

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究（S）

研究期間：2008～2012

課題番号：20676008

研究課題名（和文） 外洋における異常波発生要因特定のための観測研究

研究課題名（英文） Observational study to determine the causes of the freak wave generation in the open ocean

研究代表者

早稲田 卓爾（WASEDA TAKUJI）

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：30376488

研究成果の概要（和文）：

外洋に突発的に起こるフリーク波の発生機構解明のために、大水深（5400m）の大型係留浮体を利用した GPS 波浪計と漂流型の GPS 波浪計の開発を行った。日本近海にて延べ 1 年以上行った計測では、波高 13m のフリーク波、波高 18m の巨大波を含む、時系列及び統計データ計測に、この海域ではじめて成功した。その観測結果を用いて、フリーク波発生指標の検証を行い、海難事故解析に利用した。また、フリーク波が起きやすい波浪場において突風率が上昇する事例も観測され、波浪場と気象場の相互作用に関する新たな知見を得た。

研究成果の概要（英文）：

To understand the freak wave generation mechanism, GPS wave observation systems utilizing an existing buoy moored in a deep ocean (~5400 m) and a drifting buoy were developed. Freak waves exceeding 13 m in wave height and giant waves around 18 m were observed near Japan, over a yearlong observations, for the first time in this region. Based on these observational evidences, we have validated the freakish sea index and analyzed marine accident cases near Japan. In addition, we have analyzed the wind data from the buoy and discovered that for certain cases the wind gust events occur concurrently with the freakish sea event, which is a new finding in the possible air-sea interaction.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	11,600,000	3,480,000	15,080,000
2009 年度	13,700,000	4,110,000	17,810,000
2010 年度	16,600,000	4,980,000	21,580,000
2011 年度	9,800,000	2,940,000	12,740,000
2012 年度	7,200,000	2,160,000	9,360,000
総計	58,900,000	17,670,000	76,570,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：巨大波発生要因、GPS 波浪計測、浮体動揺特性、黒潮統流、大気・海洋・波浪相互作用

1. 研究開始当初の背景

異常波の発生と、不規則波の不安定との関係が理論的・実験的に指摘されているが、観測による実証はない。世界的に、定点、漂流型

にかかわらず、外洋・強流域で波浪と同時に、風・海流の時系列を同時測定した例は少ない。長期モニタリングが実現すれば、世界的にも独創的な波浪・風・海流データベースが構築

でき、巨大波の発生と環境要因の関係を解明することができるであろう。また、今回実現する定点観測拠点は、すでに大気・海洋の相互作用の研究で実績があり、中緯度における大気・海洋相互作用における波浪の積極的な役割（物質交換など）に対する研究へと発展させることが期待される。

2. 研究の目的

実海域での波浪スペクトルは、風の変動、海流の影響により、激しく変動する。本研究では、このような風の変動や海流を波浪と同時に測定し、異常波発生の前兆となる環境要因の変動特性を特定する。以下のメカニズムを仮説として検証を行う：i) 風速の急変（前線の通過など）に伴う、波浪エネルギーの分散集中；ii) 黒潮や中規模渦による波線の屈折によるエネルギー集中；iii) 以上の特殊な環境要因下で形成された波浪場の不安定による異常波発生

3. 研究の方法

具体的には、次の研究を逐次進める：

1) 新たに外洋（黒潮続流周辺）における巨大波浪観測ブイシステムを開発し、その有効性を検証する；2) 開発したシステムを用いた定点観測により得られる、巨大波発生時の時系列データの解析；3) 拠点定点観測点周辺における短期集中観測で得られる各種環境要因の分布とその変動の現場観測データについて、数値シミュレーションモデル計算結果および異なる海域での観測結果などと相互比較する。

