熱帯や極域の国際プロジェクトにおける船舶観測

米山邦夫（海洋研究開発機構）

１．はじめに

気象学に従事したり、興味を持ったり、これから志したりする方にとって、“船舶観測”とはどのような印象だろうか？　中には 1981 年まで夏の時期だけ継続した気象庁の観測船による北緯 29 度、東経 135 度での定点観測を覚えている方もいるかもしれない。近年、かなりの部分は人工衛星や気象海象ブイなどによる観測に切り替わり、観測船の数自体は減少しているが、現場の詳細な大気と海洋を観測することができ、また、洋上プラットフォームとして、新規に開発された測器や他の観測システムとの組み合わせによる多角的観測の実現のため、現在も研究の最先端で使用されている。本稿では、後者の例を、特に国際プロジェクトのプラットフォームとして活用されている様子を、主に海洋地球研究船「みらい」を用いた熱帯および極域の観測から紹介する。

図１　海洋地球研究船「みらい」

２．船舶観測に係る留意点

国際プロジェクトにおける船舶観測を紹介する前に、その実現に必要ないくつかの点を記す。

2.1 観測装置の適切な運用

1997 年 10 月に竣工し、1 年間の慣熟訓練航海を経て 1998 年 11 月から本格運用を開始した海洋地球研究船「みらい」には、当初から大気と海洋の観測装置として、C バンド・ドップラーレーダー（2014 年から二重偏波機能が付いた新レーダーに更新されている）（勝俣 2014；米山・勝俣 2018）、ラジオゾンデ、海上気象・海洋表層連続測定装置、電気伝導度（塩分）・水温・深度計（CTD）、音響式ドップラー流向流速計（ADCP）など、多数搭載されている。個々の測器は、製造業者による定期的なメンテナンスに加えて、専門の観測技術員による維持管理が徹底されているが、測器そのものが正確に計測をしていても、時にそのデータをそのままでは使うことができない場合が生じる。例えば、「みらい」の場合、作業甲板は木で覆われているが、船そのものは鉄の塊である。まして、観測船として世界最大級の大きさ（全長 128.5m、国際総トン数 8,706 トン）を誇る船である。船舶観測の目的は海洋や海上の大気の状態を計測することにあるが、船の材質・構造自体が船の周辺だけ気温や湿度を変えてしまい、たとえ正確に計測しても、船が存在しない場合の海上の様子をとらえることが難しい。また、例えば、船が１つの地点に止まって計測していたとしても、風や波やうねりが存在するため、船は一定の姿勢を保つために常にエンジンをかけてプロペラを回し、制御する。これは船の周りの海をかき乱すことにもつながっている。このような船舶特有の環境の中で、正確に海洋や海上の様子を観測するために、例えば、温湿度計は左舷と右舷両方に取り付け、常に風上のデータだけを採用する、船の動きでかき乱された時の水深 5m までのデータは使用しない、船体自身が作り出す温度や湿度の変化分を別途計測し、影響を差し引く、などの処理を行う。このように、観測データは取得したままを使うのではなく、一定の管理の下で、補正済みデータとして研究に供されている。

2.2 排他的経済水域内における観測

船舶観測の最大の強みは、移動できることである。大気や海洋の変動を調べるためには、その現象が起きている海域で観測をすることが最初の一歩となる。しかしながら、それは自由に行うことができない。海に面した国々には、管轄権が認められている領海があり、その外側に鉱物資源や漁業、科学調査を行う権利を主張できる排他的経済水域（Exclusive Economic Zone: EEZ）を設定できる。このため、日本以外の国の EEZ 内で我々が海洋科学調査（Marine Scientific Research: MSR）を行う場合には、国連海洋法条約に基づき、該当国に申請を出し、了解を得る必要がある（以後 MSR 申請と呼ぶ）。また、国に

