天気予報の技術開発に携わって

—1998年度藤原賞受賞記念講演—

立 平 良 三*

1. はじめに

気象業務法が制定され、気象庁(当時は中央气象台)が行政官庁として本格的にスタートしたのは1952年のことで、約半世紀を経過しました。私が予報業務の現場に配属されたのはこの翌年でした。以後もっぱら観測・予報技術に係わってきましたが、このような実用的な仕事を学会からも評価して頂きましたことは、この上ない喜びであります。

当時の予報のための主な道具は地上および高層天気図でした。やがて気象レーダー、数値予報、アメダス、気象衛星などが順次加わり、また気象資料の処理及び集配信技術も急速に進歩しました。そこで1970年代の半ば頃から、これらの新しい観測・予報・通信技術をフルに活用し、気象情報に対する社会のニーズに適切に対応できるような「地域的時間的にきめ細かい量的予報」のための短期予報システムを構築しようという機運が高まり、NWW計画が発足しました(気象庁総務部企画課, 1978)。私の受賞理由の中の「予報の革新」が意味するものは殆どがこのNWWに関係したものであり、たまたま私がこの計画の中で技術開発分野を担当していたが故に、この計画を推進された数多くの方々を代表して受賞させて頂いたものと感謝しております。

NWWというのはNational Weather Watch(国内気象監視)の略称で、世界気象機関(WMO)の推進しているWWW(World Weather Watch)計画になぞらえて命名されたものです。この計画は1980年代後半にほぼ当初の目標を達成し、現在さらに最新の技術を取り入れてレベルアップが図られています。

2. レーダーエコーのデジタル化

NWW計画の策定や実行に当たっては、当時の窪田正八予報部長を委員長として全庁的なNWW委員会が殆ど毎週開かれ、活発な討論が行われました。実は、NWWの始まる数年前から、窪田氏(当時電子計算室長)が主催する「レーダー利用技術研究会」と称する勉強会が開かれていました。この当時、現業用のレーダー観測網は既に現在とほぼ同じ形に整備されていましたが、レーダーの能力が予報作業に十分生かされていないと感じている技術者が多く、それがこのような研究会の発足した理由でした。この研究会は技術的にはNWW委員会の前身といった意味合いがあって、私のような地方でレーダー係長を経験した技術者とか、予報関係の若手の技術者が主なメンバーでした。

レーダーを大雨の探知や注意報・警報に利用するにはデジタル化してコンピュータで迅速に処理することが不可欠であり、それには地形エコーを除去する技術が必須だが、開発の可能性はといった議論が交わされました。電子計算室は現在数値予報課と改称しているように、当時から数値予報優先の色彩が濃厚でしたが、窪田室長は広い視野から予報業務全般へのコンピュータ利用を構想されておられたように思います。

「レーダー利用技術研究会」の検討内容はNWW委員会にも引き継がれ、レーダーの予報への利用はNWW計画の主要な柱の1つでした。ネックとなっていた地形エコーの除去は、幸い日本無線株式会社清水紀雄氏(現同社研究所副所長)の熱心な協力によって解決されました(立平ほか, 1976)。この地形エコー除去技術は、地形エコー強度には時間変動が殆どなく、降水エコー強度の方は激しく変動することを利用するものです。つまり、変動成分だけ取り出せば地形エコーは除去できるわけです。しかし、通常使われているレーダー受信機は対数特性増幅器なので、降水エコーの変

* (財団法人)気象業務支援センター。

—1998年9月21日受領—

—1998年11月4日受理—

動成分は強度に拘わらずいつも一定になってしまい、エコー強度の情報が失われてしまいます。だから降水エコー強度を知るには、直線特性¹増幅器を使わねばなりません。気象レーダーに使えるようなダイナミックレンジの大きい直線特性増幅器は無理という所で行き詰まっていた。ところが、その頃にはもう信号のデジタル化がかなり容易にできるようになっており、対数増幅器の出力信号をデジタル化して演算で直線特性に直し、それから変動成分を取り出せばよいことに気付いて地形エコー除去は可能になりました。

しかし、除去装置を試作し実験したところ、直線特性では強い地形エコーはかなり消え残りました。この問題も、清水紀雄氏が装置の調整中にたまたま直線特性(つまり1.0乗特性)を0.6~0.7乗特性に変えて良好な除去特性が得られることを見だし、その理由も明らかにされて解決しました(Tatehira and Shimizu, 1980)。これが、現在気象庁で運用しているレーダーエコーデジタル化装置の地形エコー除去技術です。

