

レーダーで診る大気の動き

ー 信楽とインドネシアからの研究紹介 ー

橋口 浩之^{1*}

Radar measurement of atmospheric motion

- Introduction of studies from Shigaraki and Indonesia -

Hiroyuki Hashiguchi^{1*}

概要

雨も雲もない大気に電波を当てて、大気を観測することができる。それが大気レーダー(ウィンドプロファイラ)である。生存圏研究所は、MU レーダーをはじめとする多くの大気レーダーを開発し、小型の下部対流圏レーダーは気象庁のウィンドプロファイラネットワーク WINDAS に繋がり、日々の天気予報に実用化されている。また、インドネシア共和国西スマトラ州の赤道直下に赤道大気レーダーを設置して赤道域大気の研究を推進している。本稿では、大気レーダーに関する歴史、原理、観測結果などについて紹介する。

1. はじめに

地球温暖化や異常気象の科学的理解と社会適応策が、安心・安全で快適な社会を維持しながら、人類が持続的に発展するために重要である。気象庁では、「過去 30 年の気候に対して著しい偏りを示した天候」を異常気象と定義しているが、30 年に 1 回よりもっと頻度の高い現象でも気象災害を起こしたり社会経済に大きな影響を与えたりすることがあるので、それらをまとめて「極端気象」と呼んでいる。近年、極端気象の頻度が増しており、地球温暖化がその原因の一つと言われている。長期的には地球温暖化の原因となる二酸化炭素などの排出を抑える対策が必要であるが、短期的には気象予報の精度を上げ、極端気象に備えることが重要になる。計算機の性能向上に伴い気象予報の精度は向上しているが、気象現象はカオスの性質を有しているため、時間発展系の決定論的予測が原理的に不可能であることが証明されており、気象予報モデルによる予報には限界もある¹⁾。そこで、高分解能・高精度な気象観測に基づいて、予報を行うことが重要である。

大気の動き(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あり、気象庁のアメダスと呼ばれる約 1300 カ所の自動地上気象観測ステーションでも使われている。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である。水素あるいはヘリウムガスを充填した気球に気温・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る。観測値は電波にのせて送られると共に GNSS 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る。高高度までの観測が可能であるが、1 回の観測に 2 時間弱かかること、また手間がかか

2020 年 7 月 24 日受理.

¹⁾〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所 大気圏精測診断分野.

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

るため連続観測が困難で、気象庁においては通常半日毎にしか行われていない。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ある。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ある。ここでは、我々が研究している上空の大気の動きを高時間・高度分解能で計測可能な大気レーダーについて紹介する。

2. 大気レーダー(ウィンドプロファイラ)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た。その原型は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る。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る。1930～1940年頃に日本を含む多くの国で開発が行われ、レーダーは第二次世界大戦中に大きな発展を遂げた。

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警報システムとして開発したことから始まる。雨滴の観測には高い周波数のレーダーが必要となるが、1930年代までは技術的に200～400MHzまでがせいぜいであり、より高い周波数は1940年代まで待たねばならなかった。世界で最初のレーダーによる降水観測は、1941年に3GHzのレーダーによって行われた²⁾。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る³⁾。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拡がり、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る。

気象レーダーは、降水からの電波散乱をターゲットとしているため降水時しか観測できないが、非降水時の晴天大気からも電波は散乱される。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と呼ばれる⁴⁾。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エコーと考えられていたが、航空機との同時観測などから、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った。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頻度は少なかったが風と共に移動する点状のエコーが観測された。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、「天使のこだま(angel echo)」と呼ばれ、この原因解明のための研究が1950年代に精力的に行われた。当初は昆虫や鳥からの反射と考えられたが、理論的検討が多くなされ、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ことが分かった⁵⁾。

降水を主な観測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ったが、一方1960年代後半から、電離層中の自由電子の振る舞いを調べることを目的として、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シボで、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と巨大なものであった。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る。1960年代末に50MHz帯の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60～70kmの中間圏で強いエコーが観測された。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 Guillen⁶⁾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た。このエコーを利用すれば中間圏や成層圏などの中性大気観測が可能になるので、次々とレーダーが建設されていくことになる。ISレーダーより小型だが中間圏(Mesosphere)、成層圏(Stratosphere)そして対流圏(Troposphere)を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レーダーと呼ばれる。

我が国でも、4 節で詳述するように、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(現 甲賀市)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鹿児島県山川町(現 指宿市)や北海道稚内市に(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る。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の開発へと発展していくことになる。

