船舶の損傷時復原性規則に基づく区画最適化に関する研究

正員 川 原 佑 来* 正員 池 田 良 穂**
正員 二 瓶 泰 範**

Optimization of Ship-Compartments Arrangement on the Basis of the New Damage Stability Criteria

by Yuki Kawahara, *Member* Yoshiho Ikeda, *Member*
Yasunori Nihei, *Member*

Summary

Design of the ship-compartments arrangement in the initial design stage of a ship is one of the most important and troublesome steps to determine the loading capacity and the safety level of the ship. Since the ship's damage stability is strongly related to the safety level of the ship, the maximization of her survivability is a primary recommendation for the designer, especially in view of recent changes of the damage stability regulations towards more stringent requirement. Moreover, the optimum design which is satisfied with both sides of the loading capacity and the ship building cost guaranteeing the adequate safety is requested the designer by the ship owner.

In the present study, a multi-objective optimization method of ship-compartments arrangement by using genetic algorithm is developed for the purpose of the reduction of the designer's load and the increase of the design efficiency. The objectives of this optimization problem are herein the maximization of the Attained Subdivision Index as a safety level and the maximization of the total lanes lengths. The effectiveness of the proposed method for optimizing ship-compartments arrangement is demonstrated through applying this methodology to a practical design of ship-compartments arrangements.

1. 緒 言

船舶は、海上でかけがえない人命や貴重な貨物を輸送する手段として、非損傷時は勿論のこと、損傷時においても一定基準以上の安全性を有する必要がある。船舶の初期計画時における区画配置の検討は、その船の持つ貨物の積載能力や安全レベルを左右する最も重要な検討項目の1つである。そして、この区画配置の検討と並び、船の安全性に直結する事項が損傷時復原性の検討であり、船型と区画配置に関する情報に加えて、二次浸水を引き起こす非水密の開口部や配管、弁の位置等の詳細な情報が必要となる。基本設計の段階において、それらの詳細情報が揃うことは稀であるために、各種復原性要件の事前の適否の予測が難しく、その確認には多大な手間と時間を要する。さらに、損傷時復原性の検討は設計ループの最終段階にあり、その適否如何によってはそれまで

の検討を振り出しに戻す惧れもあることから、設計者の負担は計り知れない。

しかしながら、これらの検討は、設計の死活を左右する事項であるにもかかわらず、未だ設計者の経験に基づいて行われたり、既存船に倣うことが多いのが現状であり、最適設計がなされているとはいいがたい¹⁾。欧州では、NAPAの新SOLASの損傷時復原性規則の計算ソフトが普及し、それを活用した区画最適化の試みもなされているが、まだその最適化手法が確立されるまでには至っていない²⁾。

そこで本研究では、設計者の負担軽減および最適設計を目的として、損傷時復原性規則に基づいた船内区画の最適化手法の開発を行う。最適化は、対象船の安全レベルと貨物の積載能力の二つの目的関数の最大化問題として捉えることとし、大域的最適解に到達する可能性の高い遺伝的アルゴリズムを最適化手法として用いる。以上のようにして得られた結果から、設計者に最適区画配置の一例を示し、本手法の妥当性・有効性を検討する。

* 三菱重工業（研究当時大阪府立大学大学院）

** 大阪府立大学大学院工学研究科

2. 研究概要

2.1 新損傷時復原性規則の概要

SOLAS 条約第 II-1 章の損傷時復原性要件が、2006 年に全面的に改正され、乾貨物船と旅客船に対して確率論に基づく

規則に一本化された。確率論に基づく新損傷時復原性規則の概要は、船体における仮想損傷に対して船全体としての生存確率をある一定基準以上確保するというものである。具体的には、船に損傷が生じた際に、ある区画（または区画群）が浸水する条件付き確率を P_i で表す。また、ある区画が損傷浸水した場合、波浪中にあっても転覆・沈没せずに生存する確率を S_i とする。この生存確率 S_i は、浸水最終平衡状態で基準以上の復原性を有していれば1、沈没もしくは転覆する場合は0となるが、海象の影響も考慮してその間の値も規定されている。これら P_i と S_i の積を、あらゆる浸水ケースについて計算し、船全体としての生存確率を算出する。この船全体の生存確率を、到達区画指数 (Attained Subdivision Index ; A) と呼び、船の種類に応じて、長さや乗員数によって決められる要求区画指数 (Required Subdivision Index ; R) 以上であることが求められる。

