大波高波浪中の船体波浪荷重に関する水槽実験

技術研究所　松波 亮樹　三宅 竜二

1. 緒　言

従来から船体の運動や船体に働く波浪荷重は単位波高あたりに換算すると波高が高くなるにつれて一般に減少することが知られている。これに対し、現在、主に波浪荷重推定法として用いられている線形ストリップ法では微小振幅を前提とした線形理論であることから、船体構造設計などに必要とされる遭遇確立 10^{-8} レベルでの当該物理量の線形長期予測値は現実の値よりかなり大きめの値であることが、実船による長期計測結果などから推定されている。また、航路変更によって嵐を回避するなどの実際の操船を考えれば、遭遇確立 10^{-8} レベルの荷重を設計に用いることは現実にそぐわない場合も多いと考えられている。このような非現実的な過度の設計荷重を避けるために、従来は例えば 10^{-8} レベルの線形長期予測値に 1 より小さなある経験定数を掛けたり、あるいは遭遇確立を 10^{-8} から 10^{-6} に下げるなどの便宜的な手法が用いられてきた。しかしながら、このような経験的な手法では運動や荷重に関するデータベースの存在しない新しい船型を設計する場合にどのような定数や遭遇確率を採用すべきかについての信頼できる根拠が得られにくい。そこで、これまでも大波高中における船体運動や船体波浪荷重に関する研究は、水槽実験 [1)2)3)4)5)6)] や、CFD 等の非線形数値計算による研究 [7)8)9)] が様々な研究機関において行われてきた。しかしながら、過去において行われた水槽実験の多くは、大波高中におけるせん断力や曲げモーメントなどいわゆるマクロな量の非線形性を調べるための実験であり、船体各部に働く波浪変動圧力などの詳細にまで立ち入った計測はほとんど行われていない。また、いずれも入射波との出会角、出会周波数あるいは入射波高など船体運動や船体波浪荷重にとって重要なパラメータのある限られた範囲の試験に留まっている。一方、CFD 等の非線形数値計算法は現在鋭意開発中であるが、未だ定量的に船体運動や船体波浪荷重の非線形性を説明し得る段階には至っていない。

このようなことから、本研究では甲板打ち込みを伴うような大波高中を航行する船舶の運動や船体に働く波浪荷重の非線形性を詳細に調査し、そのメカニズムを考察すると共に、現在開発中の非線形計算法の比較・検証データを得ることを目的として、肥大模型船を用いて、模型船と波との出会角・出会周波数・入射波高を系統的に変化させ、その中を航行する当該模型船の運動・波浪荷重及び船体 20 箇所における波浪変動圧力、さらには甲板荷重を計測するといった従来にない詳細な水槽実験を行った。以下、このような水槽実験により得られた結果を示すと共に、得られたデータから、各種応答の非線形特性のメカニズムについて考察・検討した結果を報告する。

2. 水槽実験

2. 1 供試模型

供試模型は海上技術安全研究所が保有する木製肥大船模型を用いた。この供試模型はほぼ剛体とみなせ、曲げモーメントを計測するために船体中央部で二分割された二分割模型である。
この模型船の主要目を Table 1 に示す。

Table 1 The particulars of the ship model

Length	Lpp	4.500 m
Breadth	B	0.793 m
Depth	D	0.390 m
draft	d	0.285 m
Displacement	Δ	850.7 kgf

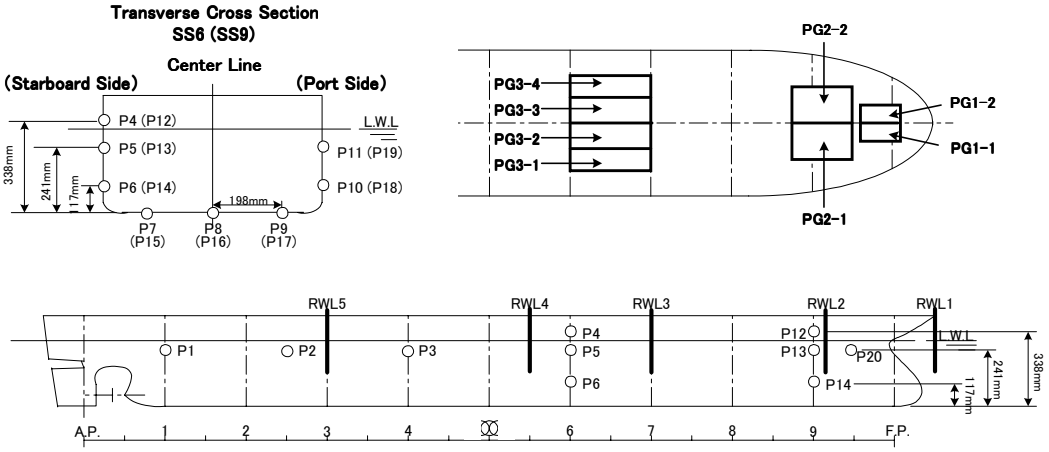


Fig.1 Locations of pressure gauges, Wave probes and Strain panels used to measure the green sea loads

