

博 士 論 文

船体構造二重底部における  
形状・板厚最適化に関する研究

(Study on Optimization of the Shape and Thickness at Double Bottom Part of Ship Structure)

平成 24 年 3 月

上 寺 哲 也



# 目次

## 第1章 序論

1.1	研究背景	1
1.2	研究対象船舶について	2
1.2.1	ばら積み貨物船について	2
1.2.2	ばら積み貨物船の基本構造について	2
1.3	現状の船舶設計手法について	3
1.4	現状の船舶設計手法の問題点について	6
1.5	従来の研究について	7
1.6	本論文の概要	9

## 第2章 構造最適化

2.1	構造最適化手法の検討	11
2.1.1	構造最適化手法について	11
2.1.2	寸法最適化について	11
2.1.3	位相最適化について	13
2.1.4	形状最適化について	13
2.2	本研究で取り扱う最適化手法について	15

第 3 章	対象船舶と設計変数	
3.1	対象船舶について	17
3.2	設計変数について	18
3.2.1	形状に関する設計変数	18
3.2.2	板厚に関する設計変数	20
第 4 章	独立要素分割を用いた形状設計変数の変更	
4.1	船舶と形状設計について	25
4.2	多点拘束	25
4.2.1	形状最適化の問題点と多点拘束	25
4.2.2	多点拘束の精度	27
4.3	形状最適設計と独立要素分割	32
4.4	独立要素分割と MPC を利用した構造の結合	33
4.5	独立要素分割の課題	34
第 5 章	部材認識機能を利用した独立要素分割モデルの作成	
5.1	背景	37
5.2	基本方針	37
5.3	独立要素分割グループの定義	39
5.3	PSH による構造分割	40
5.4	PSH 分割グループの再分割と結合	42
5.5	FEM メッシュの割り当てと MPC の設定	43
5.6	ばら積み貨物船モデルへの適用	44
5.6.1	対象船舶及び設計変数	44
5.6.2	PSH 分割	45
5.7	独立要素分割グループの生成	46

5.8	設計変数の変更と FEM データ更新の確認	49
5.9	形状変更における荷重条件と境界条件	50
第 6 章	近似式を用いた構造評価の検討	
6.1	感度解析の利用検討	53
6.2	感度解析を用いた近似式作成について	55
6.4	影響度を考慮した教師データの選択手法	56
6.4.1	影響度の定義	56
6.4.2	影響度の算出	57
6.4.3	影響度による設計変数の選択	57
6.5	影響度の閾値と近似精度	59
6.5.1	近似精度の検証について	59
6.5.2	各影響度の閾値における教師データ数	59
6.5.3	各影響度の閾値における近似精度	59
6.6	影響度の閾値を考慮した座屈判定値近似式作成	63
6.7	船体重量近似式の作成	64
6.8	近似式作成に要する時間と解の算出に要する時間	65
第 7 章	本研究で使用する構造最適化手法	
7.1	遺伝的アルゴリズムについて	67
7.2	船体構造最適化について	69
7.2.1	本研究における構造最適化までの流れ	69
7.2.2	最適化の実行と GA パラメーター	71
7.2.3	荷重条件	72
7.2.4	制約条件と目的関数	74
7.3	本研究で取り扱う最適化条件	76

第 8 章	最適化結果と構造的考察	
8.1	降伏応力を考慮した最適化の結果	77
8.1.1	板厚を設計変数とした最適化 Case a) の場合	77
8.1.2	形状を設計変数とした最適化 Case b) の場合	83
8.1.3	板厚・形状を設計変数とした最適化 Case c) の場合	83
8.2	降伏及び座屈応力を考慮した最適化の結果	85
8.2.1	板厚を設計変数とした最適化 Case d) の場合	85
8.2.2	形状を設計変数とした最適化 Case e) の場合	88
8.2.3	板厚・形状を設計変数とした最適化 Case f) の場合	88
8.3	従来の（設計者の試行錯誤による）設計手法との比較	91
8.4	解析結果の検証	93
8.5	最適化に要する計算時間	95
第 9 章	結 言	
	結 言	97
	謝 辞	
	謝 辞	101
	参考文献	
	参考文献	103
付録 1	PSH を利用した独立要素分割モデルの作成	
1.	PSH を利用した独立要素分割モデルの作成について	107
2.	PSH について	107
3.	PSH の利用	108

3.1 部材認識.....	108
3.2 部材名付加.....	108
4. 独立要素分割モデルの生成.....	109
付録 2      テーラー級数展開を用いた近似式の導出方法について	
テーラー級数展開を用いた近似式の導出方法について.....	137
付録 3      遺伝的アルゴリズムについて	
1. 設計変数のコーディング.....	141
2. 選択.....	142
3. 交叉.....	144
4. 突然変異.....	145
5. 島モデル遺伝的アルゴリズム.....	146
付録 4      構造最適化プログラムの実行について	
構造最適化プログラムの実行について.....	147





# 第1章

## 序 論

### 1.1 研究背景

近年、鋼材等の資材価格高騰や円高による輸出産業への打撃は深刻であり、多量の鋼材を用いて製品を製造し輸出する日本の造船業においては、深刻な問題となっている。さらに今日、韓国・中国の造船技術の高まりに加え、人件費・鋼材費の安さから、韓国・中国の建造量比が伸び続けている<sup>[1]</sup>。そのため日本の造船業では、構造物に対する信頼性、安全性を保ちつつ、建造費の削減を求める風潮はますます強くなっている。

一般的な鋼構造物の設計を考えた場合、鋼材費削減のため、必要以上の強度を持たない構造体を設計する事が望まれるが、推定される使用環境下において外力が負荷された場合にも十分な強度を有する事が要求される。そのため、鋼構造物の設計では外力の影響による詳細な応力評価や強度評価を行う必要があり、有限要素解析を用いる事が一般的となっている。しかし、船舶等の大型構造物を対象とする場合、有限要素モデルの作成、解析、解析結果の評価のいずれにおいても複雑な作業や多大な時間が必要であり、労力を要する。また、初期設計段階では各設計変数の組み合わせによる多数の設計案が存在し、その全てに対してモデル作成、解析、解析結果の評価を行う事は、時間的制約と労力のコスト面から難しい。

そこで制約条件を満たしながら、実用的な時間と労力の範囲内で、ある目的関数に対する最適解を得る事が可能な、構造最適化手法を提案する必要がある。本研究では、上記の問題点と解決方法の提案を行い、さらに提案手法を用いた実船舶の構造最適化を行う。構造最適化では目的関数と制約条件を組み合わせで変更し、目的関数と制約条件が対象船舶の構造設計案に与える影響を検討・整理する。



Fig.1-2-1 Bulk Carrier

## 1.2 研究対象船舶について

### 1.2.1 ばら積み貨物船について

本研究ではばら積み貨物船 (Bulk Carrier) を研究対象とする。ばら積み貨物船の例として、Fig.1-2-1 に常石造船株式会社が製造するカムサマックス (KAMSARMAX) 型ばら積み貨物船<sup>[2]</sup>の写真を示す。ばら積み貨物船はバルクキャリアと呼ばれ、穀物や石炭、鉄鉱石などをばらのままで積載する船である<sup>[3]</sup>。ばら積み貨物船は世界の商船の40パーセントを占めており、その大きさは船艙が1つの小型ばら積み船から載貨重量が40万トンに達する巨大鉄鉱石船まで多種多様に存在する。多くの専用設計が存在し、貨物船そのものに積み荷を降ろす能力を持っているもの、積み荷を降ろすために港の設備に頼るもの、さらに搭載中に積み荷の梱包作業を行うものもある。ばら積み貨物船の最大の建造国は日本であり、また8割はアジアで建造されている<sup>[4]</sup>。

### 1.2.2 ばら積み貨物船の基本構造について

Fig.1-2-2 にばら積み貨物船の基本構造を示す。Fig.1-2-2 に示す通り、船艙部分は船長方向にいくつかのカーゴホールドに分かれており、コルゲートバルクヘッドにより区切られている。コルゲートバルクヘッドを支える上部構造をアッパースツール、下部構造をロアスツール

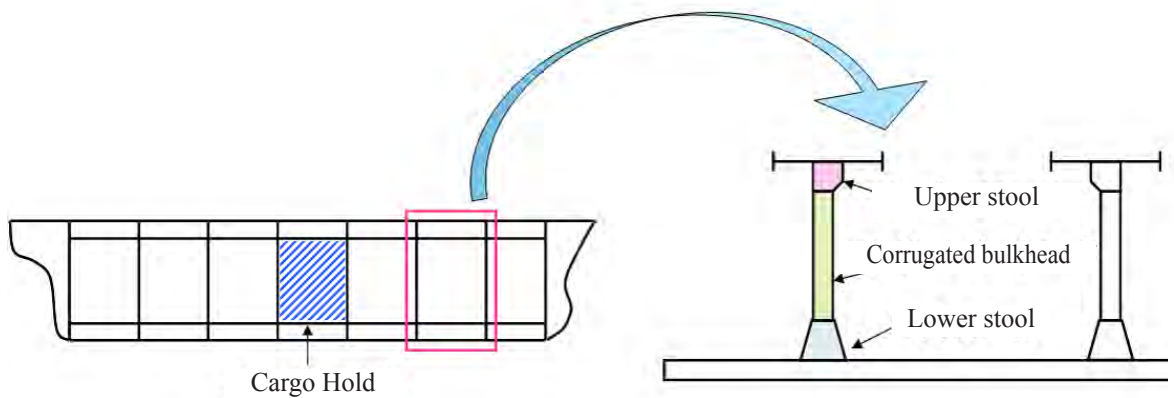


Fig.1-2-2 Structure of Bulk Carrier

ルと呼ぶ。 Fig.1-2-3 にばら積み貨物船の断面図を示す。 Fig.1-2-3 に示す通り， 上部に積荷・揚荷を行うための大型のハッチ， 両舷上部にトップサイドタンク， 下部にビルジホッパー， 船底部分には二重底を有している <sup>[5][6]</sup>。

### 1.3 現状の船舶設計手法について

ここで，ばら積み貨物船の現状の設計手順について説明する。 一般的なばら積み貨物船の基本設計 <sup>[7]</sup> では， 主要目設計， 概略一般配置設計の後に， 日本海事協会が開発した船舶設計支援システムである PrimeShip - HULL（以降 PSH）を用いた中央断面

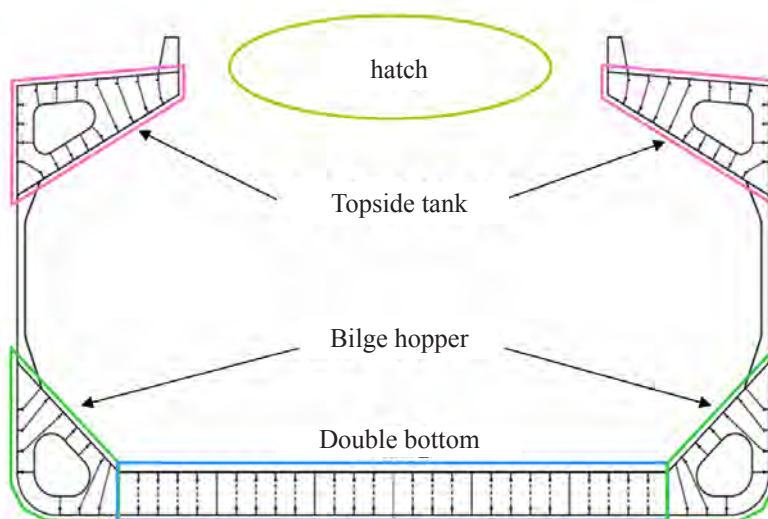


Fig.1-2-3 Structure of Bulk Carrier (cross-section)

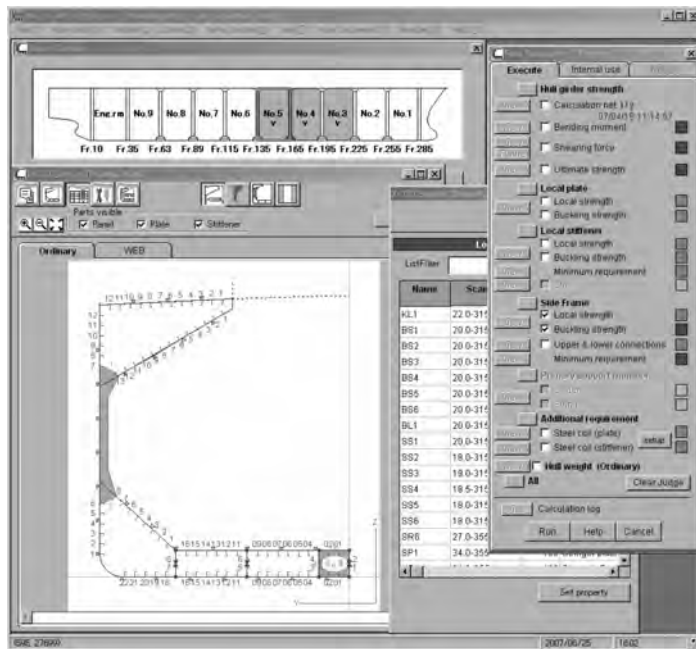


Fig.1-3-1 PSH operate window (Rule Calculation)

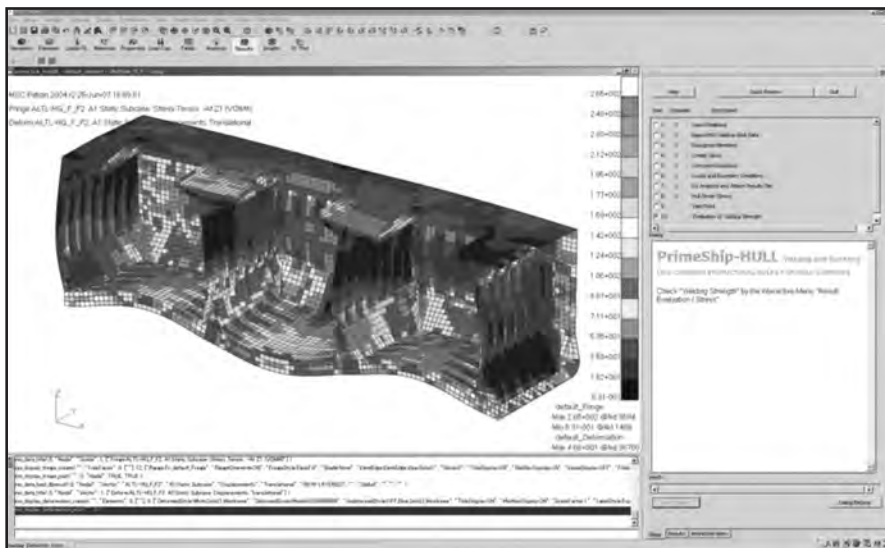


Fig.1-3-2 PSH operate window (Patran based system)

設計が行われている<sup>[8][9]</sup>。PSHは日本海事協会が開発した船舶設計支援システムであり、CSR（Common Structural Rules）施行以降<sup>[10][11]</sup>、ばら積み貨物船の基本設計では必要不可欠な存在となっており、国内の殆どの造船会社に導入されている。PSHはFig.1-3-1に示す算式計算ソフトウェア（Rule Calculations）と、Fig.1-3-2に示すMSC.Patran（以降Patran）をプラットフォームとした構造解析と強度評価を実施する直接強度計算システム（Direct Strength Analysis）により構成されている<sup>[12]</sup>。算式計算ソフトウェアでは、CSRが定める算式計算規則に基づき、中央断面の設計及び評価を行う。次に、算式計算ソフトウェアで決定した各寸法を反映したFEMモデルを作成し、直接強度計算システムを利用して、FEMによる構造解析と強度評価を実施する。

ここで、ばら積み貨物船の二重底構造に着目し、船体強度の観点から、概略一般配置と中央断面との設計間における相互関係を考える。ばら積み貨物船の中央横断面図とロアスツール部縦断面における主要な形状設計変数をFig.1-3-3に示す。二重底高さ、内底板幅、ビルジホッパータンク高さ、ロアスツール長さは、概略一般配置設計の段階で決定される設計変数の一部である。これらを含む概略一般配置の

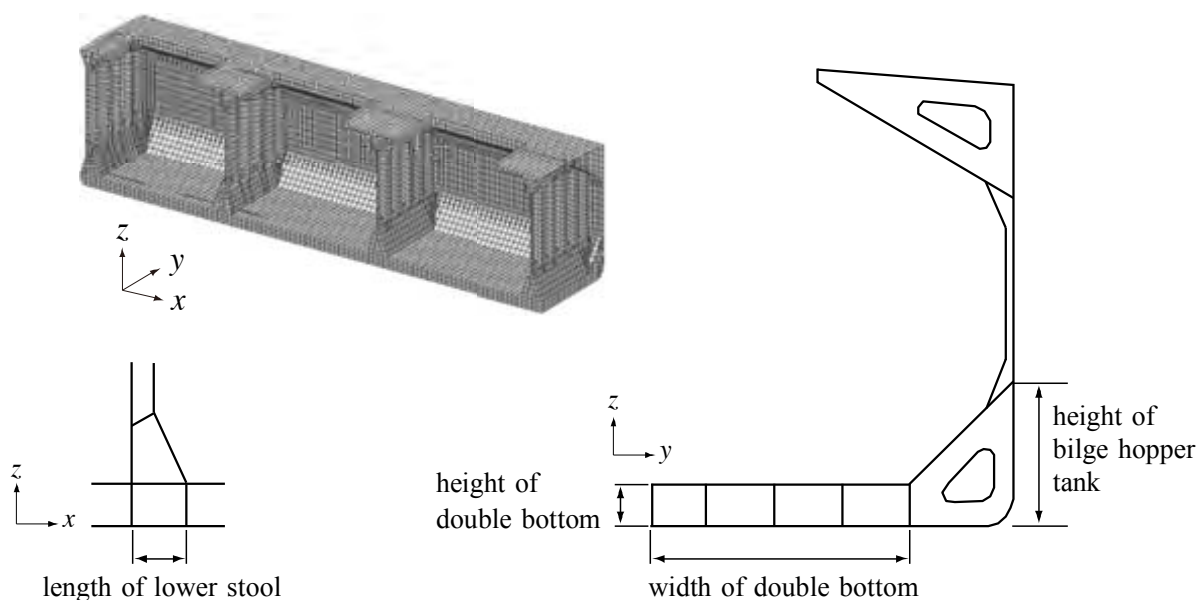


Fig. 1-3-3 Design variables for shape optimization

設計終了後に、中央断面設計にて、強度に関係する設計変数（例えば、各種部材の板厚、縦通補強材の数や寸法など）を算式計算規則等に基づいて決定する<sup>[13]</sup>。その後、複数の船艙に対する有限要素解析を行ない、直接計算規則に基づいて船底外板、内底板、フローア、ガーダーの板厚等を変更する。

#### 1.4 現状の船舶設計手法の問題点について

現状の設計手法では、直接強度計算システムにおいて制約条件を満足させる為に、応力評価を行った後、制約条件を満足しない設計変数部の板厚増加を行い、再び解析・評価を行うという作業を繰り返し行っている。そのため制約に余裕がある、または板厚増加後に余裕が生まれた他の部材の板厚を減少させる検討が十分に行われているとは言い難い。また Fig.1-3-3 に示すばら積み貨物船の二重底高さ、内底板幅、ビルジホッパータンク高さ、ロアスツール長さ等の船体二重底部形状は、直接計算により評価される応力等に大きく関係する設計変数でありながら、直接強度計算の段階では決定済の変数として扱われる。しかし、船舶が必要な強度を有しながら、その重量を可能な限り少なくするという構造最適化の観点からすると、二重底部形状を設計変数として含めた最適化は高い効果を有すると思われる。以上の様に各設計ステージで決定される各種構造や寸法の間には関連性があるため、より良い設計案を作成するためには、各設計ステージ間に密な連携を与える事が望まれる。しかし、船舶設計の複雑さや設計に使用できる時間的制約等のため、十分な連携や検討を行う事は困難である<sup>[14][15]</sup>。これは、解析モデルを作成・変更するには多大な時間と労力を要する為であり、限られた納期の中で時間がかかる解析モデルの変更を何度も行う事は、時間的制約から難しいからである。

## 1.5 従来の研究について

船舶の構造最適化の検討は古くから行われており、計算機の処理能力やメモリ容量の向上により、経験に基づく手法から次第に理論的な根拠に基づいた構造最適化が行われる様になった<sup>[16]</sup>。しかし、能力の高い計算機が出現した今日でも、構造最適化を有限要素法等の構造解析法と組み合わせて利用すると、非常に多くの解析時間を要する問題が残されている。また、目的関数の向上を考えた場合、船体全体の設計変数及び制約条件を一度に考慮した構造最適化が望まれるが、最適解への収束に非常に多くの時間を要するため、実現出来ていない。そこで、構造解析の時間を短縮する手法、及び最適化を効率良く行う手法の双方が様々な研究者により検討されてきた。以下に本論文で参考とした船舶構造最適化に関する論文の一例をまとめる。

### 1) 船体構造の最適設計に関する研究<sup>[17]</sup>

設計変数を減少させ最適化計算の規模を縮小する手法を提案している。あらかじめ肋骨の断面形状の最適化計算結果から、断面係数と最適断面寸法との関係の近似式を求める事により、設計変数を大幅に減少させる手法を提案している。さらに、SUMT法を利用して数種類の船舶に対して構造最適化を実行し、従来から経験に基づき決定されていた設計変数が、数理的にも妥当である事を示している。

### 2) 多段階最適化手法による船体構造最適設計<sup>[18]</sup>

最適化対象の構造物をいくつかのブロックに分割し、構造物全体の最適化と各ブロックの内での構造最適化を段階的に繰り返す手法を提案している。構造解析の時間短縮のため、各ブロックにおける最適解を用い、構造全体に関わる設計変数の感度を求め、構造全体の最適化を行う。構造全体及び各ブロックに於ける最適化には逐次二次計画法を用い、ダブルハルトンカーの縦強度部材の最適設計を実施している。

### 3) 後座屈挙動を考慮した防撓パネルの最適設計に関する研究<sup>[19]</sup>

船舶構造の主要構成部材である防撓パネルを、感度解析及び近似式を用いて弾

性大撓み理論に基づく撓みと応力を近似し、逐次線形計画法に適用して構造最適化を行っている。

#### 4) 神経回路網モデルによる船体中央横断面の離散的最適設計<sup>[20]</sup>

ニューラルネットワークのエネルギー最小化原理を利用した組合せ最適化手法を構造最適化に応用している。ニューロンの状態を設計変数として、ペナルティを含む目的関数(エネルギー)を最小化する手法を提案している。

#### 5) 遺伝的アルゴリズムによる船体構造最適設計<sup>[21]</sup>

ダブルハルタンカーの船体中央断面の設計において、主要寸法、配置要素、部材寸法、材質選定を離散的な独立変数として構造最適化を行うために、遺伝的アルゴリズムを用いて最適化を行っている。船殻重量や建造コストの推定精度を高め制約条件を正しく与える事により、船体計画から構造設計までを含んだ精度の高い最適設計を短時間で行う事が可能である事を示した。

#### 6) 構造初期計画における船体構造評価用ニューラル・ネットワークの構築と構造最適化に関する研究<sup>[22]</sup>

有限要素法の解析結果を教師データとするニューラルネットワークを構築し、設計変数を入力因子、応力を出力因子として有限要素法等の構造解析の代替手段として利用する方法を検討している。重回帰分析による設計変数の選定や簡易計算法の解を補助的な入力因子として導入する等の工夫により、ニューラルネットワークの近似精度向上を行っている。また、最適化手法に遺伝的アルゴリズムを利用して船体構造最適化を実行し、短時間で精度良く最適化を行う事を示している。

#### 7) 遺伝的アルゴリズムを用いた船体構造の最適設計と解の収束に関する研究<sup>[23]</sup>

コンテナ船の船艙部構造の最適設計に遺伝的アルゴリズムを適用し、構造最適化を行っている。特に不等式制約条件付最小化問題を無制約条件最小化問題に変換する際に用いられるペナルティ係数に着目し、ペナルティ係数の初期値の決定及び増加方法の検討を行い、遺伝的アルゴリズムにおける解の収束性を向上



させる手法の検討を行っている。

#### 8) 船殻中央横断面の Sub Optimization による構造最適化システムの研究<sup>[24]</sup>

ダブルハルタンカーの船体中央断面を対象とし、Sub Optimization 理論を適用して船体構造の最適化を行っている。船体構造を数種類の区画に分割し、構造区画を設計変数として捉え、先に構造全体に関わる設計変数のみによる最適化を行い、続いて各区画の最適化を行う事により、解析時間を大幅に短縮している。

以上の様に、既往研究では様々な手法により構造解析の時間を短縮する手法、及び最適化を効率良く行う手法の検討が行われ、それぞれに高い成果が得られている。

しかし、これらの既往研究で扱われている設計変数の殆どは、板厚または補強材等の高さ等であり、船体構造の形状変更に関する設計変数は扱われない場合が多い。また、形状変更に関する設計変数が適用される場合は、簡易計算法での構造解析が行われており、詳細な応力の状況が不明であるという問題点がある。さらに FEM を基とした手法では、取り扱う船舶モデルに限り形状設計変数が適用可能であり、他船舶への汎用性が乏しいという問題点が残されている。

また、最適化の実行は通常的设计作業とは異なる作業が大半を占め、各手法に対する学習が必要である等、設計作業への負担が大きいという問題がある。そのため、現状の設計業務へこれらの手法を取り入れる事は、大きな労力と時間が必要であると思われる。

### 1.6 本論文の概要

前節までに述べた問題点を解決するため、本研究では以下に示す各章で述べる手法を用いて、形状設計変数と板厚設計変数を同時に取り扱い、設計者が設計の現場で現実的な時間内に実施可能な船体構造最適化手法の提案を行う。

第 2 章において、有限要素法を用いた構造最適化問題における種々の問題点と、最適化手法選択の検討を行う。

第3章において、本研究にて取り扱う対象船舶の有限要素モデルの説明、及び形状設計変数・板厚設計変数の説明を行う。

第4章において、有限要素モデル内の形状設計変数を効率良く変更を可能とする為に、本研究で提案する独立要素分割法と多点拘束を用いた手法について解説する。

第5章において、第4章で提案した手法を特定の船舶だけでなく、日本海事協会が開発した船舶設計支援システムであるPSHで扱われる一般的なばら積み貨物船に適用する為の手法を提案する。

第6章において、有限要素法を用いた構造最適化手法の最大の弱点である解析時間の問題に対して、感度解析を用いた予測値の算出方法の提案と精度の検証を行う。さらに、座屈判定値や船体重量の予測値算出方法について、提案及び検証を行う。

第7章において、最適化手法の説明及び本論文での最適化までの流れを説明する。また、本論文で行う最適化における荷重条件、制約条件、目的関数の説明を行う。

第8章において、実船舶モデルに本論文で提案した手法を適用した最適化結果について述べる。設計変数と制約条件を様々に組み合わせ、設計変数と制約条件が設計案に与える影響を考察し、本研究手法の妥当性を検証する。

最後に第9章として、本研究を総括する。

# 第 2 章

## 構造最適化

### 2.1 構造最適化手法の検討

#### 2.1.1 構造最適化手法について

構造物の最適化手法は「寸法最適化」,「位相最適化」,「形状最適化」の 3 つに大別される<sup>[25]</sup>. 本章ではそれぞれの最適化手法の特徴について簡単に説明し, 本研究に最も適した最適化手法について考察する事を目的とする.

#### 2.1.2 寸法最適化について

寸法最適化は構造物の板厚や補強材断面形状等の変更を行う最適化である. Fig.2-1-1 に上段, 中段, 下段を持つ箱形構造物において寸法最適化手法における設計変数の変更例を示す. Fig.2-1-1 の設計変更の例では, 中段を支える両側の垂直方向の板部材の板厚を増加させている. 有限要素法を用いる設計手法の場合, 寸法最適化では設計変数の変更は構造物の板厚や補強材断面形状等にとどまるため, 有限要素モデルにおける節点座標の変更は行われない. 手間のかかるモデル変更が不要なため, 大型構造物の構造最適化等, 複雑な構造物にも比

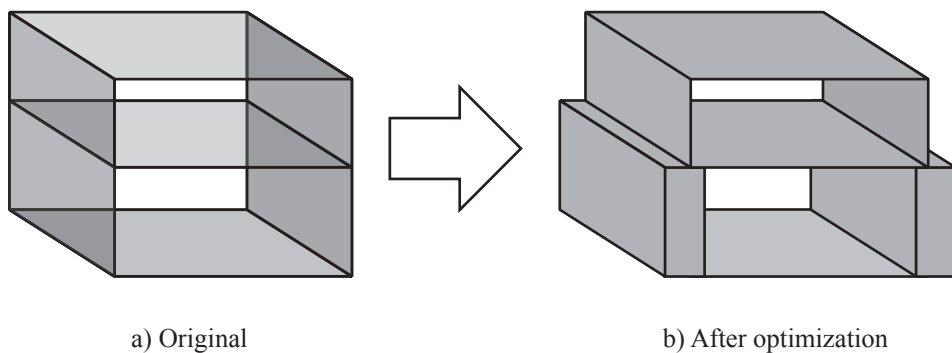


Fig.2-1-1 Size optimization

較的適用しやすく、市販のソフトウェアでも盛んに取り扱われている。

寸法最適化において、実際に有限要素モデルにて板厚設計変数の変更を行う際、ソルバーの入力ファイルにおいて、要素の厚さは要素ごとに指定されるのではなく、同一の板厚を指定する領域に所属する要素を一つのグループに指定し、そのグループに板厚を指定する方法が一般的である。そのため、あらかじめ設計変数として要素のグループを設定しておけば、グループの板厚を変更するのみで良いため、短時間で板厚の変更が可能である。

板厚設計変数を変更する例として、Fig.2-1-2.a)に三層からなる簡単な有限要素モデルを、Fig.2-1-2.b)にそのデータを示す。Fig.2-1-2.b)は節点の位置情報や要素を構成する節点の情報、各要素が所属するグループ及びグループ内の要素板厚の情報を示している。ここで Fig.2-1-2.a)に示す最下面の板厚を変更する場合を考える。最下面に存在する要素が所属する要素グループを「area\_A」とすると、まず Fig.2-1-2.b)に示す FEM データから板厚を変更したい「area\_A」を探す。次に「area\_A」グループの板厚を示す部分を変更する。以上で設計変数の変更は終了ため、短時間で設計変更が可能である。

問題点としては、設計変数の変更後に再度 FEM 解析の実行、及び結果の検証を行う必要があり、最適化を実施する際には時間を要する事である。また、構造形状の変更は行われな

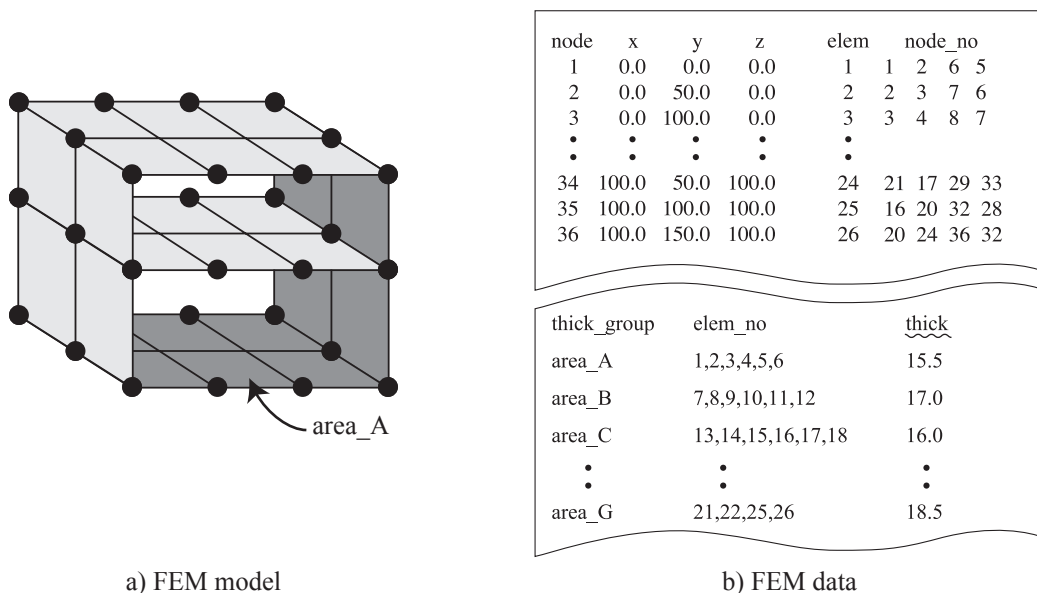


Fig.2-1-2 FEM model and FEM data

いため、目的関数の大幅な改善は期待できないという欠点を有する。

### 2.1.3 位相最適化について

位相最適化は近年、機械部品等の形状の最適化に盛んに研究<sup>[26]-[28]</sup>及び実用化が検討<sup>[29]</sup>されている最適化手法である。最も基本的な位相最適化は設計領域内の要素の要・不要を計算する手法であり、他の手法に比べ大幅な目的関数改善の可能性がある。Fig.2-1-3 に位相最適化における設計変数の変更例を示す。Fig.2-1-3 では四角形の領域において、左端を固定し、右端上部に荷重を付加した場合での位相最適化の例を示している。位相最適化は従来製品とは全く異なる新しい形状を導出する事も可能なため、新製品の概念形状の決定や、既存の製品形状の限界設計にも利用可能である。導出された概念形状を出発点として、さらに形状最適化や寸法最適化を組み合わせるなどすれば、実用的な設計を行う事が可能であると思われる。しかし位相最適化は、中空など物理的に加工できない形状を算出する可能性や、実構造に適さない形状を算出する可能性があるため、本研究で対象とする CSR に則った船舶設計システムに組み込む事は困難であると思われる。

### 2.1.4 形状最適化について

形状最適化は、対象となる構造物の外形や内部構造部材の形状を設計変数とした最適化である。Fig.2-1-4 に形状最適化における設計変数の変更例を示す。2.1.2 小節の寸法最適化の場合と同様に、上段、中段、下段を持つ箱形構造物において、中段から上段を支える両側の垂直方向の板部材の高さを変更する例を示す。形状設計変数の変更は、構造物の剛性を考慮した構造最適化には有利であり、効率の良い設計を行う事が可能である。さらに、寸法最適

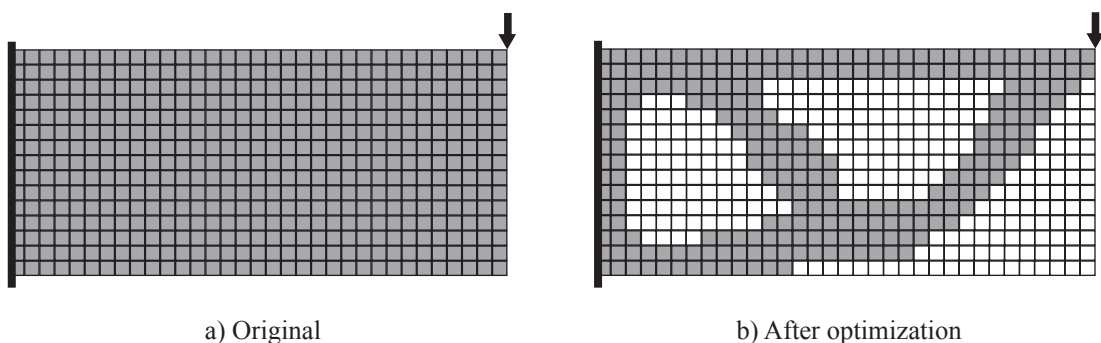


Fig.2-1-3 Topology optimization

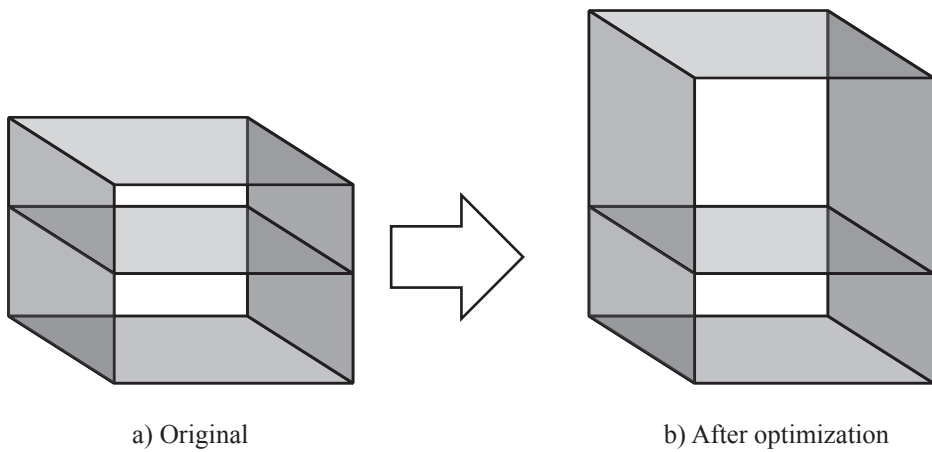


Fig.2-1-4 Shape optimization

化と併用が可能であり、目的関数の削減に大きな力を発揮する事が期待出来る。しかし有限要素モデルを使用した最適化の場合、設計案毎に設計変数の変更を考慮した有限要素モデルの更新を行う必要があり、特に大型構造物の設計変更では大きな労力が必要となる。

実際に有限要素モデルにおいて形状設計変数の変更を行う場合、あらかじめ各設計変数ごとに対象となる節点の移動方向及び移動量を与える必要があり、現状ではこれらを設計者の手により設定する必要がある。形状設計変数を変更する例として、2.1.2 小節の寸法最適化の場合と同様に、Fig.2-1-5.a) に三層からなる簡単な有限要素モデルを示す。中段と下段の間の高さを設計変数  $s$  とした場合、設計変数が  $s'$  に変更した際のモデルを Fig.2-1-5.b) に示す。

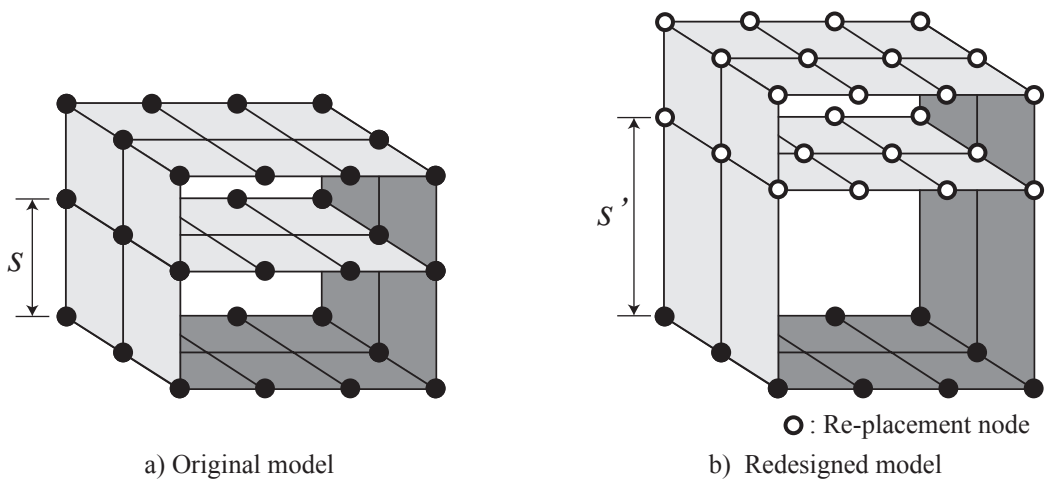


Fig.2-1-5 FEM Original and Redesigned model

また、設計変更において、更新の必要があった節点を図中に白丸で、更新の必要が無かった節点を黒丸で示す。Fig.2-1-5.b) より、1つの設計変数の変更でありながら、多数の節点情報の更新が必要である事がわかる。また前途の通り、これらの節点を設計変数の変化に応じて移動させる為には、設計変数  $s$  に応じて各節点がどの方向にどれだけ移動する必要があるかを計算し、あらかじめ与えておく必要がある。以上の様に、この例では変更した形状設計変数は1つでありながら、多大な労力を必要とする事がわかる。そのため、節点が多数存在する船体構造の設計変更では、非常に大きな労力が必要となる事が予想される。従って船体構造の形状設計変更を設計者の手により何度も設計変更を行う事は、時間的制約から厳しい状況であると思われる。

また寸法最適化の場合と同様に、設計変数の変更後に再度 FEM 解析の実行、及び結果の検証を行う必要があり、最適化を実施する際には長い時間を要する事が予想される。

## 2.2 本研究で取り扱う最適化手法について

2.1.3 小節で述べた通り、位相最適化は目的関数の削減には大きな効果が得られる可能性が高いが、現状の船舶設計システムに取り入れる事は非常に困難である。そこで本研究では、現状の船舶設計システムに組み入れる事が可能であり、目的関数の削減に大きな力を発揮する可能性のある形状最適化と、従来より研究・実用が進められている寸法最適化の双方を考慮した最適化を実施する。

しかし、形状最適化に有限要素解析を用いる場合には、2.1.4 小節で述べたいくつかの問題点が生じ、それに対する有効な手法がないのが現状である。そこで第4章では、形状最適化と寸法最適化の双方を考慮した船体構造の最適化を実施する際に生ずる問題点を解決する手法を提案する。





# 第 3 章

## 対象船舶と設計変数

### 3.1 対象船舶について

本研究では, Fig.3-1-1 に示す一般的なばら積み貨物船の FEM モデル (2 番～4 番カーゴホール部分) を用いて船体構造の最適化を行う. この FEM モデルは, 船長方向長さ 82.175m, 船幅 32.26m, 高さ 21.5m であり, 板要素にシェル要素, 棒要素にはロッド及びビーム要素を用い, 総節点数は 36,914, 総要素数は 65,477 である. 本研究ではこの FEM モデルを基本モデルと呼ぶ事とする. 基本モデルの各構造寸法及び各板厚の決定は, 実際に船舶設計を行う設計者に依頼し, PSH の算式計算ソフトウェアにて算出された値と経験, 及び CSR の最低要求寸法<sup>[30]</sup>に基づき決定されている.

