

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 27 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289166

研究課題名(和文) 沿岸域の不規則波浪に伴う長周期波の出現特性の解明とその標準方向スペクトルの提案

研究課題名(英文) Study on characteristics of long-period waves accompanied by irregular sea waves in coastal regions and their directional spectrum

研究代表者

橋本 典明 (Hashimoto, Noriaki)

九州大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90371749

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,300,000円

研究成果の概要(和文)：ドップラー式海象計を改修し、3地点で10層の水粒子速度を観測した。また、これらのデータから高精度な方向スペクトルを推定可能な方法を開発し、その有用性を示した。さらに本方法により方向スペクトルの出現特性を検討した。

多地点の波浪データをスペクトル解析し、長周期波の出現特性およびそのスペクトルについて検討した。その結果、スペクトルの月平均値は既往の標準スペクトルと同様な分布となるが、長周期が卓越する条件では標準形の適用は困難であり、更なる検討が必要であることが示唆された。有義波周期よりもマウス1次モード周期の方が長周期波の出現特性を合理的に表示できる等の知見が得られた。

研究成果の概要(英文)：With an upgraded ultrasonic Doppler type directional wave meter (DWM), we carried out multi wave quantity components measurements of water surface elevation and 30 oblique components of water particle velocities at 10 layers in water. First, we examined estimation accuracy of directional spectrum through numerical simulations for the DWM by using several representative analysis methods. Then the directional spectra estimated from field data observed with DWM were investigated for various cases of different combinations of wave quantities to clarify occurrence characteristics of coastal directional spectra. We also carried out spectral analysis of wave data measured at several wave observation stations around Japan and investigated occurrence characteristics of long waves. As a result, it was found to be difficult to apply the existing standard formula under the condition that long period waves are dominant, suggesting that further study is necessary.

研究分野：水工学

キーワード：方向スペクトル 波浪観測 海洋波 長周期波

1. 研究開始当初の背景

海洋には様々な周期を有する海面変動が存在する。海岸工学分野では、これまで周期数秒～十数秒の波浪を扱うことが多かったが、近年、それ以上の周期を有する長周期波が注目されている。例えば、周期 30 秒～300 秒程度の海面変動は、港内に着棧した大型船舶の動揺の原因となり、係留船舶の切断につながる。また、周期数分～数十分の副振動(あびき、気象津波とも呼ばれる)は、岸壁や道路の浸水、小型船舶・漁船の転覆や沈没につながる被害をもたらす。

これまでも長周期波の出現特性の解明を目的とした現地観測が実施されてきた。例えば国土交通省が実施している全国港湾海洋波浪情報網 NOWPHAS では、長周期波を 30～60 秒、60～300 秒、300～600 秒、600 秒～に区分してそのエネルギー分布を算出し、長周期の出現特性を検討している。しかし、これらの情報を活用する確立された技術は無く、実務上有用な情報として認知されていない。

2. 研究の目的

本研究では、既存の多層型超音波ドップラー式海象計を改修し、これまでに前例の無い多量の波動量(水面変動および各層 3 成分×10 層の水粒子速度)を、太平洋側沿岸および日本海側沿岸の複数地点で連続観測する。また、これらの多量の波動量データから安定性が高く高精度で信頼性の高い方向スペクトル解析法を開発・改良する。そして、これまで必ずしも明確ではなかった方向スペクトルの方向集中度等の特性を検討する。さらに、それらのスペクトルに含まれる周期 30s～300s 程度のうねりおよび長周期波の特性を検討する。これにより、これまで未解明であった沿岸域の長周期波の出現特性を解明するとともに実務上重要な長周期波スペクトルのエネルギー分布特性を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究が目標とする、沿岸域の不規則波浪に伴う長周期波の出現特性の解明とその標準方向スペクトルの提案は、主として以下の(1)～(4)のテーマから構成される。

