動 揺 の 遠 隔 監 視 に つ い て II

川 島 利 兵 衛*

On Remote Monitoring of Ship's Motions—II

R. Kawashima

Abstract

A radio telemetering system for the ship's rolling motions has been designed and it was discussed in the previous paper.

In the present paper, the method for analysis of the ship's rolling record which was obtained by means of the above mentioned system was discussed; an analyser for the application of this method was designed and examined.

Change in the value of transverse metacentric height ($=GM$) of the ship is the most useful information for judging of the safety of the ship's stability in the seaway. Generally, according to the relation between GM and the rolling period of the ship, if the transverse radius of gyration of the ship ($=\kappa$) or coefficient c ($=\kappa/B$) is given as a constant value, the value of GM and the change of GM ($=\Delta GM$) are calculated by equation (1) and (2), respectively.

As to Tables I and II in which the practical ship's data are shown for drifter and pelagic fishing boats respectively, by calculating of GM for each datum in accordance with equation (2), their mean values are found to be 0.209 m for drifter and 0.0972 m for pelagic fishing boats against 1 second change of the ship's rolling period.

Concerning the results of the above calculations, though the mean values of GM are from 20% to 30% for the value of GM , it is necessary to know the value of GM within 10% for the value of GM at least, from the practical view point.

According to the relation of GM and the value of the change of the ship's rolling period ($=\Delta T$) which is shown in equation (2), it is required that the rolling period of the ship should be taken within the precision of one-fourth second.

In the above mentioned meaning, in order to presume the rolling period of the ship from the record of the ship's rolling, the method making use of the spectrum is more practicable than the method by means of the apparent period.

The author discussed the several methods for calculating the rolling period from the record of the ship's rolling, and designed an analyser which consists of a function generator and a frequency analyser.

It was found that this analyser is sufficiently effective for the above mentioned purpose.

* 北大水産学部

1. 緒 言

著者は前文¹⁾に、航海中の船の横揺れ角のデジタル方式による無線テレメータ装置の試作について述べたが、本文にはこの装置により得られる情報の処理に関して述べる。

不規則な横揺れの解析において、得られるデータの処理に統計的方法は有用な手段となる。例えば第1図は海洋波中を船が航行している場合、波の進行方向と船の前進方向との相対角度をかえて、その各々の方向に対応して横揺れを計測した揺れ角の時系列について見掛の周期及び振幅を求め、周期分布についてのヒストグラム及びスペクトラムを示している。²⁾ 周期分布をみると、固有周期と推定される頻度の大きい周期成分が認められる、エネルギースペクトラムにおいてはもつと顕著に現われている。この様に横揺れの固有周期の推定にはスペクトラム表示の方が有効である。著者は、航海中の横揺れ角の記録から固有周期の推定方法としてスペクトラム解析を用い、その自動的処理の方法として任意函数発生器と周波数分析器を使用する解析を試みた。

図1 不規則波の中の横揺れの周期分布にスペクトラム

この様に横揺れの固有周期の推定にはスペクトラム表示の方が有効である。著者は、航海中の横揺れ角の記録から固有周期の推定方法としてスペクトラム解析を用い、その自動的処理の方法として任意函数発生器と周波数分析器を使用する解析を試みた。

2. 固有周期からGMの変化量の推定

横揺れの固有周期を求めてGMを計算するには、次式を用いることはよく知られている。

$$GM = 4.03 \frac{C^2 B^2}{T^2} \quad (1)$$

但し、 T_0 : 横揺れ固有周期、 B : 船の幅

$C = \kappa/B$ κ : 船の横方向慣動半径

この場合、 C 係数は一定値をもつものとする。(1)式について、航海中船体の質量配置等の変化によつて周期のみが変化したとしてその変化量 ΔT と GM の変化量 ΔGM の関係を表わすと次式で与えられる。

$$\Delta GM = -8.06 \frac{C^2 B^2}{T^3} \Delta T \quad (2)$$

これらの関係を実例について計算する。表1及び2は夫々鮭鱒流網漁船及び遠洋鮪延縄漁船についてのデータである。

(1)式に対する関係は図2に示され、(2)式に対して $\Delta T = 1$ 秒に対する ΔGM を各表に示す。

この変化量 ΔGM の各々に対する平均値を求めると、表1から 0.209m、表2から 0.0972m が得られ、これらは各表に示される状態における GM 値の約 30% 及び 20% となる。

