まき網漁船（116 トン型）の動揺について—II.

——横動揺の計算値と実測値の比較——

高 島 末 夫*

On the Motions of a Purse Seiner (116 GT Type) in Waves—II.

——Comparison of Measured and Calculated Rolling of the Ship——

Sueo TAKASHIMA

Abstract

It is well known that if we obtain the wave spectrum in a suitable form and the theoretical response characteristics of the ship to the regular waves, it is possible to compute the spectrum of ship motions. In this report, the author calculated the ship rolling motion in irregular waves and compared it with the measured motion.

The wave spectrum applied in this calculation were obtained using the Pierson-Moskowitz wave spectrum for the not fully arisen wave, and assumed that the wave spectrum have maximum energy at the natural frequency of the ship rolling. Basic equation for the rolling motion is shown in formula (1).

The calculated spectra obtained in this way are compared in Fig. (3) with spectra computed from the actual rolling motion which was measured during the trials at a speed of 8 kts on three headings to the dominant wave direction. The statistical values of ship rolling calculated using the calculated roll spectra, are compared with measured values in Figs. (5)~(6).

The agreement between calculated and measured results is reasonable good, although the theory tends to under-estimate the motion in bow waves and to over-estimate it in quartering waves.

1. 前 書

船の運動は3軸6自由度をもつ運動で、それぞれ互に連成しており、厳密な意味での耐航性研究には、同時に全ての運動が検討されている⁽¹⁾。しかし検討する内容によっては、6つの運動の中にはそれぞれ重要度合が異なっている。ここではこのような考えのもとに、実船実験結果と対比する都合上、船の横揺れのみを他の運動と分離して取り上げる。

船体運動等波高の一乗に比例する応答については、エネルギースペクトラムを理論の中心に、拡張された統計的方法で処理することが出来る。即ち、船体運動等の統計量の不規則波中での累積エネルギー密度を E 、そのエネルギースペクトラムを $[S(\omega)]^2$ とし、規則波に対する応答関数を $[A(\omega)]^2$ 、不規則波のエネルギースペクトラムを $[r(\omega)]^2$ とすると、

$$[S(\omega)]^2 = [A(\omega)]^2 \times [r(\omega)]^2$$

$$E = \int [S(\omega)]^2 d\omega$$

* 正会員 水産大学校（下関市吉見永田本町 1944）

の関係があり⁽²⁾, この方法によって処理出来ることは既によく知られているとおりである。

このような線型的処理は, もとの運動方程式が線型であるから, 当然波高が大きくなると線型的取り扱いが無理となり, 誤差が大きくなる。波浪に比べ相対的に小さい漁船のように, 割合厳しい運動をしている場合にどの程度の波高まで, 上述の考えで処理出来るかは極めて重要な問題である。このことは, 推定値と実測値の誤差を実用上どの程度まで許容出来るかと言うことに関連する。

ここでは以上のような考えのもとに, 不規則波海面における船の横揺れ計算値と実船実測値の比較を試みたので, その結果を報告する。

2. 規則波中の応答関数

最近の耐航性に関する研究は目覚しく, 規則波中の運動では, ストリップ法を基礎とした理論的実験的研究の成果が多く見られる^{(3),(4)}。そして各種運動の中でも横揺れ計算が, 計算値, 実測値の一致という点では一番難かしいとも言われている。たしかに横揺れ運動にかかわる各種の力, モーメントを忠実に表現するのは難かしいが⁽⁵⁾, ここでは次の近似表現を用いる。

$$\ddot{\theta} + 2\kappa\dot{\theta} \pm (\alpha/2)\dot{\theta}^2 + \omega_s^2\theta = \omega_s^2\gamma\Phi \sin \chi \sin \omega t \quad (1)$$

χ は波の出会い波向で船尾を 0° とし, 波の出会い周波数への変換には, $\omega_e = \omega - \omega^2 v \cos \chi / g$ の関係を用いる。

