

機関番号：12614

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560744

研究課題名(和文) 非線形・非定常船体運動のスペクトル解析に関する研究

研究課題名(英文) Study on Spectral Analysis of Non-linear and Non-stationary Ship Motion Data

研究代表者

井関 俊夫 (ISEKI TOSHIO)

東京海洋大学・海洋工学部・教授

研究者番号：70212959

研究成果の概要(和文)：

本研究課題では、非線形・非定常船体動揺を解析するための瞬間高次スペクトル解析法の開発を行った。この方法は時変係数多変量自己回帰モデルを用いた瞬間パワースペクトル解析法を高次スペクトル解析へ拡張応用したものであり、練習船を用いた実船実験解析結果より、旋回運動中の高次スペクトルの時間的変化を明らかにし、国内外の学会で高い評価を得ることができた。よって、本研究課題の目標を達成することができたといえる。

研究成果の概要(英文)：

In this study, the real-time algorithm of higher order spectral analysis is proposed in order to investigate the non-linear and non-stationary ship motions. The algorithm is based on the time-varying vector auto-regressive modeling and can be considered as an extension of the instantaneous power spectral analysis. The analyzed results of the full scale ship motion data were presented at the domestic and international conferences and were highly regarded. Therefore, it can be recognized that the objectives of this study have been achieved.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2008年度 | 1,300,000 | 390,000 | 1,690,000 |
| 2009年度 | 1,500,000 | 450,000 | 1,950,000 |
| 2010年度 | 700,000 | 210,000 | 910,000 |
| 総計 | 3,500,000 | 1,050,000 | 4,550,000 |

研究分野：誘導制御

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：高次スペクトル解析、非線形・非定常船体運動

1. 研究開始当初の背景

船舶運航者が自船の安全性を常時把握しておくことは非常に重要である。しかしながら、一般商船の運航においては、安全性の指針は流体静力学による復原力計算を基準としたものであり、船舶の大型化、高速化が著しい近年においては、新たな非線形現象の発生が顕著となってきており、安全性が十分に保証されているとは言い難い状況となっている。現に、1998年、米国のC11級ポストパナマックスコンテナ船が北太平洋上で発達した低気圧に遭遇し、向波中で激しい縦揺

れとともに大振幅の横揺れを起し、多数のコンテナを流出する事故を起した。この原因は、縦波中で横揺れ復原力が固有周波数の二倍の周波数で変動することによって発生する非線形動揺現象、すなわちパラメトリック横揺れであると言われている。その後、荒天中の大振幅動揺や波浪中の復原力低下などの非線形船体運動が注目され、国際海事機関(IMO)では非損傷時船舶復原性基準(IS Code)の一部強制化を前提とした短期的改正と、従来の基準とは異なる性能ベース化のための長期的改正が検討されている。

これらの非線形現象に対しては、時間領域における実験的・理論的解析手法を用いた研究が精力的に行われているが、実際の船舶運航安全性評価の観点からは確率統計的な検討が必要であると考えられる。しかしながら、線形理論に基づいた確率統計的手法、すなわちパワースペクトルやクロススペクトルを用いた解析手法は、非線形現象の解析においてエネルギー漏洩等があるため適切ではなく、高次スペクトルを用いた解析法を導入する必要があると指摘されている。

研究代表者は、研究課題「非定常船体動揺データの解析に関する研究」(基盤研究 C(2) 17560706、平成 17 年度から平成 19 年度)において、操船中の非定常な船体動揺データの瞬間スペクトル解析(3)を行い、船舶耐航性短期予測法へ適用する研究を行ってきた。研究期間中、日本船舶海洋工学会「IMO 復原性基準の機能要件化のための転覆リスク評価法研究委員会：略称 SCAPE(Strategic research committee on CAPsizing Estimation)」に参加して、パラメトリック横揺れ実験データに対して瞬間スペクトル解析法を適用し、スペクトル構造の時間的変化を明らかにする必要性を感じ、本研究の着想を得るに至った。

