

レーダー気象を学ぶために

立 平 良 三*

学問の分野というのは、何によらずはっきりした境界を決めにくいものであるが、レーダー気象学もご多分に漏れない。レーダーは気象観測のための電波測器の一つであり、その観測結果が気象学の諸分野に利用されるわけであるから、いわゆるレーダー気象学のかなりの部分を利用者側の分野に所属させることもできよう。レーダー観測の大口利用者としては、雲物理学、メソ気象学、予報防災業務などがあげられる。

レーダー気象学の最も本質的な部分は、気象目標（降水粒子、エンゼルなど）に電磁波が当たったときに起る反射、散乱、吸収などの現象の機構に関するものであろう。この知識を利用すれば、逆に受信信号（エコー）の解析によって気象目標の性質を推定することができる。目標が降水粒子の場合は、形状、数、相、降水量などの性質である。この種の知識は、気象用のレーダーによって得られる情報を気象学の各分野に利用する際の基礎になるものである。

レーダーエコーは、二つの重要なパラメーターを含んでいる。それは振幅と位相（周波数と言ってもよい）である。このうち振幅のみを取り扱うのが通常のレーダーで、ドップラーレーダーは両方を取り扱える。移動する目標からの反射電波はドップラー効果で送信周波数からのズレを起しているが、ドップラーレーダーは、このズレを測定することによって目標の移動速度を算出することができる。ドップラーレーダーに関連する分野は最近急速な発展をみせており、レーダー気象学の最も先端的な部分を形成している。

気象測器としてみた場合のレーダーの大きな特色は、広大な空間内を連続的に即時に観測できる能力にある。それゆえ、レーダーは空間内に分布している気象目標からのエコーを連続的なエコーパターンとして表示できる。大気中には、気象学上重要な意味を持つさまざまな系が存在しているが、その多くは降水粒子のような気象目標を伴っており、その系の性質に応じて独特なエコーパターンを伴っていることが期待される。レーダーの探

知範囲からみて、エコーパターンに結びついている気象系はミクروسケールないしメソスケールと考えられる。典型的な例として、雷雨はレーダーにより特徴あるエコーパターンとしてとらえられ、しかもその激しさに応じて変化している。

このようなエコーパターンと気象系の性質の間関係についての知識は、やはりレーダー観測をメソ気象学や予報防災業務のような分野に利用していくうえの基礎とすることができる。換言すれば、エコーパターン解釈の基礎である。それゆえ、本文ではこの種の問題も、レーダー気象学の範囲に含めることにする。

レーダー気象学のもう一つの重要な課題として、レーダーエコーの処理、表示の問題がある。レーダーエコーから希望する気象学的情報を最も使いやすい形を取り出すためには、どのように気象レーダーを構成したらよいかということである。この問題についてももちろんこれまで数多くの研究があるが、もともと気象レーダーは軍用の探知レーダーから派生したものだけに、点目標探知レーダーの枠から脱皮しきっていない感があり、まだ体系的にまとめられていないように思われる。

レーダー気象学を一応この範囲に考えて、この分野に入ってゆくのに参考になる文献を列記してみよう。

(1) 教科書

レーダー気象学全体について解説した教科書は比較的数量が少ない。最初に現われたのは、**Battan: Radar Meteorology (1959)**で、これはシカゴ大学における大学院の講義をもとにしたものである。内容はレーダー気象学の全般を広く網羅しているが、レーダー気象学の進歩が早いだけに最近の興味ある成果が入っていない点が少々物足りない。また気象レーダーの構成およびドップラーレーダーについてもほとんどふれていない。この教科書は大阪管区気象台で邦訳されている（山本・古郷・後町：レーダー気象）。

やや実用的な傾向の教科書としては **Heiser and Freseman: Radar Meteorology (1959)** がある。これはマイアミ大学における U.S. 気象局のレーダー観測者養成コース（4週間）のテキストである。基礎理論

