

第4章 解析雨量と降水短時間予報の改善

4.1 解析雨量の改善*

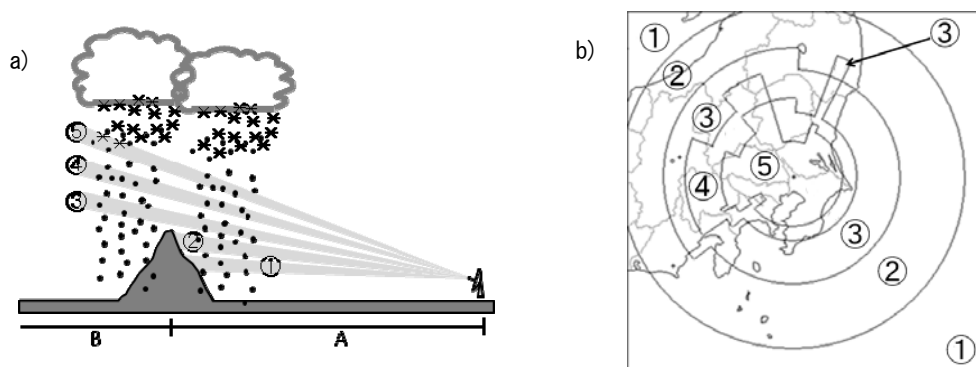
解析雨量は、広範囲に面的な観測が可能なレーダーと、スポットではあるが正確な観測が可能な雨量計の、双方の良いところを組み合わせることで面的に正確な降水量情報を作成するプロダクトである。

解析雨量では国土交通省レーダ雨量計（国交省レーダー）の利用、エコー強度積算手法改善など様々な改善を施してきた。これまでの改善項目は、解析のアルゴリズムの改良やレーダー・雨量計の増加が含まれており、さらにブライツバンド対策などレーダーの性質により現れる特異な現象の対策も実施している。

今年度は、レーダーの特異な現象のうち上空エコーに対する対策を施すための開発を行っている。

4.1.1 レーダーデータ

気象庁のレーダーは複数の仰角を使い、降水の三次元的な分布を観測している。このうち、最もよく観測できる仰角をメッシュ毎に選んで合成したデータを最下層データと呼んでいる。最下層データは、全国合成レーダーエコー強度データに使われており、解析雨量でもこのデータを用いている。最下層データの作成方法を第4.1.1図に示す。



第4.1.1図 最下層データ作成の概略

レーダーは方位方向に回転しながら仰角を変更して複数の仰角による観測データを作成している。降水の三次元的な解析を行うときは全ての仰角を使うが、最下層データを作成する際には、低い仰角から数えて5つ程度の仰角を使っている。

a)の例では、Aの領域で使用する仰角は①～⑤から最適なものを選べるが、Bの領域になると①と②の仰角はレーダーから見て山の影となるため通常は③～⑤の仰角を選択する(注)。

b)は、東京レーダーの各メッシュにおける使用仰角を示す図。使用する仰角は地物の影響や、過去の観測データから決める。

(注) ③～⑤のビーム高度があまりに高くなりすぎ、正確な観測が期待できないときは、①あるいは②を選択して故意に観測値を得られなくする場合もある。

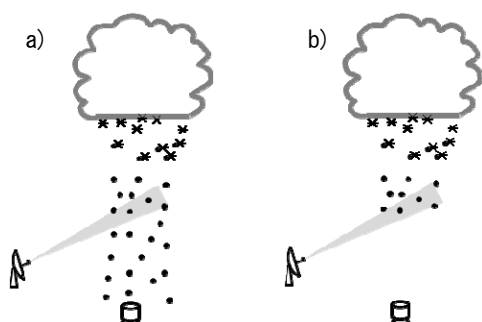
国交省レーダーでは三次元的な降水分布を得るための観測を行っていないが、地物の影響を少なくするため、気象庁レーダーと同様に複数の仰角を使って観測して合成している。

4.1.2 上空エコー

レーダーは電波を使った観測であり、電波はほぼ直進する性質があるため、地球の曲率の関係で、レーダーサイトから遠方になると、観測しているビームの高度が高くなり、上空だけに存在するエコーを捉える事がある(第4.1.2図)。

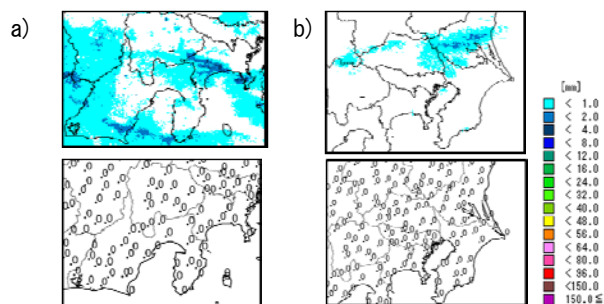
*宮城 仁史 (気象庁予報部予報課)

この現象は上空エコーと呼ばれ、大規模な降水の前面で見られることが多いが、周辺に全く降水がないときに見られることもある。上空エコーの例を第4.1.3図に示す。



第4.1.2図 上空エコー

a)は地上まで降水粒子が落ちているが、b)は上空だけである。レーダービームは地上より上空を観測しているので、b)のような場合にはエコーがあっても地上降水には至らない。



