

SR 246

SHIP RESEARCH SUMMARY REPORT

船殻ブロックのデジタル生産技術の基礎研究

成 果 報 告 書

平成15年3月

社団 法人 日本造船研究協会

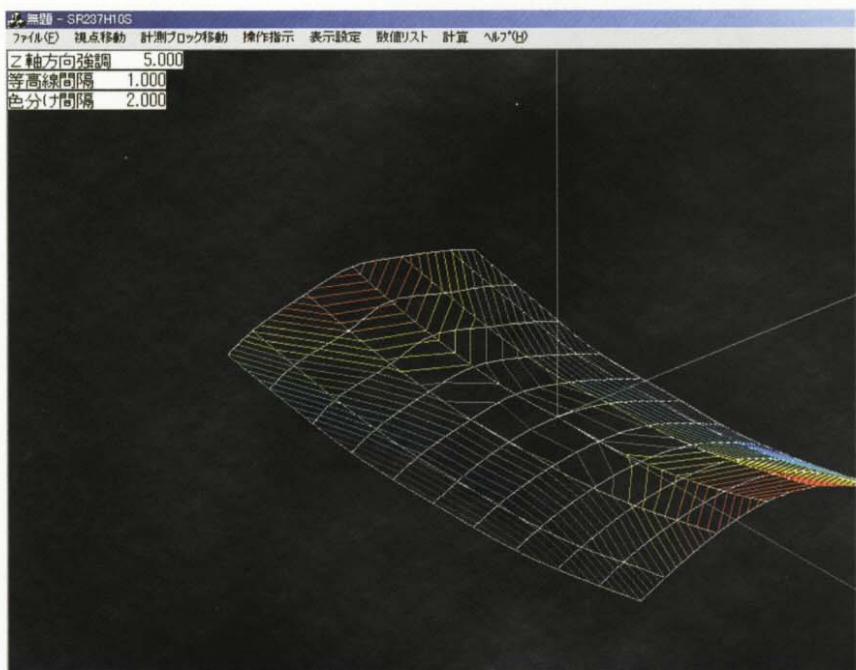
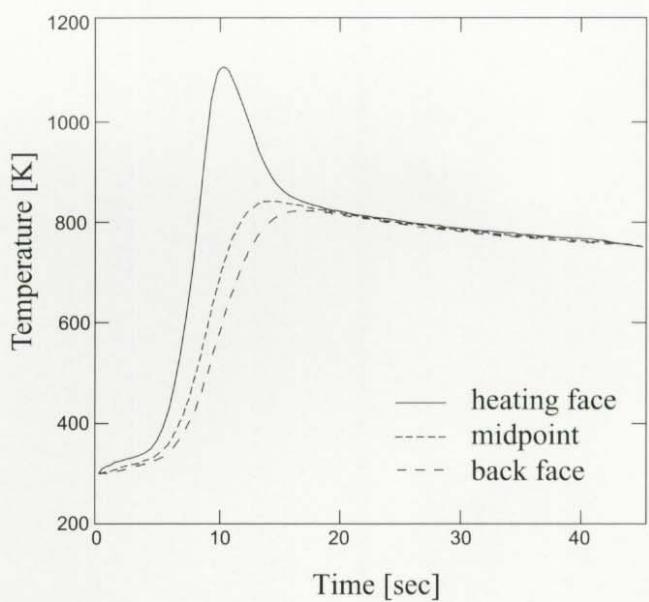
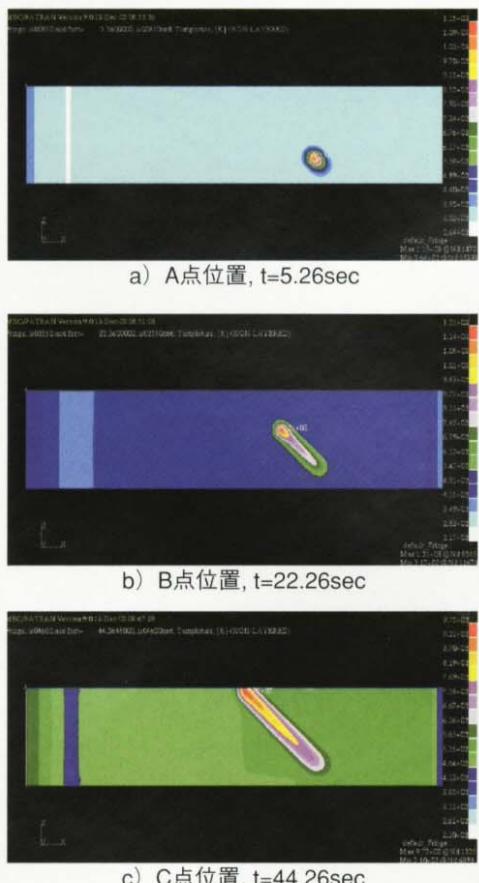


図1. 新しい板曲げ加工例（鞍型）



図B. ウエブD点位置における熱サイクル

図A. ウエブ加熱面温度分布

図2. 热サイクルシミュレーションの結果

SR246「船殻ブロックのデジタル生産技術の基礎研究」

要 約

Ship Research Panel 246

Practical Application of Digital Production Technologies for Ship Hull Blocks

Summary

In order for Japan to effectively compete internationally in the shipbuilding industry, digital production technology driven by numerical information processing must be introduced in shipyards, thus ensuring new and advanced shipbuilding capabilities and production technologies. The following digital production technologies have been developed in the context of SR246.

- 1) Establishment of heating deformation estimation technology and heating deformation control technology for ship hull materials and blocks, to be used in high precision forming and assembly.
- 2) Establishment of digital conversion technology for the creation of theory and simple numerical/formulaic methods from the process-related knowledge possessed by skilled workers.
- 3) Development of 3D measurement technology to substitute for the eyes of skilled workers, to be used to ascertain the dimensions and shapes of materials at each manufacturing step.
- 4) Development of numerical information processing technology for the fusion of the technologies described in items 1) ~ 3) above.

The following results can be expected from the introduction into shipyards of the foregoing digital production technologies.

- (1) Consistent high precision and high efficiency block production, from plate bending through to construction in dry dock.
- (2) Substantial reduction in non-value-added work (readjustment, re-marking, etc.)
- (3) Reduced lead time, enabling shorter construction/delivery time and increased annual volume of construction.

1. 研究の目的

本研究の目的は、我が国の造船業が厳しい国際競争に打ち勝つために、次に示す要件を満たす造船工場を構築することにある。

- (1) 現状の工場においてさらなる生産性の向上
- (2) 製造コストの低減を図り、高品質生産の維持を指向
- (3) 高精度生産技術を工場全体に定着させ「むり、むら、むだ」を徹底排除

これらを実現するためには、数値情報処理技術を駆使したデジタル生産技術を造船現場に投入し、従来ない造船の高精度生産技術を確立する必要がある。これにより、溶接付帯作業を低減し、「むり、むら、むだ」を徹底排除した造船工場に変革することで生産性の一層の向上を図ると共に、熟練工の減少と高齢化への対処とすることである。

2. 研究の目標

造船現場にデジタル生産技術を投入するため、次の技術目標を設定した。

- (1) 高精度な加工及び組立のための、船殻部材及びブロックの加熱変形推定技術と加熱変形制御技術の確立
- (2) 熟練技能者の作業知識の理論化または簡便な数値化及び数式化によるデジタル変換技術の確立
- (3) 各製造段階における部材の寸法形状を把握するための、熟練技能者の目に変わる三次元計測技術の開発
- (4) 上記1)～3) 項の技術を融合した数値情報処理技術の開発

3. 研究の内容

造船現場にデジタル生産技術を適用するため次の技術開発を行った。

- (1) ナレッジとデジタル化
板曲げ加工、ロンジ曲げ加工及び中組立作業の暗黙知である熟練技能をシミュレーション技術やモデル化により形式知化し、デジタル化を試みた。
- (2) 加熱変形データベースと変形シミュレーション技術
板曲げ加工、ロンジ曲げ加工の加工指示書を設計段階で作成するために必要な、加熱変形データベースとシミュレーション技術の基盤を固めた。
- (3) 三次元計測技術
熟練技能者の目に代わる最新の三次元計測技術を、造船現場の各ステージ（板曲げ加工、ロンジ曲げ加工、中組立作業）毎に適合性を調査した。更に、これら三次元計測技術を適用する場合に必要な造船現場特有の自重、拘束、温度影響をキャンセルする手法について検討した。
- (4) 実証実験
上記ナレッジの分析から得られた新しい板曲げ加工、ロンジ曲げ加工の手法を提案した。本手法の妥当性を現場での実用化を想定した実証実験により検証した。

4. 本研究で得られた成果と今後の応用展開

本研究の成果を現場の実用化という観点から下記にまとめる。

- (1) 板曲げ加工については、従来の現場板曲げ加工ステージで熟練作業者に依存していた加工要領が、本研究で開発した“曲面理論を適用した加熱位置決定手法”と“加熱変形推定技術を利用した加熱量の決定手法”を用いて「加熱位置自動決定プログラム」を実行することで、設計段階の現図展開時に加熱位置を事前に検討し加熱要領として加工指示をすることが可能になる。また、形状計測を板曲げ加工ステージでオンライン化することができれば加熱加工毎に計測し、計測結果を曲面解析して次の加熱位置を決定することが可能になると共に自動装置化することも可能になる。また、板曲げ加工の上流工程になる

設計作業の現図展開を含めて考察すると、原理的には展開時の伸ばし量が板曲げ加工時の収縮量になるので、展開誤差のない現図展開手法を応用展開すれば更に高精度に設計～加工までの一貫システムの構築が可能になる。

