船体構造設計のための全船荷重構造解析ならびに強度評価 システム DLSA-Basic の開発

松井 貞興*, 村上 睦尚*, 林原 仁志*, 笛木 隆太郎*

Development of Direct Load and Structure Analysis and Evaluation System on Whole Ship DLSA-Basic for Ship Structural Design

by

Sadaoki MATSUI, Chikahisa MURAKAMI, Hitoshi HAYASHIBARA and Ryutaro FUEKI

Abstract

The authors have developed the direct load and structure analysis and evaluation system on Whole Ship "DLSA-Basic" as a support tool for ship structural design. This article introduces the developed system and its application for structural strength evaluation. The DLSA-Basic system is based on the linear theory consisting of the linear wave load analysis (potential flow), linear structural analysis and linear statistical prediction method. Therefore, the present system might be purely classic from a technical point of view, however, this system enables structural designer to conduct the structural strength evaluation easily by direct load and structure analysis through graphical user interface as well as powerfully visualized post processing functions; for example, the statistical prediction for all structural elements of stress components is carried out and obtained statistic value of elements is displayed on FEM model. As an example of consideration of structural evaluation by using a present system, it is verified whether the conventional Equivalent Design Wave method defined in the rules of classification society can evaluate the structural strength properly. As a result, it was found that the design wave method can accurately evaluate structural response regarding to the present ship, but it was revealed by using present system that there is a possibility that the design wave method leads to an overestimated value because the untargeted load parameters are often remarkable and affect the untargeted structural members in design waves.

^{*} 構造安全評価系

目 次

1. 緒言	3
2. DLSA-Basic システムについて	4
2.1 DLSA-Basic システムの概要	4
2.2 解析手法	5
2.2.1 荷重解析	5
2.2.2 外圧の付与(マッピング)方法	5
2.2.3 内圧の付与方法	6
2.2.4 船殻慣性力の付与方法	6
2.3 静水中および波浪中の釣り合いについて	6
2.3.1 静水中および波浪中の釣り合いの確認方法	6
2.3.2 波浪中構造解析の不平衡力の原因	7
2.4 強度評価機能	
2.5 インターフェース	8
3. DLSA-Basic システムを活用した設計規則波による強度評価の妥当性の検討	9
3.1 対象船舶	9
3.2 荷重解析	10
3.3 DLSA-Basic による応力の長期予測	10
3.4 設計規則波による強度評価	13
3.4.1 設計規則波の定義	13
3.4.2 設計規則波と統計予測による応力の比	13
4. 結言	17
謝 辞	17
参考文献	18
Appendix 設計規則波毎の応力比	19

1. 緒言

船舶の構造設計では通常、船級協会の定める鋼船規則 ¹)に基づいて構造強度評価が行われる。船級規則は、積付条件及び波浪の設定、荷重の推定、構造解析、強度評価の各ステップが簡略化されたもので、構造設計者はこれに規定された一連の手続きに従うことで、各ステップに対する専門的な知識を有さずとも構造強度評価を行えるようになっている。しかしながら、船級規則は一定の範囲の船種やサイズに焦点を当て開発される傾向にあり、就航実績などの経験則に基づく要件が多分に含まれるため、想定されていなかった様式の船舶に対して非合理的な結果を与える可能性を持つ。船舶の大型化や多様化が進む中、より合理的な強度評価を行うには、波浪荷重を解析により直接的に推定し、その荷重を考慮した直接強度計算を行う荷重構造一貫解析(以下一貫解析)の実施が求められる。2018年には日本海事協会から直接荷重解析に基づく強度評価のガイドライン²⁾が発行され、一貫解析による強度評価を行った船舶に対する船級符号が認められた。このような時流において、一貫解析による合理的な構造強度評価の重要性は今後も増すことが予想される。

一貫解析それ自体は新しい技術ではなく、確立された要素技術の組み合わせである^{3,4)}. しかしながら、一貫解析は荷重解析、構造解析、強度評価の各フェーズでそれぞれ異なる専門性が要求されるため、単独の設計者が実施する場合には広範な知識と解析技術が必要とされる. 特に、荷重解析と構造解析の間にある分野の隔たりは大きく、船殻構造設計者にとって荷重解析は敬遠される傾向にある. とはいえ、複数の専門家によって分業的に実施される場合には、情報の伝達に多大な工数を要し、また結果の総合的な判断に困難を伴うことになる. 以上の状況を鑑みると、実設計において一貫解析を実施することのハードルは依然として高いのが現状である.

そこで著者らは、単独の設計者が一貫解析を通しで実施することを念頭に置いた、シームレスかつ信頼性の高い全船荷重構造一貫解析ならびに強度評価システム"DLSA(<u>D</u>irect <u>L</u>oad and <u>S</u>tructure <u>A</u>nalysis)-Basic"を開発した. DLSA システム自体は非線形荷重・非線形構造解析までを含めた包括的なシステムである 5が,DLSA-"Basic"はその中の線形荷重・線形構造解析から成るシステムを指す。DLSA-Basic システムは、荷重解析から強度評価までを同一のプラットフォーム上で行うことができ、各フェーズにおける解析の妥当性のチェックを容易に確認することができるようになっている。加えて強度評価のフェーズにおいては、全船構造要素の応力の統計値及び疲労被害度、さらには支配海象条件が FEM モデル上にコンター表示されるため、本システムを用いれば、波浪中の現象がどのように構造応答に影響しているかを容易に理解することができる。

従来では一貫解析が可能な場合でも実施に数ヶ月程度要していたところを、本システムによりその期間が数日程度に短縮されることで、設計業務における一貫解析の活用が可能となった。本システムは、社会への普及を見据えて実用の面に注力して開発されたものであり、一貫解析ソフトにおけるデファクトスタンダード化を目指している。かつて DOS が Windows に置き換わる事でコンピュータが一般社会へ普及し、それによって急速に発展したように、本システムにより、現状の一貫解析のハードルを下げることで、今後の海事産業の競争力強化に大いに貢献するものと期待される。

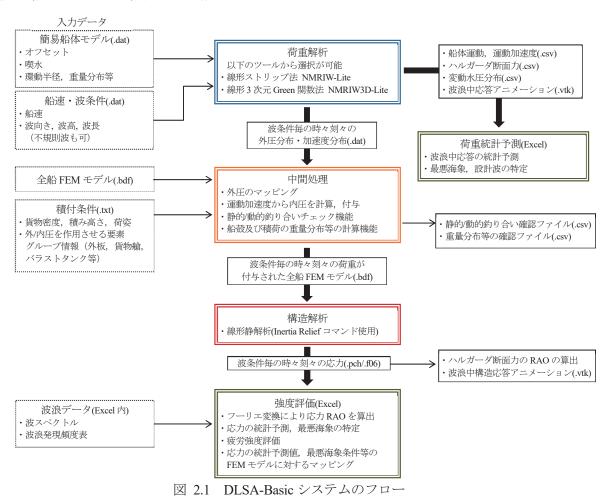
本論文では、開発した DLSA-Basic システムの構成について述べ、それを用いた構造強度評価の検討を通じて、本システムが構造設計の高度化にもたらす利点について示す。システムの構成では、全船一貫解析技術の共通の問題である、波浪中構造解析の荷重平衡について詳しく述べる。構造強度評価の検討では、本システム特有のポスト処理機能を活用し、現行の鋼船規則で用いられている設計規則波のに基づく強度評価の妥当性の検証と、その傾向について考察を行う。

2. DLSA-Basic システムについて

2.1 DLSA-Basic システムの概要

DLSA-Basic システムは、線形荷重解析ならびに線形構造解析を組み合わせ、線形の統計予測法に基づいた船体構造強度評価システムである。DLSA-Basic システムの全体フローを図 2.1 に示す。本システムには GUI(Graphical User Interface)が備わっており、同一のプラットフォーム上で図 2.1 の一連の操作が行えるようになっている。また、可視化についても注力しており、荷重解析、構造解析、さらにそれらを組み合わせた波浪中構造解析の結果をアニメーションで出力することができる。波浪中構造解析のアニメーション出力の例を図 2.2 に示す。

次節では、本システムの解析手法及び機能について説明する.