地形エコー除去技術の実用化により、暗いレーダー観測室で観測者がエコーのスケッチに苦悶する必要はなくなりました。また、それまでせいぜい毎時にしか予報官に届かなかったレーダーエコー図が、10分程度の短い間隔でディスプレイに表示されるようになり、また、コンピュータ処理によって様々な加工が可能になりました。NWWでは、これを利用してレーダーエコー合成図、レーダーアメダス解析雨量図(気象庁予報部予報課, 1995)、降水短時間予報(気象庁予報部予報課, 1991)などの作成が計画され、1980年代後半から日本及びその近海について毎時出力されています。これらのプロダクトは、特に大雨注意報・警報の改善に寄与する所が大きく、大雨警報の見逃しは皆無といえるような状況になりました。また大雨警報発表から大雨警報基準に達するまでの時間、つまり先行時間も徐々に延長されています。レーダーアメダス解析雨量図は日本近海もかなりカバーしているので、数値予報の初期値解析にも効果的に利用されています。

3. MOSの導入

NWWの技術面でのもう1つの主要な柱は数値予報を利用したMOS(Model Output Statistics)でした。1973年から数値予報の1日2回ルーチンが開始され、数値予報の予想図が予報作業室の壁に所狭しと掲示されるようになってきました。当時まだ駆け出しの予報官だった私は、東京都の天気予報を出すために、

大量の予想図を前に時間と格闘していました。数値予報のプロダクトの中で、降水の予報に使えるものとしてまず考えられるのは上昇流とか湿度などの予想でしょうが、レーダーエコーと対比してみると、関連付けが思いのほか困難でした。多数の例について統計的に処理して、数値予報の予想値と降水との相関を見付けてみようかと考えていたら、ちょうど米国で同じようなアイデアの重相関回帰式によるMOSの論文が続々と発表され始めました(例えばKlein and Glahn, 1974)。

NWでは天気予報システムの中軸に数値予報を置き、さらにその出力をMOSなどの客観的手法で局地的な天気翻訳し、天気予報にすぐ使えるような予測資料、つまり最終製品型予測資料(ガイダンス)を予報官に配布するという方針をとりました(気象庁予報部業務課, 1979)。幸い、予報課や数値予報課の中で熱心に取り組んでくれる若手に恵まれ、意外に早くMOSが実用化され、降水確率なども客観的に予想できるようになりました。その頃、予報部の予報中枢コンピュータの更新計画が進行中で、大蔵省の予算担当官から「更新を認めたら米国みたいな確率予報もできるようになるのか」との質問があったとか。当時の窪田正八予報部長から筆者(当時予報課長)に降水確率予報の技術開発の見通しを聞かれたときには、もう技術的な準備は終わっていました。

気象庁でのMOSの開発は、降水関係、とくに防災に関連して大雨予想に最も重点がおかれていました。最初に開発されたのは大雨確率ガイダンスで、各気象官署で大雨予警報の参考資料としてまず利用されました。次は降水確率ガイダンスで、この確率値を予報官が修正するという手順で1980年の東京地方を皮切りに全国的に降水確率予報が発表されるようになりました。このほか色々の気象要素の発生確率もMOSで計算されるようになりましたが、直接には発表されず予報文作成の参考にされています。

気象庁におけるMOS技術のもう1つの特徴は、数値予報の出力をそのまま重相関回帰式の予測因子として使うのではなく、降水のメカニズムを考慮して「湿潤層の厚さ」「地形性降雨指数(立平, 1976)」「ブラック・

¹対数特性と直線特性

直線特性増幅器では出力は入力に比例しているが、対数特性増幅器では大きい入力ほど増幅率が小さく、入力の対数に比例した出力が得られる。入力のレンジが大きい場合には対数特性増幅器がよく使われる。

ボックス指数（立平・斉藤，1973）」といった形に組み合わせて重相関回帰式を求めたところにありました。また、MOSの精度は、実況値の質と量にも大きく左右されますが、日本の場合充実したレーダー網とアメダスのおかげで比較的早い時期に実用的精度に達することができたと思っています。

数値予報では、当時から上昇流と水蒸気量などの予想値から凝結量を計算し、降水量予想として出力していましたが、MOS手法による降水量予想の精度はこれをかなり上回るものでした。最近では、数値予報の精度向上により、この差は縮まってきており、それぞれ特徴のある予測資料として使い分けられているようです（気象庁，1997）。しかし、降水確率のような現象発生の確率の予想は数値予報の出力には含まれず、MOS手法のお世話にならねばなりません。また風や気温など局地性の強い気象要素の予想にも当然必要な処理ではないかと考えます。

