う必要がある。

その他の課題として

- 波スペクトル、波浪時系列データの新規収集により、波浪荷重の更なる高精度化を図ることが出来るが、これらデータは多くの応用分野に関連するので別途の考慮が必要である。
- 又、設計に使われるデータという性質上データベースから出て来る結果は国際的に公表し、広く認知される必要がある。

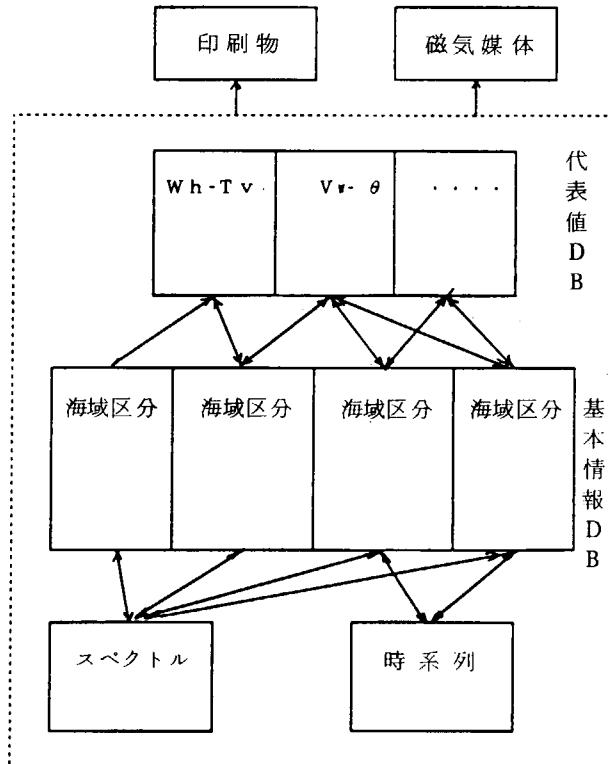


図2.1.8 波浪データベースの概要

(2) 設計荷重算定のための海象設定

(a) 統計的予測

線形重ね合わせ理論に基づいた統計的予測手法は一応確立しているので、波浪データから応答の長期予測に到る解析のプロセスで波浪データの統計的特性、航路・操船法・載荷状態等の運航条件、船体運動・荷重解析精度及びその精度が長期予測に与える影響を体系的に調査・研究する必要がある。

また、構造解析のための荷重ケースが膨大となるので大型構造モデルを用いた設計法に本手法を適用するためには離散化手法のような迅速解析法の開発をもって実用化される。

一方、次節で述べるように、非線形荷重や荷重の同時性を扱う確率論的計算法の発展によって本手法の適用範囲の拡大が期待できる。

(b) 極限海象

極限波浪モデルの設定のためには、波浪特性と応答の関係に関する体系的な研究及びそのような波の発現確率の裏付け方法の確立が必要である。

(c) 代表海象

今回の調査で示された確率論的手法に基づいた等価規則波をもとに、代表海象の設定ができる。このためには、主要な構造強度を漏れなく精査するための等価パラメーターの選定と対応する等価規則波の設定法の確立が必要である。

(d) 運航条件

波浪中の船速、波との出会い角が波浪荷重に与える影響が大きいことが試験結果判明した。このことは荷重解析における合理的な操船モデルの検討が重要であることを示す。設計上、操船影響を合理的に考慮するためには、荒天中の人為操船の実態を把握することが肝要であるが、調査に可なりの時間を要するので波浪による自然減速・変針の解析法の実用化が第一段階として必要である。これと並行して、波浪中における人為操船やウエザールーチング技術の進歩による荒天回避の効果などの調査を別途推進する必要がある。

(3) 高精度船体運動・波浪荷重解析法

(a) 線形／非線形船体運動・波浪荷重解析法

船体構造設計の合理化・高精度化が進むと、強度解析の目的や要求する精度に応じて使用する解析手法が使い分けられることが必要となる。

初期計画段階や疲労・破壊強度解析時等の局面では線形解析法が用いられる。船体運動・波浪荷重の解析において、実用的に最も簡便な線形解析法はストリップ法であり、ストリップ法の中では最も厳密な理論である STF 法が最も確からしい荷重を与えることが予想されるが、各種船型に対する模型実験との比較を含めた広汎な実験の積み重ねにより適用性の確認が必要である。しかし、特に船首尾部のように 3 次元影響の大きい部分の評価や水線面付近の波の隆起、船体長手方向の入射波の変形を考慮した波浪変動圧力の推定には

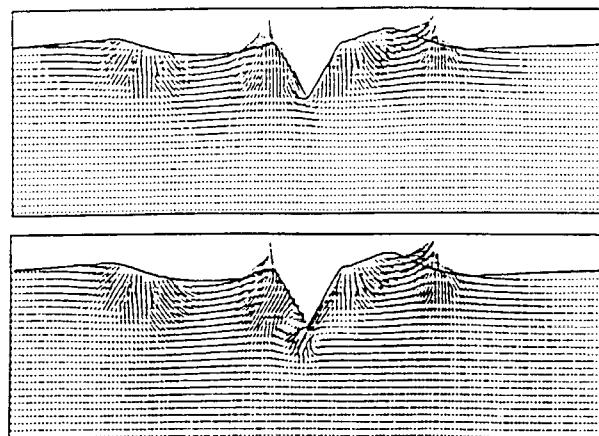


図 2.1.9 差分法による計算例

(三角柱の水平動揺の例)

ストリップ法は限界があり、3次元特異点分布法、境界要素法、差分法の導入を含めて、引き続き線形荷重解析法の高精度化・厳密化が必要である。差分法による解析例を図2.1.9に示す。

又、座屈・崩壊強度解析や特殊な場合の疲労・破壊強度解析には、波高に対する非線形性やスラミング等の衝撃的荷重を含めた非線形解析法が必要となるが、これの適用に当たっては次の点に注意した手法の開発が必要である。

- ① 非線形な波浪荷重で最も重要なものはスラミングによって生ずるが、その発生は船の航行能力、操船・操舵能力に大きく依存する。非線形性が重要となる大波高の波の中では特に、これらの能力を明らかにしなければ、正確なスラミングの発生は把握できない。
- ② 斜め波中において非線形解析を行う場合には、復元力がない運動モードに生ずる数値的ドリフトに起因する精度の低下や計算不能を排除した新解析法の開発が必要である。又、より実際の荷重条件に即した手法にするためには、波浪中の船体に作用する漂流力や操船の影響を考慮した解析法の開発が必要である。

ところで、船体運動・波浪荷重の解析は、前述のように解析の目的や要求される精度によって線形解析法と非線形解析法を使い分けることになる。又、非線形解析による場合でも現象の非線形性の強さの程度を相対的にしろ認識することは、解析結果を評価する上で有用である。波浪荷重の特性を非線形にすると考えられる船型、波向き、波長、波高、船速等の要因の組み合わせによって現象の非線形度の強さを表すパラメータを構築することが必要である。

(b) 特殊荷重解析法

特殊荷重解析法の一部は従来技術を導入してシステム開発する。又、これと並行して波浪衝撃圧、スロッシング荷重に関しては流場の離散化表現を用いた数値解析法の研究が必要である。一方、鉱石荷重に関しては、鉱石の締め固まりや荷崩れの影響等計算による取り扱いが難しい問題があるため、実船計測による現象の解明とデータの蓄積も重要である。

(c) 複合荷重解析法

複合荷重解析法の課題は、解析法構築、各要素荷重推定精度向上及び強度判定法との連結方法の構築に分けられる。

① 解析法構築

全船一体解析をベースとした簡略手法（離散化解析法等）の構築及び詳細解析法との併用法の開発

② 各荷重要素推定精度向上

船体内外荷重の位相差の精度向上及び水線面上の波浪変動圧分布、加速度による内圧変動圧分布、動的鉱石圧分布等の実用的設定法の構築が必要である。

③ 強度判定法との連結方法の構築

荷重推定－強度解析－強度判定の中での複合荷重推定の位置付けを明確にする。

(d) 確率論的手法による荷重応答予測法

線形応答系への適用は実用化されているが構造応答は本来非線形応答系であり、又複数の荷重成分を扱うので次の課題を克服することによって、確率論的予測法の適用範囲の拡大を図る必要がある。

- ・複数荷重の同時性、非線形応答系を扱う確率論的計算法の開発
- ・スラミングの様なある閾値を越えると発生する現象を扱う確率論的計算法の開発

(e) 強度評価のための荷重設定法

前項までに構造設計上必要な荷重解析の基本機能に関する課題を述べた。

これらの基本機能に基づいて各強度評価に適合した荷重設定法を確立する必要があり、そのための開発課題を以下に述べる。

(a) 座屈・崩壊強度評価のための荷重設定法

- ・大波高領域における波浪データ、操船法などの基本データの精度向上

発現確率の低い大波高領域の波浪データを必要とするが、データの数が少なく、精度向上を図るためにには、データの収集が必要である。

・また、極限海象時の船体に働く荷重に対し、船速、波との相対出会い角などの条件の影響が大きい。実状にあつた検討が必要である。

- ・線形波浪荷重設定法の確立

「崩壊検討」での階層的な解析・評価における荷重条件の与え方として、手法が既に確立されている統計的に予測する手法の場合には問題はないが、代表海象を設定する手法の場合には、検討すべき課題が少なくなつ。すなわち、代表海象を設定する手法の精度及び適用上の限界の確認、あるいは必要に応じた修正法の検討等による手法の構築が必要である。

- ・非線形波浪荷重設定手法の構築

座屈設計法の精度に大きく影響する非線形波浪荷重を高精度に求めるためには、極限波浪の高精度推定と非線形時刻歴解析法の確立が必要である。このためには、現実の波に近い双峰型スペクトルも表現できる多種のパラメータで整理された波浪データによる精度の確認が必要であるが、データの収集及び手法の確立には長期を要する。

暫定的手段として、非線形波浪荷重を求める近似手法が必要であろう。例えば、スラミング、ホイッピングなどの衝撃荷重とその応答に対しては、波浪条件を正面波に制限した非線形時刻歴解析を行い、その他の非線形波浪荷重に修正を施す方法等が考えられる。

(b) 疲労・破壊強度評価のための荷重設定法

- ・精査必要箇所選定のための代表海象設定条件の確立
- ・変動応力の長期頻度分布予測法の開発
- ・スラミング等の非線形荷重による変動応力の長期頻度分布への算入法の開発
- ・膨大な荷重ケースの合理的な取り込みによる効率的な荷重設定法の開発

(c) 信頼性評価のための荷重設定

構造設計に信頼性評価を適用するためには、荷重・応力の長期分布に影響する諸因子の統計的特性の定量的把握が必要である。

2.2 座屈・崩壊強度の高精度解析手法

2.2.1 現状と問題点

近年の土木・建築・原子力機器等の構造物の分野についてみると、大規模かつ大型の接合構造物の座屈実験の実施と共に、非線形解析技術の急速な発展による座屈及び崩壊挙動のパラメータサーベイが可能となつたことにより、座屈設計法、座屈基準をより合理的なもの、即ち、従来の「公式による設計」に対し、詳細な応力解析による応力分布を座屈という損傷様式に対し評価し得るような設計基準が整備されるようになつた。更に、最近では信頼性評価手法の導入、及び最終耐力に対する余剰強度を考慮した部材の座屈安全率の設定が行われ始めている。

一方、船体構造設計においては、近年、有限要素法を用いた直接強度計算が多く用いられるようになってきては

いるが、基本的には船級協会規則に基づいた許容応力法による設計手法がとられている。このような設計法は多くの実績より検証された簡便な設計法であるが、その中には様々な不整合な点が少くない。特に、全体強度と局部強度のバランスがとれていない、即ち、強度の配分が合理的とはいえない欠点がある。

全体強度から局部強度まで真に整合性のとれた、合理的な船体構造を設計するためには船体の最終強度に基づく信頼性評価手法を取り入れた抜本的な座屈設計法の構築が必要である。そのためには次の主要課題が挙げられる。

図 2.2.1 は、これらの主要課題の相関を示したものである。

- (1) 荷重条件の設定、精査必要箇所の選定、強度解析と評価、評価結果に基づく構造寸法及び最適配置の決定などからなる座屈設計法の基本的な構想の確立
- (2) 荷重、材料強度等のばらつきを把握した CAPACITY と DEMAND を求め、信頼性評価を行う手法の確立と、精査必要箇所の選定手法の確立。
- (3) 計算時間と労力のかからない迅速解析法の開発及び再設計・最適設計の為の座屈・崩壊強度の再解析法及び感度解析法の開発。

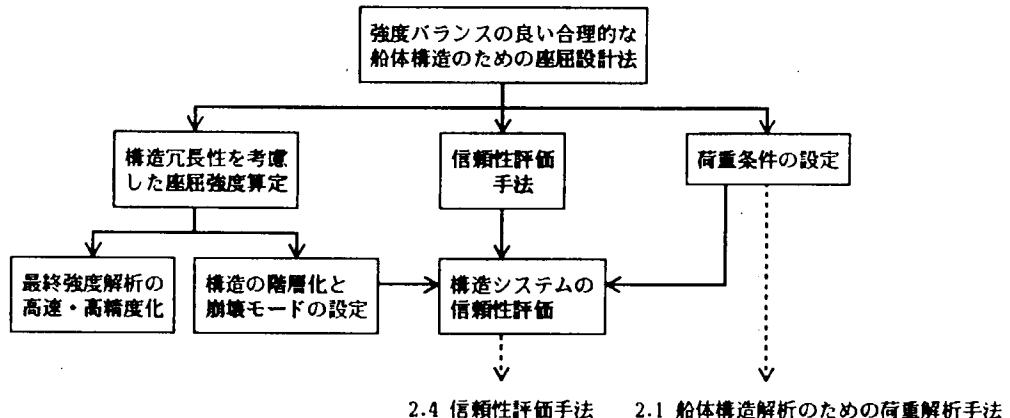


図 2.2.1 座屈設計法の主要課題

本研究は、上記課題を解決するための予備調査と、それを基に座屈設計法の確立とシステムの構築に関する研究開発の立案を行うことを目的として実施した。

2.2.2 調査検討の概要と検討結果

前述の(1)から(3)の主要課題に関する調査・検討の概要を、座屈設計法全体の基本的な構成、また座屈設計法の骨子である船体全体構造の崩壊に対する強度評価手法及び本設計法の主要な要素技術である座屈・崩壊強度の算定法の3項目に分けて報告する。

(1) 座屈設計法の基本構想

(a) 座屈設計法の基本方針

土木・建築・原子力及び海洋構造物などの大型の鋼構造物を対象とする分野の座屈強度に関する研究及び設計基準の動向を調査し、船舶に適用する座屈設計法の基本的な考え方について検討した。その結果、今後の座屈設計法は次の①～③の基本方針に沿って構築すべきであると考えられる。

- ① 強度の基準として最終強度を探り、構造物の冗長性を考慮する。

ここで、構造物の冗長性とは、構造物の局部の座屈から構造物全体の崩壊に至る余裕の度合を示す性質を意味する。具体例として、川本らによる二重底の最終強度（座屈・崩壊強度）の解析の一例を図2.2.2に示す。二重底の船底外板の座屈発生から二重底構造全体の崩壊までは、かなりの余裕があることが判る。従来の船舶の座屈設計基準では、局部の部材についても一律に座屈を防止するという基本的な考え方に基づいており、座屈以後の強度の余裕、即ち構造物の冗長性を考慮していない。

強度上のバランスのよい、合理的な設計を行うためには、構造物の冗長性を考慮して、最終強度を強度評価の基準とし、各部材の重要度に応じて強度評価を行うことが必要である。最終強度を基準とするというこの方針の意味するところは、単に座屈を許容するか否かと言うことではなく、構造物全体として強度バランスの良い設計を指向するということである。

② 信頼性理論に基づく強度評価を行い、船体構造をシステムとして捉える。

信頼性解析手法としては、原則的に信頼性指標(β)を用いたレベル2法によることとする(2.4信頼性評価法参照)。この信頼性指標を用いた評価を行うことにより、全く経験のない構造様式の船舶に対しても従来の構造と同じ程度の安全性を持った設計を行なうことが可能となる。

船体構造は不静定次数の高い、複雑な構造物であるために、一度に全体構造からパネル、スチフナー等の構造要素のレベルまで信頼性理論に基づく強度評価を行うことは困難である。そこで、まず図2.2.3にタンカーの例を示すように、船体構造を構造要素(パネル、防撃板など)一部分構造(上甲板、船側構造、船底構造など)一全体構造の3段階に階層化し、船体構造をシステムとして捉え、全体崩壊から構造要素の座屈迄を一種の冗長を有するシステムとして系統的に把握し、冗長性を有するシステムに関する信頼性理論を適用して、信頼性評価を可能とする必要がある。

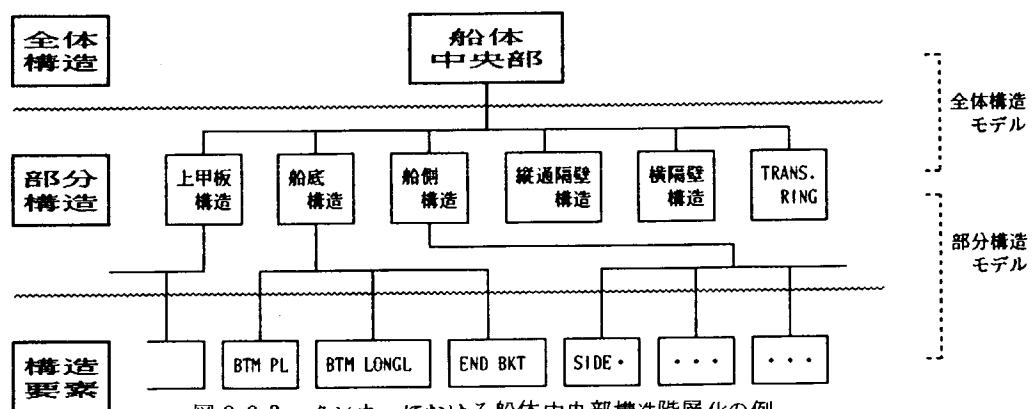


図2.2.3 タンカーにおける船体中央部構造階層化の例

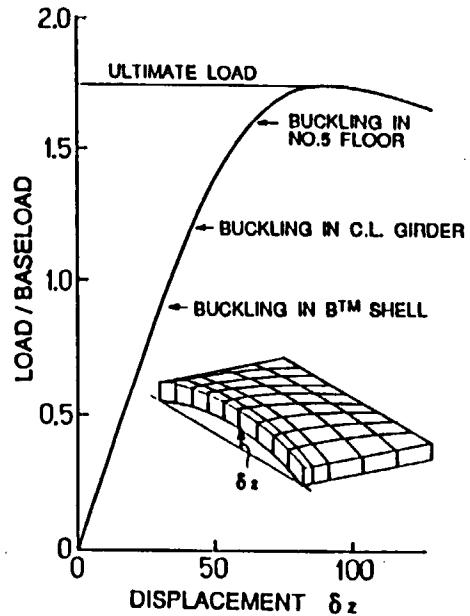


図2.2.2 川本らによる二重底の座屈・崩壊強度解析例

(3) 荷重条件として、最大リスク及び通常リスクの2つの条件を設定する。

航空・宇宙の分野では制限荷重と終極荷重、原子力の分野ではプラント状態I～IVといったように、複数の荷重レベルを設け、各々の荷重レベルに対応した損傷の程度を想定した評価を行っている。これにより、合理的な強度設計ができるよう配慮されている。一方、従来の船舶の設計基準では、荷重のレベルとそれに対応する損傷の許容量が明確になっておらず、合理的な強度設計の妨げとなっている。そこで、本座屈設計法では、通常の運航状態に生じる荷重に対応する通常リスク条件と、船が寿命中一度遭遇するような極限荷重に対応する最大リスク条件を設定する。通常リスク条件は、構造の初期寸法を定め、座屈検討を行うために用いられ、最大リスク条件は、船舶の全体構造の崩壊に関与する重大損傷を崩壊モードとして想定し、その崩壊を防止するように船舶の安全性の面から検証・設計するために用いられる。

(b) 以上の3つの基本方針を考慮した座屈設計法は、

図2.2.4に示すように、通常リスクに対応する荷重に対して船体各部位の部材寸法に関し座屈検討を行うための「座屈検討」と、最大リスクに対応する荷重に対して船体の折損等の全体構造の崩壊を防止するための「崩壊検討」との2段階で構成される。

通常リスク条件に対する「座屈検討」では、線形FEM解析による全船一体解析の結果を基に、信頼性理論に基づくレベル1法あるいはレベル2法による座屈検討を行い、船体各部位の部材寸法を定める。この「座屈検討」は、外見的には従来からの弾性設計法と同様のものであるが、評価に際して信頼性理論に基づく部分安全係数あるいは信頼性指標を用いる点が従来の設計法と異なる。

「座屈検討」による船体構造の部材寸法が一応求められた段階で、座屈・崩壊強度を評価基準とし、最大リスク条件における崩壊を防止するように安全性の面からの検証を行い、全体的に構造強度のバランスがとれた設計を実現する「崩壊検討」を行う。

「崩壊検討」は、全体構造一部分構造一構造要素に階層化された船体構造を、予め抽出される縦曲げモーメント、スラミング衝撃などの崩壊状態に対応した崩壊モード毎に全体構造から構造要素へ、即ち、上位構造から下位構造へとレベル2法による信頼性評価を行い、必要に応じた部材寸法の変更を繰り返しながら、最終的に最適な強度配分が得られる構成となっている。

(c) 荷重条件のあり方

座屈設計法において荷重条件を設定する上で、次の点に留意する必要がある。

- ・「座屈検討」における全船一体解析のための荷重条件と、「崩壊検討」における階層的構造応答解析のための荷重条件を設定する必要がある。
- ・「崩壊検討」では、階層的に構造応答解析を行うために解析量が膨大になる。
- ・複合応力状態の座屈強度評価のために、応力の同時性を考慮する必要がある。

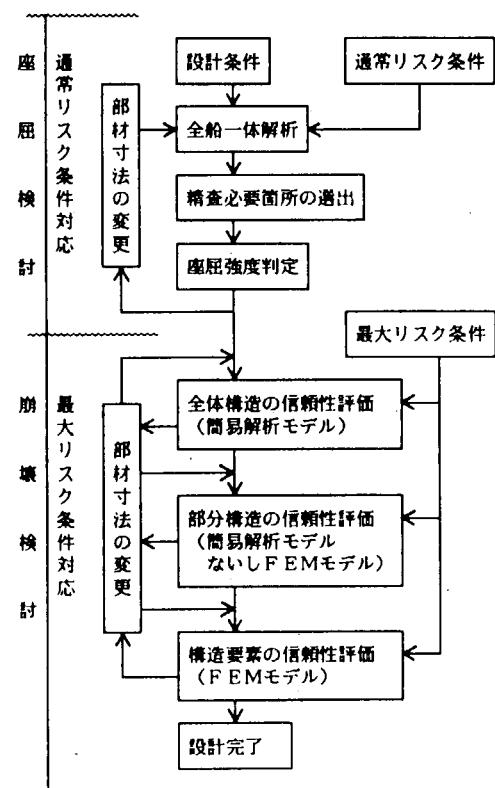


図2.2.4 座屈設計法の基本構成

以上の点を考慮して、特に高精度が要求され、解析量が膨大となることが予測される「崩壊検討」における階層的に行う構造応答解析のための波浪荷重の設定法を確立することが重要である。

線形的取り扱いのできる波浪荷重の場合には、いわゆる統計的に予測する手法と代表海象を設定する方法の2種類が考えられるが、どちらも一長一短があり、今後これらの問題点を考慮して最適な荷重設定法を検討していくことが必要である。特に、統計的に予測する手法を採用する場合には、先に述べた応力の同時性を満足する評価関数（「等価」応力）を確立することが必要である。

スラミング衝撃などの非線形的取り扱いを要する波浪荷重については、理論的であり、かつ高精度が期待される、実際の波を表現できる波の因子の長期頻度分布データと時刻歴解析法を用いる手法の開発と共に、暫定的に極限海象を設定する方法などの近似的な手法も構築する必要がある。

(2) 崩壊検討手法

座屈・崩壊強度評価を行う座屈設計法の骨子である「崩壊検討」について、その強度評価の考え方、流れ及び設計の合理化を図るために部材重要度の導入などの検討を行った。

図2.2.5は、崩壊検討の全体フローを示したものであり、大きく初期設定と、全体構造、部分構造及び構造要素の各構造レベルの強度評価の4段階に

分けられる。以下では、このフローに従い、崩壊検討の要点を説明する。

(a) 初期設定

初期設定では、初めて崩壊状態の設定と船体構造の階層化を行い、この設定された崩壊状態と階層化構造を基に、荷重条件と許容信頼性指標の設定、更に崩壊モードの抽出といった、いわゆる強度評価に進むための準備を行なう。

崩壊状態の設定とは、船体構造とそれに働く荷重の特性から、JACK KNIFINGあるいはスラミング衝撃などの”意図する期間内において、その船体構造の機能喪失を生ぜしめる”崩壊状態を、強度設計上必要十分に網羅することである。崩壊状態の設定に伴い、各崩壊状態に対応した荷重条件の設定が可能となり、また、船体構造の崩壊に対応した許容信頼性指標 (β_{all}) が設定される。

次いで、設定された崩壊状態を船体構造のFAULT TREEのTOP EVENTとして、階層化された船体構造についてFTA (FAULT

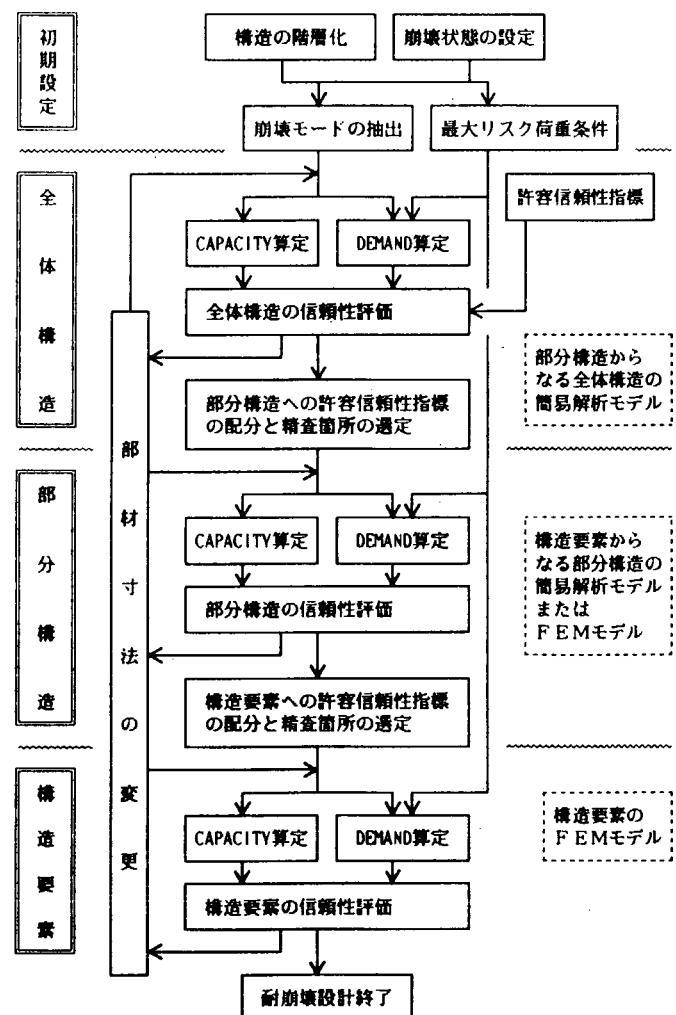


図2.2.5 崩壊検討フロー

TREE ANALYSIS)を実施し、船体構造が崩壊にいたるメカニズムを明確にし、強度設計を行なう上で過不足のない崩壊モードを抽出する。初期設定に続いて行われる強度評価では、ここで求められた崩壊モード毎に信頼性評価を行う為、抽出の漏れは強度評価の欠落を意味するので、崩壊モードの抽出手法の確立は今後の重要な課題である。

船体構造に関しFTAを実施するに際し、冗長性を有する船体構造の場合、全体構造の最終強度は、それを構成する構造要素が最終強度に至る履歴に依存するため、明快なFAULT TREEを描くことは困難であるが、船体構造を階層化し、一種の構造システムとして捉えることにより、FTAの実施を容易にすることができる。従って、崩壊モードの抽出を行う前に、船体構造を合理的に階層化する必要がある。

(b) CAPACITYとDEMANDの算定

初期設定に続いて、順次、全体構造、部分構造、構造要素の3段階の構造レベルの応力・強度の算定と信頼性評価を行う。崩壊検討フローにおける、全体構造及び部分構造などの個々の構造レベルにおける具体的な信頼性評価フローを図2.2.6に示す。

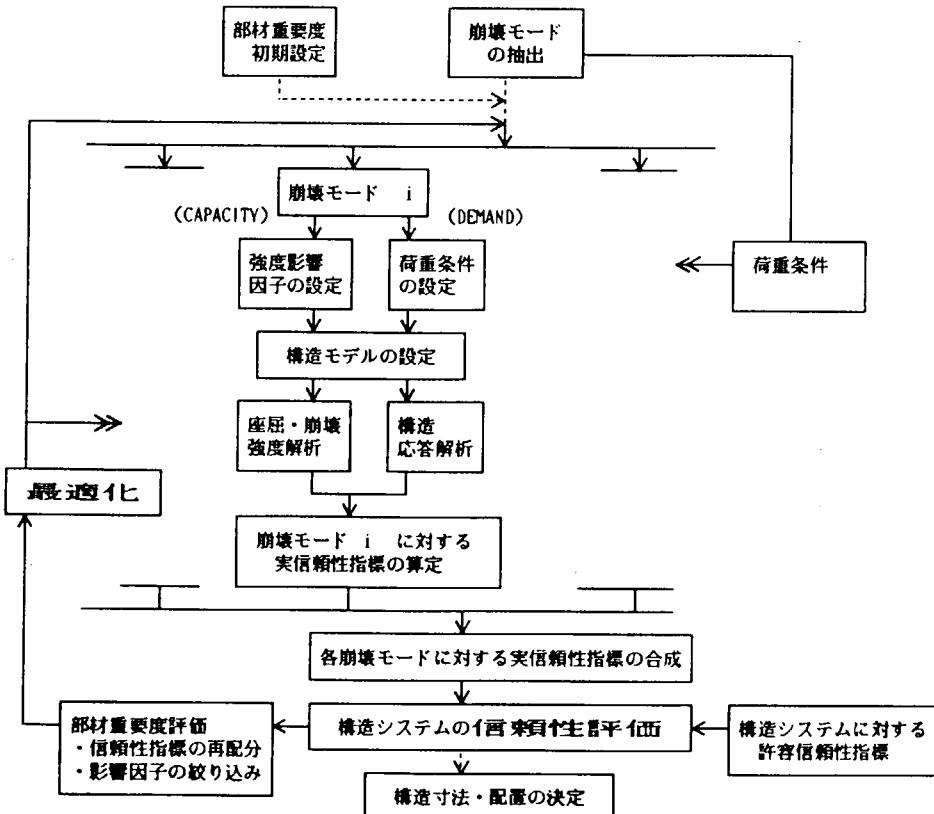


図2.2.6 座屈・崩壊強度評価フロー

レベル2法による信頼性評価を行うためには、その構造の持つ強度(CAPACITY)と、荷重条件に対する構造の応答(DEMAND)を算定し、各々が平均値と分散の形で与えられることが必要である。

CAPACITYとDEMANDの算定に用いられる構造解析モデルは、全体構造一部分構造、部分構造一構造要素の各構造レベルに適応したモデル化がなされていることが必要である。即ち、全体構造モデルの場合に

は、その強度評価を行う上で合理的な構造モデルであると同時に、構成要素である部分構造の強度特性が充分盛り込まれた、理想化された簡易解析モデルであることが要求される。また、部分構造モデルの場合には、その構成要素はパネル、防撲板などの構造要素であるが、理想化された構造要素を用いた簡易解析モデルあるいはFEMモデルが用いられる。構造を理想化するためには、座屈・崩壊強度に関する理論的研究と共に、数多くの解析と実験による検証を積み重ね、船体構造を構成する様々な構造の強度特性に関するデータベースが充実されることが必要である。

CAPACITY の平均値と分散を算出する場合、その構造システムの崩壊強度が、材料強度、工作誤差などの強度に影響する因子により陽な形で定式化されている場合には、各々の強度影響因子の確率的情報から CAPACITY の平均値と分散を求めることが可能である。しかし、座屈・崩壊強度の分野では、現在のところ、この定式化は防撲板レベルの構造要素に限られており、より大きく複雑な構造について定式化が行われていくことが望まれる。

定式化以外の方法として、ABS の Thayamballi らによる影響度指數を用いた方法が試みられている。この方法は、構造強度に影響を与える各因子の平均値の周りで数点づつ強度解析を行い、その因子の強度に対する影響度を求め、それらの一次近似として構造の持つ強度の平均値と分散を求めるというものである。さらに将来的には、各影響因子のばらつきを考慮しつつ解析を行う確率有限要素法を非線形問題に拡張したもの用いることも期待される。

(c) 信頼性評価手法

CAPACITY と DEMAND の算定に続き、それらの算定値を用いて信頼性評価が行なわれる。信頼性評価は、抽出された崩壊モードに対して求められた構造システムの持つ実信頼性指標 (β_{act}) を、その構造システムに対する全ての崩壊モードに関して合成し、予め設定されている許容信頼性指標 (β_{all}) との比較・評価することにより行われる。この比較を行うことにより、許容信頼性指標を満足しない場合には、その構造システムの最適化を行い、再度、解析と評価が繰り返され、許容信頼性指標を満足する場合には、次のステップである下位構造の強度評価へ進む。

(d) 部材重要度を適用した構造部材の最適化

強度の再評価に伴う最適化、あるいは次項で述べる精査検討箇所の選定などを合理的に行なう為に、各構造部材毎に強度の影響度、機能の重要度、さらに検査と補修の難易度を、定量的かつ総合的に評価した部材重要度という評価点を用いる。

この部材重要度は強度評価を始める前に設定されたものであるが、強度の影響度に関しては、初期の設定ではそれまでの経験を基に設定されるが、解析・評価を進める中で順次検証と再設定がなされ、解析結果に裏付けられた値が求められる。しかし、他の機能の重要度、検査及び補修の難易度については、初期設定以後は変更されず、その設定も多分に個人差が影響する恐れがあるため、その定量化にはファジィ理論などの導入を考える必要があろう。部材重要度の初期設定の例として、バルクキャリアーの甲板構造の場合を、表 2.2.1 に示す。

許容信頼性指標を満足しないということは、下位構造の構造寸法・配置が不適当であることを意味しているが、このことは同時にそれら下位構造に設定された部材重要度が不適当であることを意味している。従って、最適化においては、部材重要度の強度の影響度を再設定する必要がある。この再設定は、部材重要度をパラメータとした感度解析などの手法により、各下位構造の上位構造への強度影響の度合を求め、最適化の一環として行われる。

(e) 精査検討箇所の選定と許容信頼性指標の配分

上位構造の強度評価が終了し、下位の構造の強度評価へ移るに当り、下位構造の各々にその部材重要度に応じた許容信頼性指標を設定し、下位構造の信頼性評価の基準とする。

表 2.2.1 部材重要度初期設定値の例（バルクキャリアの場合）

構造分類		強度	機能	検査	補修	部材 重要度
部分構造	構造要素	γ_1	γ_2	γ_3	γ_4	γ
甲板 口側縁外 甲板構造 (E)	パネル (Se)	1.52	1.05 1.10	1.02	1.79	
	ロンジ (E)	1.60			2.01	
	ガ ダ 面材 (E)	1.52			1.91	
	スチフナー(SI)	1.36			2.01	
	T _R , B _{KT} , (M)	1.44		1.04	1.71	
	ト ラン ス ウェブ (Se)	1.44			1.81	
	面材 (E)	1.52			1.91	
	スチフナー(SI)	1.29			1.62	
	(Se) T _R , B _{KT} , (M)	1.37			1.72	
	パネル (Se)	0.95		1.05	1.02	1.12
甲板 口側縁内 甲板構造 (S)	ビーム (E)	1.00	1.10			1.26
	プラケット (E)	1.00		1.10	1.04	1.26

注：() 内の E, Se, M, SI は強度上の評価を示し、各評価点は次に様に設定した。
 E (Extreme) : 1.60 Se (Severe) : 1.40
 M (Moderate) : 1.20 SI (Slight) : 1.00

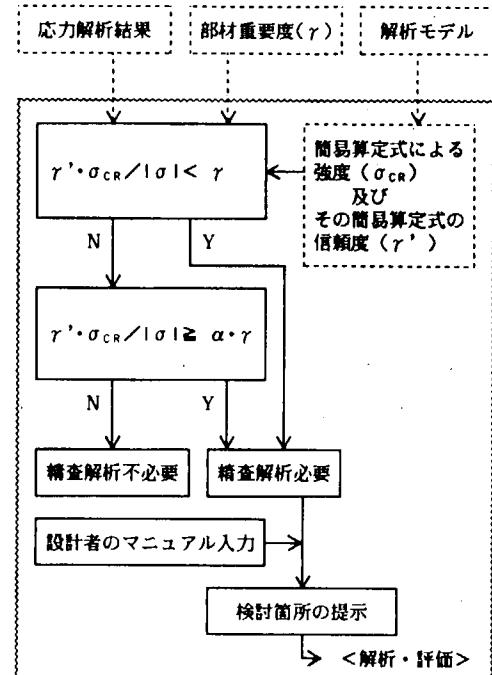


図 2.2.7 精査検討箇所の選定法フロー

また、全ての下位構造を解析・評価することは設計効率が悪化するので、精査検討を行うべき下位構造、即ち強度が基準値に対し下回っている箇所、あるいは充分すぎる余裕があり、寸法の軽減が可能な箇所を選定する必要がある。この選定は、部材重要度、解析結果などを評価して行われる。

図 2.2.7 は、精査検討箇所の選定方法の一案であり、部材重要度 (γ)、応力解析結果 (σ)、簡易座屈算定式による強度 (σ_{cr}) 及び簡易座屈算定式の信頼度 (γ') を用いて選定する手法を示している。選定に当っては、次式を満たすものを検討必要箇所としている。

$$\gamma' \cdot \sigma_{cr} / |\sigma| < \gamma$$

一方、合理的設計を考える上で、強度が他部材に比べ極度に大きい場合には、部材寸法を修正する必要がある。このような部材を選定する条件として、次式を用意する。

$$\gamma' \cdot \sigma_{cr} / |\sigma| \geq \alpha \cdot \gamma$$

ここで、 α は 1.0 よりも大きな一定値とする。すなわち α が 1.0 に近いほど、各構造部材のバランスが良くなる。

簡易座屈算定式の信頼度 (γ') の設定法としては、一様板厚 t の周辺単純支持パネルにモデル化した時の座屈強度と厳密解との比により次式で与えられる。

$$\gamma' = (\text{厳密解の値}) / (\text{簡易座屈算定式の値})$$

例えば、板厚の異なる矩形板(図2.2.8)及び平行四辺形板(図2.2.9)の場合の信頼度は1.16及び1.62となる。

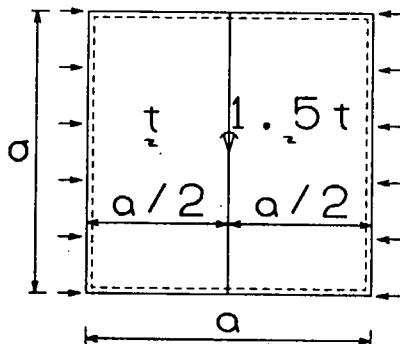


図2.2.8

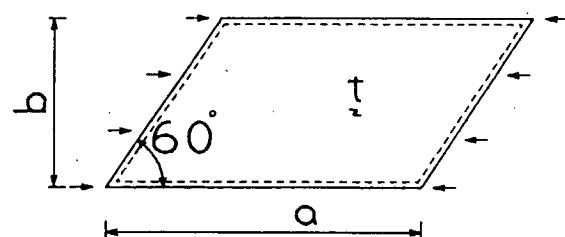


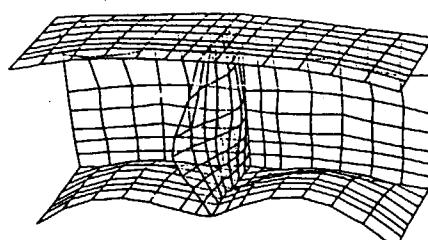
図2.2.9

(3) 座屈・崩壊強度高精度解析法

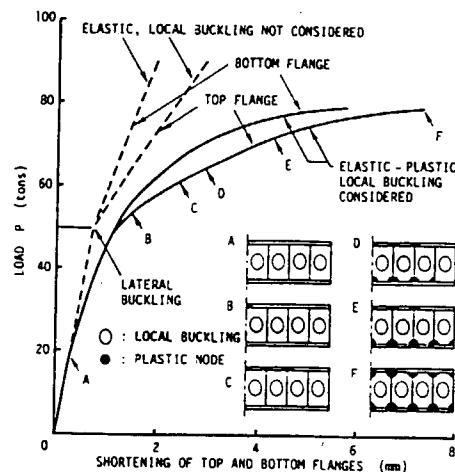
座屈・崩壊強度評価に適応した、強度解析を迅速かつ高精度で行うために必要な座屈・崩壊強度解析法、再解析・感度解析、解析モデル自動生成法の3つの項目について現状技術の調査と問題点の検討を行った。

(a) 非線形FEM解析法と崩壊強度簡易解析法

構造物の座屈・崩壊強度解析法として、標準的な非線形FEM解析法と、計算コスト低減のため塑性や大変形の扱いあるいは要素について何らかの方法で簡略化した簡易解析法がある。図2.2.10にそれらの解析結果の例を示す。



非線形FEM解析法



理想化構造要素法

図2.2.10 非線形解析法

(i) 標準的な非線形FEM解析法

座屈・崩壊強度解析手法として最も一般的である非線形FEM解析法は、簡易解析法と異なり、解析対象の制限がなく、非線形挙動を詳細に高精度で解析できる反面、構造物が複雑になると計算時間が増大する欠

点がある。従って、計算の高速度化が主要な問題であるが、対策として将来大型計算機への適用が期待される多重並列処理機能を利用した高速非線形アルゴリズムを採用する手法が考えられる。このアルゴリズムには、並列処理の割当を要素毎に行なうものと比較的大型の部分構造毎に行なうものとが提案されているが、いずれのアルゴリズムを用いる場合でもプロセッサーの数にほぼ反比例して計算時間が短縮されると報告されている。

また、本解析法の一般的な課題として、塑性域の拡大により剛な結果を与えるロッキング現象、低次要素に低減積分法を適用した場合の仮想的なアワーグラス現象あるいは大変形における構成方程式の高精度アルゴリズムと客観応力速度の選択などが挙げられる。これらの課題に対しては、現在諸方面で様々な解決策が検討されており、いずれ実用的な手法が構築されるものと思われる。

(ii) 崩壊強度簡易解析法

有限帯板法、塑性関節法、塑性節点法、剛体ばねモデル、理想化構造要素法などが簡易解析法として挙げられる。また弹性大たわみ解析と塑性解析を組み合わせた崩壊強度解析法も簡易解析法の一種と見なすことができる。

この中で、理想化構造要素法は、有限要素法と比較して要素数が極端に少なくなる有力な解析法といえる。事実、甲板模型による実験と解析結果との比較を行った結果では、有用な解析法であることが確認された。しかしながら、現存の要素では解析できない問題も多くあり、適用範囲の明確化を初めとして今後検討をする問題は少なくない。

これらの解析法は崩壊検討における全体構造、部分構造等の各々の構造レベルの強度評価に適した解析モデルに対応して、選択・適用されるべきであり、解析モデルのあり方と併せて検討していくべきである。

(b) 解析モデル自動生成法

座屈設計法に適用される非線形FEM解析、簡易解析、再解析及び感度解析等のいずれの解析においても、解析モデルの自動生成法は、解析の迅速化、省力化を図るために必要不可欠な技術である。

解析モデルの自動生成法が有すべき機能は、①CAD図面の自動認識、②解析法に適した自動要素分割、③材料特性などの形状以外の解析用データの生成、④解析法に適したデータ様式の変換等であり、これらの機能を向上させるためには、①A I手法やエキスパートシステムの導入、②座屈解析に適した要素分割手法の開発、③形状以外の項目のデータベース利用、④標準のデータ仕様（IGES, PDES/STEP）の利用などの対策が必要である。

CAD図面の作成ソフトとFEM解析モデルデータのそれは、機能とデータ内容の相違から、従来それぞれ別個に開発されてきた為、現状では両者のデータの相互変換は効率が悪い。しかし最近、CADとFEMのデータベースを相互に効率的に変換するため、共通のデータ仕様の構築やエキスパートシステムの適用などによる合理化の動きがみられ、この点の改良が近い将来には期待できる。

(c) 再解析・感度解析

既に行われた解析結果を基に構造の変更及び変更後の応答を効率的に求める手段として、再解析法および感度解析法が適用される。線形問題に対してと同様に、座屈・崩壊強度解析のような非線形問題に対しても、再解析・感度解析の基本的な定式化は既に行われているが、非線形問題を扱った解析例は、現状では一次元部材より成る単純な構造に対するものしか示されていない。従って、船体を構成する板骨構造のような複雑な構造の非線形挙動に対して、再解析・感度解析を可能とする手法の実用化を図ることが必要である。さらに、これらの再解析・感度解析を組み込んだ最適設計システムについても検討を要する。

2.2.3 研究開発課題と解決策

(1) 座屈設計法の基本構想

座屈設計法を具体化して行くための全体構成上の課題とその対策を以下にまとめる。

(a) 座屈設計法の具体化研究

2.2.2 の(1)座屈設計法の基本構想は、まだコンセプトの段階であり、抽象的な概念に終わっている部分も少なくない。そのために、ここで抽出されなかった様々な課題が埋もれていると考えられ、それらの課題抽出が当面急がれる。全体的な構成の具体化を行うには、座屈設計法に限った基本的かつ簡易なミニ・システムを実際に構築してみることが最も適した方法と考えられる。

(b) 船体構造の階層化と合理的な構造モデルの検討

崩壊検討においては、全体構造・部分構造・構造要素の3段階に階層化することが必要であるが、階層化はタンカー、バルクキャリアーなどの船種毎に異なる。崩壊モードを抽出し、FTAを実施することにより、各船種のもつ構造特性を明確にし、各々に最適な階層化を行うことが必要である。また、従来にない新構造に対処するために、階層化を行うための基本的な手法を用意することも課題である。

また、船体構造の各階層における強度特性を的確に表現し、最適化における強度の再配分を容易にする合理的な構造モデルを考える必要がある。このモデル化の問題は、(3)座屈・崩壊強度高精度解析法における強度算定時の解析手法にも大きく関わる問題であり、並列的に検討されるべきである。

(c) 荷重条件設定のための課題

線形的取り扱いのできる波浪荷重については、統計的に予測する手法と代表海象を設定する手法が考えられるが、前者に関しては、(2)の(d)で述べるように、応力、荷重の同時性を考慮できる評価関数（「等価」応力）の構築が課題であり、後者の場合には、設計波を選択するパラメータとなる崩壊モードに対応した縦曲げモーメント、スラミング圧等の波浪荷重要素を網羅すること、また崩壊モードに対応した代表海象を設定する手法を構築することが課題である。

また、非線形波浪荷重については、その基本となる発現確率に対応した波浪データの構築を前提とした非線形時刻歴解析法を確立することが理想的であるが、当面暫定的に、利用可能な波浪データと解析法を行い、極限海象と代表海象を組み合わせた、設計に適用できる近似的な手法を構築する必要があろう。

(2) 崩壊検討手法

構造の冗長性と信頼性を考慮した崩壊検討手法を確立するための、研究開発課題と解決策を以下にまとめる。

(a) 強度影響因子の確率的情報の収集

材料強度、製作誤差などの座屈・崩壊強度に影響を与える諸因子の確率的情報は、信頼性評価をするに当たり不可欠である。構造強度に影響を与える諸因子はきわめて多種にわたる。従って、情報の効率的収集を図るには、特に影響度の高い因子から重点的に収集していくことが必要であり、まず影響の度合を評価した諸因子の序列化を行なう必要がある。

この序列に従い、強度影響因子の確率的情報を組織的に収集・分析を行い、システムに適用できる形に定式化、データベース化して行かなければならない。

(b) 座屈・崩壊強度の平均値と分散を算定する手法の確立

座屈・崩壊強度の信頼性評価を行うには、その影響因子が陽な形で定式化されていることが望ましい。しかしながら、このような定式化は現在のところごく単純な構造に限られており、船体構造のような冗長構造に対しては最終強度の平均値と分散を算定する合理的手法の確立が課題である。

(c) 座屈設計法における部材重要度の設定法・適用法の確立

高次の不静定度を有する船体構造において、正攻法により信頼性評価を行うことは困難であり、構造の理想化、影響因子の絞り込み、下位構造への信頼度配分といった、強度の算定法・評価法における合理化・効率化が必要である。その意味で、座屈・崩壊強度の観点からみた部材重要度の設定及びその適用法の確立が重要な課題である。

(d) 評価関数の設定及び設定手法の確立

線形波浪荷重に対し統計的予測手法により荷重に対する応答解析を行う場合、複合応力状態における座屈・崩壊強度評価に当たっては、応力の同時性を考慮するために、全体構造から構造要素にいたる各構造部材について、最適な評価関数（あるいは「等価」応力）を設定する必要がある。

従来船型については、崩壊モードを設定して座屈・崩壊強度解析を実施し、予め各種の船体構造部材に対する評価関数を用意しておく必要がある。

また、新船型に対しても適用が可能な、汎用性のある設定手法を確立することも課題である。

(3) 座屈・崩壊強度高精度解析法

高精度かつ省力効果の高い座屈・崩壊強度解析を行うために必要な技術の開発、及びこれらの技術の総合化による解析システムの実現が研究開発課題である。この為に、解析の高精度化技術、最適設計を目的とする再解析・感度解析技術、解析モデルの自動生成技術について実用化を目指した研究が必要となる。具体的な研究開発課題と解決策を以下に示す。

(a) 解析手法の実用化、高精度化技術の研究

各種解析手法の持つ特性や精度を考慮して、全体構造、部分構造、構造要素の各構造レベルに適応した解析手法を検討・選択する必要がある。

また、現在の解析コードの適用可能範囲である局部構造に対し、実用的な座屈・崩壊強度解析のための専用システムを検討し、そのコスト、精度、使いやすさなどを検証し、実用上の問題点を明確にする必要がある。

非線形FEM解析法においては、複雑な非線形現象の解析を精度良く高速で処理するため、コンピューターの多重並列処理機能による高速アルゴリズムの具体化が重要である。

さらに、大型構造物崩壊実験に対し、非線形FEM解析法を適用し、実際の非線形挙動に対する解析機能の再現能力を調べ、問題点の摘出、解決策の検討を行う必要がある。

(b) 簡易解析法の整備

実験あるいは詳細非線形FEM解析などにより、理想化構造要素の適用可能範囲を明確にする必要がある。

また、船体大型構造実験に対し、計算コスト低減のために使用されている理想化構造要素法などの崩壊強度簡易解析法を適用し、精度の検証、適用範囲の明確化を行なうことも重要である。

(c) 解析モデルの自動生成技術

現状で設計者の作業量が最も多いのが解析モデルの生成である。CAD図面とFEM解析モデルの共通データを基に、相互データの自動変換を行う機能の向上を図ることによる省力化を検討する必要がある。

また、座屈・崩壊挙動を精度良く解析するための解析モデルの要素分割は、座屈・崩壊挙動を考慮して行われねばならない。分割アルゴリズムを含むエキスパートシステムの導入により要素分割作業の自動化を図っていく必要がある。

(d) 最適設計を目的とする再解析・感度解析技術

新船体構造設計法において重要な役割を果たす最適設計システムに関して、再解析及び感度解析などの手法

に関する基礎的な研究、具体化とシステム化の研究が必要である。

まず座屈問題に適用できる再解析、感度解析の各手法について、手法の理論的検討と効率的なアルゴリズムの開発による開発研究を行い、実用化を図る必要がある。

さらに、座屈問題に適用できる感度解析手法を、座屈問題を考慮した船体構造の最適設計システムの一部に適用していく必要がある。このためには、解析手法とアルゴリズムを具体化したプログラムの作成と実構造への適用による機能の検証という課題が挙げられる。

2.3 疲労・破壊強度の高精度解析手法

2.3.1 現状と問題点

一般船殻構造の強度設計は、長年の間に培われた膨大な実績を基礎に、いわゆる経験工学に基づく各国船級協会規則などを基準に行なわれてきた。すなわち、近似的な強度解析（部材力や応力の解析）を行なって損傷実績をもとにした許容応力を設定し、それによる相対的評価を繰返しながら改良を加えるという手法に頼ってきた。

本研究では、疲労・破壊強度設計手法を確立し ADDA の中で実現することを目指して、船体構造における疲労き裂の発生、伝播、不安定き裂の発生、伝播、伝播・停止といった一連の損傷モードを念頭において、信頼性の高い解析手法について、調査・検討し、問題点を抽出した。

船舶および他分野での変動荷重下の疲労寿命（疲労き裂発生強度）評価の現状は、単純な設計荷重と線形累積被害則に基づいている。

さて、線形累積被害則を使用するに際しては、次のような問題がある。

- ① どの被害則を用いるか（一般には修正マイナー則が多いが）
- ② どの S-N 線図（定荷重下）を用いるか
- ③ 限界累積被害値 (f_{cr}) をいくらにするか
- ④ 応力の頻度分布は

また、疲労き裂伝播強度解析、不安定破壊強度解析および信頼性解析は、特別な場合以外ほとんど行なわれていない。

その他、変動荷重下での組合せ応力状態に対する疲労強度解析、残留応力、平均応力の定量的な扱い方、腐食・防食に対する考え方、工作精度の定量的な扱い方など、問題点は多い。

本研究では、これらの諸問題を解決するための予備調査と、実用性の高い疲労・破壊強度の高精度解析手法の開発課題の抽出と試案の作成を行った。

2.3.2 調査検討の概要と検討結果

(1) 疲労・破壊強度実用設計手法の基本構想

船舶および他の分野の疲労強度に関する現行の設計基準を調査検討し、新船体構造設計法（ADDA）における疲労・破壊強度に望まれる設計法について検討した。

疲労・破壊強度実用設計手法の基本構想は次の五つの基本方針で構成され、図 2.3.1 に概略をフローチャートで示す。

- ① 疲労・破壊強度解析法は疲労き裂発生・疲労き裂伝播ならびに不安定破壊のそれぞれに対し、寿命あるいは強度を高精度かつ効率的に絶対評価し得るシステムとする。さらに、本システムは、就航後の各構造部材の劣化度および余寿命を絶対評価できるものとする。
- ② 変動荷重下の疲労強度解析法としては、変動荷重疲労試験結果に基づいた新しい観点からの絶対評価手法

を確立する。

変動荷重下の疲労強度解析は当面線形累積被害則を使用するが、変動荷重疲労試験結果に基づいて、暫定的に使用する S-N 線図あるいは限界累積被害値 (f_{cr}) を定め、現行解析法に十分な改良を加えその信頼性を高める。

将来は変動荷重疲労試験結果に基づいた新しい観点からの絶対評価手法を確立する。

- ③ 疲労・破壊強度評価は信頼性理論に基づいて行なう。

荷重、材料強度、部材工作精度などは確率変数であることを考慮し、許容応力設定、安全率設定などは部材重要度を配慮して、信頼性解析等によるものとする。

- ④ 船体に作用する荷重解析は、統計的予測手法による船体運動・波浪荷重解析法によるものとする。

疲労・破壊強度に対する荷重としては、変動範囲に重点を置いたある超過確率（発現確率）の荷重ならびに荷重の頻度分布が必要である。そのためには荷重（外力）の評価は、原則として設計海象を設定した線形重ね合わせ理論に基づく統計的予測手法により、ある超過確率の荷重および荷重の頻度分布の解析により行なう。

- ⑤ 応力応答解析および強度解析における応力解析法の整合性を図る。

船体構造部材の応力応答解析結果と材料強度の評価基準である応力とは一対一の対応が不可欠であることは当然である。しかし、現状での応力応答解析法はこの認識が必ずしも十分とは言えないで、両者の応力の整合性について検討し、強度評価の観点から新たに応力の種類の定義（例えばピーク応力： peak stress, ホットスポット応力： hot spot stress, 公称応力： nominal stress）および応力解析の精度について十分考察する。

(2) 疲労・破壊強度検討部材の選定法

(a) 荷重条件のあり方

疲労・破壊強度検討対象部材の選定は、①高応力が作用している部材で、②その部材が船体を構成する上での重要度および過去の損傷実績を考慮して行なう必要がある。

基本的にはまず高応力が作用している部材に注目することになるが、疲労き裂の発生・伝播強度は、単に作用応力のみでは評価できない。すなわち、疲労き裂発生強度の精査必要箇所を全船一体解析による境界力で選定するためには、その境界力の出現頻度および頻度分布を各構造部材について明らかにする必要がある。そのためには、荷重条件の設定が不可欠である。

荷重を設定するために、図 2.3.2 に示すような種々の簡便法が考えられるが、最終的には統計的予測手法に基づく線形および非線形の船体運動解析が必要である。

具体的には、船体に作用する荷重の履歴を正確に評価する必要がある。
すなわち、

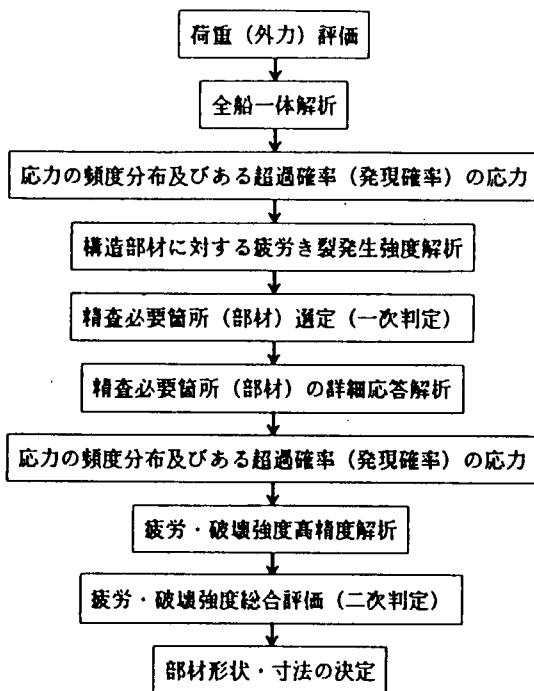


図 2.3.1 疲労・破壊強度実用設計手法の基本構想

- ・積付け条件の変化による荷重の変動

- ・波浪中で作用する動的荷重

- ・船体に作用する最大荷重

等の把握が不可欠である。

なお、波浪中で作用する荷重の解析は、統計的予測法に基づく、短・長期予測を基本とするが、一次照査や疲労き裂伝播解析における径路の設定破壊強度解析に用いられる荷重に関しては、今後の研究が必要である。

一方、スラミングなどによる非線形応答による疲労被害も重要な場合があり、非線形応答による疲労寿命評価法を備えておく必要がある。

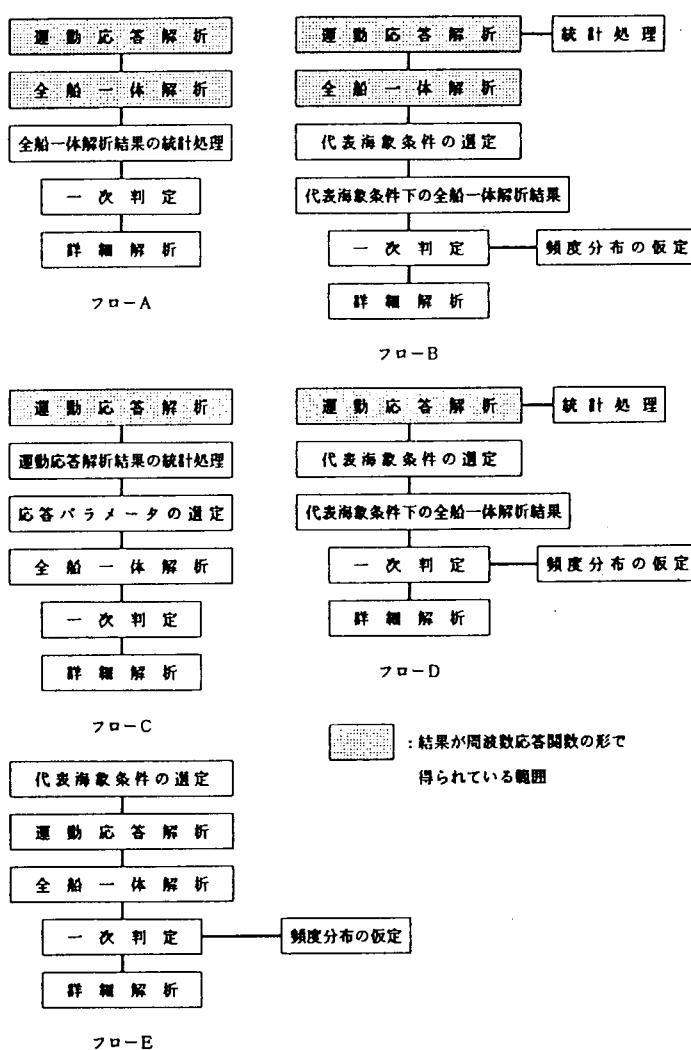


図 2.3.2 疲労・破壊強度解析における荷重条件の設定例

(b) 検討対象部材の選定

現状では、どの船体構造部材について疲労・破壊強度を検討すべきかは明確にされていない。同様に、各構造部材に対して、その機能上および重要度などに応じての分類はなされていない等の問題点を有している。

これらに対処するため、次のような基本方針で疲労・破壊強度検討部材の選定を行なう必要がある。

- ① 船体を構成する各部材を、その機能上有るいは重要度に応じて階層化する。
- ② 実損傷例を基に、疲労損傷部材を分類する。

③ 上記の分類を参考にして、先ず、初期の全船一体解析結果に基づいて、船体各構造部材に関する疲労き裂発生強度を照査し、詳細解析（高精度解析）が必要である部材を抽出する（一次判定）。この段階での強度判定は、以下による。

- ・明らかに疲労強度が不足している、または余り過ぎていると判断される部材は構造変更した後、再評価する。
- ・疲労強度が不足しているが、さらに詳細解析による疲労強度判定が必要であると考えられる部材を抽出する。
- ・新構造様式の部材、および構造機能上あるいは部材重要度から、疲労き裂発生強度だけでなく、疲労き裂伝播強度、不安定破壊強度の評価が必要であると考えられる部材を抽出する。

④ 部分構造解析、局部構造解析などのより精度の高い解析（高精度解析）により、疲労・破壊強度評価を行なう（二次判定）。

- ・二次判定で疲労・破壊強度が不足していると判定された箇所については、局部構造を変更した後、再解析・評価する。

なお、部材重要度の評価に際しては、FTA、Fuzzy 理論等に基づく解析によって部材の階層化を図る必要がある。

(3) 疲労・破壊強度判定手法

疲労き裂発生強度の判定は、船舶、海洋および他分野で主として線形累積被害則に基づいて行なわれている。しかし、疲労き裂伝播強度、不安定破壊強度の判定はほとんど行なわれていない。疲労き裂の発生を完全に防止することはいたずらに船殻重量を増すのみで合理的かつ経済的でない。さらに船舶の就航後の健全性あるいは保守・点検期などの設定のためには、き裂伝播強度、不安定破壊強度の検討が望まれる。

そこで、疲労・破壊強度判定手法の基本方針として、下記の方針を提案する。すなわち、

- ① 疲労き裂発生、伝播強度の判定は、変動荷重疲労試験データに基づいたこれまでの判定手法とは異なった観点からの評価法を提案する。
- ② 不安定破壊強度の判定手法を提案する。
- ③ 上記の強度判定には、変動荷重下での腐食環境の影響および防食効果、工作誤差の影響、平均応力、残留応力の影響などを定量的に反映する。
- ④ 変動荷重下で組合せ応力状態での強度判定手法を提案する。

(a) 疲労き裂発生強度

疲労き裂発生強度の判定手法は図 2.3.1 および図 2.3.3 のフローチャートに示すように、先ず、初期の全船一体解析結果に基づいて船体各構造部材に対して、疲労き裂発生強度を照査し詳細解析（精査解析）が必要である部材を抽出する。

