

レーダーで探る大気の流れ*

橋口 浩之**

1. はじめに

大気の流れ(風)を測る最も一般的な方法は、プロペラ型の風向風速計で、気象庁のアメダスと呼ばれる約 1300 カ所の自動観測ステーションでも使われています。この風速計を鉄塔に設置すれば高度数十 m までの風速の高度分布を得ることができます。さらに上空の風を測定する手法として最も一般的なのはラジオゾンデ観測です。水素あるいはヘリウムガスを充填した気球に温度・湿度・気圧センサーをつり下げ、約 6 m/s の速度で上昇させて、約 30 km までの観測を行うことができます。観測値は電波にのせて送られると共に GPS 等で時々刻々の気球の位置を知ること、風向風速を観測できます。高高度までの観測が可能ですが、1 回の観測に 2 時間弱かかること、また手間がかかるため連続観測が困難で、気象庁においては通常 9 時と 21 時の 2 回(あるいは 3 時と 15 時を加えて 4 回)/日しか行われていません。特に下層大気では風向風速が時間と共に大きく変化するため、予報精度の向上には高時間分解能の連続観測が必要です。

風向風速の高度分布を連続的かつ自動的に観測するために有効な手段が地上からのリモートセンシングです。風のリモートセンシングには、ドップラー効果を用います。近づいて来る救急車のサイレンは高く聞こえ、遠ざかる場合は低く聞こえるのがドップラー効果です。同様に、移動している物体に電波を当てると反射された電波の周波数は、その速度に応じて発射した周波数からずれます。この周波数のずれ(ドップラーシフト)は物体の速度に比例するため、ずれを測定することで速度を知ることができます。

大気の移動と共に動く物体に電波を当ててドップラーシフトを測定すれば風が分かります。雨滴を散乱体とするのが、主要空港などに設置されている気象ドップラーレーダーです。雨滴は、重力で落下していますが水平方向には風と共に移動するため雨滴の動きから風が分かり、特に航空機の離発着に影響の大きい風の急変(ウィンドシア)の探知に効果的です。しかし、降水時しか観測できないという大きな制約があります。晴天時の大気の乱れを散乱体とするのが、ここで述べる「大気レーダー」(ウィンドプロファイラーとも呼ばれます)です。

2. 大気レーダーの歴史

レーダー(RADAR: Radio Detection And Ranging)は、電波を用いて物体の存在や距離を検知するもので、1940 年に米国で命名されました。その原型は今から約 100 年前に遡り、1904 年にドイツで金属片の検出に成功したのが最初と言われています。1920 年代には、数 MHz の電波を用いて電離層で反射されたエコーを受信することに使われました。距離も不明確で、まだレーダーと呼べるものではありませんでしたが、レーダーの開発は電離層研究として始まりました。1930 年代には対流圏における晴天大気中の気温逆転領域から反射されるエコーを観測しており、同時期に米国で航空機の検知実験が行われています。この 1930~1940 年頃は日本を含む多くの国で開発が行われ、世界最初のレーダーもこの頃にできたものと考えられています。このレーダーは、第二次世界大戦中に大きな発展を遂げ、「米

*2008 年 4 月 17 日作成。第 4 回生存圏研究所公開講演会(2007 年 10 月 20 日)における講演要旨に加筆・変更を行ったものである。

** 611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所レーダー大気圏科学分野。

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

国が戦争に勝利した大きな要因は爆弾の発達ではなくレーダー技術の発展にある。」とも言われているほどです。

気象への応用は、英国が第一次世界大戦中に航空機への落雷の警報システムとして開発したことから始まります。雨滴は数 mm と小さいため、その観測には高い周波数のレーダーが必要となります。しかし、1930 年代までは技術的に 200~400 MHz までがせいぜいで、より高い周波数は 1940 年代まで待たねばなりません。世界で最初に降水の観測を行ったのは、1941 年に 3GHz レーダーによるものと言われています¹⁾。続いて米国が 1943 年に、また我が国でも 1954 年に気象研究所が気象レーダーを完成させています²⁾。1940 年代に、レーダーを用いた降水観測の理論的根拠が与えられたこともあり、レーダーの気象観測への応用が急速に広がり、1953 年には英国で最初の気象パルスドップラーレーダーが開発されています。

