ワイルドカード GA を利用した 船舶設計プロセスの最適化に関する研究

正会員 濱 田 邦 裕* 学生会員 藤 井 亮*
弘 中 睦 己** 正会員 平 田 法 隆*
正会員 北 村 充*

A Study on the Optimization of Ship Design Process Using Wildcard GA

by Kunihiro Hamada, *Member* Ryo Fujii, *Student Member*
Yoshiki Hironaka Noritaka Hirata, *Member*
Mitsuru Kitamura, *Member*

Summary

The performance of the product and the design time are influenced by the design process. Therefore, it is very important to advance the design in an appropriate design process. However, the design process generally relies on the experiences of the designer and it is difficult to examine their characteristics.

In this study, design process of ship principal particulars is optimized by using the optimization technique. Moreover, the features of the optimized design processes are examined. Characteristics of this paper are following points;

- The optimum design process is generated by using the Wildcard Genetic Algorithm which can deal with the uncertainty of product information.
- By executing the optimization, two kinds of design processes are generated i.e. performance valuing process and feasibility valuing process.
- Characteristics of the optimized design processes are analyzed by using our design support system in which dependency of the information and changes in the variation range of constraints and objective functions according to the progress of the design are visualized.

In this paper, optimization method of design process and the results of the optimization are shown. Moreover, overview of our design support system and features of the optimized design process are discussed. As a result, effectiveness of the proposed system is confirmed.

1. 緒 言

製品設計において、適切な手順で設計を進めることは極めて重要である。一般的に、熟練した設計者と新米の設計者とは、意思決定の手順や意思決定の際に検討する項目・方法は異なっており、その相違が設計解の性能や設計時間に大きな影響を与えていると言われている。したがって、設計環境の変化や社会環境の変化を考慮しつつ、その時代の要求に合致した適切な設計プロセスを検討することは極めて重要である¹⁾。

造船業においても設計プロセスの重要性は認識されてお

り、大和、青山、稗方らによって、熟練者の設計プロセスを抽出する仕組みや、抽出された設計プロセスを計算機内部に記述し再利用する仕組みについて研究が進められている^{2),3),4)}。また、著者らも設計プロセスの相違が設計解に与える影響を評価するための設計支援環境を報告している⁵⁾。しかし、これらの研究は、設計者によって提案された設計プロセスの抽出・記述・再利用・評価を主目的としており、新たな設計プロセスの創成に関する研究蓄積は不十分な状況である。

近年では DSM(Design Structure Matrix)などに代表される理論的に設計プロセスを分析する手法が着目されつつある。DSM は情報間の依存関係をマトリックス形式で表現し分析する方法であり、情報の簡潔性や一覽性に優れるという特徴を有する⁶⁾。しかし、DSM では設計者が入力する情報間の依存関係を利用して手順の分析を行うことが一般的であるため、得られた設計プロセスが最適であるとは限らない。

一方、著者らは製品情報の不確定性を考慮した設計支援システムを開発した^{7),8)}。このシステムは、確定すべき製品情報と確定すべきでない製品情報を考慮して最適化を実施す

* 広島大学大学院工学研究科

** 株式会社 ノーリツ (研究当時 広島大学大学院工学研究科)

ることが可能である。そこで本研究では、先行研究のシステムを利用して最適な設計プロセスを抽出する。さらに、最適な設計プロセスが有する特徴を考察することを目的とする。研究対象はバルクキャリアの主要目設計とする。

2. 先行研究の概要

本研究では設計プロセスの最適化に先行研究^{7,8)}の成果を利用する。そこで本章では、先行研究の概要を整理する。

2.1 製品情報の不確実性と設計シナリオ

設計の初期段階では種々の不確実性が含まれる。代表的な不確実性として例えば以下の項目があげられる。

- ・ 正確な要求仕様の決定に関する不確実性
- ・ 解析手法や見積り精度に関する不確実性
- ・ 企画・方針・デザイン変更等に関する不確実性
- ・ 製造方法に関する不確実性

船舶の上流設計では、設計で利用する推定式や近似式に含まれる誤差に対応するために、マージン等を設定することが一般的である。即ち、上記の不確実性の中で特に解析手法や見積り精度の不確実性の影響が大きい。この不確実性が原因となり、上流の設計で決定された寸法等に基づき、下流の設計で詳細な検討を行った結果、上流で決定された寸法の下では制約を満足することが出来ず、上流の設計で決定された寸法を見直すことがある(Fig. 1)。

本研究では、下流で詳細な検討を行った結果、変更が生じる可能性がある製品情報を「不確実な製品情報」と定義し、そうでは無い製品情報を「確定した製品情報」と定義する。さらに、この製品情報の不確実性を積極的に利用するために以下の設計シナリオを想定する(Fig. 2)。

- ・ 上流の設計では、各種寸法を決定するとともに、不確実な製品情報と確定した製品情報との分類を行う。不確実な製品情報については、下流の設計で調整することのできる幅（調整幅）を設ける。

Fig. 1 Influence of Uncertainty in Design⁷⁾

- ・ 下流の設計では上流の意思決定に基づき、設計を進める。この際、不確実な製品情報については調整幅の範囲内であれば、下流の設計で変更可能と考える。これにより設計の手戻りの低減や製品性能の向上が期待できる。

