

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：12614

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560966

研究課題名(和文) 浮体式波力発電システムの高効率化に関する基礎的研究

研究課題名(英文) Basic study on maximization of the power take off efficiency of oscillating body type wave energy converters.

研究代表者

井関 俊夫 (Iseki, Toshio)

東京海洋大学・海洋科学技術研究科・教授

研究者番号：70212959

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、浮体式波力発電システムの発電効率最大化を目的として、浮体の動揺から周囲の波浪状況を推定する理論の改良、浮体動揺特性の変更システムの開発、パラメトリック共振を利用した動揺制御法に関する研究を行った。具体的には、ベイズ波浪推定法に浮体動揺応答関数の推定誤差を取り込んだモデルの開発ならびに計算負荷が低い離散ウェーブレット変換導入の検討を行った。さらに、スパー型ブイ模型を製作し、動揺周期を変更するシステムを複数試作するとともに、水槽実験による動揺計測によってシミュレーション実験の精度を向上させ、規則波中ならびに不規則波中においてパラメトリック共振を起こすことが可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：The objective of this study is maximization of the power take off efficiency of oscillating body type wave energy converters. This study consists of three kinds of research. The first one is improvement of the Bayesian modelling that estimates the sea state by analyzing the oscillation of the body. Specifically, errors in response functions were taken into the Bayesian modelling and the discrete wavelet transform was introduced. The second research is development of a dynamic oscillation controlling system of a spar-buoy type point absorber. The natural frequency of the heaving motion is controlled by axial-sliding valves. The third research is utilization of the auto-parametrically excited oscillation for the dynamic controlling system. Based on the numerical simulations in time domain, the possibility of utilization of auto-parametrically excited oscillation in irregular waves was shown. Therefore, it can be recognized that the objectives of this study have been achieved.

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：波力発電 浮体動揺 パラメトリック共振 マッシュー型不安定 スパー型ブイ

1. 研究開始当初の背景

温室効果ガスの排出削減を目的として、世界各国で自然エネルギー利用に向けた研究が精力的に行われている。洋上における自然エネルギーとしては、風、波、潮流、海流の利用が考えられるが、波エネルギーが最も利用の可能性が高い再生・持続可能エネルギーの一つと考えられており、近年の欧米においては、波力発電装置の実海域実証実験を行う段階まで研究開発が進んでいる。

一般に、波力発電装置はその作動原理から(1)Oscillating Water Column (OWC: 振動水柱方式)、(2)Oscillating Bodies (浮体方式)、(3)Overtopping (越波方式)の三つのタイプに分けることができる。これらの方式の中で、浮体方式の最も大きな利点は、装置自身の巨大な質量から発生する運動エネルギーを利用できるところにある。浮体方式の発電方法としては油圧モータ、油圧タービンを利用した方式やリニア発電方式のものが主流であり、その開発段階においては耐久性のみならず、係留方法、荒天時の避難等、考慮すべきことが数多くあり、浮体形状も制約を受ける。さらに、高い発電効率を目指すためには、予め設置する海域の波浪状況を調査し、最も発現頻度の高い波と同調するように浮体の主要寸法が決定される。しかしながら、ポイント・アブソーバ (Point Absorber) と呼ばれる一般的な形式では、浮体の同調周波数が一般的な波の周波数より高く、その帯域も比較的狭いため、常に高い発電効率を得られるとは限らない。このような状況の下で、浮体動揺に対して何らかの位相制御を行う方法が幾つか提案されてきた。その中で、画期的な方法の一つとしてラッチ・コントロール (phase control by latching) が挙げられる。これは、動揺する浮体を動揺周期のある瞬間において一時的に浮体を拘束し、波との位相差を変化させることによって準同調状態を作り出すものであり、近年では二重浮体方式において実用性が示されるようになってきている。

一方、波力発電方式を離れて、海洋プラットフォームとしての浮体特性に注目すると、スパーク・ブイ (spar-buoy) 方式の海洋プラットフォームは過大な同調上下揺を起こすのみならず、縦揺れとの間でパラメトリック自励共振現象を起こすことが知られている。すなわち、上下揺の周波数が縦揺れ周波数の半分である場合、その運動方程式はマシュー方程式 (Mathieu's equation) で記述されることになるので、設計段階においてはマシュー型不安定性としてその特性を詳細に検討しておく必要がある。ちなみに、この現象はパラメトリック・ローリングと基本的に同じ現象であり、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とを契機として、注目されるようになった非線形動揺現象で

