

大型レーダーで高層大気の謎解きに挑む

京大生存圏研究所 深尾昌一郎

概要

高度1万メートルを越える高層の大気はかつて目に見えるものが何もない静寂の世界と考えられていた。しかしこれに電波を当てるとその姿が鮮やかに映し出される。電波を用いるレーダーが捉えた高層大気は「波」が激しく渦巻く世界であった。地球環境変動にも深く関わっている。

1. 大気と電波とレーダー

私達の周囲には様々な電波が飛び交っている。それが証拠に至るところで携帯電話が使われている。パソコンで無線ランをやっている人も多く見掛ける。余程辺鄙なところでない限りテレビも映る。その混雑ぶりが目にみえないのは誠に幸いと言うべきである。一方、地球の大気も目には見えない。気象衛星「ひまわり」が写し出す変幻自在の画像は見るものを飽きさせない。しかし、これは雲を写しているわけで、決して背景の大気が見えているわけではない。一体、大気を見ることなど出来るのだろうか？今、大気研究の分野で電波を用いて大気を見る研究が盛んに行われている。大気は一般に、電波が通過（伝搬）する媒体であり、大気自体から強い電波が放射されるわけではない。しかし通過する電波をほんの僅か散乱する。一寸した工夫をすればそれを捉えて大気を調べることが可能となる。『レーダー』という技術を用いるのである。

レーダー (radar) は RAdio Detection And Ranging からの造語とされている。その語源が示すように強い電波を極く短い時間発射（これをパルスという）し、航空機や船舶のような標的に当てて、散乱（又は反射）されて返ってくるエコーを検出する装置である（図1）。標的方向はエコーの返ってくる方向から分かる。また電波は大気中を光速で伝搬するので、標的までの往復時間を測ると標的までの距離も知ることができる。一方、自動車の速度違反取締りにレーダーが用いられているのは既におなじみであろう。動いている物体に電波を当てるとエコーの周波数が発射電波の周波数から若干ずれる原理（ドップラー効果）を利用したもので、そのずれ（ドップラーシフト）の大きさから物体の動く速度を直接求めることができる。ここで紹介する大気を調べるレーダーも原理は同じである。ただしこのレーダーの標的はレーダー電波が通過する大気そのものというわけである [例えば、深尾・浜津, 2005]。

2. IS レーダー：高層の大気を測るレーダー

地球の大気温度が特徴的な高度変化をしていることはよく知られている。それに対応して下から順に、対流圏（地表～高度約15km）、成層圏（同15～50km）、中間圏（同50～90km）、及び熱圏（同90km以上）と区別される。熱圏では大気の一部が電離していることから電離圏と呼ばれることもある。

大気レーダーの起源は電離圏を調べるレーダーにある。アマチュア無線やFM放送に使われている数10MHz帯の電波を地上から上空に向けて発射するとどうなるか？電波は当然希薄な大気を突き抜けて宇宙の彼方へ飛び去る。しかし電離圏には多数のイオンや電子が存在する。それらが電波により揺り動かされる。とくに質量の小さい電子の揺れ動きは大きい。このため今度は、個々の電子が波源となって電波を散乱することになる。電子のランダムな熱運動のため、散乱される波の位相もランダムとなるのでこの散乱は『インコヒーレント散乱 (IS)』と呼ばれる。インコヒーレント散乱の強さはレーダーに照射される個々の自由電子が散乱する波の寄せ集めであり、当然極めて微弱である。1950年代も終わりの頃、この超微弱なエコーが当時の技術レベルで充分検知可能だと考えた若い研究者がいた。米国コーネル大学のゴードン (W. E. Gordon) である [例えば、深尾, 1993]。

