

巨大客船の横波中パラメトリック横揺れに関する実験的研究

正員 池田 良穂*
正員 Abdul Munif**

正員 片山 徹*
学生員 藤原 智***

Experimental Identification of Large Parametric Rolling of a Modern Large Passenger Ship

by Yoshiho Ikeda, *Member* Toru Katayama, *Member*
Abdul Munif, *Member* Tomo Fujiwara, *Student Member*

Summary

Modern large passenger ships usually have a buttock-flow hull shape with flat stern and large bow flare. Such shapes cause significant variations of the stability in waves. In the present study, measurements of roll motion of a scale model of a large passenger ship of 110,000 GT with such a hull shape in beam regular waves are carried out in a towing tank. The results demonstrate that when the ship has no bilge keels, large parametric rolling with 27 degrees of maximum amplitude appears at about half period of the natural roll period in 5m of wave height. The effects of wave height and roll damping on appearance and magnitude of the parametric rolling in beam seas are experimentally investigated.

1. 緒 言

近年、5000名以上の乗客乗員が乗る10万総トンを超える巨大クルーズ客船が続々と建造され、世界中で就航している。このような大型客船は、従来の客船に比べ、上部構造物が大きく、固有周期が長く、船幅に比べて喫水が浅い等の特徴がある。こうした大型でたくさんの人を乗せる客船の安全性を担保するために、その安全性について調査検討する必要性が国際海事機関(IMO)の場において提起され、その一環として各国で非損傷時復原性、損傷時復原性の分野の研究が積極的に進められている¹⁾。

本論文では、前述のような特徴を持つ巨大客船を対象として、横波中での非損傷状態における横揺れ特性について実験により調査した。その結果、これまで横波中については国内および国際的復原性規則等においても同調横揺れ時の危険性のみが検討対象となっていたが²⁾、こうした巨大客船に最近採用されている典型的な船型において、横揺れ減衰力が十分でない場合に、横揺れ固有周期の約半分の波周期において発生するパラメトリック横揺れが非常に大きな振幅にまで

発達して、船の安全性を脅かす可能性があることを実験的に確認することができた。また、パラメトリック横揺れの発生に及ぼす波高および横揺れ減衰力の影響について得られたいくつかの知見についても報告をする。

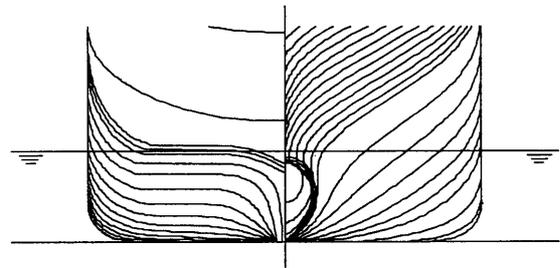


Fig.1 Body plan of the ship.

Table 1 Principle particulars of full-scale ship and its scale model.

	Full Scale	Model
Scale	1/1	1/125.32
L_{OA}	290 m	2.200 m
L_{PP}	242.24 m	1.933 m
Breadth	36 m	0.287 m
Draft	8.4 m	0.067 m
Displacement	53010 ton	26.98 kg
GM	1.579 m	0.0126 m
T_s	23 sec	2.05 sec
Bilge keel : width	1.1 m	0.0088 m
Bilge keel : location	s.s.3.0-5.0, s.s.5.25-6.0	

* 大阪府立大学大学院工学研究科

** Sepuluh Nopember Institute of Technology Surabaya

大阪府立大学客員研究員

*** 大阪府立大学工学部

2. 対象船

供試模型は、IMO における巨大客船の損傷時復原性に関する検討のために、イタリアのフィンカンテリ造船所が試設計した、架空の 11 万総トン級大型クルーズ客船の 1/125 縮尺模型¹⁾である。その正面線図および主要目を Fig.1 および Table 1 に示す。

この船の船型上の大きな特徴は、Fig. 1 の正面線図から分かるように、船尾がバトックフロー船型となっており、船尾船底が浅く平らであること、船首に比較的大きなフレアがあることである。また、横揺れ固有周期が、実船で 23 秒と比較的長いことも特徴の一つと言える。

3. 実験

模型船の上下揺れ、縦揺れ、横揺れ、左右揺れおよび横漂流を自由にした状態で規則横波をあて、そのときの運動の計測を行った。また、同時に水槽内に固定されたサーボ式波高計により、入射波の計測も行った。実験状態を Table 2 に示す。本供試船は、前後に 2 分割されたビルジキールを持っている。Table 2 に示すように、実験では、ビルジキールなし (without) およびビルジキール付 (full) に加え、前方ビルジキールのみの場合 (front)、後方ビルジキールのみの場合 (aft) についても運動の計測を行い、運動に及ぼす横揺れ減衰力の影響も調査した。

Table 2 Measured conditions.

