船体運動からの波浪情報の推定について

——波スペクトル推定における非線形計画法の応用——

正員 斎藤 公男* 前田 克弥**

An Estimation of Ocean Wave Characteristics Based on Measured Ship Motions
——Application of Nonlinear Programming to the Evaluation of Wave Spectra——

by Kimio Saito, *Member* Katsuya Maeda

Summary

Needless to say, the accumulation of a reliable database of ocean wave characteristics is very important for safe ship design and navigation. Usually, such information has been collected from reports based on shipboard visual observations. On the other hand, a ship can be regarded as a type of wave recorder and, under the assumption of linear superposition, wave spectra can thus be estimated from measured ship motions¹⁾. Based on this idea, the evaluation of one-dimensional wave spectra^{2,3,4,5)}, as well as directional wave spectra^{6,7,8,9,10,11)}, has been extensively carried out in recent years. However, when a ship is traveling with an advance speed in following seas, there is a range of the encounter frequency ω_e of the ship for which ω_e cannot be related to the wave frequency by a single-value transformation. Practically, this difficulty has been addressed by using an approximate method where only one solution ω of the relationship is retained by partitioning the ω -axis. When one keeps the lowest-frequency ω solution, however, resulting spectra tend to be narrower and displaced towards low frequencies.

In this study, we propose to design a wave spectrum by using a nonlinear programming method, in which a standard wave spectrum, such as the ISSC, is selected, and a significant wave height and average wave period are used as design parameters. The capability of this approach has been confirmed by comparing its results, based on the full-scale measurements of the motions of a container ship, with those from the so-called SMB method¹²⁾.

1. 緒 言

船舶の安全設計や安全運航にとって波浪情報に関する正確な把握と精度の高いデータベースの構築は重要である。これら波浪情報の把握は、通常、目視観測により行われている。一方、船体を一種の波浪計とみなし、さらに波浪と船体運動との間に線形の入出力関係を仮定すると、実船計測並びに理論計算によって求められた船体運動から波スペクトルを推定することができ¹⁾、これより平均波周期や有

義波高などの波浪情報の把握が可能となる。このような考えのもとに、方向性を含まない一次元波スペクトルの推定^{2,3,4,5)}だけでなく、最近では方向性をも考慮した方向波スペクトルの推定に関する研究^{6,7,8,9,10,11)}も活発に行われている。

しかし、船体が前進速度を有する場合には、追波状態において出会い周波数と波周波数との対応が必ずしも一対一とはならない問題がある。これに対し、井関⁹⁾、吉元¹⁰⁾、平山^{8,11)}らはそれぞれその解決法を提案している。この中、平山⁸⁾の方法は、出会い周波数でのスペクトルを波周波数でのものに変換する際、その変換領域に制限を加えることにより、この問題に対処している。しかし、変換領域の制限のために波スペクトルの推定が一部分しか行われず、それより得られる平均波周期や有義波高などの波浪情報は不確かなものになる場合がある。

* 広島大学大学院国際協力研究科

** 広島大学大学院国際協力研究科博士課程

Fig. 1 Coordinate system

Fig. 2 Relationship between ω and ω_e for all headings

そこで、本報告では、波スペクトルをいわゆる ISSC 型と仮定し、平山⁸⁾の方法により求められた一部周波数領域の波スペクトルから、全周波数領域における波スペクトルを非線形計画法を用いて推定している。ここで、実船計測による船体運動としては、縦揺及び上下方向加速度（船体中央部）を用いている。得られた平均波周期及び有義波高は、従来の方法による推定結果や SMB 法（Sverdrup-Munk-Bretschneider Method）による波浪推算値¹²⁾と比較し考察している。

