

気象レーダーを利用した短時間の降水・土砂災害予報と 気象業務改善の歩み

—2006年度藤原賞受賞記念講演—

牧 原 康 隆*

1. はじめに

このたび、「レーダー利用による短時間降水・土砂災害予報の技術開発」の業績により藤原賞を授与いただき、大変光栄に感じております。

私は、1980年に気象庁予報課勤務となって以来、機会を得て、気象レーダーを利用した気象予報の開発に従事してきました。この開発にあたってめざしてきたのは、「予報技術の改善を防災気象情報の高度化に生かす」ということです。

日本では、毎年のように、台風に伴う大雨や集中豪雨等の局地的に発生する大雨のため災害が繰り返されてきました。特に土砂災害は、大雨による死者の第一の要因となっています。気象庁は大雨・洪水警報をはじめとする防災気象情報を提供してこれらの減災に努めているところですが、降水実況の詳細な把握とその短時間予報は、大雨に関する情報として重要な役割になうものです。あわせて土砂災害等の発生のおそれが高い状況を把握し予想することは、気象庁の重要な責務のひとつとなっております。

このような状況の中で、諸先輩、同僚を始め、皆様のご指導とご協力のもと、「レーダー・アメダス解析雨量」、「降水短時間予報」などの実用化をすすめてきました。また、これらを利用した「土壌雨量指数」を開発して、土砂災害発生に対する予測手法を実用化し、注警報への適用を行ってきました。

毎年発生する災害に歯がゆい思いをしていたため

か、改善のスピードは遅々たるものと思っていましたが、25年前にはレーダーエコーを観測者がスケッチして電話ファックスで送っていたことを考えると、大きな進歩を実感しています。放送機関やホームページ等を通して、防災機関だけでなく、一般の方が、レーダー・アメダス解析雨量、降水短時間予報などをほぼリアルタイムで目にすることができるようになり、集中豪雨のときは、「過去数年で最も土砂災害の危険が高まっています」という呼びかけを耳にするようになりました。時には市町村名を付して放送されることもあります。また、一部の県では国土交通省砂防部、都道府県との協力のもと、土砂災害警戒情報も利用できるようになっています。

ここでは、これまで私が携わってきた気象レーダーを利用した降水予報および土砂災害の危険度予想の技術開発とそれに伴う気象業務の歩みについて、若干のエピソードを交えてご紹介いたします。

気象技術の改善についてはご存知の方も多いと思いますが、関連した業務の改善についても、この機会に理解を深めていただければと思います。

大雨による災害の軽減には、基礎的研究はもとより、私が携ってきた実用的な面からも、まだまだたくさん課題があります。開発を1つ行えば、また新たな課題が見えてきます。今日の話が、気象学の進歩とともに、常にその技術を取り込みながら、注意報警報をはじめとする防災気象情報その他の改善に携わる人の参考になれば幸いです。

2. 気象レーダーと防災気象情報との最初の関わり

私は、1980年に気象庁予報課勤務となって、気象レーダーに関わる開発作業をはじめましたが、気象庁

* 気象庁予報部。

—2006年9月6日受領—

—2006年11月20日受理—

に1976年に入ってから最初に過ぎた4年の間に、この仕事に意欲を持って取り組みたいという気持ちを持つに至るさまざまな経験をしました。

最初の1年間は鹿児島地方気象台観測課に勤務しました。アメダスが全国に展開されている頃でした(4要素のアメダスの整備期間は1974年から1979年)。勤務を始めて約3か月経った6月23日から25日にかけて大雨が降り、鹿児島県で32名の死者が出ました。大半が土砂災害の犠牲者です。鹿児島地方気象台から2kmも離れていない鹿児島大学のそばのシラスのがけが崩れ、民間の寮にいた学生が犠牲になったことが印象に残っています。鹿児島市の日降水量は6月23日112mm、24日154mm、25日166mmでした。土砂災害は25日に多発しています。先行雨量の影響が大きい事例でしたが、当時は日雨量12mmの差で、24日より25日に災害が多発したというような勝手な思い込みをしていたように思います。

次の年から3年間は、福岡県と佐賀県の県境に位置する背振山頂付近の福岡レーダーに勤務しました。気象レーダーの受信信号をスウィープしながら映し出す円形のブラウン管(CRT)の画面の上に、第1図の

透明のスケッチシートを載せ、ダーマトグラフ鉛筆でエコー域を写し、強さ、エコー頂高度を記入、さらに、そのスケッチをファックス用紙にトレースして、各気象台に送画していました。防災機関には同時送画していましたが、これらの情報が、直接一般の方や消防団など防災活動を行っている人の目に触れることはほとんどありませんでした。

梅雨時期には、レーダー観測を行いながら、アメダスで捉えられない大雨が度々発生していることを実感しました。また、スケッチシートに豪雨域を書きとめ、ファックスを送った数時間後に、テレビで、その豪雨域で土砂災害が発生した放送を見るという経験もしました。土砂災害をまさに起こそうとしている豪雨を監視していたわけですが、そこに住む人にその危機感を、迅速に、的確に伝えられないもどかしさを感じたものです。

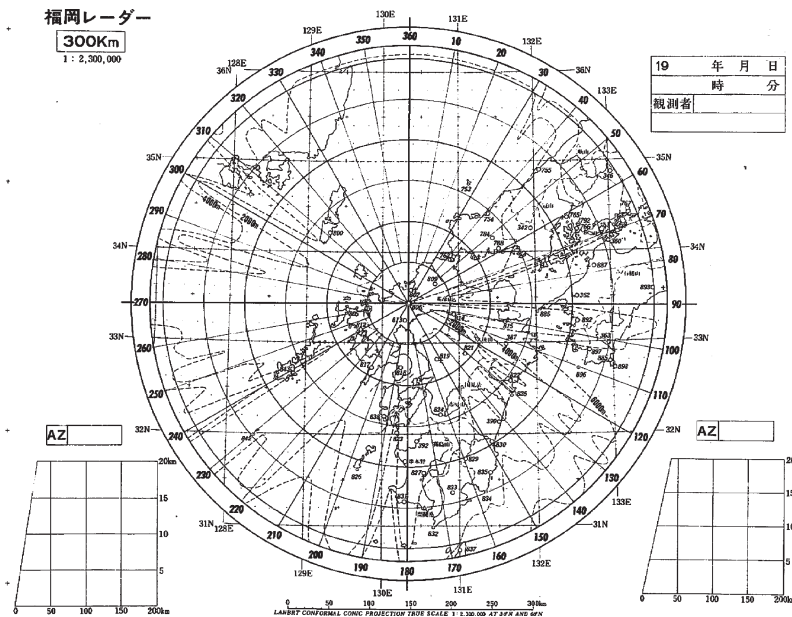
このような経験を経てきたことから、気象庁予報課に勤務となり、気象レーダーのデジタル化および高度利用のための開発に加わることができたことを、大変ありがたく感じております。

