

# CFDによる波浪中垂直曲げモーメントの非線形性の検討

杉本 圭\*, 吉田 優希\*\*

## 1. 諸言

船体構造の設計において、波浪中の垂直曲げモーメントは重要なファクターの一つであり、当該モーメントを適切に考慮することが肝要である。船級規則においては、IACSの統一規則（UR S11及びUR S11A）及び共通構造規則（CSR）において、波浪中の垂直曲げモーメントが規定されており、船舶の設計寿命において生じる当該モーメントの最大値（ホギング最大）及び最小値（サギング最大）が定式化されている<sup>1) 2) 3)</sup>。当該式においては、線形理論に基づき得られる最大期待値（例えば、超過確率 $10^{-8}$ の値）のほか、操船による影響のほか大波高において生じる非線形影響が陽または陰に考慮されている。このうち、非線形影響について焦点を当てると、開発時期が近年であるUR S11Aの場合、非線形影響が陽に定式化されているものの、コンテナ運搬船に限定された規則であるという特徴を有し、当該規則より以前に開発されたUR S11においては当該影響が明示されていないことが確認できる。

非線形影響に関して様々な研究成果が報告されているが、当該影響につきいくつものレベルに分類すると、Computational Fluid Dynamics (CFD)は"Fully Nonlinear"の計算手法に位置付けられ<sup>4) 5)</sup>、特にスラミング衝撃力や青波荷重を考慮した検討や構造連成解析によるホイッピング弾性振動評価においてその有効性が報告されている<sup>6) 7) 8)</sup>。しかし、 $10^{-8}$ 最大期待値を推定する場合、当該期待値が最悪短期海象中の $10^{-3}$ 最大期待値と概ね等しい<sup>9)</sup>と仮定した場合でも1000波相当の計算を行う必要があり、計算時間の観点から、特に多種多様な船舶の非線形影響を実用的な時間で検討する用途への適用は難しい。

実用面を考慮し計算コストを削減する方法として、応答に最も寄与する波のプロファイルを推定する手法が幾つか提案されており、そのうちのひとつとして設計不規則波法がいくつか提案されている<sup>10) 11) 12) 13)</sup>。DietzはMost likely Response waves (MLRW)を提案し、コンテナ船の波浪中垂直曲げモーメントの最大期待値の推定に関して、超過確率に対応する直接時系列計算の結果とMLRWを用いた計算の結果が良好に一致することを示した<sup>12)</sup>。

そこで、本研究では、最新の解析技術であるCFDを用いて、また、設計不規則波MLRWによる波条件を与えることで、船体構造設計で考慮する極限海象において生じ得る波浪中の垂直曲げモーメントの非線形性につき、計55隻の船舶を対象として試算を行い、傾向等につき考察した。

## 2. IACS統一規則

### 2.1 IACS UR S11

IACS UR S11 (rev. 10, 2020)及びIACS CSR B&T (2023)では、波浪中の垂直曲げモーメント（ホギング $M_{WV-Hog}$ 及びサギング $M_{WV-Sag}$ ）は次式により規定される<sup>1) 2)</sup>。

$$\begin{aligned} M_{WV-Hog} &= +190MCL^2BC_b \times 10^{-3} \text{ (kN} \cdot \text{m)} \\ M_{WV-Sag} &= -110MCL^2B(C_b + 0.7) \times 10^{-3} \text{ (kN} \cdot \text{m)} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $L$ は船の長さ、 $B$ は船幅、 $C_b$ は方形係数である。また、 $C$ は船の長さに応じて定まる係数で、 $M$ は船長方向の分布を表す係数となり、船体中央近傍では1.0である。

ホギング及びサギング間で式が異なるのは、サギングモーメントの非線形性を考慮している為である。従っ

\* 開発本部 技術研究所

\*\* 開発本部 開発部

\*1 本論文は、著者らが執筆した日本船舶海洋工学会講演会論文集 第38号 503-511頁の転載であり、公益社団法人日本船舶海洋工学会から許可を頂いたものである。著作権は公益社団法人日本船舶海洋工学会にある。

て、ホギングを仮に線形相当とすると、サギングモーメントには $110(C_b + 0.7)/(190C_b)$ の非線形影響が生じることを意味する。

## 2.2 IACS UR S11A

次に、IACS UR S11A (2015)に規定する当該モーメントのうち、船体中央断面については次式による<sup>3)</sup>。

$$M_{WV-Hog} = +1.5f_R L^3 C C_w \left(\frac{B}{L}\right)^{0.8} f_{NL-Hog} \quad (kN \cdot m) \quad (2)$$

$$M_{WV-Sag} = -1.5f_R L^3 C C_w \left(\frac{B}{L}\right)^{0.8} f_{NL-Sag} \quad (kN \cdot m)$$

$$f_{NL-Hog} = 0.3 \frac{C_b}{C_w} \sqrt{T}$$

$$f_{NL-Sag} = 4.5 \frac{1+0.2f_{Bow}}{C_w \sqrt{C_b L^{0.3}}} \quad (3)$$

ここで、 $C_w$ は水線面積係数、 $f_R$ はoperational profileを考慮した係数で0.85としている。また、 $f_{NL-Hog}$ 及び $f_{NL-Sag}$ はホギング及びサギングモーメントに対する非線形影響を考慮した係数で $C_b$ 、 $C_w$ 、 $T$ （喫水）等に依存するほか、サギングの場合は、船首部における受圧面積の差異による影響を考慮できるようにバウフレア形状を加味した係数（ $f_{Bow}$ ）を含む定式化がなされている。なお、 $f_R$ 及び $f_{NL-Hog/Sag}$ を除いた式は、 $10^{-8}$ の値に相当する。

上記に加え、船長方向分布についても規定されており、船体中央付近では式(2)に1.0を乗じた値を考慮するが、その範囲はホギングとサギングで異なるという特徴を有する。