2. 周波数変換

実船計測値は出会い周波数 ω_e で計測されるために、これを波周波数（絶対周波数） ω に変換する必要がある。よく知られているように波周波数と出会い周波数の間には、(1)式の関係がある。

$$\left. \begin{aligned} \omega_e &= \omega - KV \cos \chi \\ \omega &= \frac{1 \pm \sqrt{1 - 4V\omega_e \cos \chi / g}}{2V \cos \chi / g} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、 K は波数（ $=\omega^2/g$ ）， V は船速（m/s）， χ は船と波との出会い角（正面向波状態を 180° ）である。

ところが、この対応関係は Fig. 3 に示す通り、追波状態で船体が前進速度を有する時、出会い周波数が $\omega_e < g/4V \cos \chi$ の領域では 1 つの ω_e に対し、3 つの異なった波周波

Fig. 3 Relationship between ω and ω_e for one direction in following sea Fig. 4 Convertible region in the (ω, ω_e) plane defined by hatched boundaries ($V=21$ kts.)

数 ω が対応する。すなわち、(1)式を解いて得られる正の 2 根と、 ω_e の符号を反転して解いて得られる 1 つの正根である。

平山⁸⁾はこの問題に対し、実用的方法として $\omega_e < g/4V \cos \chi$ の場合、 ω の最小解で代表させることを提案している。すなわち、追波状態での周波数の対応関係を Fig. 3 のように $0 < \omega \leq g/2V \cos \chi$ を領域 I、 $g/2V \cos \chi < \omega \leq g/V \cos \chi$ を領域 II、 $g/V \cos \chi < \omega$ を領域 III に分け、領域 I のみを考慮する方法である。ここでもその実用的方法を用いて Fig. 4 の変換領域（斜線部）について変換を行っている。

3. 波スペクトルの推定

波スペクトルの推定には、線形重ね合わせ法に基づく方法を用いている。すなわち、線形系の仮定の下に運動スペクトルから波スペクトルを推定する方法である。

3.1 線形重ね合わせ法

線形重ね合わせ法による推定は、いわゆる「波スペクトルの逆算」であり、線形系の仮定の下に、本来入力である波スペクトル $\tilde{S}(\omega)$ を、出力である船体運動スペクトル $S_x(\omega)$ から、(2)式により推定する。

$$\tilde{S}(\omega) = S_x(\omega)/c(n) \int_{-\pi/2}^{\pi/2} [A_x(\chi + \theta, \omega)^2] \times \cos^{2n} \theta d\theta \quad (2)$$

ただし、 A_x は船体運動の周波数応答関数であり、 $\cos^{2n} \theta$ は波の方向分布性を近似的に考慮に入れたものである。 $c(n)$ は正規化係数であり、ここでは $n=1$ としている¹⁾。また、運動スペクトル $S_x(\omega)$ は、対応するスペクトルのエネルギーが等しい条件、

$$S_x(\omega) d\omega = S_x(\omega_e) d\omega_e \quad (3)$$

すなわち、

$$S_x(\omega) = S_x(\omega_e) \frac{d\omega_e}{d\omega} \quad (4)$$

を用いて実船計測から得られる $S_x(\omega_e)$ から変換したものである。

(2) 式の $\tilde{S}(\omega)$ 、 $S_x(\omega)$ の微小部分をそれぞれ $\Delta \tilde{S}(\omega)$ 、 $\Delta S_x(\omega)$ とし、シンプソン則による積分を考慮すると、

$$\Delta \tilde{S}(\omega) = \Delta S_x(\omega) / \frac{1}{9} \{A\} \Delta \theta \quad (5)$$

となる。ただし、

$$A = [A_x(\omega, \theta - 60^\circ)^2] + 1.5[A_x(\omega, \theta - 30^\circ)^2] + 4.0[A_x(\omega, \theta - 0^\circ)^2] + 1.5[A_x(\omega, \theta + 30^\circ)^2] + [A_x(\omega, \theta + 60^\circ)^2]$$

