## 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 一規則波中船体応答—

松井 貞興\*,村上 睦尚\*,岡 正義\*

## Validation of the Nonlinear Wave Load Analysis Program NMRIW-II

## in Comparison with Experiments

- Ship Responses in Regular Wave -

by

# Sadaoki MATSUI, Chikahisa MURAKAMI

and Masayoshi OKA

#### Abstract

In order to validate the applicability of the computational code for nonlinear wave loads and hull girder responses, NMRIW-II, which has been newly developed as a practical tool for ship structural design, the authors conducted tank tests in regular waves and the results are compared with calculated ones. The tank tests were carried out in comprehensive regular wave conditions; a number of combinations of ship heading, ship speed, wave height and wave length. The comparison was made in the following items of ship response; 6-DOFs motion, vertical and horizontal accelerations, vertical bending moment, horizontal bending moment and pressure fluctuation under water as well as impact pressure at bow-flare. The applicability and the future improvement of NMRIW-II was discussed based on the comparison results in this paper, however, it is noteworthy that the flexible vibration effects on the vertical bending moment was validated as well as the wave frequency components.

<sup>\*</sup> 構造安全評価系 原稿受付 平成 29 年 10 月 31 日 審 査 日 平成 29 年 12 月 21 日

1. 緒言	83
2. NMRIW-II によるシミュレーション	83
2.1 概要	83
2.2 運動方程式	
2.3 変位の展開モード	
2.4 非線形性の取り扱い	
2.4.1 衝撃力及び衝撃圧力	
2.4.2 船体形状の非線形性	85
2.4.3 横揺れ減衰力	85
3. 模型試験	86
3.1 模型試験の概要	86
3.2 対象船	86
3.3 収録装置	86
3.4 計測項目	86
3.5 試験条件	86
3.6 計測装置	
3.6.1 バックボーン模型	88
3.6.2 捩りモーメントの計測	88
3.6.3 振動特性	89
4. 波浪中応答の比較検証	
4.1 比較項目	
4.2 無次元振幅の比較	
4.2.1 時系列データの処理	
4.2.2 全体の傾向	
4.3 縦運動及び垂直加速度	
4.4 横運動および水平加速度	
4.5 縦曲げモーメント	
4.5.1 出会い波変動成分	
4.5.2 弹性振動成分	
4.6 水平曲げモーメント	
4.7 捩りモーメント	106
4.8 水圧	106
5. 結言	
謝辞	
参考文献	109
6. Appendix 規則波中応答の比較	
6.1 周波数応答関数	109
6.2 縦曲げモーメントの高周波成分の標準偏差	

#### 1. 緒言

本報告は、バックボーンを有する弾性模型船を用いた波浪中曳航試験結果との比較を通して、非線形波浪荷重 解析プログラム NMRIW-II によるシミュレーションの適用性の検証を行うことを目的としている. NMRIW-II は 構造設計に用いられる事を目的に作成された波浪中応答解析プログラムであり、スラミング及びホイッピングを 含めた非線形ストリップ法に基づいた6自由度運動のシミュレーションが可能な時間領域のプログラムである.

近年,船体の大型化に伴い,特に船首部に大きなフレアを有するコンテナ船において,ホイッピング等の弾性 振動による慣性力が構造にとって無視できない要因として認識されるようになり,荒天中のスラミング及びホ イッピングに関する研究が盛んに行われてきている.ホイッピングはスラミングによって引き起こされる弾性過 渡応答であるため,再現には時間領域の解析プログラムを必要とする.ところが,時間領域の計算では,斜め追 い波などで計算の安定性が問題になることが多く,またスラミングは向い波で顕著になるため,従来のホイッピ ングの検討は主に向い波もしくは斜め向い波に限られていた.しかしながら,実際の構造設計において,ラッキ ング変形やラッシング荷重など,横波や斜め追い波で特に問題となる現象も多く存在し,総合的な構造設計の観 点からは,あらゆる海象下の応答を想定する必要がある.即ち,船殻構造設計のための実用的な波浪中荷重推定 ツールとしては,スラミングやホイッピング等の非線形現象を考慮した上で,さらに全波向きにおける6自由度 運動を解析することができるプログラムであることが求められる.

そこで本報告では、非線形波浪荷重解析プログラム NMRIW-II の検証を行うため、コンテナ船の分割型バック ボーン模型を用いて、あらゆる波向き、波長、波高の規則波中で、代表的な船速で実施された実験のデータによっ て、船体の6自由度運動、断面力(縦・水平曲げモーメント、捩りモーメント)、加速度、水圧の比較検証を、ス ラミング及びホイッピング等の非線形現象なども含め、包括的に行った.本報告のように網羅的な条件で実験結 果が示され、またそれを用いてプログラムの検証が行われた例は少ない.以下に、NMRIW-II によるシミュレー ションの内容、模型試験の実施内容、及び両者の比較を通じた NMRIW-II によるシミュレーションの妥当性の検 証の結果を報告する.

#### 2. NMRIW-II によるシミュレーション

本章では、非線形波浪荷重解析プログラム NMRIW-II の計算手法の概要を示す. NMRIW-II の具体的な理論的 背景については、別報告<sup>1)</sup>を参照されたい.

#### 2.1 概要

NMRIW-II は、構造解析に用いる事を目的に開発された非線形ストリップ法に基づく時間領域解析プログラム であり、あらゆる波向きの規則波に加え、素成波の重ね合せで表現できる任意の不規則波中の6自由度船体応答 解析が可能である.また、荒天中に生じる船底露出、デッキの冠水、スラミングなど、船体構造にとって重要と なる非線形影響を考慮することができる.加えて、軸方向変位、縦曲げ、水平曲げ、捩りの変形を考慮すること で、弾性過渡応答であるホイッピングを再現することが可能となっている.また、必要に応じて断面力や水圧分 布、加速度を出力することができ、これらにも弾性振動に起因する成分が考慮されている.

図 2.1.1 に、NMRIW-II の座標系及び運動と断面力の向きを示す.  $M_x, M_y, M_z$ はそれぞれ捩りモーメント、縦曲 げモーメント、水平曲げモーメントを示す.



図 2.1.1 座標系及び運動と断面力の向きの定義

#### 2.2 運動方程式

NMRIW-II で計算されている運動方程式は次式のとおりである.

 $([M] + [A])\{\dot{x}\} + ([D] + [B])\{\dot{x}\} + [B^{nl}]\{\dot{x}|\dot{x}|\} + ([K] + [C])\{x\} = \{F^{G}\} + \{F^{W}\} + \{F^{S}\} + \{F^{I}\}$ (2.1)

ここに、{*x*}は運動変位ベクトル、[*M*],[*D*],[*K*]はそれぞれ質量マトリクス、構造減衰力係数マトリクス、構造剛 性マトリクス、[*A*],[*B*],[*B*<sup>n1</sup>],[*C*]はそれぞれ付加質量マトリクス、造波減衰力係数マトリクス、非線形減衰力係 数マトリクス、radiation 流体力の前進速度影響に起因する復原力係数マトリクス、{*F*<sup>G</sup>},{*F*<sup>W</sup>},{*F*<sup>S</sup>},{*F*<sup>1</sup>}はそれぞ れ重力,波力, scattering 流体力、衝撃力ベクトルである. radiation 流体力係数マトリクス及び scattering 流体力は、 船体の各断面で2次元境界要素法(所謂 close-fit 法)によって求めた2次元流体力を用いて定義される. なお、 浮力は右辺の波力*F<sup>W</sup>*の中で考慮されている. 運動変位は固有モード展開法によって一般化されており、剛体の6 自由度に加え、船体梁の軸変形、縦曲げ変形、水平曲げ変形、捩り変形は、それぞれ複数の任意形状の固有モー ドの重ね合せとして考慮される. 各船体梁係数マトリクス[*M*],[*D*],[*K*]及び各 radiation 流体力係数マトリクス [*A*],[*B*],[*C*]は Galerkin 法によって一般化された運動変位に対応する形式で定義されている.

