



レーダ気象学

門 脇 俊一郎*

大気中の粒子や屈折率のゆらぎは、入射電磁波に対し検出可能な反射波（エコー）を生ずる。気象レーダは、マイクロ波に対するエコーの検出、測定、分析、表示によって大気構造や現象を知ろうとする、大気のリモートセンシングの有力な手法である。同じ手法で光波によるものがライダー、超音波がソナーで、電波と音波の組み合わせ—RASS—もある。

レーダの気象観測手段としての価値は、任意時刻に広範囲の状態を即座に連続的に捉え得る点にある。鉛直分解能は水平方向と同等である。利点と裏腹に、測定値の気象学的意味に不確定性を含む。時々刻々入手する情報量が大き、データ処理・表示の工夫が不可欠である。これら長・短所は、リモートセンシングに共通なものである。

エコーの特性は、伝播方向と到着時刻、振幅、周波数（位相）、偏波面で決められる。伝播方向・到着時刻から、目標の位置、空間分布形がわかる。したがって、雨雪域の位置と分布形（パターン）を時々刻々知ることができ、形の特徴から台風中心位置とか雷雨、たつまき等を探知できる。これによってレーダが気象分野に導入された。また、レーダによって降水域の種々な規模の組織の存在が認識された。

振幅は、目標の大きさ、形、誘電率、空間密度、配列の仕方に関係する。レーダによる雨量測定はこれに基づく。いまの気象レーダは、点目標（飛行機、船）の探知レーダから分化し、降水域のような分布目標の定量的探測に適した内容へ発展している。より正確な雨量測定もその発展の原動力であった。信号処理技術や電子計算機の発達に伴い、60年代中ごろからエコーのデジタル化処理が注目され、70年代に入ってその開発・利用が加速されている。これによってレーダの利用価値は一段と高まり、新しい応用分野が現われた。最近、わが国で開発された地面反射除去装置もその成果の一つである。エコ

ーによる降水の短時間予測の開発が当面の課題である。

エコーの周波数からドップラー効果を介して、目標の視線速度がわかる。つまり、降水粒子や chaff（アルミ箔小片）を媒体としてその場所の風を測る。このドップラー測風も60年代に開発に着手され、60年代末から、それによる前線やシビアストーム降水系の気流の詳細構造の観測研究が発表され始めた。ドップラーレーダの情報処理表示法の開発、その気象研究への利用は現在のレーダ気象学の中心的かつ最先端の問題であるが、わが国の現状はまことに淋しいものである。

偏波面は目標の形状に関係し、雨滴の偏平度、向きなどの測定や雨量測定への利用、海面反射を介し、海面風向の測定可能性もあるが、上述の量に比べあまり使われない。

レーダ気象学と称されるものは、基礎（または狭義のレーダ気象学）として、マイクロ波の大気中伝播、降水粒子等によるマイクロ波の散乱吸収の理論からデータ処理・表示手法にわたるものと、応用としての観測値の気象学的解釈、天気予報など現業利用技術とを含むが、それ自身でクローズした一つの体系をなす訳ではない。レーダ装置は電子工学の一大集大成であり、散乱吸収は電磁気・物理光学の領域である。気象目標のエコーは大気のみさまざまな乱れにより不規則変動し、エコーからの情報抽出には不規則信号の統計解析の知識がいる。レーダ観測は、雲物理、雲力学、中小規模現象、境界層、局地気象、気候学、人工調節などの分野の重要な観測手段であり、天気予警報など気象業務面で重要な役割を果たしている。

このようにレーダ気象学は多くの専門分野に関係し、これを学ぼうとする動機、必要な知識範囲は、人によって大きく違う。そんな訳で入門手引を書くのは難しい。まして、筆者は気象庁でレーダ観測や予報利用の実務に従事しその間必要に迫られて手探りで独習し若干の関係文献に目を通したにすぎず、この入門講座の担当には当惑した。しかし、気象業務面の利用に限っても最近の進

