

第4章 高解像度降水ナウキャストと降水短時間予報の改善

4.1 高解像度降水ナウキャストにおける降水の解析・予測技術について*

要旨

高解像度降水ナウキャストは、局地的な大雨の監視・予測能力を強化するために、詳細かつ高精度なレーダー画像と降水量予測を提供するプロダクトであり、2014年8月から提供を開始する。積乱雲に伴う狭い範囲の降水は短時間の現象であることから、実況補外に加えて強雨域を空間3次元的に予測する技術を導入し、「急な強い雨」の実用的な予測を実現している。

本稿では、高解像度降水ナウキャストで用いられている解析及び予測技術について解説する。

4.1.1 はじめに

気象庁は、気象レーダーの高精度観測データを利用した局地的大雨の監視・予測能力を強化するため、2012年度から2013年度にかけてレーダー観測所処理装置を更新し、高解像度降水予測システムを整備した。高解像度降水ナウキャストは、これら更新及び整備を受けて、国土交通省が運用するXバンドMPレーダ雨量計(以下「Xバンド」と言う。)の観測データも利用し、詳細かつ高精度なレーダー画像と降水量予測を提供するプロダクトとして開発を進めてきたものである。

高解像度降水ナウキャストは、その名が示すように、格子間隔を従来の1kmから250mに細かくした降水ナウキャストである。従来の降水ナウキャストは、気象庁のCバンドドップラーレーダーの観測データ(以下「Cバンド」と言う。)のみを使って降水予測を提供しているが、高解像度降水ナウキャストでは、通称XRAINと呼ばれる国土交通省が整備したXバンドも加え、さらにアメダス・地上観測、高層ゾンデ観測、ウィンドプロファイラ観測のデータの高度利用にも取り組んだ。

高解像度降水ナウキャストの予測技術においては、強雨域を空間3次元的に予測し、初期値には存在しない強雨域を発生させる技術を開発することに加え、停滞する線状の強雨域や台風などの時空間スケールの大きな降水現象の予測精度を向上させる新たな技術を導入した。

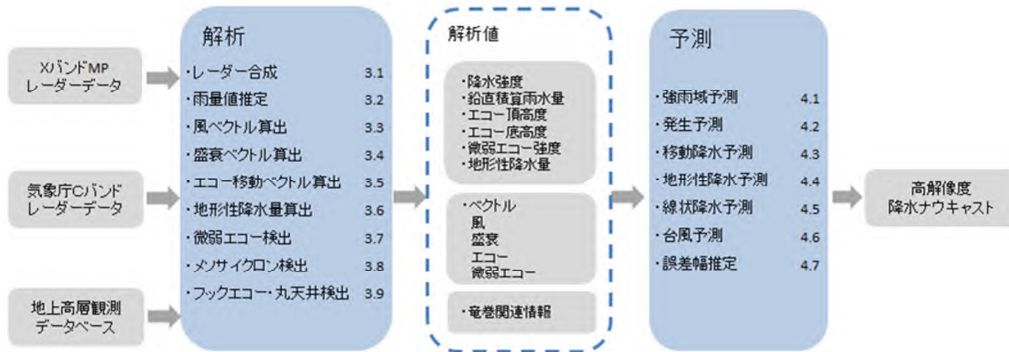
これら観測データの高度利用及び新技術導入は、従来の降水ナウキャストとは異なる発想に基づいている。例えば、地上における降水量又は降水強度の解析・予測精度を最良とする観測データの組み合わせとデータ処理方式を選択するために、解析と予測処理の最適化を行っている。また、予測の分野では、現象の時間変化を未来に向かって延長する運動学的な予測から大きく踏み出し、短時間に大きく変化する降水現象の予測に適した力学的計算手法を選択しアルゴリズムに取り込んでいる。

このように、高解像度降水ナウキャストは、単に解像度が向上しただけでなく、さまざまな観測網から得られる観測データを総合的に利用し、最新の予測技術を取り入れた新しい降水ナウキャストとして提供を開始するものである。

*運動学的予測グループ(木川誠一郎)

