OUKA
Osaka University Knowledge Archive

Title	溶接シミュレーション技術を活用した立体ブロックの高精度組立に関する研究
Author(s)	佐野, 仁則
Citation	大阪大学, 2015, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/53998
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

Osaka University

博士学位論文

溶接シミュレーション技術を活用した
立体ブロックの高精度組立に関する研究

佐 野 仁 則

2015 年 6 月

大阪大学大学院工学研究科

目　　次

第1章　緒論
1.1　現在の造船業界の工法と問題点----------1
1.1.1　工作精度の現状----------1
1.1.2　歪取り作業の概要----------3
1.1.3　建造期間に対する問題点----------3
1.2　本研究の目的と方針----------4
1.2.1　本研究の目的----------4
1.2.2　研究目的を達成するための基本方針----------5
1.3　本研究の概要----------7

第2章　溶接組立変形の解析方法----------9
2.1　緒言----------9
2.2　固有ひずみ----------10
2.2.1　固有ひずみにより作られる変形と残留応力----------10
2.2.2　溶接によって薄板に生じる固有ひずみ----------10
2.2.3　薄板における固有応力----------10
2.2.4　薄板における固有変形----------11
2.2.5　薄板における固有力----------11
2.3　有限要素法の定式化----------12
2.3.1　溶接による局部変形----------12
2.3.2　界面要素----------13
2.3.3　大変形----------13
2.4　固有ひずみ手法が適用できる問題----------16
2.5　結言----------18

第3章　自動車運搬船薄板鋼板の歪軽減----------22
3.1　緒言----------22
3.2　自動車運搬船の構造と組立方法----------22
3.3　溶接変形における入熱の影響----------24
3.3.1　横収縮----------25

3.3.2　角変形----------25
3.3.3　縦収縮----------26
3.4　溶接法が固有変形に与える影響----------27
3.4.1　モデルの概要と解析手法----------27
3.4.2　検討対象とした溶接法----------28
3.4.3　溶接法が溶接変形に与える影響----------29
3.4.4.　まとめ----------32
3.5　防撓板の面外撓みに与える溶接法の影響----------33
3.5.1　モデルの概要----------35
3.5.2　解析について----------34
3.5.3　解析結果と考察----------35
3.6　カーデッキ組立時の溶接変形における溶接順序の影響----------38
3.6.1　カーデッキブロック構造および組立順序の概要----------39
3.6.2　解析方法----------42
3.6.3　解析結果と考察----------42
3.6.4　検討結果の実船への適用----------44
3.6.5　まとめ----------45
3.7　カーデッキ搭載順序がパネルの座屈変形に及ぼす影響----------45
3.7.1　検討対象の構造----------45
3.7.2　解析の概要----------46
3.7.3　解析結果----------49
3.7.4 得られた知見および実船への適用----------58
3.8　まとめ----------58

第4章　部材位置決めの制御による溶接変形の軽減----------62
4.1　緒言----------62
4.2　位置決め制御の概念----------62
4.3　船側立体ブロックの溶接変形----------66
4.3.1　対象構造----------66
4.3.2　組立部材----------68
4.3.3　現行の組立順序----------70

4.3.4　組立時の不具合----------71
4.4　ギャップ処理対策を適用した場合の溶接変形シミュレーション-76
4.4.1　解析手法----------76
4.4.2　FEM モデルの概要と部材の定義----------76
4.4.3　境界条件と固有変形----------77
4.4.4　解析ケース----------78
4.4.5　解析結果と考察----------79
4.5　キー自由度に注目した位置決めの実船への適用----------86
4.5.1　対象構造----------86
4.5.2　対象構造のFEMモデル----------86
4.5.3　部材とキー自由度----------87
4.5.4　溶接条件----------89
4.5.5　レベル2におけるサブブロックの溶接変形----------89
4.5.6　予測を反映した位置決め----------92
4.5.7　サブブロックと外板中組立の溶接の変形----------93
4.5.8　考察----------95
4.6　まとめ----------96

第 5 章　部材精度がビルジブロックの捩れ変形に及ぼす影響----------98
5.1　諸言----------98
5.2　ビルジブロックの溶接組立における特徴----------98
5.3　検討対象ビルジブロックと FEM モデル----------100
5.3.1　対象ブロックの形状寸法および溶接条件----------100
5.3.2　ビルジブロックの FEM モデル----------100
5.3.3　シミュレーションでの検討事項----------101
5.4　捩れ変形のメカニズム----------102
5.4.1　溶接による捩れ変形----------102
5.4.2　ギャップ矯正による変形----------104
5.5　捩れ変形の修正法----------106
5.6　まとめ----------107

第 6 章　歪修正作業の上流化----------109
6.1　緒言----------109
6.2　カーフェリー上部構造の概要----------110

6.3　従来の上部構造組立の概要----------110
6.4　歪取りの上流化の重要性と問題点----------110
6.5　上部構造の溶接と歪取り----------110
6.6　建造手順改善の選択肢----------111
6.6.1　ブロック間のギャップやズレの取扱----------111
6.6.2　歪取りのタイミング----------111
6.7　解析方法について----------112
6.8　解析ブロックの FEM モデル----------113
6.9　解析結果の考察と実船との比較----------114
6.9.1　各工程における変形----------114
6.9.2　各組立手順の結果比較----------127
6.10　シミュレーション結果の実船への適用----------125
6.11　まとめ----------126

第 7 章　総括----------128

謝辞----------132

第１章 緒論

現在の造船業界における竣工量に注目すると、巨大な設備規模を持つ韓国が約４０％、低賃金労働力を確保できる中国が約４０％を占め、かつては世界の竣工量の半分を建造していた日本は、両国に比べコスト競争力の弱体化によって約２０％に低迷している。さらに、為替変動などによる受注環境の悪化の波を再三にわたって受けてきている。日本の造船企業は、今まさに存続発展のための戦略の実践が急がれる状況にある。その戦略の中の一つである“飛躍的なコスト競争力”を確保するために、現業部門においては、新たな生産技術の実船への適用が求められる。生産技術は、工法に関する技術と、生産管理に関する技術からなっているが、本研究では、工法に焦点をあて、現状の工法に関する課題の中から、解決できれば設備規模の大小に関係なく有効活用できる課題を洗い出し、それらの課題の解決を可能とする新たな工法を確立し、コスト競争力向上に貢献することを目的とした。

1.1　現在の造船業界の工法とその問題点

船の建造には、船殻、艤装、塗装、機器オペレーション工事がある。それぞれの工事が最も効率的に施行できるよう、加工，小組立、組立、地上総組、船台（ドック）、岸壁、海上の建造工程に配分される。後工程になるほど作業環境も悪くなり、管理密度も低下するために、いずれの作業もできるだけ前工程で作業が完了するように、いわゆる”上流化“を目標として計画、実行される。

各工程では、上流化を狙って配分された工事を最も効率的に実行できる工法を見つけ出し、実船に適用される。現状の各種工法は、造船所の設備規模に依存して、それらの採用が決定されているが、主な工法としては、組立効率向上を狙った平板ブロック組立工法、工事の上流化（地上化）を狙った地上総組工法が挙げられる。特に、大型造船所では、船体をリング状に輪切りした巨大構造物を地上にて総組する工法を採用している。一方、大型の設備投資がなされなかった造船所（主に中小造船所）では、設備能力の限界まで、ブロックを大型化、立体化して、船台（ドック）内での工事の低減を図っている。ここでは、全工事の大半を占める船殻工事において、最適な工法を実船適用する際に、いずれの造船所においても発生している課題の中から、注目するに値する代表的

な問題点について以下に述べる。

1.1.1　工作精度の現状

工作精度は下記の精度に関係する技術の導入、定着化によって飛躍的に向上した。その著しい成果の一つとして、従来は、ブロックの四周端に２０ｍｍほどの伸ばし代を設け、組立時、または船台（ドック）で仕上げ切りしていたのを、現在は、ブロックの四周端は皮材、骨材とも全て加工時点で仕上げるようになったことが挙げられる。

① ＮＣ切断機の採用によって、従来の手切断に比べ、部材精度は飛躍的に向上かつ安定した。

② 統計的精度管理手法の導入によって、精度確保ができる施工法の計画とその実践を定着化させて、組立時の取付精度、搭載時の決め方精度の向上を図った。

③ 溶接継手部の収縮変形に対し、“伸ばし仕上げ法”および“延べ尺法”をＣＡＤシステムに取り入れ、収縮量を加味した部材形状をＮＣ切断データとして創生できるようにした

④ 三次元計測器を開発、実用化することによって、あらゆる位置での計測を可能とし、計側精度も向上した。さらに、ＣＡＤとリンクし図面寸法との対比、相隣り合うブロックの継手部へのローリングシステム採用を可能とした。

しかし、現状の工作精度を前提とした場合、船台（ドック）での取付、溶接作業のうち、正味作業は約３０％以下程度であることが作業分析結果から判明しており、今後さらなる工作精度向上に関わる技術の開発、導入がなされれば、作業効率の向上は期待できる。正味作業率は、後工程になるほど低下しており、それは、後工程ほど作業環境が悪化することと、前工程での精度誤差をその工程で修正せず後工程に持ち込んで最終的に船台（ドック）において蓄積された精度誤差を調整することを認める施工法を採用していることが主な原因と見なされる。船台（ドック）での継手部の調整作業が円滑に行えるように、ほとんどの造船所においては精度誤差調整作業個所が多量に発生すると予測して、継手近傍に“溶接マテ“を採用している。現状では自動化の範囲は限られており、作業の多くは技能職に依存し、属人的判断の下に行われるために、データベース化をはじめとしてエンジニアリングすることが困難である。これを打開するための工作精度に関わる新たな技術の開発、導入には、建造技術に精通した技

術者（スタッフ）と、現場の決め方作業者との協業体制が必須であるが、現状では、そのようなスタッフ不在、たとえ居るとしても現場決め方作業者とのコミュニケーション不足という状況にある。

1.1.2　歪取り作業の現状

一般商船では、薄板構造（板厚約６mm 以下）を採用している部分は少なく、ほとんどが剛構造である。ただし、すべての商船において上部構造には薄板構造を採用している。また、特殊商船に分類されるカーフェリー、自動車運搬船には薄板構造が多用されている。歪取り作業は、その採用個所が限定的であるがため、造船所内では重要視されてこず、作業者に歪取りのタイミング、歪取りの方法は任されてきた。一般商船では、小組立部材の溶接によるやせ馬を除去するために行う“背焼き”作業と、薄板構造の上部構造の全域での歪取り作業が発生する。特に上部構造の歪取り作業には多大の作業時間を要している。自動車運搬船では、カーデッキと上部構造に薄板が使用されており、カーフェリーでは、船体のほとんどが薄板構造であるために、歪取り作業は作業時数、建造工程に大きな影響を与える。一般商船の上部構造と薄板構造の特殊商船では、歪取り作業は重要な管理項目として注目されるべきだが、現状は、新たな技術を開発、導入するための努力がほとんど見られず、熟練技能者に作業時間、作業工程とも全く依存しており、技術的には未着手の分野として残されたままとなっている。また、歪は、たとえ前工程で歪を除去しても、全溶接作業が終わった段階で再度発生すると考え、最終建造工程で歪取り作業をするのが常識となっており、引き渡し前の艤装、塗装作業工程を常に圧迫する原因を作ってきている。

1.1.3　建造期間に対する問題点

年間建造量を増大するために、セミタンデム建造、メガブロック（総組）工法、多点（船体の複数個所から同時搭載する）建造などの中から、設備規模に応じた最適な建造法が採用されている。いずれの建造法においても、立体的かつ複雑形状をもつブロック（総組）を取り扱わざるを得ない。したがって、ブロック（総組）継手部の精度は高いレベルを要求されることになり、船台（ドック）での建造工期短縮の鍵となっている。立体的かつ複雑形状のブロック（総

組）に対して、工作精度の確保できる工法は、現状では確立されていないと思われる。総組後、地上にて三次元計測器を使って計測し、船台（ドック）での取合い部の誤差を許容値内におさめるように仕上げ切りをしている造船所もある。また、歪み取り作業については、最終工程にその作業が集中しないような工法の採用が強く求められるが、最終建造工程で歪取り作業をするのが常識となっており、引渡し前の艤装、塗装作業工程を常に圧迫し、客先の美観に対する満足をも得られない状況が多々発生している。

1.2　本研究の目的と方針

船殻工事を効率的に進める上で注目に値する問題点を述べてきたが、それらの根底にある共通した主原因は以下の３つと考えられる。

①船体建造のほとんどの部分を作業者に頼っており、作業者の属人的ノーハウに依存せざるを得ない状況。

②溶接熱変形が信頼性のあるデータとして計画時に把握できず、工法は慣習ベースとなっている。

③船体構造は複雑な立体形状をしており、事前計画した工法を現場では守ることが困難である。

これらの原因によって、“経験ベースの暗黙知”に基づく工法の計画とその実行から脱却できない状況が続いてきた。ところが、近年、大阪大学接合科学研究所で溶接熱変形解析法が開発されたことを知って、上記の原因を除去できる可能性があるのではないかと考え、「ＦＥＭ解析技術を船殻工事の工法を計画する上でいかに活用するか、また、計画された工法を実船適用して、それらの工法が現実的に有効であるか」を検証する研究に取り組むこととした。以下に、本研究の目的と方針について具体的に述べる。

1.2.1　本研究の目的

船体の代表的な構造部を研究の対象として、船台（ドック）における工事が最少となるように、熱変形シミュレーション技術をフルに活用して、船殻工事を加工から船台（ドック）までの各工程での最適な工法と工事配分を見つけ出し、実船に適用してその有効性を検証することにより、「船殻工事全般にわたって、従来の作業者の暗黙知に基づく計画手法では得られないような高能率な工

法を発見し得る技法を構築すること」を本研究の目的とした。

1.2.2　研究目的を達成するための基本方針

大阪大学が開発した溶接組立変形シミュレーション技術は、加工から船台（ドック）間の各工程における変形を数値的に予測する手段を提供し、これを用いることにより、中間製品の切断、板曲げ、溶接による変形のみならず自重による変形量も含めて定量的に予測でき、さらに、精度誤差を有する部品間のギャップや目違いを考慮した取付け作業による変形も予測できるために、工法の計画上において強力な武器として活用することができる。そこで本研究では、溶接組立変形シミュレーション技術が有する従来に見られない、これらの独自性、優位性をよく認識して、研究を進める上での基本方針を下記のように設定した。

① 従来は精度確保が困難と思い込み、採用されなかった“複雑な立体構造ブロック”を積極的に取り入れたブロック分割を採用して、船台（ドック）工事の思い切った低減を図る。FEM 解析法を活用すれば、”複雑な立体構造ブロックでも組立法のシミュレーションを行うことにより、ブロック精度を許容範囲内に、現実的におさめ得る説得力のある工法を見つけ出すことができる。

② 大組立の前に、中組立を積極的に取り入れた工法を採用することにより、下向き姿勢作業の拡大を図ると共に、大組立では困難であった構造部（ビルジ部等）の精度を確保する。大組立の一部分としてより、中組として取り出して、FEM 解析法を活用する方が、より簡便に解析ができ、問題点への対策もより上流工程で処理できる。

③各工程で製作される中間製品について、いくつかの施工法（施工手順など）を立て、本シミュレーション技術の中核技術である FEM 解析を活用して、それぞれの施工法に従って製作したときの中間製品の溶接組立変形誤差を把握し、その原因を理論的に解明する。各ケースの中から、製作誤差が少なく、かつ許容値を越えた誤差に対しては対策が立て得る最も効率的工法を選択する。FEM 解析法を活用すれば、最も適切かつ説得力のある工法を発見することができる。また、各工程において、許容範囲を越えるような精度誤差の発生は事前に予測できる。それらは工法の中に含まれた説得力のある対策により修正することができる。

④ 全ての中間製品は、自工程において精度誤差を許容値内に収め、後工程に自工程の製作誤差を垂れ流さないこと（歪取り作業の上流化をも含めて）を職

場のルールとして確立させる。FEM 解析法を活用すれば、前工程より受け取る中間製品の精度は全て許容範囲内にあることを前提条件とするため、許容範囲を超えた精度不良は、発生させた工程において必ず是正しなければならないので、精度不良の後工程への垂れ流し（従来は、属人的判断で垂れ流されていた）は、全工程の合意のもとで防止されることになる。

⑤単なる理想化したモデルを対象とした溶接組立変形解析のみに留まらず、シミュレーション技術を用いて、製作誤差（継手部のギャップなど）が周辺の構造にいかなる影響を与えるかをも解析し、得られた知見が実際の作業現場でも活用できるようにする。そのためには、各種の実験や計測により理論値の裏付けを行うことも必要である。製作誤差が溶接品質および構造強度に与える影響度を明らかにすることにより、品質や強度に対する要求値を満足する製作精度誤差に対する許容値が合理的に設定できる。すなわち、FEM シミュレーションを活用すれば、中間製品は、必ずその精度にバラツキをもっていることを前提として、そのバラツキの最大値が、周囲の構造に与える影響値を、FEM 解析法にて事前に知り得るので、選定した工法に対し説得力のある信頼性を与える。

⑥中間製品の決め位置（ブロックでは中組材の、総組および船台ではブロックの決め位置）は、後工程における継手部の溶接変形や自重による変形を考慮して正規位置よりずらした個所に設定される場合が多い（逆変形を与えるなど)。従来、決め位置は、決め方作業者の判断でその都度で設定されていたのを、事前に FEM 解析によって変形量を把握しておくことで形式知に基づく決め方作業に転換させる。すなわち。作業者の長年の経験から得られた暗黙知を FEM 解析によって得られた形式知に置き換えることができるので決め作業は単純化され、決め方作業に関わるデータへの信頼度も大幅に高まり、生産技術（工法のみならず生産管理技術でも）の計画精度を飛躍的に向上させ得る。

⑦本手法を実船に導入すれば、継手精度を飛躍的に向上させることができる。それに伴って溶接マテ範囲の大幅な低減と、取付職（固め作業者）と溶接職の統合化を図っていく。すなわち FEM 解析法を活用すれば、現場の管理監督者は、本手法が生産技術全般へどのような波及効果をもたらすかが仮想現実を通して体得できるようになり、次々と新たな施策を見つけ出せるように

なる。上記の“溶接マテの低減”と“職種統合化”はその事例である。

⑧本手法を定着させるために、建造計画者と決め方作業者を一つのグループとして編成するなどして、両者のコミュニケーションの徹底を図る。すなわちFEM解析を生産現場で活用することによって、FEM解析を使える技術者の必要性が広く認識されるようになる。船殻技術に関わるスタッフの業務は、これまでは工事担当（船殻工事の工程促進）が主務であったが、工法の開発、導入というエンジニアリング業務が大きなウエイトを占めることになる。

1.3　本研究の概要

船の建造工程は，加工，小組立，組立，地上総組，船台（ドック），岸壁工事に分けられ，建造効率向上のポイントは如何に船台期間を短縮するかである．そのためには作業環境が悪い船台上での精度不良による手直し作業や歪取作業を極力少なくする必要があり，本研究では高精度なブロックの製作と多くの工数を要する歪取作業の上流化を実現することを目標として，従来の経験ベースではなく理論予測に基づいた立体ブロックの高精度組立法の開発を行った．研究内容の要約は以下の通りである．

第一章では，現在の造船業界における船の建造法を工作精度管理および歪取りを含めた修正作業の現状を分析し，建造期間の短縮という観点から問題点の抽出を行った．

第二章では，構造物の溶接組立における変形や寸法誤差の原因は溶接による局部収縮と位置決め時に部材間に存在するギャップや目違いとそれらの矯正であることを示し，これらが考慮できる解析法として本研究で採用した固有変形法の基本的な考え方について述べた．

第三章では，自動車運搬船の薄板甲板を対象に，固有変形法を用いたシミュレーションを行いパネルの局部座屈に対する溶接入熱の影響を検討し，従来の連続溶接に対して断続溶接の優位性を示した．また実際にカーデッキを組立てる際に大きく下方へ撓む変形を防止するために溶接順序の影響に注目して検討を行った結果、溶接順序の影響は小さいことが明らかとなったので、逆変形による変形対策を提案し効果を実施工において確認した。

また，甲板ブロックの搭載順序については厚板甲板ブロックの搭載を先行させることで薄板甲板への圧縮残留応力の重畳が防げることを示した．

第四章では，立体ブロック製作時におけるブロックの寸法精度に及ぼす位置決め要領の影響に注目し固有変形法を用いたシミュレーションによりブロックの寸法誤差の発生メカニズムを明らかにするとともに剛体変形に対応したキー自由度と逆変形に注目した寸法精度維持に有効な位置決め法の指針を示した．

第五章では，ビルジブロックの製作時にしばしば経験するがその原因が明らかにされていない捩れ変形を対象に，捩れ変形のメカニズムを分析し，ギャップ矯正で発生する残留応力による座屈がその原因であることを明らかにした．さらに，防止対策として内底板を取り込みブロックの捩れ剛性を高くすることが有効であることを示すとともに線状加熱による捩れ変形矯正法の有効性を示した．

第六章では，フェリーの建造において船台期間が延びる原因の一つが歪取であることに注目し，歪修正作業を工場内で実施し作業を上流化する建造法の有効性についてシミュレーションを用いた検討を行った．その結果，歪修正作業を上流化してもブロック搭載時においてパネルの座屈変形が再発する懸念は一部の開口部周辺を除いてほとんど無いことが明らかとなった．　第七章では，本論文で得られた研究結果を総括すると共に，今後の課題を示した．

第２章　溶接組立変形の解析法

溶接変形の解析法は、溶接の全プロセスを非定常問題として詳細に解析する熱弾塑性 FEM[1-10]と溶接により生じる局部収縮である固有ひずみあるいはこれを積分した固有変形 [11-24]をシェル FEM モデルに与え弾性計算により溶接変形を予測する固有ひずみ法 [25-31]大別される。本研究の対象は船を建造する際のブロックのように大きな構造物であるのでこれに適した固有ひずみ法あるいは固有変形法を解析法として採用した。

2.1　緒言

アーク溶接に代表される溶融接合技術は生産性に優れるため、船、自動車、車両、橋梁などの製品や構造物の製造に広く用いられている。しかしながら、熱が金属部材の局部に集中的に投与されるために冷却過程における収縮が原因となり溶接変形が必然の結果として発生する。溶接変形は製品の強度などの性能低下の原因となるばかりではなく、組立段階での変形が大きい場合にはロボットなどの自動化の妨げや手直し工事増加の原因となるので、溶接変形を予測し許容値以下に制御する必要がある。一方、船の建造を例に考えると、船は鋼材の切断、線状加熱による曲げ加工、位置決め（仮付け）、溶接、歪取、ブロック搭載などの加工工程を経て完成に至る。したがって、製品の形状・寸法精度を予測するためには、溶接だけでなく、その前工程である、切断、板曲げ、位置決め、さらに後工程である歪取を視野に入れた変形予測法が必要となる。本章では、切断から歪取までの全工程における溶接・組立変形を予測できるシミュレーション法について述べる。

溶接組立変形の原因はふたつあり、ひとつは溶接部が熱履歴を受けた結果として発生する局所的な収縮であり、いまひとつの原因は溶接組立の過程で既に変形している部材に新しい部材を取付ける際に生じる部材間のギャップやズレである。例えば、１本の溶接による横収縮がおおよそ 0.1～1.0 mm のオーダーであるとすれば、1.0 mm のギャップは無視することができない。本研究で用いた固有変形法は、溶接による局部収縮を固有変形の形で弾性有限要素法に導入し、部材の接合や切断および部材間のギャップやズレについては非線形バネで

ある界面要素を部材間に配置することによりこれらが表現できるようにしたものである。また、溶接入熱に対して板厚が薄い構造物では座屈に近い現象も発生するので、大変形も考慮できるシェル要素を用いている。以下ではその概要を説明する。

2.2　固有ひずみ

2.2.1　固有ひずみにより作られる変形と残留応力

全ひずみεは、弾性ひずみε^e、塑性ひずみε^p、熱ひずみε^T、クリープひずみε^c、変態によるひずみ ε^tの和の形に分解することができる。すなわち、

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p + \varepsilon^T + \varepsilon^c + \varepsilon^t \tag{2.1}$$

ここで、全ひずみεは変形と、弾性ひずみε^eは応力と直接関わっていることに注目して式(2.1)を次のように並べ替える。

$$\varepsilon - \varepsilon^e = \varepsilon^p + \varepsilon^T + \varepsilon^c + \varepsilon^t = \varepsilon^* \tag{2.2}$$

この式は、左辺の変形（ε）と応力（ε^e）は右辺のその他のひずみによって作られているということを意味し、変形と応力の原因である右辺のひずみ成分の和を固有ひずみε^*と定義する。

2.2.2　溶接によって薄板に生じる固有ひずみ

薄板における横収縮や縦収縮や角変形などの固有変形は、主として溶接線方向および溶接線に垂直な固有ひずみε_x^*およびε_y^*が原因となって発生するものである。このような固有ひずみが小さな有限要素１個の中に一様に分布した時の要素の収縮を表現したものが図 2.1 である。

溶接方向の固有ひずみ　　ε_x^*　　(2.3)

溶接線に直角方向の固有ひずみ　　ε_y^*　　(2.4)

2.2.3　薄板における固有応力

薄板の応力状態は平面応力状態にあるとすれば、応力－ひずみ関係より、固有ひずみε_x^*およびε_y^*は、固有応力ε_x^*およびε_y^*に変換する事ができる。すなわち、

$$\sigma_x^* = \frac{E}{1-\nu^2}\left(\varepsilon_x^* + \nu\varepsilon_y^*\right) \tag{2.5}$$

$$\sigma_y^* = \frac{E}{1-\nu^2}\left(\nu\varepsilon_x^* + \varepsilon_y^*\right) \tag{2.6}$$

2.2.4　薄板における固有変形

一方、溶接によって生じた固有ひずみを溶接線に垂直な断面全体にわたって積分し板厚 h に関して平均を取ると固有変形の縦収縮成分 δ_L^* および横収縮成分 δ_T^* が定義される。同様に、固有変形の曲げ変形成分である縦曲り θ_L^* および横曲り（角変形）θ_T^* を定義することができる。すなわち、

固有変形の縦収縮成分　　$\delta_L^* = \frac{1}{h}\int \varepsilon_x^* dxdz$ (2.7)

固有変形の横収縮成分　　$\delta_T^* = \frac{1}{h}\int \varepsilon_y^* dxdz$ (2.8)

固有変形の縦曲り成分　　$\theta_L^* = \frac{1}{I}\int z\varepsilon_x^* dxdz$ (2.9)

固有変形の横曲り成分　　$\theta_T^* = \frac{1}{I}\int z\varepsilon_y^* dxdz$ (2.10)

ここで、$I = \frac{1}{12}\int z^2 dxdz$

これらの固有変形 δ_L^* および δ_T^* を用いると、要素内に一様に分布する固有ひずみ ε_x^* および ε_y^* によって収縮した要素の変形は、図 2.2 に示された形で表すことができる。

2.2.5　薄板における固有力

さらに、次式に従って固有ひずみにヤング率 E を掛けたものを溶接線に垂直な断面にわたって積分することにより固有力の溶接線方向成分 F_L^*、溶接線に垂直な方向成分 F_T^* および固有モーメントの溶接線に垂直な軸回り成分 M_L^*、溶接線回り成分り M_T^* が定義できる。

固有力の溶接線方向成分

$$F_L^* = E\int \varepsilon_x^* dxdz = Eh\delta_L^* \tag{2.11}$$

固有力の溶接線に垂直な方向成分

$$F_T^* = E\int \varepsilon_y^* dxdz = Eh\delta_T^* \tag{2.12}$$

固有モーメントの溶接線回り成分

$$M_L^* = E\int z\varepsilon_x^* dxdz = EI\theta_L^* \tag{2.13}$$

固有モーメントの溶接線に垂直な軸回り成分

$$M_T^* = E\int z\varepsilon_y^* dxdz = EI\theta_T^* \tag{2.14}$$

以上で定義された固有変形と固有力（Tendon force F_L^*）を図 2.3 に示されるように組合わせることにより、固有ひずみε_x^*およびε_y^*により要素に生じる変形と同じ変形を表すことができる。

2.3　有限要素法の定式化

2.3.1　溶接による局部変形

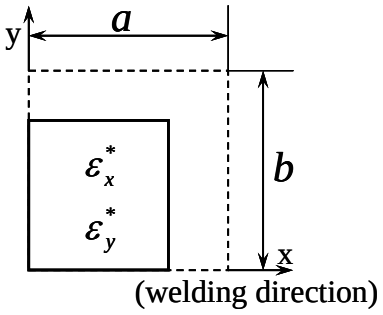


図 2.1 固有ひずみを用いて表現した要素の収縮

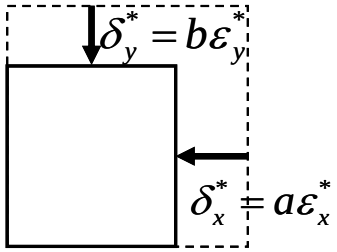
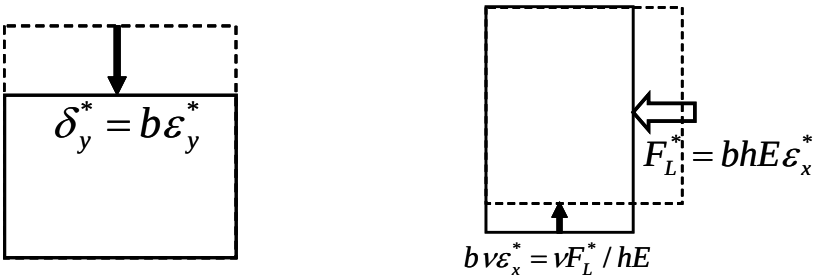


図 2.2 固有変形を用いて表現した要素の収縮



(a) 横収縮　　(b) 縦収縮

図 2.3 固有変形および個有力を用いて表現した横収縮と縦収縮

有限要素法において、溶接によって溶接部近傍に生じる局部収縮をどのように現すかを説明したものが図 2.4 である。ここで注意すべき点は、溶接線方向と溶接線に垂直な方向では溶接時の拘束が異なるという点である。すなわち、拘束が小さい溶接線に垂直な方向では、固有変形の横収縮方向成分 δ_T^* はそのまま板の幅方向の縮みとして現れるのに対して、拘束が大きい溶接線方向では、固有変形の縦収縮方向成分 δ_L^* はほとんどが応力になる。したがって、有限要素法の中で溶接による局部収縮を表す時には、横収縮は溶接線を挟んだ節点変位の不連続量 δ_T^* として表し、縦収縮は溶接線方向に働く節点力 F_L^* として表現するのが自然である。

2.3.2　界面要素

構造物の製作では、材料の切断、曲げ加工、組立・仮付け、溶接、歪取の工程が繰り返される。この過程を部材どうしの結合関係から見ると、切断は部材を分離する過程であり、組立では部材どうしが緩く結合され、溶接が終了した状態では完全に結合した状態となる。このような部材間の結合関係の変化を表現するために界面要素を導入した。界面要素とは特殊な特性を持った非線形バネであり、図 2.5 に示されるように部材の間、すなわち溶接線あるいは切断線の位置に配置される。この界面要素をはさんだ二つの部材の間の相対変位を u_L、u_N、u_T と表す。u_L は溶接線方向の成分であり部材間のズレを、u_N は溶接線に垂直な方向のギャップを、u_T は板面に垂直な方向の目違いを表す。また、溶接線回りの角変形を u_θ で表し、相対変位に対応した力あるいはモーメントを f_L、f_N、f_T、f_θ で表す。さらにこれらの変位と力の関係を示したものが図 2.6 であり、界面要素の力学的特性はバネの剛性 K、力の限界値 $f_{\max}$ およびギャップ u_G

の３パラメータにより定義される。たとえば、部材どうしが互いに自由の場合、$K=0$である。また、ストロングバックによる仮付の場合では、目違いに対する剛性は大きいがズレに対する剛性は小さく、開先内の仮付けの場合には目違いおよびズレの方向ともに剛性は大きい。さらに、溶接が完了した後では、剛性K、力の限界値$f_{\max}$も大きな値に設定される。

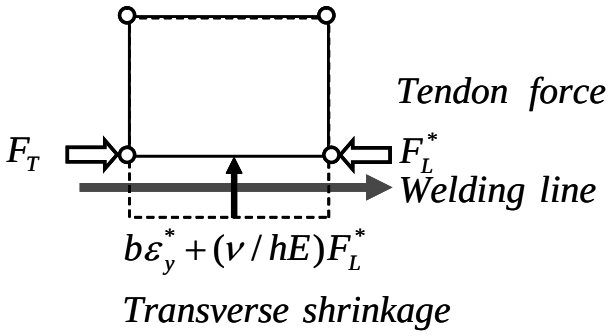


図 2.4 有限要素法の中での溶接線の横収縮の固有変形と固有力を用いた表現

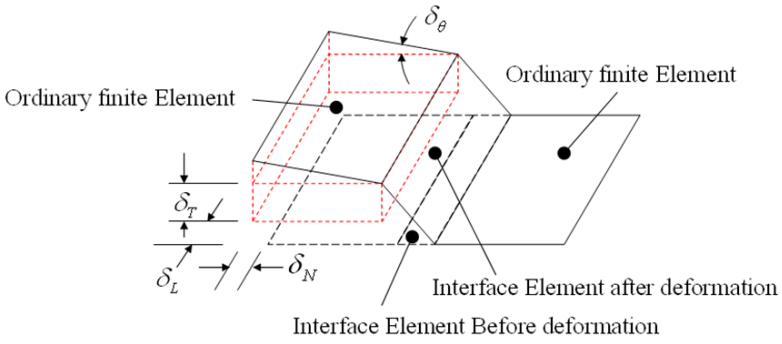


図 2.5 界面要素の変形成分の定義

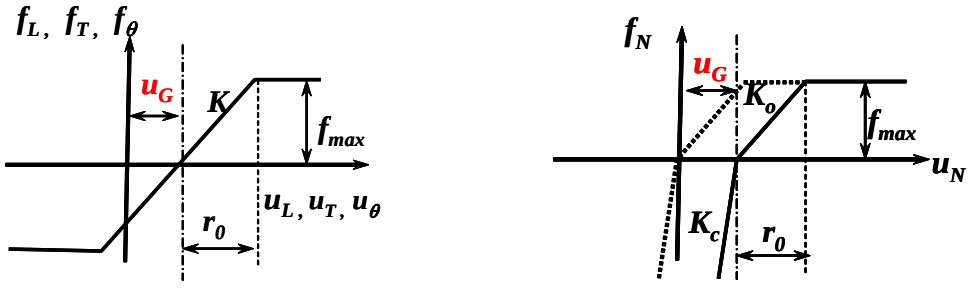


図 2.6 界面要素の力学的特性

2. 3. 3 大変形

構造物の板厚が溶接入熱と比較して薄い場合には、座屈変形が生じる可能性があるので、変形の予測には大変形理論を用いる必要がある。図 2.7 は、溶接線に接した要素内での溶接線方向の応力分布を示したものであり、要素内に分布した応力と要素端部に集中し無限大の値を持つふたつの部分がある。後者は固有力である Tendon force F_L^* に対応し、δ 関数である。これらの内、分布した応力の大変形に対する影響は通常の有限要素法の定式化で対応できるので、ここでは、Tendon force F_L^* に注目し、大変形に対する影響の取扱い方について説明する。

大変形問題では、時刻 $t+\Delta t$ におけるひずみ ε および全ポテンシャルエネルギー π は形式的に次のように表すことができる。

$$\varepsilon(u+\Delta u)=\varepsilon(u)+\Delta^1\varepsilon+\Delta^2\varepsilon \tag{2.15}$$

$$\pi(u+\Delta u)=\pi(u)+\Delta^1\pi+\Delta^2\pi \tag{2.16}$$

ここで u および Δu は変位および変位増分を表し、$\Delta^1\varepsilon$、$\Delta^2\varepsilon$、$\Delta^1\pi$、$\Delta^2\pi$ はそれぞれ変位増分 Δu の 1 次項および 2 次項を表す。全ポテンシャルエネルギーの 1 次項 $\Delta^1\pi$ からは荷重項が導かれ、2 次項 $\Delta^2\pi$ からは剛性が導かれる。一方、固有力である Tendon force F_L^* は、集中力であり δ 関数なので、その荷重項および剛性への寄与は次式により評価することができる。

$$\Delta^1\pi=.....+\int\sigma(u)\Delta^1\varepsilon\,dv=..+\int\sigma(u)\theta(u)\Delta\theta(u)dv$$

$$=..+\int F_T\theta(u)\Delta\theta(u)ds \tag{2.17}$$

$$\Delta^2\pi=....+\int\sigma(u)\Delta^2\varepsilon\,dv=....+\int\sigma(u)\{\Delta\theta(u)\}^2dv$$

$$=..+\int F_T\{\Delta\theta(u)\}^2ds \tag{2.18}$$

ここで、θ は形式的に撓みによる溶接線の回転角を表す。図 2.8 は Tendon force F_L^* と回転角 θ により発生する板面に垂直方向の力を示したものである。

2.4　固有変形法が適用できる問題

図 2.9 に示されているように、固有変形法は溶接組立工程を構成する切断、曲げ、仮付け、溶接、歪取、さらにはブロック搭載[4)]の全工程における変形の予測に適用することができる。例えば熱切断の場合には、部材間の剛性 K をゼロにし、切断の熱による固有変形を切断面に接する要素に与えれば変形が計算できる。線状加熱などによる板曲げの場合は、板全面に分布する固有ひずみをそのままの形で要素の積分点に与え弾性解析を行うことにより曲面形状が得られる。また、溶接では収縮は溶接線上に集中しているので、固有変形および固有力を溶接線に接している要素に与えることにより溶接変形が計算できる。

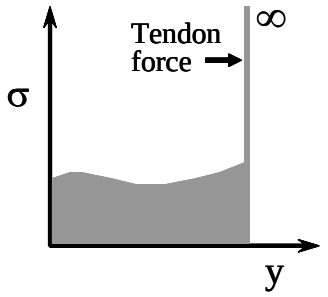


図 3.7 要素内での応力分布

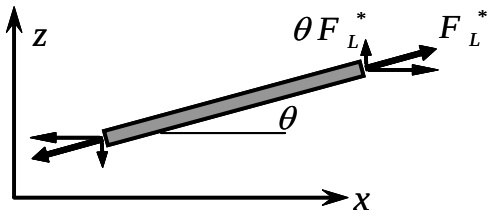


図 3.8 大変形効果により発生する横荷重

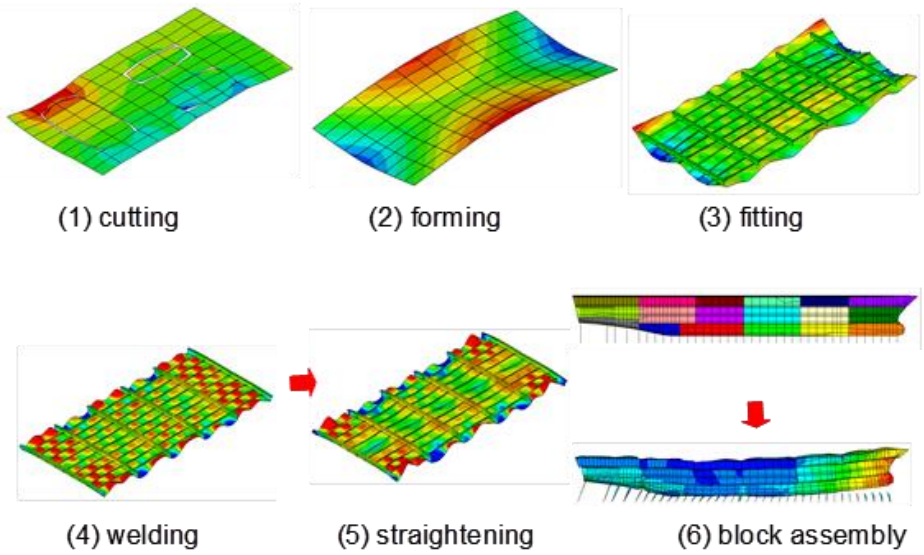


図 3.9 固有変形法を用いた切断からブロック搭載までのシミュレーシ

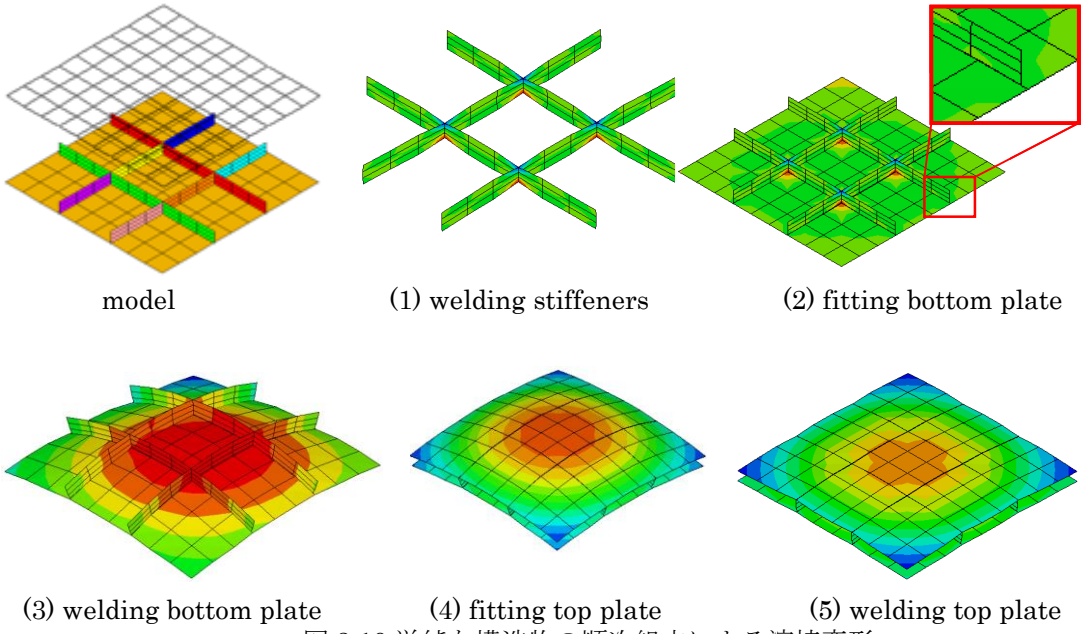


図 3.10 単純な構造物の順次組立による溶接変形

溶接組立の工程にともなう部材間の結合状態の変化と変形の関係を説明するために図 2. 10 に示された簡単な構造を考える。この構造は、格子状の骨材と上下２枚の板材から構成され、次の工程で組み立てられるものとする。

(1) 骨材の溶接　　(2) 下板の引付と仮付け

(3) 下板の溶接　　(4) 上板の引付と仮付け

(5) 上板の溶接

図 2.10 内の拡大図に示されるように、骨材の溶接により骨材が収縮するため、骨材と板材の間にズレが生じる。下板の中心線に沿った撓み分布の工程の進行にともなう変化を示した図が図 2.11 であり、溶接完了後は上に凸の変形となる。

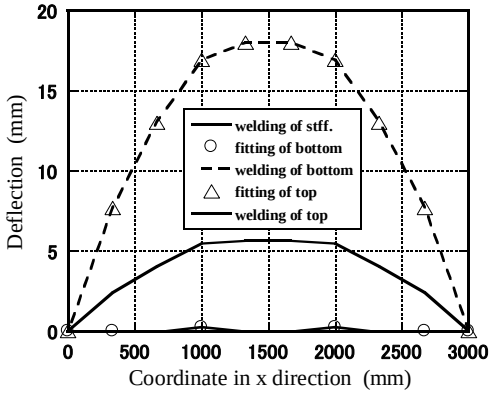


図 2.11: Deflection at each stage.

これは、溶接条件が同じであっても、下板の溶接時の剛性は上板の溶接時の剛性と比較して小さく、下板溶接による凸方向の変形量が上板溶接時の凹方向の変形量と比較して大きいためである。

2.5 結言

本研究では、船の建造における溶接組立変形を予測する手段として固有変形法を用いた。固有変形法は、溶接構造物の設計や生産に携わる技術者が溶接・組立変形を予測し改善対策を検討する際に簡便に使用できしかも実用的な変形予測法として大阪大学接合科学研究所が開発した手法であり、切断から歪取の全工程を対象とした FEM 解析法であり、本章においてその概要を述べた。

使用する立場から考えた時に道具が実用的であるために満足すべき点はふたつある。一つは簡便さであり、いまひとつは溶接組立変形に影響を及ぼすと予想される全ての要因（例えば、溶接による局部収縮、組立工程で発生するギャップや目違い、拘束など）が考慮できることである。簡便さについては、溶接完了時の固有ひずみあるいは固有変形に注目することで溶接途中の過渡変化を

考慮しなくても良く、さらに固有ひずみを積分した固有変形および固有力を用いることで溶接ビード幅のサイズなどに起因する制約を受けることなく大きなサイズの要素を使用できる点が挙げられる。また、ギャップや目違いなども、界面要素を用いることで簡便に取扱うことができることが特徴である。以下の章では、各種船体構造を対象に固有変形法を用いて溶接組立変形の生成メカニズムと低減法を検討した事例について述べる。

参考文献

1) Y. Ueda, T. Yamakawa: Analysis of Thermal Elastic-Plastic Stress and Strain during Welding by Finite Element Method, Trans. of JWS, 2(1971), 90-100.

2) 藤田譲，野本敏治：熱弾塑性問題に関する研究（その１），日本造船学会論文集，130号（1971），183-191.

3) 袁敏剛、汪建華、村川英一、上田幸雄：三次元熱弾塑性解析プログラムの開発と圧縮機の溶接組立への応用、溶接学会論文集、13（1995)、628-634

4) 西川弘泰，芹澤久，村川英一：大規模溶接シミュレーションの実機適用，溶接学会論文集，24(2006)，168-173

5) 柴原正和，生島一樹，伊藤真介，正岡孝治：動的陽解法 FEM を基にした大規模構造のための溶接過渡変形・応力解析手法の提案，溶接学会論文集，29－1（2011)，1-9

6) 生島一樹，伊藤真介，柴原正和，深沢塔一：理想化陽解法 FEM による溶接構造物の大規模接合･組立シミュレーション､溶接学会全国大会講演概要､Vol. 2011s（2011）

7) 重政拓海，生島一樹，伊藤真介，柴原正和：理想化陽解法 FEM による薄板構造の溶接変形解析、溶接学会全国大会講演概要、Vol. 2012s（2012）

8) 生島一樹，八木利起，河原充，柴原正和：重合メッシュを用いた理想化陽解法 FEM による溶接変形・残留応力解析、溶接学会全国大会講演概要、Vol. 2013f（2013）

9) 生島一樹，柴原正和：大型薄板構造物の溶接変形の効率的解析に向けた理想化陽解法 FEM の拡張、溶接学会全国大会講演概要、Vol. 2014s（2014).