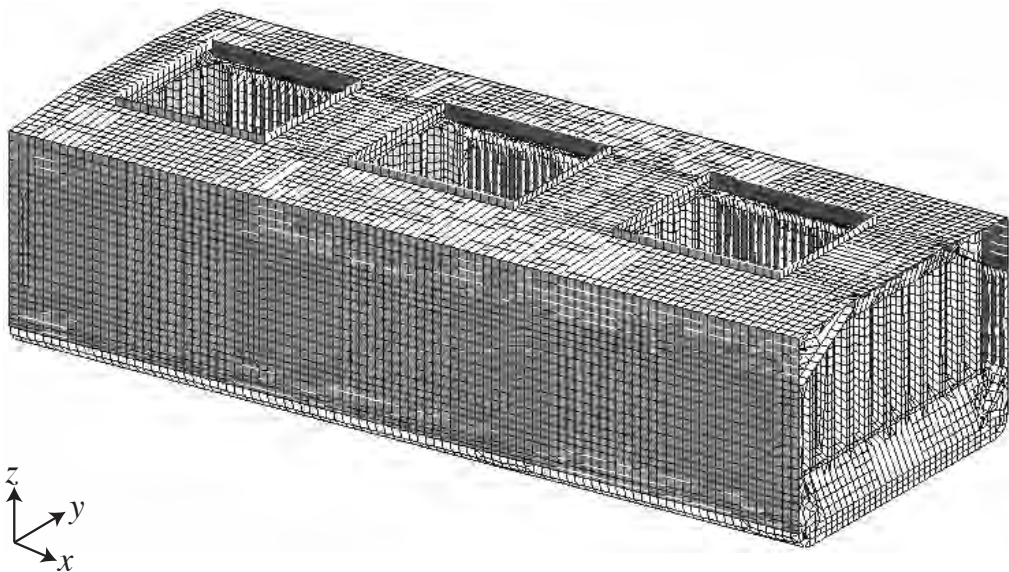
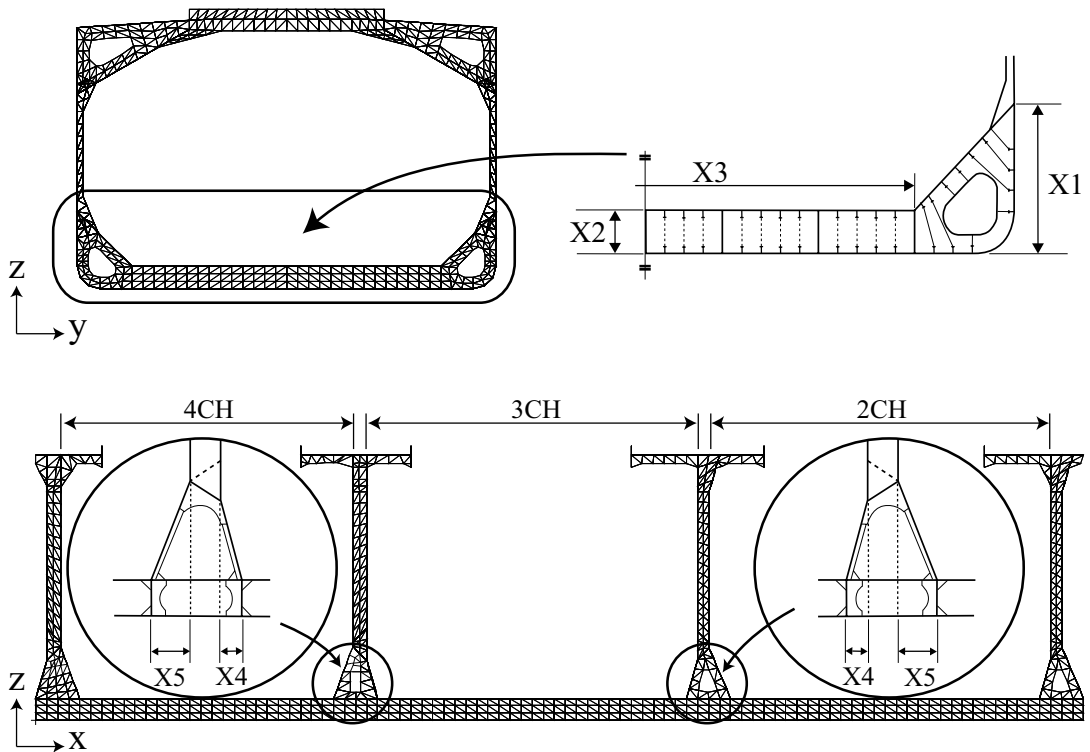


Fig.3-1-1 Original FEM model of bulk carrier

## 3.2 設計変数について

### 3.2.1 形状に関する設計変数

船体形状を決定する設計変数は多数存在するが、本研究ではばら積み貨物船の構造強度において特に重要な船体構造二重底部の構造に着目し、Fig.3-2-1 に示す船体構造二重底部の形状変更に関する 5 変数を設計変数として設定した。本研究では上記の 5 変数による形状変更を扱うが、後述の独立要素分割の手法を用いる事により、他の設計変数を取り入れる事も可能である。Table 3-2-1 に形状設計変数の取りうる範囲とその間隔を示す。



X1 : Height of the Bilge Hopper

X4 : Width of the Lower Stool 1

X2 : Height of the Double Bottom

X5 : Width of the Lower Stool 2

X3 : Width of the Double Bottom

Fig.3-2-1 Design variables for shape optimization

Table 3-2-1 Range of design variables (Difference from initial design variables)

unit : mm

		Design variables	Low. Limit	Upp. Limit	Inc.
Shape	X1	bilgehopper_h	-430.0	70.0	100.0
	X2	doublehull_h	-50.0	150.0	50.0
	X3	doublehull_w	-400.0	400.0	400.0
	X4	lowerstool_w1	-465.0	235.0	100.0
	X5	lowerstool_w2	-895.0	505.0	200.0
Plate thickness	X6	INNBTMPLATE	-2.75	2.25	1.0
	X7	BTMPLATE_01	-1.5	6.5	1.0
	X8	BTMPLATE_02	-1.5	6.5	1.0
	X9	BTMPLATE_03	-1.5	6.5	1.0
	X10	BTMPLATE_04	-1.5	6.5	1.0
	X11	BTMPLATE_05	-1.5	6.5	1.0
	X12	BTMPLATE_06	-1.5	7.5	1.0
	X13	BTMPLATE_07	-1.5	7.5	1.0
	X14	BTMPLATE_08	-1.5	7.5	1.0
	X15	BTMPLATE_09	-1.5	7.5	1.0
	X16	BTMPLATE_10	-1.5	7.5	1.0
	X17	FLOOR_01	-1.5	9.5	1.0
	X18	FLOOR_02	-1.5	13.5	1.0
	X19	FLOOR_03	-1.5	13.5	1.0
	X20	FLOOR_04	-3.5	11.5	1.0
	X21	FLOOR_05	-3.5	11.5	1.0
	X22	FLOOR_06	-5.5	9.5	1.0
	X23	FLOOR_07	-5.5	9.5	1.0
	X24	GIRDER_01	-11.5	10.5	1.0
	X25	GIRDER_02	-1.5	13.5	1.0
	X26	GIRDER_03	-1.5	20.5	1.0
	X27	GIRDER_04	-1.5	20.5	1.0
	X28	GIRDER_05	-1.5	20.5	1.0
	X29	GIRDER_06	-1.5	13.5	1.0
	X30	GIRDER_07	-1.5	20.5	1.0
	X31	GIRDER_08	-1.5	20.5	1.0
	X32	GIRDER_09	-1.5	20.5	1.0
	X33	BLGHOPPER_01	-2.75	7.25	1.0
	X34	BLGHOPPER_02	-2.75	9.25	1.0
	X35	BLGHOPPER_03	-2.75	7.25	1.0
	X36	BLGHOPPER_04	-2.75	9.25	1.0

### 3.2.2 板厚に関する設計変数

船体構造二重底部の板厚変更に関する設計変数は、以下に示す 31 変数 (X6~X36) を設定した。

- X6 : (INNBTMPLATE)

No. 3CH を中心とし, No. 2CH・No. 4CH にまたがる船底内板の板厚  
(Fig.3-2-2)

- X7 ~ X16 : (BTMPLATE)

No. 3CH を中心とし, No. 2CH・No. 4CH にまたがる船底外板の板厚  
(Fig.3-2-3)

- X17 ~ X23 : (FLOOR)

No. 3CH のフロアの板厚 (Fig.3-2-4)

- X24 ~ X32 : (GIRDER)

No. 3CH を中心とし, No. 2CH・No. 4CH にまたがるガーダーの板厚  
(Fig.3-2-5)

- X33 ~ X36 : (BLGHOPPER)

No. 3CH を中心とし, No. 2CH・No. 4CH にまたがるビルジホッパーの板厚  
(Fig.3-2-2)

また、Table 3-2-1 に各設計変数の名称、初期値及び下限値・上限値とその刻み幅を示す。なお、形状及び板厚設計変数の初期値・下限値・上限値の設定は基本モデル作成の際と同様に、実際に船舶設計を行う設計者に依頼し、CSR の最低要求寸法<sup>[30]</sup> や経験に基づき決定した。

以上の様に本研究では、ばら積み貨物船の設計過程において中央断面の決定まで設計が終了した船舶の FEM モデルを用いて、船体構造において特に重要な形状設計変数を 5 変数、板厚設計変数を 32 変数設定し、構造最適化を検討する。

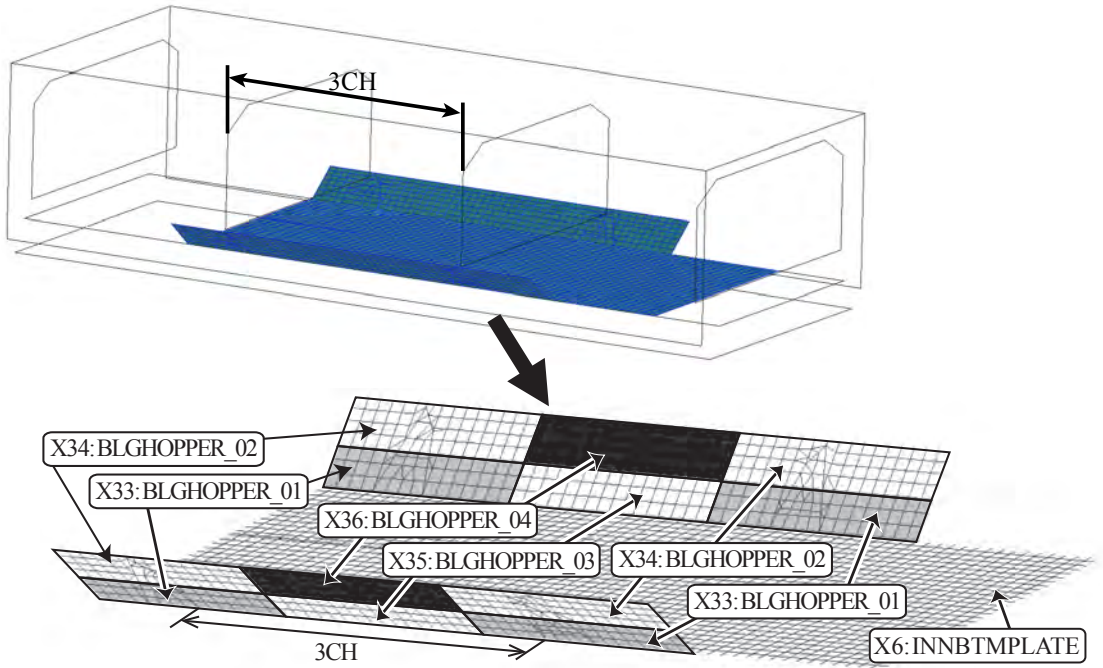


Fig.3-2-2 Design variables for plate thickness (Bilge Hopper and Inner Bottom Plate)

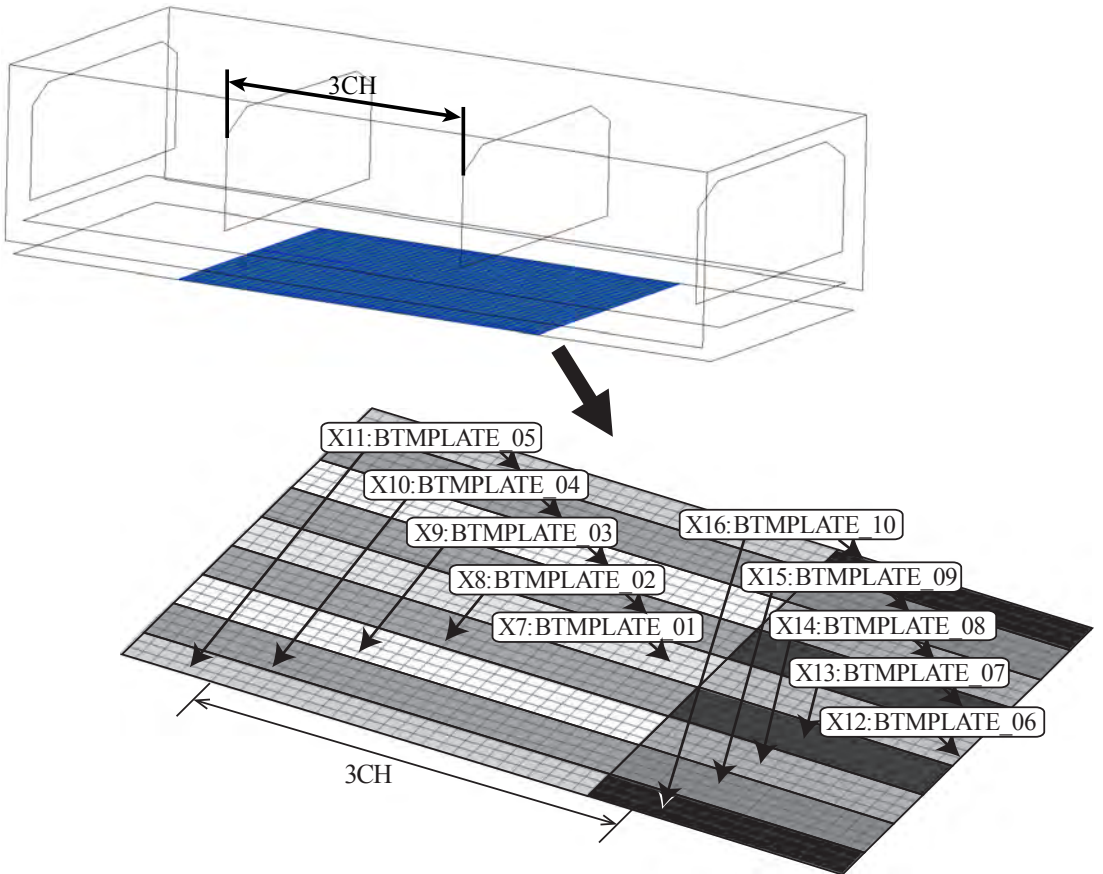


Fig.3-2-3 Design variables for plate thickness (Bottom Plate)

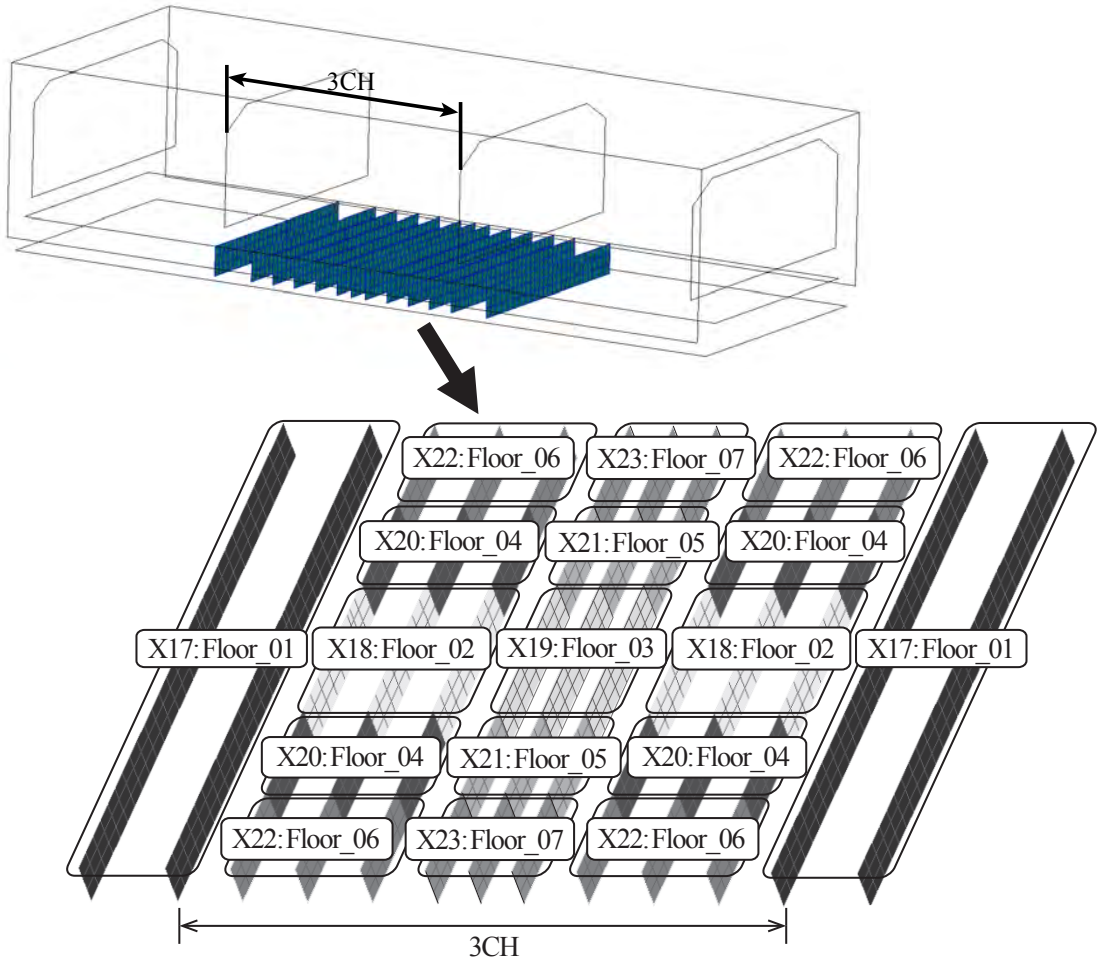


Fig. 3-2-4 Design variables for plate thickness (Floor Plate)

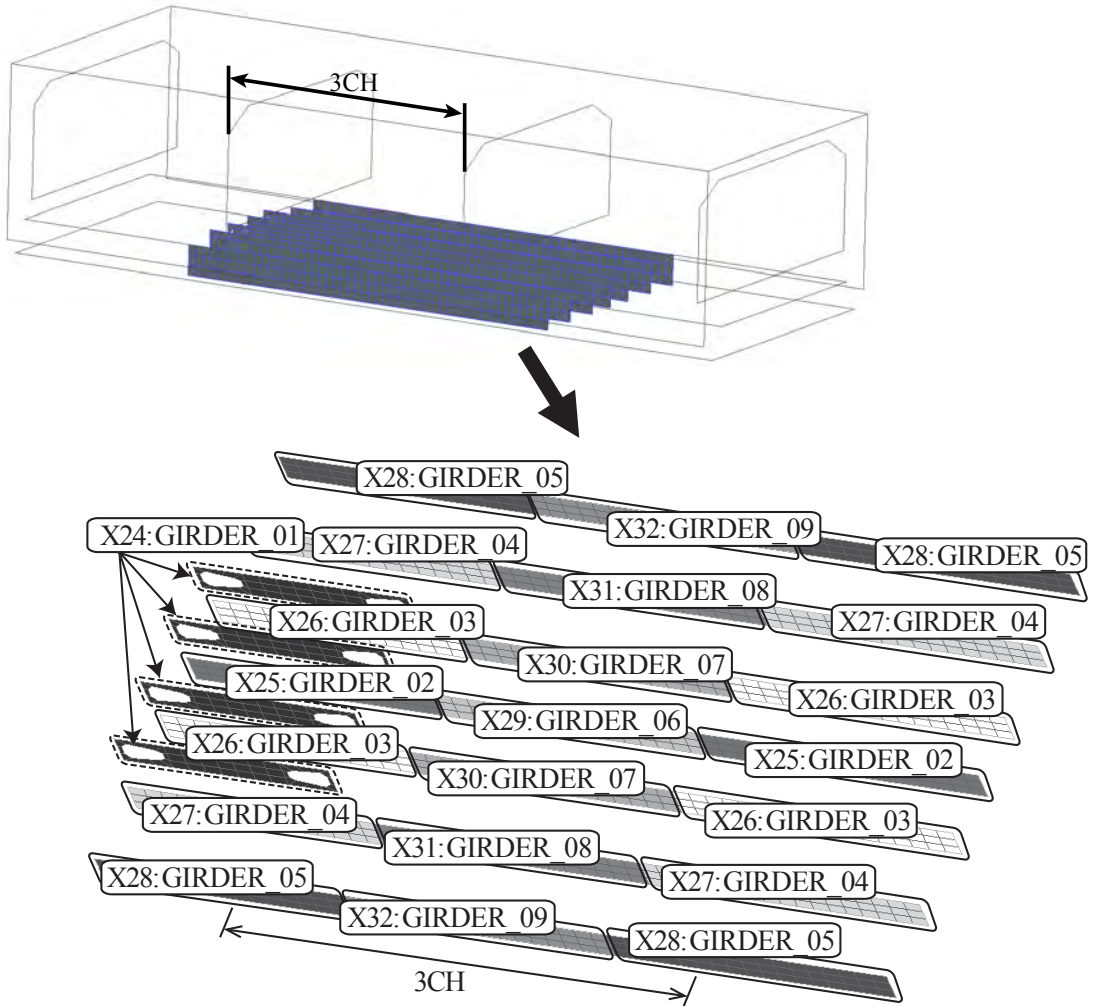


Fig. 3-2-5 Design variables for plate thickness (Girder Plate)





# 第 4 章

## 独立要素分割を用いた形状設計変数の変更

### 4.1 船舶と形状設計について

FEM モデルを用いた構造最適化問題では、2 章で述べた通り板厚を設計変数として最適化を実行する寸法最適化を行う事が一般的である。本来であれば船体重量減少の観点から、寸法最適化と形状設計変数を取り扱う形状最適化とを同時に行う事が望ましい。しかし形状最適化は、要素数・節点数が少ない、あるいは自動要素分割ツールにより FEM モデルを簡単に作成する事が可能な部品等において行なわれているが、構造が複雑な船舶等の大規模構造物においては殆ど行われていない。これは、構造物の接続関係が複雑な大規模構造物では、形状変更を把握し、矛盾なく FEM モデルに反映する事が非常に困難である事が原因である。これらの問題点を解決するため本研究では、構造物の形状最適化問題に独立要素分割と多点拘束 (Multiple Point Constraint : MPC) を用いる最適化手法を提案する。

### 4.2 多点拘束

#### 4.2.1 形状最適化の問題点と多点拘束

Fig.4-2-1 に示される 2 枚の板が接合される問題を考える。設計変数を板の取り付け位置とした場合、取り付け位置が  $(x_1, y_1)$  から  $(x_2, y_2)$  へ変更されると、メッシュ上で節点のずれが生じる。そのため、部材境界部において両部材の節点は共有されなくなる。この様な問題点を解決するため、本研究では接合部分の節点同士の結合に MPC を利用する。MPC とはある節点自由度を他の 1 つ、または複数の節点自由度により定義するものであり、一般的な有

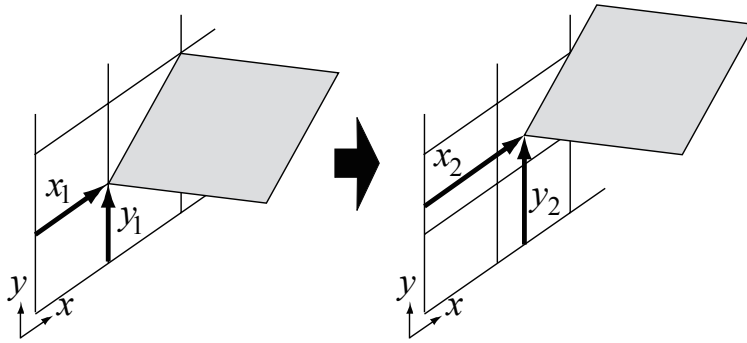


Fig. 4-2-1 Two plates varying their locations

限要素プログラムにおいて使用できる機能である。

Fig.4-2-2.a) に示す様な 1 つの節点自由度が他の 1 つの節点自由度に従属する場合、接合節点の同士の変位の関係は式 (4-2-1) により表現する。

$$u_2 = \alpha u_1 \quad (4-2-1)$$

ここで、 $u_1$  は節点 1 の x 方向成分の自由度を示しているが、他の自由度に対しても同様である。また式の中では係数  $\alpha$  を考慮しているが、本研究においては、この形式の多点拘束はすべて  $\alpha=1$  とする。つまり本研究では、自由度  $u_2$  は自由度  $u_1$  と同じ値となる事を表している。次に Fig.4-2-2.b) に示される様な、1 つの節点自由度が複数の節点自由度に従属する場合は、式 (4-2-2) により表現できる。

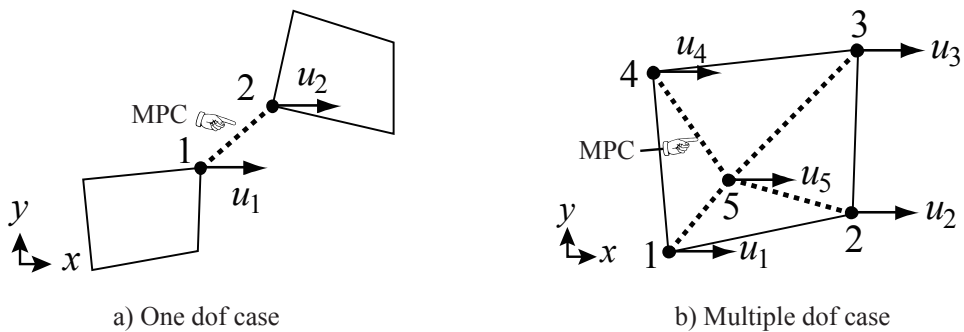


Fig. 4-2-2 Multiple point constraint (MPC)

$$u_5 = \alpha_1 u_1 + \alpha_2 u_2 + \alpha_3 u_3 + \alpha_4 u_4 \quad (4-2-2)$$

節点 1 ～ 4 が同一要素内にあり、材料特性等に特に条件がない場合は、結合係数  $\alpha_1 \sim \alpha_4$  を、節点の位置関係による定める事が考えられる。本研究では、アイソパラメトリック要素の形状関数を用いて各  $\alpha$  の値を決定する。

#### 4.2.2 多点拘束の精度

Fig.4-2-3 に示すモデルを用いて、多点拘束を利用した有限要素解析の精度を検証する。Plate B の取り付け位置を設計変数とした場合、結合部での両部材の節点位置関係は設計変数の変更に伴い変化し、Plate A と Plate B が共有できない節点が生じる。このような場合は、解析が不可能となる為、リメッシュ、またはモデル再生成が必要となる。そこで、前小節で提案した手法を用いて部材結合位置に多点拘束を用い、共有されない節点に従属関係を与える事により、メッシュやモデルの再生成を行う事なく有限要素解析を実行させる。

Plate A と Plate B の初期の取り付け状態を Fig.4-2-4.a) に示す。Plate B のコーナー部が Plate A の  $p$  点 (図中の ■) に位置している。この取り付け位置を  $p$  点から  $q$  点 (図中の □) に段階的に移動させて有限要素解析を行う。段階的に設定される Plate B のコーナー部の取り付け位置を、Fig.4-2-4.b) 中に ● △ ◆ により示す。Plate B が段階的に移動する状態において、Plate A と Plate B のメッシュ上で節点は一致しないため、先述の多点拘束を利用する。この問題の場合、式 (2) に従って Plate B の節点自由度を Plate A の節点自由度に従属させる。なお、取り付け位置が  $p$  点 (■) と  $q$  点 (□) の場合は通常の有限要素解析となる。Fig.4-2-6 に Fig.4-2-5 に示される評価ライン (Line 1 と Line 2) に沿った Mises 等価応力分布を示す。Plate B の取り付け位置が Fig.4-2-4.b) に示す  $p$  点と  $q$  点の間にある場合の解析を実施するための多点拘束モデルをそれぞれ ● を MPC model 1, △ を MPC model 2, ◆ を MPC model 3 とする。Plate B の取り付け位置からある程度離れた場所においては、取り付け位置の移動に伴い、応力分布は緩やかに変化すると思われる。Fig.4-2-6.a) において、多点拘束を用いて得られた Line 1 上の各応力値は、Plate B のコーナー部の取り付け位置  $p$  点と  $q$  点における応力値の間にあり、また、大小関係に逆転のない緩やかな変化である。Line 2 は、Plate A と Plate B の

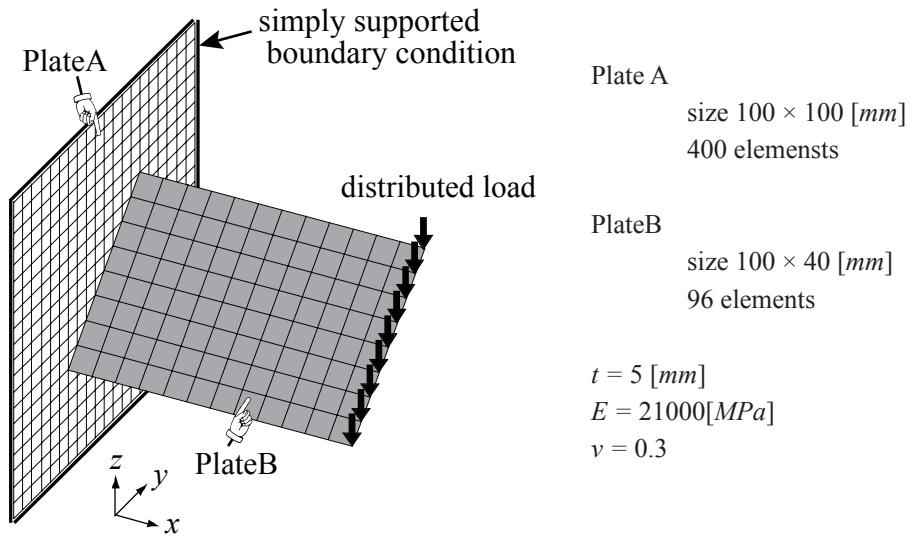


Fig. 4-2-3 Test problem of two plates

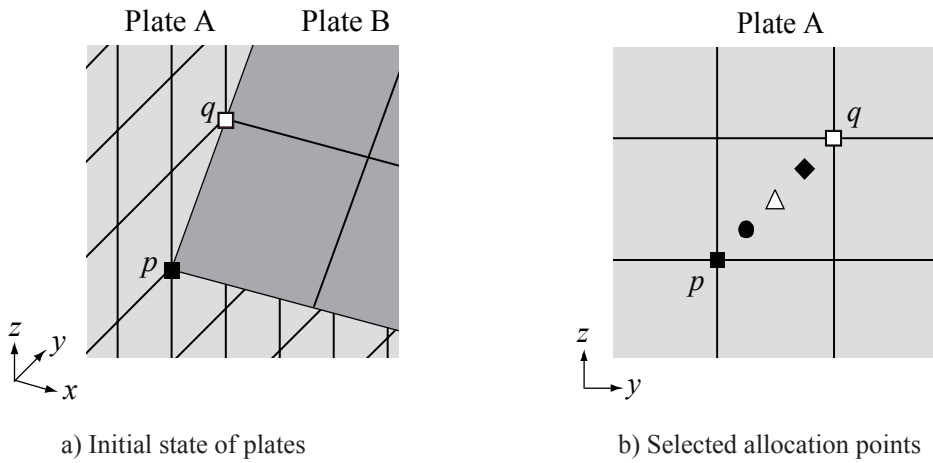


Fig.4-2-4 Allocation of two plates

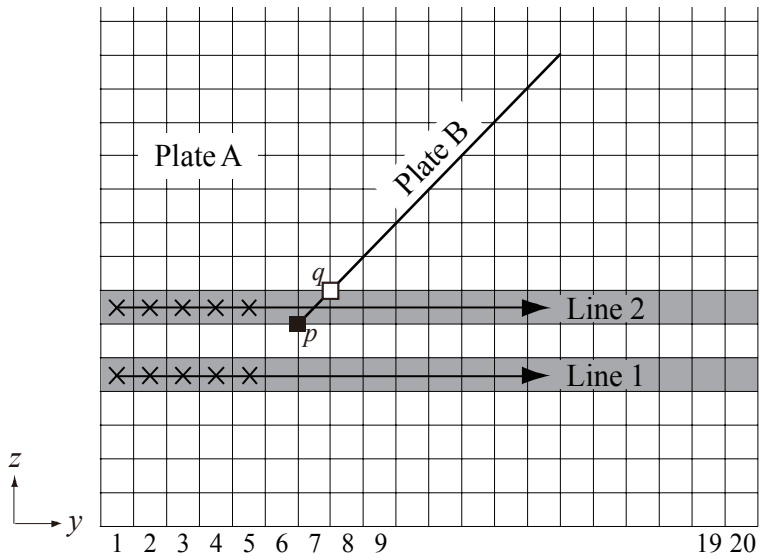
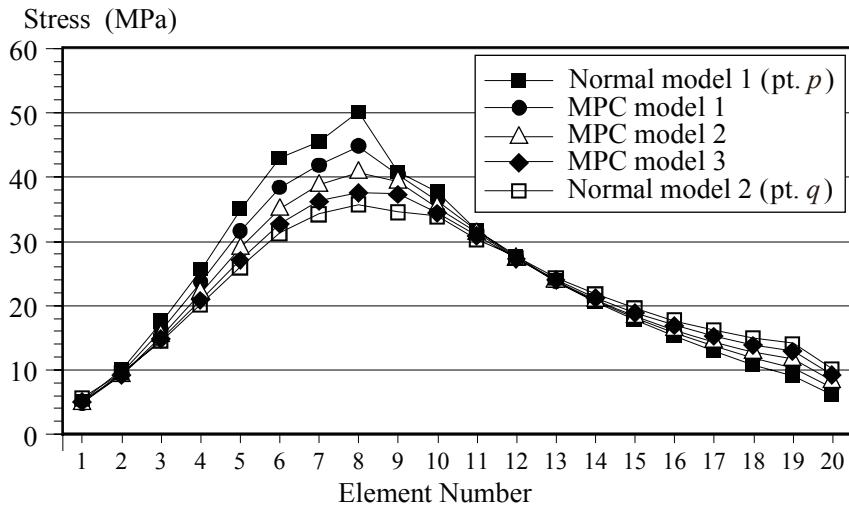
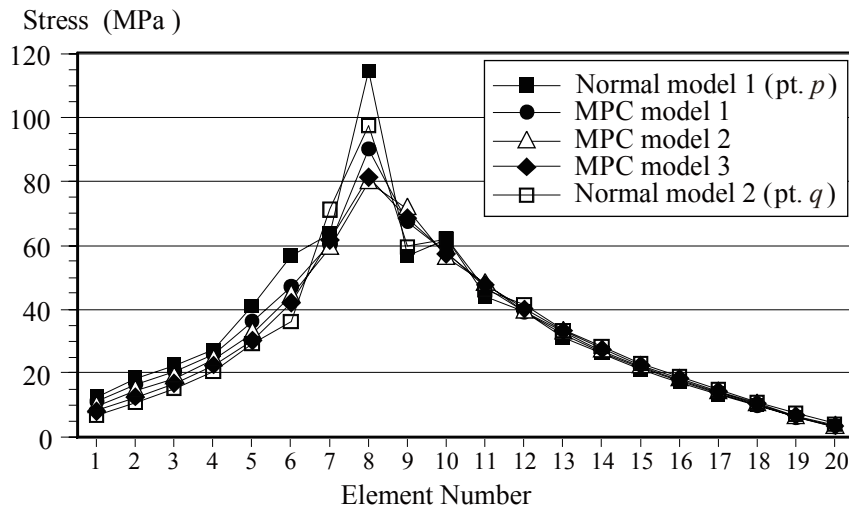


Fig.4-2-5 Stress evaluation lines and points



a) Stress distribution of MPC and normal models along Line 1



b) Stress distribution of MPC and normal models along Line 2

Fig.4-2-6 Stress distribution with MPC

接合部の要素を含むため、得られた応力値に急激な変化が見られる。要素7から10の間では、通常の有限要素解析 ( $p$  点と  $q$  点) において、応力値の大小関係が交互に変化しており、また、多点拘束を用いた解析結果もそれらの応力値の間でない。一方、それ以外の要素においては、多点拘束を用いて得られた応力値に大小関係の逆転がない。

Fig.4-2-7.b) と c) に示す再分割モデル (Remesh model 1, 2) の解析結果との比較により、多点拘束を用いた有限要素解析の精度を検証する。Remesh model 1 と 2 の Plate B の取り付け位置は、それぞれ、MPC model 1 と 3 に一致する。Line1 上における再分割モデルと多点

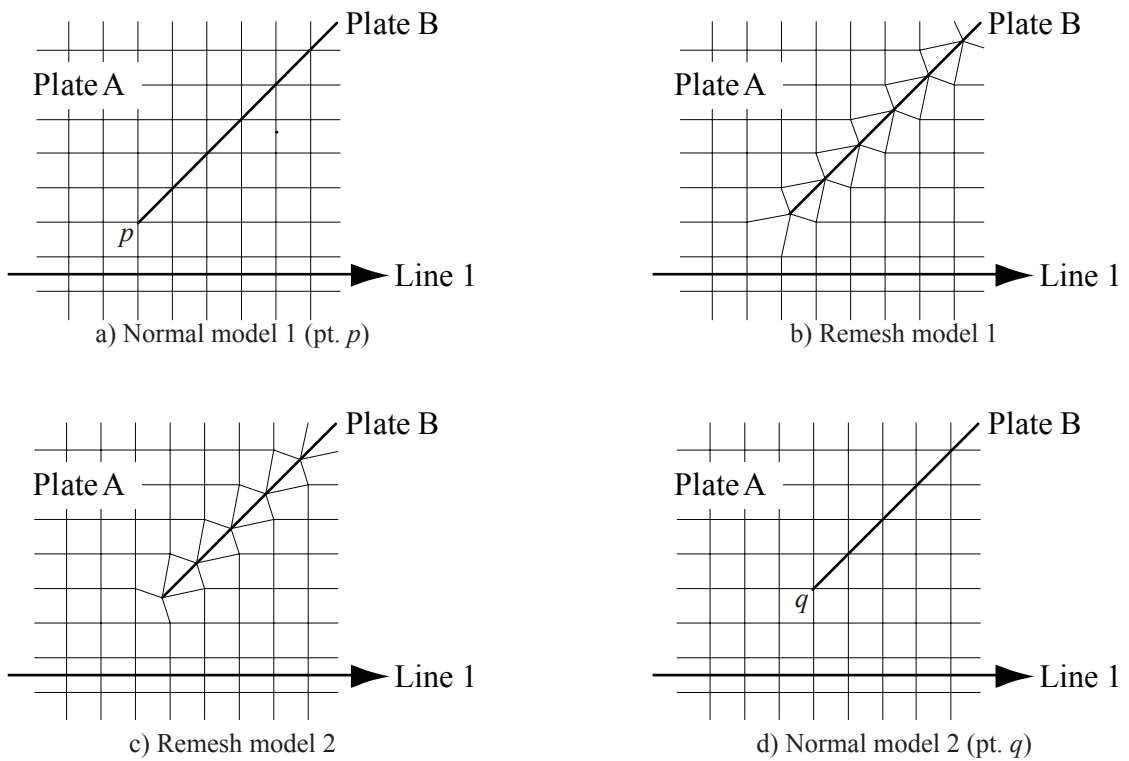
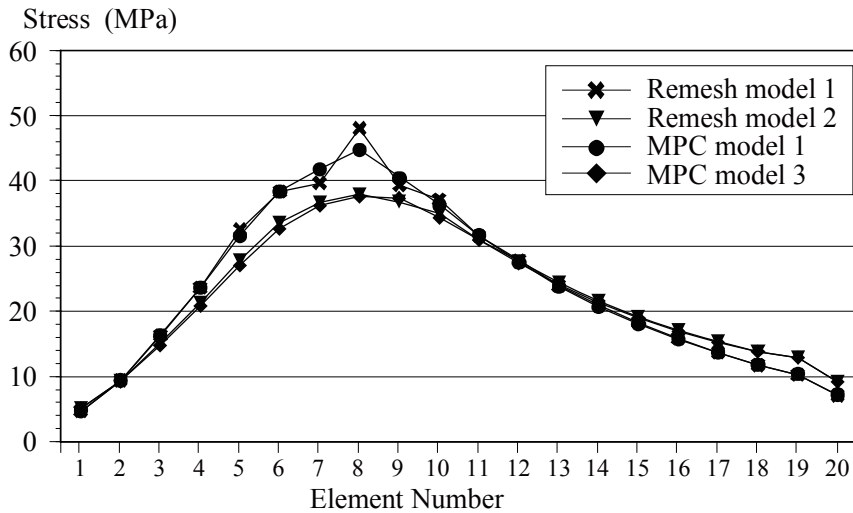
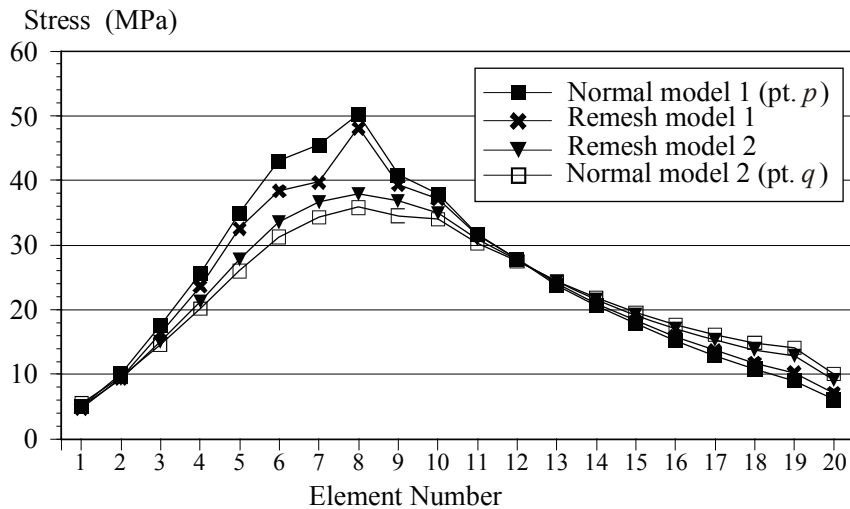


Fig.4-2-7 Remesh models

拘束モデルの Mises 等価応力分布を Fig.4-2-8.a) に比較する。Plate B の取り付け位置が Line 1 から少し離れている Remesh model 2 と MPC model 3 の結果は類似している。一方、取り付け位置が Line 1 に近い Remesh model 1 と MPC model 1 の結果は、8 番目の要素の近辺で相違が発生している。再分割モデルと通常の有限要素モデル (Fig.4-2-7: Normal model 1, 2) の Mises 等価応力分布を Fig.4-2-8.b) に示す。Fig.4-2-6.a) の Mises 等価応力分布も考慮すると、再分割モデル (Remesh model 1) の応力分布が他の解析結果と異なる傾向を示しており、多点拘束を用いた解析では、Line 1 上において、妥当な応力結果が得られていると判断する。Fig.4-2-7 に示される様に、Remesh model 1 の場合は、Plate B の取り付け位置と Line 1 の間には非正方形の大きめの要素が 1 つ存在するだけであるが、Remesh model 2 の場合は、非正方形の小さめの要素と正方形要素の 2 つが存在している。一方、全ての多点拘束モデルにおいて、Plate B の取り付け位置と Line 1 の間には、Plate B が接合される要素を含めて 2 つの正方形要素が存在している。この様な Plate B の取り付け位置と応力評価点の間に存在する要素数と要素形状のゆがみが Remesh model 1 の解析精度を下げている要因と考えられる。多



a) Stress distribution of remesh and MPC models along Line 1



b) Stress distribution of remesh and normal models along Line 1

Fig. 4-2-8 Stress distribution of remesh models

点拘束を用いた有限要素解析モデルでは、従属する節点の剛性や荷重は多点拘束により関係付けられた他の節点に分配される。剛性や荷重が分配される節点は同一要素内に存在するため、多点拘束により発生する局所的な影響も、その要素、あるいは隣接する要素の範囲内で解消される。この解析例では、Line 1 の結果より、2 要素程度離れる事により、妥当な応力値が得られている。しかし、板厚や要素サイズ等により多点拘束で接合される要素の剛性に大きな差がある場合や応力が激しく変化する様な荷重が負荷される場合は、多点拘束により発生する局所的な影響が解消される範囲が異なる事もある。この様な要素剛性等の急激な変

化は通常の有限要素解析においても注意すべき事であるが、多点拘束を用いた解析においては特に留意する必要がある。以上より、制約条件のための応力評価位置から十分に離れた要素（この例題の様に、要素間の剛性に大きな差がない場合には2要素以上）に多点拘束を使用する場合、最適設計に十分な精度を有する有限要素解析が可能であると判断する。

### 4.3 形状最適設計と独立要素分割

3.2節で述べた通り、二重底高さ、内底板幅、ビルジホッパータンク高さ、ロアスツール長さを設計変数とするため、これら変数が変更される事により、船体構造解析のための分割メッシュの節点が移動する。Fig.4-3-1.a)に構造物と設計変数の例を、Fig.4-3-1.b)に初期状態の有限要素解析メッシュの例を示す。設計変数  $s$  を変更した場合の有限要素解析メッシュをFig.4-3-1.c)に示すが、設計変数が直接的に関係する部材は2枚の縦板に限られているにも関わらず、ほとんどの節点座標値を変更しなければならない。船舶の様な大型の構造物において、この様なメッシュ変更を実施する事は非常に困難であり、形状最適設計の大きな問題

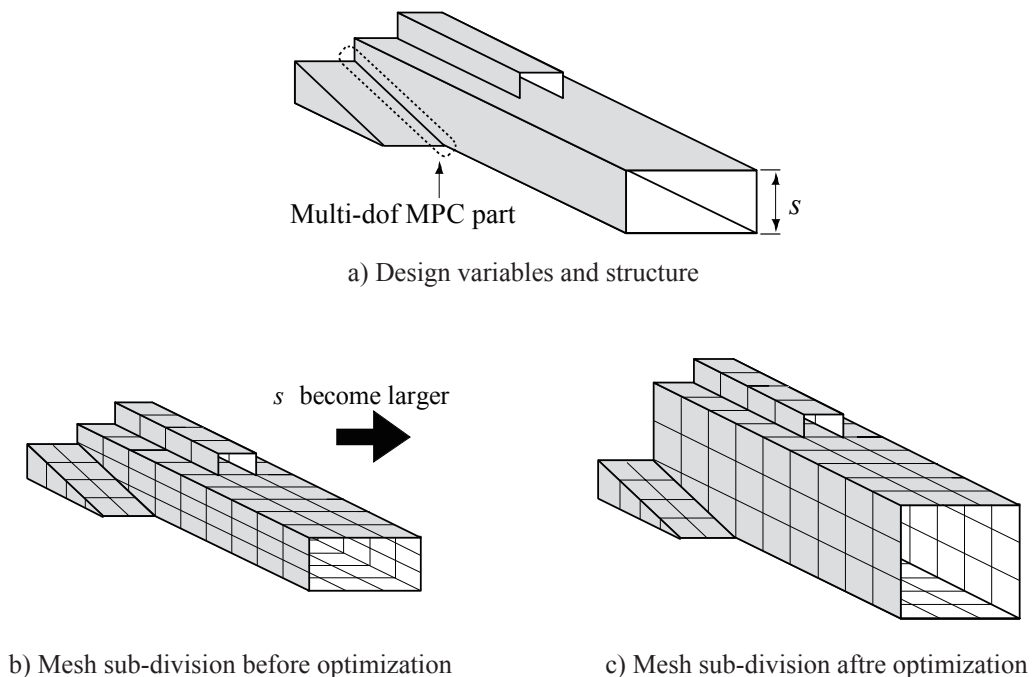


Fig. 4-3-1 Structure and mesh sub-division



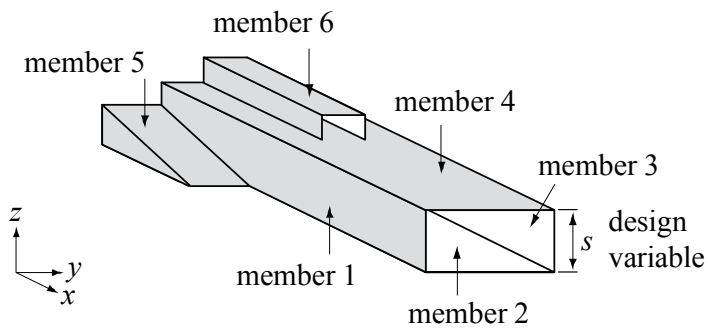


Fig. 4-3-2 Members of structure

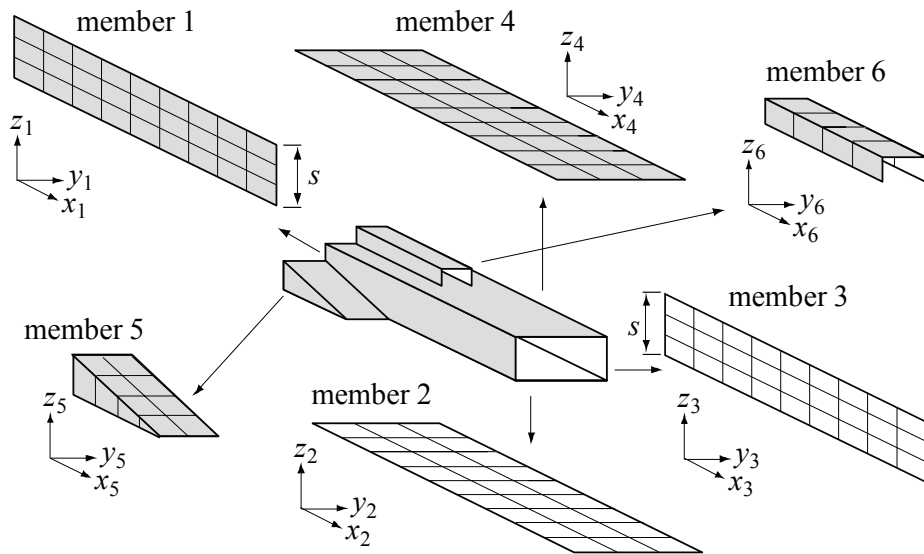


Fig. 4-3-3 Individual mesh sub-division of members

点である。Fig.4-3-1 の構造物を、Fig.4-3-2 に示される様な 6 部材に区分する。member 1 ～ member 4 はそれぞれ 1 枚の長方形板であり、member 5 と member 6 は複数の板により構成された部材である。これら部材に対して独立に要素分割を施した状態を Fig. 4-3-3 に示す。これらを各独立分割と呼ぶ事とする。ここで、各独立分割モデルは個々の 3次元座標系を有する事ができる。ただし、不要な座標変換を避けるために、各次元の方向は統一する事とする。

#### 4.4 独立要素分割と MPC を利用した構造の結合

Fig.4-4-1 に、member 1 と member 4 の間、及び、member 4 と member 6 の間に付与された

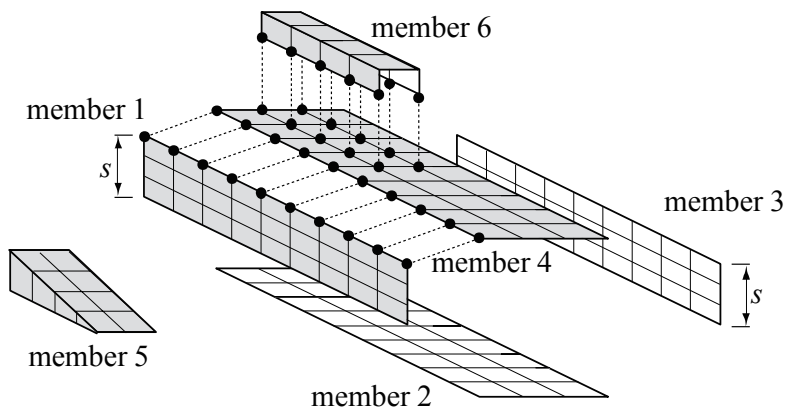


Fig. 4-4-1 MPC between individual mesh sub-division

多点拘束による接続関係を破線により示す。これは、式 (4-2-1) により表現される 1 節点对 1 節点の関係になる。図中に示されている以外にも、member1 と member 2, member 2 と member 3, member 3 と member 4 の間にも同様な多点拘束が付与される。独立分割モデルに適切な多点拘束を与える事により、通常の有限要素解析モデルと等価なものとなる。一方、節点情報に関しては、独立要素分割と多点拘束を用いた場合、設計変数  $s$  に直接的に関係する部材である member 1 と member 3 の節点を変更する必要があるが、他の部材の節点を変更する必要はない。member 1 と member 5 は式 (4-2-2) により表現される 1 節点对多節点の多点拘束により従属関係を与える。member 5 の節点が、member 1 中のどの要素内部に移動したかを把握し、有限要素の形状関数に従って、結合係数を定める。

#### 4.5 独立要素分割の課題

前節までに、独立要素分割と MPC を用いる事により、船体二重底構造部の形状最適設計を実施する事を提案した。しかし、独立要素分割 FEM モデル作成のために、以下の作業を要する。

- 1) 設計変数に適合する様に船体構造を複数の独立要素分割グループに分割する
- 2) 独立要素分割グループごとにメッシュを生成する
- 3) 設計変数の変更により節点移動するプログラムを作成する

#### 4) 独立要素分割グループ間に MPC による接続関係を付与する

これらの作業を簡単に行い、提案手法を通常の船舶設計に適用するためには、FEM モデルの作成が大きな問題となる。そこで次章では、船舶設計に於いて一般的に利用されている設計支援ソフトウェアから出力される情報を用いて、自動的に独立要素分割モデルの作成を行う手法を提案し、実際の船体構造への適応を試みる。



