

海洋地球研究船「みらい」新レーダー

勝 俣 昌 己*

1. はじめに

海洋研究開発機構が保有・運航する海洋地球研究船「みらい」は、1998年の運用開始以来、走査型降雨ドップラーレーダーを常設装備する世界唯一の研究船として、極域から熱帯に至る様々な環境下で降水システム観測を行ってきた。例えば、インド洋におけるマッデンジュリアン振動 (MJO) 対流活発期の発現・発達過程 (Yoneyama *et al.* 2008 ; Yamada *et al.* 2010 ; Yoneyama *et al.* 2013), 西太平洋モンスーンオンセット時の降水雲 (Geng *et al.* 2011), 熱帯収束帯 (Katsumata and Yoneyama 2004), 北極海における極渦 (Inoue *et al.* 2010) などは、従来レーダー観測データの乏しかった海域で純粋海洋上の降水システムの詳細時空間構造を捉えた好例と言える。更に、レーダーデータを他の観測データと組み合わせることで、対流システムとそれを取り巻く環境場との関係についての知見も深めている (Yasunaga *et al.* 2006 ; Kubota *et al.* 2006 ; Ushiyama *et al.* 2006 ; Chuda *et al.* 2008 ; Suzuki *et al.* 2010 ; Bellenger *et al.* 2010 ; Yasunaga *et al.* 2010 ; Katsumata *et al.* 2011, 2013 ; Geng *et al.* 2014 ; Yokoi *et al.* 2014 ; Bellenger *et al.* 2014ほか)。過酷な環境下 (熱帯や極域の気候, 潮風, 船体の動揺や振動, など) に晒される機器にも関わらず安定した品質のデータが供給されてきたことも特筆すべき点である (Katsumata *et al.* 2008, 2013)。

一方で、こうした過酷な条件下での長年の運用を経た近年、レーダー機材の老朽化が懸念されていた。そんな中、このたび機材更新が認められ、2014年度から

新レーダーの運用が開始された。本稿では、その新レーダーの状況と今後について紹介する。

2. 主な性能・仕様

新レーダーは旧レーダーのコンセプトを引き継ぐ一方で、多くの機能向上が施された。旧レーダーについては米山 (1998) にその概要が紹介されているが、本稿ではまず比較の為に、新旧レーダーの主な仕様を第1表に記す。

まず両者の共通コンセプトとして、波長帯はCバンド (5 GHz 帯) とした。多点展開が困難な洋上において、降雨減衰をもたらす熱帯の豪雨、微弱な反射信号の探知が必要な極域の雪雲、等の多彩な雲を十分な品質・空間範囲で観測可能とすること、船上の限られたスペースで設置稼働すること、旧レーダーからのデータや運用技術の継続性、などがこの選択の理由で

第1表 「みらい」新旧レーダーの主な諸元。

	旧レーダー	新レーダー
製造年	1997年	2014年
アンテナ径	3 m	4 m
アンテナ架台高	3 m	6 m
アンテナ中心海拔高度	21 m	24 m
周波数	5290 MHz	5370 MHz
発信管	マグネトロン	固体素子
偏波面	水平偏波	直交二偏波 (同時)
パルス形式	非圧縮パルス	パルス圧縮
尖頭出力	250 KW	6 KW + 6 KW
ビーム幅	1.4度	1.0度
最小受信電力	-109 dBm	-111 dBm
交差間偏波抑圧度	—	33 dB 以上

* Masaki KATSUMATA, 海洋研究開発機構。

katsu@jamstec.go.jp

© 2014 日本気象学会

ある。空中線も、過去の技術的蓄積が大きいパラボラアンテナによる機械走査型を引き続き採用している。更に、船体動揺の影響を排除する為、高精度ジャイロが検知した船体姿勢をキャンセルするようにパラボラアンテナの指向方向を（方位角・仰角を補正して）制御するのも、旧レーダーのコンセプトを引き継ぐものである。

一方、新レーダーでは多くの機能向上も実現した。まず見た目の違いとしての大型化が挙げられる。アンテナ径は4mとなり、ビーム幅は約1度にまで絞こまれた。また据付位置は旧レーダーより3m高上げられ、船体構造物による観測不能域が旧レーダーと比して半減した。加えて、近年のレーダー技術の発展を反映し、発振子の固体素子化とパルス圧縮技術を採用した。これにより、高品質なデータをより長時間安定して取得することが期待される。データ処理においても、例えば地形エコー除去機能などが新たに装備された。