である。

(2) 式で推定した波スペクトル $\tilde{S}(\omega)$ から、平均波周期 $T(\text{sec})$ 及び有義波高 $H_{1/3}(\text{m})$ が (7) 式により求められる。ただし、平均波周期は、ゼロクロッシング周期に対するものである。

$$T = 2\pi \sqrt{m_0/m_2} \quad (\text{sec}), \quad H_{1/3} = 4.0 \sqrt{m_0} \quad (\text{m}) \quad (7)$$

ここで、 m_n は $\tilde{S}(\omega)$ の原点周りの n 次モーメントで、次式で与えられる。

$$m_n = \int_0^\infty \omega^n \cdot \tilde{S}(\omega) d\omega \quad (8)$$

3.2 追波状態における波スペクトルの推定

追波状態では、2. で述べたように出合い周波数 ω_e と波周波数 ω の対応が 1 対 1 とはならないため、Fig. 4 に示すような変換領域を設けたが、この場合、出合い周波数でのスペクトル $S(\omega_e)$ を波周波数でのスペクトル $S(\omega)$ に変換する際、Fig. 5 に示すように一部分しか変換されない場合がある。従って、波周波数へ変換した後の運動スペクトルが極めて不自然な形状となり、推定される波スペクトルの全体像を把握することが難しくなる。また、波スペクトルから求められる波浪情報も不確かなものになると考えられる。

そこで、ここでは以下に示す非線形計画法を用いた波スペクトル推定法を検討している。すなわち、ISSC 型の波スペクトルを仮定し、平均波周期及び有義波高を設計変数として、線形重ね合わせ法による推定結果との差を目的関数にし、それを最小にするような設計変数を非線形計画法により推定する方法である。ただし、波向きは Logbook (航

Fig. 5 Example of the conversion of $S(\omega_e)$ to $S(\omega)$ in following sea

海日誌) に記載されているうねりの方向の目視観測値を用いている。

3.3 非線形計画法の応用

実船試験航路は日本～米国の往復航路である。今、波スペクトルを (9) 式の ISSC 型のスペクトルで表現できると仮定し、設計変数に平均波周期 $T(\text{sec})$ 、有義波高 $H_{1/3}(\text{m})$ を用いる。

$$S_{\text{ISSC}}(\omega) = \frac{0.11}{2\pi} \left(\frac{\omega T}{2\pi} \right)^{-5} \exp \left[-0.44 \left(\frac{\omega T}{2\pi} \right)^{-4} \right] \times H_{1/3}^2 \cdot T \quad (9)$$

また、目的関数 F を (10) 式で定義し、それを最小にする平均波周期 T (sec)、有義波高 $H_{1/3}(\text{m})$ を推定する。

$$F = \sum_{\omega=0}^{\infty} \{ \tilde{S}(\omega) - S_{\text{ISSC}}(\omega) \}^2 \quad (10)$$

ここで、 $\tilde{S}(\omega)$ は線形重ね合わせ法により推定した波スペクトルである。非線形計画法には拡張 Lagrange 乗数法を用い、制約条件は (11) 式とする。

$$0.0 < T < 17.0(\text{sec}), \quad 0.0 < H_{1/3} < 15.0(\text{m}) \quad (11)$$

4. 解析データ

4.1 実船試験

ここで使用した実船計測値は、(社)日本造船研究協会第 217 研究部会 (SR 217) のプロジェクト¹²⁾として行われた実船試験のうち、1994 年に実施された第 7 次航海の計測値で、航路は日本～米国の往復航路である。実船試験に用いられた供試船はコンテナ船でその主要目を Table 1 に、また船体形状及び各計測点を Fig. 6 に示す。上下方向加速度の計測値とそのスペクトル解析結果の一例を Fig. 7 に示す。

4.2 周波数応答関数

波スペクトルの推定に用いられる縦揺及び上下方向加速度 (船体中央部) の周波数応答関数を Fig. 8, 9 に示す。図より、縦揺に関しては、横波状態 ($\chi=90^\circ$) でほぼ 0 とな

Table 1 Principal dimensions

LOA	275.5 m
L_{PP}	261.0 m
B_{MLD}	32.2 m
D_{MLD}	21.2 m
d_{MLD}	11.2 m
Displacement	59,000 DWT

