

船舶の大振幅運動時の非線形特性に関する研究（第1報）

－大波高横波中における船体運動の非線形性－

学生員 黒田 貴子* 正員 池田 良穂*
正員 片山 徹* 正員 重廣 律男**

Non-Linear Features in Large Amplitude Ship Motions (1st Report)

Non-Linear Ship Motions in Heavy Beam Seas

by Takako Kuroda, *Student Member* Yoshiho Ikeda, *Member*
Toru Katayama, *Member* Ritsuo Shigehiro, *Member*

Summary

In this study, large amplitude rolling motion of a ship without bilge keels in heavy regular beam seas is experimentally investigated, and a new non-linear feature of lateral ship motions in high waves is revealed.

The experiments show that, in high beam waves, large amplitude rolling motion occurs not only in the frequency region of the roll resonance but also in the frequency region higher than the resonance frequency, and that jump phenomena of roll amplitudes appears near the heave natural frequency. These behaviors obtained by the experiments are investigated, and the reasons of these non-linear features are clarified as follows; the former is caused by changing encounter frequencies by large drifting velocity in high waves to make the roll-resonance region wide. The latter is caused by different drifting velocities for the same regular wave near at the heave natural frequency.

A non-linear feature of heaving motion is also experimentally confirmed near heave natural frequency.

1. 緒 言

船舶の耐航性能推定については、線形理論に基づく6自由度の船体運動理論計算手法がほぼ確立し、基本設計における性能評価に日常的に使われるようになっている。この線形理論の中においては、粘性影響が顕著な横揺れ減衰力の非線形性を線形化して取り入れることが一般的に行われており¹⁾、実用的にはほぼ満足できる精度での船体運動推定、短期予測、長期予測などが行われて

いる²⁾。最近では、推定精度の向上を目指して、大振幅運動の非線形性に着目した研究も幅広く行われており、多くの成果が発表されている^{3), 4), 5), 6), 7), 8)}。

一方、転覆やスラミングによる船体破壊、波乗りやブローチング等の非線形性の非常に強い船体運動現象については、それぞれの非線形特性を考慮したアプローチが個別に行われている⁹⁾。中でも、転覆に至る可能性の大きい横揺れについては、復原力や減衰力の非線形性が極めて強いことから、古くから研究が行われ、数多くの研究成果が公表され、各種の安全規則¹⁰⁾にも取り入れられている。最近も、非線形運動論に基づく研究が続けられており、多くの成果が公表されている^{11), 12)}。こうした強非線形現象は、特別の条件が成立する時にのみ出現する事が多く、その成立条件自体が欠落しているような

* 大阪府立大学大学院工学研究科

** 鹿児島大学水産学部

原稿受理 平成14年1月10日

春季講演会において講演 平成14年5月15, 16日

数学モデルでは勿論のこと、実験的に見つけることも大変難しく、実際の海難等の分析を通じて初めてその存在が判明することも稀ではない。

本研究では、大波高時での大振幅の船体運動における非線形現象に着目して、広範な実験的研究を行うことによって、各種の非線形現象の存在を明らかにし、その特性および原因を解明することを目的としている。その第1報として、本論文では、大波高横波中における船舶の大振幅横揺れを模型実験によって計測した結果、従来は指摘されていない非線形現象が得られ、その発生機構についてもいくつかの知見が得られたので報告する。この現象は、大波高時においては、横揺れの同調付近の波周波数だけでなく、それよりも高周波数側の広い周波数域において非常に大きな横揺れをするもので、さらに上下揺れの固有周期付近においては、横揺れ振幅が跳躍するような現象も出現するというものである。この現象の発生には、大波高横波中における漂流速度の急増による出会い周波数の変化、およびその非線形特性が大きな役割を演じていることが明らかとなった。

2. 大波高横波中の運動計測実験

2.1 実験概要

大波高横波中の船体運動特性を把握するために、模型船の左右揺れおよび横漂流を自由にした状態で、規則横波中での横揺れ及び上下揺れを計測した。

供試模型は、鹿児島大学附属練習船「かごしま丸」の1/40縮尺模型である。主要目をTable 1に、正面線図をFig. 1に示す。実船には幅0.9mのビルジキールがS.S. 3からS.S. 7に付いているが、本実験では、大振幅横揺れをさせるために、ビルジキールは付けていない。模型実験に使用した波は波高2, 4, 6, 8cm(実船換算で約0.8mから3.2m)の規則波とし、波周期を系統的に変化させた。

この実験に先立ち、静水中での自由減衰試験を行い、横揺れおよび上下揺れの固有周期を求めた。その結果をFig. 2およびFig. 3に示す。それぞれ横揺れ振幅 ϕ_a 、上下揺れ振幅 z_a に対する運動周期を表している。Fig. 2に示す横揺れ固有周期 T_ϕ は横揺れ振幅によらず、ほぼ一定となり、 $T_\phi=1.06$ 秒であった。一方、上下揺れ固有周期 T_z は、減衰が激しいために値がばらつくが、振幅が大きい所での計測値の平均をとると $T_z=0.90$ 秒であった。本供試模型の場合、横揺れ固有周期と上下揺れ固有周期が比較的近い値であるのが特徴と言える。

Table 1 Principal particulars of the model.

