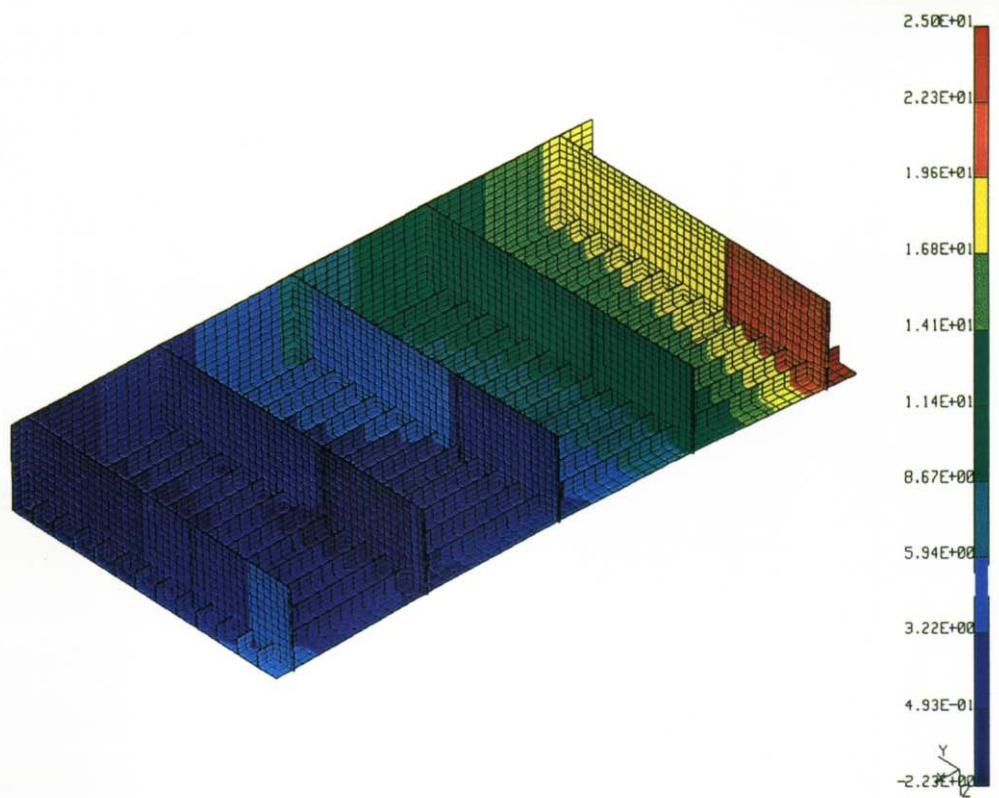


SR 237

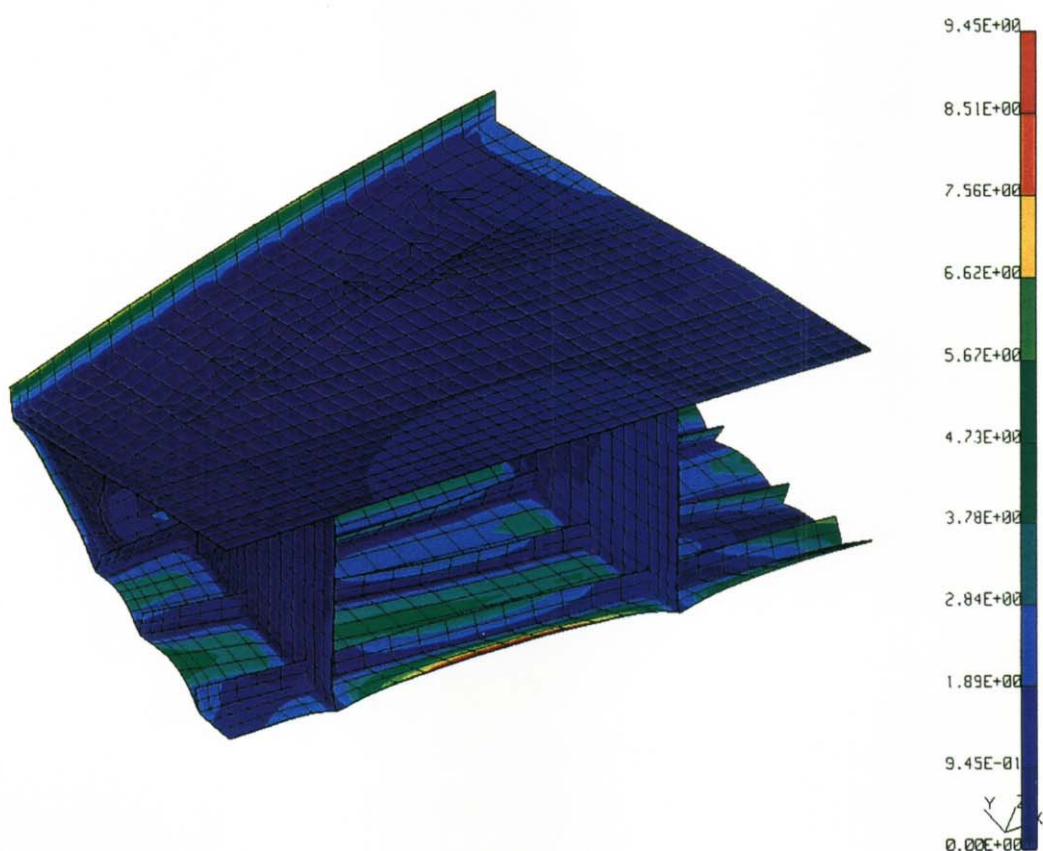
SHIP RESEARCH SUMMARY REPORT

高度工作精度管理技術に関する研究 成 果 報 告 書

平成12年3月
社団
法人 日本造船研究協会



平行部ブロックの溶接変形解析(フロア・ガーダーの取付け)



曲り部ブロックの溶接変形解析(ブロック組立)

SR237 「高度工作精度管理技術に関する研究」

要 約

Ship Research Panel 237

Development on High-grade Accuracy Control during Ship-hull Production

Summary

Production for the ship-hull blocks with high-grade accuracy control is expected to create remarkable benefits, as follows;

- (1)minimize the extra works to correct the shapes and sizes of the hull blocks,
- (2)reduce the schedules of the connection works at the dock site,
- (3)introduce the high efficient automatic and robotics welding processes at the dock site,
- (4)offer the high quality ships to the customer, etc.

In order to establish the high-grade accuracy controlled ship production system, Ship Research Panel 237 has promoted the high-grade control techniques for both fabrication and erection of hull blocks. Noteworthy results are as follows;

- (1)provide a new useful method which accurately estimates the welding shrinkage and distortion of the hull structures, by elastic finite-element-method calculation,
- (2)provide a new effective technique which evaluates the accuracy for the constructed block units and fitting stage, with measurements of three-dimensional block sizes,
- (3)develop a ultra high speed welding process with multiple-torch gas shielded metal arc welding method, which supports the high efficient connecting works at the dock site.

1. 従来の問題点

船殻建造の工作精度管理の現状の主な問題点を挙げると、

- (1) 有効な「工作精度予測技術」を保有しないため、予め部材に付与する伸ばし量・逆歪み量・変形拘束は、過去の経験に基づき設定しており、ブロックの構造・寸法や溶接施工法の変更に対応できず、製作されたブロックの工作精度は目標とした許容公差値を確保出来ていない。
- (2) 有効に機能する製作ブロックの「工作精度評価技術」がないため、渠中のブロック搭載工程は、既搭載ブロックとの「現物合わせ」により、船型基準寸法の確保と後工程の溶接作業等の作業効率を考慮しながら、高度の「位置決め」熟練技能者により実施しており、ブロックの形状修正・位置決め・取付けの作業に長時間を費やし工程維持が困難で、船殻建造のネック工程となっている。
- (3) 船殻ブロック製作は JSQS を基準に建造されているが、高水準のブロック工作精度を維持出来ず、必ずしも高精度高品質船舶を提供出来ていない。

2. 研究の内容

船殻ブロックの工作精度を現状より飛躍的に向上させることにより、

- (1) ブロック製作後の形状修正作業の極少化・排除、
- (2) 渠中でのブロック搭載・結合作業の短縮化・効率化、
- (3) ブロック継手の溶接作業の自動化・ロボット化・高能率化、
- (4) 船殻構造精度の確保が容易となり、高品質船舶の建造・提供ができる、

等、我が国造船業界の競争力維持のために重要な、品質・建造コスト・納期の面で飛躍的な向上が可能になる。

本研究部会は、高工作精度ブロックの製作技術・管理技術の向上を目的とし、ブロック製作の事前・事後の両面から高度の「工作精度予測技術」、「工作精度評価技術」の構築を目標として、研究に取り組み、次の成果を得た。

- (1) ブロックの製作過程で溶接により発生する変形・収縮量を精度良く理論的に推定する手法の提案
- (2) 製作したブロックの3次元形状を高精度で計測する技術、及び、高精度計測情報を基に、ブロックの「出来上がり精度」「取り合い精度」を高精度で評価する手法の提案
- (3) 将来技術として、高精度化されたブロック継手に適用可能な超高能率アーク溶接技術の開発

3. 研究の成果

3. 1 ブロック工作精度予測技術

(1) 平行部ブロック溶接変形予測

最近の船殻溶接技術をカバーする溶接変形データベースを編集し、これを基に部材寸法・部材取り付け位置を入力するだけで、平行部ブロックの溶接変形を精度良く推定できる、実用的な「簡易変形予測プログラム」を作成した。

(2) 曲がり部ブロック溶接変形予測

曲面立体構造の溶接変形を高精度で効率的に解析推定する「弾性FEM解析溶接変形予測手法」を開発した。この手法により、溶接変形データベースを用いて曲がり部ブロックの溶接変形解析を行い、実測データとの推定精度を比較検証の結果、従来予測が不可能であった曲がり部ブロック溶接変形量を高精度で計算できる簡易FEM推定手法であることを確認した。

(3) ブロック変形制御法

上記の溶接変形予測手法を基に、平行部ブロックの板伸ばし量・延べ尺等の部材寸法設定要領、曲がり部ブロックの板伸ばし量設定要領、及び、逆歪量・変形拘束等の面外変形制御要領を提案した。

3. 2 ブロック工作精度評価技術

(1) 3次元形状計測技術

大型構造物の各種計測法の調査結果に基づき、2種の計測法に着目してブロックモデル試験体の精度計測に実用し、曲がり外板の整形工程から中組立ての精度計測には「デジタルカメラ式写真計測法」が、また、大組立てから渠中の精度計測には「ゼオドライト光学式測定法」が、精度・効率の面で適合していることを確認した。

