

令和元年6月12日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04423

研究課題名(和文) さざ波の物理過程を考慮したSAR衛星シミュレータの開発と海面物理量推定

研究課題名(英文) Study on short gravity wind waves

研究代表者

田村 仁 (Tamura, Hitoshi)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・港湾空港技術研究所・研究官

研究者番号：80419895

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,570,000円

研究成果の概要(和文)：人工衛星「だいち2号」が捕らえる海表面でのさざ波の変動エネルギーおよび力学バランスの詳細を把握するために、「さざ波の観測システム」を開発し、相模湾平塚沖の海洋観測プラットフォームにおいて海上風乱流観測と組み合わせることでさざ波の現地観測を行った。また様々な海象条件(海上風、風波、うねりなど)での観測データを解析対象とするためにアメリカ東海岸で行われた観測プロジェクトSHOWEXの際に計測された海上風乱流および水位変動の現地観測データ解析についても行った。その結果、1. 解析に用いたスペクトル推定手法の優位性、2. 高波数領域における双峰性スペクトルの存在、3. 波浪境界層の重要性などを示すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、さざ波の物理現象ならびにその変動を支配している力学過程を解明することで、SAR衛星画像から特定の海面物理パラメータを定量的に評価することを最終目的としている。SAR衛星画像は極めて高解像度な海表面「シグナル」を映し出すことから、沿岸海洋学に新たな科学的知見をもたらす有力な観測手法として期待されている。本研究では、その基礎となるさざ波の物理現象を解明するために現地観測を行い、いくつかの重要な知見を得ることができた。これらの知見をベースに全球海面物理量の推定が可能となれば、今後の沿岸海洋モニタリングや地球環境研究に大きなインパクトを及ぼし得るものとなる。

研究成果の概要(英文)：In order to understand the details of the spectral property and dynamic balance of ripples (short gravity waves) on the sea surface, we developed observation system and conducted field observation of ripples and associated processes, off Hiratsuka Sagami Bay. In addition, we analyzed observation data under various sea state conditions (SHOWEX projects) to further understand the turbulence airflow over the ocean. We demonstrated that 1. applicability of the spectrum estimation method used for analysis, 2. existence of bimodal spectrum in high wave number domain, and 3. importance of the wave boundary layer.

研究分野：海岸工学

キーワード：さざ波 エネルギーバランス 平塚海洋観測タワー 合成開口レーダ

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

## 1. 研究開始当初の背景

陸域観測を主目的とした ALOS-2 は、近年着目されている地球環境モニタリングの観点から海域観測衛星としての役割への期待も大きい。L バンド合成開口レーダ（以下、SAR）を搭載した ALOS-2 は、マイクロ波を海面に放射し、反射される後方散乱強度を計測することで、直接的には波長 20cm 程度の海面の高波数スペクトル成分（以下「さざ波」）に関連する物理量を観測する。海上風や砕波によって生成されたさざ波が、海面における流れの収束発散などの影響を受けることで空間密度に差異が生じ、そのエネルギー密度の高低で SAR 画像に明暗が生じる。つまり、海面上のさざ波というマイクロな現象を通じて、「海上風」「海洋波」「海流」といったマクロな現象を映し出す。より精度の高い海面パラメータの推定には、実海域におけるさざ波の物理現象を解明し、SAR 画像が直接観測する後方散乱強度との関連性を定量的に評価することが重要なポイントとなる。しかしながら、卓越する風波（波高：メートルオーダー）の上に乗る極微小のさざ波（波高：ミリメートルオーダー）を現場海域で直接観測することはきわめて困難であり、SAR 画像の工学的利用への大きな障壁となっている。さらに近年では海面からの Bragg 共鳴散乱の他に、海洋波の砕波が後方散乱強度に直接影響を及ぼしていることが示唆されており（例えば Phillips 1988, Kudryavtsev et al 2005）、取り組むべき新たな研究課題が多い。

## 2. 研究の目的

本研究では ALOS-2 が観測対象とする波長 20cm までの海面のさざ波（高波数スペクトル）の物理現象を解明することで、これまで定性的にしか取り扱われてこなかった SAR 画像に現れる「シグナル」を定量的に評価することを最終目的とする。上記の目的を達成するために ALOS-2/SAR 画像に反映される L バンド波数帯におけるさざ波の物理現象を解明するために現地観測を行う。高精度容量式波高計を高密度に配置することで、波長 20cm までの高波数スペクトルを計測する観測システムを構築する。また様々な海象条件（海上風、風波、うねりなど）および海域条件（吹送距離など）での観測データを解析し、高波数スペクトル形状、砕波特性、エネルギーバランスに関する物理過程を解明する。