なお、本報告では、NMRIW-II による波浪中シミュレーションにおいて、surgeの計算は行っているが、radiation 流体力係数の surge 運動と他の運動との連成は考慮しておらず、かつ、入射波と船体との相対位置の決定に surge 変位は考慮していない.

#### 2.3 変位の展開モード

本報告においては, flexible mode は縦曲げ変形のみを考慮している. 縦曲げの固有モード $w_j(x)$  (j = 2,3,4)として,以下の一様梁の2,3,4節自由振動モードを用いる.

$$w_j = \cos\lambda_j (x - x_a) + \cosh\lambda_j (x - x_a) - \frac{\left(\cos\lambda_j L_a - \cosh\lambda_j L_a\right)}{\left(\sinh\lambda_j L_a - \sinh\lambda_j L_a\right)} \left\{\sin\lambda_j (x - x_a) + \sinh\lambda_j (x - x_a)\right\}$$
(2.2)

ただし、 $L_a$ は船の全長 (Loa)、 $x_a$ は船尾端のx座標、 $\lambda_2 L_a = 4.73$ 、 $\lambda_3 L_a = 7.85$ 、 $\lambda_4 L_a = 10.97$ である.

#### 2.4 非線形性の取り扱い

#### 2.4.1 衝撃力及び衝撃圧力

衝撃力は運動量理論に基づき,船体のx = xの位置の断面に作用する単位長さあたりの衝撃力 $f^{I}(x)$ を

$$f^{\rm I} = -\frac{\partial a^{\infty}}{\partial t} \frac{{\rm D}w^{\rm rel}}{{\rm D}t}$$
(2.3)

と定義する.ただし、 $a^{\infty}$ は周波数無限大のときの2次元付加質量、 $w^{rel}$ は船体と波面の相対鉛直変位、D/Dtは実質微分を表す.また、衝撃圧力は

84

(298)

$$p^{\rm I} = -\rho \frac{\partial \varphi^{\infty}}{\partial t} \frac{{\rm D}w^{\rm rel}}{{\rm D}t}$$
(2.4)

と表す.ここで、 $\varphi^{\infty}$ は周波数無限大のときの単位速度ポテンシャルで、以下のy-z面内の2次元境界値問題を解く事により得られる.

$$\begin{cases} \Delta \varphi^{\infty} = 0 & \text{for } z \ge 0\\ \varphi^{\infty} = 0 & \text{on } z = 0\\ \frac{\partial \varphi^{\infty}}{\partial n} = n_z & \text{on } S_H\\ \varphi^{\infty} \to 0 & \text{as } y, z \to \pm \infty \end{cases}$$
(2.5)

但し、 $S_H, n_z$ はそれぞれ船体表面及びその外向き法線ベクトルのz方向成分を意味する.以上の境界値問題を、時系列計算に先んじて各断面であらゆる喫水及び横傾斜角の没水形状について解き、単位速度ポテンシャル $\varphi^{\infty}$ 及び その積分値である付加質量 $a^{\infty}$ のテーブルを用意しておく.その上で、時系列計算の各時間ステップにおいて、船 体と波面の相対変位をパラメータとしてテーブルから内挿することで $a^{\infty}, \varphi^{\infty}$ の時間変動を表現し、式(2.3)及び (2.4)によって衝撃力及び衝撃圧力を決定することができる.

#### 2.4.2 船体形状の非線形性

運動方程式(2.1)の流体力のうち,波力,即ち浮力とFroude-Krylov力の和に関しては,各時間ステップにおいて 船体と波面の相対位置を計算し,浸水要素に対して圧力を積分することで厳密に計算している.一方で,radiation 流体力及び scattering 流体力は,時系列計算に先んじて各断面であらゆる喫水及び横傾斜角で求め, radiation/scattering 流体力テーブルとして用意しておく.その上で,時系列計算の各時間ステップにおいて,船体 と波面の相対変位をパラメータとしてテーブルから内挿することで,大波高中の流体力の非線形性を考慮している.

#### 2.4.3 横揺れ減衰力

相対的に粘性の影響が大きくなる roll に起因する radiation 流体力に対しては, free roll から求められる減滅曲線の線形係数a及び2次の係数b[1/deg]を用いて特別に考慮している.即ち, roll 角を $\theta$ とすると roll の減衰力 $F_{rd}$ は

$$F_{rd} = -B_{44}\dot{\theta} - B_{44}^{\mathrm{nl}}\dot{\theta}\left|\dot{\theta}\right| \tag{2.6}$$

と与えられる. 但し,

$$\begin{cases} B_{44} = \frac{4(A_{44}^G + J_{xx}^G)a}{T_r} \\ B_{44}^{nl} = \frac{180}{\pi} \frac{3(A_{44}^G + J_{xx}^G)b}{4} \end{cases}$$
(2.7)

である.ここで, A<sup>G</sup><sub>44</sub>, J<sup>G</sup><sub>xx</sub>は重心周りのroll付加慣性モーメント及び重心を通る軸周りのroll慣性モーメント, T<sub>r</sub>は横 揺れ固有周期である.式(2.7)はそれぞれ運動方程式(2.1)の左辺第2項の減衰力係数マトリクス,第3項の非線形 減衰力係数マトリクスで考慮される.

## 3. 模型試験

本章では、NMRIW-IIの検証に用いる模型試験の条件について示す.

#### 3.1 模型試験の概要

模型試験は、海上技術安全研究所の海洋構造物試験水槽(長さ40m,幅27.1m,深さ2m)にて行なった.本水 槽はX-Y 曳引台車及びフラップ式の造波機を備えており、斜め波中、不規則波中の試験が可能である.surge,sway については定常力/バネ力で制御し,yawについては PD 制御を用いて針路を制御した.曳航点は模型船の重心 位置とした.これらの装置を用いて波浪中の6自由度運動を再現した.

#### 3.2 対象船

6600TEUのコンテナ船の縮尺模型(L=3m:縮尺1/94.6)を試験対象とした.図 3.2.1 に斜め波中の模型試験の 様子を示す.また,表 3.1 に対象船の実船スケール及び模型スケールの主要目を示す.模型船内への浸水を防ぐ ため,船首部を除く乾舷は実際よりも高く設計した.



図 3.2.1 斜め波中の模型実験

#### 3.3 収録装置

計測データは, 共和電業製 A/D コンバータ EDX-100A(CDV40)を用いて, 500Hz のサンプリング間隔で収録した.

## 3.4 計測項目

実験で計測を行った項目及び計測位置を表 3.2 に、計測機器の配置を図 3.4.1 に示す.

## 3.5 試験条件

試験条件を表 3.3 に示す. 試験パラメータの組合せで試験を実施した. この他に各船速において, 平水中での フリーロール試験及びハンマリング試験を実施した.

