実船運航データに基づく遭遇波向きの推定について

井関 俊夫*・田尾 茂郎**・大津 皓平*

Directional Wave Analysis Based on Actual Voyage Data

Toshio ISEKI, Shigeo TAO and Kohei OHTSU

Abstract

Bayesian modelling procedure is applied to an inverse problem of how to estimate directional wave spectra from actual ship motion data. The data were recorded by the Voyage Data Recorder equipped on a real container carrier which was put on the North Pacific Line. As for the ordinary merchant ships, it is very difficult to know the actual parameters of rolling motion, such as natural periods, dumping coefficients and metacentric heights GM. And, it is almost impossible to get the hull form offset data which is required for the accurate calculation of the ship motion response functions. Therefore, it is the main purpose of this paper to clarify the availability of the Bayesian modelling procedure to the inverse problem under the unreliable conditions.

Compared with the wave direction measured by visual observations, it has shown that the estimated directional wave spectra have some peaks in the observed wave direction. This concludes that the Bayesian modelling procedure is a powerful tool for estimating the wave direction.

1. 緒 言

波浪は船体に動揺を引き起こす外力の一つであり、船舶の運航効率に大きな影響を与える要素の一つである。船舶が遭遇する波浪を正確に予測あるいは把握することは、船舶設計者のみならず操船者にとっても船舶運航上の安全性、経済性という観点から重要な課題であるといえる。

現在、実海面の波高については船載式波高計⁽¹⁾によって実用上十分な精度で計測することが可能であるが、その波浪の方向性を推定することは容易ではない。一般に波浪の方向性に関する情報を得るためには、波浪観測ブイや波高計アレイを用いて波高、波傾斜等の時系列を複数個同時計測する必要があるが、航行中の船舶、特に一般商船においてはこれらのデータを得ることは事実上困難であると言える。このような困難を克服するために、船体動揺データを用いて遭遇波浪の方向波スペクトラムを推定しようという試みがいくつか行われている。用いられている推定計算法は最尤法⁽²⁾、MEP⁽³⁾ならびにBayes型モデルを用いた方法⁽⁴⁾等であるが、実用段階にあるものは現在のところ存在しない。これらの中でBayes型モデルを用いた推定法は、実海面の方向波スペクトラムに対して考えられる種々の性質を事前分布としてモデルに取り入れることが可能であるため、十分な種類の同時計測データが得られない場合や信頼性の劣ったデータが混ざっている場合においてもある程度精度の良い推定結果が期待できる。

本研究ではBayes型モデルを用いた方向波スペクトラム推定法を採用し、その実用性を検証することを試みる。具体的には、実際に運航中のコンテナ船の船体運動データ⁽⁵⁾を用いて遭遇波浪の方向波スペクトラムを推定し、目視観測による結果と比較する。

* 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 運輸省航海訓練所 (〒231 横浜市中区北仲通5-57)

しかしながら、実際に運航中の商船を対象とした場合、本研究に限らず一般的に、

1) 実船の詳細な船型データが入手できない。

2) 運航中のトリム、GM、横揺れ減衰係数、横揺れ固有周期等のデータが不明である。

等のことと考えられるため、推定結果の精度に大きな影響を与える船体運動応答関数の計算が十分な精度を持って行うことができないことになる。したがって、このような不十分な推定条件に対して、Bayes型モデルを用いた方向波スペクトラム推定法がどの程度実用に耐えうるかを調べるのが本研究の最大の目的となる。

2. Bayes型モデルを用いた方向波スペクトラム推定法

本研究では実船上で計測された船載式波高計や船体運動のデータから実海面の方向波スペクトラムの推定を試みるわけであるが、方向波スペクトラムと船体運動との関係を模式的に表すと図1のようになる。この図からわかるように、本研究の

図1 船体運動と方向波スペクトラムの関係

課題は出力である船載式波高計や船体運動等のデータから入力である方向波スペクトラムを推定する、いわゆる逆問題を解くことであるといえる。このような問題においては、伝達関数である船体運動応答関数の推定精度が結果の精度を左右するので、できるだけ実際の運航状態に近い応答関数を求めておく必要があるが、一般商船においては正確なメタセンター高さや横揺れ減衰係数のみならず、応答関数を求めるのに必要な船型データさえ入手困難な場合が少なくないといえる。したがって、実際問題では精度の悪い船体運動応答関数からいかに正確な方向波スペクトラムを推定するかが重要な課題となる。

