

Radar Meteorology

—外国文献集紹介—

小平 信彦*

降雨域からのレーダ反射が始めて見出されてから30数年経過し、この30年間に受信される電力やエコーパターンが何を意味するか、受信信号からどうしたら最も有効な情報を取出すことができるかについて多くの研究がなされてきたといえよう。

I. Fundamentals of radar meteorology and signal interpretation

レーダエコーには空間的な拡がりや時間的変化の要素に加えて受信電力の大きさと位相に関するデータが含まれている。

Probert-Jones¹⁾ は目標の性質と受信電力の関係を示すレーダ方程式を空中線の指向性を指数関数で近似して導き出した。これにより未知係数 F を1に近づけることができた。

降水からの受信電力は目標粒子からの反射電力のベクトル和で、粒子がお互いにてたらめな運動をしているため受信電力は雑音のような変動をしている。Marshall and Hitschfeld²⁾ および Wallace³⁾ はその性質を理論的に導き変動の性質を明かにした。また Donaldson⁴⁾ は一定の指向特性をもった空中線で拡がりをもった目標をみた場合の反射強度の性質を明かにして、測定値から実際の反射強度を推定することを試みた。特にエコー頂高度の推定にはこの方法は重要である。

Lee⁵⁾ は雨滴の空間分布が完全にでたらめでなくグループをなしている場合の coherent scattering についての理論を取扱ってレーダ方程式の修正項を提案した。

Atlas 他⁶⁾ は球形誘電体目標の反射係数を plexglass を用いた実験を行ない理論値と比較した。

II. Precipitation Physics.

上記のレーダ方程式で雨量と受信電力を関係づけるためには雨滴の空間における粒径分布が必要であり、Dingle⁷⁾ は光のビームを回転しその中にある雨滴からの

光の反射強度を測定し雨滴の大きさを求めた。昼間は散乱光が雑音となる欠点があるが、データ処理に人手を要しないのと時間的に細かい変動をしらべることができる特長がある。

Rogers⁸⁾ はドップラレーダのスペクトルから雨滴の落下速度の分布を求め、終端速度で落下していると仮定して粒径分布を求めた。上昇気流があると誤差となるので他の方法で推定しなければならない。この方法はドップラレーダの開発が進むに従って多くの観測が実施されている。

雨滴を正確に測定する他の一つの方法は直接写真撮影する方法であり、Jones⁹⁾ は落下中の雨滴を撮影してその形状から扁平率を求めている。

Browning¹⁰⁾ は hailstone の構造を実測した。大型の hail は一般に密度が大きく発達過程により種々の異なる性質の層をなしていることが分かった。

III. Echo analysis

この分野は極めて広いので多くの文献がみられるが、Atlas¹¹⁾ は一般的にレーダで検出しようとする気象現象全般に関する研究のすう勢について概観を行った。

Kessler¹²⁾ は降水粒子と風の場合との関係を明かにするため2次元の連続の式をとくとき、実際に観測した降水粒子の空間分布と風との関係を明かにしてレーダの観測結果の解明を行った。

Browning¹³⁾ は立体的な大気の流れの構造のモデルを提案し、レーダで観測した severe storm の立体構造の説明を行った。

Donaldson¹⁴⁾ はレーダ反射係数 Z の垂直分布を測定して雨、Hail, $1/2''$ 以上の Hail, Tornado の各々の場合について Z の垂直分布の型を分類した。Tornado をともなう場合及び Hail storm のときは2000ft 付近で Z が最大を示しこの付近に上昇気流の最大があることを示している。また¹⁵⁾ では shower, 通常の雷雨, hailstorm, 強い雷雨など被害を及ぼすような降雨をレーダ観測で

* 気象研究所気象衛星研究部

識別するパラメータを提案し、レーダ観測者が severe storm を見出す方法をいくつか示している。

Battan¹⁶⁾は垂直上方に向けたドップラレーダで雷雲中の垂直気流を求め、降水粒子の発達状況をしらべた。下降気流は雲の寿命サイクルの早い時期から発生しそれとともなって降水粒子が雲底で分裂、蒸発していると推論している。また¹⁷⁾では対流雲の上部で19m/s以上の上昇気流を観測し、最大エコーは hail の発生している所で生じていることが分った。