気象レーダーは、降水を電波散乱ターゲットとしているため降水時しか観測できません。しかし、非降水時の晴天大気からも電波は散乱されます。この晴天大気エコーを受信し利用するレーダーは、大気レーダーと呼ばれ、特に風観測に特化したものはウィンドプロファイラーと呼ばれています³⁾。1930 年代後半に、対流圏からの晴天大気エコーが観測され、当初は雷による電離からのエコーと考えられていました。しかし、レーダーと航空機の同時観測などから、このエコーが水平方向に成層した構造を持つ大気屈折率の変化に起因する分反射が原因であることが分かりました。1940 年代には 3~10GHz 程度の高い周波数での晴天エコーの観測が行われ、低周波のレーダーに比べて頻度は少ないものの風と共に移動する点状のエコーが観測されました。人間の目には何も見えないところから電波が散乱されるためこのエコーは、当初は「おぼけエコー」そして後には「天使のこだま (angel echo)」と呼ばれるようになりました。この「天使のこだま」はそれまで知られていなかったもので、この原因解明のための精力的な研究が 1950 年代に行われました。当初は昆虫や鳥からの反射と考えられましたが、理論的検討が多くなされ、その集大成とも言えるものが当時ソ連の Tatarskii⁴⁾により成されました。大気中の乱流による大気屈折率の空間的な揺らぎ(スケールが電波波長の 1/2)が電波を散乱させ、レーダーエコーとして受信されるというものです。

降水を主な散乱対象とする気象レーダーは、3GHz 以上の高い周波数のレーダーへと向かっていきましたが、一方 1960 年代後半から数十 MHz の低い周波数の電波を用いる巨大レーダーの建設が開始されました。1930 年代のレーダー開発黎明期に用いられた電波周波数に近づいたことになります。その目的は電離層中の自由電子の振る舞いを調べることにありましたが、結果としてこのレーダーが大気レーダーの発展に大きな役割を果たしました。最初に建設されたのがペルーのヒカマルカおよびプエルトリコのアレンボで、電子からの微弱な散乱電波を受信するため出力数 MW、アンテナ直径数百 m と巨大なものです。散乱波の位相がランダムなインコヒーレント散乱(Incoherent Scattering)を利用するため IS レーダーと呼ばれています。1960 年代末ヒカマルカレーダーで、インコヒーレント散乱が存在しないはずの高度 60~70 km の中間圏で強いエコーが観測されました。当初はあまり注目されなかったこの現象を解析したのが Woodman and Guillen⁵⁾で、上述した大気乱流による大気屈折率の揺らぎが強いエコーの原因であることを示しました。このエコーを利用すれば電離層のみならず中間圏や成層圏などの中性大気観測が可能になります。これは研究者に大きな刺激を与え次々とレーダーが建設されていくことになります。IS レーダーよりやや小型で高度 70 km 程度の中間圏(Mesosphere)、成層圏(Stratosphere)そして対流圏(Troposphere)が観測可能なレーダーが MST レーダー、さらに小型で成層圏および対流圏を観測できるものが ST レーダーと呼ばれており、現在世界各国に 20 台以上が建設されています⁶⁾。

また我が国でも、後に詳述するように、IS レーダーと MST レーダーの中間に位置する世界最先端の MU(Middle and Upper atmosphere)レーダー⁷⁾が滋賀県信楽町に、また赤道大気レーダーがインドネシアに(いずれも我々のグループによる)、超高層大気観測レーダーが山川や稚内に(通信総合研究所(現情報通信研究機構)による)それぞれ建設されています。大型レーダーで開発された技術がその後の気象用ウィンドプロファイラーの開発へと発展していくことになります。