## 3. 計算対象船

計算対象船は、計55隻で、ばら積貨物船、油タンカー、コンテナ運搬船を含む様々な船種を用いた。それぞれにつき、Full load condition及びBallast conditionについてモデル化（i.e. 計110モデル）を行った。図1に当該対象船の主要目を示す。同図における赤色のプロットはCSR適用船、青はコンテナ運搬船、残りはそれ以外の船舶で、\_slenderは $C_b < 0.7$ 、\_bluntは $C_b \geq 0.7$ を意味する。なお、同図に示す $C_b$ 、 $C_w$ 、 $T$ 等のパラメータは、2章で示した規則で定義される値（構造喫水ベースの値）ではなく、計算モデル上の値としており、以降において、Full load conditionとBallast conditionで $C_b$ 、 $C_w$ 、 $T$ は異なるものとする。

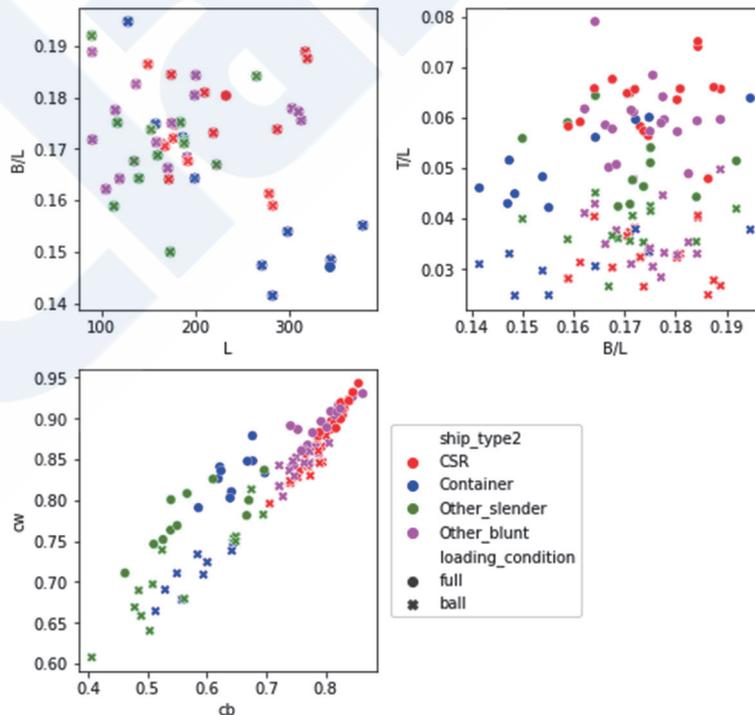


図1 Principle Particular of Target Ships (Circles: Full load condition, Crosses: Ballast condition)

## 4. 設計不規則波及びCFDによる数値計算

### 4.1 解析プログラム

後述する海象条件の同定及び設計不規則波の作成にあたって必要なデータセット（Response Amplitude Operator (RAO), 位相差）を構築するために、本会で開発した3次元グリーン関数法による線形荷重解析プログラム（3-DPM.L）<sup>14)</sup>を用いた。また、作成した設計不規則波MLRW中において、非線形影響を含む垂直曲げモーメントを再現するにあたり、商用のCFDプログラムであるSimcenter STAR-CCM+ 2210<sup>15)</sup>を用いた。

### 4.2 フロー

大波高における垂直曲げモーメントを計算するにあたり、図2に示すフローに従った。本研究では、2章で述べたIACS URで考慮している短期海象相当において生じる垂直曲げモーメントの再現に焦点を当てた。

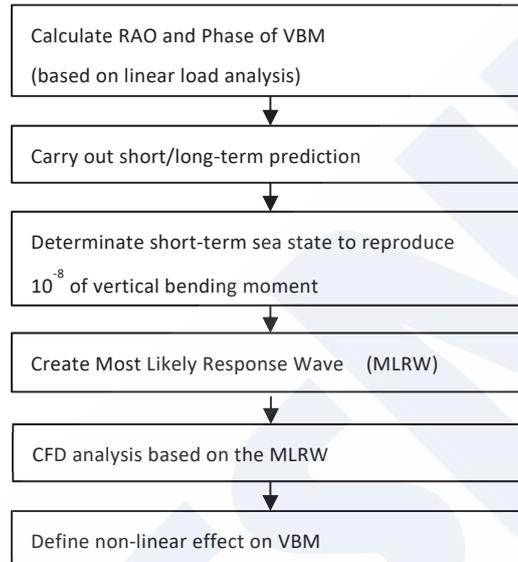


図2 Flowchart to reproduce vertical wave bending moment in extreme seas and define non-linear effect on the moment

### 4.3 考慮する海象条件等

海象条件として、IACS Recommendation No. 34 (2022)に規定する北大西洋の波スペクトル及びScatter diagramを用いた<sup>16) 17)</sup>。当該情報及び3-DPM.Lより求めた計算対象船の垂直曲げモーメントのRAOに基づき、それぞれにつき統計予測を行い $10^{-8}$ の値を求め、後述の設計不規則波におけるターゲット値と定めた。

また、RAOの計算にあたっては、船速を5 knotとした。

### 4.4 設計不規則波

3-DPM.Lによる解析から得た垂直曲げモーメントのRAO及び位相差のデータセットから、式(4)及び式(5)に従い、波 $\zeta(t)$ と垂直曲げモーメント $\eta(t)$ を対応付ける。

$$\zeta(t) = \sum_{n=1}^N a_{\zeta,n}^e [V_n \cos(-\omega_{e,n}t) + W_n \sin(-\omega_{e,n}t)] \quad (4)$$

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^N a_{\eta,n}^e [V_n \cos(-\omega_{e,n}t + \theta_{\eta,n}^e) + W_n \sin(-\omega_{e,n}t + \theta_{\eta,n}^e)] \quad (5)$$

ここで、 $a_{\zeta,n}^e$ は波の振幅、 $a_{\eta,n}^e$ は応答の振幅、 $\omega_{e,n}$ は周波数、 $\theta_{\eta,n}^e$ は応答の位相差であり、 $V_n$ 及び $W_n$ は標準正規分布に従う乱数である。添字の $e$ は波と船の出会い状態を表す。波と応答の振幅はそれぞれのスペクトル $S(\omega_{e,n})$

を用いて $\sqrt{2S(\omega_{e,n})\Delta\omega_{e,n}}$  ( $\Delta\omega_{e,n}$ :  $\omega_{e,n}$ の差分) で表される。

