

下部対流圏レーダーの開発とその大気観測研究への応用

—2008年度堀内賞受賞記念講演—

橋 口 浩 之*

1. はじめに

このたびは堀内賞を授与頂きまことにありがとうございます。この賞の対象は、「主に気象学の境界領域・隣接分野あるいは未開拓分野での調査・研究・著述等により、気象学もしくは気象技術の向上に大きな影響を与えているもの」とのことですので、気象観測技術の開発研究に努力してきた者として、評価頂けたことを大変うれしく思います。受賞対象となりました下部対流圏レーダーの開発は、私が1990年に京都大学大学院の修士課程の学生として、深尾昌一郎先生の研究室に入って以来、開発を続けてきました小型ウィンドプロファイラーのひとつであります。この場をお借りして、下部対流圏レーダー誕生までの開発の歴史と、その後の発展についてもご紹介させていただきます。

2. 小型可搬式境界層レーダーの開発

修士課程から深尾研究室でお世話になることになり、私に与えられた修士論文のテーマは「境界層レーダーの開発」でした。既にMU（中層・超高層大気）レーダー（Fukao *et al.* 1985 a, b）などのVHF帯大型レーダーを用いて、鉛直流を含む風速3成分の高度プロファイルを観測する技術はほぼ確立していましたが、大型レーダーでは大気最下層の大気境界層を観測できませんでした。そこで、L帯（1357.5 MHz）の周波数を用いて大気境界層を連続観測する境界層レーダーを開発することになりました。MUレーダーという非常にすばらしいお手本がありましたので、最初はそのような小さなレーダーなら簡単にできるのではと考

えていましたが、実際はそんなに甘いものではなく、境界層レーダーがやっと形になり信楽MU観測所に搬入・設置されたのは、私が修士2回生の12月に入ってからでした（第1図）。レーダーの設置後も、三菱電機の技術者の方と一緒に、真冬の寒い信楽に泊り込んで調整を重ね、やっとまともなデータが取れ出したのは、暮れも押し迫った28日の深夜でした（第2図）。私はこのデータを見て、やっと修士論文が書けるとほっと胸をなでおろしました。

第3図は信楽における境界層レーダーで観測された、1992年6月2日4時～20時におけるエコー強度（コンター）及び南北・鉛直流（矢印）の時間高度断面図です（Hashiguchi *et al.* 1995 a）。夜間は数100 m以下の高度に存在する比較的弱い混合層が、8時頃から14時頃にかけて強い擾乱とともに1.5 km程度まで発達する様子をきれいに捉えています。その後、この境界層レーダーはインドネシアのジャカルタ近郊のスルボンに移設し、1992年末から連続観測を開始しました（Tsuda *et al.* 1995）。以来、10年以上に渡って、熱帯大気の連続観測データを提供してくれました



第1図 信楽MU観測所に設置された境界層レーダー1号機（1991年12月10日撮影）。

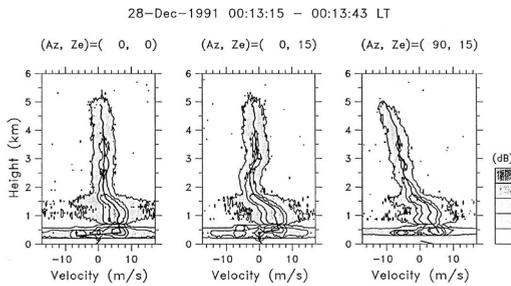
* 京都大学生存圏研究所。

—2009年2月9日受領—

—2009年9月9日受理—

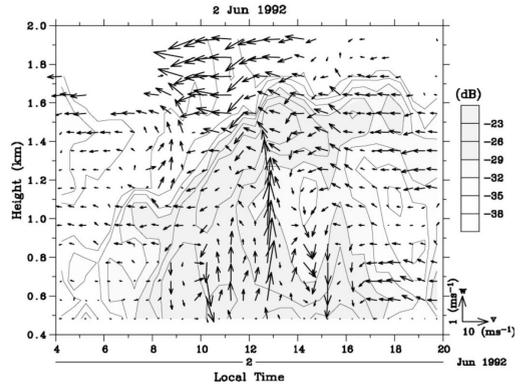
(Hashiguchi *et al.* 1995 c, 1996, 1997). 第4図は信楽(右)とインドネシア(左)における典型的なエコー強度の時間高度変化を示しています (Hashiguchi *et al.* 1995 b). 信楽の場合は、境界層(混合層)の発達高度はせいぜい1.5 km~2 km程度ですが、インドネシアの場合には4 kmを超える高高度まで境界層が発達している様子がわかります. これがインドネシア域の活発な積雲活動に寄与していると考えられます.

