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 —

正会員 平 川 真 一* 正会員 北 村 充**
学生会員 野 波 諒 太*** 正会員 牧 美津栄*

Classification of Design Variables based on Constraint Conditions and Structural Optimal Design - Application to Structural Optimal Design of Mid-ship Section -

by Shinichi Hirakawa, *Member* Mitsuru Kitamura, *Member*
Ryota Nonami, *Student Member* Mitsue Maki, *Member*

Summary

A structure optimization of mid-ship section is under consideration in this paper. A double hull oil tanker is selected for the target of optimization. Since there are many design variables in the mid-ship section, usually, design variables are divided into some groups in the viewpoints of designing and the manufacturing. When the classification of design variables is not proper, there is a problem that the optimal solution cannot be obtained. In order to overcome this drawback, a classification method of design variables is proposed here. Influences of design variables to constraint conditions are estimated based on principle component analysis and used for classifying design variables. The classification of design variables obtained by the proposed method is different from a conventional group. The selected problems by use of the proposed method are solved, and it is shown that the proposed method can give us a better solution than the conventional method.

1. 結 言

近年、船舶の受注・設計・建造を取り巻く国際環境は非常に厳しくなっており、性能や品質を担保した上で建造コストを低減する必要性が高まっている。このような背景から、船体構造の最適設計に関する研究が盛んに行われている^{1)~12)}。船体中央横断面構造の最適設計に着目すると、この問題は設計変数の組み合わせ最適化問題と捉えることができ、非常に多くの設計変数が存在することが特徴である。したがって、設計変数の総組み合わせ数は膨大となり、その中から最適な組み合わせを探索することになる。

このような問題において、全ての設計変数を使用すると、実用的な時間で最適解を得るのが困難であるため、何らかの方法で設計変数の数を減らして最適化問題を構築するのが現実的である。油槽船の船体中央横断面の構造設計を対象に

著者らが構築した最適化システムでは、設計上・製造上の観点から設計変数をグループ化することにより、設計変数の数を減らしている^{13,14)}。しかしながら、設計変数のグループ化により、探索すべき設計変数の組み合わせ数が少なくなるため、実用的な時間で解を得ることができるものの、異なるグループに分類された設計変数間の関連性が無視されるため、本来の最適解を得ることができていない可能性がある。

一方、著者らは、別のアプローチでこのような問題を克服して、効率的に最適解を求めるための船体中央横断面の部分最適設計法を提案した¹⁵⁾。この方法では、ばら積船の船体中央横断面全体の最適化問題を、二重底やトップサイドタンクといった部位ごとに分割し、多段階最適化問題として解いた。しかしこの分割法では、中央横断面の各部位をそのまま部分最適化問題として分割したのみであり、設計変数の最適化問題に対する影響は必ずしも重視されておらず、計算効率や最適解の優劣という点で最適な分割法とは言えない。

それに対し、設計変数及び制約条件の最適化問題に対する影響に基づいて分割を行う方法がいくつか提案されている。例えば、McCulley と Bloebaum¹⁶⁾、Kusiak と Chow¹⁷⁾は、それぞれ Design Structure Matrix (DSM)を用いた問題の分解法を提案した。また、Kim らは設計問題を階層的に分解し、下流問題の解を上位問題と相互に関連付け解を得るターゲットカスケディング法を提案した^{18,19)}。また、Yoshimura らは製品の特徴・機能に基づく大規模問題の分割法及び解法を

* ジャパン マリンユナイテッド株式会社

** 広島大学大学院 工学研究院

*** 広島大学大学院 工学研究科

提案した^{20,21)}。著者らは DSM を船体中央横断面の最適設計に適用したが、全ての設計変数・制約条件を対象とするとマトリックスが極めて大きくなることから、別の判断によりグループ化している⁹⁾。また、得られる最終形がマトリックス形式のため、設計変数の増加に伴い設計変数のグループ化の判断も難しくなるなど、大規模問題への適用には問題点が残る。

本研究では、設計変数及び制約条件の最適化問題に対する影響を考慮したグループ化を行う、新たな最適設計法を、船体中央横断面の最適設計に特化して、主成分分析に基づき構築する。そして、本手法を油槽船の船体中央横断面の最適設計に適用する。

