海の研究(Oceanography in Japan), 31(1), 1-21, 2022, doi: 10.5928/kaiyou.31.1_1

— 2021年度日本海洋学会賞受賞記念論文 —

衛星マイクロ波センサーに関する基礎研究と 海洋学への応用*

江淵 直人†

要旨

衛星搭載マイクロ波センサーは、マイクロ波帯の電波を利用することによって、昼夜や天 候の影響を受けずに海面を観測することができる反面、合成開口レーダを除けば、空間分 解能は10kmオーダーと粗い。可視・赤外放射計が、クロロフィルa濃度や海面水温の高 解像度画像をもたらすのに対して、マイクロ波センサーは、全球スケールの物理量観測が 中心となる。高精度の物理量観測を達成するためには、海面の物理過程を基礎としたアル ゴリズムの開発と観測精度の評価および誤差特性の把握によるアルゴリズム改良への フィードバックが必要不可欠である。本稿では、マイクロ波散乱計、レーダ波高度計、マ イクロ波放射計の3種類の衛星マイクロ波センサーによる海洋観測とその利用に関する私 のこれまで研究を振り返るとともに、今後の展望について述べたい。

キーワード:マイクロ波リモートセンシング,マイクロ波散乱計,レーダ高度計, マイクロ波放射計,大気海洋相互作用

1. はじめに

このたびは栄誉ある日本海洋学会賞をいただき光栄に 思います。会員の皆様,推薦・選考いただいた賞選考委 員の皆様に心から御礼申し上げます。また,日頃から 様々な場面でご指導・ご支援いただいた多くの皆様に感 謝します。本稿では,受賞対象としていただいた私のこ れまで研究を振り返りたいと思いますが,この後を読ん

 * 北海道大学低温科学研究所 〒 060−0819 札幌市北区北 19 条西 8 丁目 e-mail: ebuchi@lowtem.hokudai.ac.jp でいただけると分かる通り,歴代の受賞者の方々のよう に,一貫した目標に向かって地道な研究を積み重ねると いうタイプではなく,その時々の興味のままに,いくつ かの研究対象の間を行ったり来たりする節操のない研究 スタイルを続けてきました。それが祟ってまとまりのな い話になってしまうことをご容赦ください。

人工衛星をプラットフォームとしたリモートセンシン グによる地球観測は、1970年代から本格的に行われるよ うになった。その基本的な原理は、衛星に搭載したセン サーを用いて、地球から自然に放射される電磁波の信号 を受信したり(受動型)、センサーから地球に向かって電 磁波を発射し、戻ってくる信号を受信したりする(能動 型)ことによって、地球表面および大気の諸パラメータ

^{* 2021}年11月26日受領 2022年1月17日受理 著作権:日本海洋学会,2022年

を計測するものである。宇宙空間にある衛星から,地球 の大気を通して海面を含む地球表面を観測するため,大 気の透過率が高い(いわゆる「大気の窓」と呼ばれる)可 視域,赤外域,マイクロ波域の電磁波が用いられている。 短時間に広範囲を繰り返し観測できるため,観測条件の 厳しい外洋域などでは非常に有効な観測手段となってい る。

衛星マイクロ波センサーは、マイクロ波帯(約0.3~ 300 GHz)の電波を用いるため、可視・赤外のセンサー に比べ、昼夜を問わず、雲の下を観測できるという利点 がある。その反面、マイクロ波の波長は、可視・赤外に 比べて数桁以上長いため、空間分解能の点では著しく劣 る。よって、可視・赤外のセンサーが、クロロフィル a 濃度や海面水温の高分解能画像をもたらすのに対して、 マイクロ波は、全球スケールの物理量の観測が中心とな る。物理量の観測には、精度の評価と誤差特性の把握が 必要不可欠であり、また、従来の観測方法で得られた データとの整合性についても検証が必要である。マイク ロ波センサーを使った地球観測全般に関しては、Ulaby and Long (2014)の教科書を参照されたい。

私が海洋学を始めた1980年代は、赤外放射計による 海面水温観測が実用化されつつある時期であった。当 時,解析には、大きなメモリと特殊な入出力装置(とは 言っても 512×512 画素, RGB 3 バイト程度で, 現在の 初心者用 PC にもはるかに及ばない) を持った高価な画 像処理システムが必要であった。1990年代に入り、能動 型のマイクロ波センサーが登場した。日本の地球観測衛 星 ADEOS (Advanced Earth Observing Satellite, 愛称 「みどり」, 1996年打ち上げ) に米国・NASA (National Aeronautics and Space Administration)のマイクロ波散 乱計 NSCAT (NASA Scatterometer) が搭載されること になった。このような背景の下、私は、修士課程から博 士課程(中退),助手,学位取得(論博)まで,衛星観測 を意識しつつ、風洞水槽実験によって、風波の表面形状 とマイクロ波後方散乱のメカニズムの研究を行った(江 淵, 1994; Ebuchi et al., 1987, 1992a, 1993 など)。その後 の衛星データの解析においても、風波や海面境界過程の 研究 (Ebuchi et al., 1990, 1992b; Toba et al., 1990; Toba and Ebuchi, 1991 など) が、物理的なバックグラウンド として私の研究を支えていると考えている。室内実験や 衛星リモートセンシングを選んだのは,船酔いに極端に 弱い私の体質も少なからず影響した。

2. マイクロ波散乱計による海上風ベクトル観測

マイクロ波散乱計は、センサーからマイクロ波のパル スを発射し、海面から後方散乱される信号を受信して、 海上風ベクトル (風速、風向)を観測する能動型のセン サーである。海面におけるマイクロ波の後方散乱係数 (後方散乱断面積)は、マイクロ波の周波数、偏波、入射 角、風速およびレーダの視線方向と風向のなす相対方位 角などに依存することが知られている。この特性を利用 し、同一の海面を複数の方位角から観測することによっ て、風速と風向を同時に求めることが可能になる (Naderi *et al.*, 1991; Liu 2002; Ulaby and Long, 2014 など)。

Fig. 1 は、QuikSCAT 衛星に搭載されたマイクロ波散 乱計 SeaWinds によって観測された台風周辺の海上風速 ベクトル場の一例である。グアム島西方海上にある台風



Fig. 1. Vector wind field around Typhoon Man-yi (T0704) observed by QuikSCAT/SeaWinds at 20h31m on 10 July 2007, UT.

の周囲の強風の渦および中心付近の台風の目の弱風域が 捉えられている。Fig.2は、同じQuikSCAT/SeaWinds の観測データをもとに作成した月平均全球海上風ベクト ル分布である。北半球冬季の季節風と偏西風、低緯度域 の貿易風、インドモンスーンの季節による反転、南大洋 偏西風域の強風帯などの様子が捉えられている。これら の海上風ベクトルのデータは、大気海洋相互作用の様々 な研究および気象予報モデルや海洋大循環モデルへの入 力として使われている。

マイクロ波散乱計は,海上風,すなわち海面直上の空 気の動きを直接観測するわけではなく,海上風によって その形状が変化する海面から後方散乱されるマイクロ波 の強度を介して,間接的に海上風を算出するものである。 よって,観測された風速は,物理的には,海面上のある 高さの風速というよりは,海面応力に対応するものと考 えられる。現在,各機関で作成・配布されているマイク



Fig. 2. Examples of monthly-averaged global vector wind fields composed using data observed by QuikSCAT/ SeaWinds. (a) January 2008, and (b) July 2008.