境界層レーダー1号機は、送信ピーク電力1 kW

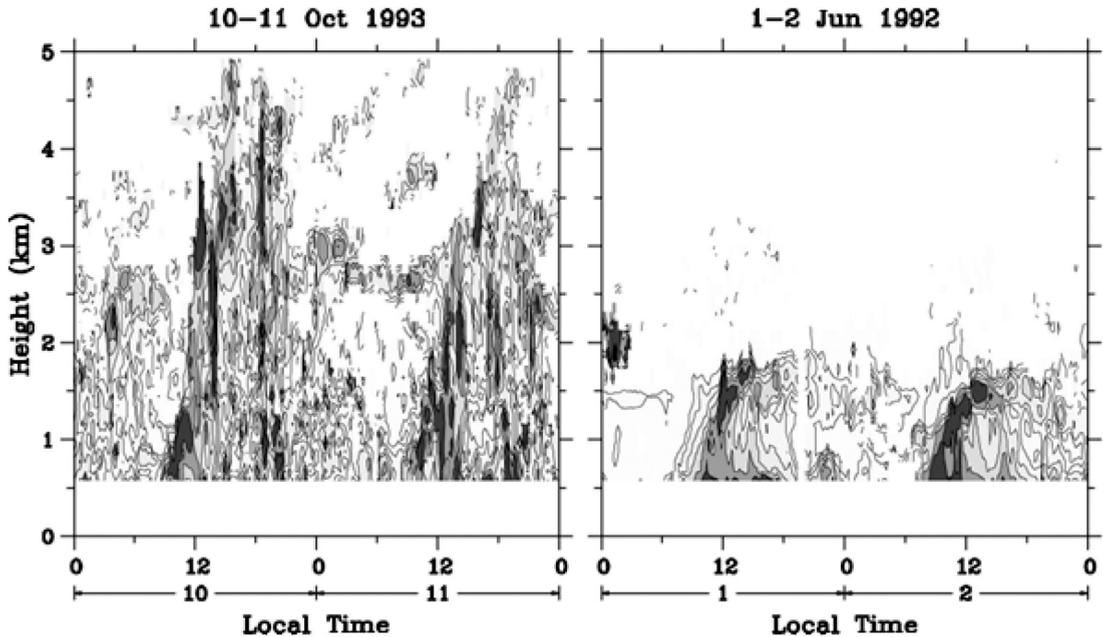


第2図 1991年12月28日深夜に境界層レーダーで初めて観測されたドップラスペクトル. 横軸はドップラー速度(レーダーに近づく成分が正), 縦軸は高度を表す.

で、第1図のように直径2 mのパラボラアンテナを3方向に向けた構造をしており、それらを切り替えて使用することで、3方向の観測を実現していました. その後、同型のレーダーが福島大学などに導入されています. また、送受信機や信号処理装置の基本構成は1号機と同じで、より可搬性を高めるため、パラボラアンテナ1基を機械的に駆動するように改良したものと



第3図 1992年6月2日に境界層レーダーで観測されたエコー強度(コンター)と南北・鉛直流(矢印)の時間・高度変化. 横軸は時間, 縦軸は高度を表す.



第4図 日本の信楽(右)及びインドネシアのスロポン(左)において境界層レーダーで観測された典型的なエコー強度の時間・高度変化. 横軸は(地方)時間, 縦軸は高度を表す.