2. 船体中央横断面の構造最適設計（従来法）

油槽船の船体中央横断面の構造設計を対象に著者らが開発した最適化システムの概要を Fig. 1 に示す。最適化システムは、日本海事協会の PrimeShip-HULL から出力される Excel spread sheet (PSH-Excel) と並列計算への適用性が高い島遺伝的アルゴリズム²²⁾を利用しており、CSR の部材寸法要件に適合する。PSH-Excel には、主要目や荷重条件の他に、最適化計算における設計変数や制約条件が記述されている。また、それらの情報を利用して目的関数を計算する機能を有している。最適化計算においては、最適化エンジンから出力される設計案に従って PSH-Excel 上の設計変数値を変更し、それに伴って変化した制約条件や目的関数の値を評価するというループを指定した回数繰り返して最適解を探索する^{13,14)}。

ここでは、大型油槽船 ($L \times B \times D = 318\text{m} \times 60\text{m} \times 29.5\text{m}$) の船体中央横断面構造を対象として、各部の板厚と防撓材寸法を設計変数とした構造最適設計の例を示す。防撓材間の板及び防撓材を個別の設計変数として取り扱えば、設計変数の数は合計 329 個（板厚：175 個、防撓材：154 個）となり、これら全ての設計変数を用いて最適設計を行うと、探索すべき設計変数の組合せ数が膨大となるため、限られた時間で最適解を得ることが困難である。そこで、上述したように、設計上・製造上の観点から設計変数をグループ化することにより、設計変数の数を合計 49 個（板厚：27 個、防撓材：22 個）に減らしている。グループ化した設計変数を Fig. 2 に示す。図中のグループ番号（板）または記号（防撓材）が同じ設計変数は、一つの設計変数として取り扱う。板厚は 11.5mm ~ 26.5mm の中から 0.5mm ピッチで選択し、防撓材寸法は予め用意した 400 種類のテーブルの中から選択した。制約条件は CSR の局部強度及びハルガーダ強度（曲げ強度、せん断強度、座屈強度、最終強度、疲労強度）に関する部材寸法要件とし、目的関数は船殻重量とした。また、島遺伝的アルゴ

リズムのパラメータを Table 1 に示す。

Fig. 1 Proposed optimization system using PrimeShip-HULL.

Fig. 2 Design variable divided into groups.

Table 1 Multi-Island GA parameters.

Number of island	4
Population of island	504
Generation	1,000
Migration rate	40%
Generation interval of migration	5
Selection method	Tournament
Crossover rate	100%
Mutation rate	1%

以上の条件で、目的関数を最小化した結果の一例を Fig. 3 に示す。グラフの縦軸は最適解を 100 とした相対構造重量を示す。計算時間は 72CPU を用いた並列計算で約 120 時間となった。設計変数のグループ化により、実用的な時間で解を得ることができるものの、異なるグループに分割された設計変数間の関連性が無視されるため、本来の最適解を得ることができていない可能性がある。また、全く新しい構造を検討する場合には、合理的に設計変数を決めることが困難になる問題が考えられる。

Fig. 3 History of hull steel weight ratio.

3. 主成分分析に基づく設計変数の分類法

2 章の例では、設計上・製造上の観点から設計変数をグループ化したが、本章では、主成分分析に基づいて設計変数がある特性を分析し、設計変数の分類と構造最適設計を実施する方法を検討する。

3.1 制約条件に対する影響度

制約条件と設計変数の関係を評価する指標として、影響度を導入する。影響度の決定には次の二つの特性を考慮する。すなわち、制約条件に対する設計変数の感度と制約条件を満足する程度を表す量（制約条件の満足率）である。これにより、制約条件に対する感度や、制約条件を満足するために必要な量が同等な設計変数は、制約条件に対する影響度も同等であるという評価がなされる。その結果、このような設計変数を同じグループとして取り扱うことにより、最適設計の効率化が期待できる。

式(1)に示すように制約条件が設計変数の線形和で表現できると仮定すると、制約条件に対する設計変数の重回帰係数は感度と捉えることができる。

$$g_j = C_j + \sum_{i=1}^m \alpha_{ij} x_i \quad (1)$$

ここで、

x_i : 設計変数 ($i=1 \sim m$) m : 全設計変数の数

g_j : 制約条件 ($j=1 \sim n$) n : 全制約条件の数

C_j : 定数項

α_{ij} : 制約条件 g_j に対する設計変数 x_i の重回帰係数

制約条件 g_j に対する設計変数 x_i の重回帰係数 α_{ij} は式(2)で表される。

$$\alpha_{ij} = \frac{g_j(x_i^{\max}) - g_j(x_i^{\min})}{x_i^{\max} - x_i^{\min}} \quad (2)$$