(2) 工作精度評価手法

ブロックの「出来上がり精度」と「取り合い精度」を評価する「工作精度評価システム」の理論体系を提案し、試作プログラムの試験適用の結果、本評価システムがブロックの工作精度を客観的に評価でき、また、ブロック搭載作業の事前検討にも活用でき、実用化が図ることを確認した。

3. 3ブロック継手の高能率溶接技術

(1) 超高速溶接技術

高精度ブロック継手の実現を前提に、船殻ブロック継手の溶接高能率化の将来像を纏めた。また、代表例として多電極 CO₂ 高速溶接装置を試作開発し、超高速溶接化の実現の可能性を示した。

4. 成果の活用

(1) ブロック工作精度予測技術

平行部ブロックの「簡易変形予測プログラム」は、参加各社で実用化に向け試行中である。試行過程で判明する問題点については情報を共有し、各社で改良を進める予定である。

曲がり部ブロックの「弾性 FEM 解析溶接変形予測手法」が確立できたので、今後この解析方法を実用して曲がり部ブロックの変形解析を重ね、パラメータ整理等によるデータベース化を進め、変形制御の実用データとして活用を図る必要がある。

(2) ブロック工作精度評価技術

曲がり部ブロックの工作精度は、溶接変形に起因する精度のみならず、条材・板の曲げ整形精度・中組立て精度も、基本的な精度管理の要点である。曲げ整形精度・中組立て精度に着目し、提案した「工作精度評価システム」を参加各社で早期に実用化し、工作精度管理を中心とした曲がり部ブロック製作に関わる工作精度管理技術の高度化を図る必要がある。

5. 成果の将来的な活用効果

本研究成果は今後更に発展させ実用化することにより、船殻建造技術の向上・新建造技術の創出・建造コスト低減に役立ち、造船業界の課題である国際競争力の維持・向上に寄与する。

- (1) 工作精度予測技術の実用化で、事前計画した高工作精度で船殻ブロックが製作できる。その結果、
 - (a) 製作ブロックの形状修正作業が極少化し、後工程の工作精度維持が容易になる。
 - (b) 渠中のブロック搭載・結合・溶接作業の損失率が極少化し、計画工程の維持・作業時間の短縮化・効率化が可能になる。
 - (c) 製作ブロックの結合工作精度が大幅に向上し、搭載ブロックの大型化が可能になる。
 - (d) ブロック継手精度が大幅に向上し、溶接の自動化・ロボット化・高効率化の推進が可能になる。
等、建造コストの損失発生がなくなると共に、建造コスト低減の新たな促進要因も創造出来る。
- (2) 工作精度評価技術の実用化で、船殻ブロックの工作精度管理技術が向上し、高工作精度ブロック製作の精度管理が容易になる。その結果、

- (a) 「出来上がり精度」評価により、製作ブロックの工作精度・不具合が確認でき、原因究明・改善案検討・対策処置が迅速に処理可能になり、結果として高精度の船殻ブロックが実現する。
- (b) 「取り合い精度」評価により、渠中へのブロック搭載前に机上で搭載・結合作業の検討・評価され、位置決め要領・部分補正要領・継手精度情報の指示・対策処置が事前に可能になり、大損失の発生が未然に防止出来る。
- (c) 複数建造案の机上での事前の検討・評価が可能になり、革新的な最適なブロック建造技術が実現でき、また、管理者・作業者の支援・教育のツールとしても活用出来る。
- (d) 高水準の工作精度維持が容易になり、高精度高品質船舶の提供が可能になる。

等、コスト損失発生の未然防止・新建造法の創出・熟練技能者育成など、多大な波及効果が得られる。

はしがき

本成果報告書は、日本財團の補助事業として、日本造船研究協会第237研究部会において、平成9年度から平成11年度の3カ年計画で実施した「高度工作精度管理技術に関する研究」の成果を取りまとめたものである。

なお、平成10～11年度の2カ年は日本造船工業会から受託して行ったものである。

第237研究部会 委員名簿

(敬称略、順不同)

部会長	野本 敏治 (東京大学)	
代表幹事	中島 宏幸 (日立造船)	
委員	青山 和浩 (東京大学)	豊貞 雅宏 (九州大学)
	村川 英一 (大阪大学)	牛尾 誠夫 (大阪大学)
	上田 幸雄 (近畿大学)	松岡 一祥 (船舶技術研究所)
的場	正明 (日本海事協会)	大澤 守彦 (日立造船)
谷川	雅之 (日立造船)	河野 隆之 (三菱重工業)
井上	好章 (三菱重工業)	本田 公志 (石川島播磨重工業)
石山	隆庸 (石川島播磨重工業)	村上 新一 (川崎重工業)
曾我部	修一 (川崎重工業)	斎藤 政男 (住友重機械工業)
豊福	正継 (日本鋼管)	渡邊 孝和 (三井造船)

第237研究部会幹事会 委員名簿

(敬称略、順不同)

主査	中島 宏幸 (日立造船)	
委員	野本 敏治 (東京大学)	大澤 守彦 (日立造船)
	谷川 雅之 (日立造船)	河野 隆之 (三菱重工業)
	井上 好章 (三菱重工業)	笹島 洋 (石川島播磨重工業)
	村上 新一 (川崎重工業)	曾我部修一 (川崎重工業)
斎藤	政男 (住友重機械工業)	宇野 清隆 (日本鋼管)
渡邊	孝和 (三井造船)	

第 237 研究部会WG 1 委員名簿

(敬称略、順不同)

主	查 豊貞 雅宏 (九州大学)	
幹	事 大澤 守彦 (日立造船)	
委	員 野本 敏治 (東京大学)	寺崎 俊夫 (九州工業大学)
	後藤 浩二 (九州大学)	丹羽 敏男 (九州大学)
	村川 英一 (大阪大学)	松岡 一祥 (船舶技術研究所)
	的場 正明 (日本海事協会)	中島 宏幸 (日立造船)
	谷川 雅之 (日立造船)	水上 優 (日立造船)
	杉村 忠士 (三菱重工業)	八尋 智孝 (石川島播磨重工業)
	大谷 博信 (石川島播磨重工業)	瀬渡 賢 (川崎重工業)
	斎藤 政男 (住友重機械工業)	武市 祥司 (住友重機械工業)
	尾上 仁久 (日本鋼管)	宇野 清隆 (日本鋼管)
	神永 雄 (三井造船)	藤田 雅啓 (三井造船)

第 237 研究部会WG 2 委員名簿

(敬称略、順不同)

主	查 野本 敏治 (東京大学)	
幹	事 河野 隆之 (三菱重工業)	
委	員 青山 和浩 (東京大学)	牛尾 誠夫 (大阪大学)
	奥本 泰久 (近畿大学)	植松 進 (船舶技術研究所)
	的場 正明 (日本海事協会)	中島 宏幸 (日立造船)
	大澤 守彦 (日立造船)	中谷 光良 (日立造船)
	寺尾 弘志 (日立造船)	榎並 靖之 (日立造船)
	與倉 隆人 (石川島播磨重工業)	井上 好章 (三菱重工業)
	児玉 克 (三菱重工業)	餅田 義典 (川崎重工業)
	長谷川壽男 (川崎重工業)	山岡 俊洋 (川崎重工業)
	清水 英樹 (川崎重工業)	糸谷 元良 (住友重機械工業)
	竹口 貴博 (住友重機械工業)	武市 祥司 (住友重機械工業)
	大矢部直樹 (日本鋼管)	河崎 登 (日本鋼管)
	吉岡 二六 (三井造船)	森本 雅文 (三井造船)
	三宅 俊良 (三井造船)	人江 隆博 (三井造船)

討議參加者

(敬称略、順不同)

水谷 和時 (日本鋼管)	伊藤秀太郎 (石川島播磨重工業)
元浦 能彰 (日本鋼管)	荒木 俊光 (川崎重工業)
重水 哲郎 (三菱重工業)	中井 雅之 (日本鋼管)
沼野 正慎 (日立造船)	岡本 敏 (三菱重工業)
中島 喜之 (石川島播磨重工業)	丹羽 太 (石川島播磨重工業)
谷田 友良 (川崎重工業)	森川 正夫 (日本鋼管)
中濱 剛 (三菱重工業)	

事務局 (日本造船研究協会) 山内 康勝・村上 好男・武田 晴雄
(日本造船工業会) 吉識 恒夫

目 次

1. 工作精度管理技術の現状と本研究の目的	1
2. 工作精度予測技術の高度化	3
2. 1 溶接変形データベースの編集・補完	3
2. 2 溶接変形解析手法の開発	5
2. 3 ブロック構造モデル試験による検証	7
2. 4 ブロック製作の溶接変形制御方法	9
2. 5 成果のまとめ	10
3. 工作精度評価技術の高度化	11
3. 1 3次元情報の取得方法の調査	11
3. 2 新工作精度管理システムの検討	13
3. 3 位置決め技能者による実用性評価	15
3. 4 成果のまとめ	15
4. ブロック継手の高能率溶接技術の検討	16
4. 1 高能率化溶接の現状調査	16
4. 2 多電極ガスシールドアーク高速溶接の試作実験	16
4. 3 成果のまとめ	17
5. 成果と今後の活用	18
5. 1 本研究の成果	18
5. 2 今後の活用	19
5. 3 成果の活用効果	19

1. 工作精度管理技術の現状と本研究の目的

従来、我が国造船業界は、船殻建造コスト競争力の優位性を確保するため、

- (1) 船殻の大ブロック化・先行舾装等の建造工法の改善
- (2) 溶接ロボット・高速溶接装置の導入等のハード面の革新
- (3) 造船 CIM の導入等のソフト面の革新

等の技術革新が推進されてきた。しかしながら、最近の東アジア諸国の為替レート下落等による受注価格低下など、我が国造船業界を取り巻く厳しい環境情勢を考慮すると、引き続きコスト競争力を堅持するためには、船殻建造の基本に立ち返り大幅な建造コスト低減・効率化への挑戦が必要である。

船殻の建造コスト低減の一方策としては、船殻ブロックの工作精度を現状より飛躍的に向上させることが挙げられる。高精度のブロック工作精度管理の実現により、

- (1) ブロック製作後の形状修正作業の極少化
- (2) 渠中のブロック搭載・結合作業の短縮化・効率化
- (3) ブロック継手の溶接作業の自動化・ロボット化・高能率化
- (4) 船殻構造精度の確保が容易になり高精度高品質船舶の建造・提供が可能

