

観測・解析を中心とした米国メソ気象学事情*

—NOAA/NSSL に滞在して—

石原正仁**

1. はじめに

大きな被害をもたらす局地的な豪雨や豪雪の発生の予測、前線・台風・雷雨などの降雨の盛衰や移動の予測、さらに短時間予測と呼ばれる数時間先の天気予報、これらはメスケールの大気現象と密接に関連し、これらの予測を改善するためには現象の十分な理解が必要である、とは多くの人によって語られてきたことである。日本と異なった自然・社会環境のもとで、米国のメソ気象学がどのように発展しつつあるのか、その一端を、観測・解析を仕事とする者の立場から簡単に紹介したい。

1985年11月から1年間、私は米国 Oklahoma 州 Norman 市の NSSL (National Severe Storms Laboratory) と CIMMS (Cooperative Institute for Mesoscale Meteorological Studies) に滞在する機会を得た。NSSL は米国海洋大気庁 (NOAA) に所属し、ドップラーレーダーを使い大規模な対流雲やトルネードを主な研究対象としている、職員数約50名の研究所である。1964年の創立から昨年5月までの21年間を Dr. Kessler が所長を務め、後任は MCC (Mesoscale Convective Complex) で知られた Dr. Maddox である。一方 CIMMS は Oklahoma 大学と NOAA が共同して設立した純職員数十数名のメソ気象学を対象とする研究所である。1978年の創立から昨年12月まで佐々木教授が所長を務め、その後任は Dr. Lilly である。この2つ研究所については、上田 (1985) の詳しい報告がある。

日本で行って来た仕事との関連上、私は滞在中米国のメソ気象学の観測・解析部門の進行状況に興味を持った。私には米国の気象界が今メソ気象学花盛りにあるように見えた。トピックスをいくつか挙げてその現状をお

* Mesoscale Meteorology of the U.S. in the Fields of Observation and Analysis.

** Masahito Ishihara, 気象研究所台風研究部。

知らせし、日本の現状と比較したい。

2. STORM 計画

The National Stormscale Operational and Research Meteorology の頭文字を取って STORM Program と呼ばれるこの計画は、1982年に始まったメソスケール現象の研究と業務に関連する一大プロジェクトである。一般の人に分かり易いように Mesoscale を Stormscale と呼び替えている。これまでに米国ではメソスケール現象を対象として、SESAME (1979) や CCOPE (1981) などの一連の特別観測が行われ、主に春夏に発達する大規模な対流雲の構造を解明することに貢献して来た (小倉, 1983)。これらの特別観測は個々の現象を理解することが目的であったが、今回の STORM 計画はその趣をかなり異にしている。

この計画の第1の特徴は、米国に発生し災害をもたらすメソスケールの現象 (雷雨, スコールライン, それらの複合体としての MCC や MCS, 前線, 低気圧による豪雨・豪雪, 等) すべてを研究対象とし、それらと大規模場との相互作用も理解しようとしていることである。そのため meso- α スケールに対応する約 2,000 km を一辺とする観測領域を設定し、1987~1991年の間に米国中部, 東部, 西部の3カ所で大規模な特別観測をそれぞれ約4カ月ずつ行う計画である。これらの特別観測がこの計画のひとつの柱である。

特徴の第2は名前の示すように、この計画には業務的側面が強く打ち出されていることである。これまでのプロジェクトは一般に「将来、研究成果が気象業務に応用されるだろう」という程度にしか業務と関連を持たなかった。ところが今回の計画では、気象局 (NWS) が行うメソスケール現象を対象にしたルーチン観測, 天気解析, 予警報の精度を飛躍的に向上させることを STORM 計画のもうひとつの柱にしている。そのため、ドップラ

ーレーダーやプロファイラー (Wind Profiler) などの新しい測器の開発, それらを加えた新しい観測網の整備, 既存データの解析法の改良, メソ数値モデルの改良, データ通信や情報伝達の改善, 研究と業務を結びつけるための予報官の研修, 等を大掛りに行っていくことになっている。この計画によってメソスケール現象に対する短時間予測と予警報の精度を飛躍的に向上させようとする意図が読み取れる。

