船体縦曲げ応力の Bayes 推定

寺田 大介*・井関 俊夫**

Bayesian Estimation of the Longitudinal Bending Stress on the Ship Hull

Daisuke TERADA and Toshio ISEKI

Abstract

Bayesian modeling procedure is applied to an inverse problem of how to estimate directional wave spectrum from actual ship motion data. According to this procedure, it is shown that the directional wave spectrum can be estimated from the vector-valued time series recorded on a running ship even in following seas. This paper presents the methods to evaluate the longitudinal bending stress based on the estimated directional wave spectrum. The spectra of the longitudinal bending stress can be evaluated based on the estimated directional wave spectrum and theoretically calculated frequency response functions by New Strip Method. Furthermore, the significant value of pitching, rolling angle and longitudinal bending stress, which change easily by the change of ship speed or course, can be predicted based on the previously estimated directional wave spectrum. In order to examine the reliability of proposed procedure, the onboard tests were carried out. Comparisons between the results of the proposed method and the experiments show good agreements.

1. 緒 言

実際の船舶運航において、そのときの気象・海象条件を考慮した操船は耐航性および経済性の観点から非常に重要である。特に、荒天中を航行する場合には、その厳しい運航条件から船体および積載貨物の安全を確保するために減速および変針操船を余儀なくされることがある。このような判断は運航者の経験に基づいて決定されるわけであるが、どの程度の操作量を与えれば安全に船舶を運航できるのかという目安を数値的に与えることができれば、非常に有益な操船支援システムを構築できると考えられる。このような観点からさまざまな研究機関によって船舶の安全運航を支援するシステムの開発がすすめられているが、現在のところ広く実用の域に達しているものは無いようである⁽¹⁾。

このような操船支援システムは変針、増減速後の船体動揺、波浪荷重および積載貨物に加わる加速度

を推定・表示する機能を必要とすると考えられるが、これは近年の船舶耐航性研究の成果を用いれば実現可能である。線形理論における船舶耐航性研究では、海洋波中の船体応答のような不規則現象は線形重ね合わせの原理を応用することによって数学的に表すことができる。すなわち、船体動揺、波浪荷重、積載貨物の加速度等の応答関数がストリップ法等を用いて理論的に求められるので、これらと与えられた海象条件を表す適切な方向波スペクトラムとを用いることによりこれらの船体応答スペクトラムが得られ、その分散値を用いて超過確率等の予測を行うことが可能である⁽²⁾。この手法の最大の利点は、実海域の方向波スペクトラムを何らかの方法で推定できれば、各種船体応答を直接計測する必要が一切ないことであり、安全運航支援システムの簡素化において非常に有効であると考えられる。

ところで、実海域の方向波スペクトラムを推定する方法の中で、船体波浪計化法は近年注目を浴びて

* 学生会員 東京商船大学大学院 (〒135-8533 東京都江東区越中島2-1-6)

** 正 会 員 東京商船大学 (〒135-8533 東京都江東区越中島2-1-6)

いる手法の一つであり、船体動揺から方向波スペクトラムを逆推定する実用的な方法である。このコンセプトに基づく手法としては、これまでに最尤法⁽³⁾、MEP法⁽⁴⁾、非線形計画法⁽⁵⁾およびBayes法⁽⁶⁾などが開発されているが、このなかで著者らの一人が提案したBayes法は、実海面に対して想定し得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、少ない計測データから比較的良好な精度の結果が得られることが確認されている⁽⁷⁾。

本研究では、安全運航支援システムの開発を目的とし、Bayes法によって方向波スペクトラムを船体動揺から逆推定し、船体縦曲げ応力等の波浪荷重やその他の船体応答を直接計測することなしに推定および予測することを試みる。具体的な内容は以下に示すとおりである。

(1) 船首波高、ピッチ角およびロール角の時系列データからBayes法を用いて方向波スペクトラムを推定し、N. S. M. によって求められた応答関数から船体縦曲げ応力を推定し、歪みゲージによって直接計測した応力値と比較する。