上記の設計シナリオは一点の設計解を探索するのではなく、ある領域を有する設計解を探索するという点において、Ward らによるセットベース設計⁹⁾の概念と類似している。セットベース設計では、初期設計における様々な不確実性を考慮して、要求仕様や設計変数を範囲集合で表現するとともに、それらの共通範囲集合を絞り込むことにより設計解を求める(Fig. 3)。このセットベース設計と比較した際の先行研究の特徴は以下のように整理できる。

- ・ セットベース設計では、一般的な設計に先立って設計変数や要求仕様の範囲集合を定義する必要があるが、この表現手法として選好度を用いる方法などが提案されている¹⁰⁾。一方、先行研究ではこのような定義は不要である。
- ・ セットベース設計では、要求仕様や設計変数の共通範囲集合を探索するため、例えば不確実性を設ける設計変数の数などを指定することはできない。一方、著者らの方法では、不確実性を設ける設計変数の数を指定することが可能であり、かつ、不確実性を設けることが有効な設計変数が自動的に探索される。

Fig. 2 Design Scenario using Unfixed Product Information⁷⁾

Fig. 3 Overview of Preference Set-based Design Method¹⁰⁾

即ち、船舶の上流設計で特に重要となる解析手法の不確定性に着目することにより、簡易な方法で設計領域の探索を可能としている点、および不確定性を設ける設計変数の数をコントロールできる点がセットベース設計と先行研究との相違といえる。

2.2 設計支援システムの概要

先行研究では、製品情報の不確定性が設計案の性能や実現可能性に与える影響の検討を支援するために、上記の設計シナリオを多目標最適化問題としてモデル化した。以下にその概要を示す。

2.2.1 設計変数

製品情報の不確定性を表現するために、一般的な設計変数に加えて、各製品情報の調整幅を設計変数として付加する。Fig. 2 に示したように、L の調整幅が 1.0 と設定された場合には、下流の設計段階において、L を 189, 190, 191 の 3 つの選択肢の間で調整できることを意味する。

2.2.2 目的関数の算出

(1) 実現可能性の最大化

実現可能性とは、主要目設計で決定された製品情報が下流の設計で成立する可能性と定義する。主要目設計における制約条件の算出には誤差が含まれるため、下流の設計における算出値（真値）を推定する必要がある。そこで、主要目設計に含まれる各種解析手法の算出値に乱数を与えて下流の設計における真値を想定し、モンテカルロ・シミュレーションにより多様な乱数に対する制約判定を行う。これにより、ある設計案が下流の設計において制約条件を満足する可能性を算出する。

製品情報が不確定性を有する場合には、生成される 3 つの選択肢の中で 1 つの設計案でも制約条件を満足する場合に、下流の設計において実現可能と考える (Fig. 4)。

(2) 軽荷重量の最小化

軽荷重量についても、主要目設計における算出値には誤差が含まれるため、下流の設計における真値を推定する必要がある。この推定も上記と同様にモンテカルロ・シミュレーションを用いて行う。また、製品情報に不確定性が含まれる場合には、Fig. 4 に示すように、調整幅の範囲内で制約を満足し軽荷重量が最小となる設計案の値を採用する。

2.3 最適化手法

製品情報の不確定性を考慮した最適化を効率的に行うため、Wildcard Genetic Algorithm (ワイルドカード GA) を提案した。ワイルドカード GA では、遺伝子列の表現に通常の 0, 1 に加え、* (アスタリスク) を用いる。* の場合には、0 と 1 及び中間値を取りうるものと認識する (Fig. 5)。この特徴によって、ある可動領域を有する不確定な設計案を表現し、最適解の探索に加え、不確定性を設ける位置や量の検討を可能とした。なお先行研究では、一般的な多目標最適化手法である Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA2)¹¹⁾ とワイルドカード GA とを組み合わせ利用している。

Fig. 4 Calculation Flow of Feasibility and the Expected Values

Fig. 5 Representation of the Chromosome in Wildcard GA⁷⁾

Table 1 Optimization Results Using Previous Study

The number of the unfixed info.	L (m)	B(m)	D(m)	D(m)	MCR (PS)	LW(t)
1	181 (±2)	30	18	11.5	15000	9655
0	179	32.5	17.25	11.5	15000	9749

2.4 ケーススタディ

先行研究のシステムを用いて 45000DWT 型のバルクキャリアの最適化を実施した結果を Table 1 に示す。Table 1 では実現可能性 80% 付近の最適解を示している。L に不確定性を設けることにより約 100t の重量が軽減されている。

以上のように、先行研究のシステムを用いることにより、不確定性を設けるべき設計変数と、その効果を定量的に検討することが可能である。

3. 最適な設計プロセスの抽出

3.1 設計プロセス抽出の基本方針

先行研究のシステムを用いると、設計解の性能と実現可能性の双方を考慮して、ある設計変数の領域を有する設計解が自動的に生成される。例えば、先行研究のシステムを用いて生成された最適解において、設計変数 L に調整幅が設定され、その他の設計変数には調整幅が含まれない場合には、L

の確定を最後にすることが実現可能性の向上と設計解の性能向上の上で有効と判断することができる。

さらに、先行研究のシステムは不確定性を設ける設計変数の数を事前に指定して最適化を行うことができる。ここで不確定性を設ける設計変数の数を2つに指定した際に、LとBに不確定性が設定されたとする。その際はその他の設計変数を先に決定し、その後、LとBを決定すべきと考えられる。さらに、不確定性を設ける設計変数の数を1つに指定した場合にLに不確定性が設けられた場合には、LとBではLを最後に残した方が有効と考えられる。したがって、この2つの最適化結果を総合的に考慮することにより、その他の設計変数→B→Lという設計プロセスを得ることができる。

