

# 目次

<b>第1章 緒論</b>	<b>1</b>
1.1 研究背景	1
1.2 研究対象	2
1.2.1 VLCCの概要	2
1.2.2 VLCCの基本構造	3
1.3 船舶の構造最適化の概要	4
1.3.1 設計変数の数が変化する構造最適化の問題点	6
1.3.2 FEMを使用した最適化の問題点	7
1.3.3 多種類の設計変数を有する構造最適化の問題点	8
1.4 研究目的	10
1.5 論文の構成	11
<b>第2章 設計変数の数が変化する最適化問題</b>	<b>12</b>
2.1 緒言	12
2.2 最適化対象構造	12
2.2.1 遺伝的アルゴリズム (GA) について	13
2.2.2 GAによる最適化の問題点	15
2.2.3 設計変数の数の変化に対応したGA	17
2.3 最適化実行例	18
2.3.1 目的関数・制約条件	18
2.3.2 ペナルティ係数の設定	21

2.3.3	最適化の実行	23
2.4	従来手法との比較	25
2.4.1	従来手法による最適化方法	25
2.4.2	個体数の検討	26
2.4.3	計算量の比較	29
2.5	結言	32
<b>第3章</b>	<b>設計領域を考慮したFEM計算手法と最適化への応用</b>	<b>33</b>
3.1	緒言	33
3.2	提案手法	33
3.2.1	計算負荷の低減	33
3.2.2	自由度数の変更方法	37
3.2.3	計算量の比較	41
3.2.4	提案手法を用いた最適化の手順	43
3.3	構造最適化	44
3.3.1	最適化対象モデル	44
3.3.2	設計変数	45
3.3.3	遺伝的アルゴリズム	45
3.3.4	目的関数と制約条件	48
3.3.5	境界条件・荷重条件	50
3.3.6	最適化結果	52
3.4	結言	56
<b>第4章</b>	<b>多種類の設計変数を有する構造最適化</b>	<b>57</b>
4.1	緒言	57
4.2	設計変数	57
4.2.1	最適化対象モデル	57

4.2.2	設計変数の分類 . . . . .	58
4.2.3	目的関数と制約条件 . . . . .	60
4.3	提案最適化手法 . . . . .	61
4.3.1	提案最適化手法の手順 . . . . .	61
4.3.2	提案最適化手法の検証 . . . . .	67
4.3.3	提案最適化手法と既存最適化手法との比較 . . . . .	79
4.4	Hybrid GA . . . . .	80
4.4.1	Hybrid GA での最適化手順 . . . . .	80
4.4.2	Hybrid GA での最適化計算例 . . . . .	81
4.4.3	提案Hybrid GA と GA の比較 . . . . .	93
4.5	結言 . . . . .	95
<b>第5章</b>	<b>結論</b>	<b>97</b>
5.1	今後の課題 . . . . .	100
	参考文献	101
	謝辞	110
	本研究に関連した発表論文	111
	付録A 個体数の検証	112
A.1	case1 の場合 . . . . .	112
A.2	case2 の場合 . . . . .	114
A.3	case0, case3~case17 の場合 . . . . .	117
A.4	検討結果 . . . . .	123
	付録B 最適化システムの概要	124
B.1	Hybrid GA を用いた最適化システムの概要 . . . . .	124

B.2 提案FEM解析手法の仕様 . . . . .	126
----------------------------	-----

# 第1章 緒論

## 1.1 研究背景

近年国内の造船業では、国外企業との価格競争が激しくなっており、コストを抑えた船舶の設計・建造が重要となってきた。船舶の建造コストは大きく分けると原材料費と工費(人件費を含む)の2つとなる[1]。奥本らはタブー探索法[5]、バックトラック法[6]、線形計画法[7]、シミュレーション技法[8]を用いて建造工程を最適化し、工費の削減を図っている。船舶の建造における工費は、例えば溶接長が長くなると工程数が増え、人件費が上昇することが考えられるが、短期間の間に大きく変動することはなく予想も比較的容易である。これに対して材料費は世界的な材料の需要の変動等の外的要因に大きく影響を受けるため、短期間の間に価格が大きく変動し、予測も困難である。そのため、原材料費を抑えた設計を行うことでコスト競争力を高めることができると考えられる。原材料費を抑えるため、設計の現場では構造最適化が行われている。構造最適化では必要以上の強度を持たないように設計を行い、できる限り材料費を抑えた設計案を探索する。この構造最適化では、熟練設計者の経験則による構造最適化が行われる場合がある。しかし、経験則は個人の力量に依存するため、得られた最適構造よりもより良い設計案が存在する可能性がある。そのため、経験則に頼ることなく確実に最適な構造を探索することのできる方法が求められている。しかし、経験則によらない構造最適化を行う場合、膨大な数の設計案を検討する必要がある。構造強度評価に一般的に用いられている有限要素法(以下FEM)を用いて、1つの設計案を評価する場合、FEMモデルの作成、解析といった時間を要する作業が必要となる。そのため、最適化のために必要な全ての設計案に対して強度評価を行うことは時間的制約から困難である。また、設計

変数の数の増加に伴い、検討すべき設計案の数も増加する。そのため、設計変数の数が多い最適化問題を解く場合、多くの時間を必要とする。そこで、本研究では実用的な時間の範囲内で実行することが可能な構造最適化手法を提案する。提案手法を用いて構造最適化を行い提案する手法の有効性の検証を行う。

## 1.2 研究対象

### 1.2.1 VLCCの概要

本研究ではVLCCを研究対象とする。VLCCの例として、Fig.1.1にジャパンマリンユナイテッド株式会社が製造するVLCCを示す。VLCCとはVery Large Crude oil Carrierのイニシャルをとったものであり、Fig.1.2に示す各カーゴホールドに原油を積載する大型タンカーである[4]。産油国から産業国へ原油を輸送する手段としては、パイプラインによる輸送とタンカーによるものがあるが、日本のような海に囲まれた国ではパイプラインを通すことが難しく、タンカーによる原油の輸送が主である。



Fig. 1.1: VLCC

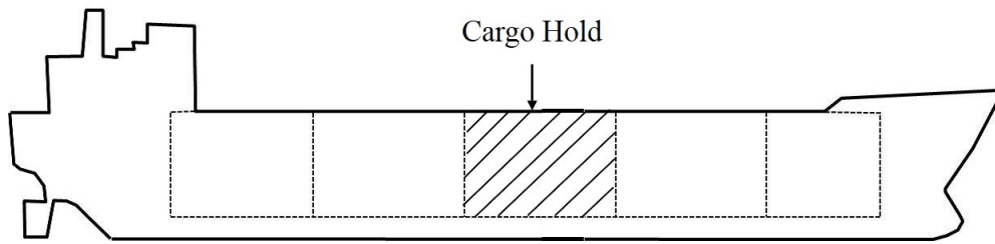


Fig. 1.2: Cargo hold of crude oil tanker

### 1.2.2 VLCCの基本構造

VLCCは衝突等の事故により船体が損傷した場合、積荷である原油が海に流失し周辺の環境に深刻な被害を与える。事故による原油流失のリスクを減らすために、VLCCはFig.1.3に示すような二重船殻構造とすることが義務付けられている。二重船殻構造にすることにより、事故による船体の損傷が軽微な場合は原油の流失を防ぐことができる。

Fig.1.4に主要な部材の名称を示す。船体はinner bottom plateやbottom plate等の板部材に対してスティフナーを取り付けることで剛性を高める構造となっている。

VLCCの設計は国際船級連合(IACS)によって定められたCSR-Tに基づいて行われている[2]。CSR-Tに基づいた構造設計では規則式による構造強度評価とFEM解析による構造強度評価が行われる[3]。

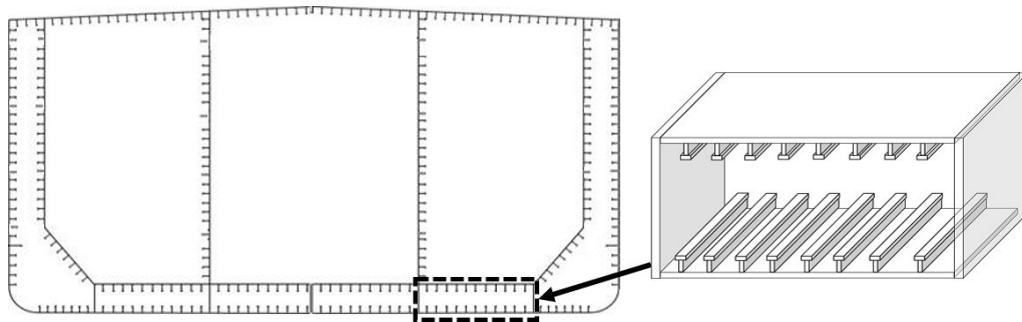


Fig. 1.3: Midship section of VLCC

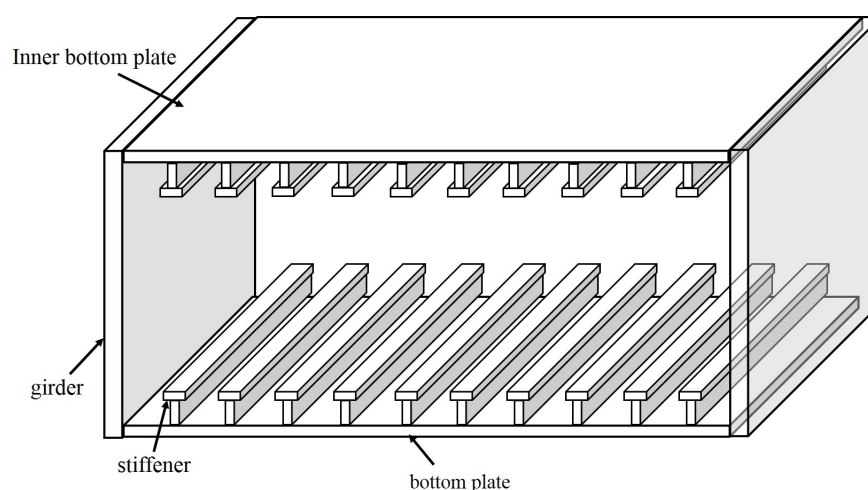


Fig. 1.4: Name of parts

### 1.3 船舶の構造最適化の概要

本節では、船舶の構造最適化に関する既往研究の紹介及び、現状での構造最適化の問題点について述べる。船舶の構造最適化の検討は古くから行われており、多くの研究報告もある [9][10]

[11][12][13]. 近年では、船舶の構造設計においてFEMが使用されるようになり、構造最適化の強度評価においてもFEMを用いることが一般的となっている [15]. しかし、船舶の構造最適化では取り扱う設計変数の数が多く、最適解を探索するために非常に多くの設計案を検討する必要があるが、FEMを用いて各設計案に対して構造強度評価を行う場合、莫大な計算時間を要するため最適化の実現が困難である。これらの問題を解決するため、FEM解析の計算時間を短縮する手法、及び検討すべき設計案の数を低減し、効率良く最適解に到達することの可能な最適化手法に関する研究が行われている。以下にこれらの研究に関する論文の概要をまとめた。

#### (1) 応答曲面法を用いた船体横強度部材の形状最適化に関する研究 [16]

オイルタンカーのタンク部分の横強度部材の形状を設計変数とし、応答曲面法にパレート解の考え方取り入れた手法を用いた構造最適化を行っている。



この手法を用いることで、少ない数の設計案の検討、及び評価のみにより効率的に船体構造の最適化を行えることを示している。

(2) 制約条件に対する影響度を考慮した設計変数の分類 [17][18]

船体中央横断面の設計変数（板厚及びスティフナー形状）を主成分分析を用いてグルーピングを行い、設計変数の数を減少させる手法を提案している。この手法でグルーピングされた設計変数を用いて、GAでの最適化を実行し、従来行われてきた設計者の経験則に基づきグルーピングされた設計変数を用いた場合に比べて、より質量の少ない最適構造が得られことを示している。

(3) 多段階最適化手法による船体構造最適設計に関する研究 [19]

船体構造最適化の手順を階層化させることで、多段階最適化問題として扱う手法を提案している。設計変数をグローバルなシステムとローカルなサブシステムに分解し、それぞれのシステムを段階的に最適化を行うことで通常の最適化手法と比較して最適解到達への収束安定性、及び計算時間を短縮することが可能であることを示している。

(4) 部材認識機能を用いた船体構造の形状最適化システムに関する研究 [20]

独立要素分割とMPCを用いて船体構造の形状を最適化する手法を提案している。MPCを用いることで要素形状の変更を容易に行うことができ、FEMモデル作成の作業コストを低減することができる。さらに、この手法を自動化し船体二重底部の最適化を行い有効性を示している。

(5) ニューラルネットワークを用いた船体中央横断面の構造最適化に関する研究 [21]

FEMによる構造強度評価の代替手段としてニューラルネットワークを用いて計算コストを削減し、船体構造最適化を試みている。最適化手法にはGAを用いて、実用的な時間の範囲内で船体中央横断面の最適化が行えることを示している。ニューラルネットワークを用いた船体構造の最適化は香川ら[27][28]によっても行われている。

## (6) 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 [23]

船舶の初期構造計画時における最適化を行うシステムを開発している。このシステムでの最適化手法として Sub Optimization 理論 [24][25][26] に基づいた最適化手法を提案し設計変数の数を最小限に抑えている。この提案する最適化手法では全探索型による最適化や GA による最適化と比較して短い時間で妥当な最適解を得られることを示している。

以上の既往研究では、構造最適化を効率良く行う手法、FEM 解析時間を低減する手法の検討が行われ、成果を得ている。しかし、これらの研究ではスティフナーの本数・位置を設計変数に含んだ、構造最適化は行われていない。その理由は設計変数の数の変化、FEM モデルの作成及び解析、最適解への収束性の3つであり以下にそれらの詳細を記す。なお、スティフナーの本数・位置を設計変数に含んだ、船体構造最適化としては、竹澤ら [29][30] や Rais [31]、奥本ら [33] が船体のスティフナーのレイアウトをトポロジー最適化を用いて行っている。しかし、トポロジー最適化では最適解の構造が材料密度分布として表されるため、得られた最適解を実構造に置き換えることは難しい。船体ではなく、平板に取り付けるスティフナーのレイアウトをトポロジー最適化を用いた研究も Ding ら [32] により行われているが、この研究においても最適化結果を実構造に置き換えることは難しい。また、中森ら [34] により船体のロンジスティフナーをの配置最適化を行った研究もあるが、本数を設計変数としては設定していない。以下に示した3つの問題点を解決し、スティフナー本数及び、位置を設計変数とした最適化を行うことができれば、従来の最適化に比べより良い最適解を得ることができると想定される。

### 1.3.1 設計変数の数が変化する構造最適化の問題点

組み合わせ最適化問題となる船体構造最適化では遺伝的アルゴリズム (GA) の使用が有効であり数多くの研究で用いられている [14][35][37][36][38][39]。スティフナーの本数、及びスティフナー間の板部材の板厚を設計変数とした最適化問題の場合、ス

スティフナー本数を変更すると板厚の設計変数の数が変化する。GAは設計変数を遺伝子として表現し、優秀な個体の遺伝子同士を交叉し、新たな設計案を創出し最適解を探索する手法である。そのため、各設計案ごとに設計変数の数が異なる場合、遺伝子の長さも異なるため交叉を実行することができない。つまり、GAは設計変数の数が変化する最適化問題に対して適応することができないという問題がある。スティフナー本数を設計変数とした最適化では荒井ら[22]による応答曲面法を用いた船体構造最適化の研究があるが、スティフナー本数のみを設計変数としているため、設計変数の数に変化はない。そのため、スティフナー本数の変化による設計変数の数の変化については議論されていない。また、伊藤ら[40]や木村[41]は遺伝子長の異なる個体同士の交叉を行う方法を示しているが、最適化対象としている配管経路に特化した手法であり、本研究に応用することはできない。

### 1.3.2 FEMを使用した最適化の問題点

スティフナーの配置位置・本数を設計変数とし、強度評価にFEMを使用した構造最適化の問題点は、FEMモデルの再生成、及びFEM解析による計算負荷である。構造最適化の一般的な例題としてトラス構造の最適化に関する研究は多数行われている[49][50][51][52]。部材の有無を設計変数とするトラス構造の最適化も行われており、河村らの研究[42]では、予め定義された節点数を変えることなく、適切な場所に部材を配置することにより最適化を行っている。同様の研究は小玉ら[43]や藤井ら[44]、小亀ら[53]により行われている。これに対して、板部材に新たにスティフナーを配置する場合、FEMモデルに節点を新たに追加する必要があり、節点数が変化する。節点数が変化するとFEMモデルのメッシュの整合性が崩れてしまうため、メッシュを切り直すという作業が必要となる。しかし、船舶のFEMモデルは大規模かつ複雑であり、検討すべき全設計案のFEMモデルを生成することは非現実的である[48]。森ら[46]はスティフナー本数を設計変数に含んだ構造最適化問題において、応答曲面法を用いてFEMモデルの作成を必要最小限に抑える手法を提案している。

しかし，スティフナー配置位置を設計変数として扱っていない．スティフナー位置を設計変数に含めると，精度の良い応答曲面を作成するためには多数の教師データが必要となり，数多くのFEMモデルを作成するため最適化は困難となると考えられる．上寺[47]も，MPCを用いてFEMモデルの形状を容易に行うことの可能なシステムを開発し，船体構造の最適化を行っているが，この研究においてもスティフナー位置を設計変数としては扱っていない．また，最適化により対象構造の一部のみを構造変更した際に，全体FEMモデルを再解析する必要があり，最適化で検討すべき多数の設計案に対して解析を行うと計算負荷が高く，最適化に要する時間が長くなるという問題もある．この問題に対して北村ら[45]はニューラルネットワークをFEM解析の代替手法として使用することを提案し，FEM解析と同等の結果を得られることを示している．しかし，ニューラルネットワークを構築するための教師データ以外の精度については議論されていない．また，平板に取り付けるリブのレイアウト最適化における研究がChengら[55][56]や山崎[57]によりなされているが，FEMモデルの再生成による最適化時間の増大については議論されていない．井上ら[54][58]もリブ配置の最適化を行っているが，予め定められた節点にリブを配置するため，自由な位置にリブを配置することはできない．

### 1.3.3 多種類の設計変数を有する構造最適化の問題点

スティフナー本数，スティフナー位置，スティフナー形状，板部材の板厚を設計変数とした最適化は組み合わせ最適化問題となり，GAの使用が有効である．しかし，GAは設計変数の数が多くなると組み合わせ数が膨大になり，最適解に収束するまでに多大な計算回数を必要とする場合や，最適解に到達できない場合がある[59]．また，GAで連続変数を含んだ最適化問題を解くと，連続変数を離散変数として扱う必要があり，設計変数の値を表現するために非常に多くのbit数を必要とし，前述したものと同様の問題が生じる．船舶の初期設計段階において，数の少ない設計変数による最適化の報告[70][71]はあるが，設計変数の数が多くなる段階での船

体構造の設計問題においては、全ての設計変数を遺伝子で表現しGAで最適化を行うと、実用的な時間で最適解を得ることは困難である。この問題を解決するためには、GAで扱う設計変数の数を減らすことで現実的な時間内に構造最適化を行う手法を構築する必要がある。設計変数の数を低減させるため、設計変数が制約条件に与える影響を考慮し設計変数のグルーピングを行う手法がある。Kimら [72][73] はターゲットカスケディング法により設計変数を分類している。また、他の研究として McCullerら [74] や Kusiakら [75] は DSM を用いた設計変数のグルーピング法を提案している。これらの研究で提案された手法は、最適化問題の規模が大きく複雑になると設計変数のグルーピングの判断が困難となるという課題がある。

別のアプローチとして、Hybrid GA を用いた研究が行われている [60][61]。Hybrid GA は最適解探索の計算回数削減、及び最適解への収束安定性を向上させるため、GA 以外の最適化手法と GA を組み合わせることで GA で扱う設計変数を減らし、最適化の効率を上げる最適化手法である。下村ら [62] はアントコロニー最適化 (ACO) と GA を組み合わせた Hybrid GA を用いて、代表的な組み合わせ最適化問題である巡回セールスマン問題の最適解を求め、単純 GA に比較して安定して最適解が得られることを示している。Hungら [67] や Andalら [68]、Yunら [69] も Hybrid GA を用いて巡回セールスマン問題の最適化を行っている。この Hybrid GA を構造最適化問題に用いた研究も行われている [63][64]。坂本ら [65] や寺田ら [66] はトラス構造の最適化問題において Hybrid GA を使用している。この研究では、離散変数であるトラスの位相を GA で、連続変数であるトラスの断面積を最適性基準法 (OCM) を用いて最適化を行い、GA で扱う設計変数の数を減らすことで、安定して最適解を探索している。しかし、本研究で扱うようなスティフナーを有する構造の最適化の場合、GA 側で扱う設計変数を十分減らすためには、最低でも2種類の設計変数を他の最適化手法で扱う必要があり、1種類の設計変数のみを GA 以外の手法で扱うのでは不十分である。また、連続変数の最適化に適した勾配を用いた最適化手法では、計算を繰り返す必要があるため最適化時間が長くなるという課題がある。

## 1.4 研究目的

本研究では，前節で述べたスティフナー本数とスティフナー配置位置を設計変数とした構造最適化における現状での3つの問題点を踏まえて，以下に示す3つの研究目的を定めた．

1. 設計変数の数が増える構造最適化の問題点を解決するため，GAの改良を行う．具体的には設計変数の数によらず遺伝子の長さを一定に保つことで，交叉を可能とする．さらに，改良したGAを用いて最適化を実行し，有効性の検証を行う．
2. FEMを使用した構造最適化の問題点を解決するため，設計変更の度にFEMモデルを再生成することなく，設計変更後の構造強度評価が可能かつ計算量を低減する計算手法を提案する．さらに，この手法を用いた構造最適化を行い，提案手法の有効性を検証する．
3. 多種類の設計変数を有する構造最適化の問題点を解決するため，本研究ではHybrid GAを用いた最適化を行う．Hybrid GAではGAと組み合わせる最適化手法が必要である．そこで，本研究の対象構造物である船体構造の設計変数の内の2種類の設計変数を扱うことに特化し，計算コストを抑えた最適化手法を提案する．さらに，この提案手法とGAを組み合わせたHybrid GAを使用して船体構造の最適化を行い，本研究で提案する最適化手法とGAを組み合わせたHybrid GAの有効性について検討する．

## 1.5 論文の構成

前節までに述べた問題点を解決し，研究目的を達成するため本論文では以下に示す各章で述べる手法を用いて，従来行われなかったスティフナー本数とスティフナー配置位置を設計変数に含めた構造最適化を実行する．

第2章「設計変数の数が増える最適化問題」では，単純GAでは扱うことのできない，各設計案ごとに異なる数の設計変数を有する最適化問題の最適解を求めるために，改良を行ったGAを提案する．次に，船体構造を模擬したモデルに対して提案GAによる最適化を実行し，提案GAの有効性を検証する．

第3章「設計領域を考慮したFEM計算手法と最適化への応用」では，スティフナー本数を変更した際にFEMモデルを作り直すことなく，強度評価を行うことのできる計算手法，及び一部分のみ構造変更を行った際に変更箇所のみで，強度計算を行うことのできる計算手法を提案する．この2つの手法を用いることで，スティフナー本数を設計変数として含んだ最適化のFEMモデル構築作業，及び計算負荷を低減することができる．次に，船体を模擬した構造を2章で述べる提案GAと3章で提案するFEM計算手法を用いて最適化を行い提案するFEM計算手法の有効性を検証する．

第4章「多種類の設計変数を有する構造最適化」では，Hybrid GAを用いた構造最適化を行う．GAは連続変数を扱うことが不得意であり，連続変数を含む最適化問題においては最適化に到達することが困難である．そこでこの問題を解決するため，GAとは異なった最適化手法とGAを組み合わせたHybrid GAを提案する．次に，第3章で扱った最適化対象モデルに対してHybrid GAを適用し手法の有効性を検証する．

第5章「結論」では本研究により得られた成果とその結論，及び今後の課題を示す．

## 第2章 設計変数の数が増える最適化問題

### 2.1 緒言

スティフナー本数を設計変数とした構造最適化では、スティフナー本数が違う設計案ごとに設計変数の数が異なる。このような最適化問題では、通常のお最適化手法による最適化が困難である。そこで、本章ではこの問題を解決するための最適化手法について検討を行う。

### 2.2 最適化対象構造

本章で最適化を行う構造はFig.2.1に示したような、船体二重底部を模擬した構造とする。この構造物を最適化する際の設計変数はスティフナー本数、及び板厚が想定される。

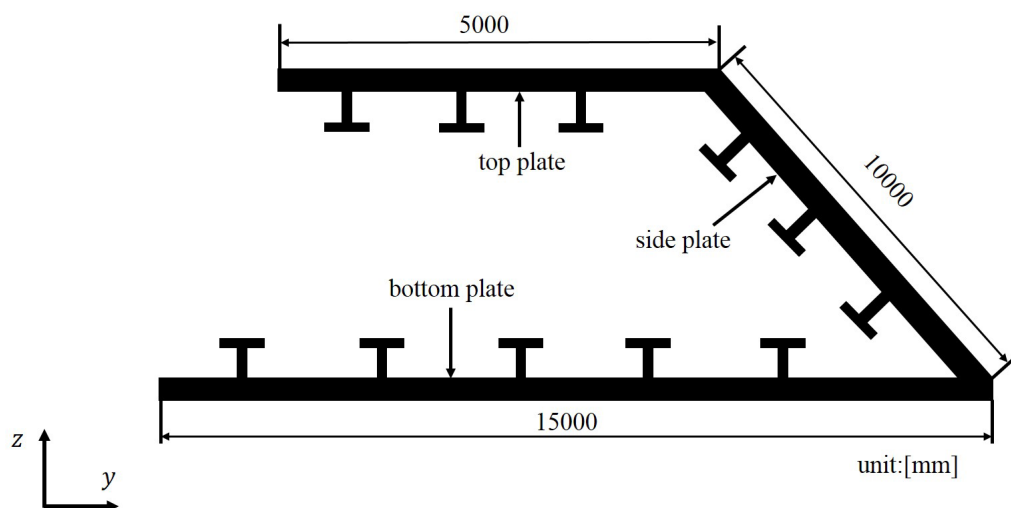


Fig. 2.1: The model for optimization



### 2.2.1 遺伝的アルゴリズム (GA) について

組み合わせ最適化問題に対して有効な最適化手法として、GAがある。本研究における最適化対象構造物の最適化は組み合わせ最適化問題となるためGAを用いての最適化を行う。Fig.2.2に単純GAのフローを示す。また、GAでの操作の詳細を以下に記す [76].

- 1) ランダムに初期個体を生成
- 2) 各個体の適応度を計算
- 3) 適応度の高い個体をエリート個体として保存
- 4) 適応度に基づき淘汰を行い親を選択
- 5) 交叉を行い新たな個体（子）を生成
- 6) 収束判定を行い、収束していれば計算終了

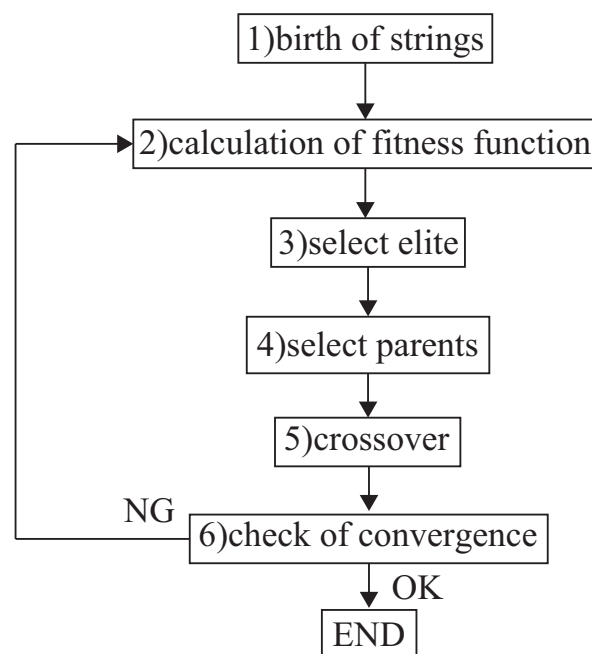


Fig. 2.2: Simple GA flow

2.2.1.1 遺伝子のコーディング

GAでは設計変数を遺伝子として扱う。そのため、Fig.2.3のように設計変数の値をbinary codeで表現する必要がある。しかし、binary codeによる設計変数の表現には問題がある。例えば、設計変数の数が1つ、最適解が16、設計案1の設計変数の値が15、設計案2が17という最適化問題の場合、設計案1と設計案2の設計変数をそれぞれbinary codeで表現すると01111(15), 10001(17)となる。最適解は16であるため、最適解近傍の設計案が得られているが、Fig.2.4に示すように16はbinary codeでは10000であり、設計案1と設計案2の交叉で最適解16の設計案を得ることは難しい。

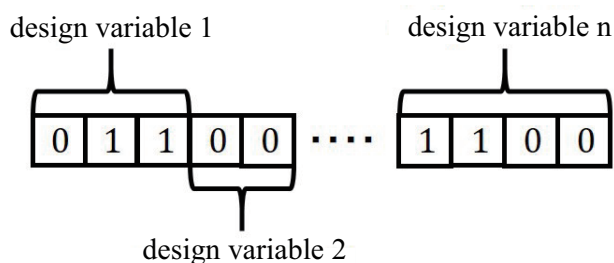


Fig. 2.3: Design variables expressed with binary code

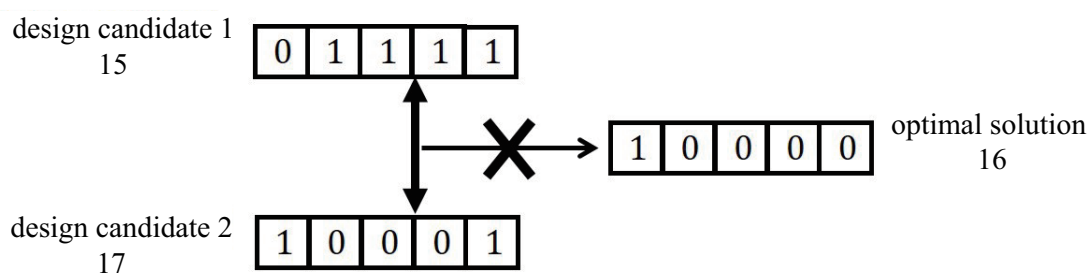


Fig. 2.4: Crossover with binary code

本研究では、上記の問題を解決するためgray code[77]を使用する。gray codeとはある値から隣接した値に変化する際に、常に1ビットしか変化しないという特徴を持ったものである。表.2.1に10進数、binary code、gray codeの対応表の例を示す。この

gray codeを使用すると15は01000, 17は11001, 最適解の16は11000となり, Fig.2.5のように最適解に到達することがbinary codeの場合に比べて容易になる. そこで, 本研究ではgray codeを使用する.

