船体運動データからの方向波スペクトルの推定について

井関 俊夫*・大津 皓平*・藤野 正隆**

A Study on Estimation of Directional Spectra Based on Ship Motions

Toshio ISEKI, Kohei OHTSU and Masataka FUJINO

Abstract

In this paper, the authors carried out on board experiments to estimate directional wave spectra from only a set of simultaneous records of ship motions. The estimating calculation consists of three steps. The first step is a calculation of cross spectra of ship motions by a stochastic approach using a multi-dimensional auto regressive model. The second one is a theoretical calculation of frequency transfer functions of the ship by New Strip Method. And, the last one is an estimation of directional wave spectra by using so called Extended Maximum Likelihood Method.

The direction in which an estimated directional wave spectrum takes maximum value is compared with a wave direction measured by the observer. Successful agreement between measured and estimated wave directions were obtained, when the actual wave was regarded as a long-crested irregular wave. And the power spectra which were obtained by integration of the estimated directional wave spectra also agreed qualitatively with the measured ones with a ship-borne wave recorder.

1. 緒 言

荒天中を航行する船舶の運航者にとって、周囲の波浪の状態を正確に把握し、船体が受ける波浪荷重あるいは貨物に加わる加速度等を推測し、適切な操船によって本船および貨物の安全を確保することは非常に重要である。本船が危険な状態に陥ることが予測され、変針および減速等の操船を余儀なくされた場合、その操作量は同時に航海の経済性とも密接に関係するため、操船の判断において運航者には豊富な経験と自船の耐航性能に関する深い知識が要求される。一方、近年の耐航性研究の成果によれば、短期の波浪海面の方向波スペクトルが与えられれば、計算によってこれらの予測は可能であり、運航者に有益な情報を提供できるものと考えられる。ところが、通常船舶が遭遇している波浪の情報をリアルタイムで得ることは今のところ困難であることから、耐航性研究の成果は実際の船舶の運航に対して十分に生かされているとはいえない。

ところで、波浪中を動揺しながら航走する船体は一種の波浪計と見なすことができる。したがって、波浪と船体運動との間に線形の入出力関係が成り立つと仮定すれば、計測された船体運動のクロススペクトルと理論計算によって得られた船体運動の応答関数とを用いて、方向波スペクトルを逆算することが可能であると考えられる。方向性に関する情報を含まない一次元波スペクトルの逆算については種々の研究成果が報告されているが^{(1)~(6)}、実際の海洋波について船体運動データのみから方向波スペクトルを推定した例は少ないようである⁽⁷⁾。本研究では、運航中の船舶においても直接計測が容易な船体運動のデータのみを用いて、理論計算により方向波スペクトルを推定することを目的とする。そのため実船実験によって得られた船体運動の時系列データを多次元ARモデルを用いてクロススペクトル解析⁽⁸⁾し、拡張最尤法⁽⁹⁾に基づく手法により方向波スペクトルの推定を行うこととする。

* 正会員 東京商船大学(〒135 東京都江東区越中島2-1-6)

** 正会員 東京大学(〒113 東京都文京区本郷7-3-1)

本報告では、まず拡張最尤法による方向波スペクトルの推定法について述べ、つづいて多次元ARモデルによるクロススペクトル解析の方法について述べる。さらに、実船実験結果より実際に方向波スペクトルを推定した結果を示すとともに若干の考察を加える。

2. 方向波スペクトルの推定式

方向波スペクトルと船体運動間のクロススペクトルとの関係は、船体運動が線形応答であると仮定すると、一般に次式のように表される。

$$\phi_{mn}(f) = \int_{-\pi}^{\pi} H_m(f, \theta) H_n^*(f, \theta) E(f, \theta) d\theta \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで、 $E(f, \theta)$ は求める方向波スペクトルを表し、 $\phi_{mn}(f)$ は船体運動 m と n のクロススペクトルを表す。 $H_m(f, \theta)$ および $H_n^*(f, \theta)$ はストリップ法等から推定される既知の船体運動の応答関数を表し、*はその複素共役を表す。また、 m および n は縦揺れ、上下揺れ等の運動の種類を意味するものとし、 f は周波数、 θ は追い波状態を0とした船体と波との出会い角を表すものとする。

