船載式波浪情報提供システムの開発に関する研究

正員 高石 敬史** 正員 増田 光一*
正員 居駒 知樹* 嶋村 祥嗣***

Development of a Ship-borne Wave Recording System

by Yoshifumi Takaishi, *Member*
Tomoki Ikoma, *Member*

Koichi Masuda, *Member*
Shoji Shimamura

Summary

An on board system for wave data analysis and application to ship operation has been developed. The system consists of wave probes, accelerometers, a soft-ware of analysis and a wave data display tool. The former two are used to estimate the encountering wave surface elevations on ship hull. The main parameters of waves, i.e. the wave direction, the mean wave period or wave length and the significant wave height are calculated by using the encounter wave elevation data at three positions on ship side.

The obtained wave parameters are used to show the situation of own ship at sea on the figures of operational guidance, so that the master can judge how to change the ship course or speed for preventing dangerous situations.

This paper presents a simple method of wave analysis using cross spectra of wave data at three positions on ship sides and the examination of the method by numerical simulations and model experiments in directional waves. The test results on actual vessel at sea will be presented.

1. 序 論

船載方式の波浪計で計測した船側波形は、いわゆる出会い波であって、絶対空間における真の波浪が船速や船体動揺などの影響によって変形したものである。従って真の波浪情報を得るためには、出会い波のデータに補正をほどこして、船

体運動の影響を除く必要がある。従来の船載方式の波浪計測技術としては、船首や船側に出会い波浪計を備えたもの、船体自体を波浪計として船体運動を測り、これを運動の応答特性で割ることにより、船体運動をひきおこした波浪自体の情報を抽出するもの等がある。

船首や船側に付ける波浪計では、船側から外に突きだした腕の先端に相対水位計と上下加速度計とを設け、両者の量を演算して船首出会い波面の上下運動を求める[1][2]。この場合、計測点は1点であるから、波高情報は得られるが、周期は船の出会い周期であり、これは船速や波方向によって変わるので真の波周期ではない。また波方向の情報は直接に得られないので、目視やレーダー画面解析などの方法を併用する必要がある。

* 日本大学理工学部海洋建築工学科

** 日本大学総合科学研究所（研究当時）

*** 日本大学大学院（研究当時）

また船体運動から波浪を逆算する方法については、多くの研究が行われているが[3]-[9]、理論的に計算した運動応答関数を介在させるため、その信頼度や船体運動が顕著でない波長域の波の推定精度等に問題がある。

船側の複数点における相対水位変動および上下加速度を測ることにより、それらの点における出会い波面の空間固定座標における上下変位を求め、統計的解析によって波浪情報に換算することができる。3点以上の複数点における波浪情報を用いれば、波高計アレイによる計測と同等であり、有義波高のみならず、平均波周期、波方向、波のエネルギースペクトルとその方向分布等を求めることができる。この方法では波浪計測位置の座標を与えるのみで、船体運動の応答関数を用いなくてもよいという利点がある。

本論文ではまず、相対水位計により船上で計測された複数点における船側波形から、真の波浪場の代表値を求める実用的システムの構築と、実船によるテストの結果を述べる。波浪データの蓄積や船上における操船への利用に対しては、波浪の代表値、例えば有義波高、平均波周期、主波方向などを先ず把握するシステムにすることが求められることも多い[10]。本論ではこのような波浪の代表値を船上において速やかに算出する簡易波浪解析法を採用し、この解析法の有効性を調べるため行った数値シミュレーションと水槽模型実験による検証結果を示す。

そして最後に、得られた波浪データの利用法として、危険度が認識されにくい追波中航行に対する操船ガイダンスを、操船者にビジュアルに示すことのできる船上のプロトタイプ装置を紹介する。

2. 波浪解析システムの構成

船体の複数点に取り付けた波浪計と加速度計によって、相対水位と、動揺する計測地点の船体変位量を示す上下加速度を計測する。船体運動を補正することにより、絶対的な波浪場を推算する方法として、船体変位加速度を時間領域で2重積分して船体変位量を求め、相対水位からその運動量を差し引く方法(2重積分解析法)と、同様の計測項目を用いて、周波数領域による処理により船体運動を補正した絶対的な波浪場を推定する方法(周波数領域解析法)を適用する。加速度の2重積分により変位を求める方法では、数値積分を2回行うため、微小な誤差が累積して、データのドリフトや長周期の変動が現れ、その後のデータ解析にいろいろ工夫が必要になる。一方、周波数領域で加速度スペクトルを計算し、変位のスペクトルに換算する方法では、計算上の理由から低周波数領域に拡大して現れるスペクトルの処理が必要となる。このようなデータ処理もそれぞれの手法についてシステムに組み込んである。周波数領域の解析法は付録A.1.1に詳述する。

