

練習船天鷹丸の波浪中動揺について*1

高島末夫・水谷壮太郎・実藤 了・下川伸也
本村紘治郎・隅川芳雄*2・長友洪太・貞包弘之

On the Motions of Training Ship, the "Tenyo-Maru" in Waves
by

Sueo Takashima, Soutaro Mizutani, Satoru Saneto, Shin-ya Shimokawa,
Kojiro Motomura, Yoshio Sumikawa*2, Kota Nagatomo
and Hiroyuki Sadakane

For the purpose of clarifying the motions of training ship "Tenyo-Maru" in waves, motion experiments were carried out. And the following results were obtained.

- (1) The mean double amplitudes of roll, pitch angle and the mean values of acceleration on X, Y, Z-axis were estimated by spectrum analysis and statistical analysis of double amplitudes. Either of the analyses brought the same result. The double amplitude of roll and pitch angle, the acceleration on X, Y, Z-axis were found to follow nearly Rayleigh distribution.
- (2) Relation were clarified among the heading angle of the ship to the wave direction, ship speed and the motion in waves.
- (3) The correlation between the motion and the acceleration on X, Y, Z-axis and the correlation between X, Y, Z-axis were made clear.
- (4) The values of acceleration on Z, Y and X-axis were large in that order, and the maximum value on Z-axis showed 0.29g.
- (5) The resultant vector of acceleration on X, Y and Z-axis increased rapidly as the ship speed increased except in case of quarter sea. The resultant vector of acceleration in drifting condition showed 0.12g.

1. まえがき

漁業練習船は教育および調査・研究を目的とするため、一般船舶にはみられない多くの精密機器を搭載し、広範囲の海域で活動する。航行中の船体動揺および動揺加速度などは、通常の安全性、耐航性に加えて、乗船学生の教育お

よび調査・研究に直接大きな影響を与える。この意味で、練習船の波浪中の動揺特性を知ることは、船体運動の研究以外に、練習船内の教育および調査・研究が行われる環境を知る上で重要である。

昭和60年5月29日に竣工した水産大学校練習船天鷹丸(三代目)は、就航後順調な活動をしているが、竣工後間も

*1 水産大学校研究業績集 第1173号, 1988年7月12日受理.

Contribution from Shimonoseki University of Fisheries, No. 1173. Received July, 12, 1988.

*2 実験当時天鷹丸船長

Tenyo-maru captain on the day of experiments

ない機会を利用し、上記の見地から動揺特性把握のため実船実験を実施した。

海面波浪は再現性のない不規則変動をしており、その波浪によって誘起される船体動揺も、同様な性質を持つことが予想される。また、波浪中の船体動揺特性は、復原力、速度、出会い波向および波浪の性質によって大きく影響を受け、さらに船体動揺による加速度特性にも影響を与える。

今回、練習航海の途次、船体動揺および加速度の計測を行う機会を得たので、その結果を報告する。

2. 実験時の状況、計測および解析方法

供試船は本校の練習船天鷹丸（国際総トン数877トン スタントロール型漁船）で主要寸法を Table 1 に、線図を

Fig. 1 にそれぞれ示す。

外洋における船体動揺実験の条件を満たすため、響灘の角島南西約20海里の水深十分な海域で実験を行った。実験時の状況を Table 2 に、沿岸の波浪状況と実験海域を Fig. 2 にそれぞれ示す。

波浪の観測は目視で行われた。パーチカルジャイロとディレクショナルジャイロにより、船体の動揺（横揺れ、縦揺れおよび船首揺れ）を計測した。また、3軸の加速度すなわちX軸（前後方向）・Y軸（正横方向）・Z軸（上下方向）については、パーチカルジャイロをプラットフォームとする加速度計を使用して計測し、いずれもペンオシログラフに記録するとともにデータレコーダに収録した。

速度と出会い波向別による船体動揺と加速度の資料を得るため、供試船の速度を2ノットから12ノットまで2ノッ

Table 1. Principal dimensions and conditions

Item	Experiments Condition	Light Load Condition	Full Load Condition
L_{pp} (m)	51.00		
B (m)	10.40		
D (m)	6.44		
d_f (m)	2.58	1.77	2.95
d_a (m)	5.14	4.72	5.28
Trim (m)	2.56 A	2.95 A	2.33 A
W (ton)	1145.05	847.26	1240.55
KG (m)	4.46	4.78	4.01
GM (m)	0.76	0.51	0.93
T_s (sec)	9.3	13.1	8.7
C_b	0.558	0.513	0.583
C_p	0.643	0.610	0.663
$C_{\tau w}$	0.823	0.733	0.861
C_m	0.868	0.841	0.880

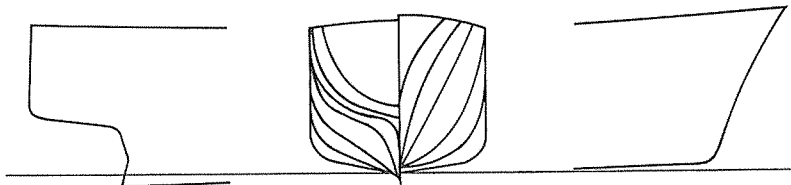


Fig. 1. Body plan and contours of stem and stern of the ship

Table 2. The condition during the field experiment

Item	Condition
Date	1986. 11. 11~12
Depth (m)	94~104
Weather	bc
Wind direction	NNE~NE
Wind speed (m/sec)	5.0~7.3
Wave height (m)	1.0
Wave period (sec)	2.6~3.8
Swell direction	NNE
Swell height (m)	1.5~2.0
Swell period (sec)	7.0

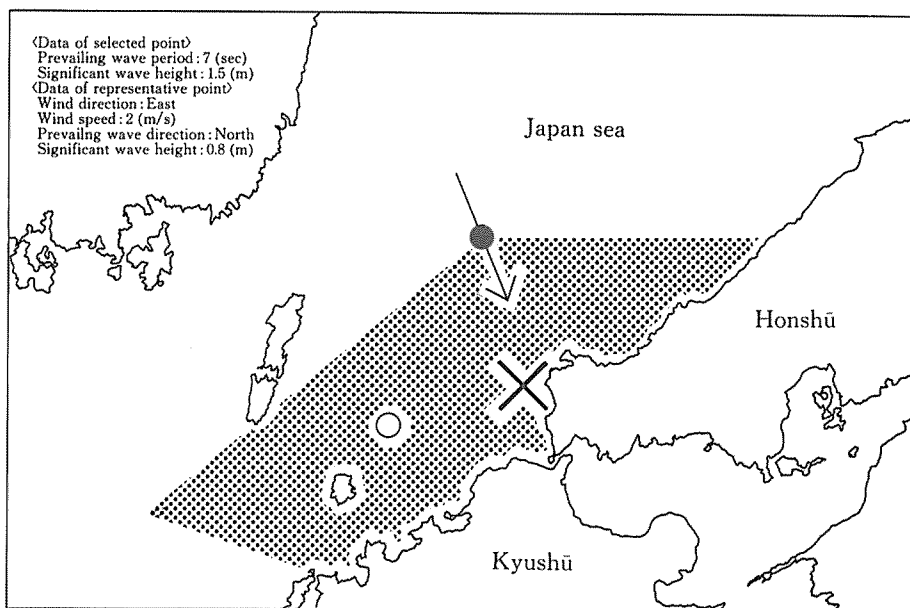


Fig. 2. Coastal wave analysis chart on 12th Nov. at 09:00 and experiment area

- Notes →: prevailing wave direction
- : Selected point in the adjacent seas of Japan (35°00'N, 130°30'E)
 - ⊠: Selected coastal areas
 - : Representative point (34°15'N, 130°00'E)
 - ×: Experiment area

トずつ増速し、また、出会い波向が船首波（記号C1）から船尾波（記号C5）にいたるまで45度ずつ変化するように航行針路を設定した。実験の計測時間はすべて6分間とした。

データの解析に当り、A/D変換のサンプリングタイムを船体動揺では0.4秒、加速度では0.2秒として、スペクトラム解析と全振幅解析を行った。

3. 結果および考察

3.1 動揺角について

(1) スペクトラム解析

波浪や船体動揺のような不規則変動量の特性を知る方法として、スペクトラム解析がよく用いられる。波浪中における船体動揺スペクトラムは、排水量、速度、出会い波向および海況などによって異なり、その時の動揺の実態を端的に表現する。

まず船体動揺の基本特性を示すものとして、停止漂流中のスペクトラムを Fig. 3 に示す。次に出会い波向の影響を表わす1例として、速度が4ノットの場合のスペクトラムを Fig. 4 に示す。

これらの図から明らかなように、実験中の海況程度では航行中の横揺れスペクトラムにみられる帯域幅は比較的狭く、エネルギーのピークは本船の横揺れ固有周期付近に現われ、ピーク周波数に与える出会い波向の影響は少ない。また、漂流中と航行中のスペクトラムを比較すると、漂流中のピーク位置は9.19秒であるのに対し、航行中の卓越したピーク位置は9.61秒付近に現われている。この現象は他の船型でも認められるが¹⁾、本船の場合でも漂流中に比べ航行中では動揺抵抗の増加等により、若干大きい周期で横揺れしていることを示している。