4.1.2 アルゴリズム

第4.1.1図に示すように、アルゴリズムは解析及び予測のアルゴリズムから構成される。2つのレーダー観測網と地上・高層観測網のデータを利用して解析アルゴリズムは解析値を作成する。予測アルゴリズムは解析値を入力し、高解像度降水ナウキャストを作成する。



第4.1.1図 高解像度降水ナウキャストの作成におけるデータの流れ

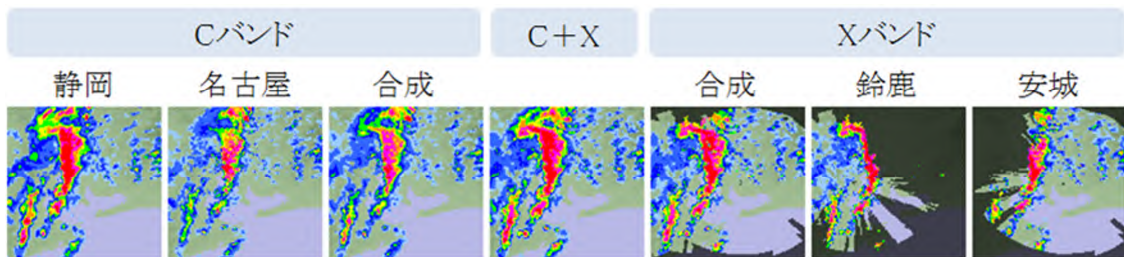
4.1.3 解析アルゴリズム

解析アルゴリズムの特徴を列挙すると

- 解析アルゴリズムでは、短時間かつ局地的にはエコーは単純に流されることを仮定して、ウィンドプロファイラの観測から得られる各高度における水平風とレーダーのスキャン時刻を利用して位置ずれを補正している。
- 高解像度降水ナウキャストは地上の降水量を解析・予測対象としている。レーダー雨量値を推定する高度およそ1~2kmから雨滴が地表に落下する間に風に流される効果も補正している。
- クラッタの原因となるものは概ね地表付近にあることから、その反射強度の鉛直分布はアンテナの鉛直方向のビームパターンに対応して、上空に向かうにつれて急速に弱まる特徴を持っており、これを利用してクラッタを検出する。
- ブライトバンドの高度と厚さは、レーダーの最大仰角に現れるリング状のエコーの大きさと形状、ウィンドプロファイラの鉛直速度、及びアメダス気温観測値から推定する。
- レーダー合成 Radar Composition
 - Cバンドでは、観測高度を挟む2つの仰角の観測値を線形内挿して、レーダー毎に観測高度における降水強度をレーダー雨量値として算出する。次にレーダー毎の降水強度から、全国合成の降水強度をレーダー毎に重みをつけて平均する加重平均法により算出する。
 - Xバンドでは、降雨による電波の減衰を正確に見積もることができない場合には、加重平均による合成では降水強度を過小に推定してしまうことがあるため、Xバンドの合成は最大値法を使う。
 - XバンドとCバンドのデータを合成する際は、まずそれぞれの全国合成データを作成した後に、処理の最終段において最大値法により両者を合成する。Xバンドは2つの偏波を使った降水強度推定を行っており、単一偏波であるCバンドに比べてレーダー雨量値の精度が高いことから、合成前に10km四方の平均降水強度についてCバンドをXバンドに合わせるように補正を行うことにより、第4.1.2図に示すようにレーダー観測範囲の端においても滑らかな合成を実現するとともに、Xバンドの高い雨量値推定精度をXバンドの探知範囲の周辺に波及させることができる。