2. 研究の目的

本研究課題では、非定常な船体動揺データに対応できる操船支援システムを確立することを目的とし、時変係数自己回帰モデルを導入し、それによって定義される瞬間スペクトルを理論的・実験的に検証し、その利用法と有効性を明らかにするとともに、非線形で非定常な高次スペクトル解析に拡張応用することを目的としている。

3. 研究の方法

上述のように、本研究ではパラメトリック横揺れ等の非線形・非定常船体動揺を解析する計算アルゴリズム開発し、その有効性の検証を行うことを目的としている。しかしながら、その基本となる高次スペクトル解析法を船体動揺解析に対して適用した例は非常に少なく、知見も多くは得られていない。そこで、本研究では非線形・非定常船体動揺を主な解析対象とすると同時に、通常航行時の船体動揺を高次スペクトル解析した結果に関する知見を得ることも重要な課題として位置づけた。そのために、本研究では、【理論的研究】時変係数自己回帰モデルを用いた瞬間バイスペクトル、瞬間トリススペクトル計算法の開発、【模型船を用いた水槽実験】模型船を用いた水槽実験を行い、上記計算法の有効性を検証する。【練習船を用いた実船実験】東京海洋大学附属練習船を用いて実船実験を行い、非線形非定常船体動揺の特性を調

べる、という 3 つの方法を取ることとし、効率的な研究遂行を目指した。

4. 研究成果

本研究課題において行った研究内容と得られた成果を、理論的研究、模型船を用いた水槽実験、練習船を用いた実船実験という 3 つの研究に分けて、年度別に雑誌論文番号とともに記述する。

(平成 20 年度)

【理論的研究】

実用上十分な計算速度と精度を保持しつつ、方向波スペクトルをリアルタイムに逆推定するためのアルゴリズム(リアルタイム Bayes 法と命名)を提案した(雑誌論文⑩および⑪)。具体的には、船体固定座標系で定義されていた方向波スペクトルを空間固定座標系で定義し直し、さらに方向波スペクトル自体を定常確率過程であると仮定することにより、各時間ステップで行っていた非線形方程式の収束計算を複数の時間ステップにわたって徐々に行うように変更した。なお、船体動揺自体は操船等により非定常となるため、船体動揺クロススペクトルの推定は時変係数多変量自己回帰(TVVAR: time-varying vector autoregressive)モデルを用いた瞬間スペクトル解析法を逐次的に用いることにした。

実船実験で収録された船体動揺データを用いて、リアルタイム推定のシミュレーションを行い、レーダ波浪観測結果等と比較することにより、以下の 3 項目を確認した。

- ・非定常時系列データへの TVVAR モデルの当てはめと瞬間クロススペクトル解析の計算は、シミュレーションでは 0.05 秒以内に完了していることから、船体動揺データのサンプリング周期内で十分実行可能であると考えられる。
 - ・スレッド化した方向波スペクトル逆推定計算は、シミュレーションでは約 4 秒周期で結果を出力できたことから、提案したリアルタイム Bayes 法は実用上十分な速さを有していると考えられる。
 - ・瞬間クロススペクトル解析の逐次計算では、動揺振幅が小さい場合に分散値が減少する傾向があり、今後解法の検討を要する。
- 以上の結果は、TVVAR モデルによる瞬間パワースペクトル解析法を高次スペクトル解析に拡張する際に必要となる改良であり、これによって効率的な高次アルゴリズムの開発が可能となる。

【模型船を用いた水槽実験】

大振幅の船体動揺を計測するために、研究室で保有する本学附属練習船「汐路丸」の 1/40 模型船に自航システム、動揺計測システムを自作して搭載した。また、水槽内での模型船位置計測のために、位置情報推定用 MOTE