Table 2.1: Correspondence table

decimal number	binary code	gray code
0	0	0
1	1	1
2	10	11
3	11	10
4	100	110
5	101	111
6	110	101
⋮	⋮	⋮
15	01111	01000
16	10000	11000
17	10001	11001

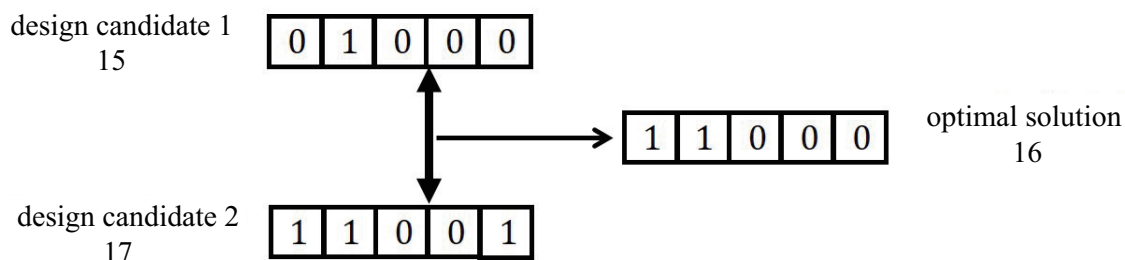


Fig. 2.5: Crossover with gray code

## 2.2.2 GAによる最適化の問題点

スティフナー本数を設計変数とした構造最適化では, スティフナー本数が異なる設計案ごとに設計変数の数が異なる. 例えば, Fig.2.6に示したようにcaseAでは, スティフナーがbottom plateに5本, side plateに2本, top plateに3本の場合, 板厚を表す設計変数は13個となる. Fig.2.7のcaseBでは, スティフナーがbottom plateに3本, side plateに1本, top plateに2本の場合, 板厚を表す設計変数は9個となる. これら2つの

設計案の遺伝子長はFig.2.8に示したように異なるため交叉を行うことができない。また、赤矢印の箇所ではbottom plateの板厚である $t_{b5}$ とside palteの板厚である $t_{s1}$ が交叉される。しかし、これら2つの設計変数は性質が異なっており、交叉が行われることは望ましくない。以上の問題点から設計変数の数が増える最適化問題に対して通常のGAを適用することは不適切である。

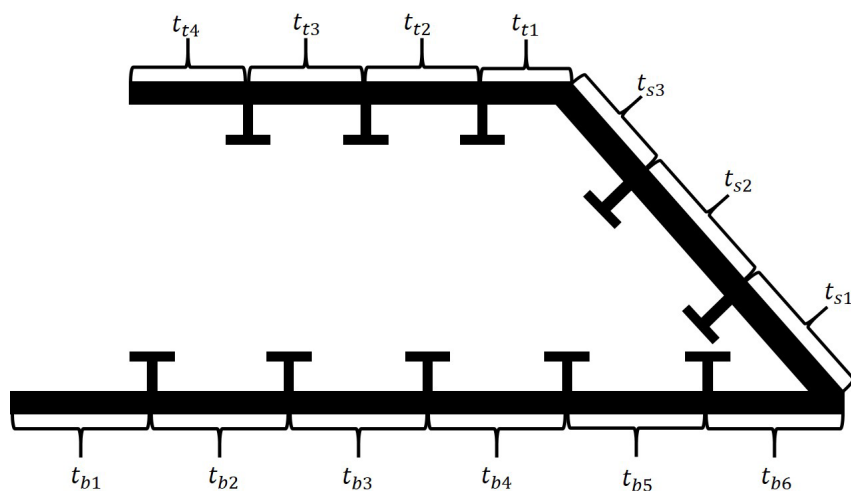


Fig. 2.6: Design variables in caseA

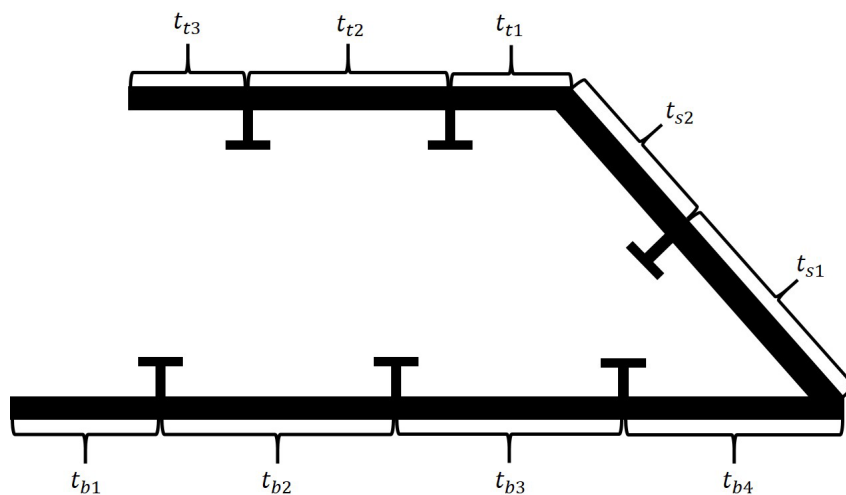
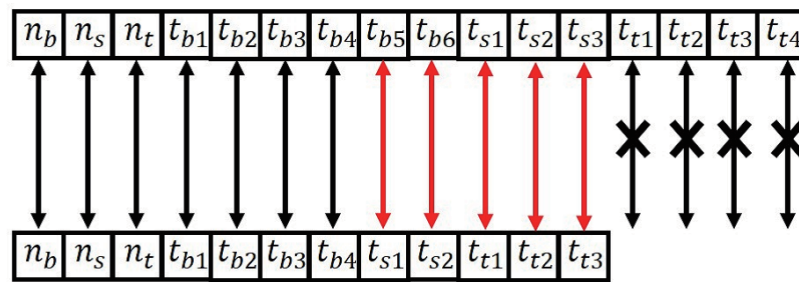


Fig. 2.7: Design variables in caseB



$n_b$  : number of stiffeners at bottom plate  
 $n_s$  : number of stiffeners at side plate  
 $n_t$  : number of stiffeners at top plate

Fig. 2.8: Strings of two design candidates for caseA and caseB

### 2.2.3 設計変数の数の変化に対応したGA

本項では前項での問題点を解決する手法について述べる。手法としては、交叉の実行を可能にするためFig.2.9に示すように隠れ遺伝子を用いる。具体的には以下に示す方法を用いることでスティフナーの本数が異なる設計案同士での交叉を可能とする。

- スティフナーの本数がFig.2.7の場合，隠れ遺伝子を  $t_{b5}^*$ ,  $t_{b6}^*$ ,  $t_{s3}^*$ ,  $t_{t4}^*$  と定義する。
- 隠れ遺伝子も通常の遺伝的アルゴリズムによって常に値を有する。
- スティフナーがFig.2.7のとき，これらの隠れ遺伝子の値を使用せず，構造解析による応力評価，質量計算を行い拡張目的関数を算出する。

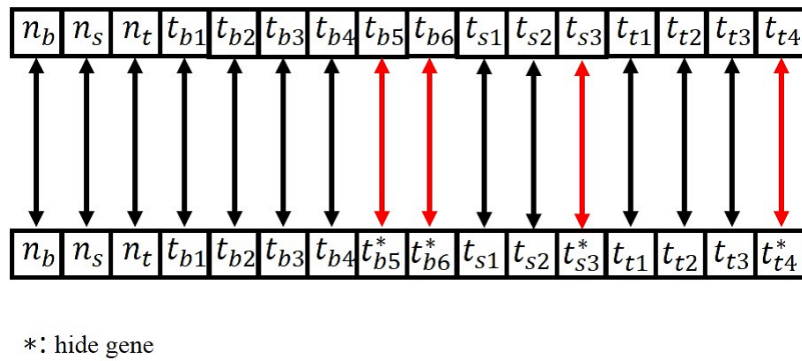


Fig. 2.9: Proposed method with hide gene

## 2.3 最適化実行例

本節では前節で提案した隠れ遺伝子を用いるGAについての数値実験を行う。最適化対象構造物はFig.2.1とし、設計変数はbottom plate, side plate, top plateに付くそれぞれのスティフナー本数、及びそれらのスティフナー間の板厚とする。なお、スティフナーの配置位置は本数に応じて等間隔とする。

### 2.3.1 目的関数・制約条件

本例題では対象構造物の質量最小化を目的とする。bottom,side,topのそれぞれの質量はAをスティフナーの断面積[mm<sup>2</sup>], Lをx方向長さ[mm], ρを密度[kg/mm<sup>3</sup>]とすると、式(2.1), 式(2.2), 式(2.3)で表される。目的関数は構造物全体の質量とするため、式(2.4)となる。

$$W_b(n_b, \mathbf{t}_b) = n_b A L \rho + \sum_{i=1}^{n_b+1} t_{b_i} s_{b_i} L \rho \tag{2.1}$$

$n_b$  : bottom plate のステイフナーの本数

$t_{bi}$  : bottom plate の  $i$  番目の板厚 [mm]

$s_{bi}$  : bottom plate の  $i$  番目のスパン [mm]

$$W_s(n_s, \mathbf{t}_s) = n_s AL\rho + \sum_{i=1}^{n_s+1} t_{si} s_{si} L\rho \quad (2.2)$$

$n_s$  : side plate のステイフナーの本数

$t_{si}$  : side plate の  $i$  番目の板厚 [mm]

$s_{si}$  : side plate の  $i$  番目のスパン [mm]

$$W_t(n_t, \mathbf{t}_t) = n_t AL\rho + \sum_{i=1}^{n_t+1} t_{ti} s_{ti} L\rho \quad (2.3)$$

$n_t$  : top plate のステイフナーの本数

$t_{ti}$  : top plate の  $i$  番目の板厚 [mm]

$s_{ti}$  : top plate の  $i$  番目のスパン [mm]

$$f(n_b, n_s, n_t, \mathbf{t}_b, \mathbf{t}_s, \mathbf{t}_t) = W_b + W_s + W_t \quad (2.4)$$

制約条件は各ステイフナー間の板部材の応力とし、bottom ,side ,top 部のそれぞれの制約条件は式 (2.5), 式 (2.6), 式 (2.7) で表される。また、式 (2.8) に示す構造全体の断面係数も制約条件とする。応力計算にはFEMを使用することが望ましいが、最適化では繰り返し計算が多くFEMを使用すると最適化に要する時間が増大し、検証を行うことが困難となる。そこで、本章では式 (2.9) に示す簡易応力計算式を用いる。この計算式はスパンが長くなると応力が増加し、板厚が薄くなると応力が増加

するといった物理現象を表したものでFEM解析結果に近いものを得られる。

$$g_{bi}(\mathbf{t}) = \frac{\sigma_{bi} - \sigma_c}{\sigma_c} \leq 0 \quad (2.5)$$

$\sigma_{bi}$  : bottom plate の  $i$  番目の板部材の応力

$\sigma_c$  : 制約条件値

$$g_{si}(\mathbf{t}) = \frac{\sigma_{si} - \sigma_c}{\sigma_c} \leq 0 \quad (2.6)$$

$\sigma_{si}$  : side plate の  $i$  番目の板部材の応力

$$g_{ti}(\mathbf{t}) = \frac{\sigma_{ti} - \sigma_c}{\sigma_c} \leq 0 \quad (2.7)$$

$\sigma_{ti}$  : top plate の  $i$  番目の板部材の応力

$$g_z = \frac{Z - Z_c}{Z_c} \geq 0 \quad (2.8)$$

$Z$  : 全体の断面係数

$Z_c$  : 制約条件値

$$\sigma_i = \frac{s_i}{100} + \frac{3000}{t_i^2} \quad (2.9)$$

ペナルティ関数は bottom plate ,side plate ,top plates 部の応力制約と断面係数制約を  
足し合わせた式(2.10)で表される。

$$\phi = \sum_{i=1}^{n_b+1} \max[0, g_{bi}] + \sum_{i=1}^{n_s+1} \max[0, g_{si}] + \sum_{i=1}^{n_t+1} \max[0, g_{ti}] + |\min[0, g_z]| \quad (2.10)$$



以上の目的関数とペナルティ関数を踏まえると拡張目的関数  $f_p$  は式(2.11)で表される.

$$f_p = f + r\phi \quad (2.11)$$

$r$  : ペナルティ係数

### 2.3.2 ペナルティ係数の設定

ペナルティ関数法ではペナルティ係数を適切に決定する必要がある. ペナルティ係数はFig.2.10のように世代数に関係なく一定の値とするものと, Fig.2.11のように世代が進むに従い増加するものがある. また, Fig.2.12のように世代が進むに従い増加し、設定された世代に到達すると一定値となるものもある.

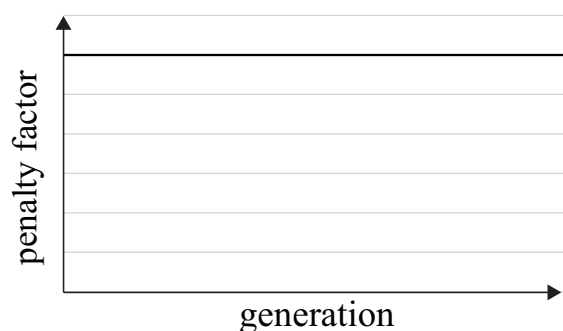


Fig. 2.10: Penalty factor 1

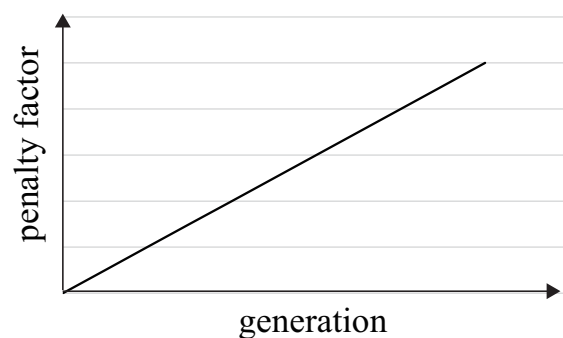


Fig. 2.11: Penalty factor 2

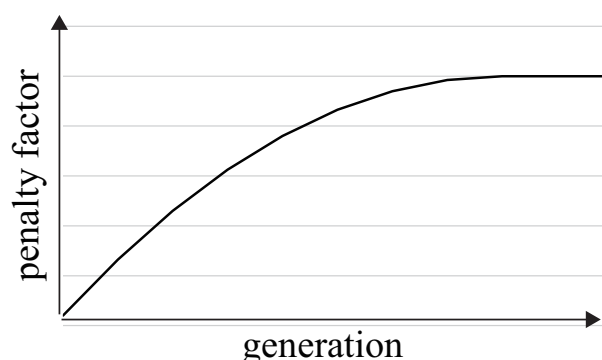


Fig. 2.12: penalty factor 3

ペナルティ係数の設定は、最適解への収束性に大きな影響を与える。そのため、適切なペナルティ係数を設定する必要がある。ペナルティ係数の決定方法についてはいくつかの研究がなされている。北村ら [78][79] は、Fig.2.12 のように初期段階では低いペナルティ係数を用いて幅広い設計案を検討し、世代が進むごとにペナルティ係数を増加させ最適解を探索する手法を用いている。そこで、本研究においても Fig.2.13 と式 (2.12) に示した、ペナルティ係数を用いて最適化を行う。このペナルティ係数の一定値は制約条件を 1% 満足しない場合に目的関数を 20% 悪化させる値である。また、ペナルティ係数の値を適切に決定する手法として猪飼ら [80] によりペナルティ係数の最適化を行いながら最適化を実行する手法が提案されている。しかし、ペナルティ係数の最適化を行うことで最適化計算の回数が増加し、最適化に要する時間が長くなるため、設計変数の数の多い最適化問題への適応は困難である。

$$r = \begin{cases} -0.0723(x - 500)^2 + 18000 & (x \leq 500) \\ 18000 & (x > 500) \end{cases} \quad (2.12)$$

$x$  : 世代数

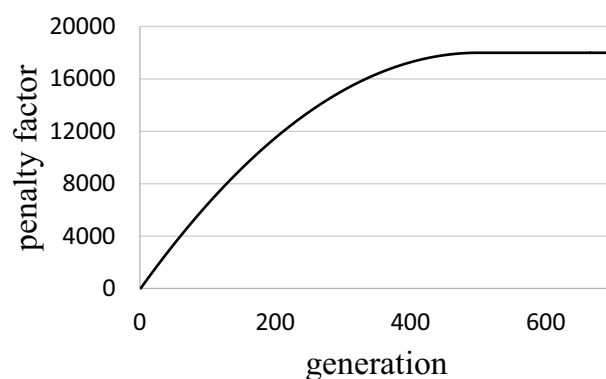


Fig. 2.13: Set penalty factor

### 2.3.3 最適化の実行

これまでに述べてきた，拡張目的関数，ペナルティ係数を用いて，隠れ遺伝子を使用したGAによりスティフナー本数，板厚を設計変数とした最適化を行った．制約条件は $\sigma_c = 40$ ， $Z_c = 1.800 \times 10^9$ とし，GAのパラメータは表2.2に示したものを使用する．最適化の過程をFig.2.14に示す．run1～run4まで全て同一の解に収束していることが確認できる．最適化後の構造はFig.2.15に示したものとなり，各板部材の応力 $\sigma_i$ は制約条件を下回っている．また，全体の断面係数 $Z$ も $1.804 \times 10^9$ となり制約条件値を上回っているため，制約条件を全て満足した構造を得ることができたといえる．bottom plate部の板厚は一樣とならず，応力の制約条件に対して余裕のある板厚となっているが，これは断面係数の制約条件を満足するためである．

Table 2.2: GA parameter

number of population	300
number of elite	30
selection method	roulette
crossover rate	100%
mutation rate	3%

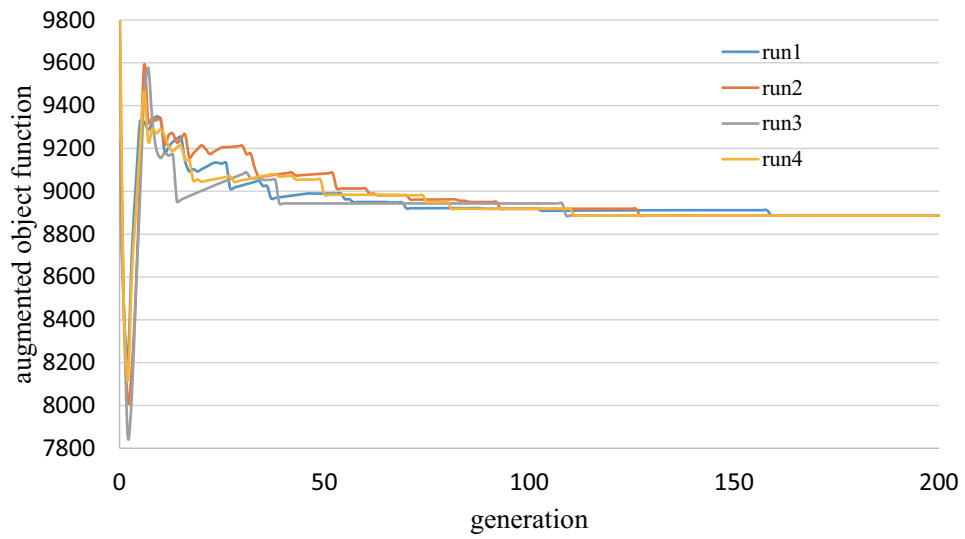


Fig. 2.14: History of augmented object function

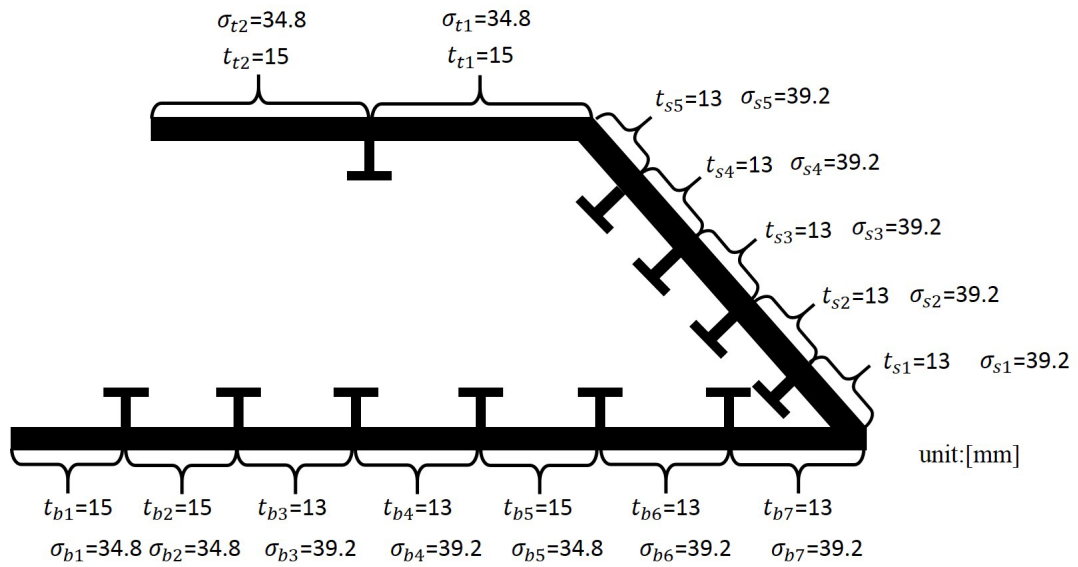


Fig. 2.15: Optimized structure

## 2.4 従来手法との比較

本章で提案する隠れ遺伝子を用いたGAと単純GAの計算量の比較を行い、有効性の検討を行う。

### 2.4.1 従来手法による最適化方法

比較対象とする単純GAではスティフナー本数を設計変数とした最適化を行うことはできない。単純GAを使用して前節で扱った最適化問題の最適解を得るためにはFig.2.16の手順で最適化を行う必要がある。なお、各項目の詳細を以下に記す。

- 1) bottom palte, side plate, top plateそれぞれのスティフナー本数を設定
- 2) スティフナー本数に応じて板厚のみを設計変数とした遺伝子を作成
- 3) 作成した遺伝子を用いて単純GAによる最適化を実行
- 4) 検討する全てのパターンが終了したら5)に移動
- 5) 最適化を行った全パターンのスティフナー本数の場合の最適解を比較し、最も質量が少ない設計案を最適解として決定

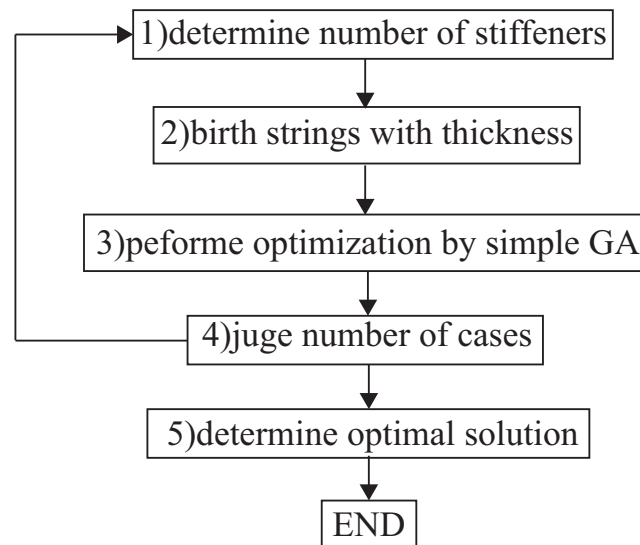


Fig. 2.16: Optimization method by simple GA

本研究では計算量の比較のため、表 2.3 に示す 18case での最適化を実行する。なお、これらのスティフナー本数は前節で得られた最適解の近傍のものである。

Table 2.3: Calculation case

	bottom plate	side plate	top plate
case0(optimization solution)	6	4	1
case1	6	4	2
case2	6	4	3
case3	6	5	1
case4	6	5	2
case5	6	5	3
case6	6	3	1
case7	6	3	2
case8	6	3	3
case9	5	4	1
case10	5	4	2
case11	5	4	3
case12	5	5	1
case13	5	5	2
case14	5	5	3
case15	5	3	1
case16	5	3	2
case17	5	3	3

#### 2.4.2 個体数の検討

計算量を比較するためには、隠れ遺伝子を用いた GA における計算と単純 GA による計算において適切な個体数を決定する必要がある。そこで、2.3.3 の最適化での個体数と最適解到達世代の関係を検証した。GA は確率的探索手法の一つであるため、最適解到達世代を評価するためには複数回の試行計算を行う必要がある。そこで、同一の個体数での試行回数を 100 とし、個体数は 10~200 まで 10 刻みでの最適化計算を行った。その結果を Fig.2.17 に示す。縦軸の平均最適解到達世代は 100 回の試行計算の内最適解到達世代数が高いものから 10、低いものから 10 の計算結果を除いた場合の平均値である。GA では個体数が増加するに従い、最適解到達世代数は減少することが想定されるが、Fig.2.17 では個体数を 100 以上に増やした場合においても

最適解到達世代数に大きな変化はない。これは、Fig.2.13に示したペナルティ係数を使用しているためであると考えられる。ペナルティ係数はある一定世代数にならない限り制約条件を満足させる十分なペナルティを与えることができないため、最適解到達世代数が個体数に依存しない結果となる。そのため、縦軸に個体数×平均収束世代数で表される総計算個体数、横軸に個体数としたFig.2.18では個体数を増やすと総計算個体数が増加している。計算量を比較するための適切な個体数を定めるためには、Fig.2.17, Fig.2.18の結果では不適切である。そこで、ペナルティ係数を世代数に依存させず一定とする。その場合の値はFig.2.13の最大値である $r = 18000$ を使用する。ペナルティ係数を一定とした場合の個体数と平均最適解到達世代の関係を図2.19に示す。全体の傾向として個体数の増加に伴い到達世代数は減少していることが確認できる。ペナルティ係数を増加させた場合の最適化到達率(Fig2.20)とペナルティ係数を一定とした場合の到達率(Fig.2.21)を比較すると、ペナルティ係数一定とした場合においても安定して最適解に到達できることがわかる。これらの結果から計算量を比較するためにはペナルティ係数を一定とする必要があるといえる。

ペナルティ係数を一定と設定することが妥当であるかの検討は表2.3に示した全18caseで行う必要がある。そこで、全18caseにおいて同様の検討を行った結果、ペナルティ係数を一定とすることが妥当であるという結論を得た。この検討の詳細は付録Aに記載する。

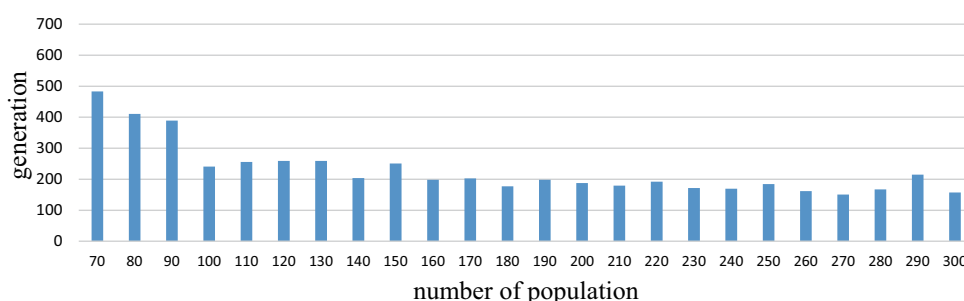


Fig. 2.17: Relationship between population and reached generation with increasing penalty factor

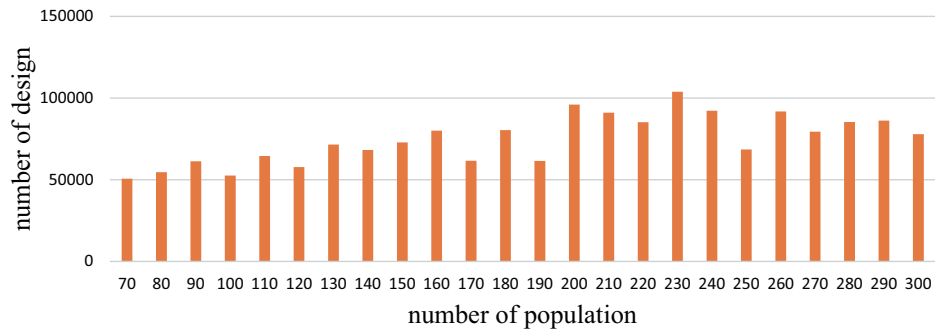


Fig. 2.18: Calculated population with increasing penalty factor

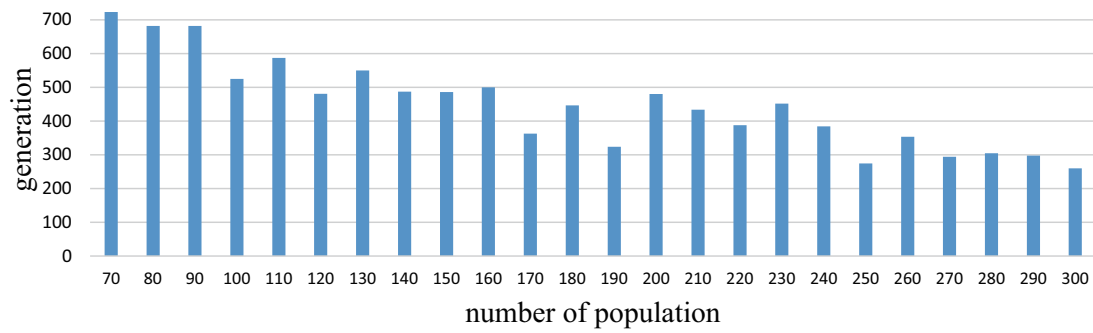


Fig. 2.19: Relationship between population and reached generation with certain penalty factor

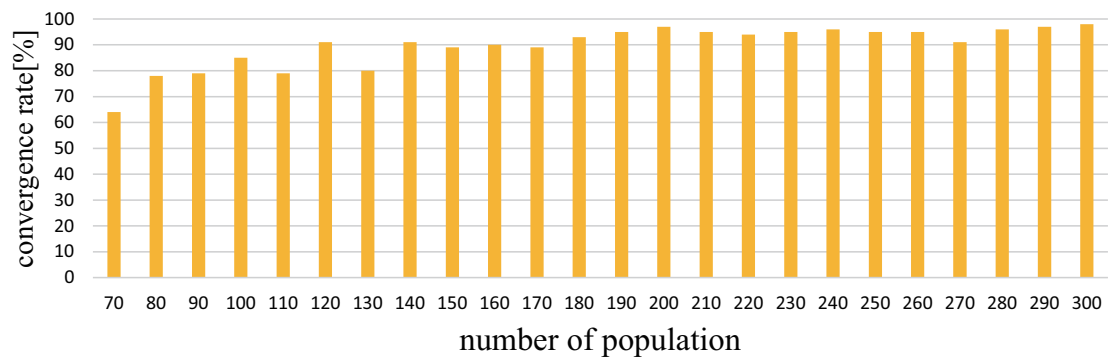


Fig. 2.20: Convergence rate with increasing penalty factor



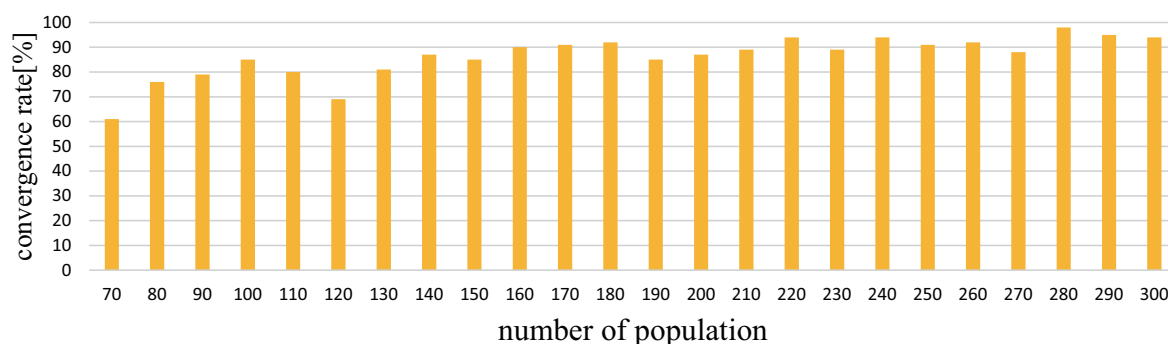


Fig. 2.21: Convergence rate with certain penalty factor

### 2.4.3 計算量の比較

本項では隠れ遺伝子を用いたGAと単純GAによる最適化の計算結果，及び計算量の比較を行い，提案する隠れ遺伝子を用いたGAの有効性の検証を行う．case1～case17までの最適化後の構造の質量を表2.4に示す．スティフナー本数を設計変数に含めた，隠れ遺伝子を用いたGAによる最適化計算で得られ最適構造の質量は8886.82であり，case1～case17の質量と比較して最も少ない結果が得られている．このことから，本研究で提案する隠れ遺伝子を用いたGAにより最適解に到達可能であることを確認できる．

表2.5に計算量の比較に用いる各caseの総計算個体数を示す．総計算個体数は各個体数で算出された総計算個体数の平均値，及び最小値とした．case0～case17までの総計算個体数の平均値と最小値のそれぞれの合計と2.3.3の隠れ遺伝子を使用したGAの総計算個体数の平均値と最小値の比較を表2.6に示す．従来手法での総計算個体数の平均値と最小値は提案手法よりも多い結果となっている．

本研究では，全18caseでの最適化を行い，提案手法である隠れ遺伝子を用いたGAによる最適化との計算量の比較を行っている．しかしながら，表2.6に示した従来手法での計算量は，検討を行うcase数に依存するため，比較対象としては不十分である．そこで，検討case数の影響を取り除くために，表2.6に示した，従来手法での総計算個体数の平均値の合計と最低値の合計を全case数である18で割ることで，1case

当たりの総計算個体数を算出する。この場合の提案手法との比較を表2.7示す。提案手法での最適解到達に要した計算量は、従来手法による最適化の1caseあたりの計算量の約2倍である。つまり、提案手法では従来手法の約2case分の計算量で最適解を取得することができる。本例題のような構造では2caseのみの検討で最適解を得ることは難しく、提案手法は従来手法に比べ少ない計算回数で最適解を得ることが可能な手法であるといえる。

Table 2.4: Mass of optimization result in case0-17

	bottom plate	side plate	top plate	mass
case0(optimization solution)	6	4	1	8886.82
case1	6	4	2	8924.89
case2	6	4	3	9077.33
case3	6	5	1	8943.70
case4	6	5	2	8981.77
case5	6	5	3	9129.91
case6	6	3	1	8973.45
case7	6	3	2	8999.68
case8	6	3	3	9146.85
case9	5	4	1	8942.80
case10	5	4	2	8920.68
case11	5	4	3	9135.56
case12	5	5	1	8999.68
case13	5	5	2	8977.56
case14	5	5	3	9192.44
case15	5	3	1	9034.92
case16	5	3	2	9021.80
case17	5	3	3	9236.68

Table 2.5: Calculation amount in case0-17

	number of population (average)	number of population (minimum)
case0 (optimization solution)	11379	8776
case1	12285	7151
case2	137119	111163
case3	24366	12636
case4	20711	13269
case5	58025	47094
case6	7440	3434
case7	15813	9461
case8	29694	14219
case9	19683	11084
case10	30367	18228
case11	68329	56654
case12	27089	21775
case13	54327	41902
case14	73666	60337
case15	13523	11287
case16	16974	10256
case17	37220	29764

Table 2.6: Comparative of calculation amount by proposed GA and simple GA

	number of population (average)	number of population (minimum)
proposed GA	74784	50610
simple GA (total)	646632	479712

Table 2.7: Comparative of calculation amount by proposed GA and simple GA per single case

	number of population (average)	number of population (minimum)
proposed GA	74784	50610
simple GA (per single case)	35924	26651

## 2.5 結言

本章では，設計変数の数が最適化の過程で変化する最適化問題に対して，隠れ遺伝子を用いたGAを提案した．この手法を用いて例題の最適化を行い有効性の検証を行った．その結果得た結論を以下に記す．

1. スティフナー本数を設計変数とした最適化では，設計変数の数が最適化の過程で変化するため，最適化を行うことができないという問題がある，この問題に対して目的関数，及び制約条件の計算には使用しない隠れ遺伝子を用いたGAを提案した．この手法を用いて構造最適化を行い最適解に到達することが可能であることを示した．
2. 単純GAと隠れ遺伝子を用いたGAの最適解到達にまで必要な計算量を比較を行った．その結果，従来手法と比較して少ない計算回数で最適解に到達できることを示した．

## 第3章 設計領域を考慮したFEM計算手法と最適化への応用

### 3.1 緒言

スティフナー本数を設計変数とした構造最適化においてFEMを使用する場合，スティフナー本数の変更に伴いFEMモデルの再生成，再解析が必要となる．そのため，構造最適化に膨大な時間を要する．そこで，本章ではこの問題を解決するための手法の検討を行う．

### 3.2 提案手法

#### 3.2.1 計算負荷の低減

FEMによる構造解析では，板厚等の物性値の変更箇所が全体の数%以下の場合においても，再解析を行う必要がある．そのため，最適化の過程で変更される領域の大きさによらず，全体剛性マトリックスを組み立て，方程式を解くという作業を行うため計算負荷が高くなる．そこで，変更領域のみを計算することで，変位を求めることが可能な計算手法についての検討を行った．

##### 3.2.1.1 計算手法

構造変更を行う場合，変更領域はFEMモデル全体ではなく一部分のみとなる場合が多く，構造変更領域と変更が行われない領域の2つに分割できる．古屋ら[81]はこの構造変更領域を $\beta$ ，それ以外の部分を $\alpha$ と定義したFEM計算手法を提案している．本研究で提案する手法はこのFEM計算手法を応用したものである．斜線で示し

た要素を構造変更要素とした場合の $\alpha, \beta$ それぞれの領域に分類される節点を Fig.3.1 に示す.