* Shunichiro Kadowaki, 気象研究所予報研究部。

展は著しいにもかかわらず、レーダ気象の入門書とか、指導者の面で、われわれの周りの不便な環境はさして変わらぬようにも見える。筆者の僅かの経験でも不便な環境にある会員の方々に多少の参考にもなるかと気を取り直して拙文をまとめる。

1. 入門書あるいは概説書

入門手引としては (1)、レーダシステム (工学) 教科書 (気象家が対象でない)、(2) レーダ気象基礎～応用の概説、(3) レーダを重要研究手段とする分野の教科書、(4) 気象業務の技術指針 が考えられる。

1.1 レーダシステム教科書

これは気象家になじみにくいかも知れぬが、レーダの原理、天然・人工目標の特性、レーダ各部の機能、測定誤差の解説を含み、レーダ資料の利用に要する基礎知識を網羅している。どの分野に興味を持つにしてもこれらの基礎概念の十分な理解が大切だが、一般の気象入門書にはレーダ資料に常用される単位・用語の解説も殆んど見かけぬ現状であるから。

宇田：レーダ工学演習は、レーダ探知に特有な基礎概念に内容をしぼり、エレクトロニクス的なものは一切省いたユニークな入門書である。内容は、パルスレーダ (原理、レーダ方程式、分解能……)、CW レーダ (主にドップラーレーダ——パルスドップラー含む——ならびに FM-CW レーダ)、レーダトラッキング、レーダの目標、レーダクラッター (降水粒子、大気粒子、海面、地面の反射)、レーダアンテナ、レーダ波の伝播、レーダ天文学、人工衛星とレーダ、レーザレーダの10章から成る。レーダ気象の基礎などと名付けてもさして違和感はなからう。著者自身作成の例題による演習書の体裁をとり、上の内容の平易かつ定量的理解を目指す。なお、著者は東北大学工学部教授からインド国立物理研究所エレクトロニクス部長をつとめられた電子工学の専門家である。1972年の出版だが現在でも入手可能なはず。じっくりとレーダ探知の基礎を理解しようとする方々におすすぬしたい。巻末には日本語 (翻訳を含む) のレーダ工学書一覧がある。

Skolnik: *Introduction to Radar Systems* は、気象論文によく引用されるレーダシステムの優れた概説である。内容は、上記の宇田の本からレーザレーダを除き、送受信装置、レーダ信号の検出・処理、システム設計などを加えたもので、程度はやや高い。各章末に詳しい文献リストがある。好学社のリプリント = Interna-

tional Student Edition) で安価容易に入手できる。同著者の *Radar Handbook* もよく参照される定評のあるものだ。

1.2 レーダ気象の概説

まず、日本語のものとして気象研究ノートにレーダ気象特集が2冊ある。No. 90 は、ドップラーレーダを含むレーダ気象の基礎から、観測方法、予報利用など実務に関するもの、雲物理、ライダーも含む広範囲を扱い、やや重複、不統一もあるが、わが国で始めてのまとまった解説であった。No. 112 は、内容をより整理しその後の発展を増補したもの。I 基礎、II 気象への利用、III ドップラーレーダの3部から成る。天気予報への利用に専ら関心のある読者は、基礎の式や単位は別として、第II部だけでほぼ事足りるかも知れぬ。ただ、II部は利用の基礎あるいは方法論が主体なので、現象の記述など、いくつかの面でこの2冊は相補なうものだ。その後のレーダ気象の活発な分野のうち、デジタル化、境界層・晴天大気構造の研究への利用など殆んど触れられていない。なお、レーザレーダは116号に充実したものが刊行された。斉藤 (1973) の解説は晴天大気構造の研究への利用などが詳しく、No. 112 を補うものである。また、台風のエコーの解説が気象研究ノート129号にある。なお、データ処理、デジタル化エコーによる降水の短時間予測など最近の発展は近く気研ノートで刊行予定と聞く。No. 90, No. 112 共品切れだが、たいいてい気象台に備えてあるはず。ただこれらは、専門的解説の面も多く、ややとつき難いだろう。そういった点から、入門書としては英語であることを除けば次の Battan の本がよいだろう。

