

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K18934

研究課題名（和文）全球波浪現場観測網構築のための波浪観測ブイの開発

研究課題名（英文）Development of a wave buoy for global observation system

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・教授

研究者番号：30376488

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：外洋の波浪は気象機関でシミュレーションによる予報を行っているが、現場観測による検証は必ずしもされていない。一方、温暖化に伴い甚大化する台風や爆弾低気圧下の波浪、海氷の減退により増大する極域の波浪など、厳しい環境下での現場観測が必要である。そのような厳しい環境下で波浪と水温・塩分を同時に計測する波浪観測ブイの開発を行った。Argo型の自動式フロートをプラットフォームとし、表層では波浪を計測し、沈降浮上を繰り返して水温塩分を計測するブイのプロトタイプを開発し海上試験を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では波浪予測精度向上のために波浪と水温・塩分を同時に計測する観測ブイを開発した。波浪予測精度の向上は、海上や沿岸の安全や効率的なオペレーションのために今後ますます重要度が増すが、気象予測精度の向上にも重要である。特に、近年強さを増す台風や爆弾低気圧の発達には海面水温が重要となる。最近の研究で波浪による海洋混合が海面水温に影響することがわかってきた。開発しているブイは、特に強風下での波浪、氷海での波浪などの計測に用いられることが期待される。

研究成果の概要（英文）：Operational wave models are used to forecast waves in the open ocean by meteorological agencies but the results are not necessarily validated by in-situ observations. On the other hand, because of the intensifying typhoons and bomb cyclones due to global warming, and increasing wave heights in the polar region due to receding sea ice, in-situ wave observation is in urgent need. In this work, we have developed a buoy that can conduct a coupled observation of surface waves and salinity and temperature profile measurements. Based on an Argo type autonomous profiling float, we have developed a buoy that can measure waves at the surface and while ascending and descending, the temperature and salinity profiles will be measured. We have conducted prototype testing in the ocean.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：海上安全 海洋物理 海洋工学 気象学 船舶工学

1. 研究開始当初の背景

(1) 極端環境下での波浪、現場波浪観測データの不足

海洋波の予測は 1940 年代に遡り、海洋学的予測の成功例としては最も歴史が古い。風による波浪の生成と発達に関する理論体系は 1960 年代には確立され、第三代波浪予報モデルは 1980 年代にその原型が完成した。一方、1990 年代初頭より衛星海面高度計による広域の有義波高の計測が可能となったため、現場波浪観測が無い空白海域が広範囲に広がっている。その一方、地球温暖化に伴い甚大化する台風や爆弾低気圧下での波浪や、増大する氷海での波浪など既存の理論・観測データでは説明のできない極端環境下での波浪の予測精度向上が大きな課題となっている。

(2) Argo プロジェクトの成功

現場での波浪観測は比較的沿岸近くの係留観測ブイに限定されるため、例えば、風速 35m/s を超えるような強風下での波浪計測例は限られる。そこで、着目したのが、1990 年代後半から 20 年にわたり全球での水温・塩分場を計測し続けている Argo プロジェクトである。国際協力により実現したフロートの数は現時点で 3800 を超えている。この Argo 型フロートをプラットフォームとして波浪を計測することを考えた。着目したのは 20 年にわたり計測を途絶えることなく継続させることができた頑強なシステムである。

2. 研究の目的

本研究では、台風や爆弾低気圧など強風下での波浪、北極海夏季開放海域での波浪など厳しい条件下も含む、全球規模での展開を想定した、頑強な漂流型の波浪計測ブイの開発を行うことが目的である。全世界中層フロート観測網として実績のある Argo フロートをプラットフォームとし、波浪計測システムの実装をめざす。

3. 研究の方法

(1) Argo 型フロートの開発

既存の Argo フロートについて調査を行う。プロトタイプとしての浮体を定め、その波浪中応答特性を把握する。そのために、水槽実験または外洋での観測実験を実施する。また、水中での挙動を制御するため、外洋にてフロートの浮沈実験を行う。

(2) 波浪計測システムの開発

水中での計測、または、通信環境が途絶える強風下での計測を想定するため、慣性ユニット (Inertial Measurement Unit) を用い、加速度、角速度、方位計測に基づく浮体の運動計測を行う。そのために、慣性ユニットの選択、性能評価を行う。そして、波浪パラメータの推定を行う解析プログラムを開発する。