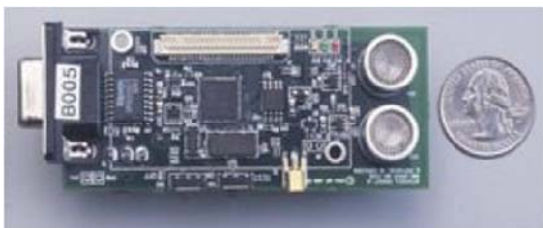


Photo 1 Position detection system (MOTE CRICKET KIT)

Cricket キット (Photo 1) の利用可能性について検討した。Cricket とは MIT で開発された屋内用位置計測装置であり、受信機 (リスナー) と発信機 (ビーコン) の両方の機能を持っており、ユーザーがその機能を任意に設定することができる。距離の測定原理は、ビーコンから送信された超音波と無線周波がリスナーに届くまでの時間差を利用して音速から距離を求めるものであり、周囲温度を感知して音速を修正する機能も持っている。

この Cricket キットのリスナーを模型船に取り付け、3 個以上のビーコンを水槽天井に取り付けることを想定すれば、ビーコンから一定の距離の集合は、リスナーのある平面上において複数の円の集合となり、この複数の円が重なった部分が模型船位置として計測される。その際、Cricket 装置から報告される距離が cm 単位であることから、円の重なりは一定の面積を持っており、開発した位置計測プログラム中ではその面積中心をリスナー位置であるとした。

Fig.1 には、計測により得られた測定値と実際リスナー位置を比較し、その誤差を検証した結果を示している。この結果より、3つのビーコンを配置した場合の計測精度は約 3cm であることが分かる。当面の問題としては以下のようなものが挙げられる。

- Cricket 装置の計測精度が cm 単位であるので、音速から独自に距離を計算するルーチンの開発。

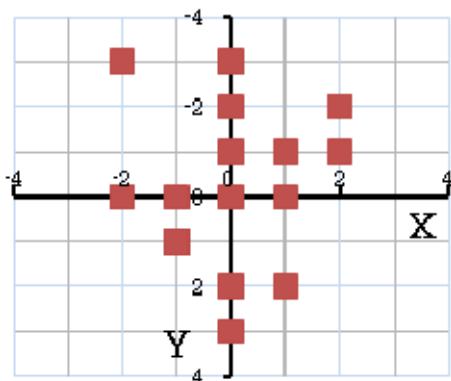


Fig.1 Scattering diagram of the estimated listener's positions in cm.



Photo 2 The training ship Shioji-maru.

- ビーコンの数が多ほど計測精度は向上するが、各ビーコンは 1 秒に 1 回のみ送信されるので、時間差を持って到達する各ビーコンを逐次処理するアルゴリズムの開発。

【練習船を用いた実船実験】

東京海洋大学附属練習船汐路丸 (Photo2) による実験航海 (平成 21 年 3 月 10 日～12 日) に参加し、船体動揺データの計測を行った。船体動揺計測に際しては、できる限り詳細な海象データを得るために、海上保安庁第三管区海上保安本部ならびに日本無線株式会社に協力を要請し、野島埼灯台のレーダ波浪観測データを入手し、比較検討を試みた。この実船計測データはリアルタイム Bayes 法のシミュレーション計算に用いられるとともに、リアルタイム高次スペクトル解析でも利用している。

Fig.2 には実験時の「汐路丸」の航跡を示している。種々の波との出会い角による船体動揺の変化を計測するために、直進と旋回を含めた多角形航走を行った。なお、レーダ波浪観測装置のカバーエリア内を走るために、航跡図に示すように、実験海域をできるだけ小さくした。

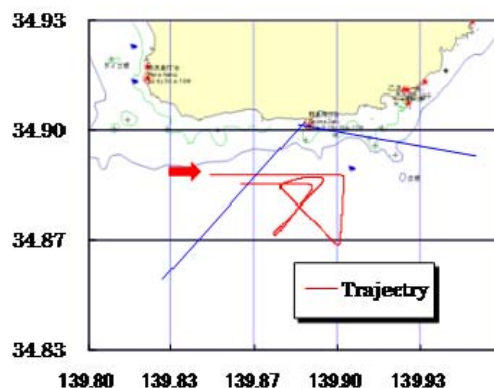


Fig.2 Trajectory of the T.S. Shioji-maru measured off Nojima-lighthouse on 11th March, 2009.