Battan: *Radar Observation of the Atmosphere*

は、同じ著者の *Radar Meteorology* (1959) の全面的改訂増補で、約2倍に頁数が増えた。増加分の殆んどは雨量測定、ドップラー測風、晴天大気構造研究への利用、雹のレーダ波散乱にあてられ、その後の発展の方向を示唆させる。レーダの気象への利用の全範囲をカバーした唯一の本と言える。観測手法としてのレーダ技術に重点を置き、種々な分野でのレーダの能力を示すことに力が注がれている。詳細な知識は当然原論文に求めねばならぬが、本書は参考文献が約600と充実している。

1.3 雲物理教科書の解説

Mason: *The Physics of Clouds*, 2nd ed., は、1959年初版の改訂版で chap. 8 の *Radar Studies of Clouds and Precipitation* (83頁) がレーダ気象の解説で

ある。初版に比べ、ドップラー測風の基礎と Browning ほかの英気象局グループの前線系の降水構造研究の紹介が加えられた。著者の意図は“マイクロ波の雲・降水による後方散乱と減衰の基礎理論ならびにハイドロミータの特性、大きさ、成長の仕方の解明に役立つ若干の技術の基礎原理”を示すことで、全般的解説を心がけたものではない。筆者は約20年前、室戸岬の任地でこの初版でレーダ気象について始めて学び啓発されるところ大であった。

Rogers: A Short Course in Clouds Physics は、レーダ気象研究の—中心、カナダ McGill 大大学院の雲物理講義録に基づく。200頁余の小冊子の一部で、まことに簡潔であるが章末に演習問題があるのがよく、実際にやってみればレーダ探知について理解を深めることができるだろう。

1.4 気象業務の技術指針

気象庁から指針、各地の気象台から手引きがいくつか出ている。後者は地方的特徴のあるものも多いが、配布先が限られ一般的でないので略する。**気象庁観測部：レーダー気象観測指針**は、昭和51年に最近のレーダ装置の改良に見合うよう改訂された。レーダ各部構成、機能、レーダ探知基本式、観測通報手順、気象擾乱のパターン、写真 から成る。付録に気象庁の全レーダサイトの地面反射写真等があり、レーダ資料利用にも便利である。**気象庁予報部：予報作業指針 No.7 雨量予報**には、降水予報への利用の解説がある。

2. 専門的解説と論文集

さきの気象研究ノート No. 90, 112は、入門書というより専門的解説あるいはレビューの性格が強い。よりのを絞ったモノグラフが、60~70年代始めにかけ、D. Atlas, C.W. Newton などによって出された。その多くは現在でも充分価値がある。最近数年はこのたぐいのものが殆んど見られないが、この間のドップラー利用等の急発展を反映しているのだらう。しかし現在の中心テーマは60年代にその萌芽を持ち、その基本文献は前記 Battan などから知ることができる。

60年代末までのわが国で出版されたレーダ気象の重要な論文のかんりのものが2回にわたる気象学会編外国気象文献集に収められ、その2回目については小平(1973)の簡要な紹介がある。

なお、最近の状況を知るためのものとして次の二つを紹介しておく。

(1) **電波研季報：地球環境の新しいリモートセンシング特集号—低層大気、地面、海面** は、レーザ、音波、HF 波などによるアクティブリモートセンシングの分野でわが国のパイオニア的存在である電波研究所のメンバーによる、この分野の現状動向の秀れた解説である。余談だが、最近、電波研鹿島支所にドップラー装置を含む各種自動観測・データ処理機能を備えた降雨観測レーダシステムが設置され観測が始められたようだ(気象学会1979年秋季大会予稿集)。これは、現在の国際水準に達したわが国はじめての研究用レーダシステムであろう。今後の研究成果が期待される。