Fig. 6 Locations of measuring instruments for ship motions

Fig. 7 Example of measured time series and spectrum of vertical acceleration at midship

り指向性が強く、従って(2)式の分母が小さくなり、波スペクトルを過大に推定する場合がある。一方、上下方向加速度では、指向性があまり見られず、出会い角によらずに均一な波スペクトルを推定できると考えられる。それぞれの周波数応答関数はSR 217⁽¹⁰⁾の結果を用いている。

Fig. 8 Response amplitude operator of pitch

Fig. 9 Response amplitude operator of vertical acceleration at midship

5. 解析結果

Fig. 10 は上下方向加速度から推定した波スペクトルの一例である。図中、LSM (Acc. Z) は線形重ね合わせ法 (Linear Superposition Method) のみを用いて推定した波スペクトルであり、LSM (Acc. Z) + NLP は線形重ね合わせ法と非線形計画法 (NLP: Nonlinear Programming Method) を応用して推定したものである。追波状態 ($|\chi| \leq 45^\circ$) の場合、線形重ね合わせ法のみでは波スペクトルの推定が困難となっていることが分かる。これに対し、非線形計画法を用いることにより斜め追波中における波スペクトルの推定が可能となる。しかしながら、非線形計画法を用いた場合においても波スペクトルの推定が難しい場合がある。これは、Fig. 3 に示した領域 I において、線形重ね合わせ法のみを用いて推定した波スペクトルが全て 0 となる場合である。この場合は、領域 II, III も含める必要があるものとするが、これについては今後の課題としたい。

また、その波スペクトルから得られた平均波周期及び有義波高を Fig. 11, 12 に示す。Fig. 11 は縦揺から得られた結果であり、図中 LSM (Pitch) は線形重ね合わせ法のみを、

Fig. 10 Examples of estimated wave spectra from two different methods using vertical acceleration at midship

Fig. 11 Comparison of estimated average wave periods and significant wave heights from two different methods using pitch

Fig. 12 Comparison of estimated average wave periods and significant wave heights from two different methods using vertical acceleration at midship

Fig. 13 Comparison of estimated average wave periods and significant wave heights (LSM) with SMB

Fig. 14 Comparison of estimated average wave periods and significant wave heights (LSM+NLP) with SMB

LSM(Pitch)+NLPは線形重ね合わせ法と非線形計画法を用いて推定したものである。これら両者を比較すると、平均波周期及び有義波高ともに大きな差が見られるものは、目視観測値で波向きが追波状態の場合である。また、Fig. 12は上下方向加速度からの推定結果である。この場合においても、縦揺からの場合とほぼ同様の傾向を示しているが、それらの差は小さくなっている。

次に、SR 217で検討されたSMB法による波浪推算値(図中SMB)との比較をFig. 13, 14に示す。Fig. 13は線形重ね合わせ法のみを用いて推定した結果との比較であり、Fig. 14は線形重ね合わせ法と非線形計画法を用いて推定した結果との比較である。ここで、波浪推算値としての平均波周期と有義波高には(12), (13)式で求められる合成周期 T_c と合成波高 H_t を用いている。

$$T_c = \frac{T_{sea} \cdot T_{swell} \cdot (H_{sea}^2 + H_{swell}^2)}{T_{sea} \cdot H_{swell}^2 + T_{swell} \cdot H_{sea}^2} \quad (12)$$

$$H_t = \sqrt{H_{sea}^2 + H_{swell}^2} \quad (13)$$

ただし、 T_{sea} 及び H_{sea} は風浪の周期及び波高であり、 T_{swell} 及び H_{swell} はうねりの周期及び波高である。

Fig. 13, 14から線形重ね合わせ法のみを用いた場合は、波浪推算値との間にはかなりの差が見られる。一方、線形重ね合わせ法と非線形計画法を用いた場合には波浪推算値との差は線形重ね合わせ法のみによるものに比べ、小さくなっている。次に、非線形計画法を用いた場合の縦揺と上

