

レーダーを使って大気を測る 信楽とインドネシアからの研究紹介

山本 衛^{1*}

Radar Measurement of Atmosphere

Introduction of studies from Shigaraki and Indonesia

Mamoru Yamamoto^{1*}

概要

レーダーを使って大気が観測できる。気象予報で紹介されるような降雨レーダーではなく、雲も雨もない大気を測る。レーダーは、電波を使って標的からの「こだま」を測る装置である。強い電波を大気に発射するとごく一部が散乱して戻ってくる。これを使って大気の揺らぎや動き（風速）を測る。1984年に開発された MU レーダーは、電子制御で電波の向きを変えられるアンテナを特徴とするが、世界初の優れた開発であったとして、国際学会である IEEE からマイルストーン認定を受けた。さらに我々は、インドネシアにも赤道大気レーダーを設置して興味深い赤道域の大気を研究している。ここでは、これらのレーダーを使った大気研究を紹介する。

1. はじめに

通信ではない電波利用としてリモートセンシングがあるが、それは観測対象が発する電波（あるいは光）を受信して相手の性質を測る受動的なリモートセンシングと、観測装置が電波や光を観測対象にあてて観測をする能動的なリモートセンシングに分かれる。レーダーは電波パルスを観測対象にあてて跳ね返ってくるエコーを調べる装置であり、能動的なリモートセンシング装置である。図1にレーダーの原理図を示す。送信機と受信機がひとつのアンテナを共用している。送受切替えスイッチを送信側に設定してパルス変調波を標的に向かって短時間送信する。その後、スイッチを受信側に切り替えて反射波の到来を待つ。送信からエコー受信までの時間差から、レーダーから標的までの距離が分かる。標的が動いていれば、エコー波の周波数がドップラーシフトを示すため、速度が分かる。飛行機や船だけではなく、大気中のさまざまな現象を標的とするレーダーが実用されている¹⁾。本稿では、大気を観測するレーダーについてご紹介する。

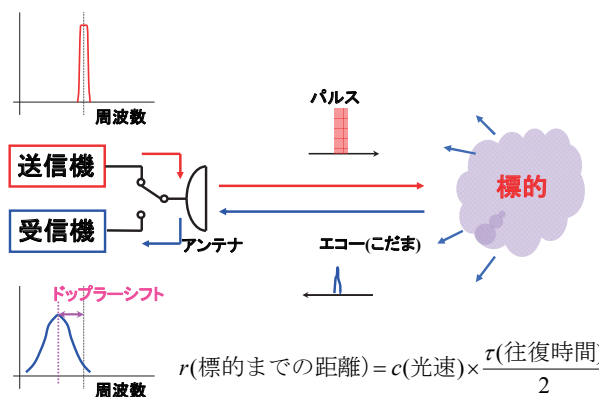


図1: レーダー原理図

2017年7月19日受理.

¹⁾ 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: yamamoto@rish.kyoto-u.ac.jp

2. 大気の種類

大気は重力によって地球表面に捉えられた気体であり、密度と圧力は地表面が最大で高度と共に指数関数的に減少する。図 2 に標準的な大気温度の高度分布を示す。気温は地表面から高度 10 km を過ぎるあたりまでは 1 km 当り約 6.5 度の割合で高度と共に低下する。ここを対流圏と呼ぶ。雨・雲などの気象現象は対流圏内の現象である。高度約 11 km に対流圏界面と呼ばれる気温の極小層があり、その上部の高度約 50 km までは高度と共に温度が上昇していく成層圏である。その上部は再び温度が

下がる中間圏、高度 90km 以上は温度が飛躍的に高くなっていく熱圏が広がっている。熱圏は、例えば高度 100 km では大気圧は 2×10^{-7} 気圧程度しかない（地表は 1 気圧）。高度 300 km 以上は希薄で人工衛星が飛翔しうる領域である。更に上部は太陽系空間に徐々に繋がって行く。宇宙空間から地球に飛び込んでくる微小な塵は高度 70~110 km において燃えて流星となる。また熱圏では大気を構成する原子や分子が太陽光線に含まれる紫外線や X 線によって電離して、電離圏を形作っている。電離圏は高度 100~120 km に広がる E 層、高度 200~400 km を中心とする F 層と呼ばれる層構造を成している。