(2) **Radar Meteorology Conference** について、レーダ気象の全分野にわたって最新の情報を得ることができる会議である。米気象学会の主催で2年毎に開催され、今回は1980年、第19回である。予稿集(Proceedings)が発行され、同学会から入手できる。第18回(1978)の内容は、広範囲降水系、境界層と晴天大気構造、風とタービュレンスの測定、対流ストーム、更正と減衰、降水測定、装置と信号処理、現場利用、レーダの基礎と新技術の各セッション から成る。米国以外からの出席も多く、これに目を通せば少なくともマイクロ波気象レーダに関して最新の状況をつかむことができる。発表論文はより完成されて学会誌に掲載されるものも多い。なお、最近10年間位のは気象庁のレーダ観測所に揃えてある。

新しいレーダ技術やデータ処理に関心のある方は電気通信やリモートセンシング関係の文献に注意する必要があるのはもちろんで、本講座の**衛星気象学**(天気, Vol. 25, No. 8)もよい手引きとならう。

(3) 現業関係

この項の内容とはやや異質だが、気象業務の現場の技術上の情報交換のため気象庁観測部から、**レーダ観測技術資料**が年1回発行されている。協同調査の報告などもある。また、1972年ごろまでの気象庁の現業関係者によるレーダ気象の調査研究のレビューと文献リストが図書月報特別号(昭和49年)にある。

3. 最近の論文から

入門講座にこの項が必要かは疑問だが、前にも述べたようにここ数年の状況は個々の論文によるしかない。レーダの気象学研究への利用面は本講座の関係分野に要を得た紹介があるので、読者は興味ある専門分野、中小規模現象の気象学(I)(II)などを見ていただきたい。以

下に、他講座との重複を避け、気象観測手段としてのレーダ技術としての立場で現状を知る手掛かりとなるものを若干あげてみよう。これは筆者にはたいへんな難題であり、筆者の理解力を越えるものも多いので、たいへん偏ったものになる点お許しいただきたい。

なお、わが国での論文・報告は容易に見ることができ、ことでもあり、他講座に詳しいリストがあるなどで二、三のものを除き省略させていただく。

3.1 観測手法、データ処理・表示・伝送

Marshall et al. (1975)は、観測範囲の全エコー（時空・強度5次元）の自動記録を目的として、分解能、データの扱い易さ、経費の関係を分析し、McGill 大学で開発した3次元表示—PPHI 等を示した。グラフィックディスプレイによる4次元表示例は **Boardman-Smith** (1974)。**Taylor-Browning** (1974) はレーダ観測網のデータ処理・表示・伝送の将来像と英国で実験中のそのプロトタイプについて述べた。データ処理上、レーダの極座標走査の直交座標への変換が問題だが、**Mohr-Vaughan** (1979) はそのソフトウェア開発例だ。エコーのデジタル化一般の解説は **立平** (1976)、デジタル化処理の実例は **Schroeder-Klazura** (1978) など。地面反射の除去は長年の懸案だが、**立平** は最近試作に成功した除去装置の基本原則を示す。第18回 Radar Meteorology Conference に **Tatehira et al.**, **Aoyagi** の関連論文がある。

ドップラーレーダ……1台のドップラー (Single Doppler) の風データ処理の新方式の検討が、**Waldenfel-Corpin** (1979) である。風の3成分をレーダ2台の協同走査 (Dual Doppler) で得る手法の基本は **Miller-Strauch** (1974) に、その誤差解析が **Doviak-Ray** (1976) にある。3台を組み合わせる方式 (Triple Doppler) の走査、データ処理の検討は **Carbone** (1977) である。複数個の観測網で各ドップラーレーダの最適配置を **Ray et al.** が論じた。より基礎的問題として、**Srivastava et al.** (1979) はドップラー信号の統計量の計算方法、**Doviak-Zrnić** (1979) は受信帯域幅の反射能、ドップラー速度測定への効果を考案した。

波長の異なる2台のドップラーレーダ (Dual wavelength Doppler) での鉛直風速、粒径分布の測定方法を、**Ray** (1976) が検討した。

新技術の導入では、航空機搭載の SAR (Synthetic Aperture Radar) による海面風の推定、**Weissman et al.** (1979) など。