更に大きな変化として、新レーダーには二重偏波機能が付加された。陸上設置型レーダーでは近年急速に普及した技術であり、降水量推定の高精度化、降水粒子判別（雪・霰・氷・液滴、等への分類）、等の応用が可能である（Bringi and Chandrasekar 2001ほか）。降水システムの特性は海洋性と陸上性と異なると言われており（Nesbitt *et al.* 2000ほか）、観測データの少ない純粋海洋上の二重偏波観測データは海洋性降水システムの新しい知見を提供することが期待される。

偏波機能としては新レーダーは水平・垂直偏波の同時発射・同時受信型であり、両偏波が時間的・空間的に全く同じ対象を観測する。また、船体動揺による偏波面の傾きは前述のアンテナ動揺補正機能では補正できないが、ソフトウェアによる事後処理において補正している。補正方法は、現時点では若山ほか（2004）の手法を採用している。

第1図に新レーダーを装備した「みらい」の全景写真を示す。「みらい」乗船・訪船経験のある方、あるいは米山（1998）と見比べていただいた方には、レーダーの外観上の変化がお分かりいただけるだろうか。

3. 試験作動データ

新レーダーは2014年度初頭に設置工事が行われ、工事後の6月6日（以後日時は世界標準時）試験作動にて初めて電波を発射しデータを取得した。ここでその初日のデータを紹介する。



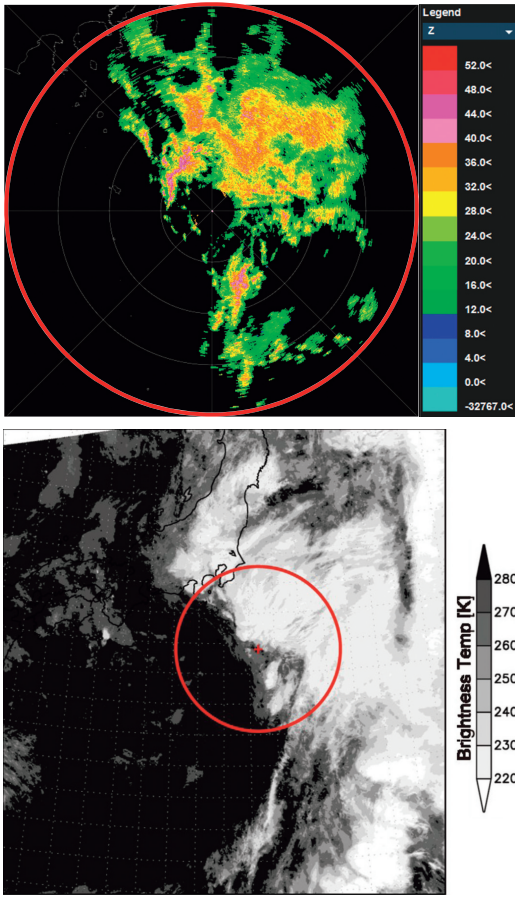
第1図 「みらい」全景。船体中央の球体が新レーダーのアンテナを格納するレドーム。2014年7月8日、(独)海洋研究開発機構横須賀本部から撮影。

当日は東日本域に中心をもつ低気圧^{※1}から南方へ前線が伸びており、「みらい」はその前線近傍の八丈島近海を航行中であつた。取得された仰角0.5度のレーダー反射強度のPPI（定仰角走査）画像^{※2}、及び同時帯のMetOp/AVHRR 赤外画像を第2図に示す。「みらい」北東に広がる層状性の降水域や、雲域の南東端にある2つのメソβスケール強エコー域などが両者で能く捉えられているのが判る。

