

対流圏ウィンドプロファイラの開発と気象観測での実用化

—2022年度岸保・立平賞受賞記念講演—

橋 口 浩 之^{*1}・松 田 知 也^{*2}

1. はじめに

このたびは岸保・立平賞を授与頂きまことにありがとうございます。橋口の所属する京都大学生存圏研究所のレーダーグループは、超高層電波研究センター(RASC)時代から数えて40年以上に渡って、三菱電機通信機製作所の方々と産学連携でレーダー開発研究を行ってきました。今般、グループを代表してこの賞を授与頂いたものと大変うれしく思います。受賞対象となりました対流圏ウィンドプロファイラは、橋口が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から、開発を続けてきたものです。この場をお借りして、これまでの開発の歴史と気象庁現業観測への応用、さらに今後の発展への期待についてご紹介させていただきます。

ご存知のように、京都大学のグループは、1980年代に大型大気レーダーであるMUレーダーの開発に成功し、大気重力波の研究などで気象学にも大変大きなインパクトを与えました(Fukao *et al.* 1985a, b; Fukao 2007)。MUレーダーはアクティブ・フェーズド・アレー方式を採用した世界初の大気レーダーで、大きな開発要素がありましたが、京都大学の研究者と三菱電機の技術者による産学連携研究の成果の賜物であると言えます。フェーズド・アレーは、アンテナは物理的に固定していて、それぞれのアンテナから放射される電波の位相を電子的に制御することで、アンテナビ-

ム方向を高速に走査する技術です。MUレーダーの場合、直径100mのパラボラアンテナを傾けるのと同じ効果を位相制御により得ることができます。MUレーダーは、「2次元アクティブ・フェーズド・アレーを用いた世界初の大規模大気レーダー」として、2015年にIEEEからマイルストーン認定も受けています(橋口 2015)。最近では、フェーズド・アレー技術は、降水分布等を高時間分解能で観測するため、気象レーダーへの応用も進んでいます(例えば, Yoshikawa *et al.* 2013)。

橋口が1990年に研究室に配属された時には、既にMUレーダーは完成していて、その実現は加藤 進先生と深尾昌一郎先生のリーダーシップによるものでした(加藤 1986)。1970年代から加藤先生は大気上下結合研究のために大型レーダー観測の重要性を提唱され、それを深尾先生が中心となり、京都大学と三菱電機の産学協働により実現されたものです。その後、深尾先生は大気レーダーの下層大気観測への有効性を認識され、MUレーダーの技術を大幅に小型化した可搬型ウィンドプロファイラの開発を提唱されました。ちょうどそのタイミングで橋口が修士課程の学生として深尾研究室に配属され、この研究テーマをさせて頂くことになりました。

2. 小型可搬式境界層レーダーの開発

初期の対流圏ウィンドプロファイラは主に大気境界層を観測対象とすることから「境界層レーダー(Boundary Layer Radar; BLR)」と呼ばれていました。MUレーダーなどのVHF帯大型レーダーでは送受の切り替えに時間がかかるため、大気境界層を観測できません。そこで、L帯(1357.5MHz)の周波数を用いて境界層レーダーを開発することになりました。

^{*1} (連絡責任著者) 京都大学生存圏研究所。

hasiguti@rish.kyoto-u.ac.jp

^{*2} 三菱電機株式会社通信機製作所インフラ情報システム部。

—2022年9月5日受領—

—2022年11月22日受理—

送信ピーク電力1 kWで、直径2 mのパラボラアンテナ3台を最初から違う方向に向けておいて、それを切り替えながら観測するという、今となっては非常にシンプルな構成ですが、色々な困難もあり、1990年から開発を始めて、レーダーがやっと形になり信楽 MU 観測所に設置されたのは、橋口が修士2回生の12月初め頃でした(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たのは、暮れも押し迫った28日の深夜でした(第2図)。

