

ドップラーレーダーによるメソ擾乱の発達機構に関する研究

—1996年度日本気象学会賞受賞記念講演—

上田 博*

1. はじめに

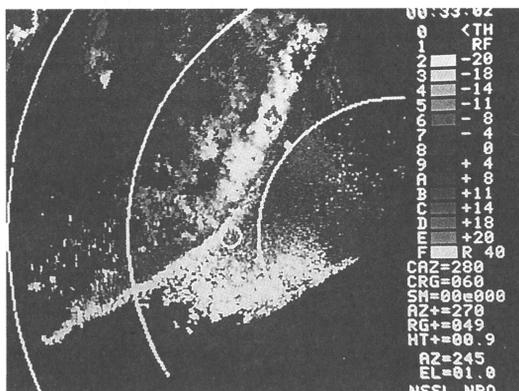
学会賞をいただきありがとうございます。

これまでの私の研究のほとんどは多くの方々との共同で行なわれたものですし、非常に多くの方々のお世話になりました、お礼申し上げます。私自身はこれまで多くの観測を行なうことができ、気象現象を五感に近いところで接することを楽しませていただきました。そのような状態で賞をいただいて良いものか考えましたが、これからもっと努力するよう「叱咤激励」を受けたのだと受け止め、これまでの気象ドップラーレーダーを用いた研究とこれからの研究のモチベーションを中心に講演をまとめました。

2. ガストフロントの検出

私がドップラーレーダーを用いたメソ擾乱の観測に取り組んだ動機は、「雲の中で何が起きているのか」を知りたいと思ったことである。北海道大学の大学院で多結晶雪結晶の成長機構を研究しているときに、「雪は天からの手紙である」という言葉で知られる中谷吉郎博士の、地上の雪を見て上空の気温や湿度の状態を知ると言う立場よりは、「雲の中を直接観てもっと気象学的な見方をしたい」と思ったことに始まる。雲のまわりの熱力学的な環境と雲内外の力学的な条件のもとに、雲内の雲物理学的な条件を観測的に明かにして、その中に雪結晶の成長過程を位置づけたいとの思いをもった。そのためにはドップラーレーダーを用いた雲の発達過程の研究が不可欠であった。

私が最初に職を得た当時の国立防災科学技術センターにおいては、自然災害の軽減・防除に関する研究



第1図 NSSLのドップラーレーダーでみた1981年5月9日00時33分のドップラー速度分布。仰角は1度、レンジマークは40, 80, 120 km。北東から南東に延びる、白く見える帯の部分はレーダーに近づく速度が大きいことを示している (Uyeda and Zrnice, 1986)。

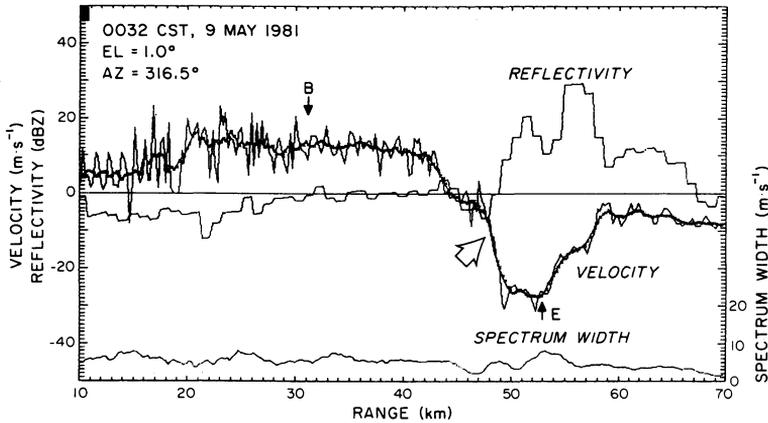
は重要テーマであったので、ドップラーレーダーによる気象擾乱の研究方法を学びに米国に留学したいという私の希望を職場は受け入れてくれた。当時 Kessler 博士が所長をしていた米国国立中小規模擾乱研究所 NSSL (National Severe Storms Laboratory) で、次世代気象レーダー (Next Generation Weather Radar) 計画の気象擾乱の自動検出アルゴリズム開発の一環として、ガストフロントの自動検出法の開発に取り組んだ。

ガストフロントの鉛直構造については Charba (1974) らの研究により知られていたが、水平的な構造も含めた3次元的な構造がよく知られるようになったのはドップラーレーダーの開発が進んでからである。ガストフロント付近のドップラー速度パターンは第1図のようになり、実線の方向の反射強度と速度は第2図のようになる (Uyeda and Zrnice, 1986)。収束域中

