総合的なライフサイクルリスク評価に基づいた構造最適化

—ダブルハルタンカーの中央断面構造への適用—

正会員 川 村 恭 己*
楓 侑 馬**

大 場 義 弘**

Structural Optimization of Mid-ship Section of Double Hull Tanker Considering Lifecycle Holistic Risk

by Yasumi Kawamura, *Member* Yoshihiro Ohba
Yuma Kaede

Summary

Recently, structural design of a ship considering various risks in the lifecycle of the ship has become more and more important. In the committee IV.1 (Design Principle and Criteria) of the International Ship and Offshore Structural Congress (ISSC), it is discussed that sustainability of ships and marine structures should be evaluated when the structure is constructed based on assessment of “holistic risk” which includes assessment of safety, environment, social responsibility and etc. Based on the concept of holistic risk evaluation, we carried out lifecycle structural optimization of mid-ship section of a double hull tanker in this study. For the evaluation of environmental risk, the method of life cycle assessment (LCA) is introduced to evaluate the CO₂ emission. Also, evaluation of environmental pollution is carried out by using oil outflow calculation shown in the MARPOL. For the evaluation of the risk of failure, we carried out structural reliability analysis of longitudinal strength of the ship. Then, we carried out the following five optimization problems, (1) Minimization of construction cost, (2) Maximization of life cycle benefit (LCB) considering the risk of oil outflow, (3) Maximization of LCB considering the risk of CO₂ emission, (4) Maximization of LCB considering the risk of failure, and (5) Maximization of LCB considering the holistic risk. Finally, the optimum solutions of these five problems are compared to discuss about the advantage of the design of ship structures based on the holistic risk evaluation.

1. 結 言

1989年のエクソン・バルデス号の事故や2002年のプレス・テージ号の事故のように、船舶の事故は人命損失や大きな環境破壊等を伴う。そのため、現在までに、構造健全性の維持を目的とした様々な構造強度評価手法等の研究が行われてきた。特に最近では、IMOにおけるFSA手法¹⁾の導入や、GBS(Goal-Based Standards)の導入に伴い安全レベルアプローチ(SLA=Safety Level Approach)手法が議論されるなど、従来の決定論的な構造健全性評価手法ではなく、確率論的なリスク評価手法の導入が進められている^{2,3)}。

一方、船舶設計の分野においては、ヨーロッパを中心にリスクベース設計の概念が提唱されてきた^{4,5)}。特にSAFEDOORプロジェクトにおいては、リスクベース設計(Risk-based Design)の基本的考え方を示すとともに、リスクベースの規則制定方法や、各種リスク評価手法(衝突、衝突後の復原性、火災リスクの評価等)に関する研究成果を示している^{5,6)}。これらの研究では、リスク評価に基づいて安全性を合理的に評価することで、従来のルールベースの設計よりも、より柔軟な設計が可能であるとしている。例えば、Papanikolaouらは、タンカーの新しい設計を見出す手法として、従来の重量(建造コスト)を最小にするような設計では

なく、油の流出による環境破壊のリスクを最小にするような設計を考えるなど多目的な評価基準を設定し、新しい設計を見出す枠組みを提示している⁷⁾。また、近年、日本国内においても、このようなリスクベース設計の重要性が認識され、海上技術安全研究所の研究プロジェクトにおいて、幅広い研究がなされている⁸⁾。

Table 1 Various risks to be considered in design

影響要因	Systemic (必ず起こる事象Pf=1)	Random (確率的な事象Pf<1)
Economic 経済的影響	建造コスト 運航コスト等	船舶の破壊 事故
Society 社会的影響	生活の質の向上 社会的責任	人命損失
Environmetal 環境影響	環境インパクト (CO ₂ , NO _x , Sox排出)	油の流出による 環境汚染等

ところで、最近、造船の分野においても、環境問題の重要性が認識されてきた。特に、海運における船舶からのCO₂排出量が、全世界のCO₂排出量の約3%に相当することから、IMO(国際海事機関)等においてもCO₂削減に関する国際的規制について議論されている⁹⁾。このような状況の中、ISSC(国際船舶海洋構造物会議)の第IV.1委員会では、これからの時代の設計・建造・運用においては、事故(安全性)に関するリスクだけではなく、経済的影響や環境影響、そして社会的影響を考慮した設計の必要性が議論されている(Table 1)^{2,3)}。ここでTable 1においては、運航コストや環境インパクト(CO₂排出等)等をSystemicな事象(必ず起こ

* 横浜国立大学大学院工学研究院

** 研究当時横浜国立大学工学部

る事象, すなわち確率($Pf=1$)として分類するとともに, 事故リスク等の確率的な事象($Pf<1$)だけではなく, Systemic な事象についても(広義の)リスクとして定義している. そして, これらの多くのリスク(総合的リスク)が受容されることを持続可能(Sustainable)な設計であると定義し, サステナビリティを考慮した船舶の設計・製造・保全が今後の重要課題であると位置付けている.

著者らの過去の研究では, Table 1における経済的影響(建造・運航コスト)や破壊リスク等を考慮した構造評価手法を提案し, それに基づく構造最適化や構造保全計画の立案手法を検討してきた^{10,11)}. 本研究では, これらの考え方を元にして, 環境影響等を含む(広義の)リスクを考慮した, 船舶の構造最適化手法の提案を行う. 具体的には, 船舶のライフサイクルにおける便益(LCB=Life Cycle Benefit)を最大化する, 単一目的関数の最適化問題を定式化するとともに, 各種リスクを必要に応じてコストを指標として評価し LCB(目的関数)の中に導入することにより, 「当該リスクに対して効果のある設計解を得る」ことができる最適化のフレームワークを提案する. また, リスクとしては, 船舶の事故リスクに加えて, CO₂ 排出による環境影響の評価や, 衝突等の事故時における油流出による環境汚染の評価を導入し, 経済性・安全性と同時に, それらのリスク考慮した最適化を行う. 最適化の対象としては, タンカーの中央断面構造とし, 各種リスクを考慮した最適解を示すことにより, 提案するコンセプトの有効性を検討する.

Fig. 1 Risk-based Optimization Framework.

