

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 23 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360216

研究課題名(和文) 周期の長い波浪の発生機構の解明と予測技術の開発に関する研究

研究課題名(英文) Investigation and development of a forecasting method of long period ocean waves ranging from 15 to over 30 seconds

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) 14,100,000円、(間接経費) 4,230,000円

研究成果の概要(和文)：我が国沿岸では、15秒～30秒程度の周期の長い波浪による港湾・海岸構造物の被災が各地で頻発している。このような周期の長い波浪の発生機構は不明であり、既存の波浪推算モデルでそれを再現することは難しい。

本研究では、現地観測データを解析し、周期の長い波浪の出現特性を検討した。また、波浪の非線形エネルギー輸送の計算法を検討すると共に、非線形エネルギー輸送に伴う方向スペクトルのピーク周波数のダウン・シフトの特性を検討することにより、周期の長い波浪の予測手法の開発に資する貴重な知見を得た。

研究成果の概要(英文)：Coastal and maritime structures have been occasionally damaged by long period waves ranging from 15 to over 30 seconds generated in deep and/or intermediate water depth areas. The mechanism of the generation and development has not been clarified yet. Hence, the predictability and reproducibility of the long period waves by existing wave models have not been discussed thoroughly so far.

In this research, we therefore investigated the occurrence characteristics of long period waves by analyzing wave data observed around Japan. Then, we investigated the frequency downshift of directional spectra caused by the nonlinear energy transfer considered to be a possible mechanism. As a result, we obtained valuable findings to contribute to the development of wave model applicable to estimate long waves.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工学

キーワード：うねり 長周期波 波浪予報 非線形エネルギー輸送 周波数ダウンシフト

1. 研究開始当初の背景

周期が1分～数分程度の長周期波は、係留船舶や荷役等に被害をもたらすことから、近年、調査・研究が精力的に行われ、その実態解明とともに、予測技術や各種対策工法の研究・開発が進められてきた。一方で、その発生原因が必ずしも明らかではない15秒～30秒程度の周期の長い波浪による沿岸災害が各地で頻発している。

既往の波浪推算に関する多くの研究では、有義波高についてはある程度の推算精度を有しているが、周期については不十分であり、観測値から大きく外れる推算例が多々見られる。しかし、どのような場合に周期の推算精度が低下するのかを具体的に検討し、その理由を明確に示した研究例はあまり見当たらない。上述の周期の長い波浪による沿岸災害は、既往の波浪推算結果における周期の過小評価が一因であり、設計時には想定外の周期の長い波浪による被災である。したがって、現状の波浪推算モデルを使用して設計波の設定を続ける限り、今後も周期の長い波浪の影響による沿岸災害は後を絶たないものと予想され、周期の長い波浪の発生機構の解明とその予測技術の開発は早急に解決しなければならない課題である。

2. 研究の目的

本研究では、既存の波浪観測データを解析して、周期の長い波浪の出現特性を検討する。また、研究代表者らがこれまでに実施してきた海洋波の非線形エネルギー輸送に関する研究成果を利用して、これまで不明であった周期の長い波浪の発生機構を解明する。さらに、周期の長い波浪を予測可能な波浪推算モデルを開発し、今後の沿岸防災および海岸・港湾構造物の安全かつ合理的な設計法の確立に資することを目的としている。

3. 研究の方法

本研究が目標とする周期の長い波浪の発生機構の解明と予測技術の開発は主として以下の(1)～(4)のテーマから構成される。

(1) 周期の長い波浪が発生した既往の気象・海象情報の収集・整理・解析

国土交通省が実施し、(独)港湾空港技術研究所がこれまでに運用してきた全国港湾海洋波浪情報網(NOWPHAS)で蓄積された膨大な波浪観測データの中から、周期の長い波浪が発生した波浪観測データを抽出し、方向スペクトル解析を行う。解析に際しては、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。これらの波浪情報と周期の長い波浪発生時の気象データを相互に比較して、どのような気象・海象条件の場合に周期の長い波浪が発生しているのか、その特性を検討する。