4. 研究成果

GPS 波浪システムの開発とフリーク波観測

漂流型 2 浮体形状と大型浮体（JAMSTEC K-TRITON ブイ）を利用して GPS 波浪観測を行った。陸上でのテストから GPS ノイズ特性を確定し、浮体の運動特性と合わせ、高度についてはハイパスフィルター、緯度・経度についてはバンドパスフィルターを用いる。平塚沖、JAMSTEC Kuroshio Extension Observatory (JKEO 38.1N, 146.4E)、神津島沖 (34.2N, 139.1E) にて観測を行った。JKEO の観測 (2009/8/29-2010/9/28) では、381 の 20 分時系列を取得。そのうち、51 ケースにフリーク波が含まれていた。10m を超えるフリーク波を 2009 年 10 月末、台風 20 号通過時に計測した (13.2m と 12.3m)；図 1 参照。

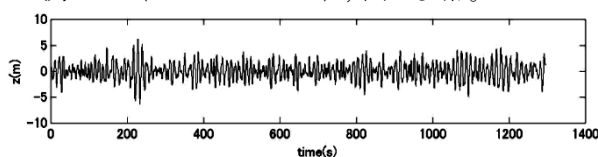


図 1 観測された最大のフリーク波 (13.2m) を含む波浪の時系列 (有義波高 6.6m)

巨大波の観測

2012 年からは、JKEO (2012/6/23-2012/9/17) と新たに NKEO (33.8N, 144.8E, 2012/6/20 - 2013/3) にて観測を行った。NKEO では、2012 年 10 月 4 日台風 19 号通過時に、波高 18.2m・周期 14.6 秒の波 (有義波高 13.1m)、18.0m・周期 14.4 秒の波 (有義波高 10.6m) を計測した。また、2013 年 1 月 14 日には同じく NKEO にて、爆弾低気圧通過の際に、波高 17.7m・波周期 12.6 秒の波 (有義波高 10.3m) を計測した。これらは、いずれもフリーク波ではないが、ブイ運動から推測される粒子の運動は極めて非線形であり、危険な波であることが想定された。このような 18m を超える外洋での巨大波の直接観測は、日本近海ではきわめて稀である。

フリーク波の発生指標 (freakish sea index)

これまでの研究で、不規則波の波長がそろい (Q_p の増加)、波向きがそろった時に (σ_θ の減少)、準共鳴相互作用 (quasi-resonance) が卓越し、フリーク波の発生確率が、高くなるということが分かってきた (Waseda et al. 2009, 引用⑨)。今回観測を行った地点と同様の海域で起こった、海難事故例では (Tamura et al. 2009, 引用⑩)、波浪スペクトルの変化が、 $Q_p - \sigma_\theta$ ダイアグラムの、右下にスペクトルパラメーターが位置する時に、フリーク波の発生頻度が高くなるということを示唆した。今回最大波を測定した期間のスペクトルの変化をみると (図 2)、仮説を支持するように、波浪スペクトルが、最もせまくなった時に、フリーク波が観測されていることが分かる。

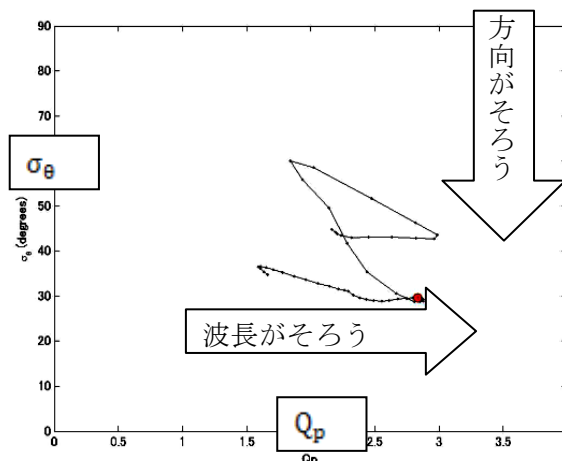


図 2 観測による、フリーク波発生指標確認。フリーク波実測時 (赤点) に指標が最も危険となる。

北海油田データの解析

JKEO での観測にて、波浪の方向スペクトルが狭帯化した時にフリーク波が発生している事例があった。しかしながら、観測自体が不規則過程からの無作為の抽出であるため、