3. レーダー・アメダス解析雨量の開発

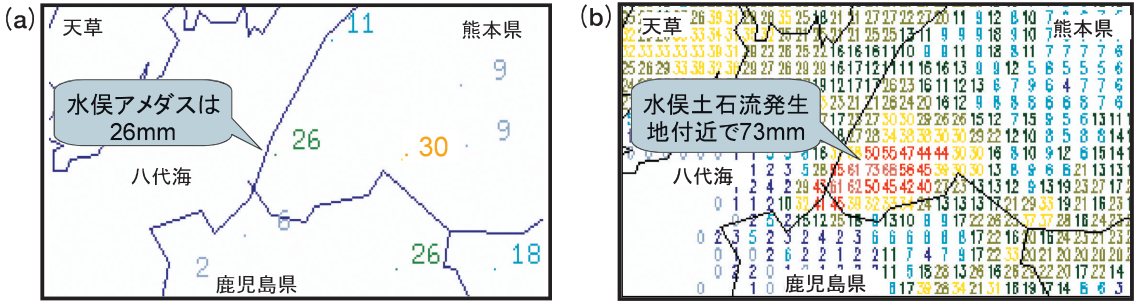
3.1 レーダー・アメダス解析雨量と気象業務との関わり

「レーダー・アメダス解析雨量」(以降本文では解析雨量と略す)は、従来の雨量計網だけでは見逃されることの多かった局地的大雨を的確に把握するために開発されました。解析雨量は、気象レーダーによって推定された雨量(レーダー雨量)をアメダス雨量で較正することにより作られた1時間降雨量分布です。

第2図は、2003年7月20日05時、水俣市で大規模な土石流が発生し、19名がなくなったときの2.5kmメッシュの解析雨量です。第2図aの範囲にはアメ



第1図 福岡レーダーのスケッチシート。透明のシートに、福岡レーダーの300kmレンジのCRT表示の縮尺に合わせて図の情報が書き込まれている。CRTの監視画面に載せて、降水エコーをダーマトグラフで書き写していた。



第2図 水俣市の大規模土石流発生時の雨量分布。(a) アメダス雨量。2003年7月20日5時(日本時)。図中のアメダス観測地点は9箇所。土石流で19名が犠牲になった。(b) レーダー・アメダス解析雨量(2.5 kmメッシュ)。2003年7月20日5時(日本時)。図中のメッシュ数は493。水俣アメダスの5 km 東に73 mm が解析されており、この付近で土石流が発生している。

ダスが9地点あり、水俣市付近の最大是水俣アメダスの26 mmです。同じ範囲の第2図bの解析雨量では、アメダスの約50倍の密度で1時間降水量の情報が得られます。それによると、水俣アメダスの5 km 東、ちょうど土石流が発生した付近で、アメダスより約50 mm 強い、73 mm を解析していることがわかります。アメダスで20 mm 以上の地点は3つあり、第2図a だけからは、20 mm 以上の強雨域はまとまっているように見えますが、解析雨量によると、熊本県と鹿児島県の強雨の間には比較的雨の弱い地域があることがわかります。

解析雨量の具体的な精度については後述しますが、現在、解析雨量は、大雨・洪水注警報や記録的短時間大雨情報の基準として利用されており、この図からもわかるように、局地的な集中豪雨の把握に十分であり、集中豪雨の見逃しはまずなくなったと考えています。

詳細な降水状況の把握には、レーダーエコーによる10分毎の監視も不可欠ですが、エコーの反射強度から推定される降水強度は誤差が大きいことが従来から指摘されてきました。この降水強度について、解析雨量算出時の較正值分布を利用して較正する手法を確立しました。この降水強度は、そのまま降水ナウキャストの初期値としても使われており、降水強度分布(テレビやホームページに表示されるレーダー画像)の精度は実用的な程度まで向上しています(杉浦ほか, 2005)。

このほか、解析雨量は、数値予報の初期値解析にも利用されるなど、各種の気象予想に重要な役割を果たしています。

3.2 レーダー・アメダス解析雨量の開発の歩み

気象庁は、国内気象監視システム(気象庁総務部企画課, 1976) 構想の元、気象レーダーのデジタル化と関連情報の高度化を進めました(牧原ほか, 1991)。まず、1982年に、福井、名古屋レーダーのデジタル化を行い、スケッチ図に代わって、デジタル化されたレーダーデータから自動的に作成されるレーダーエコー合成図のファックス配信を開始しました。1983年には、デジタル化されたレーダーデータとアメダス雨量に基づく「レーダー・アメダス雨量合成図」のファックス配信を、中部日本を対象に開始しました。その後、レーダーのデジタル化にあわせて東日本、西日本の合成図の配信が始まりました(高瀬ほか, 1985)。

1988年には、降水短時間予報業務の開始にあわせて、表示座標系を斜軸ランベルト座標から経緯度座標へ変更し名称を「レーダー・アメダス合成図」としました(Takase *et al.*, 1988)。そして、1994年に「レーダー・アメダス解析雨量」と改称して運用を開始しました。「レーダー・アメダス解析雨量」の「レーダー・アメダス合成図」との違いは、精度の向上と評価の確立により、レーダー・アメダス解析雨量を大雨・洪水の注意警報や、記録的短時間大雨情報の基準として使用することとしたこと、言い換えると名称から「図」をはずして、それぞれのメッシュ値の意味づけを明確にしたことです。その後、2001年には5 km メッシュから2.5 km メッシュに詳細化し、2006年には国土数値情報の3次メッシュ(経度45秒、緯度30秒)と同じ約1 km メッシュで提供を開始しました。

ところで、5 km メッシュの解析雨量の全国展開が完成した頃に、より細かいメッシュの降水量の必要性を実感した出来事がありましたので紹介します（牧原・国次，1999）。1998年8月29日12時、東京23区の西部で局地的な大雨が降りました（第3図）。図の中心付近の閉じた曲線はJR山手線です。このとき、気象庁は解析雨量を利用して「記録的短時間大雨情報」を発表しました。2.5 km メッシュのレーダーエコーを見ると、最も強い降水の場所は記号「A」のある池袋駅の南西付近ですが、当時解析雨量はレーダーエコーの4個分に当たる5 km メッシュで発表しており、その代表的な地域名は中心付近の「新宿」でした。このため、気象庁の発表した「記録的短時間大雨情報」の内容は、「新宿区付近で約90 mmの記録的大雨」でした。都心の記録的大雨ということで、NHKはすぐに「新宿駅」付近を中継しました。しかし、図中の東京都が設置している雨量計の観測値が示すように、新宿区役所では7 mmしか降っていませんでした。その後の報道機関の反応はご想像にお任せすることにします。数日後、私は、1人でレーダーエコーが強かった付近を聞き取りに歩き回り、その結果、池袋西口から数百メートルの南池袋付近で浸水害が発生し