よっては、この EEZ 内での観測を承認する条件として、その国の国内法に従い、観測許可証の取得を課す場合もある。例えば、インドネシアの EEZ 内で観測を行うためには、研究許可（Research Permit：RP）と軍事的に問題ないことを確認してもらうセキュリティ・クリアランス（SC）を事前にとることが必須条件となっている。そして、この許可取得のためには現地研究機関との共同研究協約があることを求められる。このため、MSR 申請は、航海開始の 6 か月前までに該当国に申請する必要があるが、インドネシアの場合、それよりも前に、現地の協力機関との間に協定を結び、RP や SC を取得しなければならない（それには通常数か月以上要する）。つまり、思いついた時に観測をする、という行為は残念ながら叶わない。このようなルールを知ったうえで、十分な検討と準備を行うことが必要となる。そして、国同士のやりとりが発生するため、所管官庁（海洋研究開発機構の場合は文部科学省）、外務省、そして現地大使館による協力が不可欠である。このため、EEZ 内での観測を実現するために、対象国に赴き、相手研究機関だけでなく大使館や許認可権を持つ省庁への説明など、関係者の理解を得ることが肝要となる。

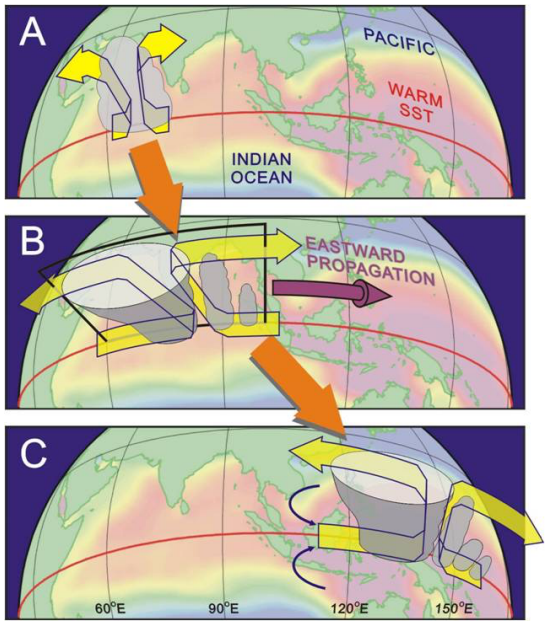

図 2　MJO 対流の模式図。主にインド洋で発生した水平規模数千 km の巨大雲群が赤道に沿って東に進む現象。対流域に吹き込む形で、対流域の西側の対流圏下層では、しばしば強い西風が卓越する。Yoneyama et al.（2008）より引用。

３．マッデン・ジュリアン振動に係る船舶観測

「みらい」の運航開始当初から続く、熱帯における主要研究テーマが、大気海洋相互作用に関する研究である。もちろん、建造前から、全球の気象・気候に与える海洋の影響の重要性を認識していたからこそ、海洋観測船としての使命を有しながら、多数の大気観測装置が搭載されている。そして、この大気海洋相互作用の結果生じる代表的な現象として、発見者にちなんで呼ばれているマッデン・ジュリアン振動（MJO）現象がある（図 2）。この MJO は、主にインド洋の赤道付近で水平規模数千 km に及ぶ巨大雲群が発達し、その後、赤道に沿って 5m/sec 程度の速さで進む現象である。1-2 か月で地球を 1 周することから、季節よりも短い周期性を持つという意味で、赤道季節内変動、とも呼ばれている。発見から 50 年が経つ現在、その特徴や世界中の気象や気候に与える影響は、かなり明らかになっている。例えば、巨大雲群に吹き込む強い西風が、西部熱帯太平洋の地球上でもっとも海面水温が高い暖水プール上空で数回にわたり卓越することで、貿易風と暖水プールとの間のバランスを崩し、暖かい海水を太平洋東部にもたらすことでエルニーニョ現象が発生する。また、MJO の対流域の通過に伴い、熱帯低気圧がしばしば発生する。さらには、テレコネクションと呼ばれる遠隔影響で、MJO の対流域の位置によって、世界各地の降水分布が変わる、ことなどがよく知られている。しかし、実は、いまだにその発生原因や、東進メカニズムなどは諸説あり、解明されていない。この最大の要因は、発生海域であるインド洋で観測データが圧倒的に不足しているからだ、との思いで実現したのが、2006 年 10 月－12 月の MISMO（Mirai Indian Ocean cruise for the Study of the MJO-convection Onset）、2011 年 10 月－2012 年 3 月の CINDY2011（Cooperative Indian Ocean experiment on intraseasonal variability in the Year 2011）プロジェクトである（Yoneyama et al. 2008; Yoneyama et al. 2013）。