次に、式(6)に示す条件（時刻 $t = 0$ で応答の大きさが $a_{\eta}$ 、応答が極大または極小、応答の瞬間的な周波数が $\omega_{\eta}$ ）を満足する応答を生じさせる波Conditional Random Response Wave (CRRW)の集合を求め、MLRWを当該集合の平均で特徴づける。

$$\zeta(t) |_{a_\eta, \omega_\eta} \equiv \hat{E} \left[ \zeta(t) \mid \eta(0) = a_\eta, \dot{\eta}(0) = 0, \frac{\hat{\eta}(0)}{\eta(0)} = \omega_\eta \right] \quad (6)$$

ここで、 $a_\eta$ はターゲットとする垂直曲げモーメントの大きさ、 $\omega_\eta$ は当該モーメントの瞬間的な周波数、 $\hat{E}[\cdot]$ は条件付き平均値、 $\dot{\eta}(t)$ は応答の時間微分、 $\hat{\eta}(t)$ は応答のHilbert変換を意味する。 $a_\eta$ は船体中央断面の値とした。 $\omega_\eta$ は $m_1/m_0$  ( $m_n$ : 応答スペクトルの $n$ 次のモーメント) で与えた。これは $m_n$ が波スペクトルのモーメントである場合、平均波角周波数( $2\pi/T_{m01}$ )に相当する量である<sup>18)</sup>。このように $\omega_\eta$ を与えた場合のCRRW及びMLRWの解析的な表現が知られている<sup>12) 19) 20)</sup>。全ての対象船において、MLRWの波向きは向波(180度)に固定した。

例として、図3に $L = \text{abt. } 290\text{m}$ のばら積貨物船(以降、BC-10)(Full load condition)のホギングモーメントを対象に、対応づけた波 $\zeta(t)$ (同図上)と垂直曲げモーメント $\eta(t)$ (同図下)を示す。同図の上において、灰色線はCRRW25波を表し、緑線はその内の1波を表す。赤線は25波の平均である。同図ではCRRWの数を制限したため赤線(CRRWの平均)と青線(MLRW)が乖離しているが、波の数を十分に増やすと赤線は青線に収束する。

得られるMLRWは $t = 0$ で船体中央に波高のピークが存在するものである。そのため、MLRWの波スペクトルの素成波の各位相につき、出会い波数を用いて調整し、CFDの計算が平水状態から開始されるようにした。また、ホギング及びサギングモーメントが最大となるMLRWは波高の正負を入れ替えたものとなり、CFDではそれぞれのMLRWに対する2通りの計算を行った。

#### 4.5 CFDにおける設定

流体は非圧縮性とし、流れの支配方程式Reynolds-averaged Navier-Stokes equation (RANS)を有限体積法により離散化した。移流項は二次精度風上差分スキームで離散化し、時間発展には後退差分スキームを使用した。離散化方程式の解法にはSemi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation (SIMPLE)アルゴリズムを用いた。

空気と海水の気液二相を考慮し、気液の界面はVolume of Fluid (VOF)法をベースとしたHigh Resolution Interface Capture (HRIC)<sup>21)</sup>を用いて求めた。

船体は剛体とし、重心における並進及び回転に関する運動方程式を解くことで船体運動量を求めた。運動自由度はheave及びpitch運動のみを考慮し、それ以外は固定した。船体運動に伴う船体周辺の流体領域の節点移動はモーフィングを用いて行い、節点の移動量はRadial basis functions (RBF)を基に決定した。

流入条件としてMLRWを与えた。計算領域の境界における波の反射影響を防ぐためにEuler overlay method (EOM)<sup>22)</sup>を用いた。

多種多様な船型に対する計算を統一的にを行うため、計算領域の大きさ、メッシュサイズ、タイムステップ等は船の主要目( $L, B, T, D$ (型深さ))や海象条件( $H_s$ (有義波高),  $T_z$ (ゼロアップクロス波周期))でパラメータ付けた。

現象の対称性を仮定して、船の半幅側のみをモデル化した。総セル数は100~120万程度とした。計算は平水状態から開始し、MLRWの波高のピークが船体を通り過ぎるまでの実時間50~70秒程度行った。

当該設定は筆者らの一人が行った研究<sup>8)</sup>に基づいており、解析結果の妥当性は確認されている。

図4にBC-10 (Full load condition)のホギングモーメントの計算について、初期時刻における波高分布を船のデッキ方向から見た様子を示す。赤は波の山、青は波の谷、緑は平水であることを表す。中央の白色領域は船を表す。なお、同図は両舷対称表示したものであり、上述の通り、計算は半幅側のみに対して行った。

同様に、図5に、初期時刻におけるVolume of Fluid (VOF)値の分布を、船首近傍のセンターライン断面に関して船幅方向から見た様子をメッシュ図と共に示す。水色が海水、白色は空気を表す。

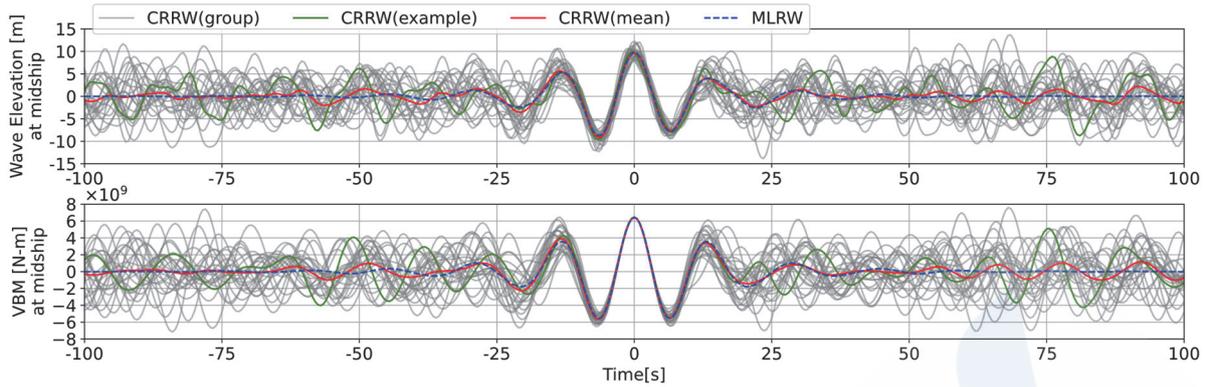


図3 An Example of wave elevation and vertical bending moment in CRRW and MLRW (Bulk carrier, BC-10, Full load condition)