下方向加速度から推定した結果を比較すると、平均波周期では波向きに関わらずほぼ一致しているが、有義波高は横波状態において、縦揺からの推定値が上下方向加速度からのものに比べ大きく、波浪推算値との間に差が見られる。これは、縦揺の周波数応答関数が小さいために線形重ね合わせ法において生じる誤差を反映したものと考えられる。

6. 結 言

本報告では、実船計測による船体運動と線形重ね合わせ法を用いる、いわゆる「波スペクトルの逆算」に対し、波スペクトルをISSC型と仮定し、そのパラメタを非線形計画法を応用して推定を行った。さらに、得られた波スペクトルから求められる平均波周期及び有義波高の推定値を波浪推算値と比較検討し、以下の結論を得た。

(1) 向波状態では、線形重ね合わせ法のみによる推定値は、ほぼ波浪推算値と一致している。また、横波状態では、上下方向加速度からの推定値はほぼ波浪推算値と一致しているが、縦揺からの推定値は有義波高において波浪推算値との間に差が見られる。そして、追波状態では、縦揺及び上下方向加速度から推定した平均波周期、有義波高ともに推定値と波浪推算値との間に差が見られ、さらに波スペクトルも一部分しか推定できない。

(2) 線形重ね合わせ法と非線形計画法を用いた推定法は、平均波周期、有義波高ともに推定値と波浪推算値との

間の差を改善することができた。

(3) しかしながら、非線形計画法を用いた場合でも追波状態では波浪推算値との間に差が見られ、また推定が難しい場合もある。今後、水槽試験などを行うことにより Fig. 3 に示す領域 II, III についての取り扱いを検討し、推定法の改善を行う必要があると考える。

(4) 今後は、本推定法と同様な考えのもとに方向波スペクトルの推定についても考察したい。

謝 辞

最後に、本報告で用いた実船計測データは、著者の一人が(社)日本造船研究協会第 217 研究部会ワーキンググループ 1 (平成 4 年～平成 7 年)に参加したときに入手したものであることを付記し、関連資料を提供下さった同主査の大阪大学船木俊彦教授並びに石川島播磨重工(株)、川崎重工(株)及び日立造船(株)の委員各位にお礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) Takekuma, K. and Takahashi, T.: On the Evaluation of Sea Spectra based on the Measured Ship Motions., 西部造船会々報, 第 45 号 (1972), pp. 51-57
- 2) 浅野誠一他: 1000 m³ LNG 実験船による波浪中走行実験 (第 1 報) — 波浪に関する計測と解析 —, 日本造船学会論文集, 第 138 号 (1975), pp. 222-232
- 3) 川島利兵衛他: 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 (1983), pp. 49-57
- 4) 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—実船試験—, 関西造船協会誌, 第 198 号 (1985), pp. 17-29
- 5) 橋爪 豊他: 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, 西部造船会々報, 第 77 号 (1988), pp. 81-91
- 6) 井関俊夫他: 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, 日本航海学会論文集, 第 86 号 (1992), pp. 179-188
- 7) 桑島 進: 航走出会い波浪による波浪方向スペクトルの推定, 日本航海学会論文集, 第 65 号 (1981), pp. 115-124
- 8) 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) — 方向スペクトルの推定 —, 関西造船協会誌, 第 204 号 (1987), pp. 21-27
- 9) 井関俊夫他: 船体運動データを用いた方向波スペクトルの Bayes 推定 (第 2 報), 日本造船学会論文集, 第 176 号 (1994), pp. 99-105
- 10) 吉元博文他: 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, 第 176 号 (1994), pp. 107-116
- 11) 平山次清他: 方向波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, 第 180 号 (1996), pp. 295-309
- 12) 日本造船研究協会第 217 研究部会: 実船計測による横部材の荷重・応力計算法の検証, 平成 7 年度報告書 (1996)