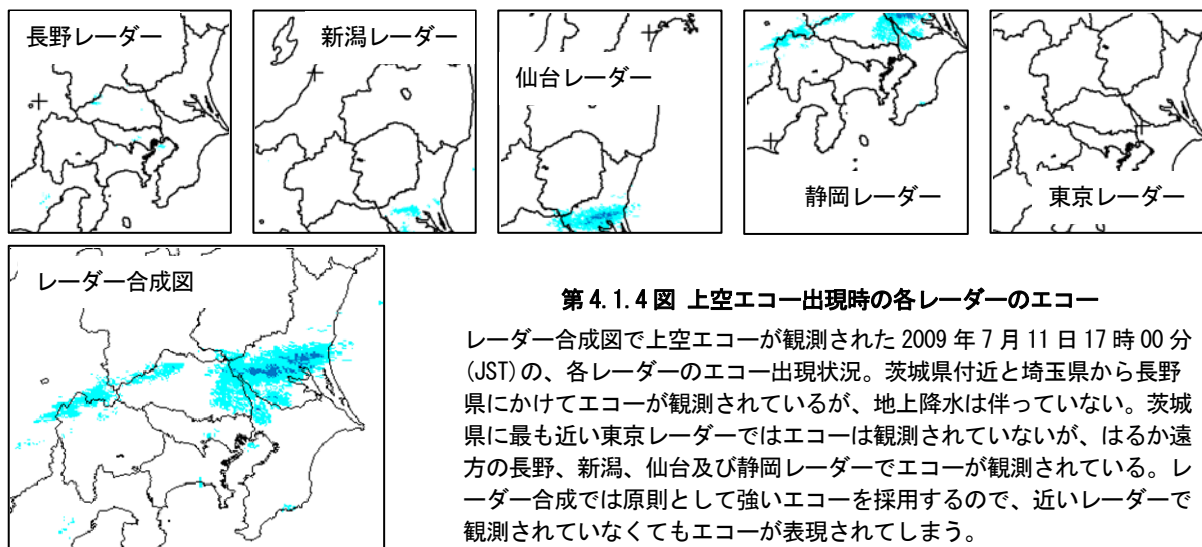
第4.1.3図 上空エコーの例

上がレーダーエコーで下がアメダス1時間雨量。a)は2012年4月13日18時(JST)のエコーで西にまとまった雨域が近付いている。b)は2009年7月11日17時(JST)のエコー。上空エコーが見られただけで降水には至らなかった。

上空エコーは非常に弱い場合が多く、短時間では注意報・警報基準となることはないが、実況の監視などに悪影響を及ぼす。

4.1.3 上空エコーの除去

上空エコーが見られるときは、エコーに近いレーダーでは観測しておらず、遠方のレーダーが捉えていることが多い。解析雨量の合成方法は原則として大きな値を優先して採用する最大値法を使っているため、近傍のレーダーでエコーがなくても、上空エコーを捉えているレーダーを採用してしまう(第4.1.4図)。



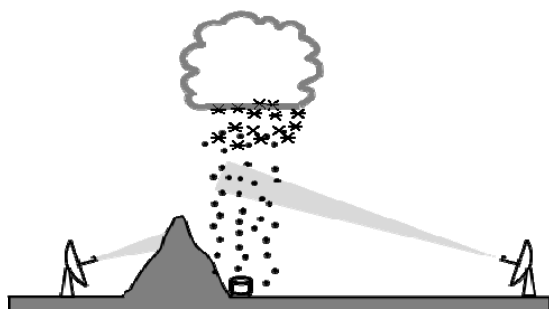
第4.1.4図 上空エコー出現時の各レーダーのエコー

レーダー合成図で上空エコーが観測された2009年7月11日17時00分(JST)の、各レーダーのエコー出現状況。茨城県付近と埼玉県から長野県にかけてエコーが観測されているが、地上降水は伴っていない。茨城県に最も近い東京レーダーではエコーは観測されていないが、はるか遠方の長野、新潟、仙台及び静岡レーダーでエコーが観測されている。レーダー合成では原則として強いエコーを採用するので、近いレーダーで観測されていない場合でもエコーが表現されてしまう。

上空エコーの除去は、レーダーの三次元的な広がりから判別することができるが、国交省レーダーには三次元的な情報がないため、複数のレーダーを使って解析する方法で上空エコー除去することとした。

複数のレーダーを使う方法は、あるレーダーでエコーが観測された際、その領域に、より近くて低い高度を観測できるレーダーにエコーがないときは、そのエコーを除去するというものである。図4.1.4の例ではエコーのある茨城県付近に最も近く、レーダービームの高度も低い東京レーダーでエコーが観測されていないため、他の4レーダー(長野、新潟、仙台及び静岡)のエコーを除去するという手順を踏む。

初めに、レーダーの各メッシュにおけるビーム高度を求める。必要となるビームの高度は最下層データのもととなる仰角の値から得る。

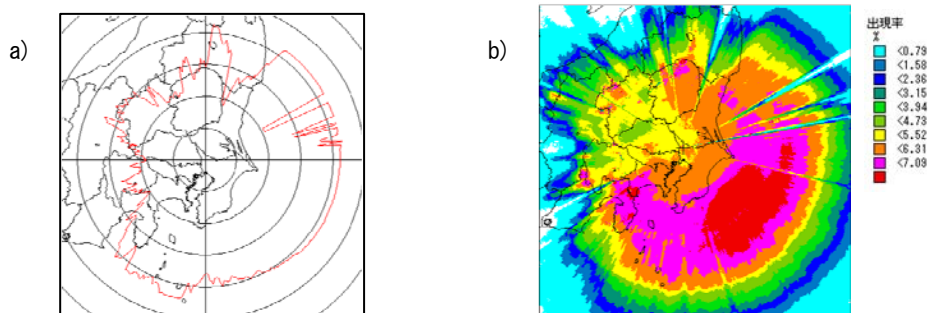


第4.1.5図 地物による影響

レーダーが降水の近くにあっても山などの障害物があると低い高度を観測できなくなってしまう。この場合、ビーム高度が高い遠方のレーダーが観測している降水が上空だけとは判別できなくなる。