# 第 5 章

## 部材認識機能を利用した独立要素分割モデルの作成

### 5.1 背景

1.3 節で述べた通り，現状の船舶設計の現場では PSH が必要不可欠な存在となっている．PSH は算式計算システムと直接強度計算システムにより構成されているが，直接強度計算システムを利用するためには，PSH に入力するための FEM モデルデータが必要であり，PSH を利用する造船会社は，必ず船舶の FEM モデルを作成する必要がある．また，直接強度計算システムには，荷重の設定と結果評価を効率的に行うために，FEM モデル上の部材を認識する機能を有する．

このような状況を考慮し，本研究では独立要素分割モデルの生成及び MPC の設定の自動化を試みる．具体的には，FEM メッシュ分割を施した一般的なばら積み貨物船モデルを題材とし，PSH の直接強度計算システムに搭載された部材認識機能を拡張して独立要素分割モデルを自動生成し，設計変数に応じて自動的に FEM モデルの形状変更を行う手法を開発することを目的とする．

### 5.2 基本方針

4 章において述べた様に，独立要素分割グループは操作対象となる設計変数との関連性を考慮して決定される．具体的には，ガーダーやフロア等が一つの独立要素分割グループとして取り扱われる．一方，研究対象である一般的なばら積み貨物船に着目すると，隔壁，二重

底，及びビルジホッパータンク等の船舶を構成する主要構造部材の概略的な配置とその接続関係には共通点が多い．個々の船舶において異なる部分は，主要構造部材の寸法及び縦通補強材等の小部材の数や間隔などである．この特徴に着目すると，ばら積み貨物船の独立要素分割グループの船ごとの共通点及び相違点は，以下の様に整理できる．

共通点：

- 独立要素分割グループの数
- 独立要素分割グループ同士の位置関係及び接続関係
- 設計変数の更新に伴って操作の対象となる独立要素分割グループ

相違点：

- 各独立要素分割グループに含まれる FEM メッシュの数
- FEM メッシュの節点座標
- FEM メッシュの節点同士の MPC 接続

以上に述べた特徴を利用して，本研究では一般的な FEM モデルデータを基に形状最適化のための FEM モデルデータを自動生成する事を試みる．具体的には，以下の方針を採用する．

- 1) 独立要素分割グループ，独立要素分割グループ同士の接続関係，及び各設計変数と独立要素分割グループの更新すべき寸法との関係を予めシステム内に定義しておく．なお，独立要素分割グループは属性として自身に所属する FEM メッシュのデータを有するが，この時点では FEM メッシュのデータは記述されていない．
- 2) 一般的な FEM モデルデータを基に，各独立要素分割グループに所属すべき FEM メッシュを判別し，独立要素分割グループの属性として FEM メッシュを記述する．なお，判別には PSH の部材認識機能に変更を加えたものを利用する．
- 3) 上記 1) で定義されている独立要素分割グループ同士の接続関係の情報と上記 2) で各独立要素分割グループに記述された FEM メッシュの節点座標に関する情報

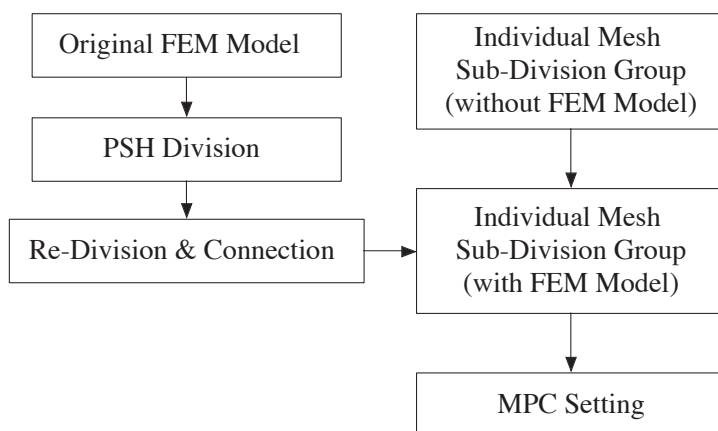


Fig.5-2-1 Flow of generating FEM model for shape optimization

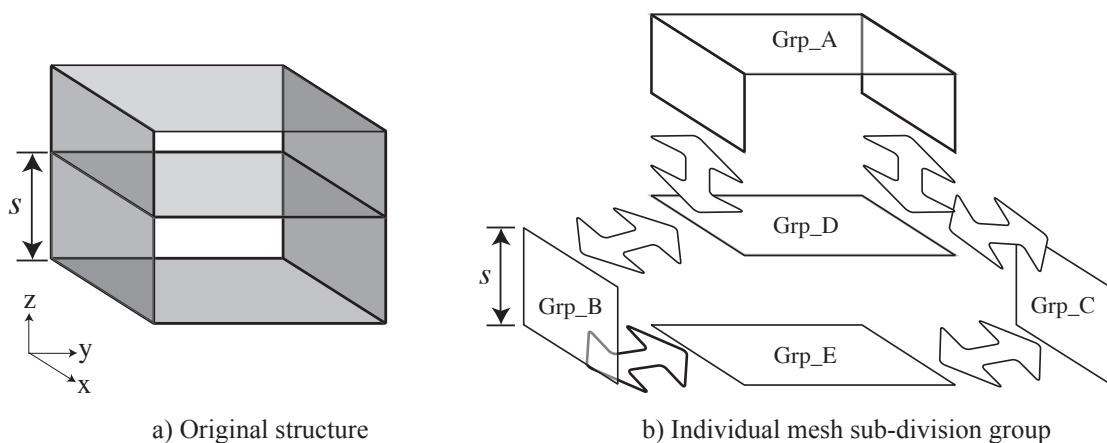


Fig.5-2-2 Original structure and individual mesh sub-division

を利用して、FEM メッシュの節点同士の MPC 接続関係を自動生成する。

形状最適化用 FEM モデルデータ作成のための情報処理の流れを Fig.5-2-1 に示す。Fig.5-2-1 の流れに沿って、以下にシステムにおける情報処理の概要を示す。

### 5.3 独立要素分割グループの定義

ここでは、Fig.5-2-2.a) に示す構造を例にとり、独立要素分割グループの定義方法を説明する。Fig.5-2-2.a) の例では、設計変数  $s$  の変更に伴い、構造物の高さ及び中板の位置が変更さ

れる事を想定している。

この例題に独立要素分割及び MPC を適用すると、Fig.5-2-2.b) に示す様に 5 つの独立要素分割グループが定義される。各独立要素分割グループに所属する節点の座標は MPC を介して相対的に定義されている。したがって、設計変数  $s$  の更新に伴い形状変更が必要となる独立要素分割グループは Grp\_B 及び Grp\_C のみであり、これらに所属する節点の  $z$  座標を変更すれば良い事なる。

以上の特徴を考慮し、初期状態の独立要素分割グループとして、以下の情報を定義する。

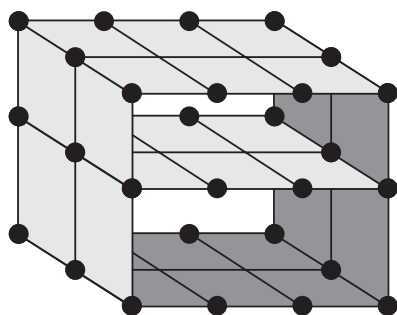
- Grp\_A ~ Grp\_E の 5 つの独立要素分割グループとその識別用名称
- 各設計変数の更新に伴って操作すべき節点座標とその操作方法（この例題では、Grp\_B 及び Grp\_C のみに、 $s$  の変更に伴う  $z$  座標の操作方法が記述される）
- 5 つの独立要素分割グループの接続関係（Grp\_B には Grp\_D 及び Grp\_E と接続関係がある事のみが記述され、具体的な位置等の情報は持たない）

本研究で使用するばら積み貨物船の場合には、ガーダーやフロア等の合計 871 個の独立要素分割グループが定義される。各独立要素分割グループには、5 つの設計変数の更新に対する節点座標の操作方法がそれぞれ記述されている。

### 5.3 PSH による構造分割

船舶の FEM 解析において、設計荷重の設定と結果評価を効率よく行うためには、区画や部材の認識が必要である。そのため、PSH の直接強度計算システムは部材分類と区画認識を自動的に行う機能を有する。5.1 節で述べた様に、PSH の対象船舶である一般的なばら積み貨物船を構成する主要構造の概略的な配置は同じである。そのため、PSH は船体の主要な寸法情報に基づいて各節点・要素がどの部材に所属するかを判断する。Patran を介して基となる FEM モデルデータを読み込み、船体主要寸法、断面寸法、ロアツール寸法等を入力す



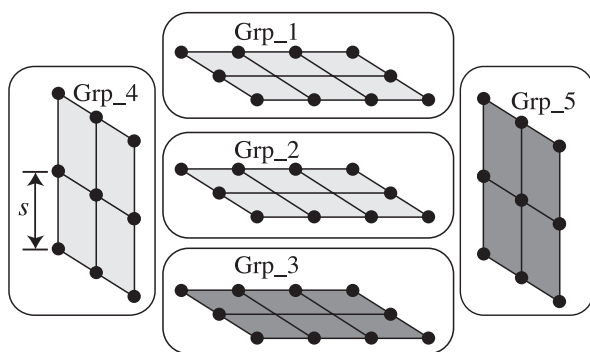


a) Original FEM mesh

node	x	y	z	elem				
1	0.0	0.0	0.0	1	1	2	6	5
2	0.0	50.0	0.0	2	2	3	7	6
3	0.0	100.0	0.0	3	3	4	8	7
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
34	100.0	50.0	100.0	24	21	17	29	33
35	100.0	100.0	100.0	25	16	20	32	28
36	100.0	150.0	100.0	26	20	24	36	32

b) FEM data

Fig.5-3-1 Original mesh and FEM data



a) Original FEM mesh

Grp_1	node 25, 26, 27, ⋯, 36	elem 13, 14, 15, ⋯, 18
Grp_2	node 13, 14, 15, ⋯, 24	elem 7, 8, 9, ⋯, 12
⋮	⋮	⋮
Grp_5	node 4, 8, 12, ⋯, 36	elem 21, 22, 25, 26

b) FEM data

Fig.5-3-2 PSH division groups and their data

る事により、PSHによる部材認識と部材を構成する要素・節点のグループ分割が実行される。本研究では、この分割をPSH分割、生成されるグループをPSH分割グループと呼ぶ事とする。

例として、Fig.5-3-1.a)及びFig.5-3-1.b)に示すFEMモデルデータのPSH分割を取り上げる。Fig.5-3-1.b)に示される通り、FEMモデルデータは、一般的なFEMデータと同様に、節点座標と要素構成情報が一つのファイルにまとめられている。このFEMモデルデータに対してPSH分割を実行すると、例えばFig.5-3-2.a)に示される様にGrp\_1からGrp\_5に分割される。また、Fig.5-3-2.b)に示される様に、それぞれのPSH分割グループには、グループに属する節点及び要素情報がグループごとに保持される。

## 5.4 PSH 分割グループの再分割と結合

PSH 分割グループは、荷重条件の付加や制約条件の判断に適した構造分割である。一方、独立要素分割グループは設計変数の更新に基づく構造変更を考慮したグループであるため、両者には相違がある。例えば、Fig.5-2-2 と Fig.5-3-2 とを比較すると共通点はあるものの、構成が異なっている事が理解できる。そこで、PSH 分割グループを再分割し、再分割された PSH 分割グループを適切に結合する事により、独立要素分割グループに割り当てる FEM メッシュを特定する。

PSH 分割グループの再分割及び結合の流れを Fig.5-4-1 に示す。Fig. 5-4-1.c) に示される様に、PSH 分割グループを再分割するための分割線は、複数の PSH 分割グループの交線として定義される。一方、船体構造の詳細は船ごとに異なるものの、生成される PSH 分割グループの基本的な構成は同一である。そこで、分割線を定義すべき場所を、複数の PSH 分割グループによって予めシステム上で規定する (Fig.5-4-1.b)). 具体的な分割線の位置は、生成された

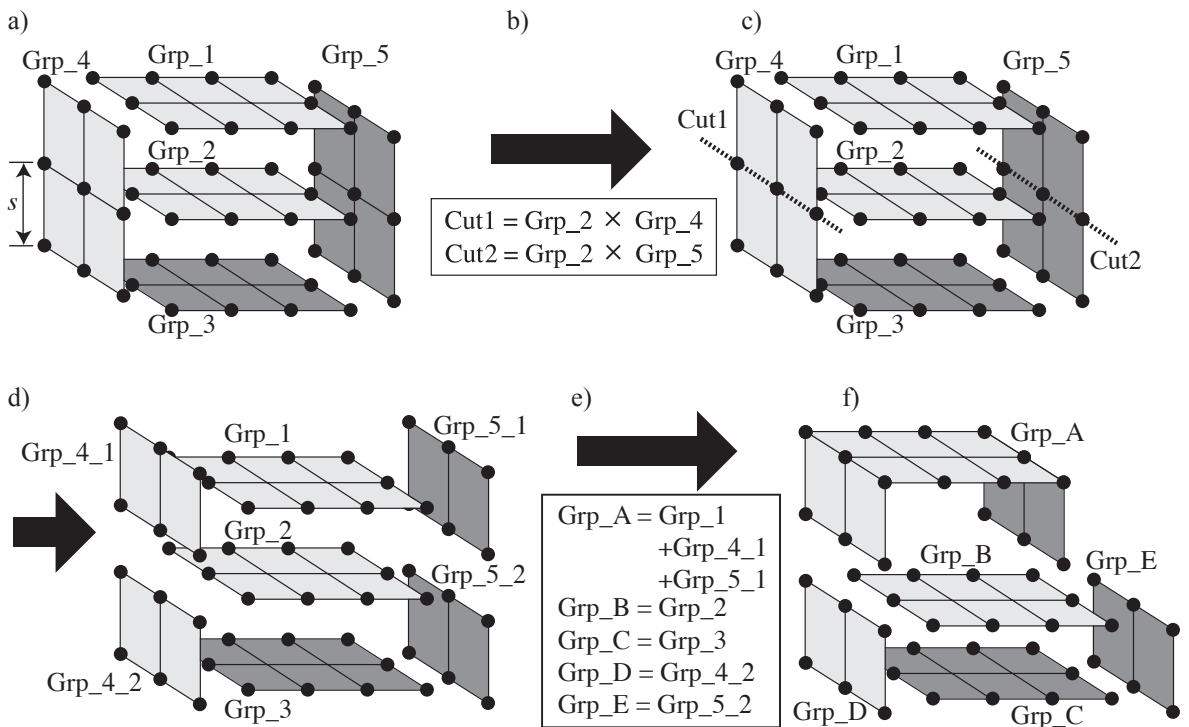


Fig.5-4-1 Redivisions and connections of PSH groups

PSH 分割グループの節点情報を利用して幾何計算を実施する事により特定する。この分割線の情報を利用して、Fig.5-4-1.d) に示される様に再分割された PSH 分割グループを生成する。

一方、上記の様にして再分割された PSH 分割グループの構成は共通であるため、再分割された PSH 分割グループと独立要素分割グループとの関係をシステム内に予め記述する。例えば Fig.5-4-1.e) に示される様に、独立要素分割グループ Grp\_A は Grp\_1, Grp\_4\_1, 及び Grp\_5\_1 によって構成されるという関係が記述されている。そこで、この情報を利用して再分割された PSH 分割グループを結合する事により、Fig.5-4-1.f) に示される様に独立要素分割グループに割り当てる FEM メッシュが特定される。なお、本節では再分割の後に結合されるという順序で説明したが、実際には結合の後に再分割が行われる事もある。この場合も、情報処理方法は同様である。

### 5.5 FEM メッシュの割り当てと MPC の設定

5.4 節の手法により特定された各独立要素分割グループに割り当てる FEM メッシュを、5.2

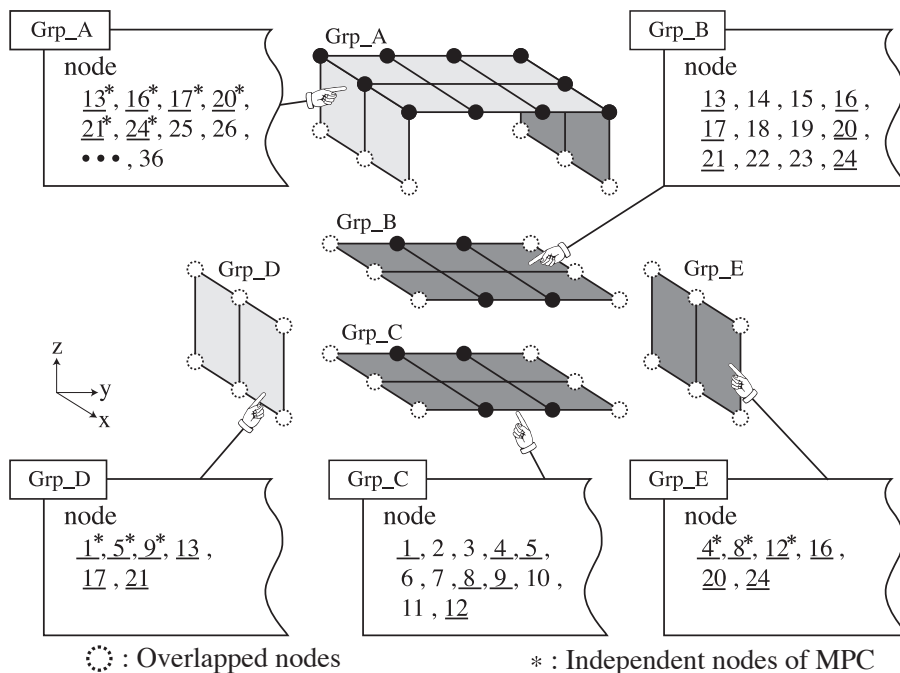


Fig.5-5-1 Overlapped nodes for individual mesh-subdivision

節で定義した独立要素分割グループの属性として記述する。但し、この時点では、全体モデル上で同一であった節点番号が重複した状況となっている。Fig.5-5-1 に節点の重複状況を示す。図中の白丸及び下線が付加されている節点番号が重複している部分である。5.2 節で述べた独立要素分割グループの接続関係は、これらの重複している節点に存在する。そこで接続関係を利用して重複する節点を特定し、新たな節点番号を付与する。合わせて、新たな節点番号を付与した節点の間に MPC を設定する (Fig.5-5-2)。

以上の方法により、本研究が目的とする独立要素分割及び MPC を利用した FEM モデルが生成され、形状変更が可能となる。

## 5.6 ばら積み貨物船モデルへの適用

### 5.6.1 対象船舶及び設計変数

本研究は、PSH にて取り扱われる全てのばら積み貨物船に対応可能な汎用性の高い形状最

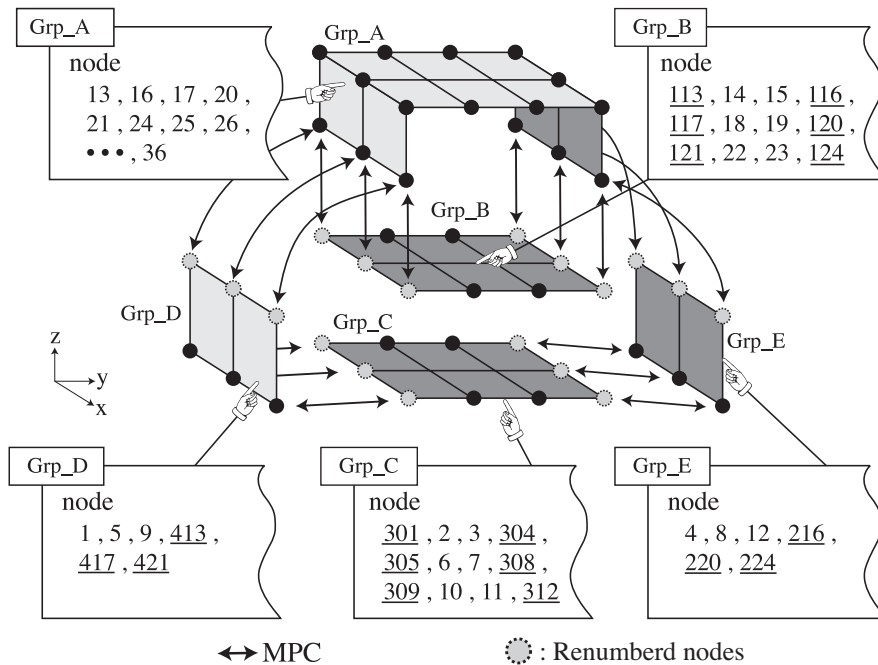


Fig.5-5-2 Renumbering and establishing MPC

適化モデル作成システムの構築方法を提案する。本研究では、Fig.3-1-1 に示すばら積み貨物船(2番～4番カーゴホールド部)二重底構造部の形状最適化を用いて、その詳細を説明する。

また設計変数は 4.2.1 節で述べた様に、船体構造二重底部の形状変更に関する 5 設計変数を採用する。本研究は上記の 5 変数による形状変更を扱うが、提案手法を用いる事により、他の設計変数を取り入れる事も可能である。

### 5.6.2 PSH 分割

5.3 節で述べた様に、ばら積み貨物船の FEM モデル (Fig.3-1-1 参照) データを PSH に入力すると、PSH 分割グループが生成される。Fig.5-6-1 にバルクヘッドプレート部に対する PSH 分割グループを示す。PSH 分割により、各バルクヘッドプレートは船体中央から左右に分けられる。その際に、PSH グループの名称として、バルクヘッドプレートを意味する

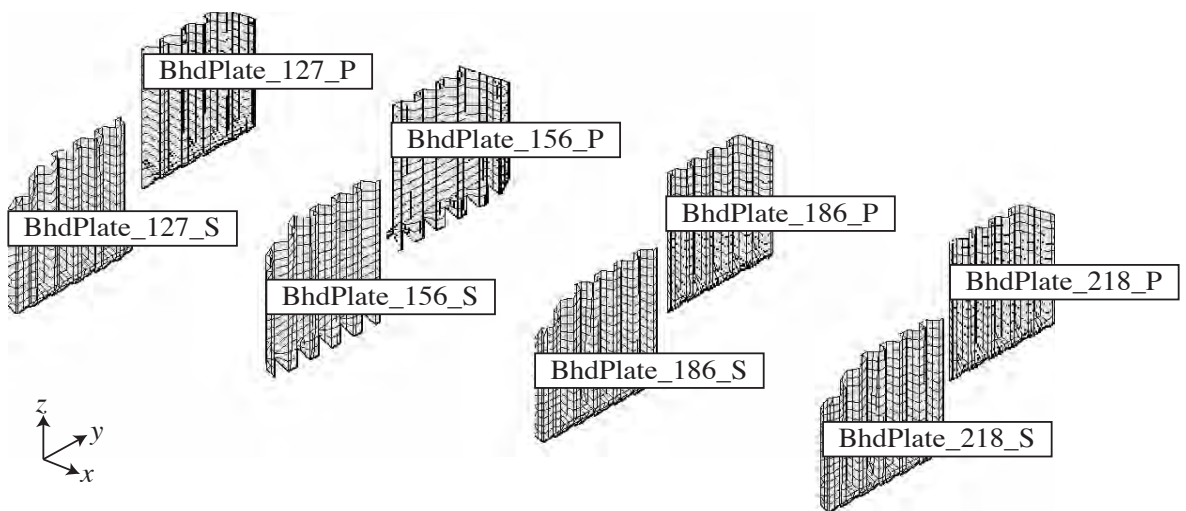


Fig.5-6-1 PSH division for Bulkhead

Table 5-6-1 Group name list (PSH division)

- |               |              |                    |                    |
|---------------|--------------|--------------------|--------------------|
| • BtmShell    | • CrossDeck  | • SideTrans        | • UStoolWeb        |
| • InnBtmShell | • BtmGirder  | • TstTrans         | • LStoolPlate_Fore |
| • BilgeHopper | • DeckGirder | • HendCoam         | • LStoolPlate_Aft  |
| • BilgeShell  | • HsideCoam  | • HendBeam         | • LStoolPlate_Top  |
| • SideShell   | • Stringer   | • BhdPlate         | • LStoolWeb        |
| • InnHull     | • Floor      | • UStoolPlate_Fore |                    |
| • DeckPlate   | • BilgeTrans | • UStoolPlate_Aft  |                    |
| • TstPlate    | • HoldFrame  | • UStoolPlate_Top  |                    |

「BhdPlate」という名称の後ろに、船長方向の位置を示す「フレーム番号」、及び左右舷を表す「P」または「S」の記号が付加される。また、生成される PSH 分割グループの一覧を Table 5-6-1 に示す。バルクヘッドプレートと同様に、Table 5-6-1 に示す他の PSH 分割グループもフレーム番号と P または S の記号等が付加される。

船体構造全体が PSH 分割グループに分類された後、考慮すべき荷重条件等の付加処理を行い、FEM 解析のためのモデルデータ、及び各 PSH 分割グループの情報を記したファイルが出力される。

### 5.7 独立要素分割グループの生成

5.1～5.5 節で述べた方法に従って、5.6.2 小節で得られたばら積み貨物船の PSH 分割グループより独立要素分割グループを生成する。Fig.5-7-1.a) は船底外板部の PSH 分割グループを示している。船底外板部は船体中央部より「BTMSHELL\_P」及び「BTMSHELL\_S」の二つの PSH 分割グループに分割されている。船底外板部は設計変数 (X3,X4,X5) に依存するが、

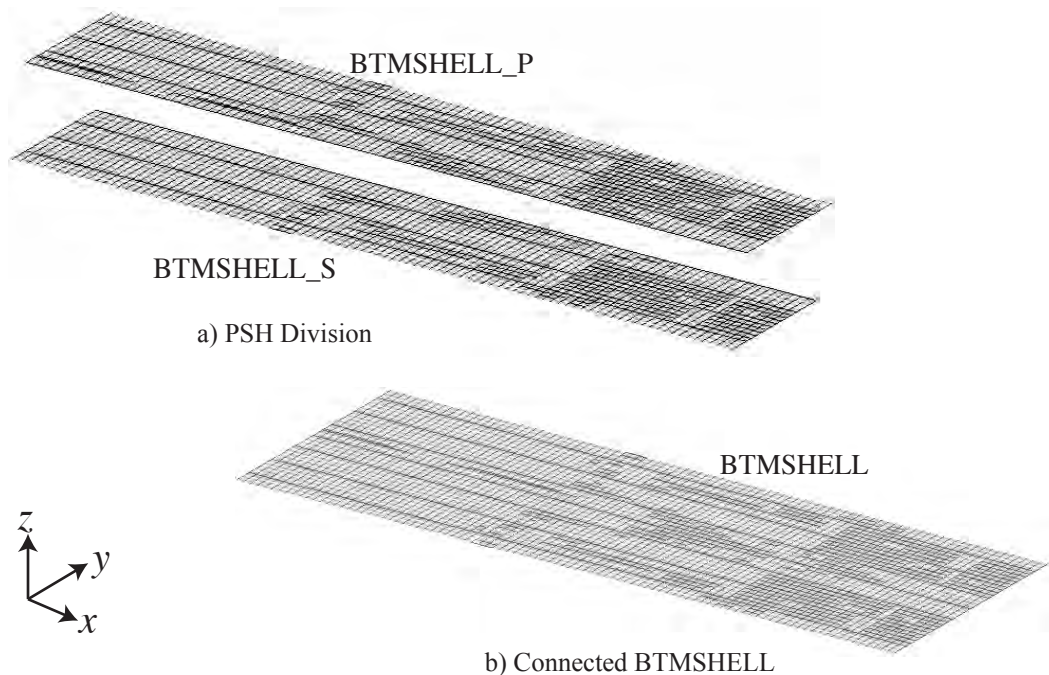
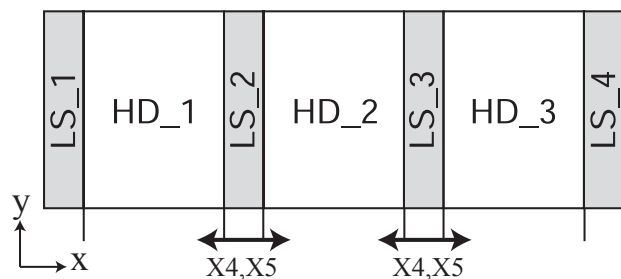


Fig.5-7-1 Connections of PSH Division groups for BTMSHELL

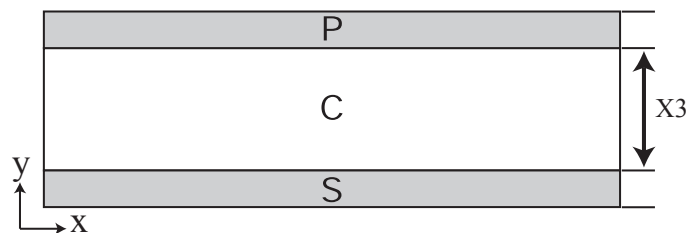
これら設計変数に対する「BTMSHELL\_P」と「BTMSHELL\_S」の挙動は同じであるため、異なるグループとして区別する必要がない。したがって、設計変数に基づく形状変更をより簡単にするために、Fig.5-7-1.b)に示される様に船底外板を一つのグループに結合する。

一方、ロアスツール幅の X4 及び X5 の変更により、船底外板部のカーゴホールド下部に位置する部分「HD\_1 ~ 3」、及びロアスツールの下部に位置する部分「LS\_1 ~ 4」の船長方向長さが変化する (Fig.5-7-2.a) 参照)。これら設計変数の変更を FEM モデルに簡単に反映するために、これら各部を異なる独立要素分割グループにする事が望ましく、船底外板を船長方向に 7 つに分割する。同様に、二重底幅の X3 の変更により、船底外板部の内底板の直下に位置する部分「C」とビルジホッパータンク下部に位置する部分「P, S」の船幅方向長さが変化するため、船底外板部を船幅方向に 3 つに分割する (Fig.5-7-2.b) 参照)。この縦・横方向の分割を重ね合わせて、船底外板部に 21 (= 7×3) 個の独立要素分割グループを定義し、Fig.5-7-3 に示す。

船側外板部を表す PSH 分割グループ「SideShell」においては、ビルジホッパータンク高さ(設



a) Individual mesh-subdivision in the direction of ship length



b) Individual mesh-subdivision in the direction of ship width

Fig.5-7-2 Division rules for individual mesh-subdivision

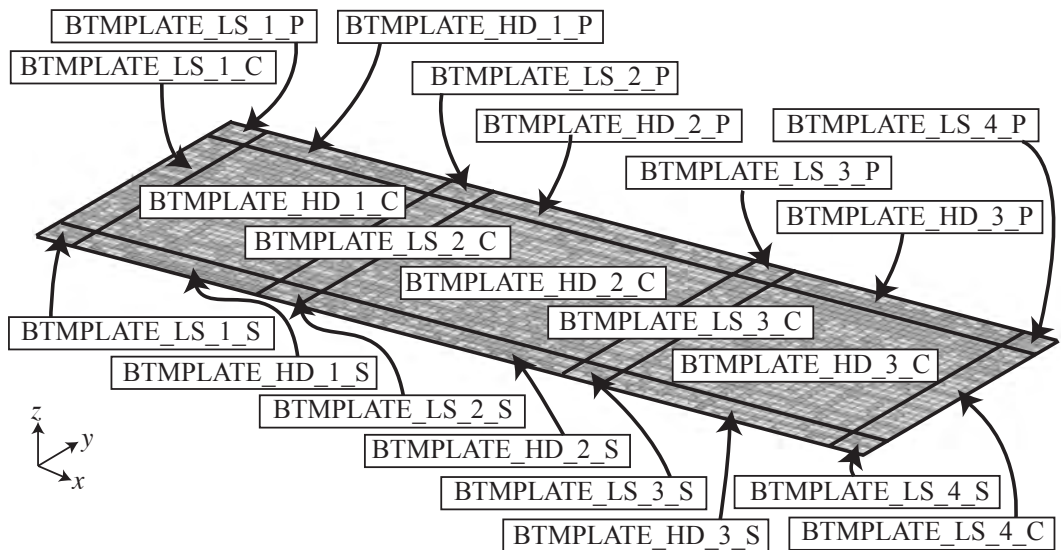


Fig.5-7-3 Individual mesh-subdivision at BTMSHELL

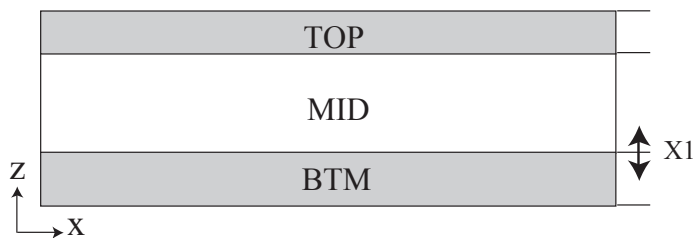


Fig.5-7-4 Individual mesh-subdivision in the direction of ship height

計変数: X1) の変更を自由に取り扱う事ができる様に、鉛直方向に 3つの独立要素分割グループ (トップサイドタンク部「TOP」、中央部「MID」、ビルジホッパータンク部「BTM」) を定義する (Fig.5-7-4 参照).

この様に、設計変数の変更に基づいた構造変更が容易になる様に、ばら積み貨物船の PSH 分割グループから 871 個の独立要素分割グループを定義した。(詳細は付録 1 に記述する.) また、この定義に基づいて、PSH 分割グループから独立要素分割グループが自動的に生成されるシステムを構築した。これにより、PSH のために準備したばら積み貨物船の FEM モデルデータから形状最適設計を行うための FEM モデルを簡単に準備する事が可能になる。



## 5.8 設計変数の変更と FEM データ更新の確認

提案手法と構築されたシステムの有効性を検証するために、Fig.3-1-1 に示されるばら積み貨物船の設計変数を変更し、FEM モデルを更新する。例として、Fig.5-8-1 に設計変数 X2（二重底高さ）を 1700mm から 2500mm へ変化させた場合を示す。二重底高さはガーダー部やフロア部に関する設計変数であるため、これらの独立要素分割グループのメッシュは更新される。一方、内底板部や船底板部には直接的な影響を与えないため、これらの独立要素分割グループのメッシュは更新されない。従って、内底板部と船底板部の間隔は変更されないが、MPC により、ガーダー部、フロア部、内底板部、船底板部に適切な接続関係が付与されているため、構造解析が実施可能である。Fig.5-8-1 はこの状態を示している。同様に、Fig.5-8-2.a) と b) に、設計変数 X3（二重底幅）を初期状態の 23800mm から 19000mm へ変化させた場合を示す。また、Fig.5-8-3.b) に設計設計変数 X4（内側のロアスツール幅）を初期状態の 865mm から 1100mm へ変化させた場合を示す。さらに Fig.5-8-3.c) に変数 X5（外側のロアスツール幅）を初期状態の 1695mm から 2200mm へ変化させた場合を示す。この様に、設計変数の変更により FEM メッシュが正しく更新されており、形状変更が適切に行われている事がわかる。

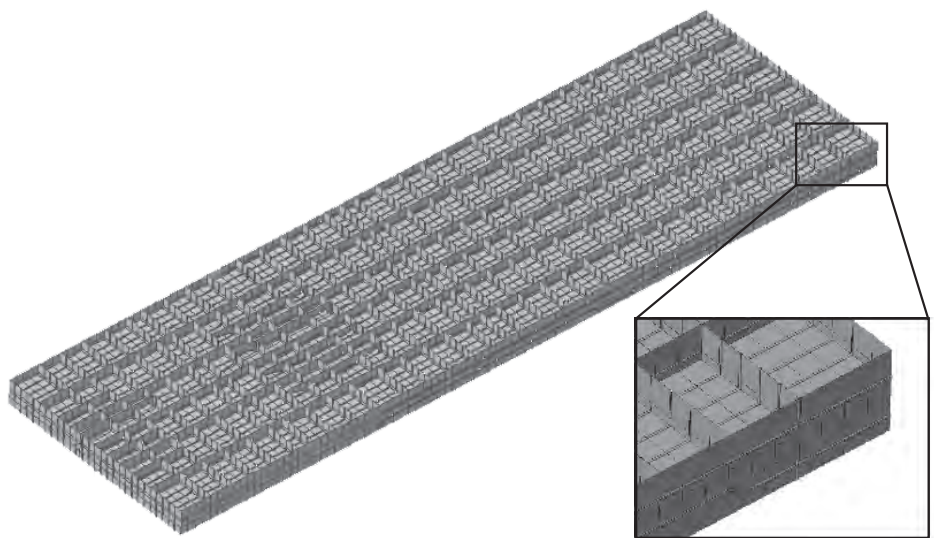


Fig.5-8-1 A result of changing design variable (X2)

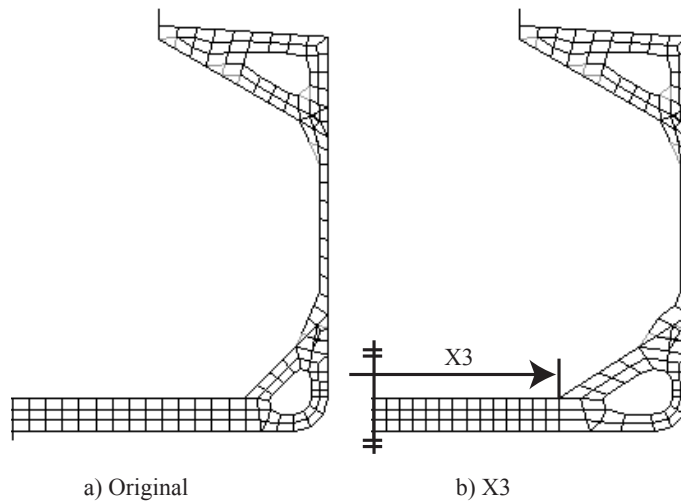


Fig.5-8-2 A result of changing design variable (X3)

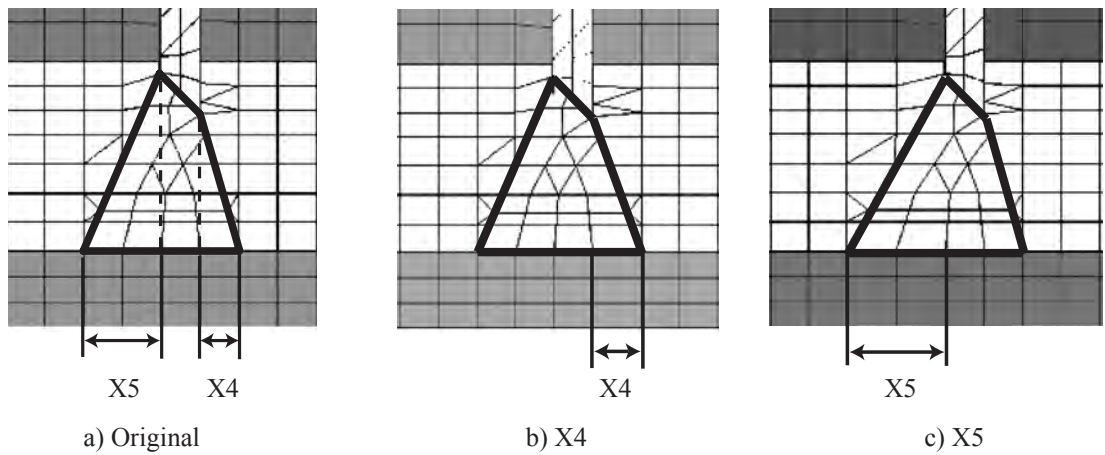


Fig.5-8-3 Results of changing design variables (X4 and X5)

以上の例に示される様に、本研究で提案・開発した船体構造の形状変更システムにより、設計変数による形状変更が FEM モデルに正しく反映されている。

## 5.9 形状変更における荷重条件と境界条件

PSH に船体構造解析モデルのデータを入力する事により、モデルに適した荷重条件と境界条件が負荷される。この情報は等価節点力などの節点に関する情報として与えられる。本研

究では、PSH 分割グループから独立要素分割グループ作成の際に、この節点に関する荷重条件と境界条件の情報を継承する事とする。したがって、設計変数の変更に伴い変更される両条件の値は本研究では取り扱わない事とする。



# 第 6 章

## 近似式を用いた構造評価の検討

### 6.1 感度解析の利用検討

鋼構造物の設計では、設計案が十分に各制約条件を満たす事を確認するために、有限要素法を用いた構造解析を行う事が一般的である。しかし、最適化プロセスでは非常に多くの設計案が生成されるため、この段階で有限要素解析を実施すると、莫大な計算時間を費やすことになる。そこで有限要素法と同等の精度を有しながら、短時間で構造解析及び評価が可能な手法を検討する必要がある。本研究では、設計変数等のパラメータの変更と応力等の解の出力を比較的簡単に算出可能な感度解析を利用した近似式<sup>[25][31]</sup>の作成を検討した。

感度解析とは、ある点を基準として変数が変動する際の解の変化率を偏微分により導出する手法である。感度解析を用いるための条件は、近似する関数が「解析領域内で連続した関数である事」、及び「微分可能な関数である事」であるため、本研究で検討する構造解析及び評価を行う簡易計算手法に合致すると思われる。また他の近似手法であるニューラルネットワーク<sup>[32][33]</sup>に必要な『学習』等の処理作業は必要は無く、必要な解が揃えば近似式作成自体には殆ど時間を要さないという特徴がある。

本研究では、基準点を中心としたテイラー級数展開を利用し、偏微分項を導出する。具体的には、基準点での関数値が既知である場合、基準点から変数を増加させた時の関数値を、基準点での関数値との差により関数近似する。そのため変数と解との関係が明確で、単純な差分操作により近似式の作成が可能である。

感度解析の例として、1変数のテーラー級数展開式を式(6.1)に示す。

$$f(x + \delta x) = f(x) + \frac{\partial f}{\partial x} \delta x + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \delta x^2 + \dots + \frac{1}{n!} \frac{\partial^n f}{\partial x^n} \delta x^n \quad (6.1)$$

$f$ : 近似関数

$x$ : 変数の基準値

$\delta x$ : 変数の基準値からの増分

$n$ : 展開数

式(6.1)の左辺は変数が基準点から  $\delta x$  増加した際の近似値、右辺第1項は変数が基準点の時の関数値、第2項及び第3項はそれぞれ近似式の一次項、二次項を、最終項は  $n$  次項を示している。式(6.1)で得られる関数の説明のため、Fig.6-1-1 に実際関数と感度解析で得られた近似式との関係の例を示す。Fig.6-1-1より、近似式の精度は展開数  $n$  により決定される事がわかる。したがって複雑な関数を近似する場合、展開数  $n$  が小さければ精度を保つ近似ができない可能性もある。しかし、本研究で取り扱う設計変数と近似する応力・座屈判定・船体重量の関係では、そのような急激な変化を行うとは考えにくく、二次までの項の利用により十分な近似精度が得られると予想される。

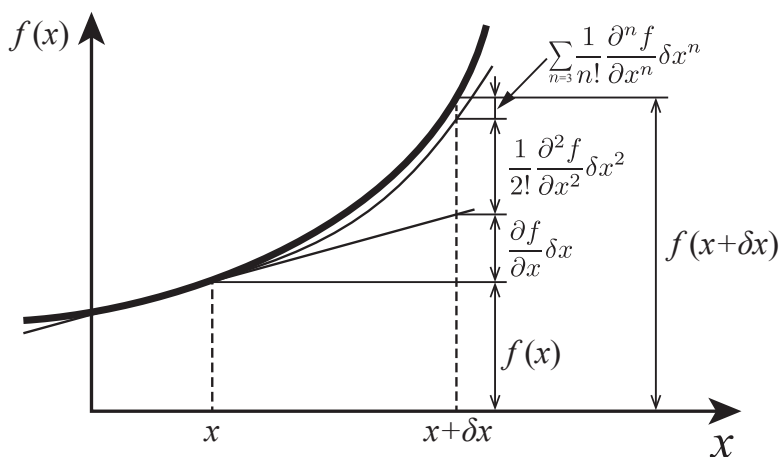


Fig.6-1-1 Relationship between real functions and Taylor series

## 6.2 感度解析を用いた近似式作成について

前節で述べた通り、本研究では感度解析を利用し、有限要素解析結果に基づく応力、座屈判定値等の近似式を作成し、設計案の評価を行う事とした。本研究では式 (6.2) に示す二次項までのテイラー級数展開式を利用して近似関数  $f(x_1, \dots, x_n)$  を定義する。

$$\begin{aligned} & f(x_1 + \delta x_1, \dots, x_n + \delta x_n) \\ &= f(x_1, \dots, x_n) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial f(x_1, \dots, x_n)}{\partial x_i} \delta x_i + \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n \frac{\partial^2 f(x_1, \dots, x_n)}{\partial x_i \partial x_j} \delta x_i \delta x_j \quad (6.2) \end{aligned}$$

$f$  : 近似関数

$x_i$  :  $i$  番目の設計変数

$n$  : 設計変数の数

式 (6.2) の右辺第 3 項は以下のように展開する事が出来る。

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n \frac{\partial^2 f(x_1, \dots, x_n)}{\partial x_i \partial x_j} \delta x_i \delta x_j \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2 f(x_1, \dots, x_n)}{\partial x_i^2} \delta x_i^2 + \sum_{i=1, j=i+1}^n \frac{\partial^2 f(x_1, \dots, x_n)}{\partial x_i \partial x_j} \delta x_i \delta x_j \quad (6.3) \end{aligned}$$

ここで、 $f(x_1, \dots, x_n)$  は近似される関数値（ここでは、有限要素法により求められた各要素の応力値等）、 $x_1, \dots, x_n$  は設計案の基準点、 $\delta x_1, \dots, \delta x_n$  は基準点からの増分値である。また式 (6.2) の右辺第 2 項は各変数の一次項を、式 (6.3) の右辺第 1 項は各変数の二次項を、式 (6.3) の右辺第 2 項は変数の交叉項をそれぞれ示している。交叉項とは、ある変数が変化した場合に他の変数の変化が解に与える影響を表すものである。実際に変数の感度を求め近似式を作成する説明は付録 2 に示し、ここでは省略する。

### 6.3 感度解析の課題

テイラー級数展開を利用した感度解析では、設計変数の数に応じて必要な予備計算（教師データと呼ぶ）数が増える。変数の数を  $n$  とした場合、必要な教師データの数は

$$\begin{aligned} \text{教師データの数} &= \text{基準点} + 1 \text{ 次展開用教師データ} + 2 \text{ 次展開用教師データ} \\ &= 1 + 2 \times n + 4 \times {}_n C_2 \end{aligned} \quad (6.4)$$

で表される。右辺第 2 項における「2」は 1 変数につき 1 次及び 2 次展開時に必要な教師データ数、右辺第 3 項における「4」は 2 変数の組み合わせ（交叉項）に対する 2 次展開時に必要な教師データである。上式を利用し必要な教師データ数を計算した例を Table 6-3-1 に示す。Table 6-1 に示す通り、2 変数であれば交叉微分まで展開しても必要な教師データは 9 個であるが、10 変数であれば 201 個、30 変数であれば 1801 個が必要となる。設計変数が多くなると、必要な計算回数に占める交叉項取得に要する計算回数の割合が大きくなる。本研究では有限要素解析を利用して教師データを取得するため、教師データを取得するために必要な有限要素解析の回数が近似式作成時間に大きな影響を与える。そのため、交叉項取得に要する計算回数を減少させる方法を検討する必要がある。

Table 6-3-1 Relation between the number of design variables and number of calculation

Design variables	1st & 2nd order section	Cross order section	Total
2	5	4	9
10	21	180	201
20	41	760	801
30	61	1740	1801
40	81	3120	3201

### 6.4 影響度を考慮した教師データの選択手法

#### 6.4.1 影響度の定義



前節の問題を解決するため、本研究では交叉項算出に必要な教師データ数を削減するための手法を提案する。

6.2 節で述べた通り、交叉項はある設計変数が変化した場合に他の設計変数の変化が解に与える影響を表すものである。しかし、全ての関係において解に与える影響が大きい訳ではなく、無視出来る関係も存在すると思われる。設計変数と近似する応力値の関係を考えた場合、形状設計変数の変化は、構造全体の応力に大きな影響を及ぼす事が想像できる。例えば、二重底高さが高い時と低い時にそれぞれ板厚設計変数を変化させた場合では、二重底部分に直接関係のない部分であっても応力値が大きく異なる可能性がある。他方、板厚設計変数を変更した際に、離れた位置に存在する他の板厚設計変数を変化した場合では、応力値の変化は殆ど無いと思われる。以上の様に、構造全体の応力に大きな影響を及ぼす設計変数の変化は、他の設計変数が解に与える影響を変化させる可能性が高いため、交叉項を含める必要があると考えられる。しかし、局所的な範囲にのみ影響を及ぼす設計変数の変化は、他の設計変数が解に与える影響を変化させる可能性は小さいと考えられる為、これらの設計変数に関わる交叉項は無視できる程に小さいと思われる。

