

105:1052:401:407:601 (メソスケール気象;
豪雨;雷雨;予報;気象災害;研究体制)

2. 防災・生活情報のためのメソ気象学

新野 宏*

1. はじめに

今回のシンポジウムに際して、標記の題での講演依頼を受けたとき、正直言って、私よりも気象庁や民間気象会社で予報・防災業務を担当されている方がはるかに適任だと思った。それを敢えてお引き受けしたのは、この機会に、日頃からメソスケールの気象(以下メソ気象)と防災に関して考えていたいくつかのことをお話してみようと思ったからである。本シンポジウムの趣旨からすると若干ずれた話になるかも知れないが、その場合はどうかご容赦願いたい。

個人的なことになるが、私にとって、メソ気象学の魅力は、大きく分けて3つある。第1は現象のダイナミックレンジの広さと多様性である。穏やかに晴れた日、海風前線の先端からモクモクと積乱雲が発達し始めたかと思うと、見る見るうちに激しい雷雨となり、1時間もするとまた何事もなかったかのように穏やかな日和に戻る。「海陸風から嵐まで」一静と動の見事な対照をなすこれら現象のすべてがメソ気象学の対象である。一方、現象の多様性を象徴するのが、メソスケール現象(メソ現象)の階層構造である。メソスケールは便宜上、メソ α スケール(200~2000 km)、メソ β スケール(20~200 km)、メソ γ スケール(2~20 km)に分けられることが多い(Orlanski, 1975)。ここで、メソ α スケールの台風を例にとると、その中にはメソ β スケールの眼の壁雲やスパイラルバンドが存在し、それらは更にメソ γ スケールの積乱雲から成っている。これらの階層構造が湿潤過程を介して複雑な非線形相互作用を行う。現象の多様性はメソ現象の魅力である反面、その研究を難しくしている要因でもある。

メソ気象学の第2の魅力は、現象の時間・空間スケ-

ールが小さいことである。メソ現象は日常生活の時間スケールで遭遇することができ、また目の前で現象の全貌を眺めることも可能である。その分、現象の概念モデルを検証する機会にも恵まれると期待できる。ただし、時間・空間分解能の粗い既存のルーチン観測網では現象が捉えられない場合も多いので、研究観測の重要な分野でもある。

第3の魅力は、本講演の題名にもあるように、研究の成果が社会の役に立つことである。このこと自身は大変良いことだが、ともすると社会の役に立つような課題が大事である、という先入観が持たれることはやや悩ましい点である。例えば、「防災・生活情報のための天文学」という話題提供は成立しないであろうが、その分、天文学は純粋な「科学」として一般社会から認知されているということはないだろうか。しかし、社会の役に立つから気象の観測・予報は業務になっており、得られたデータから現象の概念モデルが検証される機会も多くなると、ここでは積極的に捉えていきたいと思う。メソ気象学は防災・生活情報のために有用であるだけでなく、そのプロダクトとしての防災・生活情報は、社会からの批判を通して、更にメソ気象学の進歩にフィードバックすると期待されるわけである。本講演では、このような観点からメソ気象と防災・生活情報の関わりについて、最近、私が考えていることについてお話してみたい。

2. 防災・生活情報の種類

メソ気象に関わる防災・生活情報は実に多種多様であり(第1表)、とても与えられた時間でお話しできるようなものではないが、最初に簡単に概観しておくことにする。

防災・生活情報には大きく分けて3つの種類がある。第1は、平時から起こりうる災害を予測しておくもの

* 東京大学海洋研究所, niino@ori.u-tokyo.ac.jp

© 2002 日本気象学会

第1表 防災・生活情報の種類の例

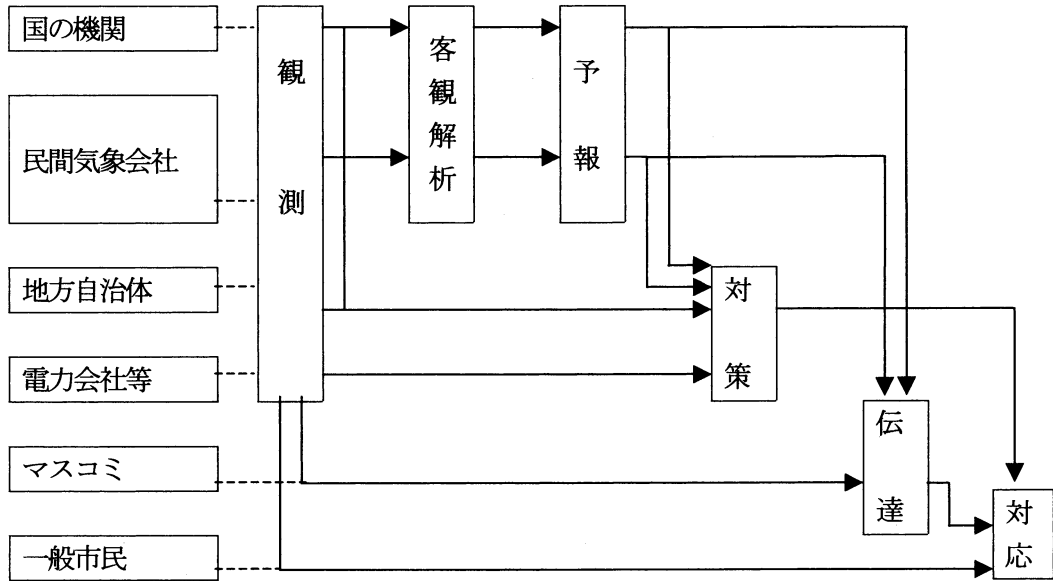
(*¹http://www.ktr.mlit.go.jp/kyoku/2_now/3_tokimk/7_hanran/06_kasmi/kouzuizu1.htm, *²<http://www.as.hda.go.jp/chisui/simurate/ishikari/main/hanran/11/sta.htm>, *³<http://www.thunder.ttcn.ne.jp/>, *⁴<http://www.metocean.co.jp/weather/satellites/amedas.htm#kanto>, *⁵<http://www-aeros.nies.go.jp/index.html>, *⁶<http://www.jwa.or.jp/pollen/>).