(1) 沿岸長周期波が発生した既往の気象・海象データの収集・整理・解析

長周期波が卓越した波浪観測データを抽出する。抽出に際しては太平洋側および日本海側の広範囲の波浪観測データを対象として、様々な気象擾乱時のデータを網羅的に調査し、多種多様なケースを選定する。また、上記の波浪観測データの期間に対応する気象データを収集・整理・解析し、沿岸域の長周期波の出現特性と気象との関連性を詳細に検討する。なお、本研究では主として周期 30 秒～300 秒程度の不規則波浪に伴う長周期波を研究対象としているが、観測データ中にはそれよりも長い数分程度の長周期波成分も含まれる場合

がある。このような長周期波の発生原因となる微気圧変動は、総観規模の天気図や気象情報では抽出が困難であることから、各気象官署で観測されている 1 分毎の気圧の生データを収集し、長周期波の出現特性解析の際の基礎情報として利用する。

(2) 多層型超音波ドップラー式海象計を対象とした方向スペクトル解析法の開発・改良

申請者らが開発したベイズ法(1987)を基礎として、多層型(10 層)超音波ドップラー式海象計に適用可能な高精度で安定性の高い方向スペクトル解析法を開発・改良する。特に本研究ではこれまでに扱ったことのない多量データを使用して方向スペクトル解析を行うことから、予期しない問題が生じる可能性がある。そこで、データの組合せや数を変えた様々な条件下、方向スペクトルを推定するための順・逆解析の双方の数値実験を行い、本研究で開発・改良したベイズ法による方向スペクトル推定法の機能、精度、安定性および使用データの組合せや数の違いによる方向スペクトルの推定精度に関する定量的評価を行う。

(3) 多層型超音波ドップラー式海象計のシステムの改修(10 層観測)と長周期波の特性解明を目的とした方向スペクトルの現地観測

現在各地で使用されている多層型超音波ドップラー式海象計のシステムの一部に改修を加えれば、水位変動と水圧変動に加えて各層 3 成分の水粒子速度の計 10 層分のデータが測得可能であることから、日本海側では秋田港、太平洋側では八戸港および下田港を対象として多層型超音波ドップラー式海象計のシステムに一部の改修を加えると共に大容量記憶装置を接続し、水位変動および 10 層(各層 3 成分)の水粒子速度の 31 成分を観測し、データを収録、蓄積する。本研究では、少なくとも数ヶ月以上の連続観測を実施する。ただし、関係諸機関と調整の上、可能であればさらに長期間のデータを収録・蓄積する。

(4) スペクトル解析に基づく長周期波の出現特性の解明と長周期波スペクトルのエネルギー分布に関する検討

(3)で測得された各波動量の時系列データから周波数スペクトルおよびクロススペクトルを推定する。ここでは、水面変動および各層 3 成分の水粒子速度成分から成る計 10 層分の水粒子速度(計 30 成分)の時系列データを使用し、496 個の周波数スペクトルとクロススペクトルを推定する。次いで、それらのスペクトルを用いて(2)で開発・改良したベイズ法により方向スペクトル解析を行う。ベイズ法の適用に際しては、周波数スペクトルおよびクロススペクトルの組合せや数が異なる様々なケースを対象として解析し、推定された個々の方向スペクトルの差異を詳細に検討することにより、最も確からしい方向スペクトルを推定する。さらに周波数スペクトルの長周期波成分に着目しその出現特性を検討する。特に

各種波浪諸元と長周期波の関係を詳細に検討し、長周期波スペクトルのエネルギー分布特性を明らかにする。

4. 研究成果

本研究で実施し、得られた主要な成果を以下の(1)～(4)に示す。

(1) 沿岸長周期波が発生した既往の気象・海象データの収集・整理・解析

全国港湾海洋波浪情報網(NOWPHAS)の波浪観測データの中から、長周期波が卓越した波浪観測データを抽出し、様々な気象擾乱時のデータを調査した。そして、沿岸から沖合までの海域における長周期波の周波数別特性の解析を行い、その違いの原因について考察した。その結果、周期 150s 以下の短い成分は、水深 250m 以下の海域に主に存在し、擾乱時と静穏時の差が大きいため年間の変動が大きい。周期 300s 以上の長い成分は、全海域にまんべんなく存在し、年間の変動も小さいことを示した。また、微気圧変動の増大と副振動の発達を調査し、副振動の出現海域の違いは、低気圧の進行方向の違いに伴う微気圧変動の伝播方向の違いによるものであることを示した。