本研究では、この特徴を利用して設計プロセスの抽出を行う。具体的には、不確定な製品情報の数を徐々に変更しながら最適化を繰り返し実施することにより、設計変数の決定順序を抽出する。

ところで、先行研究のシステムは、設計における手戻りの少なさを表現する実現可能性と、製品性能の代表である軽荷重量の2つの目的関数を有する多目標最適化システムとして開発されている。したがって、重視する目的関数によって、異なる設計プロセスを抽出することが期待できる。

3.2 問題設定

(1) 設計変数

設計変数は船舶の主要目(L, B, D, d, MCR)と主要目の調整幅とする。Table 2に設計変数とその上下限を示す。

(2) 制約条件

制約条件は載貨重量、操縦性能、航海速力、夏季満載喫水、貨物倉容積および最小船首高さとした。本研究ではハンディサイズのバルクキャリアを想定し、文献¹²⁾を参考にTable 3に示す制約条件値を設定した。

(3) 目的関数

目的関数は軽荷重量の最小化と実現可能性の最大化とする。2.2節で示したように本研究では主要目設計で利用される解析手法には誤差が含まれるものと考えられており、軽荷

重量と実現可能性はモンテカルロ・シミュレーションを実施することにより算出される。本研究では主要目設計で利用される解析手法に2%の誤差が含まれるものと仮定して、これらの値を算出した。

3.3 最適化結果と設計プロセスの抽出

製品情報の不確定性が1つの時の最適化結果をFig. 6に示す。またそのパレート最適解の抜粋をTable 4に示す。Table 4に示すように、実現可能性61%以上ではLに不確定性が与えられ、57%以下ではDに不確定性が与えられた。この結果より、実現可能性を重視するのであれば最後に決定すべき変数はLとなり、性能を重視するのであれば最後に決定すべき変数はDとなる。上記のように、重視する目的関数により最後に決定すべき設計変数が異なる結果となった。

次に、設定する製品情報の不確定性の数を2つに変更して最適化を実施した結果の抜粋をTable 5に示す。実現可能性を重視する設計案ではLとDに不確定性が与えられている。実現可能性が高い場合には最後に決定すべき変数がLであることは不確定性を1つ設けた場合の最適化結果により示されている。したがって、2つの最適化結果を総合的に考慮することにより、その他の設計変数→D→Lという決定手順が得られる(Fig. 7)。一方、実現可能性56%以下(性能を重視する場合)では、MCRとDに不確定性が与えられている。性能を重視する場合には最後に決定すべき設計変数はDであることがTable 4に示した最適化結果より判明しているた

Fig. 6 Optimum Solutions

Table 4 Pareto Optimum Solutions (unfixed info: 1)

Design Variable (Adjustment parameters)					Objective Function	
L	B	D	d	MCR	LW	Feasibility(%)
180(±2)	32.75	17	11.5	14800	9723	90
180.5(±2)	31	17.75	11.5	15000	9675	73
181(±2)	31	17	11.5	15000	9653	61
179	31.25	18(±0.5)	11.5	14800	9645	57
176.5	32	18(±0.5)	11	15000	9623	47

Table 2 Design Variables and Upper & Lower Bounds

Design Variable	L(m)	B(m)	D(m)	d(m)	MCR(PS)
Upper Bounds	200	33	20	15	15000
Lower Bounds	170	25	15	10	12000
Adjustment Parameters	-2~+2	-2~+2	-2~+2	-2~+2	-1000 ~+1000

Table 3 Constraints and Their Values

Constraints	Deadweight → $DW \geq 45,000(t)$
	Maneuverability → $C_b / (L/B) \leq 0.16$
	Cruise speed (15.4 Knots) → $MCR \geq BHS$
	Freeboard → $0 \leq (\text{max. allowable draught-d})$
	Cargo hold volume → $K_1(L \cdot B \cdot D) \geq 43,000 \cdot 42 \cdot 0.3048^3 / 1.016$
	Bow height → $56f(1 - L_f/500) \cdot 1.36 / (C_{BBS} + 0.68)$

Table 5 Pareto Optimum Solutions (unfixed info: 2)

Design Variable (Adjustment parameters)					Objective Function	
L	B	D	d	MCR	LW	Feasibility(%)
175(±2)	31.75	19.5(±0.5)	11.75	15000	9659	88
175.5(±2)	32.75	17.75(±0.5)	11.5	15000	9635	75
175(±2)	32.5	17.75(±0.5)	11.5	15000	9615	62
177	32.5	17.5(±0.5)	11.5	14200(±800)	9606	56
177.5	31.5	18(±0.5)	11.25	14400(±800)	9683	47

Fig. 7 The Extraction of The Design Process

Fig. 8 Optimum Design Processes

め、この2つの最適化結果を総合的に考慮すると、その他の設計変数→MCR→D という手順が得られる。

以上のようにして不確定性を設ける設計変数の数を増やしつつ、同様の処理を繰り返して抽出した設計プロセスを Fig. 8 に示す。図に示すように、実現可能性を重視する場合と性能を重視する場合とで異なる設計プロセスが抽出された。なお、文献¹²⁾には経験的に用いられている主要目の決定手順が記載されていた。この経験的な手順は、本研究で抽出した性能を重視する設計プロセスと同一であった。