* 東京管区気象台

の説明が平易で、エコーパターンの解釈、予報防災業務への利用などの実用的な問題が豊富な実例の下に詳しく説明されている。気象業務従事者用のテキストとしては Battan (1959) よりも適当かも知れないが、印刷が悪く図のきたないのが難点である。

もう少し最近までのレーダー気象学の発展を含めたものは **Atlas: Advance in Radar Meteorology (1964)** である。Battan (1959) 以後の重要な成果に重点を置いて書いてあるが、取り扱う範囲は Battan (1959) より狭く、エコーパターンと気象系の関連にはほとんどふれていない。この本の重点は、エコーの位相の問題に置かれている。降水のエコー強度は時々刻々激しく変動するが、これは個々の降水粒子からの反射波の位相変動に起因するもので、この変動の確率分布、平均値の性質などが詳しく論じられている。レーダー方程式に入ってくるエコー強度はこの平均値であって、平均値の性質の理解は重要である。ドップラーレーダーの場合は、この変動の解析によって降水粒子の速度スペクトラムを概観することができ、この能力を利用した代表的な研究が求められている。このほか、雹のような大きな粒子からの反射、エンゼルエコーについての記述も詳細にわたっている。

我が国では、1967年になって始めてレーダー気象学の教科書的なものが発刊された(気象研究ノート第89号)。これはレーダー気象の各分野について、第一線の研究者、技術者が解説したもので、エコーパターンと気象系の問題も含んでいる。Atlas (1964) の特長であったエコー変動、ドップラーレーダーなどの話題についても十分説明されている。しかしエンゼルエコーについての説明はほとんどなく、また多くの著者による分担執筆のため、体系的でない部分があるように思われる。

小平・立平：レーダー気象(1970年刊行予定)は、まえがきで述べたレーダー気象学の範囲をほぼまんべんなく包括し、気象レーダーの構成、各種のエコー処理装置についてもかなりの頁をさいている。我が国の気象レーダーがほとんど気象庁の現業レーダーであることを考慮して、気象庁のレーダー観測作業、予報防災業務への利用についての大綱の説明も付加されている。全体に最近の成果をできるだけ取り入れるよう配慮されている。

初歩的なテキストとしては少し内容的に古くなった点もあるが、今井：レーダー気象(1959)があげられる。エコーの位相に関連する問題は扱っていないが、レーダー気象学の全般を平易に実用的に記述している。

気象レーダーの機構についてのテキストはちょっと見当らないが、レーダー一般の構成については **Skolnik: Introduction to Radar System (1962)** が適当であろう。米国では、これを大学院のレーダー気象学コースの参考書にしている所もある。書名のとおりに、レーダー機器のシステムの解説であって、個々の回路の詳しい説明ではないので、気象屋がレーダーの動作を理解するのに適しているよう。

(2) 総合報告・解説

我が国では降水が大きな災害の原因になることが多いので、レーダーの役割としては雨量測定が比較的重視される。この問題については小平・青柳：レーダーによる雨量測定の諸問題について(1961)がある。レーダーによる雨量測定の精度に関係する諸要因を考察し、実際の観測例について測定精度を論じている。レーダーによる雨量測定精度は、この例のように等価雨量計密度で表現するのが最も実際のであろう。

雨量を測定しようとする地点がレーダーから遠ざかるにつれて、レーダービームの拡がりや上空しか走査できないことによる影響が顕著に現われてくる。これに起因する雨量測定誤差は定量的に扱にくく、小平・青柳(1961)には全く扱われていない。Harrold: Estimation of Rainfall Using Radar (1965) はこの問題についても一応の考察を含んでおり、また雨量測定のためのレーダーシステムの構成とか、減衰を利用した雨量測定など広い範囲をまとめた総合報告である。

米国における気象レーダーの実際の用途は、いわゆるシビヤーストーム(主として雷雨に伴う)の探知であり、またハリケーンの監視である。これらに関連しては次のような総合報告がある。

Donaldson and Atlas: Radar in Tropical Meteorology (1963)