	Full scale	Model
wave period	6.7 – 24.6 sec	0.6 – 2.2 sec
wave length	70 – 944 m	0.56 – 7.55 m
wave height	1.25 – 5 m	0.01 – 0.04 m
Bilge keel	without, full (front + aft) front : s.s. 5.25 – 6.0 aft : s.s. 3.0 – 5.0	

3.1. 裸殻状態での大振幅横揺れ

ビルジキールのない裸殻状態において、波高一定の条件下において、波周期を系統的に変化させた規則横波を当てて船体運動を計測した。横揺れ応答 (RAO) 結果を有次元値および無次元値で整理した結果を Fig. 2 および Fig. 3 に示す。Fig. 2 に示す結果から、波高 0.04m の結果において、横揺れ固有周期である 2.05 秒 (実船で 23 秒) 付近での同調横揺れ (約 7 度) よりもはるかに大きい、27 度に達する大振幅横揺れが、横揺れ固有周期の半分程度よりも若干短い波周期域 (約 0.8

秒) において発生していることが判る。また、この大振幅横揺れの振幅が波高の減少と共に減少し、波高が 0.03m (実船で 3.8m) 以下においてはほとんど現れないことも、この実験結果から確認できる。

同じ結果を波傾斜に対する横揺れ角として無次元化したのが Fig.3 である。無次元化すると、同調横揺れ時の方がそのピークが高くなっており、波傾斜に対する相対角度としては、この大振幅横揺れが同調時よりも必ずしも大きいわけではないことが確認できる。

こうした固有周期の 1/2 付近で横揺れが大きくなる現象については、古くからパラメトリック横揺れとして知られているが³⁴⁾、このような大振幅にまで発達する事例はまれで⁵⁶⁾、バトックフロー船型を持つ現代的な船型に特有な特性と考えられる。特に、巨大客船のように横揺れ固有周期が長く、その半分の周期である 10 秒前後の周波数域においては、海洋波のエネルギーが大きく、その領域において大振幅横揺れの可能性があることは、この種の船舶の安全性を考える上で重要となろう。

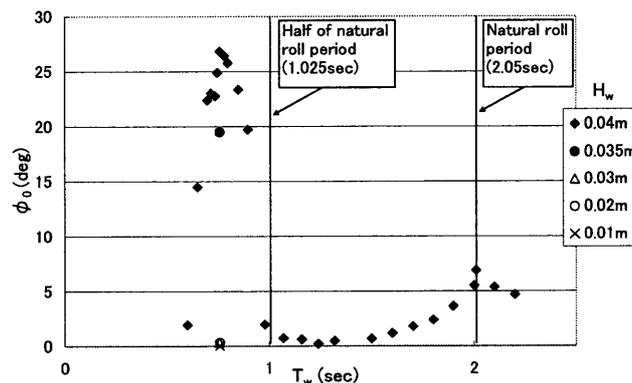


Fig.2 Measured roll amplitude for naked hull in regular beam waves.

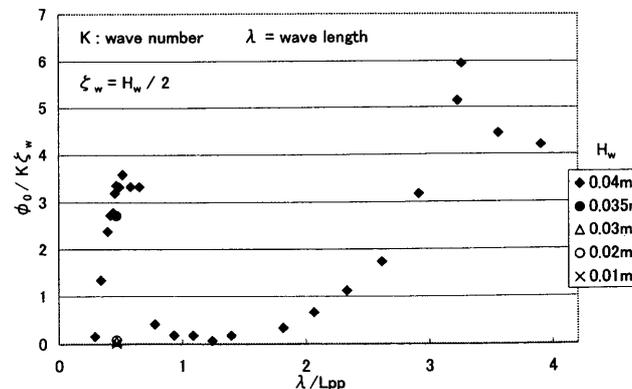


Fig.3 Non-dimensional roll amplitude for naked hull calculated by the same measured data shown in Fig. 2

3.2 時系列データの検討

前節に指摘した大振幅横揺れが、パラメトリック横揺れであることを検証するために、まず時系列データについての検討を行った。

まず、Fig.4 に、入射波の周期が横揺れ固有周期付近における、横揺れ同調時の時系列データを示す。上下揺れ、横揺れ共に入射波と同じ周期で変動しており、縦揺れはほとんど発生していない。次に、入射波周期が横揺れ固有周期の半分よりも若干短い 0.76 秒で、大振幅の横揺れが発現した場合