フリーク波が起きやすい条件で必ずフリーク波が計測されることは無い。そこで、北海における長期計測データの解析により、フリーク波の観測数が多い日の波浪方向スペクトルの特性を調べた。その結果、アイスランド低気圧が強化されるときに、観測地点周辺でフリーク波が起きやすい条件となることが判った (Waseda et al. 2011 引用③、図 3)。

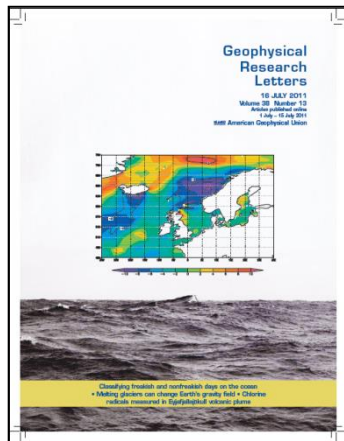


図 3 北海油田データ解析から、フリーク波の起こりやすい海域と気象場の関係を説明。J. Geophysical Research Letters の表紙

波浪モデルと方向スペクトル解析

図 2 に示した方向スペクトル特性は、太平洋全域波浪モデルから、順次ネスティングにより解像度を上げる日本近海波浪モデル (120° E から 150° E, 22.2° N から 47.6° N の 1/4 度格子) から推定した。有義波高については、観測値と良い相関が得られたが (相関係数 0.86)。方向スペクトルの検証を行うために、ある瞬間には、特定の周波数の波は、特定の方向のみに進行すると仮定する、Wavelet Detection Method (WDM) を用いた方向スペクトルの解析法を開発した。2013 年 3 月に回収されたデータを中心に、WDM と既存の手法 (Maximum Likelihood Method など) と比較を行っている。

方向スペクトルから波面の再現

2009 年 10 月 26 日 27 日に、JKE0 にて計測した最大波高 13m の波が二度計測されたが、一方はフリーク波が最も起こりやすい時に観測されたが (図 2)、もう一方は、フリーク波の発生頻度は低いと想定されるときに観測された。これらの時のモデル推定方向スペクトルから、位相解像モデル (Higher Order Spectral Method) による波形の再現を行った。その結果、フリーク波が起きやすい条件下では非線形性による自己収束によるフリーク波の生成、起きにくい条件下では線形集中によるフリーク波の生成が主なフリーク波発

生要因であることが判った (2013 年藤本東大工学部卒業論文)。今後、この手法により、より精細な統計量と動学的特性を検討する。

フリーク波と突風率

北海ではフリーク波の発生確率と概況的な大気場とに良い相関がみられた。今後、精査が必要であるが、日本近海では、前線の通過や台風の通過など個別のイベントとの関連が高く、これまでの解析では概況的な大気場と、ある観測拠点でのフリーク波の発生しやすさとの強い相関はわかっていない。しかしながら、特定のイベントに置けば、大気擾乱 (突風率の上昇) とフリーク波の発生しやすい海況が同時に起こっていることがわかり (2013 年西田智哉、東京大学大学院博士論文)、今後、詳しく検討を行いたい。

神津島での計測、その他予定していた計測

神津島北西沖 (74m 深) では、2011 年に計測を行った。海流 (黒潮) と潮汐流が卓越する海域であり、海流・潮流による影響と、島陰での突風の影響に着目して解析を行った。特に夏場に島影の影響により波浪が弱くなること、潮流の影響により有義波高が 12 時間周期で変調することなどが判り、今後さらに詳しく解析を行う。また、水槽実験から、フリーク波の生成機構である変調不安定が、流れの影響で促進されることも分かった (Toffoli et al. 2013、引用①)。このような可能性を、神津島観測データから解析したい。一方、当初予定していた、合成開口レーダー画像の入手は、ALOS (だいち) が 2011 年 5 月に運用停止となったため、波浪計測との同時計測は出来なかった。また、2 度投入した漂流型ブイが、観測途中で故障した原因は、非線形性の強い波 (碎波) に遭遇し、転倒、転覆したからであることを、水槽実験により確認し、今後のブイ開発における課題とした。