が関西総合環境センター（現 環境総合テクノス）に導入されています。同社における実験終了後、我々はレーダーを借り受け、インドネシア共和国西スマトラ州のコタババンに移設し、1998年8月から赤道大気の観測を行っています。

その後、各アンテナ素子の位相を制御することで観測方向を高速に変更できる、フェーズドアレイアンテナを使用した境界層レーダーの開発を、住友電工との共同研究で行いました。まず、192個のパッチアンテナを十字型に配置したアンテナ一辺のサイズが2.8 m、送信ピーク電力が1.1 kW のL帯境界層レーダーを開発しました。12台の送信アンプのそれぞれから16個のパッチアンテナに給電するセミアクティブ方式を採用しています。この技術開発を背景に、容易に移動観測を可能とするため、小型トラックに搭載可能なサイズに小型化したS帯境界層レーダー（第5図）の開発を行いました（Yamamoto *et al.* 2002）。送受信周波数をS帯の3050 MHzにすることでアンテナサイズを1 mにまで小型化しました。アンテナは188個のディスクアンテナを円形に配置した構造をしています。アンテナと送受信機を小型トラックの荷台に載せ、信号処理装置を後部座席に設置することで、商用電源さえあれば簡単に移動し観測を行うことを可能としました。

3. 下部対流圏レーダーの開発

1 GHz帯の境界層レーダーは、1980年代末頃から他機関でも開発が行われており、国内では通信総合研究所（現 情報通信研究機構）が、我々とほぼ同時期にL帯境界層レーダーの開発に成功しています（Ohno 1995）。また海外では、米国NOAAが我々よりも数年先行して、915 MHz帯境界層レーダーの開発に成功しています（Ecklund *et al.* 1988；Carter *et al.* 1995）。しかしながら、我々のレーダーも含めて、いずれも安定して風速を観測できる高度範囲は境界層内部の2 km程度まででした。一方、気象予報業務に利用するには5 km程度までのデータが必要であると言われていましたので、それにはこれらの境界層レーダーでは力不足でした。

一般にウィンドプロファイラーの観測高度は、送信平均出力とアンテナ開口の積で決まります（深尾・浜津 2005）。従来の1 GHz帯の境界層レーダーは出力・開口積が100 Wm²程度でしたが、5 km程度まで観測するためには10000 Wm²、すなわち約100倍の性



第5図 車載型S帯境界層レーダー。

能向上が必要でした。そのために、下部対流圏レーダーでは大きく3つの技術開発要素がありました。

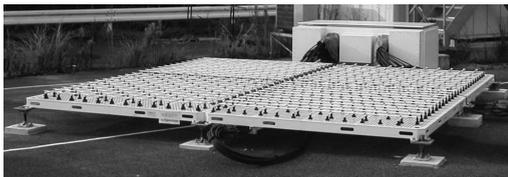
まず第一の技術開発要素は、アクティブフェーズドアレイ技術です。従来のレーダーは比較的大きな送信器1個を使って、物理的にアンテナ方向を切り替えたり（境界層レーダー1号機など）、あるいは電子制御でビーム方向を替える方式（NOAA境界層レーダーなど）が取られていましたが、そのような方式では1 kW程度の送信ピーク出力が限界でした。下部対流圏レーダーではMUレーダーと同じく、アクティブフェーズドアレイ方式を採用し、ひとつひとつは85 Wと比較的低出力の送信器を24台使用し、電波を空間で合成することでトータルの送信ピーク出力2 kWを実現しました。これにより、従来よりも2～4倍の出力向上が得られました。

一般に、高度分解能を上げようとするるとパルス幅を狭くする必要があり、そうすると送信平均出力が下がるという関係があります。そこで、MUレーダー等の大型レーダーではパルス圧縮という、送信パルスを符号変調することで高度分解能を維持したまま送信平均出力を増大させるという技術が使われていました（例えば、Woodman 1980）。しかし、この方法の欠点は、観測最低高度が犠牲になることで、中層・超高層大気観測を目的としたMUレーダーではそれほど大きな問題ではありませんでしたが、境界層観測を目的とした小型レーダーではパルス圧縮技術を使えないというのが、それまでの常識でした。ちょうど下部対流圏レーダーの開発を検討していた時期に、Spano and Ghebrehan (1996 a, b, c) が、新しいパルス圧縮符号の理論的研究の論文を発表し、この方法を使えば最低観測高度を悪化させることなく、送信平均出力を向上させることができることを報告しました。それを実現するためには、パルス送信毎に異なる符号系列を使うという複雑な処理が必要でしたが、下部対流圏レ