(3) 実海域での実証試験

Argo 型フロートに波浪計測ユニットを実装し、浮力の調整、表層における波浪中動揺計測、浮沈実験、そして、水中での挙動計測を行う。

4. 研究成果

(1) Argo 型フロートの開発 (MOF-Wave の開発)

研究開始当初、既存の Argo フロートについて調査を行った。これまでに実績のある複数社に打診したところ、すでに Argo オペレーションモードでの最適化が行われているため、波浪計測ユニットの追加には、スペース、電源、通信など余裕が無いことが判明した。そこで着目したのが、(合) オフショアテクノロジーズが開発している MOF (Multipurpose Observation Float) である。スタンダードな仕様では CTD (塩分・温度計測) を搭載し Argo ブイとしての計測を行うが、小型で運用がしやすく、他のセンサー等を搭載して、カスタム化可能な万能観測機器として開発されている。

(<https://www.offshore-technologies.com/plat-forms/>)

その MOF をプラットフォームに、波浪計測ユニットを搭載した、MOF-WAVE の開発をおこなった。

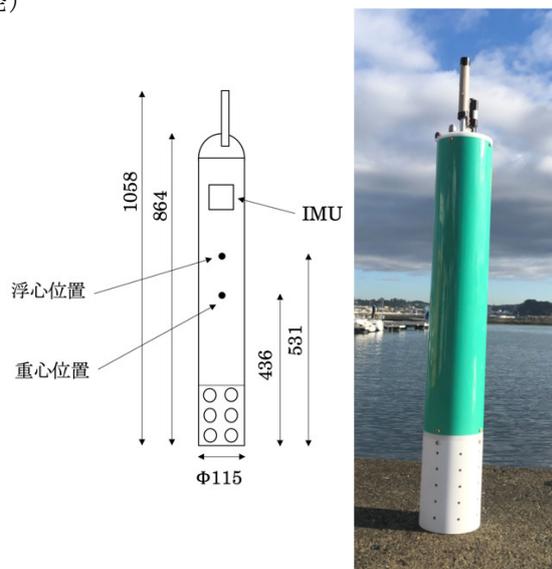


図 1 : MOF の概念図 (左) と本研究にて製造・開発した MOF-WAVE (2019 年 12 月撮影) 全長 940mm、重量約 7.8kg

今回開発した MOF の潜航深度は 500m である。Iridium SBD を用いて双方向の衛星通信が可能である。浮沈は油圧制御により行い、浮力体の体積を変えることで行う。既存のオペレーショナル Argo と異なり、PID 制御を高頻度で行うなど、水深の調整に長けていることが特徴である。ただし、浅海域での実証実験を行った際に、その浮沈制御が、浅い水深には適さないため、制御システムの大幅な変更を余儀なくされた。このため、研究計画を 1 年延長し開発を継続した (2018 年度研究の繰り越し事由)。

浮体の Heave 固有周期は、およそ、1.7 秒であることが MOF の仕様から理論的に推定される。この周期は、外洋計測時においてターゲットとするおよそ周期 4 秒以上の波浪よりもはるかに小さいため、Heave 応答関数は概ね 1 と考えて良い。但し、実際には付加質量を考慮する必要があること、また浮体水線面積が大きく変化する近傍 (浮体上部) に位置していたため、非線形応答により、実測の周期は少し長くなった。また、非線形応答により動揺も上下非対称となったが、浮力を調整し喫水を深くすると、空中部の投影面積が大きくなり、風による影響を強く受けることが想定されるため、以降の実験では喫水は変更せずに計測を行った。

(2) 波浪計測システムの開発

IoT 技術の発展により、高精度の慣性ユニット (IMU) が比較的安価で入手できるようになった。また、演算ユニットとして活用するシングルボードコンピュータは小型化が進んでおり、機器に搭載し既存の高度プログラミング言語を用いた解析が可能となっている。そこで、本研究では二つの IMU の特性を精査し、MOF-WAVE に実装した。選択したのは、ノイズレベルの大きく異なる 2 つの IMU である；IMU-A (角速度ノイズレベル $0.002 \text{ (deg/s)/}\sqrt{\text{Hz}}$ 、加速度 $0.06 \text{ mG}/\sqrt{\text{Hz}}$)；IMU-B (角速度ノイズレベル $0.015 \text{ (deg/s)/}\sqrt{\text{Hz}}$ 、加速度 $0.15 \text{ mG}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、地磁気 $0.15 \text{ }\mu\text{T/LSB}$)。

