

高校生のページ

大気を測るレーダー

生存圏研究所 山本 衛

1. はじめに

電波の利用としては、まず携帯電話やテレビに代表される通信がありますが、もうひとつ忘れてはならないのはリモートセンシングです。さらに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ます。電波を使った能動的なリモートセンシングの代表的なものがレーダーです。飛行機や船を探索する装置という印象が強いですが、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ます。ここでは、大気を観測するレーダーについて、その基礎技術、装置の概要と実際の観測成果について紹介します。

2. 大気構造

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します。図1に標準的な大気温度の高度分布を示します。気温は地表面から高度10kmを過ぎるあたりまでは1km当り約6.5度の割合で高度と共に低下して行きます。ここを対流圏と呼びます。雨・雲などの気象現象は対流圏内の現象です。高度約11km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50kmまでは高度と共に温度が上昇していく成層圏です。その上部は再び温度が下がる中間圏、高度80km以上は温度が飛躍的に高くなっていく熱圏となっています。熱圏は、例えば高度100kmでは大気密度は地表の 2×10^7 程度しかありません。高度300km以上は更に希薄で人工衛星が飛翔しうる領域です。この上部は太陽系空間に徐々につながって行きます。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ます。電離圏は高度100～120kmがE層、高度200km～400kmがF層と呼ばれる層構造をしています。

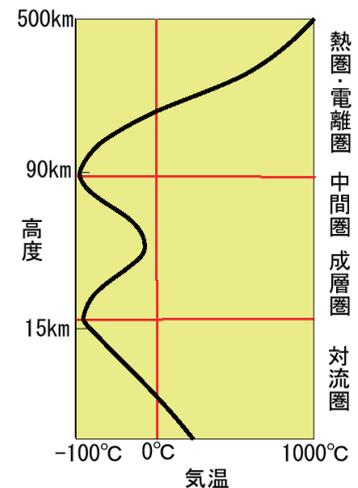


図1 大気温度分布

3. 大気レーダーの基礎

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す。図2にレーダーの原理図を示します。送信機と受信機がひとつのアンテナを共用しています。送受切替えスイッチを送信側にし

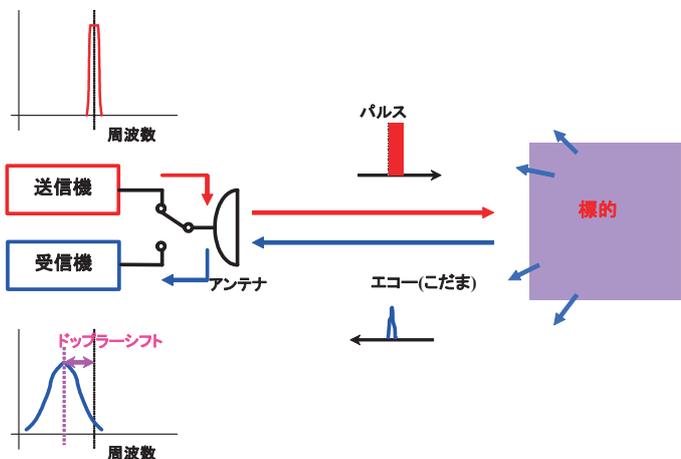


図2 レーダー原理図

てパルス変調波を標的に向かって短時間送信します。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ちます。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わかります。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していますので、速度がわかります。1方向の観測では風速の1成分しか観測できませんから、3次元の風速ベクトルを求めるためには、3つ以上の方向成分を観測する必要があります。そのため大気レーダーでは観測方向を高速に走査する工夫が必要です。これは後で述べます。

周波数 50MHz 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ります。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 10～20km、大型の MST レーダーでは高度 60～80km の中間圏も観測可能となります。これらのレーダーはまとめて「大気レーダー」と名づけられます。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ました。

大気レーダーの「標的」について図3を使って説明します。大気中には、乱流や密度成層などから生じる屈折率変動があり、電波が入射すると、ごくわずかですが、その界面に分極電界が生じ、そこから電波が再放射されます。例えば、大気中にプラスチックの球が浮かんでいる様子を考えてください。電波が入射すると球には分極電界が生じ、入射波と同じ周波数で振動しますので2次放射が生じます。大気中にはいたるところに乱流がありますので、雲粒・雨粒などがなくてもエコーが得られます。この機構で散乱される信号は、干渉性が比較的良好なので、「コヒーレント散乱」と呼ばれます。一方、高度 100km を越える電離圏においては、大気の一部が電離してプラズマになっています。自由に飛び回る電子1個1個からの非常に微弱な電波の散乱があり、大型レーダーでは捉えられます。こちらの散乱から得られる信号は干渉性が低いので「インコヒーレント散乱」と呼ばれます。