		•						
	実船	模型船(測定値)						
垂線間長(Lpp)	283.8m	3.0m						
幅(B)	42.8m	452mm						
深さ(D)	24.0m	254mm						
平均喫水(d)	14.0m	148mm						
排水量	109,480t	126.2kg						
方形係数(Cb)	0.63	0.63						
重心高さ(KG)	18.157m	192mm						
重心位置(LCG)	2.03% from M	idship(船尾方向)						
メタセンタ高さ(GM)	1.08m	11.1mm						
縦環動半径(κyy/Lpp)	0.244	0.2443						
船首摇環動半径(ĸzz/Lpp)	0.244	0.2369						
横環動半径(κxx/B)	0.354	0.354						
横揺れ固有周期	30.64sec	3.15sec						
縮尺	-	1/94.6						

## 表 3.1 対象船及び模型船の主要目

表 3.2 計測項目及び計測位置

項目	計測位置
6自由度運動変位	重心
上下及び左右加速度	S.S.8.5, S.S.5.5, S.S.1.5 の 3 点
縦曲げモーメント、水平曲げモーメン	S.S.8.0, S.S.7.0, S.S.5.5,
ト,捩りモーメント	S.S.3.5, S.S.2.0 の 5 点
波浪変動圧	9 点
バウフレア及び船尾スラミング衝撃圧	8点
出会い波変位	Midship 位置



図 3.4.1 計測機器の配置

	衣 3.5 夫破禾件
フルード数,Fn	0.00, 0.060, 0.179, 0.239 (航海速力 24.5knots)
波高, Hw [m]	3, 6, 10 (実船スケール)
波向き,χ[deg]	180 (向い波), 150, 120, 90 (右舷入射), 60, 30, 0
波長船長比, λ/L	0.2 ~1.1, (0.1 刻み), 1.25

表 3.3 実験条件

#### 3.6 計測装置

#### 3.6.1 バックボーン模型

模型試験には、分割型弾性模型(バックボーン模型)を用いた.荷重の連続性が保たれること、及び材料の粘 弾性の影響が少ないこと等がバックボーンモデルのメリットである.実船の曲げ剛性と相似になるよう、アルミ 製バックボーンの寸法を設定した.相似則は式(3.1)のフルード則に従った.本研究では一様断面のバックボーン を用いているので、剛性は長手方向に一様である.

 $E_m I_m = \alpha^5 E_s I_s$ 

(3.1)

ただし、 $E_m$ , $I_m$ はそれぞれバックボーンのヤング率、断面二次モーメントを、 $E_s$ , $I_s$ はそれぞれ実船のヤング率、断面二次モーメントを意味し、 $\alpha$ はスケール比である。曲げモーメントの検定の結果を図 3.6.1 に示す。曲げモーメントについて、良好な精度が得られることを確認した。



図 3.6.1 バックボーン模型の曲げモーメントの検定結果(左:縦曲げ,右:水平曲げ)

#### 3.6.2 捩りモーメントの計測

本模型試験では、バックボーンを用いて船体捩りモーメントの計測を行なった. 図 3.6.2 左に示すバックボーンの FE 解析結果を参考に歪ゲージの設置箇所を決めて、4 ゲージ法でブリッジ回路を組んで得られる電気出力を、 捩りモーメントに変換した. 捩りモーメントの検定は、図 3.6.2 右に示すように、検定用のウェイトを用いて定 格の捩りモーメントを与えた. 検定の結果を図 3.6.3 に示す. 捩りモーメントについても FE 解析と同程度の出力 となっており、良好な精度が得られることを確認した. なお、本試験計測においては、曲げモーメント・捩りモー メントとも理論解(梁理論あるいは FEM)の結果を校正値として使用した.





図 3.6.2 バックボーンの FE 解析(左)及び捩り検定の概要(右)

88



図 3.6.3 バックボーン模型の捩りモーメントの検定結果

#### 3.6.3 振動特性

バックボーン模型の縦曲げ振動特性を確認するため、ハンマリング試験をドライモード(以下,DRY)及び ウェットモード(以下,WET)で実施した.ハンマリング試験はいずれも重心位置をプラスチックハンマーで鉛 直方向に叩いた.DRYの計測は、2節振動の節に当る断面をスリングベルトで吊った状態で行なった.ハンマリ ング試験で得られた船体中央部(S.S. 5.5 断面)の縦曲げモーメントのスペクトルを図 3.6.5 に、固有周期及び対 数減衰率を表 3.4 に示す.表 3.4 の数値は、それぞれ 2~3 回の計測の平均値である.図 3.6.4 の中の減衰率と表 3.4 の値が異なるのは、図 3.6.4 の値はその回の減衰率であるのに対し、表 3.4 の値は平均値をとっているためで ある.

WET の固有振動数は、実船換算で 0.70[Hz]であり、同サイズのコンテナ船の実船計測による固有振動数 (0.68[Hz])<sup>2)</sup>とほぼ同じ値であった.減衰率が船速の増加とともに増加する傾向は、過去に当所で行なった実験 結果<sup>3)</sup>と同じである.縮尺模型の減衰率を実船と相似にするのは技術的に難しく、模型のほうが実物よりも減衰 しやすい傾向にあるが、ここでのバックボーン模型の対数減衰率はいずれも 0.1 以下と小さく、実船(対数減衰 率 0.03~0.1 程度)に近い減衰特性を有している. DRY の固有周期は、WET の固有周期よりも短く、これは外板 に作用する付加質量の違いによるものである.

なお, 捩りモードについてもハンマリング試験を行なって動的特性を確認したが, バックボーン模型では捩り 振動の特性を実船相似にすることはできなかった<sup>4</sup>. これについては今後の課題である.



図 3.6.4 ハンマリング試験で得られた減衰波形と対数減衰率



図 3.6.5 ハンマリング試験で得られたスペクトル

	En	Natural Frequency of	logarthmic						
	ГII	2-node vibration [Hz]	damping ratio						
	0.000	6.8	0.054						
WET	0.060	6.8	0.058						
	0.179	6.8	0.074						
	0.239	6.7	0.087						
DRY	-	9.2	0.052						

表 3.4 ハンマリング試験の結果

#### 4. 波浪中応答の比較検証

本章では、3章で示した模型試験の結果を用いて、2章で示した非線形ストリップ法プログラム NMRIW-II に よるシミュレーションの妥当性を検証する.

## 4.1 比較項目

実験及びシミュレーションの比較は、3.5 節に示した実験条件において、表 3.2 に示した計測項目のうち、6 自 由度運動、S.S. 5.5 における縦曲げ・水平曲げモーメント、S.S. 2.0 における捩りモーメント、S.S. 7.5 における変 動水圧、S.S. 8.5 における垂直・水平加速度を比較する. それぞれ、計測したうち最も大きな応答が生じる箇所を 採用している. ここで、縦曲げ・水平曲げモーメント及び垂直・水平加速度は、船体固定座標系における値を比 較している. また、シミュレーションにおける roll の減衰力係数は、各船速において free-roll によって得た減減 係数*a*,*b*を用いている.

#### 4.2 無次元振幅の比較

実験とシミュレーションとの相関とその傾向を概括的に示すため、図 4.2.2~図 4.2.19 に、3.5 節に示した全ての試験条件における、4.1 節に示した各応答無次元振幅の比較を、出会い波周期と入射波高で区別して示す.これらの図においては、出会い波周期 $T_e$ は 0.5s(模型スケール)刻みに色分けをしており、また入射波高Hw毎に記号を変えている.また、各試験条件に対応する出会い波周期の値を表 4.1 に示す.さらに、Appendix に、全ての試験条件における波長船長比  $\lambda$ L を横軸にとった無次元応答関数を示す. Appendix 中の応答関数には、波高の非線形影響を明らかにするため、シミュレーションにおいて波高を 0.01m と設定した線形計算相当の応答関数(図中

に"Linear"と表示)も記載している.なお、図中の無次元化に用いる変数 $\zeta_a, \omega_e, k, L, B$ はそれぞれ入射波振幅、出会い波周波数、波数、垂線間長、船幅を意味する.

