

第35回メソ気象研究会の報告

—メソ気象研究の将来展望・構想—

1. はじめに

コンビーナー：加藤輝之（気象庁）・
新野 宏（東京大学）

1991年から始まったメソ気象研究会は今年で20周年を迎える。この間、様々な新しい観測機器が開発され、現業観測にもドップラーレーダやウィンドプロファイラ網、雷監視システムなどが導入されてきた。また、電子計算機の発展に伴い、従来は夢でしかなかった竜巻までもが再現できる高解像度の数値シミュレーションが可能となると共に、GPS 可降水量などの新しい観測データを用いた同化手法・メソアンサンブル予報なども開発されてきた。しかし、1998年から2003年にかけて戦略的基礎研究（CREST）による「メソ対流系の構造と発生・発達メカニズムの解明」の研究が行われて以来、メソ気象に関する大規模な観測実験はほとんど行われていない。今回の研究会では20周年を機に、メソ気象研究の将来に関する展望と夢を現象・手法・研究体制や気象庁との関わり方など様々な観点から話題提供していただき、今後のメソ気象研究を推進する方向性について議論していただくことにした。そこで、「メソ気象研究の将来展望・構想」をテーマとし、春季大会前日の2011年5月17日（火）に気象庁講堂で、コンビーナーから6名の方に講演を依頼して開催した。また、メソ気象研究会としては最大の参加者（約200名）があった。

メソ気象研究会発足直後、本研究会の発起人である小倉義光氏は気象庁から講演に招かれ、メソ気象現象の予報を進展させる近道としてメソ気象センターの設立を提言した（小倉 1992）。具体的には、センターに観測部・モデル部・解析部・資料部・外来研究員部を設け、各部が有機的に連携しつつ活動することが望ましいと主張した。残念ながら、このようなセンターは現在も実現されていない。また、2001年度春季大会シンポジウム「21世紀の気象学—将来展望—」の中で、

新野（2002）はメソ気象学の魅力として、メソ現象のダイナミックレンジの広さと多様性、メソ現象の時間・空間スケールが小さいため繰り返し検証が可能なこと、防災や生活情報として研究成果が社会の役に立つことの3点を上げている。メソ気象学の研究の継続的発展には、学問・現象としての魅力や研究者個別の努力はもちろんだが、明確な将来展望・構想や小倉氏のメソ気象センター構想のような組織的な取り組みも必要と思われる。また、学問の将来を担う、あるいは学問に対する理解を有する若い世代の教育・啓発も重要である。これらの重要な課題を半日だけで議論尽くせるものではないと思うが、今回の研究会に出席された方々が今後も継続的な議論をしていただくきっかけになればと願う次第である。

2. 戦略的基礎メソ対流系から得たものおよびその発展

吉崎正憲（海洋研究開発機構）

戦略的基礎「メソ対流系」（1999-2003）では、当時のメソグループに呼びかけて全日本的な体制を構築し、主に梅雨期の東シナ海・九州の降水系と冬季日本海の降雪系を対象に、観測による実態把握およびモデルによる現象の再現とその形成・維持メカニズムの解明を目指した。当時気象庁で現業化されていなかった非静力学雲解像モデルを用いて、観測される豪雨・豪雪の事例を再現できたのは大きな進歩であった。これにより、豪雨・豪雪には積乱雲が重要であり雲解像モデルが有効であること、その形成・維持メカニズムの理解に大いに役に立つことが分かり、メソ気象の理解は飛躍的に進展した。

「それからの戦略的基礎」として、降水系と非降水系の違いを述べた。降水系は鉛直流の水平非対称な構造、メソ γ ・メソ β 等の階層構造、（赤道域の大規模降水系では）東進特性を持つのに対し、非降水系は縦横比1の対流セルの構造を持つが階層構造や東進特性はないことを示した。この違いは、二つの中立成層を