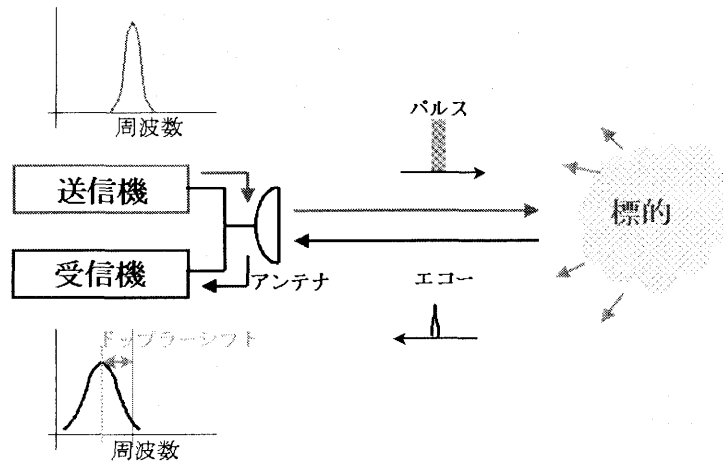


Figure 1: レーダーの原理. 得られる「情報」には標的の位置・方向・速度等様々なものがある.

レーダー電波の散乱の強さは標的の断面積に比例する. 電離圏からのインコヒーレント散乱の場合, 散乱に寄与する自由電子の断面積は航空機や船舶などとは較べものにならない程小さい. レーダーが照射する自由電子をすべて寄せ集めても高度 300km でせいぜい 10^{-4}m^2 , つまり直径約 1cm の金属球に相当する小ささである. それを検出するにはそれまで考えられたことがなかったほどの巨大なアンテナと大放射電力が必要である. しかし, 隆盛期にあった当時の米国にとってこれは甚だ魅力的な未知への挑戦であった. 早速ゴードンの予言に従って, 直径 300m のアンテナで放射電力数メガワット (MW) の送信機を持つ大型大気レーダー (これをインコヒーレント散乱レーダー, 略して『IS レーダー』と呼ぶ) がプエルトリコのアレシボとペルーのヒカマルカに建設された. 1960 年代も前半のことである [例えば, 深尾, 1993].

電離圏中の自由電子は熱運動しているので個々の電子のドップラーシフトは様々であり, エコーのスペクトル (ドップラーシフト) はレーダーの発射周波数のまわりに広く分布する. このスペクトルの形状は電子やそれと電気的に影響し合っているイオンにより定まるので, 逆にスペクトルを測定してそれらの物理量を推定することができるわけである. 例えば, 電子やイオンの密度と温度, イオンの組成, イオンが運動 (ドリフト) する速度, 中性大気の運動 (風) と温度など様々な物理量がこのスペクトルから一挙に求められる. この原理をもとに電離圏や熱圏の構造と運動の謎が次々解明された. その間に, 米国, フランス, 北欧, グリーンランドなどにも大規模な IS レーダーが続々建設された. 最近, 米国はアラスカ州に巨大な高性能 IS レーダーを建設中である. これらの IS レーダーが熱圏・電離圏研究に果たした役割は誠に大きいものがあった [例えば, 深尾, 1993].

3. MST レーダー：大気を測るレーダー

1970 年代の初めになって, 高度 70~80km から強い散乱エコーが戻ってくることが見出された. このエコーは電離圏中のように自由電子が直接散乱するものではない. 中性大気の乱れ (乱流) により大気の電波屈折率が変動するために起こる散乱である. この散乱はインコヒーレントではなく, 若干のコヒーレント性を持つため『コヒーレント散乱』と呼ばれる.