#### 4.2.1 時系列データの処理

比較した応答振幅は,実験あるいはシミュレーションによって得た応答の時系列データ*x(t)*から次式によって 得られるフーリエ係数*X*としている.

$$X = \sqrt{a^2 + b^2} \tag{4.1}$$

ここで,

$$a = \frac{2}{nT_e} \int_0^{nT_e} x(t) \cos \omega_e t \, dt \, , b = \frac{2}{nT_e} \int_0^{nT_e} x(t) \sin \omega_e t \, dt$$
(4.2)

ただし、 $\omega_e$ は出会い波周波数、 $T_e$ は出会い波周期である。本報告では、シミュレーションにおいては図 4.2.1 の ように各計算ケースで出会い波を 10 波計算しており、解析区間  $0 \le t < 10T_e$ のうち、区間  $0 \le t < 5T_e$ は緩起動 として入射波の波高を 0 から徐々に設定波高に近づけ、初期擾乱が減衰した後の区間  $8T_e \le t < 9T_e$ の時系列デー タを用いてフーリエ係数を導出している。実験においては、 $nT_e$ が 5 秒以下で且つ最大となるようなデータ区間 を用いてフーリエ係数を導出している。

実験では surge, sway はバネによって拘束し, yaw は PD 制御を用いて針路を制御しているが, NMRIW-II によるシミュレーションにおいては数値的な安定性及び断面力の計算の観点からバネあるいは制御機能は設けていない. このため, 図 4.2.1 に見られるように, 復原力のない運動モード,即ち surge, sway, yaw は,波高の二乗に比例する漂流力によって,波高が高くなるほど大きく漂流する. このため,これらの運動モードに関しては,三角関数と直交しない漂流による運動変位成分が混在することにより,式(4.1)によっては正常な振幅は得られない. そこで本報告では,データ区間を8 $T_e \leq t < 9T_e$ と短くとることで漂流による運動変位成分を時間の1次関数と近似し, surge, sway, yaw 運動変位に対して次式の処置を施すことで漂流による運動変位成分を除去している.

$$\tilde{x}(t) = x(t) - \frac{x(9T_e) - x(8T_e)}{T_e}t$$
(4.3)

以上によって得た x(t)をx(t)の変わりに用いてフーリエ係数を計算している.

#### 4.2.2 全体の傾向

無次元応答振幅の比較図 4.2.2~図 4.2.19 より,各種応答の全体的な傾向として,出会い波周期の短いケース では実験とシミュレーションの一致度は高いが,特に横運動や水平曲げモーメント,水平加速度などにおいて, 出会い波周波数の長いケースほど両者の相関が見られなくなっている事がわかる.出会い波周期が長いケースと は,表 4.1 から判るように追い波や斜め追い波で波乗り状態に近いケースのことを指す.この場合,①波乗り状 態で運動が不安定になりやすいこと,②ストリップ法は理論的には出会い波周期が短いことを前提として流場を 2 次元に近似しており,出会い波周期の長いケースでは精度が低下すること<sup>5)</sup>,③実験において,水槽の長さの 制限により出会い波の回数が十分取れず,運動が収束し難いこと,④実験において,式(4.2)に示す振幅の計算に 用いる出会い波の回数nが少なくなり,データの安定性が低下すること,等が一致度の低い主な要因であると考 えられる.特に,roll運動は実験,シミュレーションともに不安定となり,応答が出会い波周波数の調和振動で なくなる場合がある.この場合,rollと連成する横運動,水平曲げモーメント,水平加速度などの一致度も低下 する. 1.45 1.50

											1105		1.0						5.05	5105	-							
Chi		180deg				150deg				120	)deg			90	deg			600	deg			30	deg			0d	eg	
λ/L\Fn	0.000	0.060	0.179	0.239	0.000	0.060	0.179	0.239	0.000	0.060	0.179	0.239	0.000	0.060	0.179	0.239	0.000	0.060	0.179	0.239	0.000	0.060	0.179	0.239	0.000	0.060	0.179	0.239
0.20	0.620	0.464	0.310	0.265	0.620	0.480	0.332	0.287	0.620	0.531	0.413	0.371	0.620	0.620	0.620	0.620	0.620	0.745	1.244	1.878	0.620	0.875	4.729		0.620			
0.25	0.693	0.533	0.365	0.315	0.693	0.550	0.390	0.340	0.693	0.603	0.479	0.433	0.693	0.693	0.693	0.693	0.693	0.816	1.257	1.729	0.693	0.937	3.111		0.693			
0.30	0.759	0.596	0.417	0.363	0.759	0.613	0.444	0.390	0.759	0.668	0.539	0.491	0.759	0.759	0.759	0.759	0.759	0.880	1.286	1.676	0.759	0.996	2.613	14.39	0.759	1.047	4.200	
0.35	0.820	0.654	0.466	0.408	0.820	0.672	0.495	0.437	0.820	0.728	0.595	0.545	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.940	1.321	1.661	0.820	1.052	2.390	6.667	0.820	1.100	3.395	
0.40	0.877	0.708	0.513	0.450	0.877	0.727	0.543	0.482	0.877	0.784	0.647	0.595	0.877	0.877	0.877	0.877	0.877	0.995	1.359	1.666	0.877	1.104	2.274	4.880	0.877	1.150	3.018	16.62
0.45	0.930	0.760	0.557	0.491	0.930	0.779	0.589	0.524	0.930	0.836	0.697	0.643	0.930	0.930	0.930	0.930	0.930	1.047	1.397	1.680	0.930	1.154	2.210	4.105	0.930	1.199	2.809	8.697
0.50	0.980	0.808	0.600	0.531	0.980	0.828	0.633	0.565	0.980	0.886	0.744	0.689	0.980	0.980	0.980	0.980	0.980	1.097	1.436	1.701	0.980	1.202	2.176	3.682	0.980	1.245	2.682	6.417
0.55	1.028	0.855	0.641	0.569	1.028	0.875	0.675	0.605	1.028	0.934	0.789	0.732	1.028	1.028	1.028	1.028	1.028	1.144	1.474	1.725	1.028	1.247	2.160	3.422	1.028	1.290	2.603	5.350
0.60	1.074	0.899	0.680	0.606	1.074	0.919	0.715	0.643	1.074	0.979	0.833	0.774	1.074	1.074	1.074	1.074	1.074	1.189	1.512	1.751	1.074	1.291	2.155	3.252	1.074	1.333	2.552	4.740
0.65	1.118	0.942	0.718	0.641	1.118	0.962	0.754	0.680	1.118	1.022	0.874	0.815	1.118	1.118	1.118	1.118	1.118	1.233	1.549	1.779	1.118	1.333	2.158	3.136	1.118	1.374	2.520	4.350
0.70	1.160	0.983	0.755	0.676	1.160	1.004	0.792	0.716	1.160	1.064	0.915	0.854	1.160	1.160	1.160	1.160	1.160	1.275	1.585	1.807	1.160	1.374	2.166	3.053	1.160	1.414	2.501	4.085
0.75	1.201	1.023	0.791	0.710	1.201	1.044	0.829	0.751	1.201	1.105	0.954	0.892	1.201	1.201	1.201	1.201	1.201	1.315	1.620	1.836	1.201	1.413	2.178	2.995	1.201	1.453	2.492	3.895
0.80	1.240	1.062	0.826	0.743	1.240	1.082	0.864	0.785	1.240	1.144	0.991	0.929	1.240	1.240	1.240	1.240	1.240	1.354	1.655	1.864	1.240	1.451	2.193	2.953	1.240	1.491	2.488	3.755
0.85	1.278	1.099	0.860	0.775	1.278	1.120	0.899	0.818	1.278	1.182	1.028	0.965	1.278	1.278	1.278	1.278	1.278	1.392	1.689	1.893	1.278	1.488	2.209	2.923	1.278	1.527	2.490	3.650
0.90	1.315	1.135	0.893	0.806	1.315	1.156	0.933	0.850	1.315	1.219	1.064	1.000	1.315	1.315	1.315	1.315	1.315	1.428	1.723	1.922	1.315	1.525	2.228	2.903	1.315	1.563	2.496	3.569
0.95	1.351	1.171	0.925	0.837	1.351	1.192	0.966	0.882	1.351	1.255	1.098	1.034	1.351	1.351	1.351	1.351	1.351	1.464	1.755	1.951	1.351	1.560	2.247	2.889	1.351	1.598	2.504	3.507
1.00	1.386	1.205	0.957	0.867	1.386	1.227	0.998	0.913	1.386	1.289	1.132	1.067	1.386	1.386	1.386	1.386	1.386	1.499	1.787	1.979	1.386	1.594	2.267	2.881	1.386	1.632	2.515	3.458
1.05	1.421	1.239	0.988	0.897	1.421	1.260	1.030	0.943	1.421	1.324	1.165	1.099	1.421	1.421	1.421	1.421	1.421	1.533	1.819	2.007	1.421	1.628	2.288	2.878	1.421	1.665	2.527	3.420
1.10	1.454	1.272	1.018	0.925	1.454	1.293	1.061	0.973	1.454	1.357	1.198	1.131	1.454	1.454	1.454	1.454	1.454	1.566	1.850	2.035	1.454	1.660	2.310	2.878	1.454	1.697	2.541	3.391
1.15	1.487	1.304	1.048	0.954	1.487	1.326	1.091	1.002	1.487	1.389	1.230	1.162	1.487	1.487	1.487	1.487	1.487	1.599	1.880	2.063	1.487	1.692	2.332	2.880	1.487	1.729	2.556	3.369
1.20	1.519	1.335	1.077	0.982	1.519	1.357	1.121	1.031	1.519	1.421	1.261	1.193	1.519	1.519	1.519	1.519	1.519	1.631	1.910	2.090	1.519	1.724	2.354	2.885	1.519	1.760	2.572	3.352
1.25	1.550	1.366	1.106	1.009	1.550	1.388	1.150	1.059	1.550	1.452	1.291	1.223	1.550	1.550	1.550	1.550	1.550	1.662	1.939	2.117	1.550	1.754	2.376	2.892	1.550	1.791	2.589	3.339
1.30	1.581	1.397	1.134	1.036	1.581	1.419	1.179	1.086	1.581	1.483	1.321	1.252	1.581	1.581	1.581	1.581	1.581	1.692	1.968	2.144	1.581	1.785	2.398	2.901	1.581	1.821	2.606	3.331
1.35	1.611	1.426	1.162	1.063	1.611	1.448	1.207	1.114	1.611	1.513	1.350	1.281	1.611	1.611	1.611	1.611	1.611	1.722	1.996	2.170	1.611	1.814	2.420	2.910	1.611	1.850	2.624	3.326
1.40	1.640	1.455	1.189	1.089	1.640	1.478	1.235	1.140	1.640	1.542	1.379	1.309	1.640	1.640	1.640	1.640	1.640	1.752	2.024	2.196	1.640	1.843	2.443	2.921	1.640	1.879	2.642	3.323
1.45	1.669	1.484	1.216	1.115	1.669	1.507	1.262	1.167	1.669	1.571	1.407	1.337	1.669	1.669	1.669	1.669	1.669	1.781	2.052	2.222	1.669	1.872	2.465	2.933	1.669	1.908	2.661	3.322