船が停止中の減衰係数 a, b の値は, 渡辺・井上等の推定方法⁽⁶⁾によって N_{10}, N_{20} を求め, $a = 20(N_{10} - N_{20})$, $b = 2N_{20} - N_{10}$ なる関係から得た。

船の前進速力と横揺れ抵抗の関係は, 模型実験によるのが適切と思われる。しかしここでは, 他の船型の模型実験から得られた船の速力と横揺れ抵抗増の関係⁽⁵⁾を, 本船型にも転用し, 本船の速力に応じて停止中の横揺れ抵抗の値を修正して使用した。また波の有効波傾斜係数 γ は, $\gamma = 0.74(KG/d)^{0.85}$ の関係⁽⁷⁾を用いて求めた。もともと横揺れの能動・受動等の抵抗を含み, かつ正確な有効波傾斜の影響も加味したその船の同調曲線は, 模型実験によるのが最良とされている。しかしここでは, (1) 式を各出会い波向別に Runge-Kutta-Gill 法で解き, $\theta/\gamma\Phi \sim \omega$ の関係を求めた。計算結果を図1に示す。また波の単位振幅に対する応答を示す応答関数を計算し, その結果を図2に示す。

この図から応答のピークは, 正横から波を受ける場合に現われるが, 斜め向い波に比べて斜め追い波 60° の場合には, 他の出会い波向に比べて非常に広い周波数範囲で, 強い応答を示すことが推察される。

Fig. 1 $\theta/\gamma\Phi \sim \omega$ curve

Notes χ : Heading angle, $\chi=180^\circ$: Head sea
 ω : Frequency

Fig. 2 Rolling amplitude operator

3. 海面の状態

今回の実験では, 実験水域において実験中はほぼ一定の風向で $7 \sim 9$ m/sec の風が吹き, ウネリなく, 波はほぼ一定方向からのもので, 波高は目視観測により $1.5 \sim 2$ m であった。

波の目視観測の精度については、若干問題を含んでいるが⁽⁸⁾、一般船舶では波観測の中心的方法である。実験中の風浪の推定は極めて重要であり、ここでは目視観測以外の二～三の方法で波浪推定を試みた。即ち、現場の風速、吹走距離および吹続時間を用い Bretschneider の計算図表⁽⁹⁾からは、有義波高 1.3 m、波周期 4.7 sec を得た。また、実験水域から約 30 海里離れている陸上気象台の実験当日および前日の観測資料を基にして、現場有効風速を推定し、これと吹続時間から気象庁風浪計算図⁽⁹⁾を用いると、有義波高 1.3 m、有義波周期 5.0 sec を得た。この二つの方法では、ほぼ等しい波の代表値を与えるが、目視観測に比べて小さい。

そこで実験船の横揺れ固有周波数 ω_s において、エネルギーが最大となるような発達過程の不規則波のエネルギースペクトラムを、Neumann の式と Pierson-Moskowitz の式から求め⁽¹⁰⁾、それらの累積エネルギー密度から有義波高の計算を試みた。その結果、現場の平均風速（後者の式では、この風速を海面上 19.5 m の高さに換算）のとき、前者では 1.554 m、後者からは 1.761 m となった。ただし積分するときの周波数の下限は $0.85\omega_s$ 、上限は $3.45\omega_s$ 、積分の刻み幅を $0.05\omega_s$ とした。

現在のところ、海洋波のスペクトラム表現のモデルは数種類あって、それぞれ特徴がある^{(10),(11)}。ここで用いた Pierson-Moskowitz のモデルも、波浪の方向性を考えた場合、必ずしも現実の海面を忠実に表現していないとも言われている⁽¹²⁾。しかし今回の実験での目視観測に近い値を得たことと、取り扱いの簡便さから、ここでは Pierson-Moskowitz の式を用いることにする。