Items	Model
Scale	1/40
L_{pp} (m)	1.550
B (m)	0.315
d_m (m)	0.120
GM (m)	0.030
KG (m)	0.121
L_{CG} (m)	0.047(aft)
C_b	0.575

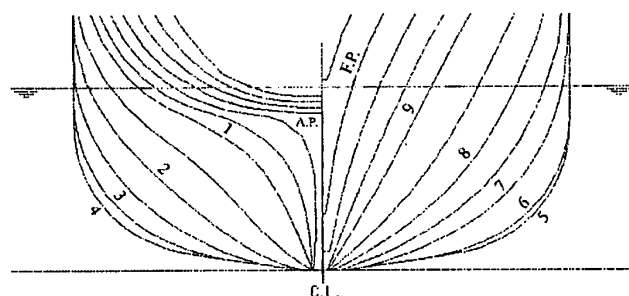


Fig. 1 Body plan of the model.

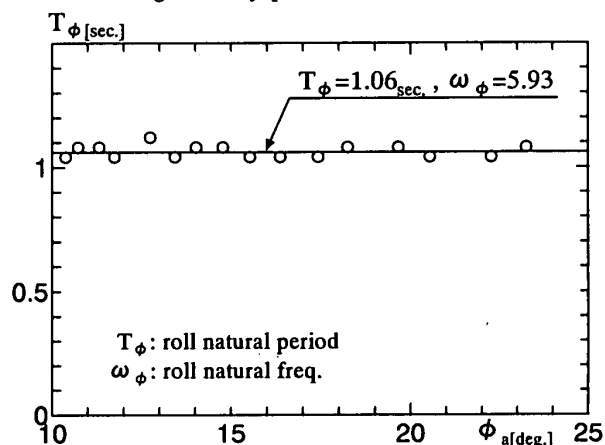


Fig. 2 Roll natural period of the model by a free decay test in calm water.

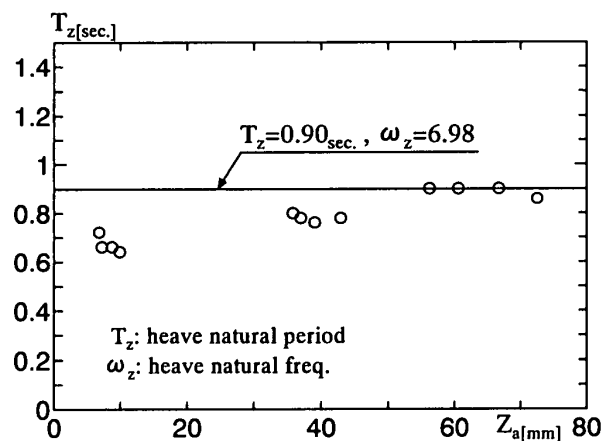


Fig. 3 Heave natural period of the model by a free decay test in calm water.

2.2 実験結果

規則横波中における横揺れ振幅の計測結果を Fig. 4 に示す。同図の横軸は波周波数 ω_w を Fig. 2 に示す横揺れ固有周波数 ω_ϕ で無次元化したものである。図中の線は OSM²⁾での計算結果であり、このときの横揺れ減衰力は、池田ら¹⁾の横揺れ減衰力の推定法により算出している。同図から分かるように、波高が小さい時には、横揺れ振幅の実験値は計算値と良く一致している。しかし、波高が増加するに従って、実験での最大値は計算値に比べ小さくなり、しかも横揺れ同調のピークが高周波数側に大きくシフトしているのが分かる。また、大波高時には、横揺れ固有周波数付近だけでなく、それより高周波数側の広い波周波数域において、非常に大きな横揺れをしていることが分かる。これは、砕波等の衝撃的な波浪強制力が働く可能性のある短波長域の広い範囲において大振幅横揺れが続くことを示しており、転覆等の危険性が高くなることを意味している。また、大波高時、周波数域 $\omega_w/\omega_\phi=1.30\sim1.35$ において横揺れ振幅が安定せず、跳躍するような現象も現れている。この現象は同じ波の条件にも拘らず、初期条件や外乱等により違う運動モードに飛び移るものらしく、それぞれの計測における横揺れは Fig. 5 に示すように安定しているのが特徴である。