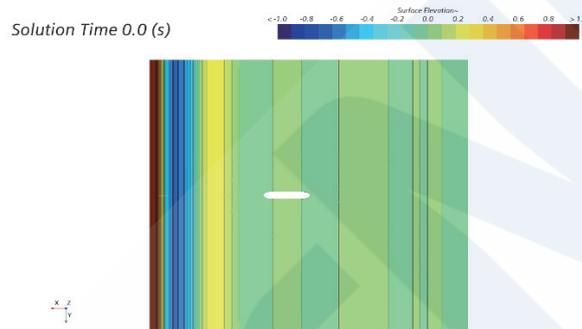


図4 Wave height distribution of BC-10 at initial condition (top view)

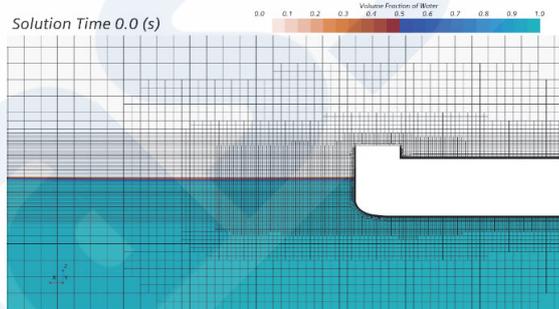


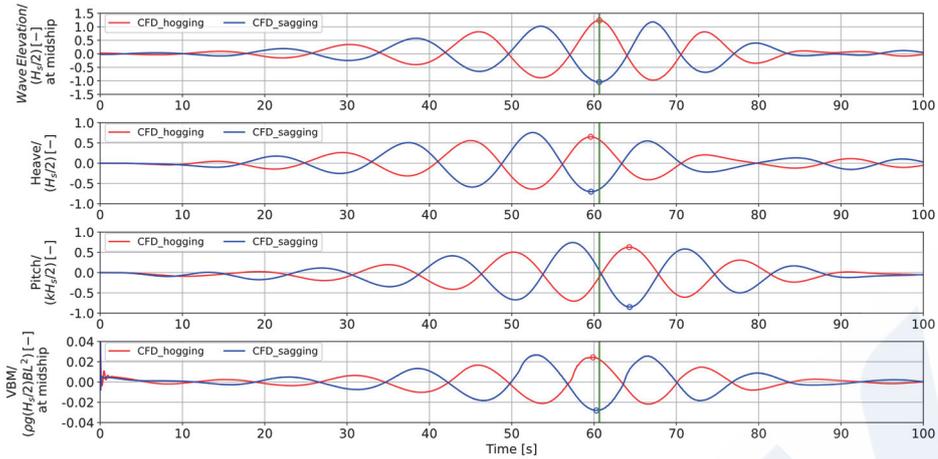
図5 VOF distribution of BC-10 with mesh diagram at initial condition (side view, near the bow)

## 5. 計算結果

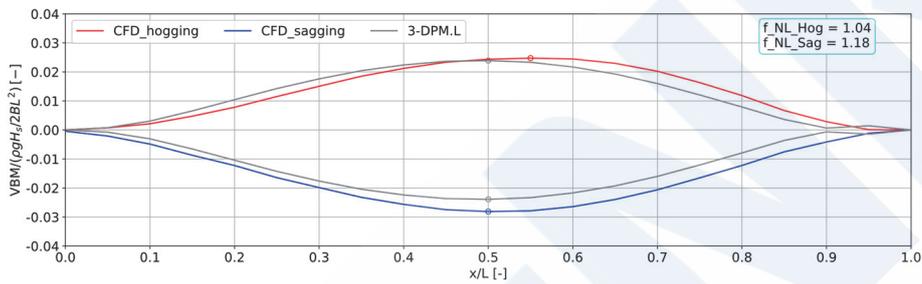
### 5.1 垂直曲げモーメントの時系列, 分布等

CFDによる解析結果の一例として、BC-10を対象に、図6にFull load conditionにおける結果を、図7にBallast conditionにおける結果を示す。それぞれの図の(a)において、上から順に、船体中央における波高、heave運動、pitch運動、船体中央断面における垂直曲げモーメントの時系列を示す。赤色の線がホギングモーメントをターゲットとした場合で、青色の線がサギングモーメントをターゲットにした場合の解析結果を意味する。この例においては、 $t = 60$  (s)近傍において、最大または最小の垂直曲げモーメントが生じており、それぞれの時系列において、最大値(または最小値)を示した時刻を丸で囲っている。

また、同図(b)では、垂直曲げモーメントの船長方向分布をそれぞれ示している。ここで、各断面におけるモーメントの値はそれぞれの時系列における最大値(または最小値)である。また、同図中における灰色の線は、線形理論で得られる垂直曲げモーメントの分布を意味しており、これらの差が大波高中において垂直曲げモーメントに生じる非線形影響とみなすことができる。

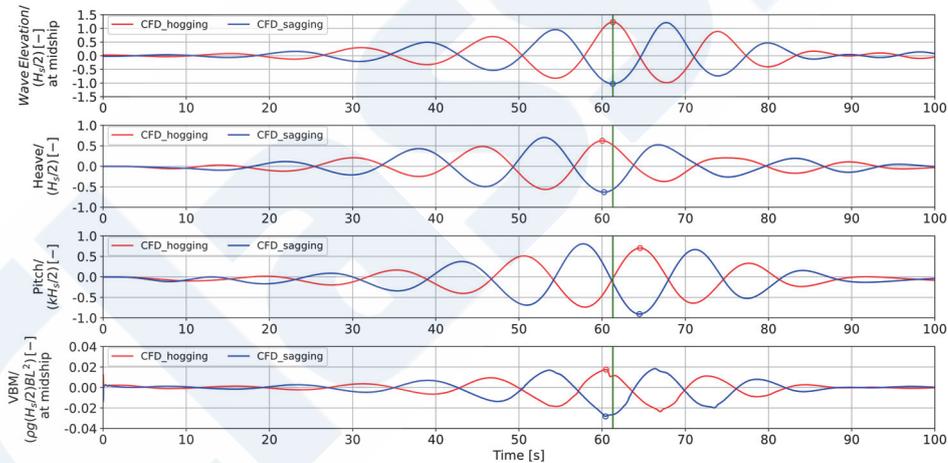


(a) CFD+MLRW, Time history of wave elevation, heave, pitch and vertical bending moment