Step14

MISES_STRESS [Pa]

1e+08

8e+07

6e+07

4e+07

2e+07

0

図 2.2 波浪中構造応答アニメーションの例(Mises 応力コンター表示,波浪外圧を矢印で表示)

2.2 解析手法

本節では、DLSA-Basic における一貫解析手法を説明する. その概要をまとめたものを、表 2.1 に示す.

荷重解析	解析手法	線形ストリップ法プログラム NMRIW-Lite, あるいは 線形 3 次元 Green 関数法プログラム NMRIW3D-Lite			
	横揺れ減衰	池田の組立法,あるいは線形・非線形減滅係数を入力			
	喫水線近傍の変動水圧	負圧を 0,かつ喫水線における正圧を上方に 45°で線形外挿			
構造解析	解析手法	出会い波の一周期を等分割した瞬時瞬時の状態について汎用 FEM ソルバーによる線形静解析を行う			
	外圧の付与方法	荷重解析によって得た外圧を外板 FE 要素にマッピング			
	内圧の付与方法	荷重解析によって得た各ホールドあるいはタンクの重心位置の加速度を用いて、共通構造規則(CSR: Common Structure Rules)に準拠した荷重を付与			
	船殻慣性力の付与方法	Inertia relief コマンドを適用			
	拘束条件	なし			

表 2.1 DLSA-Basic の解析手法の概要

2.2.1 荷重解析

荷重解析は、線形ストリップ法 NMRIW-Lite(非線形ストリップ法 NMRIW-II^{7),8)}の線形版)、線形 3 次元 Green 関数法 NMRIW3D-Lite から選択する事ができる。NMRIW-Lite は STF 法 ⁹に基づいており、2 次元流体力は close-fit 法(2 次元 Green 関数法)により計算される。一方で 3 次元 Green 関数法の NMRIW3D-Lite は、核関数には無速 Green 関数を用い、船体表面条件と圧力方程式において前進速度影響を考慮する方法を採用している ¹⁰). NMRIW-Lite 及び NMRIW3D-Lite では、流体力の計算において、一般に用いられる部分積分あるいは Tuck の定理 ¹¹⁾によって速度ポテンシャルの船長方向微分の計算を回避する方法に加え、圧力を直接積分する方法によって計算する方法も採用している。また、横揺れにおいてビルジキールの影響を考慮できるように、池田の組立法 ¹²⁾、あるいは線形・非線形の減滅係数を入力するようになっており、横揺れとそれに連成する横運動、それらに起因する波浪変動圧、横断面力は波高の非線形性の影響を受ける。さらに、波浪変動圧を構造解析に受け渡す際には、波面の変動影響(喫水線圧力を上方に 45°で線形外挿し、かつ負圧を 0 とする処理)を考慮している。

荷重解析はそれだけでも完結した役割を持っており、NMRIW-Lite 及び NMRIW3D-Lite では、船体運動、運動加速度、ハルガーダ断面力、変動水圧といった波浪中応答を時間領域及び周波数領域形式で出力する事ができ、その統計予測ならびに最悪海象の特定機能も有している。この機能によって、荷重パラメータが最大となるような設計波を比較的容易に定義することが出来る。

2.2.2 外圧の付与(マッピング)方法

荷重解析で得た波浪外圧を FEM モデルの外板にマッピングする際に注意すべきは、両者の計算メッシュ間隔の相違である。特に、FEM モデルの外板の要素は、ガース方向、船長方向のアスペクト比がほぼ1であるのに対し、ストリップ法やパネル法等の荷重解析より得られる圧力の情報は、流場の変化率の関係から、一般にガース方向に対して船長方向の間隔が広い。このような場合、シェパード法 13 等の一般的な内挿方法では船長方向の水圧分布が不連続になることがある。船長方向にも細かく刻むことで解決を図った場合、荷重解析における計算コストが増大する。この解決策として、参照距離を計算する上で船長方向の座標を縮め、ガース方向と船長方向を等間隔にした上でシェパード法を用いる方法が考えられるが、水圧の出力位置が長手方向に不均一であったりすると不合理な結果を生む可能性がある。そこで本システムに於いては、次のようなマッピング方法を採っている;FEM モデルに作用させる任意位置の水圧p(x,y,z)を得るために、まず後ろの $x=x_s$ 位置の断面における水圧で内挿し $p(x_s,y,z)$ を得、続いて前方の $x=x_{s+1}$ 位置の断面の水圧で内挿し $p(x_{s+1},y,z)$ を得たのちに、 $p(x_s,y,z)$ と $p(x_{s+1},y,z)$ の内挿を行う。本手法では水圧の出力点が構造格子となっている必要があるが、ガース方向に対して船長方向の間隔が広く、かつ断面位置 x_s が不均一な場合に対しても問題なく適用することができる。

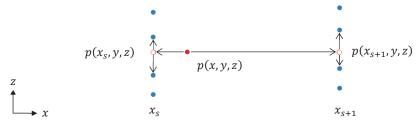


図 2.3 外圧のマッピングの概要

2.2.3 内圧の付与方法

本システムでは、貨物の流動的特性は考慮せず、荷重解析で得たホールド重心位置の船体運動加速度及び重力加速度ベクトルの変動成分から内圧を計算している。液体貨物による内圧については、自由表面が平面を保ったまま変化する線形圧力を計算しており、圧力の基準点は部分積載の場合は水面心、満載の場合はタンクの重心あるいは頂点(所謂 A 法、B 法 ¹⁴)から選択することができる。他方で、粒状貨物による内圧は内部摩擦等が存在するために物理的に正しく扱う事が難しいが、DLSA-Basicでは、粒状貨物に関しては CSR に基づく荷重 ¹⁵か、あるいは松井による応力テンソルに基づく荷重 ¹⁵かを選択することができる。前者は実験に基づく経験式であるが、慣性力との一貫性に欠ける。一方で後者は、慣性力との一貫性を保証する手法ではあるが、局所的な圧力分布に正当性が無くビルジホッパーにおいてやや過大な荷重を与える。また、粒状貨物の計算に用いる貨物上表面は、多直線の任意形状(船長方向に一様)で入力することができる。

2.2.4 船殻慣性力の付与方法

本システムでは、構造解析は線形静解析を採用しているが、静解析とはいえ、質量を持つ要素に対して慣性力を適切に作用させることで、動的解析のある瞬時の状態と全く等価な状態を表すことができる。全船モデルを扱う場合、慣性力の作用方法は次が考えられる。

- ① 仮想的に節点拘束し、慣性力を外力として作用させる方法
- ② 汎用ソルバーに搭載されている "Inertia Relief" コマンドを用いる方法

従来は①の手法が主流であった³が、本システムでは②の方法を採用している. Inertia Relief は荷重の不平衡を数値的に解消する手法であると誤解される傾向にあるが、不平衡力に起因する剛体加速度場によって発生する慣性力(加速度場と要素質量の積)を構造に付与する手法であり、ダランベールの原理に基づいた物理的に正当な手法である。また、構造解析において不平衡力が生じた場合、①の方法では不平衡力が拘束節点の反力として集中して表れるが、②の方法では構造モデルの質量を持つ要素の慣性力として不平衡力が分散されるため、比較的強度評価に影響を及ぼしにくいという利点を有する。ただし、Inertia Relief では剛体加速度場を前提とするため、船体の固有周期に対して作用時間の短い荷重が作用した場合には、ホイッピング等の弾性加速度場が生じるため適用範囲外となることに注意を要する¹ワ.船体運動を剛体と見做し、かつ不平衡力が生じない場合は、上記①と②は全く同じ結果を与える.