前述通り、MJO は水平規模数千 km の巨大雲群となるため、一般には人工衛星や数値モデル、また客観解析と呼ばれる全球を一定格子間隔でカバーするデータセットを用いた研究となる。しかし、MJO のよく知られた特徴として、東に進む数千 km 規模の雲の塊が、実は数百 km 規模の西に進む雲群からなる階層性を持っていることである（Nakazawa 1988）。また、

数値モデルで研究する場合も、一般には格子間隔よりも小さい現象を格子点上の値で代表させるための工夫(パラメタリゼーションと呼ぶ)が必要であり、その知見には積雲・積乱雲など現地での観測が有効である。これらを背景として実現したのが、前述 2 つの国際プロジェクトである。例えば、図 3 は CINDY2011 時の観測網を示すが、インド洋に浮かぶモルディブのガン島やマレ環礁、さらには南のディエゴガルシア島、北のスリランカ・コロンボの陸上観測点に加え、米国の観測船 Roger Revelle と「みらい」とで、赤道を挟んで 2 つの四角形で囲まれた観測領域を設定した。これは全点で同時にラジオゾンデ観測を実施することで、MJO 対流に伴う水・熱収支を調べるためである。移動できる船だからこそ観測に最適な位置に配置することができた例である。

本稿では、以下の 1 点を除いて研究成果の説明を割愛するが、2 つの観測キャンペーンのデータを用いた論文が 2021 年 7 月現在で 250 編以上出版されていることからわかるように、MJO に対する理解はここ 15 年で格段に進んだ。そして、そこで得られたデータは誰でも使うことができ、現在も研究が進んでいる。ここでは、現在までの数多くの成果の中で、船舶観測らしい事例を 1 つ紹介する。MISMO 航海では、「みらい」は 2006 年 10 月下旬から約 1 か月間定点観測を行った後、モルディブで人員交代を行い、後半（レグ 2）へと移行した。このレグ 2 では、同様の大気・海洋観測は継続するものの、東部インド洋に展開していた係留系の回収・設置という別のミッションを持っていた。このため、定点観測ではなく、モルディブからインドネシア・スマトラ島沖まで、赤道に沿って航行する必要があった。このプロジェクト実施前に、統計的に MJO をとらえやすい時期と場所を選んではいたが、実際には MJO 対流がいつどこで発生するかはまったくわからない。しかし、レグ 1 前半で捉えた MJO 対流の発生は、まさにレグ 2 の「みらい」航海に伴走するかのように、東進した。つまり、偶然以外の何物でもないが、「みらい」は MJO 対流の中を東に進むこととなった。そこで、得られたレーダー画像を、人工衛星による雲画像に重ね合わせたものが図 4 である(Yamada et al. 2010)。前述通り、MJO の特徴として、東進する数千 km 規模の巨大雲群は西進する 100km 規模の雲群から構成されている。このことは、図 4 の人工衛星画像（モノクロ表示部分）でも確認することができる。しかし、「みらい」レーダーで捉えた雲（色付けした部分）は、西進する雲群よりも小さくかつ雲頂高度も低い雄大積雲が東に向かって進んでいる姿であった。次々に新しく東に形成される雲群は、人工衛星で確認された上空の西に進む層状性雲の下で、発達しながら東進する積雲・積乱雲の存在によるものであることを確認したことになる。動く洋上プラットフォームだからこそ、実現した観測事例である。

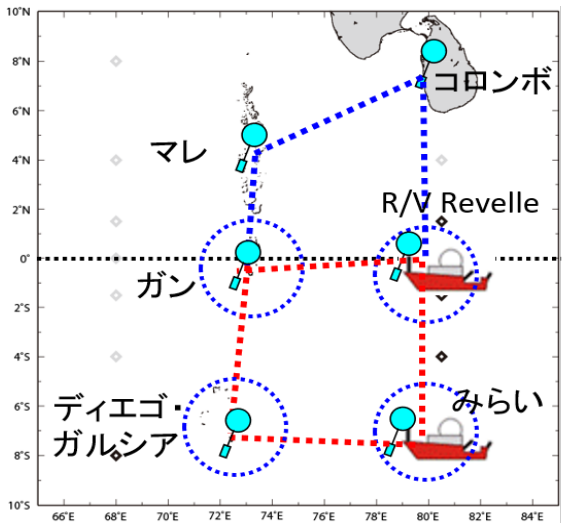

図 3 CINDY2011 観測網。水色の記号はラジオゾンデ観測網を構成する観測点。東経 80.5 度の赤道に米国観測船 Roger Revelle、南緯 8 度に「みらい」を配置した。

