コンテナ船の構造最適設計に関する研究

正員 北村 充* 正員 信川 寿*
 学生員 カハルディン ジェノド**

A Study on Optimum Structural Design of Container Ship

by Mitsuru Kitamura, *Member* Hisashi Nobukawa, *Member*
 Kaharuddin Djenod, *Student Member*

Summary

There are many unknown variables at the initial stage of ship design. Since the computational time of finite element analysis including modeling is large, it is not appropriate to use finite element method at this stage of ship design. In this paper, structural analysis by transfer matrix method for longitudinal and transverse strength is implemented for container ship design. Genetic algorithm is used for an optimization method, since discrete design variables can be handled easily. The method also has advantage that globally optimized solution can be obtained. The objective function of cost minimization is considered, and its result is compared with real ship.

1. 船体構造に適用する最適化方法

船体構造の最適設計では、船体の工作的および強度的な制約条件を満たして、建造費を最小にするように、構造部材寸法および部材配置を求めることが重要になる。ここでは、船体構造設計において、構造部材寸法を設計変数 $\mathbf{X}$ とし、材料費と溶接費からなる建造費を目的関数 $f(\mathbf{X})$ として選ぶ。制約条件としては、応力や変形が許容値以下であること、船体中央断面係数を特定値以上にすることなどの船級協会の規定を導入する。これらの制約条件は $g_i(\mathbf{X}) \geq 0$ の形式を用いて表現されるが、 $g_i(\mathbf{X})$ は構造解析によって計算される応力や変位を含む複雑な非線形となる。また、 $f(\mathbf{X})$ も簡単な数式では表

せない非線形となる。

上記の最適化問題は、次のような不等式制約条件付最小化問題として表現することができる。^{1,2,3)}

$$\left. \begin{aligned} f(\mathbf{X}) &\rightarrow \text{Minimum} \\ g_i(\mathbf{X}) &\geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, m) \\ \mathbf{X} &= (X_1, X_2, \dots, X_j, \dots, X_n) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

1.1 遺伝的アルゴリズム

遺伝的アルゴリズム^{4,5,6)} (以下 GA と略す) は、自然の生物の進化の過程を工学的にモデル化した、最適化または検索アルゴリズムの一種である。従来から用いられている様々な最適化手法に比べて、GA は、再生、選択、交叉、突然変異、多点検索、変数コード化、ランダム操作などの独特のオペレーションを必要とし、また、微分演算が不要という特徴を持っている。各設計案 (GA では個体と呼ぶ) に対してコード化の処理を行うが、これは本来、設計変数の列を遺伝子配列に見立て、組み替え処理を行うためであった。このコード化を利用することにより、標準寸法に定められている部材のような、離散的数値の処理が可能になる。目的関数の他に、各設計

* 広島大学工学部

** 広島大学大学院

Fig.1 Flow of GA

案を次世代に残すか否かを判断するための評価関数も重要である。これらの処理を、自然進化の流れに適合させて、Fig.1のようなGAの流れを組み立てる。

再生・選択においては、エリート保存を加味したルーレット選択を採用する。選択された設定案から次世代の設計案を生成する手法としては、交叉確率と突然変異確率に従った、4点交叉オペレータと突然変異オペレータを用いる。

1.2 評価関数

GAによる最適化問題においては、評価関数の最大化を検討する。設計変数により決定された各個体には、次の条件を満足する評価関数を持たせる。

1. 各個体の評価関数はすべて非負 (≥ 0) である
2. 良い個体の評価関数の値は悪い個体より大きい

上記の条件を満足するために、式(1)により表される制約条件付の最小化問題を無制約評価関数の最大化問題に変換する必要がある。その具体的な方法を以下に示す。

まず、制約条件式をペナルティ項として加えることにより、式(1)に示される目的関数を無制約拡張目的関数に変換する。

$$\Phi(\mathbf{X}) = f(\mathbf{X}) \left[1 - C_p \sum_{i=1}^m \min[0, g_i(\mathbf{X})] \right] \quad (2)$$