第3の特徴は, 計画の規模がこれまでになく大きいことである。計画には NOAA, UCAR(大学連合), NCAR(国立大気科学研究所), FAA(連邦航空局), NASA(航空宇宙局), NSF(国立科学財団), 国防省が参加している。そして上記の目的を達成するために約15年の期間と約1,000億円の費用を見込んでいる。予算は毎年連邦議会の承認が必要で, 必ずしも予定どおりには支出されていないようであるが, 1984年に NOAA の内部に事務局が設立され予算獲得の活動を行っている。

研究部門の計画は3つの期間に分かれ, 第1期(1983~86); 本観測のための計画立案と予備観測の実施, 第2期(1987~91); 前述の3回の本観測実施と解析の開始, 第3期(1991~95); 解析期間, としている。計画に従って1985年の春に中部平原で MCS (Mesoscale Convective System) を対象にして PRE-STORM 計画が, 1986年の2, 3月には中緯度の低気圧を対象にした GALE (Genesis of Atlantic Lows Experiment) 計画が東部海岸で行われた。これらの観測には4~5台のドップラーレーダー, 数機の航空機, 密な高層観測網, 数台のプロファイラーが使われた。第2期の本観測ではドップラーレーダーの数をさらに増やし, 70台のプロファイラーのレイ, 300台の地上メソネットを配置する計画で, これが実現すれば画期的な観測になるはずである。

業務部門の目玉は後述する NEXRAD と呼ばれるドップラーレーダーの現業化計画である。晴天時でも風の鉛直分布を連続的に測ることのできるプロファイラーは, 研究用だけでなくすでに実用化のための実験も行われている。また研究者と予報官が1カ所に集まり研究成果の応用, 新しい解析予報システムの開発を行うために「予報実験センター」が NWS 内に作られる計画である。後で述べる PROFS も STORM 計画のひとつの柱であろう。

3. NEXRAD 計画

次世代気象レーダー (Next Generation Weather Ra-

dar) 計画は, 米国の現業気象レーダーをすべてドップラーレーダーに更新しナウキャストに利用すると言う, 米国気象事業の一大プロジェクトである。1985年までの状況については藤原(1984)と上田(1985)に詳しく述べられているので, ここでは最近の経過についてお知らせする。

1979年に商務, 運輸, 国防の3つの省の共同事業として NEXRAD 計画が発足した。これは既存の現業気象レーダーが1957年のタイプ (WSR-57) で, これは老朽化が激しく更新が求められていることと, ドップラーレーダーが10年以上研究的に使用され, メソスケール現象の実態把握にその有効性が立証されたためである。NEXRAD の形式名は WSR-88 D である。その後レーダーの基本システムと各種のデータ解析用ソフトが開発され, 昨年12月に2つの電機会社が試作機を完成させた。基礎となったのは NSSL の 10 cm 波ドップラーレーダーである。試作機はハード, ソフトの両面から比較検討され, どちらか一社と製作契約が結ばれるが, この契約は今年初めに済んでいるはずである。その後1990年までに10~15台が展開され, 業務に使用されながら改良され, 1990年代の半ばまでには約160台が作られる。一社がほぼすべてのレーダーを同一の仕様で製作するという体制は, 根本的に日本のそれと異なっている。このうち約110台が NWS によって, 約20台が FAA によって米国内で運用される。残り約30台を米空軍が北米, ヨーロッパ, 太平洋に展開する。すべてのレーダーが展開し終わるのは約10年と約1,000億円の経費を要するという大事業である。なお, FAA は空港監視用, 特にマイクロパーストの検出用に独自の 5 cm 波のドップラーレーダーを展開し, NEXRAD の観測網を補おうとしている。