- (2) ロンジ曲げ加工についても、板曲げ加工と同様に従来の現場ロンジ曲げ加工ステージで熟練作業者に依存していた加工要領が、本研究で開発した“目標のネジレ量に対する加熱時の拘束変形量の推定技術”を用いて「加熱加工要領出力リスト」ソフトをExcelなどを使って構築することで、設計段階の現図展開時に加熱位置を事前に検討し、加熱要領として加工指示をすることが可能になる。但し、本研究では弾性域(線形)における拘束影響を利用した純捻れ加工方法を対象としているため、塑性域(非線形)まで拘束影響を考慮した、即ち、熱弾塑性FEM計算を駆使して加熱時の拘束変形量の推定を行って加工要領を出力できるように応用展開を図ることが望まれる。
- (3) 加熱変形推定技術のために必要なガスバーナー加熱時の入熱量の定量化が図られ、従来は現場での入熱量は大、中、小と定性的な指示だったものが、本研究成果を活用することで入熱量のダイナミックな時間変動まで考慮可能な推定技術化が可能となり、現場での定量的に入熱量を指示することが可能となる。更に、本成果を加熱変形推定技術との連結を図ることにより、通常、推定計算条件としてガス入熱時の温度分布を実験的に求める必要があったが、推定計算のみでガストーチの移動まで考慮した温度分布の時系列変化までダイナミックスに高精度に推定することが可能となる。更にモデリングや計算時間の簡素化が図れるものと期待できる。
- (4) デジタル生産技術に不可欠であると思われる三次元形状計測技術については、従来の巻尺、金尺、水ホース等の計測ツールを用いた計測から、計測データのデジタル値を入手することによって工作精度管理技術に活用できると考えられる。しかしながら、最新の三次元形状計測装置によって高精度に計測が可能となるが、その実現のためには計測対象に応じた治具、場所、基準となる計測ポイントなどが必要である。これらの設備の選択及び使い込むには熟練を要するため、予め計測対象に応じた設備が整備された計測ステージを設けることにより熟練レスでだれでも簡単に形状計測が可能となるものと考えられる。応用展開としての実用面では計測ステージの構想も必要になると思われる。
- (5) また、三次元計測技術については、造船に必要な精度以上に高精度に計測が出来ても元々剛性が低い状態では、設置状況、気温、その他の条件で部材が変形してしまう。このため設計情報と工作情報を単純に比較出来ず、計測結果から部材の必要な精度を管理するには経験と勘に基づく熟練を要していた。本研究で開発した“計測対象の自重、拘束、温度影響キャンセル技術”を用いることで単純に設計情報であるCAD値と計測値を比較することが可能になると考えられる。また、特にブロック製作時の精度管理項目であり、捻れなどの要因を捉えるのに有効なガス長さの計算も管理ソフトとして利用することで計測データを入力するだけで簡単に把握することが出来るようになると考えられる。更に応用展開を図るには、(4)の計測ステージの整備と同様に計測対象に応じた評価ソフトの整備を図る必要がある。
- (6) 中組立工作精度管理としては、従来は経験と勘に基づく工作精度管理ブロックを設定していたが、本研究の成果を活用することにより板曲げ、ロンジ曲げでの部材精度管理のみで中組ブロックの高精度な生産が可能なブロック形状はどのようなものなのかといったことを定量化することができる。更に、この技術の応用展開として、ブロック分割の合理的な設計手法の開発に応用出来るものと考えられる。
- (7) 本研究自体の研究開発の手法は、造船の多くの熟練を要すると云われる技能に対して作業ノウハウである作業知識を形式知化、即ち、ナレッジ化するためのアプローチとして有効であると考えられる。従来は各社自前の現場ノウハウであり、更には作業者に依存していた技能であった作業ノウハウを、本研究部会で実施した現状調査、ヒアリング、討論会を通して得た知見を基に、「各社いい所取り」で実用化を進めている。今後は、本研究部会で取得した研究の進め方を参考に、例えば、中組立作業のデジタル化などで、鉄工作業を模擬した部材引き付け影響を考慮した組立変形推定技術の開発などの応用が可能となる。

はしがき

本成果報告書は、日本財団の助成事業として、日本造船研究協会第246研究部会において、平成12から14年度の3カ年計画で実施した「船殻ブロックのデジタル生産技術の基礎研究」の成果を取りまとめたものである。なお、本研究は日本造船工業会から受託して行ったものである。

第246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	河野 隆之 (三菱重工業)
委員	豊貞 雅宏 (九州大学) 青山 和浩 (東京大学) 豊田 政男 (大阪大学) 富田 康光 (大阪大学) 寺崎 俊夫 (九州工業大学) 村川 英一 (大阪大学接合科学研究所) 松岡 一祥 (海上技術安全研究所) 井上 好章 (三菱重工業) 大澤 守彦 (日立造船) 谷川 雅之 (日立造船) 水谷 和時 (ユニバーサル造船) 島本 英史 (住友重機械工業) 石山 隆庸 (IHIマリンユナイテッド) 内藤 喜幸 (三井造船) 工藤 仁志 (川崎造船)
前委員	佐竹 博己 (川崎重工業) 稲見 皎 (川崎重工業)

第246研究部会幹事会 委員名簿

(敬称略、順不同)

主査	河野 隆之 (三菱重工業)
委員	井上 好章 (三菱重工業) 大澤 守彦 (日立造船) 水谷 和時 (ユニバーサル造船) 島本 英史 (住友重機械工業) 石山 隆庸 (IHIマリンユナイテッド) 内藤 喜幸 (三井造船) 工藤 仁志 (川崎造船)
前委員	佐竹 博己 (川崎重工業) 稲見 皎 (川崎重工業)

第246研究部会WG1 委員名簿

(敬称略、順不同)

主査	豊貞 雅宏 (九州大学)
幹事	大澤 守彦 (日立造船)
委員	武市 祥司 (東京大学) 村川 英一 (大阪大学接合科学研究所) 大沢 直樹 (大阪大学) 寺崎 俊夫 (九州工業大学) 後藤 浩二 (九州大学) 岩田 知明 (海上技術安全研究所) 河野 隆之 (三菱重工業) 杉村 忠士 (三菱重工業) 谷川 雅之 (日立造船) 谷 和彦 (日立造船) 水上 優 (ユニバーサル造船) 小山 清文 (ユニバーサル造船)

森川 正夫 (ユニバーサル造船)	尾上 仁久 (ユニバーサル造船)
天野 昌祥 (住友重機械工業)	小林 順 (IHIマリンユナイテッド)
谷口 清久 (川崎造船)	梅本浩一朗 (川崎造船)
神永 駿 (三井造船)	近藤 学 (三井造船)
前委員 楊並 靖之 (日立造船)	伊藤 久 (日本鋼管)
伊藤 圭司 (住友重機械工業)	

第246研究部会WG2 委員名簿

(敬称略、順不同)

主査 野本 敏治 (東京大学)	
幹事 井上 好章 (三菱重工業)	
委員 青山 和浩 (東京大学)	松岡 一様 (海上技術安全研究所)
田中 義照 (海上技術安全研究所)	河野 隆之 (三菱重工業)
三浦 正美 (三菱重工業)	中谷 光良 (日立造船)
北川 義訓 (ユニバーサル造船)	柳田 博彦 (ユニバーサル造船)
河崎 登 (ユニバーサル造船)	宇野 清隆 (ユニバーサル造船)
浪越 正至 (住友重機械工業)	石川 太郎 (IHIマリンユナイテッド)
清水 英樹 (川崎重工業)	太田 光一 (川崎造船)
藤村 英明 (三井造船)	近藤 学 (三井造船)
古賀 由秀 (三井造船)	
前委員 松浦 盈雅 (日立造船)	秦 直也 (川崎重工業)
笠木 明 (三井造船)	

討議参加者

(敬称略、順不同)

宮脇 伸賢 (住友重機械工業)	白土 次男 (三井造船)
中濱 剛 (三菱重工業)	

事務局 (日本造船研究協会) 宮澤 徹、大森 勝、村上 好男
 (日本造船工業会) 吉識 恒夫

注) 前委員の事業所名は、会社統合化・分社化前に委員交替されたため、旧事業所名としている。

【平成14年10月1日付 造船会社の統合・分社化】

- (1)「日立造船株式会社(造船部門)」と「日本鋼管株式会社」が合併統合され、「ユニバーサル造船株式会社」となる。
- (2)石川島播磨重工業株式会社の船舶海洋部門が分社化され、「株式会社IHIマリンユナイテッド」となる。
- (3)川崎重工業株式会社の船舶部門が分社化され、「株式会社 川崎造船」となる。

SR246「船殻ブロックのデジタル生産技術の基礎研究」

目 次

1. 研究の目的	1
2. 現場ナレッジとデジタル化	2
2.1 現状調査	2
2.2 ナレッジのデジタル化	4
2.3 板曲げ加工のナレッジとデジタル化	4
2.4 ロンジ曲げ加工のナレッジとデジタル化	5
2.5 中組立作業のナレッジとデジタル化	5
3. 加熱変形データベースと変形シミュレーション技術	6
3.1 加熱変形シミュレーションの位置付け	6
3.2 板曲げ加工における加熱変形データベース	6
3.3 ロンジ曲げ加工における加熱変形データベース	8
4. 三次元計測技術	9
5. 実証実験	10
5.1 新しい板曲げ加工の実証実験による検証	10
5.2 ロンジ曲げ加工の実証実験による検証	12
5.3 中組立作業のシミュレーション技術による変形要因の分析	13
6. 成果と今後の活用	14

1. 研究の目的

我が国の造船業は、厳しい国際競争に勝ち抜くために、次のような要件を満たす新しい造船工場に変革する必要がある。

- (1) 現状の工場においてさらなる生産性の向上
- (2) 製造コストの低減を図り、高品質生産の維持を指向
- (3) 高精度生産技術を工場全体に定着させ「むり、むら、むだ」を徹底排除

これらを実現するためには、数値情報処理技術を駆使したデジタル生産技術を造船現場に投入し、従来にない造船の高精度生産技術を確立する必要がある。造船現場に必要なデジタル生産技術を開発するためには、

- (1) 高精度な加工及び組立のための、船殻部材及びブロックの加熱変形推定技術と加熱変形制御技術の確立
- (2) 熟練技能者の作業知識の理論化または簡便な数値化及び数式化によるデジタル変換技術の確立
- (3) 各製造段階における部材の寸法形状を把握するための、熟練技能者の目に変わる三次元計測技術の開発
- (4) 上記1)～3) 項の技術を融合した数値情報処理技術の開発

が必要と考えられる。

造船は部材の剛性が低く、温度変化に対してもブロックが変形しやすい特徴を持つため、高精度に部材を加工し、ブロックを組立てることが、高精度生産技術のキーとなると考えられる。特に、剛性の面から精度確保が困難な工程は、外板に骨材などの内構材を組立てて中組作業であると考えられる。

造船現場では、曲がり部ブロック製作工数が、平行部ブロック製作に比べて単位重量当たり約3倍掛かると云われているため、造船のネック工程は曲がり部ブロック製作であると思われる。従って、曲がりブロック製作を高精度に行なうことがネック工程の解消につながり、造船の生産性を大幅に向上させるものと考えられる。

本研究部会では、平成12年から3年間にわたって、「船殻ブロックのデジタル生産技術の基礎研究」を実施し、精度確保が困難な曲がり部ブロックの製作の中での曲がり加工から中組立までに至る、各ステージにおける高精度で高効率に加工・組立を行うためのデジタル生産技術の活用方法について検討した。特に、デジタル化にあたっては、現場ノウハウであるナレッジ(作業知識)を抽出し、得られたノウハウをデジタル化する試みであるナレッジ・エンジニアリング手法について取り組み、我が国の強みである造船の熟練技能の技術伝承の方法についても検討した。