IV. Clear Air Echo

Glover 他¹⁸⁾は Angel エコーの正体を明かにするため昆虫の反射係数を実測により求めた。種々の昆虫を飛行機で上空にはこび大気中にはなすと同時にレーダで追跡して反射強度を求め波長特性として $\lambda^{-2} \sim \lambda^{-3}$ に比例することが分った。

Hardy 他¹⁹⁾は3.2cm, 10.7cm, 71cm の3つの波長のレーダで層状の Angel を観測した。2種のエコーが観測され1つは波長特性をもっており大型の昆虫である仮定が成立つ。他の1つは波長に無関係で通常3cmでは観測されない。屈折率 (refractive index) の変化によるものと考えられる。Atlas²⁰⁾はこのような Angel エコーを屈折率の乱れによるものとして説明し、また²¹⁾では10cm と71cm のエコーの比較から $\lambda^{-1/3}$ に比例することを示し、OH (Over Horizon Propagation) の伝播の基礎となる散乱の機構を明かにした。

Saxton²²⁾はレーダによる晴天エコーの観測と、同時に行ったマイクロ波屈折率計の測定結果を比較し屈折率の変化と Angel エコーの出現がよく一致していることを確めた。屈折率計は航空機に乗せて測定し10~15N/10m 程度以上の変化のある所で Angel エコーが生じている。

Atlas 他²³⁾は波長、レーダ感度と晴天乱流の検出能力を比較し、晴天乱流を見出すため最良の航空機用レーダでは CAT を10n mi (1分前) に発見でき、波長としては5~6cm が良いことを示した。

V. Instrumentation

CAPPI を最初に提案したのは McGill 大学の Marshall 他²⁴⁾で、レーダの仰角を変えて同一高度の echo を PPI 上にリング状に表示し、写真で合成して等高度の echo のみを集める方式である。

Hilton 他²⁵⁾は実用的にエコーのスケッチをする代りに PPI 像を Fax で撮影して電話回線で伝送する方式を開発した。アメリカでは既に実用になっており、任意

の測候所を通常の電話で呼出すと電話に接続してある Fax に自動的に PPI 像が現われるもので受像に数分必要である。

Armstrong 他²⁶⁾は Doppler の情報を PPI 画面上に現わす一つの方式を開発した。ビーム方向のエコー速度成分のみを表すものである。

VI. Precipitation Measurement.

Harold²⁷⁾は種々の方法による雨量測定を総合的にレビューした。反射強度から求める方式と減衰から求める方式があるが前者で、ある面積についての積算を行うと条件がよければ25%程度の誤差で測定できる。

Stout²⁸⁾はレーダと実際の面積雨量の多くの比較観測を行った。Z-R 関係に起因する誤差はあるが降雨の性質、地域的特性などを考慮するとこの差はある程度改善することが可能で、平均値をとるとよい結果が出ることを示した。

VII. Doppler Radar, Wind Measurement

ドップラレーダは降水粒子の速度に関する情報を与えてくれるのでレーダ気象に大きな寄与をなしている。Lhermitte²⁹⁾は晴天乱流をトレーサーとして上層風の測定をドップラレーダ (波長3.2cm, コニカル走査) で行い、降雨のないときでも上層風の観測ができることを示した。また³⁰⁾では垂直上方に向けたドップラレーダで垂直気流の時間高度図を作り、severe storm の構造を明かにした。更に³¹⁾ではドップラレーダによる乱気流の検出が極めて有力な手段であることを示している。しかしドップラレーダで得られる情報量は非常に多くしかも速度が早いのでこれを処理する方式を開発しないと情報を無駄にすることとなる。

Browning³²⁾はドップラレーダにより一様な降雨状況のとき風の場の力学的性質を求める VAD (Velocity-Azimuth Display) 方式を開発し、divergence の立体構造を測定した。

Atlas³³⁾はドップラでない通常のレーダでビームをある角度に分けて2つ出しそれぞれのエコーの位相差から風を求める方式を提案した。

Rogers³⁶⁾はハワイにおけるいくつかの降雨のドップラレーダによる観測を行ない、上昇気流の強い所では降水強度が強くなっており最大の Z は $10^6 \text{mm}^6/\text{m}^3$ に達していることを観測した。

