
船舶搭載型下部対流圏レーダー (SB-LTR) の開発

(研究課題番号 13354005)

平成13年度～平成15年度科学研究費補助金(基盤研究(A)(2))

研究成果報告書

平成17年3月

研究代表者 深尾 昌一郎

(京都大学生存圏研究所 教授)

船舶搭載型下部対流圏レーダー (SB-LTR) の開発

(研究課題番号 13354005)

平成13年度～平成15年度科学研究費補助金(基盤研究(A)(2))

研究成果報告書

平成17年3月

研究代表者 深尾 昌一郎

(京都大学生存圏研究所 教授)

I 研究組織

研究代表者

深尾 昌一郎 京都大学生存圏研究所 * 教授

研究分担者

橋口 浩之 京都大学生存圏研究所 * 助教授

山本 衛 京都大学生存圏研究所 * 助教授

藤井 康宏 三菱電機(株) 通信機製作所 課長

柴垣 佳明 大阪電気通信大学工学部 講師

海外共同研究者

K. S. Gage Aeronomy Laboratory, NOAA, USA

(*) 旧所属：宙空電波科学研究センター
生存圏研究所は旧木質科学研究所と旧宙空電波科学研究センターの
再編・統合により平成 16 年 4 月に発足した。

II 研究経費

平成 13 年度 6,400 千円

平成 14 年度 21,500 千円

平成 15 年度 6,000 千円

計 33,900 千円

III 研究発表

学会誌等

- 1) Renggono, F., H. Hashiguchi, S. Fukao, M. D. Yamanaka, S. Ogino, N. Okamoto, F. Murata, B. P. Sitorus, M. Kudsy, M. Kartasasmita, and G. Ibrahim, Precipitating clouds observed by L-band boundary layer radars in equatorial Indonesia, *Annales Geophysicae*, **19**, 889–897, 2001.
- 2) Teshiba, M., H. Hashiguchi, Y. Shibagaki, and S. Fukao, Typhoon 9707 observations with the MU radar and L-band boundary layer radar, *Annales Geophysicae*, **19**, 925–931, 2001.
- 3) Yamamoto, M.K., Hashiguchi, H., S. Fukao, Y. Shibano, and K. Imai, Development of a transportable 3-GHz wind profiler for wind and precipitation studies, *J. Meteor. Soc. Japan*, **80**, 273–283, 2002.
- 4) Murata, F., M. D. Yamanaka, M. Fujiwara, S. Ogino, H. Hashiguchi, S. Fukao, M. Kudsy, T. Sribimawati, S. W. B. Harijono, and E. Kelena, Relationship between wind and precipitation observed with UHF radar, GPS rawinsondes and surface meteorological instruments at Kototabang, West Sumatera during September–October 1998, *J. Meteor. Soc. Japan*, **80**, 347–360, 2002.
- 5) 若山俊夫, 松田知也, 藤坂貴彦, 河原恭一, 石原正仁, 橋口浩之, 深尾昌一郎, Lバンドウィンドプロファイラ観測における低高度でのデータ取得率改善, 信学技報, **SANE2002-11**, 1–6, 2002.
- 6) Hadi, T. W., T. Horinouchi, T. Tsuda, H. Hashiguchi, and S. Fukao, Sea-breeze circulation over Jakarta, Indonesia: A climatology based on boundary layer radar observations, *Mon. Weather Rev.*, **130**, 2153–2166, 2002.
- 7) Rao, Q.J., H. Hashiguchi, and S. Fukao, Study on ground clutter prevention fences for boundary layer radars, *Radio Sci.*, **38**, 1030, doi:10.1029/2001RS002489, 2003.
- 8) Fukao, S., H. Hashiguchi, M. Yamamoto, T. Tsuda, T. Nakamura, M.K. Yamamoto, T. Sato, M. Hagio, and Y. Yabugaki, Equatorial Atmosphere Radar (EAR): System description and first results, *Radio Sci.*, **38**, 1053, doi:10.1029/2002RS002767, 2003.
- 9) Rao, Q.J., H. Hashiguchi, and S. Fukao, Radiation pattern of a planar electromagnetically coupled coaxial dipole array mounted over a finite metallic reflected plate, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, **51**, 1132–1136, 2003.
- 10) 若山俊夫, 松田知也, 藤坂貴彦, 河原恭一, 石原正仁, 橋口浩之, 深尾昌一郎, Lバンドウィンドプロファイラ観測における低高度でのデータ取得率改善, 電子情報通信学会論文誌 B, **J87-B**, 715–725, 2004.