当初の重相関回帰式を用いたMOSでは、1～2年程度の数値予報出力の蓄積を待たねばならず、モデルチェンジへの対応が遅れるという欠点がありました。しかし、その後、逐次学習の機能を備えたカルマンフィルターとかニューラルネットワークといった統計手法がMOSに用いられるようになり、比較的短期間にモデルチェンジに対応できるように改良されています。

4. 降水確率予報のスタート

降水確率予報の発足に際しては、マスメディアから「予報の当たらないのをごまかすためではないか」など、見当外れの批判もありましたが、全体として好評だったように記憶しています。加藤寛氏や竹内宏氏など高名な経済専門家からもその意義を認められ、このような確率表現の予報ができるのは現象のメカニズムがよく解明されているからだろうとのコメントがありました。経済予測との比較が念頭にあっての発言と理解していました。

最初の降水確率予報は、1980年6月1日の朝、東京地方に対して発表した「午後3時から9時の予報」でした。当日の夜になって、各新聞社ともその当たり具合を取材にきました。幸い「40%」という降水確率予報に対して、都内のアメダス10か所のうち5か所で雨が降り、まずは順調な滑り出しでした。担当の浜田周作予報官から、ぴったりでなくて済みませんと謝られたが、実はMOSガイダンスは30%と計算していたのを10%改善した立派な予報だったのでした¹。

大学の入学試験で降水確率予報に関する問題が出たこともありましたが、京都大学経済学部の昭和63年度入試の出題で、立平（1987）から降水確率予報に関する節が引用され、「あいまい理論」と関連させて小論文にまとめよというものでした。

しかし、何といたっても新しい試みですから、出す予報官側でも、受けとるユーザー側でも多少の誤解や混乱は避けられませんでした。このため、テレビに出たり新聞や雑誌に寄稿したりしてPRに努め、部内でも各種の会議の席上で趣旨の徹底を図りました。

大阪管区の予報検討会に招かれ、降水確率ガイダンスの修正法について講演したあと、当時の大阪管区予報課長岡林一夫氏が「五か条の御誓文を守ろう」とユーモアのある締めくくりをされたこともありましたが、というのは、ガイダンスを予報官が主観的に改悪して降水確率予報を発表するケースがまま見られたので、それに対する注意事項を並べたらまた「五か条」あったということでした。

降水確率予報は一般の利用の他に、企業活動における重要な意思決定にも使って貰えるものと期待していましたが、こちらははかばかしくありませんでした。よく引き合いに出される「球場の弁当屋」を例にとり、確率予報の利用法を解説したことがありますが（立平，1979）、口の悪い予報官から「弁当屋がこの通り確率予報を利用したら潰れるのでは」と冷やかされました。

天気予報は人間の諸活動における意思決定に利用されて初めて価値を生じ、国民の福祉に寄与するものです。朝、天気予報を聞いて、傘を持つかどうかを決定するような単純なケースもありますが、もっと複雑で大きな利害を伴うような意思決定も多々あります。天気予報を利用して最も適切な対策行動を決定するためには、まず天気予報の誤差が明示されていることが不可欠で、そのための実用的手段が天気予報の確率表現です（立平・保科，1984）。天気の経済活動への影響については、これまでかなりの解説がありますが、予報には必ず誤差を伴うことを踏まえての議論は極めて少

¹降水確率の意味

東京都の降水確率予報が40%というのは、都内各地点のそれぞれにおいて1mm以上の降水のある可能性が40%という意味である。予報の検証は都内の10点のアメダス雨量計によるが、この日のように都内のアメダスの5点（50%）で1mm以上の降水があった場合は、50%に近い確率予報ほど精度が高くなる。

ないように思います。

最近では1か月予報や3か月予報といった長期予報にも確率表現が付加されるようになり、この確率的長期予報を使ってある大手スーパーが季節商品の仕入れ量を調整しているという話を聞きました。長期予報の精度はまだ低いので、例えば暖冬との予報をそのまま信用して、冬物の仕入を暖冬に見合う量に制限したりすれば、予報が外れた場合に在庫切れになって儲け損なうことになります。暖冬と予報されている場合でも、確率表現すれば「高い50%」「平常並み30%」「低い20%」といった程度のもので外れる可能性はかなりあります。この確率表現を利用すれば、利益の期待値を最大にするにはどれくらい仕入れるべきかを計算することができる筈です。