これらのデータ処理によって求められた波浪計2点間の空間固定の波高のクロス・スペクトルから両点における波浪の位相差が求まる。これは波浪の空間的な位相差であり、3

点間の2組の値を用いることにより、波の方向と波長を算出することができる。この簡易波浪解析法の詳細は付録A.1.2に記述する。

このシステムのデータ処理・解析のフローをFig.2.1に示す。さらに詳細なデータの流れは付録A.1.3に図示してある。

Fig.2.1 Flow chart of ship-borne wave recording system

3. 実海域実験

波浪推定法の本システムを実船にて実験した。供試船は東京商船大学練習船「汐路丸」であり、実験海域は伊豆大島の東方海域である。波との出会い角を変えた5角航走を2種類の船速で行った(Fig.3.1参照)。Table 3.1に実験条件を、Fig.3.2に船側に設置した波浪計の配置図を示す。波浪計の配置は解析手法の検討に用いた場所に準じた3点、A Point(Port3.5), B Point(Star Mid), C Point(Star2)である。

実験当日は3方からの波浪があり、wave(1)が風浪、wave(2), wave(3)がうねりである(Fig.3.1参照)。解析データの一例として、Fig.3.3にPort3.5(A Point)の相対水位、船体加速度及び2重積分法によって導かれた船体変位及び絶対水位の時系列を、Fig.3.4に3点の平均した出会い波浪パワースペクトラムを示す。

Fig.3.1 Course of ship experiment at sea

Fig.3.2 Arrangement of wave sensors at ship side

Table 3.1 Conditions of actual ship experiment

Date	2001.12.4-12.6
Weather	Fine
Wind direction and speed	5 (deg), 2.0 (m/sec)
Encounter Angles χ (deg)	0, 90, 180
Ship speeds V (kt)	5.0, 10.0

Case502 A Point Relative Wave and Acceleration $V=10.0$ (knot)

Fig.3.3 Time series of relative and absolute wave elevation

2点間の Co-スペクトラム, Qu-スペクトラム, 位相差を Fig.3.5, Fig.3.6, Fig.3.7 にそれぞれ示す。図中には時間領域の2重積分による解析と周波数領域の解析の両者を併記してある。この場合、両者は出会い波スペクトル、2点間の位相差ともよく合っている。

Fig. 3.4 Average spectra of three points

Fig. 3.5 Co-Spectra between Port3.5 and StarMid

Fig.3.6 Qu-Spectra between Port3.5 and StarMid

Fig. 3.7 Phase difference between Port3.5 and StarMid

得られた位相差を用いて簡易波浪解析法により実海域実験のデータを解析した結果を Table3.2 に示す。

Table 3.2 Results of ship experiment at sea

	Encounter Angles (deg)	Wave height $H_{1/2}$ (m)	Average wave period T_0 (sec)
Case 501	303 (304)	0.92 (0.92)	7.03 (6.77)
Case 502	279 (272)	1.13 (1.17)	7.09 (7.28)
Case 503	326 (326)	1.10 (1.16)	4.87 (5.37)
Case 504	141 (72)	1.28 (1.24)	6.18(10.27)
Case 505	49 (31)	1.20 (1.21)	9.43 (8.68)
Case 506	348 (346)	1.02 (1.11)	6.19 (6.46)
Case 507	164 (157)	1.13 (1.14)	6.28 (10.51)
Case 508	112 (89)	1.08 (1.02)	6.79 (7.94)
Case 509	21 (23)	1.08 (1.05)	7.69 (8.04)
Case 510	30 (56)	0.90 (0.92)	7.38 (7.98)

() : Time domain analysis

一方、当日の実験海域における波浪追算結果が(独立行政法人)海上技術安全研究所の委託により日本気象協会(JWA)によって行われた。その結果によれば下記の値であった。

波向き(絶対方位): 60-70°
 波高: 0.9-1.0 (m)
 波周期: 6.6 (sec)
 日時: 2001.12.5 AM

Fig.3.1 に示す船の針路と、Table3.2 に示す波の出会い角とから、波の主方向の方位を求めると、各実験ケースについて下記ようになる。

実験 Case : 501 502 503 504 505 506 507 508 509 510
波方位(°): 60 80 80 80 130 100 150 115 160 150

波向きについては、実船実験の解析結果は実験の前半はJWAの追算値とよく一致している。実験の後半では、波向きは東北東から東南方向へ変化していることが分かる。目視によれば、うねり方向は東と南の2系統があったが、実験前半では東のうねりが卓越し、後半では東と南のうねりの平均的な方向を波の主方向として算定したことになる。

波高は追算値とほぼ同じか僅かに高め、波周期は全般的にほぼ同じ値を出している。このように船上で解析された波浪データは、第5章で述べる操船支援システムへ入力されるとともに、波浪データベースとして蓄積される。