海難事故解析

海難事故時の海象場を解析することにより、危険指標 (freakish sea index) が何らかの傾向を示すか、検討した。日本近海での 7 つの海難事故時の波浪場を解析し、その多くが、波浪スペクトルが狭帯化する、フリーク波が発生しやすい条件下で起きていることが判った (Waseda et al. 2011、引用②)。実際の事故がフリーク波との遭遇が直接的な要因であることはわかっていないが、事故が起こりやすい海象条件を示唆しているということが、言えるであろう。今後、実際に発生する波形やその動学的特性を、解明したい。

今後の研究の発展

有義波高の 2 倍を超える波も、非線形性が相

対的に強い場と、線形性が相対的に強い場とで生成されることが判った。このようなフリーク波が、航行する船舶にとって危険かどうかは必ずしもわかっていない。そのような観点から、波浪スペクトルから HOSM により波形を作成し、フリーク波を実験水槽にて造波し、模型船との遭遇を再現することを計画している(科研 A、2013 - 2015 年度、代表早稲田)。一方、大気の擾乱(乱流強度・突風率)に着目した観測とモデルを合わせた検討を行うため、再び JKEO に波浪計を設置する(科研新学術領域公募研究、2013 - 2014 年度、代表早稲田)。このように、本研究で得られた成果が、複数の新しい研究へと展開している。

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 17 件)

【査読付き雑誌論文】

- ① Toffoli, A., Waseda, T., Houtani, H., Kinoshita, T., Collins, K., Proment, D., & Onorato, M. (2013). Excitation of rogue waves in a variable medium: An experimental study on the interaction of water waves and currents. *Physical Review E*, 87(5), 051201.
- ② Waseda, T., Tamura, H., & Kinoshita, T. (2012). Freakish sea index and sea states during ship accidents. *Journal of marine science and technology*, 17(3), 305-314.
- ③ Waseda, T., Hallerstig, M., Ozaki, K., & Tomita, H. (2011). Enhanced freak wave occurrence with narrow directional spectrum in the North Sea. *Geophysical Research Letters*, 38(13).
- ④ Babanin, A. V., T. Waseda, T. Kinoshita, A. Toffoli, 2011, Wave breaking in directional fields, *Journal of Physical Oceanography*, 41, 145-156
- ⑤ Lamont-Smith T. Mitomi, M. Kawamura, T. Waseda, T., 2010, Electromagnetic scattering from wind blown waves and ripples modulated by longer waves under laboratory conditions, *IET Radar, Sonar and Navigation*, 4, 265-279
- ⑥ Toffoli, A., A. Babanin, M. Onorato, T. Waseda, 2010, Maximum steepness of oceanic waves: Field and laboratory, *Geophysical Research Letters*, 37, doi10.1029/2009GL041771
- ⑦ Tamura, H., T. Waseda, Y. Miyazawa, 2010, Impact of nonlinear energy transfer on the wave field in Pacific hindcast experiments, *Journal of Geophysical Research*, 115, doi : 10.1029/2009JC006014
- ⑧ Waseda, T., T. Kinoshita and H. Tamura, 2009, Evolution of a random directional wave and freak wave occurrence, *J. Phys. Oceanogr.*, 38(3), 621-639
- ⑨ Waseda, T., T. Kinoshita and H. Tamura, 2009, Interplay of resonant and quasi-resonant interaction of the directional ocean wave, *J. Phys. Oceanogr.*, 39, 2351-2362
- ⑩ Onorato, M., T. Waseda, A. Toffoli, L. Cavaleri, Fouques, O. Gramstad, P. A. E. M. Janssen, T. Kinoshita, J. Monbaliu, N. Mori, A. Osborne, Pakodzi, Serio, K. Stansberg, H. Tamura, and K. Trulsen, 2009, Statistical properties of directional ocean waves: the role of the modulational instability in the formation of extreme events, *Phys. Rev. Lett.*, 36, doi:10.1103/PhysRevLett.102.114502
- ⑪ Tamura, H., T. Waseda and Y. Miyazawa, 2009, Freakish sea state and swell-windsea coupling -numerical study of Suwa-Marun incident-, *Geophys. Res. Letters*, 36, L01607, doi:10.1029/2008GL036280
- ⑫ Tamura, H., T. Waseda, Y. Miyazawa, K. Komatsu, 2008, Current-induced modulation of the ocean wave spectrum and the role of nonlinear energy transfer, *J. Phys. Oceanogr.*, 38, 2662-2684
- ⑬ Lamont-Smith, T., and T. Waseda, 2008, Wind wave growth at short fetch, *J. Phys. Oceanogr.*, 38(7), 1597-1606