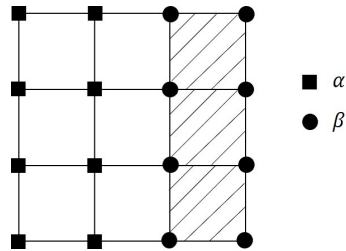


Fig. 3.1:  $\alpha$  and  $\beta$  of FEM model

式(3.1)の剛性方程式を解くことによってFEMによる構造解析を行う.

$$\mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{f} \quad (3.1)$$

$\mathbf{K}$  : 全体剛性マトリックス

$\mathbf{u}$  : 変位ベクトル

$\mathbf{f}$  : 荷重ベクトル

$\mathbf{K}$ を $\alpha, \beta$ の成分に分解したものを式(3.2)に示す.

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{\alpha\alpha} & \mathbf{K}_{\alpha\beta} \\ \mathbf{K}_{\beta\alpha} & \mathbf{K}_{\beta\beta} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

式(3.2)を用いて剛性方程式を表すと式(3.3)となる.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{\alpha\alpha} & \mathbf{K}_{\alpha\beta} \\ \mathbf{K}_{\beta\alpha} & \mathbf{K}_{\beta\beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_\alpha \\ \mathbf{x}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_\alpha \\ \mathbf{f}_\beta \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$\mathbf{x}_\alpha$  :  $\alpha$  節点の変位ベクトル

$\mathbf{x}_\beta$  :  $\beta$  節点の変位ベクトル

$\mathbf{f}_\alpha$  :  $\alpha$  節点の荷重ベクトル

$\mathbf{f}_\beta$  :  $\beta$  節点の荷重ベクトル

構造変更後の剛性方程式は $\mathbf{K}_{\alpha\alpha}$ に対して構造変更による剛性マトリックスの変化量 $\Delta\mathbf{K}$ を足し合わせた式(3.4)となる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{\alpha\alpha} & \mathbf{K}_{\alpha\beta} \\ \mathbf{K}_{\beta\alpha} & \mathbf{K}_{\beta\beta} + \Delta\mathbf{K}_{\beta\beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}'_{\alpha} \\ \mathbf{x}'_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{\alpha} \\ \mathbf{f}_{\beta} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$\mathbf{x}'_{\alpha}$  :  $\alpha$  節点の構造変更後の変位ベクトル

$\mathbf{x}'_{\beta}$  :  $\beta$  節点の構造変更後の変位ベクトル

式(3.4)を $\mathbf{x}'_{\alpha}$ と $\mathbf{x}'_{\beta}$ について展開すると式(3.5)となる。なお $\mathbf{G}$ は式(3.6)で表される全体剛性マトリックス $\mathbf{K}$ の逆行列である。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}'_{\alpha} \\ \mathbf{x}'_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{\alpha\alpha} & \mathbf{G}_{\alpha\beta} \\ \mathbf{G}_{\beta\alpha} & \mathbf{G}_{\beta\beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{\alpha} \\ \mathbf{f}_{\beta} - \Delta\mathbf{K}_{\beta\beta}\mathbf{x}'_{\beta} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G}_{\alpha\alpha} & \mathbf{G}_{\alpha\beta} \\ \mathbf{G}_{\beta\alpha} & \mathbf{G}_{\beta\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{\alpha\alpha} & \mathbf{K}_{\alpha\beta} \\ \mathbf{K}_{\beta\alpha} & \mathbf{K}_{\beta\beta} \end{bmatrix}^{-1} \quad (3.6)$$

式(3.5)をさらに $\mathbf{x}'_{\beta}$ について展開すると式(3.7)が得られる。

$$\mathbf{x}'_{\beta} = \mathbf{G}_{\beta\alpha}\mathbf{f}_{\alpha} + \mathbf{G}_{\beta\beta}\mathbf{f}_{\beta} - \mathbf{G}_{\beta\beta}\Delta\mathbf{K}_{\beta\beta}\mathbf{x}'_{\beta} \quad (3.7)$$

式(3.7)の右辺の第1項と第2項を足し合わせたものは式(3.3)より $\mathbf{x}_{\beta}$ となる。したがって $\mathbf{x}'_{\beta}$ は式(3.8)で表される。

$$\mathbf{x}'_{\beta} = [\mathbf{I} + \mathbf{G}_{\beta\beta}\Delta\mathbf{K}_{\beta\beta}]^{-1}\mathbf{x}_{\beta} \quad (3.8)$$

同様に式(3.5)を $\mathbf{x}'_\alpha$ について展開すると式(3.9)が得られる。

$$\mathbf{x}'_\alpha = \mathbf{x}_\alpha - \mathbf{G}_{\alpha\beta} \Delta \mathbf{K}_{\beta\beta} \mathbf{x}'_\beta \quad (3.9)$$

構造変更後の変位は式(3.8)と式(3.9)で求めることができる。変位 $\mathbf{x}'_\beta$ を求める場合の計算量は $\mathbf{G}_{\beta\beta}$ のサイズのマトリックス演算となる。そのため、本手法の計算量は全体FEMモデルのサイズに依存せず、構造変更領域 $\beta$ の大きさのみのよって定まる。

### 3.2.1.2 簡易モデルによる計算手法の検証

式(3.9)の計算の妥当性の検証を板の単純引張問題を用いて行う。Fig.3.2の物性値と境界条件を表3.1に示す。なお、本計算には2自由度の平面応力要素を用いる。

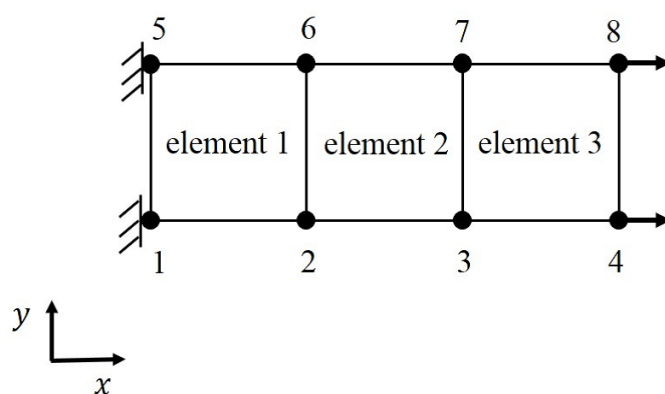


Fig. 3.2: Testing FEM model

Table 3.1: Material properties of the testing FEM model

size of element	30[mm]×30[mm]
thickness	0.01[m]
force	100[MN]
young's modulus	210[GPa]
poisson's ratio	0.3

Fig.3.2の要素2の板厚を2倍にした場合の市販ソルバーによる解析結果の変位と本計算手法を用いて計算されて変位をTable3.2に示す。Table3.2からわかるように通



常のFEMを用いて計算された変位と、本研究での提案手法で計算した変位は完全に一致し、本研究の提案手法の妥当性を確認できる。

Table 3.2: Comparative of displacement by commercial solver and proposed method

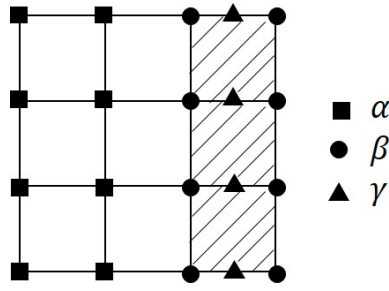
	commercial solver	proposed method	error[%]
$u_2$ [mm]	0.09211	0.09211	0
$v_2$ [mm]	0.01813	0.01813	0
$u_3$ [mm]	0.18817	0.18817	0
$v_3$ [mm]	0.01319	0.01319	0
$u_4$ [mm]	0.28324	0.28324	0
$v_4$ [mm]	0.01483	0.01483	0
$u_6$ [mm]	0.18817	0.18817	0
$v_6$ [mm]	-0.01319	-0.01319	0
$u_7$ [mm]	0.18817	0.18817	0
$v_7$ [mm]	-0.01319	-0.01319	0
$u_4$ [mm]	0.28324	0.28324	0
$v_4$ [mm]	-0.01483	-0.01483	0

### 3.2.2 自由度数の変更方法

スティフナーの本数を設計変数として構造最適化を行う場合、新たに配置されるスティフナーの位置に節点を定義する必要がある。しかし、節点をFEMモデルに追加しメッシュを作り直すことは複雑な作業が伴い容易ではない。そこで、FEMモデルを作り直すことなく節点を自由に配置することが可能な計算手法の検討を行った。

#### 3.2.2.1 計算手法

本手法は、前項で述べた計算量を低減する手法に対して、追加する節点の領域 $\gamma$ を追加し節点追加後のFEM計算を行う計算手法である。斜線で示した要素を構造変更要素とした場合の $\alpha, \beta, \gamma$ のそれぞれの領域に分類される節点をFig.3.3に示す。Fig.3.3に示したように節点を追加する領域 $\gamma$ は構造変更領域内のみ存在する。

Fig. 3.3:  $\alpha$  and  $\beta, \gamma$  of FEM model

節点追加後の剛性方程式を  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  の3領域に分解すると式(3.10)となる.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{\alpha\alpha} & \mathbf{K}_{\alpha\beta} & 0 \\ \mathbf{K}_{\beta\alpha} & \mathbf{K}_{\beta\beta} + \Delta\mathbf{K}_{\beta\beta} & \Delta\mathbf{K}_{\beta\gamma} \\ 0 & \Delta\mathbf{K}_{\gamma\beta} & \Delta\mathbf{K}_{\gamma\gamma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}'_{\alpha} \\ \mathbf{x}'_{\beta} \\ \mathbf{x}'_{\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{\alpha} \\ \mathbf{f}_{\beta} \\ \mathbf{f}_{\gamma} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

ここで,  $\mathbf{x}'_{\alpha}$ ,  $\mathbf{x}'_{\beta}$ ,  $\mathbf{x}'_{\gamma}$  は節点追加後の変位ベクトル,  $\mathbf{f}_{\alpha}$ ,  $\mathbf{f}_{\beta}$ ,  $\mathbf{f}_{\gamma}$  は節点追加前の荷重ベクトルを表している. 節点追加前には  $\gamma$  の節点が存在しないので  $\mathbf{f}_{\gamma}=0$  となる. 式(3.10)に  $\mathbf{f}_{\gamma}=0$  を代入し節点追加後の変位  $\mathbf{x}'_{\alpha}$ ,  $\mathbf{x}'_{\beta}$ ,  $\mathbf{x}'_{\gamma}$  について解くと式(3.11)となる.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G}_{\alpha\alpha} & \mathbf{G}_{\alpha\beta} & 0 \\ \mathbf{G}_{\beta\alpha} & \mathbf{G}_{\beta\beta} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{\alpha} \\ \mathbf{f}_{\beta} - \Delta\mathbf{K}_{\beta\beta}\mathbf{x}'_{\beta} - \Delta\mathbf{K}_{\beta\gamma}\mathbf{x}'_{\gamma} \\ -\Delta\mathbf{K}_{\gamma\gamma}^{-1}\Delta\mathbf{K}_{\gamma\beta}\mathbf{x}'_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}'_{\alpha} \\ \mathbf{x}'_{\beta} \\ \mathbf{x}'_{\gamma} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

なお, 式(3.11)の  $\mathbf{G}$  マトリックスは式(3.12)で示すように構造変更前の全体剛性マトリックスの逆行列である.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G}_{\alpha\alpha} & \mathbf{G}_{\alpha\beta} \\ \mathbf{G}_{\beta\alpha} & \mathbf{G}_{\beta\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{\alpha\alpha} & \mathbf{K}_{\alpha\beta} \\ \mathbf{K}_{\beta\alpha} & \mathbf{K}_{\beta\beta} \end{bmatrix}^{-1} \quad (3.12)$$

式(3.11)を整理し  $\mathbf{x}'_{\beta}$ ,  $\mathbf{x}'_{\gamma}$  の成分を抜き出すと式(3.13)を得る.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G}_{\beta\alpha}\mathbf{f}_{\alpha} + \mathbf{G}_{\beta\beta}(\mathbf{f}_{\beta} - \Delta\mathbf{K}_{\beta\beta}\mathbf{x}'_{\beta} - \Delta\mathbf{K}_{\beta\gamma}\mathbf{x}'_{\gamma}) \\ -\Delta\mathbf{K}_{\gamma\gamma}^{-1}\Delta\mathbf{K}_{\gamma\beta}\mathbf{x}'_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}'_{\beta} \\ \mathbf{x}'_{\gamma} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

式(3.13)に含まれる  $\mathbf{G}_{\beta\alpha}\mathbf{f}_\alpha + \mathbf{G}_{\beta\beta}\mathbf{f}_\beta$  は、節点追加前の剛性方程式である式(3.3)と式(3.6)から節点追加前の  $\beta$  節点変位  $\mathbf{x}_\beta$  となる。式(3.13)に  $\mathbf{G}_{\beta\alpha}\mathbf{f}_\alpha + \mathbf{G}_{\beta\beta}\mathbf{f}_\beta = \mathbf{x}_\beta$  を代入し  $\mathbf{x}'_\beta$ ,  $\mathbf{x}'_\gamma$  について解くと式(3.14)を得る。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I} + \mathbf{G}_{\beta\beta}\Delta\mathbf{K}_{\beta\beta} & \mathbf{G}_{\beta\beta}\Delta\mathbf{K}_{\beta\gamma} \\ \Delta\mathbf{K}_{\gamma\beta} & \Delta\mathbf{K}_{\gamma\gamma} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_\beta \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}'_\beta \\ \mathbf{x}'_\gamma \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

式(3.14)を用いることで、節点追加後の変位を求めることができる。さらに、式(3.14)は式(3.15)のように表現できる。

$$\left[ \begin{bmatrix} \mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{\beta\beta} & 0 \\ 0 & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{K}_{\beta\beta} & \Delta\mathbf{K}_{\beta\gamma} \\ \Delta\mathbf{K}_{\gamma\beta} & \Delta\mathbf{K}_{\gamma\gamma} \end{bmatrix} \right]^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_\beta \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}'_\beta \\ \mathbf{x}'_\gamma \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

式(3.15)から節点追加後の変位を求めるためには  $\mathbf{G}_{\beta\beta}, \Delta\mathbf{K}, \mathbf{x}_\beta$  の3つが必要であることがわかる。 $\Delta\mathbf{K}$ は構造変更領域の節点追加後の剛性マトリックスと節点追加前の剛性マトリックスの差である。節点を追加する場合の  $\Delta\mathbf{K}$ は節点追加後の剛性マトリックスを  $\mathbf{K}^a$ , 節点追加前の剛性マトリックスを  $\mathbf{K}^b$  とすると式(3.16)により計算される。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{\beta\beta}^b & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{K}_{\beta\beta} & \Delta\mathbf{K}_{\beta\gamma} \\ \Delta\mathbf{K}_{\gamma\beta} & \Delta\mathbf{K}_{\gamma\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{\beta\beta}^a & \mathbf{K}_{\beta\gamma}^a \\ \mathbf{K}_{\gamma\beta}^a & \mathbf{K}_{\gamma\gamma}^a \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

また、 $\mathbf{x}'_\alpha$  について式(3.11)を解くと式(3.17)となる。

$$\mathbf{x}'_\alpha = \mathbf{G}_{\alpha\alpha}\mathbf{f}_\alpha + \mathbf{G}_{\alpha\beta}(\mathbf{f}_\beta - \Delta\mathbf{K}_{\beta\beta}\mathbf{x}'_\beta - \Delta\mathbf{K}_{\beta\gamma}\mathbf{x}'_\gamma) \quad (3.17)$$

式(3.17)に含まれる  $\mathbf{G}_{\alpha\alpha}\mathbf{f}_\alpha + \mathbf{G}_{\alpha\beta}\mathbf{f}_\beta$  は節点追加前の剛性方程式である式(3.3)と式

(3.6)から節点追加前の変更領域外の変位  $\mathbf{x}_\alpha$  となるため, 節点追加後の構造変更領域外の変位  $\mathbf{x}'_\alpha$  は, 式(3.18)で求めることができる.

$$\mathbf{x}'_\alpha = \mathbf{x}_\alpha - \mathbf{G}_{\alpha\beta}(\Delta\mathbf{K}_{\beta\beta}\mathbf{x}'_\beta + \Delta\mathbf{K}_{\beta\gamma}\mathbf{x}'_\gamma) \quad (3.18)$$

### 3.2.2.2 簡易モデルによる計算手法の検証

単純な引張問題を例として Fig.3.4 に示したモデルに新たな節点9, 10を追加する計算を実行し, 提案手法の計算の妥当性の確認を行う. Fig.3.4の物性値と境界条件を表3.3に示す. なお, 本計算には2自由度の平面応力要素を用いる.

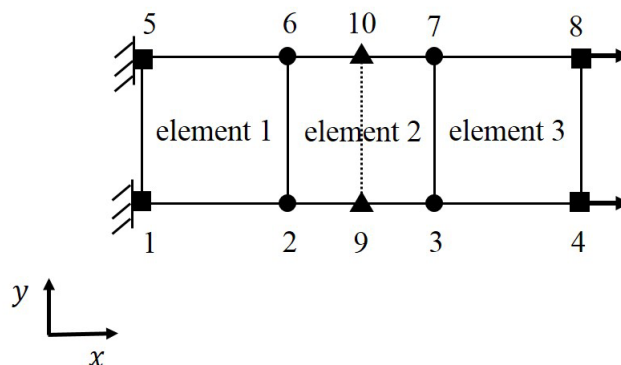


Fig. 3.4: Added nodes model

Table 3.3: Material properties of the testing FEM model

size of element	30[mm]×30[mm]
thickness	0.001[m]
force	100[MN]
young's modulus	210[GPa]
Poisson's ratio	0.3

市販ソルバーの解析による変位と提案手法を用いて計算を行った場合の変位の結果を比較したものを表3.4に示す. 表3.4の結果から提案手法の計算の妥当性を確認することができる.

Table 3.4: Comparative of displacement by commercial solver and proposed method

	commercial solver	proposed method	error[%]
$u_2$ [mm]	0.09244	0.09244	0
$v_2$ [mm]	0.01926	0.019265	0
$u_3$ [mm]	0.18807	0.18807	0
$v_3$ [mm]	0.01454	0.01454	0
$u_4$ [mm]	0.28335	0.28335	0
$v_4$ [mm]	0.01415	0.01415	0
$u_6$ [mm]	0.09244	0.09244	0
$v_6$ [mm]	-0.01926	-0.01926	0
$u_7$ [mm]	0.18807	0.18807	0
$v_7$ [mm]	-0.01454	-0.01454	0
$u_8$ [mm]	0.28335	0.28335	0
$v_8$ [mm]	-0.01415	-0.01415	0
$u_9$ [mm]	0.14061	0.14061	0
$v_9$ [mm]	0.01297	0.01297	0
$u_{10}$ [mm]	0.14061	0.14061	0
$v_{10}$ [mm]	-0.01297	-0.01297	0

本節で提案した手法を用いることで、以下に示すの2つのことが可能となる。

1. FEM計算のコスト削減
2. FEMモデルを再度生成することなく、節点を追加した構造のFEM解析

この提案する計算手法を用いてスティフナー本数を設計変数とした構造最適化を行う。

### 3.2.3 計算量の比較

本提案手法では構造変更領域のみを計算するため計算時間短縮が可能である。しかし、構造変更領域が広くなると、全体FEMモデルの計算をした方が計算時間が短くなる場合がある。そのため、本来なら計算時間の比較が必要であるが、スパースマトリックスの外部計算ルーチンには数多くの種類があり、使用する計算ルーチンによって計算時間が異なり計算時間を一意的に比較することが難しく、スパースマトリックスとフルマトリックスの計算時間の比較についても同様の問題が発生する

ため、今回は計算時間の比較ではなく、Fig.3.5に示した船体FEMモデルを例に計算量の比較を行った。この船体FEMモデルは節点数が78787である。全体剛性マトリックスはスパース性があるため、スカイライン法やバンドマトリックス法等 [82] でマトリックスを縮小し計算量を低減することができる。ここではバンドマトリックス法を使用した場合のマトリックスを用いて計算量の比較を行う。この船体FEMモデルの全体剛性マトリックスのバンド幅は節点自由度を1にした場合808であり、バンドマトリックスの要素数は $64 \times 10^6$ となる。なお、バンド幅は汎用コード (Patran) を用いて、最小となるように節点番号を振り直している。このバンドマトリックスと同じ要素数となるフルマトリックスのサイズは $7979 \times 7979$ となる。このことから、本計算手法を用いて計算量を低減するためには構造変更領域の節点数は7979以下でなければならない。これは、Fig.3.5に示したFEMモデルの節点数の10.1%に相当する。表3.5に最適化による構造変更箇所として想定される double bottom と upper deck の節点数と船体FEMモデルの全節点数に対する割合を示す。double bottom ならば5cargo holdを、upper deck ならば7cargo holdを、両者を構造変更範囲とした場合においても3cargo holdを構造変更範囲としても、その範囲内の節点数が全体の節点数の10.1%以下となるため、本計算手法を用いることで計算量を低減することが可能である。

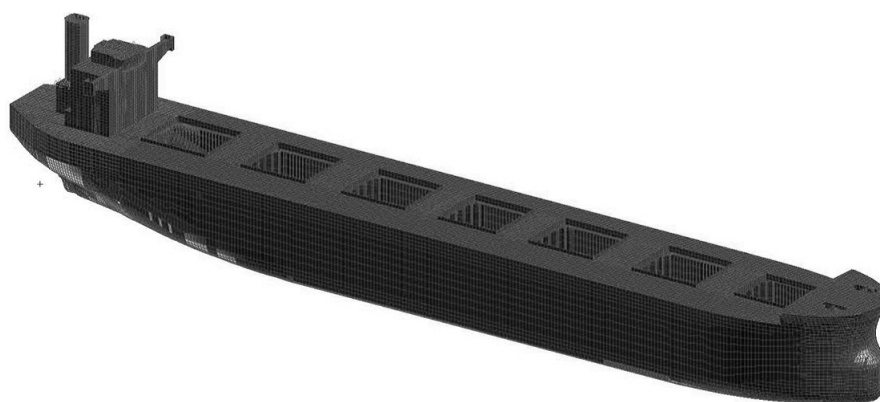


Fig. 3.5: FEM model of ship

Table 3.5: Ratio of structural modification part to the whole FEM model

region of modification	number of node	percentage
double bottom (1 cargo hold)	1478	2%
double bottom (3 cargo hold)	4434	6%
double bottom (5 cargo hold)	7390	9%
upper deck (1 cargo hold)	763	1%
upper deck (3 cargo hold)	2289	3%
upper deck (5 cargo hold)	3815	5%
upper deck (7 cargo hold)	5316	7%
double bottom + upper deck (1 cargo hold)	2241	3%
double bottom + upper deck (3 cargo hold)	6723	9%

### 3.2.4 提案手法を用いた最適化の手順

本提案手法を用いた最適化手順を Fig.3.6 に示す. また, 各項目での詳細を以下に記す.

- 1) 全体剛性マトリックスの逆行列である  $\mathbf{G}$  マトリックスの構造変更範囲の成分である  $\mathbf{G}_{\beta\beta}$  を作成する.
- 2) 設計案を作成する.
- 3) 構造変更範囲の  $\mathbf{K}_{\beta\beta}$  マトリックスの増分  $\Delta\mathbf{K}_{\beta\beta}$  を計算する.
- 4) 式 (3.8) または式 (3.15) により変位を計算し応力を算出する.
- 5) 目的関数の計算を行う.
- 6) 計算された目的関数の評価を行い, 最適解に収束していれば計算を終了する.  
収束していない場合は2) に戻る.

$\mathbf{G}_{\beta\beta}$  を取得するためには全体剛性マトリックス  $\mathbf{K}$  の逆行列  $\mathbf{G}$  を計算する必要がある. 逆行列の計算は計算負荷が高くなるが, 提案手法を用いた最適化では  $\mathbf{G}_{\beta\beta}$  は最初の1回のみ作成する. その後の最適化による構造変更の際には  $\Delta\mathbf{K}_{\beta\beta}$  を求め, 式

(3.8) または式(3.15)による計算を行うだけとなるので、計算負荷を低減することができる。  $\Delta K_{\beta\beta}$  の算出方法については付録 B に記載する。

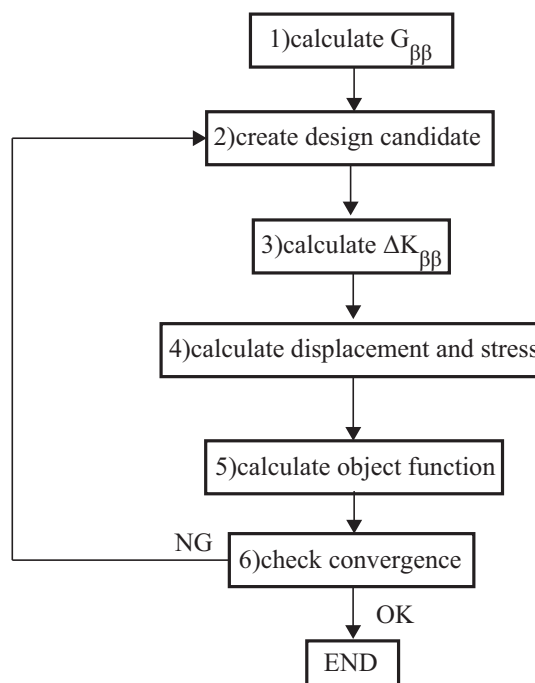


Fig. 3.6: Flow of proposed method

### 3.3 構造最適化

本節では前節で述べた計算手法を用いて、構造最適化を実行し提案手法の有効性を検証する。

#### 3.3.1 最適化対象モデル

提案手法の検討を行うための最適化対象のFEMモデルをFig.4.1に示す。このモデルは船体の二重底構造部分を模擬しており、top plateとbottom plateにステイフナーが取り付けられている。構造最適化の範囲はtop plateの箇所とするため、構造変更領域  $\beta$  はtop plateの全ての箇所となる。ステイフナー本数の最適化はtop plate部のステイフナーのみのため、節点追加領域  $\gamma$  は  $\beta$  領域内部 (top plate) に設定する。また、top plate部以外の領域を  $\alpha$  と設定する。



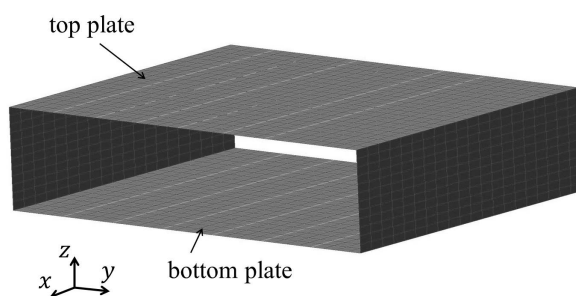


Fig. 3.7: The target model for optimization

### 3.3.2 設計変数

本例題の設計変数はtop plateの板部材の板厚及び、そこに設置されるスティフナーの本数・位置とする。スティフナーの本数を7本とした場合の設計変数をFig.3.8に示す。この場合、板厚の設計変数が $t_1 \sim t_8$ 、スティフナー位置の設計変数が $s_1 \sim s_7$ となり、全設計変数は15個になる。

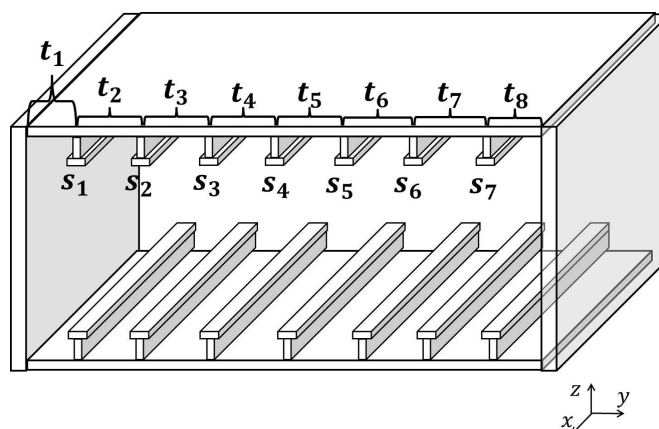


Fig. 3.8: The design variables of stiffener position and plate thickness in the case of 7 stiffeners

### 3.3.3 遺伝的アルゴリズム

本例題の最適化では、設計変数をスティフナーの本数・位置、及び板部材の板厚としている。これらの設計変数を用いた最適化は組合せ最適化問題となる。そのため、組合せ最適化問題に対して有効とされる遺伝的アルゴリズムを用いて最適化

を行う。遺伝的アルゴリズムでは設計変数を遺伝子列で表現する必要があるため、設計変数をFig.3.9のような遺伝子列とした。また、それぞれの設計変数を表す遺伝子のbit数をFig.3.10に示したように設定した。スティフナーの位置を表す設計変数 $s_1 \sim s_7$ からスティフナーの配置位置を決定する方法をFig.3.11に示される例を用いて説明する。長さ $l$ の板に対してスティフナーを取り付ける場合はstep1のように $l$ を設計変数 $s_1$ に与えられた6bitで表現できる10進数の最大値 $64(=2^6)$ に分割する。次に、step2のように設計変数 $s_1$ の値によって分割されたどの位置にスティフナーを設置するか決定する。2本目のスティフナーは、step3のように板部材の長さ $l$ から1本目のスティフナーの左からの距離 $a_1$ との差 $l - a_1$ を設計変数 $s_2$ に与えられた6bitで表現できる10進数の最大値( $=2^6$ )に分割し、step4で設計変数 $s_2$ の値によって位置を決める。3本目以降も同様に決定していく(step5)。この決定法では分割数(bit数)が大きい程配置位置の自由度が向上する。1本目と2本目のスティフナーの配置位置を表す設計変数は長い区間を分割するため、bit数を最も高く設定している。3本目以降は分割される部分の長さが短くなるためbit数を徐々に小さくすることで遺伝子列の長さを短くし、最適化への収束性を向上させる。なお、本例題は第2章で扱った最適化の過程で設計変数の数が増える最適化問題となる。そのため、第2章で提案した隠れ遺伝子を用いたGAを使用する。本最適化では表3.6に示すGAパラメータを使用した。

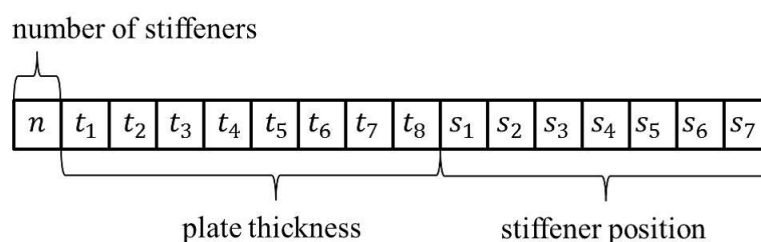


Fig. 3.9: The design variables expressed by gene

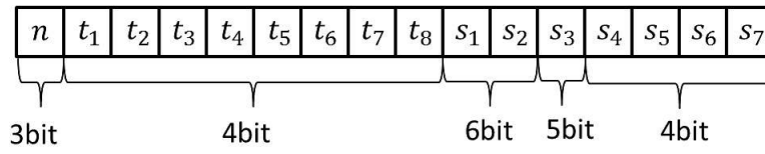


Fig. 3.10: The number of bit of the design variables

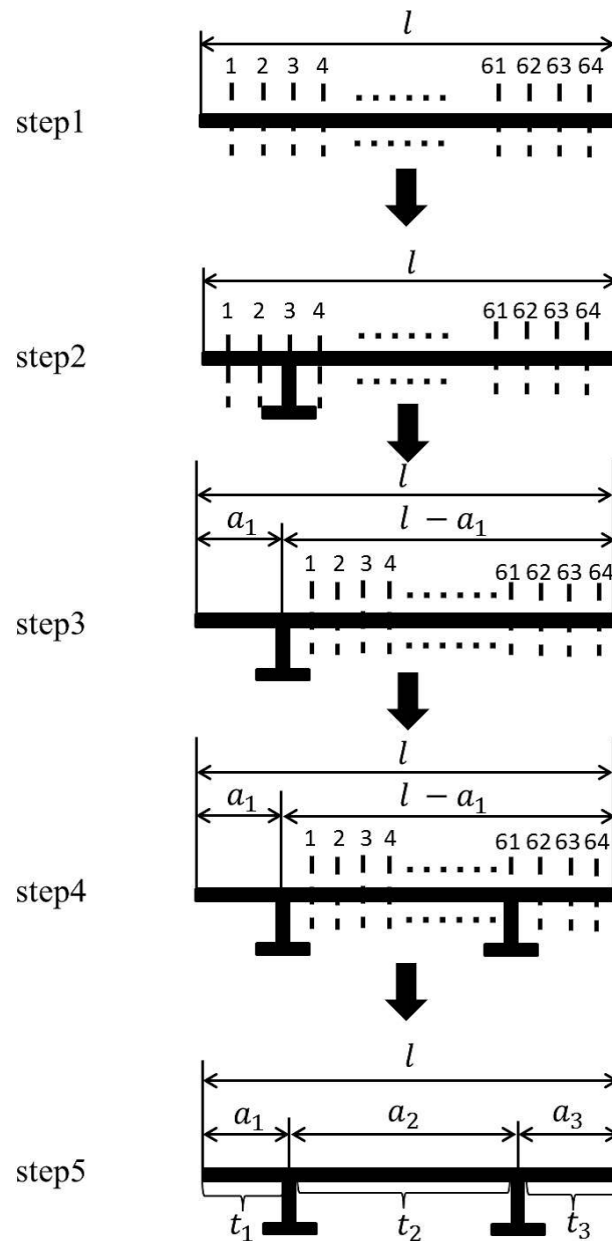


Fig. 3.11: The position of stiffeners

Table 3.6: GA parameter

number of population	120
number of elite	15
selection method	roulette
crossover rate	100%
mutation rate	3%