もつ大気（条件付不安定成層）か、一つの中立成層を持つ大気（絶対不安定成層）かに依存する。環境場の不安定を作る時定数が対流より大きい場合には、前者だけが階層構造を持つようになる。降水は、大気中から落下することで非断熱加熱を起し非可逆的となる。つまり降水系は水平方向に非一様な扱いになる。ところが降水現象を扱う線型論で一つの波数で水平構造を表す流儀が特に熱帯の力学研究者に多く見られるが、これは無降水系を仮定したことになるので注意した方がよい。

孤立系の無降水系は相当温位と全水量が保存する。例えば、Emanuel (1986) は台風の維持機構で海面水温の重要性を示すために、エントロピーなど熱力学的な保存量を用いて式を導出した。ところが、降水系では相当温位は保存するが、降水があるために全水量は保存せず、降水まで含めたエントロピーは保存しなくなる。降水系に適した新たな理論作りが必要になると思われる。

夢として、例えば1平方メートル当たり1mmh⁻¹の降水がある場合、それは約700Wのエネルギーに換算され、その降水エネルギーの利用について語った。東日本大震災以来自然エネルギーの利用が喧しく取りざたされているが、この降水エネルギーを自由に取り出せれば、日本のエネルギーと水の問題は一挙に解決する。しかし、その道のりはまだ遠い。

3. 観測システムの将来像—観測屋のなすべき事—

石原正仁（高層気象台）

メソ降水現象による災害に対処するため気象庁・大学・研究機関は1960年代の北陸豪雪調査、梅雨末期集中豪雨研究にはじまり、1990年代のつくば域降雨実験や2000年前後の戦略基礎「メソ対流系」による東シナ海・九州の梅雨観測や冬季日本海メソ対流系観測まで、多くの特別観測を実施し、現象の理解につとめてきた。気象庁の現場では、地方気象台単位の調査研究から全国予報技術検討会、さらに研究機関との共同研究などを長年続けている。メソ降水現象に関連する観測・解析・予報に関する気象研究ノートは少なくとも15編を数える。

アメダスやレーダに見られる気象観測網と解析雨量などの解析技術の進歩は、メソ降水現象の実況把握と監視の改良をもたらしてきた。予報・予報の分野ではメソモデルの導入・改良、土壌雨量指数などの新プロダクトの導入、市町村単位の気象警報の発表などを通

じて長い『闘い』を続けている。ウィンドプロファイラ網 WINDAS (2001年～) は、観測分野と予報分野が「データ同化」を媒介として直接協力し合うことを目的に手を組むことになった最初の施策であろう。ただしこうした努力をもってしてもメソ降水現象はなお難物といわざるをえない。

2008年夏季に東京都雑司ヶ谷や神戸市都賀川で発生した『局地的大雨』による災害は「都市型水害」の典型的な事例であり、この分野にかかわる人間は大きな問題提起を受けた。前者の例では二つの積乱雲が発生してから数十分の間に大雨がもたらされた。これらの積乱雲は当日東京周辺で発生した180個ほどの積乱雲の中でも特別なものではなかった。Byers and Braham (1949) 以来の積乱雲の古典的概念が通用するのか、新しい知見を得ることでこうした局地的大雨の監視・予報を改良する可能性があるのかを見極めるため、2010年から5か年計画で科学技術戦略推進費による「気候変動に伴う極端気象に強い都市創り <http://www.mpsep.jp/>」が始まった。この中の課題1「稠密観測による極端気象のメカニズム解明」プロジェクトでは、東京都区部を中心として地上、研究・現業レーダ、GPS、ドップラーライダー、シンチロメータ、気象衛星ひまわりラピッドスキャン、航空機などによる高密度な観測網を展開し、そこに発生する積乱雲を原点に戻って観測し解析する。積乱雲が発生するまでのメソ環境場、大気境界層の諸過程、積雲から積乱雲への発達過程、通常の雨と大雨とを分けるメカニズム、大雨の発生を察知するための因子などを明らかにしたい。このプロジェクトには現在13の機関と約50名の観測・解析・同化・モデル・水文に関する研究者や技術者が参加している。今後も参加者が増えることを期待している。