Bayes的推論法はあらかじめ適当と思われるモデルの性質を仮定することが可能であり、推定精度の安定性に有利な点を多く有するといえる。したがって、方向波スペクトラムの推定においても船体運動応答関数の誤差の影響を低く抑え、精度良く計算を行うことが期待できる。Bayes型モデルを用いた計算手順については参考文献(4)で詳しく述べているので、ここではその概略を述べるにとどめる。

船体運動が波浪入力に対して線形応答であると仮定すると、ある波との出会い周波数 f_e において方向波スペクトラム $E(f_e, \chi)$ と船体運動のクロススペクトラム $\phi_{mn}(f_e)$ との間の関係は、一般に次のような式で表される。

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

ここで、 m と n は縦揺れや横揺れなどの船体運動要素を表し、 $H_m(f_e, \chi)$ 、 $H_n^*(f_e, \chi)$ はそれぞれの運動要素の応答関数を表す。また、 χ は波との出会い角を表し、 $*$ は複素共役を表している。

この式を出会い角について適当に離散化すると次式のような線形回帰モデルに変換することができる。

$$\mathbf{B} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{W} \quad (2)$$

ただし、 $\mathbf{B}$ は船体運動のクロススペクトラムマトリックスの要素 ϕ_{mn} で構成されるベクトル、 $\mathbf{A}$ は船体運動の応答関数で構成される係数マトリックス、 $\mathbf{X}$ は出会い角で離散化された方向波スペクトラムから構成される未知ベクトルを表す。また、 $\mathbf{W}$ は問題を統計的に扱うために挿入されたホワイトノイズを表す。

このモデルの尤度関数は $\mathbf{W}$ が分散 σ^2 の正規分布に従うと仮定すれば、

$$L(\mathbf{X} | \sigma^2) = \left(\frac{1}{2\pi\sigma^2} \right)^{\frac{L}{2}} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma^2} \|\mathbf{A}\mathbf{X} - \mathbf{B}\|^2 \right] \quad (3)$$

で表される。ただし、 $\|\cdot\|$ はベクトルのノルムを表し、 L はベクトル $\mathbf{B}$ の要素数を表す。

赤池によって定式化されたBayes的推論法⁽⁶⁾に従えば、方向波スペクトラムの最良の推定値を得るためにはこのモデルの尤度関数 $L(\mathbf{X} | \sigma^2)$ と適当に仮定された事前分布 $P(\mathbf{X})$ との積を最大化するベクトル $\mathbf{X}$ を求めれば良いことになる。

事前分布としては種々のものが考えられるが、本研究では方向波スペクトラムの推定量が波との出会い角と波周波数とに対して滑らかに変化すると規定する事前分布と方向波スペクトラムが過大に推定される

傾向⁽⁷⁾を抑制するための事前分布を考慮した。したがって、一般的に次の形をとる尤度関数と事前分布との積を最大化すれば良いことになる。

$$L(\mathbf{X} | \sigma^2) P(\mathbf{X}) = \left(\frac{1}{2\pi\sigma^2} \right)^{\frac{L}{2}} \left(\frac{u^2}{2\pi\sigma^2} \right)^{\frac{M}{2}} \times \exp \left[-\frac{1}{2\sigma^2} \{ \|\mathbf{AX} - \mathbf{B}\|^2 + u^2 \|\mathbf{DX}\|^2 \} \right] \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{D}$ は事前分布を表すマトリックスであり、 M は事前分布を構成する式の数を表す。

(4)式の中の u^2 はハイパーパラメータと呼ばれるものであり、モデルの適合度と事前分布で与えられた性質のバランスを決める重み係数の役割を果たす。なお、 u^2 はABIC (赤池のベイズ型情報量規準)

$$ABIC = -2 \log \int L(\mathbf{X} | \sigma^2) P(\mathbf{X}) d\mathbf{X} \quad (5)$$