	情報の発信者	情報の種類	備考
事前把握	国土交通省・総務庁	洪水・土石流	洪水実績図*1、洪水氾濫危険区域図、浸水予想区域図*2、洪水ハザードマップ、災害情報の立体視化
		拡散	工場などの立地条件・事故時の対策
	民間気象会社	立地環境評価	風力エネルギー、スキー場サイトの選定、道路の視程改善
実況	電力会社	雷探知情報*3	
	民間気象会社	レーダー*4	
予警報・生活情報	気象庁	各種警報・注意報・各種情報	数値モデル・実況・土壌雨量指数(岡田ほか,2000)洪水予報
	地方自治体	避難勧告	気象庁等の情報に基づく。竜巻警報(豊橋市)
		大気汚染注意報	環境省・民間気象会社と連携*5
	民間気象会社	花粉飛散予報	実況・経験式・数値モデル*6
		大気汚染予報	数値モデル*5
		農業気象予報・情報	霜・積算の日射量など
		生活関連情報	洗濯指数・不快指数・紫外線量情報
		交通関連情報	雪・路面凍結・霧
	レジャー関連情報	雷(ゴルフ)・波(サーフィン)	

で、代表的なものとして被害想定図(ハザードマップ)がある。自分のいる場所が、自然災害・人為災害に対してどのような脆弱さを持つか、また万一災害が起きたときにはどのような被害が想定されるかを認識しておくことは、防災の基本である。しかし、わが国では、行政が把握していても、被害想定図を一般市民に普及することは、極めて不十分である。これは、余分な不安を一般市民に与えたくないという行政側の配慮と、災害に対して脆弱であることを公にされたくないという地域住民の気持ちが噛み合っていることと思われる。しかし、災害時には、一般市民1人1人の日頃からの心構えと適切な対応が不可欠である。ある場所でどれだけの雨が降れば、洪水・がけ崩れ・土石流の危険性があるか、原子力発電所でどれだけの事故があれば、風向・風速・成層安定度によって放射性物質がどのように拡散するかなどの被害想定図は本来ならば広く公開されるべきであると思う。これらの被害想定図は、大気拡散モデルや水理モデルなどの結果に加えて、過去の記録や実地観測による検証を行うことにより、か

なり信頼できるものが作成できるはずである。被害には結びつかないが、風力エネルギー資源の調査・立地環境調査などもこの分類に含まれる。

第2は、観測データの実況情報である。現実に観測されるデータは数多くあるが、一般市民が入手できるデータはあまり多くない。その中でも特に有用と思うものは、全国に展開されている気象庁の現業レーダーと、いくつかの電力会社の雷探知システムのデータ(気象庁でも2000年度から航空機のための雷監視を始めている)である。これらの情報(過去1時間の動画が望ましい)は、一度その意味するところを知れば、この先1時間くらいの降水や雷雨の見通しがつき、専門家だけでなく一般市民にとっても有用この上ない。出先でびしょぬれになったり、買い物中に洗濯物が濡れてしまったり、学校のグラウンドで練習中に落雷に会うなどの被害が防げるはずである。強い雷雨は、竜巻やダウンバースト、雹などを伴うことも多いので、予め雨戸を閉めるなど被害の防止にも役立つ。このように有用なデータが、観測を実施している気象庁から直接社



第1図 防災・生活情報の流れ。

会に無償で還元されれば、気象庁がその活動を日常的に社会にアピールする良い機会になると思うし、防災教育にも一役買うはずである¹¹。

第3は予報・予測にもとづく情報である。生の観測データが有用といっても、現状では多くの一般市民はそれを十分使いこなすまでには到っていない。難しいことはどうでも良いから結局今後どうなるのかを教えてください、という要求が実際には多いのである。予報・予測には大きく分けて2つのタイプがある。第1は、実況と単純な外挿や経験則にもとづいて短時間の予測をするもので、従来の気象庁の短時間降水予報¹²がこれにあたる。珍しい例としては、1999年9月24日の竜巻で小中学校に大きな被害が出た豊橋市ではこれを契機として、竜巻が発生したらサイレンを鳴らして知らせることにしたと聞いている。第2のタイプは、メソ数値モデルを用いて物理的に予報するものである。平成13年3月から気象庁によるMSM (Mesoscale Spectral Model) による1日4回のメソスケール予報が始まったが、民間の気象会社でも、花粉や大気汚染、農業気象情報などを数値モデルにもとづいて予報し、情

報提供することが実用化している。

3. 防災・生活情報の流れ

第1図は防災・生活情報の流れの概略を示したものである。防災情報と生活情報では、情報の緊急度・重要度が異なるという質的な違いがあるが、情報の流れという観点から見ると両者に大きな違いはないように思われる。図に示したように、防災・生活情報の流れは、観測、客観解析、予報、伝達、対応の一体化したシステムとして認識する必要がある。どの過程が不十分でも、有用な情報は一般市民に届かない。以下、それぞれの過程について簡単に見ていこう。