### 3.3.4 目的関数と制約条件

構造最適化での目的関数は質量最小化とし，式(3.19)に示す．設計変数はスティフナー本数である  $n$  とスティフナー間の板厚  $t_i$  であり，これらの可動範囲はそれぞれ  $1 \leq n \leq 7$ ， $10 \leq t_i \leq 25$  (1刻み)とする．またスティフナーの断面積  $A_s$  は一定とする．

$$f(n, \mathbf{t}, \mathbf{s}) = nA_s L \rho + \sum_{i=1}^{n+1} t_i s_i L \rho \quad (3.19)$$

$n$  : 上板のスティフナーの本数

$A_s$  : スティフナーの断面積 [mm<sup>2</sup>]

$L$  : x方向長さ [mm]

$\rho$  : 密度 [kg/mm<sup>3</sup>]

$t_i$  :  $i$ 番目の板厚 [mm]

$s_i$  :  $i$ 番目の各スティフナー間の長さ [mm]

最適化対象モデルではスティフナーがx方向に配置されており，スティフナーの影響はx方向応力に対して最も大きくなる．そこで，制約条件は式(3.20)で示す各スティフナー間のx方向応力の最大値  $\sigma_i$  を制約値以下とする．

$$g_i(s_i, t_i) = \frac{\sigma_i - \sigma_c}{\sigma_c} \leq 0 \quad (3.20)$$

$\sigma_i$  :  $i$  番目の top plate の板部材の x 方向最大応力 [MPa]

$\sigma_c$  : 板部材の応力の上限値 [MPa]

ここで  $\sigma_c = 260$  [MPa] と設定する．ペナルティ関数は式 (3.21) で表される．

$$\phi = \sum_{i=1}^{n+1} \max[0, g_i] \quad (3.21)$$

以上の目的関数とペナルティ関数を踏まえると拡張目的関数  $f_p$  は式 (3.22) で表される．

$$f_p(n, \mathbf{t}, \mathbf{s}) = f(n, \mathbf{t}, \mathbf{s}) + r\phi \quad (3.22)$$

$r$  : ペナルティ係数

ペナルティ係数は式 (3.23) と Fig.3.12 に示すものを使用した．このペナルティ係数は解の多様性を保持するため，初期世代では値を小さく設定した [78]．世代が進むに従い増加し，3000 世代で一定の値に収束させた．この一定値は制約条件を 1% 満たさないときに目的関数を約 20% 悪化させる数値である．

$$r = \begin{cases} -0.000040(x - 500)^2 + 100 & (x \leq 500) \\ 100 & (x > 500) \end{cases} \quad (3.23)$$

$x$  : 世代数

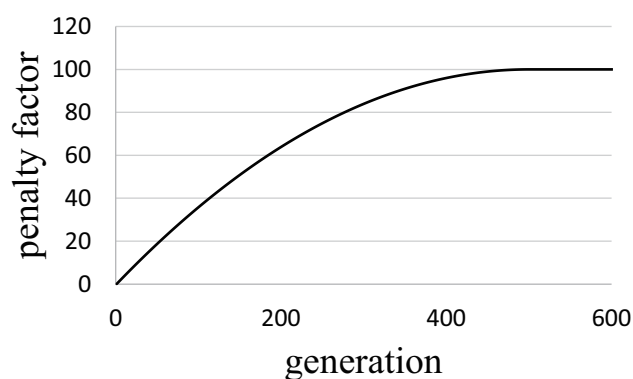


Fig. 3.12: Set penalty factor

### 3.3.5 境界条件・荷重条件

本研究での最適化を実行する際のFEMモデルの境界条件は、スティフナーの影響が大きくなるようにスティフナーの両端を完全固定とした (Fig.3.13 参照). また, 最適化により配置されるスティフナーの位置が適切となるかを検証するため, 荷重条件を Fig.3.14 の等分布荷重と Fig.3.15 の三角分布荷重に設定する. また, Fig.3.16 にスティフナーが7本取り付けられている構造に対して等分布荷重を加えた場合の変形図を, Fig.3.17 にスティフナーが7本取り付けられた構造に対して三角分布荷重を加えた場合の変形図を示す. Fig.3.16, Fig.3.17 から本研究対象モデルではスティフナー取り付け部の剛性が高く, スティフナー間の中央部で最大変位をとることがわかる.

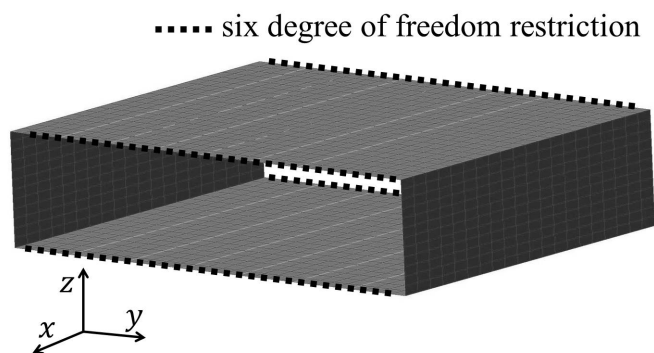


Fig. 3.13: Boundary condition

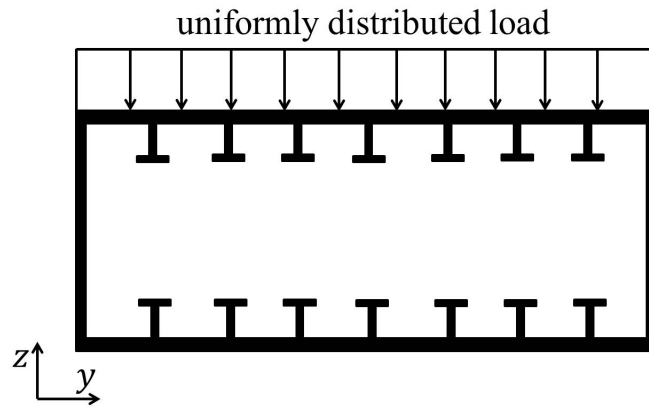


Fig. 3.14: Load case A

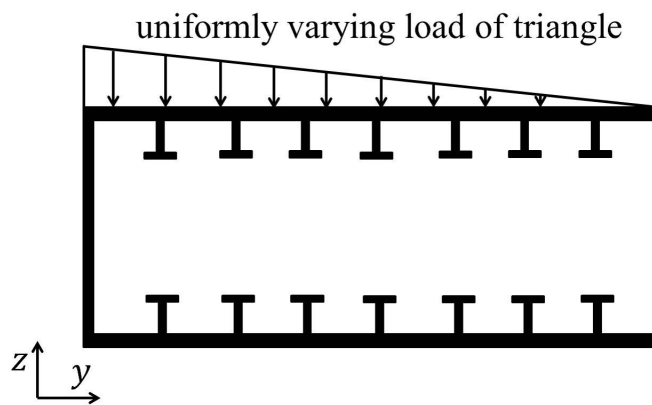


Fig. 3.15: Load case B

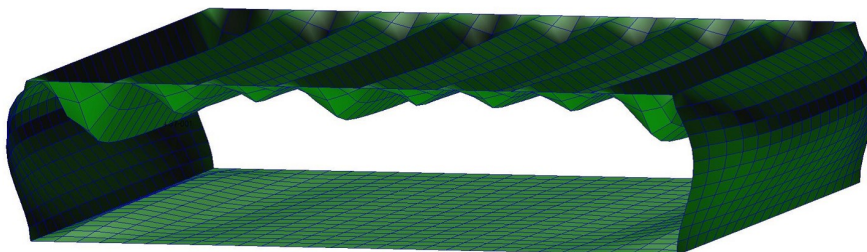


Fig. 3.16: Deformation of load case A

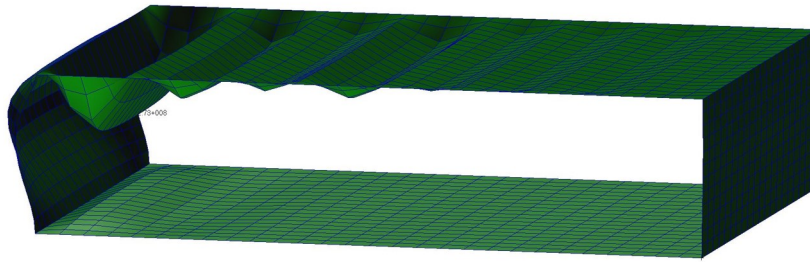


Fig. 3.17: Deformation of load case B

### 3.3.6 最適化結果

等分布荷重と三角分布荷重で構造最適化を実行し得られた結果から，本研究の提案手法の有効性を検証する．等分布荷重に対する最適化後のステッナー位置と板厚を Fig.3.18 に示す．また， Fig.3.19 に最適化後の構造の応力を示す．ステッナーの間での最大応力は制約値をわずかに下回り制約条件を満たしていることがわかる．左端から1本目のステッナー間の応力は他の場所より低くなっているが，22[mm]の板厚を最小変化量である1[mm]薄くした場合，応力は制約値を上回り制約条件を満たすことができない．このように，最適化で得られた板厚は制約条件を満たすことのできる最小の値である．

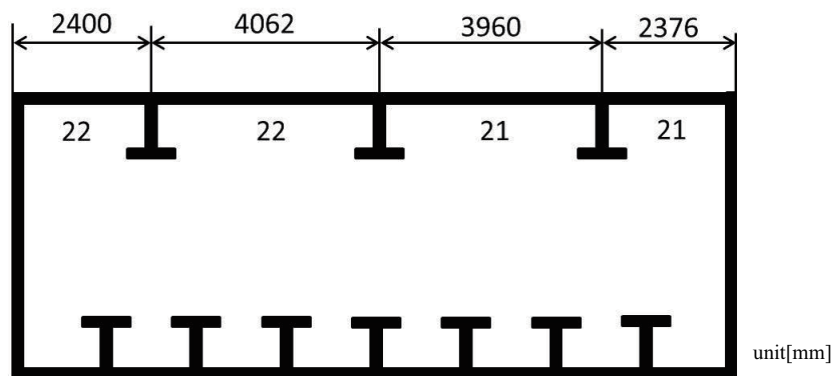


Fig. 3.18: Optimized structure in the case of load case A



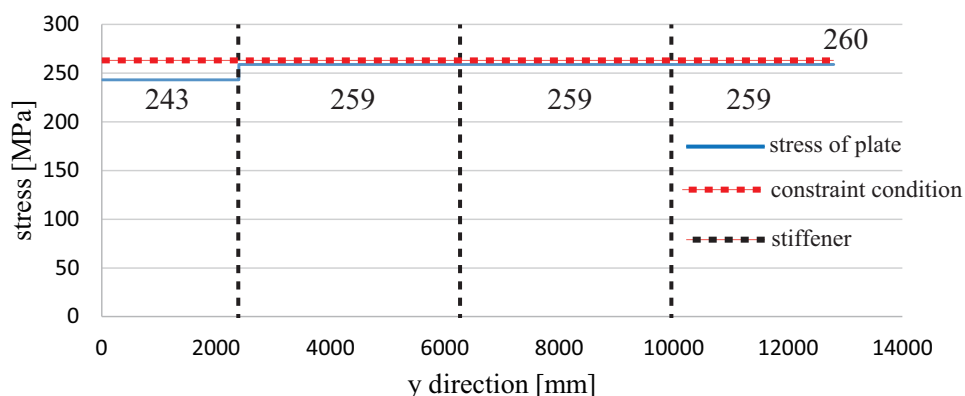


Fig. 3.19: Stress of top plate in the case of load case A

### 3.3.6.1 最適化結果の検証

等分布荷重を加えているため、最適化後の構造は左右対称になると考えられるが、Fig.3.18の最適化後の構造は想定される構造となっていない。これはスティフナーの位置を表す設計変数の値が1変化した場合のスティフナーの移動量(刻み)が大きいためである。Fig.3.10に示したbit数で3本のスティフナーを配置する場合、1本目のスティフナーの配置間隔は100mm刻み、2本目のスティフナーの配置間隔は162.5mm刻み、3本目のスティフナーの配置間隔は198mm刻みとなる。スティフナーを10mm刻みで配置できる場合、最適解はFig.3.20のように左右対称の解となる(真の最適化)。しかし、10mm刻みにスティフナーを配置するために必要なbit数では、組み合わせ数は $2 \times 10^{20}$ となる。今回の最適化計算に用いたbit数での組み合わせ数は $2 \times 10^9$ であり、10刻みの場合の方が組み合わせ数が多く最適化困難であるため、10mm刻みでの最適化は行わなかった。

Fig.3.21はスティフナー間の長さを今回の最適化計算に用いた刻みで最も真の最適解に近づけ、板厚を制約条件を満たすように決定した構造である。このように決定した構造(Fig.3.21)の質量とFig.3.18に示される今回の最適化計算によって得られた構造の質量を比較すると、最適化計算によって得られた構造の方がより少ない。このことから、Fig.3.10に示されるbit数を用いる場合、左右非対称ではあるが最適

化計算で得られた構造が最適解となる。

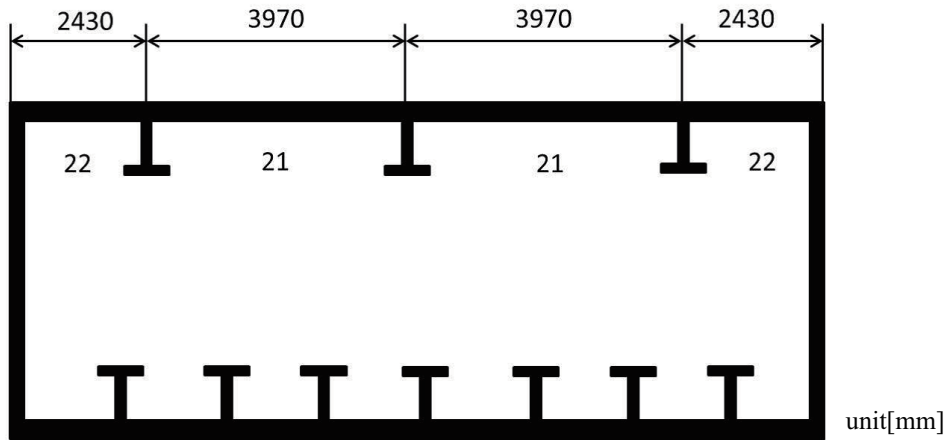


Fig. 3.20: Best optimized structure

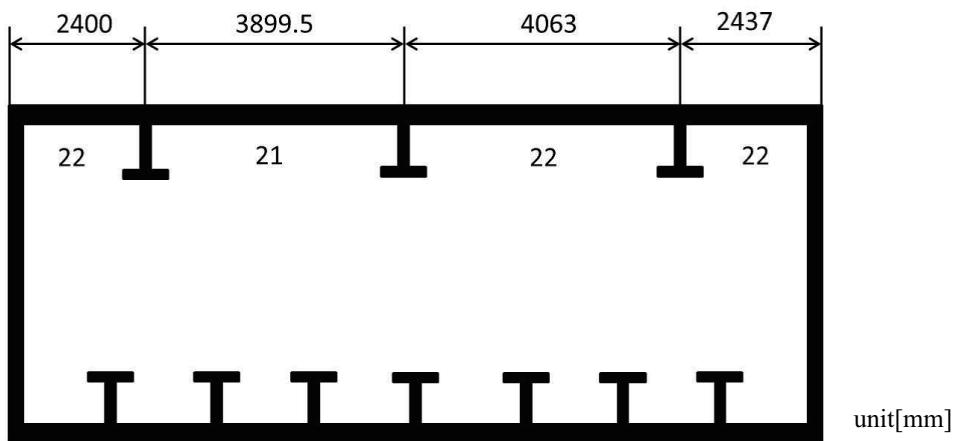


Fig. 3.21: Structure near the best optimal solution by present step

3.3.6.2 三角分布荷重の場合

Fig.3.22に示す三角分布荷重に対する最適化計算によって得られた構造では、荷重が大きい左側にスティフナーが多く配置されている。その結果、Fig.3.23に示すように、各板の応力は制約条件を適切な余裕で満足している。これより、Fig.3.22に示されるスティフナーの位置と板厚は三角分布荷重に対して妥当と思われる。

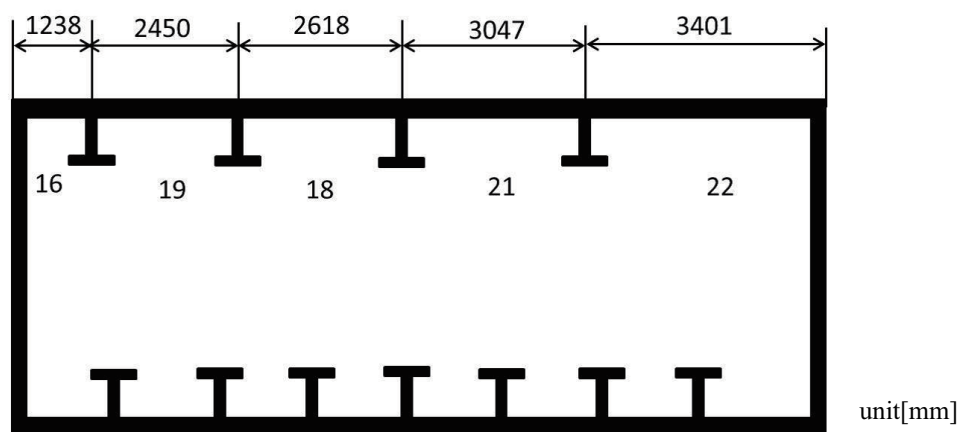


Fig. 3.22: Optimized structure in the case of load case B

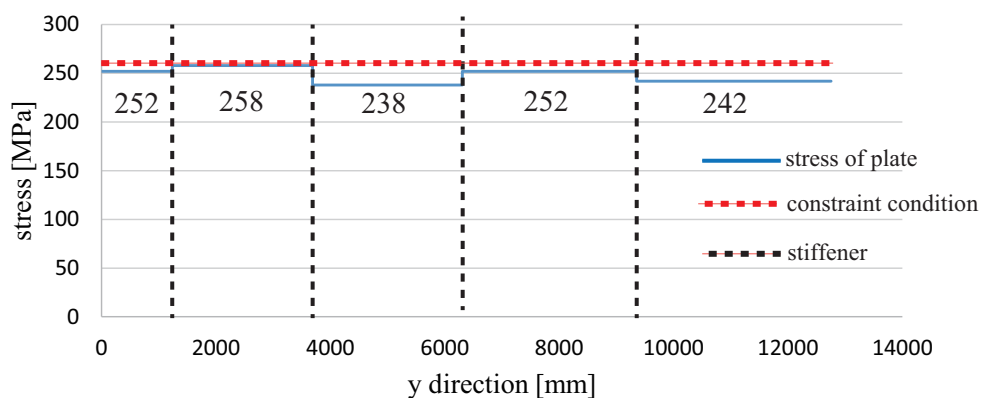


Fig. 3.23: Stress of top plate in the case of load case B

### 3.4 結言

本章では、船舶のスティフナーのレイアウトを考慮した構造最適化の検討を行った。スティフナー本数、及び位置が変更された場合においても、FEMモデルを作成することなく構造強度評価可能な手法、及び計算量を低減することのできる手法を提案し、検証モデルの最適化を行うことで提案手法の有効性を検証した。その結果得られた結論を以下に述べる。

1. 構造の一部分のみを構造変更した際に、構造変更領域のみを計算することで変位、応力が取得可能な手法を提案した。この手法を簡易モデルに適用することで精度を検証した結果、全体FEMモデルを解析した場合と同一の結果を得ることが可能であることを示した。また、本手法を用いることでの計算量低減の効果を検証した結果、構造変更領域が全体FEMモデルの10.1%以下であれば効果があることも示した。
2. スティフナーの本数が変更されFEMモデルの節点数が変更される際に、FEMモデルを作り直すことなく変位、応力が取得可能な手法を提案した。この手法を簡易モデルに適用することで精度を検証した結果、FEMモデルを作り直し解析した場合と同一の結果を得ることが可能であることを示した。
3. 本章で提案した計算手法を二重底部を模擬した構造に適用し、等分布荷重と三角分布荷重両方の荷重条件で必要最低限の本数のスティフナーが適切な位置に設置された結果をが得られることを示した。現状では困難であったスティフナーのレイアウトを考慮した構造最適化を実行し最適構造得ることが可能となった。

## 第4章 多種類の設計変数を有する構造最適化

### 4.1 緒言

第3章では設計変数を板厚，スティフナー本数，スティフナー位置の3種類とし構造最適化を行った．本章ではさらにスティフナーの形状を設計変数として加えた最適化を行う．スティフナー形状を加えることで設計変数の種類は4種類となり，第3章で扱った最適化問題に比べ設計案の組み合わせ数が増え複雑化する．そのため，第2章で提案した隠れ遺伝子を用いたGAではこれら4種類の設計変数の組み合わせ最適化問題の最適解を得るために多くの最適化計算を必要とし，時間的制約から最適化困難となる．そこで，この問題を解決するため本章では隠れ遺伝子を用いたGAと他の最適化手法を組み合わせたHybrid GAを使用した構造最適化について検討する．

### 4.2 設計変数

本節では研究対象構造，及び最適化を行う際の設計変数の取り扱いについて述べる．

#### 4.2.1 最適化対象モデル

本研究において最適化を行うFEMモデルをFig.4.1に示す．このFEMモデルは船体の二重底構造部を模擬しており，top plateとbottom plateに対して $x$ 方向にスティフナーが取り付けられている．本研究で構造最適化を行う範囲はtop plate部の板厚とスティフナーとする．

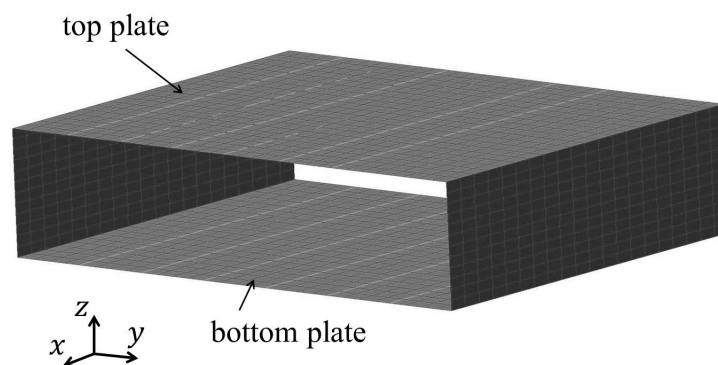


Fig. 4.1: Target model for optimization

#### 4.2.2 設計変数の分類

Fig.4.1に示したFEMモデルの設計変数について述べる．本研究では設計変数はスティフナーの本数・位置・形状，及び板部材の板厚の4種類とする．スティフナーの本数が5本の場合の設計変数をFig.4.2に示す．この場合，板厚の設計変数が $t_1 \sim t_6$ ，スティフナー間の距離(スパン)の設計変数が $s_1 \sim s_6$ となる．さらに，スティフナー本数とスティフナー形状を示す設計変数を，それぞれ， $n$ と $m_1 \sim m_5$ とし，合計18の設計変数となる．なお，スティフナー形状はFig.4.3, 表4.1に示す8つの候補の中から選択する方式を採用する．

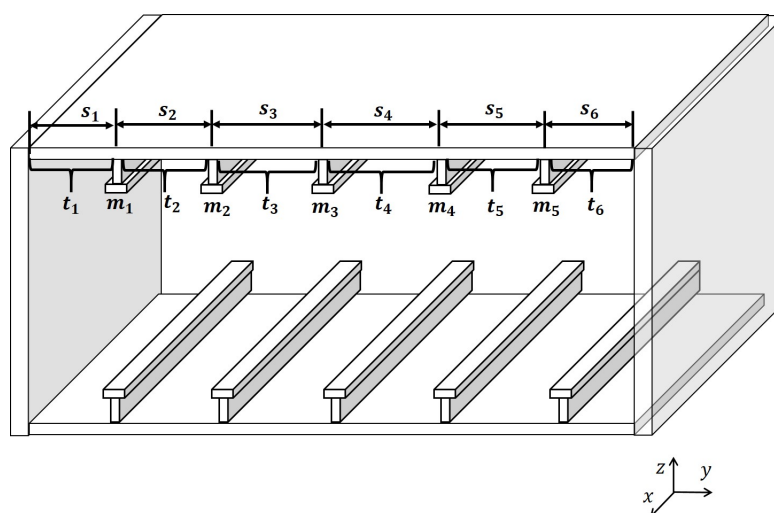


Fig. 4.2: Design variables in this study

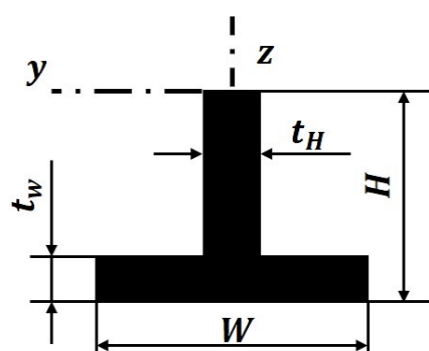


Fig. 4.3: Cross section of stiffener

Table 4.1: Shape of stiffener

number	$W$ [mm]	$H$ [mm]	$t_W$ [mm]	$t_H$ [mm]	$A$ [mm <sup>2</sup> ]	$I_y$ [mm <sup>4</sup> ]	$I_z$ [mm <sup>4</sup> ]
0	60	60	20	30	2400	$3.68 \times 10^6$	$4.50 \times 10^5$
1	80	80	20	30	3400	$1.01 \times 10^7$	$9.88 \times 10^5$
2	100	105	25	30	4900	$2.66 \times 10^7$	$1.13 \times 10^6$
3	120	90	30	30	5400	$2.27 \times 10^7$	$4.46 \times 10^6$
4	150	125	25	25	7250	$5.93 \times 10^7$	$7.39 \times 10^6$
5	180	150	30	30	9000	$1.16 \times 10^8$	$1.49 \times 10^7$
6	200	180	40	40	13600	$2.42 \times 10^8$	$2.74 \times 10^7$
7	400	240	40	40	24000	$8.83 \times 10^8$	$2.14 \times 10^7$

本研究で扱う4種類の設計変数の中でスティフナー本数とスティフナー形状の2種類は離散変数となる。残りの2種類の設計変数であるスパン及び板厚は、実際の船舶の設計ではスパンの最小変更量は1mm、板厚は0.5mmとして扱う離散変数である。しかし、最小変更量が非常に小さく連続変数として扱うことに問題はないため、本研究では連続変数として扱う。GAは離散変数の最適化では有効な手段であるが、連続変数を遺伝子で表現する場合、連続的に変化すると感じられる程度の細かな増分が必要であり、1つの設計変数のbit数が多くなる。そのため、連続変数をGAで扱うと遺伝子長が非常に長くなり、計算回数の増加、及び最適解への収束安定性が低下する。そこで、本研究では連続変数であるスパン $s_i$ 及び板厚 $t_i$ をGA以外の最適化手法で最適化を行い、スティフナー本数 $n$ ・形状 $m_i$ をGAで取り扱うこととする。

### 4.2.3 目的関数と制約条件

本研究の構造最適化では目的関数を質量最小化とし、式(4.1)に示す。スティフナー本数である  $n$  とスティフナー間の板厚  $t_i$  の可動範囲はそれぞれ  $1 \leq n \leq 7$ ,  $5 \leq t_i \leq 25$  とする。

$$f(n, \mathbf{A}, \mathbf{t}, \mathbf{s}) = \sum_{i=1}^n A_i L \rho + \sum_{i=1}^{n+1} t_i s_i L \rho \quad (4.1)$$

$n$  : 上板のスティフナーの本数

$A_i$  :  $i$  番目のスティフナーの断面積 [ $\text{mm}^2$ ]

$L$  :  $x$  方向長さ [ $\text{mm}$ ]

$\rho$  : 密度 [ $\text{kg}/\text{mm}^3$ ]

$t_i$  :  $i$  番目の板厚 [ $\text{mm}$ ]

$s_i$  :  $i$  番目のスパン [ $\text{mm}$ ]

制約条件は式(4.2)に示した各スティフナー間の板部材の最大変位  $w_i$  が制約条件値  $w_c$  以下とするものと、式(4.3)に示した各スティフナー間の板部材の最大応力  $\sigma_i$  が制約条件値  $\sigma_c$  以下とする2つの条件とする。変位と応力の制約条件を同時に満たす最適化を行うべきではあるが、本研究ではそれぞれの制約条件の場合での手法の検証を行うため、制約条件を変位とした場合と応力とした場合の異なる最適化計算を行う。

$$w_i \leq w_c \quad (4.2)$$

$$\sigma_i \leq \sigma_c \quad (4.3)$$



### 4.3 提案最適化手法

本節ではGAと組み合わせる最適化手法について説明する。前節で述べたように、扱う設計変数はスパン及び板厚であり、これらを設計変数とした構造最適化に特化した手法を提案する。

#### 4.3.1 提案最適化手法の手順

FEMによる構造解析は計算負荷が高く、最適化により繰り返し行くと最適化に長い時間を要する。そこで、本最適化手法はFEM計算を用いない計算負荷の低い推測式とFEM計算の両方を用いることで最適化時間の短縮を図る。Fig.4.4にこの提案最適化手法の手順を示す。また各項目での操作内容を以下に示す。

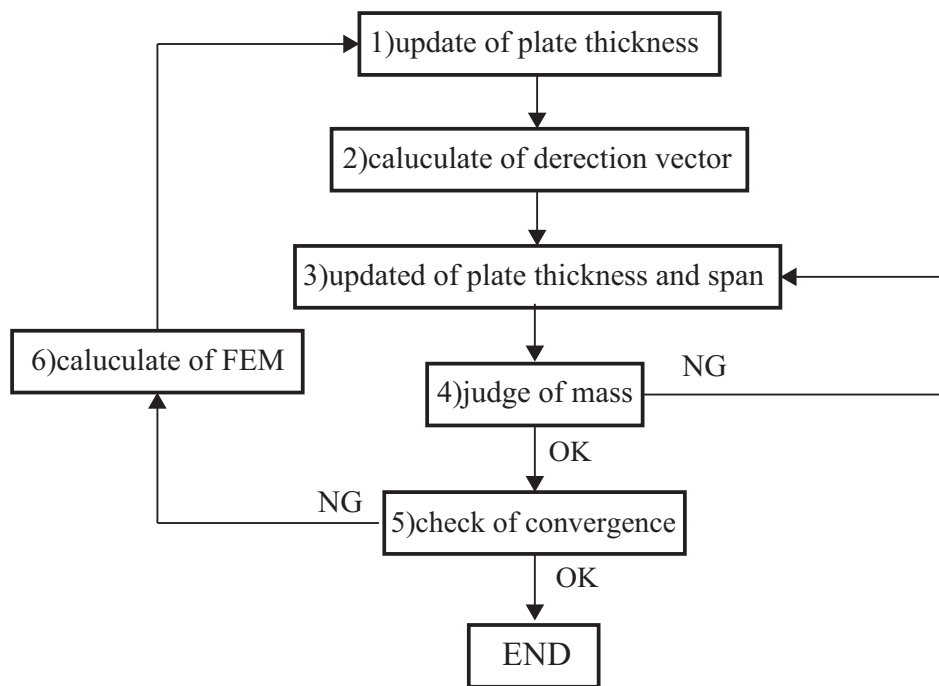


Fig. 4.4: Flow of proposed optimization method

- 1) 板厚の最適化を行い、変位または応力を制約条件の限界値に近づける。最適化方法の詳細については4.3.1.1で述べる。

- 2) 質量を軽くするための適切なスパンの変更比率を計算する。なお、本研究ではこの各スパンの変更比率を有するベクトルを変更ベクトルと定義する。この変更ベクトルの具体的な計算方法については4.3.1.2で述べる
- 3) 算出した変更ベクトルを用いてスパンを変更する。その後、板厚を変更し質量を計算する。この計算は推測式を用いる。詳細については4.3.1.3で述べる。
- 4) 質量が最小値であるかの判断を行う。最小値となるまで、3)の計算を繰り返す。
- 5) 収束判定を行う。1)での設計案と同じ設計案であれば計算を終了する。
- 6) FEMによる計算を実行し、1)に戻る。

本提案最適化手法は、FEMによる計算量を必要最低限に抑えた最適化手法である。3),4)では繰り返し計算を行う必要があるが、本最適化手法ではFEMではなく4.3.1.1で述べる推測式を用いることで計算コストの低減を図る。しかし、この推測式は解析精度がFEM解析に比べて悪いため、推測式のみを用いての最適化は実行できず、3),4)の計算終了後FEM解析を実行し、誤差を修正する必要がある。

