実船試験による漁船の耐航性について—VII

——東海・黄海漁場の波浪特性——

西ノ首 英 之*・川 島 利兵衛**

On the Sea Keeping Qualities of a Fishing Boat by Field Measurement—VII

——The Wave Characteristics of the East
China Sea and Yellow Sea——

Hideyuki NISHINOKUBI and Rihei KAWASHIMA

Abstract

In order to clarify the movement of a fishing boat encounter to ocean waves, it is essential to understand the wave characteristics. Using a special made device of measuring the wave height, a series of experiment was conducted in the East China Sea and Yellow Sea fishing ground on board of a bull trawler.

The time series data were analyzed statistically as well as by spectral analysis. The substantial results are:

1. There were seasonal differences in the characteristics of the waves in the East China Sea and Yellow Sea. The dominant wave direction and sea state were South-East with calm-slight sea in summer; NW-NNE with smooth-moderate sea in autumn; and NW-NE with slight-very rough sea in winter (Figs. 2 and 3).

2. Considering the relationship between the wave periods and its height, it is clear that in the both fishing grounds the wave height in winter was higher than in autumn; while the wave steepness in winter was greater than in autumn (Fig. 4).

3. The wave spectra in the both sea were approximately near to the spectra of modified Pierson-Moskowitz or I. S. S. C. wave spectra (Fig. 7).

1. 緒 言

船舶の海洋波に対する応答運動を明らかにするためには、波の観測は不可欠である。航海中の船が遭遇する船と波浪波形との相対関係まで含めて計測し、運動との対応を各時刻ごとに行う必要がある。いわゆる出合い波浪の測定による波高と船体運動の同時計測を要し、両者の関係を同時に知る事が重要である。

以西底曳網漁船は東海・黄海を主漁場としているが、当海域は四季によりそれぞれ波浪特性を異にする事が明らかである⁽¹⁾。1年間を通じた場合、海況が最も厳しい冬季、最も穏やかな夏季および両者の中間的状況の春秋に大別され、各々変化し異なる。そこで以西底曳網漁船の耐航性に関する研究の実船実験は夏季、秋季および冬季の計3航海にわたり行い、船体運動特性については前報^(2,3,4)までに報告した。本報では各航海で得られた

* 正会員 長崎大学水産学部（長崎市文教町 1-14）

** 正会員 北海道大学水産学部（函館市港町 3-1-1）

図 1 東海・黄海漁場と実船実験位置

により変換を行った。また出合い波スペクトル $S(\omega_e)$ についても (2) 式により一固定点における波スペクトル $S(\omega_0)$ に変換を行ったのち、無次元化波スペクトルを求め I.S.S.C. において提案された Modified Pierson-Moskowitz 型の波スペクトルと比較した。

$$\omega_0 = \frac{1 + \sqrt{1 - 4 \frac{v \cdot \cos \theta}{g} \omega_e}}{2 \frac{v \cdot \cos \theta}{g}} \quad (1)$$

$$S(\omega_0) = \sqrt{1 - 4 \frac{v \cdot \cos \theta}{g} \omega_e} S(\omega_e) \quad (2)$$

3. 結果および考察

3.1 東海・黄海の海況特性

夏季、秋季および冬季の各航海における航海日誌の記録から 4 時間毎の波向および風浪階級（気象庁風浪階級，昭和 38 年 1 月 1 日施行）データを基に，それらの頻度を図 2 および図 3 に示す。これらの図から各季それぞれの海況特性が明らかである。すなわち，夏季の海況特性は波向が主として南および東で風浪階級は 1~3 が卓越している。秋季特性は波向が北西~北北東の範囲で風浪階級は 2~4 である。冬季特性は波向についてはほぼ秋季と同様で北西~北北東の範囲であるが，なかでも北が最も卓越し，風浪階級については 3~6 である。冬季はシベリヤ高気圧による季節風のため，大きい波浪が出現している事が顕著に表わされている。

これらの事から東海・黄海の海況特性としては同海域で通年して操業する漁船にとって，冬季が最も厳しく，次いで秋季であり夏季が最も穏やかである事が分る。ただし，図 3 の夏季航海における風浪階級 5~6 は台風接近が 1 度あり，そのためのものである。したがって夏季は通常最も穏やかではあるが，台風の動向には十分注意

波高測定データについて，統計解析および時系列解析を行い，東海・黄海漁場の波浪特性について検討し，二・三の知見が得られたので報告する。

2. 資料および解析方法

2.1 資料

解析に供した資料は前報までの報告に用いた以西底曳網漁船の操業中の実船実験において，船体運動と同時計測により得られた波高データである。なお使用した波高計と計測処理方法については概要を付録に示した。