ダーではその実装に成功しました。この第二の技術開発により送信平均出力を8倍向上させることができました。

第三の技術開発については、三菱電機の独自技術で私自身はほとんど貢献していませんが、電磁結合同軸ダイポールアンテナというPHSの基地局などで使われているアンテナ技術を三菱が有していました(Miyashita *et al.* 1999)。そのアンテナを下部対流圏レーダーに用いることで、4m×4mという比較的大型のアンテナと可搬性を両立することができました。これにより1号機に比べて、ほぼ同じ設置面積でアンテナ開口を約5倍向上させることができました。

以上の技術開発により、従来に比べて約100倍の性能向上が見込まれ、高度5kmまでの観測が可能となりました。第6図及び第1表に下部対流圏レーダーの概観と主要諸元を示します(Hashiguchi *et al.* 2004)。アンテナサイズは4m×4m、送信ピーク電力は2kWで、Spano and Ghebrehanの符号を用いたパルス圧縮により送信平均電力400Wを実現しています。アンテナ素子毎に5ビットの移相器を有する送受信モジュールを設けることで、ビームを任意の天頂角に向けることができます。



第6図 下部対流圏レーダー。

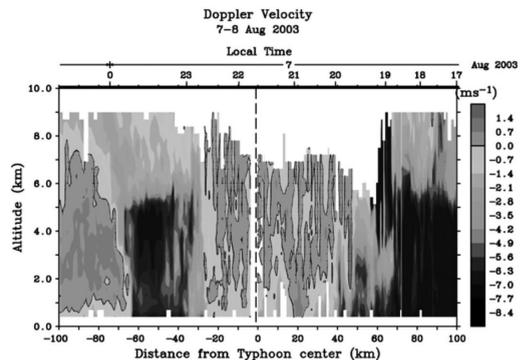
第1表 下部対流圏レーダーの主要諸元。

送受信周波数	1357.5 MHz
送信ピーク電力	2 kW
アンテナ形式	フェーズドアレイ
アンテナ開口	16 m ²
送受信ビーム幅	4.0°
空中線利得	33 dBi
送信パルス幅	0.67, 1, 2 μs
パルス繰返し周期	50, 100, 200 μs
ビーム方向	鉛直+東西南北(天頂角:任意)
距離分解能(最小)	100 m

4. 下部対流圏レーダーの大気観測への応用

ちょうど下部対流圏レーダーを開発していた時期に、気象庁が国内にウィンドプロファイラーネットワークを整備する計画を進めていました。このネットワークは「局地的気象監視システム；略称WINDAS (Wind Profiler Network and Data Acquisition System)」と名づけられ、国際競争入札により、その構成レーダーとして下部対流圏レーダーが採用されました。WINDASは2001年に25台でスタートし、2003年に6台が追加され、現在31地点で連続観測が行われています。全国各地の観測データは本庁に集められ、日々の天気予報業務に利用されています。WINDASによる観測データの同化により、特に局地的な集中豪雨などの予報精度が向上したと言われています(Ishihara *et al.* 2006)。

下部対流圏レーダー(WINDAS)による観測の一例として、Teshiba *et al.* (2005)による台風0310号の中心付近の観測を取り上げます。ウィンドプロファイラーで観測される物理量は本質的に高さ方向(レーダー直上)の一次元量ですが、高時間分解能で連続データが得られるため、その間で気象現象の時間変化が小さいとすると、レーダー上空の高さ・時間の二次元データを、現象の高さ・距離断面と読み替えることができます。第7図は、2003年8月7日に台風0310号が鹿児島県名瀬市(現・奄美市)付近を発達しながら通過した際に、WINDAS名瀬サイトの下部対流圏レーダーで捉えられた台風中心付近の鉛直成分の台風