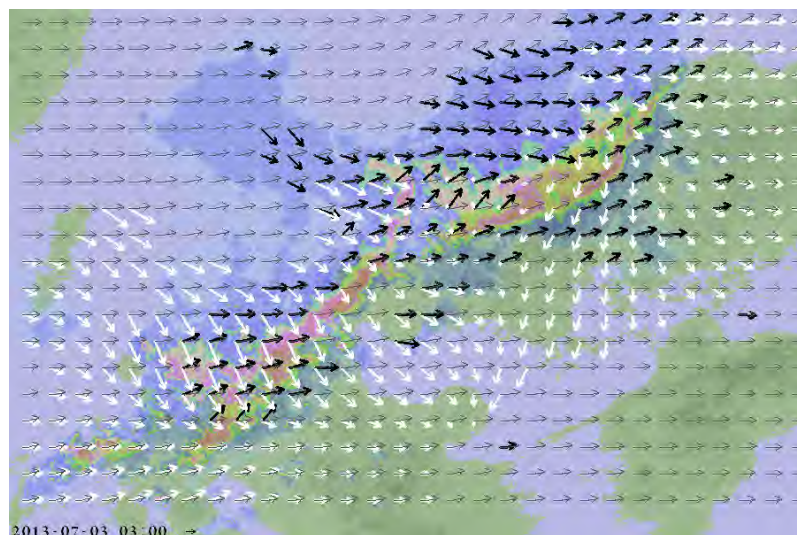
- ベクトル Vectors

- 全国を範囲とする風ベクトルは、鉛直3層（高度1km、2km、及び3km）において水平方向1km格子の風ベクトルを算出し、これを10km格子においてベクトルの方位角に対する度数分布から主成分、副成分を算出するとともに、渦度及び水平発散を計算する。一方、強雨域では水平方向250m、鉛直方向100m毎に風ベクトルを計算する。
- 降水強度の盛衰量について水平方向の動きを計算し、これを盛衰ベクトルと呼ぶ。盛衰量は風ベクトルに沿って計算した30分間の降水強度の変化であり、降水強度のラグランジュ微分に相当する。その盛衰量のパターンの動きを1時間にわたって追跡したものが盛衰ベクトルとなるので、盛衰ベクトルは時間スケールの長い雨域の盛衰を追跡している。
- エコーの移動ベクトルを求めるときは、時間的、空間的に様々な規模の移動を捉えるために、従来の降水ナウキャストと同様に階層的移動検出の手法を用いている。
- 第4.1.3図では、エコー移動ベクトルが北東から東に向かっていることに対して、降水強度が強い（背景が赤色の）領域では盛衰ベクトルは南成分が大きく、これは個々の強雨エコーは発生北東から東に移動 消散を繰り返しながら雨域として南下していることを示している。



第4.1.2 図 レーダー合成の例

中央のC+XがCバンドとXバンドを合成した解析値。



第4.1.3 図 エコー移動ベクトル（灰色）と盛衰ベクトル（白）の例

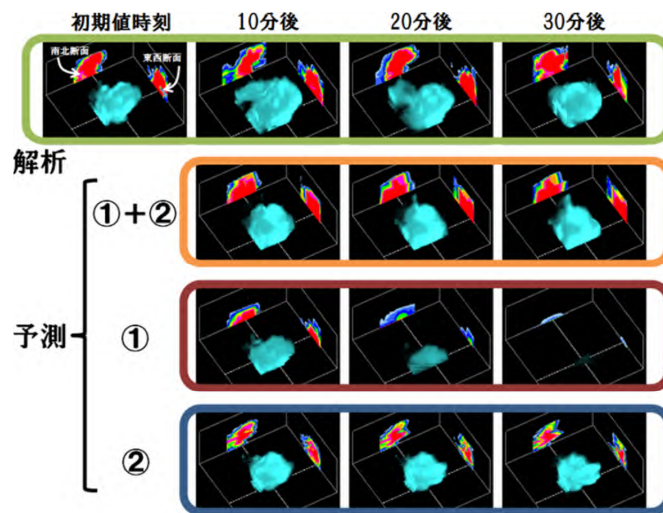
黒はレーダーのドップラー速度から算出した風ベクトルを示す。背景は地図の上に重ねた降水強度解析値である。

4.1.4 3次元予測

高解像度降水ナウキャストでは、注目すべき強雨域を選び出して高解像度の空間3次元降水予測を行うとともに、その他の領域では降水の3次元分布から複数の2次元情報を作成しておくことで鉛直方向の計算量を減らし、計算時間間隔も長くとる手法を採用した。これにより、ナウキャストとしての速報性を確保しつつ、高解像度かつ高精度の予測を提供することが可能となった。