10) H. Murakawa, N. Ma, H. Huang : Iterative substructure method employing concept of inherent strain for large-scale welding problems, Welding in the World, 59 (1)

(2014), pp. 53-63.
11) 佐藤邦彦，寺崎俊夫：構造用材料の溶接残留応力におよぼす溶接諸条件の影響，溶接学会誌， 45（1976)， 150-156
12) 佐藤邦彦，寺崎俊夫：構造用材料の溶接変形におよぼす溶接諸条件の影響，溶接学会誌，45（1976)，302-308
13) 寺崎俊夫，石村知樹，松石研一，秋山哲也：ビードオンプレート溶接継手に生じる縦収縮に関する研究、溶接学会論文集、Vol. 20（2002）No. 1.
14) 寺崎俊夫，渡壁陽雄，長谷川弘毅：連続切断により生じる切断変形について、溶接学会論文集、Vol. 21（2003）No. 3.
15) 寺崎俊夫，北村貴典，城戸田巌，石村知樹，浜島志伸：すみ肉 T 継手に生じる縦収縮・縦曲り変形に関する研究、溶接学会論文集、Vol. 21（2003）No. 1
16) 梁偉，曽根慎二，芹澤久，村川英一：逆解析を用いた溶接固有変形の推定法、溶接学会全国大会講演概要、Vol. 2004f（2004).
17) 寺崎俊夫，川上博己，福谷理明，北村貴典：溶接によって生じる相変態を有する鋼の横収縮に関する研究、日本船舶海洋工学会論文集、Vol. 4 (2006).
18) 三上欣希，森影康，望月正人，豊田政男：T 型すみ肉溶接継手の角変形挙動の計測実験と数値解析、溶接学会論文集、Vol. 24（2006）No. 4.
19) 梁 偉，ベガ アダン，芹澤久，村川英一：線状加熱における固有変形の逆解析による同定、溶接学会全国大会講演概要、Vol. 2006f（2006).
20) 岡野成威，松下和憲，望月正人，豊田政男，上山智之，大縄登史男：溶接法が異なる場合の入熱パラメータと角変形の関係に関する一考察、溶接学会全国大会講演概要、Vol. 2008s（2008).
21) 岡野成威，松下和憲，望月正人，豊田政男，上山智之：入熱パラメータと溶接角変形の関係に関する実験的考察、溶接学会論文集、Vol. 28 (2010) No. 1.
22) 岡野成威，松下和憲，望月正人，豊田政男：移動熱源の影響に注目した入熱パラメータと角変形の関係に関する一考察、溶接学会論文集、Vol. 28（2010）No. 3.
23) 村川英一，麻寧緒，大須賀佑介：溶接変形予測のための固有ひずみ、固有変形および固有力の概念、溶接学会全国大会講演概要、Vol. 88（2011).
24) 王江超，松尾祐希，村川英一：ビード溶接における固有縦収縮変形および

縦収縮力に関する理論的検討、溶接学会全国大会講演概要、Vol. 2012f (2012)
25) 福田　敬二：残留応力測定の一般理論と３次元溶接残留応力測定法の開発に関する研究，大阪大学提出博士論文(1979)
26) 村川英一，鄧徳安，柴原正和：薄板構造物の溶接組立における溶接変形予測-ギャップおよび目違いを考慮した変形予測- 、関西造船協会論文集、238号 (2002), 163-172.
27) W. Liang, D. Dean, S. Sone and H. Murakawa ：Prediction of welding distortion by elastic Finite Element Analysis using inherent deformation estimated through inverse analysis, Welding in the World, Vol.49, No.11/12 (2005), pp.30-39.
28) H. Murakawa, N. Ma and Y. Osuga: Concept of Inherent Strain, Inherent Deformation and Inherent Force for Prediction of Welding Distortion, Preprints of the National Meeting of J.W.S., 88 (2011), 178-179. (in Japanese)
29) J. Wang, H. Murakawa, M. Shibahara and X. Zhang : Twisting Deformation of Thin Plate Stiffened Structure under Welding, Preprints of the National Meeting of J.W.S., 89 (2011), 162-163.
30) W. Liang, D. Dean, S. Sone and H. Murakawa ：Prediction of welding distortion by elastic Finite Element Analysis using inherent deformation estimated through inverse analysis, Welding in the World, Vol.49, No.11/12 (2005), pp.30-39.
31) H. Murakawa, S. Rashed, A. Kawahara and T. Uesugi：Finite Element Method for Prediction of Bending Deformation of Ship, Preprints of the National Meeting of J.W.S., 86 (2010), 156-157. (in Japanese)

第 3 章 自動車運搬船の薄板鋼板の歪発生軽減

3.1 緒言

自動車運搬船(Pure Car Carrier、PCC)では、重量を減少させて、船の重心を下げるために 5、6ｍｍといった薄い板厚の鋼板が強度デッキ以外のデッキに多用されている。また、薄厚のデッキの層数が多いのも自動車運搬船の特徴であり、デッキ全体の半数近くを占めている。このような薄い鋼板の溶接では、大きな溶接変形や座屈が発生するのが常であり、また、船の建造はいくつかの工程に分かれており、小組、中組、大組での局所的な変形は、累積し最終的に大きな歪となってしまう。発生した歪は線状加熱などにより矯正されるが、自動車運搬船では歪取が必要な範囲が広大なため、多大な修正時間と作業者の数を要することとなる。また、修正時間が掛かるということは工事遅延の恐れもある。さらに歪修正を行う作業者は、非常に高度な技を身につけた匠とも言える存在であり、この熟練作業者が退職していく中で、作業者の数を確保できないのが現状である。このような環境下においては歪矯正に多大な工数を必要とする従来法では現状の仕事をこなすことが非常に困難である。

ゆえに、この歪取り作業の量を軽減することを目的に、歪の発生を軽減させ、且つ早期に完了させるために歪取り作業の上流化を図った。

従って、本章での目標として次の３項目を設定した。

① 溶接変形を軽減できる溶接設計の採用
② 溶接変形を軽減できる組立法および溶接順序の採用
③ 歪修正に費やす時間の削減

3.2 自動車運搬船の構造と組立法

本研究で検討対象とする自動車運搬船の中央断面を示した図が図 3.1(a)である。対象船の No.1～No.4 デッキと No.9 デッキは乗用車格納専用のデッキであり、板厚は6㎜となっている。これらのカーデッキの従来の組立工程では図3.1(b)のように 1 枚の鋼板に 3 本ロンジ材を溶接し、それを 3～4 枚繋げて、図 3.2(c)のように、1 つのブロックにする単板工法を採用している。単板のサブ部材を反転し、単板同士の継手部にＩ型鋼を設置し、そこをタック溶接で繋ぐ。その後、トランス材を配材し、溶接を行う。次にブロックを反転し、Ｉ型鋼の上を沸か

し込み溶接する。このようにカーデッキは全て下向き溶接になるように組立が行われるが、その過程に含まれる各溶接工程が原因で、カーデッキに歪が発生する。完成したデッキブロックは船台にクレーンで搭載し、デッキブロックの四周を溶接していくが、図 3.1(d) のように下層から上層へ溶接していく過程で、船側ブロックが内側に引き付けられ、この変形により既設のデッキに圧縮応力が負荷され、さらなる歪を発生が発生することになる。また、自動車運搬船では各デッキの高さの維持が必要であるが、船台で搭載されるブロック数が多く、高精度を維持することが非常に困難である。さらに、デッキの総面積も広く、歪修正に時間が掛かるため、溶接入熱とともに歪修正の入熱の管理が課題となっていた。

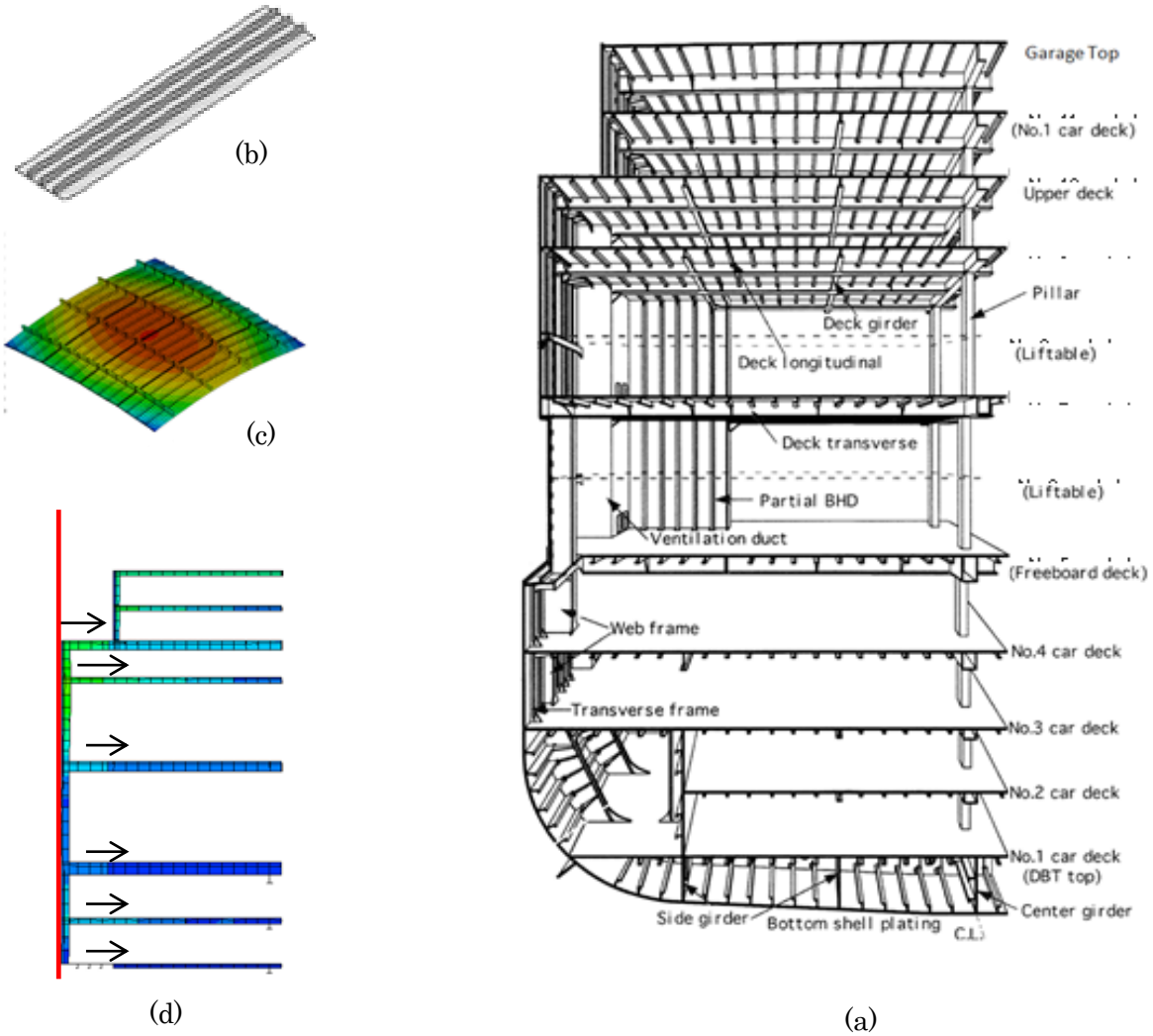


図 3.1　(a) 自動車運搬船断面図　(b) デッキ中組（単板）
(c) カーデッキ　(d) 船側ブロックの引き付け

3.3 溶接変形における入熱の影響

溶接は局部的に大量の入熱を与えて、材料を溶融・凝固させる過程であるから、部材に不均一な温度分布が生ずることは避けることができない。この不均一な温度分布が材料に塑性変形を生じさせ、溶接変形の原因となる。図 3.2 は溶接変形の分類を示し、大きく面内の収縮変形と面外撓みに分類される。

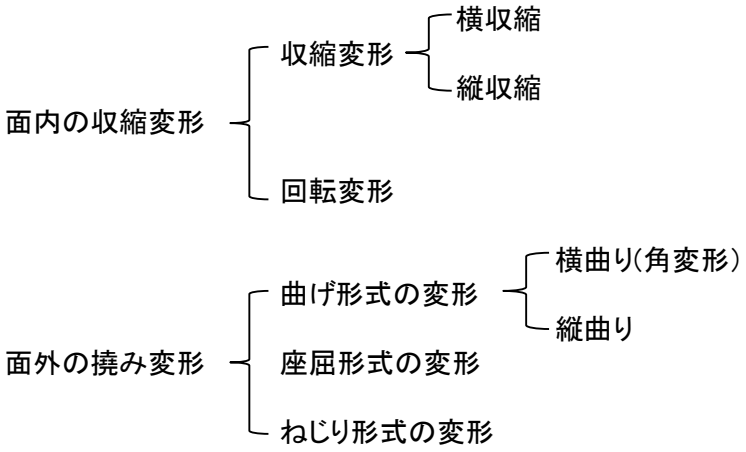


図 3.2　溶接変形の分類

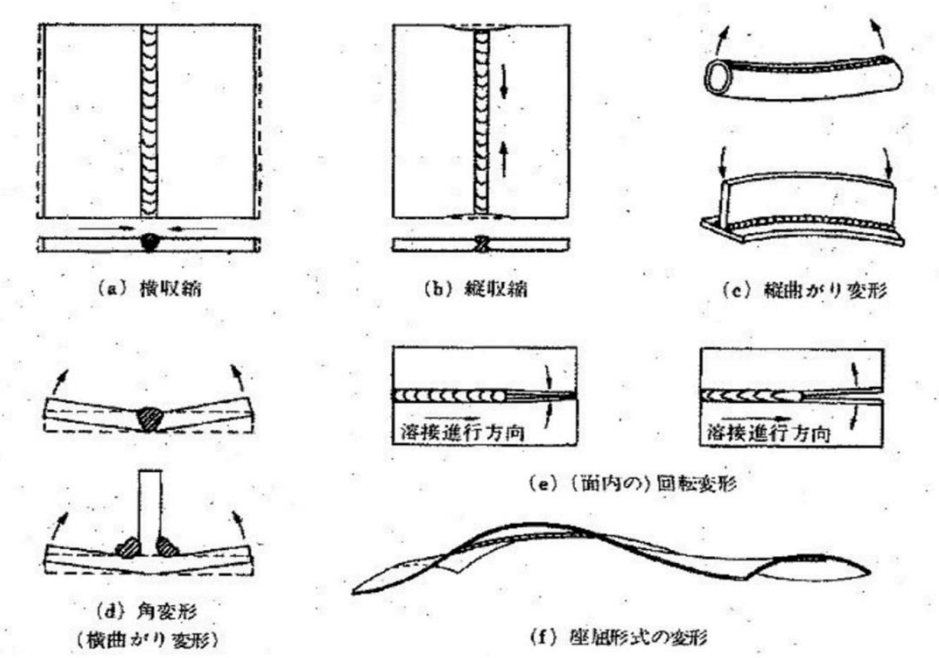


図 3.3　溶接継手に発生する各種の変形

溶接変形は基本となる横収縮、縦収縮、角変形の 3 種類の変形が原因となり、構造物全体あるいは部材に現れた変形である。したがって、構造物の溶接変形の基本は横収縮、縦収縮、角変形となる。これらは材料、板厚 h、溶接入熱 Q が既知であれば、算出する事が可能である[1, 2)]。

3.3.1 横収縮

溶接線に対して直角方向の収縮を横収縮 S(transverse shrinkage)という。溶接継手では横収縮に対して拘束力が働かないため、横収縮が顕著に発生する。図 3.4 は横収縮 S と単位溶接長当たりの有効入熱量 Q（真の入熱量）の関係を示したものである。有効入熱量とは、溶接によって溶接部材に実際に投入された熱量であり、公称入熱量に熱効率 η を掛けたものである。また、横軸の Q/h^2 は、板厚 h に対する入熱 Q の相対的な大きさを示したパラメーターであり、この値が小さい時は、板の溶接側の一部が力学的溶融温度に達する場合に対応し、Q/h^2 が 20 J/mm^3 以上の領域は、入熱が大きく、板の裏面も力学的溶融温度を超える場合に対応する。Q/h^2 が大きい完全溶け込みの場合には、実験点は一直線上にならび、横収縮 S と入熱 Q/h^2 の間にほぼ比例関係が成立する。これは入熱 Q によって生じる熱膨張と等しい量が結果的に横収縮の大きさになることに対応している。一方、Q/h^2 が小さく部分溶け込みの場合には、未溶融部分が変形を拘束するために、横収縮は直線上の値よりは小さくなる。

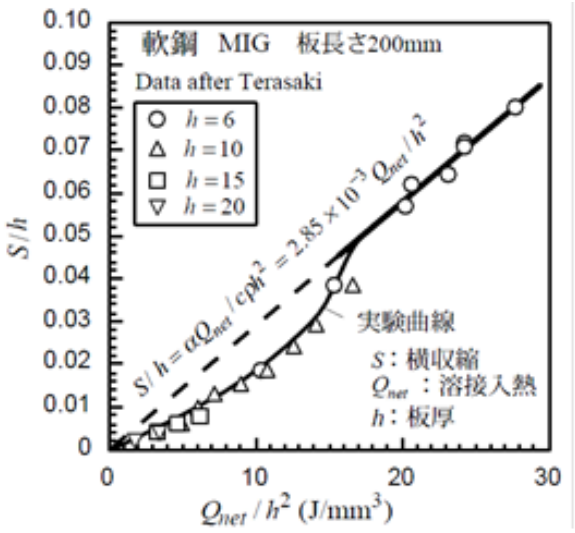


図 3.4:横収縮に及ぼす溶接入熱の影響

ここで継手部の横収縮量 S、線膨張係数 α、比熱 c、密度 ρ、単位長さ当たりの溶接入熱 Q、板厚 h とすると、次式で表すことができる。

$$S = \frac{\alpha}{c\rho h} Q \qquad \text{横収縮量} \qquad (1)$$

3.3.2 角変形

溶接により面内の収縮変形だけではなく、面外への変形も生じ、溶接線に沿

って折れ曲がる変形が角変形δ(angular　distortion)である。これはV型開先のような多層溶接や隅肉溶接で通常発生し、下層と上層とで溶融金属量すなわち収縮量の差が原因である。

また､図3.5は角変形量と入熱Q/h^2パラメーターの関係を示したものである。角変形は板厚方向に温度勾配があり、部分溶け込みの場合に顕著に見られる変形であり、入熱パラメーターQ/h^2が小さい領域では、角変形量δは入熱パラメーターQ/h^2にほぼ比例する。これに対して入熱が大きい場合には、溶接部が凝固し力学的な剛性を回復する温度域での板厚方向の温度勾配が小さくなるため、角変形は入熱の増加とともに減少する。

ここで継手部の角変形量δ、線膨張係数α、比熱c、密度ρ、単位長さ当たりの溶接入熱Q、板厚hとすると、次式で表すことができる。

$$\delta \propto \frac{\alpha}{c\rho h^2} Q$$

角変形量　　(2)

3.3.3 縦収縮

溶接線に対して溶接線方向の収縮を縦収縮S_L（longitudinal　shrinkage）という。これは横収収縮や角変形が直接変形量として扱われるのに対して､縦収縮の場合は､‘力’すなわち縦収縮力F_T(tendon　force)の形で議論される。その理由は拘束の強さにある.横収縮や角変形の場合は､拘束が弱いため溶接部に生じた非可逆ひずみ（固有ひずみ）のほとんどが変形として現れるのに対し、縦収縮の場合は拘束が大きいために、非可逆ひずみは変形ではなく、そのほとんどが応力として現れるためである。

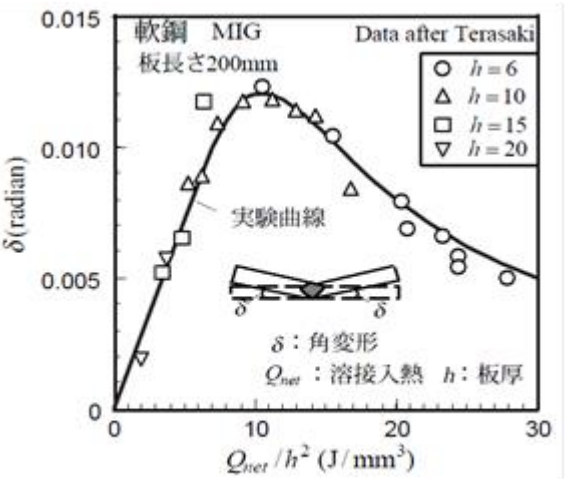


図 3.5:縦収縮に及ぼす溶接入熱の影響

従来の研究によれば、縦収縮力F_Tは、aを比例定数として入熱量Qに比例し、

$$F_T = aQ$$

縦収縮力＝Tendon　force　　(3)

の関係が成立する。なお、比例定数aはおおよそ0.2である。以上の説明から、

横収縮、角変形、縦収縮のいずれの溶接変形も、基本的には入熱量に比例する。

ここで継手部の縦収縮量 S_L、縦収縮力 F_T、線膨張係数 α、ヤング率 E、比熱 c、密度 ρ、単位長さ当たりの溶接入熱 Q、板厚 h とすると、縦収縮量および縦数収縮力は次式で表すことができる。

$$S_L = \frac{F_T L}{EBh} \propto \frac{\alpha L}{c\rho Bh} Q$$

縦収縮量 (4)

$$F_T = aQ \propto \frac{E\alpha}{c\rho} Q$$

縦収縮力 (5)

3.4 溶接法が固有変形に与える影響

自動車運搬船は種類や大きさ、重量が異なる自動車を運ぶために、板厚の違う多くのカーデッキで構成されている。カーデッキの中でもデッキパネルが 6㎜と最も薄い９番デッキで、基準値を超える面外撓みが多く発生している。

本項では両側連続溶接、片側連続溶接、並列断続溶接、千鳥溶接を対象に熱弾塑性解析[3)]を実施し、防撓材の溶接により発生する固有変形に及ぼす溶接法および溶接条件の影響を明らかにする。さらに防撓材で囲まれたパネルの座屈に注目し、座屈防止の観点から溶接法の比較を行う。

3.4.1　モデルの概要と解析手法

本項で使用するモデルは長さが 3,280㎜ 幅が 820㎜、板厚が 6㎜ のデッキパネルに、1 本のロンジ材が溶接されているモデルと、長さ 820㎜、幅 820㎜、板厚が 6㎜ の板にトランス材が溶接されているモデルである。ロンジ材は L 型材で、ウェブの高さが 100㎜、フランジの幅が 75㎜ である。板厚はウェブ、フランジともに 7㎜ である。トランス材は T 型材で、ウェブの高さが 368㎜、フランジの幅が 230㎜ である。板厚はウェブが 11㎜、フランジが 12㎜ であり、有限要素ソリッドモデルを用いて熱弾塑性解析を行った。各モデルともに、スキンプレート・防撓材および隅肉溶接部で構成されており、隅肉部分に入熱を行うことで隅肉溶接シミュレーションを行った。また、境界条件は剛体変形のみを拘束している。

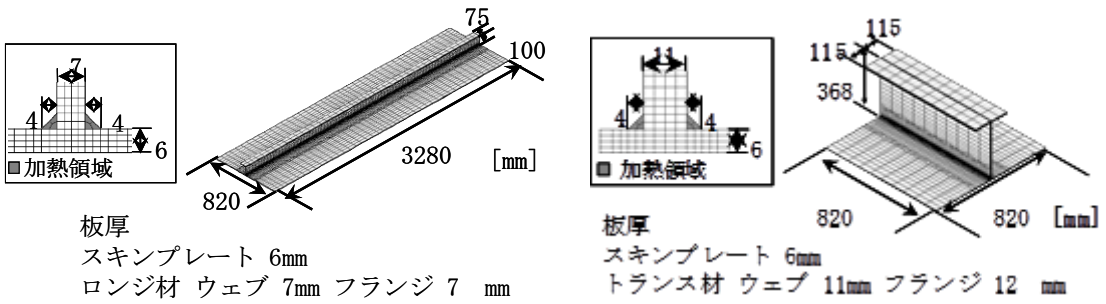


図 3.6　熱弾塑性解析用防撓材付きモデル

3.4.2　検討対象とした溶接法

ここでは図 3.7 に示されるように、両側連続溶接、片側連続溶接、並列断続溶接、千鳥溶接の４つの溶接法について検討を行った。両側連続溶接は、車両が頻繁に移動するスロープ周辺など、衝撃荷重が頻繁に加わる部分で使用することが定められている。また片側連続溶接は、カーデッキの防撓材溶接において一般的に使用される方法である。断続並列および千鳥溶接は、隅肉溶接で間隔をあけて行う方法で、連続溶接と比べ溶接線に沿った単位長さあたりの入熱量を小さくできる。すなわち、両側連続溶接における入熱量を 2.0 とすると、片側連続溶接が 1.1、並列断続溶接と千鳥溶接が 0.8 となる。断続溶接の溶接部分と非溶接部分の長さは、図 3.7 のように NK の断続溶接規則を満足するように設定している。

入熱条件は造船所で使用されている値の平均値を用いており、電流は 225(A)、電圧は 24(V)、溶接速度は 6.5(mm/sec)である。単位長さあたりの入熱量は

$$Q = \frac{I \times V}{v} = 831(J/mm) \tag{6}$$

である。本研究では入熱効率を 0.5 としているので有効入熱は、

$$Q_{net} = \eta Q = 623(J/mm) \tag{7}$$

である。

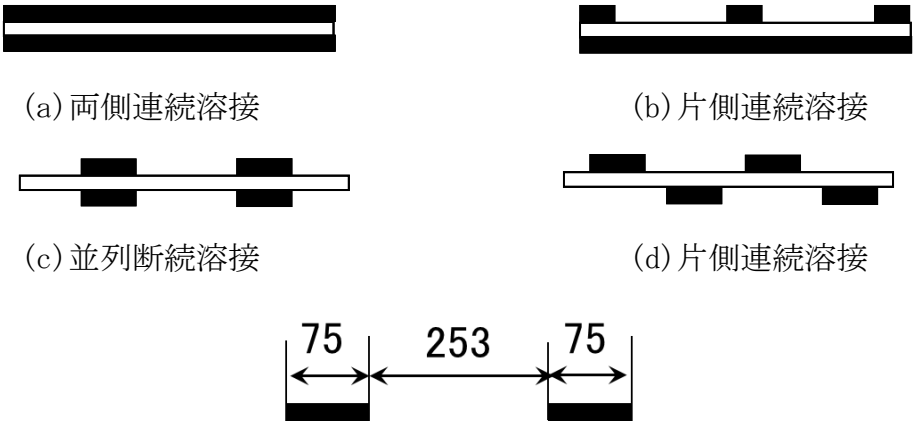


図 3.7　各溶接法と断続溶接の溶接長

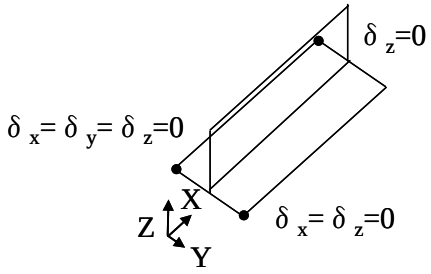


図 3.8　熱弾塑性解析の境界条件

3.4.3　溶接法が溶接変形に与える影響

①溶接法が固有変形に与える影響

最初に熱弾塑性解析を使用して、４種類の溶接法それぞれにおいて発生する縦収縮、横収縮、角変形などの固有変形を計算した。その結果を単位長さ当りの平均入熱あるいは単位長さ当りの平均入熱を板厚の２乗で除した入熱パラメータを横軸に整理したものが図3.9～図3.11である。まず、図3.9および図3.10に示された縦収縮力（テンドンフォース）と横収縮に注目すると、これらは溶接の方法に関係なく、単位長さ当りの平均入熱で整理されることが分る。このことは、平均入熱が同じ並列断続溶接と千鳥溶接で発生する縦収縮および横収縮にはほとんど差が無くほぼ同等であることを意味する。

一方、角変形を入熱パラメーターで整理した図3.11に注目すると、角変形は溶接法によって異なることが分る。すなわち、同じ平均入熱であれば、千鳥溶接と比較して並列断続溶接の場合に角変形が小さい。

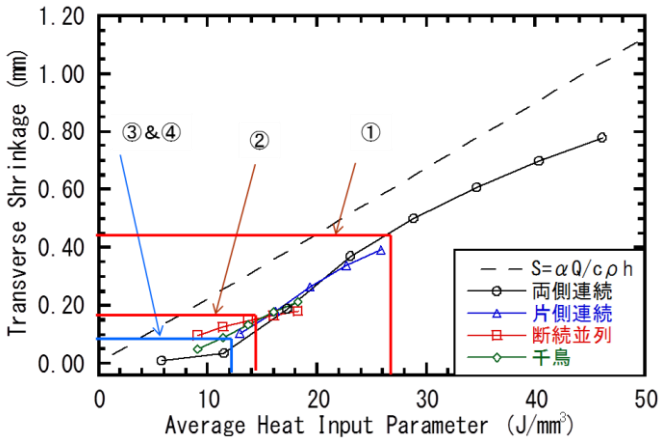


図3.9 溶接法がテンドンフォースに与える影響

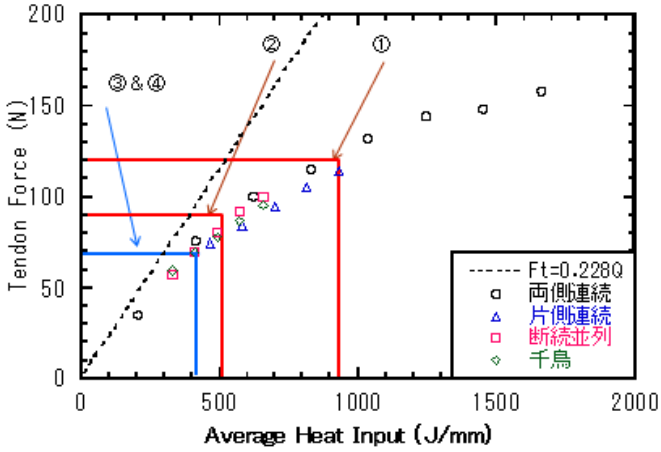


図3.10 溶接法が横収縮に与える影響

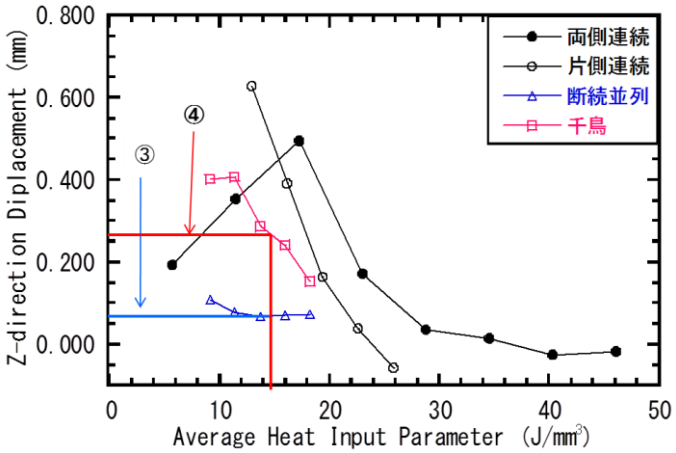


図3.11 角変形が横収縮に与える影響

②溶接法がパネルの座屈変形に与える影響

次に座屈に注目すると、縦収縮力は板の座屈の観点から特に重要と考えられるので、防撓材で囲まれたパネルの座屈についても検討を行った。カーデッキのデッキプレートにトランス材とロンジ材を溶接する際に生じるテンドンフォースは、図3.12に示されたロンジ材付およびトランス材付モデルを使って熱弾塑性解析を行ない評価した。図3.13は結果として得られた縦収縮力（テンドンフォース）を単位長さ当りの入熱を横軸に整理したものである。図から明らかなように比較対象として示した平板を含め、継手の形状によらずテンドンフォースは単位長さ当りの入熱で整理できることが分る。

図3.13は代表的なカーデッキプレートを周辺単純支持された矩形板とみなし、2軸応力を受ける時の座屈範囲を示したものであり[4-8]、前節で検討した４種類の溶接法を採用した時にパネルに生じる圧縮応力が重ねてプロットされている。斜線で示された部分は座屈が発生する範囲であり、両側連続溶接の場合はパネルが座屈することが分る。溶接により座屈が生じてしまうとこれを矯正するために歪取が行われるが単純な角変形の矯正と比較してより高い技術が必要となる。これを防ぐためには、片側連続溶接、千鳥溶接、断続並列溶接が効果があり、特に千鳥溶接、断続並列溶接の場合には大きな効果が期待できる。

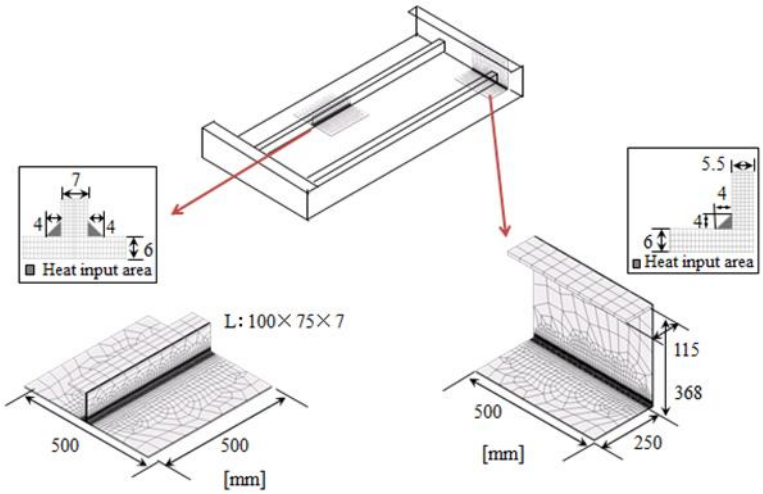


図3.12 ロンジ材およびトランス材が溶接された防撓パネルモデル

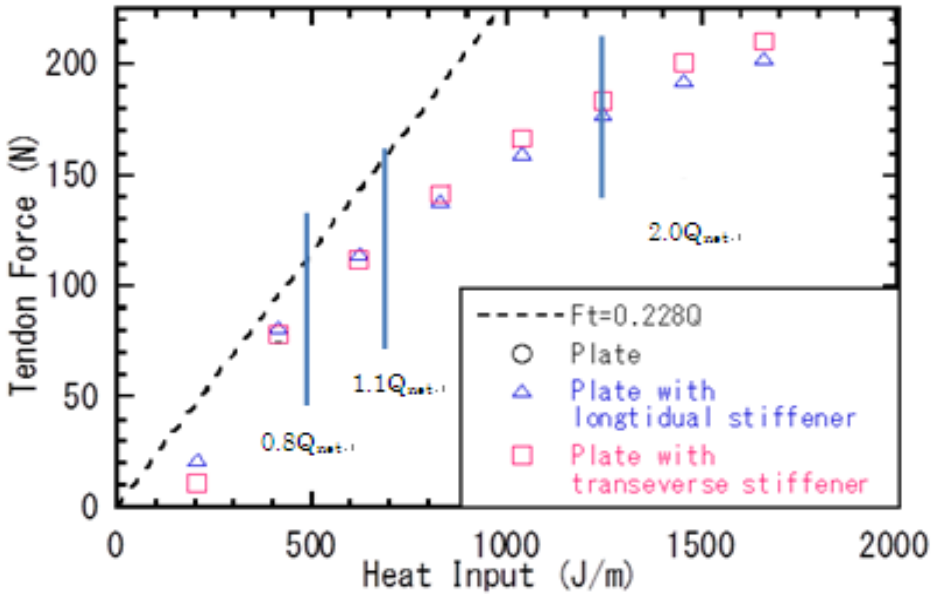


図 3.13 溶接法がパネルの座屈に与える影響

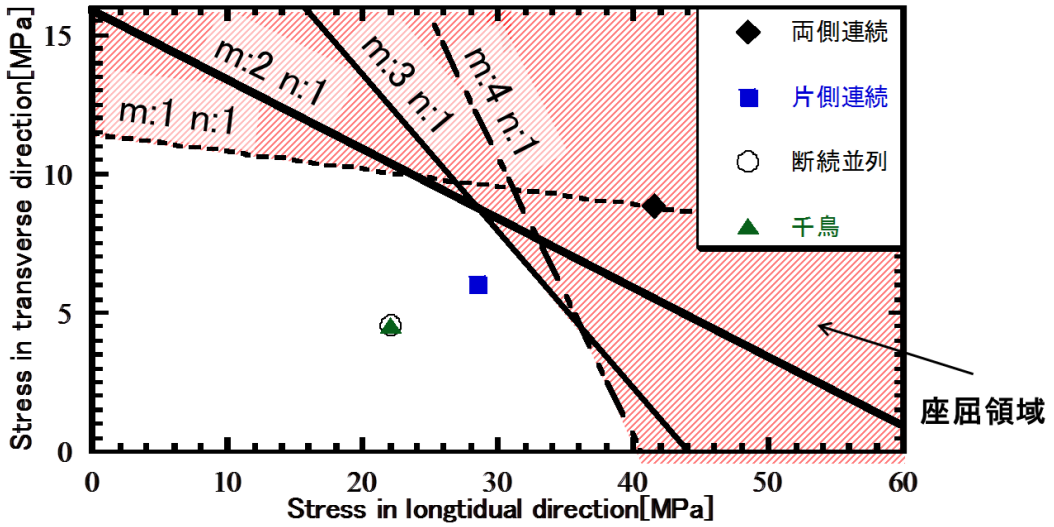


図 3.14 スティフナがテンドンフォースに与える影響

3.4.4 まとめ

この項ではいかにカーデッキの歪発生を軽減できるかを検討した。歪発生のメカニズムを分析するとともに、現在自動車運搬船で採用できる 4 つの溶接法について縦収縮力、横収縮、角変形、座屈の観点からそれぞれ熱弾塑性解析を用いて評価した。そこで得られた結果をまとめたものが表 3.1 である。

自動車運搬船カーデッキにおいて歪発生が最も効果的に軽減できる溶接法は断続並列溶接であることが明らかとなった。しかし、実船のカーデッキでは作用荷重についても考慮する必要があり、表 3.1 に示されるように荷重のかかるデッキには両側連続溶接あるいは片側連続溶接を採用し、荷重があまりかからないデッキには断続並列溶接を採用することで溶接変形の低減が可能となる。

なお、断続並列溶接を効率的に施工する為に、単板機を改良し、断続並列溶接を可能とした。また、強度面においても熱弾塑性解析での安全性の確認およびマクロ試験での溶け込み過不足を確認した。

表 3.1　溶接法の変形に及ぼす影響と使い分け

溶接法種類	残留応力	溶接変形	従来PCC	研究対象PCC
両側連続溶接	大	中	荷重のかかる構造箇所(走行頻度高い)	同左
片側連続溶接	中	大	上記以外の薄板構造全面	Upp.Dkより上部11Dk,GA-Dk,居住区
断続並列溶接	小	小	なし	荷重のかからない箇所全面
千鳥溶接	小	中	なし	なし

3.5 防撓板の面外撓みに与える溶接法の影響

前節では座屈が発生するか否かという観点から 4 種類の溶接法の比較を行ったがここでは、固有ひずみを用いた弾性大撓み計算により座屈変形も含めた座屈後の変形を直接計算し、比較を行う。そのためのモデルが図 4.16 に示されたモデルである。

3.5.1 モデルの概要

図 3.16 に示されたモデルは、長さが 13,120 mm、幅が 3,280 mm、板厚が 6 mm のスキンプレートと、3 本のロンジ材と 4 本のトランス材から構成されている。ロンジ材間隔・トランス材間隔はそれぞれ 820 mm、3,280 mm である。ロンジ材は L 型材で、ウェブの高さが 100 mm、フランジの幅が 75 mm である。板厚はウェブ、フランジともに 7 mm である。トランス材は T 型材で、ウェブの高さが 368

mm、フランジの幅が 230 mm である。板厚はウェブが 11 mm、フランジが 12 mm である。

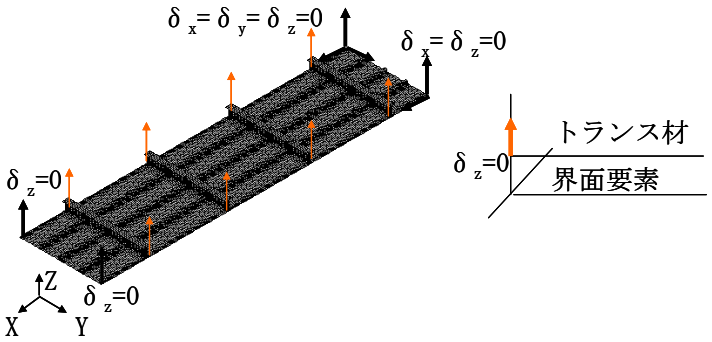


図 3.16 弾性溶接解析の境界条件

3.5.2 解析について

解析法については、固有変形法 [9-13] を使用している。固有変形量については、3.2 節で行った熱弾塑性解析より求めた固有値を使用し、具体的な値を表 3.2 に示す。境界条件は図 3.16 のように、剛体変形の拘束に加え、Z 方向変位の拘束を一か所増やし、防撓板全体の捩れ防止を行っている。各トランス材の位置での捩れを防止するためにトランス材の両端下部を Z 方向に拘束している。

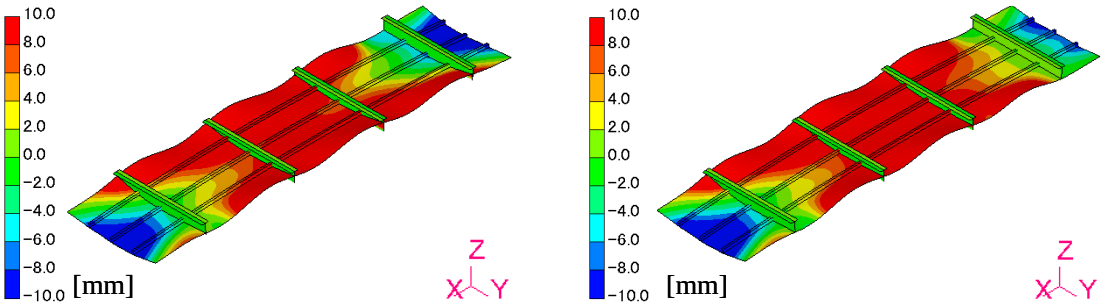
溶接変形の計算では、実際の組立手順に従って、(a)ロンジ材と板材の溶接、(b)～(e)トランス材の仮付、(f)～(i)トランス材の溶接の工程を詳細に反映した計算を行った。

表 3.2　各溶接継手に与える固有変形

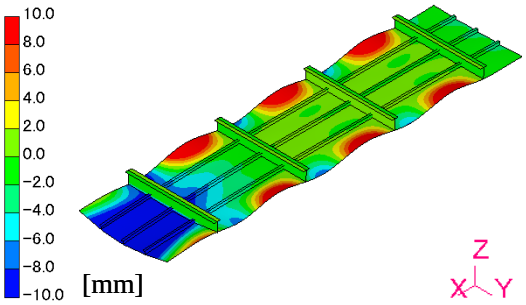
溶接法	溶接工程	部材	縦収縮 (mm)	横収縮 (mm)	縦曲がり (rad)	横曲がり (rad)
両側連続溶接	ロンジ材溶接	スキンプレート	-0.0103	-0.2688	0.1772	-0.0561
		ロンジ材	-0.1165	-0.1686	-0.0423	0.0141
	トランス材溶接	スキンプレート	-0.6633	0.0396	0.0152	-0.0126
		トランス材	0.6816	-0.4433	0.0347	-0.0103
片側連続溶接	ロンジ材溶接	スキンプレート	0.0259	-0.1795	0.3607	-0.1162
		ロンジ材	-0.1444	-0.0601	0.0617	-0.0062
	トランス材溶接	スキンプレート	-1.9053	0.4357	0.0923	-0.0352
		トランス材	2.0873	-0.8692	0.0146	0.0043
並列断続溶接	ロンジ材溶接	スキンプレート	0.0027	-0.1724	0.1629	-0.0508
		ロンジ材	-0.0583	-0.1839	-0.0571	0.0166
	トランス材溶接	スキンプレート	0.139	-0.1137	-0.0469	0.0106
		トランス材	-0.2215	-0.2345	0.0113	-0.0034
千鳥溶接	ロンジ材溶接	スキンプレート	-0.0182	-0.1404	0.0514	-0.0199
		ロンジ材	-0.0151	-0.2897	-0.0626	0.0185
	トランス材溶接	スキンプレート	-0.1569	-0.0193	-0.0994	0.0252
		トランス材	0.1231	-0.3864	0.0083	-0.003

3.5.3 解析結果とまとめ

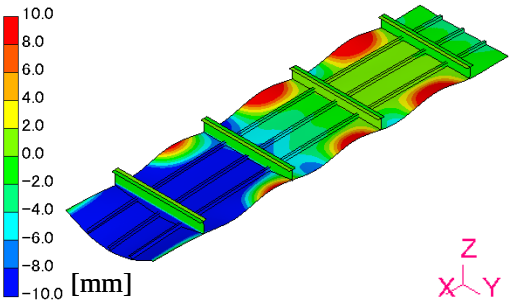
各組立工程で、両側連続溶接により防撓板に生じる面外撓みを図 3.17 に示す。組立工程の進行に従って、面外撓みの分布が変化しているのが分る。同様に、片側連続溶接、並列断続溶接、千鳥溶接の場合の変形を図 3.18～図 3.20 に示す。さらに図 3.21(b)、(c)は中央部の面外撓みの詳細を見るための図 3.21(a)に示された LINE1 と LINE２に沿った面外撓みの分布である。同図から分るように、片側連続溶接の面外撓みが最も大きく、次に両側連続の面外撓みが大きい。千鳥溶接の面外撓みが次に大きく、並列断続溶接の面外撓みが最も小さい。したがって断続溶接を用いれば、防撓板の組立時に生じる面外撓みの低減が可能となる。この結果は 3.3 項で得られた結果と同じである