(2) 遭遇している波浪が定常であるという仮定のもとで、推定した方向波スペクトラムから変針・増減速後における船体動揺、船体縦曲げ応力を予測し、実際の変針・増減速後の計測値と比較する。

これらの比較検討の結果から、精度良く方向波スペクトラムが推定できれば、船体縦曲げ応力の推定・予測および船体動揺の予測は可能であることが確認できたので報告するとともに、若干の問題点についても述べる。

2. Bayes法による方向波スペクトラムの推定

Bayes法によれば航行中の船舶の動揺データから精度よく方向波スペクトラムを推定できることが明らかにされておりその計算手順も詳しく述べられている⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾ので、ここではその概略について述べる。

船体動揺が波浪入力に対して線形応答であると仮定すると、ある波の出会い周波数 f_e における方向波スペクトラム $E(f_e, \chi)$ と船体動揺のクロススペクトラム $\phi_{mn}(f_e)$ との関係は、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動揺要素を表し、 $H_m(f_e, \chi)$ 、 $H_n^*(f_e, \chi)$ 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

を表している。

この関係式において方向波スペクトラムを絶対周波数 f_e ベースに置き換えて、出会い角で離散化すると次式のような線形回帰モデルで表すことができる。

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

ここで、 $\mathbf{B}$ は船体動揺クロススペクトラム ϕ_{mn} の要素で構成されるベクトル、 $\mathbf{A}$ は船体動揺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それぞれ表す。また、 $\mathbf{W}$ は問題を統計的に取り扱うために導入されたホワイトノイズを表す。

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

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

のように表される。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。

赤池により定式化されたBayes的推論法に従えば、方向波スペクトラムの最良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 $\mathbf{X}$ を求めればよい。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物理的性質を考慮して、方向波スペクトラムの推定量は波との出会い角および波周波数に対して滑らかに変化するという分布と船体動揺の応答関数が小さい部分においては方向波スペクトルの推定量も小さいという分布を採用した。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よいことになる。

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

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)式の中に含まれる 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。これは次の式で示される $ABIC$ (赤池のベイズ型情報量規準)の最小化により客観的に決定することができる。

$$ABIC = -2 \log \int L(X|\sigma^2) P(X) dX \quad (5)$$

以上の計算過程において、船体動揺の応答関数は Close Fit法を用いたN.S.M.で計算しており、推定精度向上のために参考文献(8)と同様に推定した方向波スペクトラムの可逆性を保証するための条件式を付加し、計測された船体動揺のクロススペクトラムをその分散値で無次元化して推定誤差を正規化している。

3. 船体縦曲げ応力の推定

2.で求めた方向波スペクトラムを用いて、船体の任意の位置に加わる縦曲げ応力を理論的に推定することが可能である。すなわち、実船上で計測された船体動揺のクロススペクトラムと理論的に推定された船体動揺の応答関数を用いて遭遇している実海面の方向波スペクトラムを逆推定し、その結果を入力と考え、再度線形の入出力の仮定により船体縦曲げ応力を推定する方法が考えられる。この過程を模式的に示すと図1のようになる。

図1 船体縦曲げ応力の推定

ここで、与えられた方向波スペクトラムから船体の任意の位置における縦曲げ応力を求める手順は以下のとおりである。

(1) 船体縦曲げモーメントの応答関数の推定

船体動揺の応答関数を求める方法とはほぼ同じ計算によって船体縦曲げモーメントの応答関数を計算することができる。具体的には、本報告では2.で述べた船体動揺の応答関数の計算と同様に、Close Fit法を用いたN.S.M.に基づいて、上下揺、縦揺から船体縦曲げモーメント、せん断力の応答関数を計算している⁽²⁾。

(2) 応力を求めたい位置における断面係数の計算

船体中央横断面中の縦強度部材をすべて抽出し、船体の縦曲げに関する中立軸とその軸まわりの断面2次モーメントを各部材ごとに計算し、その結果を合計して断面全体の断面2次モーメント I を求める。さらに、縦曲げ応力を求めたい場所の中立軸からの距離 y を計測し、次式により断面係数を計算す

