甲板打ち込みを伴う大波高中の肥大船に働く波浪荷重 に関する研究（第1報 模型水槽実験）

正員 松 波 亮 樹*	正員 熊 野 厚*
正員 朱 庭 耀*	林 竜 也**
正員 影 本 浩***	正員 谷 澤 克 治****
正員 小 川 剛 孝****	正員 南 真紀子****

Wave Loads Acting on a Blunt Ship in Regular and Irregular Extreme Waves
with Green Sea Loading on Decks (1st Report: Model Tests)

by	Ryoju Matsunami, <i>Member</i>	Atsushi Kumano, <i>Member</i>
	Tingyao Zhu, <i>Member</i>	Tatsuya Hayashi
	Hiroshi Kagemoto, <i>Member</i>	Katsuji Tanizawa, <i>Member</i>
	Yoshitaka Ogawa, <i>Member</i>	Makiko Minami, <i>Member</i>

Summary

Wave basin experiments of a blunt ship model were conducted comprehensively in regular and irregular extreme waves. Six degrees of motions, vertical as well as horizontal bending moments at the midship section, hydrodynamic pressures on the hull at 20 locations, relative wave elevations at 5 locations and green sea loads on fore deck and two hatch covers were measured in a quite systemic manner. The selected regular wave conditions were 5 different wave encountering angles, 6 different wave frequencies and 4 different incident-wave heights, while the selected irregular ones were only the head and beam seas with the significant wave height of 10.6 meters and the mean wave period of 14 seconds. The main purpose of the experiments is to investigate and understand the characteristics on the wave-induced motions, hydrodynamic pressures and loads in extreme waves especially as the green sea loading on the decks. And the final objective of this study is to establish practical approaches of evaluating wave loads in extreme waves qualitatively and quantitatively. As the first report of this study, this paper mainly introduces the results obtained by the experiments. The nonlinear characteristics with respect to wave height of wave-induced ship motions and loads in extreme waves are also discussed with the phenomenon of the green sea loading on the decks.

1. 緒 言

ばら積み貨物船の一連の事故や Derbyshire の遭難事故を契機として、船体の保守・点検・検査の重要性が改

めて認識されるとともに、船体構造に加わる荷重、特に極めて厳しい波浪状況下で船体に働く波浪荷重をこれまで以上に正確に把握することが船体構造強度上の安全確保という観点から特に重要であることが指摘されている。

波浪荷重を推定する場合、これまでは主に線形ストリップ法を用いて船体運動、波浪断面力および変動水圧を推定している。このストリップ法は、水槽実験により実用的には十分な精度を有していることが確認されている。しかし、船体構造の強度検討に際して検討対象とな

* 財団法人日本海事協会
 ** 財団法人日本海事協会（実験当時：東京大学）
 *** 東京大学大学院新領域創成科学研究科
 **** 独立行政法人海上技術安全研究所

る大波高中の船体に働く荷重推定は線形ストリップ法の適用限界を超えていると考えられ、また、その推定精度を実験などで十分に把握しているとは言えない。このため、その手法により推定された荷重を強度検討に利用する場合には荷重の推定精度について慎重な検討が必要になってくる。波浪が甲板を超えるような大波高中では強非線形現象が生じていると考えられ、これらを把握するには水槽実験は欠かせない。過去にいくつかの実験^{1) 2) 3) 4) 5) 6) 7)}が行われているが、これらは通常波高5～6m程度のものであり甲板打ち込みを伴う程大きな波高では行われていない。

近年、数値計算手法の発展により、非線形船体運動および波浪荷重の時刻歴解析も試みられているが、比較すべき実験データが極少ないため、十分な検証がなされていない状況であると思われる。

これらの状況を考慮し、本研究では甲板を超えるような大波高中において船体に働く荷重特性を把握し、高精度で定量的な荷重推定法を確立するためのデータを収集することを目的として、入射波高（最大で1.4m）、波周期、波向きなどを系統的に変化させて水槽実験を行った。