航行中の横揺れは斜め追い波（C4）のとき最も激しく、続いて正横波（C3）のとき激しい。斜め向い波（C2）および船尾波（C5）では小さく、最も小さいのは船首波（C1）のときである。このように波浪中の横揺れは出会い

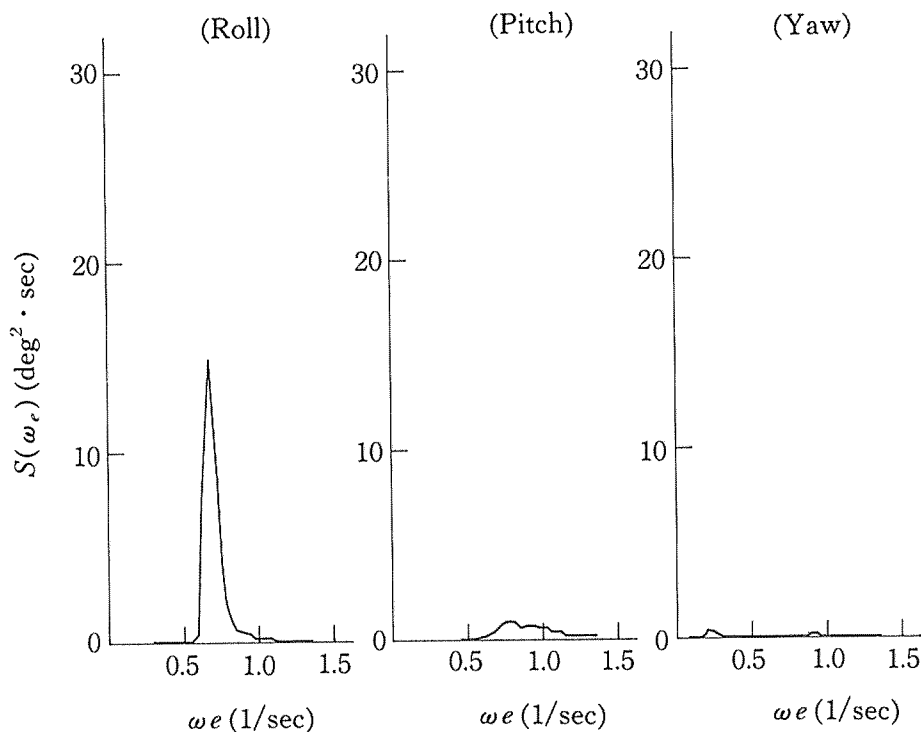


Fig. 3. Spectrum of ship motion during drifting in beam sea

い波向に大きく影響されているが、一方、速度の影響も受けている。そこで、今回の実験時の海況で得られた横揺れのスペクトラムを速度別に比較検討を行ったところ、次のことが認められた。速度が6ノット以下の場合では供試船の横揺れは激しく、また、出会い波向による影響が顕著に現われている。特に速度4ノットの場合が最も顕著に現われる。また、8ノット以上では出会い波向による影響は小さく、全般的に横揺れはそれほど激しくない。

縦揺れは横揺れに比べてエネルギーレベルは低く、激しい動揺は現われていないが、スペクトラムにみられる帯域幅は広い。停止漂流中ではピークが8.16秒に現われ、ほぼこの周期を中心に動揺している。一方、航行中は出会い波向の影響を受け、船首波 (C1) では5.41秒、船尾波 (C5) では7.50秒付近で動揺している。縦揺れは正横波 (C3) では小さいが、それ以外の出会い波向ではほぼ同程度の大き

きであり、なおその揺れは比較的激しい。

船首揺れは波浪と操舵が主原因となって現われ、スペクトラム解析にみられるように不規則な長周期の運動をしている。低速航行時、手動操舵中の船首揺れの解析には、本解析法以外の手法が必要かと思われる。

前述のように、船体動揺は出会い波向だけでなく、速度の影響も受けている。各出会い波向において、横揺れスペクトラムに与える速度の影響を比較検討してみると、船首波 (C1)、斜め向い波 (C2) および船尾波 (C5) では、横揺れに対する速度の影響は小さい。しかし、斜め追い波 (C4) および正横波 (C3) では、他の波向に比べ常に横揺れは激しく、特に今回の海況では2, 4, 6ノットの速度範囲で激しく動揺している。1例として、斜め追い波 (C4) のときの速度別のスペクトラムを Fig. 5 に示す。縦揺れのスペクトラムのピーク位置は速度の影響が明確に

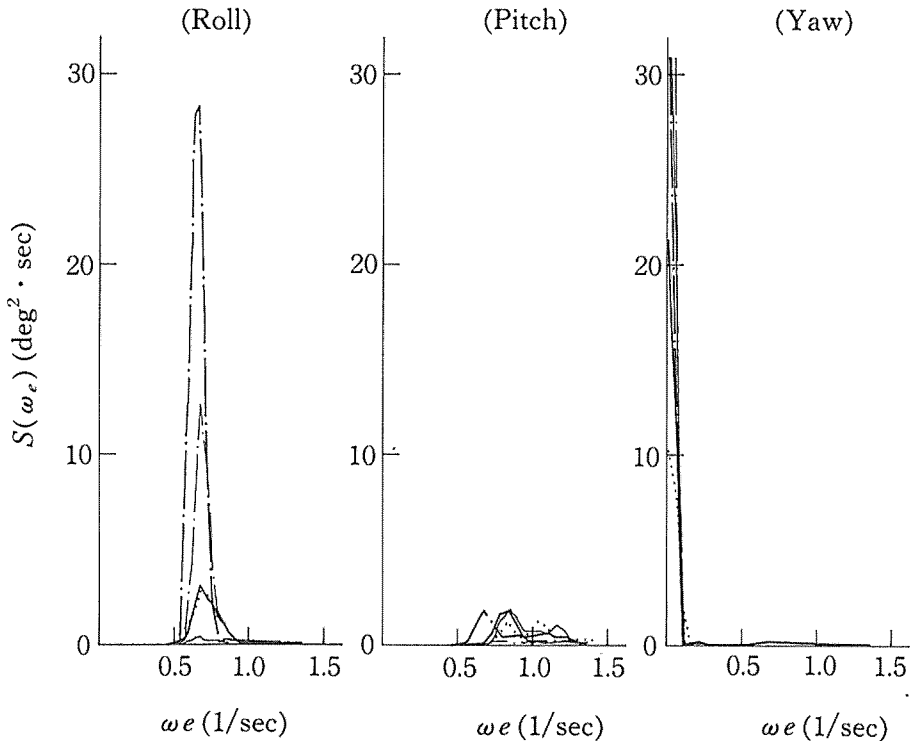


Fig. 4. Effect of heading angle on spectrum of ship motions when ship's speed is 4 kts

Notes ———: C1 (Head sea)
: C2 (Bow sea)
 - · - ·: C3 (Beam sea)
 - - - -: C4 (Quarterming sea)
 ———: C5 (Following sea)

みられる。すなわち、船首波 (C1) では低速で長く8.02秒、高速で短く5.05秒、船尾波 (C5)、斜め追い波 (C4) では低速で短く8.61秒、高速で長く12.24秒となり、出会い波向の影響を顕著に受けている。船首揺れについては、ピークをもつスペクトラムではないが、高速では曲線の囲む面積が小さく、反対に2, 4, 6ノットの低速ではその面積が大きい。このことは、低速航行中の保針性の難しさを示している。

(2) 全振幅解析

時系列データの分布は正規分布であることが知られている²⁾。今回の実験データからその分布型を調べた1例をFig. 6に示す。同図は速度4ノットで航行中、出会い波向を変化させた場合のデータである。図示のように、横揺れ、

縦揺れの時系列データは正規確率紙の上ではほぼ直線になり、正規分布とみられるが、船首揺れでは必ずしも直線上に分布しない。特に船首揺れの分布が漂流中や低速航行中では直線から離れるが、高速航行中ではほぼ直線に乗る。これは船首揺れの変位角の周波数および位相が必ずしも不規則ではなく、速度が操舵による保針性に及ぼす影響の一面を示し、船首揺れの特徴とみられる。

不規則変動する船体動揺の記録データから、電算機処理によりすべての全振幅を計算し、その統計解析を行なった。この全振幅の確率分布はレイレイ分布に近いことが多くの実船実験例で報告されている³⁾。今回の実験で得られた速度4ノット、船首波 (C1) の場合の動揺全振幅の頻度分布をFig. 7に示す。図中、実線は次式で示すレイレイ分