#### 4.3.1.1 板厚の更新式(変位制約の場合)

本研究での板厚の変更法について説明する。Fig.4.1に示した最適化対象モデルのスティフナー間の板部材の最大変位は、板曲げ問題として扱うことが可能である。そのため、スティフナー間の板部材の最大変位  $w_{max}$  と板厚及びスパンの関係は式(4.4)で表される[83]。

$$w_{max} = \beta \frac{ps^4}{Et^3} \quad (4.4)$$

$p$  : 等分布荷重 [N/mm<sup>2</sup>]

$E$  : ヤング率 [N/mm<sup>2</sup>]

$t$  : 板厚 [mm]

$s$  : スパン [mm]

$\beta$  : 周辺境界条件による補正係数

現在の設計案の状態を添え字  $a$  とし, 次ステップの設計案の状態を添え字  $a+1$  とすると, 式(4.4)は式(4.5), 式(4.6)となる.  $\beta$ は周辺境界条件やアスペクト比によって決定される補正係数であり, スティフナー剛性の変更やスパンの変更により値が変化する. しかし, 今回の計算で行うスティフナー剛性, スパンの変更量の範囲内では  $\beta$ の値は微小な変化となるため, 式(4.5)と式(4.6)の  $\beta$ は同値とした.

$$w_a = \beta \frac{ps_a^4}{Et_a^3} \quad (4.5)$$

$$w_{a+1} = \beta \frac{ps_{a+1}^4}{Et_{a+1}^3} \quad (4.6)$$

式(4.6)の変位  $w_{a+1}$ を制約条件の値である  $w_c$ とすると, 式(4.6)のスパン  $s_{a+1}$ と板厚  $t_{a+1}$ は制約条件を満たす値であるといえる. つまり, 式(4.5), 式(4.6)より制約条件を満たす  $t_{a+1}$ を式(4.7)で求めることができる.

$$t_{a+1} = t_a \sqrt[3]{\frac{s_{a+1}^4}{s_a^4} \frac{w_a}{w_c}} \quad (4.7)$$

スパンが変化しない ( $s_a = s_{a+1}$ ) 場合, 制約条件を満たす  $t_{a+1}$ を式(4.8)で求めるこ

とができる。

$$t_{a+1} = t_a \sqrt[3]{\frac{w_a}{w_c}} \quad (4.8)$$

Fig.4.4の1)では式(4.8)を用いて板厚を最適化する。  $w_a$  はFEM解析により得れた変位を用いる。なお、式(4.7)の推定式は現在のスパン、板厚、応力の関係からスパン変更後の板厚を推測するものであり、元となっている式(4.4)で計算される変位はFEMの解析結果とは一致しない。

#### 4.3.1.2 変更ベクトルの算出方法

設計変数であるスパンは、伸ばす方向と縮める方向に変更することができる。効率良く質量最小の設計案に到達するためには、どのスパンをどのような比率で変更するかを決定する必要がある。そこで、スパンの変更方向及び変更量を決定する方法についてFig.4.5に示したモデルを例に説明する。

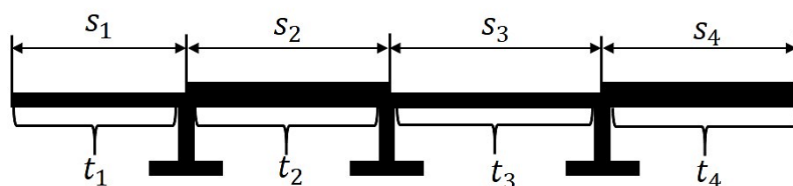


Fig. 4.5: Example model for calculating direction vector

スパンの変更ベクトルを求めるためには、スパンの変更が質量に対してどのような影響を与えるかを調べる必要がある。そこで、影響を調べるため式(4.9)に示すように  $i$  番目のスパンを  $s_\alpha$  増加させる。  $s_\alpha$  は任意の値となる。  $i$  番目のスパンを増加させたことにより、全体の長さ  $\sum_{i=1}^4 s_i$  が元の長さより長くなってしまいうため、  $i$  以外のスパンを均等に減少することで全体の長さを保つ。このようにスパンを変更

した際の質量  $V_i$  を計算する。質量  $V_i$  はスパンを変更した際に質量に対してどのような影響を与えるかの指針となる。

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} = L\rho \begin{bmatrix} s_1 + s_\alpha & s_2 - \frac{s_\alpha}{3} & s_3 - \frac{s_\alpha}{3} & s_4 - \frac{s_\alpha}{3} \\ s_1 - \frac{s_\alpha}{3} & s_2 + s_\alpha & s_3 - \frac{s_\alpha}{3} & s_4 - \frac{s_\alpha}{3} \\ s_1 - \frac{s_\alpha}{3} & s_2 - \frac{s_\alpha}{3} & s_3 + s_\alpha & s_4 - \frac{s_\alpha}{3} \\ s_1 - \frac{s_\alpha}{3} & s_2 - \frac{s_\alpha}{3} & s_3 - \frac{s_\alpha}{3} & s_4 + s_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$V_i$  と初期質量  $V_{initial}$  の差を変更ベクトル  $\mathbf{d}$  と定義し、式 (4.10) に示す。

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} - \mathbf{V}_{initial} \quad (4.10)$$

$\mathbf{d}$  は全てのスパンを  $s_\alpha$  変更した際の質量の変化量を表している。 $d_i$  の値が+の場合、 $i$  番目のスパンを伸ばすことにより質量が増加することを示している。また、 $d_i$  の値が-の場合は  $i$  番目のスパンを伸ばすことで質量が減少することを示している。このように算出された  $\mathbf{d}$  を用いてスパンを変更することで、効率良く質量を減少させることを試みる。

#### 4.3.1.3 スパンと板厚の変更(変位制約の場合)

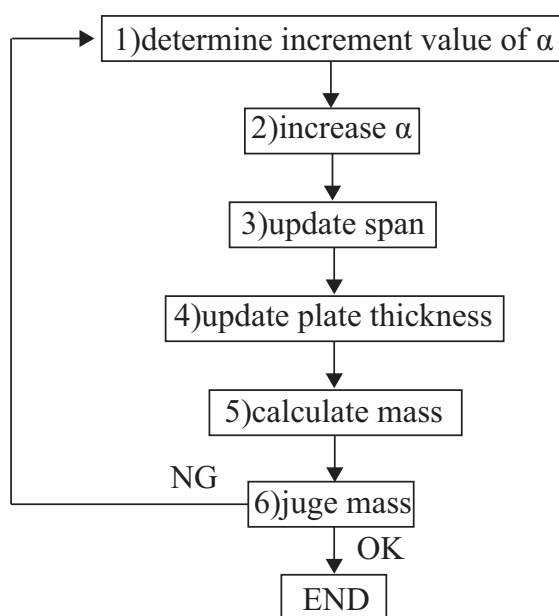
変更後のスパン  $s_{\alpha+1}$  は式 (4.11) により求める。ここでの  $\alpha$  は任意の数値である。

$$s_{\alpha+1} = \alpha \mathbf{d} + s_\alpha \quad (4.11)$$

Fig.4.6 に式 (4.11) の  $\alpha$  を探索する手順を示す。また、操作の詳細を以下に記す。

- 1)  $\alpha$  の増分値を任意に設定する。この増分値は設計変数であるスパンの最小変化量である刻みを表す。

- 2) 設定された増分値に従い $\alpha$ の値を増加させる。
- 3) 2)で得られた $\alpha$ を用いて式(4.11)によりスパンを変更する。
- 4) スパン変更後制約条件である変位の値が変わるため,式(4.7)を用いて板厚を変更し変位の値を保つ。
- 5) 4)で変更されたスパン及び板厚の場合の質量を計算する。
- 6) 1)に戻り計算を繰り返す。前ステップより質量が増加した場合,最小値に到達したと判断し計算を終了する。

Fig. 4.6: Flow of  $\alpha$  search

この方法ではスパン変更後に制約条件を満たすための板厚  $t_{a+1}$  を式(4.7)により推測することにより, FEM 計算を行うことなく計算コストを抑えて最小質量の探索を行うことが可能となる。

### 4.3.2 提案最適化手法の検証

本項では前項で述べたGAと組み合わせる提案最適化手法の検証を行う。この提案手法で扱う設計変数はFig.4.1に示したモデルのスパンと板厚であり、目的関数は式(4.1)に示した質量から設計変数に含んでいないスティフナー質量を除いたものとする。荷重条件はFig.4.7に示す等分布荷重及びFig.4.8に示す三角分布荷重とし、制約条件は変位及び応力とした4パターンでの最適化を行う。なお、GAで取り扱う設計変数であるスティフナー本数及び形状は本数を4、形状を6に固定している。

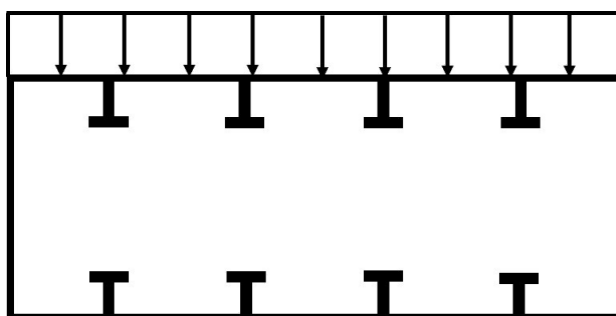


Fig. 4.7: Uniformly distributed load

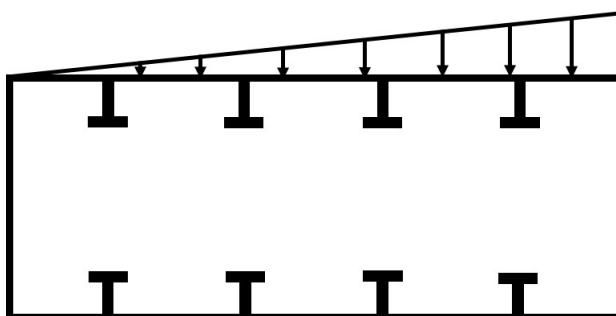


Fig. 4.8: Uniformly varying load of triangle

## 4.3.2.1 制約条件：変位 荷重条件：等分布荷重の場合

制約条件は  $w_c = 42\text{mm}$  と設定し、荷重条件は top plate 部に等分布荷重を加え、構造最適化を実行した。Fig.4.9 に最適化の過程を示す。横軸は FEM 計算の回数を示しており、縦軸は目的関数である質量を示している。FEM による計算回数が 17 回を超えた時点で質量が変化しなくなり、最適解に収束したことがわかる。なお、FEM 計算が 4 回目の時点で収束値と同等の質量が得られているが、この設計案は制約条件を満足していない。最適化後の構造は Fig.4.10 に示したものとなった。各スティフナー間の板部材の最大変位  $w_i$  の値は左から順に 42mm, 42mm, 41mm, 42mm, 42mm となり、制約条件を満たしている。本計算により得られた構造が最適解であるかの検証を行うため、Fig.4.10 の近傍の構造の質量との比較を行った。この比較対象となる構造は Fig.4.10 のスパンを変化させ、制約条件を満たすために板厚を変化させたものである。なお、スパンの変更量はスパン変更後に板厚が制約条件を満足するため最小刻みである 0.1mm 以上変化する程度である 10mm とその 2.5 倍である 25mm とした。これらの構造の質量を表 4.2 に示す。表 4.2 から最適化計算により得られた Fig.4.10 の構造が最も質量が少なく、最適解であることが確認できる。

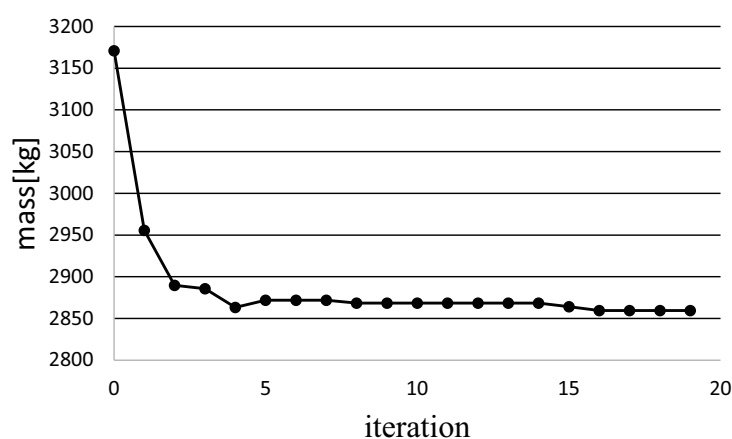


Fig. 4.9: History of mass with displacement constraint and uniformly distributed load



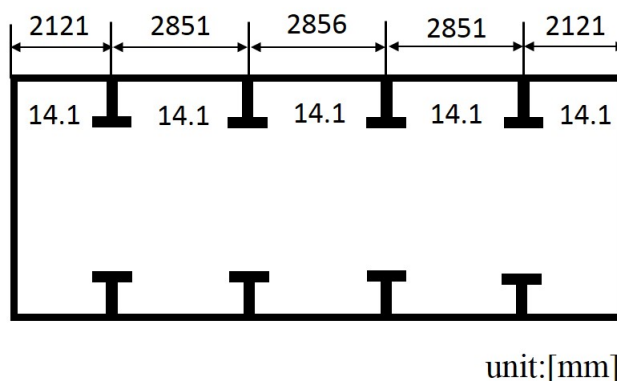


Fig. 4.10: Structure of optimization result with displacement constraint and uniformly distributed load

Table 4.2: Comparison of mass

$S_1$ [mm]	$S_2$ [mm]	$S_3$ [mm]	$S_4$ [mm]	$S_5$ [mm]	mass[kg]
$t_1$ [mm]	$t_2$ [mm]	$t_3$ [mm]	$t_4$ [mm]	$t_5$ [mm]	
2121	2851	2856	2851	2121	2851.58
14.1	14.1	14.1	14.1	14.1	
2121 + 10	2851 - 10	2856	2851 - 10	2121 + 10	2854.18
14.2	14	14.2	14	14.2	
2121 - 10	2851 + 10	2856	2851 + 10	2121 - 10	2853.54
14	14.2	14.1	14.2	14	
2121 + 25	2851 - 25	2856	2851 - 25	2121 + 25	2858.74
14.5	13.8	14.3	13.8	14.4	
2121 - 25	2851 + 25	2856	2851 + 25	2121 - 25	2862.23
13.8	14.5	14	14.5	13.8	
2121	2851 + 10	2856 - 20	2851 + 10	2121	2859.61
14.1	14.3	13.9	14.3	14.1	
2121	2851 - 10	2856 + 20	2851 - 10	2121	2856.12
14.1	14	14.4	14	14.1	
2121	2851 + 25	2856 - 50	2851 + 25	2121	2870.80
14.1	14.5	13.8	14.5	14.1	
2121	2851 - 25	2856 + 50	2851 - 25	2121	2854.72
14.2	13.8	14.6	13.8	14.2	

## 4.3.2.2 制約条件:変位 荷重条件:三角分布荷重の場合

制約条件は  $w_c = 42\text{mm}$  と設定し、荷重条件は top plate 部に三角分布荷重を加え、構造最適化を実行した。Fig.4.11 に最適化の過程を示す。横軸は FEM 計算の回数を示しており、縦軸は目的関数である質量を示している。FEM による計算回数が 18 回を超えた時点で質量が変化しなくなり、最適解に収束したことがわかる。なお、FEM 計算が 3 回目の時点で収束値と同等の質量が得られているが、この設計案は最適解を満足していない。最適化後の構造は Fig.4.12 に示したものとなった。各スティフナー間の板部材の最大変位  $w_i$  の値は左から順に 42mm, 42mm, 42mm, 42mm, 42mm となり、制約条件を満たしている。スティフナーの配置位置は荷重の大きな部分に密に配置されており本最適化計算で得られた最適解は妥当な構造である。本計算により得られた構造が最適解であるかの検証を行うため、4.3.2.1 と同様に、Fig.4.12 の近傍の構造の質量との比較を行った結果を表 4.3 に示す。表 4.3 から最適化計算により得られた Fig.4.12 の構造が最も質量が少なく、最適解であることが確認できる。

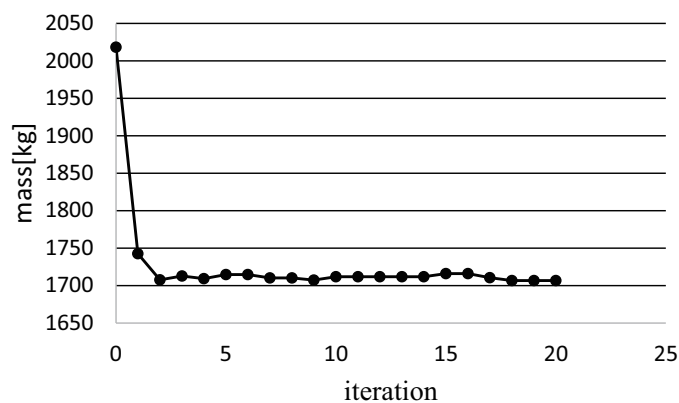


Fig. 4.11: History of mass with displacement constraint and uniformly varying load of triangle

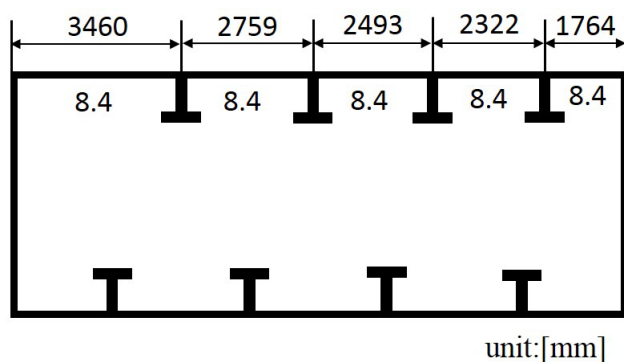


Fig. 4.12: Structure of optimization result with displacement constraint and uniformly varying load of triangle

Table 4.3: Comparison of mass

$S_1$ [mm]	$S_2$ [mm]	$S_3$ [mm]	$S_4$ [mm]	$S_5$ [mm]	mass[kg]
$t_1$ [mm]	$t_2$ [mm]	$t_3$ [mm]	$t_4$ [mm]	$t_5$ [mm]	
3460	2759	2493	2322	1764	1713.37
8.4	8.4	8.4	8.4	8.4	
3460 + 10	2759 - 10	2493	2322	1764	1723.59
8.5	8.4	8.5	8.5	8.3	
3460 - 10	2759 + 10	2493	2322	1764	1718.52
8.4	8.5	8.4	8.5	8.3	
3460 + 25	2759 - 25	2493	2322	1764	1720.56
8.6	8.2	8.5	8.5	8.3	
3460 - 25	2759 + 25	2493	2322	1764	1716.37
8.2	8.7	8.4	8.5	8.3	
3460	2759 + 10	2493 - 10	2322	1764	1718.52
8.4	8.5	8.4	8.5	8.3	
3460	2759 - 10	2493 + 10	2322	1764	1724.84
8.4	8.4	8.6	8.5	8.4	
3460	2759 + 25	2493 - 25	2322	1764	1714.07
8.3	8.7	8.2	8.5	8.3	
3460	2759 - 25	2493 + 25	2322	1764	1722.11
8.5	8.2	8.7	8.4	8.4	

3460	2759	2493 + 10	2322 - 10	1764	1721.21
8.4	8.4	8.6	8.4	8.4	
3460	2759	2493 - 10	2322 + 10	1764	1722.17
8.4	8.5	8.4	8.6	8.3	
3460	2759	2493 + 25	2322 - 25	1764	1723.54
8.5	8.4	8.7	8.2	8.4	
3460	2759	2493 - 25	2322 + 25	1764	1718.15
8.4	8.5	8.2	8.7	8.3	
3460	2759	2493	2322 + 10	1764 - 10	1715.85
8.4	8.4	8.4	8.6	8.2	
3460	2759	2493	2322 - 10	1764 + 10	1717.28
8.4	8.4	8.5	8.4	8.4	
3460	2759	2493	2322 + 25	1764 - 25	1719.65
8.4	8.4	8.4	8.8	8.1	
3460	2759	2493	2322 - 25	1764 + 25	1715.85
8.4	8.4	8.5	8.2	8.6	

4.3.2.3 制約条件：応力 荷重条件：等分布荷重の場合

制約条件に応力を使用する場合は，4.3.2.1, 4.3.2.2 で用いた変位の推測式を応力の推測式に変更する．4辺を支持された板曲げ問題の最大応力  $\sigma_{max}$  は式(4.12)である[83]. 変位の場合と同様に展開すると制約条件  $\sigma_c$  を満足するための板厚  $t_{a+1}$  は式(4.13)で推測され，スパン変更後に制約条件  $\sigma_c$  を満足する板厚  $t_{a+1}$  は式(4.14)から推測することができる．

$$\sigma_{max} = \beta \frac{ps^2}{Et^2} \tag{4.12}$$

$$t_{a+1} = t_a \sqrt{\frac{\sigma_a}{\sigma_c}} \tag{4.13}$$

$$t_{a+1} = t_a \frac{s_{a+1}}{s_a} \sqrt{\frac{\sigma_a}{\sigma_c}} \tag{4.14}$$

これらの推測式を用いて制約条件を  $\sigma_c = 235\text{MPa}$  に変更し、最適化を実行した。Fig.4.13 は最適化の過程を示しており、FEM 計算の回数が4を超えると、質量が増加している。これは、Fig.4.14 に示したスパン  $s_1$  が短くなると、FEM 計算による応力  $\sigma_1$  が増加するという推測式と逆の現象が生じているためである。本手法で用いている式 (4.14) は4辺支持板の最大応力を表す式 (4.12) が基になっており、隣接する板の影響は考慮されていない。そのため、 $s_1$  と  $s_2$  の比が大きくなると隣接する板の影響が大きくなり FEM 解析結果は推測式で予想されるスパンと応力の関係と異なる傾向となると考えられる。

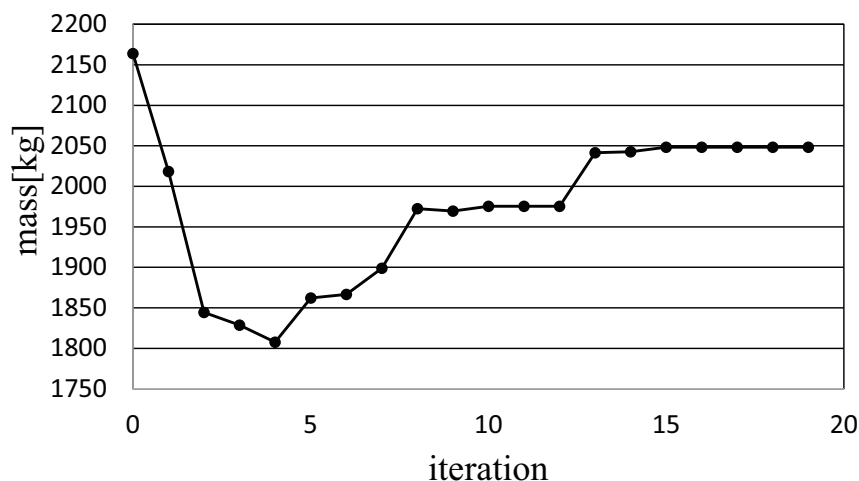


Fig. 4.13: History of mass with stress constraint

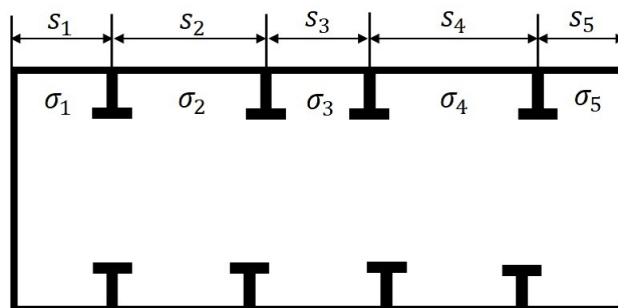


Fig. 4.14: Relation between span and stress

そこで、この現象が起こった際には以下の変更した推測式を用いて最適化を行う。

$$t'_{a+1} = \frac{t_{a+1} - t_a}{s_{a+1} - s_a} (s'_{a+1} - s'_a) + t_a \quad (4.15)$$

ステップ  $a$  と  $a+1$  の板厚とスパンの値を使い感度を求め、新たな板厚  $t'_{a+1}$  を求めるものである。この方法を用いて最適化を行った場合の計算過程を Fig.4.15 に、最適化後の構造を Fig.4.16 に示す。5回目の計算で質量が増加しているがこれは前述した現象が起こっているためである。5回目の計算が終了した時点で4回目と5回目の板厚とスパンの値を使い式(4.15)による計算に切り替える。6回目以降、目的関数に変化はなく最適解に収束していることがわかる。制約条件である各スパンの最大応力は左から順に 235MPa, 232MPa, 232MPa, 232MPa, 235MPa と制約条件を満たしている。本計算により得られた構造が最適解であるかの検証を行うため、4.3.2.1と同様に、Fig.4.16の近傍の構造の質量との比較を行った。制約条件である応力は変位に比べてスパンの変化の影響を受けにくいため、スパンの変更量を変位制約条件の場合より増やし、板厚が最小刻みである0.1mm変化する程度の値である30mmとした。さらに、50mmの場合の質量の計算も行った。これらの構造の質量を表4.4に示す。表4.4から最適化計算により得られたFig.4.16の構造が最も質量が少なく、最適解であることが確認できる。

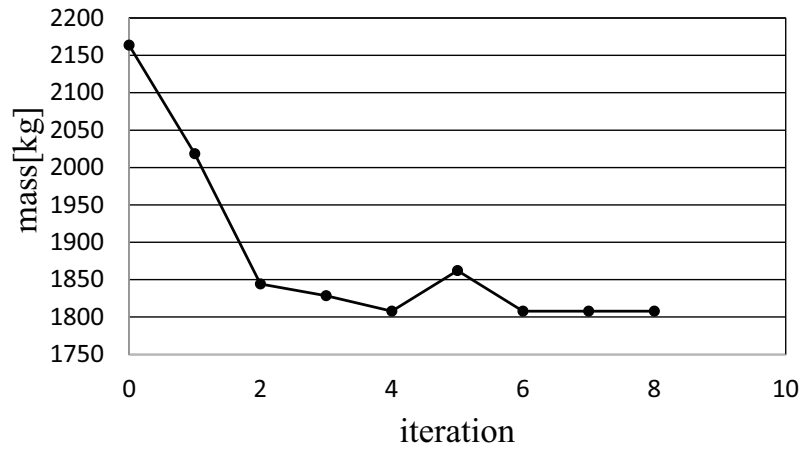


Fig. 4.15: History of mass with stress constraint when equation is changed

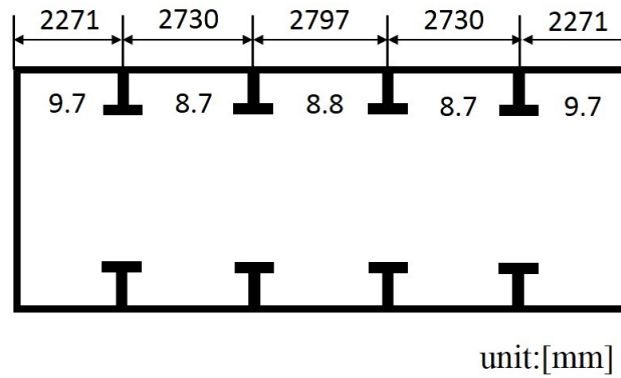


Fig. 4.16: Structure of optimization result with stress constraint

Table 4.4: Comparison of mass

$S_1$ [mm]	$S_2$ [mm]	$S_3$ [mm]	$S_4$ [mm]	$S_5$ [mm]	mass[kg]
$t_1$ [mm]	$t_2$ [mm]	$t_3$ [mm]	$t_4$ [mm]	$t_5$ [mm]	
2271	2730	2797	2730	2271	1806.78
9.7	8.7	8.8	8.7	9.7	
2271 + 30	2730 - 30	2797	2730 - 30	2271 + 30	1815.50
9.8	8.7	8.9	8.7	9.8	
2271 - 30	2730 + 30	2797	2730 + 30	2271 - 30	1813.22
9.8	8.7	8.8	8.7	9.8	
2271 + 50	2730 - 50	2797	2730 - 50	2271 + 50	1839.88
9.9	8.8	9.0	8.8	9.9	
2271 - 50	2730 + 50	2797	2730 + 50	2271 - 50	1824.11
9.9	8.8	8.7	8.8	9.9	
2271	2730 + 30	2797 - 60	2730 + 30	2271	1808.02
9.9	8.7	8.5	8.7	9.9	
2271	2730 - 30	2797 + 60	2730 - 30	2271	1850.58
9.7	9.0	9.2	9.0	9.7	
2271	2730 + 50	2797 - 100	2730 + 50	2271	1832.82
10.0	8.9	8.5	8.9	10.0	
2271	2730 - 50	2797 + 100	2730 - 50	2271	1859.27
9.7	9.1	9.2	9.1	9.7	

#### 4.3.2.4 制約条件：応力 荷重条件：三角布荷重の場合

制約条件を応力、荷重条件を三角分布荷重とした最適化を行った。Fig.4.17は最適化の過程をFig.4.18は最適後の構造を示している。8回目の計算で質量が増加しているがこれは前述のFEM解析結果と推測式の傾向が異なる現象が起こっているためである。8回目の計算が終了した時点で7回目と8回目の板厚とスパンの値を使い式(4.15)による計算に切り替える。9回目以降、目的関数に変化はなく最適解に収束していることがわかる。制約条件である各スパンの最大応力は左から順に235MPa, 232MPa, 232MPa, 232MPa, 235MPaと制約条件を満たしている。スティフナーの配置位置は荷重の大きな部分に密に配置されており本最適化計算で得られた構造は妥当な構造である。本計算により得られた構造が最適解であるかの検証を行うため、



4.3.2.3と同様に，Fig.4.18の近傍の構造の質量との比較を行った結果を表4.5に示す。表4.5から最適化計算により得られたFig.4.18の構造が最も質量が少なく，最適解であることが確認できる。

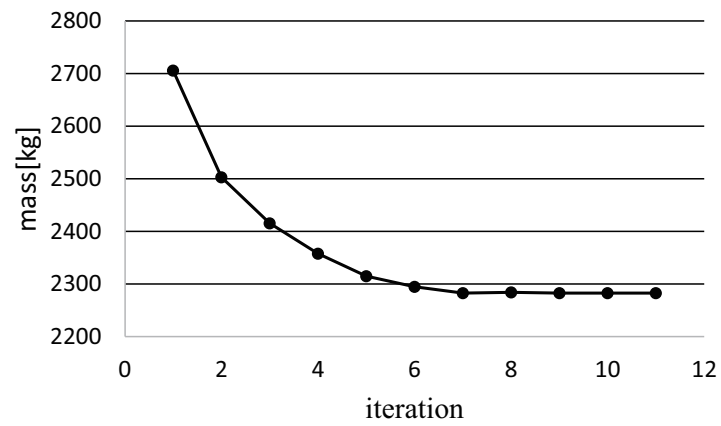


Fig. 4.17: History of mass with stress constraint and uniformly varying load of triangle

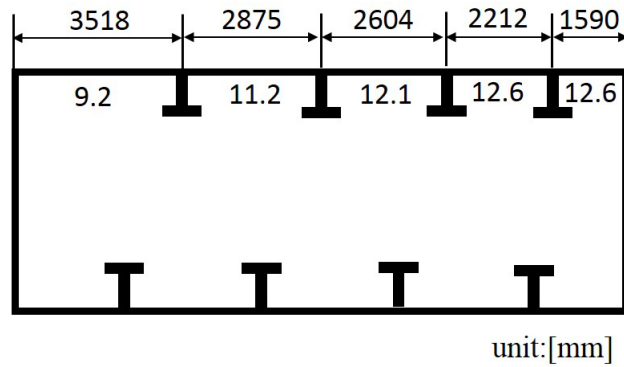


Fig. 4.18: Structure of optimization result with stress constraint and uniformly varying load of triangle

Table 4.5: Comparison of mass

$S_1$ [mm]	$S_2$ [mm]	$S_3$ [mm]	$S_4$ [mm]	$S_5$ [mm]	mass[kg]
$t_1$ [mm]	$t_2$ [mm]	$t_3$ [mm]	$t_4$ [mm]	$t_5$ [mm]	
3568	2825	2604	2212	1590	2274.87
9.2	11.2	12.1	12.6	12.6	
3568 + 30	2825 - 30	2604	2212	1590	2274.87
9.2	11.2	12.2	12.6	12.6	
3568 - 30	2825 + 30	2604	2212	1590	2283.84
9.3	11.2	12.1	12.6	12.7	
3568 + 50	2825 - 50	2604	2212	1590	2277.41
9.2	11.2	12.2	12.6	12.6	
3568 - 50	2825 + 50	2604	2212	1590	2289.92
9.4	11.2	12.1	12.6	12.7	
3568	2825 + 30	2604 - 30	2212	1590	2291.57
9.4	11.2	12.1	12.7	12.7	
3568	2825 - 30	2604 + 30	2212	1590	2292.28
9.2	11.3	12.4	12.6	12.6	
3568	2825 + 50	2604 - 50	2212	1590	2297.43
9.5	11.3	12.0	12.7	12.7	
3568	2825 - 50	2604 + 50	2212	1590	2301.28
9.2	11.4	12.5	12.6	12.6	
3568	2825	2604 + 30	2212 - 30	1590	2295.82
9.2	11.3	12.5	12.6	12.6	
3568	2825	2604 - 30	2212 + 30	1590	2299.86
9.3	11.2	12.1	13.0	12.8	
3568	2825	2604 + 50	2212 - 50	1590	2298.05
9.2	11.5	12.5	12.4	12.6	
3568	2825	2604 - 50	2212 + 50	1590	2290.55
9.3	11.2	11.8	13.0	12.9	
3568	2825	2604	2212 + 30	1590 - 30	2299.53
9.3	11.2	12.1	13.0	12.8	
3568	2825	2604	2212 - 30	1590 + 30	2288.66
9.3	11.2	12.3	12.6	12.6	
3568	2825	2604	2212 + 50	1590 - 50	2302.03
9.3	11.2	12.1	13.0	12.9	
3568	2825	2604	2212 - 50	1590 + 50	2282.53
9.3	11.2	12.4	12.3	12.6	