乱流は様々な大きさを持つ乱渦と呼ばれる渦の集りで表現される. 一般に乱流のエネルギーは大きな乱渦から小さな乱渦に移っていき, やがて粘性のため熱となり消える. 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乱渦だけである. 粘性でつぶれる乱渦の最小スケールは対流圏では 1cm 位である. しかし, 乱渦の最小スケールは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出来るだけ長い (周波数が低い) ほどよい. 大気圏全域をカバーするには 50MHz (波長 6m) 程度の周波数が適当とされている. この大気散乱エコーの発見は, 電離圏

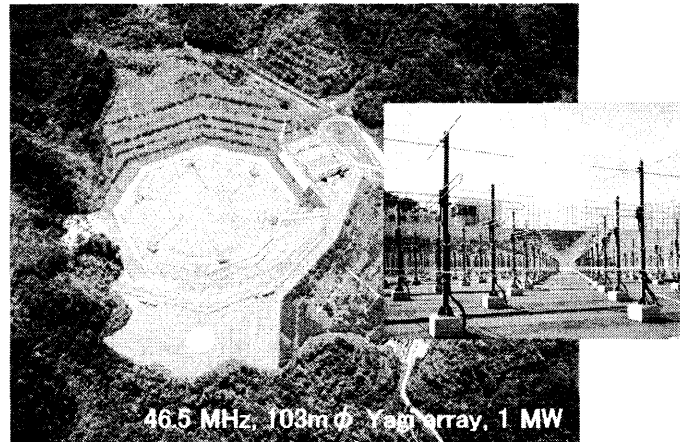


Figure 2: 京都大学 MU レーダーの全景. 滋賀県信楽町の国有林内にある. 中央の直径 100 メートルの円形内がアンテナアレイ. その周辺の 6 棟の建屋に 475 台の小型送受信機が収納されている.

だけでなくその下に広がる中性の地球大気の観測にも大気レーダーが活躍できる道を拓くものであった [例えば, 深尾・浜津, 2005].

乱渦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成分が推定できる. 鉛直流を含む風速の 3 成分は, 天頂付近の異なった 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ことになる.

上層の大気の風速を測定できるこの技術は, 当時まだ充分に理解されていなかった中層大気 (Middle atmosphere; 高度 10~100km の範囲で, 成層圏・中間圏及び熱圏下部を含む領域) の解明を目指していた研究者がすぐ着目するところとなった. このための専用の大型レーダーの建設が米国, 西独はじめ各国で始まった. このタイプの大気レーダーは中間圏 (Mesosphere), 成層圏 (Stratosphere) の一部や対流圏 (Troposphere) の観測が可能であることから, それぞれの大気圏の頭文字を取って MST, 或いは ST/T レーダーなどと呼ばれている [例えば, 深尾, 1993].

MST レーダーの標的は電離圏の自由電子に比べて相対的に大きく, しかも距離 (高度) も近いことからレーダーの規模は IS レーダー程大きくする必要はない. アンテナの大きさとして直径 100m, 放射電力は数 100 キロワット (kW) 程度あれば充分とされている. 今日では各国の MST レーダーの活躍はめざましく, 人工衛星と共に大気観測の強力な計測器として定着している [例えば, 深尾, 1993].

4. 京都大学の MU レーダー

京都大学の我々のグループも大気散乱エコーの発見と前後してこの種の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た [Kato et al., 1984]. 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; 高度 100km 以上の熱圏・電離圏) 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 100m の円形凹地に八木アンテナ 475 基を設置している (図 2). 50MHz に近い周波数が用いられているのは先に触れたように中層大気全域を観測するためである [Kato et al., 1984; Fukao et al., 1985a, b].

MU レーダーには他の MST レーダーや IS レーダーにない特徴がいくつもある. なかでも特筆すべきは, MU レーダーには巨大な送信機が見られないことである. そのかわり各アンテナにそれぞれ小さな半導体送受信機が取り付けられている. 一個の小型送受信機の発射電力は 2.4kW にすぎないが, アンテナと同数の小型送受信機を同時に働かせることにより 1MW の発射電力を得る仕組みになっている. この結果各ア

ンテナからの発射電波の位相を容易に変えることができる。この位相変化をコンピュータ制御により系統的に行うことでアンテナビーム方向を高速に変えることができる。ビームの方向変化はパルスを発射する毎に、つまり最高 2,500 分の 1 秒毎に可能であるのでほぼ瞬時にアンテナビームを望む方向に向けることができる [Fukao et al., 1985a, b]。現在に至るまで MU レーダーは時間的変動の激しい大気の乱れを観測可能な世界で唯一のレーダーである。