(2) 様々な海象条件を対象とした非線形エネルギー輸送に関する検討

深海域に適用可能な非線形エネルギー輸送の計算法(RIAM, SRIAM, 小松ら, 1993, 1996)および研究代表者ら(1998)が開発した有限水深域にも適用可能な厳密計算法(FD-RIAM)を用い、様々な形状の方向スペクトルを対象として、非線形エネルギー輸送の特性に関する網羅的かつ系統的な検討を行う。これにより、方向スペクトルがどのようなエネルギー分布形状の場合に、いったいどのような非線形エネルギー輸送が発生し、またそれが実際の波浪にいったいどのような作用を及ぼす可能性があるのかを検討する。

(3) 周期の長い波浪を推算可能な波浪推算モデルの開発・改良に向けた検討

非線形エネルギー輸送の計算法を波浪推算モデルに組み込むための計算スキームを検討する。非線形エネルギー輸送項は計算負荷が大きいため、陽解法では実務上の支障が生じる可能性がある。そこで、計算効率の高い半陰解法または陰解法を検討する。そして、これらの計算スキームをモデルに組み込み、様々な方向スペクトルを初期値として、それらがどのように時間発展するのかを検討し、精度と安定性を検討する。非線形エネルギー輸送に伴う方向スペクトルの時間発展に関する検討では、風波、うねり、風波とうねりが重合した複雑な波浪場を対象として、それぞれの波浪系の諸条件(有義波高・周期および波向等)を種々変化させた場合の非線形エネルギー輸送の特性等を詳しく検討し、本研究で対象とする周期の長い波浪の出現特性の解明に向けた基礎的知見を得る。

(4) 周期の長い波浪の発生機構の解明と予測技術に関する検討

波浪推算に際しては、既往の波浪推算モデルによる波浪推算を実施し、改良した波浪推算モデルによる推算結果との差を比較し、改良した波浪推算モデルによる改善点を検討する。なお、ここで推算する周期の長い波浪現象は、既往のモデルでは再現できない事例である。したがって、現時点では、改良した波浪推算モデルが周期の長い波浪現象に対してどの程度の再現性を有しているのか不明である。改良した波浪推算モデルの再現性が不十分な場合には、誤差の原因を調査し、更なるモデルの改良点について検討する。

なお、周期が30秒～300s程度の波浪成分については、波浪の2次の非線形性から発生する拘束波成分も含まれる。そこで、その大きさを理論的に推定するとともに、波浪や、長周期波全体との関係について調べ、拘束波高を有義波高と方向集中度、波浪の非線形性を示すアーセル数から推定可能な方法を検討する。

4. 研究成果

本研究で得られた主要な成果を以下の(1)～(5)に示す。

(1) 周期の長い波浪が発生した既往の気象・海象情報の収集・整理・解析

港湾海洋波浪情報網(NOWPHAS)の沿岸波浪計/GPS波浪計により得られた波浪観測データを利用して、隣接する複数の地点で同時に有義波周期が長くなっている擾乱を抽出することによりうねり性波浪に関する資料を収集した。また、日本海の寄り回り波および太平洋側の台風を事例として第三世代波浪推算モデルWAMによる再現計算を行い、周期の推定精度に関する検討を行った。検討の結果、WAMにより推算された有義波周期は概ね良好な精度を有していると判断されるが、事例によっては必ずしも精度良く推算できていない例もあり、その原因について更なる検討の必要性が示唆された。

本研究では、寄り回り波を含む周期の長い波浪の観測事例の検討に加えて、黒潮などの海流と波浪の相互作用による方向スペクトルの変動に着目し種々の検討を行った。

図-1は黒潮強流域近傍で漁船転覆事故が発生した2008年6月23日12時の黒潮の影響を考慮した波浪推算結果である。黒潮を考慮した場合と考慮しない場合の有義波高の差の分布を図-2に示す。図-1から、事故発生海域付近で波高が最大になっており、黒潮の強流域で差

