

4. 降水現象の予報高度化の技術

齊藤和雄*・牧原康隆**

1. はじめに

大気中にはさまざまな時間空間スケールの気象現象が存在する。多少の分類の違いはあるものの、水平スケールが2000 km から1 km 程度の現象をメソ（スケール）現象と呼んでおり、顕著な降水はこのスケールの現象に伴って生ずる。集中豪雨のような災害に直結する局地的な顕著現象の予測は多くの困難を伴うが、近年、数値モデルや新しい観測データの利用など、顕著な降水現象についての力学的予測に大きな進展が見られるようになった。また、豪雨に伴う災害の発生のおそれをリアルタイムで定量的に評価し、防災情報を高度化しようとする取り組みも進んでいる。ここでは上記の降水現象の予報高度化に向けた気象庁の取り組みについて紹介する。

2. 数値モデルによる降水予測

2.1 気象庁の現業メソ数値予報

気象庁では、2001年3月からメソ数値予報モデル(MSM)の運用を開始している。このモデルは日本とその周辺の3600 km×2880 kmの領域を対象とし、防災支援情報の高度化を主な目的にするほか、降水短時間予報や航空気象業務の支援にも用いられている。

第1図は2001年3月から2006年7月までのMSMによる降水の予測精度の変遷である。この図では、日本周辺のレーダーアメダス解析雨量で3時間10 mm以上の強度の雨を対象に、10 kmの検証格子に対し、9時間予報の降水予報におけるスレットスコアを調べたものである。月毎の変動が大きいものの、2001年3月の運用開始以来、スコアは次第に向上している。メ

ソ数値予報には運用開始後、第1表に示すような変更や改良が加えられている。

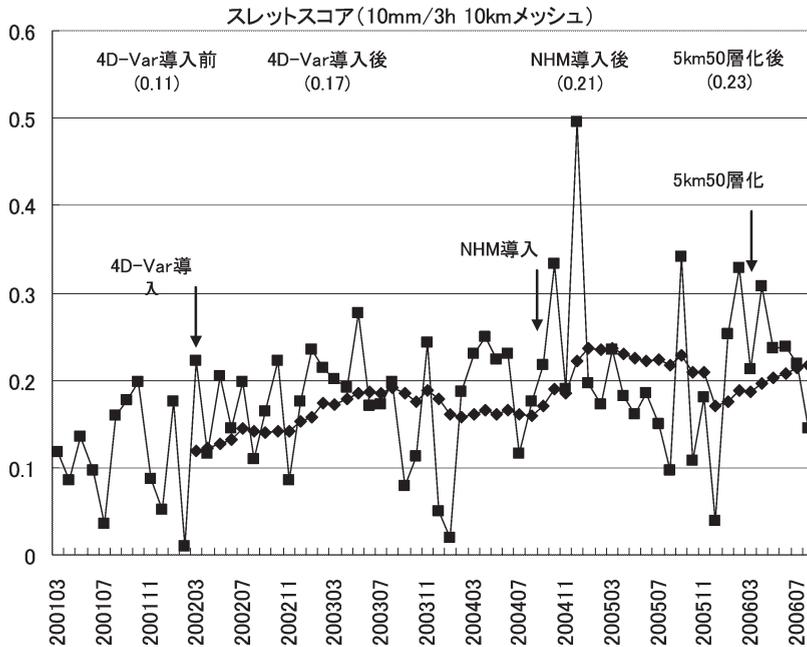
2.1.1 4次元変分法の導入

気象庁では、2002年3月から、MSMの初期値作成に4次元変分法(4D-Var)を導入している。変分法は、モデルの予報変数を観測物理量に変換する観測演算子を導入し、解析値と第一推定値との差(背景項)と観測演算子によって変換された値と観測値との差(観測項)の和で定義される評価関数が最少になるように解析値を決める手法である。最適内挿法などでは、解析変数と線形関係にある物理量しか同化できない、という制約があるが、変分法では、観測演算子を導入することにより、衛星観測データのような解析変数と非線形な関係の物理量の観測データでも同化して情報を引き出すことができる。4D-Varでは、数値モデルの時間発展を表すモデル演算子を加えることで、評価関数は解析時刻のみだけではなく、時間的広がりをもった同化期間(同化ウィンドウ)全体で計算される。これにより、同化ウィンドウに含まれる非定時の観測データを生かすことができる。また、評価関数にモデル演算子が含まれることにより、求められる解析値は物理的にバランスが取れたものになる。4D-Varでは、時間積分のための前方モデルに加え、評価関数の勾配を計算するための随伴モデルが新たに必要になり、また繰り返し計算が必要なため多くの計算機資源を必要とする。気象庁のメソ4次元変分法(石川・小泉, 2002)では、静力学MSMをベースに前方モデルと随伴モデルを構築しており、水平分解能を20 kmに落として同化ウィンドウでの計算を行うインクリメント法を採用して計算時間の短縮を行っている。またレーダーアメダス解析雨量を同化して、降水の予測精度を大幅に高めることに成功している。第1図では、4D-Var導入によりMSMの降水予測精度が改善して

* 気象研究所予報研究部, ksaito@mri-jma.go.jp

** 気象庁予報部予報課。

© 2007 日本気象学会



第1図 気象庁メソ数値予報モデル (MSM) の降水予測精度の変遷。月ごとの値と12か月の移動平均。冬季は10 mm/3 hr以上の降水は少ないので、少数の事例でスコアが左右されるため変動が大きくなることに注意。気象庁数値予報課瀬川氏の好意による。