5. MU レーダーが捉えた大気の波

MU レーダーをはじめとする MST レーダーが観測する物理量は本質的にレーダーの真上の高さ方向の一次元量である。しかし、観測を時間的に連続に行える点が大きな特徴となっている。観測の間隔は観測高度にもよるが中層大気では 1~10 分程度である。定常気象観測で用いられる気象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 回以下であることからレーダー観測の威力を理解していただけるだろう。一般に、中層大気の現象は様々な波動——大気波動——が重なったものとして理解することが出来るので、レーダーで高さ-時間の高分解能二次元データが得られることは、解析に甚だ好都合である。以下では特に MU レーダーが解明に大きな寄与をしたひとつの大気波動を取り上げよう。

有名な葛飾北斎の富嶽三十六景神奈川沖浪裏に描かれた躍動感溢れる波の姿を思い浮かべていただきたい。水面の波は、盛り上がった水面が地球の重力によって下に引き降ろされ、その反作用で隣の水面が持ち上げられることにより水面の高低が波の形で次々前方へ伝わって行くものである。この波は地球の重力により作られる波であることから、『重力波』と呼ばれている。目には見えないが実は大気中にも水の場合と同様の重力波が存在する。例えば山並に平行してきれいな雲の列が生じているのを見ることがある。これは山越え気流が山脈を通り過ぎるときに風下に発生する大気重力波によってできるものである [例えば、深尾, 1993]。

大気重力波は水面の波と異なり、主として対流圏でつくられ大空高く伝搬して行く。高度とともに大気密度が減少するにつれ波の振幅が指数関数的に増大しついには不安定になって壊れてしまう。電波の散乱に寄与する乱流はこうして作られるのである。MU レーダーでも中層/超高層大気の至るところで大気重力波や乱流が観測されている。

では、この種の波は地球大気全体の大規模な運動にとってどんな役割を担っているのだろうか？気流が山を越えるとき、山は抵抗を受け、その反作用として山を越える気流自身にも一種の抵抗が働くことは力学の教えるところである。気流は山だけでなく、例えば雲 (上昇気流) の上を越える場合にも抵抗を受ける。気流が受けるこの減速作用は、山や雲に接した空気だけが感じるのではない。発生した大気重力波が上方へ伝搬することから、上空の高いところで吹く風もまたこの減速作用を受けることになる [例えば、深尾, 1993]。

地球規模の大気の運動として高度 60~80 キロメートルあたりを中心に夏は東風 (西向きの風)、冬は西風 (東向きの風) が吹いていることはよく知られている。しかし、ひとつの興味深い謎は、高度 80 キロメートル付近にいつも風速の非常に弱い層が存在していることであった。太陽による加熱だけで気圧分布が決まるとするとその高度で風速が弱まることはない。実はこの事実の説明に大気重力波が上方に伝搬し、ブレーキとして働いていると言う説が多く気象学者により提唱されていた。MU レーダーで観測される大気重力波について、その背景風の減速量が求められた。その結果、確かに東風が吹く夏には東向きの、西風の吹く冬には西向きの抵抗が発生し、背景風を減速することが明かとなり 10 年来の謎が解明された [Tsuda et al., 1990]。

大気レーダーが本格的な観測を始めた 1970 年代のはじめまで、中層大気は何も起こらない静寂の世界と考えられていた。しかし実態は大気重力波の荒れ狂う世界であることが明らかになりつつある。中層大気中で物質やエネルギーを運ぶ主な担い手がこれらの波であることも明らかになりつつある。しかし、これらの波が一体どこで発生しているのか？上で触れた、山岳のほか、積雲対流や台風、或いは前線などでも大気重力波は作られているらしい。ではその強さや地域による分布は一体どうなっているのか？大気重力波はまだまだ我々を魅して止まない。