IMU の運動から求められた roll, pitch, heading から加速度データを IMU の座標系から地球座標系へ変換し、水平・垂直変位を推定する。その際に、地磁気センサーのキャリブレーション、加速度計の傾斜補正などを行った。各成分から、ノイズレベルの分離を行うハイパスフィルターをアダプティブに行う。即ち、カットオフ周波数を各時系列において個別に定めることにより、S/N 比が逆転する周波数を検出する。得られた垂直変位の時系列から、ゼロアップクロス法にて有義値を推定する。また、水平・垂直変位のクロススペクトルから、方向スペクトルを推定する。

予備実験における計測は、静止状態、強制振動、そして、MOF-WAVE に実装し海洋研究開発機構本部岸壁における計測にて行った。図 2 左に示すよう、静止状態のノイズレベルは 10-100 倍程度異なる。一方、強制動揺中はそれぞれノイズレベルが静止状態とは異なり、100 倍から 1000 倍程度異なるが、周波数 0.5[Hz]、振幅 5[cm]の動揺は十分検出できることがわかった。次に、海洋研究開発機構の岸壁における計測例を示す (図 2 右)。特に IMU-B は低周波のノイズが信号レベルを超えているが、明確に信号と低周波ノイズのスペクトルエネルギー密度レベルが最小値を取る周波数が存在し、ハイパスフィルターを用いることでノイズの分離が可能であることがわかる。IMU-A,B ともに周期 3.5 秒程度、有義波高 18 cm 程度の波浪が計測できている。

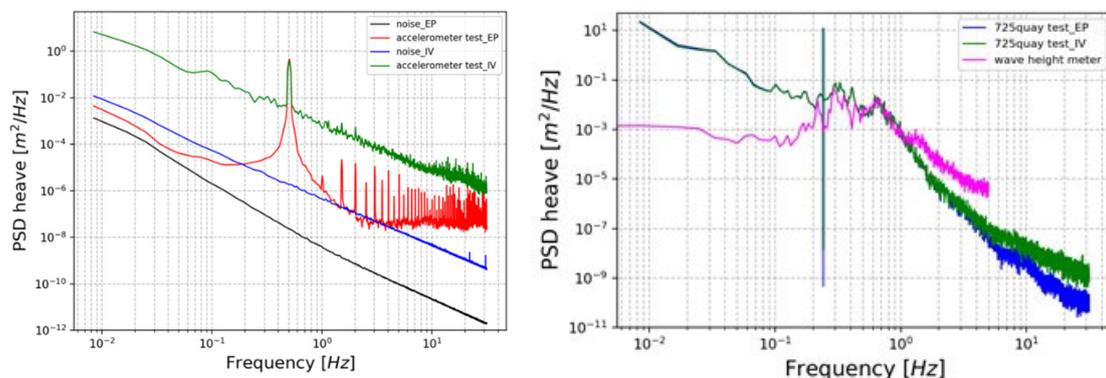


図 2 (左図) IMU-A と IMU-B による予備実験：それぞれ、ノイズレベル (静止) 黒線、青線；強制動揺試験、赤線、緑線。(右図) 海洋実証実験 (海洋研究開発機構本部岸壁における計測)：IMU-A (青線) と IMU-B (緑線)、波高計 (マゼンタ線)。

(3) 実海域での実証試験

海洋研究開発機構横須賀本部岸壁での予備実験に続き、2019年8月25日に江の島沖で、2019年12月18日に平塚沖で、そして、2019年12月27日に江の島沖にて実証試験を行った。同時に Spotter ブイを展開し、相互比較により MOF-WAVE の検証を行った。平塚沖では、東京大学平塚沖総合実験タワーに設置されている超音波式波高計との相互比較も行った。江の島沖は水深約 100m 程度の海域、平塚沖は水深 20m 程度の海域となる。浮体の沈降実験は数 10 メートルを目標としていたため、江の島沖で実施した。江の島沖、平塚沖データからは、方向スペクトルの推定も行った。