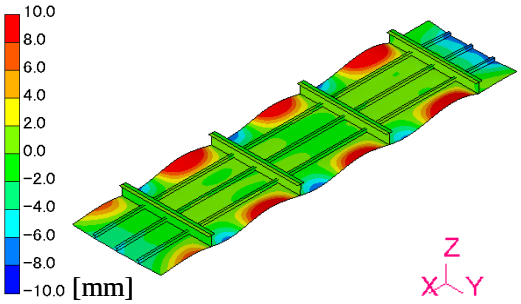
(a) ロンジ材溶接後　　(b) トランス材１ポジショニング後



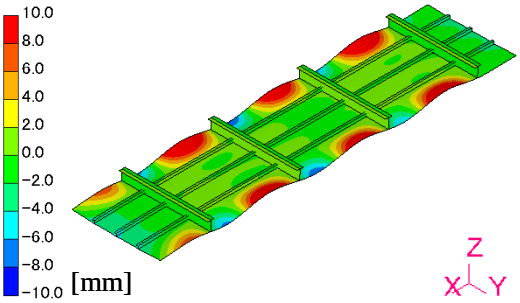
(c) トランス材２ポジショニング後



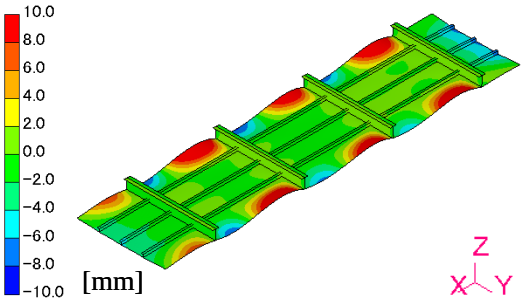
(d) トランス材３ポジショニング後



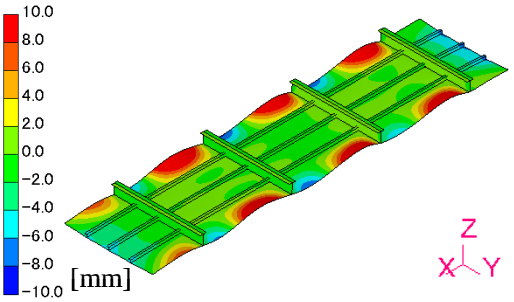
(e) トランス材４ポジショニング後



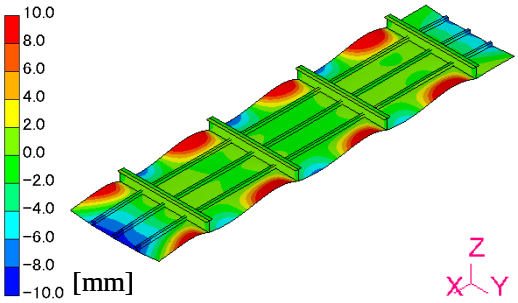
(f) トランス材１溶接後



(g) トランス材２溶接後

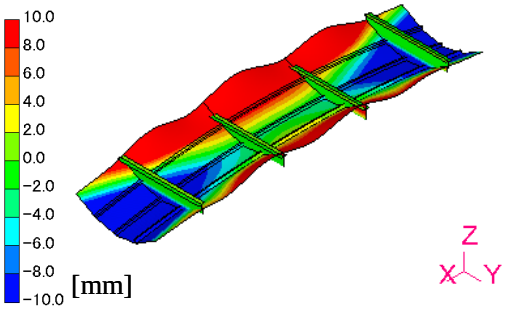


(h) トランス材３溶接後

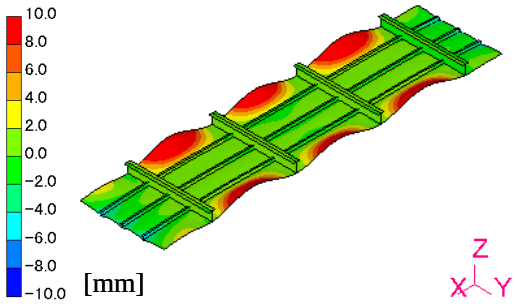


(i) トランス材４溶接後

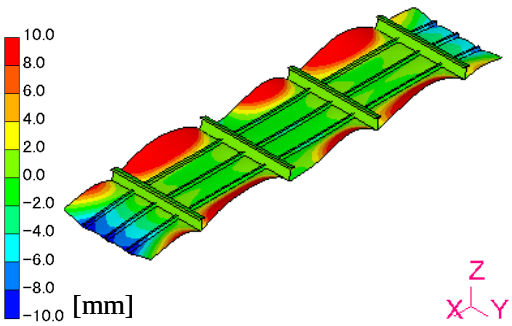
図 3.17 両側連続溶接による面外撓み(変形 20 倍)



(a) ロンジ材溶接後

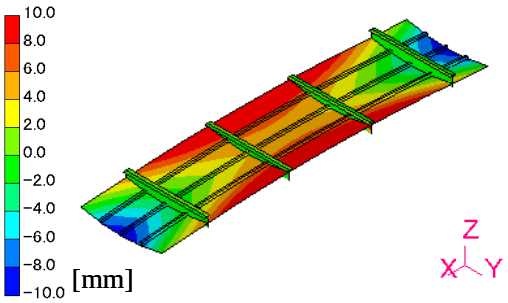


(b) トランス材ポジショニング後

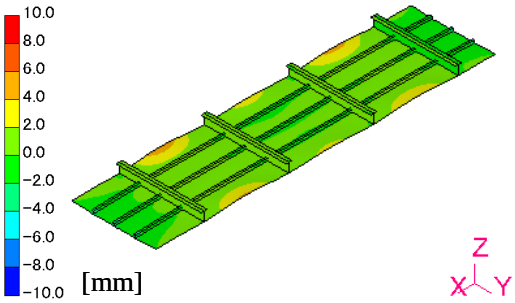


(c) トランス材溶接後

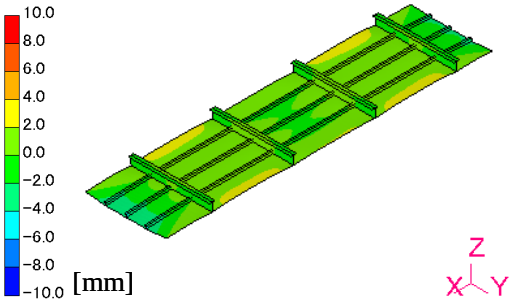
図 3.18 片側連続溶接による面外撓み(変形 20 倍)



(a) ロンジ材溶接後

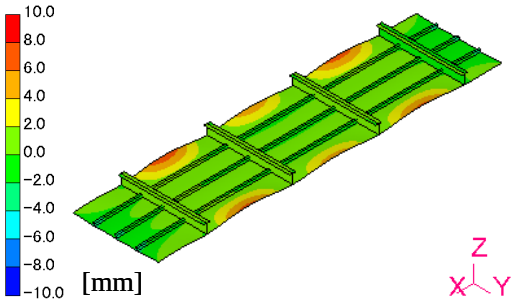


(b) トランス材ポジショニング後

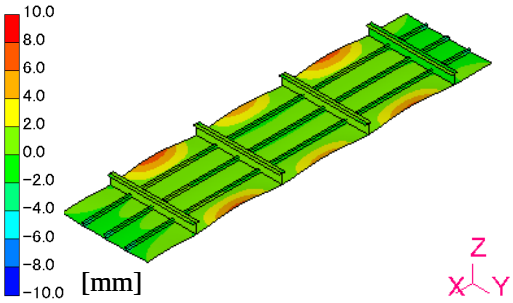


(c) トランス材溶接後

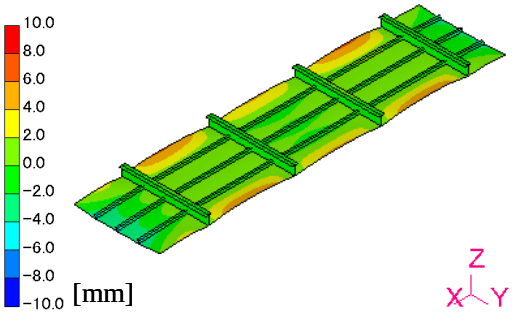
図 3.19 並列断続溶接による面外撓み(変形 20 倍)



(a) ロンジ材溶接後

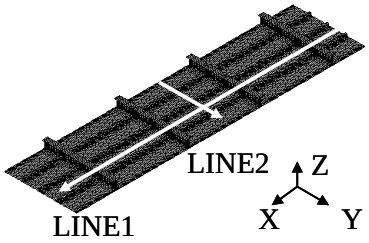


(b) トランス材ポジショニング後

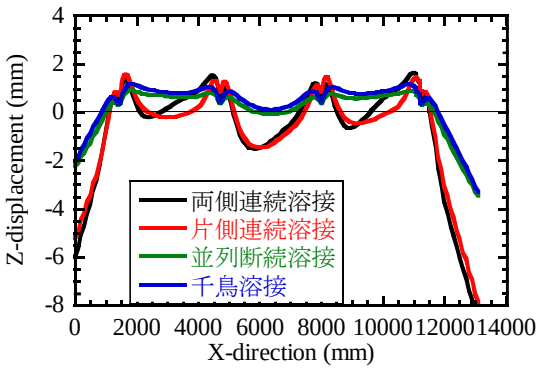


(c) トランス材溶接後

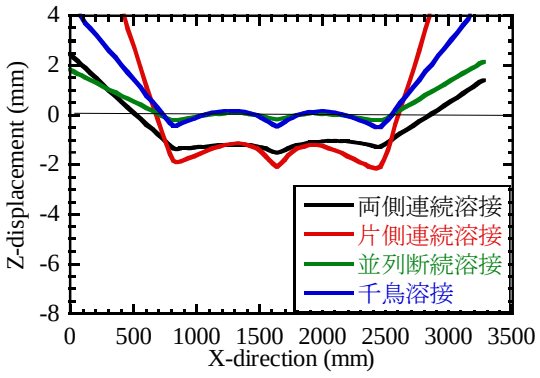
図 3.20 千鳥溶接による面外撓み（変形 20 倍）



(a) LINE 1 と LINE 2 の位置



(b) LINE 1



(c) LINE 2

図 3.21 各溶接法の面外撓み分布

3.6 カーデッキ組立時の溶接変形における溶接順序の影響

前節において、自動車運搬船のカーデッキブロックの歪発生が軽減できる溶接設計を明らかにすることができた。これにより歪の発生は従来の自動車運搬船よりかなり軽減されると考えられる。しかしながら、実際には歪修正を全く行わなくても良いわけではない。デッキブロックは複数の部材を順次組み立てて製作される。この場合、先行の溶接による変形のために新たに取り付けるべき部材との間に何らかのギャップや目違いが生じるので、これら修正した後、仮付け、本溶接という工程が繰り返される。また、部材の切断にはガス、プラズマ、レーザなどによる熱切断が用いられるため、切断による熱変形の影響も無視できない。

このように溶接組立による寸法、形状誤差の原因は、溶接自身に伴う局部収縮だけではなく、切断誤差、曲面成形誤差、ギャップ矯正、歪取りによる収縮の全てが原因となっているので、寸法、形状誤差を予測しこれを低減するためには、製作の全工程を視野に入れた検討が必要となる。そこでこの節ではカーデッキブロックの製作を対象に組立手順が溶接変形に及ぼす影響について検討を行った。

さらに、各種熱加工による収縮を固有ひずみおよび固有変形あるいは固有力により表現し、組立時のギャップ矯正過程を界面要素により表現した溶接組立変形のシミュレーション法を用いて、実際のブロックと同寸のモデルを対象に自動車運搬船ブロックの製作において発生するパネル全体のたわみ軽減を目指した製作工程および工法の最適化を行った。

3.6.1 カーデッキブロック構造および組立順序の概要

①カーデッキブロック構造

カーデッキブロックは図 3.22 に示すように一辺 13.12 m からなるブロックであり、全部で 24 の部材からなり、デッキプレート・ロンジ材・I 型鋼・トランス材・アングルの 5 種類の部材から構成される。基本的な部材寸法を表したものが図 3.23 である。部材定義を施し部材ごとに色分けして表したものが図 3.24 である。さらに溶接個所の概略図を表したものが図 3.25 である。また、溶接条件を表 3.3 に示す。溶接法については、前節での検討結果を折り込み、トランス材には主として片側連続溶接を採用し、ブロックを支持している周辺は両側連続溶接を採用すると想定した。I 型鋼には片面連続溶接を、ロンジ材には一部を除き断続並列溶接を採用すると想定した。

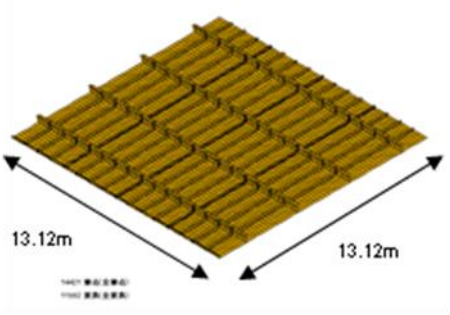


図 3.22 カーデッキの概略図

Skin plate (4)	t=6mm
Longitudinal(12)	web and face: t=7, h=100mm
I-sections (3)	web: t=5mm face: t=8, h=100mm
Transverses(4)	web• face: t=11, h=394mm
Angle (1)	t=7mm h=125mm

表 3.3 カーデッキの溶接条件

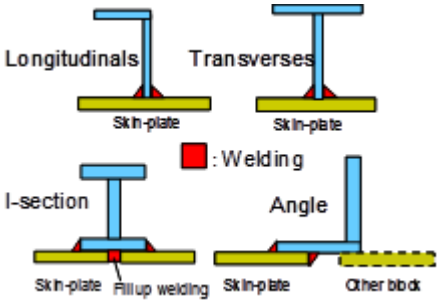


図 3.25 溶接個所の概略図

Welding area＼Heat input	Current(A)	Voltage(V)	speed(mm/min)
Longitudinals ×skin-plate	325	32	800
I-sections × skin-plate Transverses ×skin-plate	330	32	600
Angle × longitudinals Angle × skin-plate	220	28	400
Transverse ×longitudinal	220	28	400
Fill up welding	330	32	600

図 3.23 カーデッキの部材寸法

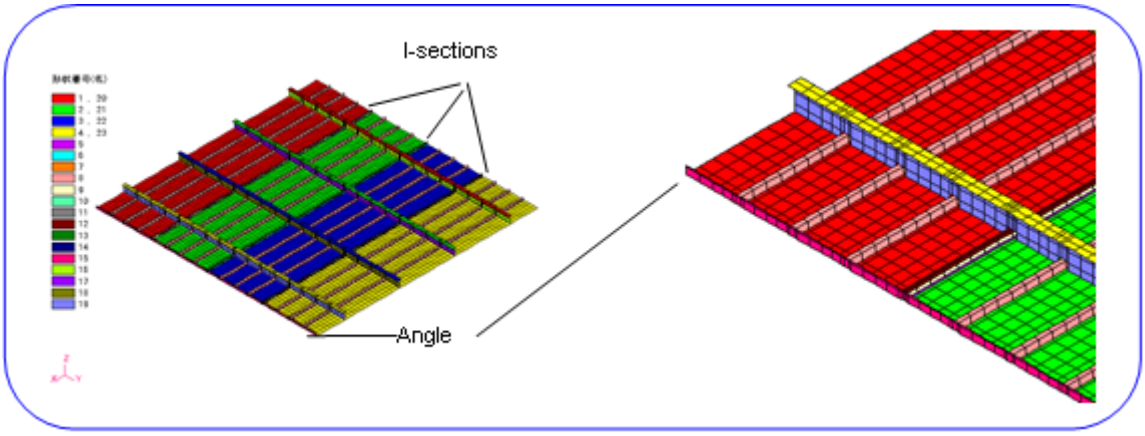


図 3.24 色分けによる部材定義

②組立順序

カーデッキの組立には前項で示したように両側連続溶接、片側連続溶接、断続並列溶接を適宜使い分けるものとし、ここでは組立順序がブロックの変形に及ぼす影響について検討を行う。表 3.4 はカーデッキを組み立てる際の作業工程を表にしたものである。現在採用されている工程は①ロンジ材－スキンプレート溶接、②I 型鋼－スキンプレート仮付け、③トランス材－スキンプレート仮付け、④アングル－スキンプレート仮付け、⑤I 型鋼－スキンプレート溶接、⑥

トランス材ースキンプレート溶接、⑦アングルースキンプレート溶接、⑧アングルーロンジートランス溶接、⑨正転、⑩沸かしこみ溶接、⑪ひずみ修正の順番である。

これらの作業工程の順番を入れ替え、変形が少なく、しかも工数の少ない組立順序を見出すために、表 3.5 に示された a)～d)の 4 種類の組立順序について検討した。これら 4 種類の組立順序の特徴を分かり易く表示したものが表 3.6 である。表 3.6 は各ケースと検討すべき着目点の関係を示したものである。すなわち、まず拘束とは、拘束の影響を把握するためカーデッキの周囲を上下方向に拘束するか否かであり、I 型鋼先行とは、通常、全部材をデッキに配材してから溶接工程にはいるが、これでは簡易台車溶接機（高能率、高品質が可能）が走行できないので、I 型鋼を先行で自動溶接して、トランスを配材する場合、お椀型治具は、デッキに逆変形をかけて撓みを軽減する場合であり、解析では下方に強制変位を 40mm かけた形となっている。背焼きの有無は歪修正をブロック段階で実施するか否かである。また組立能率とは、現場はコストの意識も必要なので、高能率順に番号付けしたものである。

表 3.4　カーデッキ組立における作業工程および部材番号

工　程		番号
I型鋼×デッキ	仮付	1
トランス×デッキ	仮付	2
アングル×デッキ	仮付	3
I型鋼×デッキ	溶接	4
トランス×デッキ	溶接	5
アングル×デッキ	溶接	6
アングル×ロンジ×デッキ	溶接	7
反転		8
I型鋼×デッキ	溶接	9
アングル×デッキ	溶接	10
歪修正		11

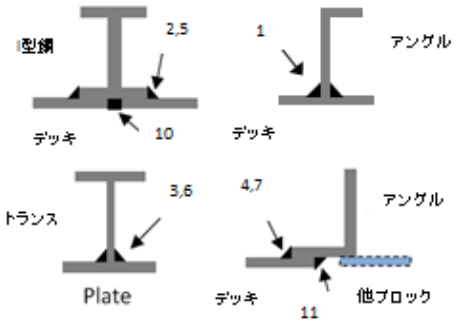


表 3.5 解析ケースの簡略図

組立ケース	作業順序											備考
a)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		従来の組立法
b)	1	2	5	3	4	6	7	8	9	10	11	
c)	b)と同様											デッキ周囲を拘束
d	b)と同様											強制変位をかける

表 3.6 解析ケース別の特徴

ケース	拘束	I型鋼先行	お椀型治具工法	背焼の有無	組立時能率
a	×	×	×	×	③
b	×	○	×	○	①
c	○	×	×	○	④
d	×	○	○	○	②

3.6.2 解析法

解析には固有変形法を用い、固有変形の値として 3.2 節で求めた値を使用した。さらに、取付けや仮付けなどの詳細な組立手順を追跡するために部材間には界面要素を配置した。また、境界条件は基本的に剛体変位のみを拘束しているが、4 つのケースの中のケース c)については図 3.26 の赤丸の位置で Z 方向の変位を拘束している。

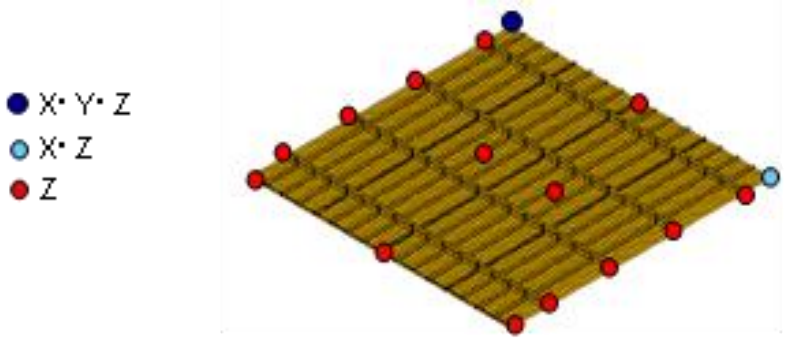


図 3.26 解析モデルの拘束条件

3.6.3 解析結果と考察

異なる組立順序について解析を行い、得られた最終結果を図 3.27 に示す。また、それぞれのブロック全体の撓み量（ブロック中央部）とそれに対する考察を以下に述べる。

ケース a)

これは従来造船所で実施していたカーデッキ組立法である。この解析結果ではデッキの撓み量は約 20mm になっており。デッキの撓み量は大きくはないが、歪修正を行っていなので、デッキにやせ馬歪が発生している。

ケース b)

ケースでは歪取による変形も考慮しているため、デッキの撓み量は約 40mm と大きい。しかし、歪取の効果で、やせ馬歪はほとんど発生していない。

ケース c)

この解析結果はデッキの撓み量は約 30mm と大きい。また、拘束した個所において、拘束を外した後にが大きく変形しているが、やせ馬歪は殆ど発生していない。

ケース d)

40 mm の逆変形と背焼きによる歪取を実施したためデッキの撓みは殆ど発生していなく、やせ馬歪も発生しない。

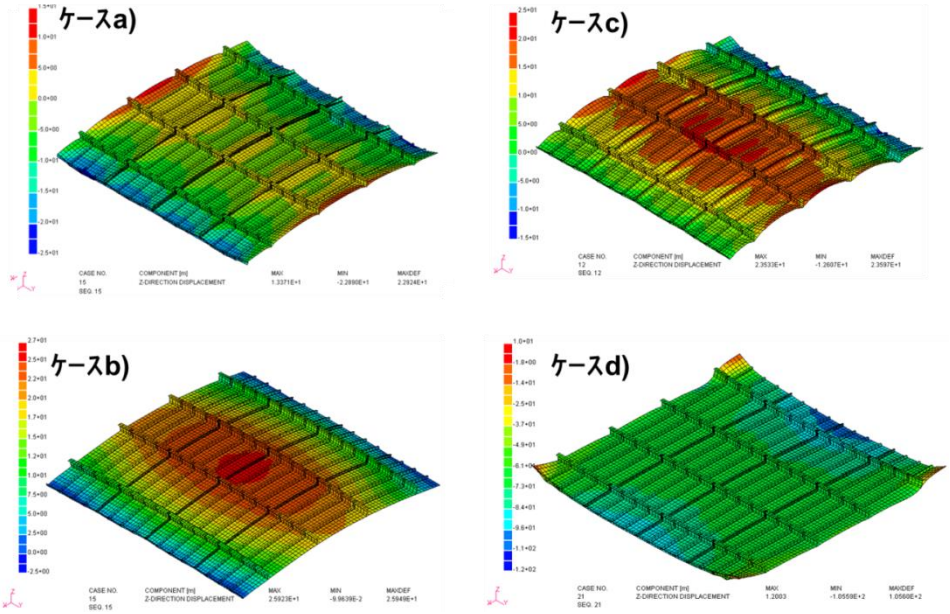


図 3.27 解析ケース毎の最終結果

3.6.4　検討結果の実船への適用

上述の検討結果を基に造船所では、ブロック全体の撓みが一番小さく、やせ馬変形が除去できるので、逆変形と背焼きによる歪取を実施するケース d)を組立手順として採用した。なお、逆変形を導入するためにブロックをお椀型に組む際の撓み量については、通常の組立法のケース b)では 40 mm 下方に撓んだので、その数値を参考に図 3.48 のように 55 mm 下げたお椀型に治具定盤の高さ調整をした。この 55mm という数値は、実際の現場では溶接入熱が解析で想定した値より大きくなる傾向があり、自重での撓み量が約 1mm であることや自動車積載時の撓み量として約 3mm を考慮して解析値より 15mm 大きい数値として設定した値である。また、歪修正については、ブロックステージでは複雑な歪は発生していないので、簡易装置のヒートライナーを造船所用にて改良して、背焼きを行う事とした。この簡易装置は 4 本トーチのアセチレンガスを使用し、水冷可能である。また、作業の効率化をさらに上げるために複数台/人で使用し、修正時間を大幅に削減した。

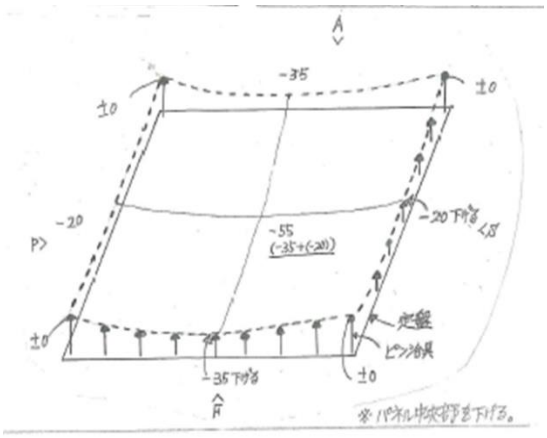


図 3.28 カーデッキ組立時の逆変形

実際に製作した際の実船計測値は図 3.29 に示した略図のようにブロック全体の撓みについては、出来上がり寸法で+5mm～+10mm となり、良好であった。またやせ馬歪ついては、解析では約 2mm であり、実船では 4mm 程度となった。この程度の数値ならば簡易装置で十分修正可能なので、結果は良好であったと言える。

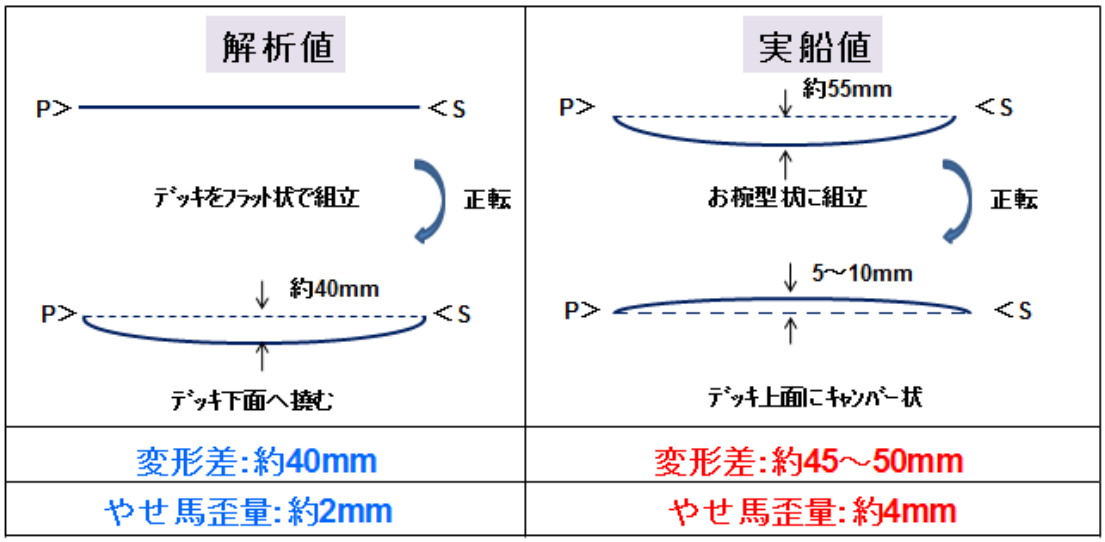


図 3.29　解析と実船における最終工程でのデッキ撓みの比較

3.6.5 まとめ

各種熱加工による収縮を固有ひずみおよび固有変形あるいは固有力により表現し、溶接構造物の組立過程を界面要素により表現した溶接組立変形のシミュレーション法を使用した。このシミュレーション法で実際の現場のように、ギャップ矯正、仮付、本溶接が繰り返される組立工程を表現することが可能となった。この結果現場への定量的な指示や工数の大幅な削減が可能となる。また、逆変形法等は従来から使用されていたが、熟練作業者の暗黙知であったが、今回の研究でより形式知化することができた。異なった種類のブロックについても固有変形法を適用し同様の検討を行うことで、建造の効率化や技術の向上を実現することができる.

3.7 カーデッキ搭載順序がパネルの座屈変形に及ぼす影響

3.3 節から 3.5 節ではカーデッキブロック製作時に注目し、溶接法および溶接入熱影響、溶接組立順序の変形に対する影響に注目し検討を行った。この節では、完成したカーデッキブロックを船台で搭載する際の搭載順序がデッキパネルの座屈変形に及ぼす影響について検討する。

3.7.1　検討対象の構造

ここでは、4300 台搭載の自動車運搬船を対象として検討を行った。対象船の全長は 170m、幅は 30.2m、船底から最上部の露天甲板(Garage Top)までの高さ

は 33.3m であり、11 層のカーデッキが設置されている。船体中央部の横断面の概略を図 3.30 に示す。６番デッキと８番デッキは搭載する車両によってデッキの高さが設定可能なリフタブルデッキであり、船体に溶接されていないためモデルから除外されている。まず、各溶接継手の固有ひずみを評価した後、カーデッキブロックの搭載順序に従って固有変形法を用いて船体横断面の変形を計算した[14]。

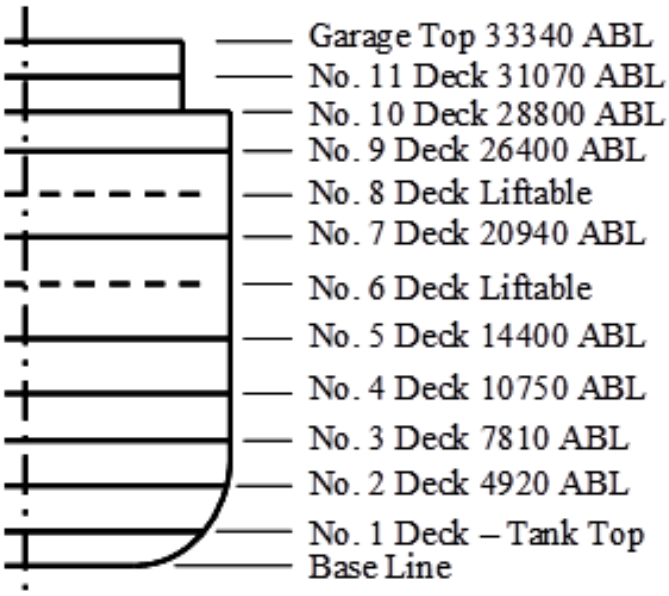


図 3.30 自動車運搬船実船の横断面概略図

3.7.2 解析の概要

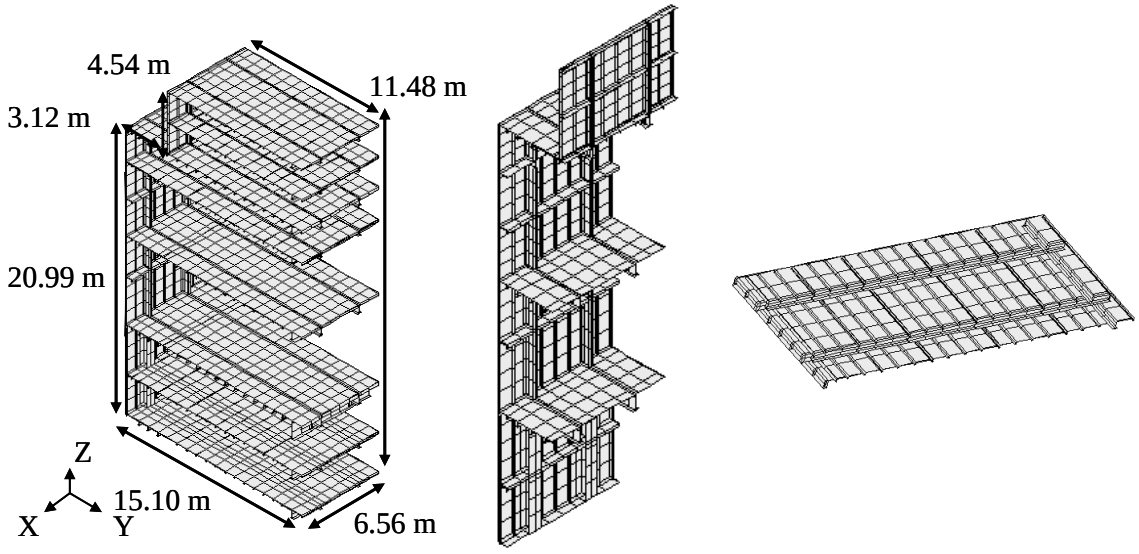
カーデッキを船側ブロックに溶接する際の溶接による収縮でそのカーデッキには引張りの応力が発生し、釣合いとして既に溶接されているカーデッキに圧縮の応力が新たに発生する。厚板カーデッキの溶接は入熱量が大きく、大きな引張りの力が生じる。これに対して、薄板カーデッキの剛性は厚板カーデッキのものより小さく、釣合いで加わる圧縮の力により大きな圧縮の応力が発生する。また、薄板カーデッキのスキンプレートの座屈荷重は小さく、圧縮の応力により座屈および座屈変形が発生しやすい。この節では、固有ひずみを用いてカーデッキの搭載中に薄板カーデッキに発生する応力の予測、さらに搭載順序が薄板カーデッキに発生する応力に与える影響について述べる。

デッキブロック搭載において発生するデッキパネルの座屈変形を検討するため図 3.31 に示されるように船体中央部のトランス材 2 区画分に対応する 6.56m

を解析の対象とした。この船では 3 番デッキより下の構造は、3 次元構造となっているため、これより上の 2 次元的構造を有するデッキと比べて剛性が非常に大きいので剛体とみなしこれより上部の構造についてモデル化を行った。具体的にはリフタブルデッキである 2、8 番デッキを除いて 3、4、5、7、9、10、11 番デッキおよび Garage Top がモデル化されている。3 番デッキの溶接は既に完了しているとして、それより上部のデッキについて以下の部分の溶接を考慮する。

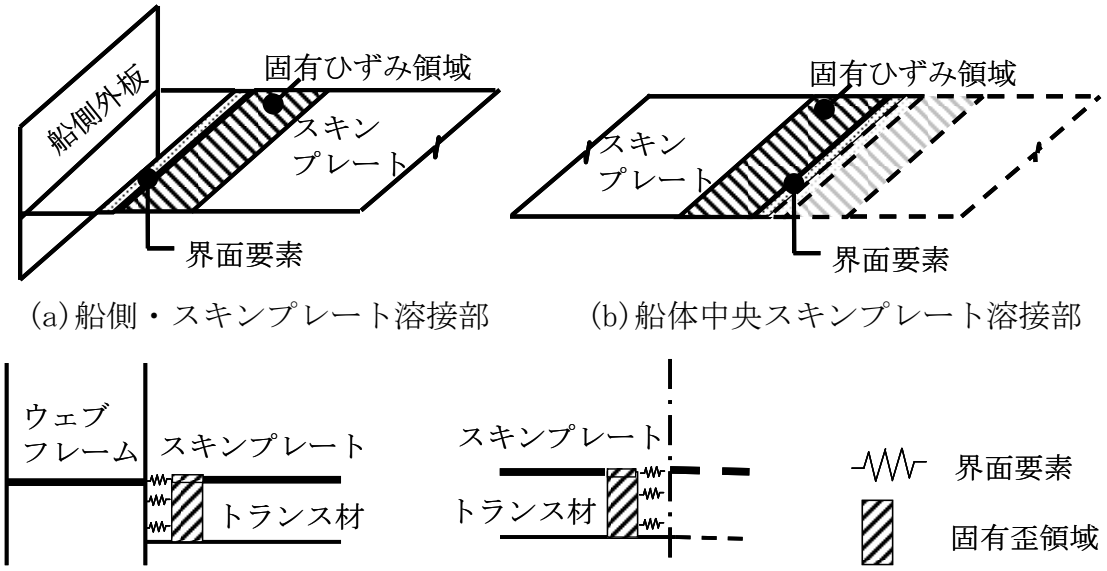
① 船側でのスキンプレートと船側外板に溶接された水平部材との溶接、およびトランス材とウェブフレームとの溶接
② 船体中央でのスキンプレート同士とトランス材同士の溶接
③ 前後端でのスキンプレートと隣のブロックとの溶接
④ 薄板カーデッキの連続防撓板同士の溶接(薄板車両甲板の場合のみカーデッキの組立時に溶接される)

なお、ここでの解析では固有変位ではなくこれと等価な固有ひずみを用いた固有ひずみ法を用い、船側および船体中央での固有ひずみ領域と界面要素の配置を、スキンプレートに関しては図 3.32(a)、(b)に、トランス材に関しては(c)、(d)に示す。



(a)全体図　　(b)船側の構造　　(c) 9 番デッキの構造

図 3.31 船体中央部横断面の有限要素モデル



(a)船側・スキンプレート溶接部　　(b)船体中央スキンプレート溶接部

(c)船側・トランス材溶接部　　(d)船体中央トランス材溶接部

図 3.32 固有ひずみ領域と界面要素の配置

固有ひずみ法では溶接による固有変形を初期ひずみとして固有ひずみ領域に与えることで変形を予測する。部材間の関係の変化は、界面要素の荷重-変位関係を変更することで表現した。仮付けおよび溶接のされていないカーデッキは物理的に自由である。また、付き合わせ溶接では開先のギャップが大きい場合には肉盛した後に溶接が行われるので解析では過大なギャップをジャッキなどで閉じるギャップ矯正を行っていない。溶接完了後はギャップが変化しないように界面要素の剛性を大きく設定した。また、それぞれの溶接の継手に対して固有ひずみ領域に表 3.7 の固有変形を初期ひずみとして加え、搭載順序を考慮した弾性溶接解析を行った。なお固有変形は実際の溶接条件を用いて溶接継手の溶接変形を熱弾塑性解析することにより算出した。

ここでは二種類の搭載順序の比較を行っている。一つは内海造船において現在行われているのと同じ搭載順序である。もう一つは、厚板カーデッキの搭載時に薄板カーデッキに圧縮の応力が加わるのを防ぐために、板厚の厚いカーデッキから先に搭載を行う方法である。低い位置にある薄板カーデッキは、船体に搭載して仮付けのみを行い、厚板カーデッキを先に溶接した後に、本溶接を実施して船体に接合すると想定した。表 3.8 は搭載順序を具体的に示したものであり、各組立順序の番号に従って、各デッキのデッキプレート、トランス材、船側外板、ウェブフレームなどの溶接が実施される。

表 3.7 各デッキに発生する固有ひずみ

デッキ	縦収縮 (mm)	横収縮 (mm)	縦曲がり (rad)	横曲がり (rad)
No.9 No.11 Garage Top	-0.00122	-0.00748	2.46E-08	-1.70E-08
No.4	-0.0012	-0.00678	1.31E-09	-4.60E-08
No.10	-0.00142	-0.00939	1.36E-08	-5.40E-08
No.7	-0.00131	-0.00865	7.93E-09	-2.80E-08
No.5	-0.00143	-0.00817	1.40E-08	-1.20E-07

表 3.8 考慮した組立順序

		現行の順序	厚いデッキから
No.4	デッキプレート	1	1(仮付け)⇒11
	トランス材	5	12
No.5	デッキプレート	2	2
	トランス材	7(仮付け)⇒11	3
No.5 - No.7船側	船側外板	3(仮付け)⇒8	4
	ウェブフレーム	9	5
No.7	デッキプレート	4	6
	トランス材	18	7
No.9	デッキプレート	6	8(仮付け)⇒13
	トランス材	19	14
No.10	デッキプレート	10	9
	トランス材	21	10
No.10- No.11船側	船側外板	13	15
	ウェブフレーム	14	16
No.11	デッキプレート	12	19
	トランス材	22	20
No.11-Garage Top船側	船側外板	15	17
	ウェブフレーム	16	18
Garage Top	デッキプレート	17	21
	トランス材	20	22

3.7.3 解析結果

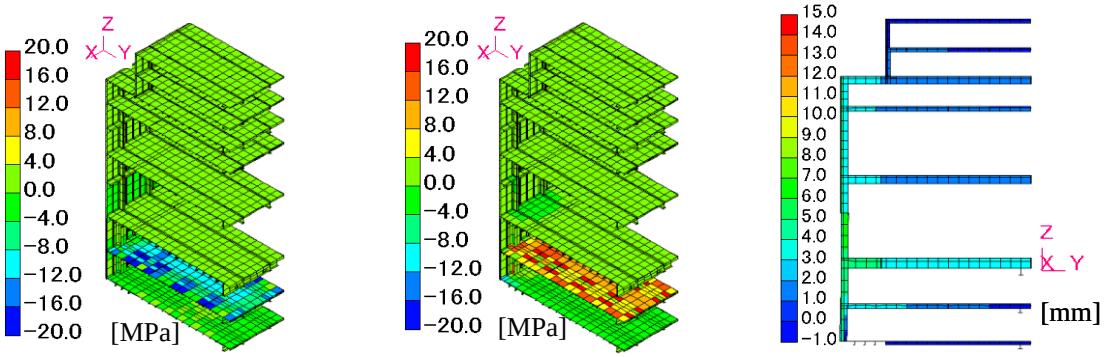
①倒れ込みの影響

図 3.32 から図 3.34 は現行の順序で搭載したときの、薄板カーデッキである No.4デッキと No.9デッキの溶接後とすべてのカーデッキの搭載が終了した後の

残留応力分布と横断面の変形を示したものである。No.4 デッキのスキンプレートの溶接後を示した図 3.32 では、X 方向には圧縮応力が発生しているが、Y 方向には引張りの応力が発生している。これは、No.3 デッキ以下の剛性が高いため船側外板とウェブフレームが強く拘束されており、No.4 番デッキの溶接の際の溶接部近傍の収縮が船側外板を内側に引き込むことが出来ないため、スキンプレートが引張られたからである。その後トランス材の溶接を行うと、デッキパネルの収縮を妨げていたトランス材が収縮するために、デッキパネルの引張りの応力が減少する。一方、No.3 デッキから離れている No.9 デッキでは船側外板を内側に引込み易く、図 3.33 に示されるようにスキンプレート全体に渡る引張応力は発生しなかった。周囲のカーデッキも船側外板を内側に倒れさせ易いため、他のカーデッキの溶接により発生した引張り力の釣合いとして圧縮の応力が発生した。

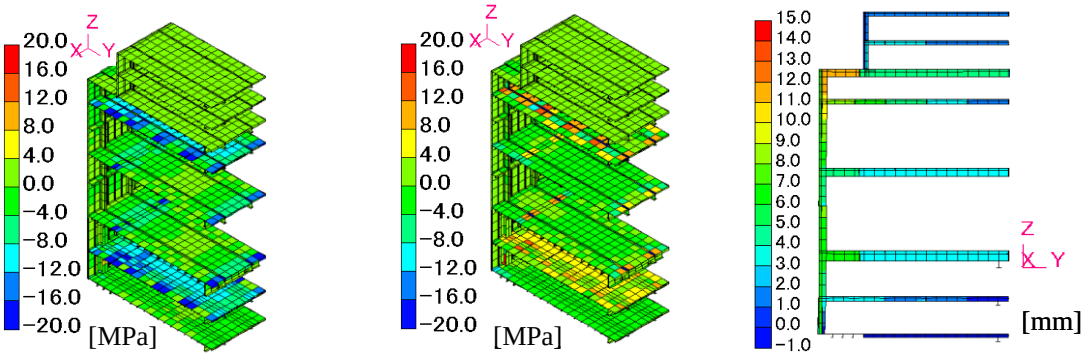
図 3.35 から図 3.37 は厚板カーデッキから組み立てたときの、すべての組立が終了した後の残留応力分布と横断面の変形である。4 番デッキに発生する引張り応力が大きくなり、 9 番デッキにも引張りの応力が発生した。これは、先に厚板カーデッキを溶接することにより船側外板が厚板甲板によって強く支持され、薄板カーデッキの溶接の際のスキンプレートの収縮を妨げるからである。船側外板が早い段階で強く支持されることにより、船側外板の倒れ込みも小さくなる。

2 つの組立順序の、4 番デッキおよび 9 番デッキに発生する応力および船側外板の倒れこみを表 3.9 にまとめる。



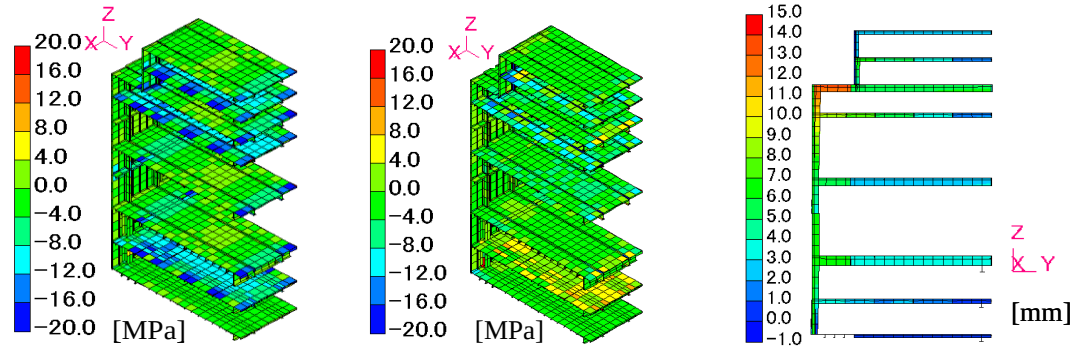
(a)X 方向垂直応力　　(b)Y 方向垂直応力　　(c)Y 方向変位

図 3.32 現行の組立順序ステップ 1　No.4 デッキスキンプレート溶接後
応力分布と横断面の変形(変形 1 倍、(c)のみ Y 方向の変形を 20 倍)