2. 2 実験方法

水槽実験は海上技術安全研究所 80m 角水槽（長さ 80m×幅 80m×水深 4.5m）において実施した。80m 角水槽には曳航電車が無いため、模型船を無線で操縦し、完全自由航走状態で実験計測を行った。計測中は波との出会角と前進速度を一定に保つためにオートパイロット装置とプロペラ回転数を固定できる自航機を使用した。模型船の前進速度と船位については、超音波式位置指示器により測定を行い、所定速度(0.872m/s：実機で 14knot)の 3%内に到達するまで試行錯誤により自航機のプロペラ回転数を変化させて実験を繰り返し行った。

2.3 計測項目及び計測方法

水槽実験における計測項目は、船体運動、波浪変動圧力、船体中央曲げモーメント、相対水位、甲板打ち込み荷重である。波浪変動圧測定用水圧計、相対水位計及び甲板打ち込み荷重測定用パネルゲージの取り付け位置を Fig. 1 に示す。

船体運動は光ファイバージャイロを用いて 6 自由度の運動を計測した。波浪変動圧力は Fig. 1 に示すように船体表面 20 箇所に水圧計を取り付け計測した。船体中央曲げモーメントは船体中央分割部を検力計で接続し、縦曲げ、水平曲げモーメントを計測した。相対水位は右舷側(weather side)の 5 箇所(Stem, S.S.9.15, S.S.7, S.S.5.5, S.S.3)に容量式波高計を取り付け計測した。甲板打ち込み荷重は歪みゲージ式のパネルゲージを取り付け計測した。パネルゲージに作用する打ち込み荷重はパネルゲージの自重による慣性力を除いたものであるので、その影響を考慮するためにパネルゲージ中央直下にサーボ式加速度計を取り付け、船体運動による垂直方向加速度についても計測した。

Table 2　Experimental parameters in Regular Waves

Fn=0.131

H_w=0.088m　(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=0.147m　(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=0.176m　(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=0.205m　(Full Scale 14.0m)		
λ/L	0.8, 1.0, 1.2	
χ(deg.)	135, 180	

Fn=0.0

H_w=0.088m　(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

2.4 試験条件

本水槽実験では規則波及び不規則波中における実験を行ったが、本研究では規則波中における水槽実験について示す。

規則波中実験では、Table 2 に示すように入射波の波長と出会角及び入射波高を系統的に変化させて水槽実験を行った。入射波との出会角については、向波を 180deg.、追波を 0deg.とした。また、船速に関しては、フルード数 Fn=0.131　(0.872m/s：実機で 14knot)で実施した。尚、船速ゼロについても一部実験を行った。

Photo 1　The situation of an experiment in regular waves

3. 水槽実験結果及びその考察

3. 1　相対水位

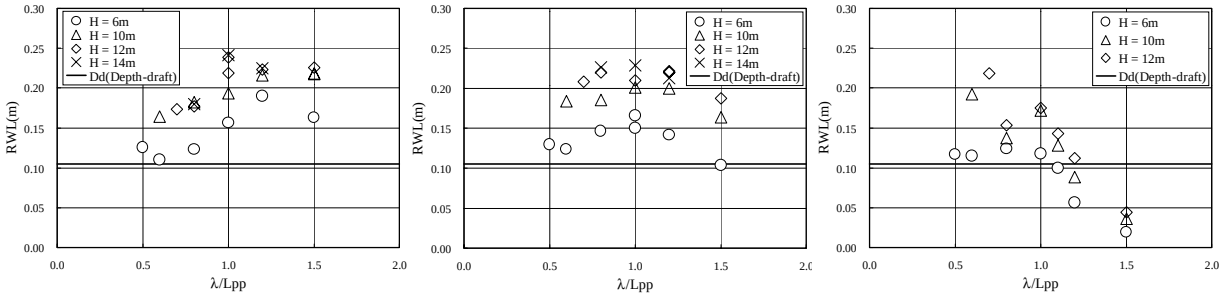
計測した相対水位より求めた応答曲線の代表例を Fig. 2 に示す。横軸に波長船長比 λ/L を、縦軸に相対水位の振幅を示す。ここで示す値は、計測値の主要な応答成分を捉えるために、計測波形をフーリエ解析して求めた出会波周期と同じ周期をもつ一次成分の振幅とした。尚、図中の "H=6m", "H=10m", "H=12m", "H=14m"は実機換算で波高 6, 10, 12, 14m における実験結果を示している。また、図中の" Dd(Depth-draft)"は乾玄の高さを示しており、これより上方にシンボルがある場合は甲板上に波が打ち込んでいる状態を意味している。これらの実験結果より、船首部では向波(180deg.)や斜向波(135deg.)において、船体中央部では横波(90deg.)において、 photo 1 に示すように甲板上に波が激しく打ち込んでいることが分かる。