次にレーダーが低い高度を好条件で観測できるメッシュ（好条件メッシュ）を特定する。最下層データは山などの遮蔽物を避けるように作成していることが多いが、遮蔽物が高すぎて避けきれないときなどは、計算上レーダービームの高度が低くても、実際にはほとんどエコーを観測できない。このように観測しにくい領域を上空エコーの識別

別に使ってしまうと、誤ってエコーを除去してしまう（第4.1.5図）。観測しにくい領域を見つけるには地形データを使用すればよいが、これだけではレーダーに非常に近い山岳や建物などの影響は正しく計算できない。そこで、実際の観測結果から得られたエコー出現率（第4.1.6図）を使って好条件メッシュを特定する。エコー出現率が高いほどレーダーで観測しやすいメッシュと言えるので、ある一定の閾値により好条件か否かを識別する。エコー出現率とビーム高度から、各レーダーの好条件メッシュを決定する。



第4.1.6図 東京レーダーの等ビーム高度線とエコー出現率

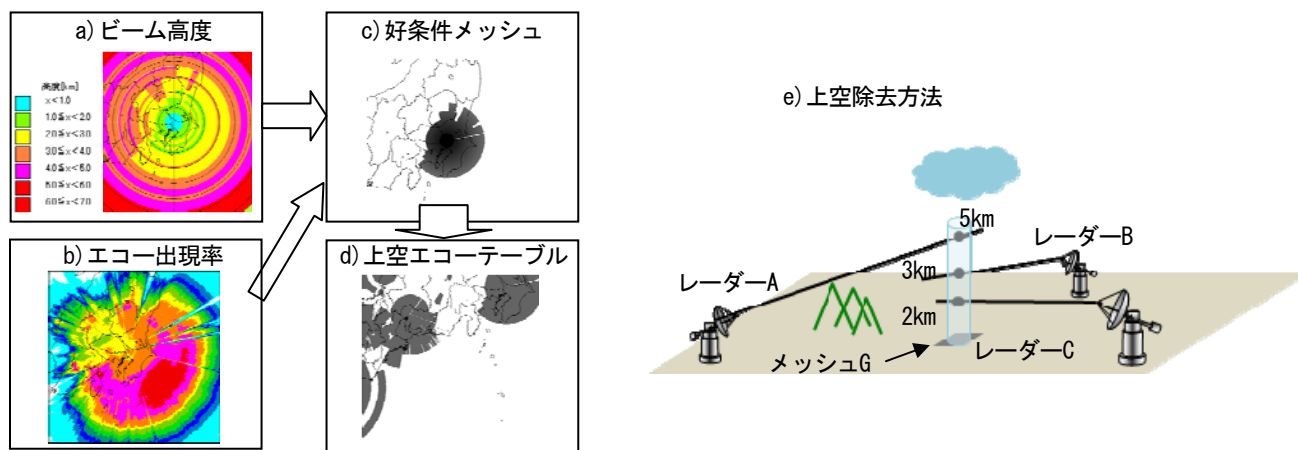
a)は東京レーダーの2km等ビーム高度線。2km等ビーム高度線とは、地形データ等により山等の影響を考慮し2kmの高度以下をレーダーで観測できると計算された限界線。図の赤い線の内側が、2km以下の高度を観測できる領域。
b)は東京レーダーの2012年のエコー出現率。エコー出現率は、一定期間のレーダーエコーの出現数を計数し、全体の観測数で各メッシュの出現数を割ったもので、レーダーデータの品質管理や最下層データで使用する仰角の検討などに使われる。レーダーからよく見える領域の出現率は高く、地物の影となる領域は出現率が低い。a)では表現されない放射状の低出現率の領域が分かる。上空エコー除去では、地形データだけから得られる情報 a)では、建物やごく近傍の山などの影響を正確に表現しきれないため、実際の観測結果を使ったエコー出現頻度 b)も使う。

各レーダーの観測高度が高くなるメッシュ（高ビームメッシュ）も抽出しておく。高ビームメッシュにおいて、好条件メッシュとなる別のレーダーを探し、メッシュから近い順に順位を付けたテーブル（上空エコーテーブル）を作成し保存する。このテーブルだけが上空エコー除去に利用される。

上空エコーの除去は、レーダー毎の最下層データを読み込み、上空エコーテーブルが示す第1順位のレーダーの最下層データを参照して、エコーがなければそのメッシュのエコーを除去する。第1順位のレーダーが欠測のときは第2順位のレーダーを、第2順位も欠測のときは第3順位のレーダーを参照する。第3順位まで欠測のときは上空エコー除去を行わない。また、レーダーの電波は強い雨により減衰することも考慮

し、非常に強い降水がレーダーの上空や途中に見られるときは、そのレーダーは使用せず、他のレーダーだけを使って判別する。上空エコー除去の手順を第4.1.7図に示す。

なお、上空エコーテーブルは定数ファイルであるが、地形の変化や建物の建設などにより、各メッシュの条件は変化する。エコー出現率を随時チェックし、必要があればテーブルの更新を行う必要がある。