第7図 下部対流圏レーダー(WINDAS名瀬サイト)で観測された鉛直成分の距離・高度分布。横軸は台風中心からの距離(正が台風前面)、縦軸は高度を表す。図上に示す軸は対応する時間を表す。(Teshiba *et al.* 2005)

中心からの距離・高度分布です。2 m/s 以上の下降成分は雨滴の落下速度に対応しており、眼の壁雲と考えられるその領域では強い降水が見られたことが分かります。一方、距離50 km 以内では、降水は見られず、上昇流と下降流が激しく入れ替わっている様子が分かります。台風を中心付近は下降流が支配的であると考えられていましたが、下部対流圏レーダーによる観測により、激しく上下に変動している様子が初めて見出されました。

5. その後の発展

その後も小型レーダーの開発は続けており、例えば第8図のような、より設置面積を小さくして、かつコストダウンを狙ったウィンドプロファイラーを、住友電工との共同研究により開発しています。直径80 cm のルネベルグレンズアンテナ（1944年にルネベルグが考案した誘電体レンズの一種）を7つ使用した、アクティブフェーズドアレイ方式のレーダーで、アンテナサイズは約2.5 m と下部対流圏レーダーより開口面積は小さいですが、それを補うように送信平均出力を拡大して、また受信感度を高めることで、総合的には下部対流圏レーダーと同等の観測性能を有しています。京都大学では、2001年にインドネシア共和国西スマトラ州コトタバンに VHF 帯赤道大気レーダー（Fukao *et al.* 2003）を建設し連続観測を行っています。それに加えて、地球観測システム構築推進プランの HAR-IMAU（Hydrometeorological Array for ISV-Monsoon Automonitoring）プロジェクト（海洋研究開発機構 山中大学代表）によって、レンズアンテナ型ウィンドプロファイラー3台を、西からカリマンタン



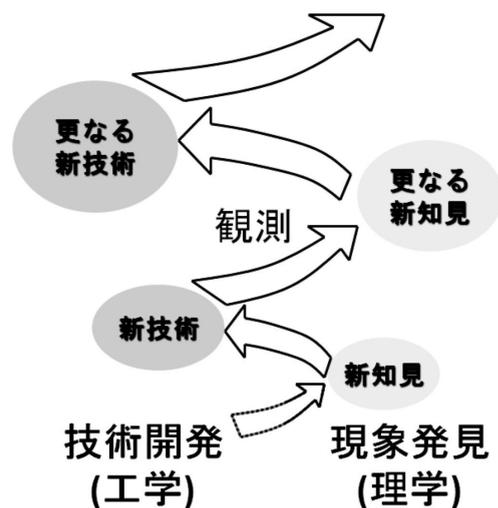
第8図 ルネベルグレンズアンテナを用いた最新型ウィンドプロファイラー。

島のポンティアナ、スラウェシ島のマナド、ニューギニア島の北の島であるピアクに設置し、赤道上のネットワーク観測を行っています（Yamanaka *et al.* 2008）。現在これを使って、海洋大陸域の季節内変動等の研究を進めています。

ウィンドプロファイラーの船舶搭載についても研究開発を行っています。海洋上の高層観測データは少なく、海洋の面積は陸地の2倍以上ありますので、ウィンドプロファイラーで海洋上を観測できるようになれば、気象予報に対するインパクトも小さくないことが容易に想像できます。まず手始めに、下部対流圏レーダーを一部改造して、海洋研究開発機構の海洋地球研究船「みらい」に載せて頂き、試験観測を実施しました。その結果、「みらい」のような減揺装置を備えた大型船舶であれば、下部対流圏レーダーの改造でも十分に実用になることが分かりました。しかし、一般の商船に搭載する場合には、海面からの反射（シークラッター）の対策や、船の揺れに合わせてビーム方向を電子制御でアクティブに補償することなど、次の技術開発課題が明らかになってきました。今後、これらの課題を解決して、タンカーやコンテナ船に搭載できるようにし、さらに将来的にはブイに設置できるような小型レーダーの開発も行いたいと考えています。