大型レーダーが受信する「天使のこだま」は、大気乱流による大気屈折率の揺らぎに起因します。乱流は風と共に流されるため、このエコーのドップラーシフトを測定することで風の観測が可能になります。1970 年代後半、米国は、ラジオゾンデ観測との比較から、大型レーダーによる風の観測可能性についての研究を行いました。1980 年代前半までには、VHF/UHF 帯大型レーダーで風が十分観測可能であることが明らかになりました。1983 年には、現在のウィンドプロファイラーの原型ともいえるべき 3 つの VHF/UHF 帯の周波数(50 MHz, 404 MHz, 915 MHz)のレーダーからなるコロラドウィンドプロファイリングネットワークが構築されました。この施設を用いて観測手法や気象への応用性に関する種々の検証が行われ、その後、米国中西部に 400 MHz 帯ウィンドプロファイラー 35 台から成るネットワーク(WPDN: Wind-Profiler Demonstration Network)が 1992 年に完成しました。これに続いて、世界各国で、ウィンドプロファイラーの開発・改良・観測が精力的に行われ、我が国でも 1988 年に 404MHz ウィンドプロファイラーが気象研究所に導入されました。また、1357 MHz 帯のウィンドプロファイラーが通信総合研究所(現 情報通信研究機構)と我々のグループで独立に開発されました。2001 年には、ウィンドプロファイラーネットワークが気象庁により構築されています。レーダーにおける「天使のこだま」や大型レーダーの研究成果が、1970 年代後半のウィンドプロファイラーの黎明期に繋がり、1980 年代におけるウィンドプロファイラーの目覚ましい発展、そして現在の華々しい実用化へと生かされてきたのです。

3. レーダーによる大気のリモートセンシング

上空の大気の状態を測定するには、計測機器を気球・航空機・ロケット等に搭載して対象となる大気層に持ち込んで測定する直接測定法(in-situ measurement)と、地上あるいは人工衛星から遠隔測定するリモートセンシング(remote sensing)とに大別されます。リモートセンシングにはさらに、電波・音波・光を自ら送信して散乱信号を受信する active 法と、大気自体からの放射や太陽透過光などを受信する passive 法とがあります。

直接測定の代表例は、全国 18 ヶ所の気象台・測候所が定常気象観測のために用いているラジオゾンデです。温度・湿度・気圧センサーを小型気球にぶら下げて放球し、気球が上昇する間に時々刻々測定値を地上に電波伝送することで各大気パラメータの高度プロファイルを得ることができます。同時に気球の位置を GPS で定め、気球位置の時間変化から水平風速を求めることもできます。一方、地上からのリモートセンシングの代表例がレーダーです。以下ではレーダーによる大気の観測法について述べます。

上で述べたように、中性大気の乱れ(乱流)は大気の電波屈折率変動をつくり出し、レーダー電波を散乱させエコーを返します。乱流は様々な大きさを持つ乱渦と呼ばれる渦の集まりで表現され、エネルギーは大きな渦から小さな渦に移っていき、やがて粘性のために熱となって消えます。様々な大きさを持つ乱渦の中でも、レーダー電波の散乱に寄与するものは電波の波長の半分の大きさの渦だけです(Bragg 散乱)。粘性でつぶれる乱渦の最小スケールは対流圏では 1cm 程度ですが、高度と共に指数関数的に大きくなります。従って、高い高度からのエコーを受けるためにはレーダーの波長はできるだけ長い(周波数が低い)方が良いのです。乱流が強いほど強いエコーが得られることから、逆に測定されたエコー強度から乱流強度を推定することができます。

乱流(大気の乱れ)は背景の大気の流れつまり風に乗って移動(移流)していくので、これをトレーサーと考えてエコーのドップラーシフトから風速の視線方向(レーダービーム方向)成分を求めることができます。鉛直流を含む風速三成分は、天頂付近の異った 3 方向にアンテナビームを向けて、それぞれの視線方向速度成分から計算により求めます。観測の間隔(時間分解能)は観測高度にもよりますが 1~10 分程度で、定常気象観測で用いられるラジオゾンデの放球はせいぜい一日に 2~4 回、気象ロケットに至っては週に 1 回以下であることに比べて、レーダー観測の時間分解能は格段に優れているといえます。