観測は、防災・生活情報を作成する上での最も基本となる過程である。どのような情報も現状の的確な把握なしには成立しない。観測データは、信頼できるものであれば、多ければ多いほど有用である。近年、GPS、空港ドップラーレーダー、プロファイラ、雷探知装置など新しい測器の展開が進んでいるが、残念ながら現状では、特定の組織内でしか利用できないものも少なくない。

観測データはすべてが同時刻に同じ空間分解能で得られるものではない。また、観測には誤差がつきものであり、観測点ごとの特性や精度も様でない。そこで、観測データをもとに品質管理を行い、過去のデータに基づく予報の情報や、物理法則の拘束条件などの

¹¹ 現時点では、電力会社や民間の気象会社からインターネットで公開されているのみである (第1表)。

¹² 2001年3月からはMSMによる予報結果も考慮されている。

客観的な基準にもとづき、最も現実に近いと思われる物理量の空間分布を推定したデータ(客観解析データ)を作成する必要がある。客観解析データは、最も信頼できる実況データとなると同時に、数値モデルによる予報の初期値をも提供する。降水を伴うメソ現象では、降水系とこれに伴う発散場を初期値として適切に表現することが、その後の降水系の発展に決定的な影響を持つ。そこで重要になるのが4次元データ同化であるが、これについては露木さんの学会賞受賞記念解説が「天気」に掲載されている(露木, 2001)ので、ここではこれ以上触れないことにする。

客観解析データは、気象庁・民間気象会社などにおいて、数値モデルや簡単な経験モデルを用いた予報に使われる。モデルの予報結果は、現象に応じて、実況データの情報も総合しながら、予報文・予警報・各種情報として自治体やマスコミに伝えられる。自治体は状況に応じて様々な対策を講じ、また一般市民にその判断を伝達する。また、マスコミも様々な手段を通じて一般市民に情報を伝える。一般市民はこれらの情報をもとに適切な対応を行う。

4. メソ気象学の貢献

メソ気象学はこれまでどのように防災・生活情報に寄与してきたのであろうか。メソ気象学の目的は、メソ現象の構造や機構を明らかにすることであるから、まず現象の観測を行う必要がある。そのために、これまで通常レーダー、ドップラーレーダー、アメダス(アメリカでは Mesonet)、GPS、プロファイラ、雷探知装置などが開発されてきた。これらの測器は今では気象業務用にも使われており、一般社会に貴重な情報を提供している。現在も、バイスタティック・レーダーや phased-array radar などの多様な測器が開発されつつある。

しかしながら、メソ気象学の最も重要な貢献は、やはりメソ現象に関する概念モデルの構築であろう。例えば、数少ないレーダー観測等から Browning (1964) が提出した竜巻を起こす積乱雲(スーパーセル)の概念モデルは、1970年代のドップラーレーダーによる観測でほぼ実証されることになった。優れた概念モデルは、現象を観測するために必要な物理量や時間・空間分解能を決める際に有用な指針を与える。

概念モデルは、また、現象を再現する数値モデルのデザインにも不可欠である。計算資源は有限であるので、どのようなシミュレーションを行う際にも、モデ

ルで考慮すべき物理過程や格子間隔、領域サイズを選択する必要がある。予報業務で使われる数値モデルでは、限られた時間内に予報を終えなければならないので、その判断は更に重要である。数値モデルに組み込まれる個々の物理過程の表現にも、メソ気象学の成果は利用される。数値モデルの仕様に依じて、データ同化のスキームも検討される。

実際の予報に当たっては、単に概念モデルだけではなく、メソ気象学に関するあらゆる知識が要求される。大気汚染などの拡散現象については、数値モデルの結果はある程度信用できるが、降水現象、中でも集中豪雨のような現象になってくると、次節で詳しく述べるように数値モデルでいつも予報できるとは限らない。予警報の発令に当たっては、数値モデルにどのような効果が考慮してあり、どのような癖を持っているかを知った上で、モデル結果だけでなく、過去の事例、実況データなども考慮して総合的に判断する必要がある。

発令された予警報は、地方自治体等に伝えられると共に、マスコミなどを通じて一般市民に伝えられる。一般市民にわかりやすい形で情報を提供することが重要なほうまでない。

しかし、今回の講演で特に強調しておきたいのは、予警報に対する一般市民の対応である。1999年8月14日熱帯低気圧の接近する中、神奈川県山北町の玄倉川の中州でキャンプを張っていた18人が流され、死者行方不明13名を生ずる事故があったのは記憶に新しい。この事故は、気象庁による「弱い熱帯低気圧」という用語の見直しにまで発展した。神奈川県によると、これ以外にも17件、200人を超える孤立者が出たとのことである(平成11年8月24日神奈川県記者発表)。この事故は、情報を提供する側には誰にもわかりやすい情報を工夫すべきだという教訓を残したが、同時に、いくらの確かな予警報を出しても、これを受け取る側のアンテナの感度が不十分では機能しないことを示した。