等、我が国造船業界の競争力維持のために重要な、品質・建造コスト・納期の面で飛躍的な向上が可能になる。

船殻建造の工作精度管理の現状の主な問題点を挙げると、

- (1) 有効な「工作精度予測技術」を保有しないため、予め部材に付与する伸ばし量・逆歪み量・変形拘束は、過去の経験に基づき設定しており、ブロックの構造・寸法や溶接施工法の変更に対応できず、製作されたブロックの工作精度は目標とした許容公差値を確保出来ていない。
- (2) 有効に機能する製作ブロックの「工作精度評価技術」がないため、渠中のブロック搭載工程は、既搭載ブロックとの「現物合わせ」により、船型基準寸法の確保と後工程の溶接作業等の作業効率を考慮しながら、高度の「位置決め」熟練技能者により実施しており、ブロックの形状修正・位置決め・取付けの作業に長時間を費やし工程維持が困難で、船殻建造のネック工程となっている。
- (3) 船殻ブロック製作は JSQS を基準に建造されているが、高水準のブロック工作精度を維持できず、必ずしも高精度高品質船舶を提供出来ていない。

船殻ブロックの工作精度を向上させるには、

- (1) ブロックの製作過程で発生する溶接変形・収縮量を適切に見積り、予め伸ばし量や逆ひずみ量として部材に付与することにより、製作後のブロックの工作精度を許容公差内に収める理論的な高精度の「ブロック工作精度予測技術」の構築と、
- (2) ブロック製作後の「出来上がり精度」を高精度で計測し評価すると共に、計測情報を基にブロック結合過程での「取り合い精度」を高精度で評価する「工作精度評価技術」の構築の、ブロック製作の事前・事後にわたる船殻工作精度管理技術の高度化が必要である。

本研究部会は、高工作精度ブロックの製作技術・管理技術の向上を目的とし、高度の「工作精度予測技術」「工作精度評価技術」を構築し、ブロック製作の事前・事後の両面から「工作精度管理技術」を高度化することを目標として、以下の項目の研究を行った。

- (1) ブロック製作過程で溶接により発生する変形・収縮量を精度良く理論的に推定する手法の提案
- (2) 製作したブロックの3次元形状を高精度で計測する技術、及び、高精度計測情報を基に、ブロックの「出来上がり精度」「取り合い精度」を高精度で評価する手法の提案
- (3) 将来技術として、高精度化されたブロック継手に適用可能な超高能率アーク溶接技術の開発

2. 工作精度予測技術の高度化

ブロック製作過程で溶接により発生する変形・収縮量を精度良く理論的に推定する手法を確立・実用化するため、溶接変形データベースの編集・補完、弾性FEM解析溶接変形推定手法の提案・検証の研究を行った。

2.1 溶接変形データベースの編集・補完

各種溶接変形・収縮法の推定法・簡易式・防止法について文献資料を調査し、各種溶接法の横収縮量・角変形量、溶接変形に及ぼす溶接長・溶接層数・拘束の影響等について、溶接変形データベースを編集した。また、最新の船殻ブロック製作工程の溶接施工法の溶接変形量、溶接変形量に及ぼす降伏強度・溶接長・曲率の影響等、基礎継手溶接実験を追加実施し、溶接変形データベースの補完拡充をした。

(1) 隅肉継手の角変形

ウェブとフランジの板厚を考慮して入熱量を補正することにより、T継手の角変形が推定出来ることを確認した(図2.1-1)。

(2) 溶接長の影響

各種溶接長の基礎継手データから、溶接長200mmを基準とした横収縮及び角変形の溶接長に関する補正式を示した(図2.1-2)。

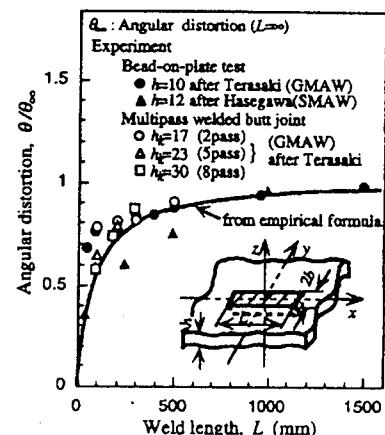
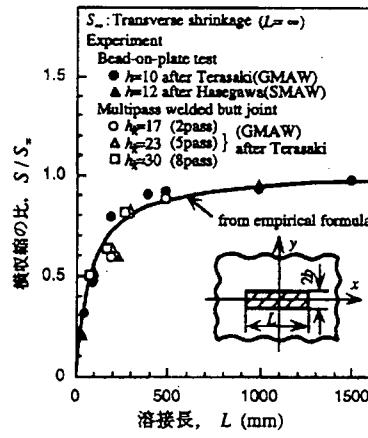
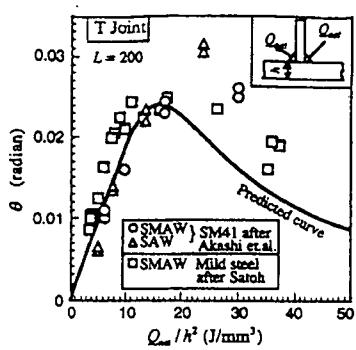


図2.1-1 隅肉継手の角変形

図2.1-2 横収縮・角変形に及ぼす溶接長の影響

(3) 多層突合継手

多層盛溶接の横収縮・角変形を計算する方法を提示し、精度良く推定出来ることを確認した(図2.1-3)。

(4) 拘束継手の横収縮

拘束継手の横収縮は拘束が大きい場合、拘束係数と溶接金属の降伏応力で予測出来ることを確認した(図2.1-4)。

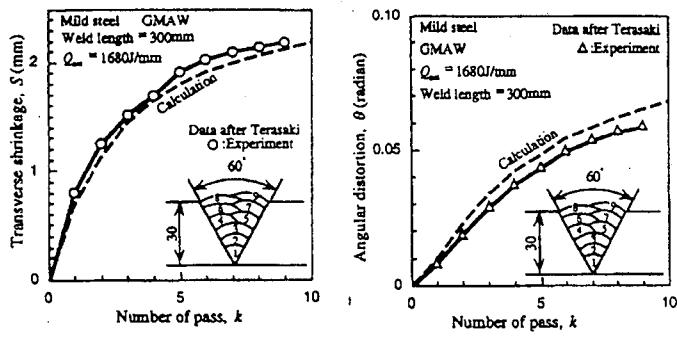


図 2.1-3 多層突合継手の横収縮・角変形

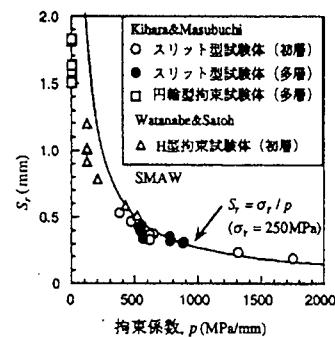
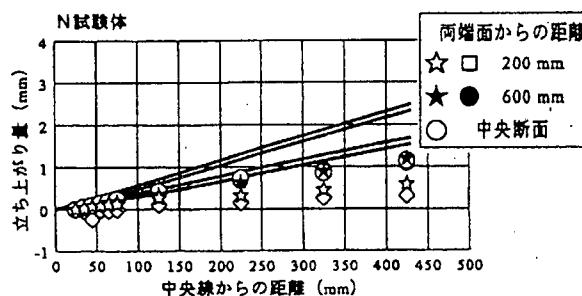


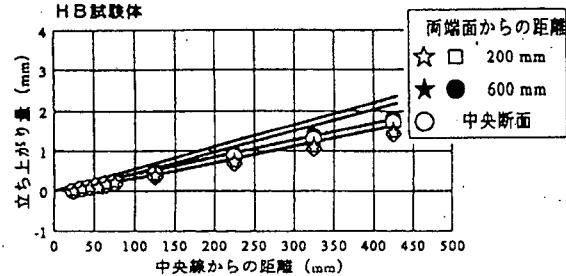
図 2.1-4 拘束継手の横収縮

(5) ロンジ材隅肉溶接

単電極ツイン溶接法とタンデムツイン溶接法による隅肉溶接実験と変形解析を行った。左右トーチ間のずれ量が 300mm 程度以上の場合は左右入熱の最大値を用いて、左右トーチ間のずれ量がない場合は左右の全有効入熱量を用いて固有変形を評価すれば良いことが判った。図 2.1-5 は角変形の計測値と解析結果の比較を示す。また、溶接変形に対する溶接長の影響を調べるために単電極ツイン溶接による実験を行い、図 2.1-6 に示すように溶接長が長くなると溶接変形が収束することを確認した。



(a) 単電極ツイン溶接



(b) タンデムツイン溶接

図 2.1-5 ロンジ材先付け溶接の角変形に及ぼす溶接法の影響

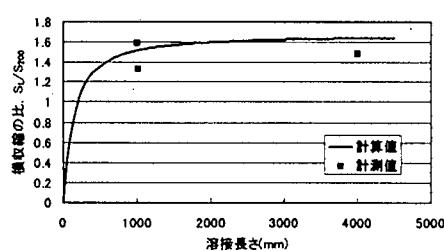


図 2.1-6 横収縮に及ぼす溶接長の影響

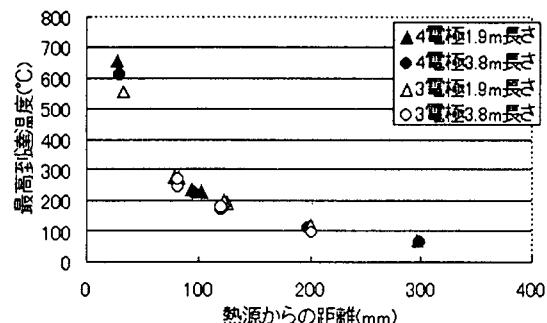


図 2.1-7 板継 S A W溶接の最高到達温度

(6) 多電極 SAW 板継溶接

3 電極（従来速度）及び 4 電極（高速度）の多電極 SAW 溶接法による板継ぎ溶接実験を行い、温度、変形量、残留応力を計測し定量化した。縦収縮力算出の基礎となる最高到達温度を把握した（図 2.1-7）。

(7) 鋼材降伏強度の影響

造船用軟鋼 (KA) と 40 キロ降伏点鋼 (KA40) のビード溶接実験を行った結果、高入熱域を除くと両者の溶接変形はほぼ同じとなることが判った（図 2.1-8）。