また、全国沿岸における副振動の出現特性を調べた。副振動の出現回数の経年変化は、地点によって異なり、近傍の地点でも必ずしも良く似ているとは限らない。逆に距離が離れていたり、海域が異なったりする2地点でも、特性が似ている場合がある。一方、出現回数の季節変化をみると、北海道や沖縄、内湾の一部を除き、全国的に非常に似た特性を示す。副振動の原因となる低気圧や台風の影響は、毎年局地的に変動するが、長期間を通してみると、全国的にほぼ同じであることが示唆された。

(2) 多層型超音波ドップラー式海象計を対象とした方向スペクトル解析法の開発・改良

申請者が開発したベイズ法(1987)は、原理的にはドップラー式海象計における計測層数を増すに伴って情報量が増え、波浪場の解析

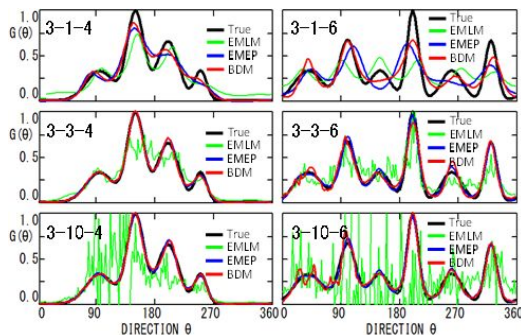


図-1 多層型超音波ドップラー式海象計の1層(上段)、3層(中段)、10層(下段)を用いた場合の方向関数の推定例(左図: 4°-ク、右図: 6°-クの方向関数)

精度は向上するはずである。しかし有限桁数の数値計算の制約内では、波動量の計測位置が近接し過ぎると、クロススペクトルの値が互いに近くなって独立性が損なわれ、連立積分方程式に多重共線性の問題が生じる可能性がある。そこで、拡張最尤法(EMLM)、拡張最大エントロピー原理法(EMEP)、およびベイズ法(BDM)を用いて本計測システムを対象とした数値実験を行い、本計測システムで推定される方向スペクトルの特性や推定精度を検討した。図-1は多層型超音波ドップラー式海象計で、1層、3層、10層を用いた場合の方向関数の推定例である。1層では精度良く推定できなかった4°および6°を有する複雑な方向関数がEMEPとBDMでは3層と10層の場合には精度良く推定可能である。層数を増やすとEMLMは不安定化する。BDMとEMEPを比べるとBDMの方が精度と安定性に優れていることが分かった。

以上のように、これまでに提案された方向スペクトル推定手法の中ではベイズ法が最も高精度であることが示されたが、実観測データから方向スペクトルを推定する場合には数値計算の安定性の面で検討の余地が残されていた。そこで、既存のベイズ法に比べてより安定性の高い推定手法の開発を目的として、非負制約最小二乗法(NNLS)を新たにベイズ法に導入し、安定性の向上を図った。検討に際しては、観測データから推定された方向スペクトルの場合には真値が不明であることから、模擬観測データを用いた双子実験を行い、改良の効果を評価した。模擬観測データの作成に際してはBretschneider-Mitsuyasu型の周波数スペクトルと光型方向関数の組み合わせで設定した。模擬観測データは、海象計により観測された10層の流速変動データを想定し、設定した真値の方向スペクトルから線形波の数値シミュレーションを行って作成し、模擬観測データの時系列に正規乱数に基づく観測ノイズを付加した。なお、推定に使用するデータの増加に伴う推定精度の変化を評価するために、3層のみの流速変動データを使った場合と10層全ての流速変動データを使った場合の推定精度の比較を行った。加えて、海象計による方向スペクトル推定手法として広く使われている拡張最尤法(EMLM)による推定値とも比較を行った。また、方向スペクトル推定精度の評価: 方向集中度を表す指標としてDonelan(1996)らが用いたRCA(Ratio of Cross-wave and Along-wave spectra)により推定精度を評価した。図-2には、EMLMによる推定値、設定した真値、およびRCAによる