ここで、 $\Phi(\mathbf{X})$ は無制約拡張目的関数であり、 C_p はペナルティ係数である。式(2)を用いて、最大化問題の評価関数を次のように定義する。

$$F_j(\mathbf{X}) = \Phi_{\max}(\mathbf{X}) - \Phi_j(\mathbf{X}) \quad (3)$$

ここで、 $F_j(\mathbf{X})$ は第 j 番目の個体の評価関数である。 $\Phi_{\max}(\mathbf{X})$ は各世代における無制約拡張目的関数の最大値であり、 $\Phi_j(\mathbf{X})$ は第 j 番目の個体の無制約拡張目的関数である。

2. コンテナ船の強度解析

コンテナ船の設計において、捩り変形を考慮した縦強度解析と横強度解析を伝達マトリックス法⁸⁾を用いて行なう。以下にそれぞれの解析方法を示す。

2.1 縦強度解析

斜波をうけて航行しているコンテナ船は、縦曲げ、および、捩り強度を考慮して設計する必要がある。特に、倉口の捩り変形量は大きくなるため、倉口蓋の開閉および損傷などのトラブルが発生しない構造設計は重要になる。ここで考慮するコンテナ船は二重殻船側と二重底を有する構造とする。左舷と右舷の船側、および、二重底は面内変形のみが生じるものとし、それぞれの構造(以後パネルと呼ぶ)は分離して考える。Fig.2に示されるように、コンテナ船は3つの船倉を有するが、各船倉を船長方向に複数個に分割して、構造強度を取り扱う。この最小単位を要素と定義するが、1要素は左舷船側、右舷船側、船底を表す3つのパネルにより構成される。本研究では、各船倉を8要素に分割して($N=3 \times 8=24$)、コンテナ船の構造解析を行なう。

各パネルに局所座標系を設置するが、Fig.3.aに示されるように、左・右舷船側パネルの深さ中央に局所座標系の原点を置く。船底パネルにおいては、船体中心線上に原点を置く。パネルの面内には、曲げモーメント、せん断力、および軸力が作用し、各パネルの結合部分にはせん断流が発生する。ここで考慮する諸量をFig.3.b~dに示すが、要素 n の縦強度に対する各パネルのモーメントとせん断力の釣合より、次式を得る。²⁾

$$\{\mathbf{V}_L\}_n^A = [\mathbf{F}_L]_n \{\mathbf{V}_L\}_n^F \quad (4)$$

ここで、 $\{\mathbf{V}_L\}_n^A$ は要素 n の船尾側における状態量(各パネルに対する、たわみ、たわみ角、曲げモーメント、せん断力の計12成分)を含むベクトル、 $\{\mathbf{V}_L\}_n^F$ は要素 n の船首側にある状態量を含むベクトル、 $[\mathbf{F}_L]_n$

Fig.2 Element of ship structure

Fig.3 Forces on each panel

Fig.4 Deformation of transverse bulkhead

は要素 n の両端の状態量の関係を表す格間マトリクスである。各要素の状態量は同一船倉内のパネルにおいては連続性を有する。つまり、要素 $n-1$ と n 間には以下の関係が成立する。

$$\{\mathbf{V}_L\}_{n-1}^F = \{\mathbf{V}_L\}_n^A \quad (5)$$

次に、横隔壁を挟んだ2要素の状態量の関係を導出する。Fig.4 に示されるように、左舷と右舷のたわみの差によって発生する横隔壁 m のせん断変形は、次式により表現される。

$$F_m^{TL} = -F_m^{TR} = GA_m \frac{w_m^{TR} - w_m^{TL}}{B} \quad (6)$$

ここで、 GA_m は横隔壁のせん断剛性、 w_m^{TR} と w_m^{TL} 、および、 F_m^{TL} と F_m^{TR} は、横隔壁の左舷船側と右舷船側のたわみ量とせん断力である。Fig.5 に示されるように、要素 $n-1$ と要素 n の間に横隔壁 m が存在している場合を考える。横隔壁の前後における左舷船側のせん断力の変化は次のようになる。