5. 予報精度評価の業務化

前節で述べたように、天気予報を利用して対策行動を決定するには、まず天気予報の誤差を知ることが必要で、確率予報では、予報の発表ごとに精度が表示されているわけです。発表ごとでなくとも、せめて年平均とか季節平均での予報精度が分かっているだけでは適切な利用はできません。このように予報精度の評価は予報利用の基礎ですが、それと同時に予報技術改善のための基礎資料でもあります。しかし、NWW以前には、ごく限られた地域（東京大手町など）について、しかも一部の気象要素についての評価が時に中断しながら行われていたに過ぎません。

気象庁は1981年に筆者を委員長として予報成績評価要領作成委員会を発足させ、組織的な天気予報精度評価のありかたについて検討を開始しました。1982年、一応の答申が出され、それに基づいて定員要求がおこなわれ、東京管区内の予報精度評価業務が1987年度から発足する運びとなりました。評価業務の内容は、次の2分野に大別されます。まず各気象要素（降水、気温、風など）の日々の予報精度について月平均など各種の統計値を算出すること、次に大きく外れた場合のケーススタディを実施し、外れの原因を追及することです。

後者については、実は長年続けられてきた予報検討会がこの種の調査を度々取り上げてきながら、あまり精度向上には寄与しなかったという経過もあり、組織的な評価業務には馴染まないのではという意見もありました。しかし、航空機事故の調査が航空機の安全性に大きく寄与している例を考えても、外れの原因追及

は技術改善の基本であるとの意見も強く、一応答申の中に含まれました。この線に沿って、地方気象台の予報官に、予報を外した場合に原因を調査して報告するよう求めた時期がありました。これは『懺悔録』といったニュアンスで現場の予報官に大きな負担を与えたものの、予報改善への寄与は定かではなかったようです。

天気予報の場合には、通常の工学分野における故障原因の調査とは違って、外れた原因の確定が一般には困難です。例えば「ある気象要素の変化をもっと重視しておれば外れを防げた」といった調査結果が一応は得られたとしても、単に見かけ上の偶発的因果関係である可能性があります。1つの「外れ事例」の原因調査の結果、こうしたら改善できるという手法を提案できても、次に同じようなケースに遭遇したとき、その手法に従って却って予報を外してしまうこともよく経験されます。確実に予報改善に結びつけるには、似たような「外れ事例」を数多く探し出して、「提案手法」が確かに予報改善をもたらすことを確認する必要があります。『懺悔録』に引き続いてこのような作業が組織的に実施されなければ、予報官に負担をかけるだけのことになってしまいます。

6. 予報業務の系列化

筆者が気象庁に入った1950年代には、電信で集信されたデータを手書きで地図に記入し、鉛筆と消しゴムで天気図に仕上げるという作業が予報業務の中で大きな比重を占めていました。天気図は天気予報を担当する各気象台や測候所ごとに作成され、「天気図を千枚は書かねば一人前でない」とか「他人の書いた天気図で予報が出せるか」といった時代でした。その後、数値予報のような画期的な予報技術が登場し、また気象資料の集配信技術にもFAXなどの新技術が導入され、各気象台における予報作業も徐々に効率化されてはきましたが、本庁と地方を総合した予報システムの見直しはNWW計画で本格化したといえます（気象庁予報部業務課、1979）。

NWWでは、数値予報の予想図やガイダンスは勿論のこと、天気図（地上・高層）なども気象庁本庁で一括作成配布され、各予報担当官署はFAXやワークステーション画面で見えるように計画されました。さらに、各管区気象台や地方予報区を担当する気象台（全国に11）もそれぞれの担当域に共通して必要な予測資料（主としてメソ現象関連）あるいは指示報の発信を担当す

るという形で、いわゆる各級予報官署の系列化が推進されました。今日・今夜・明日の予報、つまり短期予報用のガイダンスとしては、前述の降水確率や大雨確率の他、発雷確率や降水量、最大風速、最高・最低気温、最小湿度などについても作成され、1994年度からは、これらの客観的予想値を総合して、天気予報文を自動的に作成する技術も実用に供されるようになりました。このような予報システムの変革は、米国をはじめ先進諸国においても、それぞれの国の特色はあるにせよ基本的には同じ道をたどっています（例えば Carter, *et al.*, 1989）。

天気予報の中でも目先数時間についての予報、つまり短時間予報については、NWW では 2 節で述べたようにレーダーやアメダスを活用し、レーダーアメダス解析雨量図や降水短時間予報などのガイダンスを作成・配布して、各予報官署の担当者による降水の実況監視や目先の予報を支援しています。