いるのが分かる。

2.1.2 新規観測データの利用

第1表に示すように、メソ数値予報の運用開始以来、さまざまな新規データの利用が追加されている。ウインドプロファイラは、地上に設置したアンテナから電波を発射し、大気の流れによって乱反射されて戻ってくる電波を受信することによって、上空約5 kmまでの風を連続的に観測する測器で、2001年に全国展開された。当初25箇所、2003年に6箇所を追加

第1表 気象庁メソ数値予報の主な変更。

2001年3月	メソ数値予報運用開始
2001年6月	ウインドプロファイラデータ利用開始
2002年3月	メソ4次元変分法導入
2002年8月	国内 ACARS データ利用開始
2003年10月	衛星マイクロ波放射計可降水量/降水強度同化開始
2004年7月	衛星マイクロ波散乱計海上風同化開始
2004年9月	非静力学モデル導入
2005年3月	ドップラー動径風同化開始
2006年3月	5 km 50層 1日8回化

2007年7月

し、現在では全国31箇所得上層風の連続観測が行われている。

ACARSは Aircraft Communications Addressing and Reporting Systemの略で、2002年8月から国内の民間航空機（日本航空、2003年9月からは全日空も追加）が日本上空の航空路上で観測する気温と風のデータを利用している。

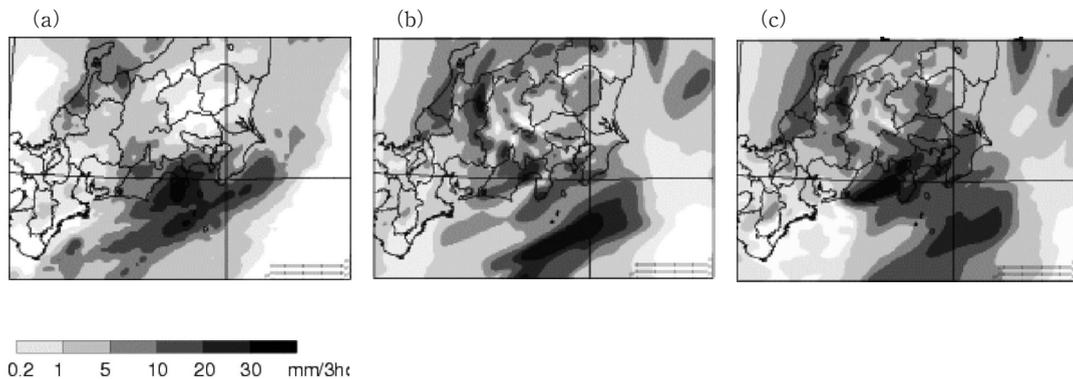
2003年10月には、地球観測衛星 (TRMM, DMSP) のマイクロ波放射計 (TMI, SSM/I) データによる可降水量 (水蒸気の鉛直積算) と降水強度の同化が、2004年7月には、地球観測衛星 (QuikSCAT) のマイクロ波散乱計データによる海上風データの利用が始まっている。マイクロ波放射計は、地表面や大

気のマイクロ波領域の熱放射を測定し、海面の状態や大気の水蒸気量などを観測する。マイクロ波散乱計は衛星から射出したマイクロ波の水面での反射を測り、海上風を求める。これらのデータは通常の観測が少ない海上での貴重なデータとなっている。なお2004年11月からは、地球観測衛星 (Aqua) のマイクロ波放射計データ (AMSR-E) による可降水量と降水強度の同化が追加になっている。

2005年3月からは、メソ解析に空港気象ドップラーレーダー動径風データの利用を開始している。気象庁では、新千歳空港、成田国際空港、東京国際空港、中部国際空港、大阪国際空港、関西国際空港、福岡空港及び那覇空港の計8箇所に、ドップラーレーダーを展開している。第2図は2004年2月2日に伊豆半島に強い雨が合った時の例で、南の海上にずれて予想された降水域の位置が、動径風の利用により大きく改善している。

2.1.3 非静力学モデルの導入と高解像度化

MSMは当初水平解像度10 km鉛直40層で運用が開始された。このモデルは気象庁領域スペクトルモデル (RSM) の高分解能版で、静力学近似を行っていた。



第2図 (a) 2004年2月2日午後3-6時の解析雨量. (b) 2日午前3時を初期値とするMSM15時間予報による前3時間降水量, ドップラー動径風なしの場合. (c) 動径風ありの場合. 気象庁数値予報課小泉・石川氏の好意による.

2004年9月からは、力学過程に非静力学モデルを導入している。非静力学モデルは、気圧計算の仕方や音波の扱いに工夫が必要になるものの、水平分解能に原理的な制約がなくなり、モデルを高分解能化した場合に積乱雲内の上昇流や局地的な地形の影響を受ける風をより正しく表現することができる。メソ数値予報に導入された非静力学モデル（非静力学MSM）は、気象研究所と気象庁数値予報課が共同開発したモデル（MRI/NPD-NHM；Saito *et al.*, 2001）をベースに、10 km メソ数値予報用に力学過程や物理過程に改良を加えたもの（JMA-NHM；Saito *et al.*, 2006）である。