いま、 θ に関する積分範囲を K 個の微小区間に分け、 K を充分大きな数と仮定すると、微小積分範囲内での船体運動の応答関数および方向波スペクトルは一定と見なすことができ、(1)式は次のような形に書きかえられる。

$$\phi_{mn}(f) = \Delta\theta \sum_{k=1}^K H_{mk}(f) H_{nk}^*(f) E_k(f) \quad \cdots \cdots (2)$$

ただし、

$$E_k(f) = E(f, \theta_k)$$

$$H_{mk}(f) = H_m(f, \theta_k), \quad H_{nk}^*(f) = H_n^*(f, \theta_k)$$

$$\Delta\theta = 2\pi/K$$

さらに、 M 種類の船体運動に対するクロススペクトルは $M \times M$ の行列 $[\Phi]$ となるので、方向波スペクトルと船体運動スペクトルの関係式も次式のようなマトリックス表示となる。

$$[\Phi] = \Delta\theta [H] [E] [H^*]^T \quad \cdots \cdots (3)$$

ただし、 $[\]$ は行列を表し、 $[\]^T$ はその転置行列を表すものとする。また、それぞれの行列は次のように定義される。

$$[\Phi] = \begin{pmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \cdots & \phi_{1M} \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \cdots & \phi_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{M1} & \phi_{M2} & \cdots & \phi_{MM} \end{pmatrix} \quad [H] = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} & \cdots & H_{1K} \\ H_{21} & H_{22} & \cdots & H_{2K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{M1} & H_{M2} & \cdots & H_{MK} \end{pmatrix}$$

$$[E] = \begin{pmatrix} E_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & E_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & E_K \end{pmatrix}$$

(3)式右辺の応答関数 $[H]$ は $M \times K$ 行列であり、一般に正方行列とはならない。なぜならば、 K は充分大きな数であるのに対し、船体運動は6自由度であることから M はたかだか6であるからである。したがって、 $[H]$ の逆行列が計算できないために(3)式を方向波スペクトルについて解くことは不可能である。そこで本報告では、拡張最尤法を導入し方向波スペクトルの推定を行った。

拡張最尤法では、求める方向波スペクトルの推定値が船体運動のクロススペクトルと未知のパラメータベクトル (A_n) の線形結合で表されるものと仮定する。すなわち、

$$\hat{E}_n = \frac{1}{\Delta\theta} (A_n^*)^T [\Phi] (A_n) \quad \cdots \cdots (4)$$

なる関係式で表されると仮定する。ここで、 $(\)$ はベクトルを表し、 $\hat{E}_n$ は n 方向の方向波スペクトルの推定値を表すものとする ($n=1 \sim K$)。

(3)式を(4)式に代入すると,

$$\hat{E}_n = \sum_{m=1}^K W_{nm} E_m \quad \dots\dots(5)$$

となる。ただし,

$$W_{nm} = \sum_{i=1}^M A_{ni}^* H_{im} \cdot \sum_{j=1}^M A_{nj} H_{jm}^* \quad \dots\dots(6)$$

結局方向波スペクトルの推定値 $\hat{E}_n$ は, 方向波スペクトルの真の値に重み関数すなわちウィンドウ関数 W_{nm} をかけたものの総和で表されることになる。したがって最も精度の良い推定値は, W_{nm} が $n=m$ のときに1となり, その他のときに0となるような, いわゆるデルタ関数的なウィンドウ関数のときに得られるといえる。いま, $W_{nn}=1$ なる条件を課し, 推定値の誤差を

$$\varepsilon_n = \hat{E}_n - E_n \quad \dots\dots(7)$$

のように定義すれば, ラグランジュの未定乗数法を使って以下のように方向波スペクトルの最尤推定量を決定することが出来る。すなわち, ラグランジュ関数(尤度関数の符号を反転したもの)を

$$L_n = \varepsilon_n - \lambda(W_{nn} - 1) \quad \dots\dots(8)$$

とおき, この L_n を最小とするために未知のパラメータベクトル $(A_n^*)^T$ で微分して0とおけば,

$$-\frac{1}{\Delta\theta} [\Phi](A_n) = \lambda(H_n)(A_n)^T (H_n^*) \quad \dots\dots(9)$$