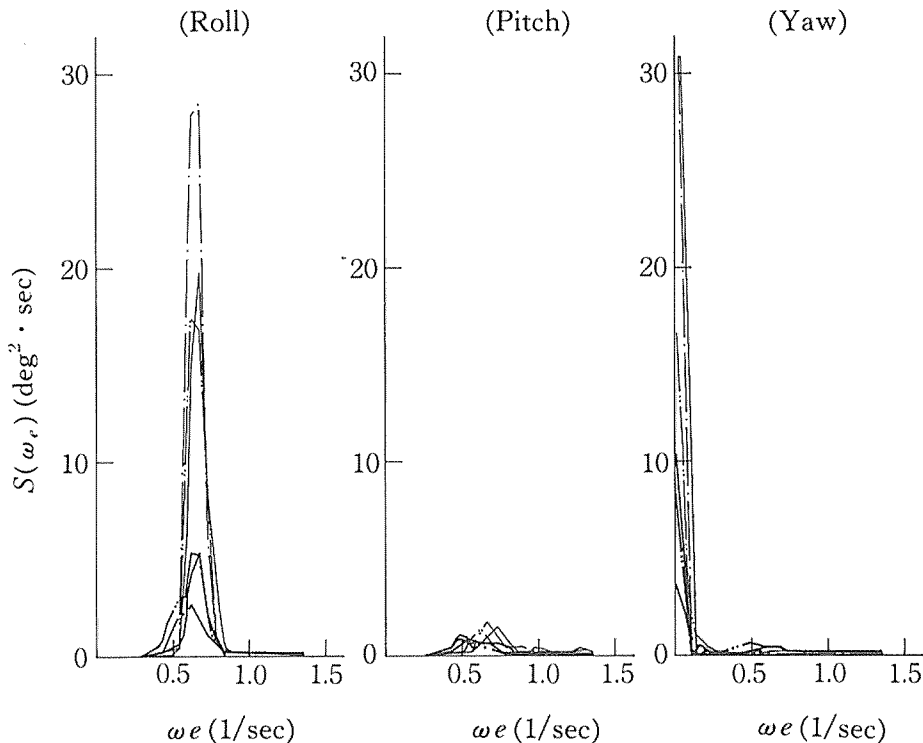


Fig. 5 Effect of speeds on spectrum of ship motions in quartering sea

Notes —: 2 kts
 - - - : 4 kts
 - · - · : 6 kts
 - - - - : 8 kts
 - · · · : 10 kts
 - · · · : 12 kts

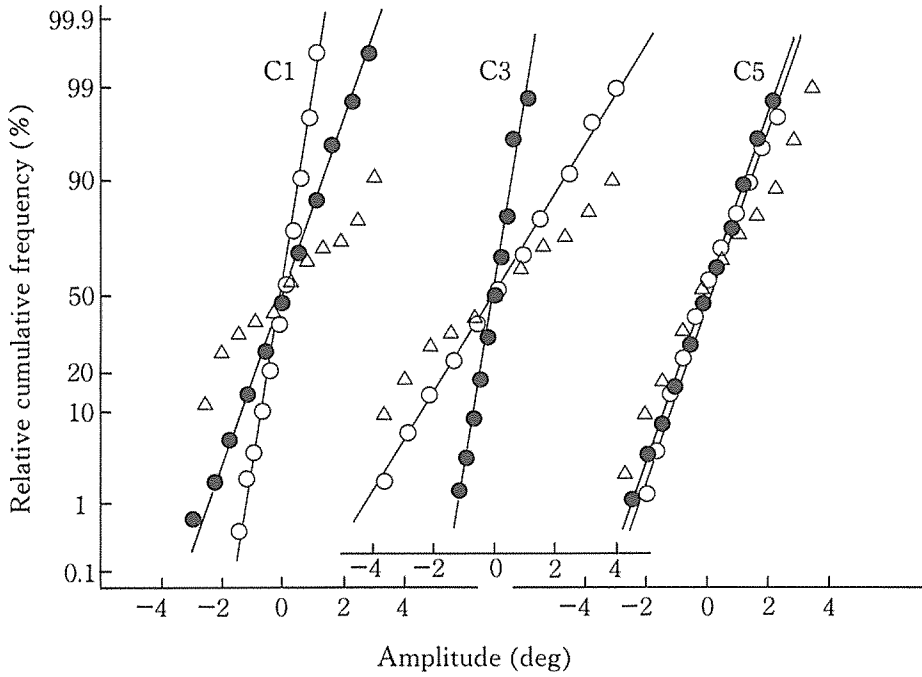


Fig. 6. Distribution of successive points equal intervals of time in ship motion records during seakeeping trials
Notes ○: Roll ●: Pitch △: Yaw

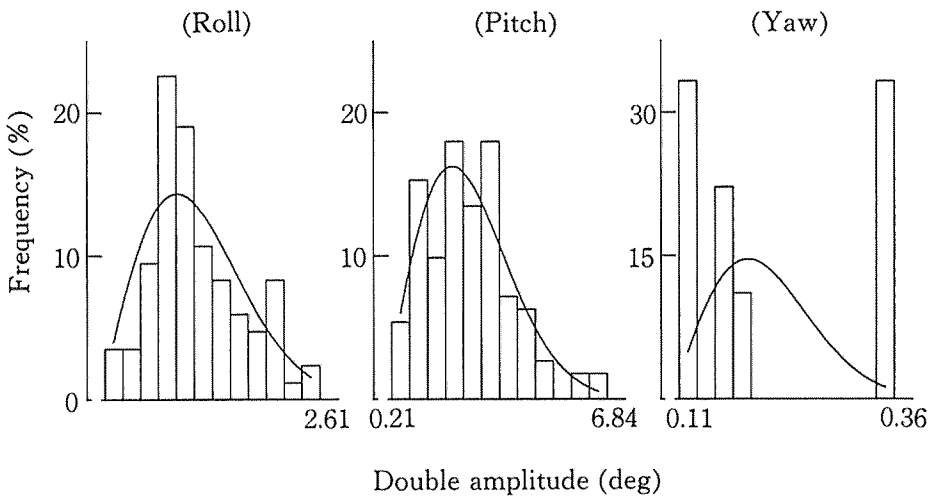


Fig. 7. Histograms of double amplitude when ship's speed is 4kts in head sea
Note Curves are obtained by the Eq. (1)

布の計算値を表わす。平均値を \bar{H} とすると、この変動量 H の確率分布 $p(H)$ は

$$p(H) = \pi H \cdot \exp(-\pi H^2/4\bar{H}^2)/2\bar{H}^2 \dots\dots\dots(1)$$

で表わせる。同図に示すように、横揺れおよび縦揺れの全振幅の分布はほぼレイレイ分布で近似出来るが、斜め追い波 (C4) ではずれがみられた。また、船首揺れの全振幅の分布は操舵、すなわち当て舵の影響でレイレイ分布への適合は悪かった。

また、動揺全振幅の解析で得た平均動揺角 \bar{H} (度) と統計代表値の関係を Fig. 8 に示す。全振幅の頻度分布が完全なレイレイ分布である場合には、平均値と代表値の間にはそれぞれ理論的な比例関係が存在する。Fig. 8 に示した直線は、レイレイ分布とした場合の関係式を表す。

これらの図から明らかなように、一見複雑な運動をする

動揺も、船首揺れ以外ではその全振幅の頻度分布は速度および出会い波向の変化に関係なく、供試船クラスの船も他の実験結果^{1, 3)}と同様に、レイレイ分布に極めて近いことが認められた。しかし、この関係がどの程度の海況まで成立するかについては、さらに幅広い海況変化の中での実験が必要であろう。

全振幅数を N とすると、全振幅の最大値 H_{max} は Longuet-Higgins の式により、

$$H_{max} = 1.129\bar{H}(\text{Log}_e N)^{1/2} \dots\dots\dots(2)$$

で求められ、その大きさは全振幅数 N に関係する。今回、動揺実験は30回実施し、その平均の N は横揺れで78.37、縦揺れで108.93、船首揺れで34.87であった。それぞれの N に対する係数を H_{max} の実線で示した。図示のとおり最大値も若干ばらつきはあるが、横揺れおよび縦揺れは計

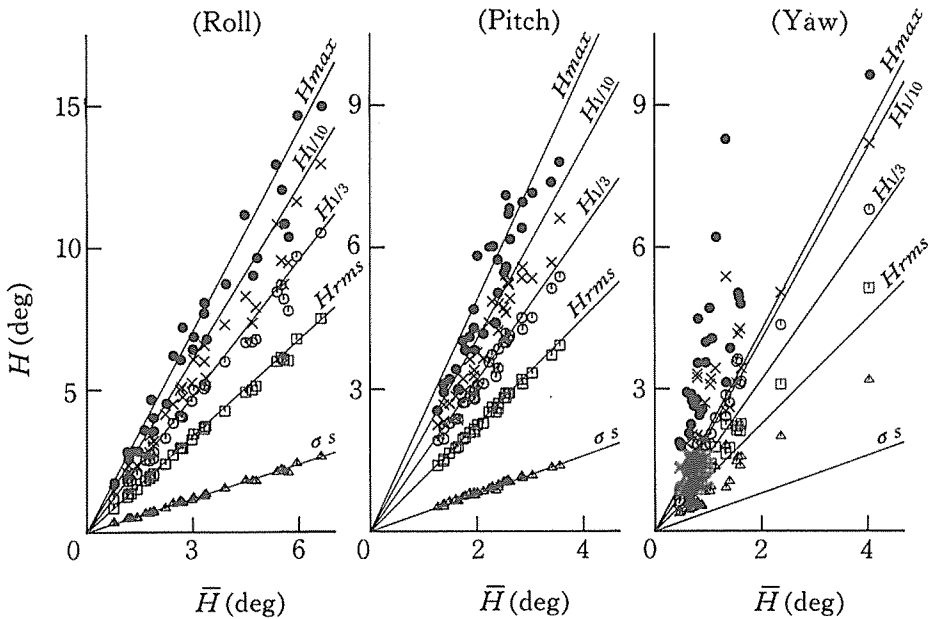


Fig. 8. Relation between the mean of double amplitude of ship motions, \bar{H} and statistical values