第3図は信楽における境界層レーダーで1992年6月

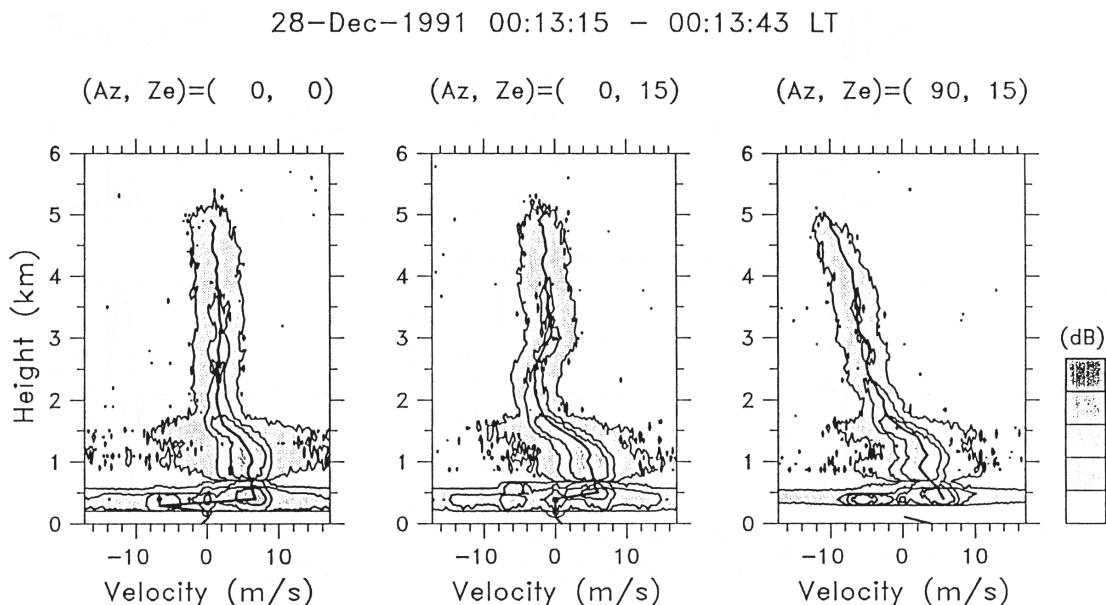


第1図 信楽 MU 観測所に設置された境界層レーダー1号機(1991年12月10日撮影)。

2日4時~20時に観測されたエコー強度(コンター)及び南北・鉛直流(矢印)の時間高度断面です(Hashiguchi *et al.* 1995a)。エコーパターンから、夜間は数100m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1.5km程度まで発達する様子がきれいに捉えてられています。また、境界層内部で強い上昇流が観測されている様子も分かります。

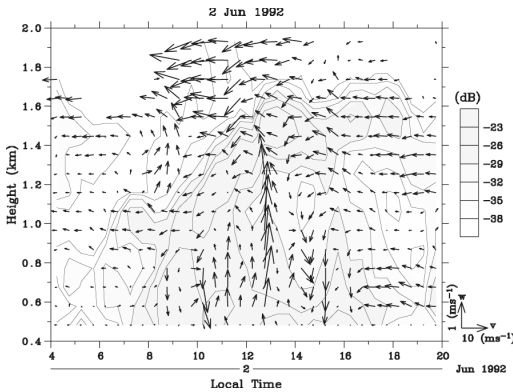
その後、この境界層レーダーをインドネシアのジャカルタ近郊のスルボンに移設し、1992年末から連続観測を開始しました(Tsuda *et al.* 1995)。以来、落雷など何回かトラブルはありましたが、10年以上に渡って、熱帯大気の詳細観測データを提供してくれました(Hashiguchi *et al.* 1995c, 1996, 1997; Widiyatmi *et al.* 1999, 2001; Hadi *et al.* 2000; Renggono *et al.* 2001)。第4図は信楽(右)とインドネシア(左)における典型的なエコー強度の時間高度変化を示しています(Hashiguchi *et al.* 1995b)。信楽では、境界層(混合層)の発達高度はせいぜい1.5km~2 km程度ですが、インドネシアの場合には4 kmを越える高高度まで境界層が発達している様子が分かります。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。

その後、同型のレーダーが福島大学などに導入され



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ースペクトル。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。

ています。また、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まで小型化した境界層レーダーの開発なども行いました (Yamamoto *et al.* 2002)。これは送受信周波数を S 帯の 3050 MHz にすることでアンテナサイズを 1 m にまで小型化しており、東シナ海・九州梅雨特別観測 (X-BAIU) などで活躍しました (Umemoto *et al.* 2004; 吉崎 2005)。