周波数 50 MHz 付近から数 GHz の電波を利用するレーダーとしてウィンドプロファイラーや ST（成層圏・対流圏）レーダー、MST（中間圏・成層圏・対流圏）レーダーなどと呼ばれるグループがある。これらは大気中の密度変動や水蒸気分布などからのエコーを利用して風速を観測する点に特徴がある。観測高度範囲は、小型のものでは高度数 km、ST レーダーと呼ばれるタイプで高度 10~20 km まで、大型の MST レーダーではこれらに加えて高度 60~80 km の中間圏も観測可能である。これらのレーダーはまとめて「大気レーダー」と名づけられる。京都大学生存圏研究所では、大気レーダーを中心として多様な装置を開発し、大気研究に利用してきた。

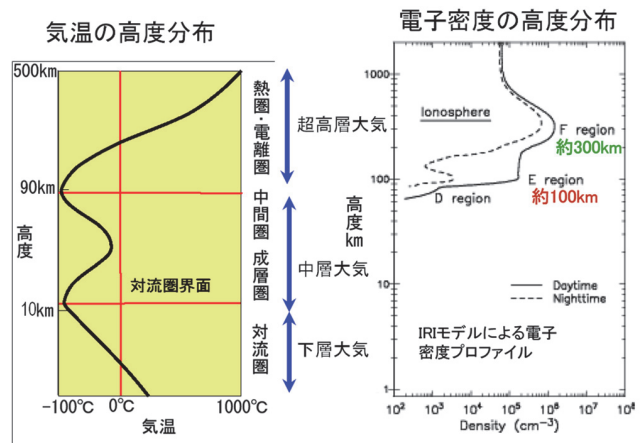


図 2： 大気の温度分布と電子密度分布

3. 大気からのエコー

大気レーダーの標的は、大気乱流や密度成層などから生じる屈折率変動であり、雲粒・雨粒などが大気になくてもエコーが得られる。大気中にはいたるところに乱流が発生しており、それにとまって密度変動が存在し電波や光の屈折率が変動する（図 3）。例えば星の光が大気を通過する際に屈折することで、またたきが生じる。これは、大気密度の変化によって光や電波が影



図 3： 大気エコーの仕組み（左図）と大気の揺らぎの例（右図）

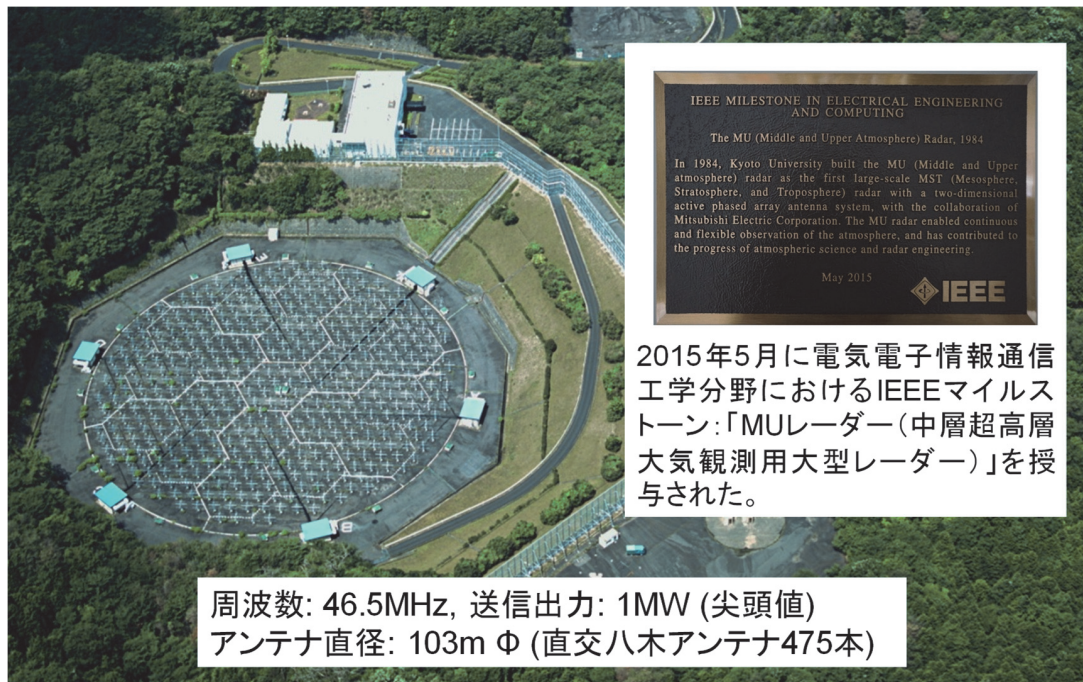


図 4: 滋賀県甲賀市信楽町にあるMUレーダー全景写真。IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) は、米国に本部を持つ電気・電子・情報・通信分野の世界最大の学会である。