2.3 静水中および波浪中の釣り合いについて

一貫解析における構造解析では拘束の無い全船モデルを扱うため、外力とそれに起因する船殻の慣性力が釣り合い状態になっていることが重要となる.これが成り立っていなければ構造解析において不平衡力が生じ、2.2.4でも述べたように、Inertia Reliefを用いる方法では非現実的な船殻慣性力を発生させることになる.以下に、DLSA-Basicシステムにおける釣り合いの確認方法、並びに不平衡力の発生する主な原因について述べる.

2.3.1 静水中および波浪中の釣り合いの確認方法

当システムでは、静水中、並びに波浪中の釣り合いについて、次のように確認を行っている.

◆静水中の釣り合い

静水中構造解析の釣り合いに関しては簡明で、船殻重量と積載重量の和が排水量に一致すること、およびLCG (重心の前後位置)とLCB(浮心の前後位置)が一致することを確認すればよい。本システムでは、排水量、LCB は外板要素上、ホールド並びにタンクの重量と LCG はホールド並びにタンクの境界要素上の積分によって計算している ¹⁶.

◆波浪中の釣り合い

波浪中の釣り合いとは、いわば構造モデルに作用する荷重(波浪外力、貨物慣性力、船殻慣性力)が、荷重解析における荷重状態と整合しているかどうかである。本システムでは、荷重解析における運動加速度と、構造解析において生じる inertia relief の強制加速度の対応を確認している。両者をつき合わせる上で気を付けるべきは、座標系の違いである。通常、荷重解析では一定船速で前進する慣性座標系で扱われ、これに対し構造解析は船体固定座標系で扱われる。荷重解析における 6 自由度運動変位を $\{\xi_1,\dots,\xi_6\}^T$ (それぞれ surge, sway, heave, roll, pitch, yaw)と書くと、FEM モデルにおいて生じる船体固定座標系における強制加速度ベクトル $\{\bar{a}_1^{IR},\dots,\bar{a}_6^{IR}\}^T$ (ここに、 $\bar{a}_1^{IR},\bar{a}_2^{IR},\bar{a}_3^{IR}$ はそれぞれ船体重心位置における船体固定x,y,z方向加速度、 $\bar{a}_4^{IR},\bar{a}_5^{IR},\bar{a}_6^{IR}$ はそれぞれ角加速度ベクトルの船体固定x,y,z方向成分を意味する)は次式によって表される。

$$\begin{cases}
\bar{a}_{1}^{IR} \\
\bar{a}_{2}^{IR} \\
\bar{a}_{3}^{IR}
\end{cases} = \begin{bmatrix}
1 & \xi_{6} & -\xi_{5} \\
-\xi_{6} & 1 & \xi_{4} \\
\xi_{5} & -\xi_{4} & 1
\end{bmatrix} \begin{Bmatrix}
\ddot{\xi}_{1} \\
\ddot{\xi}_{2} \\
\ddot{\xi}_{3} + g
\end{Bmatrix}, \begin{cases}
\bar{a}_{4}^{IR} \\
\bar{a}_{5}^{IR} \\
\bar{a}_{6}^{IR}
\end{Bmatrix} = \begin{bmatrix}
1 & \xi_{6} & -\xi_{5} \\
-\xi_{6} & 1 & \xi_{4} \\
\xi_{5} & -\xi_{4} & 1
\end{bmatrix} \begin{Bmatrix}
\ddot{\xi}_{4} \\
\ddot{\xi}_{5} \\
\ddot{\xi}_{6}
\end{cases} \tag{2.1}$$

Heave 加速度 ξ_3 に重力加速度gが加わるのは、強制加速度には静水荷重によって生じる重力加速度も含まれているためである。この両辺の対応を確認することで、波浪中の平衡状態を確認することができる。

2.3.2 波浪中構造解析の不平衡力の原因

運動加速度と強制加速度は、構造モデルに作用する荷重(波浪外力、貨物慣性力、船殻慣性力)が、荷重解析における荷重状態と整合していれば一致するはずであるが、これらはしばしば一致しない。その要因は、次のように分類される。

I) 荷重解析における,流体力と水圧の計算方法の不一致

荷重解析プログラムではビルジキールの影響等を考慮するために、運動に用いる横揺れ減衰係数はポテンシャル理論による流体力とは別に与えることが一般的である。また、流体力を計算する際に、波浪変動圧の移流項の計算を回避するため、ストリップ法では部分積分が、3次元パネル法では Tuck の定理が用いられることが多く ¹⁸, これらは一般に圧力の直接積分による値とは一致しない。以上の二つの事項によって、構造モデルに付与する波浪圧力を積分した値と、運動加速度を計算するのに用いられる流体力が整合せず、不平衡力が生じることがある。後者の影響は船速が高くなるほど大きくなるが、本システムでは、2.2.1 でも述べた通り圧力の直接積分によって運動を計算することもできるため、この問題は回避されている。

Ⅱ) 荷重解析と構造解析における質量モデルの不一致

荷重解析と構造解析とで船体の質量や慣性モーメントが一致していなければ、不平衡力が生じる. 特に、荷重解析プログラムでは、横揺れ環動半径の値は多くの場合簡易推定値 (CSR による値や便覧の簡易推定式等 ¹⁹⁾) が用いられるが、この値が FEM モデルの環動半径と一致せず、roll 加速度に対する不平衡力が生じることが多い. これについて、主著者らは FEM モデルから、貨物も含めた慣性モーメントを計算する実用的方法を示しており ¹⁶⁾、本システムでは当計算によって得られた慣性モーメントの情報を確認することができる.

Ⅲ) 慣性力と内圧の積分値の不一致

荷重解析では一般に貨物は質量として扱われるが、構造解析ではホールドあるいはタンク内の液体や粒状体貨物は圧力として与えられる。そのため、内圧の積分値は貨物慣性力と一致している必要がある。しかしながら、粒状貨物について CSR の算式 ¹⁾を用いた場合、船体固定の水平方向に対する圧力の積分値が慣性力に一致しない。この影響は、満載状態のときに大きくなる。これについては、主著者が慣性力と一致する内圧の計算方法を提示しており ¹⁵⁾、本システムでは当計算法と CSR の算式から選択することができる。

IV) 水圧の喫水線近傍の補間による波高の非線形影響

線形荷重解析-構造解析においても、2.2.1 で説明した喫水線近傍の線形補間を施した場合、両解析の水圧の積分範囲が相違するため、不平衡が生じる。この影響は波高が高いほど大きくなるため、単位波高あたりの構造応答は波高に依存する非線形応答となる。

V) 波浪外圧のマッピング誤差

上記 2.2.2 に述べた通り、荷重解析と構造解析とでは計算格子が大きく異なるため、これに依る誤差が生じる. しかしながら、上記 I) \sim IV)と比べると、その影響は大きくない.

以上の要因によって発生した不平衡は、Inertia Relief の強制加速度、即ち構造解析における船殻慣性力にしわ寄せがいく.このことは、集中質量モデル化がされている箇所で不合理な集中荷重が作用することもあるため、注意が必要である.