表 4.1 各条件における出会い波周期T<sub>e</sub>[s](模型スケール)の値





図 4.2.3 Surge の無次元振幅の比較(レンジ拡大)



図 4.2.5 Heave の無次元振幅の比較



図 4.2.7 Rollの無次元振幅の比較(レンジ拡大)



図 4.2.8 Pitch の無次元振幅の比較



 Te:0.5s~1.0s, Hw=3m ▲ Te:0.5s~1.0s, Hw=6m ×Te:0.5s~1.0s, Hw=10m ◆ Te:1.0s~1.5s, Hw=3m ▲ Te:1.0s~1.5s, Hw=6m ×Te:1.0s~1.5s, Hw=10m Te:1.5s~2.0s, Hw=3m ▲ Te:1.5s~2.0s, Hw=6m ×Te:1.5s~2.0s, Hw=10m ◆ Te:2.0s~2.5s, Hw=3m ▲ Te:2.0s~2.5s, Hw=6m ×Te:2.0s~2.5s, Hw=10m ◆ Te:2.5s~3.0s, Hw=3m ▲ Te:2.5s~3.0s, Hw=6m ×Te:2.5s~3.0s, Hw=10m ◆ Te:3.0s~, Hw=3m ▲ Te:3.0s~, Hw=6m 0.8 × Te:3.0s~, Hw=10m



図 4.2.10 Yaw の無次元振幅の比較(レンジ拡大)



図 4.2.11 S.S. 2.0 における捩りモーメントの無次元振幅の比較



図 4.2.12 S.S. 5.5 における縦曲げモーメントの比較



図 4.2.13 S.S. 5.5 における水平曲げモーメントの無次元振幅の比較



図 4.2.14 S.S. 7.5 右舷喫水下 53mm における水圧の無次元振幅の比較



図 4.2.15 S.S. 7.5 船底 C.L.より右舷側 42mm における水圧の無次元振幅の比較



図 4.2.16 S.S. 7.5 左舷喫水下 53mm における水圧の無次元振幅の比較



図 4.2.17 S.S. 8.5 における垂直加速度の無次元振幅の比較





図 4.2.19 S.S. 8.5 における水平加速度の無次元振幅の比較(レンジ拡大)

#### 4.3 縦運動及び垂直加速度

線形理論では,船体が左右対称の場合,縦運動と横運動は連成しないことが知られている. そのため,縦運動 は roll の影響を受けにくく,斜め追い波中においても実験,シミュレーションとも応答が安定しており,全ケー スに亘って良い一致を示している.

特に復原力の存在する heave 及び pitch については,図 4.2.5 及び図 4.2.8 より,全体的に実験とシミュレーションの値が良好に一致している.また,Appendixの周波数応答関数の図 6.1.9~図 6.1.12,図 6.1.16~図 6.1.19 から分かるように,波高が高くなるほど無次元運動振幅が小さくなるという非線形性の傾向についても,シミュレーションで正しく再現できている.この非線形性の傾向は,浮力の非線形性で凡その説明ができる.即ち,微小波高では浮力は heave/pitch 運動変位に比例するが,大波高中では船体が露出し水線面積が小さくなることで,浮力は heave/pitch 運動変位に比例すると仮定した値よりも小さくなるためである.

復原力の存在しない surge に関して、NMRIW-II の計算においては、船体表面法線ベクトルのx方向成分を考慮 していないため、surge の radiation/scattering 流体力は計算しておらず、Froude-Krylov 力のみを考慮している.し かしながら、図 4.2.3 から、出会い波周期の長いケースを除くと、両者の傾向はおおよそ良い一致を示している. Surge は減衰の小さいモードであるため、出会い波周期の長くなるケースでは、実験、シミュレーションともに 非常に大きな振幅となっている事がわかる.