4. MU レーダー

MU レーダー (Middle and Upper atmosphere radar) は、京都大学生存圏研究所 (当時の名称は超高層電波研究センター) が滋賀県甲賀市信楽町に 1984 年に完成させた大型の大気レーダーです。図4にその全景写真と個々のアンテナの写真を示します。直径約 100m の円形敷地内に 3 素子直交八木アンテナ 475 本を敷き詰めたアクティブ・フェーズド・アレイアンテナを特徴としています。中心周波数は 46.5MHz、各八木アンテナと同数の送受信機を有し、それぞれの送信出力を合成することで全体の送信出力は 1MW に達します。従来の大気レーダーは、送信パルスを高出力の真空管式増幅器で増幅してから各アンテナ素子に給電していましたが、MU レーダーでは、小型の半導体



図3 大気レーダーの標的



図4 MUレーダー全景写真と個々のアンテナの写真

送受信機を用いた分散型システムを取っています。MU レーダーのアンテナアレイは6角形状に区切られた、八木アンテナ19本からなる25個の「群」から構成されています。このようなアンテナ構成をアクティブ・フェーズド・アレイ方式と呼びます。図5にその動作原理を示します。個々の八木アンテナから放射される電波の位相を揃えることで、巨大なパラボラアンテナと同じ働きをさせることができ、上空に細い

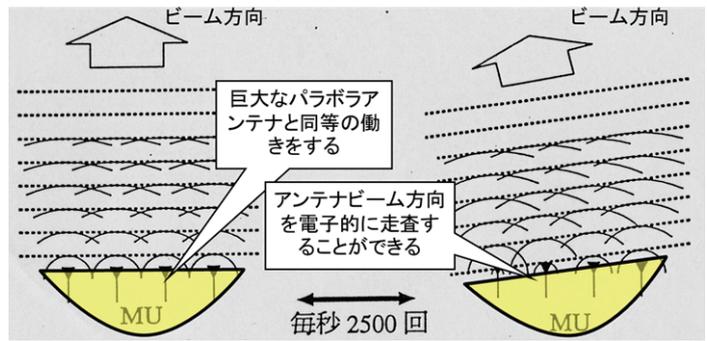


図5 アクティブ・フェーズド・アレイ・アンテナの動作原理

ビームを向けて強い電波を送ることが出来ます（左図）。さらに、個々のアンテナから放射される電波の位相を少しずつずらすことによって、アンテナビームを傾けることもできます（右図）。MU レーダーは、このように電子制御によって電波の向きを変化できる点に特徴があります。全アンテナを一体として使用したとき、ビーム半値幅は3.6度であり、ビーム方向を天頂角30度以内のプリセットされた約2000の方向に、1秒間に最大2500回で走査できます。大気運動の変化は、ビーム走査に比べて十分遅いので、3次元風速の測定や、レーダー上空の大気乱流の分布等が観測できます。

5. 観測例

MU レーダーを用いて台風を観測した例を示します。この台風は紀伊半島を縦断しながら北進し、1994年9月29日にMU レーダーの上空を通過しました。このため、台風を完全に輪切りにする観測に成功しました。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ます。そこで図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

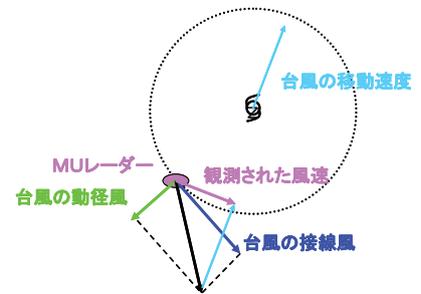


図6 台風観測の原理図

風速を求め、さらに回転成分（接線風）と半径方向の成分（動径風）に分解して研究を進めました。図7には台風9426号の観測から得た接線風の水平距離・高度分布を示します。ここで水平距離は、元は時間変化としてえられた風速を、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す。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ました。台風は接線風はほぼ全域にわたって反時計回りであり、高度10kmより下側で強い風が吹いています。台風中心付近に時計回りの成分（負の値）が見られますが、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ます。図8には同時に観測され