2. 総合的リスク評価に基づく最適化フレームワーク

Fig.1 に本研究で提案する「総合的リスク評価に基づいた最適化のフレームワーク」を示す. 本フレームワークでは, あらかじめ設計パラメータを用いた各種リスクの評価ツールが準備されているとする. そして, 設計者が設計変数を決定する際には, どのようなリスクを考慮した設計を行うべきかを, 顧客ニーズや開発コンセプトに基づいて判断し, 必要に応じてそれぞれのリスクを選択し, 最適化の際の目的関数

の一部とする(図中の矢印). 考慮するリスクとしては, 様々な破壊モードに関する破壊リスクや, CO₂ 排出や油流出リスク等の環境に関連するリスク, また, 初期建造コストやライフサイクルにおけるコストや収入等の経済的リスク等が考えられる. これらのリスクを, 3章で示すライフサイクル便益(LCB)を用いて評価する. このようなフレームワークを利用することにより, 例えば, 環境に優しい船, 経済性に優れた船, 事故に強い船等の各種コンセプトに応じた設計の支援が可能になると考えられる.

なお, 本研究で提案するコンセプトは, 従来の多目的な最適化を前提としたリスクベース設計のアプローチとは異なり, 単一目的関数の最適化とすることにより, 設計者の意図を考慮した最適化フレームワークを提案するところに特徴がある. また, 環境影響として, 従来のリスクベース設計では考慮されていなかった, CO₂ 排出に関しての評価をコストに換算して評価し, 構造最適化と結び付けている. 次節以降に, これらの最適化の定式化, 及び各種リスクの評価方法について説明する.

3. VLCC 中央断面構造の最適化

3.1 対象構造と設計変数

本研究では最適化の対象とするモデル船として, Fig.2 のような VLCC(Very Large Crude Oil Carrier)を設定した. また今回は簡単のため, VLCC の中央断面における構造部材の寸法について最適化を行うこととする(Fig.2(b), Table 2).

主要諸元		
垂線間長	L	324.00[m]
船幅	B	60.00[m]
型深さ	D	29.00[m]
喫水	d	21.15[m]

(a) Specifications of VLCC

(b) Design Variables (Mid-ship Section of VLCC)
Fig.2 Target Structure

後述するように本研究では, 最適化アルゴリズムとして遺伝的アルゴリズム(GA)¹²⁾を用いている. そのため, 計算コストの観点から今回の最適化における設計変数の数を 10 程度に制限することにした. 具体的には, 中央断面における寸法 (Z, Y, t) とロンジ部材の数 (N_b, N_s), ロンジの寸法 (t_w, h_w, t_f, b_f), 及び, メンテナンス間隔 M とした. すなわち, ロ

ンジ寸法はすべてのロンジ部材で同じであると仮定するとともに、これらの設計変数の値を決定することにより、中央断面の部材寸法がすべてパラメトリックに定まると仮定した。この仮定は、現実の設計と比較して粗すぎる仮定ではあるが、今回は設計変数の数を減らすことにより、遺伝的アルゴリズムの現実的な適用を可能とした。また、このように問題を単純化することにより、最適化における目的関数の違いが、最適構造にどのような影響を与えるかを主に検討した。

Table 2 Design Variables and Setup of GA

設計変数		記号 (単位)	設計変数の範囲	間隔	遺伝子 長
二重底高さ		Z (mm)	1600~4700	100	5
二重船側幅		Y (mm)	1600~4700	100	5
外板板厚		t (mm)	10~41	1	5
船底ロンジの数		N _b	12~43	1	5
サイドロンジの数		N _s	12~43	1	5
ロンジ 寸法	ウェブ板厚	t _w (mm)	5~36	1	5
	フランジ板厚	t _f (mm)	8~39	1	5
	ウェブ高さ	h _w (mm)	200~820	20	5
	フランジ幅	b _f (mm)	50~360	10	5
メンテナンス間隔		M (年)	0, 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28	／	3

3.2 最適化戦略

Fig.3 に船舶等の構造物におけるライフサイクルコスト (LCC) の考え方を示す。一般に構造物の LCC は、建造コスト (C_I)、保守管理コスト (C_M)、保険料 (C_{INS}) 及び、事故を起こした場合の事故リスク (期待される損失) (C_{RISK}) 等から成ると考えられる。これらのコストは構造物の初期設計によって変化する。すなわち、より事故の起こる確率 (p_f) の低い (強度の高い) 設計をすれば事故リスク (C_{RISK}) やメンテナンスコスト (C_M) 等は下がるが、鋼材費などにより建造コスト (C_I) は上昇することになる。よって、トータルな LCC を考えると、LCC が最小になる最適な設計が存在すると考えられる。

Fig. 3 Optimum design by minimizing LCC.

著者らは、上記の LCC 設計の考え方に基づいて、構造強度に関する破壊リスクと、ライフサイクルにおける利益やコストを考慮したバルクキャリアのホールドフレーム構造の最適化の検討を行った¹¹⁾。これらの研究においては、ライフサイクルにおける運航収入とコストの差を表すライフサイクル便益 (LCB) を目的関数として構造最適化を行うとともに、ライフサイクルコストの一部として船舶の事故リスク (破壊リスク) を考慮した。

本研究においてもこの考え方をを用いるとともに、事故 (破

壊) リスクだけでなく、環境リスクを含めた総合的リスクを考慮した構造最適化を行った。すなわち、ライフサイクル便益 (Life Cycle Benefit = LCB) を目的関数とする単一目的関数の最適化問題を設定するとともに、最適化戦略に応じて目的関数の中に各種リスクを考慮した。具体的には、Table 3 に示すように、(1) 油流出リスクを考慮した LCB 最大化 (Max. LCB (C_{Roil}))、(2) CO₂ 排出リスクを考慮した LCB 最大化 (Max. LCB (C_{RCO2}))、(3) 事故 (破壊) リスク (Max. LCB (C_{Rfailure})) を考慮した LCB 最大化、(4) 総合的リスク (すべてのリスク (C_{Roil}, C_{RCO2}, C_{Rfailure})) を考慮した LCB 最大化 (Max. LCB (Holistic Risk))、を行った。そして、本研究では、これらの問題の最適解の違いを検討するとともに、古典的な建造費最小化 (Min. C_I) 問題と比較することにより、提案するコンセプトの有効性を検討する。