2. 現場ナレッジとデジタル化

本研究では、曲げ加工から中組立作業までを対象にデジタル生産技術の実現を図り、従来にない造船の高精度生産技術を確立するために、従来の作業者に依存した作業を技術的に理論化、体系化することにより、暗黙知であった作業知識を形式知化して明確化することで、デジタル化に必要なモデルの構築を検討するために、現場の現状調査を実施することにし、得られた知見を基にデジタル化を試行することで研究を進めた。

2.1 現状調査

現状調査にあたっては、工場や作業者毎に作業の考え方方が違うため作業者の言葉を我々技術者が理解できるように変換する必要があると考えた。そこで、技術者による文献調査、アンケート調査、ヒアリング、IEを取り入れた現場観測を実施し、暗黙知の形式知化を図り、その後、熟練技能者との討論会を実施して作業者と熟練技能者との作業知識を共有化することを試みた。

(1) 板曲げ加工の現状調査結果

- ・曲げ加工の約7割～8割近くが椀(皿)型の加工であり、椀(皿)型加工の自動化が出来れば、造船工場にとって効率化が図られることが分かった(図2.1-1)。
- ・板曲げの上流工程である現図展開との関係から、原理的には現図展開と板曲げは逆変換の関係にあり、展開時の伸ばし量が板曲げ加工時の収縮量になることが分かった。

(2) ロンジ曲げ加工の現状調査結果

- ・ロンジ曲げ加工のネック作業を調査した。その結果、ネック作業は捩れ加工であり、タンカー1隻当たりのロンジ曲げ加工の工数内訳の内、捩れのある加工が約8割強となることが分かった(図2.1-2)。

(3) 中組立の現状調査結果

- ・工作精度から見た変形要因は、主に人為的因子、設備・機械的因子、施工的因子、部材的因子があることが分かった(図2.1-3)。
- ・中組ブロックには、ローラ芯とロンジ方向が異なる非対称の曲がりのあるブロック等、船首尾部分に、常に精度が悪くなるブロックがあることが分かった(要管理ブロック)。

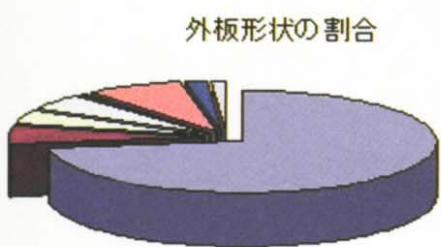


図2.1-1 板曲げ加工形状の割合

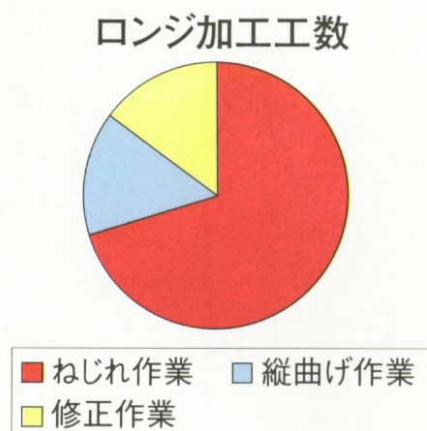
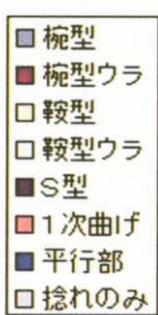


図2.1-2 ロンジ曲げ加工工数

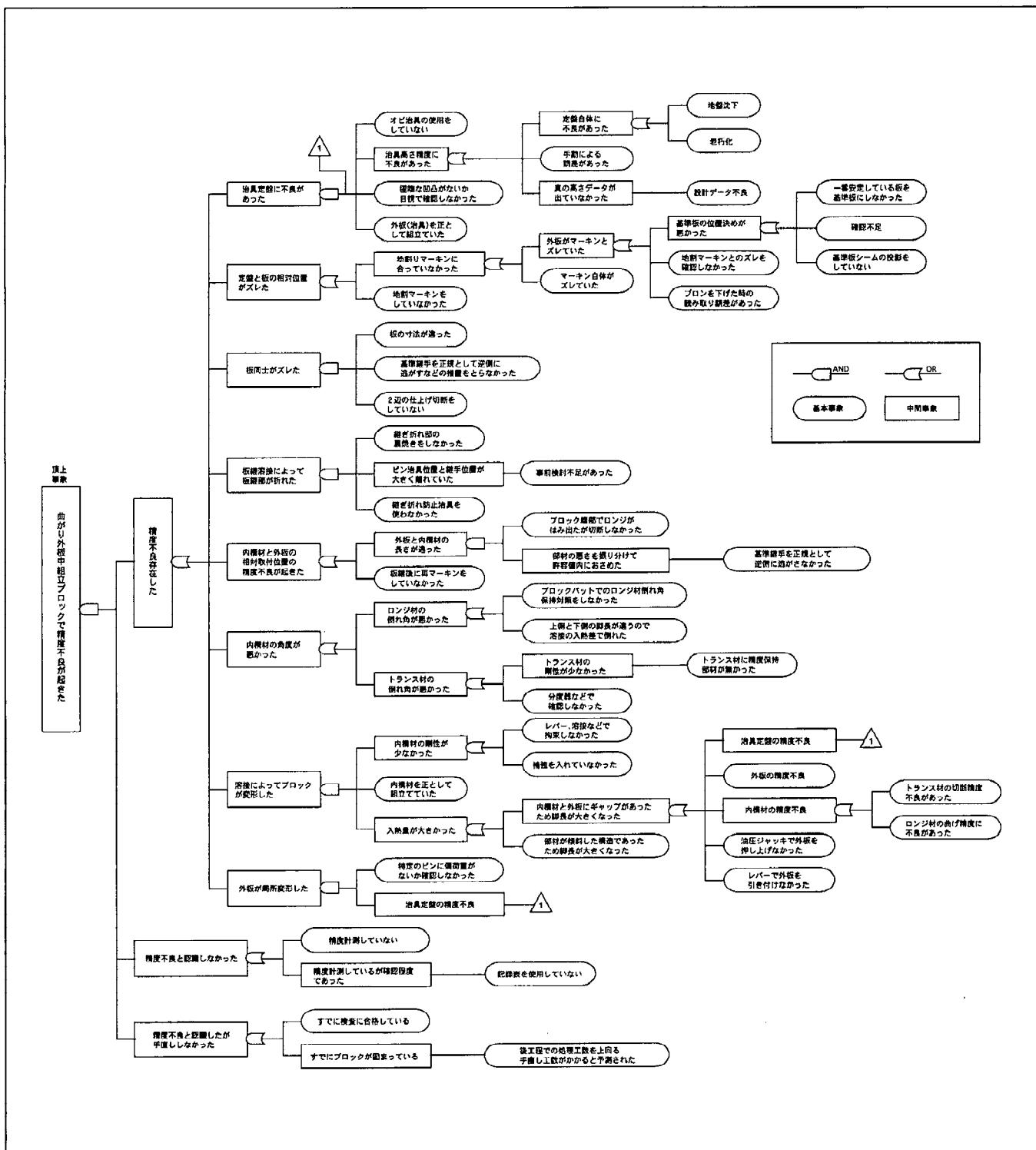


図2.1-3 工作精度FTA図

2.2 ナレッジのデジタル化

本研究部会ではナレッジとは、「人に活用できるよう体系化された情報」、あるいは、「利用可能に体系化された効果と効用を内包している情報」であると定義し、この観点から、2.1で得られた作業ノウハウをデジタル化する試みを実施した。

デジタル化に際しては、ナレッジ・エンジニアリング手法を用いることを試行した。ナレッジ・エンジニアリング手法としては、

- ① コンピューター・シミュレーションを用いたノウハウの体系化
- ② 抽象化モデルの類似モデルの利用

があり、板曲げ加工、ロンジ曲げ加工、中組立作業にそれぞれ適合する手法を用いた(図2.2-1)。

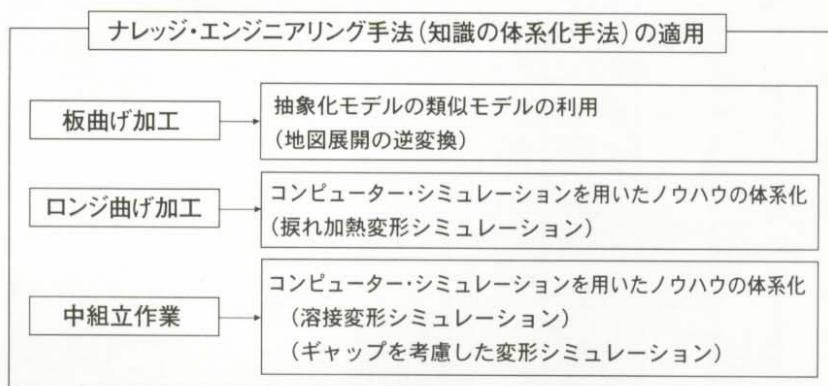


図2.2-1 各工程に適用したナレッジ・エンジニアリング手法

2.3 板曲げ加工のナレッジとデジタル化

板曲げ加工の現状調査結果から現図展開を抽象化モデルとして表現し、抽象化モデルの類似モデルの利用によるナレッジ・エンジニアリング手法の適用を図ることで、板曲げ加工、現図展開、地図展開の抽象化モデルを構築することが出来た。これにより、板曲げ加工を幾何モデルとしてモデル化した(図2.3-1)。

また、加熱変形のモデルも考案し、幾何モデルと加熱変形モデルの論理的な整合性を取ることが出来た(図2.3-2)。

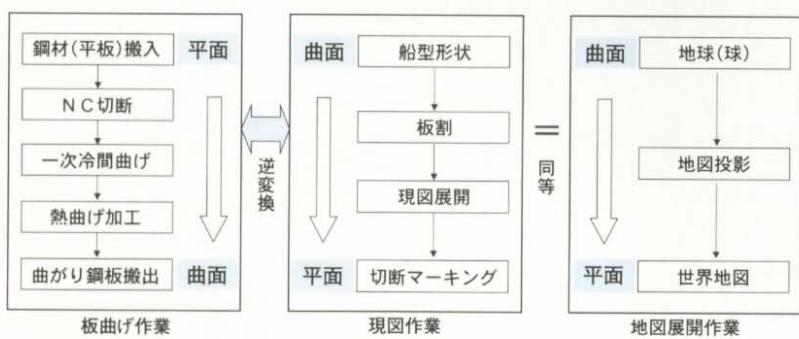


図2.3-1 板曲げ加工モデルの抽象化

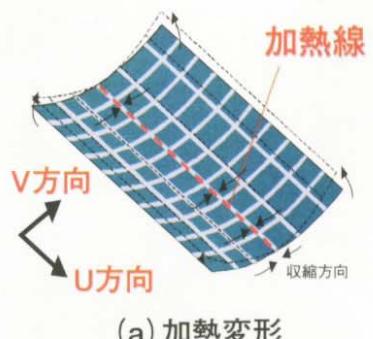


図2.3-2 加熱変形のモデル

2.4 ロンジ曲げ加工のナレッジとデジタル化

ロンジ曲げ加工の現状調査より、ロンジのねじり加工が熟練と時間を要する作業であることが分かったため、ナレッジ・エンジニアリング手法の適用として、ロンジのねじり加工作業の現場ナレッジを作業手順に沿って(図2.4-1)、シミュレーション技術によるノウハウの理論体系化することにした(図2.4-2)。