この段階で得られる応力は公称応力（nominal stress）レベルであるので、疲労き裂発生強度の判定には、公称応力（S）と応力集中係数（K_t）で表わされる疲労き裂発生強度線図を用いる。すなわち、船体構造部材に作用する応力の頻度分布をワイブル分布とし、分布の shape parameter (h) をパラメータとした疲労き裂発生強度線図を用意する必要がある。

詳細解析後の疲労き裂発生強度の判定手法も、基本的には上述の判定と同様の図表を用いて行なう。この図表は応力応答解析の精度に従い、応力応答解析結果と材料強度評価の応力の整合性を考慮して改めて作成する。応力がホットスポット応力で得られれば、ホットスポット応力に基づいた図表も作成することになる。

この段階での強度判定は、

- ① 前段階で詳細解析が必要とされた部材について、疲労き裂発生強度、疲労き裂伝播強度、不安定破壊強度を順次評価し、
- ② 強度が不足していると判定された部材に関しては、局部詳細構造の変更により再解析し、応力集中係数を低くすることで疲労・破壊強度を確保することになる。

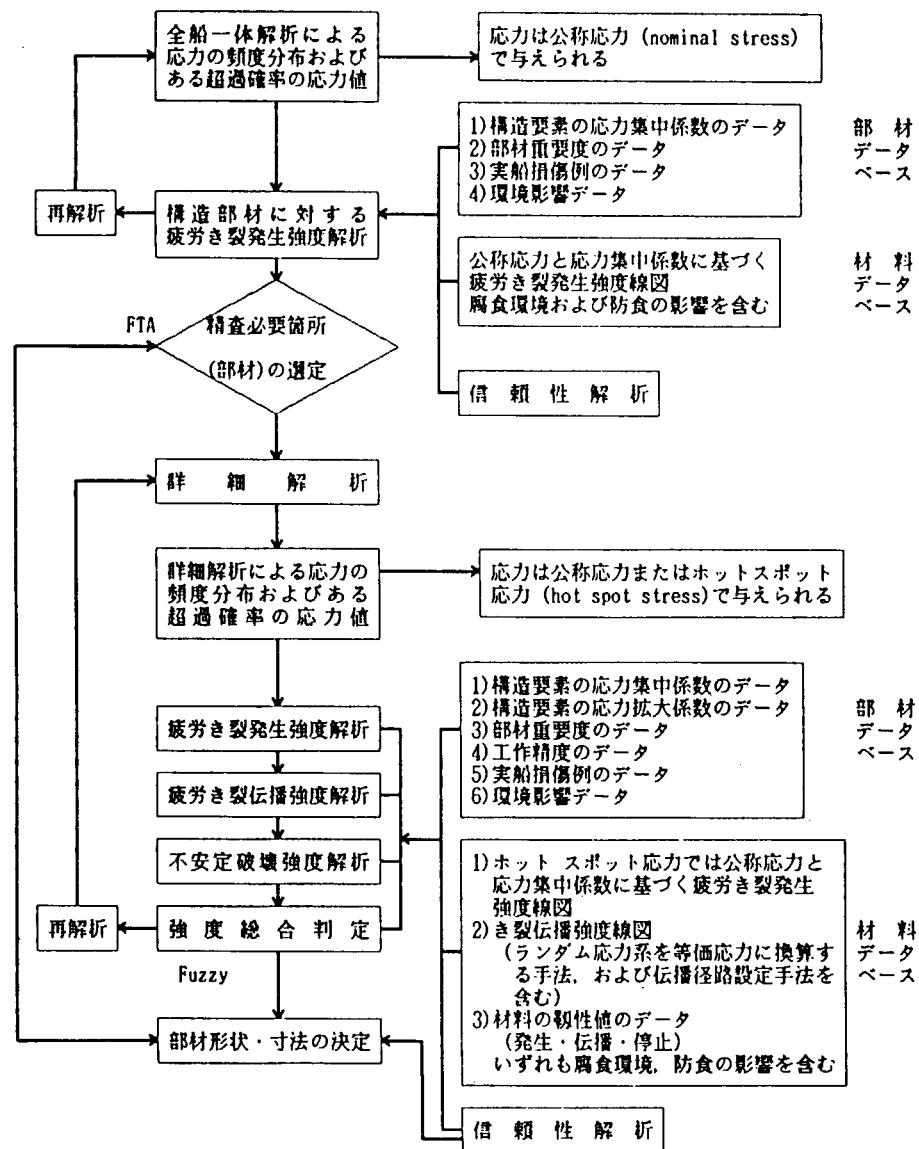


図 2.3.3 疲労・破壊強度判定手法のフローチャート

(b) 疲労き裂伝播強度

疲労き裂が発生しないよう、第1段階として疲労き裂発生強度解析が行われるが、外力および疲労き裂発生は本来確率過程である。設計条件を逸脱した場合や、欠陥が存在した場合には疲労き裂が発生することもある。そこで、万一疲労き裂が発生したとしても、機能喪失にいたるような大きなき裂に成長しないように考えて設計しておくことが必要である。

(c) 不安定破壊強度

不安定破壊は、発生、伝播、伝播・停止という一連の過程より成り立っている。しかし、これらの現象を統一的に取扱うことは難しく、通常は発生と伝播・停止とに分けて考えられている。不安定破壊発生を規定するパラメータとして実用段階にあるものとしては、応力拡大係数（K）とき裂先端開口変位（CTOD）が挙げられるよう。前者は巨視的に弾塑的挙動を示す場合に有効であり、後者は大規模な塑性変形後の破壊に対しても適用できるパラメータである。一方、不安定破壊の伝播・停止現象については、未だ不明な点も多く決定的な考え方方が存在しないのが現状である。したがって、不安定破壊の伝播・停止挙動の解明に対する今後の検討が必要である。

(d) 腐食防食効果

今までに得られている、疲労き裂発生強度に対する腐食環境の影響に関する調査検討結果によれば、十分な防食対策が施工されていれば、海水環境においても疲労き裂発生寿命については、腐食の影響を考慮する必要はないことが判明している。したがって、船体内外の腐食環境下にある部位には、原則として防食対策を施工することとし、疲労き裂発生強度の判定には腐食の影響を考えないこととする。なお、この場合、各種防食法の施工・保守のための管理技術を確立しておく必要があろう。なお、防食対策が施工できない部位の腐食の影響については、これを評価できる実験結果が得られていないので、その取扱い方法を検討する必要がある。

一方、腐食環境下でのき裂伝播の下限界値（ ΔK_{th} ）は大気中とほぼ同等であるが、定常的なき裂伝播速度は大気中の伝播速度より増加する。増加の程度は、腐食・防食環境、鋼種、応力比および繰り返し速度に依存する。なお、不明な点は多いが、腐食環境下での疲労き裂伝播寿命は、以下の方針で推定することにする。

- ① き裂発生初期の微小き裂状態においては、防食の効果があるものと見なし、腐食環境の影響を考慮しない。
- ② 定常域では、部材のおかれる腐食環境の効果を考慮し、伝播速度の増加を見込むものとする。

(e) 工作誤差

目違い、角変形などの工作誤差は面外曲げ応力を誘起し、疲労強度を低下させる。したがって工作誤差が疲労強度に与える影響を定量的に把握しなければならない。この定量的評価法としては、以下の二つの取扱い法が考えられる。

- ① 工作誤差を含む継手の疲労試験結果より、工作誤差のレベル毎に疲労設計線図を与える方法。
- ② 工作誤差によって誘起される曲げ応力を重畠して、作用応力を求め、工作誤差を含まない継手の疲労設計線図を用いて照査する方法。

一定振幅の疲労試験では、これまでに工作誤差を考慮した実験が行なわれている。

図2.3.4は目違いを有する軟鋼突合せ継手（板厚20mm）の軸力疲労試験結果の一例¹⁾を示したものである。

これまでの一定振幅下の実験結果を利用するにしても、工作誤差を有する継手の変動荷重疲労試験を実施することが必要であり、その結果をもとに上記①、②のどちらの手法で照査するかを決定する必要がある。ただし①の手法をとるためには多くの実験が必要であり、できるだけ②の手法で評価を行ない得るようにすることが望ましい。この場合、公称応力、すなわち疲労試験における荷重の頻度分布形状と、工作誤差により誘起される曲げ応力を重畠した組合せ応力の頻度分布形状が異なる（すなわち誘起曲げ応力と作用応力が線形関係になるとは限らない）こともあるので、このことも考慮した解析法の確立が必要となる。

上記は評価手法に関するものであるが、設計段階では工作誤差がどの程度になるのかという情報は通常得られない。したがって、通常の設計においてはJ S Q S基準で許される最大の工作誤差を見込んで評価されるようにデータバンク化することが必要である。一方、工作過程でのロボット化が今後一段と進むと考えられ、この場合

の工作誤差はこれまでよりも小さくなることが期待される。したがって、これに対応した疲労強度の照査ができるようにもする必要がある。

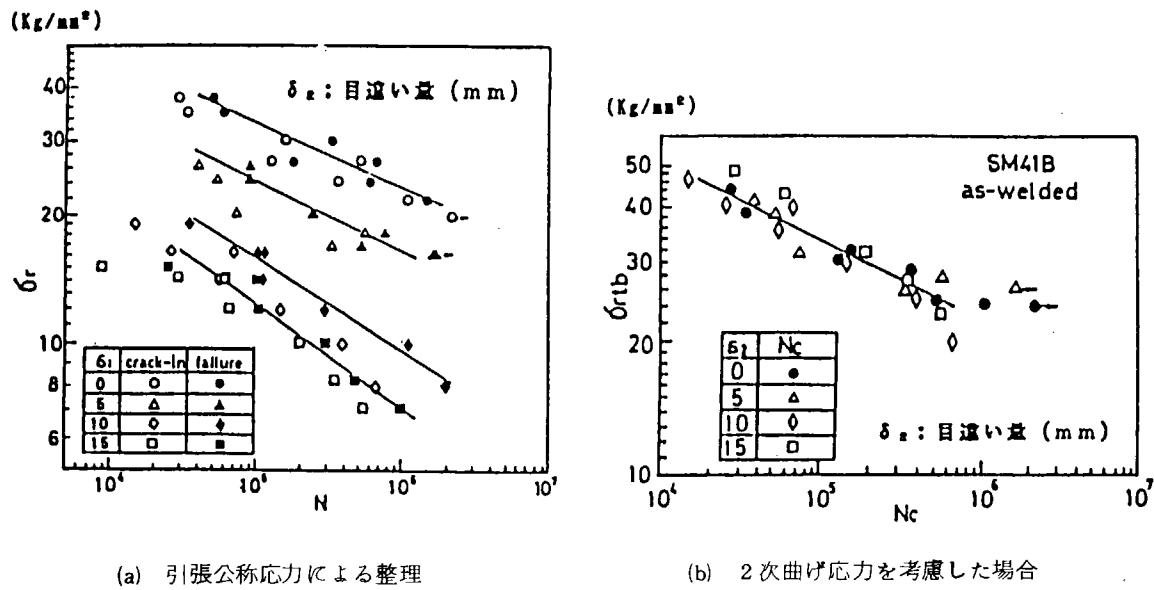


図 2.3.4 目違いを有するSM 41B鋼板の疲労強度

(4) 疲労・破壊強度高精度解析手法

先に、図 2.3.1 に示したフローチャートの、主として、全船一体解析、応力の頻度分布およびある超過確率の応力、精査必要箇所の詳細応力応答解析の項目について述べる。疲労・破壊強度解析を行なうために必要な技術について、現状の技術の調査と問題点の検討を行なった。

(a) 疲労・破壊強度解析における応力解析法

疲労・破壊強度評価を行なう場合には、構造局部の応力を精度良く評価する必要がある。船体構造のような大規模な構造物では局部応力を求めるのに必要な要素と同じ精密さで有限要素法による解析を行なうことは現実的ではない。そこで、先ず、低次のモデル化（荒い要素分割や、低次の要素）を用いて構造物全体の応力解析を行ない、ズーミング手法を用いて局部構造解析を行なうのが一般的な方法である。

疲労・破壊強度解析における応力解析ではいかに効率的に、かつ、精度良くズーミング手法を用いた解析ができるかが最も重要な問題である。

さらに、局部応力解析から得られる応力の値と疲労試験結果（S-N線図）との対応関係を明らかにしておく必要がある。

(b) 精査必要箇所選定（一次判定）のための応力、応力頻度分布

疲労・破壊強度の一次判定は、全船一体解析の結果を用いて疲労き裂発生寿命または破断寿命解析により実施される。疲労・破壊強度解析を行なうためには、部材力から応力集中率を用いて局部の応力を推定する必要があろう。従来型の構造様式の場合には、応力集中率データバンクを整備することは可能であり、一次判定の効率化に大きく寄与する。端部構造の応力集中率（K_t）データの一例を図 2.3.5 に示す。全船一体解析により得られる応力との対応を明確にしつつ、船体構造についても、構造要素別のS-N線図の再整理が必要である。

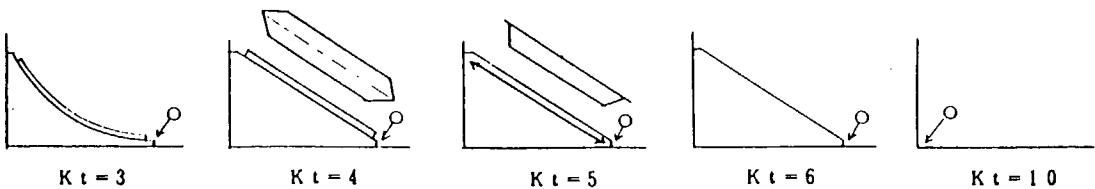


図 2.3.5 端部構造における応力集中率データ

(c) 二次判定のための応力、応力頻度分布

疲労・破壊強度設計の二次判定は、部分または局部構造解析結果の応力を用いて疲労き裂発生寿命、疲労き裂伝播寿命解析または不安定破壊強度解析によって行なわれる。

不安定破壊強度解析については、最大応力状態についての解析を行なうことになる。すなわち、船体の寿命の中で最も厳しい荷重状態を想定し、船体運動解析、疲労き裂の存在を仮定した状態も含めた応力解析を行ない、構造部材の応力状態を求める。この応力分布を用いて不安定破壊の発生、伝播、伝播・停止についての解析を実施する。

一方、疲労き裂発生寿命、疲労き裂伝播寿命解析の場合は、統計的予測手法を基本とする。すなわち、線形荷重解析、線形応答解析を実施することにより、最大応力、応力頻度分布を求める。ただし、非線形応答を考慮する必要がある場合には、非線形の影響を解析し、その結果を長期予測結果に重ね合わせて取り扱う。

図 2.3.6 に疲労・破壊強度解析のための応力解析の全体フローを示す。図中、右欄(Ⅰ)は正攻法を示すが、この手法を探るには多大な手間と計算時間がかかる。図中、左欄(Ⅱ)は簡易的手法を示す。すなわち、船体に作用する荷重を工学的な考察を基にしてパターン化し、それぞれのパターンにおける応力から応力応答関数を求めようとする方法である。この手法を探る場合は運動応答解析の結果として、船体全体に作用する圧力と加速度の分布以外に、たとえば、縦曲げモーメント、ねじりモーメント、剪断力などの出力が運動・荷重解析に必

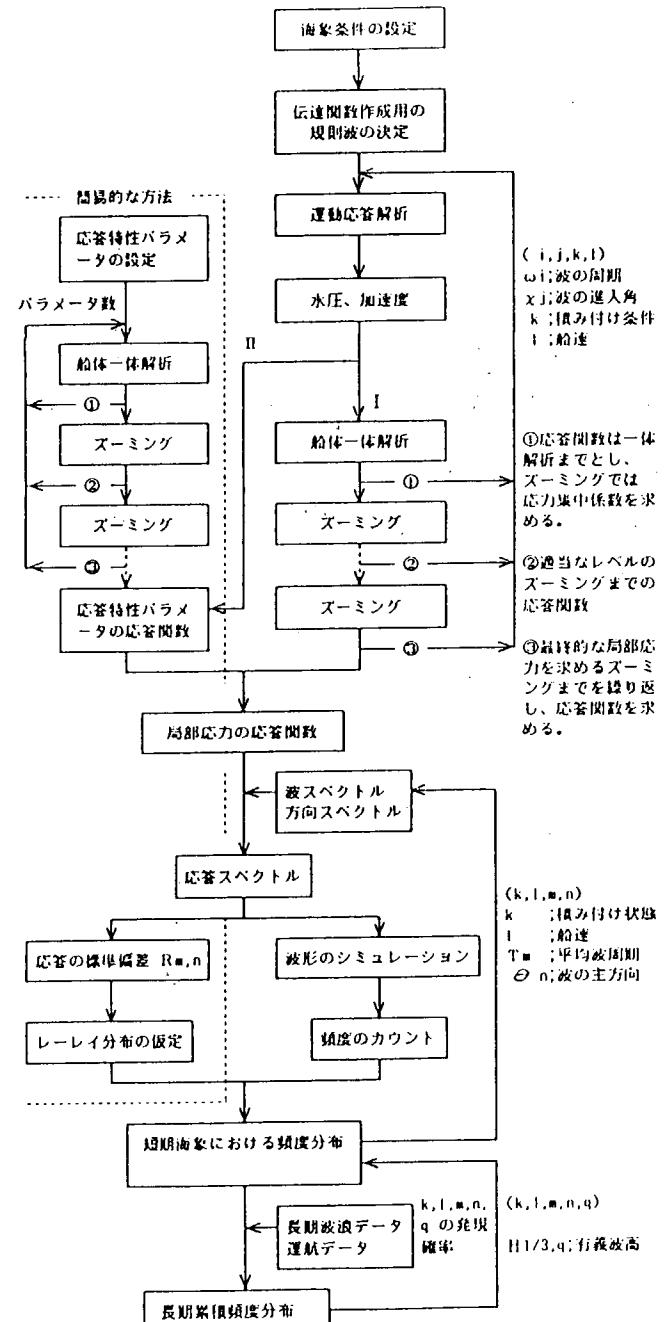


図 2.3.6 疲労・破壊強度評価における応力解析の流れ図

要になる。

局部応力の検討として、8万トン型タンカーの供試船について、W.G.5で行なわれた全船一体解析の結果をもとに、センタータンクボトムトランスのロンジバルクヘッド付きの端部について局部応力の試解析を実施した。

また、図2.3.7では、船長192m、排水量22600トンのコンテナ船の船体構造に生じる応力の長期予測結果の一例²⁾を示す。解析結果を見ると、応力の長期頻度分布の形状は、従来、解析時に仮定されることの多い指指数分布ではなく、ワイブル分布の形状パラメータ(h)の値が1.0以下の分布形状になっている。

船の種類、部材によっては、スラミング現象などの非線形現象が重要となる場合がある。その場合には非線形時刻歴解析を行なう必要がある。

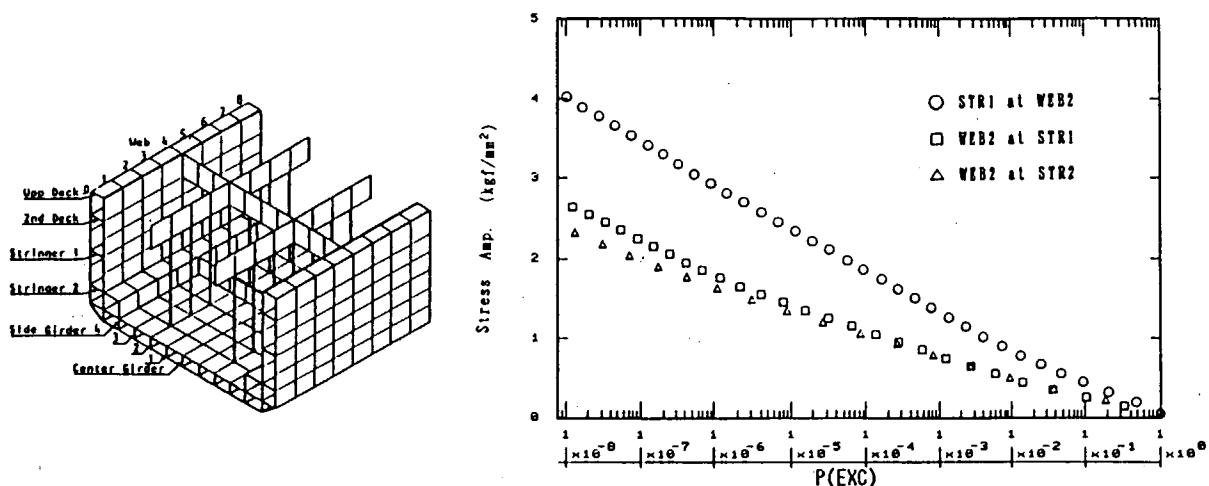


図2.3.7 船体構造の応力長期予測結果の一例

(d) 信頼性評価

船体構造の疲労・破壊強度が設計寿命に対して要求信頼度を満足するように設計される必要があり、疲労寿命の考え方として次の二つが考えられている。

① 疲労損傷の発生を基準に寿命を考える(安全寿命設計)。

② き裂の存在を前提にして、そのき裂が限界の大きさに達するまでの寿命を考える、保守検査に重点を置いた設計(損傷許容設計、フェールセーフ設計も含む)。

前者では、疲労き裂発生、または部材が破壊するまでの疲労寿命で評価される。後者では、き裂伝播寿命とき裂を有する構造(要素)の最終強度により評価される。上記の二つの設計の考え方のうち、現状では、安全寿命設計の適用が多く、LNG船、LPG船のタンクにおけるSLPS(Small Leak Protection System)の適用以外、フェールセーフ設計の例は少ない。しかし、今後新しい構造に対して適用が期待される。

構造設計における信頼性解析の手法にはいくつかのレベルがあるが、新船体構造設計法(ADDA)では、レベル2(2次モーメント法)の信頼性解析が基本となり、その実用化が必要である。

单一の破壊モードに対する信頼性評価の手法はある程度整備されているが、今後は表2.3.1に示すような各影響因子に対する信頼性の観点からの評価が必要である。さらに、複数の破壊モードを考慮した信頼性解析手法の開発が必要である。

表 2.3.1 疲労・破壊強度における不確かさ

<p>1. DEMAND 側(作用応力)の不確かさ</p> <ul style="list-style-type: none"> a) 外力の不確かさ <ul style="list-style-type: none"> 短期海象 長期海象 (Shape Parameter, Scale Parameter) b) 応力解析の不確かさ <ul style="list-style-type: none"> 運動応答解析 一体構造解析 ズーミング解析 K値解析 c) 工作精度による応力の不確かさ <ul style="list-style-type: none"> 板厚, 寸法のばらつき 形状の不整
<p>2. CAPACITY 側(疲労強度)の不確かさ</p> <ul style="list-style-type: none"> a) 材料自体の強度のばらつき b) 溶接の品質 <ul style="list-style-type: none"> 溶接部の形状のばらつき 不整量(角変形, 目違い)のばらつき 溶接欠陥 残留応力の影響 c) その他の影響 <ul style="list-style-type: none"> 腐食環境(防食効果の評価)
<p>3. 疲労強度評価法の不確かさ</p> <ul style="list-style-type: none"> a) ランダム荷重下の疲労寿命評価におけるばらつき <ul style="list-style-type: none"> または, マイナー則適用時の疲労被害度Dの偏向(バイアス)と, ばらつき b) ランダム疲労き裂伝播試験によりシミュレーション荷重下のき裂伝播速度の偏向と, ばらつき

参考文献

- 1) 八木, 恒成, 尾野: 角変形・目違ひのある溶接継手の疲労強度(第1報), 関西造船協会誌, 第168号(昭53.6), p.89
- 2) M. Huss : Combined Wave Induced Stresses on a Lo/Lo Container Ship., Rept. TRITA-SKP 1059, Royal Institute of Technology, Sweden.

2.3.3 研究開発課題と解決策

(1) 疲労・破壊強度実用設計手法の基本構想

新船体構造設計法(ADDA)における疲労・破壊強度実用設計手法を、現状の疲労設計法の問題点を考慮し、2.3.2(1)項で、五つの基本方針に基づいて、図2.3.1にフローチャートで提案した。それは荷重評価/応答解析/強度算定/評価を一貫して行うことのできる新しい設計システムである。

疲労・破壊強度実用設計手法の基本構成上の課題とその対策を以下に簡単に説明する。また、これらの基本問題を整理するために、新しい一貫した検討システムを構築して研究を進めることが望ましい。

(a) 荷重評価のための課題

船体構造部材の疲労・破壊強度解析に必要な荷重は、船舶が稼働期間中に経験するある超過確率（発現確率）での荷重および荷重の頻度分布あるいは荷重スペクトルである。これらを把握・整備するためには、設計しようとする船舶が稼働期間中に経験する海象、運航等の条件を正確に表わす海象データ、波浪データ、運航データ等から解析用波条件を決定し、線形あるいは非線形応答解析から得られる荷重評価が必要である。近い将来に上述の各種データの収集と分析をし、解析用波データを構築することは必ずしも容易でないと予想される。したがって、設計に適用できる近似的な手法を定める必要がある。さらに、疲労き裂伝播解析用の荷重条件設定法および不安定破壊強度解析用の荷重条件設定法の確立が必要である。

(b) 応力応答解析における課題

船舶に作用する実働荷重のもとでの構造部材の応力応答解析結果が、材料強度の評価基準である応力と整合するような応力応答解析法の標準化が必要である。

そのためには、荷重評価の信頼性とともに、ピーク応力（peak stress）、ホットスポット応力（hot spot stress）、公称応力（nominal stress）の各応力で強度評価を行うに際し、応力応答解析法の標準化（例えば、FEM解析の要素、応力算定の位置など）を図り、応力応答解析結果と材料強度の評価基準である応力との整合を図ることが必要である。

(c) 強度評価のための課題

変動荷重下での疲労き裂発生、疲労き裂伝播、不安定破壊に対する強度評価を絶対評価できる新評価法の構築が必要である。

そのためには、現状の線形累積被害則に基づく評価法とは異なった観点からの評価法の構築が必要である。このためには、変動荷重下の大型疲労試験データの蓄積と、絶対評価に適用可能な実船損傷例の逆解析が必要である。詳細は、(2), (3)項で述べる。

(2) 疲労・破壊強度検討部材の選定法

疲労・破壊強度検討対象部材の選定には、次の開発課題に対する取り組みが必要である。

① 部材重要度評価法の開発

何が損傷の原因となり得るかについてはFTAが、多くの要因に対する配慮は多基準分析が、確率的手法としてReliability理論が、数値化したいものはFuzzy理論が、最終値の決定にはDelphy法およびDeFuzzy法等がある。これらの手法を有機的に組合せて、実用性のある評価手法の開発が必要となる。

② 損傷データベースの構築

損傷データの再解析とデータベースの整備が必要である。

既存の損傷データバンク等の有効活用を図る。

(3) 疲労・破壊強度判定手法

現行の疲労・破壊強度解析が経験に基づく相対強度評価が主流であるのに比べ、新船体構造設計法（ADDA）での強度評価は、絶対評価法を構築すべきであると考えられる。

(a) 疲労き裂発生および伝播強度

変動荷重下の絶対強度評価には、荷重評価が正確であること、応力応答解析結果と材料強度評価の応力の整合性が十分であることに加え、変動荷重下の疲労試験のデータの蓄積が不可欠の条件である。これによる強度評価の信頼性向上のためには、大型の変動荷重疲労試験のデータが必要である。その他疲労強度に影響を与える因子、例えば組合せ応力状態での疲労強度評価法、腐食環境の影響、防食効果、工作誤差、平均応力、残留

応力などの変動荷重下での定量的評価法の開発が必要である。

(b) 不安定破壊強度

不安定破壊に関する破壊の発生に対する評価技術は得られているが、伝播および伝播・停止に関しては充分な理論的解明がなされていないのが現状である。しかし伝播・停止現象の把握は、信頼度の高い船舶の設計・建造において、その強度解析を行う上で非常に重要な意味を持っている。今後、経済的にも安全性の上でも合理的な船舶を設計・建造していくためには、是非ともその解決が望まれる。そのためには、廃船利用の実船実験を含む大型模型試験による研究が必要である。

(c) 腐食防食効果

船体構造の疲労・破壊強度に及ぼす腐食・防食効果を定量的に評価するためには、船体特有の腐食環境を明らかにし、そこにおける各強度を実験的に求める必要がある。これらのデータを充足した上で、船種別、部位別の腐食環境と腐食影響係数、適切な防食対策とその寿命等を包括したデータベースを構築することが、疲労・破壊強度の判定および防食対策の施工・保守管理のために必要となる。

(4) 疲労・破壊強度高精度解析手法

疲労・破壊強度評価に対応した高精度で、かつ効率的な疲労・破壊強度解析を行うために必要な技術の開発と、解析システムの構築を行う必要がある。このためには、応力解析の高度化、応力頻度解析の高精度化と効率化、応力解析結果と疲労試験結果（S-N線図）の関連の明確化を目指した研究が必要である。具体的には研究開発課題と決策を以下に示す。

(a) 応力解析における課題

① ズーミング

部材の追加、形状変化処理のシステムティックな取り扱い方法の開発が必要である。

② 疲労・破壊強度評価（一次判定）の効率化

全船一体解析後の一次判定時に得られる部材力から局部応力を効率的に、かつ高精度で推定するためには、応力集中率データベースの整備が必要である。

③ 最適設計を目的とする構造感度解析

疲労設計においては、部分構造形状の変化をパラメータとした構造感度解析の開発が必要であり、効率的な手法を開発する必要がある。

④ 疲労き裂伝播解析の高度化

疲労き裂伝播解析において、疲労き裂の進展に伴う応力の再配分を考慮した解析が望ましく、効率的で精度の良い解析手法の開発が必要である。

(b) 応力解析結果と疲労試験結果の関連の明確化における課題

疲労き裂発生寿命解析、破断寿命解析のための基準となる疲労強度すなわち応力値は、実験結果を基に得られている。一方、解析によって得られる応力の値は、要素の種類、要素の大きさなどの影響を受けることから、現状では、疲労・破壊強度評価の精度があいまいになっている。疲労・破壊強度評価の高精度化にとって大きな課題である。

① 応力解析手法の標準化

疲労・破壊強度評価時に用いる応力の概念、すなわち、ピーク応力、ホットスポット応力、公称応力に対応して、応力解析時に用いる要素の種類と要素サイズの標準化が必要である。また、それぞれの応力に対し、応力の評価位置の標準化も必要である。

② 自動要素分割

疲労・破壊強度解析における解析モデルの生成にあたっては、上記の条件を考慮した上で精度のよい応力を効率よく求めるために要素分割を行う必要がある。

(c) 疲労・破壊強度解析の高精度化と効率化における課題

① 高精度高効率応力頻度解析手法の開発とその検証

統計的予測手法の高精度化とともに、高効率化を図る必要がある。線形解析を基準とする場合でも多大な解析コストが必要となる。そこで、船体構造応答の特性を利用した解析手法の開発が必要である。また、本手法の検証のための解析、実験が必要である。

② 短期予測の高精度化（短期海象におけるレーレイ分布仮定の妥当性）

短期予測において、応力振幅の短期分布をレーレイ分布と仮定しているが、この仮定の精度については疑問が残る。応力頻度分布の形状を明らかにするために、短期分布形状の確認が必要である。

③ 非線形現象の取り扱い手法の開発

非線形現象を効率よく、かつ、高精度で応力頻度分布に反映させる解析手法の開発が必要である。

④ 不安定破壊強度評価時の応力解析手法の開発

疲労き裂が発生した後の不安定破壊の発生解析を行う場合に、き裂の存在を考慮したK値解析を行う必要がある場合がある。このような場合の効率のよい解析手法を開発する必要がある。

(d) 信頼性評価

単一の破壊モードに関する信頼性評価方法は比較的整理されており、構造物の疲労寿命に影響を与える個々の因子のバラツキを定量的に評価することが今後の課題となる。疲労寿命のバラツキに影響を及ぼす因子の主なものを先に表2.3.1に示した。外力の評価、座屈・崩壊解析、構造解析などと共に問題についてはADDAシステム全体として総合的に検討されるべきである。

一方、疲労き裂発生からき裂伝播、不安定破壊までを総合した信頼性評価や、構造の冗長性を考慮した構造物としての最終的な信頼度の評価など、複数の破壊モードを考慮した信頼性解析手法を開発する必要がある。

2.4 信頼性評価手法

2.4.1 現状と問題点

船体構造の安全性を向上させ以って不測の海難事故を未然に防止する必要があることは言を俟たない。しかしながら一方において莫大な投資をすれば別であるが一般に絶対に安全という構造物もあり得ない。実際、現行の規則で設計された船舶でも事故は皆無ではなく損傷も少なからず発生している。

従って、実際の構造物においては安全性と経済性との調和を図る必要があり、ここに信頼性工学適用の意義がある。

現行の船体構造設計法は一般に船級協会規則に基づいており、その基本的な考え方は「許容応力設計法」（＝「安全率設計法」）という確定論的手法である。

即ち、

$$\frac{\sigma_k}{\lambda} = \sigma_a \geq \sigma_w$$

σ_k = 材料強度の公称値

λ = 安全率

σ_a = 許容応力

σ_w = 作用応力

この許容応力（実際の規則算式は直接的に部材寸法を与える場合が多い）は“経験的に定められた”ものであり、このことが現行の設計法が“経験工学”といわれる所以である。ここで留意しなければならない点は所定の安全率を確保しても損傷の確率を推定できることである。

現行設計法の問題点は、まず“経験工学”に基づくが故に経験の乏しい船体構造（新構造、新材料等）に対する適用が難しい点が挙げられる。次に現行設計法では、一般に降伏点や座屈強度に対応する荷重以下の荷重に対する余裕を示すが、それ以上の荷重に対する余裕は不明である。つまりこの場合の安全率は最終強度に対する尺度ではなく、また最終強度のバラツキを考慮していないという点で不充分である。これらの不充分な点の解決を可能とするのが信頼性工学である。調査によれば航空・原子力等の他業種においては信頼性工学を志向しており、造船技術においても早急に取り組むべき課題であると考える。なお、U.S.Coast Guard 等の各国 Authority や外国船級も信頼性工学を採用する方向で検討を行っている。

船体構造の安全性を評価するには、荷重、強度、工作精度、解析精度等のバラツキによる不確定要因を考慮するとともに各部材の重要度及び破壊の様式などを反映させる必要がある。ところが従来はこのような要因については経験的に対応しているのが実状であり、個々の構造要素あるいは全体構造に対し過大（過小）設計あるいは不均一な設計がなされている可能性は否定しえない。

信頼性工学はこれらのバラツキの要因を明確にし、安全性を確率的に定量化するもので、近年の理論や解析技術の発展をとり入れ、過去の実績データおよび将来にわたって蓄積されてゆくデータを活用して設計決定を合理化するために不可欠の技術であるといえよう。

更に船という巨大で複雑な構造物を安全にしかも経済的なものにするには、個々の部分構造の強度あるいは個々の破壊モードを把えるのみでなく、構造の冗長性や破壊モードの組合せを考慮して大規模構造である船体構造システムの合理的な設計法を摸索して行く必要がある。即ち確定論的手法では扱いにくい損傷確率の定量化により、耐損傷性の評価を行い、また新型式構造の評価を経験と比較・検討できるようにしなければならない。

以上の考察に従い下記項目につき調査検討を行った。

- (1) 船体構造強度評価法への信頼性工学の導入
- (2) 部材重要度評価法
- (3) 船体構造強度総合評価法

2.4.2 調査検討の概要と検討結果

船体構造設計に信頼性工学を導入するためには、今後、どのような研究を行うべきであるかという点に関して検討を続けてきた。まず第一に問われたのは信頼性工学が必要であるかどうかということであったと言えよう。また、それが役に立つかという問でもあった。

従来行われている安全係数を用いた設計法では、安全係数は必要なのかどうか。言うまでもなく、無くてはならぬものである。この係数が導入される迄は、どのようであったか知る由もないが、想像するに、設計者各人の適当な判断で設計していたのであろう。暗黙のうちに、安全係数のようなものを採用し、それが次第に共通の概念となり普遍的な設計手法として認められるに至ったのであろう。構造信頼性工学の発達と共に、いわゆる安全係数の大小が必ずしも安全性あるいは信頼性の大小と一致するとは限らないことが明確にされた。この二つの事実、即ち、安全係数は不可欠の概念であるということと、にもかかわらず、不十分な概念であるということから得られる結論は一つである。安全係数に代えて、信頼性工学に基づく他の適当な数値の採用を検討すべきであるということである。安全係数を用いた設計法に代わる実用的な、より合理的方法は何かについて調査検討を行った。さらに、議論の過程で明らかになった一つの重要な問題に、部材重要度という概念があるが、船体構造を構成する各部分にどの

程度の信頼性を付与すれば最も効果的かを考察する際に必要となろうと考えられている。しかし、部材重要度をどのように定義すべきかについては、結論を得る事は出来なかった。この問題は合理的な船体構造設計のために是非とも解決しておかなければならぬもの一つである。信頼性工学の応用に関する基本的問題でもある。

一方、十数年後を念頭に置けば、現在、信頼性工学の分野で研究されている種々の技法を船体構造設計法に組み込むための研究も是非とも進めておかねばならぬと考える。

(1) 船体構造強度評価法への信頼性工学の導入

2.4.1 項に述べた現行設計法の問題点を解決するためにまず船体構造強度評価法への信頼性工学の導入に当つての問題点等について検討を行った。

調査検討項目としては、船体構造設計法の現状と問題点、他業種における信頼性設計技術の適用動向、船体構造信頼性評価に関する技術文献調査及び一部試解析を実施した。他業種調査のうち例えは航空・宇宙関係では、軽量化と安全性に対する要求が厳しいので、それらを総合的に評価できる信頼性手法の利用はますます盛んになるであろうと予想されている。

調査の結果、信頼性工学解析手法の設計基準への適用については表2.4.1のように整理される。

表 2.4.1 信頼性工学解析手法の設計基準への適用

設計基準 (許容応力設計法)	従来法 (許容応力設計法)	レベル1 (部分安全係数設計法)	レベル2 (2次モーメント法)	レベル3 (厳密解析法)
特 徴	経験的安全率による確定論的手法	設計因子毎に重みを付けて安全係数を設定	設計因子のバラツキを平均値と分散で代表させて信頼性指標を算出	設計因子の確率特性に基づいて破壊確率を厳密に計算
適用例	一般商船 (従来規則)	LNG船タンク 海洋構造物	土木(欧洲)	なし
			航空機 原子力容器	
長 所	簡単	・やゝ簡単 ・ある程度細かい配慮が可能	・一応確率論的手法 ・実用的 ・破壊確率と対応しているので安全性の評価が可能 (新構造の評価可能)	・物理的意味が明解 ・環境を含めた全システムの解析が可能
短 所	・物理的意味が不明確 (安全率) ↓ (不確実率) ・安全の定量化不可 ・新構造の評価が難しい	・安全の定量化についてやゝ問題有り	・分布関数を特定すれば破壊確率と結びつくものの依然として実績との対応が必要	・設計因子の詳細確率特性データの収集は困難

表 2.4.1 に示すように安全率を用いた従来法などでは新構造船舶の評価が難しく、これを可能とするには信頼性工学の導入が是非共必要であり、その際少なくともレベル 2 法（2 次モーメント法）以上の手法を採用する必要があることがわかった。ところがレベル 3 法を採用した場合には、全ての設計因子の正確な確率分布を知ることは現実には不可能に近いので、新船体構造設計法においては荷重 (Demand) と強度 (Capacity) の確率分布の 1 次及び 2 次のモーメントである平均値と分散を用いて信頼性を評価するレベル 2 法が最も適当であると考えられる。この手法においては荷重および強度の平均をそれぞれ μ_d , μ_c 、分散をそれぞれ σ_d^2 , σ_c^2 で表わし、荷重と強度との間に確率論的相関が無いとすると信頼性指標 (Reliability Index) β は次式で表わされる。

$$\beta = \frac{\mu_c - \mu_d}{\sqrt{\sigma_c^2 + \sigma_d^2}} \quad \dots \quad (2.4.1)$$

確率分布が正規分布の場合には破壊確率 P_f との間に次式で表わされる関係が成り立つ。

$$P_f = 1 - \phi(\beta) \quad \dots \quad (2.4.2)$$

ϕ = 正規確率積分

すなわち、本手法では確率分布が正規分布であれば構造が安全である確率 ($= 1 - P_f$) が β を指標として表現できる。また例え正規分布でない場合でも構造物の安全性は β によりある程度予想できる。

β と従来の安全率 (λ) との間には次の関係式が成り立つ

$$\beta = \frac{\lambda - 1}{\sqrt{\lambda^2 (\sigma_c/\mu_c)^2 + (\sigma_d/\mu_d)^2}} \quad \dots \quad (2.4.3)$$

本式はたとえ安全率 (λ) が同一であっても、荷重のバラツキ (σ_d/μ_d) や強度のバラツキ (σ_c/μ_c) が変われば信頼性指標 (β) も変化することを示している。

このように β は設計因子のバラツキを評価でき、また破壊確率との対応がつくるので信頼性指標による評価法は安全率による従来の手法からは大きく進歩した評価法であるということができる。

船体構造強度の信頼性評価を β で実施する場合のイメージ図を図 2.4.1 に示す。また、数種類の構造物に対する計算例を図 2.4.2 に示す。但し、本結果はいくつかの仮定に基づいているが、Faulkner のように現状の商船にはかなりの強度余裕があるとの見方をする人もいる。しかしながらこれらの仮定を検証するためのデータの整備は今後の課題であると云えよう。

上述のような信頼性工学を導入した場合の効果について具体的な事例で考える。

(a) 新しい構造様式の船舶の設計

従来新型式船舶の場合には過度の安全率を見込んだり、あるいは過去の経験からの外挿によっていたがこの場合の安全性と経済性とのバランスについては、多分に疑問がある。即ち、許容応力設計法

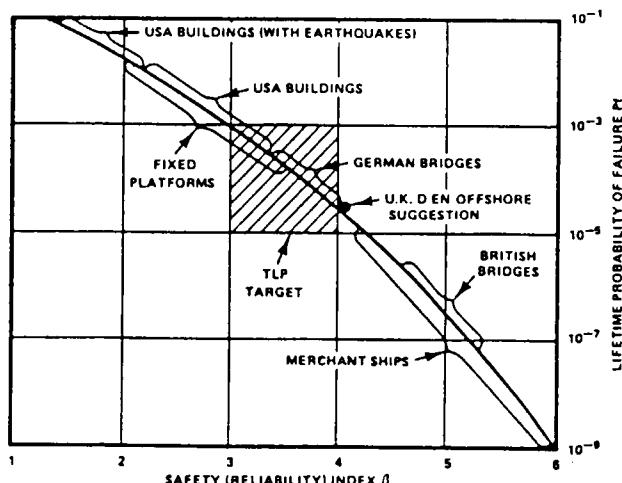


図 2.4.2 β と P_f の関係 (正規分布) および実構造物の実績と規則に基づく β の値 (D. Faulkner et al. OTC 4648)

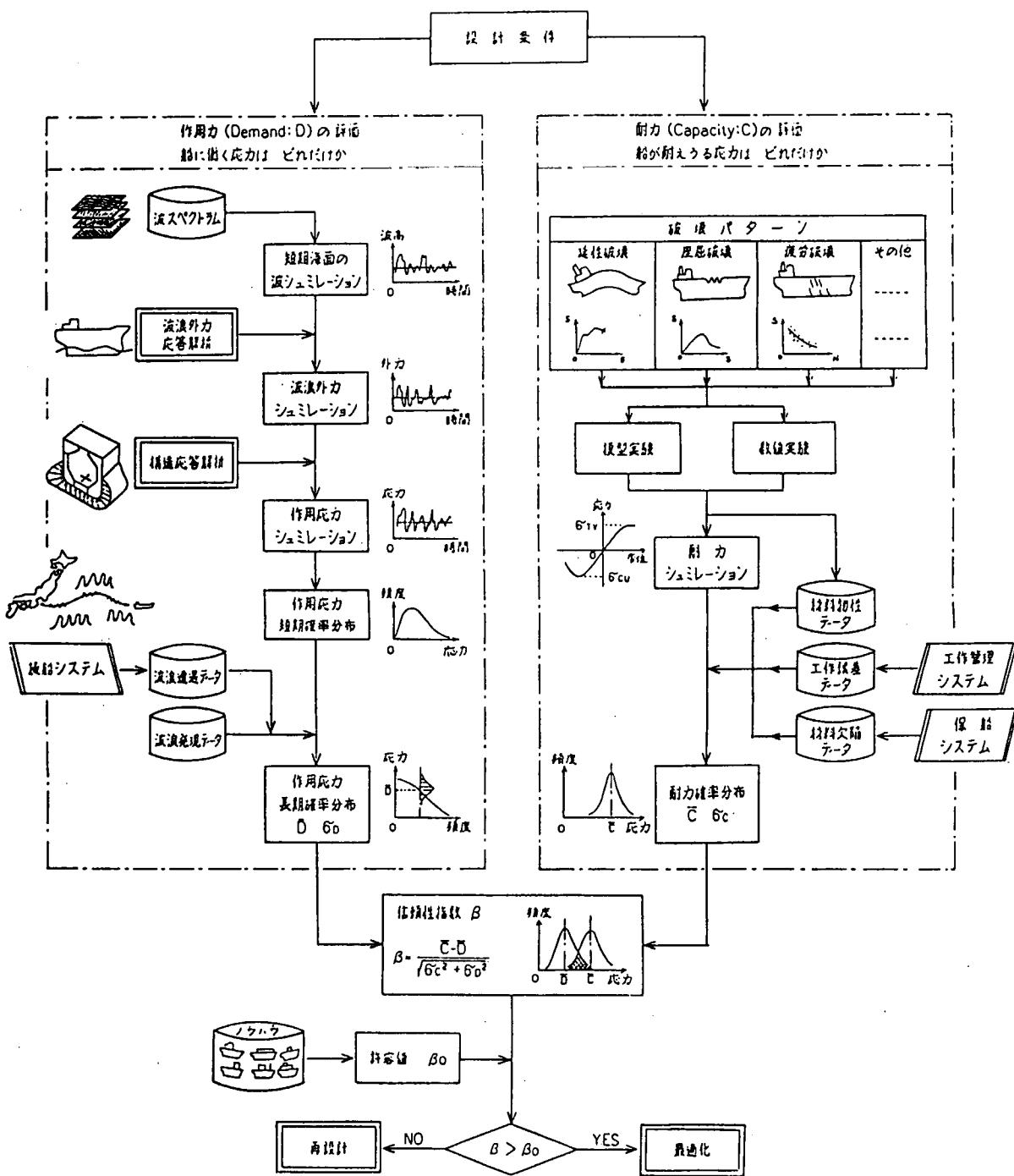


図 2.4.1 信頼性指標 (β) による信頼性評価

では、荷重や強度のバラツキ (σ/μ) を明確にせず、実績の経験をベースに安全率 (λ) を設定し、許容応力を与えることが多く、新しい構造には合理的な λ が与えられない。安全の確保には破壊確率 (P_f) を重視せねばならず、評価手段として信頼性指標 (β) を用いれば最近の著しい解析技術の進歩と相俟って新しい構造に対しても経済性との調和を図りつつ従来と同等以上の安全性を保証しうるであろう。

(b) 新しい材料の採用

古くは軟鋼に対しての経験に基づき設計がなされ、その後 32 キロあるいは 36 キロ鋼と高張力化が進んだ。

最近は更に高張力化が進む傾向にあり、作用応力が上昇するものの、軟鋼と比較して疲労強度や座屈強度の上昇はそれほど期待できない。したがってこのような新しい材料を採用した場合、単に寸法の変更だけでなく、部材配置や形状を変えた新構造の採用も考えられ、これらの検証のためには信頼性工学に基づく評価手法が必要となってくるであろう。また信頼性による詳細な評価は材料の能力を充分発揮させることにつながると考えられる。

(c) 材料や解析技術及び建造技術等の進歩

設計の因子となる量（荷重、材料強度、工作精度、解析精度………）は、現実には確定量ではなく全てバラツキを有している。

最近の解析技術、特に計算機を利用した数値計算法の進歩により以前に比べると解析精度は飛躍的に向上している。

また一方では材料自身も品質管理技術の向上によりその物理的特性が改善されており、更に建造技術の進歩も構造強度を向上させている。このことは強度のバラツキが減少したことを意味し、その結果安全性が向上したことになる。しかしながら許容応力設計法ではバラツキが結果として一定値として扱われているため技術の進歩が設計に反映されていないことになる。信頼性工学を適用すれば上述の解析技術の進歩、材料の物性値の向上あるいは建造技術の進歩等を設計に反映させることが出来るようになる。但し、この場合でも暗々裡に期待している構造余力に必然的に存在するバラツキを定量的に評価して総合的な判断に基づいた設計によらなければ思わぬ事故につながることも考えられ、ここにおいても安全確保のために、設計において実船破壊試験の不可能な船体構造の数値シミュレーションの評価技術として信頼性工学による検討が必要と考えられる。

図 2.4.3 (a) および(b) は 6 万 DWT タンカーについて 2 つの限界状態（甲板の座屈損傷および全断面崩壊）を想定し、それぞれに対する外力や強度のバラツキによる β （それぞれ β_e , β_p と表わす）の変化の計算例を示すが、このような解析によりどのような設計因子のバラツキを把握することが重要であるかが明らかになる。

以上のように信頼性工学の設計への応用により、技術競争力の強化が図れると考えられる。

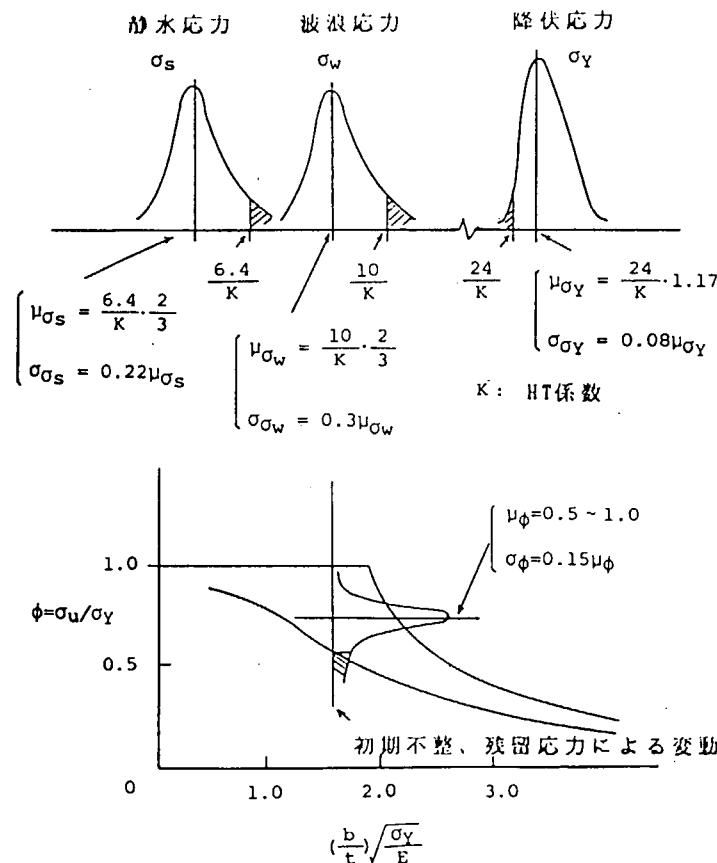
(2) 部材重要度評価法

船体構造の目的はその使用期間において荷重に耐える機能を失うことなく安全に稼動することにある。従って船体構造システムが目的を果さなくなる“折れる”や“破れる”の事故が起きては困るのである。現在の設計では部材個々の働きに対して許容応力を用いて寸法が決められるのでシステムとして機能を失う確率の量化はできない。

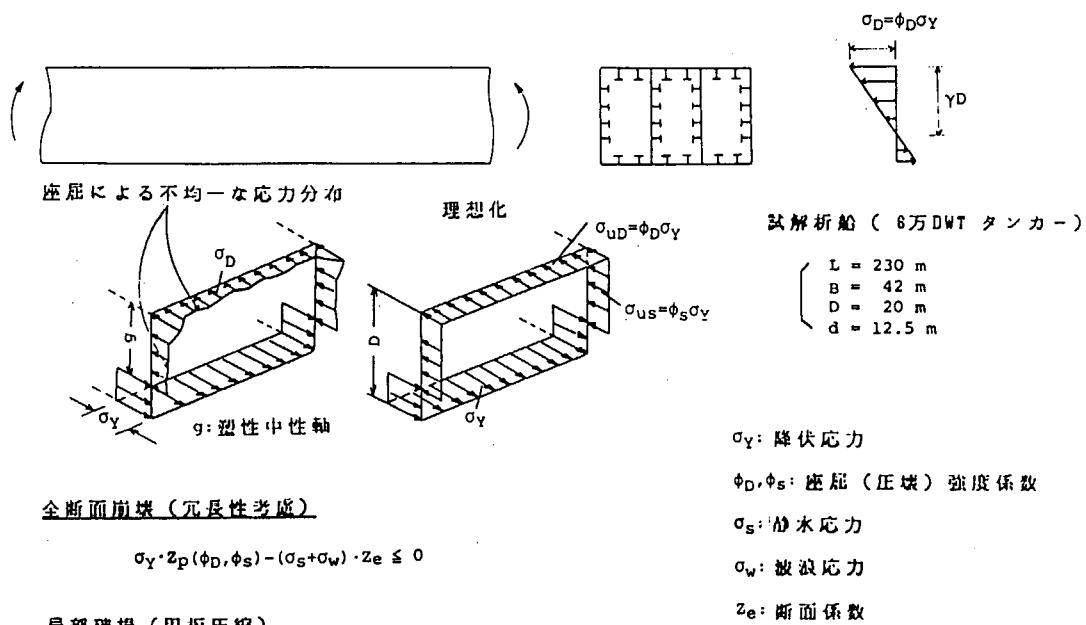
しかし、信頼性手法を用いればFTA(Fault Tree Analysis)に信頼性解析を応用することにより、この定量化が可能となる。従って“折れる”や“破れる”の終極強度を考えるとき、どの様なTreeをたどり、いか程の確率になるかは部材夫々に対する重要度(重みづけ)で変る。

構造費用も含め、安全稼動を策定するにはこの様な目的に合わせた部材重要度の設計理念が明確にされる必要があることがわかった。

すなわち前項で述べた信頼性指標(β)をどの構造部材にどの程度配分するかは船体構造全体の合理的・効率的設計のために重要な問題となってくる。本項ではこの問題を解決するために部材重要度の概念、評価法及び適用法等について調査検討を行った。



(i) 想定したパラメータの確率特性値



(ii) 限界状態基準式の具体例

図 2.4.3(a) 船体梁崩壊強度計算例 (想定したパラメータの確率特性値及び限界状態基準式の具体例)

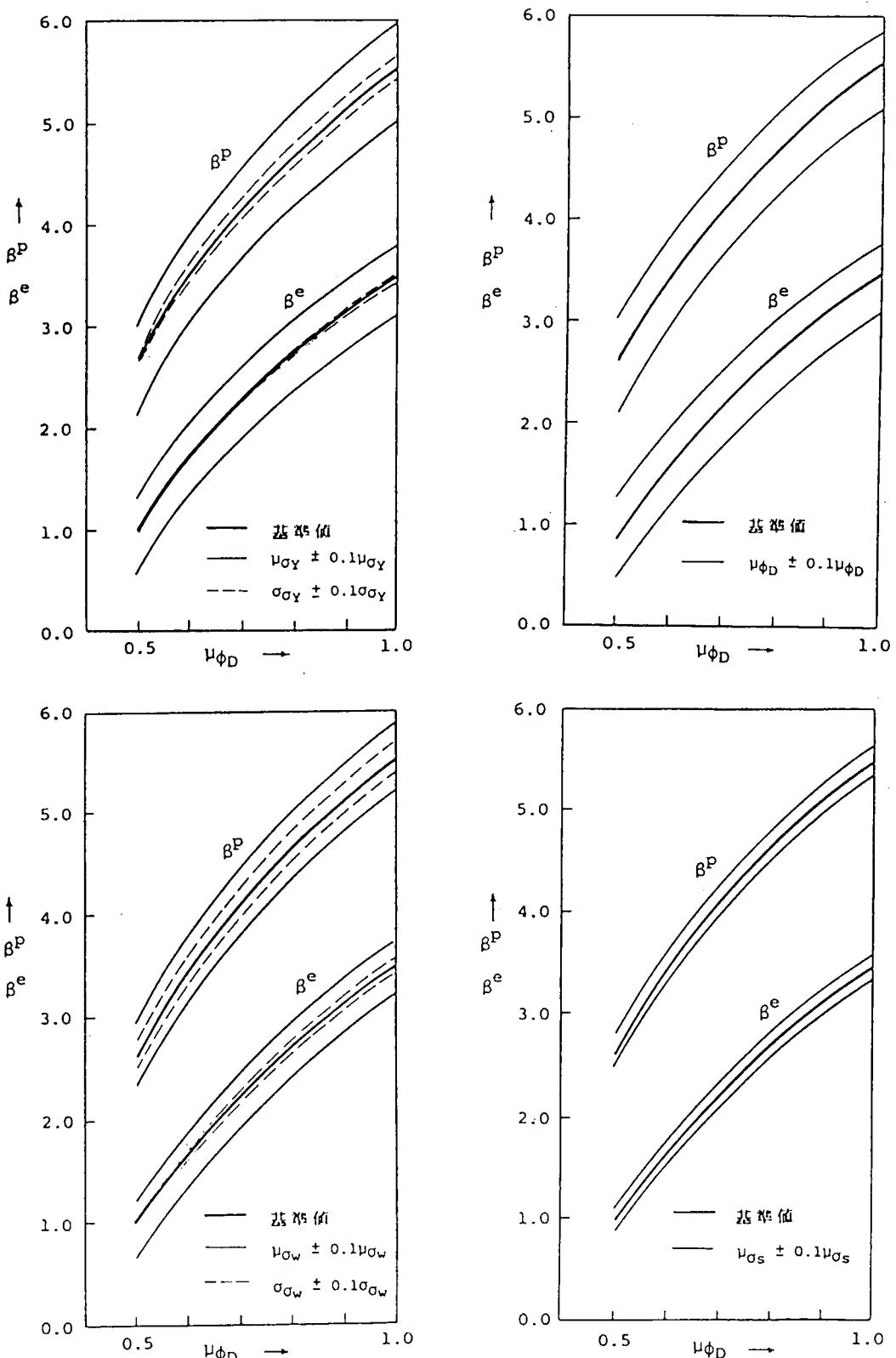


図 2.4.3 (b) 船体梁崩壊強度計算例(感度解析結果)

β^P ; 全断面崩壊に対する信頼性指標

β^e ; 甲板の座屈損傷に対する信頼性指標

μ_x ; x の平均 σ_x ; x の標準偏差

従来の規則においても許容応力規定、鋼種使用区分規定等に重要度の考え方を見うけられるもののその理論的背景は不明確である。この点を明確にし、経験からの理論的・解析的展開を図り、大規模構造である船体構造の合理的・効率的設計法の確立のために、部材重要度概念の導入が必要であることがわかった。部材重要度概念を導入した船体構造の総合信頼性評価過程の概要についての検討結果を表

2.4.2 に示す。部材重要度の定義は信頼性評価に基づくもの、基づかないもの等いくつか考えられ、それぞれの定義に応じた評価法が考えられることがわかった。後者の例としては 2.2.2 に示されているような部材重要度の初期設定値がある。また前者の信頼性評価に基づく場合の定量化のためのタンカー横強度の崩壊モード計算例を図 2.4.4 に示す。本結果はトランス・リングを構成する部材の崩壊順序および破壊確率を示しており、各荷重条件における崩壊に対しどの部材の寄与が大きいかを判定することができる。部材重要度の定義は船舶の機能をいかに規定するか、また機能維持のための耐荷重強度をいかに確保するかという点において設計理念と深くかかわっており、今後さらに研究を進めて行く必要がある。

建造費(I)に保守・損失費(R)を加えた期待総費用(L)は、図 2.4.5 に示す如く、部材重要度概念に基づく適切な β の配分により最小化が図れると考えられる。

(3) 船体構造強度総合評価法

信頼性解析に基づいて船体構造強度を総合的に評価するためには、一次近似二次モーメント(FOSM)法の採用が現時点では最適であると考えられた。この点に関しては、疲労および座屈強度に関する研究も信頼性工学的アプローチを加味する傾向にあり、FOSM の適用を十分考慮して研究計画を立てれば問題はない。また、船体構造設計に FOSM 法を具体的に適用する素地は十分にある。

このような観点からは、信頼性工学を船体構造設計に適用するためになすべきことは、信頼性工学独自の研究ではなくいかに設計の総合評価に組み込むかである。即ち、信頼性工学は要素技術に相当するので、新船体構造設計法に組み込むためにこれらを総合したシステムを構築せねばならない。そのためには表 2.4.2 からわかるように各要素技術の整合性が大切であり、それをいかに図るかを十分考慮した研究体制が必要であろうと考えられる。

言うまでもなく、FOSM 法を適用するのは次善の策であって、本来船舶に発生する重大損傷などは、ある種の確率過程としては捉え解析をするべきものである。このことを考えれば、FOSM 法を適用するのは信頼性を考慮した設計の第一歩にしか過ぎないということを銘記すべきであろう。この比較的簡便化した手法でも、実際に応用しようとすると、恐らくデータの質と量という問題が全面に出てくるであろう。

Gumbel の著書 "STATISTICS OF EXTREMES" (1967) にある statement, 即ち, 'At present the shipbuilding industry knows less than any other construction industry about the service conditions under which it must operate. Only small efforts have been made...'