る。

$$z = I/y \quad (6)$$

(3) 船体縦曲げ応力の推定

船体の任意位置における縦曲げ応力 σ_L は梁理論に基づき、(1)で求めた船体縦曲げモーメント M と(2)で求めた断面係数 z を用いて次式で求めることができる。

$$\sigma_L = M/z \quad (7)$$

4. 実船計測データとの比較検討

本研究で使用した船体動揺データは、東京商船大学付属練習船汐路丸（主要目を表1に示す）の実験航海時に収録されたものであり、平成2年から平成5年の間に計測された42の時系列データである。各時系列データは、サンプリング周期0.5秒で収録されており、データ点数は600から720である。

図2に解析に用いた時系列データの一例を示す。この図に示した時系列は、上から順に、船体動揺総合計測装置によって計測されたピッチ角およびロー

表1 船体主要目

Length (P.P.)	46.00m
Breadth (M _{LD})	10.00m
Depth (M _{LD})	6.10m
Draught (M _{LD})	3.00m
Displacement	785.0t
Section modulus	0.632m ³

図2 使用した時系列データ

ル角、マイクロ波式波高計によって計測された船首絶対波高、全通船楼甲板の中央部付近に貼付された歪ゲージによって計測された船体歪を表している。なお、このデータの収録時には、190度の方位から波高約0.4 (m)、出会い周期約6秒のうねりが目視観測されており、汐路丸は斜め追い波状態で直進していたと記録されている。

4.1 方向波スペクトラムの推定結果

方向波スペクトラムの推定はピッチ角、ロール角および船首絶対波高のデータを使用して行った。

図3には、図2のデータに対して、多次元ARモデルによるクロススペクトラム解析を行った結果を示している。一般に、出会い周波数ベースのスペクトラムにおいては、向かい波状態では高周波数側に裾野が広く伸びた形状となり、追い波状態では低周波数側に圧縮されたようなスペクトラムの形となる。

図3 船体動揺のクロススペクトラム

図2のデータが斜め追い波状態において収録されたことを考慮すると、図3のクロススペクトラム解析結果は、この傾向をよく示していると思われる。

図4に、図3で示したクロススペクトラムから推定した方向波スペクトラムを示す。この図は、方向波スペクトラムを等高線で表したものであり、半径方向に絶対周波数、円周方向に方位角を表している。この図から、目視観測による波向きとほぼ同じ方向に方向波スペクトラムのピークが存在することがわかる。

図5は、すべてのデータの目視観測による波向きとBayes法により推定した波向きとの相関を表している。なお、ここでの推定された波向きとは、推定された方向波スペクトラムを周波数について積分し、得られた方向分布の最大のピークが存在する方

図4 逆推定した方向波スペクトラム

図5 波向きの推定値と観測値の比較

向(図中におけるWave Dir.1)および二番目に大きいピークが存在する方向(図中におけるWave Dir.2)を指している。図の横軸は観測値であり、縦軸は推定値である。ただし、絶対波向きによる推定値は実験海域の性質から一方向に偏ることになるので、この図では正面向い波状態を0度とする相対波向きで示している。この図から、Bayes法による方向波スペクトラムの推定値は観測値と大体一致していることがわかる。解析に用いたデータの動揺振幅が必ずしも大きくはなく、したがって船体を波浪計とみなすには十分な実験条件ではなかったことを考慮すると、波向きを概略推定する場合にはBayes法は非常に有効であることがわかる。

