

第43回メソ気象研究会の報告

—短時間強雨予測への挑戦—

コンピーナー：加藤輝之*

1. はじめに

2014年8月20日未明に広島で発生した大雨事例に代表されるように、大雨が引き起こす土砂災害等により多数の人命が失われてきている。このような大雨を事前に予測することは防災対策として必須で、そのためには数値予報モデルの予報精度向上に加えて、補外法を基本とする実況の観測データを主に利用した運動学的予測(ノウキャスト)の改善を行っていく必要がある。前述の広島での大雨のように、幅20~30 km、長さ100 km程度の線状降水帯が数時間停滞することで引き起こされる集中豪雨では、降水帯の発生に加えて、それがいつまで停滞するかが鍵となる。一方、数十分という短い時間で数十mm程度、1時間で100 mmを超えるような大雨も引き起こす局地的大雨(局地的豪雨)の多くは、20~30 km程度の水平スケールを持つ団塊状の降水系によって引き起こされ、短時間強雨の直前予測が鍵となる。特に都市域では局地的に短時間に降る強雨により、中・小河川の越水や鉄砲水、低平地での内水氾濫が発生しやすいために、数分でも早く強雨を予測することが課題となっている。また、局地的大雨は予想が難しいことから「ゲリラ豪雨」とも呼ばれている。

集中豪雨、局地的大雨ともに、1つの積乱雲ではなく、複数の積乱雲で組織化された積乱雲群(マルチセル)で引き起こされる。その積乱雲群中の降水分布を気象レーダーにより3次元的に捉え、地上に達していない上空の強雨域の落下を考えることで、短時間強雨の直前予測が可能となる。例えば、雨滴の落下速度は最大8 m/s程度なので、高度5 kmから地上に落下

するのに10分以上掛かるためである。そのような短時間強雨の直前予測も視野に入れ、気象庁は2014年8月から国土交通省XRAINのデータも活用した水平分解能250 mの高解像度降水ノウキャスト(30分の予測まで。その後1時間までは水平分解能1 km)を開始した(木川2014)。このプロダクトの説明に加えて、第43回メソ気象研究会では、「短時間強雨予測への挑戦」をテーマに、短時間強雨予測に対する取り組みを行っている方に講演をお願いした。春季大会前日の2015年5月20日(水)に気象庁講堂で開催し、180名を超える方々に参加していただき、各講演後には活発な質疑応答が行われ、総合討論では今後の展望について話し合った。

2. 気象庁の高解像度降水ノウキャストについて

木川誠一郎(気象庁観測部)

気象庁は2014年8月に高解像度降水ノウキャストの提供を始めた。この新しいノウキャストは、気象レーダーの高精度観測データを利用して局地的大雨、短時間強雨の監視・予測能力を強化するために開発されたプロダクトであり、面的な実況補外に加えて強雨域の降水を空間3次元的に予測する技術を導入し、1時間先までのより精度の高い予測を提供している。

降水の3次元予測では、3次元の実況補外と力学的予測(鉛直1次元対流モデル)を併用している。鉛直1次元モデルでは、積乱雲のなかで起こる物理過程をモデル化し、雨粒の生成、成長、落下、蒸発などを数値計算する。鉛直1次元対流モデルが使用する大気の鉛直プロファイルは、ゾンデ観測を初期値として、レーダーエコーの情報に基づいて更新する。面的な実況補外においても、鉛直1次元対流モデルをさらに簡略化して、鉛直方向に積算した雨水量の時間1次微分、2次微分をそれぞれ鉛直速度、鉛直加速度に対応

* (連絡責任著者) Teruyuki KATO, 気象研究所.
tkato@mri-jma.go.jp

© 2015 日本気象学会

づけて、それらに基づいた降水の盛衰予測を行う。

高解像度降水ナウキャストには、線状降水帯を予測する機能も組み込まれている。平成26年8月豪雨を受けて機能改良の取り組みを続け、レーダーのドップラー速度データから水平ロール渦成分を検出し、予測に利用する手法を開発した。この新手法では、高度3 kmの風に沿って12時間前まで降水の履歴をトレースし、線状降水帯の発生、消滅のタイミングを予測する。ただしこの手法では、すべての線状降水帯を予測できるまでには至っておらず、降水予測全体で見れば改善は限定的であるが、従来の経験則による予測から力学的予測に一步踏み出したものと言える。

