

リモートセンシング

I. レーダー*

上田 博**

1. はじめに

「雲の中で何が起きているか?」は長い間気象学研究者が抱き続けてきた疑問であるが、最近の気象観測方法の進歩、特に気象レーダーの発展によってこの疑問が解かれつつある。気象レーダーで得られる雲内の情報は、積雲スケールの問題から気候変動の問題までを考える上で不可欠なものになりつつある。また、数値モデルや気象衛星の利用技術の発展のためにも重要なものとなりつつある。さらに、気象レーダーは雲や降水のない場合の気流の観測にも利用されはじめている。そこで、発展のめざましい、マイクロ波レーダーを中心に気象レーダーの1980年以降の研究発展の方向をいくつかの項目に分けて紹介し、気象学の研究に気象レーダー及び気象レーダーデータをどの様に利用したら良いかを考える一助にしたい。

2. レーダーの分類

レーダーとは、電波のエコーをみて目標物の方向と距離を検出する装置のことである。従来、気象学の分野で“レーダー”といえば、気象研究ノート¹⁾²⁾³⁾⁴⁾にみられるようにマイクロ波の通常気象レーダーであり、風の測定のできるレーダーは“ドップラーレーダー”と言って区別されてきた。ドップラーレーダーに関しては、気象研究ノート、総合報告⁵⁾⁶⁾や教科書⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾が多数出版されている。その他1~2年毎に開催される、国際レーダー気象学会議のプレプリント等が参考になる。最近では、ドップラーレーダーだけでなく、マイクロ波の偏波を利用したり、直交2偏波の送受信波の位相差を測定して降水粒子の形状の空間分布も観測されるようになった。その他にも、多種多様な気象レーダーの多彩な利用方法が開発されつつあるので、まず、気象レーダーの分類をこころみる。

2.1 波長による分類

目標とする散乱体の大きさによって使用するレーダーの波長が異なる。気象観測用に割り当てられている電波の波長は限られている。霧粒などの小さな降水粒子を対象とする場合には、ミリ波帯($\lambda=8.6\text{ mm}$)のレーダーが使用される。海霧の観測¹²⁾などに使用されたが、観測例は少ない。雨粒や雪粒を散乱体として観測する場合にはマイクロ波レーダーが使用される。対象とする降水粒子の大きさによって、2.2, 3.2, 5.6, 9.8 cm等の波長のレーダーが使い分けられている。これらのレーダーは、レイリー散乱を仮定してレーダー反射因子の測定から降水強度を推定している。波長の短いものほど降雨減衰の影響を受ける。減衰の影響が少ない限り、通常パラボラアンテナを回転(スキャン)させて降水域を面的(空間的)に観測することができる(波長に応じて通常半径40~400 km)。

従来、特に日本では、レーダーで降水強度を測定することに主眼がおかれてきたが、長い波長を用いた、大気の流れを散乱体にするレーダー観測もなされるようになってきた。VHF帯のウインドプロファイラー等¹³⁾がそれである。散乱体からの反射強度の鉛直時間断面などから大気の成層構造などが解析される。

2.2 機能による分類

以上述べたのは、レーダーの受信電力の強度測定に関してのみである。近年確立した方法は、散乱体からの受信信号の位相情報を用いて降水粒子の移動速度、すなわち(降水粒子は風に流されていると考えているので)、風を測定するものである。原理や解析方法については前出の出版物¹⁻¹⁰⁾が参考になる。また、降水粒子の種類・形状や降水量の推定に関する研究も新たな観点から進歩している。

2.2.1. ドップラーレーダー

ドップラー速度はレーダーの視線方向の風の成分を示すものであるから(通常半径150 km以内)、一台のドップラーレーダーで風ベクトルや収束発散量を求めるためには種々の工夫が必要である。高い仰角でのアンテナの水平スキャンにより、一様風を仮定して風の鉛直プロ

* Remote Sensing, I. Radar.