2.4 強度評価機能

本システムでは、構造解析で得た応力の模擬時系列から、フーリエ変換によって応力の応答関数を計算の上、線形の統計予測に基づき、降伏強度と疲労強度の評価を行えるようになっている。統計予測では、任意の波スペクトル、波浪発現頻度表を入力することができ、応力の長期分布を計算し、S-Nカーブを用いたマイナー則に基づく疲労被害度を計算することができる。次章で詳しく示すように、構造 FEM モデル上に応力の統計量をコンターで表示する事が可能である。

2.5 インターフェース

DLSA-Basic システムは、図 2.1 に示した一連の解析を同一の GUI 上で実施することができる. 荷重解析の GUI 画面の例を図 2.4 に示す. 一貫解析において最も工数を要するのは、荷重解析によって得られた内外圧を FEM モデルに作用させる作業であり、その中でも荷重を作用させるために外板、ホールドならびにタンク毎の FEM 要素グループを要素の表裏毎に定義する作業である. 本システムは、これらの要素グループを GUI 上で自動抽出することができる. さらに、定義した法線の向きや入力した貨物上表面を表示することができ (図 2.5)、入力のミスの有無を容易に確認できるようになっている.

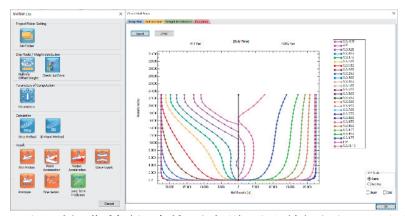


図 2.4 GUI 画面の例:荷重解析の各種入出力選択画面(左)とオフセット表示(右)

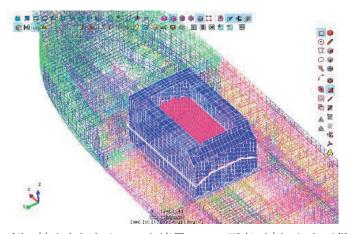
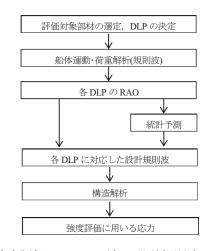


図 2.5 GUI 画面の例:抽出されたホールド境界シェル要素(青)および貨物上表面(赤)

3. DLSA-Basic システムを活用した設計規則波による強度評価の妥当性の検討

現在の船体構造設計における考え方には、系の非線形性はあまり大きくないとした線形の確率統計論にもとづく短期・長期予測法(以下、統計予測とよぶ)と、現象を決定論的に取り扱って非線形現象を重視する設計波法の2つが併用されている。現状のCSRでは、超過確率が10⁻⁸相当(以下、10⁻⁸レベルと呼ぶ)の荷重状態を再現するような複数の代表的な"等価設計規則波"に基づく荷重が定義されており²¹⁾、一貫解析ガイドラインにおいても、設計規則波を用いた強度評価が一手法として推奨されている²⁾(図 3.1 左)。設計規則波による強度評価は、荷重の同時性および非線形性を考慮できる簡便な手法ではあるものの、確率論に基づく量を特定の波浪といった決定論的状態で表現しようとすること、および実際には不規則波である波浪を規則波で置き換えることに無理が生じ、応力を過大あるいは過小評価する可能性があることが指摘されている²⁰⁾。

設計波法に対し、より直接的な方法として、応力の応答関数を用いて統計予測を行う方法(図 3.1 右)があり、非線形影響を無視した場合はこちらの方が正当な手段である。この方法は厳密ではあるものの、あらゆる波条件における応力のデータを保持しておく必要があるので、計算機の制約から、従来は評価する要素をあらかじめ絞っておく必要があった。重見らは、タンカーのいくつかの主要構造部材の要素をピックアップし、応力の応答関数から10⁻⁸レベルの値を得、それが設計規則波によってカバーされることを確認しているのが、想定されていない構造部材に対して同様の結果が得られるかは定かではない。これに対し、本システムでは近年の発達した計算機の性能を活かし、全ての構造要素について統計予測をおこない、統計量を構造モデル上に表示することができる。そこで、本章では DLSA-Basic システムを活用した検討の一例として、全ての構造要素に対し、応力の応答関数から得た10⁻⁸レベルの応力と設計規則波による応力との比較を行い、線形理論の範囲内で、設計規則波による強度評価の妥当性を検証した。



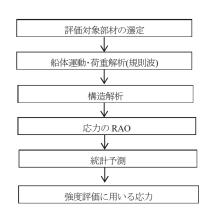


図 3.1 強度評価のフロー (左:設計規則波による強度評価,右:応力の応答関数による強度評価)

3.1 対象船舶

今回の検証に用いた船舶の主要目等を表 3.1 に、荷重解析ならびに構造解析モデルを図 3.2、図 3.3 に示す.

大 5/11 / 八 3// / - - - - - - -				
船種	ばら積み船			
積付状態	満載 (Light cargo)			
Lpp	278m			
В	45m			
D	17.5m			
Cb	0.838			
KG	12.9m			

表 3.1 対象船舶の主要目

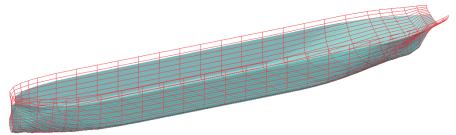


図 3.2 対象船舶の荷重解析モデル (流体力計算用の水面下のパネル(水色面)と外圧の出力用の格子(赤線))

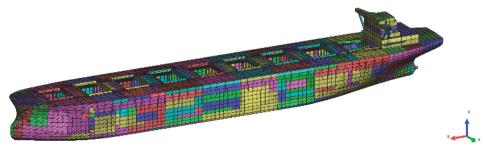


図 3.3 対象船舶の構造解析モデル (shell 要素数:38273)

3.2 荷重解析

線形 3 次元 Green 関数法プログラム NMRIW3D-Lite を用いて、構造解析に用いる波浪外圧、加速度分布、ならびに DLP(Dominant Load Parameter)を計算した。 DLP とは波浪中応答のうち、波浪荷重を決定づける支配的パラメータで、ここでは設計規則波を定めるために計算している。 DLP は、一般的に用いられる midship における縦曲げモーメント、F.P.における垂直加速度、横揺れ角、S.S.2.5 における捩りモーメント、 midship の喫水線近傍における波浪変動圧とした $^{\circ}$. 荷重解析の条件を表 $^{\circ}$ 3.2 に示す。線形理論の範囲内での検討とするため、波高を微小とすることで喫水線近傍の処理による構造応答の非線形性を除去し、また横揺れ減滅係数も線形係数のみ与えている。 得られた DLP の単位波振幅あたりの応答関数を図 $^{\circ}$ 3.4~図 $^{\circ}$ 3.6 に示す。 DLP の応答関数は、片舷からの入射($^{\circ}$ ~180°)のみ示しているが、解析は全方位について実施している。

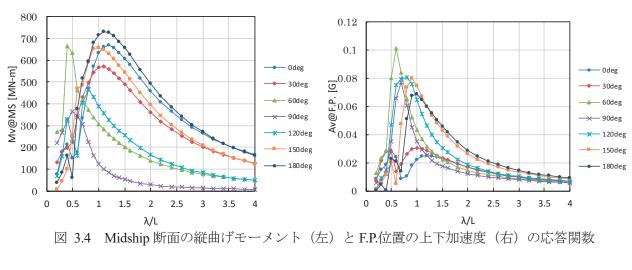
25.2 阿里州(V)米什					
波向き	0°~330°, 30°刻み				
	(180°は向波, 90°は右舷から入射する横波)				
波長船長比	0.2~4.0				
波高	0.1m (非線形影響が現れない範囲)				
船速	5kt				
横揺れ減滅係数(線形)	0.4				