4. 設計支援システムの概要

4.1 設計プロセス分析の基本方針

設計プロセスの分析には、著者らの設計支援環境を利用する。この設計支援環境では、船舶初期設計に必要な評価機能などがコンポーネントとして定義されており、このコンポーネントの組み合わせにより、設計の流れをシステム上に表現する⁹⁾。さらに、設計変数に値を入力すると、システムにより制約条件値や目的関数値が自動的に計算される。

本研究では、設計プロセスの特徴の分析のために、既存のシステムに以下の機能を新たに付加した。

- ・ 設計変数の制約条件や目的関数への影響の把握の支援
- ・ 制約条件の有効度の把握の支援
- ・ 設計の進展に伴う制約条件や目的関数の変動領域の変

化の把握の支援

本章では、新たに付加された機能の概要を説明する。なお、これらの計算のためには、設計者が予め設計空間（各設計変数の上下限）を指定することが必要である。

4.2 設計変数の制約条件や目的関数への影響の把握の支援

設計プロセスの特徴を理解する上で、各設計変数の特徴、即ち、その設計変数を操作することにより、制約条件や目的関数がどのように変化するかを把握することは重要である。本研究では、各設計変数の制約条件や目的関数に対する感度をシステムが自動算出して設計者に提示することにより、影響の把握を支援する。本研究の感度算出の特徴は L18 直交表¹³⁾を利用して、設計空間全体の大局的かつ概略的な感度を簡易的に算出している点にある。以下に設計変数 L の軽荷重量 LW に対する感度の算出手順を示す。

- ① 設計者が各設計変数の下限値、基準値、上限値を指定することにより、設計空間を指定する(Fig. 9①)。
- ② 本研究の設計変数は5つであるため、下限値、基準値、上限値の3つの水準のみを考慮しても、その組み合わせ数は $3^5=243$ 通りとなる。この試行回数を減らすため実験計画法における L18 直交表を利用する。直交表とは因子間の高次の交互作用を無視することで、少ない実験で要因効果を知るための方法である¹³⁾。上記①の設計変数を L18 直交表に割り付けた例を Fig. 9②に示す。
- ③ L18 直交表のそれぞれの設計案において、制約条件値および目的関数値を算出する。18 個の設計案には L が下限値、基準値、上限値の設計案がそれぞれ6つ生成されている。それぞれの LW の平均値である LW_{L-min} , LW_{L-mid} , LW_{L-max} を計算する。

Fig. 9 Flow to Calculate the Sensitivity of L on LW

- ④ 上記③の結果を利用して、図中(1)式により L の LW に対する感度を算出する。

以上の結果はネットワークとして可視化される。Fig. 10 に感度の算出結果を示す。Fig. 10 において左側のノードが設計変数を示しており、右側のノードが制約条件や目的関数を示している。また、リンク上の数値が感度の算出結果であり、感度の大きさによりリンクの太さを変更されている。なお、感度が極めて小さい場合には、リンクは削除して表示される。

4.3 制約条件の有効度の把握の支援

実際の設計では、満足することが容易な制約条件と、常に意識することが必要な制約条件が混在している。このような制約条件の特徴を表現する指標として制約条件の有効度を定義する。制約条件の有効度は、設計空間全体で各制約条件がどの程度の割合でアクティブな制約条件として作用するかを表現するものである。

ところで、前節で示したように、本研究のシステムでは L18 直交表を利用して 18 個の設計案が生成され、それぞれの設計案の制約条件値が計算されている。そこで、この計算結果を利用して簡易的に有効度を算出する。具体的には Table 6 の例では、DW の制約条件を満足しない設計案が 10 個ある。この場合の有効度は、生成された 18 個の設計案の内、制約を満たさない設計案がいくつ存在するかで定義され、

Fig. 10 Analysis Result of the Target Problem

Table 6 Calculation of the Active Ratio of DW

No.	L	B	D	d	MCR	DW $\geq$ 45000	Judge
1	170	33	17.5	15	12000	43220	×
2	170	29	15	12.5	15000	35020	×
3	170	25	20	10	13500	30632	×
4	170	33	15	12.5	12000	39509	×
5	170	29	20	10	15000	33999	×
6	170	25	17.5	15	13500	35364	×
7	185	33	20	12.5	13500	49645	○
8	185	29	17.5	10	12000	40396	×
9	185	25	15	15	15000	42066	×
10	185	33	17.5	10	15000	45547	○
11	185	29	15	15	13500	45929	○
12	185	25	20	12.5	12000	40632	×
13	200	33	20	15	15000	62200	○
14	200	29	17.5	12.5	13500	51806	○
15	200	25	15	10	12000	42850	×
16	200	33	15	10	13500	53096	○
17	200	29	20	15	12000	56345	○
18	200	25	17.5	12.5	15000	47415	○

10/18=55.6%と算出される。なお、この影響度の算出結果もネットワーク上で表示される。Fig. 10 において制約条件を表現するノードの右にある数値(56%等)は制約条件の有効度を示している。

4.4 設計の進展に伴う変動領域の変化の把握の支援

一般的に設計の初期段階では設計空間は広く、制約条件や目的関数の変動領域も広い(Fig. 11 (1)). ある設計変数を確定することにより、設計空間が狭まると同時に制約条件値や目的関数値の変動領域も狭まる(Fig. 11 (2)). 最終的に全ての設計変数を決定すると、制約条件値・目的関数値も 1 つに決定される(Fig. 11 (3)).