非静力学モデル導入によるもう1つの大きな違いは、湿潤過程に雲物理過程を導入した点である。それまでのMSMでは凝結した水蒸気をほぼそのまま降水とみなしていたが、非静力学MSMでは、水物質を水蒸気、雲水、雲氷、雨、雪、あられ、の6つのカテゴリーに分類し、それらの移流や成長、落下、相変化に伴う熱の出入りなどを計算している。また積乱雲の効果の扱いについても、高分解能モデル向けの手法（Kain-Fritschスキーム）を採用している。

第3図は2003年7月の九州大宰府での豪雨の事例について、比較したものである。当時の現業モデルだった静力学MSMでは予想できなかった九州北部の強い降雨帯が非静力学MSMでは表現されている。

2006年3月からは、水平格子間隔5 km 鉛直50層に解像度を強化し、運用回数も1日4回から8回に高頻度化している。この分解能では積雲対流のパラメタリゼーションを除去するには至らないが、メソ対流系の

組織化をより適切に表現することが可能になる。また高解像度化にあたって、雲物理過程、Kain-Fritschスキームの調整の他、放射スキームや地表面過程などにも改良が加えられた（石田ほか, 2005）。第1図では、非静力学MSM導入後にスレットスコア0.3を超える月がしばしば見られるようになり、またNAPS8導入による高解像度化後は降水予測精度がさらに改善しているのが分かる。

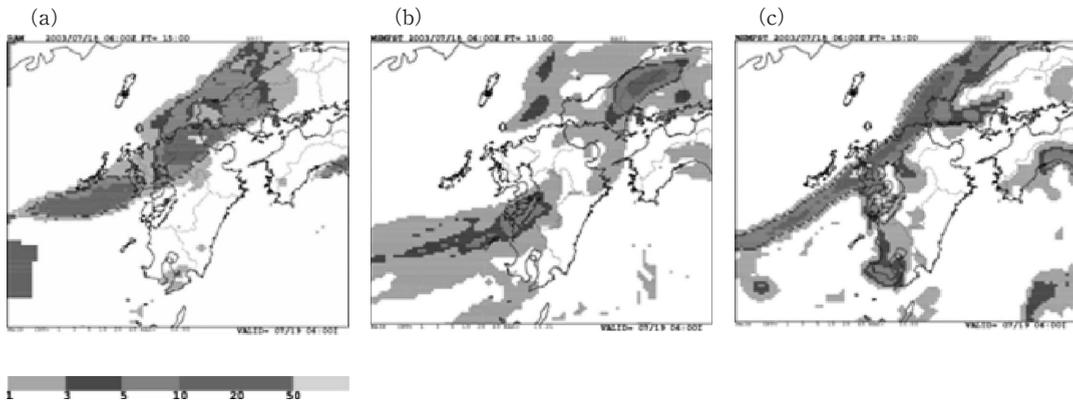
2.1.4 境界値

MSMは計算領域が限られているので、その予報は境界条件の影響を強く受ける。MSMでは境界値としてRSMの予報を用いているが、2003年6月からはRSMの初期値解析にも4次元変分法が導入されており、精度が大きく向上している。RSMに境界値を提供する全球モデルにも様々な改良が行われている。特に、2002年からは「全球モデル開発プロジェクト」を2.5年計画で推進し（気象庁予報部, 2004；2005）、物理過程（積雲対流スキーム、放射スキームなど）の改良や、衛星データの高度利用（マイクロ波散乱計海上風、ATOVS直接同化、MODIS極域風データなど）、4次元変分法の導入などを集中的に行った。この結果、気象庁全球モデルの短期予測精度は大きく向上し、世界の先進予報センターと肩を並べるようになっている。これら全球モデルとRSMの予測精度向上は境界条件と解析予報サイクルを通じた初期値の改善によりメソモデルの予測精度向上に貢献している。

2.2 集中豪雨の予知に向けて

2.2.1 雲解像モデル

集中豪雨などの顕著な降水現象の多くは、積乱雲や



第3図 (a) 2003年7月19日午前6時の解析雨量。(b) 対応する18日午後3時を初期値とする静力学MSM15時間予報による前1時間降水量。(c) 静力学MSMによる予報。斉藤ほか(2004)より。

メソ対流系と呼ばれる積乱雲の集合体によって引き起こされている。積乱雲の水平スケールは通常10 km以下で、水の相変化に伴う潜熱の解放と雲内水物質の分布が、運動場と降水域の決定に重要な役割を果たしている。現在のMSMでは、個々の積乱雲を直接解像することができないため、積雲対流などに伴う降水は格子スケール以下の現象としてパラメタライズしている。数値モデルをさらに高分解能化して、個々の雲を解像するモデルで降水予測を行うことについても各方面で取り組みが行われており、気象庁でも領域を限定した局地モデルの実験的な運用を始める可能性がある。ただし、1-4 km程度の水平解像度では、対流を解像するには十分ではないという報告もあり、数値予報モデルとして実用化するためには、浅い対流の扱いなどに工夫が必要になる可能性がある。

2.2.2 初期値

2002年に導入されたメソ4次元変分法は、メソ数値予報の精度改善に貢献したが、前方モデルと随伴モデルは静力学MSMをベースにしたもので、水平分解能は20 kmに落としている。メソ4次元変分法は分解能に制約がある上、雲物理過程が含まれていないため、レーダー反射強度などリモートセンシングデータのより直接的な利用にも発展性に乏しい。気象庁と気象研究所では、JMA-NHMをベースとした新しい4次元変分法システムについての開発を行っている。MSM初期値のためのメソ解析については、数値予報課が中心となって2007年現業化を目指して気象庁非静力学モデルをベースとした4次元変分法システムの開発が進んでいる。平成16年福井豪雨の例では、従