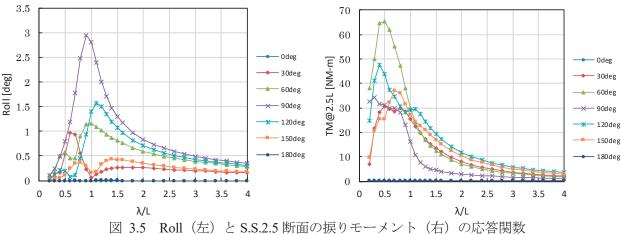
表 3.2 荷重解析の条件

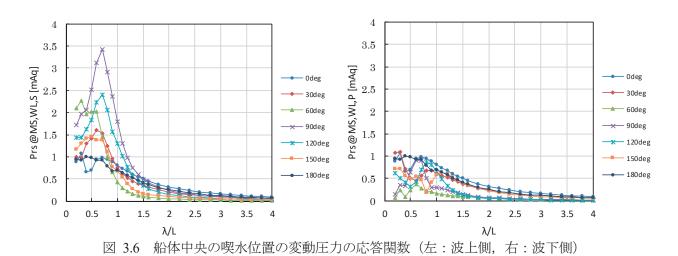
3.3 DLSA-Basic による応力の長期予測

波浪荷重解析により得た荷重を用いて、波浪中構造応答を計算し、全構造要素の応力の応答関数を求めたうえで統計予測を行った。波スペクトル及び波テーブルは、IACS の Standard Wave Data²²⁾に基づき、Pierson-Moskowitz型波スペクトル及び北大西洋の波浪発現頻度表を用いた。

設計規則波の応答と比較する上で、10⁻⁸レベルのミーゼス応力の値を指標として用いることにする。ミーゼス 応力は降伏強度評価に用いられるスカラー量で、強度評価の判断を行う上で有用な指標である。しかしながら、ミーゼス応力は非線形量なので、線形重ね合わせに基づく統計予測ではその長期予測値を求める事はできない。 そのため、本システムでは、次のように計算した値を便宜上のミーゼス応力の長期予測値として扱っている.







- 1) 要素平面応力 $\sigma_x,\sigma_y, au_{xy}$ の応答関数を計算し、それぞれの 10^{-8} レベルの値を求める.
- 2) それぞれの応力成分に対し設計規則波条件を作成する. 設計規則波は, 応答関数の最大値となる条件から波長, 波向きを決め, 波高は応答関数の最大値を線形倍して10⁻⁸レベルの値となるような波高として定める.
- 3) 以上の3つの設計規則波それぞれにおける σ_x , σ_y , τ_{xy} の振幅と位相を用いて, σ_x , σ_y , τ_{xy} の模擬時系列を作成. この時,通常、静水中応力も定常成分として足し合わせる(ただし、今回は考慮しない).
- 4)以上の σ_x , σ_y , τ_{xy} の模擬時系列から Mises 応力の模擬時系列を計算し、その最大値を 10^{-8} レベルの Mises 応力とする.

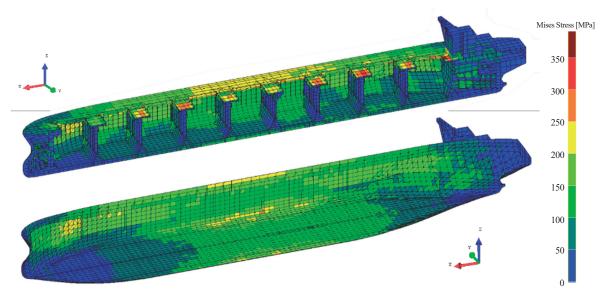


図 3.7 静水中応力成分を含まない10⁻⁸レベルの Mises 応力

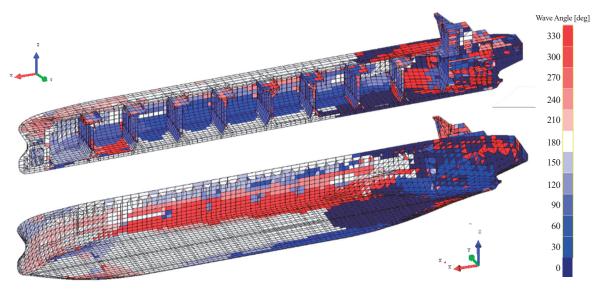


図 3.8 応力の応答関数が最大となる波向き

以上によって求めた Mises 応力は, σ_x , σ_y , τ_{xy} がそれぞれ単独で最大となる状態しか見ていないため, σ_x , σ_y , τ_{xy} の組み合わせによって Mises 応力が最大となるような状態は考慮されていないことに注意が必要である.なお,上記 3)にも示しているとおり,今回の解析では静水中応力成分を考慮していないが,この理由については 3.4.1 にて詳述する.

計算した10⁻⁸レベルの Mises 応力を図 3.7 に、上記 2)で定めた設計規則波の波向きを図 3.8 に示す。図 3.7 より、一部、クロスデッキ等で比較的高い応力が生じているが、全体的に降伏応力(350MPa 程度)より小さく、波浪成分については降伏強度が満足されていることが分かる。一方で図 3.8 より、クロスデッキでは斜め向波あるいは斜め追波で高応力が生じており、捩り変形に起因する応答であることが読み取れる。また、midship 付近のデッキ及び船底は、向い波 180°だけでなく、船側付近は斜め追い波 60°,300°で最大をとっているが、これは、図 3.4 左の縦曲げモーメントの応答関数において、斜め追い波の短波長において局所的に高くなる周波数が存在することによる。

3.4 設計規則波による強度評価

3.4.1 設計規則波の定義

設計規則波とは、DLP の 10^{-8} レベルの応答を生じさせるような規則波であるが、 10^{-8} レベルの応答を生じる波浪条件は確率的な広がりを持つため、一意には定まらない。ここでは CSR に準拠し、表 3.3 に示す 7 種類の設計規則波を定めた。表 3.3 は、DLP 及び波向きについては CSR に規定された設計規則波の定義に従い、波長船長比、波高の条件は荷重解析による値を用いた。重見らの手法 0 に従い、波長船長比はその波向きにおける応答関数が最大値となる条件から決定し、波高は定めた波向き・波長の規則波において、DLP が 10^{-8} レベルとなるように次式によって決定した。

(設計規則波の波高) =
$$2 \times \frac{\left(10^{-8} \, \text{レベルの値}\right)}{\left(定めた波向き・波長における応答関数の値\right)}$$
 (3.1)

式(3.1)において、2が乗じられているのは波振幅から波高への変換である.

表 3.3 を見ると波高が極めて高くなっており、線形解析とはいえ、2.3.2 のIV)で述べた波高の非線形性の影響が大きく現れる。ここでは非線形影響を除去した線形理論の枠組みの中での比較に限定するため、解析上の波高は 0.1 m とし、得られた Mises 応力を設計規則波の波高倍(例えば HSM では得た Mises 応力を 19.74/0.1 倍)した. Mises 応力は本来波高に比例しない非線形量であるが、要素平面応力の成分 σ_x , σ_y , τ_{xy} が全て α 倍されれば Mises 応力も α 倍されるという性質をもつため、静水中の定常応力を加味しない場合、Mises 応力に対してもこのような処理を行うことができる.