【編集査読のみの雑誌論文】

- ⑭ 早稲田卓爾, 2009, 外洋に突発的に現れる異常波の発生と気象条件、*海と空*, 85 (2)、pp49-56

【査読付き会議録】

- ⑮ Babanin, A. V., Waseda, T., Shugan, I., & Hwung, H. H. (2011). Modulational Instability in Directional Wave Fields, and Extreme Wave Events. ASME.
- ⑯ Waseda, T., S. Masato, T. Nishida, H.

Tamura, Y., Miyazawa, Y. Kawai, H. Ichikawa, H. Tomita, A. Nagano, K. Taniguchi, 2011, GPS-based wave observation using a moored oceanographic buoy in the deep ocean, 21th International Offshore (Ocean) and Polar Engineering Conference, 2011/6/22 Maui, U. S. A.

- ⑰ In, K., T. Waseda, K. Kiyomatsu, H. Tamura, Y. Miyazawa, K. Iyama, 2009, Analysis of a marine accident and freak wave prediction with an operational wave model, 19th International Offshore (Ocean) and Polar Engineering Conference, 2009/6/23神戸

〔学会発表〕 (計 31 件)

【招待講演】

- ① Waseda、2013、Marine accident and observed rogue waves near Japan, ROGUE WAVES WARNING CRITERIA, 2013/2/28, Torino, Italy
- ② 早稲田卓爾、2010、Freak waves and marine accidents、International workshop on Anomalous waves in the Ocean、2010/11/30台湾 台南
- ③ Waseda, T.、Freak wave and ocean current energy utilization - overview of researches at U Tokyo -, 2009, Sep. 19, MOERI, Daejun, Korea
- ④ 早稲田、外洋に突発的に現れる異常波の発生と気象条件、海洋気象学会波浪シンポジウム 2008/12/10、神戸市

【学会等発表】

- ⑤ 藤本、清松、早稲田、2013、波浪モデルと高次スペクトル法を用いたフリーク波の再現と形状、日本海洋学会春季大会、2013/3/24、東京海洋大学・品川
- ⑥ 広部、早稲田、木下、川村、2013、表面重力波の非線形相互作用と風との相乗効果によるdynamical cascade の進行、日本海洋学会春季大会、2013/3/24、東京海洋大学・品川
- ⑦ 戸田、早稲田、2013、非線形・非定常波の自由表面の速度場推定手法の提案と検証、日本海洋学会春季大会、2013/3/24、東京海洋大学・品川
- ⑧ 早稲田、清松、藤本、川合、谷口、2013、大水深係留浮体による大波高計測、日本

海洋学会春季大会、2013/3/24、東京海洋大学・品川

- ⑨ Hirobe, Waseda, Kinoshita, Kawamura, 2012, Numerical investigation of the effect of wind on four-wave interaction, IWMO, 2012/5/23, JAMSTEC・横浜
- ⑩ Waseda, Hirobe, Kawamura, Initial generation of wind-waves, a comparison of physical experiment and direct numerical simulation, 2012, IWMO, 2012/5/23, JAMSTEC・横浜
- ⑪ Hidetaka Houtani, Takuji Waseda and Alessandro Toffoli, 2012, Short-term and long-term evolution of modulational wave train under influence of current, European Geophysical Union General Assembly, 2012/4/25, Vienna, Austria
- ⑫ Toffoli, Waseda, Cavaleri, 2012, Spectral evolution and energy dissipation on adverse current gradients: Laboratory experiment and numerical simulations, Water Waves in Shallow Water Environment (WISE), 19th, 2012/4/17, Barcelona, Spain
- ⑬ Hidetaka Houtani, Takuji Waseda and Alessandro Toffoli, 2012, Short-term and long-term evolution of modulational wave train under influence of current, Water Waves in Shallow Water Environment (WISE), 19th, 2012/4/17, Barcelona, Spain
- ⑭ 田村、早稲田、宮澤、木下、2011、伊豆諸島周辺における波浪特性、2011年度日本海洋学会春季大会、2011/03/25柏
- ⑮ 早稲田、木下、Toffoli、Cavaleri、2011、海洋波の非線形発達と海流の影響、2011年度日本海洋学会春季大会、2011/03/25柏
- ⑯ 早稲田卓爾 2010、Marine accident and freak wave、KAIST シンポジウム、2010/09/10、韓国デジユン
- ⑰ 早稲田卓爾、2010、海難事故時の気象・海象条件に関する考察、日本海洋学会シンポジウム、9月6日—9日、女満別市

