

— 解 説 —

ウインドプロファイラ観測網の展開

— 集中豪雨の監視・予測の精度向上をめざして —

札幌管区気象台 村松 照男

1. 局地的気象監視システムの展開

— 空のアメダス、ウインドプロファイラ観測網 —

2000年9月、東海地方は記録的な豪雨に見舞われ都市における浸水災害として最大級の被害が発生した。被害の中心となった名古屋市では2日間の雨量が557ミリ、1時間雨量93ミリの豪雨となり、豪雨域は三重県から愛知県の狭い帯上に分布していた。このような集中豪雨は、局地的に集中しメソ気象現象と呼ばれる寿命が数時間から十数時間、規模が数十kmから数百kmの激しい気象現象によって引き起されている。

この局地的な集中豪雨を監視・観測するために、静止気象衛星ひまわりからの毎時の雲の観測や移動、局地的な豪雨をもたらす積乱雲の盛衰の監視を行い、全国20個所に展開している気象レーダー観測によって豪雨の中身である雨や雪の分布や強さの変化、動きをなど10分間隔で捉えている。降った雨や雪は全国約1300個所のアメダスの雨量観測所（その内、約800個所は雨に加えて風、気温、日照の4要素の観測）で、10分毎に自動観測・収集がされており気象官署による観測とともに詳細な姿を捉えている。豪雪には約200個所の積雪計で1時間毎のデータを得ている。さらに全国18個所の高層気象観測（気球に観測機器を載せて、高さおよそ30kmまで観測）など行って立体的に観測を行い、集中豪雨を取巻く大気を捉えている。

しかしながら集中豪雨を監視・予測するのは現象の寿命とそのスケールから現在の観測網はなお十分とはなっておらず難しい仕事となっている。集中豪雨などの予測精度の向上をはかり防災情報の高度化という社会からの要請に答えるべく気象庁は、平成13年3月、それまでの約20倍の能力を持つ新しいスーパーコンピュータを中核とする数値解析予報システムの運用を開始した。このスーパーコンピュータによって東海豪雨や平成10年の那須豪雨や新潟豪雨などのメソ気象現象の予測をターゲットとした、格子間隔10kmのメソ数値予報モデルの実用運用を開始した。この予報の精度をさらに向上させるためには、初期場といわれる計算をスタートする時の大気の状態をジャングルジムのような格子点上でできるだけ正確に得ることが必要である。大気を3次元で捉えるにはより詳しい高層観測が必要だが、世界でも比較的密に展開している日本列島でもおよそ300km格子程度の空間分解能であり、1日2回、12時間毎に風、気温、湿度、高度を観測する高層気象観測と、風のみの高層風2回を加えても6時間間隔の観測のみである。これを強化するのはコストパフォーマンスが悪い。

東海豪雨の場合は、沖縄南東海上を北上していた台風の東側から太平洋高気圧の周辺を回って日本列島に非常に湿った空気が流れ込み、本州上に停滞していた秋雨前線付近で収束して豪雨となった。四方を海に囲まれている日本列島では、このような豪雨を監視し今後の推移、降水短時間予報、メソ数値予報の精度を上げるためには、1日4回の高層観測では不十分であり風を連続的に捉えることが最も重要な課題となっていた。

このため気象庁は、平成13年4月から「ウインドプロファイラ」という新しい観測システムによって、高度約5kmまでの風向・風速を10分間隔で連続的に観測する気象観測網「局地的気象監視システム」の運用を開始した。全国25個所、従来の高層気象観測の約3倍の密度で、豪雨や豪雪をもたらす「湿った空気の流れ」を捉えることができるようになった。アメダスが地上の観測網であり、集中豪雨監視の役割の一担を担うものであるため、このシステムを「空のアメダス」の愛称で呼んで