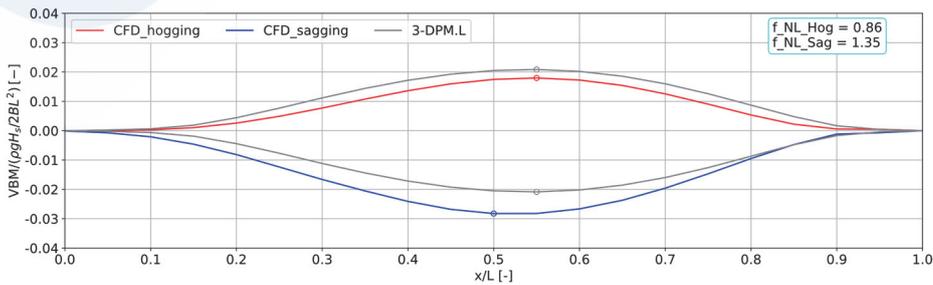


(b) CFD+MLRW, Vertical bending moment distribution along the ship length

図6 An Example of CFD analysis result (Bulk carrier, BC-10, Full load condition)



(a) CFD+MLRW, Time history of wave elevation, heave, pitch and vertical bending moment



(b) CFD+MLRW, Vertical bending moment distribution along the ship length

図7 An Example of CFD analysis result (Bulk carrier, BC-10, Ballast condition)

55隻（110モデル）のシリーズ計算結果を横並びでみたところ、同様のスペックを有する対象船であっても、サギングモーメントの傾向が著しく異なるケースが見られた。分析した結果、青波荷重による影響が疑われたことから、BC-10 (Full load condition)をベースに、図8に示す3種類のforecastleの形状を用いた感度解析を行い、垂直曲げモーメントの変化を観察した。その結果を図9に示す。また、図10に、当該解析結果における青波の状態を可視化したものを示す。

同図の灰色の線は、決定した短期海象中における、線形理論に基づく垂直曲げモーメントの値と超過確率の関係を意味する。また、赤、青、緑のプロットは、CFD及びMLRWにより得た垂直曲げモーメントの値を意味し、図8の色と対応している。このことから、青波が強く作用するモデルである程、サギングモーメントを抑制することが分かり、また、ホギングに対しては（forecastle部は暴露状態に必ず青波が作用しない為、自明ではあるが）影響を与えないことも確認できた。



図8 Side view with assumed forecastle shape model based on BC-10

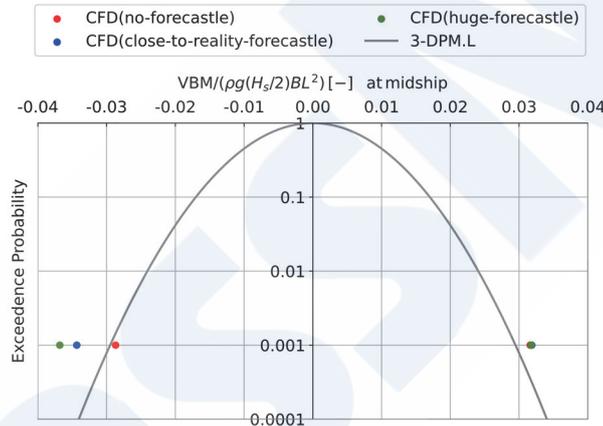


図9 The Effect of with/without forecastle on vertical wave bending moment at midship (Bulk carrier, BC-10, Full load condition)

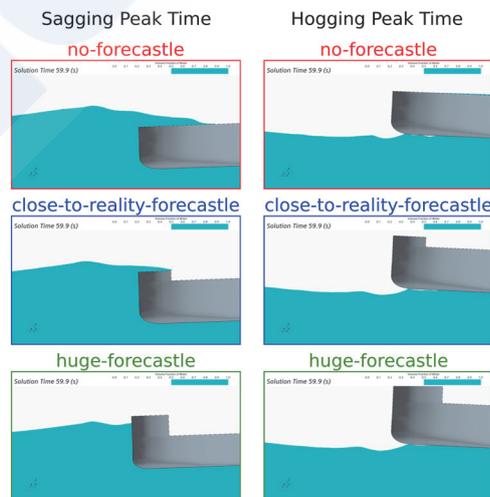


図10 Comparison of green water on deck at the time of maximum hogging and minimum sagging moment. (Bulk carrier, BC-10, Full load condition)

この考察から、本研究では、それぞれのモデルにつき、実船に近いforecastleをモデル化した上で計算を行うことで統一した。喫水と乾舷によっては、青波が発生するケースはあったものの、その程度は小さいことが目視で確認でき、また、後述する主要目との比較検討等において、それらのケースがほかと異なる傾向を導く程のものではなかったことから、以降に示す分析においてhuge-forecastleのような仮想モデルは採用する必要は無いと判断した。

### 5.2 非線形影響係数と主要目に対する感度

本研究では、大波高中の垂直曲げモーメントにおける非線形影響を次式のように定義し、以降の考察を行った。

$$f_{NL-Hog} \equiv \frac{M_{WV-Hog-max}^{CFD}}{M_{WV-Hog-max}^{linear}} = \frac{\max_{0 \leq x/L \leq 1} M_{WV-Hog}^{CFD}(x/L)}{\max_{0 \leq x/L \leq 1} M_{WV-Hog}^{linear}(x/L)} \quad (7)$$

$$f_{NL-Sag} \equiv \frac{M_{WV-Sag-min}^{CFD}}{M_{WV-Sag-min}^{linear}} = \frac{\min_{0 \leq x/L \leq 1} M_{WV-Sag}^{CFD}(x/L)}{\min_{0 \leq x/L \leq 1} M_{WV-Sag}^{linear}(x/L)}$$