- ⑮ 早稲田卓爾、2010、海難事故とフリーク波、日本船舶海洋工学会、6月7日—8日、東京
- ⑯ 新地政人、早稲田卓爾、川合義美、市川洋、田村仁、宮澤泰正、2010、巨大波発見のためのGPS波浪観測、日本船舶海洋工学会、6月7日—8日、東京
- ⑳ 尾崎、早稲田、2010、北海におけるFreak Waveの統計的解析、2010/03/29東京 日本海洋学会春季大会
- 21 西田、早稲田、河合、市川、宮澤、田村 K-Triton ブイ気象場解析、2010/03/29東京 日本海洋学会春季大会
- 22 早稲田、新地、高橋、鈴木、田村、外洋におけるフリーク波検出のための観測計画(Ⅱ)、宮澤、市川、河合、永野、富田、2010/03/29 東京 日本海洋学会春季大会
- 23 田村、早稲田、宮澤、太平洋における波浪ハインドキャスト実験、2010/03/29 東京 日本海洋学会春季大会
- 24 早稲田、新地、鈴木、田村、宮澤、市川、川合、永野、富田、外洋におけるフリーク波検出のための観測計画 日本海洋学会 秋季大会 2009/09/26京都
- 25 早稲田、Hallerstig、富田 Freak Waves in the North Sea and Meteorological Causes、日本海洋学会春季大会 2009/04/08東京
- 26 田村、早稲田、宮澤 うねりと風波の共鳴相互作用による波浪スペクトルの狭帯化メカニズム—第58寿和丸事故解析—日本海洋学会春季大会 2009/04/08東京
- 27 Tamura、Waseda、& Miyazawa Numerical study of the sea state in the Kuroshio Extension region at the time of an accident, Rogue Wave 2008, 2008/10/15 Brest, France
- 28 Waseda、H. Tamura、T. Kinoshita Extremely Narrow Spectrum and Freak Wave - an Abnormal Sea State, Rogue Wave 2008, 2008/10/15 Brest, France
- 29 西田、因、早稲田、高野 再解析データを用いた日本周辺における海上風と有義波高の長期傾向 日本海洋学会 秋季大会 2008/9/27 呉市
- 30 早稲田、田村、因、木下 極端に

狭い波浪スペクトルとフリーク波に、日本海洋学会秋季大会、2008/9/27 呉

31 Waseda, T., Interplay of resonant and non-resonant wave-wave interaction of directional wave, Water Waves in Shallow Water Environment (WISE), 2008/06/03 Helsinki, Finland

[図書] (計1件)

シリーズ：シリーズ〈環境の世界〉4、海洋技術環境学の創る世界、5.2 節海洋情報管理—海洋科学から海洋情報産業へ、p132 - p154、2012年、朝倉書店、181p、ISBN978-4-254-18534-8 C3340、東京大学大学院環境学研究系編

[その他]

ホームページ等

<http://waseda2.t.u-tokyo.ac.jp/~waseda> 波浪推算値(過去)を提供するサーバー

<http://157.82.253.137/las7p>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

早稲田 卓爾 (WASEDA TAKUJI)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授
研究者番号：30376488

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：