海洋波中の漁船の横揺れ応答函数の統計的推定について

第2報 実船の洋上実験による応答特性の推定

川島利兵衛*

The response on rolling motion of the fishing boat among
ocean waves Part II

Rihei, Kawashima

Abstract

By the means of the method described in the former paper, the characteristic response of the ship's motion among ocean waves was estimated and discussed on the basis of the record of the actual ship experiments in the seaway.

In the experiments, when ship stopped her engine and drifted among the waves, wave heights, angles of roll and pitch were measured and recorded by the wave pole with telemetering apparatus and Gyro type roll and pitch meter, respectively at the same time.

The numerical data reading from these records, taking each constant as $\Delta t=1$ sec, $h=45$ and $M=318$, the calculations were performed. The results were shown in Figs. 3, 4 and 5

Where; Δt : Time interval between adjacent data values

h : Number of lags of correlations used for the computation of the estimates

M : Number of data used for calculations

1. 緒言

著者は前文〔1〕において模型実験から得た有限の長さのデータについて、その不規則波を入力とし、船体の横揺れを出力としてこの運動系の波に対する周波数応答特性の推定について述べた。

本文においては実船について洋上を漂流中に波高計を用い、船体に向つて入進する波の高さと船体動揺を同時に計測し、これらの記録にもとづいて波高を運動系への入力とし、船体の横揺れ及び縦揺れ角を出力として、各々入出力間の相互相関係数から前文〔1〕の方法によつてこの系の応答特性を推定した。

尚、波と船体の間の相互作用も考慮して波高を2点において計測し、この間の波の伝達特性についても検討を試みた。

2. 資料及び解析の方法

本文で取扱つた資料は、北海道大学練習船おしよ丸1200GT、で同船は船尾トロール漁業設備をもっている。同船が太平洋上における海洋観測のために漂流中に実験を行つた記録結果である。

* 北海道大学水産学部（函館市港町 253）

2.1 資料

2.1.1 実験時の気象及び海象, 船体の推定状態

実験当時の天気図, 気象観測結果等については, 特に本文においてはこれらとの関係を論じない

Table I

Ship's condition in the experiment
Oshoro Maru (GT 1180.64 tons)
Principle dimension

L_{pp}	60.500m
B	11.000m
D	5.400m

Ship's condition

Draft	F	2.50	m
	A	4.44	m
	M	3.47	m

Displacement 1378.85 tons

KM_t 5.2800 m

KG_t 4.2413 m

GM_t 1.0387 m

GG_0 0.1260 m

G_0M 0.9127 m

T_r 9.32 sec

(Period of roll) (0.1073 s/s)

Trim moment 1559.19 m-t

Area of water plane 524.00 m²

KM_l 84.50 m

GM_l 80.26 m

T_p 5.20 sec

(Period of pitch) (0.1923c/s)

いので省略する。

船体に関する状態の推定値を第1表に示す。

2.1.2 実験の方法

波高の測定は次の2点において40MC並びに42MC帯の波高テレメータ装置を取付けた波高計を用いた, その測定方法は前文〔2〕〔3〕の通りである。

又入出力の関係にある波高と船体動揺との間の coherency の問題があるために船体と波高測定点の距離を一定に保つ方法として, 各々長さ

100米と50米のロープによつて繫止しておいた。船体と波高計との相対位置を六分儀及び羅針儀を用いて求めた。

第1測点: 右舷 110度 距離 75米 (40MC)

第2測点: 右舷 95度 距離 40米 (42MC)

使用した波高テレメータ装置は前文〔2〕と同じ性能をもつ最大測定波高6.0米, ステップ式波高ゲージを使用した, テレメータ機構については改良したものを使用した。

船体動揺は次の計測装置を用いた。

ジャイロ型動揺計 JV-1D 型, 日本航空電子(株)製, パーチカルジャイロにより垂直検出し, ポテンシオメータ方式によつて, 横揺れ及び縦揺れ角を検出し, 直流増幅器を通してペン書きオシロに記録した。