Fig. 11 Design Process and Variation Range

Fig. 12 Calculations of the Variation Range

本研究では設計変数の値を決定することを制約条件や目的関数の変動領域を狭めることと考える。一般的には、全ての設計変数の値を決定しないと制約条件や目的関数の値は算出できないが、本研究では、設計の進展に伴う制約条件や目的関数の変動領域の変化を算出し、設計者に提示することを試みる。LW の変動領域の算出手順を以下に示す(Fig. 12).

- ① 既に述べたように、設計者が設計空間を入力すると L18 直交表に基づき 18 個の設計案が生成され、それぞれの制約条件値や目的関数値が算出される。
- ② 18 個の設計案の LW の平均値を算出し、それを初期状態における LW の期待値と考える。また、18 個の設計案の内、LW が最大のものと最小のものを抽出し、それぞれを LW の変動領域の上限値、下限値と考える。
- ③ 同様の処理が全ての目的関数および制約条件に対して実施され、設計者に提示される。
- ④ ある設計変数の値が決定された場合には、L18 直交表における対象となる設計変数の値を更新し、制約条件値および目的関数値の再計算を実施する(Fig. 12 (2)). その後、上記②と同様の処理を行うことにより、変動領域の変化を把握する。

5. 設計プロセスの特徴の考察

5.1 対象問題の特徴

前章のシステムを利用して、本研究が対象とした主要目設計問題を分析した結果は、Fig. 10 に示した通りである。Fig. 10 から以下の特徴を理解することができる。

(1) 制約条件の有効度について

- ・ 最もアクティブな制約条件は載貨重量 (DW) であり、設計空間全体の約 5/9 でアクティブな制約条件として作用する。

- ・ 一方、この問題では操縦性能 (Maneuverability) と航海速力 (Cruise Speed) を満足することは容易である。
- ・ その他の夏季満載喫水 (Freeboard)、貨物倉容積 (Cargo Hold Volume) および最小船首高さ (Bow Height) については、有効度は中程度である。

(2) 設計変数の影響について

- ・ L: 最もアクティブな制約条件である DW と目的関数である LW に対する影響度が最も大きい。
- ・ B: 目的関数 LW に加え、DW、航海速力、貨物倉容積と関係する。各制約条件への影響は中程度である。
- ・ D: 最も多くの制約条件と目的関数に関係するハブである。影響度は B と同様に中程度である。
- ・ MCR: 目的関数への影響が少なく、航海速力に対する影響が大きい。
- ・ d: 目的関数への影響が極めて少なく、夏季満載喫水、最小船首高さに対しての影響度が著しく大きい。

5.2 実現可能性を重視した設計プロセスの特徴の考察

実現可能性を重視した設計プロセスは以下の通りである。

d→MCR→B→D→L

この設計プロセスを採用した際の設計解を Table 7 に、また制約条件や目的関数の変動領域の変化を Fig. 13 に示す。Fig. 13 において横軸は設計の進展を示している。また、それぞれのグラフの上に記載されている数字は、その段階において対象となる制約条件が満足される確率を示している。例えば DW に着目すると、設計の開始時において 30000DWT から

Table 7 Optimum Solutions by Two Kinds of Design Processes

	L(m)	B(m)	D(m)	d(m)	MCR(PS)
Feasibility Valuing Process	180	32.5	17	11.5	15000
Performance Valuing Process	178	32	18	11	15000

Fig. 13 The Variation Range of Constraints and the Objective Function (Feasibility Valuing Process)

62000DWTの変動範囲があり、この制約条件を満足する可能性は44%であることが理解できる。5.1節の設計問題の特徴とFig. 13を踏まえると、この設計プロセスの特徴は以下のよう考えることができる。

- ① この設計プロセスではまず d が決定され、次に MCR が決定されている。これらの設計変数は以下の特徴がある。
 - ・これらの設計変数は一部の制約条件のみと関係する。
 - ・目的関数である LW への影響が小さい。

つまり、ある制約条件への影響のみを考慮してこれらの設計変数の値を決定することができるため、これらの決定が優先されたものと考えられる。事実、この2つの変数の決定により、操縦性能と最小船首高さを満足する可能性が100%に向上している。目的関数の悪化もあまり見られず、特に d の場合は無視できる。

- ② 次に、 B と D が決定され、 DW 以外の制約条件を満足する可能性が100%に向上している。つまりここでは、貨物倉容積と夏季満載喫水を満足することを目的としている。

- ③ 最後に L を決定している。 L は目的関数である LW と最もアクティブな制約条件である DW への影響が最も強い。この特徴を利用して、 DW を満足する範囲内で LW を最小化するように、 L の値を決定している。

つまり、このプロセスでは制約条件を満足することを優先させて設計をすすめ、最後に、 DW と LW との間のトレードオフの関係を利用することにより、目的関数の向上を図っていると考えることができる。

5.3 性能を重視した設計プロセスの特徴の考察

性能を重視した設計プロセスは以下の通りである。

$d \rightarrow L \rightarrow B \rightarrow MCR \rightarrow D$

この設計プロセスを採用した際の設計解もTable 7に示されている。また制約条件や目的関数の変動領域の変化をFig. 14に示す。この設計プロセスの特徴は以下のように考えること

ができる。

- ① まず d が決定されている。この理由は前節と同様と考えることができる。
- ② 次に、 L が決定されており、これが実現可能性重視の場合との最大の相違である。 L は目的関数である LW に最大の影響を与える。またこの手順で決定された L の値は、実現可能性重視の場合よりも小さな値となっている。この決定により LW の期待値が向上し、変動領域も狭まっている。つまり、 L を早めに決定することにより目的関数の悪化を防いでいると考えられる。
- ③ L の決定後、 B と MCR が決定され、最後に D を決定している。このプロセスは実現可能性重視の設計プロセスと比較して全般的に制約条件を満足する可能性が低下している。このため、ハブである D の決定を最後にするにより、様々な制約条件の調整を可能にしていると考えられる。