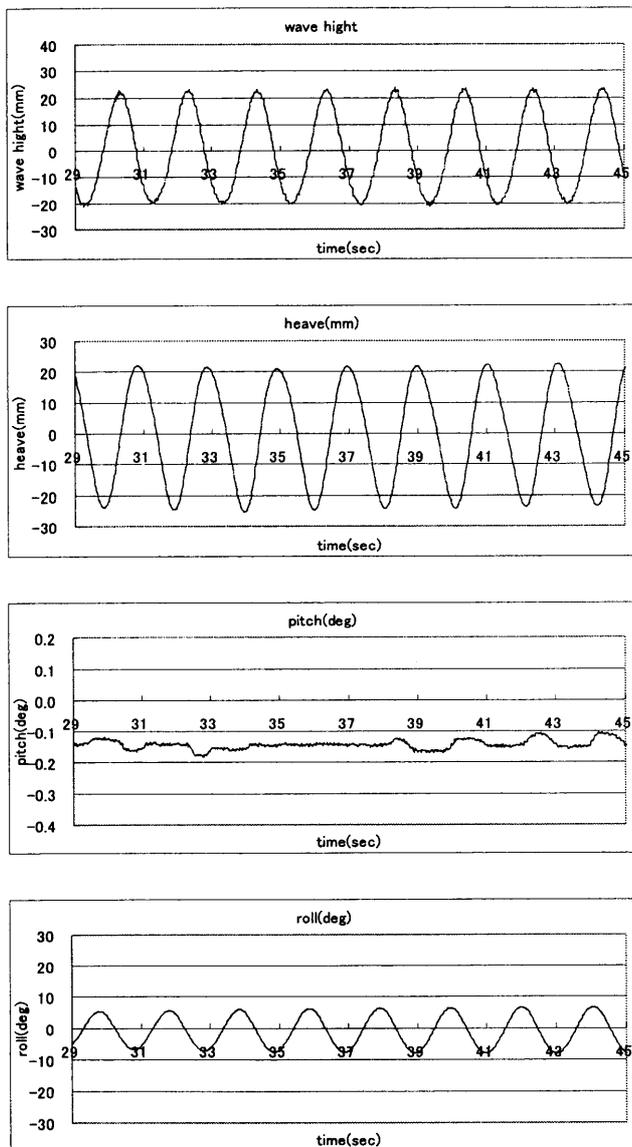


Fig.4 Time histories of measured data for naked hull at roll resonance condition at $H_w=0.04\text{m}$ and $T_w=2.01\text{sec}$.

の時系列データを Fig.5 に示す。上下揺れは、入射波周期とほぼ同じ周期で運動しているが、縦揺れの波形はかなり乱れており、横揺れは時間と共に増加し、最終的には 25~27 度程度の振幅の定常状態に達している。この時の横揺れの周期は、入射波の 2 倍に近く、かつ横揺れ固有周期に近いが若干短くなっている。

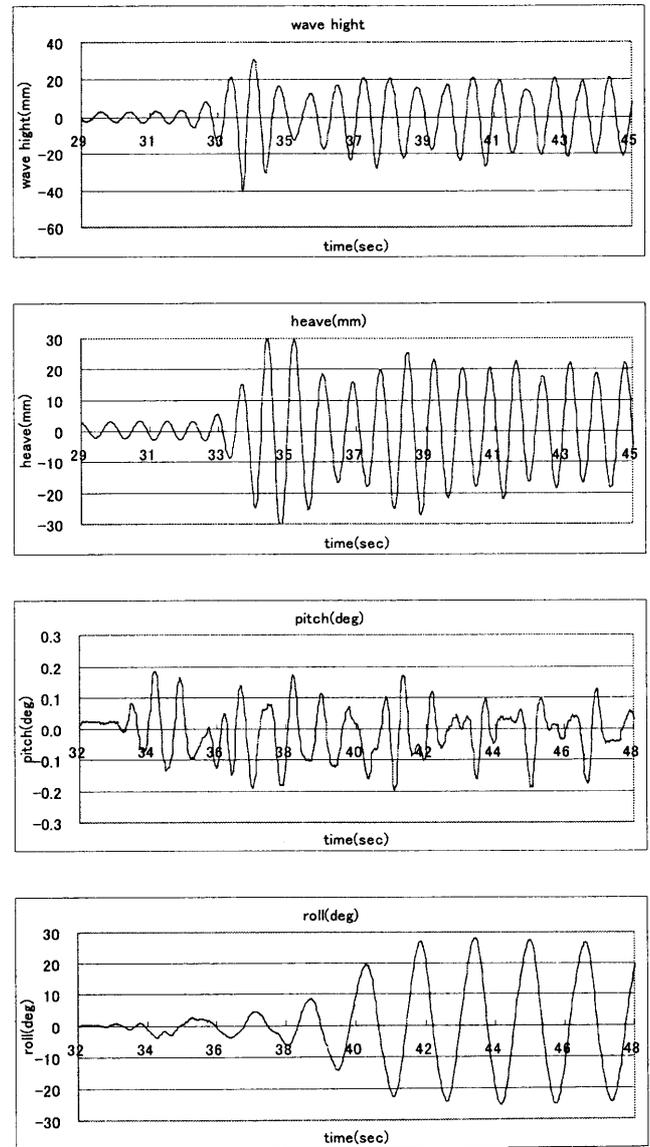


Fig.5 Time histories of measured data for naked hull at case of maximum roll motion at $H_w=0.04\text{m}$ and $T_w=0.76\text{sec}$.