** Hiroshi Uyeda, 北海道大学理学部.

ファイルを求める VAD (Velocity Azimuth Display) 法⁷⁾¹⁴⁾ (高次の項を考えると風の発散量や変形についても情報が得られる), 2 仰角のアンテナスキャンにより扇形領域の風の諸量を求める VVP (Volume Velocity Processing) 法¹⁵⁾ などがある。これらは広く普及しているので, 解析ルーチンを提供してくれる研究者は多い。また, 現業観測を念頭に置いた, シアーラインや竜巻の検出方法等についても多くの研究がなされるようになった¹⁶⁾¹⁷⁾¹⁸⁾。アンテナの鉛直スキャンにより風の場の鉛直構造を観測したり, 2 次元性を仮定できる場合には上昇流の分布も計算されている。最近では, 一台のドップラーレーダーによる観測解析方法は米国の NEXRAD (Next Generation Weather Radar) 計画によってルーチンが蓄積され現業でも利用されるめどが立ちつつある¹⁹⁾²⁰⁾。残された問題は, 日本のように地形の複雑な場所などにおける特殊目的に応じた観測解析方法の開発である。もちろん一台のドップラーレーダーをもちいた観測研究は日本でも盛んになされてきた²¹⁾²²⁾²³⁾²⁴⁾。

2 台以上のドップラーレーダーを用いることにより, 気流の 3 次元的な構造が測定できる。米国では複数台のドップラーレーダーを用いた研究が常識になっている。ドップラーレーダーを用いた研究という総括的なレビュー²⁵⁾²⁶⁾は 1980 年代前半までは可能であったが, 最近では, ドップラーレーダーを用いた研究を各気象現象ごとに整理するだけでも大変なほど多くの研究がある。日本でもいくつかのグループがドップラーレーダーを持ち寄って共同観測がなされるようになり²⁶⁾²⁷⁾, この分野の研究の発展はめざましい。各グループとも 2 台のドップラーレーダーのデータをもとに気流系を求める解析ルーチンを持つに至った。ここ数年の内に膨大なデータが蓄積されるので, この分野に多数の研究者が参加して, 種々の角度から解析研究を進めることが期待される。

降水のないクリアーエアでも, ドップラーレーダーの波長が 10 cm 程度に長くなると, 乱流からの散乱により大気境界層内の気流系を測定することができる²⁸⁾。もちろん, ウインドプロファイラーはドップラー機能を持っているので, 風の鉛直プロファイルを得ることができる。晴天大気の観測研究はドップラーレーダーやラズレーダーの発展もあり, 急速に研究が進んでいる。

2.2.2. マルチパラメーターレーダー

雲内の力学的な場を測定するドップラーレーダーに対して, 降水量の測定や降水粒子の形状の識別を行なう偏波レーダーや 2 周波レーダーの研究もなされるようにな

った。これらのレーダーは, 1991 年 6 月にパリで行なわれた国際レーダー気象学会議では, マルチ・パラメーター・レーダーとして総称されていた。いよいよ 2 周波や偏波その他の機能を総合して観測研究に利用する時代にはいったといえる。

2 周波レーダーは二つの波長による後方散乱強度の差を用いて降水粒子の種類や粒径分布を推定するものであり, 直交 2 偏波レーダーは直交する 2 つの偏波による後方散乱強度の比から降水粒子の形状を推定するものである。最近話題になっているのは, 直交 2 偏波の減衰の違いを位相差から評価しようと言うものである²⁹⁾。雹と雨粒の識別が可能だとされている³⁰⁾。これらの全ての機能を 1 台のレーダーにそなえるなら降水粒子の形状と降水量の正確な評価が可能になると期待されている。但し, 日本では, 土木研究所³¹⁾と北大理学部³²⁾に直交 2 偏波・ドップラーレーダーが導入され研究が開始されたばかりである。なお, 各国のマルチパラメーターレーダーの諸元等については一覽表³³⁾があるが年々機能が更新されている。