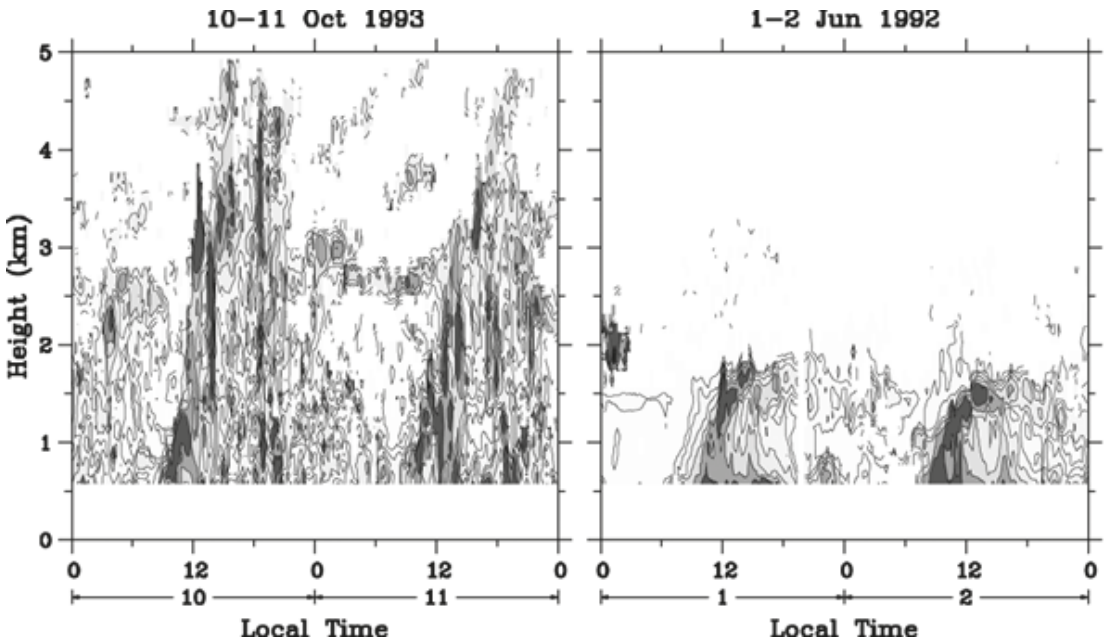


第3図 1992年6月2日に境界層レーダーで観測されたエコー強度 (コンター) と南北・鉛直流 (矢印) の時間・高度変化。横軸は時間, 縦軸は高度を表す。

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年代末頃から複数機関で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)。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 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おり, より高性能なウィンドプロファイラの開発が待たれていました。

1990年代後半は移動体通信として, 携帯電話と並んで PHS がまだ全盛の時代でした。PHS の基地局には, 電磁結合同軸ダイポールアンテナと呼ばれる棒状のアンテナが使われていました。給電点は 1 ヶ所で, 数 10 個のダイポールアンテナをアレー上に並べたのと同様な効果があるアンテナ方式です。三菱電機でもこの種のアンテナを開発しており (Miyashita *et al.* 1999), 周波数帯も近いことから, これをウィンドプロファイラに応用できないかという話が持ち上がりました。開発予算のために深尾先生が研究代表者として科研費の



第4図 日本の信楽 (右) 及びインドネシアのスルボン (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。

基盤 A に応募したところ、幸いにも採択されました。境界層だけでなく、高度 5 km 程度までの観測を目標として「下部対流圏レーダー (Lower Troposphere Radar ; LTR)」と呼ぶことにしました。

一般にウィンドプロファイラの観測高度は、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 100Wm^2 程度でしたが、5 km 程度まで観測するためには 10000Wm^2 、すなわち約 100 倍の性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、上で述べた小型軽量で取り回しのしやすい電磁結合同軸ダイポールアンテナの 2 m の長さのものを 96 本用いてフェーズド・アレーを構成することで、 $4\text{m} \times 4\text{m}$ という比較的大型のアンテナと可搬性を両立させました。これにより 2 m 径のパラボラアンテナを 3 個使った境界層レーダー 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。

第二の技術開発要素は、アクティブ・フェーズド・アレー技術です。従来のレーダーは比較的大きな送信器 1 個を使って、境界層レーダー 1 号機のように物理的にアンテナ方向を切り替えたり、あるいは NOAA のレーダーのように送信電力を各アンテナ素子に分配