の様なことが、新船体構造設計法(ADDA)についても言われることのないように心すべきであろう。

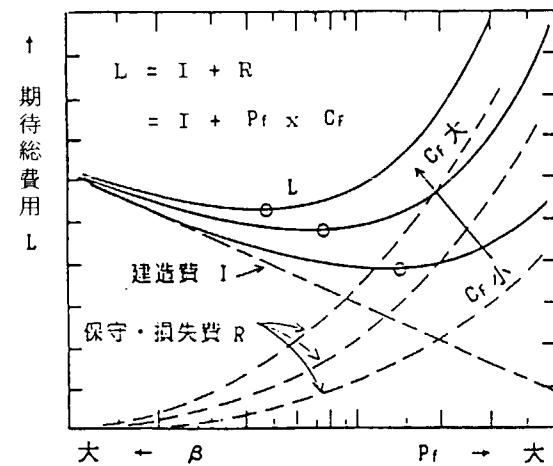
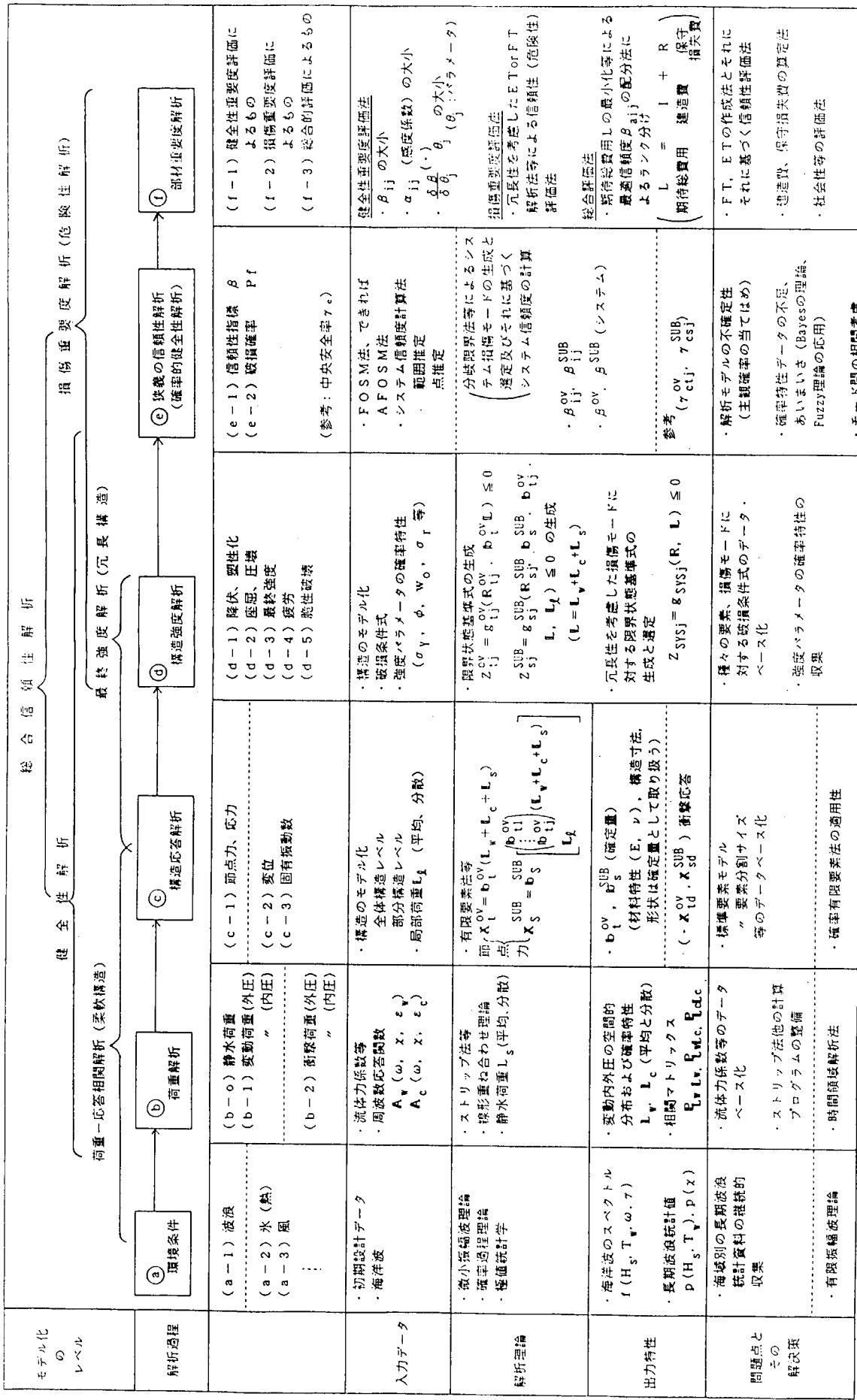
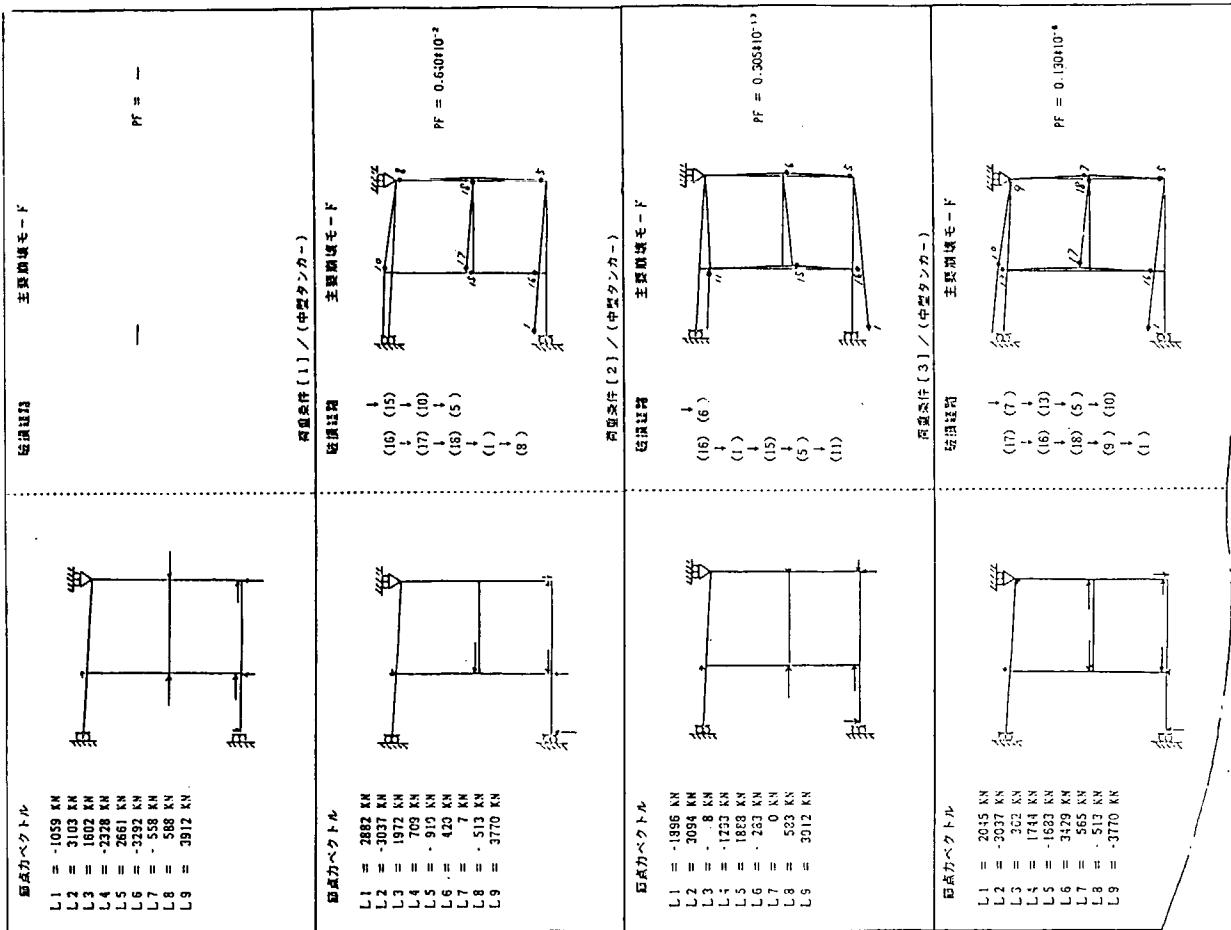


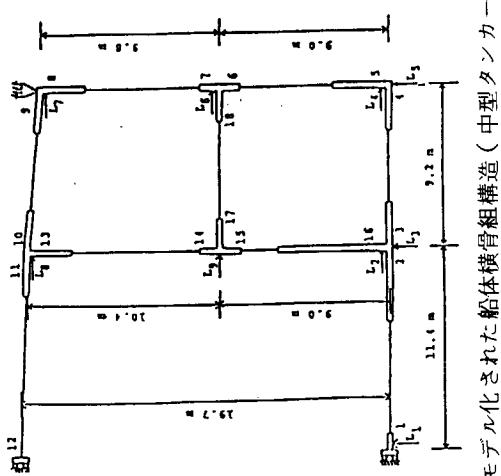
図 2.4.5 期待総費用最小化信頼度配分の概念図

表 2.4.2 部材重要度概念を導入した船体構造の総合信頼性評価過程の概要

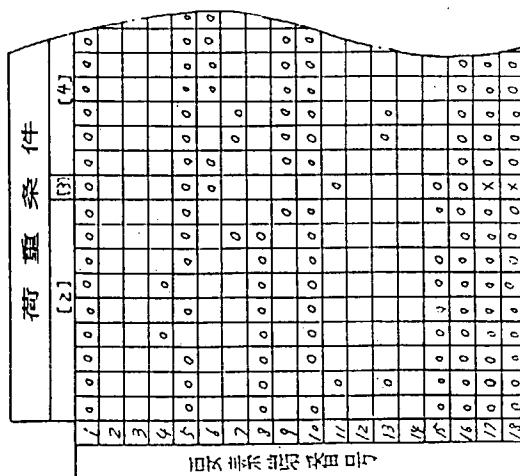




各条件に対し選択された崩壊モードの破損要素端の一覧／(中型タンカー)



モデル化された船体横骨組構造（中型タンカー）



○—破損確率(大) △—破損確率(小) ×—破損確率(微小)

図2.4.4 タンカーの横断面崩壊解析例

船体構造強度総合評価法の構築に当って取組むべき全般の問題としては、まず一定の評価手法に基づいて多くの実績船のデータを集め基準値を設定することであろう。その際、設計因子となるデータのバラツキについて広範な調査を行う必要がある。

また具体的な問題として荷重、材料強度等のバラツキをいかにして解析に反映して応答値を求めるかについて更に検討を進めて行く必要がある。

腐食等の劣化をも考慮に入れた構造信頼性の経年変化の模式図を図 2.4.6 に示す。

時間の経過と共に荷重の最大期待値が増加する一方で、強度は腐食等の影響により、そのバラツキを拡大しながら低下して行くため、破壊確率は次第に大きくなって行く。座屈・最終強度の信頼性評価法においては、部分構造レベルと全体構造レベルとに分けて考え、構造形態別あるいは変形機構別に組み合せ荷重のもとでの限界状態を求めこれを信頼性評価して強度ランク評価へと結びつけていく必要があることがわかった。

疲労強度面では、それを設計寿命の観点から評価するための代表的な設計法である安全寿命設計とダメージトレラント設計を取り上げ、各設計に必要な要因と今後検討すべき問題を明らかにした。安全寿命設計は、疲労破壊する可能性を極めて低く抑えた、Maintenance - free の設計であり、一方、ダメージトレラント設計はフェールセーフ設計の安全性を更に高めるために、部分破壊が進行する過程も的確に捉えて、計画的な検査によりその破壊が起きる以前に発見・修理する設計である。

以上述べた船体強度総合評価法を信頼性設計で実施する場合の設計フローの検討例を図 2.4.7 に示す。

2.4.3 研究開発課題と解決策

(1) 船体構造強度評価法への信頼性工学の導入

本研究課題では信頼性工学を船体構造設計に導入するに当ってはまず以下に述べる基礎的な問題を解決していく必要がある。

(a) 船体構造強度の信頼性評価のためのフローの確立

信頼性工学を導入した場合の設計フローの試案を図 2.4.7 及び図 2.4.1 に示した。

これらのフローについては今後さらに検査等の問題を含めて具体的展開を図る必要があると同時に実績値の β の収集により基準値確立を図ることが必要となってくる。

(b) AFOSM 法の船体構造への適用

2.4.2(1)で述べた手法は MVFOSM (=Mean-Value First-Order Second-Moment Method) 法と呼ばれるレベル 2 法であるが、近年数々の改良案が加えられてきた。これらのレベル 2 法は AFOSM (=Advanced First-Order Second-Moment Method) 法の名で総称されている。主な改良点は破損関数が非線形となる場合(例えば多軸応力下のパネルの座屈強度など)や、確率分布が非正規分布(例えば、波浪外力の Extreme Value の確率分布は Double Exponential 分布で精度よく表わすことができる)の場合に関するものなどであ

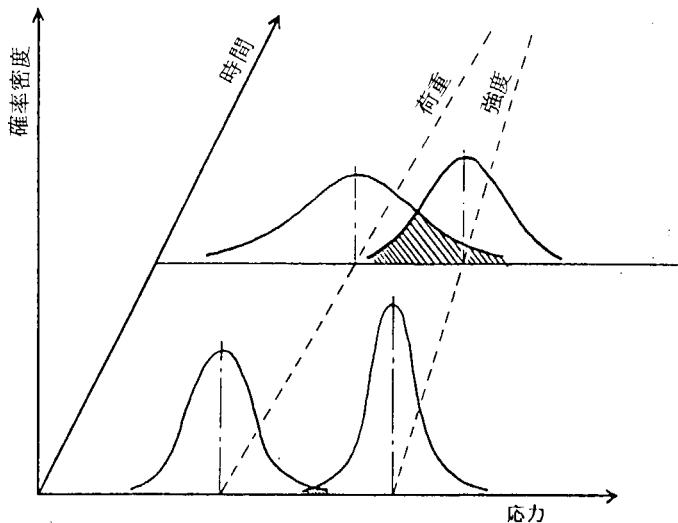


図 2.4.6 構造信頼性の経年変化の模式図

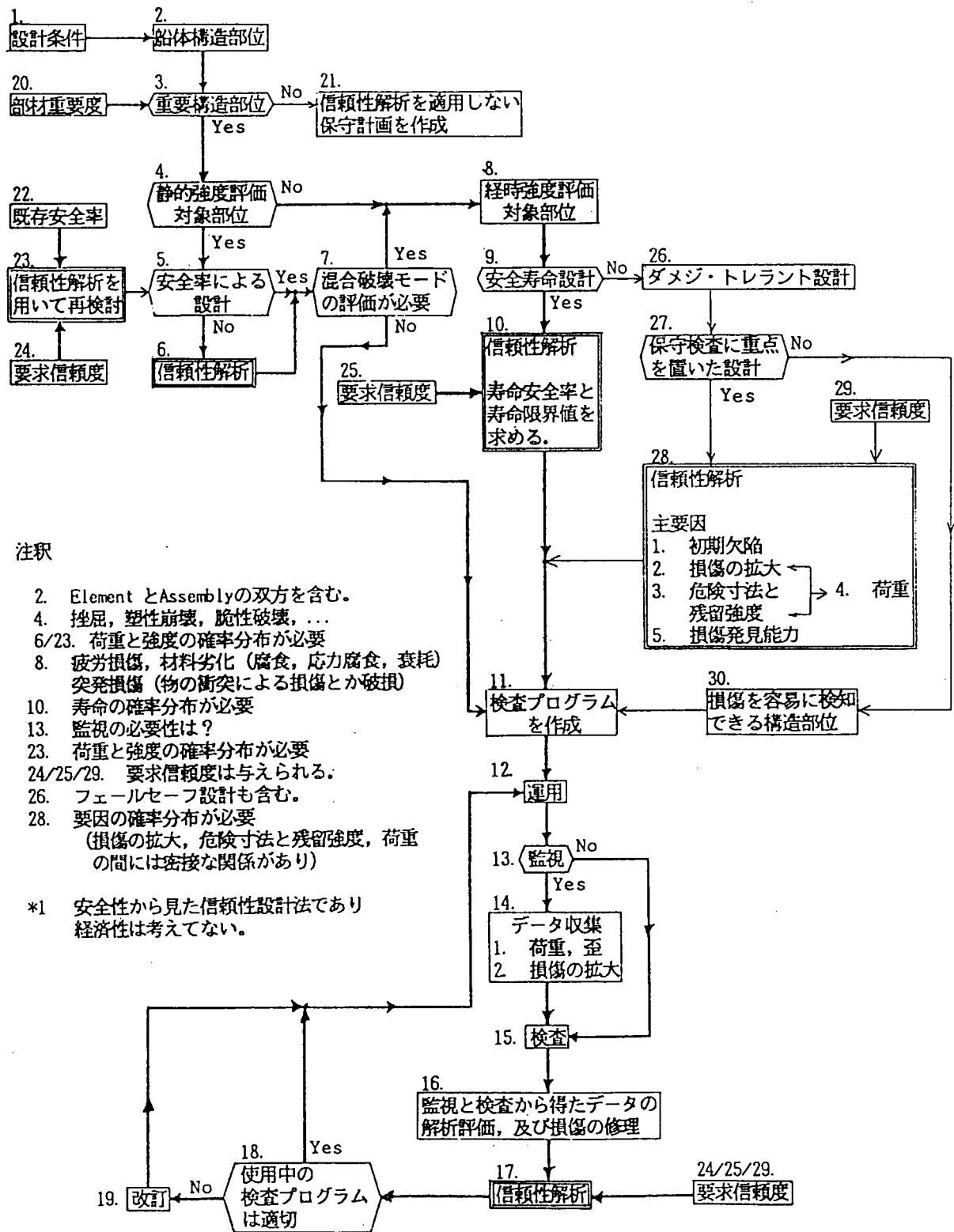


図 2.4.7 信頼性設計フロー

り、平均、分散以上の情報により精度向上を狙っている。

本手法を大規模構造である船体構造へ適用する方法は未だ確立しておらず、より精度の高い信頼性評価のためには今後の検討が必要である。

(c) 複合荷重の信頼性に及ぼす効果の検討

実際の船体構造強度を評価するに当って、单一荷重下のケースは少なく、例えば縦曲げと捩りモーメントの組み合わせのごとき位相差を考慮に入れて複数荷重下の強度評価について検討する必要がある。また必ずしも荷重解析だけでは荷重の組合せ状態が決定できないケースも考えられこのような場合についての評価法の検討も重要である。

(d) 材料・工作情報の信頼性評価への組込み

実際の材料のバラツキや船体建造時における工作精度等のデータを信頼性評価に活用するための検討が必要である。

(e) 検査・保守の信頼性評価への組込み

船体構造の安全性・信頼性評価は、その検査・保守の情報が重要である。従って構造設計と検査・保守との間の情報システム的な結びつきを図らなければならない。本課題においては、信頼性工学の観点から検査結果あるいは保守状況を船体強度との関連において定量的に判断し、検査間隔等について信頼性評価に結びつくアプローチが重要となる。この時、経験の Feed Back の方法としてベイズの方法やそれに代わる方法も検討する必要がある。

(f) 波浪シミュレーションによる信頼性の検証法

設定された設計海象を用いての船体構造応答の時系列シミュレーション結果に対する信頼性工学的評価が必要となる。

(2) 部材重要度評価法

以下の開発の課題が挙げられる。

(a) 部材重要度概念の分類・整理

本課題の解決のためには、船体構造における機能喪失の定義を明らかにして行く必要がある。
また従来設計者が経験のあるいは感覚的に把んでいる部材の重要度の概念を分類・整理する。

(b) 部材重要度の定量的評価法の確立

上記(a)の分類に従って定量的評価法を確立させる必要がある。

このために実施すべき内容としては、船体構造における FTA(Fault Tree Analysis), Redundancy Analysis, 感度解析等である。

(c) 部材重要度概念を導入した設計法の検討

新船体構造設計法において、どのような形で部材重要度概念を織込むか、またそのときの設計法の流れについて具体的な検討を加える。

(3) 船体構造強度総合評価法

(1)で述べた基礎研究の成果を実際の建造船に適用する際の研究開発課題となる。このときの研究開発課題と実施すべき内容は以下の通りである。

(a) 船体構造強度に対する信頼性評価

開発された信頼性評価解析コードを用いて実績船の解析を実施してデータを蓄積すると共に、新型式船舶の試設計を実施する。

(b) 理論レベルの整合化

構造強度の総合的評価は荷重算定、構造応答計算及び強度算定のそれぞれの結果を用いて実施される。

このとき各算定技術間のレベルの整合を図り、評価法を合理的なものとする必要がある。

ここでは評価法をレベル2法で実施することを提案しており、荷重から強度まで全て少なくともそれぞれの平均及び分散を算定する必要がある。更に可能なものについてはその確率分布を示すことが望ましい。

(c) 材料・構造劣化の評価

腐食を含め船体構造の経年変化は強度評価上重要な問題である。本課題においてはこれが船体構造の信頼性にいかなる影響を及ぼすかについての定量的評価法を確立する。

(d) 工作管理システムの策定

建造時の工作精度等を強度評価結果にてらして管理するための手法についての検討をする。

(e) 検査・保守プログラムの策定

2.4.3(1)(e)で開発された信頼性評価による検査・保守法に基づいて、実船に対する新しい検査・保守プログラムを策定する。

(f) 強度ランク評価法

船体構造のトータルとしての信頼度を求めこれをレベルに分けてランク付けする評価法を開発する。強度ランクは建造時・就航中・修復後において変化して行く。

(g) 設計寿命評価法

船体構造の耐用年数に応じた設計を可能とするため、設計寿命の評価法を確立する。また就航時においてモニタリング結果に基づいて余寿命を判定する方法についても開発を実施する。

(h) ダメージトレラント設計

ダメージトレラント設計は、部材重要度と絡んで今後検討を続けるべきであろう。全体解析の高速化によつて、どの位置にどのような損傷を生じたならば、信頼性にいかなる影響があるかを逐一調査するか、Subjective judgementによりあらかじめ選択をしておくかのいづれかである。このようなことに関連して、fuzzy set理論を船体構造設計の信頼性解析に導入する方法を検討すべきであると思われる。

2.5 迅速・高精度応力解析手法

2.5.1 現状と問題点

ADDA応力解析の主力となるFEMも開発されてから既に20年を経ようとしているが、船の設計におけるFEMの役割は初期の頃に比べ大きく様変わりしているものと思われる。例として初期の頃のFEMプログラムPASSAGEと、今回ADDAが目指すプログラムとの比較を表2.5.1に示す。表にみる如く使用環境、使用目的などの点で大きな相違がある事が判る。以下に主な点をさらに詳しく説明する。

表2.5.2はADDAの稼動時に予想されるコンピュータ環境をコンピュータネットワーク状態に焦点をあて示したものである。つまり、

- ① ネットワークはかなり進んだ状態であり、少なくとも使用者側各自およびADDA管理機構とはWANにより接続された状態にあるものと予想される。
- ② 使用者側は独自のLANを構築しており、分散型の処理、情報管理体制ができているものと思われる。
- ③ 計算の規模、性格により階層的なコンピュータ使用体制になるものと思われる。
- ④ ADDA、CIMS、数値水槽または他のシステムは同一のネットワーク上で稼動するため、各システム間の有機的情報交換が可能となる。

以上PASSAGEの時代の一つのCOMPUTER(CDC6600)を使用各社がバッチモード形式で使っていた形態と比較すれば隔世の感がある。

次にADDAの主要演算部となるスーパーコンピュータの性能について示したのが表2.5.3である。PASSAGEの時代のCDC6600に比較すれば既に2桁以上性能が向上しており、今後ともこの程度の性能向上は続くものと予想される。

最後に次の点を付け加えたい。即ち、船の設計が、飛行機などの設計と根本的に異なった点は、飛行機の場合、実物実験により設計の妥当性を最終的に確認できるのに対し、船の場合にはほとんどができなかった事にあると言える。しかし、今回ADDAが目指すプログラムが開発されれば、真の意味での実物実験ではないが、数値上の実物実験が可能となり、設計に対する信頼性は大巾に向上する事になる。

現状はPASSAGEの時代からADDAの時代への変化の時代に当たるものと考えられる。通常NASTRAN、ADINA、MARCなどといった汎用応力解析プログラムを使用し、限られた構造に限られた荷重を想定した、模型実験的解析が多い現状である。

現状からADDA応力解析プログラム開発に当り、問題となる点を要約すると、

- ① ADDAでは応力解析が一つの独立した解析だとの見方はもはや成立しない。他の解析システムとの有機的なつながりが何より肝要であるが、現状ではほとんど、実績がないといえる。
- ② ADDAではぼう大な解析を数多く実施する事になる。これを可能とする為には最先端のコンピューターハード、ソフトの活用が必要となる。
- ③ ぼう大な解析を要領よく実施する為のコンピューター利用技術、解析アルゴリズムなどの開発が必要である。

2.5.2 調査検討の概要と検討結果

(1) 全船一体試解析

(a) 概要

80型タンカー($L \times B \times D = 227.6 \times 39.9 \times 19.0$)の全船一体FEMモデルについて波浪中における強度計算を行い、現状の解析技術及びシステム上における問題点の抽出を行い、将来あるべき姿を検討した。

表 2.5.1 ADDAとPASSAGEの比較

	項目	ADDA	PASSAGE
computer 環境	computer性能	100~1000	1
	計算コスト	$\frac{1}{100} \sim \frac{1}{1000}$	1
	出力機	高性能ディスプレイ	プロッター
	利用形態	会話型	バッチ型
Program 環境	プログラム内容	荷重解析、応力解析、強度解析、信頼解析などを備えた総合システム	構造解析のみ
	使用頻度	50~500	1
	対象構造	全船を含め、任意の大きさ	2-Hold程度
	対象船種	任意	タンカー、パーカチャリアー
	利用目的	・構造設計の主手段 ・数値実船実験 ・新船種の開発	応力解析の最終チェック

表 2.5.2 ADDA Computer環境(NET WORK)

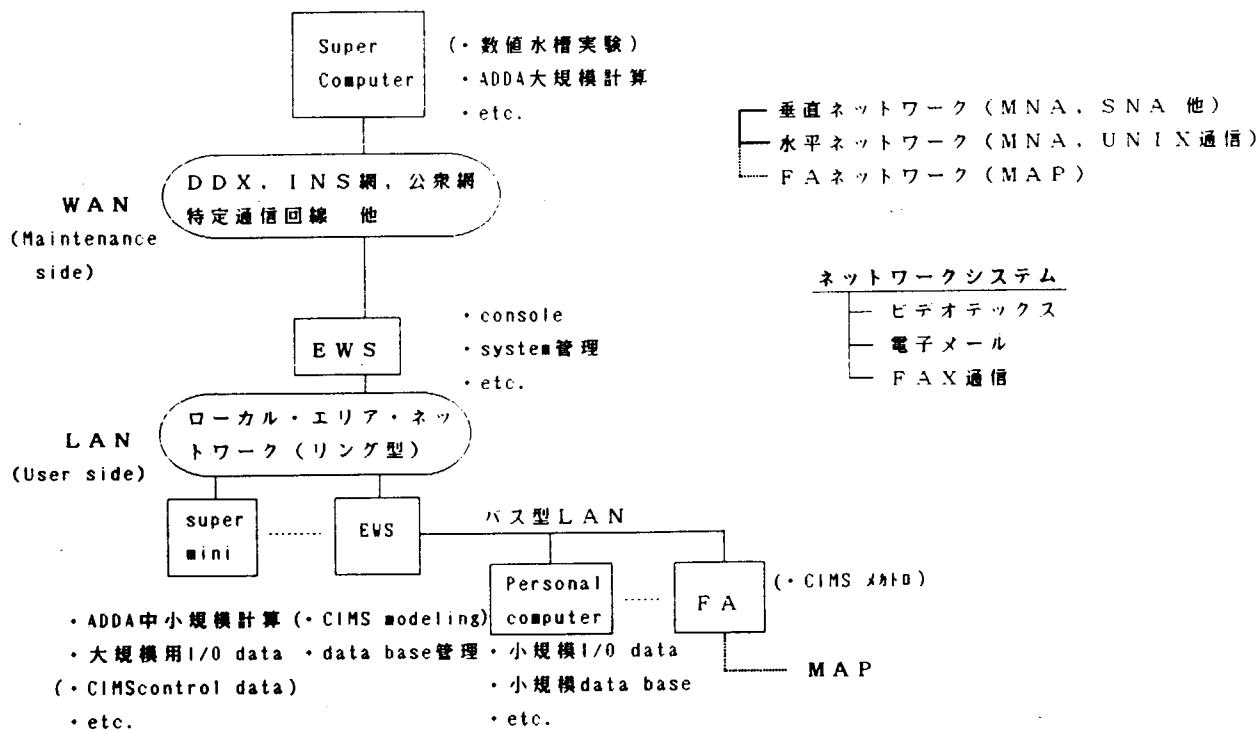


表 2.5.3 最近のスーパー コンピュータ 性能

(出典; リクルート Vector Register. June, 1988)

Giga Supers (≥ 1 Gflops)	Linpack Gflops *1 1000 × 1000	Peak 64-bit Gflops *2
Connection Machine CM-2		5.0
ETA 10-E (8 proc., 10.5ns)		3.05
Cray Y-MP/8	2.14	2.67
Hitachi S820/80		2.0
Cray 2S/4	1.41	1.95

Supers - Mid-Range (≥ 300 mflops)	Linpack Mflops	Peak Mflops
NEC SX/2A	885	1300
Cray X-MP/4	822	941
Cray 2S/2	741	976
Fujitsu VP400E	521	1140
Hitachi S820/60		1000
Hitachi S810/20		571
Fujitsu VP200E	424	571
NEC SX/1A	422	650
Cray X-MP/2	426	470
IBM 3090/600E VF	387	696
ETA 10-Q (2 proc.)		421
ETA 10-E (1 proc.)	334	381
IBM 3090/500E VF	332	580

c.f. CDC6600 (PASSAGE対象マシン) のPeakは10Mflops以下

* 1 Linpack のガウス消去法ソルバーで 1000×1000 マトリックスを解いた結果から換算。Vector processor, Parallel processor用 tuningあり

* 2 次式より算定

$$\text{Peak} = \frac{2n \times n}{\text{clock(ns)}} \text{ (Gflops)}$$

ここに $n \times n$: multiplierの数

n : processorの数

荷重はWG 1 から船体運動計算結果の波浪変動圧、船体加速度の形で受取り、構造解析モデルの節点荷重に変換した。

モデリングはCAD、構造モデル作成はプリボストプロセッサを用いて自動メッシュ分割を行い、構造モデルへの荷重分配、座屈・疲労解析用のデータ抽出は一部プログラムを作成した。又、解析には汎用コードのNASTRANを使用した。

今回行なわれた試解析は将来開発されるであろうシステムによる本解析と比較すると以下の大きな相違点が変換した。

	試 解 析	本 解 析 と の 相 違
対 象 船	80型タンカー	全船種を対象とする。
モ デ ル	前後端の一部を除き、ほぼ全船を両舷共モデル化	全船両舷をモデル化
要 素 分 割	HOLD部のBHDと2 Trans Ring部をFine Mesh, その他をCoarse Meshとした。	全船をFine Mesh化
モ デ ル の 規 模	4000 節点, 6000 要素	大規模解析で10万要素
要 素 の 種 類	外板は面外曲げを考慮した要素, その他は面内要素	外板, BHDは面外要素, 他は面内要素
支 持	前後端壁の各節点と剛体要素で結合された主節点をそれぞれ拘束	船首尾端自由を許す仮想拘束
荷 重	波 長 $\lambda / L = 1.2$ 入 射 角 向波, 斜波 波 高 8 M 船 速 NORの90% 載貨状態 Full, Ballast 2ケース 上の4条件(入射角2ケース, 載貨状態2ケース)のそれぞれ cos, sin 成分の合計8ケースについて計算した。	検討課題であるが, 合計 100~500 ケースの計算が必要になると見込まれる。
荷 重 計 算	ルイスフォームを用いた船体運動計算	特異点分布法等による三次元形状モデルによる同計算
荷 重 変 換	波浪変動圧 ルイスフォームの形状から構造モデル形状に変換 加速度 Trans Ring断面でのタンクの重心の加速度を分布荷重に変換	上記よりの変換 同 上
荷重のバランス	モーメントは考慮せず力だけをバランスさせた。	荷重変換段階での両者のバランスをとる。

(b) 試解析結果

試解析結果はカラープリントで出図され, 必要データは他のWGへ引渡され更に詳細な解析が行なわれた。上記の試解析において最も多くの時間を要したものは, 構造モデルと構造解析用荷重のデータ作成であった。また, FEM計算には高速コンピュータ(VP-50)を使用したが, 計算に要した時間は下記の通りである。

(1 回当りの計算時間を示す。)

	消 費 時 間	C P U 時 間
荷重1ケース	42M04S	13M59.04S
荷重8ケース同時	48M17S	16M05.30S

試解析の結果, ADDAで考えている大規模構造解析を短期間で処理するためには, FEM計算用のスーパーコンピュータの演算速度は 25GFLOPS以上必要と考えられるが, 最新のものと比べて約 10~20倍程度の性能であり数年以内には十分達成されると予想できる。

一方, モデリング作成や計算結果の図形表示処理等に使用されるEWSは例えば全船一体解析結果を瞬時に

見ようすれば360GIPSの処理速度が必要と考えられるが、数年以内には達成しがたい性能であり、膨大なデータ量を目的に応じて必要最小限で処理するデータマネジメントシステムと併せて検討されなければならない。

スーパーコンピュータとEWS間のデータ転送は75MBytes/sの転送速度が必要になると考えられる。Ethernet等のLAN(域内ネットワーク)では、10MBytes/sを実現しており数年内には実現可能と思われるが、コンピュータセンターと各社工場間のWAN(広域ネットワーク)では、実現が難しい数値であり、システム構築にあたっては、造船CIMSとの関連も含めて検討する必要がある。

(2) 解析アルゴリズム

ADDAに期待される解析アルゴリズムとして以下の項目について調査検討を行なった。

(a) 確率有限要素法の適用に関する検討

船体の諸寸法が船全体の応力状態にどのような影響を与えるかが判れば、船の合理的設計、強いては船の最適寸法決定に益する所が大きい。このような感度解析は、船全体としての信頼性の算定にも不可欠である為、確率有限要素法なる名前で呼ばれる事がある。本WGでは確率有限要素法の現状を調査すると共に構造設計への適用について検討した。結果を要約すると、

- ① 全寸法を感度解析の対象とするのは実際上困難であるし実用上も賢明な策とはいえない。主要寸法程度を対象とするのであれば可能と考えられるし、又得る所が多いと考えられる。
- ② 問題は船の場合、系の自由度がかなり大きくなる等が予想され、現在行なわれているような小さな系の場合とは次元の異なる難しさが予想される点にあると考えられる。
- ③ 解法としては、反復法をベースとしたFDM的な解法が有用と考えられる。図2.5.1はボトムトランクの感度解析の一例である。

(b) 再解析のアルゴリズム

ADDAでは種々のレベルでの再解析が必要となるが、各々のレベルでの再解析アルゴリズムについて検討を行なった。結果を要約すると、

- ① 船型を変えるといった大変更の場合、計算を新たにやり直すしかない。
- ② 中程度の変更(例えばサイドガーダーの位置を変えるといった)の場合、現構造での解を初期値としたiteration解析が有力と考えられる。
- ③ 小程度の変更(例えばある部材の板厚を変えるといった)の場合、①と同様のiterationを限られた部分構造で実施する等が考えられる。この場合、部分構造のboundaryが変わらない事が前提となる為、部分構造の設定方法などについて検討する必要がある。

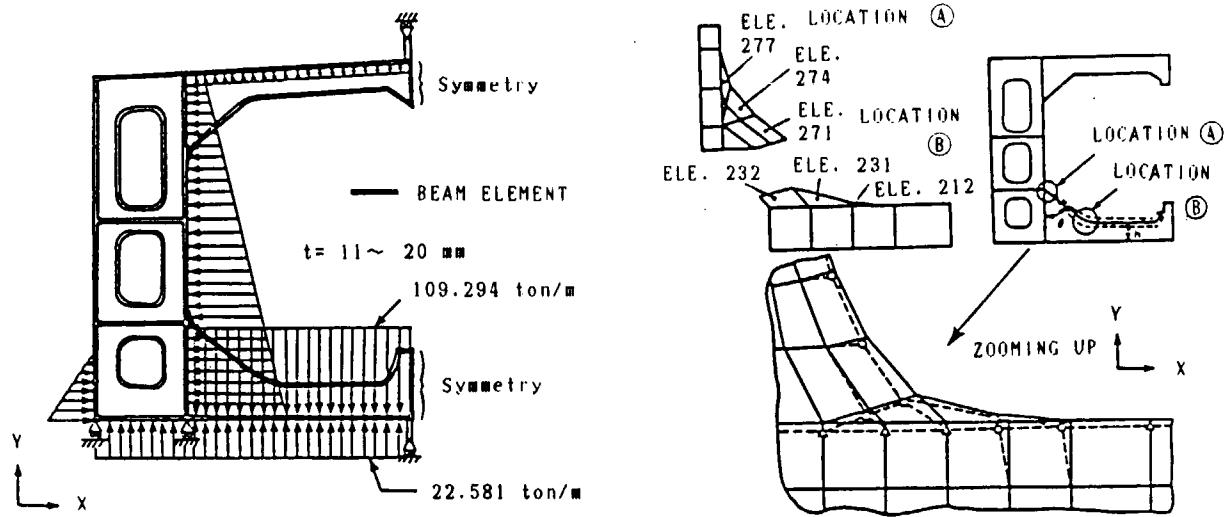
(c) 荷重のパターン化

ADDAの場合、膨大な荷重ケースについて解析を実施するが、もし全ての荷重が、各々独立したパターン荷重の線形和として表示する事が可能ならば、パターン荷重に対する応力解析のみを実施し、各々荷重ケースに対する解析はパターン荷重下の解析結果の線形和として求める事ができ、計算量を大幅に節約できる。

この件については各社の過去の経験などの報告を行い、結局、解析結果のファイリング方法に意を用いねばならぬ事などの結論を得た。

(3) 解析システム

解析システムとして考慮すべきテーマが多いが主となるものとして以下に述べるテーマについて調査検討した。



(a) タンカートラスリングの解析モデル

(b) 形状変更位置および要素番号

(c) 感度解析解と確定解の比較（主応力）

[Unit : kg/mm²]

Web Height	Location	Element No.	Deterministic solution	Sensitivity Analysis solution (First order)
+ 10% Original Height	A	277	16.7	16.8
		274	19.8	19.8
	B	231	14.0	13.9
		212	10.2	9.8
0% Original Height	A	277	16.0	16.0
		274	18.6	18.6
	B	231	16.5	16.5
		212	12.3	12.3
- 10%	A	277	15.2	15.3
		274	17.4	17.4
	B	231	19.4	19.3
		212	15.5	14.9

Note : Element numbers are shown in Fig.(b)

図 2.5.1 感度解析例

(a) CADとの接続方法

FEMを実施する場合最も大変なのはメッシュ分割し、解析用のデータを作ることだと考えられる。一方、CADではメッシュ分割に必要なデータをほとんど有している。したがってCADからFEM計算に必要なデータを取り出し、そのデータを基に自動メッシュ分割ができれば、FEM解析作業は大幅に節約できる。この件については各社のCADの現状を調査し、検討した。結果を要約すると、

- ① CADが変わればfiling方法その他も大きく変わる為、どのCADシステムにも適用可能な接続方法はほとんど不可能である。
- ② そこでCADデータにより、船体各部の形状をCRT上に描き、FEMに必要なデータをCRT画面上よりライ

トペンなどにより読みとるといった間接的な接続方法が検討された。

(b) スーパーコンピュータの活用方法

ADDAの解析システムでは計算スピードをあげる事は大きなテーマの一つである。現在スーパーコンピュータと呼ばれている machineにおいて、チューニングの実績、効果などの調査を行なった。現状のスーパーコンピュータのベクトルプロセッサー、スカラープロセッサーには各自特質があり、コンピュータにより得意な計算が異なり画一的な結論は得られなかつたが、うまくチューニングすれば10倍程度スピードを上げる事は可能と予想できる。又将来的にはパラレルプロセッサーの適用も検討する必要がある。

(c) グラフィックディスプレイの活用

膨大な計算結果を判りやすく、コンパクトに表示する方法として、グラフィックディスプレイの重要性は非常に大きい。又ハードとしての進歩も著しく、ADDA解析システムの成功の鍵はグラフィックをいかに効率よく取り込むかという問題にもあるとの認識を持った。

(d) ファイリングシステム

膨大な情報の効率的なハンドリングは全てファイリングシステムにかかっている。FORTRANを使ったファイリングシステムはほぼ限界にきており、C言語をベースにした。各種高級言語などの適用を考えるべき時期にきている。

2.5.3 研究開発課題と解決策

(1) 解析アルゴリズム

ADDAが新しく目指す解析目標を達成する為、次のような解析機能を開発すべきと考える。

(a) 感度解析手法の確立

直接的には確率有限要素法に対応するが、広く設計最適化の手段と考えるのが適当と考える。

(b) iterationベースの解析ルーチンの開発

直接には再解析を念頭に置くが、キングサイズ方程式の解法のオプションとして開発価値は非常に大きいと考える。

(c) 荷重パターン化、解析結果の線形和ルーチンの開発

荷重パターン化については、もうすこし検討の余地がある。（特に波浪外力のパターン化）、線形和ルーチンについては、既存のものもあるが、ADDAでは、1,000ケース程度の解析結果（解のサイズ、数万～数十万）の線形和が必要とすれば、全く新しい構造を基に開発する必要がある。

(2) 解析システム

システムというものは常にupdateする努力を怠ると陳腐化の速度が早く無価値になる。したがって、最初のシステム構築と共にシステムの維持／更新等の運営が重要であり、充分な配慮が必要である。

(a) super computer の活用

チューニング技術の習得、システムへの導入が肝要。この技術の進歩は今後急激になるものと考えられ、
update 努力が最も望まれる。

(b) graphic display の活用

実績を積むのが肝要と考えられる。若年技術者の努力に負う所が多い。

(c) 新しい file システムの開発

FORTRAN以外の新しい言語を専門とする若い技術集団の養成が必要と考えられる。

2.6 システム化に関する調査・研究

2.6.1 現状と問題点

最近、各船級協会あるいは特定船主は FEM を使用した直接強度計算を行い、部材を決定し強度を確認せよとの要求を強くしつつある。そして、その要求規模も程度も、より高度なものとなりつつある。又、造船所独自で信頼性の高い船を考えて強度計算を行う機会も増大している。

現状では全船一体解析のような大規模構造応力解析を試験的に行なった例はあるが、日常的にはルールに従った部分構造モデルについて CAD と自動分割機能を備えた FEM 及びマニアルを併用し、計算されている。この程度の計算においても 2 ヶ月以上を要し、部材の寸法承認・材料発注をタイムリーに行なうことが非常に難しく、マンパワーでカバーしているのが現状である。

従って、今までは、直接強度計算が構造部材の決定と、確認・承認用に使用され、新しい構造の開発や合理的部材配置の検討等将来を指向した積極的な使い方が非常に難しい。

最近のスーパーコンピュータ、EWS、CG、エキスパートシステム等ハードソフト面の進歩はめざましく、これらを有効に使用した初級設計技術者でも容易に確実に迅速に使える構造設計システムにより、これまでに述べた新手法を織り込んだ上流段階の設計範囲までカバー出来る CAE システムの構築が必要である。

2.6.2 構造解析システム調査

62 年度において各社で使用している構造解析に関するプリポストプロセッサ、ソルバ、ハードについて調査を実施した。

63 年度は、米国における大規模構造解析システムと関連する周辺についての調査をした。本調査は ADVANCED TECHNOLOGY TRANSFER INC. の協力を得て行われた。大規模構造解析は予想されたように主として 2 つの産業において実行されていることがわかった。航空宇宙産業と自動車産業である。造船の分野においては、米国造船業は国防省の契約に完全に依存しており、従って大規模構造解析は多分行なわれているだろうが、それに関する情報は入手できなかった。航空宇宙、自動車産業いずれにおいても CRAY スーパーコンピューター上で MSC / NASTRAN を走らすことが、大規模構造解析の最も一般的なハードとソフトの組合せのように見える。自動車会社では自社開発のプリ・ポストプロセッサーを使っており、航空宇宙会社は主として SDRC の I-DEAS あるいは PDA の PATRAN を用いている。CAD と有限要素解析 (FEA) システムの統合化は航空宇宙産業よりも自動車産業においてより進歩している。この事は自動車会社がプリ・ポストプロセッサーと同様に CAD システムを自社開発していることに起因していると思われる。CAD の形状データは IGES (Initial Graphic Exchange Specification) トランスレーターによらずプリプロセッサーに伝達される。しかし一方、航空宇宙会社においては大規模有限要素モデルはしばしばプリプロセッサーを使わずに作られているということがこの調査によってわかった。

FEA プログラムを実行するために使われるコンピューターシステムは、会社ごとに著しく異なる。2 つの産業

においてCRAYのX-MPスーパーコンピューターあるいはIBM3090メインフレームコンピューターのネットワークが大規模構造解析に対して用いられている。CRAYコンピューターが使われるとき、フロントエンドコンピューターとしてPRIMEやCDCの様な複数の小型のコンピューターが設置されるのが普通である。ほとんどの会社では、エンジニアリングワークステーション(EWS)を用いる代わりにミニ・コンピューターあるいはより大型コンピューターに接続された端末機、あるいはグラフィックス端末機を用いて大規模有限要素モデルを作る。そして作られたモデルをCRAYやIBMメインフレームに移すということがわかつた。コンピューター、端末機その他の装置をつなげるネットワーク形態についても各会社で異なる。企業は既存のシステムにコンピューターや端末機を付け加えるように、単純にネットワークを追加しているように見える。ここで調査された航空宇宙および自動車会社は構造解析にエキスパートシステムや真の意味でのデータベースマネージメントシステムは用いていない。いくつかの自動車会社においては同じ形状データがCADシステムとブリ・ポストプロセッサーとで共通に使われていると報告してきている。

構造解析(特にFEA)の分野において現在の研究および開発の努力は、CADとFEAシステムのより良い統合化に向けられているように思う。真の統合化のために以下の項目の達成が必要である。1) 一般的な形状に対する有限要素モデルの自動生成。2) 用いられている有限要素分割から生じる誤差の制御。3) CADの幾何モデルと有限要素モデル間の取り扱い範囲を処理する方法の開発。である。ソリッドモデリングと自動要素分割における、過去数年の技術的進歩は第一の目標は達成可能であることを示している。第二の目標は誤差評価と順応型要素分割に対する広範な理論的研究が必要である。第三の目標に関しての困難性は有限要素モデルは、CADデータにおけるような幾何学的詳細を必要としないこと、そして境界条件や荷重条件のために構造表現の一部分だけが必要であることである。一方CAEの実際的な処理方法を開発するためにさらに多くの作業が必要と思われる。

CADとFEAシステムの統合化が、CAMまで展開されているときFEAに大きな影響を与える2つの技術分野がある。それはCADプロダクト定義データの伝達方法とデータベースマネージメントシステムである。IGESは米国においてCADデータをポータブルにするために広く用いられているにもかかわらず、フランス国内標準であるSET(Specification du Standard d'Exchange at de Transfert)がIGESよりもはるかに小数ファイルで、はるかに処理時間が短いことが認識されている。IGESの組織によって開発されてきたProduct Data Exchange Specification(PDES)は一部の人によってIGESの将来の代替と考えられている。いくつかのデータベースマネージメントシステムが構造設計や解析へ適応するものとして提案されていている。オブジェクト指向データベースマネージメントシステムはCAD/CAMデータベースに最も適当であるということで最近注目を浴びている。

近い将来FEAにインパクトを与えるのはパラレルプロセッシングとエキスパートシステムの開発であろう。

○ボーイング民間航空会社(Boeing Commercial Airplane Company)において、開発されたATLASが、主な構造解析作業のために使われている。ボーイングが開発したもう1つのプログラム、SAMECSと外部購入のMSC/NASTRANもまた時々使われている。大規模有限要素モデルは端末を用いてマニアルで、あるいは、基本的にはIBMによって売られているSDRCのI-DEASであるブリ・ポストプロセッサーCAEDSを用いてインタラクティブに作られる。構造解析プログラムはフロントエンドコンピューターとしての2台のCDC CYBERコンピュータにつながっているCRAY X-MP上で走らせる。CAEDSはIBM RTパソコン上で走る。

CADデータは現在のところ有限要素モデルを作るのには用いられないが、ボーイングは構造解析に対するインターフェースを有する新しい統合化されたCAD/CAMを作ろうとしている。そのシステムの中心となるのはCATIA CADシステムである。ボーイングは事務システム、材料発注、有限要素解析等やドキュメンテーションのような、CAD以外の全ての計算作業もCATIAを中心統合化しようとしている。IBM5080グラ

フィックスワークステーションを有する IBM 3090 メインフレームコンピューターによって CATIA に対するハードウェアシステムを構築する。ボイントは 2000 年までに新しい統合化システムのために約 10 億ドルを支出すると予想される。

- フォード自動車会社の北米自動車オペレーション (North America Automotive Operations) は大規模構造解析のために MSC/NASTRAN を使っている。フォードは PDGS と呼ばれる CAD システムを自社開発している。有限要素モデルは、これもまたフォードによって開発されたブリ・ポストプロセッサー FAST を使って作られる。FAST はシェルモデリングにおいて PATRAN よりも強力であると報告されている。PDGS と FAST は同一のデータベースを共有する。MSC/NASTRAN は CRAY X-MP 上で走り、PDGS と FAST の両者は LUNDY グラフィックス端末を有する PRIME 2655 コンピューター上で走る。約 1 万自由度有限要素モデルが典型的と考えられているが、時には約 30 万自由度のモデルはサブストラクチャー法を用いて解かれることが報告されている。
- ヒューズ航空会社は大規模構造解析に対して MSC/NASTRAN を用いている。またブリ・ポストプロセッシングは PDA の PATRAN を用いている。CAD の形状データは有限要素モデルを作製するのには用いられない。ハードウェア構成は、2 台の IBM 3090、1 台の IBM 3084、マイクロ VAX から VAX 8800 までの 13 台の VAX コンピューターから成る。大規模有限要素モデルは VAX コンピューター上の PATRAN を使って作られ、NASTRAN をインストールしている IBM ホストコンピュータに送られる。
- ノースロップコーポレーションの航空機部門においては、COSMIC/NATRAN が主要な構造解析に用いられている。ノースロップは CAD システム NCAD とブリ・ポストプロセッサーの NCASA を開発している。NCAD の形状データは NCASA を通じて変換され、NASTRAN の有限要素モデルが作られる。ハードウェア構成は、6 台の IBM 3090/600 と約 200 台の IBM 3250 端末と 5080 グラフィックスワークステーションより成る。ノースロップは有限要素分割の妥当性をチェックするためと詳細解析用の細分割をおこなうために、エキスパートシステムの開発を開始したと報告されている。そのプロジェクトは 1988 年にスタートし、3 年以内に完了する予定である。

2.6.3 調査検討の概要と検討結果

ADDA システムについてシステムの構成及びデータベースについて検討した。機能毎にサブシステムに分け、そのインターフェースについても検討を行った。

(1) 全体システム

概要

ADDA システムは、荷重・応力・強度評価を一貫して行い、多様化するニーズに対応した質の高い構造開発を可能とし迅速・高精度に実行できるシステムである。

以下の 6 つのサブシステムで構成される。

- ① 高精度船体荷重解析システム
- ② 迅速・高精度構造解析システム
- ③ 船体構造強度算定システム（最終強度、疲労強度）
- ④ 船体構造強度総合評価システム
- ⑤ 構造設計支援インテリジェントシステム
- ⑥ 構造解析モデリングシステム

システム全体の基本構成を図 2.6.1 に示す。又、ADDA システムを構成する各サブシステム・サブモジュールを表 2.6.1 に示す。機能は各サブシステムに共通なものを示し、各サブモジュールに固有なものは各項で述べる。

又、データベースは最も関係の深いサブシステムの項に示したが、全体として共通なものを記した。各サブシステムの出力結果のデータベースは本表から省略している。

システム全体の基本構成は図 2.6.1 に示す通り、高精度船体荷重解析システムにより、船体運動を解析し、必要な全ての荷重を算出する。迅速・高精度構造解析システムで応答・応力解析を行い、船体構造強度総合評価システムで一次判定を行い、必要ならば船体構造強度算定システムにより、座屈強度・崩壊強度を解析し、二次判定を行う。構造設計支援インテリジェントシステムではADDAシステムを容易・高度に利用できるよう支援すると共に膨大な情報を簡易・確実に管理するシステムである。又、構造解析モデリングシステムではADDAで必要とする全ての種類のモデルを作成する。

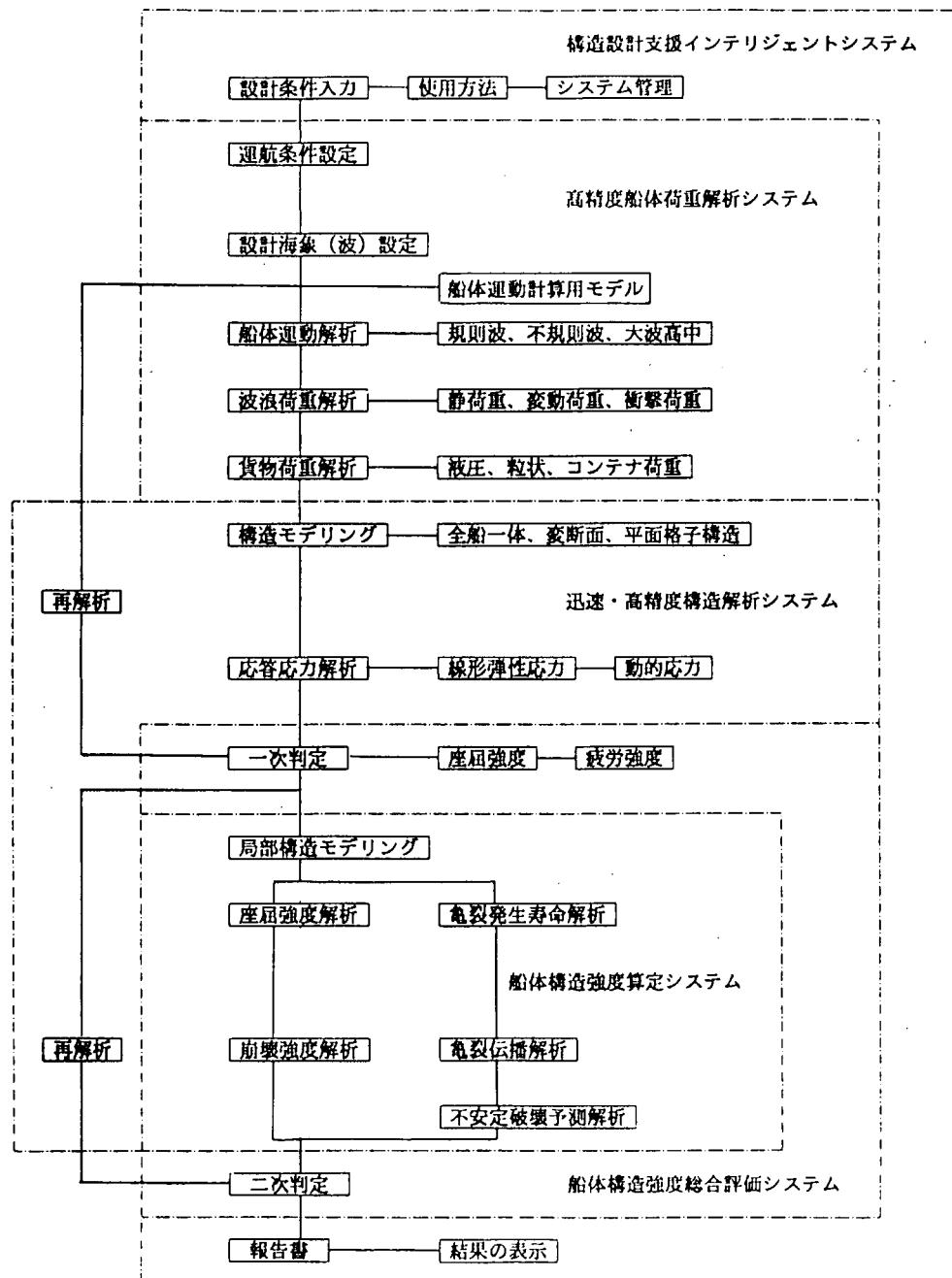


図 2.6.1 全体システムの基本構成図

表2.6.1 全体システム概念図

サブシステム	サブモジュール	機能	データベース
構造解析システム	FEM解析用モデル 船体運動計算用モデル 構造品積査 分析用モデル ADAで扱う全てのモデルを作成する	合理的解析(Zooming) 自動生成(CADとの結合) 自社C端末との結合 環境条件の自動設定 自動Mesh分割 (全船一體・座屈・疲労解析別) (自重・荷重・荷物)	輸送構造 船型(Shine) Zooring用データ
高精度船体荷重解析システム	船体運動解析 波浪設定から船体運動 不規則波中船体運動 設計海象波設定 断面荷重設定 運航条件設定(波向き、船速等) 大波高中の船体運動(非線形計算)	規則波中船体運動 不規則波中船体運動 設計海象波設定 断面荷重設定 運航条件設定(波向き、船速等) 大波高中の船体運動(非線形計算)	波浪頻度分布 設計波入ベクトル 設計波計測系 荷重要因 運航(船舶)情報 保有船 異常波浪分布 波浪頻度分布 (海象シミュレーション)
迅速構造解析システム	荷重解析 変形圧縮・加速度・荷重 (液圧、板状、コントラ、自重) 衝撃荷重 (スロッシング、パンチング、 熱荷重) 船点荷重変換	水圧(静、変動) 荷物(静、変動) (液圧、板状、コントラ、自重) 衝撃荷重 (スロッシング、パンチング、 熱荷重) 船点荷重変換	荷重(荷物、…)
船体構造強度評価システム(舷)	FEM 構造応答 强度算定 構造解析手順を用いる 他の他の解析応答を用いる	構造解析 無弹性応力解析 非線形応答解析(材料非線形) 動的応答解析	材料特性(弾性、…)
船体構造強度評価システム(座屈)	強度算定 構造強度のCapacityを 算定する	座屈強度 座屈強度解析 危険伝播解析 危険発生寿命解析 不安定微振子測定	大わらみ解析 固有数 COD計算 K値計算 理化燃運需要算定 FEM界界面計算 荷重計算・船体計算
船体構造強度評価システム(座屈)	構合評価 構造応答に基づき評価 強度算定する	一次判定(座屈、疲労吟討箇所) 二次判定(座屈、疲労強度評価)	冗長性評価 再解析 座屈後 座屈強度算定 座屈強度 座屈強度評価 構造の変更指示
構造設計支援システム	支承システム	初期設計支援システム システム使用支援 出入力データ作成・チェック支援 システム及びデータ管理 出入力データ表示 報告書作成 知識獲得支援	知識データベース

(2) 高精度船体荷重解析システム

(a) 概 要

船体構造の合理的な強度評価にとって必須の条件である荷重の高精度化と、それらを構造解析および評価に最適な形に変換することが本サブシステムの目的である。すなわち、新設計法の基本となる確率論的手法に対処し、非線形荷重の解析などを含む高度な機能を有す。

また、迅速構造解析システムに適応した荷重変換機能を持ち、新構造の評価のみならず、従来型船の設計にも有効に作動し得る柔軟なシステムとする。

システムの重要な柱であり、船体運動解析や、構造解析への荷重交換におけるC A Dシステムおよび高精度な波浪情報データベースとのインターフェースにも十分配慮する。

本サブシステムは、次のサブモジュールから構成されており、これらの組み合わせにより、新設計法に対処することが可能である。

(b) サブシステム

船体運動解析サブシステムと荷重解析サブシステムに大別される。これらのサブシステムは荷重解析サブシステム以外でも必要に応じて使用される。主要なモジュールは次のとおりである。

(i) 船体運動解析サブシステム

- ・運航条件設定サブモジュール……設計荷重を設定するための船体運動の条件を与える。積付条件や船速低下は、船種に応じた標準値を設定する。
 - ・設計海象（波）設定サブモジュール……船舶の航路を指定し、波浪情報データベースから構造強度の評価法に対応した荷重算定のための海象設定を行う。確率論的なアルゴリズムに立脚する。
 - ・規則波中船体運動解析サブモジュール……規則波中の船体運動応答および波浪荷重を求める。ストリップ法以外に特異点分布法などによる高精度化をはかる。船体運動（加速度）、変動水圧などの応答関数と位相で線形計算により求める。
 - ・大波中の船体運動解析サブモジュール……非線形流体力、衝撃力等を考慮した船体応答(T-SLAM等)、波浪荷重を算出する。
- 船体の弾性応答を考慮する必要があり、船体の構造データ(CADデータ)を利用する。確率論的手法として時系列シミュレーションの機能を有す。
- ・衝撃荷重値設定サブモジュール……船体運動に影響を及ぼさない範囲の局部的な荷重として、従来技術を導入してシステム化する。スロッシング圧力などの数値解析法のシステム化も考慮する。

(ii) 荷重解析サブシステム

- ・変動水圧サブモジュール……全船の水圧分布を与える。水線面上の水圧分布を貨物荷重とバランスするよう設定する機能を有す。
 - ・貨物荷重サブモジュール……貨物の慣性力を貨物倉の囲壁に作用する分布荷重として与える。粒状貨物については船体剛性も考慮する。
 - ・衝撃荷重サブモジュール……局部的な荷重として、その分布を与える。
- 構造の弾性応答を考慮する。
- ・節点荷重変換サブモジュール

迅速・高精度解析システムの荷重形態への変換機能で、全体解析及びズーミング解析に対応する。

(3) 迅速・高精度構造解析システム

(a) 概要

本システムはFEMやその他の解析手段を用いて構造の応答を迅速かつ高精度で求める事を目的とする。

本サブシステムは、1) 線形弾性応力解析、2) 熱応力解析、3) 非線形応答解析、4) 動的応答解析の4つのサブモジュールより構成される。

必要とされる機能としては再解析、計算結果の編集処理、迅速・高精度、応力頻度分布、感度解析、誤差評価などである。

なお、データベースとしては、材料特性に関するものが必要である。

(b) サブモジュール

- 線形弾性応力解析サブモジュール(FEM, BEM, FDM)

大規模な線形弾性応力解析をFEM, BEM, FDM等を用いて十分な解析精度を保ちつつ迅速に行なう。

- 熱応力解析サブモジュール

温度分布が与えられた状態で熱応力解析を精度良く迅速に行なう。

- 非線形応答解析(材料非線形)サブモジュール

材料非線形性(非線形バネを含む)を有する応答解析を精度良く迅速に行なう。

- 動的応答解析モジュール

動的応答(過渡応答)解析を高精度かつ迅速に行なう。

(4) 船体構造強度算定システム(最終強度)

(a) 概要

本サブシステムは最終強度の信頼性評価を行うために、簡易式(1次判定), FEM計算等により、船体構造部材の座屈・崩壊強度の算定及び船体構造全体の崩壊強度(最終強度)に関する構造強度のCAPACITYの算定を行なうこととする。

本サブシステムは、①座屈強度算定、②崩壊強度算定の2つのサブモジュールから構成されており、本サブシステムの主な機能は、①与えられた計算モデルに適用する算定法の選定、②座屈・崩壊強度の迅速かつ高精度な解析、③解析結果の誤差評価及び再分割指示による再解析、④強度のバラツキの評価、⑤座屈・崩壊強度評価の為の解析結果の出力、⑥座屈・崩壊強度評価に基づく最適設計を目的とした感度解析及びそれに伴い構造修正が発生した場合の再解析、である。

なお、データベースとしては、①簡易計算式、②材料特性、③工作精度、④座屈・崩壊解析モデル、⑤座屈・崩壊解析結果、⑥座屈・崩壊強度解析の知識、が必要である。

(b) サブモジュール

- 座屈強度算定サブモジュール

作成された座屈解析モデルを用いて、簡易計算式(1次判定), FEM弾性座屈解析と塑性修正法あるいはFEM弾塑性座屈解析法(FEM弾塑性大撓み解析法、簡易解析法)により座屈強度の算定を行なう。

解析結果として座屈固有値、座屈モード、最大耐荷力等、及び工作精度、材料特性等のバラツキを考慮した座屈強度の分布・分散・平均値を出力する。

- 崩壊強度算定サブモジュール

作成された崩壊解析モデルを用いて、FEM弾塑性大撓み解析あるいは簡易非線形FEMによる方法(理想化構造要素法等)により最終強度の算定を行う。解析結果として最大耐荷力、崩壊モード、崩壊順序等、及び工作精度、材料特性等のバラツキを考慮した崩壊強度の分布・分散・平均値を出力する。

(5) 船体構造強度算定システム（疲労強度）

(a) 概要

このサブシステムは、船体構造部材の亀裂発生や亀裂伝播等の疲労強度に関連する構造強度のCAPACITYを算定することを目的とする。

このサブシステムは、次のサブモジュールから構成されている。

- 1.亀裂発生寿命解析サブモジュール
- 2.亀裂伝播解析サブモジュール
- 3.不安定破壊予測サブモジュール

共通のデータベースとして、次のものが挙げられる。

部材重要度データベース、工作データベース、損傷データベース、材料特性データベース

(b) サブモジュール

- 亀裂発生寿命解析サブモジュール

亀裂発生寿命の簡易解析（1次判定）、または詳細解析（2次判定）を行ない解析結果を出力するのが目的である。詳細解析の出力は、種々のバラツキを強度判定時に考慮できるよう、疲労強度の分布、分散、平均値という形で出力する。

関連データベースとして、疲労亀裂発生強度線図データベース、累積被害値（ $S_{max}-D_i$ ）データベース、応力集中係数データベースが挙げられる。

- 亀裂伝播解析サブモジュール

応力解析結果、統計解析結果を用いて疲労亀裂伝播解析を行ない、バラツキを考慮にいれて、破壊力学をもとにした、疲労設計、余寿命評価を実施する。

関連データベースとして、亀裂伝播速度データベース、応力拡大係数算定法データベースが挙げられる。

- 不安定破壊予測サブモジュール

設計波条件下での構造応答をベースに、J値、K値、COD計算などにより、構造物の不安定破壊を推定する。

関連データベースとして、応力拡大係数算定データベースが挙げられる。

(6) 船体構造強度総合評価システム

(a) 概要

本サブシステムは、迅速・高精度構造解析システムに依って計算された応力及び変位が、船体構造強度算定システムに依って求められる。構造の座屈・崩壊・疲労強度のある一定値以下になる信頼度の評価を目的とする。

本サブシステムは、一次判定及び二次判定の各サブモジュールから構成されており、一次判定サブモジュールは精査解析必要箇所の選定、二次判定サブモジュールは信頼性工学に基づく船体構造部材の評価が主な機能である。

各サブモジュールに共通する機能としては、一定の基準値（簡易強度算定値、許容応力、信頼性指標の基準値等）と解析結果との比較等により評価を行なう事が挙げられるが、その評価・判定はシステム内部で自動的に行なわれるだけでなく、構造設計支援システム等を利用した設計者の種々の判断に基づく判定条件の入力も可能である。