一般に鉛直流(上昇下降流)は水平速度に比べて1桁以上小さく測定が困難な量です。例えば、ラジオゾンデでは気球自体が浮力により上昇しているので、鉛直流を測定することは原理的に不可能です。大気レーダーでは鉛直上方にアンテナを向けることで、この量を直接に測定することができます。これから大気微量成分やエネルギーなどの鉛直輸送を定量的に見積もることができるなど、鉛直流を直接測定できることは大気レーダーの最大の特長の一つです。

4. 京都大学で開発されたレーダーシステム

4.1 MU レーダー

我々のグループは、ヒカマルカレーダーによる乱流エコーの発見に前後して、大型レーダーの建設を計画し、1984年11月、陶器で有名な滋賀県信楽町の国有林内に完成させました^{8, 9)}。このレーダーはMST(Mesosphere, Stratosphere, and Troposphere)レーダーとして世界最高性能を誇る他、ISレーダーとして超高層大気(Upper atmosphere)の一部も観測できるのでMU(Middle and Upper atmosphere)レーダーと名付けられました。直径約100mの円形凹地に八木アンテナ475基を設置しており(図1)、送受信周波数は46.5MHzです。

MUレーダーには当時の最先端のレーダー技術が随所に取り入れられています。最大の特長は、従来の大型レーダーで一般に用いられてきた大電力増幅器による集中型送受信方式を採用せず、475基の八木アンテナそれぞれを小型半導体送受信モジュールで励振する分散型送受信方式(Active Phased Array System)を採用していることです。1台の小型送受信機の送信電力は2.4kWですが、475台の小型送受信機を同時に働かせることにより合計1MWの送信電力を得ることができます。実に通常の放送局の10倍以上の送信電力です。またレーダーシステム全体がマイクロコンピュータを用いてソフトウェアにより制御される柔軟な構成となっており、その結果各アンテナについて送受信信号の自由な位相制御が可能となり、アンテナビーム方向をパルス送信毎に、最高1秒間に2500回という高速で走査できます。また、MUレーダーのアンテナは25個の小アンテナ群に分割することが可能であり、それぞれ独立な小型レーダーとしても動作します。この機能を使うとアンテナ全体を送信に用いて、散乱電波を複数の小アンテナ群で同時に受信するということが可能になります。それぞれの小アンテナ群で受信された散乱電波のごくわずかな位相差を利用すると、乱流等の微細な構造を知ることができるのです。



図1: MUレーダー。中央の円形の部分が475本の八木アンテナから構成されるフェーズド・アレイ・アンテナ(直径103m)。

4.2 赤道大気レーダー(EAR)

「海洋大陸」と呼ばれるインドネシア域は、赤道域の中でも特に積雲活動が活発で、大気大循環の駆動源とされていますが、これまで中緯度域に比べて観測データが不足していました。そこで、MUレーダーの成果を背景に「赤道大気レーダー」(Equatorial Atmosphere Radar; EAR)を開発し、2001年にインドネシア共和国西スマトラ州に建設しました¹⁰⁾。赤道大気レーダーは、MUレーダーと同様に分散型送受信方式を採用しており、MUレーダーより一回り大きい直径約110mの略円形フィー

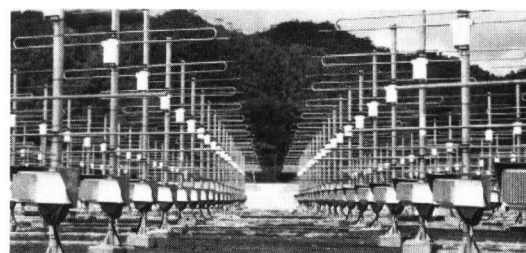


図2: 赤道大気レーダーのアンテナ。

ルドに 560 基の 3 素子八木アンテナを配置しています。図 2 に示すように、各八木アンテナの基部にそれぞれ半導体送受信モジュールが配置されており、電子制御によってアンテナビーム方向を最大 5000 回/秒の速度で高速に走査できる特長を持ちます。中心周波数は 47 MHz、ピーク送信電力は 100 kW で、高度約 1.5～20 km 範囲を連続観測できます。

4.3 境界層レーダー (BLR)