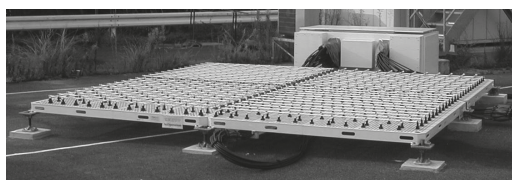
して電子制御でビーム方向を変えるパッシブ・フェーズド・アレー方式が取られていましたが、そのような方式では 1 kW 程度の送信ピーク出力が限界でした。そこで下部対流圏レーダーでは MU レーダーと同じく、アクティブ・フェーズド・アレー方式を採用し、個々は 85 W と比較的低出力の送信器を 24 台使用し、電波を空間で合成することでトータル送信ピーク出力 2 kW を実現しました。これにより、従来よりも 2 ～ 4 倍の出力向上が得られました。

一般に、高度分解能を上げようとすると送信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低くなり、観測最高高度が下がります。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犠牲にすることなく送信平均出力を増大させる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、下層大気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、従来の常識でした。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 (1996a, b, c) が、彼らの提案する新しいパルス圧縮符号を使えば、理論的には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できることを示しました。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、下部対流圏レーダーではその実装に成功しました。この第三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。

以上の技術開発により、従来に比べて約 100 倍の性能向上が実現し、高度 5 km までの観測が可能となりました。第 5 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 $4\text{m} \times 4\text{m}$ 、送信ピーク電力は 2 kW 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 400 W を実現しています。アンテナ素子毎に 5 ビット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 45 度までの任意の天頂角に向けることができます。

4. 対流圏ウィンドプロファイラの現業気象観測への実用化

ちょうど下部対流圏レーダーを開発していた時期



第 5 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

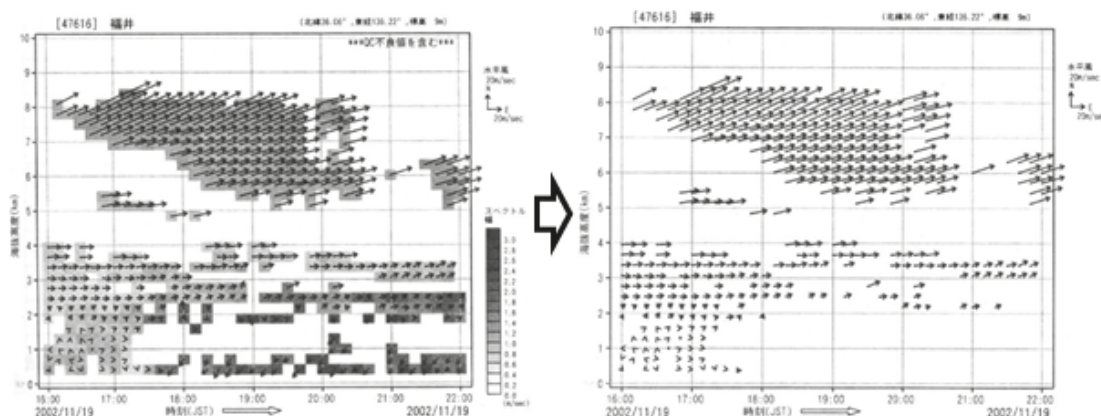
送受信周波数	1357.5MHz
送信ピーク電力	2 kW
アンテナ形式	フェーズド・アレー
アンテナ開口	16m^2
送受信ビーム幅	4.0°
空中線利得	33dBi
送信パルス幅	0.67, 1, 2 μs
パルス繰返し周期	50, 100, 200 μs
ビーム方向	鉛直+東西南北 (天頂角: $0 \sim 45^\circ$)
距離分解能 (最小)	100m

に、気象庁が国内にウィンドプロファイラネットワークを整備する計画を進めていました。当時、気象庁観測課におられた石原正仁博士が、1999年12月に完成したばかりの下部対流圏レーダーの視察に信楽MU観測所まで来られました。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三菱電機が受注し、下部対流圏レーダーが採用されることになりました。WINDASは2001年に25台でスタートし、2003年に6台が追加され、さらに東日本大震災後に2台が追加され、現在33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気象予報モデルに同化され、日々の天気予報業務に利用されています。WINDAS 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)。