Fig. 3. Comparison of (a) wind speed and (b) direction observed by QuikSCAT/SeaWinds with data from offshore buoys (Ebuchi *et al.*, 2002). For wind direction, only the data of wind speed higher than 5 ms⁻¹ were plotted.

ロ波散乱計(他のマイクロ波センサーも同様)の海上風速 は、海面上高度10mにおける中立成層相当風速(海面応 力と1対1に対応)にチューニングされているものがほ とんどである。高度10mに置いた風速計が観測する風 速とは異なることに注意が必要である。また、マイクロ 波散乱計の風ベクトルからバルク式を使って海面応力ベ クトルを計算する際には、安定度の項を含まない抵抗係 数を使うことが推奨されている(Liu, 2002 など)。

上述の通り、マイクロ波散乱計は海面でのマイクロ波 の後方散乱を介して間接的に海上風速・風向を観測する ため、現場観測との比較などによる精度評価と誤差特性 の把握が必要不可欠である。Fig. 3 は、その一例として QuikSCAT/SeaWinds で観測された海上風速・風向と外 洋の係留ブイの観測データを比較した結果を示す。風 速、風向ともブイの観測データとよく一致していること が分かる。風速、風向の標準偏差は、それぞれ、 1.01 ms⁻¹, 23°(風速 3 ms⁻¹以上のデータのみ)であった (Ebuchi *et al.*, 2002)。この比較では、ブイで計測した1 点における 10 分平均の風速・風向と散乱計が観測した 25 km 平均、ほぼ瞬間値の風速・風向が等価であると仮 定し、最大 30 分の時間差, 25 km の位置のずれを許容し た。また,強い降雨の影響を受けたと考えられるデータ は除去してある。1999年7月から2000年12月の18か 月間で得られた48,000点あまりの同期データを使用し た。

日本の ADEOS 衛星に米国のマイクロ波散乱計 NSCAT が搭載されることになり、国内でもデータ利用 のためのサイエンスチームが立ち上がり、私もそのメン バーとして参加することになった。そこで、NSCAT に 先行して欧州が 1991 年に打ち上げた ERS-1 (European Remote sensing Satellite-1) 衛星に搭載されたマイクロ 波センサー AMI (Advanced Microwave Instrument) の散乱計モードの観測データの解析を始めた (Ebuchi 1993; Graber *et al.*, 1996; Ebuchi, 1997a)。

衛星・センサーの打ち上げ直後は,観測精度評価とセ ンサーの校正やモデル関数(後方散乱係数を,周波数, 偏波,入射角,風速,相対風向などの関数で表現したも の),アルゴリズム等の改良を繰り返し行うことによって 観測精度の向上を図る。その際,この評価と改良のサイ クルをなるべく早く回すことが望まれるが,Fig.3のよう な現場観測との比較では,短期間に多数の同期観測デー タを得ることは難しい。気象解析データなどの数値モデ ルの出力データを用いることも考えられるが、マイクロ 波散乱計の運用が始まった 1990 年代には、その精度や 時空間代表性に疑問も少なくなかった。そこで、ERS-1/ AMI データを用いた準備期間に、風速・風向の統計分布 を用いて self-consistency をチェックする方法を開発し た(Ebuchi and Graber, 1998)。材料の都合上、本稿で は、2006 年打ち上げの MetOp-A (Meteorological Operational Satellite Program of Europe-A) 衛星に搭載され た ASCAT (Advanced Wind Scatterometer) を例とし て、この方法を紹介する (Ebuchi, 2012a)。Fig. 4 から Fig. 8 は、すべて、全球海洋 60°N-60°S で 2010 年の1 年間に観測されたデータから計算したものである。



Fig. 4. Variations in global wind speed histograms with cross-track wind vector cell location for (a) left and (b) right swaths of ASCAT winds and (c) left and (d) right swaths of collocated ECMWF winds (Ebuchi, 2012a).

Fig. 4 は, (a), (b) が ASCAT で観測した全球の風速 ヒストグラム, (c), (d) が, ASCAT と観測時刻・位置 を合わせて同期した ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)の再解析データ (ERA Interim)の風速ヒストグラムである。(a), (c) が衛星右 側の観測域,(b),(d)が左側の観測域であり,線の色・ 種類は,衛星の飛行方向に直交する方向の観測セルの位 置を表している。ECMWFの再解析データは参考値とし て用いており,ASCATとECMWFの結果が完全に一致 することは期待していない。しかしながら,全球の風速



Fig. 5. Dependence of (a) mean, (b) standard deviation, (c) skewness, and (d) kurtosis of wind speed histograms on cross-track wind vector cell location. Red circles, green crosses, blue squares, and black triangles represent ASCAT ascending paths, ASCAT descending paths, collocated ECMWF ascending paths, and collocated ECMWF descending paths, respectively (Ebuchi, 2012a).

ヒストグラムが、衛星センサーの観測セルの位置に依存 して系統的に変化することは考えられない。実際, Fig. 4 (c), (d) では, ECMWF のヒストグラムは, 観測セルの 位置によらず、全く同じ形をしている。これに対して Fig. 4 (a), (b) の ASCAT の風速ヒストグラムは, 観測 セルの位置によって、ピークの高さや幅, 高風速域の裾 野の広がりなどが系統的に変化している。これは、 ASCAT の観測データに系統的な誤差が存在することを 示している。ASCAT のようなファンビーム型の散乱計 の場合、衛星の姿勢情報、センサーのアラインメント、 アンテナビームの校正バランス、モデル関数の入射角依 存性パラメータなどの問題が影響している可能性が考え られる。Fig. 5は, Fig. 4のヒストグラムから (a) 平均, (b)標準偏差,(c)スキューネス,(d)クルトシスを求め, 観測セルの位置の関数として示したものである。左右の 観測域で対称であることや、昇交・降交軌道の結果が一

致する点から考えて,モデル関数の入射角依存性に問題 がある可能性が強く疑われる。

Fig. 6 は、ASCAT 観測データ(赤)と ECMWF 同期 データ(青)の全球の相対風向ヒストグラムを、降交軌道 の衛星左側の観測域について、観測セルの位置ごとに描 いたものである(風速 7 ~ 9 ms⁻¹のデータのみを使用)。 相対風向は、衛星の飛行方向に対して相対的な方位角で 定義した。図の上向きが衛星の飛行方向で、左右の 3本 のアンテナは、前後 45°と 真横(90°)に位置する。 ASCATと ECMWF の相対風向のヒストグラムは概ね一 致しているが、ASCAT の方には、アンテナ方向に系統 的な歪みが見られる。この原因としては、衛星の姿勢情 報、アンテナビームの校正バランス、モデル関数の相対 風向依存性パラメータなどの問題が考えられる。

Fig. 6のアンテナビーム方向の系統的な風向分布の歪 みをより明確に示すため、Fig. 6の ASCAT の分布を





Fig. 6. Distributions of wind directions relative to spacecraft flight direction for wind speeds ranging from 7 to 9 ms⁻¹, left swath, and descending paths. Red and blue lines represent ASCAT and collocated ECMWF winds, respectively (Ebuchi, 2012a).