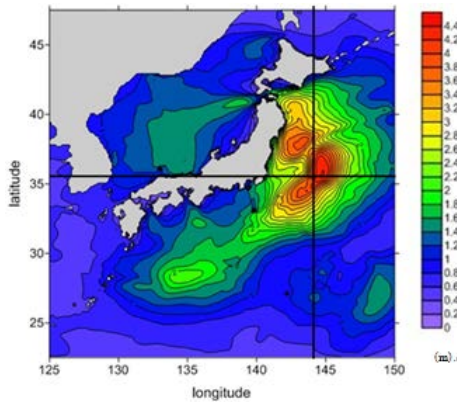


図-1 黒潮を考慮した場合の有義波高分布

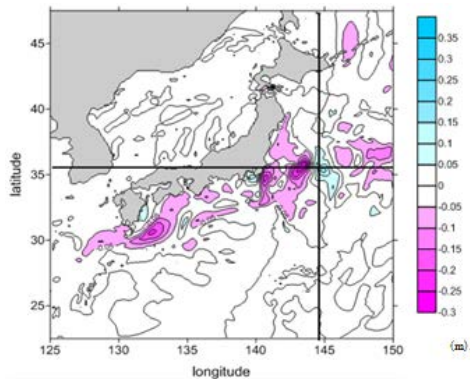


図-2 黒潮の有無による有義波高の差の分布

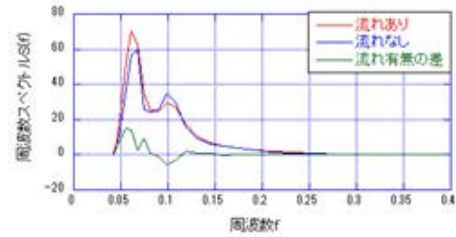


図-3 周波数スペクトルの比較

(潮岬, T0416, 8月28日21時)

が大きい。なお、黒潮を考慮しない方が事故発生地点周辺海域での波高は高くなるのに対して、事故発生地点近傍だけは黒潮を考慮した方が波高が高くなる点は興味深い。

図-3は台風0416号(2004年8月28日17時)における潮岬の周波数スペクトルの推算例である。図-3には黒潮を考慮した場合と無視した場合およびその差を示している。黒潮を考慮する場合には、無視した場合に比べて周期の短い波浪成分のエネルギーは小さく推算される一方で、周期の長い成分はエネルギーがやや大きく推算されるなど、黒潮の流向と波浪の伝播方向の交差角に依存して、風波のエネルギーが減少し、逆にうねりのエネルギーが増大するなどの興味深い事例が見られ、波浪と流れの相互作用の重要性を示唆している。

(2) 深海域における波浪の周波数ダウンシフトに関する研究

本研究ではまず非線形エネルギー輸送を高精度かつ効率的に計算可能なRIAMおよびSRIAM(小松, 1996)のソースコードを開発した。また、それらを波浪モデルに組み込むための陽解法および陰解法の計算スキームに関する検討を行い、安定性の高いコードを開発した。さらに、duration-limitedの条件で波浪推算可能な、簡略化した第三世代波浪モデルSlim WAMにそれらを組み込み、様々な波浪条件下で方向スペクトルの時間発展を計算するとともに、各時間ステップでの非線形エネルギー輸送の変動を検討した。数値計算に際しては、風波とうねりの波高・周期・波向および方向と周波数に関する方向スペクトルのエネルギー集中度等を様々に変化させ、風波とうねりが単独で存在する場合、両者が共存する場合および2系統以上のうねりと風波が重合する場合など様々な条件で検討した。

検討の結果、第三世代波浪モデルで標準的に利用されている非線形相互作用の計算法である離散相互作用近似DIAに比べて、RIAMおよびSRIAMではより滑らかで連続的な非線形エネルギー輸送が計算可能であることから、方向スペクトルのピーク周波数が滑らかかつ連続的にダウンシフトすることが分かった。また、RIAMはSRIAMに比べて方向スペクト