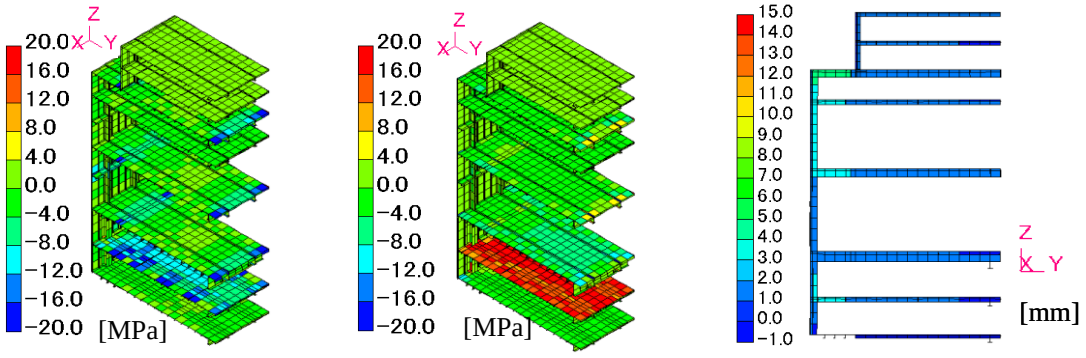
(a)X 方向垂直応力　　(b)Y 方向垂直応力　　(c)Y 方向変位

図 3.33 現行の組立順序ステップ 6 （No.9 デッキスキンプレート溶接後）
応力分布と横断面の変形(変形 1 倍、(c)のみ Y 方向の変形を 20 倍)



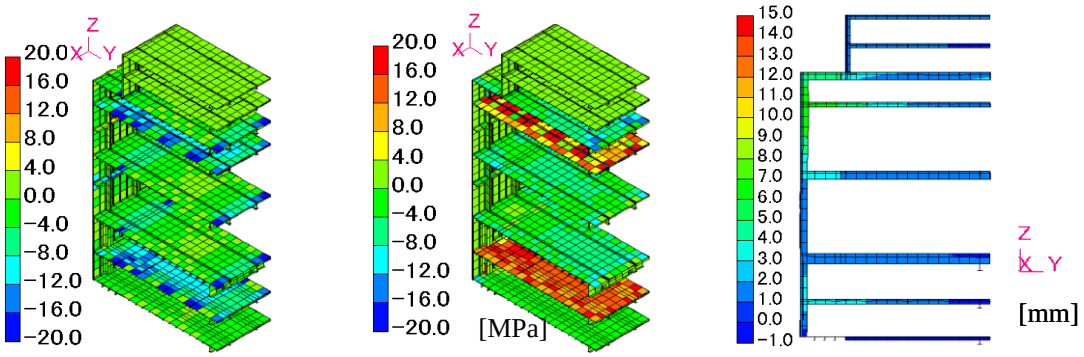
(a)X 方向垂直応力　　(b)Y 方向垂直応力　　(c)Y 方向変位

図 3.34 現行の組立順序で組立　組立後の応力分布と横断面の変形
(変形 1 倍、(c)のみ Y 方向の変形を 20 倍)



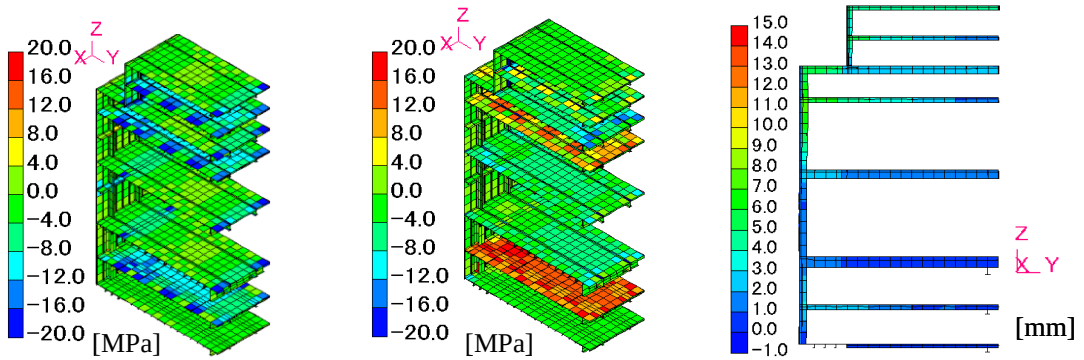
(a)X 方向垂直応力　　(b)Y 方向垂直応力　　(c)Y 方向変位

図 3.35 厚板カーデッキから溶接した場合の 4 番デッキスキンプレート溶接後
の応力分布と横断面の変形(変形 1 倍、(c)のみ Y 方向の変形を 20 倍)



(a)X 方向垂直応力　　(b)Y 方向垂直応力　　(c)Y 方向変位

図 3.36 厚板カーデッキから溶接した場合の No.9 デッキスキンプレート溶接後の応力分布と横断面の変形(変形 1 倍、(c)のみ Y 方向の変形を 20 倍)



(a)X 方向垂直応力　　(b)Y 方向垂直応力　　(c)Y 方向変位

図 3.37 厚板カーデッキから溶接した場合の搭載完了後における応力分布と横断面の変形(変形 1 倍、(c)のみ Y 方向の変形を 20 倍)

表 3.9　各組立順序における薄板カーデッキに発生する応力と船側外板の倒れ込み量の比較

	現行の組立順序		厚板カーデッキから	
発生した応力[MPa]	X 方向	Y 方向	X 方向	Y 方向
4 番デッキ	-13～-7	-4～6	-13～-7	14～16
9 番デッキ	-13～-8	-5～2	-13～-8	3～13
船側外板の倒れこみ[mm]	13.5		7.4	

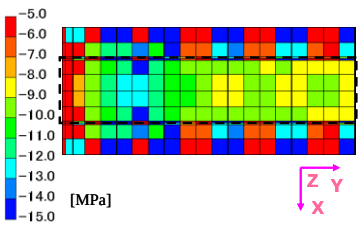
②船側外板倒れ込みがカーデッキへ与える影響

前節までの検討により、現行の組立順序ではカーデッキの搭載過程で薄板カ

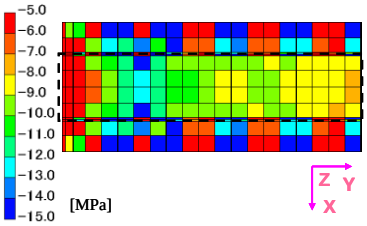
ーデッキに圧縮の応力が発生すること、これに対して厚板カーデッキから搭載すると薄板カーデッキに引張の応力を発生させることが出来ることが分かった。

現行の搭載順序で、カーデッキの搭載過程で 9 番デッキに発生する応力は図 3.38 のようになる。なお、実船におけるカーデッキは図 3.40 に示されるようにトランス 4 本、ロンジ 3 本から構成されているが数値実験の能力の制限のため搭載解析では、トランス 2 本、ロンジ 2 本の構造として解析を行った。そのため、図 3.38、図 3.39 の枠内のトランス材に挟まれている部分に発生している応力のうち最も大きな圧縮の応力を、カーデッキの搭載時に薄板カーデッキに発生する圧縮の応力とすれば、カーデッキに発生しうる最も大きな面外撓みの増加を評価できる。現行の搭載順序で 9 番デッキの連続防撓板に加わる応力は、X 方向が-12MPa、Y 方向応力が-4.5MPa であり、これを図 3.40 のように、スキンプレートに作用する荷重として、連続防撓板の組立時の溶接変形と残留応力を保った連続防撓板の四辺に加えた。境界条件は図 12 と同一である。

また、厚板カーデッキから搭載した時に 9 番デッキに発生する応力は図 3.39 のようになり、X 方向に応力が-12MPa、Y 方向に応力が-4.5MPa であり、これらに相当する荷重を四辺に加えた。

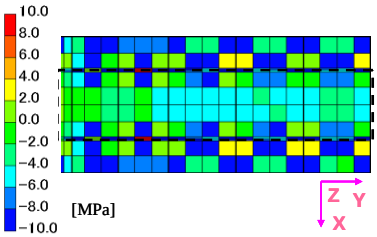


(a) X 方向垂直応力

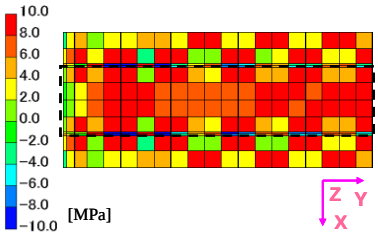


(b) Y 方向垂直応力

図 3.38 現行の搭載順序でカーデッキを組み立てた時に
9 番デッキに発生する応力



(a) X 方向垂直応力



(b) Y 方向垂直応力

図 3.39 厚板カーデッキからカーデッキを搭載した時に
9 番デッキに発生する応力

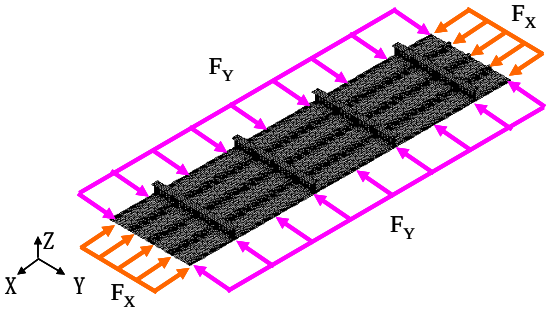
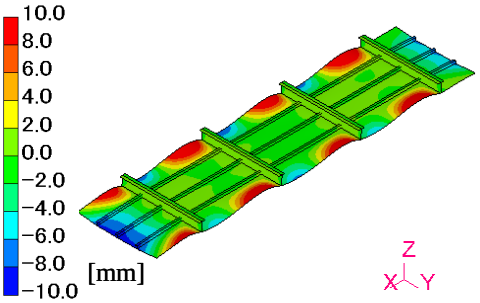
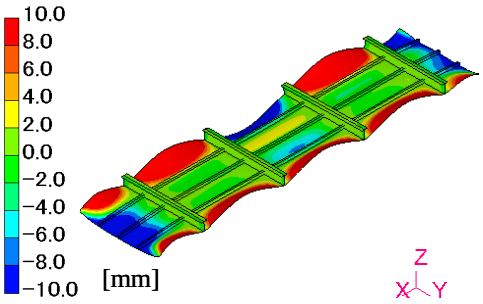


図 3.40 連続防撓板に加えた荷重

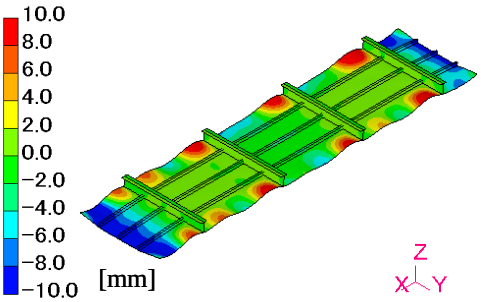
両側連続溶接・片側連続溶接・並列断続溶接・千鳥溶接のそれぞれの溶接を用いて連続防撓板を組み立てた後、現行の搭載順序と厚板カーデッキから搭載した時の面外撓みの変化を図 3.41 から図 3.44 に示す。現行の搭載順序では、連続防撓板の組立時に断続溶接を使用して組立前の面外撓みを低減した場合でも、組立後に面外撓みが大きく増加していることが分かる。一方、断続溶接を使用し厚板カーデッキから搭載すると、面外撓みは増加せず連続防撓板組立時に発生したものも中央部ではほとんど無くなる。また、規則により連続溶接を使用しなければならない部分についても、厚板カーデッキから組み立てれば最終的な撓みを低減することが出来る。



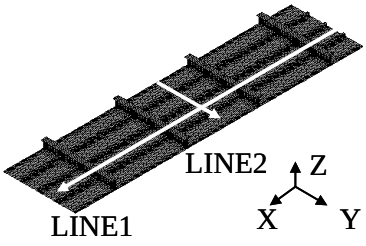
(a)組立



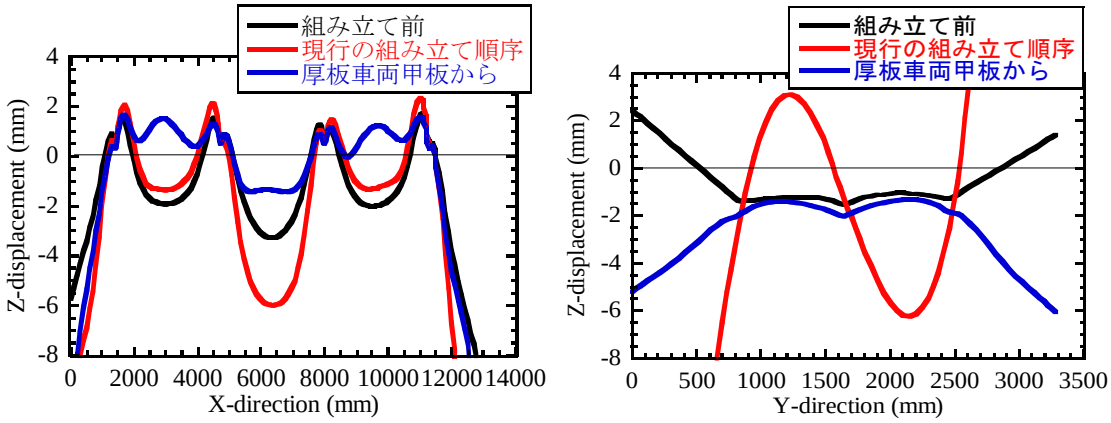
(b)現行の順序で組立



(c)厚板カーデッキから組立

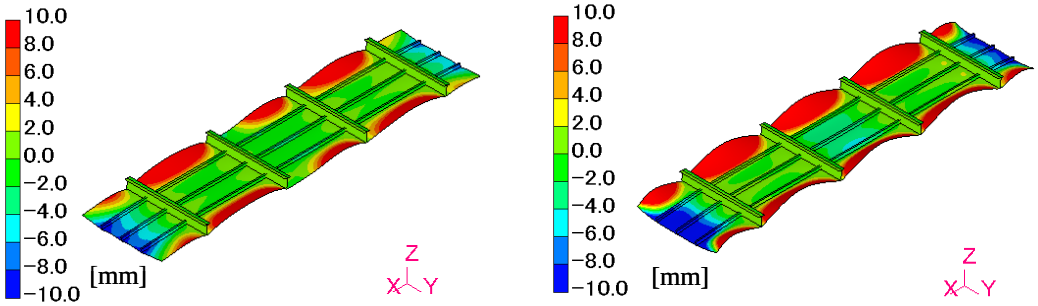


(d)LINE 1 と LINE 2 の位置

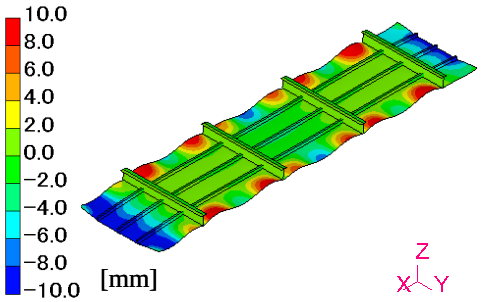


(e) LINE 1　　(f) LINE 2

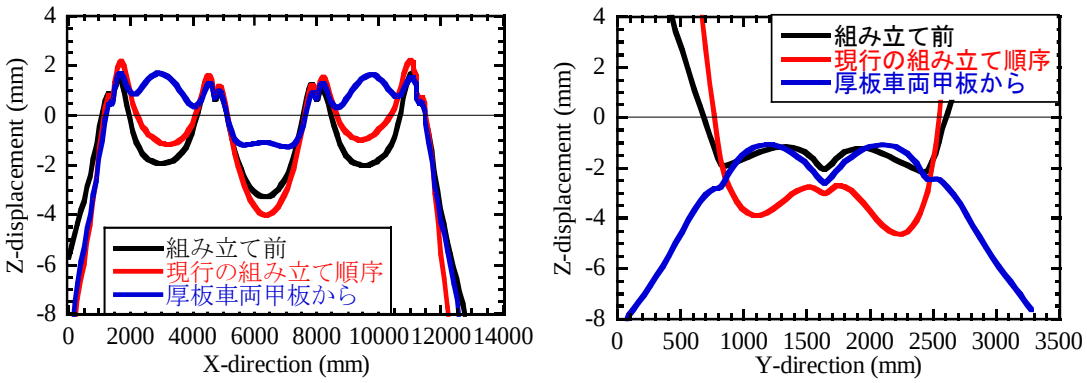
図 3.41 カーデッキの組立順序が薄板カーデッキの
連続防撓板の面外撓みに与える影響
両側連続溶接・変形 10 倍



(a)組立前　　(b) 現行の順序で組立

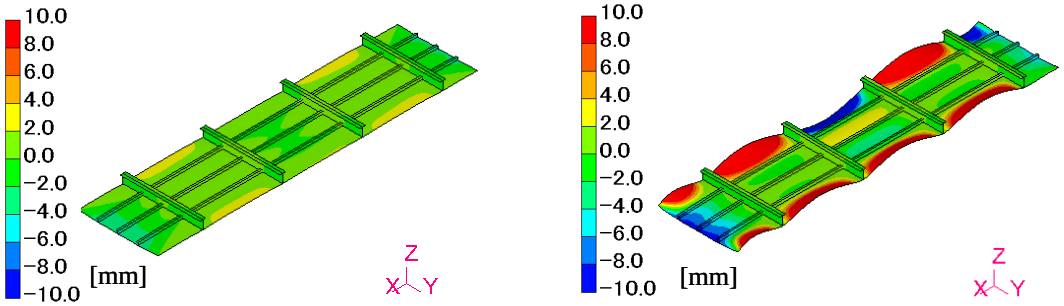


(c)厚板カーデッキから組立

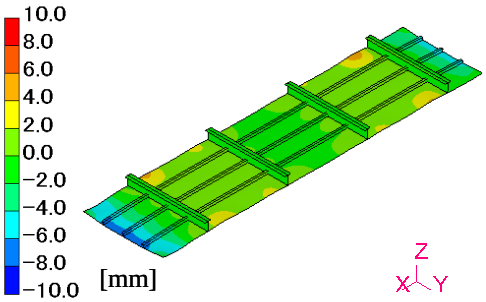


(d)　LINE 1　　(e) LINE 2

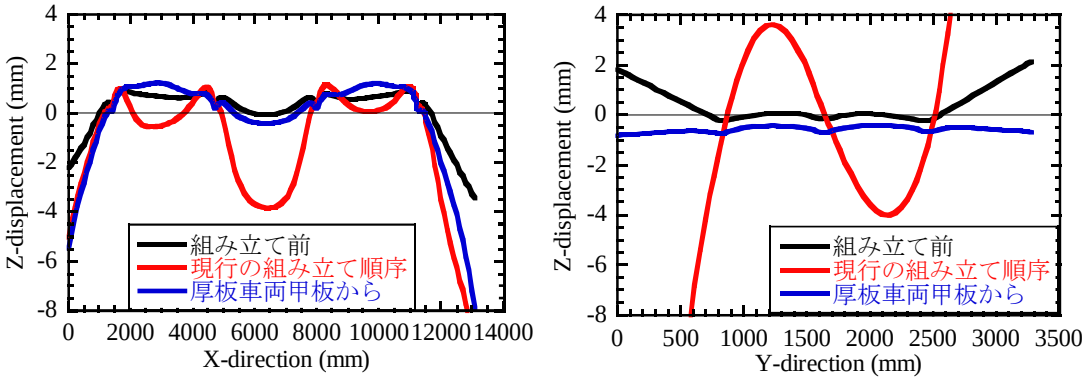
図 3.42 カーデッキの組立順序が薄板カーデッキの
連続防撓板の面外撓みに与える影響
片側連続溶接・変形 10 倍



(a)組立前　　(b) 現行の順序で組立

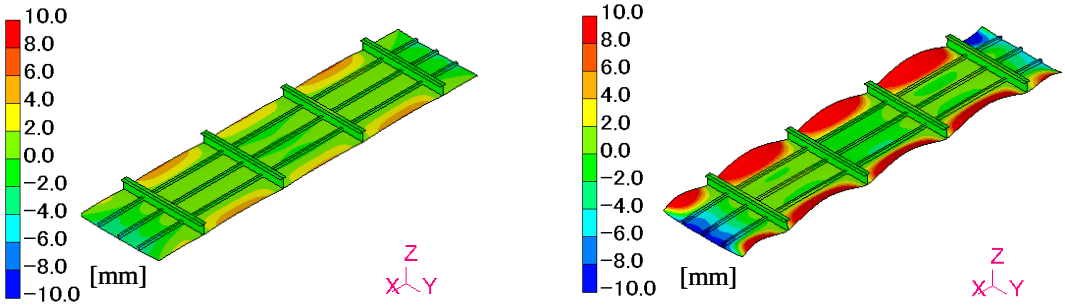


(c)厚板カーデッキから組立

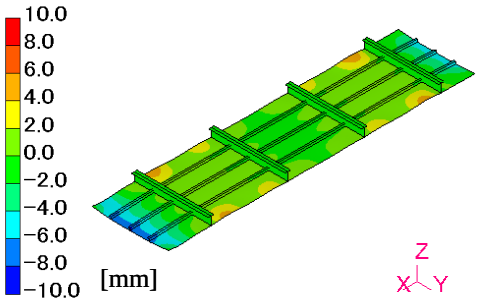


(d)LINE 1　　(e) LINE 2

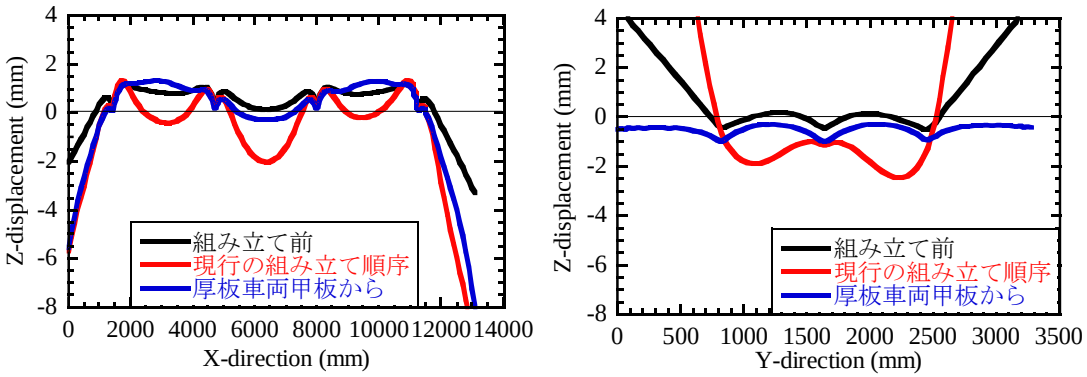
図 3.43 カーデッキの組立順序が薄板カーデッキの
連続防撓板の面外撓みに与える影響
並列断続溶接・変形 10 倍



(a)組立前　　(b) 現行の順序で組立



(c)厚板カーデッキから組立



(d)LINE 1　　(e) LINE 2

図 3.44 カーデッキの組立順序が薄板カーデッキの
連続防撓板の面外撓みに与える影響
千鳥溶接・変形 10 倍

3.7.4 得られた知見および実船への適用

本節ではカーデッキ搭載の歪発生への影響について数値解析を行った結果、以下の知見が得られた。

カーデッキを船体に搭載する際に、先に搭載される薄板カーデッキは仮付けのみを行っておき、板厚が厚いカーデッキから溶接を行った後に薄板カーデッキを溶接すれば、カーデッキ組立時に薄板カーデッキに新たに発生する応力が圧縮から引張りへと変化する。

また、カーデッキ組立時に新たに発生する応力が圧縮から引張りへと変化することにより、薄板カーデッキのスキンプレートのカーデッキ組立時の面外撓みの増加を防止し低減することが出来る。

解析結果から船側ブロックがカーデッキの搭載により約 14mm 倒れ込むことが分ったので、実船では 20mm 正規寸法より幅を広げて船側外板の位置決めを行った。また、船側ブロックの倒れ込みによりカーデッキ発生する応力の観点からは、厚板カーデッキより搭載する方が好ましいことが解析から明らかとなったが、実船では工程面、安全面の理由から試行できなかった。

3.8 まとめ

本章では自動車運搬船を建造するに当たって以下の事を検討し、建造法の最適化を図った。

①溶接変形における入熱の影響

3.2 項では溶接入熱にどのような収縮が発生し、それがどのような変形を起こすかという溶接におけるメカニズムの分析を行った。溶接変形は溶接入熱に比例して大きくなるので、溶接入熱を軽減することが、溶接変形を軽減することに繋がる。

②溶接法が歪発生に与える影響

3.2 項で溶接変形のメカニズムを理解したので、入熱を下げることのできる 4 つの溶接法について、防撓板を対象に検討を行った。その結果、連続溶接の代わりに，入熱量が小さい並列断続溶接や千鳥溶接などの断続溶接を採用することが歪低減に最も効果的であることが明らかとなった。

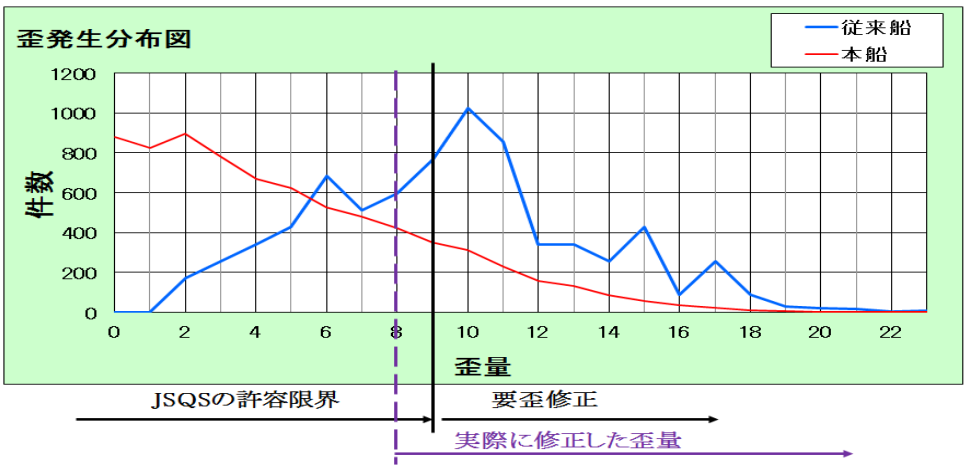
③カーデッキ組立時の溶接変形における溶接順序の影響

3.4 項では実際にカーデッキを組み立てる際に大きく下方へ撓む変形を防止するために検討を行った。組立作業を洗い出し、4 つの組立順序を検討した。しかし、薄板カーデッキの組立時の変形は免れることは出来ないので、逆変形を与えて組み立てる事が最適であることが分った。これにより、従来の組立法では実施できなかったブロック段階での歪修正も可能となった。

④船台でのカーデッキ搭載時の影響

3.5 項ではカーデッキを搭載後にも歪が発生する要因があることが分った。カーデッキを溶接していく際に船側ブロックが引付けられ、これが原因となって薄板カーデッキに圧縮応力が発生する。これを軽減させるためには厚板カーデッキから溶接を行う事が最適である事が分った。

以上の研究を実際の自動車運搬船建造法に織り込むことによる効果を評価するために、実船での搭載後のカーデッキの歪を約 10000 箇所計測した。計測した結果を図 3.45 に示す。図から分るように撓みが修正許容値の 9 ㎜ を超えている発生件数が従来船と比較すると約 50%となった。また、歪修正工数も従来船と比較すると 50%以上低減できた。さらに、歪み発生のメカニズムも理解できたので、現場主任も定量的な指示が可能となり、熟練作業者しかできなかった歪修正を若手作業者でも施工することが可能となった。また、波及効果として歪修正工数も下がったので工事の早期完了も可能となった。



・実測点数
約10000箇所／1隻

JSQSの許容限界を超えている比率	従来船	49%
	本船	14%
実際に修正した歪量の比率実績	従来船	68%
	本船	24%

図 3. 45 実船での歪発生量計測における従来船との比較

参考文献

(1) 佐藤邦彦，寺崎俊夫:構造用材料の溶接変形に及ぼす諸条件の影響』溶接学会誌，1976 年 第 4 号（1976），pp. 302-308.
(2) 寺崎俊夫，北村貴典，白戸田巌，浜島志伸:『隅肉T継ぎ手に生じる縦収縮・横曲がり変形に関する研究、溶接学会論文集，第 21 巻 第 1 号（2003），pp. 81-86.
(3) 西川弘泰，芹澤久，村川英一：大規模溶接シミュレーション手法の開発，日本船舶海洋工学会論文集, 2 号（2005), pp. 379-385.
(4) 矢尾哲也:船体構造の座屈・塑性崩壊強度、日本海事協会本部，（1995），pp. 25-36.
(5) 上田幸雄，Sherif M.H. Rashed，白点基:矩形版の弾性座屈相関関係式、日本造船学会論文集，第 157 号（1985），pp. 424-438.
(6) American Bureau of Shipping：ABS RULES FOR BUILDING AND CLASSING STEEL VESSELS 2006, Part 3, Chapter 2 Hull Structures and Arrangements, Section 19 Weld Design, (2006), pp. 223-230.
(7) Timoshenko SP, and Gere JM：Theory of Elastic Stability』, McGraw-Hill 1961, p. 357.
(8) Yusuke Tajima, Sherif Rashed, Yasuhisa Okumoto, Yasuo Katayama,

Hidekazu Murakawa：Prediction of Welding Distortion and Panel Buckling of Car Carrier Decks using Database Generated by FEA, Transactions of JWRI, 36-1 (2007), pp. 65-71.
(9) 村川英一, 羅宇, 上田幸雄：固有ひずみを用いた弾性計算による溶接変形及び残留応力の計算 –(第一報)溶接における固有ひずみの生成機構-, 溶接学会誌, 180 (1996), pp. 739-751.
(10)村川英一, 羅宇, 上田幸雄：固有ひずみを用いた弾性計算による溶接変形及び残留応力の計算 –(第二報)多重履歴の元手の変形と残留応力-, 溶接学会誌, 182 (1997) , pp. 783-793.
(11)Wei Liang, Dean Deng, Shinji Sone, Hidekazu Murakawa：Prediction of Welding Distortion by Elastic Finite Element Analysis Using Inherent Deformation Estimated Through Inverse Analysis, Transactions of IIW-1706-05, Welding in the world, 49-11/12 (2005), pp. 30-39.
(12)Dean Deng, Hisashi Serizawa, Hidekazu Murakawa：FEM Simulation of Welding Distortion in Thin Curved Structures during Assembly Considering Gap and Misalignment, Transactions of JWRI, 31-2 (2002), pp. 219-226
(13)Dean Deng, Hidekazu Murakawa, Wei Liang：Numerical simulation of welding distortion in large structure, Computer methods in applied mechanics and engineering, 196 (2007), pp. 4613-4627.
(14)Yusuke Tajima, Sherif Rashed, Yasuhisa Okumoto, Shigeo Sasaki, Hidekazu Murakawa：Effect of deck welding sequence on panel buckling and welding deformation during block assembly of car carriers, Proceeding of TEAM 2008 (2008), pp.437- 445.

第 4 章 部材位置決めの制御による溶接変形の軽減

4.1 緒言

局部収縮によるブロックの溶接変形を吸収するために端部伸ばしや延べ尺などが設定されているがそれらの設定が適切でない、あるいはバラツキがある場合にはサブ組立や、中組立の寸法に誤差が生じる。このような寸法誤差を有する小組立を溶接して中組立を製作する際、またいくつかの中組立を溶接して大組ブロックを製作する際には部材の重なりが生じたり、ギャップやズレが発生する。部材の重なりに対しては切り合わせを行い、ギャップやズレに対しては仮付の前にジャッキ等の力を加えて溶接が行いやすい条件に整える。このような施工では、部材が本来あるべき位置から互いにずれた状態で位置決めされ溶接されることになるので、溶接条件が守られたとしても、位置決め誤差のために小組立や中組立の段階で大きな誤差が発生する可能性がある。また、この位置決めの誤差は小組立、中組立と組立の工程が進むのにしたがって蓄積される。したがってブロックの寸法精度を確保するためには、溶接変形を軽減させることに加えて、位置決めの際に生じる誤差を意識的に管理する必要がある[1-6]。そこで本章では次の 2 点に注目して部材位置決めの有るべき方向性を検討した。

① 部材位置決めにおけるキーポイントの発見

② 溶接変形を最小にする位置決めの方法

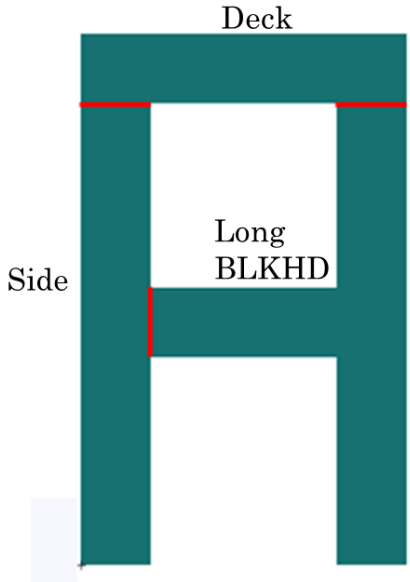
具体的な対策法としては下流工程での溶接変形を見込んだ逆変形がよく知られている。これは変形が予め予測できた場合に溶接変形を低減、吸収させるために採用される方法である。本章では逆変形に注目し、理想的な位置決め法について検討を行った。以下ではこの逆変形の考え方を単純な 2 次元構造を用いて説明する。

4.2 位置決め制御の概念

位置決めの際に、ギャップやズレをジャッキなどの力を借りて矯正することは構造物に変形のみならず応力を導入してしまう。目に見えない応力は管理することができないので、位置決めは構造物に応力を新しく導入しない剛体変形のみで行うという方針を採用した。さらに剛体変形を拘束するための自由度を

キー自由度と定義し、合理的かつ単純な逆変形の考え方を以下の枠組のうえに構築した。

① 位置決め時は剛体変位のみを考える
② 組立段階の小組立、中組立、総組立にはそれぞれ剛体変位を拘束するための６個の変位が有りこれをキー自由度と呼ぶ
③ キー自由度は小組立、中組立、総組立の段階の寸法精度に対して影響の大きいものから選ぶ
④ キー自由度は、拘束自由度と調整可能自由度に分類される
⑤ キー自由度は、総組立、中組立、小組立と上位から下位に順番に決めて行く
⑥ 位置決め時には上位の溶接変形計算で求まった変形の符号を入れ替えたものを逆変形として調節可能自由度に与える
⑦ 上記の逆変形を適用すると全てのキー自由度が正規の位置に収まる
⑧ 他の自由度は剛体変位により従属的に動くので、各ステージにおける部品段階で計測・修正を行い精度を確保する



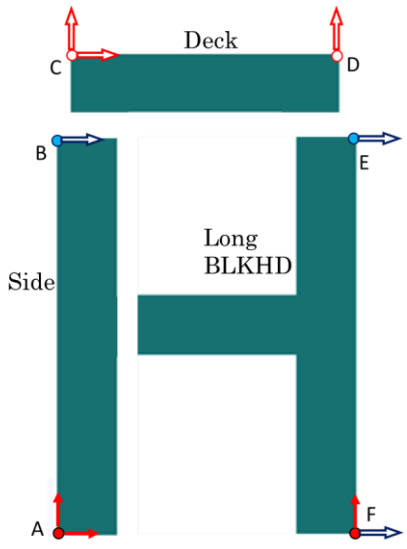
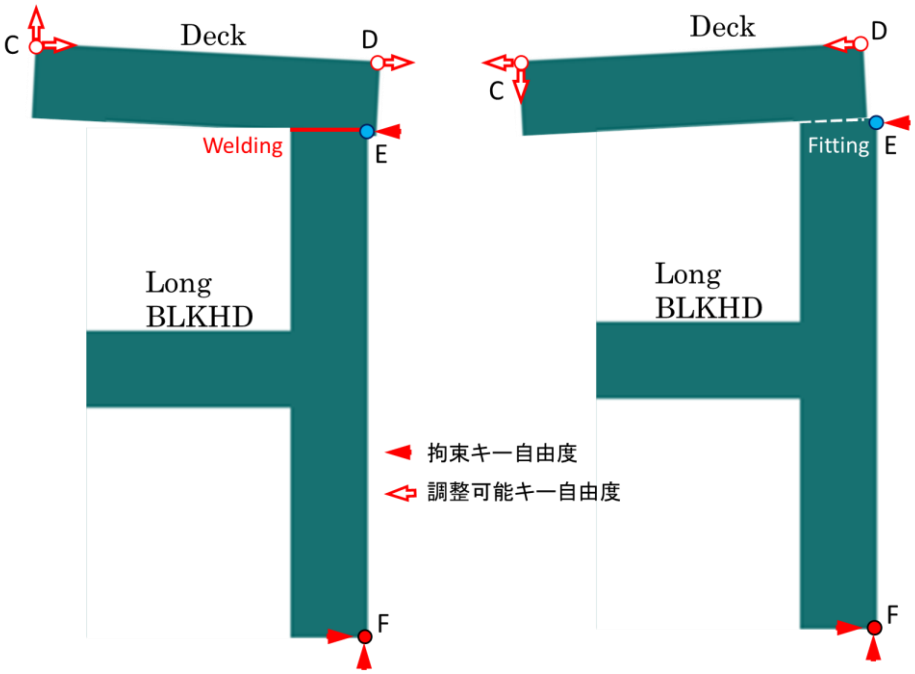


図 4.1 トランスリングの２次元モデル　図 4.2 中組立のキー自由度

図 4.1 はトランスリングの２次元モデルである。このトランスリングは図 4.2 に示されるように Side、Deck、Long BLKHD の３個の中組立から構成されるそれぞれの中組立の剛体変位を止めるためにはそれぞれ点（A、B）、（C、D）、（E、F）

において２次元問題なので３成分の変位を拘束する必要がある。これらの剛体変位を止めるのに必要な自由度をキー自由度と呼ぶ。トランスリングを製作するために図 4.2 に示されるようにまず Deck、Long BLKHD の２個の中組立を溶接してサブブロックを製作する。図 4.2(a)はサブブロックを組立てた時の溶接変形を表す。図中の赤い線は溶接継手であり、点 E および点 F に付けられた三角はサブブロックの剛体変位を拘束するためのキー自由度である。一方、点 C および点 D は図 4.2 に示されるように Deck 中組立の剛体変位に対応したキー自由度である。図 4.3(a)に示されたように溶接により点 C、点 D はキー自由度方向に移動するため設計形状からズレが生じる。もし、その変形量が予め予測できていれば、図 4.3(b)に示した位置決めにおいて予測された変形の符号を逆にした量だけ調節可能キー自由度に逆変形を与える。この逆変形は溶接変形により打ち消されるので、溶接後のキー自由度は図面位置に収まる。

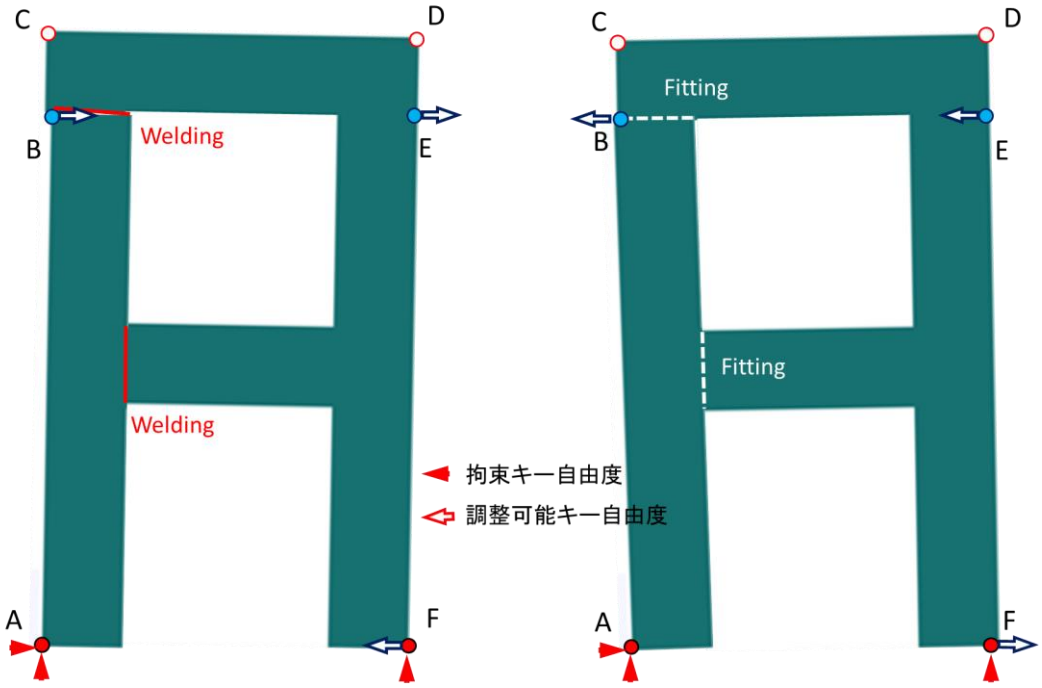


(a) 中組立間の溶接による変形　　(b) 位置決めにおける逆変形

図 4.3 サブブロックの溶接と位置決め

これと同様な逆変形は Side と中組立とサブブロックの溶接にも適用でき、図 4.4(a)のように溶接変形が予め予測できればこの段階での調整可能キー自由度に逆変形を与えるような位置決めをすれば溶接変形をキャンセルすることがで

きる。したがって、このような位置決めを小組立、中組立、大組立と階層的に実施すれば設定した全てのキー自由度の座標は設計座標に収めることができる。



(a) トランスリングの溶接による変形　(b) 位置決めにおける逆変形

図 4.4 トランスリングの溶接と位置決め

しかしキー自由度に設定されなかった点、例えば図 4.5 中に星印で示されたクロスタイの先端の位置の管理は図 4.5 のように距離計測により別途実施する必要がある。ここで提案したキー自由度を使った位置決め法の場合、位置決め時に管理しなければならない自由度がキー自由度として明確に定義されているので、キー自由度以外で管理すべき点の抽出は容易であり数が限定されるので、計測に要する工数が削減できるという効果も期待できる。

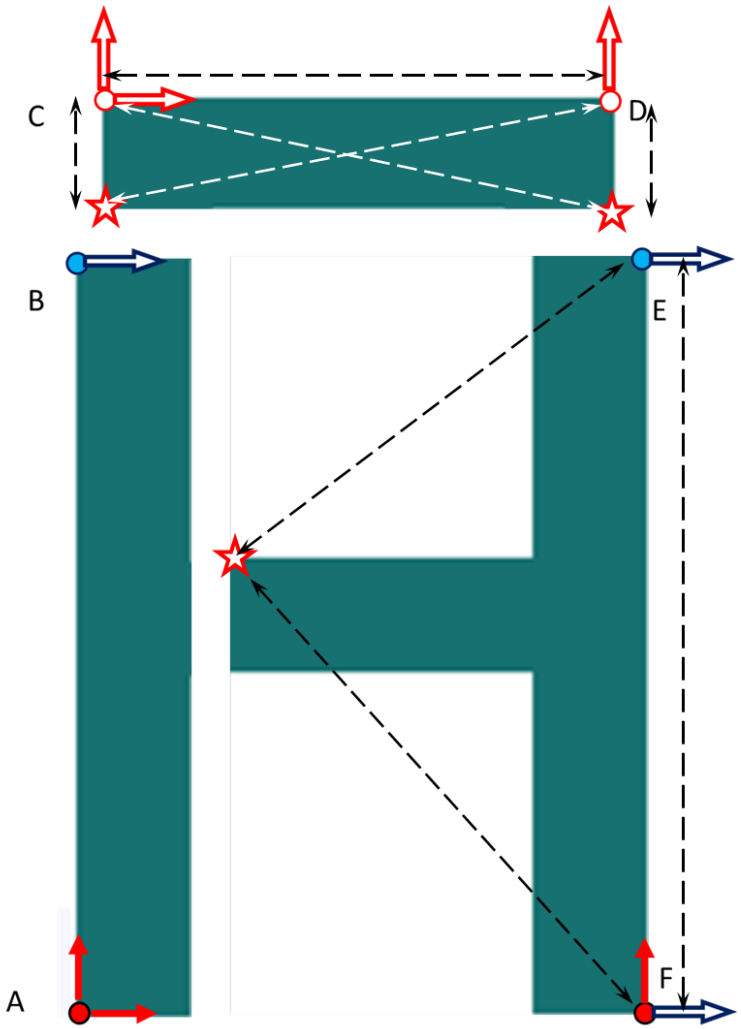


図 4.5 キー自由度以外の点の管理法

4.3 船側立体ブロックの溶接変形

前節では単純な 2 次元トランスリング構造モデルを例に溶接構造物のキー自由度について説明した。実船の立体ブロックでは、位置決めの精度不良や溶接変形により、設計寸法通りのブロックを組立てることが困難である。しかし、船を建造する際に必ず精度保持を行う必要がある箇所が発生する。本節では実船の建造で経験した溶接変形および位置決め時の不具合について述べる。

4.3.1 対象構造

対象とする実船のブロックは図 4.3.1 に示すような船の船側ブロックである。

このブロックの高さは 12.3m、長さは 15.5m、幅は 8.2mである。このブロックでの大きな問題は、内部構造部材が船側中段に設けてあるクロスタイとブロック端部に設けてあるバラストタンクのバルクヘッドのみであり極めて少なく、精度保持が非常に困難である点である。このブロックは搭載時に二重底ブロックと取り合うため、足元の幅を保持する必要がある。また、アッパーデッキにはハッチコーミングが搭載されるため、アッパーデッキのキャンバーの保持も必要である。これらに精度不良が発生すると、搭載後にブロックに対して大がかりなサバキ作業を行う必要があり、場当たり的な対症療法により対処しているのが現状である。また、サバキ作業は工期の大幅な遅れの原因になる。