日本造船研究協会³⁾が、既存の様々な船種に対して、従来規則 (Present) と新規則 (SDSWG) で試算を行った結果を Fig.1 に示す。新規則適用にあたっては、従来規則と安全レベルが等価となるよう決定されたが、Fig.1 に示すように、要求安全レベルが上昇し、船内に大きな車両スペースを有する PCC や Ro-Ro 貨物船、撒積貨物船といった船種で規則を満たすことが難しくなることが予想されている。設計者は、隔壁の増加や区画配置の変更等の何らかの設計変更を通して、新規則に対応する必要があると思われる。

Fig. 1 Comparison of the safety level between the new probabilistic criteria and the traditional criteria.

2.2 最適化システム

遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm ; GA) とは生物が環境に適合し、進化していく過程を工学的に模倣した最適化アルゴリズムである。GA では、個体の集団のことを、母集団 (Population) と呼び、この母集団に対して選択 (Selection)、交叉 (Crossover)、突然変異 (Mutation) などの遺伝的操作を繰り返し行うことによって解探索を行う。本研究では、単一目的の GA⁴⁾ を多目的 GA へと拡張した。その際、アルゴリズム実装の容易さも踏まえ、Fonseca⁵⁾ により提案された

MOGA (Multi-Objective Genetic Algorithm) を採用することとした。MOGA は、パレートの概念を用いる手法の中で、代表的なアルゴリズムの一つであり、単一目的 GA にわずかな変更を加えることで実装可能である。

本研究で使用する最適化システムを Fig.2 に示す。主計算部には作成した MOGA を、損傷時復原性計算部には大阪府立大学で開発された新規則対応のプログラムを使用する。主計算部において、各世代の個体毎に船体の区画形状を決める隔壁の船長方向位置データが出力される。そのデータを基に、船体オフセットや区画形状データ等を生成し、各区画浸水時の復原力計算を行う。最後に、その船の安全レベルの指標となる到達区画指数を算出し、主計算部にデータを渡す。主計算部では、得られた到達区画指数および区画配置から算出される積載能力の値を基に、その個体の適合度を決め、交叉・突然変異を行う。この操作を設定した世代数だけ繰り返し、最適化終了である。

Fig. 2 Flow of optimization of ship-compartments arrangement with Multi-Objective Genetic Algorithms.

2.3 区画最適化問題の定式化

区画最適化問題における目的関数として、損傷時復原性規則で規定される到達区画指数と貨物の積載能力を設定し、両者の最大化問題を考える。また設計変数として、機関室前端的隔壁より船首側に存在する隔壁の船長方向位置を考え、それを変化させることによって様々な区画を生成する。これは、船種と大きさが決まれば、機関出力が決まり、結果的に機関室の大きさがある程度決まってしまうため、機関室を含む船尾部の区画最適化の必要性は少ないと考えられるからである。なお、最適化の対象となる区画内に縦通隔壁や二重底、乾舷甲板を予め設定することで、Fig.3 に示すような二種類もしくはそれ以上の断面形状を持つ区画が生成可能になる。縦通隔壁や二重底の設定は、積荷の種類や必要なタンクの数によって、制約を受ける検討事項であり、最適化の前段階で予め設計者が設定することが望ましい。そのため、本システ

ムでは、最適化の前に縦通隔壁の幅方向位置、二重底・乾舷甲板高さ等を設定する必要性がある。

現実的な設計という面から見れば、タンク配置・容積が変更されたことによるトリム計算や構造強度を考慮する必要性があると思われる。しかし、そういった種々の拘束条件を取り入れることは、得られる解集合の自由度を狭め、幅広い区画配置を設計者に提案することが出来なくなると予想される。同時に、損傷時復原性要件の改正によって生じ得る設計変更は、従来の設計で培われた勘や経験が通用しない可能性もある。幅広い区画配置を設計者に示すことは、設計変数が変化した際の目的関数（到達区画指数）への影響度を確認できるという利点もある。そのため、本研究においては上記の拘束条件を考慮しないこととした。