4.1.5 高解像度3次元予測

高解像度3次元予測は、実況の補外と鉛直1次元対流モデルによる予測から構成される。実況補外では、積分時間間隔を1分としてセミラグランジュ法の時間積分より雨水量の3次元分布を予測する。時間積分の方法によって、雨水量の大きさに応じた終端速度で鉛直方向のみに落下する時間積分、ドップラー速度データを使った3次元風ベクトルを利用したすべての方向の時間積分、の2種類があり、それぞれの計算結果を最大値法により合成して予測値とする。この雨水量には、雨域の発達・衰弱傾向又は鉛直1次元対流モデルが予測する雨水量に比例する係数が乗算されるので、雨域の移動、回転、伸縮、さらに発達・衰弱傾向を表現することができる。この予測手法は、第4.1.4図に示すように、5分からおよそ20分までの予測を、およそ20分以降の予測を担うように設計されている。



第4.1.4図 高解像度3次元予測の例

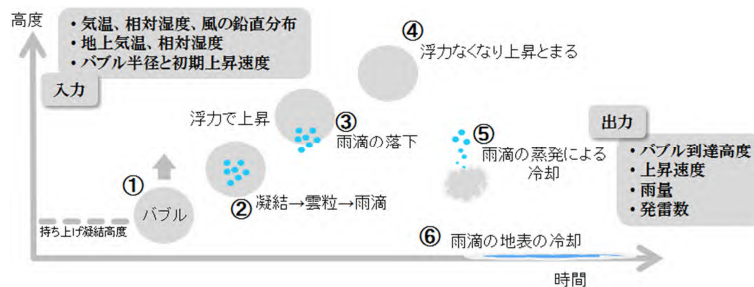
図の最上段は解析値、2段目は と を合成した予測、3段目は 、最下段は の予測を示す。この図は南東斜め上方向から雨域を見たものであり、雨水量が多いほど輝度が大きくなる。東西及び南北断面は雨域のなかで雨水量が最も大きい格子を通る白い点線における断面を示す。初期値時刻は2014年6月24日14時30分、雨域は東京都三鷹市周辺に降雷をもたらした積乱雲であり、オーバーハングと表現されるひさしのように突き出したエコーの構造が見られることは、強い上昇気流の存在を示唆している。なお、実際には から雨水量の供給を受けるが、ここでは雨滴の落下の様子をわかりやすく示すため、 から への雨水量供給を0として計算した結果を において図示している。

鉛直1次元対流モデルには、Simpson 他（1965、1969）及び山岸（1973）を発展させた予測モデルを使用する。第4.1.5図にその予測概念を示した。モデル内の計算では、上昇するバブルは持ち上げ凝結高度を通過し（図中の ）凝結した水蒸気はすぐに雲粒となり、auto-conversionにより雨滴を生成する。生成した雨滴は周囲の雲粒を取り込んで成長し（ ）、雨滴として十分に大きくなるとバブルから落下する（ ）、さ

らに上昇したバブルは平衡高度に到達して浮力がなくなり上昇が止まる()、バブルから落下を始めた雨滴はその一部が蒸発して周囲の空気を冷却し()、また地表に落下して地表面を冷却する()。

バブルは最大 15 個まで連続して打ち上げることが可能であり、打ち上がるバブルの数に比例して積算雨量が多くなる。

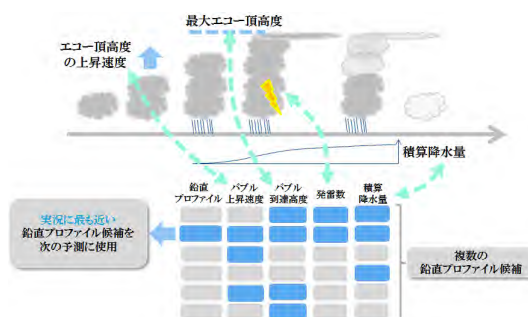
このように予測された鉛直 1 次元対流予測モデルによる雨水量は、鉛直方向の重み付けがなされ、先に述べた実況補外の予測と最大値法により合成される。