第2図と同時間帯に実施した鉛直走査によるRHI画像^{※3}を第3図に示す。レンジ距離75km付近のレーダー反射強度の強い位置においてドップラー速度が水平方向に変わっており、水平シアーと強雨域が対応しているのがわかる。また、強エコー域にて偏波間伝搬位相差変化率（ K_{DP} ）や偏波間反射因子差（ Z_{DR} ）の値が大きいのは、大きな雨粒を伴う強雨と解釈でき、定性的には良い対応と考えられる。加えて、偏波間相関係数（ ρ_{HV} ）が高度4km付近で低い値であるのは、当日の気温0°C高度4.2kmから推測される融解層の高度と良く対応している。

4. 今後の課題と展望

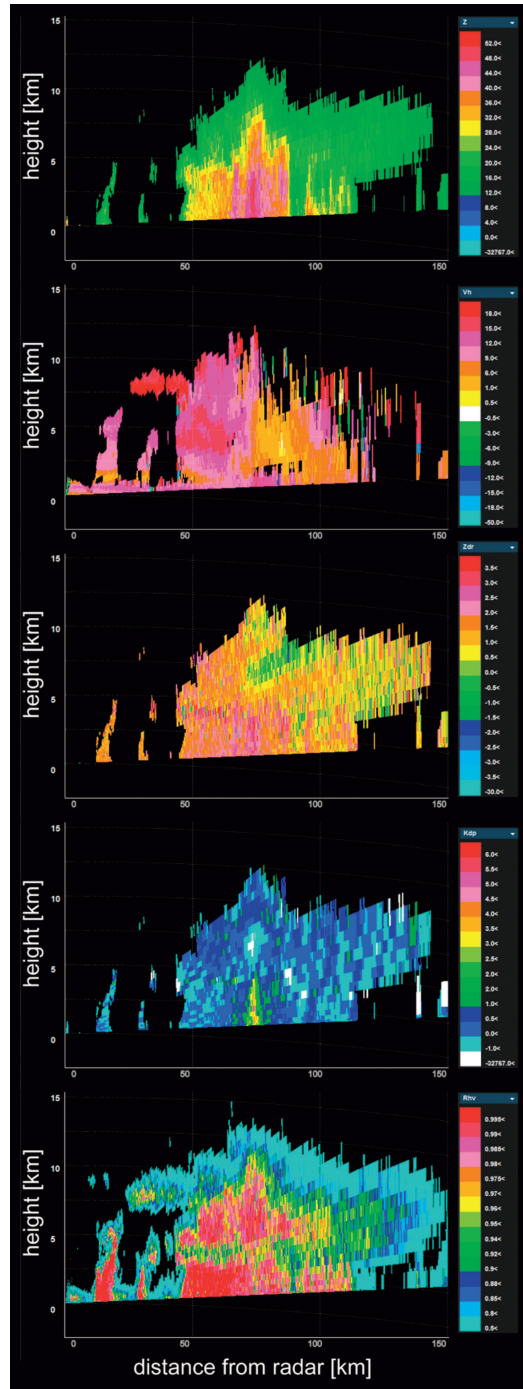
前章で示した初期データからは、「みらい」新レーダーは定性的には良いパフォーマンスを示していると考えられる。今後、定量的な解釈に向けた各種検討を進めていく予定である。要検討事項は多岐にわたるが、まずはレーダーとしての基本性能である反射強度の妥当性や他のレーダーとの整合性を、高度に検定補正された衛星搭載降雨レーダーであるTRMM/PRやGPM/DPRのデータなどと比較することで確認する予定である。また、偏波パラメータについても各種検討を予定している。まず偏波面動揺補正については、



第2図 (上) 6月6日12:30の「みらい」新レーダーPPI (仰角0.5度, 半径300 km) 反射強度画像 (単位: dBZ). 同時刻の船位は北緯32度50分, 東経141度17分. (下) 同日11:56のMetOp/AVHRR赤外画像. 丸は上図のレーダー観測範囲を示す.

現在採用している若山ほか (2004) 以外にも Thurai *et al.* (2014) の方法が提案されており, 今後より良い方法を適用すべく検討する予定である. また, 偏波パラメータと実際の降水粒子との対応関係も今後の課題である. このためには, 過去の研究結果や数値シミュレーションの応用に加え, ビデオゾンデやHYVIS, ディスドロメータなどを用いた現場観測による検証研究が必要である. 例えば「みらい」レーダーが採用しているCバンドの波長は偏波パラメータに resonance 効果が多いこと (Keenan *et al.* 2001ほか) から, 大粒径の降水粒子が多いと言われていた海洋性降水雲における応用には検証が必要である

2014年10月



第3図 「みらい」新レーダーによるRHI (鉛直断面) 観測で得られたパラメータの例. 6月6日12:18 (船位: 北緯32度50分, 東経141度15分) から方位角330度方向. 上から, レーダー反射強度, ドップラー速度, 偏波間反射因子差 (Z_{DR}), 偏波間伝搬位相差変化率 (K_{DP}), 偏波間相関係数 (ρ_{hv}).