最近、小中学生の理科離れがマスコミで騒がれており、高校の地学もほとんど履修する人がいない状況である。もともと全国の大学で気象の講座のあるところは数少ない。更に悪いことに、2002年度から実施される文部科学省の新指導要領では、テレビの気象情報などで気象に親しむ機会は多いとの理由で、天気図などの気象の学習が大幅に削られることになっている。日々の生活、レジャーなどで直接間にも関わることが多い気象が義務教育で教えられなくなると、一般市民

に予警報を適切に受け取るアンテナは備わるのか大変心配である。1991年の台風19号では台風慣れているはずの九州でさえ、眼に入って屋根の修理をしていた人が通過後の吹き返しで飛ばされて亡くなるなどの信じられない被害が出た。強い台風の経験のない東京に、もし強い台風が来たら、本来なら防ぎうる被害がどれほど出るか、想像に難くない。

そこで、気象学会員は、自分の住んでいる周辺からでも良いから、ボランティアで気象に関する理解を深めてもらう努力をしていくべきだと思う。それには、現在の小中学校での気象教育の題材ではなく、私は積乱雲のしくみとそれに伴う大雨、雷、突風、雹などの現象を題材に、防災の観点から話すのが良いと思っている。現象を良く理解してもらうと共に、現状での予報の限界についても正しく理解してもらうことが重要である。学会としても、良い教材を準備したり、ボランティアの講師を登録しておいて、派遣のアレンジをする窓口を設けるなどのサービスをして良いと思う。積乱雲についての知識が広く普及してくれば、先に述べたレーダーや雷探知装置のデータの有難さも一般市民に理解されてくると期待される。

5. 防災・生活情報にかかわるメソ気象学の課題

メソ気象学における課題を限られた時間で網羅することは難しい。以下では、防災・生活情報に関わるメソ気象学の課題に限定して私見を述べて見たい。花粉や大気汚染などの大気拡散にかかわる現象は、生活情報としては非常に重要だが、その基礎はある程度確立したものと思われるので、以下では主として降水過程がかかわる現象を中心に述べる。特に、現時点で、何が予報できて、何が予報できないかを的確に認識しておくことは重要である。

5.1 雷雨の発生

関東平野における雷雨の研究から、大規模な雷雨は何らかの総観規模やメソスケールの強制のもとで起こりやすいことが知られている(例えば吉崎, 1996)。一般に雷雨は、海陸風前線、古いストームに伴うガストフロント、drylineなど、境界層での何らかの強制が効く場所で発生することが多い(例えば、小倉, 1996)。

最近、水平方向に比較的一様な場の中で気団性雷雨が発生する際には、対流混合層内のロール状対流が重要な役割を演ずるとする考えが提出されている(例えば Weckwerth, 2000)。フロリダ半島などの多湿域では、ロール状対流の上昇域で水蒸気混合比の偏差が大

きく、自由対流高度が1 km以上低くなっていることが原因という。もし、これが事実であれば、混合層内の水蒸気混合比の偏差を見積もることが雷雲の発生には重要なことになり、その予報の難しさを示している。1999年5月3日にオクラホマ州オクラホマシティ周辺にF5の竜巻をもたらしたスーパーセル・ストームもロール状対流から発生したとする説が出されている(Edwards *et al.*, 2000)。

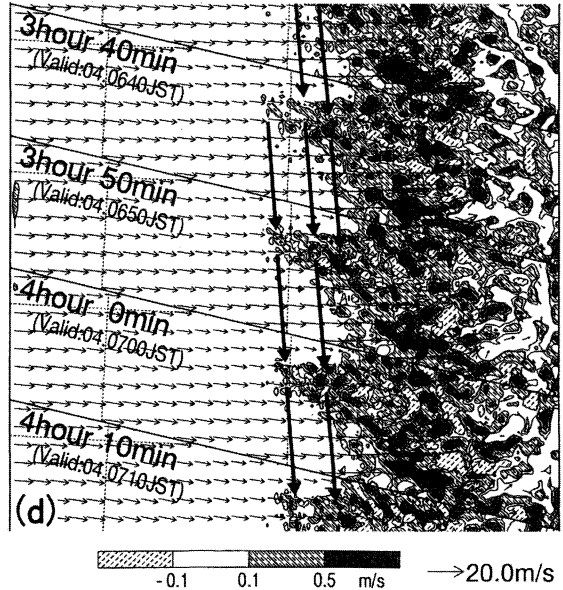
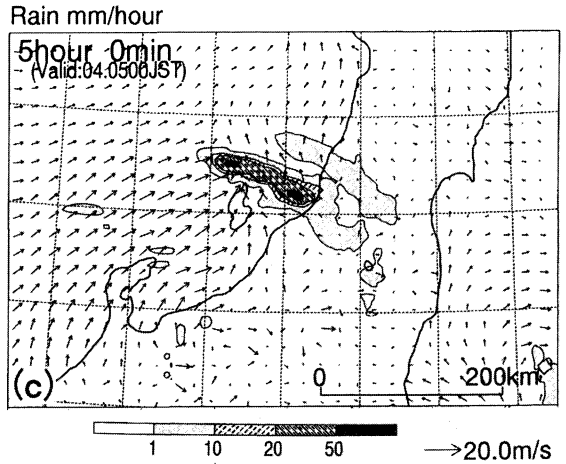
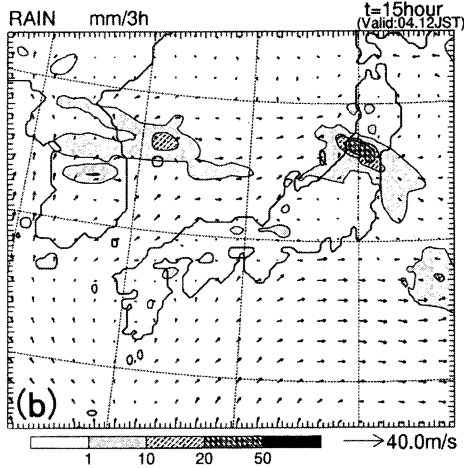
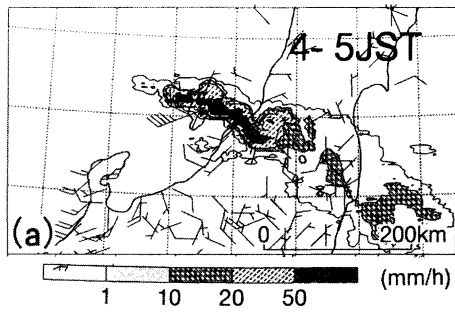
5.2 集中豪雨の予報