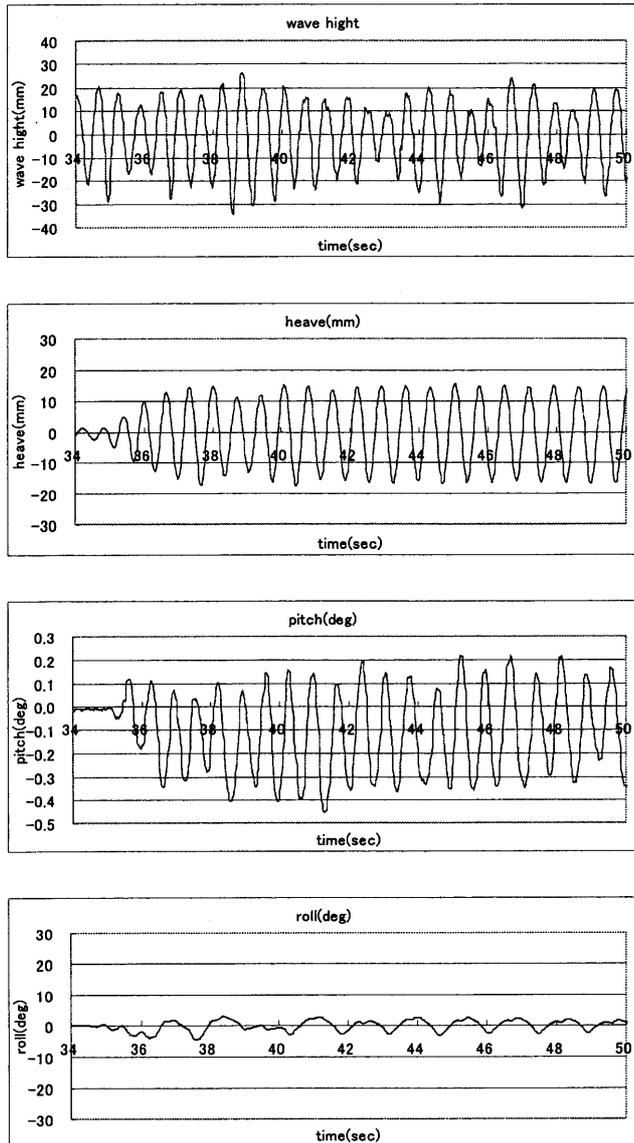


Fig.6 Time histories of measured data for naked hull at $H_w=0.04\text{m}$ and $T_w=0.60\text{sec}$.

Fig. 6, 7 には、Fig.5 に示す大振幅横揺れのピーク発生周期よりも短周期での時系列データの例を示す。Fig. 6 の記録から、横揺れ振幅は小さいが、その周期は入射波周期よりはるかに長いことが分かる。Fig.7 に示す記録は、Fig.5 と Fig.6 との間の周期におけるもので、入射波のほぼ 2 倍周期の横揺れが明瞭に発現している。

Fig.8 には、Fig.5 に示す実験より長周期域で横揺れ振幅が非常に小さい周期での結果を示す。同図からわかるように、横揺れ振幅は非常に小さいものの、その周期は入射波周期の 2 倍近くになっており、パラメトリック横揺れが発現している可能性があるものと思われる。

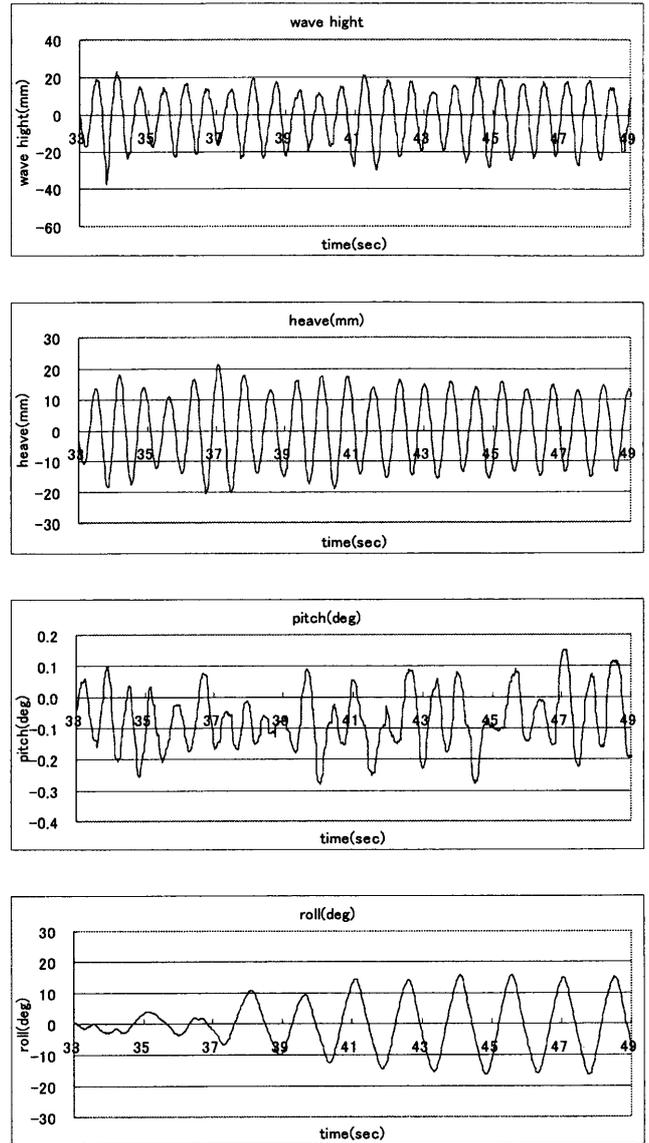


Fig.7 Time histories of measured data for naked hull at $H_w=0.04\text{m}$ and $T_w=0.65\text{sec}$.