Fig.5 Shear forces at transverse bulkhead

$$\begin{aligned} F_n^{LA} &= F_{n-1}^{LF} - F_m^{TL} \\ &= F_{n-1}^{LF} - GA_m \frac{w_m^{TR} - w_m^{TL}}{B} \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 F_n^{LA} は第 n 要素の左舷船尾側端部におけるせん断力、 F_{n-1}^{LF} は第 $n-1$ 要素の左舷船首側端部におけるせん断力である。右舷船側においても、同様な関係式が得られる。この関係を考慮することにより、横隔壁を挟んだ要素間の状態量の変化は次のように表現できる。

$$\{\mathbf{V}_L\}_n^A = [\mathbf{P}_L]_n \{\mathbf{V}_L\}_{n-1}^F \quad (8)$$

船首隔壁と船尾隔壁のせん断変形とせん断力の関係は、それぞれ、次のように与えられる。

$$\frac{1}{A^F} (F_1^F - F_2^F) = G \frac{w_2^F - w_1^F}{B} \quad (9)$$

$$\frac{1}{A^A} (F_2^A - F_1^A) = G \frac{w_2^A - w_1^A}{B} \quad (10)$$

スーパースクリプト F と A は、それぞれ、船首隔壁と船尾隔壁の諸量を意味し、サブスクリプト 1 と 2 はパネル 1 とパネル 2 を意味する。ここで、船首隔壁と船尾隔壁におけるせん断力の釣り合いを考慮し、また、船首境界条件、船尾境界条件として、 $w_1 = \phi_1 = \phi_2 = w_3 = \phi_3 = 0$ を適用すると、要素 N と要素 1 に対して以下のマトリクス表現式が導出される。^{1,2)}

$$[\mathbf{R}_L]^F \{\mathbf{V}_L\}_N^F = \{0\} \quad (11)$$

$$\{\mathbf{V}_L\}_1^A = [\mathbf{R}_L]^A \{\mathbf{A}_L\}_1^A \quad (12)$$

ここで、 $[\mathbf{R}_L]^F$ は上記の船首境界条件を考慮したマトリックスであり、 $[\mathbf{R}_L]^A$ は船尾境界条件を考慮したマトリックスである。 $\{\mathbf{A}_L\}_1^A$ は要素 1 の船尾側における各パネルのせん断力と曲げモーメントを有するベクトルである。

式 (4)、(8) による各要素の両端における状態量の関係式と式 (11)、(12) の境界条件式より、3 船倉に対する状態量の関係式が導出される。

$$[\mathbf{R}_L]^F [\mathbf{B}_L] [\mathbf{R}_L]^A \{\mathbf{A}_L\}_1^A = \{0\} \quad (13)$$

ここで,

$$[\mathbf{B}_L] \equiv [\mathbf{F}_L]_N [\mathbf{P}_L]_N \cdots [\mathbf{P}_L]_2 [\mathbf{F}_L]_1 \quad (14)$$

式(13)を $\{\mathbf{A}_L\}_1^A$ について解いた後、各要素ごとの関係式より、全要素のたわみ、たわみ角、せん断力、曲げモーメントを得ることができる。

普通の曲げ振り解析では、船体横断面を梁として取り扱い、ワグナーの曲げ振り理論により解析を行う。しかし、この場合には、船体に働く曲げ振りモーメントの推定が複雑になるため、本研究では、両舷に作用する吃水のみで計算できるようにするために、船側と船底を、それぞれ、面内変形のみを考慮するパネルとして取り扱う。このパネルを組み合わせ、各パネルの接合部に生じるせん断流を考慮することにより、船体横断面の曲げ振りを解析する。

Fig.6 に示されるパネル内の領域 $\square_{abcd}$ に作用する水平方向の力の釣り合いより、次式を得る。

$$\tau dx - r dx + \int_y^{D/2} t d\sigma dy = 0 \quad (15)$$

したがって、せん断応力は次式により表現される。

$$\tau = \frac{r}{t} - \int_y^{D/2} \frac{d\sigma}{dx} dy \quad (16)$$

ここで,

$$\frac{d\sigma}{dx} = -\frac{y}{I} \frac{dM}{dx} + \frac{dN}{dx} \frac{1}{A} \quad (17)$$

Fig.6 Shear and bending stresses

Fig.7 Stress distribution on ship hull panels

であり、 r は各パネルの接合部に生じるせん断流である。これにより、船体の任意断面におけるせん断応力分布が求められ、この結果、断面にはそりが発生する。本研究の計算において、Fig.7 に示されるような、船体横断面に作用する垂直応力とせん断応力が求められる。