最近発行された1998年の新潟・栃木・高知の豪雨に関する気象庁技術報告(気象庁, 2000)は、豪雨に関する数値モデルによる予報の現状を知るのに大変参考になる。ここでは、その中から、加藤(2000)の報告を中心に紹介したい。

まずシミュレーションがうまくいった例は、1998年8月4日の新潟豪雨である(第2図)。この例では、気象庁の現業領域予報モデルであるRSM (Regional Spectral Model: 水平格子間隔約20 kmの静水圧モデル)により、発生時刻こそ実況(第2図a)より6時間程度遅く、降雨強度も55 mm/3hと弱いものの、帯状の降水帯の発生が予測されている(第2図b)。このRSMにネストした水平格子5 kmの気象研究所非静水圧モデル(MRI-NHM; 例えば齊藤・加藤, 2000)は、帯状の降水帯の位置こそ実況より20~30 km北にずれ、発生時刻も2時間程度遅れるものの、実況に近い83 mm/hの降水強度を再現した(第2図c)。更に、この中に、水平格子2 kmのMRI-NHMをネストして、降水セルの振舞を見たところ、レーダーにより観測されたと同様、降水帯の風上で次々と新しいセルが形成されては風下に流されるバックビルディング型の降水帯が再現された(第2図d)。2 kmモデルの降水量は、5 kmモデルの結果とほぼ変わらなかった。

1998年8月26~27日の福島・栃木豪雨、9月24~25日の高知豪雨については、2001年3月から気象庁の予報業務に使われているMSM (Mesoscale Spectral Model: RSMと同じ静水圧モデルだが、水平格子間隔10 km)による予報は降水帯の再現に成功せず(郷田, 2000)、これにネストした5 kmのMRI-NHMの結果も思わしくなかった(加藤, 2000)。

これらの結果から多くのことがわかり、一方疑問も湧いてくる: 1) 2001年から全国に展開される気象庁のプロファイラ網や、民間航空機のデータ、GPSなどをデータ同化に取り込むことにより、領域モデルの予報が今後どの程度改善されるか、注意深く見守ってい

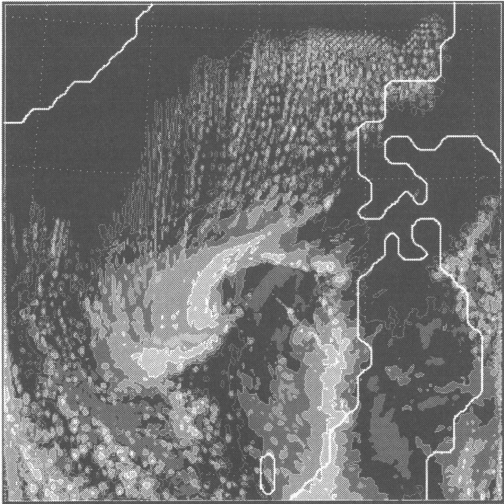


第2図 1999年8月4日の新潟豪雨の実況とシミュレーション結果(加藤, 2000より). (a) 05 JSTのレーダー・アメダスによる前1時間解析雨量とアメダスによる風, (b) RSMによる12 JSTの地上付近の風と前3時間降水量予報, (c) 5 km分解能のMRI-NHMによる05 JSTの地上付近の風と前1時間降水量予報, (d) 2 km分解能のMRI-NHMによる0640-0700 JSTの高度1.06 kmの水平風と鉛直流の時系列(濃い影は0.5 m/s以上).

く必要はあるが, 集中豪雨は現状では予報できない事例も多い. 集中豪雨の予警報は, その地方の過去の事例や実況データにもとづいて発令せざるをえない. 2) 領域モデルの予報が悪い場合には, いくら非静力モデルをネストしてもあまり予報の改善は見られない. 新潟豪雨で領域モデルの予報が良かったのは, この豪雨が梅雨前線の強化に伴ったものであったためと思われる. 3) 対流をパラメタライズした格子間隔10 kmのMSMで対流自身の効果の表現が良くなることは期待できるのか? 4) 領域モデルにおいて降水帯がある程度表現される場合には, 格子間隔5 kmの非静水圧

モデルをネストすることにより, 現実的な降水強度が予報されるが, 5 kmの格子間隔で表現される積雲対流というのは一体どのようなものか? また, 何故予報が改善されるのか? 5) 更に格子間隔2 kmの非静水圧モデルをネストすることにより, バックビルディング型の降水帯が表現できるが, 雨量は格子間隔5 kmの結果と差が無い. これは, 個々の対流セルは正確に表現しなくとも, 対流セルの総合的な効果として凝結熱による加熱さえ表現すれば良い予報が得られることを意味するのか?