ECMWF の分布で割ることによって、規格化を行った。 Fig. 7 にその結果を示した。ASCAT と ECMWF の風向 分布が一致すれば、この図では半径1の円になる。Fig. 7 では、アンテナ方向に相対的な歪みが明確に表現される とともに、それが、昇交軌道、降交軌道で一致すること が明らかとなった。また、ここでは結果は示さないが、 Fig. 7 で示した衛星左側の観測域と同様に、衛星右側の 観測域においても、ほぼ同じ形の風向分布の歪みが見ら れた。これら結果は、相対風向データの分布の歪みが、 衛星の姿勢やビームバランスなどではなく、モデル関数 の誤差によることを強く示唆している。

Fig. 8 は, 規格化した相対風向分布の風速依存性を左 側観測域中央の観測セルについて示したものである。風 速によって歪みのパターンが変化する様子が明らかであ る。これは, モデル関数の相対風向依存を表すパラメー タの誤差が, 入射角だけではなく, 風速にも依存するこ とを示唆している。このように Fig. 4~8に示した比較 的簡単な統計量を求めるだけで, 誤差の要因を推定でき る点がこの方法の便利な点である。実際, モデル関数に 適当な人為的誤差を与えたシミュレーションによって, 類似のパターンが再現することができる (Ebuchi, 1999a)。Fig. 4~8の例では1年分の観測データを用い たが, 1週間程度以上の全球観測データがあれば十分安 定した統計分布を得ることが可能である。

1996年8月の ADEOS/NSCAT の打ち上げ直後には, 米国中から著名な研究者がカリフォルニア州パサデナに ある Jet Propulsion Laboratory (JPL) に集まり,数か月 間集中して初期校正・評価・改良の作業に取り組んだ。 まさに,"NSCAT Dream Team"と呼べる状況であった。 私は,幸いにも,約3か月間この作業に加わる機会を得 た。日米,多くの方々のサポートをいただいたことは言 うまでもない。NASA の研究所で,プロジェクトがいか に進められていくかを現場で目の当たりにする,非常に 貴重で刺激的な経験であった。もちろん,日本から来た





Fig. 7. Normalized distributions of ASCAT relative wind directions for wind speeds ranging from 7 to 9 ms⁻¹ and left swath. Red and blue lines represent ascending and descending paths, respectively (Ebuchi, 2012a).



Fig. 8. Variations of normalized distributions of ASCAT relative wind directions with wind speed for left mid swath (wind vector cell number 10-12). Red and blue lines represent ascending and descending paths, respectively. (Ebuchi, 2012a).

無名の若造は、Dream Teamの補欠どころか球拾いでさ えもない見学者扱いだったが、何とかミッションに貢献 する成果を出したいと考え、処理データがアップデート されるごとに上記の統計処理を行った(Ebuchi, 1997b, 1999b, 2000)。その結果、この手法は短期間のデータで、 衛星の姿勢やセンサーのアラインメント、ビームバラン ス、モデル関数などの問題をクリアに示すことができる 点が評価されるようになった。特に、Fig. 6~8の相対 風向分布のレーダーチャートには"Ebuchi plot"という 名前をもらった。その後、同様の方法を QuikSCAT/ SeaWinds, ADEOS-II/SeaWinds, MetOp/ASCAT, ISS/ RapidSCAT, OSCAT (Oceansat-2 Scatterometer), ScatSat などの多くのマイクロ波散乱計ミッションの精度 評価に利用した(Ebuchi, 2012a, b, 2013, 2015 など)。

NSCAT は、衛星本体の故障によって短命に終わった が、その代替機として QuikSCAT が急遽打ち上げられ、 10年以上にわたって観測を続け、貴重なデータセットを 残した。その後、米国のマイクロ波散乱計ミッションは、 国際宇宙ステーション (International Space Station、 ISS)に搭載された小型のマイクロ波散乱計 RapidSCAT (2014年9月~2016年8月)に引き継がれたが,それ以 降,後継ミッションは途絶えている。いくつかの提案は 出されているが,現時点で,実現の見通しは立っていな い。欧州は,気象予報への現業利用を目的に MetOp 衛 星シリーズに ASCAT 散乱計を連続して搭載している。 また,インドや中国もマイクロ波散乱計を搭載した衛星 を打ち上げ,CFOSAT (Chinese-French Oceanography Satellite)衛星に搭載された RFSCAT (Rotating Fanbeam Scatterometer) などの新しいタイプのセンサーも 登場している。

レーダ波高度計による黒潮再循環域の中規 模渦の観測

レーダ高度計は、衛星から直下点に向けてマイクロ波 のパルスを発射し、海面で反射された信号が受信される までの時間を計測することにより、海面の高度を cm オーダーで観測し、地衡流の関係を使って海面の流れの 情報を得ることを目的とする能動型マイクロ波センサー である。衛星-海面間の距離をパルスの往復時間から求 め,別の方法で決定した衛星軌道高度から差し引くこと で、地球の準拠楕円体面基準の海面高度が求まる。も し、準拠楕円体面基準のジオイド高が既知であれば、ジ オイド基準の海面高度を求めることができる。現時点で は、ジオイド高の精度・空間分解能が、海洋の変動を議 論するには必ずしも十分ではないため、ジオイドは時間 変化しないと仮定して、同一軌道上での海面高度の時間 変化を求め、別の方法で推定した平均海面高度と足し合 わせることにより、海面高度場を作成している。Fig. 9 は、マイクロ波高度計で観測された北太平洋の海面高度 分布の一例である。亜熱帯循環・亜寒帯循環などの海盆 スケールの大きな構造や黒潮のような西岸境界流および 多数の渦などが捉えられている。マイクロ波高度計によ る海面高度および海流の観測については Fu and Kazenave (2001) などを参照されたい。

私は,当初,マイクロ波高度計の主目的である海面高 度や表層流ではなく,副産物ともいえる有義波高やスカ ラー風速のデータを使った波浪の発達などの研究を行っ

ていた (Ebuchi et al., 1992c; Ebuchi and Kawamura, 1994; Ebuchi, 1999c)。1997年, 前節で紹介した NSCAT 散乱計を搭載した ADEOS 衛星が,衛星本体の故障によ り運用を停止し、その代替機として、1998年に SeaWinds 散乱計を搭載した QuikSCAT 衛星の打ち上げが急 遽計画された。私は、NSCAT 同様、打ち上げ後の校正・ 検証作業に参加すべく準備を進めていたが、直前にロ ケットのトラブルによって QuikSCAT の打ち上げが延期 となった。結果的に延期期間は約1年に及んだ。そこで, この空いた時間を利用して、当時、東北大学理学部(大 学院理学研究科)の海洋物理グループが行っていた東京 - 父島間の定期船「おがさわら丸」を利用した XBT・ ADCP モニタリング TOLEX (Tokyo-Ogasawara Line Experiment)の観測データと海面高度計 TOPEX/Poseidon の海面高度偏差データを組み合わせた黒潮再循環流 域の中規模渦の研究に着手した (Ebuchi and Hanawa, 2000)。

Fig. 10 は, TOLEX の ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler) と XBT(eXpendable Bathy Thrermograph) で観測された中規模渦の例である。Fig. 10 (a)



Fig. 9. Map of sea surface height composed from multi-mission radar altimeter observations (unit in m, January 1, 2021, UT, produced by using the AVISO Live Access Server).