- 11) Hashiguchi, H., S. Fukao, Y. Moritani, T. Wakayama, and S. Watanabe, A lower troposphere radar: 1.3-GHz active phased-array type wind profiler with RASS, *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 915–931, 2004.
- 12) Umemoto, Y., M. Teshiba, Y. Shibagaki, H. Hashiguchi, M. D. Yamanaka, S. Fukao, and X-BAIU-99 and X-BAIU-02 observational groups, Combined wind profiler-weather radar observations of orographic rainband around Kyushu, Japan in the Baiu season, *Annales Geophysicae*, **22**, 3971–3982, 2004.
- 13) Teshiba, M., M. D. Yamanaka, H. Hashiguchi, Y. Shibagaki, Y. Ohno, and S. Fukao, Secondary circulation within a tropical cyclone observed with L-band wind profilers, *Annales Geophysicae*, **22**, 3951–3958, 2004.
- 14) Rao, Q.J., H. Hashiguchi, S. Fukao, and T. Matsuda, Effects of a clutter suppression cut-fence with a metallic disk on low-elevation sidelobes of lower-troposphere radar, *Radio Sci.*, **39**, doi:10.1029/2003RS002915, 2004.

口頭発表 (抜粋)

- 1) H. Hashiguchi, Findy R., S. Fukao, Sri Woro B. H., Harjono D., and Sri Diharto, Precipitating clouds observed by boundary layer radars in Indonesia, 8th Scientific Assembly of IAMAS, Innsbruck, Austria, July 10–18, 2001.
- 2) Q. Rao, H. Hashiguchi, and S. Fukao, Pattern Modeling of the LTR Phased Antenna Array inside a Square Cylindrical Conducting Fence, Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2001), Osaka, Japan, July 18–22, 2001.
- 3) K. Imai, T. Kishimoto, T. Iwai, Y. Shibano, H. Hashiguchi, and S. Fukao, Development of Transportable S-Band Boundary Layer Radar, Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2001), Osaka, Japan, July 18–22, 2001.
- 4) 橋口浩之・深尾昌一郎・津田敏隆・山本衛・中村卓司・山本真之・佐藤亨・山中大学・浜津享助・磯村昭彦, 京大 RASC における境界層レーダー・下部対流圏レーダー開発, 日本気象学会 2002 年度春期大会, 大宮, 2002 年 5 月.
- 5) 若山俊夫・松田知也・藤坂貴彦・河原恭一・石原正仁・橋口浩之・深尾昌一郎, L バンド ウィンドプロファイラ観測における低高度でのデータ取得率改善, 日本気象学会 2002 年度春期大会, 大宮, 2002 年 5 月.
- 6) M. Teshiba, Y. Shibagaki, H. Hashiguchi, S. Fukao, H. Eito, M. Yoshizaki, and X-BAIU-99 observation group, Study on mesoscale convective systems near the Baiu front caused by mountains in Kyushu area, Japan, The International Conference on Mesoscale Convective Systems and Heavy Rainfall/Snowfall in East Asia, Tokyo, Japan, October 29–31, 2002.

- 7) 西澤一史・宮下裕章・若山俊夫・松田知也・橋口浩之・深尾昌一郎, BL レーダ用 1.3GHz 帯アクティブフェーズドアレーアンテナ, 電子情報通信学会総合大会, 仙台, 2003 年 3 月.
- 8) Y. Umemoto, M. Teshiba, H. Hashiguchi, Y. Shibagaki, Y. Tanaka, M. D. Yamanaka, X-BAIU-02 observation group, Boundary layer radar observations of Baiu-frontal mesoscale convective systems in the leeward side of small islands (Koshikijima lines), The Tenth Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST/ST Radar, Piura, Peru, May 13-20, 2003.
- 9) H. Hashiguchi, S. Fukao, T. Wakayama, and S. Watanabe, A Lower Troposphere Radar: L-band active phased-array type wind profiler with RASS, IUGG XXIII General Assembly, Sapporo, Japan, June 30-July 11, 2003.
- 10) K. Nishizawa, H. Miyashita, T. Wakayama, T. Matsuda, H. Hashiguchi, and S. Fukao, A 1.3 GHz active phased array antenna for wind profiling boundary layer radar, IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology 2003, Boston, October 2003.
- 11) 手柴充博・藤田浩史・橋口浩之・柴垣佳明・山中大学・深尾昌一郎, MU レーダー・LTR・WINDAS を用いた台風 0310 号の同時観測, 第 4 回 MU レーダーシンポジウム, 京都, 2003 年 12 月.
- 12) 橋口浩之・深尾昌一郎, 船舶搭載型下部対流圏レーダー (SB-LTR) の開発による赤道西太平洋域大気運動の観測, 日本気象学会 2004 年度春期大会, 東京, 2004 年 5 月.
- 13) 橋口浩之・深尾昌一郎・手柴充博, 船舶搭載型下部対流圏レーダー (SB-LTR) の開発による赤道西太平洋域大気運動の観測, 第 8 回みらいシンポジウム, 横浜, 2005 年 1 月.