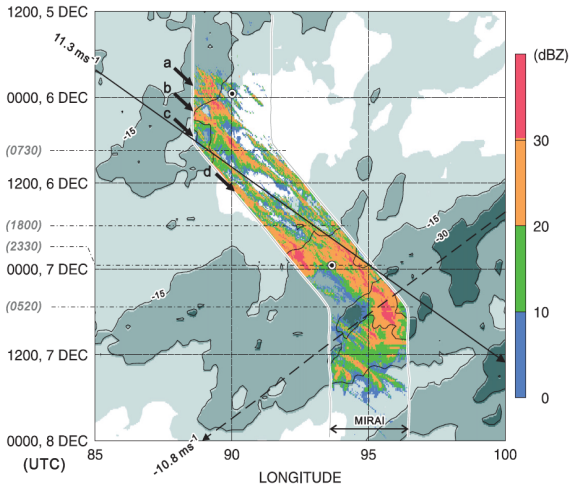

図 4 2006 年 12 月 5 日－7 日、MISMO 航海中に得られたレーダー反射強度（カラー）の経度－時間断面図。人工衛星による雲頂輝度温度分布に重ねて表示。Yamada et al. (2010) より引用。

４．極域観測

近年、地球温暖化の影響が最も顕著に現れる場所として北極海は注目を集め、多くの国際プロジェクトが立ち上げられ、実施されている。その中には、ドイツのアルフレッドウェゲナー研究所を代表機関として、20 か国からの研究機関・大学の参加を得て、砕氷観測船 Polarstern を北極の氷の中に閉じ込めて、2019 年 9 月から 2020 年 10 月までの 1 年間に渡り氷と共に過ごすという壮大な試みが、MOSAiC（Multidisciplinary Drifting Observatory for the Study of Arctic Climate）プロジェクトとして実施された(https://mosaic-expedition.org)。この間、膨大に蓄積されたデータの解析研究により今後様々な特徴が明らかになることが期待される一方で、北極域は単に受け身の海域ではないことも注目すべき点である。

言うまでもなく大気に国境はなく、極域の変化は特に中緯度の偏西風帯の振る舞いを変化させ得る。このため、北極域の状況が観測データによりわかると、中緯度の天気の変化を説明できる場合がある。その事例を「みらい」による観測と関係するものから１つ紹介する。「みらい」に砕氷能力はないが、耐氷能力はあるため、一年でもっとも氷の量が減る北半球の夏から秋にかけての時季は、北極海の気候理解のため、観測航海に出かけている。特に近年は、文部科学省の補助事業として国立極地研究所、北海道大学及び海洋研究開発機構が拠点となって国内の研究機関・大学の参加を得た北極域研究推進プロジェクト ArCS（2015 年 9 月～2020 年 3 月）、その後継である北極域研究加速プロジェクト ArCS II（2020 年 6 月～2025 年 3 月）が実施されており、同プロジェクトの主要観測プラットフォームの 1 つが「みらい」である。2016 年に実施された「みらい」北極航海は、ラジオゾンデ観測を強化したが、国際連携の下、同時期（2016 年 8－9 月）に他の観測船や陸地でもラジオゾンデ観測が強化されていた。そこで得られたラジオゾンデのデータを用いて、数値モデルに観測データを取り込むデータ同化技術を用いて、観測データを入れた場合と入れない場合とを比較した結果、北極域の観測データを入れることで、日本へ上陸した台風や北大西洋で発達した熱帯低気圧の進路予想が改善することが確認された（Sato et al. 2018)。最近の研究では、観測データの与える影響評価が簡易にできるようになり、北極海の観測データ取得により、北米の 1 週間先の天気予報が改善されることも示されている（Yamazaki et al. 2021)。この手法を活用すれば、観測データの影響評価だけでなく、むしろ効率的・効果的な観測計画を立てることが可能となり、目的に応じて適した場所に適した時季に観測を行うことが期待されている。