- Notes \triangle : σ_s \square : H_{rms}
 \circ : $H_{1/3}$ \times : $H_{1/10}$ \bullet : H_{max}
 —: Predicted lines by Rayleigh distribution
 $\sigma_s = 0.399\bar{H}$ $H_{rms} = 1.129\bar{H}$
 $H_{1/3} = 1.598\bar{H}$ $H_{1/10} = 2.032\bar{H}$
 $H_{max} = 2.358\bar{H}$ (Roll)
 $H_{max} = 2.445\bar{H}$ (Pitch)
 $H_{max} = 2.128\bar{H}$ (Yaw)

算値に近いことを示している。

船体動揺は波浪特性、出会い波向および速度等の相互影響で変化する。全振幅の統計解析で得た各実験の1/10最大平均値 $H_{1/10}$ と出会い波向および速度の関係を Fig. 9 に示す。同図は今回の実験のすべてのデータを解析したものである。 $H_{1/3}$ 等、他の代表値もほぼ同様な傾向を示した。

図示のように横揺れは船首波 (C1)、船尾波 (C5) では比較的小さく、速度影響も小さい。しかし、正横波 (C3) から斜め追い波 (C4) で最大の横揺れ角が発生し、4、6、8 ノットの速度範囲で動揺角は大きく、他の速度では小さい。これはスペクトラム解析の結果とも一致し、他の実船実験例と同じ傾向を示している⁴⁾。

縦揺れはどの速度でも船首波 (C1) が最大の動揺角を示し、次に船尾波 (C5)、そして最も小さいのは正横波 (C3) である。最大の縦揺れは10、12 ノットの場合に現われている。Fig. 9 に示すように、横揺れ角の最小値は最大値の約22%となり、縦揺れ角の最小値は最大値の約50%の値となっている。このことから、出会い波向および速度を適切に変更することにより、船体の動揺は相当軽減することが期待される。

船首揺れは斜め追い波 (C4) では大きく、なかでも2、

4、6 ノットの低速のときが大きく、保針の困難さを示している。

船の動揺角などの代表値は、スペクトラム解析および全振幅解析の双方から求まる。当然、同じ結果が得られるはずであるが、サンプリングタイムや計算条件などの影響で結果に差が出る場合がある。今回の解析の比較例を Fig. 10、Fig. 11 に示す。

Fig. 10 に示す横揺れと縦揺れにおける全振幅解析とスペクトラム解析による標準偏差 σ 、 σ_s については、各速度において、横揺れでは正横波 (C3) と斜め追い波 (C4) で、縦揺れでは船首波 (C1) と船尾波 (C5) で σ_s が σ より大きくなった。また、Fig. 11 に示す平均値 \bar{H} 、 \bar{H}_S についてはよく一致しているので、結果の信頼性の高さとともに、代表値は何れか一つの方法で得ることが出来る。

波浪中の船の動揺周期を検討する場合、いわゆる動揺波形の zero up cross 定義による peak to peak 周期 T_M (秒) と zero up cross 周期 T_Z (秒) がよく用いられる。全動揺データから全振幅解析により T_M 、 T_Z を計算し、その平均値 \bar{T}_M と \bar{T}_Z の比較を Fig. 12 に示す。

横揺れの場合、 \bar{T}_Z は固有周期を中心とし、その分布範囲は狭く、ほとんどの \bar{T}_M は \bar{T}_Z より小さい。一方、縦揺

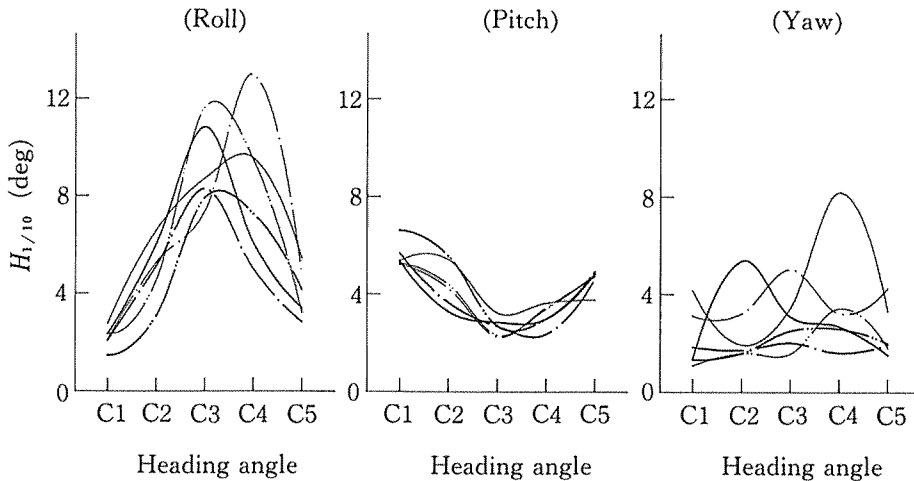


Fig. 9. Relation between the $H_{1/10}$ values of double amplitude of ship motions, heading angles and speeds

- Notes
- : 2 kts
 - · -: 4 kts
 - · ·: 6 kts
 - · ·: 8 kts
 - · - ·: 10 kts
 - · · ·: 12 kts

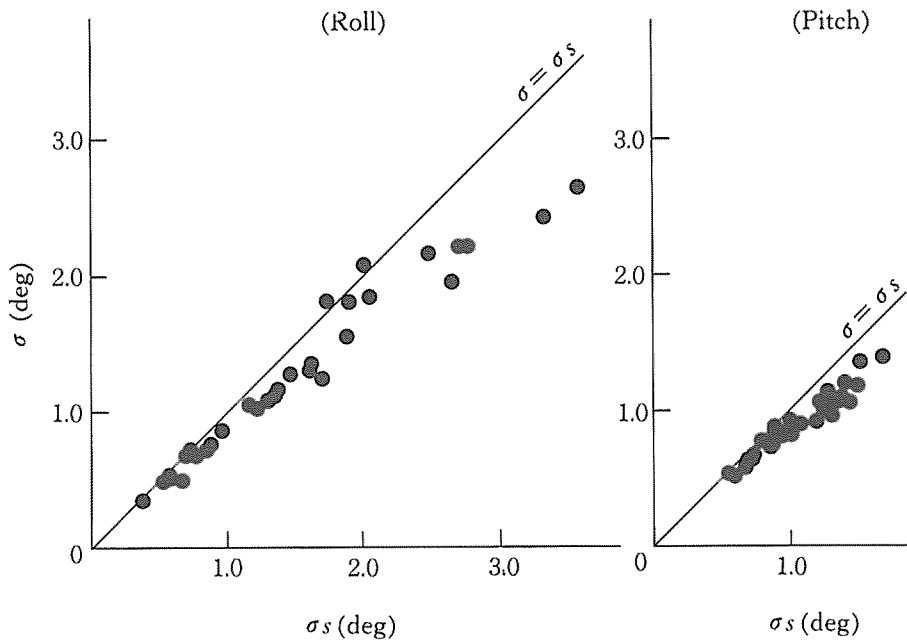


Fig. 10. Relation between σ and σ_s of ship motions
 Notes σ : Standard deviations of double amplitude of ship motions
 σ_s : Standard deviations of spectrum analysis of ship motions

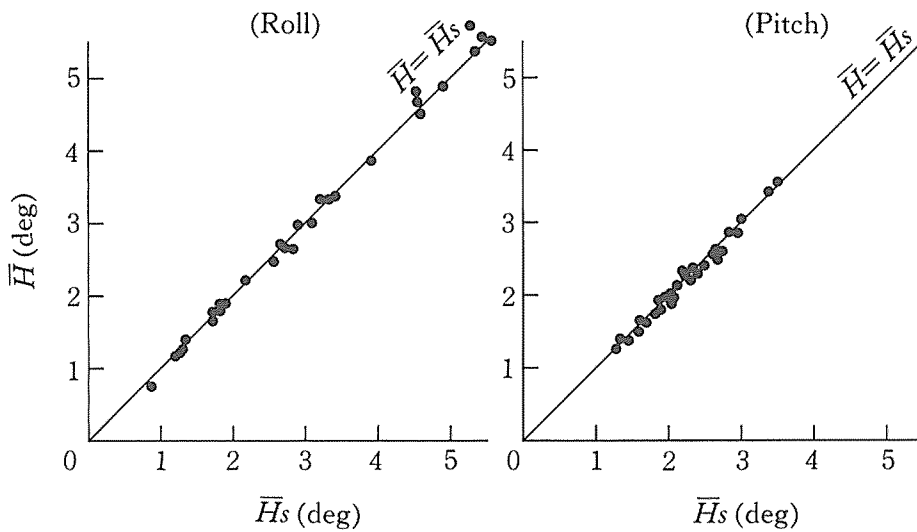


Fig. 11. Relation between \bar{H} and \bar{H}_s of ship motions
 Notes \bar{H} : The mean of double amplitude of ship motions
 \bar{H}_s : The mean of spectrum analysis of ship motions