4. 横揺れエネルギースペクトラムの計算値と実測値の比較

以上のようにして求めた応答関数と波スペクトラムを用いて、横揺れのエネルギースペクトラムを計算した。図 3 に計算値と実測値を比較して示し、図 4 に出会い波向を 30° 刻みにして計算したものを示す。横軸は両図とも出会い周波数で、船の速力は 8 kt で航行中の場合である。

横揺れの計算は、計算値、実測値の適合度からみると一般的に他の運動計算より難かしく⁽¹³⁾、実船実験例でも必ずしもその適合は良くない^{(14),(15)}。今回の計算では、図 3 から明らかなように、全体としての傾向は計算値、実測値ともにほぼ合っているが、スペクトラムのピークを生じる出会い周波数は、実測値が少し大き目に出ている。またスペクトラムの囲む面積については、斜め追い波の場合に計算値、実測値の一致は良くない。

この原因は、(1) ここでは横揺れの運動方程式を非常に簡易化して取り扱ったこと、(2) 波高、波傾斜等の実海面の状態と、モデル海面との相違によること、(3) 海面の波スペクトラムを出会い周波数に変換するときにかかる問題⁽¹⁴⁾、(4) 実験中の波の主方向推定の誤差、(5) 手動操舵による針路の振れ、即ち出会い波向の振れに

Fig. 3 Comparison of measured and calculated roll spectra at ship speed 8 knot

Notes —: Calculated

—●—: $\chi=45^\circ$
 —×—: $\chi=90^\circ$
 —○—: $\chi=135^\circ$ } Measured

ω_e : Frequency of encounter

Fig. 4 Calculated roll spectra

よる実験誤差等各種の原因が含まれていると思われる。

実海面における船体の横揺れを精度良く推定するためには、実船、模型船実験を重ねながら以上の諸問題点を解決することが、最大の課題と思われる。

5. 横揺れ角代表値の計算値、実測値の比較

前項で計算した横揺れのエネルギー Spektrum を用い、横揺れの統計代表値を計算したものと、実測値を解析して得た代表値を、出会い波向を横軸にとって示したものが図5である。また標準偏差の計算値と実測値の関係を図6に示す。

これらの図から明らかなように、本船型の場合には、波を正横から $15^\circ \sim 20^\circ$ 後方に受けて航走する場合に、他の出会い波向の場合に比べて大きい横揺れを生じる。この現象は、経験的事実と一致するように思える。

正横から波を受けた場合には、計算値と実測値はほぼ一致している。しかし斜め向い波の場合には、計算値が実測値に比べて $0.5^\circ \sim 1^\circ$ 小さ目となり、斜め追い波の場合はこれと逆の傾向となる。これらの値は、実験当時の海況を背景としたものであるが、計算値誤差の一つの目安となるとと思われる。また激しい横揺れを減少させるためには、針路変更の手段が効果のあることも十分理解出来る。

Fig. 5 Comparison of measured and calculated statistical values of ship rolling at ship speed 8 knot

Notes —: Calculated

○: $\theta_{1/10}$
●: $\theta_{1/3}$
▲: θ mean } Measured

次に連続した N 回の横揺れの中で現われる最大横揺れ角は、Longuet-Higgins の関係式即ち、 $H_{\max} = H_{\text{rms}} \sqrt{\log_e N}$ によって求められる。そこで、今回の実験で得た実測値をもとにして得た最大値（ここでは、この値を実測値とする）と、Spektrum を用いて計算した計算値を、出会い波向をパラメーターとして示すと図7のようになる。この場合も、正横から波を受ける場合は良く一致しているが、斜め向い波の場合は計算値が実測値に比べて小さ目に、斜め追い波の場合はこの逆の傾向となる。

以上のように、横揺れ角の代表値や期待値の計算値、実測値を比較してみると、正横から波を受ける場合以外は、必ずしも良好な一致とは言えない。しかし

Fig. 6 Comparison of measured and calculated statistical values of ship rolling at ship speed 8 knot (Standard deviation)

Notes —: Calculated, ×: Measured

Fig. 7 Comparison of measured and calculated statistical maximum values

Notes —: Calculated

N: Numbers of successive oscillations

And other marks are shown in Fig. 3.