来のメソ4次元変分法による解析では上手く予想できなかった福井県の強い降水が、非静力学4次元変分法による解析を初期値にした予報では実況に近い場所に再現されることが報告されている(Honda *et al.*, 2006)。

雲を解像する分解能での非静力学4次元変分法の開発は気象研究所で行われており、Kawabata *et al.* (2006)は、1999年の練馬豪雨の事例を対象に、2 km分解能でドップラー動径風やGPS水蒸気データ、アメダス観測データなどを短時間間隔で同化する実験を行い、豪雨を発生させた深い対流を再現させることに成功している。

データ利用についても様々な取り組みが行われている。近年特に注目されているのはGPS衛星からの電波の遅延量から伝播経路に沿った水蒸気の変動や可降水量を求める手法である。日本では、国土地理院が水平距離15~25 km間隔の高密度なGPS観測網(GEONET; GPS Earth Observation Network)を整備・運用しており、空間的に微細な水蒸気変動が解析できると期待されている。小司(2005)は2004年6月に発生した静岡での豪雨についてメソ4次元変分法を用いたGPS可降水量の同化予報実験を行い、GPSデータを同化した初期値を用いると、風上にあたる南岸沿いで水蒸気が増加し、静岡県の高雨域の予測が改善されることを報告している。メソ数値予報に間に合う時間にデータ処理が必要であり、現業化に向けた課題は残っているものの期待が持てる結果となっている。GPSを気象予報に応用する手法としては、低軌道の別の衛星から地球大気をかすめて伝播してくる

GPS電波を観測して大気構造の解析を行うもの(GPS掩蔽法)もあり、全球大気モデル予測の改善に期待されているほか、メソ数値予報への応用実験も始まっている(瀬古ほか, 2005)

メソモデルへのデータ利用に関しては、このほか、衛星マイクロ波放射計・鉛直探査計データの直接同化手法の開発、ウィンドプロファイラが観測する屈折率鉛直勾配から水蒸気分布を求める研究なども行われている。雲物理過程を含む非静力学4次元変分法により、衛星データやレーダー反射強度を直接同化することができるになれば、メソスケール現象の詳細な構造をモデル初期値に取り込むことが出来るようになる」と期待される。

2.2.3 アンサンブル予報

集中豪雨を引き起こす積乱雲は、時間スケールが1時間程度しかないため、雲を解像する高分解能の数値モデルや同化システムを用いても、個々の積乱雲を半日以上前に予測することは将来的にも不可能と考えられる。積乱雲の集合体であるメソ対流系の時間スケールはもう少し長い、地形や大規模場の強制が明瞭でない場合には、初期値の僅かな違いが結果を大きく変えてしまう場合がある。一方、比較的予報が信頼できるケースもあり、実用的なリスクマネジメントのためには、予測に信頼度情報が付加されることが望ましい。近年、アンサンブル予報を領域予報やメソ予報の分野にも適用しようとする試みが、国外予報センターや研究機関で始まっており、気象庁でも将来メソ数値予報にアンサンブル予報を導入する可能性がある。齊藤ほか(2006)は2004年7月の新潟豪雨のケースについて全球週間アンサンブル予報の摂動を規格化してメソ解析に加えて非静力学MSMを実行する実験を行い、いくつかのメンバーでライン状の強い降水が予報されたことを報告している(第4図)。

アンサンブル予報で得られる予報誤差の情報を用いて推定誤差が最小となる解を求める手法(アンサンブルカルマ

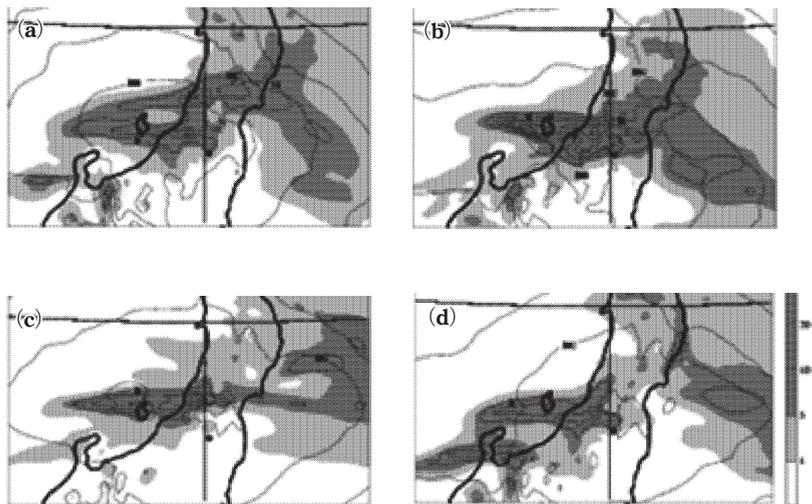
ンフィルタ;例えば、三好, 2005など)が、変分法に代わる新しいデータ同化手法として注目されており、取り組みも始まっている。将来的にはメソ数値予報への応用も試みられるかも知れない。

3. 防災情報の高度化

3.1 レーダー・アメダス解析雨量, 降水短時間予報, 降水ナウキャストと基準地域メッシュ対応降水とくに強雨は局地的であることから、気象庁では、降水の実況を細かな空間・時間分解能で提供することおよび降水予測の改善を進めてきた。