以上に示したように、2つの設計プロセスの主要な相違は L の決定順序にある。 L は最もアクティブな制約条件 DW と目的関数 LW の双方に強い影響を与える。性能重視の場合には、 L を早めに決定することにより、性能の低下を防ぐことができると考えられる。一方で実現可能性重視の場合には、最もアクティブな制約条件を確実に満足できるように、その決定を最後にしていると考えられる。

5.4 仮説の検証

本章の議論の妥当性を考察するために、仮想的な設計問題を定義し設計変数、制約条件、目的関数は同じ設定のまま、設計変数の上限、下限を変更し分析を行った。変更した主要目設計の分析結果をFig. 15に示す。Fig. 15より、以下の特徴が理解できる。

- ・最もアクティブな制約条件が DW から操縦性能 (Maneuverability) に変更されている。
- ・操縦性能に最も強い影響を与えるのは B である。

Fig. 14 The Variation Range of Constraints and the Objective Function (Performance Valuing Process)

Fig. 15 Analysis Result of the Virtual Design Problem

- ・ d は夏季満載喫水と最小船首高さに極めて強い影響を与えるが, LW に対する影響は無視できる. この特徴は原問題と同様である.

以上の特徴を踏まえると, 実現可能性を重視する場合には, d を最初に決定し, B を最後に決定すべきと考えられる.

一方, 3 章で示した手法を用いて上記の仮想問題の最適な設計プロセスを抽出した. その結果, 実現可能性を重視する設計プロセスは以下の通りとなった.

d→L→MCR→D→B

この設計プロセスは推測された設計プロセスと合致する. 以上により, 本章の議論の妥当性が確認されたと考えられる.

6. 設計空間が設計プロセスに与える影響の考察

前章の検証結果より, 設計空間の設定によって最適な設計プロセスは変化すると考えられる. そこで, 本章では設計空間の設定が設計プロセスや設計解に与える影響を考察する.

6.1 実現可能性を重視した設計プロセスに関する考察

6.1.1 問題設定

本節では, 実現可能性を重視した設計プロセスに着目し, 設計変数 L および B の設計空間の変化が設計プロセスおよび設計解に与える影響を検討する. 検討する設計空間の設定を Table 8 および Table 9 に示す. Table 8 および Table 9 の問題設定の基本方針は以下の通りである.

- ・ 制約条件および目的関数は 3 章と同一とする.
- ・ Table 8 に示す case0 を基準とする. case0 の基準値は Table 7 に示した最適解の値を参考に決定した.
- ・ 設計空間の幅は基準値±10%を基本とする.
- ・ caseL1-caseL4 では L の設計空間のみを上方あるいは下方に変更している.
- ・ caseB1-caseB4 では B の設計空間のみを上方あるいは下方に変更している.

6.1.2 シミュレーション結果

前項の問題設定に基づき最適化を実施し, 最後に決定すべき設計変数および軽荷重量を検討した結果を Table 10 に示す. Table 10 に示すように, 設計空間の設定により最後に決定すべき設計変数が変化し, 設計解の性能も変化する.

Table 8 Design Space of case0

Design Variable	L(m)	B(m)	D(m)	d(m)	MCR(PS)
Upper Bounds	198	35	20	13	16500
Standard Values	180	32	17.5	11.5	15000
Lower Bounds	172	29	15	10	13500

Table 9 Design Spaces of Simulations
(Feasibility Valuing Process)

	case0	caseL1	caseL2	caseL3	caseL4
Upper Bounds (L)	198	165	183	220	231
Standard Values (L)	180	150	165	200	210
Lower Bounds (L)	162	135	147	180	189

	case0	caseB1	caseB2	caseB3	caseB4
Upper Bounds (B)	35	26	32	38	44
Standard Values (B)	32	23	29	35	40
Lower Bounds (B)	29	20	26	32	36

caseL1 のように, 問題設定によっては最適解を得られない場合も存在する.

6.1.3 設計空間の設定が与える影響の考察

ここでは, caseL1 および caseL3 に着目して, 最後に決定すべき設計変数と設計解の性能が変化した理由を考察する.

(1) caseL1

caseL1 では L の設計空間を下方に変更し, その結果, 解を得ることができなかった. この問題設定における制約条件 DW の変動領域を Fig. 16 に示す. Fig. 16 から理解できるように, このケースでは問題設定が悪く, 設計空間内に制約条件 DW を満足する解が存在しない. このために設計解を得ることができず, 最適な設計プロセスも存在しない.