3.2 降水量の測定と予測への利用

広範囲の雨量分布の測定はレーダと雨量計の組み合わせによるのが現実的・効果的だが、**Brandes** (1975) は、最適結果を得るための客観解析方法を論じた。5 cm 波は 10 cm 波に比べ経済的だが、降水による減衰がより大きい。**Hildebrand** (1978) は、降雨モデルを与えて反復法による途中降雨の減衰補正方法を考案した。雨量計による補正は海上では得にくい。**Cunning-Sax** (1977) は、GATE で観測船レーダで雨量測定する必要から、雲底高度の粒径分布測定により GATE 域の Z-R 関係の検討を行なった。偏波面による反射能差の雨量測定の利用について、**Seliga-Bringi** (1976) の提案がある。

降雪量のレーダ測定は、**Collier-Larke** (1978) が精度を評価した。

Austin-Bellon (1974) はパターン認識による降水量の短時間客観予測実験を行ない、その2年間のリアルタイム運用結果が **Bellon-Austin** (1978) に報告された。**立平** はか (1976) は、700 mb の風 (客観解析、150 km 格子) でエコーを流すエコーパターン客観予測を試みた。いずれも、エコーの発達衰弱の予測が難題である。この点に関し、最近境界層内の収束と対流性降水の発達衰弱の関係に注目されている、**Weaver** (1979)、**Ulanski-Garstang** (1978) など。

3.3 悪天 (Severe Weather) の見分け

エコーの特徴からトルネードなど Severe Weather を見分けることは現業的に重要である。電と反射係数の関係 **Dye-Martner** (1978)、2波長ドップラーによる大きな電の有無の探知可能性の検討 **Jameson-Srivastava** (1978) など。ドップラー風速勾配のリアルタイム表示、PSI によるトルネード観測例は **Donaldson** (1978)。Severe Weather 予報へのデジタルデータ利用は **Muench** (1976) の解説がある。

3.4 中小規模系の観測への利用

降水構造……諸手段を総合した観測研究は、英気象局、Washington 大学の各グループが数年来活発である。前者は気流、後者は雲物理構造の観測解析に特色がある。最近の報告は、**James-Browning** (1979)、**Leary-Houze** (1979)。**Henrion et al.** (1978) は、ミリ波レーダによる層状雲からの降水の微細構造の研究である。なお、降水過程の数値モデルでの反射係数の計算方法に関し、**Smith et al.** (1975) がある。

ライフヒストリー……**Ogura-Chen** (1977) はオクラホマのスコールラインの解析、**Leary-Houze** (1979)

は熱帯対流雲系の観測, **Lewis・Jorgensen** (1978) はハリケーンの消滅過程を扱った。

Severe Local Storm の解析……**Fujita・Byers**(1977) は航空機事故時の強雷雨の Spearhead エコーと Downburst の観測. **Caracena et al.** (1979) は停滞性エコー系からの局地豪雨 (死者多数) の解析である. **Pruppacher** 編 **Cloud Dynamics** はレーダ解析関連を数編含み, **Newton・Fankhauser** (1975) は多重セルシステムの移動と周りの風の関係の観測モデルである。

ドップラーレーダによる Severe Local Storms の観測……一般的解説は **Lemon et al.** (1977), 分解能と測定範囲等の考察が **Doviak・Sirmans** (1978) である。観測例として, 1レーダは **Lemon et al.** (1978), 2レーダは **Eagleman・Lin** (1977), 3レーダが **Ray et al.** (1978), **Heymsfield** (1978) は2レーダによる運動学的力学的構造の解析を含む. **Blustein・Sohl** (1979) は雷雨エコーの分裂過程の観測である。

3.5 雲物理, 人工調節実験への利用

鉛直ビームレーダで, 降水粒子のタイプ, 粒径分布, 成長過程の観測が種々あり, **Weiss et al.** (1977) は Washington 大学グループのドップラーレーダによる固体粒子タイプの推定である。人工調節にもレーダが多方面に利用されるが, **Browning・Atlas** (1977) は電抑制実験へのマルチドップラーシステム利用の提案である。