我々は MU レーダー観測の経験を活かして、高度 2～3km 以下の大気境界層を対象とした小型可搬式の境界層レーダー (Boundary Layer Radar; BLR) を開発しました。小型にするため、送受信周波数は 1357.5MHz (L バンド) を用いており、送信ピーク電力は 1kW です。アンテナは直径 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 PIN スイッチにより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す。1991 年度末に完成し、国内での試験観測の後、インドネシア共和国ジャカルタ近郊のスルポンに移設し、1992 年 11 月から現在まで連続観測を継続しています¹¹⁾。これと同型のものが竹中工務店、関西電力堺火力発電所、福島大学に導入されており、例えば超高層ビルの耐風設計などに利用されています。その後、我々はより可搬性を高めた境界層レーダー 2 号機、フェーズドアレイを用いてビームを 5 方向に高速走査可能にした境界層レーダー 3 号機や、S バンドを用いた車載型境界層レーダーの開発にも成功しています。

4.4 下部対流圏レーダー (LTR)

その後、境界層レーダーの可搬性の特長を残しつつ、より高高度まで観測可能なレーダーを開発しました¹²⁾。下部対流圏全域を観測可能なことから「下部対流圏レーダー」 (Lower Troposphere Radar; LTR) と呼んでいます。図 3 に LTR の外観を示します。アンテナには 4 m x 4 m のフェーズド・アレイ・アンテナを用いており、境界層レーダー 1 号機と比較してアンテナ開口は 5 倍

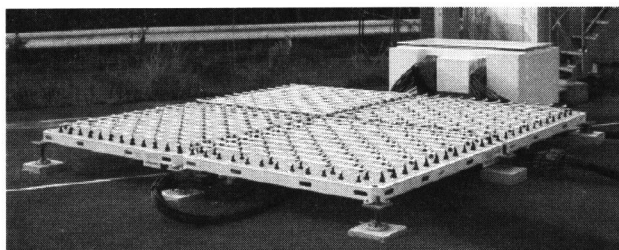


図 3: 下部対流圏レーダーのアンテナ。

に向上していますが、設置に必要な面積はほとんど変わっていません。アンテナ素子には、電磁結合ダイポールアンテナを採用しており、それぞれに 5 ビットの移相器を設けることで、ビームを $\pm 15^\circ$ 範囲内の任意の天頂角で天頂及び東西南北の 5 方向に高速に走査可能です。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ます。ピーク送信電力は 2 kW で、最大 8 ビットのパルス圧縮も可能なので、平均電力で境界層レーダー 1 号機の 16 倍の高出力を有します。同型機が気象庁のプロファイラーネットワーク「WINDAS」をはじめ複数の研究機関で採用され、全国 (一部は海外) で使用されています。その後も、船舶に搭載して観測可能とする船舶搭載型下部対流圏レーダーや、ルネベルグレンズと呼ばれる球形のアンテナを用いた下部対流圏レーダーの開発を行っています。

5. 大気レーダーによる気象現象の観測結果

本節では、下部対流圏レーダー (WINDAS) と赤道大気レーダーによる観測結果について、紙面の都合上、それぞれ 1 例ずつ取り上げて紹介します。

5.1 下部対流圏レーダーによる台風 0310 号の中心付近の観測

大気レーダ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、数分の時間間隔で観測を連続的に行える点が大きな特徴です。一方、我々は天気時々刻々移り変わっていくことを経験的に知っていますが、これは様々な気象現象が西から東に向かって移動することによるものです。つまり、地上に固定された大気レーダーの上を気象現象が西から東に動いているのです。このことを利用して、地上に固定された大気レーダーで得られるのはレーダー上空の高さ・時間の二次元データであるものの、時間変化を空間構造に読み替えることで、現象の高さ・距離断面を得ることができます。