3.3 周波数特性

ここでは、全ての運動計測結果から運動周波数特性を解析した結果について述べる。

Fig.9 には、計測された横揺れ周波数と、水槽固定の波高計で計測された入射波周波数の比較を示す。この図から円周波数が 6 付近で、横揺れ周波数が急変しており、これより低周波数域では波周波数と一致し、高周波数域では波周波数のほぼ 1/2 に近い周波数での横揺れとなっており、円周波数が 6 以上の高周波数域での横揺れがパラメトリック横揺れである可能性を示唆している。しかし、この結果を詳細に見ると、高周波数になるほど 1/2 の関係から次第に外れていく傾向が見られる。

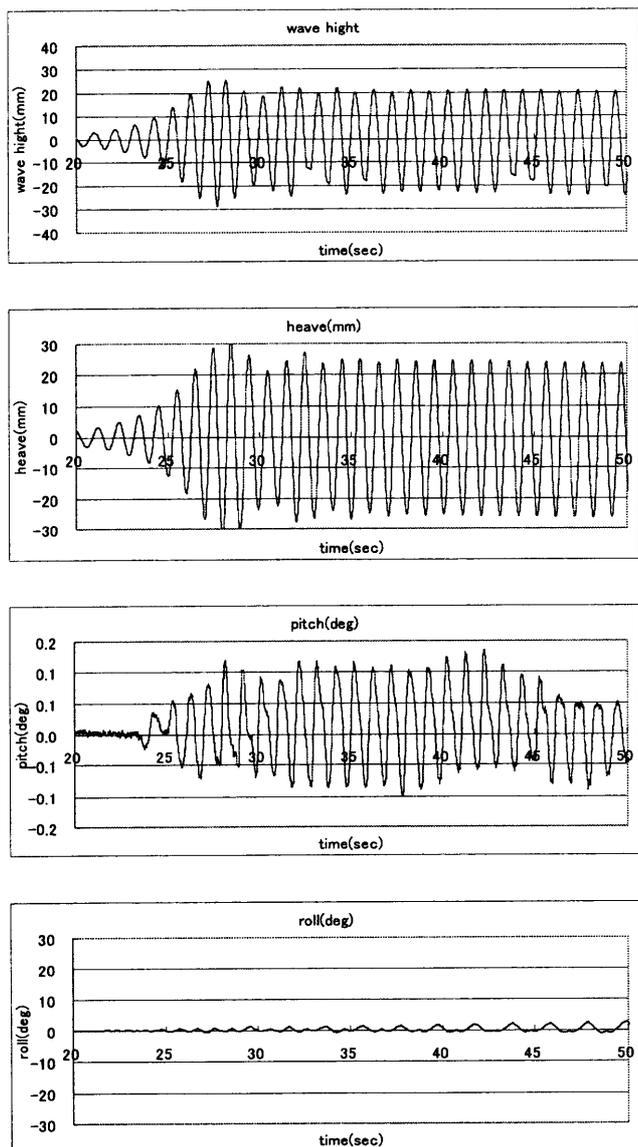


Fig.8 Time histories of measured data for naked hull at $H_w=0.04\text{m}$ and $T_w=0.98\text{sec}$.

この原因を調べるために、出会い周波数の変化について調べてみた。Fig.10は、上下揺れの周波数と入射波周波数を比較した図である。同図から、上下揺れの周波数は高周波数域において入射波周波数より短くなっており、これは波による船体の横漂流の影響と考えられる。このような比較的高い波の中で、高周波数域においては、横漂流が急増し、横揺れ等の横運動に与える影響が大きいことが、黒田らによって指摘されており⁷⁾、今回の実験でも最大10%程度の周波数減少が見られる。

この横漂流による出会い周期の変化を考慮に入れた上での横揺れの周波数特性を明らかにするために、Fig.11では上下揺れの周波数と、横揺れの周波数との比較を行なった。こ

のように実験値をプロットすると、横揺れおよび上下揺れのいずれも出会い周波数となっており、特に上下揺れの周波数は、入射波の出会い周波数と考えてもよい。この図から、横揺れ周波数が急変する6以下の周波数では、横揺れは上下揺れ周波数と一致しており、この周波数より高周波数域においては横揺れ周波数は波の出会い周波数のちょうど半分になっており、従来からパラメトリック横揺れで見られる特性と一致していることが確認できた。

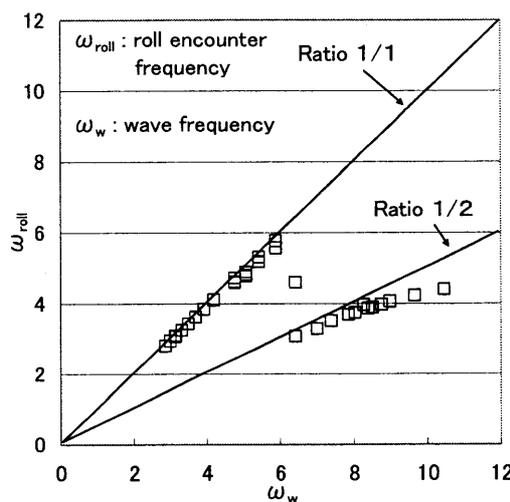


Fig.9 Comparison between measured roll frequency and wave frequency obtained by wave meter fixed in tank.