3.6 局地気象, 境界層

米国セントルイス域の都市が気象に及ぼす効果の研究プロジェクト, METROMEX ではレーダエコーも研究対象とされ, **Braham・Dungey** (1978) などがある。**Kropfli・Kohn** (1978) は chaff をトレーサーとし, 2台のドップラーレーダ方式で都市域の晴天時の混合層の大気運動を調べた。

FM-CW レーダ, 音波探査などの総合的観測解析は, **Noonkester** (1979) のカリフォルニア沿岸海霧の研究がある。

3.7 統計

高分解能レーダによる対流性降水セルの統計 **Konrad** (1977), GATE で観測したエコーの統計解析 **Warner・Austin** (1978) などを挙げておく。

文 献

1.1

宇田新太郎, 1972: レーダ工学演習, 287頁, 学献社。

Skolnik, M.I., 1962: Introduction to Radar Systems, McGraw-Hill, (リプリント: 好学社)。

———, 1970: Radar Handbook, McGraw-Hill.

1.2

気象研究ノート, 日本気象学会

第90号 レーダー気象特集, 1967.

第112号 レーダー気象特集, 1972.

第116号 ライダと気象観測, 1972.

第129号 台風特集, 1976 (2・3・4台風のレーダーエコー)。

齊藤 実, 1973: レーダー気象学研究の最近の動向, 天気, 20, 457-475.

Battan, L. J., 1973: Radar Observation of the Atmosphere, 324 pp, Chicago Univ. Press.

1.3

Mason, B.J., 1971: The physics of clouds, Oxford Univ. Press.

Rogers, R.R., 1976: A short course in cloud physics, 227 pp., Pergamon Press.

1.4

レーダ気象観測指針, 気象庁観測部, 昭和51年(1976年)改訂。

予報作業指針, No. 7, 雨量予報, 気象庁予報部, 1973.

2.1

小平信彦, 1973: Radar Meteorology—外国気象文献紹介一, 天気, 20, 542-544.

郵政省電波研究所編, 1976: 地球環境の新しいリモートセンシング特集号, 電波研季報, 22, No.121.

Proceedings of the 18th Radar Meteorology Conference, 1978, Amer. Met. Soc., 気象庁図書月報第19巻特別号(2), 地方レーダー気象文献のまとめ。

3.1

Marshall, J.S. and E.H. Ballantyne, 1975: Weather surveillance radar, J. App. Met., 14, 1317-1338.

Boardman, J.H. and P.L. Smith, Jr., 1974: A computer generated "four dimensional" graphic display for weather radar data, Bull. Amer. Met. Soc., 55, 16-19.

Taylor, B.C. and K.A. Browning, 1974: Towards an automated weather radar network, Weather, 27, 202-216. (測候時報 43 (1976), 1-8 に志崎の紹介がある。)

Mohr, C.G. and R.V. Vaughan, 1979: An economical procedure for Cartesian interpolation and display of reflectivity factor data in three-dimensional space, J. App. Met., 18, 661-670.

立平良三, 1976: レーダーエコーのデジタル化, 天気, 23, 69-74.

Schroeder, M.J. and G.E. Klazura, 1978: Computer processing of digital radar data gathered during HILPLEX, J. App. Met., 17, 498-507.