Table 10 Influences of the Design Space
(Feasibility Valuing Process)

L	case0	caseL1	caseL2	caseL3	caseL4
Upper Bounds	198	165	183	220	231
Standard Values	180	150	165	200	210
Lower Bounds	162	135	147	180	189
Design Variable(last fixed)	L	-	L	B	B
LW(t)	9694.06	-	9694.79	9700.24	9867.42

B	case0	caseB1	caseB2	caseB3	caseB4
Upper Bounds	35	26	32	38	44
Middle Bounds	32	23	29	35	40
Lower Bounds	29	20	26	32	36
Design Variable(last fixed)	L	L	L	B	L or B
LW(t)	9694.06	9711.56	9693.32	9694.75	9708.12

Fig. 16 Variation Range of DW (caseL1)

(2) caseL3

caseL3 では L の設計空間を上方に変更した結果、最後に決定すべき設計変数は L から B に変化した。この問題設定において、B を最後に決定する場合と L を最後に決定する場合の制約条件 DW の変動領域の相違を Fig. 17 に示す。同様に目的関数 LW の変動領域の相違を Fig. 18 に示す。Fig. 17 および Fig. 18 から理解できるように、DW および LW に対する影響度は B よりも L の方が大きく、L を最後に決定した方が DW や LW の調整の自由度は高い。このことは 5.2 節の議論と一致している。しかし、caseL3 の問題設定では、制約条件 DW をほぼ満足できる範囲で L の設計空間が指定されている。このために L はほぼ下限値付近の値をとり、L の事実上の設計空間は極めて狭いものとなっている。このため、L ではなく B が最後に決定すべき設計変数になっている。また、この影響により、設計解の期待値も悪化している。

6.1.4 良好な解を得るための設計空間の特徴

前項で示したように、設計空間の設定が不適切である場合には設計解が得られない、あるいは最後に決定すべき設計変数が変化する等の状況が発生する。しかし、性能が高い設計解を得られる問題設定を行った場合には、今回のケースでは L が最後に決定されている。以上より、適切な問題設定を行った場合には、最適な設計プロセスも 1 つに収束すると考えられる。そこで、最も良い設計解が得られた caseB2 を参考に、適切な問題設定の特徴について考察する。caseB2, caseB1, caseL3 における制約条件 DW の変動領域の相違を Fig. 19 に比較する。最も良い解が得られた caseB2 では、制約条件の閾値付近を中心に変動領域が設定されている。言い換えれば、有効度が高い制約条件が閾値を中心に変動するように設計空間を設定することにより、事実上の設計空間を広げていることが良好な設計空間の特徴と考えることができる。

Fig. 17 Influence of Design Process on Variation Range of DW (caseL3)

Fig. 18 Influence of Design Process on Variation Range of LW (caseL3)

Fig. 19 Comparisons of Variation Ranges of DW (caseB2, caseB1, caseL3)

6.2 性能を重視した設計プロセスに関する考察

6.2.1 問題設定

本節では性能を重視した設計プロセスに着目し、その設計空間を変化させることにより、最後に決定すべき設計変数と最適解の性能がどのように変化するかを考察する。制約条件および目的関数は3章と同一とする。設計空間はTable 8を基準とし、設計変数BおよびDの基準値を上方あるいは下方に変化させ、Table 11に示す20通りのケースについて検討を行った。なお、3章の問題設定はcase8に相当する。

6.2.2 シミュレーション結果

前項の問題設定に基づき最適化を実施し、最後に決定すべき設計変数および軽荷重量を検討した結果をTable 12に示す。Table 12の太枠部は、以下を示している。

- ・設計空間の基準値は、Bが26m、Dが17.5mである。
- ・最後に決定すべき設計変数はDであり、最適解の軽荷重量は9633.8tである。

なお、case4において最後に決定すべき設計変数がB or Dと示されているが、これはパレート最適解においてBとDが混在していたことを示している。Table 12から以下の特徴が理解できる。

- ・case1,2のように設計空間を厳しく設定すると、設計解を得ることができない。
- ・設計解を得ることができる設計空間では、設計空間を余裕がある上方に変化させることにより、最後に決定すべき設計変数がD→B→Lと変化し、この変化につれて最適解の性能も悪化する。

6.2.3 設計空間の設定が与える影響の考察

ここでは前項で示した設計プロセスの変化の理由を考察する。Table 13は、各設計変数の制約条件および目的関数に関する感度を示している。Table 14は各ケースにおいて最後の設計変数を決定する際にアクティブに作用する制約条件を示している。またFig. 20は最後にDが決定されるcase3, Bが決定されるcase14, Lが決定されるcase20において、設計の進展に伴い制約条件DWの変動領域がどのように変化しているかを比較している。これらの結果から、最後に決定すべき設計変数が変化した理由は以下のように考えることができる。

Table 11 Design Spaces of Simulations
(Performance Valuing Process)

		D				
		15	16	17.5	20	25
B	26	case1	case2	case3	case4	case5
	29	case6	case7	case8	case9	case10
	32	case11	case12	case13	case14	case15
	38	case16	case17	case18	case19	case20

Table 12 Optimum Solutions of Simulations

		D				
		15	16	17.5	20	25
B	26	-	-	9633.8 D	9634.1 B or D	9636.4 L
	29	9635.5 D	9636.1 D	9635.3 D	9635.5 B	9635.4 L
	32	9635.5 D	9635.3 B	9635.3 B	9635.0 B	9635.8 L
	38	9636.0 B	9636.3 B	9636.1 L	9635.4 L	9636.6 L

Table 13 Sensitivities of Design Variables

	L	B	D
DW	23.43%	10.57%	7.05%
Cargo Hold Volume	10.02%	11.51%	13.85%
Freeboard	37.33%	7.46%	243%
Bow Height	9.55%	6.13%	205.27%
LW	13.72%	6.19%	4.13%