響を受けるひとつの例である。レーダービームを覆いつくす多くの散乱体からの寄与の合成を考えると、電波が同位相で足しあわされる条件(ブラッグ条件)が満たされるとき散乱波は最大となる¹⁾。すなわち、大気レーダーは乱流などによる屈折率変動のうち、レーダー波の半波長スケールの成分を主として観測することになる。

4. 大気レーダーの実際

生存圏研究所は、1984年に大型の大気観測用レーダーであるMUレーダーを滋賀県甲賀市信楽町の信楽MU観測所に完成し、現在まで様々な研究を行ってきた²⁾。図4にMUレーダーの全景写真を示す。丸く見えるのはアンテナシステムであり、直径100mの円形の敷地内に475本の八木アンテナ(詳しくは、3素子のクロス八木アンテナ)が整然と並んでいる。アンテナ面の回りには6棟の小屋が並んでいるが、この中には各々のアンテナについて1台ずつ対応する半導体の送受信機が収容されている。MUレーダーは多くの送受信機とアンテナから構成されるが、電子制御によってそれらを一体のものとして運用する。即ち、全体を中心周波数46.5MHz、送信時の最大電力が全体で1MWに及ぶ巨大なレーダーとして使用する。MUレーダーのアンテナの働きは、同じ大きさの開口をもつパラボラアンテナと同等であり、更に送受信の電波の位相を制御することによって、電波の発射方向を電子的に振ることができる。こういう構成のアンテナは、アクティブ・フェーズド・アレイと呼ばれる。MUレーダーは、電気・電子・情報・通信分野の世界最大の学会であるIEEEによって、「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」としてマイルストーンに認定された。

MUレーダーの観測領域は、地表面近くから高度約1000kmまでの地球大気全域に及ぶが、超高層大気に関しては、(1)電離圏の電子1個1個からの超微弱な散乱電波を捉える「非干渉性散乱エコー」と、(2)電離圏プラズマの不安定現象に関連して生じる電子密度の不規則構造に伴う「電離圏イレギュラリティエコー」の観測が主となる。また(3)役目を終えた人工衛星やその破片などからなるいわゆるスペースデブリの観測も実施されている。