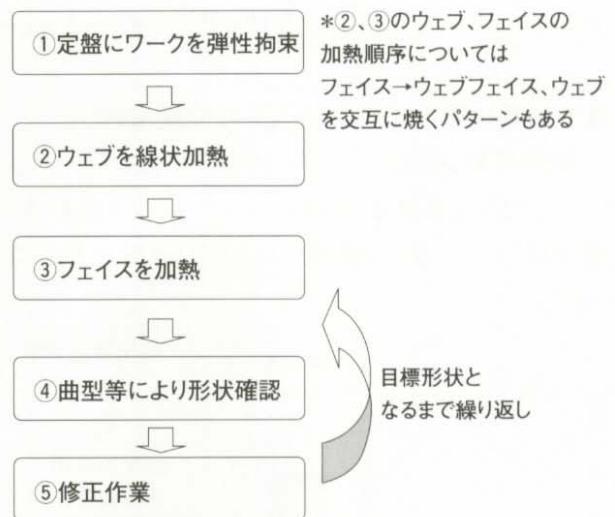


図2.4-1 現場のナレッジ

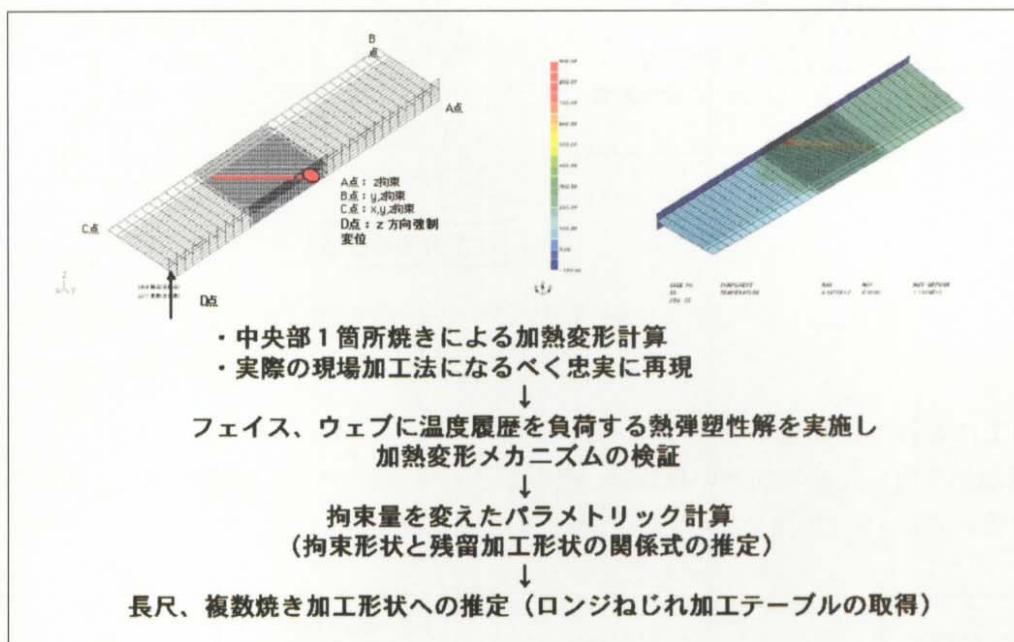


図2.4-2 ロンジ曲げ加工のデジタル化

2.5 中組立作業のナレッジとデジタル化

中組立作業の現場調査から、部材的因子(部材精度)と施工的因子(溶接変形)が工学的な対象と考え、ナレッジ・エンジニアリング手法の適用として、変形シミュレーション技術による変形現象の理論体系化することにした。

(1) 変形シミュレーション

FEMモデルに溶接固有変形を与えることによってプロック全体の溶接変形予測を実施した。また、界面要素の手法を用いることでギャップの引寄せによって生じる変形の予測も可能になった。

(2) 三次元計測装置利用によるブロック精度管理

最新の三次元計測装置を利用することでブロックの形状を三次元座標値としてデジタル化が可能となるとなり、仮組時の位置決め精度確認の精度向上やブロック出来あがり形状確認の精度向上が図れる。

3. 加熱変形データベースと変形シミュレーション技術

3.1 加熱変形シミュレーションの位置付け

加熱変形シミュレーション技術の位置付けを図3.1-1に示す。

ここで開発される一連のシミュレーション技術は、板曲げ加工、ロンジ曲げ加工、ブロック組立における加工方案を生成したり、新しく提案される工作法を仮想的な試行を通じて評価する際の有効な手段として位置付けられる。

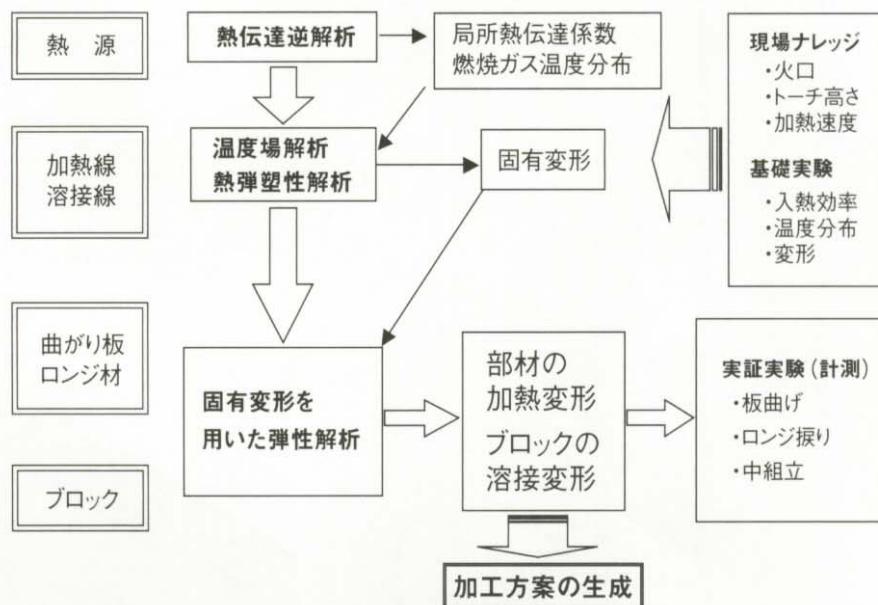


図3.1-1 加熱変形シミュレーションの位置付

3.2 板曲げ加工における加熱変形データベース

高周波誘導加熱を用いた線状加熱の横収縮、角変形と入熱パラメータの関係を図3.2-1及び図3.2-2に示す。横収縮及び角変形共に、ガス加熱に比べ1.4~2.0倍近い値になった。

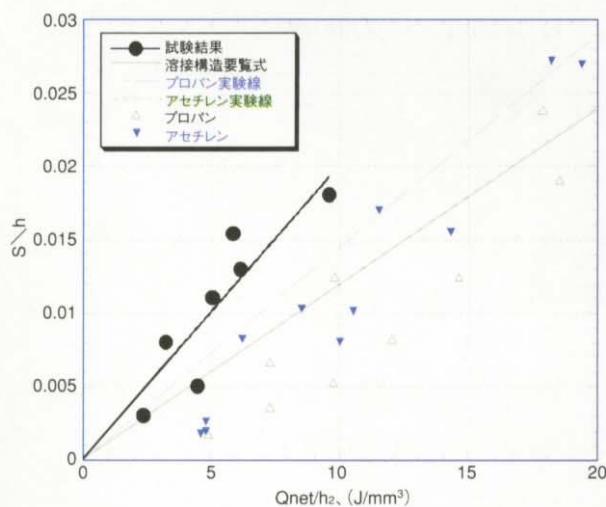


図3.2-1 収縮と入熱パラメータの関係

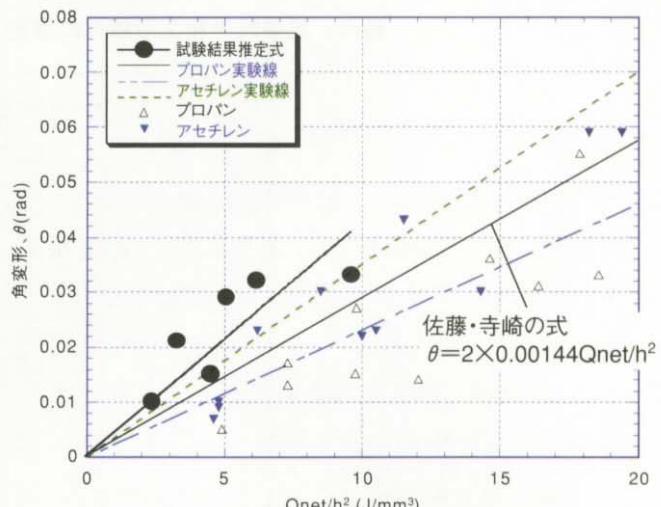


図3.2-2 角変形と入熱パラメータの関係

アセチレンガス炎を用いた線状加熱の横収縮、角変形と入熱パラメータの関係を図3.2-3及び図3.2-4に示す。横収縮の推定式として次式が算出された。

$$S = 0.0012 \times Q_{net} / h$$

座屈変形した試験対(図3.2-4)は座屈による縦曲がりのため異常に大きな角変形が認められた。

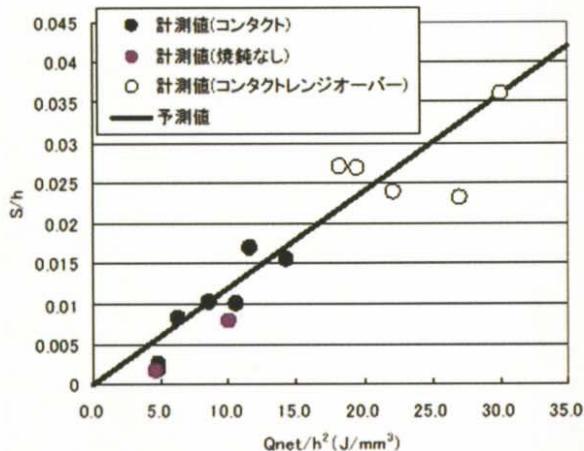


図3.2-3 収縮と入熱パラメータの関係

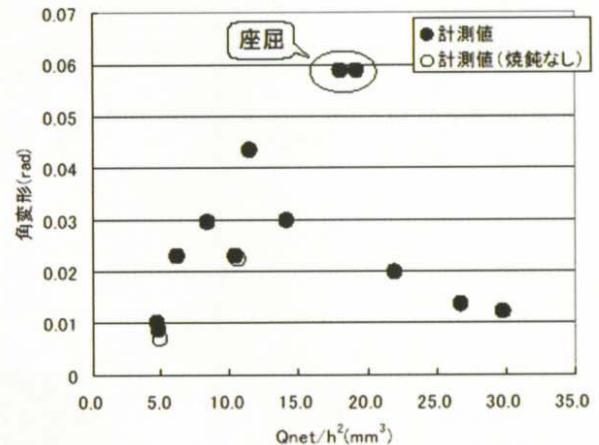


図3.2-4 入熱パラメータと角変形の関係

現場で椀(皿)曲げ、鞍曲げをする時の加熱速度の時間変化を実測した。加熱速度の計測状況を図3.2-5に、加熱速度の時間変化を図3.2-6に示す。椀(皿)曲げでは時間経過と共に、加熱速度が遅くなり、鞍曲げでは殆ど変化が無いことが観測された。