Table 14 Active Constraints of Each Case

		D				
		15	16	17.5	20	25
B	26	DW, Cargo Hold Volume, Freeboard, Bow Height,	DW, Cargo Hold Volume, Freeboard, Bow Height,	DW, Cargo Hold Volume, Freeboard,	DW, Cargo Hold Volume	DW
	29	DW, Cargo Hold Volume, Freeboard, Bow Height,	DW, Cargo Hold Volume, Freeboard,	DW, Cargo Hold Volume, Freeboard,	DW	DW
	32	DW, Cargo Hold Volume, Freeboard, Bow Height,	DW, Cargo Hold Volume	DW	DW	DW
	38	DW	DW	DW	DW	DW

Fig. 20 Comparisons of Variation Ranges of DW (case3, case14 and case20)

(1) 最後に決定される設計変数が D の場合の設計プロセス
設計空間が下方側で厳しめに設定されている場合には、Table 14 に示すように有効な制約条件が多く存在している。このため、多様な制約条件を調整することが可能な設計変数 D が最後に決定される。この特徴は 5.3 節の議論と一致する。

(2) 最後に決定される設計変数が B の場合の設計プロセス
上記(1)よりも設計空間がやや余裕を持って設定された場合には、Table 14 に示すように有効な制約条件は DW と Cargo Hold Volume のみとなり、特に DW の影響が強い。このために、D よりも B を最後に残した方が制約条件の調整がしやすくなるために、最後に決定すべき設計変数が D から B に変化する。

(3) 最後に決定される設計変数が L の場合の設計プロセス
上記(2)よりもさらに設計空間に余裕を持たせると最後に決定される設計変数が L に変化する。Fig. 20 に示すように、この場合には設計空間の広い範囲において制約条件を満足することが可能であり、前 6.1 節に示した実現可能性を重視した設計プロセスと同様の特徴を示す。このために、実現可能性を重視した設計プロセスと同様の理由により、最後に決定すべき設計変数が L に変化したと考えることができる。

以上の考察に基づくと、性能を重視する場合には設計解を得ることができる厳しめの範囲に設計空間を設定した case3 が適切な設計空間の設定と考えることができる。

7. 結 論

本研究では、バルクキャリアの主要目設計に着目し、最適な設計プロセスの生成を支援するシステムについて検討した。本研究の主要な特徴は以下の通りである。

- ・ 製品情報の不確定性を考慮した最適化手法であるワイルドカード GA を利用した、設計プロセスの最適化手法を提案している点。
- ・ 抽出された設計プロセスの特徴を理解するために、各設計変数の制約条件や目的関数への影響、制約条件の有効度および設計の進展に伴う制約条件や目的関数の変動領域の変化を把握できるシステムを開発した点。

設計プロセスの最適化を実施した結果、性能を重視する場合と実現可能性を重視する場合とで、異なった設計プロセスが生成された。また、開発システムを用いて生成された設計プロセスを分析することにより、各プロセスが持つ特徴を明確化するとともに、設計空間の設定が最適な設計プロセスに与える影響を考察することができた。

ところで、本研究では設計プロセスの相違が設計解に与える影響を定量的に議論するために、最適化による設計解の探索を行いながら同時に適切な設計プロセスを探索する手法

を採用した。この手法で得られた設計プロセスは次回以降の船舶の設計において有効に利用できるが、製品設計を行う前に適切な設計プロセスを導出する要望があることも事実である。このためには DSM 等に代表される定性的な設計プロセス分析手法と本研究の知見との統合が重要と考えられ、今後、検討する必要がある。

なお、本研究は科学研究費（基礎研究(B)24360356）の援助を受けて実施した。またシステム開発に名村造船所（株）の VISION を利用させていただいた。ここに御礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) 梶原, 濱田他：次世代造船システムの構想設計に関する研究委員会 最終報告書, 日本船舶海洋工学会, 2012.
- 2) 大和, 安藤他：セマンティックウェブとワークフローシステムを用いた造船 CAD システム, 日本造船学会論文集, 第 195 号, pp.111-122, 2004.
- 3) 青山他：トップダウン指向設計における商船情報の段階的詳細化モデルの提案と設計支援システムの構築, 日本造船学会論文集, 第 192 号, pp.453-464, 2002.
- 4) 稗方他：設計情報を利用した知識獲得支援フレームワークに関する研究, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol.6, pp.151-158, 2007.
- 5) 濱田, 北村他：船舶初期設計プロセスを対象とした設計プロセスシミュレータの開発, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol. 9, pp.211-222, 2009.
- 6) Lindemann, U., Maik Maurer, M. and Braun, T. : Structural Complexity Management, Springer, 2009.
- 7) 濱田, 北村他：製品情報の不確定性を考慮した船舶主要目設計支援システムに関する研究, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol. 13, pp. 239-248, 2011.
- 8) Tokumoto, H., Hamada, K. et al. : A study on design support system for ship principal particulars in consideration of uncertainties, Proc. of TEAM 2011, pp.1-8, 2011.
- 9) A.Ward et al. : The Second Toyota Paradox : How Delaying Decisions Can Make Better Cars Faster, Sloan Management Review, 36, 3, pp. 43-61, 1995.
- 10) 石川晴雄：多目的最適化設計—セットベース設計手法による多目的満足化—, コロナ社, 2010.
- 11) K. Deb, S. Agarwal, A. Pratap and T. Meyarivan.: A Fast Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization: NSGA-II, KanGAL report 200001, Indian Institute of Technology, 2000.
- 12) 造船テキスト研究会：商船設計の基礎（上）, 成山堂, 1982.
- 13) Ray, W. : An introduction to experimental design, Macmillan, 1960.