船体縦強度解析にあたり、船首部と船尾部の縦方向変位は拘束されるが、この境界条件により、断面のそりは拘束を受けるため、結果的に垂直応力が発生することになる。

2.2 横強度解析

Fig.8.a に示されるコンテナ船の横強度部材を、Fig.8.b に示されるように、剛体部を持つ骨組み構造に置き換えて、船倉部の横荷重に対する強度を解析する。縦強度部材としては、上甲板縦桁、船底縦桁を考え、Fig.8.b の 1, ..., 6 は、縦強度部材が位置する節点番号とする。船体横強度部材の変形は、船体中心部に対して左右対称とし、船体肋骨の船底縦桁との交差部のたわみ角は生じないものとする。

Fig.9.a に示されるような、船倉部の横荷重による強度を解析する。節点が変位しないで、横荷重が作用した場合に、1 トランス間の横強度部材に生じる曲げモーメントを M_0 、せん断力を Q_0 とする。Fig.9.b ~ f に示されるように、節点 2 を除く各節点が単位変位したときの曲げモーメントとせん断力を $M_1^w \sim M_6^w$ と $Q_1^w \sim Q_6^w$ とする。各節点のたわみが $w_1 \sim w_6$ により与えられたときに、横部材に作用する曲げモーメント M_T^w とせん断力 Q_T^w は

$$M_T^w = M_0 + M_1^w w_1 + M_3^w w_3 + M_4^w w_4 + M_5^w w_5 + M_6^w w_6 \quad (18)$$

$$Q_T^w = Q_0 + Q_1^w w_1 + Q_3^w w_3 + Q_4^w w_4 + Q_5^w w_5 + Q_6^w w_6 \quad (19)$$

により与えられる。

次に、Fig.10 に示されるように、節点 1 ~ 5 に、単位曲げモーメントを、それぞれ作用させたときに発生する曲げモーメントとせん断力を、 $M_1^m \sim M_5^m$ 、 $Q_1^m \sim Q_5^m$ とする。非対称変形は考慮しないため、節点 6 には

Fig.8 Midship section

Fig.9 Loading and mode shapes

Fig.10 Unit moment at nodes

単位曲げモーメントを負荷しない。縦部材から振りモーメント $m_1 \sim m_5$ が、横部材の各節点に作用したときに、横部材に作用する曲げモーメント M_T^m とせん断力 Q_T^m は次のようになる。

$$M_T^m = M_1^m m_1 + M_2^m m_2 + M_3^m m_3 + M_4^m m_4 + M_5^m m_5 \quad (20)$$

$$Q_T^m = Q_1^m m_1 + Q_2^m m_2 + Q_3^m m_3 + Q_4^m m_4 + Q_5^m m_5 \quad (21)$$

Fig.11 に示されるように、横部材に挟まれた上甲板縦桁、船底縦桁などの縦部材群を1つの要素と定義する。横部材の各節点の状態量（たわみ、たわみ角、振り角、曲げモーメント、せん断力、振りモーメントの6成分）は縦部材を介して、隣の横部材に伝達される。この関係は、振りとせん断を考慮した弾性梁の関係式より導き出され、

$$\{\mathbf{V}_T\}_n^F = [\mathbf{F}_T]_n \{\mathbf{V}_T\}_n^A \quad (22)$$

により表現される。 $\{\mathbf{V}_T\}_n^F$ と $\{\mathbf{V}_T\}_n^A$ は要素 n の船首側と船尾側の端における横部材の節点 1 ～ 6 の状態量である。

一方、要素 $n-1$ の船首側の状態量と要素 n の船尾側の状態量の関係として、式 (18) ～ (21) に示される M_0 , M_1^w , $\dots$, Q_1^w , $\dots$, M_5^m , $\dots$, Q_5^m などを用いることにより、次の表現式を得る。

$$\{\mathbf{V}_T\}_n^A = [\mathbf{P}_T]_n \{\mathbf{V}_T\}_{n-1}^F \quad (23)$$

横強度解析における船倉後端と前端の境界条件を表現するマトリックス $[\mathbf{R}_T]^A$ と $[\mathbf{R}_T]^F$ を負荷することにより、横強度解析に対する構造全体の式を得ることができる。

$$[\mathbf{R}_T]^F [\mathbf{B}_T] [\mathbf{R}_T]^A \{\mathbf{A}_T\}_1^A = \{0\} \quad (24)$$