(平成 21 年度)

【理論的研究】

昨年度開発した、リアルタイム Bayes 法に関する論文を第 28 回海洋工学および極地工学に関する国際会議 (OMAE2009) で発表した (雑誌論文⑩および⑨)。さらに、リアルタイム Bayes 法によって推定された方向波スペクトルを利用したリアルタイム操船支援システムを開発し、アジア航海学会 (ANC2009) で発表した (雑誌論文⑧)。本操船支援システムは 3 つの計算ステップで構成されている。第一の計算は、TVVAR モデルを用いた船体動揺の瞬間クロススペクトルのリアルタイム推定、第二の計算はリアルタイム Bayes 法を用いた船体周りの方向波スペクトル推定、第三の計算は船舶耐航性能研究成果に基づく船体応答の短期予測であり、具体的には、あらゆる変針、増減速操船に対する船体縦曲げモーメントの有義値をレーダチャート状に示すものであり、操船者はそのグラフィック画面見ること、適切な操船判断を一瞬で行うことができる。

また、本解析法に関連して、デンマーク工科大学のニールセン准教授と Bayes 波浪推定法に関する共同研究を実施し、同じく OMAE2010 に論文を投稿した (雑誌論文⑦)。この研究では、前述の汐路丸実験航海でのデータを使用しており、計算時間短縮のために、ハイパーパラメータを固定した場合の推定精度への影響を検証している。

さらに、本研究課題の主目的である非線形・非定常の船体動揺を解析するために、TVVAR モデルを高次スペクトル解析に適用し、リアルタイムで高次スペクトル解析が可能なアルゴリズムを開発した。具体的には、TVVAR モデルを状態空間表現の形に変換し、カルマンフィルタのアルゴリズムによって求められた時々刻々の多次元時変 AR 係数をフーリエ変換し、パワースペクトル、バイスペクトルおよびトリスペクトルを求めるものである。この解析法を実船実験結果に適用した結果を OMAE2010 に投稿し、平成 22 年 6 月に発表することになった (雑誌論文⑥)。

【模型船を用いた水槽実験】

今年度では模型船の製作を行った。本学調査・研究船「やよい」の模型船を製作するために、本船を建造した三井造船株式会社と交渉して線図を入手し、精密模型船製作者を探して製作を依頼した。模型船は年度当初で製作する予定であったが、図面の入手に関する交渉 (誓約書の提出) と、精密模型船製作者の数が少なくなっているためにかかなりの時間を要した。製作費を低く抑えるために、プロペラは市販品を使用し、その寸法から全体の縮尺比(1/14.16)を決定した。

Photo 3 と Photos 4 に調査・研究船「やよい」と本研究課題で製作した模型船を示す。



Photo 3 Research and training boat "Yayoi".



Photos 4 Model ship "Yayoi"

【練習船を用いた実船実験】

非線形・非定常船体動揺データを計測するために、汐路丸実験航海 (平成 22 年 3 月 10 日~12 日) に参加した。本年度は野島埼灯台のレーダ波浪計データが得られなかったため、実験海域を館山沖周辺海域に移し、航海初日(10 日)と二日目(11 日)に動揺計測を行った。この結果はリアルタイム Bayes 法のシミュレーション計算に用いられるとともに、リアルタイム高次スペクトル解析でも利用している。

(平成 22 年度)