は,縦軸は航路に沿った緯度,横軸方向には時間をとり, 渦の西進とともに観測された表層の流速ベクトルを描い たものである。最大流速 30 cms⁻¹ 程度の反時計回りの渦 が捉えられている。Fig. 10 (b) は,XBT で観測した水 温断面である。渦にともない,主水温躍層が約200m変 位している様子が分かる。同様の低気圧性・高気圧性両 方の渦が頻繁に観測された。

Fig. 11は, TOPEX/Poseidon 高度計で観測した海面



Fig. 10. Example of a cyclonic eddy observed by TOLEX ADCP/XBT. (a) Surface current vectors observed by the ADCP and (b) a temperature profile observed by XBTs (unit °C). The origins of the horizontal and vertical axis of the panel (a) are September 12, 1994, UT and 29.8°N. The XBT temperature profiles were observed on September 15-16, 1994, UT (Ebuchi and Hanawa, 2000).

江淵 直人



Fig. 11. Composite profiles of sea surface height anomaly and cross-track velocity for (a) cyclonic and (b) anticyclonic eddies. Numbers of cyclonic and anticyclonic eddies which passed across Path 010 in the 5-year period of the TOPEX/Poseidon data (Oct. 1992-Oct. 1997), and which are used to calculate the composite profiles, are 17 and 19, respectively. Thin lines in upper panels indicate standard deviations from the mean sea surface height anomalies (Ebuchi and Hanawa, 2000).

高度偏差の軌道沿いのデータから,渦の中央を観測した ケースのコンポジットを,低気圧性・高気圧性両方の渦 について計算したものである。上が,高度偏差の平均と 標準偏差,下が動径方向の流速である。どちらも直径 250 km 程度で,高度偏差は15 cm,動径方向の最大流速 は15 ~ 20 cms⁻¹であった。衛星高度計と現場観測を組 み合わせて用いることによって,このような中規模渦の 大きさ,形状,伝播の様子などを定量的に捉えることが できた。

海面高度計のデータを面的に利用すると、このような 中規模渦の西方伝播の軌跡を追跡することが可能である (Ebuchi and Hanawa, 2001)。Fig. 12 は、高・低気圧そ れぞれの軌跡を追跡したものである。多くの中規模渦は 黒潮続流域を起源として、約7 cms⁻¹の速度で西方へ伝 播し,伊豆海嶺のギャップを通り抜けて,四国沖まで達 する。この伝播特性に,高気圧性渦と低気圧性渦の違い は見られなかった。

Fig. 12 に示したように,西方伝播によって四国沖に達した中規模渦のいくつかは,黒潮に衝突して,小蛇行の発生に関与している可能性が示唆された(Ebuchi and Hanawa, 2003)。四国沖には,約5ヵ月の周期で時計回りに移動している高気圧性渦が存在し,それが黒潮に近づくと小蛇行が発生して,下流へ伝播する様子が捉えられた(Fig. 13)。その後,中規模渦が黒潮流路に与える影響については,Endoh and Hibiya(2001)やUsui *et al.*(2008)などの数値モデルを使った研究が行われ,そのメカニズムが明らかになってきた。

現在では, 高度計データを時空間補間した格子データ



Fig. 12. Trajectories of (a) cyclonic and (b) anticyclonic eddies. The time series of maps from October 22, 1992 to June 3, 1998, yielded tracings of 21 cyclonic and 22 anticyclonic eddies (Ebuchi and Hanawa, 2001).

が AVISO (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data) などで作成・配布され, 様々な研究に使われている。上記の研究を始めたころは, ちょうど格子データセットの初期のものが出回り始めた 時期であった。軌道沿いのデータと格子データを見比べ ながら,渦を手作業で追跡した。現在は,Okubo-Weiss パラメータなどを使って自動的に中規模渦を識別・追跡 する方法が開発され,渦の軌跡のデータセットなども作 成されている。しかしながら,軌道沿いの観測データの 時空間補間で作成された格子データを利用する際には, 格子間隔にかかわらず,元データの軌道間隔や観測時間 間隔を意識する必要があり,短時間での渦の移動速度の 変化や渦の大きさ,形に関する情報を使用する際には十 分な注意が必要であろう。

北大低温研へ異動後は,海面高度計のデータを使用し たオホーツク海の研究にも取り組んだ。オホーツク海で 高度計データを利用する際には,潮汐補正や海氷の影響 など,中緯度外洋に比べ工夫が必要な点もあったが,東 サハリン海流や知床沖の暖水渦などの季節変動・経年変 動を明確に捉えることができた (Ebuchi, 2006a; Uchimoto *et al.*, 2007 など)。



Fig. 13. Composite profiles of the Kuroshio axis with reference to the time when the clockwise-revolving anticyclonic eddy was in the northernmost position for the cases when meanders were generated (thick lines with error bars). The profiles are drawn with time shifting downward. Thin lines with circles and dashed lines represent the mean location of the Kuroshio axis with the standard deviations (Ebuchi and Hanawa, 2003).

4. マイクロ波放射計による海上風速観測

マイクロ波放射計は、地球表面および大気からのマイ クロ波域の放射を複数の周波数・偏波で計測する受動型 センサーで,鉛直積算水蒸気量,雲水量,降水量,海上 風速,海面水温,海氷密接度,土壌水分,積雪深などの 情報が得られる。地表面,海面,海氷,大気などは,マ イクロ波域においては黒体と見なすことができないため、 その放射強度(放射輝度温度)は、放射体の温度に加え て、電気的な特性(複素比誘電率)や形状などに依存す る。マイクロ波放射計は、1970年代後半から実用化され た。1990年代後半以降,日本のセンサーが世界最高性能 と認識されている。海面水温観測のためのC-バンド (6.9 GHz) チャンネルの付加や、2 m 級の大型アンテナに よる高空間分解能・高精度校正の実現などが画期的で あった。Fig. 14は、2012年に JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency)が打ち上げた日本の地球観測衛星 GCOM-W (Global Change Observation Mission-Water, しずく)に搭載されたマイクロ波放射計 AMSR2(Advanced Microwave Scanning Radiometer 2) によって観 測された全球の海面水温,海上風速,可降水量,北極の 海氷密接度の5日平均値の一例である(江淵ほか、 2021)