ていたことがわかりました。被災者の不幸を喜ぶことはできませんが、もっと細かな資料の提供に十分な価値があることが確認でき、ホッとした事を鮮明に覚えています。

3.3 レーダー・アメダス解析雨量処理の概要と特徴

解析雨量の具体的な処理については、牧原（2000 a）などに譲り、ここでは特徴となる処理について概要を述べます。

解析雨量の前身であるレーダー・アメダス雨量合成図開発の頃は、気象レーダーと地上の雨量計とを組み合わせることで詳細で正確な雨量分布を作成するアイデアについて、各国でさかんに研究が行われていましたが（例えば、Austin, 1987；Brandes, 1975；Colier *et al.*, 1975）、解析雨量の基本的な考え方、すなわち、気象レーダーの反射強度に基づくレーダー雨量を地上雨量計で補正するという手法は、当時から実用的な手法のひとつと考えられていました。

解析雨量の解析手法のイメージは、次のようなものです（第4図参照）。

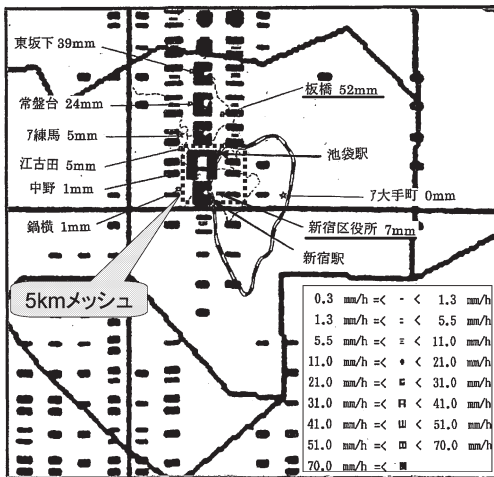
「アメダスのあるメッシュでは、アメダス雨量が再現できるように、

アメダスのないメッシュでは、レーダー雨量の強弱分布が再現できるように」

解析雨量で、レーダー雨量の代表的な誤差の要因として処理を行っているのは次の項目です。

- ① 複数のレーダーのレーダー雨量を合成すると、レーダーの探知範囲の境で不整合が起きること
- ② 降水からのレーダー電波の反射強度 Z と降水強度 R との関係、すなわち Z - R 関係[†]が最適化されていないこと
- ③ 強雨による電波の減衰
- ④ 雨量観測値が直上のレーダー観測値と必ずしも一対一に対応しないこと。

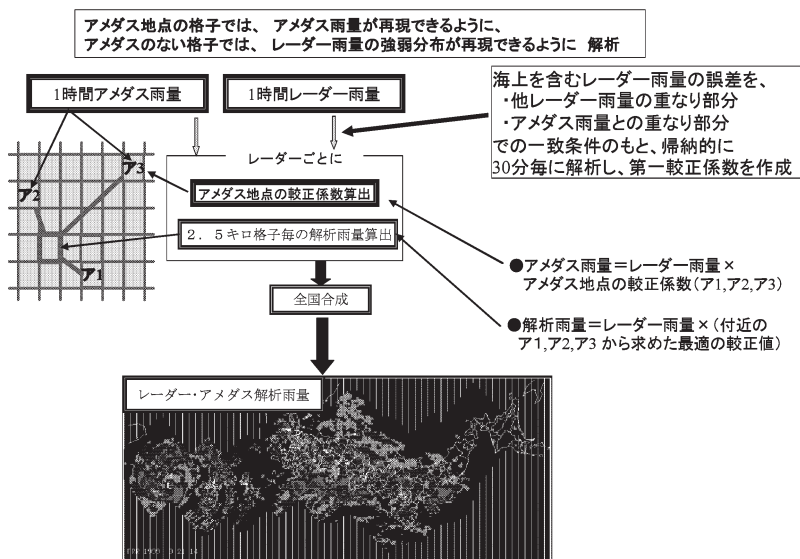
解析雨量のアルゴリズムでは、これらのレーダー雨量の誤差要因に対応してまずモデル的な修正パラメータを作成し、次に具体的な修正パラメータの数値をアメダスの実況値を参考にして決定しています。実際には、これらの誤差について次のように対処しています。



第3図 2.5 km メッシュの東京レーダー雨量分布（強度未補正）。1998年8月29日12時（日本時）。図中の数字は東京都の雨量計観測値。5 km メッシュの代表地点を使い「新宿で記録的短時間大雨」と発表した。新宿区役所では7 mmしか降っていない。東京レーダーでは、池袋の南西メッシュが最大値を示している。

[†] 降水からのレーダー電波の反射強度 Z と降水強度 R との統計的關係。係数 B と指数 β で次式で表される。 $Z=BR^\beta$

レーダー・アメダス解析処理



第4図 レーダー・アメダス解析雨量処理の概要。

てのレーダー雨量に適用すると、特に対流性の強いレーダー雨量に対して、観測された修正係数よりもかなり大きな修正係数が設定されることがあり、その結果、極端に大きな雨量が解析されます。大雨に対して防災体制を促す立場からは、過大評価はできるだけ避ける必要があるため、この点を考慮しながらレーダー雨量の修正を行っています。大雑把なイメージとしては、 $B-\beta$ の係数の修正を部分的には行うが、修正係数の上限と下限は観測結果から得られた数値を超えない、というようなものです。

① レーダー合成時の不連続を低減するアルゴリズム (Makihara, 1996) では、Z-R 関係の係数とレーダーエコーを観測した高度 (レーダー観測高度^{††}) に依存する係数を次のような条件をできるだけ満たすように最小自乗法で算出します。