(8) 変形拘束の影響

箱形状の拘束試験体を用いてビード溶接の横収縮・角変形に及ぼす変形拘束の影響を調べる実験を行った結果、溶接横収縮は拘束の影響を受けないこと、角変形も高入熱域を除くと影響を受けないことを確認した（図 2.1-9）。

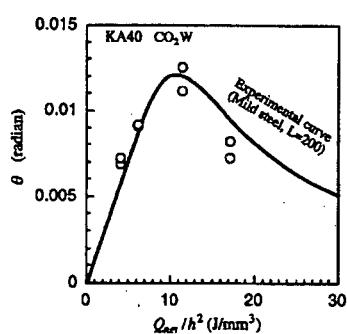


図 2.1-8 KA40 鋼の角変形

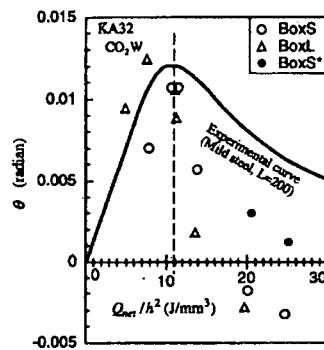


図 2.1-9 箱形試験体の角変形

2.2 溶接変形解析手法の開発

(1) 溶接変形解析法

立体構造ブロックの溶接変形を推定する簡便な方法として、シェル要素・梁要素でモデル化した「弾性 FEM 解析の溶接変形予測手法」を採用し、変形発生源として「固有応力・変形（縦収縮力-Tendon Force、横収縮力、回転変形力）」の溶接部へ与える方法を具体化した（図 2.2-1）。また、平行部ブロック溶接継手の平均収縮量（縦収縮量、横収縮量）を高精度で推定できる「簡易変形予測式」を設定した。

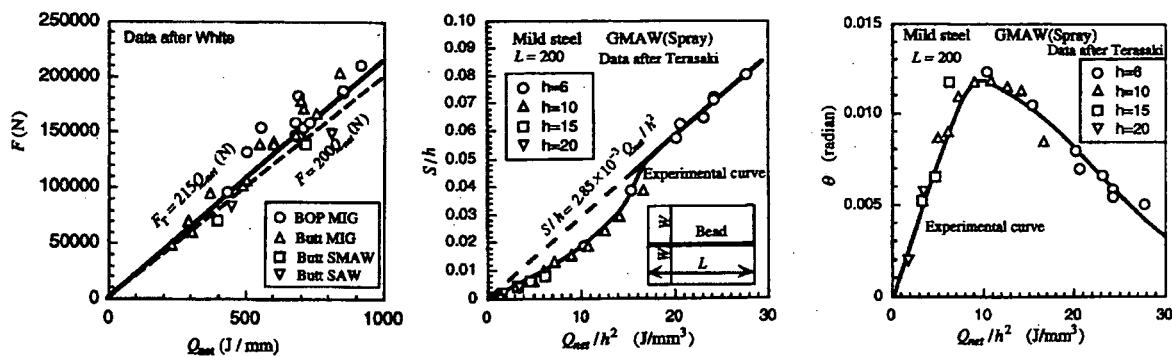
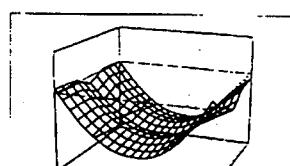


図 2.2-1 GMAW の固有応力・変形 (Tendon Force、横収縮力、回転変形力)

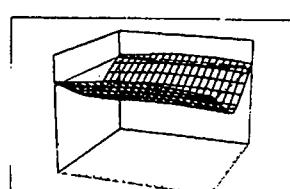
(2) 曲がり板基礎継手溶接

曲率を有する溶接線の取り扱いを確定するため、平板と2次曲面を有する曲がり板のビード溶接及びスチフナ溶接の基礎継手溶接実験を行い、その溶接変形量の実測値と「弾性FEM溶接変形予測手法」による溶接変形量の推定結果とを比較検証し、曲がり部プロツクへの適用性を検討した。

ビード溶接の場合、曲がり板と平板で固有変形の差は小さいが、面外変形は板の曲率の影響を大きく受けることが判った（図2.2-2）。また、熱弾塑性大変形解析、弾性変形解析とも良い精度で変形が推定出来ることを確認した（図2.2-3）。



曲りビード溶接



平板ビード溶接

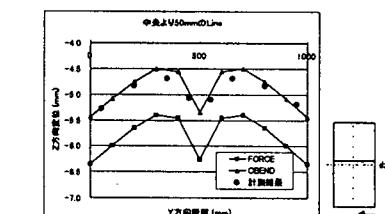
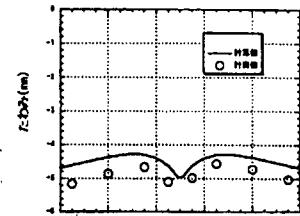
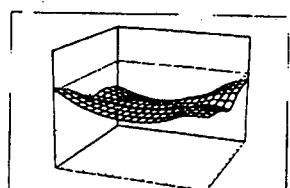


図2.2-3 計測値と解析結果の比較

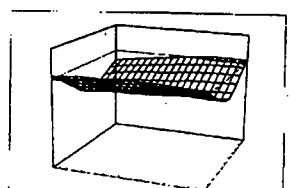
図2.2-2 面外変形の計測値

溶接線直交中央断面の面外変形

スチフナ溶接についても、平板と曲がり板に対し弾性変形解析を行った。図2.2-4に示すように面外変形が板の曲率の影響を受けるが、良い精度で推定出来ることを確認した（図2.2-5）。



曲りスチフナ溶接



平板スチフナ溶接

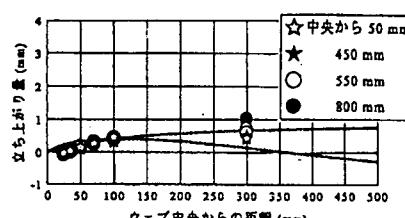


図2.2-5 計測値と解析結果の比較
溶接線直交断面の面外変形

図2.2-4 面外変形の計測値

2.3 ブロック構造モデル試験による検証

開発した「弾性 FEM 溶接変形予測手法」によるブロック組立時の溶接変形の推定精度を確認のため、平行部ブロック構造モデル試験体及び曲がり部ブロック構造モデル試験体を製作し、各製作工程毎の溶接変形量を実測し「弾性 FEM 溶接変形予測手法」の推定結果と比較検証した。

(1) 平行部ブロック構造モデル試験

図 2.3-1 に示すモデルブロック試験体を図 2.3-2 の手順で製作し、製作ステージ毎の変形を計測した。

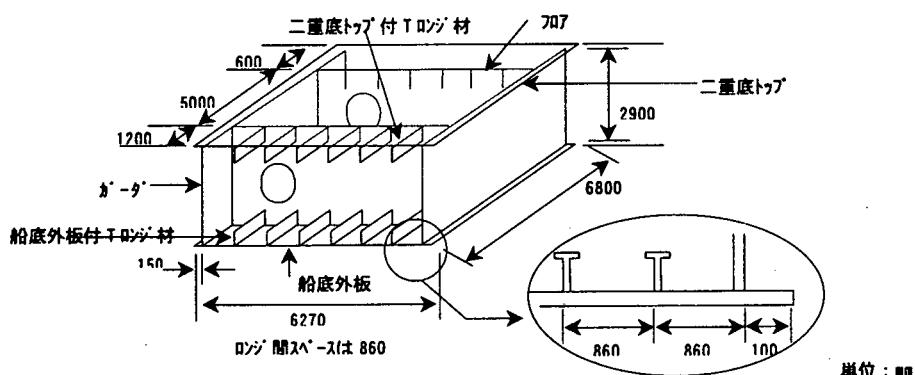


図 2.3-1 平行部ブロック構造モデル

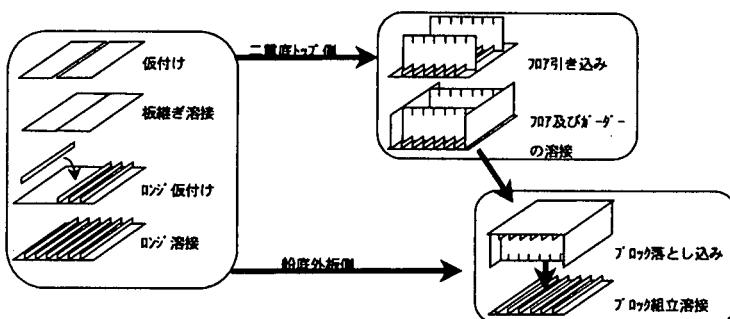


図 2.3-2 平行部ブロック構造モデルの製作手順

図 2.3-3 FEM 解析モデル
(フロア・ガーダ取付け)

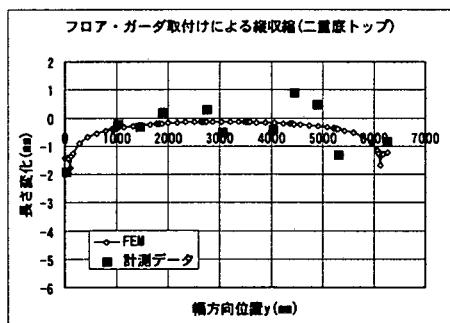


図 2.3-4 長さ変化の比較(フロア・ガーダ取付け)

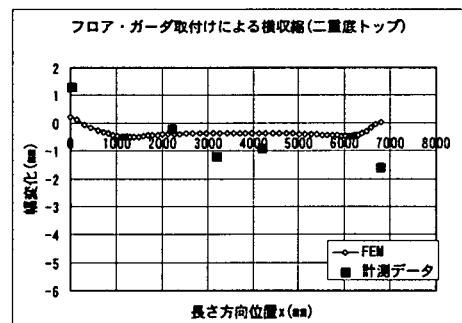


図 2.3-5 幅変化の比較(フロア・ガーダ取付け)

内底板にフロア・ガーダを取り付けた場合の変形を解析した結果（図 2.3-3）、長さ変化・幅変化とも比較的良い精度で推定出来ることを確認した（図 2.3-4、図 2.3-5）。

また、ロンジ材取付け時の FEM による変形解析結果を図 2.3-6 に示す。自重を考慮することにより面外変形も良い精度で推定出来るようになった（図 2.3-7）。