2.1.3 実験の結果

前項の計測記録装置によつて, 2個所の測点における波高と船体の横揺れ並びに縦揺れ角の4要素について同時計測記録を行つた。

記録データについては省略する。

2.2 解析の方法

前文〔1〕〔4〕等の方法によつて同文の Appendix に示した順序に従い, 自己相関係数計算機 (FACOM 426) を用いて数値計算を行つた。

2.2.1 この資料の処理上用いた諸定数は次の通りである。

i) 記録からのデータの読み取り間隔, $\Delta t = 1 \text{ sec}$

ii) スペクトル分割数 $h = 45$

iii) データの数 $M = 318$

入力を X_i , 出力を Y_i として表示すると次の諸式によつて計算した。

(1) オートコログラム: $C_{xx}(k)$, $C_{yy}(k)$

$$C_{xx}(k) = \sum_{i=1}^{318} \hat{X}_i \hat{X}_{i+k} \quad k = 0, 1, 2, \dots, 45 \quad (1)$$

$$C_{yy}(k) = \sum_{i=1}^{318} \hat{Y}_i \hat{Y}_{i+k} \quad k = 0, 1, 2, \dots, 45 \quad (2)$$

但し, $\hat{X}_i = X_i - \bar{X}$, $\hat{Y}_i = Y_i - \bar{Y}$

$$\bar{X} = \frac{1}{318} \sum_{i=1}^{318} X_i, \quad \bar{Y} = \frac{1}{318} \sum_{i=1}^{318} Y_i \quad (3)$$

(2) クロスコレログラム: $C_{yx}(l)$

データのウインドウのシフト量 K は, 計測した各々の現象の関係によつて異なるが, 特に波高と船の運動のクロスコレログラムの計算においてはデータの数の Mat の 5% 以上になる場合もあるので Y_i の代りに Y_{i+K} を用いて計算した。

$$\text{即ち} \quad \bar{X} = \sum_{i=1}^{318} X_i / 318, \quad \bar{Y}_K = \sum_{i=1}^{318} Y_{K+i} / 318 \quad (4)$$

$$C_{yy}(k) = \sum_{i=1}^{318} \hat{Y}_{i+K} \hat{Y}_{i+K+k} / 318, \quad \hat{Y}_{i+K} = Y_{i+K} - \bar{Y}_K \quad (5)$$

$$C_{yx}(l) = \sum_{n=1}^{318-l} \hat{Y}_{n+K+l} \hat{X}_n / 318 \quad l \geq 0 \quad (6)$$

$$= \sum_{n=-l}^{318} \hat{Y}_{n+K+l} \hat{X}_n / 318 \quad l < 0$$

$$l = -45, -44, \dots, -1, 0, 1, 2, \dots, 44, 45$$

(3) パワースペクトル $\hat{P}_x(f)$, $\hat{P}_y(f)$ 及びクロススペクトル $\hat{P}_{yx}(f)$

$$\bar{P}_x\left(\frac{r}{90}\right) = C_{xx}(0) + 2 \sum_{k=1}^{44} C_{xx}(k) \cdot \cos(4^\circ \times k) + (-1)^r C_{xx}(45) \quad (7)$$

$$r = 0, 1, 2, \dots, 45$$

$\bar{P}_y\left(\frac{r}{90}\right)$ は上式の x の代りに y について計算した。

$$\bar{C}_{yx}\left(\frac{r}{90}\right) = C_{yx}^+(0) + 2 \sum_{l=1}^{44} C_{yx}(l) \cdot \cos(4^\circ \times l) + (-1)^r C_{yx}(45) \quad (8)$$

但し, $C_{yx}^+(l) = \frac{1}{2} \{C_{yx}(l) + C_{yx}(-l)\}$

$$\bar{S}_{yx}\left(\frac{r}{90}\right) = -\left\{ 2 \sum_{l=1}^{44} C_{yx} \sin(4^\circ \times l) \right\} \quad (9)$$

但し, $\bar{C}_{yx}(l) = \frac{1}{2} \{C_{yx}(l) - C_{yx}(-l)\}$

$$\bar{P}_{yx}\left(\frac{r}{90}\right) = \bar{C}_{yx}\left(\frac{l}{90}\right) + i \bar{S}_{yx}\left(\frac{l}{90}\right) \quad (10)$$