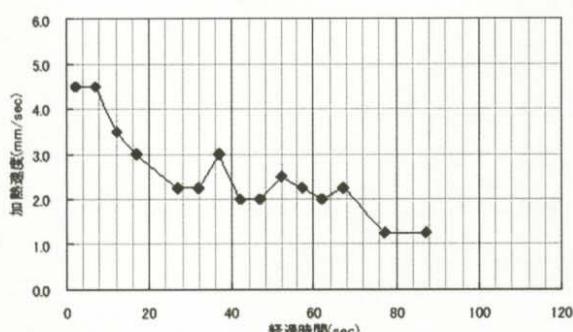


(a) 試験体 No.s8 (椀曲げ)

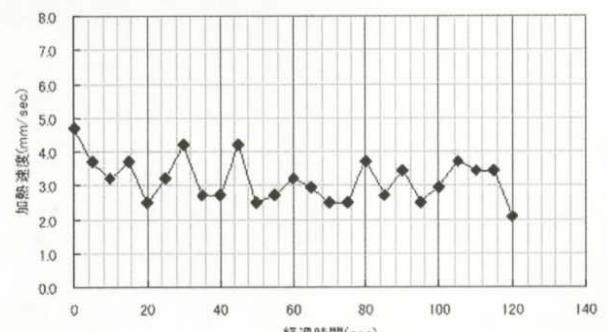


(b) 試験体 No.s5 (鞍曲げ)

図3.2-5 ガス火炎の観察状況



(a) 試験体 No.s3 (椀曲げ)



(b) 試験体 No.s5 (鞍曲げ)

図3.2-6 ガス火炎加熱速度の時間変化

3.3 ロンジ曲げ加工における加熱変形データベース

ロンジ曲げ加工に関しては、加熱に熟練と時間を要する捩れ曲げ加工を対象とした。代表的なシミュレーション結果(フェイス焼き加工結果)を図3.3-1に、拘束変位と残留変形の関係を図3.3-2に示す。

図3.3-2に示すように、シミュレーションにて得られた拘束変位と残留応力の関係は、実験結果と良い一致を示した。

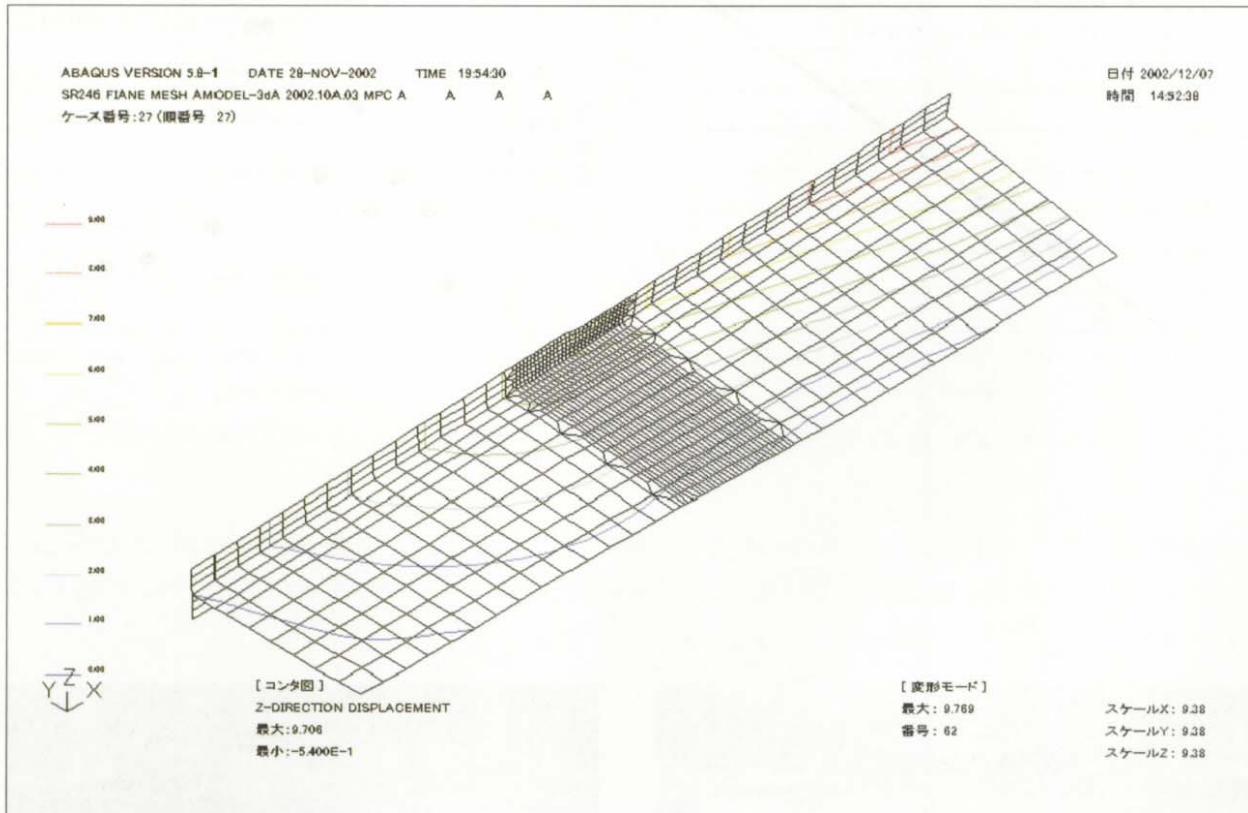


図3.3-1 フェイス焼き加工形状

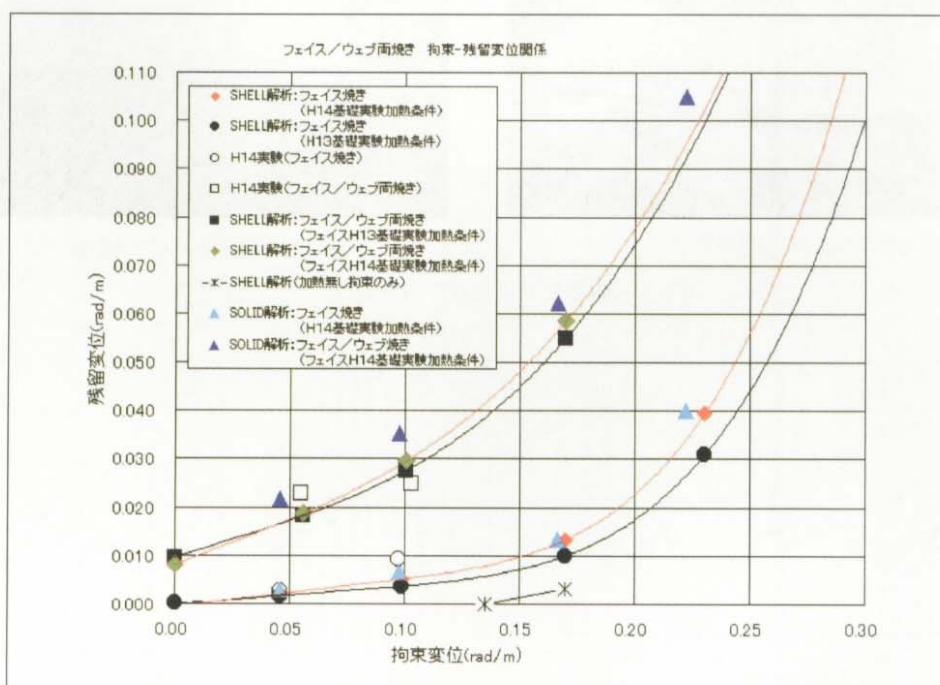


図3.3-2 フェイス / ウェーブ両焼きねじり加工解析結果

4. 三次元計測技術

板曲げ加工、ロンジ曲げ加工、中組立作業ステージにおける三次元計測技術を調査した。今回検討した三次元計測技術の一覧を表4.1に示す。代表的な計測状況を図4.1に示す。試験結果を表4.2に、板曲げステージをFMレーザー方式及びデジタル写真計測が、中組立作業とロンジ曲げ加工ステージは、レーザートラッカ方式が造船現場への適用に有効であることが分かった。

表4.1 検討した三次元形状計測技術一覧

方式	製品名	精度確認		試験体計測							
		絶対	繰返し	a	b	c	d	e	f	g	h
トータル・ステーション	MONMOS NET2B			●			●				
	MONMOS MET2NT			●							
	Elta3	○									
写真計測	MR2			●							
	V-STARS	○		●	●	●	●	○			
画像解析	Metronor System			●							
レーザー・スキャナ	SOASIC	○					○				
	LASAR			●							
	MetricVision 100B	○	○				○	○			
モアレットボグラフィ	WM-1000L						○				
レーザー・トラッカ	FARO Laser Tracker	○	○				○	○	○		
測定アーム	FAROArm		○				○				
曲率測定テープ	Shape Tape	○					○				
	○:SR246にて実施 ●:SR237にて実施			ブロック ブロック ブロック ブロック ブロック ブロック ブロック 中組ブロック							