NWW 計画の進行中、筆者は「新しい天気予報」と題した著書（立平, 1986）を出版しましたが、中身は降水確率予報と降水短時間予報（ナウキャスト）¹でした。もっと他に取り上げるべき新しい天気予報があるのでは、という感じを持たれた読者もいたようですが、予報というのは発表行為も含めてのことです。数値予報を始め各種リモートセンシングなど、予報の品質の向上に寄与したものは多々あるものの、これまでにない新しい天気予報として一般利用者に発表されたのは、降水確率予報と降水短時間予報と考えたわけです。

7. 気象学的ガン論争

NWW で最終製品型資料（ガイダンス）の開発が重視されたのは、いわゆる大量退職時代が迫っていたという事情もありました。気象庁では終戦時に海外気象官署や軍の気象技術者を大量に受け入れていましたので、1980年代半ば頃から数年に亘り年間三、四百名の退職者が予想され、従ってまた経験豊富な職員が予報業務から去ることになります。その時期でも予報精度を落とさないためには、降水確率などのガイダンスの精度を予報官並にまで高めておけば万全です。この目標は数値予報の精度向上と相まって達成できたと思っ

¹短時間予報とナウキャスト

短時間予報とは 6 または 12 時間先までを対象時間とする予報である。特に、実況の外挿を基本として 2 時間程度先までを予報する短時間予報ををナウキャストという。

ています。さらに予報官によるガイダンス修正技術の進歩もあって、大量退職後も予報精度は着実に向上しています。

しかし、NWW では、以前は予報官の役割であった作業のかなりの部分をガイダンスなど客観的技術に置き換えています。このため予報官の士気が低下して、ガイダンス任せの無気力な仕事ぶりになるのではという危惧は日本のみならず米国にもありました。米国ではこれを気象学的ガン（Meteorological Cancer）と呼んで警告する論文なども発表されました（Snellman, 1977）。この問題を巡って、日本気象学会でもシンポジウムや座談会が開催され、「将来の予報官像」といったテーマで活発な議論がありました（日本気象学会シンポジウム, 1978；日本気象学会座談会, 1978）。

ガイダンス任せになる弊害を防ぐため、予報官の技術は、従来のように予報の「当たり外れ」によって評価されるのではなく、ガイダンスをどれだけ改善（又は改悪）したかによって評価すべきであることが強調されました（立平, 1986）。その後の経過を見ると、深刻な事態にはならなかったものの、予報官の意識切替えにはやはり時間がかかっているように感じます。

本来の NNW の趣旨は、Machine（数値予報や客観的天気翻訳）の活用によって Man の負担を軽くし、予報官は Man にしかできないことに集中させることにありました（立平, 1979b）。「Man にしかできないこと」としてまず考えられるのは、Machine 資料の修正です。客観的予想資料（数値予報や天気翻訳）の精度は着実に向上していますが、予報技術者による修正が必要な局面はまだ残されています。

客観的予想資料は今のところ 12 時間おきにしき計算されていませんし、しかも出力が初期時刻の数時間後なので、最新の気象観測データによる修正は当然 Man の仕事です。この修正は、頻繁な更新を必要とする目先数時間から半日程度の予報の場合に特に大切なことです。また激しい天気現象の場合は、注意報・警報発表など防災上の観点からも、この最新実況の監視および予想修正は極めて重要な作業です。例えば大雨などの場合は、その大雨発生から災害発生までには時間的ラグがあることも多いので、予想の修正までは手が回らなくても、監視結果を直ちに情報として発表するだけでも防災効果が期待できます。暴風の場合でも、過去の移動の単純外挿による情報が速報されれば有効でしょう。

ここで最新の気象観測データというのは、主として

レーダー、アメダス、気象衛星など、時間的空間的にきめ細かい、いわゆるメソスケール観測網によるものを意味します。降水については3時間先までは、これらのデータから作成された客観的予想資料（降水短時間予報）がありますが、時間と共に精度の低下は著しく、又3時間より先の予想は予報技術者が担当せねばなりません。この種の修正は主としてメソスケール以下の大気現象に関連するものであり、大規模現象とは違ってメカニズムの理解が十分でない現状では、体系的な技術にまとめるのは容易なことではないでしょう。現在、統計的手法やメソ天気系の概念モデル（立平, 1989）の開発といった形での努力が続けられています。また、気象庁の重要課題の1つとして開発が進んでいるメソ数値予報モデル（MSM: Meso Scale Model）が実用化されるに伴い、Manによるメソスケール現象がらみの修正作業は順次肩代わりされることが期待されます。

修正の問題に限らず、一般に予報官の役割は、予報現場における作業から技術開発に移行する趨勢にあると考えています。予報現場の作業はできるだけMachineに任せ、Manはその作業の流れを監督し、調整するというわけで、いわば職人（Artisan）から監督者（Supervisor）への変身です（立平, 1979b）。つまり、これからの予報官は、予報に関連する科学技術の現状と地域社会の多様なニーズの動向を適確に把握し、天気予報システムの最適化のための技術開発に協力することに仕事の比重を移すべきだということです。