2002年に打ち上げられた日本の ADEOS-II 衛星に, 米国のマイクロ波散乱計 SeaWinds と日本のマイクロ波 放射計 AMSR が搭載された。マイクロ波散乱計とマイク ロ放射計が同じ衛星に搭載されて同時観測を行うのは, 1978年打ち上げの Seasat 衛星以来のことであった。残 念ながら, ADEOS-II は ADEOS に続いて,衛星本体の 故障により, 10 か月あまりの短命に終わったが,貴重な 同期観測のデータを残した。このデータを使って,両セ ンサーで観測された海上風速 (スカラー)の相互比較や 散乱計の降雨フラグの検証,降雨補正の可能性などの研 究を行った (Ebuchi, 2005a, 2005b, 2006b, 2009 など)。 同様の手法を GCOM-W 衛星搭載 AMSR2 マイクロ波放 射計の海上風速の検証とアルゴリズム改良にも適用した (Ebuchi, 2014, 2017a, b など)。

Fig. 15 は, AMSR2 の 3 つのバージョンの海上風速 データを RapidScat 散乱計のデータと比較したものであ



Fig. 14. Examples of 5-day average map of (a) sea surface temperature, (b) sea surface wind speed, (c) vertically-integrated water vapor, and (d) sea ice concentration observed by AMSR2 (Ebuchi *et al.*, 2021).

る。時間差 60 分以内,観測中心の位置のずれ 12.5 km 以 内の条件で同期データを作成した。2015 年 1 月から 3 月 の 3 か月間で 420 万点あまりのデータが集まった(Ebuchi, 2017a, b)。3 つのバージョンの図を見比べると, v2.1 や v3 では、5 ms⁻¹ 以下の低風速域での過小評価の傾向や 5~15 ms⁻¹ の風速レンジでの歪みが見られるが, v4 では, これらの問題はかなり軽減されている。残差の標準偏差 は、v2.1 が 1.20 ms⁻¹, v3 が 1.42 ms⁻¹, v4 が 1.03 ms⁻¹ と, v2.1 から v3 へのバージョンアップが,必ずしも精度向上 につながっていないことが分かる。このような,地道な 精度検証とアルゴリズム改良の繰り返しが観測精度の向 上に繋がっている。

AMSR2 の海上風速の最新バージョンは, Fig. 15 の結 果やブイとの比較などによって, 20 ms⁻¹ 以下の風速域で は 1 ms⁻¹ 程度の観測精度を持つことが示されている。し かしながら,標準の海上風速プロダクトは,主に 36 GHz の輝度温度を用いて作成されているため、20 ms⁻¹ 以上の 高風速条件での感度低下や強い降雨による散乱・減衰の 影響が懸念される。台風やハリケーンなどの熱帯低気圧 の周辺における高風速・強降雨の条件で海上風速を観測 するためには、より低い周波数を使ったプロダクトが必 要となる。そこで JAXA は、6.9 GHz および 10 GHz の輝 度温度データを用いた全天候海上風データ(All-weather Sea surface Wind, ASW)を作成している。しかしなが ら、高風速域には信頼できる参照データが乏しい。ブイ には波浪による動揺や気流の剥離の影響が大きく、船舶 や観測塔には構造物による気流の歪みの問題があり、気 象解析データには、時空間代表性や境界層のパラメータ 化の妥当性の問題が存在する。

現在,熱帯低気圧などの高風速・強降雨条件での現場 観測としては,ドロップゾンデが最も信頼できると考え られている。ただし,ドロップゾンデは1点における観

江淵 直人



Fig. 15. Comparison of AMSR2 wind speeds with RSCAT data for (a) version 2.1, (b) version 3 and (c) version 4. Number density relative to the total number (%) in boxes of $0.2 \times 0.2 \text{ ms}^{-1}$ is shown by color (Ebuchi, 2017a, b).

測であり、数10kmの分解能を持つ衛星センサーの観測 データと直接比較することは難しい。特に、風速の空間 変化が大きい熱帯低気圧の中心付近では、この違いは致 命的である。そこで, 航空機搭載の Stepped Frequency Microwave Radiometer (SFMR) の観測データ (空間分 解能100m程度)をドロップゾンデのデータで校正し, 飛行経路沿いに衛星センサーの空間分解能と同等の空間 スケールの平滑化を行って、衛星観測データと比較する 方法が推奨されている。Fig. 16 は、この方法で JAXA ASW 海上風速を SFMR 観測データと比較した結果であ る (Ebuchi, 2018)。15 ms⁻¹ 以上の風速域で、残差の標 準偏差 3.6 ms⁻¹とよく一致していることが示されている。 また、ASW データの面的分布の検証として、気象庁の 台風ベストトラックデータを用いて暴風域 (風速 50 kt 以 上)の大きさの比較も行い、良好な結果を得た(Ebuchi, 2020)。

2011年に海面塩分観測を目的とした NASA の L-バン ドマイクロ波放射計 Aquarius がアルゼンチンの衛星 SAC-D に搭載された。Aquarius の国際研究公募に,国 内の共同研究者の皆さんとともに応募し,採択された。 海面塩分による輝度温度の変化の信号は非常に小さく, 海洋学的に意味のある観測精度(悪くとも 0.1 程度)を達 成することは,特に低水温域では難しい。Aquariusでは, 100 km,1ヵ月の平均操作によりランダム誤差を抑えて 0.2 の観測精度実現を目指した。このミッションに参加



Fig. 16. Comparison of wind speeds around hurricanes from SFMR and AMSR2/ASW (Ebuchi, 2018).

し, Argo の観測データによる観測精度評価と誤差特性 の抽出 (Abe and Ebuchi, 2014 など) や観測データの利 用研究 (Toyoda *et al.*, 2015; Abe *et al.*, 2019) などを行っ た。

5. おわりに — 今後の展望

本稿では、3つのマイクロ波センサーを使ってこれまで の私が行ってきた研究を紹介したが、最後に今後の展望 について述べたい。

現在,マイクロ波放射計 AMSR2 は,設計寿命の5年 を大幅に超えて10年目の運用に入っている。現時点で, 衛星に搭載された燃料には十分余裕があり,また,衛 星,センサーとも大きな異常の兆候は見られない。しか しながら,今後の観測継続の先行きは見通せない状況で もあり,JAXA は,AMSR2の後継機としてAMSR3の 開発に着手した。AMSR3 は,温室効果ガスを観測する センサー TANSO-3 (Total Anthropogenic and Natural emissions mapping SpectrOmeter-3)とともに,GO-SAT-GW (Global Observing Satellite for Greenhouse gases and Water cycle)衛星に搭載される。現時点での 打上げ予定は、2023年度中となっている。GOSAT-GW の軌道は、昇交点通過地方太陽時がGCOM-Wと同じ 13時 30分であるが、軌道高度は666 km とGCOM-W の700 km に比べやや低く設定されている。

