

大気レーダー観測原理の確立について思うこと

加藤 進*

1. ことの始まりと経過

レーダー観測は第二次世界大戦中、英米でのレーダー技術の完成に始まったが、観測対象が、大気、電離層に向けられたのは戦後のことだ。これに寄与したのは物理屋、気象屋、電離層屋達だが、特に観測原理への理解と興味は彼等の間はかなり大きな違いがある気がする。著者は1950年以来この課題に関わった。著者は地球物理学教室の学生だったが、わが教室の講義にはほとんど出席せず、専ら数学教室、物理学教室の講義に出席したので、地球物理学教室の先生の覚えは良くなかったようだ。でも、この多面性のある課題に強い興味を持ったのは著者の学生時代の学び方によるかも知れない。

1950年代、工学部の電子工学教室に技官として雇われ、IGY (International Geophysical Year, 国際地球観測年) に備えた電離層観測器の組み立てに携わりながら、この課題研究に、電子工学専攻の学生と共に興味を持った。このころ、対流圏乱流による電波の散乱を用いた通信が実用化していた。たまたま見つけた Physical Review に載った米国の物理屋の論文 (Villars and Weisskopf 1954) を読み興味を持ったが、やがて疑問も感じた。この論文は大気乱流の電波散乱断面積の導出で、電波エコーの発生原因も論じていた。この論文の著者達は物理屋さんなので、電波の屈折率 (refractive index, 略して RRI, N と示す) は大気密度、水蒸気の関数で、基本的には高さと共に変化することに気が付かなかっただろう。上下運動する乱流で RRI, N の乱れが発生し、それを照射する電波パルスが散乱し、電波エコーが発生する。divergence-free の乱流 (速度) を仮定したので、乱流が RRI, N の乱れを発生させることの説明に苦労していたようだ。それでも彼等は物理屋さんなので Heisenberg の乱

流理論 (Heisenberg 1948) を電波散乱に応用することに興味を持ったのだろう。彼等はいまでも役立つ散乱断面積を正しく導出した。レーダー電波波長と散乱に与る乱流スケールの関係なども明らかにした。だが、乱流による対流圏通信は衛星通信の時代到来で影をひそめた。

2. MU レーダー、赤道レーダー、南極レーダーの観測原理

1960年、IGY の到来に合わせて、先ずインコヒーレント散乱・レーダー (IS レーダー) が米国で建設された。高出力のパルスレーダー技術開発に成功したおかげだ。この大型レーダーは高出力のパルスを電離層プラズマに打ち込み、プラズマが散乱する超微弱なインコヒーレント・エコーを受信し、そのドップラー・スペクトルを解析し、プラズマの速度、成分、密度を観測できるレーダーだ。ペルーに建設された IS レーダーは、1970年代、電離層観測中、電離層より低高度の中間圏から、電離層プラズマからのインコヒーレント・エコーでない強いコヒーレント・エコーを発見した。これが新しい大気観測レーダーの誕生に繋がった。つまり IS レーダーと同様なシステムだが、sensitivity (アンテナ開口面積×平均出力) が 1/10以下のレーダーで、中間圏 (Mesosphere)、成層圏 (Stratosphere)、対流圏 (Troposphere) 観測に適したレーダーで、これらの頭文字を取って MST レーダーと呼ばれる。MST レーダーは、中層大気国際協同観測計画 MAP (Middle Atmosphere Program 1982-85) の目玉事業として各地で建設された。日本のものは、MST レーダーとしては最大級で、レーダー・ビームの方向を高速で振れるコンピュータ制御の MU (Middle and Upper atmosphere) レーダーが1984年、滋賀県信楽に完成した。さらに2001年、同様なシステムだが小型の赤道レーダー (EAR: 正確に言えば MST レーダーでなく、

* Susumu KATO, 京都大学名誉教授.

© 2012 日本気象学会

STレーダー)がスマトラに完成,そして,南極レーダー(PANSY)が昭和基地に,ごく最近完成すると聞いている. MUレーダーと南極レーダーはMST大気観測の他,小型インコヒーレント・レーダーとして,電離層プラズマの観測もできる. 残念だが,母体のISレーダーの観測原理はプラズマ物理屋,電波工学屋の素晴らしい研究で確立したが,MSTレーダーの観測原理はまだ確立していない. いまでも「エコーは乱流で発生し,それを風が運ぶ」と簡単に思われているのではないか. エコーはRRI,Nの乱れで,RRI,Nの成分は対流圏,成層圏,中間圏では異なり,その動きにも実体の動きだけではなく波動の伝搬もありうる. また中間圏ではエコー成分は電子であるから,地球磁場がエコーの動きに影響する. このような状況を著者の論文(Kato 2009)をもとにしてエッセイ調に簡単に以下で述べたい.