- 立平良三, 清水紀雄, 小佐野慎悟, 1976: 地形と重畳した降水エコーの強度測定——地形エコー除去の方法, 研究時報, 28, 313-316.
- Tatehira, R. and T. Shimizu, 1978: Intensity measurement of precipitation echo superposed on ground clutter—a new automatic technique for ground clutter rejection, 18th radar meteorology conference, 364-369.
- Aoyagi, J., 1978: Ground clutter rejection by MTI weather radar, 18th Radar Meteorology Conference, 358-363.
- Waldeufel, P. and H. Corbin, 1979: On the analysis of single doppler radar data, J. App. Met., 18, 532-542.
- Miller, L.J. and R.C. Strauch, 1974: A dual-doppler radar method for the determination of wind velocities within precipitating weather systems, Remote sensing of environment, 3, 219-235.
- Doviak, R.J. and P.S. Ray, 1976: Estimation in winds fields derived from dual-doppler radar measurement, J. App. Met., 15, 868-878.
- Carbone, R.E., 1977: The tetrahedral scan for Tri-doppler radar and other remote sensing applications, J. App. Met., 16, 844-850.
- Ray, B.S., J.J. Stephens and K.W. Johnson, 1979: Multiple-doppler radar network design, J. App. Met., 18, 706-710.
- Srivastava, R.C., A.R. Jonson. and P.H. Hildebrand, 1979: Time-domain computation of mean and variance of doppler spectra, J. App. Met., 18, 189-194.
- Doviak, R.J. and D. Zrnicek, 1979: Receiver bandwidth effect on reflectivity and doppler velocity estimates, J. App. Met., 18, 69-79.
- Ray, P.S., 1976: Examination of a dual-wavelength doppler radar technique to measure vertical wind velocity and drop size distribution, Remote sensing of environment, 5, 35-45.
- Weissman, D.E., D.B. King and T.W. Thomson, 1979: Relationship between Hurricane surface winds and L-band radar backscatter from the sea., J. App. Met., 18, 1023-1034.
- 3.2
- Brandes, E.A., 1975: Optimizing rainfall estimates with aid of radar, J. App. Met., 14, 1339-1345.
- Hildebrand, P.H., 1978: Iterative correction for attenuation of 5 cm radar in rain, J. App. Met., 17, 508-514.
- Cunning, J.B. and R. I. Sax, 1977: A Z-R relationship for the GATE B-scan array, Mon. Wea. Rev., 105, 1330-1336.
- Seliga, T.A. and V.N. Bringi, 1976: Potential use of radar reflectivity measurements at orthogonal polarizations for measuring precipitation. J. App. Met. 15, 69-76.
- Collier, C.G. and P.R. Larke, 1978: A case study of the measurement of snowfall by radar: an assessment of accuracy, Q.J.R.M.S., 104, 615-621.
- Austin, G.L. and A. Bellon, 1974: The use of digital weather records for short-term precipitation forecasting, Q.J.R.M.S., 100, 658-664.
- Bellon, A. and G.L. Austin, 1978: The estimation of two years of real-time operation of a short-term precipitation forecasting procedure (SHA-REP), J. App. Met., 17, 1778-1787.
- 立平良三, 佐藤英夫, 牧野義久, 1976: エコーパターンの短時間予報, 研究時報, 28, 61-70.
- Weaver, J.F. 1979: Storm motion as related to boundary-layer convergence, Mon. Wea. Rev., 107, 612-619.
- Ulanski, S.L. and M. Garstang, 1978: The role of surface divergence and vorticity in the lifecycle of convective rainfall, Part I: Observation and analysis, J. Atmos. Sci., 35, 1047-1062.
- 3.3
- Dye, J.E. and B.E. Martner, 1978: The relationship between radar reflectivity factor and hail at ground for Northeast Colorado thunderstorm, J. App. Met., 17, 1335-1341.
- Jameson, A.R. and R.C. Srivastava, 1978: Dual-wavelength doppler radar observations of hail at vertical incidence, J. App. Met., 17, 1694-1703.
- Donaldson, Jr., R.J., 1978: Observation of the Union City tornadoes by plan shear indicator, Mon. Wea. Rev., 106, 39-47.
- Muench, H.S., 1976: Use of digital radar data in severe weather forecasting, Bull. Amer. Met. Soc., 57, 298-308.
- 3.4
- James, P.K. and K.A. Browning, 1979: Mesoscale structure of line convection at surface cold front, Q.J.R.M.S., 105, 371-382.
- Leary, C.A. and R.A. Houze, Jr., 1979: Melting and evaporation of hydrometeors in precipitation from the anvil clouds of deep tropical convection, J. Atmos. Sci., 36, 669-679.
- Henrion, X., H. Sauvageot and D. Ramond, 1978: Fine structure of precipitation and temperature in a stratocumulus cloud, J. Atmos. Sci., 35, 2315-2324.
- Smith, Jr., P.L. Myers, C.G. and H.D. Orville, 1975: Radar reflectivity factor calculations in numerical cloud models using bulk parameta-