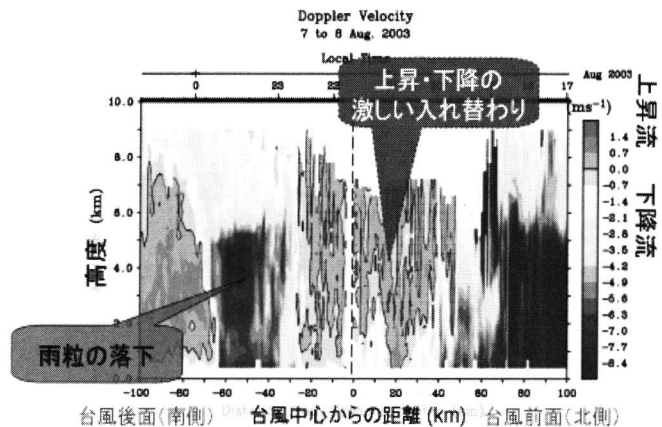


図 4: 下部対流圏レーダー(WINDAS 名瀬サイト)で観測された鉛直成分の台風中心からの距離・高度分布。

2003 年 8 月 7 日に台風 0310 号が鹿児島県名瀬市付近を発達しながら最接近し通過しました。図 4 は、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中心からの距離・高度分布です。2m/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 50km 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。従来、台風の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、本観測により、激しく上下に変動していることが初めて見出されました¹³⁾。

5.2 赤道大気レーダーによる対流圏界面付近の観測

赤道域では地球上で最も活発な積雲対流活動により、各種の大気擾乱が励起されており、エルニーニョに代表される地球規模の気候・環境変動にも結びつく現象が発生しています。海洋大陸と呼ばれる赤道インドネシアの経度域で特に顕著に発現します。しかしながら、従来の観測データの蓄積は余りに不十分でした。我々は 2001 年に赤道大気レーダーを西スマトラ州の赤道直下に設置し、赤道大気の詳細観測を行っています。

図 5 は赤道大気レーダーで観測された東西風の時間・高度変化の一例です。×印は

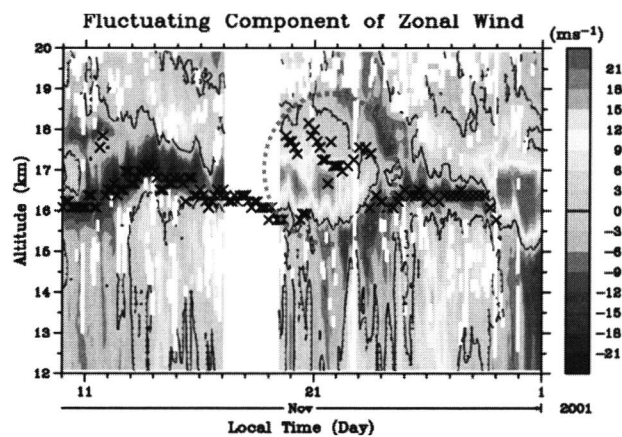


図 5: 赤道大気レーダーで観測された東西風の時間・高度変化。

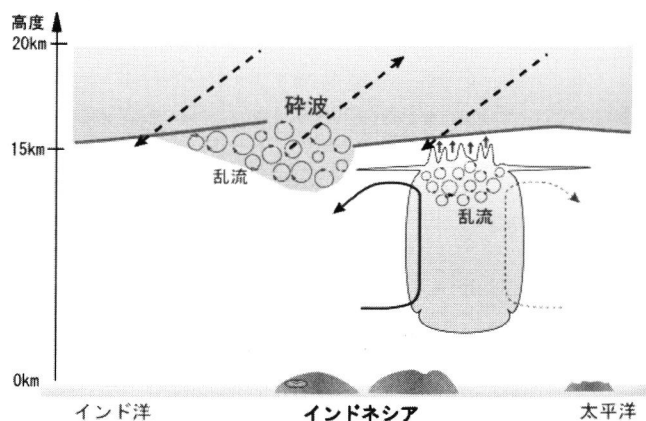


図 6: 対流圏と成層圏の大気混合を示す模式図。

ラジオゾンデ観測により得られた対流圏界面高度です。成層圏領域において、東西風が10日程度の周期で変動しており、時間とともにその高度を下げる様子が見られます。東向き成分が対流圏界面に届いたところ(丸破線の部分)で、対流圏高度のジャンプが見られます。これは赤道ケルビン波と呼ばれる大気波動が、その領域で不安定(砕波)を引き起こす過程を詳細に捉えたものです。図は示しませんが、赤道大気レーダーによる観測から砕波の発生と共に対流圏界面における大気乱流が増強しており、図6に示すように対流圏・成層圏の大気混合が発生していることが初めて明らかとなりました¹⁴⁾。また、赤道大気レーダーの長期連続観測から、対流圏界面上部において風速シアによる不安定現象が準定常的に発生し、薄い大気乱流層が存在していることも明らかになっています¹⁵⁾。これらは、通常は極めて交じり合いにくい対流圏と成層圏の大気塊が、大気波動現象と共に混合する様子を初めて観測的に実証したものです。