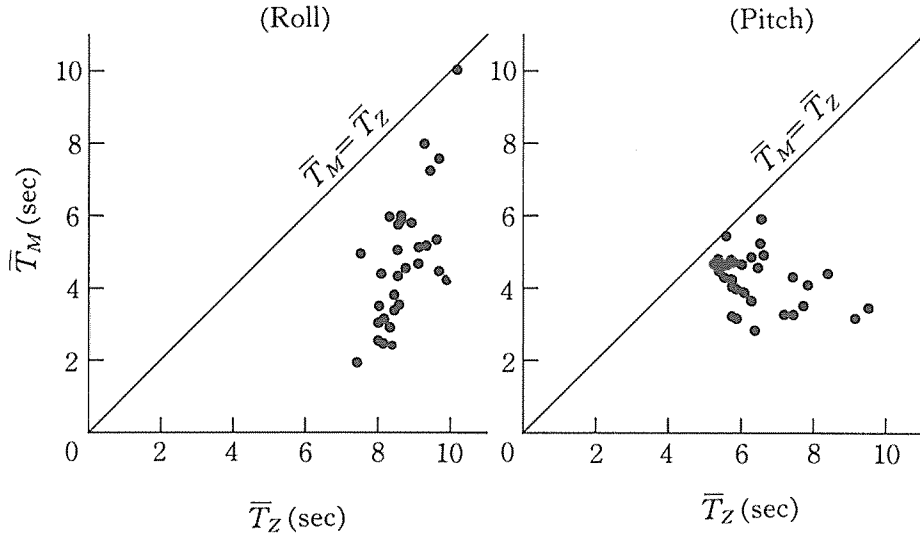


Fig. 12. Relation between \bar{T}_Z and \bar{T}_M of ship motions

Notes \bar{T}_Z : The Mean of zero up crossing of ship motions by statistical analysis

\bar{T}_M : The Mean of peak to peak period of ship motions by statistical analysis

れでは、 \bar{T}_Z が出会い波向の影響を受けているため、 \bar{T}_M に比べて分布範囲が広い。全振幅解析から求めた横揺れおよび縦揺れの \bar{T}_Z の分布傾向は、スペクトラム解析によるスペクトラムのピーク位置の分布と対応している。

3.2 動揺加速度について

波浪中を航行している場合、船体には不規則な動揺が起り、しかもその動揺が多軸性であるため、船体、構造物、機器および乗組員は複雑な加速度を受ける。したがって、加速度は構造物、機器の破損という安全性の問題のほか、船内乗組員の居住性、作業性、快適さ、船酔いおよびその他の環境条件に幅広い影響を及ぼす。この加速度は方向性を持ち、計測する場所によりその値は異なる。しかも加速度の記録を行うとき、各種の振動に起因する雑音が含まれやすく、また、衝撃的な波形であるためにピーク値の読取りが難しい。そこで今回は船体動揺のみの加速度を把握するために、ローパスフィルターを入れて処理した。

(1) スペクトラム解析

加速度計の設置場所が船の重心Gから離れていた（上方に0.84m、左舷側に0.25m、船首側に0.15m）ため、それ

ぞれの軸の加速度は動揺の影響を受けている。船体が停止漂流中の加速度のスペクトラムを Fig. 13 に示す。

停止漂流中の動揺のスペクトラム Fig. 3 と比較すると、エネルギーのピーク周波数から考えて、X軸加速度は縦揺れの、また、Y軸加速度は横揺れの影響を大きく受けている。Z軸加速度のスペクトラムは双峰形となり、7.50秒、4.31秒付近にピークが現われた。実験中の船の状態から各種の方法^{5, 6)}で縦揺れおよび上下揺れの固有周期を推定してみると、縦揺れは3.54~4.76秒、上下揺れは3.11~4.47秒であった。したがって、4.31秒付近のピークは縦揺れおよび上下揺れによるものと考えられる。船体の振動源となる主機、発電機およびコンプレッサー等の振動周波数は、双峰形スペクトラムのピーク周波数より高い。また、これらの振動は3軸いずれのスペクトラムにも顕著に現われず、7.50秒付近に現われるピークは他の運動によるものと考えられる。このことからZ軸加速度は上下運動と他の運動が連成され、その結果が現われていると思われる。

加速度スペクトラムと出会い波向の関係を Fig. 14 に示す。同図は、速度12ノットで航行中の場合の例を示した。

X軸は縦揺れが影響しているためか、出会い波向によりスペクトラムのピーク位置が変化する。すなわち、船首波

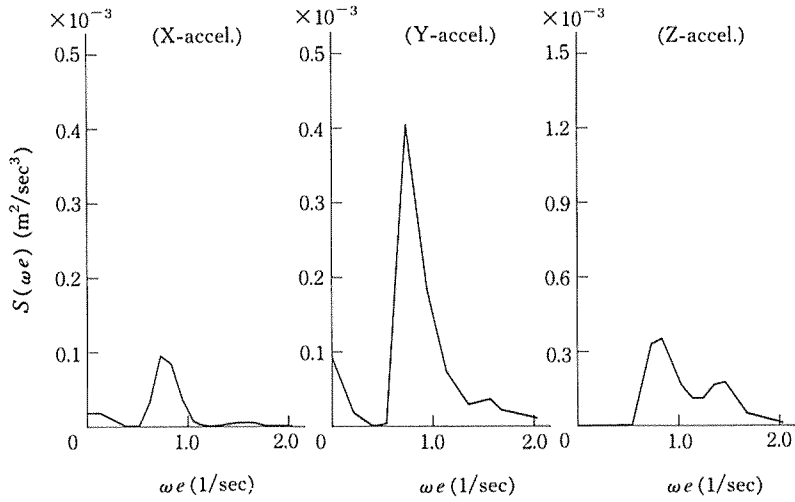


Fig. 13. Spectrum of ship acceleration during drifting in beam sea

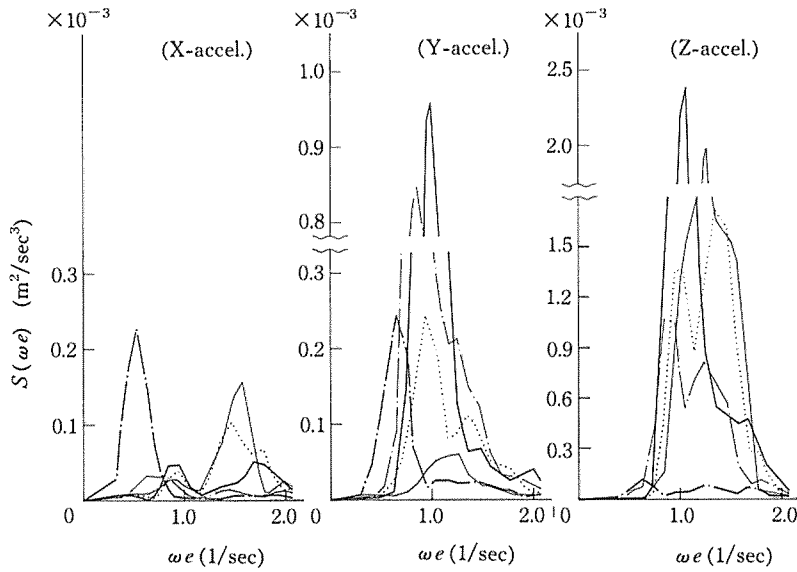


Fig. 14. Effect of heading angles on spectrum of ship accelerations when ship's speed is 12 kts

- Notes
- : C1 (Head sea)
 -: C2 (Bow sea)
 - · - ·: C3 (Beam sea)
 - · - ·: C4 (Quartering sea)
 - : C5 (Following sea)