然乍ら、海上を航行又は漁撈作業中は少くとも GM の 5% の変化を知る必要がある。この為には(1)式の関係から GM 値を推定する場合、横揺れの固有周期を求めるには、少くとも4分の1秒程度の精度を必要とするものと考えらる。

表1 鮭 鰯 流 網 漁 船

船 名	ΔF	ΔL	B	ΔT	GM	T_s	$C(=k/B)$	$\Delta GMm/sec$
18 富 丸	186.47	111.31	5.30	113.90	0.530	6.40	0.437	0.165
11 富 丸	134.18	94.92	5.00	98.54	0.466	6.20	0.421	0.150
大 宝 丸	137.28	108.77	5.30	119.25	0.721	5.50	0.438	0.261
23 睦 丸	178.87	126.81	5.30	129.87	0.703	5.40	0.425	0.260
3 白 鷗 丸	178.37	126.23	5.30	129.51	0.712	5.40	0.428	0.263
2 大 亀 丸	203.46	145.26	5.30	155.47	0.570	6.07	0.430	0.187
5 明 石 丸	199.49	135.51	5.40	138.06 207.12	0.578 0.507	6.17 6.67	0.432 0.438	0.152 0.187
7 明 石 丸	199.40	134.50	5.40	139.60	0.612	5.98	0.430	0.203
8 明 石 丸	198.36	134.18	5.40	138.89	0.534	6.19	0.410	0.167
8 明 石 丸	192.26	123.48	5.40	139.10	0.516	6.33	0.419	0.163
37 明 石 丸	189.67	120.89	5.40	137.03	0.509	6.48	0.426	0.157
38 明 石 丸	192.59	123.81	5.40	135.55	0.599	6.27	0.447	0.191
39 明 石 丸	192.58	123.80	5.40	132.86	0.592	6.10	0.432	0.193
12 白 竜 丸	180.82	134.01	5.30	132.69	0.768	5.17	0.426	0.297
8 旭 光 丸	199.91	136.74	5.60	146.73	0.733	5.55	0.422	0.263
11 美 代 丸	195.18	131.94	5.60	141.68	0.788	5.55	0.438	0.284
33 明 石 丸	197.23	118.25	5.40	138.88	0.596	6.13	0.436	0.194
35 明 石 丸	199.16	120.18	5.40	142.76	0.568	6.22	0.432	0.182

表2 遠 洋 マ グ ロ 漁 船

船 名	ΔF	ΔL	B	ΔT	GM	T_s	$C(=k/B)$	$\Delta GMm/sec$
2 大 宮 丸	907.38	493.75	7.98	552.96	0.498	9.9	0.436	0.1010
13 海 幸 丸	719.64	380.80	7.40	412.00	0.487	9.0	0.422	0.1080
2 豊 洋 丸	632.15	339.19	7.20	373.07	0.422	10.2	0.458	0.0826
28 琴 平 丸	856.67	470.71	7.80	483.50	0.420	10.6	0.438	0.0854
3 清 勝 丸	488.14	271.86	6.70	275.90	0.435	9.2	0.451	0.0945
12 丸 高 丸	367.90	271.30	6.00	219.90	0.431	7.0	0.381	0.1230
な が さ き	744.87	425.80	7.50	424.28	0.428	9.9	0.430	0.0864

普通、航海中横揺れ固有周期は、ストップウオッチを用いて船が不規則に横揺れしているとき、適当に固有横揺れを抽出して見掛の周期を計る方法によつて求めている。

この方法が若し理想的に実施されたとすると自記々録計による横揺れ角の連続記録にもとづいて見掛の周期、即ち揺れ曲線の峰から峰又は谷から谷の時間々隔 T_0 を読取ることと相当する。図1はこの方法によつて求めたすべての周期を含む周期頻度分布のヒストグラムである。見掛の周期により固有周期の推定をする為には、この様なヒストグラムにおいて固有周期の頻度分布が大きいことがその条件になる。以上の様な立場から図1の各ヒストグラム及び

図2 横揺れの固有周期とGMとの関係

スペクトラムを検討すると次の様になる。

- (1) 波と船の各進行方向の相対角対見掛の周期の頻度分布からみると、各相対角に対して必ずしも固有周期が最大頻度となっていない。
- (2) エネルギースペクトルはヒストログラムよりも固有周期を特徴づけている。
- (3) 船が漂流する場合、エネルギースペクトラム、ヒストログラム共に固有周期に高い峰をもっている。
- (4) 見掛の周期による固有周期の推定によつては5%の精度は困難である。これについては、表

