波浪中における沿岸漁船の動揺について—II.

——スケグ付き船型の動揺——

高島 末夫*・浜口 正人*・本間辰太郎*

On the Motions of a Inshore Fishing Boat in Waves—II.

——Motions of a fishing boat with skeg——

Sueo TAKASHIMA, Masato HAMAGUCHI
and Tatsutaro HONMA

Abstract

As a series of experiment for the motions of inshore fishing boat in waves, the seakeeping experiments were carried out varying speeds, heading angles and displacement of a actual boat. And these experiments were repeated for four different sea conditions. From these experiments, we obtained the following results.

- (1) The wave hights of a record and double amplitude of roll and pitch angles were found to follow nearly Rayleigh distribution.
- (2) The values of the bandwidth parameter, ϵ_s , obtained by spectral analysis, lies in the range $\epsilon_s=0.30$ to $\epsilon_s=0.80$ for roll angles and in the range $\epsilon_s=0.40$ to $\epsilon_s=0.95$ for pitch angles under various boat and sea condition. And the values of ϵ_s for these motions were found to increase as the speeds increase.

1. はじめに

全漁船隻数の約90%が20トン未満の漁船であり、これらの漁船がわが国の沿岸漁業を支えている。近年沿岸漁業の見直しが強く要望されているとき、これに従事する漁船も多くの課題を抱え、安全運航・操業の効率向上・省エネ対策等多くの視点から検討がすすめられている。

漁船の動揺実態調査もその1つであるが、沿岸漁船の船型は地域・漁業種類により多種多様である。これを動揺特性の調査という観点からみると規模は20トン以下でハードチェーン付き、船尾船底はフラットな船型とスケグ付き船型に分類することが出来る。比較的小型で前者の船型については既に述べた⁽¹⁾ので、今回は沿岸漁船の特性を幅広く把握する意味で18トンスケグ付き船型を選び、波浪中の動揺実験を行ったのでその統計的解析結果を報告する。

2. 供試船および計測・実験方法

供試船はFRP製18トン型でハードチェーンを有し、かつスケグ（概略の大きさはバーキールを含めて推進器柱の位置で約1.20m、 $\square$ で約0.20mの高さを有する）を付けている沿岸漁船である。その一般配置図を図1に示す。実験は山口県日本海側響灘沿岸で、沖合2～10海里の水深十分な水域で実施した。実験および計測・記録の方法は前報と同じである。

波高計測は動揺実験の区切りを利用して、1日当たり数回計測した。この有義波高の平均を基準にして、海面波

* 正会員 水産大学校（下関市吉見永田本町1,944）

浪の状態を海況1～4（記号S1～S4）の4段階に分けた。その間の風速は平均で3.5～11.5m/sであった。今回の動揺実験中の海況および波浪代表値を表1に示す。

供試船の排水量は操業の実状を考慮して、軽荷状態（記号W1）、半載状態（記号W2）および満載状態（記号W3）の3状態を設定、それぞれの状態について傾斜試験と静水中の動揺試験を行い、その結果は表2に示す。船の速力は低速（平均5.84ノット、記号V1）、半速（平均9.82ノット、記号V2）および全速（平均12.93ノット、記号V3）の3段階に変化、また出会い波向は向い波（記号C1）から45°間隔に追い波（記号C5）まで5段階に変化

して、排水量、速力、出会い波向等と船の動揺（ロール、ピッチおよびヨウ）の関係を測定した。本報告では解析方法は前報と同じ方法によって、ロール・ピッチについて検討した。

Fig. 1 General arrangement of the fishing boat

Table 1 Sea conditions and representative values of waves

Sea cond.	Wave heights and periods (Standard deviation)		
	H_{max} (m)	$H_{1/3}$ (m)	$T_{z\ 1/3}$ (sec)
1	1.558 ± 0.629 (0.5995)	0.738 ± 0.093 (0.0886)	4.965 ± 0.422 (0.4024)
2	2.093 ± 1.456 (0.5859)	1.200 ± 0.240 (0.0964)	6.577 ± 0.355 (0.1429)
3	2.675 ± 0.192 (0.1833)	1.543 ± 0.111 (0.1054)	6.302 ± 1.255 (1.1956)
4	3.337 ± 0.880 (0.8379)	2.053 ± 0.235 (0.2234)	7.120 ± 0.695 (0.6617)