4. 波浪解析手法の検討

波浪解析法の推定精度をチェックするため方向波の数値シミュレーション及び水槽実験を行った。

4.1 数値シミュレーション

水槽実験で用いる模型船および実海域実験に用いる東京商船大学練習船「沙路丸」の船側複数点に波浪計を設置する

ことを想定して、数値シミュレーションによりP-M型スペクトラムの波浪場を生成させた。生成させた波浪場を船舶が航走して得られる出会い波浪の時系列を算出し [11]、本論で用いた簡易波浪解析法及び既存の方向波スペクトル解析法により波浪の代表値を推算して数値シミュレーションの設定値との比較を行った。設定した波浪計測地点(6点)の座標をFig.4.1.1に示す。このうち簡易波浪解析及びパラメータ法で用いた計測地点はPort 3.5, Star Mid(S-Mid), Star2(S-2)の3点である。比較に用いたベイズ法では選定した点は異なっている。

波浪解析結果の比較をTable 4.1.2に示す。

Fig. 4.1.1 Arrangement of wave probe for simulation

Table 4.1.2 Results of wave analysis (Simulation data) n=4

Ship Speed V (m/sec)	Encounter Angle χ (deg)	Bayesian Method			Parameter Method			Present Method		
		χ deg	$H_{1/3}$ m	T sec	χ deg	$H_{1/3}$ m	T sec	χ deg	$H_{1/3}$ m	T sec
0.000	0	0	1.84	6.2	1	1.92	7.2	4	1.87	6.6
	30	40	1.84	7.4	30	1.95	7.2	34	1.89	6.6
	180	170	1.82	8.0	185	1.94	6.9	177	1.90	6.6
3.056	0	0	1.91	7.0	-5	2.19	8.0	1	1.95	6.7
	30	30	2.15	6.2	40	2.29	6.5	21	2.09	7.3
	180	180	1.91	4.8	178	1.62	7.2	174	1.95	6.5
4.054	0	0	1.76	8.4	-6	1.77	8.3	1	1.83	8.1
	30	10	2.15	7.6	40	1.92	8.4	17	2.10	5.5
	180	180	1.96	6.2	178	1.64	8.0	186	2.00	7.1
5.069	0	0	2.31	7.3	7	1.97	10.2	3	2.08	6.2
	30	20	1.99	7.6	29	1.75	8.7	21	1.95	5.8
	180	180	1.91	5.8	182	1.40	8.9	182	1.97	8.0
6.034	0	20	1.92	6.5	0	1.74	9.7	0	1.92	6.3
	30	40	2.07	5.0	—	—	—	6	2.23	6.2
	180	180	1.94	6.0	179	1.54	9.0	184	2.01	7.2
6.998	0	-20	1.91	7.4	5	1.36	8.8	6	1.92	6.8
	30	30	1.82	7.9	36	1.74	10.4	4	1.85	7.1
	180	180	1.95	6.9	177	1.54	9.3	176	2.04	7.4
8.018	0	20	1.88	7.4	-22	0.98	9.4	7	1.94	6.5
	30	40	2.06	7.5	52	1.25	9.8	18	2.08	6.6
	180	180	1.92	6.9	—	—	—	179	2.03	7.6
Position of wave probe		P-8, S-Mid, P-3.5			P-3.5, S-Mid, S-2			P-3.5, S-Mid, S-2		

Table 4.1.2 のほかに方向分布指数 n が 10 および ∞ (一方方向規則波) の場合の解析結果も得られている。これらの結果

から簡易波浪解析法について下記のように評価することができる。

- (a) 波主方向については、ほぼ設定値から $\pm 20^\circ$ の範囲で推定している。但し、斜め追波中でやや高速の場合、最大 25° 程度設定値から隔たるケースがある。
- (b) 波周期については設定値の7(sec)から ± 1 (sec)以内にほぼ収まっている。但し、1.5(sec)の隔たりがある場合が、斜め追波の場合に2-3ケースある。
- (c) 方向分布の集中度が高いほど、波主方向、波周期とも推定精度がよくなる。
- (d) 既存のプログラムによる方向波スペクトル解析結果(非線形計画法, MLM, ペイズ法, パラメータ法)のうち解析ケースが多いペイズ法とパラメータ法の結果と比較してみると、ペイズ法では波主方向で最大 20° 、波周期ではばらつきが大きい。パラメータ法の場合、高速時に周期を長いほうに推定する傾向がある。
- (e) 有義波高については、時系列の分散から求めた値を使えば、どの方法も同じ値になるはずである。
- (f) 以上の結果から、本論で用いた簡易波浪解析法は、従来の方向波スペクトル解析法と同等の精度をもって波の主方向と周期を推定すると考えてよい。

以上は波浪計が船体運動の影響を受けない場合の結果であるが、次節においては船体に波浪計を取り付けて船体運動の影響が入った場合、このような解析精度がどのようになるのかを示す。