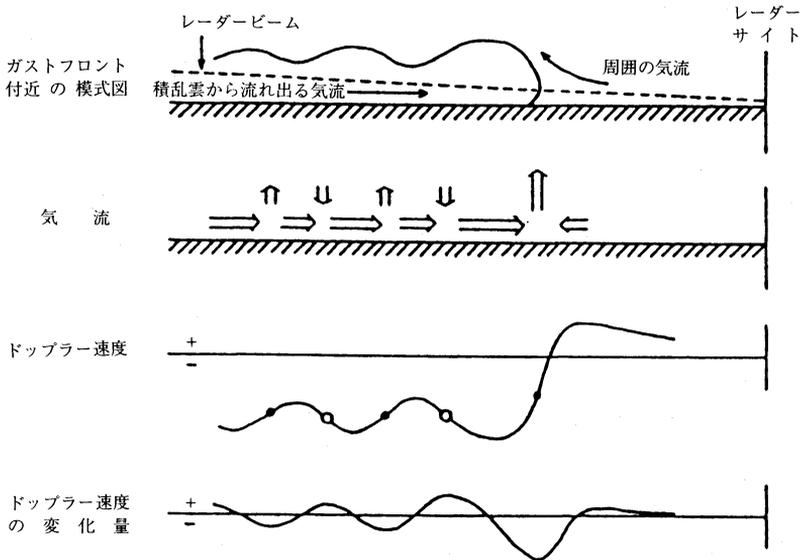
* 北海道大学大学院理学研究科。

—1996年10月28日受領—

—1997年1月21日受理—



第2図 第1図における方位角316.5度方向、レーダーから10~70 kmの範囲の反射強度、ドップラー速度及びドップラー速度の分散。ドップラー速度には移動平均も示した。白矢印はガストフロントの候補点を示す (Uyeda and Zrnich, 1986)。

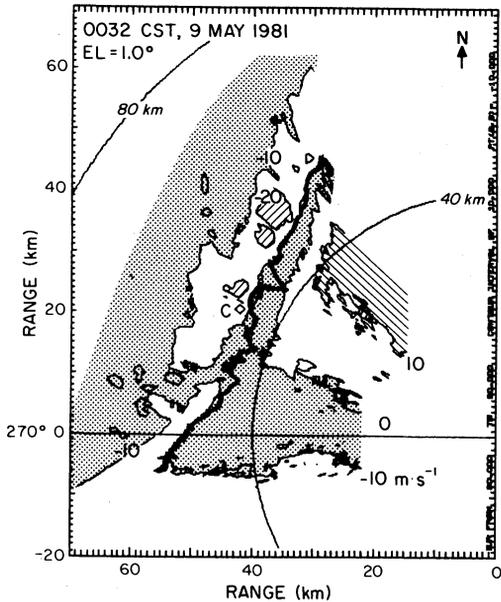


第3図 レーダービーム方向のガストフロントの鉛直断面内の構造の概念図。ビーム方向の速度成分及び速度成分の勾配も示した。ドップラー速度の変化図上に黒丸で示した部分が収束量極大域でガストフロントの候補点を示す (Uyeda and Zrnich, 1988)。

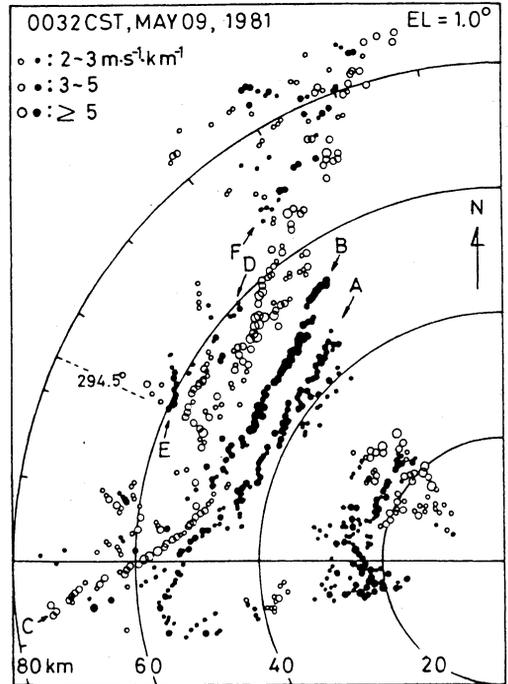
(ドップラー速度の減少域、B~Eの間)に速度勾配が極大になる変曲点(白矢印)がガストフロントの候補点になる。第3図のように、ガストフロントは積乱雲からの強い下降流が地表に到達して周囲に向けて吹き出す気流とその周囲の気流の境界であり、一般にその部分には上昇流がある。従って、水平に近い低仰角でレーダーを走査したときに得られるドップラー速度分布では、収束量の大きな部分がガストフロントに対応