8月25日の江の島沖での計測では、有義波高 1m 弱、周期 9 秒程度の南からのうねりが卓越する条件での計測となった。表層での波浪計測では MOF-WAVE、Spotter がそれぞれ有義波高 0.97m、0.78m、有義波周期が 9.2 秒、9.4 秒と少し異なる値を計測したが、二つのブイが離れていることから、自然のばらつき（空間的な不均一性）とデータの代表性（時系列の長さ 20 分程度）の点から、妥当な結果と言える。ただし、この時には浮沈制御と波浪計測の制御を連続して行うことができず、得られたデータは限定された。次に 12月18日に平塚沖での計測を行った。この時は比較的周期の短い南からの波浪が卓越していた。MOF-WAVE、Spotter、平塚タワー計測値は、一度目の有義波高が 0.46m、0.58m、0.59m、有義波周期が 5.4 秒、7.7 秒、6.2 秒、二度目の有義波高が 0.71m、0.55m、0.56m、有義波周期が 8.6 秒、7.5 秒、6.0 秒となり、やはり、無秩序なばらつきがみられる。12月27日の江の島沖計測では、MOF-WAVE、Spotter、それぞれ有義波高が 0.56m、0.67m、有義波周期が 12.1 秒、11.3 秒となった。これらの結果を図 3 にまとめるが、先述したように、計測された有義波高の違いが周期に依存することはなく、浮体の応答特性に起因するばらつきとは考えられない。

12月27日江の島沖の計測では、沈降させ浮体の水中での運動も記録した。沈降とともに運動が減少すること、水中でも波浪による運動が計測されることがわかった。しかしながら、浮体をロープで係留した状態で実験を行ったため、弱い流れの影響を受け、浮体の運動が制約を受けていたことにより、浮体の 3 次元的な運動は必ずしも流体力学的に整合性のあるものではなかった。この点は、完全に自由に運動できる状態での計測、さらには、より大きな波高での長い期間での計測による実証が必要となる。

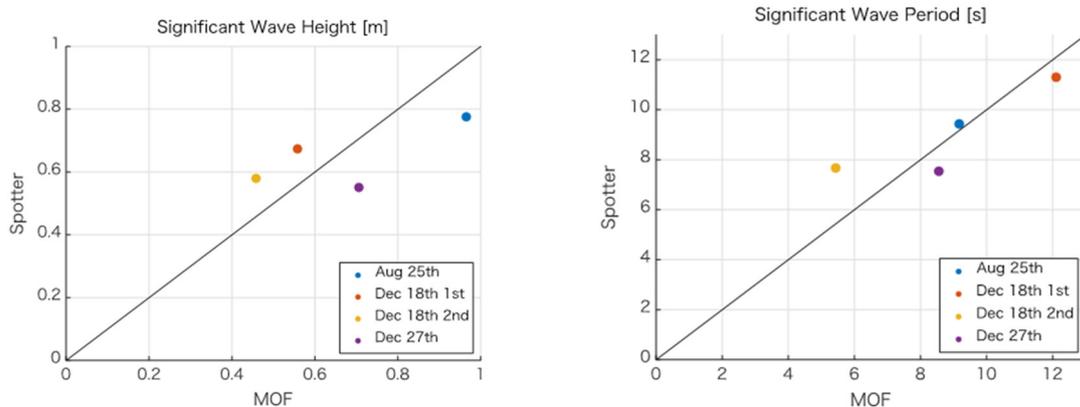


図 3 (左図) 有義波高 (m) の比較 (右図) 有義波周期の比較；横軸 MOF-WAVE, 縦軸 Spotter、8月25日 (水色)、12月18日 (赤、黄色)、12月27日 (紫)