計算機の性能が向上して, 格子間隔が10 km 弱のモ



第3図 1997年1月21日00 UTCを初期値とするMRI-NHMによるポーラーロウのシミュレーションにおける16 UTCの全水量(水蒸気は除く)の鉛直積分。明るいほど全水量が多い。水平方向の計算領域は720 km×720 kmで格子間隔は2 km(柳瀬ほか, 2000)。

デルが現実的に使われるようになってきた。格子間隔が小さくなれば、地形をより現実的に表現できるため、地形性の降水はより良く表現できると期待できる。しかし、水平格子10 km弱のモデルで、対流をパラメタライズした場合と対流をパラメタライズしない場合で、それぞれ一体どのような物理が表現されているのか真剣に検討する必要がある。

第3図は柳瀬ほか(2000)が行った格子間隔2 kmのMRI-NHMによる日本海のポーラーロウのシミュレーションである。観測で見られた台風に似たスパイラルバンドと眼を伴うポーラーロウに加えて、寒気の吹き出しに伴う筋状雲が、一瞬衛星写真かと見間違ふくらい良く再現できている。シミュレーション結果から、観測ではわからないポーラーロウの詳しい構造や力学がわかってきている。ただし、ここで見られる筋状雲は海面近くの厚さ2 km程度の対流混合層内の対流に対応しているはずであるが、水平格子2 kmで表現される対流混合層内の対流がどれくらい妥当なものかはまだまだ検討の余地がある。

5.3 アンサンブル予報とポテンシャル予報

総観規模の予報に、アンサンブル予報^{*1}を用いることはかなり一般的になりつつある。しかし、湿潤過程が重要となるメソ現象の予報にアンサンブル予報を用

いることが有効かどうかについては現在も明確でない。第1に、初期値の異なるアンサンブルのメンバーをどのように生成するかという難しい問題がある。総観規模の予報では、モンテ・カルロ法を使うもの、特異ベクトルを求めるもの、増幅擾乱を試しに育てる方法などが使われているが、メソ気象ではまだいろいろ試行されている段階である。特に、メソスケールの観測データに伴う観測誤差の評価が確立していないという難しい問題がある。

第2は、粗い格子のアンサンブル予報と細かい格子の単一の予報とのどちらが良いかという問題である。Stensrud *et al.* (1999)は水平格子80 kmのNCEP (National Centers for Environmental Prediction)のetaモデル^{*2}による10メンバーのアンサンブル予報と29 kmのメソetaモデルの単一の予報を比較し、両者の予報誤差に差が無いことを報告した。粗い格子のアンサンブル予報の結果が、細かい格子の予報に匹敵することは興味深いが、この例では10メンバーのアンサンブル予報の方が計算時間がかかるという問題がある。また、アンサンブル予報には予報の信頼度が得られるという利点が考えられるが、彼らの結果は、低気圧の中心位置で比較する限りアンサンブル予報によるばらつき具合と予報の精度とは相関は見られなかった。更に、物理的に現象を適切に表しえない粗い格子のモデルで、いくらアンサンブル予報をやっても、精度の向上は期待できないのではないかという疑問もないわけでない (Leslie and Speer, 2000)。

第3に、何をもちいて良い予報と判断するか基準の確立である。5.2節で述べた豪雨の予報では、位置が多少ずれても、数10 kmの範囲で非常に強い雨が予報されれば、予報官が予報を行う際には大変有用な情報となる。しかし、位置がずれると、通常の評価システムでは良い予報とは評価されないであろう。

このようにメソ気象のアンサンブル予報はまだまだ多くの問題を抱えている。そこで、従来から行われているポテンシャル予報も併用せざるをえないと思われる。ここでは、竜巻を発生させるスーパーセルを例としたポテンシャル予報^{*3}の試みを紹介しておこう。近年、わが国で発生した竜巻を伴ったスーパーセルとこれに伴う竜巻に似た渦が高層観測データを水平一様な基本場とした積雲モデルで再現されている (Niino and Noda, 2000; 野田・新野, 2000; 坪木ほか, 2000)。スーパーセルが発生しやすい場合は、大きなCAPE (Convective Available Potential Energy) と大きな

環境風の鉛直シア Sh (あるいはストームに相対的なヘリシティ) で特徴づけられる。Hamil and Church (2000) はシビアストームの報告 (NOAA の Storm Data) と水平格子 40 km の数値モデルの格子点値から求めた CAPE と Sh から、強い竜巻を伴うスーパーセルの起こる確率密度を CAPE と Sh の関数として求め、これをモデルの予報値に適用してみた。その結果は、1999年5月3日にオクラホマシティの近くで F5 の竜巻が発生した際の、竜巻を含むシビアストームの発生分布をかなり良く表現している。個々のストームの発生場所は 5.1 節で見たように確率的と見なさざるをえないことから、このようなポテンシャル予報の工夫は今後も続けられるべきであろう。

5.4 将来のメソ予報

近年、気象庁では予報の中央集権化が行われてきた。しかし、計算機の能力の向上と非静水圧メソモデルの進歩により、数値予報課で行った領域モデルやメソモデルの結果を初期値・境界値として地方の気象官署でその予報担当区域の非静水圧メソモデルを動かすことも可能になってきている (上野ほか, 2000)。近い将来、数値予報課で行った粗い格子のモデルの中に、細かい格子のモデルをネストするようなことが行われるようになったとき、気になった現象のすべてを細かい格子のモデルを用いて中央で確認するのか、その判断を地方に委ねるのかの選択を迫られる時期も来るのではないかと思う。