レーダー・アメダス解析雨量および降水短時間予報は、大雨や洪水の注警報のための資料として1989年運用を開始した。レーダー・アメダス解析雨量は、以降、自治体雨量計の取り込みや解析手法の改善、格子系の詳細化などの高度化を行っている(牧原, 2000; 黒良ほか, 2005)。

降水短時間予報は、レーダー・アメダス解析雨量等から得られる降水域の移動や発達・衰弱情報をもとにした「実況補外型」予測により3時間先まで予報していたが、現在はメソ数値予報MSMの降水予想値も取り入れており、両者の予想値を数時間前の疑似予測の精度に応じて重みつき平均で合成した値を「降水短時間予報」として6時間先まで算出している(國次, 2002)。

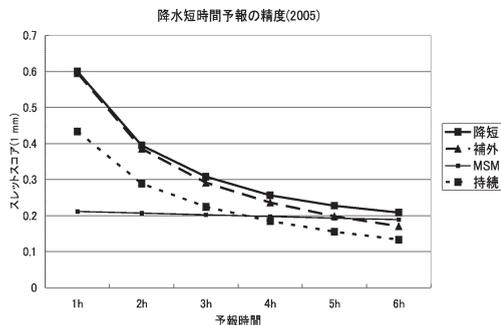


第4図 2004年7月12日午後9時を初期値とする10 km非静力学モデルを用いたアンサンブル予報による東北地方の3時間雨量。(a) M03p (FT=12-15), (b) M04p (FT=12-15), (c) M08p (FT=15-18), (d) M12m (FT=12-15). 齊藤ほか(2006)より。

「実況補外型」予測では、現在および過去3時間のレーダー・アメダス解析雨量をもとに、主としてパターンマッチングにより、100 km および20 km 程度のスケールそれぞれの降水域の移動ベクトルを算出している。また降水の発達・衰弱については、地形性降水に関する feeder-seeder の考え方にもとづいて、移動ベクトルのほか MSM の風および気温予想を利用して算出している。第5図に計算全領域の2005年の精度をスレットスコアで示す。いずれの時間も持続予報を0.2程度上回っている。また、目先の予報では「実況補外」型予測の精度が高く、予報時間が長くなるにしたがい、MSM との合成の効果による精度の改善が明確になっていることがわかる。

一方、近年は都市域の短時間強雨による浸水被害が目目されていることなどから、10分ごとの降水予報「降水ナウキャスト」の運用を2004年6月1日に開始した(杉浦ほか, 2005)。ここでは格子系として、地域メッシュ統計や国土数値情報と同じ「基準地域メッシュ」(緯度方向0.5分、経度方向0.75分、約1 km 格子)が使われている。基準地域メッシュは、地形・地質・植生・都市化率・市町村域等の地図情報に利用されており、降水に関する災害の予測への利用や対応する自治体の識別等が容易となることから、今後の活用が期待される。平成18年3月からは、レーダー・アメダス解析雨量および降水短時間予報についても、「基準地域メッシュ」で計算を行っている。

降水ナウキャストは、日本全国を覆う領域の10分間降水量を、10分毎に60分先まで計算し、観測時刻から3分以内に GPV 配信を行っている。一方、降水短時間予報は6時間先までの1時間降水量の予報で、観測時刻から約20分後に配信している。



第5図 降水短時間予報の精度(2005年)。全領域の20 km 格子平均1 mm のスレットスコア。

降水ナウキャストの降水短時間予報との大きな違いは、対応する実況と配信時刻である。降水ナウキャストでは、急激に盛衰を繰り返す対流性降水に対応するため、実況値は10分間降水量とし、レーダー雨量の較正や降雨域の移動ベクトルの算出を簡略化し、地形による降水の発達・衰弱予測を省略することで、計算時間を大幅に短縮している。平均的な精度は、降水短時間予報より若干低いが、降水短時間予報より約17分早く入手できることから、急速に発達する降水に対して、降水ナウキャストの果たす役割は大きい。

3.2 土壌雨量指数

土砂災害については、表層土壌の水分量を推定する土壌雨量指数を開発し、土砂災害のおそれを伝える大雨警報の支援資料として1999年より利用している。

山やがけの斜面崩壊は、地表付近の土壌が多量の水分を含むことによって、表層の土壌が滑落して発生することが多いと言われている。また、表層の土壌は数十センチから数メートルで、一度崩壊すると基岩が露出するため崩壊しなくなることから「免疫性」があると言われている。免疫性は、土壌の風化や植物による土質の劣化、人工施設の建設等により、10年~20年のオーダーでなくなっていく。これらのことから、土壌水分量が多いほど崩壊しやすいこと、過去数年間の土壌水分量と比較して多いことが、崩壊する土壌の多少に影響することがわかる。

「土壌雨量指数」はこのような土砂災害の性質を考慮して、5 km 格子ごとの土壌水分量を Ishihara and Kobatake (1979) の直列3段タンクモデルおよびレーダー・アメダス解析雨量を元に算出したものである(立原ほか, 2005)。また5 km 格子ごとに過去10年間の土壌雨量指数を計算しており、現在の水分量を過去の値と比較することにより、土砂災害の危険度について推定している。

第6図aは、土壌雨量指数(降水量に換算して何ミリの水分が土壌に存在するか)を示している。また第6図bは、格子毎に土壌雨量指数が過去10年で何番目に大きいかを示している。この中で、瀬戸内海の広島県東部、岡山県は、普段大雨が降らないため、土壌水分量そのものは四国南部の山沿いより小さいが、過去10年になかった土壌水分量の大きさととなり、斜面崩壊が発生し死者が出ている。第7図に1991年から1998年までの指数の順位と崩壊件数を示した。過去8年で土壌雨量指数が最も高い場合は、他と比較して崩壊の件数が極端に多いことがわかる。