IV 研究経過

1. はじめに

近年世界的に、大気運動の高度プロファイルを連続観測できる大気レーダー (いわゆるウィンドプロファイラー) をネットワーク展開し、気象予報業務に利用することが積極的に行われ始めている。国内でも気象庁が平成 13 年度に大気レーダー 31 台 (当初は 25 台) から成るネットワーク「局地的気象監視システム (WINDAS)」[加藤他, 2003] を全国展開し、観測データは日々の気象予報業務に利用されている他、研究者にも公開されている。この WINDAS を構成する大気レーダーは、我々のグループが開発した「L バンド下部対流圏レーダー (Lower Troposphere Radar; LTR)」[Hashiguchi et al., 2004] であり、同レーダーは大学や研究機関でも使用されており、この種の小型レーダーの実質上の国内標準機と言っても過言ではない。

陸面上の高層風観測については、ラジオゾンデ観測ネットワークに加えて、上記のレーダーネットワークにより非常に密なデータを取得できるようになった。一方、海洋上については、海面近傍は衛星により観測可能であるが、高層観測データは適当な観測手段がないため非常に不足している。もし毎日海洋上を行き交う商船に大気レーダーを搭載しデータを取得できれば、海洋上の大気変動研究の飛躍的な発展が期待できるのみならず、気象予報精度が向上することは確実である。そこで、まず手始めとして、地上設置型の LTR を船舶搭載型下部対流圏レーダー (Ship Borne Lower Troposphere Radar; SB-LTR) として改良し、2004 年 3 月及び 12 月～翌年 1 月に海洋研究開発機構の海洋地球研究船「みらい」(図 1) の赤道西太平洋域航海 (MR04-01 及び MR04-08) に搭載し、試験観測を実施した。



図 1: 海洋研究開発機構 (旧 海洋科学技術センター) の海洋地球研究船「みらい」

2. レーダーシステム

LTR はアンテナ、24 台の送受信モジュール、送受信機、及びデータ処理装置から構成される。アンテナ部には 4m×4m のフェーズド・アレイ・アンテナを用いており、アンテナ素子には電磁結合ダイポールアンテナを使用している。移設時には 4 分割可能な構成となっているため、可搬性にも優れている。船舶に搭載するにあたり、MR04-01 航海では 4m×4m の設置面積の確保が困難であったため、アンテナを一面のみ使用し、そのサイズを 2m×2m とした (図 2)。ただし、24 個の分配・合成器を追加し、送信出力は 2kW を確保した (主要諸元を表 1 に示す)。すなわち、パワー開口積で決まるレーダー感度は、地上設置型の 1/4 (−6dB) である。MR04-08 航海では「みらい」関係者の特別の配慮により、4m×4m 開口で観測を実施できた (図 3)。アンテナを除く全ての機器は海上輸送用を改造したコンテナに搭載し、塩害を防いでいる (図 4)。船舶 (アンテナ) の傾きをリアルタイムにモニターするためアンテナに図 5 に示す 3 軸角度センサー (3DM, MicroStrain Inc.) を取り付け、また船舶の位置、進行速度等の情報を取得するため GPS センサー (SC-60, 古野電気) をコンテナの上に設置した。また、MR04-01 航海時にシークラッターの影響が大きかったので、MR04-08 航海時にはクラッターエコーを抑えるため、アンテナ周囲に高さ 1m 程のフェンスを設置した。

3. 信号処理

観測は地上設置時と同様 5 ビーム観測モードで行った。地上設置時には約 1 分間のコヒーレント及びインコヒーレント積分後のデータを記録するが、今回はできるだけ生データに近いコヒーレント積分後 (3.2ms 毎) の時系列複素データを記録した。観測期間中の全データ量はそれぞれ約 100GB であった。これらの時系列データと同時に、GPS センサーによる緯度、経度、方位、進行方向、進行速度の情報と、角度センサーによるピッチ、ロールの情報も記録した。FFT、インコヒーレント積分、パラメータ (風速) 推定処理等は全てオフラインで行った。現在まだアルゴリズムの改良中であるが、現状のオフライン処理では、インコヒーレント積分時に、それぞれの時刻におけるピッチ・ロール値のどちらかが 2σ (σ はそれぞれの標準偏差) を越えている