ここで、

$$[\mathbf{B}_T] \equiv [\mathbf{F}_T]_N \cdot [\mathbf{P}_T]_N \cdots [\mathbf{F}_T]_1 \quad (25)$$

縦強度解析と同様に、式 (24) を $\{\mathbf{A}_T\}_1^A$ について解くことにより、船倉内の横強度に関する全状態量を得ることができる。

2.3 荷重状態

本研究で考慮する荷重状態を Fig.12 に示す。これは日本海事協会の直接強度計算に関する検査要領⁷⁾に基づくものである。Fig.12.a は縦強度解析および振り強度解析に対する荷重条件であり、Fig.12.b は横強度解析に対するものである。Fig.12 に示される波浪荷重が、船長方向に一樣に分布すると仮定して、強度解析を行う。

Fig.11 Element for transverse strength

Fig.12 Loading conditions

Table 1 Principal dimensions

Length	Lpp	152.0 m
Length	LWL	155.6 m
Breadth	Bmid	28.2 m
Depth	Dmid	15.3 m
Draft	ds	10.0 m
Deadweight	D/W	21,229.0 MT

Table 2 Limits of design variables

Design Variables	Lower Limits	Upper Limits	Increments
X_0	1.0	2.5	0.1
X_1	1.0	2.5	0.1
X_2	1.0	2.5	0.1
X_3	1.0	2.5	0.1
X_4	1.0	2.5	0.1
X_5	1.0	2.5	0.1
X_6	1.0	2.5	0.1
X_7	1.0	2.5	0.1
X_8	1.0	2.5	0.1
X_9	1.0	2.5	0.1
X_{10}	1.0	2.5	0.1
X_{11}	1.0	2.5	0.1
X_{12}	1.0	2.5	0.1
X_{13}	1.0	2.5	0.1
X_{14}	5.5	13.0	0.5
X_{15}	5.5	13.0	0.5
X_{16}	5.5	13.0	0.5
X_{17}	15.0	30.0	1.0
X_{18}	15.0	30.0	1.0
X_{19}	15.0	30.0	1.0
X_{20}	125.0	140.0	1.0
X_{21}	83.0	124.0	41.0
X_{22}	280.9	361.6	-----

(unit : cm)

3. コンテナ船の最適設計

上記の構造解析結果に基づいた、コンテナ船の最適設計を行う。最適化により得られた設計案の有効性を調査するために、実際に建造されたコンテナ船と比較・検討する。Table 1 にコンテナ船の主要目を示す。

3.1 目的関数

本研究では、建造費最小とするコンテナ船の最適設計を行う。ここで考慮する建造費とは、コンテナ船の船倉部分の鋼板材料費とすみ肉溶接費の和とする。すべての構造部材は、HT32 高張力鋼板を採用し、鋼板 1 トンあたりの価格を 90,000 円に設定する。また、すみ肉溶接の価格は、脚長 1cm、長さ 1m の溶接に対して 4,200 円とする。この目的関数に基づく最適設計を行ない、実船と設計案を比較・検討する。