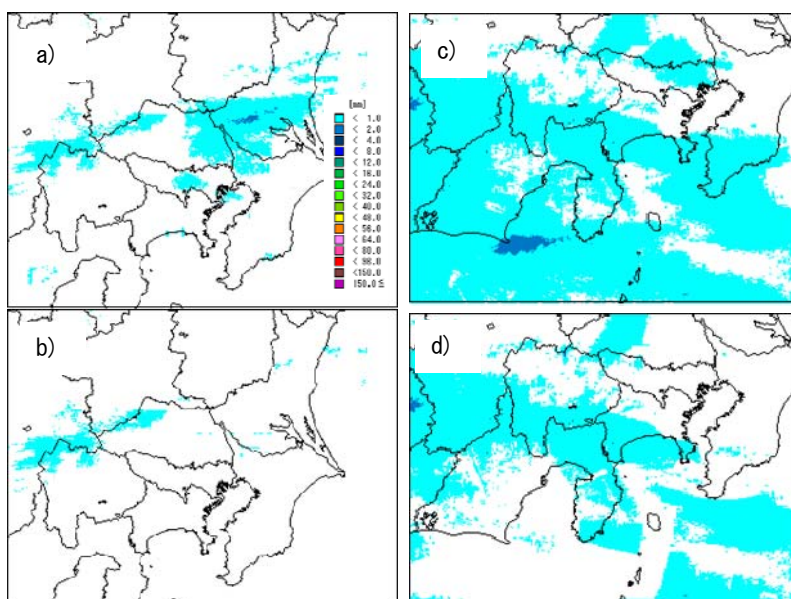


第4.1.7図 上空エコー除去の手順

a)は東京レーダーのビーム高度、b)は東京レーダーの出現率、c)は東京レーダーの好条件メッシュ、d)は静岡レーダーの上空エコーテーブル。レーダー単体の情報を使い、a)とb)からc)の好条件メッシュデータを作成する(図の黒い領域が好条件メッシュ)。同時に各メッシュの緯度経度情報と高ビームメッシュデータも作成しておく。全レーダーのc)のデータと緯度経度情報から、対象レーダー(この場合は静岡レーダー)の高ビームメッシュにおいて好条件メッシュを持つレーダーを検索し、距離の近い順に第3位まで順位を付けてd)の上空エコーテーブルを作成する(色の濃い部分が順位のついているメッシュ)。e)は上空エコー除去の手順を図で示したものである。レーダーAの観測データについて、高ビームメッシュがメッシュGとすると、メッシュGにより近いレーダーBとレーダーCが候補に挙がる。メッシュGに最も近いレーダーCが運用中でもメッシュGまでの間に非常に強いエコーがあった時は、レーダーBを判断基準とする。レーダーBにエコーがあればそのまま、エコーがなければレーダーAのメッシュGのエコーは除去される。

4.1.4 事例紹介

上空エコー除去の2事例を紹介する。いずれも解析雨量ではなくレーダーエコーの1時間積算であるが、上空エコーの除去状況が把握できると思う。第4.1.8図のa)とb)は2009年7月11日の事例で、レーダーが5分毎の観測を開始する前の10分毎のデータである。茨城県の広範囲な上空エコーが消えている。c)と



第4.1.8図 上空エコー除去の事例

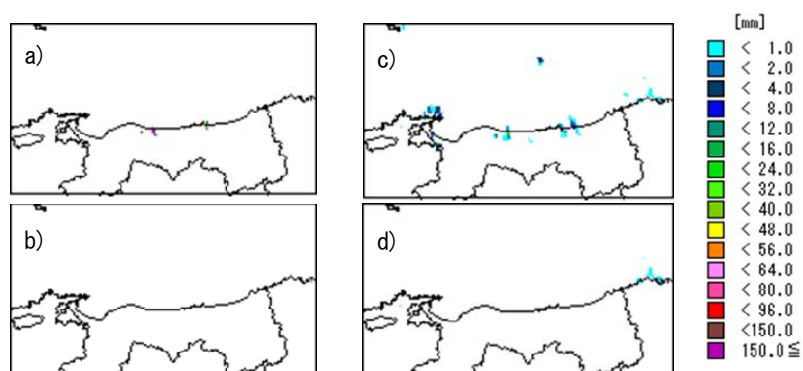
a)とb)は2009年7月11日17時00分(JST)のレーダーエコー1時間積算で、前後に降水はない。a)が除去前、b)が除去後。埼玉から長野にかけて広範囲な消えのこりが見られる。また、ほかのところにも所々消えのこりがみられるが、大規模な上空エコーは消えている。

c)とd)は2012年04月13日18時00分(JST)のレーダーエコー1時間積算で、数時間後に雨量計で降水が観測されている。c)の除去前と比べると、d)の除去後は大幅にエコーを減らすことができているが、これほど広範囲だと、他レーダーの好条件メッシュでは蔽いきれないため、消えのこりが広い。

P65d)は2012年4月13日の事例で、この時刻の数時間後に雨量計でも降水が観測される。広い領域の上空エコーを消すことができているが、消えのこりもかなり多い。いずれも、好条件メッシュの設定が高度2kmと厳しいため、設定をチューニングすることにより、改良の余地はあるが、c), d)の例のように大規模だとかなり消えのこると思われる。

4. 1. 5 上空エコー除去の応用

上空エコー除去は、基本的に高い高度のエコーを除去するものであるが、エコーに近いレーダーを参照することにより、異常伝搬によるグラウンドクラッターやシークラッターもある程度除去する効果がある。グラウンドクラッターやシークラッターは、通常低い高度に表れる。解析雨量で使っているレーダーデータでは、過去の経験から、これらのクラッターが極力現れないような仰角を選んで作成されている。しかし、通常はレーダービームが当たらないような領域でも、大気の状態により電波は異常伝搬し、クラッターを捉えてしまうことがある。異常伝搬によるクラッターは長時間同一メッシュに現れたり、非常に強い強度を示すことがあるため、解析雨量のみならず、これを利用する土壌雨量指数等のプロダクトに悪影響を与える。これらクラッターは遠方に見られることが多いため、今回紹介した除去技術でもある程度の除去が期待できる。第4.1.9図にクラッターを除去した事例を示す。



第4.1.9図 異常伝搬によるクラッター除去例

a)とb)は2013年05月14日16時20分(JST)のレーダーエコー強度。除去前のa)では鳥取県の沿岸付近に200mm/hのエコーを観測している。このエコーは近くの松江レーダーで捉えたものではなく、福井レーダーで捉えたもので、上空エコー除去のアルゴリズムを施した結果のb)ではクラッターが認められない。c)とd)は17時00分(JST)の1時間エコー積算であるが、除去前のc)では、積算後も20mm近い雨量となっている。除去後のd)ではエコーを除去することができるが、兵庫県にはエコーが残っている。

このように、上空エコー除去技術の有効性は大きいですが、解析によりエコーを消してしまうため、慎重にチューニングをして運用する必要がある。

参考文献

- 永田和彦, 辻村豊, 2006: 解析雨量及び降水短時間予報の特性と利用上の注意点. 平成18年量的予報研修テキスト, 気象庁予報部, 9-24.
- 宮城仁史, 入口武史, 佐藤大輔, 熊谷小緒里, 白石瞬, 木川誠一郎, 2012: 解析雨量・降水短時間予報・降水ナウキャストの改善. 平成24年度予報技術研修テキスト, 気象庁予報部, 108-121.