8. ドップラーレーダーとの再会

気象庁に在職した39年間は一貫して行政職で、研究職として研究に専念したことはありませんでしたが、1967年から1968年にかけて1年間だけはシカゴ大学で研究協力員（Research Associate）としてD. Atlas教授の研究に協力しました。Atlas教授は当時からドップラーレーダーに熱中しており、私もVAD（Browning and Wexler, 1968）を利用したメソ解析を手伝いました（Atlas, *et al.*, 1969）。日本に戻ってから、ドップラーレーダーについての総合報告（立平, 1972）をまとめたりしながら、何とか気象庁でも早くドップラーレーダーをと願っていましたら、当時の気象研究所小平邦彦室長のご努力で研究所に設置されました。残念ながら、このレーダーとは殆ど無縁のまま気象庁を定年退職ということになりました。

幸い電気通信大学の電子工学科に奉職することになり、再びドップラーレーダーを扱う機会が巡ってきました。もっとも、自前のレーダーを持てる筈もないので、もっぱら気象研究所のドップラーレーダーのデータを使わせて頂きました。

NWW計画では、デジタル化レーダーやアメダスなどを活用して降水の実況把握及び予測についてはかなり水準の高いシステムが構成できたと思っています。しかし、風についてはアメダスによってかなり細かい時間的・地域的分解能で地上風データが得られるものの、降水の場合のレーダーの役割を果たすものがありません。さらに、地上風は降水に比べて近隣の地物の影響を受けやすく、また降水と違って鉛直方向の変化が大きいということもあって、風の実況把握及び予測については技術開発が遅れています。従ってまた、暴風警報など風関係の予報・警報の精度は降水関係に比べて悪く、短時間予報も実用化されていません。

風の3次元的なメソスケール観測手段としては、まずドップラーレーダーが挙げられます。降水粒子がなくとも大気の屈折率の乱れや昆虫などが利用できる場合もあります。米国気象局（NWS: National Weather Service）が推進している気象業務近代化計画においても、その技術的裏付けとしてまず第1にWSR-88D型ドップラーレーダーの利用が挙げられています（Friday, 1994）。米国気象局は、航空局および国防省と協力して、全米に約150台の設置を既に完了しています。しかし、ドップラーレーダーの第1の問題点は、測定するものが動径速度であって風そのものではない所にあります。通常のレーダーの場合も、測定するものが後方散乱面積であって降水強度でも含水量でもないという似たような事情がありますが、実用的な換算法はレーダーアメダス解析雨量で一応確立されています。

動径速度分布から、風分布を求める手法として、まず提案されたのはVAD技術です。ただし、この技術で求められるのはレーダー設置点の直上の風及び水平発散などです（Browning and Wexler, 1968）。

その後、レーダー探知範囲内の任意の点の風を推定する手法としてVVP¹¹（Waldteufel and Corbin, 1979）が提案されました。この手法では精度を保持するため水平分解能はせいぜい10 km四方程度に押さえられますが、アルゴリズムは比較的簡単で、いわゆるメソ β システムのルーチン解析には適しているように思います。

米国では、激しい雷雲 (Severe Storm) に伴うトルネードやダウンバーストのようなメソ γ システム¹²に関心が高く、2基のドップラーレーダーの同時観測データを組み合わせて風の細かい構造を推定する研究が盛んに行われてきました。しかし、3次元空間内の各点を2レーダーで同時に観測することは容易ではなく、また観測可能範囲も狭くなるので、ルーチン観測システムの構築には向かないように思います。このため、単一レーダーでメソ γ スケールの観測を可能にしようとする手法も研究されていますが (例えば Shapiro, 1997)、コンピューター資源はかなり必要とされそうです。

日本で防災上関心の高い集中豪雨や台風の場合は当面まずメソ β スケールの3次元的な実況把握やメカニズム解明が急務で、VVPによるメソ β スケールの風分布は、風の警報や短時間予報のみならず、降水短時間予報の改善、メソ数値予報の初期値の改善などに極めて有効な資料になる筈です。このような見通しの下で、VVPを日本のメソ現象に適用した場合の精度や精度改善の方法について、幾つかの研究を行いました。

まず、VVPによる推定風を航空機による観測値と比較して精度を評価し、実用性を確かめました (立平・鈴木, 1994)。続いて、VVPによって求めた個々の風ベクトルの精度を推定する手法、及びシアラインの近辺の風推定の精度を高める手法を提案しました (立平ほか, 1995)。