ルがやや先鋭に計算される。

図-4～図-6は、それぞれDIA, RIAM, SRIAMをWAMに組み込んで計算した結果である。図中の赤線が初期スペクトル(0分)であり、15, 30, 45分および1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 100時間後のスペクトルの時間変動(左図)とそれぞれのスペクトルに対する非線形エネルギー輸送の時間変動(右図)を示している。図の横軸は周波数 f 、縦軸は初期値の絶対値のピーク値で正規化して図示した。非線形エネルギー輸送は、初期段階では0.12Hz周辺のエネルギーを0.1Hz周辺に急速に輸送する。その後、波形勾配の低下に伴い輸送強度を減少させつつ、非常にゆっくりと低周波数側へエネルギー輸送する。

図-7は、非線形エネルギー輸送項とエネルギー消散項を同時に作用させた場合のスペクトルの時間変化(左: DIA, 右: SRIAM)を示したものである。図-7に見られるように、エネルギー消散項を作用させた場合には、DIAでは不連続なエネルギー減衰が生じるのに対して、SRIAMでは滑らかで連続的なエネルギー減衰が生じており、より合理的なスペクトルの時間変動が計算出来ることが分かる。

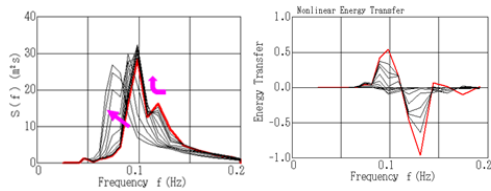


図-4 DIAによるスペクトルの時間発展(左)とその時の非線形エネルギー輸送の変化

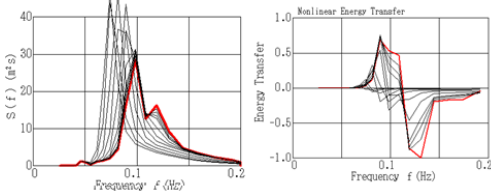


図-5 RIAMによるスペクトルの時間発展(左)とその時の非線形エネルギー輸送の変化

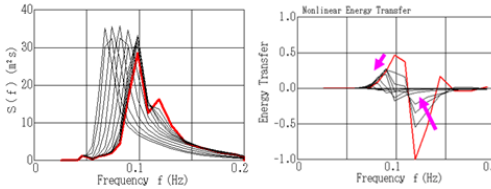


図-6 SRIAMによるスペクトルの時間発展(左)とその時の非線形エネルギー輸送の変化

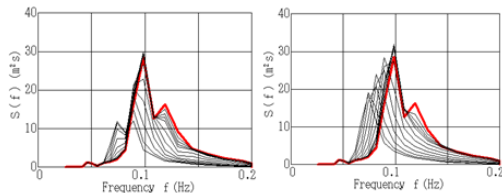


図-7 非線形エネルギー輸送項とエネルギー消散項を同時に作用させた場合のスペクトルの時間発展(左: DIA, 右: SRIAM)

なお、非線形エネルギー輸送の強度は波浪場の波形勾配に強く依存する。また、風から波へのエネルギー輸送項と砕波等によるエネルギー消散項を無視し、非線形エネルギー輸送項のみによりスペクトルの時間発展を計算する場合においても、風波の局所平衡仮説であるToba(1972)の3/2乗則が、スペクトル場に平衡をもたらす強い拘束条件として作用していることを示唆する結果が得られた。すなわち、 $T_g = 3.3H_g^{0.63}$ (合田, 2003) で表される関係式の周辺の値やそれをやや越えるようなスペクトル形が発生すると、そこでは強いエネルギー輸送(ダウンシフト)が発生し、ある特定のスペクトル形に近づく傾向がある。この結果は、地形や流れなどの種々の要因による方向スペクトルエネルギーの時空間的集中が発生し得る場では、低周波数側への強いダウンシフトを生じさせる可能性があることを示唆するものと思われる。