気象庁ホームページの高解像度降水ナウキャストのページでは、いざというときにすぐに使えるよう、少ない操作で分かりやすく情報を取り出すことができる工夫を随所に盛り込んでいる。さらに気象庁は、「急な大雨・雷・竜巻から身を守るためにナウキャストを活用してください」とさまざまな機会を通じて社会に呼びかけている。しかし、2014年度に気象庁が実施した「気象情報等の利活用に関する調査」では、4人に3人が高解像度降水ナウキャストのサービスを知らないと回答するなど認知度は低い。講演者は、急な大雨・雷・竜巻から身を守るためには、これまでの公助に加えて、自助・共助の重要性が今後増すとともに、地域社会の高齢化によって特に共助の役割が大きくなると考える。そのような状況においては、気象の専門知識を持つ人々が、ナウキャストのような情報を有効に活用しつつ、地域の防災活動に積極的に関与することが重要であろう。

討論では、予測誤差に関する情報の作成方法、鉛直速度の計算方法、鉛直1次元対流モデルの精度評価、線状降水帯の予測における消滅タイミングの予測方法、水平ロール渦の気象学的な意味等について議論した。

3. 局地的大雨の観測から予測へ

—積乱雲の一生の観測と発達予測—

岩波 越 (防災科学技術研究所)

防災科学技術研究所は2011年度から局地的大雨をもたらす積乱雲の一生の実態解明と早期予測手法開発を目的とした観測研究を首都圏で開始し、Kaバンドレーダー観測による発達初期段階の事例解析 (Sakurai *et al.* 2012) 等を実施してきた。さらに降雨開始前の観測を強化するために、2013、2014年度に新た

な観測機器を首都圏に整備した。

マイクロ波放射計 (10台) は、14チャンネルの輝度温度観測により、可降水量、鉛直積算雲水量、気温・水蒸気・雲水量の鉛直分布を推定する。2014年9月のつくばにおけるゾンデデータとの比較によれば、両者の可降水量は非常に良く一致しており、10台のデータを使って水平分布を1分以下の時間間隔で解析することができた。また気温の鉛直分布については、天頂のみならず低仰角観測も含めた境界層スキャンのデータを解析に用いることで、高度2~3 km以下ではゾンデ観測値と対応が良く、日2回の現業ゾンデ観測では得られない日変化を明瞭に捉えることができた。

ドップラーライダー (3台) の最大測風範囲 (絶対値) は38 m/s以上で、導波路型アンプの採用により最大観測半径が30 kmに拡張された。レーザー光の散乱体がエアロゾルのため観測半径は大きく変動するが、目黒区大岡山での仰角2度の連続観測データから、夏季は平均して半径15 km程度が観測可能で30 kmに達する事例もあり、冬季は観測範囲が狭まることを確認した。動径風データを用いた3次元変分法による風速分布解析結果と同化予測実験における降水の位置・強度の精度改善例を示した。

5台の雲レーダーはいずれもKaバンドドップラーレーダーで、うち2台は感度を重視した単一偏波レーダー (積分効果を含めない、距離20 kmにおける感度は-20 dBZ。2000年導入のレーダーより13 dBZ向上)、3台は同時送 (受) 信タイプの直交2偏波レーダー (距離20 kmで感度-17 dBZ) である。偏波機能はデータの品質管理と氷晶の識別に有効と考えている。レンジビンは75 mまたは150 mで最大観測半径は30 kmである。試験観測を開始したところであるが、観測データの雲水量への変換が重要な課題で、雲粒の「その場」観測との比較を準備中である。2011年の観測事例を対象とした予測実験により、雲水量 (潜熱) のデータ同化が積乱雲発達予測に与える効果を示した。

2台のXバンドMPレーダーについては、1、2分間隔で3次元セクタースキャン観測を行って気流分布を求め、さらに加速度項を陽に扱った熱力学リトリバル手法により温位偏差分布の導出を可能にした。求めた温位偏差分布のデータ同化の効果を、越谷市周辺に被害を与えた竜巻の親雲の事例で示した。また、鉛直積算雨水量 (VIL) による降水ナウキャスト手法を国土交通省XRAINの5分間隔の3次元デー