なお、表 3.3 の設計波によって定義される荷重は、CSR に規定される規則荷重とは異なることを付言しておく. というのも、CSR の規則荷重には操船影響係数等の経験則に基づく係数が含まれており、さらに荷重の付与方法も評価箇所が所定の断面力になるように境界条件を調整するなど、部分構造モデルに適合させたものになっているためである.

設計規則波	支配荷重パラメータ	10-8レベルの値	波向[deg]	波長船長比	波高[m]
HSM	縦曲げモーメント@MS	7190 [MN-m]	180	1.1	19.74
FSM			0	1.2	21.59
HSA	垂直加速度@FP	0.720 [G]	180	1.0	21.67
OSA		0.739 [G]	120/240	0.8	18.39
OST	捩りモーメント@S.S.2.5	477 [MN-m]	60/300	0.5	14.61
BSR	横揺れ角	18.5 [deg]	90/270	0.9	12.63
BSP	変動水圧@MS,WL	23.1 [mAq]	90/270	0.7	13.49

表 3.3 設計規則波の条件

3.4.2 設計規則波と統計予測による応力の比

以降は、静水中荷重を除いた設計規則波中の Mises 応力の最大値 (1周期中の最大値) と、図 3.7 に示した 10^{-8} レベルの Mises 応力の比をとったものについて考察する。この応力比が意味するところは、設計規則波による強度評価が線形理論の範囲内でどの程度過小・過大評価しているかの指標である。なお、分母が小さな値をとる場合は比の値が過剰になるため、以降、 10^{-8} レベルの Mises 応力が 50 MPa を閾値とし、これを下回る要素については考慮しないこととする。

全設計規則波における Mises 応力最大値と 10^{-8} レベルの Mises 応力の比,及び Mises 応力が最大となる設計規則波を shell 要素上に表示したものそれぞれ図 3.9,図 3.10 に,応力比のヒストグラムを図 3.11 に示す.図 3.11 の左は,閾値を上げた場合の要素に関するヒストグラムが分かるように, 10^{-8} レベルの Mises 応力の大きさで色分けしており,図 3.11 の右は応力が最大となる等価設計波毎に色分けしている.設計規則波毎の応力比の表示は,Appendix に記載しておく.図 3.9~図 3.11 より次のことが分かる.

a) 応力比のヒストグラムについて

図 3.9, 図 3.11 から、応力比は、やや安全側であるものの、全域にわたって概ね 1.0 前後の値となっている. このことから、7 種の設計規則波のみによる強度評価でも、あらゆる波浪を考慮した統計値と比べてある程度合理的な結果が得られていることが分かる. 応力比は、閾値を超える要素のうちの 60.1%が±10%以内、93.3%が±20%以内に収まり、200MPa を超える高応力箇所については、その 63.8%が±10%以内、97.6%が±20%以内に収まっていることが確認された.

b) 応力が最大となる設計規則波について

図 3.10, 図 3.11 から、Mises 応力が最大となる設計規則波は、HSA 及び OST が多くみられ、その一方で HSM 及び BSR は全くみられない。BSR については、本対象船では横揺れ角が大きくなく、かつバルクヘッド等の横強 度部材は BSP によってカバーされているためである。一方で、縦強度部材について支配的となるはずの HSM が一切見られないのは、非合理的な結果である。これは、表 3.3 の HSM と HSA の波条件を見比べると明らかであるが、本来船首ホールドの内圧(貨物慣性力)が最大となる状態を再現するはずの HSA が、HSM よりも大きな縦曲げモーメントを生じさせてしまうためである。垂直加速度の応答関数(図 3.4 右)では向い波で高い値が出ておらず、設計規則波では10⁻⁸ レベルの応答を生じるように式(3.1)で定義される波高で帳尻を合わせるため、HSA では非常に高い波高となってしまっている。そこで、HSA を除いた 6 種の設計規則波について、図 3.9~図 3.11 と同様のコンター図及びヒストグラムを作成したものを図 3.12~図 3.14 に示す。図 3.13 では、船体の前半分の縦強度部材で HSM が最大をとっており、また図 3.14 を見ると、過安全側であった要素が減り、HSA を除くことでより合理的な結果が得られていることがわかる。このときの応力比は、関値を超える要素のうちの 72.0%が±10%以内、95.2%が±20%以内に収まり、200MPa を超える高応力箇所については、その 79.4%が±10%以内、98.0%が±20%以内に収まっていることが確認された。

以上と同様の現象は、OST でも見られる. すなわち、OST は本来捩り変形に影響する部材を評価するための波条件であるが、OST の条件(波向き 60°、波長船長比 0.5) における縦曲げモーメントと垂直加速度の応答関数(図 3.4) が大きな値をとっているために、これらの荷重因子が応力に有意に影響を及ぼしている. 図 3.9 を見ると、船首から 2,3 番目の船艙のビルジホッパータンクにおいて、OST によって過大な応力が生じているが、これは捩りによる反り応力以外に、縦曲げ応力と慣性力による局部応力が重畳していることが原因と考えられる. とはいえ、OST は HSA とは違い他の設計波で補うことができない荷重因子を持つため、これを除くと過小評価となる部材が現れる.

c) 設計規則波による強度評価の妥当性について

ある設計波において、狙った DLP の影響する部材以外の部材が過少評価になる場合は、その部材に対して影響する DLP から新たに設計波を定義し、それによってカバーすれば済む話である。しかしながら、上記 b)で述べた HSA と OTS のように、狙った DLP 以外の DLP が過大となる場合は、狙った部材以外を過大評価することになってしまう。これについては、設計波法によって船体全体の強度評価を行う場合には避けられない問題であろう。したがって、全船構造モデルで構造解析を実施する場合は、応力の応答関数に基づいた統計予測を実施することが、より合理的な設計につながると考えられる。ただし、その場合、部材ごとに波高の非線形性をどのように取り入れるかが課題となる。

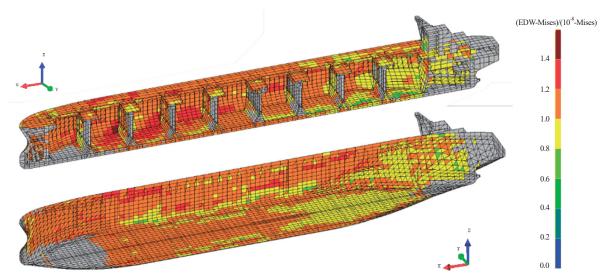


図 3.9 全ての設計規則波の Mises 応力最大値と10⁻⁸ レベルの Mises 応力の比

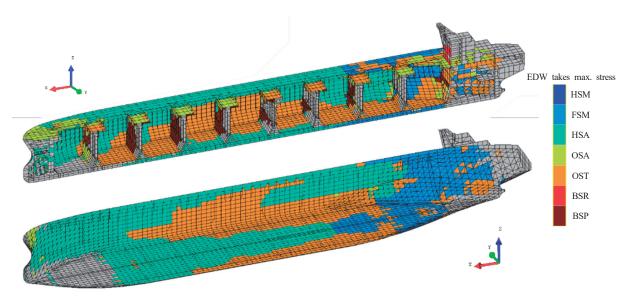


図 3.10 Mises 応力が最大となる設計規則波

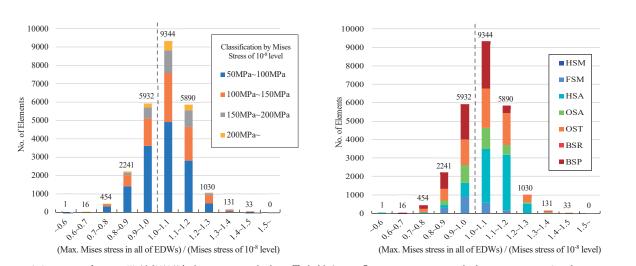


図 3.11 全ての設計規則波中の Mises 応力の最大値と 10^{-8} レベルの Mises 応力の比のヒストグラム (左: 10^{-8} レベルの Mises 応力の大きさ別に色分け、右:最大となる設計規則波別に色分け)