(4) ウインドウ $\{a_0=0.5134, a_1=a_{-1}=0.2434, a_2=a_{-2}=0\}$

上記の各スペクトル $\bar{P}_x$, $\bar{P}_y$ 及び $\bar{P}_{yx}$ に平均化係数を用いて $\hat{P}_x$, $\hat{P}_y$, $\hat{P}_{yx}$ を求める。

$$\hat{P}_x\left(\frac{r}{90}\right) = 0.2434 \hat{P}_x\left(\frac{r-1}{90}\right) + 0.5134 \hat{P}_x\left(\frac{r}{90}\right) + 0.2434 \hat{P}_x\left(\frac{r+1}{90}\right) \quad (11)$$

同称にして $\hat{P}_y\left(\frac{r}{90}\right)$ を求める。

$$\hat{P}_{yx}\left(\frac{r}{90}\right) = \hat{C}_{yx}\left(\frac{l}{90}\right) + i \hat{S}_{yx}\left(\frac{l}{90}\right) \dots\dots\dots (12)$$

$$\hat{C}_{yx}\left(\frac{l}{90}\right) = 0.2434 \hat{C}_{yx}\left(\frac{l-1}{90}\right) + 0.5134 \hat{C}_{yx}\left(\frac{l}{90}\right) + 0.2434 \hat{C}_{yx}\left(\frac{l+1}{90}\right)$$

$$\hat{S}_{yx}\left(\frac{l}{90}\right) = 0.2434 \hat{S}_{yx}\left(\frac{l-1}{90}\right) + 0.5134 \hat{S}_{yx}\left(\frac{l}{90}\right) + 0.2434 \hat{S}_{yx}\left(\frac{l+1}{90}\right)$$

(5) 周波数応答特性の推定：振幅特性 $\hat{A}(f)$ 及び位相特性 $\hat{\Phi}(f)$ は次式によって求める。

$$\hat{A}\left(\frac{r}{90}\right) = \hat{P}_{yx}\left(\frac{r}{90}\right) / \hat{P}_{xx}\left(\frac{r}{90}\right) \dots\dots\dots (13)$$

$$\hat{\Phi}\left(\frac{r}{90}\right) = \tan^{-1} \hat{S}_{yx}\left(\frac{r}{90}\right) / \hat{C}_{yx}\left(\frac{r}{90}\right) \dots\dots\dots (14)$$

(6) 周波数 $f = \frac{r}{90}$ に対する coherency の推定

$$\hat{\gamma}^2\left(\frac{r}{90}\right) = \left\{ \hat{A}\left(\frac{r}{90}\right) \right\}^2 \cdot \left\{ \hat{P}_{yx}\left(\frac{r}{90}\right) / \hat{P}_{xx}\left(\frac{r}{90}\right) \right\}^{-1} \dots\dots\dots (15)$$

$$r = 0, 1, 2, \dots, 45$$

2.3 解析結果

実験結果の4要素の計測記録について上記の諸式によって計算し下記を得た。

2.3.1 2つの測定の波高，船体横揺れ及び縦揺れ角に対するコレログラム並びにパワースペクトラム，図1及び2に示す。

2.3.2 波高の伝達特性，第1測点の波高を入力とし第2測点の波高を出力として応答特性を求めた。図3に示す。

2.3.3 波に対する船体横揺れ及び縦揺れの応答特性は，夫々次の入出力関係において求めた。

第1測点の波高 $\times$ 船体横揺れ角

第2測点の波高 $\times$ 船体横揺れ角

第1測定の波高 $\times$ 船体縦揺れ角

これらの計算結果を図4及び5に示す。

図 1

3. 考 察

実験時における船体状態及び解析結果から次の様になる。

3.1 パワースペクトラム。(図2)

2つの測点における波高，船体横揺れ及び縦揺れ角のパワースペクトラから入出力関係の特徴が分る。

2測点の波高のパワーは周波数範囲は殆んど一致するがパワーの異なっている点がある。この実験における波の特徴としては4秒以下及び14秒以上の波のパワーは認められない。尚，前文

〔3〕〔5〕等に述べられている様に長周期の波の測定に関してはこの波高計の応答特性が問題になる。

次に船体動揺に関しては、横揺れにおいては表1に示す固有周期(9.3秒)附近に顕著なパワーを示しているが、縦揺れでは、その固有周期附近(5.2秒)と、入力である波のパワーの大きな附近との2個所において顕著な特徴を示している。これらは2つの動揺系の性質をよく表はしていることが分る。