第1表は NEXRAD の特性である。波長 10 cm の電波が採用されたが, これは降水による電波の減衰が少ないこと, ドップラー速度の測定限界(折り返し速度)を大きく取れること, 測定範囲を広げられること, 晴天でも境界層内の風の測定が可能なこと, 等の点で 5 cm 波よりすぐれているからである。しかし 10 cm 波の場合, システム全体が大型化し1台あたりの建設費は高い。もし日本で 5 cm 波のドップラーレーダーを現業用に導入したら, 測定領域を考えると現在の2倍以上の数が要になるかも知れない。

これまでの研究観測では, 複数のドップラーレーダーを組み合わせて降水雲内の気流の3次元構造を調べるや

第1表 NEXRAD レーダーの特性

波長	10 cm
出力	1 MW
ビーム幅	1.0 deg
アンテナ直径	9.0 m
アンテナ回転数	3 rpm
探知範囲	230 km (Vr, W) 460 km (Ze)
繰り返し周波数	650 sec ⁻¹ (Vr, W) 325 sec ⁻¹ (Ze)
折り返し速度	16 m sec ⁻¹

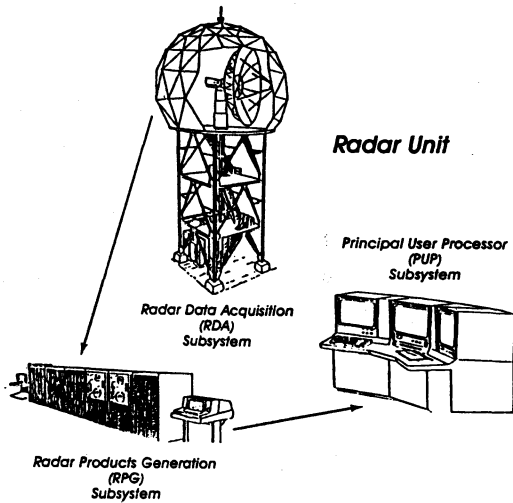
注) Vr, ドップラー速度
W, 同スペクトル分散
Ze, 反射強度

り方が主流で、気象研究所でもこの方式によって観測を行っている(石原ら, 1987)。しかしこの方式では観測システムが複雑であり、データの処理に時間がかかる。そして何より100台以上のレーダーを使っても米国全土をカバーすることが不可能という理由で、NEXRADは単一方式で使用されることになった。つまり、レーダービームに沿った風速成分のみを観測し、それを現場で利用するのである。これはなかなか容易なことではない。

NEXRADの基本思想は、デジタル化とデータ処理の全自動化によって severe weather の短時間予測を行うことにある。反射強度の分布は別としてもドップラー速度の生データ、つまり渦巻き状の速度パターンを予報官や一般のユーザーに直接提示しても即戦力にはなりにくい。そこでレーダーサイトごとに生データを計算機によ

第2表 NEXRAD Products

Severe weather analysis products	STORM TRACKING STORM CENTROIDS STORM POSITION FORECAST STROM STRUCTURE STROM SEGMENTS LAYER COMPOSITE HAIL ECHO TOPS SEVERE WEATHER PROBABILITY MESOCYCLONE DETECTION TVS DETECTON FLASH FLOOD ICING
Precipitation analysis products	VERTICALLY-INTEGRATED LIQUID WATER PRECIPITATION PREPROCESSING PRECIPITATION RATE PRECIPITATION ACCUMURATION PRECIPITATION ADJUSTMENT PRECIPITATION PRODUCTS STRATIFORM PRECIPITATION TRACKING
Momentum analysis products	VELOCITY AZIMUTH DISPLAY SHEAR TURBULENCE DIVERGENCE DETECTON TRANSVERSE WIND MODIFIED VELOCITY VOLUME PROCESSING GUST FRONT TROPICAL CYCLONE DOWNBURST/MICROBURST



第1図 NEXRAD の構成

って処理し、表2に示すような各種の「製品」に加工し、カラーディスプレイを通じてユーザーに提供する。第1図はNEXRADの構成図である。RDA、RPG、PUPの3つのシステムによって構成されている。