WINDAS の初期整備 (2000~2001年) では、開発完了直後のレーダーを25サイト分製造し全国に展開するとともに、これらの観測データの収集・品質管理・データ配信を行う中央監視局の整備も行われました。機器の現地工事は2000年11月から、北は留萌、南は与那国島までピーク時は1週間に3サイト同時に試験調整・完成検査・総務省による電監検査を行うというハードなスケジュールでした。レーダーを製造した三菱電機も製造場所である通信機製作所が一丸となり納期に間に合わせるべく調達・製造・試験作業を行いましたが、すべての設置場所は新設であったことから、土地の確保・基礎工事・通信網の確保・総務省への無線局免許申請等、気象庁においても想像を絶する苦労があったものと思われます。各位の尽力により、2001

年3月にはすべての設置調整が完了し、試験調整を経て2001年6月から当初の予定通り、WINDAS の現業気象観測が開始されています。

現業気象観測を行うには、確実な観測データの品質管理が必要条件となります。WINDAS における信号処理ならびにデータ品質管理については加藤ほか (2003) にて詳しく述べられていますが、ここでは特に苦労した渡り鳥エコーについて紹介します。後に渡り鳥エコーと名付けられた異常エコーは、運用開始後の2001年秋に、風のない晴天日の夕方から夜間にかけて観測データが異常となる事例が全国各地で多く発生することが明らかになり、問題となりました。これまで連続的、かつ全国規模でウィンドプロファイラを運用した経験がなかったため、全国各地で同時に発生するデータの異常は装置の不具合である可能性もあったため、三菱電機としても早急な原因分析が必要でした。異常データ発生時期や天候との関係、米国、欧州での実績調査に加え、福井や高知などでの実測調査の結果、この異常エコーは、レーダーの電波が上空を飛ぶ渡り鳥の集団に反射され、レーダーに受信されるために生じたものであることがほぼ特定されました。データ分析の結果、渡り鳥エコーは不連続に発生することもわかり、これを自動的に除去するアルゴリズムが気象庁で開発され、2003年3月にシステムに組み込むことで、観測業務における品質管理がより向上されました (第6図；小林ほか 2005)。渡り鳥エコーについては、石原・津田 (2012) によって著された「最先端の気象観測」のコラム (ウィングスと渡り鳥、104ページ) にも登場しています。今となっては苦労話の一つですが、当時未知であった課題に対して京都大学のみ



第6図 渡り鳥エコー除去の例 (小林ほか 2005より抜粋)。

ならず気象庁の方々とともに解決し、安定運用に貢献できたことも本賞を頂いた背景であると考えます。

5. WINDAS による研究成果ならびに将来展望

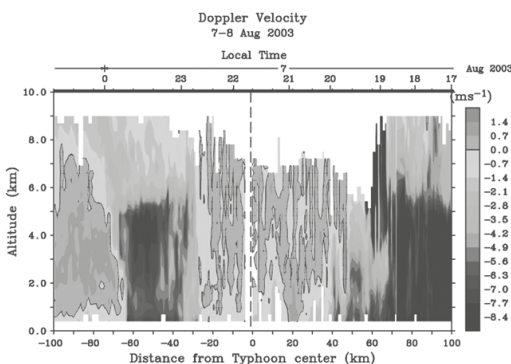
下部対流圏レーダー (WINDAS) による観測の一例として, Teshiba *et al.* (2005) による台風0310号の中心付近の観測を取り上げます。これまでも MU レーダーによる台風の観測例はありましたが, 信楽に到達する頃には衰弱していることが多く (例えば, Shibagaki *et al.* 2003), この時には最盛期の台風が捉えられています。ウィンドプロファイラで観測される物理量は基本的に高さ方向 (レーダー直上) の一次元量ですが, 高時間分解能で連続データが得られるため, その間で気象現象の時間変化が小さいとすると, レーダー上空の高さ・時間の二次元データを, 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 名瀬サイトで捉えられた台風中心付近の鉛直成分の台風中心からの距離・高度分布です。L 帯レーダーの場合, 大気より雨粒に対する感度の方が高いので, 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 $-60 \sim -40$ km および $70 \sim 100$ km 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。台風の中心付近は弱い下降流であると考えられていましたが, この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。