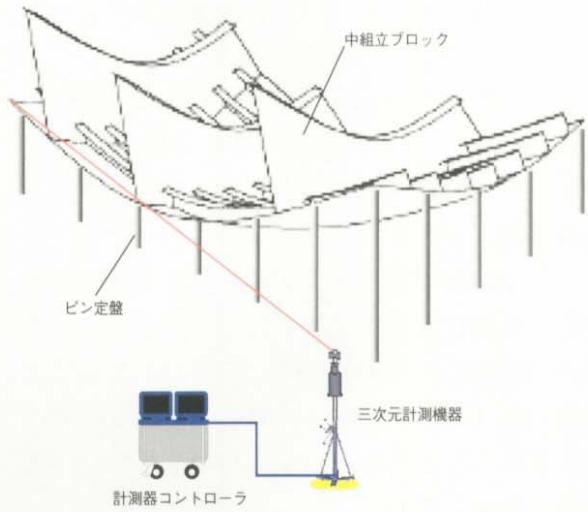


図4.1 中組ステージにおける計測システム

表4.2 有望な三次元形状計測技術のまとめ

方 式	レーザー・トラッカ	FM式レーザー・スキャナ	デジタル写真計測	トータル・ステーション
製 品 名	FARO Laser Tracker	MetricVision 100B	V-STARS	MONMOS
計測精度	±0.025mm	±0.1mm(ターゲット使用)、±0.5mm(ターゲット不使用)	±0.5mm	±1mm
作業効率	・一人作業可能 ・音声入力使用 ・計測時間は短い	・二人作業(レーザ照射位置の確認が必要) ・計測時間は普通	・一人作業可能 ・計測時間は長い	・ターゲット据置では一人作業可能 ・計測時間は普通
長 所	・三次元モデルがない場合に比較的作業効率が高い ・クラスIIレーザ使用	・オフラインプログラミングが可能 ・非接触で計測可能 ・クラスIレーザ使用 ・水濡れ状態でも計測可能	・装置が小型軽量で機動性が高い ・計測対象の振動に強い ・計測の記録が残る	・装置が小型軽量で機動性が高い
短 所	・反射ターゲットを計測点に接触させる必要あり ・座標系つなぎ込み技術が未成熟 ・反射ターゲットのレーザ追尾に技能が必要	・三次元モデルが無い場合に、レーザー照射位置を確認することが困難	・大型対象物では多数のコードターゲットを必要とする ・撮影方法によっては誤差が大きい ・座標データを算出するのに時間を要する	・計測誤差が比較的大きい
適用作業ステージ	中組立/ロンジ曲げ	板曲げ	板曲げ	スポット利用

5. 実証実験

前章までの検討、開発結果を基に、板曲げ加工、ロンジ曲げ加工については、実工場での適用イメージに基づいて実証実験を行い有効性の確認を実施した。中組立作業については、シミュレーション技術の適用性について検討を行った。

5.1 新しい板曲げ加工の実証実験による検証

板曲げ加工については、曲面解析技術、実長展開及び加熱変形推定技術を活用した現図段階からの加工要領出力機能と、曲面解析技術、実長展開及び三次元計測装置を活用した加工ステージでの加工指示出力機能として、新しい板曲げ加工を提案した(図5.1-1)。

そこで、現図段階からの加熱要領出力機能を模擬する試行実験を実施した(図5.1-2)。その結果、ほぼ目標形状通りに加工することが確認された(図5.1-3及び図5.1-4)。特に、現状の板曲げ作業と比べると横曲がりが崩れることなく目標形状に漸近して加工できることが確認できた。

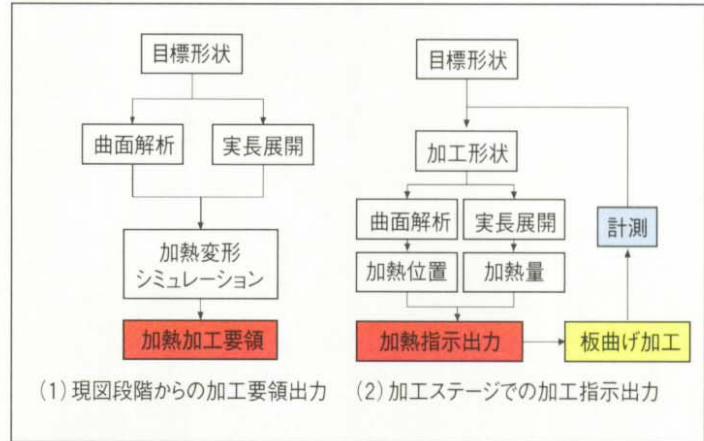


図5.1-1 新しい板曲げ加工の実用イメージ

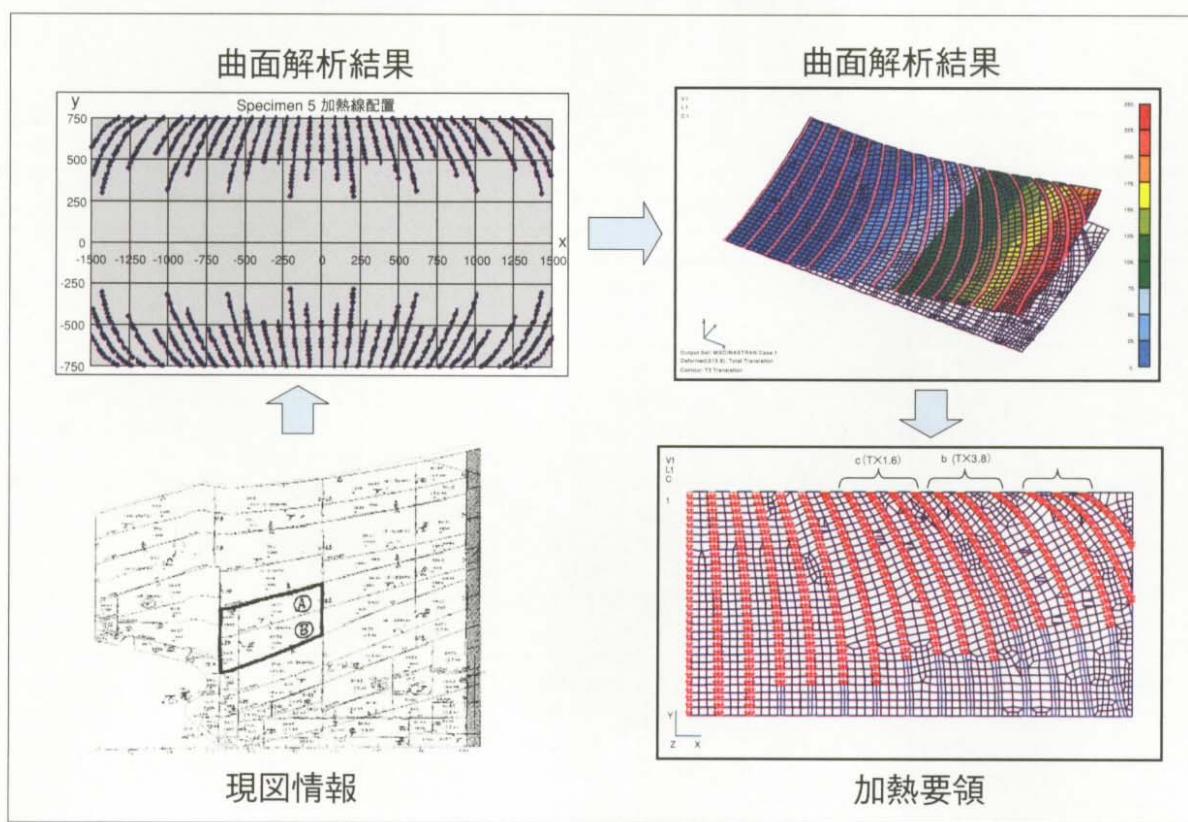


図5.1-2 現図段階からの加熱要領出力機能の模擬

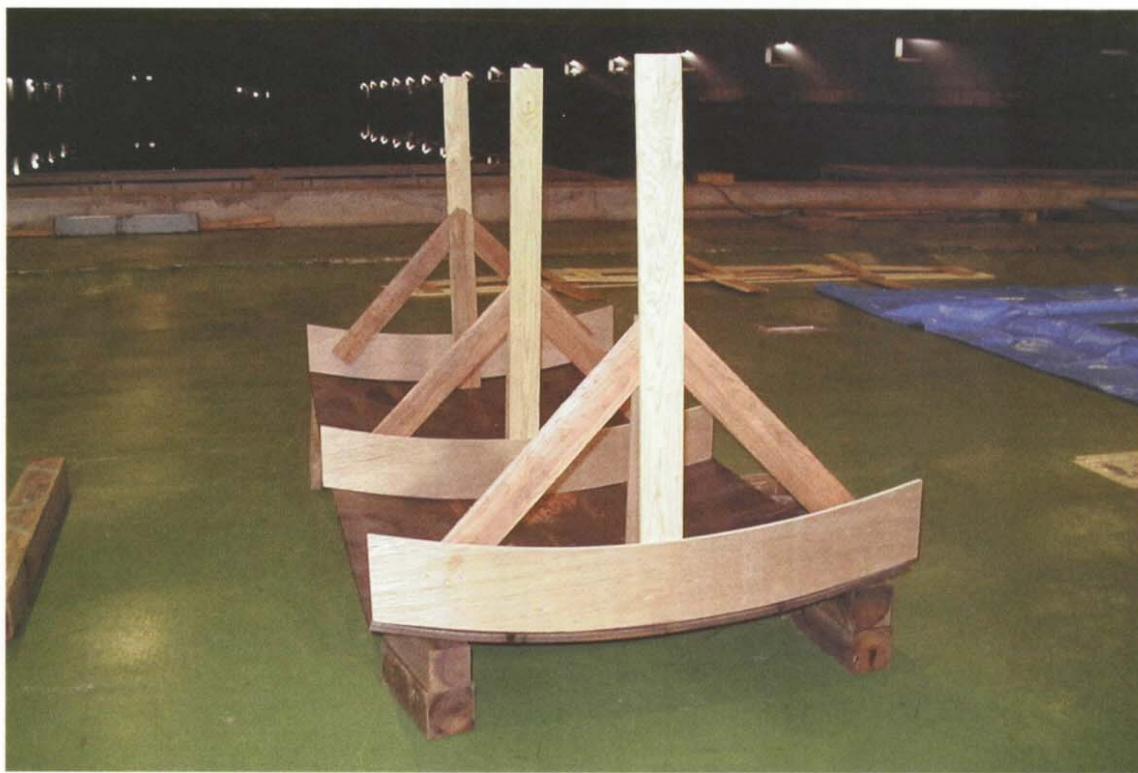
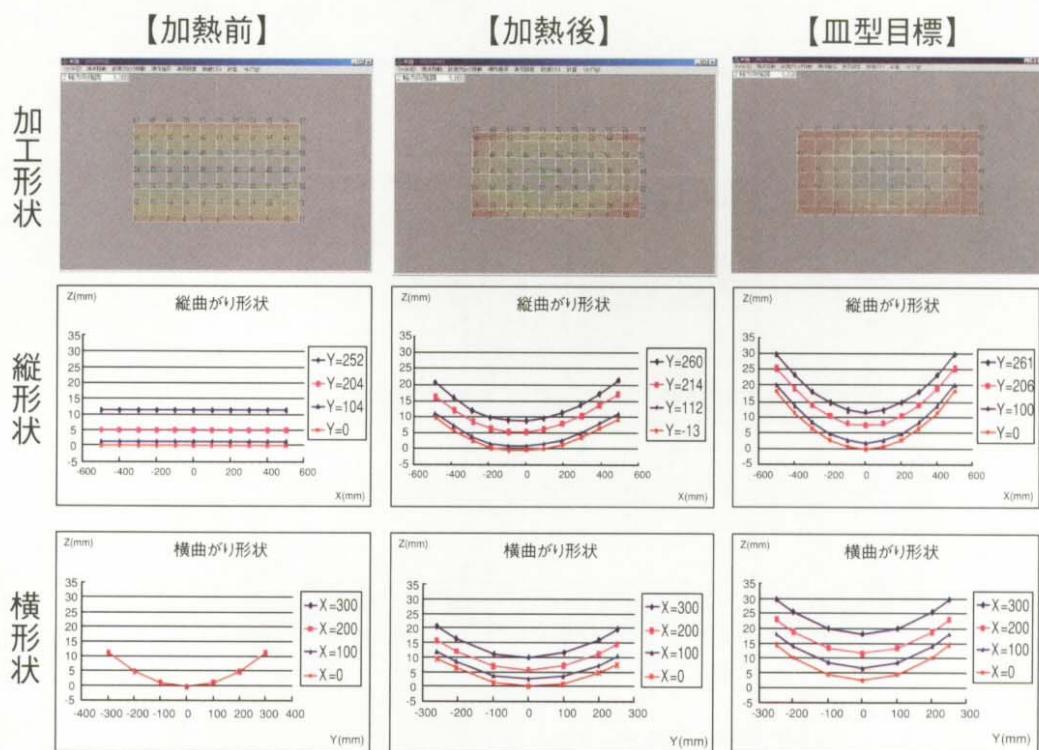