さらに、不規則波中においても同様の実験を行った。今回は第1報として、得られた実験結果を中心に紹介する。

2. 水槽実験

2.1 実験水槽

本実験は海上技術安全研究所 80m角水槽（長さ 80m × 幅 80m × 深さ 4.5m）にて実施した。水槽には南側に波長 1.0m～14.0m、波高 0.6m まで、東側に波長 0.5m～10.0m、波高 0.2m までの波を起こすことが出来る造波機が2基設置しており、規則波および波長に対して任意のエネルギー分布を持つ不規則波を起こすことが出来る。但し、今回の実験では南側の造波機のみ用いており、模型船の発進位置によって波との出会い角を調整した。また、水槽の四隅には超音波受信機があり模型船に取りつけられた超音波発信機から発信される超音波を受信して船速や位置などを知ることが出来る。

2.2 供試模型

供試模型として海上技術安全研究所が保有する木製の肥大船模型を用いた。主要目および排水量などを Table 1 に示す。この模型船は、船体中央部の縦曲げモーメントおよび水平曲げモーメントを計測するために船体中央部で分割し、ロードセルを介して前後を接続している。

Table 1 The particulars of the ship model

Length	L _{pp}	4.500 m
Breadth	B	0.793 m
Depth	D	0.390 m
draft	d	0.285 m
Displacement	Δ	850.7 kgf

2.3 試験条件

2.3.1 船速

船速は $U=0.872\text{m/s}$ （実船で 14knot, $Fn=0.131$ ）とした。但し、一部船速ゼロの実験も行った。

2.3.2 波条件

規則波中実験における波条件を Table 2 に、不規則波中実験における波条件を Table 3 にそれぞれ示す。

但し、 H_w は入射波高、 λ/L は波長船長比、 χ は波と船との出会い角であり、 $\chi=180^\circ$ で向波、 $\chi=90^\circ$ で右舷側からの横波を示す。

Table 2 Experimental Conditions in Regular Waves
 $Fn=0.131$

$H_w=0.088\text{m}$ (Full Scale 6.0m)	
λ/L	0.5, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5 (1.1 only beam sea)
χ (deg.)	0, 45, 90, 135, 180
$H_w=0.147\text{m}$ (Full Scale 10.0m)	
λ/L	0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5 (1.1 only beam sea)
χ (deg.)	45, 90, 135, 180
$H_w=0.176\text{m}$ (Full Scale 12.0m)	
λ/L	0.7, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5 (1.1 only beam sea)
χ (deg.)	45, 90, 135, 180
$H_w=0.205\text{m}$ (Full Scale 14.0m)	
λ/L	0.8, 1.0, 1.2
χ (deg.)	135, 180

$Fn=0$

$H_w=0.088\text{m}$ (Full Scale 6.0m)		
λ/L	0.5, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5	0.8, 1.0, 1.1
χ (deg.)	180	90

Table 3 Experimental Conditions in Irregular Waves

Wave Spectrum	I.S.S.C
Significant Wave height	10.6m (Full Scale)
Wave Angle and Fn	180deg. ($Fn=0$ and 0.131) 90deg. ($Fn=0.131$)
Mean Wave Period (sec.)	14.026 (Full Scale)
Duration	500 Wave Periods

2.3.3 計測項目

Fig. 1 Locations of Pressure gauges, Wave probes and Strain panels used to measure the green sea loads

計測項目は、船体運動、波浪縦曲げおよび水平曲げモーメント、波浪変動圧、相対水位、デッキ水圧、打ち込み荷重計測位置における船体加速度など合計 46ch である。

船体運動は、光ファイバージャイロにて 6 自由度の運動を計測した。

縦曲げ、水平曲げモーメントは、船体中央部に取り付けたロードセルによって計測した。

波浪変動圧は、歪みゲージ式圧力計を 20 点取り付け計測した。水面より露出している圧力計には、実験直前に水を掛けることによってサーマルショック⁸⁾を防止した。

相対水位は、右舷側（今回の実験では常に波上側）の 5 ヶ所に取り付けた容量式の波高計を用いて計測した。

デッキ水圧は、歪みゲージを取り付けたパネル（以下パネルゲージ）を用いて計測した。これもサーマルショックを防止するために直射日光を避けるなどの措置を取った。

船体加速度は、サーボ加速度計を用いて計測した。これらの計測器の取り付け位置を Fig. 1 に示す。

2.3.4 実験方法

模型船は完全な自由航走模型で無線を使って操縦し、計測を行った。計測中はモーター回転数で速度を、オートパイロットで Yaw 角をそれぞれ調整し、模型船が各実験状態に従って走行するようにした。どの実験でも予定速度の 0.872m/s（実船で 14knot）から誤差 3% 以内におさまるように本計測を行った。