の最小化によって客観的に決定することができる。

3. 結果および考察

3.1 実船実験データの概要

本研究で用いた船体運動データは北太平洋就航の定期コンテナ船 (41,442総トン) を供試船 (表1 参照) としてボエジレコーダによって記録されたものである。ボエジレコーダは桑島ら⁽⁵⁾によって開発された、船体運動ならびに海洋環境自動記録装置の名称であり、航空機のフライトレコーダと同等の役割を果たす航海自動記録装置である。この装置によって計測されるデータの種類の表2に示されるとおりである。計測は航海中の毎正時 (JST) から10分間、0.5秒のサンプリング周期で自動的に行われ、データはコンピュータのハードディスクに蓄積されるようになっている。解析に用いたデータは1993年および1994年の冬季の航海データの中から選ばれたものであり、図2にはその計測された時系列の一例を示している。なお、これらの時系列データの中で実際の波向き推定に用いたものは船首波高、船体縦揺れおよび横揺れの3種類である。

3.2 船型データの推定

2.で述べたように、出力である船載式波高計や船体運動等のデータから入力である方向波スペクトラムを推定する逆問題においては、伝達関数である船体運動の応答関数を精度良く推定する必要がある。しかしながら、推定計算に必要な船型データは一般的に入手が困難であるため、本研究では適当な類似船のオフセットデータをもとに供試船の船型データを作成した。具体的には、類似船の主要目が供試船の主要目に一致するように長さ、幅、深さ方向の寸法比をすべてのオフセットデータに乘じ、さらに排水量が一致するように船体中央平行部を増減させた。船体運動の応答関数の計算はN.S.M.を用いて行っており、2次元流体力の計算はclose-fit法によって行った。図3に2次元流体力計算に用いた離散化された船型を示す。なお、運航中の横揺れ減衰係数については全く資料がないため、類似船のものをそのまま使用している。

3.3 方向波スペクトラムの推定結果

図4に推定された方向波スペクトラムの一例を示す。図は方向波スペクトラムを等高線で表したものであり、半径方向が周波数、図面上側が船首

表1 供試船の主要目

Registered Tonnage	Gross	41,442 Tons
	Net	15,149 Tons
Length P.P.		230.00 m
Breadth		32.22 m
Depth		21.00 m
Draught	Summer	11.517 m
	Winter	11.277 m
Deadweight	Summer	39,157 Tons
	Winter	37,687 Tons

表2 ボエジレコーダの計測項目

出合い実波高	±10m
船首上下加速度	±2.5G
ロール角	±50deg
ピッチ角	±50deg
ヒープ加速度	±1.0G
サージ加速度	±1.0G
風速	最大 60m/s
風向	0~360deg

図2 ボエジレコーダによって計測された時系列の一例

方向を表している。また、図中の矢印は目視観測による波向きを示している。図を見ると、目視観測による波向きとほぼ同じ方向に方向スペクトラムのピークが存在しており、本計算法が有効であることがわかる。本報告ではこの図に示されるような推定計算を航海中に連続して収録されたデータに対して行い、求められた方向波スペクトラムの最も高いピークの存在する方向を波の主方向とみなした。

図5に北太平洋航海中の1994年3月10日から3月18日の9日間について、4時間おきに方向波スペクトラムを推定した結果を示す。図中には目視観測による波向きと、推定された波の主方向が矢印で示されている。図を見ると、目視観測と左右反対に波向きが推定されている点はいくつかあるが、この傾向は図4の結果においても見受けられる。この推定の誤りの原因については次のように容易に推測することができる。すなわち、推定計算において左右舷の区別に関する情報を与えているものは横運動である横揺れのデータのみであるから、左右舷の推定誤りはそれに対応する横揺れの応答関数に原因があるということである。実際の推定計算に用いている船体運動の応答関数は、前述のように類似船型から適当に作られた船型データと横揺れ減衰係数等から求められているだけでなく、9日間の平均速力について計算されているので、非線形性の強い横揺れに関してはかなり推定精度が低いと言わざるを得ない。