6. おわりに

今回の公開講演では、主に本研究所で開発している大気レーダーとそれらを用いた観測結果について述べました。近年、世界各地で大気レーダーのネットワーク利用が進みつつあります。我々のグループも地球観測システム構築推進プラン「海大陸レーダーネットワーク構築」(海洋研究開発機構 山中大学代表)により、今まさに赤道インドネシア域に大気レーダーネットワークを構築しつつあります。大気レーダーの有効利用が21世紀における天気予報の精密化の鍵を握ると言っても過言ではなく、本研究所では大気レーダーによる地球大気の新しい計測技術の開発研究を今後も続けていく必要があります。

参考文献

- 1) Atlas, D., Radar in Meteorology, *American Meteorological Society*, 806pp., 1990.
- 2) Kodaira, N. and J. Aoyagi, History of Radar Meteorology in Japan, *Rader in Meteorology*, 69-76, 1990.
- 3) Hardy, K. R. and K. S. Gage, The history of radar studies of the clear atmosphere, in *Radar in Meteorology, American Meteorological Society*, 806pp., 1990.
- 4) Tatarskii, V. I., Wave Propagation in a Turbulent Medium, *McGraw-Hill*, 285 pp., 1961.
- 5) Woodman, R. F. and A. Guillen, Radar observations of winds and turbulence in the stratosphere and mesosphere, *J. Atmos. Sci.*, **31**, 493-505, 1974.
- 6) Rottger, J. and M. F. Larsen, UHF/VHF radar techniques for atmospheric research and wind profiler applications, in *Radar in Meteorology, American Meteorological Society*, 806pp., 1990.
- 7) 加藤進, 福山薫, 若杉耕一郎, 佐藤亨, 深尾昌一郎, 大型レーダーによる中層大気の観測, 「気象の遠隔測定 (I)」, 気象研究ノート, **144**, 1-55, 1982.
- 8) Fukao, S., T. Sato, T. Tsuda, S. Kato, K. Wakasugi, and T. Makihira, The MU radar with an active phased array system: 1. Antenna and power amplifiers, *Radio Sci.*, **20**, 1155-1168, 1985.
- 9) Fukao, S., T. Tsuda, T. Sato, S. Kato, K. Wakasugi, and T. Makihira, The MU radar with an active phased array system: 2. In-house equipment, *Radio Sci.*, **20**, 1169-1176, 1985.
- 10) 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.
- 11) Hashiguchi, H., S. Fukao, T. Tsuda, M. D. Yamanaka, D. L. Tobing, T. Sribimawati, S. W. B. Harijono, and H. Wiryosumarto, Observations of the planetary boundary layer over equatorial Indonesia with an L-band clear-air Doppler radar: Initial results, *Radio Sci.*, **30**, 1043-1054, 1995.
- 12) 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.
- 13) Teshiba, M., H. Fujita, H. Hashiguchi, Y. Shigagaki, M.D. Yamanaka, and S. Fukao, Detailed structure within tropical

- cyclone ``Eye", *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L24805, doi:10.1029/2005GL023242, 2005.
- 14) Fujiwara, M., M. K. Yamamoto, H. Hashiguchi, T. Horinouchi, and S. Fukao, Turbulence at the tropopause due to breaking Kelvin waves observed by the equatorial atmosphere radar, *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1171, doi:10.1029/2002GL016278, 2003.
 - 15) Yamamoto, M. K., M. Fujiwara, T. Horinouchi, H. Hashiguchi, and S. Fukao, Kelvin-Helmholtz instability around the tropical tropopause observed with the equatorial atmosphere radar, *Geophys. Res. Lett.*, **30**, doi:10.1029/2002GL016685, 2003.