4. 2 降水短時間予報の改善*

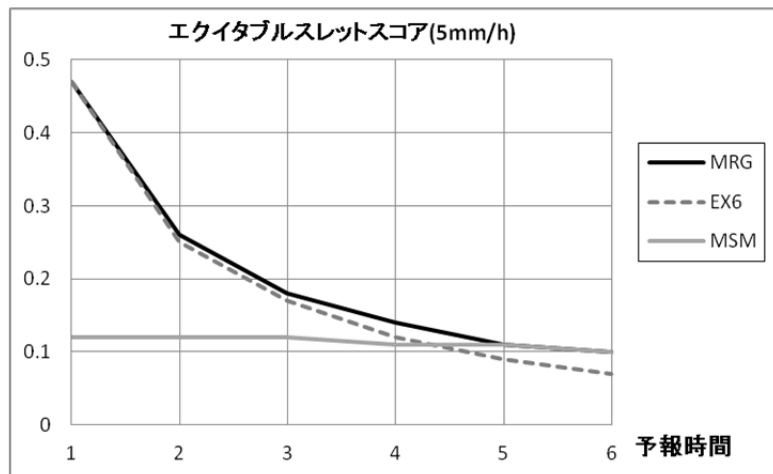
降水短時間予報では、2001年3月から数値予報資料としてメソモデル(以下、MSM)の予報値の利用を進めてきた。MSMの予報値を利用することによって予報後半の精度だけではなく、宮城他(2012)で述べているように予報前半の地形性降水の予報精度も向上した。

一方、気象庁では局地モデル(以下、LFM)の試験運用を2010年11月から行っており、2012年8月には本運用を開始し、2013年5月には毎時実行・全国をカバーするようになった。LFMとMSMのおおまかな違いを述べると、MSMの水平解像度が5kmであるのに対してLFMは2kmと細かいこと、予報頻度もMSMが1日8回3時間毎であるのに対してLFMは1日24回1時間毎と高頻度になっていることが挙げられる。つまり、MSMよりもLFMの方が、より細かいスケールの気象現象を表現でき、より最新の予報値を提供できるといえる。このLFMの運用開始を受けて、降水短時間予報でもその予報値を有効に利用し精度向上を図るべく検討を進めてきた。

本節では、降水短時間予報におけるLFMの利用方法とLFMの利用の有無による予報特性の違いについての解説を行う。なお、LFMについての詳細な説明は、永戸他(2012)を参照していただきたい。

4. 2. 1 降水短時間予報におけるLFMの利用方法

従来の降水短時間予報(以下、CTRL)では、実況補外型予測(以下、EX6)と数値予報資料としてMSMの降水予測を重み付き平均して予報値を作成(結合処理あるいはマージと呼ぶ。以下、MRG)していた。第4.2.1図に2013年7月のMRG、EX6、MSMのエクイタブルスレットスコアを示す。予報2-4時間目はMRGがEX6、MSM単体よりもスコアが良くなっており、これはEX6とMSMという複数の予報値の精度の良い部分を利用する効果といえる。



第4.2.1図
2013年7月全国陸上における5km格子平均
5mm/hのエクイタブルスレットスコア
MRGは結合予測、EX6は実況補外型予測、MSMはメソモデル。

この考え方をLFMの利用方法にも適用し、新しい降水短時間予報(以下、TEST)ではMSMとLFMの降水予測精度から求めた重みを利用した平均値を新たな数値予報資料として利用することとした。MSMとLFMの降水予測精度を初期時刻毎に評価し、精度の良い方の重みを大きくすることで、MSM、LFMを状況に応じて使い分けることが可能となっている。また、実況と比較してLFMの予測降水量が過大となる場合があることが永戸他(2012)で指摘されているが、LFMの重みが1でなく、MSMで同じ場所に同程度以上の降水予測が無ければ重み付き平均値はLFMの予測降水量よりも小さくなることから、過大値対策としても有効である。

ここで、MSMとLFMの重み付き平均値を新たな数値予報資料とする手法について少し詳しく説明する。第4.2.1図から、EX6とMSMのスコアの特徴は大きく異なり、EX6は予報初期のスコアは高いが予報時間が進むにつれて急速に低下することが分かる。一方、MSMのスコアはEX6と比べると予報初期のスコアは低いも

*熊谷 小緒里 (気象庁予報部予報課)

の、予報時間の経過に伴うスコアの低下はかなり緩やかである。これは数値予報モデル全般に共通した特性であるといえる。このため、EX6, MSM, LFM を一度に重み付き平均するのではなく、まず、降水予測精度特性が似ている MSM と LFM を予報時間に依存しない重みによって平均して1つの予報値（ブレンドと呼ぶ。以下、BLD）を作成し、その後、EX6 と BLD に対して予報時間によって重みを変化させて結合処理をする MRG を施すこととした。