一方で、Tobaの3/2乗則によれば発生し得る風波は波高が大きくなるにつれて波形勾配が小さくなる。すなわち、非線形エネルギー輸送が小さくなる。本研究でも深海の風波スペクトルの標準形であるJONSWAP型のスペクトルを初期値として、その後の方向スペクトルの時間発展を計算すると、Tobaの3/2乗則によって周波数ダウンシフトが制約される結果となり、非線形エネルギー輸送に伴う周波数ダウンシフトで発生する波浪の周期は約30秒程度が上限であることが判明した。その他、風波とうねりの重合による周波数ダウンシフトの発生可能性を示唆した既往研究があるが、この見解には一般性が無く、むしろ方向スペクトルのピークが先鋭な場合に、ダウンシフトが発生しやすい一般的傾向があることが示唆された。

(3) 有限水深域における波浪の周波数ダウンシフトに関する検討

本研究では、第三世代波浪モデルで使用されているDIA(離散相互作用近似)と、有限水深域での非線形エネルギー輸送の計算精度と安定性を向上させた厳密計算法(FD-RIAM, 橋本ら, 1996, 2002, 小松ら, 2001)を用い、種々の方向スペクトルを対象として非線形エネルギー輸送の計算を行い、それらの差異について検討した。また、それらの計算法をモデルに組み込み、種々の方向スペクトルを初期値として方向スペクトルの時間発展を計算し、その特性の差異について検討した。なお、本研究では非線形エネルギー輸送項による方向スペクトルの時間発展について詳細に検討するため、数値分散の大きい移流項を無視したduration limitedの条件で、波形勾配、相対水深、周波数集中度、方向集中度などの種々の

パラメータを変化させて推算し、有限水深域における非線形エネルギー輸送項が方向スペクトルの時間発展に及ぼす影響を検討した。さらに、本モデルに風から波へのエネルギー輸送項、白波砕波による減衰項、海底摩擦による減衰項および地形性砕波による減衰項を付加し、各項の有無による方向スペクトルの時間発展の差異を詳細に検討することにより、有限水深域における各エネルギーソース項が方向スペクトルの時間発展に及ぼす影響を評価し、今後の波浪モデルの改良に向けた具体的方途について検討した。

検討の結果、厳密計算法FD-RIAMで計算した非線形エネルギー輸送の強度は、浅水変形が顕在化する相対水深0.1以浅では極めて活発になることが分かった。その傾向は波形勾配が大きいほど、また方向スペクトルのエネルギー集中度が高いほど大きくなる。特に、砕波が発生するような条件下では、極めて大きな非線形エネルギー輸送による周波数ダウンシフトが生じ、方向スペクトルが大変形する。一方、DIAでは深海域での非線形エネルギー輸送量に浅水係数に該当する増幅係数を乗じて有限水深域の値として代用するため、非線形エネルギー輸送量および方向スペクトルの変形ともFD-RIAMで計算したものととは全く異なるものになる。また、非線形エネルギー輸送項と風から波へのエネルギー輸送項を同時に作用させる場合、FD-RIAMを用いる方がDIAを用いる場合よりも発達速度がやや早くなる。逆に、非線形エネルギー輸送項とエネルギー減衰項を同時に作用させる場合、DF-RIAMの方がDIAの場合よりもエネルギー減衰がやや大きくなる。

図-8は $h/L_p=0.09$, $H_s/L_p=0.03$ ($f_p=0.2\text{Hz}$)の非線形エネルギー輸送とスペクトルの時間変化を、図-9は $h/L_p=0.08$, $H_s/L_p=0.04$ ($f_p=0.2\text{Hz}$)の例を示している。赤線が初期値で、15分ごとの時間発展を黒線で示している。なお、各図の上段の非線形エネルギー輸送はFD-RIAMの絶対値で正規化しており、図-8と図-9でその大きさが分かりにくいのが、図-8に比べて図-9では