第 4.1.5 図 鉛直 1 次元対流予測モデルの予測概念

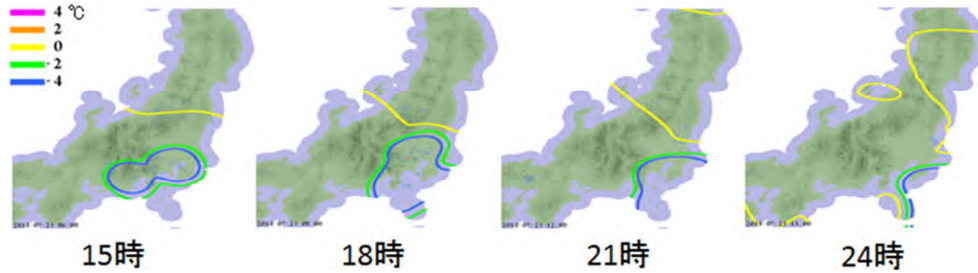
縦軸が高度、横軸が時間であり、ここでは 1 つのバブルの時間経過を示している。

鉛直 1 次元対流モデルの入力データである大気鉛直プロファイルは、高層ゾンデの観測値を初期値として、第 4.1.6 図に示す手法により更新する。まず、初期値となる鉛直プロファイルから主に気温を変化させた鉛直プロファイルを複数作成し、それぞれの鉛直プロファイルにおけるバブルの上昇速度、到達高度、積算雨量、及び単位時間当たりの最大発雷数を計算する。これらのパラメータが観測値に最も適合する鉛直プロファイルを選び、雨域とその周辺の鉛直プロファイルに反映する。この更新は 5 分毎に行われ、更新された鉛直プロファイルが次の時刻の予測において利用される。また、この鉛直プロファイルは高度 3km の風でセミラグランジュ法を用いて時間積分しているため、第 4.1.7 図に例を示すように時間とともに移動していく。



第 4.1.6 図 鉛直プロファイルの更新の概念図

上段の横軸は時間であり、左に積乱雲の発生、右に進むにつれて発達、最盛期、そして消散となる。下段には 6 つの鉛直プロファイル候補が用意されており、右側の 4 要素の青色が実況に近いことを表す。この例では、上から 2 行目の鉛直プロファイルが最も実況を良く表現できるとして選ばれる。



第4.1.7図 鉛直プロファイルの更新の例

ここでは2013年7月23日の海拔5,000mの気温を示している。15時には関東南部から東海地方にかけて鉛直プロファイルの更新によって気温が周囲よりも低い領域が見られる。その領域は高度3kmの風に流されて24時には南東海上に移動する。

4.1.6 低解像度3次元予測

前項で述べた高解像度3次元予測は計算量が多く、予測できる強雨域数は1初期値当たり5~10程度(ただし、鉛直プロファイルの更新のみ行う強雨域の上限数は100である。)であるので、数多くの積乱雲が発達するときには、ここで述べる低解像度3次元予測が併用される。

低解像度3次元予測は、より広い空間範囲を予測することを目的として、空気塊の鉛直加速度を降水の盛衰に結びつけた予測モデルを使用する。この予測モデルは、鉛直1次元対流モデルから着想を得たものである。鉛直1次元対流モデルでは、auto-conversionにおいて雨水の単位時間当たりの生成量 dM/dt が雲水量に比例し、鉛直速度が大きくなるほど雲水量が増えることから、単位時間当たり気柱内で生成される雨水量 $d(M_i)/dt$ は気柱内で平均した鉛直速度 w に比例すると仮定する。一方、単位時間当たり気柱下端から外に出る雨水量を降水強度 R とし、氷の状態を考えなければ、気柱内の総雨水量である鉛直積算雨水量 VIL との関係は、次の式(4.1.1)で表すことができる。

$$w \propto \frac{d}{dt} M_i = \frac{d}{dt} VIL + R \quad (4.1.1)$$

次に鉛直1次元対流モデルでは、バブルが鉛直上向きの加速度を持つときにバブルが上昇し、雨滴が生成され降水がもたらされる。そこで、 w の時間微分をとると

$$\frac{d}{dt} w \propto \frac{d^2}{dt^2} VIL + \frac{d}{dt} R \quad (4.1.2)$$

となり、この右辺が鉛直加速度の指標となり、指標がプラスのときは雨が強まると仮定する。

指標が大きい領域では鉛直速度が加速され積乱雲が発達し、20~30分遅れて強雨をもたらすと予測する。20~30分より先の予測については、気温又は水平発散の空間勾配が大きいときは強雨が持続、小さいときは衰弱すると予測する。