以上のことを式で書くと、以下のように表される。

$$\text{BLD} = \text{MSM} \times \text{weit_msm} + \text{LFM} \times \text{weit_lfm} \quad (4.2.1)$$

$$\text{MRG} = \text{EX6} \times \text{weit_ex6} + \text{BLD} \times \text{weit_bld} \quad (4.2.2)$$

ここで weit_msm , weit_lfm , weit_ex6 , weit_bld はそれぞれの予報値の重みを示し、 $\text{weit_msm}(\text{lfm})$ については以下のように定義される。

$$\text{weit_msm}(\text{lfm}) = \text{MSM}(\text{LFM}) \text{の降水量比スコア} / (\text{MSMの降水量比スコア} + \text{LFMの降水量比スコア}) \quad (4.2.3)$$

なお、降水量比スコアについては後述の(4.2.4)式を、MRG 処理の重み(weit_ex6 , weit_bld)についての説明は宮城他(2012)、永田他(2006)を参照いただきたい。

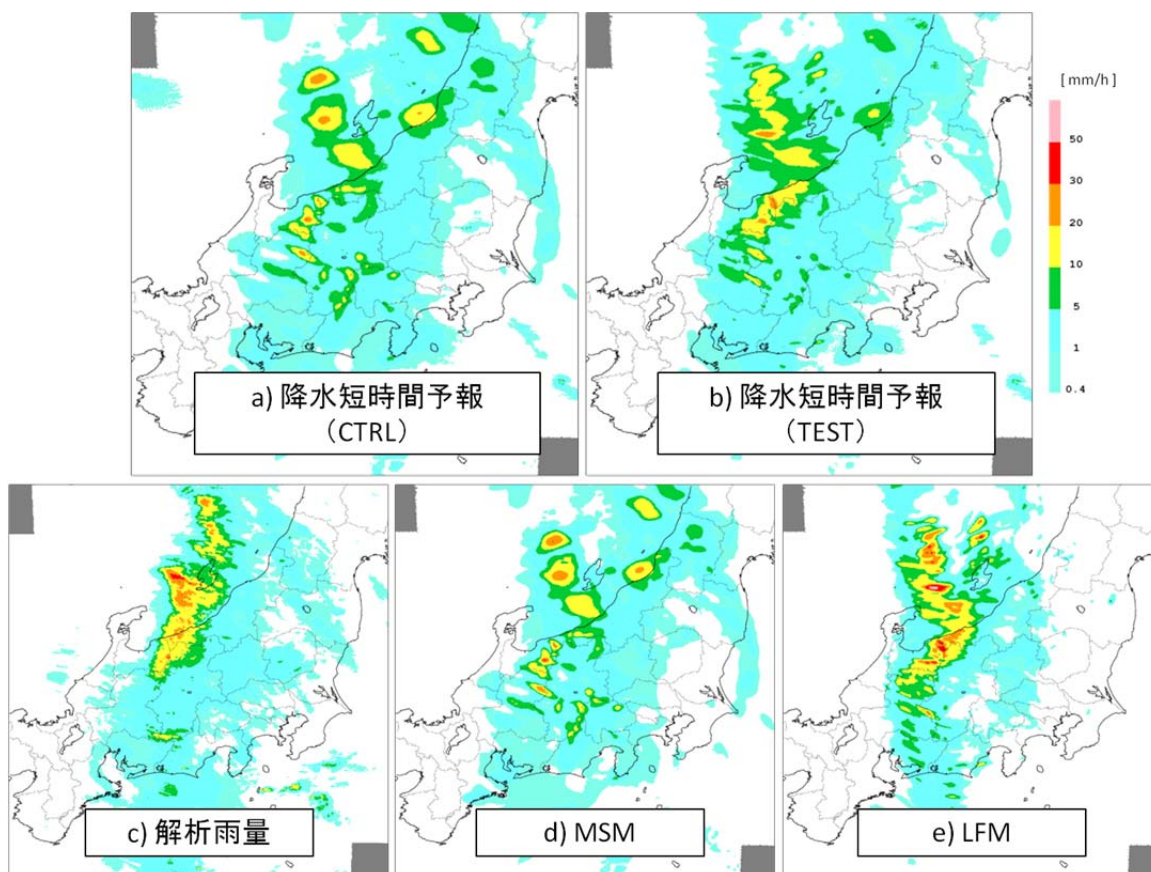
4.2.2 事例紹介

この項では、変更前後の降水短時間予報の予報結果を比較するために2つの事例を紹介する。

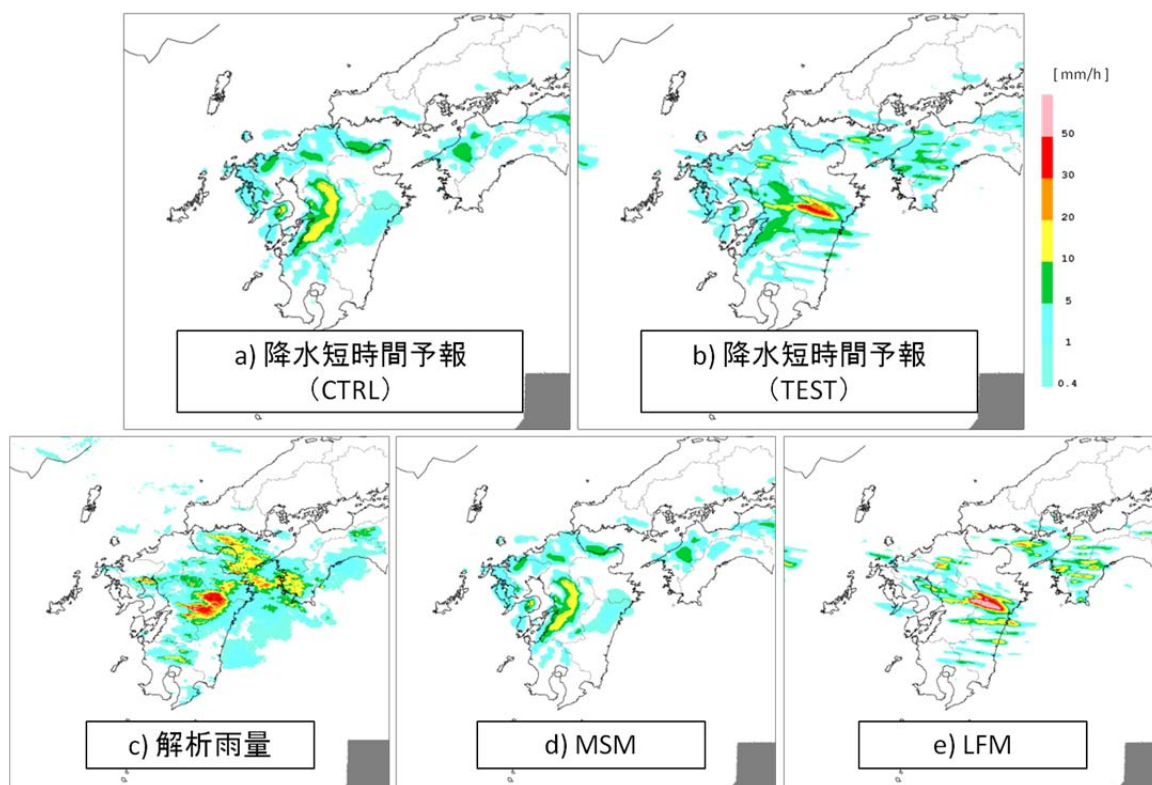