あり、避けるべき現象として認識されている。

2. 研究の目的

本研究では、浮体式波力発電システムの動揺特性変更システムを考案し、周囲の波浪状況に応じて発電効率が最高となるようなシステムを開発することを目的とした。そのためには、常時周囲の波浪状況が分かることと、浮体の動揺特性を自由に変更できることが必要となる。波浪の状況を知るためには浮体の近傍に波浪計測ブイを設置すれば良いが、方向スペクトルの形で波の情報が得られるブイは一般に高価であり、長期間の保守を考えると実際的ではない。そこで、本研究では浮体動揺から周囲の波浪状況を効率良く推定する方法の開発を行った。さらに、浮体動揺特性を自由に変更できる具体的なシステムを開発するために、本研究課題ではポイント・アブソーバであるスパーク・ブイ型の波力発電装置を想定し、模型を製作して水槽実験を行うとともに、シミュレーション計算により、動揺特性の動的制御法を検討した。ただし、電力の取出し効率 (PTO: Power Take Off) には言及せず、動揺制御の観点からの効率を論ずることとした。さらに、パラメトリック・ローリングからヒントを得て、対象としているスパーク・ブイが上下揺単独でパラメトリック自励共振をおこす方法を検討した。

3. 研究の方法

上述のように、浮体式波力発電システムの動揺特性変更システムを開発するために、浮体動揺から方向スペクトルを推定する方法と浮体動揺特性を自由に変更できるシステムを検討した。浮体動揺から方向スペクトルを推定する方法の検討については、研究代表者は以前から操船支援システムの開発に関する研究を行っており、その中で、船体動揺から方向波スペクトルを推定する方法を検討してきたので、その手法を拡張改良することとした。この手法はベイズ波浪推定として船舶海洋工学の分野では広く認識されており、研究協力者であるデンマーク工科大学のUlrik Dam Nielsen 准教授や、サンパウロ工科大学のTannuri 教授やSimos 教授らも精力的に研究を行っている。

本研究課題の前半では、浮体式波浪発電システムの具体的な形状が定まっていなかったため、実船の動揺データを対象として、実海域におけるベイズ波浪推定計算の効率向上を図ることとした。具体的には、動揺の応答関数に誤差が含まれていることをモデル化し、計算の安定化と適用性を向上させることを試みた。

研究期間の後半では、浮体動揺特性を自由に変更できるシステムを開発するために、ポイント・アブソーバであるスパーク・ブイ型の波力発電装置を想定し、模型を製作して水槽実験を行うとともに、シミュレーション計算により、動揺特性の動的制御法を検討した。

ただし、電力の取だし効率 (PTO : Power Take Off) には言及せず、動揺制御の観点からの効率を論ずることとした。また、このシステムでは、周囲の波浪状況に応じて発電効率が最高となるようにシステムを動的に制御することと、浮体動揺から周囲の波浪状況を推定する方法を確立することを目的としているため、非定常時系列データを取り扱う必要が出てくる。そこで、比較的計算負荷の低い離散型ウェーブレット変換を利用することを検討した。

4. 研究成果

以下に、本研究課題において行った研究内容を、理論的研究、動揺特性最適化システムの開発、模型試作と水槽実験による有効性の検証という3つの研究に分けて、年度別に発表論文番号とともに記述する。

(平成 23 年度)

(1) 理論的研究

浮体の動揺から周囲の波浪状況を推定する理論の確立を目的として、浮体動揺応答関数の推定誤差を取り込む新しいベイズ型モデルを開発した。このベイズ波浪推定法を実際のコンテナ船の動揺に適用し、波浪レーダの推定結果と比較した。これらの結果を2本の論文にまとめ、ISOPE2012 と OMAE2012 の国際学会に投稿した (学会発表⑦および⑧)。ベイズ波浪推定では、赤池のベイズ型情報量基準 (ABIC) を最小化する必要がある

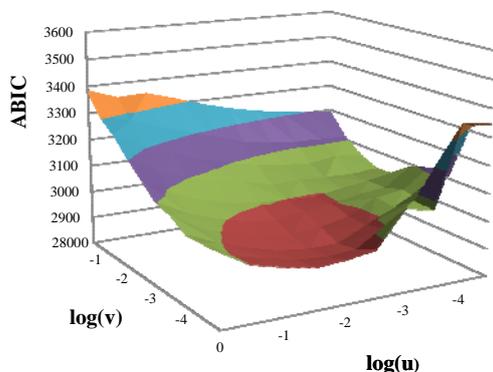


Fig.1 ABIC surface in the wave estimation based on the normal Bayesian modeling.