4.2 水槽実験

水槽実験は水産庁水産工学研究所漁業生産工学部海洋工学総合実験棟にて、以下の(a)及び(b)に示す2つの内容について行った。水槽実験で設定した波浪特性値の条件を Table 4.2.1 に、波浪場中に想定した波浪計側地点の位置を、船体中心を原点として Fig.4.2.1 に示す。解析に用いた計測地点は数値シミュレーションと同様、Port3.5 (A Point), Star Mid (B Point), Star2 (C Point) の3点を用いた。

Fig. 4.2.1 Model ship and arrangement of wave probes

Case 24-103 A Point Time series of directional wave
Fig. 4.2.2 Time series of waves and accelerations

Table 4.2.1 Conditions of model experiment

Significant wave height (m)	$H_{1/3}$	0.05
Average wave period (sec)	T_{01}	1.45
Directional distribution index	n	4, 10, ∞ ($\cos^n \theta$)
Encounter Angles (deg)	χ	0, 30, 90, 150, 180
Ship speeds (kt/sec)	V/T	0.000, 0.849, 1.126, 1.40 8 1.676, 1.944, 2.225

(a) 波高計アレイによる実験

数値シミュレーションと対応した、波高計アレイのみを曳航電車に固定して航走させ空間座標における出会い波浪場を計測する。そこで計測されたデータを以下の模型船曳航実験による波浪データの比較基準とする。

(b) 模型船曳航実験

模型船に相対水位計, 3方向運動計測装置兼ガイド装置及び上下加速度計を取り付け、相対水位および船体運動を計測する。次に船体運動の影響を取り除いた水槽の絶対波浪場を推算し、(a)の波高計アレイ実験結果と比較する。

水槽実験の解析の一例として Fig.4.2.2 に Port3.5 (A Point) の相対水位、船体変位加速度時系列及び2重積分法によって導かれた船体変位及び絶対水位を示す。絶対水位においてはアレイ実験で得られた絶対水位と比較した時系列を示している。アレイ実験と模型船曳航実験の比較として、Fig.4.2.3 に3点の平均した出会い波浪パワースペクトラム、Fig.4.2.4, Fig.4.2.5, Fig.4.2.6 に2点間のCo-スペクトラム、Qu-スペクトラム、位相差を示す。アレイ実験と模型船曳航実験で得られた波浪の代表値の一例を付録A.2.2に、またこのうち波の主方向の推定結果を図示したのが Fig.4.2.7 である。

Fig. 4.2.3 Average spectra of three points

Fig. 4.2.4 Co-Spectra between Port3.5 and StarMid

Fig. 4.2.5 Qu-Spectra between Port3.5 and StarMid

Fig. 4.2.6 Phase difference between Port3.5 and StarMid

Fig. 4.2.7 Estimated and nominal encounter angles

水槽実験の時系列、スペクトル、主波方向解析結果などを比較した結果、以下の結論を得た。

- (1) アレイ実験結果では、数値シミュレーションとほぼ同様の周期・波高・波向きに対する推定精度が得られた。但し、周期に関しては船速が速くなるにつれて、解析精度が若干落ちる傾向が見られる。
- (2) 模型船実験では、船体運動補正法・簡易主方向算定法によって絶対波浪高を推定し、アレイ実験と比較した。
 - (a) 波主方向については、方向分布の集中度が高いほど推定精度はよい。方向分布指数 n が ∞ (1 方向波) の場合 $\pm 15^\circ$ 以内、 $n=10$ の場合 $\pm 20^\circ$ 以内、 $n=4$ の場合にアレイ実験からのへだたり最大 30° 程度である。(2.3 の例外あり)
 - (b) 波高に関しては、大部分のケースで $\pm 10\%$ の範囲

に納まっている。

- (c) 波周期に関しては、ほぼ $\pm 15\%$ の範囲に入っているが、追波中で波のエネルギーが集中する船速において推定値のパラツキがそれより大きくなることが認められる。
- (d) 水槽実験においては航走距離がかぎられているので、高速時には計測データの長さが統計的解析をするのに十分でない。実船において計測時間が十分とれば、本解析法の精度も模型実験の場合より改善されると思われる。
- (e) クロススペクトルを計算する場合に、2重積分法（時間領域）による場合と、周波数領域の解析による場合の比較も行った。それによると、位相差の形状についてはアレイ実験と両者ともよく一致しており、位相差を利用した簡易主方向算定法からの波向き推定は一応精度のよい結果が得られている。波高については2重積分法のほうがアレイ実験に近い結果である。

以上より、船体運動補正法を用いた絶対波浪場の推定では、アレイ実験に比べ多少精度が劣るものの、実用上の精度としては十分であることが確認された。

5. 操船支援システムへの適用

数値シミュレーションと水槽実験にて実用性を確認した簡易波浪解析法を操船支援システムとして構築し、前述の実船実験においてテストした。波浪データを操船支援システムの上に表示する形式は下記の2種類である。