以上を考慮して本研究では、影響度を「各設計変数を最小から最大まで変化させた際の近似対象の変化量」として定義し、影響度の高い設計変数についてのみ交叉項まで展開する事とした。

#### 6.4.2 影響度の算出

影響度の具体的な算出方法について、応力の場合を例に説明する。まず全設計変数について、最小と最大とに変化させた際の各要素での応力変化量を求める。次に、応力変化量の総和に対する、設計変数ごとの応力変化量の百分率を算出し、この値を影響度とする。この影響度を用いて交叉項の有無を決定するが、選定基準は近似する対象や設計変数等によって最適な値は異なると考えられるので、近似対象ごとに適切な割合を決定する必要がある。

#### 6.4.3 影響度による設計変数の選択

本研究では、交叉項を算出する設計変数の選択方法を「各要素において、設計変数の影響度を上位から順に足し合わせ、設定した閾値を初めて超える設計変数まで選択する」事と

した。設計変数の選択例として、ある要素 A 及び B における各設計変数の影響度の一覧を Table 6-4-1 に示す。Table 6-4-1-a) 及び b) は左から要素内での影響度の順位，設計変数，設計変数の影響度を示している。また，閾値を 0.0 から 0.2, 0.4, …, 1.0 と変化させ検討する。

ここで閾値を 0.2 とした場合，要素 A では選択される設計変数の組合せは「7」と「29」となる。また，閾値を 0.4 とした場合は「7」「29」「8」の 3 つの設計変数が選択されるため，交叉項は「7」と「29」，「7」と「8」，「8」と「29」の設計変数の項を求める事となる。しかし要素 B では，閾値を 0.6 より大きくしなければ選択される設計変数は存在しない。交叉項は他の設計変数との影響を表す項である為，要素 B の設計変数 7 の様に単独で影響度が大きな設計変数は，一次項及び二次項での近似で十分な精度が得られると考えられる。また，閾値を 0.6 に設定した場合，要素 B では「7」「8」の設計変数が選択されるが，要素 A でも同じ 2 つの設計変数は選択されるため，求める交叉項は増加しない。

以上の様に本研究の交叉項の選択手法は，各要素の影響度により設計変数を選択する手法

Table 6-4-1 Selected design variables using Effective value

a) Element A

	Design Variable	Effective Value	Cumulative Value	Threshold
1	7	0.19	0.19	
2	29	0.14	0.33	←0.2
3	8	0.12	0.45	←0.4
4	5	0.12	0.57	
5	3	0.11	0.68	←0.6
6	9	0.06	0.74	
7	2	0.06	0.80	←0.8
8	6	0.03	0.83	
9	4	0.03	0.86	
10	30	0.03	0.89	
11	32	0.02	0.91	
12	31	0.02	0.93	
13	1	0.01	0.94	
14	26	0.01	0.95	
15	25	0.01	0.96	
16	11	0.01	0.97	
17	10	0.00	0.97	
18	27	0.00	0.97	
31	12	0.00	0.99	
32	24	0.00	1.00	

b) Element B

	Design Variable	Effective Value	Cumulative Value	Threshold
1	7	0.55	0.55	
2	8	0.07	0.62	←0.6
3	30	0.05	0.67	
4	4	0.05	0.72	
5	10	0.03	0.75	
6	5	0.03	0.78	
7	11	0.02	0.80	←0.8
8	3	0.02	0.82	
9	6	0.02	0.84	
10	1	0.02	0.86	
11	27	0.02	0.88	
12	13	0.01	0.89	
13	2	0.01	0.90	
14	28	0.01	0.91	
15	12	0.01	0.92	
16	15	0.01	0.93	
17	29	0.01	0.94	
18	31	0.01	0.95	
31	20	0.00	0.99	
32	25	0.00	1.00	

であるため、低い閾値から多くの交叉項を選択するという傾向にあるが、要素ごとの解の誤差率を平均化する様に働くため、効率の良い方法であると思われる。

## 6.5 影響度の閾値と近似精度

### 6.5.1 近似精度の検証について

6.4.2 小節で述べた通り、影響度の閾値は近似対象ごとに適切な割合を設定する必要がある、近似精度に大きく関わりと予測される。そこで本節では、影響度の閾値と近似精度の関係の検証を行う為に Fig. 3-1-1 に示したモデルを利用し、Fig. 3-2-1 に示す 5 つの形状設計変数を用い、板厚設計変数を 27 個として影響度を算出する。近似対象は Fig.3-1-1 に示す FEM モデルの 3 番カーゴホールドの二重底構造部に存在する 3706 要素における Misess 応力とし、4 種類の荷重条件を付加した。

### 6.5.2 各影響度の閾値における教師データ数

Fig.6-5-1 に各影響度の閾値における必要な教師データ数をグラフに表す。全ての交叉項を求める場合である閾値 1.0 においては 2049 個、交叉項を全く求めない場合である閾値 0.0 においては 65 個の教師データ数 (FEM 解析) が必要となる。教師データ数に比例して近似精度は上昇する為、必要な近似精度と教師データ取得に要する時間との関係により使用する影響度の閾値を決定する必要があると思われる。

### 6.5.3 各影響度の閾値における近似精度

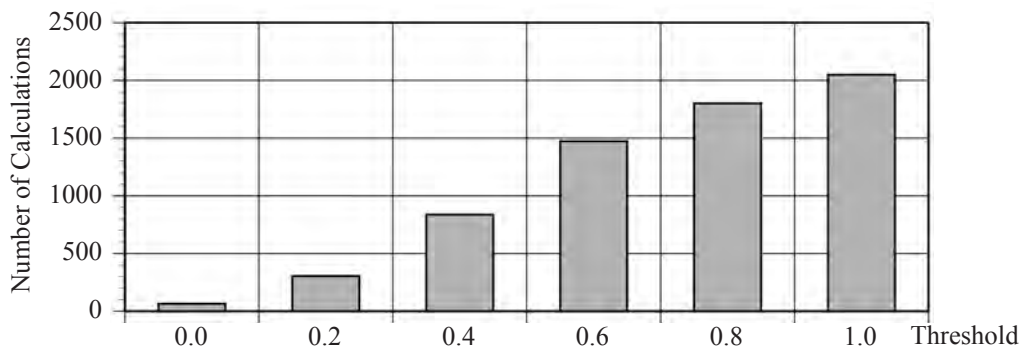


Fig.6-5-1 Relationship between threshold and the number of calculations

Table 6-5-1 Average error at test case [ % ]

		Threshold					
		0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
Test Case	1	1.184	1.357	0.953	0.936	0.937	0.937
	2	1.293	1.487	1.378	1.405	1.395	1.394
	3	1.597	1.636	1.457	1.444	1.436	1.435
	4	1.601	1.494	1.363	1.120	1.118	1.119
	5	1.085	1.165	1.280	1.297	1.317	1.320
	6	1.157	1.130	0.978	0.862	0.846	0.846
	7	2.164	1.596	1.264	1.179	1.178	1.178
	8	1.479	1.353	1.242	1.207	1.207	1.209
	9	2.712	2.340	1.663	1.442	1.412	1.411
	10	1.906	2.032	1.180	1.134	1.122	1.120
Average Error (Total)[%]		1.586	1.507	1.286	1.210	1.205	1.205
Max. Error (Average) (Over 300MPa)[%]		2.993	2.816	2.095	1.910	1.896	1.929
Standard deviation (-)		1.546	1.128	0.636	0.604	0.600	0.599

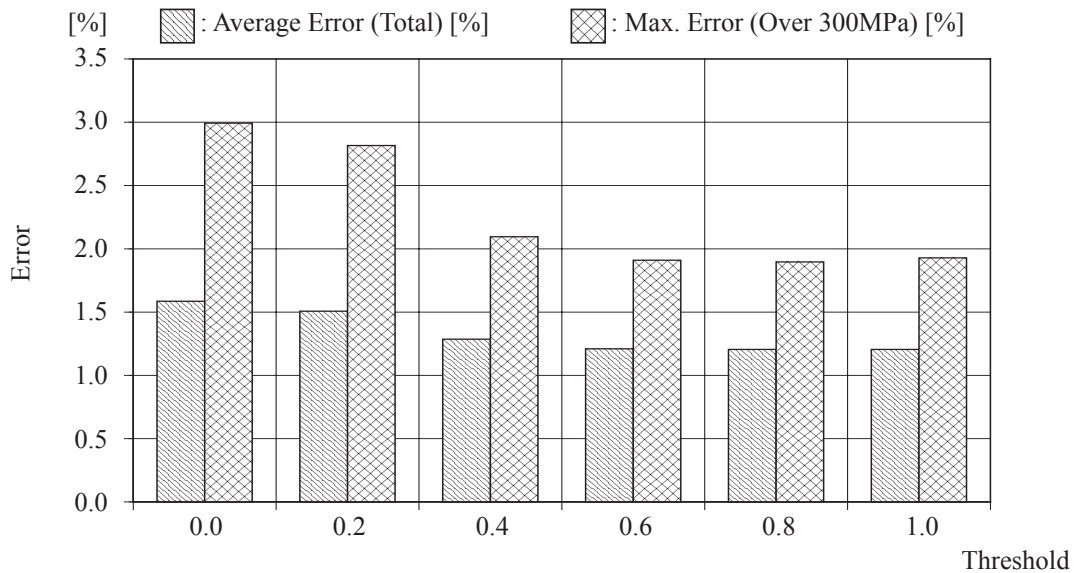


Fig 6-5-2 Average error and average of maximum error

各閾値における近似精度の検証のため、設計変数をランダムに選択した 10 種類のテストケースを作成し、それぞれの近似値と FEM 解との誤差を算出する。

Table 6-5-1 中段に各テストケース及び各閾値における、全要素及び全荷重条件における誤差の平均値を示す。また Table 6-5-1 下段に、10 個のテストケースの平均誤差、300[MPa]以上に限定した際の応力の最大誤差平均値 [%]、10 個のテストケースにおける誤差の標準偏差を示す。さらに、Table 6-5-1 における平均誤差、300[MPa]以上に限定した際の応力の最大誤差、平均誤差を Fig.6-5-2 にグラフとして示す。

Fig. 6-5-2 より、閾値が上昇するに従い近似精度が向上しており、交叉項を考慮する数が近似精度に影響を及ぼしている事がわかる。また、閾値が 0.0 から 0.4 の間では平均誤差、300[MPa] 以上の応力最大誤差、平均誤差共に減少率は高いが、0.6 から 1.0 の間では減少率は殆ど無い。閾値が 1.0 と 0.6 の場合を比較すると、教師データ数が 25% 以上減少したにもかかわらず、応力の誤差は閾値が 1.0 の場合と同等な精度を有している事がわかる。Fig.6-5-3 に、作成した近似式において一次項、二次項及び交叉項の係数 (絶対値) を合計した際の、交叉項の割合を示す。Fig.6-5-3 に示す通り、交叉項の割合は閾値が 0.6 から 1.0 の間では殆ど増加しておらず、主要な交叉項は閾値が 0.6 までの間に選択された事を示している。さらに、式 (6.5) を用いて各テストケースにおける平均誤差のばらつきを示す標準偏差を示す。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{x}_i - \bar{\bar{x}})^2} \quad (6.5)$$

$n$ : テストケースの数 (10 ケース)

$\bar{x}_i$ : 各テストケースにおける平均誤差

$\bar{\bar{x}}$ :  $n$  個のテストケースに於ける平均誤差の平均

$\sigma$ : 標準偏差

式 (6.5) より得られた標準偏差を Fig. 6-5-4 に示すが、閾値が 0.6 の場合は 1.0 の場合と同等な精度を有している事がわかる。以上より本論文では、教師データ数と近似式の近似精度

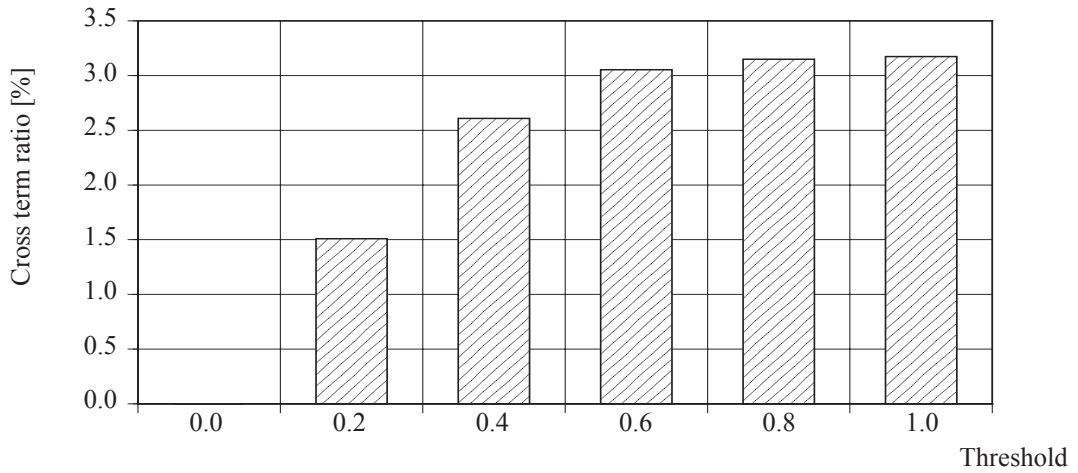


Fig.6-5-3 Cross term ratio

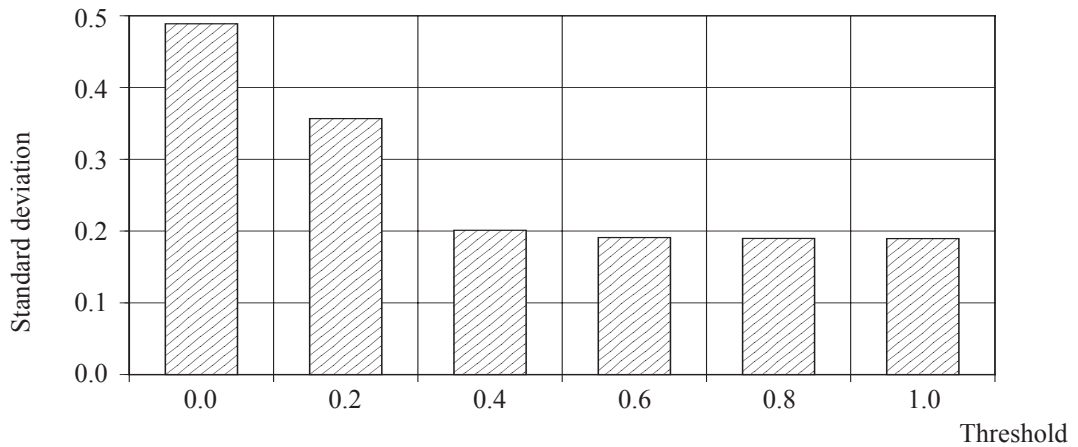


Fig.6-5-4 Standard deviation

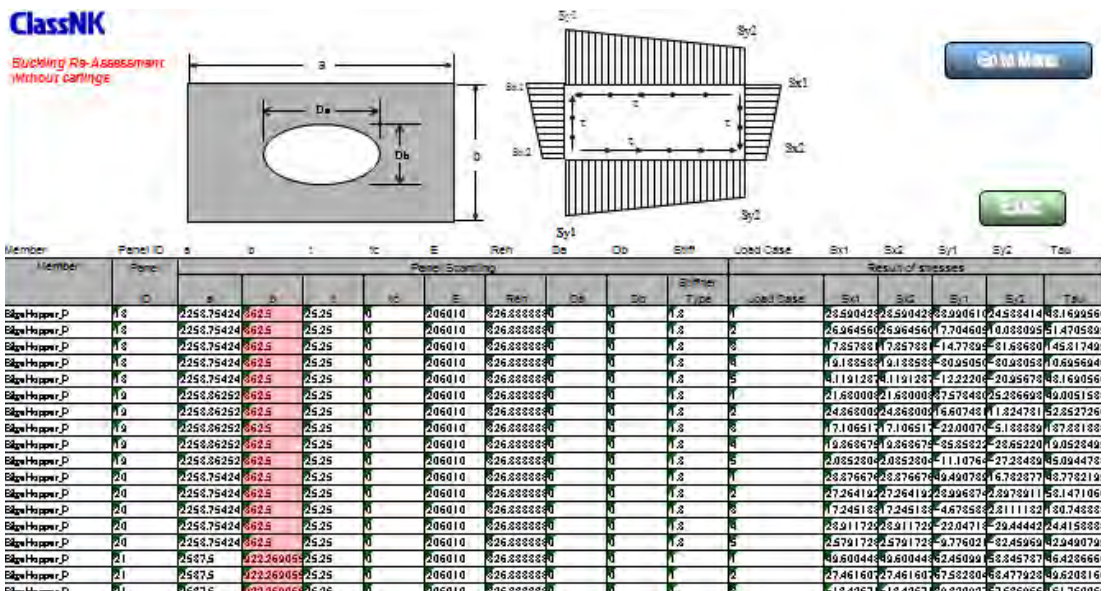


Fig.6-6-1 Buckling Re-Assessment (Ver.1.0.2)

の関係から影響度の閾値は 0.6 を採用し、要素の Missess 応力、座屈パネルの座屈判定値式、及び船体重量の近似式を算出する事とした。

## 6.6 影響度の閾値を考慮した座屈判定値近似式作成

通常の PSH を用いた船体の構造設計において、座屈評価は PSH の内部処理により行われ、Patran の画面上に座屈強度評価が表示される。そのため、外部に座屈評価情報を取り出すには、作業者の手により Patran を操作する必要がある。感度解析による近似式作成は膨大な計算を要するため、PSH のみを用いた感度解析は困難である。そこで本論文では、Fig.6-6-1 に示す PSH に付属の座屈評価 Excel シートである「Buckling Re-Assessment (Ver.1.0.2)」を用いて感度解析を行う。この Excel シートは、Patran や PSH から独立して動作が可能であり、座屈評価パネルの寸法、パネル内の開口情報、各パネルの応力情報を入力する事により、座屈評価や不足板厚の表示等を行う事が可能である。本論文では、各設計変数より計算したパネル寸法や板厚と、MSC Nastran (以降、Nastran) から得られた各設計案における要素の応力情報を Excel シートに出力し、座屈評価を行う。しかし、シートに入力すべき応力情報は各パネルの境界応力であり、各パネル境界での応力算出が必要となる。そこで本論文では、Fig.6-6-2 に示す様に、座屈パネルを構成する各要素中心の応力より、最小二乗法を用いてパネル境界の応力を算出する事とした。

また応力近似式作成の場合と同様に、座屈判定値近似式の交差項の選定は、各設計変数の

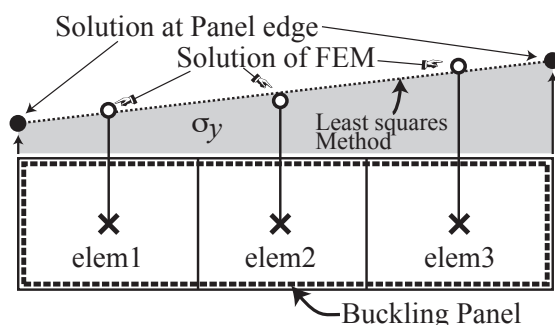


Fig.6-6-2 Solution at Panel edge

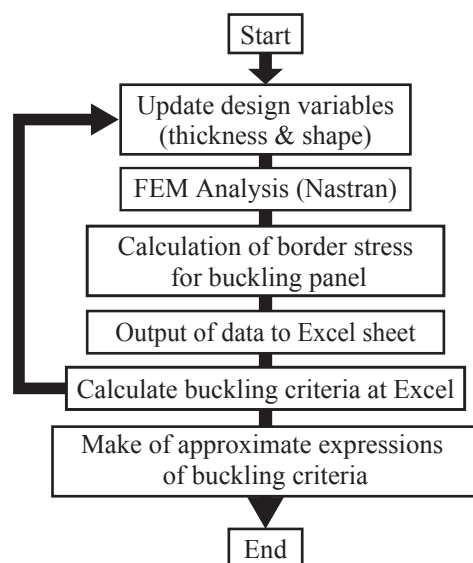


Fig.6-6-3 Flowchart to create approximate expressions of buckling criteria

影響度を算出し、閾値を 0.6 として求めた。

本論文で用いた座屈判定値の近似式作成の手順を Fig.6-6-3 に示す。本研究では、これらすべての作業を自動的に行うシステムを開発したため、作業者は必要なファイルをそろえる等の初期設定のみで座屈判定値近似式を得ることが可能である (付録 4)。

以上の手法により作成した座屈判定値近似式の精度を、後述の 8.2.3 節で述べる最適化 (Case f) で得られた設計案を用いて検証したところ、座屈判定値を 0.95 以上に限定した場合の平均誤差は 2.61[%]、最大誤差は 5[%] であり、構造検討を行う際には十分な精度を保持していると思われる。

## 6.7 船体重量近似式の作成

船体重量の厳密解の算出は、まず FEM データから要素の構成節点・節点座標及び板厚、密度を検索する。これらを利用して面積を算出し、板厚、密度を掛ける事により、1 要素の重量を算出する。船体重量の算出には上記の作業を全要素に対して行う為、非常に多くの計算時間を要する。最適化では船体重量も設計案毎に算出する必要があるため、船体重量においても感度解析を用いた近似式を作成する。船体重量の近似式作成にあたっては、影響度の



算出を行わず，以下の基準により強制的に交叉項を求める変数を指定する。

形状設計変数はその変更に伴い，要素の面積が変化する可能性があるため，形状設計変数に関わる全ての交叉項を求める事とした。対して板厚設計変数は，他の設計変数に面積等を変更する影響が無いため，交叉項の算出を行わない事とした。

座屈判定値近似式の場合と同様に，後述の 8.2.3 節で述べる最適化 (Case f) で得られた設計案を用いて検証したところ，誤差は極めて小さく 0.0[%] であった。

## 6.8 近似式作成に要する時間と解の算出に要する時間

前節までの手法を用いて実際に応力・座屈判定・及び船体重量の近似式を作成する場合，本論文で採用した閾値が 0.6 の時には，下に記す時間が必要である。

応力の近似式作成	:	約 47 時間 (約 2 日間)
座屈判定式の近似式作成	:	約 145 時間 (約 6 日間)
船体重量の近似式作成	:	約 5 時間

上に示す通り，特に座屈判定式の近似式作成では多くの時間が必要である。これは，Nastran での FEM 解析に加え，座屈パネルの境界応力の算出や，Excel シートへのデータの受け渡し，さらに Excel シート上での座屈判定値計算が加わるためである。しかし，これらの近似式作成の過程は同時に処理する事が可能であり，座屈判定式を求める以上に時間が掛かる事は無い。また，Nastran による解析を並列化する事により，時間短縮は十分に可能である。



# 第 7 章

## 本研究で使用する構造最適化手法

### 7.1 遺伝的アルゴリズムについて

遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: 以下 GA と略す)<sup>[34]-[36]</sup> とは、ダーウィンの自然淘汰説に基づき自然の生物の進化の過程を工学的にモデル化した、最適化または検索アルゴリズムの一種である。微分演算等の数学的手法を用いた従来から用いられている様々な最適化手法とは異なり、変数コード化、再生、選択、交叉、突然変異、ランダム操作などの独特のオペレーションを行うという特徴がある。また従来のお最適化手法に比べ、局所解に陥りにくく、多数の設計変数・制約条件に対しても、比較的簡単に対応が可能であるといった特徴がある。そのため、研究<sup>[37]-[39]</sup>及び様々な分野で応用されている<sup>[40]</sup>最適化手法である。

GA では設計案 (GA では個体と呼ぶ) を遺伝子配列に見立てコード化処理を行い、各世代において組み替えの処理を行う事により、最適な設計案を探索する。設計案のコード化により、標準寸法が定められている部材の様な、離散的数値の処理が可能となる。

本研究で行う構造最適化問題は、次に示す不等式制約条件付き最小化問題となる。

$$F(X) \rightarrow \text{Minimum} \quad (7.1)$$

$$g_i(X) \leq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (7.2)$$

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_n) \quad (7.3)$$

ここで

$F(X)$  : 目的関数

$X$  : 設計案

- $g_i(X)$  : 制約条件式  
 $m$  : 制約条件個数  
 $x_j$  :  $j$  番目の設計変数  
 $n$  : 設計変数の個数

一般的な構造最適設計法では、重量やコストなどの最小化を目的関数として最適化を行うが、GA における最適化問題では、個体の環境への適合度を評価する評価関数を最大化する事を目的関数とする。制約条件の満足度は、この評価関数の中に入れられる事が一般的である。個体群の中で各個体の評価関数は、次の条件に満たさなければならない。

- 各個体（設計案）の評価はすべて非負 ( $\geq 0$ ) である事
- 良い個体（設計案）の評価値は悪い個体より大きい事

これらの条件を満足するために、式 (7.1) と式 (7.2) で与えられる制約条件付き最小化問題を、次式 (7.4) により無制約条件最小化問題に変換する。

$$\Phi(X) = f(X) \left[ 1 + C_p \sum_{i=1}^m \text{Max}[0, g_i(x)] \right] \quad (7.4)$$

ここで

- $f(X)$  : 目的関数 (重量, コストなど)  
 $\Phi(X)$  : 無制約拡張目的関数  
 $C_p$  : ペナルティ係数

無制約条件最小化問題の上記の式 (7.4) を次式 (7.5) で評価関数最大化問題に変換する。

$$F_j(X) = \Phi_{\max}(X) - \Phi_j(X) \quad (7.5)$$

ここで

$F_j(X)$  : j 番目の個体の評価関数

$\Phi_{\max}(X)$  : 同世代無制約拡張目的関数の最大値

$\Phi_j(X)$  : j 番目の無制約拡張目的関数

以上の定義により，GA における最適化問題では，評価関数を最大化する事を目的として，処理を行う．以上の処理を，自然進化の様な流れに組み合わせ，Fig.7-1-1 に示す手順にて最適化を行う．また本論文で使用する遺伝的アルゴリズムの詳細については，付録 3 に記述する．

## 7.2 船体構造最適化について

### 7.2.1 本研究における構造最適化までの流れ

本研究における船体構造二重底部の構造最適化までの流れを Fig.7-2-1 に示す．

- ① 通常の船舶設計の場合と同様に，FEM モデルを Patran にて作成する．
- ② 各板厚設計変数の要素を Patran にて設定する．

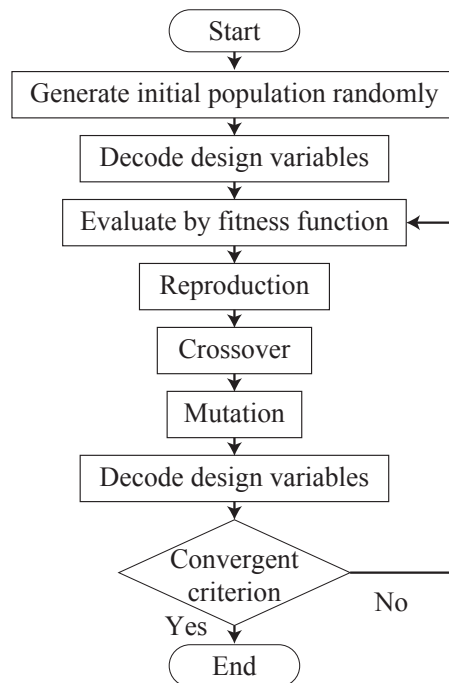


Fig. 7-1-1 Flowchart of Genetic Algorithm

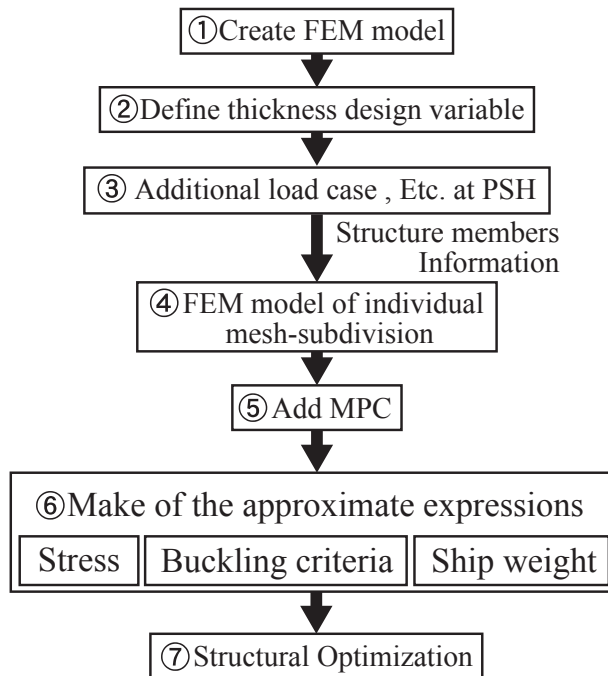


Fig.7-2-1 Flowchart before optimization

- ③ 通常の船舶設計と同様に、PSHにて荷重条件の付加等の作業を行う。その際、PSHでは荷重条件を付加するための部材認識が行われる。
- ④ ③にて認識された部材情報を用いて、独立要素分割を施したFEMモデルが作成される。
- ⑤ 独立したグループに構造的な関係を持たせるため、MPCが付加される。以上により、形状・板厚設計変数が変更可能なFEMモデルが作成される。
- ⑥ ⑤で作成されたFEMモデルを用いて、評価領域内の各要素の応力、座屈パネルの座屈判定値、及び船体重量の近似式が作成される。
- ⑦ ⑥で作成された近似式を用いて、GAによる最適化を行う。

以上により、通常のFEMモデルから構造最適化が実行可能なモデルへの変更と、対象領域の応力、座屈判定、及び船体重量の近似式を求め、最適化実行の準備を行う。

また①及び③の作業は、通常の船舶設計で行う作業と同等であり、設計者への新たな負担はない。しかし②及び④～⑥の作業は、最適化の為に新たな作業を設計者へ与え、特に④～

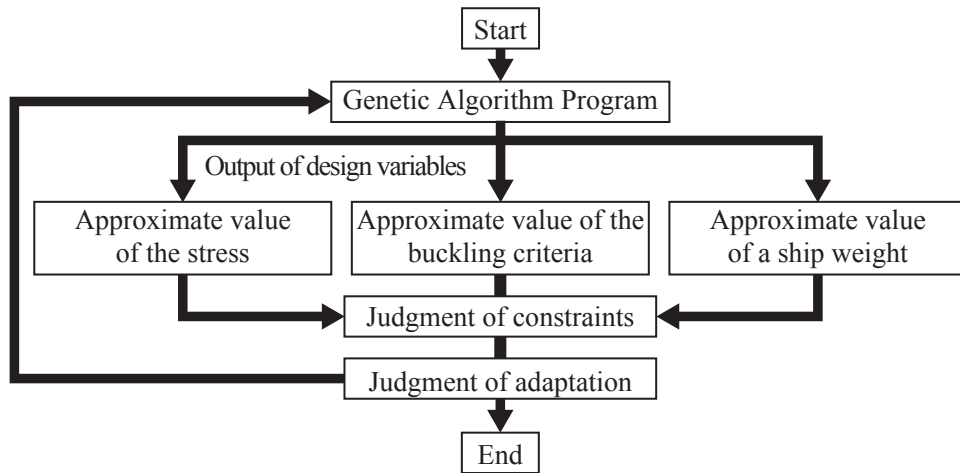


Fig.7-2-2 Process of optimization using genetic algorithm

⑥の作業は実行に時間を要する。設計者の負担を減らすため、④～⑥の作業を自動的に行う様に付録4に示す自動化プログラムを作成した。

### 7.2.2 最適化の実行と GA パラメーター

構造最適化における GA プログラムと、応力、座屈判定、船体重量の近似式、及び制約条件判定との関係を Fig.7-2-2 に示す。Fig.7-2-2 に示す通り、GA プログラムにより出力された設計案を基に、各近似式により各要素応力、各座屈パネルの座屈評価、及び船体重量を算出する。次に応力及び座屈評価値をそれぞれの許容値より制約条件判定を行う。ここで式 (7.4) を用いて、許容値を超えた応力及び座屈評価の超過分をそれぞれの許容値を用いて無次元化し、ペナルティー係数を乗じて船体重量に加算する。これにより制約付き目的関数は無制約拡張目的関数に変換する。さらに無制約拡張目的関数を式 (7.5) を用いて評価関数最大化問題に変換する事により、GA に対する適応度とする。以上の作業を繰り返し、最適化を実行する。

また、GA パラメータを以下に示す通りに設定する。

- 最適化手法：島モデル遺伝的アルゴリズム
- 計算数：5 島 × 10 個体 × 2000 世代
- 移住：4 個体 × 5 世代間隔

- 突然変異確率：1%
- ペナルティー係数：0.8
- 交叉方法：1点交叉
- 交叉確率：100%
- エリート戦略：2 個体 /1 島 /1 世代
- 

### 7.2.3 荷重条件

荷重条件として、PSH が提供する中でも厳しいとされる Fig.7-2-3 から Fig.7-2-5 に示す以下の3 ケースを選択する。

#### I) ALTE-HG-F\_F2 : Fig.7-2-3

- 隔倉積状態
- 静水中縦曲げモーメント
- ホギング条件
- 追波
- ホギング最大モーメント

#### II) ALTE-SF-F\_F2 : Fig.7-2-4

- 隔倉積状態
- 静水中縦曲げモーメント
- ホギング条件
- 追波
- 80% ホギングモーメント

#### III) ALTL-00-P\_P1 : Fig.7-2-5

- 隔倉積状態
- 静水中縦曲げモーメントなし
- 横波（左舷）
- 波浪変動圧最大



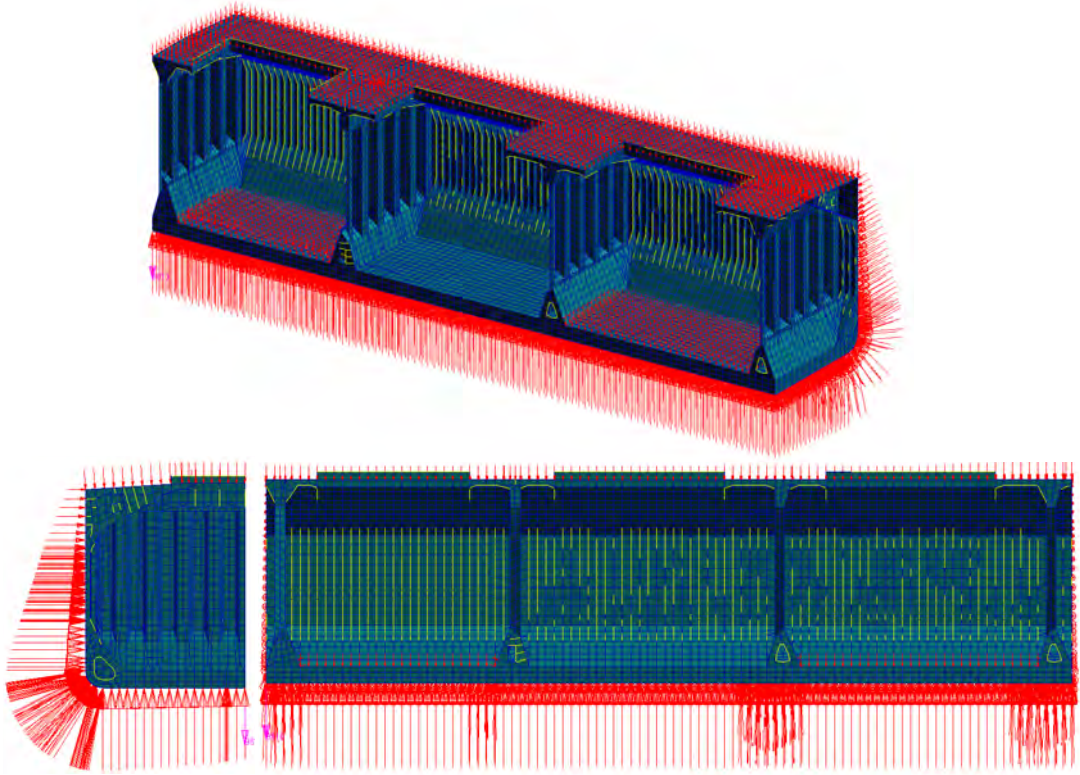


Fig.7-2-3 Load Case ALTE-HG-F\_F2

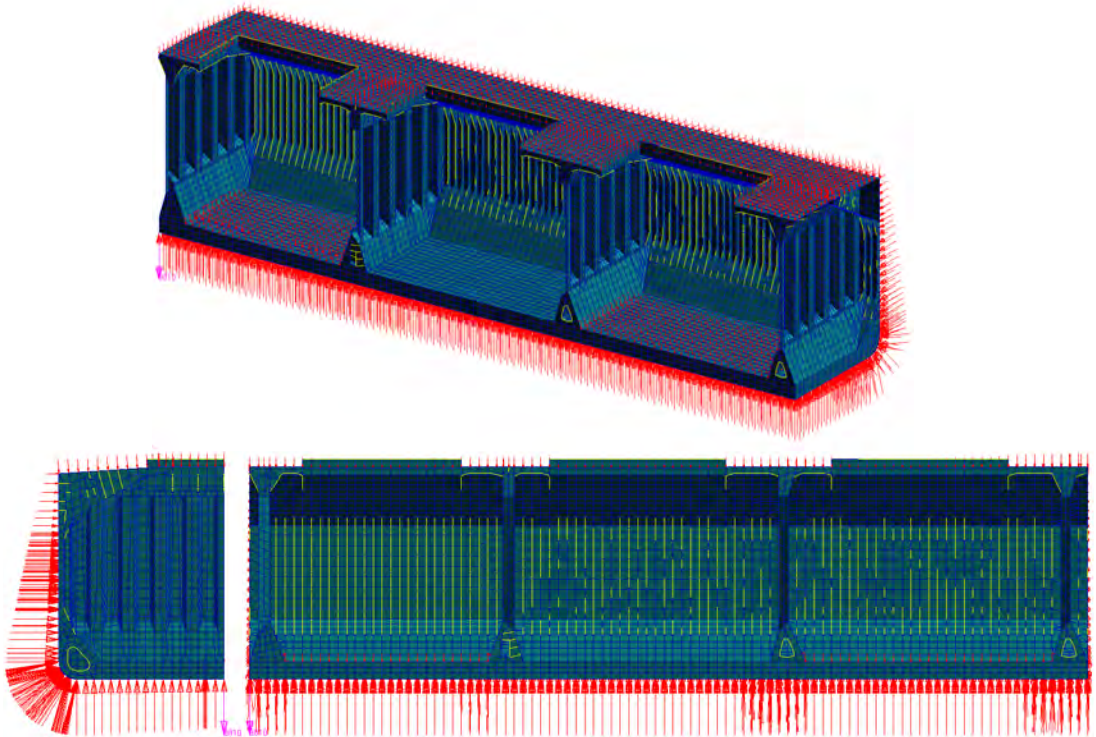


Fig.7-2-4 Load Case ALTE-SF-F\_F2

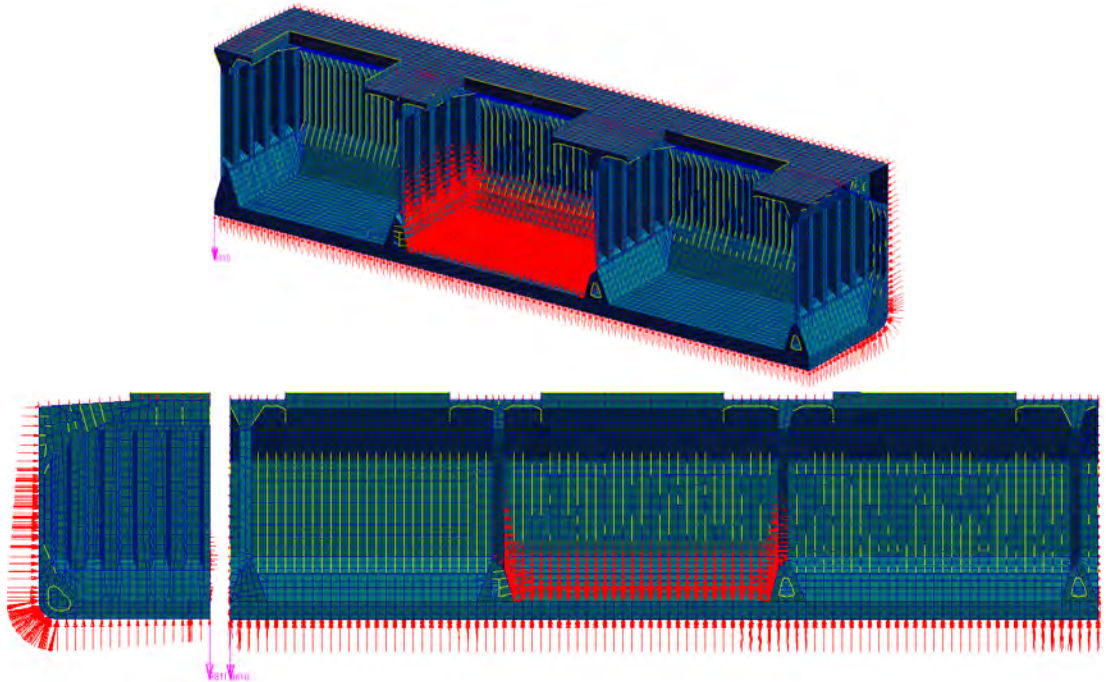


Fig.7-2-5 Load Case ALTL-00-P\_P1

荷重条件 I) 及び II) は左右対称の解析条件であるが、III) は横波を受ける条件のため、左右対称の解析条件ではない。そのため、荷重条件 III) を考慮し、後述する応力及び座屈の制約条件を考慮する領域は、より厳しい条件となる左舷を選択した。

#### 7.2.4 制約条件と目的関数

本研究では、制約条件の評価対象をばら積み貨物船における中央部の荷室 (No. 3CH) の左舷における、ビルジホッパープレート、ガーダープレート、フロアプレート、ボトムプレート、インナーボトムプレートの要素とした。評価対象部分を Fig.7-2-6 に示す。降伏応力は Fig.7-2-3 に示す計 3706 要素の要素中心での相当応力で評価し、許容値は 326.4 [MPa] とした。

また座屈評価は、Fig.7-2-6 で示した範囲に存在する、PSH で作成した計 626 個の座屈パネルで行う事とし、許容値は 1.0 に設定した。PSH にて作成された座屈パネルの例を Fig.7-2-7 に示す。Fig.7-2-7 は設計変数 X25 で示すボトムガーダー上に生成された座屈パネルの一部を示しており、細線で示す四角形が 1 つの要素、太線で示される四角形が一つの座屈パネルである。

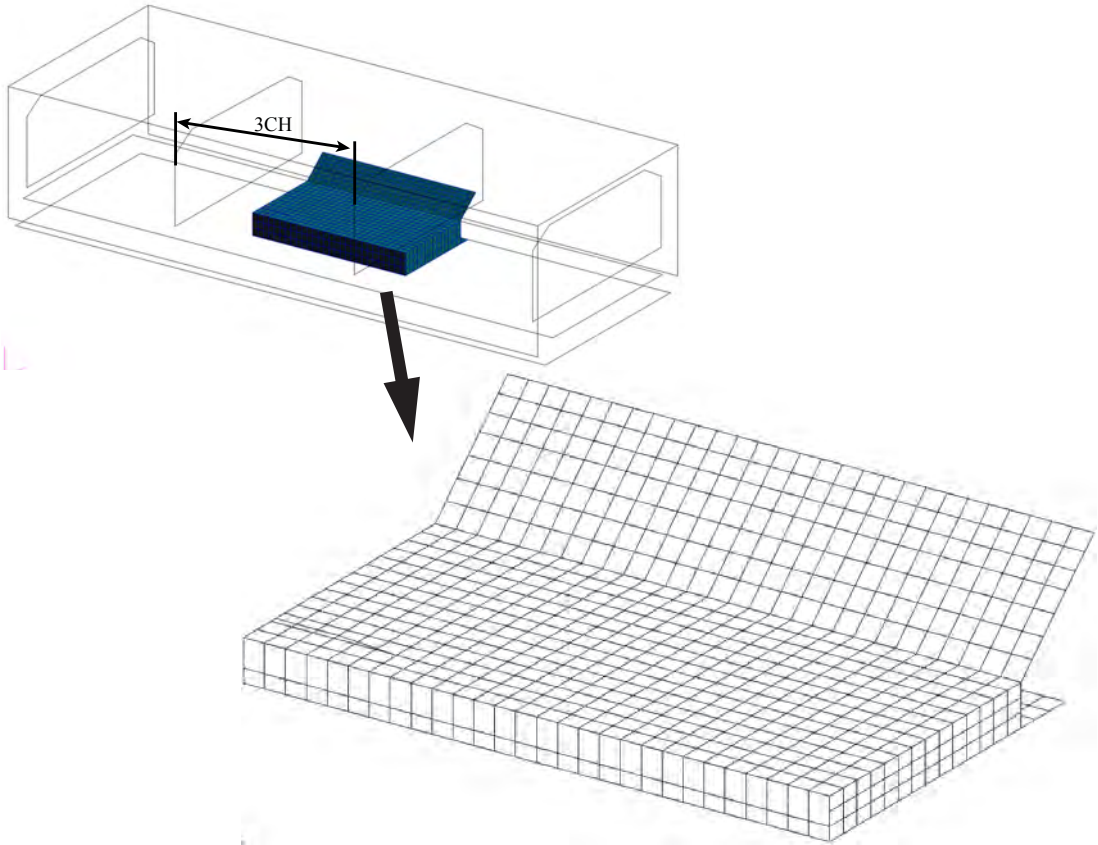


Fig.7-2-6 Stress and Buckling constraint area

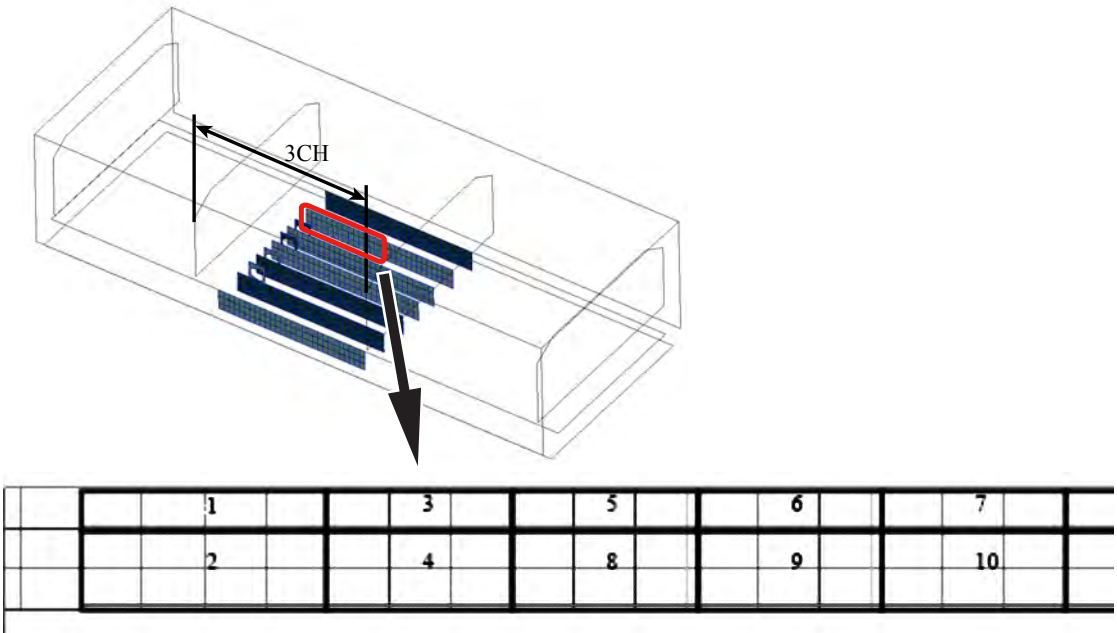


Fig.7-2-7 Example of buckling panel (BtmGirder\_2\_P)