図5.1-3 板曲げ加工実証実験の結果



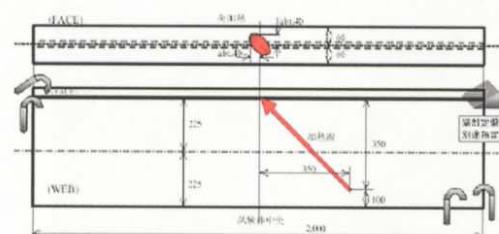
一次ローラ曲げ加工材から皿型の加工実験結果

図5.1-4 板曲げ加工実証実験の結果 (冷間曲げ→椀型)

5.2 ロンジ曲げ加工の実証実験による検証

ロンジ材の捩り加工は、適切な弾性拘束の下では、拘束変位量と残留捩れ量の間に線形関係が成立する。この線形関係をデータベースとして、所定の捩れ量を得るための方案、即ち、一定の加熱要領を前提とし、拘束変位量と加熱位置をデジタル情報として作成する手法を開発した(図5.2-1)。

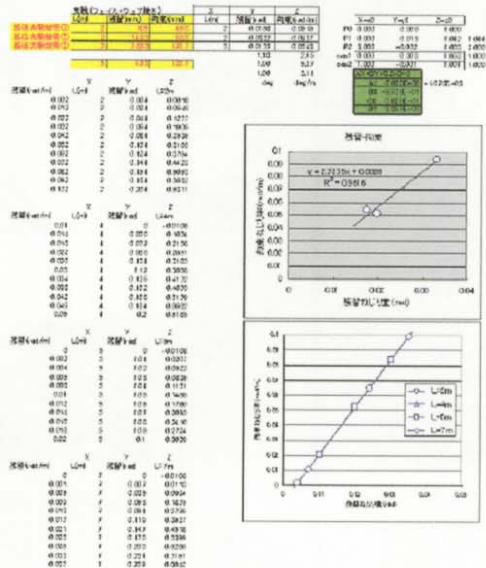
さらに、作成された加工要領方案(図5.2-2)に基づき実証実験を行い、ほぼ予測どおりの変形が得られることを確認するとともに、現場の熟練者からも開発手法に対する良い評価が得られた。



加熱変形基礎実験



ロンジねじれ加工用テーブル



基礎実験から得られた推定式の係数

図5.2-1 強制拘束条件での加熱加工要領出力機能

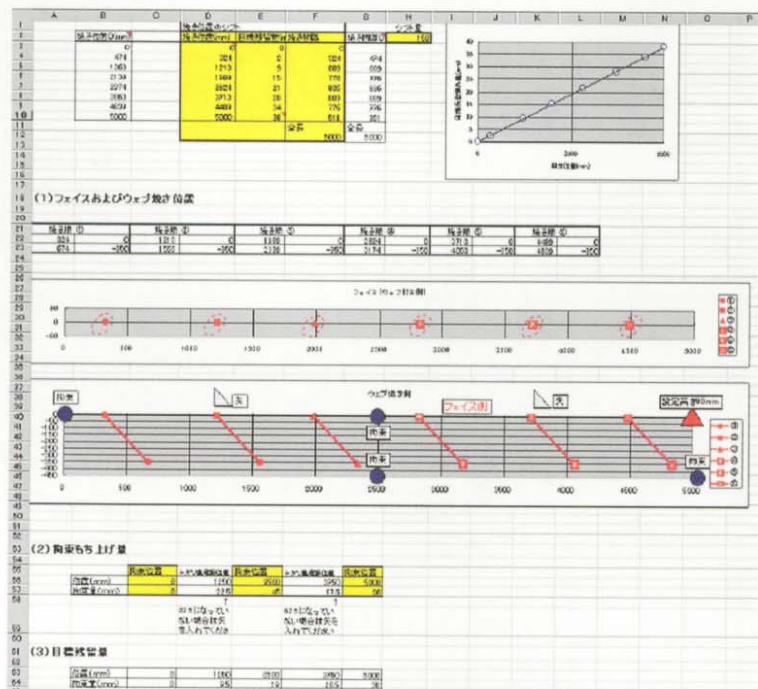


図5.2-2 加熱加工要領出力

5.3 中組立作業のシミュレーション技術による変形要因の分析

非対称中組曲がりブロックFEMモデルによる部材精度影響による変形推定計算を実施した。結果、ギャップのない内向材の組立時にも捩れ変形が起こることが示された(図5.3-1)。更に、ロンジ材に面内型の形状誤差がある場合のギャップを矯正した後に溶接を実施する場合には、ギャップによる影響が現れる(図5.3-2 Case5,6)ことや、ローラ芯とロンジ方向のなす角度がある場合は、ギャップがなくてもねじれるなどの影響があることが分かった(図5.3-3)。

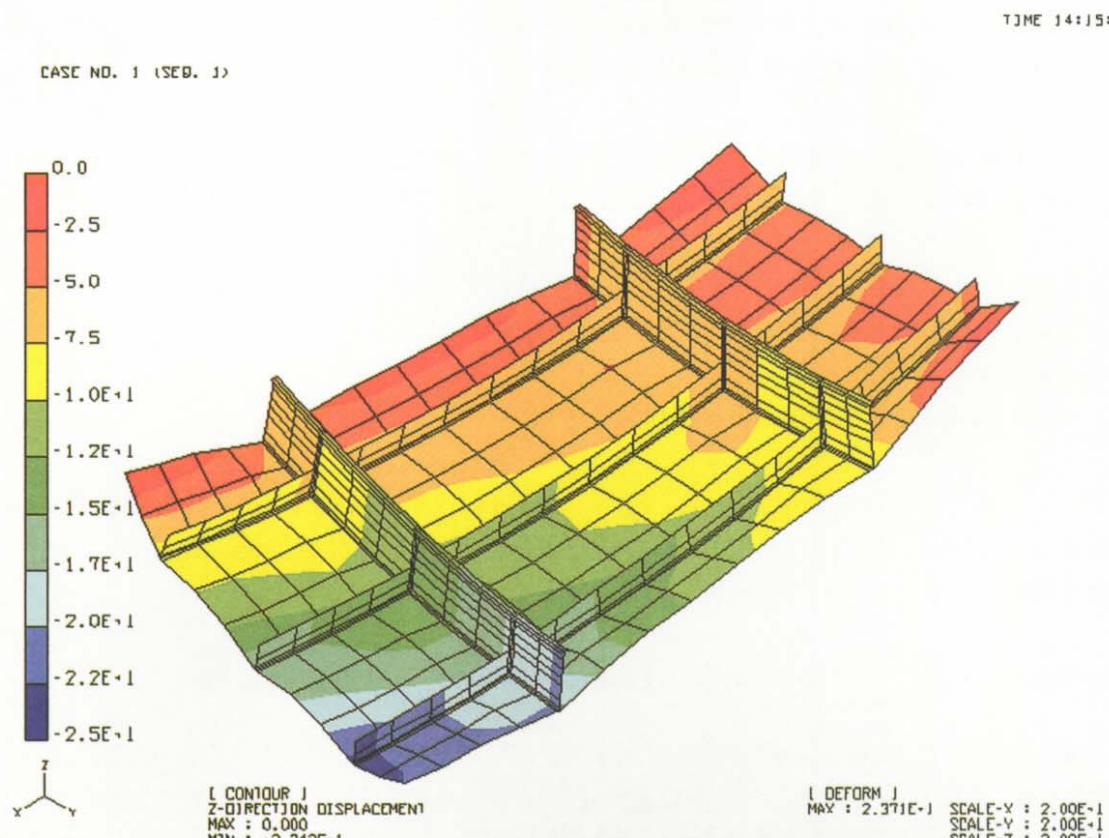


図5.3-1 ギャップのない溶接変形モデル計算結果

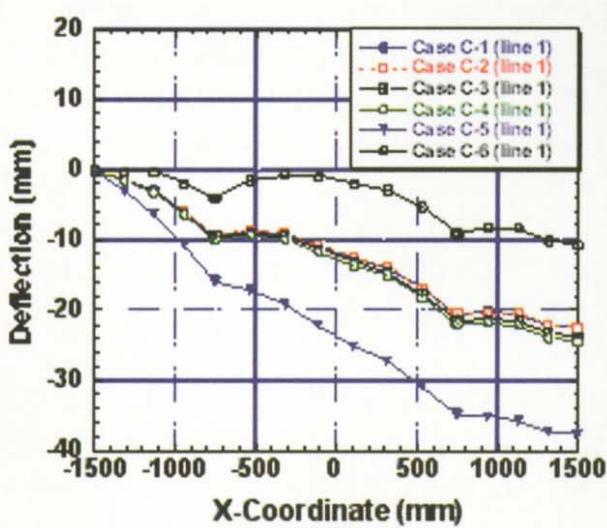


図5.3-2 ロンジ材の各種形状誤差が曲がりブロックの捩れ変形に及ぼす影響

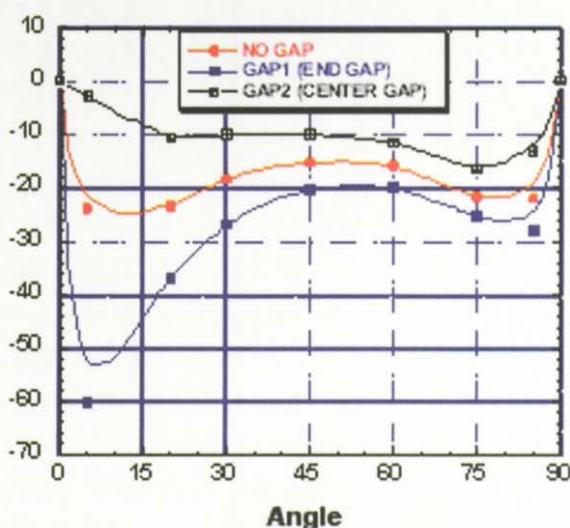


図5.3-3 ローラ芯とロンジ方向のなす角度がブロックの捩れ変形に及ぼす影響

6. 成果と今後の活用

本研究部会では、デジタル生産技術を造船現場に投入し、従来にない造船の高精度生産技術を確立することを目標に、次の事項を目標に研究開発を行ってきた。

- 1) 高精度な加工及び組立のための、船殻部材及びブロックの加熱変形推定技術と加熱変形制御技術を確立
- 2) 熟練技能者の作業知識の理論化または簡便な数値化及び式化によるデジタル変換技術を確立
- 3) 各製造段階における部材の寸法形状を把握するための、熟練技能者の目に変わる三次元計測技術の開発
- 4) 1)～3) 項の技術を融合した数値情報処理技術の開発