4. 観測システムの将来像—質と量—

藤吉康志（北海道大学）

観測には主に、現象発見、予報（防災）のためのデータ提供、そして知識（経験）の蓄積という目的がある。これらの目的を達成するためには、新しい測定装置の開発・導入による新しい質の導入と、量（測定地点、頻度、期間）の増加が必要不可欠である。自明ではあるが、通常の気象要素では特に大きな変化が無くとも、大気質に大きな変化がみられることがある。このような現象に着目し、それを理解する過程で、新たなメカニズムが見えてくる。

量については、アメリカで既に始まっている、車を使った気象観測データの収集・利用がこれからの観測の方向性を示している (Mahoney *et al.* 2010). 衝突防止レーダのデータも雨量検知に活用すべきで、路線や運行時間が正確な公共交通機関 (列車、バスなど) にもセンサーを搭載すれば、メソの大気現象ばかりではなく、気候研究にも有効である。そのためには、多少精度は低くても軽量で簡便な測定装置の開発、データマネジメント (複数データのグリッド化による質の向上と同時に個人情報保証など)、そして社会への利益還元を気象庁 (国土交通省) ならば実行可能で、同じシステムを海外にも広めることが可能であろう。

私はこれまで多くの国内外での集中観測に参加してきたが、今は、地域密着滞在型の観測に魅力を感じている。地域に密着した観測に基づいた話は具体的にイメージもしやすいため、地元の方々にも理解しやすく、教育効果・普及効果も大きい。地域特有のメソ現象を解明し、その研究成果を防災に役立てるためには、道州制のように、気象学会の支部単位程度にまとまった、相互に同レベルの観測研究体制が必要である。

正攻法で行けば、気象観測用の専用航空機の導入が望ましいが、これは、よほどのことが無い限り、道のりは厳しい。上記の簡便・軽量の装置の開発が進めば、無人小型航空機の利用が先に主流となると考えられる。もちろん、「大気科学観測・研究センター」の設立は夢だが、日本で閉じるのではなく、立ち上げ時から多国籍 (特にアジアの研究者を中心に) のスタッフ構成で出発すべきである。設立費用も各国で負担し、各国の得意分野を活かせば、現在の日本では不可能か困難な事業が実施可能になるであろう。

最後に、今後の研究課題としては、陸上・海洋上の大気境界層の流れと自由大気中の多層構造の解明が重要である。特に後者は、中・上層雲の形成にとって本質的と考えている。

5. メソスケールのデータ同化とアンサンブル研究

齊藤和雄 (気象研究所)

気象庁の現業メソ数値予報は、2001年3月の運用開始から10年余りを経ている。この間、モデル・解析手法・同化データに様々な改良が加えられ、降水の有無についての予測精度は大きく向上している。しかしながら、閾値で3時間で20 mm を超えるような強い降

水の予測精度の改善は、まだ不十分である。前線に伴う大規模収束による大雨は、現在のメソ数値予報で表現可能になってきているものの、大規模な強制力が弱い場合の対流性の大雨は、時間的・空間的スケールが小さいことと、僅かな初期値の差で結果が大きく変わる場合があることなどから、数値予報による予測は大変難しいのが現状である。

気象研究所では、予報研究部第二研究室が中心となって、短期気象予測研究に取り組んできている。短期予測では、数値モデルの初期値が重要で、高解像度データ同化システムの開発と、GPS やレーダなど各種リモートセンシングデータの利用研究が行われている。Kawabata *et al.* (2011) は、非静力学4次元変分法を雲スケールに適用して、ドップラーレーダの動径風データや反射率データ、GPS 可降水量などを短時間間隔で同化して、2005年9月の杉並豪雨を引き起こした局地的な対流系システムの再現に成功している。現在、GPS 視線遅延量の高精度解析や雲スケールへの同化の試みが進んでいる。