タを用いて改良・検証し、従来型ナウキャストでは困難な降水雲の急発達段階における遅れを改善し、特に10分先雨量の予測精度が高まることを示した。2つの手法は、フェーズドアレイレーダーのデータにも適用可能である。

これらのデータを活用して、発生・発達初期段階を含む積乱雲の発達過程及び雲粒から降水の形成過程の理解とデータ同化による積乱雲発達の早期予測のために研究を進める計画である。

4. ゲリラ豪雨の早期探知と危険性予測

中北英一（京都大学防災研究所）

2008年7月28日に神戸市都賀川で発生した鉄砲水による水難事故以来、「ゲリラ豪雨」というキーワードが社会現象化し、都市域を中心とした局地的豪雨への関心が高まった。突然の豪雨も当然のことながら、それに伴う都市域の小河川の水位の急上昇がゲリラ豪雨災害の特徴であり、都賀川の場合は降り始めてから7分後に出水が生じた。したがって、このような時間スケールが極端に小さな災害では、5分でも10分でも早い注意喚起が防災上、必要不可欠となってくる。

そこで中北ほか（2009, 2010）は、1982年以来立体観測を継続していた国土交通省深山レーダー雨量計（Cバンドレーダー）の3次元画像を解析して、都賀川での鉄砲水の原因となった局地的豪雨、その豪雨をもたらした積乱雲が急激に発生・発達するごく初期の段階に、上空でのみ最初に存在するレーダーエコー（初期エコーあるいはファーストエコー）が確認できることを明らかにした。加えて、それが都賀川出水時の30分前には出現していることから、避難にとって極めて重要な、ゲリラ豪雨の早期探知に欠かせない情報であり、防災の視点からこのファーストエコーの早期探知を現業化すべきとの提案を行い、そのファーストエコーを、防災的観点から「ゲリラ豪雨のタマゴ」と命名した。

一方、国土交通省は、2010年から順次、全国の政令指定都市を中心に既存のレーダー雨量計よりも時間・空間ともに高解像度でかつ精度良く降雨強度を推定できるXバンドMP（マルチパラメータ・ドップラー偏波）レーダーを配備し、3次元ドップラー観測をも標準としたゲリラ豪雨災害への観測体制を強化した。現在では39基による観測ネットワーク（XRAIN）を構築している。中北ほか（2013）はXRAINで観測された多数の事例を用いて、積乱雲が強化される際に

は、地上強雨がもたらされるより前に「ゲリラ豪雨のタマゴ」が上空で出現すること、ドップラー風速により推測される渦度がほぼ確実にファーストエコーの段階から確認されることを明らかにした。加えて、タマゴの早期探知手法と追跡手法、並びに危険性予測手法を統合したゲリラ豪雨予報システムのプロトタイプを構築した（中北ほか 2014）。さらに、フェーズドアレイレーダー観測情報も利用して渦管の詳細な振る舞いを解析している（中北ほか 2015）。

国土交通省は上記一連の研究とタイアップしながら、XRAINの現業化直後から、ゲリラ豪雨の早期探知・危険性予測の現業化を目指した取り組み進めてきた（片山ほか 2015）。大阪・神戸・京都を含む近畿地域において、XRAINの5サイトの観測値から、水平・鉛直方向ともに格子間隔500 mの等高度面データ（CAPPI）を1分毎に高度10 kmまで作成し、渦度に加えて水平収束量や雲頂高度発達速度などを統合した豪雨危険度指数を基に、豪雨警戒ランクを3段階で判定する手法を開発し、Web表示するシステムを構築した。現在試験運用を継続しており、今後、都賀川の早期避難サイレン灯システムとのタイアップも進んでゆくよう祈念したい。

5. 「ビッグデータ同化」でゲリラ豪雨に挑む

三好建正（理化学研究所）

計算機性能の向上により、シミュレーションでできる現象スケールは格段に向上してきた。今や、わが国が誇るスーパーコンピュータ「京」を使って、100 mメッシュの気象シミュレーションが高速に計算できるようになった。単独の積乱雲が持つスケールは数 kmであるので、この一つ一つを十分に解像する。また、2012年に大阪大学に設置されたフェーズドアレイ気象レーダーにより、ビーム方向の分解能100 m、鉛直方向には100層の解像度で、60 kmまでの範囲を30秒毎に捉えられるようになった。これまで5分かけて15層を捉えていた従来型の気象レーダーに比べ、およそ100倍のデータ量となる。さらに、2014年10月7日に打ち上げられた静止気象衛星ひまわり8号は、2分半毎に日本域の高速撮像を行うほか、限られた地域を30秒毎に超高速撮像することができ、従前の静止気象衛星に比べて50倍程度の大容量データを生み出す。これらの高頻度な観測「ビッグデータ」により、分単位でダイナミックに変動する積乱雲の動きを詳細に捉えられる。