## 3. 研究の方法

(1) さざ波の観測システムの開発と現地観測およびデータ解析 人工衛星 ALOS-2 が捕らえる海面での L バンド波数帯の海面変動およびエネルギーバランスの詳細を把握するために、波長 20cm までを解像する「さざ波の観測システム」を開発する。さざ波観測にはきわめて高精度・高分解能（波高 mm 単位、波長 20cm 分解能、サンプリング 20Hz）な水位変動の計測が要求される。本研究では、これまでマイアミ大学が開発してきた ASIS (air-sea interaction spar) ブイ (Drennan et al 2003) として観測実績がある高精度容量式波高計を高密度に配置することでさざ波現地観測手法を確立する。また、観測プラットフォームには東京大学海洋アライアンスが所有する平塚観測棟（相模湾沖、北緯 35.305 度、東経 139.345 度）を利用し、海上風および砕波観測と組み合わせて「さざ波の現地観測システム」を構築する。得られた水位変動は Donelan らによる WDM 法を用いて 2 次元波数スペクトルの推定を行った。

(2) ASIS ブイによる海上風乱流計測とデータ解析 1999 年にアメリカ東海岸 (North Carolina 沖) で行われた観測プロジェクト SHOWEX の際に ASIS ブイによって計測された海上風乱流および水位変動の現地観測データ解析を行う。ブイはおよそ 50km 沖合の水深 35m の海域（北緯 36.47 度、西経 75.25 度）に設置された。超音波風速計 (Gill Solent 1012R2A) は平均海面から 7m 高さに、また容量式波高計はブイ側面に 5 角形状および中心部に合わせて 6 本取り付けられ、1 サンプルを 20Hz、30 分間として計測された。計測データはブイ本体に取り付けられたモーションセンサーを用いて動揺を補正し物理パラメータを得た。2 次元波浪スペクトルは MLM (Maximum likelihood method) を用いて推定した。観測期間はおよそ 40 日で総データサンプル数は 2646 である。

## 4. 研究成果

### (1) さざ波の観測システム構築

海表面のさざ波と海上風および砕波乱流を同時計測することを目的として「さざ波観測システム」を構築した。波高計には AKAMINA 社製の AWP-4-24-3 型の容量式波高計（センサー長 3m）を中心 1 本、半径 10cm (R1) に 5 本、半径 70cm (R2) に 5 本の計 11 本を配置し海面変動の同時計測が可能となった。計測周波数は 20Hz で 30 分間を 1 サンプルとして計測した。また、波高センサー設置架台上には超音波風速計 (Gill 社製・Wind Master PRO)、下には超音波流速計 (Nortek 社製・VECTOR) も設置し Keyence 社製 NR-HA08 を用いて計測データの収集を行った (図-1)。