2.3 観測場所による分類

通常の気象レーダーは陸海空のどこでも観測されている。降雨域をみる気象レーダーは通常見晴らしの良い山の上や高い塔の上に設置されているが, 下層のシアーを観測する必要がある空港監視用のドップラーレーダーなどは平地に設置されることになる。

観測領域が固定される地上レーダーに比べると, 自由に観測範囲を選べる航空機搭載型のドップラーレーダーは, 台風の内部構造の観測等に有効である³⁴⁾。しかし, 航空機搭載型のドップラーレーダーは, 地面や海面の散乱の影響などもあり, 地表付近の観測には適さない。また, 3 次元的な気流系の解析には多くの工夫を要する³⁵⁾。従来は, 飛行機の後尾のパラボラアンテナを飛行機の進行方向に直角に回転させ, L 字形に飛行経路をとり, レーダービームの交差する点の風向・風速を求めていた。最近ではアンテナの回転を前方・後方に交互に傾け直線飛行でも気流系の測定ができるように工夫がなされている。

しかし, 気象観測専用の飛行機を持たない日本では航空機搭載のドップラーレーダーを持つには時間がかかるかも知れない。また, 船の上にドップラーレーダーを乗せる方法の研究は非常に遅れている。厳密に 2 台のドップラーレーダーの姿勢を制御して観測を行い得る船舶搭載用のレーダーはまだ開発されていない。一方, 衛星

搭載型のレーダーは、また、通常レーダーであるが、TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission)³⁶⁾で計画している衛星搭載のレーダーによる降水量観測にたいする期待は大きい。

3. レーダー観測網の展開

レーダー観測では各種のレーダー観測網をどの様に展開するかが大切である。現業用のレーダーは各国とも独自のネットワーク³⁷⁾³⁸⁾を持っている。米国ではいよいよドップラーレーダー網が現業観測用に展開されるはこびとなりつつある。日本では、気象災害や水収支に関係した研究には、ルーチンで連続的に観測しているレーダーのデータを利用するのが便利である。気象庁のレーダーがほぼデジタル化され³⁹⁾、建設省や特定の地方自治体でもレーダーのデータをデジタルで収録しており、今後、気候学的な研究にもデータを使用することが可能になると考えられる。日本も、一歩進んで現業観測用にもドップラーレーダーの導入が必要な時期にきている。

一方、研究観測には目的に応じた観測網の展開が不可欠である。積雲群内の3次元的な気流系の観測には複数台のドップラーレーダーを適当な間隔で設置する必要がある。日本においても複数台のドップラーレーダーを用いた観測がここ5~6年前から行なわれている。しかし、レーダーの数がまだ不十分なこと、移動型のドップラーレーダーのほとんどが波長3cmのレーダーであるために観測領域が限られ、降雨減衰の影響を受けるなどの問題点も残されている。また、降水粒子の識別や降水量の正確な見積りをするためのマルチパラメーターレーダーの数が不十分である。個々のレーダーで全ての観測が一度にできるわけではないので、できるだけ多くの種類のレーダーを多数集めて同時観測を行なう必要がある。どのようなレーダーをどう組み合わせるとどのようなオペレーションを行なうかといった、レーダー観測方法自体の研究も今後の課題である。さらには、目的指向型の観測計画作りも必要である。

4. ドップラーレーダーデータの利用方法

ドップラーレーダーの観測はメソスケールからメソβスケールの気象擾乱の構造の解明に威力を発揮している。ドップラーレーダーの観測データを用いて、3次元的な気流系が解析されると、数値モデルの計算結果と比較したり、数値実験の初期条件に利用したりすることが可能である。このことは、雲物理学の教科書⁴⁰⁾にドップラ