Table 3 Objective function for each optimization strategy

最適化問題	目的関数
建造費最小化 (比較のため実施) Min. C _I	C _I
各種リスクを考慮した ライフサイクル便益 (LCB) 最大化問題 (1)~(4))	$LCB = R_{OPE} - \left\{ \sum_{i=1}^{t_{life}} (C_{OPEi} + C_{INSi}) + C_I + C_M + C_{RISK} \right\}$
	(1) 油流出リスクを 考慮した LCB 最大化 Max. LCB (C _{Roil})
	(2) CO ₂ 排出リスクを 考慮した LCB 最大化 Max. LCB (C _{RCO2})
	(3) 破壊リスクを 考慮した LCB 最大化 Max. LCB (C _{Rfailure})
	(4) 総合的リスクを 考慮した LCB 最大化 Max. LCB (Holistic Risk)

3.3 目的関数 (LCB 最大化問題)

本研究では、リスクを考慮する方法として、次式で表わされるライフサイクル便益 (LCB) を目的関数として設定する。

$$LCB = R_{OPE} - LCC \quad (1)$$

ここで、R_{OPE} はライフサイクルにおける運航収入を、また LCC はライフサイクルにおけるコストを表す。

(i) 運航収入 (R_{OPE}) の評価

運航収入は、年間あたりの収入に、船舶の使用期間 (t_{life}=30 年) を乗じた次式で算定した。

$$R_{OPE} = t_{life} \times R_C \times N_R \quad (2)$$

ここで、N_R は年間航海数、R_C はタンカー運賃である。タンカー運賃については、当該航路の基準運賃 (Flat Rate=19.62 [US\$/ton] と仮定) に、輸送される貨物の重量トンと運賃率 (World Scale) を乗じて算出した。すなわち、輸送可能な貨物の量 (DWT) が大きければ大きいほど、運航収入 (R_{OPE}) が大きくなる定式化となっている。

(ii) ライフサイクルコスト (LCC) の評価

ライフサイクルコストは、次式を用いて計算する。

$$LCC = \sum_{i=1}^{t_{life}} (C_{OPEi} + C_{INSi}) + C_I + C_M + C_{RISK} \quad (3)$$

ここで、 C_{OPEi} は船齢 i における年間運航コスト、 C_{INSi} は年間保険料を、 C_M は保守管理コストを、 C_{RISK} はリスク（コストに換算したリスク）を、また C_I は建造費を示す。

(3)式中の運航コスト(C_{OPEi})と保険料(C_{INSi})は、統計データや調査等に基づいて定められた推定式を用いて計算した¹⁰⁾。

また、建造費(C_I)の算定であるが、次式のように、鋼材費(C_{steel})、溶接費(C_{weld})、その他の費用(C_{iother})を考慮した。

$$C_I = C_{steel} + C_{weld} + C_{iother} \quad (4)$$

ここで、鋼材費計算に必要な鋼材体積は、最適化のプロセスで得られた中央断面の寸法から、プレート・ロンジ・ガーダー量を計算するとともに、その他の部分に使用している鋼材相当の体積を加算して推定した¹⁰⁾。また、推定の際の鋼材費については 10,000[yen/ton]と仮定した。溶接長さについても、ロンジ長さにロンジ以外の部分の溶接長(一般的な VLCC の溶接長のデータを参考にして仮定)を加算して溶接長を求め、溶接長さあたりの費用 (3,000[yen/m]と仮定)を乗じて推定した。その他の費用としては 40 億円を仮定した。

また、保守管理コスト (C_M) は、次式で評価した。

$$C_M = C_{M0} + X \times C_{rec} \quad (5)$$

本研究では、後述するように腐食による構造劣化を考慮したので、修理コストとしては防食再塗装の費用(C_{rec})のみを考えた。また、 X はライフサイクルにおけるメンテナンス回数であり設計変数 M (何年毎に再塗装を行うか) により決められる。それ以外の費用 (検査コストや他の修理コスト) は C_{M0} に含まれるとした。なお、文献 10) では国内での修理を想定していたが、本研究では塗装費の安価な海外での防食再塗装を想定し単位面積あたり塗装コストを 3,750 [yen/m²] として C_{rec} を計算した。

次に、(3)式中の C_{RISK} (コストの単位に換算したリスク) であるが、本研究では油流出によるリスク C_{Roil} 、CO₂ 排出によるリスク C_{RCO2} 、船体の破壊 (事故) リスク $C_{Rfailure}$ の 3 つを考慮している。よって各最適化戦略 (3.2 節(1)~(4)及び Table 3) に応じて、 C_{RISK} はこれらのリスクを加算したものとする。

$$C_{RISK} = w_{Roil} C_{Roil} + w_{RCO2} C_{RCO2} + w_{Rfailure} C_{Rfailure} \quad (6)$$

ここで、 w_{Roil} 等は、各リスクに対する重みを表し、最適化戦略に応じて設定する。本論文では、3.2 節の最適化戦略に応じて 1.0 または 0.0 とした (Table 3)。なお、これらのリスクの評価法については 4 章に示す。

3.4 制約条件

リスクベース設計では、リスク評価に基づいて安全性を合理的に評価することで、従来のルールベースの設計よりも、より設計空間の広い柔軟な設計が可能であるとされている⁴⁾。よってリスクベース設計においては、設計変数と様々な

リスク (安全性) や性能との関係を適切にモデル化する必要がある。そして船舶の設計とは、そのようなモデル化を行った上で、それらのリスクや性能を目的関数とした多目的最適化問題であると考えられる⁴⁾。しかしながら、現実の設計問題においては、適切なモデル化が困難であるとともに、多目的最適化を行った場合には、多くのパレート解が存在し、一義的に最適解を決めることが難しいという問題がある。

そこで、本研究では、設計者がその設計思想に基づいて重視するリスクに重み付けを行った単一の目的関数 (式 (3)(6)) による最適化による設計支援を提案する。そして、その際、安全性に関するリスク基準は、制約条件により十分満たされるとして、その制約条件により制限された設計空間内での最適化を行うものとする。

具体的には、鋼船規則 C 編にある構造設計に関する規則 (各種板厚、ロンジの断面係数に関する規則) と、海洋汚染防止条約における外殻と内殻の間隔に関する規則 (設計変数 Y, Z が 2m より大きい) を制約条件として設定した^{13,14)}。ただし、鋼船規則には掲載されていないが、ロンジのウェブとフランジの板厚に関する条件 ($t_w, t_f \geq 10$ [mm]) を、実際の設計においてしばしば考慮される経験的条件として導入した。