ここで、

$x_i^{\max}$: 設計変数 x_i の最大値

$x_i^{\min}$: 設計変数 x_i の最小値

$g_j(x_i^{\max})$: 設計変数 x_i が最大値の時の制約条件 g_j の値

$g_j(x_i^{\min})$: 設計変数 x_i が最小値の時の制約条件 g_j の値

また、設計変数が可動範囲の中間値（基準値）の場合の制約条件の満足度を式(3)で定義する。制約条件 $g_j(x)$ が要求値 $g_j^{\text{req}}(x)$ 以上であれば要求を満たし、その場合、制約条件の満足率は 1.0 以上となる。

$$g_j^{\text{satis}} = \left(\frac{g_j(x^{\text{base}})}{g_j^{\text{req}}(x^{\text{base}})} \right) \quad (3)$$

ここで、

g_j^{satis} : 制約条件 g_j の満足率

$g_j(x^{\text{base}})$: 基準値における制約条件 g_j の値

$g_j^{\text{req}}(x^{\text{base}})$: 基準値における制約条件 g_j の要求値

x^{base} : 設計変数 x の基準値

設計変数の制約条件に対する影響度を式(4)で定義する。制約条件に対する設計変数の感度は、無次元化される。例えば、設計変数の長さが異なれば、設計変数が単位量変化した場合の制約条件の変化量は異なる。この影響を排除するために、制約条件に対する設計変数の重回帰係数を、目的関数に対する設計変数の重回帰係数で除している。

$$e_{ij} = \left(\frac{\alpha_{ij}}{\beta_i} \right) \quad (4)$$

ここで、

β_i : 目的関数に対する設計変数 x_i の重回帰係数

e_{ij} を成分とする影響度行列 E を以下のように定義する。式(5)の右部に示される $x_1 \sim x_m$ は設計変数に関する行を意味し、上部に示される $g_1 \sim g_n$ は制約条件に関する列を意味している。

$$E = \begin{bmatrix} g_1 & \cdots & g_n \\ e_{11} & \cdots & e_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{m1} & \cdots & e_{mn} \end{bmatrix} \begin{matrix} x_1 \\ \vdots \\ x_m \end{matrix} \quad (5)$$

3.2 主成分分析

影響度行列 E に基づいて、設計変数の相関行列 R を定める。

$$R = \begin{bmatrix} x_1 & \cdots & x_m \\ r_{11} & \cdots & r_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mm} \end{bmatrix} \begin{matrix} x_1 \\ \vdots \\ x_m \end{matrix} \quad (6)$$

式(6)の右部と上部に示される $x_1 \sim x_m$ は設計変数に関する行と列を意味している。また、成分 r_{ik} は式(7)~(9)により求められる。

$$\bar{e}_i = \sum_{j=1}^n e_{ij} / n \quad (7)$$

$$V_{ik} = \sum_{j=1}^n (e_{ij} - \bar{e}_i)(e_{kj} - \bar{e}_k) / (n-1) \quad (8)$$

$$r_{ik} = V_{ik} / \sqrt{V_{ii}V_{kk}} \quad (9)$$

ここで、

$\bar{e}_i$: e_{ij} の相加平均

V_{ik} : e_{ij} の分散・共分散

相関行列 R の成分 $r_{ik}(=r_{ki})$ は設計変数 x_i と x_k が全制約条件に対してどの程度同様な影響度を有するかを示すものになる。対応する影響度行列の成分(e_{ij} と e_{kj})の両者ともに相加平均($\bar{e}_i$ と $\bar{e}_k$)よりも大きいなど同じ側に振れる場合、相関行列の成分(r_{ik})は正になり、異なる側に振れる場合は負になる。相関行列 R の各成分(r_{ik})は-1~1 の値を有し、 $r_{ik} = 1$ は、対応する2つの設計変数(x_i, x_k)が制約条件に対して同じ度合の影響を持つことを意味し、 $r_{ik} = -1$ は、これらの設計変数は逆関係の影響度を持つことを意味する。