これらの新しい観測データを生かし、100 m メッシュの高精細シミュレーションが現実起こっている積乱雲を忠実に表現できれば、ピンポイントに豪雨を予測できるのではないかと。昨今「ゲリラ豪雨」とも呼ばれる不意を突く局地的大雨も、事前に予測し備えることができるのではないかと。これを目指し、私たちの研究グループでは、「ビッグデータ同化」の技術革新を創出する新たな研究を進めている。

新たに研究開発中の「ビッグデータ同化」システムでは、100 m メッシュの30秒シミュレーションを100個並列実行し（100メンバーのアンサンブル予報）、この100個のばらつきからシミュレーションの誤差を捉えることで、高度なデータ同化手法であるアンサンブルカルマンフィルタを実行する。この際、前30秒間の観測データを取り込む。これにより、観測された雨や雲の分布をシミュレーションの中に忠実に再現する。観測量はレーダーの反射強度やドップラー速度、ひまわりが捉える可視や赤外の放射輝度等だが、「ビッグデータ同化」により、シミュレーションでは熱力学場を含むトータルな気象場が再現され、力学的な予測が可能となる。

過去の実際の豪雨事例でテストしたところ、観測された積乱雲群を高精度に再現する良好な結果を得た。しかし、この計算に要した時間は、実時間よりも大幅に長い。実時間で予測を実現するには、スーパーコンピュータ「京」を高効率で活用するほか、30秒毎の観測データを高速に処理・転送するなど、シミュレーション及び観測双方のビッグデータを扱う技術革新が求められる。発展を続けるスーパーコンピューティング技術及び観測技術を統合的に活用し、「ゲリラ豪雨」に挑む研究は始まったところであるが、早期実用化に結びつくよう努力したい。

6. 上流下層加湿による短時間降水予測と対流初期構造の定式化

若月泰孝（筑波大学）

局地的大雨などを対象とした短時間予測は、高度化されたレーダーエコーの時間外挿によっている。これらは大気の物理モデルシミュレーションではないため、積雲対流の生成消滅の表現が十分ではない。そこで大気モデルシミュレーションによる予測が必要となるが、多くの場合、積雲対流の内部構造が初期値に組み込まれていないため、2時間程度先までの予測精度が、ニーズに対して十分ではない。積雲対流の物理過

程には強い非線形性が含まれている。そのため、データ同化技術と観測が高度化しているにもかかわらず、データ同化の際に内部構造が一意に決まらず、予測が十分に高精度化しているとは言えない。その強い非線形性によって予測誤差は急激に増大する性質があるため、短時間間隔で予測を更新しなければならない。そこで、降雨情報を取り込むための、計算負荷のより小さい簡便な手法の開発が求められている。

若月（2015）は、積雲対流の内部構造の簡便なデータ同化として、上流下層加湿法を提案した。2次元のレーダーエコーデータから強雨域を同定し、エコーの移動ベクトルを求めたうえで、20分程度の時間を遡った時刻と場所を、その強雨をもたらした積乱雲の発生位置とした。その発生位置の下層に水蒸気量の疑似観測データを作成した。自由対流高度より少し厚い層厚で、飽和に達する水蒸気量を疑似観測とした。これを時定数1分程度のナッジングで同化すると、概ね期待通りの位置に積乱雲とそれに伴う強雨を再現することができる。上流下層加湿は、積乱雲の初期構造を想定した対流ボーガスである。この方法で、2013年9月2日に埼玉・千葉県で観測され、竜巻を発生させたスーパーセル型積乱雲に伴う強雨を概ね再現することができた。この方法は、降雨の観測情報を3次元的な相関構造で他の物理量の偏差に変換するのではなく、観測情報を、同化ウィンドウ内の物理的過程を通じて上流側に伝搬させて同化する4次元変分法データ同化を、非常に簡便な方法で近似したものと考えることができる。