3.5 最適化手法

本研究では、最適化アルゴリズムとして遺伝的アルゴリズム (GA)¹²⁾ を用いた。遺伝的アルゴリズムにおける各設計変数の設定を Table 1 に示す。これら設計変数のうち、ロンジの本数 (N_b, N_s) や、メンテナンス間隔 M は離散的な設計変数で、それぞれの遺伝子長は 5 及び 3 であり、16 通りの値または 8 通りの値を取ることになる。(ただし、破壊リスクを考慮していない最適化問題においては、メンテナンス間隔 M は設計変数として考慮していない。) また、他の設計変数は基本的には連続変数であるが、遺伝的アルゴリズムにより最適化するため、適切な Interval を有する遺伝子長 5 の変数と定義した。また、遺伝的アルゴリズムの設定としては、遺伝子長が 48、1 世代の個体 (遺伝子) 総数を 40、突然変異率を 0.05、交叉アルゴリズムとしては 2 点交叉を用いた。

4. 総合的リスクの評価方法

本研究では、リスク (C_{RISK}) として油流出リスク、CO₂ 排出によるリスク、及び、破壊リスクを考慮した。ここでは、それらのリスクの評価方法の概要を述べる。

4.1 油流出によるリスク(C_{Roil})の評価

本研究における油流出リスクの推定においては、海洋汚染防止条約の手法¹⁴⁾により計算されるタンカーの仮想油流出量を基に評価した。これは、タンカーの衝突・座礁時のリスクのうち (人命損失等の評価は行わずに) 油流出による環境影響のみを評価していることに相当する。この計算では、まずタンクの体積を計算し、統計データより定められた各タンクの損傷確率を用いて側面と底面のそれぞれの損傷におけ

る平均油流出量を求める。本研究では、中央断面のみ構造寸法の最適化を行っているため、中央断面に位置するタンクの平均流出量のみをこの計算法により求めた。そして、それを定数倍($\times 6.0$)することにより、船舶全体での流出量が得られると仮定した(Fig.4)。次に得られた油流出量(W)をコストに換算した。油流出量とコストの関係式としてはIMOによるもの¹⁵⁾があるが、本研究ではYamadaらが提案した換算式¹⁶⁾を用いた。これは、油流出重量から油流出に伴って必要となるコスト(油回収コストや補償等を含む)を推定する関係式を、IOPCF レポートの油流出事故の統計データを用いた回帰分析により導いたものである。これを用いて、油流出コスト(C_{Foil})を次式で推定した。

$$C_{Foil} = 38735 \times W^{0.66} \times C_{rate} \quad (7)$$

ここで、 C_{rate} は米ドルと日本円の換算レートであり、1ドル85円($C_{rate}=85$)とした。

最終的に、年間の油流出によるリスク(C_{Roil})は、年間の事故確率(p_o)と事故時の損害額(=油流出コスト C_{Foil})、及び運用年数(t_{life})の積として、下記のように表すことができる。年間の事故確率(p_o)については、2004年の世界におけるタンカー一航路数と油流出事故数のデータを考慮して0.0092とした^{17,18)}。

$$C_{Roil} = t_{life} \times (p_o \times C_{Foil}) \quad (8)$$

Fig.4 Flowchart of computation of hypothetical oil spill volume.

なお、上記(7)式中の W のべき乗が0.66となっていることから、油流出量の統計データの実際の分布が対数正規分布である¹⁶⁾ことから、上記の評価は正確には平均油流出コストとなっていないことに注意する必要がある。本研究では、簡単のため上記のような評価を用いたが、正確な評価のためにはそれらを検討する必要があると考えられる。

4.2 CO₂ 排出リスク(C_{RCO2})の評価

本研究では、船舶建造時と運航時におけるCO₂排出量を算定し、それぞれのCO₂排出リスクを求め、その和をCO₂排出リスクとした。

$$C_{RCO2} = CO2_{const} + CO2_{ope} \quad (9)$$

(1) 船舶建造におけるCO₂排出リスク

建造時におけるCO₂排出量の算定には、LCA手法の一つであるライフサイクルインベントリ(LCI)分析を適用した。

LCI分析とは、製品の製造・運用・廃棄における様々なプロセスごとに投入(インプット)される資源や排出(アウトプット)される廃棄物を明確にし、これにより各プロセス毎の環境汚染物質排出量を算定する方法である。具体的には文献19)の手順でCO₂排出量 TC_{CO2} を求め、建造時におけるCO₂排出リスクを次式で求めた。

$$CO2_{const} = TC_{CO2} \times R_{CO2Em} \quad (10)$$

ここで、 R_{CO2Em} はCO₂排出権国際取引価格として2,654 [yen/ton]を用いた。

(2) 船舶運航におけるCO₂排出リスク

運航時のCO₂排出量算出の際は、まず評価対象船の載貨重量(DWT)を用いて機関出力や航海速度を推定する²⁰⁾とともに、千葉～中東間の航路を想定して1航海あたりの燃料消費量を計算した。これに、CO₂換算係数²¹⁾を乗じることによりCO₂排出量を推定した。ただし、上記の機関出力等の推定においては、設計の違いによる鋼材重量の変化も影響要因であると考え、「(最適化中に生成される)設計から算出される鋼材重量」と「基準となるモデル船の鋼材重量」との差をDWTに加算した上で機関出力等を推定した。

ところで、近年、IMOにおいて、船舶からのCO₂排出量削減に関して、EEDIを用いた国際的規制について議論されている。本研究では、算出した対象船のCO₂排出量からEEDI値を簡易的に求め、その値が要求値を上回った場合には、リスクとしてライフサイクルコスト(LCC)に加算するとともに、EEDIが要求値より下回った場合は、その値に応じた還付金を与え、LCCから減じることを考えた。対象船のEEDI値は、上記の手順で求めた1航海あたりのCO₂排出量(T_{voyage})と、対象船の貨物量(DWT)、往復の輸送距離(drp)を用いて算定した。

$$EEDI = \frac{T_{voyage} \times 10^6}{DWT \times drp} \quad [\text{g/ton-mile}] \quad (11)$$

次に、EEDIの要求値を定めるために、文献22)を参考にタンカーにおけるベースラインを定めた(Fig.5 $EEDI_{BASE}$)。そして要求値については、ベースラインからの10%削減ライン(Fig.5 $EEDI_{REQ10\%}$)を用いた。最終的には(11)式で計算されたEEDI値とこの要求値を比較して、以下のように1航海あたりのCO₂排出リスク($CO2_{navi}$)を決定した。

Fig.5 EEDI (Baseline and Required (10 % Reduction))

(a) $EEDI < EEDI_{REQ10\%}$ の場合

$EEDI$ が要求値を下回った場合は, CO_2 排出権国際取引価格を用いて, 下回った分の排出権を売却できると仮定した.

$$CO_{2navi} = R_{CO2Em} \times (EEDI - EEDI_{REQ10\%}) \times drp \times DWT \times 10^{-6} \quad (12)$$

このとき, CO_2 排出リスクは負の値をとるため, LCC に加算するとコストの削減に寄与することになる.