実験当時の海況のもとでの本船型に、ここで述べた横揺れ角推定方法を適用した場合の、誤差量とその傾向はある程度目安がついたと思われる。したがって、この誤差量を考慮することにより、他の状態における横揺れを推定することが出来ると思われる。

6. 結 言

ここでは、まき網漁船(116トン型)の動揺のうち航走中の横揺れのみをとりあげ、波スペクトラムおよび横揺れ応答関数を推定し、横揺れ角の代表値を計算して前報の実船実験の結果と比較した。実海面における船の横揺れを忠実に計算するのは難かしいが、ここで考察した結果を要約すると次のようである。

(1) 横揺れエネルギースペクトラムの形、大きさは、出会い波向が正横、斜め向い波の場合には計算値、実測値ともにほぼ一致する。しかし斜め追い波では適合度は悪い。

(2) 横揺れの代表値は、正横から波を受ける場合は計算値、実測値ともにほぼ一致する。しかし斜め向い波では計算値が小さめに、斜め追い波ではこの逆の傾向となる。

(3) 短期の予測値も(2)と同じ傾向である。

(4) 実験時の船および海面状態のもとでの横揺れについて、計算値、実測値の誤差の傾向と大きさがほぼ明らかになった。

参 考 文 献

- (1) S R 125, 超高速コンテナ船の耐航性に関する研究・報告書, 日本造船研究協会, 研究資料 No. 211 (1975)
- (2) 加藤 弘ほか, 不規則な波及び風の中における船の横揺れについて, 造船協会論文集, 102 号 (1958)
- (3) 高石敬史ほか, 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, p. 109, 日本造船学会 (1977)
- (4) 高橋 生ほか, 漁船の船型, 状態に関する船体運動学的考察—I, 航海学会論文集, 58 号, p. 61 (1977)
- (5) 菅井和夫ほか, 強制動揺法による船の横揺れ特性の研究, 造船協会論文集, 114 号, p. 54 (1963)
- (6) 船舶工学便覧, 造船協会編, p. 566, コロナ社 (1960)
- (7) 加藤 弘, 船の安定性能の簡易判定法, 造船協会論文集, 98 号, p. 39 (1956)
- (8) 松本次男, 海洋波浪の観測と予報, 第2回耐航性に関するシンポジウム, p. 62, 日本造船学会 (1977)
- (9) 淵 秀隆ほか, 海の波, p. 13, 地人書館 (1976)
- (10) 山内保文, 海洋波中の応答, 耐航性に関するシンポジウム, p. 53, 日本造船学会 (1969)
- (11) 桑島 進, 波浪の確率密度分布について, 日本航海学会誌, 49 号, p. 40 (1976)
- (12) Lloyd A. Regier and Russ E. Davis, Observations of the power and directional spectrum of ocean surface waves, Journal of Marine Research, Vol. 35, No. 3, p. 433 (1977)
- (13) S R 125, 超高速コンテナ船の耐航性に関する研究・報告書, 日本造船研究協会, 研究資料 No. 188, p. 127 (1974)
- (14) 高石敬史ほか, 一軸高速コンテナ船の斜め波中における動揺特性, 造船学会論文集, 129 号, p. 67 (1971)
- (15) J.E. Conolly, Rolling and its Stabilisation by Active Fines, RINA, Vol. 111, p. 21 (1969)

質 疑 応 答

川島利兵衛: (1) 横揺れ運動計算に用いられた横揺れ減衰係数は、実測値を用いられましたか。(2) 計算に用いた波スペクトラムのモデルは如何。(3) C 係数で安全性判定をしたのですか。

高島末夫: (1) 渡辺・井上の方法で N を求め、 N を用いて係数 a, b を出し、 a, b を用いて横揺れ抵抗成分を求めました。(2) Pierson-Moskowitz のモデルで不完全発達波の波スペクトラムを用いました。(3) 今回は C 係数判定はしていません。