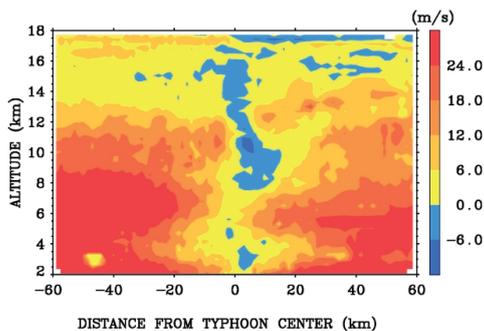


図7 台風9426号の接線風速の分布図

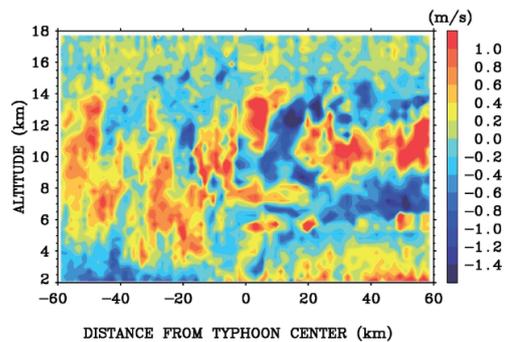


図8 台風9426号の鉛直風の分布図

た鉛直風の分布を示しますが、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ました。このように台風内部の3次元風速の分布を高い分解能で明らかにできたのは、MU レーダーならではの成果です。

7. まとめ

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原理・レーダーシステム・観測成果についてまとめました。レーダーは大気の観測に広く用いられています。

MU レーダーに引き続き、我々は2001年にインドネシア共和国にあるスマトラ島の赤道上に赤道大気レーダー (Equatorial Atmosphere Radar; 以下ではEAR) を建設しました。図9にアンテナ面の写真を示しますが、EARもMUレーダーと同様、直径110mの円形敷地内に560本の3素子八木アンテナを配置し、各アンテナの直下に半導体の送受信機を備えたアクティブ・フェーズド・アレイ方式の分散システムを取っています。MUレーダーと比較すると、送信出力 (尖頭値) が100kWと小さいために感度が1/10ですが、高度20kmまでの大気エコーの観測は可能です。現在まで10年以上にわたって赤道大気データのデータを取り続けています。また図9に示すとおり、日本が設置運営にかかわる大型レーダーが他にもあります。国立極地研究所と東京大学はPANSYと呼ばれるMUレーダーと同等規模の大型レーダーを、南極の昭和基地に設置しています (PANSYには情報学研究科の佐藤亨教授が技術面で協力しておられます)。さらに国立極地研究所と名古屋大学は、北極域にあるEISCATと呼ばれる電離圏観測用の大型レーダーの運営にもヨーロッパの数カ国と共に参加しています。MUレーダーと赤道大気レーダーをあわせると、日本は北極～赤道域～南極と世界中をカバーする観測網を有しています。さらに、MUレーダーの技術は天気予報にも実用化されています。我々の技術を基礎としてウィンドプロファイラーと呼ばれる小型レーダーが開発されており、気象庁がそれを用いた観測網を全国30数カ所に展開しています。ウィンドプロファイラーからの風速データは日々の天気予報のためのデータとして活用され、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っています。

電気電子分野の世界最大の学会IEEEでは、25年以上を経過した顕著かつその後に大きな影響を与えた開発業績に対して「マイルストーン」表彰を行っています (IEEEマイルストーンプログラムのホームページ http://www.ieeeighn.org/wiki/index.php/Milestones:IEEE_Milestones_Program#Lists_of_IEEE_Milestones)。つい最近に、MUレーダーが「アクティブ・フェーズド・アレイ・アンテナを備えた先駆的な大型大気レーダー」として2015年5月に受賞することが決まりました。1984年に始まる日本の大型レーダー開発と大気研究に対する高い評価に深く感謝いたします。今後も新たな研究開発に向かって行きたいと考えています。

参考文献

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、491ページ、ISBN:4-87698-653-3、2005年3月。(改訂第2版ISBN:978-4-87698-788-7、2009年7月)(大気レーダーと気象レーダーの優れた教科書です。インターネット上の京都大学学術情報レポジトリから公開されておりダウンロードできます。<http://hdl.handle.net/2433/49766>)

MUレーダー／赤道大気レーダーのホームページ <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/mu+ear/index.html>



図9 赤道大気レーダー全景と、日本がかかわる大気レーダーの配置