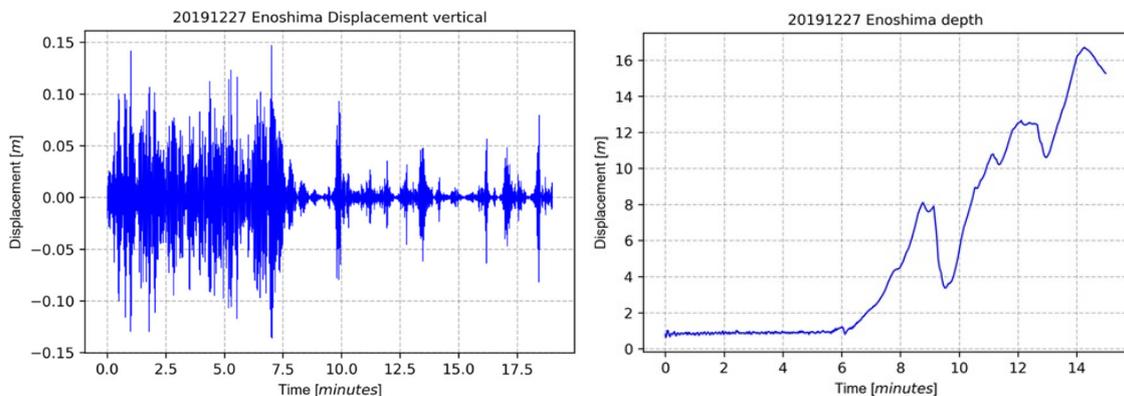


図 4 (左図) MOF-WAVE の鉛直変位。(右図) MOF-WAVE の水深。6 分ころから沈降を開始する。

江の島沖での計測では、CTD によるプロファイル計測も行った。水深 50m まで MOF-WAVE を沈降させた際の水温、塩分と推定された密度鉛直プロファイルを図 5 に示す。河川水の影響と思われる低塩分水が上層にあり、密度が水深とともに階段状に変化していることがわかる。上層の低密度層は海上風の影響を受けやすいことから、漂流ブイは吹送流によっても流される。図 4、図 5 に示したような、波浪と水温・塩分の同時計測が MOF-WAVE が目指すところであり、この実験により、その有効性が確認できた。

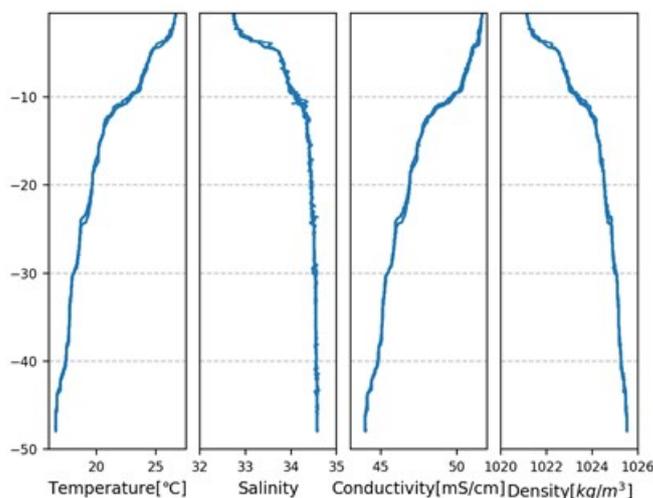


図 5 左から、水温、塩分、電気伝導率、密度の鉛直プロファイル。

(4) Argo 型波浪計測システムのさらなる展開

当初設定した目標に従い、Argo 型の浮体を利用した波浪観測の開発を行ったが、研究を進めるにあたり、当初想定していなかった展開もあった。一つ目は、海外を中心に小型の漂流型波浪ブイの開発が急速に進展したことである。本プロジェクトにおける実証実験で比較に使った小型漂流型波浪ブイ (Spotter/SOFAR 社) は、2020 年 6 月現在、独自に数百の波浪ブイを太平洋に展開する。また、同様の軽量な小型漂流型波浪ブイの開発も複数行われており、我が国における国土交通省 NOWPHAS ブイ、米国 NDBC 係留波浪ブイ、英国気象庁の係留波浪ブイなど大型の波浪ブイにとって代わろうとしている。そのような中、Argo ネットワークを利用した波浪計測は、全球波浪ブイネットワークの構築という点では、その意義を見直す必要があると言える。

その一方で、強風下の波浪の極大化とそれに伴う海洋混合が、海面水温の変化、海面傾度の変化を通して、海洋と大気に影響を与えることがわかってきた (北祐樹 2020 年 3 月東京大学博士論文)。このような大気・海洋・波浪相互作用は、しかしながら、実測で検証されたことが無い。本研究で開発した MOF-WAVE は波浪と海洋の水温塩分構造を同時に計測できるという特色がある。そこで、本研究で開発した MOF-WAVE の活用方法として、海洋・波浪結合観測ということが新たな目標として考えられる。高波高域での観測はそれ自体に意味があるが、しかし、同時に水温・塩分構造の変化が計測できれば、直接的に波浪による海洋混合のエビデンスを得ることができる。このような、波浪混合は、北極海でも観測されている (Smith et al. 2018)。強風と波浪の影響で、亜表層の高温水が湧昇し、海氷を 1 日で融解させたということは、比較的波高が低い極域でも波浪・海洋結合過程が重要であることを意味する。MOF-WAVE の活用は極域でも期待される。