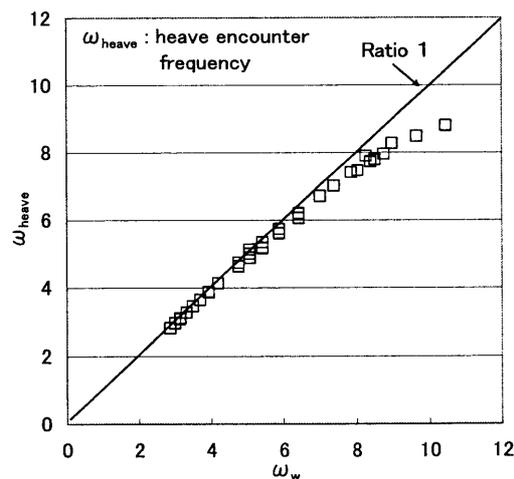


Fig.10 Comparison between heaving encounter frequency and incident wave frequency of wave height of 0.04m.

次に、高周波数域(ここでは横揺れ固有周波数の2倍前後の周波数域を指す)における横揺れ運動の周期と、横揺れ固有周期との関係について調べた結果について述べる。Fig.12には、横軸に入射波の出会い周期(ここでは上下揺れの周期

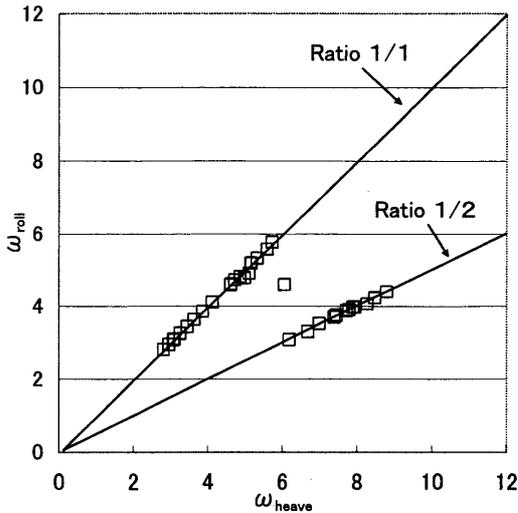


Fig.11 Comparison between measured encounter frequencies of heaving and rolling motions.

で代用)を横揺れ固有周期で割った値をとって、 $H_w=0.04m$ の時の横揺れ振幅をまとめた結果を示す。短い周期域での横揺れは、横揺れ固有周期の1/2よりも16%近く小さい周期でピークを持っている。

この原因を調べるために、復原力曲線の非線形性について調査を行った。Fig.13に模型船の復原力曲線を示す。また同図中には $GM \cdot \phi$ の値も実線で示している。横傾斜角が5度程度以下の小さな範囲では復原力曲線はほぼ直線であるが、横傾斜角が大きくなるに従い非線形性が強くなり、前述の実験で現れた最大横揺れ振幅である27度付近では、線形の $GM \cdot \phi$ の値に比べて16%程度大きな値となることがわかる。このことは、大振幅横揺れ発生時に、復原力曲線の非線形性

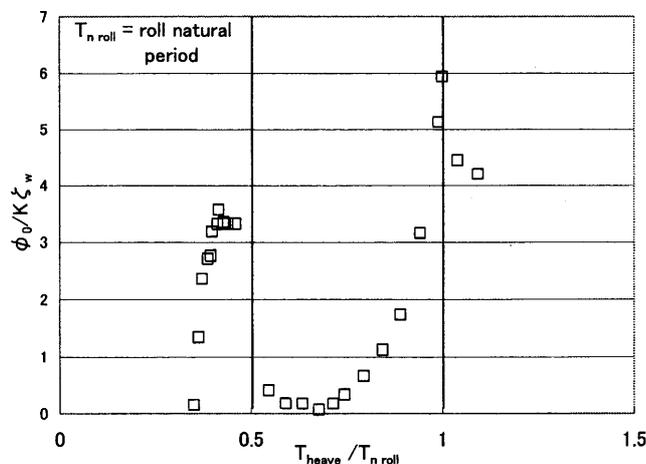


Fig.12 Re-plotting of non-dimensional roll amplitudes for naked hull in beam regular waves of 0.04m wave height.