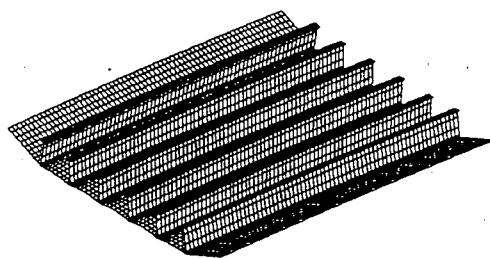


図 2.3-6 ロンジ取付け時の全体変形

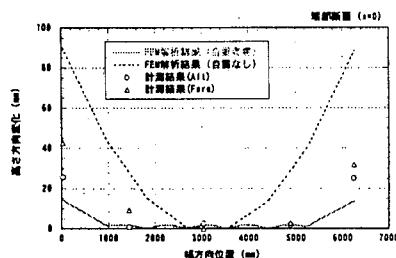


図 2.3-7 面外変形の計測値との比較

(2) 曲がり部ブロック構造モデル試験

面外変形が問題となる曲がり部のブロックに対し、タンカーのエンジンルームを対象としたモデルブロックを製作し変形を計測した（図 2.3-8）。

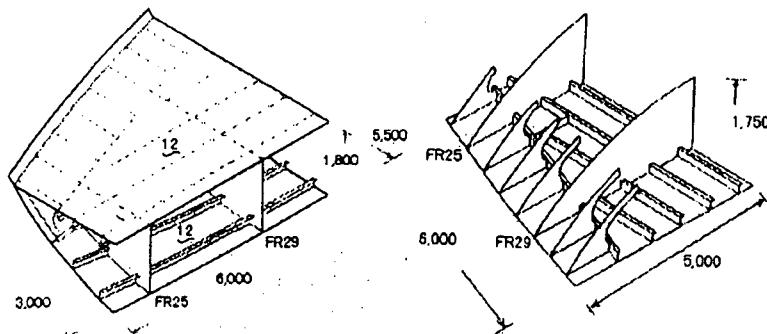


図 2.3-8 曲がり部ブロック構造モデル

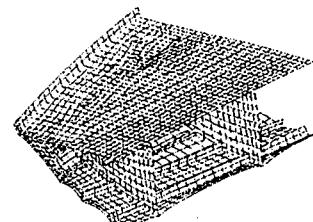


図 2.3-9 曲がり部 FEM モデル

図 2.3-9 に示すモデルを作成し、板継ぎとブロック組立の 2 ステージに対して変形解析を行い、計測値と比較した。解析結果は板継ぎの面外変形に対してはやや大き目の推定となった部分もあるが、概ね精度良く推定出来ることを確認した（図 2.3-10、図 2.3-11）。

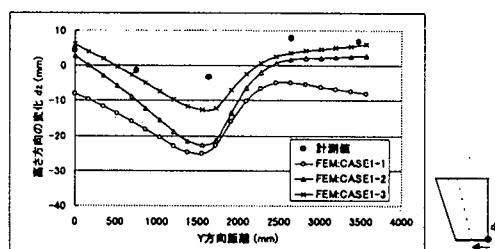


図 2.3-10 面外変形の比較（板継溶接）

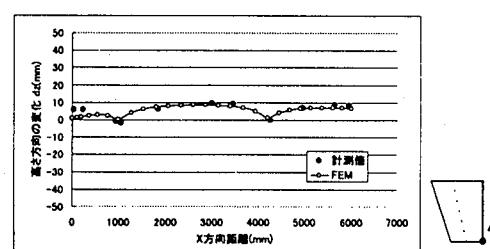


図 2.3-11 面外変形の比較（ブロック組立溶接）

2.4 ブロック製作の溶接変形制御方法

溶接変形に及ぼす溶接順序・変形拘束の影響を基礎溶接継手実験とFEM解析により検討し、その効果を確認した。また、ブロックの伸ばし量・延べ尺の設定要領、逆ひずみ・変形拘束等の変形制御要領を検討し、高精度ブロック製作の指針を取りまとめた。

(1) 溶接順序による変形制御試験

溶接順序により変形が制御出来るかどうかを調べるため、図2.4-1に示す升目構造試験体を、内→外、外→内の2通りの溶接手順で作成し変形を比較した。計測値に差は観られなかったが、手順を考慮できる解析方法を開発し変形の過程が推定出来ることを確認した（図2.4-2）。

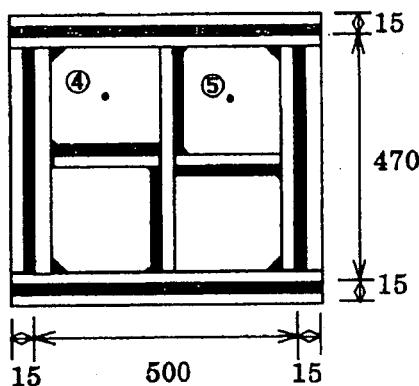


図2.4-1 升目構造試験体

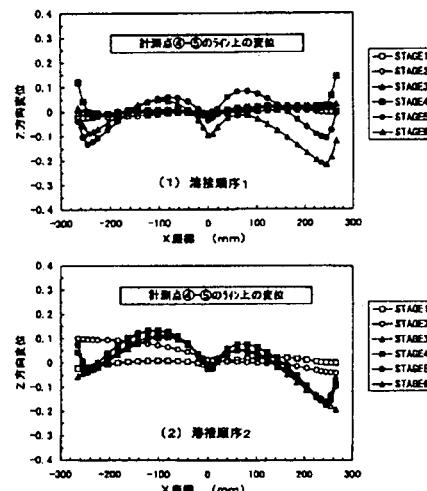


図2.4-2 溶接順序による面外変形の比較(FEM解析)

(2) 面外変形拘束による変形制御試験

溶接始終端部の面外角変形を逆ひずみを与えた面外変形拘束によって制御できるかどうかを調べるため、図2.4-3に示す試験体と拘束治具を用いた実験を行った。面外変形拘束は有効であることを確認するとともに、熱弾塑性大変形解析により推定出来ることを確認した（図2.4-4）。

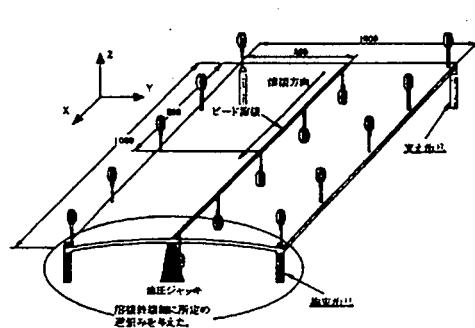


図2.4-3 面外変形拘束試験体

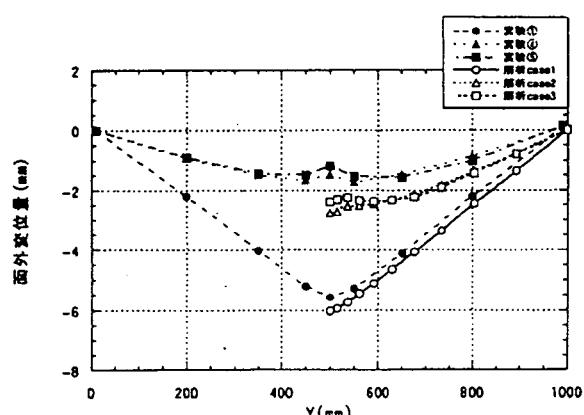


図2.4-4 面外変形に対する拘束・逆歪の効果

(3) 溶接変形制御方法の提案

平行部ブロックでは面内収縮変形が問題であり、高精度のブロックを製作するためには適正な「伸ばし・延べ尺」を設定すれば良いことが判った。曲がり部ブロックのガース長さの変化に対して、は平板の「伸ばし・延べ尺」を用いれば良いことを確認した。曲がり部ブロックの面外変形は内構材の剛性によってかなり抑制出来ること、端部の面外変形は逆ひずみを考慮した拘束治具で制御出来ることを確認した。

更に、逆ひずみや拘束の効果を調べる場合、FEMによる変形解析は有効な方法であることを確認した。

また、ブロックの伸ばし量・延べ尺の設定要領、逆ひずみ・変形拘束等の変形制御要領を検討し、高精度ブロック製作の指針を取りまとめた。

2.5 成果のまとめ

ブロック工作精度予測技術の構築・実用化を目標に、ブロック製作過程で溶接により発生する変形・収縮量を精度良く理論的に推定する手法の研究を行い、以下の成果を得た。

- (1) 文献調査、追加基礎継手溶接実験により、溶接変形データベースを取りまとめた。
- (2) 実用的な、立体構造ブロックの溶接変形を高精度で推定する方法として、シェル要素・梁要素でモデル化した「弾性 FEM 溶接変形解析手法」を開発し、変形発生源として「溶接部への固有応力・変形の与え方」を設定した。この成果により、従来予測出来なかった曲がり部ブロックの溶接変形・収縮量を高精度で推定出来るようになった。また、平行部ブロックの溶接変形の推定に実用出来る高精度の「平均収縮量の推定簡易式」を提案した。
- (3) ブロックの伸ばし量・延べ尺の設定要領、逆ひずみ・変形拘束等の変形制御要領を提案し、高精度ブロック製作の指針を取りまとめた。

3. 工作精度評価技術の高度化

ブロック製作後の「出来上がり精度」を高精度で計測し評価すると共に、ブロック形状計測情報を基にブロック結合過程の「取り合い精度」を高精度で評価する「工作精度評価技術」を高度化するため、製作ブロックの3次元形状を高精度で計測する技術の調査と、新工作精度評価システムの検討の研究を行った。

3.1 3次元情報の取得方法の調査

船殻ブロックの3次元形状情報取得法として、大型構造物の各種3次元形状計測技術を調査し、実際の船殻ブロックの実測により現場適用の観点から長所・短所を把握した。この結果を基にして船殻建造現場の各ステージへの実用化の指針をまとめた。

(1) 各種3次元計測手法の調査

最近著しい進歩を遂げている大型構造物の3次元形状計測技術（船舶・航空・土木分野、他）を調査し、造船現場への応用を念頭において比較検討を行った。測定原理を表3.1-1に、調査結果を表3.1-2に示す。

その結果「デジタルカメラ方式写真計測法」は、小組立から中組立にかけての計測対象が比較的小型の場合に適しており、また、従来技術の「セオドライト方式距離計測法」は大型ブロックの計測や渠内内の計測に適しているなど、造船現場の各ステージで使い分けが必要であることを把握した。