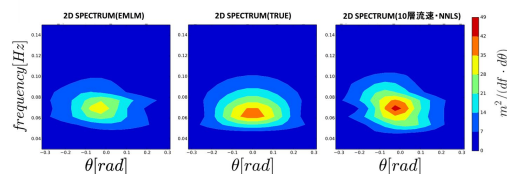


図-2 推定された方向スペクトルの比較(左: EMLM, 中央: 真値, 右: 10層)

る比較で最も真値に近かった推定手法(10層流速・NNLS)の推定値を示す。推定に使用する流速データを10層とすることで、3層で推定した結果よりも推定精度が向上した。これはデータの増加とともに推定精度が向上するベイズ推定の特徴が現れたものと考えられる。また、従来の近似的解法ではなく、より厳密な解法である NNLS を用いることでも数値計算の安定性が向上した。検討の結果、従来想定されていないような S_{max} が 150 に達するうねりを実際に観測した場合でも、海象計の10層流速データの使用と NNLS を用いた推定の組み合わせにより、十分高精度に方向スペクトルを推定可能であることを示し、うねり性波浪の実態解明に向けた有用性が示唆された。

(3) 多層型超音波ドップラー式海象計のシステムの改修(10層観測)と長周期波の特性解明を目的とした方向スペクトルの現地観測

国土交通省および東北地方整備局・中部地方整備局の協力を得て、太平洋側では八戸港と下田港、日本海側では秋田港を対象として多層型超音波ドップラー式海象計の陸上局のシステムに一部の改修を加えると共に大容量記憶装置を接続し、水位変動、水圧変動および10層(各層3成分)の水粒子速度の32成分を観測し、データを収録・蓄積した。また、八戸港、秋田港の波浪の出現特性に関する情報交換および情報収集を実施した。図-3は多層型超音波ドップラー式海象計の設置イメージ図、図-4は(1)水位変動と3層、(2)水圧変動と10層の水粒子速度を観測するレイ配置の投影図を示したものである。

上記の観測で得られた各波動量の時系列

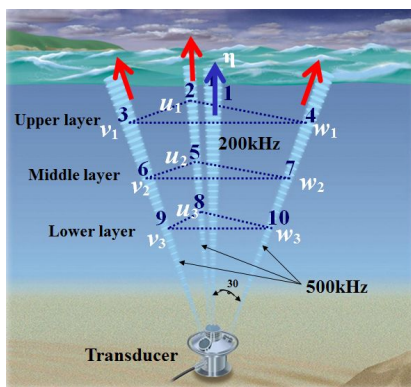


図-3 多層型超音波ドップラー式海象計

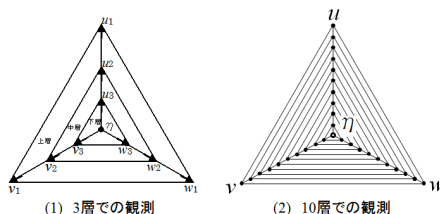


図-4 波動量 (u, v, w) の観測配置 (上からの見た投影図)

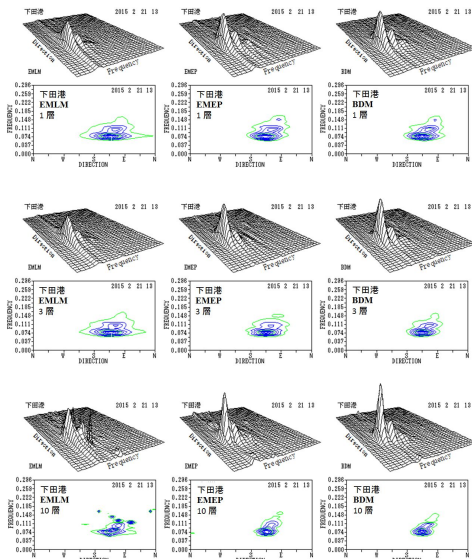


図-5 下田港における現地観測データの方向スペクトル解析例

(上段: 1層, 中段: 3層, 下段: 10層による現地観測例で, 各図とも, 左: EMLM, 中央: EMEP, 右: BDMで推定した)