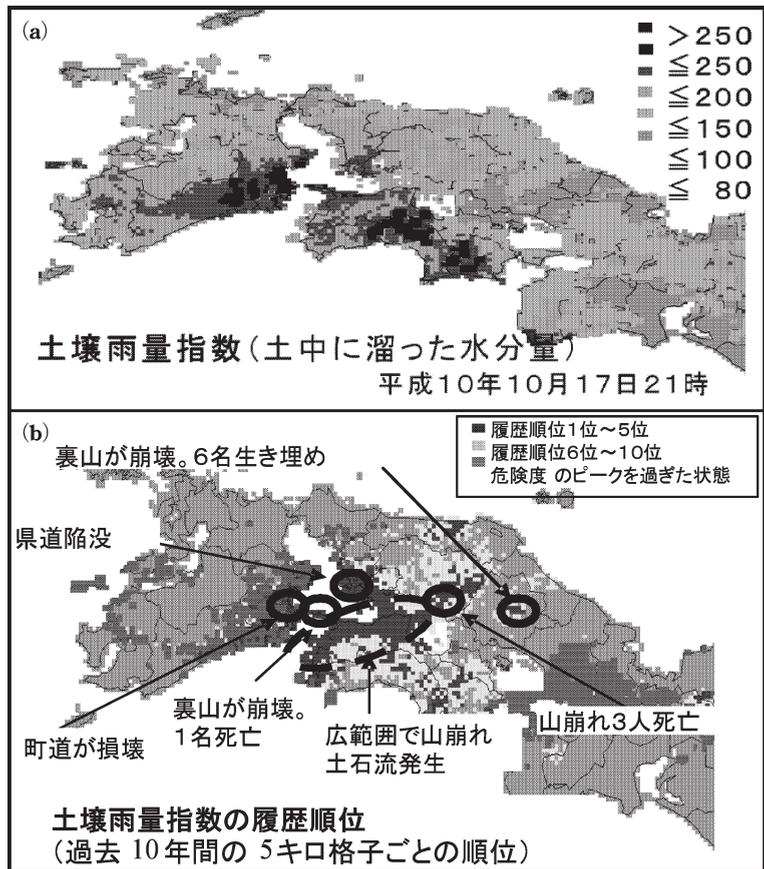
斜面を数〜数十メートル毎の格子に分割して、土壌水分量や土壌パラメータを詳細に把握し、地表面から1〜数メートルの深さにある基岩の上に乗っている表層土が、水分量の変化によって滑落するかどうかを判定する、安定解析を行う手法の開発も進められている。特定の斜面の詳細な崩壊過程を推定する手法として今後期待されるが、数キロ四方程度の土砂災害の発生しやすいさを広範囲に推定するには、当面、土壌雨量指数やそれに類似する手法、例えば土砂災害警戒情報で使用している Radial Basis Function Network (倉本ほか, 2001) が、災害軽減に対し現実的な手段と考えられる。

3.3 流出雨量指数

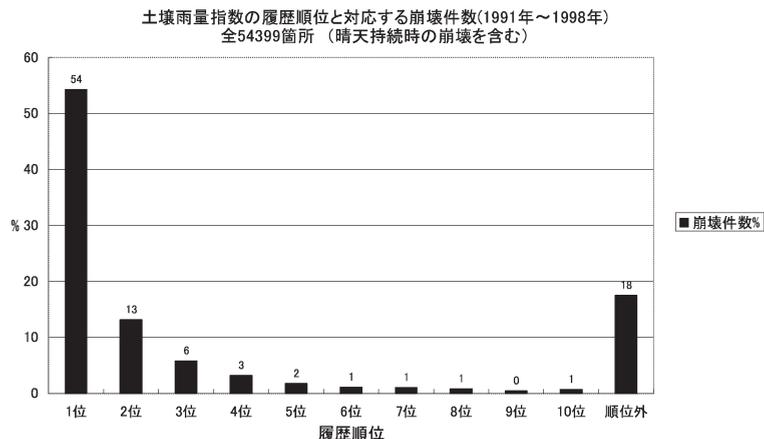
気象庁の洪水注警報は、現在、注警報の対象となる地域内の降雨に基づいて発表しているが、洪水は河川上流の降雨との関係が深いことから、対象地域より上流の降雨を考慮して洪水の規模と時間帯を推定する「流出雨量指数(仮称)」の開発をすすめている(田中ほか, 2005)。

流出雨量指数は、レーダー・アメダス解析雨量をもとに、5 km 格子毎の全国約3000の河川の流量(の平方根)を解析したものである(国土交通省河川局または都道府県と気象庁が共同で河川名を示して発表している洪水予報「指定河川洪水予報」の対象河川を除く)。ダムなどの制御は考慮していない。降水短時間予報を使用した6時間先までの予測の精度についても調査を行っている。

降水が、同じ格子内の河川へ流出する過程には、非都市用として Ishihara and Kobatake (1979)