3. 2　船体運動

計測された運動変位より求めた船体運動の応答曲線の代表例を Fig. 3 に示す。横軸に波長船長比 λ/L を、縦軸に入射波の振幅(Roll, Pitch は波傾斜)で無次元化した単位波振幅あたりの運動変位の振幅を示す。ここで示す値は、計測値の主要な応答成分を捉えるために、計測波形をフーリエ解析して求めた出会波周期と同じ周期をもつ一次成分の振幅とした。

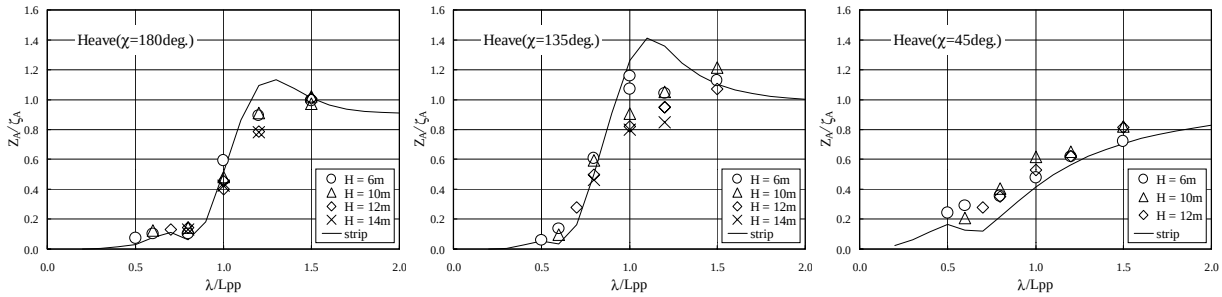
相対水位と同様に、図中の"H=6m", "H=10m", "H=12m", "H=14m"は実機換算で波高 6, 10, 12, 14m における実験結果を示し、 "strip"は波高 6m におけるストリップ法(STFM)による計算結果を示している。

Roll 運動に関しては、斜向波(135deg.)、横波(90deg.)において、波高の増大と共に単位波高あたりの応答振幅が顕著に小さくなる非線形性が見受けられる。これらの領域は Roll 運動の同調周期及びその近傍である。同調周期付近の Roll 運動はビルジキールからの渦放出などに伴う非線形

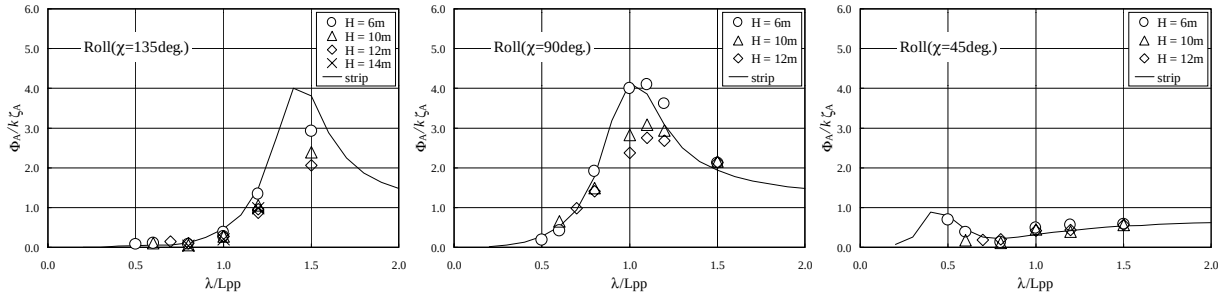


(a) Stem (χ=180deg.) (b) Stem (χ=135deg.) (c) S.S.5.5 (χ=90deg.)

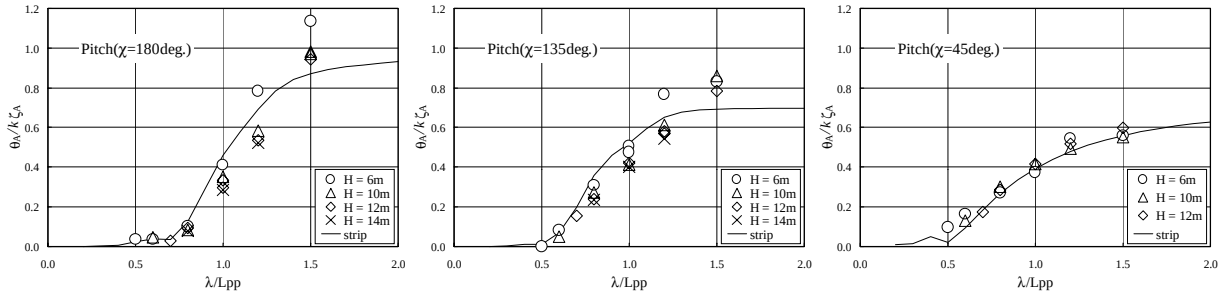
Fig. 2 The experimental results on relative water height of the model



(a) Heave motion amplitude(Z_A) (χ=180, 135, 45deg.)