3.2 測点間の波の伝達特性

両測点の距離は45米、両点とも船体の風上側にあり波は風上側から船体に向っている。図3に風上側第1測点の波高を入力とし船側に近い第2測点の波高を出力と見做し、この入出力間の振幅利得 $\hat{A}(f)$ 、位相特性 $\hat{\Phi}(f)$ 及び coherency $\hat{\gamma}(f)$ を求め伝達特性として検討した。図3から4.5秒から14秒の範囲で $\hat{A}(f)$ は80%を示し、 $\hat{\Phi}(f)$ は殆んど直線的に変化している。且つ coherency も良好である。波のパワースペクトラも考慮すると高周波成分はパワーは小さく殆んどノイズ成分とも考えられ計算結果も安定していない。

3.3 波に対する船体動揺の応答特性(図5)

前述のパワースペクトラ及び coherency から見て5秒から15秒の間についての波に対する船の動揺応答について特性を知ることが出来る。特に各々の関係において13秒附近の利得が大きい点についてはこの波高計の動

図 2

図3 W. H x W. H

図4-1

特性から見て可り小さ目に計測されているものと考えられる。

3.3.1 横揺れの応答特性

- (1) 振幅利得 $\hat{A}(f)$: 固有周期附近において利得が最大になっている。この図では波高×横揺れ角の関係で求めているが波傾斜に対しては次式で与えられる。

$$\hat{A}_\theta(f) = \hat{A}_h(f) \cdot \frac{\omega^2}{g} \dots\dots\dots (16)$$

この式によると第1測点の波高に対する横揺れの振幅利得 $\hat{A}_\theta(f) = 2.71$ となる。

- (2) 位相特性 $\hat{\Phi}(f)$: 9秒 (0.111 c/s) 附近で大きく変化しておりこの附近に系の固有周期であることが分る。第1及び第2測点に対する各々の特性が9秒附近で交叉しているのは両測点間の距離による位相差を意味する。

- (3) coherency $\hat{\gamma}(f)$: 応答特性はこの coherency の値はその推定の目安となることは前文〔1〕に述べた通りであるが、図5においては5秒から14秒の間は可成り良い値を示しており、この範囲外では横揺れのパワーは殆んど存在しない。

3.3.2 縦揺れの応答特性

図5には第1測点の波高を入力として計算した場合を示した。

- (1) 振幅利得 $\hat{A}(f)$: 縦揺れのパワースペクトラムにも見られる様に、入力のパワーの小さな5秒附近に利得の大きな処がある。これが表1にも示されている様に固有周期となっている。

- (2) 位相特性 $\hat{\Phi}(f)$: 横揺れ特性と比較すると同じ入力の波に対して各々固有周期附近の位相変化が逆になっていることが分る。

- (3) coherency $\hat{\gamma}(f)$: 5秒附近の値 $\hat{\gamma}(5 \text{ sec}) \approx 0.5$ になっており、横揺れの場合に比して高周波側に良くなっておる。この相違からも両運動の特徴を示している。

4. 結 言

得られた各々の応答特性を実際に運動の予測等に用いる場合にはパラメタの選択等多くの問題がある。本実験においては前文に述べた様に coherency の良い解析成果を得ることが重要であるとして、波浪条件等にもよるが、4要素の同時測定の際船体と波高計の距離の変化による影響を避ける様に配慮した。

図4-2

図5

coherency は模型実験の場合よりも良いが、波高計が船体の漂流の影響をうけて特に長周期の波の測定が無理であつたことが認められる。

本文の目的のためには更に入力としての波の測定方法に改良を加える必要がある。

最後に本実験に御助力を賜つた本学部元田教授はじめ諸教官並びに練習船おしよる丸乗組員各位に深謝する。

文 献

- 1) 川島利兵衛：海洋波中の漁船の横揺れの応答函数の統計的推定について，航海学会誌，31（1964）
- 2) 川島利兵衛：波高計の試作について，航海学会誌，30（1963）
- 3) Rihei KAWASHIMA; On the measurement of Ocean Waves, Bulletin of the Faculty of Fisheries Vol. 14 No. 1 (1963)
- 4) H. AKAIKE et al; Studies of the Statistical Estimation of Frequency Response Functions, Annals of the Institute of Statistical Mathematics, Supplement III (1964)
- 5) J. W. Johson et al; Ships and Waves, Concl Wave Research of Soc. Nav. Arch. Mar. Eng. (1954)