いる。この観測システムの紹介とその利用について解説する。局地数値予報モデルに取り込まれ、局地現象に対する予報精度の向上に大きく寄与している。

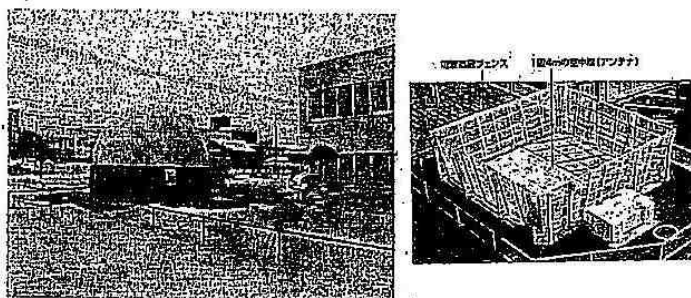
2. 観測の原理とシステムの概要

1) 観測システムの概要

ウィンドプロファイラとは、「風の鉛直プロファイル（分布）を測定する機器」いう意味である。この装置は、地上から上空に電波を発射し大気の流れによって散乱され戻ってくる電波を受信することで、上空の風向・風速を測定している。今回、気象庁で展開したウィンドプロファイラ観測網は波長 22cm (1.3GHz 帯) の電波を発射し、高度約 5 km までの風を常時観測する新しい大気レーダの観測システムである。

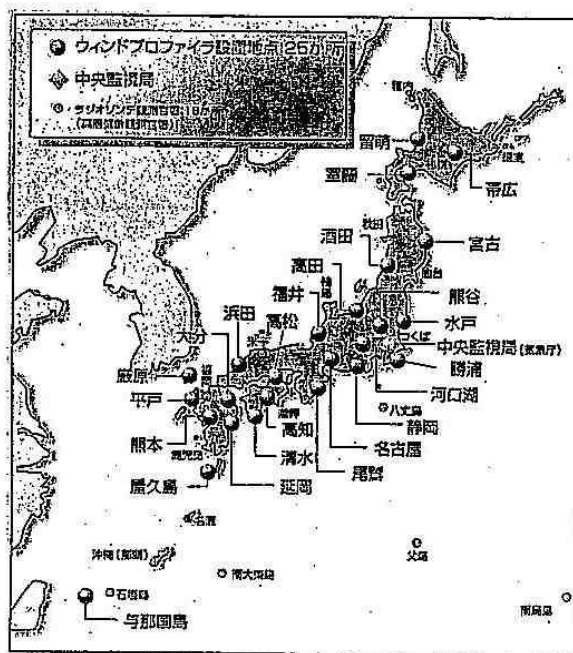
滋賀県南部の信楽に設置されている京都大学宇宙空電波科学センターの「MUレーダ」がわが国で大気レーダの草分けであり主に成層圏の風を観測して現在に至っている。MUレーダは波長が6mと長く、成層圏から中間圏まで観測できるが、波長が長いので発射するアンテナのサイズも大きくなり、MUレーダでは直径135mと大規模である。近年アンテナサイズを小さく、波長を短くして対流圏の風を主に観測する装置が開発が進められ、400MHz帯から1.3GHz帯の波長の短い対流圏の観測を行う大気レーダを「ウィンドプロファイラ」と呼ばれるシステムが実用した。波長が短くなるほど観測高度は下がり400MHz帯の波長で上空10数kmまで観測できるが、アンテナサイズは15mくらいと大きく、この波長帯域は多様な用途があり日本では電波の割当がなかなか難しいのが実情であった。そこで集中豪雨等を対象として対流圏下部の観測を行うため1.3GHz帯のウィンドプロファイラの展開となった。この装置では第1図の写真右のように4m四方のアンテナ群でよいことになり実用性に勝っている。

アメリカは400MHz帯のプロファイラシステムを1990年代の初めに中央平原に30基展開して観測



ウィンドプロファイラ(帯広)

第1図 ウィンドプロファイラ観測局のシステム。
右側の写真がアンテナ群、24x24列のアンテナ群で構成されている。
左側の写真が積雪地用のドームで覆われた観測局(帯広)