- (a) Type A：追波・斜め追波中の操船ガイダンス [12] に含まれている V/T-ダイヤグラムの表示形式。
- (b) Type B：船舶の操船に常用されている北を基準とする絶対方位による表示形式。

V/T Diagram (Wave co-ordinate)

Fig. 5.1 Present guidance system showing Case502 in Table3.2

Fig.5.1 は TypeA であり、図中には汐路丸による実船実験結果の中の Case502(Table3.2 参照)を示している。

この図は波の進行方向を上向きに取り、それを基準として船の進行方向を波に対する出会い角（追波を 0° とする）を取る。船の進行方向を示す放射線上に、船速と波周期との比 V/T (knot/sec) を同心円の半径で示す。波のデータと船速及び針路は数値としても表示される。図中には追波・斜め追波中の出会い群波の危険領域を赤色のゾーンで示してある。船の状態を表す点がこの領域に入っているか否かで危険回避の操船の必要性の有無を示している。

本システムを用いることにより、船長が波浪と自船の相対的な出会い関係を即座に定量的に把握することが可能となり、危険な波浪条件を回避する操船に役立てることがができる。また解析結果を波浪情報データベースとして蓄積することも可能となる。

6. 結 言

- (1) 船側に取りつけた相対水位計と加速度計あるいは船体動揺計の時系列を船上にてオンラインで解析して船をかこむ波浪の代表値を求めるシステムを構築し、実船実験によりその作動を確認した。
- (2) このシステムの中心である簡易波浪解析法の有効性を調べるため数値シミュレーションによる方向波スペクトルを用いた各解析理論の比較・検討を行った。そして波浪の代表値について、方向波スペクトルの各解析手法と同等の解析結果を得ることができ、且つ、解析に時間を要さない等、船上での有用性が確認された。（波方向については $\pm 25^\circ$ 以内、波周期では $\pm$ 約15%）
- (3) 数値シミュレーションで検証された簡易波浪解析法は、波浪計アレイ実験においてもその有用性が確認できた。模型船曳航実験では、船体運動を含む相対水位の計測値に船体運動の補正を行って、船側の絶対水位変動を求め、船体に乱されない絶対波浪場を計測したアレイ実験と比較した。船体運動補正の算法として時間領域における2重積分解析法、周波数領域解析法とも、実船上で実用に耐える精度の解析結果を得ることができ、その適用性が確認された。（波主方向についてはプラスマイナス 30° 以内、波周期については $\pm 15\%$ 以内、波高については $\pm 10\%$ 以内）
- (4) この船体運動補正法・簡易主方向算定法を操船支援システムの内部に組み込み、一連の船上システムとして構築した。システムは2重積分解析法を主体としたものと、周波数領域解析法を主体としたものの2つを選択できる。
- (5) 構築された操船支援システムの作動を実船実験にて確認した。操船支援システムの表示には2種類ある。
- (6) 今後の課題
 - a. 波周期の推定が追波・斜め追波の群波危険領域（波

のエネルギーが出会い波中に集中して現れる出会い周波数域)において精度がわるくなる。操船ガイダンスの信頼性を増すためにこれを改善する必要がある。

- b. データ処理して求められた出会い波の時系列やスペクトルには、出会い波の周波数帯から外れた、低周波数領域に大きな変動、即ちドリフトや長周期の変動が入ってくる。これは時間領域の処理においては、加速度の2重積分による数値的な誤差の積み重なりであり、周波数領域の処理においては、やはり加速度を変位のスペクトルに変換するときには生じる計算式上の問題である。
これを除くため時間領域処理においては数値フィルタを用い、周波数領域処理においては、低周波数のスペクトルをカットすることで対処した。カットする周波数は出会い波の周期、即ち波周期、出会い角、船速によって変化する。現在はデータを見て、経験的に選んでいるが、これを船上において自動的に行えるようにすることが望ましい。
- c. パラメータ法などの方向波スペクトル解析は、この研究においては船上のオンライン利用には至らなかった。実船のデータを収録したのちに、必要に応じてオフラインで解析して、その結果は波浪のデータベースとして後の利用に備えるという位置付けである。その理由は、データ取り込みから解析までのあいだに、なお人の判断を必要とする部分が残されているということである。前項のカット周波数の選択と同じく、方向波解析を自動化して組み込むことが望ましい。

謝 辞

本研究は運輸施設整備事業団による公募型研究:海洋環境調査と船舶の安全運航情報提供のための船載方式波浪計測システムに関する研究(船体運動補正法及び操船支援システムへの応用の研究)(99-02)として実施された[13][14]。

本研究を実施するにあたり、多くの方のご協力をいただいた。既存の方法による方向スペクトルの解析については、非線形計画法は広島大学国際協力研究科斎藤公男教授、前田克弥氏(当時同大学院)ベイズ法は東京商船大学井関俊夫助教授、MLM法は同じく東京商船大学南清和助教授、パラメータ法は(独立行政法人)海上技術安全研究所(前運輸施設整備事業団運輸技術研究員)宮崎剛氏(当時)にそれぞれ計算を行っていただいた。