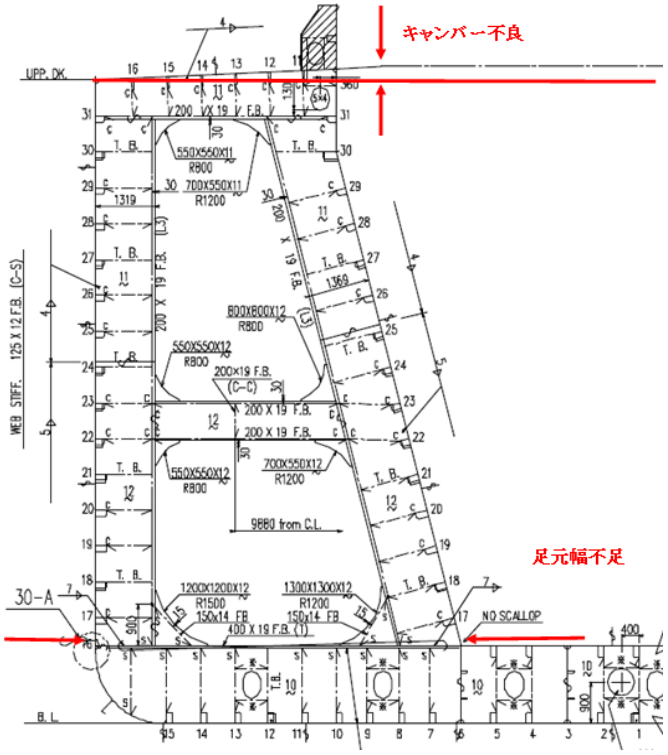


図 4.3.1　船側ブロックの断面図

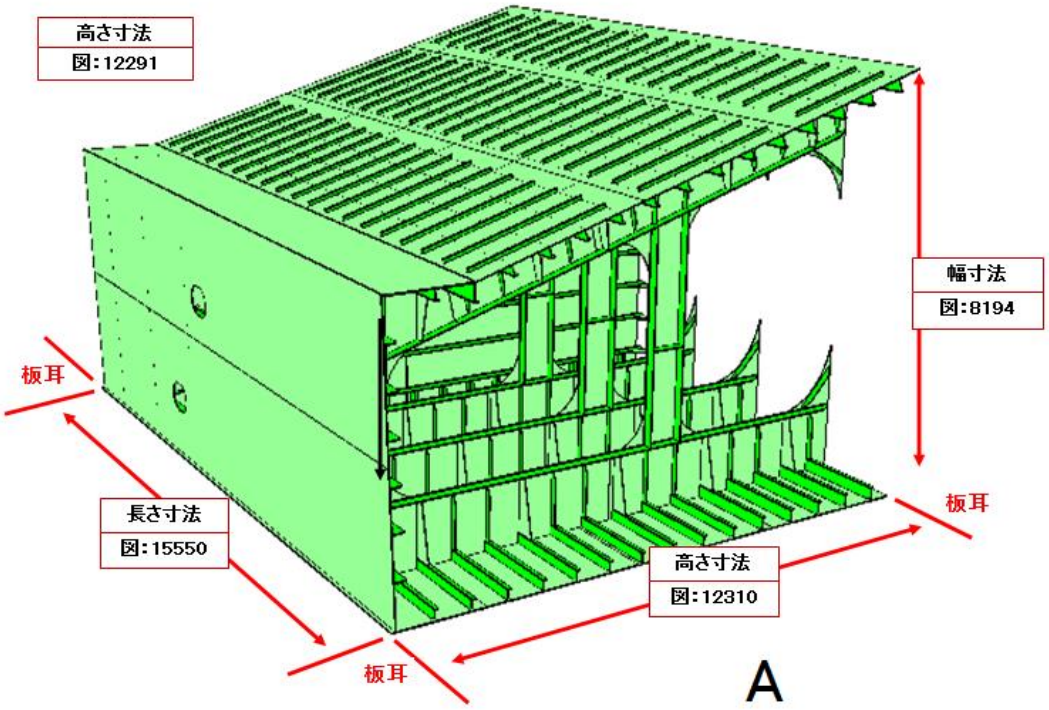


図 4.3.2　船側ブロック立体図（最終組立姿勢）

4.3.2　組立部材

対象ブロックの組立工程は大きく分けて、小組立工程、中組立工程、大組立工程、総組工程の 4 つの組立工程から成立っている。

① 小組立工程

図 4.3.3 に示すようにデッキ、バルクヘッドにロンジ材（アングル）を溶接する工程（平板ブロックの製作)。もうひとつは図に示すウェブフレームのようにフレームにフェースを溶接する工程である。

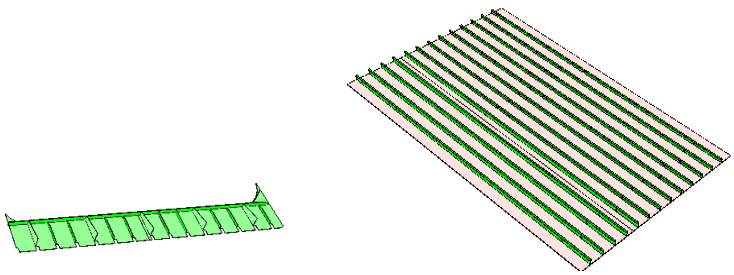


図 4.3.3 小組立工程部材

② 中組立工程

それぞれのロンジ材が溶接されたデッキやバルクヘッドにウェブフレームを溶接する工程である。図 4.3.4 に示すように船側ブロックは外板中組立、アッパーデッキ中組立、ロンジバルクヘッド中組立、バルクヘッド中組立の 4 つの中組立に分けられる。

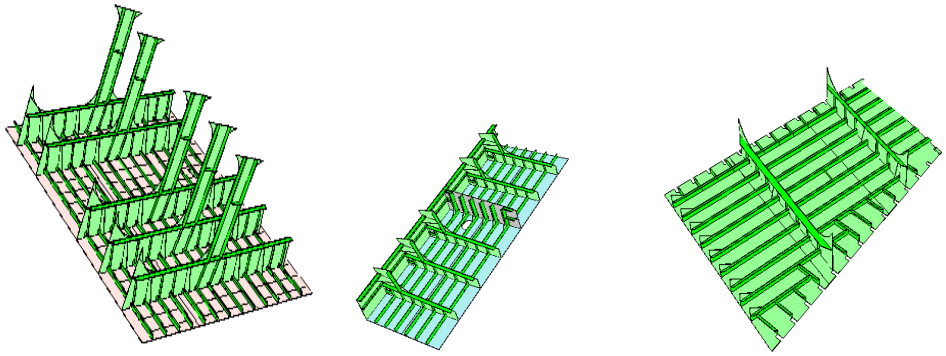


図 4.3.4 中組立工程ブロック

③ 大組立工程

ロンジバルクヘッドベースでアッパーデッキの中組立とロンジバルクヘッド中組立をドッキングさせる工程である。また、クロスタイがウェブフレームの上に溶接される。図 4.3.5 のようにかなり大きなブロックとなり、空中での位置決めが必要となる。

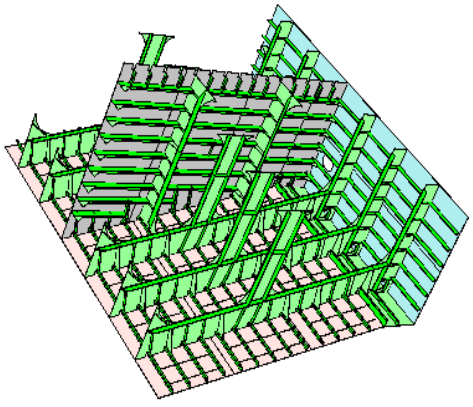


図 4.3.5 大組立ブロック

④総組工程

総組工程は外板ベースで外板中組立に大組立ブロック③を搭載する工程である。この工程では③の構造物を支える部材がクロスタイのみとなり、位置決めが困難な作業となる。

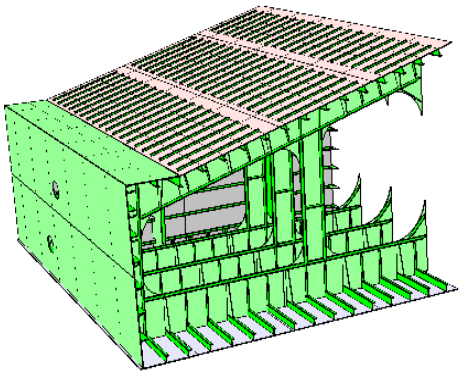


図 4.3.6 総組工程ブロック

4.3.3　現行の組立順序

図 4.3.7 は組立順序を示し、先ず小組立ステージにて、板にフェースを取り付けるウェブフレーム、クロスタイの製作、またパネルにアングルを取り付けるデッキやバルクヘッドの製作が行われる。

次に中組立ステージではアッパーデッキのパネルにウェブフレームを取り付け、ロンジバルクヘッドの一部も取り付けるアッパーデッキ中組立、ロンジバルクヘッドにウェブフレームおよびクロスタイを取り付けたロンジバルクヘッド中組立、外板にウェブフレームを取り付け外板中組立を製作する。

次に大組立では、ロンジバルクヘッド中組立をベースにアッパーデッキ中組立を取り付けた大組立ブロックを作成し、最後に外板中組立部材ベースに大組ブロックを取り付けることで最終ブロックが完成する。また、位置決めの精度を要する箇所ではそれぞれ計測を行い、溶接工程に入れるかの是非を確認する。

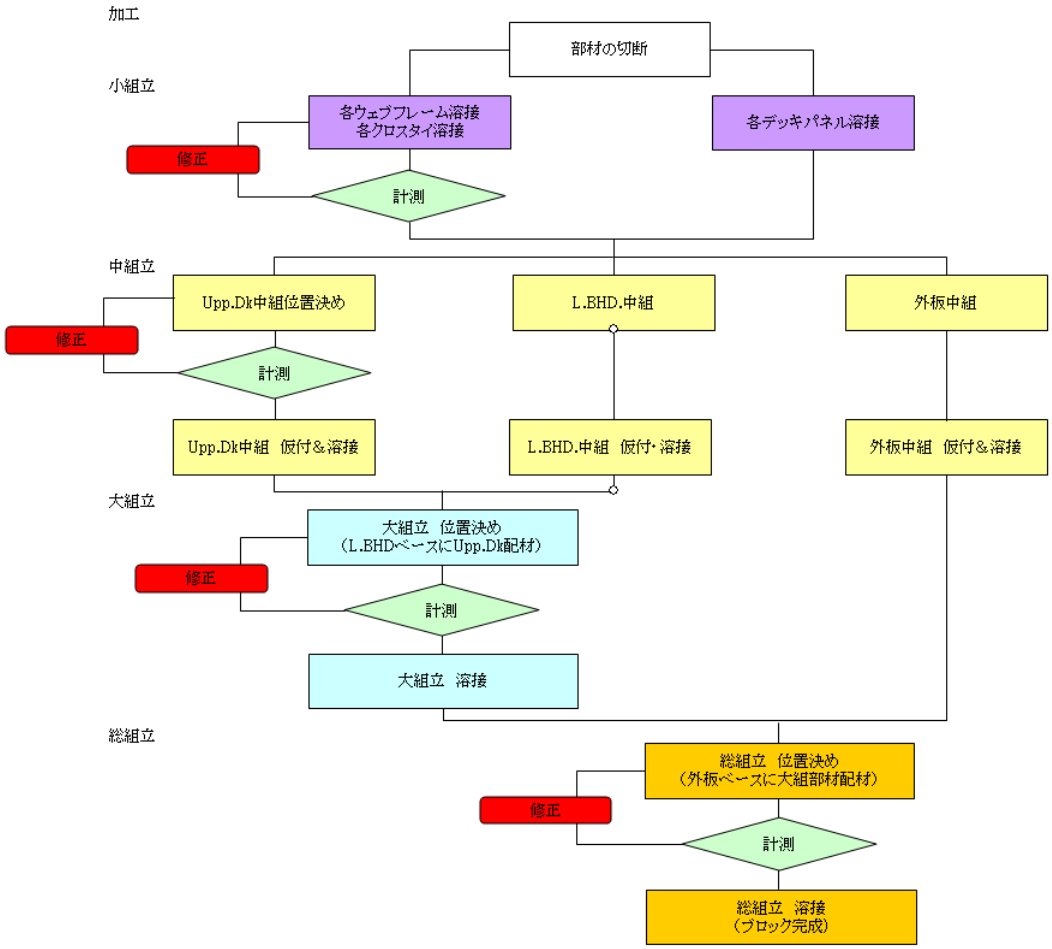


図 4.3.7　立体ブロックの工程フローチャート

4.3.4　組立時の不具合

前項で各組立工程の概要を述べたが、本項では各組立工程で実際に発生した精度不良および不具合について述べる。各工程において、搭載後の位置決めに必要な寸法（キー自由度）を定め、従来の最終工程での精度不良の調整ではなく、4.1 節のように、逆算にて計測・位置決めを行う。しかし、下記に述べるように図面寸法を維持しようとしたが、実際の現場結果は満足できるものではなかった。

①小組立工程

小組立の工程では板にフェースを L 型に取り付け、溶接する。この工程で図 4.3.8 のように面外および面内の変形が大きく発生する。実測では面外の変形は最大 80㎜ 以上発生した。面内の変形については 7㎜ ほどであった。また、クロスタイの面内の変形については 25㎜ ほど発生した。修正については、面外の変

形については、ブロック組立上大きく問題にならないので、逆変形を設けて変形を軽減する対策ができる。面内の変形については最終的なブロック精度に影響するので、背焼きによる修正を行った。しかし、フレームの数はかなりあるので、できれば修正する時間を省く対策を検討する必要がある。

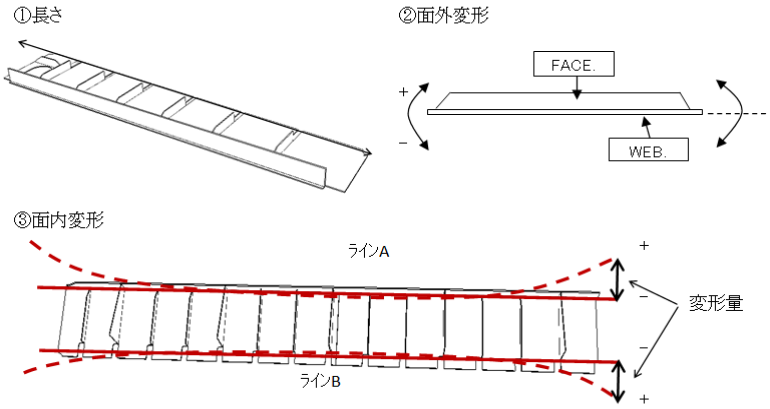


図 4.3.8 ウェブフレームの変形

②中組立工程

この工程には 3 つの中組立がある。1 つ目は外板中組立である。これは外板のスキン材にロンジが溶接された部材にウェブフレームを配材する工程のみである。したがって、先ほど発生した面外の変形が悪影響を及ぼさないように設計寸法位置にくるように、ジャッキ等で力を加えて配材する必要がある。しかし、この中組立部材については、剛性が低いため変形についての対策は特に行っていない。

2 つ目はロンジバルクヘッド中組立である。これは外板中組立と同様であるため、対策や計測は行わない。

3 つ目は図 4.3.9 のようなアッパーデッキ中組立である。これはロンジバルクヘッド中組立とアッパーデッキ中組立をＬ型に組立てる工程である。ここではブロック完成時にキャンバー寸法を求められるため、対角寸法を維持する必要がある。実船の計測では図面寸法が 5,621ｍｍに対して、±3ｍｍ位に収まっており、もちろんキャンバーも同様に許容範囲に収まっている。従って外板の中組立同様、製作上の難易度は高くないと思われる。

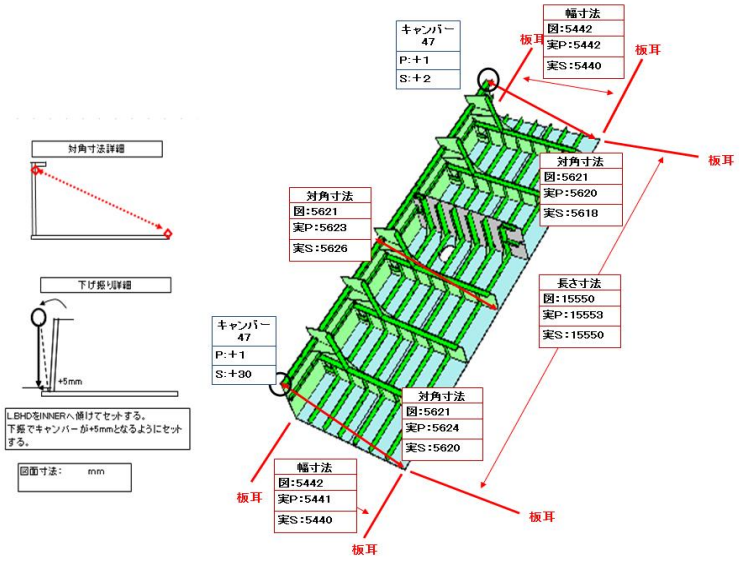


図 4.3.9　アッパーデッキ中組立計測

③大組立工程

この工程では図 4.3.10 のような計測を行う。この場合も中組立時と同様にキャンバーの数値を図面寸法になるように位置決めを行う必要がある。したがって、この工程でも対角寸法の計測により、キャンバーの計測を行った。実測では図面寸法から+15～+30ｍｍ位の精度不良が発生した。同時にキャンバー量も+5～+15ｍｍ位不足した。この精度不良の問題は図 4.3.11 に示すように、中組立部材の配材に困難がともなうためである。すなわち、バーニヤ冶具の調整上、高さを上げることはできないため、ロンジバルクヘッド中組立は斜めにセットする必要がある。その後にアッパーデッキ中組立を下から潜り込ませるように配材しなければならない。これはブロック組立上非常に困難を要する組立方法である。また、キャンバーや対角寸法を無理に合わせようとすると、図 4.3.11 のようにトランス部に大きなギャップが発生する。また、対角寸法を合わせようとするとトランス部にラップが発生する。このラップ部の切り合わせを行うと対角寸法が短くなるため、トランスの継手部にはギャップを持たせて対角寸法を図面寸法に合わせる様に位置決めを行った。また、クロスタイの位置決めについては、マーキン線が部材に記入してあるため、それを使用して位置決めを行った。

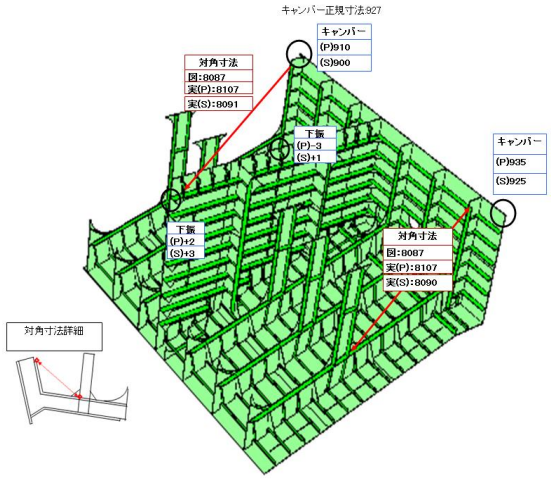


図 4.3.10　サブブロックの計測

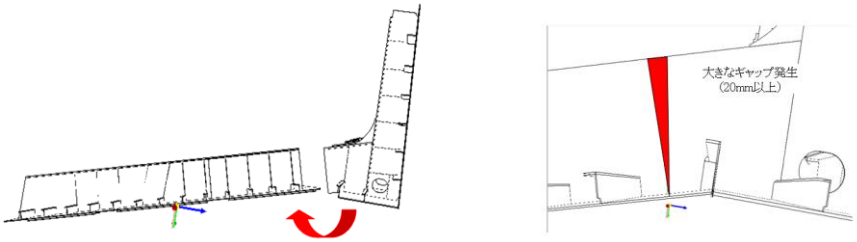
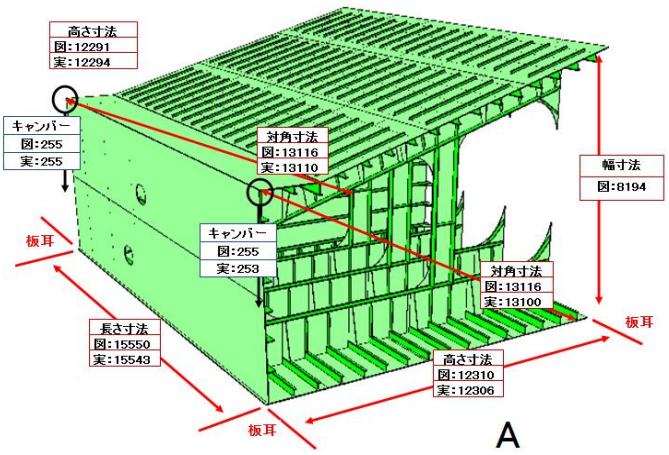


図 4.3.11　部材配材簡略図と発生するギャップの詳細

④総組立工程

この工程は最終工程であるため、ブロック搭載後に必要な寸法の計測を行った。従来の精度管理方法では、最終工程でのみで計測を行い、精度不良の蓄積を吸収する方法であったが、今回は小組立から計測を行い、各工程において次工程で必要な箇所の寸法を維持することを図った。計測結果から、キャンバーの寸法は図面寸法とほぼ同等の寸法に収まっているが、足元の幅は図 4.3.12 のように最大 40mm 短くなった状態で位置決めされたことが明らかとなった。また、図 4.3.13 のようにクロスタイとトランス部にもギャップが発生した。これは前工程でのクロスタイの位置決めの精度も不良が発生していたこととなる。このような２つの精度不良を有するブロックに対しては、キャンバーは搭載後に修正するのは不可能なので足元幅精度を犠牲にして、キャンバーが確保できるようにブロックを製作した。当然ながら、このブロックを搭載すると足元の幅が不足するため、トランスとロンジバルクヘッドの溶接部をサバキ、無理やりに足元の幅を合わせることになった。その結果、大幅な工期の遅れと、後戻り作業が発生した。また、計測方法についてもレーザー、下げ振り等の簡易的な計

測器しか使用していないため、計測精度不良が起因して、ブロック精度不良を発生さていると思われる。



足元幅寸法		
図面寸法	8194	差
Fr.A:	8154	40
Fr.B:	8174	20
Fr.C:	8154	40
Fr.D:	8170	24

図 4.3.12　ブロックの計測と発生した足元幅不足量

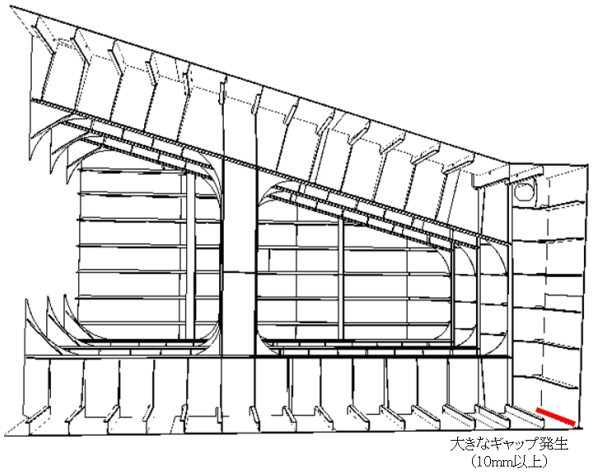


図 4.3.13　ブロック組立時に発生するギャップ

4.4　ギャップ処理対策を適用した場合の溶接変形シミュレーション

実船での組立不具合から理解できたことは、ギャップや目違い、ラップの処理が、ブロック完成精度に大きな影響を与えるのではないかという事である。すなわち、ブロックの組立精度不良の主たる原因は溶接変形ではなく、部材の位置決めの精度ではないかと考え、本節ではこのギャップ等の処理方法に注目して以下の解析を行った。

4.4.1　解析手法

解析には固有変形法を使用した。固有変形法による解析では実際の溶接条件より求めた固有変形の値を用いた。さらに、組立工程に従って部材が順次取付けられる過程での変形が考慮できるように部材間には界面要素を導入した。ただし、ロンジバルクヘッドと外板の大板を構成する板継溶接に関しては剛性が低いため、溶接変形を考慮していない。

4.4.2　FEM モデルの概要と部材の定義

対象構造である船側ブロックの有限要素モデルは設計寸法通りに作成した。本構造は外板側とロンジバルクヘッド側とでは非対称であり、前後方向でもバルクヘッドがあるために、完全な非対称の構造である。また、モデルは設計寸法通りに作成されているので延べ尺や端部伸ばしは考慮されていない。図 4.6.1 は有限要素メッシュを示す。図面に記入されている部材はどのような小さな部材でもモデル化している。ただし、ロンジバルクヘッドとアッパーデッキの継ぎ手部においては、実際は隅肉溶接構造となっているが、本モデルでは板継溶接構造とし、固有変形量については隅肉溶接の固有変形の値を用いた。また、要素分割に関しては可能な限り要素の形状が正方形に近くなるようにモデルを作成した。全ての部材にシェル要素を使用し、モデルの要素数は 26066、節点数は 25603 であり、部材番号を示した表 4.4.1 のように 38 の部材で構成されている。

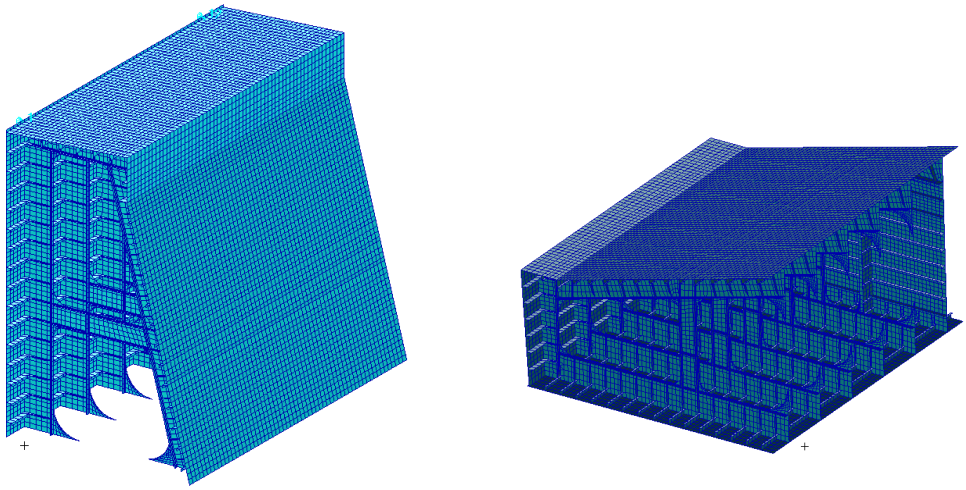


図 4.4.1　有限要素モデル

表 4.4.1　モデルの部材の種類と番号

番号	部材名	板厚	番号	部材名	板厚
1	Shell	14.5	20	Middle Bracket P	12
2	Upp. Deck	19	21	Shell web stiffner	12
3	L-bhd upp	21	22	Upp. Deck trans stiffner	12
4	L-bhd low	14	23	L-bhd web upp stiffner	12
5	Shell Long	11.5	24	L-bhd web low stiffner	12
6	Upp. Deck Long	19	25	Bottom Bracket S	12
7	L-bhd Long upp	12.5	26	Middle Bracket S	12
8	L-bhd Long low	11.5	27	Bottom Bracket P	12
9	Shell web	11.5	28	T-BHD	11
10	Upp.deck trans	11	29	T-BHD 21STR. Skin	12.5
11	L-bhd web upp	11	30	T-BHD 21STR. Face	19
12	L-bhd web low	11.5	31	T-BHD 21STR. Stiffner	10
13	Shell web face	19	32	T-BHD 27STR. Skin	11.5
14	Upp. Deck trans face	19	33	T-BHD 27STR. Face	14
15	L-bhd web face upp	19	34	T-BHD 27STR. Stiffner	10
16	L-bhd web face low	19	35	T-BHD_horizontal_stiffner_	12
17	Cross tie	12	36	T-BHD_horizontal_stiffner_	12
18	Cross tie face	19	37	T-BHD_vertical_stiffner_	12
19	Top bracket	11	38	Upp.Deck_Bracket	11

4.4.3　境界条件と固有変形

境界条件は図 4.4.2 のように剛体変位のみを固定している。各溶接部の固有変形は熱弾塑性解析と実験結果に基づいて定めた値を用いており、表 4.4.2 は溶接される 2 部材間に与えた固有変形の値の一部を例として示している。解析は実際の組立工程に従って 4 ステップに分けて実施した。ステップ 1 は小組立、ステップ 2 は中組立、ステップ 3 は大組立、ステップ 4 は総組立であり、どこの工程において精度不良が発生するかを検討した。

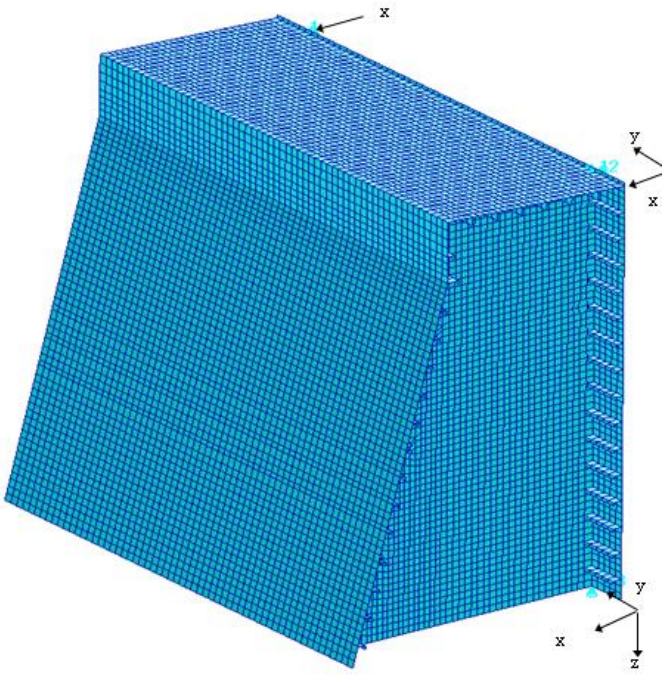


図 4.4.2　剛体変位の拘束箇所

表 4.4.2　固有変形値　例

STEP	部材名（隅肉溶接）		固有変形			
			縦収縮（両方分）	横収縮（両方分）	縦曲がり	横曲がり
	部材A	部材B	mm	mm	mm	mm
1	Shell Long	Shell	0.0638	0.0303	0.0638	0.0000
	Upp.deck Long	Upp.deck	0.0420	0.0200	0.0420	0.0000
	L-BHD Long upp	L-BHD upp	0.0415	0.0197	0.0415	0.0000
	L-BHD Long low	L-BHD low	0.0583	0.0277	0.0583	0.0000
	Shell web stiffner	Shell web	0.0480	0.0228	0.0480	0.0000
	Shell web stiffner	Shell web face	0.0336	0.0160	0.0336	0.0000
	Upp.deck web stiffner	Upp.deck web	0.0494	0.0235	0.0494	0.0000
	Upp.deck web stiffner	Upp,deck web face	0.0336	0.0160	0.0336	0.0000
	L-BHD web stiffner upp	L-BHD web upp	0.0494	0.0235	0.0494	0.0000
	L-BHD web stiffner upp	L-BHD web face upp	0.0400	0.0190	0.0400	0.0000
	L-BHD web stiffner low	L-BHD web low	0.0494	0.0235	0.0494	0.0000
	L-BHD web stiffner low	L-BHD web face low	0.0360	0.0171	0.0360	0.0000
	T-BHD	T-BHD__vertical_stiffner_	0.0684	0.0325	0.0684	0.0000
	T-BHD	T-BHD__horizontal_stiffner_in	0.0480	0.0228	0.0480	0.0000
	T-BHD	T-BHD__horizontal_stiffner_out	0.0480	0.0228	0.0480	0.0000
	T-BHD 21STR. Skin	T-BHD 21STR. Face	0.0436	0.0207	0.0436	0.0000
	T-BHD 21STR. Skin	T-BHD 21STR. Stiffner	0.0480	0.0228	0.0480	0.0000
	T-BHD 27STR. Skin	T-BHD 27STR. Face	0.0454	0.0216	0.0454	0.0000
	T-BHD 27STR. Skin	T-BHD 27STR. Stiffner	0.0509	0.0242	0.0509	0.0000
	T-BHD__horizontal_stiffner_in	T-BHD__vertical_stiffner_	0.0467	0.0222	0.0467	0.0000
	T-BHD__horizontal_stiffner_out	T-BHD__vertical_stiffner_	0.0467	0.0222	0.0467	0.0000
2	Shell web	Shell	0.0540	0.0257	0.0540	0.0000

4.4.4　解析ケース

解析ケースについては 4.4.4 項の実船で発生したギャップの処理を考慮して、5 ケースの解析を行った。ケース 1 は実際の溶接順序を考慮した場合であり発生

したギャップについては完全に閉じるケース。最終的にギャップが完全に閉じられるので理想的な位置決めが行われたケースと同等であり、同時溶接を想定した場合と同じ変形となる。ケース 2 はステップ 4 での総組立工程において、アッパーデッキと外板の継手部に発生するギャップを残したケース。なお、このケースではギャップをそのまま維持しているために溶接の層数が増加することを考慮して、該当箇所の固有変形量も増加させた。ケース 3 はステップ 4 でのギャップの維持とステップ 3 でのトランスの継手部に発生するギャップを維持したケース。これもケース 3 同様にギャップを維持した箇所は、固有変形量を増加させた。ケース 4 はケース 1 と同様にギャップは完全に閉じるがトランス材の小組立の変形量を他のケースより大きくしたケースである。これは造船所では入熱量が大きいグラビティー溶接が使用されるため、その溶接法を採用した場合のケースである。ケース 5 はケース 2、3、4 の全ての位置決め不具合を考慮したケースである。このケースが実船で発生した一番精度が悪いブロックに近いケースになると思われる。これら5つのケースをまとめた物が、表4.4.3である。

表 4.4.3　解析ケースのまとめ

ｹｰｽ番号	内容	固有変形増加有無	ｷﾞｬｯﾌﾟの開閉
1	理想的な組立工程	無	閉
2	ｽﾃｯﾌﾟ4での精度不良を考慮	有	維持
3	ｽﾃｯﾌﾟ3&4での精度不良を考慮	有	維持
4	ﾄﾗﾝｽ材の精度不良を考慮	有	閉
5	ｹｰｽ2&3&4の精度不良を考慮	有	維持

4.4.5　解析結果と考察

①各ケースの解析結果および考察

図 4.4.3(a)と(b)はケース 1 の解析の結果得られたＸ方向（足元幅方向）の変位分布をコンター図として示したものである。解析での結果は理想的な位置決めを実施したとしても、溶接変形により足元幅は 10㎜ ほど狭くなっている。ただし、10㎜ ほどの変形であれば、搭載後の処置は容易にできるので問題はないといえる。また、図 4.4.3(c)はＺ方向（ロンジバルクヘッドトップ位置）の変形である。この位置はハッチコーミングが搭載されるため、変形が大きいと問

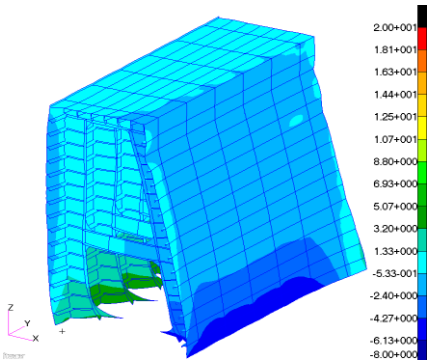
題になるが、本ケースではデッキの変形ほぼ一様で絶対値も小さい。

全ての部材がギャップや目違いの無い状態で仮付けされた後に一斉に溶接された理想的な状態に対応するケース 1 のｘ方向（幅方向）の変形を異なった角度から見た図として示したものが図 4.4.3(a)と(b)である。また、図 4.4.3(c)はｚ方向(高さ方向)の変形を示す。変形量としては幅方向の変形が-3㎜～+2㎜、であり高さ方向の変形が-5㎜～+5㎜ である。同様に、総組立工程での不具合を模擬したケース 2 における変形を示した図が図 4.4.4 である。ケース 1 と比較するとバルクヘッドを基準にして、ブロック全体がロンジバルクヘッド側に入り込で、捩れ変形が発生している。これはステップ 1 におけるトランスの面外変形のために発生したギャップをステップ 4 で保持した状態で溶接したために発生したものである。

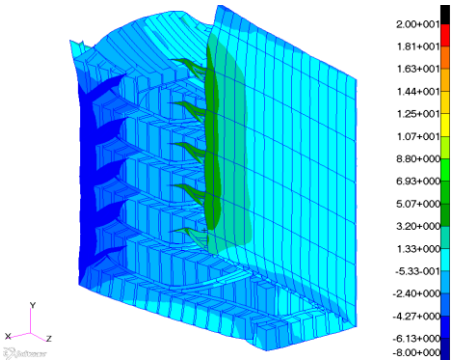
図 4.4.5 はケース 3 の総組立工程と大組立工程での不具合を考慮したケースである。こちらもケース 2 同様バルクヘッドを基準にして、ブロック全体が大きく捩れており、ケース 2 と比較して変形量が大きい。この違いはステップ 3、4 の両方でギャップを残しているため、すなわち外板側とロンバルバルクヘッド側の両方の捩れが要因となり大きく変形していると思われる。ただし、実船では約 20㎜ 程度の変形でも、発生すると、溶接箇所をさばいて、強引に足元の幅を合わす作業が発生する。また、キャンバーの不足については足元にギャップを設けるか、足元をガスで切断し、無理やりに高さを合わす作業が発生する。

図 4.4.6 はギャップについては完全に閉じるがトランス材を組立てる際の溶接変形量を大きくしたケース 4 の変形である。トランスの面外の変形量を大きくしても、ギャップを残さなければケース 1 とほぼ同じ変形となる。

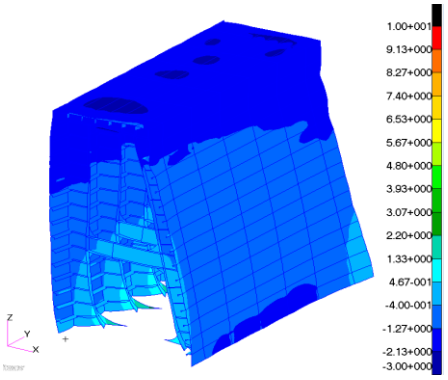
図 4.4.7 は一番条件が悪く、実船に近い位置決めを再現したケース 5 の変形を示す。この場合にもケース 2、3 と同様に捩れ変形が認められ、ケース 2、3、4 で考慮した要因が重なっているため変形量もかなり大きく 25㎜ 位の変形量が発生している。また、図 4.4.8 はトランス部に発生するギャップを拡大した図である。



(a)X 方向変位-１

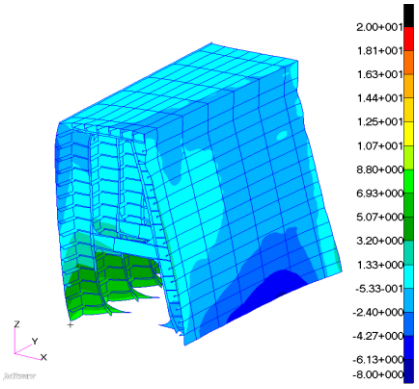


(b)X 方向変位-２

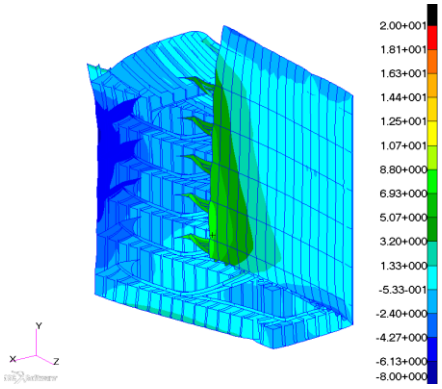


(c)Z 方向変位

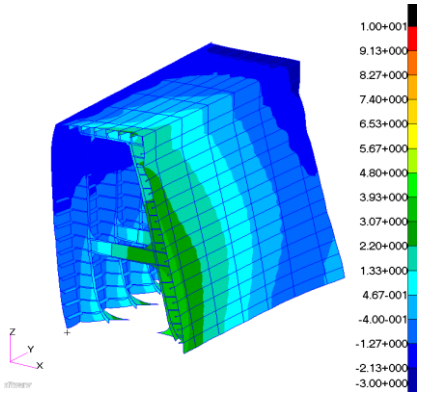
図 4.4.3　ケース 1 解析結果



(a)X 方向変位-１

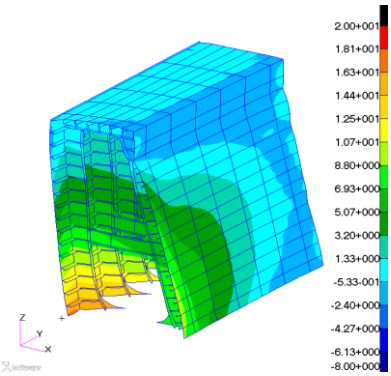


(b)X 方向変位-２

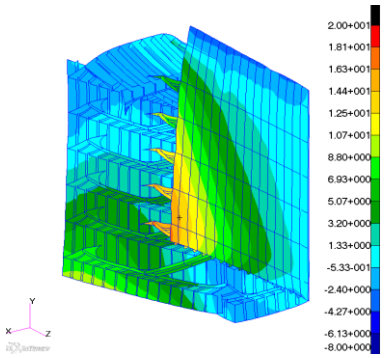


(c)Z 方向変位

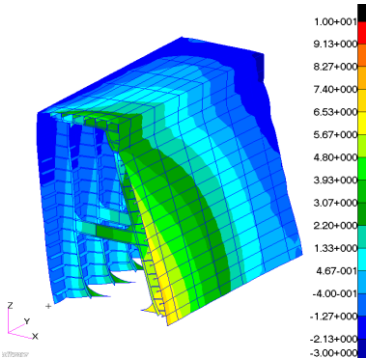
図 4.4.4　ケース 2 解析結果



(a)X 方向変位-１

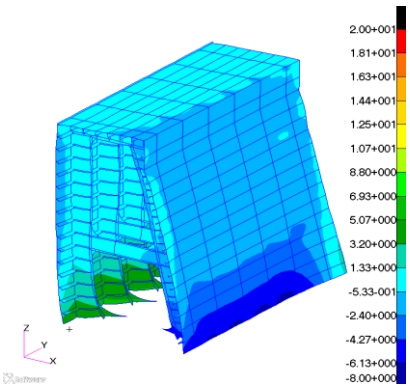


(b)X 方向変位-２

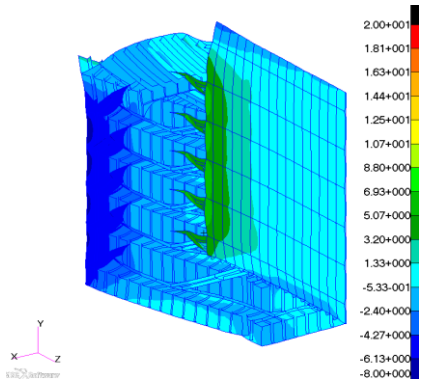


(c)Z 方向変位

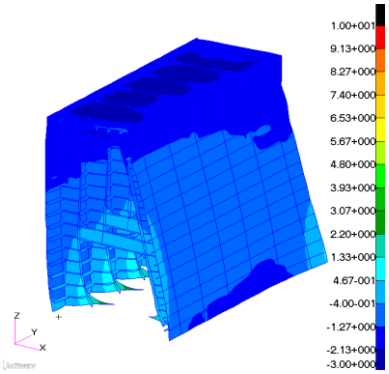
図 4.4.5　ケース 3 解析結果



(a)X 方向変位-１

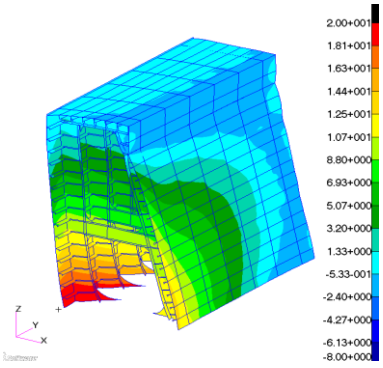


(b)X 方向変位-２

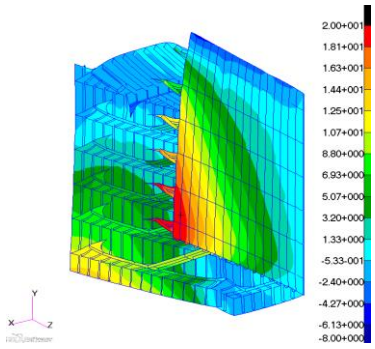


(c)Z 方向変位

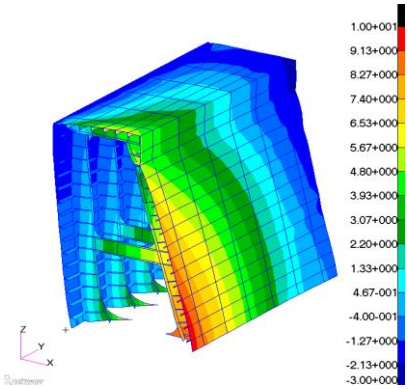
図 4.4.6　ケース 4 解析結果



(a)X 方向変位-１



(b)X 方向変位-２



(c)Z 方向変位

図 4.4.7　ケース 5 解析結果

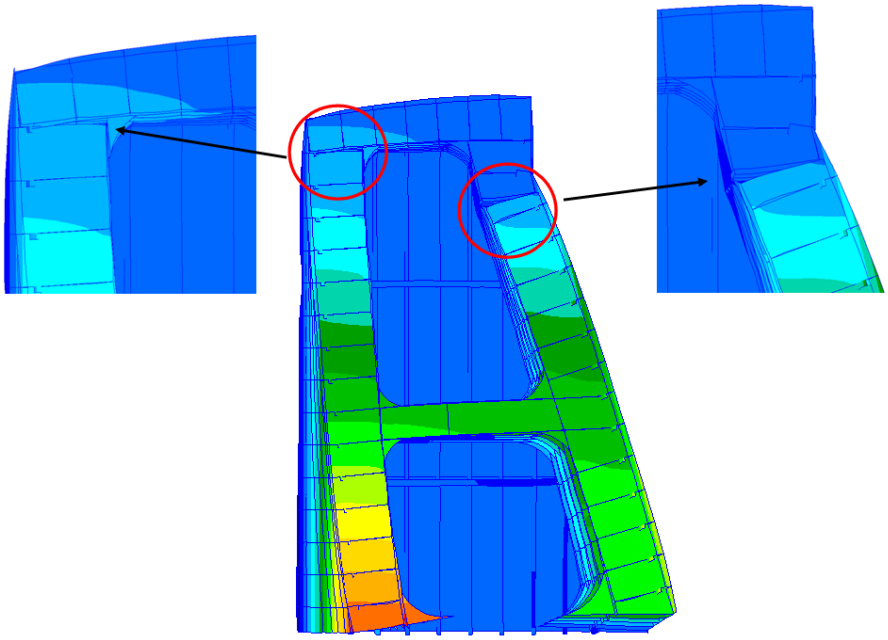


図 4.4.8　トランス部ギャップの拡大図

②各ケースの比較

ここでは各ケースの比較するためにグラフを用いて考察する。図 4.6.1 は船側ブロックの足元ライン AB とライン CD の最終状態での幅方向の変形量をプロットしたものである。ブロックの捩れに注目するとケース 3 およびケース 5 で約 25 mm 程度の捩れが発生しており、ケース 1、2、4 の捩れ変形は小さい。これはケース 3 および 5 ではステップ 3 のギャップを保持するように解析を行っているが、その際にトランスバルクヘッドに設置しているストリンガーにギャップが大きく発生している。これがブロック全体を大きく捩る要因だと思われる。また足元幅についてはいずれのケースにおいても約 10 mm 足元幅が減少している。実船で発生した 40mm をこえるような数値では無いが足元幅が減少する傾向については計算結果は実船の状況に対応している。なお、実船で足元幅の減少が大きかったのは、小組立段階での部材精度または、ブロックの位置決めの精度に大きく影響を受けているためと思われる。キャンバーの過不足に対する考察のために、アッパーデッキのライン EF に沿った高さ方向の変形分布に注目し、これを示した図が図 4.4.2 である。ケース２、３および５に捩れ変形が発生していることが分る。この捩れ変形についても、ステップ 3 および 4 にギャップを保持しているため他ケースとの違いが生じ、捩れが発生したと思われる。実船ではアッパーデッキの捩れは計測することはできなかったが、恐らく捩れ変形が発生していたのであろうと思われる。