第6図 (a) 土壌雨量指数と (b) 指数の履歴順位。



第7図 土壌雨量指数の履歴順位と対応する崩壊数。1991年~1998年、順位外の多くは晴天持続時の崩壊。

のタンクモデルを使用し、都市用として地表の傾斜を考慮したタンクモデルを使用している。河川内の水の流下にはマンニング式（例えば土木学会，1989）を使用している。また、流下に関するパラメータとして、国土数値情報の、標高、地質、都市化率、河川情報を使用している。ここでは、流量 Q 、傾斜 I が与えられ、マンニングの粗度係数 n を適宜与え、堤防断面積を径深 R を使って mR^2 (m : 係数) とすることで、流速 v を求めている。

$$v = \left(\frac{Q}{m} \right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{1}{n} I^{1/2} \right)^{\frac{3}{4}}$$

これに水量を保存させることで、各格子内の水の分布を与えておくと、 ΔT 時間後の河川内の水の分布がわかる。すなわち、格子内の水の総量は、タンクモデルを経由して降水から格子内の河川へ流入する量、河川上流から格子内の河川への流入量および河川の下流方向に格子の外へ出る流出量の総和で表される。なお、格子内における降水が河川への流入する総量は、流量と同じ次元であり、5 km 格子内で 1 mm/h の降水が定常的に降り続き、蒸発等が無視できる場合は、河川への流入量は約 6.9 ton/s となる。

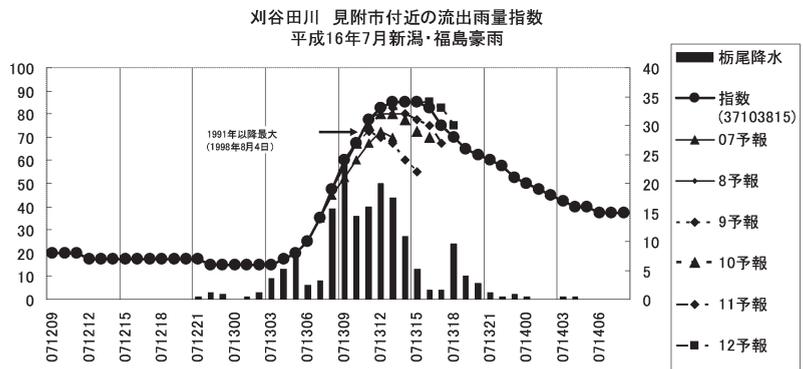
一例として平成16年7月新潟・福島豪雨における、新潟県内を流れる河川の事例を示す。第8図は流出雨量指数および降水短時間予測を利用した指数の予測である。また矢印は過去15年で最大の指数（1998年8月、以下98年8月指数と略。新潟市を中心に浸水や土砂災害の被害が発生している）を示しており、およそ3時間前から98年8月指数に達する見込みであったこと、さらに98年8月指数に達した時刻には、そのおよそ3時間後の12時から13時にかけて、水位がさらに上昇することが予想されている。この指数に対応する刈谷田川の見附市付近では13時頃破堤している。この地点のように、過去15年で災害がある場合は指数を活用することで災害のおそれの程度について判断が可能と考えている。また災害が発生していない場合は、河川的设计が、河川流量の再現年数を基準にしていること、中小

河川では10年から20年で洪水の被害が発生する例が多いことなどを考慮しながら、指数が過去15年になかった高い値であることや15年を超える特定の再現年であることなどをキーワードにして、洪水のおそれを呼びかけることを検討している。水位観測に基づいて水位予測を行う指定河川洪水予報と精度を同一に論じることができないが、中小河川に対する気象庁の洪水注警報を改善する可能性があるものと考えている。

3.4 顕著現象に対する防災へのよびかけ

平成16年は相次ぐ台風の襲来や豪雨により犠牲者が300名を越えた。現地調査では、多数の被災者の話から「これまでに経験のない豪雨や洪水」の発生のために、「通常の対応では十分でなかった」ことが示されている。気象庁では、基準を境としたカテゴリーとして注・警報を発表しているが、顕著な災害に対応するため「これまでに経験のない状況が予想される。通常の対応では不十分。通常以上の対応をお願いします」という趣旨の情報の提供を行っている。土壌雨量指数による「過去数年で最も土砂災害のおそれが高い」は、そのひとつである。

また「記録的短時間大雨情報」は、都道府県内で数年に1度見られる1時間降水量を観測した時に発表するものである。ただ1時間降水量がメカニズムとして浸水や土砂災害に直結しているわけではない。例えば、2005年9月4日には、東京都23区西部で4000棟を超える浸水が発生した。そのときの1時間雨量は最大で112ミリである。一方、1999年7月21日には、1時間131ミリを観測したが浸水棟数は300棟余りである。雨は観測値であり簡便で利用者に理解しやすい指標で



第8図 流出雨量指数（刈谷田川平成16年7月新潟・福島豪雨）。棒グラフは刈谷田川上流の栃尾アメダスの1時間雨量。矢印は1991年以降最大を記録した1998年8月の指数を示す。縦軸右に指数、左に降水量（mm）の大きさを示した。

はあるが、災害軽減の点からは災害の規模が推定できる指標が望ましい。例えば、この事例における神田川の流出雨量指数は、文京区付近で21（2005年9月）と15（1999年7月）であり、指数で1.4倍程度、流量では2倍となっている。浸水災害は河川の流量だけで説明できない部分も多いが、流量に限って言えば、流域の雨量の時系列と流下速度、都市化率等による流出率により決まってくることから、それらを考慮した指標を参考にすることが災害を理解する上には必要と考えられる。