う。また海洋上では層状性降水域の占める割合が陸上より大きい、層状性降水域では上空の水相過程が重要であり、この部分での観測データの検証も必要である。これら検証に必要な海洋性降水雲の実測データは稀少であり、レーダー検証のみならず科学的にも重要かつ貴重なデータとなりうる為、各方面と協力してこれらの観測・検証を進めていきたいと考えている。

今後の「みらい」研究航海については、2014年夏現在、3年先すなわち2017年度までの予定が公開されている^(注4)。うち、2014年度の北極海航海（国際プロジェクトARCROSE2014の一環）、2015年度の東インド洋航海、2017年度の東インド洋航海（国際プロジェクトYear of Maritime Continentの一環）については、大気観測を主眼とした観測機動や多彩な機材の運用が予定されている。これら航海においては、多種類の機材で取得されたデータとの比較によってレーダーの検証を行うこと、及び、偏波パラメータという新たなデータを活用した降水雲を軸とした大気海洋相互作用についての知見が深まることが期待される。更には、固体素子化によるランニングコスト軽減という利点を活かし、全航海での連続観測による長期広域のデータ蓄積も計画中である。

なお、偶然か必然か、「みらい」新レーダーとほぼ同時期に、豪州の新研究船「Investigator」にもCバンド二重偏波気象レーダーが装備された。また、他国における類似機材の構想も聞こえている。この分野の研究において国際競争が激しくなることが予想されるが、皆様にも是非「みらい」新レーダーを用いた観測研究に積極的に参加していただき、世界をリードしていただきたい。

謝辞

「みらい」新レーダー導入に当たっては、(株)グローバル・オーシャン・ディベロップメント、(株)東芝、(株)三菱重工業、(独)海洋研究開発機構、ほか関係者の皆様にも多大なるご尽力をいただきました。ここに篤く御礼申し上げます。

参考文献

- Bellenger, H., Y. N. Takayabu, T. Ushiyama and K. Yoneyama, 2010: Role of diurnal warm layers in the diurnal cycle of convection over the tropical Indian Ocean during MISMO. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 2426-2433.
- Bellenger, H., K. Yoneyama, M. Katsumata, T. Nishizawa, K. Yasunaga and R. Shirooka, 2014: Observation of moisture tendencies related to shallow convection. *J. Atmos. Sci.*, in revision.
- Bringi, V. N. and V. Chandrasekar, 2001: *Polarimetric Doppler Weather Radar. Principles and Applications*. Cambridge University Press, 636pp.
- Chuda, T., H. Niino, K. Yoneyama, M. Katsumata, T. Ushiyama and O. Tsukamoto, 2008: A statistical analysis of surface turbulent heat flux enhancements due to precipitating clouds observed in the tropical western Pacific. *J. Meteor. Soc. Japan*, **86**, 439-457.
- Geng, B., K. Yoneyama, R. Shirooka and M. Yoshizaki, 2011: Characteristics of precipitation systems and their environment observed during the onset of the western North Pacific summer monsoon in 2008. *J. Meteor. Soc. Japan*, **89A**, 1-25.
- Geng, B., K. Yoneyama and R. Shirooka, 2014: Observations of upper-tropospheric influence on a monsoon trough over the western north Pacific. *Mon. Wea. Rev.*, **142**, 1472-1488.
- Inoue, J., M. E. Hori, Y. Tachibana and T. Kikuchi, 2010: A polar low embedded in a blocking high over the Pacific Arctic. *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L14808, doi:10.1029/2010GL043946.
- Katsumata, M. and K. Yoneyama, 2004: Internal structure of ITCZ mesoscale convective systems and related environmental factors in the western Pacific: An observational case study. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 1035-1056.
- Katsumata, M., T. Ushiyama, K. Yoneyama and Y. Fujiyoshi, 2008: Combined use of TRMM/PR and disdrometer data to correct reflectivity of ground-based radars. *SOLA*, **4**, 101-104.
- Katsumata, M., P. E. Ciesielski and R. H. Johnson, 2011: Evaluation of budget analyses during MISMO. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **50**, 241-254.
- Katsumata, M., H. Yamada, H. Kubota, Q. Moteki and R. Shirooka, 2013: Observed evolution of northward-propagating intraseasonal variation over the western Pacific: A case study in boreal early summer. *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 690-706.
- Keenan, T. D., L. D. Carey, D. S. Zrnica and P. T. May, 2001: Sensitivity of 5-cm wavelength polarimetric radar variables to raindrop axial ratio and drop size distribution. *J. Appl. Meteor.*, **40**, 526-545.
- Kubota, H., R. Shirooka, T. Ushiyama, J. Chen, T. Chuda, K. Takeuchi, K. Yoneyama and M. Katsumata, 2006: Observations of the structures of deep