- ・「レーダー雨量同士が重なっている部分」ではそれらが互いに一致する
- ・「アメダス雨量と重なっている部分」では、レーダー雨量とアメダス雨量が一致する。

このアルゴリズムにより、レーダー探知範囲の境付近の解析雨量の不連続が低減されるとともに、海上から接近する大雨に対する予報精度が向上しました。

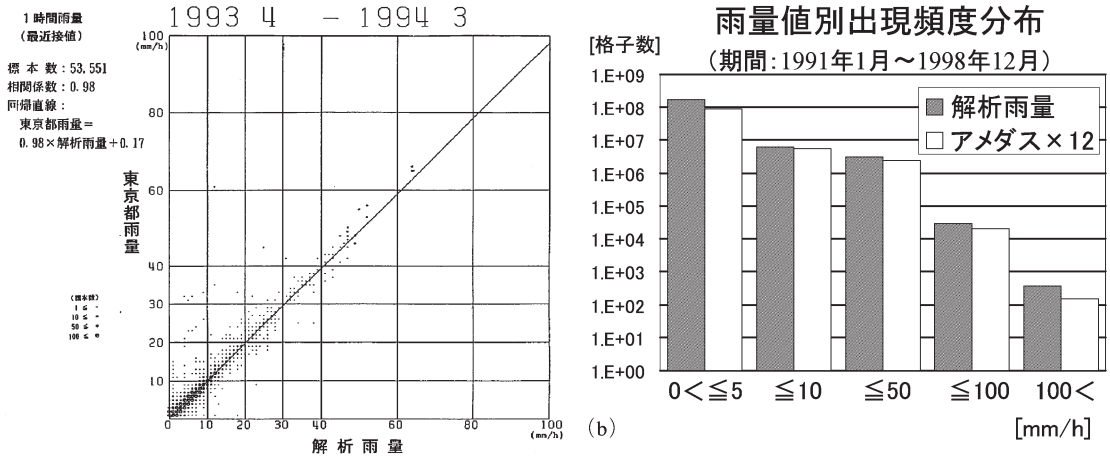
② 雨の性質の違いによる $B-\beta$ の変化については、「レーダー雨量を“係数”によって修正する」視点から見ると、雨量強度の違いに応じて修正係数が変化することへの対応ということになります。

係数 B と指数 β の両者を、観測された多数の修正係数 (レーダー雨量のアメダス雨量に対する比) から求めて、「レーダー雨量を修正する」研究もありますが、指数値である β を変更し、そのまま全

③ 電波が降雨により減衰した場合の処理については、過大修正とならないように配慮しました。具体的には、降雨減衰を受けているアメダスのあるメッシュでは、減衰に関する正確な修正係数が求められますので、アメダスと同じ程度の減衰を受けているところでは、アメダスのあるメッシュと同じ修正係数 (降雨減衰に関する修正係数) に近づくように、対象メッシュとアメダスのあるメッシュとで、減衰率に関する重み付平均により、修正係数を求めています。やはり修正係数に上限と下限を設けることで、過大修正を避ける設計になっています。

④ 雨量観測値が直上のレーダー観測値と必ずしも一対一に対応しないことによる誤差の較正は、特に対流性の降水に対する精度を確保する上で重要な課題です。上空の風のため、レーダー雨量は真下の雨量計に達しない場合がほとんどです。さらに、降水の空間分布が様でない場合、雨量計の位置が対応メッシュの真ん中か端かでもレーダー雨量との対応が変わることが考えられます。解析雨量では、このような実態を考慮して、修正係数を最初に決めておくのではなく、「修正係数の取りうる値の範囲」を最初に決めることにして処理を行うことにしました。取りうる値の範囲は、上空の風の影響を考慮して、雨量計のあるメッシュとその周

^{††} レーダーによる雨量観測では、レーダーからの距離が離れるほどより上空の雨の分布を観測するので、その高度を考慮した修正も必要である。



第5図 (a) 5 km メッシュのレーダー・アメダス解析雨量と東京都雨量計観測値との対応。東京都雨量計は約 5 km 四方に 1 箇所配置。期間は1993年4月～1994年3月。雨量計のメッシュとその1つ隣のメッシュでの最近接値を比較している。(b) 5 km メッシュのレーダー・アメダス解析雨量 (陸上) とアメダス雨量の出現頻度の比較。期間は1991年1月～1998年12月。データの密度を一致させるため、アメダス雨量の頻度を約12倍 (=陸上の解析雨量の格子数/アメダスの地点数={380000 km²/25 km²}/1317地点) している。

辺のレーダー雨量の最大値と最小値の幅を持つというものです。さらに、そのレーダー雨量の値の広がりに応じて、観測結果の、修正係数に対する影響の重みを変化することにしました。観測の信頼度に応じて修正の重みを変更するわけです。複数地点、複数時刻から得られる観測結果、および過去の統計的な結果をもとに、最終的な雨量計とレーダー雨量との対応関係を決定します。この処理によって、対流性降水が不自然に過剰補正されることがなくなり、レーダー雨量の強弱の分布を維持しながら修正が行われるようになりました。

3.4 レーダー・アメダス解析雨量の精度

ここでは、5 km メッシュで作成された解析雨量の精度について紹介します。詳細は、Makihara *et al.* (1996)、黒良ほか (2005) などを参照してください。第5図 a は、約 5 km 四方に 1 箇所の平均密度で設置されている東京都の雨量計との比較です。この時点では、東京都の雨量計は解析雨量に用いられていません。雨量計観測値と、雨量計が設置されているメッシュまたはその1つ隣の解析雨量で最も近い値とを比較しています。同じメッシュだけで比較していないのは、3.3.④の理由からです。この他に、強度別の雨量の出現頻度をアメダスと解析雨量とで比較しています (第5図 b)。これらから、解析雨量は、アメダスとほぼ同じ出現頻度の特性を持ち、1メッシュの位置

誤差を考慮すると、雨量計の観測値とほぼ同じ数値を再現していることがわかります。

4. 降水短時間予報の開発

4.1 降水短時間予報と気象業務との関わり

降水短時間予報は、降水の詳細な実況に基づく目先の予報として、大雨や洪水の注警報に利用されています。特に、注警報の基準になっている1時間降水量を予想の対象としていることが降水短時間予報の特徴のひとつです。

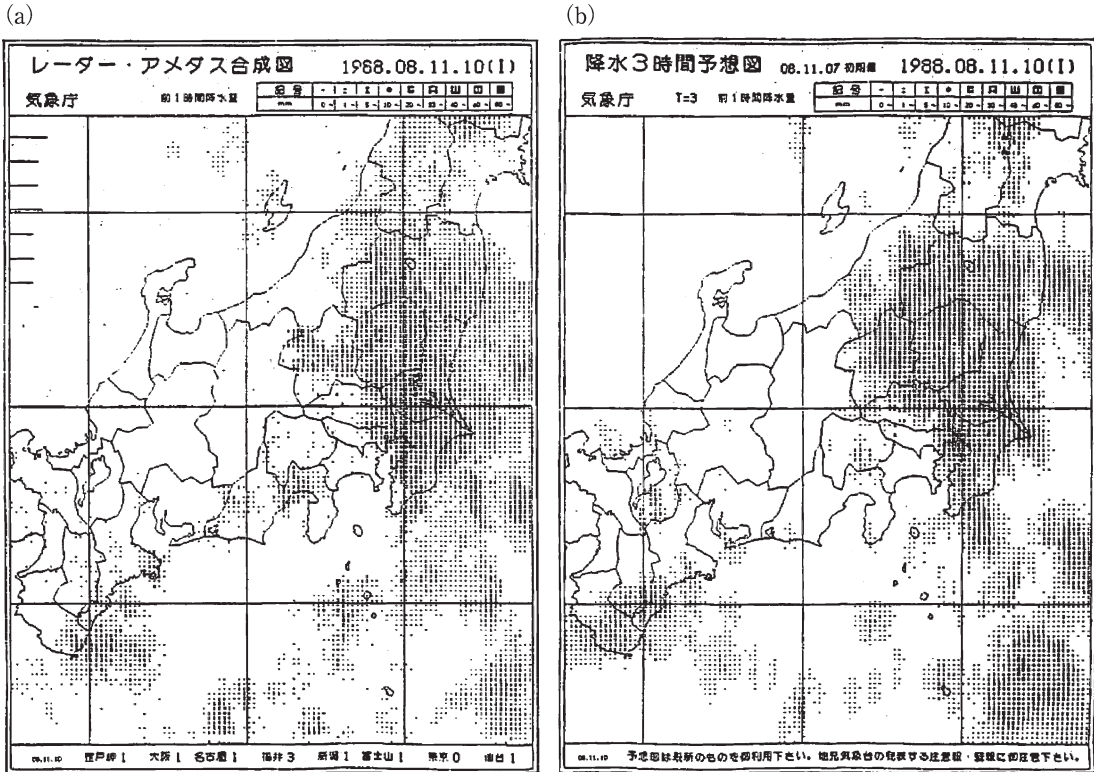
降水量予想値は、土壌雨量指数、土砂災害警戒情報、あるいは指定河川洪水予報の予想値の計算にも利用されており、土砂災害、洪水災害の軽減に寄与しています。