ところで、2000年9月に東海地方を中心にした豪雨の際に氾濫した、名古屋市を流れる天白川周辺住民から「1991年の氾濫の際に100年に1度の洪水のために氾濫したと説明を受けた。10年後に同様に氾濫した。おかしいではないか」との批判の声が出た。過去の記録がある場合は、現状を比較して、「過去何年間で最も」あるいは「1991年を超えるおそれ」ということで理解を得ることが可能だが、過去の記録期間が短い場合や、20年程度の再現年数をはるかに超える顕著な現象の場合は、この方法では不十分である。再現年数の活用は、このような場合に、住民に近年なかった水害のおそれを伝えるための少ない選択肢の1つだが、残念ながらその表現や利用方法にまだまだ工夫が必要だと思う。

2004年に災害を受けたある現地調査によると、避難勧告を聞いた人のうち、勧告に従って避難した人はわずかに3割にとどまっており、他の地域も大きく異なるものではないとのことである。適切な避難勧告を出すための支援となる情報の提供とともに、住民が避難の必要性を理解できる効果的な情報や呼びかけについても検討が必要と考えている。

参 考 文 献

- 土木学会編, 1989: 開水路流, 土木工学ハンドブック, 技報堂出版, 492-496.
- Honda, Y., M. Nishijima, K. Koizumi, Y. Ohta, K. Tamiya, T. Kawabata and T. Tsuyuki, 2006: A pre-operational variational data assimilation system for a nonhydrostatic model at the Japan Meteorological Agency: Formulation and preliminary results, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 3465-3475.
- 石田純一, 瀬川知則, 大森志郎, 2005: 新しいメソ数値予報モデル. 平成17年度数値予報研修テキスト, 14-32.
- Ishihara, Y. and S. Kobatake, 1979: Runoff model for flood forecasting, *Bull. Disas. Prev. Res. Inst.*, Kyoto Univ., **29**, 27-43.
- 石川宜広, 小泉 耕, 2002: メソ4次元変分法, 数値予報課報告, 別冊第48号, 37-59.
- Kawabata, T., H. Seko, K. Saito, T. Kuroda, K. Tamiya, T. Tsuyuki, Y. Honda and Y. Wakazuki, 2007: An assimilation and forecasting experiment of the Nerima heavy rainfall with a cloud resolving nonhydrostatic 4-dimensional variational data assimilation system, *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 225-276.
- 気象庁予報部, 2004: 全球モデル開発プロジェクト, 数値予報課報告, 別冊第50号, 142pp.
- 気象庁予報部, 2005: 全球モデル開発プロジェクト (II), 数値予報課報告, 別冊第51号, 117pp.
- 國次雅司, 2002: 気象庁における降水量の解析と短時間予報, 第6回水資源に関するシンポジウム論文集, 651-656.
- 倉本和正, 鉄賀博己, 東 寛和, 荒川雅生, 中山弘隆, 古川浩平, 2001: RBF ネットワークを用いた非線形がけ崩れ発生限界雨量線の設定に関する研究, *土木学会論文集*, **672/VI-50**, 117-132.
- 黒良龍太, 國次雅司, 辻村 豊, 牧原康隆, 2005: レーダー・アメダス解析雨量の概要, *気象学会春季大会予稿集*, C462.
- 牧原康隆, 2000: レーダーとアメダスの詳細解析に基づく降水短時間予報実況解析アルゴリズムの改善, *気象研究所技術報告*, **39**, 63-111.
- 三好建正, 2005: アンサンブルカルマンフィルタ, *天気*, **52**, 93-104.
- Saito, K., T. Kato, H. Eito and C. Muroi, 2001: Documentation of the Meteorological Research Institute/ Numerical Prediction Division unified nonhydrostatic model, *Technical Reports of the MRI*, **42**, 133pp.
- 斉藤和雄, 山田芳則, 藤田 司, 石田純一, 田中小緒里, 2004: 非静力学メソ数値予報モデル試験運用を開始, *NWPにゆーす*, **23-1**, 11pp.
- Saito, K., Y. Yamada, J. Ishida, Y. Kumagai, K. Aranami, S. Ohmori, R. Nagasawa, S. Kumagai, C. Muroi, T. Kato, H. Eito and Y. Yamazaki, 2006: The operational JMA nonhydrostatic model, *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 1257-1289.
- 斉藤和雄, 経田正幸, 山口宗彦, 2006: メソアンサンブル予報, *数値予報課報告・別冊第52号*, 66-79.
- 瀬古 弘, 小司禎教, 斉藤和雄, 國井 勝, 笹岡雅宏, 古本淳一, 青山雄一, 2005: 豪雨や短時間強雨をもたらした降水系の同化実験 (その2), *気象学会秋季大会予稿集*, P381.
- 杉浦伊織, 國次雅司, 辻村 豊, 牧原康隆, 2005: 気象庁降水ノウキャストの概要, *気象学会春季大会予稿集*, C463.

小司禎教, 國井 勝, 小泉 耕, 川畑拓矢, 瀬古 弘,
2005: 2004年6月30日, 静岡で発生した豪雨のGPS
データ同化・予測実験, 気象学会春季大会予稿集,
C256.
立原秀一, 岡田憲治, 板井秀泰, 牧原康隆, 2005: 気象庁

土壌雨量指数の概要, 気象学会春季大会予稿集,
B409.
田中信行, 西垣語人, 牧原康隆, 峯 宏太郎, 2005: 流出
雨量指数の概要, 気象学会春季大会予稿集, C464.