Atlas: Radar Analysis of Severe Storms (1963)

Donaldson: Methods for Identifying Severe Thunderstorms by Radar (1965)

Donaldson and Atlas (1963) はレーダーを利用したハリケーン研究の成果を概観して、今後の進むべき方向を示唆している。

Atlas (1963) はシビヤーストーム解析への利用のための基礎的なレーダー気象学、および新しいレーダー技術(特にドップラーレーダー)の解説に重点が置かれており、むしろ気象レーダーのポテンシャルを強調したものである。一方 Donaldson (1965) はシビヤースト

ムについてのより実用的な総合報告としてすぐれており、雷雨についての研究成果を体系的に整理して記述している。

ドップラーレーダーの気象学的意義についての解説としては **Lhermitte: Application of Pulse Doppler Radar Technique to Meteorology** がある。ドップラーレーダーにより、どのような気象学的情報が得られるか、またそのためにはどのようなシステムデザインが望ましいかが述べられている。

Mason: Some Outstanding problems in Cloud Physics (1969) では雲物理学の今後の進展に対してドップラーレーダーの果たすべき役割が解説されている。つまりドップラーレーダーによるストーム内の気流系の詳細な観測が、ミクロな雲物理学的過程と力学的過程の仲立ちの役割を果たすようになってくるということである。

(3) 気象業務関係

我が国では気象レーダーのほとんどが気象庁に所属し、ルーチン観測を行なっているため、レーダーを利用した調査研究にもこの種のレーダー資料が使われることが多い。その際には、ルーチン観測業務についての一応の知識が必要にならう。気象庁：**レーダー気象観測指針 (1968)** は気象庁のレーダー観測業務の内容のほか、観測作業に必要なレーダー気象学の知識が概説されている。

米国におけるルーチン観測の内容は **Weather Radar Manual (1967)** に詳しく記述されている。その **Part B** は、レーダー観測者に必要なレーダー気象学の解説および気象業務への応用技術にあてられているが、これはレーダー資料の利用者に対してもよい参考にならう。

Bigler, ed.: Use of Ground Based Radar in Meteorology (1966) もレーダーの気象業務への利用

を主題とし、それに関連するレーダー気象学の解説を含めたものである。この解説は非常に広い範囲をまんべんなくあつさりともとめているところが特色であるが、降水量測定（特に写真技術による測定）についてはかなり詳しい説明がある。

気象庁のレーダーの性能についてある程度の理解を持つことも、その観測資料の利用に必要なことであろう。

下島：気象用レーダー (1963) は富士山レーダー以前の気象庁レーダーの設計の基本的な思想を説明し、またその構成を概説したものである。1968年の大阪レーダー以降では、かなり大きな改良が加えられているが、まだまだとめて解説したものはない。

気象庁レーダーの資料は今のところ、各レーダー官署に保管されているが、東京管区気象台管内のレーダー（富士山、東京、名古屋、新潟、福井）の資料（1967年4月以降）についてはコピーが東京管区技術課に集められており、貸し出しに応じている。

(4) Weather Radar Conference

レーダー気象学の分野では、1～2年おきに各国の学者の出席あるいは寄稿によつて Conference がもたれている。1947年に第1回会議が Massachusetts Institute of Technology で開かれ、1968年の第13回会議 (Mc Gill 大学) に至っている。

主催は American Meteorological Society と開催地の研究機関であり、その **Proceedings** は American Meteorological Society から刊行されている。この Proceedings を見れば、その時点における各国の第一線の研究活動の状況をつかむことができる。

今までの Conference の開催期日、主催者は文献リストにまとめてある。気象庁図書館では、第4回および第6回以降の Proceedings が備えられているが、これ以上古いものを参照する必要はまずなからう。

文献（本文中の文献を掲載順に並べた）

教科書

Battan, L.J., 1959: Radar Meteorology, Univ. of Chicago Press, 161p.

(邦訳…山本・古郷・後町：レーダー気象，大阪管区気象台，138p.)