(b) $EEDI > EEDI_{REQ10\%}$ の場合

ここでは, 規制を上回った CO_2 排出量分だけのペナルティが課せられると仮定した. ペナルティとしては, CO_2 排出取引価格の 100 倍(R_{Penal})を仮定した. よって, 1 航海における CO_2 排出リスクは次式で計算する.

$$CO_{2navi} = R_{Penal} \times (EEDI - EEDI_{REQ10\%}) \times drp \times DWT \times 10^{-6} \quad (13)$$

なお, 船舶のライフサイクルにおける運航による CO_2 排出リスクは, 船舶の使用年数 (t_{life}) と年間航海数 (N_R)を用いて, 以下ようになる.

$$CO_{2ope} = t_{life} \times N_R \times CO_{2navi} \quad (14)$$

4.3 破壊リスク($C_{Rfailure}$)の評価

(1) 構造信頼性解析を用いた破壊リスクの評価

船舶の事故リスクには様々な原因がある. 構造強度の不足から生じる事故によるリスクだけでなく, 様々な人的要因 (ヒューマンエラー) によるもの等があり, 一般にそれらすべての原因を合理的に評価するのは大変困難である. このような背景から, 本研究では船舶の事故リスク (破壊リスク) を評価する際には, 比較的定式化が容易な船体縦曲げ崩壊における破壊リスクのみを考慮した. 船舶の縦強度に関する構造信頼性解析は, 近年数多く研究されてきた²³⁻²⁶⁾. 著者らも, 余寿命便益を用いた船体構造の保守管理計画の立案手法を検討する際に, 簡易的に縦強度に関する構造信頼性解析を行った¹⁰⁾. 本研究では, 著者らの手法と同様な方法で, まず対象船舶の縦曲げ強度に関する一航海あたりの破壊確率 $p_{fvoyage(i)}$ を, 次式の限界状態関数を用いて計算した.

$$g(t) = x_u M_u - (x_{SW} M_{SW} + x_W M_W) \quad (15)$$

ここで, M_u は縦曲げ最終強度, M_{SW} , M_W はそれぞれ静水曲げモーメントと波浪曲げモーメントを表す確率変数である. また, x_u , x_{SW} , x_W はモデル化に関する不確定性を表している. Table 4 にこれらの確率変数の定義を示す. これらの算定の考え方については, 既報¹⁰⁾を参照されたい.

本研究では, 汎用の信頼性解析コード NESSUS のライブラリ (NESSUS_PA^{27,28)})を用いて, 式(15)の限界状態関数に関する破壊確率($p_{fvoyage(i)}$)を求め, 年間航海数 N_R を考慮することにより船齢 i における年間破壊確率($p_{fyear(i)}$)を算定した. そして, 最終的に, 事故時の損害額 C_{Ffail} (建造費, 乗組員・

全損時の油流出による汚染の補償費用((7)式より算出)を考慮)を乗じた次式を用いてライフサイクルにおける破壊リスク ($C_{Rfailure}$)を算定した.

$$C_{Rfailure} = \sum_{i=1}^{t_{life}} (K \times p_{fyear(i)} \times C_{Ffail}) \quad (16)$$

すなわち, ライフサイクルのリスクを, $i=1$ から t_{life} までの各船齢における年間破壊リスクの和として計算した. また, 式中の K は縦曲げ破壊以外の事故形態を考慮に入れるために導入された係数¹⁰⁾であり, 本稿では $K=50.0$ を用いた.

Table 4 Definition of probability variables

確率変数	平均	標準偏差	分布関数
E [GPa]	205.8	15.435	Normal
σ_Y [MPa]	411.8	20.59	Lognormal
$r(t)$ [mm]	船齢毎に変化(4.3(2)参照)		Weibull
$M_{SW}(\text{sagging})$ [GNm]	4.065	0.678	Normal
$M_W(\text{sagging})$ [GNm]	9.985	0.808	Frechet
x_u	1.0	0.15	Normal
x_{SW}	1.0	0.05	Normal
x_W	1.0	0.15	Normal

(2) 腐食衰耗の影響の考慮

一般の船舶においては, 船齢とともに腐食・疲労等の構造劣化が進行するために強度が低下する. よって, ライフサイクルにおける破壊リスクを評価するためには, 船齢に伴う構造強度の低下を考慮する必要がある. 本研究では, 上記構造信頼性解析の際に, 経年腐食による部材板厚の減少を考慮した. 具体的には, 評価対象の中央断面における各部材において, 船齢 t における腐食衰耗量($r(t)$)を, 次式の腐食衰耗モデルを用いて予測した.

$$r(t) = \begin{cases} 0 & (t \leq t_0) \\ \alpha(t - t_0)^\beta & (t > t_0) \end{cases} \quad (17)$$

ここで t_0 は塗装被膜の寿命を表すパラメータであり, α と β は腐食の進行速度に関わるパラメータである. この式は船齢が塗装被膜の寿命 t_0 年を超えない場合には腐食は進行しないものとしている. 上式に基づく腐食進行モデルは多くの研究者により提案されているが²⁹⁻³²⁾, ここでは Guo らの研究³²⁾を参考に, $\beta < 1$ とした非線形モデルを用いた. Guo らは, タンカーのデッキプレートの腐食深さの統計データを調査し, 腐食量の「平均(μ)」と「平均+標準偏差($\mu+\sigma$)」の経年変化について, それぞれ上記のパラメータを定数として定めている. 本研究では, Guo らの方法を参考に, Paik らの腐食衰耗モデルのデータ³³⁾を用いて, 中央断面の各部所 (Fig.6(a)) における腐食衰耗モデル (パラメータ α , β , t_0) を定めた (Fig.6(b)). これらを用いて船齢 t における, 平均衰耗量(μ)と標準偏差(σ)を求めることができ, 腐食衰耗量 $r(t)$ をそれら (μ , σ) に従う Weibull 分布として仮定できる²⁵⁾.