船速ゼロの実験では Yaw 角のオートパイロットをあらかじめ強くかけておき、波と出会ってから模型船が流され始める瞬間にモーターの回転数を上げオートパイ

ロットを効かせ、常に一定の出会い角を保つようにした。船速、船位の測定は船底に取り付けた 2 つの超音波発信機と角水槽の四隅にある超音波受信機との相対位置から求まるデータをもとに行い、リアルタイムに観測しつつ記録した。

また、不規則波中での実験では、水槽の長さの制限により全てのデータを一度に計測することは不可能なので、約 500 波を 1 つの時系列として作成した不規則波を船速、出会い角毎に 20~30 分割して計測を行った。解析は各々の計測結果をつなげて 1 つのデータとして行った。船速は平均船速が所定の値になるようにモーターの回転数を調整した。

3. 実験結果および考察

3.1 規則波中

実験によって得られたデータとともにストリップ法 (STFM) による計算結果（波高 6 m での計算結果で、横揺れ非線形減衰力を考慮している。）も参考までに示す。なお、波高の表記は実船スケールで示している。

3.1.1 船体運動

船体運動に関しては主要な応答成分を捉えるためにすべてフーリエ解析を行い、フーリエ解析によって求められた出会い波周期と同じ周期の 1 次成分を各運動振幅とした。それらを波振幅 (h) あるいは波傾斜で無次元化したものを縦軸に、 λ/L を横軸にとった図を Fig. 2 に示す。

Pitch に関しては長波長域において、波高の増大とともに単位波高当たりの応答振幅が小さくなる非線形性を示している。特に波高 6 m から 10 m にかけて応答値

Fig. 2 RAO in regular waves Pitch($\chi=180^\circ, 135^\circ$), Heave($\chi=180^\circ, 135^\circ$), Roll ($\chi=90^\circ, 135^\circ$)

Fig. 3 Relative water height ($\chi=180^\circ, 135^\circ$ at stem, $\chi=90^\circ$ at SS 5.5)

が大きく落ちているが、これは波高の増大に伴う波高影響に加えて、波高10mを超えると甲板への波の打ち込みが激しくなることも原因として考えられる。(次項、相対水位参照)

Heave に関しても Pitch と同様のことが言える。

Roll に関しては横揺れ同調付近において顕著な非線形性が見られるが、これは従来から知られている横揺れの非線形減衰力によるものと考えられる。また、この時甲板上に波が被ってきておりこれが Roll を抑制する方向に働いていることも一因だと考えられる。

3.1.2 相対水位

今回の実験では各実験毎に0点計測を行い、その時の水面と船体との接触高さ(喫水)を0とし、その後の喫水線と水面変位との相対距離変動を計測した。得られたデータをフーリエ解析し、それにより求めた出会い周期と同じ周期の1次成分を変動振幅とした。この変動振幅を縦軸に、 λ/L を横軸にとった図を Fig. 3 に示す。図中の D-d という直線は乾舷の高さを示しており、これより上方にシンボルがあると甲板上に波が打ち込んでいる、ということを示している。

Stem に取り付けられた相対水位計 RWL 1 より、 $\lambda/L=1.5$ のときの相対水位は波高6mから10mにかけて大きく増加していることがわかるが、これは甲板上に打ち込む波の高さの増加を示している。これより甲板上に打ち込む波が、前項における Pitch の応答値が示す非線形性に大きく影響しているものと考えられる。

但し、非線形性の原因としては、波高影響や3次元影響なども考えられるため、甲板打ち込みによって発生する非線形性がどの程度なのかは今後詳しく検討して行く必要がある。

SS 5.5 の波上側に取りつけられた RWL 4 より、 $\lambda/L=1.0$ のときの相対水位も波高6mから10mにかけて大きく増加しているが、これも前項における Roll が示す非線形性に影響を与えているものと思われる。ただし、実験時の様子から横波状態では縦波状態での打ち込みほど大きな衝撃はかかっていないと思われるので、その影響は Pitch に比べて小さいものであると考えられる。

3.1.3 波浪断面力

船体中央部に働く縦曲げおよび水平曲げモーメントを示す。実験によって得られたデータをフーリエ解析す

Fig. 4 RAO in regular waves (Vertical Bending Moment, Horizontal Bending Moment)