Heiser, H.W. and W.L. Freseman, 1959: Radar Meteorology, The Marine Laboratory, Univ. of Miami, 257p.

Atlas, D., 1964: Advance in Radar Meteorology, Advance in Geophysics, Vol. 10, Academic Press, 317-487.

小平ほか，1967：気象レーダー特集，気象研究ノート第89号，243p.

小平信彦・立平良三，1970：レーダー気象，地人書館「新気象学叢書」として発刊予定。

今井一郎，1959：レーダー気象，通信教育部テキスト補講第6分冊，気象庁研修所。

Skolnik, M.I., 1962: Introduction to Radar System, McGraw-Hill, 648p.

総合報告・解説

小平信彦・青柳二郎，1961：レーダーによる雨量測定の諸問題について，気象集誌，39，215-229.

- Harrold, T.W., 1965: Estimation of Rainfall Using Radar -A Critical Review, Scientific Paper, No. 21, Royal Meteorological Office Publication, H.M.S.O., 53p.
- Donaldson, R.J. and D. Atlas, 1963: Radar in Tropical Meteorology, WMO Symposium on Tropical Meteorology, 51p.
- Atlas, D., 1963: Radar Analysis of Severe Storms, Meteorological Monographs. Vol. 5, No. 27, 177-220.
- Donaldson, R.J., 1965: Methods for Identifying Severe Thunderstorms by Radar: A Guide and Bibliography, Bulletin of AMS, **46**, 174-193.
- Lhermitte, R.M., 1966: Application of Pulse Doppler Radar Technique to Meteorology, Bulletin of A.M.S., **47**, 703-711.
- Mason, B.J., 1969: Some Outstanding Problems in Cloud Physics, Quart. J.R. Met. Soc., **95**, 449-485.

気象業務関係

- 気象庁, 1968: レーダー気象観測指針 (気象協会で購入することができる.)
- U.S. Dept. of Commerce et al., 1967: Weather Radar Manual (Part A,B) U.S. Government Printing Office, 256p.
- Bigler, S.G., ed., 1966: Use of Ground-Based Radar in Meteorology, WMO Technical Note, No. 78, 104p.
- 下島省吾, 1963: 気象用レーダー, 気象研究ノート, **14**, 192-229.

Proceedings of Weather Radar Conference

FIRST	Weather Radar Research Project, M.I.T., Cambridge, Massachusetts	March 14, 1947.
SECOND	Illinois State Water Survey, Urbana, Illinois	October 1-3, 1951.
THIRD	Stormy Weather Group, McGill University, Montreal, Canada	September 15-17, 1952
FOURTH	Electrical Engineering Research Laboratory, University of Texas, Austin, Texas	November 9-12, 1953
FIFTH	Evans Signal Laboratory, U.S. Army Signal Corps, Asbury Park, New Jersey	September 12-15, 1955
SIXTH	American Meteorological Society, Weather Radar Research Project, Blue Hill Meteorological Observatory, Geophysics Research Directorate, AFCRC, M.I.T., Cambridge, Massachusetts	March 26-28, 1957
SEVENTH	American Meteorological Society, Radar Meteorological Section, University of Miami, Miami Beach, Florida	November 17-20, 1958
EIGHTH	American Meteorological Society, Stanford Research Institute	April 11-14, 1960
NINTH	American Meteorological Society, U.S. Weather Bureau	October 23-26, 1961
TENTH	American Meteorological Society, U.S. Weather Bureau Inter-Union Committee on Radio Meteorology, URSI and UGGI, American Meteorological Society, Central Radio Propagation Laboratory, U.S. Weather Bureau	April 22-25, 1963
ELEVENTH	American Meteorological Society	September 14-18, 1964
TWELFTH	American Meteorological Society, Canadian Meteorological Society, Inter-Union Committee on Radio Meteorology, National Research Council of Canada	October 17-20, 1966
THIRTEENTH		August 20-23, 1968