Fig. 6 に、 $\omega_w/\omega_\phi=1.28$ において、波高を系統的に変化させた場合の横揺れ振幅の計測結果を示す。波高が $H_w/d_m=0.35$ 以上になると、線形の OSM の計算値からはずれて急激に大きくなり、強い非線形性を示すことが分かる。

Fig. 4 に示す横揺れ振幅の実験値を最大波傾斜 k と ω_w で無次元化した結果を Fig. 7 に示す。同図中の $\omega_w/\omega_\phi=1.0$ 近傍の実験結果から、波高が増加するに従って横揺れ同調時付近の値が横揺れ減衰力の非線形性により減少していることが分かる。この傾向は、池田ら¹⁾の横揺れ減衰力推定法を用いてその非線形性を考慮した計算結果(図中の各線)とも符合している。しかし、横揺れ同調に伴うピークの高さおよび周波数には小振幅の場合においてさえ、大きな違いがあることが分かり、これは後述するように、出会い周期の変化に伴うものである。また、波周波数が高い領域($\omega_w/\omega_\phi>1.2$)では、実験値は計算値に比べて大きくなっており、また、波高が高い程、無次元横揺れ振幅が大きくなっていることが分かる。

次に上下揺れ振幅の計測結果を Fig. 8 に示す。横軸は、波周波数 ω_w を上下揺れ固有周波数 ω_z で無次元化したものである。同図から波高 $H_w/d_m=0.17\sim0.50$ では、上下揺れ振幅は波高の増加に伴い徐々に減少することが分かる。特に $H_w/d_m=0.33, 0.50$ の結果からは波周波数が低くなるに従って上下揺れ振幅が減少する傾向が見られ

る。また、波高 $H_w/d_m=0.67$ では上下揺れ振幅が大きくばらついてことが分かる。

Fig. 9 に、横揺れを基準とした上下揺れの位相遅れ ε_z を示す。波高が増加するに従い、位相のカーブが高周波数側へシフトし、OSM の結果とは大きな差異があることが分かる。

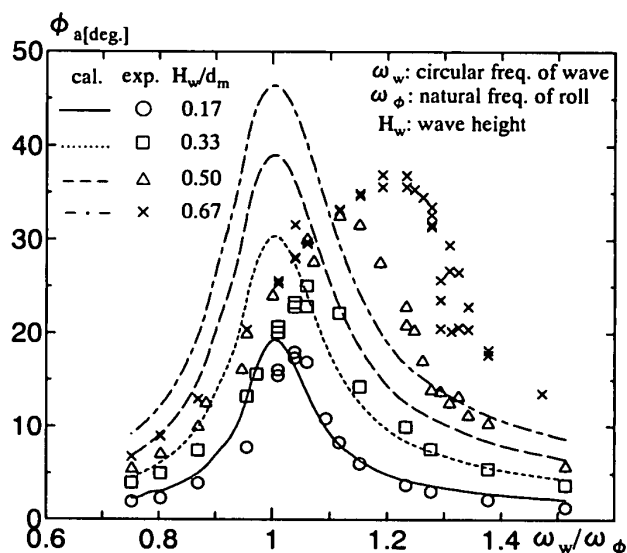


Fig. 4 Measured roll amplitudes in beam seas.

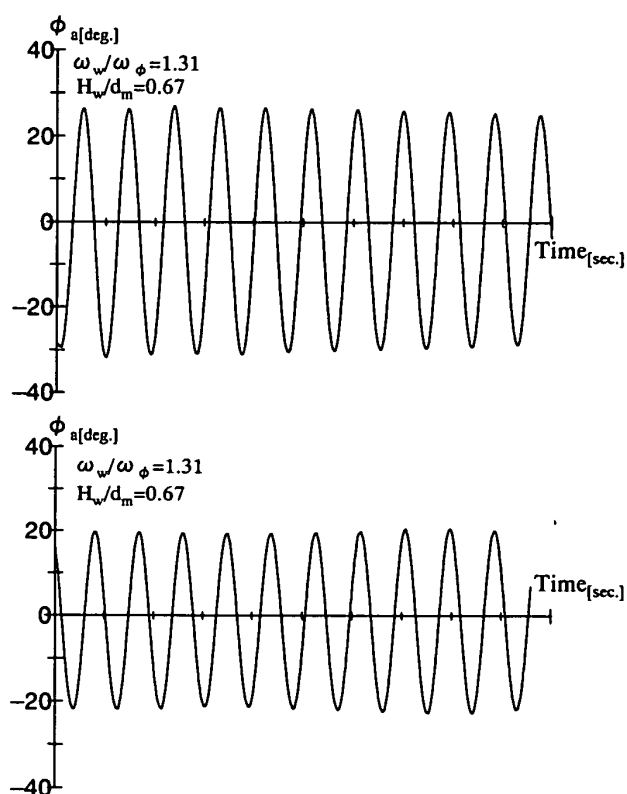


Fig. 5 Different roll motions appearing in beam seas at the same wave condition.