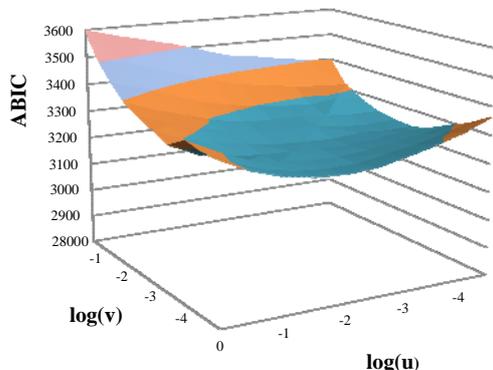


Fig.2 ABIC surface in the wave estimation based on the modified Bayesian modeling.

が、Fig.1 に示すように、これまでのベイズ法では ABIC 面が滑らかではないため、最適値の推定において局部的極小値に捕らわれる可能性があった。一方、浮体動揺応答関数の推定誤差を取り込んだ新しいベイズ型モデルによれば、Fig.2 に示すように ABIC 面は滑らかになり、安定した推定が行えることがわかった。

(2) 動揺特性最適化システムの開発

波浪状況に応じて浮体の動揺特性を動的かつ省エネルギーで最適化する一つの方法として、メインの浮力体であるインナー・パイプとバルブ開閉機構を持った 12 本の小型アウター・パイプで構成されたスパー・ブイ型波浪発電装置を想定した検討を行った。アウター・パイプはバルブ開閉によって浮力の有無を制御することが可能であり、これによる復原力変化により上下揺れ固有周期を動的に変更できるシステムを検討した。さらに、このシステムでパラメトリック自励共振が発生可能かどうかをシミュレーション計算によって検証した。しかしながら、この段階では動揺特性を変更するタイミングに関する理論的検証が不足しており、アウター・パイプのバルブ開閉制御のみによってパラメトリック自励共振現象を発生させるまでには至らなかった。

(3) 模型試作と水槽実験

浮体動揺特性を変更できるアクリル模型 (Fig. 3) を製作し、固有周期や減衰係数等の変更に関する基本的データを収集するとともに、動揺特性を静的に変更する検討を行った。この段階では、スライディング・バルブ型式とソレノイド・バルブ型式について検討を行った。また、動的制御部分の開発に先立って、シミュレーション計算を実施した。水槽実験結果により、固有周期および減衰係数を測定した結果、動揺特性の変更可能範囲は想定したものより狭く、広い周波数帯域の波浪に追従するには更なる改良が必要であることが分かった。



Fig.3 Configuration of the spar-buoy model.

(平成 24 年度)

(1) 理論的研究

平成 23 年度から引き続き、ベイズ波浪推定法の改良を行った。浮体動揺応答関数の推定誤差を取り込むベイズ型モデルを開発し、実際のコンテナ船の動揺に適用し、波浪レーダの推定結果と比較した。なお、本研究ではスパー・ブイ型波浪発電システムを想定しており、浮体の運動解析に前進速度影響を考慮する必要はないが、スパー・ブイ型波浪発電装置模型が不規則波中実験を行える状態に至っていないことと、将来的な実海域の不規則波浪海面での実用化を想定して、今年度も船体動揺データを使用することとした。計算結果を追加し、得られた知見を論文にまとめて IAIN2012 において発表した(学会発表⑥)。さらに、改良を加えた計算法を開発し、平成 25 年 6 月開催の OMAE2013 と TransNav2013 に投稿した(学会発表④および⑤)。Fig.4 はベイズ波浪推定によって船体動揺から推定された有義波高と NOAA の結果を比較したものであるが良い一致を示していることがわかる。なお、学会発表④には最優秀発表賞が授与された。