Fig. 3 Overview of optimization in ship-compartments arrangement

3. 最適化事例 - Ro-Ro 貨物船 -

3.1 対象船

本稿では、Fig.4に示す Ro-Ro 貨物船を対象として区画最適化を行った結果を示す。前述したように、Ro-Ro 貨物船は船内に大きな車両スペースを有していることから、新規規則適用により大きく安全レベルが低下すると予想される船種である。最適化対象の区画内には、船体に沿った縦通隔壁と車両区画底部に二重底を設けることとし、制約条件として、縦通隔壁の幅方向位置が 0 とならないようにした。

最適化の目的関数である貨物の積載能力として、本対象船では車両スペースの最大化を考慮することとし、No.1~No.4 までの車両甲板長の総和で定義する。また、乾舷甲板下の車両スペースとなる区画内に縦通隔壁と二重底を設け、Fig.4の左下に示す断面形状に設定した。なお、最適化条件を Table 1 に示す。一般に突然変異率は、0~5%と交叉率と比較して小さい値が使われる。これは、高い突然変異率を設定することで、ランダム探索に近い状態となり、解が収束しにくくなるためであり、逆に小さすぎても解を局所的にしか探索できない。本研究では、比較的高い突然変異率を用いることで幅広い解を探索することとした。同時に、GA は多点同時探索を行うために、計算コストが高いことが知られている。これは、単純に母集団サイズ×世代数だけ個体の評価計算を行う

必要があるためである。本研究における個体の評価（ダメスタ計算）にかかる時間はおよそ 2 分であり、計算コストが高くなりすぎないように、Table 1 のように最適化条件を設定した。

Fig. 4 General arrangement of Ro-Ro Ship.

Table 1 Simulation Conditions of SGA and MOGA

	SGA	MOGA
Population Size	30	50
Bit Size	10	
Generation Size	20	
Crossover Rate	0.90	
Mutation Rate	0.1	
Selection	Roulette	
Crossover Method	N-Point Crossover	

また、対象船の仮想損傷範囲を表す特性三角形を Fig.5 に示す。対象船の船尾より順に 1~13 の仮想損傷範囲 (ZONE) に分割し、それぞれの ZONE における 1~4 区画浸水を考える。なお、乾舷甲板より下方での損傷浸水と、それを越えて浸水が起こる 2 ケースについてそれぞれ計算を行う。また Fig.5 には、ZONE 5 の乾舷甲板より下方が損傷する際の浸水区画を薄灰色部で示している。車両甲板上に水密隔壁が存在しないために、乾舷甲板以下の大部分の甲板に、浸水が及ぶことがわかる。

Fig. 5 Possible single and multiple zone damages in a Ship.

3.2 単一目的最適化

本節では、目的関数として安全レベル（到達区画指数）の最大化にのみ着目し、単一目的のGA（Single Genetic Algorithm; SGA）を用いて、区画最適化を行った結果を示す。最適化結果をFig.6に示す。縦軸は、到達区画指数Aを要求区画指数Rで除した値を示している。世代数が増し、最適化が進んでいくに従い、徐々に安全レベルが向上していることがわかる。全世代を通して最も高い到達区画指数を獲得した解は、初期世代に得られたその最大値と比較して、およそ10%高い安全レベルを獲得している。

Fig. 6 Result of the optimization with SGA for a Ro-Ro Ship;
Flooding Point z : 13.5m

Fig. 7 Comparisons of the maximum safety level among the several conditions with SGA for a Ro-Ro Ship

また、海水流入口が13.5, 15, 17mの条件で、隔壁数を6～10に変化させて最適化を行った結果をFig.7に示す。それぞれの隔壁数において獲得できる安全レベルの最大値は、隔壁数が増すにつれて増加し、流入口位置によっては、隔壁が6枚と10枚ではおよそ20%もの差が生まれている。同時に、流入口位置を高くすることによって、安全レベルは10%～20%向上することがわかる。実際の設計現場においても、要求安全レベルを満たすことが出来なければ、まず流入口位置を高くすることで対応することから、その効果の高さが窺える。