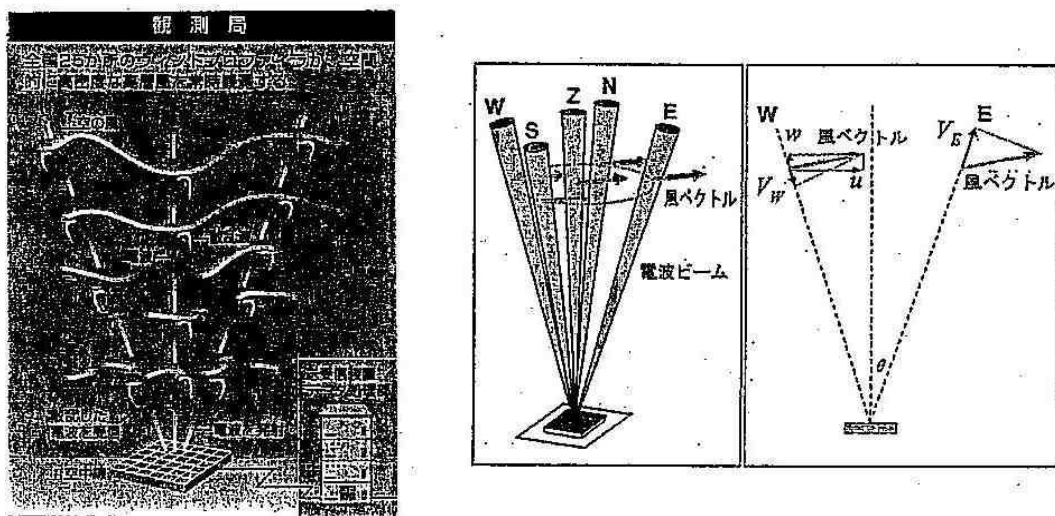


第2図 ウィンドプロファイラ観測局の全国配置図。
全国で25箇所、北海道では、帯広、室蘭、留萌の3箇所。
気象庁に中央監視局が設置されデータ収集と中央での一括処理が行なわれている。

を行っているが、今回の日本での展開は1.3GHz帯のものを25基、世界で最も高密度である。第1図の写真の右がアンテナ群であり、左側は、降雪地用のドームで覆ったものである。北海道では帯広、室蘭、留萌の3箇所全てでドーム型であり、全国展開の配置図を第2図に示す。西日本に多く海岸部に重点的に配置されているのは、東シナ海方面や本州南海上から流れ込む気流を連続的に捉え、集中豪雨などのシビア現象をより正確に予想するため、数値予報の初期場の改善を図る目的で配置された。

2) 上空の風が観測できる原理

光が屈折率の異なる大気を通過すると屈折するが、そこが複雑に乱れていると周囲に散乱される。電磁波(電波)も光と同じであり、ウインドプロファイラから上空に発射された電波も大気の乱れ、乱流(ゆらぎ)によって散乱され発射したサイトに戻ってくる(第3図左)。この間、乱れは上空の風に流



第3図 左図:ウインドプロファイラの観測原理。上空に22cm(1.3GHz)の電波ビーム発射して、大気の乱れの動きをドップラー観測する。
 中図:電子ビームは鉛直方向と、鉛直方向から10度の傾きで東北西南の方向に5方向に発射する。
 右図:風のベクトルの成分の分解。この成分から風向風速を計算する。

されるのでドップラー効果によって発射されて電波と戻ってくる電波の周波数に差が生じる。この差を観測して計算すれば乱れを押し流している上空の流れ、風速が測定できることになる。ドップラーレーダは雨粒がなければ測定できないが、ウインドプロファイラは降水がなくとも大気の流れが測定できる利点がある。しかしながらドップラーレーダが電波を四方に出して3次元の観測ができるが、プロファイラは連続的に観測はできるが観測点の真上のみしか観測できないという違いがある。

観測可能の高度は、上空の乱れは大気の状態(気温、気圧、湿度)の鉛直分布で決まる。上空の乱れで散乱され返ってくる電波は半波長のサイズの乱れに限られるので1.3GHz帯では、現在のシステムでは平均して高度5kmまでの対流圏の下部に限られる。対流圏における乱れによる大気の屈折率は湿度に大きく依存するので、水蒸気が多い夏の季節では観測可能高度が上がり6~7kmまで、冬は下がって3~4kmとなるが、日々、場所によって異なる。