ーレーダーの観測・解析結果が多数引用されていることでも分かる。また、さらに進んで、ドップラーレーダーで得られる3次元的な気流系をもとに、積雲内の温位、気圧、水蒸気量、雲水量の復元を行なうリトリーバル法⁴¹⁾⁴²⁾⁴³⁾等も開発されている。これらの研究が確立すると擾乱内の空気塊のトラジェクトリー解析や降水粒子の成長過程を追跡する研究が発展すると考えられる。この段階になると、マルチパラメーターレーダーの観測データを活かして、メソスケールの擾乱の雲物理過程から積雲群の発達過程までの統一した理解を行なうことができるようになる。さらに、VHFレーダー等を駆使し降水のない領域の気流も測定し、今後打ち上げられるマイクロ波放射計搭載の気象衛星データも同時に直接比較することにより、熱帯から極域にわたる、気象現象の階層構造の本質が解明され、ひいては気候変動の解明にも糸口を見つけることが可能になると考えられる。

5. おわりに

レーダーの観測方法を中心とした説明になってしまい、必ずしも日本におけるレーダー関連の研究の明るい展望については述べることはできなかった。これは、日本ではまだ、レーダーの観測データを研究者が自由に入手できるようにはなっておらず、特にメソスケールの気象現象の研究に使用するデータはレーダーを使用する研究者がメンテナンスから観測解析まですべて行なわなければならない厳しい研究環境であり、データ提供のサービスを行なう体制にはなっていないためである。しかし、今後現業観測にドップラーレーダーやマルチパラメーターレーダーが利用されるようになると、データ量は膨大なものになり、研究解析をする人の数が必要となると考えられる。

レーダーで取得するデータが質量ともに膨大なものとなると、研究のねらいによってデータを使い分けることも重要になると考えられる。これからレーダーを利用した研究を目指す人は、レーダーに関する一通りの知識が必要になると考えられるので、全体を総括したような本⁶⁾を参考にすると良いと考えられる。目的が決まっている場合には、これまでに挙げた参考図書を参照して頂きたい。すでに研究に取り組みはじめた方は、気象学会内のメソ気象研究会等種々の場で実際の研究成果を基に議論を深めていただきたい。