表3.1-1 各種3次元計測技術の測定原理工作精度

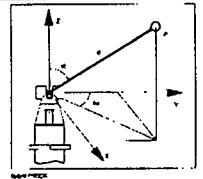
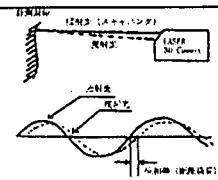
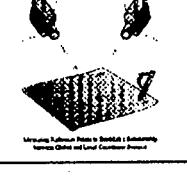
計測法	計測原理
セオドライトと絶対距離計の組合せ	<p>① 近赤外線光の反射光と照射光との位相差によって視点と対象物までの距離を計測。</p> <p>② さらに、測定点を視準して2軸コンペンセータによって水平角、天頂角を求める。</p> <p>③ 距離、水平角、天頂角の情報から測定点の球座標値を求める。</p> 
レーザー・レーダー	<p>④ 振幅変調したレーザー・ビームを対象物に対して高速に走査しながら照射する。</p> <p>⑤ 対象物より反射された光の強度により2次元(明暗)画像、照射光と反射光との位相差によって3次元(距離)画像を生成する。</p> 
写真計測	<p>⑥ 計測対象物を異なる視点から3枚以上撮影する。</p> <p>⑦ カメラのレンズ歪み等の撮影情報を入力。</p> <p>⑧ 画像上の計測点と基準点をデジタイザにて入力、または、画像処理により認識する。</p> <p>⑨ 写真測量技術のバンドル解析計算により3次元寸法を求める。</p> 
ライトペン使用画像処理システム	<p>⑩ 2台のCCDカメラを用いて計測対象を指示するライトペンの発光位置を入力し、視差を用いて計測点の座標を計算する。</p> 

表 3.1-2 各種 3 次元計測技術の比較検討

計測法	調査結果			造船所へ導入する時の評価
	性能	40 点の計測所要時間 ($6.3^{\text{m}} \times 6.8^{\text{L}} \times 2.9^{\text{H}}\text{m}$)	計測時の特徴	
セオドライトと絶対距離計の組合せ	計測範囲： 2~100m 精度： $\pm 1\text{mm}$	1名 90 分	・ 曲面部の測定には不向き。 ・ 大型フ'ロッケ'ット取付け作業が困難。 ・ タ-ゲ'ット視準による作業者の慣れが必要。	・ マニュアル方式は、造船所導入済。 ・ 自動視準方式で計測の効率化が可能。
レーザー・レーダー	計測範囲：2~ 38m 精度： $\pm 2\text{mm}$	1名 30 分	・ 数万点が短時間で計測される。 ・ 計測したい位置を指定できないため、計測画像から補間する必要がある。 ・ 物体端部の検出困難。	・ 人払いが必要なため、計測ステージが必要。 ・ 板曲げ時の曲面計測には、計測時間が短いため開発の価値有。
写真計測	計測範囲： $\sim 15\text{m}$ 精度： 10ppm (10m の対象物で 0.1mm)	アナログ 1名 45 分 (後処理 1ヶ月)	・ 写真画像が残るので、記録性が高い。 ・ 3次元データを得るまでの後処理に時間がかかる。	・ データ出力までの高速化が必要。
		デジタル 1名 15 分	・ 取り扱いが簡便。 ・ 計測点以外に画像処理用のコードターゲットが必要。	・ 撮影計画立案に習熟が必要（特に大型構造物）。 ・ 中組段階への応用に開発の価値有。
ライトペン使用画像処理システム	計測範囲： $\sim 20\text{m}$ 精度： 6ppm (5m の対象物で 0.03mm)	2名 90 分	・ 計測ポイントにライトペンを正確に当てるには、習熟が必要。 ・ ライトペン側と計測処理システム側に人員が必要。	・ 造船現場の環境に対しては、制約が多い。

(2) 「デジタルカメラ方式写真計測法」による形状計測実験

曲がり部ブロックを対象に「デジタルカメラ方式写真計測法」にて 3 次元形状計測を行った。代表的なプロツクの形状と計測点を図 3.1-1 に、その時の計測状況を図 3.1-2、図 3.1-3 に示す。計測結果を表 3.1-3 に示す。「デジタルカメラ方式」は、ブロックの寸法が 10m 程度まで計測点数が 40 点以上の場合に有効（作業時間が「セオドライト方式」に比べ短い）である。

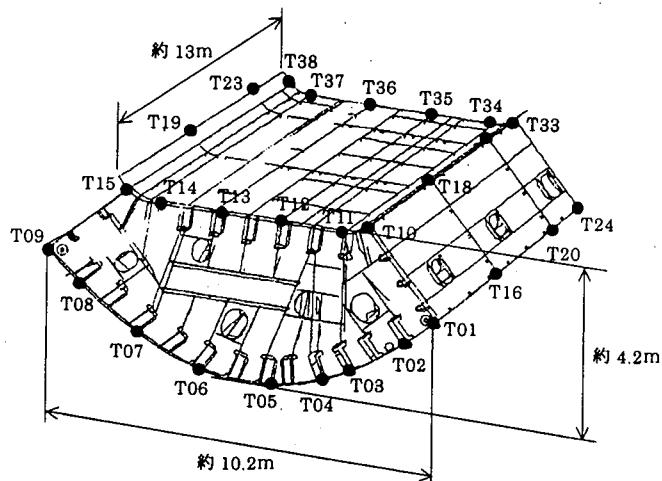


図 3.1-1 曲がり部ブロックの形状と計測点

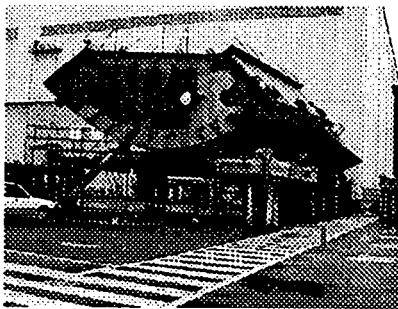


図 3.1-2 曲がり部ブロックの設置状況



図 3.1-3 曲がり部ブロックの計測状況

表 3.1-3 デジタルカメラ方式写真計測法による 3 次元形状計測結果

計測点	図面からの読み取り			計測値			変動			偏差		
	X	Y	Z	X	Y	Z	ΔX	ΔY	ΔZ	σX	σY	σZ
T01	0.0	6927.0	7380.0	20.5	6899.2	7423.4	20.5	-27.8	43.4	0.5	0.4	0.3
T02	0.0	6811.0	6450.0	-1.5	6806.6	6462.8	-1.5	-4.4	12.8	0.1	0.1	0.1
T03	0.0	6438.0	4590.0	-2.0	6437.4	4601.0	-2.0	-0.6	11.0	0.1	0.1	0.1
T04	0.0	5731.0	2791.0	-4.6	5731.3	2803.1	-4.6	0.3	12.1	0.1	0.1	0.1
T05	0.0	4602.0	1377.0	-4.2	4594.1	1375.7	-4.2	-7.9	-1.3	0.1	0.1	0.1
T06	0.0	3162.0	489.0	-1.7	3157.2	487.7	-1.7	-4.8	-1.3	0.1	0.1	0.1
T10	0.0	4380.0	7380.0	-0.6	4375.6	7380.4	-0.6	-4.4	0.4	0.1	0.1	0.1

注) Δ : 製作誤差、計測誤差を含む変動

σ : 計測点座標値計算での偏差

3.2 新工作精度管理システムの検討

製作ブロックの「出来上がり精度」「取り合い精度」を評価する「新工作精度評価システム」を提案し、試作プログラムにより実際の船殻ブロックの精度管理に試用し有効性を評価した。

(1) 計測に基づく精度管理システムの構想

高精度 3 次元形状計測技術の活用を前提に、造船工作における新しい工作精度管理システムについて検討した。精度管理における精度情報を「出来上がり精度」と「取り合い精度」に分類した(図 3.2-1)。更に、形状情報を精度情報に交換し、精度一損失時間によるコスト評価を行った(図 3.2-2、図 3.2-3)。

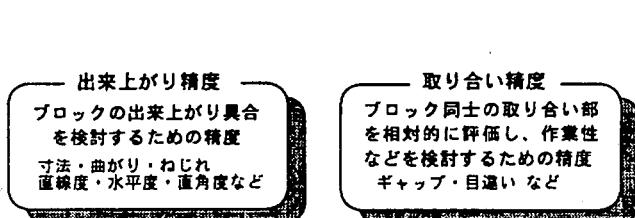


図 3.2-1 「出來上がり精度」と「取り合い精度」

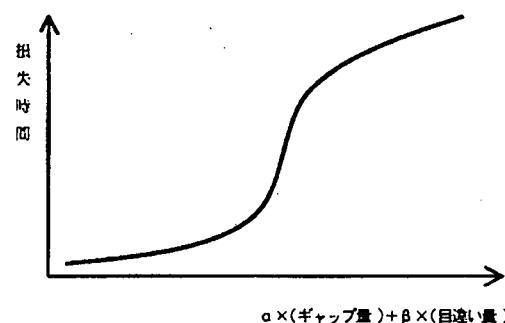


図 3.2-3 「取り合い精度」の評価関数の一例

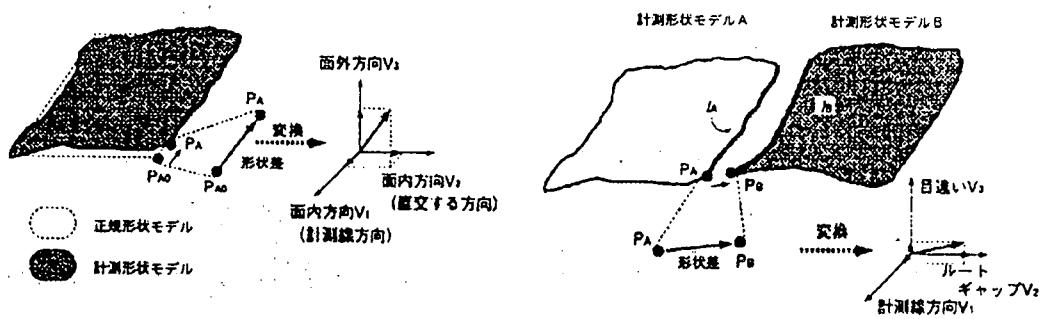


図 3.2-2 形状差から精度情報への交換機能

(2) 試作「搭載位置決めシミュレータ」の試行実験

計測した3次元形状情報と計測精度から精度情報を示し、更に精度と損失時間コストを指標とする精度評価を行う「新工作精度評価システム」を提案した(図3.2-4)。そのシステムの基本機能を確認するため、精度評価プログラムを試作し動作確認を行い(図3.2-5、図3.2-6)、その有効性を示した。