対流ボーガスとして、下層大気を持ち上げと混合を考慮し、加熱や加湿を適切な構造で与える手法の開発も行っている（Air-lifting-blending法）。より適切な初期構造を与えることが、積雲対流のその後の進化の精度により影響を与えることが示唆された。このように、簡易手法であっても、より実用的で精度の高い強雨予測ができるよう、さらなる改良・開発を進めている。なお、本手法は、従来の降水ナウキャストや物理モデルシミュレーションに付加する予測の枠組みを念頭に置いて開発されている。

7. 総合討論

総合討論では、短時間強雨予測の今後の展望として、ナウキャストへの観測データ、特に新規データ（フェーズドアレイレーダー・MPレーダー・雲レーダー・ドップラーライダー・水蒸気ライダー・衛星測

位システム (GNSS) などの利用による早期探知と現状より数分リードタイムを長く取れる強雨予測の実現性、その後の予測を担うノウキャストと数値予報との役割 (ビックデータ利用によるデータ同化の高度化がもたらす予報初期精度向上やノウキャストへの簡易数値モデルの導入など) についての議論を促した。

まず局地的大雨はそもそも予測可能なのかという問題提起がなされた。数時間前には発生する可能性が高い領域を絞ることができるが、場所と時間を正確に予測することは不可能であることが再確認され、2時間程度先までを主に担うノウキャストへの期待が共有された。大学・研究機関等で開発された短時間強雨予測システムを気象庁が採用するタイミングについて、今回の研究会のように気象庁関係者も含めた開発者間の情報共有の重要性が指摘された。高解像度降水ノウキャストの認知度が30%と低く驚きだという感想が述べられ、研究会に参加された方はその仕組みについての理解も深まったことから、大雨時の共助の立場から宣伝に努めて欲しいとのコメントがあった。積乱雲の内部構造を詳細に把握できるような観測データが取得されるようになってきているので、ノウキャストへの利用だけでなく、積乱雲の実態把握や機構解明を行うことで、数値モデルの雲物理過程の改良に繋げ、数値予報の精度向上にも努めるべきだという意見が上がった。最後にビックデータを用いた予測が実現する時期についての質問があり、三好建正氏から10～20年後には実現できるように努力したいという回答があった。

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・運営をしていただいた気象学会員の有志の

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。

参 考 文 献

- 片山勝之, 山路昭彦, 中村文彦, 森田 宏, 中北英一, 2015: 局地的豪雨探知システムの開発. 河川技術論文集, **21**, 401-406.
- 木川誠一郎, 2014: 高解像度降水ノウキャストにおける降水の解析・予測技術について. 測候時報, **81**, 55-76.
- 中北英一, 山口弘誠, 山邊洋之, 2009: レーダー情報を用いたゲリラ豪雨の卵の解析. 京都大学防災研究所年報, **52B**, 547-562.
- 中北英一, 山邊洋之, 山口弘誠, 2010: ゲリラ豪雨の早期探知に関する研究. 土木学会水工学論文集 B1 (水工学), **54**, 343-348.
- 中北英一, 西脇隆太, 山邊洋之, 山口弘誠, 2013: ドップラー風速を用いたゲリラ豪雨のタマゴの危険性予知に関する研究. 土木学会論文集 B1 (水工学), **57**, 325-330.
- 中北英一, 西脇隆太, 山口弘誠, 2014: ゲリラ豪雨の早期探知・予報システムの開発. 河川技術論文集, **20**, 355-360.
- 中北英一, 佐藤悠人, 西脇隆太, 山口弘誠, 2015: ゲリラ豪雨危険性予知手法の高精度化に向けた積乱雲生成時の渦管構造の解析. 京都大学防災研究所年報, **58B**, 221-231.
- Sakurai, N., K. Iwanami, T. Maesaka, S. Suzuki, S. Shimizu, R. Misumi, D.-S. Kim and M. Maki, 2012: Case study of mesoscale convective echo behavior associated with cumulonimbus development observed by Ka-band Doppler radar in the Kanto region, Japan. SOLA, **8**, 107-110.
- 若月泰孝, 2015: 上流下層加湿による積雲対流の予測実験. 土木学会論文集 B1 (水工学), **71**, I_505-I_510.