Table 2 Principal dimension and conditions

Item	Light load cond. W 1	Half load cond. W 2	Full load cond. W 3
L (Registered) (m)	14.95		
B (Registered) (m)	3.10		
D (Registered) (m)	1.15		
df (m)	0.06	0.48	0.80
da (m)	1.59	1.58	1.56
Trim (m)	1.25 A	0.70 A	0.37 A
W (ton)	19.552	29.809	35.441
$\overline{\overline{G}}$ (m)	4.15 A	2.05 A	1.42 A
KG (m)	1.46	1.19	1.11
GM_0 (m)	0.552	0.491	0.430
Cb	0.605	0.700	0.736
Cp	0.830	0.880	0.900
$C_{\overline{\overline{G}}}$	0.728	0.790	0.812
Cw	1.005	1.030	1.033

3. 結果および考察

3.1 実験中の波浪について

実験中の波浪はほとんど沖合からの波で、陸岸影響はないと考えられる。海面水位の時間変動量の Gauss 分布に対する χ^2 検定では、有意水準 $\alpha=0.01$ に対し、21計測例中主として波高が小さい海況で4例が棄却となったが、全般的に水面偏差のヒストグラムと Gauss 分布との適合性は良かった。

波浪データのスペクトル解析を行い、同一海況の波浪スペクトラムを3例ずつまとめて図2に示した。この図から明らかなように海況1から海況4になるに従い波周期、エネルギーともに大きくなり、風浪・ウネリともに発達している海況4では4.8~7.4秒の周期の波が卓越していたことが認められる。この海況4程度になると沿岸漁船の操業実態からみて出漁限界であり、航行中にも激しい動揺が出現することがあり注意が必要な海面と思われる。また波スペクトラムから帯域幅パラメータ ϵ_s を計算した結果、0.41~0.80の間に分布し、その平均は0.65であった。

全振幅解析によって得た平均波高 $\bar{H}$ (m) と波浪代表値の関係を図3に示した。波高の Rayleigh 分布に対する χ^2 検定では、21計測例中4例が棄却 ($\alpha=0.01$) となったが、Rayleigh

Fig. 2 Typical measured point wave spectrum with different sea conditions

Notes S1~S4 : Sea conditions

Fig. 3 Relation between the mean double amplitude of waves, $\bar{H}$, and statistical values

Notes $\blacktriangle$: S1 $\times$: S2 $\circ$: S3 $\bullet$: S4

Fig. 4 Relation between m_0 and $H_{1/3}$ of wave heights

Note Symbols are shown in Fig. 3

分布との適合性は良い。図3では波高分布を Rayleigh 分布としたときの係数を直線で示したが、最大波高の分布以外はほぼ一致している。

スペクトラムモーメントから計算した平均波高 $\bar{H}_s$ (m) と $\bar{H}$ の間には、海況1~4の範囲で $\bar{H} = 0.86 \bar{H}_s$ の関係がみられた。この関係と $\varepsilon_s = 0.65$ を用いると、全振幅解析から得た有義波高 $H_{1/3}$ とスペクトラムのゼロ次モーメント m_0 の関係は $H_{1/3} = 3.445\sqrt{m_0}$ となり、この実測値との対応を図4に示す。またスペクトラムから計算した zero up cross 平均周期 $\bar{T}_z$ (秒) と全振幅解析から得た有義波高 $H_{1/3}$ の間には、多少ばらつきはあるが、他の実測例⁽²⁾ に見られるように、 $\bar{T}_z = 3.55\sqrt{H_{1/3}}$ の関係が認められる (図5)。

3.2 ロールおよびピッチについて

動揺記録データの時間変動量の分布形は、海面水位の変動と同様に Gauss 分布をしていると言われている。この確認のため Gauss 分布に対する χ^2 検定 ($\alpha=0.01$) を試みた。その結果ロールでは130例中25例が棄却となり、その傾向は排水量が小さいほど、速力が大きいほど棄却となる例が多く、出会い波向と海況の影響は明確でない。一方ピッチでは排水量と速力が大きいほど、また向い波または追い波を受ける場合に棄却となる例が多く、海況が小さい場合に多かった。しかし全般的に動揺偏差のヒストグラムと Gauss 分布との適合性は良い。