次に強雨盛衰ベクトルと呼ぶ w の移流速度(u, v)を式(4.1.3)から算出し、エコー移動ベクトルに合成して予測に使用する。

$$u = \frac{\partial w}{\partial t} \Big/ -\frac{\partial w}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial w}{\partial t} \Big/ -\frac{\partial w}{\partial y} \quad (4.1.3)$$

4.1.7 発生予測

高解像度降水ナウキャストでは、「急な強い雨」に対してより長いリードタイムを得るために、積乱雲の発生予測にも取り組んでいる。この発生予測は、積乱雲の発生のきっかけ（トリガー）となる次の3種類の現象を捉えて発生を予測する。

(1) 強雨に伴う下降気流

積乱雲の強雨に伴って強い下降気流が発生し、ガストフロントと積乱雲周辺の地上付近の風とが最も強く収束する地点に新しい積乱雲の発生を予測する。積乱雲が複数存在する状況では、それぞれの積乱雲から発生するガストフロントの交点においても積乱雲の発生を予測する。

(2) 地上気温・水蒸気量の時間変化

アメダスの風向・風速から推定した地上風分布の収束域が存在し、かつそれがGPS可降水量の増加域と減少域の境界域にあり、地上気温の上昇域と下降域の境界域でもあるときに積乱雲の発生を予測する。

(3) 弧状微弱エコーの交差

局地前線又は不連続線に関連付けられる線又は弧状の微弱エコーの位置と速度の情報を検出し、2つの微弱エコーが交差するときに上昇気流が一時的に強まると考えて、交差する領域に積乱雲を予測する。

これらのトリガーが検出された場合、鉛直1次元対流予測モデルを使って降水量を予測する。トリガーが検出され大気状態が不安定で積乱雲の発生を予測したにもかかわらず実際には発生しなかったときは、鉛直プロファイルを安定させる方向に調整する。

これらの手法による積乱雲の発生予測は、島嶼及び山岳ではアメダス観測点が少なく、山岳では微弱エコーの検出も難しいことから、捕捉率が1割以下と低く、改善の余地が多く残されている。

4.1.8 誤差幅推定

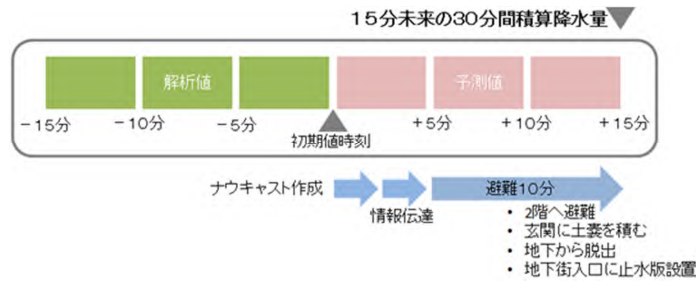
高解像度降水ナウキャストの、5分間積算降水量と降水強度の配信データには、解析・予測値の誤差に関する情報を、それぞれ異なる形で格納している。

量的予報として利用される5分間積算降水量では、1時間先までの予測降水量を合計した値をP、実際の1時間降水量をQ、誤差情報に格納される誤差幅推定値を とするとき、 $P - Q$ が-2 から までの間に入る確率がおおよそ70%となる。1時間予測降水量の誤差($P - Q$)は、実際には1時間後に初めて知ることができる量であり、 は予測降水量が持つ誤差の度合いを予測したものである。