4.2 船体縦曲げ応力のパワースペクトラム

図6 縦曲げ応力のパワースペクトラムの比較

3. で述べたように、方向波スペクトラムと船体縦曲げ応力の間に線形の入出力関係を仮定すると、4.1 で示した方向波スペクトラムの推定結果と理論的に計算された応答関数を用いて、船体縦曲げ応力のスペクトラムを推定することが可能である。図6はその一例であり、汐路丸が斜め追い波状態で直進している場合の出会い周波数ベースの実測値と推定値の比較を示している。図中の実線は歪ゲージの実測値に基づく船体縦曲げ応力のパワースペクトラムであり、破線はBayes法によって推定された方向波スペクトラムと船体縦曲げ応力の応答関数を用いて求められたパワースペクトラムを出会い周波数ベースに変換した結果を示している。ただし、船体縦曲げモーメントの応答関数は船体動揺の応答関数と同様に、Close Fit 法を用いて2次元流体力を求めたN. S. M. によって理論的に計算されたものであり、曲げ応力を求めるための断面係数は歪ゲージ貼付位置付近の船体横断面図より計算されたものである。これらの結果を比較すると、パワースペクトラムの面積は少なからず異なっているが、ピーク値が存在する周波数近傍においては、推定結果は十分な精度を有していることがわかる。計測値と推定値の面積に若干のずれが生じた理由としては、実測値は船体振動や撓みの影響を受けていると同時に、船体前後方向の軸力や、歪ゲージが船体中心線上に取り付けられていないために生ずる横曲げ応力が計測値に含まれていることが考えられる。

4.3 船体縦曲げ応力の有義値

4.2で示したように、方向波スペクトラムの推定結

図7 縦曲げ応力の推定値と実測値の比較

果と理論的に計算された応答関数を用いて、船体縦曲げ応力のスペクトラムをある程度の精度で推定できることが確認された。ここでは、船体縦曲げ応力の有義値に着目し、実測値と推定値の相関について考察する。図7は本報告で用いた全データの相関図であり、横軸は歪ゲージの時系列データから計算された縦曲げ応力の有義値、縦軸は推定された縦曲げ応力のスペクトラムの面積から計算された有義値を示している。計測値と推定値は若干ばらついてはいるものの、図中に示されるように、決定係数が約0.6であることから両者は正の相関を持っていることがわかる。前節で述べたように、実測値が船体振動や横曲げ応力の影響を受けていることを考慮すると、縦曲げ応力の推定式を高精度化することにより相関の度合いを十分に高めることが可能であると考えられる。

4.4 船体動揺および船体縦曲げ応力の予測

前節では、船体縦曲げ応力の有義値に着目し、実測値と推定値の相関について考察したが、ここでは変針・増減速後の船体縦曲げ応力やその他の船体応答の変化を予測することを試みる。すなわち、船体まわりの波浪が定常であると仮定すると、ある時刻において逆推定された方向波スペクトラムを用いて、あらゆる変針・増減速に対する船体動揺および船体縦曲げ応力等の変化を理論的に予測することが可能である。前節では船体縦曲げ応力の有義値を直接比較したのに対し、ここでは有義値の変化の傾向を予測することが主眼となる点が異なる。表2に針路と船速を種々変化させて行った一連の実験の概要を示す。この表中の9時29分のデータから方向波スペ

表2 実験時の針路および速力

Time stump	Course	Speed
9:29	300(deg)	10.5(knot)
9:36	330(deg)	10.2(knot)
9:42	0(deg)	10.1(knot)
9:51	30(deg)	10.4(knot)
10:10	60(deg)	10.5(knot)
10:17	90(deg)	11.0(knot)

図8(a) ローリングおよびピッチングの変針・増減速後における予測値と実測値の比較

図8(b) 縦曲げ応力の変針・増減速後における予測値と実測値の比較

クトラムを逆推定し、その結果のみを用いて以後の操船に対する船体動揺や船体縦曲げ応力の変化を予測したものを図8(a)および図8(b)に示す。図8(a)はピッチ角およびロール角の有義値の変化を予測した結果と実際に変針・増減速を行った後の有義値とを比較した図であり、図8(b)は船体縦曲げ応力について同様に比較した図である。前述のように、船体縦曲げ応力の実測値は船体振動や横曲げ応力の

影響を受けているために、変針・増減速に対して推定値ほど大きく変化してはいないが、ピッチ角およびロール角の有義値の変化はかなりの精度で推定できていることがわかる。

5. 結 言

本研究では、安全運航支援システムの開発を目的として、Bayes法で逆推定した方向スペクトラムから直接計測することなしに船体縦曲げ応力の推定・予測および船体動揺の予測を試みた。推定値と実際の計測値とを比較することにより、次のような結論を得た。