これは、ある区画浸水時の復原力計算をした際に、流入口が没水すると、例え十分な復原力を有していたとしてもその区画の生存率が0、すなわち沈没するという扱いになってしまうため、流入口を少し高く設定し直すことで、その没水角を大きくし、生存率を上げているのである。また、Fig.7中の二点鎖線は、本対象船で考えられる車両スペース（T.L.M.）の最大値324を保持した上で、安全レベルをどこまで高く確保できるかということを示しているが、隔壁数の増加に伴って単調には増加していない。これは、解の探索が安全レベルの最大値を狙う方向であるために、車両スペースが最大となるT.L.M.=324付近の解を十分に探索出来ていないからではないかと考えられる。ここで、得られた区画配置の詳細については後述することとして、到達区画指数と車両スペースとの関係をFig.8に示す。Fig.8より、両者はトレード・オフの関係にあることがわかり、最適設計のためには安全レベルを要求値以上保持しつつ、貨物スペースを最大にするような区画配置を求めることが要求される。

Fig. 8 Correlation between Attained Subdivision Index and
Total Lane Meter for a Ro-Ro Ship

3.3 多目的最適化

目的関数として、到達区画指数・車両スペースを設定し、両者の最大化問題として多目的最適化を行った。海水流入口位置を13.5mとして最適化を行った結果をFig.9, 10に示す。他のどの解にも劣らない、パレート最適解集合は、グラフ中の太い実線で示しており、設計者は安全レベルと車両スペースの両立のとれる設計案をこの解集合の中から選択することが出来る。Fig.9に示す結果より、隔壁数が6の場合、要求安全レベルを満たそうとすると、確保できる車両スペースは、本対象船で考えられる最大甲板長よりも8%弱短くなってしまふ。安全レベルを満たし、なおかつ最大の車両スペースを確保しようとするれば、隔壁を7枚以上に設定するか、流入口を少し高く設定するか二つの選択肢が考えられる。一例として、Fig.9, 10のパレート最適解集合の(c), (d), (e), (f)の区画配置をFig.11に示す。

Fig. 9 Scatter diagram of Attained Subdivision Index vs. Total Lane Meter with MOGA for a Ro-Ro Ship, Flooding Point ;

Fig. 10 Scatter diagram of Attained Subdivision Index vs. Total Lane Meter with MOGA for a Ro-Ro Ship, Flooding Point ;

A-INDEX / R-INDEX

Number of Bulkhead

Total Lane Meter / Total Lane Meter_{MAX}

Fig. 11 Comparisons of optimum (black colored) and initial (gray colored) arrangement of Ro-Ro Ship

大きな安全レベルを獲得した(d), (f) に示す区画配置では, 比較的船首に近い区画が大きくなり, 船体中央部の車両スペースが小さくなっている. これは, 車両甲板内に浸水を食い止める水密隔壁が存在しないため, そこへの浸水が常に2区画以上の浸水に発展してしまうことに起因する. つまり, 高い安全レベルを獲得するためには, この車両スペースを小さくする必要があり, それに伴って船首の区画が大きくなるのである.

また, 到達区画指数を計算する際の浸水確率 P_i は, 損傷統計に基づき決定されているため, 船首・船尾を含む区画では比較的大きい値をとる. そのため, 船首に近い区画を大きくすることは, 浸水時に要求される復原力を満たす範囲内であれば, 結果的に大きな生存率を獲得できることになる.

逆に, (c), (e) に示すのは, 安全レベルを要求値以上保持し, 車両スペースを出来る限り広く確保した区画配置であり, 実際の設計現場において, 最も理想的な区画配置の一つでは

ないかと考えられる. 本対象船には, 車両甲板内に船体形状に沿った縦通隔壁を設定しているが, この縦通隔壁の幅方向位置が0にならないよう制約を設けている. 得られた区画配置をみると, この制約をぎりぎりまで狙って解の探索が行われたことがわかる.

また, Fig.11 に示すように, 二つの目的関数間でのパレート最適解に加え, 設計変数やその他の情報について整理しなおすことで, 設計者が理解しやすい形で感度解析を行うことも出来る. 多目的最適化によって得られるパレート最適解は, 単一目的の最適解に比べはるかに多くの情報を設計者に提供することが可能であることがわかる.