表 1: 船舶搭載型下部対流圏レーダー (SB-LTR) の主要諸元

送受信周波数	1357.5 MHz	
アンテナ形式	フェーズド・アレイ・アンテナ	
アンテナ開口	約 4 m ² (2 m×2 m)	(MR04-01 航海時)
	約 16 m ² (4 m×4 m)	(MR04-08 航海時)
ビーム幅	8.0° (半値全幅)	(MR04-01 航海時)
	4.0° (半値全幅)	(MR04-08 航海時)
ビーム方向	5 方向 (天頂・東西南北)	
ビーム天頂角	45° 以内で任意	
偏波	直線偏波	
ピーク送信電力	2 kW	
平均送信電力	428 W (デューティ比 21.4%) (最大)	
帯域幅	10 MHz	
パルス幅	0.67, 1.0, 1.33 μ s (切替)	
IPP	25, 50, 100 μ s (切替)	
距離分解能	100 m (最小)	

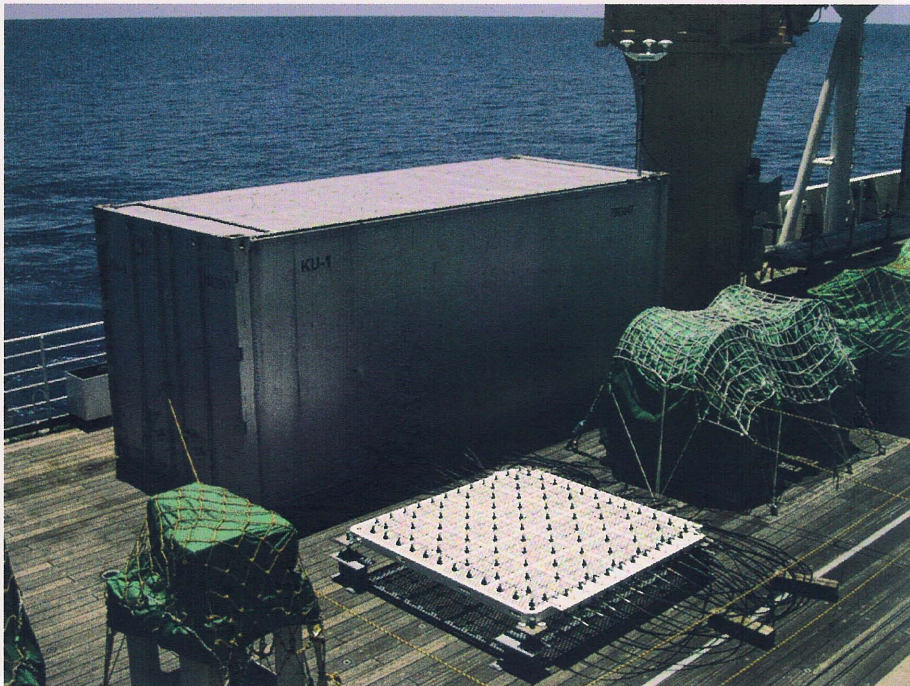


図 2: 「みらい」 MR04-01 航海時の SB-LTR 観測風景。アンテナ開口は $2\text{m} \times 2\text{m}$ 。



図 3: 「みらい」 MR04-08 航海時の SB-LTR 観測風景。アンテナ開口は $4\text{m} \times 4\text{m}$ 。



図 4: 「みらい」航海時のコンテナ内の様子。奥が送受信モジュール部、手前が送受信機とデータ処理装置。

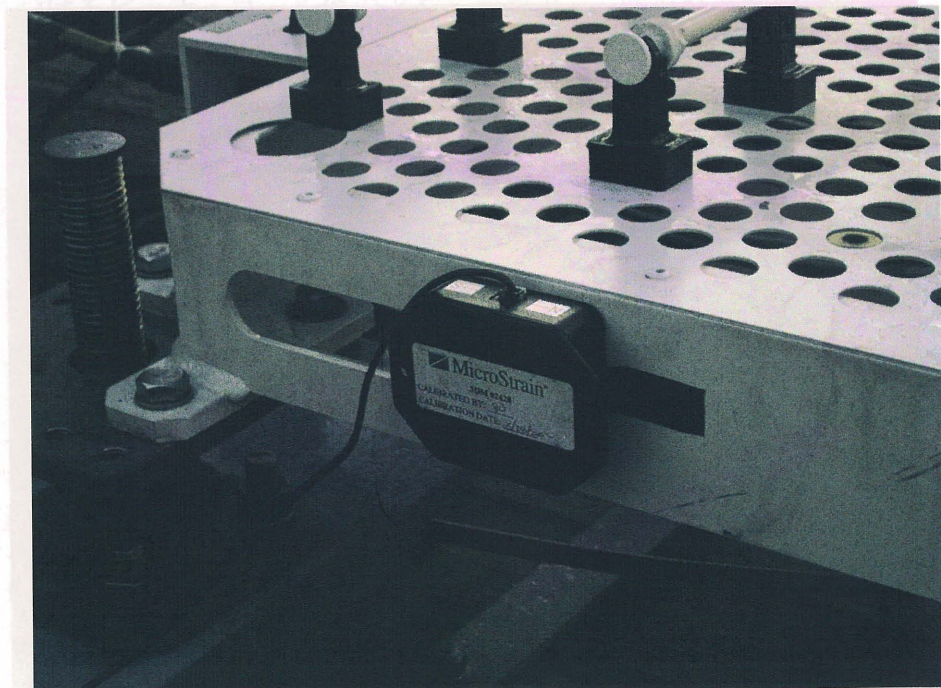


図 5: 3 軸角度センサー

時には積分対象から除外する方法により、所望の観測領域から外れているデータを取り除くことで、船の動揺による影響を最小限に抑えている。この処理により除かれるデータは全体の10～20%で、これによる Detectability の減少は1dB以下である。積分後のデータをガウスフィッティングすることによりパラメータ推定を行っている。ただし、鉛直流については、水平風の漏れ込みを防ぐためにロール・ピッチの平均が1°以上の場合には欠測扱いとした。

上記の方法で求めた水平風速は、船に相対的な速度として得られるので、以下の方法によりそれを補正する。すなわち、船首の方向を θ_h (北向き: 0°, 東向き: 90° で定義)、船の速度ベクトルを $v_s = (u_s, v_s)$ 、観測される船に相対的な風速ベクトルのプロファイル $v_o(h) = (u_o(h), v_o(h))$ とすると、静止系での風速ベクトルのプロファイル $v(h) = (u(h), v(h))$ は