6. メソ気象学の研究体制

小倉 (1992) は、わが国でも観測・モデル・解析・資料・外来研究員施設からなるメソ気象センターを設立すべきであると提案したが、残念ながら現在も実現していない。提案のもとになった気象庁での講演を拝聴したときにも思ったが、日本では省庁間の壁があって欧米のような官学共同出資のセンターを設立することは難しい。しかしながら、メソ気象学を推進するためには、やはりメソ気象センターの設立は必要だと思う。

そこで、物理的・経済的な障害を克服するために、インターネット上に電腦メソ気象センター (以下メソセンター) を構築してはどうであろうか。メソセンターには、気象庁現業モデルの予報結果、気象庁・地方自治体のリアルタイム観測データ、アーカイブデータなどが常時眺められ、ダウンロードできる環境を実現する。研究情報を研究者間で共有できるようになれば、

組織の壁を越えて共通のデータを眺めながら、多くの研究者間で議論することが可能になる。メソ気象は時間・空間スケールが小さいので、その解析をしようとすると慢性的にデータ不足に苦しむ。利用できるデータはすべて利用したいのが実情である。ところが、その最大の障害は、データの入手である。例えば、大学院生がある現象を解析してみたいと思ったとする。とりあえず、解析して論文になるかどうか当たってみるために、データがほしいとしても、データがすぐに入手できない。そこで、指導教官に頼むと、指導教官は気象庁の知り合いに頼み込んで、データをもらってくれる。しかし、研究の話であるから、折角データをもたらしても解析がものにならないこともある。それが度重なると、間に多くの人を介しているためデータがもらいにくくなる。

気象庁の現業で使われているメソ数値モデルがどんな問題を抱えているか、気象庁内部の人しかわからない。もし、多くの研究者がリアルタイムデータと合わせて予報結果を眺められるようになれば、どのようなときに予報が合わないかがわかり、気象庁の外でもそのような事例の解析やモデルの改善に興味を持つ人も出てくるかもしれない。先に気象庁のモデルを公開する英断が下されたのは歓迎すべきことだが、興味を持った事例について、現業モデルの予報の中に非静水圧モデルを組み込んで調べることが可能な事例かどうかの判断を下したり、実際にモデルを走らせる場合の初期値・境界値を得る上でも、データの容易なアクセスは重要である。アメリカでは 25 以上の大学でリアルタイムでモデルを走らせているというが (Droegmeier, 2000)、わが国では望むべくもない。

そして、メソ気象研究者にとっては何よりも、生活の一部として、常にメソ現象を眺めていることが大事である。総観場の推移を頭に入れた上で、日々、出張中でも、会議中でも (?), 興味深い現象の実況中継が見られることは、現象に対する知識の蓄積・検証、研究課題の発掘に不可欠である。研究の対象となる現象が発生する時空間の窓は狭い。日々の概況が頭に入っていないで、後から、何日分ものデータをオフラインで見返すことは労多くして得るところが少ない。大学院に進んでから、絶えずこのような環境が得られれば、博士課程を終える頃には、立派なメソ気象研究者が育つことであろう。

さて、上述のメソ気象センターは、モデル・解析・資料に関しては機能するだろうが、観測は原理的に取

り込むことが難しい。観測に関しては、国内の研究機関が協力して行う体制がある程度確立しており（例えば吉崎, 2000）、残念だが当分この方式で行くしかないように思う。

7. まとめ

防災・生活情報は観測・客観解析・予報・伝達・対応の5つの要素からなり、このいずれが欠けても成立しない。メソ気象学の目的はメソ現象の解明であるが、その最も重要な成果である現象の概念モデルは、この5つの要素のいずれにとっても重要な役割を演ずる。また、現象を解明するために開発された観測機器や数値モデルは、直接、観測・予報業務に役立てられる。

これら5つの要素のうち、特に大事なのは一般市民の対応の部分である。いくら良い予報をしても、適切な対応がとられなければ効果はない。気象庁・気象学会で連携して、義務教育レベルから気象とりわけ災害にかかわる知識の教育・普及に努めるべきである。これには、インターネットを利用するのも有効であろう。

わが国のメソ気象学の発展には、メソ気象研究センターの設立が急務である。省庁間の障壁を考慮すると、電腦メソ気象センターが最も有望と思われる。その最大の機能は広くデータを共有して、メソ気象研究者が共通の土俵の上で議論ができる素地を作ることである。メソ気象・メソ予報には、まだまだ多くの問題が残っている。欧米に比べて限られた人員で最大の効果をあげるには、少しでも研究の効率を良くする工夫が必要である。

謝辞

日本気象協会の田口晶彦さん、登内道彦さん、鈴木基雄さんには第1表の生活情報の作成に関して多くのことをご教示いただいた。また、気象研究所の加藤輝之博士、気象庁数値予報課の斉藤和雄博士、東京大学海洋研究所の木村龍治先生、大学院生の野田 暁君と柳瀬 亘君には本稿作成に関して様々な面からお世話になった。深く感謝する。