ここで、 $M_{WV-Hog-max}^{CFD}$ はCFDにより得られた垂直曲げモーメント（ホギング）の全横断面における最大値で、 $M_{WV-Hog-max}^{linear}$ は線形理論で得られる当該モーメントの全横断面における最大値を意味する。なお、最大値を示す横断面はいずれのケースにおいても船体中央近傍ではあるものの、両方で必ずしも一致しない。また、添字がminの場合は、サギングモーメント（最小値）を意味する。

図11に、ホギングに対する非線形影響係数 $f_{NL-Hog}$ と、船舶の主要目との関係を示す。また、図12に、サギングに対する非線形影響係数 $f_{NL-Sag}$ と、船舶の主要目との関係を示す。これらの図より、船の長さ $L$ 、船の幅 $B$ に対する感度は低く、方形係数 $C_b$ 、水線面積係数 $C_w$ に対する傾向が高いことが示唆された。また、ホギングモーメントにおいては、喫水 $T$ による感度を有することも認められた。IACS UR S11Aのサギングモーメントに対する非線形影響係数の中に含まれる係数 $f_{Bow}$ （バウフレア形状を考慮した係数）については、コンテナ運搬船においては一定の傾向が認められるものの（図12の青色のプロット参照）、それ以外の船舶に対しては一定の傾向が認められなかった。

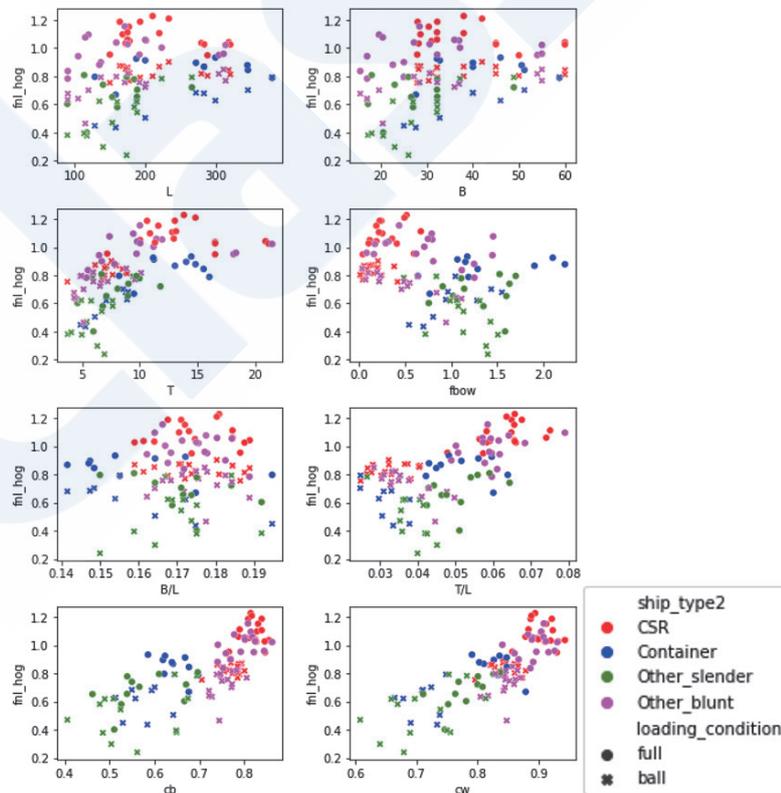


図11 Sensitivity of non-linear effect coefficient to principal particulars of ships, hogging moment

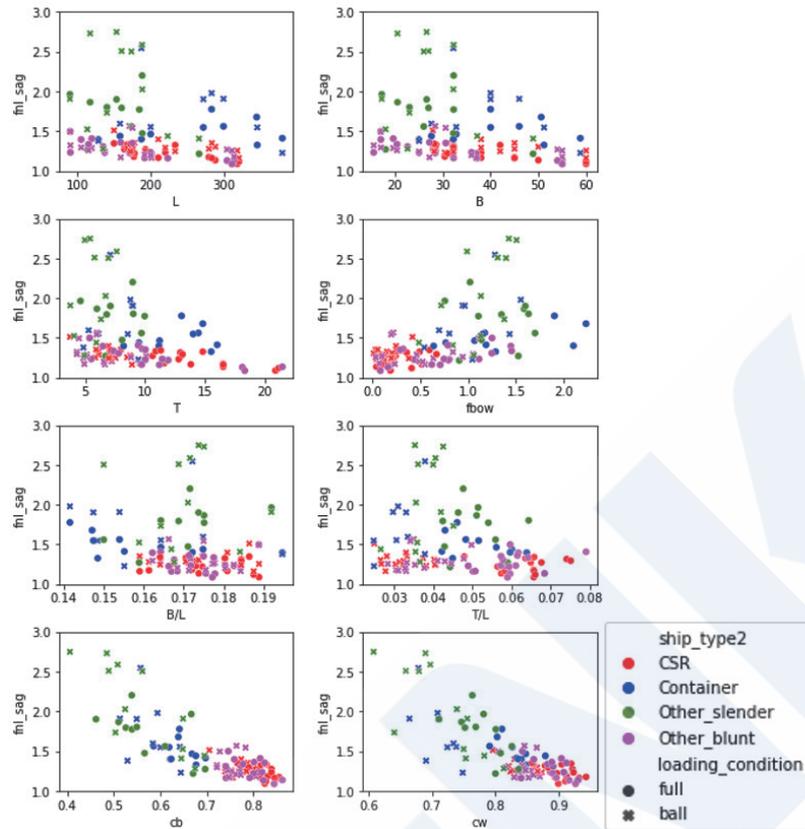


図12 Sensitivity of non-linear effect coefficient to principal particulars of ships, sagging moment