- (1) 方向波スペクトラムを精度良く逆推定できれば、船体縦曲げ応力の推定したパワースペクトラムと計測したパワースペクトラムは良く一致する。従って、その面積を積分して得られる有義値についても良く一致し、船体縦曲げ応力は直接計測することなく推定することが可能である。
- (2) さらに、遭遇している波浪が定常であるならば、変針・増減速後における船体動揺および縦曲げ応力の有義値は概略予測することができる。

ただし、これらの結論は、方向波スペクトラムの逆推定の精度に大きく依存している。従って、信頼性の高い方向波スペクトラムが推定できているかどうかを判定する条件を明らかにすることが必要である。また、応答関数は三次元理論等を用いることにより高精度化することが必要である。さらに、船体縦曲げ応力の推定・予測については、横曲げモーメント、前後方向の軸力および船体振動などの影響を考慮した計算法を確立することが必要である。これらの課題を克服することにより、実用的な安全運航支援システムの開発が実現できると考えられる。

6. 謝 辞

実船実験データの採取に際しまして、快く御協力下さいました東京商船大学付属練習船汐路丸の歴代の船長ならびに乗組員の方々に心から感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 菅井和夫：船体強度モニタリングシステムについて—船体モニタリングシステム序説—，日本造船学会誌，第705号，pp.21-23，1985。
- (2) 藤井 斉・菅井和夫・藤野正隆：船体に働く波浪外力，第2回耐航性に関するシンポジウムテキスト，日本造船学会，pp.135-163，1977。
- (3) 平山次清・南 清和・平松真紀子：方向波スペ

クトルのハイブリット型船上計測法開発, 日本造船学会論文集, 第180号, pp.295-309, 1996.

- (4) 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, 第176号, pp.107-116, 1994.
- (5) 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—波スペクトル推定における非線形計画法の応用—, 日本造船学会論文集, 第182号, pp.231-237, 1997.
- (6) 井関俊夫・大津皓平: 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.
- (7) 井関俊夫・田尾茂郎・大津皓平: 実船運航データに基づく遭遇波向きの推定について, 日本航海学会論文集, 第97号, pp.149-154, 1997.
- (8) 井関俊夫: 船体波浪計化法による波浪モニタリングについて—上下加速度と船載式波浪計による推定精度の比較—, 日本航海学会論文集, 第102号, pp.107-113, 2000.

質 疑 応 答

木村暢夫(北海道大学大学院水産科学研究科): 縦曲げ応力の推定値と計測値の比較は、 $y=x$ に対して R^2 を求めるべきではないのか。

寺田大介: 御討論ありがとうございます。

御指摘のとおりです。修正した図を掲載させていただきます。図中に示しましたように、 R^2 値は若干小さくなりましたが、縦曲げ応力の推定値と計測値は正の相関を持っていることが分かります。このことから、本論文にも記しましたように、縦曲げ応力の推定式を高精度化することにより両者の相関の度合いを高めることは可能であると考えられます。

木村暢夫: 今回の用いている船体動揺 (Roll, Pitch) が小さいので、もう少し大きな波のデータを基にモデルの精度を検討すべきでないのか。(今回用いた船体動揺の推定においても予測値と実測値に有意な差はあると思うので、このモデルが実用を目指されるのであれば、上記海況において検討を行うべきだ。)

寺田大介: 御指摘のとおり、方向波スペクトラムの逆推定に使用した時系列データは、その振幅が小さいです。しかしながら、供試船が練習船であることから、船体動揺の大きいデータを得ることは限界があります。従いまして、今後機会があれば船体波浪計化法による方向波スペクトラムの逆推定に適した海域すなわち大きな船体動揺を誘起する海域を航行する船舶のデータを用いて、ここで提案したモデルの精度を検討していきたいと思っています。

付図 縦曲げ応力の推定値と実測値の比較