水槽実験では水産庁水産工学研究所漁業生産工学部山越康行部長はじめ同部研究官の皆さんのご指導を受けて、同所海洋工学総合実験棟の耐航性水槽を使用させていただいた。実船実験では、東京商船大学練習船「汐路丸」の歴代の船長さんや乗組員の皆さんのご協力をいただいた。これらの方々の好意あるご援助に対し、ここに記して深甚の謝意を表すも

のである。

日本大学大学院学生河田真之君(当時)の修士論文[15]、海洋建築工科学学生滝本憲司君、竹ノ谷友美君達の卒業研究としてそれぞれ実験や解析を担当したことを附記し、その努力に感謝するものである。

参 考 文 献

- [1] 高石敬史ほか; 船載式波浪計の性能について、一実船及び模型船による実験結果一、船舶技術研究所報告, 13巻4号, (1976), pp.1-16
- [2] 高石敬史ほか; 同上、一空中超音波式と Tucker 式の比較一、同上20巻5号, (1983), pp.1-20
- [3] 井関俊夫, 大津皓平, 藤野正隆; 船体運動データを用いた方向波スペクトルの Bayes 推定, 日本造船学会論文集 172, (1992), pp.17-25
- [4] 井関俊夫, 大津皓平; 同上(第2報), 日本造船学会論文集 176, (1994), pp.99-105
- [5] 平山次清, 南 清和, 平松真紀子; 方向スペクトルのハイブリッド型船上計測法開発, 日本造船学会論文集 180, (1996), pp.295-309
- [6] 平山次清, 南 清和, 平松真紀子, 河内 功; 同上(その2), 一新開発方向波浪ブイによる検証一, 日本造船学会論文集 182, (1997), pp.217-229
- [7] 吉元博文, 渡辺 巖; 航走する船舶が遭遇する方向波スペクトルの推定法について, 日本造船学会論文集 176, (1994), pp.107-116
- [8] 斎藤公男, 前田克弥; 船体運動からの波浪情報の推定について、一波スペクトル推定における非線形計画法の応用一, 日本造船学会論文集 182, (1997), pp.231-237
- [9] 斎藤公男, 前田克弥; 同(第2報), 一波スペクトル推定における周波数変換の取扱一, 日本造船学会論文集 184, (1998), pp.163-169
- [10] 合田良実; 共分散法を用いた波向推定法の数値的検討, 港湾技術研究所報告, 20巻3号, (1981), pp.53-92
- [11] 高石敬史, 渡辺健二, 増田光一; 出会い群波現象の確率論的解析, 日本造船学会論文集 180, (1996), pp.283-294
- [12] MSC/IMO; Guidance for Masters to Avoid Dangerous Situations in Following and Quartering Seas, MSC Circular 707, (1995)
- [13] 渡辺巖, 石田茂資, 増田光一, 大津皓平, 宮崎剛; 船載方式波浪計測システムの研究開発について, 船舶技術研究所研究発表会第74回講演概要集, (2000)
- [14] Takaishi, Y. et al.; A Navigation Assistance System on Board Using Wave Data Obtained by Ship-borne Wave Sensors, PACON 2002, Makuhari, Chiba, Japan, (2002)
- [15] 河田真之; 船舶及び浮体式海洋構造物における多方向波計測に関する基礎的研究, 日本大学大学院理工学研究科平成12年度修士論文(2001)

付 録

A.1 波浪解析理論

A.1.1 周波数領域解析法

波浪計測点 i, j 点の2点間絶対水位クロススペクトルは、2点間絶対水位の相互相関関数を用いて次式によって求めることができる。

$$S_{w_i w_j}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega\tau} E[h_{w_i}(t) \cdot h_{w_j}(t+\tau)] d\tau = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega\tau} R_{ij}(\tau) d\tau \quad (A.1)$$

$$S_{w_i w_j}(\omega) = Co(\omega) - iQu(\omega) \quad (A.2)$$

ここに、 Co : コースペクトラム、 Qu : コードラチュアスペクトラム、 $i = \sqrt{-1}$ である。これらを用いると、2点間の出会い波の位相差は下式により求められる。

$$\varepsilon(\omega) = \tan^{-1} \frac{Qu(\omega)}{Co(\omega)} \quad (A.3)$$

相互相関関数は、相対水位 h_{ri} 及び船体上下変位 Z_i の時系列を用いて

$$\begin{aligned} R_{ij}(\tau) &= E[h_{w_i}(t) \cdot h_{w_j}(t+\tau)] \\ &= E[Z_i(t) - h_{ri}(t)] \cdot [Z_j(t+\tau) - h_{rj}(t+\tau)] \\ &= E[Z_i(t) \cdot Z_j(t+\tau)] + E[h_{ri}(t) \cdot h_{rj}(t+\tau)] \\ &\quad - E[Z_i(t) \cdot h_{rj}(t+\tau)] - E[h_{ri}(t) \cdot Z_j(t+\tau)] \end{aligned} \quad (A.4)$$