- convections and their environment during the active phase of an Madden-Julian Oscillation event over the equatorial western Pacific. *J. Meteor. Soc. Japan*, **84**, 115-128.
- Nesbitt, S. W., E. J. Zipser and D. J. Cecil, 2000: A census of precipitation features in the tropics using TRMM: Radar, ice scattering, and lightning observations. *J. Climate*, **13**, 4087-4106.
- Suzuki, J., M. Fujiwara, A. Hamada, Y. Inai, J. Yamaguchi, R. Shiroyaka, F. Hasebe and T. Takano, 2010: Cloud-top height variability associated with equatorial Kelvin waves in the tropical tropopause layer during the Mirai Indian Ocean cruise for the study of the MJO-convection onset (MISMO) campaign. *SOLA*, **6**, 97-100.
- Thurai, M., P. T. May and A. Protat, 2014: Shipborne polarimetric weather radar: Impact of ship movement on polarimetric variables at C-band. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **31**, 1557-1563.
- Ushiyama, T., R. Shiroyaka, T. Chuda, H. Kubota, S. Iwasaki, J. Chen, K. Takeuchi and H. Uyeda, 2006: An isolated cloud band around a typhoon in the western tropical Pacific. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L12808, doi: 10.1029/2006GL026100.
- 若山俊夫, 畑 清之, 岡村 敦, 2004: 船舶搭載二重偏波気象レーダにおける動揺の影響とその補正方法. *電子情報通信学会論文誌*, **J87-B**, 544-554.
- Yamada, H., K. Yoneyama, M. Katsumata and R. Shiroyaka, 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.
- Yasunaga, K. *et al.*, 2006: Melting layer cloud observed during R/V Mirai cruise MR01-K05. *J. Atmos. Sci.*, **63**, 3020-3032.
- Yasunaga, K., K. Yoneyama, Q. Moteki, M. Fujita, Y. N. Takayabu, J. Suzuki, T. Ushiyama and B. Mapes, 2010: Characteristics of 3-4- and 6-8-day period disturbances observed over the tropical Indian Ocean. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 4158-4174.
- Yokoi, S., M. Katsumata and K. Yoneyama, 2014: Variability in surface meteorology and air-sea fluxes due to cumulus convective systems observed during CINDY/DYNAMO. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **119**, 2064-2078.
- 米山邦夫, 1998: 海洋地球研究船「みらい」に搭載されたドップラーレーダーについて. *天気*, **45**, 133-136.
- Yoneyama, K. *et al.*, 2008: MISMO field experiment in the equatorial Indian Ocean. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **89**, 1889-1903.
- Yoneyama, K., C. Zhang and C. N. Long, 2013: Tracking pulses of the Madden-Julian oscillation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **94**, 1871-1891.

後注

- 注1) 当日, 関東地方の一部観測点では6月の24時間雨量として史上最多を記録した。
- 注2) 試験中の為, レンジ距離30 km 以遠のデータのみ取得。
- 注3) 試験中の為, 仰角0.5度より上のデータのみ取得。
- 注4) JAMSTEC 海洋工学センターの Web を参照のこと。