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する。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る。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った。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った。1983 年には、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 35 台から成るネットワーク(WPDN: Wind-Profiler Demonstration Network)が 1992 年に完成した。これに続いて、世界各国で、ウィンドプロファイラの開発・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が気象研究所に導入された。また、1.3GHz 帯のウィンドプロファイラが通信総合研究所と我々のグループで独立に開発された。4.3 節で述べるように、2001 年には、ウィンドプロファイラネットワークが気象庁により構築されている。

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とに大別される。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ある。気温・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る。同時に気球の位置を GNSS 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る。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ある。以下ではレーダーによる大気の観測法について述べる。

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、やがて粘性のため熱となって消える。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のは電波の波長の半分の大きさの渦だけである(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 程度であるが、高度と共に指数関数的に大きくなる。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)方がよい。

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る。風のリモートセンシングには、ドップラー効果を用いる。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ある。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る。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る。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る。観測の間隔(時間分解能)は観測高度にもよるが 1~10 分程度であり、定常気象観測で用いられるラジオゾンデの放球は一日に 2 回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。

一般に鉛直流(上昇下降流)は、水平風速に比べて 1 桁以上小さく、また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、測定が困難である。ウィンドプロファイラ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る。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、鉛直流を高精度に測定できることはウィンドプロファイラの最大の特長の一つである。

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(現 甲賀市)の国有林内に完成させた^{8,9,10)}。このレーダーは MST 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 である。

MU レーダーには当時の最先端のレーダー技術が取り入れられている。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(アクティブ・フェーズド・アレイ・システム)を採用していることである。1 台の小型送受信機の送信電力は 2.4kW であるが、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る。レーダーシステム全体がマイクロプロセッサ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る。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する。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で、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。

MU レーダーは「世界初のアクティブ・フェーズド・アレイ方式の大気レーダー」(図 2)として、2015 年に IEEE マイルストーンに認定された¹¹⁾。これは、電気・電子・情報・通信分野の世界最大の学会である IEEE が、IEEE の分野における歴史的偉業に対して認定する賞で、認定されるためには 25 年以上に渡って世の中で高く評価を受けてきたという実績が必要である。



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)。

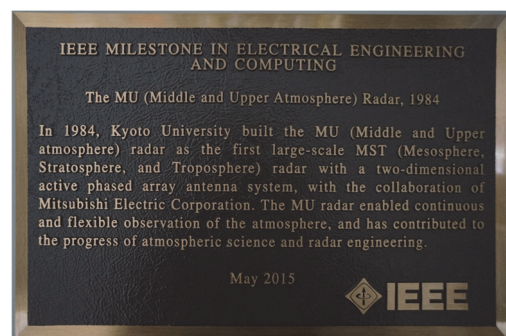


図 2: 電気電子情報通信工学分野における IEEE マイルストーン「MU レーダー(中層超高層大気観測用大型レーダー), 1984」

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言われているが、これまで中緯度域に比べて観測データが不足していた。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た¹²⁾。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110 mの略円形フィールドに560基の3素子八木アンテナを配置している。図3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高速走査できる特長を持つ。中心周波数は47 MHz、ピーク送信電力は100 kWであり、高度約1.5～20 km範囲を連続観測できる。

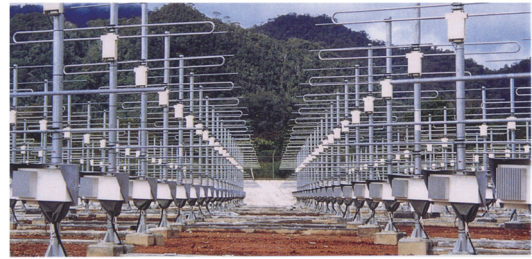


図3：赤道大気レーダーのアンテナ。

4.3 下部対流圏レーダー (LTR)

我々はMUレーダー観測の経験を活かして、1991年に高度2～3km以下の大気境界層を対象とした1357.5MHz(Lバンド)を用いた小型可搬式の境界層レーダー(Boundary Layer Radar; BLR)を開発した。翌年には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、連続観測を行った¹³⁾。その後、境界層レーダーの可搬性の特長を残しつつ、より高高度の下部対流圏全域を観測可能な「下部対流圏レーダー」(Lower Troposphere Radar; LTR)を開発した¹⁴⁾。図4にLTRの外観を示す。4m×4mのフェーズド・アレイ・アンテナには、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±15°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ある。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であるので、境界層レーダー1号機に比べて約100倍感度が向上している。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¹⁵⁾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なども行っている。