緒言で指摘したように、影響度行列や相関行列をそのまま利用した場合、設計変数のグループ化の判断は難しく、大規模問題への適用には問題点が残る。一方、相関行列 R の l 次の固有値 λ_l と固有ベクトル v_l は、それぞれ、主成分軸の強さとその軸における各設計変数の類似性を示す。つまり、固有値が大きい主成分軸ほど全体に与える影響が大きい。また、固有ベクトルの成分は影響因子の共通性を示す指標になる²³⁾。式(6)の相関行列 R の固有値は m 個得られ、これは m 本の主成分軸で問題を表現することを意味する。一方、 m 本全ての主成分軸を用いずに、それより少ない q 本の主成分軸で元の問題を表現する場合がある。その際、何本の主成分軸を用いるかを判断する指標として累積寄与率を用い、 q 個の主成分の累積寄与率 C_q は式(10)で求められる²³⁾。このような特性を考慮して、固有値と固有ベクトルの成分の値に基づいて設計変数をグループに分類する方法を提案する。また、3.1 節で制約条件を設計変数の線形和で表現しているため、本手法は、設計変数の可動範囲において制約条件が線形的に変化

する問題に適用可能であると考える。

$$C_q = \sum_{l=1}^q \lambda_l / m \quad (10)$$

3.3 主成分分析による設計変数の分類例

Fig. 4 に示す箱船 ($L \times B \times D = 318\text{m} \times 60\text{m} \times 30\text{m}$) を対象として、Fig. 5 に示す水圧荷重を載荷した構造最適設計の例を用いて、主成分分析に基づいた設計変数のグループ分けの妥当性を検証する。P1 及び P2 は外水圧荷重を、P3 は青波荷重を想定して、それぞれ載荷する。

設計変数は合計 59 個 (板厚: 30 個, 防撓材: 29 個) で、設計変数の可動範囲, 制約条件, 目的関数を以下のように設定した。板厚は 1mm~20mm の中から 1mm ピッチで選択し、防撓材は全て T 型として、Table 2 に示す 21 種類の中から選択した。また、式(11)²⁴⁾で計算される板に対する要求板厚と式(12)²⁴⁾で計算される防撓材に対する要求断面係数の合計 59 個 (板厚: 30 個, 防撓材: 29 個) が制約条件である。なお、式(11)の C_a 及び式(12)の C_s には縦曲げ応力が含まれているため、制約条件を満足する板厚及び断面係数を一意に求めることはできない。目的関数は船殻重量である。

Fig. 4 Design variables.

Fig. 5 Loading conditions.

$$t_{net} = 0.0158 \alpha_p \sqrt{\frac{|P|}{C_a \sigma_{yd}}} \quad (11)$$

ここで、

t_{net} : 要求板厚 (mm)

α_p : 板のアスペクト比による補正率

s : 防撓材間隔 (mm)

P : 水圧 (kN/m²)

C_a : 許容曲げ応力の係数

σ_{yd} : 降伏応力 (N/mm²)

$$Z_{net} = \frac{|P| s l_{bdg}^2}{f_{bdg} C_s \sigma_{yd}} \quad (12)$$

ここで、

Z_{net} : 要求断面係数 (cm³)

f_{bdg} : 曲げモーメントの係数

l_{bdg} : 有効曲げスパン (m)

C_s : 許容曲げ応力の係数

Table 2 Dimension of stiffeners.

ID	h_w	t_w	b_f	t_f	ID	h_w	t_w	b_f	t_f
1	325	11	125	14	12	475	12	200	30
2	375	11	125	14	13	500	12	200	30
3	375	11	150	16	14	525	13	200	28
4	350	12	150	26	15	550	13	200	28
5	375	12	180	22	16	550	13	200	32
6	400	12	180	22	17	600	14	200	26
7	425	11	180	24	18	600	14	200	30
8	450	12	200	20	19	625	14	200	30
9	450	12	200	24	20	650	14	200	30
10	450	11	200	28	21	700	13	200	32
11	475	12	200	26					

前述した主成分分析を行うと、固有値と固有ベクトルが計算される。なお、防撓材の要求断面係数は板と相関関係があるため、板と防撓材は同時に主成分分析を行っている。この場合、相関行列 R の大きさは (59 行 59 列) となるため、固有値は 59 個得られるが、これらの内、7 次までの固有値及び累積寄与率を Table 3 に示す。6 次までの累積寄与率は 50% を超え、また、7 次以降の固有値は 6 次の 1/7 以下に低下する。したがって、設計変数の分類における 7 次以降の固有値の重要度は相対的に低いと考えられる。

Table 3 Eigenvalue and cumulative contribution ratio.