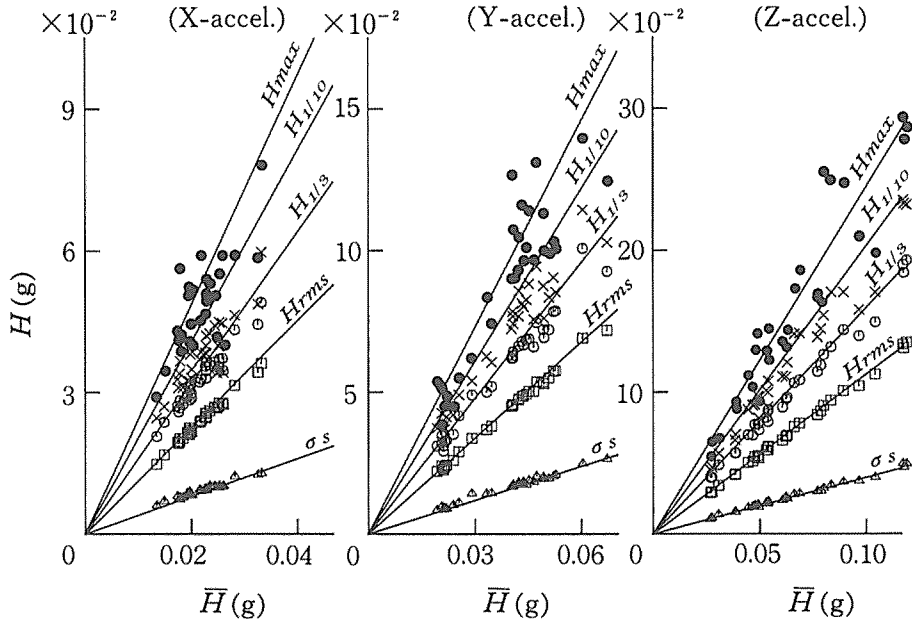


Fig. 16. Relation between the mean of double amplitude of ship accelerations, \bar{H} and statistical values

Note \triangle : σ_s \square : H_{rms} \circ : $H_{1/3}$ \times : $H_{1/10}$ \bullet : H_{max}

—: Predicted lines by Rayleigh distribution

$$\sigma_s = 0.399\bar{H} \quad \bar{H}_{rms} = 1.129\bar{H} \quad \bar{H}_{1/3} = 1.598\bar{H} \quad \bar{H}_{1/10} = 2.032\bar{H}$$

$$H_{max} = 2.427\bar{H} \text{ (X-accel.)} \quad H_{max} = 2.431\bar{H} \text{ (Y-accel.)}$$

$$H_{max} = 2.451\bar{H} \text{ (Z-accel.)}$$

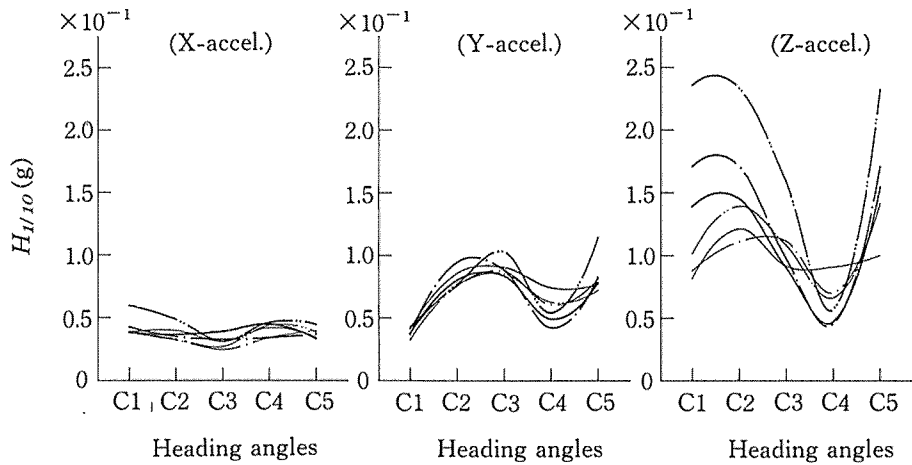


Fig. 17. Relation between the $H_{1/10}$ values of double amplitude of ship accelerations, heading angles and speeds

Notes —: 2 kts $-\cdot-\cdot-$: 4 kts $-\cdot-\cdot-$: 6 kts
 $-\cdot-\cdot-$: 8 kts $-\cdot-\cdot-$: 10 kts $-\cdot-\cdot-$: 12 kts

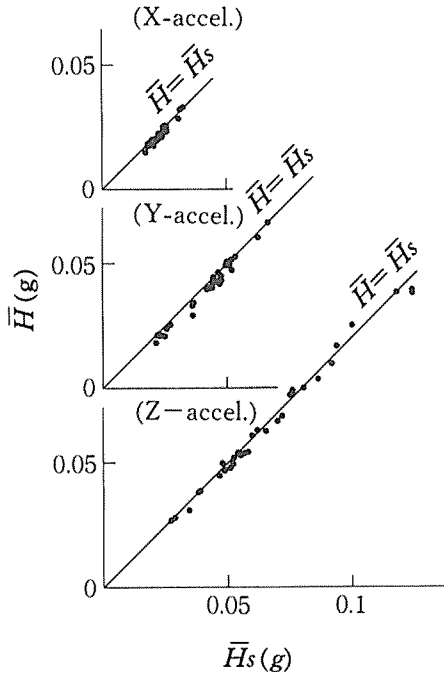


Fig. 18. Relation between \bar{H} and \bar{H}_s of ship accelerations
 Notes \bar{H} : The mean of double amplitude of ship accelerations
 \bar{H}_s : The mean of spectrum analysis of ship accelerations

とみなせるようである。全振幅の最大値の分布は直線のまわりになりにばらついている。船体、構造物および機器の破損などについては最大加速度による影響が大きく、さらに詳細な検討が必要である。今回の実験で計測した加速度は、X軸、Y軸、Z軸の順に大きくなり、最大値は $0.29g$ ($g=9.8\text{m/sec}^2$)であった。

全振幅解析で得られた加速度の1/10最大平均値 $H_{1/10}$ と出会い波向、速度の関係を Fig. 17 に示す。この図から明らかのようにX、Y、Z各軸の加速度は、速度が増加するほど大きくなる傾向がみられ、特にZ軸加速度は船首寄りの出会い波向のとき、この傾向が顕著である。出会い波向と加速度の大きさとの関係は、Z軸では船首波 (C1)、斜め向い波 (C2) および船尾波 (C5) で加速度が大きく、斜め追い波 (C4) では速度に関係なく小さく現われた。Y軸加速度も斜め追い波 (C4) で小さくなっているが、

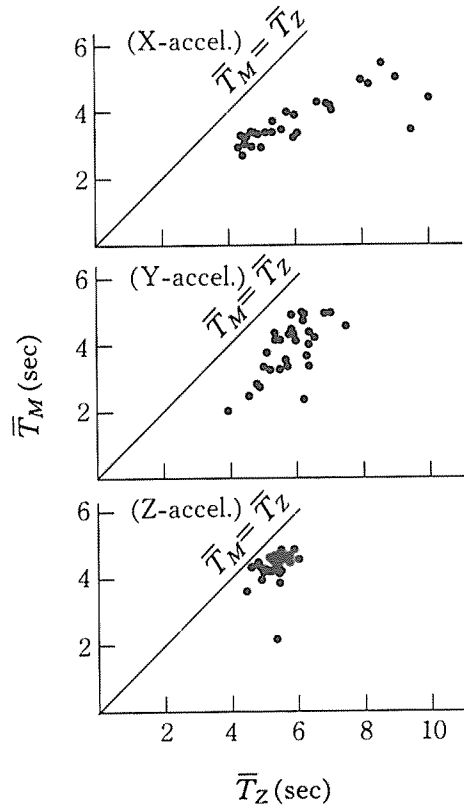


Fig. 19. Relation between \bar{T}_Z and \bar{T}_M of ship accelerations
 Notes \bar{T}_Z : The mean of zero up crossing of ship accelerations by statistical analysis
 \bar{T}_M : The mean of peak to peak period of ship accelerations by statistical analysis

波の出会い周期と密接な関係があり、今後詳細に検討する必要がある。

加速度データについても、スペクトラム解析と全振幅解析の2法で検討したが、その比較例を Fig. 18 に示す。図示のとおり、加速度は衝撃的な変動が多いが、フィルタを通したためか両者は比較的よく一致している。

加速度の周期解析を試み、動揺角の場合と同様に \bar{T}_Z および \bar{T}_M を比較して Fig. 19 に示す。各軸とも \bar{T}_Z が \bar{T}_M に比較して大きく、特にX軸、Y軸ではそれが顕著に現われている。

(C1) では3.42秒、船尾波 (C5) では7.26~11.60秒にピークが現われた。また正横波 (C3) では小さく、船首波 (C1) および斜め追い波 (C4) で大きい加速度を受ける。しかし、全般的に他の軸に比較して加速度は小さい。

Y軸は横揺れの影響を強く受けているために、スペクトラムのピーク位置は出会い波向により大きく変化しない。これは横揺れのスペクトラムと同じ傾向である。今回の実験では、ピーク位置は5.80~9.69秒付近に集中している。また、全般的にX軸より加速度は大きい。