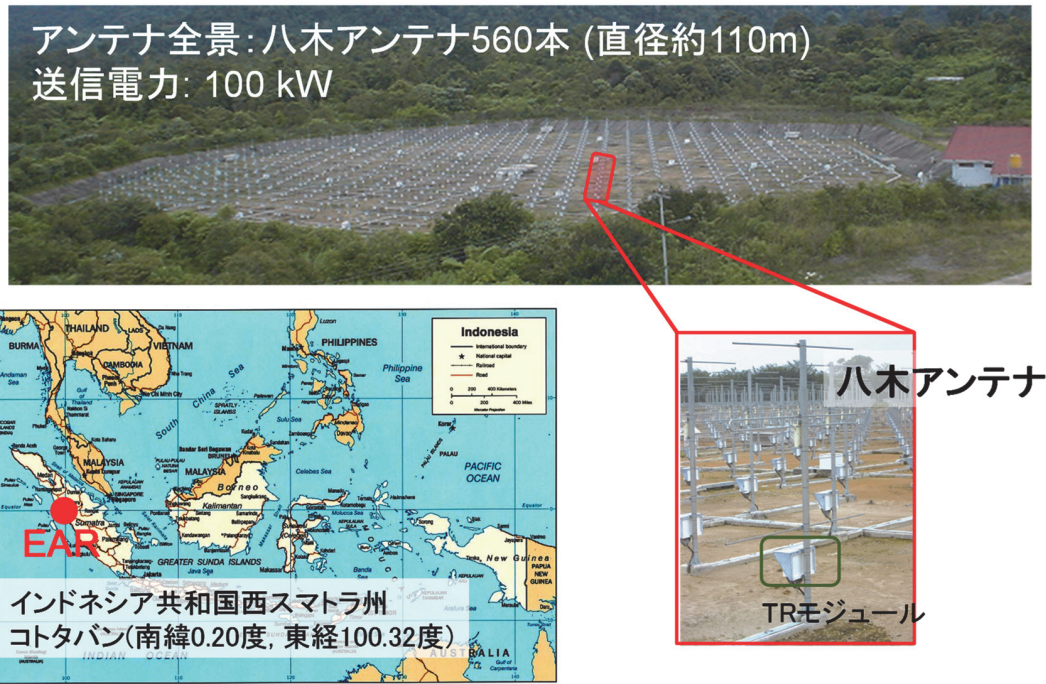


図 5： 赤道大気レーダーの全景 (上)、アンテナ・TR モジュール (下右)、レーダーの位置 (下左)。

生存圏研究所には、MU レーダーに良く似た大型のレーダーがインドネシア共和国西スマトラ州コタババンにもう一台ある³⁾。赤道大気レーダー (Equatorial Atmosphere Radar; EAR) と呼ばれるこのレーダーの全景とアンテナ部を図 5 に示す。周波数 47 MHz で直径約 110 m のアンテナを備えており、アンテナと直下の送受信モジュールの総数は 560 に達する。MU レーダーと同様にアクティブ・フェーズド・アレイ構成であり、全体の送信出力が 100 kW と MU レーダーの 10 分の 1 である以外は、ほぼ同様の機能を備えている。超高層大気に関しては上記の(2)の観測ができるが、(1)と(3)には感度が不足している。EAR の運営は、インドネシア航空宇宙庁 (LAPAN) との密接な協力の下で進められている。設置場所の特徴を活かして、赤道大気に特有の波動現象や、低緯度・赤道域の電離圏に特徴的なプラズマバブルという現象の研究を精力的に実施している。

5. 観測例と実用化

レーダーによる観測例を示す。1994 年の台風 9426 号は、紀伊半島を縦断しながら北進し、9 月 29 日に MU レーダーの上空を通過した。このため、台風を完全に輪切りにする観測に成功した。台風は中心の周りに大気が反時計回りにまわる巨大な渦巻き構造を持つ。図 6 に示すように、MU レーダーで観測された風速から台風の移動速度を引き去ることで台風と共に動く系からみた風速を求め、さらにこれを回転成分(接線風)と半径方向の成分(動径風)に分解して研究を進めた。図 7 には台風 9426 号の観測か