大規模強制の弱い場での対流性降水の予測可能性の低さを補う手法としては、アンサンブル予報がある。気象研究所では数値予報課と協力して、世界天気研究計画 (WWRP) のメソアンサンブル予報国際比較実験「北京オリンピック予報実証研究開発プロジェクト」に参加し、各種摂動手法の開発や比較を行った (Saito *et al.* 2011)。気温や降水の予測で概ね良好な成績を得たが、強雨の降水捕捉率に課題を残し、高解像度化の必要性が示唆された。アンサンブル予報から得られる動的な予報誤差をデータ同化に適用する手法として、アンサンブルカルマンフィルタがあり、Seko *et al.* (2011) は、2008年7月の神戸での豪雨について、GPS 可降水量を同化した5 km アンサンブル予報とその1.6 km ダウンスケール予報により、実況に似たライン状の降水系を再現することに成功している。今後は雲解像アンサンブル予報を局地豪雨のリードタイムを持った定量的確率予測やメソスケールのデータ同化に適用する研究を進めていく必要があるが、膨大な計算資源を必要とする。神戸に建設中の次世代スーパーコンピュータ「京」を利用する研究プロジェクトに、文部科学省「HPCI 戦略プログラム」があり、分野3「防災・減災に資する地球変動予測」のサブ課題「超高精度メソスケール気象予測の実証」が平成23年度から始まっている。主な目標に、雲解像4次元データ同化技術の開発、雲解像アンサンブル解析

予測システムの開発と検証、高精度大気モデルの開発とそれを用いた基礎研究があり、海洋研究開発機構や気象庁数値予報課、東北大学、東京大学大気海洋研究所などと研究協力を開始している。雲スケールの同化研究には観測データが重要で、観測的研究との連携も必要である。

6. 観測と数値モデル—もっと基礎研究と発見を

坪木和久 (名古屋大学)

メソ気象学は対象とする現象のスケールがメソスケールであるとともに、学問分野においてもメソ、すなわち他の分野の中間に位置している。このため多くの分野とかがかりがあり、特に天気予報や防災科学において中心的な役割を担っている。その多くは問題解決型の研究で、社会に対して直接的貢献をするという点で重要である。一方でメソ気象は雲・降水に関わる現象を多く含んでおり、学問的にも興味深い研究が可能な領域である。前者の研究の重要性は言うに及ばないが、後者、すなわち現象を理解する、現象を発見する、あるいは将来の研究の土台となるような基礎研究も重要で、特に大学ではそのような研究がもっと活発になってほしいと希望している。名古屋大学地球水循環研究センターは、全国共同利用施設として、観測装置や雲解像モデルを提供することで、そのような研究を支援・推進をしている。本研究会では当センターの偏波レーダ、雲粒子観測装置、および雲解像モデルCReSSの現状を紹介した。さらにそのような研究において、特に雲・降水に関わる研究として、今後10年で解きたい11の問題を提案した。今回の研究会はメソ気象の展望や方向性を議論するものであるので、ここにあらためてそれらをまとめておきたい。

問題1：高湿潤場における豪雨システムの停滞メカニズム。1982年の長崎豪雨や2009年の兵庫県佐用町の豪雨のように、高湿潤場で蒸発冷却のないような場においても長時間の豪雨の停滞がなぜ起こるのか。そのメカニズムを明らかにしたい。

問題2：100 mmh⁻¹を越える降水形成の雲物理過程。2000年の東海豪雨や平成20年8月末豪雨のような極端に効率のよい降水形成機構は雲物理過程から説明されなければならない。

問題3：梅雨期のメソ低気圧の構造と発生メカニズム及び豪雨形成の役割。たとえば2010年の奄美豪雨では、名瀬の気圧変化はメソ低気圧の通過を示唆している。梅雨期の東シナ海上にはこのようなメソ低気

圧が発生していて、豪雨をもたらしているのかもしれない。

問題4：2次氷晶の発生メカニズムとそのモデル化。

これについてはすでに Hallett and Mossop (1974) などのモデルがあるが、まだ、2次氷晶については実態もメカニズムもわからない点が多く、雲のモデリングの課題の一つである。

問題5：氷晶の時空間分布、粒径分布と放射過程を通しての台風強度への影響。21世紀気候変動予測革新プログラムの名古屋大学のチームの研究で、氷晶が放射過程を通して間接的に台風の強度に影響することが示された。しかしながら台風上部の氷晶の特性には未解明な点が多い。