第4.2.2図には2013年7月23日22:00UTC初期値の予報結果を示す。a)がCTRL、b)がTESTの降水短時間予報の予報6時間目の降水分布であり、予報対象時刻の解析雨量をc)に、同時刻を予報したMSM, LFMの予報をd), e)に示している。富山・新潟・長野3県の県境付近から岐阜県北部にかけMSM, LFMともに強雨を予報しており、さらにMSMでは長野・静岡県境、新潟県北部の降水が過大である。CTRLでは、MSMのみを用いているために、長野・静岡県境、新潟県北部の降水は解析雨量に比べて過大な予報となっている。一方、TESTでは、MSMとLFMをブレンドすることでそれぞれの過大な降水は抑えられている。

第4.2.3図に2013年7月25日22:00UTC初期値の予報結果を示す。a)からd)が示している内容は第4.2.2図と同様のものである。九州中部の降水域の予報がMSMとLFMでは大きく異なり、MSMはLFMと比べて山の風上側で地形に沿ったような分布の降水を予測している。一方、LFMはMSMと比較して線状の降水域を予測しており、実際の降水分布に近いが、量がやや過大である。TESTではMSMとLFMをブレンドしているため、LFMの過大値を抑制しつつ降水分布を改善し、量・分布ともに解析雨量に近づいている。

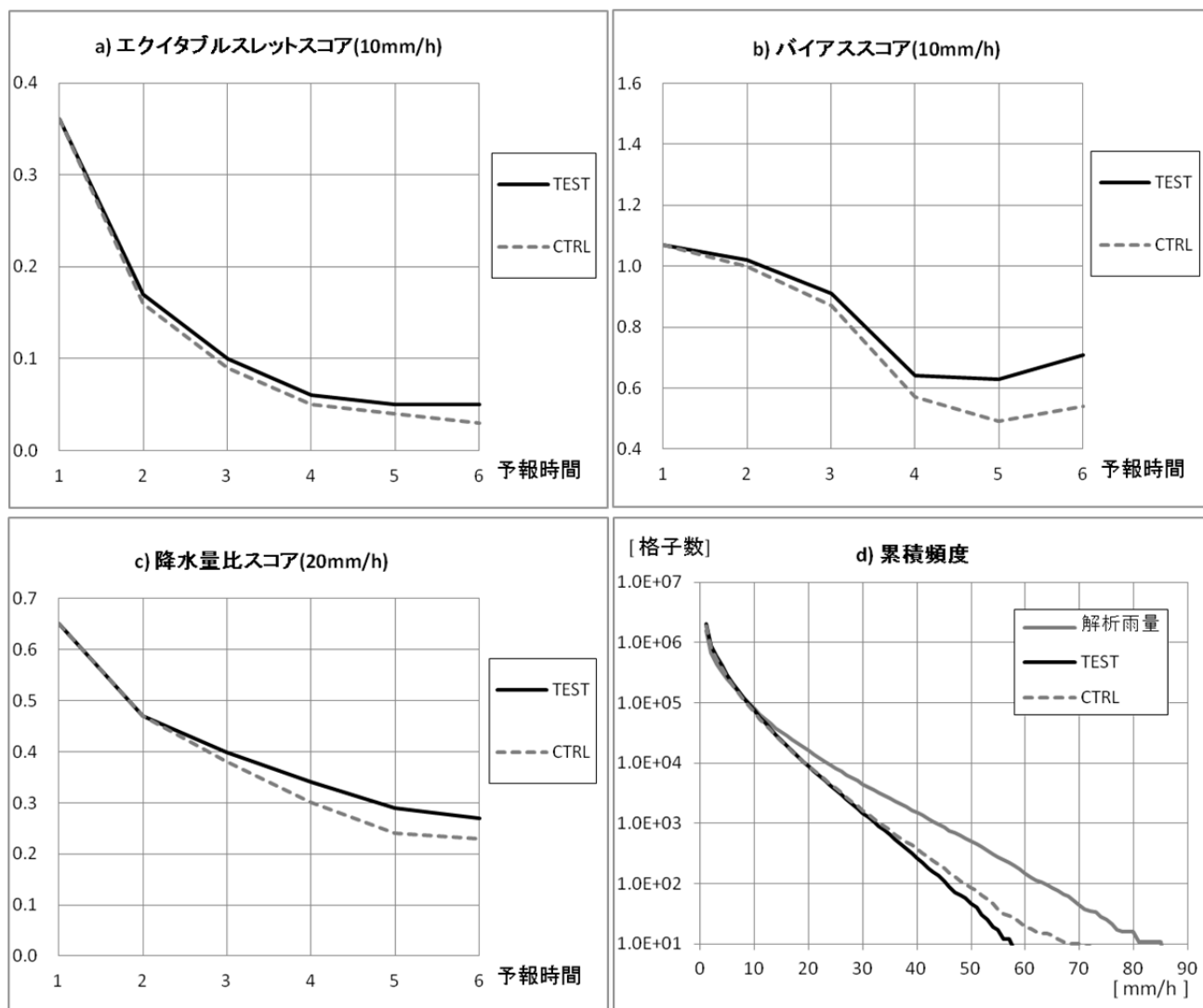
1例目は、主にMSMとLFMの複数のモデルを利用する効果による改善であり、2例目はその効果に加えて、LFMが小スケールの降水域を精度良く予想した結果を取り込めることによる改善となっている。