VVPでは、解析領域内の風の場合が線形と仮定して諸パラメータ (水平発散や鉛直シアなど) を求めます。しかし、風ベクトルを求めるにはさらに仮定を強めて「解析領域内で風が一樣」としなければなりません。上記の2つの研究は、一樣風の仮定の下に行われた、いわゆる簡略化VVPです。

本来のVVPで鉛直シアを推定した場合の精度に

ついては、秋雨前線の降水域に適用して評価した結果、かなり非線形性¹³の大きい領域でも高度1 kmあたり 15 ms^{-1} 程度の鉛直シアが、 3 ms^{-1} 程度の誤差で推定できることが分かりました。この結果を利用して、一樣風の仮定が無理な領域の風を推定するのに、その上 (又は下) の高度面で一樣風の仮定が可能なら、その高度面の推定風に鉛直シアを加算して風ベクトルを推定するという手法を提案しました (立平ほか, 1997)。

VVPによる水平発散の推定誤差を評価するためには、渦度と水平発散の集中した顕著なシアライン (つまり非線形性の大きい風系) に適用してみました。シアラインをモデル化した風系についてのシミュレーションを利用して推定誤差を評価したところ、非線形性が大きな誤差を引き起こすことが分かりました。しかし、この解析例のような比較的単純な構造のシアラインの場合は、シミュレーションで見積もった非線形誤差を差し引くことによって補正が可能で、補正後の水平発散 (対流圏下層) がシアラインに伴うレイnbandの発達衰弱に密接に関連していることが分かりました (立平ほか, 1998 a)。

雨関係の警報に比較して、風関係の警報が立ち遅れていることは前述しました。風に関する警報のかなりの部分は台風に関連して発表されており、上陸前に海上の暴風域の実態が把握できれば防災対策に大きく寄与することは明らかです。解析領域内で一樣風を仮定したVVPでは、台風のように大きな渦度が存在する場合は大きな誤差を生じます。そこで、仮定を台風の風系にできるだけ適合するように工夫し、誤差の軽減を試みました。モデル化した台風の風系についてテストしたところ、簡略化VVPの場合の平均誤差 41 ms^{-1} を 8 ms^{-1} にまで改善することができました (立平ほか, 1998 b)。

¹¹VADとVVP

共に、ドップラー速度がある領域内でどのような分布をしているかに着目し、領域内の平均的な風を推定する技術である。VADではレーダー設置点の上空の各高度の風が推定できる。VVPではレーダー設置点に限らず探知範囲内の各高度の風、鉛直シア、水平発散などを推定できる。これらの推定は、風の場合が推定領域内で「一樣」とか「線形」といった仮定の下に行われるので、仮定が成り立たない場合、つまり非線形の場合には大きな誤差を伴う可能性がある。

¹²メソ β とメソ γ

メソ β システムは200~20 km程度、メソ γ システムは20~2 km程度といった区分がよく使われている。

¹³非線形性

ある領域内の風の場合が線形というのは、領域内の風の分布をテラー級数で表現したときに、二次以上の微分を含む項を無視できる場合である。シャープなシアラインのように、風向風速が急変しているような場では高次の微分を含む項が無視できず、非線形性が大きくなる。

9. おわりに

NNW 計画が発足したのは、終戦後30年を経過した頃でした。NNW 計画で考えられていた予報システムは関係者各位のご努力で現在ほぼ全てが実現されています。ただ、最前線である地方気象台の予報担当者が、NNW 予報システムに適合した技術者に完全に脱皮しているかどうかについては、まだ懸念が残ります。

いま振り返ってみると、NNW ではレーダーの利用はかなり徹底していたように思いますが、気象衛星の利用についてはまだ可能性が残されているように感じます。また降水の予報・警報に比べると風関係の予報・警報はまだ水準が低く、特に「空振り」の頻発を解決するのが緊急の課題と思っています。

1997年に打ち上げられた「ひまわり5号」は水蒸気チャンネルを搭載し大気中・上層の水蒸気分布を描き出す能力がありますし、GPSを利用した水蒸気量の推定も実用化されつつあります。風についても、ドップラーレーダー、プロファイラー、エイカースなどを利用して時間的・空間的にきめ細かい風データが得られる可能性が出てきました。関東地域には、現時点でもこの種のデータが比較的豊富に存在するので、現在気象庁予報部を中心に「関東地域メソ解析プロジェクト」が進行中で、メソ数値予報の初期値解析のためのデータセットの作成を目標として聞いております。このようなプロジェクトを核として、今後の気象観測システムのあり方、それをフルに活用した21世紀の天気予報システムの構築へ向けての検討が開始されることを期待しております。