第2表に示すように「製品」はおおまかに3種類に分けられる (Sarreal et al., 1986)。「製品」の第1は、Severe weather analysis products と呼ばれ、主に活発な対流雲の実態把握、移動の予測、雹の有無の判別、トルネードの発生の子想に関するものである。現在、米国にはIIのデジタル気象レーダーがあり、それらはRADAP II というシステムによって実験的に運用されているが、NEXRAD がこれに取って代わる。

第2は Precipitation analysis products と呼ばれ、2 km × 2 km の格子点上で1時間降水量、毎正時降水量、3時間積算降水量、総降水量などが計算される。この過程で雨量計との比較からレーダー雨量の補正も行われる。これらは大雨や洪水の予警報のために利用される。米国版のレーダー・アメダス合成図である。

第3は、Momentum analysis products と呼ばれるドップラー速度に関する情報の集合である。ドップラー速度の分布、VADによる水平風の鉛直プロファイル、小領域内では水平風一定であるという仮定による風向・風速の計算、収束発散の計算、ガストフロントの自動検出、風の動径または切線成分のシャー、ドップラー速度のスペクトルの分散から求めた大気の大擾乱度、等である。将来は、マイクロバーストの検出、ハリケーンの中心決定も目指している。

ほとんどの「製品」は5分毎にRPGによって計算され、予報官やユーザーの指定によってPUPに出力される。これとは別に各レーダーサイトでは4 km 間隔の格子点上の反射強度、VADで求めたレーダー上空の風の鉛直プロファイル、トルネードや雹の発生位置とエコー頂高度が、Radar-coded message として自動的に中央に送られ、全国規模のレーダーチャートが作られる。この4 km は LFM (Local Finemesh Model) の格子間隔の1/40に相当する。

NEXRAD は表面的にはごく最近始まったように思っていたが、実は米国のドップラーレーダーの長年の実績に負うところが大きいことが分かった。ハードウェアと観測の実績の豊富さは言うまでもないが、データ解析ソフトはNOAA、FAA、Air Forceなどの数々の研究所で膨大な人員と経費をかけて開発してきたようだ。それでも反射強度に比べると、ドップラー速度の情報はまだ十分に利用され尽くされておらず、今後に期待をかける人、批判的な見方をする人、と様々である。ドップラーレーダーという新しい測器が現場で使われるためには、人と物と時間についてかなりの投資が必要なことを、NEXRAD 計画は私達に教えている。

4. PROFS

4～6月は私の滞在していたNSSLでは恒例のSpring Program が実施され、研究所が一体となってスーパーセルやマルチセルの雷雲、スコールライン等の観測を行う時期である。平素はさまざまな分野を専門とする研究者、技術者がこの期間には全員観測のために何らかの仕事を担当する。期間中毎日、研究者が当番で当日の天気予報と現象の発生の有無の予想を行う briefing がNSSLの会議室で開かれる。この席に登場したのがPROFS POWER systemであった。JAWSやSTORMをはじめ、米国では特別観測やシステムの名前に実一般受けのするものを考え出す。この場合、PROFSはProgram for Regional Observing and Forecasting Servicesの略、POWER systemはPROFS Operation Weather Education and Research systemの略である。

PROFSはNOAAの研究所群(ERL)に所属する組織で、30名ほどの職員がメソスケール現象の短時間予測のための解析システムを開発している。NCARのあるColorado州Boulderの町に本部がある。米国の現場ではAFOSというデータ配信システムがすでに10年

ほど前に導入され、気象台ではディスプレイによる総観解析が一般化している。PROFS はこれと似たシステムをメソスケールの解析にも導入しようとする試みである。高層、地上、レーダー、衛星等の既存の現業データに加え、研究用の地上のメソネット（米国にはアメダスに相当する地上の観測網はない）、ドップラーレーダー、プロファイラーのデータをリアルタイムで1カ所に集中し計算機処理し、その結果を予報官が対話形式で利用し、メソスケールの予報を行うことをめざしている。1985年には開発中のシステムによって業務実験が行われた。数値モデルが短時間予測の決め手にはなりにくいが現状なので、既存のデータにいくつかの新しいデータを加え、それを最大限に利用しやすい形に直して予報官に提供しようとする思想である。