$$v(h) = Rv_o(h) - v_s$$

で求めることができる。ここで、 R は回転を表すマトリクスで

$$R = \begin{pmatrix} \cos \theta_h & -\sin \theta_h \\ \sin \theta_h & \cos \theta_h \end{pmatrix}$$

である。

4. 初期観測結果

図6に、2004年12月12日～2005年1月9日にSB-LTRで観測された風速3成分の時間高度変化を示す。風の大規模場が12月24日頃に西風から東風に変わった様子を捉えることができる。また、南北風には数日スケールの変動が捉えられている。図7に、2004年12月28日における風速3成分の時間高度変化を水平風をベクトル表示で、鉛直流をコンタ表示で示す。0.7m/sより大きな下向き成分は降水エコーを捉えたものである。7時頃から11時過ぎに降水が見られるまでの間、継続的に上昇流が観測されている。図8に同日の気象衛星による赤外面像を示すが、SB-LTRで得られた鉛直成分(降水エコー)と発達した雲域との対応が見られている。

より詳細なデータ解析は今後の課題であるが、赤道域インドネシア周辺のいわゆる「海洋大陸」域は、地球環境変動にも関係するモンスーン変動やエルニーニョの機構解明の鍵を握る重要な領域と考えられていることから、今回得られたデータは今後の赤道熱帯域大気研究にも多いに貢献するものと考えられる。

5. 今後の発展

「みらい」を利用した試験観測で一定の成果を収めることができたものの、「みらい」のような特殊な減揺装置を持たない一般の商船に搭載する場合には、本来地上設置を目的に開発されたLTRの改良では限界があり、今後解決しないといけないくつもの問題も明らかとなった。すなわち、ビーム方向を制御し船の動揺をアクティブに補償することと、海面からの強い反射エコー(シークラッター)を抑圧することが、次の開発課題である。そこで、船舶に搭載して海面近くから高度数kmまでの大気運動を連続観測できるアクティブ・フェーズド・アレイ方式の「船舶搭載用下層大気レーダー」(Shipborne Lower Atmospheric Radar; SOLAR)を提案する。一般にプロファイラーの探知性能はアンテナサイズと送信出力の積(パワー開口積)で決まるが、高度5km程度までのデータを取得するためにはLTRと同等のパワー開口積が必要である。船舶に搭載する上では設置面積が制限される可能性があることから、LTRよりアンテナを小型化し直径3.2mとし、それを補償するように送信出力を4kWとする。信号処理装置等の室内機器は小型の標準ラック1台に収め、大人1人で移動可能な重量とする。