### 5.3 ホギングとサギング間の関係

図13に、 $f_{NL-Hog}$ と $f_{NL-sag}$ の関係について示す。同図より、肥大船における非線形影響は相対的に小さく、Full load conditionの場合、ホギングにおいて1.0前後の値が、サギングにおいて1.2前後の値が得られた。また、Ballast conditionの場合、ホギングにおいて0.8前後の値を示し、サギングにおいてはFull load conditionと同程度もしくは微増となる結果を得た。また、コンテナ船を含む瘦型船においては、肥大船と比較して、ホギングにおける非線形影響は小さくなり、サギングにおける当該影響は相対的に大きくなることが確認された。

また、参考として、図14に、IACSが公開しているUR S11Aに対するTechnical background document<sup>23)</sup>に記載されている非線形影響係数に関する計算結果と、本研究の結果を同じフォーマットで図示して比較したものを示す。

図14(b)に示すデータはCFDではなく、非線形性を考慮した3次元グリーン関数法等に基づくプログラムによる結果であるが、マクロの傾向は本研究結果と大差ないことがうかがえる。

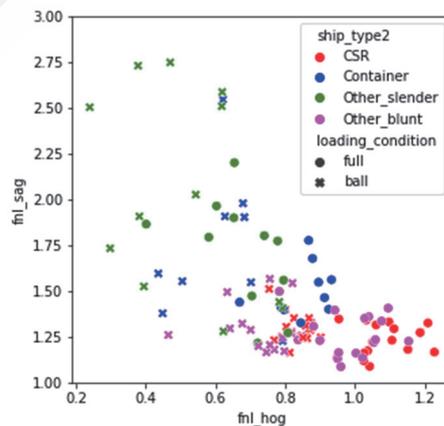
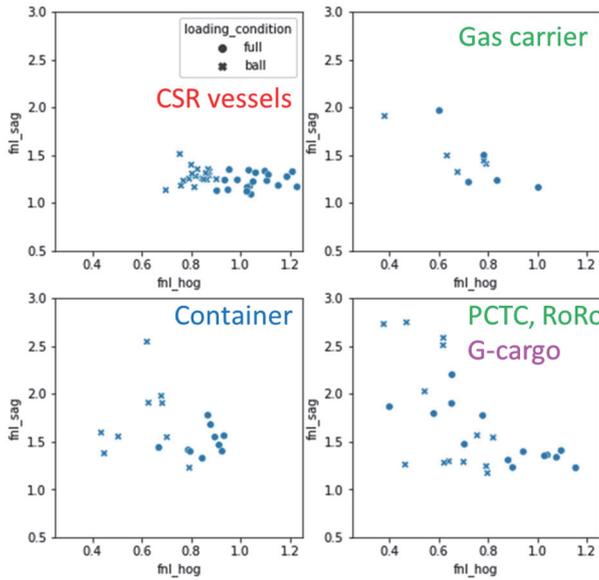
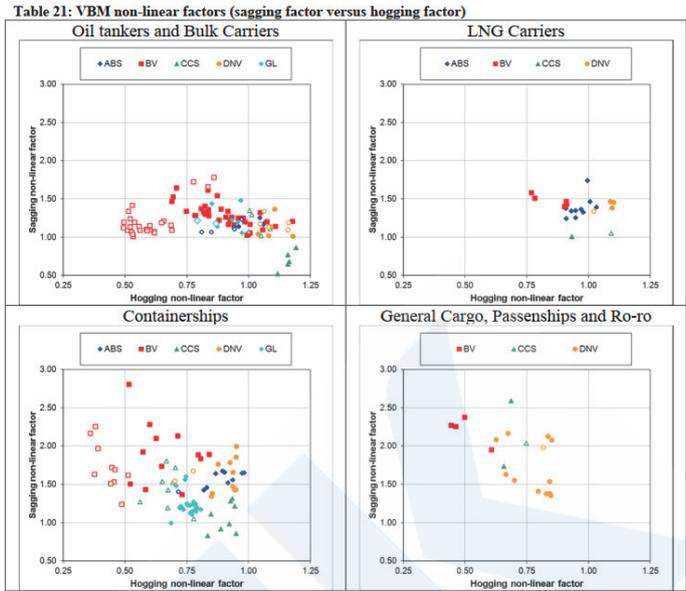


図13 Relationship between  $f_{NL-Hog}$  and  $f_{NL-sag}$



(a) Based on CFD+MLRW (same as Fig. 9)



(b) According to an IACS document

図14 Comparison with a past investigation regarding relationship between  $f_{NL-Hog}$  and  $f_{NL-Sag}$

最後に、図15に、当該URに規定する非線形影響係数と本研究の結果に基づく非線形影響係数の関係を参考として示す。なお、3章で述べた通り、 $C_b$ 、 $C_w$ 、 $T$ の値は積付状態における値を用いており、同図の横軸（つまり、URの値）も同様としている。また、当該URに定める上下限值も同図では考慮していない。従って、当該URと厳密に比較したものではないが、同図より双方は概ね良い相関を有していることがうかがえる。ストリップ法や3次元グリーン関数法等のポテンシャル理論をベースに非線形性を考慮したコードは、一般に、非線形影響に対して支配的とされているフルードクリロフ力の非線形性及び復原項の非線形性を考慮したものが多くと推測されることから、同図が示す相関は、それら2つの成分以外は、垂直曲げモーメントの非線形性に対する影響が小さいことを示唆している可能性がある。

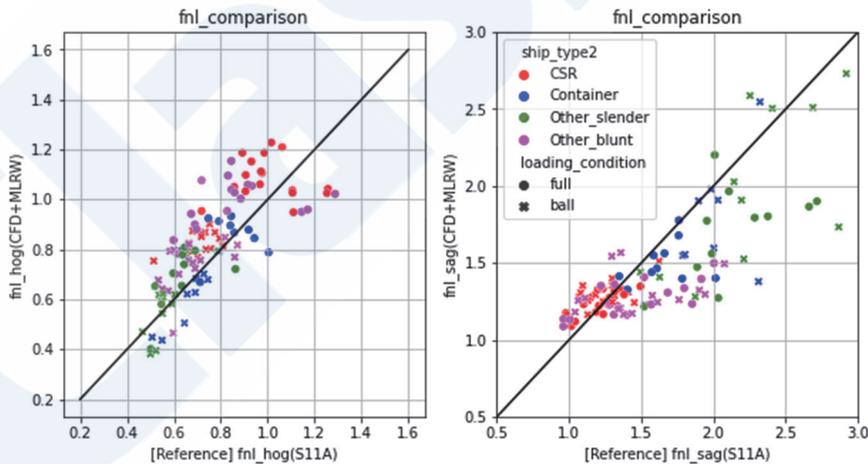


図15 Comparison with non-linear factor specified in IACS UR S11A (as reference), (left): hogging, (right): sagging.

