

3. インド洋における大気・海洋集中観測 MISMO

—目指したもの、得たもの、残したもの—

米 山 邦 夫*

1. はじめに

2006年10月から12月にかけて、中部赤道インド洋において、マッデン・ジュリアン振動 (MJO; Madden and Julian 1994) に伴う積雲対流の発生時の大気と海洋の特徴を捉えることを目的として、海洋地球研究船「みらい」やモルディブ諸島に展開した観測サイトを拠点に集中観測 MISMO (Mirai Indian Ocean cruise for the Study of the MJO-convection Onset) を実施した。

MJO は東西波数 1 から 6 程度の空間規模の現象で、それに伴う雲域も数1,000km 規模であるため、これまでの研究は人工衛星や客観解析のデータ解析、数値モデルなど大規模現象を扱えるデータや手法での研究が中心で、現場観測のデータ解析は主に TOGA-COARE (Webster and Lukas 1992) で得られた西部熱帯太平洋のデータを利用したものである。現在までの MJO に関する知見や今後解決すべき問題点など、例えば Zhang (2005) にまとめられているが、未解明の課題の 1 つとして MJO 対流の発生メカニズムの解明が挙げられている。MJO 対流の多くはインド洋でその発生が確認されるが、これまでインド洋で MJO 対流を中心対象とした現場集中観測は実施されたことがなく、現在まで多数提出されている MJO 対流発生に関する諸説に対して検証できない理由の 1 つでもある。この状態を少しでも克服すべく MISMO プロジェクトは立案され、実行された。本稿では観測の概要や 2~3 の解析結果例を紹介する。より詳細な報告は、Yoneyama *et al.* (2008) を参照されたい。

2. 目的 —目指したもの—

MISMO プロジェクトはその名の通り、MJO 対流発生時の特徴を捉えることを目的としたが、限られた資材・期間の中で効果的に有効なデータを取得するため、主要テーマを、1) 大気の鉛直構造の時間変化、2) 海面水温の日変化、3) MJO 対流発生に伴う海洋応答、の 3 つに設定し、以下に示す観測網を構築した。

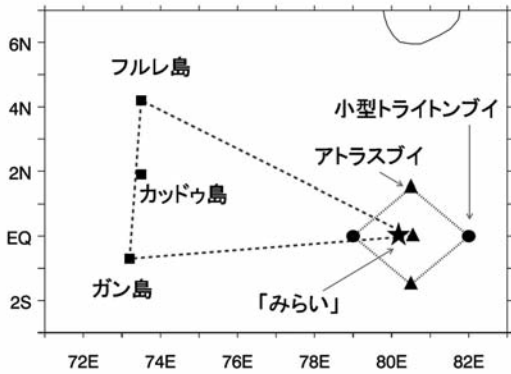
人工衛星データ解析に基づく過去の MJO 対流発生 の事例と、CLIVAR/GOOS インド洋パネルが推進して展開が進められているインド洋の係留ブイ網配置を勘案し、赤道上の東経80.5度を主な定点観測海域とし、その周囲に海上気象や海洋表層の水温・塩分を計測する小型トライトンブイや音響式流向流速計を取り付けた中層係留系などからなるブイ網を築き、主に海洋応答の観測を目指した (第 1 図)。一方、モルディブ諸島のフルレ島、ガン島でラジオゾンデ観測を実施することで、「みらい」と合わせた高層気象観測網を構築し、大気の鉛直構造とその変動や収支を1,000km 規模で理解することを試みた。

MISMO プロジェクトには共同利用型運用されている「みらい」への乗船や、上記ブイ網の構築、モルディブ諸島での強化観測などのため、国内からは北海道大学、東北大学、千葉大学、東京大学、名古屋大学、富山大学、京都大学、大阪府立大学、岡山大学、山口大学、国立環境研究所が、また国外からは米国海洋大気庁太平洋海洋環境研究所、マイアミ大学、国際太平洋研究センター、インド国立海洋研究所、モルディブ気象局が参加し、さらにグローバルオーシャンディベロップメント及びマリンワークジャパンの観測技術員によるサポートを得た。加えて、同時期、海洋研究開発機構地球環境観測研究センター (現：地球環