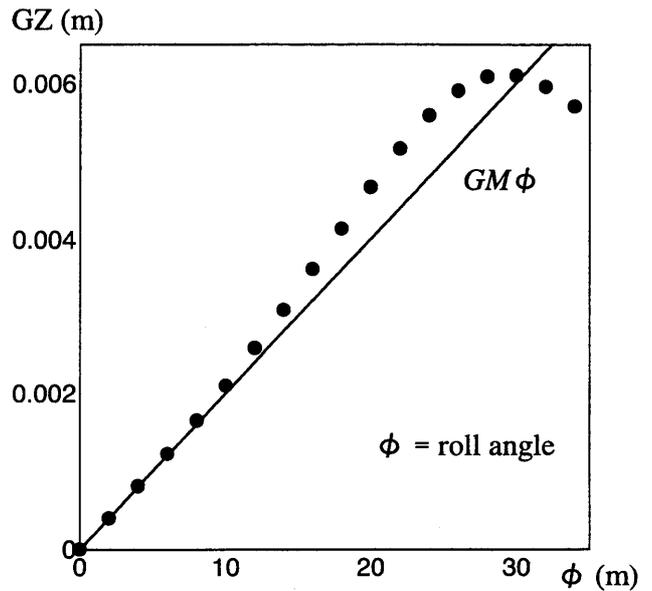


Fig.13 GZ-curve of the model in calm water.

により横揺れ固有周波数が約8%余り大きくなることを示しているが、定量的には実験値における差異を説明ができない。この点については、さらに詳細な調査が必要と考えられる。

3.4 パラメトリック横揺れに及ぼすビルジキールの影響

本実験で計測されたパラメトリック横揺れが、横波による時間的な復原力変動によって引き起こされたものであるとすると、その発生は波浪中復原力変動振幅と共に、横揺れ減衰力にも影響を受ける。そこで、本実験では横揺れ減衰力の大きさを変化させた時の実験を実施し、パラメトリック横揺れ発生の有無およびその振幅を調査した。横揺れ減衰力の大きさを変化させる方法としては、ビルジキールの長さ(船体後方の短いビルジキールのみ、船体前方の長いビルジキールのみ、両方のビルジキール)を変化させた。

Fig.14に横揺れ振幅の結果を示す。まず3種類のビルジキールをそれぞれ付けた状態での横揺れ同調時 ($T_{heave} / T_{n\ roll} = 1$)の横揺れ振幅を、裸殻での結果と比較すると、全ビルジキール、長い方のビルジキールのみ、短い方のビルジキールのみを付けた場合で、それぞれ約50%、35%、22%程度横揺れ振幅が減少しており、横揺れ減衰力はそれぞれの状態で裸殻状態に比べ約2倍、1.5倍、1.3倍に増加しているものと考えられる。

次に、パラメトリック横揺れの発生の有無を見ると、 $T_{heave} / T_{n\ roll}$ が0.4付近の横揺れは減衰力の増加とともに小さくなり、減衰力が裸殻状態に比べ約1.5倍となる長いビルジキールのみを取り付けた状態ではパラメトリック横揺れは発生しなくなる結果が得られた。

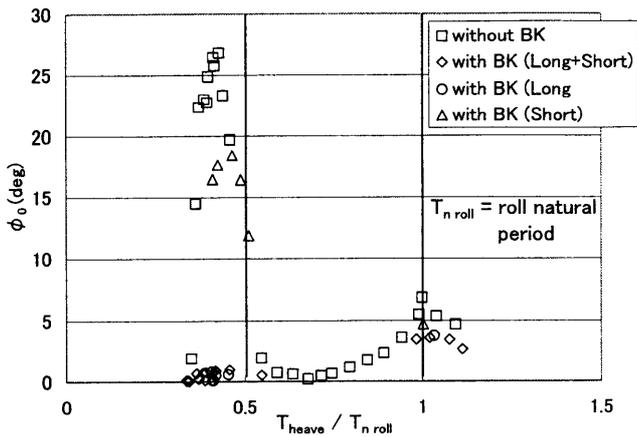


Fig.14 Measured rolling amplitudes for hulls with different bilge keel length in beam waves of 0.04m wave height.

4. 横波中の復原力変動

周知のとおりパラメトリック横揺れは、波浪によって復原力が時間的に変動することが原因で発生する。そこで本研究で用いた巨大客船の横波中での復原力変動の計算を行った。

Fig.15 に、パラメトリック横揺れが発生した波浪条件下における横復原力変動の計算結果を示す。同計算においては、上下揺れおよび縦揺れは、波長が船幅に比べて十分に大きいので($\lambda/B=3.14$)、準静的に釣り合っていると仮定し、フルードクリロフの仮定に基づいて各傾斜角に対する復原力を計算している。同図から、船体が入射波の山に位置する場合と谷に位置する場合とで、復原力が大きく変動していることがわかる。また Fig.16 には、同横波中における水線面の変動を図示した。この図から、Fig.15 に示す横波中の復原力変動が、平らな船尾形状と、大きな船首フレアによるものであることが理解できる。