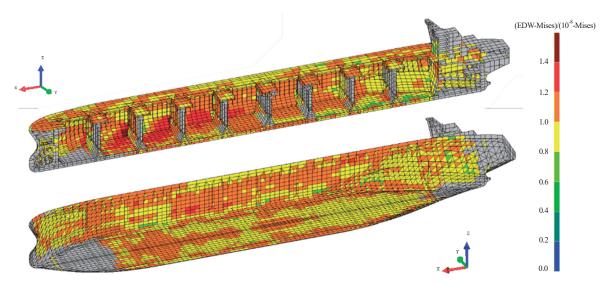


図 3.12 HSA を除く設計規則波の Mises 応力最大値と10⁻⁸レベルの Mises 応力の比

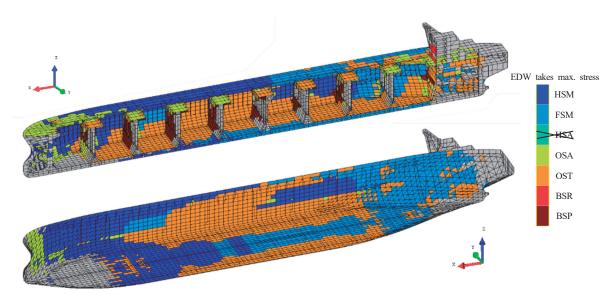


図 3.13 Mises 応力が最大となる設計規則波 (HSA を除く)

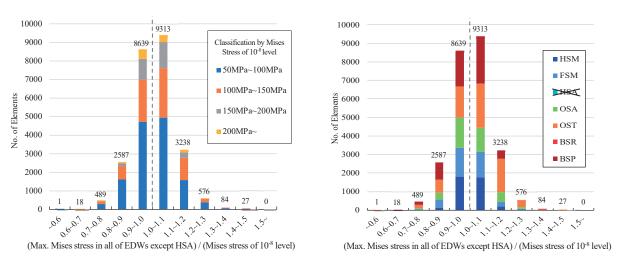


図 3.14 HSA を除く全ての設計規則波中の Mises 応力の最大値と 10^{-8} レベルの Mises 応力の比のヒストグラム (左: 10^{-8} レベルの Mises 応力の大きさ別に色分け、右:最大となる設計規則波別に色分け)

4. 結言

本論文は、開発した DLSA-Basic システムの説明と、それを用いて設計規則波による構造強度評価の妥当性について検討を行った。 DLSA-Basic システムの開発に関する要点を以下に示す.

- 本システムは、線形荷重解析、線形構造解析、ならびに線形の統計予測法による強度評価に立脚するクラシカルなシステムであるが、荷重解析はストリップ法に加え 3 次元 Green 関数法も選択可能としており、荷重解析における流体力の計算や、内外圧や船殼慣性力の付与方法など、細部で種々の新しい考え方が取り入れられている。本論文では比較的新しい手法の例として、Inertia Relief を用いたときの釣り合いの確認方法を示し、また不平衡力が生じる要因とその傾向について整理している。
- 荷重構造一貫解析は古くから存在する考え方であるが、本システムでは近年の PC の発展に伴い実現可能となった機能を有している。例えば、全船を対象に全ての構造要素の応力成分の応答関数を計算し、統計値や支配的波条件を構造要素上に表示するといった機能等である。このことが、波浪中の構造応答に対する現象の理解や、想定外の高応力箇所の検出などを容易にしている。
- 本システムは、同一のプラットフォーム上で GUI を介して操作し、結果を確認することができる. これによって、単独の設計者が波浪の選定から強度評価までの一連の解析及び検討を比較的簡単に行うことができるようになり、構造設計者の包括的な知見の蓄積に貢献することが期待される.

また、本システムを用いてばら積み運搬船の全船構造要素に対して10⁻⁸レベルの応力を求め、等価設計規則波による応力との比較を行い、線形理論の範囲内で等価設計波による強度評価の妥当性について検証した。主要な結果を以下に示す。

- 本対象船舶では、CSR で用いられる 7 種類の設計規則波で、概ね精度よく 10^{-8} レベルの応力を推定できる 結果となった (50MPa を超える要素のうち 60.1%が ± 10 %以内、93.3%が ± 20 %以内)。設計波から HSA を 除いたところ、過安全側の要素が減り、さらに合理的な推定ができることが分かった(50MPa を超える要素のうち 72.0%が ± 1 割以内、95.2%が ± 2 割以内)。
- 当解析においては、HSAでは縦曲げモーメントが過大となり、かつ HSA が支配的となる強度部材は HSM、FSM によってカバーされていることから、少なくとも本対象船舶では HSA は不要な設計波であることが分かった.一方で、OST は捩りが最大となるような波条件であるが、同波条件では縦曲げモーメント及び縦加速度も大きくなっており、それらの影響が重畳することで一部の部材の応力を過大評価することが分かった.
- 設計規則波法は、対象とする強度部材に対する DLP を適切に選び、それに基づいた設計規則波を用いれば、その部材に対しては適切な評価を行えると考えられる。しかしながら、全船構造モデルを用いて船体全体にわたって強度評価する場合、その規則波において狙った DLP 以外の DLP が支配的となり、対象部材以外の部材について、過大な応答を生じる可能性が示唆された。全船構造モデルを用いてより合理的な設計を行うためには、全ての要素に対して応力の応答関数から統計予測を行う方法を適用するのが良いと考えられる。本システムでは当該機能を実装しており、構造解析のポスト処理としてスムーズに実施することが可能である。ただし、応力の統計処理において、波高の非線形性を適切に考慮する必要があり、その方法については、今後の検討課題である。