6. おわりに

気象学における観測の重要性は、計算機の性能向上



第9図 新しい観測技術開発と気象現象発見による気象学の発展。

とともに数値モデルの発展が著しい現在においても、変わらないと思います。第9図に示すように、新しい観測技術の開発(工学)により、何らかの新しい現象の発見(理学)があり、それがまた新しい観測技術の開発課題を生み出すことで、さらなる発展が得られるであろうと考えます。今後もこのような工学と理学が融合した場で研究を進め、気象学の発展に少しでも貢献していけるよう、努力して参りたいと思います。

謝 辞

本研究を進めるに当たって、非常に多くの方々からご指導・ご協力を頂きました。特に、恩師の深尾昌一郎先生・山中大学先生には学生時代はもちろん、現在でもご指導を頂いており、心からお礼を申し上げます。加藤 進先生・廣田 勇先生には、事あるごとにあたたかい励ましのお言葉を掛けて頂いております。津田敏隆先生・佐藤 亨先生・山本 衛先生・中村卓司先生には、レーダーの開発に関して多くの有益なアドバイスを頂きました。また、レーダーの開発には、優秀な学生諸氏の力が必要でしたし、メーカーの技術者の方々も忘れることができません。改めてこれらの方々へ感謝申し上げます。

参 考 文 献

- Carter D. A., K. S. Gage, W. L. Ecklund, W. M. Angevine, P. E. Johnston, A. C. Riddle, J. Wilson and C. R. Williams, 1995 : Developments in UHF lower tropospheric wind profiling at NOAA's Aeronomy Laboratory. *Radio Sci.*, **30**, 977-1001.
- Ecklund, W. L., D. A. Carter and B. B. Balsley, 1988 : A UHF wind profiler for the boundary layer : Brief description and initial results. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **5**, 432-441.
- 深尾昌一郎, 浜津享助, 2005 : 気象と大気のレーダーリモートセンシング. 京都大学学術出版会, 491 pp.
- Fukao, S., T. Sato, T. Tsuda, S. Kato, K. Wakasugi and T. Makihira, 1985 a : The MU radar with an active phased array system, 1. Antenna and power amplifiers. *Radio Sci.*, **20**, 1155-1168.
- Fukao, S., T. Tsuda, T. Sato, S. Kato, K. Wakasugi and T. Makihira, 1985 b : The MU radar with an active phased array system, 2. In-house equipment. *Radio Sci.*, **20**, 1169-1176.
- Fukao, S., H. Hashiguchi, M. Yamamoto, T. Tsuda, T. Nakamura, M.K. Yamamoto, T. Sato, M. Hagio and Y. Yabugaki, 2003 : Equatorial Atmosphere Radar (EAR) : System description and first results. *Radio Sci.*, **38**, 1053, doi : 10.1029/2002RS002767.
- Hashiguchi, H., M. D. Yamanaka, T. Tsuda, M. Yamamoto, T. Nakamura, T. Adachi, S. Fukao, T. Sato and D. L. Tobing, 1995 a : Diurnal variations of the planetary boundary layer observed with an L-band clear-air Doppler radar. *Bound.-Layer Meteor.*, **74**, 419-424.
- Hashiguchi, H., S. Fukao, T. Tsuda, M. D. Yamanaka, D. L. Tobing, T. Sribimawati, S. W. B. Harijono and H. Wiryosumarto, 1995 b : Observations of the planetary boundary layer over equatorial Indonesia with an L band clear-air Doppler radar : Initial results. *Radio Sci.*, **30**, 1043-1054.
- Hashiguchi, H., S. Fukao, M. D. Yamanaka, T. Tsuda, S. W. B. Harijono and H. Wiryosumarto, 1995 c : Boundary layer radar observations of the passage of the convection center over Serpong, Indonesia (6 S, 107 E) during the TOGA COARE Intensive Observation Period. *J. Meteor. Soc. Japan*, **73**, 535-548.
- Hashiguchi, H., S. Fukao, T. Tsuda, M. D. Yamanaka, S. W. B. Harijono and H. Wiryosumarto, 1996 : An overview of the planetary boundary layer observations over equatorial Indonesia with an L-band clear-air Doppler radar. *Contrib. Atmos. Phys.*, **69**, 13-25.
- Hashiguchi, H., S. Fukao, M. D. Yamanaka and T. Tsuda, 1997 : Frequency spectra of wind velocity fluctuations between 1 hour and 1 month in the atmospheric boundary layer over equatorial Indonesia. *J. Geomagn. Geoelectr.*, **49**, S187-S195.
- Hashiguchi, H., S. Fukao, Y. Moritani, T. Wakayama and S. Watanabe, 2004 : A lower troposphere radar : 1.3-GHz active phased-array type wind profiler with RASS. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 915-931.
- Ishihara, M., Y. Kato, T. Abo, K. Kobayashi and Y. Izumikawa, 2006 : Characteristics and performance of the operational wind profiler network of the Japan Meteorological Agency. *J. Meteor. Soc. Japan*, **84**, 1085-1096.
- Miyashita, H., H. Ohmine, K. Nishizawa, S. Makino and S. Urasaki, 1999 : Electromagnetically coupled coaxial dipole array antenna. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **47**, 1716-1726.
- Ohno, Y., 1995 : Land and sea breezes observed by a 1357 MHz wind profiler. *Proceedings of the Seventh Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar*, South Carolina, November 7-11, 1995, 323-326.
- Spano, E. and O. Ghebrehbrhan, 1996 a : Pulse coding