する。

低仰角のドップラーレーダー観測で収束量の大きな部分を検出する場合、鉛直速度は測定にかからないので、水平収束のみが対象になる。そこで、視線方向(r 方向)の速度変化($\Delta v_r/\Delta r$)のみからガストフロントの候補点を探そうというのが自動検出方法の基本的な発想である。それらの候補点をグルーピングして水平方向につなげたのがガストフロントになる。



第4図 ガストフロントの検出例。ドップラー速度（負の値がレーダーに近づく成分を示す）分布と検出したガストフロント（太い実線）。ガストフロントの後方（レーダーから遠い部分）にレーダーに近づく速度の大きな部分（ $>20 \text{ m/s}$ ）が見られる (Uyeda and Zrnich, 1988)。



第5図 ドップラー速度の変曲点（黒丸が収束域，白丸が発散域を示す）分布。AとBの平行な2列の変曲点が見られる (Uyeda and Zrnich, 1988)。

視線方向の速度変化だけではガストフロントの広がり全体をみることはできないので、速度 (v_r) の方位方向 (θ 方向) の変化率 ($\Delta v_r / r \Delta \theta$) の大きな部分もガストフロントの検出に重要である (Uyeda and Zrnich, 1986)。実は、($\Delta v_r / r \Delta \theta$) は地表付近の対称性の良い渦の場合には渦度の値の目安となるものである。この量は、ドップラーレーダーの速度分布からメソサイクロン（小低気圧）や竜巻を検出する上では重要な量である。

ガストフロントの自動検出方法が確立すると、その方法を発展させてガストフロントの微細構造を知ることができる。例えば、第1図の速度分布に検出されたガストフロントを重ねた第4図では、ガストフロントにいくつかの屈曲がみられる。その原因を探るために速度の変曲点をプロットしてみた(第5図)。黒丸で示した収束を示す変曲点が2列に並んでおり(図中A, B)、この一部は前方の列(図中A)の方が強い収束を示すことがありうることがわかった。このようにして、できるだけ加工しない分解能の高い生のデータを用いた、1台のドップラーレーダーの解析により、ガスト

フロントの前面と後面の波動の特徴が明かになった (Uyeda and Zrnich, 1988)。

3. 積乱雲の発達過程

ガストフロントは積乱雲の衰退期に発生する現象であることは米国での研究で明らかになったが、このような現象は日本ではどのように起きているのか、また、熱帯や極域でも同じような現象が起きているのかどうかという疑問が生じる。北海道大学に移ってから、研究室のレーダーをドップラー化することができ、このような疑問に対する答えを探すべく、各地でメソ擾乱の観測をすることができた(第1表)ことは幸せであった。

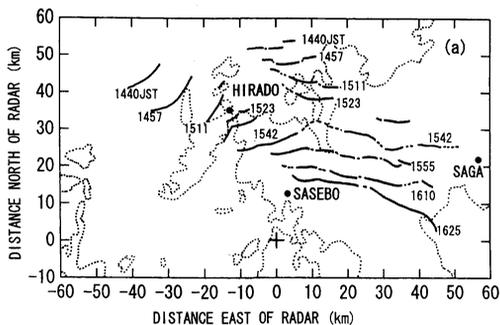
私自身にとっての日本における最初のドップラーレーダー観測は、1988年7月の梅雨末期の集中豪雨の共同観測(浅井, 1990)であった。7月17日には第6図に示したように、1台のドップラーレーダーによりガストフロント(シャーライン)の位置の時間変化を追跡することができた。積乱雲の発達段階とガストフロントの関係を直接観測し(第7図)、下層が湿潤な梅

第1表 ドップラーレーダー観測参加一覧
 <ドップラーレーダー (1988年7月から)>

観測対象	観測時期	レーダー設置場所
梅雨末期の集中豪雨	1988年7月	虚空蔵山, 長崎県
竜巻	1988年9月	北大構内, 札幌市
スノーバースト	1989年1月	北大構内, 札幌市
山の周りの気流	1989年8月	羊蹄山麓, 北海道
梅雨	1990, 1991年 6~7月	信楽, 滋賀県 (京大 MU レーダーサイト)
熱帯のクラウド クラスター	1992年11月 ~1993年1月	マヌス島, パプア・ニューギ ニア (TOGA-COARE)

<直交二偏波ドップラーレーダー (1991年1月から)>

観測対象	観測時期	レーダー設置場所
雪雲	1991年1月	礼文島, 北海道
雪雲	1991年12月~ 1992年1月	石狩町, 北海道
雪雲	1994, 95, 96年1月	北大構内, 札幌
竜巻	1992年7月	北大構内, 札幌
冬季雷	1993年11~12月 1994年12月 ~1995年1月	美浜町, 福井県
北極圏のメソ擾乱	1994年9~10月	タクトヤクタク, カナダ (BASE)