その一環として POWER system が作られた。2台の高解像度のカラーディスプレイと1台のマイコンからなる work station が、Boulder の本部のミニコン象群と電話回線で接続されている。これによって既存のあらゆる現業データを、ほぼ「リアルタイム」で「様々な組み合わせ」で「カラーディスプレイ」上に見ることが出来る。最初の「リアルタイム」は短時間予測には必須である。次の「様々な組み合わせ」で「カラーディスプレイ」というところに、実際のシステムを見て関心させられた。

例えば、北アメリカの総観天気図に衛星やレーダーの画像を重ねそれを2日前までさかのぼってループで見る。州単位程度の領域の地上天気図に流線解析を施し、衛星とレーダー画像を重ね、水蒸気フラックスの等値線を入れ雷雲発生の予報をする。高層断面図やエマグラム、プロファイラーで求めた高層風の時間変化、等を即座に表示する、等である。これまで現場にばらばらに流され、予報官の頭の中や図面の上で再構築されていた各種データが、予報官の選択で1つのカラーディスプレイの上に随時表示され、それらを重ねたりループにすることが自由にできる。

これまでは後日、調査研究のテーマとして手間ひまかけてやっていた解析作業が、このシステムを使うとほぼリアルタイムにできてしまう。メソスケールの短時間予測は完成品の天気図だけではできないので、最大量のデータを最良の形で即座に予報官に提供することのようなシステムが有効ようだ。実際に一度使ってみて、既存のデータの持つ潜在能力の大きさに驚いた。同時に、予報官がそれらを最大限に利用するには、各メソスケール現

象に対する概念的モデルがしっかり出来上がっていることが必要であり、この点が短時間予測のむずかしさを暗示している。このシステムはまだ実験段階にあるが、将来 NEXRAD やプロファイラーの観測網のデータを加えれば、より一層 powerful になるに違いない。

5. TAMEX

1年間の滞在で見聞したことの中で、最も驚いたものは TAMEX (Taiwan Area Mesoscale Experiment) 計画であった。これは名の示すとおり台湾を中心として梅雨前線のメソスケールの構造を調べる観測計画である。梅雨前線にともなうメソスケール循環、MCS の形態、地形効果の3つを研究対象として取り上げている。在米の台湾出身の NCAR の Dr. Kuo が先頭に立ち、米国の Dr. Zipser を中心とした NCAR や NOAA の研究者が台湾の研究者と協同して、今年の5、6月に特別観測を実施した。米国からは2台のドップラーレーダーとドップラーレーダー搭載の気象観測機 P-3、そして34名の研究者が台湾に集まり観測に参加した。

私は昨年この計画を知って3つのことに驚いた。第1は、米国のメソ気象の研究者が東アジアの梅雨前線にまで興味を示していること。しかし梅雨前線は現象の規模や強さから見てメソスケールの研究対象としては十分に価値がある訳だから、当然かも知れない。第2に台湾政府は観測に備えて5cm波のドップラーレーダーとプロファイラーを各1台建設した。また既存の4カ所に加え7カ所の特別高層観測点を設置する。その内2点は観測船上で行われる。第3に、米国の研究者を通じて日本に対して観測参加の要請がなされたが日本は参加しないこと。政治的に困難というのが第一の理由である。日本でも大学が中心となって九州で梅雨観測が近年行われている。日本のメソ気象の研究者にとっては梅雨前線は強い興味の対象であり、大きな被害をもたらすことから最優先の研究テーマであろう。TAMEX 計画に少しでも参加する方法がなかったものだろうか。