- techniques for ST/MST radar systems : A general approach based on a matrix formulation. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **34**, 304-316.
- Spano, E. and O. Ghebrehghan, 1996 b : Complementary sequences with high sidelobe suppression factors for ST/MST radar applications. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **34**, 317-329.
- Spano, E. and O. Ghebrehghan, 1996 c : Sequences of complementary codes for the optimum decoding of truncated ranges and high sidelobe suppression factors for ST/MST radar systems. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **34**, 330-345.
- Teshiba, M., H. Fujita, H. Hashiguchi, Y. Shibagaki, M. D. Yamanaka and S. Fukao, 2005 : Detailed structure within a tropical cyclone "eye". *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L24805, doi : 10.1029/2005.GL023242.
- Tsuda, T., S. Fukao, M. Yamamoto, T. Nakamura, M. D. Yamanaka, T. Adachi, H. Hashiguchi, N. Fujioka, M. Tsutsumi, S. Kato, S. W. B. Harijono, T. Sribimawati, B. P. Sitorus, R. B. Yahya, M. Karmini, F. Renggono, B. L. Parapat, W. Djojonegoro, P. Mardio, N. Adikusumah, H. T. Endi and H. Wiryo Sumarto, 1995 : A preliminary report on observations of equatorial atmosphere dynamics in Indonesia with radars and radiosondes. *J. Meteor. Soc. Japan*, **73**, 393-406.
- Woodman, R. F., 1980 : High-altitude-resolution stratospheric measurements with the Arecibo 2380-MHz radar. *Radio Sci.*, **15**, 423-430.
- Yamamoto, M. K., H. Hashiguchi, S. Fukao, Y. Shibano and K. Imai, 2002 : Development of a transportable 3-GHz wind profiler for wind and precipitation studies. *J. Meteor. Soc. Japan*, **80**, 273-283.
- Yamanaka, M. D., H. Hashiguchi, S. Mori, P. Wu, F. Syamsudin, T. Manik, Hamada J.-I., M. K. Yamamoto, M. Kawashima, Y. Fujiyoshi, N. Sakurai, M. Ohi, R. Shirooka, M. Katsumata, Y. Shibagaki, T. Shimomai, Erlansyah, W. Setiawan, B. Tejasukmana, Y. S. Djajadihardja and J. T. Anggadiredja, 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.

Development of a Lower Troposphere Radar and Its Application to Atmospheric Observation Study

Hiroyuki HASHIGUCHI*

* *Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, Gokasho, Uji City, Kyoto Prefecture 611-0011, Japan.*

(Received 9 February 2009 ; Accepted 9 September 2009)