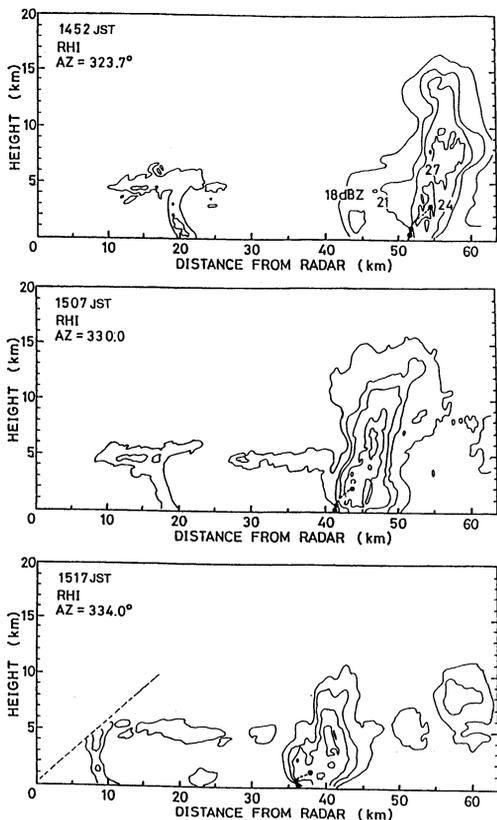
第6図 長崎県西海町虚空蔵山山頂に設置したドップラーレーダー(+印)で観測した, 1988年1月17日14時40分~16時25分のシャーライン(ガストフロント)の位置の時間変化。2つのガストフロントが15時40分頃1つにまとまり, 東西に延びるシャーラインを形成し南東進した(Takahashi *et al.*, 1996)。

雨期にもガストフロント周辺の気流の構造, すなわち積乱雲からの下降流の強さと吹き出し方(方向・厚さ)が次の積乱雲の発達に重要な役割をはたしていることを明かにした(Takahashi *et al.*, 1996)。

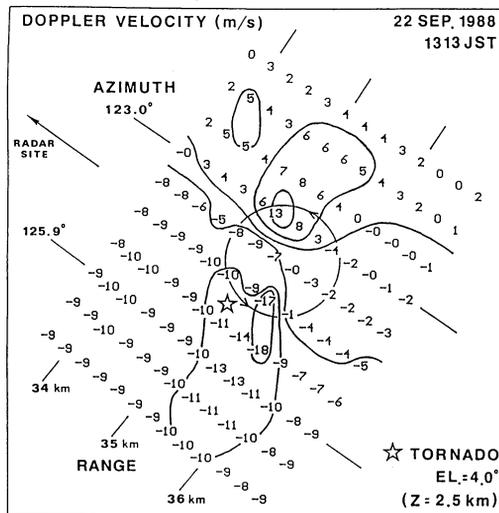
九州での梅雨観測から札幌に帰ってすぐの1988年9月22日に, 北海道大学構内に設置したドップラーレーダーで千歳市周辺に発生した竜巻を観測することがで

きた(Kobayashi *et al.*, 1995; Shirooka *et al.*, 1991)。第8図のように, ドップラー速度分布から, 直径1 km程度の強い渦を地上の竜巻に対応する位置のすぐ近くに検出することができた。数仰角のPPI (Plan Position Indicator) 水平走査とRHI (Range Height Indicator) 垂直走査から, 竜巻をもたらした積乱雲内の循環と竜巻及びマイクロバーストの鉛直構造の時間変化(第9図)を, 日本で初めてドップラーレーダーを用いた観測で明らかにした。