S.S. 8.5 における垂直加速度は, heave 及び pitch と同様,実験の値と良好に一致していることが確認できる.非 線形影響も,heave 及び pitch と同様,波高が高くなるほど無次元振幅値は下がる傾向となっている.出会い波周 期の変動以外に,船首付近の垂直加速度は,縦曲げ弾性振動による影響を強く受ける.図 4.3.1 及び図 4.3.2 に, ホイッピングが顕著に生じる条件における垂直加速度の時刻歴を示す.出会い波周波数の振動に加え,弾性振動 成分もシミュレーションと実験で良く一致している事がわかる.



図 4.3.1 S.S. 8.5 における垂直加速度の時系列 (Chi=180deg, Fn=0.179, Hw=10m, λL=1.0)



図 4.3.2 S.S. 8.5 における垂直加速度の時系列 (Chi=150deg, Fn=0.179, Hw=10m, λ/L=0.9)

#### 4.4 横運動および水平加速度

roll に関して,図 4.2.6 を見ると,roll の固有周期(3.15[s])と比較して出会い波周期が十分短いケースでは実験,シミュレーションともに振幅は小さいが,出会い波周期が roll の固有周期に近づくと振幅は顕著に増大し,

実験とシミュレーションの相関があまり見られない結果となっている.この原因は,4.2.2項にてすでに述べたとおりである.

出会い波周期の長いケース以外でも, roll の挙動が不安定になる現象として, パラメトリック横揺れが知られ ている. パラメトリック横揺れは,船舶の横復原力が周期的に変動することで引き起こされる非線形現象であり, 出会い波周期が roll の固有周期の半分程度(1.6[sec])のケースにおいて roll の固有周期運動が大きく発達する現 象である<sup>の</sup>. 図 4.4.1 はパラメトリック横揺れが生じる条件における pitch 及び roll の時刻歴の一例である. pitch は出会い波周波数で振動している一方で, roll に関しては、シミュレーション及び実験の双方で途中から固有周 波数の振動が大きく発達しており、不安定現象が再現できていることがわかる.ところが、rollの固有振動周期 運動の発達の仕方については異なっており、実験では徐々に振幅が増加しているが、シミュレーションでは一度 振幅が大きくなり、その後収束している. この傾向の違いは、実験においては入射波が目的の振幅に達した後に 船を走航させている一方で、シミュレーションにおいては前進座標系において緩起動によって徐々に入射波を増 幅させているため、初期擾乱の影響が異なるからであると考えられる.このように、シミュレーションにおいて も roll の不安定現象は再現できるものの、発達の傾向やタイミングなどは必ずしも一致しないことから、不安定 挙動の定量的な比較は難しい. そのため,本報告では, roll 運動の比較は式(4.1)による出会い波周期成分のみに とどめている. 一般に積分区間nT<sub>a</sub>は roll の固有振動周期の整数倍とはならないため,式(4.1)の出会い波周期の フーリエ係数では固有振動による成分が混入することにより、横揺れの固有振動が生じているケースでは実験と シミュレーションの応答振幅の一致度が低下する. 図 6.1.15 の Chi=30deg, Fn=0.179 の応答関数を見ると, 実験, シミュレーションともに λL=0.8~1.2 の範囲で roll の振幅が波長船長比に対して激しく上下しているが, これはパ ラメトリック横揺れが生じていることによるものである.

以上のように、roll は安定性が低く、また非常に減衰力係数に対して鋭敏であるため、定量的な推定は難しいが、ラッキング変形など、roll の最大角が構造強度に直接的に影響する場合が存在する<sup>7)</sup>. そのため、耐航性のみならず、構造設計の観点からも、roll の推定法は重要な課題として今後も検討を続けていく必要がある.

sway 及び yaw は, 図 4.2.4 及び図 4.2.9 に示すとおり, これらは roll と連成するために, roll が不安定となる斜 め追い波中において, シミュレーションと実験で差が見られる. しかしながら, それ以外のケースでは全体的に 良好に一致している結果となった.

S.S. 8.5 における水平加速度は、図 4.2.18 及び図 4.2.19 に示すとおり、やはり出会い波周期の長いケースを除くと、全体的に実験とシミュレーションとで良く一致している.ここでの水平加速度は船体固定座標での値であるため、横傾斜によって重力加速度に船体固定水平方向成分が生じ、roll 振幅が大きいケースにおいては水平加速度の変動も大きくなる.斜め追い波中では roll 振幅が過大となるために、実験及びシミュレーションの両者において、水平加速度の無次元振幅値が非常に大きな値をとっている.



図 4.4.1 パラメトリックの例 (Chi=30deg, Fn=0.06, Hw=6m, \l=1.0)

## 4.5 縦曲げモーメント

## 4.5.1 出会い波変動成分

S.S. 5.5 における縦曲げモーメントは,図 4.2.12 に見られるように,全体的に実験と比べシミュレーションによる値がやや大きめであるが,両者はおおむね良く一致している.

図 4.2.12 及び Appendix の図 6.1.26~図 6.1.29 には縦曲げモーメントの変動振幅を示しているが,船体構造設計の立場からは,波浪中の縦曲げモーメントの推定には hogging モーメント及び sagging モーメントの区別が重要となる.そこで,図 4.5.1 に,向い波中における縦曲げモーメントの剛体成分の hogging/sagging モーメントの周波数応答関数を示す.ここで、剛体成分とは、2 節縦曲げ固有周波数と出会い波周波数の平均周波数ω1を閾値としてローパスフィルターを介した縦曲げモーメントのことで、hogging/sagging モーメントはその時系列の最大/最小値をとっている.また、図中には、線形計算相当の波高 0.01m 中の結果"Linear"も記載している.図 4.5.1 から、線形計算では hogging モーメントと sagging モーメントの大きさは一致するが、波高の非線形性によって、無次元 hogging/sagging モーメントと bogging モーメントの方がやや大きくなっている事が分かる.このような hogging/sagging モーメントの非線形性の違いもシミュレーションで良く再現できている.

縦運動と同様に,縦曲げモーメントの出会い波変動成分の非線形性の傾向についても,浮力の非線形性で説明 ができる. コンテナ船の前後端付近の形状を簡単に逆三角形断面と見做すと,船体の長手方向に波の山-谷-山が 位置する瞬間では前後端の水線幅が増えるため前後端の浮力が増加し,saggingモーメントが大きくなる. 反対に 谷-山-谷の瞬間では前後端の水線幅が減るため前後端の浮力は減少し,hoggingモーメントも大きくなる. コンテ ナ船において一般に saggingモーメントが hoggingモーメントに比べ非線形性が強い理由は,傾斜の強いフレアが 存在することによって水線幅の増加が顕著となるためである.



図 4.5.1 向い波中の S.S. 5.5 における無次元縦曲げ hogging/sagging モーメント

#### 4.5.2 弾性振動成分

次に、図 4.5.2 に、正面向い波においてホイッピングが顕著になるケースにおける縦曲げモーメントの時刻歴 の比較を示す.両者は、出会い波周期の成分に縦曲げ弾性振動成分が重畳しており、傾向はよく一致しているが、 弾性振動成分がシミュレーションの方がやや小さくなっている.そこで、弾性振動の傾向の検証を行うために、 全てのケースに対して、S.S. 5.5 における縦曲げモーメントの弾性振動成分の標準偏差 $\sigma_{VBM}^{HF}$ を比較した.弾性振 動成分の標準偏差 $\sigma_{VBM}^{HF}$ は、縦曲げモーメントの時系列データx(t)からスペクトル解析によって得た片側応答スペ クトル $\Phi_{VBM}(\omega)$ から、出会い波周波数と縦曲げ固有振動周波数の平均値 $\omega_1$ を閾値とした次式によって計算した.

$$\sigma_{VBM}^{HF} = \sqrt{\int_{\omega_1}^{\infty} \Phi_{VBM} \, \mathrm{d}\omega} \tag{4.4}$$

応答関数と同様の形式で、実験及びシミュレーションの縦曲げモーメントの高周波振動成分の無次元標準偏差を Appendix の図 6.2.1~図 6.2.4 に示す. 無次元化は出会い波周周期の変動振幅と同様の係数で除している.