また、就航後のモニタリングや検査結果のフィードバックが効果的に行なわれ損傷・検査・実船計測D/B等が逐次更新される。

(b) サブモジュール

- 一次判定サブモジュール（座屈・疲労検討箇所指示）

全船一体解析結果のうち、発現頻度等を考慮して予め設定された荷重条件における応力・変位を簡易強度算定結果等により評価し、精査解析必要箇所を選定する。また、評価に基づき、設計変更部材の指示を行なう。

選定条件として下記が挙げられる。

- 1.許容応力等のある一定値以上の高応力箇所を選定する。
- 2.座屈・疲労簡易強度算定結果から座屈・疲労上、強度レベルの低いと思われる箇所を選定する。
- 3.強度上の重要度、機能上の重要度、修理・検査の難易度、損傷・検査・実船計測D/Bから総合的に判断し決定された座屈・疲労解析必要度D/Bを参照し、検討箇所を選定する。

上記3条件は各々独立に機能するものではなく、相互に関連しつつ総合的な評価・選定を行なう。

- 二次判定サブモジュール（座屈・崩壊・疲労強度評価）

精査解析結果から得られる応力・変位の分布、分散、平均値(Demand)及び座屈・崩壊・疲労強度の分布、分散、平均値(Capacity)により信頼性工学に基づいた評価を行なうと共に、船体全体に対して強度ランク(推定設計荷重以下になる信頼度)、設計寿命(使用期間健全の信頼度)の算定、評価を行なう。

二次判定時の評価方法として下記が挙げられる。

- 1.レベル2法に基づき、対象構造の信頼性指標を算定する。
- 2.信頼性指標の基準値を多くの実績船のデータ(損傷・検査・実船計測D/B)を収集した上で算定する。
- 3.上記1.と2.を部材重要度(D/B)を加味した上で相対比較するなどの評価手法により構造配置、構造寸法の最終決定を下す。

不具合箇所に対しては、部材重要度(影響度)に基づいた再解析の指示、設計変更部材の指示を行なう。

(7) 構造設計支援インテリジェントシステム

(a) 概要

設計者が容易・効果的にADDAを利用できるように支援すると共に膨大な情報を簡易・確実に管理するシステムで、上級設計者のノウハウを反映させることができる柔軟な設計システムを目指す。

本サブシステムは後述する7つのサブモジュールから構成される。

本サブシステムはADDA内部の各サブシステムとのインターフェースを持つだけでなく、各社固有のシステムやCIMSとのインターフェースを持ち、共通のデータベースの管理およびユーザー、管理者、専門家とのインターフェースも含む。

(b) サブモジュール

- 初期設計支援サブモジュール

設計者が初期設計段階で、構造解析・評価を効率良く実施し、指示された設計条件の下で最適な部材配置や部材寸法を決定出来る機能を持つ。

- システム使用支援サブモジュール

ユーザーにシステムの使用法を教える目的で、選択メニュー表示とシステム制御機能、使用法の分りやすい説明表示機能を持つ。

- 入出力データ作成チェック支援サブモジュール
各サブシステムへの入力データの作成を支援すると共に、各サブシステム間のデータの授受の際に、不具合なデータをチェックし、修正を支援するために、データチェックのロジック、データ編集機能を持つ。
- システムおよびデータ管理支援サブモジュール
共通データベースおよび固有データベースは、外部からのアクセスに対し、破壊されないようにし、データファイルの検索、データリストの閲覧、データの構築・バックアップ・メインテナンス支援機能、秘密保持機能を持つ。
- 報告書作成支援サブモジュール
計算された結果の報告書作成を支援するために、文書のパターン化、W／P機能、グラフ表示機能、高速高品質印刷・編集機能を持つ。
- 入出力データ表示支援サブモジュール
膨大な入出力データをユーザーに、視覚などで理解し易いように表示するために、データの組合せ機能、作画機能（3次元グラフィックなど）および動画表示機能を持つ。
- 知識獲得支援サブモジュール
設計者を支援するためには、設計者の知識ベースの構築が不可欠であるが、その知識ベースを簡単に作成できる機能を持つ。

(8) 構造解析モデリングシステム

(a) 概要

本システムは、FEM解析用モデル、船体運動計算用モデル、座屈精査、疲労精査解析用モデルを含むADDAで扱う全てのモデルの作成を目的とする。

本サブシステムは、1)全船一体構造モデル、2)部分構造モデル、3)局部構造モデル、4)変断面梁モデル、5)平面格子モデル、6)船体運動計算モデルの6つのサブモジュールより構成される。

機能としては、合理的再解析（ズーミング）、自動生成（船体中央部の他に前後部も含む）、CIMSとの結合、境界条件の自動設定、自動メッシュ分割（全船一体、座屈・疲労解析別）、データ簡易入力（自重、積荷）などを有する。

データベースには、標準構造、船型（LINES）、ズーミング用データなどに関するものを持つ。

(b) サブモジュール

• 全船一体構造モデルサブモジュール

前後部の大骨材も含めた全船一体応力解析を行なうための大規模なFEM解析用モデルである。座屈及び疲労についてマクロな強度評価が可能なモデルとする。

• 部分構造モデルサブモジュール

BHD、TRANS、1～2HOLD等を解析対象構造としてFEM解析を行なうためのモデルである。座屈・疲労に対する強度評価が全船一体解析よりもさらに詳細に出来るように構造要素の部材応力が求められるメッシュ分割のモデルである。

• 局部構造モデルサブモジュール

パネル、大骨材端部等の解析対象構造としてFEM解析を行なうためのモデルである。部分構造モデルよりもさらに詳細な応力を得ることが出来、座屈・疲労に対する強度評価がより詳細に出来るメッシュ分割のモデルである。

- ・ 変断面梁モデルサブモジュール
船体を一本の変断面梁と考え、動的応答解析を行うためのモデルである。
- ・ 平面格子モデルサブモジュール
全船一体解析を省略し、部分構造モデルを用いた解析から F E M 解析を始める際に必要となる境界力を与えるための解析を行なうモデルである。
- ・ 船体運動計算モデルサブモジュール
船体運動を計算するためのモデルである。

2.6.4 研究開発課題と解決策

(1) 全体システム

(a) システムの構築

疲労と座屈、崩壊強度算定システム等、各サブシステム相互において共有可能な部分の調整、統合をはかり、システム全体を構築。

(b) ハード面の検討

システム調査の結果、次の検討が必要。大型、中型、EWS 等、解析目的に適した階層的コンピューターの利用、大量データを高速に処理するためのハード面からの検討、ADDA システム内および各社間とのネットワークによる分散処理、入出力を支援する CG による画像処理技術の検討

(2) 高精度船体荷重解析システム

(a) 船体運動解析

波浪中（規則波、不規則波、大波高中）における船体運動解析の評価法に対応した設計海象（波）の設定
運航条件の設定

波浪、運航に関するデータベースの構築

(b) 荷重解析

静水中、波浪中における船体に加わる波浪による荷重解析

静水中、波浪中における船体に加わる貨物（液圧、粒状、コンテナー）による荷重解析

(3) 迅速・高精度構造解析システム

大規模な構造（10万節点）を迅速・高精度に解析できるソフトの開発

応力解析（線形、非線形）

動的応力解析

熱応力解析

(4) 船体構造強度算定システム

(a) 最終強度

非線形 F E M 解析は、現状では多大な計算時間がかかる。迅速かつ高精度な最終強度解析を行うために、スーパーコンピュータによるベクトル処理の導入、サブストラクチャ法の利用等により非線形アルゴリズムの高速処理化を図る。

座屈・崩壊強度に対する再解析法、感度解析法は研究例も少なく十分確立されていない。座屈・崩壊強度の最適設計を目的として、再解析法、感度解析法の基礎研究を実施し具体化（システム化）を図る。

座屈・崩壊強度解析

座屈・崩壊強度に対する再解析、感度解析

(b) 疲労強度

船体構造部材に働くランダムな実働応力に対応した、解析モジュール、データベースを開発する。

腐食環境の船体疲労強度に対する影響を検討するとともに、上記に関連する検査記録データベースの充実を図る。

不安定破壊予測を行うため、工作データベース（初期歪、工作精度、初期欠陥など）の充実を図る。

疲労亀裂発生強度解析

疲労亀裂伝播強度解析

不安定破壊解析

(5) 船体構造強度総合評価システム

(a) 一次判定

一次判定時の精査解析必要箇所の選定を効率的かつ高精度に行なうため、解析、実測等により選定対象部材（範囲）を明確にすると共に、簡易強度算定式などD／Bの精度向上と効率的運用方法の検討、チェックシステムの構築によるチェック漏れの防止を図る。

疲労強度、座屈強度精査必要箇所の選定

(b) 二次判定

二次判定条件に実績、経験等の知識を反映させるため、AIを応用したDecision Making Systemの組み込み、検証データのフィードバックシステムの構築を図る。

二次判定に基づいて、効率的に設計部材の変更を指示するため、指示内容（部材、応力、判定結果等）、指示方法（CGなどの表示方法）につき調査・検討を行なうと共に、部材重要度（影響度）に基づいた最適設計変更を図る。

信頼性解析に基づく疲労、座屈、崩壊強度評価

設計変更部材の指示

データベース（簡易強度算定式、実船計測、部材重要度、知識）の構築

(6) 構造設計支援インテリジェントシステム

(a) 知識DBによる支援

ペテンランや専門家の知識の運用方法の分析とそれに基づいた知識ベースの構築

初期設計支援

システム使用支援

(b) DATA生成・授受の支援

大量なデータを各システム、データベース間での高速な伝送を可能にするハード構成と利用者の手間のかかる作業を自動化あるいは半自動化のためのソフト開発

入出力データ作成・チェック支援

入出力データ表示支援

報告書作成支援

(c) システム及びデータ管理支援

各社固有システム、CIMSなどの外部システムとのインターフェース機能、ADDAシステムの保守、機密保持の機能が必要。

そのために、データベース・マネジメントシステムの構築と利用者との知的インターフェースの作成が必要。

(d) 知識獲得支援

ADDA システムで用いる知識の追加、更新、削除の支援が必要

そのため、ペテランや専門家が実行しやすい知的インターフェースの作成及び知識ベース化するための知識の構造化の機能が必要

(7) 構造解析モデリングシステム

構造解析モデリング自動生成システムの開発

構造モデルの作成に多くの時間を要しているので C A D との結合、図面情報の入力自動化、前後部構造やFEM メッシュ分割が迅速に自動生成が行なえるシステムを開発する必要がある。

この開発にあたっては CIMS の全体システムにおける具体的構造を表現するモデリングの部分と密接な関係を持つており、両者の共通の基盤となる情報には次のものがある。

1. 外形、全体配置情報
2. 構造部材の形状、寸法情報
3. 構造部材の配置情報
4. ぎ装品との取り合い、荷重情報
5. 工作精度等の工作情報
6. 船の用途、目的に応じた設計条件情報

総合的システムの観点から両者のシステムでこれらの情報のモデリングは共通化が図られるべきである。

又、ADDA システムにとって具体的構造を解析可能な数学モデルにするには解析の目的に応じて全体または部分的 F E M 、あるいは梁構造モデルは ADDA に必要な固有の情報を付加して構築されるシステムが必要である。

F E M 構造モデル（全船、部分、局部）

梁構造モデル（変断面、平面格子）

船体運動計算モデル

データベース（標準構造、線型）の構築

2.7 大型実験／実船計測による検証

ADDA は、高精度の解析手法を開発し、これを用いて船体構造の解析設計を行なうシステムであり、ADDA による解析結果は実船の就航時の船体構造の応答を精度よくシミュレートしているとの前提に立って設計を進めて行く。

従って、ADDA による構造設計の解析結果は実船の応力および構造応答と良く一致していることを検証しておく必要がある。そのためには、実船計測を行いその結果と ADDA による解析結果が精度よく一致することを実証する必要がある。

また、ADDA の最終設計を推定するための解析手法の一部には、実船計測では実施し得ない部分があり、その部分は特別な実験によって検証せねばならぬ部分もあるであろう。

更に前章までに述べた ADDA が導入する新手法の基礎研究に必要な実験や実船計測も必要である。従って、ここでは ADDA を開発、実用化するために必要な実船計測および実験について検討取り纏めることにした。

2.7.1 現状と問題点

先づ、検証すべき項目を洗い出し、これら検証すべき各項目に関するデータ収集解析手法・センサ・ソフト・解析処理方法について、現状技術・適用事例・要開発項目を調査し、問題点のリストアップを行ない、また、検証システムへの提言の参考とした。

次に、過去の代表的実船計測について、その概要・問題点をとりまとめた。従来の実験の一例として、造研、船研、NK等で行なわれた実船計測についてその概要を紹介する(表2.7.1)。

従来の計測で最も問題と考えられる点は応答と荷重の対応が明確に記録されている計測の例が少ない点であり、より正確な荷重、特に波浪と応力などの応答の継続的計測が必要であると考えられる。

一方、現在のセンサ、コンピュータ等ハードウェアの進歩は著しく、計測システム構築上の問題では実施にあたってあらかじめ検証を加えれば解決出来ない様な問題は少ない。代表的な計測・解析装置と問題点について表2.7.2に示す。また、現状技術のレベルに基づいて計測上の問題を列挙してみると波浪計測が最も重要な項目でありながら問題点も多い。分析された波浪計測システムに関する問題点の一部を表2.7.3に示す。

他製品における荷重計測システムの1例として航空機の設計荷重設定のため行なわれた荷重計測システムについてその実施例を調査したが、航空機業界においては既に設計荷重設定のため、大規模かつ長期の計測が行なわれていることが明らかとなつた。

さらに、信頼性に基づく設計法の検証を行なうには、確率分布・頻度分布の短長期データが必要であり、想定する再現期間に対応する値を推定できる程度の長期にわたるデータの収集が必要であり、従来の記録では期間・航路・船種等システム検証のデータとするには問題が多い。

一方、記録として残されたデータのフォーマット、種類、計測箇所、項目も統一的でなく、システムの総合的な検証に不充分である。

以上を勘案するとADDAを検証する上で、新たに目的に合った実船実験を実施することが必要不可欠であると考えられる。

また、ADDAの最終強度判定の一部を構成する座屈崩壊や不安定破壊の解析精度検証に必要な実船計測データの収集は従来ほとんど行なわれていないが、これも追加することが必要である。しかしながら、これらの解析精度は実船計測で実証出来るものではないので、廃船を用いた実験および大型模型実験が必要である。

表2.7.1 実船計測の概要(共同研究分を含む)

	船種	主要寸法	計測期間	航路	計測項目	使用機器	文献
A	コンテナ船	204.0 x 31.2 x 18.9 x 11.23 m 26.840 DWT 1.441 TEU	1973.7 ~ 6 voyages	北米西岸	Deck Stress Acceleration	アログレコーダ データローディング	日本造船学会論文集 No.141 (1977) 日本海事協会誌 No.159 (1977)
B	鉱石運搬船	260.0 x 44.0 x 21.8 x 16.11 m 135.700 DWT	1975.12 ~ 28 voyages	豪州	Side Slot Stress Bottom Slot Stress	応力頻度計	日本海事協会誌 No.178 (1982) PRADS '83 Symposium in Tokyo & Seoul (1983)
C	ばら積貨物船	244.0 x 40.2 x 23.9 x 16.92 m 119.500 DWT	1977.1 ~ 34 voyages	メキシコ 豪カナダ	S. Frame Stress Deck Stress Girr Stress T. S. T Stress	応力頻度計	日本造船学会論文集 No.140 (1980) 日本海事協会誌 No.172 (1980)
D	自動車運搬船	176.0 x 29.5 x 27.3 /11.96 x 8.62 m 15.000 DWT 4.000 Cars	1978.2 ~ 16 voyages	北米東岸 ベルシャ湾 欧州	Webframe Stress S. Frame Stress Deck Stress Acceleration	アログレコーダ データローディング バーソナルビュータ	日本造船学会論文集 No.147 (1980) 日本海事協会誌 No.172 (1980)
E	LPG船	216.0 x 35.4 x 22.6 x 11.78 m 52.700 DWT 83.100 m	1979.8 ~ 15 voyages	ペルシャ湾	(Sloshing) Pressure Acceleration Deck Stress	アログレコーダ データローディング バーソナルビュータ	日本造船学会論文集 No.150 (1981)
F	LPG船	212.0 x 36.0 x 22.3 x 11.4 m 50.000 DWT 80.300 m	1980.11 ~ 1982.10	ペルシャ湾	(Tank Supports) Reaction Force Acceleration	アログレコーダ データローディング バーソナルビュータ	日本海事協会研究発表 会員論文集 (1982) 日本造船学会論文集 No.153 (1983)
G	自動車運搬船	166.0 x 27.0 x 26.4 /11.9 x 8.20 m 12.600 DWT 3.200 Cars	1982.7 ~ 16 voyages	豪州 ベルシャ湾 欧ラジル	Webframe Stress Deck Stress Acceleration Others	アログレコーダ データローディング バーソナルビュータ	日本海事協会研究発表 会員論文集 (1982) 日本造船学会論文集 No.150 (1985) 日本海事協会誌 No.159 (1986)
H	ばら積貨物船	285.0 x 50.0 x 25.0 x 18.53 m 201.000 DWT	1983.7 ~ 11 voyages	豪カナダ 欧ラジル	Deck Stress Bottom Stress Acceleration Others	バーソナル ビュータ	日本造船学会論文集 No.161 (1987)
I	モジュール運搬船	117.0 x 30.0 x 7.00 x 4.80 m 10.000 DWT	1985.1 ~ 1 voyage	北米西岸	Acceleration Ship Motion Deck Stress	アログレコーダ データローディング	日本海事協会誌 No.198 (1987)
J	ばら積貨物船	257.0 x 43.0 x 24.1 x 17.33 m 146.000 DWT	1987.2 ~ 一航月中	豪ラジル 欧州	Bottom Stress Deck Stress Acceleration Others	バーソナル ビュータ	

表 2.7.2 計測・解析装置一覧

計測項目	センサ、計測機器	特徴、問題点等
船体動揺	パーティカルジャイロ レートジャイロ*	- 信頼性あり、耐久性に問題 - 耐久性あり
加速度	歪ゲージ式*、サーボ式*	- 信頼性ほぼ確立
応力、歪	歪ゲージ*、増幅器*	- 信頼性ほぼ確立
水圧	歪ゲージ式圧力計* パネル歪から逆算*	- 腐食等耐久性に問題 - 信頼性ほぼ確立
波高	投げ込みパイ式 船体運動からの逆算*	- コストに問題 - 大波高、波方向スペクトル等の計測困難
相対水位	超音波式*、レーダ式*	- 耐久性に問題
波向	レーダ式波向計**	- 実用化、制約あり
鉛石圧	部材歪から逆算*	- 信頼性ほぼ確立
変形	レーザ式*	- 可能性高いが実績が少ない
状態記録	ビデオ装置**	- 信頼性ほぼ確立
記録装置	アナログデータレコーダ* デジタルデータレコーダ*	- S/N(Signal/Noise)比に問題。信頼性あり - S/N比良、主波数特性等問題あり
解析装置	各種パソコン**	- 32bit機の出現でさらに高速、高機能化 低価格、高信頼性
関連機器	磁気テープ装置** 磁気ディスク装置** 追記型光ディスク装置** AD変換器等**	- 主に磁気ディスクのバックアップ用 として使用、信頼性あり - データ記録に不可欠、信頼性あり - 大容量で可能性が高いが実績がない - 多様な製品が提供されている

注 *) 改善されたもの、**) 新規に出現、または大幅に改善されたもの

表 2.7.3 従来の波浪計測の問題点

項目	問題点	
センサ (波浪計)	目視観測	波高、波長、波向とともに誤差範囲の明確化が必要
	投棄式波浪ブイ	計測回数が制限される 出会い波浪が計測されない
	相対水位計	船体運動による補正が必要 船体による造波の影響の評価が必要
	船体運動からの逆算	応答が線形の範囲では問題がない 非線形応答に対する補正が必要
計測期間	計測が短期間であり、遭遇する海象が限られている	
計測方法	これまでの計測では計測機器、項目、計測時間等、その都度設定されておりデータの相互利用を難しくしている	
応答計測値	波浪荷重との対応が明確でない	
解析結果	設計上の問題解決に必ずしも十分に結びついていない点を改善する要あり	

2.7.2 調査研究の概要と検討結果

(1) 波浪荷重の検証

ADDAの荷重推定システムにおいては理論計算、模型実験だけからは推定し得ない現象や、従来安全係数的な考え方で推定上の不明確さをカバーしていた非線形応答や、統計的変動をも明確に意味づけした形で各種荷重を予測する必要がある。

すなわち、波浪荷重に関する実船計測の目的は、新船体構造設計法の開発期間中および完成後において設計法改良のための資料を得ること、および荷重推定システムの妥当性、精度を検証することにある。

以上に基づき、設計法の改良および検証のためのデータ収集を目的として、波浪とその応答荷重を計測するシステムについて調査を行い、問題を提起した。

すなわち、従来の実船計測では、荷重（構造応答）の頻度分布や極大値を得ることに主眼をおいていたが、荷重解析法の検証のためには波浪・船体・荷重の伝達系の夫々の段階での計測を行ない用いられている理論の妥当性を検証する必要がある。

入力データとしては波浪およびその他の外力、中間出力である船体運動等の計測も行なって、最終出力である圧力分布等を計測し、荷重推定システムの各段階における検証を可能とすることが重要である。

(2) 座屈崩壊強度の検証

座屈崩壊強度解析法の検証について調査を行なったが、従来の実船計測で座屈崩壊現象を把握しようとして行なわれたものはなかった。座屈崩壊は稀な現象であり、従来の一般的な船体運動、加速度および歪の計測から直接感知することは困難であると考えられる。そのため、実船において座屈崩壊現象を把握するには変形計測用の新しいセンサーの開発が必要である。

過去に行なわれた実船大型模型による崩壊実験および立体模型を用いた崩壊実験について調査・検討を行なったが、船体構造の主要な崩壊モードがカバーされていない、立体模型では実船相似条件が必ずしも満たされていない等の問題点があることがわかった。このため、合理的な船体部分模型の崩壊実験および縮尺影響を受けない廃船利用の崩壊実験が必要であると考えられる。

(3) 疲労破壊強度の検証

疲労強度を評価するには、疲労亀裂発生点における歪範囲の頻度分布と総返し数が必要な入力データとなる。

これまで船殻構造のあらゆる部分において、その場所に作用する応力頻度分布は指數分布になると仮定し、考慮する期間に対応する最大期待値に相当する外力を与えて構造応答解析および応力解析した結果と組み合わせて応力頻度分布を推定し、マイナー則による累積疲労被害度等により疲労亀裂発生の照査が行なわれてきた。

しかし実際の局部構造では常に指數分布の応力頻度分布が作用しているとは限らない。従って、各種の応力頻度分布形状を有するランダム荷重が作用する場合を想定し、各種応力頻度分布を有するランダム荷重を試験片に実際に与えて試験し、応力／歪集中も考慮した形で各種応力頻度分布下における疲労強度の評価法の確立を必要とする。

また、不安定破壊に関しては、就航中の実船の計測で理論の推定精度を検証出来るものではない。また、試験機のコンプライアンスは実船のそれとかけはなれており、そのコンプライアンスが脆性破壊に大きな影響を及ぼすことは明らかなので、これらを勘案して廃船による実船計測も必要である。

(4) 信頼性解析の検証

信頼性解析の検証を念頭において実船実験を行う場合、その目的は次のように分類できる。すなわち、採用しようとしている信頼性解析手法のうちの demand 側の 2 つの段階に関する情報、第 1 は海象そのもので、波浪の波高、波周期、波向に関する確率密度関数(or 分布関数)または最少限のそれらの平均値、分散、第 2 は船体の合応力の確率密度関数(or 分布関数)または最少限のその平均値、分散が得られるデータ採取・記録・解析を行なう必要がある。

以上に留意し、実船計測の目的を分類した。

データ解析時の参照データとして必要な工作精度のバラツキは別途陸上において準備される初期不整・板厚ばらつきデータ等の一部としてあらかじめ船体情報のひとつとしてデータベース化されている必要がある。

2.7.3 研究開発課題と解決策

(1) 波浪荷重の検証

波浪はすべての応答出力に対しての入力であり、波浪荷重を推定するには海象のデータを如何に収集するかが最も重要な問題である。波浪の計測の場合、各種の計測項目のうちより精度の高い波高の計測が従来より課題とされている。波高の計測を含めて波浪に関する計測は近年活発に試みられている船体運動を利用して波スペクトルを推定する手法などにより、ぜひとも広範にデータ収集を実施すべき項目である。

本来、波浪計測の目的はADDAシステムにおける設計荷重算定用の海象を設定するためであるが、その前段として、2.1でのべたように波スペクトルに基づく統計的表現による海象および極限海象の2つの海象設定法の考え方に対する検証が必要である。

統計的設定法では、まず、短期海象の波スペクトルと応答関数により、線形重ね合わせの理論に基づいて応答スペクトルを求め短期予測を行なう。さらに波浪の長期発現頻度を用いて長期予測を行なう。具体的には、統計的設定法の実船計測による検証では、波浪データベースから抽出した海象（波スペクトル）が、実海面の波スペクトルと合致するか、波の方向分布特性が標準的仮定と合致するか、出会い角の分布の仮定が妥当か否かを検証する。

一方、統計的予測では取り扱いが困難な荷重応答の非線形性を考慮し、最終強度解析を行なうためには極限波浪を設定する必要がある。極限波浪には、最大応答が発生する波浪特性を明確にした波浪モデルと、構造応答特性を波浪データから最大応答が発生する短期海象を求め、その波スペクトルから発生させた時系列波が考えられる。

極限海象の実船計測による検証では、上記のおきかえが妥当なものかどうかの検証を行なう。従って、海象中の最大波高、波周期、波方向などの計測によって、極限海象が実海象と対応するかの検証を行なうこととなる。ただし、極限海象の検証はこれを実船計測で行なう場合、荒天中の避航や減速及び操船影響等も入ってくるため種々人為的な問題を含んでいるが、解決しなければならない問題である。

(2) 座屈・崩壊強度の検証

実船における座屈・崩壊現象を客観的なデータとして計測・記録するには、単なる点についての応力あるいは変位のみではなく、そのモードに対応した変形を捉える必要がある。このため、実船計測によって座屈崩壊強度の検証を行なうには、座屈変形を直接計測するためのセンサーあるいはシステムの開発が必要である。

座屈崩壊強度の検証を行なうには、その工作法および縮尺影響（残留応力、初期撓み等）について十分に検討された実船相似の船体部分模型を用いて崩壊実験を行ない、崩壊強度および崩壊のメカニズムを正確に求める必要がある。

さらに、スケール影響を受けない高精度の実験として、廃船利用の崩壊実験について実験条件および実験費用等の調査を行なった。局部座屈の発生から船全体の折損に至る崩壊現象の把握と解析法の検証のためには廃船利用の崩壊実験が必要である。

(3) 疲労・破壊強度の検証

疲労強度検証の観点から以下を目的として実船実験を行なう必要がある。また、クラックアレスター機能の評価法確立のため廃船による実船実験が必要である。

1) 実船における波浪その他の時系列計測と、任意評価点における歪の時系列計測

2) 実船に設けたダミー構造による疲労寿命の計測

試験片と実船の局部構造では拘束条件が異なる。ホットスポット歪による疲労強度評価法が実船にも適用できるか否かを検討する。

適当な応力／歪集中個所に疲労亀裂を必ず発生させることを目的として、部分的に薄板とするか、或はダミー構造を船体構造の一部に附加して疲労亀裂発生個所を限定して設計、その部分に以下に示すように歪ゲージを貼付すると同時に、ホットスポット歪の発生頻度を計測する。また、同時に線ゲージを貼付して亀裂発生をモニターする。図2.7.1参照。

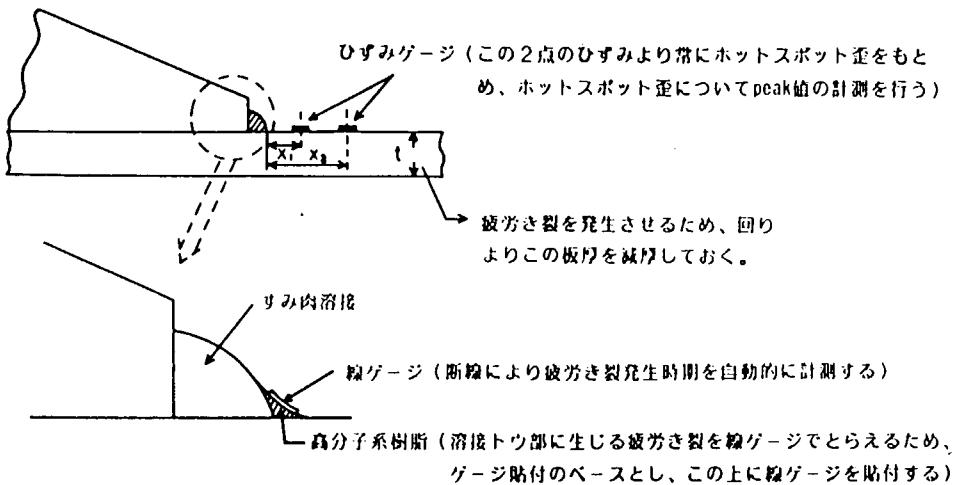


図 2.7.1 構造的不連続部における疲労亀裂発生寿命検証法

3) 廃船を利用した脆性亀裂伝播停止実験

廃船を利用し、船首側および船尾側タンクに水をはり、デッキが許容応力状態となるように設定し、デッキ部のA級鋼部において冷却および局部負荷により脆性亀裂を発生・伝播させ、ラウンドガンセル部のE級鋼に突入させる実験を行なう。

このとき、亀裂速度、周辺の歪（応力）の時間変化等を計測し、解析に供することになる。本実験ではスティフナーの脆性破壊停止効果も検討する。

(4) 信頼性解析の検証

信頼性解析システム検証のためには波浪外力(demand)の確率論的評価が実際の現象をどの程度正確に表わしているかを見る事にある故、外力の根本的原因である波浪海面の計測およびその結果としての代表的な応答の長期計測が実船計測の基本となる。ここでは波浪海面に関する情報源として船体運動の計測、代表的な応答として船体合応力の計測を基本的な計測項目として提案した。

(5) 実船計測の統一的手法について

以上のべた如く、計測は多岐にわたり且つかなり長期間の計測を要するものもある。

現状の問題点の分析に基づいて、今後の実船計測の標準的システム仕様、計測法案、計測項目、供試船等をとりまとめ、将来の統一的計測の指針とした。

1) 統一の必要性

波浪中実船計測の最大の目的は、“予測値との相関をとる”ことにあるため、試験後の解析が確実にできるよう、計測および処理手順は、一定の基準に沿っていることが必要である。

2) 要検討内容

- ① 実船計測値の出力仕様の作成
(処理項目との関連把握、実績値の問題点洗いだしを含む。)
- ② 計測項目の決定
- ③ 計測技術の設計(ハードウェア、ソフトウェア)
- ④ 計測の統一手法の作成
- ⑤ プロトタイプ計測システムの設計

(6) まとめ

ADDAは、このシステムにより、就航中の船体応答を精度よくシミュレート出来ることが前提となった構造設計法である。従って、実用に先立って、その詳細検証がなされなければならない。ADDAシステムの検証については実船計測と大型模型実験（廃船による実船実験）を必要とする。また、一部の問題は現象の把握を実船実験で行なう必要のあることを明らかにし、検証のためのシステムについて、そのあり方と基本計画を指針として設定した。計測目的と計測項目の一覧を表2.7.4に示す。システムの概念と運用フローを図2.7.2, 2.7.3に示した。

表2.7.4 実船計測計画一覧表

計測項目 計測目的	波浪	波浪荷重	運動	応力	圧力	変形	その他
1. 波浪荷重							
a. 海象	○ 時系列+スペクトル		○ 同左				風向、風速他
b. 設計海象設定	○ 極値分布	○ 同左	○ 同左	○ 同左			
c. 荷重解析	○ 時系列+分布 +スペクトル	○ 同左	○ 同左	○ 同左	○ 同左		
2. 座屈崩壊強度							
a. 座屈変形		○ 分布		○ 同左	○ 同左	○ 同左	
b. (模型実験)		○ 履歴・絶対値		○ 同左		○ 同左	
c. (廃船利用実験)		○ 履歴・絶対値		○ 同左			
3. 疲労破壊強度							
a. 疲労発生		○ 時系列		○ 同左		○ 変形量	
b. 疲労亀裂伝播		○ 頻度分布		○ 同左		○ 同左	
c. (模型実験)				○ 履歴		○ 同左	亀裂伝播阻止
d. (廃船利用実験)				○ 履歴		○ 同左	疲労亀裂他
4. 信頼性解析							
a. demandの計測							
i. 海象情報	○ 分布関数						
ii. 合応力情報		○ 分布関数		○ 同左			
b. 評価手法検証	○ 確立分布・極値分布						

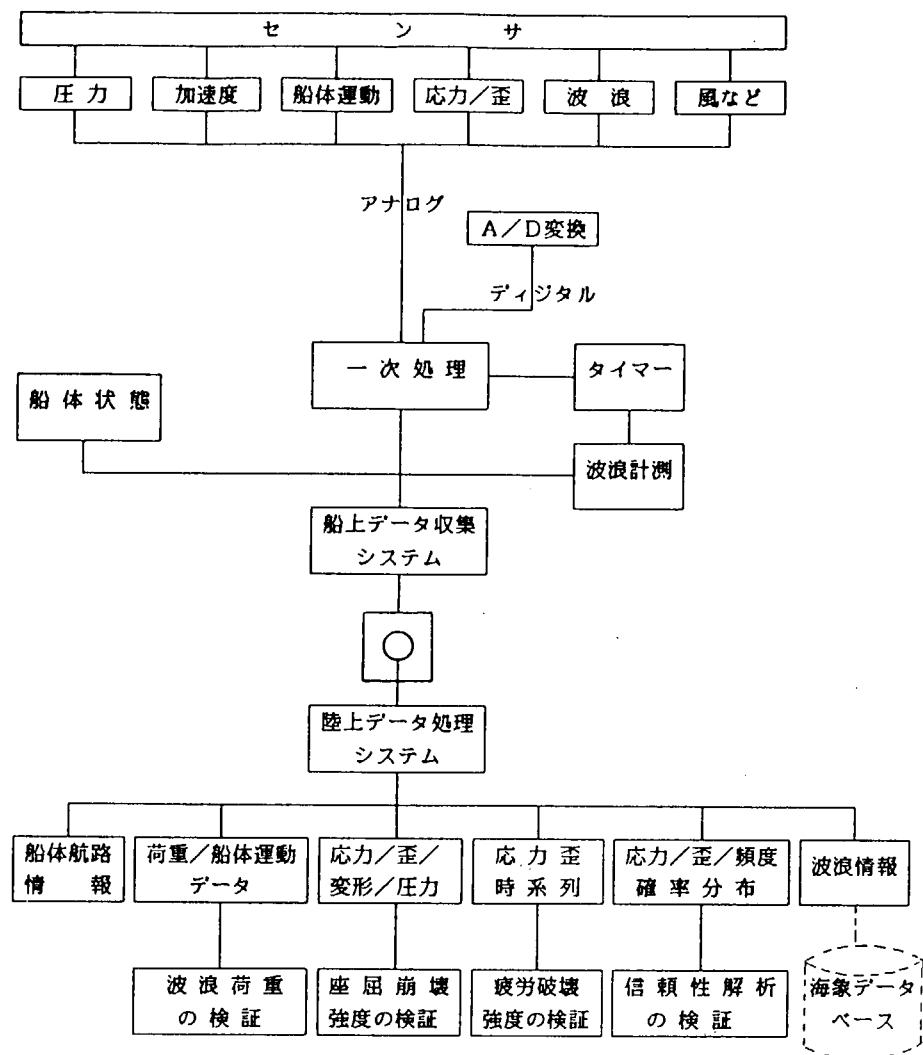


図 2.7.2 ADDA 実船計測検証システムのフロー

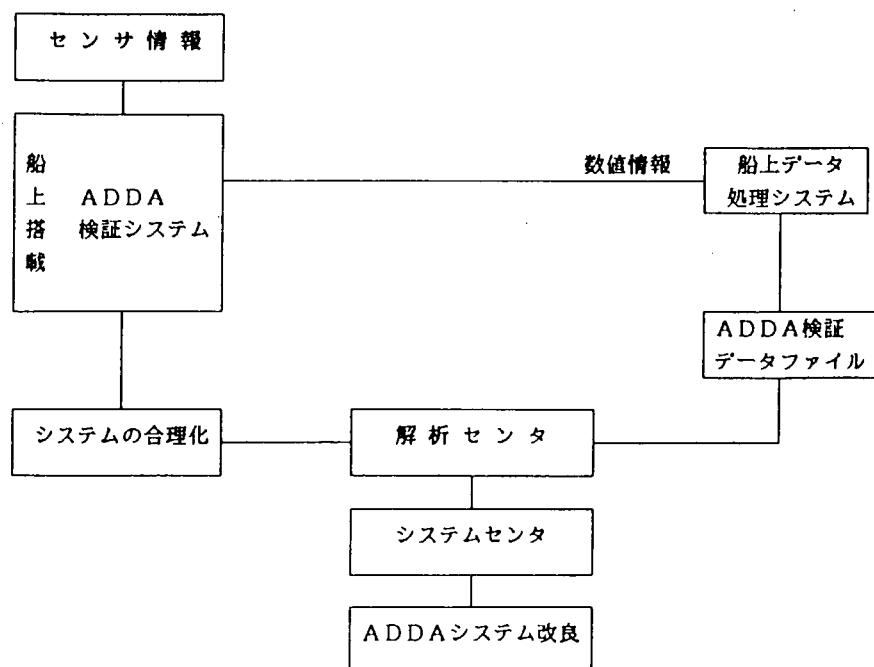


図 2.7.3 ADDA 検証システムの運用フロー

3. 研究開発課題とその進め方

昭和 62 年度より 2 年間にわたり、新船体構造設計法の構想とその開発課題の調査研究を実施した。航空機、原子力等の大型構造の評価技術は着実に学問的進展を見せており、また将来のスーパーコンピュータの利用が一層容易になると予想される。このような技術環境において船体構造の開発力の強化のために新しい設計法の開発を是非とも実施すべきであると認識されている。第 2 分科会は、新船体構造設計法の備えるべき要件とそれを実現するための研究開発課題を吟味・検討してきた。本項ではその要約として研究開発課題を示し、その進め方の基本的考え方について述べる。

3.1 研究開発課題

新船体構造設計法とそのシステム構築を実現するための種々の課題は前節で述べた通りであり、その主要課題を表 3.1 に要約する。本表に示すようにシステム構築に必要な基礎研究課題 (A1~A6) はシステム課題 (B1~B6) と分離される。

本分科会における課題の検討においては、ADDA システム構築のために必要なすべての課題を議論することに留意しており、そのため、ADDA の必須事項であっても、コンピュータ関連技術のように、更に広範囲なニーズの下に、進展されるべきものも含んでいる。また一部にはシステムの利用者自らが、補完すべき事項についてもふれている。

造船 CIMS との関係では本表に示すように、B1 の構造解析モデリングシステムは構造の具体的表現において造船 CIMS と共通であるべきであるが、ADDA の固有部分も多く、本分科会でも前述の考え方から取り上げている。B6 の構造設計支援インテリジェントシステムについても同様である。

ADDA の構築のための諸課題は広汎な専門分野にわたるものであり、A/B 両課題とも必要不可欠であるが、その研究開発は長年を要するものであり、広く技術動向に留意しつつ、次のような見方でその推進がなされるべきである。

- ① 荷重／応力／強度／評価の一貫したプロセスの構築のための概念、手法、条件等の研究が優先されるべきである。
- ② 数値実験の実現と設計ツールとしての実用化に向けて、コンピュータの最新機能を利用した手法高度化・近代化の研究を優先すべきである。
- ③ 先端的な信頼性評価技術や設計迅速化技術の船舶への適用、検証に関する研究を重視する必要がある。

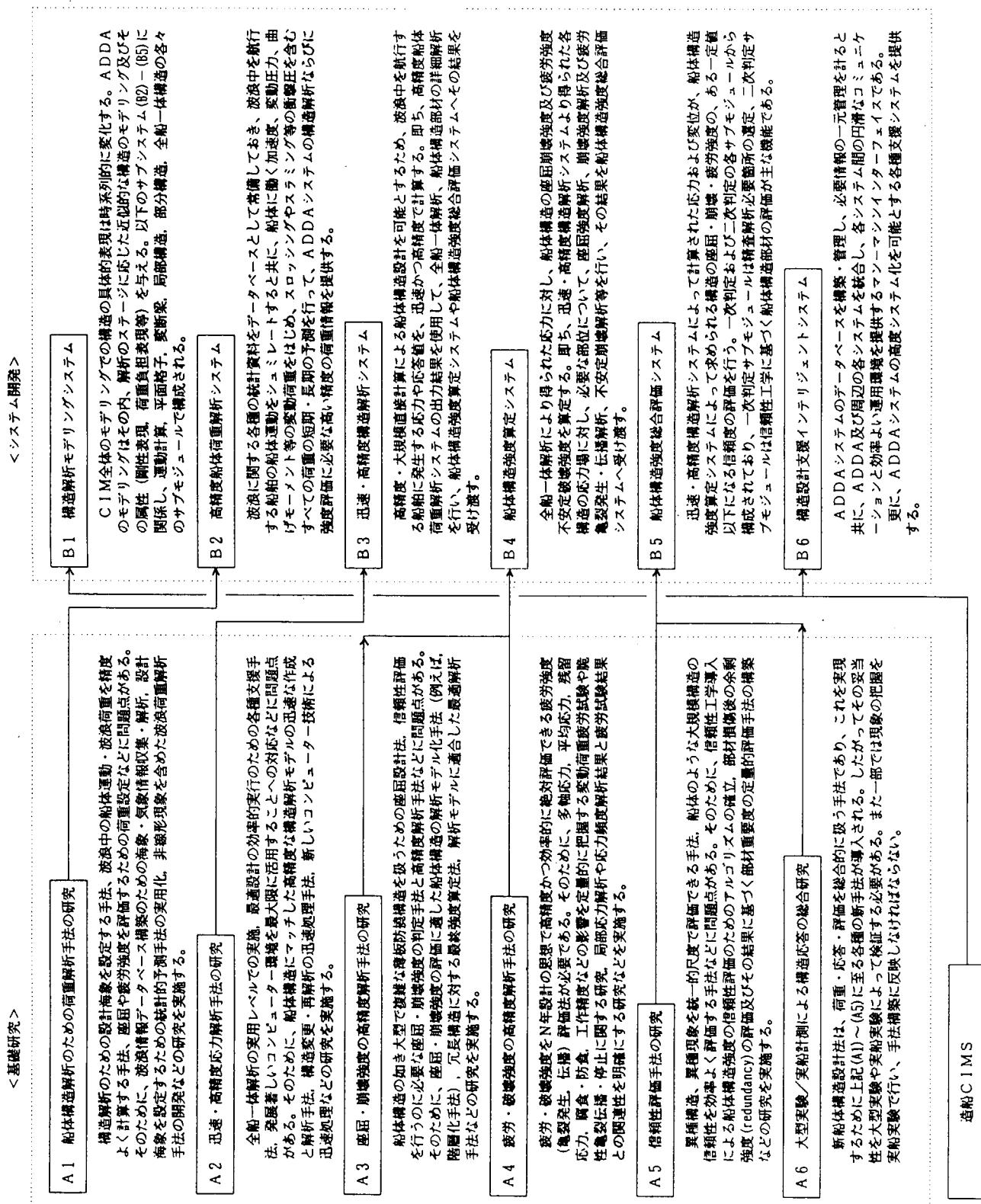
3.2 研究開発の進め方

新船体構造の開発を効果的かつ効率的に実施するためには、開発目標の達成に必要な基礎研究課題の現状をふまえ、かつコンピュータ環境の成熟度に応じ、全体計画が立案されなければならない。

ADDA のサブシステムとその構築のために必要な基礎研究課題との関係は表 3.1 に矢印で示すとおりである。これらの基礎研究課題は前述のように種々の課題を含むが、広く技術動向に留意しつつ、早急に着手されることが望ましい。また構造解析モデリングシステムはシステムの基幹をなす部分であり、造船 CIMS と構造の具体的表現において共通化を計るべきであり、造船 CIMS の開発進捗状況を参考にして進めるのが合理的である。

なお、上記基礎研究の推進に当たっては、現状知らされている最新の技術的知見の上に立って、産官学の有機的な連携のもとに推進されるよう期待するものである。

表 3.1 新船体構造設計法の研究開発課題



第三章 数値水槽に関する調査研究

1. 数値水槽の全体構想

1.1 基本認識

船型設計は、船舶の引合い、受注から建造に至る流れの中で技術面では最上流に位置し、船舶の有する固有性能（例えば推進性能など）は船型設計段階において決定されると言って差し支えない。しかるに、

船型設計の基礎となる推進性能の評価は、現在のところ主として模型による水槽試験に頼っているが、試験を実施するまでに約1ヶ月以上の準備期間を要するため、その結果を船型設計にタイミングよく反映させる際の制約となる。また、

水槽試験の評価には過去の実績による模型と実船との相関関係が不可欠であるため、実績データに乏しい新船型を実船に採用するまでに至らない場合がある。更に、

水槽試験では、船体の周りの流れの定量化が困難であり、船型の改良に関する的確な情報が得られないこと、波浪中性能の評価が困難なこと等の制約があり、船型開発力のより一層の強化が阻まれている。

このように、船型設計や船型開発は、現状では主として水槽試験による実験工学的なアプローチであるため船型の最適化は部分的に留まっている。一方、数値流体力学は航空機産業を始め諸産業において着実な学問的進展を見せており、将来スーパーコンピュータの利用が一層容易になるにつれて数値解析技術は飛躍的に進展するであろうと予想されている。

このような技術環境において水槽試験の限界等による諸問題を解決し、船型開発や船型設計力を革新的に進歩させ今後の日本造船業の国際競争力を増し、常に高性能の船舶を提供することにより海運界に寄与するためには、航空機分野で行われているように、数値シミュレーションにより船舶の流体力学的性能を評価する技術、即ち「数値水槽」が不可欠であり、特に船型設計の基本となる推進性能を評価するための「推進性能数値水槽」の開発は是非とも実施すべきであると理解されている。

1.2 数値水槽の概念

数値水槽とは、船体周りの流れとそれに基づく船舶の推進性能特性を数値計算により求めるものである。具体的には、

コンピュータ内に各種の流体力学的物理現象に対応した理論モデルを構築し、船型やプロペラ形状あるいは波浪等を入力することによって船体表面および周囲の微細な流れ場、圧力、抵抗等更には速力／馬力の関係等を出力する推進性能解析システムである。

数値水槽は新世代造船システムにおけるCAEシステムの基本要素システムとして、次のシミュレータから構成されると考えられる。

(a) 流場シミュレータとして

- (1) 造波流場シミュレータ
- (2) 粘性流場シミュレータ
- (3) 船体近傍乱流場シミュレータ
- (4) プロペラ流場シミュレータ
- (5) 波浪中流場シミュレータ

(b) 性能シミュレータとして

- (1) 平水中推進性能シミュレータ
- (2) 波浪中推進性能シミュレータ

数値水槽の概念イメージを図1.2.1に示し、CAEシステムとの関係を図1.2.2に示す。

1.3 数値水槽の開発構想

数値水槽開発の目標は、流場、波場、抵抗性能、自航性能および波浪中抵抗増加を含み、船型開発あるいは船型設計に際して波浪中を含む推進性能諸要素を迅速、かつ実用的な高精度で評価、予測しうる数値シミュレーション技術即ち推進性能数値水槽を開発することにある。このためには、数値水槽プロトタイプシステム（総合システム）として具体化する必要がある。

数値水槽は前述のとおり流場シミュレータと性能シミュレータから構成されるが、各要素シミュレータは下記の機能を有することが必要である。

(1) 造波流場シミュレータ

- 1. 船体周りの崩波を伴う波場（自由表面流れ場）の推定・解析・表示
- 2. 特に、船首尾部等の微細波場の推定・解析・表示
- 3. 目的に応じて2次元及び3次元流れを取り扱うことができるプログラムシステム構成

(2) 粘性流場シミュレータ

- 1. 船体周りの粘性流場の推定・解析・表示
- 2. 特に、剥離、渦等の流体现象の評価（乱流構造の精密把握が必要となる）
- 3. 目的に応じて2次元流れや、自由表面の無い場合も扱えるプログラムシステムの構成

(3) 船体近傍乱流場シミュレータ

- 1. 船体表面および周囲の乱流場の推定・解析・表示
- 2. 特に、境界層内、後流中の流場の推定・解析・表示
- 3. 船体表面の圧力場、伴流分布の推定・解析・表示
- 4. レイノルズ数（模型船域、実船域）に応じたプログラムシステム構成
- 5. 専用データベースを含むシステム構成

(4) プロペラ流場シミュレータ

- 1. プロペラ単独特性、翼表面の圧力分布、渦分布等の推定・解析・表示
- 2. プロペラ周囲流場の推定・解析・表示

(5) 波浪中流場シミュレータ

- 1. 船体周りの波浪中流場の推定・解析・表示
- 2. 特に、船首尾部の波の状態の表示

(6) 平水中推進性能シミュレータ

- 1. 全抵抗、造波・粘性抵抗成分の計算
- 2. 船体、プロペラ、舵を含む自航状態での流場、伴流分布及び自航要素の解析・表示
- 3. 速力／馬力の関係等推進性能計算及び評価
- 4. 専用データベースを含むシステム構成

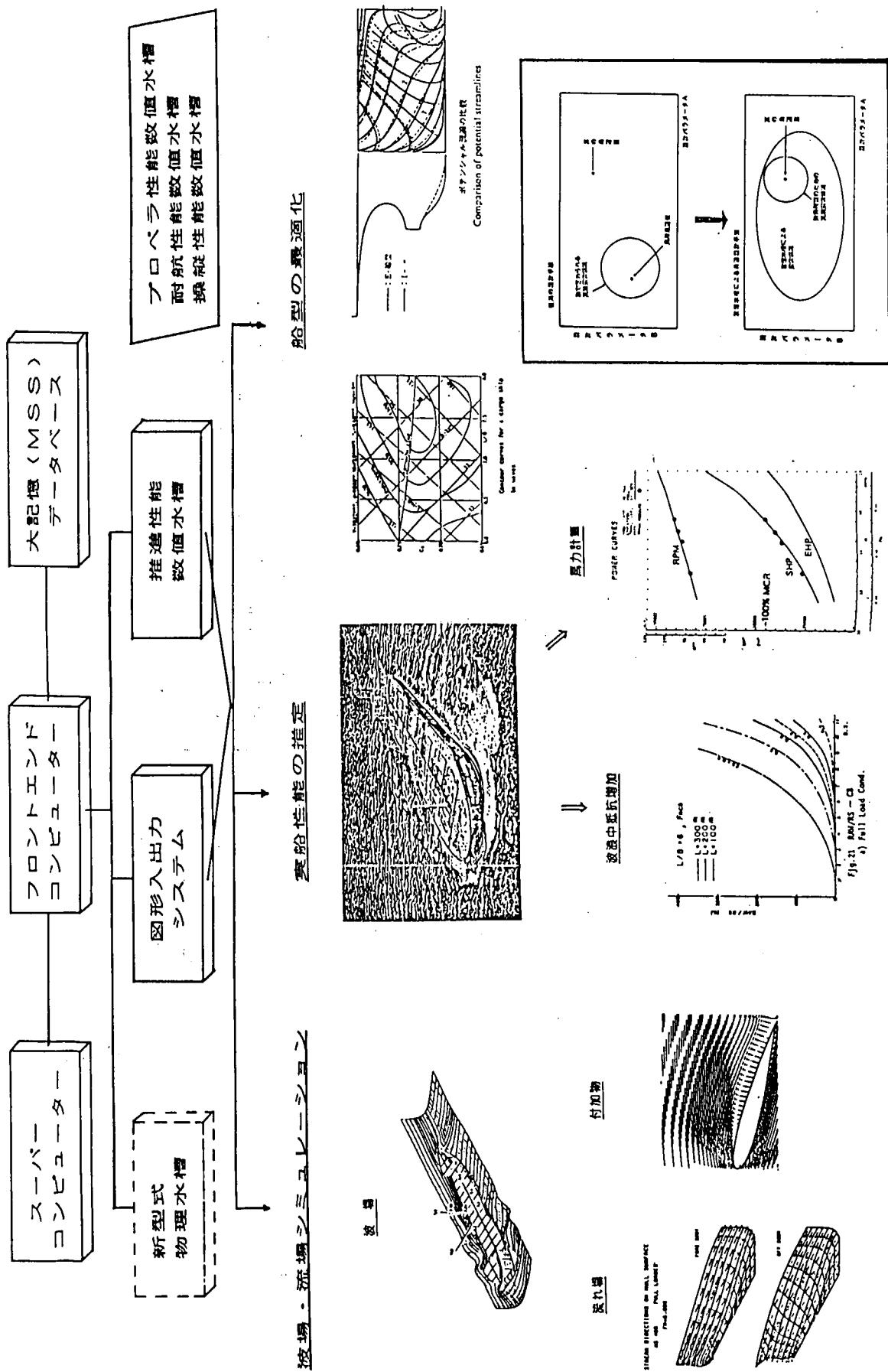


图 1.2.1 推进性能概念图

(7) 波浪中推進性能シミュレータ

1. 波浪中抵抗増加の計算
2. 風抵抗の計算
3. 波浪中速力／馬力関係等の波浪中推進性能計算及び評価
4. 専用データベースを含むシステム構成

数値水槽におけるこれらの要素シミュレータの構成を図 1.3.1 に示す。

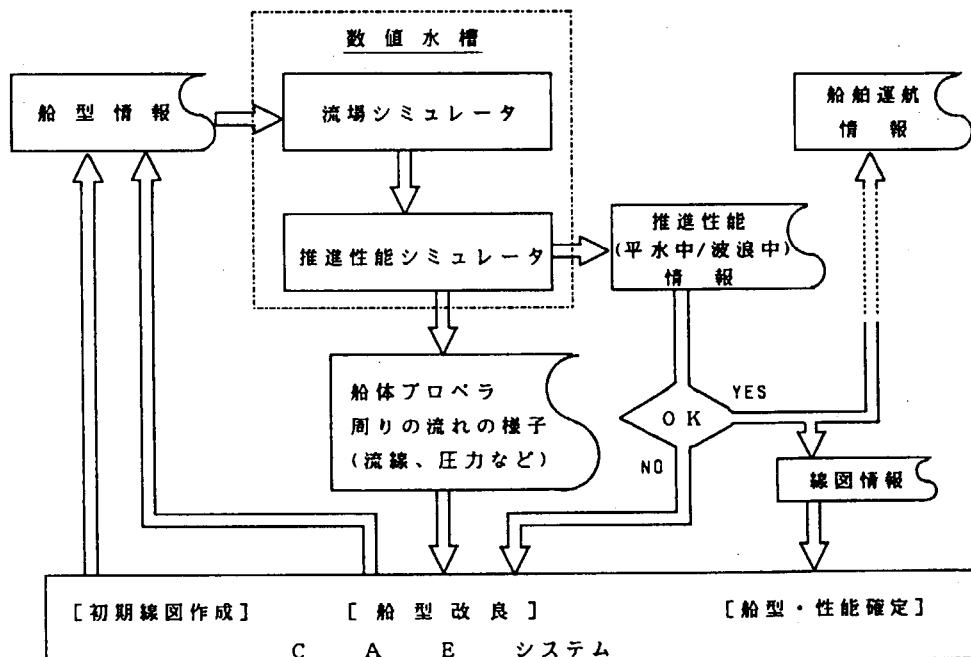


図 1.2.2 数値水槽と CAE システム

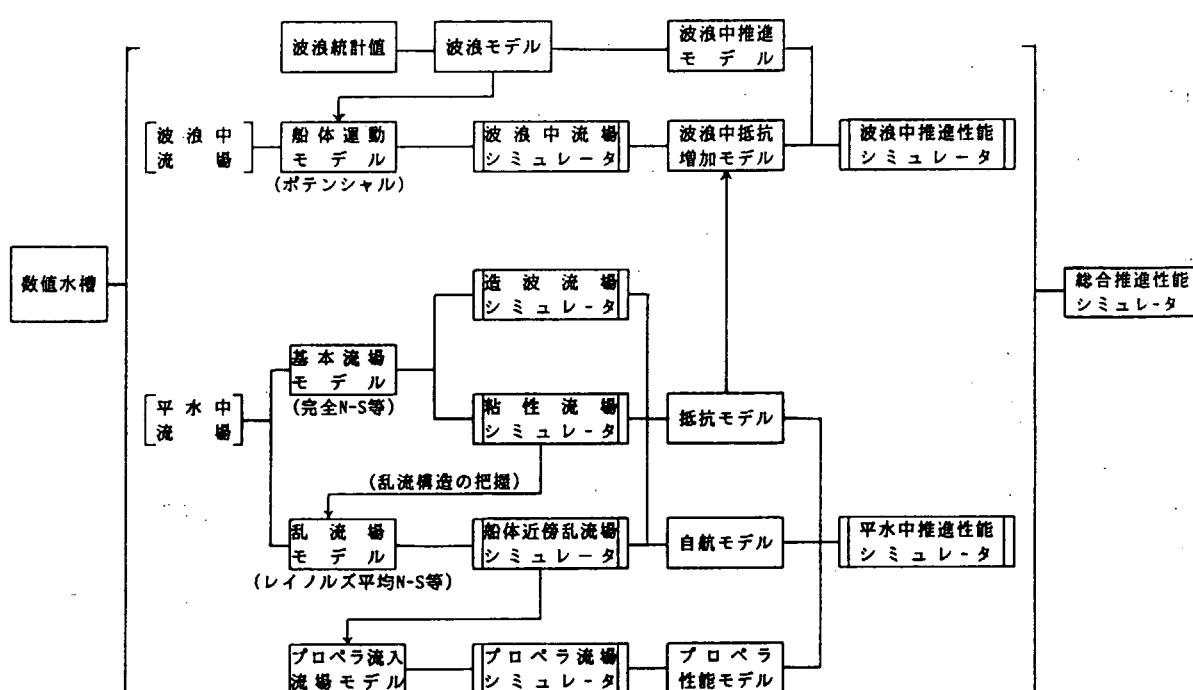


図 1.3.1 数値水槽要素シミュレータの構成

1.4 開発の効果と波及効果

(1) 海運業に与える効果

(a) 船舶の経済性の向上

大洋航行中の推進性能推定の高度化・精密化により、運航状態を含めた船型設計の最適化が可能となり、船舶の運航経済性が向上する。

(b) 船舶の最適運航への寄与

最適運航に必要な船舶の性能情報を数値シミュレーション技術で予測し、あるいは、リアルタイムに提供することが可能となる。これは、ADDAの研究成果との合体により海陸一体となる情報管理に基づく総合運航システムの確立につながる。

(2) 造船業に与える効果

(a) 高性能船のタイムリーな設計

船型設計、船型開発の合理化、最適化により実船性能を迅速に、かつ精度よく推定する。（図1.4.1）

(b) 設計技術向上による競争力の強化

経験工学を脱した設計技術の高度化により、新形式船・高技術船の開発が著しく容易になる。また、新世代造船システムの重要な土台のひとつとなる。

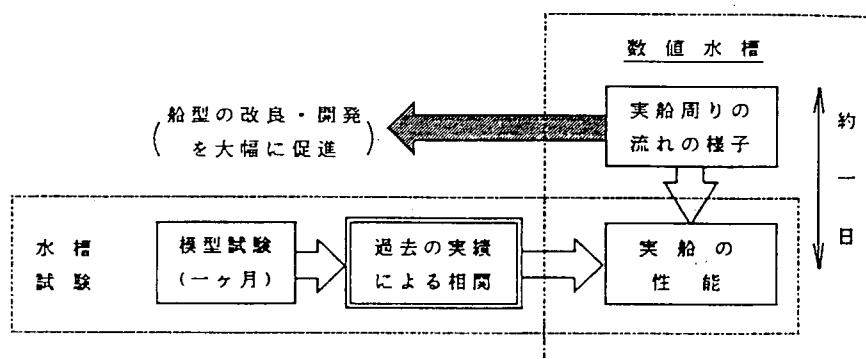


図 1.4.1 数値水槽と水槽試験

2. 調査研究の概要

本研究は第210研究部会第3分科会において数値水槽開発の準備段階として、船体及びプロペラ周囲流場に関する数値解析法開発のための主要要素技術の検討、問題点の抽出及びその解決のための調査研究を主目的とし、昭和62年4月発足以来、全体方針の確認・調整・検討を分科会及び幹事会にて行うとともに、その方針に沿った具体的な研究作業は

WG 1 : 船体周囲流場の数値解析法の調査研究

WG 2 : 波浪中抵抗増加理論の高度化に関する調査研究

WG 3 : プロペラ周囲流場の調査研究

が夫々開発課題を分担して実施した。

各WGともに、昭和62年度は文献等による現状調査と問題点の抽出のために一部試計算及び計測法の検討を実施、その研究成果は分科会報告書としてまとめた。昭和63年度は試計算を継続実施するとともに数値水槽構築へ向けての研究開発課題と解決策を取りまとめた。

本節は、2ヶ年に亘る調査研究の概要を述べるものであり、2.1節はWG 1、2.2節はWG 2、2.3節はWG 3が担当した。

2.1 船体周囲流場の数値解析法の調査研究

2.1.1 現状と問題点

新世代造船技術を開発し、これを実用化する動きの手始めとして、船舶の推進性能に関する要素技術としては、スーパー・コンピュータの援用により、従来にも増して専門家のうちに蓄えられたノウハウを情報化し、スピーディにかつ一貫した総合活動にオンライン化していく必要がある。このため、第3分科会の第一作業部会では船体周囲流場の数値解析および流場計測法に関する調査研究を実施することになった。

数値解析および流場計測を新しい造船技術の一要素として有効に機能させるには、これらの分野における技術レベルおよびその実体をよく認識し、もし問題があるとすればどこにあるのか、それはどのようにして解きほぐされるべきかという両課題の解決が不可欠である。よって本作業部会では、第1回に数値解析技術ならびに流場計測手法の現状を知るための文献調査を実施した。第2回に船体周囲流場の数値解析技術とくに粘性流場・波動流場およびこれらが流体中の物体にもたらす諸力について、これらをシミュレートする計算プログラムを動かし、その問題点を明らかにすることとした。

実際、近未来に有望視される各種の計算手法に対して、手法の確立を目的とした問題点の抽出を試みた。

船体周囲流場の数値解法の現状と、その検証に必要な流場計測手法の現状について、文献調査の結果、次のことが分った。

- (1) 船体のように複雑な曲面をもち、かつ自由表面がある流場の解析をするために、解析領域の格子生成はひとつ重要な研究課題である。格子生成法に関する論文の代表例として、Thompson (1984) がある。
- (2) 船体周囲流場の解析については、1985年に開催された第4回計算船舶流体力学国際会議、第2回粘性抵抗シンポジウム、船の粘性流れに関する大阪国際会議等で各種のレイノルズ平均Navier-Stokes方程式の解法が紹介された。これらの多くは乱流モデルとして、 $k-\epsilon$ モデルを使用している。今回の調査ではこれらのうち代表的な4つの手法を調査した。いずれも船尾流の定性的な予測はできるが、粘性抵抗値の算出までには到っていない。その後、自由表面流場を扱い、かつレイノルズ平均より近似の少ないNS方程式の直接解法や、Large eddy simulation 手法を加味したより一般的な解法が提案されている。ただし現在のところは低レイノルズ数域で乱流は想定されていない。
- (3) 乱流場計算の具体例を示した代表的な論文が4件調査された。このうちNavier-Stokes方程式の直接解法によりチャンネル内乱流を計算したKim et al. (1987) の研究は注目に値し、実験値ともよい一致がみられ、この方面的研究の有用性が示されている。ただしこの計算は400万点の格子分割を行い、Super computer: Cray X-MPにて250時間を要している。このような基礎研究をもとに合理的な乱流モデルを構築していくことになる。このような乱流シミュレーション計算の発展と共に、より一般的な解法の改良発展が今後の重要課題となる。さらに実用的な観点から、より計算時間の少ないレイノルズ平均NS方程式の解法も、乱流モデルの改良と共に発展させるべき手法と考えられる。また、船体とプロペラの干渉の計算においてもレイノルズ平均NS方程式の解法(partially parabolicではあるが)が試みはじめられている。