波浪中の船体動揺スペクトラムは、船の排水量、速力、出会い波向、海況等によって変化し、その時の動揺の実態を把握し易い。全ての実験についてスペクトラム解析を行ったが、そのうち船体が停止・横波を受け漂流中の動揺スペクトラムの一例を図6に示す。この図は海況4で、軽荷、半載および満載状態の場合である。漁船では波浪中でも停止・漂流または低速で操業することが多く、この点で停止横波漂流中の動揺は基本的な状態を示

Fig. 5 Relation between $H_{1/3}$ and $\bar{T}_z$ of waves

Note Symbols are shown in Fig. 3

Fig. 6 Spectrum of ship motions during drifting in beam seas (C3) with S4

Notes : — : W1 - - - : W2 . . . : W3

Fig. 7 Effect of speeds on spectrum of ship motions during seaway in quatering seas (C4) with W1 · S4

Notes ——— : V1 (5.84 kts)
 ----- : V2 (9.82 kts)
 - - - : V3 (12.93 kts)

している。同図では排水量変化の影響を示したが、今回の実験では満載は軽荷に比べ排水量は 1.81 倍に増加、 GM は 0.65 倍に減少している。これに対し満載状態のロール角は 11%，ピッチ角は 16% 減少している。操業中バラストを入れると動揺が減少し、操業し易いと言う乗組員の話を裏付けしていると思われる。漂流中のロール周期 T_R (秒) は図 6 から明らかなように排水量変化によってはほとんど変化なく、静水中ロールの固有周期に比べ約 7% 大きい周期を中心に動揺している。ピッチの動揺角はロールに比べて小さく、ほぼロールの 1/3 の大きさで、動揺周期は波強制力の影響を大きく受けている。ロールのスペクトラムの形状は、いわゆる狭帯域スペクトラムに近い。

動揺スペクトラムの形状と船の速力変化との関係の 1 例として、海況 4・軽荷・斜め追い波中で速力を変化させた場合のスペクトラムを図 7 に示した。船体が停止・漂流中の場合に比べ、ロールのスペクトラムの形状は双峰形・鋸切波状等非常に複雑になり、広い周波数範囲でエネルギーレベルは高く、スペクトラムのピークの位置も長周期側に移り、速力が大きくなるに従い長周期大角度の激しい動揺をしている。漂流中に比べロールのスペクトラムは広帯域スペクトラムに近づくとも言える。ピッチスペクトラムの速度影響は速力が大きくなるに従い、ピーク位置は長周期側に移るが、エネルギーレベルは低速で大きく高速ほど小さくなっている。これは高速になると 1 つ 1 つの波には応答せず、波を突き切って航走するためとも考えられる。動揺スペクトラムの形状と船の速力の関係を示した図 7 は、勿論全ての出会い波向に共通する一般的なものではないが、追い波・斜め追い波を受けて航行中のロールでは、前報と同じく相当顕著な速度影響がみられる。この現象は今後実験中の波浪特性と対応して検討する必要がある、操船上の注意も必要である。

スペクトラムの形状と出会い波向との関係を図 8 に示す。この例では海況 4・軽荷・半速で航行中、出会い波向を変化させた場合である。経験的事実のとおり出会い波向の影響は大きく、ロールでは向い波から正横波に対しては固有周期付近にスペクトラムのピークがあり、正横の波ではピークが顕著である。正横から後方の波に対してはスペクトラムの形は複雑で、エネルギーレベルも高くピークは長周期側に移動し、特に斜め追い波では大

Fig. 8 Effect of heading angles on spectrum with W1 · V2 · S4

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

角度の動揺をする。ピッチは正横の波では小さく、向い波、斜め向い波に対しては短い周期で、追い波、斜め追い波に対しては長周期で動揺し、波の出会い周期の影響を大きく受けている。

次にスペクトラムの形状を代表する帯域幅パラメータ ϵ_s について検討する。全ての動揺実験について ϵ_s を計算し、その頻度分布を海況別に整理して図9に示した。同図では ϵ_s と海況の間に顕著な特徴は見られないが、 ϵ_s の値はロールが0.30~0.80、ピッチが0.40~0.95の間に幅広く分布している。しかも分布の下限上限ともにロールに比べてピッチの ϵ_s が大きい。この ϵ_s を各排水量別に速度ベースで整理すると図10のようになる。図に示すように排水量の差によって ϵ_s に明らかな変化は認められないが、ロール・ピッチともに低速から高速になるに従い ϵ_s は大きくなり、しかも ϵ_s の値はロールよりピッチが大きい。 $\epsilon_s=0$ の場合はいわゆる狭帯域スペクトラムで、ある固有の周波数 ω_0 付近で動揺しているのに対し、 $\epsilon_s=1$ では広帯域スペクトラムで非常に不規則な動揺となる。従って図10は停止・漂流中から高速航行中までの各速力に対するスペクトラムの形状の一面を表わしているとも言える。