夏季データは 1973 年 7 月 14 日~8 月 19 日，秋季データは同年 10 月 22 日~11 月 15 日および冬季データは 1974 年 1 月 17 日~2 月 28 日の各航海で得られたものである。実験計測を行った海域は図 1 に示す通りである。また，波向および風浪階級頻度は航海日誌により各 4 時間毎のデータを利用した。

2.2 解析方法

データレコーダに連続記録されたデータから，読み取り時間間隔 1.0 秒，データ数 382 個の時系列波高データについて，全振幅の各種統計計算およびスペクトル解析⁽⁵⁾を行った。なお，記録はすべて船上での記録であるから解析結果の波周期は出合い周期である。

そこで出合い周期から 1 固定点における周期に (1) 式

図 2 波向頻度

図 3 風浪階級頻度

を払い、避航の時期を失しない事が重要である。

3.2 波高と波周期との関係

東海・黄海の波浪特性として、波高と波周期の関係を図4に示す。同図において、横座標は有義波高を示し、縦座標は零交差法によって求められた波周期を示す。なお海況特性が最も穏やかな夏季データは除き、秋季および冬季航海のデータを示した。

図4から秋季と冬季における波浪を比較すると、冬季の波高は秋季の波高よりも高く、波傾斜は秋季のそれよりも急で険しいことが判断される。図中、 $T=5.00\sqrt{H_{1/3}}$ の線は国際試験水槽会議 (I.T.T.C.) で提唱した波スペクトルの有義波高と零交差周期との関係を示したものである。他方の $T=3.29\sqrt{H_{1/3}}$ は本実験で得られたデータから有義波高 2m 以上のものについて、最少自乗法により求めた関係式である。有義波高 2m 以下のデータを除いたのは波高に対して周期の変動が大きく、長周期成分の「うねり」などの影響が大きいと考えられたからである。

波高と周期との関係 ($T=3.29\sqrt{H_{1/3}}$) から、東海・黄海の波浪は Pierson-Moskowitz 型の波浪と比較した場合、例えば同等の波高に対して周期は短かく、したがって波長が短かく険しい波であるといえる。

3.3 波高の統計値および波スペクトルモデル

波高や船体運動のような不規則振動現象の短期の極値分布はレーレー分布であると仮定して、平均値、最大期待値などを推定するのが標準的方法である。そこで、この仮定がどの程度正しいかを知るために実際の短期確率分布の実態を知る事、頻度分布と実測スペクトルとの関係の実状を検討する事は重要な事である。Longuet-Higgins⁽⁶⁾ は波高の平均値、1/3 最大平均値など各種統計値について明らかにしている。

そこで、風浪階級が1~7と広い範囲にわたっている冬季データについて統計解析を行い各種期待値を示したのが図5である。同図において横軸は波高の平均値 ($\bar{H}$) であり、縦軸は各種期待値である。同図から東海・黄海の波高の統計値は Longuet-Higgins の示した値より約 10% 低い値であるが全ての統計値について同様な傾向を示している事が分る。約 10% 低い原因については全

図 4 有義波高と零交差波周期との関係

図 5 波高の統計値

振幅の算出を 1.0 秒間隔に読み取られた時系列データ中の極大、極小値から求めたため、それに起因する誤差によるものが一因と考えられ、期待値は妥当な値であると考えられる。

図 5 に示された冬季データを波と船との出合いの相対針路別に分類し、その中から有義波高が約 1m, 2m, 3m, 4m および 5m のものを選び出し、各針路の無次元化波スペクトルを平均し、I.S.S.C. の標準波スペクトルと比較した。すなわち、I.S.S.C. において提案された Modified Pierson-Moskowitz 型の標準波スペクトルの式は波高の有義値と平均波周期の二つのパラメータにより決定され⁽⁷⁾、次式で表わされる。

$$S(\omega) = A\omega^{-5} \exp(-B\omega^{-4}) \quad (3)$$

ここで定数 A および B は現実の海面における有義波高 (H_s) と波の平均周期 ($T_w = 2\pi/\omega_1$) の二つの条件を満足するように決定される。すなわち、

$$H_s = 4\sqrt{m_0} \quad \text{および} \quad \omega_1 = m_1/m_0 \quad (4)$$

ここで、 m_n はスペクトルの原点周りのモーメントで、 $m_n = 2 \int_0^\infty \omega^n S(\omega) d\omega$

である。

式 (4) の条件によって定数 A および B を決定し式 (3) は次のようになる。

$$S(\omega) = 0.11 H_s^2 \omega_1^{-1} (\omega/\omega_1)^{-5} \exp\{-0.44(\omega/\omega_1)^{-4}\} \quad (5)$$