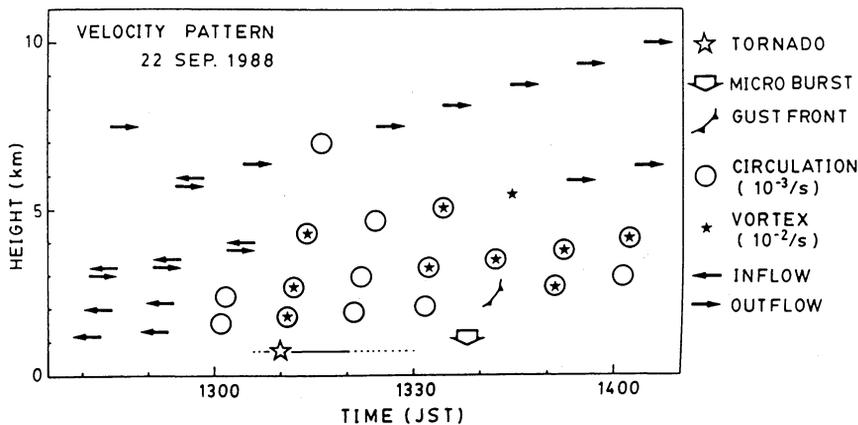
ドップラーレーダー観測が可能になると, 発達した雪雲からの強い下降流と強い吹き出しの存在(Shirooka and Uyeda, 1990)を明かにすることが可能になる。第10図のように, 急速に発達した雪雲が消滅するときに, 進行方向前方に風速20 m/sを超える吹き出しを作ることが確認された。雪雲にも, 発達した積乱雲からの強い下降流が存在し, その形成には霰のローディング(霰が空気を押下げる効果)が寄与していると考えられる。この現象は吹雪の発生原因として重要であると考えられ, このような現象を自動的に検出して, 吹雪の発生予測をしようという研究プロジェクトが行われるようになった。冬季日本海側の雪雲の構造については, 1992年の石狩湾周辺での集中観測(菊地, 1993)などで解明されつつあるが, さらに研究を進めたい未解決の問題も多い。



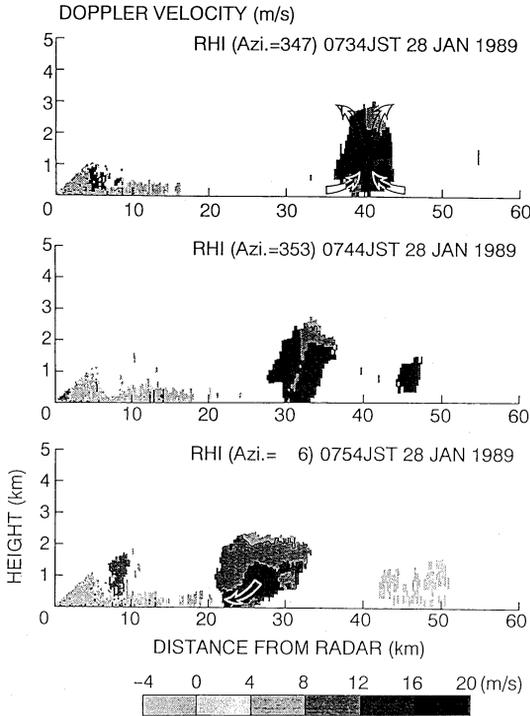
第7図 第6図に示したガスフロントをもたらすレーダーエコーを追跡した鉛直断面図。黒丸と破線でガスフロントの位置を示す。反射強度の強さを等値線で示した (Takahashi et al., 1996)。



第8図 ドップラーレーダーで観測した、1988年9月22日13時13分千歳市周辺で発生した竜巻周辺のドップラー速度(ここでは正の値がレーダーに近づく成分を示す)分布と地上の竜巻の位置(星印)、直径約1 kmの円で反時計周りの強い渦の位置を示す (Kobayashi et al., 1996)。

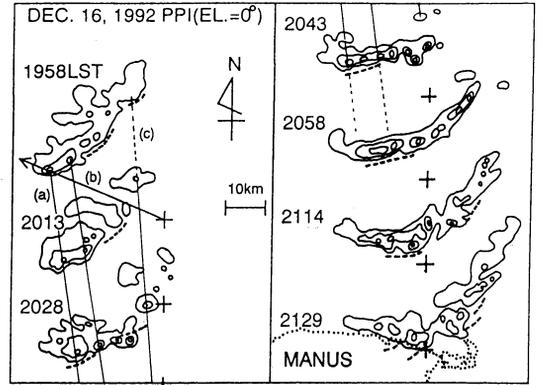


第9図 1988年9月22日12時~14時の千歳市周辺で発生した竜巻とマイクロバーストの鉛直構造。白星印が竜巻、白矢印がマイクロバーストの位置を示す。白丸で観測内の循環、黒星印で強い渦を示す (Shirooka and Uyeda, 1991)。



第10図 1989年1月28日07時34分～07時54分の10分間隔の、孤立した雪雲の鉛直断面内のドップラー速度(正の値はレーダーに近づく成分を示す)。矢印で雪雲に相対的な鉛直断面内の気流の概観を示す。

中緯度での観測に慣れた目には、静止気象衛星の赤外画像にみられる西太平洋赤道域の雄大なクラウドクラスターには、さぞかし強い下降流やガストフロントが存在すると映る。しかし、TOGA-COARE (Tropical Ocean and Global Atmosphere-Coupled Ocean Atmosphere Research Experiment) の集中観測 (住, 1995) において、パプア・ニューギニアのマヌス島に2台のドップラーレーダーを設置した3か月間の観測 (Uyeda *et al.*, 1995; Satoh *et al.*, 1995; Takahashi and Uyeda, 1995) では、北アメリカ大陸でみられるような水平スケール100 kmに達するような大規模なガストフロントは観測されなかった。第11図のように、レーダーエコーの進行方向前面に、個々のセルの衰退期に対応する吹き出しが作る、小規模のガストフロントが見られるばかりであった。エコーの後方、高度2～3 kmから下降流中に取り込まれた気流が、前面下層(1 km以下)に吹き出すのが多く観測された(第12図)。大規模なガストフロントが形成されない理由は、熱帯では中層の不安定度が小さく、下層が湿っていて、「暖