また、本研究課題では浮体動揺特性を動的に変更するシステムを開発しているため、ベイズ波浪推定法において非定常時系列データが取り扱えるように計算法を変更する検討を行った。多変量時変係数自己回帰モデルによるクロススペクトル解析法を以前の研究で導入したが、計算量が膨大となるため、平成 24 年度においては離散型ウェーブレット変換導入の可能性について検討を開始した。離散型ウェーブレット解析は計算負荷が低いため、ベイズ法との組み合わせにより、実用的な計算法を構築することが期待できる。

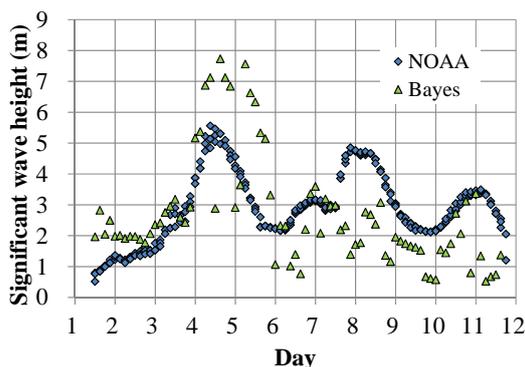


Fig.4 Scatter diagrams of the wave direction, the period and the significant wave height.

(2) 動揺特性最適化システムの開発

平成 24 年度においても、動揺特性最適化システムの型式として、スライディング・バルブ型式とソレノイド・バルブ型式について検討を行った。また、動的制御部分についてはラジコン用サーボ・モータとマイコンボードの使用を想定し、システムの開発を行った。

(3) 模型試作と水槽実験

アクリルパイプによりスパー・ブイ小型模型の改良型を製作し、動揺特性を動的に変更するシステムを開発した。具体的には、マイコンボード Arduino と MEMS 型加速度センサおよび無線モジュール Xbee を用いて、任意のタイミングで空気弁を開閉するシステムとした。平成 24 年度においてはセンサ感度と機械的追従性の調整を行った。また、方向スペクトル計測用の波高計アレイを製作するための容量式波高計と、浮体動揺計測用ヴァーティカルジャイロを購入して、船舶運航性能実験水槽における模型実験を開始した。Fig.5 と Fig.6 に製作したスライディング・バルブ型式とソレノイド・バルブ型式のバルブ開閉機構の写真を示す。



Fig.5 Axial-sliding valve mechanism.



Fig.6 Solenoid valve mechanism.

(平成 25 年度)

(1) 理論的研究

スパー・ブイ型波浪発電システムの上下揺の運動方程式をマシュー方程式に変換し、アウター・パイプの最適バルブ開閉タイミングを理論的に推定した。さらに、スパー・ブイ小型模型を用いた水槽実験で得られた動揺特性を取り込み、スパー・ブイ型波浪発電システムに関する動揺シミュレーションプログラムを開発した。Fig.7 に本研究で開発したシミュレーションプログラムのグラフィック画面を示す。本プログラム中の運動モデルは 3 次元特異点分布法によって求められたラディエーション流体力を採用しているが、減

衰係数については粘性減衰力に比べて造波減衰力が非常に小さいため、模型実験から得られた減衰係数を用いることとした。このシミュレーション実験によって、スパー・ブイ型浮体が上下揺単独でパラメトリック自励共振をおこすことが可能であることが分かったため、論文にまとめて国際学会 OMAE2014 ならびに MARTECH2014 に投稿した（学会発表①および②）。

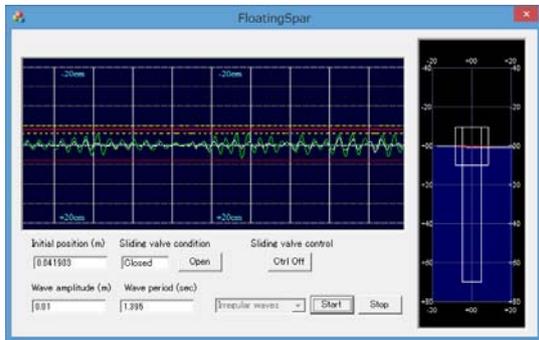


Fig.7 Screenshot of the simulation software.