## 4.3.3 提案最適化手法と既存最適化手法との比較

本提案手法の有効性を示すために既存の勾配を用いた最適化手法である共役勾配法との最適化計算量の比較を行った。最適化の対象構造物をスティフナーが5本配置されたFig.4.19に示したものとし、設計変数を板厚とスパン、目的関数を質量最小化、制約条件を応力とした構造最適化を提案手法と共役勾配法により実行した。計算量は最適化の過程で最も計算負荷が高いFEM計算の回数を対象とする。なお、今回は簡易的な式(4.16)に示す簡易的な応力推定式を用いる。この応力推定式を使用した回数をFEM計算回数とする。

最適化を行った結果、提案手法と共役勾配法それぞれが最適化で必要としたFEM計算回数は表4.6に示したものとなった。提案手法ではFEM計算回数が共役勾配法の0.7%で最適化を得ることができており、非常に少ない計算量での最適化が可能であることを示している。

$$\sigma_i = \frac{s_i}{100} + \frac{3000}{t_i^2} \quad (4.16)$$

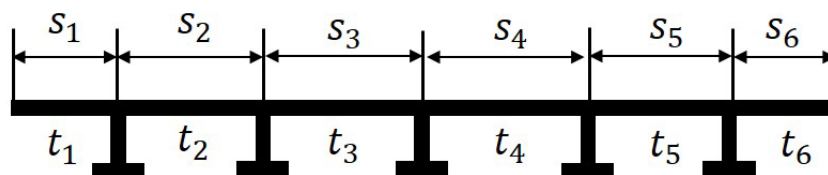


Fig. 4.19: Target structure to compare calculation amount

Table 4.6: Comparison of number of FEM calculation

	number of FEM
proposed method	17
conjugate gradient method	2493

## 4.4 Hybrid GA

本節では提案最適化手法とGAを組み合わせたHybrid GAを用いた構造最適化を実行し手法の検証を行う。本最適化ではスティフナー本数を設計変数としているため、最適化の過程において設計変数の数が増える。そこで、本研究では第3章で提案した隠れ遺伝子を用いたGAを使用する。

### 4.4.1 Hybrid GAでの最適化手順

提案最適化手法とGAを組み合わせた、Hybrid GAでの計算の流れをFig.4.20に示す。以下これに従い説明する。

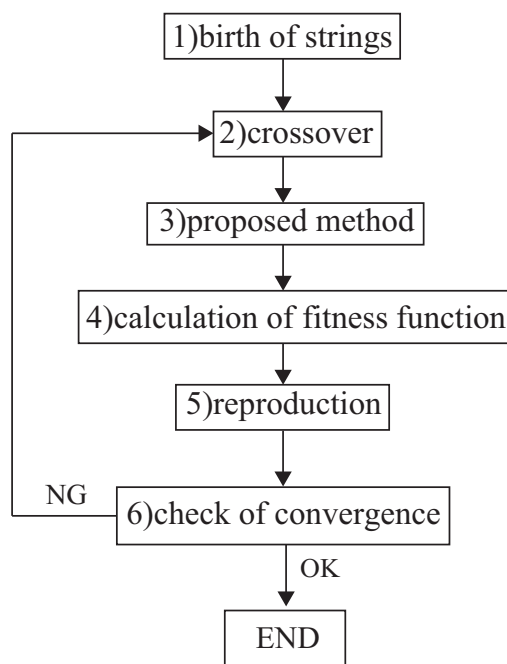


Fig. 4.20: Flow of Hybrid GA

- 1) 初期集団をランダムに発生させる。設計変数を遺伝子で表現すると Fig.4.21 に示したものとなる。
- 2) 交叉を行い遺伝子を変化させる。

- 3) GAにより決定されたステッファナー本数と形状の値を用いて、板厚とスパンを設計変数とした最適化を提案最適化手法で行う。
- 4) 提案最適化手法により最適化された設計変数の値を用いて設計案の目的関数の計算を行い適応度を評価する。
- 5) 適応度の値を用いて淘汰を行い親を選択する。
- 6) 収束判定を行う。収束していなければ2)に戻る。なお、今回は収束判定を行わず世代数を固定し計算を実行した。

このHybrid GAでは遺伝子長はFig.4.21から24bitとなり、組み合わせ数は $1.7 \times 10^7$ となる。仮に全ての設計変数を遺伝子で表現しGAで最適化を行う場合、板厚を0.1mm、スパンを1mm刻みとすると遺伝子長は160bitとなる。組み合わせ数は $1.5 \times 10^{48}$ という非常に膨大な組み合わせ数となるため、最適化への収束が困難である。このことから、GAに比べてHybrid GAを用いることで現実的な時間で安定して最適解に到達することが可能であることがわかる。

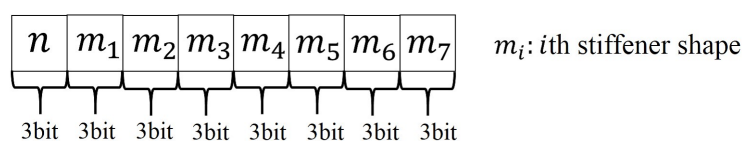


Fig. 4.21: Strings

#### 4.4.2 Hybrid GAでの最適化計算例

Hybrid GAを用いて最適化を実行し本手法の有効性を検証する。最適化の対象構造はFig.4.1で示したものとする。設計変数はステッファナー本数、各ステッファナーの

形状，板厚，スパンとする．目的関数は式(4.1)に示した質量を最小化とし，制約条件は変位 ( $w_c = 42\text{mm}$ ) と応力 ( $\sigma_c = 235\text{MPa}$ ) の2パターンとする．また，荷重条件はFig.4.7の等分布荷重とFig.4.8の三角分布荷重で行う．検証を行うため表4.7に示した，制約条件が2パターン，荷重条件が2パターンの合計4つの最適化を実行する．GAは表4.8に示したパラメータを使用した．なお，本最適化例題ではスティフナー本数を設計変数としているため，設計案ごとにFEMモデルのメッシュを作り直す必要がある．しかし，最適化の過程で評価される各設計案のFEMモデルの作成及び解析を行うことは時間的制約から難しい．そこで，第3章で述べた，FEM解析手法を用いて解析を行う．

Table 4.7: Condition of optimization

constraint	uniformly distributed load	uniformly varying load of triangle
displacement	case1	case2
stress	case3	case4

Table 4.8: GA parameter

number of population	28
number of generation	30
number of elite	6
selection method	roulette
crossover rate	100%
mutation rate	3%

#### 4.4.2.1 case1 の最適化結果

制約条件を変位，荷重条件を等分布荷重としたときの最適化の計算過程と収束世代数をFig.4.22に，最適化後の構造をFig.4.23に示す．4回の試行計算を行った結果，最小では5世代目(run3)，最大では13世代目(run2)で全て同一の解に収束しており，局所解に陥らず安定して最適解に到達している．最適化後の構造では，スティフナー本数は5本，各スティフナー間の板部材の最大変位  $w_i$  の値は全て41.9mmとなり，制約条件を満たしている．最適解ではスパンが左右対称になると考えられるが，本最

最適化計算で得られた構造はスパンは完全に左右対称の解となっていない。本最適化計算では、板厚の最小変化量は0.1mmであり、板厚を0.1mm変化させたときの変位の変化は約0.2mm程度となる。これは、スパンを約6mm程度変更したときの変位の変化と同等である。つまり、スパンの変更量が6mm程度以下ならば板厚は変化せず、質量も変化しない場合もあり、複数の最適解が存在する。そのため、本計算で得られた構造は左右対称となっていない。本計算により得られた構造が最適解であるかの検証を行うため、Fig.4.23の近傍の構造の質量との比較を行った。この比較対象となる構造はFig.4.23のスパンを変化させ、制約条件を満たすために板厚を変化させたものである。なお、スパンの変更量はスパン変更後に板厚が制約条件を満足するため最小刻みである0.1mm以上変化する程度である10mmとその2.5倍である25mmとした。これらの構造の質量を表4.9に示す。表4.9から最適化計算により得られたFig.4.23の構造が最も質量が少なく、最適解であることが確認できる。

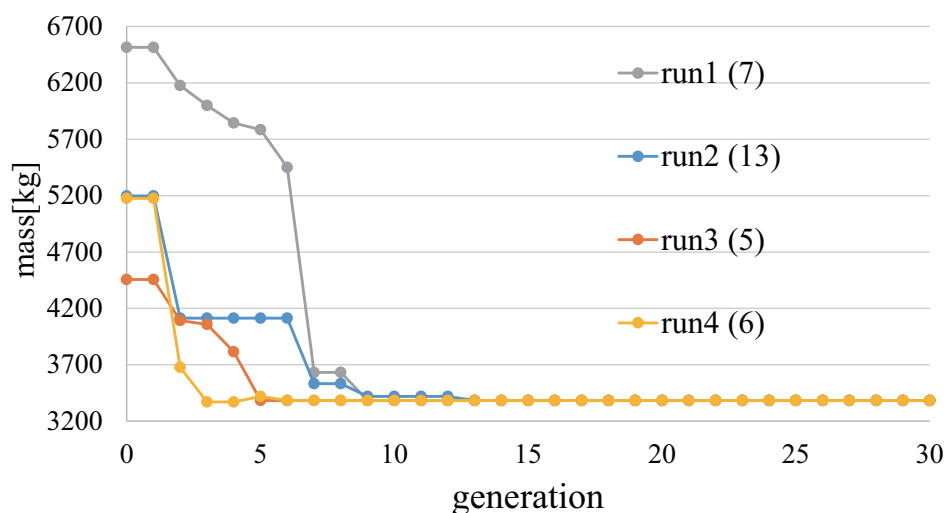


Fig. 4.22: History of mass in case1

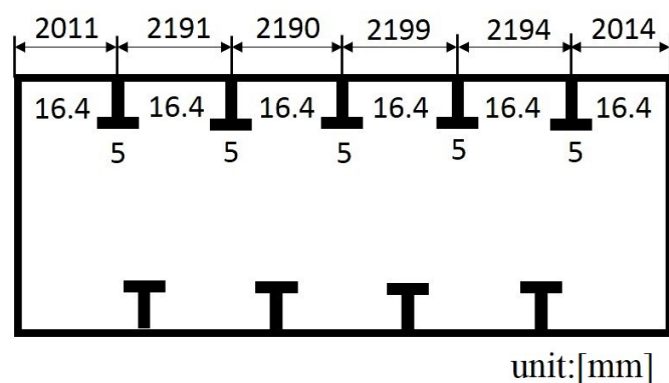


Fig. 4.23: Structure of optimization result in case1

Table 4.9: Comparison of mass in case1

$S_1$ [mm]	$S_2$ [mm]	$S_3$ [mm]	$S_4$ [mm]	$S_5$ [mm]	$S_6$ [mm]	mass[kg]
$t_1$ [mm]	$t_2$ [mm]	$t_3$ [mm]	$t_4$ [mm]	$t_5$ [mm]	$t_6$ [mm]	
2011	2191	2190	2199	2194	2014	3316.48
16.4	16.4	16.4	16.4	16.4	16.4	
2011 + 10	2191 - 10	2190	2199	2194 - 10	2014 + 10	3316.48
16.5	16.2	16.4	16.5	16.3	16.6	
2011 - 10	2191 + 10	2190	2199	2194 + 10	2014 - 10	3316.48
16.3	16.5	16.4	16.4	16.5	16.3	
2011 + 25	2191 - 25	2190	2199	2194 - 25	2014 + 25	3316.48
16.7	16.1	16.5	16.5	16.1	16.7	
2011 - 25	2191 + 25	2190	2199	2194 + 25	2014 - 25	3316.48
16.1	16.8	16.4	16.4	16.8	16.1	
2011	2191 + 10	2190 - 10	2199 - 10	2194 + 10	2014	3316.48
16.5	16.6	16.2	16.2	16.5	16.5	
2011	2191 - 10	2190 + 10	2199 + 10	2194 - 10	2014	3316.48
16.5	16.2	16.6	16.6	16.2	16.5	
2011	2191 + 25	2190 - 25	2199 - 25	2194 + 25	2014	3316.48
16.4	16.9	16.1	16.1	16.9	16.4	
2011	2191 - 25	2190 + 25	2199 + 25	2194 - 25	2014	3316.48
16.4	16.1	16.9	16.9	16.1	16.4	



#### 4.4.2.2 case2の最適化結果

制約条件を変位，荷重条件を等分布荷重としたときの最適化の計算過程をFig.4.24に，最適化後の構造をFig.4.25に示す．なお，runの後に示される数字は収束した世代数を示す．4回の試行計算を行った結果，最小では8世代目(run2)，最大では14世代目(run4)で全て同一の解に収束しており，局所解に陥らず安定して最適解に到達している．最適化後の構造では，スティフナー本数は5本，各スティフナー間の板部材の最大変位 $w_i$ の値は全て41.9mmとなり，制約条件を満たしている．本計算により得られた構造が最適解であるかの検証を行うため，4.4.2.1と同様に，Fig.4.25の近傍の構造の質量との比較を行った結果を表4.10に示す．表4.10から最適化計算により得られたFig.4.25の構造が最も質量が少なく，最適解であることが確認できる．最適化後の構造は荷重の大きな箇所ではスティフナーが密に配置されている．しかし，本最適化計算で得られた構造では右から2番目のスパンは1932mmで右から3番目のスパンの1897mmより長くなっている．予想される最適解はスパンが右から順に長くなるものであるが，Fig.4.25では右の2つのスティフナー形状が4であるため強く補強されており，スパンが長くなっていると考えられる．また，スティフナー形状は右から4, 4, 2, 2, 2であり形状3のスティフナーが使われていない．スティフナー形状は荷重の大きい右から順に剛性の高い物を使用する構造が最適化だと予想される．そこで，最適化計算で得られたスティフナー形状の値を変更し，最適解近傍となるスティフナー形状を設定しスパンと板厚を設計変数とした最適化を実行した結果得られた質量を表4.11に示す．表4.11から本最適化計算により得られた構造(Fig.4.25)の質量が最も軽く最適化であることが確認できる．

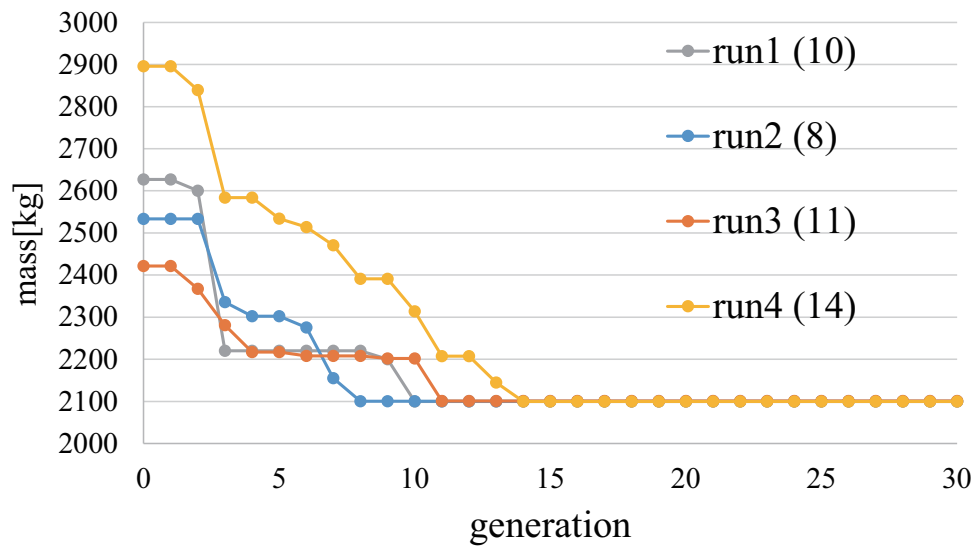


Fig. 4.24: History of mass in case2

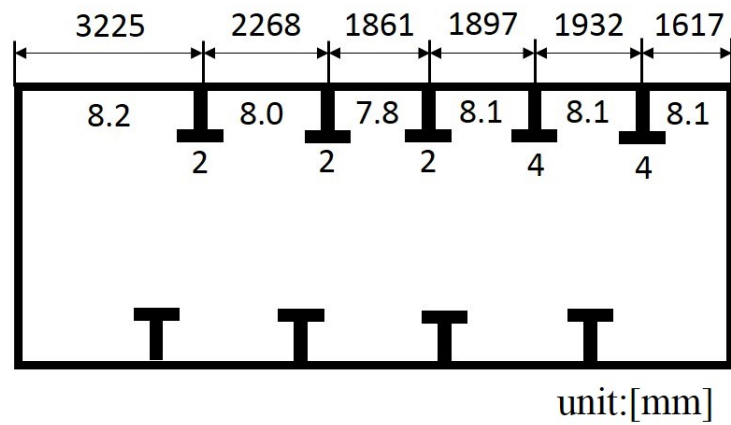


Fig. 4.25: Structure of optimization result in case2

Table 4.10: Comparison of mass in case2

$S_1$ [mm]	$S_2$ [mm]	$S_3$ [mm]	$S_4$ [mm]	$S_5$ [mm]	$S_6$ [mm]	mass[kg]
$t_1$ [mm]	$t_2$ [mm]	$t_3$ [mm]	$t_4$ [mm]	$t_5$ [mm]	$t_6$ [mm]	
3225	2268	1861	1897	1932	1617	2100.06
8.2	8.0	7.8	8.1	8.1	8.1	
3225 + 10	2268 - 10	1861	1897	1932	1617	2113.44
8.3	8.0	7.8	8.2	8.2	8.2	
3225 - 10	2268 + 10	1861	1897	1932	1617	2111.92
8.2	8.1	7.8	8.2	8.2	8.2	
3225 + 25	2268 - 25	1861	1897	1932	1617	2111.04
8.4	7.8	7.8	8.2	8.2	8.2	
3225 - 25	2268 + 25	1861	1897	1932	1617	2110.42
8.1	8.2	7.8	8.2	8.2	8.2	
3225	2268 + 10	1861 - 10	1897	1932	1617	2108.60
8.2	8.1	7.7	8.2	8.2	8.2	
3225	2268 - 10	1861 + 10	1897	1932	1617	2106.66
8.2	7.9	7.9	8.2	8.2	8.2	
3225	2268 + 25	1861 - 25	1897	1932	1617	2111.36
8.2	8.3	7.6	8.1	8.2	8.2	
3225	2268 - 25	1861 + 25	1897	1932	1617	2115.06
8.3	7.8	8.1	8.2	8.2	8.2	
3225	2268	1861 + 10	1897 - 10	1932	1617	2110.77
8.2	8.0	7.9	8.2	8.2	8.2	
3225	2268	1861 - 10	1897 + 10	1932	1617	2101.92
8.2	8.0	7.7	8.1	8.2	8.2	
3225	2268	1861 + 25	1897 - 25	1932	1617	2113.05
8.2	7.9	8.1	8.2	8.2	8.2	
3225	2268	1861 - 25	1897 + 25	1932	1617	2103.21
8.3	8.1	7.5	8.1	8.1	8.2	
3225	2268	1861	1897 + 10	1932 - 10	1617	2101.56
8.3	8.0	7.8	8.0	8.0	8.1	
3225	2268	1861	1897 - 10	1932 + 10	1617	2110.18
8.2	8.0	7.8	8.2	8.3	8.2	
3225	2268	1861	1897 + 25	1932 - 25	1617	2102.59
8.3	8.1	7.7	8.0	8.0	8.1	
3225	2268	1861	1897 - 25	1932 + 25	1617	2122.73
8.2	8.0	7.9	8.4	8.4	8.3	

3225	2268	1861	1897	1932 + 10	1617 - 10	2110.22
8.2	8.0	7.8	8.2	8.3	8.2	
3225	2268	1861	1897	1932 - 10	1617 + 10	2104.07
8.2	8.0	7.8	8.1	8.0	8.1	
3225	2268	1861	1897	1932 + 25	1617 - 25	2122.33
8.2	8.0	7.8	8.4	8.5	8.3	
3225	2268	1861	1897	1932 - 25	1617 + 25	2106.84
8.4	8.0	7.8	8.0	7.9	8.2	

Table 4.11: Compared mass in case2

	shape1	shape2	shape3	shape4	shape5	mass[kg]
design1(optimized structure)	2	2	2	4	4	2100.06
design2	2	2	2	3	4	2329.13
design3	2	2	3	4	4	2136.88
design4	2	2	2	3	3	4904.93
design5	2	2	3	3	4	2399.89
design6	1	2	3	3	4	2730.33

#### 4.4.2.3 case3 の最適化結果

制約条件を応力、荷重条件を等分布荷重としたときの最適化の計算過程をFig.4.26に、最適化後の構造をFig.4.27に示す。なお、runの後に示される数字は収束した世代数を示す。4回の試行計算を行った結果、最小では8世代目(run1, 3)、最大では13世代目(run4)で全て同一の解に収束しており、局所解に陥らず安定して最適解に到達している。最適化後の構造では、スティフナー本数は5本、各スティフナー間の板部材の最大応力 $\sigma_i$ の値は左から順に233MPa, 234MPa, 233MPa, 233MPa, 234MPa, 233MPaとなり、制約条件を満たしている。本計算により得られた構造が最適解であるかの検証を行うため、4.4.2.1と同様に、Fig.4.27の近傍の構造の質量との比較を行った。制約条件である応力は変位に比べてスパンの変化の影響を受けにくいため、スパンの変更量を変位制約条件の場合より増やし、板厚が最小刻みである0.1mm変化する程度の値である30mmとした。さらに、50mmの場合の質量の計算も行った。これらの構造の質量を表4.12に示す。表4.12から最適化計算により得られたFig.4.27の構造

が最も質量が少なく、最適解であることが確認できる。また、スパンが完全には左右対称となっていないが、その理由は4.4.2.1と同じである。以上のことから本最適化計算で得られ構造は最適解であるといえる。

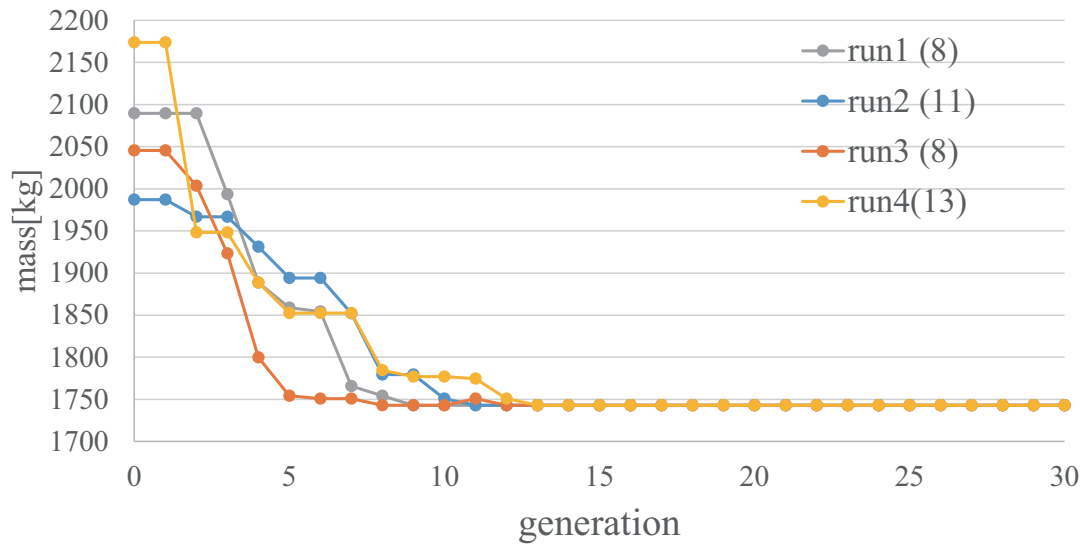


Fig. 4.26: History of mass in case3

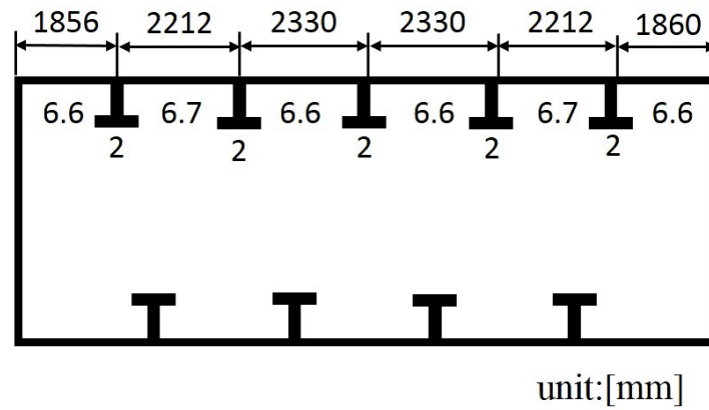


Fig. 4.27: Structure of optimization result in case3

Table 4.12: Comparison of mass in case3

$S_1$ [mm]	$S_2$ [mm]	$S_3$ [mm]	$S_4$ [mm]	$S_5$ [mm]	$S_6$ [mm]	mass[kg]
$t_1$ [mm]	$t_2$ [mm]	$t_3$ [mm]	$t_4$ [mm]	$t_5$ [mm]	$t_6$ [mm]	
1856	2212	2330	2330	2212	1860	1748.07
6.6	6.7	6.6	6.6	6.7	6.6	
1856 + 30	2212 - 30	2330	2330	2212 - 30	1860 + 30	1750.83
6.8	6.6	6.6	6.6	6.6	6.8	
1856 - 30	2212 + 30	2330	2330	2212 + 30	1860 - 30	1761.11
6.7	6.9	6.5	6.5	6.9	6.7	
1856 + 50	2212 - 50	2330	2330	2212 - 50	1860 + 50	1767.66
6.9	6.6	6.7	6.7	6.6	6.9	
1856 - 50	2212 + 50	2330	2330	2212 + 50	1860 - 50	1781.32
6.8	7.1	6.5	6.5	7.1	6.8	
1856	2212 + 30	2330 - 30	2330 - 30	2212 + 30	1860	1754.28
6.7	6.9	6.4	6.4	6.9	6.7	
1856	2212 - 30	2330 + 30	2330 + 30	2212 - 30	1860	1755.48
6.6	6.7	6.7	6.7	6.7	6.6	
1856	2212 + 50	2330 - 50	2330 - 50	2212 + 50	1860	1774.70
6.8	7.0	6.5	6.5	7.0	6.8	
1856	2212 - 50	2330 + 50	2330 + 50	2212 - 50	1860	1780.01
6.6	6.8	6.9	6.9	6.8	6.7	

#### 4.4.2.4 case4 の最適化結果

制約条件を応力、荷重条件を等分布荷重としたときの最適化の計算過程を Fig.4.28 に、最適化後の構造を Fig.4.29 に示す。なお、run の後に示される数字は収束した世代数を示す。4回の試行計算を行った結果、最小では3世代目(run1, 4)最大では6世代目(run3)で全て同一の解に収束しており、局所解に陥らず安定して最適解に到達している。最適化後の構造では、スティフナー本数は2本、各スティフナー間の板部材の最大応力 $\sigma_i$ の値は左から順に233MPa, 234MPa, 233MPaとなり、制約条件を満たしている。本計算により得られた構造が最適解であるかの検証を行うため、4.4.2.3と同様に、Fig.4.29の近傍の構造の質量との比較を行った結果を表4.13に示す。表4.13から最適化計算により得られたFig.4.29の構造が最も質量が少なく、最適解であるこ

とが確認できる。最適化後の構造は荷重の大きな箇所ではスティフナーが密に配置されている。しかし、スティフナー形状は荷重の大きな場所に剛性の低いものが使われている。これは、スティフナーを2本とすると荷重の低い部分のスペンが長くなり、それを支えるため剛性の高いスティフナーを用いていると考えられる。本最適化計算で得られた構造が最適解であるかを確認するため、最適解近傍の設計案 (design2, design3) と荷重が大きい部分のスティフナーに剛性の高いものを使用したとき (design4, design5, design6) のスティフナー形状を設定しスペンと板厚を設計変数とした最適化を実行した結果得られた質量を比較したものを表4.14に示す。表4.14からわかるように、本最適化計算で得られた構造が最も軽く最適解であることがわかる。

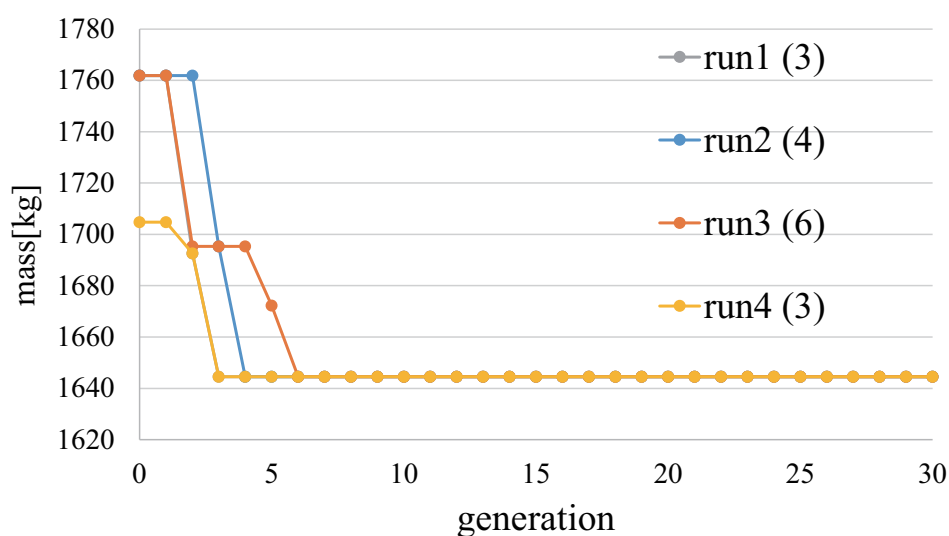


Fig. 4.28: History of mass in case4

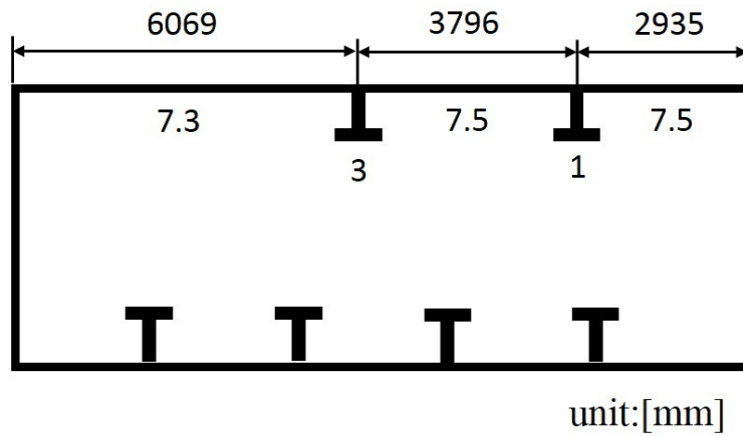


Fig. 4.29: Structure of optimization result in case4

Table 4.13: Comparison of mass in case4

$S_1$ [mm]	$S_2$ [mm]	$S_3$ [mm]	mass[kg]
$t_1$ [mm]	$t_2$ [mm]	$t_3$ [mm]	
6069	3766	2935	1645.62
7.3	7.5	7.5	
6069 + 30	3766 - 30	2935	1661.11
7.4	7.6	7.5	
6069 - 30	3766 + 30	2935	1651.76
7.3	7.6	7.5	
6069 + 50	3766 - 50	2935	1670.72
7.5	7.6	7.5	
6069 - 50	3766 + 50	2935	1648.42
7.2	7.7	7.5	
6069	3766 + 30	2935 - 30	1653.12
7.3	7.7	7.4	
6069	3766 - 30	2935 + 30	1659.90
7.4	7.5	7.6	
6069	3766 + 50	2935 - 50	1654.74
7.3	7.8	7.3	
6069	3766 - 50	2935 + 50	1670.56
7.4	7.6	7.7	



Table 4.14: Compared mass in case4

	shape1	shape2	mass[kg]
design1(optimized structure)	3	1	1644.56
design2	3	2	1969.42
design3	2	1	1672.26
design4	1	3	2047.94
design5	1	2	2046.14
design6	2	2	1968.84

#### 4.4.3 提案 Hybrid GA と GA の比較

本研究で提案した Hybrid GA と GA との最適化計算の比較を行い，Hybrid GA の有効性を検証する．GA による最適化問題では，目的関数を質量，制約条件を応力，荷重条件を等分布荷重 (図.16(a)) とする．設計変数はスティフナー本数，スパン，板厚の3種類16個とし，設計変数の最小変化量はスパンが150mm，板厚が1mmとすると，遺伝子列の総 bit 数は64となる．これに対して，Hybrid GA の設計変数はスティフナー本数，スパン，板厚に加えてスティフナー形状の4種類24個であるが，GA 側で扱う設計変数は8個であり遺伝子列の総 bit 数は24となるため，GA による計算負荷を大幅に軽減することができる．GA の遺伝子列の総 bit 数は Hybrid GA よりも多いため，個体数は Hybrid GA の場合よりも多い90とし，エリート保存数10，交叉確率100%，突然変異確率3%と設定した．なお，Hybrid GA での設計変数の最小変化量はスパンを1mm，板厚を0.1mmとしており，GA で扱う最適化問題に比べて複雑になる．

本最適化計算の中で最も計算負荷の高いものはFEM計算である．そこで，GA で扱う最適化問題と目的関数，制約条件，荷重条件が同一な case3 と GA の FEM 計算の回数を比較する．GA では最適解に422世代目で到達した．個体数は90のため，最適解に到達するまでに  $422 \times 90 = 37890$  回の FEM 計算を必要とした．対して，Hybrid GA では最適解に到達するまでに必要な FEM 計算回数は9240であった．Hybrid GA で扱った最適化問題は GA での最適化問題に比べ複雑であるが，最適解到達に必要な