式 (5) を無次元化すると次の通りである。

$$S(\omega)/(H_s^2/\omega_1) = 0.11 \omega_0^{-5} \exp(-0.44\omega_0^{-4}) \quad (6)$$

ただし、 $\omega_0 = \omega/\omega_1$ とする。

以上が I.S.S.C. の波スペクトルの表示式についてである。

そこで東海・黄海の波スペクトルについても有義波高 (H_s) と平均波周波数 (ω_1) により無次元化を行った。無次元化に先立ち、式 (4) の条件である H_s と m_0 との関係について検討した。その結果を図 6 に示す。同図から H_s と $\sqrt{m_0}$ との関係は良好な直線関係を有し、(4) 式を十分満足している。したがってスペクトルの無次元化における $\{H_s^2\}$ の導入は可能であり、その結果、(3) 式の定数 A および B は実測スペクトルを満足するように最少自乗法により求める事が出来る。

各相対針路別に無次元化波スペクトルを ω_0 軸上で各海況にわたり平均し、その結果を図 7 に示す。同図から、無次元化波スペクトルは各相対針路共ほぼ等しい事が分かる。そこで全相対針路の平均値から、最少自乗法により東海・黄海の波スペクトルの推定式を求めた。その結果が次の式であり、図 7 の太点線で示されたもので

図 6 $\sqrt{m_0}$ と有義波高との関係

図 7 無次元化波スペクトル

ある。

$$S(\omega)/(H_s^2/\omega_1) = 0.14\omega_0^{-5} \exp(-0.57\omega_0^{-4}) \quad (7)$$

図7には I.S.S.C. の波スペクトルの式(6)の値を太実線で示したが、東海・黄海の波スペクトルは I.S.S.C. の標準波スペクトルにほぼ近似しているといえる。

I.S.S.C. の標準波スペクトルと東海・黄海の波スペクトルを比較すると、3.2 で述べた様に本海域の波は陰しく、スペクトルの形から見ても短波頂不規則波であると考えられる。両波スペクトルの相違については、実船実験における波高計測精度、例えば船体影響、加速度の二重積分精度および船速誤差等が若干あるが、同海域の地理的要因および気象学的要因によるものと考えられる。すなわち、同海域における風の吹走距離、吹続時間、低気圧の移動速度とこれに伴う波の伝達距離、角伝搬の効果または逆に三角波の発生など種々の要因が考えられる。同海域の波浪の気象学的分野からの研究はほとんどなく、これら要因と波スペクトルとの相互関係は明らかでない。しかし、なんらかの方法により有義波高と平均波周期波数が分かれば、東海・黄海の数値波スペクトルモデルが(7)式により推定可能である。

4. 要 約

以西底曳網漁船の主漁場である東海・黄海の夏季、秋季および冬季の海況特性を明らかにした。また冬季航海で得られた 77 回の波高計測データから当漁場の波高および波周期特性および数値波スペクトルモデルが導かれた。

1) 海況特性として卓越した波向および風浪階級は夏季の場合、南～東の 1～3、秋季の場合、北西～北北東の 2～4 および冬季の場合、北西～北東の 3～6 であった。

2) 有義波高と波周期との関係は有義波高 2 m 以上の波について、 $T=3.29\sqrt{H_{1/3}}$ の式で表わされた。

3) 波高の平均値、最大期待値等の統計値は Longuet-Higgins の示した理論値とほぼ等しかった。

4) 波スペクトルは I.S.S.C. で提案した Modified Pierson-Moskowitz 型にほぼ近似していたが当漁場の数値波スペクトルモデルの推定実験式は次の通りである。

$$S(\omega) = 0.14H_s^2\omega_1^{-1}(\omega/\omega_1)^{-5} \exp\{-0.57(\omega/\omega_1)^{-4}\}$$