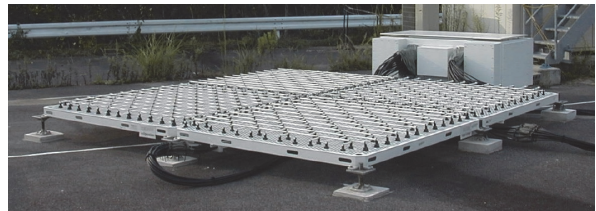


図4：下部対流圏レーダーのアンテナ。

気象庁は全国25地点に上記の下部対流圏レーダー(LTR)を設置し、これらによって構成される観測ネットワークにより高層風の観測業務を2001年4月に開始した。この観測網は「局地的気象監視システム；略称 WINDAS(Wind Profiler Network and Data Acquisition System；ウィンダス)」と名づけられ、各地点上空の高度400mから5km程度までの風を時間的にほぼ連続して測定している^{16,17)}。その後、ネットワークが拡充され、現在33地点で観測が行われている。WINDASのデータは観測間隔10分、通報間隔1時間で、中央監視局に集められ、気象予報モデルへの入力データとして利用され、日々の天気予報に貢献している。

気象庁は全国25地点に上記の下部対流圏レーダー(LTR)を設置し、これらによって構成される観測ネットワークにより高層風の観測業務を2001年4月に開始した。この観測網は「局地的気象監視システム；略称 WINDAS(Wind Profiler Network and Data Acquisition System；ウィンダス)」と名づけられ、各地点上空の高度400mから5km程度までの風を時間的にほぼ連続して測定している^{16,17)}。その後、ネットワークが拡充され、現在33地点で観測が行われている。WINDASのデータは観測間隔10分、通報間隔1時間で、中央監視局に集められ、気象予報モデルへの入力データとして利用され、日々の天気予報に貢献している。

5. 大気レーダーによる気象現象の観測例

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する。

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

ウィンドプロファイラで観測される物理量は本質的に高さ方向(レーダー直上)の一次元量であるが、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ある。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るが、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ある。つまり、地上に固定されたウィンドプロファイラの上を気象現象が西から東に動いているのである。このことを利用して、地上に固定されたウィンドプロファイラ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る。

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た。図 5 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流の台風中心からの距離・高度分布である。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る。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る。従来、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た¹⁸⁾。

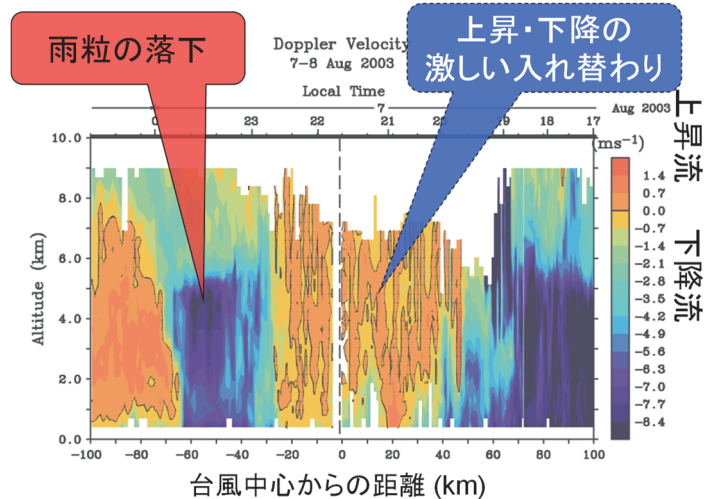


図 5: 下部対流圏レーダー(WINDAS 名瀬サイト)で観測された鉛直流の台風中心からの距離・高度分布。

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る。特に海洋大陸と呼ばれる赤道インドネシア域で積雲対流活動は活発であるが、従来の観測データの蓄積は余りに不十分であった。そこで、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る。

図 6 は赤道大気レーダーで観測された東西風の時間・高度変化の一例である。×印はラジオゾンデ観測により得られた気温極小で定義される対流圏界面高度である。

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る。東向き成分が対流圏界面に届いたところで、対流圏界面高度のジャンプが見られる。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

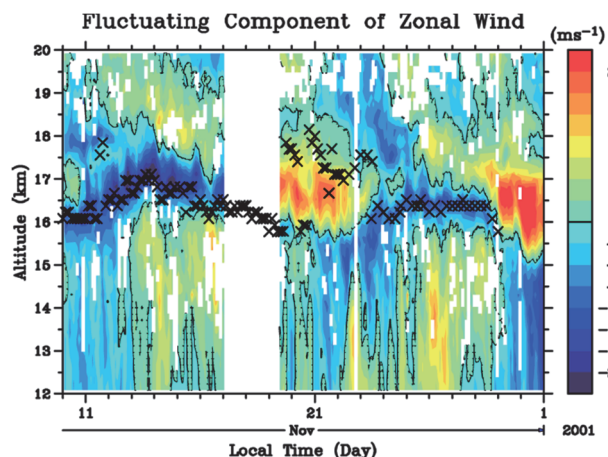


図 6: 赤道大気レーダー(EAR)で観測された東西風の時間・高度変化。

たものである。図は示さないが、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、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った¹⁹⁾。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る²⁰⁾。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ある。