図3 模型船Aに対する不規則波の中の横揺れの周期分布

と見做され、このコレログラムについてスペクトラム解析する方法が精度の点において最も有利な方法であるとされている。然乍らこの方法では標本系列の自己相関係数を求めることが必要でその計算を迅速にするには自動計算機を要するが、このスペクトラム解析における問題点は充分検討され実用精度を認められている。⁴⁾

前文において試作されたテレメータ装置では、横揺れ角は1秒毎にサンプリングされる離散的なデータとなる。よつて次の計算式が用いられる。

データM箇 $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_M$

に対して平均値 $\bar{x} = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M x_n$ として次の系列を求める。 $\hat{x}_n = x_n - \bar{x} \quad n=1, 2, 3, \dots, M$

この時系列に対する自己相関係数 $C_{xx}(k)$ は、

$$C_{xx}(k) = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^{M-k} \hat{x}_n \hat{x}_{n-k} \quad (3)$$

3に示す模型船の不規則波の中の横揺れから得た見掛の周期分布を図3に示す。この図から分る様に2分の1秒以内の精度で求めることは困難である。

(5) 横揺れの解析によるその固有周期の推定はスペクトラム解析を用いる方が適当である。

3. 海洋波中の横揺れの周期分析

海洋波中の横揺れは、所謂超低周波の不規則振動でこの様な現象の周期分析の方法として、前述の様な見掛の周期の頻度分布による方法もあるが、現象が

$$y(t) = \sum_i a_i \sin(2\pi t/T + \phi_i)$$

によつて表示されるとして解析するペリオッドグラム解析³⁾がある、これは $y(t)$ なるデータを直接フーリエ変換して各周波数成分のパワーを算出する方法で、単に直接フーリエ変換するのみでは大きな誤差を含むことになる。

不規則振動を定常確率過程とみると、計測される横揺れの系列は一つの標本系列（時系

(3)式に対して移動平均を用いてコレログラムを求めそのフーリエ余弦変換を行つてパワースペクトルを得、適切な平均化係数を用いて最終的なパワースペクトルが求められる。

本文においては次節に、(3)式を任意函数発生器において電氣的に変換し、これを周波数分析器に入れてフーリエ変換及び平均化演算を行つてパワースペクトルを求める方法についてのべる。

前述の様に(3)式の計算には極めて多くの労力を要するが、データ読み取りの級間の数を変えることにより計算の簡素化が出来る。即ち

$$C_{xx}(k) = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^{M-k} \hat{x}_n \hat{x}_{n+k} / |\hat{x}_{n+k}| \quad (4)$$

$$C_{xx}(k) = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^{M-k} \hat{x}_n \hat{x}_{n+k} / |\hat{x}_{n+k} \cdot \hat{x}_{n+k}| \quad (5)$$

(4)式は高橋式の方法⁵⁾として知られる方法で(5)式は友田氏の方法⁶⁾に相当する計算式である。

4. 任意函数発生器を用いた横揺れ周波数分析装置

不規則振動の解析のための自動処理方法はアナログ又はデジタル何れの方式によるも種々の型式がある⁷⁾が、ここでは次の方法を用いた。

等間隔にサンプリングされた横揺れ角を直接に、或いは(3)(4)及び(5)の各式により求めた函数 $C_{xx}(k)$ を任意函数発生器におく。次に電氣的に変つた函数を周波数分析器に入れて分析すると、前者に対してはフーリエスペクトラムを後者に対してはパワースペクトラムを求めることになる。

この分析装置の作動原理を図4に、全景を写真1に示す。又次の各部から成つている。

- (1) 任意函数発生器
- (2) 周波数分析器

発生される函数形を確認するためにブラウン管オシロスコープを使用する。これら各部の構造は次の通りである。

(1) 任意函数発生器：図に示される様に、各時点に対する横揺れ角 x_i 又は $\hat{x}_i$ 或いは $C_{xx}(k)$ の値を回転角対抵抗の線型な120箇のポテンシオメーターにおき、シンクロナスモーターとギヤーにより500 RPMにて回転する円板型スイッチをもつ切換機構により、与えられた函数をステップ函数として