用語の簡単な解説

*1 アンサンブル予報：数値予報に用いる初期値は多様な観測データから求めたもので、必ずなんらかの誤差を含んでいる。ところが、大気の運動は非線形であるため、初期値がごく僅か違っていただけでも、少し先の予報を行うと大きく違った状態が予報されること

は珍しくない。従って、観測から求められた初期値を含む誤差を考慮して、いくつかの異なった初期値から予報を行うなどして、予報結果の信頼性を検討したり、またこれらいくつかの予報結果の平均を取ることで、数値予報が有効な予報期間を延長しようとするのがアンサンブル予報である。

*2 eta モデル：1993年から米国気象局で用いられている数値予報モデルで、地形を階段状の凹凸で近似し、eta 座標系と呼ばれる鉛直座標系を採用しているところに特徴がある。

*3 ポテンシャル予報：現在の数値予報では、集中豪雨や竜巻・突風などがいつどこで発生するかを正確に予測することは難しい。しかしながら、ある時間帯に数100 km 四方程度の領域に特定の現象が発生する可能性が高いという予想は、これらの現象を起こしやすい環境場のパラメータに注目しながら、数値予報の結果を眺めることにより可能な場合があり、防災上は有効と考えられる。このような予報をポテンシャル予報という。

参考文献

- Browning, K. A., 1964: Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the winds, *J. Atmos. Sci.*, **21**, 634-639.
- Droegemeier, K. K., 2000: Meso- and storm-scale NWP: Scientific and operational challenges for the next decade, COMET Faculty Course on NWP, 9 June 1999, Boulder, Colorado. 92pp. (Available at http://www.comet.ucar.edu/class/faculty/Jun07_1999/html/nwp699/index.htm).
- Edwards, R., R. L. Thompson and J. G. LaDue, 2000: Initiation of storm A (3 May 1999) along a possible horizontal convective roll, Preprints, 20th Conf. on Severe Local Storms, Orlando, FL, Amer. Meteor. Soc., 60-63 (also available at <http://www.spc.noaa.gov/publications/edwards/hcr3may.htm>).
- Hamil, T. M. and A. T. Church, 2000: Conditional probabilities of significant tornadoes from RUC-2 forecasts, *Wea. Forecasting*, **15**, 461-475.
- 加藤輝之, 2000: 気象研究所非静力学メソスケールモデルを用いた局地的豪雨の予想結果について, 気象庁技術報告, (121), 92-112.
- 気象庁, 2000: 平成10年新潟, 栃木・福島, 高知の豪雨調査報告, 気象庁技術報告, (121), 177pp.
- 郷田治念, 2000: 1998年の3つの豪雨についての現行数値予報モデル (RSM, MSM) 予報の検証, 気象庁技

- 術報告, (121), 77-91.
- Leslie, L. M. and M. S. Speer, 2000: Comments on "Using ensembles for short-range forecasting", *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 3018-3020.
- Niino, H. and A. Noda, 2000: Numerical simulation of a mini-supercell over Kanto plain on 19 September 1990, Preprint 20th Conf. on Severe Local Storms, Amer. Meteor. Soc., 607-610
- 野田 暁, 新野 宏, 2000: 微細格子による小型スーパーセルの数値シミュレーションと下層のトルネードサイクロンの渦度収支解析, 日本気象学会秋季大会講演予稿集, 55.
- 岡田憲治, 牧原康隆, 新保明彦, 永田和彦, 国次雅司, 齊藤 清, 2000: 土壌雨量指数, *天気*, **48**, 349-356.
- 小倉義光, 1992: メソ気象センター設立のすすめ, *天気*, **39**, 581-583.
- 小倉義光, 1996: 「雷雨の発生環境について」に対するコメント, *天気*, **43**, 738-741.
- Orlanski, I., 1975: A rational subdivision of scales for atmospheric process, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **56**, 527-530.
- 齊藤和雄, 加藤輝之, 2000: 気象研究所非静力学メソスケールモデル, *気象研究ノート*, (196), 169-195.
- Stensrud, D. J., H. E., Brooks, J. Du, S. Tracton, and E. Rogers, 1999: Using ensembles for short-range forecasting, *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 433-446.
- 坪木和久, 耿驃, 武田喬男, 2000: 台風9918号外縁部で発生した1999年9月24日の東海地方の竜巻とメソサイクロン, *天気*, **47**, 777-783.
- 露木 義, 2001: 湿潤過程を含んだ4次元変分法による熱帯の4次元データ同化の研究—2001年度日本気象学会賞受賞記念講演—, *天気*, **48**, 863-871.
- 上野幹雄, 川畑拓矢, 坂井亮太, 白川栄一, 石田純一, 齊藤和雄, 2000: NHM 統合環境の紹介—パソコン版気象研究所非静力学モデル(NHM)—, *天気*, **47**, 289-294.
- Weckwerth, T. M., 2000: The effects of small-scale moisture variability on thunderstorm initiation, *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 4017-4030.
- 柳瀬 亘, 新野 宏, 齊藤和雄, 2000: 雲解像並列モデルによる日本海ポーラーロウのシミュレーション, 日本気象学会秋季大会予稿集, 195.
- 吉崎正憲, 1996: 雷雨の発生環境について, *天気*, **43**, 734-738.
- 吉崎正憲, 瀬古 弘, 加藤輝之, 小司禎教, 永戸久喜, 別所康太郎, 郷田治稔, X-BAIU-99観測グループ, 2000: 1999年東シナ海・九州梅雨特別観測 (X-BAIU-99) 報告, *天気*, **47**, 217-224.