3.2 設計変数

Fig.13 に示すように、部材寸法と部材位置などの 23 個の設計変数を考慮する。すべての設計変数は、下限値から上限値まで、一様な刻み幅で増加する離散的な数値

を有する。Table 2 に設計変数の下限値、上限値、および、刻み幅を示す。

3.3 構造解析に基づく制約条件

コンテナ船の強度計算に基づいて、以下に示す制約条件を採用する。

1) 船倉口の水平たわみ： δ_{deck}

ハッチ・カバーの開閉の障害にならないように、許容たわみを $\delta_{allow}=5\text{mm}$ とする。

$$g(\mathbf{X}) = 1 - \frac{\delta_{deck}}{\delta_{allow}} \geq 0$$

2) 二重底のたわみ： δ_{bottom}

二重底の許容たわみを $\delta_{allow}=4\text{cm}$ とする。

$$g(\mathbf{X}) = 1 - \frac{\delta_{bottom}}{\delta_{allow}} \geq 0$$

3) 船体横断面の断面二次モーメント： I_{mid}

船体中央断面における縦断面二次モーメント (I_{mid}) は次の値以上とする。

$$I_{min} = 3.2 \cdot W_{min} \cdot Lpp$$

ここで、 W_{min} はコンテナ船の総トン数である。制約条件式は、次のようになる。

$$g(\mathbf{X}) = 1 - \frac{I_{min}}{I_{mid}} \geq 0$$

4) 横強度部材の曲げ応力： σ_{trans}

横強度部材の許容曲げ応力を $\sigma_{allow}=18.0 \text{ kg/mm}^2$ とすると、制約条件式は次のようになる。

$$g(\mathbf{X}) = 1 - \frac{\sigma_{trans}}{\sigma_{allow}} \geq 0$$

5) 横強度部材のせん断応力： τ_{trans}

横強度部材の許容せん断応力を $\tau_{allow}=10.0 \text{ kg/mm}^2$ とすると、制約条件式は次のようになる。

$$g(\mathbf{X}) = 1 - \frac{\tau_{trans}}{\tau_{allow}} \geq 0$$

6) 縦強度部材の曲げ応力： σ_{long}

縦強度部材の許容曲げ応力を $\sigma_{allow}=15.0 \text{ kg/mm}^2$ とすると、制約条件式は次のようになる。

Fig.13 Design variables for container ship

Fig.14 Convergence considering elitism

Fig.15 Convergence considering crossover rate

Fig.16 Convergence considering mutation rate

$$g(\mathbf{X}) = 1 - \frac{\sigma_{long}}{\sigma_{allow}} \geq 0$$

7) 縦強度部材のせん断応力: τ_{long}

縦強度部材の許容せん断応力を $\tau_{allow}=8.5 \text{ kg/mm}^2$ とすると、制約条件式は次のようになる。

$$g(\mathbf{X}) = 1 - \frac{\tau_{long}}{\tau_{allow}} \geq 0$$

3.4 GA オペレータの設定

良好な結果を得るためには適切な GA パラメータが必要になるが、これらの数値は問題に依存するため、一意に決定することは難しい。以下では、いくつかのオペレータ係数を比較・検討しながら、各オペレータの適切な係数を求める。求められた適切なオペレータ係数を組み合わせることにより、コンテナ船の構造最適設計問題を解析する。

まず、初期オペレータの組み合わせを次のように仮定する。

個体数 (n_p)	60 個体
交叉確率 (P_c)	0.8
突然変異確率 (P_m)	0.03
エリート保存数 (n_e)	2 個体

上記の組み合わせの中から、エリート保存数と交叉確率と突然変異を変化させ、最適な数値を検索する。

3.4.1 エリート保存数の影響

エリート保存数を 2, 5, 10, 20, 30 と変化させ、解の収束性について比較・検討する。建造費最小の最適化問題における計算結果を Fig.14 に示す。図中に記されている数字はエリート保存数である。今回の最適化問題においては、エリート保存数が 20 のときに、最も収束率がよい。エリート保存は優良個体を無条件で次世代に残すため、残される個体の性質が変わらない。よって、エリート保存数が増えると、同世代の全個体の適合度を計算する必要がないため、計算負担を削減することもできる。

3.4.2 交叉確率の影響

エリート保存数を 20 に固定し、交叉確率を 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 に変化させて計算を行い、その結果を Fig.15 に示す。交叉確率を 0.7, 0.8, 0.9 に設定した計算は良好な収束性を有するが、0.8 の交叉確率が最適解を与えている。

3.4.3 突然変異確率の影響

突然変異確率を 0.003, 0.005, 0.007, 0.009, 0.01, 0.03 に変更して、GA の収束性を比較する。最適化の結果を Fig.16 に示すが、0.007 が最も良い収束率を与えている。しかし、僅かに小さい 0.005 を用いると、収束率が非常に悪くなり、突然変異確率の選択の困難性が伺える。

3.5 解析結果

前述のパラメータの影響を考慮して、次のように GA オペレータを選定して、コンテナ船の最適設計を行う。

個体数 (n_p)	60 個体
交叉確率 (P_c)	0.8
突然変異確率 (P_m)	0.007
エリート保存数 (n_e)	20 個体

建造費最小を目的関数とした最適化問題を行った。実船と最適化により提案された設計案における制約条件の状態を Table 3 にまとめる。表中の数値は、許容値に対する割合を示している。実船では、横強度解析における船底の最大湾みに対する制約条件が満足されていなかったが、本研究により得られた設計案は、この制約条件が