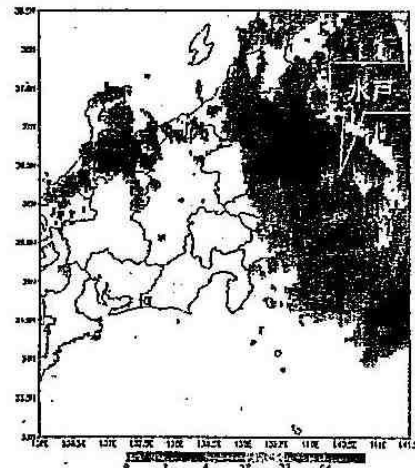
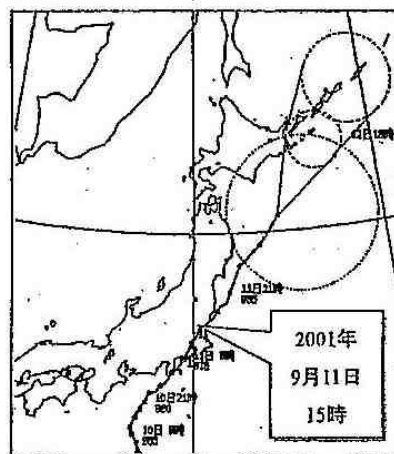
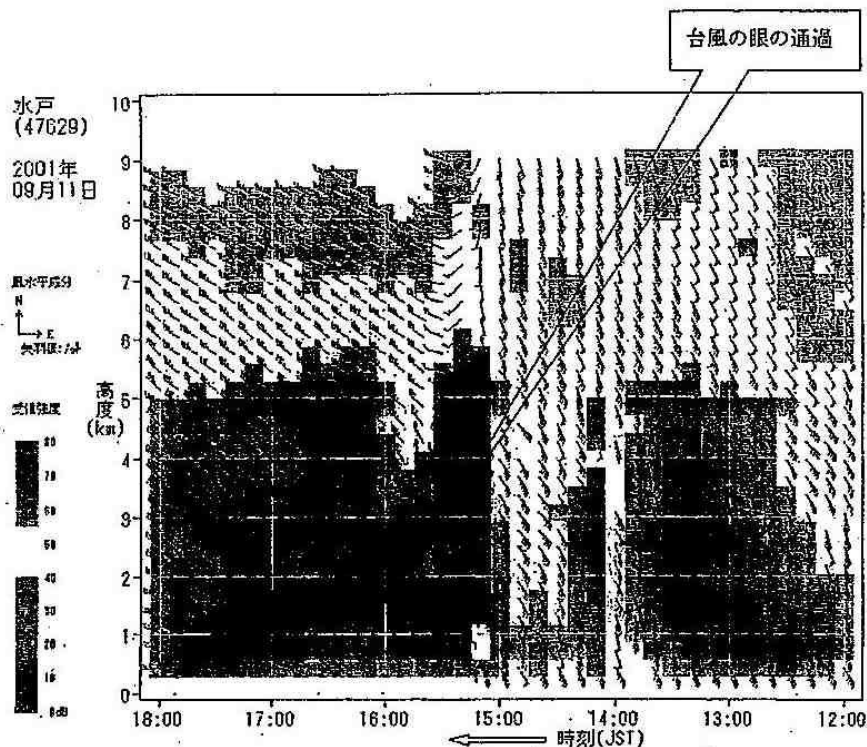
実際の風の測定は、プロファイラ装置から第3図(中)で示めされているように、電波ビームを鉛直方向と角度10度で、東西南北の方向に4本、計5方向に発射して、電波のドップラー偏移を観測しそれぞれ風ベクトルを計算している。1方向に発射されたデータからも求まる風ベクトルを東西、南北の水平成分に分解して水平風ベクトルが求め、独立した5つのベクトルの組ができるので、その連立式を計算して水平風が求まる。鉛直流も求まるが水平風よりもともと偏移が小さいので誤差が大き

い。観測データを高層観測データと比較する、現在までの 25 観測点での平均風速で0.5~0.9mの範囲に収まり、系統的な誤差はなく高層風として扱うには問題はないと報告されている。

観測局のアンテナの開口面積は4m四方で、1列24本を24列並べアンテナ群からビーム幅は4度幅で送信電力は2キロワットで電子ビームを発射する。ドップラー速度の観測は1分間隔で行うが、ノイズや不良値の除去などの処理を行って、10分間隔、高度分解能200m~約500mの風速・風向を出力している。観測データはアメダスと同様に、全国25箇所の観測局からNTTの回線網などで気象庁の中央監視局に送信され処理され、気象資料総合処理システムで処理される。そのデータが数値予報の初期値としてのデータとしてすでにモデルに組み込まれている。これら処理された各観測点のデータは気象官署に提供され、シビア現象の監視に使われる予定となっている。