なる関係式が得られる。

ここで, この式の両辺に左から $(A_n^*)^T$ をかけると, (4), (6)式より

$$\hat{E}_n = \lambda W_{nn} = \lambda \quad \dots\dots(10)$$

となり, 求める最尤推定量 $\hat{E}_n$ は固有値 λ に等しいことがわかる。また, (9)式の両辺に左から応答関数と船体運動のクロススペクトルの逆行列をかけて, λ について解けば拡張最尤法による方向波スペクトルの推定式が次のように求められる。

$$\lambda = \hat{E}_n = \frac{1}{\Delta\theta (H_n^*)^T [\Phi]^{-1} (H_n)} \quad \dots\dots(11)$$

ここで, 船体運動のクロススペクトルが船上で計測されたものであるならば, 応答関数ならびに方向波スペクトルは出会い周波数の関数となることに注意する必要がある。

3. 多次元 AR モデルによるクロススペクトル解析

一般に, 計測される船体運動の時系列データには種々のノイズが含まれており, その度合いは計測する運動の種類によって異なる。前節の結果によれば, 方向波スペクトルを推定するためには船体運動のクロススペクトルの逆行列を求めておく必要があるが, 異なるノイズを含んだ複数の船体運動の時系列データからクロススペクトルを計算する場合には, ノイズを考慮した多次元の統計モデルを導入し, そのモデルをもとにスペクトルを推定した方が計算効率上有利であると考えられる。したがって, 本研究では多次元ARモデルを用いて船体運動のクロススペクトル解析を行った。

船体運動の離散的 M 次元時系列ベクトル $X(s)$ は, 多次元 AR モデルにより次のように表される。

$$X(s) = \sum_{j=1}^J A_J(j) \cdot X(s-j) + U(s) \quad \dots\dots(12)$$

ただし, $A_J(j)$ は J 次の自己回帰係数行列であり, $U(s)$ は M 次元の予測誤差ベクトルを表す。予測誤差ベクトル $U(s)$ の成分 $\varepsilon_i(s)$ は白色雑音であると仮定する。したがって, $\varepsilon_i(s)$ と $\varepsilon_j(s)$ の相互相関関数は

$$R_{\varepsilon_i \varepsilon_j}(l) = \begin{cases} \sigma_{ij}(l=0) \\ 0 \quad (l \neq 0) \end{cases} \quad \dots\dots(13)$$

となる。ここで、 l はラグを表し σ_{ij} は $\varepsilon_i(s)$ と $\varepsilon_j(s)$ の共分散を表す。したがって、予測誤差ベクトル $U(s)$ のスペクトルは次のような共分散行列 Σ となる。

$$\Sigma = T \cdot U(f) \cdot U^*(f)^T \quad \dots\dots(14)$$

ただし、 T は時系列データの長さを表し、 $U(f)$ は予測誤差ベクトル $U(s)$ のフーリエ変換を意味する。

一方、(12)式のフーリエ変換より

$$X(f) = [I - A(f)]^{-1} \cdot U(f) \quad \dots\dots(15)$$

なる関係が得られるので、離散的時系列 $X(s)$ のクロススペクトル $\Phi(f)$ は次のように求められる。

$$\Phi(f) = [I - A(f)]^{-1} \cdot \Sigma \cdot [I - A(f)]^*{}^{-1} \quad \dots\dots(16)$$