Order	Eigenvalue	Cumulative cont. ratio (%)
1	7.83	13.26
2	6.60	24.46
3	5.20	33.27
4	4.74	41.30
5	4.48	48.89
6	4.36	56.29
7	0.60	57.30

得られた固有ベクトルの内、板の固有ベクトルの 1 次成分と 2 次成分を Fig. 6 ~ Fig. 7 に示す。固有ベクトルの成分は影響因子の共通性を示す指標であり、例えば、Fig. 6 の船底 (1 ~ 10) の固有ベクトルの成分はほぼ等しいため、これらは制約条件に対して同程度の影響を持っていると判断できる。また、甲板 (21 ~ 30) も同じように評価できる。一方、船側 (11 ~ 20) の固有ベクトルの成分は、線形的に変化しており、船側の設計変数が制約条件に対する影響は一様ではないことを示唆している。これらの傾向は、制約条件の中に含まれる荷重条件の傾向を反映していると考えられる。また、Fig. 7 の船側に着目すると、1 次成分とは異なり、2 次関数的な変化をしている。これは、制約条件の中に含まれる縦曲げ応力に対する船側部の設計変数の影響が中立軸からの距離の 2 乗で変化する傾向を反映していると考えられる。防撓材の固有ベクトルも板と同様の傾向を示していることを確認している。

Fig. 6 1st order Eigenvector (Plate).

Fig. 7 2nd order Eigenvector (Plate).

以上のように、同じ次数の固有ベクトルの成分の値は、制約条件に対する共通性を示していることが確認できるので、これらの情報を用いて設計変数をグループ化する。なお、PrimeShip-HULL では、全荷重ケースの計算を行った後、最も厳しい状態 (これをアクティブな状態と定義する) の荷重ケースにおける制約条件の結果のみを出力する仕様となっている。これでは制約条件に対する設計変数の影響を評価する際に、荷重ケースが異なる影響も加味されるため評価結果に悪影響を及ぼす。そこで、これを補う方法として、荷重ケースに対してアクティブな制約条件の情報を式(5)の影響度行列に加味した。具体的には、共通な荷重ケースに対してアクティブな状態になる制約条件間に関連性があると捉え、荷重ケースが同じでかつ制約条件の種類 (例えば制約条件「要求板厚」という種類) が同じ場合に、該当する影響度行列成分を加算した結果を影響度行列の新たな列に加えた。その結果、影響度行列は (m 行 n 列) から加算した N 列分大きく

なり, (m 行 n+N 列) となる. 本節の例では, 設計変数 59 個, 制約条件 59 個, 荷重ケース 6 個 (板, 防撓材それぞれ 3 個) であるため, 影響度行列の大きさは (59 行 65 列) となる. 設計変数をグループ化するために, 式(13)に示す α を導入する. α の値は, 固有値や対象の固有ベクトルの成分の最大値と最小値の差及び変化率, 対象の設計変数の個数に応じて変化し, 固有値が大きく, 対象の固有ベクトルの成分の変化が大きく, 個数が多いほど α は大きくなり, 設計変数を多くのグループに分類することになる.

最終的な設計変数の個数は, 最適化計算時間と設計の精度を考慮して, 設計者が予め決定する. また, 設計変数を分類するための閾値は, v_{diff} を分割数で均等割りして決定する.

$$\alpha = \lambda_l \times v_{diff} \times v_{rat} \times n \quad (13)$$

$$v_{diff} = v_{l_max} - v_{l_min} \quad (14)$$

$$v_{rat} = \frac{v_{diff}}{\max(|v_{l_max}|, |v_{l_min}|)} \quad (15)$$

ここで,

v_{l_max} : 対象の設計変数の l 次の固有ベクトルの成分の最大値

v_{l_min} : 対象の設計変数の l 次の固有ベクトルの成分の最小値

n : 対象の設計変数の個数

具体的に設計変数をグループ化する例を示す. この例では, 設計変数を最終的に 12 個 (板: 6 個, 防撓材: 6 個) のグループに分類することを目指す. まず, 1 次の固有ベクトルから判断して, その傾向が他と明らかに異なる設計変数 1~10, 11~20, 21~30 の 3 グループに分ける. これら 3 つの設計変数グループはアクティブな荷重ケースが異なり, それぞれ, 船底, 船側, 甲板になった. 次に, 1 次の固有値及び固有ベクトルから式(13)により計算した α に基づきグループを分ける. α の計算結果を Table 4 に示す. Gr. 2 に着目すると, 1 次の固有値 λ_1 は 7.83, 対象の設計変数の個数 n は 11~20 の 10 個, これら 10 個の設計変数の固有ベクトルの成分の中で最大値 v_{l_max} は 0.03482, 同様に最小値 v_{l_min} は -0.02787 であり, 式(13)より α を計算すると約 8.83 となる.