* 海洋研究開発機構地球環境変動領域。

yoneyamak@jamstec.go.jp

© 2010 日本気象学会



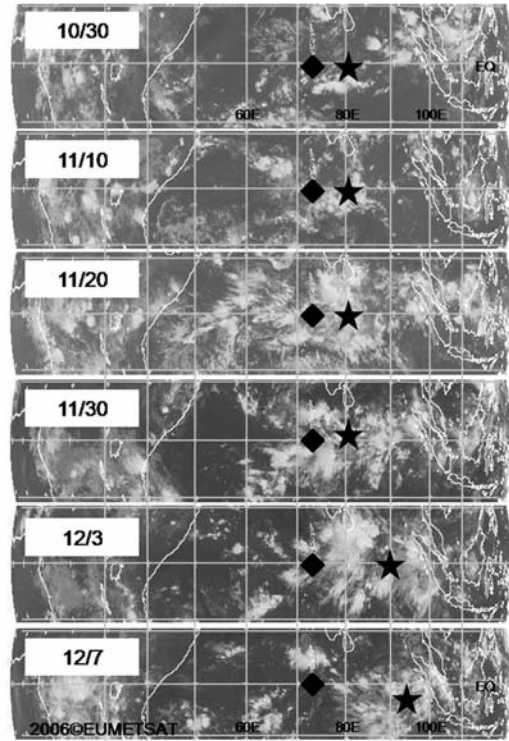
第1図 Mismo観測網。破線はゾンデ観測網、点線はブイ網を示す。アトラスブイ及び小型トライトンブイの設置点には音響式流向流速計のついた中層係留系も展開した。なお、アトラスブイはRAMAブイ網として長期展開されている海上気象及び水深500mまでの水温・塩分を計測する係留系である。

境変動領域)を中心にインドネシアにおいてHAR-IMAUプロジェクトによる集中観測も実施され(Yamanaka *et al.* 2008), インド洋東端も観測している。

「みらい」では、ドップラーレーダーやラジオゾンデ観測のほか、表皮海面水温を連続計測する赤外放射温度計が搭載されたほか、ウィンドプロファイラー、ライダー、雲レーダー、ビデオゾンデ、水蒸気・オゾンゾンデ、などの大気観測や、蛍光光度計をつけたCTD(水温・塩分測定計)やアルゴフロートなどの海洋観測が上述機関により実施された。一方、モルディブ諸島のガン島ではドップラーレーダーや全天雲画像の連続撮影なども実施した。

3. 結果 一得たもの一

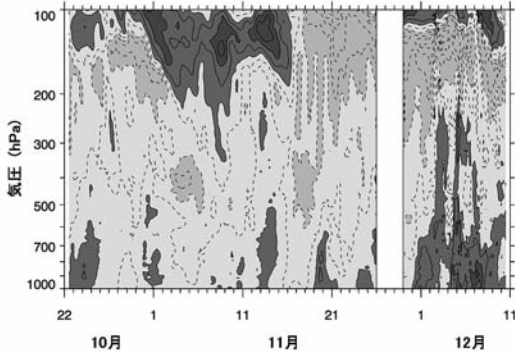
第2図はMismo観測期間中のインド洋上空の雲の様子を示したものである。10月下旬は中部熱帯インド洋において対流活動は比較的不活発だったが、11月中旬には水平スケールが3,000–4,000kmにもなる雲群が発達し、その後、東進していることが認められる。「みらい」は10月24日から11月25日にかけて赤道上、東経80.5度を中心とする海域で定点観測を実施したが、11月27–28日にいったんモルディブに寄港し人員交代をした後、係留系の回収・設置のため赤道上を東進しながら各種観測を継続した。このため、ちょう



第2図 Mismo期間中のインド洋上空の赤外雲画像。星印と菱形はそれぞれ「みらい」とモルディブの観測位置を示す。

どこの東進する雲群とともに進む形となり、雲内の観測を行うこともできた。この人工衛星による雲のデータを波数-周波数空間でフィルタリング処理することにより、この雲群がMJO対流として同定されるシグナルが得られており、11月中旬に発生したことが確認されているが、インドネシア海大陸域に到達する前に減衰した弱いものであった(図略)。