なお、モデル(12)の次数 J は M 次元 AR モデルの AIC 、すなわち

$$AIC(J) = N \log |\Sigma_J| + 2M^2(J+1) \quad \dots\dots(17)$$

が最小となるものを選びいわゆる MAICE 法⁽⁸⁾により決定する。ただし、 N は離散的時系列のデータ数を表し、 $|\Sigma_J|$ は予測誤差共分散行列の行列式を表す。

4. 計算結果および考察

ここでは実船実験によって得られたデータをもとに実際に方向波スペクトルを推定した結果を示す。なお、本報告では船体の縦運動のみを計算の対象としたので、船体運動データとして船首上下加速度およびピッチ角の実船実験データを採用した。また、縦運動は波との出会い角について左右対称であるので、この場合の方向波スペクトルは右舷および左舷の識別が不可能である。したがって、本報告における方向波スペクトルの推定結果は右舷側のみで示すものとする。

4.1 実船実験

実船実験は東京商船大学附属練習船汐路丸により千葉県館山沖の海域において行った。同船の主要目を表1に

表1 汐路丸主要目

船 型	全通船楼甲板船
垂線間長	46.00m
型 幅	10.00m
型深さ	3.80m
型喫水 (満載)	2.80m
排水量	717.52t
総トン数	425t

図1 実船実験要領

示す。本報告で用いたデータは平成2年3月15日および平成3年7月17日に行われた実験航海において収録されたものである。実験は同船の巡航速度である船速12ノットで四角形を描いて航走し、同時に複数の船体運動を計測することにより行われた。図1に同実験において航走したコースの模式図を示す。なお、図1には目視観測による波向きを矢印で示しており、各実験ケースの識別名をA1からA4、B1からB4で示している。

本実験での計測項目は針路、ピッチ角、ロール角、船首上下加速度、左右加速度、舵角および波高の7項目とした。汐路丸の計測システムにおいては、船体運動データは同船搭載の船体運動総合測定装置により測定され、ラインコントローラでA/D変換された後、バスラインを經由して研究室内のラインコンピュータに送られる。

したがって、簡単なコンピュータプログラムを作成することにより、容易に船体運動データをコンピュータのハードディスクに記録することが可能である。また、同船は船首部に波高計を搭載しているため、そのデータも船体運動データと同様に研究室内のコンピュータで記録することが可能である。したがって、本実験では波高データの記録も同時に行った。本実験において記録された時系列データの一例を図2に示す。なお、サンプリング周期は1.0秒であり離散の時系列のデータ数は各ケース約300点である。

図2 収録された時系列データの一例

る。目視観測による波との出会い角は実験A3においては $\theta=0^\circ\sim 50^\circ$ 、実験B4においては $\theta=-40^\circ\sim -50^\circ$ である。実験A3および実験B4の時系列データ数はそれぞれ300および276であり、MAICE法により決定された多次元ARモデルの次数はそれぞれ6および9であった。

これらの結果より多次元ARモデルを用いたクロススペクトル解析によれば、振動の少ない滑らかなスペクトルが得られることがわかる。また、得られたクロススペクトルの特徴として、チャンネル1と2のスペクトルに注目すれば、斜め向い波状態では虚数部が正、実数部が負の値をとるのに対し、斜め追い波状態では両方とも負の値をとることがわかる。さらに、斜め追い波状態におけるクロススペクトルの特徴として、出会い周波数の低い部分すなわち図3(c)においては0.07Hz、図3(d)においては0.08Hzに鋭いピークが現れていることがわかる。この傾向は図4に示す追い波中の絶対周波数 f_0 と出会い周波数 f_e との関係を表す曲線によって説明することができる。すなわち、船速を V 、出会い角を θ として、 $A \equiv 2\pi V \cos \theta / g$ なる量を定義すると、出会い周波数 $f_e = 1/4A$ において f_e と f_0 の関係を表す曲線の傾きは0となる。したがって、絶対周波数ベースのスペクトル $S(f_0)$ から出会い周波数ベースのスペクトル $S(f_e)$ への変換が $S(f_e) = S(f_0) |df_0/df_e|$ なる関係式によって行われることを考えると、出会い周波数 $f_e = 1/4A$ におけるスペクトル $S(f_e)$ は理論的に無限大となることがわかる。この無限大となる出会い周波数が図3(c)および図3(d)の鋭いピークに対応して現れているも