α の大きい設計変数グループ (11~20) を分類するが, 最終的な分割数 (6 個) を考慮して, ここでは 2 個にグループ化する. その結果, Fig. 8 に示すように設計変数 11~20 は, 11~15, 16~20 の 2 個にグループ化される. なお, α が相対的に小さい場合は, 設計変数グループを分類しない. 船底外板や甲板には一定の水圧がかかる条件のため, 要求板厚も一定となる. したがって, このような設計変数は, 分類せずにそれぞれ一つの設計変数として取り扱うことは理に適っている. なお, 板と同様の主成分分析を行って防撓材の設計変数を分類した結果を Fig. 8 に示している.

次に, 1 次の分類結果を引き継いだ上で, 2 次の固有値及び固有ベクトルから式(13)により α を計算して, 同様に設計変数をグループ化する. Table 5 と Fig. 9 に示すように設計

変数 11~15 は, 11~12, 13~15 の 2 個のグループに, 設計変数 16~20 は, 16~18, 19~20 の 2 個のグループにそれぞれ分類され, 合計 6 個の設計変数に分類された. ここで, 予め決定していたグループ数に到達したため, 設計変数の分類を終了する.

Table 4 Division of design variables (1st order).

Group ID	Gr. 1	Gr. 2	Gr. 3
Design variable	1~10	11~20	21~30
α	0.024	8.833	0.205
Num. div.	1	2	1

Fig. 8 Division of design variables (1st order).

Table 5 Division of design variables (2nd order).

Group ID	Gr. 1	Gr. 2-1	Gr. 2-2	Gr.3
Des. Var.	1~10	11~15	16~20	21~30
α	0.021	0.292	0.335	0.144
Num. div.	1	2	2	1

Fig. 9 Division of design variables (2nd order).

このように, 本研究では固有値の寄与率に基づき, 有意性の高い固有値から順次使用して設計変数の分類を進める. 設計変数の分類を終了する条件は設計変数の分類数が規定数に到達することになっているため, 本例のように設計変数が少ない場合には低次の固有値で分類を終了することになる. ま

た、各次数における分類数の決定には、固有ベクトルの状況や式(13)に示される α の値等を参考にしたユーザーの判断も必要になる。

主成分分析に基づいて決定した設計変数グループによる最適設計を行い、その効果を確認する。比較のために Fig. 10 に示すように設計変数グループを設計者の意思で決定した Case B ~ Case D のモデルを作成した。いずれも、船側部の板厚と防撓材の分割数を 4 個として、設計変数の合計数 (12 個) を提案モデルと揃えている。また、船側部の板厚と防撓材を全て分割した Case A も作成した。この場合、設計変数は 23 個になるため参考解として取り扱う。

2 章と同様に島遺伝的アルゴリズムによる構造最適設計を行って得られた重量の履歴を Fig.11 に示す。設計変数の合計数を揃えたモデルの中では提案モデルが最も軽い。各モデルの最適解を Table 6 に示す。Case B ~ Case D 及び提案モデルの船側部の最適値を Case A の参考最適値と比較すると提案した設計変数の分類が適切であることが分かる。

Fig. 10 Optimal calculation models.

Fig. 11 History of weight.

以上の知見に基づいて、本研究では、制約条件に対する各設計変数の影響度を対象とする主成分分析を実施し、求められた固有値、固有ベクトルによって設計変数を分類する。

Table 6 Optimal results of design variables.