動揺データの全振幅の分布は Rayleigh 分布で推定出来る

Fig. 9 Distribution of the values of the bandwidth parameter, ϵ_s with different sea conditions

Notes ——— : Roll angles - - - - - : Pitch angles

と言われている。これを確認するために、ロールの全振幅の Rayleigh 分布に対する χ^2 検定 ($\alpha=0.01$) を試みた結果は、130例中15例が棄却となった。その傾向は、排水量が多いほど棄却となった例が多いが、海況、速力および出会い波向に対しては明確な特徴が見られなかった。ピッチの χ^2 検定 ($\alpha=0.01$) 結果は、130例中22例が棄却となった。その傾向は排水量が多いほど、出会い波向は向い波・斜め向い波の場合に多く棄却が現われ、海況、速力の影響は明確でなかった。

全振幅解析で得た平均動揺角 $\bar{H}$ (度) と動揺代表値の関係の1例を図11に示す。同図は海況1と海況4の軽荷状態の解析結果をまとめたものである。この図から明らかなように、動揺の最大値にはばらつきがあるが、その他の代表値はほぼ Rayleigh 分布で近似出来ると思われる。またこの平均動揺角 $\bar{H}$ (度) とスペクトラム計算から求めた平均動揺角 $\bar{H}_s$ (度) の関係は図12に示したように、海況、排水量の変化してもほぼ $\bar{H}=0.95\bar{H}_s$ の関係がある。ピッチについても同様の関係が認められた。これは主としてスペクトラムの数値積分による誤差と考えられるが、スペクトラム解析、全振幅解析のいずれか1つの方法で平均動揺角が推定出来ると思われる。

波浪中の船の動揺周期は、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。全振幅解析から T_M , T_Z を計算し、その平均値 $\bar{T}_M$, $\bar{T}_Z$ を比較した1例を図13に示した。同図は海況1の場合である。これら2つの周期の関係は前報と同様な傾向を示し、ロール・ピッ

Fig. 10 Effect of speeds on the values of the bandwidth parameter, ϵ_s
Notes $\blacktriangle$: W1 $\bigcirc$: W2 $\bullet$: W3

Fig. 11 Relation between the mean double amplitude of motions, $\bar{H}$, and statistical values in light load condition (W1) with S1 and S4

Notes $\blacktriangle$: σ_s $\square$: H_{rms} $\bullet$: $H_{1/3}$ $\times$: $H_{1/10}$ $\triangle$: H_{max}
— : Predicted lines by Rayleigh distribution

Fig. 12 Relation between $\bar{H}_s$ and $\bar{H}$ with different sea conditions

Notes $\bar{H}$: Mean double amplitude of roll angles obtained by statistical analysis
 $\bar{H}_s$: Mean double amplitude of roll angles obtained by spectral analysis
 And other symbols are shown in Fig. 10

ちともに $\bar{T}_M$ の分布範囲は固有周期を中心にして狭く、 $\bar{T}_Z$ の分布は 4~10 秒と幅広く分布している。

動揺スペクトラムのモーメントを用いると、この $\bar{T}_M$ 、 $\bar{T}_Z$ の定義に相当する $\bar{T}_{MS}$ 、 $\bar{T}_{ZS}$ を計算することが出来る。これに実験で得た ϵ_s の分布を考慮すると $\bar{T}_{MS} \doteq 0.95 \sim 0.60 \bar{T}_{ZS}$ となるが、全振幅解析の結果では図13のように $\bar{T}_Z$ の分布幅が広い。したがって個々の T_Z はさらに大きい値となる場合があり、大きい T_Z の出現状況は動揺周期特性の1つを示すものと思われる。そこで動揺の固有周期を基準として、少なくとも固有周期の3倍以上の大きい T_Z の出現率と船の速力の関係を調べて図14に示した。同図で満載状態が他の状態に比べて若干出現率が高くなっているのは、他の状態より GM が小さいためと考えられる。ロール・ピッチともに低速から高速になるに従い出現率が高くなっているが、これは ϵ_s の速度影響と同じである。また出現率と出会い波向との関係の1例を図15に示した。同図に見られるようにロール・ピッチともに追い波、斜め追い波を受ける場合に出現率は高く、正横から向い波になると低くなり、さらにロールよりピッチがこの傾向は顕著である。