大気レーダーを船舶に搭載する上で最大の課題の一つは、船の動揺(ロール、ピッチ)を如何に補償するかである。「みらい」の場合には減揺装置により動揺がかなり抑えられていたため、3

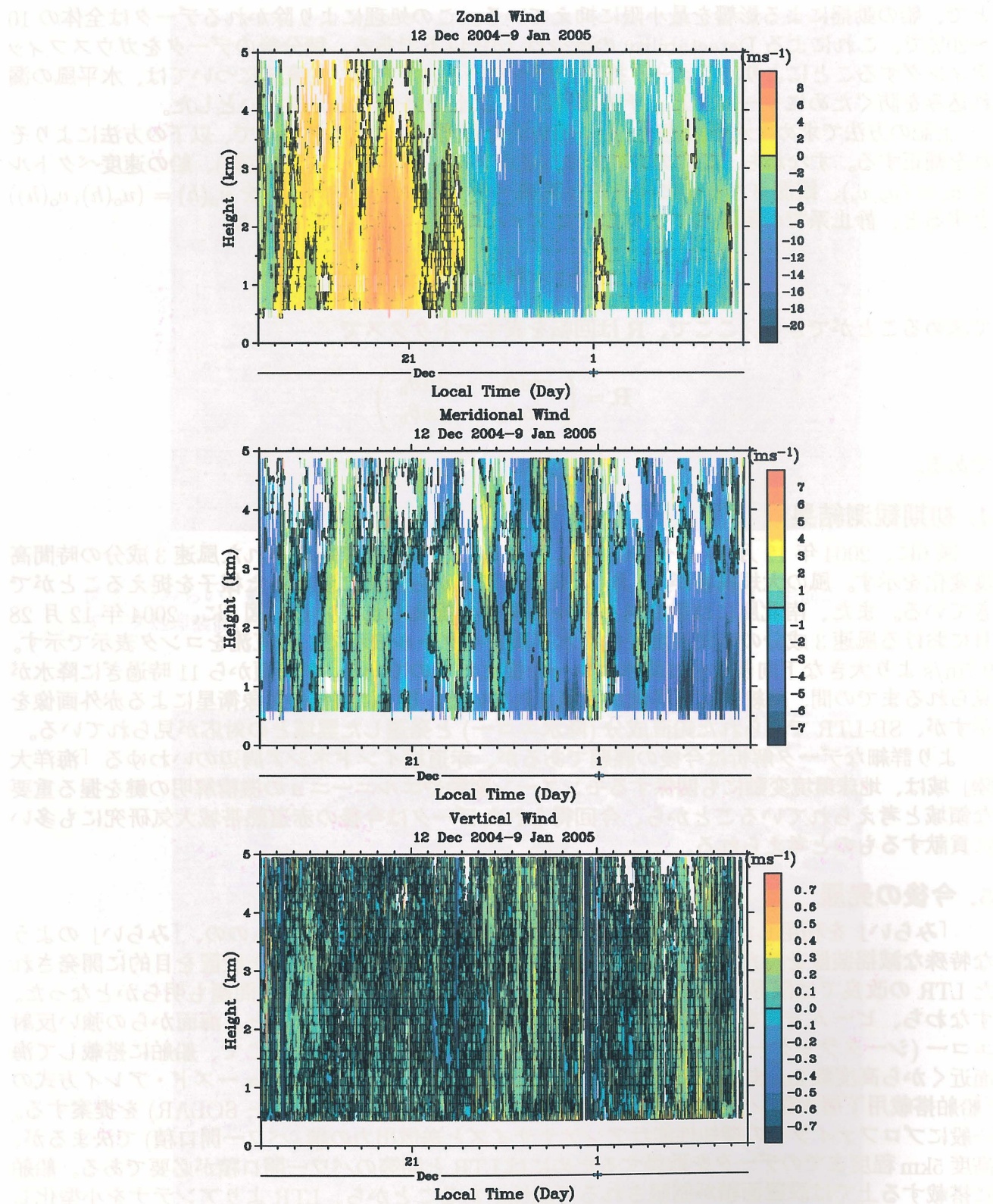


図 6: 2004 年 12 月 12 日～2005 年 1 月 9 日に SB-LTR で観測された東西風 (上)、南北風 (中央)、鉛直流 (下) の時間高度変化。