参 考 文 献

- Atlas, D., R. Tatehira, R. C. Srivastava, W. Marker and R. E. Carbone, 1969: Precipitation-induced mesoscale wind perturbation in the melting layer, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **95**, 544-560.
- Browning, K. A., and R. Wexler, 1968: A determination of kinematic properties of a wind field using Doppler radar, *J. Appl. Meteor.*, **7**, 105-113.
- Carter, G. M., J. P. Dallavalle and H. R. Glahn, 1989: Statistical forecasts based on the NMC's numerical weather prediction system, *Wea. Forecast.*, **4**, 401-412.
- Friday Jr., E. W., 1994: The modernization and associated restructuring of the National Weather Service: An overview, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **75**, 43-52.
- 気象庁, 1997: 平成9年度最新数値予報テキスト, 気象業務支援センター, 63pp.
- 気象庁総務部企画課, 1978: 国内気象監視 (NNW) について, *測候時報*, **45**, 1-7.
- 気象庁予報部業務課, 1979: 予報業務の改善について, *測候時報*, **46**, 53-85.
- 気象庁予報部予報課, 1991: 降水短時間予報プロダクト作成におけるデータ処理について, *測候時報*, **58**, 189-207.
- 気象庁予報部予報課, 1995: レーダー・アメダス解析雨量の解析手法と精度, *測候時報*, **62**, 279-339.
- Klein, W. H. and H. R. Glahn, 1974: Forecasting local weather by means of Model Output Statistics, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **55**, 1217-1227.
- 日本気象学会座談会, 1978: シンポジウム「天気予報の現状と将来」に参加して, *天気*, **25**, 339-347.
- 日本気象学会シンポジウム, 1978: シンポジウム「天気予報の現状と将来」, *天気*, **25**, 175-198.
- Shapiro, A., L. Zhao and S. Weygandt, 1997: Single-Doppler velocity retrieval experiments with WSR-88D data of an Oklahoma squall line, *Proc. 28th Conf. on Radar Meteor.*, 414-415.
- Snellman, L. W., 1977: Operational forecasting using automated guidance, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **58**, 1036-1044.
- 立平良三, 1972: 気象ドップラーレーダー, 気象研究ノート, (112), 129-171.
- 立平良三, 斉藤直輔, 1973: 豪雨予想の一方法, *研究時報*, **25**, 31-42.
- 立平良三, 清水紀雄, 小佐野慎吾, 1976: 地形エコー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, 1980: Improvement in performance of ground clutter rejection, *Proc., 19th Conf. on Radar Meteor.*, 176-179.
- 立平良三, 1976: 雨滴成長を考慮した地形性降雨の計算, *天気*, **45**, 249-257.
- 立平良三, 1979a: 新しい予報発表形式 (確率予報), *気象*, **23**(6), 2-5.
- 立平良三, 1979b: 気象予測 (天気予報の現状と展望), *計測と制御*, **18**, 650-658.
- 立平良三, 保科正男, 1984: 確率予報, 気象研究ノート, (150), 1-22.
- 立平良三, 1986: 新しい天気予報, 東京堂出版, 186pp.
- 立平良三, 1987: 天気情報の見方, 岩波新書, 193pp.
- 立平良三, 1989: 降水短時間予報の今後 (天気系モデルの利用), *気象*, **33**(5), 4-7.
- 立平良三, 鈴木修, 1994: 単一ドップラーレーダーによる上層風推定の精度, *天気*, **41**, 761-764.

立平良三, 笠原塔子, 鈴木修, 1995: 単一ドップラーレーダーによる上層風推定の誤差特性と精度改善, 天気, **42**, 773-777.

立平良三, 村田行泰, 瀬古弘, 1997: 単一ドップラーレーダーによる風の鉛直シアの推定精度, 天気, **44**, 251-256.

立平良三, 村田行泰, 鈴木修, 1998 a: 単一ドップラーレーダーによる水平発散の推定精度, 天気, **45**, 249-

257.

立平良三, 瀬古弘, 鈴木智広, 1998 b: 単一ドップラーレーダーによる台風域の高層風推定, 天気, **45**, 633-642.

Waldteufel, P. and H. Corbin, 1979: On the analysis of single Doppler radar data, J. Appl. Meteor. **18**, 532-542.

Towards Modernization of Weather Forecasting

Ryozo Tatehira*

* *Meteorological Business Support Center, Tokyo 101-0054, Japan.*

(Received 21 September 1998 ; Accepted 4 November 1998)