と表され、故にクロススペクトルは次式ようになる。

$$\begin{aligned} S_{w_i w_j}(\omega) &= S_{z_i z_j}(\omega) + S_{r_i r_j}(\omega) - S_{r_i z_j}(\omega) - S_{z_i r_j}(\omega) \\ &= S_{z_i z_j}(\omega)/\omega^4 + S_{r_i r_j}(\omega) + S_{r_i z_j}(\omega)/\omega^2 + S_{z_i r_j}(\omega)/\omega^2 \end{aligned} \quad (A.5)$$

ここに、船体上下加速度と変位のスペクトルの間には次式の関係がある。

$$S_{\ddot{z}}(\omega) = S_z(\omega)/\omega^4 \quad (A.6)$$

$$S_{\ddot{r}}(\omega) = -S_r(\omega)/\omega^2 \quad (A.7)$$

また、式 (A.2) に示すコースペクトルとコードラチュアスペクトラムは次式で表すことができる。

$$\begin{cases} Co_{w_i w_j}(\omega) = Co_{z_i z_j}(\omega)/\omega^4 + Co_{r_i r_j}(\omega) \\ \quad + Co_{r_i z_j}(\omega)/\omega^2 + Co_{z_i r_j}(\omega)/\omega^2 \\ Qu_{w_i w_j}(\omega) = Qu_{z_i z_j}(\omega)/\omega^4 + Qu_{r_i r_j}(\omega) \\ \quad + Qu_{r_i z_j}(\omega)/\omega^2 + Qu_{z_i r_j}(\omega)/\omega^2 \end{cases} \quad (A.8)$$

但し、 $S_{r_i r_j}$: 2点間相対水位クロススペクトル、 $S_{\ddot{z} \ddot{z}}$: 2点間船体加速度クロススペクトル、 $S_{\ddot{r} \ddot{z}}$: 2点間相対水位と船体加速度のクロススペクトルである。

A.1.2 簡易主方向算定法

3点の波浪計から規則波中での波向き χ_1 と周期 T を求める理論を以下に示す。

$$P_0 \text{ と } P_1 \text{ の位相差を } \varepsilon_{01} \text{ とすると} \quad (A.9)$$

$$\varepsilon_{01} = \eta k \cos \chi_1$$

$$P_0 \text{ と } P_2 \text{ の位相差を } \varepsilon_{02} \text{ とすると} \quad (A.10)$$

$$\varepsilon_{02} = r_2 k \cos \chi_2$$

Fig.A.1.1 Coordinate system

ここで、波数は

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (A.11)$$

であり、 ω : 円周波数、 r_1 : P_0, P_1 間の距離、 r_2 : P_0, P_2 間の距離、 β : $\angle P_1 P_0 P_2$ である。また、

$$\chi_2 = \beta + \chi_1 \quad (A.12)$$

より波向き χ_1 は次のように表せる。

$$\frac{\varepsilon_{01} r_2}{\varepsilon_{02} r_1} = \frac{\cos \chi_1}{\cos(\beta + \chi_1)} = \frac{\cos \chi_1}{\cos \beta \cos \chi_1 - \sin \beta \sin \chi_1} \quad (A.13)$$

または

$$\frac{\varepsilon_{02} r_1}{\varepsilon_{01} r_2} = \cos \beta - \sin \beta \cdot \tan \chi_1 \quad (A.14)$$

ゆえに、求める波向き χ_1 は以下になる。

$$\chi_1 = \tan^{-1} \left[\frac{\cos \beta - \varepsilon_{02} r_1 / \varepsilon_{01} r_2}{\sin \beta} \right] \quad (A.15)$$

また、波向き χ_1 の判別法は

$$\varepsilon_{01} < 0 \quad -90^\circ < \chi_1 < 90^\circ \quad (A.16)$$

$$\varepsilon_{01} > 0 \quad 90^\circ < \chi_1 < 270^\circ$$

$$\varepsilon_{01} = 0 \quad \chi_1 = 90^\circ \text{ or } 270^\circ \quad (\varepsilon_{02} \text{ の正負で判定})$$

である。

下式 (A.17) より波長 λ が求まり、さらに式 (A.19) より周期 T を求めることができる。波長 λ は

$$\lambda = \frac{2\pi r_1 \cos \chi_1}{\varepsilon_{01}} \quad (A.17)$$

または、

$$\lambda = \frac{2\pi r_2 \cos(\beta + \chi_1)}{\varepsilon_{02}} \quad (A.18)$$