ここで, 各最適区画配置(a) ~ (f) における到達区画指数 ($P_i \times S_i$) の船長分布を Fig.12 に示す. また, Fig.13 の円グラフは, 船全体の到達区画浸水 (要求区画指数) に占める1~4区画浸水で獲得される到達区画指数の割合を示している.

Fig. 12 Distribution of $P_i \times S_i$ on each extent in optimum arrangements of Ro-Ro Ship

Fig. 13 A-Index ratio of each compartment flooding in optimum arrangements of Ro-Ro Ship

Fig.12 に示す到達区画指数の分布を見ると、高い安全レベルを獲得した(b), (d)の区画は、1, 2区画浸水時において車両甲板よりも船首側の区画でバランスよく到達区画指数を獲得していることがわかる。しかしながら、車両甲板が広く取れた(a), (c), (e)の区画では、車両甲板への1区画浸水時に大きな到達区画指数を獲得しているものの、他の区画浸水時の安全レベルはそれほど大きくない。これは、Fig.13の各区画浸水時の割合からも明白であり、(c), (e)の区画で2区画浸水の際に獲得される到達区画指数の割合は、(b), (d)の区画におけるそれと比較して小さい。また、(f)の区画は隔壁が9枚の場合に最も安全レベルが高い区画であるが、船首から三つ目の区画でかなり大きな到達区画指数を獲得していることがわかる。実際には様々な制約や、積載能力の確保という観点から、(f)のような極端な区画配置になることはないが、ある一つの区画で船全体としての安全レベル、すなわち到達区画指数を要求値以上獲得すれば、規則を満足することができるのも事実である。ただし、客船基準であれば隣接2区画に浸水したときに S_i が0.9以上となるように設計するマイナーダメージ要件が、設計要件として追加される。

また、Fig.14は要求GMと海水流入口との関係を示している。このグラフは、先に示したパレート最適解集合の中からある区画配置を選択した後に作成し、設計者に非損傷時・損傷時における復原性規則を満足しているかを確認するためのものである。Fig.14は、先に示したOptimum Design (c)の区画配置において要求GMを算出したものである。Optimum Design (c)に示す区画においては、海水流入口が高い位置にあれば、損傷時復原性規則よりも非損傷時復原性規則のほうが要求されるGMは大きく、厳しい条件となることがわかる。ただし、流入口位置が15mの場合においては、損傷時復原性規則により要求されるGMのほうが厳しいということがわかる。設計現場では、このグラフにおける右上のSafety Zoneを出来る限り広く取ることが出来るよう求められる。

Fig. 14 Allowable GM curve in the optimum design

4. 結 言

本研究では、船舶の初期計画時における設計者の負担軽減および最適設計を目的として、損傷時復原性規則に基づいた区画配置の最適化を行う手法を提案した。最適化は、損傷時復原性規則で規定される到達区画指数と貨物の積載能力の二つの目的関数の最大化問題として捉えることとし、大域的最適解に到達する可能性の高い遺伝的アルゴリズムを最適化手法として採用した。

本稿では、新規規則適用により大きく安全レベルが低下すると予想されるRo-Ro貨物船へ本手法を適用し、トレード・オフの関係にある安全レベルと車両スペースのバランスのとれた区画配置を示し、本手法の有効性を示すことが出来た。

また、得られた区画配置における船長方向の到達区画指数の獲得分布を示すことで、確率論によって生じうる問題点も指摘した。

参 考 文 献

- 1) 池田良穂, 瀬崎良明, 高橋俊次朗: 損傷時復原性規則とその理論的背景, 試験水槽委員会シンポジウム—操縦性および復原性基準に関する研究の動向—, 2000.
- 2) Vassalos et al. Design Implications of the New Harmonised Probabilistic Damage Stability Regulations, STAB2006.
- 3) 梅田直哉: H13 年度第2回基準研究成果報告会講演要旨 報告VI 損傷時復原性要件の調和作業, 日本造船研究協会 2001.
- 4) 石田良平, 小山修平, 村瀬治比古: 遺伝的アルゴリズムの基礎と応用, 森北出版, 1997.
- 5) Carlos M. Fonseca and Peter J. Fleming.: Genetic Algorithms for Multi-objective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization, Proceedings of the 5th International Conference on Genetic Algorithms, 1993.