(b) Roll motion amplitude(Φ_A) (χ=135, 90, 45deg.)



(c) Pitch motion amplitude(θ_A) (χ=180, 135, 45deg.)

Fig. 3 The experimental results on motion amplitude of the model in regular wave

減衰力のために単位波高あたりの運動変位は、波高の増大に伴って顕著に減少することが従来から知られており、本実験結果からもこの従来の知見が再確認された。

Heave 運動に関しては、向波(180deg.)、斜向波(135deg.)のλ/L=1.2 周辺において、波高の増大と共に単位波高あたりの応答振幅が小さくなる非線形性が明らかに認められる。これらの波向・波長域における出会い周期は Heave 運動の固有周期に対応しており、Heave 運動の同調点周囲におけるこのような非線形特性は先に行われた水槽実験[6)]においても確認されている。さらに、Pitch 運動についても Heave 運動の非線形性が示された波向・波長域で非線形性が見受けられる。しかしながら、これらの波向・波長域における Pitch 運動の非線形性は、先に行われた実験結果[6)]では、本実験結果程、明らかな非線形性が示されてはいない。先に行われた水槽実験[6)]では、波が甲板上に打ち込むような大波高では実験計測を行っていないが、本水槽実験では Fig. 2-(a)(b)に示すように、これらの波向・波長域では、特に甲板上への波の打ち込みが激しかったことから、打ち込み荷重が Pitch 運動の非線形性に大きな影響を与えたと考えられる。

同様に Fig. 2-(c)に示すように横波(90deg.)においても船体中央部の甲板上に波の打ち込みが生じていたことから、先の Roll 運動の非線形性にはビルジキールからの渦放出などに伴う非線形減衰力だけではなく、打ち込み荷重による影響も含まれていると考えられる。

3. 3 波浪変動圧力

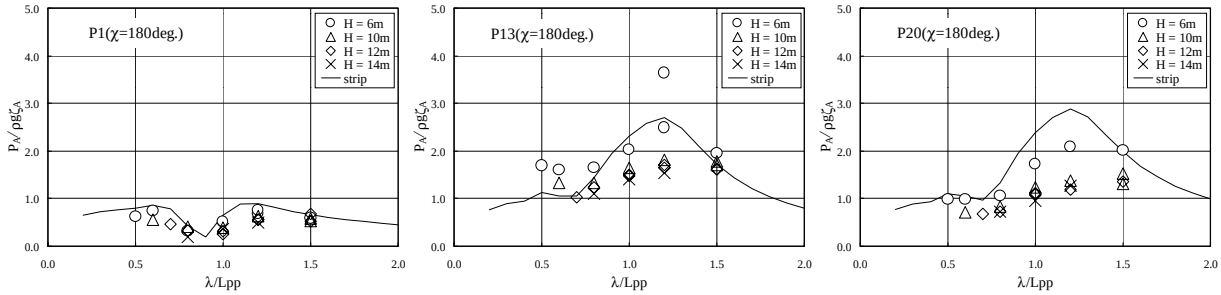
船首水線面近傍(P13, P20)及び船尾水線面近傍(P1)における波浪変動圧力の応答曲線を、船体中央断面(S.S.6；P5, P6, P7, P10)における波浪変動圧力の応答曲線をそれぞれ Fig. 4, Fig. 5 に示す。（ただし紙面の都合上、実験結果の代表的なものについてのみ示した。）各図共に、横軸に波長船長比λ/L を、縦軸に入射波の振幅に相当する水頭圧で無次元化した単位波振幅あたりの波浪変動圧力の振幅（計測値の主要な応答成分を捉えるために、出会い周期と同じ周期成分を持つ一次成分の振幅）を示している。水線面近傍における水圧計では船体運動を含む相対水位変動から水圧計が空中に飛び出し、時系列波形が正弦波形を一部切り取ったようないわゆる半波形状となる場合がある。このような場合にはフーリエ解析による解析結果ではなく、半波処理[10)]を用いた解析結果を用いた。

さらに、船体運動と同様に図中の"H=6m", "H=10m", "H=12m", "H=14m"は実機換算で波高 6, 10, 12, 14m における実験結果を示し、"strip"は波高 6m におけるストリップ法(STFM)による計算結果を示している。