6. おわりに

本稿では、主に本研究所で開発している大気レーダー(ウィンドプロファイラ)及びそれらを用いた観測結果について述べた。赤道大気レーダー(EAR)は MU レーダーに比べて送信出力が 1/10 であり、中間圏や電離圏の IS 観測を行うには感度が不足している。また、受信チャンネルは 1 個のみであるため、空間領域のイメージング観測ができないなど、機能面でも MU レーダーに劣っている。下層大気で発生した大気波動が上方へ伝搬し、上層大気の運動を変化させる様子など、大気の構造・運動の解明をより一層進めるため、MU レーダーと同等の感度・機能を有する「赤道MUレーダー(EMU)」の新設を計画している。この EMU を主要設備の一つとする大型研究計画「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る。今後も大気レーダー研究の発展のため努力を続けていく。

参考文献

- 1) Lorenz, E. N., Deterministic Nonperiodic Flow, *J. Atmos. Sci.*, 20, 130-141, 1963.
- 2) Atlas, D. and C. W. Ulbrich, Early Foundations of the Measurement of Rainfall by Radar, in *Radar in Meteorology, American Meteorological Society*, 86-97, 1990.
- 3) Kodaira, N. and J. Aoyagi, History of Radar Meteorology in Japan, in *Radar in Meteorology, American Meteorological Society*, 69-76, 1990.
- 4) Hardy, K. R. and K. S. Gage, The history of radar studies of the clear atmosphere, in *Radar in Meteorology, American Meteorological Society*, 130-142, 1990.
- 5) Tatarskii, V. I., Wave Propagation in a Turbulent Medium, *McGraw-Hill*, 285pp, 1961.
- 6) Woodman, R. F. and A. Guillen, Radar observations of winds and turbulence in the stratosphere and mesosphere, *J. Atmos. Sci.*, 31, 493-505, 1974.
- 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, 1985a.
- 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, 1985b.
- 10) 加藤進, 橋口浩之, 津田敏隆, 山本衛, MU レーダー, *電子情報通信学会 通信ソサイエティマガジン B-plus*, 36, 236-242, 2016.
- 11) 橋口浩之, MU レーダーIEEE マイルストーン認定, *生存圏研究*, 12, 48-54, 2016.
- 12) 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.
- 13) 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.

- 14) 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.
- 15) Kawano, N., H. Hashiguchi, K. Yoneyama, and S. Fukao, Lower atmosphere observations over the equatorial Indian Ocean with a shipborne lower troposphere radar during MISMO field experiment, *Radio Sci.*, 44 RS6011, doi:10.1029/2008RS003885, 2009.
- 16) 石原正仁, 気象庁がウィンドプロファイラ観測業務を開始, *気象*, 9, 17378-17384, 2001.
- 17) Ishihara, M., Y. Kato, T. Abo, K. Kobayashi, and Y. Izumikawa, Characteristics and performance of the operational wind profiler network of the Japan Meteorological Agency, *J. Meteor. Soc. Japan*, 84, 1085-1096, 2006.
- 18) Teshiba, M., H. Fujita, H. Hashiguchi, Y. Shigasaki, M.D. Yamanaka, and S. Fukao, Detailed structure within tropical cyclone "Eye", *Geophys. Res. Lett.*, 32, L24805, doi:10.1029/2005GL023242, 2005.
- 19) 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.
- 20) 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.

著者プロフィール



橋口 浩之 (Hiroyuki Hashiguchi)

<略歴> 1990 年京都工芸繊維大学工芸学部電気工学科卒業／1992 年日本学術振興会 特別研究員 DC1 (京都大学超高層電波研究センター所属)／1995 年京都大学工学研究科博士後期課程電子工学専攻修了 (工学博士)／同年日本学術振興会 特別研究員 PD (京都大学超高層電波研究センター所属)／1997 年京都大学超高層電波研究センター 助手／2001 年同大学宙空電波科学研究センター 助教授／2018 年同大学生存圏研究所 教授、現在に至る。

<研究テーマ> 大気観測用レーダーの開発とそれらを用いた気象観測への応用研究。