	ID	Case A	Prop.	Case B	Case C	Case D
		opt. val.	opt. val.	opt. val.	opt. val.	opt. val.
Plate	1~10	9	9	11	9	9
	11	9	9	10	9	9
	12	9			9	8
	13	7	7	7		7
	14	7				
	15	6	6	7	7	
	16	6				
	17	6	6	6	5	
	18	6				
	19	5	5	5	5	
	20	3				
21~30	3	3	3	3	4	
Stiff.	a~j	18	18	16	18	18
	k	15	15	18	15	15
	l	11			11	12
	m	9	9	7		9
	n	7				
	o	7	6	7	7	
	p	5				5
	q	4				
	r	3	4	4	5	
	s	1				
	t~ac	1	1	1	1	1
Weight (ton)		328	333	345	337	342
Num. of D. V.		23	12	12	12	12

4. 船体中央横断面の構造最適設計 (提案法)

2 章で取り上げた大型油槽船の船体中央横断面構造の最適設計問題に、提案した手法を適用する。影響度に基づく主成分分析を実施して得られた固有値の内、7 次までの固有値及び累積寄与率を Table 7 に示す。また、これらを利用して分類した設計変数グループを Fig. 12 に示す。設計変数の合計数は、設計上・製造上の観点から設計変数をグループ化した Fig. 2 と同様に 49 個 (板: 27 個, 防撓材: 22 個) としている。その結果、板の設計変数は 6 次までの固有値を、防撓材の設計変数は 5 次までの固有値を利用した時点で設計変数の目標数に到達した。両者を比較すると、提案モデルは、船底外板の分割数を最小限としている。また、船側外板や縦通隔壁など要求寸法が一樣ではない深さ方向に伸びる部材は、より多く分割していることが確認できる。また、制約条件には設計変数の空間的配置の情報を含まないため、防撓材の設計変数「c」や「e」のように離れた個所の設計変数が同じグループに分類される場合がある。このことが製造上の問題となる場合には、制約条件に空間的配置情報を加味することにより回避することが可能である。

提案モデルを 2 章と同条件にて最適設計した結果を Fig. 13 に示す。また、最適解における各部の重量を、従来モデルの最適値と比較して Table 8 に示す。提案モデルは当初よ

りも約 0.3%軽量化できた。提案モデルの最適解は、深さ方向の部材の設計変数をより多く分割した効果により、特に縦隔壁の板を軽量化することができている。不足する縦強度は甲板を増厚することで制約条件を満足しているが、防撓材寸法を小さくして軽量化している。板と防撓材の重量比については、両モデルに大きな違いはない。

以上より、提案手法は設計変数や制約条件が大幅に増加した実船モデルに適用することが可能であり、複雑な制約条件下においても適切な設計変数グループを作成できる。その結果、より高精度な最適設計が可能であることが確認された。

Table 7 Eigenvalue and cumulative contribution ratio.

Order	Eigenvalue	Cumulative cont. ratio (%)
1	116.98	35.99
2	23.25	43.15
3	13.77	47.39
4	11.59	50.95
5	8.33	53.52
6	7.76	55.90
7	6.50	57.90

Fig. 12 Design variable divided into groups.

Table 8 Rate of the hull weight of each structural part.

Structural part	Org.		Prop.	
	Plate	Stiff.	Plate	Stiff.
Bottom	7.4	4.9	7.2	4.9
Inn. Bottom	5.8	3.5	5.9	3.4
Deck	9.8	3.4	10.5	3.1
Side	7.4	3.6	7.5	3.7
Out. L. Bhd	8.0	3.8	7.6	3.8
Inn. L. Bhd	6.6	4.3	6.3	4.4
Sub total	45.1	23.5	45.0	23.3
Others	31.4		31.4	
Total	100.0		99.72

Fig. 13 History of hull steel weight ratio.

5. 結言

本論文では、膨大な設計変数及び制約条件を有する構造最適化問題の設計変数の分類法について検討し、大型油槽船の中央横断面設計に適用した。ここで得られた知見を以下に示す。

1. 設計変数の制約条件に対する影響度を導入し、影響度の主成分分析に基づいて、設計変数と制約条件の関係を整理した。また、主成分軸成分の値に従った設計変数のグループ化法を提案した。これにより、従来は設計上・製造上の観点から決定していた設計変数グループを、数理最適化の観点から適切な設計変数グループに分類することが可能になった。
2. 提案手法を用いて、水圧荷重を受ける箱船の構造最適設計を実施した。各部材の要求寸法に見合った適切な設計変数グループに分類することにより、提案手法により得られた最適設計案が最も優れていることが確認され、本手法の妥当性が得られた。
3. 大型油槽船の中央横断面の構造最適設計を試みた。設計変数の合計数は従来手法と等しい49個としたが、提案手法を用いて決定した設計変数グループは、制約条件に対する影響を考慮して適切に決定されているため、従来よりも0.3%軽量化された設計案を得ることができた。
4. 提案手法により、数理最適化の観点から予断のない設計変数グループに分類できる可能性を示した。提案手法を適用した例においては、経験の浅い設計者が最適設計を行う場合や、新しい構造の最適設計が必要な場合において、有用な手法であると考えられる。
5. 主成分分析結果の各次数における設計変数の分類数について、ユーザー判断に委ねる部分が課題として残っており、明確な指針が得られるように更なる検討を進める。