また、目的関数として船体モデルの全重量を設定し、重量最小化問題として最適化を行う。

### 7.3 本研究で取り扱う最適化条件

本研究では、Table 7-1-1 に示す設計変数及び制約条件の組み合わせにより最適化を行い、比較検討を行う。

- Case a) 板厚を設計変数とする最適化を行う。形状設計変数は初期値で固定し、制約条件は各評価要素の降伏応力とする。
- Case b) 形状設計変数のみを変更する最適化を行う。板厚設計変数は初期値で固定し、制約条件は Case a) と同様に各評価要素の降伏応力とする。
- Case c) 形状及び板厚を設計変数とする最適化を行う。制約条件は Case a) , Case b) と同様に、各評価要素の降伏応力とする。
- Case d) Case a) の場合と同様に、板厚を設計変数とする最適化を行う。制約条件は各評価要素の降伏応力及び座屈パネルの座屈判定値とする。
- Case e) 形状のみを設計変数とする最適化を行う。板厚設計変数は初期値で固定し、制約条件は各評価要素の降伏応力及び座屈パネルの座屈判定値とする。
- Case f) Case c) の場合と同様に、形状及び板厚を設計変数とする最適化を行う。制約条件は各要素の降伏応力及び座屈パネルの座屈判定値とする。

Table 7-1-1 Combination of design variables and constraints

	Desing Val.	Constraint
Case a )	Plate Thickness	Stress
Case b )	Structural	Stress
Case c )	Plate Thickness & Structural	Stress
Case d )	Plate Thickness	Stress & Buckling
Case e )	Structural	Stress & Buckling
Case f )	Plate Thickness & Structural	Stress & Buckling

# 第 8 章

## 最適化結果と構造的考察

### 8.1 降伏応力を考慮した最適化の結果

#### 8.1.1 板厚を設計変数とした最適化 Case a) の場合

板厚を設計変数とした最適化 Case a) の最適化結果について述べる。Fig. 8-1-1 に GA による最適化の様子を示す。Fig. 8-1-1 より、目的関数と拡張目的関数は最適化の初期段階から同値であるため、制約条件を早期に満たしている事がわかる。また、最終世代で示される設計案は 1204 世代で出力された設計案と同じであるため、解の探索が十分に行われた事を示している。以降に示す Case b) から Case f) の最適化の場合も同様に、十分な探索が行われており、Case b) から Case f) のグラフは省略する。Table 8-1-1-a) に最適化による設計案及び船体重量、最大応力値及び発生する荷重条件と場所、最大座屈判定値及び発生する荷重条件と場所を示す。各要素の応力は、初期設計案では多数の要素で降伏応力を満足しておらず、最大値は 621.81[MPa] であったが、最適化により全ての要素で条件を満足し、最大値は

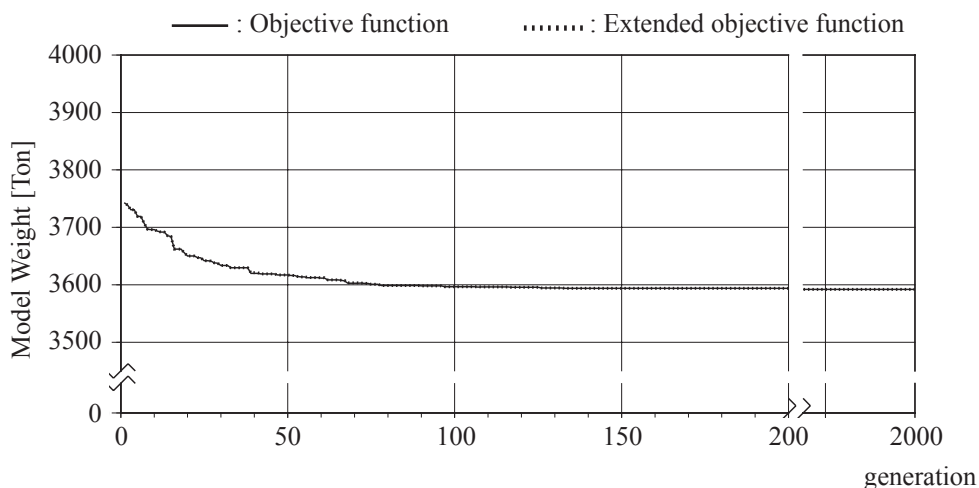


Fig. 8-1-1 Optimization history (Case a) [Ton]

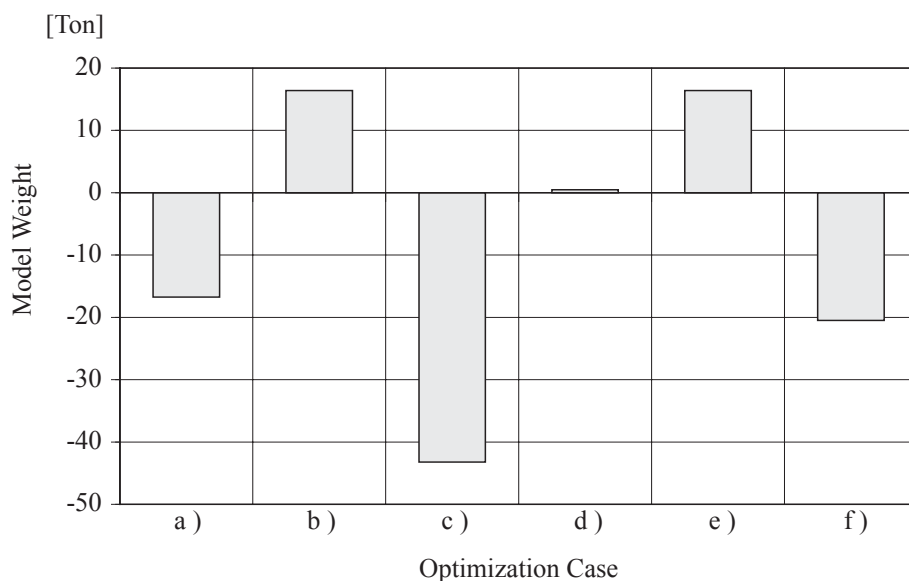


Fig. 8-1-2 Model weight of each optimization [Ton]

325.54[MPa]となった。また、Fig. 8-1-2 に目的関数であるモデル重量の初期設計案からの差をグラフで示す。Fig. 8-1-2 より、制約条件を満たしながら、初期設計案よりも 16.74[ton] 減少しており、最適化の有効性が示された。

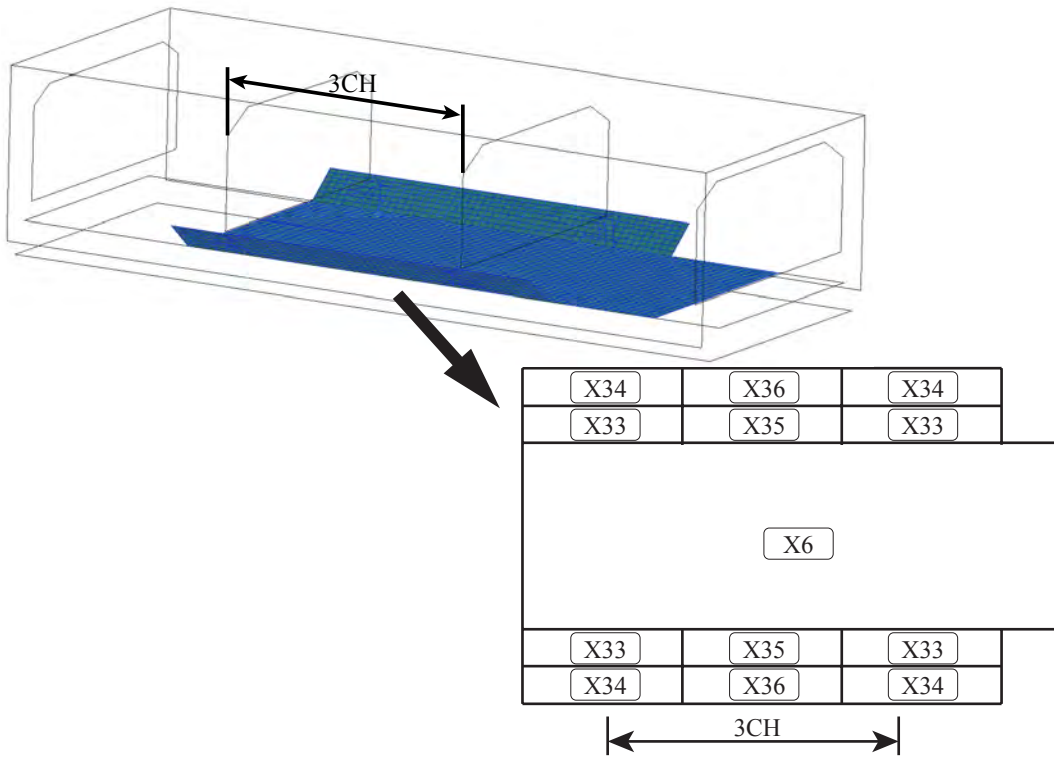
Fig. 8-1-3-a) に INNBTMPLATE 及び BLGHOPPER, Fig. 8-1-3-b) に BTMPLATE, Fig. 8-1-3-c) に FLOOR, Fig. 8-1-3-d) に GIRDER にそれぞれ存在する板厚設計変数の配置を示す。Fig. 8-1-3 従い、Fig.8-1-4 に INNBTMPLATE, BLGHOPPER, BTMPLATE, FLOOR 及び GIRDER における板厚を、ある共通基準値からの差として示す。

Fig.8-1-4-a) 及び Fig.8-1-4-b) より INNBTMPLATE 及び BTMPLATE は、全ての設計変数部材で下限値を選択した。BLGHOPPER では、船艙の両側では厚く、中央では薄い板厚が選択された。Fig.8-1-4-c) より FLOOR は、船艙中央付近では薄く、その他では厚い板厚が選択された。ロアスツール直下に位置する部材は、隔壁からの力に、また船側の部材は、ビルジホッププレート等からの力を支えていると思われる。Fig.8-1-4-d) より GIRDER は、船体幅方向では船艙中央付近で厚く、船側に近づくに従い薄い板厚が選択され、最も外側のガーダーは最も薄い板厚が選択された。これより、積載荷重や底部にかかる水圧による二重底部の変形が設計に大きな影響を与えている事が推察される。特に船艙中央付近は二重底構造部しか無

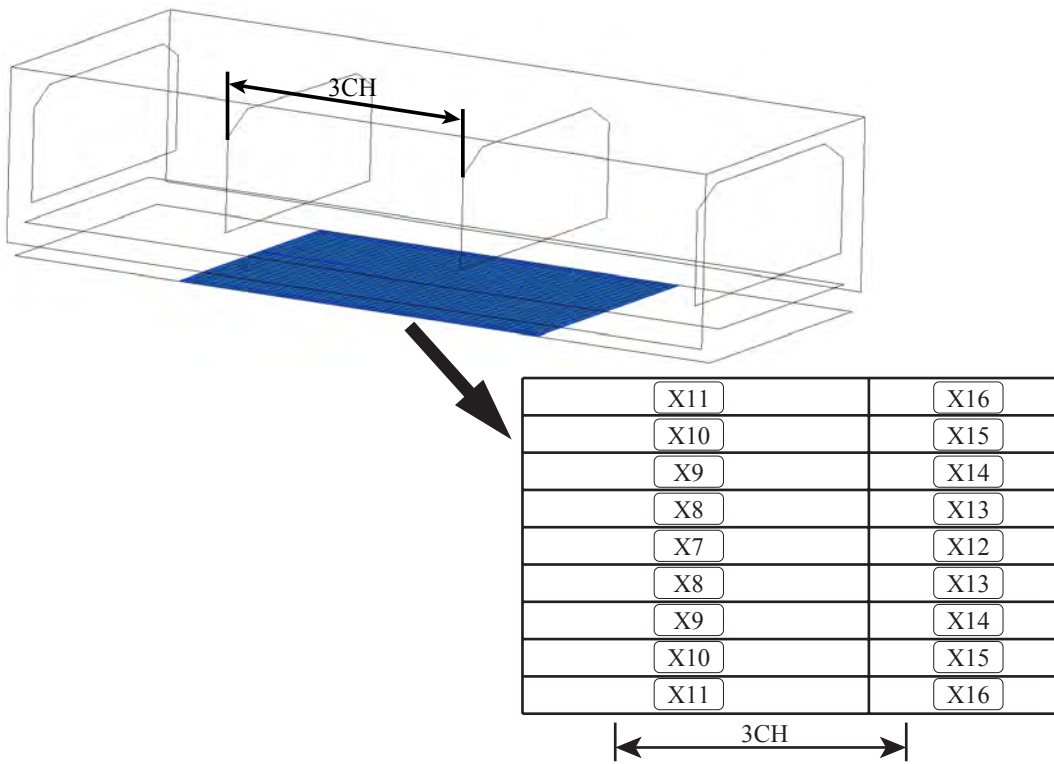
Table 8-1-1 Results of optimization (Difference from initial design variables) unit : mm

U : Upper Limit L : Lower Limit

Design Variable		Constraints		Stress			Stress and Buckling						
				a)	b)	c)	d)	e)	f)				
		Initial	Thickness	Structural	Thickness and Structural	Thickness	Structural	Thickness and Structural					
X1	bilgehopper h	Initial	Initial	U	70.0	L	-430.0	Initial	U	70.0	L	-430.0	
X2	doublehull h			U	150.0	L	-50.0		U	150.0	L	-50.0	
X3	doublehull w			L	-400.0	L	-400.0		L	-400.0	L	-400.0	
X4	lowerstool w1			U	235.0		135.0		U	235.0		35.0	
X5	lowerstool w2			L	-895.0	L	-895.0		L	-895.0	L	-895.0	
X6	INNBTMPLATE	L	-2.75	Initial	L	-2.75	L	-2.75	Initial	L	-2.75		
X7	BTMPLATE_01	L	-1.5		L	-1.5	U	6.5			2.5		
X8	BTMPLATE_02	L	-1.5		L	-1.5		0.5			2.5		
X9	BTMPLATE_03	L	-1.5		L	-1.5		-0.5			1.5		
X10	BTMPLATE_04	L	-1.5		L	-1.5	L	-1.5			L	-1.5	
X11	BTMPLATE_05	L	-1.5		L	-1.5	L	-1.5			L	-1.5	
X12	BTMPLATE_06	L	-1.5		L	-1.5	L	-1.5			L	-1.5	
X13	BTMPLATE_07	L	-1.5		L	-1.5	L	-1.5			L	-1.5	
X14	BTMPLATE_08	L	-1.5		L	-1.5	L	-1.5			L	-1.5	
X15	BTMPLATE_09	L	-1.5		L	-1.5	L	-1.5			L	-1.5	
X16	BTMPLATE_10	L	-1.5		L	-1.5	L	-1.5			L	-1.5	
X17	FLOOR_01	L	-1.5		L	-1.5	L	-1.5			L	-1.5	
X18	FLOOR_02	L	-1.5		L	-1.5		-0.5				-0.5	
X19	FLOOR_03	L	-1.5		L	-1.5	L	-1.5				-0.5	
X20	FLOOR_04	L	-3.5		L	-3.5		-0.5				-0.5	
X21	FLOOR_05	L	-3.5		L	-3.5		-0.5				-0.5	
X22	FLOOR_06		-3.5			-4.5		-1.5				-1.5	
X23	FLOOR_07		-4.5			-3.5		-1.5				-1.5	
X24	GIRDER_01		-1.5			-0.5		4.5				-1.5	
X25	GIRDER_02		9.5			10.5		10.5				8.5	
X26	GIRDER_03	U	20.5			16.5		17.5				16.5	
X27	GIRDER_04		14.5			14.5		12.5				14.5	
X28	GIRDER_05		2.5			4.5		3.5				6.5	
X29	GIRDER_06	L	-1.5			-0.5		0.5				-0.5	
X30	GIRDER_07		14.5			7.5		14.5				7.5	
X31	GIRDER_08		6.5			6.5		6.5				4.5	
X32	GIRDER_09	L	-1.5			-1.5		-0.5				-0.5	
X33	BLGHOPPER_01		0.25			1.25		0.25				1.25	
X34	BLGHOPPER_02		1.25			1.25		1.25				5.25	
X35	BLGHOPPER_03	L	-2.75			-2.75	L	-2.75			L	-2.75	
X36	BLGHOPPER_04	L	-2.75			-2.75	L	-2.75			L	-2.75	
Weight[t] =			-16.74		16.39	-43.20	0.46	16.39		-20.46			
Stress	Max. Stress =	621.81	325.54		555.30	325.78	325.54	555.30		325.78			
	Load Case	ALTL-00_P_P1	ALTL-00_P_P1		ALTL-00_P_P1	ALTL-00_P_P1	ALTL-00_P_P1	ALTL-00_P_P1		ALTL-00_P_P1			
	Location	GIRDER_03	GIRDER_01		GIRDER_03	FLOOR_01	GIRDER_01	GIRDER_03		FLOOR_01			
Buckling	Max. Criteria =	4.152				0.998	3.664	0.996					
	Load Case	ALTL-00_P_P1				ALTE-HG_F_F2	ALTL-00_P_P1	ALTL-00_P_P1					
	Location	BtmGirder				BtmShell	BtmGirder	BilgHopper					



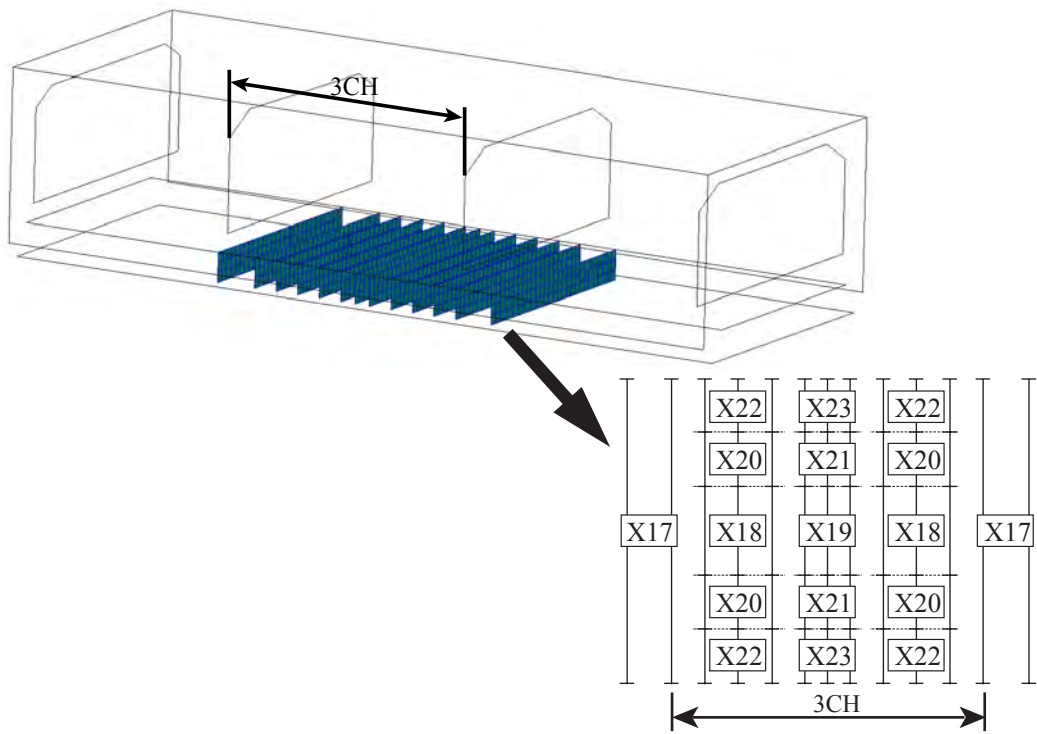
a) INNBTMPLATE and BLGHOPPER



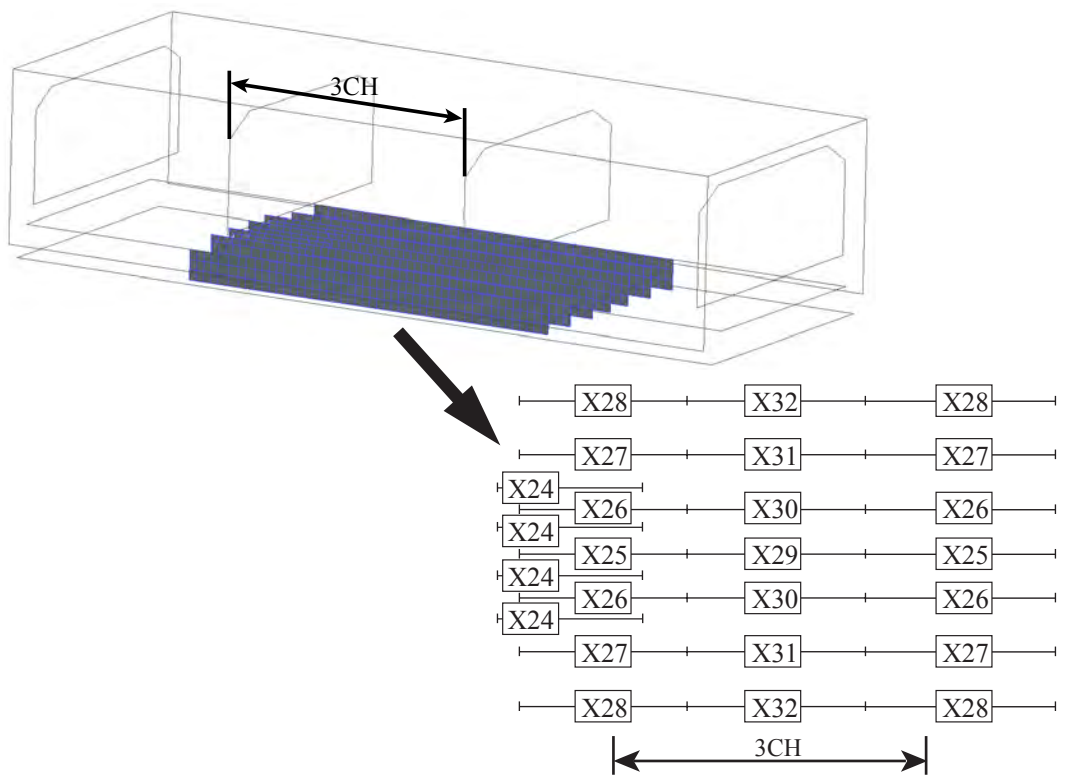
b) BTMPLATE

Fig. 8-1-3(1) Setting of the design variable



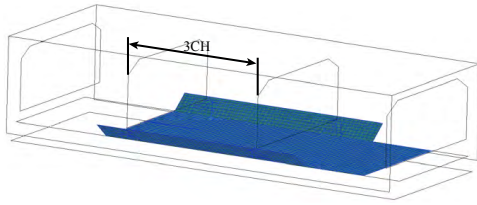


c) FLOOR



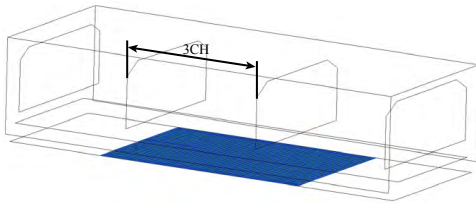
d) GIRDER

Fig. 8-1-3(2) Setting of the design variable



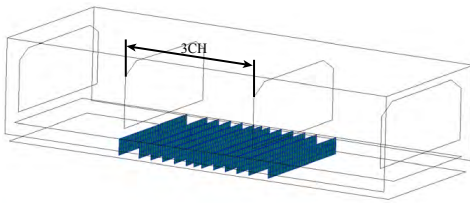
10.75	6.75	10.75
12.5	9.25	12.5
9.25		
12.5	9.25	12.5
10.75	6.75	10.75

a) INNBTMPLATE and BLGHOPPER



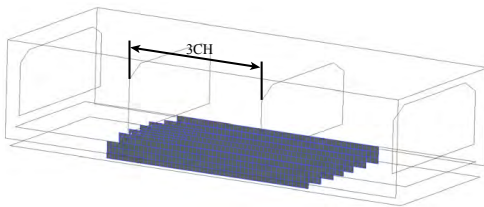
5.5	5.0
5.5	5.0
5.5	5.0
5.5	5.0
5.5	5.0
5.5	5.0
5.5	5.0
5.5	5.0
5.5	5.0

b) BTMPLATE



4.0	2.0	1.0	2.0	4.0
	0.0	0.0	0.0	
	0.0	0.0	0.0	
	0.0	0.0	0.0	
	2.0	1.0	2.0	

c) FLOOR



4.0	0.0	4.0
16.0	8.0	16.0
10.0	22.0	22.0
10.0	17.5	17.5
10.0	22.0	22.0
16.0	8.0	16.0
4.0	0.0	4.0

d) GIRDER

unit : mm

Fig.8-1-4 Plate thickness at the Case a) (Difference from the certain standard value)

いため、積載荷重等による二重底部の変形に対して弱いと考えられる。そのため、船艙中央付近のガーダーの板厚は厚く、船側では薄い板厚が選択されていると推察される。また船体長さ方向では、船艙の両端では厚く、中央では薄い板厚が選択されている。ロアスツールに接する部材では、より厚い板厚が選択され、最大応力はロアスツール下のパーシャルガーダーで発生している。これより、隔壁からの力の影響を大きく受けている事が推察される。

以上より、応力制約のみを考慮した場合、ガーダーは隔壁付近とセンターライン付近で、フロアは船側付近とロアスツール下において厚く設計すべきであると数値的に確認された。

### 8.1.2 形状を設計変数とした最適化 Case b) の場合

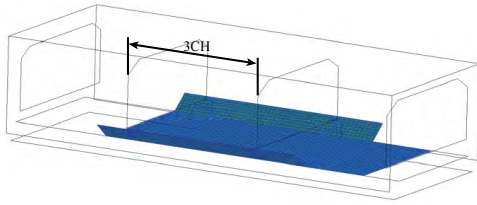
Table 8-1-1-b) に最適化結果を示す。Fig. 8-1-2 に示す通り、モデル重量は初期設計案に比べ 16.39[ton] 増えており、目的関数そのものを減少させる様な最適化は行われなかった。設計変数はそれぞれ、bilgehopper\_h, doublehull\_h, lowerstool\_w1(No.3CH 内側) は上限値、doublehull\_w, lowerstool\_w2(No.3CH 外側) は下限値を選択した。ところが、多数の要素で許容応力を満たしておらず、応力の最大値は荷重条件 ALTL-00\_P\_P1 において 555.30[MPa] であった。しかし初期設計案の場合より 66.51[MPa] 減少しており、評価対象である二重底部の要素の応力を下げ、拡張目的関数を減少させる様に最適化が行われた事を示している。以上より、形状設計変数であるビルジホッパータンクの高さ、二重底の高さ、ロアスツール幅(内側)を増加し、二重底部の横幅、ロアスツール幅(外側)を減少させる事により、対象である二重底部の要素の応力を下げる事が数値的に確認された。

### 8.1.3 板厚・形状を設計変数とした最適化 Case c) の場合

Table 8-1-1-c) に最適化結果を示す。目的関数である重量は、初期設計案より 43.20[Ton] 減少した。Fig. 8-1-2 に示す通り、これは Case a) の場合に比べ軽量であり、形状設計変数の効果が大きい事がわかる。制約条件は全ての要素について満足しており、応力の最大値は 325.78[MPa] になった。

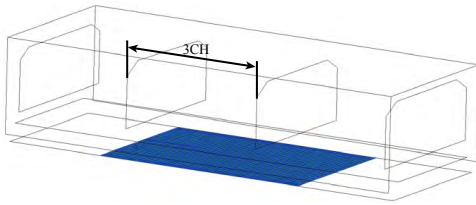
形状設計変数は、bilgehopper\_h, doublehull\_h, lowerstool\_w2(No.3CH 外側) がそれぞれ下限値を選択し、lowerstool\_w1(No.3CH 内側) が初期値より 135mm 増加した。

板厚設計変数の変更の様子を、Case a) の値からの差として Fig.8-1-5 に示す。Fig.8-1-5-a)



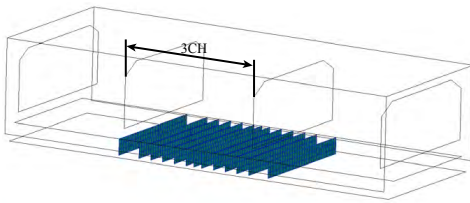
0.0	0.0	0.0
1.0	0.0	1.0
0.0		
1.0	0.0	1.0
0.0	0.0	0.0

a) INNBTMPLATE and BLGHOPPER



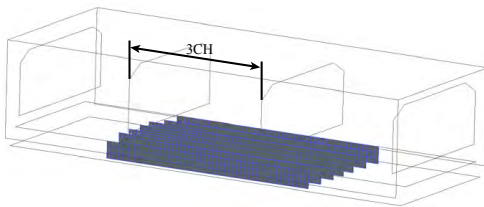
0.0	0.0
0.0	0.0
0.0	0.0
0.0	0.0
0.0	0.0
0.0	0.0
0.0	0.0
0.0	0.0
0.0	0.0

b) BTMPLATE



	-1.0	1.0	-1.0	
	0.0	0.0	0.0	
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	
	-1.0	1.0	-1.0	

c) FLOOR



	2.0	0.0	2.0
	0.0	0.0	0.0
1.0	-4.0	-7.0	-4.0
1.0	1.0	1.0	1.0
1.0	-4.0	-7.0	-4.0
1.0	0.0	0.0	0.0
	2.0	0.0	2.0

d) GIRDER

unit : mm

Fig.8-1-5 Plate thickness at the Case c) (Difference from the Case a) )

及び Fig.8-1-5-b) より INNBTMPLATE 及び BTMPLATE では、前述の Case a) と同様に、全ての設計変数部材で下限値を選択した。BILGHOPPER は、Case a) と比較した場合、01(X33) が 1mm 増加しているが、その他の部分では同様の値を選択した。

Fig.8-1-5-c) より FLOOR には大きな変更は見られないが、Fig.8-1-5-d) より GIRDER は、センターラインから少し離れた部材で板厚が大幅に減少しており、ロアスツール幅が二重底全体強度に与える影響が強い事を示していると思われる。

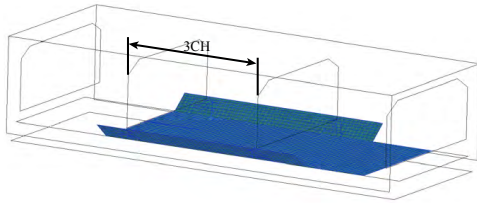
以上より、ロアスツール幅(内側)が船艙方向に張り出した結果、ガーダー部にかかる力が分散され、板厚も分散した値が選択された事が数値的に確認された。また、全ての制約を満足しながら、目的関数である船体重量をより一層減少させる事が可能である事がわかる。

## 8.2 降伏及び座屈応力を考慮した最適化の結果

### 8.2.1 板厚を設計変数とした最適化 Case d) の場合

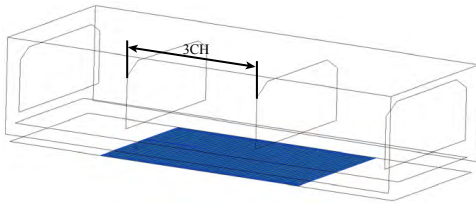
Table 8-1-1-d) に最適化結果を示す。目的関数は初期設計案より 0.46 [Ton] 上昇した。しかし初期設計案では、最大応力及び最大座屈判定値がそれぞれ、621.81 [MPa], 4.152 であったものが、最適化により 325.54 [MPa], 0.998 となり、全ての要素及び座屈評価パネルにおいて制約条件を満足した。

板厚設計変数の変更の様子を、考慮する変数が同一である Case a) の値からの差として Fig.8-2-1 に示す。Fig.8-2-1-a) より INNBTMPLATE と BLGHOPPER では板厚の変化は見られなかった。Fig.8-2-1-b) より BTMPLATE はセンターライン付近に位置する 01(X7), 02(X8), 03(X9) で板厚が増加した。特に、センターライン上の 01(X7) では 8mm 増加し、近傍の 02(X8) 及び 03(X9) とは離れた数値を選択している。本論文では、隣り合う板厚設計変数値の差に制約を設けていないため、設計変数として選択される可能性は存在する。しかし、一般的に船底外板の左右方向の応力分布は、船体中央で大きい圧縮応力となり船側方向に向けて漸減していくため、通常はこの応力分布に従ってなだらかに変化する様に板厚が選択されると考えられる<sup>[41]</sup>。そこで解の妥当性を検証するため、最適化 Case d) の設計案におい



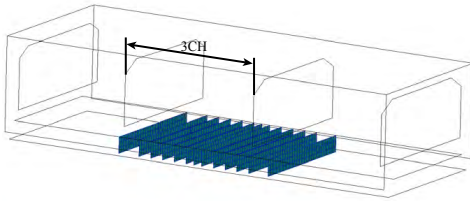
0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0
0.0		
0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0

a) INNBTMPLATE and BLGHOPPER



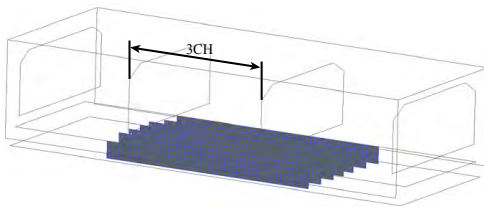
0.0	0.0
0.0	0.0
1.0	0.0
2.0	0.0
8.0	0.0
2.0	0.0
1.0	0.0
0.0	0.0
0.0	0.0

b) BTMPLATE



0.0	2.0	3.0	2.0	0.0
	3.0	3.0	3.0	
	1.0	0.0	1.0	
	3.0	3.0	3.0	
	2.0	3.0	2.0	

c) FLOOR



1.0	1.0	1.0	
-2.0	0.0	-2.0	
6.0	-3.0	0.0	-3.0
6.0	1.0	2.0	1.0
6.0	-3.0	0.0	-3.0
-2.0	0.0	-2.0	
1.0	1.0	1.0	

d) GIRDER

unit : mm

Fig.8-2-1 Plate thickness at the Case d) (Difference from the Case a) )

て、01(X7)から刻み幅である 1.0 を引いた値 (X7 - 1.0) で解析を行った結果、01(X7)における許容応力及び座屈判定値は許容値以下であった。しかし、Fig.8-2-2 に示す 02(X8)及び 03(X9)に存在する座屈パネルにおいて、座屈制約を満足しないパネルが存在した。そのため 01(X7)から 03(X9)にかけての板厚は、十分な最適化により選択されていると考えられる。次に 01(X7)と近傍の 02(X8)及び 03(X9)を制約条件にて比較した所、01(X7)は制約に余裕があり、02(X8)及び 03(X9)には余裕が少ない事がわかった。従って 01(X7)の板厚を下げ、02(X8)及び 03(X9)の板厚を上げた場合でも制約条件を満足する事は可能であると考えられる。しかし、02(X8)及び 03(X9)の対象面積は 01(X7)に比べ大きく、板厚を増加させると目的関数が大きく増加する事、及び設計変数が 1mm 刻みの離散的数値である事から、面積の小さな 01(X7)を大幅に増加して力を受け持たせ、面積の大きな 02(X8)及び 03(X9)を必要最低限に抑える設計が選択された。これにより、応力に比例して板厚を増加するよりも、目的関数がより小さくなる事がわかった。

Fig.8-2-1-c)より FLOOR は、船側とセンターラインの間の板厚が増加している。また Fig.8-2-1-d)より GIRDER は、左に位置するパーシャルガーダー、船側、及びセンターライ

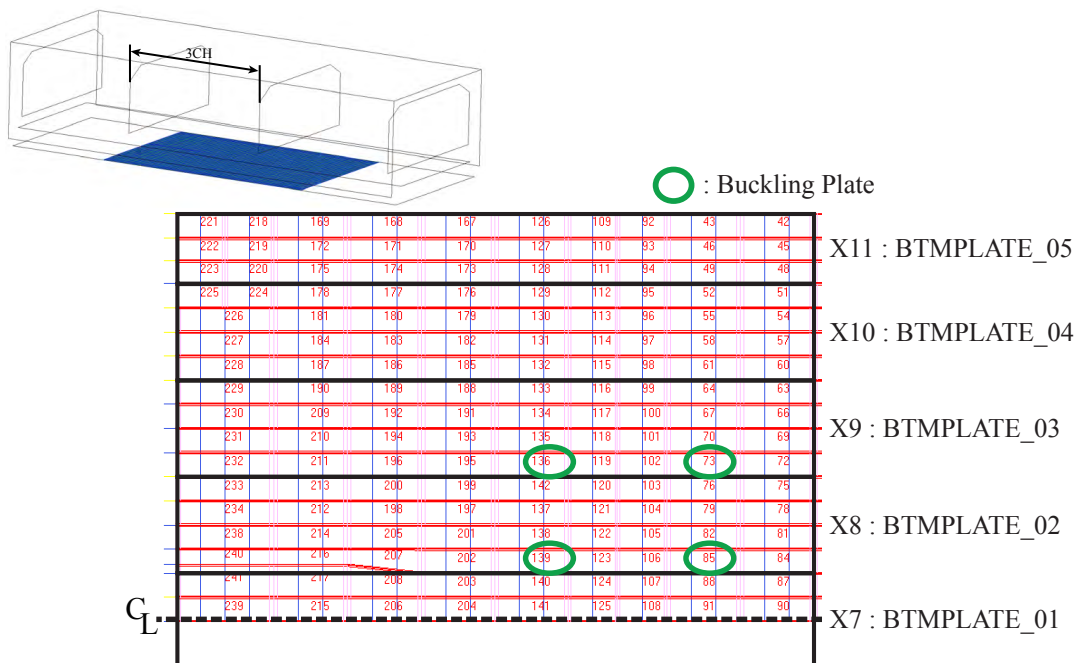


Fig.8-2-2 Buckling plate which exceeds constraints

ン上の板厚が増加している。

以上より、Case a)と比較した場合に板厚が増加した設計変数部材は、応力制約よりも座屈制約に対して弱い部分であり、座屈対策として、十分な板厚が必要である事が数値的に確認された。

### 8.2.2 形状を設計変数とした最適化 Case e) の場合

Table 8-1-1-e) に最適化結果を示す。設計変数はそれぞれ bilgehopper\_h, doublehull\_h, lowerstool\_w1(No.3CH 内側) は上限値, doublehull\_w, lowerstool\_w2(No.3CH 外側) は下限値を選択し、同じ設計変数である Case b と同一の結果であった。また多数の要素・座屈評価パネルで制約条件を満足しておらず、応力及び座屈判定値の最大値はそれぞれ 555.30 [MPa], 3.664 になった。しかし、初期設計案の場合では、応力及び座屈判定値の最大値はそれぞれ 621.81 [MPa], 4.152 であったため、形状変更により最適化が行われている事がわかる。

以上より Case b と同様に、形状設計変数にて評価対象である二重底部の要素の応力及び座屈判定値を下げるためには、ビルジホッパータンクの高さ、二重底の高さ、船艙内側のロアスツール幅を増加させて、船底外板と船底内板との空間を広くし、二重底部の横幅を減少すれば良い事が数値的に確認された。

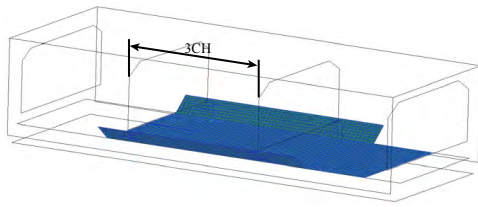
### 8.2.3 板厚・形状を設計変数とした最適化 Case f) の場合

Table 8-1-1-f) に最適化結果を示す。制約条件は全ての条件について満足しており、最大応力は 325.78 [MPa], 最大座屈判定値は 0.996 になった。また目的関数は、設計変数が板厚のみである Case d) 及び形状のみである Case e) では、それぞれ初期設計案より 0.46[Ton], 16.39[Ton] 上昇したが、本条件では 20.46[Ton] も減少した。これにより、形状及び板厚設計変数を同時に変更する事により、大幅な重量削減の可能性があると示された。

考慮する設計変数が同一である Case c) と比較した場合、形状設計変数は、lowerstool\_w1(No.3CH 内側) が 100mm 減少したが、他の設計変数は同一の値を選択した。

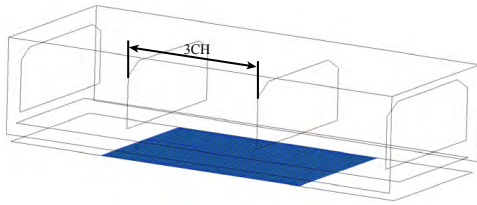
Fig.8-2-3 に板厚設計変数の変更の様子を設計変数が同様の Case c) の値からの差として示す。Fig.8-2-3-a) より BLGHOPPER では、ロアスツール上部との取り合い部分の板厚が増加している。また、Fig.8-2-3-b) より BTMPLATE では、センターライン付近に位置する 01,





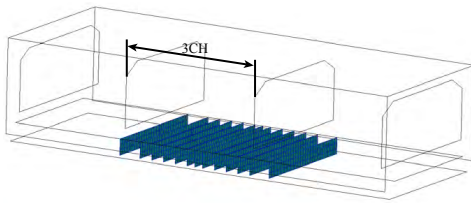
4.0	0.0	4.0
0.0	0.0	0.0
0.0		
0.0	0.0	0.0
4.0	0.0	4.0

a) INNBTMPLATE and BLGHOPPER



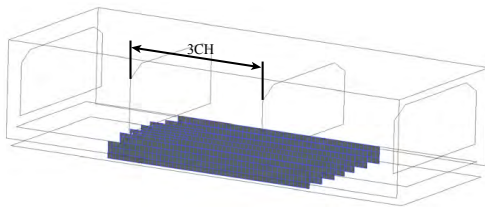
0.0	0.0
0.0	0.0
3.0	0.0
4.0	0.0
4.0	0.0
4.0	0.0
3.0	0.0
0.0	0.0
0.0	0.0

b) BTMPLATE



0.0	3.0	2.0	3.0	0.0
	3.0	3.0	3.0	
	1.0	1.0	1.0	
	3.0	3.0	3.0	
	3.0	2.0	3.0	

c) FLOOR

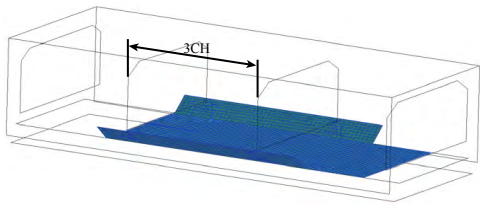


	2.0	1.0	2.0	
	0.0	-2.0	0.0	
-1.0	0.0	0.0	0.0	
-1.0	-2.0	0.0	-2.0	
-1.0	0.0	0.0	0.0	
	0.0	-2.0	0.0	
	2.0	1.0	2.0	

d) GIRDER

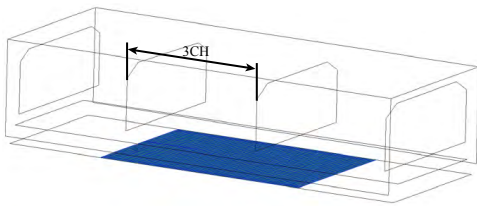
unit : mm

Fig.8-2-3 Plate thickness at the Case f ) (Difference from the Case c )



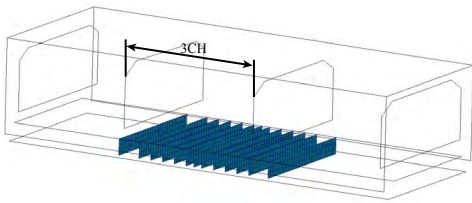
4.0	0.0	4.0
1.0	0.0	1.0
0.0		
1.0	0.0	1.0
4.0	0.0	4.0

a) INNBTMPLATE and BLGHOPPER



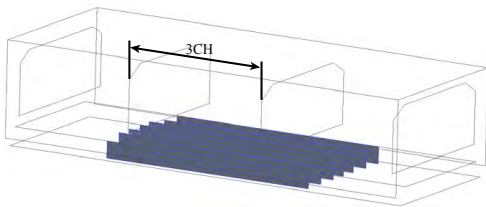
0.0	0.0
0.0	0.0
2.0	0.0
2.0	0.0
-4.0	0.0
2.0	0.0
2.0	0.0
0.0	0.0
0.0	0.0

b) BTMPLATE



0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	1.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

c) FLOOR



3.0	0.0	3.0	
2.0	-2.0	2.0	
-6.0	-1.0	-7.0	-1.0
-6.0	-2.0	-1.0	-2.0
-6.0	-1.0	-7.0	-1.0
-6.0	-1.0	-7.0	-1.0
2.0	-2.0	2.0	
3.0	0.0	3.0	

d) GIRDER

unit : mm

Fig.8-2-4 Plate thickness at the Case f ) (Difference from the Case d )

02, 03 で板厚が増加した。Fig.8-2-3-c) より FLOOR はロアスツール直下に位置する部材を除く全ての部分で板厚が増加した。Fig.8-2-3-d) より GIRDER は最も船側のガーダーは板厚が増加したが、パーシャルガーダー及びセンターライン上の部材の一部等では減少した。

以上より、FLOOR 全体と船側に最も近いガーダーは、座屈制約に対して特に弱い部分であり、Case c) に比べ板厚は増加した。また lowerstool\_w1(No.3CH 内側) の変更と他の板厚の増加により、GIRDER で余裕が生まれた部分では、板厚が減少したものと数値的に確認できる。また、他の設計変数部材も同様に、板厚が増加した部材は、応力制約よりも座屈制約に対して弱い部分であり、座屈の対策として十分な板厚が必要である事が数値的に確認された。

また、同様の制約条件下において形状設計変数の影響を調べるため、Fig.8-2-4 に板厚設計変数の変更の様子を Case d) からの差として示す。Fig.8-2-4-a) より BLGHOPPER は、ロアスツール部との取り合い部分の板厚が増加しており、前途の Case c) との比較及び、Case a) と Case c) との比較等から、座屈制約による影響よりも lowerstool\_w1(No.3CH 内側) の変更による影響が大きく現れている事が数値的に確認できる。また Fig.8-2-4-b) より BTMPLATE はセンターライン付近で板厚が減少し、船艙前後の船側付近で板厚が増加したため、結果的にセンターラインから船側にかけてなだらかな板厚の変化となった。Fig.8-2-4-c) より BTMPLTE では大きな変化は見られなかったが、Fig.8-2-4-d) より GIRDER ではセンターライン付近とパーシャルガーダーで板厚が大幅に減少している。以上の様に、形状設計変数の変更により、二重底幅が狭まり、ロアスツール幅(内側)が船艙内側に張り出した結果、ガーダー部にかかる力が分散され、板厚もセンターラインから船側にかけてなだらかに変化する値が選択された事が数値的に確認された。また、全ての制約を満足しながら、目的関数である船体重量をより一層減少させる事が可能である事がわかる。

### 8.3 従来の(設計者の試行錯誤による)設計手法との比較

本研究の手法は、応力及び座屈制約に余裕のある設計変数部材の板厚を減少させる事が可

能な為、従来の設計者による試行錯誤の設計手法に比べ、船体重量を大幅に削減する可能性がある。これは従来の設計者が試行錯誤する設計手法では、時間的制約等から十分な検討を行う事が出来なかった為である。本研究手法と設計者が試行錯誤し設計する設計案を比較するため、従来手法の設計案として Case d) において、板厚設計変数の可変範囲を初期値から上限値のみに限定し、最適化を行った(これを Case d')と呼ぶ)。Table 8-3-1 に Case d') と本研究の全設計変数及び制約条件を考慮した Case f) における重量の変化について比較する。Table 8-3-1 では初期設計案より板厚が増加した部分の重量増加量、及び板厚が減少した部分の重量減少量を分けて記した。また、Table 8-3-1 の内容をグラフとして Fig. 8-3-1 に示す。Table 8-3-1 及び Fig. 8-3-1 より Case d') において、初期設計案より増加した重量は 40.11[Ton] であり、応力及び座屈制約を満たすために板厚が不足した設計変数部材が補われたと推察される。Case d') と Case f) との重量の差は 60.57[Ton] であり、時間的制約から板厚削減の検討を行わない事もある従来の設計手法では、増加分がそのまま船体重量の増加となる可能性があるため、Table 8-1-1 で示した値よりも大きな効果が得られている事が示された。さらに形状設計変数を加えた Case f) では、重量増加量が 46.36[Ton] であったのに対し、重量減少