このような異常に長い周期の T_Z の出現は、長周期・大角度の動揺の出現とともに、船の安全性・作業性・乗心地とも密接に関係するの

Fig. 13 Relation between $\bar{T}_Z$ and $\bar{T}_M$ with sea condition S1

Notes $\bar{T}_Z$: Mean zero up crossing period of motions obtained by statistical analysis
 $\bar{T}_M$: Mean peak to peak period of motions obtained by statistical analysis
 And other symbols are shown in Fig. 10

Fig. 14 Relation between ship speeds and frequency of appearance in case of indicating $\bar{T}_Z > 3 \cdot \bar{T}_s$
 Notes $\bar{T}_Z$: Zero up crossing period of motions obtained by statistical analysis
 $\bar{T}_s$: Natural roll and pitch period
 And other symbols are shown in Fig. 10

で、実験中の波浪とも対応させてさらに詳しく検討する必要がある。

4. あとがき

今回の報告では、沿岸漁船としては大型のスケグ付き18トン型について、波浪中の動揺実験および波浪計測の統計的解析結果を述べたが、要約すると次のようである。

- (1) 海面水位および動揺の時間変動量は Gauss 分布、波高および動揺の全振幅は Rayleigh 分布として推定出来る。
- (2) 斜め追い波中では動揺に与える速度影響が大きくなる場合があり、操船上注意が必要である。
- (3) 帯域幅パラメータ ε_s の値は波浪が 0.41~0.80, ロールが 0.30~0.80, ピッチが 0.40~0.95 の範囲に分布していた。また動揺の ε_s の値は船の速力を増すほど大きくなる傾向がある。
- (4) 動揺周期 T_z は T_M に比べて分布幅が広く、非常に大きい T_z は追い波、斜め追い波中で速力が低速より高速になるほど出現率は高い。

終りにこの研究にあたり種々ご協力を賜った水産工学研究所長土屋 孟氏、同船体性能部長小林 務氏、同山越康行氏および実験にあたりご協力を頂いた西日本FRP造船KK、厳しい海況の中での実船実験に快く協力して頂いた船主泉 勇次氏の各位に対し、心からお礼申しあげる。

参考文献

- (1) 高島末夫, 浜口正人, 本間辰太郎: 波浪中における沿岸漁船の動揺について—I, 日航論, 第67号, pp.1~9, 昭和57年8月
- (2) 竹沢誠二: 海洋構造物水槽試験に使用する波浪—II, 日本造船学会誌, 第614号, p. 14, 昭和55年8月

質疑応答

川島利兵衛 (北海道大学):

- (1) 前刷図1のロールスペクトラムについて、スペクトルの形(ピークの多い形)をどのように考えられますか。
- (2) サンプルングタイム (Δt), データ数またスムージングには何を使用しましたか。
- (3) “固有周期の3倍以上の T_z の出現する割合” をみることにどのような意味がありますか。

高島末夫: (1) 本実験では最大の時化で斜め追い波状態であり、風浪・ウネリの主方向の差、手動操舵の影響等を受けているほか、サンプルングタイム等データ処理法の影響が現われていると考えている。

- (2) 実験回数、固有周期を考慮してサンプルングタイム $\Delta t=1.0$ 秒、データ数300個とした。またスムージングには Q ウィンドウを用いた。

- (3) 動揺角全振幅の速力、出会い波向・海況等と関連した分布特性と、大きい値を持つ T_z の出現率を対応させることにより波浪中の動揺特性を振幅・周期の両面から知ることが出来る。基礎解析の段階で3倍という数値には特に根拠はありません。

松岡達郎(北海道大学): 停止漂流中の例で船体状態が変わっても横揺れスペクトルのピーク的位置に変化はないということでしたが、GM、固有周期はどの程度の差があったのですか。

高島末夫: GM は表2に示したとおりで、固有周期は軽荷時 3.89 秒, 半載時 4.08 秒, 満載時 3.76 秒でした。

Fig. 15 Relation between heading angles and frequency of appearance in case of indicating $T_z > 3 \cdot T_s$

Note Symbols are shown in Fig. 3 and Fig. 8