また、降水短時間予報で使用される移動情報は、降水ナウキャスト (杉浦ほか, 2005) における降水域の移動予測にも使われています。

4.2 降水短時間予報の開発の歩み

レーダーエコーの移動を外挿して目先数時間の降水分布を予測する計画はレーダー設置当初からあり、実用化に向けて開発や実験が行われてきました (例えば、立平・牧野, 1974; 立平ほか, 1976; 立平, 1984; 竹村, 1986; Takemura *et al.*, 1987)。

急峻で複雑な地形のため大きな課題であった降水の移動や盛衰におよぼす地形の影響を考慮したアルゴリ



第6図 レーダー・アメダス合成図と降水3時間予想図（ファックス配信図）。(a) 1988年8月11日10時（日本時）のレーダー・アメダス合成図，(b) 3時間前の7時を初期値とする10時の3時間予想図。

ズムの開発のめどが立ち、大型計算機の資源が整った1988年3月、降水短時間予報業務が正式に開始され、5 km メッシュのレーダー・アメダス合成図、降水3時間予想図が配信されるようになりました（第6図）。

その後、2001年には、メソスケール数値予報(MSM)の予想値との合成処理を行うことにより、降水6時間予報の運用を開始しました。

また、2006年には、国土数値情報との相互利用を促進するため、メッシュの大きさを5 km から約1 km (国土数値情報の3次メッシュ)へ変更しています。

4.3 降水短時間予報アルゴリズムの概要と特徴

降水短時間予報は、気象レーダーや解析雨量から得られた過去数時間の降水域の移動や発達・衰弱の傾向を補外する「実況補外型予想」（気象庁予報部予報課，1991）と、「メソスケール数値予報(MSM)の降水予想」を合成することにより、6時間先まで作成されます（國次，2002）。ここでは主に、私が関わってきた、目先3時間先までの精度の高い「実況補外型予想」を中心に概要と特徴を説明します。

気象レーダーを使用した降水予測は、世界各国で実用化されていますが、気象庁が提供している降水短時間予報の大きな特徴は、1時間降水量を予想していること、降水の移動や発達・衰弱処理について、地形の影響を考慮したアルゴリズムを導入していること、数値予報の降水量予想との合成により6時間先まで予想していること、などです。

1時間降水量を対象としている気象レーダーによる予報システムは世界では少数です。その背景としては、①気象レーダーを使用した実況降水量分布として、解析雨量のような広範囲のリアルタイム雨量計の運用と解析例が少ないこと、②災害対策の第一目標がそれぞれの国においてことなること、具体的には日本では頻発する土砂災害や洪水災害に深く関わる1時間降水量の予報への期待が大きいが、たとえば米国では竜巻や雷による災害対策に最優先で取り組んでいること、などが考えられます。

「実況補外型予想」には、プロセスA「降水域の移動予測（パターンマッチング）」とプロセスB「地形

による降水の発達・衰弱]の2つのプロセスがあり、プロセスC「メソ数値予報MSMとのマージ」により予報ができあがります(第7図参照)。このうち、プロセスAの降水域の移動については、これまでにさまざまな研究が行われてきています。降水短時間予報では、もっとも一般的な、精度も高いパターンマッチング法を使用しています。ただ、アメリカのトルネード等の追跡と比較して予想時間が長いので、マッチングには比較する降水分布の時刻差を最大3時間までとっています。また、対象は降水強度分布でなく解析雨量分布です。比較する時刻の差が大きいため、個々の降水のセルでなく、クラスターの移動を追跡しています。じょう乱のライフタイムを考慮すると、移動速度を求める考え方としては妥当ですが、パターンの変形が大きいため、ミスマッチングの可能性が高くなるのが難点です。このため、以下のような処理を行っています(第7図参照)。

- ① 100 km メッシュ(全般)と20 km メッシュ(強雨)とで移動速度を算出する。

- ② 地形による停滞性降水の影響を除くため降水量の他、降水量の時間変化量も計算の対象としている。
- ③ 1 メッシュに20候補のマッチングを求め、その中から時間的・空間的連続性を考慮した cost 関数を設定し、cost の最小値として移動速度を決定する。
- ④ 強雨は持続時間が短いため、 $t=0$ h, -0.5 h, -1 h の分布を使用し、一般の移動速度から大きく異ならない条件下で推定する。
- ⑤ MSM の700 hPa 予想風を、新たに発生した降水など、パターンマッチングができない場合等に使用する。

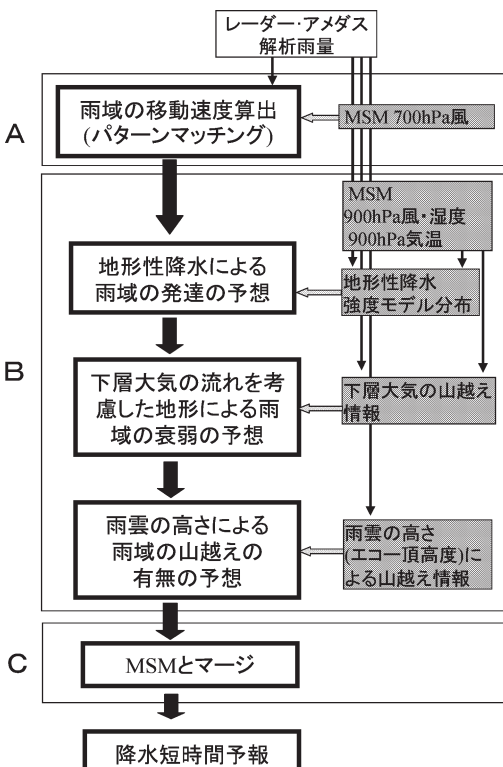
プロセスBの降水の発達・衰弱は地形に関して行っています。降水の発達については、Seeder-Feeder Model (Browning and Hill, 1981) に基づいて計算しています。なお、実際の地形発達量を求め、あらかじめMSMの900 hPaの風・湿度・気温の予想値に基づいてモデル計算した発達量を実際の発達量で逐次修正することにより、地形の影響による発達が新たに予想される地域での精度の向上を図っています。