Table 8-3-1 Effect of plate thickness reduction [Ton]

Condition	Increment	Decrement	Total
Case d')	40.11	-	40.11
Case f)	46.36	66.82	-20.46
		Difference	60.57

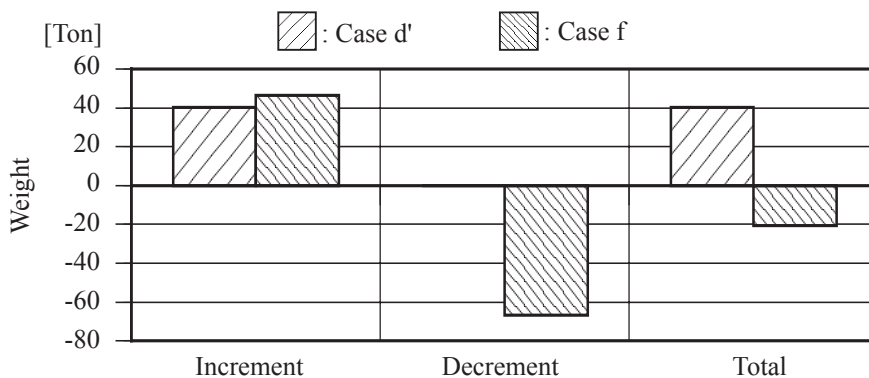


Fig. 8-3-1 Effect of plate thickness reduction [Ton]

量は 66.82[Ton] となり，形状設計変数の採用により船体二重底部のみの設計であるにもかかわらず，船体重量の大幅な削減の可能性がある事が示された．以上により本研究の手法を利用することで，概略一般配置にて決定される形状設計変数も含めた設計を行う事が可能となり，船体重量の大幅な削減が期待できる事を示した．

#### 8.4 解析結果の検証

本論文で用いた近似式の精度検証のため，前節の最適化 Case f) の場合で得られた設計案を Nastran を用いて解析し，近似式より得られた応力値及び座屈判定値と比較した．Table 8-4-1-a) ， Table 8-4-1-b) に応力及び座屈判定値の平均誤差，最大誤差率，最大誤差を示す．応力を制約条件付近の 300[MPa] 以上に限定した場合の平均誤差は 0.99[%]，最大誤差は 4.01[%] であった．また座屈判定値において，制約条件付近の 0.95 以上に限定した場合の平均誤差は 2.61[%]，最大誤差は 5[%] であり，十分な精度を有している事がわかる．Nastran で得られた応力状態と許容値を超えた部分を Fig. 8-4-1 に，また屈判定値が許容値である 1.0 を超えたパネルを Fig. 8-4-2 に示す．最大応力は荷重条件 ALTL-00\_PP1 において，板厚設計変数 GIRDER\_01 内部で発生し，326.77[MPa] であった．これは許容応力である 326.40[MPa]

Table 8-4-1-a) Accuracy of the stress approximation

Average error (3706 Elements , 3 Load Case : Stress > 300[Mpa])	0.99[%]
Maximum error rate (Stress > 300[Mpa])	4.01[%]
Number of elements over stress constraint	2
Max. error	0.38[MPa]

Table 8-4-1-b) Accuracy of the stress approximation

Average error (626 Panels , 3 Load Case : criteria> 0.95[-])	2.61[%]
Maximum error rate (criteria> 0.95)	4.78[%]
Number of elements over buckling constraint	6
Max. error	0.05[-]

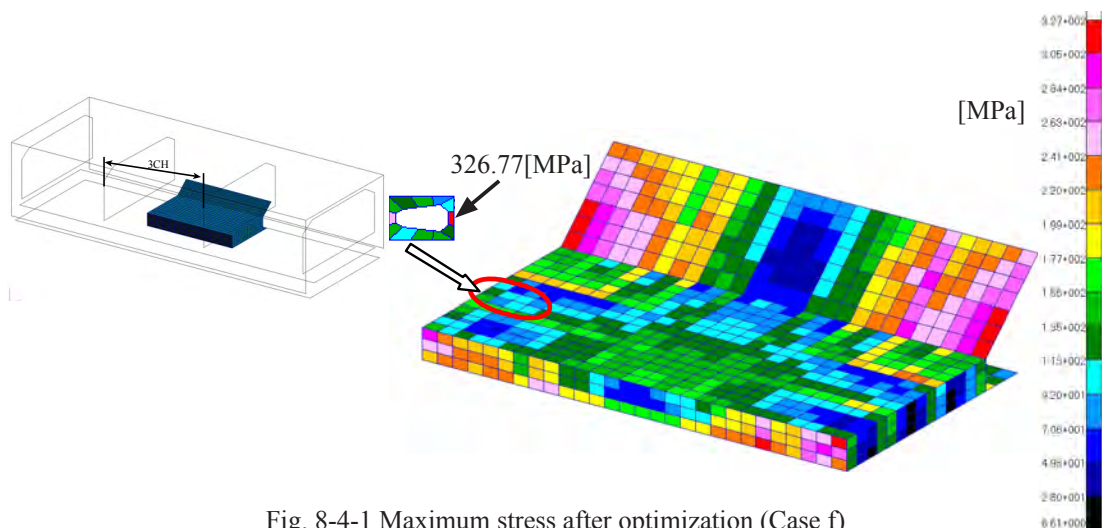


Fig. 8-4-1 Maximum stress after optimization (Case f)

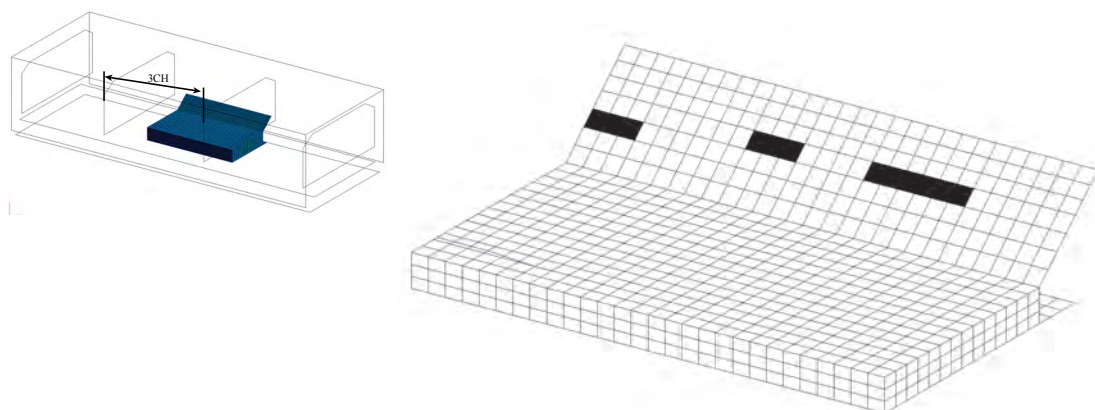


Fig. 8-2-5 Buckling plate of over Criteria after Optimization (Case f)

を若干ではあるが超えている。同様に最大座屈判定値は、荷重条件 ALTL-00\_PP1 において、板厚設計変数 BLGHOPPER 内部で発生し、1.044 であった。応力の場合と同様に、許容値である 1.0 を超えている。しかし、本研究で対象としている設計段階は最終的な詳細設計の段階ではないため、作成した近似式の精度は高く、誤差は十分許容出来る誤差範囲であると言える。また、許容値内に応力及び座屈判定値を納めるには、誤差を許容出来る様に制約条件に余裕を持たせる、制約条件を満たす様に該当部分の板厚設計変数のみを変更する等の方法により、簡単に対応可能である。

## 8.5 最適化に要する計算時間

本論文では、船舶構造の最適化の際に作成した近似式により応力・座屈判定・船体重量を求め、設計案の評価を行った。これにより、提案手法を使用しない場合に比べ大幅な計算時間の短縮を図る事が出来た。

提案手法を使用しない場合、設計変数の変更に 60 分間、Nastran による解析に 2 分間、座屈判定に 1 分間かかるとすると、本論文で行った GA による最適化の条件は 5 島 × 10 個体 × 2000 世代であるため、必要な計算回数は 100,000 回であり、単純計算では 6,300,000 分 (105,000 時間 : 4375 日) が必要である。しかし、本論文で提案した近似式を用いる事で、板厚設計変数と応力制約を考慮した Case a) の最適化の場合で約 17 時間、板厚・形状設計変数、及び応力・座屈制約を考慮した Case f) の最適化の場合でも約 21 時間で終了する。以上の様に本研究の手法を用いる事で、大幅な時間短縮が可能である。





# 第 9 章

## 結 言

本研究では、ばら積み貨物船 FEM モデルを対象として、船体構造二重底部の形状と板厚の最適設計に関する研究を行った。得られた知見を以下にまとめる。

1. 形状の変更を簡単に分割メッシュに反映させるために、独立要素分割を提案した。設計変数が直接的に関係する部材のみの節点座標を移動すればよいため、船舶のような大型構造物でも、簡単に形状変更を実施できることを示した。
2. 独立要素分割により生成された各部材の分割メッシュに適切な接合関係を与えるために、多点拘束の利用を提案した。独立要素分割と併用することにより、形状最適設計を簡単に実施できることを示した。
3. ばら積み貨物船の場合、船体モデルごとに独立要素分割モデルを構成するメッシュの数やサイズは異なるものの、独立要素分割グループの構成及びその接続関係には共通点が多い。この特徴を利用して一般的なばら積み貨物船の FEM モデルを基に、形状最適化のための FEM モデルを自動生成する方法を検討した。
4. 上記を実現するために、PSH の部材認識機能に着目した。PSH の部材認識機能によって生成される PSH 分割グループは、船体を構成する主要構造グループと対応している。設計変数の変更を的確に反映するために、PSH 分割グループから独立要素分割グループを定義・生成することを提案した。
5. 独立要素分割グループ生成時の節点番号重複情報と定義されている独立要素分割グループ間の接続関係の情報を利用して、MPC を自動的に付加する方法を提案した。

6. 設計変数の影響度を考慮した応力・座屈評価・船体重量の近似式作成方法を提案した。設計変数の影響度を利用することにより、教師データ数を抑えても高い精度を有する近似式を作成できることを示した。
7. ばら積み貨物船の船体構造二重底部の形状と板厚の最適設計を実施した。形状と板厚を同時に取り扱うことにより、大幅な設計変更が可能であることできることを示した。また全ての制約を満足しながら、目的関数である船体重量を減少させる事が可能であるとの結論が得られた。
8. 構造最適化を設計変数と制約条件の組合せを様々に変更し実行した結果、以下の構造的特徴が確認された。
  - 応力制約においては、フロアやインナーボトム、ボトムプレートには余裕がある部分が多く、また、ガーダーは、センターライン付近やロアスツール付近では余裕が無い部材が多いため、十分な板厚が必要である事が数値的に確認された。
  - ボトムプレートのセンターライン付近、フロアの大部分、ロアスツール下のパーシャルガーダー、ビルジホッパープレートの両端等は、応力制約よりも座屈制約に対して弱い部分である。よって板厚の増加の検討と同時に、他の座屈対策の検討を行う事により、船体重量の増加を防ぐ事が可能である事が数値的に確認された。
  - 形状設計変数を用いて、二重底部の応力及び座屈判定値を下げるには、ビルジホッパータンクの高さ、二重底の高さ、ロアスツール幅(内側)を増加させて、船底外板と船底内板との空間を広くし、二重底部の横幅を減少すれば良い事が数値的に確認された。

本研究で扱う船体構造二重底部の形状と板厚との定性的な関係は一般的に把握されているが、本最適結果においても定量的に確認する事が出来た。これにより、設計者の知識や経験の一部を再現出来た。

また本研究では、

- 評価対象をばら積み貨物船の船体構造二重底部分に限定している.
- 製作上の制約を考慮していない.
- 概略一般配置にて検討されている制約条件を考慮していない.
- 縦強度の制約を考慮していない.
- 各タンク容積の制約を考慮していない.

等, 未考慮の制約も残っている. しかし, 異なる設計ステージにてそれぞれに決定される形状設計変数と板厚設計変数を同時に取り扱う構造最適化を実施し, 更なる軽量化の可能性を示す事が出来た. 更に, PSH で取り扱う一般的なばら積み貨物船の FEM モデルに対し, 形状及び板厚設計変数を取扱い, 応力及び座屈評価を考慮可能な最適化システムを構築することが出来た. これにより, マンパワーの省力化が可能となり, 船舶の構造検討では大きな力を発揮すると思われる.



# 謝 辞

本論文をまとめる機会を与えて頂くと共に広島大学へ編入学させて頂いて以来、長期に渡り多大なるご指導ならびにご助言を賜りました広島大学大学院工学研究院 北村充教授には心からの謝意を表します。また日頃よりご指導、ご鞭撻を賜りました広島大学大学院工学研究院 濱田邦宏教授、竹澤晃弘准教授には心よりお礼を申し上げます。さらに本論文の審査に際し、有益なご助言ならびにご討論を賜りました広島大学大学院工学研究院 大崎純教授、岡澤重信准教授には心よりお礼を申し上げます。

PrimeShip-HULL の利用手法のご教授から、船体モデルのご提供、設計案のご指導等、多岐にわたりご協力くださいました常石造船株式会社の関係者の皆様、特にお取りまとめ頂いた大槻康明様には心よりお礼を申し上げます。

本研究を遂行するにあたり使用させて頂いた船体設計支援ソフトウェアである PrimeShip-HULL は、日本海事協会にて開発されたものであり、このプログラム無くして本研究を遂行する事は出来ませんでした。また PrimeShip-HULL の貴重な情報をご提供くださいました、日本海事協会情報技術部 小林敬幸様には大変お世話になりました。日本海事協会ならびに小林敬幸様には心よりお礼申し上げます。

同じく本研究を遂行するにあたり使用させて頂いた、遺伝的アルゴリズムを用いた最適化プログラムは、広島大学大学院工学研究科輸送・環境システム専攻の構造設計研究室で開発されたものです。開発に携わった皆様に心よりお礼申し上げます。

研究を進めるにあたり、(株)名村造船所の古野弘志様ならびに中森隆一様に於かれましては、数々のご助言を頂きました。心よりお礼申し上げます。

多方面よりご支援を頂きました、呉工業高等専門学校の遠藤一太校長および教職員の皆様、ならびにご協力頂いた機械工学分野教職員の皆様には心よりお礼を申し上げます。

最後に、いつも暖かく励ましの言葉をかけてくれた家族や友人に、心から感謝申し上げます。



# 参考文献

- [1] 国土交通省海事局船舶産業課：造船市場と造船業の現状について(資料3), 新造船政策検討会(第1回), 2010
- [2] 森 淳一：常石造船 KAMSARMAX (カムサマックス) BULK CARRIER "BULK FIVE", 咸臨(日本船舶海洋工学会誌), 第5号, pp73, 2006
- [3] 池田 宗雄：船舶知識のABC, 成山堂書店, 2002
- [4] U.S. Department of Transportation Maritime Administration：World Merchant Fleet 2005
- [5] 造船テキスト研究会：商船設計の基礎知識, 成山堂書店, 2009
- [6] 面田 信昭：船舶工学概論, 成山堂書店, 2002
- [7] 関西造船協会編集委員会, 船－引合から解船まで, 日本船舶海洋工学会, 2007
- [8] 北村充, 濱田邦裕, 鈴木博喜, 矢野佳苗, 徳岡慶輔, 大槻康明：船体中央断面最適設計の実用化と高速最適化システムの開発に関する研究, 日本船舶海洋工学会論文集, vol.6, pp.141-149, 2007.
- [9] 濱田邦裕, 武市祥司, 青山和浩：要求分析と設計プロセス分析に基づく接合設計支援システムの構築, 溶接学会論文集, Vol. 25, No. 2, pp. 286-297, 2007.
- [10] 麩谷 茂：共通船体構造規則(CSR)が造船所に与える影響とその課題, 咸臨(日本船舶海洋工学会誌), 第12号, pp14-16, 2007
- [11] 山本 聡：共通船体構造規則(CSR)が造船業に与える影響と日本造船業の課題, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第2E号, pp35-36, 2006
- [12] Class NK：PrimeShip-HULL(CSR) User's Guide to Direct Strength Assessment System for Bulk Carriers, PrimeShip-HULL(CSR) Direct Calculations インストール CD, Ver.2.40, 2008.
- [13] 北村充, 濱田邦裕, カハルディン・ジェノド：有限要素解析に基づいた構造評価用ニューラルネットワークの構築とコンテナ船の最適設計への利用, 日本造船学会論文集, vol.192, pp.661-668, 2002.

- [14] 内村秀之, 松岡和彦, 田中義雄, 喜多宏司:船殻中央断面構造の最適化に関する研究, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, vol.3, pp.133-134, 2006.
- [15] 岡田哲男, 豊田昌信, 小林英質: 船体構造の初期計画における実用的な最適化の適用例, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, vol.3, pp.135-136, 2006.
- [16] 信川 寿: 船舶構造の最適設計法について (退官記念誌), 広島大学工学部第四類エンジニアリングシステム教室, 2000
- [17] 信川 寿: 船体構造の最適設計に関する研究, 広島大学博士論文, 1977
- [18] 鈴木 克幸, 大坪 英臣: 多段階最適化手法による船体構造最適設計, 日本造船学会論文集, 第 178 号, pp405-411, 1995
- [19] 藤久保 昌彦, 柳原 大輔, 矢尾 哲也: 後座屈挙動を考慮した防撓パネルの最適設計に関する研究, 関西造船協会誌, 第 219 号, pp123-133, 1993
- [20] 岸 光男, 有馬 正和, 前田 朝樹: 神経回路網モデルによる船体中央横断面の離散的最適設計, 関西造船協会誌, 第 214 号, pp11-17, 1990
- [21] 岡田 哲男, 根木 勲: 遺伝的アルゴリズムによる船体構造最適設計, 日本造船学会論文集, 第 171 号, pp259-266, 1992
- [22] Kaharuddin Djenod Manyambeang: 構造初期計画における船体構造評価用ニューラル・ネットワークの構築と構造最適化に関する研究, 広島大学博士論文, 2003
- [23] 北村 充, カハルディン・ジェノド, 中森 隆一 他: 遺伝的アルゴリズムを用いた船体構造の最適設計と解の収束に関する研究, 西部造船会会報, 第 101 号, pp185-194, 2001
- [24] 松岡 和彦, カハルディン・ジェノド, 田中 義雄 他: 船殻中央横断面の Sub Optimization による構造最適化システムの研究, 西部造船会会報, 第 109 号, pp37-47, 2005
- [25] 日本機械学会: 計算力学ハンドブック (1), 日本機械学会, 1999
- [26] 新居 悟, 竹澤 晃弘, 北村 充, 小木曾 望: 統合・簡易化された線形システムの固有値解析に基づくロバストトポロジー最適化, 日本機械学会 2010 年度年次大会講演論



- 文集, pp297-298, 2010
- [27] 竹澤 晃弘, 西脇 眞二, 北村 充: フェーズフィールド法に基づく構造最適化, 日本機械学会論文集, A 編第 760 号第 75 巻, pp1784-1793, 2009
- [28] 竹澤 晃弘, 西脇 眞二, 北村 充: フェーズフィールド法と感度解析に基づく構造最適化, 日本機械学会論文集, A 編第 761 号第 76 巻, pp1-9, 2010
- [29] 細井 寛哲, 橋村 徹, 泉 耕 一郎, 中村 元, 阪本 正悟: アルミ鍛造サスペンション部材設計への最適化技術の適用, 神戸製鋼技報, 第 60 号 No. 2, 2010
- [30] 日本海事協会: 鋼船規則 CSR-B 編 ばら積貨物船のための共通構造規則, 2011
- [31] 柏村 孝義, 于 強, 白鳥 正樹, 小柳 義夫: 実験計画法による非線形問題の最適化, 朝倉書店, 1998
- [32] 熊沢逸夫: 学習とニューラルネットワーク, 森沢出版, 1998
- [33] 田辺和俊: ニューラルネットワーク入門, 日刊工業新聞社, 2003
- [34] 伊庭 斉志: 遺伝的アルゴリズムの基礎, オーム社, 1994
- [35] 古田 均, 杉本 博之: 遺伝的アルゴリズムの構造工学への応用, 森北出版, 1997
- [36] 石田 良平, 小山 修平, 村瀬 治比古: パソコンで学ぶ遺伝的アルゴリズムの基礎と応用, 森北出版, 1997
- [37] 古野 弘志, 北村 充: DOUBLE HULL TANKER の構造初期計画システムの構築 (その 3 遺伝的アルゴリズムによる重量最適化), 西部造船会会報, 第 102 号, pp381-389, 2001
- [38] 古野 弘志, 北村 充: DOUBLE HULL TANKER の構造初期計画システムの構築 (その 4 船体構造の総合的最適化), 西部造船会会報, 第 105 号, pp295-303, 2003
- [39] 平川 真一, 牧 美津栄: 遺伝的アルゴリズムによるタンカーの構造最適化, ユニバーサル造船テクニカルレビュー, 第 7 号, pp1-4, 2011
- [40] 電気学会 GA ニューロを用いた学習法とその応用調査専門委員会: 学習とそのアルゴリズム, 森北出版, 2002
- [41] 関西造船協会: 造船設計便覧, 海文堂, 1983



# 付録 1

## PSH を利用した独立要素分割モデルの作成

### 1. PSH を利用した独立要素分割モデルの作成について

本文 5 章で述べた独立要素分割を利用した船体モデルの作成には多大な時間がかかり、実船舶を扱う設計現場で使用する事は時間的制約から難しい。そこで本文 5 章にて通常の有限要素モデルを独立要素分割モデルへと変更するシステムを提案した。本章では、より具体的に独立要素分割モデル生成システムについて述べる。

### 2. PSH について

本文 1.3 節で説明した通り、本研究では形状最適化用モデル作成支援システムに PSH を利用する。PSH とは、ばら積み貨物船と二重船殻油タンカーに特化した構造解析評価ツールである。特徴として

1. FEM モデリングソフトウェアである MSC.Patran をプラットフォームとしている
2. 造船 CAD システムや汎用 CAE ソフトとの連携が可能である
3. 荷重条件負荷のための区画・部材の自動認識・名称設定機能を有する
4. CSR(Common Structure Rules) による荷重条件付与・強度評価を行う
5. 結果レポート作成機能を有する

の 5 点が挙げられる。<sup>[12]</sup>

特に 1 番目・2 番目及び 4 番目で挙げた特徴の通り、通常的设计業務で使用されているソフトウェアを利用可能であり、さらに CSR による評価を行う事が可能であるため、さまざま

まな造船会社で利用されている。

### 3. PSH の利用

#### 3.1 部材認識

PSH は CSR 評価基準による強度評価を行うため、さまざまな荷重条件を付与する必要がある。荷重を負荷する為には、どの要素が船体のどの部分にあたるか、またモデル内のどの部分が荷重を受け持つかを判断する必要がある。そのため PSH はそれぞれの区画及び部材を自動的に認識する機能を備えている。

部材認識を行うために必要な各種船体の寸法を Fig. appendix-1-1 に、これらの値の入力画面を Fig. appendix-1-2 にそれぞれ示す。部材認識を行うためには Fig. appendix-1-1 に示した数値の他に、Fig. appendix-1-3 の Dim.1 ~ Dim.14 に示す断面の寸法や、Fig. appendix-1-4 に示すロアツール寸法、カーゴホールド番号、フレーム番号などの入力が必要である。

#### 3.2 部材名付加

部材の認識を行う際に、設計者に分かりやすい様に部材を分別する事が望まれる。そのため PSH は部材の認識機能に加え、自動的に部材の名称を付与する機能が備えられている。PSH で生成される部材名の一覧は本文の Table 5-6-1 に示した。

前節で述べた部材認識と本節で述べた部材名付加機能は、通常的设计作業における PSH

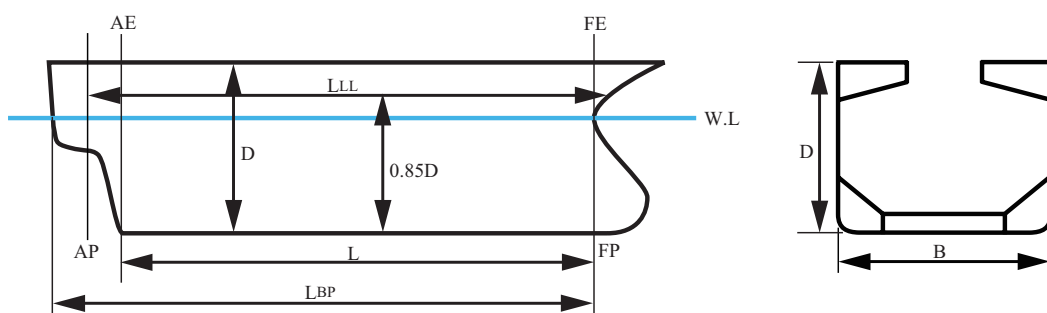


Fig. appendix-1-1

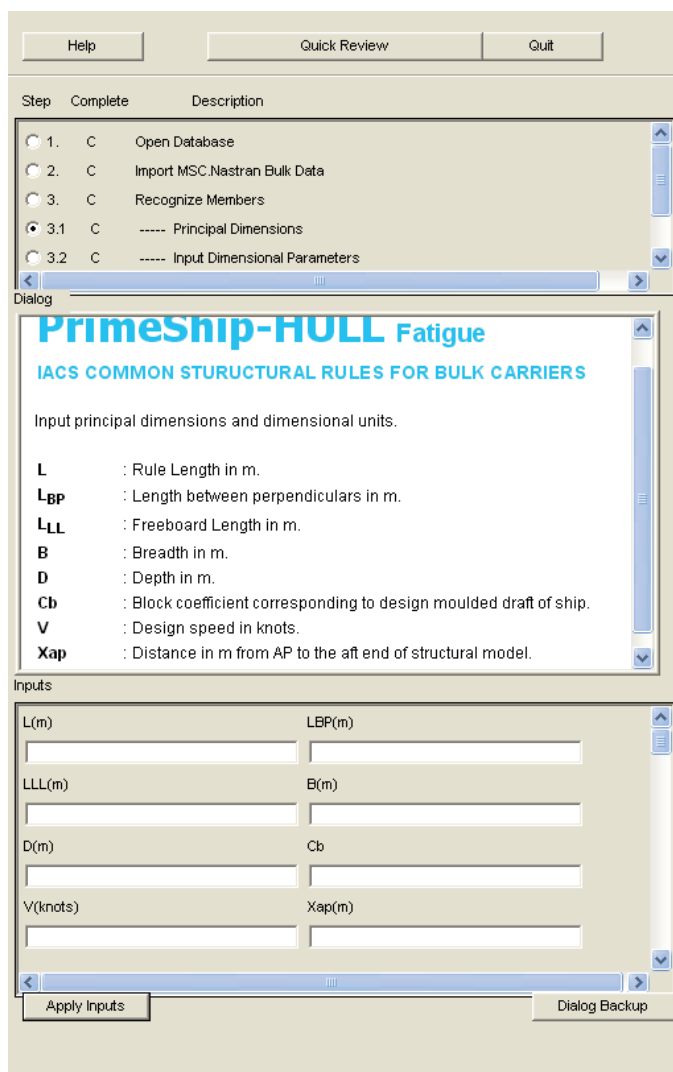


Fig. appendix-1-2

の使用において必ず使用する機能である。そのため、設計者に新たな作業を課すものではなく、作業者の作業負担は変わらないという利点がある。

#### 4. 独立要素分割モデルの生成

独立要素分割モデル生成の手法説明は本文 5 章にて述べた。本節では Fig. appendix-1-5 から Fig. appendix-1-24 に、PSH 分割の様子と PSH 分割を利用して実際に生成した独立要素分

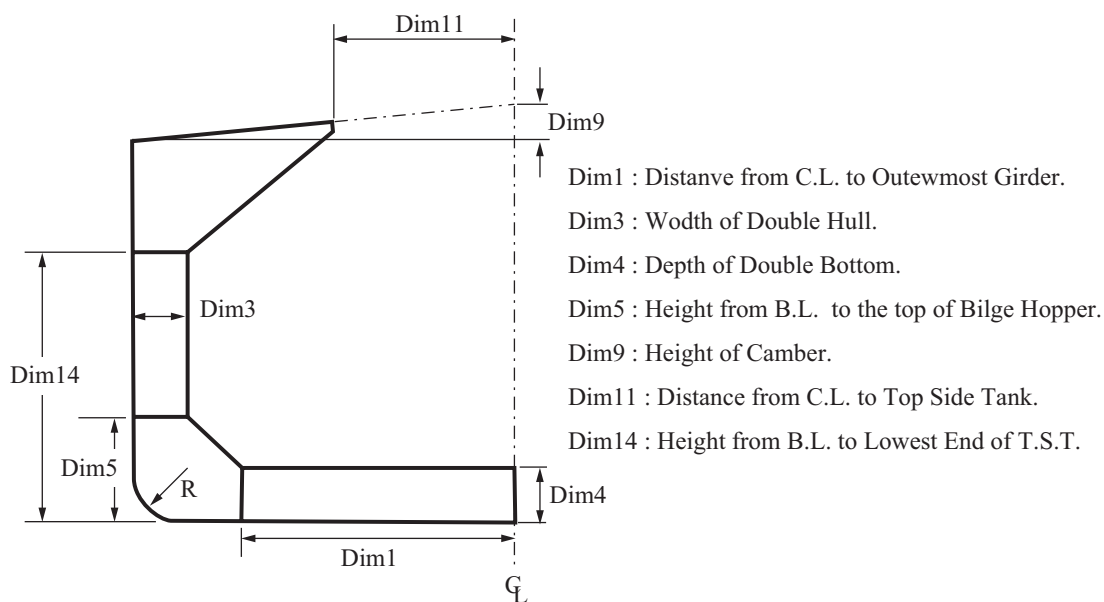


Fig. appendix-1-3

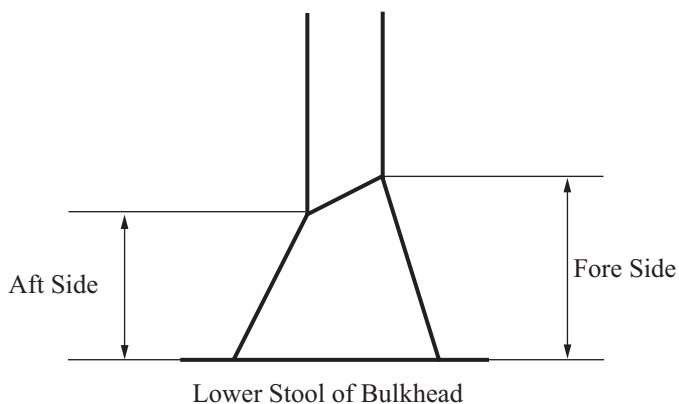


Fig. appendix-1-4

割の様子を、各部材グループ事に示す。またこれらの一覧を Table appendix-3 に示す。

独立要素分割グループ作成における主な方針は、船体長さ方向において、ロアスツール部分の形状設計変数の変更に対応する為、ロアスツール部分とホールド部分の分割を行っている事、また、船体高さ方向において、二重底高さ及びビルジホップタンク高さの設計変数に対応するため、SIDESHELL 等の分割を行っている事である。さらに 5 章で述べた通り、

INNBTMPLATE が P 及び S に分割されている様な、形状変更には必要としない PSH 分割は統合し、一つのグループとして取り扱う事としている。他方、形状設計変数の変更で特に分割・統合する必要の無い PSH 分割グループは、PSH グループのまま利用している。

各グループの名称は、設計者及び形状変更プログラムで扱いやすい様に変更した。名称付けの方針は、独立要素分割グループ作成における方針と同様に、ロアツール部分とホールド部分のに分かれたグループには、名称として「LS」や「HD」を付加した。またガーダー部分等では、板厚設計変数の位置を考慮し、センターラインを中心に対称に名称を付加した。

Table appendix-3-1 PSH Division and Individual Submesh Division

PSH Division		Individual Submesh Division	
BLGTRANS_*1_P/S	*1 : Frame number	BLGTRANS_HD_*1_P/S_*2	*1 : HOLD number
		BLGTRANS_LS_*1_P/S_*2	*2 : Individual number
BTMGIRDER_*1_C/P/S	*1 : Order from centerline	BTMGIRDER_HD_*1_*2	*1 : HOLD number
		BTMGIRDER_LS_*1_*2	*2 : Individual number
FLOOR_*1_C/P/S	*1 : Frame number	FLOOR_HD_*1_*2	*1 : HOLD number
		FLOOR_LS_*1_*2	*2 : Individual number
Innbtmshell_P		INNBTMPLATE_HD_*1	*1 : HOLD number
Innbtmshell_S		INNBTMPLATE_LS_*1	*1 : HOLD number
BLGHOPPER P/S		BLGHOPPER_HD_*1_P/S	*1 : HOLD number
		BLGHOPPER_LS_*1_P/S	*1 : HOLD number
		BLGHOPPER_LSSIDE_*1_P/S	*1 : HOLD number
BLGSHELL_P/S		BLGSHELL_HD_*1_*2	*1 : HOLD number
		BLGSHELL_LS_*1_*2	*2 : Individual number
BHDPLATE_P_*1	*1 : HOLD number	BHD_*1	*1 : HOLD number
BHDPLATE_S_*1	*1 : HOLD number		*2 : Individual number
BLGHOPPER P/S		SIDESHELL_HD_TOP/BTM_*1_P/S	*1 : HOLD number
		SIDESHELL_HD_MID_*1_P/S	*1 : HOLD number
		SIDESHELL_LS_TOP/BTM_*1_P/S	*1 : HOLD number
		SIDESHELL_LS_MID_*1_P/S	*1 : HOLD number

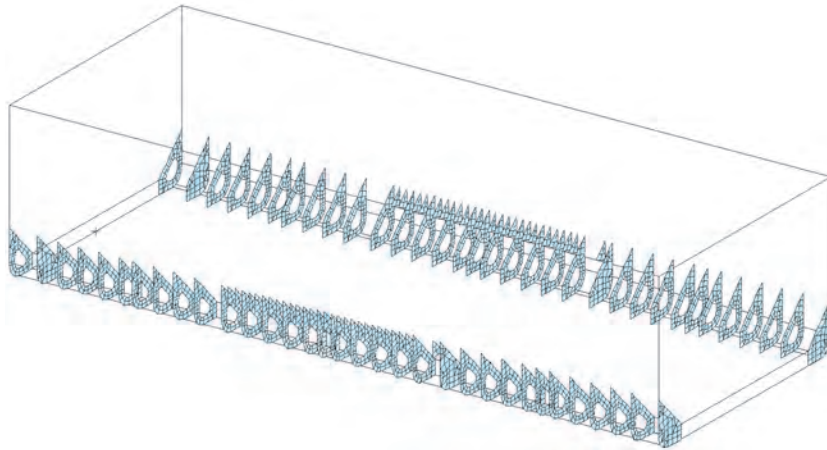


Table appendix-3-2 PSH Division and Individual Submesh Division

PSH Division		Individual Submesh Division	
TSTTRANS_*1_P/S	*1 : Frame number	TSTTRANS_HD_*1_P/S_*2	*1 : HOLD number *2 : Individual number
		TSTTRANS_LS_*1_P/S_*2	*1 : HOLD number *2 : Individual number
TSTPLATE_P/S		TSTPLATE_HD_*1_P/S	*1 : HOLD number
		TSTPLATE_LS_*1_P/S	*1 : HOLD number
DECKPLATE_P/S		DECKPLATE_HD_*1_P/S	*1 : HOLD number
		DECKPLATE_LS_*1_P/S	*1 : HOLD number
CROSSDECK_P/S		CROSSDECK_HD_*1	*1 : HOLD number
		CROSSDECK_LS_*1	*1 : HOLD number
DECKGIRDER_*1_C/P/S	*1 : Order from centerline	DECKGIRDER_HD_*1_P/S_*2	*1 : HOLD number *2 : Individual number
		DECKGIRDER_LS_*1_P/S_*2	*1 : HOLD number *2 : Individual number
LSTOOLPLATE_AFT_*1_P	*1 : Frame number	LSTOOL_AFT_*1_C	*1 : HOLD number
		LSTOOL_AFT_*1_P/S	*1 : HOLD number
LSTOOLPLATE_FORE_*1_P	*1 : Frame number	LSTOOL_FORE_*1_C	*1 : HOLD number
		LSTOOL_FORE_*1_P/S	*1 : HOLD number
LSTOOLPLATE_TOP_*1_P	*1 : Frame number	LSTOOL_FORE_*1_C	*1 : HOLD number
		LSTOOL_FORE_*1_P/S	*1 : HOLD number
HOLDFRAME_*1_P/S	*1 : Frame number	HOLDFRAME_HD_*1_P/S_*2	*1 : HOLD number *2 : Individual number
		HOLDFRAME_LS_*1_P/S_*2	*1 : HOLD number *2 : Individual number

Table appendix-3-3 PSH Division and Individual Submesh Division

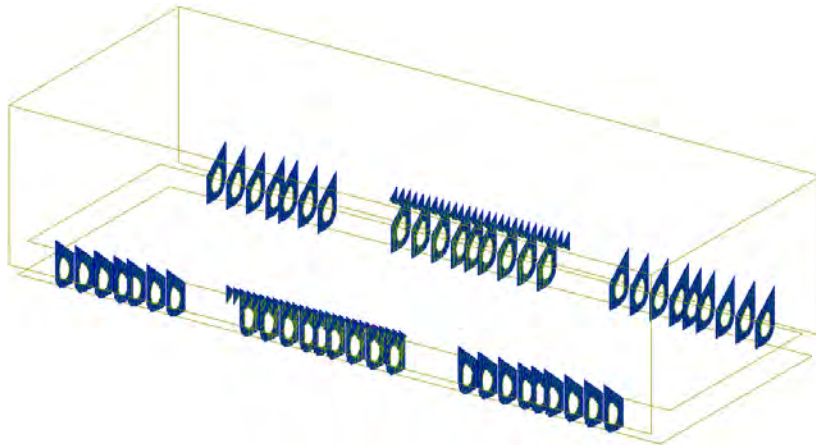
PSH Division		Individual Submesh Division		
LSTOOLWEB_*1_*2_C/P/S	*1 : Frame number	LSTOOLWEB_HD_*1_C/P/S_*2	*1 : HOLD number	*2 : Individual number
	*2 : Individual number	LSTOOLWEB_LS_*1_P/S_*2	*1 : HOLD number	*2 : Individual number
USTOOLWEB_*1_*2_C/P/S	*1 : Frame number	USTOOLWEB_*1_*2	*1 : HOLD number	*2 : Individual number
	*2 : Order from centerline			
LSTOOLPLATE_AFT_*1_P/S	*1 : Frame number	LSTOOLPLATE_*1_AFT	*1 : HOLD number	
LSTOOLPLATE_FORE_*1_P/S	*1 : Frame number	LSTOOLPLATE_*1_FORE	*1 : HOLD number	
LSTOOLPLATE_TOP_*1_P/S	*1 : Frame number	LSTOOLPLATE_*1_TOP	*1 : HOLD number	
HENDCOAM_*1_P/S	*1 : Frame number	HENDCOAM_HD_*1_*2	*1 : HOLD number	*2 : Individual number
HSECOAM_P/S		HSECOAM_HD_*1_P/S	*1 : HOLD number	



BLGTRANS\_\*1\_P/S

\*1 : Frame number

a) PSH Division

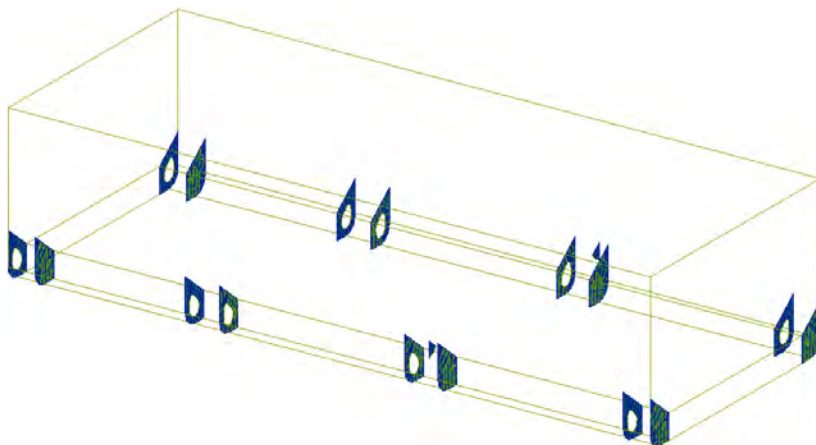


BLGTRANS\_HD\_\*1\_P/S\_\*2

\*1 : HOLD number

\*2 : Individual number

b) Individual Submesh Division-1



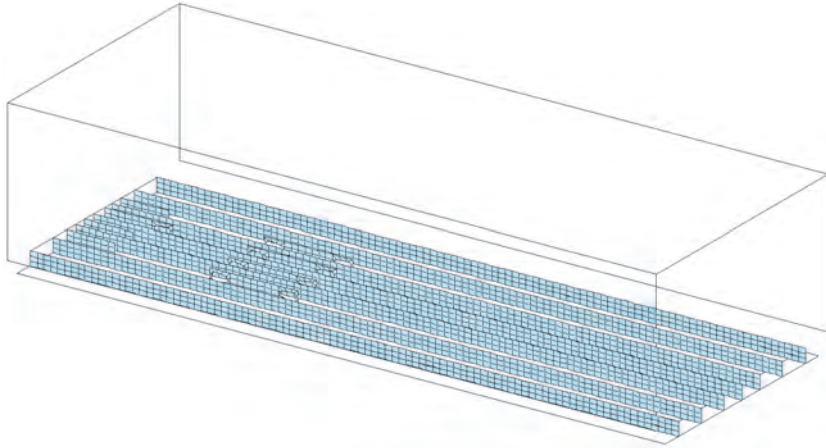
BLGTRANS\_LS\_\*1\_P/S\_\*2

\*1 : HOLD number

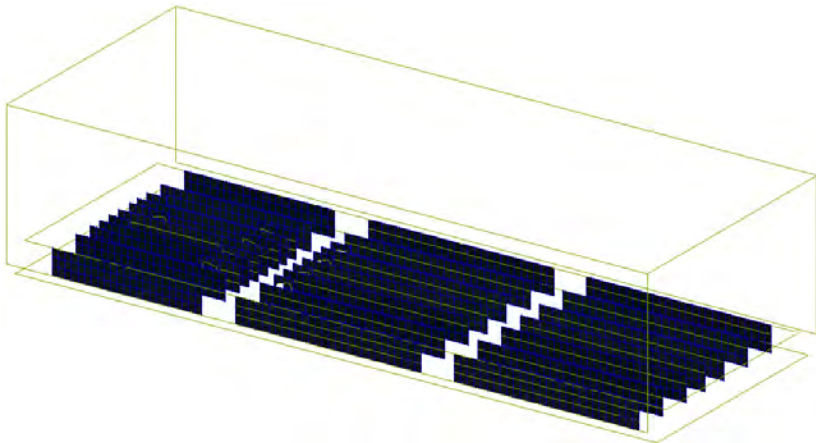
\*2 : Individual number

c) Individual Submesh Division-2

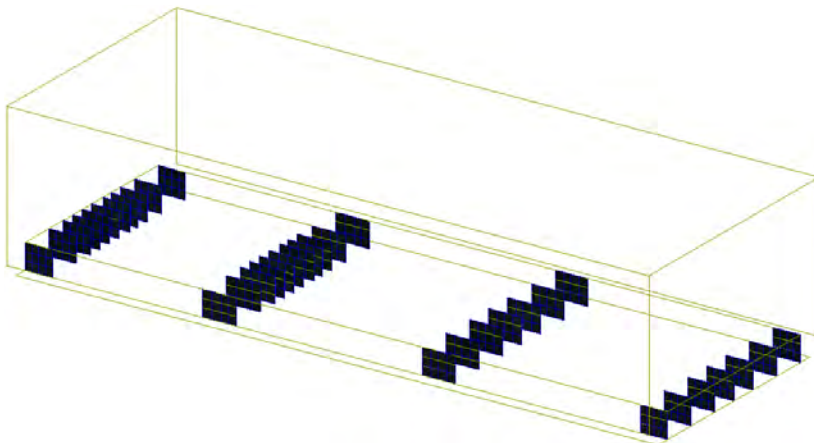
Fig. appendix-1-5 BLGTRANS Division



BTMGIRDER\_\*1\_C/P/S                    \*1 : Order from centerline  
a ) PSH Division

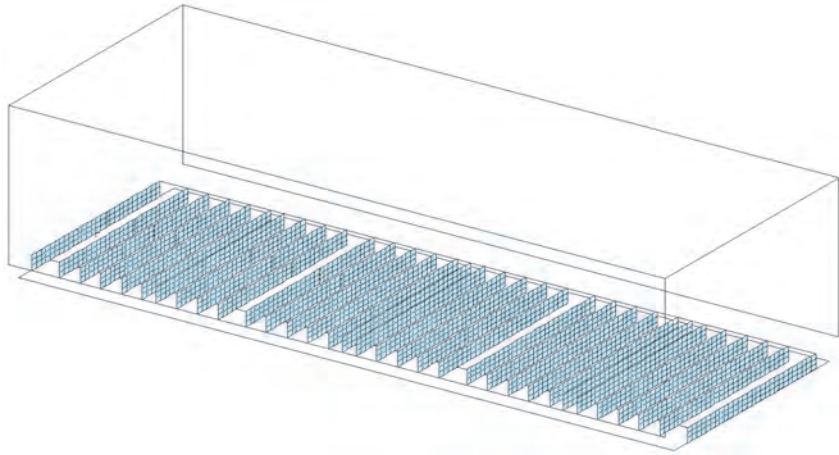


BTMGIRDER\_HD\_\*1\_\*2                  \*1 : HOLD number  
    \*2 : Individual number  
b ) Individual Submesh Division-1

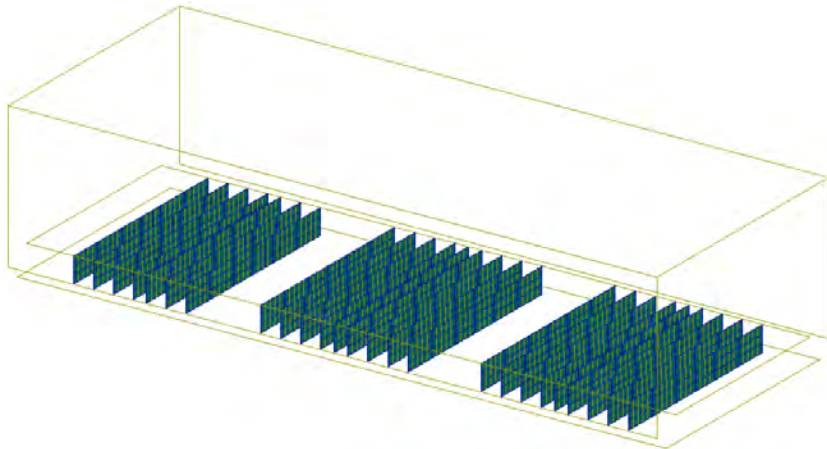


BTMGIRDER\_LS\_\*1\_\*2                  \*1 : HOLD number  
    \*2 : Individual number  
c ) Individual Submesh Division-2