データから周波数スペクトルおよびクロススペクトルを推定し、それらのスペクトルを用いてベイズ法(BDM)、拡張最大エントロピー法(EMEP)および拡張最尤法(EMLM)により方向スペクトル解析を実施した。方向スペクトル解析に際しては、上記の3種類の解析法の現地観測データへの適用性を検討すると共に、それらの3種類の方向スペクトル推定法で推定された方向スペクトルを詳細に検討し、特に方向集中度パラメータの推定値の差異について検討した。図-5は、下田港沖水深50mの地点に設置された送受波器により、2015年2月21日に観測された現地データを用いて方向スペクトルを推定した一例である。図中上段が上層1層、中段が3層、そして下段は10層分の観測成分をそれぞれ利用したものである。また各段とも、左がEMLM、中央がEMEP、右がBDMの各推定法による解析結果を示している。図-6に見られるように、方向スペクトルの推定に利用した層数、すなわち観測成分の増加に伴い、方向集中度は概して高くなる傾向が確認できる。ただし、EMLMで10層を利用した場合には、正常な方向スペクトル形状を得ることはできなかった。また従来から蓄積されてきた波向パラメータを利用して各ケースにおける方向集中度の変化傾向を把握するため、収録した約100日分の平均分散角を求めた。その結果、BDMによって推定した方向スペクトルの平均分散角は、層数を1から10に増やすことにより平均的に25%程度減少した。さらに、従来手法である1層のデータを利用したEMLMによる平均分散角と比較すると、BDMはEMLMに比べ30%から40%、波浪状況によっては半減するケースも存在した。

(4) スペクトル解析に基づく長周期波の出現特性の解明と長周期波スペクトルのエネルギー分布に関する検討

直江津，苫小牧，常陸那珂，細島の 2008 年～2012 年の 5 年間の観測データをスペクトル解析した。そして，これらの解析データを元に我が国周辺海域の長周期波浪成分の出現特性，特にスペクトル特性を検討した。図-6 は 4 地点の周波数スペクトルの月平均値の一例として 1 月の例を図示したものである。長周期成分については 1 月以外のいずれの月の月平均値も平石ら (1997) が提案した標準スペクトルと同様に平坦な形状を示した。一方で，図-7 は 1 月 12 日 12 時の直江津の周波数スペクトルを示したものである。図中の標準スペクトルは長周期成分のエネルギー積分値が解析データと等しくなるようにパラメータを設定した。長周期波が卓越したスペクトルは，標準スペクトルとは異なり，周波数に対して右肩下りのエネルギー分布を示す例が多い。一般に高波浪時の長周期波成分のエネルギー分布は地点別、擾乱別に広い範囲で分布形が変動し，それらの特性を有義波高・周期等の波浪諸元でパラメータ化することは困難であり，標準スペクトルの再検討の必要性があることが示唆された。

そこで，周期に関する波浪パラメータとして有義波周期に加えて，どのようなパラメータがスペクトルの周波数特性を合理的に表現可能なのか検討した。一例として，図-8 に示す長周期波成分のエネルギー分布から長周期波成分の卓越度を示す指標 T_L を定義し， T_L と既往の周期に関するパラメータ ($T_{1/3}$, T_{01} , T_{02} , T_{-01}) との関係調べた。その結果， $T_{1/3}$ と T_{-01} (マウス 1 次モード周期) の差が大きい場合には T_{-01} が大きくなるにつれて T_L も大きくなるが，その差が小さい場合には T_L は大きくはならない。これは，長周期成分が卓越していない波浪場では