以上の結果からも、本実験で計測された大振幅横揺れは、船体と入射波との相対位置により、横揺れ固有周期の半分の周期で時々刻々と復原力が変動することによるパラメトリック横揺れであることの確証が得られたものと考えられる。この変動復原力係数を用いたパラメトリック横揺れのシミュレーション結果については、次報にて報告をする。

5. 結 言

巨大客船を対象とした横波中の船体運動計測実験を行い、以下の結論を得た。

1. バトックフロー船型を採用して、浅く平らな船尾船底を有し、かつ大きな船首フレアを持つ最近の巨大客船の

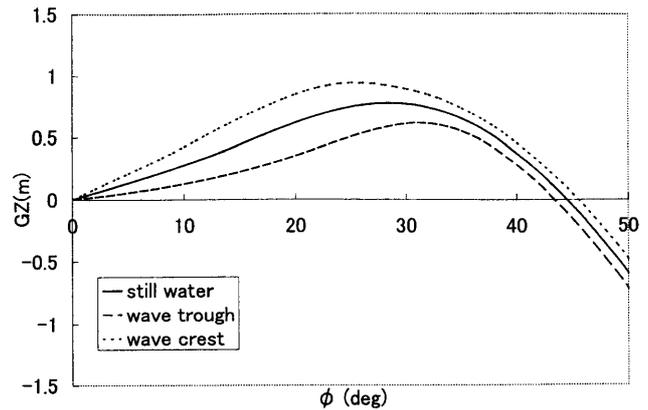


Fig.15 Variation of GZ-curve in beam waves at the condition when large parametric roll occurs in the experiment. ($H_w=0.04\text{m}$ and $T_w=0.76\text{sec}$).

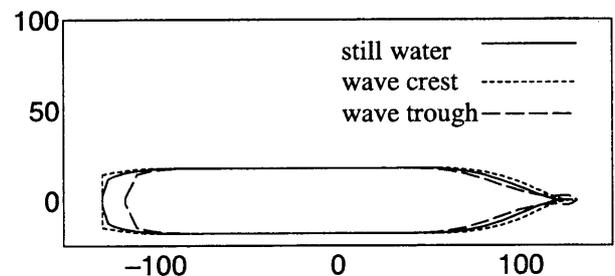


Fig.16 Variation of water plane area in beam waves at the condition when large parametric roll occurs in the experiment. ($H_w=0.04\text{m}$ and $T_w=0.76\text{sec}$).

ような船型においては、十分な横揺れ減衰力がなければ、横揺れ固有周期の半分より若干短い周期の入射波において、同調時の横揺れよりも大きなパラメトリック横揺れが発生する可能性がある。

2. このパラメトリック横揺れが、横揺れ固有周期の半分よりも若干短い入射波周期で発生するのは、横漂流による出会い周期の変化と、復原力の非線形性によるものである。
3. このパラメトリック横揺れは、本研究の供試船では、実船で7~10秒程度に対応する比較的広い周期で発生し、ビルジキールがない場合には4mの波高で最大27度まで達する。
4. ビルジキールによって横揺れ減衰力を増加させることにより、パラメトリック横揺れの振幅は減少し、さらに完全に発生しなくすることができる。本研究の供試船に計画された寸法のビルジキールでは、パラメトリック横揺れは発生しない。

今後、数値計算によってパラメトリック横揺れのシミュレーションを行って、その結果を実験値と比較し、さらにそれらの結果を利用して横波中での復原力変動量とパラメトリック横揺れを誘起させないために必要な横揺れ減衰力の大きさとの関係を明らかにする計画である。

謝 辞

本研究の遂行にあたって、大阪府立大学大学院学生の本木亮氏、中林恵美子氏、金子武史氏に実験にあたっての協力を得たことを記し、心から感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) Yoshiho Ikeda, Seiichi Shimoda, Yuji Takeuchi: Experimental Studies on Transient Motion and Time to Sink of a Damaged Large Passenger Ship, Proc. of the 8th Int. Conf. On the Stability of Ships and Ocean Vehicles, 2003.9., pp.243-252
- 2) 元良誠三、山越康行：船舶の安全性と非損傷時復原性規則の動向、運動性能研究委員会第3回シンポジウム(日本造船学会)、昭和61年10月、pp.23-60.
- 3) 菅信、山越康行：船舶の横波中の転覆、運動性能研究委員会・第3回シンポジウム、昭和61年10月、pp.95-124
- 4) 田才福造：Beam Seaにおける船体運動、西部造船会会報、No.30, 1965, pp.83-103
- 5) 定兼広行：大浪上の横揺れについて、関西造船協会誌、No. 169, 1978
- 6) W. Blocki : Ship Safety in Connection with Parametric Resonance of the Roll, International Shipbuilding Progress, 27-306, 1980
- 7) 黒田貴子、池田良穂、片山徹、重廣律男：船舶の大振幅運動時非線形特性に関する研究(第1報)、日本造船学会論文集、第191号、平成14年6月、pp.97-103.
- 8) 黒田貴子、池淵哲朗、池田良穂：船舶の大振幅運動時非線形特性に関する研究(第2報)、日本造船学会論文集、第192号、平成14年12月、pp.237-246.