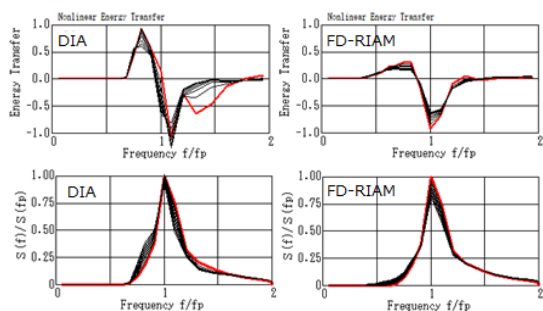


図-8 $h/L_p=0.09$, $H_s/L_p=0.03$ ($f_p=0.2\text{Hz}$)の非線形エネルギー輸送(上段)とスペクトルの時間発展(下段) (左図: DIA, 右図: FD-RIAM, 図の縦軸はFD-RIAMの絶対値の最大値で正規化)

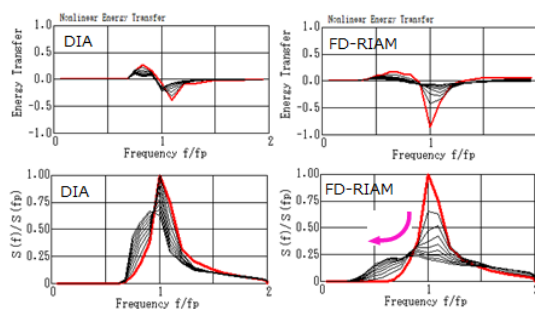


図-9 $h/L_p=0.08$, $H_s/L_p=0.04$ ($f_p=0.2\text{Hz}$)の非線形エネルギー輸送(上段)とスペクトルの時間発展(下段) (左図: DIA, 右図: FD-RIAM, 図の縦軸はFD-RIAMの絶対値の最大値で正規化)

極めて大きな非線形エネルギー輸送が生じている。各図の下段は中段のスペクトルを対数表示したものである。

(4) 波浪モデルの数値計算スキームの検討

Lavrenov (2003)の陰解法による計算スキームで方向スペクトルの時間発展を計算する場合、非線形エネルギー輸送のみによる方向スペクトルの時間発展は安定した計算が可能であるが、風から波へのエネルギー輸送項等を付加して計算する場合には、まれに計算が不安定になる場合があることから、単位時間あたりの方向スペクトルの増分に上限を設けるなどの工夫が必要であることが判明した。

(5) 長周期波浪の予測式に関する検討

周期が約30~300秒程度の長周期波成分の内、波浪の非線形性から生じる拘束長周期波について検討した。特に、拘束長周期波と波浪および長周期波全体との関係について現地観測データを用いて検討し、拘束長周期波高と長周期波高全体との比に関してアーセル数と水深とをパラメータとする推定式を提案した。さらに、上記の結果を組み合わせ、長周期波高そのものを、有義波高、方向集中度、水深から推定する式を提案し、同様に全国沿岸の波浪観測データを用いてその適用性を検討した。これらの成果は、波浪予報で提供される波高、周期の予報値を本研究で提案した推定式に適用すれば、約30~300秒程度の長周期波高と拘束長周期波高の予測が可能になることを示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計13件)

- ① 仲井圭二, 橋本典明, 副振動に関係した微気圧変動の時空間特性, 土木工学論文集 B2 (海岸工学), 査読有, Vol.67, No.2, 2011, pp.160-170.
- ② 岩崎裕志, 横田雅紀, 橋本典明, 三井正雄, 河合弘泰, 海象計における種々の波動量の組合せによる方向スペクトル推定精度の比較, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 査読