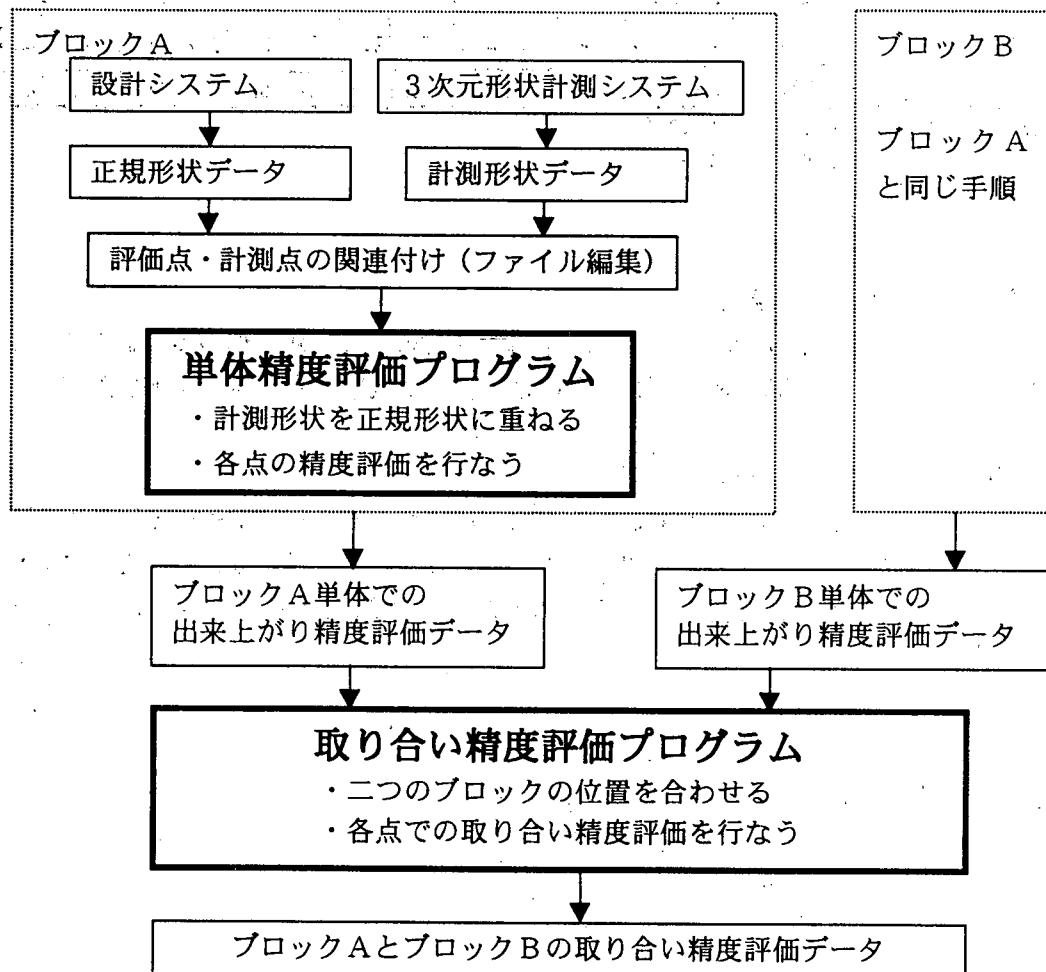


図 3.2-4 システム構成と試作したプログラムの関連

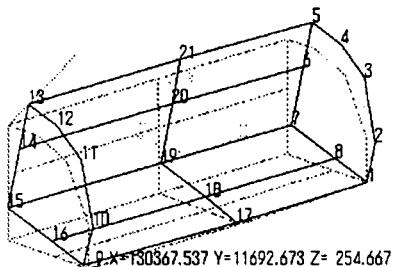


図 3.2-5 単体精度（出来上がり精度）評価画面

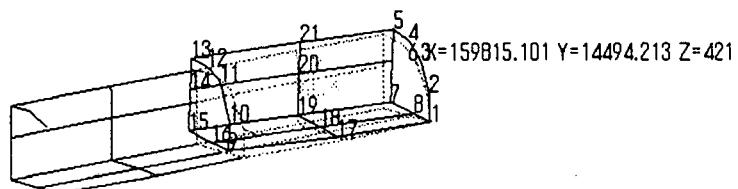


図 3.2-6 「取り合い精度」評価画面

3.3 位置決め技能者による実用性評価

試作したプログラムを熟練技能者に使用してもらい、実用性を評価してもらった。また、各社熟練技能者による「位置決め技術討論会」を開き、現場での問題点を示してもらった。その時に示された前後工程の精度と生産コストの関係を図 3.3-1 に示す。これにより、本研究で検討した精度管理の概念が現場サイドでも有用であることが確認できた。

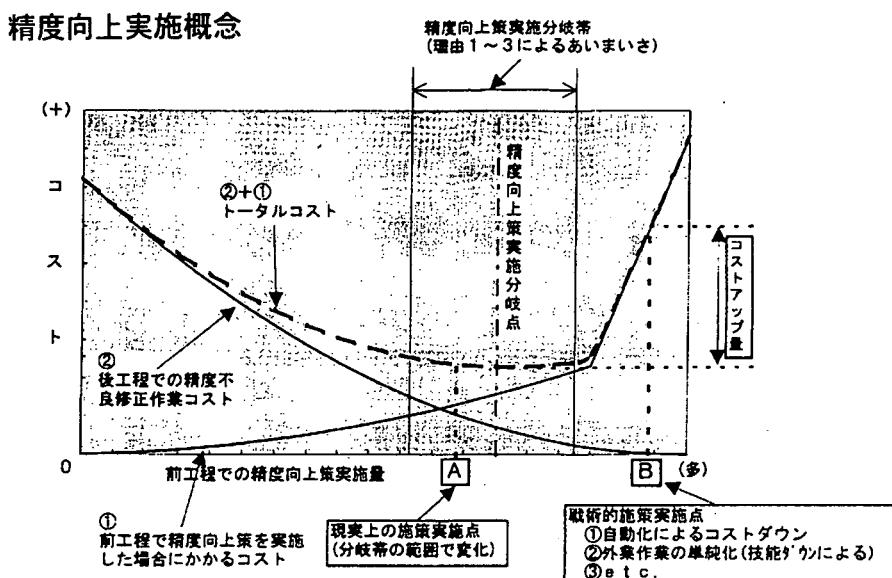


図 3.3-1 前後工程の精度と生産コストの関係

3.4 成果のまとめ

ブロック工作精度評価技術の構築・実用化を目標に、船殻ブロックの高精度形状計測法の調査、船殻ブロック「新工作精度評価システム」の検討の研究を行い、以下の成果を得た。

- (1) ブロックの高精度 3 次元形状計測技術の調査・検証を行い、船殻建造現場適用の観点から、従来計測法の光学式測距法は大型ブロックや渠内内の計測に、「デジタルカメラ式写真計測法」は小組立から中組立の計測に実用できることを把握した。
- (2) 計測取得した高精度 3 次元ブロック情報と船殻 3 次元 CAD の構造情報との比較を基に、製作ブロックの「出来上がり精度」と搭載ブロックの「取り合い精度」を評価し、損失時間・コストを評価指標とする実用的な「工作精度評価システム」を提案し、基礎となるプログラムを試作し、その有効性を確認した。

4. ブロック継手の高能率溶接技術の検討

ブロックの工作精度が高精度になることを想定して、ブロック継手に適用可能な高能率溶接技術について検討し、超高速超高速溶接技術の実現の可能性について研究を行った。

4.1 高能率化溶接の現状調査

国内外の文献調査に基づき、ブロック精度向上に伴う造船溶接の方向性を検討した。その結果、溶接継手の開先精度向上による直接的な効果は溶接速度の高速化による高能率化にあるとの調査結果を得た（図 4.1-1、図 4.1-2、図 4.1-3）。

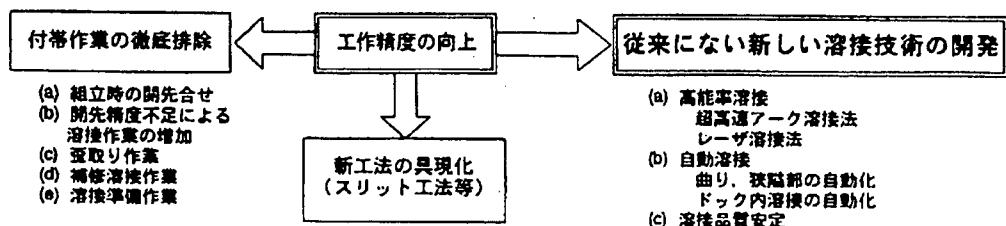


図 4.1-1 工作精度向上に伴う波及効果

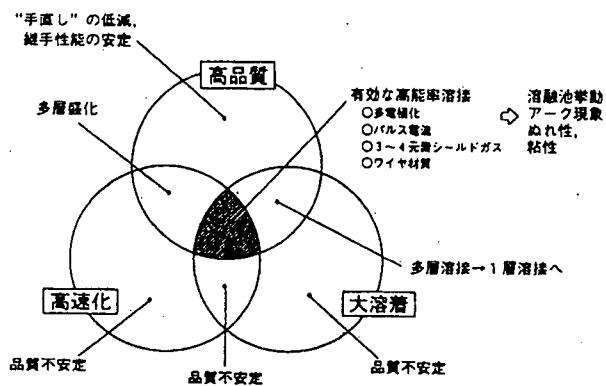


図 4.1-2 高能率溶接の考え方

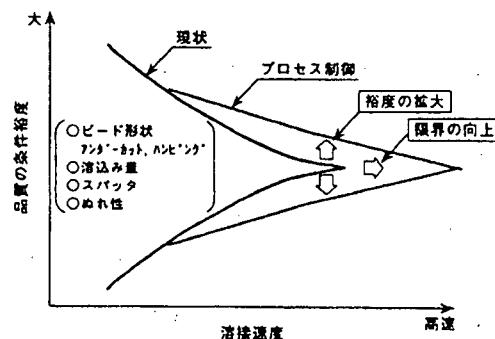


図 4.1-3 溶接の高速化に伴う品質の確保

4.2 多電極ガスシールドアーク高速溶接の試作実験

高能率溶接法の具体的な溶接プロセスとして従来の 5 倍の速度を狙う多電極ガスシールドアーク法を提案し、実験を行った（図 4.2-1、図 4.2-2）。

(1) 溶接設備の設計・製作

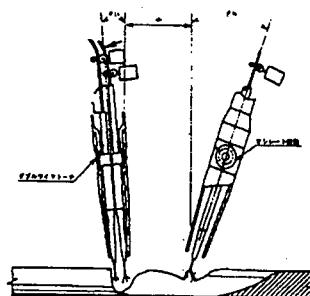


図 4.2-1 多電極ガスシールドアーク溶接法の構成

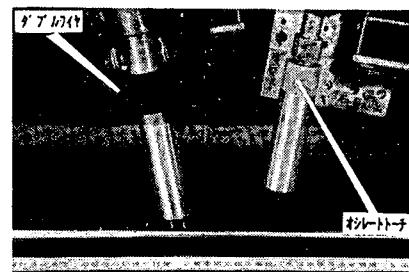


図 4.2-2 溶接装置のトーチ周辺

(2) 高速溶接試験

本装置を用いて高速化の基礎となる大溶着化技術について下記項目を検討し、溶接試験から 1 電極当たり最大溶着量 $800\text{g} / \text{min}$ が可能となった。

