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. 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、それらは観測対象が 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 信側にしてパルス変調波を標的に向かって



短時間送信し、そのあと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 ドップラーシフトするので速度が分かる。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。本稿では、大気を観測するレーダーについて紹介する¹⁾。

2. 大気の構造とレーダーの種類

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 90~100



図2 大気の温度分布と電子密度分布

* 〒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 km以上は温度が飛躍的に高くなっていく熱圏となっている。熱圏は、例えば高度 100 km では大気密度は 2×10⁻⁷気圧程度しかない(地表は 1 気圧)。高度 300 km以上は更に希薄で人工衛星が飛翔しうる領域である。この上部は太陽系空間に徐々につながって行く。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 の観測も可能である。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、研究に利用してきた。

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・雨粒などが大気中になく 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、それにともな 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 が影響を受けるひとつの例で ある。レーダービームを覆い



星のまたたき

図3 大気エコーの仕組み(左図)と大気の揺らぎの例(右図)

与の合成を考えるとき、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。これから、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

つくす多くの散乱体からの寄

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、直径約 100 m 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。アンテナ面の周囲には 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ており、電子制御によってそれらを



図4 滋賀県甲賀市信楽町にあるMUレーダー全景写真

一体のものとして運用する。即ち、全体を中心周波数 46.5 MHz、送信時の最大電力が全体で1 MW 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 1000 km 程度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「非干渉計散乱エコー」 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。

生存圏研究所は、MU レーダーに良く似たもう一台の大型レーダーを、インドネシア共和国西スマ トラ州コトタバンに有している。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³⁾。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 が不足する。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。



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

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26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っている。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 26 号の観測か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 変化として得られた風速を、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。台風の中心が 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





図7 1994年の台風 26号の接線風の分布図



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 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)の境目となっている。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 が読み明図を示す。対流圏 と成層明の部分が多いが、 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し

(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「インドネシア字 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 小型にしたウィンドプロフ ァイラーと呼ばれるレーダ





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

ーを開発してきた。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)に注目し、2000~2001年に、 全国 31 箇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 に WINDAS データの有無による気象予報精度の検討結果を示す。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。

6. 大気レーダーの今後

レーダーは大気観測に広く用い 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利用される という点で実用されている。

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



図 11 気象庁のレーダーネットワーク WINDAS

即座に、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されている。 さらに、東北大・名古屋大・京都大・九州大・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 メタデータの整備が進み、さらにデータの相互参照を容易にする取組みが行われている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(国会科学 会議)の WDS(世界科

云蔵)の wDS (世外枠 学データシステム) に Regular Member として 参加することになった。

インドネシアの 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 $-\breve{y}$ – (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



図12 気象庁の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

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(一方で、EAR は MU レーダーに比べるとアンテナ面積はほぼ同等だが送信出力が 1/10 と不足 している)。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 究基盤構築」を日本学術会議のマスタープラン 2014 に提案し、27 件の重点大型研究計画の一つとし て採択された⁶。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ている。EMU レーダーは実現の一歩手前まで来ている。

参考文献

- 深尾昌一郎・浜津享助 共著、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 ページ, ISBN4-87698-653-3.
- 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 レーダー): 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/masterplan2014/