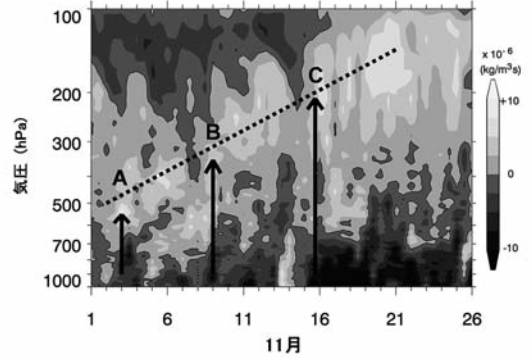
この雲群発生前後での風の鉛直分布を見ると(第3図)、顕著な特徴として200hPaより上空の圏界面付近で11月に入って強い西風が卓越していたが、11月16日のわずか1日で東風に変化していることがわかる。この日は下層でも東風が強化されている。この東風は人工衛星による外向き長波放射データや客観解析の東西風データの解析などから赤道ロスビー波に伴って太平洋上空から到達したものであることが確認されており(図略)、赤道波動と雲群発生に関する関係が示唆される。なお、全体的に見ると対流圏下層では11月中は弱い東風が卓越し、雲群発生後も強い西風は見られ



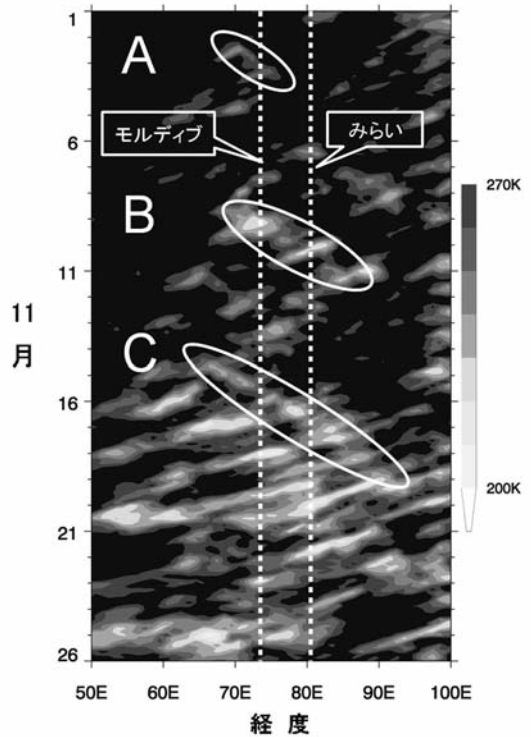
第3図 「みらい」ラジオゾンデ観測により得られた東西風の高度-時間断面図。コンター間隔は5 m/sで、実(破)線および濃い(薄い)陰影部分が西(東)風領域を示す。途中、空白域はモルディブ寄港中に相当し、その左側は東経80.5度の赤道付近の定点、右側は赤道に沿って東部インド洋まで回航中に得られたもの。

ない。その後、12月に「みらい」が雲群とともに東進しているときには一般的に西風バーストと呼ばれるほどの強さはないものの、下層西風が強まっていることがわかる。

MISMO 海域における対流活動の活発化は、ラジオゾンデ観測網による発散場の高度-時間断面でより明瞭に理解される。第4図はこの3点のゾンデデータから算出された水蒸気収束の高度-時間断面を示す。大規模雲群が発達した11月16日以降を見ると、700hPa面以下の下層で強い収束、200hPaより上空で強い発散が見られ、深い対流がよく発達していたことがわかる。ここで、上層の発散領域に注目すると、点線で示されたように比較的対流活動が不活発だった11月初旬から徐々にそのピークの位置の高度が上昇していることが明らかであり、MISMO 観測領域の場として徐々に対流活動が活発化していったことを示すものであると言える。一方で、この上昇する発散域のピークをよく見ると、5-6日の周期で弱まり、その翌日、記号A-Cで示したように、下層収束・上層発散のペアが強くなっていることに気付く。第5図は雲頂輝度温度の赤道に沿った経度-時間断面図であるが、このA-Cで示された日付に注目すると、第4図で見られた下層収束・上層発散のペアはこの東進する東西スケール数100kmのメソ降水システムに伴う対流活動に相当していたことが理解される。以上のことから、11月中旬以降の季節内変動スケールでの大規模雲群の発生の



第4図 「みらい」、ガン島、フルネ島のゾンデ観測により得られた水蒸気収束の高度-時間断面図 (Yoneyama *et al.* (2008) より引用)。



第5図 赤道に沿った雲頂輝度温度の経度-時間断面図。破線はモルディブと「みらい」の位置を示す。A, B, Cと楕円は第4図記載の記号に相当する。

前に、観測領域では徐々に対流活動が活発化しているが、それには(東進する)メソ降水システムからの寄与が大きい、と言える (Katsumata *et al.* 2009)。ただし、このメソ降水システムの発達自体が、コールド