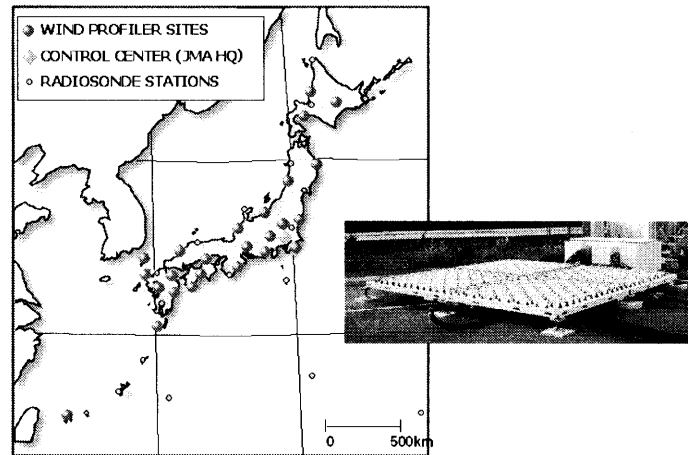


Figure 3: 京都大学で開発された小型大気レーダー．平成 13 年 4 月気象庁ウインドプロファイラ観測網『WINDAS』に採用され全国展開された．

6. 気象予報への応用

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ことは上で述べた．それはいわば、スリットカメラで撮る写真にも似ている．一方、我々は、中緯度ではお天気が西から変わることを知っているが、これは気象現象が西から東に向かって移動することによる．地上に固定された MU レーダーの上を気象現象が動いていくわけである．このことを利用して高さ-時間データを現象の東西構造に読み換えその高さ-東西距離断面を推定することができる．同種の現象を幾例も観測してやればこうした断面図が多数得られるわけでその現象の立体的構造が解析される．MU レーダーで目に見えない気象現象の立体構造が解明される訳である．

これまでに、台風の眼や梅雨前線の立体構造、さらに水平スケールが数 1,000km の温帯低気圧に伴った冷たい空気の渦 (寒冷渦) の構造などが詳しく調べられている．MU レーダーが初めて明らかにした対流の鉛直流変動は極めて複雑で、雲が小規模なものから大規模なものに変化 (組織化) して行く過程が克明に捉えられた．将来、これらの成果が集中豪雨の解明に繋がるのではないかと期待されている．既によく分かっているとされてきた諸現象が、新しい観測技術の進歩でその神秘のベールを脱いでゆく [深尾・浜津, 2005]．

一方、日米欧では MST レーダーの観測上限高度や分解能を許せるだけ犠牲にした簡便なレーダーシステムが『ウインドプロファイラー』として開発されている．手軽に風を測れる標準的な可搬機を開発することのほか、これを多数ネットワークして気象予報に用いることが大きな目的である．我が国の気象庁は、平成 13 年 4 月よりウインドプロファイラーによる新しい高層風観測網『WINDAS』の運用を開始した．同庁は全国 18 地点において従来から気球 (レーウィンゾンデ) を用いた高層気象観測を実施している．ウインドプロファイラーはこれを補完するように、全国 31ヶ所に配置され、遠隔制御によって自動観測を行うものである．観測データは 1 時間毎に気象庁本庁に送られ、現業の気象予報モデルの初期値として利用されている．同庁はこれにより予報の難しい局地的な豪雨や豪雪の予報精度の向上を図っている [深尾・浜津, 2005]．

実は WINDAS に採用された 31 台のウインドプロファイラーは我々がほぼ 10 年の歳月をかけて開発した小型大気レーダー (図 3) である [Hashiguchi et al., 2004]．先述の MU レーダーで培った技術で開発されたもので、高度 5 km までの下部対流圏の風を高い精度と分解能で計測できる．大学の研究室で生まれた技術が発展して天気予報という我々の身近な用途に用いられることになったわけである．