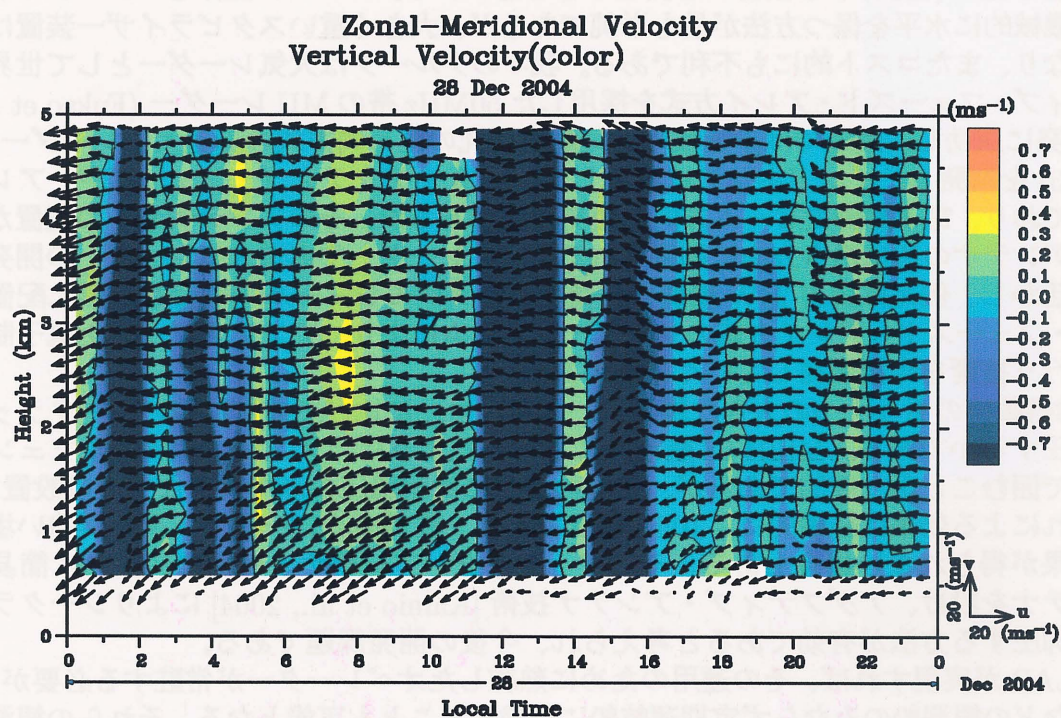


図 7: 2004 年 12 月 28 日に SB-LTR で観測された水平風 (ベクトル) と鉛直流 (コンタ) の時間高度変化。

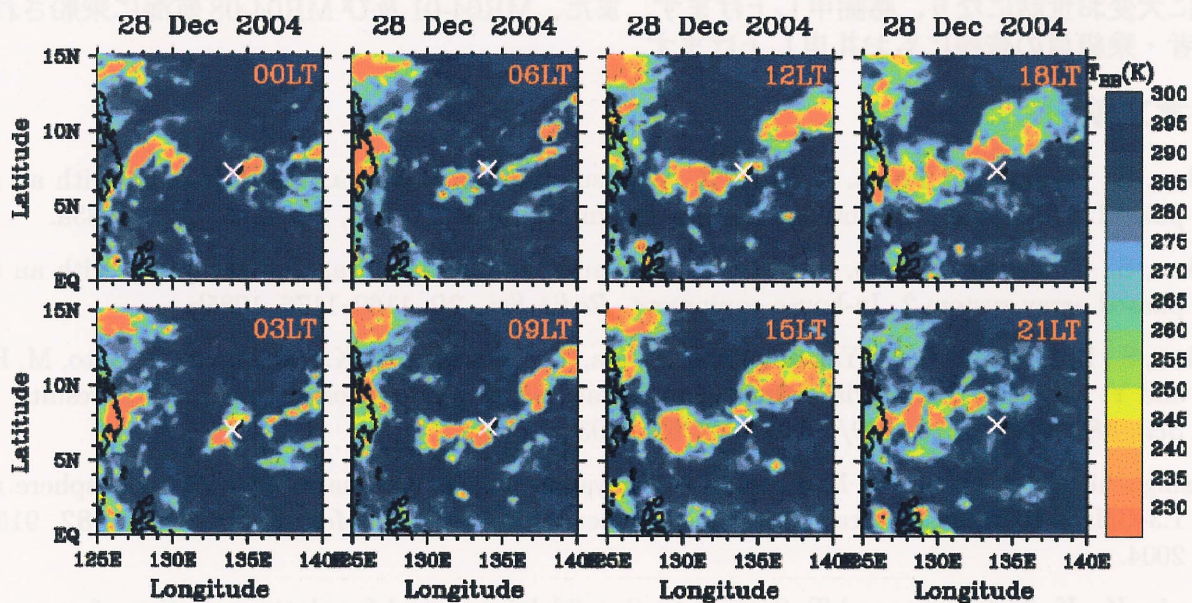


図 8: 2004 年 12 月 28 日に気象衛星で得られた赤外画像。× 印がその時刻における「みらい」の位置を表す。

節で述べた信号処理法で風速の測定が可能であったが、一般の商船に搭載する場合にはレーダー側で動揺を補正(補償)する機構が必要となると思われる。アンテナ全体をスタビライザー装置に載せ、機械的に水平を保つ方法が最も単純であるが、大きく重いスタビライザー装置は設置時に障害となり、またコスト的にも不利である。我々のグループは大気レーダーとして世界で初めてアクティブ・フェーズド・アレイ方式を採用した 50MHz 帯の MU レーダー (Fukao et al., 1985a, b) の開発に成功し、最近では赤道域の大気観測研究のため同方式の赤道大気レーダー (Fukao et al., 2003) を開発し、インドネシアに設置した。LTR もアクティブ・フェーズド・アレイ方式を採用しており、電子制御でビーム方向を変更可能であるが、そのアンテナ素子の配置から、その方向がアンテナの辺に沿う方向に制限される。MU レーダーや赤道大気レーダーの開発で培った技術を活かし、例えば出力 24W 程度の送受信アンテナモジュール 169 台を円形に配置し、アクティブ・フェーズド・アレイ方式のレーダーシステムにより、アンテナビームを電子制御し動揺補償を行う技術を今後開発していく必要がある。

船舶搭載時のもう一つの大きな課題は、大気エコーに比べて非常に強いシークラッターを如何に抑圧するかである。MR04-08 航海時にも行ったように、アンテナの周囲をフェンスやスクリーンで囲むことが一般的であるが、船舶の場合には耐風圧の点で大きなものは設置が困難で、またそれによる効果は経験的に -10dB 程度であり、波が高くシークラッターが強い場合には十分な効果が得られない場合もある。そこで、レーダーアンテナとは別に、周囲に簡易な受信専用アンテナを設け、アダプティブ・アンテナ技術 [Kamio et al., 2004] によりシークラッターエコーを抑圧する方法が有効であると考えられ、今後の開発課題である。

SOLAR が実現すれば、その運用のために熟練したオペレーターが常駐する必要がないので、気象庁などの観測船のみならず定期運航船に搭載することも可能となる。それらの観測データを衛星回線を通じてリアルタイムに取得できるようにすれば、質の高い海洋上の高層気象データが連続的に得られるようになり、特に長・中期の気象予報精度の向上につながると期待される。