MSTレーダーは大気乱流によるRRI,Nの乱れの電波散乱エコーを受信し,ISレーダー同様にドップラー・スペクトルを求める. エコー強度の推定では,上述したように1950年代のVillars and Weisskopf (1954)の研究が利用できる. しかし風速の観測原理はまだ確立されていない. この問題は「電波エコーが風と共に移動する(co-movement)のは本当か? 本当ならば何故か?」だ. かつて気象屋には「風速はレーダーでは測れない」と主張する者もいた. 実は1983年夏,気象屋であるHolton, Lindzen, Fritts, 廣田 勇の各氏と電離層屋であるWoodman氏,著者が,アラスカの山中にこもり,この問題を大議論した. この時,問題解決には至らなかったが,気象屋のレーダー観測への理解が高まったと思う. ここで明らかにしたいことは,日本では1960年代後半,気象屋,電離層屋,電波工学屋から成る大気観測レーダー建設研究グループがすでに結成されていたことだ.

MUレーダー建設後,対流圏観測に関しては,レーダーエコーのドップラー速度とラザオゾンデ観測の風速とは一致することが判明した. つまりco-movement予想の正しさが確認された. 成層圏については,ゾンデ観測は実現していないので,co-movementの確認なし. だが,理論的予想はこうだ. 成層圏下部のRRI,N成分は大気分子であり,RRI,Nの乱れの動きは当然乱流と同じであるはずだから,乱流がdivergence-freeなので,co-movementが成立する予想が成り立つ. つまり,連続方程式で $DN/Dt=0$ となり,co-movementが証明され

る(Holton 1992). この数式表現はRRI,Nの乱れの輸送は乱流(divergence-free)の場合のみ成立し,RRI,Nの乱れが大気の流れとともに運ばれることを示す. 若し乱れが波動ならば,divergenceがnon-zeroになり, $DN/Dt \neq 0$ となる. 乱流のdivergence-freeは仮定(Batchelor 1953)だが,成層圏観測では大気乱流について成立が確認されている. この問題はMUレーダーの完成時,気象屋,電離層屋で大いに議論した記憶があるが,どこにも記録が残っていない.

上部成層圏,中間圏では事情が全く違う. 電子から成るRRI,Nの乱れによる電波エコーの発生は,電子密度の垂直勾配の存在から理解できるが,co-movementは簡単に予想できない. 通常,電子は地球磁場 \mathbf{B}_0 を横切って動くことはできない. だが,もし電場があれば \mathbf{B}_0 支配は弱まる. まず乱流によって運ばれるものは,電子でなく,イオンであることだ. このイオンだけが勝手に移動しようとするれば,電場が発生する. 確かにイオンは中性大気との衝突で駆動され,120km以下の高度では,風(中性大気の動き)とco-moveする. プラズマの電子,イオンは常に同数でなければ安定しないので,電子を置き去りにして,イオンだけが風とco-moveしようとするれば,電離層プラズマの数密度分布に勾配があるために,電子とイオン密度の分布にずれが起こることになる. 実際はこのずれの発生を避けようとして,分極電場 \mathbf{E}_p が発生し,電子も駆動される. 通常,乱流速度を \mathbf{W} とすると $\mathbf{E}_p + \mathbf{B}_0 \times \mathbf{W} = \mathbf{0}$ が成立し,強い \mathbf{E}_p が発生し,電子とイオンは完全にco-moveすることになる. そうなれば目出度く中間圏でも風のレーダー観測ができることになる. \mathbf{E}_p は電子密度と分布の勾配に依存し,従って結局,乱流の強度とサイズに依存するから,時には,完全にco-movementが成立しないことも在り得る. このco-movementが不成立になれば,観測速度に誤差がおこる. また面白いのは,この \mathbf{E}_p は磁力線に沿って超高層,さらに磁気共役点までも伝搬するかもしれない. つまり大気の電磁学的結合が起こる可能性もある. 南極ではさまざまな電磁的擾乱が多いから, \mathbf{E}_p に関する観測とシミュレーションの研究が必要だろう.

3. おわりに

MUレーダーが1984年完成,赤道レーダーは2001年完成. 南極レーダーもごく近いうちにフルシステム

が稼働するだろう。これで、約30年に亘る長年月をかけて、年代の違う多数の気象学者、電離層理工学者が協力し、共通の興味を持ち続け、遂に、日本製の大気観測レーダーがグローバルに配列されたことになる。

この事業の完成は大気研究の発展に大きな意義を持つと思う。それに関連して、MUレーダー建設の発案者として、今やレーダー観測原理を確立させる重要性を肝に銘じている。

参 考 文 献

Batchelor, G. K., 1953: The Theory of Homogeneous

Turbulence. Cambridge Univ. Press, 197pp.

Heisenberg, W., 1948: On the theory of statistical and isotropic turbulence. Proc. Roy. Soc., **A195**, 402-406.

Holton, J. R., 1992: An Introduction to Dynamic Meteorology. Academic Press, Third ed., 511pp.

Kato, S., 2009: Validity on radar observation of middle- and upper-atmosphere dynamics. Earth Planets Space, **61**, 545-549.

Villars, F. and V. F. Weisskopf, 1954: The scattering of electromagnetic waves by turbulent atmospheric fluctuations. Phys. Rev., **94**, 232-240.