Fig.6 Corrosion wastage model for each location

実際に、構造信頼性解析を行う際には、Table 1 で示した設計変数のうち、外板の板厚(t)、ウェブの板厚(t_w)、フランジの板厚(t_f)を、推定された腐食衰耗量だけ減じて縦曲げ最終強度(M_u)を計算することにより、経年劣化による強度劣化を考慮できる。また、設計変数 M (メンテナンス間隔) を考慮する場合は、 M 年毎に防食再塗装が行われるとするとともに、再塗装後においては t_0 年 (塗装被膜の寿命) 以内は腐食衰耗が進行しないものとした。なお、縦曲げ最終強度(M_u) の推定は修正 Caldwell の式²⁶⁾を用いた。

5. 最適解の比較

前節までに定式化した最適化問題を遺伝的アルゴリズムを用いて解いた結果 (最適解) を Table 5 に、また、最適解の時の目的関数等の値を Table 6 に示す。

Table 5 Optimum solution for each optimization strategy

最適化戦略	設計変数	Z [mm]	Y [mm]	t [mm]	N _b	N _s	t _w [mm]	t _f [mm]	t _w [mm]	b _f [mm]	M [year]
Min. C _I		3000	2400	19	22	21	10	13	820	90	—
(1)Max. LCB (C _{Roil})		2000	2000	19	28	22	10	14	760	50	—
(2)Max. LCB (C _{RCO2})		2000	2000	20	29	20	10	11	760	50	—
(3)Max. LCB (C _{Rfailure})		2000	2000	27	34	20	11	32	480	120	16
(4)Max. LCB (Holistic Risk)		2000	2000	25	37	21	14	21	520	80	8

Table 6 Comparison of LCB, R_{OPe}, LCC, C_I and C_{RISK} for each optimum solution (×10⁶ yen)

	Min C _I	(1)Max LCB (C _{Roil})	(2)Max LCB (C _{RCO2})	(3)Max LCB (C _{Rfailure})	(4)Max LCB (Holistic)
LCB	—	26,703	26,597	24,238	23,815
R _{OPe}	—	87,844	87,781	86,984	87,122
LCC	—	61,141	61,184	62,746	63,307
C _I	10,476	10,538	10,581	11,304	11,231
C _{RISK}	—	159	137	612	1,096

5.1 建造費最小化問題 (Min. C_I)

本論文で提案するライフサイクル便益(LCB)を用いた最適化を行う前に、まず、本研究で用いた遺伝的アルゴリズム (GA) の妥当性を検証するために、建造費最小化問題 (Min. C_I) を解いて GA の収束状況の確認を行った。Fig.7 に示すように、約 200 世代の計算でほぼ収束している。この問題では、500 世代の GA の計算を行い最適解であるとした。また、以降の LCB 最大化問題では同様に収束状況を確認したうえで 1000 世代目の解を最適解とした。

Fig.7 Convergence of GA (Min. C_I)

建造費最小化の最適解 (Table 5 (Min. C_I)) においては、板厚は、比較的小さい値 ($t=19$, $t_w=10$, $t_f=13$) を取った。これにより、建造費を小さくしていると考えられる。ただし、ウェブ高さ(h_w)については、強度に関する制約条件を満たすようにある程度大きい値 ($h_w=820$) となった。

次に、二重船殻の幅 (Y, Z) であるが、MARPOL 条約に基づく下限の制約条件 (2000mm) と比較して大きい値となった。この結果は後述する LCB 最大化の解とは異なっている。これは、建造費最小化が貨物倉の大きさを影響しない (運航収入を考慮していない) 定式化であるためと考えられる。また、Table 6 に示すように、本最適解における建造コスト (C_I) は、後述する他の最適解より低い値となっている。

5.2 ライフサイクル便益 (LCB) 最大化問題 (1) —油流出リスクを考慮 (1) Max. LCB (C_{Roil})—

Table 5(1)に、油流出リスクを考慮した LCB 最大化の最適化問題の解を示す。この解は、板厚は比較的小さい値となり ($t=19$, $t_w=10$, $t_f=14$)、またウェブ高さは比較的大きい値となった ($h_w=760$)。これは建造費最小化の最適解と同様に、ロンジ材の強度の制約を満たしつつ建造費を減らす解となっていると思われる。また、LCB 最大化においては、それに加えて鋼材重量を軽くすることで運航コスト (燃料コスト) を減らす効果があると考えられる。

次に、二重船殻幅であるが、 Y も Z も MARPOL の制約条件を満たす最小の値である 2000mm となっている。一般に、二重船殻幅を減じると、油流出リスク (C_{Roil}) は増大してしまうと考えられる。Fig.8 に GA による最適化のプロセスで発生された各設計点における、油流出量と LCB との関係を示す。図のように最適解においては、LCB だけでなく油流出

量が MARPOL の二重船殻幅に関する規則を満たす範囲内で最大となっている。また、Table 6 に示すように、本最適解では、目的関数(LCB)の大きさに比較して、リスク(C_{RISK})の値が低くなっている。すなわち、本定式化においては、「二重船殻幅減による油流出リスクの増加」よりも、貨物倉の増加すなわち「DWT の増加による運航収入の増加」を重視した戦略の最適化を行っていることになる。

Fig.8 LCB vs Oil-Outflow for each generated sample design in GA

5.3 ライフサイクル便益(LCB)最大化問題 (2)

- CO₂ 排出リスクを考慮 ((2) Max. $LCB(C_{RCO_2})$) -

Table 5(2)に、CO₂ 排出リスクを考慮した LCB 最大化における最適解を示す。本最適解は、油流出リスクのみを考慮した場合の最適解と傾向が似ている解となった。Fig.9 に、DWT の変化に伴う $EEDI$ の変化を示す。

Fig.9 Required and computed EEDI for each design sample

図のように全体の傾向としては、DWT が大きいと $EEDI$ が小さくなっていることがわかる。すなわち、DWT の大きな船舶を製造する方が環境に良いといえる。また、右下がりの青いラインは本研究で設定した $EEDI$ の要求値を示しており、GA のプロセスの中で要求値を下回る構造（設計点）が多く出ていることがわかる。これは、 $EEDI$ の計算値が要求値を越えた場合には多額のペナルティを設定したためと思われる。ここで、 $EEDI$ の要求値のラインであるが、本研究での最適化プロセスにおいては、多くの設計点がラインより下側になり、最終的に得られた最適解は、DWT が大きく $EEDI$ が最小である解を得ることができた。しかしながら、この要求値のラインが不適切である場合には(図中の緑の点線のような場合)、DWT を大きくすると要求値を満たせなくなり、結果的に大型で $EEDI$ が少ない効率の良い船舶を設計から排