なFEMの計算回数はGAの24%程度であり、提案Hybrid GAは従来のGAに比べて有効性があるといえる。

## 4.5 結言

本章では、船体構造最適化を行う際に想定されるスティフナー本数、スティフナー形状、スパン、板厚の4種類を設計変数とした構造最適化について検討を行った。スパン及び板厚は連続変数の性質を持つため、単純GAを使用しての最適化には最適解への収束性に課題がある。この課題を解決するためにHybrid GAを構造最適化問題に適応し、その有効性について検証した。その結果得られた結論を以下に述べる。

1. Hybrid GAはGAと他の最適化手法を組み合わせた手法であるため、それぞれの手法で扱う設計変数を決定する必要がある。そこで、本研究で扱う設計変数を連続変数の性質を有するものと離散変数の2つに分類した。スパン及び板厚は設計変数の値が連続的に変化するため連続変数となり、スティフナー本数及びスティフナー形状は離散変数と分類される。
2. 連続変数であるスパン及び板厚を最適化するための簡易な最適化手法を提案した。この提案最適化手法は板曲げ理論に基づいた推測式を用いて、最も計算負荷の高いFEMの計算回数を低減し、既存の勾配法と比較して少ない計算回数で最適解に到達できる手法である。この提案最適手法を変位制約最適化問題と応力制約最適化問題に適用した結果、変位制約では妥当な最適化を得られた。応力制約の場合では、推測式と異なる傾向を示す場合があり、推測式を変更することで対応し、妥当な最適解を得られることを示した。
3. GAと提案最適化手法を組み合わせたHybrid GAを用いて制約条件と荷重条件を変更した4パターンの構造最適化を実行した結果、妥当と考えられる構造を得て、本研究で用いたHybrid GAは有効な最適化手法であることを示した。
4. 本研究で使用したHybrid GAでは多くのbit数を必要とする連続変数(スパン・板厚)を提案最適化手法で扱うことで、通常のGAで同じ最適化問題を扱う場合に比べて遺伝子長を短くすることができる。そのため、最適解を得られる

信頼性が高く、スティフナーを有する船体構造では、少ない計算量で最適解に安定して収束することを示した。

## 第5章 結論

船舶の価格競争は激しさを増しており，船体構造最適化による材料コストの削減は非常に重要である．材料コストを削減するために船体構造最適化を行う場合問題となるのが最適化に要する計算時間である．船体構造の強度評価にはFEMを用いることが一般的である．しかし，FEMによる構造計算では，FEMモデルの作成及び大規模なマトリックスの演算処理が必要であり，長い時間を要する．また，FEMモデルの作成・解析を繰り返し行うため，最適化に必要な時間が長くなる．この最適化時間の問題を解決するためにFEMモデルの作成・解析時間を短縮する手法，及び最適化の過程での繰り返し計算の回数を低減させるための，効率的な最適化手法に関する研究が盛んに行われている．しかし，既往の研究ではスティフナー本数とスティフナー配置を設計変数とした構造最適化は行われていない．その理由は以下のようにまとめられる．

- スティフナー本数を設計変数とすると，設計案ごとに設計変数の数が異なる場合がある．船体構造最適化を行う場合は組み合わせ最適化問題となるためGAが有効な手法である．しかし，GAは最適化の過程で設計変数の数が変化する最適化問題に適用することができない．そのため，GAを使用してのスティフナー本数を設計変数とした構造最適化は行われていない．
- スティフナー本数及び配置を変更すると，FEMモデルを作り直す必要が生じる．特にスティフナー本数を変更した場合は，FEMモデルの自由度数が変わるためメッシュの大幅な作り直しが必要となる．また，最適化による構造変更箇所が全体の数%以下の場合においても全体FEMモデルの解析を実行する必要

があり計算負荷が高い。そのため、最適化計算により繰り返しFEMモデルの作成・解析を行うことは時間的制約から困難である。

- スティフナー本数とスティフナー配置を設計変数とした最適化問題では、他の設計変数としてスティフナー間の板厚，スティフナー形状が想定される。これら4種類の設計変数の最適化問題は設計変数の数が多く，組み合わせ数が膨大となる。そのため，GAによる最適化では，最適解へ到達しない場合や数多くの設計案を検討する必要が生じる。

以上3つの問題点からスティフナー本数及びスティフナー位置を設計変数とした船体構造最適化は困難であるが，最適化を実行することができればより良い構造を創生することが可能であると考えられる。そこで，本研究ではスティフナー本数及びスティフナー位置を設計変数として含む構造最適化の実行を目的とし，現状での問題点を解決するための有限要素解析手法及び，最適化手法についての検討を行った。その成果を以下に示す。

- スティフナー本数を設計変数とすることにより，求めるべき板厚の数やスパンの数が増えるという問題点を解決する最適化手法を，第2章「設計変数の数が増える最適化問題」では提案した。提案する手法は隠れ遺伝子を導入することにより，設計変数の数が異なる個体同士においてもGAでの最適化を可能とする。この隠れ遺伝子を用いたGAを船体を模擬した検証用モデルに適用し，妥当な最適解を得られることを示した。また，本提案手法と従来の単純GAによる最適化に必要な計算量を比較するため，それぞれの手法で同一の最適化問題での最適化計算を行った。結果，提案する隠れ遺伝子を用いたGAは単純GAを用いた従来手法と比較して少ない計算量で最適解が得られることを示した。このことから，スティフナー本数を設計変数とした最適化問題では隠れ遺伝子を用いたGAは有効な最適化手法であることを確認できる。
- スティフナー本数の変更に伴う，FEMモデルの再生成と構造強度評価のための

FEM解析による最適化時間の増加という問題点を解決するためのFEM計算手法を、第3章「設計領域を考慮したFEM計算手法と最適化への応用」では提案した。提案手法はスティフナー本数等の変更による剛性の変化を直接FEM計算に取り入れる方法であり、FEMモデルを再生成することなく強度評価が可能である。また、構造変更領域のみを計算するため計算負荷低減の効果もある。提案する計算手法と第2章で提案した隠れ遺伝子を使用したGAを用いて、船体を模擬した検証用モデルのスティフナー本数、スティフナー位置、板厚を設計変数とした構造最適化を実行した。荷重条件は等分布荷重と三角分布荷重の2種類とし、それぞれの荷重条件で妥当な最適構造が得られた。このことから、提案するFEM計算手法はスティフナー本数及び配置位置を設計変数に含む最適化問題に対して有効な手法であるといえる。

- 第3章で行った構造最適化の設計変数である、スティフナー本数、スティフナー位置、板厚にスティフナー形状を加えた4つの設計変数を持つ最適化問題では設計変数の数が多く、GAを使用しての最適化では最適解への収束安定性に問題がある。この問題を解決するため第4章「多種類の設計変数を有する構造最適化」ではGAと他の最適化手法を組み合わせたHybrid GAの検討を行った。GAと組み合わせる最適化手法は既存の手法を用いることも可能であるが、本研究では計算量を低減させるためにスティフナー位置、及び板厚を最適化するために特化した手法を提案した。この提案手法を用いて変位制約、及び応力制約での最適化を実行し妥当な結果を得ることができ提案最適化手法の有効性が示された。次に、スティフナー位置と板厚の最適化に特化した提案手法と第2章で提案した隠れ遺伝子を使用するGAを組み合わせたHybrid GAを構築し、強度評価に第3章で提案したFEM計算手法を用いて、船体を模擬した検証用モデルの構造最適化を行い安定して妥当な最適解を得られることを示した。また、Hybrid GAとGA単体での最適化計算量を比較した結果、Hybrid GAを使用することで少ない計算量で最適化に到達することが可能であることを示した。

本研究ではまず初めに，第2章で隠れ遺伝子を用いたGAを提案した．第3章ではスティフナー本数変更後にFEMモデルの再生成の必要がなく，構造変更箇所の計算のみで強度評価可能なFEM計算手法を提案し，隠れ遺伝子を用いたGAを使用して，スティフナー本数，スティフナー位置，板厚を設計変数とした最適化を実行した．第4章ではスティフナー位置と板厚に特化した最適化手法を提案し，隠れ遺伝子を用いたGAと組み合わせたHybrid GAを構築した．最適化手法をこのHybrid GA，強度評価を第3章で提案したFEM計算手法により行い，スティフナー本数，スティフナー位置，スティフナー形状，板厚を設計変数とした最適化を実行した．これらの研究成果は前述した通りである．以上のことから，本研究で提案した手法を用いることで，既往の研究では行われていないスティフナー本数，スティフナー位置を設計変数として含んだ構造最適化が可能となると結論づける．

## 5.1 今後の課題

本研究では提案した手法を実際の船体FEMモデルに対して適用しておらず，船体FEMモデル用いての最適化を行い提案手法の検討を行う必要がある．また，本研究で用いた境界条件や荷重条件は簡易的なものであり，CSRに記載された境界条件と荷重条件を用いての検討を行うことも必要である．このように，実際の船舶設計で考慮すべき点が多数残っており，これらを検討・解決することが今後の課題である．



## 参考文献

- [1] 造船テキスト研究会：新訂 商船設計の概要，成山堂書店，1995.
- [2] 日本船級協会：鋼船規則 CSR-T 編.
- [3] International Association of Classification Societies：Common structural rules for double hull oil tanker,2012.
- [4] 池田宗雄：船舶知識の ABC，成山堂書店，2002.
- [5] 奥本泰久，山本由加里：タブー探索法による建造工程の最適化，日本造船学会論文集，第 194 号，pp.219-225，2003.
- [6] 奥本泰久，村瀬晃平，石山隆庸，山本由加里：バックトラック法によるブロック組立順序の最適化計画，西部造船会会報，第 104 号，pp.257-266，2002.
- [7] 奥本泰久，村瀬晃平，石山隆庸，山岸小百合：線形計画による組立工程の詳細日程・配員計画，西部造船会会報，第 102 号，pp.403-412，2001.
- [8] 奥本泰久，藤岡慎治：シミュレーション技法と分枝限定法を用いた管加工・組立の最適化計画，西部造船会会報，第 105 号，pp.165-177，2003.
- [9] Hughes O.F.: Ship structural design: A rationally-based, Computer-aided optimization Approach,SNAME,1988.
- [10] Hughes O.F., Mistree F.,Zanic V.: A practical method for the rational design of ship structures, J.Ship Research., 24, pp.101-113, 1980.

- [11] Hung C.F: Computer aided design of complex ship structure based on finite element and multilevel optimization method, Proc. PRADS87,pp.845-860,1987.
- [12] Lyon T.: A calculator-based preliminary ship design procedure, Mar. Tech., 19,2pp.140-158,1982.
- [13] Moe J.,Lund S.: Cost and weight minimization of structures with special emphasis on longitudinal strength member of tankers, Trans. RINA, 110, pp.43-70,1968.
- [14] Lee K., Roh M. : An Efficient Genetic Algorithm Using Gradient Information for Ship Structural Design Optimization, Ship Technology Resarch., Vol.48, pp.161-170, 2001.
- [15] Zanic V.,Jancube T.,Andrie J. : Mathematical models for analysis and optimization in concept and preliminary ship structural design,Proc.IMAM2000,,pp.15-22, 2000.
- [16] 清水泰人, 荒井誠: 応答曲面法を用いた油槽船舷側タンク横強度部材の形状最適化, 日本造船学会論文集, 第191号, pp.273-282, 2002.
- [17] 平川真一, 北村充, 野波諒太, 牧美津栄, 制約条件に対する影響度を考慮した設計変数の分類と構造最適設計:—船体中央横断面の構造最適設計への応用—, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol.19, pp.149-157, 2014.
- [18] 平川真一: 主成分分析に基づく設計変数分類法と実用的な船舶構造最適化システムに関する研究, 広島大学博士論文, 2014.
- [19] 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, pp.405-411, 1995.
- [20] 北村充, 上寺哲也, 濱田邦裕, 竹澤晃弘: 部材認識機能を利用した船体構造の形状最適化システムに関する研究-船体構造二重底部の形状最適化-, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol.8, pp.281-289, 2008.

- [21] 大岩根慎也, 横田一平, 森茂博, 前田正広, 吉川孝雄: 遺伝的アルゴリズムならびにニューラルネットワークを適用した船体中央横断面構造の最適化について, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第6号, pp.375-378, 2008.
- [22] 荒井誠, 鈴木竜浩, 清水泰人: 船体構造設計最適化への応答曲面法の適用性検討, 日本造船学会論文集, 第188号, pp.545-552, 2000.
- [23] 松岡和彦, ジェノドカハルディン, 田中義雄, 大久保禎二: 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100号, pp.37-47, 2005.
- [24] 奥村敏恵, 大久保禎二: Sub optimizationによる鋼連続桁の最適設計, 土木学会論文報告集, No.215, pp.1-14, 1973.
- [25] 大久保禎二: 船トラス構造物の最適設計法に関する研究, 土木学会論文報告集, No.177, pp.9-19, 1970.
- [26] 大久保禎二, 谷脇一弘: 双対理論および部材のSub optimizationによるトラス構造物の最適設計法, 土木学会論文集, No.350, pp.331-340, 1984.
- [27] 香川洸二, 前田正広, 豊田和隆, 安澤幸隆, 大庭直樹: ニューラルネットワークによる設計最適化, 西部造船会会報, 第102号, pp.349-360, 2001.
- [28] 前田正広, 香川洸二, 藤田一誠, 畷田芳記: ニューラルネットワークによる設計最適化(第2報), 西部造船会会報, 第103号, pp.43-52, 2002.
- [29] 竹澤晃弘, 金野有里, 松本麻里, 北村充, 濱田邦裕, 大槻康明: トポロジー最適化を用いた船体上部構造の防振設計に関する研究, 日本機械学会設計工学・システム部門講演会講演論文集, 第19号, pp.253-255, 2009.
- [30] 大福将史, 川崎航平, 竹澤晃弘: 船体機関部における補強構造のトポロジー最適化, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第16号, pp.155-157, 2013.

- [31] M. Rais-Rohani., J Lokits : Reinforcement layout and sizing optimization of composite submarine sail structures,Structural and Multidisciplinary Optimization,Vol.34,No.1,pp.75-90,2007.
- [32] X Ding., K Yamazaki. : Stiffener layout design for plate structures by growing and branching tree model -application to vibration-proof design-,Structural and Multidisciplinary Optimization,Vol.26,No.1,pp.99-110,2004.
- [33] 奥本泰久，濱川博行：位相最適化手法を用いた二重底構造の最適化，日本船舶海洋工学会講演会論文集，第1号，pp.329-330，2007.
- [34] 中森隆一，北村充，濱田邦裕：船首尾部のロンジ配置最適化に関する研究，日本船舶海洋工学会論文集，第7号，pp.81-88，2008.
- [35] 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，pp.259-266，1992.
- [36] OKADA T. NEKI I.:Optimization of ship structural design by genetic algorithm,Journal of the Society of Naval Architects of Japan,Vol.171,pp. 259-266,1992.
- [37] 辛松，森茂博，前田正広：遺伝的アルゴリズムならびに応答曲面法を適用した船体中央横断面構造の最適化について，日本船舶海洋工学会講演会論文集，第17号，pp.387-390，1992.
- [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，pp.381-389,2001.
- [39] 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，pp.295-303，2003.
- [40] 伊藤照明，福田収一：遺伝的アルゴリズムを用いた配管経路探索法の検討，人工知能学会誌，第13巻，第5号，pp.791-802，1998.

- [41] 木村元:機器配置およびパイプの分岐を扱う配管自動設計システム-パイプ材料コストおよびバルブ操作性評価の多目的最適化-, 日本船舶海洋工学会論文集, 第14号, pp.165-173, 2011.
- [42] 河村拓昌, 長田宗平, 大森博司: 遺伝的アルゴリズムによるフレーム構造物の位相設計, 構造工学論文集, B第47巻, pp.1-6, 2001.
- [43] 小玉真一, 石田高義, 大森博司:多目的最適化法による鋼構造物の構造創生支援に関する研究-小梁配置最適化問題への応用-, 構造工学論文集, B 56B, 553-558, 2010.
- [44] 藤井健司, 山邊友一郎, 谷明勲: パラメータフリー遺伝的アルゴリズムを用いた鉄骨構造物の構造要素最適配置システム-部材選択最適化における探索の効率化-, 日本建築学会近畿支部研究, Vol49, pp133-136, 2009.
- [45] 北村充, カハルディン・ジェノド, 濱田邦裕: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, 第192号, pp.661-668, 2002.
- [46] 森茂博, 辛松, 前田正広, 吉川孝男:遺伝的アルゴリズムと応答曲面を適用した船体中央断面の構造最適化に関する研究, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol.20, pp.109-117, 2014.
- [47] 上寺哲也: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, 広島大学博士論文, 2012.
- [48] 鈴木克幸:構造分野への最適化手法の適用-なぜ最適設計は実務に使われないか-, TECHNO MARINE, 第859号, pp.65-71, 2001.
- [49] Goldberg.D.E., Samtani.M.P:Engineering Optimization Via Genetic Algorithm,Proceedings of the Ninth Conference on Electronic Computation,ASCE,pp.471-482,1986.

- [50] S. Rajeev., C. S, Krishnamoorthy. : Discrete Optimization of Structures Using Genetic Algorithms, J of structural Engineering, ASCE, Vol.118, pp.1233-1250, 1992.
- [51] P. Hajela. : Genetic search - An approach to the nonconvex optimization problem, AIAA Journal, Vol.28, No.7, pp.1205-1210, 1990.
- [52] 大久保禎二, 谷脇一弘: 構造形状・部材の材種・断面寸法を設計変数としたトラス構造物の耐震最適設計法, 土木学会論文集, Vol.570, pp.47-61, 1997.
- [53] 小亀裕侍, 谷明勲, 山邊友一郎: GAを用いた鉄骨造ラーメンの柱配置と部材断面の最適化に関する研究, 学術講演梗概集(情報システム技術), pp.137-138, 2014.
- [54] 井上克己, 笹木秀亮, 加藤正名: 小領域の特性に着目したGA困難なリブ配置の設計, 日本機械学会論文集C編, Vol.62, No.599, pp.2891-2896, 1996.
- [55] Cheng Keng Tung.: On non-smoothness in optimal design of solid, elastic plates, International Journal of Solids and Structures, Vol.17, No.8, pp.795-810, 1981.
- [56] Cheng Keng Tung., Niels Olhoff.: Regularized formulation for optimal design of axisymmetric plates, International Journal of Solids and Structures, Vol.18, No.2, pp.153-169, 1982.
- [57] 山崎光悦, 小林篤司: 薄板のスティフナ形態の最大剛性設計法, 日本機械学会論文集A編, Vol.54, No.501, pp.1165-1171, 1988.
- [58] Inoue K., Fueki H., Ohmachi T. and Kato, M. : An Application of Generic Algorithms to Design of Stiffened Plates, Proc. of 10th ICED, Praha, pp.1369-1377, 1995,.
- [59] 尾田十八, 金井亮, 河登洋介: 遺伝子の特徴抽出による新しいGA法とその応用, 日本機械学会論文集A編, Vol.70, No.698, pp.1434-1439, 2004.
- [60] 朝山正輝, 長谷川治志, 川面恵司: 遺伝的アルゴリズムと全応力設計を用いたトラス構造物の構造形態決定, 日本シミュレーション学会 シミュレーション, Vol.17, No.2, pp.153-164, 1998.

- [61] 朝山正輝, 長谷川治志, 川面恵司: GA を利用した応力制約下におけるトラス構造の寸法最適化に関する数値実験-主として全応力設計と GA を組合せたハイブリッド法の検討-, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.62, No.597, pp.1234-1241, 1996.
- [62] 下村将, 松下春奈, 西尾芳文: 遺伝的アルゴリズムと応答曲面を適用した船体中央断面の構造最適化に関する研究, 電子情報通信学会技術研究報告. NLP, 非線形問題, Vol.111, No.62, pp.111-115, 2011.
- [63] 坂本博夫, 高田志郎, 伊藤順子, 宮崎正行, 土方明躬: 遺伝的アルゴリズムによる構造最適化の実用化手法に関する検討-ハイブリッド GA の提案と CRT バルブの板厚最適化問題への適用-, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.66, No.646, pp.1083-1090, 2000.
- [64] 坂本博夫, 高田志郎, 伊藤順子, 宮崎正行: 村上敏英, 菅原恒彦, ハイブリッド GA によるフラット CRT の構造最適化, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.72, No.716, pp.385-390, 2006.
- [65] 坂本二郎, 尾田十八: 遺伝的アルゴリズムを利用した最適トラス形態決定法, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.59, No.562, pp.1568-1573, 1993.
- [66] 寺田栄一, 高島英幸: ハイブリッド GA を用いた平面トラスの最適部材配置の探索法に関する研究 (構造), 日本建築学会関東支部研究報告集 I, No.73, pp.363-366, 2003.
- [67] Hung Dinh Nguyen., Yoshihara I., Yamamori K., Yasunaga M. : Implementation of an Effective Hybrid GA for Large-Scale Traveling Salesman Problems, IEEE Trans, Systems, Man, and Cybernetics, Part B, Cybernetics, Vol.37, pp.92-99, 2007.
- [68] G Andal Jayalakshmi., S Sathiamoorthy., R Rajaram. : A Hybrid Genetic Algorithm-A New Approach to Solve Traveling Salesman Problem -, Int. J. Comp. Eng. Sci, Vol.2, pp.339, 2001.

- [69] Tae Yun., Park Gilbert., F Froment. : A hybrid genetic algorithm for the estimation of parameters in detailed kinetic models, *Int. Computers Chemical Engineering*, Vol.22, pp.103-110, 1998.
- [70] 岡田哲男, 豊田昌信, 小林英資: 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*, 第3号, pp.135-136, 2006.
- [71] 内村秀之, 松岡和彦, 田中義雄, 喜多宏司, 大久保禎二: 船殻中央横断面構造の最適化に関する研究-油槽船の場合-, *日本船舶海洋工学会講演会論文集*, 第3号, pp.133-134, 2006.
- [72] Kim H.M., Michelena N.F., Papalambros P.Y., Jiang Y. : Target cascading in optimal system design, *J. of Mech.Des.*, Vol.125, pp.474-480, 2003.
- [73] Kim H.M., Rideout D.G., Papalambros P.Y., Stein J.L. : Analytical target cascading in automotive vehicle design, *J. of Mech.Des.*, Vol.125, pp.481-489, 2003.
- [74] McCulley C., Bloebaum C.L : A genetic tool for optimal design sequencing in complex engineering systems, *Struct. Opt*, Vol.12, pp.186-201, 1996.
- [75] Kusiak A., Chow W.S. : Efficient solving of the group technology problem, *J. Manuf Mech.Syst.*, Vol.6, No.2, pp.117-124, 1987.
- [76] 伊庭斉志: 遺伝的アルゴリズムの基礎, オーム社, 1994.
- [77] 田原俊司, 小川智弘, 黒岩和治, 星野修: 多音源場における音源方向の推定精度改善-Gray表現を用いたGA-, *電子情報通信学会技術研究報告EA*, 応用音響, 100巻, 第468号, pp.39-44, 2000.
- [78] 北村充, 中森隆一: 遺伝的アルゴリズムを用いた船体構造の最適設計と制約条件に関する研究, *西部造船会会報*, 第102号, pp.371-380, 2001.



- [79] 北村充, カハルディン・ジェノド, 中森隆一, 山中一樹, 山本元道: 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, pp.185-194, 2001.
- [80] 猪飼武夫, 山口泰孝, 真野敬章: Hopfield-上坂最適化法におけるペナルティ係数最適化, 電子情報通信学会技術研究報告 NLP 非線形問題, Vol.94, No.98, pp.49-56, 2001.
- [81] 古屋耕平, 吉村卓也, 須藤晶, 斉藤浩司, 剛性マトリックスの固有値と固有ベクトルを利用した FRF 感度解析, 日本機械学会, Dynamics and Design Conference, pp.437-437, 2004.
- [82] O.C. ツィエンキーヴィッツ, R.L. テイラー: マトリックス有限要素法, 科学技術出版社, 1996.
- [83] 渥美光, 鈴木幸三, 三ヶ田賢次: 材料力学 II SI 版, 森北出版, 1985.

## 謝辞

本研究は、著者が広島大学大学院工学研究科博士課程後期輸送・環境システム専攻において、同大学院工学研究院の北村充教授の御指導の下で行われたものである。

北村充教授には、本研究の全般に渡り懇切丁寧なるご指導，ご鞭撻を戴き心より感謝し，ここに厚く御礼申し上げます。また，同大学工学研究院の濱田邦裕教授には貴重な御助言を頂き，心より御礼申し上げます。竹澤晃弘准教授には，貴重な御助言や学会での引率をして頂き，心より感謝いたします。田中智行助教には，御助言やソフトウェアの使用に関して御支援して頂き，心より御礼申し上げます。山梨大学大学院医学工学総合研究部の岡澤重信教授には貴重な御助言を頂き，心より御礼申し上げます。

本研究の遂行に当たり，船舶に関する貴重なデータや御助言を頂いたジャパンマリンユナイテッド株式会社の関係者の皆様，特に多くの御助言を頂いた平川真一氏には，心より御礼申し上げます。また，呉工業高等専門学校機械工学科の上寺哲也准教授には，助言を頂き，心より御礼申し上げます。

本論文の作成に当たっては，著者が6年間研究を行った，大学院工学研究科輸送・環境システム専攻構造設計研究の在学生ならびに卒業生の方々には多大なる御協力をして頂いたことに，感謝を申し上げます。

本研究は，以上の方々を初め多数の方々の御協力によって成し得たものであり，御協力していただいた全ての方々に，心からの感謝を申し上げます。

最後に，私生活を支え終始暖かく見守ってくれた家族にも感謝します。

## 本研究に関連した発表論文

1. 野波諒太, 北村充, 竹澤晃弘, 平川真一, 補強材のレイアウトを考慮した船体構造最適化に関する研究, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol.22, 2016.(印刷中)
2. 野波諒太, 北村充, 竹澤晃弘, Hybrid GAを用いたスティフナーを有する大型構造物の最適化に関する研究, 日本機械学会論文集C編, Vol.81, No.832, 2015.
3. R.Nonami, M.Kitamura, A.Takezawa, S.Hirakawa, A study on optimization the structure of ship in consideration of layout of the stiffeners, Proc. of the Int. off. and Pol.Eng.Conf., Vol.4, pp.876-882, 2014.
4. 平川真一, 北村充, 野波諒太, 牧美津栄, 制約条件に対する影響度を考慮した設計変数の分類と構造最適設計:—船体中央横断面の構造最適設計への応用—, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol.19, pp.149-157, 2014.

## 付録A 個体数の検証

第2章の従来手法による最適化でペナルティ係数を一定とした場合に総計算個体数が個体数に依存しない結果となることを表2.3のcase0~case17で検証した。その検討結果を示す。

### A.1 case1の場合

case1の場合は設計変数は板厚のみとなるため、Fig.A.1に示す遺伝子を使用し最適化を行う。なお、前述した最適化問題と比較して設計変数の数は減少しているため計算を行う個体数は20~190とした。この最適化計算での平均到達世代数と個体数の関係をFig.A.2に示す。個体数を増やすと最適解到達世代数は減少しており、縦軸に個体数×平均収束世代数で表される総計算個体数と個体数の関係を表すFig.A.3においても総計算個体数は個体数に依存しておらず、ほぼ一定の値となっている。このことからcase1の場合においてもペナルティ係数を一定とすることで、計算量を比較することが可能であることがわかる。

$t_{b1}$	$t_{b2}$	$t_{b3}$	$t_{b4}$	$t_{b5}$	$t_{b6}$	$t_{b7}$	$t_{s1}$	$t_{s2}$	$t_{s3}$	$t_{s4}$	$t_{s5}$	$t_{t1}$	$t_{t2}$
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Fig. A.1: Strings in case1

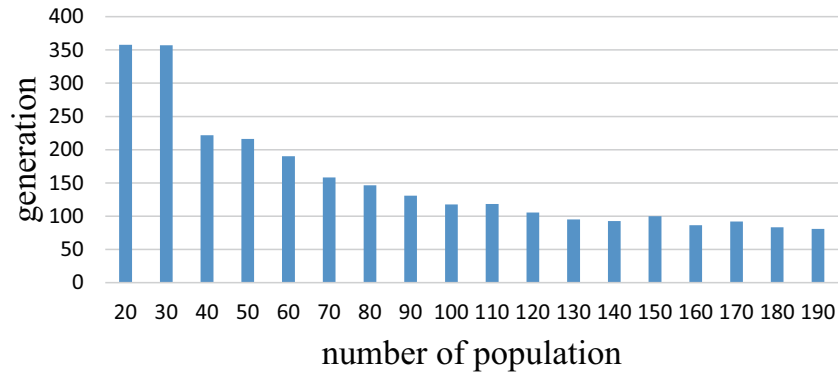


Fig. A.2: Relationship between population and reached generation with certain penalty factor in case1

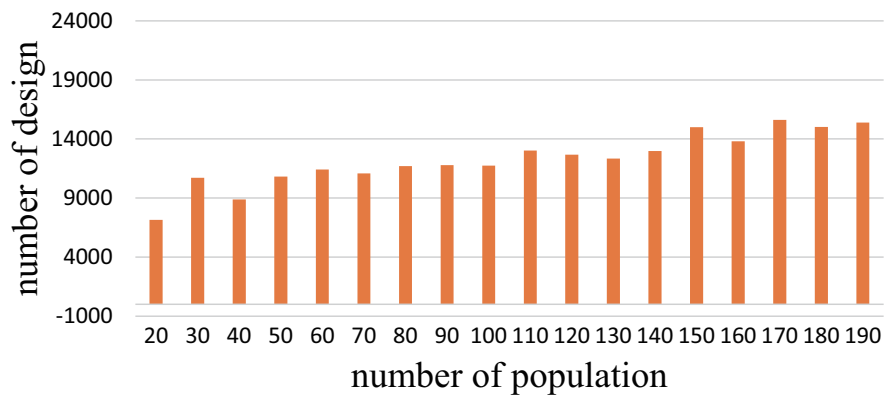


Fig. A.3: Calculated population with certain penalty factor in case1

## A.2 case2 の場合

表 2.3 の case2 の場合の個体数と収束世代数の関係を検証する。case2 の場合も case1 と同様に設計変数は板厚のみとなるため，Fig.A.4 に示す遺伝子を使用し最適化を行う。最適化計算の結果得られた，平均収束世代数と総計算個体数を Fig.A.5 と Fig.A.6 に示す。総計算個体数は個体数を増やすと増加する傾向を示しており，計算量を比較するために個体数を決定することができない。この原因は最適解への到達率を表す Fig.A.7 では 110 個体まで，到達率が 80% を下回っており，適切な結果を得られなかったためと考えられる。

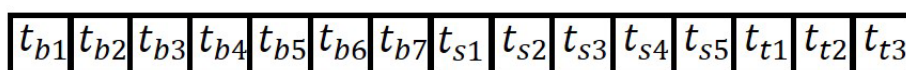


Fig. A.4: Strings in case1

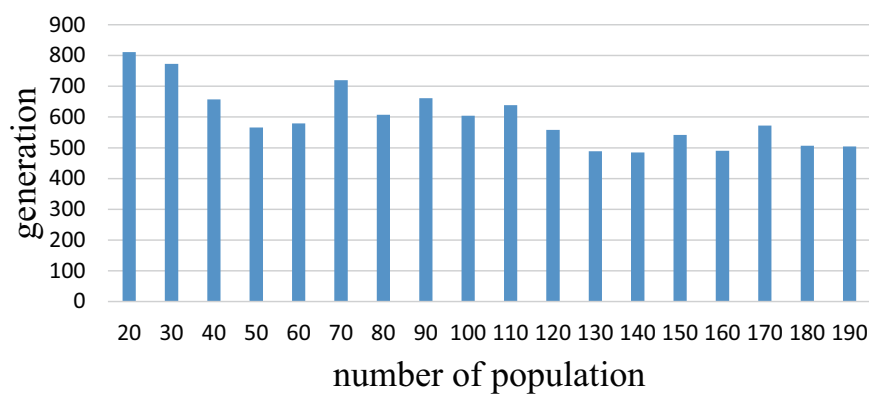


Fig. A.5: Relationship between population and reached generation with certain penalty factor in case2

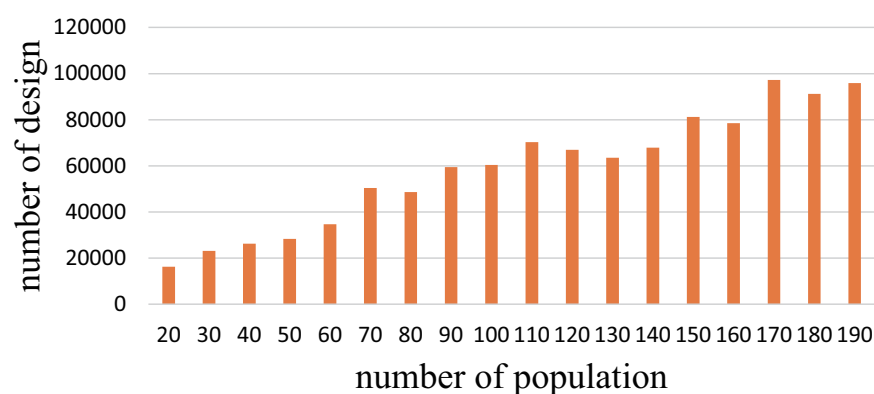


Fig. A.6: Calculated population with certain penalty factor in case2

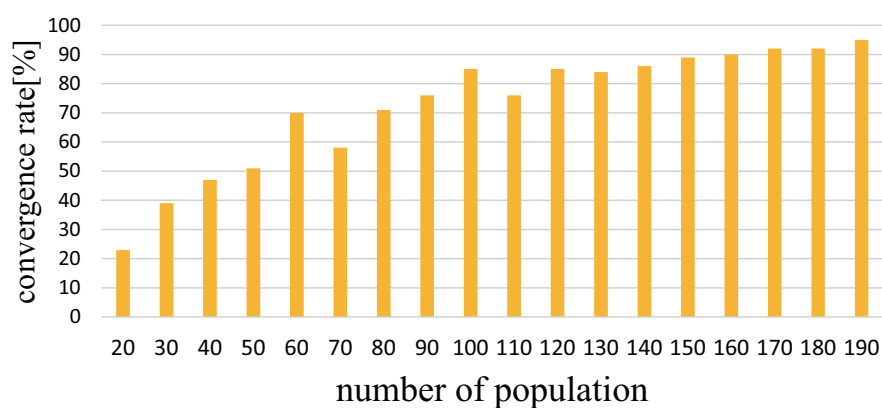


Fig. A.7: Convergence rate with certain penalty factor in case2

そこで、到達率の高い個体数での評価を行う。到達率が80%以上となる100～290個体での平均収束世代数と総計算個体数、到達率をFig.A.8, Fig.A.9, Fig.A.10に示す。総計算個体数は個体数の変化の影響を受けておらず、個体数を決定するための適切な結果を得られた。このことから、到達率を考慮し個体数を決める必要があることがわかる。