Z軸は正横波 (C3) および斜め追い波 (C4) では加速度が比較的小さいが、船首波 (C1)、斜め向い波 (C2) および船尾波 (C5) の場合には、他の2軸より大きい加速度を受けている。スペクトラムのピーク位置は、船首波 (C1) で5.00秒、船尾波 (C5) で5.96秒に現われ、波向が船首から船尾方向に近づくほど、ピーク位置は長い周期のところにも現われる。

加速度スペクトラムに現われる速度影響は次のようである。X軸方向の加速度は船尾波 (C5) では速度の影響が小さい。しかし、船尾波 (C1) および斜め向い波 (C2) では、速度が大きくなるに従いスペクトラムの周期は短い方に移動し、加速度も比較的大きくなる。Y軸では、ピー

ク位置は速度によって顕著な変化はみられないが、加速度はX軸に比較して全て大きい。Z軸では、スペクトラムの形状は双峰形のものも多く現われ、他の軸より複雑な運動がみられる。また、加速度は他の2軸より常に大きく、しかも速度の増加とともに大きくなる傾向がみられる。このような実船のY軸、Z軸の加速度特性は、理論計算による他船型の例とも同じ傾向を示している⁷⁾。

(2) 全振幅解析

動揺角と同様に加速度データの全振幅解析を行なった。X軸、Y軸、Z軸それぞれ加速度の時系列データを正規確率紙上にプロットした1例を Fig. 15 に示す。同図は速度12ノットで航行中、出会い波向を変化させた場合の3軸の加速度分布を示したものである。図示のとおりほぼ直線上に分布し、正規分布とみられる。

3軸加速度の全振幅のそれぞれの平均値 \bar{H} と統計代表値の関係を Fig. 16 に示す。図中の直線はレイレイ分布の場合の関係式を表す。30実験の全振幅数 N の平均がX軸、Y軸ともに102.13、Z軸で111.30であった。この N を用い、(2)式より最大値 H_{max} の係数を求めた。図示のとおり、加速度全振幅の代表値は最大値を除いてレイレイ分布

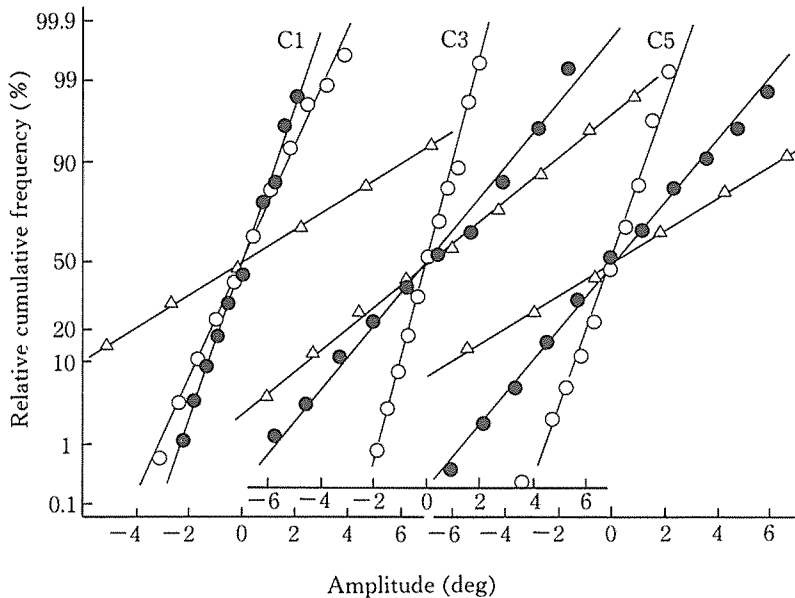


Fig. 15. Distribution of successive points equal intervals of time in ship accelerations records during seakeeping trials
Notes ○: X-accel. ●: Y-accel. △: Z-accel.

(3) 各軸加速度の相関性

船内での調査、計測、その他の作業を行う場合、ある方向の加速度は多少大きくても支障はないが、他の方向では支障をきたす場合がある。したがって現行の作業特性を考えに入れたうえ、3軸の加速度の相互関連性を知って操船する必要がある。不規則波中を動揺しながら船舶が航行している場合、船内の任意点で受ける加速度は単純ではない。このような加速度は船体の運動方程式を解くことにより、ある程度推定出来る。任意点での加速度は、動揺中心における3軸の加速度以外に、X軸では縦揺れの、Y軸では横揺れ、船首揺れおよび重力加速度成分の、また、Z軸では横揺れと縦揺れの影響を受けている。船内ではこれら3軸の加速度の合成されたものを受けるが、ここでは同じ海況

のもとで、各種の出会い波向、速度で航行した場合、それぞれの軸の加速度の相互関係について解析した。

横揺れ、縦揺れおよび船首揺れの動揺角の代表値、すなわち平均値 \bar{H} 、有義値 $H_{1/3}$ 、1/10最大平均地 $H_{1/10}$ と、3軸それぞれの加速度の代表値 \bar{A} 、 $H_{1/3}$ 、 $H_{1/10}$ との関連を調べ、その1例をFig. 20に示す。図中直線はそれぞれ最小2乗法で求めた回帰直線を表わす。

同図は動揺角と加速度について、それぞれ1/10最大平均値 $H_{1/10}$ の関係を示すが、他の代表値もほぼ同じ傾向を示した。図から明らかのように、

- (1) 横揺れ角が大きくなるとX軸、Z軸加速度は減少し、Y軸加速度は増大する。
- (2) 縦揺れ角が大きくなるとY軸加速度は減少するが、

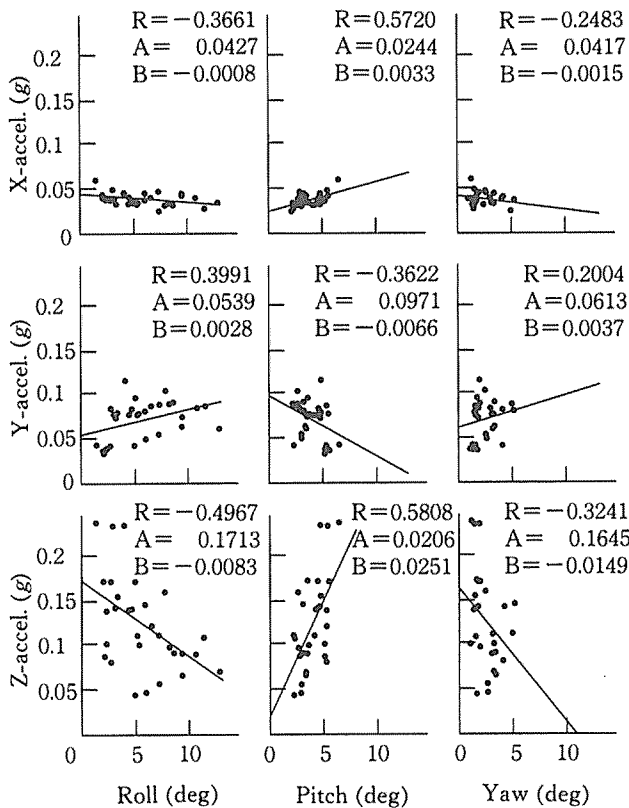


Fig. 20. Correlation between double amplitude of ship motions and ship accelerations
 Notes R: Correlation coefficient
 A, B: Regression coefficient
 —: Obtained by equation, $Y=A+BX$

Table 3. The correlation coefficient between double amplitude and acceleration

			Roll	Pitch	Yaw	
			\bar{H}			
Acceleration	X	\bar{H}	-0.3327	0.6007	-0.3185	
	Y		0.4920	-0.5351	0.2180	
	Z		-0.4742	0.5256	-0.3040	
				$H_{1/3}$		
	X	$H_{1/3}$	-0.3458	0.5745	-0.2765	
	Y		0.4361	-0.4526	0.0897	
	Z		-0.5049	0.5474	-0.3596	
				$H_{1/10}$		
	X	$H_{1/10}$	-0.3661	0.5720	-0.2483	
	Y		0.3991	-0.3622	0.2004	
	Z		-0.4967	0.5808	-0.3241	

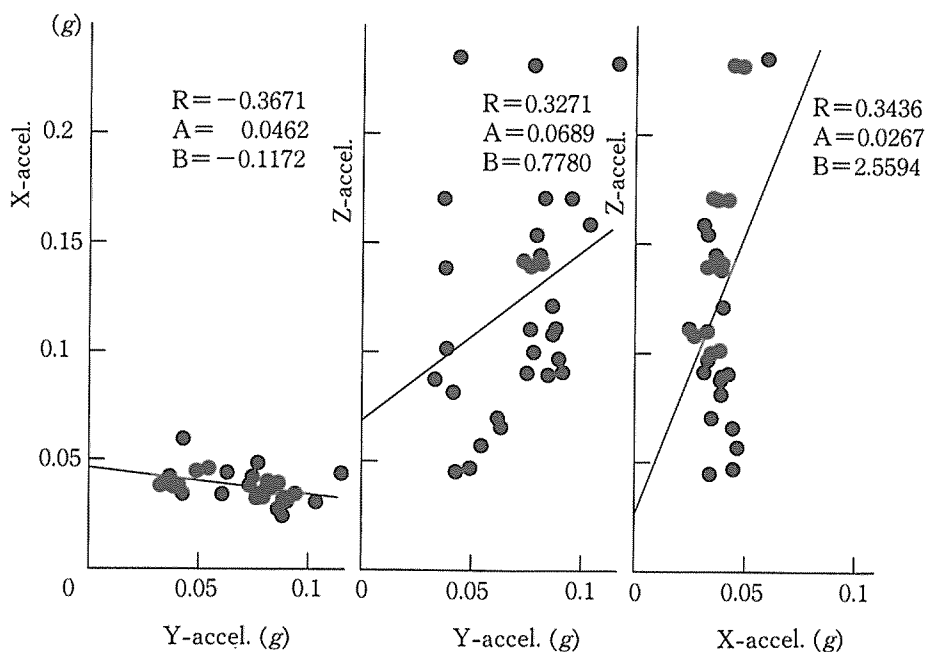


Fig. 21. Correlation between X-axis accel and Y-axis accel., Y-axis accel. and Z-axis accel. and X-axis accel. and Z-axis accel.