これらの研究開発で得られた成果により従来技術からどのように生産技術が革新されるかについて述べ、更には応用範囲を高めるために必要な技術について触れて本研究成果をまとめたい。

本研究の成果を活用して造船工場にデジタル生産技術を導入することにより次の効果が期待できる。

- ① 板曲げからドック内工事までの一貫した高精度・高効率ブロック生産
- ② 付加価値のない付帯作業(手直し、再マーキング他)の大幅削減
- ③ リードタイム短縮による短納期建造と年間建造量の増大

また、表6.1に本研究部会の成果をまとめる。なお、本研究の成果をNASAなどで技術の成熟度と今後の投資効果を評価することを目的に使用されている技術評価基準のTRL (Technology Readiness Level)を用いて自己評価を試行した結果についても併せて記載した。

以下にそれぞれの項目について実用化出来る技術とその技術の応用展開について述べる。

- (1) 板曲げ加工については、従来の現場板曲げ加工ステージで熟練作業者に依存していた加工要領が、本研究で開発した“曲面理論を適用した加熱位置決定手法”と“加熱変形推定技術を利用した加熱量の決定手法”を用いて「加熱位置自動決定プログラム」を開発することで、設計段階の現図展開時に加熱位置を事前に検討し加熱要領として加工指示をすることが可能になる。また、形状計測を板曲げ加工ステージでオンライン化すれば加熱加工毎に計測し、計測結果を曲面解析して次の加熱位置を決定することが可能になると同時に、自動装置化することも可能になる。また、板曲げ加工の上流工程になる設計作業の現図展開を含めて考察すると、原理的には展開時の伸ばし量が板曲げ加工時の収縮量になるので、展開誤差のない現図展開手法を応用展開すれば更に高精度に設計～加工までの一貫システムの構築が可能になる。
- (2) ロンジ曲げ加工についても、板曲げ加工と同様に従来の現場ロンジ曲げ加工ステージで熟練作業者に依存していた加工要領が、本研究で開発した“目標のねじれ量に対する加熱時の拘束変形量の推定技術”を用いて「加熱加工要領出力リスト」ソフトをExcelなどを使って構築することで、設計段階の現図展開時に加熱位置を事前に検討し加熱要領として加工指示をすることが可能になる。但し、本研究では弾性域(線形)における拘束影響を利用した純捻れ加工方法を対象としているため、塑性域(非線形)まで拘束影響を考慮した、即ち、熱弾塑性FEM計算を駆使して加熱時の拘束変形量の推定を行って加工要領を出力できるように応用展開を図ることが望まれる。
- (3) 加熱変形推定技術のために必要なガスバーナー加熱時の入熱量の定量化が図られ、従来は現場での入熱量は大、中、小と定性的な指示だったものが、本研究成果を活用することで入熱量のダイナミックスな時間変動まで考慮可能な推定技術化が可能となり、現場での定量的に入熱量を指示することが可能となる。更に、本成果を加熱変形推定技術との連結を図ることにより、通常、推定計算条件としてガス入熱時の温度分布を実験的に求める必要があったが、推定計算のみでガストーチの移動まで考慮した温度

- (4) デジタル生産技術に不可欠であると思われる三次元形状計測技術については、従来の巻尺、金尺、水ホース等の計測ツールを用いた計測から、計測データのデジタル値を入手することによって工作精度管理技術に活用できると考えられる。しかしながら、最新の三次元形状計測装置によって高精度に計測が可能となるが、その実現のためには計測対象に応じた治具、場所、基準となる計測ポイントなどが必要である。これらの設備の選択及び使い込むには熟練を要するため、予め計測対象に応じた設備が整備された計測ステージを設けることにより熟練レスでだれでも簡単に形状計測が可能となるものと考えられる。応用展開としての実用面では計測ステージの構想も必要になると思われる。
- (5) また、三次元計測技術については、造船に必要な精度以上に高精度に計測が出来ても元々剛性が低い状態では、設置状況、気温、その他の条件で部材が変形してしまう。このため、設計情報と工作情報を単純に比較出来ず、計測結果から部材の必要な精度を管理するには経験と勘に基づく熟練を要していた。本研究で開発した“計測対象の自重、拘束、温度影響キャンセル技術”を用いることで単純に設計情報であるCAD値と計測値を比較することが可能になると考えられる。また、特にブロック製作時の精度管理項目であり、捻れなどの要因を捉えるのに有効なガース長さの計算も管理ソフトとして利用することで計測データを入力するだけで簡単に把握することができるようになると考えられる。更に応用展開を図るには、(4)の計測ステージの整備と同様に計測対象に応じた評価ソフトの整備を図る必要がある。
- (6) 中組立工作精度管理としては、従来は経験と勘に基づく工作精度管理ブロックを設定していたが、本研究の成果を活用することにより板曲げ、ロンジ曲げでの部材精度管理のみで中組ブロックの高精度な生産が可能なブロック形状はどのようなものなのかといったことを定量化することができる。更に、この技術の応用展開として、ブロック分割の合理的な設計手法の開発に応用出来るものと考えられる。
- (7) 本研究自体の研究開発の手法は、造船の多くの熟練を要すると云われる技能に対して作業ノウハウである作業知識を形式知化、即ち、ナレッジ化するためのアプローチとして有効であると考えられる。従来は各社自前の現場ノウハウであり更には作業者に依存していた技能であった作業ノウハウを、本研究部会で実施した現状調査、ヒアリング、討論会を通して得た知見を基に、「各社いい所取り」で実用化を進めている。今後は、本研究部会で取得した研究の進め方を参考に、例えば、中組立作業のデジタル化などで、鉄工作業を模擬した部材引き付け影響を考慮した組立変形推定技術の開発などの応用が可能となる。

最後に、本研究の実施を支援していただいた日本財團にお礼を申し上げると共に、始終活発な研究と討議を行って頂いた参加委員各位に、更には、本研究部会に参画ご指導頂いた先生方、また、研究の実施に始終努力を払われた日本造船工業会及び日本造船研究協会の方々に心より感謝する次第である。

表6.1 船殻ブロックのデジタル生産技術の実用化(技術Map)

開発テーマ (*特許出願)	従来技術 (SR246実施前)	設計・現場へ即適用可能なデジタル生産技術 (SR246実施後)	応用範囲を高めるために 必要な技術	TRL
(1)*設計段階から の板曲げ加工 指示	現場板曲げ加工 ステージで熟練作 業者に依存	a.曲面理論を適用した加熱位置決定法 b.加熱変形推定技術を利用した加熱量 の決定法 (試作ソフト) 加熱位置自動決定ソフト	a.展開誤差のない現図展 開手法	4
(2)設計段階から のネジレのある ロンジ曲げ加工 指示	現場板曲げ加工 ステージで熟練作 業者に依存	a.目標のネジレ量に対する加熱時の拘束 変形量の推定技術 (試作帳票) 加熱加工要領出力リスト	a.塑性域(非線形)まで拘 束影響を考慮した加熱時 の拘束変形量の指定	5
(3)ガスバーナー加 熱時の入熱量 の定量化	現場での入熱量 の指示は大、中、 小と定性的	a.入熱量のダイナミクスな時間変動まで 考慮可能な推定技術→現場での入熱 量指示の定量化	a.加熱変形推定技術との 高度な連結 (モデリング、計算時間の 簡素化)	5
(4)板曲げ、骨曲 げ、中組ステー ジの3次元形 状計測技術	巻尺、金尺、水ホ ース等の計測ツー ルを用いた計測	a.計測データのデジタル値入手による工 作精度管理技術 (作業ステージに適合した最新計測技術 の選定) (試作ソフト) 工作精度評価ソフト	a.3次元形状計測技術に対 応した造船現場の基盤 整備 (計測ステージの設置他)	4
(5)*設計情報と 工作情報の整 合性評価技術	決め方、鉄工職な どの専門的な熟 練技能に依存した 評価	a.計測対象の自重、拘束、温度影響キャ ンセル技術 b.工作精度管理計測技術 (試作ソフト) ガス長さ管理ソフト	a.計測対象に応じた評価ソ フトの整備	5
(6)中組工作精度 管理	経験に基づく工作 精度管理ブロック の設定	a.板曲げ、ロンジ曲げの部材精度管理の みで中組ブロック高精度生産が可能な ブロック形状を定量化(ブロックのネジレ 度の把握)	a.左記観点からのブロック分 割合理化設計法の開発	3
(7)造船現場固有 のノウハウのナ レッジ化	各社自前の現場 ノウハウで運営	a.各社横通しの熟練技能者討論会(板 曲げ、ロンジ曲げ、中組立)を実施し、熟練 技能のデジタル化手法が明確になった。	a.中組立て鉄工作業のデ ジタル化 例:鉄工作業を模擬し、部 材引き付け影響を考慮 した組立変形推定技術 の開発	4

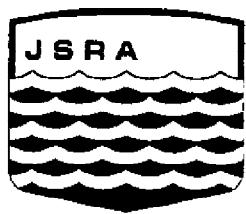
TRL (Technology Readiness Level) : NASA等で使用されている技術評価基準を用いた自己評価

レベル 内 容

1. 原理・技術コンセプトの提案
2. 机上解析レベルでの検証
3. 実験室レベルでの検証(模擬環境)
4. 実験室レベルでのスケールアップ則の検証
5. 設計・現場での技術検証

発 行 平成15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
海洋船舶ビル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、競艇の交付金による日本財団の助成金を受けて作成
したものを増刷し頒布するものです。」



The Shipbuilding Research Association of Japan