一方、降水強度における誤差情報には、画像としての視覚的な利用を前提に注意喚起を目的として、解析値における誤差要因である、クラッタ、ブライツバンド、上空エコー、及び雹を検出したことを示す情報を格納している。

4.1.9 効果的な利用方法

ここでは、高解像度降水ナウキャストの効果的な利用方法として、第4.1.8図に示すように、解析値15分間積算降水量と予測値15分間降水量をあわせた15分未来における30分間降水量を紹介する。



第 4.1.8 図 15 分未来の 30 分間降水量の計算方法

ナウキャストの作成に 2.5 分、情報の伝達に 2.5 分、さらに安全確保のための避難行動に最低限必要と考
える 10 分を想定している。

第 4.1.1 表は、列方向は予測値に誤差幅推定値を加えた 15 分未来の 30 分間積算降水量を、行方向に同じ
時間範囲をすべて解析値で積算した 30 分間降水量をとったもので、表の数字は格子数である。下段に急な強
い雨の条件を適用した場合を示したが、30 分間積算降水量が 50mm 以上の捕捉率は 7 割であるが、空振りも
多い。もし 50mm 程度の予測に対し、実況である解析値で 30~50mm までを適中と見做せば、空振り率は 4 割
まで下がる。一方、50mm 程度のみを適中と考える場合においても、急な強い雨は空間的に狭い範囲の降水現
象でもあるので、50mm 程度が予測されたが、実際には 30~50mm であったことが同じ格子に起きる頻度は、
頻度 1 回以上の総数に対して累積度数が 7 割という閾値であれば、1km 格子では 1 回 / 51 日、5km 格子では 4
回 / 51 日であり、空間範囲を狭く設定した情報であれば「予測ほど降らなかったが、かなり降った」雨にひ
と夏で同じ場所において遭遇する回数は相当に少ないと考えられる。従って、実感としての空振りは過多と
はならないものと期待される。

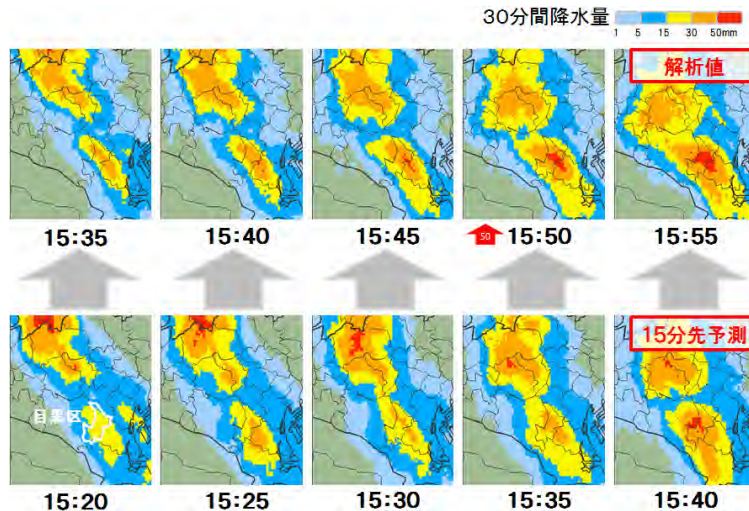
第 4.1.1 表 15 分未来の 30 分間積算降水量の検証 (予測値に誤差幅を加算する場合)

予測値に誤差幅推定値 を加算する方法は、予測期間 5 分から 30 分まで 5 分間予測降水量に 0.069、0.071、
0.074、0.077、0.079、0.082 をそれぞれ乗算し、それらに比例させて を分配し加算する。下段に急な強い
雨、中段は降り続く雨、上段は条件なし。2013 年 7 月 10 日から 8 月 31 日の 10 分毎、空間範囲は 250m 格子を単
純平均により 1km 格子に変換し、陸上の格子のみ使用した。