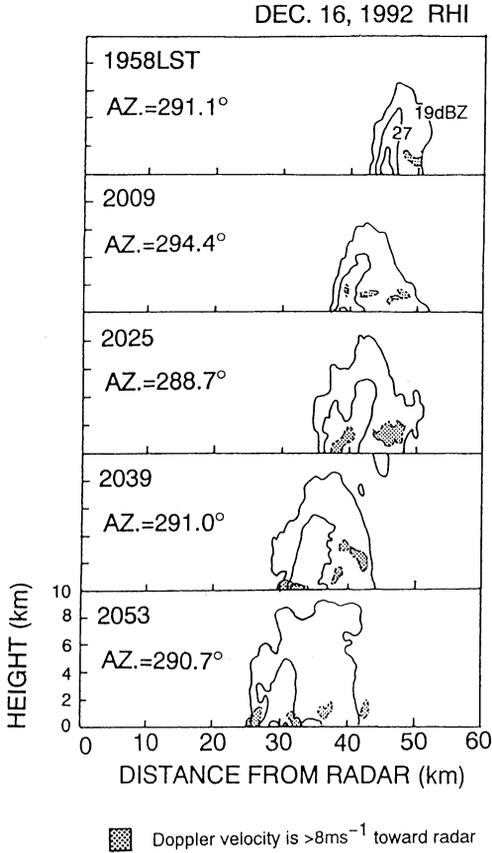


第11図 パプア・ニューギニアのマヌス島に設置したドップラーレーダーで観測したバンド状エコーの移動とガストフロント(破線)の位置。(+)印で各時刻のレーダーの位置を示す。(a), (b), (c)のエコーセルの追跡を実線と破線で示した (Takahashi *et al.*, 1995)。

かい雨」の機構による強い降雨が形成されるので、中緯度にみられるような雹や霰の融解と蒸発による急激な冷たい下降流の形成がなされないためであると考えられる。また、熱帯海上のクラウドクラスターも梅雨前線帯や低気圧の暖域内の雲と同様、広がりの多くの部分は層状の水晶雲であり、その下での降水量はそれほど大きくないということになる。しかし、時として雷を伴うこともあるので、熱帯の雲の構造についてはさらに観測・研究を続ける必要がある。

厳冬期の極域でのメソ擾乱のレーダー観測はこれからであるが、これまでの研究では、積乱雲はあっても密度の大きな霰はできないようなので、強い下降流やガストフロントは存在しないと考えられる。しかし、凍雨や低温領域での降水機構など興味の尽きない現象がある。

これまで種々の場所で「観たい」、「知りたい」という思いにつき動かされて観測を続けてきて (Uyeda *et al.*, 1991; Takahashi *et al.*, 1993; Belotsercovsky *et al.*, 1994)、各種の気象擾乱、特に水平スケール100 km程度のメソ擾乱、の個々の特徴はある程度わかってきた気がする。さらに、降水粒子の種類・数密度の空間分布と、雲からの降水とその周囲との相互作用を明らかにすることが大切なことはこれまで言われてきた通りである。しかし、「雲の中で何が起きているのか」という疑問に答えるためには雲の構造・成長機構を统一的に理解するための鍵となる要素が必要である。



第12図 第11図の矢印方向の鉛直断面図。反射強度を等値線で示し、レーダーに向かう速度成分が8 m/s以上の部分を影で示した。20時25分以後、エコーの進行方向前面下層に下降流からの吹き出しが見られる (Takahashi et al., 1996)。

4. 雲の構造の千差万別の別れ道

レーダーで観測できる100 km程度の現象は、メソスケールからβスケールの現象が中心になる。ここでは、雲の中でどのような降水粒子がどの程度、どのように発生・発達するかということが、現象の理解の上で重要な問題になる。直交二偏波レーダーにより、降水粒子の種類と粒径分布の3次元構造も観測可能になりつつある今、メソ擾乱の発達機構を解明するうえでドップラーレーダーの集中観測や特別観測を行なう意味を考え、今後の研究の方向を整理してみたい。

特別観測を行なう意味の一つは、地域に特有な現象に即した観測を行ない、その地域を対象にした現業的な観測システムを構築するための指針を示すことである。一方、気象現象の理解のために、ドップラーレー