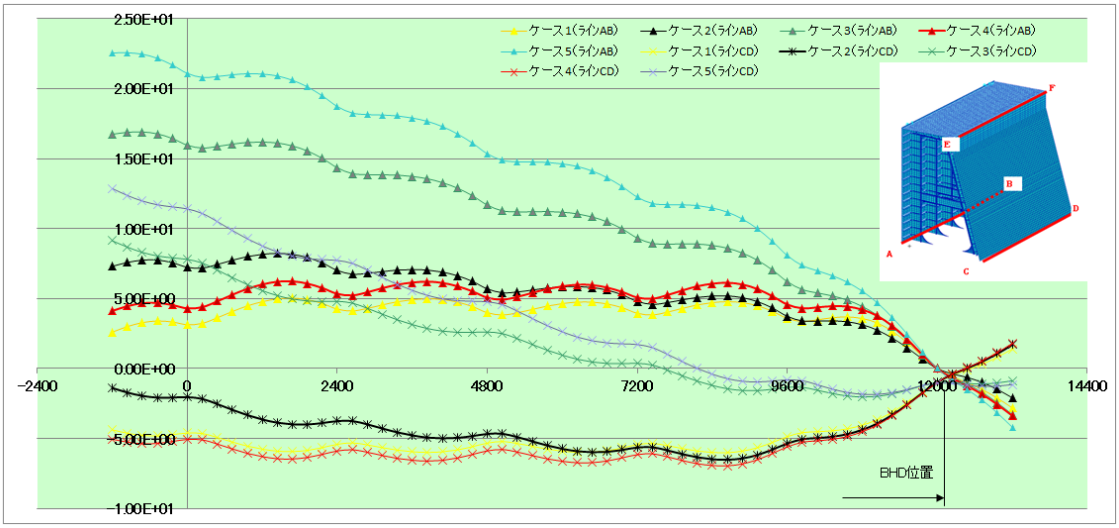


図 4.4.1　各ケースにおけるライン AB、CD に沿った幅方向の変形

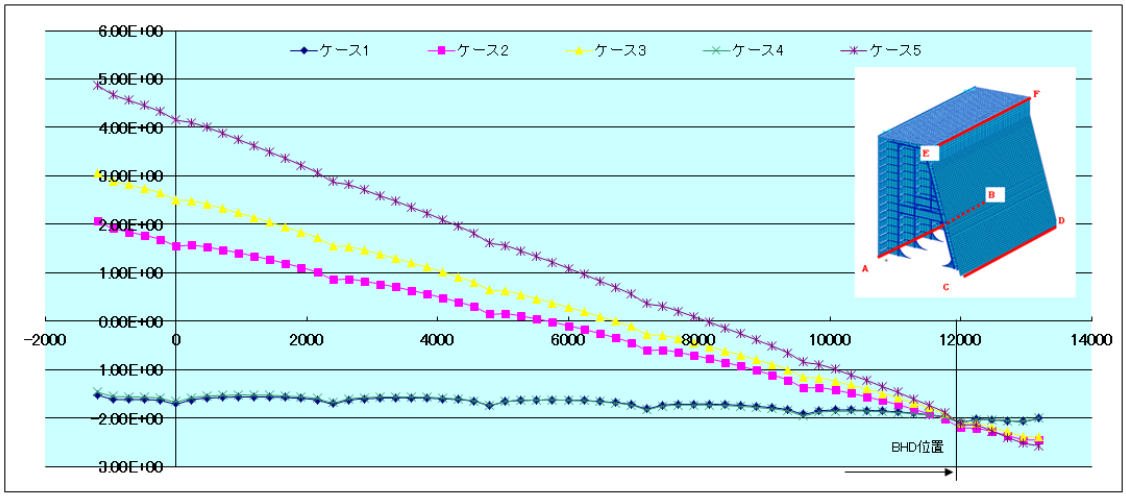


図 4.4.1 各ケースにおけるライン EF に沿った高さ方向の変形

4.5　キー自由度に注目した位置決めの実船への適用

4.5.1　対象構造

本節で検討の対象となる構造は図4.5.1に示すように、前項での解析で使用した構造と同じ構造である。

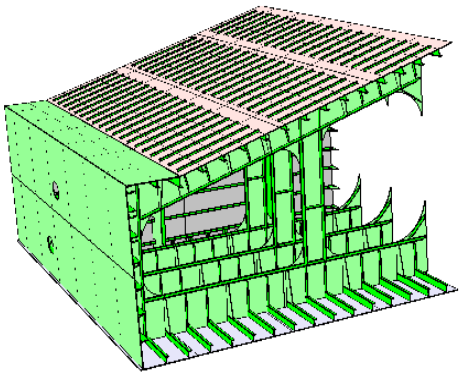


図4.5.1　対象構造

4.5.2　対象構造のFEMモデル

図4.5.2は本節で使用するFEMモデルを示し、4.5節と同じ船側サイドブロック構造である。

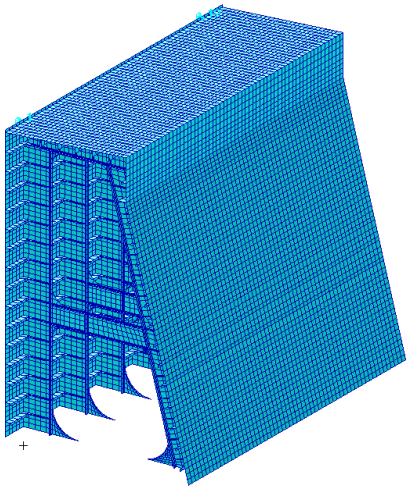


図4.5.2　FEMモデル

4.5.3　部材とキー自由度

前述したように、本解析で使用するブロックは４つの中組立部材で構成されている。図4.5.3はアッパーデッキ中組立、ロンジバルクヘッド中組立、外板中組立、バルクヘッド中組立の概要を示している。これらの中組立を組立て、船側ブロックを製作する。組立順序はロンジバルクヘッド中組立にアッパーデッキ中組立とバルクヘッド中組立を溶接しロンジバルクヘッドサブブロックを製作する。その後に外板ベースにロンジバルクヘッドサブブロックを反転して、取り付ける。従って、最終工程では２つのサブブロック部材（外板中組立とロンジバルクヘッドサブブロック）となる。したがって、２つのサブブロック部材の剛体運動を防止するためには、各部材に６つの自由度、合わせて１２の自由度を考慮する事ができる。選択した１２のキー自由度を示したものが図4.5.3および図4.5.5である。

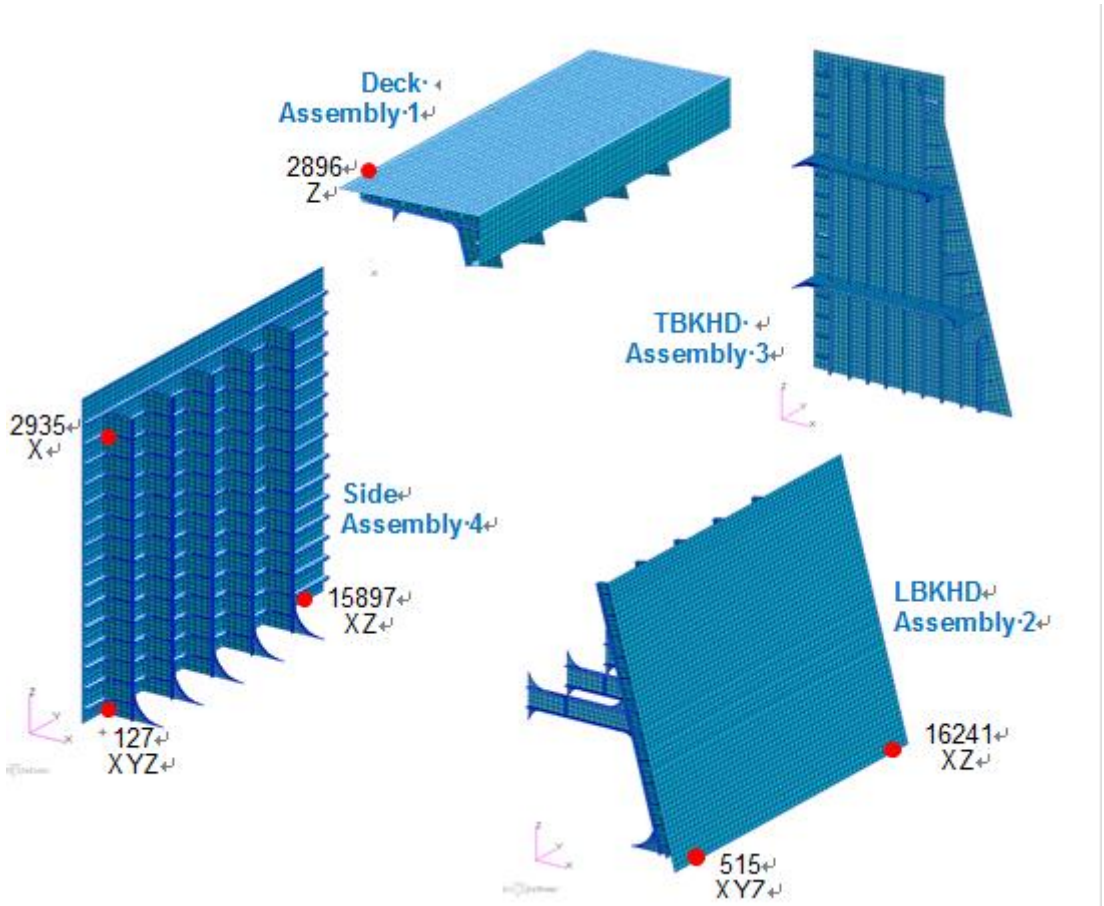


図4.5.3　４つの中組立部材

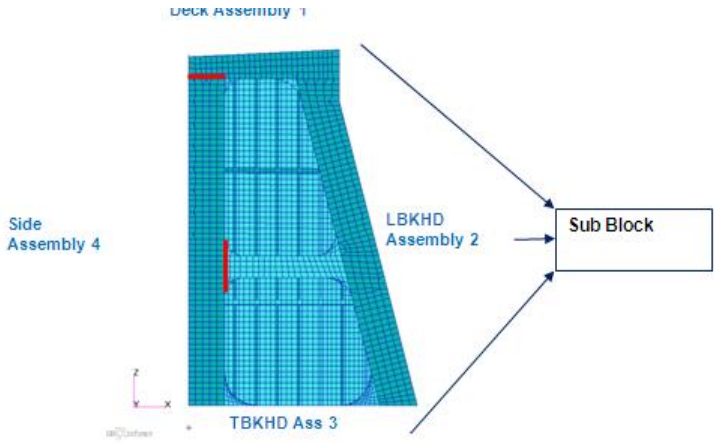


図4.5.4　組立の概要：サブブロック（中組立1+2+3と中組立4）

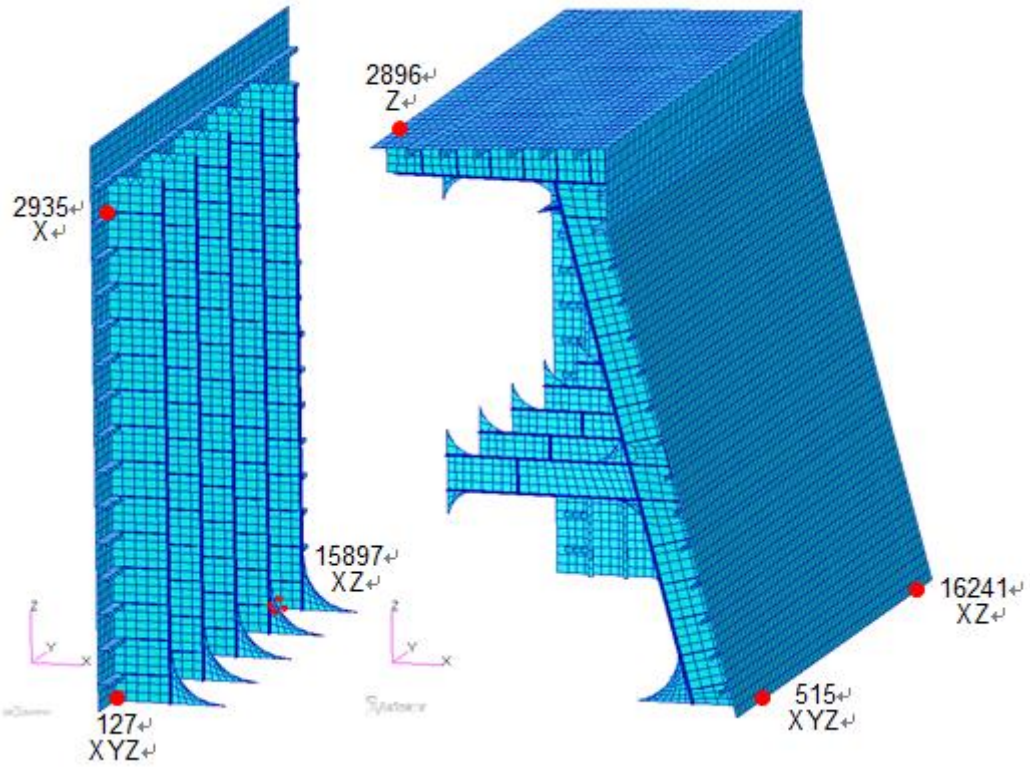


図4.5.5　設定したキー自由度

もし４個の中組立を独立した単位と考え、中組立段階から大組立、船側ブロックの最終組立と階層的にキー自由度の考えを適用すると、４個の中組立にそれぞれ６個のキー自由度、合計で２４個のキー自由度を考慮する事ができる。これは位置決めの際の自由度の増加を意味し、ブロックの組立精度向上に繋がる。

4.5.4　溶接条件

サブブロックの溶接条件（レベル１の溶接：アッパーデッキ中組立、ロンジバルクヘッド中組立およびトランスバルクヘッド中組立）と総組の溶接条件（レベル２の溶接：外板中組立とロンジバルクヘッド中組立）は4.6節で示したケース1の溶接と同じなので、レベル１およびレベル２での溶接固有変形の値についてもケース1と同じ値を用いた。

4.5.5　レベル２におけるサブブロックの溶接変形

キー自由度に注目した位置決め手順の最初のステップは最終的な溶接によって発生する溶接変形を予測する事である。それがレベル２（ロンジバルクヘッ

ドベースのサブブロック）の溶接である。

FEM組立シミュレーションでは、以下の境界条件とレベル２の固有変形を用いて、大変形解析により変形を予測した（図4.6.5を参照)。すなわちキー自由度の内、下記の6個の自由度を拘束キー自由度として拘束した。

節点 127　　$\delta_X = 0.0, \delta_Y = 0.0, \delta_Z = 0.0$

節点 15897　　$\delta_Z = 0.0$

節点 515　　$\delta_Y = 0.0, \delta_Z = 0.0$

δ_X, δ_Y とδ_Z はＸ、ＹおよびＺ方向の変位である。

図 4.5.6 は変形倍率 50:1 でＸ、ＹおよびＺ方向の変形をコンター図として示したものである。変形量の最大値は 2.44mm と小さく、船体のブロックで良く発生する大きな寸法誤差は、溶接変形による誤差ではなく、位置決めの誤差の蓄積であることを示唆している。表 4.5.1 はキー自由度を含む節点の変位を示しており、調節可能なキー自由度の変位は赤色で示されている。

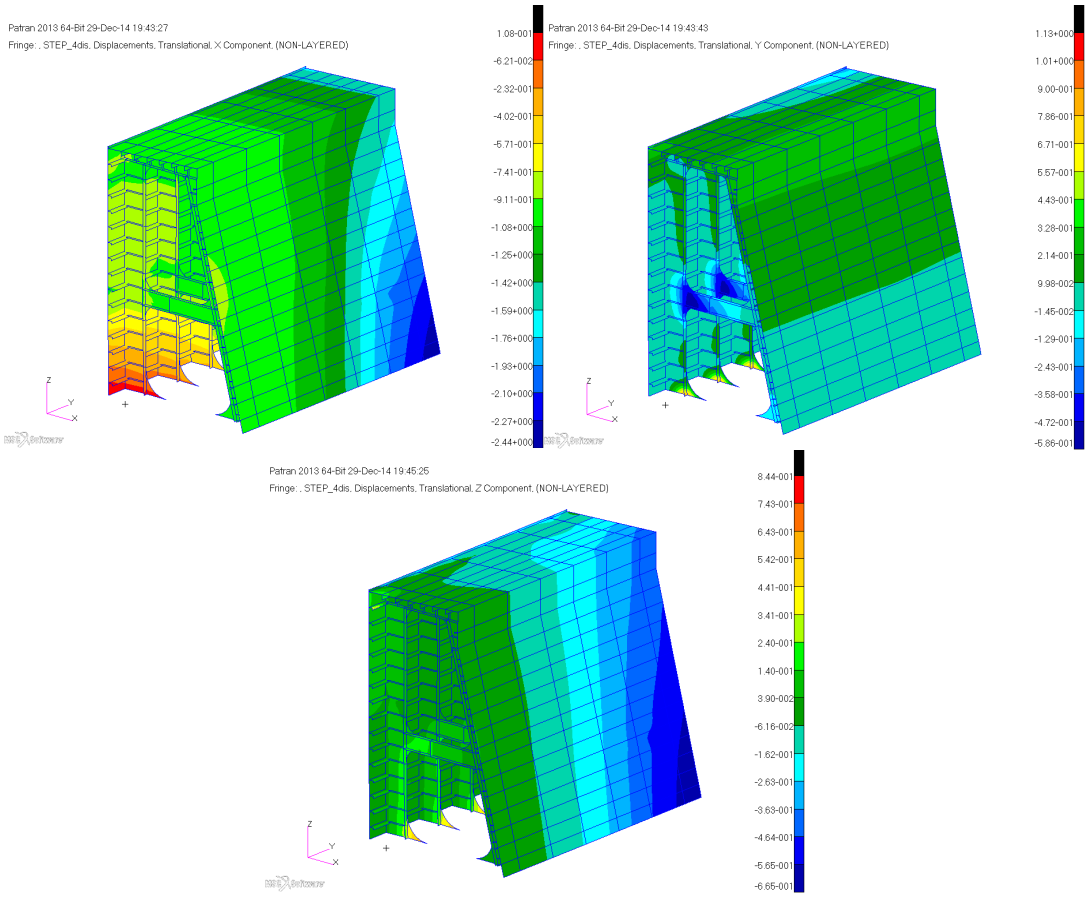


図 4.5.6　変形形状をＸ、Ｙ、Ｚ方向に表したコンター図
（レベル２における溶接変形）
変形倍率　50:1

表 4.5.1　中組立１、２および３を組立てる際の溶接変形（レベル１）

ノード	X変位	Y変位	Z変位
127	0.00000	0.00000	0.00000
515	-0.95815	0.00000	0.00000
2896	-0.96549	0.23201	-0.14394
2935	-0.92587	0.11512	0.05100
15897	-1.39398	0.06141	0.00000
16241	-1.95869	-0.00016	-0.46085

サブブロックを作成するために中組立1,2,3を組立てる際に生じる溶接に起因する変形は、レベル1の溶接固有変形を適用し、大変形により計算を行った。なお、この段階ではサブブロックと外板中組立は互いに溶接されていない状態で独立しているので両者の剛体変形を防止するために図4.5.5に示される12個の節点の変位を下記のように拘束キー自由度として拘束した。
拘束した。

節点 127　　$\delta_X = 0.0, \delta_Y = 0.0, \delta_Z = 0.0$
節点 15897　　$\delta_Z = 0.0$
節点 515　　$\delta_Y = 0.0, \delta_Z = 0.0$
節点 2935　　$\delta_X = 0.0$
節点 16241　　$\delta_X = 0.0, \delta_Z = 0.0$
節点 2896　　$\delta_Z = 0.0$

計算の結果得られたX、Y、Z方向の変位をコンター図として示したものが図4.5.7であり、変形倍率は50：1である。なお、この計算での最大変形量は3.49㎜となっている。

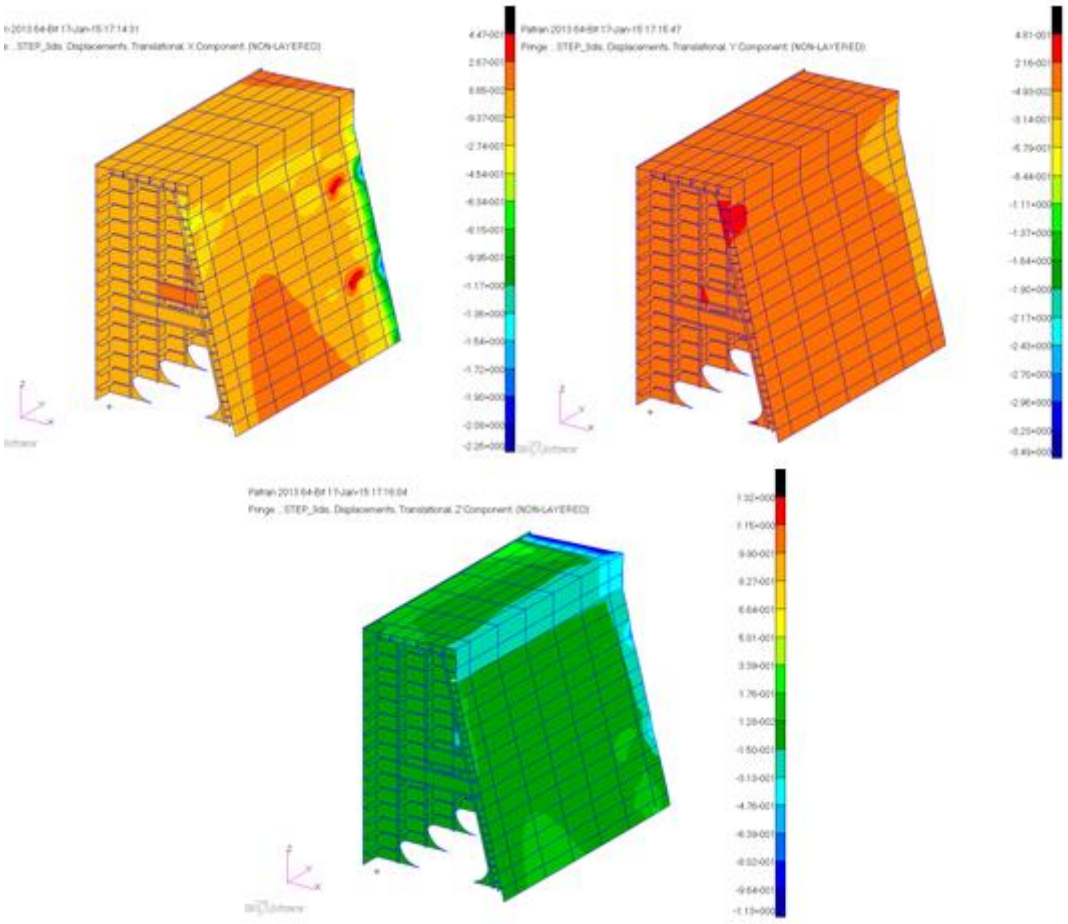


図4.5.7　レベル1の溶接によるX、Y、Z方向変位をプロットしたコンター図
変形倍率40:1

4.5.6　予測を反映した位置決め

ここでは予め溶接による変形を予測し、その変形量を考慮した位置決めのシミュレーションの結果を示す。サブブロックの拘束キー自由度と調節可能キー自由度は図4.5.5の通りである。4.5.5項で得られ表4.5.1に示された調節可能キー自由度の変形量を符号を変えて逆ひずみとして位置決めを行った。一方、拘束キー自由度は設計寸法上の位置に保持され、表4.5.1に示されるように変位の値はゼロに設定した。すなわち、

節点 127	δ_X = 0.0,	δ_Y=0.0,	δ_Z = 0.0
節点 15897	δ_X = +1.393980,	δ_Z = 0.0	
節点 515	δ_X = +0.958148,	δ_Y = 0.0,	δ_Z = 0.0
節点 2935	δ_X = +0.925865		
節点 16241	δ_X = +1.958690,	δ_Z = +0.460845	
節点 2896	δ_Z = +0.143935		

δ_X, δ_Yとδ_ZはX、Y、Z方向変位を表す。このようにキー自由度を設定すると小さなギャップがサブロックと外板中組立との間に生じるが、キー自由度に生じたギャップを保持した状態で仮付け、すなわち位置決めを行った。

4.5.7　サブブロックと外板中組立（中組立部材2）の溶接の変形（レベル2）

位置決めに引続いてサブブロックと外板中組立との溶接による変形を計算した。なお、この例では位置決めの際に発生したギャップは、極めて小さいので固有変形に対する影響は無視できるとして表4.5.2に与えられた固有変形の値を用いた。

図4.5.8は計算の結果得られたX、Y、Z方向の変位を示しており、位置決めおよびレベル2の溶接後の変形形状をコンター図に表したものである。また、変形倍率は50:1である。表4.5.2はキー自由度に設定している節点の変位を示す。キー自由度の変位は赤色にて示している。この表から分るように逆ひずみを与えた調整可能なキー自由度の変位はゼロにほぼ等しい。ここで調整可能なキー自由度の変位が完全にゼロにならないのは大変形理論で計算しているために生じるわずかな非線形成分の影響と考えられる。

造船所での実際の構造、特に3次元ブロックでは位置の計測にともなう誤差が大きく、シミュレーション通りに位置決めを行うことは困難である。したがって、これらの誤差の問題を解消するために3次元計測器の導入が考えられる。ここで提案する位置決め法は少数の剛体変形に対応したキー自由度のみを計測すれば良いため3次元計測器の精度を効果的に活かすことができるという特長を持つ。

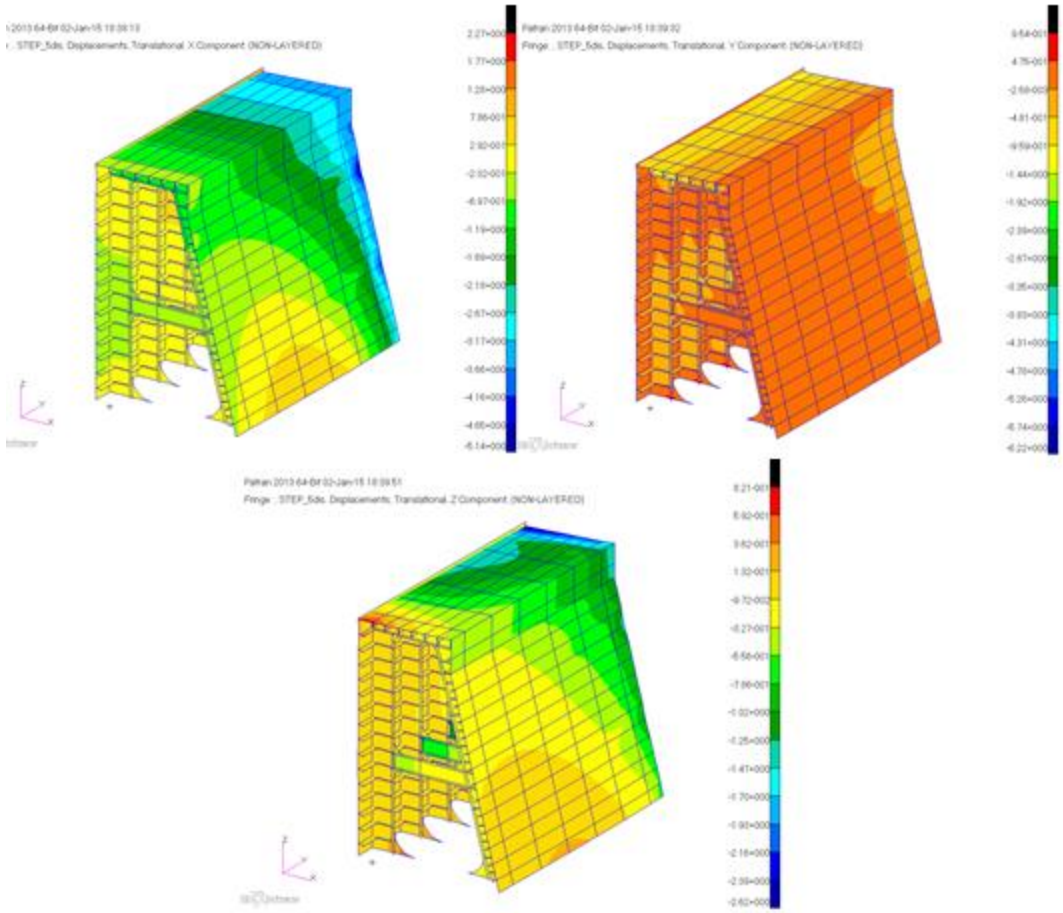


図4.5.8　位置決め後のレベル2の溶接によるX、Y、Z方向変位に
プロットしたコンター図
変形倍率50:1

表 4.5.2　サブブロックと中組立３を組立てる際の溶接変形（レベル 2）

ノード	X変位	Y変位	Z変位
127	0.00000	0.00000	0.00000
515	0.01070	0.00000	0.00000
2896	-0.69306	-0.81757	-0.00176
2935	0.00961	0.11467	0.05061
15897	-0.10719	0.06128	0.00000
16241	-0.10321	0.10066	-0.04340

4.5.8　考察

以上のことから、組立てでの誤差は主に位置決めの誤差であり溶接による局部収縮が原因となって発生する誤差は小さい。本章で考案した位置決めを行うことで、理論的にはキー自由度を設定した箇所の位置誤差をほぼゼロまで減らすことができる。

本章ではサブブロックとブロックを組立てるレベル２の組立を例に提案法を適用したが、この考え方はサブブロックを製作するために中組立同士を組立てる際にも同じように適用できる。図4.5.9はサブブロックが３個の中組立から作られる過程にもキー自由度の考えを適用した場合を示している。４個の中組立のそれぞれに6個のキー自由度が設定されるのでキー自由度は合計２４個となる。３個の中組立を溶接してサブブロックを製作する過程に注目すると、３×６＝１８個のキー自由度の内、中実の赤矢印２個と白抜きの青矢印４個はサブブロックの剛体変位を止めるための拘束キー自由度で有り、他の１２個の白抜き赤矢印は、調整可能なキー自由度であり、これらに予め予測した溶接変形を逆方向に与える形の位置決めを行うと１８個全てのキー自由度を正規位置に収めることができる。

このようにキー自由度の考えを階層的に適用することにより調整可能な自由度は増え、精度管理の柔軟性が確保される。しかしながら、理論的には組立精度誤差を限りなくゼロに近づける事は可能であるが、実際の造船所ではキー自由度の図面寸法に設置できているかを確認するための計測に誤差が発生する。計測誤差の低減対策としては精度の高い３次元計測器の導入と、適切な訓練を実施すれば計測誤差を2、3㎜程度まで下げる事が可能となるであろう。

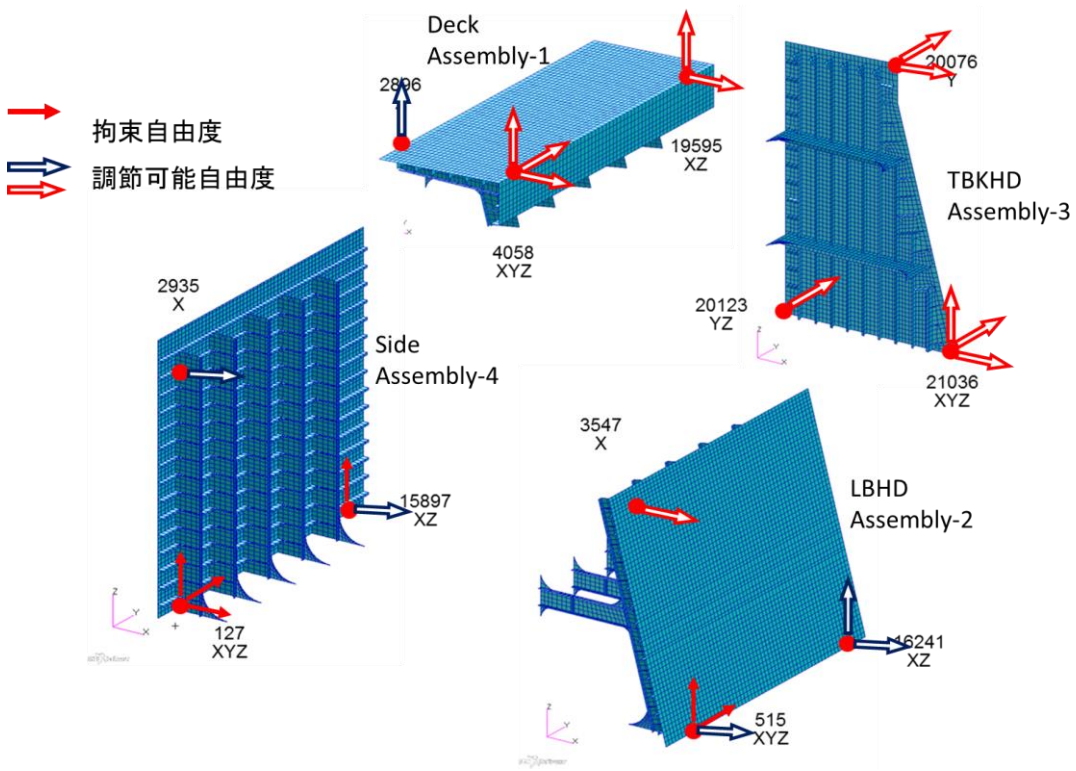


図4.5.9　各中組立部材の24のキー自由度

4.6　まとめ

本章では、位置決めの際に蓄積される精度誤差を軽減するために次工程の溶接で生じる変形を予測し、これをキャンセルする逆変形を導入した位置決め法としてキー自由度に注目した位置決め法を提案し、基本的な概念を２次元トランスリングモデルを用いて説明した。さらに船側ブロックを例に、固有変形法を用いた FEM 解析によりその有効性を示した。キー自由度に注目した位置決め法は、小組立、中組立、大組立、最終ブロックなどの構造単位の剛体変形を拘束するために必要な自由度を精度管理におけるキーポイントすなわちキー自由度と位置付けた位置決め法である。キー自由度は剛体変位を拘束するための拘束キー自由度と自由に調整できる調整可能キー自由度に分けられ、調整可能な自由度に対して予測された溶接変形を位置決め時に逆変形として与えることで全てのキー自由度の座標を設計座標に収める方法である。

なお、本章では詳細には述べていないが精度管理で不可欠な技術は計測技術であり計測精度である。逆変形の位置にキー自由度を固定するため、さらにキー自由度には含まれていないが管理する必要があるポイントの位置確認に精度の高い計測技術が必要である。計測という点でもキー自由度の概念を活用すれ

ば計測すべきポイントを絞込む事ができ、効果的な計測が可能になるものと予想される。

参考文献

(1) 野本敏治、武市祥司、青山和浩：組立工程における製品の精度管理システムに関する基礎研究、日本造船学会論文集、178 (1995)、pp. 725-737.
(2) 野本敏治、武市祥司、青山和浩：溶接変形の予測に基づく精度管理システムに関する研究、日本造船学会論文集、181 (1997)、pp. 249-260.
(3) 武市祥司、青山和浩、野本敏治：精度管理システムを用いた位置決め作業支援に関する研究、日本造船学会論文集、188 (2000)、pp. 399-408.
(4) 望月正人, 若松栄史, 長谷川雅丈, 伊藤真介, 岡野成威, 森永英二, 山下 泰生, 杉廣武俊：大型溶接構造物の組立・搭載工程計画に関する研究、溶接学会全国大会講演概要、Vol. 2009s (2009)、pp 24-25.
(5) 若松栄史, 望月正人, 成願覚, 森永英二, 伊藤真介, 岡野成威, 荒井栄司：大型溶接構造物の組立・搭載工程計画に関する研究、溶接学会全国大会講演概要、Vol. 2009s (2009)、pp 26-27.
(6) 成願覚, 若松栄史, 森永英二, 伊藤真介, 岡野成威, 望月正人, 荒井栄司：大型溶接構造物の組立・搭載工程計画に関する研究、溶接学会全国大会講演概要、Vol. 2009f (2009)、pp. 58-59.

第 5 章　部材精度がビルジブロックの捩れ変形に及ぼす影響

5.1 緒言

造船所で日常経験されているように３次元曲りブロックの製作では溶接組立による変形の予測や制御は非常に難しい．比較的単純な平行部のビルジブロックの場合でも時に大きな捩れ変形が発生するが，なぜ捩れるかについての理論的説明は未だなされていない．著者らは，溶接組立による構造物の変形の原因は二つあり，ひとつは溶接による横収縮や角変形などの局部変形であり，いまひとつは溶接組立の各段階で発生するギャップや目違いであると考えている．そこでこの視点からビルジブロックに発生する捩れ変形のメカニズムの解明と変形低減対策について検討を行った．そのための手法として，固有変形の概念と界面要素を導入した弾性シェル FEM[1,2]を使用し系統的な計算を行った。

5.2 ビルジブロックの溶接組立における特徴

ビルジブロックは、ビルジ外板、ガーダー、フロアーおよびそれらに取付けられたビルジキールおよびフロアーのスティフナーから構成される。まれではあるが内底板の一部を含めてブロックとする場合がある。ブロックの組立は溶接の作業姿勢は下向き溶接なるように進められ、ビルジブロックの組立手順を示した図が図 5.1～図 5.3 である。具体的な組立工程は、

①部材の切断、曲げ加工

②ビルジ外板にビルジキールを取り付ける小組立とガーダー及びフロアーにスティフナーを溶接後、歪矯正を実施（ここまでは捩れない)。

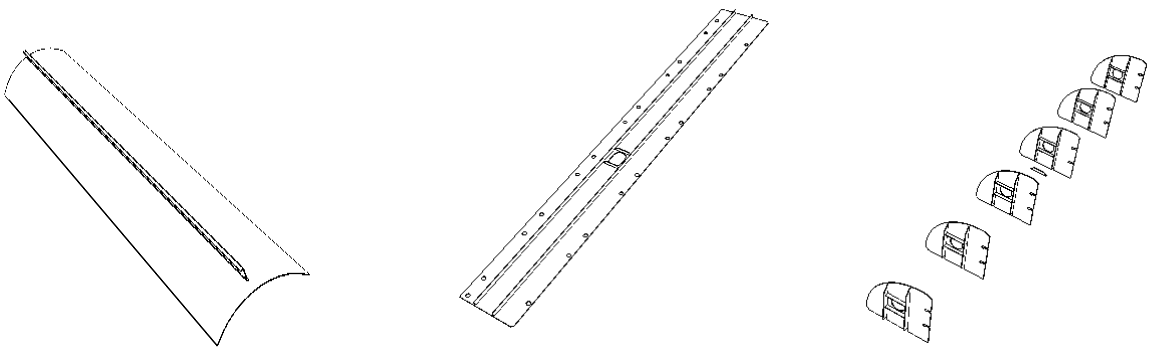


図 5.1 ビルジ部小組

③ガーダーベースにてフロアーを垂直な姿勢にして立体に組上げ

（ビルジ外板とフロアー引付、この時に捩れる）

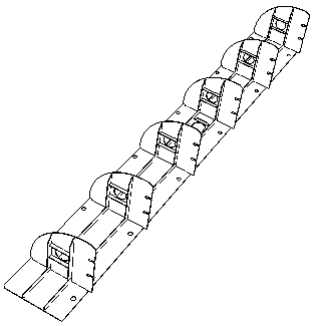


図 5.2 フロア＆ガーダーの取付

④ビルジ外板をベースとしてセットし、フロアーの溶接
（ビルジ外板/フロアー間のギャップが有れば閉じるので捩れる）

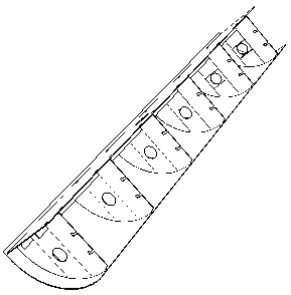


図 5.3 ビルジ外板中組

の４段階となる。すなわち、まず部材を切断し、ビルジ外板は曲げ加工される。次に、ビルジ外板とビルジキールの溶接とフロアーにスティフナーを立てる工程とガーダーにスティフナーを立てる工程の後に、ガーダーへフロアーを取り付ける。最後にビルジ外板ベースにてフロアーの溶接を行う。この時にキールの溶接でビルジ外板に縦反りと曲がりの緩みが生じ、ガーダーとフロアーの溶接では角変形が生じるのでこれを矯正する。これらの溶接は作業効率を考慮して全て下向きで行うようにする。次の段階でフロアー付きガーダーにビルジ外板を取付けるが、(捩れ防止のために拘束を施す or 敢えて拘束しないで）通常フロアーと外板の間に５㎜程度のギャップが見られるのでこれを引付けて仮付けを行う。この場合の仮付けは本溶接での欠陥発生を抑えるために最小限に止めている（捩れを防ぐために可能な限り強い仮付けを指示)。本溶接は中央のフレームから外に向けて順次実施。

通常は、ビルジブロックの前後が下がった太鼓型の変形が見られるが、たまに大きく捩れた形の変形が生じる事がある。このような捩れ変形に関しては大きさ方向に規則性は認められない。また、ビルジブロックは船底ブロックと船側ブロックのつなぎ目でありブロック搭載精度の要となるブロックであり、過大な捩れ変形が生じた場合にはガス加熱による矯正が行われる。この矯正作業には熟練を要し、近年ではその技術を持つ作業者が得難い状況となっているので、ブロック搭載時の精度を確保するためには捩れ変形の発生メカ

ニズムを明らかにし、これを防止することが急務となっている。

5.3　検討対象ビルジブロックと FEM モデル

ビルジブロックの具体的な例として 38000 トン級バラ積船を採用した。図 5.4 は、対象としたビルジブロックを示し、全長は約 14.5m であり、ビルジ外板、ロンジガーダー、7 枚のフロアーおよびそれらに取付けられたビルジキールおよびスティフナーから構成される。

5.3.1　対象ブロックの形状寸法および溶接条件

①ビルジ外板の概略図と部材寸法

ビルジ外板ブロックの長さは 14.5m、幅 1.8mであり、部材の板厚は表(5.1)となっている。

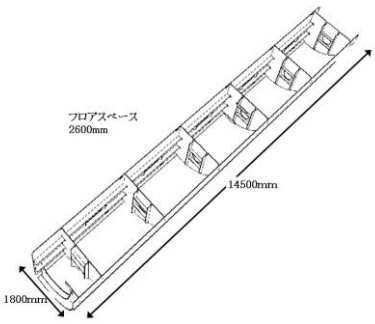


図 5.4 検討対象ビルジブロックの寸法

表 5.1 ビルジ外板部材の板厚

部材の板厚	
部材名	板厚
ビルジ外板	15mm
ビルジキール	12,17,18mm
ガーダー	10.5mm
フロア	12,14mm
タンクトップ板	15mm
スティフナー	12mm

②溶接条件

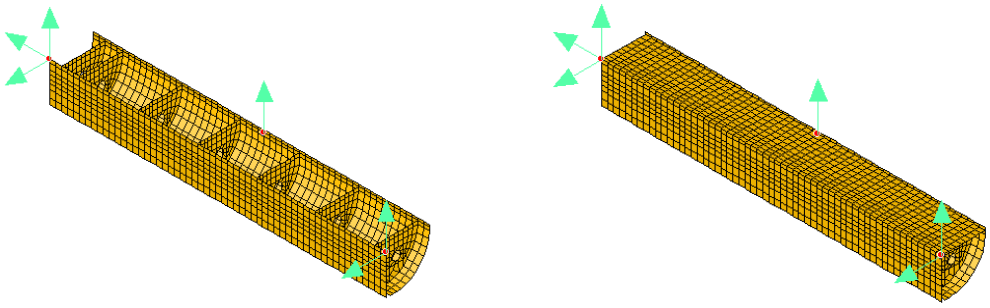
ビルジ外板ブロックの溶接条件は表 5.2 に示されており、この溶接条件は実船で使用している溶接条件である。

表 5.2：ビルジ外板ブロックの溶接条件

溶接継手	溶接電流(A)	溶接電圧(V)	溶接速度(mm/s)	溶接効率
ビルジ外板/ビルジキール	300	36	4.17	0.75
ビルジ外板/フロアー	240	32	5.33	
フロアー/スティフナー	240	32	5	
ガーダー/フロアー	220	28	5.33	
ガーダー/スティフナー	240	30	5.83	

5.3.2 ビルジブロックの FEM モデル

上述のビルジブロックの FEM モデルを図 5.5 に示す。現行の建造法では工程の効率化のため内底板はビルジブロックに含まれていないが、これを含んだ場合についても検討するため図 55 には内底板が含まれていないモデル (Model-A) と含まれているモデル (Model-B) が示されている。



(a) Model-A　　(b) Model-B

図 5.5 ビルジブロックの FEM モデルおよび拘束条件

ビルジブロックの捩れを把握しやすいようにガーダーの両端とビルジ外板の中央の 3 点を垂直方向に拘束する拘束条件を設定した。

また、部材間の溶接による局部変形すなわち固有変形の値として表 5.3 の値を用いた。

表 5.3 隅肉溶接継手の固有変形

溶接継手	横収縮 (mm)	縦収縮 (mm)	横曲り (rad)	縦曲り (rad)
ビルジ外板/キール	0.132	0.418	0.020	0.0
ビルジ外板/フロアー	0.0456	0.160	0.020	0.0
フロアー/スティフナー	0.0548	0.173	0.020	0.0
ガーダー/フロアー	0.0522	0.165	0.020	0.0
ガーダー/スティフナー	0.0464	0.146	0.020	0.0
内底板/ビルジ外板	0.0522	0.146	0.02	0.0
内底板/ガーダー	0.0522	0.165	0.02	0.0
内底板/フロアー	0.0522	0.165	0.02	0.0

5.3.3 シミュレーションでの検討事項

第 2 章で述べたように溶接組立てによる変形の原因は溶接による継手部の収縮（固有変形）とギャップの二つである。そこでこれらがビルジブロックの捩れ変形に及ぼす影響を明らかにするために次の理想的な場合を考える。

(1) 部材の形状寸法に誤差は無く、ギャップの無い状態で溶接中にズレやギャップが生じない程度に十分強い仮付けをした後にスティフナーの溶接も含め全ての溶接を行った場合。

(2) フレームの切断精度が悪く、フレームとビルジ外板の間にギャップが有りこれを組立て時に引付けて仮付けをした場合

また、理想的な仮付けと異なり現実の施工で行われる仮付けは本溶接で溶接欠陥が発生しないように可能な限り仮付けビードの寸法は小さく抑えられるので、先行の溶接によって

仮付の変形により部材間のギャップが開いたり閉じたりすることは十分考えられる。そのような場合には、溶接順序によってギャップの開閉口量が変化し結果として捩れ変形が発生する可能性があるのでこれについても検討する。

以上の検討により捩れ変形が発生するメカニズムを把握した上で、現行の建造法を模擬した計算を行い、捩れ変形発生の原因を明らかにするとともにその防止あるいは低減法を検討する。さらに、建造の能率と言う観点からビルジブロックに含まれていない内底板をビルジブロックに含めブロックの剛性を高めた場合の効果についても検討を行う。

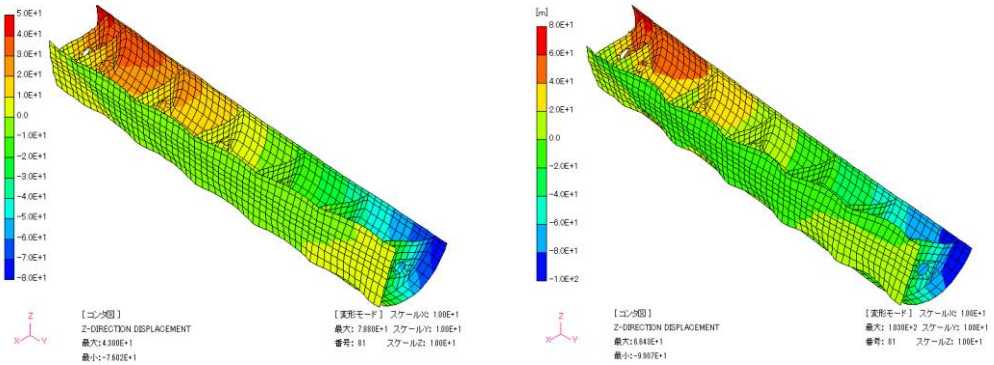
5.4 捩れ変形のメカニズム

5.4.1 溶接による捩れ変形

まず局部変形のみによる変形を検討するため全ての部材には形状誤差は無くギャップや目違いが無い状態で強く仮付けされていると仮定して計算を行った．ここではどの部分の溶接が捩れ変形の主要な原因であるかを見極めるために下記の２ケースについてそれぞれ微小変形と大変形を仮定した計算を行った．

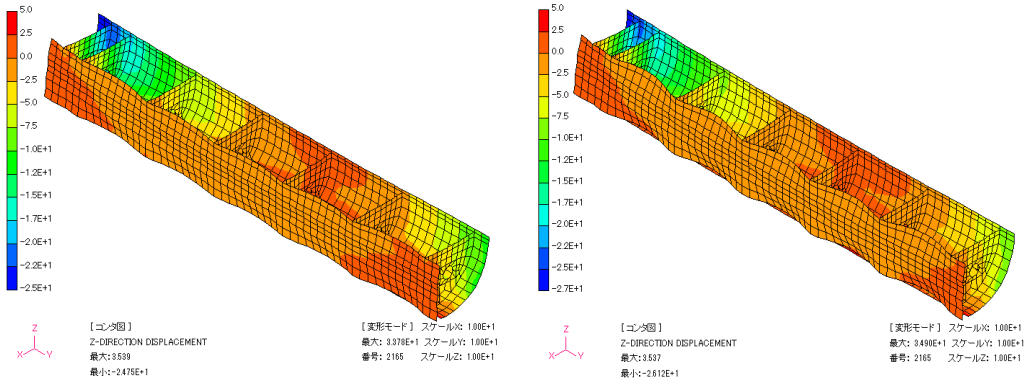
Case-A1 全ての溶接による局部変形を考慮した計
Case-A2 フロアとスティフナー間の溶接以外の溶接を考慮した計算

なお，ビルジガーダーの捩れを明確に捉えるために図 5.5 に示される拘束を設けた．
この計算では，表 5.3 に示された固有変形，すなわち横収縮，縦収縮，角変形を各溶接継に与えた．まず，内底板を含まない Model-A について，全ての局部変形を考慮した Case-A1 で微小変形および大変形理論を用いて計算した結果を示した図が図 5.6 である．図が示すように，微小変形，大変形の何れの場合にも捩れ変形が認められる．変形の最大値はそれぞれ 43 mm，66 mm でありオーダー的には差が無い．このことは，局部変形によるビルジガーダーの捩れ変形では大変形の影響は無視できないが基本的には微小変形支配の現象と言える．



(a) 微小変形解析 (b) 大変形解析
(最大変位=43 mm) (最大変位=66 mm)

図 5.6 溶接局部変形による捩れ変形 (Case-A1).