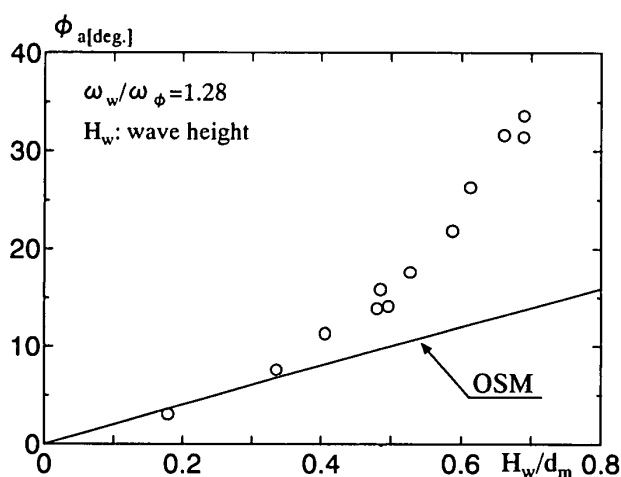


Fig. 6 Non-linear feature of roll amplitudes with wave height in beam seas in $\omega_w/\omega_\phi = 1.28$.

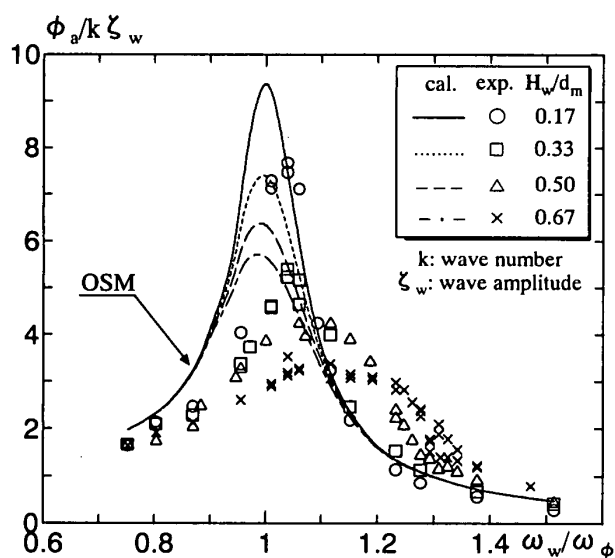


Fig. 7 Non-dimensional roll amplitudes in beam seas.

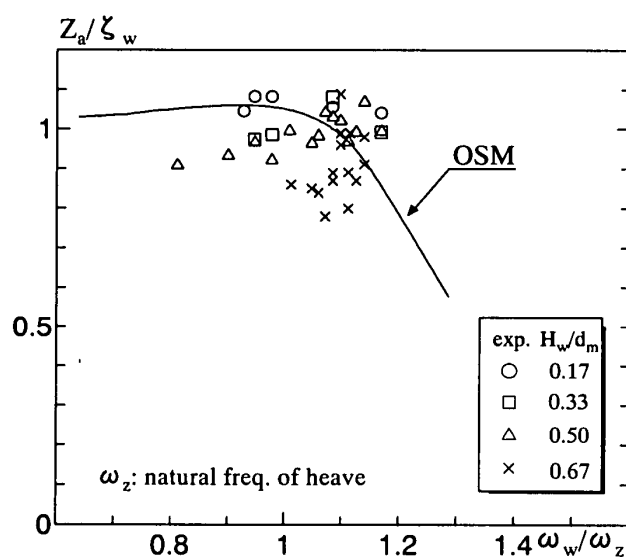


Fig. 8 Non-dimensional heave amplitudes in beam seas.

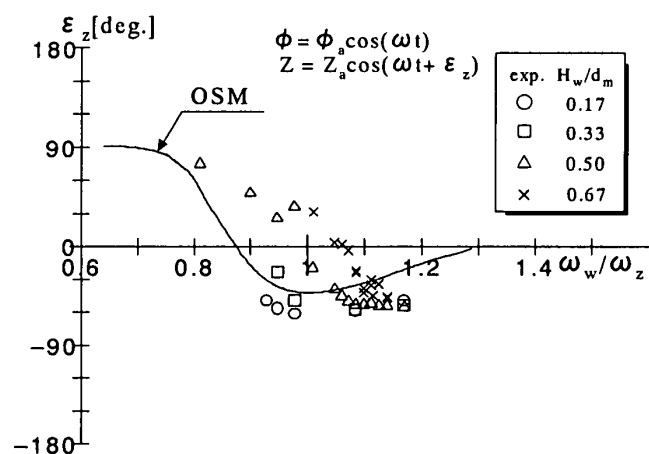


Fig. 9 Phase angles of heaving motion from rolling motion in beam seas.