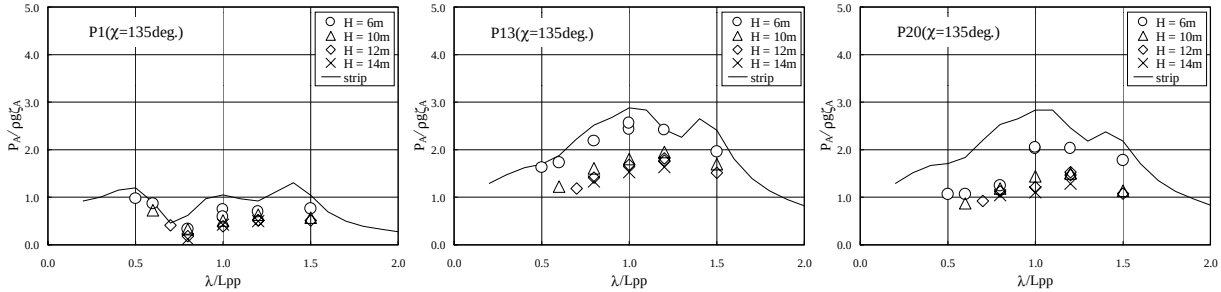
波浪変動圧力の実験結果から、次のような特徴的な非線形性が認められた。

(1) 向波(180deg.)、斜向波(135deg.)、横波(90deg.)中において波高に対する非線形性が大きく、そのほとんどは単位波高あたりの変動圧力応答振幅が波高の増大と共に小さくなる。斜追波(45deg.)中では、非線形性は相対的に小さいが、比較的に短波長域においては非線形性が見られる。

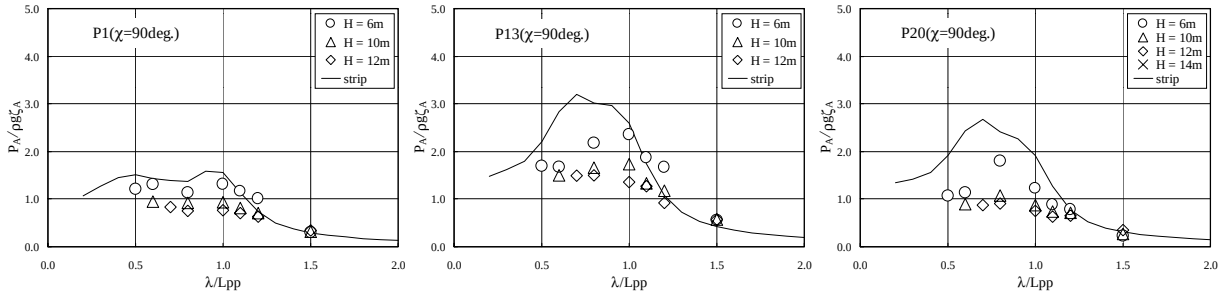
(2) 斜向波(135deg.)中においては、weather side における圧力の非線形性が lee side のそれに比べて大きい。



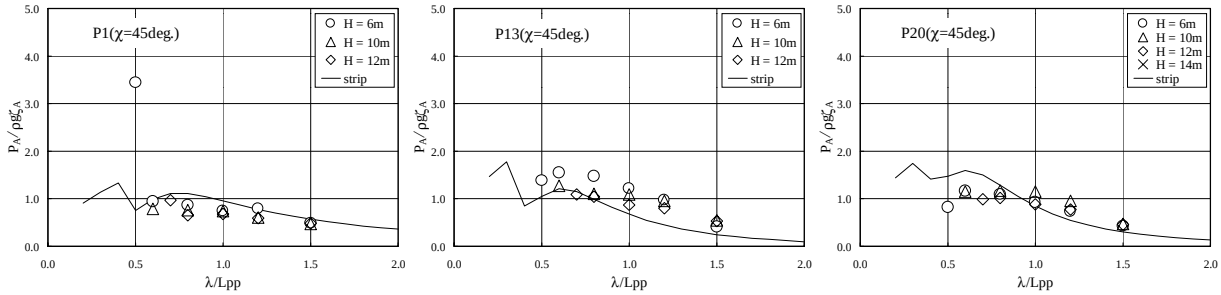
(a) χ=180deg. (P1, P13, P20)



(b) χ=135deg. (P1, P13, P20)



(c) χ=90deg. (P1, P13, P20)