除してしまう可能性がある。よって、 $EEDI$ の要求値の決め方には注意が必要である。

5.4 ライフサイクル便益(LCB)最大化問題 (3)

- 破壊リスクを考慮 ((3) Max. $LCB(C_{Rfailure})$) -

Table 5(3)に、破壊リスクを考慮した LCB 最大化における最適解を示す。本最適化では、前節までとは異なり破壊リスクを考慮したために、より強度の高い最適解が得られた。特に、プレートの板厚($t=27$)、フランジの板厚や幅($t_f=32, b_f=120$)、ロンジ本数 ($N_b=34$)が大きくなった。次に、二重船殻の幅(Y, Z)に関してであるが、これは上記 5.2, 5.3 の最適化と同様に、幅を小さくすることにより、運航収入が大きくなるような解となった。なお、破壊リスクを考慮した場合は、設計変数 M (何年毎に再塗装を行うか) については、16 年目に再塗装を行うという解が得られた。

Fig.10 に、最適化のプロセスにおいて生成された設計点における初期コスト(Initial Cost)と破壊確率との関係を示す。全体の傾向として、破壊確率が小さいほど、建造費が急激に大きくなっている。本最適化においては、定義した目的関数において、適切な初期コストを有し、適切な破壊確率となるバランスの良い設計点が最適解となったと考えられる。

Fig.10 Initial Cost vs P_f at 30 ship-year

5.5 ライフサイクル便益(LCB)最大化問題 (4)

- 総合的リスクを考慮 ((4) Max. $LCB(Holistic)$) -

Table 5(4)に、すべてのリスク考慮した LCB 最大化における最適解を示す。本最適化も 5.4 節で示した破壊リスクを考慮した LCB 最大化で得られた解と同様に、比較的強度の高い最適解が得られた。ただし、プレート板厚($t=25$)、フランジ板厚($t_f=21$)、フランジ幅($b_f=80$)については、破壊リスクのみを考慮した最適解よりも小さい値となった。本最適解は、5.4 節の最適解と、5.2 節・5.3 節の最適解との中間的な解となったと考えられる。すなわち、ロンジサイズを小さくすることで建造費や CO₂ 排出リスクを低減するが、破壊リスクを抑えるために強度が高い構造になっていると考えられる。また、Table 6 を見ると、本節の最適化におけるリスクの値 (Table 6(4)の C_{RISK})が、5.2 節・5.3 節のリスクの値 (Table 6(1)(2))と比較して大きいことがわかる。すなわち、本定式化では、他のリスクを考慮しながらも、破壊リスクの評価を重視した

戦略で最適化を行っていることがわかる。

一方、二重船殻の幅については他の *LCB* 最適化の解と同様に運航収入が多くなるように、制約条件の範囲の中で最小の値($Y=Z=2000$)となった。なお、本最適解においてメンテナンス回数については、 $M=8$ となっており、建造コスト(強度)を減らして CO_2 排出リスクを減らす代わりに、メンテナンス頻度を多くして破壊確率を減らした解となった。ただし、8年に一度の防食再塗装($M=8$)は現実的ではなく、本コンセプトを用いて実際の解を得るためには、破壊リスク等の算定式に関してキャリブレーションが必要であると思われる。

6. 結言

本研究の結論を以下に述べる。

- (1) 本研究では、総合的なリスク評価に基づく船舶の構造最適化支援のフレームワークを提案した。具体的には、*LCB* (ライフサイクル便益)を単一の目的関数とした最適化問題を定式化するとともに、様々なリスクをライフサイクルコストの一部として評価することにより、最適化戦略に応じた最適解の検討が可能にようにした。
- (2) 提案したコンセプトに基づく最適化の例として、ダブルハルタンカー中央断面の構造最適化を行った。具体的には、ライフサイクル便益(*LCB*)を最大化する最適化を、遺伝的アルゴリズム(GA)を用いて行った。また、リスクとして、(1)油流出リスク、(2) CO_2 排出リスク、(3)破壊リスク、を考慮した場合と、(4)総合的(すべての)リスクを考慮した場合の4種類の最適化を行った。
- (3) 各最適解を比較した結果以下の観察結果が得られた。
 - (a)比較のために行った建造費最小化問題($\text{Min. } C_I$)、および油流出リスクまたは CO_2 排出リスクを考慮した *LCB* 最大化問題((1) $\text{Max. } LCB(C_{Roil})$, (2) $\text{Max. } LCB(C_{RCO2})$)においては、ロンジの寸法や本数が小さい解が得られた。これにより、建造費や運航費が低くなっていると考えられる。
 - (b)*LCB* 最大化問題では、二重船殻幅については制約条件を満たす中で最小となった。これは、二重船殻幅を小さく取ることにより、貨物倉が大きくなり運航収入が多くなるためである。また油流出リスクを考慮した場合は、二重船殻幅の減少により油流出リスクは増加するが、本定式化では、それよりも運航収入の増加の影響が上回る結果となった。
 - (c)破壊リスクを考慮した *LCB* 最大化問題((3) $\text{Max. } LCB(C_{Rfailure})$)においては、ロンジ・プレートの寸法が比較的大きい解が得られた。すなわち、破壊リスクを考慮したために、強度が高くなるように他の最適問題の解と比べて大きな寸法となった。
 - (d)総合的リスクを評価した *LCB* 最大化問題((4) $\text{Max. } LCB(\text{Holistic})$)においては、破壊リスクのみを考慮した場合と、油流出や CO_2 排出リスクを考慮した場合との中間的な構

造になった。

以上のように、本研究で提案した「リスク評価に基づいた最適化のフレームワーク」の考え方により、経済性・安全性だけでなく環境評価等を取り入れた総合的リスク評価に基づくバランスの良い最適化が可能になると考えられる。

今後の研究課題としては下記が考えられる。

- (1) 本研究における最適化では、ロンジ寸法を全ての箇所と同じであると仮定する等多くの単純化を行っている。今後、本コンセプトを実構造へ適用するには、より詳細な定式化の検討が必要であると思われる。
- (2) 今後、より正確な最適化を行うためには、各種リスク評価手法の高度化を検討していく必要があると思われる。特に、本研究で示した油流出リスク評価は、衝突・座礁事故時の油流出による環境影響のみを考慮しただけであり、今後は構造寸法に基づいた構造強度の評価や、人命損失等の考慮が必要であると考えられる。