である。また、周期 T は

$$T = \sqrt{2\pi\lambda/g} \quad (A.19)$$

により求まる。

上述した規則波中での理論を展開し、不規則波中での波向き χ_1 と周期 T を求める理論を以下に示す。

P_0, P_1 から得られた不規則波の時系列を

$$P_0 : \eta(t) \quad (A.20)$$

$$P_1 : \eta_j(t) \quad (A.21)$$

とすると、これら2つの時系列の相互相関関数 $R_{ij}(\tau)$ は、

$$R_{ij}(\tau) = E[\eta(t) \cdot \eta_j(t+\tau)] \quad (A.22)$$

であり、これをフーリエ変換してクロススペクトルを計算する。クロススペクトルは式 (A.2) のように表され、不規則波を構成する各周波数毎の成分波の P_0, P_1 間の位相差 $\varepsilon_{ij}(\omega)$

は式 (A.3) で求められる。

この成分波の位相差を式 (A.15), (A.17) に代入し波向き χ_1 及び周期 T を求める。尚, 計算に用いる位相差は計測3地点の出会い波波パワースペクトルを平均した値の, ピーク周波数に対応した値を用いる。

従って(A.19)式で求めた周期は波スペクトルのピーク周期 T_p であるから, 平均周期 T_{01} は P-M 型スペクトルにおける関係式(A.23)式を用いて換算する。

$$T_{01} = 0.73 T_p \quad (\text{A.23})$$

シミュレーションで得た方向波データについて上記の位相解析を行った結果, 波エネルギーのある周波数領域においては, 設定した波主方向の規則波に対する理論的な位相差とほぼ一致していることが分かった。従って, 本解析法を波主方向及び波周期を推定する簡易法としてシステムに採用することにした。

A.1.3 船上波浪解析システムにおけるデータ処理のフロー図

Fig. A.1.2 Flow of data process in onboard wave analysis

A.2.1 水槽実験結果の一例

Table A.2.1 An example of model experiment results

Left : Wave probe array

Right : Wave probes on the model ship

$V=0.000$

$n=\infty$

*括弧内は2重積分法による解析結果

Case No.	$H_{1/3}$ (cm)	T_{01} (sec)	λ (cm)	χ (deg)	χ_0 (deg)	Case No.	$H_{1/3}$ (cm)	T_{01} (sec)	λ (cm)	χ (deg)
029	6.57	1.56	6.37	1	0	113	7.51 (6.01)	1.41 (1.43)	5.25 (5.36)	2 (359)
026	6.61	1.55	6.61	30	30	109	8.13 (6.43)	1.29 (1.41)	4.33 (5.21)	54 (42)
015	7.40	1.54	6.23	90	90	163	8.05 (8.93)	1.34 (2.30)	4.71 (13.81)	91 (84)
025	6.52	1.54	6.23	150	150	103	7.77 (6.50)	1.20 (1.27)	3.80 (4.20)	130 (138)
023	6.51	1.54	6.23	180	180	102	7.37 (5.92)	1.37 (1.39)	4.94 (5.92)	178 (179)

$n=10$

Case No.	$H_{1/3}$ (cm)	T_{01} (sec)	λ (cm)	χ (deg)	χ_0 (deg)	Case No.	$H_{1/3}$ (cm)	T_{01} (sec)	λ (cm)	χ (deg)
032	6.09	1.54	6.24	12	0	112	7.50 (5.94)	1.42 (1.49)	5.30 (5.83)	27 (23)
					30	179	6.98 (5.35)	1.24 (1.31)	4.06 (4.48)	63 (45)
	7.30	1.57	6.43	102	90	107	8.59 (11.06)	1.02 (1.09)	2.73 (3.11)	100 (102)
					150	104	7.80 (6.56)	1.32 (1.38)	4.53 (4.96)	144 (151)
021	7.06	1.60	6.71	188	180	101	7.43 (5.85)	1.44 (1.40)	5.39 (5.13)	206 (201)

$n=4$

Case No.	$H_{1/3}$ (cm)	T_{01} (sec)	λ (cm)	χ (deg)	χ_0 (deg)	Case No.	$H_{1/3}$ (cm)	T_{01} (sec)	λ (cm)	χ (deg)
030	7.41	1.55	6.29	8	0	111	9.41 (7.44)	1.39 (1.48)	5.06 (5.76)	26 (24)
028	7.84	1.61	6.76	36	30	110	10.34 (8.58)	1.28 (1.41)	4.30 (5.20)	70 (64)
016	9.36	1.64	7.01	98	90	106	10.92 (13.37)	1.14 (1.15)	3.44 (3.45)	101 (102)
024	8.18	1.66	7.19	151	150	103	9.79 (8.37)	1.36 (1.40)	4.86 (5.09)	139 (149)
020	8.95	1.68	7.39	180	180	100	9.42 (7.42)	1.51 (1.45)	5.94 (5.50)	202 (199)