- 有, Vol. 67, No. 2, 2011, pp.955-960.
- ③橋本典明, 小松幸生, 横田雅紀, 仲井圭二, 非線形エネルギー輸送による周波数ダウンシフトに関する数値的検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 査読有, Vol. 68, 2012, pp.116-120.
- ④仲井圭二, 橋本典明, 波数スペクトル解析による微気圧変動の水平及び鉛直伝搬特性, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 査読有, 68, 2012, pp.141-145.
- ⑤仲井圭二, 橋本典明, 全国沿岸における長周期波の周波数別季節変動特性, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 査読有, 68, 2012, pp.810-815.
- ⑥橋本典明, 山城賢, 横田雅紀, 児玉充由, 有限水深域における海洋波の非線形エネルギー輸送に関する検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 査読有, 69, 2, 2013, pp.131-135.
- ⑦横田雅紀, 橋本典明, 網屋凌太, 児玉充由, 波浪データに基づく海面抵抗係数の風速依存性に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 査読有, 69, 2, 2013, pp.136-140.
- ⑧関克己, 河合弘泰, 川口浩二, 猪股勉, 橋本典明, GPS 波浪計の観測に基づく波浪の方向スペクトル推定法に関する検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 査読有, 69, 2, 2013, pp.1431-1435.
- ⑨仲井圭二, 橋本典明, 額田恭史, 日本沿岸における拘束長周期波の年間出現特性, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 査読有, 69, 2, 2013, pp.652-657.
- ⑩関克己, 河合弘泰, 川口浩二, 猪股勉, 橋本典明, GPS 波浪計による沖合の方向スペクトル推定手法の検討, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 査読有, 69, 2, 2013, pp.1144-1149.
- ⑪Yokota, M., N. Hashimoto, M. Kodama, R. Amiya, Estimation of The Sea Surface Drag Coefficient Based on a Wave Data, Proc. 7th Int. Conf. on Asia and Pacific Coasts APAC2013, 査読有, 2013, pp.629-633.
- ⑫Kawai, H., K. Seki, K. Kawaguchi, and T. Inomata, Deepwater Wave characteristics around Japan Observed by NOWPHAS GPS Buoy Network, Proc. of the 23rd International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE2013), 査読有, Vol.3, 2013, pp.1046-1053
- ⑬Kawai, H., K. Seki, K. Kawaguchi, and T. Inomata, Annual-to-decadal Variations in Wave Power statistics at NOWPHAS stations around Japan, Proc. of the 24rd International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE2014), 査読有, 2014, (in press.)

[学会発表] (計 6件)

- ① Hashimoto, N. and M. Yokota, Inverse Estimation of Sea Surface Drag Coefficient

- under Stormy Winds Based on Wave Data Observed outside Storm, The 18th Waves In Shallow water Environment meeting (WISE meeting), 2011.
- ②Muhammad Z. and N. Hashimoto, Directional wave spectrum in shallow water waves using an array of pixel brightness on video images, The 6th International Conference on Asian pacific Coasts (APAC2011), 2011.
- ③Hashimoto, N. Recent Progress in Directional Spectrum Analysis Method and Wave Meter in Japan, The 18th Waves In Shallow water Environment meeting (WISE meeting), 2012.
- ④Muhammad Z., N. Hashimoto, M. Yamashiro, M. Yokota, K. Suzuki, Application of Video Images for Monitoring Coastal Zones in Hasaki, Japan, International Conference on Coastal Engineering, 2012.
- ⑤Gerbrant Ph. van Vledder and N. Hashimoto, Inter-comparison Study of Methods for Computing Non-linear Four-wave Interactions in Directional Wave Models, 13th International Workshop on Wave Hindcasting and 4th Coastal Hazards Symposium, 2013.
- ⑥Suzuki Y. and Y. Toba, A New Sea Surface Roughness Expression Based on the Concept of Wind-Wave Saturation, Proc. Joint IAHS-IAPSO-IASPEI Conference, 2013.

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：90371749

(2) 研究分担者

鈴木 靖 (SUZUKI Yasushi)
日本気象協会・本社・技師長
研究者番号：80572388

河合 弘泰 (KAWAI Hiroyasu)
独立行政法人港湾空港技術研究所・海洋情報研究領域・海洋情報研究領域長
研究者番号：40371752

川口 浩二 (KAWAGUCHI Koji)
独立行政法人港湾空港技術研究所・海洋情報研究領域・海象情報研究チームリーダー
研究者番号：50371753

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：70336014

横田 雅紀 (YOKOTA Masaki)
九州大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号：60432861