そのような観点から、MOF-WAVE を発展させた、Wave-Argo-Typhoon (WAT) を引き続き開発する (科学研究費補助金挑戦的研究 (開拓) Wave-Argo-Typhoon の開発と国際的な展開、2019-2021)。いくつかの実海域でのケーススタディーを行った後、国際的な同意が得られれば、Argo ネットワークの一部としての利用も考えられる。

最後に、本研究の一環として、国際展開も様々な形で行った。6th Argo Science Workshop (2018) にて、MOF-WAVE のコンセプトについて発表を行ったのち、10 年に一度開催され、次の 10 年の観測計画を定める国際会議である Ocean Obs '19 (2019) にて、MOF-WAVE を紹介した。この会合では、観測自体が圧倒的に不足している南半球での波浪計測におけるコミュニティーホワイトペーパーも共著で発表した (Babanin et al. 2019)、そこには、MOF-WAVE を用いた計測も含まれている。日本を含む 9 か国から 21 名が共著となった本論文に基づき、今後、MOF-WAVE を用いた、南太平洋での波浪観測が、オーストラリアとの共同研究で計画されている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Kodaira Tsubasa, Wada Ryota, Wada Daimon, Watanabe Shogo, Kita Yuki, Waseda Takuji	4. 巻 29
2. 論文標題 Development and Demonstration of a Low-Cost Coastal Wind Observation System	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers	6. 最初と最後の頁 163 ~ 169
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2534/jjasnaoe.29.163	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kodaira Tsubasa, Waseda Takuji	4. 巻 69
2. 論文標題 Tidally generated island wakes and surface water cooling over Izu Ridge	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Ocean Dynamics	6. 最初と最後の頁 1373 ~ 1385
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10236-019-01302-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Babanin Alexander V., Rogers W. Erick, Waseda Takuji, and 19 authors	4. 巻 6
2. 論文標題 Waves and Swells in High Wind and Extreme Fetches, Measurements in the Southern Ocean	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Frontiers in Marine Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fmars.2019.00361	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Waseda Takuji, Webb Adrean, Sato Kazutoshi, Inoue Jun, Kohout Alison, Penrose Bill, Penrose Scott	4. 巻 8
2. 論文標題 Correlated Increase of High Ocean Waves and Winds in the Ice-Free Waters of the Arctic Ocean	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-22500-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 10件）

1. 発表者名 Waseda, T., T. Nose, T. Kodaira, A. Kohout, J. Gemrich, H. Shen, and J. Inoue
2. 発表標題 Waves in the refreezing eastern Chukchi Sea during 2018 Mirai Cruise
3. 学会等名 Pacific Congress on Marine Science and Technology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 麻崎 和太、早稲田 卓爾、小平 翼
2. 発表標題 全球規模を想定した漂流型波浪観測ブイの開発に関する研究
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Babanin, A. and 21 authors, T. Waseda
2. 発表標題 Waves and Swells in High Wind and Extreme Fetches, Measurements in the Southern Ocean
3. 学会等名 Ocean Obs'19 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kita, Y., T. Waseda
2. 発表標題 The Effect of Ocean Waves on an Explosive Cyclone Development: Investigation with a Coupled Model
3. 学会等名 AOGS 16th annual meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Waseda, T., T. Kodaira, S. Hosoda, K. Watari, and F. Sugimoto
2. 発表標題 Development of the Wave-Argo
3. 学会等名 Ocean Obs '19 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takuji Waseda, Tsubasa Kodaira, Shigeki Hosoda, Kensuke Watari and Fumitaka Sugimoto
2. 発表標題 Development of the Wave-Argo
3. 学会等名 The Sixth Argo Science Workshop (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	小平 翼 (Kodaira Tsubasa) (60795459)	東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教 (12601)	
研究 協力者	細田 滋毅 (Hosoda Shigeki) (60399582)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門 海洋観測研究センター・グループリーダー (82706)	