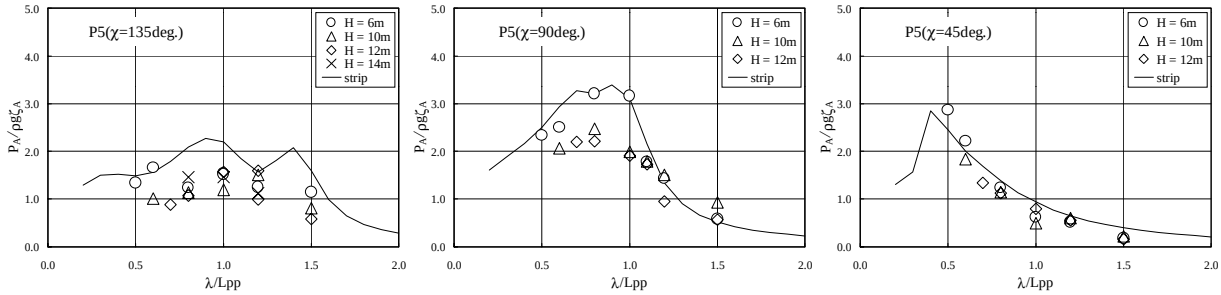
(d) χ=45deg. (P1, P13, P20)

Fig. 4 The experimental results on pressure amplitude(P_A) at P1, P13, P20 of the model

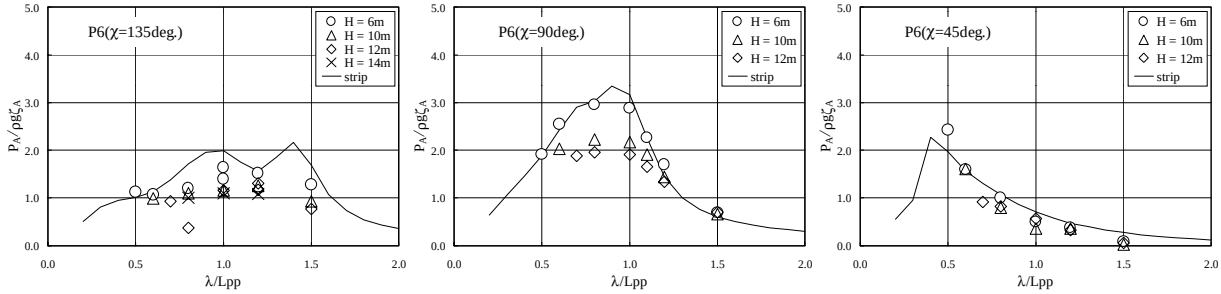
(3) 水面近傍で船首に近い部分の圧力において、非線形性が大きい。

(4) P7 などの midship 船底では圧力応答振幅の絶対値が小さく圧力応答振幅は波高に対してほぼ線形であるが、斜向波(135deg.)や横波(90deg.)では、水面下のかなり深い部分 P6 でも顕著な非線形性が存在する。

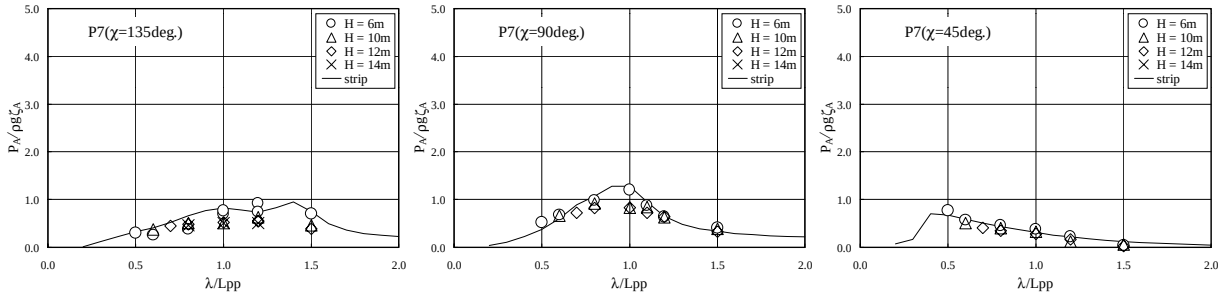
(3)に述べた水面近傍の圧力点における非線形性は、向波・斜向波中の船首部分は波の Diffraction が大きいところであることから、短波長域においては波力の非線形性が要因として考えられる。



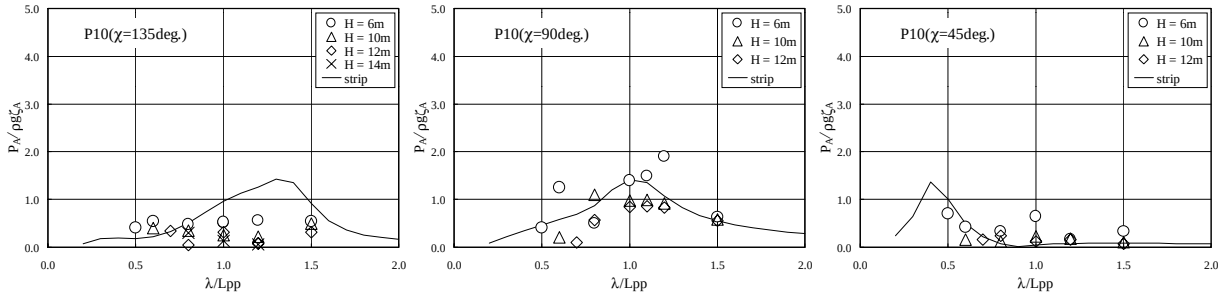
(a) P5 (χ=135, 90, 45deg.)