3. 非線形横揺れの原因

3.1 復原力の影響

横揺れ振幅の非線形性の原因として最も一般的なものは、横揺れ復原力の非線形性に基づくものである。Fig. 10 に、本供試模型の GZ 曲線を示す。今回の実験で計測された横揺れの角度域（最大約 38 度）においては、横揺れ復原力の非線形性はほとんどなく、前章で述べた横揺れの非線形特性は、復原力の非線形性に基づくものではないことが分かる。

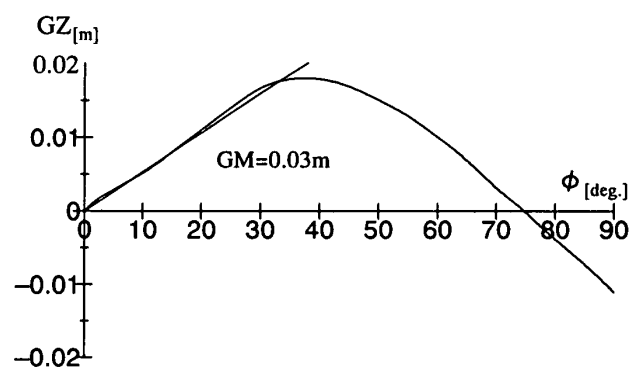


Fig. 10 GZ-curve of the model.

3.2 出会い周波数の変化

Fig. 11 に、実験時の波周波数と横揺れ運動周波数（出会い周波数 ω_e ）の関係を示す。同図から、波周波数が低い領域においては、両者は良く一致しているが、波周波数が大きくなり、かつ、波高が高くなると出会い周波数の方が波周波数より低くなることが分かる。特に横揺れ振幅の非線形性が顕著となる波周波数域 $\omega_w/\omega_\phi = 1.2 \sim 1.4$ において、波周波数が一定でも、横揺れの運動周波数が波高の増加に伴って小さくなることが分かる。これは渡邊¹³⁾や田才^{14), 15)}が指摘しているように、波高

の増加に伴って船体運動が増加し、漂流速度が急激に増加することにより出会い周期が変化しているためと考えられる。さらに波周波数域 $\omega_w/\omega_\phi=1.30\sim1.35$ では、出会い周波数が大きくばらついている。この周波数域は Fig. 4 に示すように、横揺れの跳躍現象が現れた範囲である。

Fig. 11 に示す出会い周波数を用いて横揺れ振幅の実験値をまとめ直したものを Fig. 12 に示す。同図中 $H_w/d_m=0.67$ の結果から、大波高時においても横揺れの応答曲線は滑らかであり、Fig. 4 に見られたような横揺れ振幅の跳躍は見られないことが分かる。この事は、前述の横揺れ跳躍現象は横揺れ運動方程式自体の非線形性に基づくものではないことを示唆しており、横漂流との連成の結果として非線形性が横揺れに現れたものと思われる。また、Fig. 4 に現れた波周波数の広い範囲にわたる横揺れ同調の発生は、短波長域において漂流速度の増加によって出会い周波数が小さくなったことが原因であることも分かる。小波高においては、当然のことながら、OSM による理論計算値が実験値と良く合っていることも分かる。

4. 漂流速度及び上下揺れの非線形性

4.1 漂流速度の非線形性

漂流速度の変動を把握するために、波周波数と出会い周波数から漂流速度 V_d を以下の式を用いて算出した。

$$V_d = \left(1 - \frac{\omega_e}{\omega_w}\right) V_w \quad (1)$$

ただし、波の速度 V_w は深海波として、

$$V_w = \frac{g}{\omega_w} \quad (2)$$

とした。ただし、ここで g は重力加速度、 λ は波長である。漂流速度と出会い周波数の関係を Fig. 13 に示す。船舶の横漂流について、渡邉¹³⁾は、横揺れ同調時に最大になることを示し、さらに田才^{14), 15)}は理論的かつ実験的に、上下揺れ同調時と横揺れ同調時に極大値となることを示している。今回の実験の場合、Fig. 13 から分かるように、波高が増加するに従って漂流速度が大きくなっている。特に大波高 ($H_w/d_m=0.67$) の結果では、横揺れ同調 ($\omega_w/\omega_\phi=1.0$) 付近で漂流速度が著しく増加していることが分かる。また、Fig. 4 の結果に横揺れ跳躍現象が現れた波周波数域 ($\omega_w/\omega_\phi=1.3\sim1.35$, $\omega_w/\omega_\phi=1.15\sim1.20$ に相当) において、漂流速度が実験毎にばら