Table 3 Design constraints

			Allowable value	Original ship	Optimized ship	
Transversal strength	Upper deck	δ	100.0	87.24	99.72	
	Side hull	σ	100.0	17.11	8.23	
		τ	100.0	23.90	34.75	
	Bottom plate	δ	100.0	145.86	100.00	
		σ	100.0	17.13	8.24	
		τ	100.0	65.12	76.73	
Long. strength	Side hull	σ	100.0	49.10	67.27	
		τ	100.0	88.59	99.95	
	Bottom plate	σ	100.0	58.54	61.21	
		τ	100.0	76.40	74.50	
Moment inertia of midship section			I	100.0	528.38	478.29

unit : percent (%)

Table 4 Result of design variables

Design Variable	Original Value	Optimal Ship Design
X_0	2.0	1.9
X_1	1.4	1.1
X_2	1.2	1.1
X_3	1.2	1.8
X_4	1.1	1.0
X_5	1.3	1.4
X_6	1.6	1.0
X_7	1.1	1.0
X_8	1.1	1.1
X_9	1.5	2.0
X_{10}	1.3	1.5
X_{11}	1.3	1.1
X_{12}	1.8	2.4
X_{13}	1.5	1.0
X_{14}	9.0	12.0
X_{15}	9.0	12.0
X_{16}	9.0	5.5
X_{17}	20.0	24.0
X_{18}	30.0	17.0
X_{19}	30.0	15.0
X_{20}	137.0	120.0
X_{21}	83.0	124.0
X_{22}	316.0	316.0
(unit : cm)		
Cost (10 ⁷ yen)	9.54	8.77
Weight (10 ² ton)	8.60	7.95

限界, つまり, アクティブになっている。また, 本研究により得られた最適設計案は, 船級協会の規定を満足することも示されている。

最終的に得られた設計変数と目的関数の数値を Table 4 に示す。最適化案の設計変数の中には, 実船の数値の半分にまで減少しているものもあり, 経験からでは得られないような設計案を本研究は提案している。今回のコンテナ船の最適化においては, 3.3 節に述べた制約条件のみを考慮している。実船の設計では他の制約条件も考慮されており, 本設計案がそれらの制約条件をどの程度満足することができるかの疑問は残るが, 目的関数である建造費と重量を約 8% 減少させることができた。

4. 結論

遺伝的アルゴリズムは, 目的関数や制約条件の微分を必要としないため, 船舶の構造設計のような複雑な最適化問題においても, 比較的簡単に解を得ることができる。2 進数表現を用いたコード化により, 設計変数に離散的数値を与えることができる。これにより, 市場に出回っている既製の部材を設計案に採用することが可能になる。このように, GA は数多くの規定に従う船舶構造設計のような設計最適化には適切であると言える。

一方, GA においては, 適切なオペレータ係数を用いた最適設計を行わないと, 最適解への収束率が極めて悪くなり, さらに, 最適解に到達しない恐れもある。したがって, 問題の種類と GA オペレータの関係などをさらに検討する必要があると考える。

参考文献

- 1) 信川寿: 船体構造の最適設計に関する研究, 西部造船会 (1977)
- 2) H.Nobukawa, G.Zhou, M.Kitamura and S.Kobayashi: Structural Optimization for Small Container Ship with Large Hatch Opening, Transactions of the West-japan Society of Naval Architects, No.90 (1995), pp.181-197
- 3) M.Kitamura, Y.Fengxiang, H.Nobukawa: Design Optimization of Engine Room with Dynamic Response Using Genetic Algorithms, J. Soc. Naval Arch. of Japan, Vol. 186 (1999), pp. 345-353
- 4) J.S.Arora: Introduction to Optimum Design, McGraw-Hill (1989)
- 5) D.E.Goldberg: Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison Wesley (1989)
- 6) 坂和正敏, 田中雅博: 遺伝的アルゴリズム, 朝倉書店 (1995)
- 7) 日本海事協会: 鋼船規則検査要領 (1993)
- 8) E.C.Pestel and F.A.Leckie: Matrix Methods in Elastomechanics, McGraw-Hill (1963)