実験とシミュレーションにおける弾性振動成分のおおまかな傾向を比較する.向い波及び斜め向い波で特に大きな弾性振動が生じており、また大波高になるほどその影響も顕著になっているという傾向については、シミュレーションの結果は実験と同様である.スラミングは運動量理論によると相対速度の二乗に比例するため、それによって生じるホイッピングも凡そ波高の二乗に比例することになる.また、規則波中における縦曲げ弾性振動は、出会い波周期が二節固有振動周期(本模型船では 0.18[s])の整数倍の時に同調し、大きな応答を生じる.例えば、図 6.2.1 の Chi=180deg, Fn=0.179 や Chi=150deg, Fn=0.179 のケースをみると、実験、シミュレーションともにピークがいくつか存在し、同調が明確に確認される.

次に,弾性振動成分の値を比較する.向い波の Chi=180deg, 150deg において,全体的にシミュレーションが実 験と比べやや低めの値となっているが,これは NMRIW-II の計算で,スラミング荷重を過小評価していることに よるものと考えられる.NMRIW-II では,水面の盛り上がりを考慮しない,いわば Karman の衝撃力理論相当の荷 重である.水面の盛り上がりを考慮することで,弾性振動は増大するものと考えられる.逆に,斜め追い波や追 い波においては,シミュレーションが実験値を上回る.これは,NMRIW-II においてスラミングの3次元影響が 正しく考慮されていないために,船尾スラミングを過大評価していることが原因だと考えられる.船尾付近の断 面は,二次元的にみると,垂線面と成す傾斜角即ちデッドライズアングルは非常に小さく,2次元流場としては 非常に大きな衝撃力を生じる形状となっている.しかしながら実際には,Center Line 上のx-z断面を考えたとき, pitch 運動によって船底と波面の交点が滑らかに後方に移動するといった3次元的な要因によって,船尾スラミン グは軽減されるものと推察される.



図 4.5.2 S.S. 5.5 における縦曲げモーメントの時系列 (Chi=180deg, Fn=0.179, Hw=10m, \L=1.0)

#### 4.6 水平曲げモーメント

水平曲げモーメントは、ここでは船体固定座標で比較している.このとき、横傾斜によって静水中縦曲げモー メントが水平曲げモーメントに加わるため、水平曲げモーメントは roll 運動の影響を大きく受ける.このため、 図 4.2.13 に見られるように、sway や yaw と同様に roll が不安定になる出会い波周波数が長くなる条件において は精度が低下する.しかしそれを除くと、全体的に実験値と良く一致している事がわかる.また、図 4.6.1 に、 斜め波において水平曲げモーメントの非線形性が顕著となるケースにおける水平曲げモーメント時刻歴を示す. 実験において、スラミングによって、大きな水平曲げのホイッピングを生じている事がわかる.本検討では、 NMRIW-II の計算に水平曲げによる弾性振動を考慮していないため、高周波振動成分が考慮されていないが、低 周波成分のみに着目すると、両者はよく一致しているといえる.



図 4.6.1 S.S. 5.5 における水平曲げモーメントの時系列 (Chi=150deg, Fn=0.179, Hw=10m, \L=0.9)

#### 4.7 捩りモーメント

S.S. 2.0 における捩りモーメントは、図 4.2.11 に見られるように、縦曲げモーメント及び水平曲げモーメント と比較すると、出会い波周期の短長に関わらず、全体的に実験とシミュレーションの相関が弱い結果となった. 捩りモーメントは縦・水平曲げモーメントに比べ、モーメントの値が絶対的に小さく、また外力モーメント分布 のローカルな分布に影響されやすいため、誤差が相対的に大きくなりやすい.両者に差が生じる主な原因として、 ①ストリップ法において、短波長域で顕著となる船首尾付近の 3 次元影響が正しく考慮されていないこと<sup>8</sup>、② 実験と計算条件とで質量の 3 次元的な分布、即ち長手方向の重量分布に加え重心高さの長手方向分布が完全に一 致していなかったことが考えられる.また、実験的側面としては、③バックボーンと固定壁との結合が完全に剛 ではなかったこと、④分割された船体表面にかかる流体力は結合部のみを通じてバックボーンに伝わるため、船 体が流体から受けるモーメント分布とバックボーンが受けるモーメント分布が異なっていたこと、等が考えられ る.

以上の要因を明らかにするには、非一様な分布の捩りモーメントを与えた検定や船体を拘束した状態での波浪 中実験を行うなど、より基本的な検証を段階的に行う必要があるだろう.

#### 4.8 水圧

S.S. 7.5 の 3 箇所における変動水圧は、図 4.2.14~図 4.2.16 より、いずれも実験とシミュレーションで良い相関が見られる.しかしながら、出会い波周期が長いケースにおいては、roll によって静圧が大きく変動するために、相関が弱い結果となっている.また、出会い波周期が短いケース、即ち向い波及び斜め向い波においては、シミュレーションによる値が実験値を幾分か下回っている.これは、ストリップ法計算において、①radiation/scattering 速度ポテンシャルを 2 次元近似によって計算していることと、②radiation/scattering 速度ポテンシャルの長手方向変化に係る項を無視していることが要因として考えられる.前者は、scattering 速度ポテンシャルに関してはヘルムホルツ方程式によって求める事で改善される<sup>9</sup>.後者は、変動水圧に関しては前後のストリップ間との差分を取るなどして、速度ポテンシャルの長手方向変化量を数値的に求めることで考慮する事が出来る.しかし本プログラムでは、断面形状が急激に変化する場合やストリップの間隔が大きい場合のロバスト性を重視し、本項は考慮していない.なお、後者は変動水圧の計算における問題であり、流体力に対しては部分積分によって正しく考慮されている.

図 4.8.1 に,縦波中のホイッピングが顕著に生じるケースにおける船底の水圧の時刻歴を示す. NMRIW-II では 弾性振動に起因する radiation 流場成分も計算しており,出会い波周波数成分に加え高周波成分も正しく考慮され ていることがわかる. 衝撃圧の生じるバウ・フレア部における水圧の時刻歴を図 4.8.3 及び図 4.8.4 に示す. NMRIW-II では衝撃圧計 算において水面の盛り上がりを考慮していないため、実験と比較してやや面積(力積)は小さいが、傾向は良く 一致している. 加えて、弾性振動成分に起因する radiation 流場による水圧の振動も再現できている. また、船尾





図 4.8.4 S.S. 0.75 喫水下 22mm における水圧の時系列 (Chi=180deg, Fn=0.179, Hw=10m, λ/L=1.0)

部の水圧の時刻歴を図 4.8.4 に示す. 高周波の振動が顕著に現れており,弾性振動による変動量が水圧において も構造にとって無視できない程度存在する事が確認されたと同時に,シミュレーションによって正しく再現でき ていることが確認された.