問題6：台風は不安定現象か？傾圧不安定や対流不安定など、多くの大気中の不安定は全エネルギーでみると散逸過程である。一方で台風は弱い渦から強い渦へのエネルギー集積過程のように見える。台風の理解においてあるいは強度の予測において、台風を不安定現象ととらえることが適切だろうか？

問題7：台風の眼と台風全体の水平スケールを何が決めるのか。

問題8：台風中心付近の熱・水蒸気・運動量フラックスの観測とモデル化、特に暴風圏直下について。

問題9：高湿潤場における竜巻の可能最大強度。

問題10：竜巻を発生させる積乱雲と発生させない積乱雲の違いは何か。

問題11：雲内電荷の生成と消散メカニズムおよびそのモデル化。

これら11の問題は私が主観的にあげたものである。ほとんどが雲・降水に関係している基礎研究的な課題である。メソ気象研究会にはさまざまな研究者が参加しているので、それぞれの研究者がこのように問題を提案して、これから解くべき問題を議論し、将来のメソ気象学を考えていけば、この研究領域の展望や方向性がより明確に見えてくるのではないだろうか。

7. 気象庁や他分野との関わり方

加藤輝之 (気象庁)

Kato *et al.* (2003) では、豪雨予測には暖湿流の流入元である日本列島南海上における大気下層の水蒸気場の解析精度向上が必要不可欠であり、飛行機観測を含めた観測の強化を主張した。だが、意に反して2008年4月にその領域に位置する沖縄での高層ゾンデ観測が取り止めになった。事前に気象庁サイドから意見収

集がなかっただけでなく、気象学会を含めた研究者サイドからの研究成果のアピールが十分でなかったことが悔やまれる。この教訓に学べば、研究者は研究成果が論文として発表されれば終わりではなく、気象庁のみならず一般社会に対しても研究成果のアピールに力を注ぐべきである。

気象庁地方官署の予報官らは観測・数値予報データを見ることで、日々の天気を把握し、予報業務を行っている。すなわち、彼らには潜在的な知見があり、それをいかに取り出して活かすかが課題となる。そこで、2010年から気象庁が重点的に取り組んでいる、“予警報発表までの短縮化”や“予報技術および開発技術の保持”の試みについて簡単に説明する（詳しくは加藤（2010）を参照）。それらの具体的な目的は、“予報官が大雨にともなう予警報の迅速な発表を行う”ための診断技術の向上と、QPE・QPF（量的降水推定・予測）・ナウキャストの改善である。前者では気象庁内全ての人々が利用できる事例解析システム（観測・数値予報データの提供も含む）を構築し、地方官署でのメソ気象に関する知見の体系化と集約を目指している。例えば気象研究コンソーシアムを拡充することで、このようなシステムを将来的に気象学会内に置ければ、また気象庁との情報共有や連携（高層ゾンデ観測機器等の利用も含む）が進められれば、今後の我が国における人材育成も含めたメソ気象研究の継続・発展に繋がると期待できる。

気象庁以外の他分野との連携も非常に重要である。もちろん、気象学の化学分野（エアロゾルの取り扱い等）などとの連携を進めることは当然であるが、社会的要望に便乗することで工学系などと連携することが特に大切であると考えている。なぜなら、メソ気象は多様な分野に関与しているからである。例えば、太陽光や風力発電などの自然エネルギーの効率的な利用を行うためにはメソ気象の新たな知見やメソ数値モデルの開発・改良が不可欠である。また、メソ気象の機構解明には、今後より大きな計算機資源（グラフィックスの高速描画のために利用されているGPUの利用等）の取得が望まれる。そのためには、計算機科学の専門家との連携が必要である。このように、新たな分野を開拓し、魅力ある学問にすることも積極的に行っていく必要がある。