ることによって求められた出会い波周期と同じ周期の1次成分を応答値とし、縦軸にその応答を無次元化したものをとり、横軸に λ/L をとった図をFig. 4に示す。

縦曲げモーメントに関しては、向波で λ/L が1.2の時、および斜向波で λ/L が1.0の時に、波高の増大とともに単位波高当たりの応答振幅が小さくなる非線形性を示している。これは過去に報告されている大波高中のコンテナ船の実験結果⁷⁾とは逆の傾向を示しているがその原因としては、今回の模型が大型肥大船でありフレアがほとんどない船型が影響していると思われる。また、今回の実験では大波高による甲板打ち込みが発生していることからそのことも影響していると考えられる。

水平曲げモーメントに関しては、斜追波の時は非線形性が見られず、単位波高当たりの応答値が概ね同程度であると言えるが、横波、斜向波の時は応答値が波高に対して非線形性を示していることがわかる。

3.1.4 波浪変動圧

波浪変動圧は、水圧計によって計測されたデータをフ

ーリエ解析法によって解析し、出会い波周期と同じ周期の1次成分を応答値とした。ただし、喫水線近傍の点では船体運動と波面変動との相対関係によって水圧計が波面を出入りするため^{6) 9) 10)}、得られる時系列データがFig. 5の実線に示すような半波波形になる。したがって、これを正確に解析するためにFig. 5に示す方法で半波波形を正弦波形に変換する半波処理を行い、それらを目で読むことによって応答値を得た。

Fig. 6-1~16に示す図は、各波高において計測された波浪変動圧の内、 $\lambda/L=0.8, 1.0, 1.2$ の3種類の波長に対する向波、斜向波、横波、斜追波の結果で、縦軸に応答値の無次元値、横軸に波高をとった図である。

全体的に見ると、各計測点において計測された波浪変動圧の単位波高あたりの応答は波高の増大に伴って小さくなっているが、その減衰の傾向は場所によって異なっていることがわかる。波上側の喫水線近くにあるP1, P2, P3, P5, P13, P20に関しては、波高に対する非線形性という面では類似した傾向を示し、横波の状態で

Fig. 5 A specification of correction for the pressures where the measured positions were exposed to the air

Fig. 6-1~8 Pressure (P1, P2, P3, P5, P6, P7, P8, P9)

Fig. 6-9~16 Pressure (P10, P13, P14, P15, P16, P17, P18, P20)

顕著な非線形性が現れている。

また、P2, P3 においては斜追波の状態、P13, P20 においては向波、斜向波の状態でも非線形性が認められる。

SS 6 の船底から船底近くにある P6 ~ P10 に関しては、P6 と P10 において横波の状態では非線形性が現れるものの、それ以外では大きな非線形性は認められない。 $\lambda/L=1.0$ のときに特に非線形性が強く出ているが、これは Roll の同調周期付近であることから Roll に伴う非線形現象が波浪変動圧にも起きていると考えられる。

船首部分の船底から船底近くにある P14 ~ P18 に関しては、向波、斜向波の状態では非線形性が現れているが、特に長波長の波においてその傾向は強くなっている。これは Pitch の長波長域における非線形性の影響を受けているものと考えられる。

3.2 不規則波中

I.S.S.C の波スペクトラムに従う不規則波を発生させて実験を行った。実験状態は先に Table 3 で示したとおりである。

実験は約 500 波を 1 つの時系列として作成した不規則波を船速、出会い角毎に 20 ~ 30 分割して計測を行い、各々の計測結果をつなげて 1 つのデータとして解析を行った。以下に代表的な応答について解析を行う。

解析では各応答値をピークトゥピークで読み取り、頻度分布を求め超過確率分布を出した。船体応答は狭帯域のスペクトルを持ち、各応答の極大値は Rayleigh 分布に従うと考えられるので、実験値の超過確率分布と Rayleigh 分布による超過確率を比較することとする。

3.2.1 向波中、 $F_n=0.131$

Fig. 7-1 に Pitch と縦曲げモーメントのピーク値の超過確率分布を Rayleigh 分布に基く計算結果とともに示す。図の縦軸は超過確率、横軸は各応答値である。

Pitch に関して、応答がかなり大きくなると Rayleigh 分布よりも超過確率がやや小さくなるのは規則波中にみられた向波中での Pitch の非線形性と整合しており、大波高中で単位波高あたりの応答が波高の増大に対して小さくなる傾向が現れている。