謝 辞

本研究は科学研究費の基盤研究(B)(課題番号 23360383)の助成を受けたものである。また、川崎重工業(株)より補助を受けました。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) (社)日本造船研究: RR74, Formal Safety Assessment (FSA) of Bulk Carrier Safety, 2002.
- 2) ISSC2009 Committee Report, IV.1 Design Principle and Criteria, Proc. of the 17th International Ship and Offshore Structures Congress (ISSC), pp587-688, 2009.
- 3) ISSC2012 Committee Report, IV.1 Design Principle and Criteria, Proc. of the 18th ISSC, pp.435-506, 2012.
- 4) D. Vassalos, Risk-based design: From philosophy to implementation, Proc. IMDC 2004 (2nd International Maritime Conference on Design for Safety), Sakai, Japan, Oct, 2004, pp.1-10.
- 5) D. Vassalos, Design for safety: Risk-based design life-cycle risk management, Proc. IMDC 2012 (11th International Maritime Conference on Design for Safety), Vol.2, Glasgow, June 2012, pp.83-106.
- 6) A. Papanikolaou(eds), Risk-based ship design -Methods, tools and applications -, Springer, 2009.
- 7) A. Papanikolaou, Multi-objective optimization of oil tanker design, Journal of Marine Science and Technology, Vol.15 pp.359-373, 2010.
- 8) F. Kaneko, et al., Research on advanced risk based design, Proc. IMDC 2012 (11th International Maritime Conference on Design for Safety), Vol.1, Glasgow, June 2012, pp.517-529.
- 9) 国土交通省 海事局安全基準課, 国際海事機関(IMO)第1回船舶のエネルギー効率に関する中間会合(EE-WG1)の開催結果, Press Release, H22/7/25.
- 10) 川村恭己, 西本匡伸, 角洋一, 余寿命便益評価に基づく船体構造の保守管理手法に関する研究, 日本船舶海

- 洋工学会論文集, 第 6 号, pp.361-369, 2007.
- 11) Y. Kawamura, M. Miyazaki, Structural optimization of the hold frame of a bulk carrier considering lifecycle risk, *Advances in Marine Structures* (Guedes Soares & Fricke (eds), 2011 Taylor & Francis Group, London), *Proc. MARSTRUCT 2011*, pp.691-698, 2011.
 - 12) 例えば, 坂和正敏, 田中雅博: 遺伝的アルゴリズム, 朝倉書店, 1995.
 - 13) ClassNK, 鋼船規則 C 編, 2006.
 - 14) 国土交通省総合政策局海洋政策課(監修), 海洋汚染防止条約(2007 改訂版), 海文堂, 2008.
 - 15) IMO MSC91/22/Add.2 Annex34, Revised Guidelines for formal safety assessment (FSA) for use in the IMO rule making process, Dec 2012.
 - 16) Y. Yamada, The Cost of Oil Spills from Tankers in Relation to Weight of Spilled Oil, *Marine Technology*, Volume 46, Number 4, pp. 219-228, 2009.
 - 17) 海洋政策研究財団, 船舶からの温室効果ガス及び大気汚染物質の世界的な排出量算定調査報告書, 海洋政策研究財団, 2010.
 - 18) K. Huijter, Trends in Oil Spills from Tanker Ships 1995-2004, *International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF)*, 2005.
 - 19) 月井晋太, 川村恭己, 船舶海洋構造物の環境負荷量の算定とその評価法について, 第 21 回海洋工学シンポジウム, OES21-116, pp1-6, 2009.
 - 20) 平岡克英, 亀山道弘, LCA 解析のための外航貨物船の運航状況分析と海上輸送の大気環境負荷物質の排出係数, 海上技術安全研究所報告, 第 5 卷 3 号, pp.25-90, 2005.
 - 21) 日本海事協会, 地球温暖化ガス排出削減に対する NK の取組み, 2010ClassNK 秋季技術セミナー, p.215, 2010.
 - 22) 国土交通省 大坪新一郎, 船舶の NOx・Sox 規制と CO2 排出削減に関するセミナー講演資料 後編, 日本船舶技術研究協会, p.31-62, 2009.
 - 23) A.E. Mansour, et al., Assessment of Reliability of Ship Structures, SSC-Report-398, Ship Structure Committee, 1997.
 - 24) C. Guedes Soares, Y. Garbatov, Reliability of maintained ship hull girders subjected to corrosion and fatigue, *Structural Safety*, 20, pp.201-219, 1998.
 - 25) U.O.Akpan, T.S.KoKo, B.Ayuub, Risk assessment of aging ship hull structures in the presence of corrosion and fatigue, *Marine Structures* 10, pp.325-352, 1997.
 - 26) H.H.Sun, Y.Bai, Time-variant reliability assessment of FPSO hull girders, *Marine Structures*, 16, pp.219-253, 2003.
 - 27) B.H.Thacker, D.S. Riha, S.H.K. Fitch, L.J.Huyse, J.B. Fleming, Probabilistic engineering analysis using the NESSUS software, *Structural Safety*, 28, pp.83-107, 2006.
 - 28) NESSUS_PA Users' Manual, Version 0.5, Southwest Research Institute, November 3, 2009.
 - 29) N.Yamamoto, K.Ikegami, A study on the degradation of coating and corrosion of ship's hull based on the probabilistic approach, *J. Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 120(3), pp.121-128, 1998.
 - 30) Paik, J. K., et al. 2003. Time-dependent risk assessment of aging ships accounting for general/pit corrosion, fatigue cracking and local denting damage, *Trans. SNAME*, 111: 159-197.
 - 31) J.K.Paik, A.K.Thayambali, Y.I.Park, J.S.Hwang, A time-dependent corrosion wastage model for seawater ballast tank structures of ships, *Corrosion Science* 46, 2004, pp.471-486.
 - 32) J. Guo, G. Wang, L. Ivanov, A.N.Perakis, Time-varying ultimate strength of aging tanker deck plate considering corrosion effect, *Marine Structures*, 21(4), pp.402-419, 2008.
 - 33) J.K. Paik and A.E. Mansour, A simple formulation for predicting the ultimate strength of ships, *J Mar Sci Technol*, 1, pp.52-62, 1995.
-