(b) P6 (χ=135, 90, 45deg.)



(c) P7 (χ=135, 90, 45deg.)

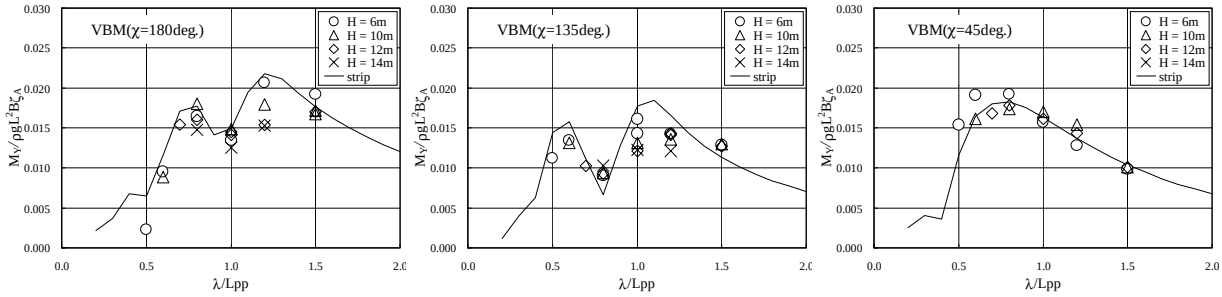


(d) P10 (χ=135, 90, 45deg.)

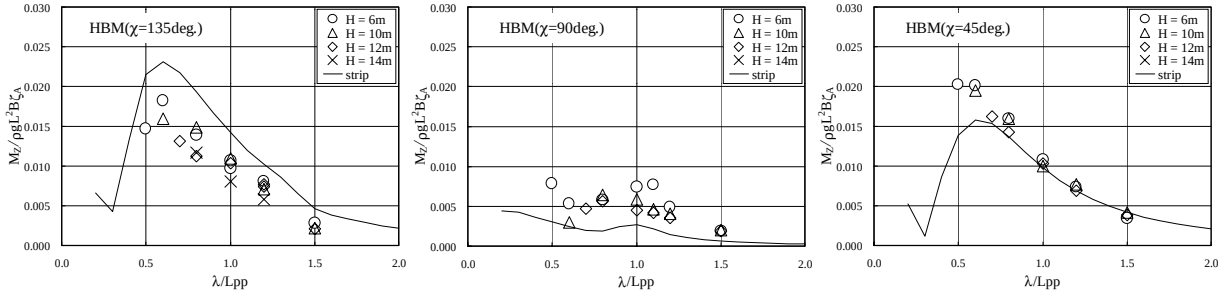
Fig. 5 The experimental results on pressure amplitude(P_A)
at S.S.6(P5, P6, P7, P10) of the model

さらに、長波長域においては Radiation 力や復原力の非線形性が影響してくるものと考えられる。

P6 などの水面からかなり深く大波高中においても空中に露出することのない部分の圧力振幅に非線形性が見られることは、その非線形性の現れる波長域が Roll 運動との同調点に一致していることから、Fig.3-(b)に示した Roll 運動の非線形特性に起因しているものと考えられる。



(a) Vertical Bending Moment (χ=180, 135, 45deg.)



(b) Horizontal Bending Moment (χ=135, 90, 45deg.)

Fig. 6　The experimental results on the bending-moment amplitude at the midship of the model

3. 4　船体中央曲げモーメント

Fig. 6 に船体中央曲げモーメントの応答曲線を示す。横軸に波長船長比λ/L を、縦軸に入射波の振幅で無次元化した単位波振幅あたりの曲げモーメントの振幅を示している。図に示す振幅の値は計測波形をフーリエ解析して求めた出会波周期と同じ周期をもつ一次成分の振幅である。船体運動や波浪変動圧力と同様に、図中の"H=6m", "H=10m", "H=12m", "H=14m"は実機換算で波高 6, 10, 12, 14m における実験結果を示し、"strip"は波高 6m におけるストリップ法(STFM)による計算結果を示している。

船側変動圧力には波高に対する大きな非線形性が存在したが、Fig. 6 に示す曲げモーメントには波浪変動圧力のような大きな非線形性は見受けられない。これはおそらく、曲げモーメントに関しては慣性力が支配的であることから、その慣性力を決める船体運動の非線形性が小さいためであると考えられる。しかしながら、向波(180deg.)におけるλ/L=1.2 付近や、斜向波(135deg.)中のλ/L=1.0 付近では単位波高あたりの船体中央縦曲げモーメントが波高の増大と共に小さくなる傾向が示されている。