VIII. Optical Radar-Lidar

Collis³⁴⁾は電波より短い波長の可視光を用いたライダーによってレーダでは検出できない細かい粒子をトレーサー

ーとして下層大気の構造の観測を行った。

Fiocco³⁵⁾ はルビーレーザを用いて高度20km までのエーロゾルの観測を行った。

Radar Meteorology

I. Fundamentals of Radar Meteorology and Signal Interpretation.

- 1) Probert-Jones, J.R. 1962: The radar equations in meteorology. *Q. J. R. M. Soc.*, **88**, 485-495,
- 2) Marshall, J.S. and W. Hirschfeld, 1953: Interpretation of the fluctuating echo from randomly distributed scatterers, Part I. *Can. J. Phys.*, **31**, 992-994.
- 3) Wallace, P.R., 1953: Interpretation of the fluctuating echo from randomly distributed scatterers Part II. *Can. J. Phys.*, **5**, 995-1009.
- 4) Donaldson, R.J. 1965: Resolution of a radar antenna for distributed targets. *J. Appl. Met.*, **4**, 727-740.
- 5) Lee Chi-Chen 1963: Radar equation by taking into consideration the coherent scattering of radar waves from cloud and raindrops. *Scientia Sinica*, **12**, 5, 695-708.
- 6) Atlas, D., L.J. Battan, W.G. Harper, B.M. Herman, M. Kerker and E. Matijevic 1963: Back-scatter by dielectric sphere. *I.E.E.E. Transactions on Antennas and Propagation AP-11*, No. 1, Jan 1, pp 68-72.

II. Precipitation Physics.

- 7) Dingle, A.N. and H.C. Schulte, Jr. 1962: A research instrument for study of raindrop-size spectra, *J. Appl. Met.* **1**, 48-59.
- 8) Rogers R.R. and R.J. Pilié 1962: Radar measurement of drop size distribution. *J. Atmos. Sci.*, **19**, 503-506.
- 9) Jones, D.M.A. 1959: The shape of rain-drops. *J. Met.*, **16**, 504-510.
- 10) Browning, K.A., F.H. Ludlum and W.C. Macklin 1963: The density and structure of hailstones. *Q. J. R. M. Soc.* **89**, 75-84.

III. Echo analysis.

- 11) Atlas, D. 1963: Radar analysis of severe storms. *Met. Monographs* **5**, 27, 177-220.
- 12) Kessler, E. III 1961: Kinematical relations between wind and precipitation distributions, *II. J. Met.* **18**, 510-525.
- 13) Browning, K.A. 1964: Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the winds. *J. Atmos. Sci.*, **21**, 634-639.
- 14) Donaldson, R.J. 1961: Radar reflectivity

profiles in thunderstorms. *J. Met.* **18(3)**, 292-304.

- 15) Donaldson R.J. 1965: Method of identifying severe thunderstorms by radar: a guide and bibliography. *Bull. of A. Met. Soc.* **46(3)**, 174-193.
- 16) Battan, L.J. 1964: Some observations of vertical velocities and precipitation sizes in a thunderstorm. *J. Appl. Met.*, **3**, 5, 415-420.
- 17) Battan, L.J. and J.B. Theiss 1966: Observations of vertical motions and particle size in a thunder storm. *J. Atmos. Sci.*, **33**, 1, 78-87.

IV. Clear Air Echo

- 18) Glover, K.M., K.R. Hardy, T.G. Konrad, W.N. Sullivan and N.S. Michaels 1966: Radar observation of insects in free flight. *Science*, **154**, No. 3752, pp 967-972.
- 19) Hardy K.R., D. Atlas and K.M. Glover 1966: Multiwavelength backscatter from the clear atmosphere. *J. Geophys. Res.*, **71**, 1537-1552.
- 20) Atlas, D., K.R., Hardy, K.M. Glover, I. Katz and T.G. Konrad 1966: Tropopause detected by radar. *Science*, **153**, 1110-1112.
- 21) Atlas, D., K.R., Hardy and T.G. Konrad 1966: Radar detection of the tropopause and clear air turbulence. *Proc. 12-th W.R.C.*, 279-284.
- 22) Saxton, J.A., J.A. Laue, R.W. Meedons and P.A. Matthews 1964: Layer structure of the troposphere-simultaneous radar and microwave refractometer investigations. *Proc. IEE*, **3**, 275-283.
- 23) Atlas, D., K.R. Hardy and K. Naito 1966: Optimizing the radar detection of clear air turbulence. *J. Appl. Met.*, **5**, 450-460.