- rization of precipitation, *J. App. Met.*, **14**, 1156-1165.
- Ogura, Y. and Y.L. Chen, 1977: A life history of an intense mesoscale convective storm in Oklahoma, *J. Atmos. Sci.*, **34**, 1458-1476.
- Leary, C.A. and R.A. Houze, Jr. 1979: The structure and evolution of convection in a tropical cloud cluster, *J. Atmos. Sci.*, **36**, 437-457.
- Lewis, B.M. and I. Jorgensen, 1978: Study of the dissipation of hurricane Gertrude (1974), *Mon. Wea. Rev.*, **106**, 1288-1306.
- Fujita, T.T. and H.R. Byers, 1977: Spearhead echo and downburst in the crush of an airliner, *Mon. Wea. Rev.*, **105**, 129-146.
- Caracena, F., R.A. Maddox, L.R. Hoxit, and C. F. Chappel, 1979: Mesoanalysis of Big Tompon storm, *Mon. Wea. Rev.*, **107**, 1-17.
- Newton, C.W. and J.C. Fankhauser, 1975: Movement and propagation of multi-cellular convective storms, *Pure and Applied Geophysics*, Special Issue of cloud dynamics, 747-764.
- Lemon, L.R., Donaldson, Jr., D.W. Burges and R.A. Brown, 1977: Doppler radar application to severe thunderstorm study and potential real-time warning, *Bull. Amer. Met. Soc.*, **58**, 1187-1193.
- Doviak, R.J. and D. Sirmans, 1978: Considerations for pulse-doppler radar observation of severe thunderstorms, *J. App. Met.*, **17**, 189-205.
- Lemon, L.R., D.W. Burges and R.A. Brown, 1978: Tornadoic storm airflow and morphology derived from single doppler radar measurements, *Mon. Wea. Rev.*, **106**, 48-61.
- Eagleman, J.R. and W.C. Lin, 1977: Severe thunderstorm internal structure from dual-doppler radar measurements, *J. App. Met.*, **16**, 1036-1048.
- Ray, P.S., K.K. Wagner, K.W. Johnson, J. J. Stephens, W.C. Bumgarner and E.A. Mueller, 1978: Triple-doppler observations of a convective storm, *J. App. Met.*, **17**, 1201-1212.
- Heymsfield, G.M., 1978: Kinematic and dynamic aspects of the Harrah tornadic storm analysed from dual-doppler radar data, *Mon. Wea. Rev.*, **106**, 233-254.
- Bluestein, H.B. and C.J. Sohl, 1979: Some observations of a splitting severe thunderstorm, *Mon. Wea. Rev.*, **107**, 861-873.
- 3.5
- Weiss, Jr, R.R., J.D. Locatelli, and P.V. Hobbs, 1977: Deduction of Ice particles types in the vicinity of the melting layer from doppler radar measurements, *J. App. Met.*, **16**, 314-316.
- Browning, K.A. and D. Atlas, 1977: Some new approaches in hail suppression experiments, *J. App. Met.*, **16**, 327-332.
- 3.6
- Braham, Jr. R.B. and M.J. Dungey, 1978: A survey of urban effects of radar first echoes, *J. App. Met.*, **17**, 644-654.
- Kropfli, R.A. and N.M. Kohn, 1978: Persistent horizontal rolls in the urban mixed layer as revealed by dual-doppler radar, *J. App. Met.*, **17**, 669-676.
- Noonkester, V.R., 1979: Coastal marine fog in Southern California, *Mon. Wea. Rev.*, **107**, 830-851.
- 3.7
- Konrad, T.G., 1978: Statistical models of summer rainshowers from finescale radar observations, *J. App. Met.*, **17**, 171-188.
- Warner, C. and G.L. Austine, 1978: Statistics of radar echoes on day 261 of GATE, *Mon. Wea. Rev.*, **106**, 983-994.