文献調査による主要な結論は、現在の数値解析法は船体周りの流場の定性的把握には役立つが、船型性能評価に必須の抵抗値の定量的算出については未だ問題がある。従って、NS方程式の解法に関し、基礎的な研究、例えば差分スキーム、格子生成法、乱流モデル等の研究が必要である。

次節2.1.2では、数値解析技術の現状を具体的に把握するために、現在利用できる解析手法や、基礎調査のために新たに作成した解析手法をもとに、差分スキーム、格子生成法、乱流モデル等について調査した結果を述べる。

今回検討の対象とした解析手法は大きく次の3種に分類できる。

- (1) NS 方程式の差分解法
- (2) 境界要素法による水波計算
- (3) その他の計算法(理論解析との組合せ)

NS 方程式の差分解法に関しては、更に次の3通りの分類を行って、詳細な調査を実施した。

- (1) 2次元 NS 方程式の差分解法
- (2) 船体まわりの3次元 Full NS 方程式の差分解法
- (3) 船体まわりのレイノルズ平均 NS 方程式の差分解法(方程式の近似化による実用的解法)

調査検討の結果判明した主要な問題点は

- (1) Full NS 方程式の解法において現状で扱っているレイノルズ数は 10^5 程度迄である。粘性流れの基礎的研究用として利用できるが、模型船対応、さらには実船対応レイノルズ数の場合には、適切な乱流モデルを導入した近似解法であるレイノルズ平均 NS 解法が有望視される。
- (2) レイノルズ平均 NS 解法においては、レイノルズ数 10^6 程度までの計算が試みられている。現状では船体抵抗の推定精度が低く改良のための研究を続けねばならない。
- (3) 船体周囲流場の特徴である自由表面水波の計算に関しては、差分解法あるいは境界要素法による解法により実用的な答を得ることができる。ただし、粘性との干渉を解明しようとする場合、上述(1)、(2)と同じ課題が残る。

これら数値解析の評価に必要な流場データ収集には計測精度の向上と、微妙な流れの状況把握のための非接触な計測法、たとえばレーザー流速計の利用法、さらに画像処理技術を利用した広域瞬時計測法の開発が必要である。また、数値解析手法及びこれと同程度の重要性をもつ前後処理手法に関し、先駆的な研究を行っている米国の研究機関を訪問し調査した。これらの調査結果を 2.1.2 に報告する。さらに 2.1.3 では、今後の研究開発課題と解決策について述べる。

2.1.2 調査検討結果

(1) NS 方程式の差分解法による計算法

(a) 2次元 NS 方程式の差分解法

本節では、基本的流れである2次元流れを対象として、差分スキーム、格子生成、乱流シミュレーション、計算効率の向上、計算スキームの工夫などの問題点について調査した結果について述べる。

(i) 差分スキーム

微分方程式の差分化には種々の方法がある。差分の方法によって解が異なる場合もあり、問題となる。

NS 方程式の回転によって得られる定常渦方程式の対流項に Leonard 法、Agarwal 法及び Kawamura 法の3種の差分スキームを応用した場合の結果を比較した。計算対象は正方形キャビティ流れである。図 2.1.1 でみると、格子数が 21×21 の場合は、解は差分スキームによって大きく異なっている。しかし 61×61 の場合には差は見られない。このことから、格子の数がある程度十分であれば、差分スキームによる違いはそれ程大きくないことがわかった。

(ii) 格子間隔と数値散逸

WISDAM-2D コード(空間に関して全て中心差分を用いた NS 方程式の時間前進解法)によって、形状の変化する2平面間流れについて、格子間隔と対流項の数値散逸の影響について調べた。図 2.1.2 は三角形の突起のついた平行平板間の結果で、格子数が 61×41 とその2倍の 121×81 の結果を比較したもの

である。計算では境界適合格子が用いられているが、格子数によって、流れや圧力分布は大きく異なっている。 121×81 の場合でも、圧力の結果に格子間隔を半波長とする振動が生じており、この格子間隔でも必ずしも十分でないことがわかる。

一般に4階微分散逸量を大きくすると解の振動が抑制されるが、同時に流速、ことに壁面近くの速度勾配にも影響を及ぼすことがわかっている。図2.1.3は制御パラメータ α_4 を変化させて壁面上約0.07の流速を比較したものである。格子数が 51×51 のCASE-Aでは散逸量の影響が顕著であるが、 101×101 のCASE-Bでは減衰は見られない。散逸量の最適値は格子間隔やレイノルズ数とも関係しているようである。

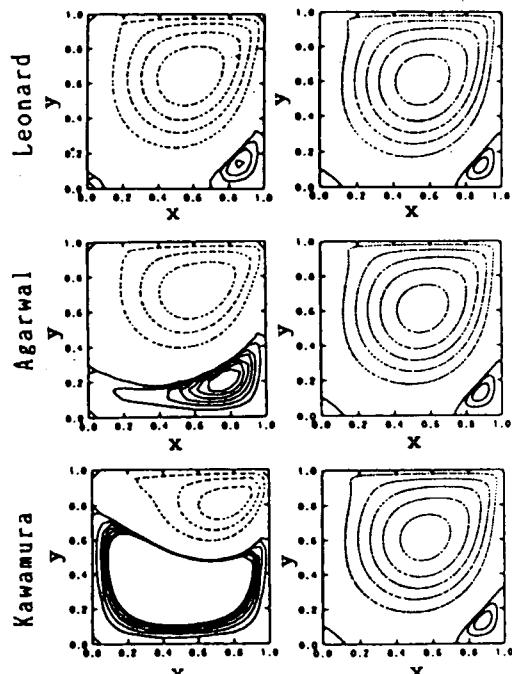


図2.1.1
差分スキームの違いによる比較
(左: 21×21 、右: 61×61)

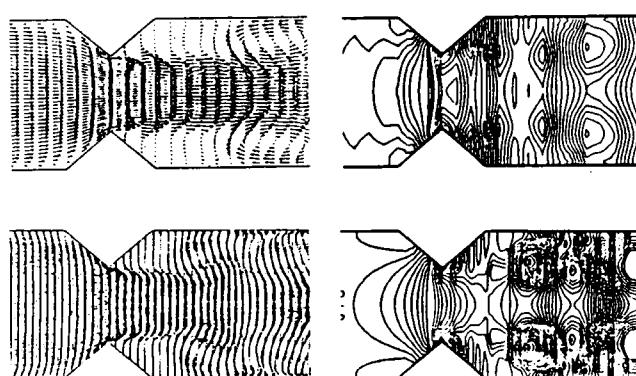


図2.1.2
格子間隔の違いによる比較
(左: 流場、右: 圧力
上: 121×81 、下: 61×61)

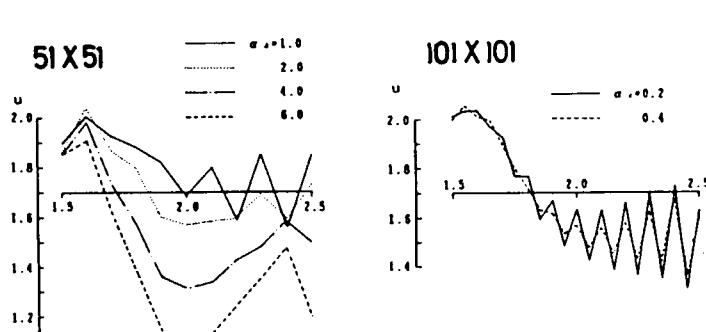


図2.1.3 数値散逸量の影響

計算スキーム	時間刻み幅	計算時間(CPU)
陽解法(準MAC法)	0.002	41m49s
局所時間刻み法	0.002 0.0092	47m37s
多種格子法	0.002	29m43s
IAF法	0.01	11m50s

(ii) 水波計算に対する計算効率とレイノルズ数影響

水波計算では流場(圧力、流速)計算の他に波面の計算が必要である。また波は下流に発達しながら伝播するため計算領域および計算時間を十分にとる必要がある。そのため計算効率の向上は緊要である。表2.1.1は自由表面上の圧力分布による波の計算で各種の計算法に対する計算時間を比較したものである。計算は全てスカラー計算機によるが、IAF(Implicit Approximate Factorization)による結果の効率がよい。同じタイムステップでも、波面の発達は早い。多重格子法も有効である。

水波計算におけるレイノルズ数影響を調べるために、没水翼による波の非粘性計算を実施し、レイノルズ数

10,000の結果と比較した(図2.1.4)。Case-1は粘性計算で、Case-2,-3は非粘性計算である。レイノルズ数が10,000程度でも粘性影響が強く、実験結果(レイノルズ数は 10^6 程度)と大きく異なっている。むしろ、非粘性の結果の方がよくあっており、高レイノルズ数での的確な計算方法の開発が必要である。

(iv) LESによる乱流シミュレーション

LESは離散化の上でSpectral法と差分法に分類される。差分法は適用の自由度が高い方法であるが、計算の安定化のための工夫が必要である。4階微分散逸項は高波数成分を除去し、解の振動を抑制する。この影響を差分法による平行平板間乱流の計算で調べた。図2.1.5に平行平板間中央の主流方向流速の時間変化を示す。散逸係数 $\alpha=1$ では単調に振動しながら加速されている。この場合空間的乱れはほとんどない。これに対し、 $\alpha=0.2$ では乱れは強くなり、実測値に近づく。 $\alpha=0.1$ とすると計算は発散した。 α はフィルター幅に関連するものである。計算に用いた格子で解像できる乱れより高波数成分を除去し、かつ計算が発散しない値を取らなければいけない。

(v) 計算方法の工夫およびその他の計算

基礎方程式としてNS方程式のどのような形を用いるかによって計算精度や効率は大きく異なる。定常流に対して時間項を省き逐次計算で解く方法が試みられた。平板流れに対してはよい結果が得られた。また擬似圧縮性に相当する圧力の時間微分項を加えることにより計算精度と効率の向上が試みられ、正方形キャビティ流れに対して興味深い結果が得られた。

一様流中に置かれた円柱周り流れの計算についても調査した。その結果レイノルズ数10,000程度までは計算できることができた。しかしながら、全体的に若干大きめの抗力係数がえられている。

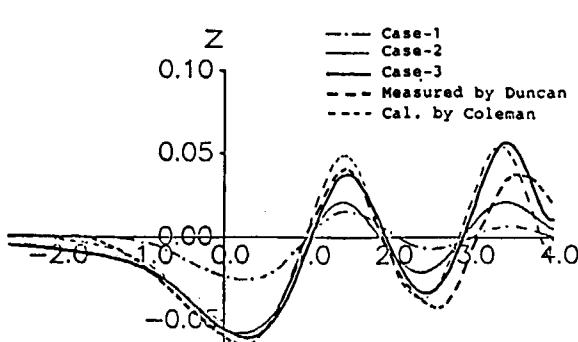


図2.1.4 水波におけるレイノルズ数の影響

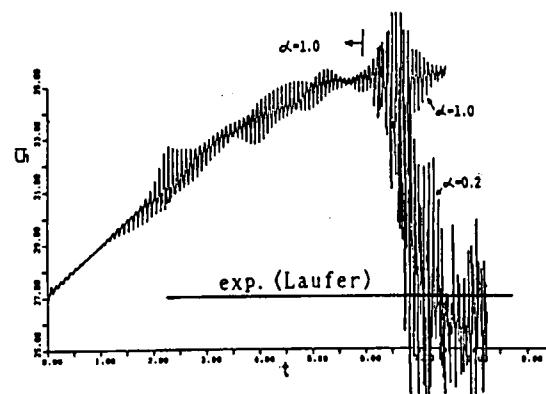


図2.1.5 平行平板間中央の流速変化

(b) 船体まわりの3次元Full NS方程式の差分法

(i) 基礎調査の概要

東京大学工学部船舶工学科船型試験水槽において船体周囲流場の高精度解析技術に関する基礎調査を行った。船体のような3次元の任意形状の境界を持つ領域での高レイノルズ数の流れを予測することは非常に難しく、格子生成技術、離散化手法から乱流モデルの検証まで幅広い基本的な研究が必要である。この調査ではNS式を有限差分法で解くときの基本的な計算技術に重点をおき、数値誤差に関するいくつかの問題点を明らかにした。

昭和62年度は7月8日から7月14日まで各委員が東大に集まり、集中的に調査を行った。予め東大で作

成したWISDAM-2DコードをベースにPCR(Program Code Reading)を開き、差分スキーム、計算アルゴリズム、コーディング技術についての討論を行った。WISDAM-2Dは2次元内部流解析用のコードであり、精円型偏微分方程式の数値解法によって格子系を生成し、対流項を勾配形で表したNS式を独立変数のみ曲線座標に変換するという最も基本的な計算法を用いている。空間微分は中心差分で近似し、また支配方程式には計算を安定に行うための非線形な数値散逸モデルが組み込まれている。

まず全体の格子点数や格子生成の制御関数のパラメータを変えることによって格子間隔を変化させ、格子系に依存した数値誤差が数値解に及ぼす影響について調べた。その結果、格子系による解像力の変化は渦の放出過程などの流れのパターンそのものを変えてしまい、計算結果に大きな影響を及ぼすことが分かった。次に誤差制御モデルを用いて4階微分の非線形数値散逸が数値解に及ぼす影響を調べた。数値散逸が大きすぎると逆流域が大きくなるなどの拡散効果が生じ、また数値散逸が小さすぎると解像力不足による振動が拡大して計算が発散することがある。この非線形散逸モデルは解像力不足による数値的不安定性を抑えるために有効であるが、流れのレイノルズ数や用いる格子系に応じて拡散効果を最小限に制御する必要があることが分かった。

昭和63年度は7月11日から7月22日まで各委員が東大に集まり、前年度の基礎調査をさらに進め、3次元粘性流の計算法に関する基礎的研究を行った。東大で開発したWISDAM-IIIをベースにPCRを開き、3次元の場合の計算技術、開領域問題における境界条件の取り扱い、ベクトル演算による計算の高速化などの技術上の問題点について討論した。

まず計算の解像力と流れの3次元性がダブルステップ上の2次元渦構造に及ぼす影響について調べた。せん断流中の3次元構造は乱れの生成と重要な関係があるにもかかわらず、物理実験ではもちろん数値実験でも捉えることが難しく、その全容は明らかにされていない。そこで格子間隔やスパン方向の計算領域を変えることにより3次元運動に対する解像力や拘束条件を変化させた数値実験を行った。その結果、ある程度組織的な縦渦構造が捉えられたとき、その激しい混合作用によって2次元渦構造が変化し、2次元渦同士の合体が促進される傾向があることが分かった。次に計算の効率について調べた。MACタイプの非圧縮性流の計算は圧力のポアソン方程式を各時間ステップで解くことによって連続の条件を満足させているが、計算時間の8割以上がこの部分で費やされている。WISDAMではベクトル演算を適用しやすいという観点から古典的なヤコビ反復法を用いてきた。そこでポアソン方程式の解法のためにいくつかの新しい方法を取り入れ、その比較計算を行った。しかしCPU時間でオリジナルのWISDAM法を上回る解法は見いだせなかった。さらに計算の効率を向上させるためにはベクトル演算向きのアルゴリズムの検討などより基本的な研究が必要であることが分かった。

(ii) WISDAM-IIIによる3次元計算の基礎調査

(1) 計算法の概要

WISDAM-IIIは非線形対流項から生じる数値誤差の挙動を調べるために開発された誤差解析用のコードであり、ダブルステップ上の流れを対象としている。境界形状は2次元であるが、あるレイノルズ数以上の流れは3次元であり、WISDAM-IIIはスパン方向には周期境界条件を用いた3次元コードである。支配方程式は対流項を回転形で表したナビエ・ストークスの方程式であり、これをデカルト座標系で展開し、精度制御可能な5点差分で近似している。

(2) 精度の検討

① 格子間隔の影響及び実験値との比較

計算対象として、3次元的ダブルステップとし、計算格子間隔を変化させた場合、計算結果にどのような影響を与えるか調査し、また計算による物体表面上の圧力分布を実験値と比較した。

計算条件は、レイノルズ数 $R_n = 13,000$ 、4次の数値散逸のパラメータ α_4 を 1.0 とし、無次元格子間隔は今回、X, Y, Z 方向の各格子間隔 Δ を 0.10 と 0.05 の 2種類に設定し、各々 CASE 1, CASE 2とした。

図 2.1.6 は、等渦度分布図であり、この図より Δ の違いにより流場の様子が相違しているが、これは α_4 が Δ の 3乗に比例するため、 Δ が小さくなるほど α_4 の影響が小さくなるためと考えられる。このため $\Delta = 0.10$ の場合は、 $\Delta = 0.05$ に比較してあたかも、レイノルズ数が低くなったような流場となっている。

図 2.1.7 は、物体表面上の圧力を棒グラフにて示したものである。これは、実験値と共に各 CASE の計算値を使って外挿した計算値が実線として上書きしてある。この図より、計算値は実験値と比較して、全体的な傾向はよい一致を見ているが、step 上面、step 後方領域では、あまり一致していないようである。これは、計算値の時間平均値の時間範囲が短すぎたためと考えられる。また、 Δ の違いによる圧力の大小比較も渦の大きさに関係していることが窺えるが、step 上面で圧力の大きさが実験値と比較して小さくなるのは、step 上面での流れの急激な変化に格子間隔が十分に対応し切れていなかったものと思われる。つまり、実験では、step の leading edge から小さな強い渦が連続的に発生し step 上面を流れていることが予想される。



(a) $\Delta = 0.05$



(b) $\Delta = 0.10$

図 2.1.6 等渦度分布図

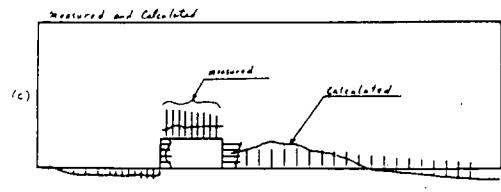


図 2.1.7 物体表面上の
圧力分布

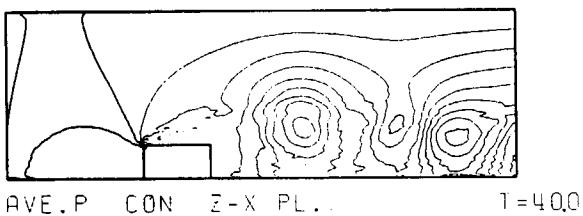


② 幅方向の計算領域が流れに及ぼす影響

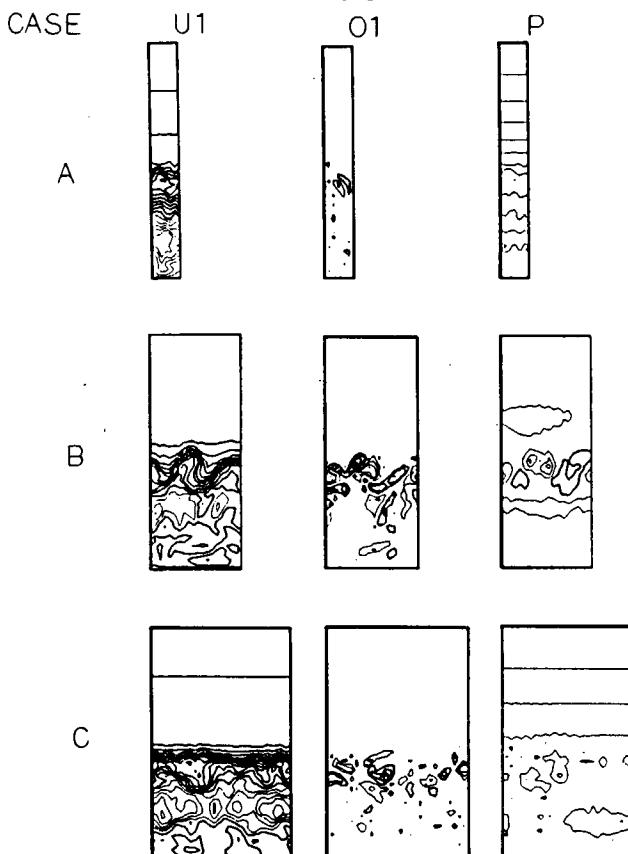
従来、2次元問題として扱ったものを3次元問題として扱うにあたり、幅方向の計算領域が流れの構造にどの様な影響を与えているのかを調べた。今回は幅方向に計算領域の異なる3種類のダブルステップ (CASE A, B, C) を設定し、その他の条件は全て同一にして比較計算を行った。計算条件は、前述のものと同一であり、X, Y, Z 方向の格子間隔は各 CASE 共に共通で 0.10 とした。

図 2.1.8 に、無次元時間 $t = 40$ における幅方向に平均した圧力等高線図の CASE による比較を示す。この図より、どの CASE についても、流れの変化の過程に変わりはなく $t = 30$ で存在する 2つの渦の間の正圧部が徐々に消滅し、その後上流側と下流側の渦が合体するという過程を経る。但し、CASE によって流場の変化する早さが異なり、CASE B, C, A の順に変化は遅くなっている。図 2.1.9 は $t = 40$ での step 後方の断面の主流方向速度 (U_1)、主流方向渦度 (O_1)、圧力 (P) を示す。剝離剪断流における流れの3次元構造があることが判り、不充分なスパン方向の領域広さを用いると、この現象を無視した計算を行うことになることを示している。今後、このような2次元性の強い流れを3次元で計算する場合、幅方向の領域広さと境界条件に充分注意を払うべきであろう。また、今回の結果は適切な幅方向の格子間隔と格子数を取れば、単に計算領域を広く取るよりも早い時間ステップで合理的な結果を得られる可能性も示唆している。

CASE



CASE

図 2.1.8 圧力等高線図 ($t = 40$)

(イ) ポアソン方程式の解法の検討

WISDAM-Ⅲのように非圧縮性流体の支配方程式である Navier-Stokes の式（運動量保存則）と連続の式（質量保存則）を差分近似し、半陰解法を用いて数値的に解くことは、放物型の Navier-Stokes の式を初期値問題として、橿円型の圧力に関する Poisson 方程式を境界値問題として解くことに帰着される。

圧力に関する Poisson 方程式を数値的に解くには、圧力を未知数とする連立一次方程式を解く必要があり、非常に多くの計算時間を必要とする。従って、圧力に関する Poisson 方程式を効率よく、かつ精度よく解く解法を見いだすことは、数値計算の効率を高めることにつながると考えられる。

今回の基礎調査コースでは、圧力に関する Poisson 方程式を数種類の数値解法を用いて解き、その計算時間や精度等の比較を行った。特に、今回は、東大の HITAC S 820/80 のようなスーパーコンピュータが持っているベクトルプロセッサーのもとでの各数値解法の性能を調べることにポイントをおいた。

WISDAM-Ⅲに各種解法を組み込み、ダブルステップの流れを例題にし、ベクトルプロセッサーのもとでの性能比較を行った。比較に用いた解法は、Jacobi 法、Line-Jacobi 法および SLOR 法である。Jacobi 法はオリジナルの WISDAM-Ⅲに用いられている解法である。

表 2.1.2 に各解法で 10,000 ステップまで計算した場合の CPU time とベクトル計算時間およびベクトル化率を示す。各解法間の CPU time はオーダー的に大差ないが、CPU time 自身は Jacobi 法が最も

図 2.1.9 step 後方断面の流場 ($t = 40$)

表 2.1.2 計算時間の比較

解法	CPU time (秒)	ベクトル計算 時間 (秒)	ベクトル化率 (%)
Jacobi	144.43	99	69
SLOR	205.06	168	82
Line-Jacobi	164.90	144	87

速くなっている。収束性という点では、SLOR法、Line-Jacobi法はともにJacobi法より優れている。しかし、ベクトルプロセッサーのもとでは、計算時間が元のJacobi法より増加するので、その長所は相殺されてしまっている。

SLOR法およびLine-Jacobi法では、一回の反復計算に要する計算量が、Jacobi法と比較するとかなり多くなる。また、Jacobi法は単純な陽解法であり、三方向についてベクトル化でき、その結果ベクトル長を長く($N=NI \times NJ \times NK$ 程度)できるので、ベクトル計算の効率を高めることが可能である。しかし、SLOR法、Line-Jacobi法では、アルゴリズムが複雑であるので、一方向のみしかベクトル化できず、ベクトル長は高々 NI 程度しかとれず、Jacobi法ほどベクトル計算の効率を高めることはできなかった。

ベクトルプロセッサーのもとでは、一回の反復計算に要する計算をどの程度ベクトル化できるかということも計算時間に大きく影響する。すなわち、

$$(計算時間) \propto \left(\frac{\text{ベクトル計算量}}{\text{ベクトル演算速度}} + \frac{\text{スカラー計算量}}{\text{スカラー演算速度}} \right) \times (\text{収束回数})$$

と考えられる。SLOR法およびLine-Jacobi法は、Jacobi法に比べて収束回数は少なくなっていた。しかし、計算量が増加したこと、およびベクトル長を長く取れない等ベクトル化の効率が悪かったことなどが原因し、性能的にはJacobi法を越えることはできなかった。

(iii) TUMMAC-Nによる船体造波計算の応用法の調査

TUMMAC-NはMAC法をベースにした水波計算プログラムTUMMAC法の中の、3次元任意形状船体の造波問題を扱うバージョンである。water lineは折れ線近似、frame lineは階段状近似して矩形格子系で3次元の任意船体形状を扱う。格子系はスタガードであり、markerの追跡により自由表面形状を求める。物体表面ではfree-slip条件を与え、実質的に非粘性の計算法である。

(1) 実用船型の場合

粘性をほとんど無視した船体造波専用の数値計算コードであるTUMMAC-Nを用いて、実用船型の造波計算を実施した。船首部の形状の違いと水槽試験により確認された抵抗性能との関係が、計算結果にどのように反映されるかを調査した。対象船型は、 $L = 7.2\text{ m}$ 、 $C_b = 0.8$ の肥大船である。船首部の形状すなわちフレームラインが異なり、船尾形状が同じである2種類の船型について計算を行った。TUMMAC-Nの計算条件は、東大での標準にならった。船体前半部のみを計算範囲とし、満載状態は、 $F_n = 0.17$ バラスト状態は、 $F_n = 0.18$ の速度である。 600 time step まで計算し、計算時間は1状態につき、約1時間(HITAC M-680)を要した。

計算された船側波形は、約S.S.8付近での波の落ち込みや、約S.S.7付近の盛り上がりなど水槽試験と良く一致した。満載状態の船側波形の計算結果だけからも、造波抵抗の大小が、推測できる。波形の鳥瞰図を図2.1.10に示す。造波抵抗性能の評価を簡便に $\sum \{ (\text{波高})^2 \cdot \Delta S \}$ で行った。水槽試験による造波抵抗係数の大小と計算による $\sum \{ (\text{波高})^2 \cdot \Delta S \}$ の大小と一致した。以上の調査からTUMMAC-Nが比較的低速の肥大船の船体前半部の造波抵抗性能の推定にも有効なToolであると確認出来た。

(2) 超高速の場合

船体周り造波シミュレーションプログラムTUMMAC-Nを用いて高速航行時の造波計算を行い、同プログラムの超高速での応用性を検討した。対象とした船型は 2.5 m のWigley Modelであり、船速 $F_n = 0.4$ 及び 0.6 の2つの速度について計算を行った。表2.1.3に主要目と計算条件を示す。

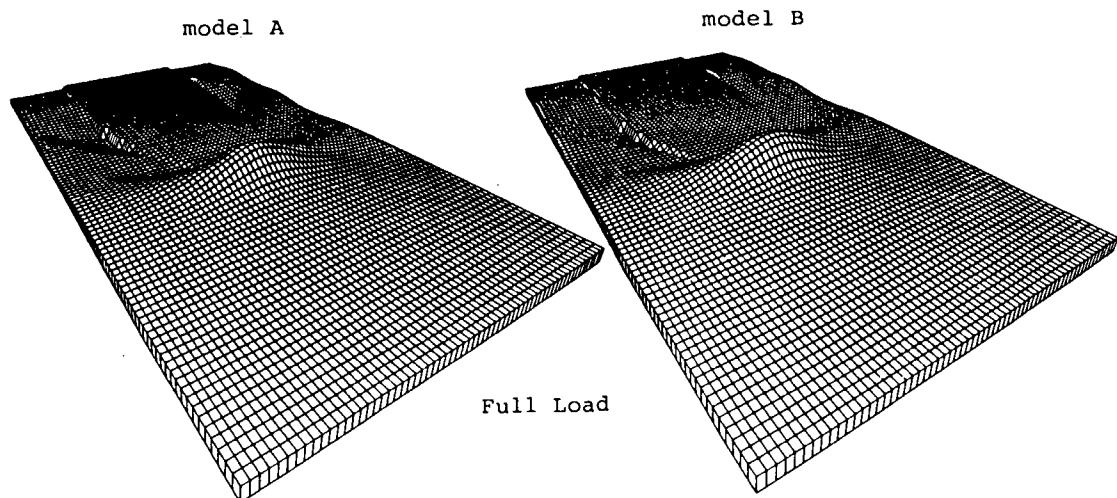


図 2.1.10 波形の鳥瞰図(満載状態)

計算の結果得られた $F_n = 0.6$ の波形鳥瞰図を図 2.1.11 に示す。この図では Z 方向を 5 倍に拡大して示している。 $F_n = 0.6$ については適当な水槽試験データが無く、検証が難しい。図 2.1.11 で計算領域等がまだ不十分と思われる点があり、超高速の場合計算領域を広くとる必要があると思われるが、計算結果は実験からかけ離れたものではない。今後、計算結果の評価には何等かの基準を持つ必要があるであろう。

表 2.1.3 主要目及び計算条件

SHIP	WIGLEY
LPP (m)	2.5000
B (m)	0.2500
d (m)	0.15625
計算領域	x (L) y (B/2) z (d) -0.240 ~ 1.880 0.0 ~ 2.400 -2.321 ~ 0.850
格子間隔	DX (L _{pp}) DY (L _{pp}) DZ (L _{pp}) 0.0100 0.0060 0.0031 ~ 0.0192
格子数	x · y · z 水面下計 213 · 42 · 30 161028
速度	(Fn) 0.400 0.600
開始 (STEP) 加速 (STEP) 終了 (STEP)	0 600 1500 1900 2500
dt (10 ⁻³ sec)	3.030 2.020
計算機 TIME	M-680 4h 18m → 6h 33m

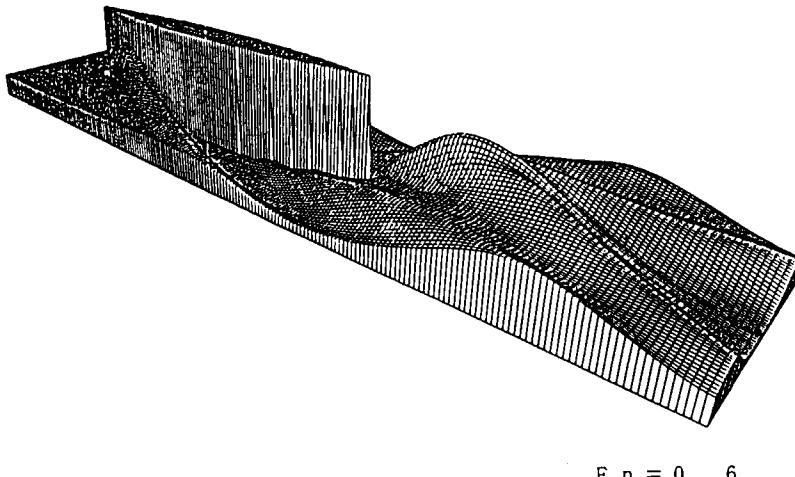


図 2.1.11 波形鳥瞰図

Wigley Model $F_n = 0.6$ TUMMAC - N

(V) 船体適合格子による船体造波計算法(日野の方法)

船体形状には適合するが自由表面の動きには追従しない計算格子による Navier - Stokes 方程式の有限差分解法である。基礎式は時間に依存しない曲線座標系で書いた Navier - Stokes 方程式であり、時間差分は Euler explicit、対流項は 3 次上流差分、他の項は 2 次と 4 次の中心差分でそれぞれ評価する。乱流モデルは用いていない。圧力の決定は Poisson 方程式による。物体表面では no-slip 条件を与え、自由表面条件のうち運動学的条件は差分解法による波形決定プロセスで、圧力条件は Poisson 方程式の境界条件としてそれぞれ満たしている。

数式船型として Wigley 船型、実用船型として Series 60 ($C_b = 0.60$) を対象として計算を実施した。

格子数および計算領域はWigley 船型の場合、

$$-0.7 \leq X \leq 1.0 \text{ (格子数 100)} \quad 0.0 \leq Y \leq 0.5 \text{ (格子数 30)} \quad -0.5 \leq Z \leq 0.054 \text{ (格子数 20)}$$

Series 60 船型では、

$$-1.0 \leq X \leq 1.0 \text{ (格子数 100)} \quad 0.0 \leq Y \leq 0.5 \text{ (格子数 30)} \quad -0.5 \leq Z \leq 0.025 \text{ (格子数 25)}$$

とした。ただし座標は船体の L_{pp} で無次元化し、 $X = 0$ は船体中央（前方+）、 $Y = 0$ は中心面（外側+）， $Z = 0$ は静止水面（上方+）である。図 2.1.12 に計算格子を示す。

計算条件は両船型ともフルード数 0.25、レイノルズ数 10,000 とした。静止状態から一様流まで加速し、その後無次元時間で 5 (Wigley 船型) あるいは 10 (Series 60) まで計算した。

図 2.1.13 に波高の等高線図を示す。両計算ともレイノルズ数が小さいため、船尾波は非常に弱くなっている。船首波は Wigley 船型の場合はいわゆるケルビンパターンに相似の波形となっているが、Series 60 船型では波形が十分発達していないようである。実用船型に対応するため格子の歪みが大きいことが原因の一つと考えられる。

今後、スキームの改良によって計算の高精度化、効率化をはかり、乱流モデルを導入して高レイノルズ数に対応した手法を開発する必要がある。

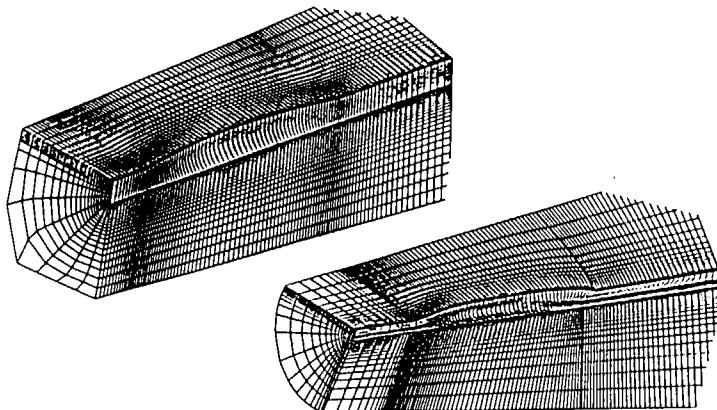


図 2.1.12 計算格子（左：Wigley、右：Series 60）

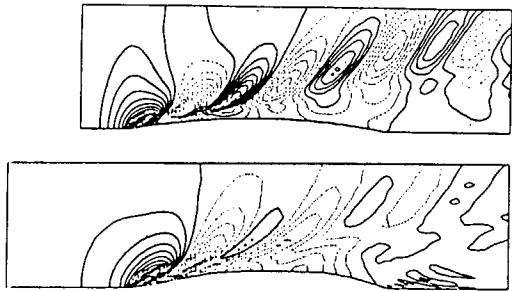


図 2.1.13 波形等高線図
(実線+ : 破線-, 間隔は 0.02
(上: Wigley、下: Series 60)

(v) 波と粘性を同時に解く方法 (WISDAM-II)

WISDAM-II は物体適合格子系を用いて 3 次元の粘性流と船体造波を同時に扱う計算法である。アルゴリズムは MAC 法と同じだが、レギュラー格子系を用いており、回転系 NS 方程式を高精度差分スキームで差分化している。乱流モデルには SGS 乱流モデルを用いている。

WISDAM-II を用いて船体まわりの粘性流の高レイノルズ数の差分計算における SGS 乱流モデルの工学的適用性について研究を行った。SGS 乱流モデルの等方性仮定は壁面乱流に適さない面があるので、乱流運動エネルギーの生成と散逸の均衡を保つために、その手がかりとして混合距離理論の Van Driest の壁面指數減衰係数を Sub-Grid Scale の評価に導入し、減衰パラメータである壁面近くの応力の評価に船体境界層の粘性底層内の圧力勾配を考慮に入れた。計算は $Rn = 10^5$ で Wigley ダブル・モデルまわりの粘性流について無次元時間 $t = 2.33$ まで行われた。図 2.1.14 は S.S.4 から S.S.1/2 までキールに平行するある WL 上の船体からの速度分布を速度の壁法則のようにプロットしたもので、midship から船体境界層が段々

発達して乱流に遷移していくことが分かる。図 2.1.15 は船体表面の $z/d = 0.0$ における圧力係数 C_p の分布とポテンシャル理論解及び実験との比較を示す。

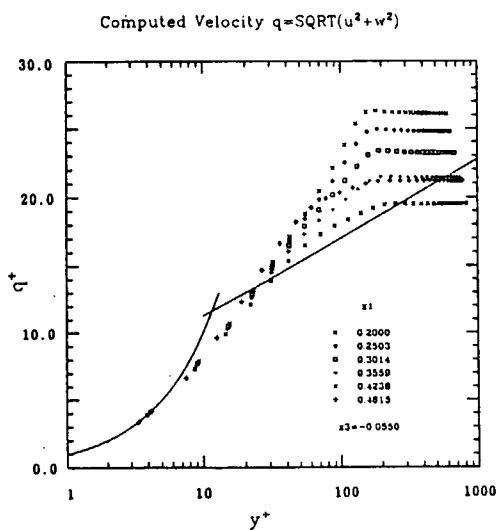


図 2.1.14 速度の対数分布

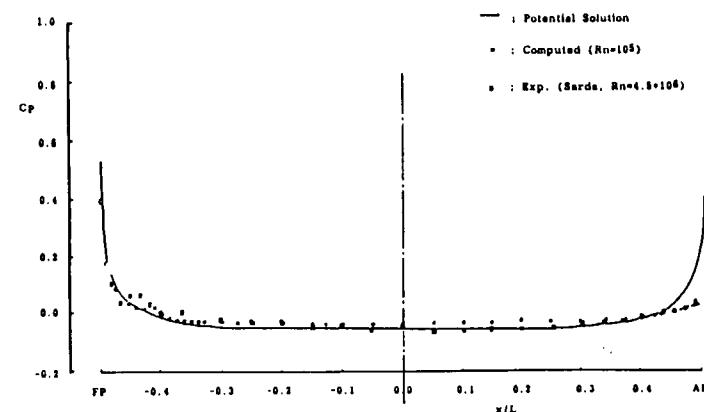


図 2.1.15 圧力係数の分布

(vi) 直交格子による任意形状物体計算法 (TUMMAC-V_{wv})

TUMMAC-V_{wv} は、MAC 法をベースに矩形格子系のもとで 2 次元の水波と粘性流を同時に扱う計算法である。物体形状は折れ線で近似し、物体表面条件に特殊な工夫をして no-slip 条件を課している。格子系はスタガードであり、乱流モデルとしては SGS 乱流モデルを用いている。

境界適合格子系に比べて、矩形格子系の場合は、格子生成のための苦労はほとんどいらないし、また格子系から出てくる特異性で計算が途中で発散する心配も無い。物体境界セルにおいて、対流項に関しては、no-slip 条件そのままと 1 次上流差分を用いる。また、圧力計算の場合は、control volume 的に取り扱い、発散を考える圧力・速度同時反復法を採用している。

完成させた解法で、円柱（自由表面なし、波浪中）、車等に対して実証計算を実施した。一様流の場合、円柱表面上の圧力分布と、波浪中円柱まわりの渦度分布の一例を図 2.1.16 と図 2.1.17 に示す。複雑形状の例として地面のない車の場合は、 $Rn = 2.7 \times 10^6$ (時速 36.0 Km/H) で計算ができた。

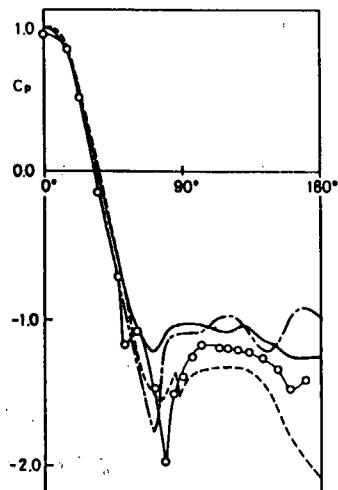


図 2.1.16
円柱表面上の平均圧力分布

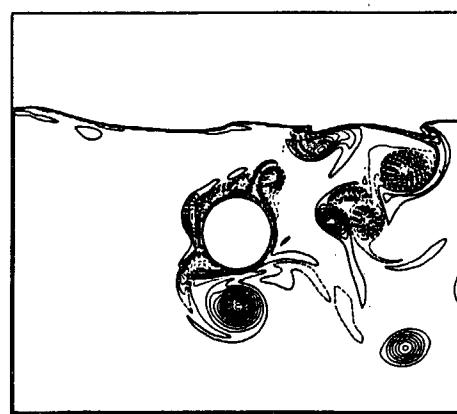


図 2.1.17
自由表面がある場合の円柱のまわりの等渦度分布図、 $K_c = 3.86$

(c) 船体まわりのレイノルズ平均NS方程式の差分法解

(i) 児玉の方法

(1) 計算法の概要

児玉の方法では、連続の式に擬似圧縮性を導入して運動量の保存則であるNS方程式と連立させて解く。

空間微分項には近似因数分解法(IAF法)を用いる。時間依存形の方程式を用いて非定常問題を計算し、収束解として定常解を得る。乱流モデルとしてはBaldwin-Lomaxのゼロ方程式モデルを用いる。自由表面は対称面として取り扱う。空間差分式は2次あるいは4次の中心差分に4階の数値散逸項を加えた形を用いる。時間微分はEuler implicitを用いる。計算格子は、船体表面形状を双三次スプラインで表現し、船体表面格子を幾何学的方法を用いて生成した後、空間格子を同じく幾何学的方法を用いて生成する。

(2) 昭和62年度の検討結果

昭和62年度には、本計算法を非保存形の定式化のもとに、数式船型であるWigley船型まわりのレイノルズ数 $R_n = 10^6$ の流れに適用した。4階の数値散逸項の大きさを2種類変えて計算を行ったが、数値散逸項が小さいほうは伴流分布がやや細くなる傾向が見られた。船体表面圧力分布及び伴流分布の実験値との一致度は比較的良好であったが、せん断応力分布は実験値よりもかなり小さめの値が得られた。また、船首尾で圧力分布にやや振動が存在した。

(3) 昭和63年度の検討結果

昭和63年度には、実用船型まわりの計算を可能にするため、任意船型まわりの格子生成プログラムを新たに開発した。それを用いてSeries 60($C_b = 0.6$)船型まわりの格子を生成した。

NS solverを、従来の非保存形から保存形に改良した。これによって、圧力分布に見られていた数値的な振動が無くなり、滑らかな分布が得られるようになった。また、高レイノルズ数計算における数値安定性が改善された。このsolverと先に生成した格子を用いてSeries 60($C_b = 0.6$)まわりのレイノルズ数 $R_n = 10^6$ の流れを計算した。圧力分布は実験値とよく一致したが、伴流分布は実験値よりもやや広めとなつた。

(4) 今後の課題

今後は、乱流モデルを改良して実験値との一致度を高めるとともに、数値安定性をさらに向上させて計算時間の短縮をはかることが課題である。

(ii) IHIの方法

(1) 計算法の概要

IHIの方法では時間平均したNS方程式、すなわちレイノルズ方程式を支配方程式とし、乱流の計算には $k-\epsilon$ モデルを採用する。計算する未知数は流速の3成分 u, v, w と圧力 p 、および乱流の特性量 k, ϵ である。定常状態の支配方程式を有限体積法により差分化し、SIMPLE法を用いて計算する。差分スキームには2次中心差分と1次上流差分を組み合わせたハイブリッド・スキームを利用する。計算格子にはThompsonの方法で生成した物体適合格子を用いる。

(2) 昭和62年度の検討結果

昭和62年度には、本計算法をフレーム・ライン形状が異なる3隻の数式船型に適用して実験結果と比較し、計算精度を評価するとともに船型の変化に対する計算結果の追従性を調査した。その結果、本計算法は船型の違いによる流場や圧力の変化をとらえることができ、また縦渦の弱い船型の場合には計算結果は定量的にも実験結果とよく一致することがわかった。ただし圧力の収束性が悪く、また縦渦が強い場合に

は計算結果と実験結果の一一致度は悪化した。後者については、旋回流の計算例から、等方性乱流を仮定した標準の $k-\epsilon$ モデルに原因があると考えられた。

(イ) 昭和 63 年度の検討結果

昭和 63 年度には、前年度の結果をふまえ、まず圧力の収束性を改善した。これは、外部境界における圧力の境界条件の設定方法の改良によるもので、実用的な計算時間内ではほぼ完全な収束解が得られるようになった。次に、この計算法を Wigley 船型に適用し、格子数、計算領域の影響等を検討するとともに実測との詳細な比較を行った。その結果、本計算法は格子数、計算領域をある程度大きくとれば、それらに敏感に依存しない安定な解が得られることがわかり、また計算で得られる抵抗値は定性的な検討には使える程度の精度をもつことがわかった。さらに本計算法を実用船型に適用できるよう拡張し、Series 60 の計算をおこなった。

(ロ) 今後の課題

今後は、計算精度の向上、とくに乱流モデルの改良が重要な課題である。

(ミ) まとめ

ここでは、上記 2 種の計算法の比較について述べる。

(イ) 計算手法

前者(児玉の方法)は対流項を 2 次中心差分と 4 階の数値散逸項との組み合わせで扱っており、後者(IHI の方法)では 2 次中心差分と 1 次上流差分の組み合わせで扱う。そのため後者では 2 階の数値粘性項が入る可能性があり、物理的な粘性と干渉する恐れがある。前者ではその恐れはないが、4 階の数値散逸項の大きさを適当な値に調節する手間がかかる。また、圧力振動がおきやすい。乱流モデルは、前者ではゼロ方程式系のモデルを、後者では 2 方程式系の $k-\epsilon$ モデルを用いている。

(ロ) 計算結果

両者には計算手法・乱流モデルなど大きな相違があるにもかかわらず、Series 60 ($C_b = 0.6$) に関しては非常に似通った計算結果が得られた。ここでは前者の計算結果を代表として示す。図 2.1.18 に船体表面圧力分布を示す。実験値は、曳航水槽でレイノルズ数 $R_n = 7.7 \times 10^6$ 、フルード数 $F_n = 0.22$ の下に得られた。両者は良く一致している。midshipあたりの不一致は自由表面の影響と思われる。図 2.1.19 に midship での主流方向速度 u 及び面内速度分布を示す。両者はよく一致している。図 2.1.20 に A.P. での速度分布を示す。伴流分布は計算値の方が広めであり、縦渦の発達はかなり良くとらえられている。

(イ) 今後の課題

ひとつは、汎用性の高い格子生成プログラムを整備する必要がある。また、計算値と実験値との不一致の主な原因と思われる乱流モデルを改良する必要がある。そのためには、信頼できる実験データの蓄積が重要である。

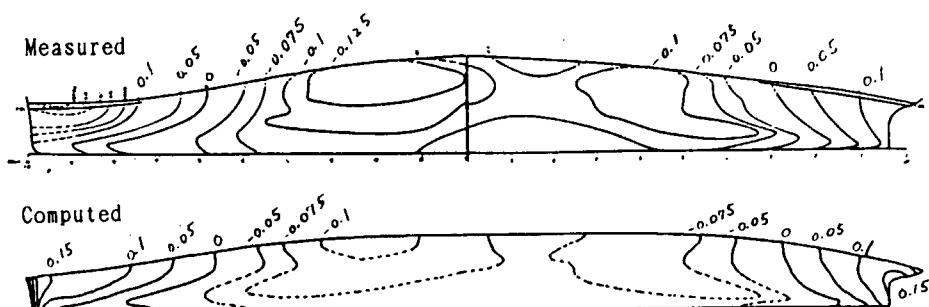


図 2.1.18 船体表面圧力分布

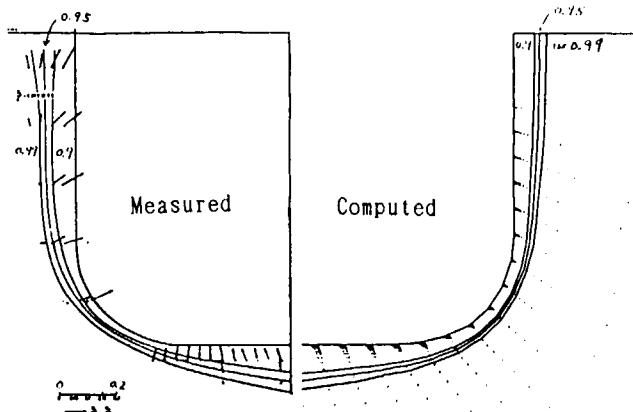


図 2.1.19 Midship での速度分布

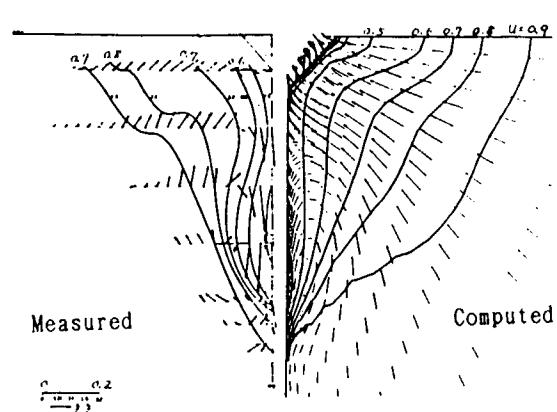


図 2.1.20 A.P. での速度分布

(2) 境界要素法による水波計算法

水波計算に用いられている境界要素法として、速度ポテンシャルを未知数として解く直接法と吹出しなどの特異点分布を未知数として解く間接法とがある。ここでは、まず間接法の代表的な方法として良く用いられるRankine Source 法 (Dawson 法) を用いる計算法の問題点と、この計算法を船の推進性能計算に適用する可能性について調査した結果を述べ、次に直接法を用いて非線形水波を計算する手法について検討した結果を述べる。

(a) Rankine Source 法

Dawson 法を用いて、2 次元および 3 次元点吹出しと二重吹出しによる波を求めて解析解と比較検討したところ、数値解が使用する差分式によって大幅に変ること、計算領域の後端やメッシュの大きさを変えた位置近傍で静水面吹出し分布が振動すること、計算領域を小さく取ると解が発散することなどの問題点が明らかになった。九州大学でこれらの欠点を除いた差分式を用いない方法を開発し、解析解とも良い一致を示す方法であること及び没水体にも有効に使用できることを確かめたが、船など水面を貫通する物体に対してはあまり良い結果が得られていない。図 2.1.21 は、2 次元の点二重吹出しによる波高と静水面上吹出し分布の比較を示しており、本方法により Dawson 法の欠点が改善されているのが分る。

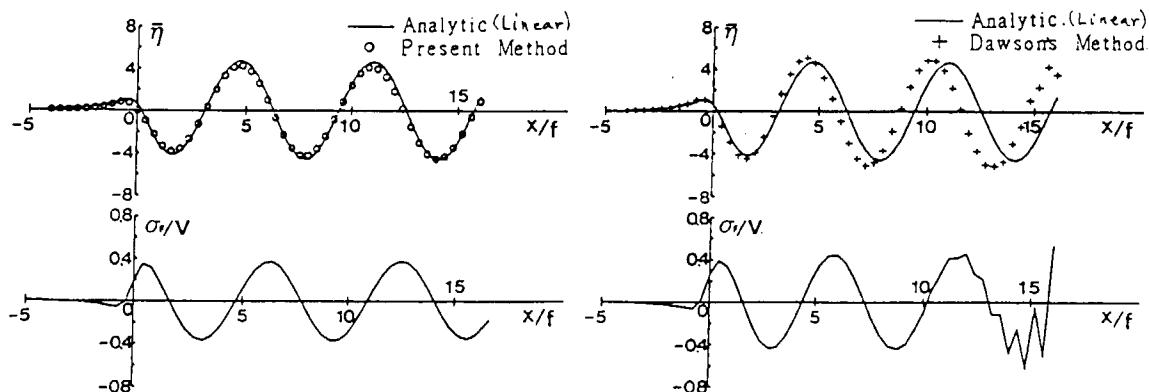


図 2.1.21 波高と吹出し分布の比較 (2-D 点二重吹出し)

次に、水産工学研究所において Wigley 船型に対して計算を行い、Dawson 法においては、船体表面吹出しに及ぼす自由表面影響が船体表面条件を左右する重要な成分であることを確かめ、さらに Series 60 ($C_b = 0.6$) 船型に対して計算を行い、静水面パネルの流線方向の分割の仕方によって、解の形や大きさがかなり変化することを確認した。つまり、船の横方向の分割は一定にして、流線方向の分割数と船首尾近くの分割の仕方 ($\alpha = 1.0$ は等分割、 $\alpha = 0$ は船首尾の分割が密になっている) を変えて、TB 350、TB 450、TB 520、TB 590 ($\alpha = 0 \sim 1.0$) という全部で 20 種類のパネルについて、これらのパネルの影響について検討した。図 2.1.22 に TB 590 のパネル分割例、図 2.1.23 にパネルによる船側波形の変化の様子を示す。これらの結果より、分割数を増すと船側波形の実験値との一致は良くなる方向へ行くが、船首尾の分割を増すと船首波が実測値より尖った形状になるなどの問題点も明らかになった。しかし、この計算法は粘性の影響を含んでいないが実測値に近い値を与えており、従来の解析解より計算も容易で、計算時間や計算費用の少なさを考えると、船の造波現象を予測する上で実用上役に立つ計算法と言える。

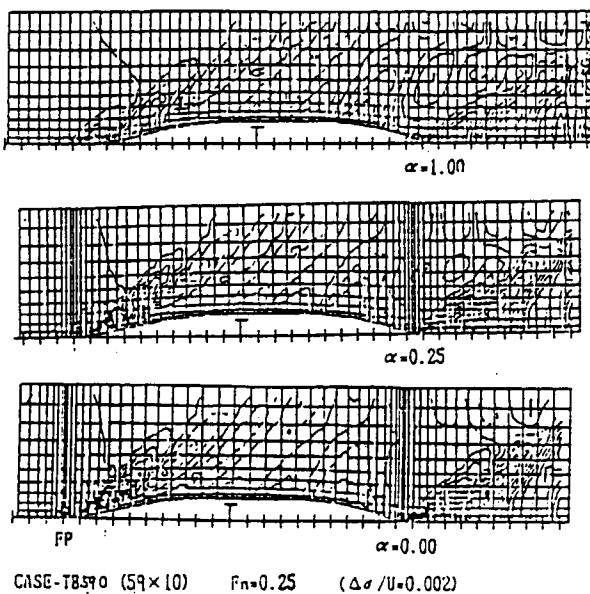


図 2.1.22 静水面パネル分割例 TB 590

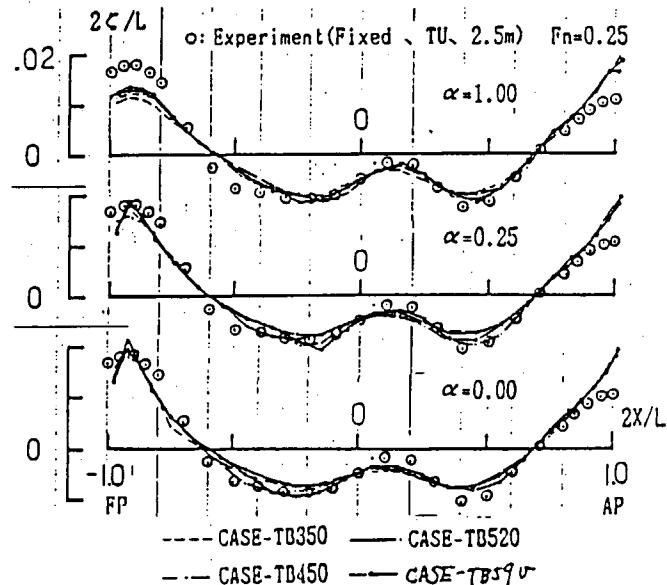


図 2.1.23 船側波形の比較

さらに、Dawson 法の可能性を調査するために九州大学において、これを比較的自由表面の影響が大きい場合の船の推進性能の計算に適用して検討を行った。粘性影響は船の摩擦抵抗とプロペラ面の粘性伴流率の形で考慮しているに過ぎないが、Wigley 船型と舵の組合せに対する実験結果から得られた推力減少率や有効伴流率の傾向、特に船速と共にこれらの値が波打つ傾向が計算によって求められ、Dawson 法が船の推進性能の計算にも適用できることを確かめた。今後は粘性流れの影響および船の姿勢変化の影響をどう計算するかが問題であろう。

(b) 直接法

広島大学において、直接法による非線形水波の計算が没水球と半没水高速船に適用されている。境界を三角形パネルで囲み、パネル内では速度ポテンシャルが線形的に変化するので、ふつう良く使われている Hess-Smith 法の四角形パネルと一定吹出しを用いる方法よりかなり計算精度は上っている。図 2.1.24 に没水球上

の波面の発達状況、図 2.1.25 に造波抵抗係数の収束の様子を示す。このように波の発達の状況や造波抵抗値ももっともらしいものが得られており、今後の発展 — 特に船体への適用 — が期待される。非定常計算を繰り返して定常状態を得るため、計算時間と計算費用は、Dawson 法に比べるとかなり大きなものとなる。この計算法においても、非粘性流体に対する計算であるため、粘性流れの影響および船の姿勢変化の影響をどう計算するかが問題となろう。

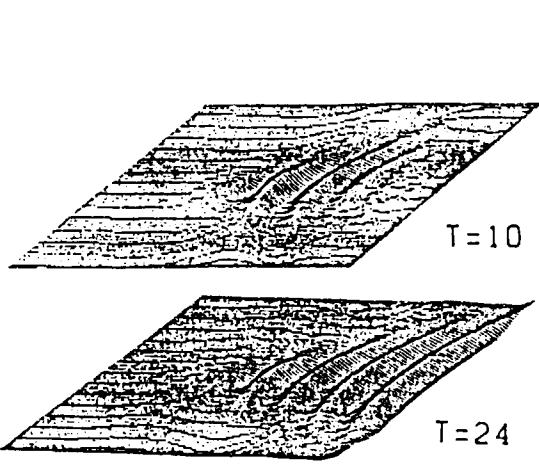


図 2.1.24 没水球上の波面の発達状況

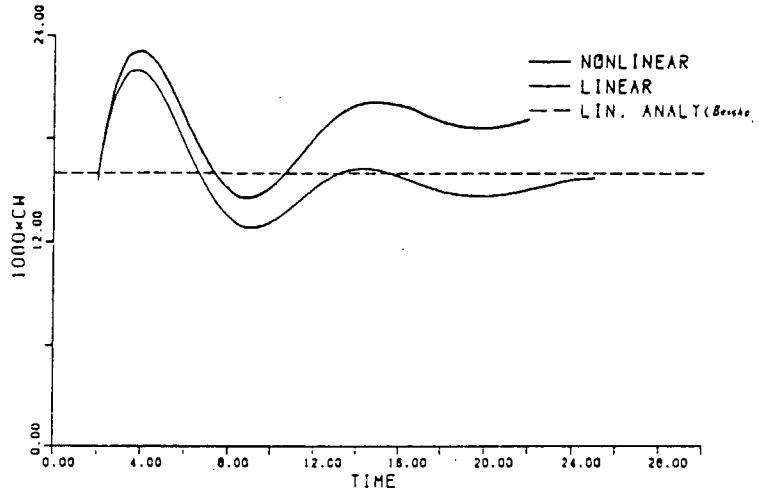


図 2.1.25 没水球の造波抵抗係数の収束の様子

(3) その他の計算法

(a) Neumann-Kelvin 法

造波抵抗を、計算で求めるには、波の効果を含んだ核関数を有する積分方程式を解かねばならない。こうした波核関数を計算する方法はいくつか提案されているが、殆どが莫大な計算量を必要とするものであり、問題を解く上でネックとなっている。波核関数の表示式として Bessho の提案した一重積分表示を用いて、積分路として最急降下線を採用することにより短時間で精度良く計算できるプログラムを開発中である。数値積分としては計算精度を予め指定できる Newton-Cotes 系の QUANC 8 なる積分公式を用い、最急降下線については、B-Spline 補間を行なっている。計算結果の例を図 2.1.26 に示す。水面下 -0.01 に置いた点吹き出しの水面上における速度ポテンシャルの等高線である ($\chi = \pi$)。今後、精度等の細かい検証を経て、斜行平板、実船と対象を拡げていく必要がある。

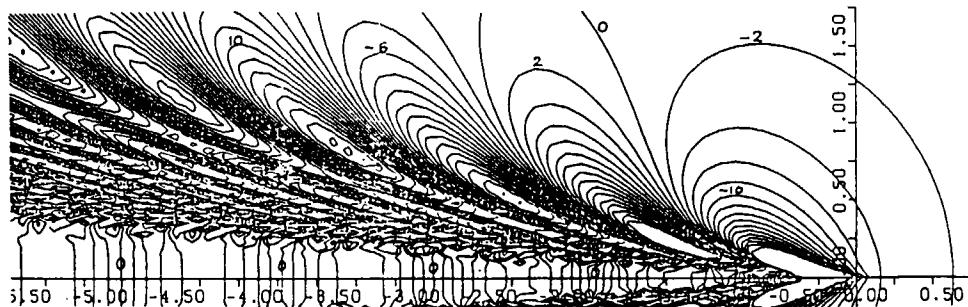


図 2.1.26 波吹き出しの速度ポテンシャル等高線

(b) 厚い境界層理論

境界層方程式の積分的解法の外端条件に、Rankine Source 法による造波の影響を考慮して、Wigley 模型のプロペラ円内伴流分布を計算した。図 2.1.27 に各半径毎の円周方向分布図を示す。

船体主要目：長 = 25 m、幅 = 0.25 m、喫水 = 0.15625 m

プロペラ要目：直径 = 0.1 m、位置 = A.P. より 1 % 船長後方

プロペラ軸心水深 = 75 % 直径

計算条件：フルード数 $F_n = 0.33$ 、レイノルズ数 $R_n = 3.37 \times 10^6$

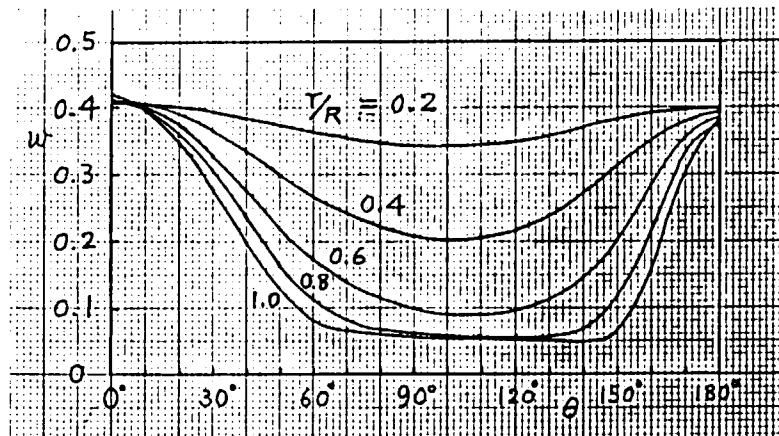


図 2.1.27 Wigley 模型プロペラ円内伴流分布

(4) 流場計測手法の調査

(a) 現状技術の調査

大規模数値シミュレーション結果の評価に必要となる船体まわりの流場計測に関して、現在使われている技術について文献調査を行い、いくつかの項目に関しては調査・実験も実施した。まず現在水槽実験などに使用されている代表的な流場計測技術を表 2.1.4 にまとめて示す。表では流場を表す物理量として、波形、圧力、流速のみを取り上げている。

まず、波形計測については、波高計を使って計測される方法が最も一般的であるが、これによって船体まわりの波形パターンを計測することは困難である。この種の計測にはステレオ写真法など 3 次元計測手法を用いる必要があるが、かなり大がかりな実験・解析になるため、現状ではあまり多く実施されていない。今後は画像解析の技術を導入し、より簡単に利用できるシステムの開発が必要と思われる。