ダー観測等によって世界各地の降水をともなう雲を観測していく方向がある。これは、異なるタイプの雲の内部構造の観測結果を集め、整理し直して、降水雲の統一的理解をめざすことである。

目で見た雲の形の分類が始まり、人工衛星で見た雲の形状やレーダー反射強度の鉛直構造などから、「対流雲」か「層状雲」かという分類はなされている。しかし、雲の形による分類を一歩進めて、物理量で整理し直して地球上の種々の場所での雲の構造を統一的に理解したい。このことは、ラージスケールの気象現象を考える上で「雲をどうパラメタライズすればよいか？」という問に答えることにつながる。

この問に答える上で、小林慎作博士(1980)の「(雲の形は何種類あるか?)という問いに答えることは(雪結晶の形の千差万別の別れ道)を示すことだ。」という言葉が参考になる。氷晶核からスタートして、雪結晶が単結晶になるか多結晶になるかが一つの別れ道である。単結晶の雪結晶の形(晶癖)は温度と過飽和度で決まり、板状や樹枝状などのよく知られた結晶形をとる。多結晶の雪結晶では、多結晶の結晶軸方位の組み合わせ方で結晶形が決まり、その後の形は単結晶と同じく温度と過飽和度で決まる晶癖に従う。この分野では、実験の難しい0°C付近と-25°C以下の低温領域で成長する雪結晶の形が残された問題である。雪結晶の美しさやめずらしさには、結晶成長学的にはほぼ説明を加えることが可能になったといえる。

時として我々を引きつけて放さない美しい雲やめずらしい雲にも気象学的な説明を加えたい。そうした説明が統一的にできたときに降水をともなう雲を理解したことになり、メソ擾乱の理解につながると思う。雪結晶の形のアナロジーで考えると、「雲をどうパラメタライズすればよいか？」という問に答えることは「(対流)雲(群)の形(構造、発達過程)の千差万別への別れ道」を示すことが一つの方法である。降水を伴うまでに発達した雲を対象とすると、氷晶過程を含む雲であるか氷晶過程を含まない雲であるかがまず最初の別れ道になると考えられる。大気不安定度、鉛直シャー及び水平収束(発散)などの場が、雲粒子と降水粒子の成長の仕方と分布にどのようにきくのかは次の別れ道の説明に必要なと考えられる。雲粒の粒径分布と降水粒子の種類や粒径分布は、粒子の捕捉成長過程を決め降水過程を決定するから、下降流形成を決定すると考えられる。雲の中の雲粒子と降水粒子の成長に関する基礎実験は、かつて実験室内で数多くな

れたが、実際の雲の中での雲粒子と降水粒子の成長を室内実験で行なうことは困難であるので、ドップラーレーダー等のリモートセンサーや飛行機を用いた特別観測が必要である。

数値実験も重要な研究手段であるが、「雲をどうパラメタライズすればよいか？」という問に答えるためには定量的な観測データがまず不可欠である。雲粒の粒径分布と降水粒子の種類・粒径分布についての定量的な観測には莫大な予算を必要とするが、国内でも各種の観測機器の整備が進みつつあるので、将来の方向性を正しく示し、その重要性を広く理解してもらえらるなら、そうしたことの実現も決して無理なことではなくなってきた。

5. まとめ

私はここ十数年間、個々の雲の構造の理解から雲システムの理解をめざして、種々のレーダー観測を行ってきた。メソ擾乱の発達機構に果たす降水の役割、特に降水とガストフロントとの関係及びガストフロントと次の対流雲の立ち方、の重要性を示し、雲の構造の理解を整理するために必要な材料（観測結果）を提供してきた。

多くの観測を手がける中で、メソ擾乱の特別観測には多くの人の協力がますます必要になっていることを身をもって経験した。また、レーダー観測と数値モデルとの結合、放射の観測、衛星計測との協力等、新たな研究の推進のために、ドップラーレーダーをはじめとする地上リモートセンサーによる高度な観測の必要性はさらに高まっていると感じている。

研究に参加する一人一人の興味を満たしつつ、研究結果が広い分野に利用されるようなテーマを模索して、多くの人が取り組むべき研究の方向性を明確にできるように、研究を続けたい。

謝 辞

私が研究者として自立できたのは、北海道大学理学部の孫野先生・菊地先生のご指導のおかげです。国立防災科学技術センターに職を得てからは八木室長、木下部長を始め、同センターの方々のお世話になりました。その間に、米国のNSSLに1年間滞在する機会を得ましたが、このとき、オクラホマ大学教授でありCIMMS(メソ気象共同研究所)所長をされていた佐々木先生にお世話になりました。特に、ガストフロントの解析について多くのご教示をいただきました。この