参 考 文 献

- 1) Hogben, N. and Lumb, F.: Ocean wave statistics. Her Majesty's stationary office. p. 144~147 (1967)
- 2) 西ノ首・川島: 実船試験による漁船の耐航性について—Ⅲ, 本誌, 55, p. 1~6 (1976)
- 3) 西ノ首・川島: 実船試験による漁船の耐航性について—Ⅳ, 本誌, 56, p. 77~89 (1976)
- 4) 西ノ首・川島: 実船試験による漁船の耐航性について—Ⅴ, 本誌, 56, p. 91~100 (1976)
- 5) SR-125: 超高速コンテナ船の耐航性に関する研究, 研究資料, No. 157, p. 61~68 (1972)
- 6) Longuet-Higgins, M.S.: On the statistical distribution of the height of sea waves, J. Mar. Res., 11, p. 245~266 (1952)
- 7) Pierson, W.J. and Moskowitz, L.: A proposed spectral form for full developed wind seas based on the similarity theory of S.A. Kitaigorodskii, J. of Geophysical Res., 69 (24), p. 5181~5190 (1964)

質 疑 応 答

鞠谷 宏士: 季節(夏と冬)で漁場が南北に距っていますが、同一性質の波であると見てよいのでしょうか。

西ノ首英之: 図4の波高と波周期との関係で分かる様に波高が小さい場合は波周期の変動が大きく、波スペクトルの形も多少異なります。しかし荒天となり波高が高くなるに従って波周期は変動が小さくなり、両者は一定の関係($T=3.29\sqrt{H_{1/3}}$)となり波スペクトルの形もほぼ等しくなります。これらの事から図1に示した実験海域においては同一性質の波であると見てよいのではないかと考えています。

付 録

船体装着型ステップ式波高計と波高計測方法の概要は次の通りである。

出合い波高計測システムのブロック図を図8に示す。図中(A)の部分は実船実験による船体運動の3要素(横揺れ, 縦揺れおよび上下動加速度)と船体に取付けられたステップ式波高計による船体中央舷側における相対波高の検出測定部である。(B)の部分は上下動加速度を上下動変位に変換するための2回積分処理部, すなわち, アナログ積分演算部である。(C)の部分は(A)で計測された船体運動成分を含んだ出合いの相対波高より(B)において演算処理された船体運動を除き, 地軸空間における波高変動を得るためのデジタル演算処理部である。

本方式による出合い波高と船体運動計測値との関係は次式で与えられる。求める波高 h , 計測される相対波高 h_e , 計測される船体運動の横揺れ角 r , 縦揺れ角 p および上下動変位を z とおく。これらはすべて時間の関数であり, ある時刻における関数は,

$$h(t) = h_e(t) \pm B/2 \cdot \tan \{r(t)\} \pm CW \cdot \tan \{p(t)\} \pm z(t)$$

で与えられる。ここで B は波高計取付け部における船の幅であり, CW は波高計と浮面心との船首尾線上の水平距離である。

本システムでは A/D 変換の後, デジタル演算処理を行っているのでサンプリング時間間隔を Δt とすると上式は次のようになる。

図8 出合い波高計測システムのブロックダイアグラム

図9 ステップ式波高計の断面図

図10 波高計の船体装着図(曳網中, 船速約 3.5 ノット)

$$h(i \cdot \Delta t) = h_e(i \cdot \Delta t) \pm B/2 \cdot \tan \{r(i \cdot \Delta t)\} \\ \pm CW \cdot \tan \{p(i \cdot \Delta t)\} \pm z(i \cdot \Delta t)$$

ここで、 $i=1, 2, 3, \dots, N$ として処理されるが、 $z(i \cdot \Delta t)$ については (B) に示されるように加速度で検出されているのでアナログ処理による 2 回積分の後に A/D 変換する必要がある。

製作した波高検出ポール部の断面図および船体取付図をそれぞれ図 9, 10 に示す。ステップ間にそう入した抵抗は通信用の $1/4p$, $49.5 \pm 0.5 \Omega$ 以内のものを選び使用した。海水によってステップ間を短絡させるリレーは富士通信機製 151 型小型リレーである。波高計の全長は 4.20 m, ステップの間隔は 8 cm とし 50 ステップとした。

また、図 8 の (B) の部分のアナログ演算処理のための積分器およびハイパスフィルターの周波数特性を図 11 に示す。同図からアナログ演算処理の利得特性および位相特性は $0.05H_z$ 以上の周波数範囲で $\pm 0.5 \text{ dB}$ および 15 度以内である。東海・黄海の波周波数および以西底曳網漁船の上下動運動周波数範囲から考え、本方式による波高測定は実用的に十分満足し得るものであると考えられる。

g_1, θ_1 : by approximate integral method ($T_i=40\text{sec}, T_s=15\text{sec}$ and $h=0.1$)
 g_2, θ_2 : by differentiation and integration
 F_1, F_2 : active high pass filter ($f_c=0.03\text{Hz}$ and 0.05Hz)

図 11 積分器およびフィルターの周波数特性