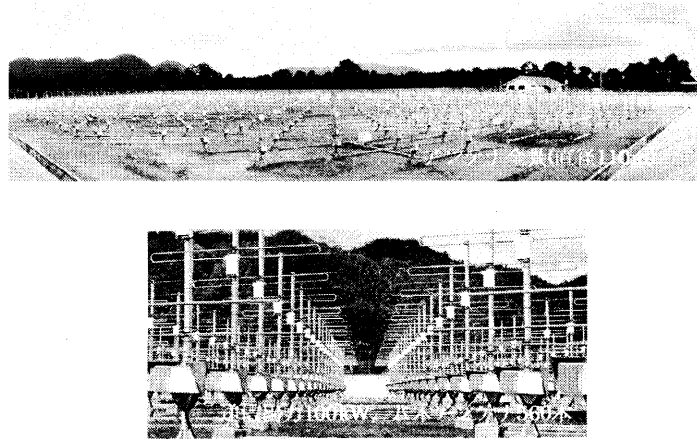


Figure 4: 平成 13 年 3 月赤道直下に完成した京都大学の赤道大気レーダー (EAR)

7. 新しいフロンティア—赤道大気の謎に挑戦

大気レーダーの進歩はまさに日進月歩と言ってよからう。今後も地球環境問題などに対する関心の高まりから、一層広く展開が進められるだろう。特に、地球規模の大気循環の源である赤道域の大気レーダー観測は世界中の研究者の関心の的である。なかでもインドネシア近辺は世界で最高温の海洋に無数の島が浮かぶ『海洋大陸』となっている。その上空は活発な積雲対流に伴う激しい上昇気流によって水蒸気はじめ様々な物質が中層大気へ運ばれる回廊の役割を果たしているらしい。一般に、互いに混じりにくい対流圏と成層圏の大気がインドネシアの上空で混じり合っているわけである。成層圏のオゾン層を破壊するフロンもここから入り込み、成層圏内に広がって南極まで運ばれ、オゾンホールを作っていることがわかっている。赤道域はことのほか大気波動の活動も盛んであり、これらの物質の輸送にも関与しているはずである。海洋大陸域の大気の振舞いは、赤道域にとどまらず地球全体の環境変動に大きな影響を及ぼしているのである。しかしながら未だこの地域での観測データは極めて少ない [例えば、深尾, 1993]。

去る平成 13 年 3 月、我々のグループは同国スマトラ島の赤道直下のプキティンギ市郊外コトタバンに『赤道大気レーダー (Equatorial Atmosphere Radar; EAR)』(図 4) を建設した [Fukao et al., 2003]。赤道域大気の解明を目指して最初に構想されて以来 10 余年を経て漸く実現したものである。このレーダーは MU レーダーほど強力ではないが、それでも赤道大気を地表近くから高度 20km まで一気に調べることができる。あわせて電離圏大気も一部観測できる。EAR は、既に、赤道域固有の大気波動が対流圏と成層圏の境界域で両者の大気の混交に重要な役割を演じている証拠を捉えている。

EAR の運用は同国航空宇宙庁 (LAPAN) と共同で行われている。我が国の大学が外国で運用する初めての大型設備となり、先駆的な学術成果とともに新しい形態の国際共同研究としてその進展が期待されている。

参考文献

深尾昌一郎, 大型レーダーで高層大気を捉える, 科学, 63, 179-186, 1993.

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 頁, 平成 17 年 3 月.

Fukao, S., S. 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.

Fukao, S., T. Tsuda, S. 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.

- 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.
- 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.
- Kato, S., T. Ogawa, T. Tsuda, T. Sato, I. Kimura, and S. Fukao, The Middle and Upper atmosphere radar: First results using a partial system, *Radio Sci.*, *19*, 1475-1484, 1984.
- Tsuda, T., S. Kato, T. Yokoi, T. Inoue, M. Yamamoto, T.E. VanZandt, S. Fukao, and T. Sato, Gravity waves in the mesosphere observed with the MU radar, *Radio Science*, *25*, 1005-1018, 1990.