これに対し、従来から大波高中においてスラミングなどを起こし、船底露出により衝撃荷重が生じた場合には、単位波高あたりの船体中央縦曲げモーメントが波高の増大と共に大きくなる傾向があると指摘されている [1)2)]。これはおそらく、本実験では船底露出が観察されていないことからスラミングによる衝撃荷重が船体には作用していないことと、本実験では甲板に激しい打ち込み荷重が作用していたことから、過大なサギングモーメントの発生を抑制していたことが要因として考えられる。

5. 結 言

甲板打ち込みを伴うような大波高中を航行する船舶の運動や船体に働く波浪荷重の非線形性を詳細に調査し、そのメカニズムを考察すると共に、現在開発中の非線形計算法の比較・検証データを得ることを目的として、肥大模型船を用いて、模型船と波との出会角・出会周波数・入射波高を系統的に変化させるといった従来にない詳細な水槽実験を行った。

得られた知見をまとめると以下のようになる。

(1) Roll 運動の同調現象に伴う運動の非線形性は従来から知られていたが、本水槽実験においてもこのような非線形性が再確認された。

(2) 向波や斜向波における Heave の同調点近傍で、単位波高あたりの Heave 運動の振幅が波高の増大と共に小さくなる非線形性が確認された。

(3) 甲板上打ち込み荷重の影響による Pitch 運動の非線形性(単位波高あたりの Pitch 運動の振幅が波高の増大と共に小さくなる)が見受けられた。

(4) 波浪変動圧力について、向波、斜向波、横波中において波高に対する非線形性が大きく、そのほとんどは単位波高あたりの変動圧力応答振幅が波高の増大と共に小さくなる。特に、水面近傍で船首に近い部分の圧力において非線形性が大きい。

(5) Roll 運動の同調点付近で水面近傍のみならず、水面よりかなり深い部分においても変動圧力振幅に顕著な非線形性が見られた。

(6) 向波、斜向波において船体中央縦曲げモーメントは単位波高あたりの応答振幅が波高の増大と共に小さくなる非線形性が見受けられた。

本研究の解析では、フーリエ解析により得られた一次の応答値を調べることにより、計測値における主要な応答成分の非線形特性について検討及び考察を行った。しかしながら、本水槽実験のように甲板打ち込みを伴う大波高中における強非線形現象を詳細も把握するためには、一次成分のみならず、高次の応答成分についても解析を行う必要があり、今後の課題である。

また、本実験における応答関数を用いて短期予測や長期予測を行うことで、短期予測や長期予測ベースで波高による非線形性の修正を行う係数（非線形性影響係数）を導くことが可能である。そこで、このような短期予測や長期予測ベースによる波高に対する適切な非線形影響係数を求めるための調査、検討を行っている。

謝 辞

本研究は海上技術安全研究所、東京大学、日本海事協会の共同研究として実施されたものであり、海上技術安全研究所運動性能部 渡辺巌部長(現理事)、東京大学大学院新領域創成科学研究科影本浩教授をはじめ、ご協力頂いた皆様に深くお礼を申し上げます。

参考文献

1) 山本善之, 藤野正隆, 深沢塔一 : 非線形性を考慮した波浪中の船体運動および縦強度, 日本造船学会論文集, 第 143 号, (1978), pp. 179-187
2) N.Toki, K.Hatakenaka, T.Takahashi, H.Fujii : Experimental and Theoretical Approach to the Estimation of Non-Linear Vertical Wave Load, Journal of The Society of Naval Architects of Japan, Vol.154, (1983), pp. 141-150
3) 藤野正隆, 伊 範相 : 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), pp. 169-158
4) 上野道雄, 渡辺 巌 : 船体縦曲げモーメントにおける非対称性について, 日本造船学会論文集, 第 162 号, (1987), pp. 175-182
5) 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), pp. 181-192
6) 三宅竜二, 朱庭耀, 影本浩 : VLCC 及びコンテナ船の大波高中における運動・波浪荷重に関する実験的研究, 日本造船学会論文集, 第 190 号, (2001), pp. 75-86
7) D.C.Kring, Y.F-.Huang, P.D.Sclavounos, T.Vada, A.Braathen : Nonlinear Ship Motions and Wave Induced Loads by a Rankine Panel Method, Proc.21th Symposium on Naval Hydrodynamics, Trondheim, (1996)
8) 木下嗣基 : 数値流体力学的手法による浮体の波浪中非線形運動の計算法に関する研究, 東京大学学位論文, (1999)
9) R.Miyake, T.Kinoshita, H.Kagemoto, T.Zhu : Ship Motions and Loads in Large Waves, Proc.23rd Symposium on Naval Hydrodynamics, Val de Reuil, (2000), pp. 48-61
10) 谷澤克治, 田口晴邦, 猿田俊彦, 渡辺巌 : 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), pp. 233-242