５．おわりに

本稿では、海洋地球研究船「みらい」の観測例として、熱帯観測では MJO に関わる 2 つのインド洋における国際プロジェクト MISMO と CINDY2011 を取り上げた。この 2 つのプロジェクトは MJO 研究の中でも解明が遅れている発生過程をターゲットにしたものであった。他に MJO を巡る研究テーマで未解明とされる代表的なものに、インドネシアなどが位置する海大陸と呼ばれる島（陸）と海が混在する海域で MJO 対流がしばしば変調をきたすメカニズムがある。同域の積雲対流活動はテレコネクションによって中緯度域の天気に与える影響が大きいため、日々の天気予報の改善のためにも重要な知見が眠っていると考えられている。この問題に取り組むため、2017 年からは同域を対象にした海大陸研究強化年（Years of the Maritime Continent: YMC）プロジェクトが進行中である（Yoneyama and Zhang 2020)。このプロジェクトでも「みらい」を始めとする複数の船舶が参加して、特に MISMO や CINSY2011 などとは異なり、外洋ではなく、沿岸付近に船を配置し、陸上の観測と連携しながら海と陸双方の影響を調べる試みがなされている。沿岸での観測には、領海での観測も含むため、2 節で紹介した観測許可がさらに厳しい条件で適用されることになるが、関係機関の協力により申請のいくつかは条件をクリアして実現できている。事実、「みらい」もスマトラ島の沿岸でこれまでに 2 度航海を実施した。YMC の目的は MJO に限らず同域の気象・気候の知見を得ることであるが、同時に海大陸域の国々への成果還元も大きなテーマとして位置付けている。これは、長期的な戦略で、同域の観測データを観測キャンペーンとは関係なく恒常的に取得するために、その意義を現地の方にこそ理解して欲しいためである。観測実現に向けた準備段階では、この観測がどのように海大陸域の国々にとってメリットがあるのかを説明した。観測終了後は、研究成果の創出と同時に、知見の還元が責務となる。

また、極域研究については、北半球夏季から秋季にかけて実施した「みらい」の観測データが、中緯度の気象・気候の理解に貢献している例を紹介した。関連話題として、海洋研究開発機構では、今年度から砕氷能力を有する北極域研究船の建造に着手した（http://www.jamstec.go.jp/mare3/e/outreach/pdf/researchicebreaker-brochure.pdf)。これにより、季節に関係なく北極海を観測ターゲットとすることが可能になる。前述通り、数値モデルやデータ同化技術などと組み合わせ、効率的・効果的な観測を実現しながら、北極海の変動とそれが中緯度に与える影響を調べていくことが望まれる。

船舶観測にはまだまだ多くの使命がある。

引用文献

勝俣昌己，2014：海洋地球研究船「みらい」新レーダー．天気，**61**，871-875.

Nakazawa, T., 1988: Tropical super clusters within intraseasonal variations over the western Pacific. *J. Meteor. Soc. Japan*, **66**, 823-839.

Sato, K., J. Inoue, A. Yamazaki, J.-H. Kim, A. Makshats, and M. Maturilli, 2018: Impact on predictability of tropical and mid-latitude cyclones by extra Arctic observations. *Sci. Rep.*, **8**, 12104.

Yamada, H., K. Yoneyama, M. Katsumata, and R. Shirooka, 2010: Observations of a super cloud cluster accompanied by synoptic-scale eastward-propagating precipitating systems over the Indian Ocean. *J. Atmos. Sci.*, **67**, 1456-1473.

Yamazaki, A., T. Miyoshi, J. Inoue, T. Enomoto, and N. Komori, 2021: EFSO at different geographical locations verified with observing system experiments. Wea. Forecast., **36**, 1219-1236.

Yoneyama, K., and co-authors, 2008: MISMO field experiment in the equatorial Indian Ocean. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **89**, 1889-1903.

Yoneyama, K., and C. Zhang, 2020: Years of the Maritime Continent. *Geophys. Res. Lett.*, **47**, e2020GL087182.

Yoneyama, K., C. Zhang, and C. N. Long, 2013: Tracking pulses of the Madden-Julian Oscillation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **94**, 1871-1891.

米山邦夫，勝俣昌己，2018：海洋地球研究船「みらい」搭載のドップラーレーダーを用いた観測研究．石原正仁，藤吉康志，上田博，立平良三編，気象研究ノート第 237 号「気象レーダー60 年の歩みと将来展望」，日本気象学会，218-225.