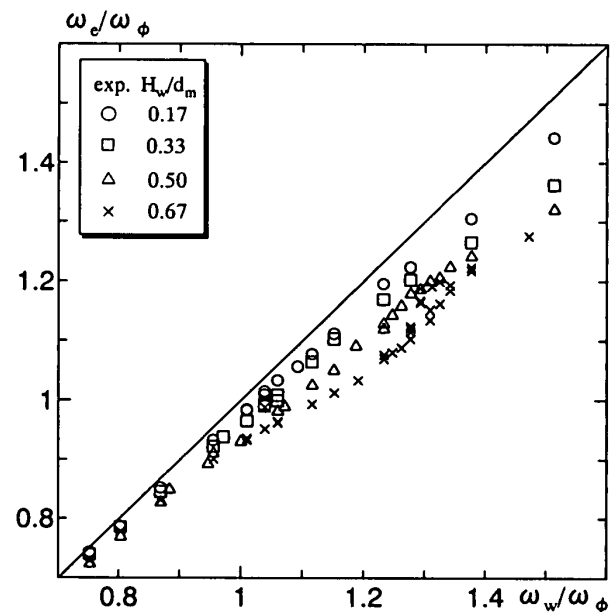


Fig. 11 Relation between wave frequency and encounter frequency in beam seas.

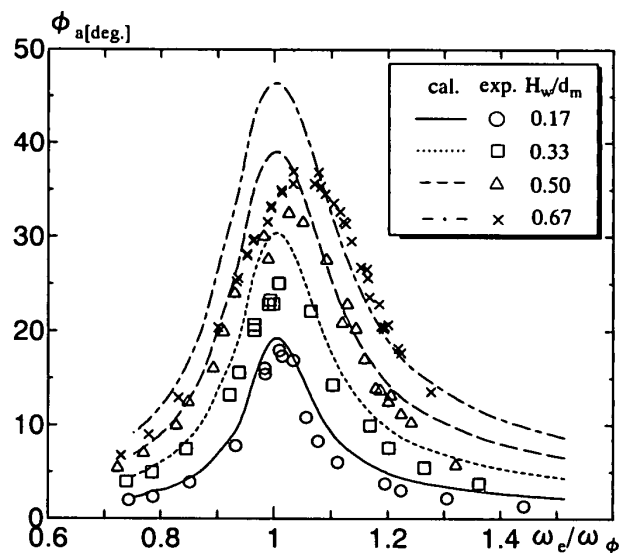


Fig. 12 Re-plotting of measured roll amplitudes with measured encounter frequency.

ついていることが分かる。以上のことから、Fig. 4 に示す結果に現れた横揺れの跳躍現象は、漂流速度自体の不安定性によって、同一の入射波に対して出会い周期が複数の解を持つためであることが分かる。

4.2 上下揺れの非線形性

Fig. 12 の横揺れの場合と同様に、出会い周波数を用いて上下揺れ振幅の実験値をまとめた結果を Fig. 14 に示す。同図と Fig. 8 の結果を比べると、上下揺れの場合は横揺れとは異なり、出会い周波数でまとめてみても振幅の大きなばらつきは消えないことが分かる。ただし、

小波高時の実験値は当然のことながら線形理論値 (OSM) と良く合うようになる。

Fig. 15 に、漂流速度と上下揺れ固有周波数との関係を示す。この図から、漂流速度が大きくばらつく周波数域がちょうど上下揺れ固有周波数付近であることが分かる。

以上のことから、前節で指摘した漂流速度の不安定性は、上下揺れ振幅の非線形性に関係していることが予想される。

4.3 運動の定常成分

漂流速度が大きくなる出会い周波数域での運動には、横揺れ振幅および上下揺れ振幅に定常成分 (バイアス成分) が現れることが実験結果から明らかになった。Fig. 16 に横揺れの定常成分 a_ϕ を、Fig. 17 に上下揺れの定常成分 a_z を示す。 a_ϕ は波下側定傾斜をマイナス、 a_z は定常的浮上量をマイナスとして表している。

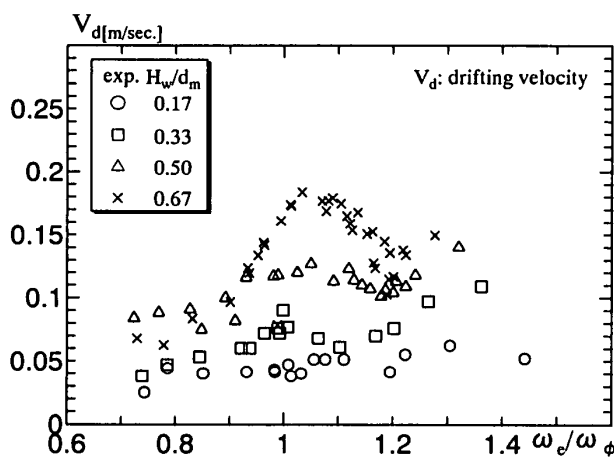


Fig. 13 Calculated drifting velocity from measured encounter frequency.