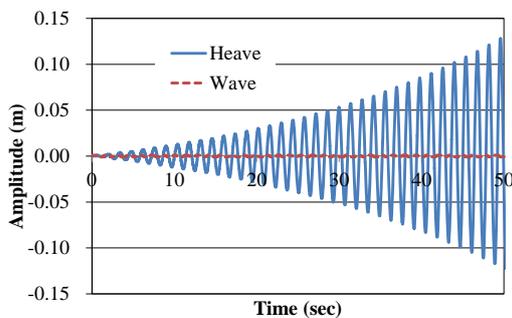


Fig.8 Simulated auto-parametrically excited oscillation.

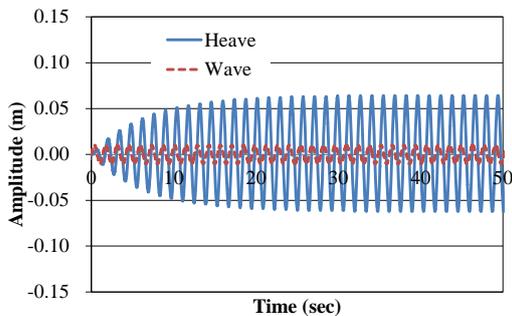


Fig.9 Simulated time history with increased damping.

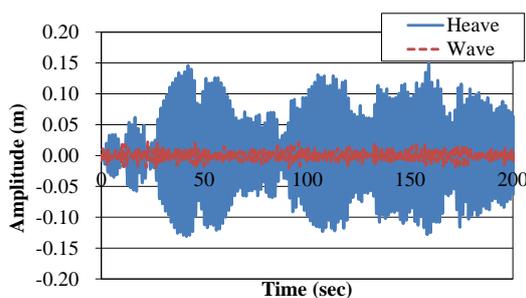


Fig.10 Simulated time histories in irregular waves under the dynamic control.

Fig.8 は規則波中においてスパー・ブイがパラメトリック自励共振を起こす様子をシミュレートしている。規則波との振幅比が無限大になることが分かるが、実際には非線形影響によってこのような振動は起こらない。

Fig.9 は発電装置によって動揺の運動エネルギーを吸収した場合の結果を示している。バルブ開閉の動的制御によって安定したパラメトリック自励共振が起こっていないことが分かる。

Fig.10 は不規則波中において発生するパラメトリック自励共振の様子を示している。本シミュレーションにおけるバルブ開閉の制御則は規則波中のものと同じであるが、スパー・ブイの同調周波数帯が非常に狭いために、不規則波中においても有効に作用していることが分かる。

(2) 動揺特性最適化システムの開発

非定常時系列解析に対する有効性を検証するために、変針増減速中の船体動揺データに離散型ウェーブレット変換を適用した。離散型ウェーブレット変換はハイパス・フィルタとローパス・フィルタの組み合わせと考えることができ、変換を繰り返すことによって、バンドパス・デジタル・フィルタと同様の機能を持つと言える。ウェーブレット係数を用いて一種の時変スペクトルを定義することができるので、多変量時変係数自己回帰モデルによるクロススペクトル解析法と比較検討した。得られた結果を論文にまとめて、国際学会 ANC2013 で発表（学会発表③）するとともに、日本航海学会誌に要約記事を投稿した（雑誌論文③）。

(3) 模型試作と水槽実験

平成 24 年度中に製作したスパー・ブイ小型模型の改良を行った。具体的には空気弁の開閉システムを 2 種類作成し、水槽実験において浮体動揺特性変更システムの有効性を検証した。空気弁開閉システムについては種々の改良を行ったものの、および加速度センサ感度と空気弁（ソレノイド・バルブ）の気密性が完全ではないことと、機械的追従性の問題から、模型実験によってパラメトリック自励共振現象を確認するまでには至らなかった。そこで、模型実験で得られた流体力係数を用いてシミュレーション計算の精度を向上させ、シミュレーション実験によりパラメトリック自励共振現象を確認することができた。この結果をまとめて国際学会 OMAE2014 ならびに MARTECH2014 に投稿した（学会発表①および②）。

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 9 件）

① Toshio Iseki, Dynamic Control of Oscillation Characteristics of a Spar-buoy, Proceedings of 2nd International Conference on Maritime

Technology and Engineering (MARTECH 2014), (2014年10月発表予定) (査読有)