衰弱については、降水域と大気下層風(900 hPaの予想風)の両者が山岳を越える場合に、実況における衰弱量を元に帰納的に減衰率を算出しています。また、冬の季節風の吹き出しに伴う降雪のように、降水エコーの頂高度が低い場合は山岳を越えることができないため、エコー頂高度と衰弱の関係についても、実際の消滅状況を元に、帰納的に算出しています。

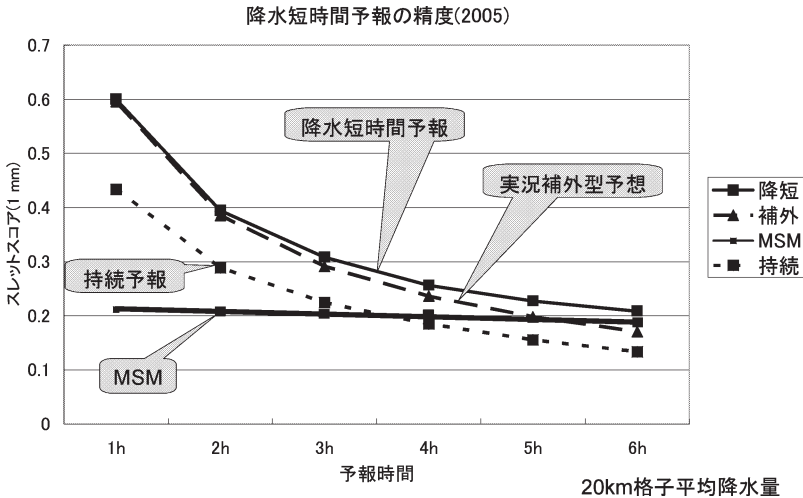
プロセスCの実況補外型予想とMSM降水量予想との結合(マージ)は、3時間前のそれぞれの予想の精度を毎30分の予想計算の度に比較して、それぞれの予想雨量を両者の精度に応じて重み付平均することにより最終的な予想雨量としています。この処理のおかげで、最終的な製品である降水短時間予報の統計的な精度は、実況補外予測、MSM降水予測それぞれの予想精度よりも高くなっています。

4.4 降水短時間予報の精度

2005年の降水短時間予報、実況補外型予想、MSM降水量予想、持続予報(現在の状態がそのまま継続すると仮定する予報)それぞれの精度を第8図に示します。20 km メッシュの1 mm 以上の平均雨量を対象にしたスレツスコアです。スレツスコアは、一定期間に発表した多数の予報を集計したときに、あるしきい値(ここでは1 mm)以上の予報について、「有り



第7図 降水短時間予報処理の概要。



第 8 図 降水短時間予報の精度。20 km メッシュにおける 1 mm 以上の平均雨量を対象とした降水短時間予報、実況補外型予想、MSM、持続予報のスレットスコア。

予報で当たり]、「有り予報ではずれ]、「なし予報ではずれ]の総数に対する「有り予報で当たり」の割合をさします。

降水短時間予報は、いずれの時間においても持続予報を0.1から0.15程度上回っており、予報としての価値が明確です。

目先4時間先までは実況補外型の予想の精度が高くなっていますが、5時間先以降は、MSM降水予想の精度が高くなります。1時間先の精度は実況補外型予想、6時間先の精度はMSM降水量予想とほとんど同じです。降水短時間予報は、降水のパターンや季節によって異なる精度の違いを、予想時刻ごとに比較して合成していることから、特に、4・5時間は、2つのどちらの予想よりも高い精度になっていることが図に表れています。なお、10 mm以上のやや強い降水についても同様の傾向がありますが、降水の局地性が高いことから、実況補外型予想の精度が目先やや良くなります(図略)。

5. 土砂災害の軽減に向けた防災気象情報の開発

5.1 土砂災害と気象業務との関わり

気象庁は気象業務法および気象業務施行令の中で「地面現象警報」の発表が義務づけられており、現在は、大雨警報の中で土砂災害に対する警戒を呼びかけています。

土砂災害の発生が土壌の水分量に密接に関係してい

ることから導入した「土壌雨量指数」は、およそ2週間前までの先行雨量を考慮したモデル土壌水分量で、レーダー・アメダス解析雨量および降水短時間予報を入力値として30分ごとに算出されています。土砂災害に関わる指標の開発は、降水短時間予報が業務されて間もなく始まりましたが(牧原・平沢1992)、解析雨量のアーカイブを活用することで実用化され、2000年から大雨警報の際に利用されるようになりました(牧原, 2000b)。現在、2004年から運用されている「過

去数年で最も土砂災害の恐れが高い」という見出しを付して発表される「大雨警報の重要変更!」(!マークは、注・警報や気象情報の中で、重要変更の場合にのみ使用し、利用者の注意を喚起するため、また電文処理を容易にするために使用しています)や、2005年から一部の府県で運用が始まった「土砂災害警戒情報」に活用されています。

5.2 土壌雨量指数の概要と特徴

土砂災害の発生については、従来、短時間雨量および先行雨量を含む長時間の雨量を使用して推定していました。気象庁では、長時間の雨量として24時間雨量を注警報の基準として使用していますが、土砂災害に関係の深い土壌の水分量を推定する場合は、少なくとも数週間の先行雨量が必要です。また雨の強さや断続時間の長さなどの雨の降り方によって土砂災害に対する影響が変わってきます。これらを客観的に評価するため、土壌表層のモデル水分量である「土壌雨量指数」を導入しました。

一方、斜面崩壊には「免疫性」があることが認められています。すなわち、斜面崩壊は、斜面表層の土壌が、より深い固い層の上をすべることで発生するケースが多く、一度崩壊すると、表層土がなくなり崩壊しにくくなるというものです。すぐにはピンと来ないかもしれませんが、例えば、年間の降水量3000 mmの四国の太平洋側と年間降水量1200 mm程度の四国の瀬戸内側では、大雨警報の24時間降水量基準がそれぞれ