実験時の波浪の状態は両実験ともうねりが卓越しており、概ね長波頂不規則波と見なせる状態であった。同時記録された船載式波高計のデータを解析した結果によれば、実験Aでは平均波周期8.83秒、平均波高0.86mであり、実験Bでは平均波周期7.32秒、平均波高0.61mであった。

4.2 船体運動のクロススペクトル

3. で述べた方法により船体運動のクロススペクトルを計算した結果を図3(a)~(d)に示す。なお、図において太線はスペクトルの実数部を表し、細線は虚数部を表す。また本報告では、船体運動は縦運動のみを対象としているので、チャンネル1として船首上下加速度をとり、チャンネル2としてピッチ角をとった。したがって、クロススペクトルは図に示すように 2×2 マトリックスとなる。

図3(a)および図3(b)に示す結果は図1における実験A1および実験B2のクロススペクトルであり、ともに斜め向い波状態における結果である。目視観測による波との出会い角は実験A1においては $\theta = -115^\circ \sim -165^\circ$ 、実験B2においては $\theta = 130^\circ \sim 140^\circ$ である。実験A1および実験B2の時系列データ数はそれぞれ300および228であり、MAICE法により決定された多次元ARモデルの次数はそれぞれ8および6であった。また、図3(c)および図3(d)は実験A3および実験B4におけるクロススペクトルであり、斜め追い波状態における結果であ

図3(a) 実験A1の船体運動のクロススペクトル
出会い角 $\theta = -115^\circ \sim -165^\circ$ (目視観測)

図3(b) 実験B2の船体運動のクロススペクトル
出会い角 $\theta = 130^\circ \sim 140^\circ$ (目視観測)

図3(c) 実験A3の船体運動のクロススペクトル
出会い角 $\theta = 0^\circ \sim 50^\circ$ (目視観測)

図3(d) 実験B4の船体運動のクロススペクトル
出会い角 $\theta = -40^\circ \sim -50^\circ$ (目視観測)

のと考えられる。参考のために船速 V に本実験での船速を代入し、 $f_c = 0.07\text{Hz}$ および $f_c = 0.08\text{Hz}$ について出会い角 θ を逆算してみるとそれぞれ $\theta = 25.5^\circ$ および $\theta = 37.8^\circ$ となり、図3(c)の実験A3および図3(d)の実験B4における目視観測の結果と非常に良く一致することがわかる。

以上のことより、船体運動のクロススペクトルには波との出会い角によって明らかな差が見受けられ、波浪の状態が本実験時のように長波頂不規則波と見なせる範囲内では、クロススペクトルには波との出会い角に対応する特徴が現れることがわかる。

4.3 船体運動の応答関数

方向波スペクトルの推定に用いた船体運動の応答関数は、N. S. M. の理論計算によって求めた。応答関数の計算結果と模型実験との比較の一例を図5に示す。図は出会い角 $\theta=150^\circ$ 、フルード数 $F_n=0.291$ （実船の巡航速度に対応）の場合の結果である。図からわかるように理論計算の結果と模型実験の結果との一致は良好である。なお、3.で述べたように、船体運動のクロススペクトルが出会い周波数ベースである場合、推定に用いる応答関数も出会い周波数ベースである必要があるが、追い波状態においては一般に図4に示すように $f_e < 1/4A$ のときに三つの f_0 が対応する。そこで本報告では平山の方法⁽⁷⁾に従って、 f_0 が f_e に対して三価関数になる場合には f_0 の最小の解によって代表させることにした。

図4 絶対周波数と出会い周波数の関係

図5 船体運動の応答関数
出会い角 $\theta=150^\circ$ 、フルード数 $F_n=0.291$

DIRECTIONAL SPECTRUM
FROUDE NUM. = 0.290

図6(a) 実験A1の方向波スペクトルの推定結果
出会い角 $\theta=-115^\circ \sim -165^\circ$ (目視観測)