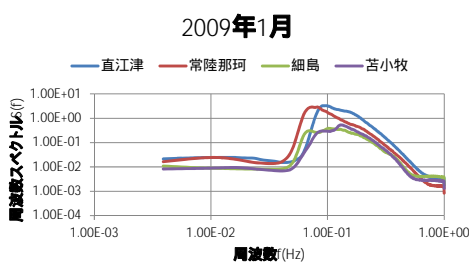


図-6 周波数スペクトルの月平均値

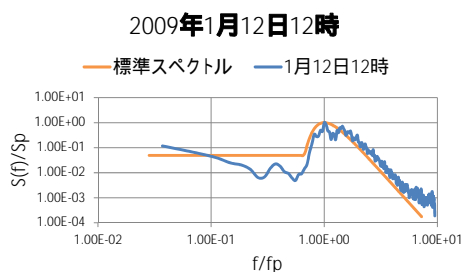


図-7 周波数スペクトル観測地と標準スペクトル

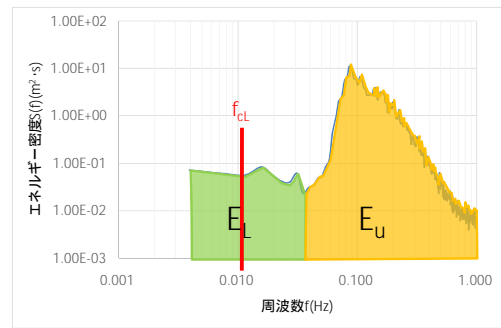


図-8 指標 T_L の概念図

$$T_L = \frac{E_L}{E_u f_{cl}}$$

$$E_L = \int_{1/256}^{1/32} S(f) df \dots \text{長周期成分エネルギー}$$

$$E_u = \int_{1/32}^1 S(f) df \dots \text{長周期成分除外エネルギー}$$

$$f_{cl} = \frac{\int_{1/256}^{1/32} S(f) f df}{\int_{1/256}^{1/32} S(f) df} \dots \text{長周期成分重心位置}$$

$T_{1/3} \approx T_{-01}$ となるが，長周期成分の卓越時には $T_{1/3}$ はその影響を適切に評価できないことが示唆している。したがって，長周期波等の現象を考慮する場合には， $T_{1/3}$ のみならず T_{-01} を指標の一つとして取り扱う必要性があることを示唆している。

さらに，検討した観測データ期間の気象擾乱を入力条件として，第三代波浪モデルを用いて波浪推算を実施した。そして，波浪推算値と波浪観測データの解析値とを比較し，波浪モデルによる方向スペクトルの再現精度を検討した。その結果，気象擾乱時に沿岸域で発達するうねりの特性を推算するためには，更なる改良の必要性があることが示唆された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 13 件)

Fujiki, T., N. Hashimoto, and K. Kawaguchi, Improvement in Estimation Stability and Accuracy of Wave Directional Spectrum by a Bayesian Method for Swell Observation, The Proceedings of the 27th International Ocean and Polar Engineering Conference, 査読有, 2017, CD-ROM

Nakai, K., N. Hashimoto, K. Kawaguchi, K. Nukada and R. Inoue, A Proposal for Extreme Statistics Using Annual Maximum Data with Trend of Increasing or Decreasing, Techno-Ocean, 査読有 2016, 460-464
仲井圭二, 橋本典明, 額田恭史, 全国沿岸における副振動の広域的出現特性, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 72(2) 査読有, 2016, I_318-I_323

Fitri, S., N. Hashimoto, M. Yokota, and M. Yamashiro, Efficient Configurations for Computing Nonlinear Energy Transfer in Gravity Wave Spectrum, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 72(2), 査読有, 2016, I_295-I_300

横田雅紀, 小田圭祐, 齋藤隆介, 橋本典

明, 三井正雄, 児玉充由, 波の方向集中度の出現特性に関する基礎的検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 72(2), 査読有, 2016, I_163-I_168

藤木峻, 橋本典明, 川口浩二, 櫻庭敏, うねり性波浪の実態解明に向けた方向スペクトル推定手法の高精度化に関する研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 72(2), 査読有, 2016, I_115-I_120