ときの直接の上司であったNSSLのZrnich'博士、部長のDoviak博士および所長のKessler博士に大いに啓発されました。

北海道大学に奉職してからは、菊地教授はじめスタッフの皆様のお世話になっています。現在は各方面で活躍中の当時の学生の皆さんと一緒に行った研究成果の多くも、今回の受賞内容に含まれていると理解しています。共同研究等で、多くの大学の方々や気象研究所をはじめ多くの研究機関の方々に種々の形で支えられました。お礼申し上げます。さらに、研究用にレーダーの改良に尽力くださったレーダーメーカーの方々にもお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 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, 1-458.
- Belotsercovsky, A. V., H. Uyeda and K. Kikuchi, 1994: Radar imagery nowcasting using adaptive stochastic models, *Atmos. Res.*, **34**, 249-257.
- Charba, J., 1974: Application of a gravity current model to analysis of squall line gust front, *Mon. Wea. Rev.*, **102**, 140-156.
- 菊地勝弘, 1993: 都市の豪雪災害の予測と軽減・防除に関する研究, 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, 1-609.
- 小林禎作, 1980: 六花の美—雪の結晶成長とその形—, サイエンス社, 1-249.
- Kobayashi, F., K. Kikuchi and H. Uyeda, 1996: Life cycle of the Chitose tornado of September 22, 1988, *J. Meteor. Soc. Japan*, **74**, 125-140.
- Satoh, S., A. Kinoshita and H. Uyeda, 1995: Doppler radar observations on the structures and characteristics of tropical clouds during TOGA-COARE IOP in Manus, Papua New Guinea: Dual-Doppler analysis of mesoscale convective systems composing a cloud cluster, *J. Meteor. Soc. Japan*, **73**, 443-459.
- Shirooka, R. and H. Uyeda, 1990: Morphological structure of snowburst in the winter monsoon surges, *J. Meteor. Soc. Japan*, **68**, 677-686.
- Shirooka, R. and H. Uyeda, 1991: Doppler radar Observation of tornado and microburst around Chitose airport, *Proc. 25th International. Conf. Radar Meteorology*, J73-J76.
- 住 明正, 1995: TOGA を中心とした熱帯—海洋結合系の研究について, *天気*, **42**, 5-15.
- Takahashi, N., H. Uyeda and K. Kikuchi, 1993:

- Doppler radar observation on wave-like echoes generated in a strong vertical shear, *J. Meteor. Soc. Japan*, **71**, 357-365.
- Takahashi, T. and H. Uyeda, 1995 : Doppler radar observations on the structures and characteristics of tropical clouds during TOGA-COARE IOP in Manus, Papua New Guinea : Three case studies on November 23 and December 16, 1992, *J. Meteor. Soc. Japan*, **73**, 427-442.
- Takahashi, N., H. Uyeda, K. Kikuchi and K. Iwanami, 1996 : Mesoscale and convective scale features of heavy rainfall events in late period of the Baiu season in July 1988, Nagasaki prefecture, *J. Meteor. Soc. Japan*, **74**, 539-561.
- Uyeda, H. and D. S. Zrnich, 1986 : Automatic detection of gust fronts, *J. Atmos. and Oceanic Technol.*, **3**, 36-50.
- Uyeda, H. and D. S. Zrnich, 1988 : Fine structure of gust fronts obtained from the analysis of single Doppler radar data, *J. Meteor. Soc. Japan*, **66**, 869-881.
- Uyeda, H. R., Shirooka, K. Iwanami, A. Takemoto, K. Kikuchi, G. Yoshida and M. Okazaki, 1991 : Observation of vertical structure of convective snow clouds with a dual-polarization radar in Hokkaido, Japan, *Proc. 25th International. Conf. Radar Meteorology*, 717-720.
- Uyeda, H., Y. Asuma, N. Takahashi, S. Shimizu, O. Kikuchi, A. Kinoshita, M. Katsumata, K. Takeuchi, T. Endoh, M. Ohi, S. Satoh, Y. Tachibana, T. Ushiyama, Y. Fujiyoshi, R. Shirooka, N. Nishi, T. Tomita, H. Ueda, T. Sueda and A. Sumi, 1995 : Doppler radar observations on the structures and characteristics of tropical clouds during TOGA-COARE IOP in Manus, Papua New Guinea : Outline of the observation, *J. Meteor. Soc. Japan*, **73**, 415-426.

Studies on the Development of Mesoscale Disturbances with Doppler Radars

Hiroshi Uyeda*

**Graduate School of Science, Hokkaido University, Sapporo 060, Japan.*

(Received 28 October 1996 ; Accepted 21 January 1997)