DIRECTIONAL SPECTRUM
FROUDE NUM. = 0.290

図6(b) 実験B2の方向波スペクトルの推定結果
出会い角 $\theta=130^\circ \sim 140^\circ$ (目視観測)

DIRECTIONAL SPECTRUM
FROUDE NUM. = 0.290

図6(c) 実験A3の方向波スペクトルの推定結果
出会い角 $\theta=0^\circ \sim 50^\circ$ (目視観測)

DIRECTIONAL SPECTRUM
FROUDE NUM. = 0.290

図6(d) 実験B4の方向波スペクトルの推定結果
出会い角 $\theta=-40^\circ \sim -50^\circ$ (目視観測)

4.4 方向波スペクトルの推定結果

図6(a)～(d)には本計算法によって推定された方向波スペクトルの結果の一部を示す。図に示される結果は図3(a)～(d)に対応しており、それぞれ実験A1、B2、A3および実験B4の結果をもとに推定したもので

ある。図は半径方向に出会い周波数を $0.01 \sim 0.4 \text{ Hz}$ まで示しており、船首方向を図面右手とし推定された方向波スペクトルを右舷側 180° に集めて表示している。また目視観測による出会い角を矢印によって示している。これらの結果より、本計算法による方向波スペクトルの示す波の主方向と、目視観測による波の主方向は良く一致しているといえる。ただし、波の主方向に対する議論は本来この図を絶対周波数ベースに変換してから行うべきであるが、船速を有する場合の追い波については理論的に変換が不可能であること、また本実験結果のように一方向のうねりが卓越しており波浪が長波頂不規則波と見なせる範囲内では波の主方向の判定も可能と考えられるため、出会い周波数ベースのまま比較を行った。

なお、本報告では以上の方向波スペクトルの推定計算において、船体運動の応答関数の値によって計算を行わない領域を設定した。すなわち、(11)式で与えられる拡張最尤法による推定式においては、応答関数の振幅（ゲイン）が絶対的に小さい部分では推定値が必然的に大きくなるため、本計算では応答関数の振幅が全体の最大値の $1/2$ に達しない部分での計算は省略した。ただし、この $1/2$ なる値は適当に設定した値であり、理論計算による応答関数と実船の応答関数との一致度がさらに良くなれば、この値もさらに小さくできるものと考えられる。

図7 一次元波スペクトルの比較

図7に、船載式波高計によって得られた一次元波スペクトルと図6の結果を出会い角について積分して得られた一次元波スペクトルとの比較を示す。図の横軸はすべて出会い周波数である。これらの図より、本計算法による推定結果のうちピークの周波数は船載式波高計によるものとわずかに異なっているものの、全般的にスペクトルの形状をとらえていることがわかる。なお、 $\theta = 130^\circ \sim 140^\circ$ の観測値における 0.06 Hz 付近のピークは推定結果には現れていないが、これは上述の方法によって推定計算が省略されているためである。また、本計算法によるスペクトルの絶対値は、船載式波高計によるものと大きく異なっているものもあり、推定値の定量的な評価を行うためにはさらに検討の必要があると思われる。

5. 結 言

本研究では、実船実験によって得られた船体運動のデータと理論計算によって得られた応答関数のみを用いて、実海面の方向波スペクトルを拡張最尤法により推定した。得られた結論をまとめると次のようになる。

- (1) 多次元ARモデルを用いた船体運動のクロススペクトル解析では、振動の少ない滑らかなスペクトルを得ることができる。
- (2) 波浪が長波頂不規則波と見なせる範囲内では、波浪と船体の出会い角によって、船体運動のクロススペクトルに明らかな差違が見受けられ、その傾向から出会い角に関する情報を得ることができる。
- (3) 波浪が長波頂不規則波と見なせる範囲内では、拡張最尤法により波の主方向の判別は可能である。
また今後の課題として、水槽実験等により本計算法の定量的な精度の検討を行うことが考えられる。