Hashimoto, N., Y. Kinashib, M. Yamashiro, and M. Yokota, Numerical simulations of storm-surge inundation based on past violent typhoons- Case studies along innermost coast of Ariake Sea, Japan -, Proceedings of the 11th International Conference of the International Institute for Infrastructure Resilience and Reconstruction, (I3R2), 査読有, 2015, CD-ROM

Hashimoto, N., Y. Kinashi, T. Kawashima, M. Yokota, M. Yamashiro and M. Kodama, Bias Correction in Typhoon and Storm Surge Projection Considering Characteristics of Global Climate Model MRI-AGCM3.2S, Journal of Disaster Research Vol.10, No.3, 査読有, 2015, pp.448-456

Fitri, S., N. Hashimoto, M. Yokota, and M. Yamashiro, Directional Characteristics of the Nonlinear Energy Transfer of Gravity Wave Spectrum, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 71(2), 査読有, 2015, I_347-I_352

横田雅紀, 橋本典明, 児玉充由, 柘植和哉, 高波の将来予測を目的とした気候モデル予測値の海上風バイアス補正に関する研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 71(2), 2015, 査読有, I_1531-I_1536

橋本典明, 三井正雄, 川口浩二, 横田雅紀・小田圭祐・濱野有貴, 高精度な方向スペクトルの観測と解析に向けた数値実験と現地観測, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 71(2), 査読有, 2015, I_79-I_84

仲井圭二, 橋本典明, 額田恭史, 微気圧変動の伝播特性の違いによる副振動の発生海域の違い, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 70(2), 査読有, 2014, I_136-I_140

仲井圭二, 橋本典明, 額田恭史, 沖合と沿岸における長周期波の周波数特性の違い, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 70(2), 査読有, 2014, I_205-I_210

[学会発表](計7件)

仲井圭二, 橋本典明, 川口浩二, 額田恭史, 井上亮一, 経年的な増減傾向を持つ年最大風速・波高データを用いた極値統計に関する提案, 第59回風に関するシンポジウム, 2017年3月13日

濱野有貴, 橋本典明, 三井正雄, 波浪特性を表示する幾つかの代表的周期パタームの妥当性に関する研究, 平成28年度西部支部研究発表会, 2017年3月4日

山本健太郎, 児玉充由, 橋本典明, 我が

国沿岸の長周期うねりの出現特性に関する研究, 平成28年度西部支部研究発表会, 2017年3月4日

小田圭祐, 横田雅紀, 児玉充由, 橋本典明, 波浪推算モデルを用いた波の方向分散特性に関する研究, 平成27年度西部支部研究発表会, 2016年3月6日

齋藤隆介, 横田雅紀, 児玉充由, 橋本典明, 方向集中度に着目した波浪出現特性に関する研究, 平成27年度西部支部研究発表会, 2016年3月6日

仲井圭二, 橋本典明, 額田恭史, 全国沿岸における副振動の広域的出現特性, 第34回日本自然災害学会学術講演会, 2015年9月24日

濱野有貴, 横田雅紀, 橋本典明, 方向スペクトル解析の高度化に関する数値実験～多層データ利用～, 平成26年度西部支部研究発表会, 2015年3月7日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

橋本 典明 (HASHIMOTO Noriaki)
九州大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号: 9 0 3 7 1 7 4 9

(2) 研究分担者

川口 浩二 (KAWAGUCHI Koji)
国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・海象情報・津波研究領域・象情報研究グループ・グループ長
研究者番号: 5 0 3 7 1 7 5 3

伴野 雅之 (BANNO Masayuki)
国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・沿岸環境研究領域 沿岸土砂管理研究グループ・主任研究官
研究者番号: 8 0 5 4 9 2 0 4

藤木 峻 (FUJIKI Takashi)
国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・海象情報・津波研究領域・象情報研究グループ・研究官
研究者番号: 1 0 7 3 5 0 0 4

山城 賢 (YAMASHIRO Masaru)
九州大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号: 7 0 3 3 6 0 1 4

横田 雅紀 (YOKOTA Masaki)
九州産業大学・工学部・講師
研究者番号: 6 0 4 3 2 8 6 1