② Toshio Iseki, Optimization Method for Oscillation Characteristics of a Spar-buoy, Proceedings of the ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2014), (2014年6月発表予定) (査読有)

③ 姜 秉昊、井関俊夫、離散ウェーブレット変換の船体動揺解析への応用、日本航海学会誌 NAVIGATION (ISSN 0919-9985)、第187号、p.40、2014年1月31日 (査読無)

④ Byung Ho Kang and Toshio Iseki, Application of Discrete Wavelet Transform to Ship Motion Analysis, Proceedings of Asia Navigation Conference 2013 (ANC2013), p.20 - 26, 2013年10月24日 (査読有)

⑤ Toshio Iseki, Mitsunori Baba and Keiichi Hirayama, Hybrid Bayesian wave estimation for actual merchant vessels, Marine Navigation and Safety of Sea Transportation Maritime Transport & Shipping (TransNav2013), (ISBN 978-1-138-00105-3), p.293 - 298, 2013年6月19日 (査読有)

⑥ Toshio Iseki and Ulrik D, Nielsen, Study on a Method for Estimating Fuel Consumption in a Seaway, Proceedings of the ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2013-10990 Volume 5 (ISBN 978-0-7918-5539-3), p.1 - 6, 2013年6月12日 (査読有)

⑦ Toshio Iseki, Mitsunori Baba and Keiichi Hirayama, Study on Bayesian Wave Estimation for Actual Merchant Vessels, Proceedings of 14th IAIN Congress 2012, International Association of Institute of Navigation, DVD p.1 - 8, 2012年10月2日 (査読有)

⑧ Toshio Iseki, An Improved Stochastic Modeling for Bayesian Wave Estimation, Proceedings of the ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2012-83740 Volume 2 (ISBN 978-0-7918-4489-2), p.455 - 461, 2012年7月2日 (査読有)

⑨ Toshio Iseki, Mitsunori Baba and Keiichi Hirayama, Application of Bayesian Wave Estimation to Actual Merchant Vessels, The Proceedings of The Twenty-second (2012) International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE2012) Volume 3 (ISSN 1098-6189), p.715 - 720, 2012年6月19日 (査読有)

[学会発表] (計8件)

① Toshio Iseki, Dynamic Control of Oscillation Characteristics of a Spar-buoy, 2nd International Conference on Maritime Technology and Engineering (MARTECH 2014), 2014年10月発表予定、リスボン、ポルトガル共和国

② Toshio Iseki, Optimization Method for

Oscillation Characteristics of a Spar-buoy, the ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2014), 2014年6月10日発表予定、サンフランシスコ、アメリカ合衆国

③ Byung Ho Kang, Application of Discrete Wavelet Transform to Ship Motion Analysis, Asia Navigation Conference 2013 (ANC2013), 2013年10月24日発表、プサン、大韓民国

④ Toshio Iseki, Hybrid Bayesian wave estimation for actual merchant vessels, Marine Navigation and Safety of Sea Transportation Maritime Transport & Shipping (TransNav2013), 2013年6月19日発表、グディニア、ポーランド共和国

⑤ Toshio Iseki, Study on a Method for Estimating Fuel Consumption in a Seaway, ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2013), 2013年6月12日発表、ナント、フランス共和国

⑥ Toshio Iseki, Study on Bayesian Wave Estimation for Actual Merchant Vessels, 14th IAIN Congress 2012, International Association of Institute of Navigation (IAIN2012), 2012年10月2日発表、カイロ、エジプトアラブ共和国

⑦ Toshio Iseki, An Improved Stochastic Modeling for Bayesian Wave Estimation, Proceedings of the ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2012), 2012年7月2日発表、リオデジャネイロ、ブラジル連邦共和国

⑧ Toshio Iseki, Application of Bayesian Wave Estimation to Actual Merchant Vessels, The Proceedings of The Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE2012), 2012年6月19日発表、ロードス、ギリシア共和国

[その他]

ポーランド共和国で開催された「航海と海上交通安全に関する国際会議 (TransNav)」において、上記学会発表④に最優秀発表賞が授与された。

6. 研究組織

(1)研究代表者

井関 俊夫 (ISEKI TOSHIO)

東京海洋大学大学院・海洋工学系・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