6. おわりに

ごく限られた範囲ではあるが米国のメソ気象学の現状の一端を紹介した。メソスケール現象を理解するためには、既存の観測網では不十分というのは周知の事実である。メソ気象の観測に特に有効な測器はドップラーレーダー、航空機、プロファイラーと思われる。米国では現在の1台に加えて1990年までに計3台の大型観測機がド

ップラーレーダーを搭載する。航空機搭載のドップラーレーダーは機動力の面から特筆に値する。前に述べたようにプロファイラーもかなりの数が稼動している。

日本の現状はどうであろうか。残念ながら航空機は論外としても、京都大学の共同利用施設である MU レーダーは世界有数のプロファイラーである。年々利用者が増え、対流圏を対象にした観測も行われている。ドップラーレーダーは現在、気象研究所に2台、北海道大学、電波研究所、土木研究所、名古屋大学に各1台の計6台が稼動している。数の上からは世界2位である。ちなみに諸外国では、フランスの2台、西ドイツ、フィンランドの各1台である。しかし、日本ではおのおのの研究所、大学が独自に対象を選んで観測を行っている。米国の例を見ても分かるように、観測には1つの対象に対して持てる力をすべて投入する「全力投球型」の体制で臨むことが大切のようだ。研究環境や行政上の違い、研究費の少なさ、等問題は確かに多いが、メソ気象の観測的研究の分野では協同の特別観測の体制作りが急務であるように思える。メソ気象は行政官庁は防災の面から、研究所や大学は学問的な面から、おのおの十分に興味を持ち得る対象であるからである。

米国で今急速に普及しているケーブルテレビには、Weather Channel という24時間解説つきで天気予報を流し続けるチャンネルがある。通常のテレビ局には専門の「meteorologist」がいて独自の天気予報を出す。アメ

リカ人もなかなか天気予報好きである。国が集めたさまざまな気象データは民間に流して有効に利用されている。国の気象に関連するいくつかの行政機関が協力体制にあることを含めて、このあたり日本とはずいぶん異なる社会環境である。

おわりに、私の米国滞在は科学技術庁長期在外研究員制度によった、Oklahoma 大学・CIMMS の佐々木教授、また NSSL の Kessler, Maddox 両所長や職員の方々には滞在中たいへんお世話になりました。渡米に関しては気象研究所の多くの方々にお世話になりました。この紙面を借りて深く感謝いたします。

文 献

- 石原正仁, 榊原 均, 柳沢善次, 松浦和夫, 青柳二郎, 今泉孝男, 1987: 2台のドップラーレーダーによって観測された関東地方の雷雲の内部構造, 天気, 34, 321-332.
- 上田 博, 1985: NSSL(NOAA/ERL) に滞在中, 天気, 32, 201-206.
- 小倉義光, 1983: 集中豪雨とたつまき, 科学, 53, 169-176.
- 藤原美幸, 1984: 第21回レーダー会議に出席して(II), 天気, 31, 231-234.
- Sarreal et al., 1986: NEXRAD products and algorithms, Part 1 Descriptions and scientific basis, Preprints, 23rd Conf. on Radar Meteor., JP 83-86, Snowmass, CO, AMS, MA.

「朝日賞」候補者推薦のお願い

昭和62年度朝日賞の受賞候補者をご推薦くださいますようお願い申し上げます。原則として昭和62年1月1日から同12月31日までに完成、または完成予定の業績を対象とします。フレッシュな候補者の推薦も歓迎します。また貴殿の専門外の分野からでも構いません。なお、勝手ながら、推薦票は本年9月16日までに、お送りいただきたいと存じます。

朝日賞の正賞は賞牌とし、別に副賞(賞金=1件につ

き100万円)をお贈りします。受賞者は昭和63年元日の朝日新聞の紙面で発表し、1月中旬、朝日新聞東京本社で贈呈式を行います。

お問い合わせなどは、下記へお願いいたします。

朝日新聞東京本社 企画第二部「朝日賞」係
〒104 東京都中央区築地5-3-2
電話 03-545-0131 内線 5477