## 5. 結言

本報告では、模型実験との比較と通じて、波浪中非線形解析プログラム NMRIW-II の適用性について検証を行った. あらゆる波向き, 波長, 波高の規則波中の代表的な船速における 6 自由度船体運動, 断面力, 加速度, 水圧 に対する検証を, 非線形影響を考慮し包括的に行った. 本検討により得られた結果及び明らかとなった課題を以下にまとめる.

- 応答振幅の全体的な傾向として、出会い波周期が短いケースでは実験と良い相関が見られたが、出会い波周期が長いケースでは、相関が弱いことが確認された.この原因としては、水槽の制限等により出会い波の数が十分とれず、運動が収束しにくいこと、波乗り状態において運動が不安定となること、ストリップ法の近似において出会い波周期の長いケースを想定していないことなどが挙げられる.
- 縦運動,特にheave,pitch,船首縦加速度の振幅は殆どのケースで良好な一致を示した.また,波高が高くなるほど無次元振幅が小さくなると言う非線形影響の傾向も,実験とシミュレーションの両者において確認された.surgeは出会い波周期が長いケースで振幅が過大となるが,概ね良い相関が見られた.
- roll に関しては、出会い波周期の短いケースでは応答が小さく、出会い波周期の長いケースでは不安定になることで、実験とシミュレーションの相関がやや弱い結果となった.roll が不安定化した場合、出会い波周期の調和振動から外れるため、応答振幅での単純な比較は難しくなる.しかしながら、パラメトリック横揺れなどの不安定現象は、本プログラムにおいても正しく再現されることが確認された.不安定現象を含めたroll の定量的な比較方法の検討は今後の課題である.
- sway, yaw 及び船首水平加速度の振幅は、出会い波周期の長いケースを除くと良い相関を示していることが 確認された.しかしながら、sway, yaw は本報告においてはシミュレーションでは拘束しておらず、現実的 でかつ目的に即した拘束、制御の検討は今後の課題である.
- ・縦曲げモーメントの振幅は、シミュレーションがやや安全側の結果を与える結果となったが、実験と良い相関が見られた.低周波成分、即ち剛体成分における hogging/sagging モーメントのピークを比較したところ、 波高が高くなるほど無次元 sagging モーメントがより高くなるという波高の非線形性の傾向もよく一致していることが確認された.また、高周波成分、即ち弾性振動成分の標準偏差の比較を行ったところ、波高やピークの傾向は一致していたものの、シミュレーションによる値が向かい波では小さめに、追い波では大きめとなる結果となった.これは、衝撃荷重において水面の盛り上がりが考慮されていないこと、衝撃荷重に3次 元影響が考慮されていないこと等が原因と考えられる.衝撃荷重の改良及び詳細な検討は今後の課題である.
- 水平曲げモーメントの振幅は全体的に良く一致していることが確認された.一方で、捩りモーメントの振幅は、縦曲げモーメント、水平曲げモーメントと比較して相関が弱い結果となった.捩りモーメントは絶対値が小さく、また局所的なモーメント分布に作用されやすいため、精度良く推定することは難しい.ストリップ法の理論上の誤差、実験計測の誤差の両面から詳細な検討を行う事が必要とされる.
- 変動水圧は、出会い波周期の長いケースを除くと、概ね傾向は一致している.しかし、向い波において、ややシミュレーションによる値が小さい結果となった.これは、ストリップ法による計算においてradiation/scattering 流場を2次元近似していること、radiation/scattering ポテンシャルの長手方向変化を 無視していることなどが原因と考えられる.特に後者は、水圧と運動加速度との非一貫性につながり、構造 解析において問題となるため、今後対応すべき課題である.
- バウ・フレアにおける衝撃水圧は、実験の時系列と傾向が概ね一致しており、提案手法の有効性が示された.
   しかしながら、シミュレーションでは水面衝撃による水面の盛り上がりを考慮していないために、力積としてはやや小さめになることが明らかになった.また、弾性振動が顕著になるケースでは、弾性振動に起因す

る radiation 流場による圧力の振動が有意に生じており, NMRIW-II によるシミュレーションにおいても正 しく再現できていることが確認された.

#### 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.また,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) 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(2018)
- 2) T. Okada, *el.al.* : On board measurement of stresses and deflections of a Post-Panamax containership and its feedback to rational design, Marine Structures, No. 19, Elsevier Ltd (2006), pp. 141-172.
- 3) M. Oka, *et.al.* : An experimental study on wave loads of a large container ship and its hydroelastic vibration. Proc. 4th Int. Conf. Hydroelasticity in Maritime Technology (2009), pp. 183-192
- 4) 岡正義,新型バックボーン模型による波浪中船体振動の再現について,第10回海上技術安全研究所発 表会講演集(2010), pp. 297-298
- 5) M. Ohkusu: Prediction of Wave Forces on a Ship Running in Following Waves with Very Low Encounter Frequency, Journal of the Society of Naval Architects Japan, 159 (1986), pp. 129-138
- 6) V. V. Bolotin: The Dynamic Stability of Elastic Systems, Holden-Day, Inc., San Francisco (1964)
- 7) ClassNK, 自動車運搬船のラッキング強度評価に関するガイドライン 降伏強度評価ガイドライン (2016)
- 8) 三宅竜二,朱庭耀他:コンテナ船の波浪荷重に関する研究, ClassNK 研究発表会講演集(2003)
- 9) 柏木正,岩下英嗣,高木健,安川宏紀:三次元理論による計算法,運動性能委員会第11回シンポジウム第3編第3章,日本造船学会(1994),pp.219-292

## 6. Appendix 規則波中応答の比較

## 6.1 周波数応答関数

(次頁以降)







図 6.1.3 Surge の応答関数 (Chi=60deg)



(327)



(328)


















(337)









128













図 6.1.24 S.S. 2.0 における捩りモーメントの応答関数 (Chi=90deg, 60deg)



図 6.1.25 S.S. 2.0 における捩りモーメントの応答関数 (Chi=30deg 及び縦軸を縮小した 30deg)





(350)



図 6.1.28 S.S. 5.5 における縦曲げモーメントの応答関数 (Chi=60deg, 30deg)



図 6.1.29 S.S. 5.5 における縦曲げモーメントの応答関数 (Chi=Odeg)



(353)



図 6.1.31 S.S. 5.5 における水平曲げモーメントの応答関数 (Chi=90deg, 60deg)



図 6.1.32 S.S. 5.5 における水平曲げモーメントの応答関数 (Chi=30deg)





(357)



図 6.1.35 S.S. 7.5 右舷喫水下 53mm における水圧の応答関数 (Chi=60deg, 30deg)



図 6.1.36 S.S. 7.5 右舷喫水下 53mm における水圧の応答関数 (Chi=0deg)



図 6.1.37 S.S. 7.5 船底 C.L.より右舷側 42mm における水圧の応答関数 (Chi=180deg, 150deg)



(361)



図 6.1.39 S.S. 7.5 船底 C.L.より右舷側 42mm における水圧の応答関数 (Chi=60deg, 30deg)



図 6.1.40 S.S. 7.5 船底 C.L.より右舷側 42mm における水圧の応答関数 (Chi=0deg)



(364)



図 6.1.42 S.S. 7.5 左舷喫水下 53mm における水圧の応答関数 (Chi=120deg, 90deg)



図 6.1.43 S.S. 7.5 左舷喫水下 53mm における水圧の応答関数 (Chi=60deg, 30deg)


図 6.1.44 S.S. 7.5 左舷喫水下 53mm における水圧の応答関数 (Chi=0deg)











(372)





(374)











図 6.2.4 S.S. 5.5 における縦曲げモーメントの高周波成分の標準偏差 (Chi=Odeg)