3) 観測事例

第4図は、2001年9月11日15時20分頃、台風第15号の中心が茨城県水戸観測局の上を通過した時のウインドプロファイラ観測の記録である。台風を中心気圧は976hPa、中心付近の最大風速は25m/s、毎時20kmの速さで北上していた。台風が観測局の南西側から北東側に通過した結果、風向風速の高度断面(中心から約60kmの範囲)において、中心の通過前ではほぼ南東の風向が持続し高度9kmまで風速40ノットから50ノット(20~25m/s)の強い風が様に吹いており、通過後は一転して北西から西北西

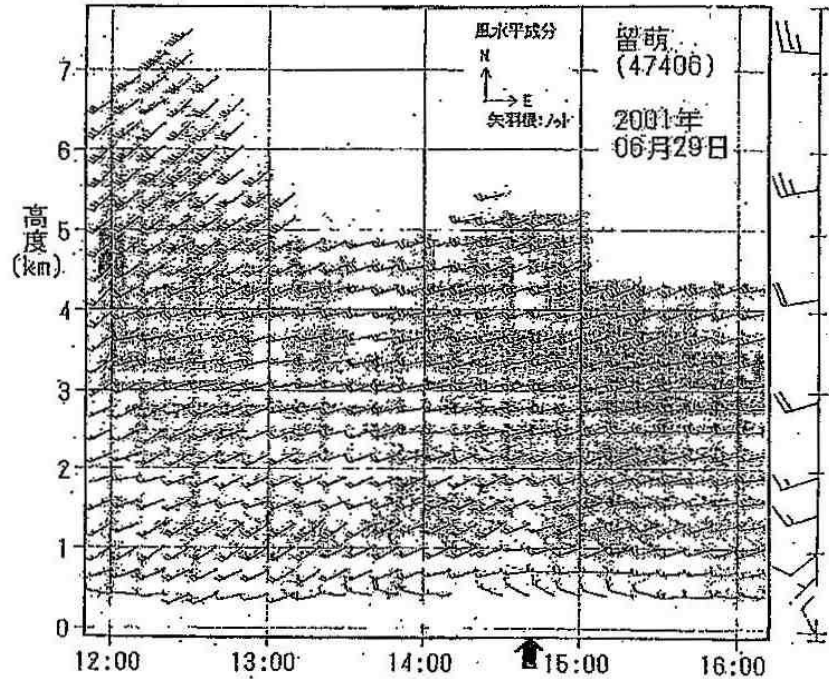


第4図

2001年、台風第15号の通過にともなう水戸観測局のウインドプロファイラ観測の記録(上段)である。期間は9月11日12時から18時の間の風向・風速の時間-高度断面図。10分間隔のデータ、高度は300m間隔。風速は矢羽で表わしている。台風が中心の通過は15時20分頃。下図左、経路図、右図はレーダーエコー図、水戸観測局の南西に台風中心のエコーが弱いところと、それを取巻く循環が明瞭。

35ノットから50ノット(18~25m/s)となった。台風目の通過により、15時10分から30分の間で

中心付近の特徴である直径10km程度の弱風域も見事に捕らえられている。風向・風速の断面をみても大気中層では傾度風により台風中心から同心円上の循環となっており、一方、高度1km付近を中心に周辺より強い風が吹き風向も等圧線(等高線)に角度をもって吹き込んでいることがわかる。台風が海上を進んできて関東地方に上陸したが、なお強い循環を維持しながら縦断していったありさまが明瞭に観測されており、レーダーエコーでも循環が明瞭で、中心に眼の存在を示唆する弱いエコー戸なっ



第5図 2001年6月29日の空知地方の北竜町における竜巻発生時の留萌観測局のウインドプロファイラの風観測データ。右端は、札幌における15時の高層風観測データ。竜巻は留萌の南東約30km付近で発生。

ていた。このような緯度でかつ温帯低気圧化が進行しているときの観測としては、この例は最初であり、極めて貴重なデータである。今後、25個所で次々と興味深い現象が捉えられ、シビア現象の解明に利用できるであろうことを示唆している。また、この観測では台風を中心付近で湿度が高い層が上空まで広がっており、その結果、年平均では5kmの観測高度が9kmまで観測されている。