AMSR3 は、基本的には、AMSR2 と同じアンテナ開口 径、周波数、偏波を引き継ぐとともに、高分解能海面水 温観測のための 10.25 GHz、帯域幅 500 MHz、鉛直・水 平偏波チャンネルおよび降雪量観測と水蒸気量サウン ディングを目的とした G-バンドチャンネル (165.5 GHz, 183.3 ± 7 GHz, 183.3 ± 3 GHz, いずれも鉛直偏波のみ) が追加された。これによって、AMSR シリーズでこれま で続いてきた観測の継続性を担保するとともに、新しい パラメータの観測にもチャレンジする。

2002 年打ち上げの AMSR, AMSR-E から始まり, 2012 年打ち上げの AMSR2 に続く日本のマイクロ波放射 計観測は, 2023 年度打ち上げ予定の AMSR3 によって約 30 年間にわたると期待され,気候変動を含む長期のデー 夕解析に耐える貴重なデータセットをもたらすことにな る。しかし,基本的なセンサーのスペックは, AMSR か ら AMSR3 まで,この 20 年間ほとんど変わっていない。 ESA (European Space Agency) は Copernicus 計画の 下で,開口径7 m 級のマイクロ波放射計 CIMR (Copernicus Imaging Microwave Radiometer)を計画している (Vanin *et al.*, 2020)。これが実現すれば AMSR シリーズの優位性を脅かす存在になることは間違いない。日本 も、AMSR シリーズの遺産を継承しつつ、世界をリード する画期的なマイクロ波放射計ミッションを計画・立案・ 実現していかなければならない。

マイクロ波高度計に関しては, NASA が 2022 年 11 月 に干渉型の海面高度計を搭載した衛星ミッション SWOT (Surface Water and Ocean Topography)の打ち上げを 予定している。従来の海面高度計が、衛星直下点のみの 線の観測であったのに対し, SWOT は衛星の直下点の両 側をそれぞれ幅60kmにわたって、空間分解能2km以 下で面的に観測することが可能である (Durand et al., 2010)。また, SWOT には, 従来の直下型高度計も搭載 される。これによって,近年注目を集めているサブメソ スケールの現象を捉えることが期待されている。これま でのセンサーでは捉えることができない現象が見えるよ うになる、というのが衛星リモートセンシングの醍醐味 である。従来型の高度計と同じように使いこなすまでに は、多少時間はかかるかも知れないが、サブメソスケー ルの変動をターゲットとした現場観測や数値モデルの高 解像度化と組み合わせることによって、物理過程のみな らず物質循環や生物過程を含めた表層の海洋学の新しい 展開が期待される。日本でも、海洋一宇宙連携の枠組み で、干渉型海面高度計ミッション COMPIRA (Coastal and Ocean Measurement Mission with Precise and Innovative Radar Altimeter)の技術検討を行ったが、現 在のところ実現の見通しは立っていない。

マイクロ波散乱計に関しては、散乱計にドップラー速 度検出機能を付加し、従来の海上風ベクトルに加えて、 表層流速ベクトルを同時観測する新しいミッション Winds and Currents Mission (WaCM)が提案され (Rodriguez *et al.*, 2018; Wineteer *et al.*, 2020),航空機搭載 センサーによる観測実験がすでに行われている。ドップ ラー速度を計測するため、非地衡流を含んだ表層流の情 報が得られ、サブメソスケールの海洋変動とそれにとも なう大気海洋相互作用の研究への利用が期待される。同 様 の 構 想 は、HARMONY, SeaSTAR, Ocean Surface Currents Observation Mission (OSCOM) など複数提案 されている。

本稿では取り上げなかったが、日本のL-バンド合成

開口レーダ (Synthetic Aperture Radar, SAR) の気象・ 海洋への本格的な利用にも期待したい。現在, JAXA, 気象研究所などのグループが、台風やハリケーンなど熱 帯低気圧の中心付近の風速観測に挑戦している。L-バン ドは、衛星リモートセンシングに使われるマイクロ波帯 の中では最も波長が長い(周波数が低い)ため、高風速 域での後方散乱強度の飽和や降雨による減衰・散乱など の影響が小さく、熱帯低気圧の観測に適している。ただ し、散乱計や放射計などの実開口センサーでは、空間分 解能が数10km以上となり、熱帯低気圧の中心付近の複 雑な構造を捉えるには粗すぎる。これに対し、SAR なら ば100m以下の高分解能観測が可能である。日本は、 1992年打ち上げの JERS-1 (Japanese Earth Resources Satellite-1) 衛星以来, ALOS (Advanced Land Observing Satellite,「だいち」, 2006 年打ち上げ) 衛星搭載 PAL-SAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar), ALOS-2(「だいち2号」, 2014年)衛星搭載 PALSAR-2とL-バンド SAR を開発・運用してきた実 績がある。ただし、衛星の名前の通り、もともと陸域観 測用として開発されたため、現状では、気象・海洋の現 象に使うためには観測頻度が圧倒的に足りない。この課 題を克服できれば、より細かいスケールの海上風場や海 洋表層・海氷の変動の観測に非常に有力な手段となると 考えられる。

衛星搭載マイクロ波センサーによる海洋観測の先駆け となった Seasat 衛星 (1978 年打ち上げ)の時代に,欧米 の研究者たちが目指していたことは,海上風ベクトル, 海面水温,海面高度と表層流速場,塩分観測など,かな りの部分が実現したと考えていいだろう。これからは, より新しい発想と技術で,さらなる発展を考えなければ ならない。また,マイクロ波センサーを含む衛星リモー トセンシングは,海洋観測の道具の一つでしかなく,現 場観測や数値モデルとの有機的な組み合わせが必要不可 欠なことは言うまでもない。

謝 辞

この度の日本海洋学会賞受賞にあたり,会員の皆様お よび推薦・選考いただいた賞選考委員の皆様にあらため て心から御礼申し上げます。また,学生時代からお世話

になった東北大学関係者の皆様、現在の所属先である北 海道大学関係者の皆様, JAXA 関係者の皆様, International Ocean Vector Wind Science Team (IOVWST) 関 係者の皆様、海洋理工学会関係者の皆様、マイアミ大学 Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science (RSMAS)関係者の皆様、衛星大型科研費(高木重点、 住重点)関係者の皆様, Research Revolution 2002 (RR2002)関係者の皆様、アムール・オホーツクプロジェ クト関係者の皆様、熱海潮音荘研究会関係者の皆様、九 州大学応用力学研究所研究集会関係者の皆様、北海道大 学低温科学研究所研究集会関係者の皆様, Environmental Monitoring from Space of East Asia (EMSEA) 関係 者の皆様、ほか、夜な夜なお付き合いいただいた皆様な ど、多くの方々の物心両面でのご支援に心から感謝しま す。紙幅の都合上,お一人お一人のお名前を挙げること はできませんがご容赦ください。