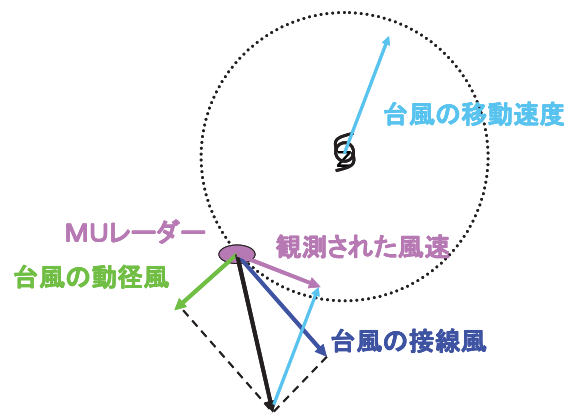


図 6： 台風観測の原理図

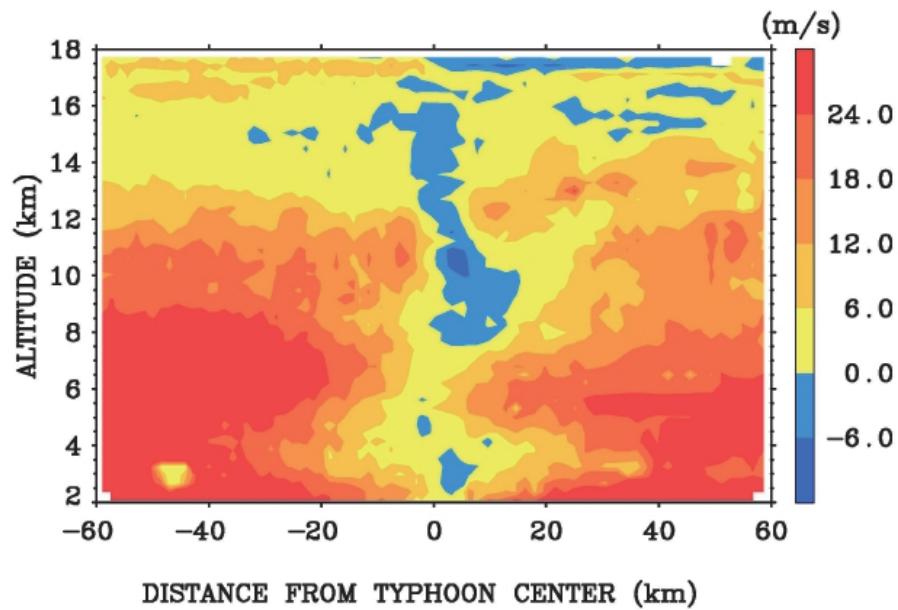


図 7： 台風 9426 号の接戦風速の分布図

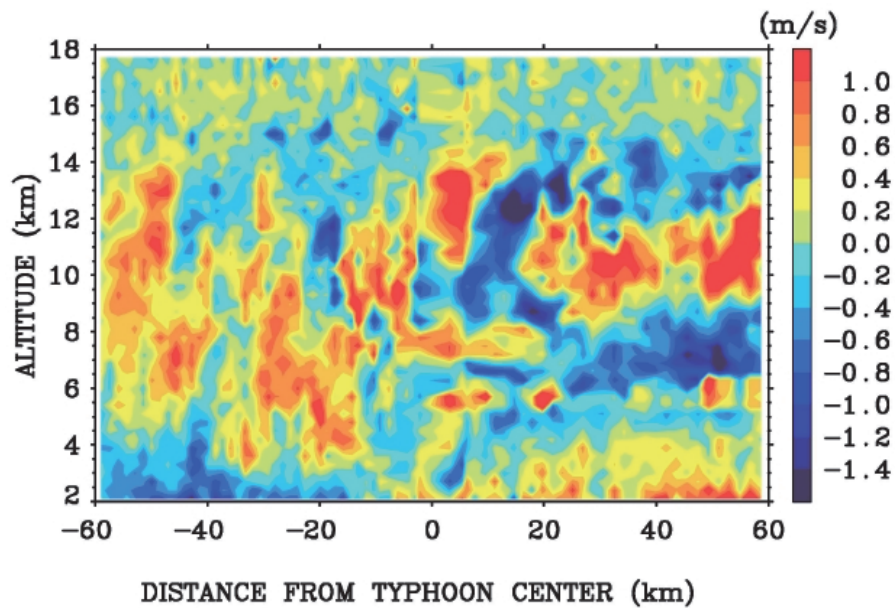


図 8： 台風 9426 号の鉛直風の分布図

ら得た接線風の水平距離・高度分布を示す。ここで水平距離は、元は時間変化として捉えた風速を、そのときの MU レーダーと台風中心との水平距離に置きなおしたものである。台風が MU レーダーを通過したため、水平距離ゼロまで観測を行うことができた。台風の接線風はほぼ全域にわたって反時計回りであり、高度 10 km より下側で強い風が吹いている。台風中心付近に時計回りの成分（負の値）が見られるが、上陸後の台風の構造が完全な軸対称からずれたことによるものと考えられる。図 8 には同時に観測された鉛直風の分布を示すが、1 m/s を超える上昇流と下降流が複雑に分布する様子が捉えられた。このように高分解能で台風内部の 3 次元風速の分布を明らかにできたのは、MU レーダーならではの成果である。

大気運動の駆動源は太陽からのエネルギーである。太陽光は赤道域を中心に降り注ぎ、赤道大気には活発な積雲対流が生じる。赤道インドネシアは地球規模の大気循環のいわばエンジンの役割を果たしており、EAR はそこに建設された。図9にEARが2001年11月に観測した東西風とスペクトル幅の時間高度分布を示す。×印は気球観測で求められた対流圏界面高度を示し、対流圏（下層）と成層圏（上層）の境目である。周期約10日で下向きの位相速度をもった大気波動が東西風に現れるが、これは赤道ケルビン波とよばれる赤道域に特徴的な波動現象である。波動が対流圏界面にあたるところ（上図の丸印の部分）に対応してスペクトル幅の増大（下図の丸印の部分）が現れ、大気の変動が強まったことが読み取れる。図10に概念的な説明図を示す。対流圏と成層圏の大気交換の実態は未解明の部分が多いが、この研究では、成層圏を伝搬する赤道ケルビン波が対流圏界面付近で砕けるとき（砕波）、大気乱流が増大して対流圏と成層圏の大気の交換が行われることを初めて明らかにした。インドネシア赤道域の研究については、