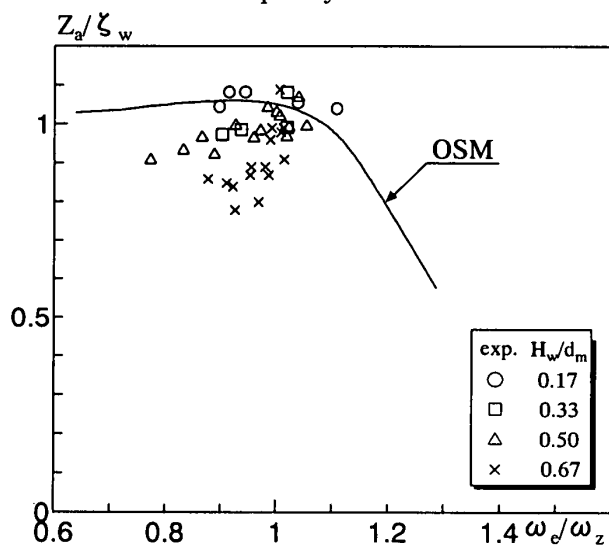


Fig. 14 Re-plotting of measured heave amplitudes with encounter frequency.

横揺れの定常成分は、漂流抵抗に基づくものと考えられ、波高が高い程大きく、また漂流速度 V_d (Fig. 13 参照) の大きくなる ω_e/ω_ϕ が 1.0~1.2 付近でピークを持っている。一方、上下揺れの定常成分は、船体を平均的に浮かす方向であり、大波高中になるとその値が波振幅の 10% にも及ぶことが確認された。これらの定常成分の特性についての詳しい分析結果は次報以降に報告したい。

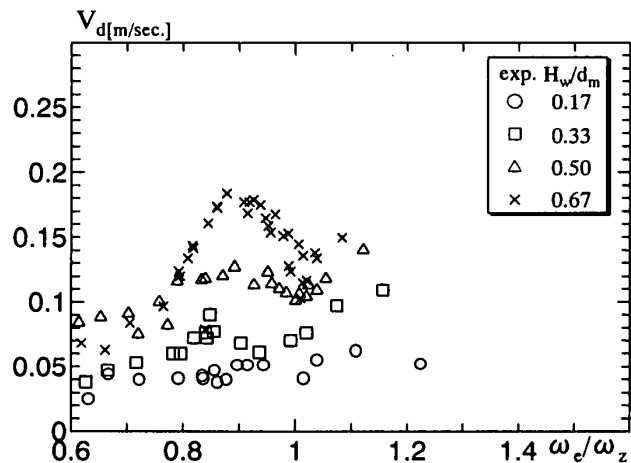


Fig. 15 Relation between drifting velocity and heave natural frequency.

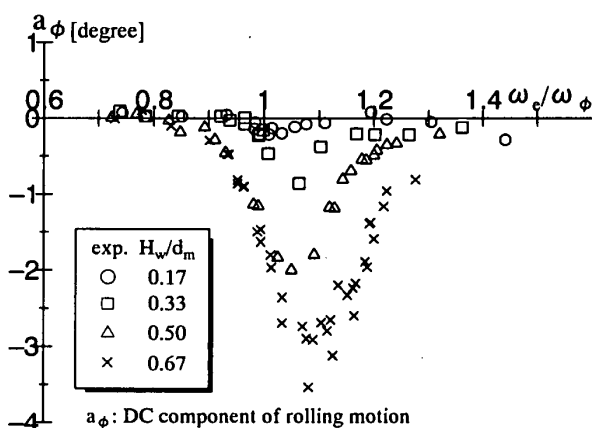


Fig. 16 Steady component in roll motion in beam seas.

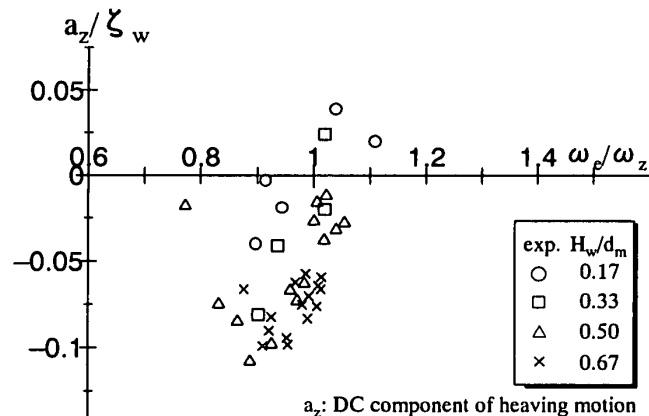


Fig. 17 Steady component in heaving motion in beam seas.