【理論的検証】

昨年度までの研究成果を元にして、新たな視点での研究を平成 22 年度に行った。

まず、本研究課題での多変量の瞬間高次スペクトル解析法を汐路丸による実船実験結果に適用し、周波数平面における特徴とその非定常性について検討を行った結果を日本航海学会で発表した (雑誌論文②)。主要な結論をまとめると以下ようになる。

・ TVVAR モデルの当てはめと瞬間高次スペクトルの推定は実際のデータサンプリング

周期内で実行可能であることを確認した。
 ・瞬間パワースペクトルの解析結果より。縦揺れ、横揺れ、上下加速度の歪度は旋回中に大きくなる傾向が見られた。
 ・瞬間トリスpekトルの推定にも本アルゴリズムは適用可能であることを確認した。
 ・トリスpekトルの物理的意味の理解を含め、本解析法を用いて、さらなる研究が必要である。

次に、Bayes 波浪推定を行う際に使用される船体運動応答関数の計算精度についてはこれまで検討されたことはなかったが、ニールセン准教授との共同研究で採用された ABICsurface の考え方を取り入れて、波浪推定に与える影響を検討した論文をアジア航海学会 (ANC2010) で発表した (雑誌論文④)。この研究成果によれば、詳細な船体形状が分からない場合に対しても Bayes 波浪推定法を適用できることが示されたが、それ以上に、推定精度の悪い応答関数を使用する場合の問題点が明確に示され、むしろ応答関数を鈍化させた場合に過大な推定誤差が改善されることを示したことが新しい知見として重要である。これらの解説は日本航海学会誌 NAVIGATION に掲載される予定であり (雑誌論文③)、この考え方をさらに進めた論文を第 30 回海洋工学および極地工学に関する国際会議 (OMAE2011) に投稿している (雑誌論文①)。

【模型船を用いた水槽実験】

昨年度製作した本学調査・研究船「やよい」の模型船に動揺計測システムならびに自航システムの搭載を行った。船体動揺計測用とオートパイロット用を兼ねてパーティカルジャイロ VG440 (Photo 5) を搭載し、PIC の回路によって模型船の制御を行った。

まず、基本的航行性能を東京海洋大学垂直循環型回流水槽において確認した (Photo 6, 7)。次に、運航性能試験水槽では計測された船体動揺データのワイヤレス送信が不安定であることが分かったため、自作 EEPROM 回路によってデータ記録することにし、船体動揺データが取得可能となった。



Photo 5 Vertical gyro VG440 in the model ship.



Photo 6 Model ship Yayoi in the circulating water channel.



Photo 7 Circulating water channel used for the model ship trial.

(研究成果のまとめ)

本研究課題において開発したアルゴリズムは TVVAR モデルを用いた瞬間パワースpekトル解析法をパワースpekトル解析とトリスpekトル解析に拡張応用したものであり、汐路丸実船実験データの解析結果から、非定常で非線形な船体運動の時系列解析に対して有効であることが確認できた。特に、周波数平面における縦揺れ、横揺れ、上下加速度の歪度が旋回中に大きくなる傾向があることが確認できた。これによって、本研究課題の目的を達成できたといえるが、パラメトリック横揺れ等の強非線形現象の発生を予測し、船舶安全運航を支援するシステムを開発するためには、さらに数多くの実験データを解析し、時系列データの特徴を明らかにしていく必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕 (計 11 件)

- ① Toshio Iseki, A Study on Akaike's Bayesian Information Criterion in Wave Estimation, Proceedings of the 30th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE2011), (査読終