科研費（特定領域研究）「赤道大気上下結合」（2001～2006

年）や、科学技術戦略推進費「インドネシア宇宙天気研究の推進と体制構築」（2010～2012年）をはじめとする多くのプロジェクトが実施され、赤道域の地表近くから電離圏にいたる全高度域にわたる研究が進められ、波動を通じて大気が上下方向に力学的結合している様子が明らかになってきた。

我々は、MU レーダーをずっと小型にしたウィンドプロファイラーと呼ばれるレーダーを開発して

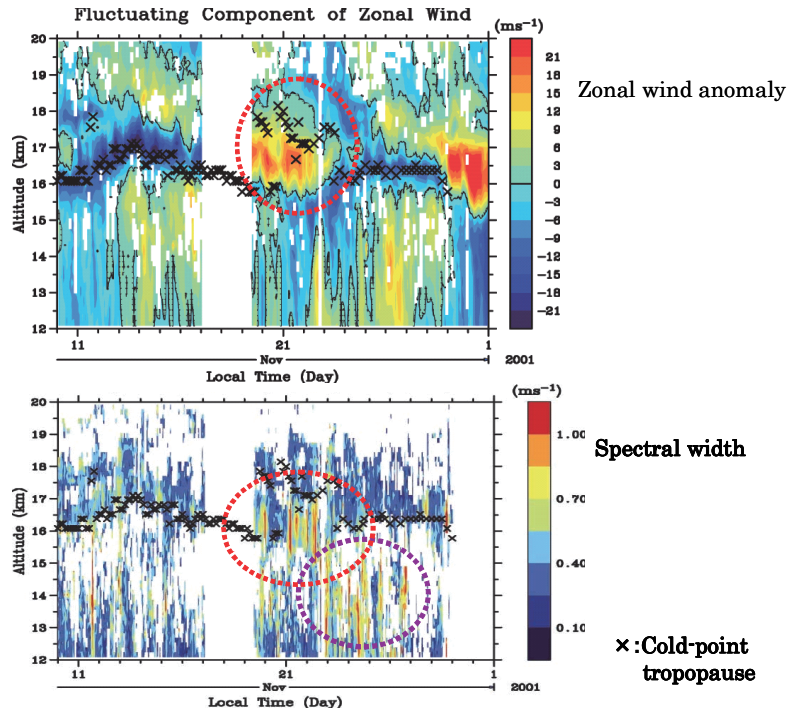


図9：赤道大気レーダーによる赤道ケルビン波の観測例

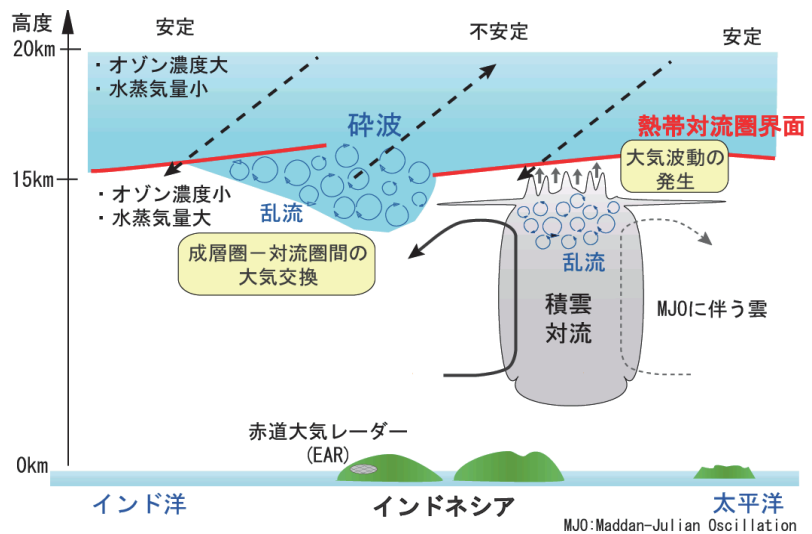


図10：赤道ケルビン波による対流圏・成層圏の大気交換の模式図

きた。小型レーダーは可搬性に優れ、またネットワーク化にも向く装置である。気象庁は我々が開発した下部対流圏レーダー（Lower Troposphere Radar; LTR）に目をつけ、2000～2001年に、全国25(現在33)ヶ所に設置してウインドプロファイラーネットワーク WINDAS を構築した(図 11)。従来の気球による風速や気温の測定に加えて、LTR による風速の 10 分平均値が気象庁に即座に集められている。図 12 が WINDAS データの有無による気象予報精度の検討結果である。上図は中国地方に起こった降雨の観測データだが、これを 3 時間前または 6 時間前の時点から予報したとき、WINDAS のデータを加えることによって精度が良くなった様子がわかる。このように WINDAS は集中豪雨などの局地的な気象現象の予報精度の向上に役立つことが確かめられており、現在では、そのデータが常に気象予報に実用されている。