参考文献

- 1) 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.
- 2) Lee K., Roh M. : An Efficient Genetic Algorithm Using Gradient Information for Ship Structural Design Optimization, Ship Tech. Res., Vol.48, pp.161-170, 2001.
- 3) Rigo Ph. : Least-Cost Structural Optimization Oriented Preliminary Design, J. Ship Prod., Vol.17, No.4, pp.202-215, 2001.
- 4) 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.
- 5) 濱田邦裕, 北村充, 上寺哲也 : 船体構造最適化システムを利用した造船設計プロセスのシミュレーション, 第 15 回設計工学・システム部門講演会講演論文集, 日本機械学会, pp.400-401, 2005.
- 6) 北村充, 濱田邦裕, 鈴木博喜, 大槻康明 : 船体中央断面の構造最適設計に関する研究, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 3 号, pp.131-132, 2006.
- 7) 内村秀之, 松岡和彦, 田中義雄, 喜多宏司 : 船殻中央断面構造の最適化に関する研究, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 3 号, pp.133-134, 2006.
- 8) 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.
- 9) 北村充, 濱田邦裕, 鈴木博喜, 矢野佳苗, 徳岡慶輔, 大槻康明 : 船体中央断面最適設計の実用化と高速最適化システムの開発に関する研究, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 6 号, pp.141-149, 2007.
- 10) 濱田邦裕, 武市祥司, 青山和浩 : 要求分析と設計プロセス分析に基づく接合設計支援システムの構築, 溶接学会論文集, Vol.25-2, pp.286-297, 2007.
- 11) 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, 第 8 号, pp.273-281, 2008.
- 12) 中森隆一, 北村充, 濱田邦裕 : 3D プロダクトモデルを利用した船体中央横断面の総合的最適化に関する研究—既存船舶情報に基づいた構造最適設計—, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 11 号, pp.229-238, 2010.
- 13) Hirakawa S., Kitamura M., Maki M. : Application of Genetic Algorithm to Structural Design of 150KDWT Tanker using PrimeShip-HULL Rule Calculation Software, Proc. of the 21st Int. Offshore and Polar Engineering Conference, Vol.4, pp.845-851, 2011.
- 14) 平川真一, 牧美津栄 : 遺伝的アルゴリズムによるタンカーの構造最適化, ユニバーサル造船テクニカルレビュー, 第 7 号, 2011.
- 15) Hamada K., Takezawa A., Kitamura M., Kanaikari K. : A Multi-step Design Optimization Method for Mid-ship Section, Ship Tech. Res., Vol.56, No.4, pp.110-120, 2009.
- 16) Kusiak A., Chow W. S. : Efficient solving of the group technology problem, J. Manuf. Syst., Vol.6, No.2, pp.117-124, 1987.
- 17) McCulley C., Bloebaum C. L. : A genetic tool for optimal design sequencing in complex engineering systems, Struct. Optim., Vol.12, No.2-3, pp.186-201, 1996.
- 18) Kim H. M., Michelena N. F., Papalambros P. Y., Jiang T. : Target cascading in optimal system design, J. Mech. Des., Vol.125, No.3, pp.474-480, 2003.
- 19) Kim H. M., Rideout D. G., Papalambros P. Y., Stein J. L. : Analytical Target cascading in automotive vehicle design, J. Mech. Des., Vol.125, No.3, pp.481-489, 2003.
- 20) Yoshimura M., Izui K. : Smart optimization of machine systems using hierarchical genotype representations, J. Mech. Des., Vol.124, No.3, pp.375-384, 2002.
- 21) Yoshimura M., Taniguchi M., Izui K., Nishiwaki S. : Hierarchical Arrangement of Characteristics in Product Design Optimization, J. Mech. Des., Vol.128, No.4, pp.701-709, 2006.
- 22) Tanase M. : Distributed Genetic Algorithm, Proc. 3rd Int. Conf. Genetic Algorithm, pp.434-439, 1989.
- 23) 寺野寿郎 : システム工学入門 - あいまい問題への挑戦 -, 共立出版, 1985.
- 24) International Association of Classification Societies : Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers, 2012.