## 6. 結言

本研究では、最新の解析技術であるCFDを用いて、また、設計不規則波による波条件を与えることで、船体構造設計で考慮する極限海象において生じ得る波浪中の垂直曲げモーメントの非線形性につき、計55隻の船舶を対象として試算を行った。

試算の過程で、青波荷重がサギングモーメントを抑制する現象が確認されたことから、実船に近いforecastle

形状に基づいたモデル化を行うことが現実の応答を試算するにあたって肝要と判断し、計算モデルをそのように統一した。

定義した非線形影響係数に基づき、ホギングとサギングモーメントそれぞれにおいて生じる非線形影響係数について分析した。肥大船及び瘦型船における傾向の差異や、船舶の主要目に対する感度を観察した。それぞれについて $C_b$ 、 $C_w$ に対する傾向が高いことのほか、既存規則（IACS UR S11A）に規定する係数とマクロの傾向は良い相関があること等を確認した。

なお、本研究はあくまで試算であり、垂直曲げモーメントに生じる非線形性について網羅的に分析したものではない。適切な構造設計のための非線形影響係数を定めるにあたっては、更なる検討が必要と考える。例えば、今回計算条件に用いた短期海象以外で生じる非線形影響についての検討、追波における非線形影響の考慮、MLRWのような限られた時間領域での数値計算だけでなく短期海象のFull simulation（約1000波の再現）による検証といったことが挙げられる。そのような検討の結果次第では、本研究で定義した非線形影響係数につき、異なる定義が適切となる可能性もある。また、本研究では検討対象外とした線形理論に対応する項も加味した総合的な検討も必要とされる。

### 参考文献

- 1) IACS: Unified Requirement S11 Longitudinal Strength Standard, 2020.
- 2) IACS: Common Structure Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers, 2023.
- 3) IACS: Unified Requirements S11A Longitudinal Strength Standard for Container Ship, 2015.
- 4) ITTC: Recommended Procedures and Guidelines Verification and Validation of Linear and Weakly Nonlinear Seakeeping Computer Codes, 2017.
- 5) ISSC: Committee I.2 Loads. 18th INTERNATIONAL SHIP AND OFFSHORE STRUCTURES CONGRESS, 2012.
- 6) Kim, S. P.: CFD as a seakeeping tool for ship design. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Vol. 3(1), pp.65–71, 2011.
- 7) Gatin, I., Vladimir, N., Malenica, Š., & Jasak, H.: Green sea loads in irregular waves with Finite Volume method. Ocean Engineering, Vol. 171, 2019.
- 8) J. Parunov, T. Badalotti, Q. Feng, X. Gu, K. Iijima, N. Ma, W. Qiu, S. Wang, X. Wang, P. Yang, Y. Yoshida, Z. Zhang, & C. Guedes Soares: Benchmark on the prediction of whipping response of a warship model in regular waves. Marine Structures, Vol. 94, 2024.
- 9) H. Mano, & H. Ueno: A Simplified Estimation of Long-Term Distributions of Various Random Variables Induced by Ocean Waves, and a Study on the Influences of Operating Conditions on the Extremes. Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 1972(132), pp.235–247, 1972.
- 10) T. Fukasawa: On the Design Wave for Collapse Strength of a Ship, 9th Technical Exchange and Advisory Meeting, TEAM'95, pp.187-201, 1995.
- 11) Adegeest, L.J.M., Braathen, A., & Lseth, R.M.: Use of Nonlinear Sea Loads simulations in desing of Ships, Proceeding of 7<sup>th</sup> PRADS, pp.53-58, 1998.
- 12) Dietz, JS.: Application of conditional waves as critical episodes for extreme loads on Marine Structures, Ph.D. thesis, Department of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 2004.
- 13) J. Juncher Jensen: Extreme value predictions and critical wave episodes for marine structures by FORM, Ships and Offshore Structures, 3:4, pp.325-333, 2008
- 14) Sugimoto, K., Fukumoto, Y., Matsuwaki J., Akamatsu, T., Ashida, S., & Onishi, K.: Non linear effect on wave induced loads for hull structural design, bulk carrier, container carrier, vehicles carrier, Proceeding of 39th international conference on ocean, offshore and arctic Engineering, 2020.
- 15) Siemens Digital Industries Software: Simcenter Star-ccm+ user guide version 2210, 2022.
- 16) IACS: Recommendation No.34, 2022.
- 17) Håvard, A., Guillaume, H., Michael, J., & Tingyao, Z.: Update of Wave Statistics Standards for

Classification Rules, The proceeding of 9<sup>th</sup> International Conference on Marine Structures, 2023.

- 18) Det Norske Veritas: ENVIRONMENTAL CONDITIONS AND ENVIRONMENTAL LOADS (Recommended Practice DNV-RP-C205), 2007.
- 19) Drummen, I., Wu, M. K., & Moan, T.: Numerical and experimental investigations into the application of response conditioned waves for long-term nonlinear analyses. *Marine Structures*, Vol. 22(3), pp.576–593, 2009.
- 20) Quon, E., Platt, A., Yu, Y.-H., & Lawson, M.: Application of the Most Likely Extreme Response Method for Wave Energy Converters. *International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, 2016.
- 21) Muzaferija, S., & Peric, M.: Computation of free surface flows using interface-tracking and interface-capturing methods, Chap. 2 in O. Mahrenholtz and M. Markiewicz (eds.), *Nonlinear Water Wave Interaction*, Computational Mechanics Publications, WIT Press, Southampton, 1999.
- 22) J. Kim, J. O’Sullivan, & A. Read: Ringing analysis of a vertical cylinder by Euler overlay method, *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE2012*, Vol.4, pp.855-866, 2012.
- 23) IACS: Technical Background of Unified Requirements S11A Longitudinal Strength Standard for Container Ship, 2015.