図4 横揺れの周波数分析装置

写真 1

↑ 発生函数監視用オシロスコープ
↑ 周波数分析器
↑ 任意函数発生器

写真 2

↑
ポテンシオメーター↑
切換機構

写真 3

再現する。写真2はその内部を示している。

図5-aを本器により再現する。この場合(5)式に従って計算したコレログラムで、発生器の設定盤に $k=-60$ から $k=59$ までの $N=120$ 個の値を標準電圧 $1V=1$ として各値をポテンシオメーターに入れる。演算の場合、入力直流3Vとすると0.6V交流が出力として得られた。その波形を写真3に示す。

(2) 周波数分析器：図4に示される様に、RC 並列T型回路を饋還回路とする撰択増幅器型コンスタントパーセントバンドパス特性を有する周波数分析器で、周波数範囲 40c/sec から $14,000\text{c/sec}$ でその確度は2%である。読み取り値は全入力に対する分析成分出力の比として直読される。

5. 不規則波の中の横揺れ固有周期

海洋波による横揺れの周期分布及びスペクトラムに示される様に、この様な不規則な横揺れの場合、船の固有周期成分に対する頻度が高く、エネルギースペクトルにおいては更にこの傾向をよく示している。

よつて、逆に不規則波の中の横揺れスペクトラムか

らその固有周期の推定も可能となる。

表3に示す模型船について、不規則波の中の横揺れ実験を行つてその結果を上記の装置を用いてスペクトラム解析して固有周期を求めた。

実験時の記録の読取り時隔は0.2秒であるが、演算及びその結果の図示においてはこの時隔を単位時間0.2秒=1とした。これは模型縮尺比からこの単位が直ちに実船時の1秒を示している。

図5-bは横揺れ角の階段式函数表示したもので、全系列データ数 $M=726$ から部分系列 $N=120$ を示している。この $M=726$ のデータに対する(3)(4)及び(5)の各式により計算したコレログラムを図6に示す。

上記の各々を任意函数発生器に設定して周期分析器を用いて直読しスペクトラムを画いたものを図7に示す。

何れの計算によつても、パワーの顕著な点が略一致して

図5 函数の階段的表示

おり又この点の周期は固有周期と推定される。同模型船の静水中の横揺れから求められた固有周期とよく一致していることが分る。

表3からその固有周期は7.90に相当するが図7から7.65から7.80の範囲となり4分の1秒以内にあることが分る。よつてこの装置によつて要する精度で固有周期を求めるこ

図6 横揺れ角のコレログラム

図7 周波分析器による横揺れの周期分析

表3 模型船要目

Table III	
Model ship A	
L	170.1mm
B	33.2mm
D	17.2mm
	42.00kg
Draft F	113.7mm
A	137.0mm
M	125.4mm
KM	153.1mm
KG	123.3mm
GM	29.8mm
GG_0	2.3mm
GM_0	27.5mm
T_s	1.58sec (7.90)

とが出来る。

尚、この場合には、ペリオッドグラム又は(3)(4)及び(5)式から計算したコレログラムによるスペクトラムの何れによつても周期を求めることについては大きな差はない。

6. 結 言

海洋波中の横揺れについて、GM

の変化量を知るためにその固有周期を求める方法はスペクトラム解析が有効であり、その手段として本文の装置は充分有用であることが分つた。

遠隔監視の今後の問題として次項について考えている。

- i) テレメータ装置及び分析装置による実船に対する監視の実験又は実施。
- ii) 各装置の実用化。

終りに、本文中に用いられた漁船資料は日魯工業株式会社造船部の御好意によるもので又任意関数発生器は函館市精進弱電工業社に周波数分析器は東亜電子測器株式会社の製作による。各位の御協力に深謝する。

文 献

- 1) 川島利兵衛：動揺の遠隔監視について—I 日本航海学会 24 (1961) pp 81—85
- 2) 同 上：津軽海峡における波による船の動揺の実験について 同上 22 (1959) pp 131—142
- 3) 高橋浩一郎：気象統計 地人書館 (1954) p 106
- 4) Blackman, Tukey, John W: The measurement of power spectrum Dover Pub. (1958) p 190
山内保文：船の波浪中動揺応答の解析法について(1)(2) 日本造船協会論文集 119, 110 (1961)
- 5) 川島利兵衛：大洋波による船の動揺解析の一方法について 日本航海学会 21 (1959) pp 71—75
- 6) 友田好文：級間の数を2とし簡単に相関係数を求める方法 地震2輯 Vol.7 No.1 (1956) pp55—56
- 7) 八反田・川島・稲葉：フーリエ解析機による波浪動揺の解析について日本航海学会 23(1960)pp67—72