Notes R: Correlation coefficient
 A, B: Regression coefficient
 —: Obtained by equation,
 $Y=A+BX$

X軸およびZ軸加速度は顕著に増大する。

(3) 船首揺れが大きくなるとX軸、Z軸加速度は減少するが、Y軸は増大する。

という傾向がみられる。なお、Z軸加速度は横揺れ、船首揺れの増大に伴い減少する傾向にあるが、ばらつきが大きく相互の関係は明らかでない。

動揺角の大きさと3軸加速度の大きさの相関係数をTable. 3に示す。表から、3軸の加速度に与える影響は縦揺れが最も強く、続いて横揺れとなり、船首揺れの影響は他の運動に比べ最も小さい。

次に加速度相互の関連性の1例をFig. 21に示す。図示のように、Y軸加速度の増大(横揺れ角の増大)に対し、X軸加速度の減少(縦揺れ角の減少)の傾向が認められる。またZ軸加速度はX軸、Y軸加速度の増大とともに急に大きくなる。

船内計器の設置場所、計測者の計測中の姿勢と向き、船内作業等では、特にある方向の加速度が作業の難易に関係する。したがって、Fig. 20~21に示す加速度の特性を操船に応用することにより、作業能率の向上を図ることが出来る。しかし、船体動揺は多軸性を持つため、加速度の変動は複雑である。そこで、3軸それぞれの加速度だけでなく、それらの総合特性も知っておく必要がある。その1方法は、各方向の加速度のベクトル和と操船との関連を知ることである。

船内作業内容により、X軸、Y軸、Z軸の加速度の影響度合いが異なり、その重みは均一ではない。各軸の重みのレベルについては研究対象によって異なるはずであるが⁸⁾、ここでは3軸の合成加速度として、次式で得られたものを考える。

$$\bar{A} = (\bar{X}^2 + \bar{Y}^2 + \bar{Z}^2)^{1/2} \dots\dots\dots(3)$$

この \bar{A} については、それぞれの軸の加速度の平均値 \bar{H} 、有義値 $H_{1/3}$ および1/10最大平均値 $H_{1/10}$ について検討した。1例として、3軸の1/10最大平均値 $H_{1/10}$ の合成加速度と速度および出会い波向の関係をFig. 22に示す。また、停止漂流中の合成加速度を求めたところ0.12gであった。同図の縦軸にそれを×印で示す。

ここには示されていないが、加速度の他の代表値についてもほぼ同様な傾向を示した。Fig. 17に示したように、今回の実験では、速度に関係なくZ軸加速度が最も小さい出会い波向は斜め追い波(C4)であった。前述のとおり、Z軸加速度は他の2軸より大きいから、斜め追い波を受けて航行中、速度が増加しても合成加速度に大きな変化はない。しかし、他の出会い波向の場合は速度の増加とともに

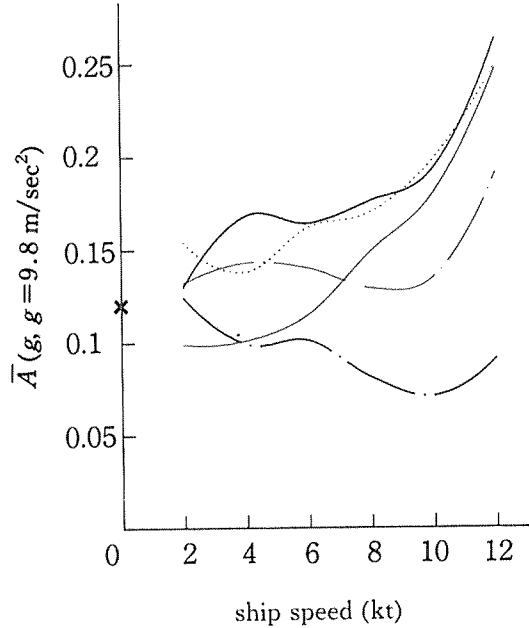


Fig. 22. Relation between \bar{A} , heading angles and speeds
 Notes —: C1 (Head sea)
: C2 (Bow sea)
 - · - ·: C3 (Beam sea)
 - · - ·: C4 (Quartering sea)
 —: C5 (Following sea)
 ×: The value during drifting
 \bar{A} : Obtained by the Eq. (3)

合成加速度は急速に大きくなり、この傾向は顕著である。Fig. 22に示した合成加速度と出会い波向、速度の定量的関係は、これまで操船に関与する動揺角の情報に加速度情報を取り入れることが可能となり、合理的な速度制御および作業環境の改善に寄与することができる。

4. あとがき

練習船天鷹丸を用いて動揺実験を行った。波浪中の動揺特性を把握するには多くの実船実験が必要であるが、今回は、航海の途中で実験を行ったため、波浪状況については限定された範囲となっている。今回の実験結果を要約すると次のようである。

- (1) 平均動揺角および平均加速度は、スペクトル解析、全振幅解析のどちらか一方で推定できる。また、横揺

れ・縦揺れの全振幅および各軸の加速度は、レイレイ分布ではほぼ近似できる。

- (2) 波浪中における出会い波向，速度と船体動揺の関係は，Fig. 9 に示すとおりほぼ明らかになった。
- (3) 船体動揺と X，Y，Z 各軸加速度の相関性および各軸加速度相互の相関性は，Fig. 20，21 に示すとおりである。
- (4) 動揺による加速度は X 軸，Y 軸，Z 軸の順に大きく，最大加速度は $0.29g$ であった。
- (5) X 軸，Y 軸および Z 軸の加速度のベクトル和は，斜め追い波以外のお会い波向では，速度とともに急激に大きくなる。漂流中の加速度のベクトル和は $0.12g$ であった。

なお今後の課題として，動揺・加速度等の定量的な確認，理論計算との対応，さらに動揺加速度と調査，教育効率等の定量的関連性について調べる予定である。

文 献

- 1) 高島末夫・浜口正人・本間辰太郎：日航論，69，77～85 (1983)。
- 2) 平山次清：日本造船学会誌，609，p.141 (1980)。
- 3) 日本造船学会：第 2 回耐航性に関するシンポジウムテキスト，p.187，(1977)。
- 4) 高島末夫：日航論，59，p.156 (1978)。
- 5) 大串雅信：理論船舶工学（下巻），9，海文堂，東京，1981，pp.47～48。
- 6) 関西造船協会：造船設計便覧，4，海文堂，東京，1983，pp.413～414。
- 7) 日本造船学会：第 2 回耐航性に関するシンポジウムテキスト，p.122，(1977)
- 8) 後藤大三：日本造船学会誌，583，p.14 (1978)

使用記号

A, B	回帰係数
\bar{A}	三軸合成加速度
B	型幅

D	型深さ
da	船尾喫水
df	船首喫水
Cb	方形係数
Cm	中央横断面係数
Cp	柱形係数
Cw	水線面積係数
C1	船首波
C2	斜め向い波
C3	正横波
C4	斜め追い波
C5	船尾波
G	船体重心
GM	メタセンター高さ
H	全振幅解析による動揺角
\bar{H}	全振幅解析による平均値
Hmax	全振幅解析による最大値
Hrms	全振幅解析による二乗平均平方根
Hs	スペクトラム解析による標準偏差
$H_{1/3}$	全振幅解析による 1/3 最大平均値
$H_{1/10}$	全振幅解析による 1/10 最大平均値
KG	キール上面よりの重心高さ
Lpp	水線間長
N	全振幅数
$p(H)$	レイレイ確率分布
R	相関係数
T_M	zero up cross 周期
\bar{T}_M	zero up cross 平均周期
T_s	船体動揺固有周期
T_z	peak to peak 周期
\bar{T}_z	peak to peak 平均周期
W	排水量
\bar{X}	X 軸平均加速度
\bar{Y}	Y 軸平均加速度
\bar{Z}	Z 軸平均加速度
σ	全振幅解析による標準偏差
σ_s	スペクトラム解析による標準偏差