V. Instrumentation

- 24) Marshall, J.S. 1957: The constant altitude presentation of radar weather pattern. *Proc. 6-th W.R.C.*, 321-324.
- 25) Hilton, R.P. and Hoag, N.E. 1966: Weather radar remoting system. *WB/RATTS -65. Proc. 12-th W.R.C.*, 91-97.
- 26) Armstrong, G.M. and R.J. Donaldson, Jr. 1969: Plan shear Indicator for real-time doppler radar identification of Hazardous Storm Winds. *J. Appl. Met.*, **8**, 376-383.

VI. Precipitation Measurement

- 27) Harold, T.W. 1965: Estimation of rainfall using radar - a critical review. *British Met. Office, Sci. Paper, No. 21, London.*

(以下 546 ページに続く)

第1c表 読む度合についての分布

種 類	内 容	よく読む					時々読む					あまり読まない								
		年 代		20	30	40	50	なし	計	20	30	40	50	なし	計	20	30	40	50	なし
	解 説	4	4	10	11	8	37	9	7	7	6	3	32	1	0	0	0	0	0	1
	シンポジウム	3	4	6	5	5	23	8	6	10	9	5	38	2	0	0	2	0	2	
	論 文	2	1	6	6	5	20	10	9	8	11	6	44	3	1	3	0	0	7	
	用語解説	8	3	7	9	5	32	7	5	3	7	3	25	0	3	2	1	2	8	
	質疑応答	10	3	12	4	6	35	3	2	3	11	3	22	0	6	2	1	1	10	
	学会だより	6	6	10	11	6	39	5	2	3	5	4	19	2	2	4	1	1	10	

第2表 読みたい内容についての分布

内 容	種 類	職 種 別		年 代 別				計	
		研究者 (含教員)	技 術 者	20歳代	30歳代	40歳代	50歳以上		年齢記入なし
力 学		11	8	4	5	5	2	3	19
雲物理		11	11	8	3	6	4	1	22
放 射		11	4	3	4	3	5	0	15
総観気象		8	19	4	2	9	5	7	27
メソ気象		7	21	1	2	11	6	7	28
境界層		10	10	3	3	7	5	3	20
測 器		10	9	2	4	5	5	3	19
乱 流		11	10	3	5	5	6	2	21
環境問題		16	13	6	6	8	7	3	29
気候変動		12	16	5	4	7	7	5	28

(注)他に航空気象(2), 教育問題, 統計, 予報技術, 化学, 水文, 気候制御, スペクトル解析各1あり

るが, 総観気象, メソ気象のように現象と関連の深いものは年齢の多い層に興味をもっている人が多い。20歳代

が技術者も含めて雲物理に興味をもっていることが目立っている。

(以下544ページの続き)

28) Stout, G.E. and E.A. Mueller 1968: Survey of relationship between rainfall rate and radar reflectivity in measurement of precepitation. J. Appl. Met., **7**, 3, 465-474.
 VII. Doppler Radar, Wind Measurement
 29) Lhermitte, R.M. 1966: Application of pulse doppler radar technique to meteorology. Bull. Amer. Met., **7**, 703-711.
 30) Lhermitte, R.M. 1964: Doppler radars as servere storm sensors. Bull. A. Met. Soc., **45**, 9, 587-596.
 31) Lhermitte, R.M. 1968: Turbulent air motion as observed by doppler radar. Proc. 13-th W.R.C., 498-503.

32) Browning, K.A. and R. Wexler 1968: A determination of kinematic properties of a wind field using doppler radar. J. Appl. Met., **7**, 105-113.
 33) Atlas, D. and R. wexler 1965: Wind measurement by conventional radar with a dual beam pattern. J. Appl. Met., **4**, 598-606.
 VIII. Optical Radar-Lidar
 34) Collis, R.T.H. 1966: Lidar: a new atmospheric probe. Q. J.R.M. Soc., **92**, 220-230.
 35) Ficco, G. and G. Grams 1964: Observations of the aerosol layer at 20km by optical radar. J. Atmos. Sci., **21**, 323-324
 36) Rogers, R.R. 1967: Doppler radar investigation of Hawaiian rain. Tellus, **19**, 432-455.