(a) 微小変形解析　　(b) 大変形解析
(最大変位=3.5 mm)　　(最大変位=3.5 mm)

図 5.7 溶接局部変形による捩れ変形(Case-A2).

図 5.7 はフロアとスティフナー間以外の全ての溶接を考慮した Case-A2 の変形を示し，微小変形，大変形いずれの場合も変形は長さ方向にアーチ型で絶対値は約 3 mm である．Case-A1 と Case-A2 の比較から局部変形で捩れの原因となるのはフロアとスティフナーの溶接であることが明らかとなったが，現実の製作ではスティフナーの溶接は小組段階で完了しているのでブロックの最終組立段階で生じる捩れ変形の原因とはならない．

次に，内底板の捩れ変形防止効果を評価するために Case-A1 の全ての溶接による局部変形を考慮した場合におけるビルジブロックの変形を Model-B についても大変形解析した．その結果をビルジ外板上面に沿った撓みについて Model-A と Model-B を比較した図が図 5.8 であり，Mode-B ではほとんど捩れ変形が認められない．これはビルジブロックに内底板を含めたことにより捩れ剛性が上昇したためと考えられる．

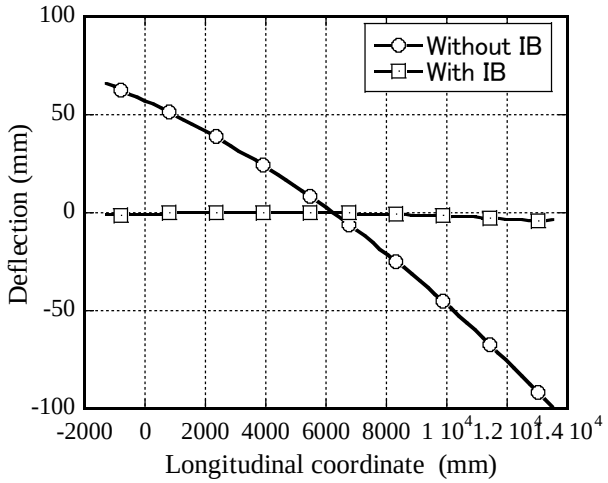
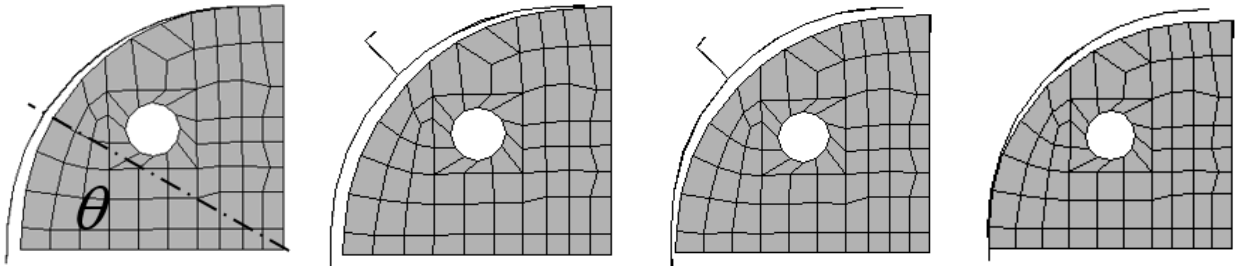


図 5.8 ビルジ外板上面に沿った垂直変位分布に注目した Model-A と Model-B の比較
(大変形解析)

5.4.2 ギャップ矯正による変形

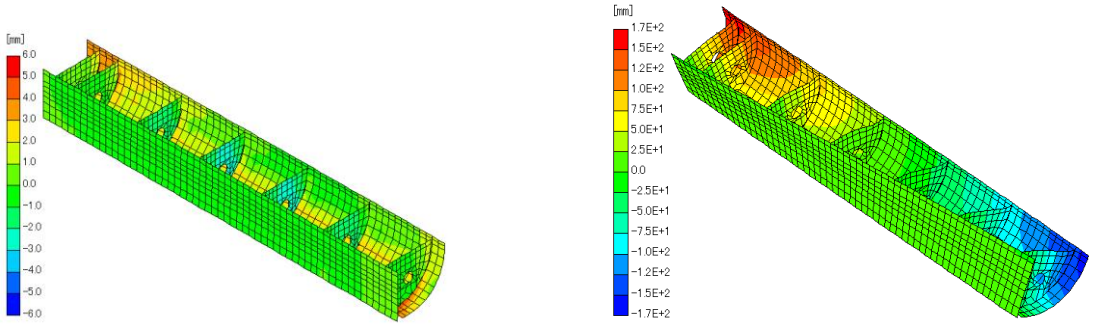
ここではギャップ矯正あるいは取付作業による捩れ変形について検討する．まず基本的な検討を行うために部材間に設置された界面要素の剛性は非常に大きく開口や目違いに対応する Kx，Ky，Kz は 10^7 N/mm^3，角変形などの回転に対応する $K_\theta x$，$K_\theta y$，$K_\theta z$ は 10^7N/mm^2 と仮定した．また，溶接による局部変形は無いものと仮定した．一方，現実に部材間に存在するギャップは多様で不規則な分布をしていると考えられるので，フロアとビルジ外板のギャップの典型的な分布として下記の Case-C1，Case-C2，Case-C3 を想定した．

Case-C1　一様に分布したギャップ
Case-C2　$a\{1+\mathrm{Cos}(2\theta+\pi x/L)\}$
Case-C3　$a\{1+\mathrm{Cos}(2\theta+2\pi x/L)\}$



(x=2080 mm)　(x=3900 mm)　(x=9100 mm)　(x=14300 mm)

図 5.9 想定したビルジ外板とフロアーの間のギャップ(Case-C2)



(a) 微小変形　　(b) 大変形

(最大変位=1.0 mm)　　(最大変位=163 mm)

図 5.10　ギャップ矯正により生じた捩れ変形（Case-C2）

ここでθは図 5.9 に示されるようにビルジサークルに沿った角度であり，Lはビルジブロックの全長，xはビルジブロックの長さ方向の座標である．たとえば Case-C2 は，最大のギャップである 10.0 mm のギャップは，ビルジブロックの端部の上面$(x=0,\theta=0)$と他端の下面$(x=L,\theta=\pi/2)$に現れる．また Case-C3 では最大のギャップが両端の上面$(x=0,L,\ \theta=0)$に現れる．

図 5.10 はギャップ分布が Case-C2 の場合の変形を示す．微小変形解析で計算した変形に

は捩れはほとんど認められないが，大変形解析で計算した結果には約 160 mm の非常に大きな捩れ変形が認められる．このように大変形解析の結果にのみ大きな捩れ変形が現れると言うことはビルジブロックの捩れ変形の原因は座屈であることを示唆している [3-6].

さらにギャップ量が捩れ変形に及ぼす影響を明らかにするため Case-C2 および Case-C3 について計算を行った．最大ギャップの大きさである $2a$ を 2 mm から 10 mm の間で変化させた時のギャップの大きさと捩れ量の関係を示した図が図 5.11 である．捩れ量はギャップ量の 2 乗にほぼ比例して増加しており現象が座屈のような大変形理論に支配された非線形の現象であることを示唆している．

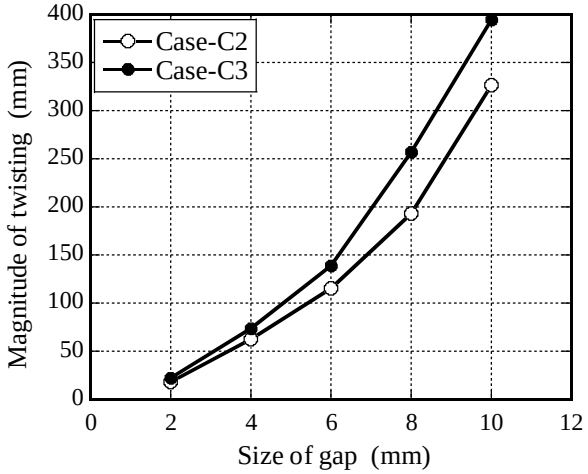


図 5.11 ギャップの大きさと捩れ変形の大きさの関係

薄板の座屈は圧縮の応力によって発生し，ビルジブロックの場合も同様に圧応力が原因である．フロアとビルジ外板の間に存在するギャップの矯正によって圧縮の応力が発生するメカニズムを説明した図が図 5.12 である．仮付した状態でギャップを強制的に閉じるとビルジ外板には圧縮の応力が，フロアには引張の応力が発生する．したがってビルジブロックの捩れを抑えるためには，ギャップ矯正によって応力を作らないように仮付の位置やタイミングに注意する必要がある．

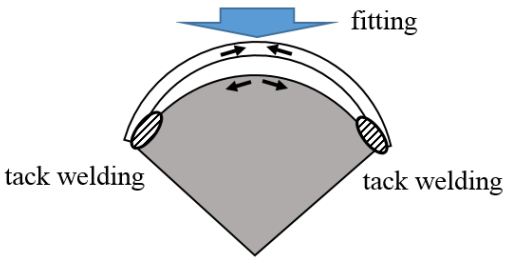


図 5.12 ギャップ矯正によりビルジ外板に圧縮の応力が発生するメカニズム

5.5 捩れ変形の修正法

ビルジブロックの製作時にギャップ矯正により生じる捩れ変形はギャップの大きさや分布，仮付けの強さやギャップ矯正の強さなど予測や制御が困難な要因に強く影響されるので，製作過程でその発生を完全に防止することは非常に難しい．したがって発生した捩れ変形を簡便な方法で除去できれば現実的な対策となる．そこで線状加熱による捩れ変形の矯正法の可能性を検討した．

線状加熱による板曲げでは，板の表裏面を互いに直交する方向に加熱することで板が捩れることが知られている．同様な方法がビルジブロックの捩りにも適用できることを確認するために，ビルジ外板に剪断型の曲率を与えた時の捩れ変形を固有ひずみ法を用いて計算した．図 5.13 は与えた曲率が 0.0004 (1/mm)の時のビルジブロックの捩れ変形を示し捩れの方向は溶接組立による捩れの方向と逆である．さらに，与えた剪断型の曲率の大きさと捩れ量の関係を Model-A と Model-B について示した図が図 5.14 であり，内底板を含まない Model-A は容易に捩れるのに対し，捩れ剛性が大きい Model-B の捩れ量は非常に小さい．このことは，ビルジブロックに内底板を含めた場合にはギャップ矯正による大きな捩れは防止できるが反対に捩れが生じた場合に線状加熱で矯正できないことを意味している．

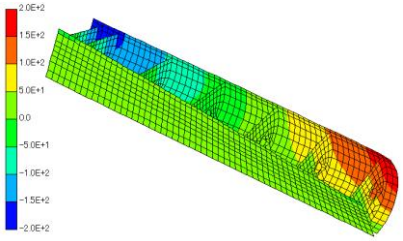


図 5.13 ビルジ外板に線状加熱を施工した時の捩れ変形 ($\kappa^* = 0.0004(1/mm)$)

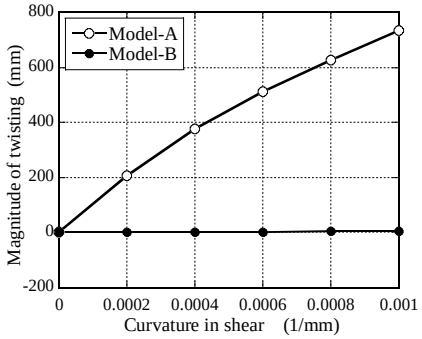


図 5.14 付与する剪断型の曲率の大きさと捩れ変形量に注目した Model-A と Model-B の比較

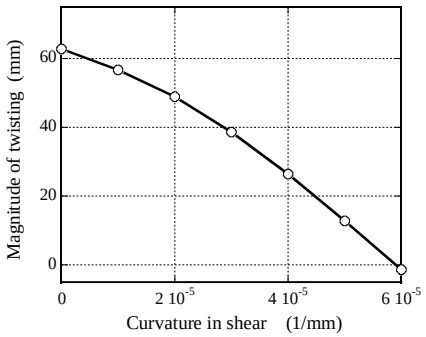


図 5.15 線状加熱によって付与する剪断型の曲率と線状加熱後の捩れ量の関係

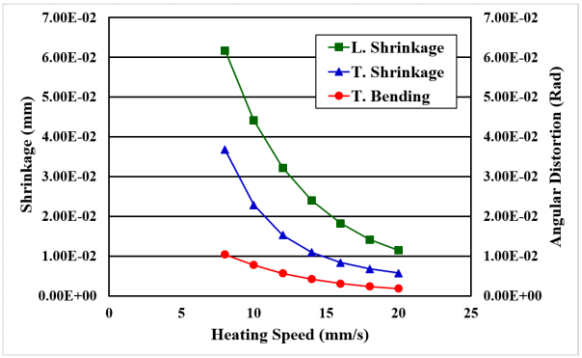


図 5.16 線状加熱における加熱速度と生成する固有変形の関係

次に，固有変形法を用いてビルジブロックの捩れ変形を再現し，これを修正する手段としての線状加熱の有効性を検討した．そのために異なる大きさの剪断型の曲率κ^*をビルジ外板に一様に与えた時の変形を計算した．現実に造船所で経験する捩れ変形のオーダーは 50 mm 程度なので，図 5.11 より捩れ変形の原因となるギャップの大きさとして 4 mm を想定し計算を行った結果，捩れ量は約 60 mm となった．60 mm 捩れたビルジブロックに異なった大きさの剪断型の曲率をビルジ外板に与えた時の捩れ量を示した図が図 5.15 であり，$\kappa^* = 6\times10^{-5}$ (1/mm)の時に捩れがほぼゼロになることが分る．

詳細は割愛するがビルジ外板の板厚である 15 mm の鋼板を 8 mm/s から 20 mm/s の速度で線状加熱した時の変形を冨田らが提案した局所熱伝達係数の考え方 [7]を導入した熱弾塑性 FEM[8]を用いて解析し，得られた横収縮，縦収縮および角変形と加熱速度の関係を示した図が図 5.16 である．トーチの移動速度が 8mm/s で線状加熱すると約 0.01 rad の角変形が得られる．この加熱条件を採用するとビルジブロックに生じた 60 mm の捩れ変形を取除くために必要な曲率である$\kappa^* = 6\times10^{-5}$ (1/mm)は，加熱線間隔を$0.01/6\times10^{-5}$=166.6 mm とした線状加熱により達成できることが分る．

5.6 まとめ

固有変形法および熱弾塑性 FEM を用いてビルジブロックの捩れ変形のメカニズムおよび捩れ変形の修正法について検討した結果，以下の知見が得られた．

(1) ビルジブロックの捩れ変形はギャップ矯正時にビルジ外板に発生する圧縮の応力による座屈現象である．また，ギャップの形態は多様であり予測が難しいので組立過程でビルジブロックの捩れ変形を制御するのは現実的ではない．

(2) ビルジブロックの捩れ剛性を大きくすることでブックの捩れ変形は大幅に低減できる．

(3) ビルジブロックの変形を抑える現実的な方法はブロックの捩り剛性を大きくすることであり，発生した捩れ変形は線状加熱により除去することができる．

参 考 文 献

(1) 村川 英一, 鄧徳安, 柴原 正和：薄板構造物の溶接組立における変形予測(第一報)，関西造船協会論文集，Vol. 2002, No. 238, 2002，pp.163-172.

(2) H. Murakawa, Y. Okumoto, S. Rashed, M. Sano : A practical method for prediction of distortion produced on large thin plate structures during welding assembly, Welding in the World, 57 (6), 2013, pp. 793-802.

(3) J. Wang, H. Murakawa, M. Shibahara and X. Zhang : Twisting Deformation of Thin Plate Stiffened Structure under Welding, Preprints of the National Meeting of J.W.S., 89 (2011), 162-163.

(4) 村川英一, 王江超, ブランドン ホワン：熱加工における座屈変形発生の理論予測、溶接学会全国大会講演概要、Vol. 2012s (2012).

(5) 村川英一, 芹澤久, 王江超：薄板構造の座屈型溶接変形の固有変形法による予測、溶接学会全国大会講演概要、Vol. 2011s (2011).

(6) 王江超, 柴原正和, 張旭東, 村川英一：薄板防撓構造の溶接による捩れ変形、溶接学会全国大会講演概要、Vol. 2011f (2011).

(7) 松岡 潔, 冨田 康光, 大沢 直樹, 橋本 聖史, 澤村 淳司：熱伝導逆解析による線状加熱時の入熱量の推定法に関する研究，関西造船協会論文集，Vol. 2002, No. 237 (2002), pp.255-261.

(8) 西川 弘泰, 芹澤 久, 村川 英一：大規模溶接シミュレーション手法の開発，日本船舶海洋工学会論文集，Vol. 2, 2005，pp.379-385.

第 6 章 歪修正作業の上流化

6.1　緒言

客船やカーフェリーの上部構造では、重量を減少させて船の重心を下げるために 5 mm あるいは 6 mm といった薄い板厚の鋼板が多用されるが、薄い鋼板の溶接では大きな変形が発生する。船の建造はいくつかの工程に分かれており、小組、中組、大組での変形が累積し、最終的に大きな歪となる。特に、船全体に薄板が使用されているカーフェリーでは大きな歪が発生するが、美観を重視する客船であるために歪の許容値も厳しく設定さているので歪修正に多くの工数が要求される。また従来の建造法では、船台あるいはドックで最終的な歪取が実施されるので艤装などの他の作業との干渉が発生し工程遅延の原因となっていた。そこで、本研究では、歪取り作業の効率化と歪取り作業を早期に完了させる上流化を目標とし、組立順序や部材間のギャップ処理が薄板パネルの座屈変形に及ぼす影響について固有変形法[1-6]を用いて検討を行った。

6.2　カーフェリー上部構造の概要

カーフェリー上部構造は船体中心面に対して左舷側と右舷側がほぼ対称であるので、図 6.1 に右舷側の構造を示す。総組は 3 つの大組の AD、ND と CPD で構築されている。AD はプロムナードデッキとその下の壁で構成され、ND はナビゲーションデッキとプロムナードデッキまでの壁で構成され、CPD はコンパスデッキとナビゲーションデッキまでの壁で構成される。AD 側壁に 9.5 mm の鋼板が使われている他はブロックのほとんどに 6 mm の鋼板が使われている。また、本研究対象としたカーフェリーの上部構造ブロックの高さは 10.75 m、幅は 23.4 m、長さは 17.2 m である。

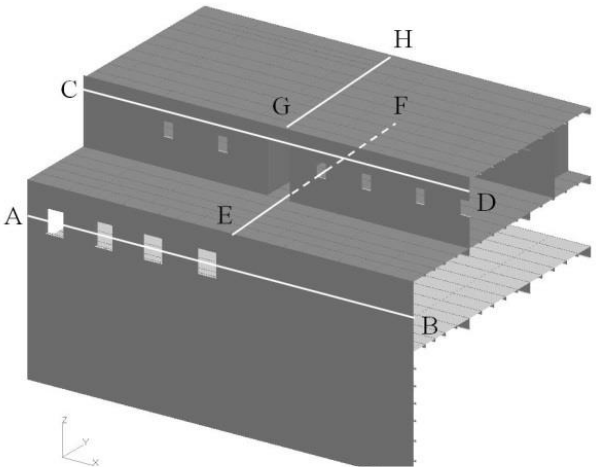


図 6.1 フェリー上部構造右舷概要

6.3　従来の上部構造組立の概要

各ブロックはフレーム構造で構成されており、AD のウェブフレームおよびデッキビーム、ND デッキビーム、CPD のデッキビームはウェブとフランジを溶接したビルトアップ部材で構成されている。そのほかロンジ材はアングル材となっている。さらに、ブロック組立の概要については、それぞれの外板、デッキにロンジ、ビーム、ウェブフレームを配材、溶接して、デッキベースにて外板を立てて、溶接を行い各デッキの大組立が完了する。次工程の総組においては AD の上に ND を搭載し、仮付、溶接行う。さらにその上に CPD を搭載、仮付、溶接を行う。総組終了後に全面の歪取りが行われる。

6.4　歪取りの上流化の重要性と問題点

歪取りの上流化には幾つかの方法があり、搭載前の大組立 AD、ND、CPD が完成した後に歪取りを行うか、もしくは外板およびデッキ中組の段階で反転して歪取を行うかなどである。

これらの工法を採用することにより、該当ブロックの船台での継手箇所以外はすべての火気工事が完了したことになるので継手の近傍以外は塗装を完了して搭載することが可能となる。また、船台での歪取り作業がほぼ完成しているので、工期を大幅に短縮する事が可能となる。計画での予想効果としては 20 日以上の工期短縮と見込める。

しかしながら、造船所の熟練作業者の間では、すべての溶接火気工事が完了した後に歪修正を実施しなければならないという定説がある。これは歪修正をブロック製作の初期段階で行うと後続の溶接により既に修正したパネルに再度大きな歪が必ず発生するという理由からである。

6.5　上部構造の溶接と歪取り

本研究では上部構造の組立工程の進行にともなう変形について固有変形法を用いた計算により追跡した。なお、計算ではデッキプレートと側壁および内部構造の壁の製作においては、それぞれを構成する大板の板継溶接および AD のデッキビームとサイドフレームのフェースとウェブは予め溶接が完了していると考え、これ以降の全ての取付け（ギャップ処理)、溶接、歪取による変形を計算した。

また、溶接条件については、内部構造の隅肉溶接脚長は 3mm であり、その他の溶接脚長は、部材の板厚によって変化するが、4～5 mm である。溶接電流は 240 A～300 A、溶接電圧は 28 V～32 V、溶接速度は 7.5 mm/s～9.2 mm/s の間となっている。

なお実施工においては、ギャップや前後左右のズレ（目違い）はジャッキ等での引き付け、小さなギャップは溶接による肉盛り溶接、重なった箇所では切り合わせが行われる。また、歪取りは主に角変形の修正を目的とし、隅肉溶接された板の反対側を 2 本同時に加熱する形で実施される。ガスの種類は酸素とアセチレンガスの混合ガスで、歪取りはブロック搭載後の溶接、すなわち全ての火気工事の完了後に施工される。

6.6　建造手順改善の選択肢

建造手順の改善に関して歪取を実施するタイミングと大組立間のギャップ処理が上部構造ブロックの変形に及ぼす影響のふたつの観点から検討を行った。

6.6.1 ブロック間のギャップやズレの取扱

薄板パネルの溶接変形は、角変形が直接原因となるやせ馬のような変形とパネルに存在する圧縮残留応力が原因となる座屈変形の２種類に分けて考えることができる。後者の座屈に関しては、圧縮残留応力はスティフナーの隅肉溶接により導入される場合と、ブロック間の取合いに発生したギャップやズレをジャッキなどの力を使って修正した際に導入される場合が考えられる。ここでは、ブロック間のギャップやズレの処理がパネルの変形に及ぼす影響を把握するために、ギャップを完全に修正するケースと発生したギャップに対して引付けや切り合わせをせずにそのまま保持し仮付けと溶接を行うケースのふたつのケースを設定した。

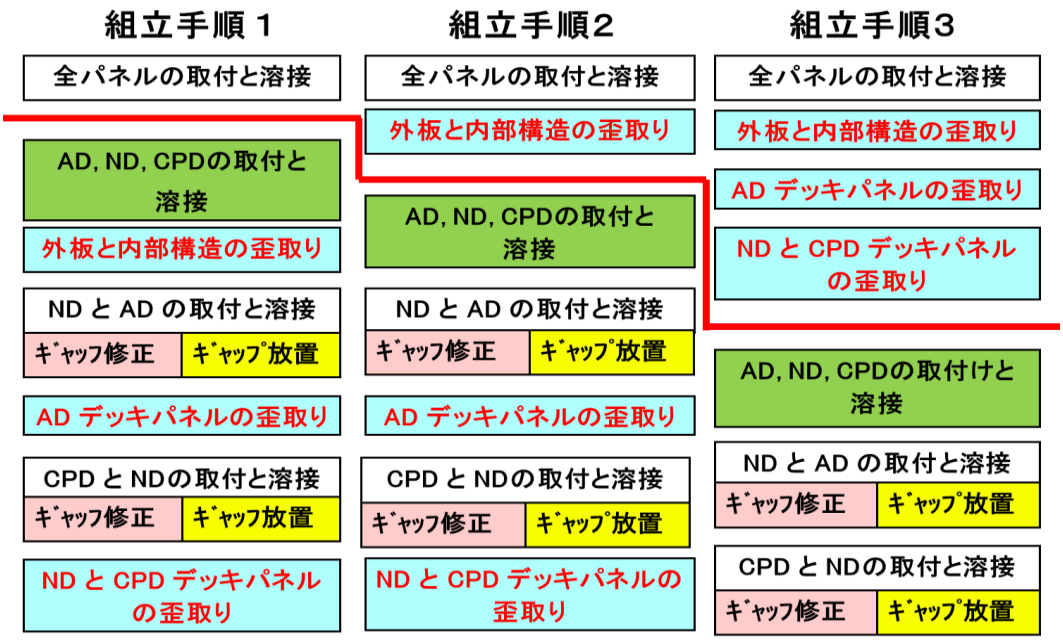
6.6.2 歪取のタイミング

次に薄板パネルの変形に影響を及ぼすと考えられるのが歪取のタイミングである。組立スケジュールを短縮するという観点からは、他の工事が早期に着手できるように、組立の初期ステージで歪取りを実施するのが望ましい。そこで、

早期の歪取りがブロックの変形に及ぼす影響について検討した。

そのために表 6.1 に示されるように組立手順 1、組立手順 2、組立手順 3 の 3 つの異なる歪取のタイミングを想定した。すなわち、手順 1 では AD、ND、CPD の大組立の溶接が完了した後に外板と内部構造の歪取が行われる。また、AD のデッキパネルの歪取りは AD に ND を搭載し溶接が完了した後に行なう。ND と CPD も同様に CPD を搭載し溶接が完了した後に ND と CPD のデッキパネルの歪取りを行なう。手順 2 では外板と内部構造の歪取りは、それらの中組が完了した後に、その場で反転して実施し、デッキパネルについては手順 1 と同様にそれぞれのデッキの大組立を搭載し溶接が完了した後に行なう。手順 3 では外板と内部構造およびデッキパネルの歪取りはパネル中組が完成した後、直ちに反転して実施される。これら 3 種類の組立手順と前述の 2 種類のギャップ処理を組合せた 6 通りの組立手順を対象に固有変形法を用いて歪発生への影響を検討した。

表 6.1 溶接および歪取り手順とギャップの処理法



6.7 解析方法について

本研究では上部構造の変形を予測するため固有変形法を使用した。各溶接部の固有変形は熱弾塑性解析と試験結果[7]に基づいて評価し、2 つの部材間にはギャップ処理を表現するために界面要素を配置した。歪修正については、補剛材の隅肉溶接による角変形を除去するための線状加熱を想定し、隅肉溶接継手の

裏側に歪修正に対応した固有変形を与えることにより計算を行った。具体的には、歪取は溶接が完了した後に継手部が冷却した後に施工されるので歪取の熱により溶接線とその周辺の溶接残留応力の一部が解放される。主にテンドンフォースに対応した溶接線方向の残留応力が解放される。その後に、継手部の冷却・収縮によって発生する新しい固有変形が加わると考え、歪取の固有変形は、溶接残留応力の解放も考慮して評価した。

境界条件については、まずデッキや壁などの中組立の段階では、それぞれの中組立は互いに独立しているので中組立間の界面要素は切断された状態に設定し、個々の中組立の剛体変位を拘束した。次に、デッキと外板や壁が溶接される大組立の段階では、デッキと外板や壁の間のギャップに対して完全に閉じるあるいは放置するという処理を行った後に界面要素の剛性を大きく設定して結合状態にした。この間の計算では、大組立毎に剛体変位を拘束した。最後の総組立における界面要素および拘束条件についても同様な取扱を行った。

6.8 解析ブロックの FEM モデル

本研究の対象構造のフェリー上部構造の有限要素モデルは設計寸法通りに作製し、延べ尺や端部伸ばし、逆変形などは考慮していない。図 6.2 は上部構造の有限要素メッシュを示す。ここでは内部構造が見やすいように右舷側のみを示す。寸法が小さい部材を除き外板、デッキおよび内部隔壁には基本的に 200×200mm の正方形を使用した。この要素サイズを採用することにより補剛材間のパネルが 4 分割され、座屈を含めて撓みを妥当な精度で予測できる。ウェブフレーム、サイドフレーム、サイドロンジ、デッキビーム、デッキロンジなどの補剛材もシェル要素を用いてモデル化した。モデルの要素数は 81931 要素、節点数は 81322 節点であり、32 種類の溶接部材から構成されている。

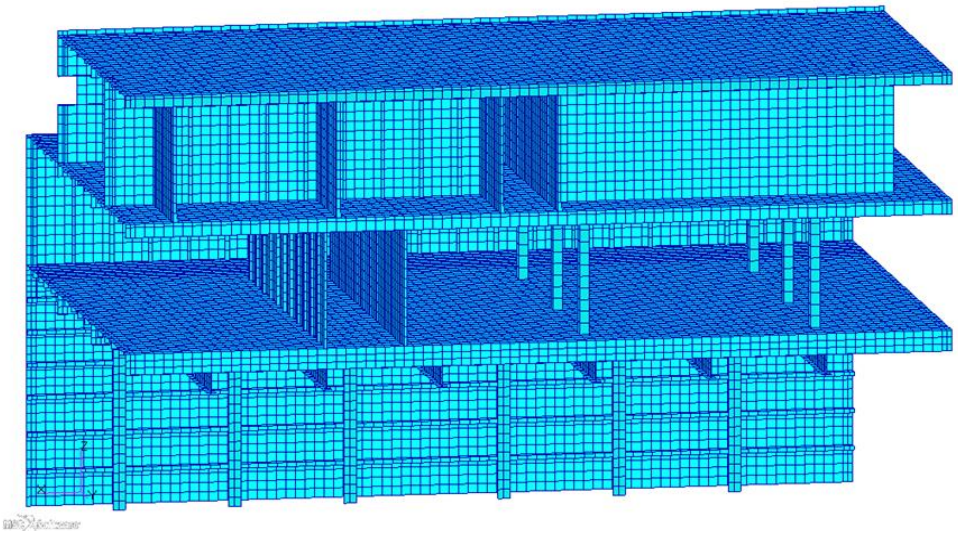


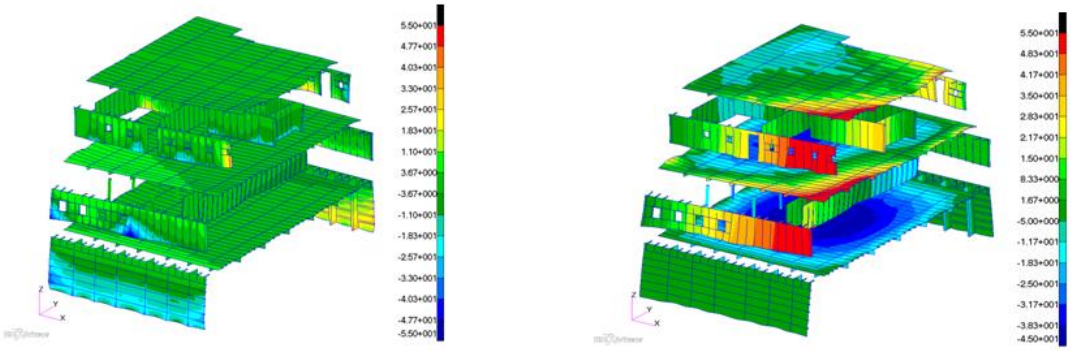
図 6.2 フェリー上部構造有限要素モデル

6.9 解析結果の考察と実船との比較

この節では、表 6.1 に示された 6 通りのケースについて固有変形法を用いた計算の結果得られた上部構造の変形を比較し、歪取工程の上流化の可否および最適な工法について検討する。

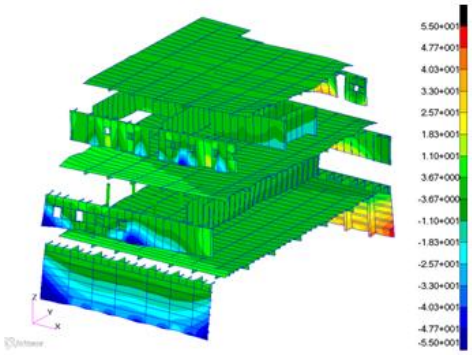
6.9.1 各工程における変形

中組立の完了後に直ちに歪取を実施する組立手順 3 でギャップを保持する場合を例に組立工程の進行にともなう変形の履歴を詳細に検討する。図 6.2 は各組立工程での船幅方向 (Y 方向) および垂直方向 (Z 方向) の変位の分布を示す。

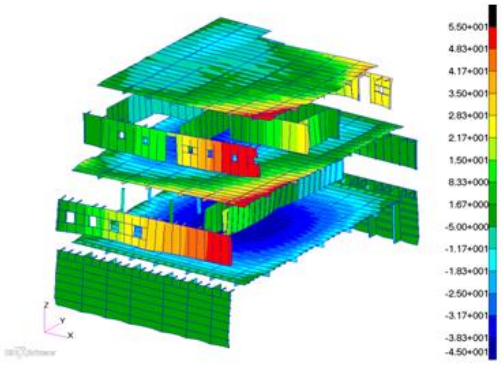


船の幅方向変位　　垂直方向変位

(Step-1) 板材と補剛材の仮付・溶接後の変形　(変形倍率 10：1)

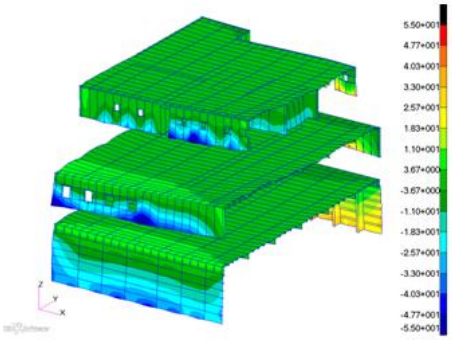


船の幅方向変位

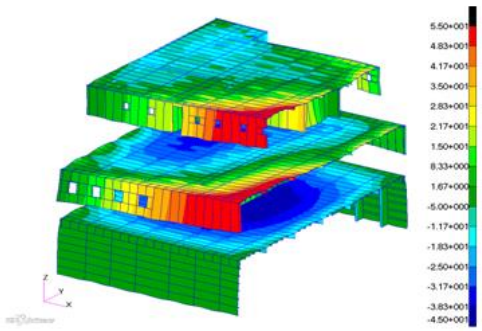


垂直方向変位

(Step-2) 中組立の歪取後の変形　(変形倍率 10：1)

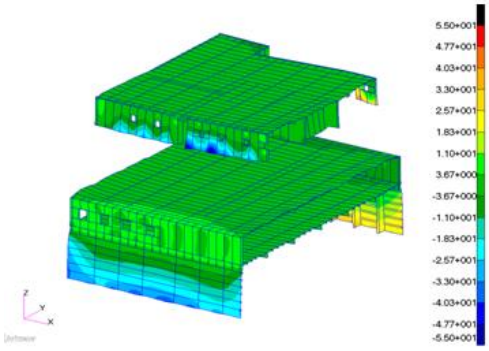


船の幅方向変位

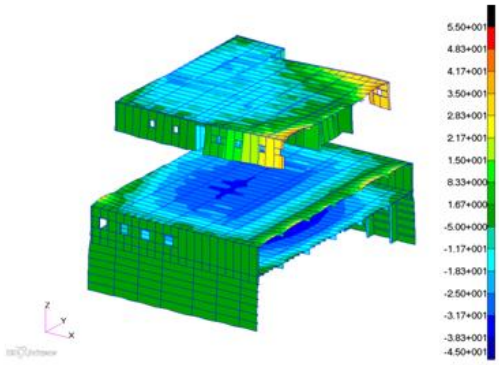


垂直方向変位

(Step-3) 大組立における仮付・溶接後の変形　(変形倍率 10：1)

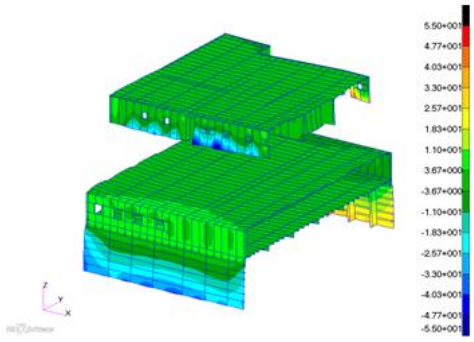


船の幅方向変位

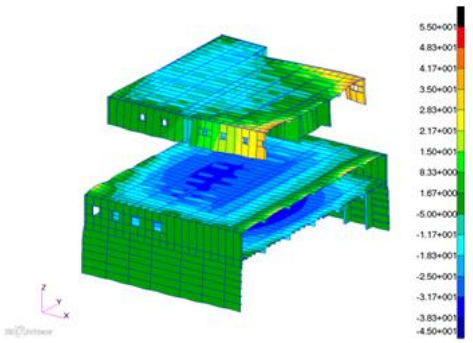


垂直方向変位

(Step-4) 大組立 AD と ND の仮付後の変形　(変形倍率 10：1)

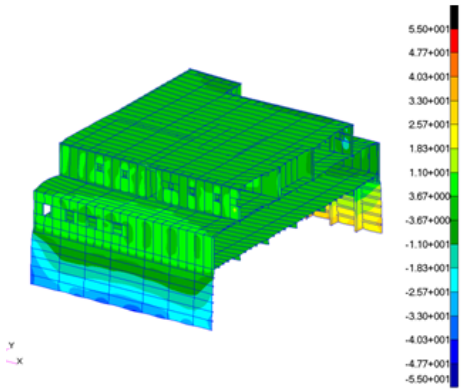


船の幅方向変位

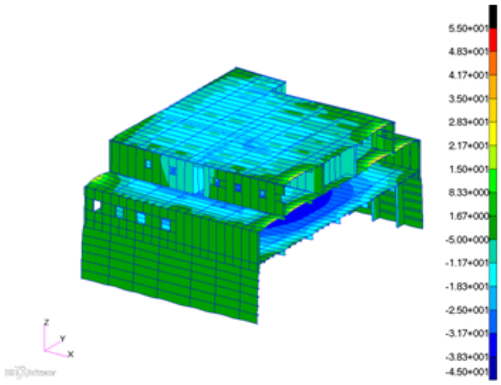


垂直方向変位

（Step-5）大組立 AD と ND の溶接後の変形　（変形倍率 10：1）

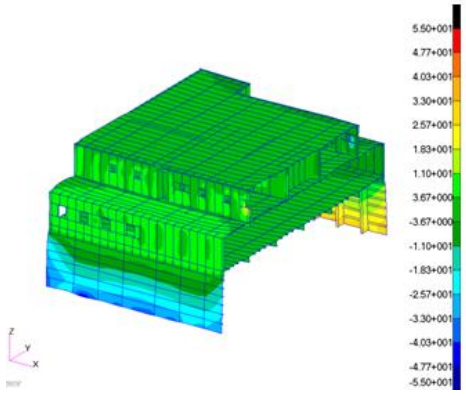


船の幅方向変位

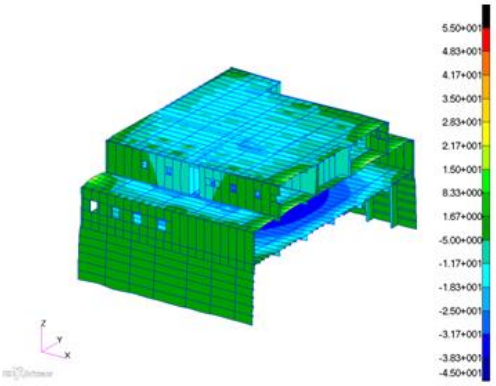


垂直方向変位

（Step-6）大組立 ND と CPD の仮付後の変形　（変形倍率 10：1）



船の幅方向変位



垂直方向変位

（Step-7）総組立完了時の変形　（変形倍率 10：1）

図 6.2 組立手順 3 でギャップ保持の場合における各工程での変形

Step-1 は各中組立（外板、デッキ、内構壁）の板材と補剛材を仮付、溶接した後のパネルの変形を示す。外板の幅方向の変形およびデッキの垂直方向の変形から分るように溶接後には痩せ馬型の歪が発生する。Step-2 は各中組立の背焼きによる歪取後の変形を示し、やせ馬型の歪が低減されることが分る。Step-3 は中組立同士の組立・溶接を行い大組立が完成した状態の変形を示し、Step-4、Step-5 は大組立 AD と ND の間のギャップを残して仮付した後および溶接後の変形を示す。さらに Step-6 は AD-ND と大組立 CPD の間の仮付後の変形を示し、Step-7 は AD-ND と大組立 CPD の間の溶接が完了し上部構造が完成した状態の変形を示す。ここで例として取上げた組立手順 3 でギャップを保持する場合では上部構造完成時に座屈のような大きな撓みは発生しないことが明らかとなった。