References

- Abe, H., and N. Ebuchi (2014): Evaluation of sea surface salinity observed by Aquarius. J. Geophys. Res. Oce., 119, 8109-8121, doi: 10.1002/ 2014JC010094.
- Abe, H., N. Ebuchi, H. Ueno, H. Ishiyama, and Y. Matsumura (2019): Aquarius reveals eddy stirring after a heavy precipitation event in the subtropical North Pacific. J. Oceanogr., 75, 37–50, doi: 10.1007/ s10872-018-0482-0.
- Durand, M., L.-L. Fu, D. P. Lettenmaier, D. E. Alsdorf, E. Rodriguez, and D. Esteban-Fernandez (2010): The Surface Water and Ocean Topography Mission: Observing terrestrial surface water and oceanic submesoscale eddies. *Proc. IEEE*, 98, 766–779, doi: 10.1109/JPROC.2010.2043031.
- Ebuchi, N. (1993): Directional distribution of wind vectors observed by ERS-1/AMI scatterometer. *Proc. IGARSS'93*, Tokyo, Japan, July 1993, 1385-1387, doi: 10.1109/IGARSS.1993.322078.
- 江濡直人 (1994):風波面における物理過程およびマイクロ波の後方散乱特 性に関する研究 (1994年度日本海洋学会岡田賞受賞記念論文).海の研 究, 3, 373-384.
- Ebuchi, N. (1997a): Sea surface temperature dependence of C-band radar cross sections observed by ERS-1/AMI scatterometer. J. Adv. Mar. Sci. Tech. Soc., 3, 157-168, doi: 10.14928/amstec.3.2_157.
- Ebuchi, N. (1997b): Statistical distribution of wind speeds and directions contained in the Preliminary NSCAT Science Data Products. J. Adv. Mar. Sci. Tech. Soc., 3, 141-156, doi: 10.14928/amstec.3.2_141.
- Ebuchi, N. (1999a): Relationship between directional distribution of scatterometer-derived winds and errors in geophysical model functions. *J. Adv. Mar. Sci. Tech. Soc.*, 5, 19–30, doi: 10.14928/amstec.5.0_19_30.
- Ebuchi, N. (1999b): Statistical distribution of wind speeds and directions observed by ADEOS/NSCAT. J. Geophys. Res. Oce., 104, 11,393–11,403, doi: 10.1029/98JC02061.

- Ebuchi, N. (1999c): Growth of wind waves with fetch in the Sea of Japan under winter monsoon investigated using data from satellite altimeters and scatterometer. J. Oceanogr., 55, 575-584, doi: 10.1023/ A:1007836701387.
- Ebuchi, N. (2000): Evaluation of NSCAT-2 wind vectors by using statistical distribution of wind speeds and directions. J. Oceanogr., 56, 161-172, doi: 10.1023/A:1011183029009.
- Ebuchi, N. (2005a): Intercomparison of Wind speeds observed by AMSR and SeaWinds on ADEOS-II. *Proc. IGARSS 2005*, Seoul, Korea, July 2005, 3314–3317, doi: 10.1109/IGARSS.2005.1526550.
- Ebuchi, N. (2005b): Assessment of rain flag for the SeaWinds wind data product using AMSR precipitation data. *Proc. IGARSS 2005*, Seoul, Korea, July 2005, 4185–4188, doi: 10.1109/IGARSS.2005.1525840.
- Ebuchi, N. (2006a): Seasonal and interannual variations in the East Sakhalin Current revealed by the TOPEX/POSEIDON altimeter data. J. Oceanogr., 62, 171-183, doi: 10.1007/s10872-006-0042-x.
- Ebuchi, N. (2006b): Evaluation of marine surface winds observed by Sea-Winds and AMSR on ADEOS-II. J. Oceanogr., 62, 293-301, doi: 10.1007/s10872-006-0054-6.
- Ebuchi, N. (2009): Evaluation of wind speed observed by AMSR using data from ocean buoys and SeaWinds. J. Remote Sens. Soc. Jpn, 29, 174– 178, doi: 10.11440/rssj.29.174.
- Ebuchi, N. (2012a): Self-consistency of marine surface wind vectors observed by ASCAT. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 50, 2473–2480, doi: 10.1109/TGRS.2011.2160648.
- Ebuchi, N. (2012b): Evaluation of wind vectors observed by OSCAT using statistical distributions. *Proc. IGARSS 2012*, Munich, Germany, July 2012, 2043–2046, doi: 10.1109/IGARSS.2012.6350974.
- Ebuchi, N. (2013): Intercomparison of four ocean vector wind products from Oceansat-2 scatterometer. *Proc. IGARSS 2013*, Melbourne, Australia, July 2013, 1254–1257, doi: 10.1109/IGARSS.2013.6723008.
- Ebuchi, N. (2014): Evaluation of wind speed globally observed by AMSR2 on GCOM-W1. *Proc. IGARSS 2014*, Quebec City, Quebec, Canada, July 2014, 3902–3905, doi: 10.1109/IGARSS.2014.6947337.
- Ebuchi, N. (2015): Evaluation of marine vector winds observed by Rapid-Scat on the International Space Station using statistical distribution. *Proc. IGARSS 2015*, Milan, Italy, July 2014, 4901–4904, doi: 10.1109/IG-ARSS.2015.7326930.
- Ebuchi, N. (2017a): Evaluation of marine surface wind speed observed by AMSR2 on GCOM-W. *IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens.*, 10, 3955-3962, doi: 10.1109/JSTARS.2017.2685432.
- Ebuchi, N. (2017b): Evaluation of improved marine surface wind products from AMSR2 on GCOM-W. *Proc. IGARSS 2017*, Fort Worth, TX, USA, July 2017, 5633-5636, doi: 10.1109/IGARSS.2017.8128283.
- Ebuchi, N. (2018): Evaluation of all-weather sea surface wind speed product from GCOM-W/AMSR2 microwave radiometer. *Proc. IGARSS* 2018, Valencia, Spain, July 2018, pp. 6663-66666, doi: 10.1109/IG-ARSS.2018.8519042.
- Ebuchi, N. (2020): Comparison of spatial distribution of high wind speed around typhoons derived from AMSR2 All-weather Sea Surface Wind Product with JMA best-track data. *Proc. IGARSS 2020*, Online, September 2020, 5777–5779, doi: 10.1109/IGARSS39084.2020.9324032.
- Ebuchi, N., H. Kawamura, and Y. Toba (1987): Fine structure of laboratory wind-wave surfaces studied using an optical method. *Bound-ary-Layer Meteorol.*, **39**, 133-151, doi: 10.1007/BF00121871.