5. 結 言

大波高横波中の船舶の大振幅運動を計測した結果、従来知られている非線形横揺れ特性とは異なる非線形運動が生じることを確かめ、その発生機構を調査した。この研究で得られた結論は以下の通りである。

- 1) 大波高横波中を漂流する船舶は、横揺れ固有周波数付近の波周波数だけでなく、それより高周波数側の広い周波数域において非常に大きな横揺れをする場合があることが実験的に確かめられた。また、上下揺れ固有周波数付近において、横揺れ振幅が跳躍する現象が起こることも分かった。
- 2) この非線形性は、波高の増加に伴って横漂流速度が増加することによって出会い周波数が変化し、その結果広い周波数域において横揺れ同調現象が起こることに起因することを明らかにした。
- 3) 上下揺れの固有周波数付近に現れた横揺れ振幅の跳躍現象は、横揺れ運動系自体の非線形性から起こるのではなく、横漂流速度の不安定性に基づくことが確認された。このため、本論文で扱うような大振幅横揺れ運動の場合には、上下揺れ、横揺れ、左右揺れおよび定常漂流の4つの運動の連成を考慮した非線形運動として扱う必要がある。
- 4) 上下揺れ振幅は、波高の増加とともに線形理論値から外れて顕著な非線形性を示し、波振幅で無次元化した相対振幅は減少する。また、1)で指摘した横揺れ振幅が跳躍するような波周波数域では、上下揺れ振幅がばらつく非線形現象が現れることが確認された。
- 5) 横漂流速度が大きくなる周波数域では、定常漂流に伴う定常横傾斜以外に、上下揺れにも定常成分が現れる。

本論文においては、新しい非線形運動現象の存在を指摘し、その運動機構について言及したが、非線形横揺れおよび上下揺れと横漂流速度の非線形性との関係、大振幅運動時の流体力の非線形特性とその発生原因など、今後解明すべき点も多く残されている。今後、さらに研究を進めて、これらの点についての知見を得たいと考えている。

謝 辞

本研究での実験を実施するにあたり、協力を頂いた大阪府立大学工学部海洋システム工学科池田研究室の学生諸君にお礼申し上げます。なお、本研究には文部省科

学研究費補助金(12304065)の援助を受けたことを記し、関係各位に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 池田良穂：横揺れ減衰力，波浪中推進性能と波浪荷重，第1回運動性能委員会シンポジウム，日本造船学会，1984，pp.241-250
- 2) 高石敬史，黒井昌明：波浪中船体運動の実用計算法，第2回耐航性に関するシンポジウム，日本造船学会，1977，pp.109-133
- 3) 平山次清：不規則波中の大振幅横揺れ，波浪中推進性能と波浪荷重，第1回運動性能研究委員会シンポジウム，日本造船学会，1984，pp.317-331
- 4) 渡辺巖，土岐直二，伊東章雄：ストリップ法による非線形船体応答シミュレーション，第11回運動性能研究委員会シンポジウム，耐航性理論の設計への応用，日本造船学会，1994，pp.204-218
- 5) 内藤林，荒井誠，谷澤克治：非線形問題への挑戦，運動性能およびその制御と海象－我が国における運動性能研究の歩みと展望－，第13回運動性能研究委員会シンポジウム第1編，日本造船学会，1997，pp.81-117
- 6) 内藤林らほか：非線形問題専門委員会成果報告書，日本造船学会，運動性能研究委員会，1997
- 7) 特集：耐航性における非線形問題，日本造船学会誌，1998
- 8) Tanizawa, K.: A Nonlinear Simulation Method of 3-D Body Motions in waves (1st Report) –Formulation of the Method with Acceleration Potential, 日本造船学会論文集, 第178号, 1995, pp.179-191
- 9) 例えば 梅田直哉：非損傷時復原性基準とその理論的背景，操縦性および復原性基準に関する研究の動向，日本造船学会，2000
- 10) 例えば 船舶復原性規則，造船設計便覧，関西造船協会，1976，pp.339-340
- 11) G. Contento and A. Francescutto : Intact Ship Stability in Beam Seas: Mathematical Modeling of Large Amplitude Motions, 3rd International Workshop on Theoretical Advances in Ship Stability and Practical Impact, 1997
- 12) A. Francescutto and G. Contento : Nonlinear Ship Rolling: Bifurcation Analysis and System Identification, Fourth Osaka Colloquium on Seakeeping Performance of Ship, 2000, pp.263-271
- 13) 渡邉恵弘：横運動における船の重心の運動と波の有効傾斜について，日本造船学会論文集，第49号，1932，pp.61-86
- 14) 田才福造：Beam seaにおける船体運動，西部造船会会報，第30号，1965，pp.83-105
- 15) 田才福造，高木又男：規則波中の応答理論および計算法，耐航性に関するシンポジウム，日本造船学会，1969，pp.1-52