400 mm, 160 mm と大きく異なっています。これは、後者の地域のほうが斜面崩壊の免疫性が低い、すなわち弱い雨で土砂災害が発生しやすいことを表しています。いつも大雨の降るところでは、崩れるがけの土がなくなっているため、同じような大雨が降っても再び土砂災害が発生しないが、普段大雨の降らないところでは、それほど強い雨でなくともがけ崩れが起こりやすいというものです。これらの原理を具体化した成果の1つが、「土壌雨量指数」の履歴順位による、土砂災害の危険性に関する呼びかけです。まず、「レーダー・アメダス解析雨量」や「降水短時間予報」を入力として、流出解析で実績のあるタンクモデル (Ishihara and Kobatake, 1979) を全国 5 km メッシュごとに設定し、モデル的な土壌表層の水分量として「土壌雨量指数」を算出します。さらに、「斜面崩壊の免疫性」を考慮して土砂災害発生危険度に対する指標を示すため、5 km メッシュごとに、実況や予想の土壌雨量指数値を過去10年間の土壌雨量指数値と比較することにしました。実際の土壌水分量は、「土壌雨量指数」に一致しない地点も少なくありませんが、過去の数値と比較し順位づけすることで、土砂災害の発生指標としての精度を確保しています。

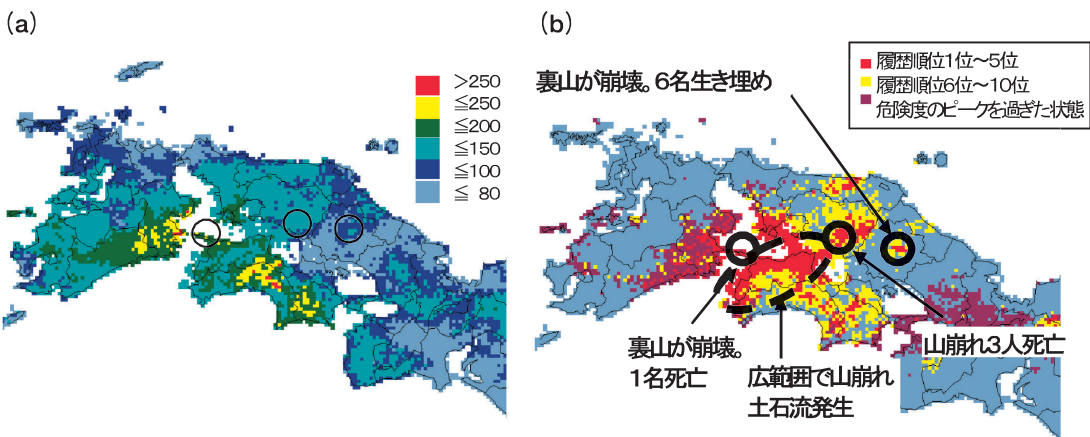
この方法により過去10年で1位の記録を土壌雨量指数の現況や目先の予想が上回っている場合、「過去数年で最も土砂災害の危険性が高くなっている」と呼びかけています。第9図に一例を示します。平成10年10

月17日、台風第9810号による大雨の時の状況です。第9図aの土壌雨量指数の数値は、大雨の降った四国の太平洋岸、大分県東部、宮崎県北部で大きな値になっています。一方、第9図bの土壌雨量指数の順位(以下履歴順位と略す)は、瀬戸内海で大きくなっています。岡山県、広島県で死者を伴う土砂災害(図中の黒丸で囲まれたところ)が発生した地域では、土壌雨量指数の数値自体は他の地域と比較してそれほど大きくありませんが、いずれも履歴順位1位を示していました。

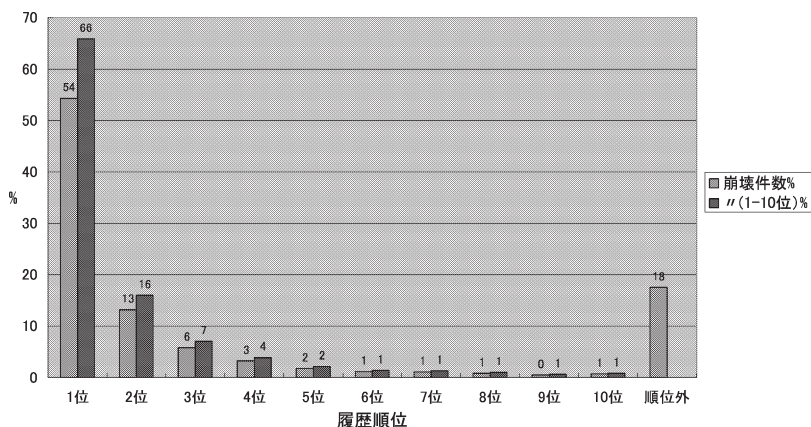
5.3 土壌雨量指数の精度

土壌雨量指数の導入の目的は土砂災害の発生の目安です。ここで精度とは、指数の履歴順位が特定のしきい値以上になった場合の土砂災害の発生状況をさすことにします。

業務開始に先立った調査によると、第10図が示すように、1991年から1998年の間に発生した約5万件の全国の土砂災害の発生件数うち、およそ六割が履歴1位で発生しています。大雨警報は平均すると各地域で毎年5回以上発表していますが、履歴8位、すなわち、毎年一回程度記録する土壌雨量指数値の時に発生する土砂災害(約1%)と比較して、履歴1位では、その約60倍の土砂災害が発生しており、土砂災害発生の危険性が非常に高まっていることがわかります(この調査の履歴1位は過去8年に1回記録される数値ですが、現在の運用は過去10年に1回で実施しており、60



第9図 (a) 土壌雨量指数値。1998年10月17日21時(日本時)。丸で囲った地域は、土砂災害で死者が出た地域。指数値は四国の太平洋側、大分県東部などで大きく、丸で囲った地域は特に大きな値ではない。(b) 土壌雨量指数の履歴順位。1998年10月17日21時(日本時)。丸で囲った地域は、土砂災害で死者が出た地域。破線で囲った地域は広範囲に斜面崩壊、土石流が発生した地域。履歴順位の1～5位は四国の瀬戸内海側に広く分布している。



第10図 土壌雨量指数の履歴順位と崩壊件数。対象は1991年～1998年の全54399箇所の崩壊（晴天持続時の崩壊を含む）。

倍以上の危険性があると推定されます）。

6. おわりに

気象庁では、自然災害の中で大きな割合を占めている降水による災害の軽減のため、気象レーダーを活用した気象予報の改善および防災気象情報の高度化が進められてきました。定性的な利用から始まった気象レーダーは、現在、レーダー・アメダス解析雨量、降水短時間予報、降水ナウキャストなどにより、定量的にリアルタイムに気象予報に利用され、土壌雨量指数などの実用化とあわせ、防災気象情報の高度化に貢献するようになりました。