その後も小型レーダーの開発は続けており, 例えば, 直径80 cm のルネベルグレンズアンテナを7個使用した, アクティブ・フェーズド・アレー方式のウィンドプロファイラを, 住友電工・住友電設との共同研究により開発しています (今井ほか 2007)。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ものの, 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。2013年度に WINDAS レーダー (最後に追加された2台を除く) の更新が行われましたが, その際にはルネベルグレンズアンテナを11個用いたものが採用されています。これにより観測最高高度が従来より1~2 km 向上しています。

現在のウィンドプロファイラは, ビームを天頂角10度程度で東西南北に振って, その範囲内で風速の一樣性を仮定して, 視線方向風速のベクトル合成によりレーダー直上における風速3成分の高度プロファイルを得るという観測方式がとられています。ウィンドプロファイラが開発されてから現在に至る約40年間, このような DBS (Doppler Beam Swinging) 方式が標準的に使われていますが, Nishimura *et al.* (2020) が提唱するスペクトル観測理論によると, レーダー干渉計インバージョンとビーム走査を組み合わせることで, 大気レーダー1台で3次元風速場を高時間分解能で得ることができるになり, ウィンドプロファイラに大きなブレークスルーがもたらされると期待されます。現在, MU レーダーを用いて, この実証実験を進めています。

MU レーダーの成功を受けて, 各国でアクティブ・フェーズド・アレー方式の大型大気レーダーの建設が進められていますが, 特に赤道域は中緯度に比べるとまだ観測データが少ない地域です。我々は, 2001年にインドネシア共和国西スマトラ州の赤道直下に 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が, 感度は MU レーダーに比べて1/10です。京都大学では MU レーダーと同等の感度を有する赤道 MU レーダー (第8図) を実現するべく, 努力を続けています。赤道 MU レーダーを中核とする研究計画「太陽地球系結合過程の研究基盤形成」は日本学術会議のマスタープラン2014/2017/2020の重点大型研究計画の一つとして採択されています (Tsuda *et al.* 2016)。



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 (Teshiba *et al.* 2005)。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。

6. おわりに

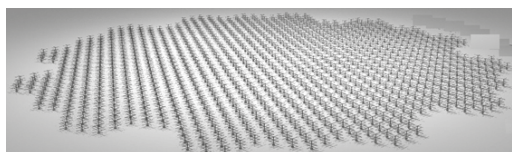
ウィンドプロファイラは地球大気を観測する強力な測器として発展してきました。新しい観測技術が次々と開発され、一部は気象予報業務に実用されるに至りました。このレーダー開発の成果は、大学の研究者だけでなし得ることは不可能で、京都大学と三菱電機で産学連携研究を継続してきたことが大きいと考えられます。我々はMUレーダー開発当時の1980年代から「〇〇技術検討会」と銘打ったミーティングを継続的に行っており、2022年8月現在、通算189回を数えます。〇〇の部分はその時々で名称が変わりますが、現在は「MUレーダー・赤道大気レーダー技術検討会」を年4回のペースで開催しています。極端な気象現象の頻度が増していると言われており、気象予報は益々重要になってくると考えられます。今後も気象学・気象予報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、その後もご指導を頂き、心からお礼を申し上げます。加藤進先生・廣田 勇先生には、度々あたたかい励ましのお言葉を掛けて頂きました。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。もちろんWINDASの成功は、石原正仁博士をはじめとする気象庁関係者の皆さんの努力の賜物です。改めてこれらの方々に敬意を表するとともに、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, doi:10.1029/95RS00649.
- 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. Ocean. Technol.*, **5**, 432-441, doi:10.1175/1520-0426(1988)005<0432:AUWPFT>2.0.CO;2.
- Fukao, S., 2007: Recent advances in atmospheric radar study. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85B**, 215-239, doi:10.2151/jmsj.85B.215.
- 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, 491pp.
- Fukao, S., T. Sato, T. Tsuda, S. Kato, K. Wakasugi and T. Makihira, 1985a: The MU radar with an active phased array system, 1. Antenna and power amplifiers. *Radio Sci.*, **20**, 1155-1168, doi:10.1029/RS020i006p01155.
- Fukao, S., T. Tsuda, T. Sato, S. Kato, K. Wakasugi and T. Makihira, 1985b: The MU radar with an active phased array system, 2. In-house equipment. *Radio Sci.*, **20**, 1169-1176, doi:10.1029/RS020i006p01169.
- 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.
- Hadi, T. W., T. Tsuda, H. Hashiguchi and S. Fukao, 2000: Tropical sea-breeze circulation and related atmospheric phenomena observed with L-band boundary layer radar in Indonesia. *J. Meteor. Soc. Japan*, **78**, 123-140, doi:10.2151/jmsj1965.78.2_123.
- 橋口浩之, 2015: 京大大学生存圏研究所のMUレーダーがIEEEマイルストーンに認定. *天気*, **62**, 927-928.
- Hashiguchi, H., M. D. Yamanaka, T. Tsuda, M. Yamamoto, T. Nakamura, T. Adachi, S. Fukao, T. Sato and D. L. Tobing, 1995a: Diurnal variations of the planetary boundary layer observed with an L-band clear-air Doppler radar. *Bound.-Layer Meteor.*, **74**, 419-424, doi:10.1007/BF00712381.
- Hashiguchi, H., S. Fukao, T. Tsuda, M. D. Yamanaka, D. L. Tobing, T. Sribimawati, S. W. B. Harijono and H. Wiryosumarto, 1995b: Observations of the planetary boundary layer over equatorial Indonesia with an L-band clear-air Doppler radar: Initial results. *Radio Sci.*, **30**, 1043-1054, doi:10.1029/95RS00653.
- Hashiguchi, H., S. Fukao, M. D. Yamanaka, T. Tsuda, S. W. B. Harijono and H. Wiryosumarto, 1995c: Boundary layer radar observations of the passage of the convection center over Serpong, Indonesia (6S, 107E) during