ここで仮に左右舷の区別を目視観測結果に従って行うことにすると、図5の結果は図6のように変化する。

図3 2次元流体力計算のための船体表面分割の様子

図4 方向波スペクトラムの推定例

図5 実船運航データを用いた波向き推定例

図6 目視観測結果を用いて修正された波向き推定結果

る。当然ではあるが、推定された波の主方向は目視観測結果と非常に良く一致することがわかる。

表3に図5と図6に示された波向きの推定精度の比較を示す。表では推定された波の主方向と目視観測による波向きの開きを推定誤差として20度毎に区切り、図5の左右舷の判別をした場合を誤差評価1、図6の左右舷の判別を目視観測にしたがった場合を誤差評価2として百分率で表している。ただし、サンプル数は45個である。この表によると誤差評価1では平均して40度から60度の推定誤差があるのに対し、誤差評価2では全体の70パーセント近くが誤差40度以内におさまっていることがわかる。したがって、横揺れ応答関数の推定精度を向上させれば実用上十分な精度で波向きが推定できるといえる。

表3 波向きの推定精度

推定誤差 (deg)	誤差評価1	誤差評価2
0~20	13.3%	31.1%
20~40	24.4%	37.8%
40~60	28.9%	24.4%
60~80	6.7%	0.0%
80~	26.7%	6.7%

4. 結 言

本報告では、詳細な船型データと横揺れ減衰係数等のパラメータが不明な実船運航データに対して、Bayes 型モデルを用いた方向波スペクトラム推定法がどの程度実用に耐え得るかを調べた。得られた結果をまとめると次のようになる。

1. 左右舷の区別を目視観測に従えば約70%の割合で、40度以内の精度で波向きを推定できる。
2. 波向きの左右舷の判別精度が悪い理由は、横揺れ減衰係数等のパラメータが不明であるため、横揺れの応答関数の推定精度が低くなったためである。

一般に横揺れ減衰係数等のパラメータについては有効な簡易推定法が存在しないので、今後の課題として、横揺れの時系列データから直接動揺パラメータを推定する方法⁽⁸⁾をアルゴリズムに組み入れていく必要があると思われる。

5. 謝 辞

本研究の遂行に際して、東京商船大学桑島進教授ならびに岩坂直人助教授から快く実船運航データを提供して頂きました。心から感謝の意を表します。また、本論文の作成に当たりご協力下さいました織田美千子さんに厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 安田明生, 他: マイクロ波を用いた船用簡易波高計の開発, 日本航海学会論文集, 第66号, pp.31-38, 1982.
- (2) 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, pp.295-309, 1996.
- (3) 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, pp.107-116, 1994.
- (4) 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, pp.95-105, 1994.
- (5) 桑島 進, 他: ボエジレコーダ (航海自動記録装置) の開発研究, 日本航海学会論文集, 第94号, pp.219-230, 1995.
- (6) Akaike, H.: Likelihood and Bayes procedure, Bayesian Statistics (Bernardo, J.M., De Groot, M.H., Lindley, D.U. and Smith, A.F.M. eds.) University Press, Valencia, pp.143-166, 1980.
- (7) 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, 日本造船学会論文集, 第172号, pp.17-25, 1992.
- (8) 大津皓平, 他: 実船データによる動揺パラメータの統計的推定 - 連続型自己回帰モデルの応用 -, 日本造船学会論文集, 第165号, pp.181-191, 1989.

質 疑 応 答

斎藤勝彦 (神戸商船大学): rollの応答関数推定精度の問題で、方向の推定精度が悪くなっているようですが、あえてrollのデータを使わずpitchのみのデータで推定するとどうなるのでしょうか。

井関俊夫: 左右舷の判別を行う横運動データがなくなるわけですから左右のどちらから波が来ているのかわからなくなります。しかし、左右舷の区別を行わないで良いのなら波向きの推定は可能です。横揺れデータの有無が波向き推定精度に及ぼす影響は、横揺れ応答関数の推定精度によりますので、精度の相当低い横揺れ応答関数ならば、横揺れデータを用いない方が有利になる場合もあると思われます。

久保雅義 (神戸商船大学): 太平洋ではうねりと風波があると思います。そのような場での波向き予測はどのようにすればよいのでしょうか。結果はうねりと風波のどちらをとらえるのでしょうか。それとも両者の平均をとらえるのでしょうか。

井関俊夫: 船体は非常に精度の悪い波浪計ですから、波向きの推定計算では船体が良く揺れる波をとらえると思われます。したがって、一般的にはうねりを良くとらえると思います。