- ・細径ワイヤの高速送給
- ・ワイヤ付き出し部のジュール熱利用
- ・アークを安定させるシールドガスの利用

この大溶着化技術を基に、更に次の新技術を組合せて板厚 20mm を溶接速度 $2\text{m} / \text{min}$ の 1 パス溶接できる可能性を得た（図 4.2-3）。これは従来溶接法の 5 倍に相当する高速溶接である。

- ・2 電極ダブルワイヤのパルス電流位相制御による
アークの安定化
- ・多電極高速オシレートアークによる溶融金属流の制御

以上の結果から、工作精度が確保されれば、従来の溶接速度の 5 倍 ($2\text{m} / \text{min}$) の溶接法（多電極ガスシールドアーク溶接法）が可能であることを把握した。

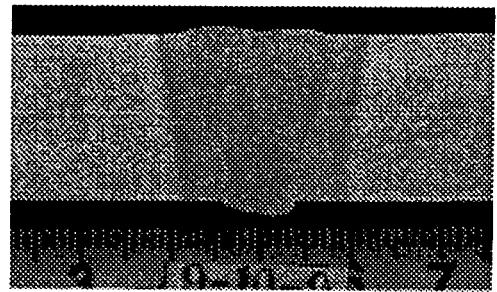


図 4.2-3 継手形成（板厚 20mm ）

4.3 成果のまとめ

高精度ブロック継手の高能率溶接技術について、その将来方向を高速溶接・姿勢溶接両面について研究を行い、以下の成果を得た。

- (1) 文献調査・分析により、高精度ブロック継手の高能率溶接の適用・開発指針を示した。
- (2) 船殻の下向姿勢高速・高能率溶接法として実現性の高い「多電極ガスシールドアーク溶接法」の開発を行い、板厚 20mm の 1 パス溶接を溶接速度 $2\text{m} / \text{min}$ で継手溶接が可能なことを確認した。

5. 成果と今後の活用

5.1 本研究の成果

船殻ブロックの高精度工作精度予測技術の構築、高度の工作精度評価技術の構築、及び、高能率ブロック継手溶接技術の開発の3課題を設定し、船殻ブロック建造の事前・事後の両面から、工作精度の向上・管理技術の高度化と溶接施工の高能率化を目標に研究を行い、下記の成果を得た。

(1) ブロック工作精度予測技術

実用的な、立体構造ブロックの溶接変形を高精度で推定する方法として、シェル要素・梁要素でモデル化した「弾性FEM溶接変形解析手法」を確定し、変形発生源として「溶接部への固有応力・変形の与え方」を設定した。この成果により、従来予測出来なかった曲がり部ブロックの溶接変形・収縮量を、高精度で推定出来るようになった。また、平行部ブロックの溶接変形の推定に実用出来る高精度の「平均収縮量の推定簡易式」も提案した。

この溶接変形推定法を実用化し、ブロックの伸ばし量・延べ尺の設定要領や逆ひずみ・変形拘束等の変形制御要領等を設定・標準化すれば、高精度ブロック製作が十分可能になる。参加各社では、直ちに研究成果の実用化を試行しており本格適用は近い。

なお、曲率効果・拘束効果の定量化、関数近似による定量化等、「弾性FEM解析変形予測手法」によらずに、曲がり部ブロック溶接変形を高精度で簡単に推定する簡易推定式の検討・研究が望まれる。

(2) ブロック工作精度評価技術

ブロックの高精度3次元形状取得法として、船殻建造現場適用の観点から、従来計測法の「セオドライト式距離計測法」は大型ブロックや渠内内の計測に、「デジタルカメラ式写真計測法」は小組立から中組立の計測法に効果が發揮出来ることが判った。

また、計測取得した高精度3次元ブロック情報と船殻3次元CADの構造情報との結合を前提に、製作ブロックの「出来上がり精度」と搭載ブロックの「取り合い精度」を検討・評価し、損失時間・コストを評価指標とする実用的な「工作精度評価システム」を提案し、基礎となるプログラムを作成し有効性を確認した。

本研究では、実計測デジタルデータを基本とする「工作精度評価システム」の精度管理の考え方から精度評価の指標までを提案し、システムの有効性を確認する試作品を開発したが、実用化された場合には、客観的且つ定量的なブロック精度評価が出来ることから、本成果を基礎として実用化研究・実システム開発へ繋げることを期待する。

「デジタルカメラ式写真計測法」は、数多くの計測点の3次元位置情報を高精度・短時間・低コストで効率的に獲得でき、船殻ブロックの3次元形状計測手法として実用出来るが、測定ターゲットの設置を必要としており、現状では計測作業を革新的に効率化するものでない。継続して開発動向を把握すると共に、今後は船殻ブロックに最適な3次元計測技術を、計測器メーカーと実用化に向けて共同開発することが必要と考える。

(3) ブロック継手の高能率溶接技術

船殻の下向姿勢高速・高能率溶接法として実現性の高い「多電極ガスシールドアーク溶接法」の開発を行い、板厚 20mm の 1 パス溶接を溶接速度 2m / min で継手溶接が可能なことを確認した。

高能率溶接法の候補として、下向姿勢の「多電極ガスシールドアーク溶接法」が実現性の高いことを把握出来たが、今後は、高能率姿勢溶接も含めて更に研究開発を重ね、渠中ブロック継手の高能率溶接を実現されることを期待する。

5. 2 今後の活用

本研究の成果の実用化により、高精度船殻ブロックの実現の目処がついた。今後は、以下に示すように船殻 3 次元 CAD と結合させ、船殻工作技術・渠中搭載技術の向上、作業の効率化等に役立てられることを望む。

- (1) 「弾性 FEM 溶接変形解析手法」は、ブロックの構造情報の入力作業に多大の労力を必要とする。
溶接変形推定作業の短縮のためには、船殻の 3 次元 CAD と結合させ構造情報の入力作業の簡素化を図ると共に、自動的に変形推定結果を生産データに反映出来るシステム化が必要である。
- (2) 「工作精度評価システム」は、船殻 3 次元 CAD からの構造情報の取得、幾何公差の導入、ブロックの形状計測点の特定化・極少化等、実システム化が必要である。

5. 3 成果の活用効果

本研究成果は今後更に発展させ実用化する事により、船殻建造技術の向上・新建造技術の創出・建造コスト低減に役立ち、我が国造船業界の課題である国際競争力の維持・強化に大きく貢献することが期待出来る。

- (1) 工作精度予測技術の実用化により、事前に計画した高工作精度で船殻ブロックが製作出来る。その結果、
 - (a) 製作後のブロック形状修正作業が極少化され、また、後工程の工作精度維持が容易になる。
 - (b) 渠中でのブロック搭載・結合・溶接作業の損失率が極少化され、計画工程の維持・作業時間の短縮化・効率化が可能になる。
 - (c) 製作ブロックの結合工作精度が大幅に向上し、搭載ブロックの大型化の推進が可能になる。
 - (d) ブロック継手精度が大幅に向上し、溶接の自動化・ロボット化・高効率化の推進が可能になる。

等、建造コストの損失発生がなくなると共に、建造コスト低減の新たな促進要因も創造出来る。
- (2) 工作精度評価技術の実用化により、船殻ブロックの工作精度管理技術が向上し、高工作精度ブロックの製作管理が容易になる。その結果、
 - (a) 「出来上がり精度」評価により、製作ブロックの工作精度・不具合が確認でき、原因究明・改善案検討・対策処置が迅速に処理可能になり、結果として高精度の船殻ブロックが実現する。
 - (b) 「取り合い精度」評価により、渠中へのブロック搭載前に机上で搭載・結合作業の検討・評価され、位置決め要領・部分補正要領・継手精度情報の指示・対策処置が事前に可能になり、大損失の発生が未然に防止出来る。
 - (c) 複数建造案の机上での事前の検討・評価が可能になり、最適な革新的なブロック建造技術が実現でき、また、管理者・作業者の支援・教育のツールとして活用出来る。

(d) 高水準の工作精度維持が容易になり、高精度高品質船舶の供給が可能になる。

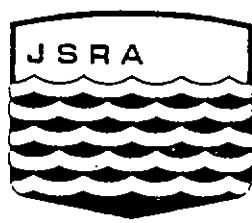
等、コスト損失発生の未然防止・新建造法の創出・熟練技能者育成等、多大な波及効果が得られる。

なお、曲がり部ブロックが、平行部ブロックに比較して工作精度が悪く、船殻建造効率化のネックとなっている現状から、曲がり部ブロックの製作工程、即ち、曲げ整形一小組立一中組立一大組立一渠中搭載の、各工程での工作精度管理技術の確立が重要である。特に、本研究では対象としなかった部材の3次元曲げ整形工程の変形予測技術・形状評価技術の確立が今後の課題である。

最後に本研究の実施を支援していただいた日本財団に厚くお礼を申し上げると共に、終始活発な研究と討論を行って頂いた参加委員各位に、また、研究の実施に始終努力を払われた日本造船研究協会及び日本造船工業会の方々に心より感謝する次第である。

発 行 平成 12 年 3 月
発 行 所 社団法人 日本造船研究協会
〒105-0001 東京都港区虎ノ門一丁目 15 番 16 号
日本財団ビル 6 階
電 話 総務部 03-3502-2132
研究部 03-3502-2133
F A X 03-3504-2350

「本書は、日本財団の補助金を受けて作製したものを増刷し
頒布するものです。」



The Shipbuilding Research Association of Japan