第8図 赤道MUレーダー計画（アンテナ直径160m, 送信出力500kW）。

- the TOGA COARE intensive observation period. *J. Meteor. Soc. Japan*, **73**, 535–548, doi:10.2151/jmsj1965.73.2B_535.
- 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. *Contr. 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. Geomag. Geo-electr.*, **49**, S187–S195, doi:10.5636/jgg.49.Supplement_S187.
- 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, doi:10.2151/jmsj.2004.915.
- 今井克之, 中川貴央, 橋口浩之, 2007: 電波レンズ搭載型対流圏ウィンドプロファイラレーダー (WPR LQ-7) の開発. *SEI テクニカルレビュー*, 住友電工, **170**, 49–53.
- 石原正仁, 津田敏隆, 2012: 最先端の気象観測. 東京堂出版, 175pp.
- 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, doi:10.2151/jmsj.84.1085.
- 加藤 進, 1986: 大気上層の乱れを探る—MST レーダーの話—, *天気*, **33**, 73–79.
- 加藤美雄, 阿保敏広, 小林健二, 泉川安志, 石原正仁, 2003: 気象庁におけるウィンドプロファイラ観測. *天気*, **50**, 891–907.
- 小林健二, 阿保敏広, 泉川安志, 河原恭一, 石原正仁, 若山俊夫, 松田知也, 2005: 気象庁のウィンドプロファイラ観測における渡り鳥エコーの影響と対策. *天気*, **52**, 11–23.
- Miyashita, H., H. Ohmine, K. Nishizawa, S. Makino and S. Urasaki, 1999: Electromagnetically coupled coaxial dipole array antenna. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, **47**, 1716–1726, doi:10.1109/8.814952.
- Nishimura, K., M. Kohma, K. Sato and T. Sato, 2020: Spectral Observation Theory and Beam Debroadening Algorithm for Atmospheric Radar. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **58**, 6767–6775, doi:10.1109/TGRS.2020.2970200.
- Ohno, Y., 1995: Land and sea breezes observed by a 1357MHz wind profiler. *Proceedings of the Seventh Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar*, South Carolina, November 7–11, 1995, 323–326.
- 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, 2001: Precipitating clouds observed by L-band boundary layer radars in equatorial Indonesia. *Ann. Geophys.*, **19**, 889–897, doi:10.5194/angeo-19-889-2001.
- Shibagaki, Y., M. D. Yamanaka, M. K. Fukase, H. Hashiguchi, Y. Maekawa and S. Fukao, 2003: Meso- α -scale wind fields and precipitating clouds in Typhoon 9426 (Orchid) observed by the MU radar. *J. Meteor. Soc. Japan*, **81**, 211–228, doi:10.2151/jmsj.81.211.
- Spano, E. and O. Ghebrehbrhan, 1996a: Pulse coding techniques for ST/MST radar systems: A general approach based on a matrix formulation, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **34**, 304–316, doi:10.1109/36.485109.
- Spano, E. and O. Ghebrehbrhan, 1996b: Complementary sequences with high sidelobe suppression factors for ST/MST radar applications. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **34**, 317–329, doi:10.1109/36.485110.
- Spano, E. and O. Ghebrehbrhan, 1996c: 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, doi:10.1109/36.485111.
- Teshiba, M., H. Fujita, H. Hashiguchi, Y. Shibagaki, M. D. Yamanaka and S. Fukao, 2005: Detailed structure within tropical cyclone “Eye”. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L24805, doi:10.1029/2005GL023242.
- 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. Wiryosumarto, 1995: A preliminary report on observations of equatorial atmosphere dynamics in Indonesia with radars and radiosondes. *J. Meteor. Soc. Japan*, **73**, 393–406, doi:10.2151/jmsj1965.73.2B_393.
- Tsuda, T., M. Yamamoto, H. Hashiguchi, K. Shiokawa, Y. Ogawa, S. Nozawa, H. Miyaoka and A. Yoshikawa, 2016: A proposal on the study of solar-terrestrial coupling processes with atmospheric radars and ground-based observation network. *Radio Sci.*, **51**, 1587–1599, doi:10.1002/2016RS006035.
- Umemoto, Y., M. Teshiba, Y. Shibagaki, H. Hashiguchi, M. D. Yamanaka, S. Fukao and X-BAIU-99 and X-BAIU-