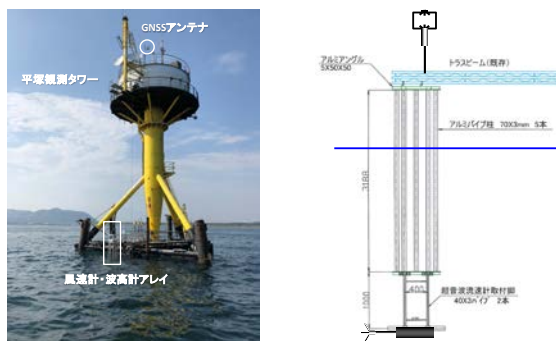


図-1 平塚観測タワーとさざ波観測システム

## (2) 平塚タワーでのさざ波観測結果

相模湾・平塚観測タワーでは2017年1月と2018年3月に観測を実施した。ここでは2017年1月の観測で得られたデータ解析結果に関して記す。図-2は観測期間中の風速計および水位計から得られた気象・海象に関する統計量の時系列である。観測期間中においてYD:22-23にかけて低気圧の通過に伴う気象擾乱が確認でき風速は南寄り10m/s以上となっている(青:南寄り, 赤:北寄り)。これに伴い水位変動はセンサーレンジを超えたためデータ欠損がYD:23前後に確認できる。計測できた最大の有義波高は1.5m程度である。また観測期間中の平塚沖では潮位変動が最大で1.5m程度になり、満潮時にデータ欠損が多いことも確認できる。図-3はこの内2017年1月21日 21:00 (JST)に計測された波数域に対する飽和スペクトル (saturation spectrum:  $B(k) = k^3 F(k)$ ) を示している。ここではWDMの優位性を示すために、通常のスเปクトル推定に用いられる方法(FFT)との比較を行っている。R2で得られる低波数側(波数 $1\text{m}^{-1}$ 程度以下)のスเปクトルエネルギーに関してはWDM(黒太線)およびFFT(灰細線)に顕著な違いは確認できないが、高波数側(波数 $1\text{m}^{-1}$ 程度以上)となると、FFTによって得られたスเปクトルエネルギーがWDMによるものを大幅に上回る結果となる。これは波浪場において一般的に知られるドップラーシフトによる推定バイアスである。図-4はWDMによって推定された高波数帯域( $k=10\text{rad/m}$ )における方向スペクトルの1例を示している。風向(破線)およびスเปクトルエネルギーの極小値(NNW方向)に対して正負45度付近に2つのエネルギーピークがあることが確認できる。これはHwang and Wang (2001)が初めて現地観測結果から示したBimodalスペクトルであると考えられ、本観測手法においてもきわめて特徴的な方向分布関数を得ることができた。

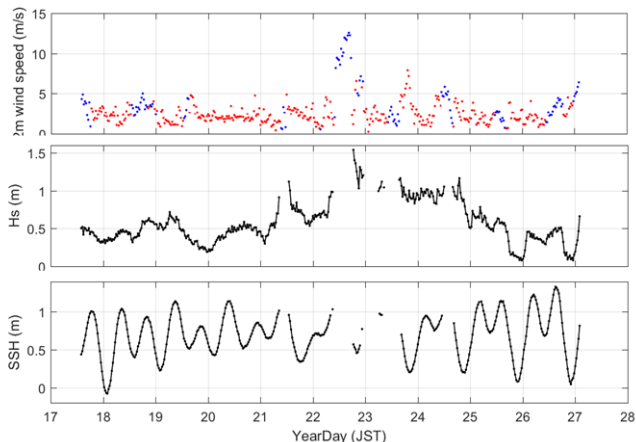


図-2 平塚2017年1月観測における気象・海象条件上:海上風速, 中:有義波高, 下:潮位

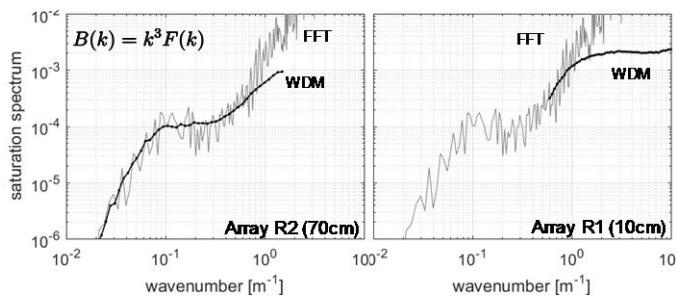


図-3 飽和スペクトル

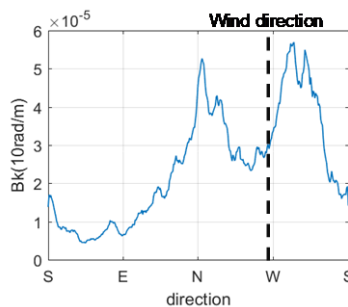


図-4 方向スペクトル

## (3) ASIS ブイデータの解析結果

ASIS ブイによって得られた海上風乱流と波浪スเปクトルデータの解析を行い、様々な海象条件下における波浪境界層内の乱流特性とさざ波の関係に関して解明を試みた。SHOWEX プロジェクトで得られた海上風乱流データから uw コスเปクトルをそれぞれの逆波齢でコンポジット平均を取ったものが図-5である。ここではMiyake et al. (1970)による海上風乱流の Universal scaling を用いて無次元化している。逆波齢が0.8以上の風波が発達している場合、既往の研究と同様に異なる海象条件であっても Universal scaling に従いコスเปクトルが同一曲線上に収束することがわかる。一方、逆波齢0.8以下の場合、Universal scaling は成立せず Miyake et al. (1970)で示された無次元レイノルズ応力の周波数分布と大きく異なることが確認できる。一方で、海上風乱流は波浪の影響が大きく反映されていることを考慮し波浪のピーク周波数で周波数を無次元化したものが図-6である。この様な無次元化を行った場合でも、逆波齢が0.8以上では Universal scaling と同様に異なる海象条件下でのコスเปクトルが収束する。さらに逆波齢が0.8以下の場合でも、物理的な解釈が可能となる。つまりうねりが海上風を追い抜く海象条件下(逆波齢:0-0.8)では波浪ピーク周波数に顕著なスเปクトルのくぼみがあり、逆波齢が0.2-0.4の場合では無次元コスเปクトルが負となる。これは波浪ピーク周波数に対応する乱流変動が上向きの運動量フラックスを引き起こすことを意味しており、海洋側から大気側へ運動量