船体表面の圧力分布計測法そのものについてはあまり大きな問題がなく、船尾流場内の圧力分布を 5 孔管を使って計測するため、その計測精度を調べた。その結果、3 次元流中においてもかなりの精度で圧力分布の計測が可能であることがわかった。5 孔管は平均流や圧力を計測するものとしては非常に使いやすく、実用的である。数値計算による結果を実験結果と比較し、評価するためには、平均流速のみならず乱流成分の計測が不可欠である。現状技術の中で最も容易に乱流計測を可能にするものは、熱線流速計およびレーザドップラ流速計 (LDV) である。これらについては、その原理、使用法を調べると共に、問題点を抽出して調査・実験も行った。その結果、これらの計測法は非定常流や乱流においても適用できる特徴を持っており、非常にすぐれた手法ではあるが、水槽実験で手軽に使うためには、熱線の温度特性によるドリフトの問題や、LDVにおける最適なシーディングの問題など、問題点も多いことが明かになった。

表2.1.4 船体まわりの流場計測法(現状)

対象流場など		センサーなど	特徴など
波形	船首、船尾流場	波高計(サーボ式、抵抗式、容量式)	点計測(波形の時系列データ計測)
		ステレオ写真法	面計測、3次元的な波形を計測、画像解析技術の導入必要
圧力	船体表面圧力分布	圧力孔+圧力計 (マノメーター、半導体式、亞ゲージ式)	定常流れの場合は、多点計測のためにスキニーバルブを使用
	流場内の圧力分布	ピトー管+圧力計	1次元流で使用、3次元流では局所流向にピトー管を向ける装置必要
		5孔管+圧力計	3次元流で使用可能、精度に注意

	流速計		計測成分	特徴など	適用する流体など
流速	翼車式流速計		1次元	一様流などの平均流速計測に適す、曳引車の対水速度など	水流、気流
	ピトー管		1次元 2次元 3次元	定常流の平均流速、手軽な計測法 境界層内の流速分布などの2次元分布 船尾後流などの3次元流で最もよく用いられている、圧力計測も可能	水流、気流 平均流(定常流)
	熱線流速計	ホットフィルム	1次元 3次元 2、3次元	比較的手軽に使えるセンサー プローブを回転させて時間平均を解析し、3次元流速成分を求める 2次元成分の計測が簡単に行える、90度回転させて3次元成分計測	水流 平均流、乱流
		ホットワイヤー	1次元 3次元 2、3次元	最も広く使われているプローブ 回転させて3次元成分を計測、ウェッジ型ホットフィルムに対応 2次元流速成分のタイムヒストリー計測可能、V型ホットフィルムに対応	気流 平均流、乱流
	レーザドップラ流速計 (LDV)	1カラー 2カラー 3カラー	1次元 2次元 3次元	前方散乱型は手軽に使える、乱流も計測可能 光ファイバーを使った後方散乱型はプロペラまわりの流場計測に使われる 大がかりなシステムになるが、最も強力な計測法	水流、気流 平均流、乱流

(b) 新しい計測法の調査

上述したように現状の計測技術に関する調査から、定常流の平均流速や圧力分布の計測のためには5孔ピトー管などの圧力を利用する計測法がよいことが確認されたが、非定常流や乱流計測のためには、応答速度の早い熱線流速計や非接触計測を実現するレーザドップラ流速計(LDV)などの使用が不可欠である。しかしながら、これらの流速計を曳航水槽などで使うためには種々の問題点を解決する必要があることも明らかになった。

大規模数値シミュレーションによって得られる結果の量は膨大で、詳細(平均流速のみならず、乱流成分、圧力分布、温度分布など)であることが多い、これに対応する計測としては大量のデータを短時間のうちに処理できるシステムを考える必要がある。前節で述べた現状のシステムはどれも、原理的に局所流の計測法であり、流場全体を把握するためには流速計を移動させながら一点づつ計測しなければならないので、大量データの処理には適当でない。したがって、これらの問題点を解決するためには、従来とは異なる新しい計測システムの開発・導入が必要と思われる。

ここでは、最近の新しい計測技術として、レーザを用いた方法と、画像解析を用いた方法についてその特徴、将来性などについて調査した。これらの手法のはほとんどは、流体中にセンサーを挿入しない、いわゆる非接触計測であり、瞬時にある平面上あるいは空間領域における広域計測が可能である。今後は、このような計測システムの開発が重要であり、中でも画像解析技術の導入が大きな鍵になっていることが明らかになった。画像解析を利用して流場の速度場を計測する手法を表2.1.5にまとめて示した。これらの手法の中で相関法によるものが現状ではかなり実用的である。近い将来の目標としては実時間計測の実現であり、さらに3次元計測、非定常流への適用へと進展するものと期待される。

表 2.1.5 画像解析を利用する流場計測法

	手 法	原理、解析法など	特徴、利点など	問題点など	今後の発展性
一定時間露光	タイムライン法	水素気泡、煙、レーザによる螢光などによってタイムライン発生させる	流速分布の可視化が容易	分解能小	レーザ蛍光法に期待
	流跡線追跡法	トレーサー粒子による流跡を撮影 流跡線の長さから流速を求める	原理は簡単明瞭	分解能比較的大 交差流線の分離処理必要 速度ペクトルの決定複雑	将来の発展性小
2次元計測	画像差最小法	2枚の画像の差が最小になる変位を求める (流場を小ブロックに分割)	処理時間短い 大きな物体認識に適す	分解能小、多数のトレーサー粒子には適さない	適用範囲を限って、大きなマーカー追跡に適す
	相関法	トレーサー粒子の対応を相関係数を使って求める (流場を小ブロックに分割)	処理時間短い アルゴリズム簡単 マイコン処理に適す	分解能小 鮮明な画像データが必要	計測誤差の自己評価法の確立必要 かなり実用的
	フーリエ変換法	画像データをフーリエ変換し、周波数領域で解析 (流場を小ブロックに分割)	周波数フィルターの利用可 乱動検出の可能性あり 光学処理との対比容易	処理時間長い 分解能は悪い	他の手法と併用、光学情報処理とのハイブリッド化に期待
	時空間微分法	画像の空間微分と時間微分を使用 (画像を微小変位したと仮定する)	分解能大、計測誤差の自己評価可能 処理時間長くない	雑音の影響大 画像データが大きく変化すると解析できない	可視化法の工夫必要 高速処理化容易 将来性あり
	連続画像	ステレオ写真法 複数台のカメラを使ってトレーサー粒子の空間移動を追跡	3次元流速成分が求められる 粒子の形状も認識できる	システムは比較的大がかり	計測精度を上げる 乱流成分も計測可能
3次元計測	レーザトモグラフィ	液体中の物質によるレーザの吸収を計測 3次元的構造を求める	3次元的構造の把握に適す	ハード面の遅れが適用範囲を制限している	投影データの高速サンプリング必要

(5) 海外調査

計算流体力学は大型計算機の発達とともに、航空、気象、機械などの流体力学の各分野で飛躍的な進歩を遂げてきた。そこで、最も活発に計算を行っている米国を訪問し、最新の計算技術についての情報収集を行った。日程表を表 2.1.6 に示す。最初に訪問した Stanford 大学は NASA Ames 研究所とともに乱流の数値シミュレーションを最も盛んに行ってきた機関であり、その推進者の一人である機械工学科の Ferziger 教授を訪ね、非圧縮性粘性流の計算方法と乱流モデルに関する情報を収集した。次に Caltech の航空学科の Coles 教授を訪ね、乱流に関する実験的研究の動向を調査した。Williamsburg の会議には各国から計算流体力学の研究者が約 200 名参加し、100 余りの論文が発表された。ここで行われた活発な討論によって、最も効率よく計算流体力学の現状と問題点についての情報を収集することができた。また NASA Langley 研究所を訪ね、大規模な超音速風洞や空中戦のシミュレーション・ドームなどの施設を見学した。最後に訪問した MIT では海洋工学科の Yue 教授と計算流体力学の現状について情報交換を行った。

これまでの計算流体力学では有限差分法が圧倒的に優勢であったが、Williamsburg の会議では非圧縮性流体の計算について大部分が、また圧縮性流体の計算でも半数以上が、有限体積法に基づいた離散化を行っている。この新しい傾向は複雑な形状の領域において十分なめらかな structured grid を作ることの難しさによるものと考えられる。grid の歪が大きい structured grid でも保存性を満足させやすい有限体積法と unstructured grid でも計算できる有限要素法が勢力を伸ばしている。時間積分の方法は様々であるが、空間微分の離散化法は TVD (Total Variation Diminishing) の考え方を統合されつつある。多くの計算で計算の効率を上げるために multigrid 法が取り込まれている。また multiprocessor computer を用いて並列化による高速化を示した計算がいくつか見られた。非圧縮粘性流の計算では MAC 法のはか、Chorin の擬似圧縮性を導入する方法がよく用いられている。これは非圧縮性流体の支配方程式を性質のよく知られた双曲型の偏微分方程式に持ち込むという利点がある。また、適合座標系での保存性を考えた方法も提案されている。

計算流体力学の最先端をいく NASA Ames 研究所では CRAY-XMP 48 を中心に構成された計算センター(AC

F) とは別に、数値風洞専用としてNAS(Numerical Aerodynamic Simulation Facility)が完成した。核となるHSP(High Speed Processor)はCRAY 2であり、これは4つのprocessorと256MWの主記憶を持ち、1720MFLOPSの計算速度を達成する。システムは発展型を目指しており、今後は常に2台のHSPを確保して1台づつ交互に最新機種に入れ替えていく計画という。スーパーコンピュータの性能については国内にも同程度のシステムはあるが、HSPを支えるSPS(Support Processor System)には大きな差がある。3次元グラフィック装置についてはSGI社のIRISが数十台、研究者2、3人に1台の割合で配置されている。また入出力装置やデータ転送の管理と制御はAMDAHL 5840とVAX 11/780を数台組み合わせた専用機で行い、効率化とユーザーの便宜を計っている。OSはUNIXに統一されており、ユーザーはどの計算機でも同じ体系を利用できる。わが国でも今後、計算技術の開発と共に、ネットワークの有効利用やOSの統一、簡素化、開発の分業体制など、計算流体力学の開発者の負担を軽減するような環境の整備が必要と思われる。

表 2.1.6 日 程 表

訪問日	訪問先	面会者
6/20 - 6/21	Stanford University	Prof. Ferziger
6/23 - 6/24	California Institute of Technology	Prof. Coles, Prof. Wu, Dr. Williamson
6/27 - 7/1	11th International Conference on Numerical Methods in Fluid Dynamics, Williamsburg	
6/29	NASA Langley Research Center	
7/5	Massachusetts Institute of Technology	Prof. Yue

2.1.3 研究開発課題と解決策

前節で述べた各種の解析手法を改良するのに今後実施すべき開発課題と解決策を要約すると以下の通りとなる。

(1) NS 方程式の差分解法

(a) 2次元粘性流の各種計算法

各種の差分スキーム、格子間隔、数値散逸、乱流モデル等について調査した結果、

(i) 格子系による解像力の変化は渦の放出過程などの流れのパターンそのものを変えてしまい、計算結果に大きな影響を与えること。

(ii) 4階微分の非線形数値散逸が大きすぎると、逆流域が大きくなってしまって拡散効果が生じ、一方数値散逸が小さすぎると解像力不足による振動が拡大して計算が発散する。

などが分かった。今後の開発課題としては、

(i) 解の信頼性にとって重要な数値散逸量の最適化

(ii) さらに水波計算を含む場合、十分な計算領域をとるための計算効率の向上

を考えられ、この課題の解決には

(i) 数値散逸量の最適化に関する基礎的研究

(ii) 水波計算等については、開境界の扱い方に関する研究及び高効率計算法の研究

が必要とされる。

(b) 船体周りの3次元Navier-Stokes 方程式の差分解法

Navier-Stokes 方程式の差分解法において、計算の解像力にとって重要な非線形数値散逸項の取り扱いについて、上述した2次元流の場合と同じく、3次元流について基礎的な調査を先ず実施した。その結果、

(i) 2次元流と同じく格子間隔の取り方が計算の解像力に大きく影響すること

- (ii) 3次元特有の縦渦構造を捉えうる程度の格子間隔や計算領域の広がりが必要なこと等が分かった。さらに、
- (iii) 連続の条件に対する圧力のポアソン方程式の解法について、ベクトル演算に適したアルゴリズムの研究が課題として指摘される。

次に実際の3次元船体形状について、現有的計算コードを用いて以下の各種計算を実施した。

(i) 水波計算

東京大学で開発された計算コードTUMMAC Nを用いて、 $C_b = 0.8$ の肥大船の船首周り水波計算及び、Wigley 船型の高速域(フルード数 0.4, 0.6)の計算を実施した。この結果、

- (1) 実用船型の船体前半部形状の相対的性能評価には使えること、
 - (2) 高速船の高速航行時の造波計算にも応用できそうであることが示された。
 - (ii) 水波・粘性流の同時計算
- 水波と粘性流を同時に解くために開発されたWISDAM-II及び日野の方法による計算を実施した。現状は、
- (1) 粘性流の解像度が未だ不十分であり、レイノルズ数の上限も 10^5 程度である。
 - (2) WISDAM-IIの場合、任意の船体形状への適用にはなお改良の余地がある。

などが指摘される。今後の開発課題として

- (1) 差分スキーム、格子系の改良
 - (2) 工学的に利用できるレイノルズ数域での計算ができるようにする
- ことが考えられ、具体的な解決策は次のような諸検討を行うことによって見出される。
- (1) WISDAM-IIに関しては、格子系、NS 方程式の展開法を含めて再調査し、計算スキームの改良、Staggered 格子系の導入検討、任意形状に適用可能な新格子生成法の案出。
 - (2) 日野の方法においては、適切な乱流モデルの導入、即ちゼロ方程式モデル、2方程式モデル、LES 法などを比較検討し、最適なものを組み込むことにより、高レイノルズ数化を計る。

さらに、水波計算をより実用性のあるものにするには

- (1) 粘性による波の伝播減衰、船体と自由表面の境界面での表面張力など複雑な現象を解明できる手法
 - (2) 極めて非線形な現象である碎波現象などをシミュレートする方法
- 等の開発が必要とされる。

(c) 船体周り流れのレイノルズ平均Navier-Stokes 方程式の差分解法

適当な乱流モデルを導入することにより、実用域のレイノルズ数における船体周り流れを計算するレイノルズ平均NS 方程式の解法において、

- (i) 連続の式に擬似圧縮性を導入して、NS 方程式と連立させ、乱流モデルとして Baldwin-Lomax のゼロ方程式モデルを使う児玉の方法と、
- (ii) 定常状態の支配方程式を有限体積法により差分化し、乱流モデルとして 2 方程式系の $k-\epsilon$ モデルを用いて解く IHI の方法

について調査した。両者は計算手法や乱流モデルなどの大幅な相違があるにもかかわらず、実用船型として計算対象に使った Series 60 ($C_b = 0.6$) に関しては、非常に似かよった計算結果が得られた。また、圧力分布や流速分布など実験値に近いものが得られた。現在のところ計算はレイノルズ数 10^6 に達している。この調査により、

- (i) レイノルズ平均NS 解法により通常の船体周りの粘性流の計算は相当に実用性を帯び、定性的な性能評価

に使える段階に今一歩と云えるので、より広い範囲の船型への応用を試みること、

- (ii) また船尾縦溝の強い船型については、実験との一致が劣る傾向にあり、精度向上のためには乱流モデルの改良が必要とされる。

従って、今後の対策としては、差分スキームに関する高度化研究に合わせ、

- (i) 汎用性の高い格子生成プログラムを整備すること、例えば解適合格子生成法、多種格子生成法、領域分割格子生成法などの研究

- (ii) 計算値と実験値の不一致の原因と思われる乱流モデルを改良すること。例えばゼロ方程式モデルの高度化、2方程式モデルの開発、LES法用のモデル化など。このためには、

- (iii) 信頼できる実験データの蓄積を行う

ことが挙げられる。

(2) 境界要素法による水波計算法

船体周囲流場の特徴である自由表面水波の計算については、上述の差分解法の他に、理想流体として扱い計算時間を短縮できる境界要素法による解法がある。本調査研究では

- (i) 速度ポテンシャルを未知数として解く直接解法

- (ii) 吹き出しなど特異点分布を未知数として解く間接法

について、基本的調査を解析解と比較しながら、解法の改良を重ね、パネルの配置法や数が解に与える影響を調査した。この結果、

- (i) 間接法の1つであるRankine Source 法では、実用船型の造波抵抗の計算値は、実験値と比較的良く一致しており、船型の造波特性の優劣評価には十分使えること

- (ii) 直接法においては、現在のところ水中航走体についての計算であるが、波の発達の状況や造波抵抗値ももっともらしい値が得られているので、今後船体への適用検討が期待される。

- (iii) 本手法は計算時間が短いので、船型とプロペラの造波干渉などの繰り返し計算に適し、船の推進性能計算への拡張が期待できる。

但し、粘性流れの影響や船の姿勢変化の影響などをどう評価するかが課題として残る。

なお、上述の諸数値解析法の外に水波計算として、Neumann-Kelvin 法の調査、及び厚い境界層理論を応用した伴流分布の計算法について調査した。これらの調査で得た知見は、上述の直接数値解との比較評価に利用される。

(3) 流場計測手法

上述したように船体周り流場の直接解法の評価ならびに改良研究には、精度の高い流動計測データが必要とされる。定常流の平均流速や圧力分布の計測のためには5孔ピトー管などの圧力を利用する計測法が良いことが確認されたが、非定常流や乱流計測のためには、応答速度の速い熱線流速計や非接触計測を実現するレーザ流速計(LDV)が不可欠である。これらを曳航水槽で利用する場合種々の課題がある。例えば、

- (i) 热線流速計の温度特性によるドリフト

- (ii) LDVにおける最適なシーディング

等が考えられる。また、これらの手法は局所流の計測であり、流場全体を把握するためには流速計を移動させながら一点づつ計測しなければならないので、大量データの処理には適当ではない。これに対処するためには従来にない新しい計測システムの開発が必要である。現在開発の途上にあるものとして、瞬時にある平面上あるいは空間領域における広域計測が可能な画像解析技術を使った手法が考えられる。この新しい計測技術を船体周りの

3次元非定常流計測へ応用していくことも、数値解析手法の改良発展にとって重要である。

2.2 波浪中抵抗増加理論の高度化に関する調査研究

2.2.1 現状と問題点

(1) 波浪中抵抗増加に関する現状調査

(a) 数値計算法の現状調査

現状の波浪中抵抗増加の計算法はいずれも線形ポテンシャル理論の上に組み立てられており、その方法には2つの流れがある。

第1の方法は、船体遠方の流場の速度ポテンシャルを基礎に抵抗増加を計算する方法で、丸尾の厳密公式および丸尾・石井・岩瀬の簡易化公式がある。これらは波浪中で運動する船体を表す特異点分布を介して抵抗増加を計算するものであるが、現実の3次元船型の船体表面の境界条件を厳密に満たすような特異点分布を決定して抵抗増加を計算する方法はまだ実用段階ではなく、通常は船体を細長体と仮定した線状特異点分布を用い、ストリップ法による運動計算と組み合わせて抵抗増加の計算が行われる。現在一般に用いられているのはこの系統の計算法である。

第2の方法は、船体近傍の流場の速度ポテンシャルを基礎に抵抗増加を計算する方法で、Faltinsenらの船体表面の圧力積分による方法、山本の運動量理論による近似計算法、などがある。しかし、これらの方法も具体的な計算段階ではストリップ法による2次元ポテンシャルを用いており、推定精度は第1の方法と同等と考えられる。

ところで、細長体の仮定に基づいた計算法では肥大船の短波長域で計測される比較的大きな抵抗増加を十分表し得ないことから、上記の計算法と船首部からの反射波に基づいた抵抗増加の実験式を組み合わせて推定する方法が藤井・高橋によって提案された。これに対し、理論に立脚した方法で短波長域の抵抗増加を求める研究が進められ、Faltinsen = 坂本・馬場の方法、大楠の方法、内藤の方法などが導かれている。

図2.2.1は、これまでに提案された各種の理論計算法とその適用範囲を示した図で、全波長域に適用できる計算法、短波長域を対象とした計算法、主として長波長域で有効な計算法とがある。

このような抵抗増加計算法の推

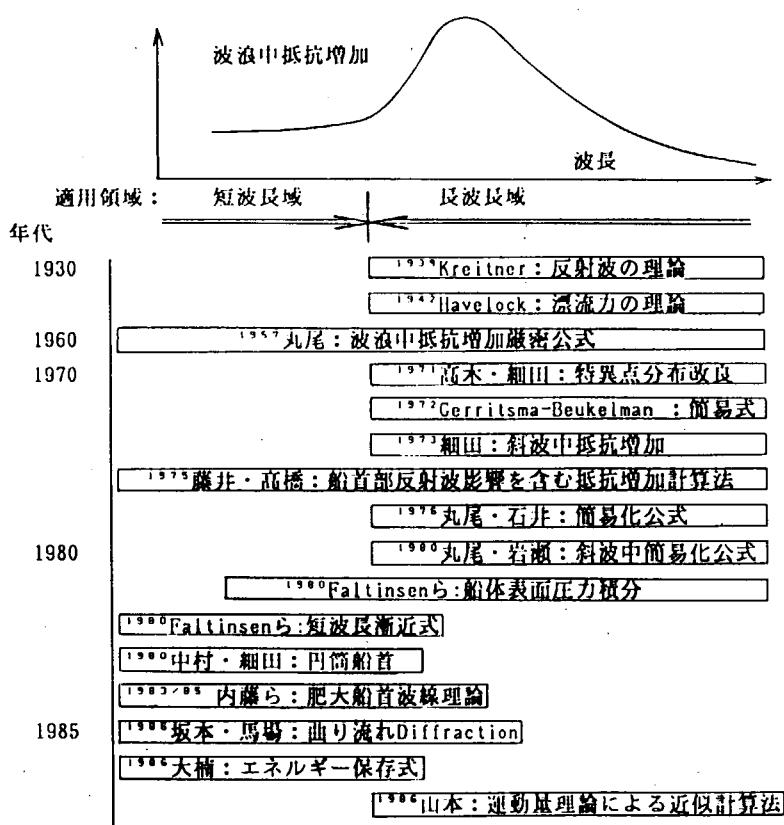


図2.2.1 波浪中抵抗増加の計算法と適用範囲

定精度と問題点を調査するため、各研究機関が保有している計算プログラムを用いて比較計算を実施した。対象船型は、やせ形船（SR108コンテナ船）と肥大船（SR196タンカー）で計算条件は次のように設定した。

SR108コンテナ船：満載状態、船速 $F_n = 0.15 \sim 0.3$

波長船長比 $\lambda/L = 0.2 \sim 2.0$ 、波方向 $\chi = 0 \sim 180 \text{ deg}$

SR196-Cタンカー：満載および軽荷状態、船速 $F_n = 0.129$

波長船長比 $\lambda/L = 0.2 \sim 2.0$ 、波方向 $\chi = 0 \sim 180 \text{ deg}$

抵抗増加の計算値は用いる船体運動の計算値によっても異なってくるので、計算法それ自体に基づく相異が明らかにできるよう船体運動の振幅・位相は各機関で同一のものを用いて比較を行った。代表的な計算結果を図2.2.2～図2.2.4に示す。

これらの調査および比較計算によって現状の計算法の推定精度と限界について次のようなことがわかった。

(i) 丸尾の厳密公式を用いる方法では、各機関で線状特異点分布の与え方がいくらか異なっているものの、やせ型船の場合は求められた抵抗増加の計算値にそれ程大きな差はなくほぼ一つにまとまっていると言える。また、実験値との比較でもほぼよい推定値を与えている〔図2.2.2参照〕。他の計算法でも向かい波では比較的よい数値を与えるが、なかには斜め追い波で大きな負の抵抗増加となり明らかに不合理と思われる結果を与える計算法もあり、注意が必要である〔図2.2.3参照〕。

(ii) これに対し肥大船の場合は、丸尾の厳密公式と線状特異点分布を用いた場合でも各機関で計算結果に差が見られ軽荷状態の抵抗増加係数で2程度の相違がある〔図2.2.4参照〕。なお、肥大船では横運動に基づく抵抗増加も見られるものの数値的にはそれ程大きくはなかった。

(iii) 比較計算の対象とした肥大船については波浪中抵抗増加の実験値がなく推定精度についての評価ができないので、今後の研究で水槽試験を行い実験データを取得した上で詳細な比較を行う必

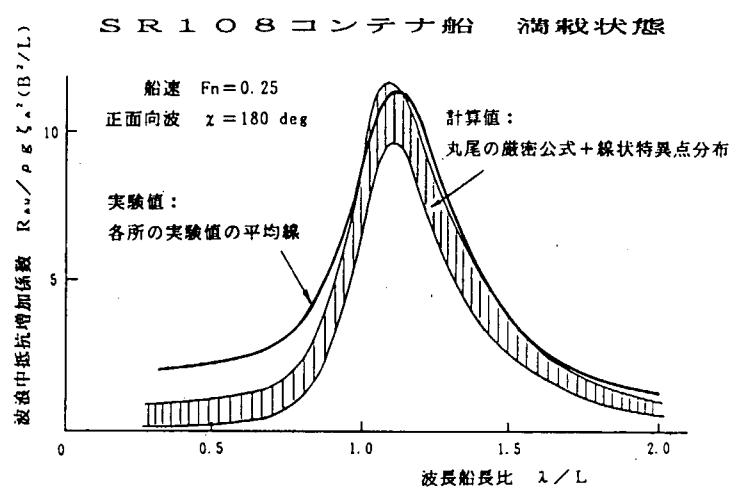


図2.2.2 波浪中抵抗増加の比較計算結果
(やせ形船、正面に向い波)

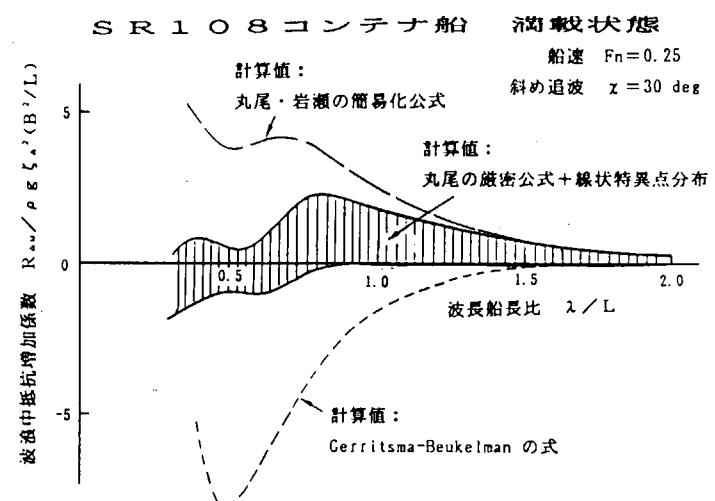


図2.2.3 波浪中抵抗増加の比較計算結果
(やせ形船、斜め追い波)

要がある。

(iv) 肥大船の短波長域の抵抗増加に関しては理論に基づく合理的な推定法が必要である。最近は理論的な研究がかなり進展してはいるものの適用範囲が限定されるなど、実用的に広く使用できるまでには至っていない。また、やせ型船においても短波長域の抵抗増加の計算値は実験値に比べて小さいので、その原因を分析する必要がある。

(v) 斜め波中の抵抗増加に関しては実験データが少なく、しかも実験の信頼性が正面向い波の場合よりも多少低いこともある。理論計算法の精度についての検証は必ずしも十分ではない。今後さらに比較検討が必要と考えられる。

(b) 計測手法の現状調査

波浪中抵抗増加に関する計測手法として、波浪中試験用の抵抗動力計、船体表面に作用する波浪変動圧力の計測法、波浪中の変動流速と流向の計測法、抵抗増加の実験データにおける非線形性やバラツキなどについて調査した。そのなかから代表的に正面向い波中の抵抗増加の計測法と非定常波紋計測法の2つを述べる。

(i) 波浪中抵抗増加計測法

波浪中の抵抗増加(R_{AW})は、波浪中における全抵抗(R_T)から平水中抵抗(R_0)を差し引いて求められる($R_{AW} = R_T - R_0$)。従って、直接計測するのは波浪中の全抵抗であるが、波浪中で運動している模型船の曳航抵抗を精度よく計測することは決して容易なことではなく、これまで各所それぞれに工夫をしながら抵抗動力計の開発をしてきた。

図2.2.5はアンケート調査によって集められた動力計のなかの代表例で、模型船の中央に船体運動計測装置を兼ねた曳航ロッドを取り付け、その曳航ロッドの下端に高精度の検力計を装着した形式のものである。このようにすればサブキャリッジの摩擦の影響が入らないので、全量型の動力計としては一応満足すべき分解能を得ることができる。サブキャリッジに付加する曳航力は、スプリング、振子式重錘、トルクモーターなどで与え、人手による微調整をしなくてよいシステムとしている。現在、正面向い波用の抵抗動力計はほぼこのような形式に固まりつつある。しかし、斜め波中となると、模型船に作用する波漂流力や回頭モーメントをどのようにバランスさせながら抵抗増加を計測するかという問題があり、試

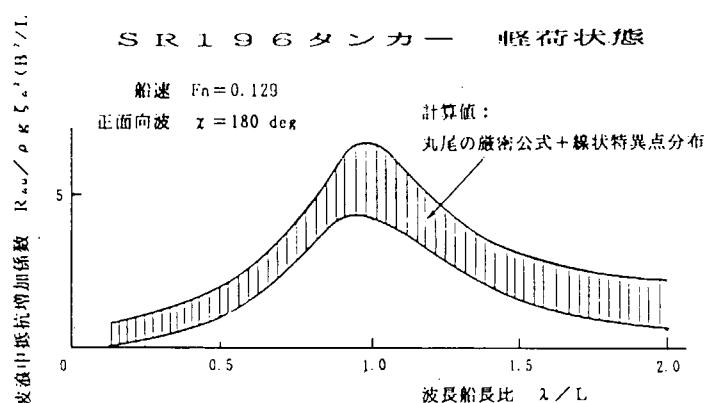


図2.2.4 波浪中抵抗増加の比較計算結果
(肥大船、正面向い波)

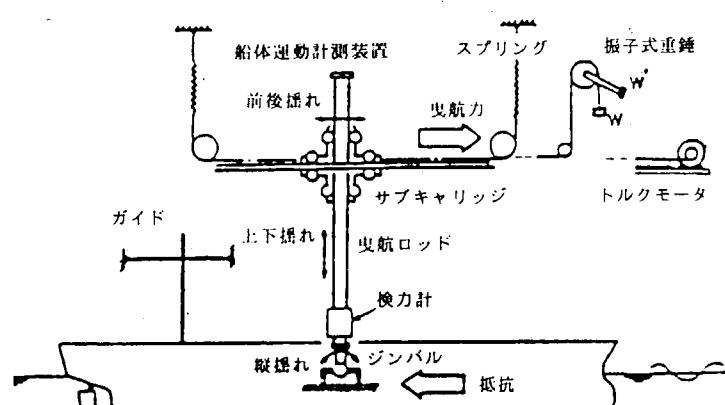


図2.2.5 正面向い波用抵抗動力計

験法としてもまだ確立されていない状況にある。

(ii) 波紋計測法

波浪中の抵抗増加は主として造波抵抗の増加であり、それは船体運動によって波を発散したり、あるいは船体表面で入射波を反射したりすることによって生ずるものである。従って、抵抗増加の現象をその原因に遡って分析し、推定精度の向上を図っていくためには、船体周りの流場の計測、そのなかでも特に波紋の計測が重要である。大槻の開発した非定常波形解析法は正にこの要求に応える計測法であり、抵抗増加と波紋とを結び付ける振幅関数について多くの重要な情報を提供してくれる。図2.2.6は、縦揺れをしながら航走する船体が造る波を水槽内に配置された複数個の波高計によって計測し、その振幅関数を求めた例であり、理論計算値と比較することによって各種計算法の問題点を知ることができる。

非定常波形解析法は今後の抵抗増加理論の高度

化を側面から支援する技術として大いに活用すべきであると考える。

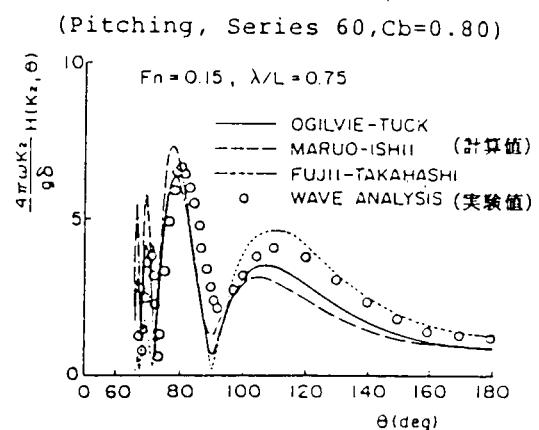
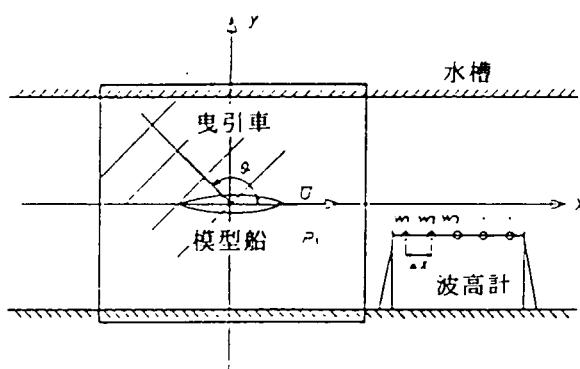


図2.2.6 非定常波形計測と縦揺れ発散波の振幅関数

(2) 波浪中推進性能評価法に関する現状調査

(a) 波浪中推進性能諸要素に関する調査

「波浪中推進性能シミュレータ」を構築するためには、前節の「波浪中抵抗増加」と並んで「波浪中推進性能諸要素」として波浪中の自航要素、プロペラ単獨特性、プロペラ負荷変動およびレーシングの推定法を確立することが必要であり、以下に現状調査

の結果をまとめた。

(i) 波浪中自航要素

波浪中自航要素については実験により、規則波中では船体運動の大きな波長範囲でスラスト減少率($1-t$)および伴流率($1-w$)は平水中の値より大きくなること、及び不規則波中では周波数影響が平均化されるため、その差は規則波中より小さくなることが定性的に確認されている。また、平水中の荷重度変更試験結果を基に波浪中の自航要素を推定することも試みられてお

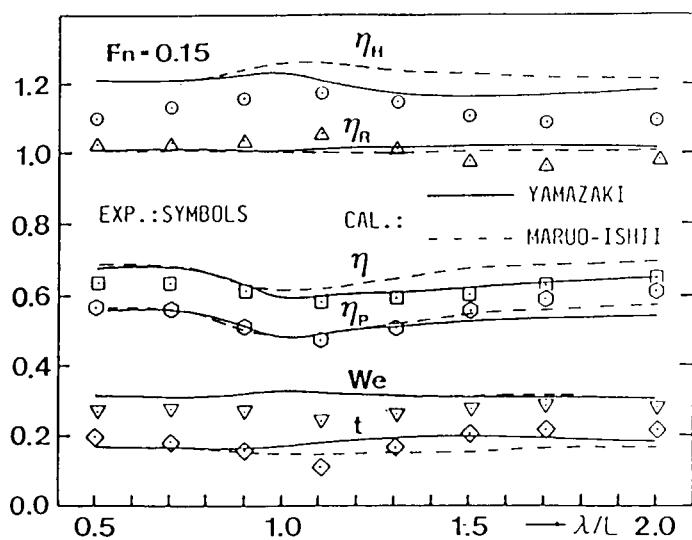


図2.2.7 波浪中自航要素の推定値

り、その定性的傾向は良く一致している。

一方、波浪中推進性能の理論的取扱いは、船体・プロペラ・舵を含む波浪中における船体周りの全速度ボテンシャルからそれらの相互干渉影響としての自航要素を求める方法が発表されており、図2.2.7のように推定値は実験値と比較的良い一致を示している。しかし、これらに関する研究例も少なく、一般的な推定法も十分ではないため、将来的には実験値を基礎とした手法と同時に、波浪中推進理論を基礎にした推定法の実用化が望ましい。

(iii) 波浪中プロペラ単獨特性

波浪中プロペラ単獨特性については没水深度が大きい場合には、プロペラ特性の時間平均値も変動振幅も平水中のプロペラ特性を基に準定常の取扱いで推定できるとされており、特に問題があるとは考えられない。

これに対して、没水深度の小さい場合は、没水深度影響を含んだ平水中プロペラ特性の実験結果をモデル化して準定常として取扱うことにより推定法を組み立てることも試みられているが、理論計算による推定は空気吸い込みや造波などの複雑な現象を伴うため現状では困難であり今後の検討が必要である。

(iv) 波浪中プロペラ負荷変動およびレーシング

波浪中におけるプロペラ負荷変動については、プロペラ単獨特性と同様に準定常の取扱いで推定できることが実験的に確認されているが、その推定に必要な波高減衰や流速変動などの船尾流場の推定手法は現状では不十分であり、今後検討が必要である。

また、プロペラレーシングに関しては、主機特性等の影響を考慮する必要があるため、実船と相似な模型実験を行うことは困難であり、結局は図2.2.8に示すようなシミュレーション計算で解く必要がある。現状では、レーシングの実船計測例も少ないとため、推定法の検証も十分に行われておらず、今後更に研究が必要である。

(b) 船速低下・馬力増加予測法の現状調査

「波浪中推進性能シミュレータ」の主要な機能として、波浪中の馬力推定があり、これらに関する従来の研究の多くは長波頂規則波中における現象を対象としているが、これを長波頂不規則波中から短波頂不規則波中、更に実船へと展開する必要がある。以下に、各段階ごとに現状の技術を調査した結果と研究課題とをまとめた。

(i) 長波頂不規則波中への展開

理論計算により長波頂規則波中の抵抗増加および自航要素等を求め、更にこれらを用いて数値計算により長波頂不規則波中の馬力を推定する時の問題点は次のとおりである。

先ずこの展開を実験的に検証した例を図2.2.9に示す。規則波中の実験から求めた応答関数を用いて推定した不規則波中の値を横軸に、不規則波中の実験値を縦軸にとったものである。これによれば、全体的に良く合っていると言えるが馬力の増加量が大きい程、バラツキも大きく30%~50%程度の差がみられ、これ

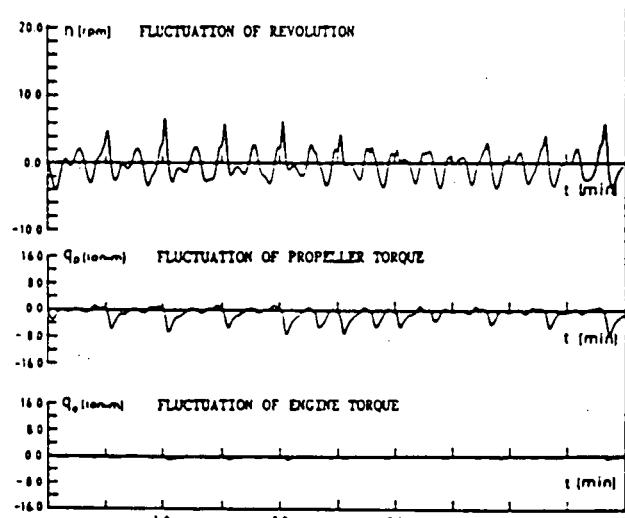


図2.2.8 プロペラレーシングのシミュレーション計算

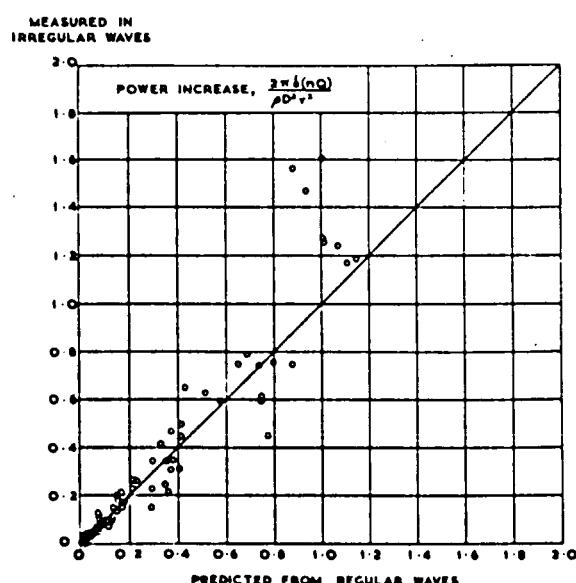


図2.2.9 規則波中結果からの推定値と不規則波中計測値との比較

らのバラツキの原因としては、不規則波中試験での実験誤差のほかに、応答が波高の自乗に比例しない場合があることがあげられている。一方従来の手法にしたがって抵抗増加を線型重畠法で求める際にも、図2.2.10に示すように、反射波に起因する抵抗増加が主成分となるような短波長域での応答関数の精度が、馬力増加全体の精度を左右することがあり、このような周波数領域における、応答関数の精度向上とともに、図2.2.9の結果にも示されているように応答が非線型であるような場合の抵抗増加の推定法についての検討が必要である。

また不規則波中の自航要素は規則波中の場合よりも平水中の値に近く、特に平均波周期の影響はほとんどないと言われるが、図2.2.11に示すように有義波高が大きくなると、その影響が現れるとされている。このように自航要素の波高依存性が問題になる場合の推定法の検討とともに、不規則波中における抵抗増加と自航要素の変動を同時に考慮した馬力推定法についても明確にすることが望ましい。

(ii) 短波頂不規則波中の展開

長波頂不規則波中の馬力推定から更に実船に近づいた状態での推定法とするためには、短波頂不規則波中の展開が必要である。この過程に関する研究はもとより、その前段階である多方向波中の研究例も少なく、二方向波中の実験においてさえも、船体応答のスペクトルは概ね各成分波への応答の重ね合わせとして表現できるとされているが、馬力増加についての検証例はない。

図2.2.12に間接的な影響を表すものとして、規則波と不規則波とからなる二方向波中で、プロペラトルクをほぼ一定に保った場合の船速低下の比較例を示す。

これによると、二方向波中の船速低下は二方向波中の最大波高と等しい波高の一方向波中の船速低下より少ないとされている。馬力増加についての同様な検証とともに、短波頂不規則波中の馬力を推定するための理論的構築及び実験的検証が必要である。

(iii) 実船波浪中馬力の推定

短波頂不規則波中の実験に相当する妥当な結果が得られたとしても厳密には、波浪中の自航要素、プロペラ特性に関するスケール・エフェクトと主機、軸系、ガバナーの特性の影響に関する問題が残る。主機特性等の導入手法については図2.2.8に示したような検討がなされているが、スケール・エフェクトに関して言及された例は見当たらない。これらの問題は「波浪中推進性能シミュレータ」における波浪中馬力推定法の妥当性を最終的に検証するうえで、場合によっては更に研究を進めることが必要であろう。

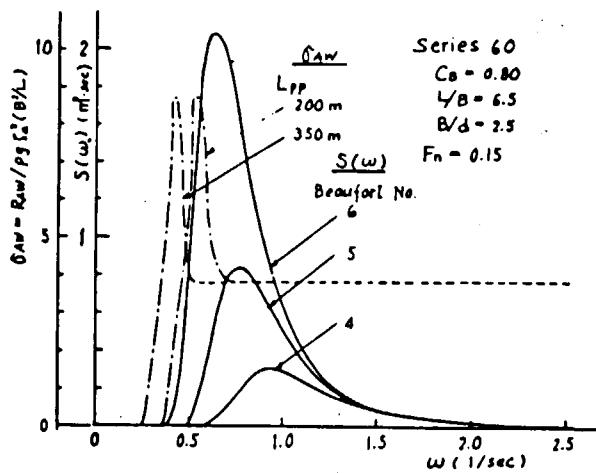


図2.2.10 波スペクトラム及び
抵抗増加の応答曲線

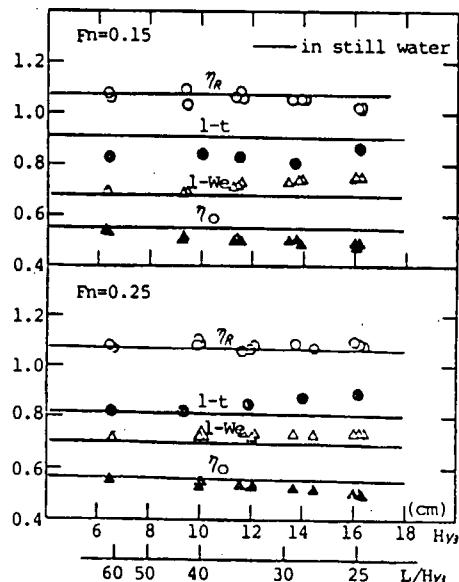


図2.2.11 不規則波中自航要素
(有義波高の影響)

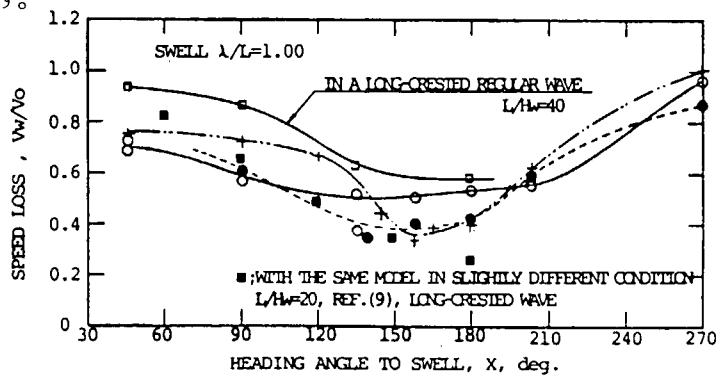


図2.2.12 波浪中船速低下

2.2.2 調査検討結果

(1) 波浪中抵抗増加理論の高度化検討

(a) 既存計算法の問題点

2.2.1 (1)で述べたように、波浪中抵抗増加の計算法が各種提案されている。これらの既存計算法の大部分は、船体から十分離れた検査面における波動の運動量変化から抵抗増加を求める丸尾の厳密公式を出発点としており、この波動を検査するための特異点分布の表示式として種々のものが提案されている。また、タンカー等の肥大船については短波長域の入射波が船首部で反射されるため、上記計算法では考慮されていない抵抗増加成分がある。この反射波による抵抗増加成分を推定する計算法が上記計算法を補完するものとして種々提案されているが、船体周りの定常流場の考慮の仕方に違いがある。これら既存計算法が、かなりの範囲で実験結果を説明し得ることが確認されており、船型開発の有力な tool として使用され始めている。しかし、既存計算法にはいくつかの問題点があり、それらは次に示す通りである。

(i) 斜波中の運動方程式の記述

抵抗増加を求めるに主眼が置かれ、斜波中の定常横力および定常回頭モーメントが求められていない。一般に、斜波中では船体は斜航状態となり、斜航による抵抗増加成分がある。また、船体の横流れを防ぐために当て舵をした場合には舵抵抗も生じる。波の散乱によって生じる狭義の波浪中抵抗増加以外に、これらの付加抵抗成分も広義の波浪中抵抗増加の一成分であり、これらを求めるためには航走時の斜航角および舵角を推定する必要がある。斜航角および舵角を推定するためには船体に作用する定常 3 分力の釣合式を解かねばならず、丸尾の理論を拡張し、抵抗増加の他に定常横力および回頭モーメントを求めることが必要となる。

(ii) 斜め追い波中の適用性

大部分の既存計算法は丸尾の厳密公式を用いている。この丸尾の厳密公式は少し複雑な形をしているのに對し、積分表示式を非常に簡略化したものとして Gerritsma-Beukelman の式および丸尾・石井・岩瀬の式がある。これらの簡略式を用いた既存計算法は、斜め追い波で不合理な結果を与える。Gerritsma-Beukelman の式は船体から真横に伝播する素成波による抵抗増加成分を取り出したものであり、出会い波周期が短い場合には前方に波は伝播せず、真横方向に伝播する素成波が抵抗増加に最も大きく影響するため、比較的妥当な結果を与える。しかし、斜め追い波の場合には出会い波周期が長くなり、船体から前方にも素成波が伝播するため、これによる抵抗増加成分を含まない Gerritsma-Beukelman の式は負の値となり、正しい結果を与えない。一方、丸尾・石井・岩瀬の式は、出会い波周期が短いとして丸尾の厳密公式を簡略化したものであり、斜め追い波ではこの基本仮定が成立しなくなるため適用が難しくなる。

(iii) 実験による計算法の検証

肥大船に短波長の入射波が作用した場合、船首部で波が反射され、抵抗増加の一成分となる。線状特異点分布と丸尾の厳密公式を用いた既存計算法ではこの成分は考慮されておらず、藤井・高橋の半実験式が通常使われている。最近、船体周りの不均一定常流場の影響による船体への波の入射方向の変化を加味して抵抗増加を求める理論が、いくつか提案されている。これらの不均一定常流場の影響を考慮した計算法は、実験結果との比較が十分に行われておらず、今後、数多くの実験結果で、その有効性を検証していくことが必要である。船体周りの入射波および反射波の方向変化の計算例を図 2.2.13 に示す。

(iv) 水面上の船体形状(フレア)の影響

既存計算法はすべて微小波高を大前提としており、静止時水面下の船体形状のみが考慮されている。し

かし、実際には船首尾で大きな相対水位変化があり、上部フレアが抵抗増加に寄与していると考えられる。肥大船の船首での波の反射の影響を考慮した藤井・高橋の半実験式は、肥大船の短波長域における抵抗増加を良く推定するが、コンテナ船のような瘦せ型船については過小評価する傾向がある。これは、藤井・高橋の式が静止時の船体の水線面形状を使用しており、肥大船では水線面形状の喫水方向の変化が小さいのに対し、瘦せ型船では水面上部の幅がフレアのために大きくなっていることが一因と考えられる。波浪中抵抗増加の推定精度を上げるためには、波との相対運動による船首尾の没水部船体形状の変化を考慮した大振幅非線形理論が必要となる。図2.2.14にSR108船型の船首部における相対水位の計算例を示す。この例では相対運動は大きく、没水部船体断面形状が大きく変化していることがわかる。

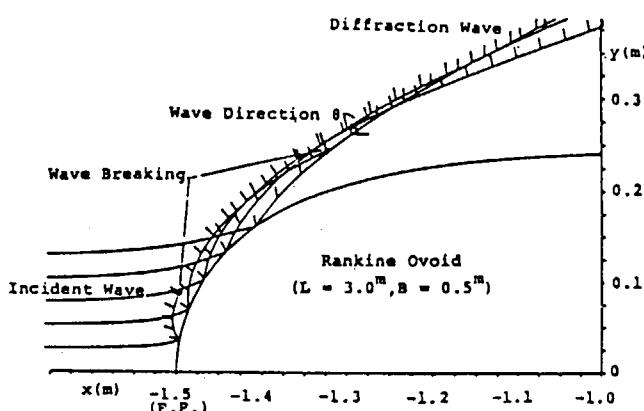


図2.2.13 入射波と反射波の伝播方向

$$Fn=0.2, \lambda/L=0.5, Q=1.21$$

(b) 3次元特異点分布法の問題点

既存の抵抗増加推定計算法の大部分は船体を細長体であると仮定しているため、フレームラインなどの細かな船型の違いが計算に反映されにくいという大きな問題点がある。まず、この問題点を克服できる十分合理的な線型理論によって極力厳密な計算を行い、現在のレベルでの抵抗増加理論の適用限界を明らかにしておくことが理論高度化への第一歩であろう。

3次元特異点分布法（積分方程式法とも言う）は、船体形状に何ら制約を受けないで厳密な計算が行える方法として以前から注目されているが、組織的な研究はあまりなされていない。その最大の原因是計算時間が非常に多くかかり、精度のよい計算ができないことがある。具体的には、解くべき積分方程式の核関数（これをグリーン関数と呼ぶ）が複雑な形をしており、これを計算するのに殆どの時間が費やされている。また積分方程式には自由表面（水面）と船体表面との交線部分にいわゆる線積分項と呼ばれる項があり、その数値的取り方、並びにそれに関連して船体表面上の分割方法、分割数の違いが数値解の精度、収束状況に大きな影響

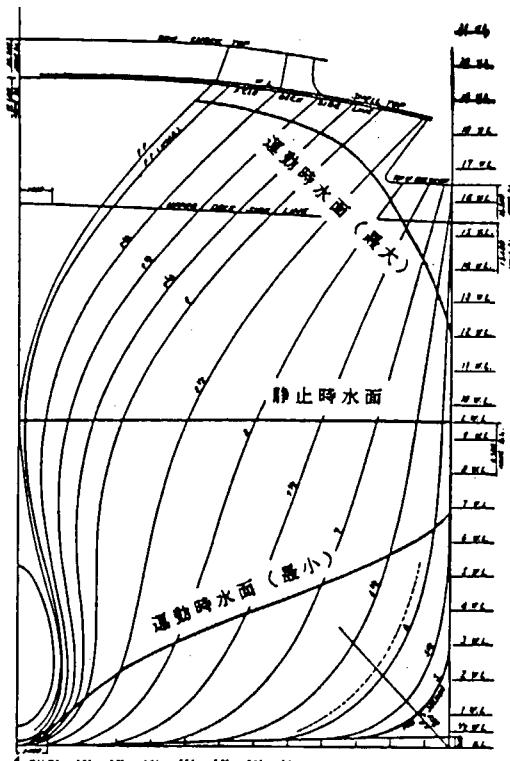


図2.2.14 SR108船型の船首部における相対水位

$$Fn=0.2, \lambda/L=1.0, Q=0.753, Hw/\lambda=1/4.0$$

を与えていた。従って、3次元特異点分布法によって抵抗増加の線型厳密計算を行うために検討しなければならないことは

- (i) 計算速度が十分に速いグリーン関数計算アルゴリズムの開発、改良
 - (ii) 船体表面の分割数、分割方法と積分方程式の数値解の精度との関係についての調査
- である。以下にこれらの検討結果について報告する。

(i) グリーン関数計算法の検討

グリーン関数は、特異点近くのいわゆる局所波を表す部分と、無限遠への発散波を表す部分とから成る。発散波を表す部分は一重積分の形で表されているが、局所波を表す部分は一般的には二重積分の形で表されている。従来の数値計算法では、この二重積分項を指数積分関数を用いた形式上一重積分の形に変換し数値積分を行うが、基本的に二重積分であることには変わりはない。また発散波を表す一重積分の項には波長の長い成分と短い成分があり、波長の短い成分は、特に特異点及び計算点の深さが浅い場合に被積分関数が激しく振動する。その場合にでも数値積分のきざみを細かくして強引に積分するので計算時間が多くかかると思われる。

これらの欠点を解消するために、別所によって示されたグリーン関数の一重積分表示式で数値計算することを試みた。この表示式では、局所波を表す部分も一重積分で表されているが、積分は複素経路積分である。しかし、被積分関数の振動が少なく減衰が速い所（最急降下線）を積分経路として選びながら積分していくという方法を採用すれば、特異点及び計算点の深さ方向の位置に殆んど関係なくほぼ一定の計算時間で計算できる。ところが、実際に計算してみると積分回数が最急降下線ごとに積算されて結局多くなり、指数積分関数を使った従来計算法に比べ、際立った計算時間の短縮には至っていない。

今後、更に速く且つ精度良くグリーン関数の計算をするためには、最急降下線の決定及びその上の積分がより簡単にできるよう改良することが課題として挙げられる。またグリーン関数がべき級数や漸近級数に展開が可能ならばそれとの組合せなども検討してみる価値はあると思われる。

(ii) 数値解の精度、収束に関する検討

解くべき積分方程式には、船体表面と自由表面との交線部分にいわゆる線積分項が存在し、これが解の精度、収束状況などに大きな影響を与える。しかし現在のグリーン関数の計算速度では、この点に関して十分な調査が出来るとは思われない。線積分項は完全没水体の場合には存在しないので、まず没水回転橢円体に対する計算を実行することによって線積分項の寄与を取り除き、物体表面上の分割数と解の精度との関係について基本的なチェックを行った。その一例を以下に示す。

図2.2.15には没水回転橢円体の1/4部分における分割の例を示している。橢円体表面上の点(x, y, z)を $x = a \cos \theta$, $y = a \epsilon \sin \theta \cos \omega$, $z = a \epsilon \sin \theta \sin \omega$ (ただし $a = L/2$, $\epsilon = B/L$)の関係式で計算することにし、 θ は $0 \sim \pi/2$ を、 ω は $0 \sim \pi$ をそれぞれ N_w 個の等分割とした。従って物体表面上の総分割数は $4 N_w^2$ である。解の精度として、抵抗増加の計算値そのものではないが、動揺問題における造波減衰力係数の計算における誤差と分割数の関係を図2.2.16に示す。この図は、細長比 $\epsilon = 0.2$ 、フルード数 $F_n = 0.2$ 、波数 $KL = 1.0$ 、没水深度 $d/B = 0.75$ に対する結果である。この図から、分割数を増やすことによって解は単純に収束していることがわかる。計算誤差は分割方法、運動モード、波数などによって大きく変化するので簡単には結論できないが、ここでの許容誤差を2%とするならば、総数400($N_w = 10$)程度の分割数が必要のようである。次に図2.2.17, 2.2.18にはそれぞれ向波中、追波中の没水回転橢円体に働く抵抗増加の計算値を示している。これらは物体表面上の総分割数が288の時の結

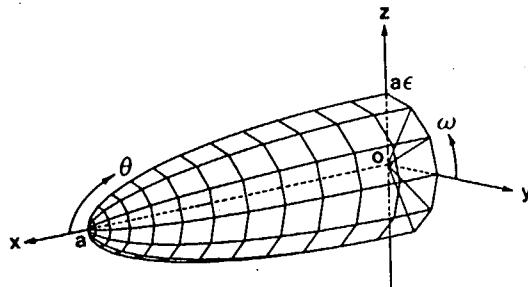


図 2.2.15 楕円体表面 $1/4$ 部分の分割例

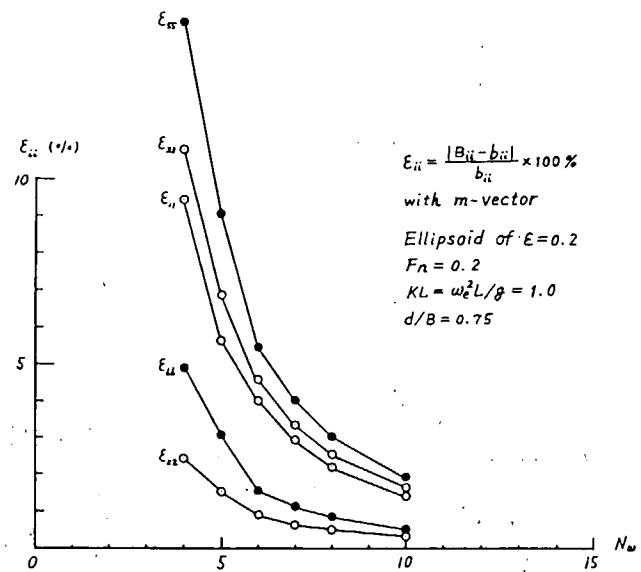


図 2.2.16 分割数と精度との関係の例

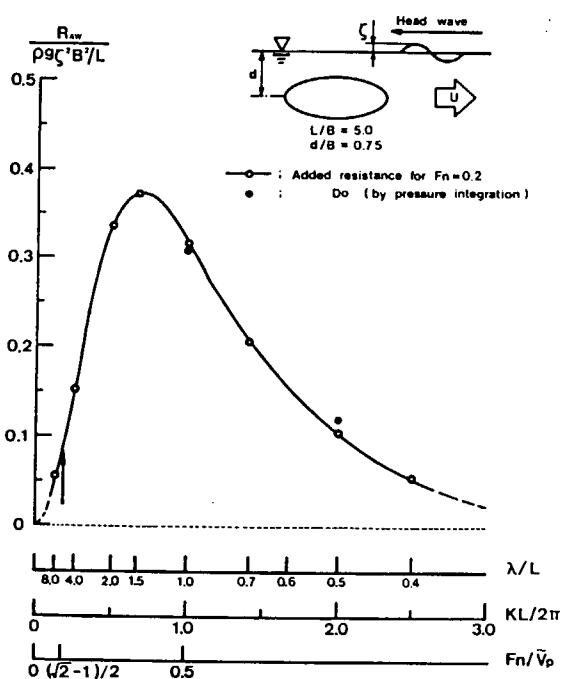


図 2.2.17 浸水回転椭円体の抵抗増加（向波）

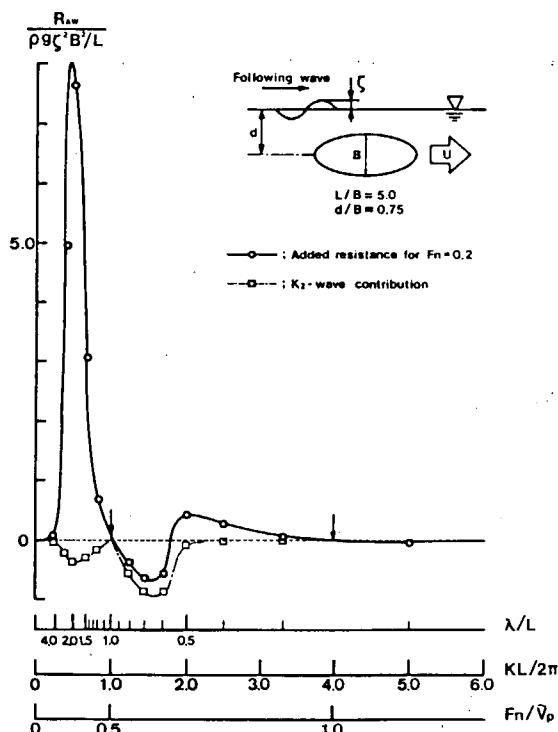


図 2.2.18 浸水回転椭円体の抵抗増加（追波）

果である。図 2.2.17 には無限遠での発散波の振幅関数（コチン関数）から計算した値（実線）以外に、物体表面上の圧力積分による値（黒丸）も示しているが、両者の一致度は満足できる程度である。

以上をまとめると、線積分項の影響のない没水体に対する計算でも精度の良い計算を行うためには、物体表面上の分割数をかなり多くする必要がある。その計算を実用的レベルの計算時間で行うためには、やはりグリーン関数の計算をより高速化することが不可欠である。それが実現されないと排水量型の実用船型に対して、フレームラインなどの細かな船型の違いを抵抗増加の計算値に精度良く反映させることは難しいであろう。

(2) 計測手法の高度化検討

(a) 斜波中試験法

斜波中では、波浪による前後方向の抵抗増加が船体に作用する他に、船を波の進行方向に流す横方向の力と船首を波の波長線と平行の方向に向けようとするヨー方向のモーメントが作用する。実船では、この波浪による定常力の他に、風圧力も船体に作用し、さらに船首方位を所定の方向に保たせるため当舵を取っており、船体に舵力が作用する。これらの力により、船は横に漂流し横流れ角 β を持ちつつ航走することから、斜航力も作用する。以上のことから、これらの力の関係を図示すると、図2.2.19のようになる。

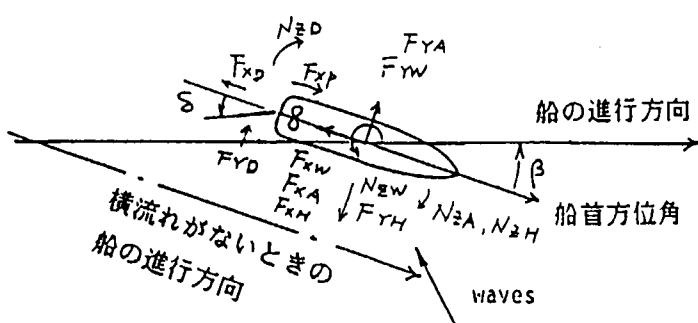


図2.2.19 斜波中の船の航走状態

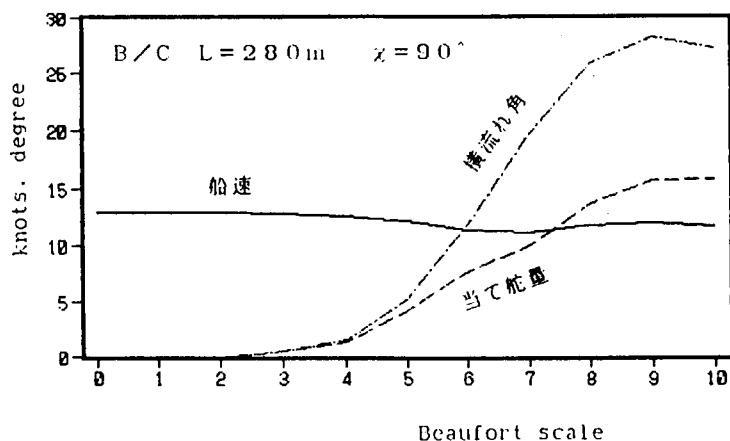


図2.2.20 斜波中の船速低下、横流れ角、当舵量

ここで、サフィックス：X, Y, Zは船体前後方向、横方向の力及び重心まわりのモーメントを、W, A, D, H, Pは波浪による定常力、風圧力、舵力、斜航船体流体力(抵抗)、プロペラ推力を表わす。船が強制力を受けず自航しているものとすると、これらの力は釣り合わねばならない。