謝辞

本報告を執筆するにあたり、丁寧かつ熱心なご助言を戴いた海上技術安全研究所フェローの深沢塔一博士に、 深謝いたします。最後に、本プログラムの実用性の検証へのご協力、また、日ごろより研究を陰で支えていただ きました大橋みどりさん、千須和佳代さん、原田泰子さんに、謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本海事協会: 鋼船規則 CSR-B&T 編 ばら積貨物船及び油タンカーのための共通構造規則, (2017)
- 2) 日本海事協会:直接荷重解析に基づく強度評価ガイドライン, (2018)
- 佐藤宏一,大塚浩友,宮崎智:最先端構造解析プログラム MHI-DILAM-大型船舶・海洋構造物への適用-,三菱重工技報 Vol. 47, No. 3, pp. 92-98 (2010)
- 4) 秋田好雄, 増田吉郎, 他8名: 船体縦強度解析に関するトータルシステム―タンカーの縦強度について 一, 日本造船学会論文集第135号, pp.229-238, (1974)
- 5) 花岡諒,村上睦尚,松井貞興,高見朋希,岡正義: DLSA(全船荷重・構造一貫強度評価システム)の 開発,海上技術安全研究所第17回研究発表会,PS-6,(2017)
- 6) 重見利幸,主庭耀:タンカーの主要構造部材に対する設計荷重の実用的設定法に関する研究―第2報 設計規則波及び設計荷重―,日本造船学会論文集第191号,pp. 209-220,(2002)
- 7) 松井貞興,村上睦尚:構造設計のための非線形波浪荷重解析プログラム NMRIW-II,海上技術安全研究所報告第17巻第3号(2017)
- 8) 松井貞興,村上睦尚,岡正義:実験との比較による非線形波浪荷重解析プログラム NMRIW-II の適用性の検証—規則波中船体応答—,海上技術安全研究所報告第17巻第3号(2017)
- 9) N. Salvesen, E.O. Tuck and O. Faltinsen: Ship Motions and Sea Loads, Trans. SNAME, Vol.78, (1970)
- 10) Papanikolaou A, Erling T, Dnv S, Se GL, Gm HS, View H, et al.: A three-dimensional panel method for motions and loads of ships with forward speed, Ship Technology Res 39, pp. 147–56, (1992)
- 11) Ogilvie, T. F., Tuck E. O.: A rational strip theory of ship motions, Dep. of NAME, University of Michigan, Rep. No. 013, (1969)
- 12) 姫野洋司: 横揺れ減衰力, 第 2 回耐航性に関するシンポジウムテキスト, 第 4 編第 1 章, 日本造船学会, pp. 199-209, (1974)
- 13) MIKKOLA, M.: Transferring Wave Induced Loads on a Finite Element Model of a Ship, MSc Thesis, Tampere University of Technology, (2008)
- 14) 深沢塔一: 大型船の疲労強度検討のための船側変動圧に関する研究, 日本造船学会論文集第 170 号, pp.157-175, (1991)
- 15) 松井貞興:全船構造解析のための粒状貨物による倉内圧の設定法,船舶海洋工学会講演会論文集第 26 号,pp. 205-210 (2018)
- 16) 松井貞興, 村上睦尚: 船体 FEM モデルを用いた貨物内体積分の計算法-慣性モーメント等やその船長 方向分布の計算と捩りモーメントへの影響-,日本船舶海洋工学会論文集第28号,pp.203-209(2018)
- 17) Lin Liao: A Study of Inertia Relief Analysis, AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 19th (2011)
- 18) 柏木正,岩下英嗣:船舶海洋工学シリーズ④ 船体運動 耐航性能編,成山堂書店,(2012)
- 19) 加藤弘: 船の横揺周期の近似計算に就いて,造船協会会報,第66号,pp. 59-64,(1951)
- 20) 深沢塔一,金平裕次,宮崎智:設計不規則波を用いた最大応答推定法—第2報:コンテナ船の局部応力の推定—,日本船舶海洋工学会論文集第4号,pp.221-227,(2006)
- 21) IACS: EDW Definition of Extreme Loads, TB-REPORT Pt 1, Ch 4, Sec 2, pp. 1-51, (2014)
- 22) IACS: Standard Wave Data No. 34, (2001)

Appendix 設計規則波毎の応力比

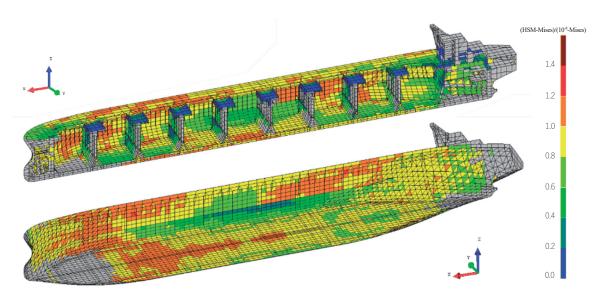


図 A.1 HSM の Mises 応力最大値と 10^{-8} レベルの Mises 応力の比

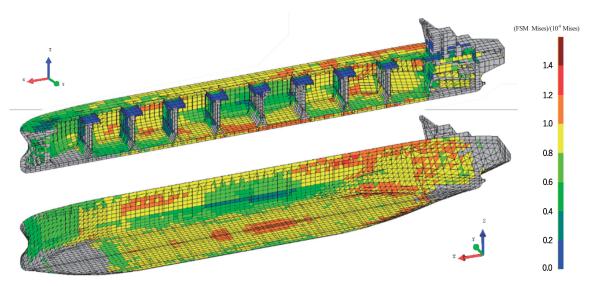


図 A.2 FSM の Mises 応力最大値と10⁻⁸レベルの Mises 応力の比

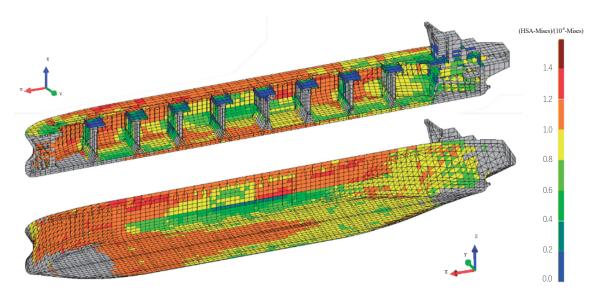


図 A.3 HSA の Mises 応力最大値と10⁻⁸レベルの Mises 応力の比

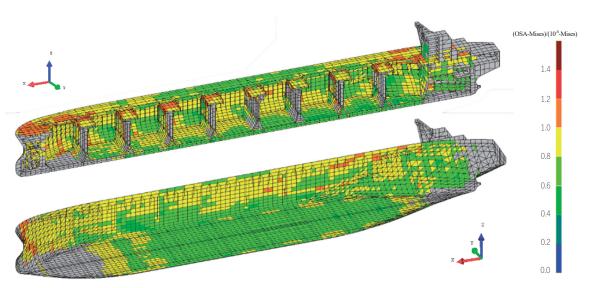


図 A.4 OSA の Mises 応力最大値と 10^{-8} レベルの Mises 応力の比

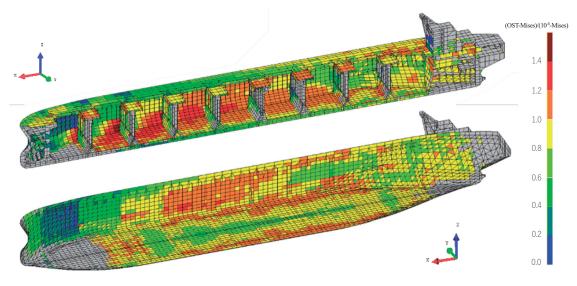


図 A.5 OST の Mises 応力最大値と10⁻⁸ レベルの Mises 応力の比

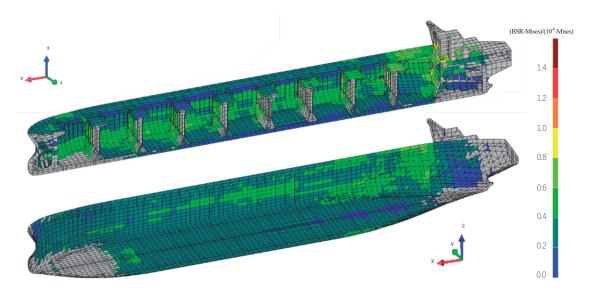


図 A.6 BSR の Mises 応力最大値と10⁻⁸レベルの Mises 応力の比

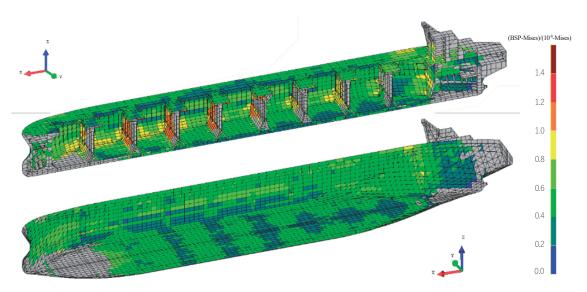


図 A.7 BSP の Mises 応力最大値と 10^{-8} レベルの Mises 応力の比