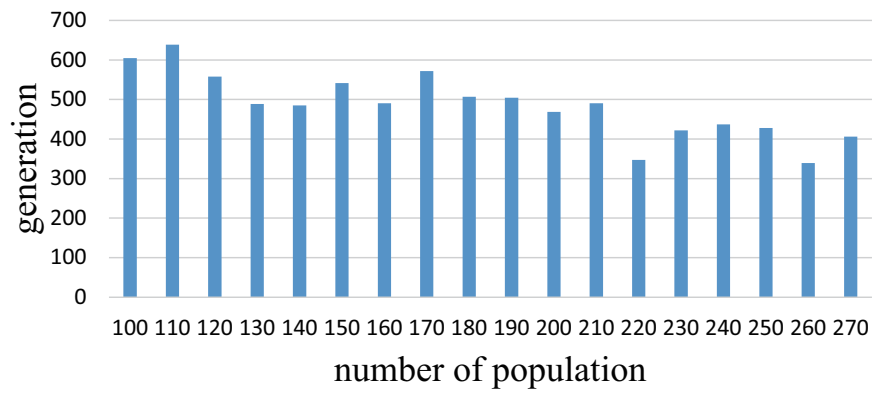


Fig. A.8: Relationship between population and reached generation with certain penalty factor in case2

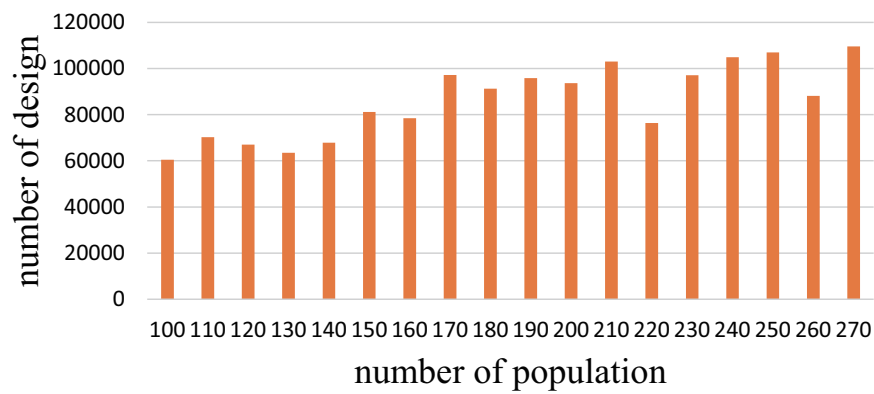


Fig. A.9: Calculated population with certain penalty factor in case2

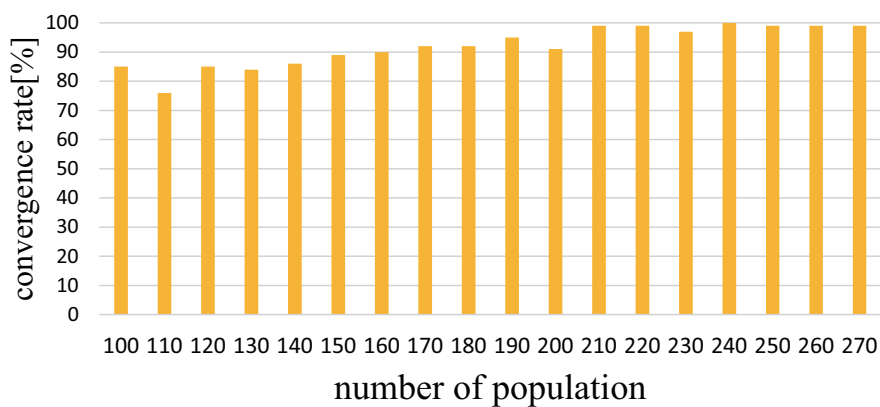


Fig. A.10: Convergence rate with certain penalty factor in case2



### A.3 case0, case3~case17の場合

case0 及び case3 以降について case1, case2 と同様の検証を行った結果, 各 case の総計算個体数は Fig.A.11~Fig.A.26 に示すものとなり, 総計算個体数は個体数に依存していないことを確認できる.

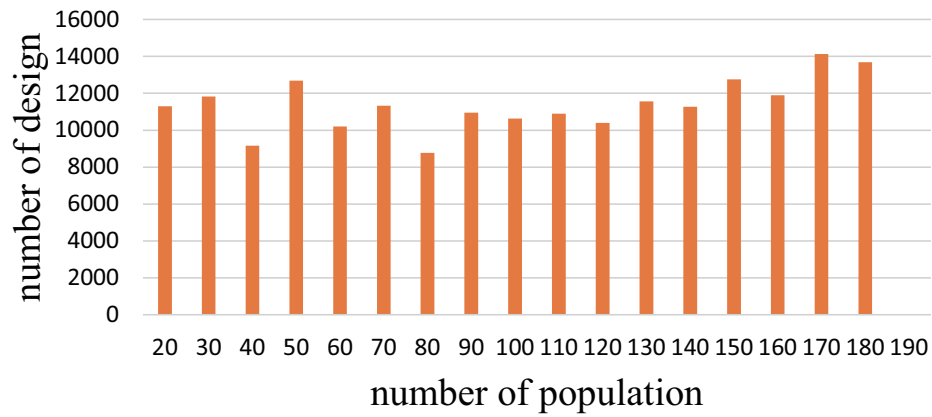


Fig. A.11: Calculated population in case0

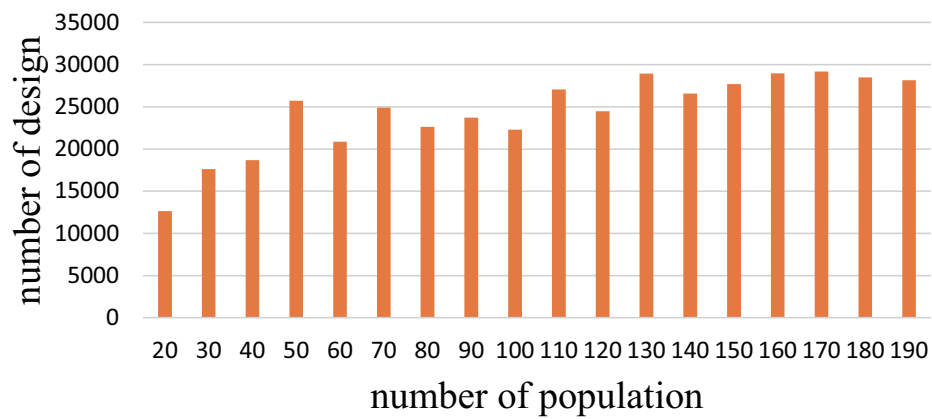


Fig. A.12: Calculated population in case3

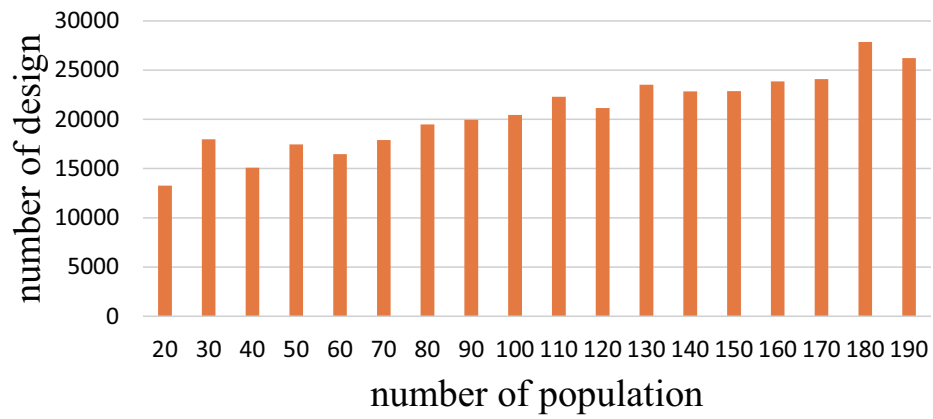


Fig. A.13: Calculated population in case4

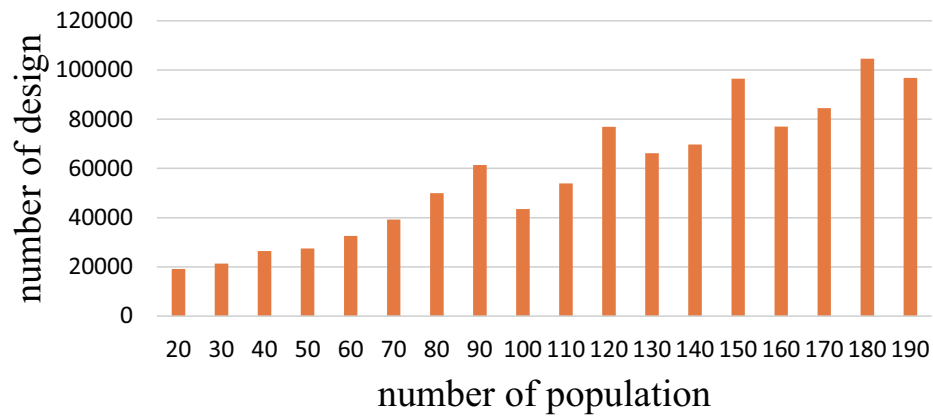


Fig. A.14: Calculated population in case5

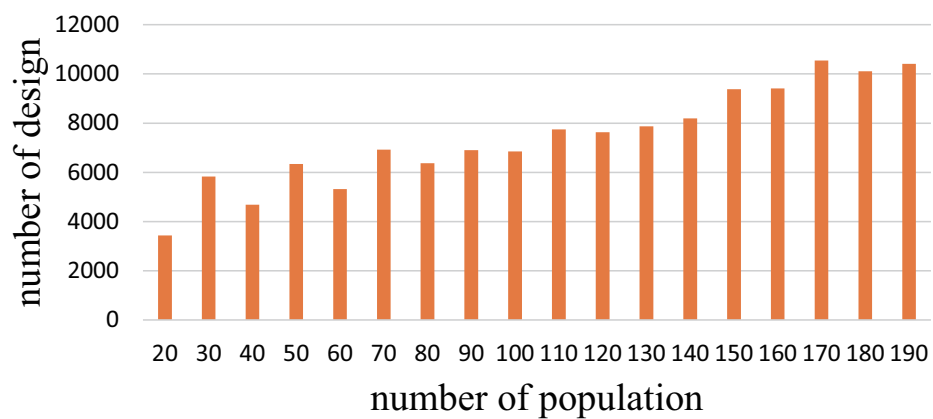


Fig. A.15: Calculated population in case6

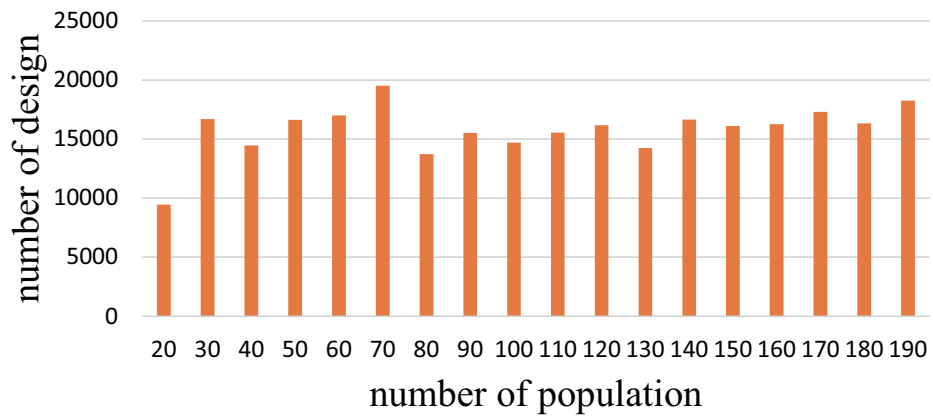


Fig. A.16: Calculated population in case7

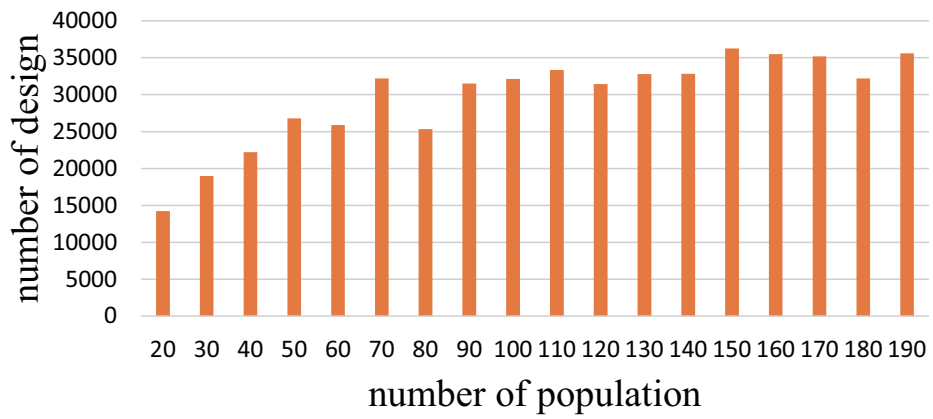


Fig. A.17: Calculated population in case8

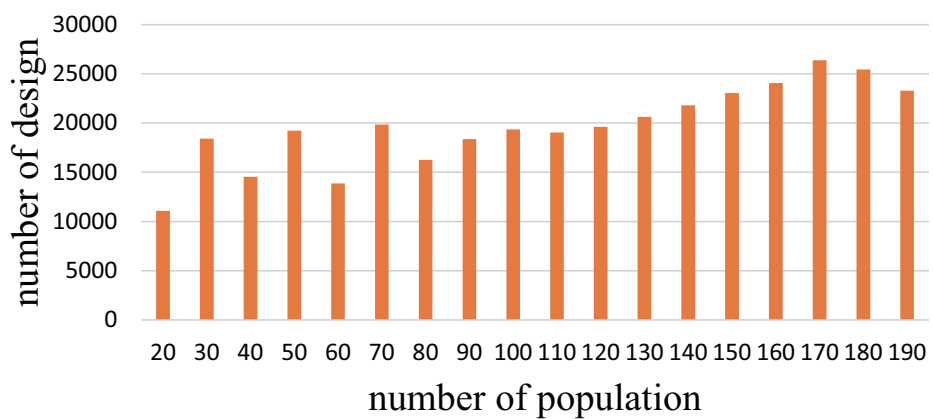


Fig. A.18: Calculated population in case9

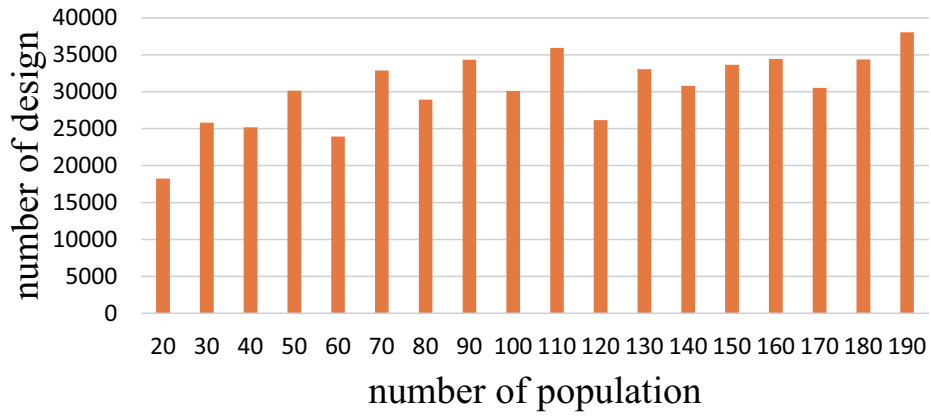


Fig. A.19: Calculated population in case10

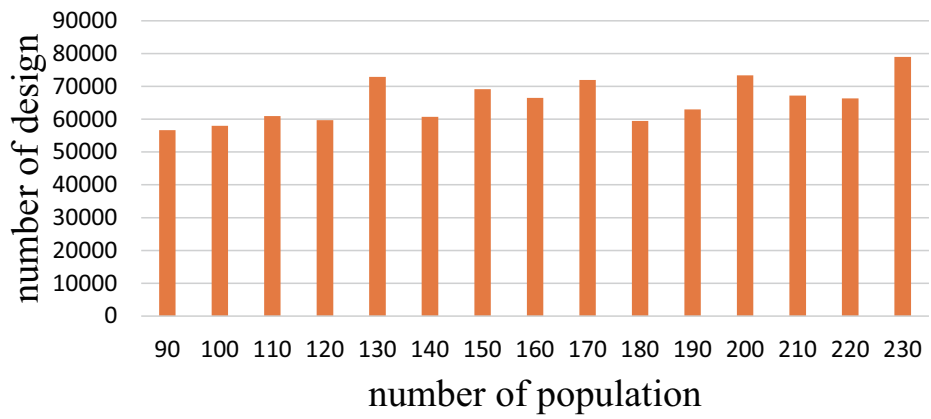


Fig. A.20: Calculated population in case11

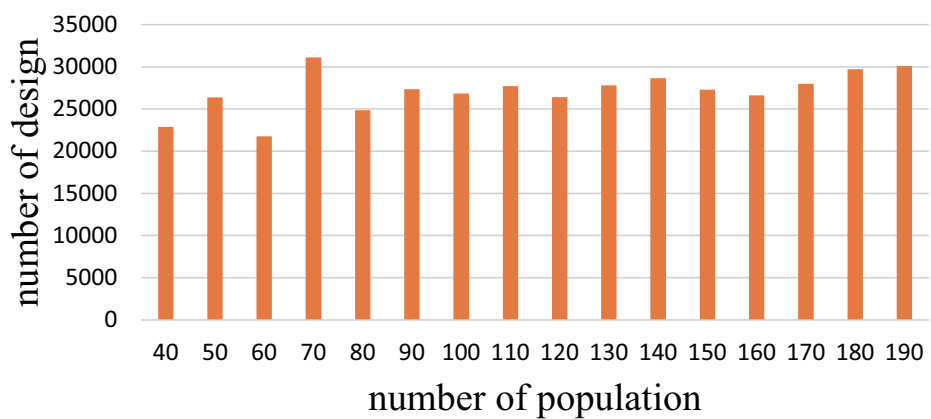


Fig. A.21: Calculated population in case12

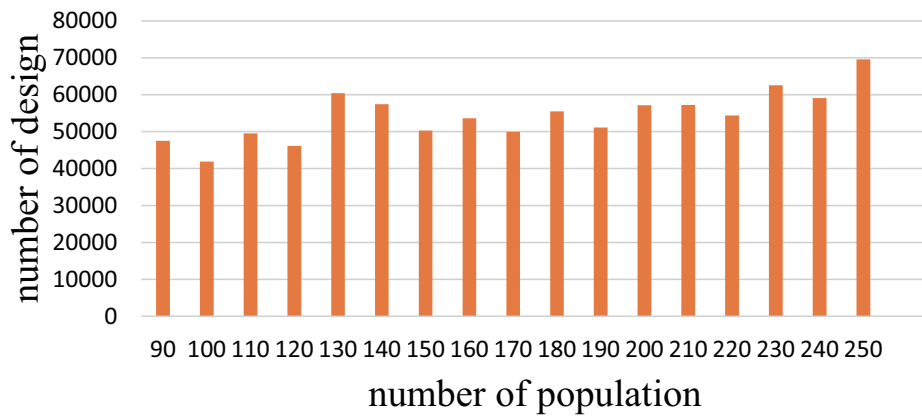


Fig. A.22: Calculated population in case13

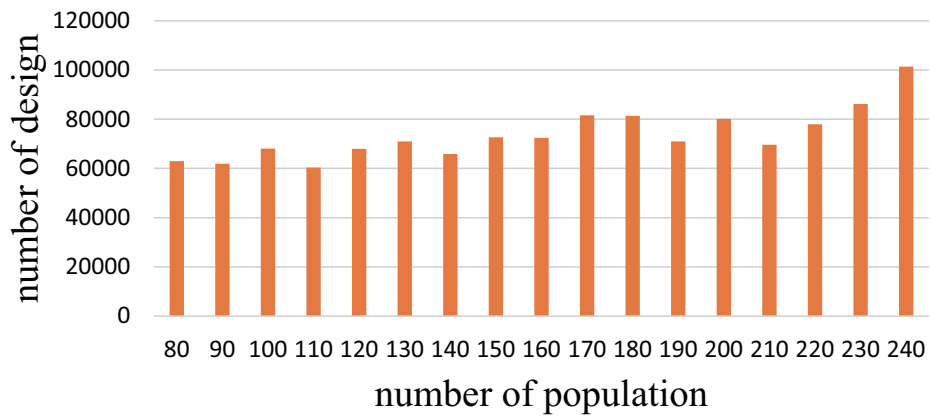


Fig. A.23: Calculated population in case14

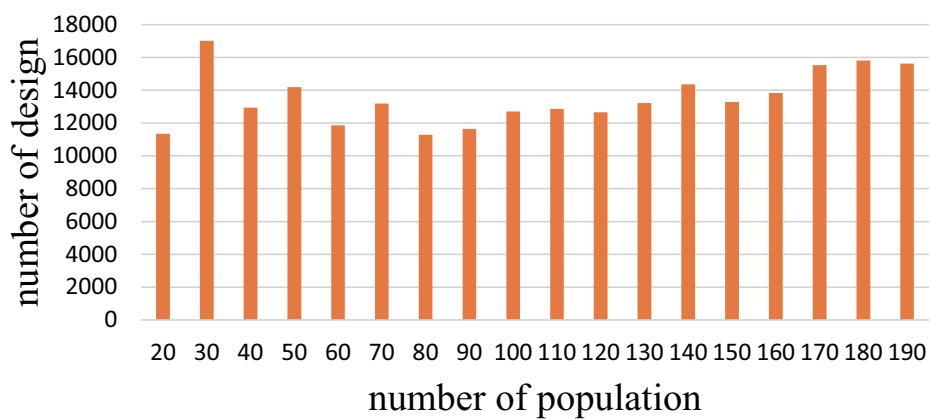


Fig. A.24: Calculated population in case15

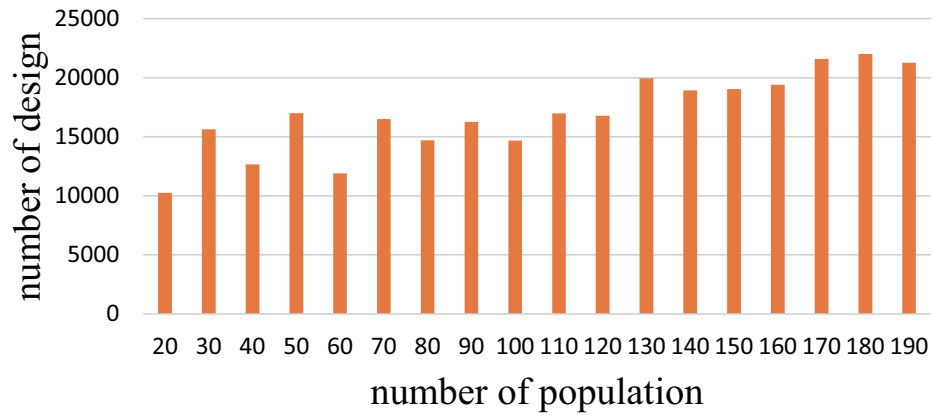


Fig. A.25: Calculated population in case16

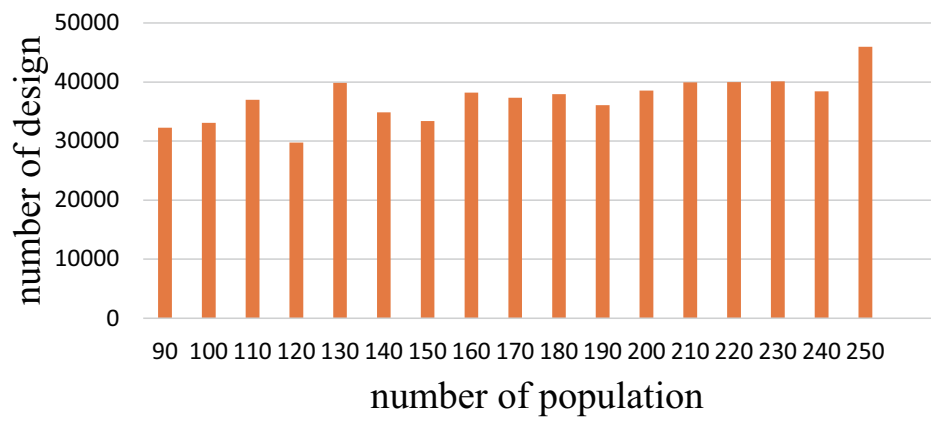


Fig. A.26: Calculated population in case17

case0~case17までの最適化計算に使用した個体数を表A.1に示す。この個体数は収束率が80%以上となる個体数を示している。

Table A.1: Evaluated population

	bottom plate	side plate	top plate	population
case0(optimization solution)	6	4	1	20~190
case1	6	4	2	20~190
case2	6	4	3	100~270
case3	6	5	1	20~190
case4	6	5	2	20~190
case5	6	5	3	170~330
case6	6	3	1	20~190
case7	6	3	2	20~190
case8	6	3	3	20~190
case9	5	4	1	20~190
case10	5	4	2	20~190
case11	5	4	3	80~230
case12	5	5	1	40~190
case13	5	5	2	80~250
case14	5	5	3	80~250
case15	5	3	1	20~190
case16	5	3	2	20~190
case17	5	3	3	80~250

## A.4 検討結果

第2章で提案する隠れ遺伝子を用いたGAと従来のGAに最適化の計算量を比較するために、ペナルティ係数を一定とした最適化を行った。全18caseの総計算個体数と個体数の関係を検討した結果、計算量を比較するための適切な計算結果となることを示した。

## 付録B 最適化システムの概要

4章で行ったHybrid GAによる最適化では本論文で提案した3つの手法を使用している。そこで、本付録ではこれら3つの提案手法の関係性を示すために4章で用いたHybrid GAによる最適化のシステムの概要を記す。

### B.1 Hybrid GAを用いた最適化システムの概要

Hybrid GAでの設計変数と目的関数，制約条件の受け渡し手順をFigB.1に，その詳細を以下に示す。また，GAでは1世代の集団に複数の個体が存在する。そのため，本研究ではFigB.2のように複数の個体の最適化を同時に行うことで計算時間の短縮を図った。

- 1) GAにおいて設計変数として扱っているスティフナー本数とスティフナー形状を提案最適化手法に渡す。
- 2) 制約条件である変位と応力を計算するためにスティフナー本数，スティフナー形状と提案最適化手法で設計変数として扱うスティフナー位置と板厚の4種類を提案FEM計算手法に渡す。
- 3) 提案FEM計算手法により計算された変位と応力を用いて設計変数であるスティフナー位置と板厚を更新する。その後，(2)に戻り最適解に到達するまで繰り返す。
- 4) 提案最適化手法により最適化されたスティフナー位置と板厚を受け取り目的関数を計算する。



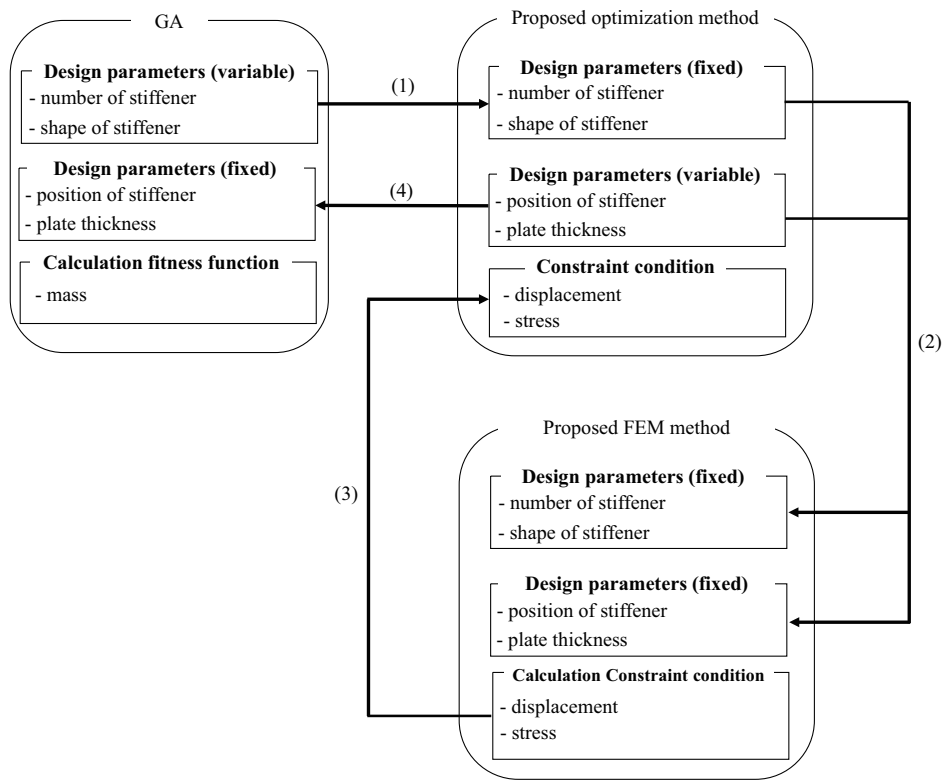


Fig. B.1: Optimization system using Hybrid GA

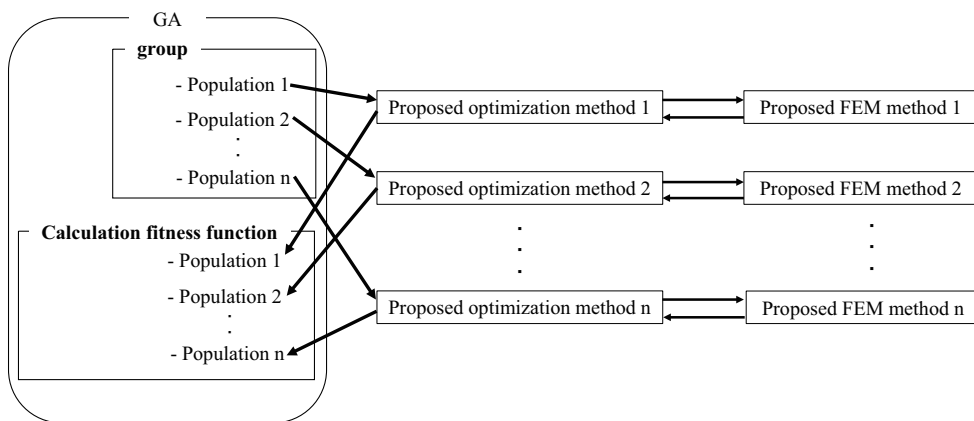


Fig. B.2: Distributed computing

## B.2 提案FEM解析手法の仕様

提案FEM解析手法では構造変更箇所の剛性マトリックスを作成する必要がある。その方法は、FigB.3のように板厚と要素長を入力し、予め用意した1要素分の剛性マトリックスを呼び出しそれらを組み合わせていくものである。そのため、設計変数であるスティフナー位置と板厚の可動範囲が広い場合や細かい場合は膨大な種類の剛性マトリックスを用意する必要がある。本研究での最適化では411500種類(18.8GB)を用意した。また、本FEM計算手法では $G_{\beta\beta}$ ,  $\Delta\mathbf{K}$ を用いてマトリックス演算を行うが、構造変更範囲が大きくこれらのマトリックスのサイズが大きい場合大量のRAMを必要とする。本研究の最適化での構造変更範囲では約4GBを必要とした。さらに、上述したように複数の個体計算を同時に行うことで、計算時間の短縮を図っているが1つのプログラムあたりRAMを2GBを必要とするため、RAMを32GB搭載したPCを使用する場合7個以下のプログラムしか起動することができない。そのため、本研究では32GBのRAMを搭載したPCを4台使用して最適化を行った。

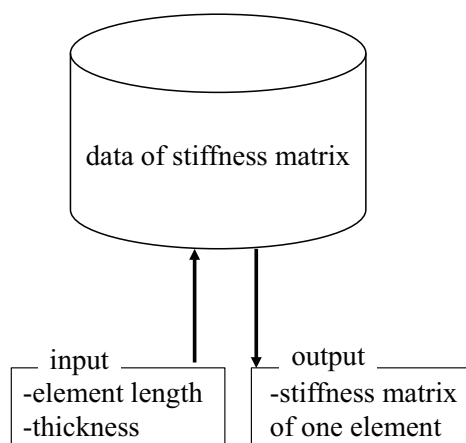


Fig. B.3: Data base of stiffness matrix