つぎに、操縦運動の推定によく用いられているMMGモデルを用いて、波浪による定常力と風圧力が当舵や横流れ角に与える影響について調査した。その結果を図2.2.20に示す。この結果から、波浪による定常力が当舵や横流れ角に強い影響を与えていているのがよくわかる。しかし、これらの現象を把握するための斜波中の実験結果が少ないと理論計算推定法が確立されていないことから、今後これらの問題を明らかにしていく必要がある。そこで、斜波中試験を行ない、前述の各種流体力成分を明らかにする必要があるが、波浪による定常力以外については操縦性能の分野でかなり研究されているので、ここでは斜波中で船体に働く波浪による定常力の計測法についてのみ検討する。

斜波中試験で横流れを許し、波浪による定常力を計測する試験では、波高により横流れ角が変化するため膨大な試験ケースを実施しなければならない。また、横流れにともなう船体の斜航抵抗は大きく、計測した抵抗量から波浪による抵抗値を評価することは困難である。そこで、斜波中抵抗増加試験法として、

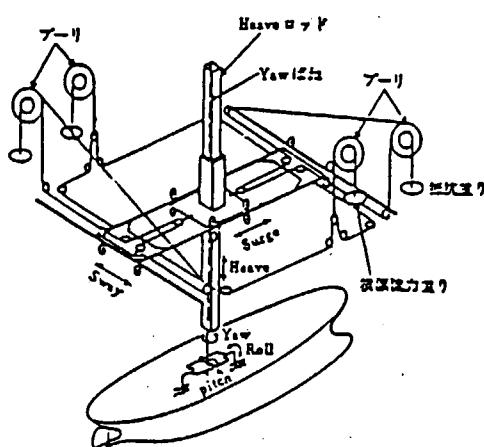


図2.2.21 斜波中抵抗計測システム

前記の抵抗成分分離を行なう解析手法に基づいた、波浪による定常力のみの計測が行なえるよう、横流れや Yaw Drift の定常変位量を無くすように制御する必要がある。これが可能な計測システムの例を図 2.2.21 に示す。

以上の検討結果から、斜波中を航行する船の状況は、そのときの各種抵抗成分に分けて分析することにより、明らかにできることを示した。今後、さらにこの斜波中抵抗計測システムの改良を行なう必要がある。

(b) 不規則波中試験法

不規則波中では波による抵抗増加も時間的に変動する。その例を不規則波とともに図 2.2.22 に示すが、先ずその平均値が重要である。抵抗を計るにはモデルを柔或は剛に拘束してその反力を計る必要があり、それらに応じて得られる変動反力も異なるが、平均値を求めるには、電気的あるいは数値的なフィルタの選択が重要である。一方、規則波中の応答関数を用いて不規則波中の平均抵抗増加を求める場合には、解析された波スペクトル自体がある揺らぎを生ずるので精度の評価には注意を要する。

又、従来波浪中抵抗増加に関しては、その変動分の平均値に主として着目していたが、変動分は図 2.2.22 (右)にも示されるように平均値よりも大きくなる場合もある。従って波浪中抵抗増加の平均値も含めて理論の高度化のためには、不規則波中でかつ変動抵抗のレベルで実験値と合うかどうかの比較をする必要がある。そのためには不規則波中での実験についても変動抵抗を精度良く計測しうるシステムとする必要がある。一方解析方法も高度化が要求される。解析方法として現在提案できるのはクロスバイスペクトル法と呼ばれる方法であるが、理論を検証できる手法として信頼しうる方法とするためには、さらに検討が必要である。更にこの手法は船の抵抗増加だけでなく、係留された浮遊型の海洋構造物で問題となる長周期の運動を誘起する波浪外力の推定に関しても適用可能であり、本手法の確立によりもたらされるメリットは大きい。

不規則波（有義波高 10 m 相当の実験）

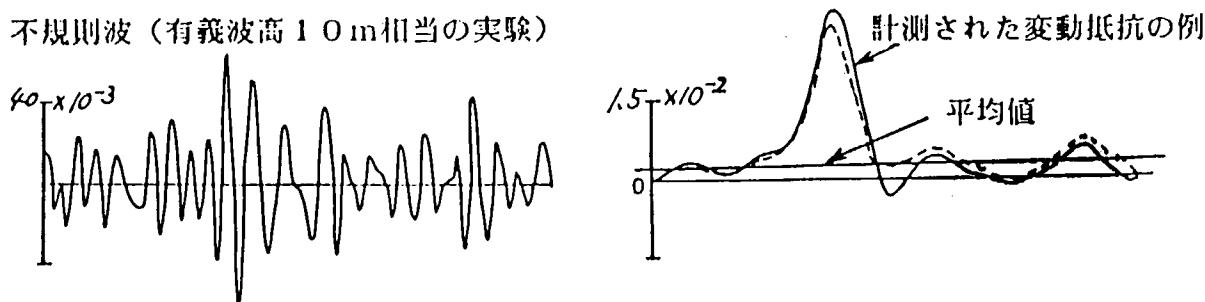


図 2.2.22 不規則波及び計測された抵抗の例

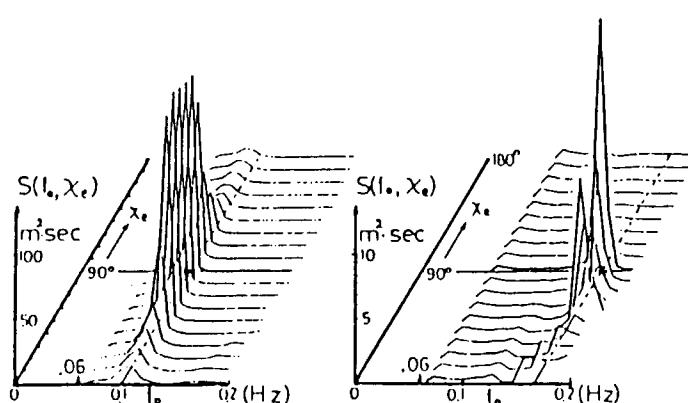


図 2.2.23 多方向波スペクトルの例

（横軸：周波数、奥行き軸：波との出会い角）

また実海面は多方向に進む波の合成されたものと考えられる故、長波頂の不規則波中の試験を更に進めて多方向不規則波、従って短波頂不規則波中の精度良い試験法の開発も必要である。そのためには波発生、解析技術の高度化も必要で多方向造波の手法、多方向スペクトル（図2.2.23に例を示す）の解析方法をまず確立する必要がある。またその場合は6自由度の船体運動を許しつつ変動抵抗を計測する事が望ましいわけで、新たな手法を開発する必要がある。

2.2.3 研究開発課題と解決策

(1) 波浪中推進性能シミュレータ構想

船舶が実際の海面を航行している状態を想起した場合、波浪が存在するということは前提条件として考えなければならない。この時の船舶の挙動を実験を行わないで全て理論計算で推定しようという高度な立場に立った場合、解決されなければならない問題点は多い。それらの問題点を正確に把握し、解決方法についての合理的な考え方及び道筋を与えることが必要で、それが本作業部会の責務である。さて、このような立場から波浪中を航行する船舶の挙動と性能評価項目との関係並びに運航上の諸問題との関係を最も一般的な形でとらえ、それを取り纏めたものが図2.2.24に示す「波浪中推進性能シミュレータ構想」である。これに示された課題そのものが長期的な研究開発プロジェクトで順次取り上げられ研究されるべきものであり、また本図は研究の進展状況の検討評価を行う際に判断の拠所になるものである。このように長期的研究開発プロジェクトの方向性及び課題が明確に提示されたことが重要である。

本作業部会では、この長期的構想の中で取り上げられた各々の課題に関する現在の研究発展段階を議論してその優先度を明らかにし、今強く求められている研究開発課題を抽出した。それは海運界や造船界の設計の立場で重要な波浪中における正確な馬力推定と船速推定並びに波浪中性能評価法である。高度な設計システム、運航支援システムとして波浪中推進性能シミュレータが利用されるためには、

- (i) 船の基本設計と直結する波浪中馬力などの「時間平均的な値の推定」
- (ii) 船体局部形状と関係する船首部碎波現象などの「時系列的な流場推定」
- (iii) 運航支援に関する「航海状態の予測・評価」

の3点が実用的精度で合理的に行われる必要がある。

この波浪中推進性能シミュレータの具体的イメージを入出力の関係で図2.2.25に示した。このシミュレータを有効に活用するためには、海気象データベース及び航海実績データベース等が整備されることが大切である。これらの海気象・航海実績データを初期設計での性能検討・運航評価の立場から分析し、船型設計ガイダンスや耐航性能評価法として確立することが次節以降で述べる抵抗増加・推進性能の推定法などの要素技術の高度化とともに急務な課題である。

(2) 波浪中定常力及び非定常流場の数値計算

波浪中抵抗増加の計算法に関連し斜波中における船体の挙動を記述する運動方程式を調査した。その結果、現実に即した形で波浪中性能を議論するためには、波浪中の抵抗増加のみならず

- (i) 定常横力、定常回頭モーメントの推定法の確立………(R-1)

が必要であることが指摘された。（「波浪中推進性能シミュレータ構想」での位置づけを図2.2.24に(R-1)で示す。）これを解決するために新たな理論構築が必要であり、例えば丸尾の抵抗増加理論を横力・回頭モーメントに適用してみるなどの検討を進めることが重要である。

抵抗増加の推定法に関しては、数値計算法の分類、適用範囲の調査などを実施するとともに、各研究機関所有のプログラムによる比較計算を行った。現在用いられている数値計算法は大部分が細長体の仮定に基づくもので

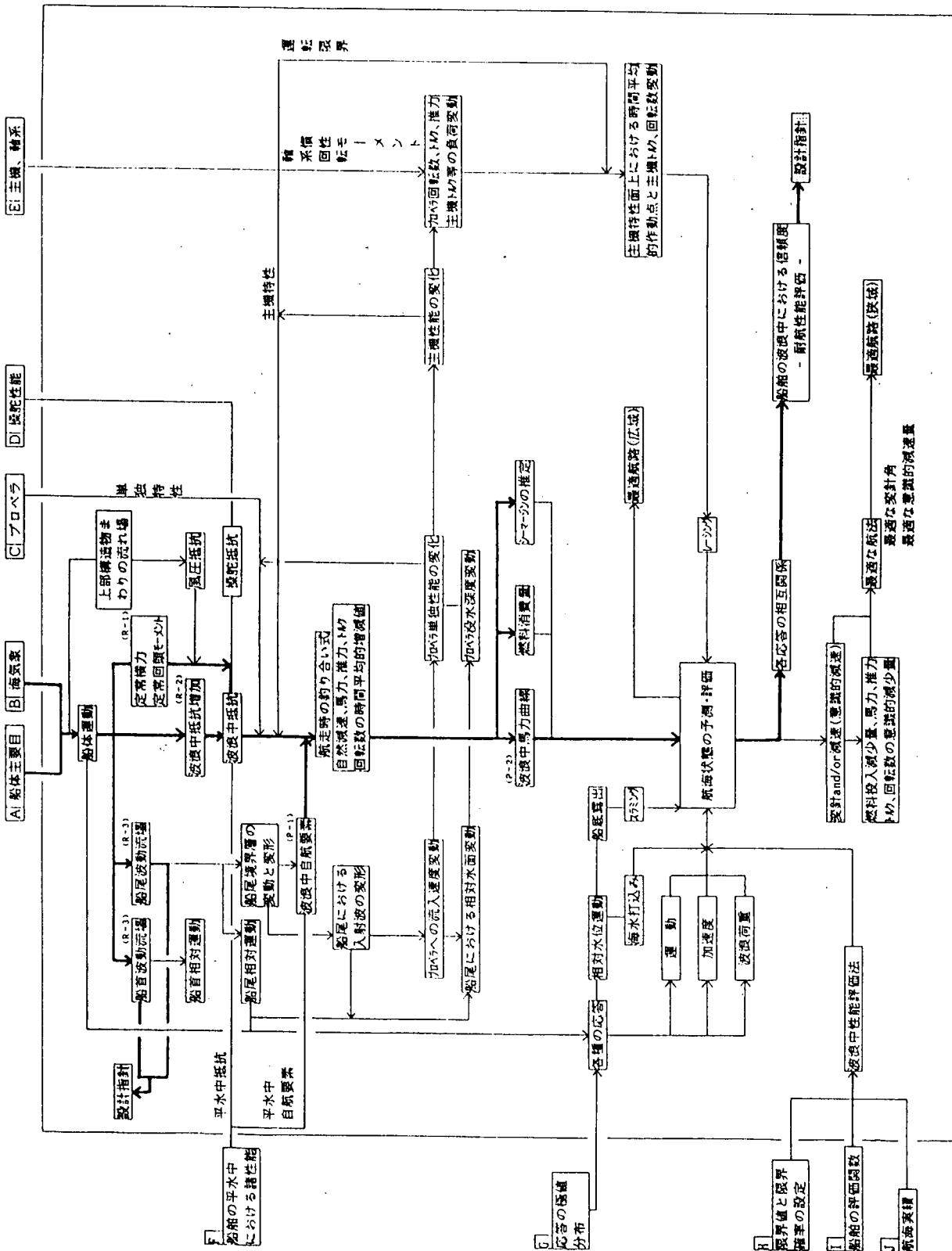
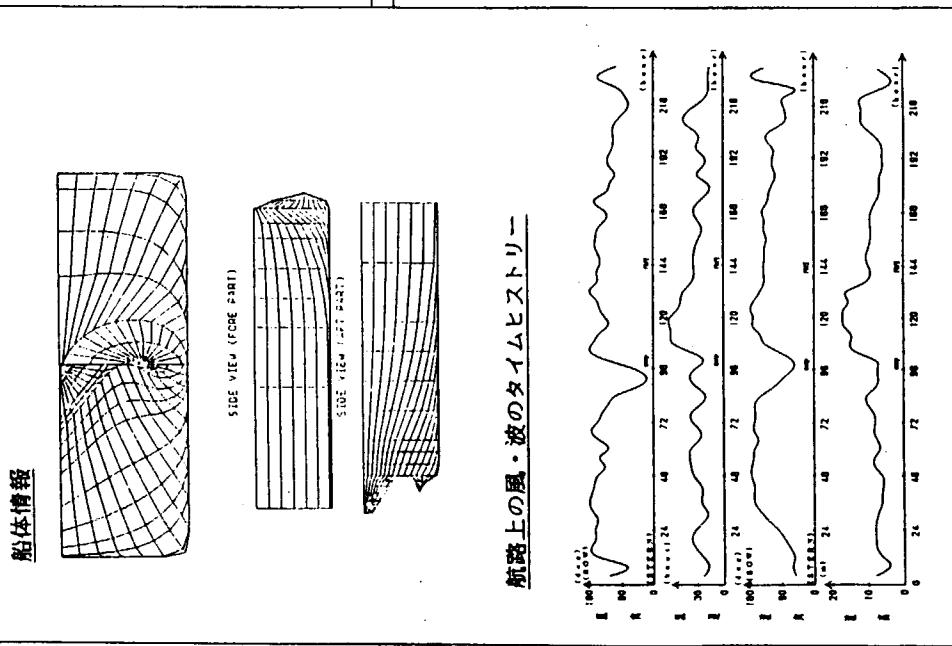


図 2.2.24 波浪中推進性能シミュレータ構成

インプット



アウトプット

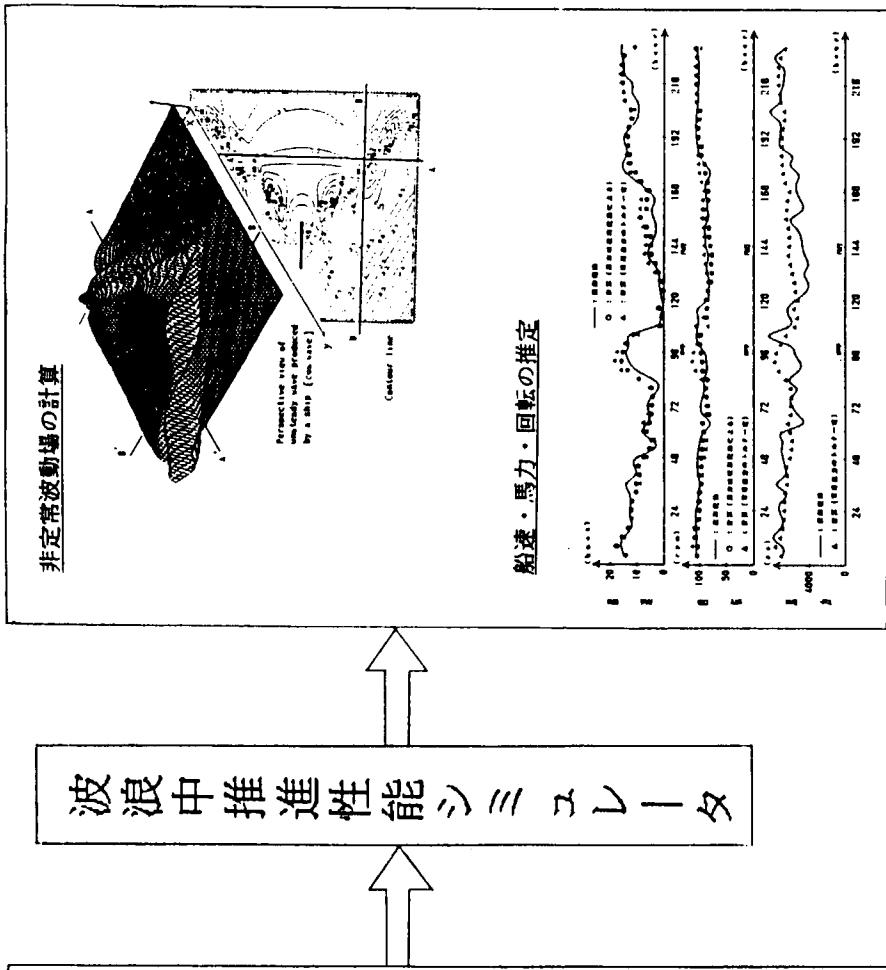


図2.2.25 波浪中推進性能シミュレータのイメージ

「波浪中推進性能シミュレータ構想」の枠外のデータを入力すると、枠内の性能が計算され出力される。

あり、やせ型から肥大船までの各種船型に対して実用的に必要な波長、波方向、船速範囲で必ずしも十分な推定精度を有しているとは言い難く、現状計算法の限界が示された。これを解決するためには、

(ii) 任意の船体形状に適用し得る3次元特異点分布法による抵抗増加計算法の開発………(R-2)

が必要で、本作業部会では抵抗増加計算の高度化のための予備検討として3次元特異点分布法の回転橍円体への適用を試みた。(図2.2.24参照) その結果、自由表面に近い物体表面では細かい要素分割を必要とし、計算速度の十分速いグリーン関数計算アルゴリズムの開発が不可欠であることが、今後の課題として明示された。

初期設計段階における船型設計においては、抵抗増加だけではなくスラミングやレーシングなどの耐航性能と深い関わりのある船首尾形状の影響を把握する必要がある。そのためには、

(iii) 波浪中を航走する船体周りの非線形な波動現象に関する数値計算法の開発………(R-3)

を推進し、船体近傍の非定常波動を定性的にシミュレートできるようにすべきであることが示された。(図2.2.24参照)

(3) 波浪中自航推進性能の理論的推定法

波浪中自航要素の特性については理論的考察が加えられつつあるが、推定法としては全面的に実験結果に依存しているのが現状である。波浪中推進性能シミュレータに組み込んで航海性能を評価するのに耐え得るだけの推定精度と適用範囲を有する理論的推定法の確立が今後の大きな課題である。具体的には、山崎理論にその方向性が示されているように、

(i) 波浪中における船体、舵、プロペラを含む統一的理論による船尾流場の数値計算法………(P-1)
の開発を推進すべきである。(図2.2.24参照)

設計と直結する波浪中馬力、船速低下の推定法においては、不規則波中における抵抗増加の推定法、自航要素の波高依存性や不規則波中での取り扱い法などに対する考察を十分に行う必要がある。すなわち、

(ii) 不規則波中での馬力・船速低下の合理的推定法の開発………(P-2)

が設計面からの要請課題の一つである。(図2.2.24参照)

以上のような開発課題に対し研究を効率的に推進するためには、前記の各現象の理解をより正確なものとし、また、より定量的な推定法とするためにも、

(iii) 系統的な波浪中抵抗・自航試験、流場計測等の水槽試験

が不可欠である。非定常な各種物理量をより精密に計測し得る計測装置の開発並びにその解析技術の高度化が必要である。

2.3 プロペラ周囲流場の調査研究

2.3.1 現状と問題点

(1) プロペラ性能の予測

プロペラ性能としてスラストとトルクの他、より微視的な量の圧力分布がある。性能を予測するための数値計算手法として、現在、プロペラ揚力面理論計算法が広く使われており、スラストやトルクばかりでなく、圧力分布や流場の速度計算をすることが可能である。しかしながら、この既存数値計算法は粘性の影響を経験常数を用いて補正しているので、精度に不安があるばかりでなく、在来型と大幅に形状の異なったプロペラの性能予測が難しい。そこで、プロペラ性能の予測精度向上の為には、粘性の影響を直接考慮する必要があり、プロペラ流場を表すNavier-Stokes方程式(以下、NS方程式という)を差分法解法することが考えられる。このため、特に差分法を用いた計算手法に関する文献調査を行った。また、計算手法の検証の為のプロペラ性能の計測を各種の

大きさのプロペラについて行うとともに、検証実験として利用するのに有用と思われる文献の調査も行った。

調査文献は予め絞り込んだこともあり、22件であった。

(a) 差分法によるプロペラ性能計算

プロペラ周りの流場を直接、数値的に解く試みは流場をオイラー方程式で記述し、差分法で解くオイラー法が主であり、徐々にではあるが計算されるようになってきており、NS方程式の差分解法につながるベースとして位置付けられる。しかし、現状の性能計算精度は既存法であるプロペラ揚力面理論計算による性能予測精度に及ばない。最近、圧縮性流体に関してではあるが、プロペラ流場の直接NS方程式の差分解法も試みられており、緒についた段階と言える。複雑な形状を有するプロペラまわりの流場の格子生成法の開発がNS方程式の差分解法をする上で最も重要な目標になっていくと思われる。

(b) 2次元翼の性能計算

現在までのところ、2次元翼周りの流場について各種のNS方程式の差分解法を用いた計算が行われている。

乱流を計算するためには、乱流モデルを導入する必要があり、簡便で実用性の大きいゼロ方程式モデルと、より一般性のある2方程式モデルの $k - \epsilon$ 法が挙げられる。後者は、乱流遷移のモデル化がなされていないことや乱れの非等方性のモデル化の問題があるのに対して、前者は多くの実験データで支えられており、現状では最も実用性が高い。以上の様なことが言えるのは流場シミュレーション計算についてであり、翼の性能計算に関して、とりわけ、抗力について充分な精度で計算が行われた例は少ないことが分かった。2次元翼はプロペラ翼素の一部であるばかりでなく、実験データが豊富なことから、2次元翼に関する計算はその計算手法の検証の為に今後も利用されていくものと考えられる。

(c) 非圧縮性流体中を作動する3次元翼をNS方程式の差分解法で解いた例は殆ど報告されていない。一方最終目的のプロペラ周りの流場の計算で難しいのは翼端渦のシミュレーションであり、この点、3次元翼の計算を行うことは、計算手法の検証を行う上で実験データの取得が容易なこともあります、利点が多い。また、3次元翼の具体的なものとして舵や各種のフィンがあり、それらの設計にも各計算法は直接有効である。NS方程式の差分解法以外として、渦系／パネル法による計算があるが、計算時間が短く、かつ実験値との一致も良く、短期的視点からは実用的な手法と考える。

(2) プロペラ流入流場の予測

船尾でプロペラが作動すると、プロペラのサクション効果によりプロペラ前方の船体境界層や、これから流出する渦度が変形をうける。このためプロペラ面に流入する流場はプロペラが作動しない場合の流場（公称伴流）と異ったものとなる。

従って船体を考慮したプロペラの設計や性能の推定を高精度で行うためには、インプットデータとしての船体との相互干渉を考慮したプロペラ流入流場を精度よく推定する事が必要となる。これはプロペラ性能の計算のみならず、船体の自航性能計算の精度向上にも関連するため、今までに種々の研究が実施されている。今回、プロペラ周囲流場の調査研究を行うにあたり、プロペラ流入流場の予測に関する約30篇の文献調査を行い、現状の把握と研究課題の位置付けを行った。

表2.3.1は調査した文献を研究内容に基づいて分類し年代順に並べたものである。

(a) 船体とプロペラの干渉

分類2は、船体を軸対称物体、プロペラを吸い込みあるいはbody forceで置き換えた $k - \epsilon$ モデルを使用した差分解法や流線繰返し法を用いて船体とプロペラの干渉および有効伴流を求める方法である。実施例が少ないが、将来有望な手法の一つである。

表 2.3.1 プロペラ流入流場の計算法に関する文献調査

分類	年代	1970	1975	1980	1985
1. 解 説			15th-ITTC Prop. Comm. (1978) 16th-Do. (1981) 17th-Do. (1984) Odabasi et.al. (1984)		
2. 軸対称物体の 有効伴流 (計算公称伴流)		(K- ϵ 乱流モデル-Sink円盤) (Body Force -VLM 搾力面)		Zhou & Yuan (1984) Stern, Patel et.al. (1985)	
3. 同上 (計測公称伴流)		(渦度方定式-流線式) (Field Point Vel.) (渦輪管状分布-作動円盤)		Nagamatu & Tokunaga (1978) Huang & Groves (1980) Dyne (1982)	
4. Shear Flowによる有効伴流		(伴流スクリーン等) (プロペラ運動量理論) (Total Head差)		Goodman (1979) Goodman & Breslin (1982) Orlov (1983)	
5. 船型と有効伴流 (計算公称伴流)		(積分法+無限翼数理論)		Nagamatu (1985) 佐藤・永松 (1986)	
6. 船型と有効伴流 (計測公称伴流)		(wakeの渦度考慮、実験計算比較) (無限翼数理論) (積分型解法の公称伴流) (無限翼数理論) (無限翼数理論) (Huang & Groves-Kerwin & Lee)		Dyne (1981), Haimov (1983) 戸田、田中ほか (1984) 笠原 (1985) 戸田ほか (1987) Chen & Reymond (1986)	

分類 5 では、プロペラの誘導速度を付加して船体のまわりの流れを境界層理論を使用して解く方法である。境界層近似が成立する単純な数学船型や薄い船ではこの方法は有効であるが、縦渦が発生するような肥えた実用船型への応用には充分に適用できない。

(b) 伴流とプロペラの干渉

分類 3, 4 は船尾の境界層から流出した公称伴流分布のみに注目し、プロペラのサクションによる伴流分布の変形を計算して有効伴流を予測するものである。この方法は計測伴流分布、計算伴流分布のいずれも入力データとして使用でき、実験的修正が施しやすいため、分類 6 に示すように、多くの計算例が発表されている。類似船の性能を評価するには有効であるが、タイブシップのない新しい船の定量的評価には不充分である。

以上の調査の結果をまとめると次のようにになる。即ち実用船型では境界層が厚く、縦渦を含む複雑な船尾伴流をもつ。このため、その有効伴流を高精度で推定するためには、分類 2 にその芽ばえが見られるように差分法等

を大規模に適用したより発展的な計算手法の開発が望まれる。

一方、現在使用されている方法も適用の範囲を把握して使用すれば、ある程度有効であり、新しい計算手法が開発されるまでは今後も使用されるべきものである。

これらの文献調査を踏まえ、次節以降では、プロペラ流入流場の新しい予測法としてプロペラの影響を考慮したNS方程式の差分解法による流入流場計算法の検討を行い、問題点を抽出する。また現状理論についても検討を行い、問題点をまとめる。

2.3.2 調査検討結果

(1) NS方程式の差分解法による調査

(a) 2次元翼周りの流場

前節で述べた通り、現在、プロペラ周りの流場を直接計算し、その性能計算をすることができないので、本調査ではプロペラ揚力面で流場を計算し、相当2次元翼周りの流れを計算し、性能計算をするハイブリッド方式の可能性を調査した。そこで、先ず、Baldwin-Lomaxのゼロ方程式モデルに基づく2次元 NS Solver (NICE-2D)と2方程式モデルである $k - \epsilon$ 法により、プロペラ翼素である2次元翼について種々の調査を行った。

(i) NACA翼型による調査

コード開発を行ったNACA0012と実験データがあるNACA4412翼型について、①プログラム・コードの一般性、②レイノルズ数変化に対する追従性、③既存のデータとの比較、④計算点数の影響、⑤グリッド形状の影響、⑥乱流モデルの影響を調べた。次のような結果が得られた。

- ① 実験との比較として圧力分布を調べた。 R_n 数が 10^6 程度で、実験結果と数値計算結果との一致は図2.3.1に示すように比較的良好。しかしながら、後縁近傍で圧力のコブが存在した。
- ② 計算グリッドの粗さを3種類変化させて計算結果に及ぼす影響を調べた結果、グリッドを粗くすると、実験と合わなくななり、一方、細かくすると計算が発散し、解が得られないことがあることが分かった。
- ③ レイノルズ数変化の影響を調べた結果、 $10^3 \sim 10^4$ と 10^6 以上とでは、計算結果が異なり、その原因として後縁近傍での剥離の有無によることが分かった。
- ④ 乱流モデルとして、Baldwin-Lomaxのゼロ方程式モデルと2方程式モデルの $k - \epsilon$ 法を用いた。 $k - \epsilon$ 法モデルはゼロ方程式モデルと異なり、圧力分布が実験結果とは一致が良くなく、又、通常の収束条件を満足した後計算を続行すると発散し、改善の余地が多く、実用段階から遠いことが明らかになった。
- ⑤ 翼型特性について既存データ ($R_n = 3 \times 10^6$) と数値計算の対応を調べた。図2.3.2に示すように揚力係数 C_L に関して比較的良好な結果が得られる反面、抗力係数 C_D に関しては計算値は実験値の3~5倍にも達し、実用上の問題が明らかになつた。この原因として圧力抵抗成分の積分スキームの精度や後縁での解の振動が挙げられた。

(ii) 実用翼型での調査

上述の翼型は比較的厚いが、プロペラ翼素はかなりの薄翼である。そこで、 $J = 0.7$ で作動する青雲丸通常型プロペラ 0.7 R での相当2次元翼について計算を試みた。その結果、前縁近傍で図2.3.3に示すような圧力の激しい振動が現れ、計算を続行すると発散した。この原因として前縁での曲率半径が小さく、グリッド生成や計算スキームが対応できなかつたことが挙げられた。

(iii) プログラム・コードの改良

上述の問題点を克服するため、①翼型後縁の厚みを考慮したグリッド生成法、②前縁半径を考慮したグリ

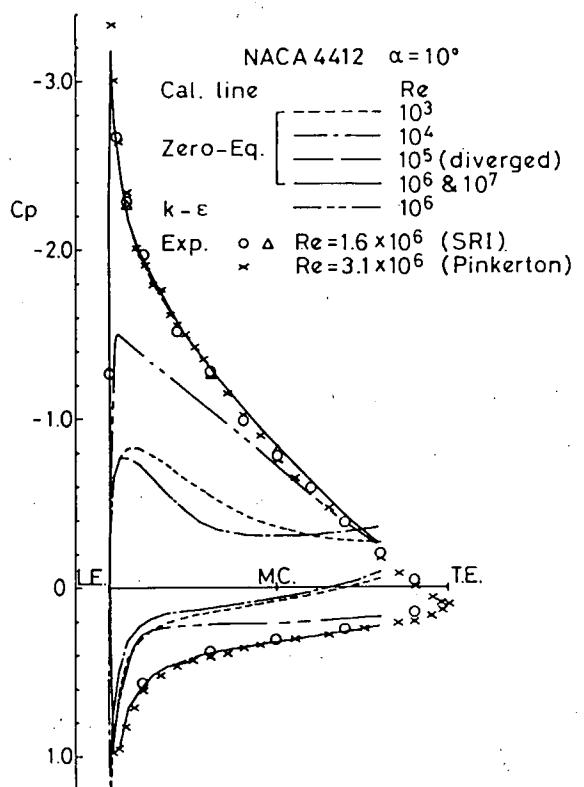


図 2.3.1 翼面上圧力分布
(NACA 4412 : $\alpha = 10^\circ$)

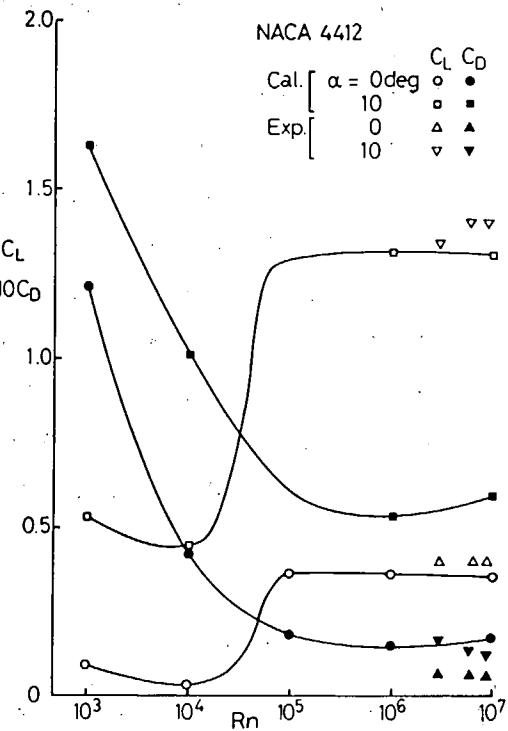


図 2.3.2 揚力係数と抗力係数に及ぼすレイノルズ数影響
(NACA 4412 : $\alpha = 0, 10^\circ$)

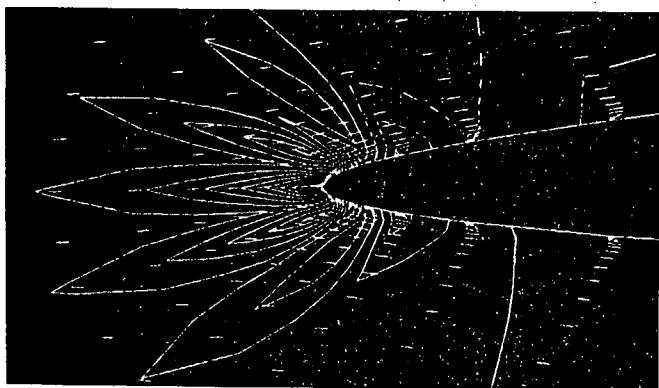


図 2.3.3 翼前縁における圧力振動の様子

MAU : $T/C = 4.8\%$, $\alpha = 0.63^\circ$,

$Rn = 6.29 \times 10^5$

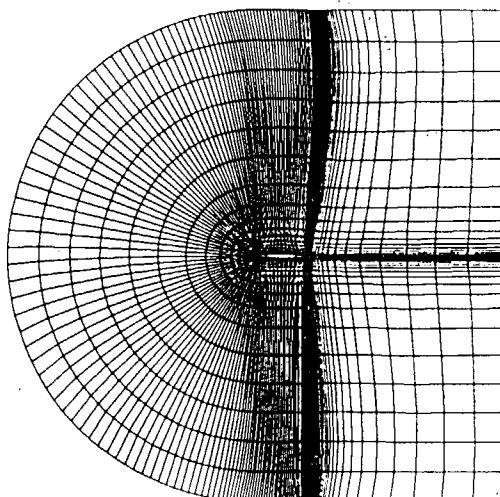


図 2.3.4 計算グリッド
(青雲丸相当二次元翼 $r/R = 0.7$, $J = 0.7$)

ドの採用, ③乱流モデルの適用法の改良を行った。NACA 翼型に適用したところ, 次のような結果が得られた。

- ① 図 2.3.4 に示すように前縁の曲率中心からみて等角度となるグリッドとすることで前縁での圧力振動は無くなった。
- ② 後縁近傍での振れや圧力のコブが無くなり, 合理的な結果が得られた。

③ 抗力係数の実験との比較の結果、粗さなしのデータの約1.5倍、粗さを付けた翼による実験とはほぼ同様であった。

(iv) プロペラ翼素の性能計算

核関数展開法(KEM)で得られた $J = 0.7$ で作動する青雲丸HSPの相当2次元翼について改良されたプログラム・コードで計算を行い、高精度翼面圧力計測法による計測結果との比較を行った。計算は $0.3R$ 、 0.5 、 0.7 及び $0.9R$ について行った。得られた圧力分布を既存手法(図2.3.5)と実験結果(図2.3.6)と比較すると、前者とは前縁近傍で若干の差異がみられるが、後縁での圧力のコブは無くなっている。実験値とは正面側を除き良い一致が見られるが、その差は計算結果の差異より大きい。これは揚力面計算法の精度に起因するところもあり、今後の計算法の課題である。翼まわりの等圧力線図を図2.3.7に示す。揚力係数 C_L と抗力係数 C_D を計算した結果を既存法と共に表2.3.2に示す。NS Solverでの計算結果は既存法より C_L が5~8%、 C_D が8~10%小さめである。このことから、既存法での粘性修正係数は比較的妥当な

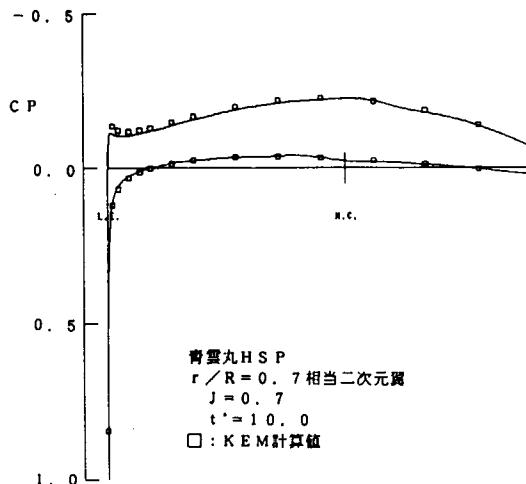


図2.3.5 圧力分布に関する本法と揚力面理論との比較
(青雲丸HSP; MP № 252, $r/R = 0.7$, $J = 0.7$)

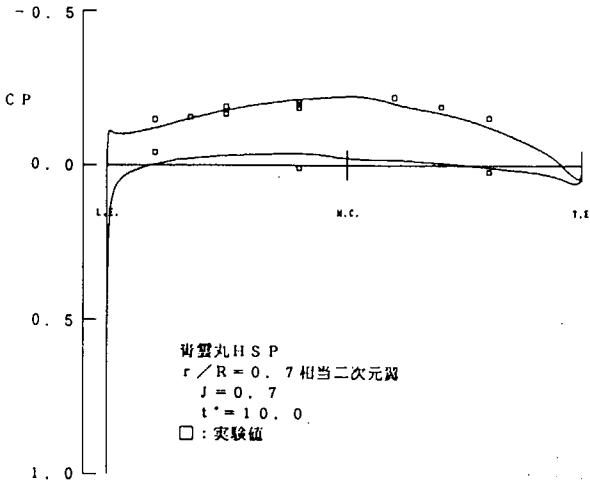


図2.3.6 圧力分布に関する本法と実験結果との比較
(青雲丸HSP; MP № 252, $r/R = 0.7$, $J = 0.7$)

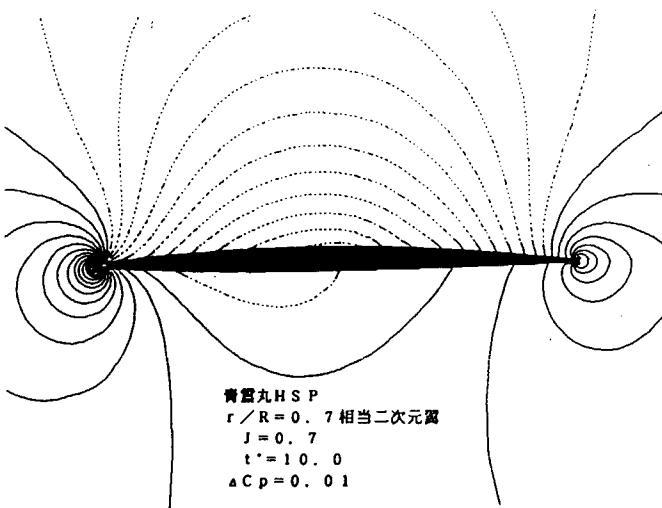


図2.3.7 等圧力線図
(青雲丸HSP, $r/R = 0.7$)

表2.3.2 C_L と C_D の計算結果

MP 252 Seiun-maru HSP in Uniform Flow $J = 0.700$

r/R	NS		KEM	
	C_L	C_D	C_L	C_D
0.3	.262	.0108	.2928	.0102
0.5	.225	.0087	.2426	.0091
0.7	.147	.0076	.1551	.0087
0.9	.094	.0076	.1148	.0085

値を用いていいると考えられる。計算点数は翼面方向に 231 点、垂直方向に 35 点、計 8,646 点で、1 翼断面当たり、Sun 4 - 260 CXP (2MFlops) で 240 時間の計算時間を要する。

(b) 3 次元翼まわりの流場

プロペラ性能計算の為の NS Solver 開発の前段階として 3 次元翼まわりの流場計算の為の 3 次元 NS Solver の開発の可能性について調査を行った。ベースとなる Solver としては船体まわりの流場計算用 NS Solver を改良したものを用いた。一方、格子生成の為に新たに、3 次元翼用の格子生成法を開発し、本計算用にグリッドを生成した。計算対象の 3 次元翼は翼断面形状が NACA 0012 で、アスペクト比 3 の橈円平面形翼である。迎角は 10° 、 R_n 数は 10^3 である。計算のグリッド数としては流れ方向に 45 点、翼幅方向に 31 点、垂直上下方向に 30 点、とった。得られたグリッドは図 2.3.8 に示される様なものであり、今回の二つの方法による計算に用いられた。グリッドのトポロジーは H-H 型であり、右側が前縁となる。本調査ではこの同一の格子に対して、二つの計算スキームで計算を行った。一つは前述の 2 次元翼と同様なゼロ方程式モデルに基づく擬似圧縮法であり、他一つは河村スキームを改良した直接シミュレーション法である。

(i) 擬似圧縮法；

擬似圧縮法では、非圧縮流体の連続の式に擬似圧縮性を導入して、圧縮性流体の数値計算手法を用いて流れを計算する。差分式は保存形を用いる。ゼロ方程式法で計算した翼上面およびそれと同一面上の圧力分布を等圧線で示す。これを図 2.3.9 に示す。流れは左から右である。橈円翼の特徴が捉えられており、各スパン位置で相似な圧力分布となっている。また、翼端から下流に翼端渦と思われる低圧域がのびた圧力分布となっている。図 2.3.10 は翼弦中央位置の断面内の流速分布を下流から見たもので、流れが翼下面の正圧域から翼端をまわりこんで翼上面の負圧域に向かっている。図 2.3.11 はさらに下流の断面内の流速分布を示し、図 2.3.10 での翼端をまわりこむ流れが、ここでは反時計回りの翼端渦に変化していることがわかる。本計算は R_n 数は 10^3 とかなり低いレイノルズ数で計算を行ったので、実験データがないため、計算精度の定量的評価は難しい。高レイノルズ数流れ計算への移行が今後の課題として考えられる。なおその場合には、非常に凝縮されたかたちで発生する翼端渦を、限られた格子点数でいかに精度良く表現できるかがポイントとなるであろう。

(ii) 直接シミュレーション法 (SACT 法)；

もう一つの方法として、3 次精度の上流差分を用いる Kawamura - Kuwahara の方法を参考にし、上記と同一の格子を持つ 3 次元翼まわりの流場を計算した。この方法は乱流モデルを使わずに、乱流の特性値や乱流への遷移を計算できると言われている直接シミュレーション法の一種であり、SACT 法とは Solution Algorithm for Cavitation and Turbulence の略である。本計算では、NS 方程式を保存形表示式への拡張を行っており、対流項について 4 次精度の中心差分を用いると共に、4 階の拡散項を陽に加えて計算を行っている。計算結果の一部として、翼上面の圧力分布を図 2.3.12 に示す。無次元時間 $t^\circ = 3.0$ の時のものである。圧力分布の傾向は前法のものと同じであるが、圧力そのものは前法のものより低くなっている。また、圧力分布の空間的振動が見られるのも前法と同じであるが、その程度は前法のものより大きい。翼弦方向の流速分布を図 2.3.13 に示す。 R_n 数が低いため、特に背面側、即ち、翼上面の境界層が非常に厚くなっているが、剥離は起こしていない。

以上、3 次元翼について 3 次元 NS Solver の適用の可能性を調べた結果、格子生成、計算スキーム、乱流モデル等の改良すべき点が明らかにされた。

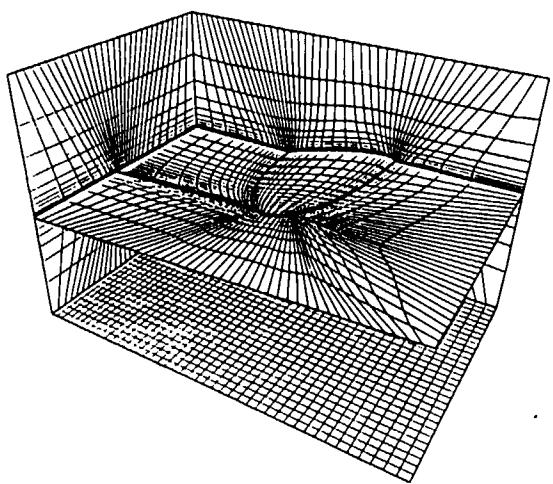


図 2.3.8 3 次元翼のグリッド

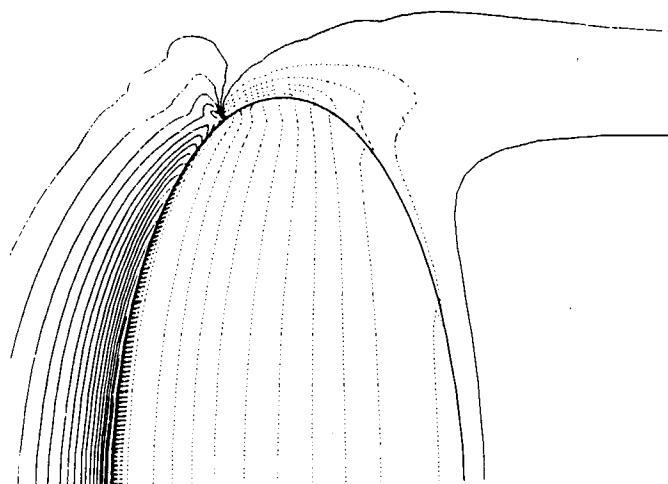


図 2.3.9 圧力分布の計算結果

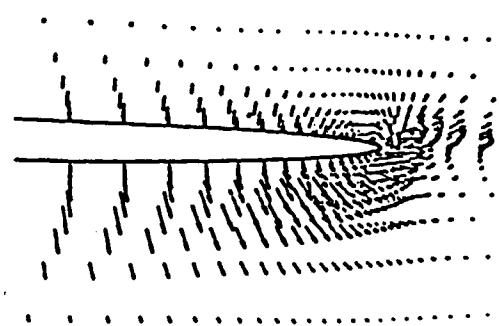


図 2.3.10 流速分布（翼弦中央位置）

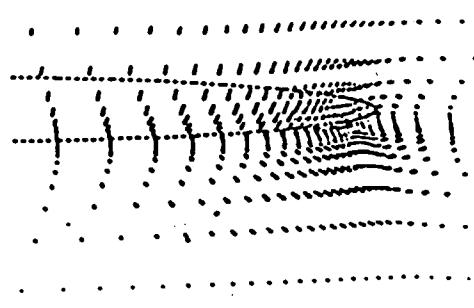


図 2.3.11 流速分布（翼後縁位置）

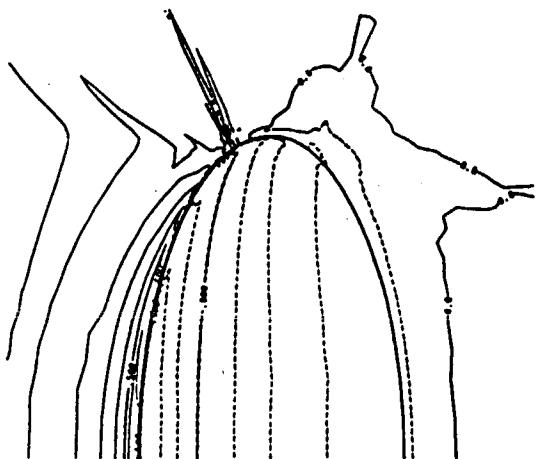


図 2.3.12 圧力分布の計算結果

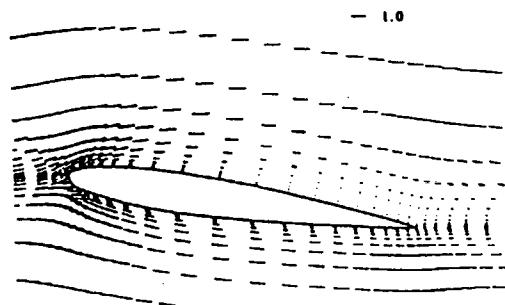


図 2.3.13 翼断面流速分布

(c) プロペラへの流入流場

船体とプロペラ干渉の粘性を考慮した解析法は馬力推定、プロペラ設計、プロペラ性能解析にとって重要な課題である。現在までのところ、この問題に関するアプローチとしては、境界層理論による船体伴流の計算と無限翼数理論計算法との組合せが主なものであり、まだ設計ツールの域ではない。本調査では、船体を NS Solver で解き、プロペラを、モーメンタム・ソースで置き換える方法により、干渉現象のシミュレーションの可能性について調査した。

(i) 2次元翼とモーメンタム・ソースの干渉計算

プロペラは流れを加速して推力を発生するが、流場からみるとプロペラの存在する場所に運動量のソースがあるものと見なせる（図 2.3.14 参照）。この方法により、既存の 2 次元 NS Solver を有効に利用して計算が可能となる。運動量方程式にソース項を付加することにより、プロペラの回転流成分は考慮できないが、加速作用は表現できる。 R_n 数が 10^2 、迎角 0° の計算を NACA0012 2 次元翼について行った。図 2.3.15 に示すようにモーメンタム・ソースの有ることにより翼のまわりの流れが加速されているのがシミュレートできている。また、表 2.3.3 に示すように抗力係数が増加しており、プロペラと船体との干渉と同様な傾向となっている。

(ii) 船体とプロペラの干渉計算

2 次元翼での計算から、船体とプロペラの干渉計算の可能性がでてきたので、プロペラ作動時の青雲丸模型まわりの高レイノルズ数流れを計算することを試みた。

先ず、プロペラ無しの状態での計算を行った。レイノルズ数 R_n は 10^6 で、満載状態である。格子点数は図 2.3.16 に示す様に、流れ方向に 81 点、ガース方向に 25 点（半船幅分）、船体表面に垂直方向に 31 点である。乱流モデルは Baldwin-Lomax のゼロ方程式モデルを用いた。図 2.3.17 に計算された船体まわりの圧力分布を示す。本計算は保存形で行ったが、振動のない滑らかな圧力分布が得られている。図 2.3.18 にプロペラ面位置での主流方向速度分布と面内速度分布を、実験値と比較して示す。主流方向速度分布では、伴流が計算では広めになっているが、傾向は良く一致している。面内速度分布も傾向は良く一致しているが、計算値のほうがやや速度成分が小さい。

次に、この伴流分布を入力としてプロペラ揚力面計算を行った。その結果、広めの伴流域の影響で K_T が 0.209 となり、実験値の 0.191 よりやや高めとなった。得られた推力分布をモーメンタム・ソースとして主流方向の運動方程式に代入し、船体まわりの粘性流計算を再度行った。このことにより、プロペラと船体の干渉効果の入った流場が求まる。図 2.3.19 にプロペラ面の D/2 前方での主流方向速度分布を実験値と比較して示す。プロペラの吸い込み効果によって伴流域が細くなる様子が良くシミュレートされている。

以上のことから、モーメンタム・ソースの手法を用いれば、既存のプロペラ計算手法と船体まわり NS Solver を組み合わせて船体とプロペラの干渉計算を行うことができ、プロペラへの流入流場の高精度推定に利用可能であることがわかった。今後の課題としては、伴流分布の推定精度向上・実船レイノルズ数への拡張などがあげられる。

表 2.3.3 NACA0012 翼型の抗力係数 $\alpha = 0.0, R_n = 100$

	C_{dp}	C_{df}	$C_d (=C_{dp} + C_{df})$
Source なし	0.0745	0.3307	0.4052
Source あり	0.1042	0.4511	0.5553

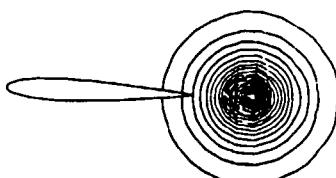
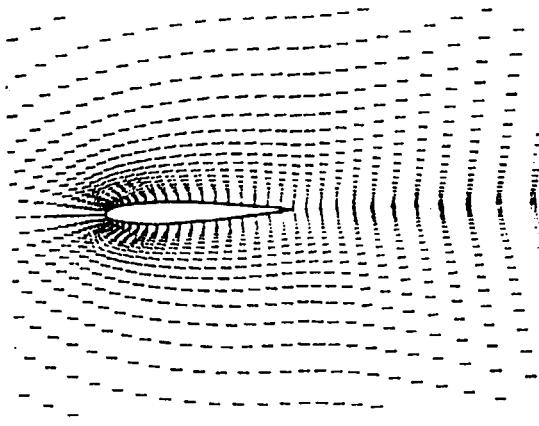
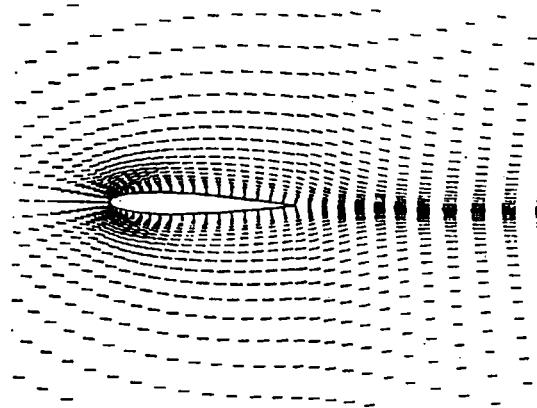


図 2.3.14 Momentum source 分布
($R_n = 100$)



a) Source なし



b) Source あり

図 2.3.15 速度分布 ($Rn = 100$)

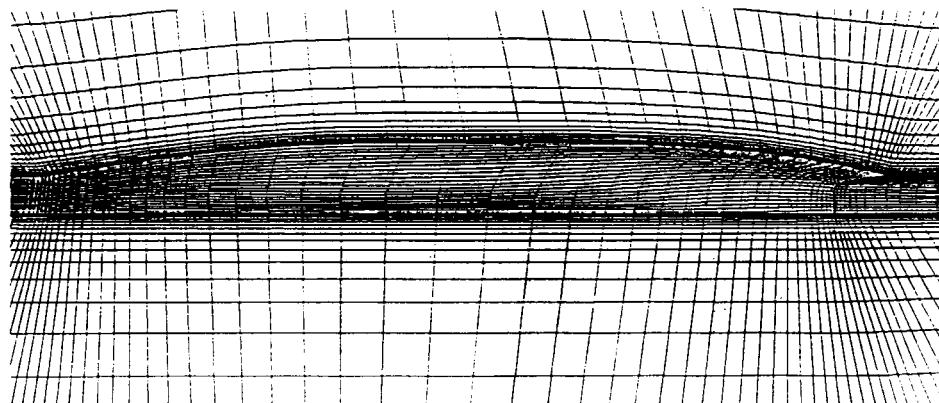


図 2.3.16 青雲丸模型船のグリッド ($Rn = 10^3$ 用)

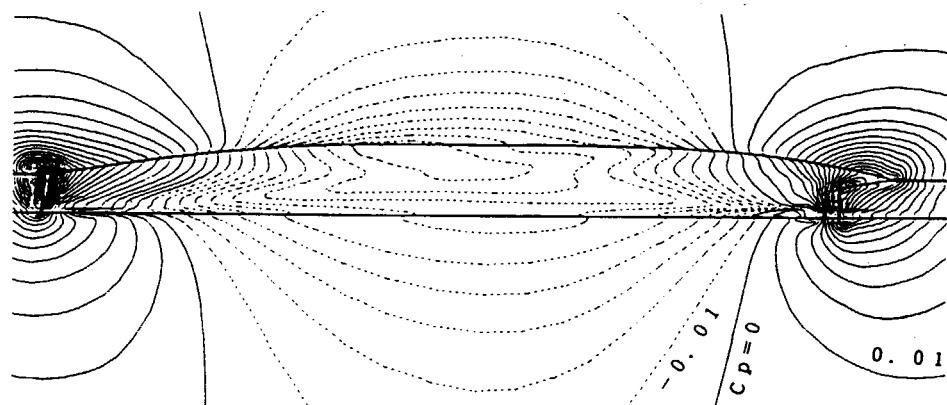


図 2.3.17 船体まわりの圧力分布

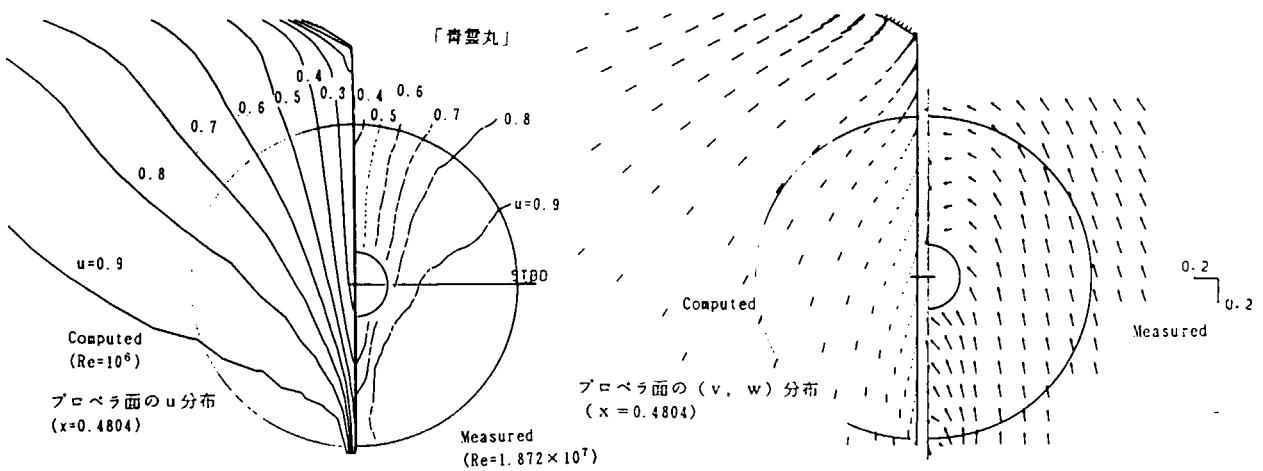


図 2.3.18 公称伴流分布の比較

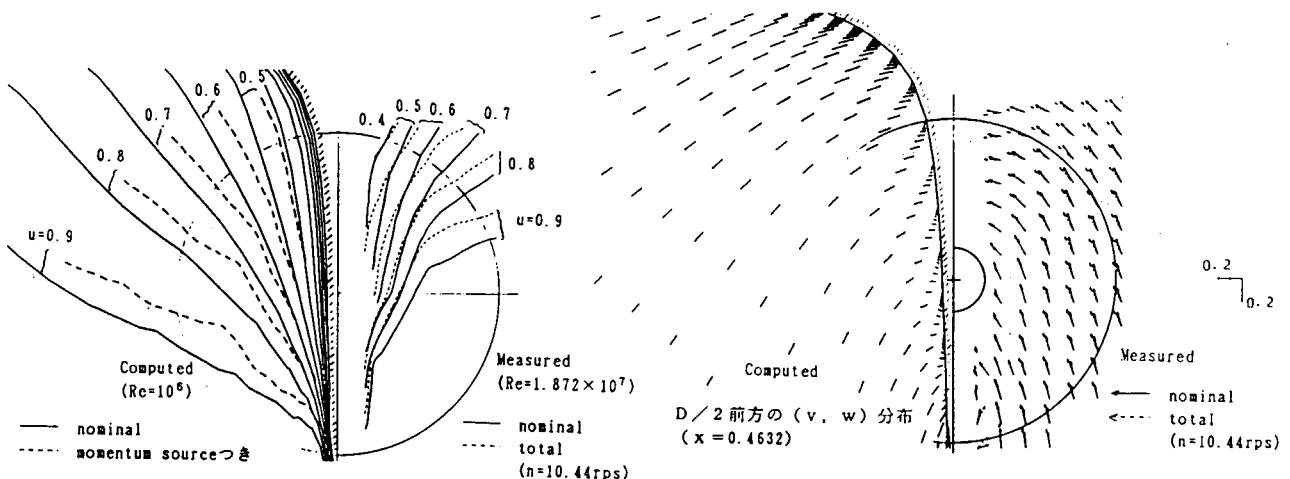


図 2.3.19 プロペラ作動時の伴流分布の比較

(2) 現状理論の調査

(a) プロペラ性能

現在利用されているプロペラ性能理論計算プログラムの計算精度及び問題点を調査した。理論計算法には、プロペラ揚力面理論に基づく最適標点法 (CLM), 核関数展開法 (KEM), 湍格子法 (VLM), 準連続分布法 (QCM) および揚力体理論に基づく境界要素法 (BEM) を対象にして、同一プロペラを同一条件のもとで計算することによって、それぞれの計算法による特徴を明らかにした。

(i) 計算対象

ハイスクュープロペラとし、青雲丸のものを選定した。

(ii) 計算状態

高荷重度領域を含み、前進率 $J = 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$ の合計 4 点とした。

(iii) 計算条件

(1) 規定：翼面分割数は、Root から Tip までを 10 等分とし、前縁から後縁までを 12 等分とした。自由渦の幾何形状については、翼の後縁から 5° おきに各等分端より同心円上に流し、かつ r/R の渦ピッチは翼面の幾何学的ピッチ角と同じとした。自由渦の後端は、プロペラ中心から後方へプロペラ直径の 2 倍までとした。粘性の影響に関しては、揚力勾配修正係数(k)を 0.882、抗力係数(C_d)を 0.0085 のそれぞれ一定値を採用するものとした。ただし、計算法あるいは計算プログラムの性質上これらの条件を満たせない場合には採用した条件や数値を示すことにした。