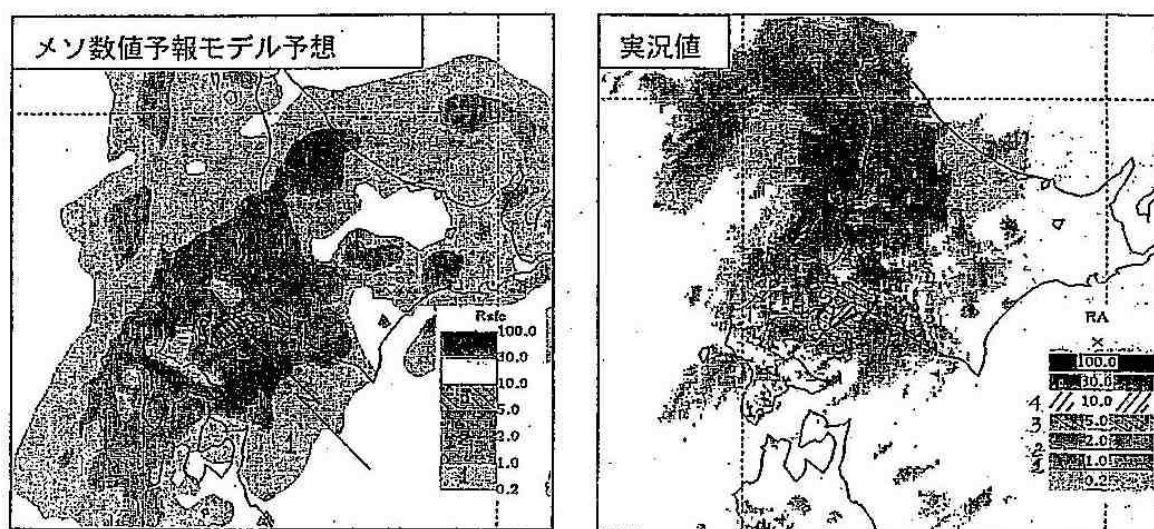
一方、第5図は北海道、留萌観測局の2001年6月29日12時から16時までの風観測データである。この観測期間のなか14時40分頃、留萌観測局の南東およそ30km付近の北竜町において、マルチセルタイプの積乱雲(約20kmサイズ)のなかにF2スケールの竜巻が発生した。このとき、竜巻発生を取り巻く高層の状況は、9時から21時の間で500hPaから300hPa付近、5km付近以上で明瞭なトラフの通過があり、1kmから下層で南よりの風系と、留萌の西北西との間で明瞭なシアラインを形成していた。また留萌観測局の13時までは上空のトラフの前面で湿っており7km以上まで観測されているのに比べ、留萌の南方で積乱雲が発生していた時期は、観測高度が5kmまで低下し大気中層が乾いている(積乱雲の発生、あるいはその結果で北側の中層が乾燥する)ことを示唆していた。留萌観測点の南およそ100kmに位置する札幌の高層観測点における15時の高層風データを第5図の右端に示したが、留萌と比較すると1km以下で南西5~10ノットとなっており下層収束を示している。

3. メソ数値予報モデルを利用して防災情報の高度化

ウインドプロファイラの実用展開に先立ち、1997年「関東地域メソ解析プロジェクト」が実施され(文献2)、アメダス、レーダーアメダス解析雨量、航空機データ(ACARS)やドップラーレーダにかかる風データ、衛星データなどとともに、気象研究所(つくば)旧郵政省通信総合研究所(小金井)、明星電気(守屋)に設置されていたウインドプロファイラデータを用いて数値予報の詳細な初期場解析の改善効果と局地数値予報への評価実験が行なわれた。3サイト全ての観測データが揃っていなかったが、関東地方での特別観測実験の事例解析では、関東地方の南よりの風系がより詳細に捉えら

れ、また予報実験では、栃木県北部に極大を持つ降雨予想が大きく改善され、この強雨に重要な関東地方の対流圏下層における南よりの暖湿気流が初期場解析により正確に反映した結果と報告されている。一方、米国におけるウインドプロファイラ観測網による評価実験の結果について、その有効性が文献1のなかに報告されている。

先に述べたように集中豪雨、豪雪予測のより精度向上するため平成13年3月から気象庁は、局地(メソ)数値予報が実用化されたが、このモデルでは全国を10km間隔の格子に区切り、18時間先までの大気の状態を1日4回、毎6時間ごとに予想計算を行い1時間毎の予想結果を出力している。現在、天気予報や注意報警報に使っている領域スペクトルモデルが1日2回、20km間隔格子と比べて格段に予測モデル精度と時間分解能がきめ細くなり局地現象を予想するのにより有効となっていた。