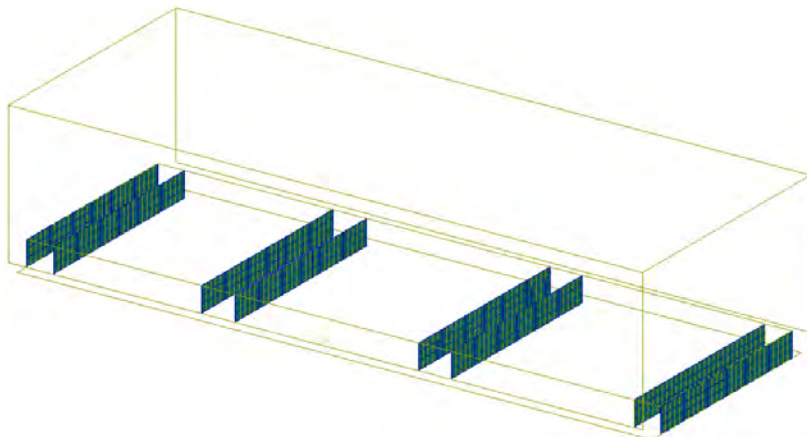
Fig. appendix-1-6 BTMGIRDER Division



FLOOR\_\*1\_C/P/S                      \*1 : Frame number  
 a) PSH Division

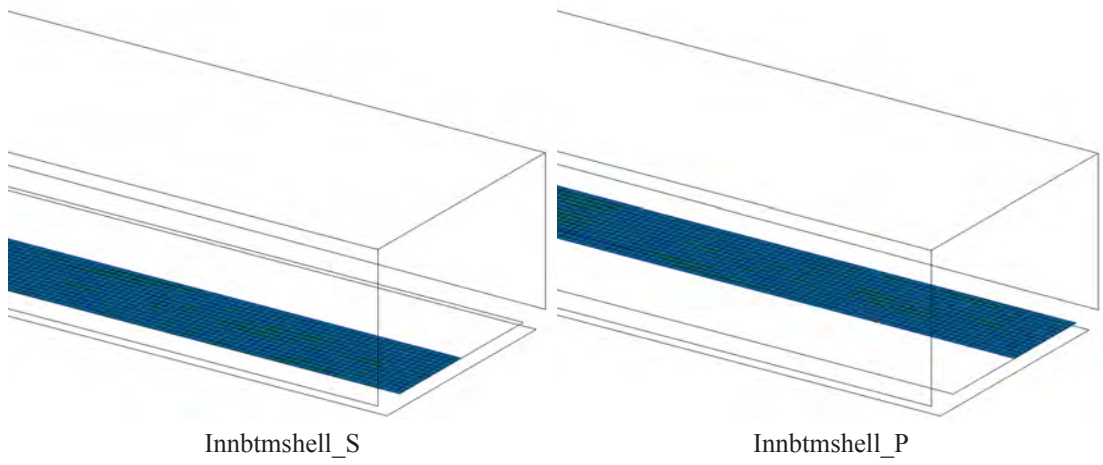


FLOOR\_HD\_\*1\_\*2                      \*1 : HOLD number  
    \*2 : Individual number  
 b) Individual Submesh Division-1

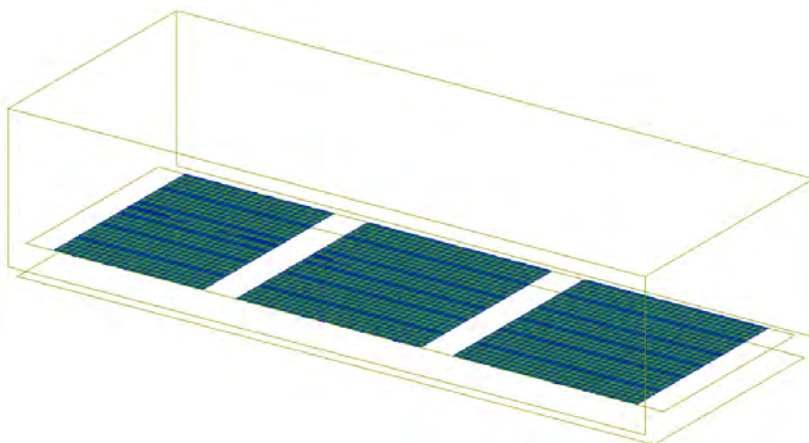


FLOOR\_LS\_\*1\_\*2                      \*1 : HOLD number  
    \*2 : Individual number  
 c) Individual Submesh Division-2

Fig. appendix-1-7 FLOOR Division

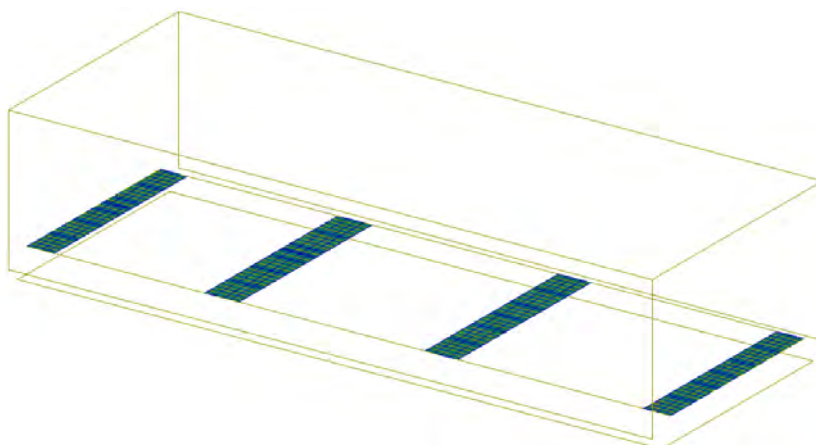


a) PSH Division



INNBTMPLATE\_HD\_\*1      \*1 : HOLD number

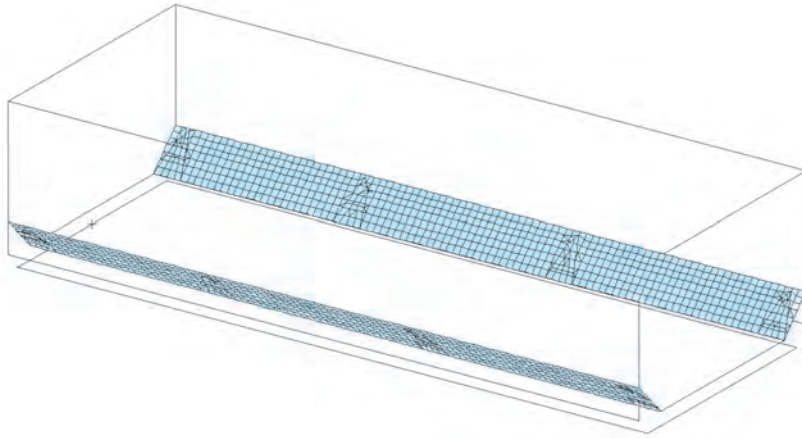
b) Individual Submesh Division-1



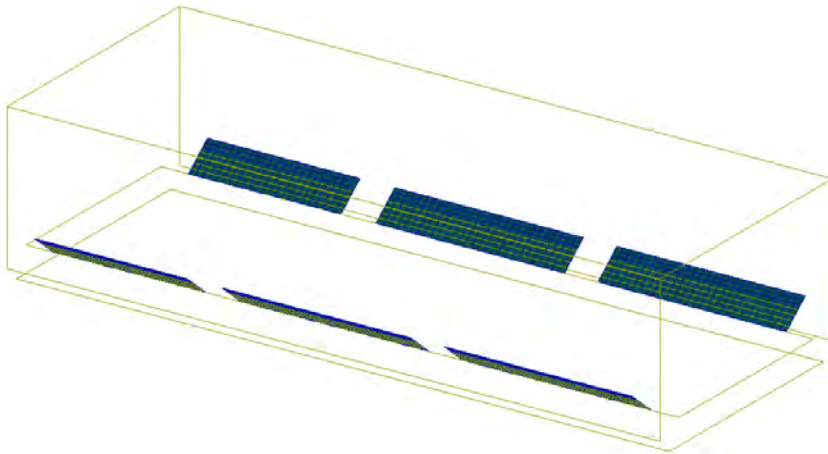
INNBTMPLATE\_LS\_\*1      \*1 : HOLD number

c) Individual Submesh Division-2

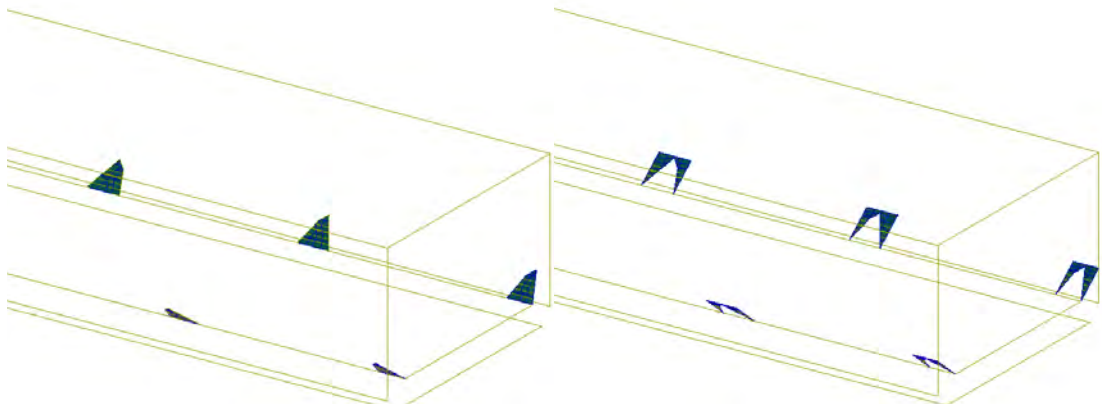
Fig. appendix-1-8 INNBTMPLATE Division



BLGHOPPER P/S  
a ) PSH Division



BLGHOPPER\_HD\_\*1\_P/S                      \*1 : HOLD number  
b ) Individual Submesh Division-1



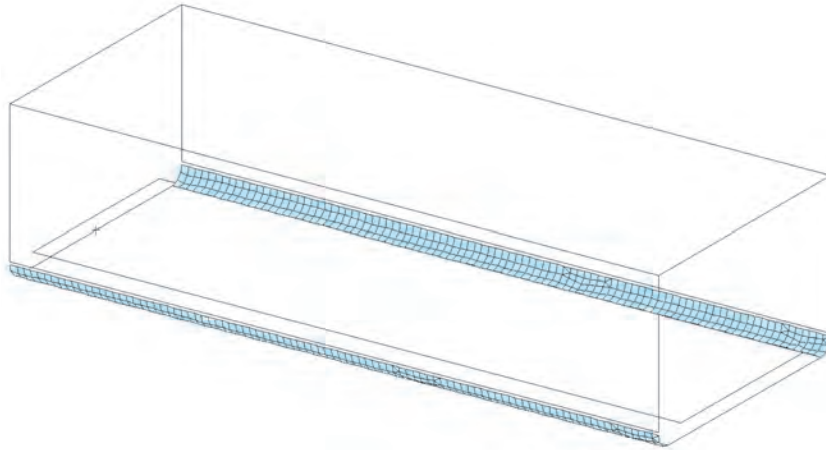
BLGHOPPER\_LS\_\*1\_P/S

BLGHOPPER\_LSSIDE\_\*1\_P/S

\*1 : HOLD number

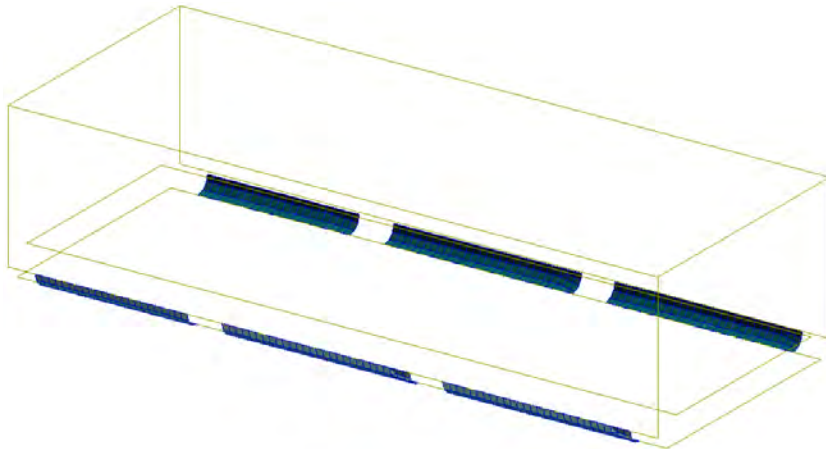
c ) Individual Submesh Division-2

Fig. appendix-1-9 BLGHOPPER Division



BLGSHELL\_P/S

a ) PSH Division

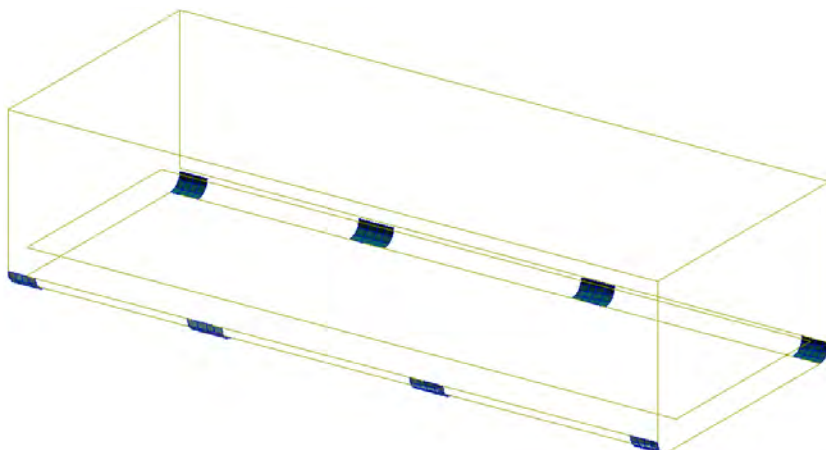


BLGSHELL\_HD\_\*1\_\*2

\*1 : HOLD number

\*2 : Individual number

b ) Individual Submesh Division-1



BLGSHELL\_LS\_\*1\_\*2

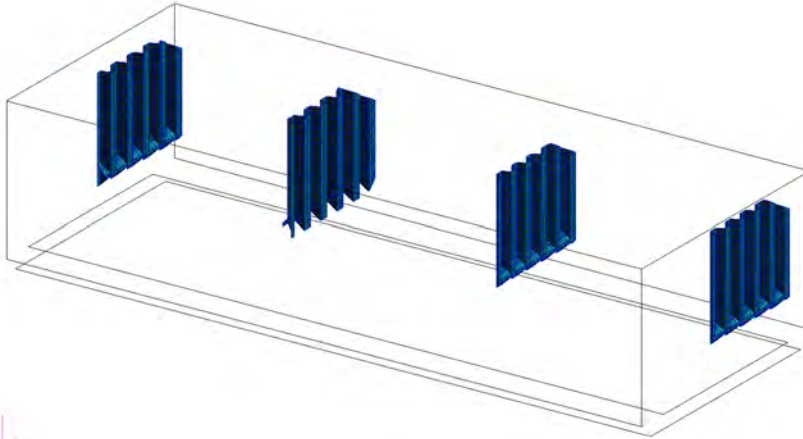
\*1 : HOLD number

\*2 : Individual number

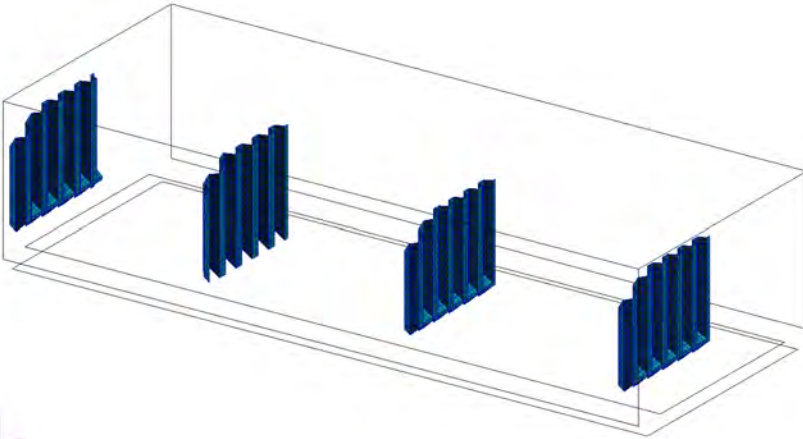
c ) Individual Submesh Division-2

Fig. appendix-1-10 BLGSHELL Division

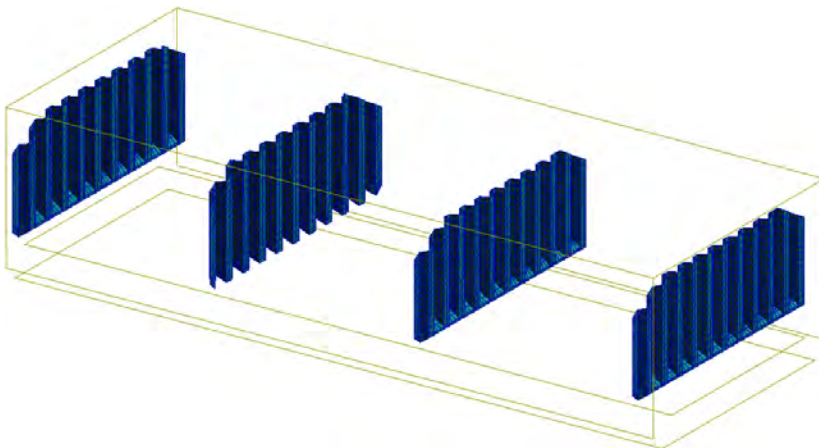




BHDPLATE\_P \*1 : HOLD number  
 a ) PSH Division-1

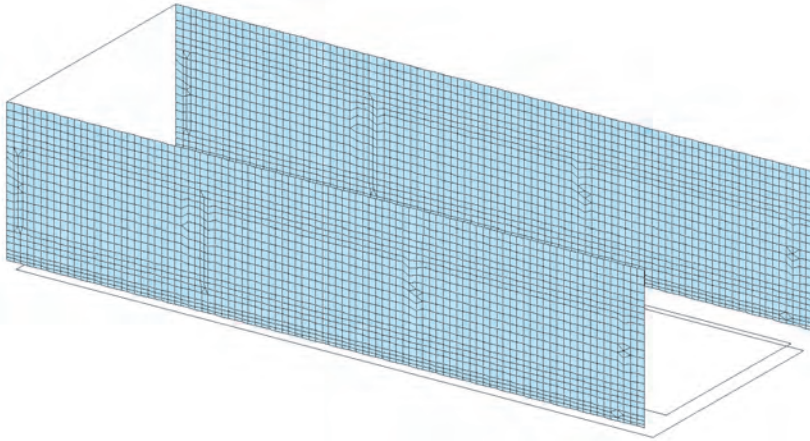


BHDPLATE\_S\_\*1 \*1 : HOLD number  
 b ) PSH Division-2

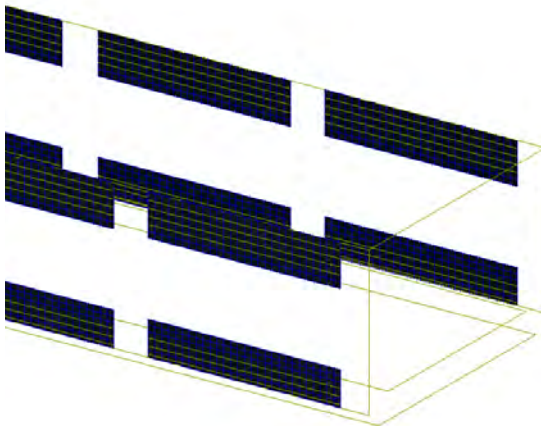


BHD\_\*1 \*1 : HOLD number  
 c ) Individual Submesh Division

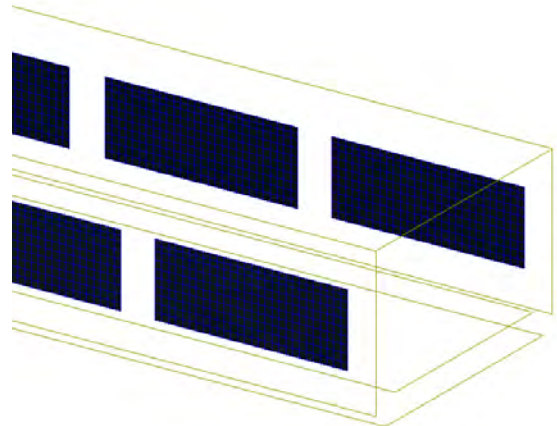
Fig. appendix-1-11 INNBTMPLATE Division



BLGHOPPER P/S  
a ) PSH Division



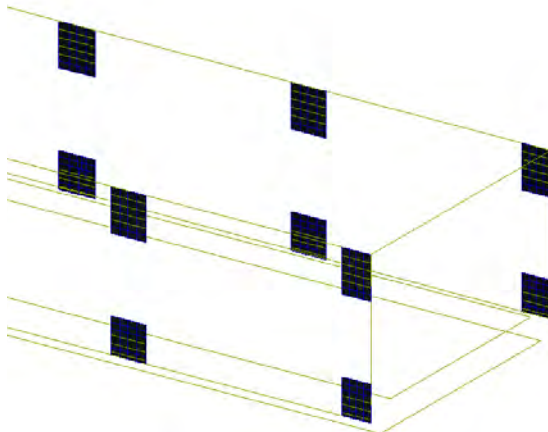
SIDESHELL\_HD\_TOP/BTM\_\*1\_P/S



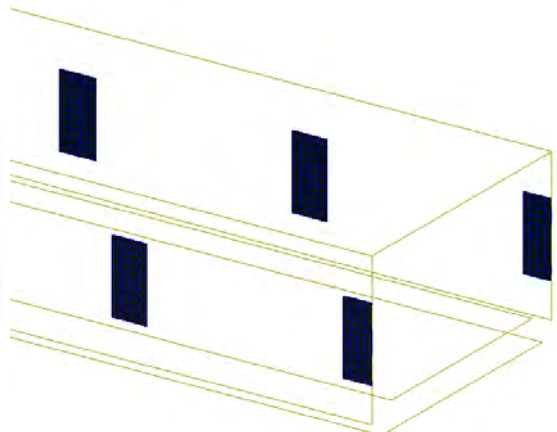
SIDESHELL\_HD\_MID\_\*1\_P/S

b ) Individual Submesh Division-1

\*1 : HOLD number



SIDESHELL\_LS\_TOP/BTM\_\*1\_P/S

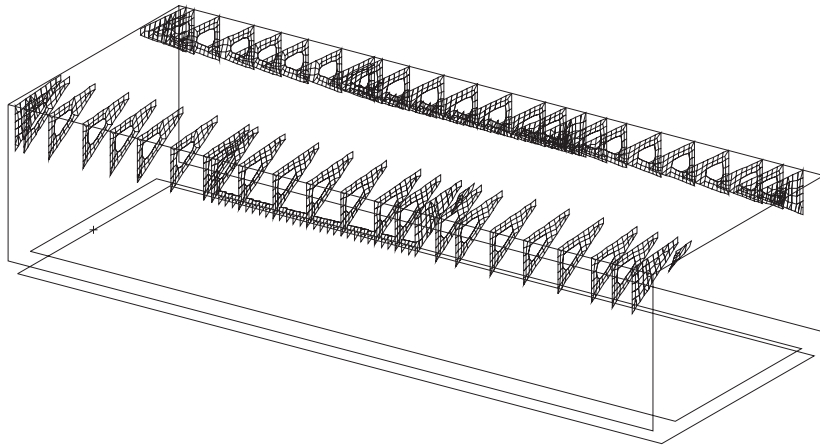


SIDESHELL\_LS\_MID\_\*1\_P/S

c ) Individual Submesh Division-2

\*1 : HOLD number

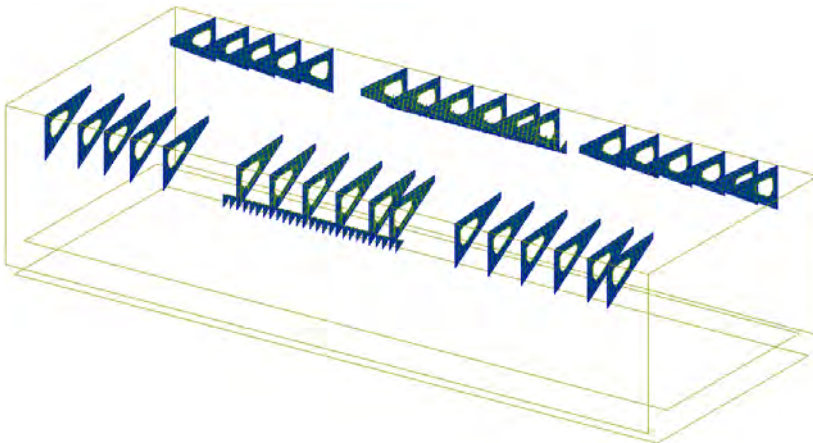
Fig. appendix-1-12 SIDESHELL Division



TSTTRANS\_\*1\_P/S

\*1 : Frame number

a) PSH Division

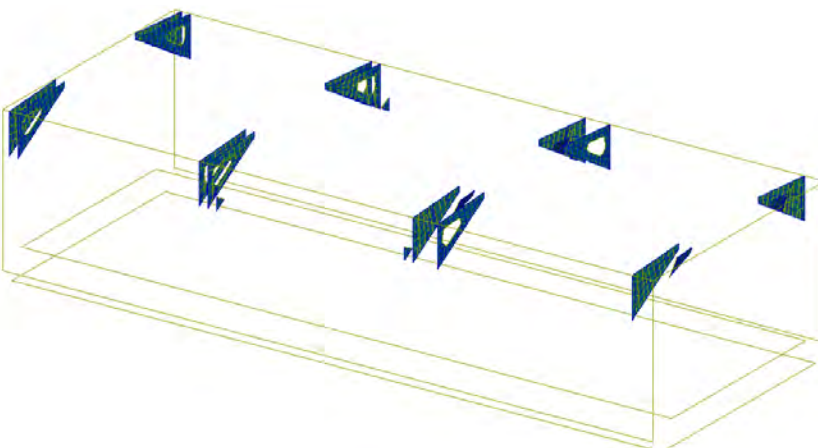


TSTTRANS\_HD\_\*1\_P/S\_\*2

\*1 : HOLD number

\*2 : Individual number

b) Individual Submesh Division-1



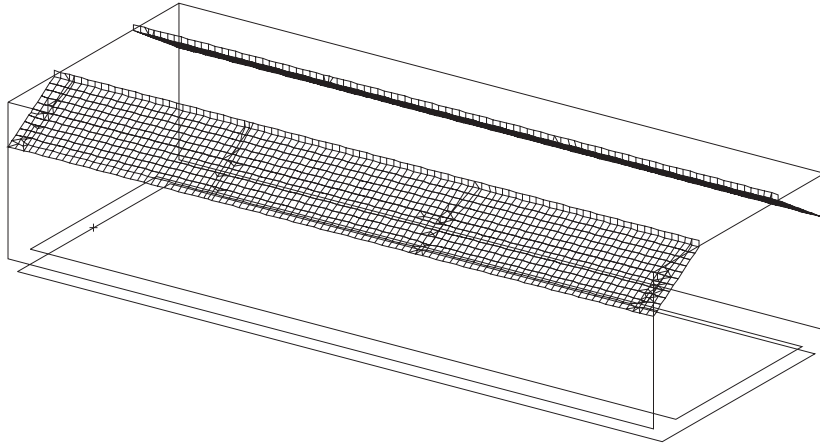
TSTTRANS\_LS\_\*1\_P/S\_\*2

\*1 : HOLD number

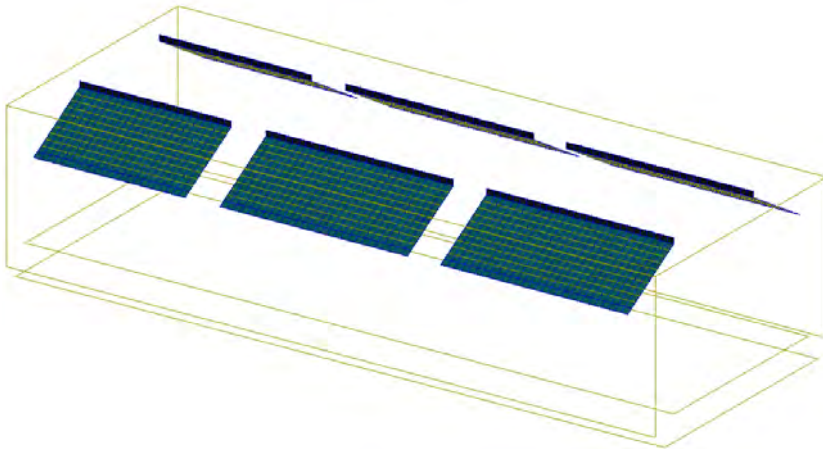
\*2 : Individual number

c) Individual Submesh Division-2

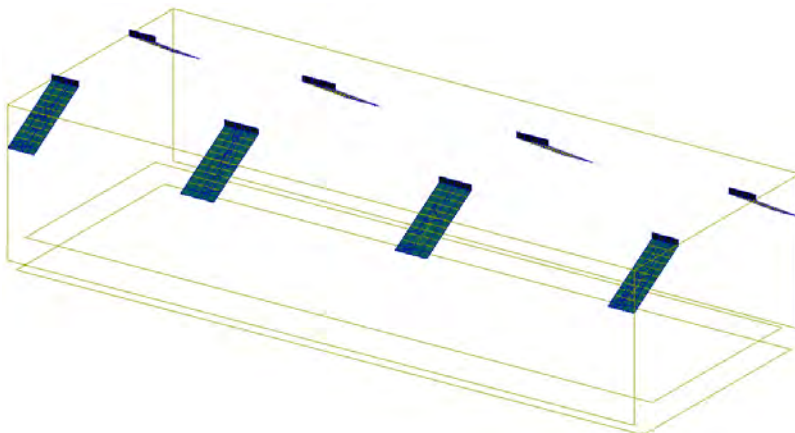
Fig. appendix-1-13 TSTTRANS Division



TSTPLATE\_P/S  
a ) PSH Division

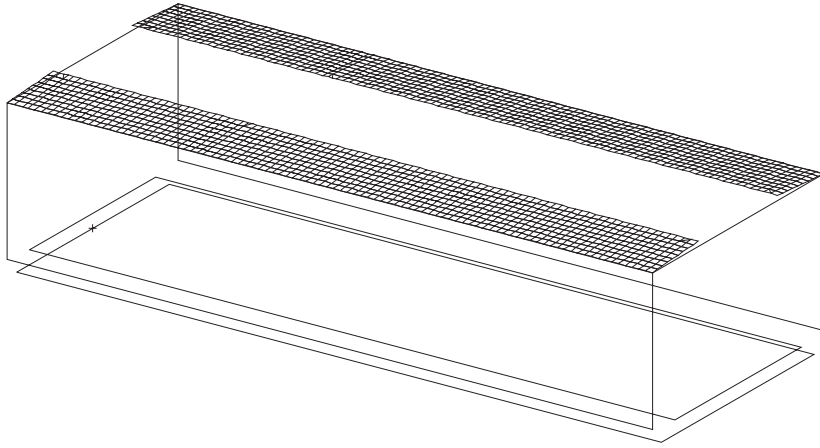


TSTPLATE\_HD\_\*1\_P/S                      \*1 : HOLD number  
b ) Individual Submesh Division-1

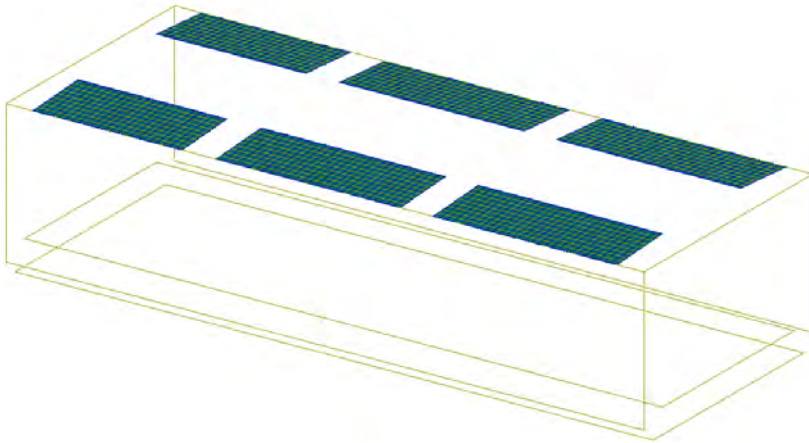


TSTPLATE\_LS\_\*1\_P/S                      \*1 : HOLD number  
c ) Individual Submesh Division-2

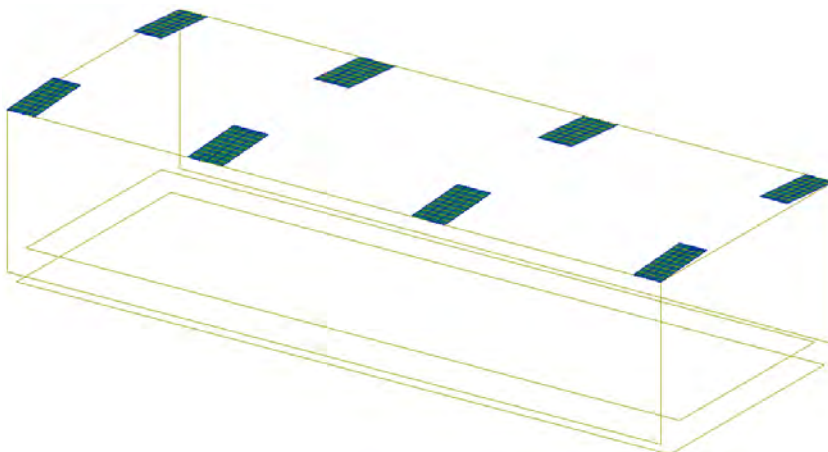
Fig. appendix-1-14 TSTTRANS Division



DECKPLATE\_P/S  
a ) PSH Division

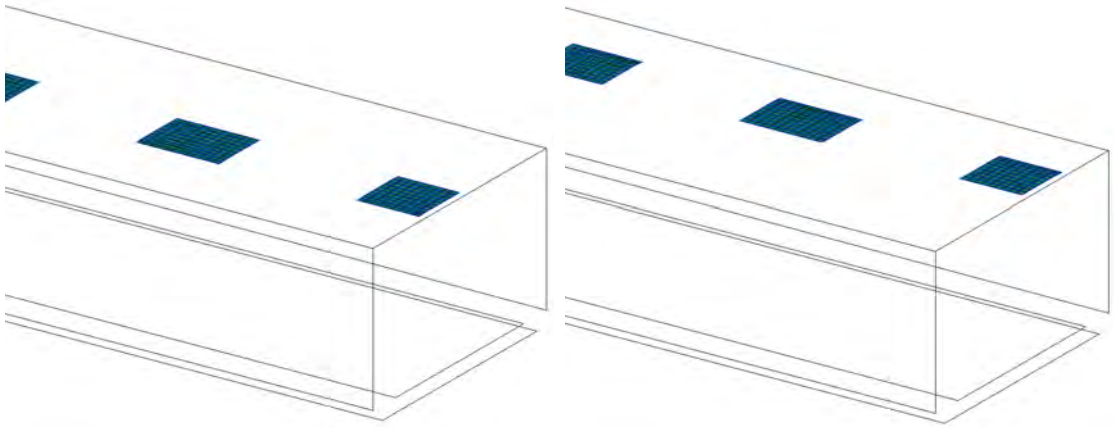


DECKPLATE\_HD\_\*1\_P/S      \*1 : HOLD number  
b ) Individual Submesh Division-1



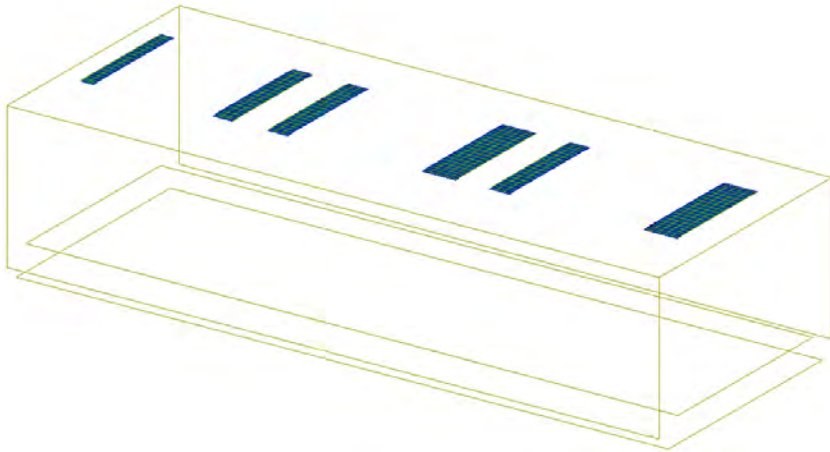
DECKPLATE\_LS\_\*1\_P/S      \*1 : HOLD number  
c ) Individual Submesh Division-2

Fig. appendix-1-15 DECKPLATE Division



CROSSDECK\_P / S

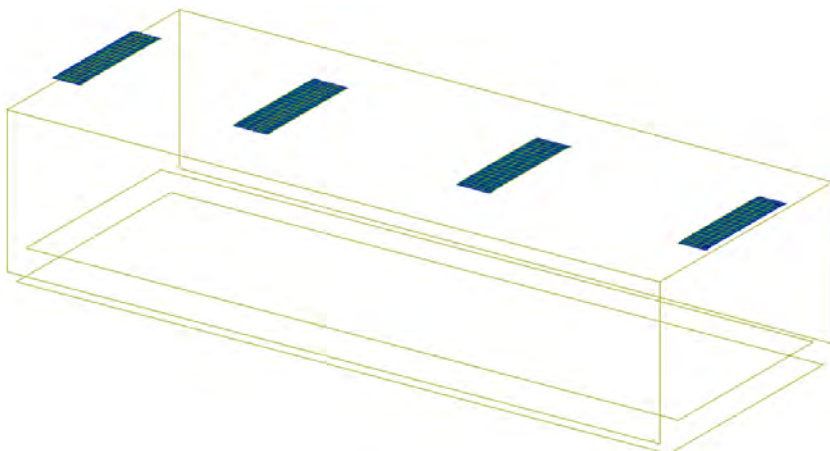
a) PSH Division



CROSSDECK\_HD\_\*1

\*1 : HOLD number

b) Individual Submesh Division-1

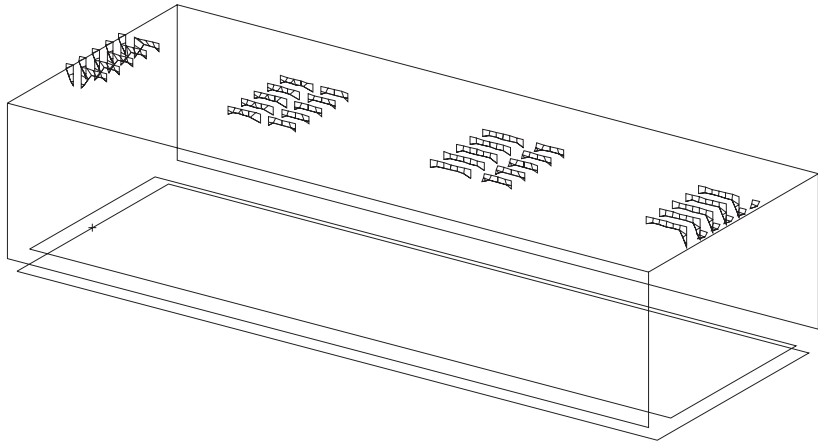


CROSSDECK\_LS\_\*1

\*1 : HOLD number

c) Individual Submesh Division-2

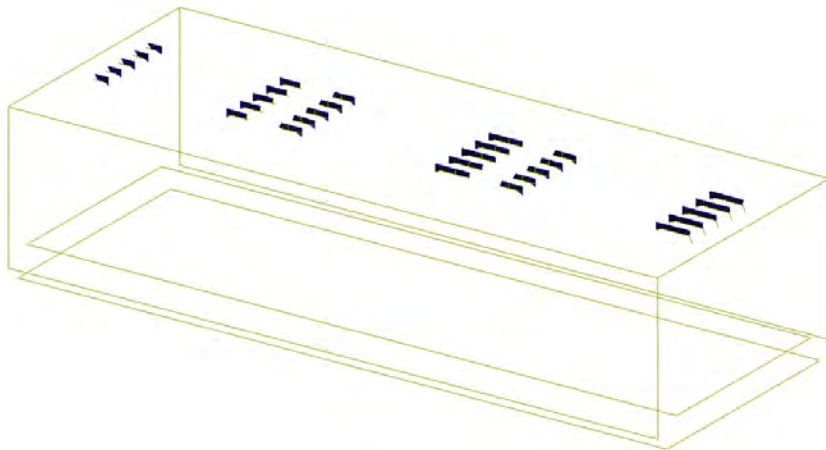
Fig. appendix-1-16 CROSSDECK Division



DECKGIRDER\_\*1\_C/P/S

\*1 : Order from centerline

a) PSH Division

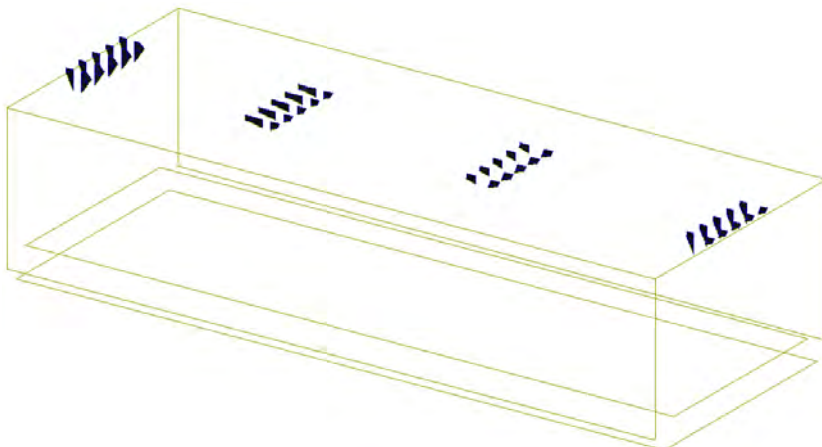


DECKGIRDER\_HD\_\*1\_P/S\_\*2

\*1 : HOLD number

\*2 : Individual number

b) Individual Submesh Division-1



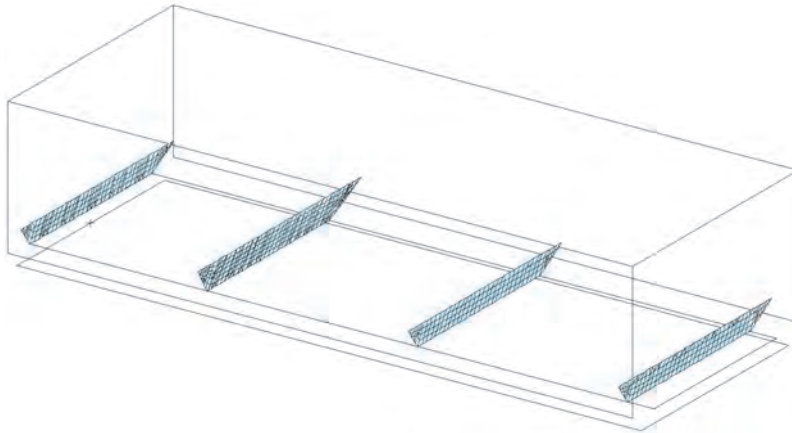
DECKGIRDER\_LS\_\*1\_P/S\_\*2

\*1 : HOLD number

\*2 : Individual number

c) Individual Submesh Division-2

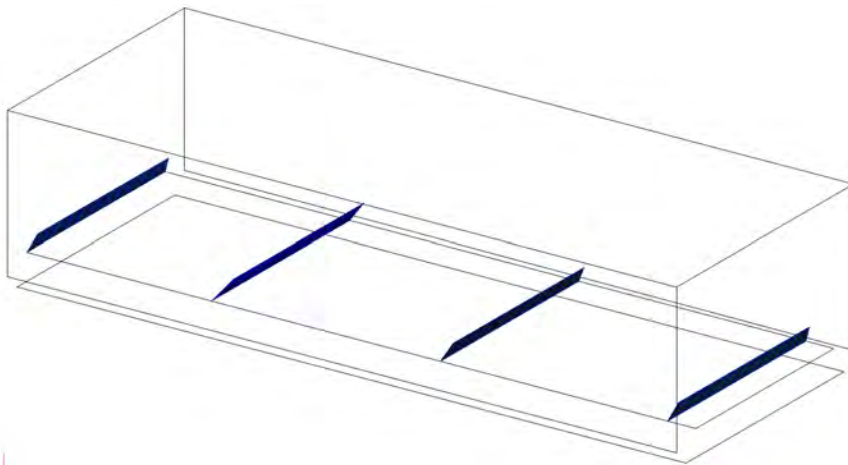
Fig. appendix-1-17 TSTTRANS Division



LSTOOLPLATE\_AFT\_\*1\_P

\*1 : Frame number

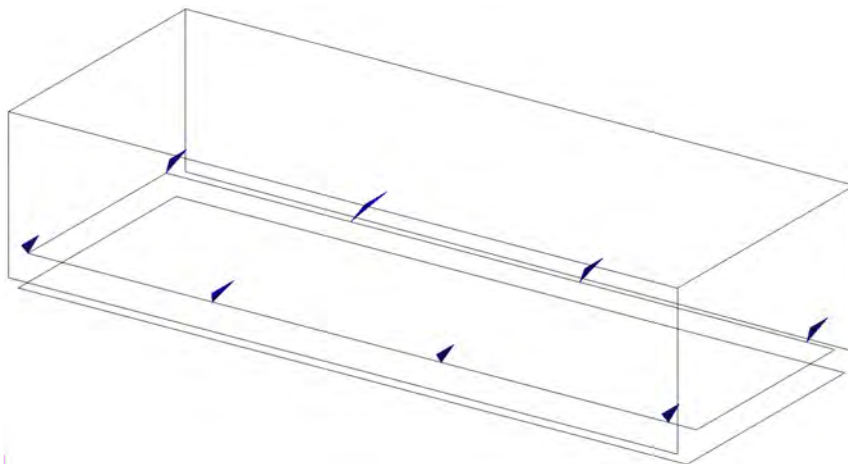
a) PSH Division



LSTOOL\_AFT\_\*1\_C

b) Individual Submesh Division-1

\*1 : HOLD number



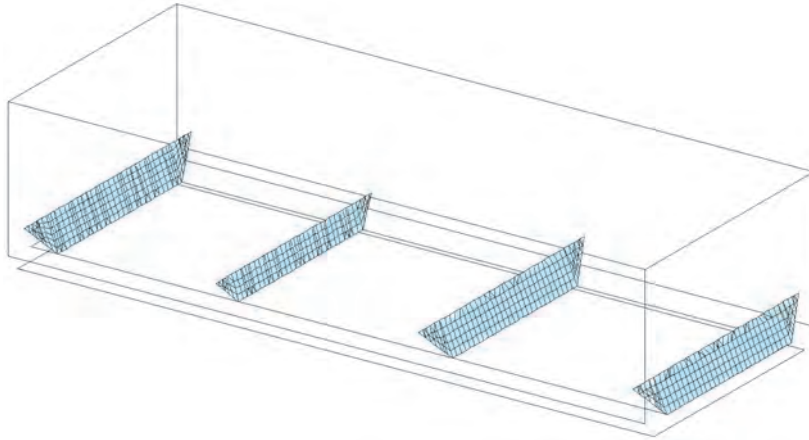
LSTOOL\_AFT\_\*1\_P/S

c) Individual Submesh Division-2

\*1 : HOLD number

Fig. appendix-1-18 LSTOOLPLATE\_AFT Division

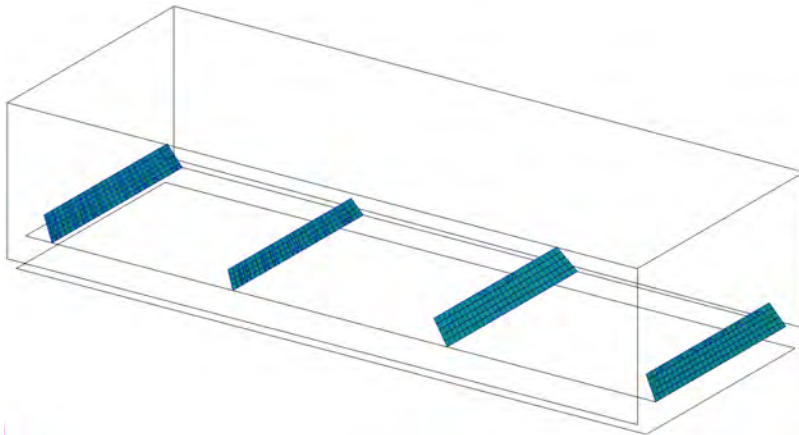




LSTOOLPLATE\_FORE\_\*1\_P

\*1 : Frame number

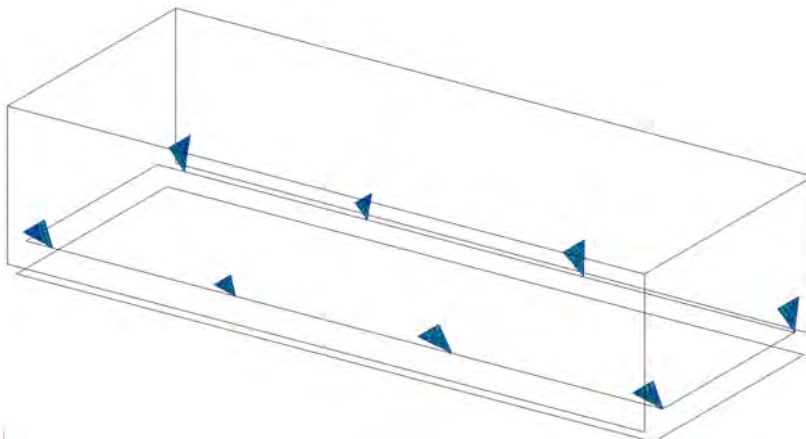
a) PSH Division



LSTOOL\_FORE\_\*1\_C

b) Individual Submesh Division-1

\*1 : HOLD number

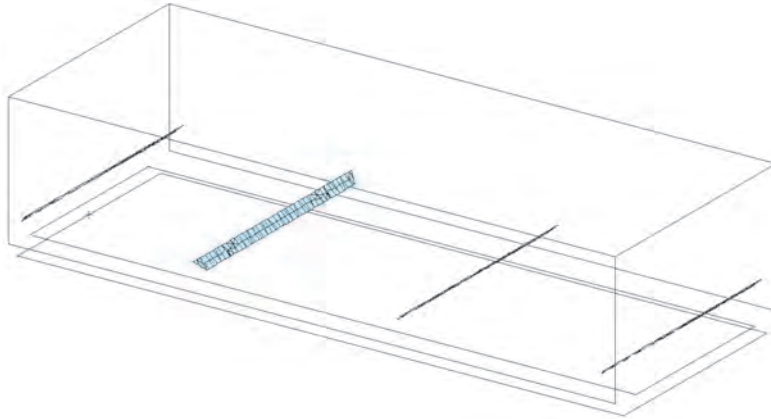


LSTOOL\_FORE\_\*1\_P/S

c) Individual Submesh Division-2

\*1 : HOLD number

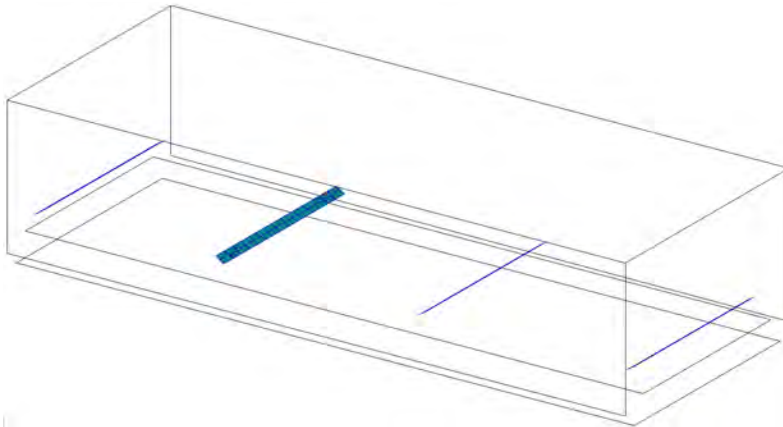
Fig. appendix-1-19 LSTOOLPLATE\_FORE Division