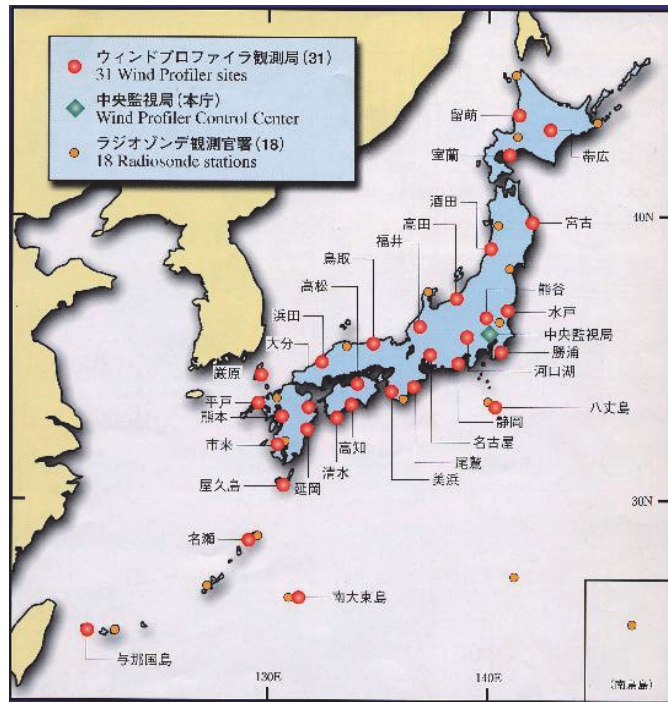
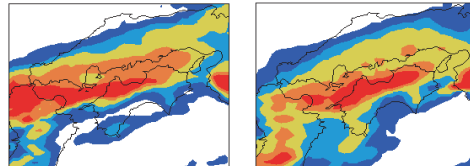
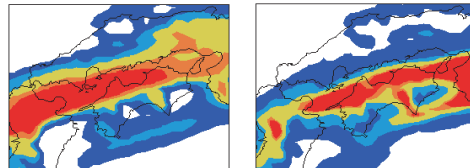


図 11: 気象庁のレーダーネットワーク WINDAS

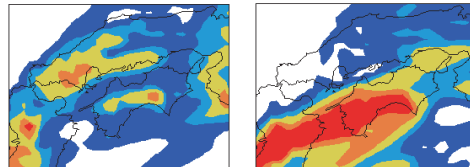
実際に降った降雨量



WINDASのデータを使った場合の予報



WINDASのデータを使わない場合の予報

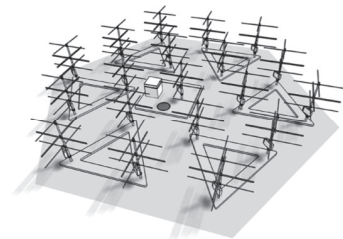
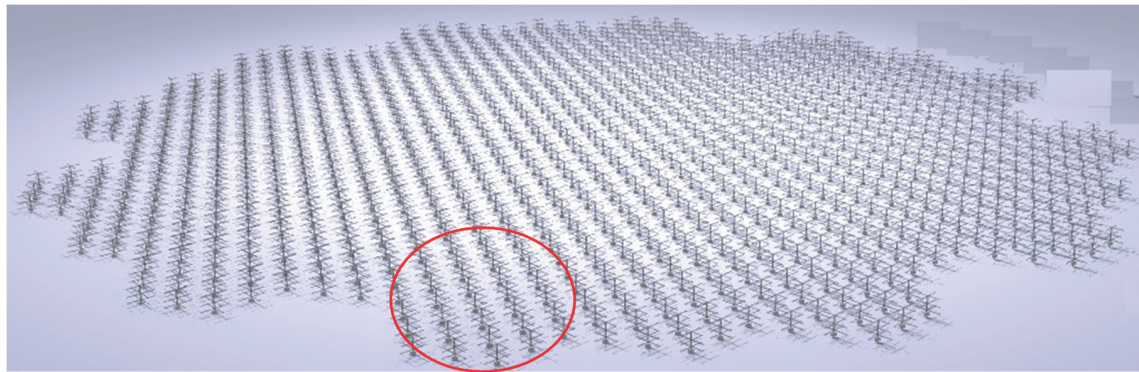