が輸送される。一方、風とうねりが逆向きの海象条件（逆波齢： $-0.3-0$ ）でも1付近に顕著な正のピークが確認される。この場合、海上風乱流は下向きの運動量フラックスを引き起こすものの、風下に発達する風波に対してうねりを減衰させる様に作用することとなる。

海表面の平均二乗勾配（MSS）は衛星搭載の散乱計や合成開口レーダのマイクロ波の後方散乱強度を間接的に反映することから、海面物理パラメータを推定する際に極めて重要となる。観測に用いられた容量式波高計の時系列から直接波形勾配（ $MSS^{1/2}$ ）を算出し、それぞれの逆波齢に応じてその平均値と確率密度関数を示したものが図-7である。逆波齢が0.8以上の場合は、MSSの平均値もそれらの確率密度分布も逆波齢とは関係なく同様の値および分布となる。これは波形勾配が高周波側のスペクトルエネルギーに大きく依存するためであると考えられる。

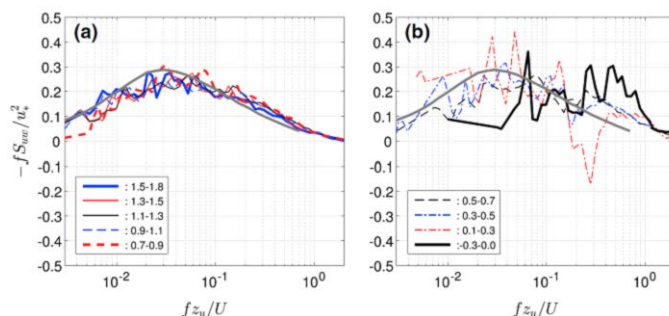


図-5 逆波齢に対する  $uw$  コスペクトル (Universal scaling で無次元化)

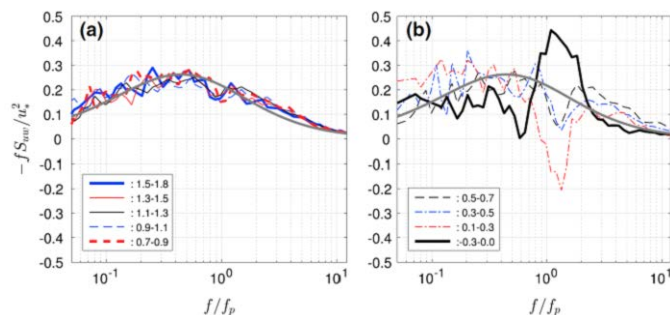


図-6 逆波齢に対する  $uw$  コスペクトル (ピーク周波数で無次元化)

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

1. H. Tamura, W.M. Drennan, C.O. Collins III, H.C. Graber (2018). Turbulent Airflow and Wave-Induced Stress over the Ocean, *Boundary-Layer Meteorology*, 169, 1, 47-66
2. 田村 仁・William M. DRENNAN (2016), 波浪境界層内における乱流特性, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 72, 2, I\_91-I\_96

[学会発表] (計2件)

1. 2017 年日本海洋学会秋季大会, 仙台, 2017 年 10 月 14 日-10 月 16 日, 波浪境界層内の乱流特性 (およびセッション座長担当)
2. 2017 年 JpGU-AGU Joint Meeting, 千葉, 2017 年 5 月 20 日-5 月 25 日, Impact of ocean surface waves on air-sea momentum flux (Invited speaker)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

### 6. 研究組織

(1)研究分担者

該当なし

(2)研究協力者

研究協力者氏名：早稻田卓爾

ローマ字氏名：Takuji Waseda

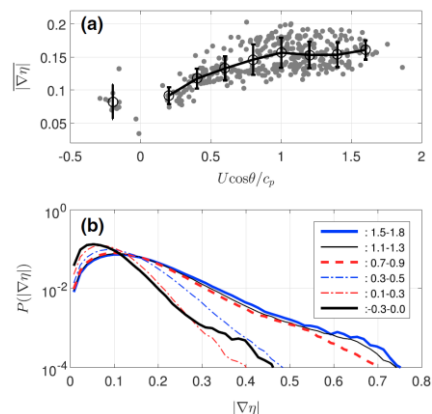


図-7 逆波齢に対する波形勾配の平均値とその確率密度分布

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。