気象レーダーに関連した研究の発展と現業での新しいレーダーの積極的導入を祈って止まない。

参考文献

- 1) 日本気象学会, 1967: 気象レーダ特集, 気象研究ノート, 90, 243 pp.
- 2) 日本気象学会, 1972: 気象レーダ特集, 気象研究ノート, 112, 171 pp.
- 3) 日本気象学会, 1980: 気象レーダ特集, 気象研究ノート, 139, 144 pp.
- 4) 立平良三, 1974: レーダー観測と解析, 気象研究ノート, 120, 1-41 pp.
- 5) 気象研究所, 1986: ドップラーレーダーによる気象海象の研究. 気象研究所技術報告, 19, 243 pp.
- 6) Atlas, D., 1990: Radar in Meteorology, Amer. Meteor. Soc., 806 pp.
- 7) Battan, L.B., 1973: Radar Observation of the Atmosphere, The University of Chicago Press, 324 pp.
- 8) Gossard, E.E. and R.G. Strauch, 1983: Radar Observation of Clear Air and Clouds. Elsevier, 280 pp.
- 9) Doviak, R.J. and D.S. Zrnić, 1984: Doppler Radar and Weather Observation. Academic Press, 458 pp.
- 10) Collier, C.G., 1989: Applications of Weather Radars Systems, Ellis Horwood Limited, 294 pp.
- 11) Burgess, D. and P.S. Ray, 1986: Principles of Radar, Mesoscale Meteorology and Forecasting, Amer. Meteor. Soc., 85-117.
- 12) 海霧研究グループ, 1985: 釧路地方における海霧の観測. 天気, 32, 41-52.
- 13) Rottger, J. and M.F. Larsen, 1990: UHF/VHF radar techniques for atmospheric research. Radar in Meteorology. Amer. Meteor. Soc., 235-281.
- 14) Wood, V.T. and R.A. Brown, 1986: single doppler radar signature interpretation of nondivergent environmental winds. J. Atmos. Oceanic Tech. 3, 114-128.
- 15) Koscielny, A.J., R.J. Doviak and R. Rabin, 1982: statistical considerations on the estimation of divergence from single-Doppler radar and application to prestorm boundary layer observations. J. Appl. Meteor., 21, 197-210.
- 16) Uyeda, H. and D.S. Zrnić 1986: automatic detection of gust fronts. J. Atmos. Oceanic Tech. 3, 36-50.
- 17) Uyeda, H. and D.S. Zrnić, 1988: fine structure of gust fronts obtained from the analysis of single doppler radar data. J. Meteor. Soc. Japan, 66, 869-881.
- 18) Vasiloff, S.V. 1991: The TDWR Tornadic vortex signature detection algorithm. 25 th Intl. Conf. on Radar Meteorology, J43-J48.
- 19) Alberty, R., L.C.T. Crum and F. Toepfer., 1991: The NEXRAD program: past, present and future; a 1991 persepective. 25 th Intl. Conf. on Radar Meteorology, 1-8.
- 20) Moore, J.A., L. Cornman and Cleon Biter, 1991: terminal Doppler weather radar program at Denver's Stapleton International Airport during 1989 and 1990. 25 th Intl. Conf. on Radar Meteorology, J21-J26.
- 21) Ishihara, M., H. Sakakibara and Z. Yanagisawa, 1989: Doppler radar analysis of the structure of mesoscale snow bands developed between the winter monsoon and the land breeze. J. Meteor. Soc. Japan, 67, 503-519.
- 22) Sakakibara, H., M. Ishihara, and Z. Yanagisawa, 1988: squall line like convective snowbands over the Sea of Japan. J. Meteor. Soc. Japan, 66, 937-953.
- 23) Tsuboki, K., Fujiyoshi and G. Wakahama, 1989: Doppler radar observation of convergence band cloud formed on the west coast of Hokkaido Island. II: cold front type. J. Meteor. Soc., 67, 985-999.
- 24) Shirooma, R. and H. Uyeda, 1991: Doppler radar observation of tornado and microburst around chitose airport. 25 th Intl. Conf. on Radar Meteorology, J73-J76.
- 25) 上田 博, 1986: 最近のドップラーレーダーの利用研究の現状. 防災科学技術研究資料, 111, 61 pp.
- 26) Ishihara, M., Z. Yanagisawa, H. Sakakibara, K. Matsuura and J. Aoyagi, 1986: structure of a typhoon rainband observed by two Doppler radars. J. Meteor. Soc. Japan, 64, 923-939.
- 27) 浅井富雄, 1990: 集中豪雨のメカニズムと予測に関する研究. 文部省科学研究費重点領域研究, 「自然災害の予測と防災力」研究成果, 458 pp.
- 28) Tuttle, D. and G.B. Foote, 1990: Determination of the boundary layer airflow from a single Doppler radar. J. Atmos. Oceanic Tech. 7, 218-232.
- 29) Bringi, V.N., V. Chandrasekar, N. Balakrishnan and D.S. Zrnic', 1990: An examination of propagation effects in rainfall on radar measurements at microwave frequencies. J. Atmos. Oceanic Tech. 7, 829-840.
- 30) Balakrishnan N. and D.S. Zrnic', 1990: Estimation of rain and hail rates in mixed-phase precipitation. J. Atmos. Sci., 47, 565-583.