ただ、大雨による災害の軽減には、基礎的研究はもとより、私が携ってきた実用的な面からも、まだまだたくさんの課題があります。

気象レーダーについては、降水や突風に関する防災気象情報の高度化のための、ドップラーレーダーの活用が喫緊の課題です。

気象業務の改善の当面の課題のうち、土砂災害については土砂災害警戒情報の全国展開があげられます。また、洪水については、従来の降水量より洪水災害との対応の良い指標の、警報の基準への導入に向け検討を進めています。土砂災害警戒情報の指標は、1時間降水量と土壌雨量指数の組み合わせであり、危険度の判定は、両者の発生頻度と災害の発生頻度を考慮した二次曲面 Radial Basis Function (RBF) ネットワーク値です。洪水警報の高度化に際して検討されている指標（仮称流域雨量指数）は、解析雨量・降水短時間予報に加え国土数値情報の1つである地形や地質、都

市化率を考慮した、降水量と流出に関する指標です（田中ほか、2005）。予報官が特定観測地点の風や気温などの観測実況をもとに大雨を予想していた時代から、数値予報モデルを活用するようになって、ずいぶん経過しましたが、防災気象情報の近代化は今まさに進行しているところです。

気象学そのものの発展は大変喜ばしいことですが、その気象学の成果を活用して災害を予測する技術につ

いても同様に発展し、車の両輪のように、それぞれがバランスよく連携しあって、自然災害の軽減につながっていくことを切に願っております。

謝 辞

このたび名誉ある藤原賞を授与いただくことができたのは、私がこの分野に従事するきっかけを下さり、多岐にわたってご指導いただいた立平会員をはじめ、共に仕事をしてきた気象庁の予報課、数値予報課、観測課その他たくさんの方々支えと協力のおかげと、大変感謝いたしております。

また、気象学の成果を社会に還元する分野に対する業績を評価いただいたことは、今後この道に進んでいる多数の方への励みにもなるものと喜んでおります。

この受賞は、私に対して、これまでの足跡に甘んずることなく、気象予報技術の改善と気象災害の一層の軽減に努めるようにとの励ましと考え、今後とも精進する所存です。今後とも、これまで同様の皆様のご理解とご協力を、よろしく願いいたします。ありがとうございました。

参 考 文 献

Austin, P. M., 1987 : Relation between measured radar reflectivity and surface rainfall, *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 1053-1070.
 Brandes, E. A., 1975 : Optimizing rainfall estimates with the aid of radar, *J. Appl. Meteor.*, **14**, 1339-1345.
 Browning, K. A. and F. F. Hill 1981 : Orographic rain, *Weather*, **35**, 326-329.

- Collier, C. G., T. W. Harrold and C. A. Nicholass, 1975 : A comparison of areal rainfall as measured by a raingauge-calibrated radar system and raingauge networks of various densities, Preprints, 16th Conf. Radar Meteor., 467-472.
- Ishihara, Y. and S. Kobatake, 1979 : Runoff Model for Flood Forecasting, Bull. D. P. R. I., Kyoto Univ., 29, 27-43.
- 気象庁総務部企画課, 1976 : 国内気象監視 (NWW) システム構想について, 気象庁測候時報, 43, 37-62.
- 気象庁予報部予報課, 1991 : 降水短時間予報プロダクト作成におけるデータ処理について, 気象庁測候時報, 58, 189-207.
- 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.
- 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2005年春季大会講演予稿集, 207.
- 牧原康隆, 竹村行雄, 浜崎雅憲, 高瀬邦夫, 1991 : 降水短時間予報業務化までの歩み, 気象庁測候時報, 58, 279-294.
- 牧原康隆, 平沢正信, 1992 : 斜面崩壊危険度予測におけるタンクモデルの精度, 気象庁研究時報, 45, 35-70.
- Makihara, Y., 1996 : A method for improving radar estimates of precipitation by comparing data from radars and raingauges, J. Meteor. Soc. Japan, 74, 459-480.
- Makihara, Y, N. Uekiyo, A. Tabata and Y. Abe, 1996 : Accuracy of Radar-AMeDAS precipitation. IEICE Trans. Commun., e79-b, 751-762.
- 牧原康隆, 國次雅司, 1999 : きわめて局地的な記録の短時間大雨, 気象, 43, 4-7.
- 牧原康隆, 2000a : 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.
- 牧原康隆, 2000b : 土壌雨量指数の精度と土壌雨量指数を活用した防災気象情報の改善, 砂防学会土砂災害費難警戒システムに関する研究, 35-42.
- 杉浦伊織, 國次雅司, 辻村 豊, 牧原康隆, 2005 : 気象庁降水ナウキャストの概要, 気象学会2005年春季大会講演予稿集, 208.
- 高瀬邦夫, 饒村 曜, 竹村行雄, 1985 : レーダーとアメダスによる降水量分布の解析—レーダー・アメダス雨量合成図について—, 日本気象学会春季大会講演予稿集, 157.
- Takase, K., Y. Takemura, K. Aonashi, N. Kitabatake, Y. Makihara and Y. Nyomura, 1988 : Operational precipitation observation system in Japan Met. Agency. Tropical Rainfall Measurements (John S. Theon and Nobuyoshi Fugono eds.), A. Deepak Pub., 407-413.
- Takemura, Y., Y. Makihara, K. Takase and K. Aonashi, 1987 : Operational experiment in very short range forecast of precipitation. Proc. Symp. Mesoscale Analysis & Forecasting, Vancouver, Canada, 17-19, August 1987, ESASP-282.
- 竹村行雄, 1986 : 小貝川流域の大雨 (昭和61年8月4日夜半) に対する降水短時間予測例, 気象庁測候時報, 53, 279-284.
- 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2005年春季大会講演予稿集, 209.
- 立平良三, 牧野義久, 1974 : デジタル化されたエコーパターンの予報への利用, 気象庁研究時報, 26, 189-199.
- 杉浦伊織, 國次雅司, 辻村 豊, 牧原康隆, 2005 : 気象庁降水ナウキャストの概要, 気象学会2005年春季大会講演予稿集, 208.
- 立平良三, 佐藤英夫, 牧野義久, 1976 : エコーパターンの短時間予報, 気象庁研究時報, 28, 61-70.
- 立平良三, 1984 : 流域雨量予測による総合防災システム (降雨災害) に関する総合研究成果報告書, 流域雨量予測に関する研究, 科学技術庁研究調整局, 25-64.

Steps towards Decreasing Heavy Rain Disasters by Short-range Precipitation
and Land-slide Forecast Using Weather Radar Accompanied by
Improvement of Meteorological Operational Activities

Yasutaka MAKIHARA*

* *Forecast Department, Japan Meteorological Agency, 1-3-4, Otemachi, Chiyoda-ku, Tokyo, 100-8122, Japan.*

(Received 6 September 2006 ; Accepted 20 November 2006)