第4.2.2図 2013年7月23日22:00UTC初期値の予報6時間目におけるCTRLとTEST(上段)の結果と予報対象時刻の解析雨量、同時刻を対象としたMSMとLFMの予報結果(下段)



第4.2.3図 2013年7月25日22:00UTC初期値の予報6時間目におけるCTRLとTEST(上段)の結果と予報対象時刻の解析雨量、同時刻を対象としたMSMとLFMの予報結果(下段)



第 4.2.4 図 2013 年 7 月の前 1 時間降水量 10mm/h に対するエクイタブルスレットスコア (a)、バイアススコア (b)、閾値 20mm/h に対する降水量比スコア (c)、予報 3 時間目の累積頻度分布 (d) 全国陸上の 5km 格子平均値を利用。

4. 2. 3 統計検証結果

第 4.2.4 図に 2013 年 7 月の CTRL と TEST の前 1 時間降水量に対する統計検証結果を示す。

検証は、全国の陸上における 5km 格子平均値に対して行った。真値として用いたデータは解析雨量である。a)は閾値 10mm/h のエクイタブルスレットスコアである。予報 2 時間目以降、TEST の精度が上回っており、ブレンドの有効性を示唆している。この傾向は他の閾値(1mm/h, 5mm/h)でも確認できた (図略)。改善幅が予報後半になる程大きくなっているのは、MRG における予報後半の数値予報資料の重みが増え、ブレンドの効果が現れているためである。また、b)は同閾値のバイアススコアを示しており、予報後半で TEST の値が大きくなり 1 に近づいている。これは、主に 2013 年 7 月は LFM のバイアススコアが大きかったことによるものである (図略)。

エクイタブルスレットスコアやバイアススコアは、閾値を超えたかどうかの ON/OFF の情報を検証するスコア (カテゴリー検証と呼ばれる) であり、今期間のバイアススコアが増えていることから予測降水量が過大となっている可能性がある。このため、カテゴリー検証とは異なり降水量を連続的に検証する降水量比ス

コアを確認した。c)は閾値 20mm/h の降水量比スコアを示している。降水量比スコアは、以下の式で表される。

$$\text{降水量比スコア} = (\text{予測降水量と解析雨量の小さい方の値}) / (\text{予測降水量と解析雨量の大きい方の値})$$

ただし、検証対象とするのは予測降水量と解析雨量の和が閾値以上の格子

(4.2.4)

図からは、降水量比スコアにおいても TEST のスコアが高く、予測降水量が解析雨量に近づいていると言える。

さらに、d)に 2013 年 7 月の全国陸上における 5km 格子平均値の予報 3 時間目の累積頻度分布図を示す。この図から、約 35mm/h を超える降水では、CTRL に比べて TEST の予報格子数が少なくなっていることが分かる。この状況はブレンドの手法に起因しており、複数の予報値を重み付き平均した値は平均前のそれぞれの予報値の最大値より小さな値となるためである。また、2013 年 7 月はスケールの小さい降水現象が多く発生したことがこの特徴をより際立たせている。スケールの小さい降水現象の予報は、降水の位置がずれることが多く、重み付き平均によってピーク値が大きく減少してしまうことが多々ある。第 4.2.2 図の事例のように、TEST では MSM の過大値も抑える効果があるために CTRL に比べて強雨の頻度が減っていると考えられる。以上のことから、CTRL に比べて TEST の 10mm/h のバイアススコアが上がってはいるが予報値が常に大きいということではなく、平均的にはエクイタブルスレットスコアや降水量比スコアで見られるように精度が向上していると言える。ただし、ブレンドの手法が重み付き平均であることから、降水短時間予報は EX6, MSM, LFM それぞれの予報値の最大値よりは小さな値となるということに留意する必要がある。

今回は複数の数値予報モデルの降水予測を利用したブレンドという手法を用い、降水短時間予報の改良を実施した。今後も数値予報モデルの改良の効果を生かすために引き続き検証を重ね、改善を図っていく予定である。

参考文献

- 永戸久喜, 藤田匡, 原旅人, 2012: 局地モデルの本運用. 平成 24 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 72-86.
- 永田和彦, 辻村豊, 2006: 解析雨量及び降水短時間予報の特性と利用上の注意点. 平成 18 年量的予報研修テキスト, 気象庁予報部, 9-24.
- 宮城仁史, 入口武史, 佐藤大輔, 熊谷小緒里, 白石瞬, 木川誠一郎, 2012: 解析雨量・降水短時間予報・降水ナウキャストの改善, 平成 24 年度予報技術研修テキスト, 気象庁予報部, 108-121.