- 31) 吉野文雄, 1990: 直交2偏波レーダーによる降水現象研究の動向. 天気, 37, 145-159.
- 32) Uyeda, H., R. Shirooka, K. Iwanami, A. Takemoto, K. Kikuchi, G. Yoshida and M. Okazaki, 1991: Observation of vertical structures of convective snow clouds with a dual-polarization radar in Hokkaido, Japan, 25 th Intl. Conf. on Radar Meteorology, 717-720.
- 33) Bringi, V.N. and A. Hendry, 1990: technology of polarization diversity radars for meteorology. Radar in Meteorology. Amer. Meteor. Soc., 153-190.
- 34) Marks, F.D. Jr. and R.A. Houze, Jr., 1987: inner core structure of Hurricane Alicia from airborne Doppler radar observation. J. Atmos. Sci. 44, 1296-1317.
- 35) Jorgensen, D.P. and J.D. DuGranrut, 1991: A Dual-beam technique for deriving wind fields from airborne Doppler radar. 25 th Intl. Conf. on Radar Meteorology, 458-461.
- 36) Simpson, J., 1988: Report of the Science Steering Group for a Tropical Rainfall Measuring Mission. NASA, 94 pp.
- 37) Kodaira, N. and J. Aoyagi, 1990: History of meteorology in Japan. Radar in Meteorology, Amer. Meteor. Soc., 69-76.
- 38) Cheze J.L., J. Tardieu and M. Gilet, 1991: The French water radar network, 25 th Intl. Conf. on Radar Meteorology, 17-20.
- 39) 迫田俊一, 1990: 気象レーダーのデジタル化について. 天気, 37, 659-670.
- 40) Cotton, W.R. and R.A. Anthes, 1989: Storm and Cloud Dynamics. Academic Press, 883 pp.
- 41) Ziegler, C.L., 1985: Retrieval of thermal and microphysical variables in observed convective storms. Part I: model development and preliminary testing. J. Atmos. Sci., 42, 1487-1509.
- 42) Hauser, D., F. Roux and P. Amayenc, 1988: Comparison of two methods for the retrieval of thermodynamic and microphysical variables from Doppler radar measurements: application to the case of a tropical squall line. J. Atmos. Sci., 45, 1285-1303.
- 43) Ziegler, C.L. and D.R. MacGorman, 1991: A model evaluation of noninductive graupel-ice charging in the early electrification of a mountain thunderstorms. J. Geophys. Res., 96, 12, 833-12, 855.



宮澤清治著

「最新天気図と気象の本」

国際地学協会, 1991年6月刊

167ページ, 定価971円

税込み1,000円

天気予報や天気図に興味をもつ初心者を対象とした気象解説書で, 著者が13年前に書いた「天気図と気象の本」を大幅に改訂して再度発刊したものである。旧版は, 著者が気象庁天気相談所長をしていた時に耳にした一般の方々や報道関係者などが抱いた気象関係の疑問点に関して, 出来るだけ分かりやすく解説しようとして書き上げたものであった。

その後著者は, 主任予報官などを歴任して8年まえに気象庁を退職し, 以来NHK-TVや同ラジオで気象解説を担当している。一般市民を対象に気象について解説しそれに対する投書などを受けた経験から, 旧版よりさらに分かりやすく書かれていることを感じる。例えば新版で

は, 初心者には取り付きにくい「気象の基礎の理論的な部分」については, 観測事実の解説の中に取り込んで分散させて説明するよう工夫しており, また, 旧版に比べ約3割増えたページ数の大部分を, 著者が最も得意とする天気図の解説に割り当てて, 「四季の天気図」の充実を計っている。その他, 旧版が発行された後に発生した異常気象(1982年7月の長崎豪雨, 1990年12月の千葉県茂原市の竜巻等)のデータや写真を加えて, 気象現象の理解を助ける工夫を図っており, さらに, 近年特にクローズアップされてきた気候変動やエルニーニョ現象についても初心者向けに新たに解説を加えている。

最後尾に付録として, 著者と小山博が共同調査した「日本の主な気象記録」および「外国の主な気象記録」を掲載している。最高・最低気温, 1時間降水量, 10分間降水量等の日本記録, 世界記録が, 旧版以後の観測値によって更新されており, これらも貴重なデータとなっている。

(気象庁予報課 飯島邦彦)