プールを形成した自律型のシステムであるのか、対流圏下層の湿潤静的エネルギーの蓄積と消費で対流のライフサイクルを説明する鉛直一次元的な考え方 (Bladé and Hartmann 1993) で理解されるのか、もしくは大規模赤道波動によるものであるか、などの関係については明らかになっておらず、今後の研究課題として現在、MISMO 参加研究者を中心に検討が進められている。なお、第5図で11月中旬以降、解析領域は東進する大規模雲群で覆われているが、多くは西進するシステムにより構成されており、Nakazawa (1988) の指摘した階層性が確認できる。

4. 今後の課題 一残したもの一

ここでは2種類の“残したもの”を記したい。1つは、前節に記した結果のように観測の実施により得られた足跡であり、もう1つは今回の観測ではなし得なかった、つまり後に残されたこと、である。

従来、提案されていた MJO 対流発生に関する仮説は、赤道を周回するシグナルがインド洋上で対流活動と結合する周回説や中緯度からロスビー波が赤道域にまで伝搬し不安定を起す説など、全球規模の変動が前提のものが多い。事実、MISMO 期間中に発生した大規模雲群の発生にも赤道波動が寄与している結果も得られた。しかし、今回の観測により明らかになりつつある事実は、人工衛星データだけでは見落としがちな対流圏下層から中層の変動やメソ降水システムの発達が大規模雲群の発生に重要な役割を持つことも示唆している。つまり、MJO という大規模な変動現象の理解のために現場観測により得られたデータが不可欠であり、両者の視点を持った研究が不可欠であることを再認識させた。今後、MISMO で得られた現場データは人工衛星や客観解析のデータ、また全球雲解像モデル NICAM など数値モデルの結果などと組み合わせて、MJO 対流発生に関する研究が進められていく。同時にさらなる現場データの蓄積が望まれる。

さらに、MISMO が実施された2006年はインド洋ダイポールモード現象が発生し、11月はそのピークにあたり、東部赤道インド洋の海面水温がもっとも低い状態にあった (Horie *et al.* 2008)。このことは MISMO 期間中に発達した雲群が海大陸を越えて太平洋まで到達しなかったことの一因として考えられる一方で、同現象の終息に MJO が寄与したとの考えも存在する。さらに MISMO の後、12月にインド洋で発生した

MJO 対流が2007年1-2月には西太平洋に到達し、これに伴い2006年エルニーニョ現象が急速に終息したのではないかと示唆する結果も得られている (McPhaden 2008)。特にダイポールモード現象はその研究の歴史も浅いが、これら大規模場の変動と MJO 対流との関係は今後詳細に研究されるべき課題である。

このほかに残された課題としては、今回の MISMO では捉えることのできなかった西風バースト発生時の海洋応答や、十分発達した雲群の発生前から通過後までの全ライフサイクルを観測することが挙げられる。このためには、観測期間の長期化や観測点の増加、など容易でない因子がクリアされなければならない。

5. 終わりに

MISMO で得られたデータは、観測日誌や写真等とともに MISMO の Web サイト (<http://www.jamstec.go.jp/iorgc/mismo/>) において公開されている。MISMO 参加研究者だけでなく、多くの研究者の利用を期待したい。

MISMO の実施から2ヶ月後の2007年1月から2月にかけて、インド洋ではフランスの研究グループにより MJO をターゲットの1つにした別の集中観測が南緯8度、東経67度付近を中心に実施された (Vialard *et al.* 2009)。あいにく活発な MJO 対流を捉えることはできなかったが、定高度漂流型ゾンデがサイクロンの中を計測するなど興味深い結果も得られている。また、赤道太平洋や大西洋には米国海洋大気庁が中心となり係留ブイ網が展開されているように、インド洋においても新たなブイ網 RAMA (McPhaden *et al.* 2009) が提案され、構築されつつある。いずれの研究グループも MJO に代表される“季節内”の変動が気候変動に果たす役割についても重要視している。そこで、CLIVAR/GOOS インド洋パネルを中心に複数の国際会議の場で MJO を主なターゲットに据えつつ、北半球冬季の赤道インド洋における大気と海洋の変動を集中的に観測する新たな研究計画 CINDY2011 (Cooperative Indian Ocean experiment on intraseasonal variability in the Year 2011) が立案され、米国の研究プロジェクト DYNAMO (Dynamics of the MJO) と連携し、CLIVAR 科学推進グループからの正式承認を得た国際集中観測プロジェクトとして2011年10月から2012年1月までの4ヶ月間にわたり実施予定である (詳細は CINDY2011 の Web サイト