6.9.2 各組立手順の結果比較

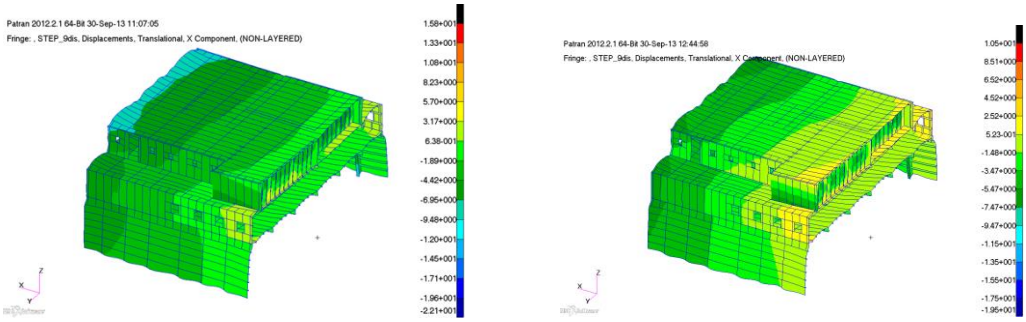
ここでは想定した３種類の組立手順について計算の結果得られた上部構造完成時の船長方向、船幅方向および垂直方向の変形についてギャップをジャッキなどを用いて矯正する場合と保持する場合について比較する。

図 6.3 は ND と CPD のデッキパネルの歪取を組立の最終段階で実施する組立手順１でギャップ矯正を行う場合とギャップを残す場合についてブロック完成時における船長方向の変位分布を示したものである。デッキブロックの搭載により CPD 側が大きく収縮するためサギング方向の縦反りが認められる。ギャップの処置の差に注目すると、ギャップ矯正を行う場合では CPD の縦収縮が約 6.3 mm であるのに対しギャップを残す場合では約 7.5 mm とやや大きい。図 6.4 は同じ組立手順１における船幅方向の変位分布を比較したものである。ND 側壁の下部のパネルの撓みに注目すると、ギャップを残した場合に大きな撓みが認められる。これは図 6.3 に示されたように、ギャップを残した場合の ND 側壁の下部の収縮がギャップ矯正を行う場合よりも大きいためと考えられる。図 6.5 は垂直方向の変位分布を示したものであり、CPD のトモ・オモテ端に位置するパネルに大きな撓みが認められる。また船幅中央におけるデッキの垂れ下りはギャップ矯正を行った場合に大きい。

次に外板と内部構造の歪取をパネル中組立完了後、直ちに実施する組立手順 2 場合の変形を示したものが図 6.6、6.7、6.8 である。船長方向、船幅方向および垂直方向の変位分布のいずれにおいても組立手順 1 の場合と同様な差がギャ

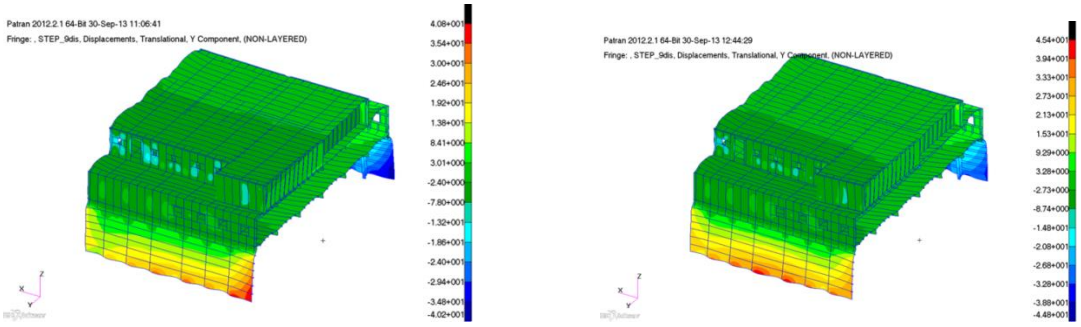
ップを矯正する場合とギャップを残す場合の間に認められる。

最後に外板、内部構造、デッキ全ての歪取をパネル中組完了後に実施する組立手順 3 について変位分布を示したものが図 6.9、6.10、6.11 である。図 6.9 に示された船長方向の変位の全体的な分布は組立手順 1 および組立手順 2 とほぼ同じであるが、開口部周辺の壁に注目するとギャップ矯正を行った場合には開口部周辺の壁に座屈によると思われる大きな変形が発生している。なお、この座屈変形を示すために組立手順 3 については y 軸の方向をあえて図 6.9、図 6.10 と逆に取った。また、図 6.10、図 6.11 は船幅方向および垂直方向の変位分布を示し、ギャップ矯正を行った場合には図 6.9 と同様に座屈と思われる変形が見られる。



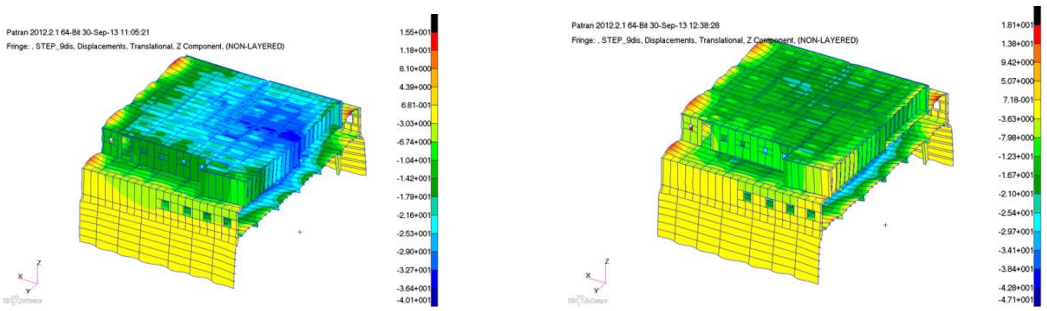
(a)ギャップ修正　　(b)ギャップ保持

図 6.3 手順 1 のブロック完成時における船長方向変位の分布



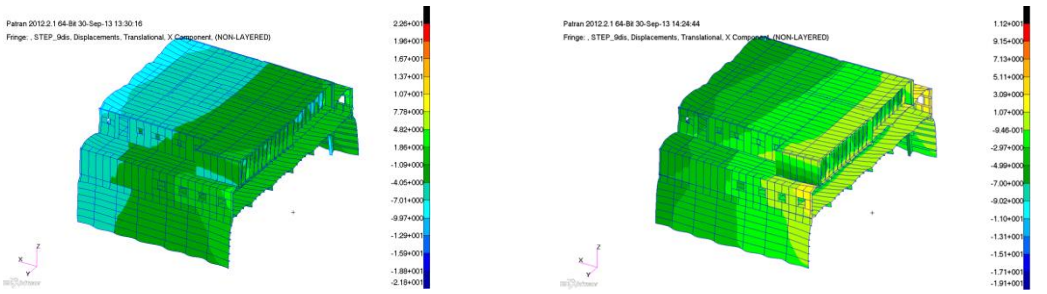
(a)ギャップ修正　　(b)ギャップ保持

図 6.4 手順 1 のブロック完成時における船幅方向変位の分布



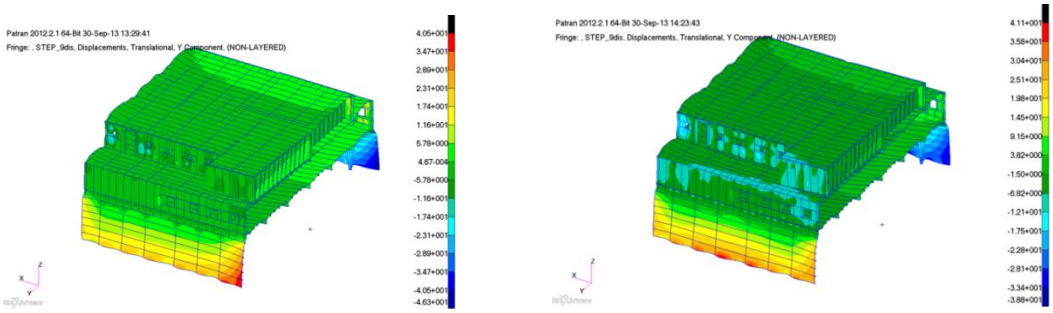
(a)ギャップ修正　　(b)ギャップ保持

図 6.5 手順 1 のブロック完成時における垂直方向変位の分布



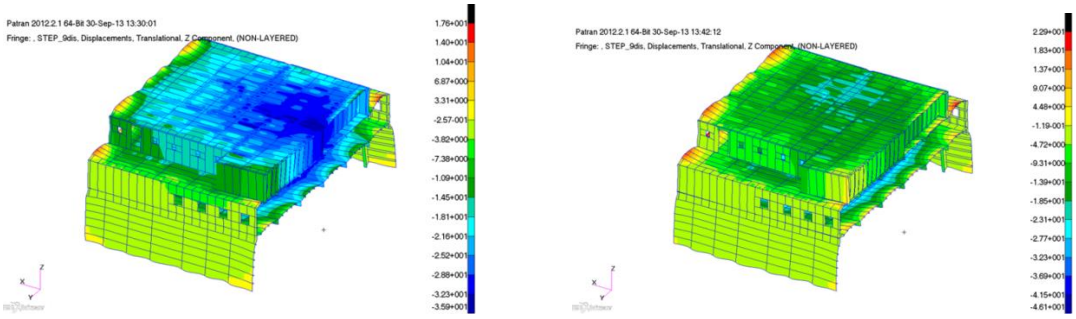
(a)ギャップ修正　　(b)ギャップ保持

図 6.6 手順 2 のブロック完成時における船長方向変位の分布



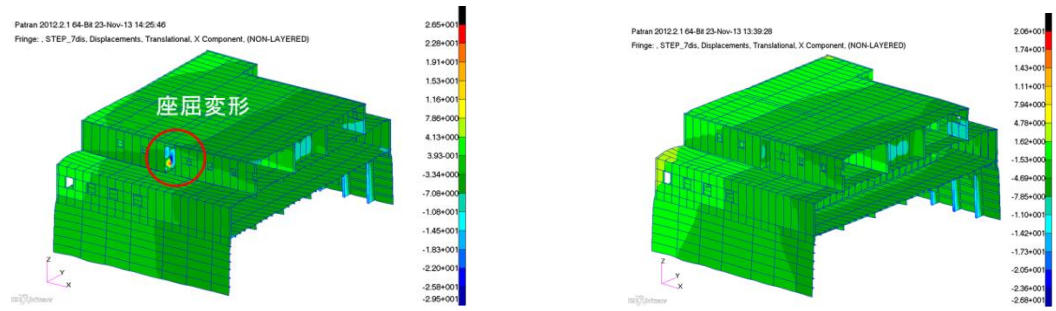
(a)ギャップ修正　　(b)ギャップ保持

図 6.7 手順 2 のブロック完成時における船幅方向変位の分布



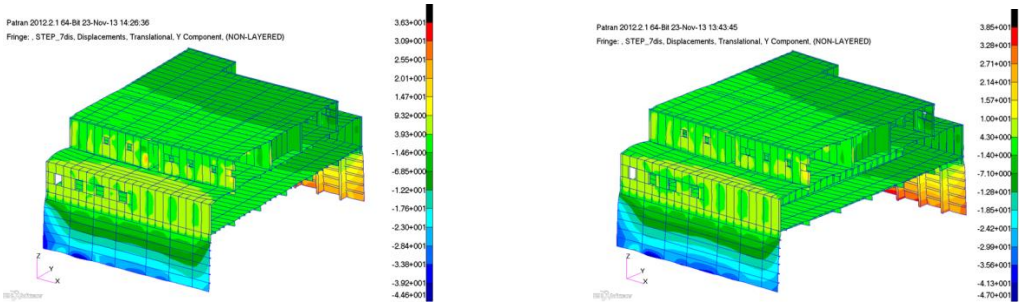
(a)ギャップ修正　　(b)ギャップ保持

図 6.8 手順 2 のブロック完成時における垂直方向変位の分布



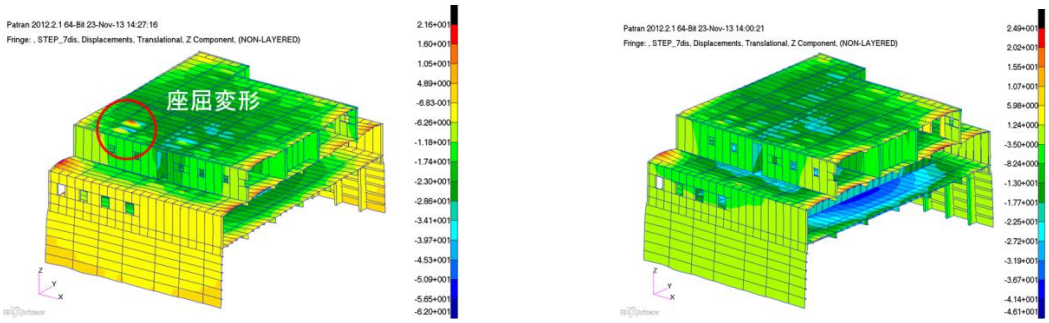
(a)ギャップ修正　　(b)ギャップ保持

図 6.9 手順 3 のブロック完成時における船長方向変位の分布



(a)ギャップ修正　　(b)ギャップ保持

図 6.10 手順 3 のブロック完成時における船幅変位の分布



(a)ギャップ修正　　(b)ギャップ保持

図 6.11 手順 3 のブロック完成時における垂直方向変位の分布？

組立手順およびギャップ処理が上部構造の変形に及ぼす影響を定量的に評価するために図 6.12 に示された 5 本の評価ラインに沿った変形分布の比較を行った。ライン A-B、C-D、G-H、I-J は側壁に沿った船長方向の変位分布に注目したものであり、ライン E-F、K-L は ND デッキ、CPD デッキに沿った船幅方向の変位分布に注目したものである。

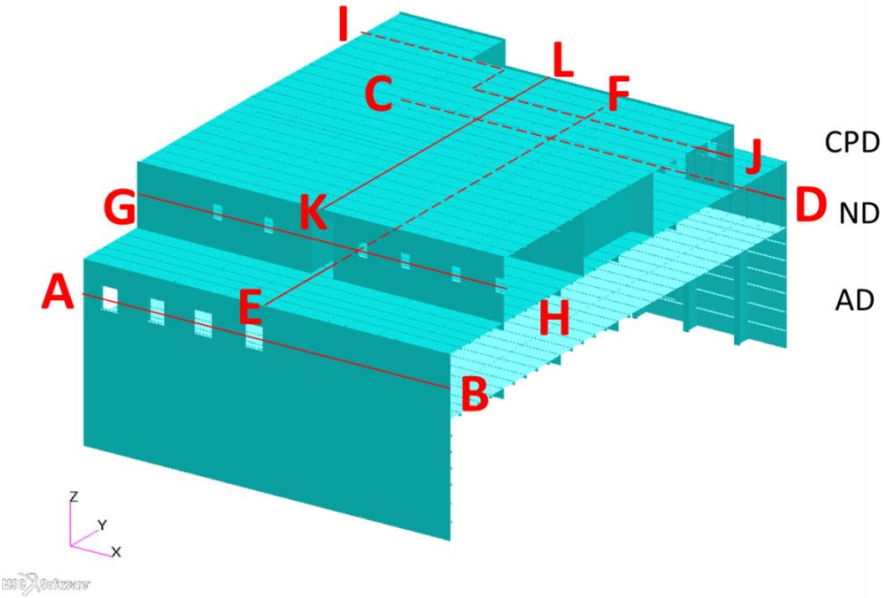


図 6.12 面外変形評価各ライン図

図 6.13 は ND 側壁のライン AB に沿ったブロック完成時の面外変形の分布を示す。組立手順 3 の場合のみ他と比較して 1mm 程度の差が認められるが、いずれの手順においても、ブロックの全長にわたる撓みは約 8mm、スティフナ間の局部

変形は約 2mm 程度であり許容値に納まっている。

図 6.14 は ND 側壁のライン CD に沿った面外変形であり、組立手順２ラインのみにギャップを矯正する場合とギャップを残す場合で約 4 mm の差が認められるがその他の点においては AB と同様の傾向である。

図 6.15 は ND デッキ上のライン EF に沿った面外変形の分布を示しており、船のセンターライン付近でデッキが約 20 mm 垂れ下がっており、スティフナ間の局部変形は概ね 2mm～5 mm 程度であるが 10 mm 程度の大な変形も現れている。特に、組立手順 3 でギャップ矯正を行った場合には局部的な座屈が発生している。

図 6.16 は CPD 側壁のライン GH に沿った面外変形の分布を示し、組立手順１および２でギャップ矯正を行う場合には、中央部付近で局部的な座屈が発生している。

図 6.17 は CPD 側壁のライン IJ に沿った面外変形の分布であり、組立手順１および２でギャップ矯正を行う場合は他と少し異なる変形となっている。

図 6.18 は CPD デッキ上のライン KL に沿った面外変形の分布を示し、組立手順３の場合端部で撓みが他と比べてやや大きいが、組立手順による差は小さく、ギャップ処理の差によって変形量に約 7ｍｍの差が生じている。

これらの解析結果から、スティフナ間の変形およびデッキ全体の変形について次のような傾向を認めることができる。まずスティフナ間の変形に関しては、ほとんどのケースでスティフナ間の局部的な変形は 2、3ｍｍ程度で許容値に納まっており、組立手順による大きな差は認められない。しかし、ギャップ矯正を行う場合およびデッキの歪修正をデッキパネルの中組立が完了した直後に実施する組立手順 3 では、局部的に大きな撓みや座屈が発生し易いことが明らかとなった。これは後続の溶接により既に修正した個所に座屈変形が発生するという定説に一致する。

また、溶接および歪修正を行うことでデッキのパネル全体が下方に大きく撓む。解析上では最大 36ｍｍの撓みが発生している。これは組立を行う際に逆変形を設けるけることで、回避することができる。

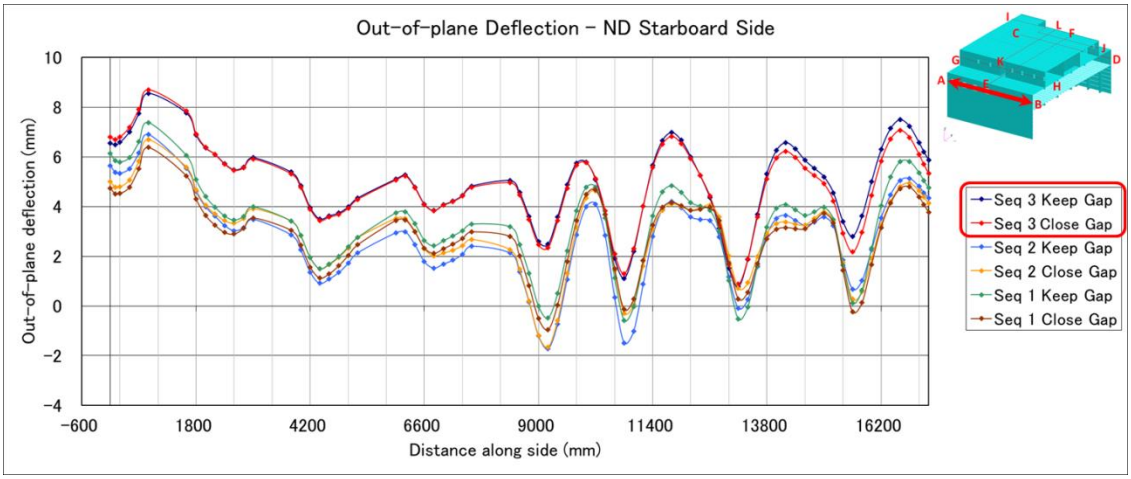


図 6.13 ND 側壁上のライン AB に沿った面外変形の分布

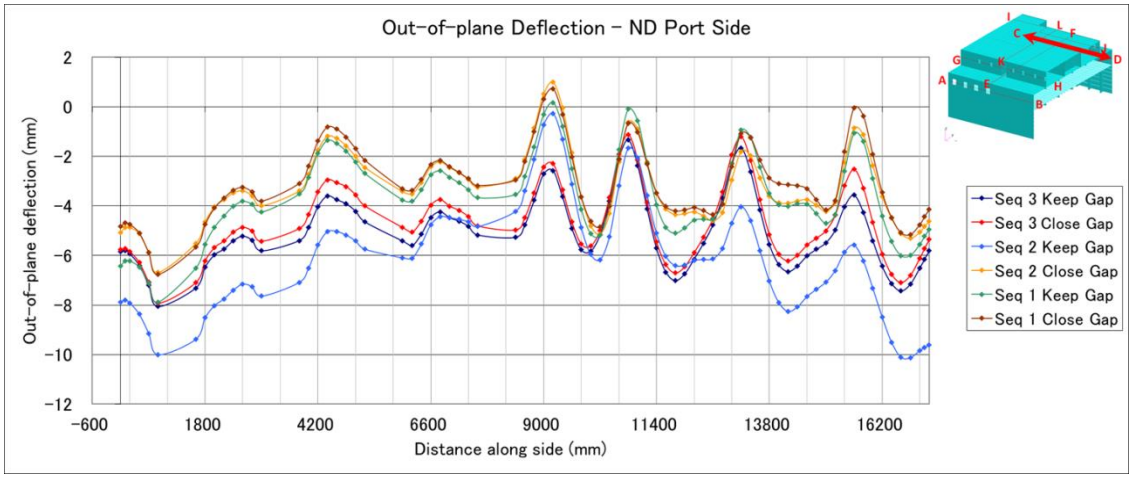


図 6.14 ND 側壁上のライン CD に沿った面外変形の分布

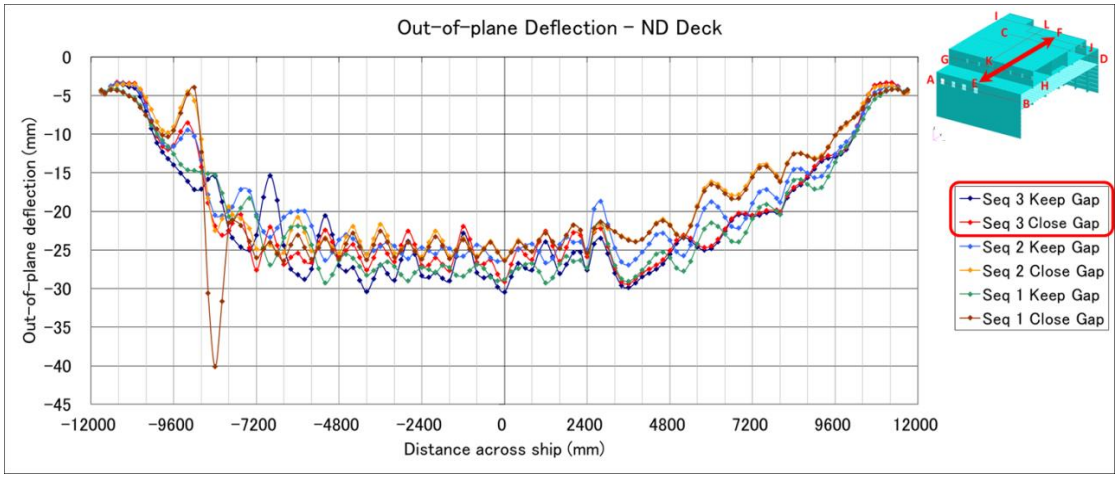


図 6.15 ND デッキ上のライン EF に沿った面外変形の分布

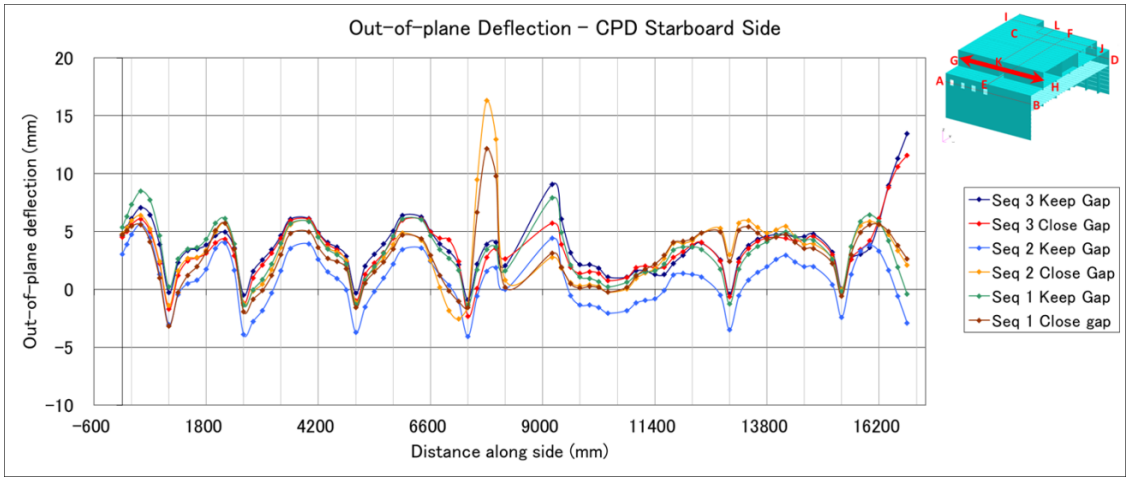


図 6.16 CPD 側壁上のライン GH に沿った面外変形の分布

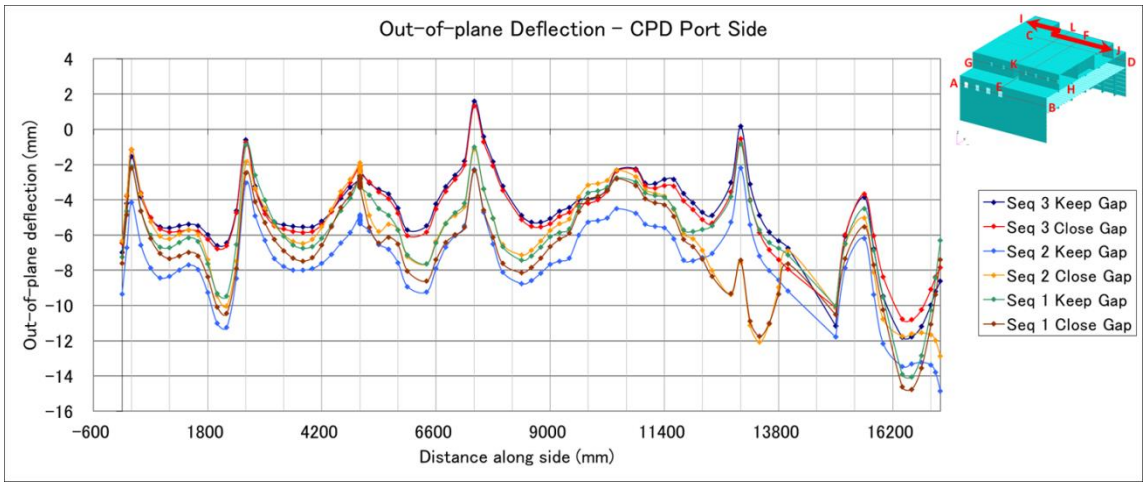


図 6.17 CPD 側壁上のライン IJ に沿った面外変形の分布

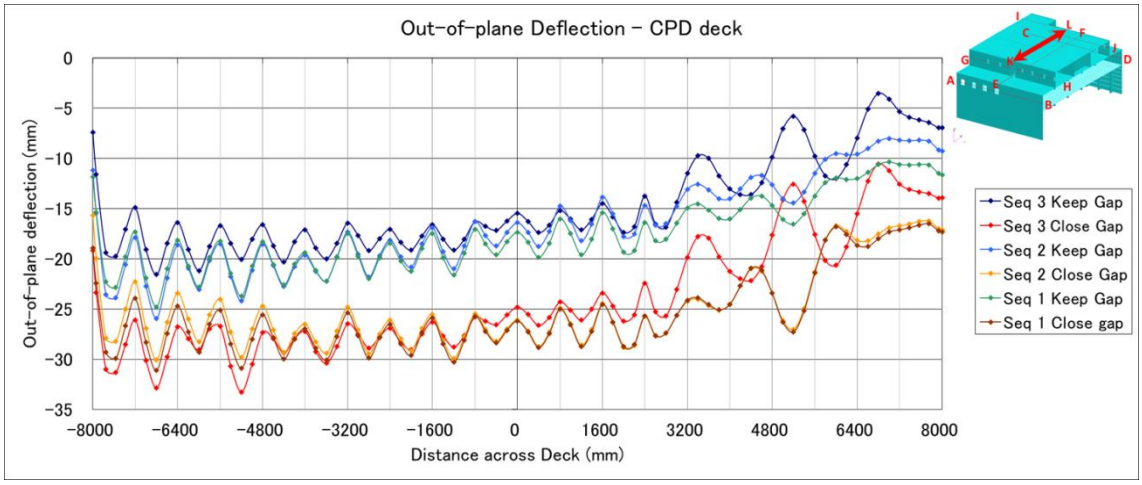


図 6.18 CPD デッキ上のライン KL に沿った面外変形の分布

6.10 シミュレーション結果の実船への適用

解析結果が示すように歪修正の上流化を行ってもほとんど支障がないことが明らかとなったので、実船においても歪修正の上流化を実施した。実船では AD、ND、CPD の大組立の溶接が完了した後に外板と内部構造の歪取が行われる組立手順 1 を実践した。各ステージでの歪量を計測し、修正箇所に再度許容値以上の歪が発生するかを確認した。なお、実船では切断、サブ組立等の残留応力、初期変形が発生しているのに対して解析ではこれらは影響が小さいと考え無視しているため全く同じ条件ではないが、実船の計測を実施し計算の結果得られた結論の妥当性を確認した。

実船ではスティフナ間の変形量を計測し、ブロック完成後、歪取り後、段積み総組後、搭載後（搭載後の溶接完了）でステージ毎に計測を行い、歪の発生量を確認した。図 6.19 は横軸に歪の発生量、縦軸に歪の発生件数を仮付け後、溶接後、歪取後および搭載後についてプロットしたものである。歪取はスティフナー間の撓みを±5 mm 以内に納めるように実施した。仮付け後と溶接後を比較すると溶接により撓みが 5 mm を超える件数の増加が認められる。歪取を実施すると 5 mm を超える件数は減少し、搭載後においてもその数に大きな変化は認められない。また、再発した個所は搭載後の継手部近傍であり、その他では殆ど再発することはなかった。

搭載後に許容値を超えた箇所は 8%ほど

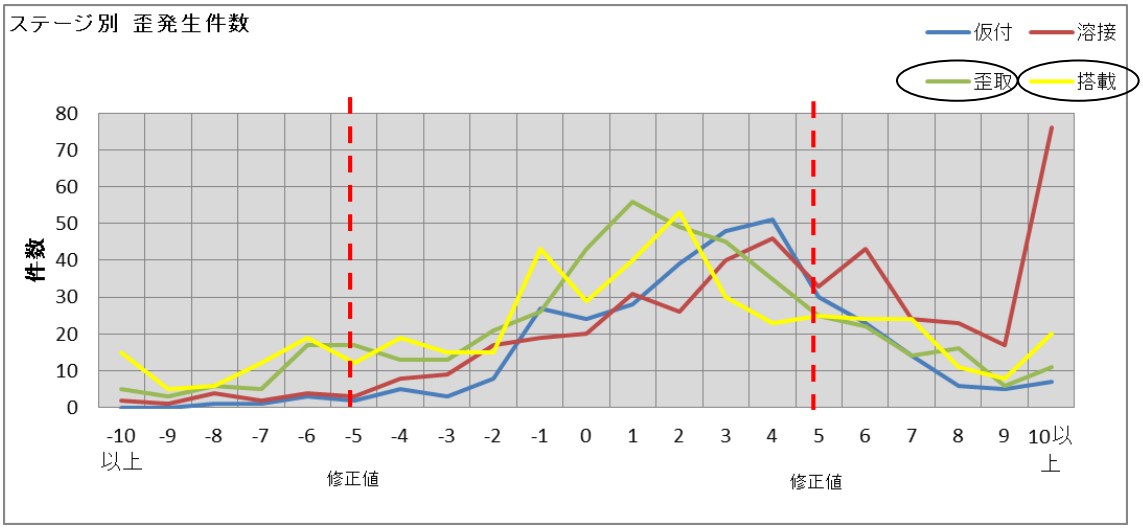


図 6.19 実船での各ステージでの歪み発生傾向

6.11　まとめ

本研究では固有変形法を用いた弾性解析により３種類の組立手順と２種類のギャップ処理法を想定し、溶接と歪修正のタイミングとギャップ処理が上部構造ブロックの変形に及ぼす影響について検討を行った結果、以下の知見が得られた。

検討対象としたフェリーの上部構造では

①従来は上部構造の溶接が完了した後に実施されていた歪修正を上流化し、外板や内部構造の壁の歪取りを中組立完了後あるいは大組立完了後に実施しても変形上の問題はほとんど無い。また、実船においても実施可能な施工法である。

②なお中組立完成後に歪修正を実施すると、後続の溶接により大きな変形が開口部周辺の一部のパネルに発生する場合はある。これについては発生箇所が限定されているのでカーリング等の補強材で発生防止を図る事が可能である。

③ギャップの処理については、ジャッキなどの力を使って矯正した場合と放置した場合を比較すると、矯正した場合に座屈変形が発生し易い。

④ブロック完成後におけるデッキパネル全体の撓みは大きく、解析上では 35 ㎜程の値になる。実船でも 50㎜以上のかなり大きな撓みが発生した。これに対する対策としては逆変形を設けた組立法や段積み総組時の歪修正では変形防止用のピラーの設置などが考えられる。

⑤現場では歪修正の上流化を図る事が出来たので、後工程への工事渡しが従来船より 20 日ほど早まり工期短縮に大きく貢献した。

⑥上流化により組立初期段階で歪修正を行えば、基本的に下向きの施工となり作業の難易度を下げることができる。これにより面積当たりの歪修正時間を表す原単位は半分となり、コスト削減が可能となった。

参考文献

(1) 村川英一、羅宇、上田幸雄：固有ひずみを用いた弾性計算による溶接変形および残留応力の推定(第１報)溶接における固有ひずみの生成機構、日本造船学会論文集、180 号 (1996)、739-751.

(2) 羅宇、村川英一、上田幸雄：固有ひずみを用いた弾性計算による溶接変形および残留応力の推定（第２報）多重熱履歴の下での変形と残留応力、日本造船学会論文集、182 (1997), 783-793.

(3) Deng, D., Serizawa, H., and Murakawa, H.: FEM Simulation of Welding Distortion in Thin Curved Structures during Assembly Considering Gap and Misalignment, *Transactions of JWRI*, Vol. 31, No. 2 (2002), pp. 219-226.
(4) Deng, D., Murakawa, H., and Liang, W.: Numerical simulation of welding distortion in large structures, *Computer methods in applied mechanics and engineering*, Vol. 196 (2007), 4613-4627
(5) 村川英一, 芹澤久, 王江超：薄板構造の座屈型溶接変形の固有変形法による予測、溶接学会全国大会講演概要、Vol. 2011s (2011), pp.180-181.
(6) 村川英一, 王江超, ブランドン ホワン：熱加工における座屈変形発生の理論予測、溶接学会全国大会講演概要、Vol. 2012s (2012), pp.138-139.
(7) Liang, W., Deng, D., and Sone, S.: Prediction of Welding Distortion by Elastic Finite Element Analysis Using Inherent Deformation Estimated through Inverse Analysis, *Welding in the world*, Vol. 49, No. 11/12 (2005), 30-39.

第 7 章　総括

船の建造工事全般にわたって、従来の作業者の暗黙知に基づく計画手法では得られないような高能率な工法を構築するために、溶接変形シミュレーション技術を使用して工法の改善を試みるとともに、実船の建造における適用性を検証し、以下の結論を得た。

第 1 章では、現在の造船業界における船の建造法について工作精度管理および歪取りを含めた修正作業の現状を分析し，建造期間の短縮という観点から問題点の抽出および整理を行った。これに基づき研究対象をどのように設定するかについて述べた。

第２章では、船の建造における溶接組立変形を予測する手段として採用した固有変形法の概要について述べた。固有変形法は、溶接構造物の設計や生産に携わる技術者が溶接・組立変形を予測し改善対策を検討する際に簡便に使用できしかも実用的な変形予測法として大阪大学接合科学研究所が開発した手法であり、切断から歪取の全工程を対象とした FEM 解析法であり、本章においてその概要を述べた。

本研究で使用した固有変形法の特長は、溶接組立変形に影響を及ぼすと予想される全ての要因（例えば、溶接による局部収縮、組立工程で発生するギャップや目違い、拘束など）が考慮できることである。また、ギャップや目違いなど部材間の状態について界面要素を用いることで簡便に取扱うことができることを述べた。

第 3 章では自動車運搬船を建造するに当たっての以下の事項を検討し、建造法の最適化について以下の知見を得た。

1. 溶接変形における入熱の影響

   溶接入熱によりどのような収縮が発生し、それがどのような変形を起こすかという溶接変形発生メカニズムの分析を行った。溶接変形は溶接入熱に比例して大きくなるので、溶接入熱を軽減することが、溶接変形の軽減につながることを確認できた。

2. 溶接法が歪発生に与える影響

溶接変形の発生メカニズムを理解した上で、入熱を下げることのできる溶接法について、防撓板を対象に検討を行なった。その結果、連続溶接の代わりに, 入熱量が小さい並列断続溶接や千鳥溶接などの断続溶接を採用することが歪低減に最も効果的であることがわかった。

3. カーデッキ組立時の溶接変形における溶接順序の影響

実際にカーデッキを組み立てる際にブロック全体が大きく下方へ撓む変形を防止するために検討を行った。組立作業の詳細を洗い出し、最適な組立順序を検討した。しかし、薄板カーデッキの組立時の変形は施工順序の変更などで解決することは困難であり、逆変形を与えて組立てる事が最適であることが分った。これにより、従来の組立法では実施できなかったブロック段階での歪修正も可能となった。また、このような平板ブロックでの組立法では逆変形法(お椀型に組立)が有効的であることがわかった。

4. 船台でのカーデッキ搭載がパネルの歪に及ぼす影響

シミュレーションによりカーデッキの搭載も歪発生の原因となり得ることが分った。カーデッキと船側ブロックの間を溶接していく際に船側ブロックが引付けられ、これが原因となって薄板カーデッキに圧縮応力が発生する。これを軽減させるためには厚板カーデッキから溶接を行う事が最適である事が分った。

5. 実際の自動車運搬船建造法に本研究で得られた知見を導入することによる効果を検証するために、実船での搭載後のカーデッキの歪計測行った。計測した結果は修正許容値を超えている発生件数が従来船と比較すると約50%となり、修正にかかる工数も 50%低減することができた。また、建造工期に対しても大幅な日数短縮に繋がった。

第 4 章では，立体ブロック製作時におけるブロックの寸法精度に及ぼす位置決め要領の影響に注目し、寸法誤差の軽減を図るために以下について検討および検証を行った。

1. 部材の位置決めの際に蓄積される精度誤差を軽減するために逆変形を導入した位置決め法としてキー自由度に注目した位置決め法を提案し、基本的な概念について２次元トランスリングモデルを用いて説明した。

2. 実船の船側ブロックを例に、固有変形法を用いたFEM解析によりキー自由度に注目した位置決め法の有効性を示した。
3. キー自由度に注目した位置決め法は、小組立、中組立、大組立、最終ブロックなどの構造単位の剛体変形を拘束するために必要な自由度を精度管理におけるキーポイントすなわちキー自由度と位置付けた位置決め法である。キー自由度は剛体変位を拘束するための拘束キー自由度と自由に調整できる調整可能キー自由度に分けられ、調整可能な自由度に対してFEM解析により予測された溶接変形を位置決め時に逆変形として与えることで全てのキー自由度の座標を設計座標に収める方法である。
4. キー自由度は最終工程が必要とする精度ポイントから設定する。すなわち下流から上流に順番に設定していく、その際にキー自由度は必ず設計座標に収め、基本的にはこれを計測するだけで構造物全体の精度を確保することができる。これは最低限の計測箇所になるので計測時間が短縮でき、メリハリのある精度管理が可能である事を示した。また、このような立体ブロックでは位置決めに注目した逆変形法が有効的であることもわかった。

第 5 章では、固有変形法および熱弾塑性 FEM を用いてビルジブロックの捩れ変形のメカニズムおよび捩れ変形の対策法について検討した結果，以下の結果が得られた.

1. ビルジブロックの捩れ変形はフロア作成時に発生する収縮により、外板との取り合い部のギャップ矯正時にビルジ外板に発生する圧縮の応力による座屈現象である．また，ギャップの形態は多様であり予測が難しいので組立過程でビルジブロックの捩れ変形を制御するのは現実的ではない.
2. ビルジブロックの捩れ剛性を大きくすることでブロックの捩れ変形は大幅に低減できる.具体的には内底板を取り込み箱形にする事でビルジブロックの剛性を飛躍的に向上させる事ができる。
3. ビルジブロックの変形を抑える現実的な方法はブロックの捩り剛性を大きくすることであり，発生した捩れ変形は線状加熱により除去することができることを示した.

第 6 章ではフェリーの上部構造を対象に、３種類の組立手順と２種類のギャップ処理法を想定した固有変形法を用いた弾性解析を実施し、溶接と歪修正のタイミングとギャップ処理が上部構造ブロックの変形に及ぼす影響について検

討を行った結果、以下の知見が得られた。

1. 従来は上部構造の溶接が完了した後に実施されていた歪修正を上流化し、外板や内部構造の壁の歪取りを中組立完了後あるいは大組立完了後に実施しても変形上の問題はほとんど無い。また、実船においても実施可能な施工法である。
2. なお中組立完成後に歪修正を実施すると、後続の溶接により大きな変形が開口部周辺の一部のパネルに発生する場合はある。これについては発生箇所が限定されているのでカーリング等の補強材で発生防止を図る事が可能である。
3. ギャップの処理については、ジャッキなどの力を使って矯正した場合と放置した場合を比較すると、矯正した場合に座屈変形が発生し易い。
4. ブロック完成後におけるデッキパネル全体の撓みは大きく､解析上では35㎜程の値になる。実船でも 50㎜ 以上のかなり大きな撓みが発生した。これに対する対策としては逆変形を設けた組立法や段積み総組時の歪修正では変形防止用のピラーの設置などが考えられる。
5. 現場では歪修正の上流化を図る事が出来たので、後工程への工事渡しが従来船より 20 日ほど早まり工期短縮に大きく貢献できた。

本研究において今後の課題は、

1. 精度管理で不可欠な技術は計測技術であり計測精度である。逆変形の位置にキー自由度を固定するため、さらにキー自由度には含まれていないが管理する必要があるポイントの位置確認に精度の高い計測技術が必要である。計測という点でもキー自由度の概念を活用すれば計測すべきポイントを絞込む事ができ、効果的な計測が可能になるものと予想される。
2. 本研究ではビルジブロックに注目したが、実際の船体の構造の殆どは曲がり構造で出来ている。したがって、シミュレーション技術を曲がり部構造にも適用させる事が必要である。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、長期間にわたって、全面的にご指導とご鞭撻を賜りました大阪大学接合科学研究所教授　村川　英一博士に誰よりもまず深く感謝しております。終始、妥協のない厳しいご指導を賜りましたおかげで、本研究を完遂することができました。また、時々挫折しそうになる私をやさしく見守って、勇気付けしていただきました。私自身の学問的にはもちろんの事、精神的にも至りませんでした数々の事を、先生のご指導のもと、これらを克服すべく必死に努力してまいりました。この体験を今後の人生において心の糧にしてまいります。また、大阪大学接合科学研究所特任教授　シェリーフ・ラシッド博士には、本研究の具体的な運営要領、FEM 解析の要領等、細部ににわたり多大なご指導を賜りました深く感謝しております。いつも休日にしか登校できない私を、休日であっても快くご指導していただきました。重ねて感謝いたします。

先生方にご指導していただいた数多くの時間は、私にとっての生涯の宝になります。

本論文をまとめるにあたり、大阪大学大学院工学研究科地球総合学科教授　大沢　直樹博士、藤久　保昌彦博士、同大学接合科学研究所准教授　芹澤　久博士より大変有益なご指導をいただきました。深く感謝いたします。

本研究を実行するにあたり、大阪大学接合科学研究所特任教授　奥本　泰久博士には造船技術に関する幅広い知識でもって、有意義な研究内容の選択・推進方法をご指導いただきました。意義深いご指導を終始賜りまして謹んで御礼申し上げます。また、大阪大学接合科学研究所特任研究員　片山　泰夫氏には本研究への実践の思いをお互いに議論しあってまいりました。そして造船現場においてその成果を見ることができたことは、私を大変心強くしてくれました。謹んで御礼申し上げます。

本研究を実施するにあたり貴重な機会を与えて頂いき、また博士課程への道を与えて下さりました内海造船株式会社　川路　道博社長、表　正和本部長、竹波　敏行副本部長、片岡　伸兒部長、田坂　光宏部長に心より感謝申し上げます。また、実船での計測や実験などの現場の技術面また、心の支えになっていただいた同会社の濱　幸雄課長に多大な尽力をいただきました。深く御礼申

し上げます。

最後に本研究ならびに論文執筆に対し、ご協力、ご指導頂いた先輩、同僚に感謝申し上げます。そして日々支え続けてくれた両親、妻に心から感謝をささげるしだいです。

2015 年 6 月

佐野　仁則