- 了、2011年6月発表予定) (査読有)
- ② 井関俊夫、増山 聡、非定常船体運動のリアルタイム高次スペクトル解析、日本航海学会論文集、第124号、p.297-302、2011年3月25日 (査読有)
 - ③ 井関俊夫、船体運動応答関数に対するベイズ波浪推定の感度研究、日本航海学会誌NAVIGATION、第176号、p.41、2011年3月10日 (査読無)
 - ④ Toshio Iseki, Sensitivity Study of Bayesian Wave Estimation to Ship Motion Response Functions, Proceedings of Asia Navigation Conference 2010 (ANC2010), p.602-p.610, 2010年11月5日 (査読有)
 - ⑤ 井関俊夫、波浪のベイズ推定に基づくリアルタイム航海支援システムの研究、日本航海学会誌NAVIGATION、第173号、p.59、2010年7月15日 (査読無)
 - ⑥ Toshio Iseki, Real-Time Analysis of Higher Order Ship Motion Spectrum, Proceedings of the 29th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE2010) CD-ROM, OMAE2010-20521, p.1-p.7, 2010年6月9日 (査読有)
 - ⑦ Ulrik D. Nielsen and Toshio Iseki, Estimation of Sea State Parameters from Measured Ship Responses - The Bayesian Approach with Fixed Hyperparameters, Proceedings of the 29th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE2010) CD-ROM, OMAE2010-20099, p.1-p.10, 2010年6月8日 (査読有)
 - ⑧ Toshio Iseki, Study on Real-time Navigation Support System Based on Bayesian Wave Estimation, Proceedings of Asia Navigation Conference 2009 (ANC2009), p.87-p.93, 2009年11月20日 (査読有)
 - ⑨ 井関俊夫、OMAE-2009における研究発表と船体動揺からの波浪逆推定の研究動向、日本航海学会誌NAVIGATION、第171号、p.72-73、2009年9月30日 (査読無)
 - ⑩ Toshio Iseki, Real-Time Estimation of Directional Wave Spectra Using Non-stationary Ship Motion Data, Proceedings of the 28th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE2009) CD-ROM, OMAE2009-79295, p.1-p.6, 2009年6月4日 (査読有)
 - ⑪ 井関俊夫、非定常船体動揺データを用いた方向波スペクトルのリアルタイム推定について、日本航海学会論文集、第120号、p.117-123、2009年3月25日 (査読有)

[学会発表] (計8件)

- ① Toshio Iseki, A Study on Akaike's Bayesian Information Criterion in Wave Estimation, The 30th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE2011), 2011年6月発表予定、ロッテルダム、オランダ
- ② Toshio Iseki, Sensitivity Study of Bayesian Wave Estimation to Ship Motion Response Functions, Asia Navigation Conference 2010 (ANC2010), 2010年11月5日、インチョン市、大韓民国
- ③ 増山 聡、非定常船体運動のリアルタイム高次スペクトル解析、日本航海学会第123回講演会、2010年10月28日、鳥羽市
- ④ Toshio Iseki, Real-Time Analysis of Higher Order Ship Motion Spectrum, The 29th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE2010), 2010年6月9日、上海市、中華人民共和国
- ⑤ Toshio Iseki, Estimation of Sea State Parameters from Measured Ship Responses - The Bayesian Approach with Fixed Hyperparameters, The 29th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE2010), 2010年6月8日、上海市、中華人民共和国
- ⑥ Toshio Iseki, Study on Real-time Navigation Support System Based on Bayesian Wave Estimation, Asia Navigation Conference 2009 (ANC2009), 2009年11月20日、静岡市
- ⑦ Toshio Iseki, Real-Time Estimation of Directional Wave Spectra Using Non-stationary Ship Motion Data, The 28th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE2009), 2009年6月4日、ホノルル、アメリカ合衆国
- ⑧ 井関俊夫、非定常船体動揺データを用いた方向波スペクトルのリアルタイム推定について、日本航海学第119回講演会、2008年10月17日、神戸市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井関 俊夫 (ISEKI TOSHIO)
東京海洋大学・海洋工学部・教授
研究者番号：70212959

(2) 研究分担者 無し

(3) 連携研究者 無し

(4) 研究協力者

ウルリク・ダム・ニールセン

(Ulrik Dam Nielsen)

デンマーク工科大学・機械工学科・准教授