6. 謝 辞

東京商船大学附属練習船汐路丸による実船実験を行うに当たり、平成2年当時船長を務めておられました東京商船大学萩原秀樹助教授には実験に際していつも快く御協力頂きました。平成3年の実験航海におきましては、同練習船松村尚志船長はじめ乗組員の方々に大変お世話になりました。さらに、同実験航海におけるデータの収録には東京商船大学大学院生田崎哲夫君の協力を得ました。心から感謝の意を表します。また、方向波スペクトルに関して有益な御討論を頂きました東京商船大学桑島進教授ならびに岩坂直人助教授、研究開始当初貴重な御意見を頂きました運輸省航海訓練所乾真氏ならびに日本鋼管船舶海洋計画部山口賢二氏、本論文作成に当たりご協力くださいました織田美千子女士に厚く御礼申し上げます。最後に、本研究の成果の一部は、著者の一人が平成3年度文部省内地研究員として東京大学工学部船舶海洋工学科において得たものであることを付記し、関係各位に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) K. Takekuma & T. Takahashi: On the Evaluation of Sea Spectra Based on the Measured Ship Motions, 西部造船会会報, 第45号, pp. 51-57, 1973.
- (2) 浅野誠一, 西牧興, 黒井昌明, 高木又男, 竹沢誠二, 井上武彦, 中村一郎, 清水喜和: 1000³ LNG 実験船による波浪中航走実験, 一波浪に関する計測と解析一, 日本造船学会論文集, 第138号, pp. 222-232, 1975.
- (3) 田中久仁雄, 竹沢誠二, 片桐徳二, 小柴幸雄, 内藤力: プラントバージの耐航性能に関する実機計測, 日本造船学会論文集, 第145号, pp. 100-111, 1979.
- (4) 川島利兵衛, 松岡達郎, 松島寛治: 船体運動計測記録からの波予測の試み, 日本航海学会論文集, 第69号, pp. 59-66, 1983.
- (5) 平山次清, 萩野芳造, 松野達夫, 渡辺憲司: 航走中の船体運動による海洋波スペクトルのリアルタイム推定—実船実験一, 関西造船協会誌, 第198号, pp. 17-29, 1985.
- (6) 橋爪豊, 岡修二, 竹本博安: 荒天下における船体運動からの波浪推定と非線形応答解析, 西部造船会会報, 第77号, pp. 81-91, 1989.
- (7) 平山次清: 航走中の船体運動による海洋波スペクトルのリアルタイム推定(その2)一方向スペクトルの推定一, 関西造船協会誌, 第204号, pp. 21-27, 1987.
- (8) 大津皓平, 北川源四郎, 堀龍教夫: 保針運動の統計的同定と最適制御, 日本造船学会論文集, 第139号, pp. 31-43, 1976.
- (9) 磯部雅彦, 近藤浩右, 堀川清司: 方向スペクトルの推定におけるMLMの拡張, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 173-177, 1984.

質 疑 応 答

高石敬史(日本大学): 波スペクトラムの方向分布関数に対する関心が高まっている。船の出会い周波数ベースの方向スペクトルのみならず、停船時の実験も行い、波そのものの分布関数を求めるとともに、出会い周波数から換算した絶対周波数に対する波スペクトラムとも比較し、波の方向分布関数に対する考察も行っていたられば有り難い。

井関俊夫: 今後の実験で是非検討したいと思います。

斎藤勝彦(神戸商船大学)：船体運動の応答関数に波の方向分散性の影響があると思いますが，規則波（長波）による応答関数を使うことによる方向スペクトル予測への定量的な影響はあるのでしょうか。

井関俊夫：本推定法はすべて線形の仮定の上に成り立っていますので，入力としてどのような分散性を有する不規則波を仮定しても，その波は長波頂規則波の重ね合わせで表現できます。したがって，規則波に対する船体運動の応答関数を用いても理論上問題はありません。また，方向波スペクトルの推定値の定量的な検討は，本論でも述べましたように今後の課題と考えています。