3時間後の予報

6時間後の予報

[mm]

図 12: 気象庁の天気予報結果に対する WINDAS の効果



1群(アンテナ本数19本)
アンテナは55群構成
(19本×55群=1045本)

◆システム構成

周波数47MHz

アレイアンテナ(直径約163m、八木アンテナ1045本)

送受信モジュール(出力500W PEP)

(八木アンテナ基部に取付)

多チャンネル変復調・データ処理装置

(変復調装置、データ処理装置、屋外分配装置・コネクタパネル・屋内分配装置・電源装置等からなる)

図 13： 計画中の「赤道 MU レーダー (EMU レーダー)」の概要

6. まとめと大気レーダーの今後

以上に述べたように、レーダーは大気の観測に広く用いられている。本稿では、大気乱流を標的とし風速測定を主とする大気レーダーを中心として、観測の原理や観測成果についてまとめた。大気レーダーは大気中の波動現象などの研究に大きな貢献を果たしているのみならず、レーダーネットワークからの観測データが気象予報に実用されている。

MU レーダーや赤道大気レーダーの観測データは、標準観測の場合はすぐに、特別観測では1年後に生存圏データベースに登録し、研究者コミュニティに公開している。さらに、東北大・名古屋大・京都大・九州大と国立極地研が参加する IUGONET プロジェクト「超高層大気長期変動の全球地上ネットワーク観測・研究」によって、データベースのカタログに相当するメタデータを整備し、データの相互参照を容易にする取組みに参加している⁴⁾。2016年3月には、MU レーダーと EAR のデータベースの重要性が認められ、生存圏研究所は ICSU (国際科学会議) の WDS (世界科学データシステム) に、正メンバーとして参加することになった。

インドネシアにある EAR は、MU レーダーに比べて感度が 1/10 と不足している。また受信チャンネルが1個であってイメージング観測ができないなど、機能面でも劣っている。そこで現在、MU レーダーと同等以上の高感度かつ高機能なものにしようと、「赤道MUレーダー (Equatorial MU radar; EMU レーダー)」の新設を計画している⁵⁾。図 13 に EMU レーダーの概要を示す。大気レーダーの感度は送信出力とアンテナ面積の積に比例する。MU レーダーと比較すると、EMU レーダーは送信出力は 1/2 だが、アンテナ面積を 2 倍以上にすることで同等の感度を達成する。我々は、EMU レーダー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」を日本学術会議のマスタープラン 2014 (および 2017) に提案し、27 (28) 件の重点大型研究計画の一つとして採択された⁶⁾。

さらに文部科学省のロードマップ 2014 にも 11 件の新規課題の一つに選定された。EMU レーダーは実現の一手手前まで来ている。

参考文献

- 1) 深尾昌一郎, 浜津享助, “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, 2005, pp. 491.
- 2) MUレーダー : <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/mu>
- 3) 赤道大気レーダー (EAR) : <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/ear>
- 4) IUGONET「超高層大気長期変動の全球地上ネットワーク観測・研究」 : <http://www.iugonet.org/>
- 5) 赤道MUレーダー (EMU) : <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/emu>
- 6) 大型研究計画「太陽地球系結合過程の研究基盤構築」 : <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/masterplan2017/>

著者プロフィール



山本 衛 (Mamoru Yamamoto)

＜略歴＞ 1983 年 京都大学工学部電子工学科卒業／1988 年 京都大学大学院工学研究科博士後期課程電子工学専攻修了（京都大学工学博士）／1988 年 京都大学超高層電波研究センター助手／1996 年 京都大学超高層電波研究センター助教授／2007 年 京都大学生存圏研究所教授、現在に至る。＜研究テーマ＞大気レーダー開発、レーダーによる大気観測手法の研究、電離圏イレギュラリティの研究（レーダー、観測ロケット、衛星＝地上ビーコン観測など）