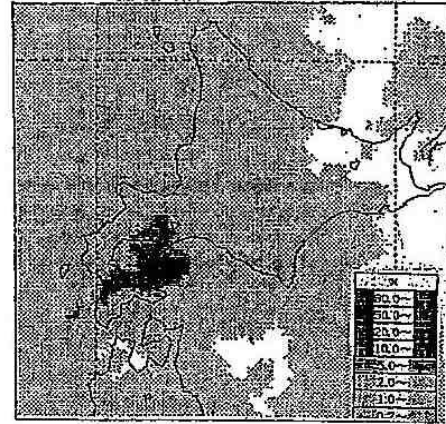
第6図 メソ数値予報モデルの予想と、実況の比較事例。(発達した低気圧が北海道を通過した時の予想事例)
 予想(左)：2001年5月31日9時を初期値とした、6時間後の1時間降水量の予想。
 実況(右)：レーダーアメダス解析雨量、15時までの1時間雨量。

第6図は、発達した低気圧が北海道地方を通過し各地で大雨と強風が吹いた事例で、このモデルの6時間後における1時間雨量の予測とレーダーアメダス解析雨量の1時間雨量の実況との比較した例である。胆振地方、オロフレ山地の南東斜面の強雨域(時間雨量、5-10ミリ、矢印先)と、北海道南西部から中央部に伸びる1-5ミリのまとまった降雨域の局地数値予報モデルの予想(第6図左)に対して、同じ時刻の降雨の実況(第6図右)では、オロフレ山地付近や、北海道南西部から中央部にかけてのまとまった雨域(1-5ミリ)が対応よく表現されていることが分かる。この予想は、領域スペクトルモデルの出力より、より詳しく、量的および集中性も改善されていた。数値予報結果を使い、激しい雨の降る場所や時刻をできるだけ特定した防災気象情報の発表をおこない、より精度の良い情報の提供できるようになった。

またこのモデルを利用することによって雨の分布をより詳しく予測する降水短時間予報の予報時間を、これまでの3時間先までから6時間先までに延長する運用を同時に開始した。気象レーダーとアメダスによる雨量の観測データを組み合わせて全国の雨量をリアルタイムで監視するレーダー・ア

メダス解析雨量の格子間隔を現在の5kmから2.5kmへと細密化し、この局地局地的な強雨をより正確に捉えることができるようにした。この解析雨量を初期値にして降雨の移動、盛衰を予測する降水短時間予報は、3時間を越えた時刻からメソ数値予報モデルの降水量予想に相対的に重点を移して予測する。第7図は第6図と同じ時刻のレーダーアメダス解析雨量を初期値として降水短時間予想の6時間後の結果である。実況は、第6図右図と同じである。

現在、数値予報の初期場にウインドプロファイラ観測データが1日4回導入され、風の初期場の改善が図られている。今後はさらに湿った気流の流れを知るため、水蒸気分布の密な観測が必要となる。これにはGPS観測から得られる可降水量のデータから水蒸気を推定する方法が開発中である。GPS観測点は全国で約1,000箇所あり処理に数時間程度かかるといわれているので、この時間の短縮と水蒸気の鉛直分布の推定について改善ができれば、プロファイラデータとで初期場の改善に相乗効果が期待できる。この結果は、現行のメソ数値予報の精度向上となるのみならず、集中豪雨に対する精密モデル、5km格子で非静力学モデルの初期場の改善におおいに利用されるであろう。



第7図 降水短時間予報

第6図と同じ初期値である。6月31日9時をスタートとした降水6時間予報の14時から15時の1時間雨量の予想。実況は第6図と同じ。

参考文献

- 1) 高層气象台・観測部・予報部、1998：ウインドプロファイラによる風観測の定常化に関する業務実験。測候時報、65、137-228.
- 2) 気象庁、1999：関東地域メソ解析プロジェクト。気象庁技術報告、120.
- 3) 石原正人、2000：ドップラーレーダとウインドプロファイラ荷関する二つの会議に出席して。天気、47、837-845.
- 4) 石原正人、2001：気象庁がウインドプロファイラ観測業務を開始。気象、45.9、4-10.