- 02 observational groups, 2004: Combined wind profiler-weather radar observations of orographic rainband around Kyushu, Japan in the Baiu season. *Ann. Geophys.*, **22**, 3971-3982, doi:10.5194/angeo-22-3971-2004.
- Widiyatmi, I., M. D. Yamanaka, H. Hashiguchi, S. Fukao, T. Tsuda, S. Ogino, S. W. B. Harijono and H. Wiryosumarto, 1999: Quasi 4 day mode observed by a boundary layer radar at Serpong (6S, 107E), Indonesia. *J. Meteor. Soc. Japan*, **77**, 1177-1184, doi:10.2151/jmsj1965.77.6_1177.
- Widiyatmi, I., H. Hashiguchi, S. Fukao, M. D. Yamanaka, S. Ogino, K. S. Gage, S. W. B. Harijono, S. Diharto and H. Djodjodihardjo, 2001: Examination of 3-6 day disturbances over equatorial Indonesia based on boundary layer radar observations during 1996-1999 at Bukit-tinggi, Serpong, and Biak. *J. Meteor. Soc. Japan*, **79**, 317-331, doi:10.2151/jmsj.79.317.
- Woodman, R. F., 1980: High altitude-resolution stratospheric measurements with the Arecibo 2380-MHz radar. *Radio Sci.*, **15**, 423-430, doi:10.1029/RS015i002p00423.
- 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, doi:10.2151/jmsj.80.273.
- Yoshikawa, E., T. Ushio, Z. Kawasaki, S. Yoshida, T. Morimoto, F. Mizutani and M. Wada, 2013: MMSE beam forming on fast-scanning Phased Array Weather Radar. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **51**, doi:10.1109/TGRS.2012.2211607.
- 吉崎正憲, 2005: 梅雨前線帯の降水系に関する研究. 気象研究ノート, (208), 15-25.

Development of a Tropospheric Wind Profiler and its Application to Meteorological Observations

Hiroyuki HASHIGUCHI^{*1} and Tomoya MATSUDA^{*2}

^{*1} (Corresponding Author) *Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011, Japan*

E-Mail: hasiguti@rish.kyoto-u.ac.jp

^{*2} *Infrastructure and Plant Engineering, Information Systems Department, Communication Systems Center, Mitsubishi Electric Corporation, Amagasaki, Hyogo 661-8661, Japan*

(Received 5 September 2022; Accepted 22 November 2022)