- Ebuchi, N., Y. Toba, and H. Kawamura (1990): On the wave dependence of sea-surface wind stress. J. Oceanogr. Soc. Jpn, 46, 177-183, doi: 10.1007/BF02125578.
- Ebuchi, N., H. Kawamura, and Y. Toba (1992a): Statistical properties of microwave backscattering from laboratory wind-wave surfaces. J. Oceanogr., 48, 139-154, doi: 10.1007/BF02239002.
- Ebuchi, N., Y. Toba, and H. Kawamura (1992b): Statistical study on the local equilibrium between wind and wind waves by using data from ocean data buoy stations. J. Oceanogr., 48, 77-92, doi: 10.1007/ BF02234033.
- Ebuchi, N., H. Kawamura, and Y. Toba (1992c): Growth of wind waves with fetch observed by the GEOSAT altimeter in the Japan Sea under winter monsoon. J. Geophys. Res. Oce., 97, 809–819, doi: 10.1029/ 91JC02452.
- Ebuchi, N., H. Kawamura, and Y. Toba (1993): Physical processes of microwave backscattering from laboratory wind-wave surfaces. J. Geophys. Res. Oce., 98, 14,669–14,681, doi: 10.1029/93JC00974.
- Ebuchi, N., and H. Kawamura (1994): Validation of wind speeds and significant wave heights observed by TOPEX altimeter around Japan. J. Oceanogr., 50, 479-487, doi: 10.1007/BF02234969.
- Ebuchi, N., and H. C. Graber (1998): Directivity of wind vectors derived from the ERS-1/AMI Scatterometer. J. Geophys. Res. Oce,, 103, 7787-7797, doi: 10.1029/97JC02727.
- Ebuchi, N., and K. Hanawa (2000): Mesoscale eddies observed by TOLEX-ADCP and TOPEX/POSEIDON altimeter in the Kuroshio Recirculation Region south of Japan. J. Oceanogr., 56, 43-57, doi: 10.1023/A:1011110507628.
- Ebuchi, N., and K. Hanawa (2001): Trajectory of mesoscale eddies in the Kuroshio recirculation region. J. Oceanogr., 57, 471-480, doi: 10.1023/ A:1021293822277.
- Ebuchi, N., H. C. Graber, and M. J. Caruso (2002): Evaluation of wind vectors observed by QuikSCAT/SeaWinds using ocean buoy data. J. Atmos. Oceanic Tech., 19, 2049–2062, doi: 10.1175/1520-0426(2002).
- Ebuchi, N., and K. Hanawa (2003): Influences of mesoscale eddies on variations of the Kuroshio axis. J. Oceanogr., 59, 25–36, doi: 10.1023/ A:1022856122033.
- 江淵直人・可知美佐子・笠原希仁 (2021): AMSR シリーズによる全球水循 環の観測. 日本リモートセンシング学会誌, 41, 267-269, doi: 10.11440/ rssi.41.267.
- Endoh, T., and T. Hibiya (2001): Numerical simulation of the transient response of the Kuroshio leading to the large meander formation south of Japan. J. Geophys. Res. Occ., 106, 26,833–26,850.
- Fu, L.-L., and A. Cazenave (2001): Satellite Altimetry and Earth Sciences. Academic Press, San Diego, USA, 463 pp.
- Graber, H. C., N. Ebuchi, and R. Vakkayil (1996): Evaluation of ERS-1 scatterometer winds with ocean buoy observations. *Proc. Oceans* '96, Fort-Lauderdale, Florida, U.S.A, September 1996, 1157-1165, doi: 10.1109/OCEANS.1996.569065.
- Liu, W. T. (2002): Progress in Scatterometer Application. J. Oceanogr., 58, 121–136, doi. 10.1023/A:1015832919110.
- Naderi, F. M., M. H. Freilich, and D. G. Long (1991): Spaceborne radar measurement of wind velocity over the ocean. – An overview the NSCAT scatterometer system. *Proc. IEEE*, **79**, 850–866, doi: 10.1109/5.90163.
- Rodriguez, E., A. Wineteer, D. Perkovic-Martin, T. Gal, B. W. Stiles, N. Niamsuwan, and R. R. Monje, (2018): Estimating ocean vector winds

and currents using a Ka-band pencil-beam Doppler scatterometer. *Remote Sensing*, **10**, 576. doi: 10.3390/rs10040576.

- Toba, Y., N. Iida, H. Kawamura, N. Ebuchi, and I. S. F. Jones (1990): Wave dependence of sea-surface wind stress. J. Phys. Oceanogr., 20, 705-721, doi: 10.1175/1520-0485(1990)020.
- Toba, Y., and N. Ebuchi (1991): Sea-surface roughness length fluctuating in concert with wind and waves. J. Oceanogr. Soc. Jpn, 47, 63-79, doi: 10.1007/BF02301483.
- Toyoda, T., Y. Fujii, T. Kuragano, J. P. Matthews, H. Abe, and N. Ebuchi, N. Usui, K. Ogawa, and M. Kamachi (2015): Improvements to a global ocean data assimilation system through the incorporation of Aquarius surface salinity data. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 141, 2750–2759, doi: 10.1002/qj.2561.
- Uchimoto, K., H. Mitsudera, N. Ebuchi, and Y. Miyazawa (2007): Clockwise eddy caused by the Soya Warm Current in an OGCM. J. Oceanogr., 63, 379–391, doi: 10.1007/s10872-007-0036-3.
- Ulaby, F. T., and D. G. Long (2014): Microwave Radar and Radiometric Remote Sensing. The University of Michigan Press, Ann Arbor, USA, 984 pp.
- Usui, N., H. Tsujino, H. Nakano, and Y. Fujii (2008): Formation process of the Kuroshio large meander in 2004. J. Geophys. Res. Oce., 113, C08047, doi:10.1029/2007JC004675.
- Vanin F, P. Laberinti, C. Donlon, B. Fiorelli, I. Barat, M. Pinol Sole, M. Palladino, P. Eggers, T. Rudolph, and C. Galeazzi (2020): Copernicus Imaging Microwave Radiometer (CIMR): System aspects and technological challenges. *Proc. IGARSS 2020*, Online, September 2020, 6535-6538, doi: 10.1109/IGARSS39084.2020.9324259.
- Wineteer, A., H. S. Torres, and E. Rodriguez, (2020): On the surface current measurement capabilities of spaceborne Doppler scatterometry. *Geophys. Res. Lett.*, 47, e2020GL090116. doi: 10.1029/2020GL090116.

Fundamental studies concerning observations of the sea surface by spaceborne microwave sensors and their applications for oceanography

Naoto Ebuchi[†]

Abstract

Spaceborne microwave sensors, such as microwave scatterometers, radar altimeters, and microwave radiometers, can observe the sea surface day and night and are not affected by clouds. Except for the synthetic aperture radar, their spatial resolution is in the order of 10 km. While visible and infrared radiometers provide high-resolution images of chlorophyll *a* concentration and sea surface temperature, microwave sensors focus on global observations of physical parameters of the sea surface. To achieve accurate observation, it is indispensable to develop algorithms that are based on the physical processes at the air-sea boundary, evaluate observation accuracy, comprehend the error characteristics, and provide feedback for algorithm improvement. In this paper, I would like to summarize my research on ocean observations using three different types of microwave sensors and their applications as well as describe future prospects.

Key words: Microwave remote sensing, scatterometer, radar altimeter, microwave radiometer, air-sea interaction

(Corresponding author's e-mail address: ebuchi@lowtem.hokudai.ac.jp) (Received 26 November 2021: accepted 17 January 2022) (doi: 10.5928/kaiyou.31.1_1) (Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2022) 21

[†] Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Kita-19, Nishi-8, Kita-ku, Sapporo 060-0819, Japan e-mail: ebuchi@lowtem.hokudai.ac.jp