LSTOOLPLATE\_TOP\_\*1\_P

\*1 : Frame number

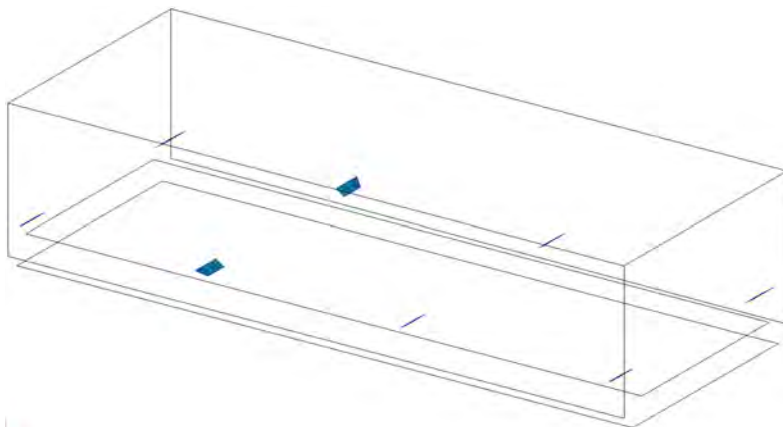
a) PSH Division



LSTOOL\_FORE\_\*1\_C

b) Individual Submesh Division-1

\*1 : HOLD number

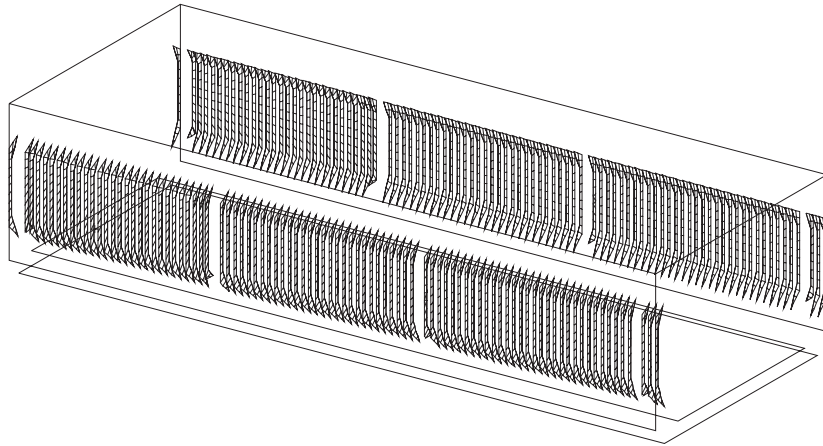


LSTOOL\_FORE\_\*1\_P/S

c) Individual Submesh Division-2

\*1 : HOLD number

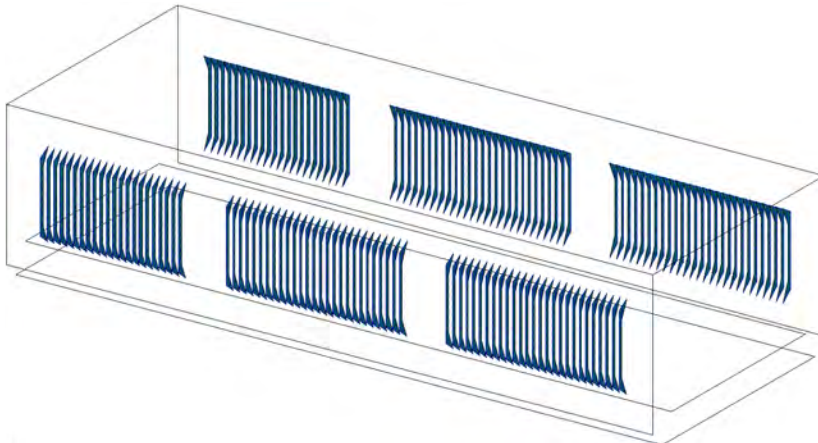
Fig. appendix-1-20 LSTOOLPLATE\_FORE Division



HOLDFRAME\_\*1\_P/S

\*1 : Frame number

a) PSH Division

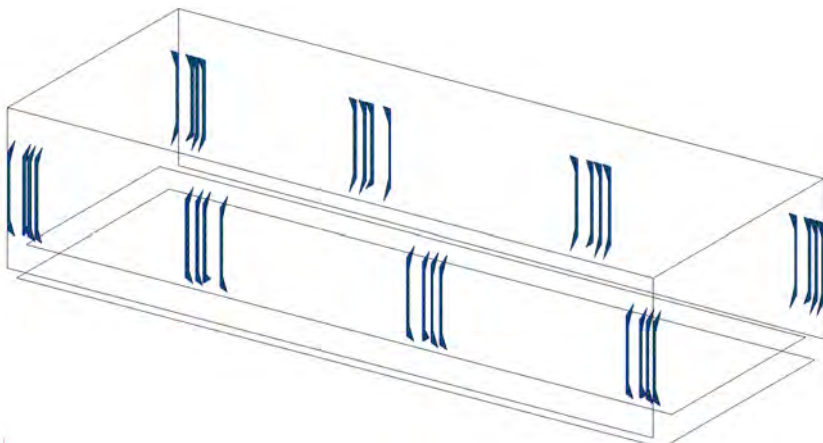


HOLDFRAME\_HD\_\*1\_P/S\_\*2

\*1 : HOLD number

\*2 : Individual number

b) Individual Submesh Division-1



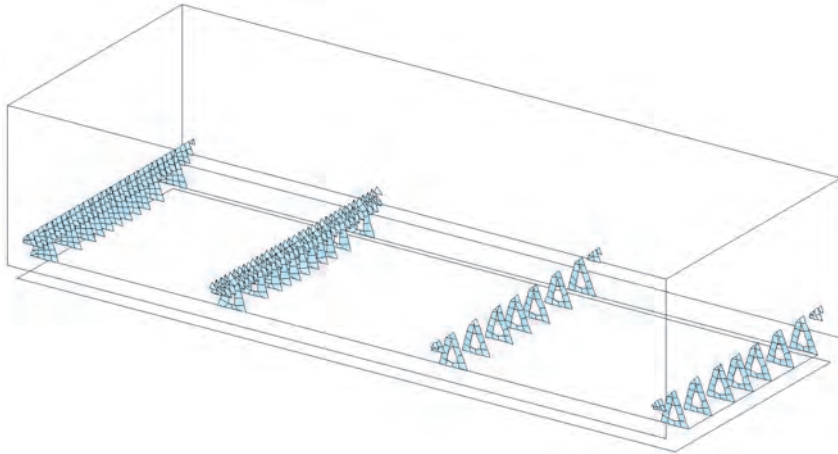
HOLDFRAME\_LS\_\*1\_P/S\_\*2

\*1 : HOLD number

\*2 : Individual number

c) Individual Submesh Division-2

Fig. appendix-1-21 HOLDFRAME Division

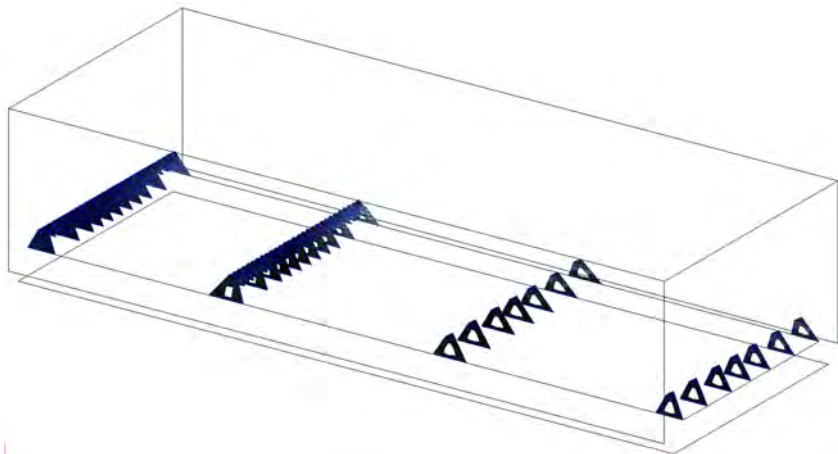


LSTOOLWEB\_\*1\_\*2\_C/P/S

a) PSH Division

\*1 : Frame number

\*2 : Individual number

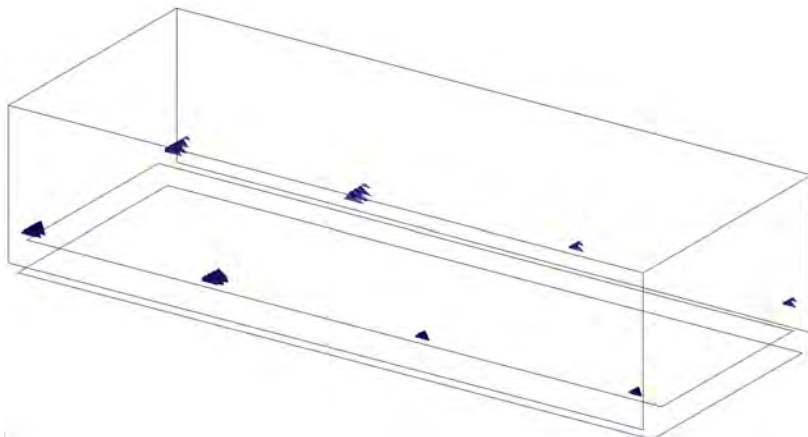


LSTOOLWEB\_HD\_\*1\_C/P/S\_\*2

b) Individual Submesh Division-1

\*1 : HOLD number

\*2 : Individual number



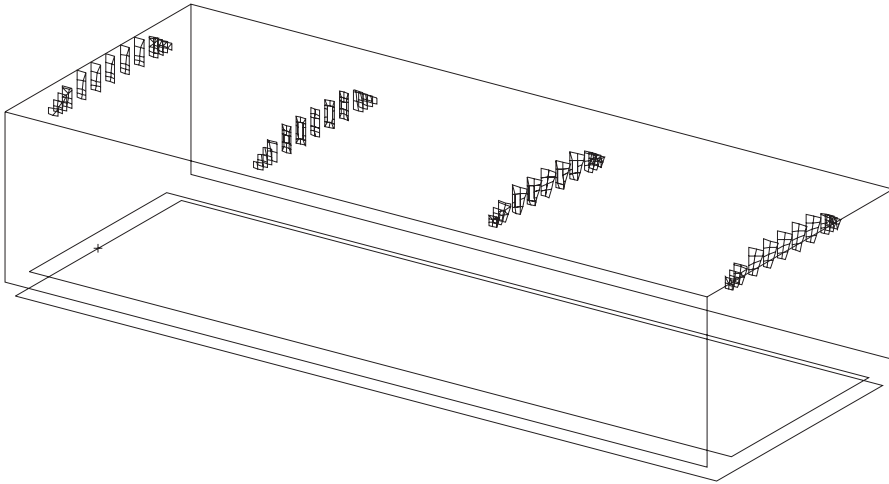
LSTOOLWEB\_LS\_\*1\_P/S\_\*2

c) Individual Submesh Division-2

\*1 : HOLD number

\*2 : Individual number

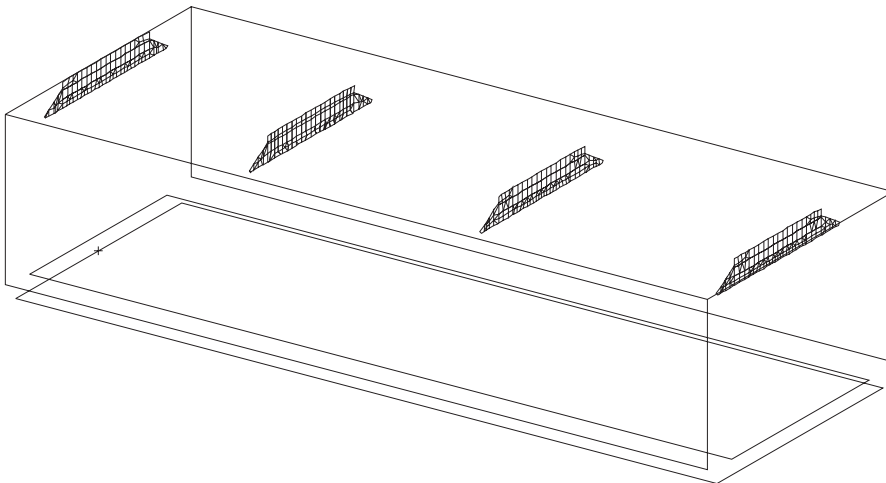
Fig. appendix-1-22 LSTOOLWEB Division



PSH Division: USTOOLWEB\_\*1\_\*2\_C/P/S \*1 : Frame number  
 \*2 : Order from centerline

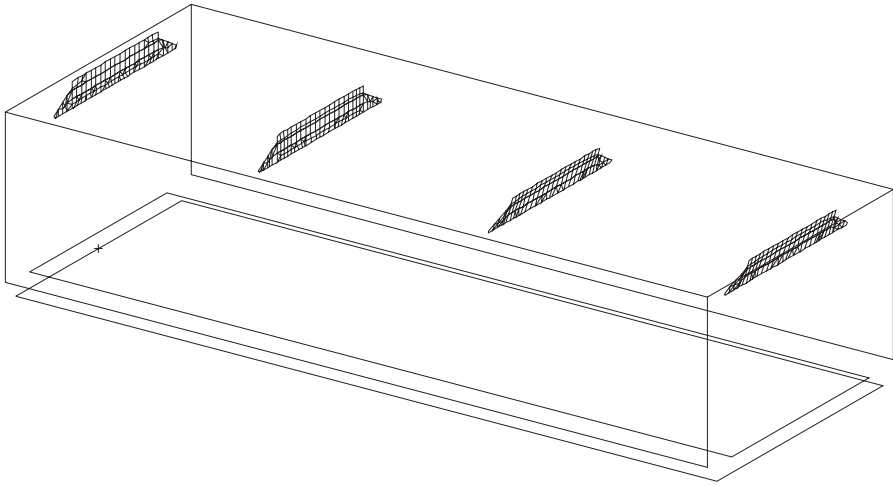
Individual Submesh Division: USTOOLWEB\_\*1\_\*2 \*1 : HOLD number  
 \*2 : Individual number

Fig. appendix-1-23 USTOOLWEB Division



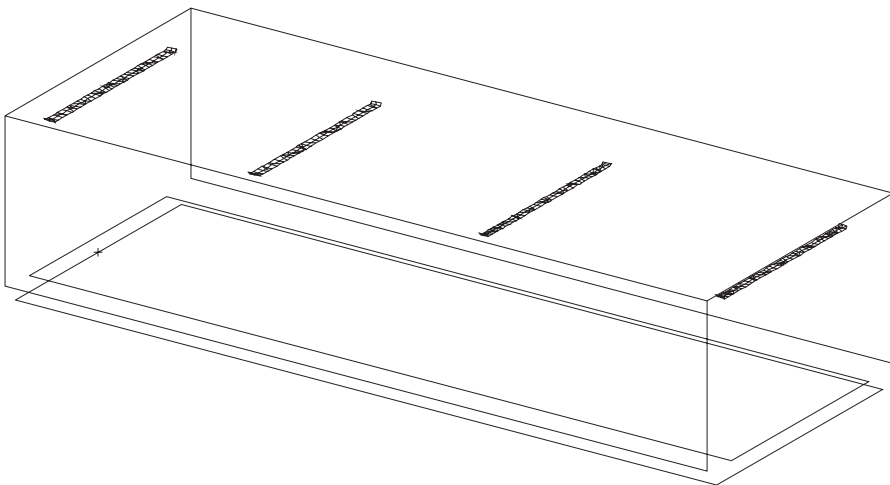
PSH Division : LSTOOLPLATE\_AFT\_\*1\_P/S \*1 : Frame number  
 Individual Submesh Division : LSTOOLPLATE\_\*1\_AFT \*1 : HOLD number

Fig. appendix-1-24 LSTOOLPLATE\_AFT Division



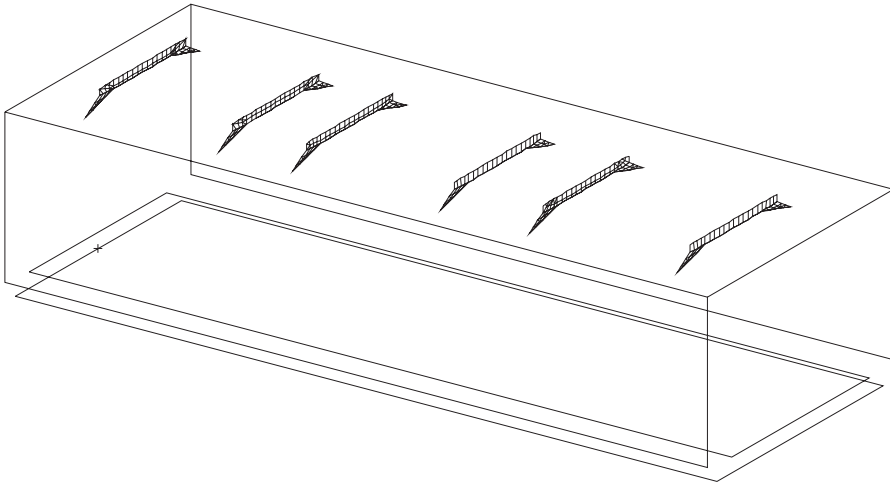
PSH Division : LSTOOLPLATE\_FORE\_\*1\_P/S \*1 : Frame number  
Individual Submesh Division : LSTOOLPLATE\_\*1\_FORE \*1 : HOLD number

Fig. appendix-1-25 LSTOOLPLATE\_FORE Division



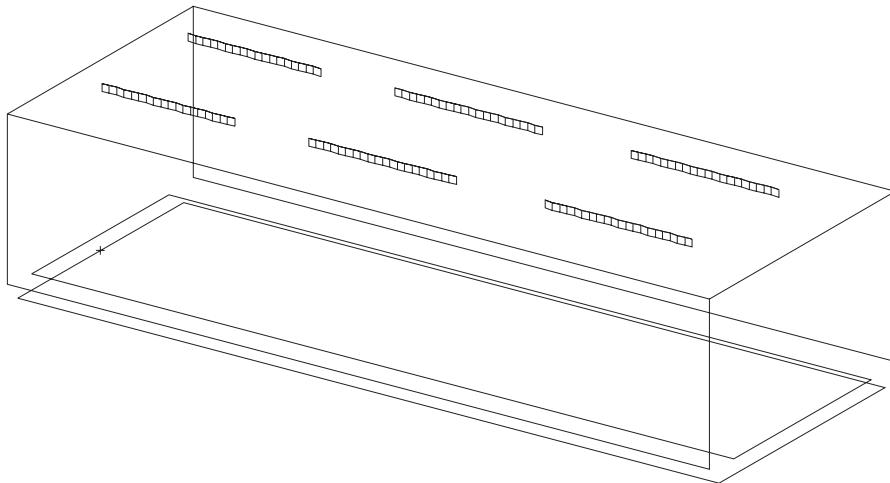
PSH Division : LSTOOLPLATE\_TOP\_\*1\_P/S \*1 : Frame number  
Individual Submesh Division : LSTOOLPLATE\_\*1\_TOP \*1 : HOLD number

Fig. appendix-1-26 LSTOOLPLATE\_TOP Division



PSH Division : HENDCOAM\_\*1\_P/S                   \*1 : Frame number  
 Individual Submesh Division : HENDCOAM\_HD\_\*1\_\*2   \*1 : HOLD number  
    \*2 : Individual number

Fig. appendix-1-27 HENDCOAM Division



PSH Division : HSIDECOAM\_P/S  
 Individual Submesh Division : HSIDECOAM\_HD\_\*1\_P/S   \*1 : HOLD number

Fig. appendix-1-28 HSIDECOAM Division





## 付録 2

### テーラー級数展開を用いた近似式の導出方法 について

$x$  及び  $y$  の二つを変数とする関数の近似式を求める場合について考える。Fig.appendix-2-1 に各感度微係数を求める為に必要な教師データの変数値を示す。Fig.appendix-2-1 に示す通り、2変数の場合は変数の基準点から  $\pm \delta x$  及び  $\pm \delta y$  の組合せが存在し、計9個の教師データが必要である事がわかる。

変数  $x, y$  の2変数問題において、二次までのテーラー級数展開は、式 (appendix-2-1) に示す通りとなる。

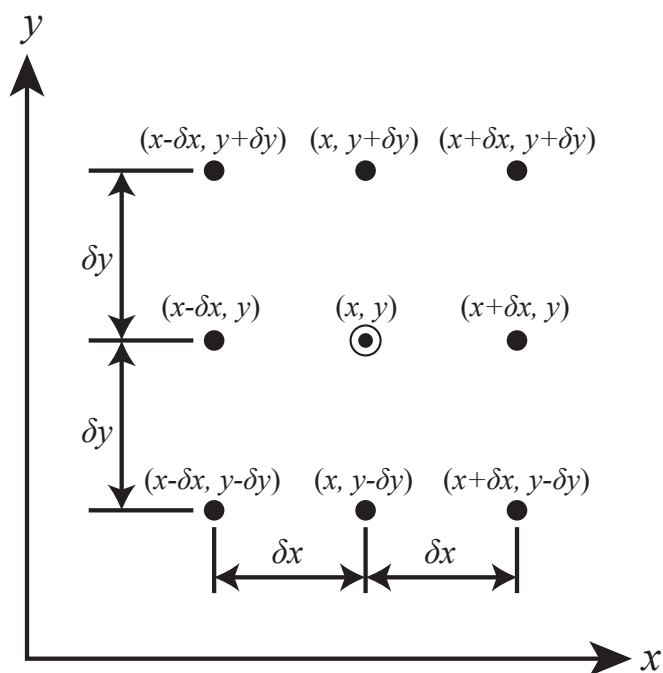


Fig.appendix-2-1 Preliminary calculations points

$$f(x + \delta x, y + \delta y) = f(x, y) + \frac{\partial f}{\partial x} \delta x + \frac{\partial f}{\partial y} \delta y + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \delta x^2 + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \delta y^2 + \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \delta x \delta y \quad (\text{appendix-2-1})$$

ここで、右辺第二項及び第三項の  $\partial f / \partial x$  ,  $\partial f / \partial y$  は変数  $x$  及び  $y$  の 1 次微分項、右辺第四項及び第五項の  $\partial^2 f / \partial x^2$  ,  $\partial^2 f / \partial y^2$  は変数  $x$  及び  $y$  の 2 次微分項、右辺第六項の  $\partial^2 f / \partial x \partial y$  は変数  $x$  ,  $y$  の交叉微分項を表している。

変数  $x$  の 1 次及び 2 次微分項を求めるには、Fig.appendix-2-1 に示す基準点  $(x, y)$  の解、及び  $(x + \delta x, y)$  ,  $(x - \delta x, y)$  の 3 点における解を使用し、それぞれの差より求める。式 (appendix-2-1) に  $(x + \delta x, y)$  及び  $(x - \delta x, y)$  を代入すると

$$f(x + \delta x, y) = f(x, y) + \frac{\partial f}{\partial x} \delta x + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \delta x^2 \quad (\text{appendix-2-2})$$

$$f(x - \delta x, y) = f(x, y) - \frac{\partial f}{\partial x} \delta x + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \delta x^2 \quad (\text{appendix-2-3})$$

式 (appendix-2-2) と式 (appendix-2-3) との差は

$$f(x + \delta x, y) - f(x - \delta x, y) = 2 \frac{\partial f}{\partial x} \delta x \quad (\text{appendix-2-4})$$

よって

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{f(x + \delta x, y) - f(x - \delta x, y)}{2\delta x} \quad (\text{appendix-2-5})$$

となり、変数  $x$  の 1 次微分項を求める事が出来る。また式 (appendix-2-2) と式 (appendix-2-3)

との和は、

$$f(x + \delta x, y) + f(x - \delta x, y) = 2f(x, y) + \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \delta x^2 \quad (\text{appendix-2-6})$$

よって

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \frac{f(x + \delta x, y) + f(x - \delta x, y) - 2f(x, y)}{\delta x^2} \quad (\text{appendix-2-7})$$

となり、数  $x$  の 2 次微分項を求める事が出来る。変数  $y$  についても同様である。

次に変数  $x, y$  の交叉微分項である  $\partial^2 f / \partial x \partial y$  を求める。交叉微分項と 1 次及び 2 次微分項と大きく異なる点は、1 つの項に関与する変数の数にある。  $x, y, z \dots$  の変数それぞれに対し、1 次及び 2 次微分項は 1 つの変数で表される。しかし 2 次までの交叉微分項は  $xy, xz, yz, \dots$  の様に 2 つの変数で構成される。つまり、交叉微分項は変数  $n$  個に対し、全ての変数の組み合わせである  ${}_n C_2$  個存在する。

変数  $x$  及び  $y$  の交叉微分項を求めるには、Fig.appendix-2-1 に示す  $(x + \delta x, y + \delta y), (x + \delta x, y - \delta y), (x - \delta x, y + \delta y), (x - \delta x, y - \delta y)$  の 4 点における解を使用し、それぞれの差より求める。これらの点の値を式 (appendix-2-1) に代入すると

$$f(x + \delta x, y + \delta y) = f(x, y) + \frac{\partial f}{\partial x} \delta x + \frac{\partial f}{\partial y} \delta y + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \delta x^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \delta y^2 + \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \delta x \delta y \quad (\text{appendix-2-8})$$

$$f(x - \delta x, y - \delta y) = f(x, y) - \frac{\partial f}{\partial x} \delta x - \frac{\partial f}{\partial y} \delta y + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \delta x^2 + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \delta y^2 + \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \delta x \delta y \quad (\text{appendix-2-9})$$

$$f(x - \delta x, y + \delta y) = f(x, y) - \frac{\partial f}{\partial x} \delta x + \frac{\partial f}{\partial y} \delta y + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \delta x^2 + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \delta y^2 - \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \delta x \delta y \quad (\text{appendix-2-10})$$

$$f(x + \delta x, y - \delta y) = f(x, y) + \frac{\partial f}{\partial x} \delta x - \frac{\partial f}{\partial y} \delta y + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \delta x^2 + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \delta y^2 - \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \delta x \delta y \quad (\text{appendix-2-11})$$

となる。式 (appendix-2-8) に式 (appendix-2-9) を加え、式 (appendix-2-10)、式 (appendix-2-11) を引くと

$$\begin{aligned} f(x + \delta x, y + \delta y) + f(x - \delta x, y - \delta y) - f(x - \delta x, y + \delta y) - f(x + \delta x, y - \delta y) \\ = 4 \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \delta x \delta y \quad (\text{appendix-2-12}) \end{aligned}$$

よって

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} = \frac{f(x + \delta x, y + \delta y) + f(x - \delta x, y - \delta y) - f(x - \delta x, y + \delta y) - f(x + \delta x, y - \delta y)}{4\delta x \delta y} \quad (\text{appendix-2-13})$$

となり、交叉微分項を求める事ができる。

# 付録 3

## 遺伝的アルゴリズムについて

### 1. 設計変数のコーディング

一般的に GA は対象とする各設計変数をコーディングした文字列で表現する。本研究で利用する最適化プログラムでは、離散最適化問題に対して、設計変数の離散集合から二進数に

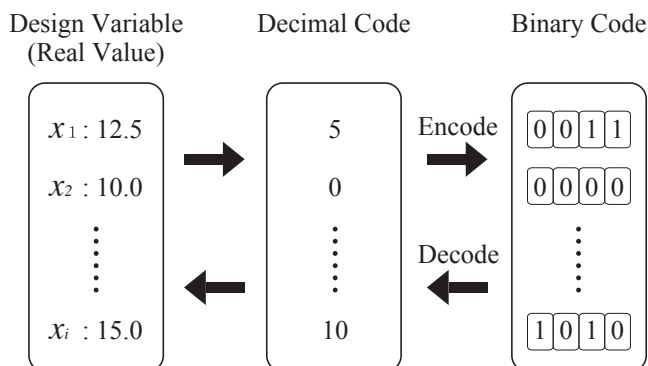


Fig. appendix-3-1 Encoding and decoding of design variables

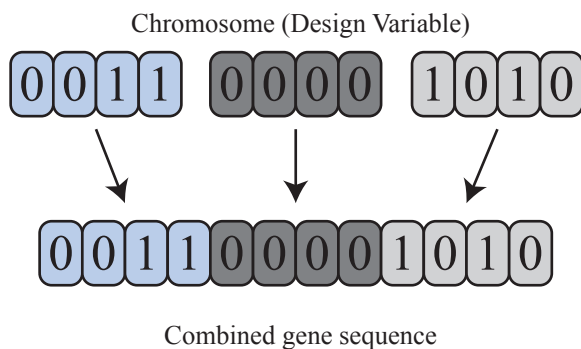


Fig. appendix-3-2 Combined gene sequence

よるエンコードを実施している。Fig. appendix-3-1 に設計変数からのエンコード、及び二進数コードから元の設計変数情報に変換するデコードの様子を示す。設計変数のコーディングは、まず定められた設計変数の上限値・下限値・刻み幅から、二進数の染色体幅（ビット数）を決定する。次に設計変数値を下限値と刻み幅から、10進数コードに変換した後、10進数コードから二進数コードに変換する。また多変数の場合は、Fig. appendix-3-2 に示す様に、コーディングした各設計変数をつないで一連の変数コードとする。また設計変数のデコードは、エンコードと逆の方向で変換を行う。以上により、離散的な設計変数を取り扱う事が可能となる。

## 2. 選択

ダーウィンの提唱した自然淘汰説では、「環境に適した生物ほど次世代に子孫を残す」事が出来るとされている。この説を踏襲し、GAの世界においても「適合度の高い個体ほど次世代にその形質を残すことができる」を原則として採用している。これにより、適合度の高い個体ほど次世代に残り、適合度の低い個体は淘汰される。この操作にはいくつかの方法があるが、本研究で利用する最適化プログラムでは、ルーレット選択、エリート戦略を使用する。

ルーレット選択では、個体群の中の各個体の適合度とその総計を求め、適合度の総計に対する割合を選択確率として個体を選択するという基本的な考えに基づいている。ルーレット選択は解析が容易であるため、GAの基本的な操作としてしばしば用いられている。Fig. appendix-3-3 にルーレット選択のイメージを示す。

Fig. appendix-3-3 のルーレットは、各個体の適合度に対応して扇形の面積が比例するように作られている。n個の個体を扱う問題の場合、ルーレット選択ではこのルーレットをn回まわし、次世代の親となる個体を選択する。親個体の選択は重複を許しているため、選択されるn個の個体の中に同一の個体が複数存在する可能性もある。また、原理的には適合度の高い個体を選択されやすいが、適合度の低い個体も選択される可能性が残されており、幅広い個体の選定が可能である。

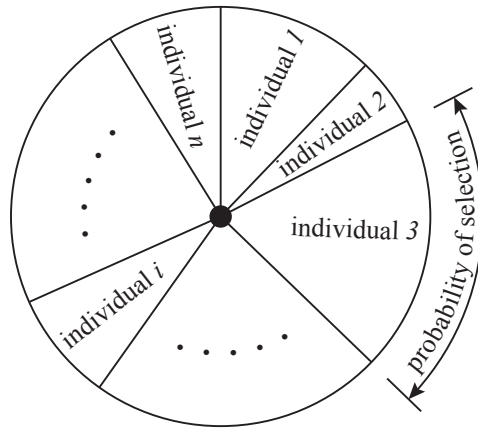


Fig. appendix-3-3 Roulette selection

エリート戦略は、優秀な親個体を子の世代での劣性個体と入れ替える手法である。この方

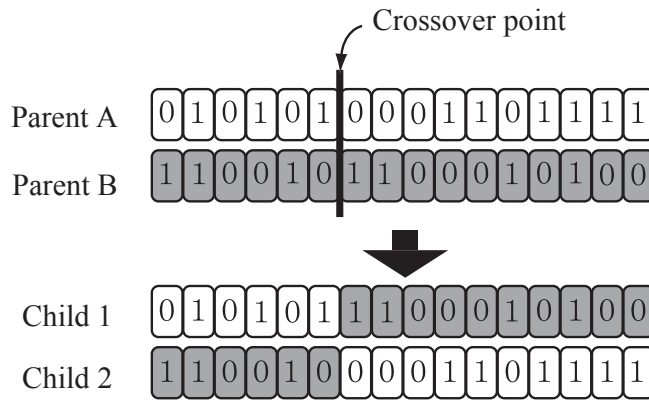


Fig. appendix-3-4 One-point crossover

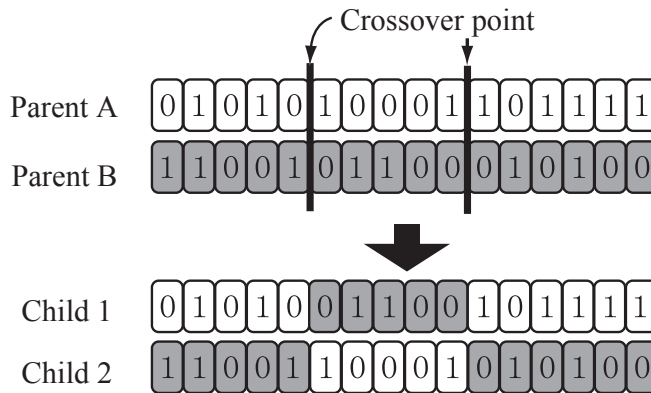


Fig. appendix-3-5 Two-point crossover

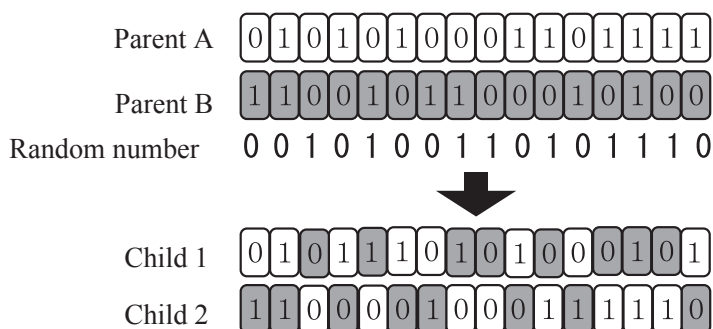


Fig. appendix-3-6 Multi-point crossover

法は，ペナルティ係数が世代の関数ではなく一定な場合，前世代より適合度が小さくなる事はなく，拡張目的関数の値は前世代より悪化することはない．そのため，一般的に探索能力が優れているとされている．しかし，探索が局所解に陥りやすいという欠点がある．

### 3. 交叉

交叉とは，2つの個体を用いてその両方の特徴を持った新しい個体を生成する事である．交叉手法には主に1点交叉，2点交叉，一様交叉があり，それぞれの操作の様子を Fig. appendix-3-4 ~ 6 に示す．個体群の中から2つの個体（親）を選択によって選び，一点交叉や二点交叉では，任意の交叉位置をランダムに決定する．そして交叉位置から親同士の個体の性質を入れ替えて子個体を生成する．一様交叉は，遺伝子座ごとに0または1の乱数を発生させ，0ならそのまま，1なら遺伝子座を入れ替えて子個体を生成する手法である．

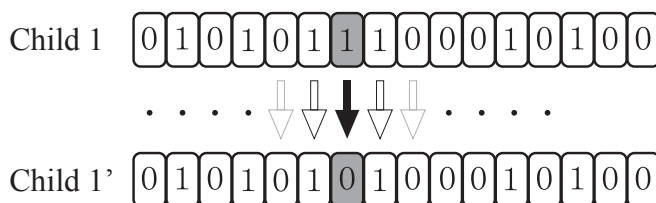


Fig. appendix-3-7 Mutation



#### 4. 突然変異

GAの基本操作である選択，淘汰，交叉を繰り返す事により，適応度の高い個体が得られるが，世代交代が進むと個体間での相違が少なくなり多様性を失う．特に扱う個体数が少ない場合は，多様性の喪失は顕著に現れる．そのため，適応度はある程度大きな値となるが，期待する解が得られなくなり，局所解へ収束してしまうという欠点がある．そこで，GAでは突然変異という操作を行う．Fig. appendix-3-7に突然変異操作の例を示す．GAの突然変異

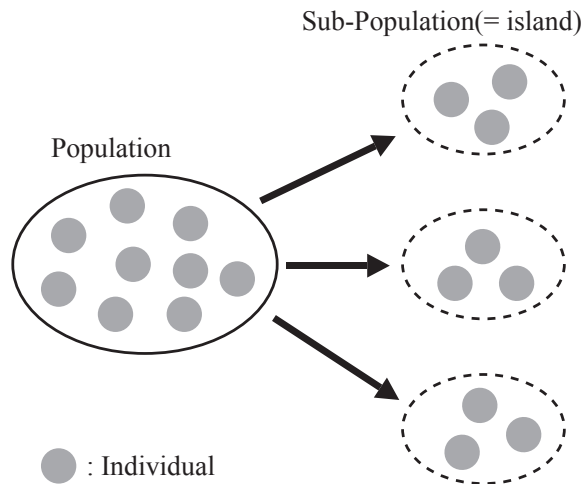


Fig. appendix-3-8 Multi island genetic algorithm

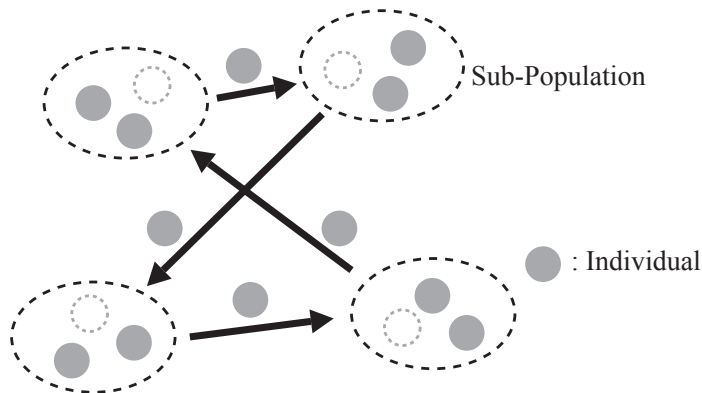


Fig. appendix-3-9 Migration

は、2進数の文字列で表される個体中の各遺伝子座に対し突然変異確率を適用し、遺伝子座の特性値を置き換える事により実施する。

## 5. 島モデル遺伝的アルゴリズム

本研究では、扱う設計変数及び制約条件が多数であるため、最適化時間の短縮を狙い最適化手法に島モデル遺伝的アルゴリズムを採用した。

島モデル遺伝的アルゴリズムとは Fig. appendix-3-8 に示す通り、母集団を複数の島と呼ばれるサブ母集団に分割し、各サブ母集団で GA を行うものである。評価や遺伝的操作は各島で独立に行い、各島で独立に最適化が行われる。そのため各島で個体の性質は大きく異なる場合も多く、母集団全体としての多様性が維持される。しかし、一島あたりの個体数が少ないため早期に局所解へ陥りやすくなる。そこで、数世代間隔で移住 (migration) という個体の交換操作を行う。Fig. appendix-3-9 に移住作業の様子を示す。移住とは数世代に一度の割合で、各サブ母集団内でいくつかの個体を別のサブ母集団と交換する操作である。これにより、他の島の個体を取り入れて多様性を維持している。

各島内に占める移住個体の割合を移住率と呼ぶ。移住個体が多すぎると母集団全体の多様性が十分に保たれず局所解に収束し、少なすぎると効果的な個体の交換が行われないため、島内での多様性が十分に保たれず局所解に収束する可能性がある。また、何世代おきに移住操作をするかは移住間隔によって決定する。

# 付録 4

## 構造最適化プログラムの実行について

本研究を遂行するにあたり、数種類のプログラムを作成した。これらのプログラムは、独立要素分割作成や MPC 結合等、それぞれの作業毎に独立した形式で作成している。そのため一連の作業を行う際には、各作業プログラム毎に、設定ファイルの更新とプログラムの実行を手動で行う必要がある。一つのプログラム実行に数時間を要する物もあり、その待ち時間は非効率である。また、設定ファイルの更新は同じ様な作業の繰り返しのため、ミスが発生する可能性があった。

そこで、必要最低限の設定ファイルを記入すれば、各プログラムの設定及び実行を自動的に行う『構造最適化準備プログラム』を作成した。Fig. appendix-4-1 に操作画面を示す。また、以下に操作の概要を示す。

### 1. ファイルチェックボタン

最適化に必要なファイルが全て揃っているかをチェックする。チェック後、不足しているファイル名を左ボックスにリストアップする。必要なファイルが全て揃った場合のみ、実行ボタンを表示する。

### 2. 実行ボタン

実行ボタンを押す事により、Fig. appendix-4-1 に示す必要な作業を順次行う。また、各作業の実行中には「実行中 ...」と表示する。また、各作業を終了すると「OK」を表示する。

### 3. 実行チェックボックス

実行の有無をチェックボックスにて選択可能としている。

### 4. 作業終了表示

全ての作業を終了した後に、ビーブ音を約5秒間流し、作業者に対して注意を促す。

## 5. 終了お知らせメール

実行終了に時間がかかるため、作業が終了した後にあらかじめ指定したアドレスに終了を知らせる機能を付加した。送信メールは以下の設定を適切に行う

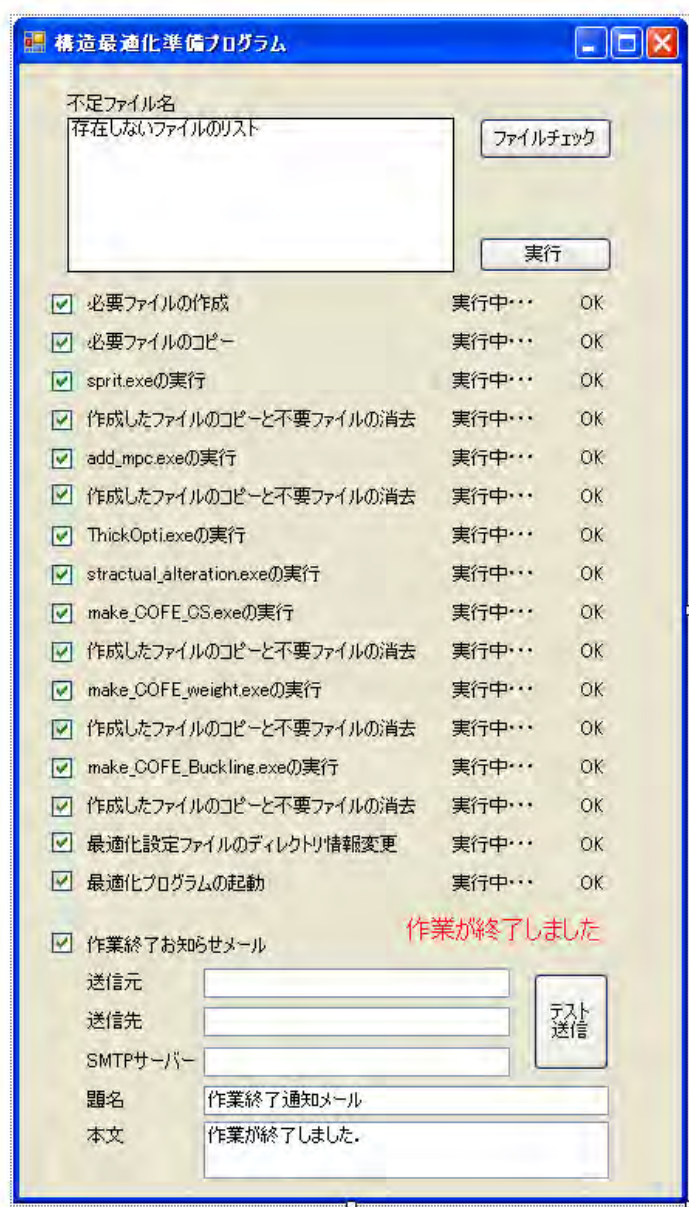


Fig. appendix-4-1 Execution control program

ことにより，実行される.

- 送信元：会社内で使用するメールアドレスなど
- 送信先：携帯電話などのメールアドレス
- SMTP サーバー：会社などのメール送信サーバー
- 題名：必要に応じて変更可能.
- 本文：必要に応じて変更可能.

全てのプログラムが終了した後，GA 最適化プログラムを設定及び実行する事で最適解が得られる.