8. 総合討論

6名の講演者に加えて、小倉義光氏をパネリストに

迎えて、パネルディスカッション方式で総合討論を行った。最初に、豪雨発生のものである海上での水蒸気場の重要性を再確認し、その観測手法について議論した。海上にGPSを搭載したブイを流すなどのアイデアが出たが、フェリーに搭載してもらうのが現実的ではないかという意見もあった。対流発生トリガーを観測できないかというコメントに対しては、ライダー等で境界層内の重力波を観測することで新たな知見の発見に繋がるのではないかという意見があった。何が数値モデルの劇的な予測向上をもたらすかという質問に対しては、雲解像モデルによる同化システムを用いれば観測を活かすことで予測の向上が図れるだろうが、乱流の取り扱いなど解決すべき問題が残されているという議論がなされた。ただ、レーダ観測などの高分解能なデータを取り込むには、現在の数値モデルの解像度では不十分で、次世代スパコンを見越した研究が必要であろうという考えが大勢だった。また、雲解像モデルの核となる雲微物理（特に、雪やあられに関わる）過程はまだよく分かっておらず、観測も含めた総合的な研究を推進すべきだという意見が多数あった。最後に、小倉氏が関東の熱雷を例に上げ、観測データを詳細に見ることで積乱雲の発生メカニズム（特に、下層の気塊を持ち上げる上昇流の発生要因）を把握することが極めて重要であると主張した。

今回の総合討論では、時間（約45分間）を掛けてある程度の議論はできたと思われるが、メソ気象研究センター構想など将来展望を取りまとめるまでの十分な時間はなかった。今回の総合討論および事前にいただいた多くの意見からメソ気象における今後の課題の整理を行い、その内容を学術に関する将来構想を取りまとめている気象学会の学術委員会等に情報提供するとともに、新たに立ち上げたメソ気象研究会のホームページ（<http://meso.sakura.ne.jp/mesoken/>）上で、一般の会員の方にも公開することを考えている。

謝辞

今回のメソ気象研究会を開催するに当たって、会場の準備・運営をさせていただいた気象庁数値予報課、気象研究所予報研究部の有志の方々ならびに筑波大学連携大学院（気象研究所）の学生のみなさまに感謝します。また、総合討論の参考のためにご意見をいただいた多くの方々にもお礼申し上げます。

参 考 文 献

- Byers, H. R. and R. R. Braham, 1949 : The Thunderstorm Project. U.S. Weather Bureau, U.S. Dept. of Commerce Tech. Rep., 287pp.
- Emanuel, K. A., 1986 : An air-sea interaction theory for tropical cyclones. Part 1 : Steady-state maintenance. *J. Atmos. Sci.*, **43**, 585-604.
- Hallett, J. and S. C. Mossop, 1974 : Production of secondary particles during the riming process. *Nature*, **249**, 26-28.
- 加藤輝之, 2010 : 豪雨監視・予測技術の開発. 平成22年度数値予報研修テキスト, (15), 109-115.
- Kato, T., M. Yoshizaki, K. Bessho, T. Inoue, Y. Sato and X-BAIU-01 observation group, 2003 : Reason for the failure of the simulation of heavy rainfall during X-BAIU-01. —Importance of a vertical profile of water vapor for numerical simulations— *J. Meteor. Soc. Japan*, **81**, 993-1013.
- Kawabata, T., T. Kuroda, H. Seko and K. Saito, 2011 : A cloud-resolving 4D-Var assimilation experiment for a local heavy rainfall event in the Tokyo metropolitan area. *Mon. Wea. Rev.*, **139**, 1911-1931.
- Mahoney, B., S. Dropbo, P. Pisano, B. McKeever and J. O'Sullivan, 2010 : Vehicles as mobile weather observation systems. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **91**, 1179-1182.
- 新野 宏, 2002 : 防災・生活情報のためのメソ気象学. *天気*, **49**, 13-22.
- 小倉義光, 1992 : メソ気象センター設立のすすめ. *天気*, **39**, 581-583.
- Saito, K., M. Hara, M. Kunii, H. Seko and M. Yamaguchi, 2011 : Comparison of initial perturbation methods for the mesoscale ensemble prediction system of the Meteorological Research Institute for the WWRP Beijing 2008 Olympics Research and Development Project (B08RDP). *Tellus*, **63A**, 445-467.
- Seko, H., T. Miyoshi, Y. Shoji and K. Saito, 2011 : Data assimilation experiments of precipitable water vapour using the LETKF system : Intense rainfall event over Japan 28 July 2008. *Tellus*, **63A**, 402-414.