謝辞

SB-LTR を「みらい」に搭載するにあたり、海洋研究開発機構の米山邦夫博士と勝俣昌己博士に大変お世話になり、感謝申し上げます。また、MR04-01 及び MR04-08 航海に乗船された研究者・乗組員の皆様にもお礼申し上げます。

参考文献

- Fukao, S., T. Sato, T. Tsuda, S. Kato, K. Wakasugi, and T. Makihiro, The MU radar with an active phased array system 1. Antenna and power amplifiers, *Radio Sci.*, **20**, 1155–1168, 1985a.
- Fukao, S., T. Tsuda, T. Sato, S. Kato, K. Wakasugi, and T. Makihiro, The MU radar with an active phased array system 2. In-house equipment, *Radio Sci.*, **20**, 1169–1176, 1985b.
- Fukao, S., H. Hashiguchi, M. Yamamoto, T. Tsuda, T. Nakamura, M.K. Yamamoto, T. Sato, M. Hagio, and Y. Yabugaki, Equatorial Atmosphere Radar (EAR): System description and first results, *Radio Sci.*, **38**, 1053, doi:10.1029/2002RS002767, 2003.
- Hashiguchi, H., S. Fukao, Y. Moritani, T. Wakayama, and S. Watanabe, A lower troposphere radar: 1.3-GHz active phased-array type wind profiler with RASS, *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 915–931, 2004.
- Kamio, K., K. Nishimura, and T. Sato, Adaptive sidelobe control for clutter rejection of atmospheric radars, *Ann. Geophys.*, **22**, 4005–4012, 2004.
- 加藤美雄, 阿保敏広, 小林健二, 泉川安志, 石原正仁, 気象庁におけるウィンドプロファイラ観測業務, 天気, **50**, 891–907, 2003.