http://www.jamstec.go.jp/iorgc/cindy/ を参照)。この計画の鍵を握る点は前節でも述べたように、MISMO に比べより長期にかつ広域に観測点を展開し季節内変動を確実に捉えようとする点と、数値モデル研究と最初の計画段階から密接な関係を構築する点である。観測船への乗船による参加だけでなく、周辺島嶼や海大陸域での観測、人工衛星データの活用、数値モデルを用いた観測との連携、など参加形態は多岐にわたる。観測プロジェクトはいわゆる観測屋だけの領分ではない。次期観測についても、様々な分野の研究者からの観測前のインプットと、観測後のアウトプットを期待したい。

謝 辞

「みらい」及びモルディブ諸島での観測に参加した研究者・観測技術員ならびに陸上からサポートしてくれた方々に感謝致します。小型トライトンブイ及びモルディブ諸島における観測の一部は文部科学省海洋開発及地球科学技術調査研究促進費地球観測システム構築推進プランにより実施されました。

略語一覧

CLIVAR : Climate Variability and Predictability
 CTD : Conductivity Temperature Depth meter
 DYNAMO : Dynamics of the Madden-Julian Oscillation
 HARIMAU : Hydrometeorological Array for Isv-Monsoon Automonitoring
 GOOS : Global Ocean Observing System
 MISMO : Mirai Indian Ocean cruise for the Study of the MJO-convection Onset
 MJO : Madden-Julian Oscillation
 NICAM : Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model
 RAMA : Research Moored Array for African-Asian-Australian Monsoon Analysis and Prediction
 TOGA-COARE : Tropical Ocean Global Atmosphere-Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment

参 考 文 献

- Bladé, I. and D. L. Hartmann, 1993 : Tropical intraseasonal oscillations in a simple nonlinear model. *J. Atmos. Sci.*, **50**, 2922-2939.
- Horii, T., H. Hase, I. Ueki and Y. Masumoto, 2008 : Oceanic precondition and evolution of the 2006 Indian Ocean dipole. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L03607, doi : 10.1029/2007GL032464.
- Katsumata, M., R. H. Johnson and P. E. Ciesielski, 2009 : Observed synoptic-scale variability during the developing phase of an ISO over the Indian Ocean during MISMO. *J. Atmos. Sci.*, **66**, 3434-3448.
- Madden, R. A. and P. R. Julian, 1994 : Observations of the 40-50-day tropical oscillation —A review. *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 814-837.
- McPhaden, M. J., 2008 : Evolution of the 2006-2007 El Niño : the role of intraseasonal to interannual time scale dynamics. *Adv. Geosci.*, **14**, 219-230.
- McPhaden, M. J. *et al.*, 2009 : RAMA : The Research Moored Array for African-Asian-Australian Monsoon Analysis and Prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **90**, 459-480.
- Nakazawa, T., 1988 : Tropical super clusters within intraseasonal variations over the western Pacific. *J. Meteor. Soc. Japan*, **66**, 823-839.
- Vialard, J. *et al.*, 2009 : Cirene : Air-sea interactions in the Seychelles-Chagos thermocline ridge region. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **90**, 45-61.
- Webster, P. J. and R. Lukas, 1992 : TOGA COARE : The Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **73**, 1377-1416.
- Yamanaka, M. D. *et al.*, 2008 : HARIMAU radar-profiler network over the Indonesian Maritime Continent : A GEOSS early achievement for hydrological cycle and disaster prevention. *J. Disaster Res.*, **3**, 78-88.
- Yoneyama, K. *et al.*, 2008 : MISMO field experiment in the equatorial Indian Ocean. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **89**, 1889-1903.
- Zhang, C., 2005 : Madden-Julian Oscillation. *Rev. Geophys.*, **43**, RG2003, doi : 10.1029/2004RG000158.