縦曲げモーメントに関しては、荷重が大きくなるほど

Fig. 7-1 Exceedance of Probability (Pitch, Vertical Bending Moment)

Fig. 7-2 Exceedance of Probability (Roll, Horizontal Bending Moment)

Rayleigh 分布より実験値の超過確率が低くなっており、大波高中での非線形性がうかがえる。

3.2.2 横波中, $Fn=0.131$

Fig. 7-2にRollと水平曲げモーメントのピーク値の超過確率分布をRayleigh分布に基く計算結果とともに示す。

Rollに関して、応答が大きくなると急激にRayleigh分布よりもRoll角が小さくなっていることから、非線形な横揺れ減衰力が顕著に現れているといえる。これは規則波中에서도見られた傾向で、相互の結果に整合性があることがわかる。

水平曲げモーメントに関しては、ほぼ線形理論通りの実験値を示しており、Rayleigh分布の方が安全サイドであることがわかる。

4. 結 言

船殻の構造強度を考える場合、大波高中に船体に加わる波浪荷重を正確に推定する必要がある。しかしながら、これはストリップ法を初めとする線形解析法の適用限界を越えており、また、非線形解析法においては、その推定精度が十分検証されていない状況にあると考えられる。このため、今回系統的な水槽実験を行い、大波高中における船体運動、波浪断面力、波浪変動圧の系統的なデータを得た。

これにより、波浪荷重の非線形性の多くは、従来から知られていたRollの非線形性に加え、Pitchの非線形性の影響が大きい事がわかった。

また、この非線形性には大波高による波高影響や3次元影響に加えて、甲板に打ち込む波が大きく影響を与えていることもわかった。

今後はこれらの解析を進めることにより船体運動、波浪断面力、波浪変動圧、打ち込み荷重などの応答の相関関係を捕え、大波高中での非線形性を考慮した高精度で定量的な波浪荷重推定法を確立して行きたい。

謝 辞

本研究は、日本海事協会、東京大学、海上技術安全研究所、日本造船技術センターによる共同研究として実施されたものである。ここに、関係各位に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 秋田好雄, 郷田国夫, 田崎亮: T2-SE-A1 タンカー模型による波浪中の船体曲げモーメントの研究 (第1報), 造船協会論文集, 第110号 (1962)

- 2) 藤野正隆, 伊範相, 河田潤, 吉野玄三郎: 大波高波浪による船体の波浪荷重に関する研究 (第1報), 日本造船学会論文集, 第156号 (1984)
- 3) 藤野正隆, 伊範相, 河田潤, 吉野玄三郎: 大波高波浪による船体の波浪荷重に関する研究 (第2報), 日本造船学会論文集, 第157号 (1985)
- 4) 藤野正隆, 伊範相, 河田潤, 吉野玄三郎: 大波高波浪による船体の波浪荷重に関する研究 (第3報), 日本造船学会論文集, 第158号 (1985)
- 5) (社)日本造船研究協会: 第228研究部会 波浪中の船体構造の安全評価の研究 平成10年度報告書 2.1.2 大波高時の非線形影響に関する検討 (P47~119) (1999)
- 6) Miyake, R., Kinoshita, T., Kagemoto, H. and Zhu, T.: Ship Motion and Loads in Large Waves, Proc. 23rd Symposium on Naval Hydrodynamics, Val de Reuil, 2000, P48-61.
- 7) 溝上宗二, 安川宏紀, 黒岩隆夫, 末岡英利, 西村信一, 宮崎智: 大波高中におけるコンテナ船の波浪荷重, 日本造船学会論文集, 第189号, 2001, P181-192
- 8) 第216研究部会: 大型船縦通肋骨材の強度に関する研究 平成4年度報告書, 日本造船研究協会, 1992
- 9) 谷澤克治, 田口晴邦, 猿田俊彦, 渡辺巖: 短波長域を航走するVLCCの船側に働く波圧に関する模型実験, 日本造船学会論文集, 第174号, 1993, P233-242
- 10) 土岐直二, 戸沢秀, 福岡祐二, 和田洋二郎: VLCC船型に作用する波浪変動圧力の特性とその長期予測について, 日本造船学会論文集, 第176号, 1994, P375-385