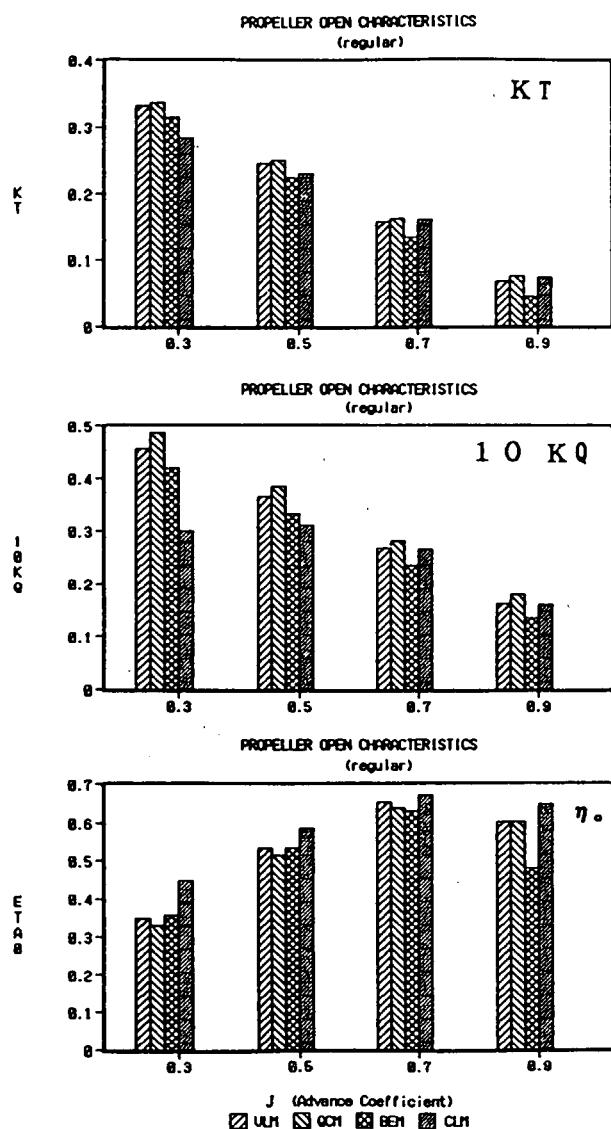


図 2.3.20 青雲丸ハイスキュープロペラ特性
特性計算（規定の場合）

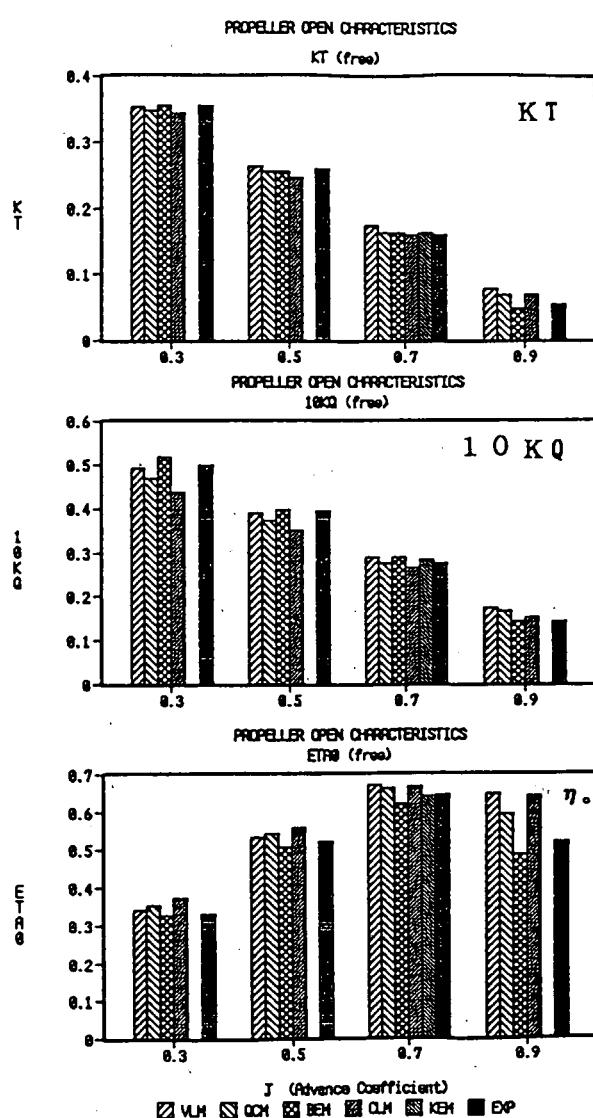


図 2.3.21 青雲丸ハイスキュープロペラ特性
特性計算（自由の場合）

(d) 自由：指定なし。ただし、計算に採用した上記の各データを明記することとした。

IV 出力項目

インプットデータの確認用アウトプットをはじめとして、循環分布、循環分布密度、吹上速度分布、圧力分布、 K_T 、 K_Q 、 η_0 を出力項目とした。

V 計算結果

(f) 規定：図2.3.20に単獨特性の計算比較を示す。計算対象がハイスクュープロペラであるにもかかわらず、ほぼ良く合う方向にあることがわかる。なお、前進率の低い領域ではCLMが他の方法に比べて離れた値を示している。

(g) 自由：図2.3.21はそれぞれの研究機関で使用されている計算方法による各計算結果を比較したものである。全ての方法による計算結果が実験値と良い一致を示している。

VI 考察

自由の場合、各計算法の精度は実用の域に達しているようにみえるが、規定の場合で明らかなように同一条件下での計算結果との対応をみると、規定と自由とでこれらの特性の大小関係が入れ替わっている。また、この傾向は循環あるいは圧力分布等の差の傾向とは必ずしも合っていない。このことは、特性計算に使用した揚力勾配修正係数や抗力係数の取り方に合理的でないものがあることを暗示している。

(b) プロペラへの流入流場

現状理論に関し、船体後方で作動するプロペラに流入する流れの計算に適用する計算法と問題点を評価し、推進器シミュレータ構想におけるプロペラ性能計算のあり方を検討した。計算手法としては、不均一流中のプロペラ特性・伴流とプロペラとの干渉・船体とプロペラとの干渉の3種類を用意した。これらによって、プロペラの誘導速度、伴流の変形および境界層の変形を求め、これらを評価して既存計算法の限界と新しい手法

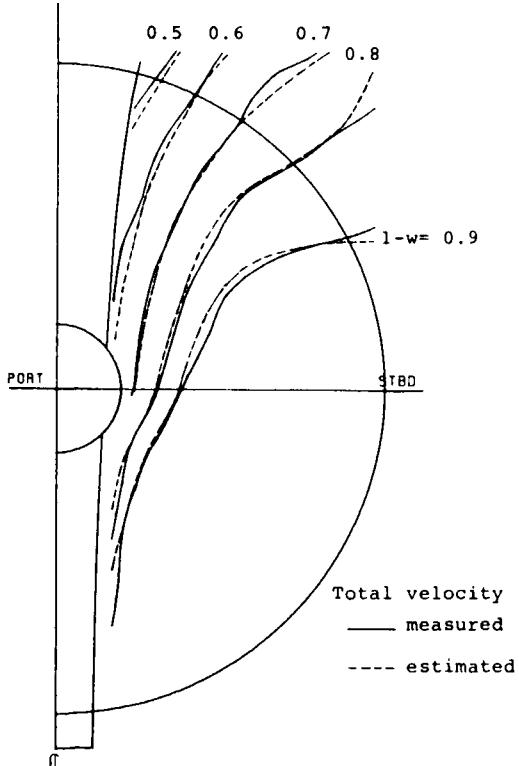


図2.3.22 青雲丸プロペラ面D／2前方
全伴流分布の計算・計測比較

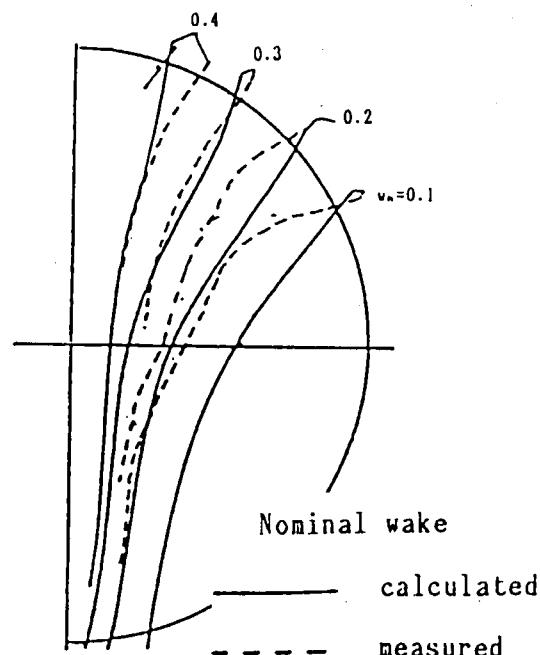


図2.3.23 青雲丸プロペラ面D／2前方
公称伴流分布の計算・計測比較

の可能性について調査した。

(i) 計算対象

青雲丸およびハイスクュープロペラを選定した。

(ii) 計算の種類と調査目的

- ① 単独プロペラ誘導速度→不均一流中での K_T ・ K_Q 等を評価する。
- ② 伴流+プロペラの干渉→有効伴流を評価する。
- ③ 船体+プロペラの干渉→公称伴流と有効伴流を評価する。

(iii) 出力項目

不均一流中のプロペラ特性、プロペラ前方の誘導速度、プロペラ前方とプロペラ面内での伴流分布等とした。

(iv) 計算結果

図 2.3.22 は②の方法によるプロペラ前方の有効伴流分布について計測された公称伴流分布を用いた計算値であり、計測値と良い一致を示している。図 2.3.23 は③の方法による同位置の公称伴流分布の計算値を計測値と比較している。

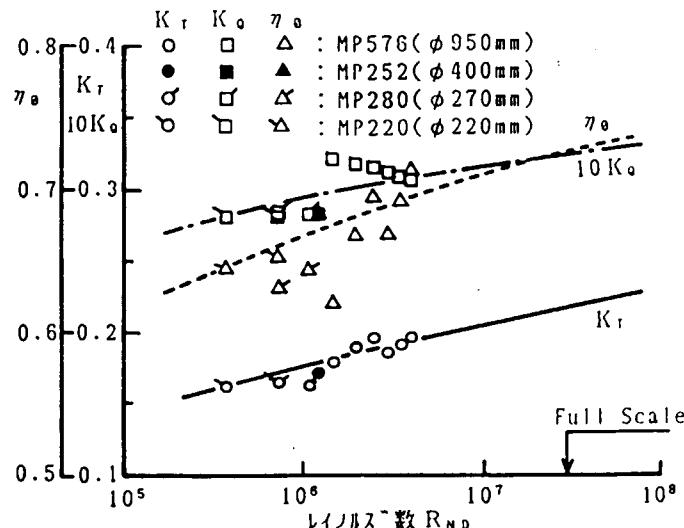
(v) 考察

①の方法では、全計測伴流分布からプロペラ特性計算 (KEM) による誘導速度分布と計測された公称伴流分布とを差引いて干渉成分を分離した。この干渉の度合は流速分布勾配に依存しているようである。②の方法による有効伴流推定法は実用的であると考えられるが、ここに入力すべき公称伴流分布の精度に左右される。すなわち、③の方法において示されたように船体表面の境界層は船底に近づくほど厚くなり過ぎる傾向がみられる。本方法による計算では船体および船体中心線近傍の Wall Law の影響の強い部分で速度分布勾配が強くなる傾向がみられる。

(3) 高精度計測法の調査

(a) プロペラ性能

プロペラのマクロな性能、すなわちスラスト係数 K_T 、トルク係数 K_Q 、単独効率 η_0 に対するレイノルズ数の影響を調べるために、直径 950 mm の大型模型プロペラの単独性能試験を行なった。また、油膜法による翼面流れの可視化も行なった。供試プロペラは、運輸省航海訓練所「青雲丸」の通常型プロペラ (CP) とハイスクュープロペラ (HSP) である。その結果を、直径 400 mm, 270 mm (HSPのみ), 220 mm の模型プロペラの既存の試験結果と比較した。大型プロペラ動力計は、基本的には IHI 山崎が用いたものと同じである。すなわち、プロペラ駆動用の電動機などは用いずに、供試プロペラの下流 5 m に取り付けた可変ピッチプロペラに水車の動きをさせ、供試プロペラを駆動する。試験条件は、曳航台車の速度



と水車のピッチ角で制御する。前進常数 $J = 0.7$ の結果を、他の直径のプロペラのものと共に図 2.3.24 に示す。結果はかなりばらついているが、直径と回転数をベースとするレイノルズ数 Rn が高くなるにつれ K_T 、 K_Q 、 η_0 ともに増加するという傾向が見られる。この結果を外挿すると、実船レベルのレイノルズ数の単独効率と、通常の模型試験レベルの 10^6 のレイノルズ数のものとは 6 % 程度もの差がある。CP のものは、ばらつき・上昇率とともに HSP のもの程大きくなないが、やはり同様の傾向がみられる。すなわち、尺度影響は HSP の方が大きい。模型試験結果に尺度影響の修正を施して実船プロペラの性能を推定するという方法について文献調査を行ない、Lerbs の等価翼型理論をベースにした修正法を考案したが、模型試験では層流境界層の範囲の大きいことが問題を複雑にする。模型試験における合理的な乱流促進法の開発が望まれる。勿論、プロペラ周りの粘性流の理論解析法の開発も望まれることは、言うまでもない。

プロペラのミクロな性能、すなわち圧力分布の計測を行なった。供試プロペラは、直径 400mm の「青雲丸」の CP と HSP である。圧力分布の計測は、これまでにも導管方式、チャンバー方式、貼付け方式等が行われているが、今回は、翼形状が変わってしまわないこと、非定常圧力が計測できること、キャビテーション状態で

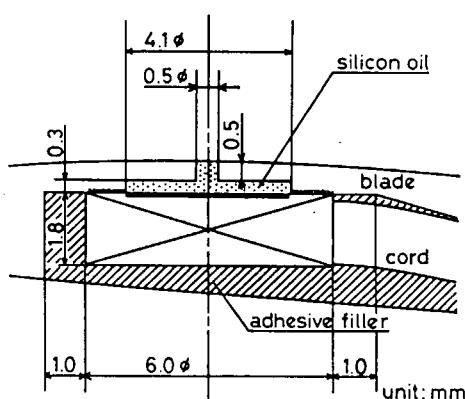


図 2.3.25 圧力計
チャンバー形状

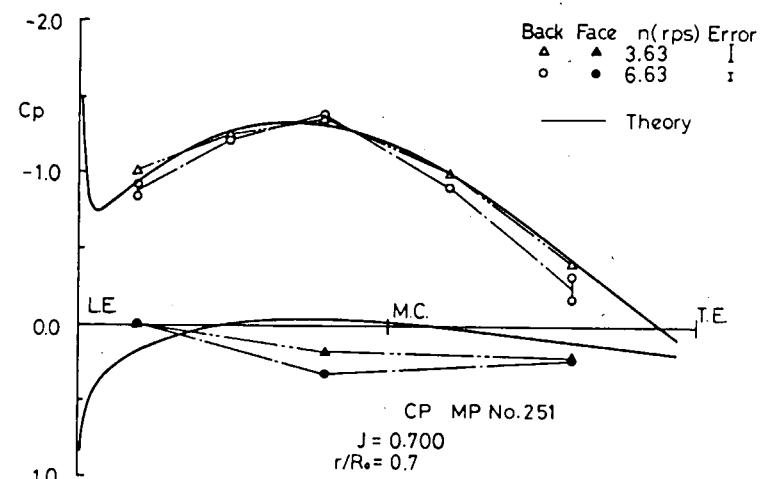


図 2.3.26 青雲丸 CP の均一流中翼弦方向の圧力分布；
 $J = 0.7, 0.7R$

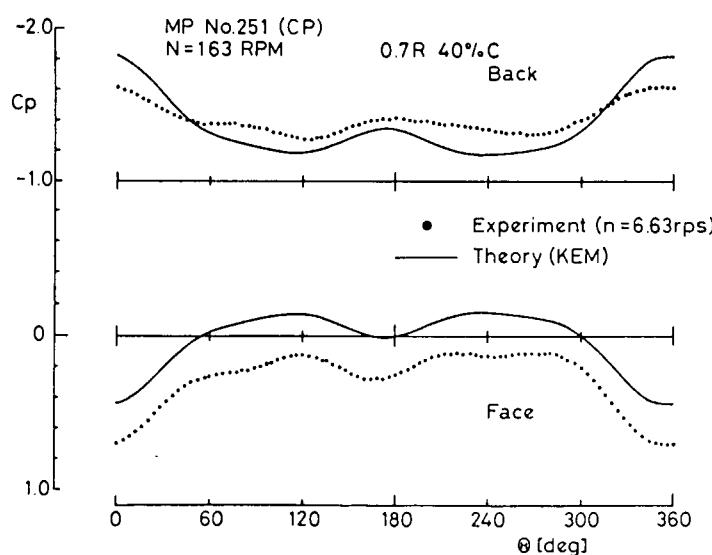


図 2.3.27 青雲丸 CP 伴流中の一回転中の圧力変化； $0.7R, 40\%C$

も計測できること等の理由で、チャンバー方式を選定した。圧力計の取付図を図2.3.25に示す。この方法で注意すべき点は、翼の歪による誤差が入らないようにすることである。そこで、特にこの点について詳しく検証するとともに、周波数応答、翼角位置による静水圧影響、キャリブレーション等にも細心の注意を払って計測精度の向上につとめた。図2.3.26に、計測結果、計測精度を、揚力面理論（小山法）による計算値と共に示す。図は、均一流中CPの $J = 0.7$ 、半径位置 $0.7R$ のものである。この様に、CPでは既存の揚力面理論による圧力分布は、特にback面で良く一致する。但し、HSPでは一致度は悪くなる。図2.3.27に、伴流中の圧力変化を示す。図は、 $K_T = 0.201$ （実船回転数163 rpmに相当）のCPの $0.7R$ 位置、翼弦位置 $40\%C$ のものである。計算値と実験値は割合良く一致しているが、Back面では実験値の変化が小さいこと、Face面では実験の圧力の方が高く位相が若干進んでいることなどの差異がみられる。以上のように、高精度の圧力計測法が開発されたが、圧力計の取付けにあたっては細心の注意が必要なことと、圧力計を埋め込むのに十分な翼厚が必要になることが欠点である。

(b) 流場の可視化、画像処理

簡便な実船伴流の計測法として、3台のCCD-TVカメラを船体外板に取り付け、水中を移動するトレーサがそれぞれのカメラの画面のどの位置に写っているかという情報をもとにトレーサの速度、すなわち流速分布を計測するという手法について検討した。

計測法の可能性を調査するために、模型船周りの流場を計測した。図2.3.28に、模型船とカメラの関係を示す。実船計測ではカメラが船体外板に取り付けられるが、模型実験では図のように模型船の下流から撮影することとした。実船計測との違いは、トレーサがカメラに近づいて来るか遠ざかって行くかのみであり、計測の本質に関わる差ではない。まず、模型船を取り付けない状態、すなわち静止するトレーサに一定速度でカメラを近付けたときの速度を計測することにより、計測法の基本的な精度を調査した。結果の一例を図2.3.29に示す。曳航台車速度は、1m/sである。この様なデータを総合すると、本法により計測した速度と曳航台車のそれとの差の平均値（偏り）が1.5%程度、標準偏差（ばらつき）が2.0%程度になり、本計測法の基本的な精度がピトー管のそれと十分比肩し得る高いものであることが分かった。次に、図2.3.28に示したset-upにて、船体周りのトレーサの移動速度を計測し、5孔ピトー管の計測値と比較した。トレーサ速度の計測点数は720（トレーサ数180）である。但し、本法の計測値は空間内の任意の点にばらついた形で与えられるため、伴流分布を評価する上でも、5孔ピトー管の結果と比較する上でも、これをある断面での格子点上の速度に換算しておく方がよい。この方法について文献調査を行なった結果、格子点を中心とするある半径内に存在する計測データを、格子点とデータ点との距離の2乗の逆数で荷重平均するという手法を用いることとした。

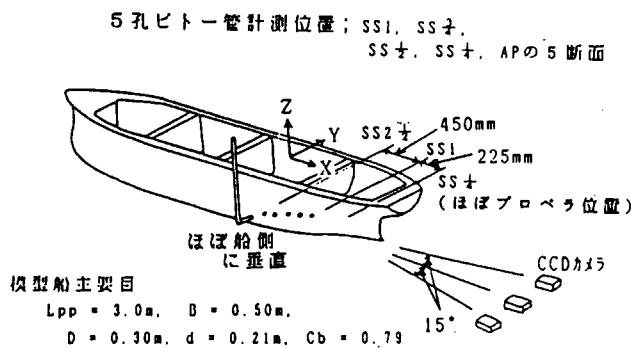


図2.3.28 トレーサ・TVカメラ法による模型船周りの流場測定 set-up

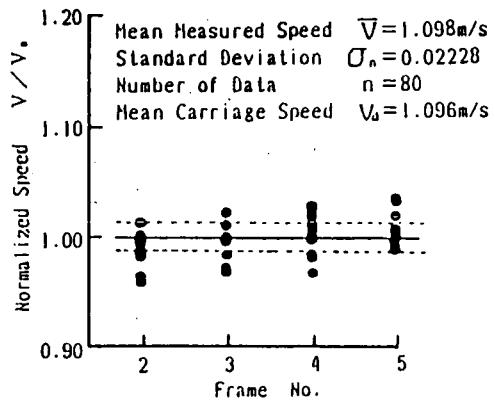
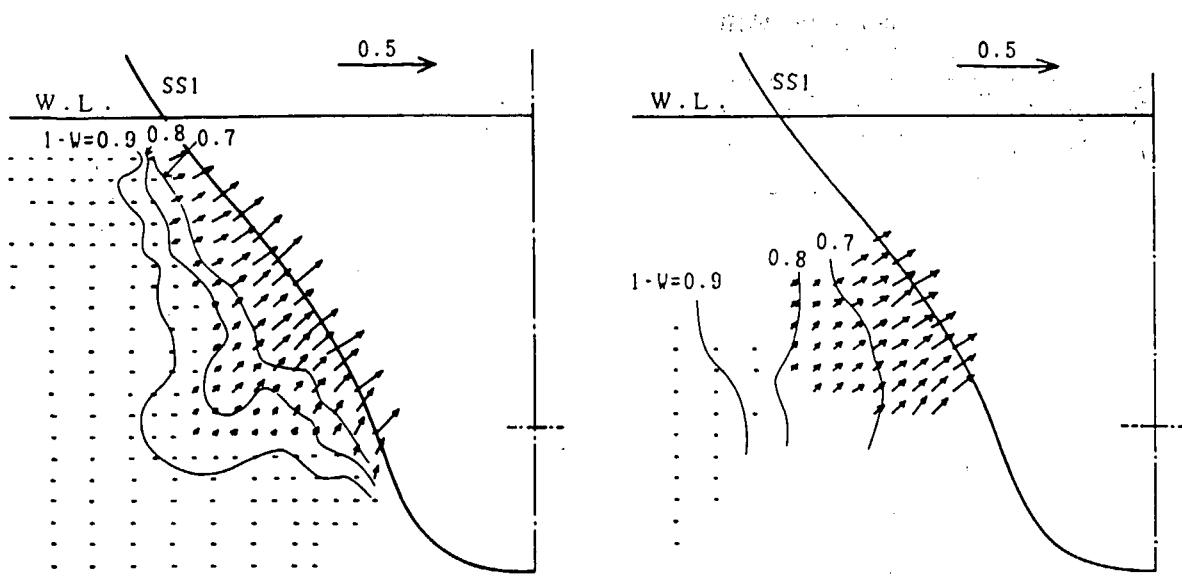


図2.3.29 均一流の測定結果；1.0 m/s,
画面取り込み間隔 0.3秒(30cm)



(1) 5孔ピト一管による計測結果

(2) 本法による計測結果 ($r = 30\text{mm}$)

図 2.3.30 模型船 SS1 の断面での流速分布の比較

プロペラ位置付近では船体のハレーションによりデータが得られなかつたため、SS1 の断面での流速分布を比較した。結果を図 2.3.30 に示す。全体に本法による流速が遅くなり、伴流の幅が広がつてゐる。この原因についてトレーサの移動に関する数値計算を行なつた結果、今回用いたトレーサ（直径 6 mm）では慣性力が強すぎ、この断面では十分加速されていないことが分かつた。すなわち、今回の両者の差の原因は計測法そのものの問題ではなく、トレーサの選定に問題のあったことが分かつた。また、データ点数を間引いて同様の処理を行なつても、流速の得られる格子点の数が減少するもの、流速そのものに大きな変化はみられず、本法の解析法がデータ点の少ない時にも適用できることが分かつた。以上のように、模型実験に若干の不備があつたため、伴流分布の計測精度の評価には至らなかつたものの、本法が船尾伴流のような歪んだ流れ場にも適用できることは示されたと言えよう。

実船計測に使用されるトレーサ及びその放出位置についてもその概略を検討した。まず、「青雲丸」の模型船周りの流場計測データをもとに、プロペラの吸い込みの影響などを考慮して船尾付近の流線を推定した。その結果、SS1 付近（プロペラより約 7 m 上流）からトレーサを放出してプロペラの上半分の領域に至らせるには、ベースライン上 1.5 ~ 2 m 程度の高さから放出すれば良いことが分かつた。また、トレーサの追従性についての数値計算も行なつた。その結果直径数 cm というピンポン球程度の大きさのトレーサならば、周囲流速とトレーサ速度の差が数% 程度以下になると、トレーサの比重と打ち出し速度を変化させることにより、トレーサの到達範囲を制御できることが分かつた。

(c) プロペラスラストの高精度計測法

実船プロペラのスラスト計測法には、大別して 2 種類ある。プロペラ軸端にあるスラスト受け内の受圧板にかかる力を油圧シリンダーや荷重計などにより計測する方法、中間軸のスラストによる圧縮変位または歪を計測する方法の 2 つである。前者は高精度であるが、建造初期から計画する必要がある。後者は、通常の中間軸で適用可能であり、特に歪ゲージの中間軸への直貼り法は非常に簡便である。しかしながら、スラストによる歪は、トルク歪の $1/30$ 程度と非常に小さいため、トルク歪や温度歪の影響や歪アンプ等の O 点移動などの影響を受け易い。従来行なわれてきた代表的な歪ゲージ結線法（今回は 2 チャンネル計測した。以下従来法 1,

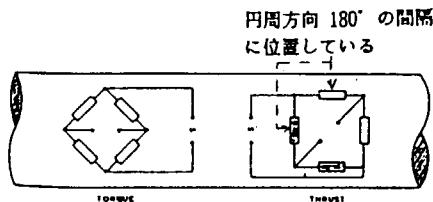


図 2.3.31 トルク及び従来方式
スラスト計測法結線図

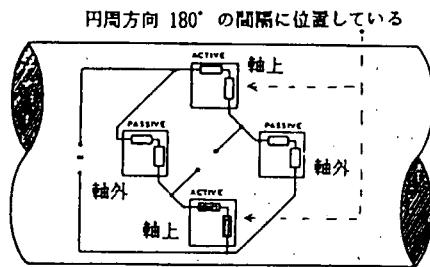


図 2.3.32 HY 方式スラスト計測法結線図

従来法 2 と称す)と、トルク歪の影響を理論的に受けなくなる Hylarides の方法(HY 法と称す)を図 2.3.31, 2.3.32 に示す。但し、温度歪については、前者はその影響を受けず、後者は passive ゲージと active ゲージに温度差があれば、その影響を受ける形になっている。後者で計測された例はほとんどない。

上記両者の直貼り法について実船計測を行なった。供試船は長さ約 100m のケミカルタンカーである。スラストの計測結果と、計測した馬力から推進効率を種々仮定して求めたスラスト(推力減少率 t は 0.2 と仮定)の比較を図 2.3.33 に示す。HY 法のスラストは 40% 程度という低い推進効率になってしまい、正確な値とは思われない。従来法 1 の推進効率は 60% 程度

という妥当な値である。従来法 2 は推進効率 70% 以上と高すぎるため、トルク歪の影響を受けたものと思われる。但し、HY 法で妥当なスラスト値が得られた例もあり、計測法としてどちらが優れているとは一概に言えない。前述のように、原理的には HY 法の方が優れているが、貼るべき歪ゲージの数が多くなるため、ゲージ接着の際の誤差や温度影響を受け易くなるからである。結局、計測例を増やして経験を積むとともに、なるべく多くのゲージセットを用いて計測を行ない、そのうち良好なデータを抜き出すという方法で計測法の改良を行なってゆくべきであろう。

(4) 数値解析応用の調査

数値解析の応用として、「プロペラ流場シミュレータ構想」について調査した。

(a) 調査内容

(i) ニーズ調査

本シミュレータに要求される機能、構成及びその利用法について、ユーザーである設計者及び研究者からのアンケートによる調査を行なった。

(ii) 文献等の調査

市場環境の変化及びシミュレータ完成時に予想される環境にも耐えられる、理想的なシミュレータを構築するために、航空宇宙分野に於ける現状や、各種公開されている流体解析プログラムの内容を把握するなどの調査を行なった。

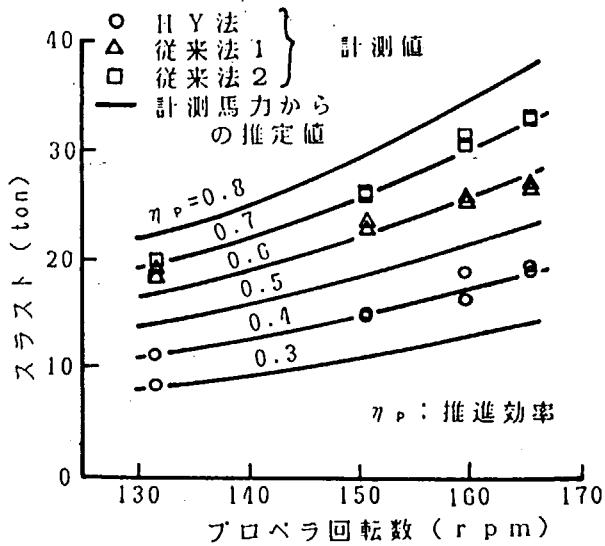


図 2.3.33 実船スラスト計測結果及び馬力から
の推定値との比較

(b) 調査結果

本シミュレータを、数値水槽のサブシステムとして位置付け、更にプロパルサーの性能設計や研究開発にも応用しうる計算システムと想定して、持つべき機能を次のようにまとめた。

<プリ・プロセッサ>

1. 利用目的の設定
 - a 数値水槽のサブシステム
 - b 設計計算
 - c 研究開発
2. 環境条件設定
 - a 自由表面無し
 - b 自由表面有り
3. 計算条件設定
船速、回転数、軸深さ
流入流場等
4. 入力データ
 - a ファイル利用
 - b 入力ガイド
5. 形状処理ルーチン
形状定義、格子生成
6. 入力データチェック
 - a 主要データ
 - b 2／3次元グラフィック
 - c 計算時間予想／計算精度

<メイン・プロセッサ>

1. 数値水槽サブシステム
 - a プロペラ単独性能計算
 - b プロペラ流場計算
 - c 船尾流場計算
 - d 自航性能計算
 - e キャビテーション、変動圧等
2. 設計計算
 - a 初期設計；データベース等
 - b 中間設計；揚力線／面理論
 - c 最終設計；揚力体理論
 - d 厳密設計；オイラー法
3. 研究開発
N-S法

<ポスト・プロセッサ>

1. 出力ガイド
 - a カタログ表示
 - b デフォルト機能
 - c オプション機能
2. ファイルセーブ
 - a 数値データ
 - b グラフィック・データ
3. グラフィック機能
 - a グラフの種類選択
 - b 2, 3次元格子図
 - c 隠面消去カラーコンター図
 - d 流れベクトル、圧力分布、渦度分布、循環分布図
 - e コンター図、ベクトル図の組み合わせ
 - f 鳥観図、界面図等
 - g 図の編集機能
 - h 簡易アニメーション

本シミュレータの簡単なフローチャート及び概念図を図2.3.34及び図2.3.35にそれぞれ示す。

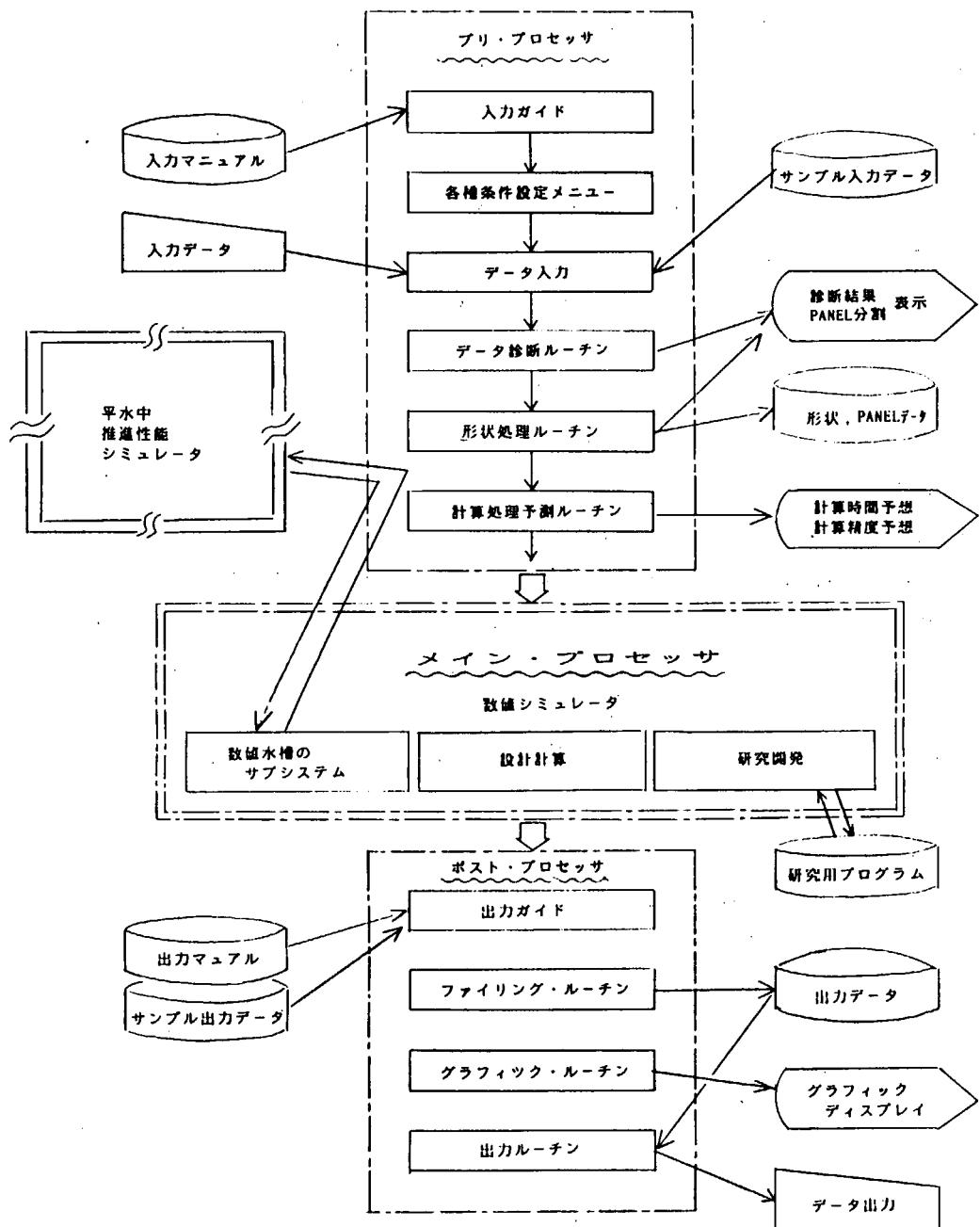


図 2.3.34 プロペラ流場シミュレータの概念図

[プリプロセッサー]

[メインプロセッサー]

[ポストプロセッサー]

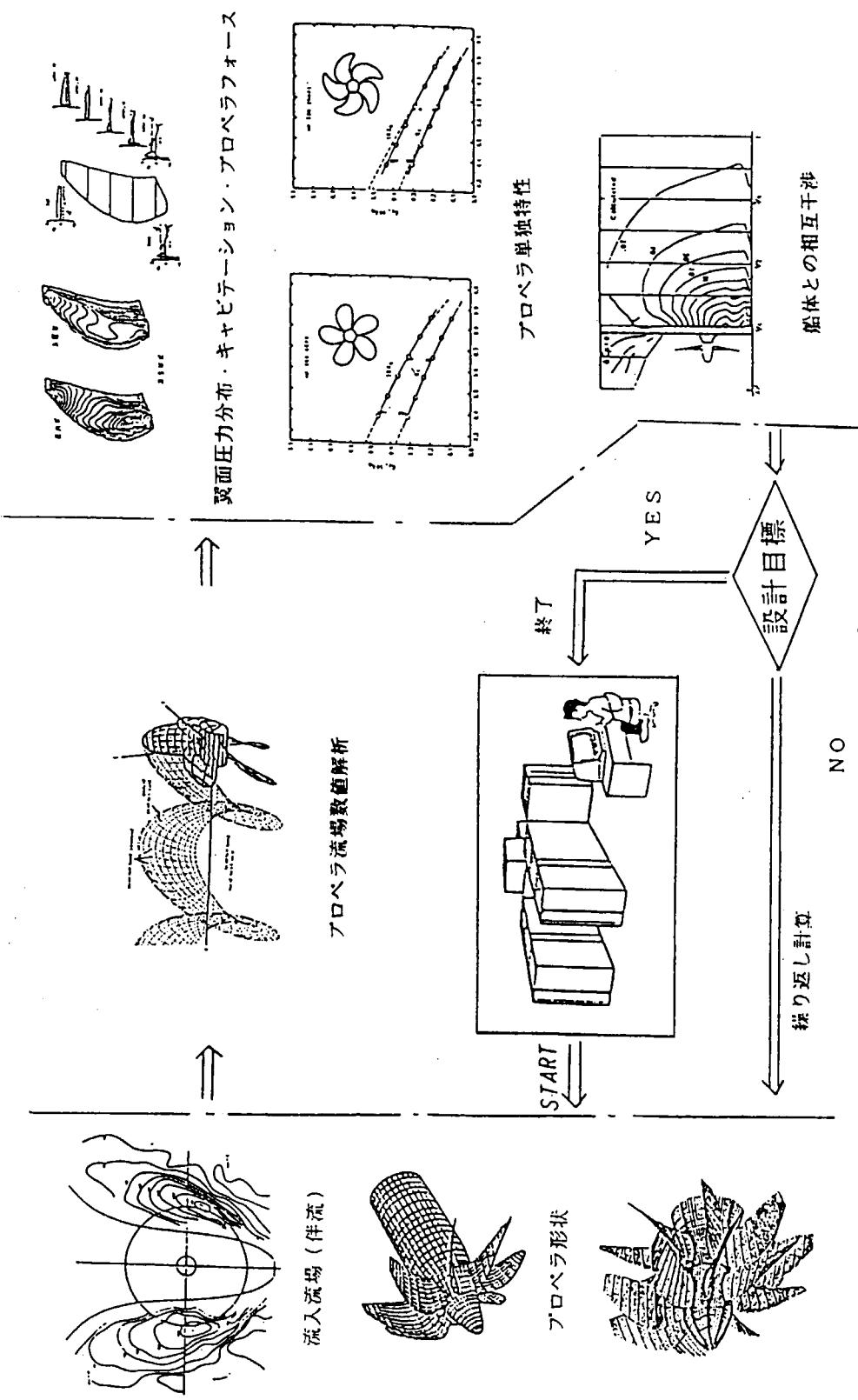


図2.3.35 「プロペラ流場シミュレータ」の概念図

2.3.3. 研究開発課題と解決策

(1) NS 方程式の解法の高精度化

2.3.2(1)で述べた様に、2次元翼、3次元翼及び船体とプロペラの組合せについて、NS Solver の適用性について調査を行った。この結果、実用レベルにまでNS解法を高度化するためには次のような課題が挙げられる。

2次元翼についてはグリッドの切り方や細かさを変えるなどのグリッド生成法を工夫することにより、翼厚が3.6%翼弦長程度の、前縁半径の小さい翼周りの計算が可能となった。この様に格子生成の工夫だけで計算が可能になったり、精度が上がる反面、計算時間が莫大となる。より高い Rn 数 10^7 での計算では実験では存在する剥離泡らしきものが計算できたが、剥離泡の大きさと格子の大きさが同程度であり、更に細かいグリッドでの計算が必要な場合もある。計算スキームを保存形にすることにより、格子を粗く出来ることから、保存形による計算コードの開発により高精度化が期待できる。

3次元翼では計算された圧力分布に特異点が生じ、現実の現象と対応しない流れが計算されていると思われる。これを解決するためには、複雑な形状に対応できるより高度な格子生成法の開発が不可欠である。今回の計算では保存形の計算スキームで計算を行っているが、物体表面と一格子分の上流においては、保存性を規制した計算スキームとなっておらず、この部分での保存性を確保した計算スキームの開発が必要である。さらに今回の擬似圧縮法による計算では乱流モデルを用いていないため、 10^3 程度の流場しか計算できていない。高レイノルズ数流れの計算を行うためには、乱流モデルの導入が必要であり、翼端渦の拡散をシミュレートできるものが不可欠である。特に、高レイノルズ数となるに従って半径が小さくなる翼端渦に関する渦度の保存性を保った計算スキームの開発が急がれる。

プロペラそのものについて直接計算する手法についても着手する必要がある。現在のところ、航空などの分野ではプロペラまわりの流場を翼列のイメージで格子表現して計算する手法が主である。この手法を船用プロペラに単純に応用すると、種々の不都合が生じる。即ち、強いスクューネスを持つ格子となるばかりでなく、各翼間の相互干渉作用が適切に表現できなくなる。これを克服するためには、グリッド生成を工夫し、例えばオーバーラッピング・グリッドを用いて、流場間の情報の受渡しを適切にするなどのNS解法の高度化が必要である。

プロペラと船体の干渉をモーメンタム・ソースを用いてモデル化することにより、プロペラ流入流場のシミュレーションの可能性を示すことが出来たが、高精度化の為にはプロペラの回転に応じて相対位置を変えることや幾何学的形状の影響を考慮した格子生成の高精度化が必要である。また、長期的にはプロペラの周りの流場計算の為のNS Solver の開発も計算スキーム及び格子生成の一貫性から高精度化につながることが期待できる。

(2) 現状理論の実用化

プロペラ性能について、現在利用されているプロペラ性能理論計算プログラムの計算精度及び問題点を調査した結果、計算条件を自由とした場合には各計算法はほぼ実用の域に達していることが明らかとなった。しかし、規定の場合にみられるように同一条件下で最適標点法(CLM)は他の方法から大きく離れた傾向を示しており、従来型のMAUプロペラ以外への適用には注意を要するとの指摘を裏付けている。一方、幾何学的に忠実な渦格子法(VLM)、準連続分布法(QCM)および境界要素法(BEM)は、ハイスクュープロペラの計算に対して極めて良好な結果を得ており、与えられた条件下で経験常数を使用すれば、実用計算に供されるだけの精度を有しているものといえよう。ただし、規定と自由とでこれら三者の特性の大小を入れ替わり、かつ循環分布や圧力分布等の傾向が必ずしも特性の大小関係の傾向に合っていないことは、揚力勾配修正係数や抗力係数の取り方等に合理的で無いものがあることを暗示している。さらに、今回の比較計算においては、特性が既知の单一のプロペラしか対象にしていないため、これらの計算法の適用限界が不明であること、従って実用計算法としての汎用性に

については未検討であり、今後の調査に委ねられるべきである。

プロペラへの流入流場については、現状理論に関し、船体後方で作動するプロペラに流入する流れの計算に適用する計算法と問題点を評価した結果、不均一流中のプロペラ特性および伴流とプロペラとの干渉に関しては入力データとして計測された公称伴流を使用する限り実用域に達しつつあるものといえよう。一方、プロペラ前方あるいはプロペラ面内の公称伴流分布の推定に対しては計測値との差が大きく、まだ未解決である。従って、プロペラの誘導速度による伴流の変形および境界層の変形については、通常の要目に対しての実用には耐えるが、船体とプロペラとの干渉の計算に用いる公称伴流の推定法に関しては、既存法の改良や新しい手法の可能性について、さらに調査を続ける必要がある。

(3) 高精度評価データの蓄積と拡充

直径 950mm の大型模型プロペラの単独性能試験を行ない、 $R_n = 4 \times 10^6$ という高レイノルズ数までプロペラ性能値を得ることができた。また、図の読み取り誤差を避けるため、相似模型の実験結果も合わせて、数値一覧表にまとめた。このデータは、今後のプロペラ性能への尺度影響の解析や数値計算結果の評価に非常に有用なものとなる。但し、実験結果はかなりばらついており、その精度評価には十分注意する必要がある。計測装置各部の精度の評価と向上を一つ一つ行なうという地道な努力が必要であろう。また、尺度影響を考察する上で、プロペラ翼面境界層の合理的な乱流促進法の開発が望まれる。

チャンバー方式によるプロペラ翼面圧力分布の高精度測定法を開発した。このデータは、今後理論計算の検証に有用なものとなる。但し、圧力計を埋め込むのに十分な翼厚が必要なため翼端や前・後縁付近の測定に適用しやすく、また、実験には細心の注意が必要である。現状よりも小型の高精度圧力計を開発するとともに、今後計測例を増やして測定法の一般的なマニュアル化が必要である。また、実船計測への適用も望まれる。

水中を移動するトレーサの速度を 3 台の CCD-TV カメラと画像処理により測定するという実船伴流計測法について検討した。その結果、基本的な測定精度が数 % 程度というピトー管に十分比肩し得る精度が得られることができた。また、測定データの解析法についても検討し、本法が船尾伴流のような歪んだ流れ場に適用可能であることが示された。しかしながら、まだ実際の伴流分布の測定には至っておらず、今後実船・模型とともに計測法の検証を行なう必要がある。

ゲージ直貼り方式による実船スラスト計測法について、実船試験により評価した。試みた計測法は、従来法とトルク歪の影響を受けない HY 法の 2 つである。結果は予想に反し、前者の方が良好なデータが得られた。HY 法は原理的にはより精度の高い計測法であるが、貼るべきゲージの数が従来法の倍になるため、温度影響やゲージ接着の際の誤差の影響等を受け易い。従来法、HY 法とも、計測例を増やして経験を積むとともに、なるべく多くのゲージセットを用いて計測を行ない、そのうち良好なデータを抜き出すという方法等により、計測法の改良を行なってゆく必要がある。

2.4 調査検討結果のまとめ

(1) 船体周囲流場の数値解析法

平水中の流場や性能を取り扱う場合に、流体運動現象を表す支配方程式としての Navier Stokes (NS) 方程式を近似なしに、あるいはより少ない近似化の範囲で解くことが究極の目標である。しかしながら現在の船体周囲流場の数値解法の技術レベルは、文献調査から得られた結果からみると、船体周りの流場の基礎特性の把握には役立つが、船型性能評価に必須の抵抗値の定量的算出が可能な技術レベルには至っていない。本調査研究において数値解析技術の現状を更に具体的に把握するために、現在利用できる解析手法や基礎調査のために新た

に作成した解析手法を用いてNS方程式の解法に関する共通的な要素技術である差分スキーム、格子生成法、乱流モデル等について調査した。今回検討の対象とした解析手法は大きく次の3種に分類できる。

- NS方程式の差分解法

Full NS方程式の差分解法(2次元及び3次元船体)

3次元船体周りのレイノルズ平均NS方程式の差分解法(方程式の近似化による実用的解法)

- 境界要素法による水波計算
- 理論解析との組合せ

これらの調査検討の結果判明した主要な点は、次の通りである。

(a) Full NS方程式の解法において現状で扱いうるレイノルズ数は 10^5 程度迄である。粘性流れの基礎的研究用として利用できるが、模型船対応のレイノルズ数 10^6 や実船対応のレイノルズ数 10^9 を対象とするためには、さらに基礎的な研究を進めていかなければならない。船体周囲の自由表面水波の計算に関しては差分解法、あるいは境界要素法による解法により粘性を考慮しない範囲では利用されつつあるが、今後は水波／粘性の干渉を更に明らかにする研究が必要である。

2次元Full NS解法については、水波問題に応用したときの効率のよい計算スキームの開発や、高レイノルズ数化、計算時間の短縮のための適切な乱流モデルの開発を行う必要がある。3次元Full NS解法については、水波問題については直交格子系の枠内で粘性現象の解像度を高める手法の開発と、格子生成に関して領域分割法、多重格子法を取り入れることが重要となる。

(b) レイノルズ平均NS解法においては、レイノルズ数 10^6 程度までの計算は試みられているが、現状では船体抵抗の推定精度が低く改良のための研究を続けねばならない。このために汎用性の高い乱流モデルの開発および格子生成法の改良を行うことが必要である。

(c) 一方、これら数値解析の評価に必要な流場データ収集には計測精度の向上と、微妙な流れの状況把握のための非接触な計測法、たとえばレーザー流速計の利用法の開発が必要である。

(d) 米国の研究機関で実施しているように、ネットワークの有効利用やOSの統一、簡素化、開発の分業体制など開発者の負担を軽減するような環境の整備が必要である。

(2) 波浪中抵抗増加理論の高度化

波浪中の流場、抵抗増加およびこれらを包括する波浪中推進性能に関する推定法は、現在主として線形理論に基づく数値計算と模型実験に頼っている。本調査研究では波浪中抵抗増加および波浪中推進性能の推定、評価技術に関し、現在利用可能な推定理論並びにその検証に必要な計測手法について広範囲に亘る文献調査と試計算の結果、主要な結論として以下の点が明らかになった。

(a) 抵抗増加の推定に関して、現在用いられている数値計算法は、大部分が細長体の仮定に基づく計算法であり、やせ型から肥大船までの各種船型に対して実用的に必要な波長、波方向、船速範囲で必ずしも十分な推定精度を有しているとは言い難い。

任意の船体形状に適用し得る計算法として3次元特異点分布法による抵抗増加計算法の実用化が期待される。斜波中の船体挙動の推定に関しては、実際の航走状態に即した斜波中の前後、左右、ヨー方向の波浪による定常力の理論計算法が確立される必要がある。また、現状の計算法は線形理論を基礎にしているため、水面上の船型の影響までは評価できない難点がある。このため、波浪中を航走する船体周りの非線形な波動現象に対する数値計算法の開発が特に要請される。

(b) 波浪中推進性能評価に関しては、波浪中自航要素の特性について理論的考察が加えられつつあるものの、推

定法としては全面的に実験結果に依存していること、また波高が高くプロペラの一部が水面上に露出するような状態に対しては極く近似的な推定法しかないために、波浪中における船体、舵、プロペラを含む統一的理論による船尾流場の数値計算法の開発が必要である。

また、波浪中推進性能シミュレータの構築に際しては、前述の要素課題の解決と併せて評価手法の確立および海象データや航海実績データも整備されねばならない。

(3) プロペラ周囲流場

シミュレータ構築の基礎となるプロペラ周囲流場の数値解析法および計測法の調査のために、プロペラ性能の予測およびプロペラ流入流場の予測に関して文献調査と試計算を行い、NS方程式の差分解法などによる数値計算上の観点、流場や力の計測など模型試験上の観点、およびプロペラスラストなど実船性能上の観点から下記の主要な検討結果を得た。

(a) プロペラ性能予測に関して、現在使用できる各種の理論計算法は一部実験データを加味して実用に供せられているが、プロペラ荷重や計算条件の変化による追従性等から理論の限界が指摘されている。一方、現状ではNS解法をプロペラに直接適用できる段階ではないため、本調査研究では現状理論の評価を行うとともに、レイノルズ平均NS解法を用いてプロペラの基本要素である2次元翼や3次元翼まわりの流場の計算を行い、差分スキーム、乱流モデルや計算グリッドなど差分計算上の条件や翼形状が計算精度に及ぼす影響を調査した。この結果、圧力分布(C_P)や揚力係数(C_L)については精度よく計算できたが、抗力係数(C_D)については、計算精度の向上が必要であることなどが分かった。

今後は、NS解法のプロペラへの適用を試みるとともに、現状の理論と併せてハイブリッド化を図る新しい計算法の開発が必要である。

(b) プロペラ流入流場については、現状理論に基づいてプロペラによる誘起速度、伴流の変形、境界層の変形などを検討した。また、NS解法の適用を図るために翼や実用船型とプロペラを表すMomentum-Sourceとの干渉計算を行い、計算手法の可能性が確認できたが、今後格子生成の最適化や計算精度の向上が必要であることなどが分かった。

(c) 高精度計測法

数値計算結果を評価できる高精度のデータを得るために、青雲丸の大型、中型模型プロペラを用いた試験を行い、プロペラ特性や翼圧力分布を得た。CCD-TVカメラを使用した流場の可視化や画像処理法を模型船レベルで調査し計測精度を把握した。新しいスラスト計測法を調査し、従来法と比較した。これらの計測法の開発や、それによって得られる高精度データの蓄積は数値解析法の検証データとして不可欠である。

3. 研究開発課題とその進め方

昭和62年度より2年間にわたって数値水槽システム開発にあたっての中核技術となる船体及びプロペラ周囲流場の数値解析法に関する調査研究を実施した。既に述べたように、数値流体力学は航空機産業を始め諸産業において着実な学問的進展を見せており、将来スーパーコンピュータの利用が一層容易になるにつれて、数値解析技術は飛躍的に進展するであろうと予想されている。

このような技術環境において、船型開発や船型設計力を革新的に進歩させ、今後の日本造船業の国際競争力を増し、常に高性能の船舶を提供することにより、海運界に寄与するためには、数値水槽の開発は是非とも実施すべきであると理解されている。しかし、2年間の調査研究結果から数値水槽の開発のためには、尚多くの基礎及び応用的研究課題があることが分かった。

本節では、数値水槽の開発を進めるに際して実施すべき研究開発課題の概要とその進め方に関する基本的考え方について述べる。

3.1. 研究開発課題

数値水槽についての研究課題は大別して数値シミュレーション技術研究課題及びプロトタイプシステムの開発課題に分けられる。即ち、数値水槽開発のためには、全ての基本となる船体周り流場や船型性能を正確に表す理論モデルの開発と、模型試験による検証を主体とする数値シミュレーション技術向上の研究が必要である。また、その研究成果を踏まえ、これらの理論モデルをシステムとして取りまとめ、波浪中を含む実船推進性能推定のための実用的な解析手段としての具体的可能性を確認することを主目的とした数値水槽プロトタイプシステムの開発が必要であり、そのための統合システムのあり方の研究（総合システム開発）と、システムを構成する要素シミュレータの開発研究を行う必要がある。更に、将来、数値水槽の本格的開発のためには、模型試験では実現不可能な高レイノルズ数域での実船スケール精密計測を実施することも必要となる。

なお、本調査研究に関連して、船型設計技術の革新的高度化のためには推進性能のみならず操縦、耐航性能評価技術の研究開発も重要である。しかし、これらの分野は数値シミュレーション技術研究の成果を利用する効率的と考えられるため、今後の研究テーマと考えられる。また、数値水槽を利用した船型設計最適化技術の開発は将来の研究課題となる。

図3.1.1にこれらの研究課題をまとめて示し、その概要を下記に述べる。

(1) 数値シミュレーション技術研究課題

(a) 船体周囲流場・波モデル

平水中、曳航時における船体（模型船および実船）周りの流場および波について、少なくとも現状の実験結果を定性的に説明できる程度の理論モデルを開発する必要がある。これらは船型性能の定性的比較、評価の基礎データを与えるだけでなく、後述の船体抵抗、自航モデル開発の支援となる。

前節で述べたように、船体周囲流場の数値解析に関しては、NS方程式の種々の解法が提案され、計算対象

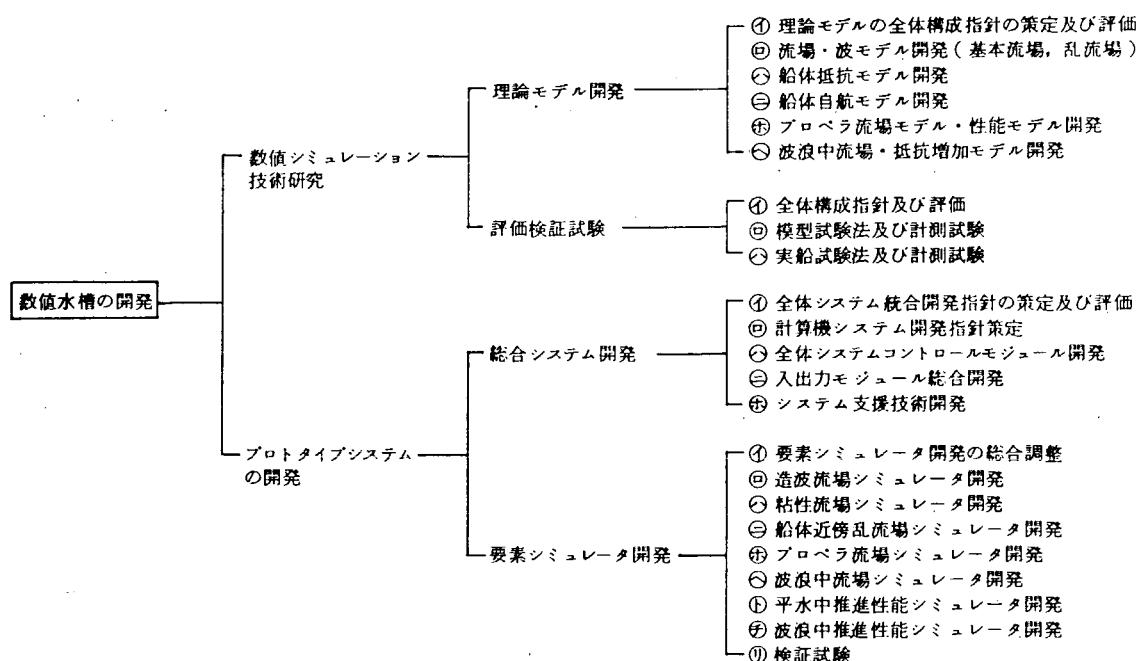


図3.1.1 研究開発課題総括

や流体現象を限定すれば部分的には利用可能な状況にあるが、全体として未だ模型実験を代替する、もしくは模型実験と同程度の精度レベルには至っていない。これらの点から判断し、平水中の推進性能の数値解析法の確立に向けてNS解法の研究が必要である。特に、平水流場を対象とする数値シミュレーション手法の研究として、NS差分解法の共通課題である計算スキーム・乱流モデル及び格子生成法についての研究、水波／粘性の一体計算のための手法の研究などの要素研究およびレイノルズ平均NS方程式をベースとするNS Solverの基礎開発などが必要とされる。

(b) 船体抵抗モデル

船舶の全抵抗およびその成分を模型船および実船対応のレイノルズ数のレベルで計算できる理論モデルを開発する必要がある。その達成精度は、現在の模型試験と同程度を最終目標とすべきであるが、当初は、少なくとも定性的比較が可能なレベルを目標とすべきである。本計算は、流場、波、船体トリムやシンケージ等のデータと共に船型改良の重要な判断材料となる。

本モデル開発は流場・波モデルの研究成果を取り入れて実施することが効率的である。

(c) 船体自航モデル

船舶の自航状態における自航要素性能を模型船および実船対応のレイノルズ数のレベルで計算できる理論モデルを開発する必要がある。その達成精度は、現在の模型試験と同程度を最終目標とすべきであるが、当初は、少なくとも定性的比較が可能なレベルを目標とすべきである。

本モデル開発は流場・波モデル及びプロペラ流場・性能モデルの研究成果を取り入れて実施することが効率的である。またNS差分解法の他、境界要素法などの適用も考慮する必要がある。

(d) プロペラ流場・性能モデル

船尾船体とプロペラ・舵まわりの流れの相互干渉を考慮したプロペラ流入流場と、プロペラ特性性能を計算できる理論モデルを開発する必要がある。プロペラ流入流場は不均一流場で作動するプロペラ性能が予測できる精度レベルを目標とすべきである。

このために、NS解法のプロペラへの適用を試みるとともに、現状理論と併せてハイブリッド化を図る数値計算法の研究が必要である。また、プロペラ流入流場については、前記流場・波モデルの研究と一体となり研究を進める必要がある。

(e) 波浪中流場・抵抗増加モデル

波浪中の船体周囲流場および船体抵抗増加を計算する理論モデルを開発する必要がある。達成精度は船首部等の形状変化による性能が定性的に評価できるレベルを目標とすべきである。

波浪中の抵抗増加理論の高度化に関しては、現状の細長体理論に基づく計算法から、次のステップとしての3次元特異点分布法による計算法の実用化および非線形現象を説明し得る理論構築に向けて研究を実施する必要がある。

(f) 平水中推進性能モデル

船舶の平水中推進性能、即ち全抵抗、伴流分布、自航要素、速力／馬力の関係等を模型船及び実船対応のレイノルズ数のレベルで計算できる理論モデルを開発する必要がある。本モデルの開発は前記(a)～(d)の諸モデルの研究成果を取り入れて実施することが効率的である。

(g) 波浪中推進性能モデル

船舶の風波中の抵抗増加、風抵抗、速力／馬力の関係等を模型船及び実船について計算できる理論モデルを開発する必要がある。このために、前記波浪中流場・抵抗増加モデルの研究成果と併せて、波浪中における船

体、舵、プロペラを含む統一理論による船尾流場の数値計算法の開発、波浪中推進性能評価手法の確立および海象データや航海実績データの整備が必要となる。

(h) 評価・検証試験

理論モデル開発を支援するために、高密度試験の実験技術および計測技術を開発し、種々の要目、フレームライン、尺度の変化を含めた広範囲な実験を実施して高精度の実験データを得る必要がある。計測データとしては、船体周りの流場、波、渦、圧力、船体抵抗、馬力、船体運動、波浪中抵抗および馬力増加等が必要となる。

(2) プロトタイプシステムの開発研究課題

(a) 統合システムのあり方の研究（総合システム開発）

数値水槽プロトタイプシステムにおいては、計算機システム、入出力モジュール、システム支援技術、および各要素シミュレータが有機的、かつ効果的に構成されるように開発を進める必要がある。特に、理論の適応性の検討と使用理論の選択、計算精度の設定と検証、およびシステムの拡張性の検討に留意する必要がある。

数値水槽システムのハードを構成する計算機システムについては、理論モデルを数値水槽化するために要求されるハードへの要求仕様の策定、開発段階の計算機システムの選定、および計算機周辺機器の選定などが重要である。

入出力モジュール及びシステム支援技術開発については、各理論モデルのコードに合わせた入出力技術の開発と共に通ソフ技術、共通表示技術、データベース等のシステム支援技術の開発が必要である。特に、入力技術であるメッシュ分割については、理論モデルおよびその解析法の特性、あるいはレイノルズ数の大きさによる乱流変動スケールに応じて分割法や分割数を変える必要があり、柔軟性をもたせたものとする必要がある。また、情報の種類および目的によって表示方法が個々に異なる可能性があり、さまざまな利用要求に対応できるようなものとする必要がある。

(b) 要素シミュレータの開発研究

数値水槽を構成する各要素シミュレータの開発を行う。理論モデルのコード化及びI/Oを含むシステム化作業が必要である。また、理論モデルから各要素シミュレータを構築する作業に際しては、その遂行が効率的に行えるようシステム共通課題の解決、開発中のシステム運営および各要素シミュレータ間の柔軟なinterface手法の開発も必要となる。

更に、シミュレータ開発に必要なデータベース拡充のための検証試験も必要である。

3.2 開発の進め方

数値水槽システムのような解析技術システムの開発を、効果的かつ効率的に実施するためには、開発目標を達成するために必要な関連する解析技術の完成度と、ハードウェアを含むシステム周辺技術利用環境の成熟度に応じて、開発の全体計画を立案しなければならない。

本調査研究でも明らかになったように、数値水槽開発は高度な計算流体力学に基づく理論モデルの構築と高精度かつ大規模な模型実証試験による理論モデルの検証、更には模型試験では実現不可能な高レイノルズ数域での実船スケール精密計測などが必要であることが認識されている。従って、その開発目標の高さと研究開発規模の大きさの双方からみて、未だ世界に先例を見ない規模の開発であり、かつ革新的な設計技術の開発となるので、システムに組み込むべき理論モデルの検討を進め、その過程に於て実用的設計手段としての可能性の目途を得つつ、コンピュータ技術の進展を取り込んで、システム開発に進むことが妥当であると考えられる。すなわち、まずシステム構築の基盤となる数値解析技

術に関する基礎的研究を組織的に実施し、その進展を見ながら全体システムの開発研究に着手することが、本開発の効率的推進につながると考えられる。

前節の研究開発課題の内、当面基礎的研究課題として取り上げるべき課題としては、NS解法の共通課題である計算スキーム、乱流モデル及び格子生成法についての研究、水波／粘性の一体計算のための手法の研究、およびレイノルズ平均NS方程式をベースとするNS Solverの基礎開発などがあり、これらの研究成果は流場・波モデル、プロペラ流場・性能モデル開発の基礎となる。また、3次元特異点分布法による波浪中抵抗増加計算法の研究、波浪中非線形流場の理論開発研究、波浪中船尾流場の数値計算法の研究及び波浪中推進性能評価手法の研究などの研究成果は、波浪中流場・抵抗増加モデル、波浪中推進性能モデル開発の基礎となる。

これらの基礎研究を実施することにより、少なくとも通常船型の模型試験レベルでの船型性能の比較評価が可能になる理論解析レベルに到達することが、数値水槽システムの実現へ向けての第一歩であると考えられる。

尚、上記基礎的研究の推進に当たっては、現在先行して実施中の関連研究を基礎として、産官学の知識、能力を総結集する研究体制が望まれる。