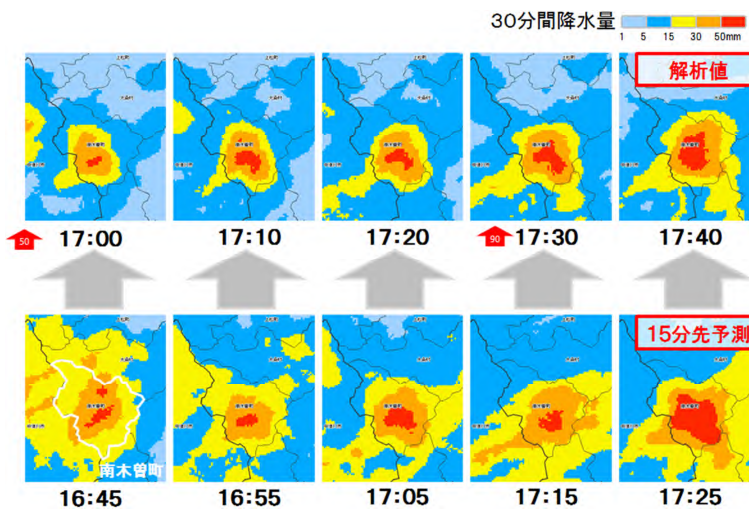
全格子		すべて						捕捉率	空振り率	空振り率
	0~1mm	1~5mm	5~15mm	15~30mm	30~50mm	50mm~				
0~1mm	2,533,654,353	27,762,881	424,475	33,467	1,293	0	0.91	0.83	0.23	
1~5mm	3,389,150	53,007,427	17,119,019	399,484	7,218	45				
5~15mm	102,814	1,010,657	15,776,139	4,207,632	188,855	2,081				
15~30mm	1,298	14,345	245,251	2,129,072	950,985	52,749				
30~50mm	1	74	1,106	40,043	306,789	146,352				
50mm~	0	0	0	48	4,044	42,501				
30分降水量の1/3以上が最後の10分に降る場合		降り続く雨						捕捉率	空振り率	空振り率
	0~1mm	1~5mm	5~15mm	15~30mm	30~50mm	50mm~				
0~1mm	2,450,905,966	17,807,334	331,572	26,070	715	0	0.85	0.79	0.22	
1~5mm	3,079,175	23,138,707	8,281,433	252,352	3,906	35				
5~15mm	102,503	906,139	6,718,566	1,772,035	88,569	951				
15~30mm	1,297	14,339	212,230	876,937	348,038	16,868				
30~50mm	1	74	1,106	31,060	132,386	45,677				
50mm~	0	0	0	48	3,031	17,258				
30分降水量の1/2以上が最後の10分に降る場合		急な強い雨						捕捉率	空振り率	空振り率
	0~1mm	1~5mm	5~15mm	15~30mm	30~50mm	50mm~				
0~1mm	2,404,136,293	5,021,040	189,222	15,271	147	0	0.70	0.87	0.35	
1~5mm	2,738,039	11,116,357	2,378,109	109,876	2,187	32				
5~15mm	101,016	752,704	2,266,880	548,162	33,416	420				
15~30mm	1,295	14,235	154,179	325,385	93,947	4,198				
30~50mm	1	74	1,072	14,050	26,641	6,890				
50mm~	0	0	0	30	717	1,783				

このように、予測値に誤差幅推定値を加えた上で解析値と合算した 15 分未来の 30 分間積算降水量は、1km
格子程度まで情報の最小単位を狭めることにより、高い捕捉率と低い空振り遭遇回数の特徴とする「リード
タイムは短い信頼度の高い情報」として、実用的な予測情報を提供できると考えられる。

次に具体事例として、第 4.1.9 図に、2013 年 7 月 23 日に、東京都目黒区で 1 時間に 100mm を超える大雨が観測された事例を示した。上段の解析値に比べて下段の 15 分未来の 30 分間積算降水量は、50mm 以上の赤色の格子の拡がり方が 5 分程度遅れているものの、15 時 40 分に予測した 15 時 55 分の予測では目黒区に 50mm 以上が拡がり始めていることが分かる。一方、第 4.1.10 図は、長野県南木曾町に土石流災害をもたらした、2014 年 7 月 9 日の局地的大雨の事例である。解析値の 30 分間積算降水量では 17 時ごろから 50mm 以上の赤色が現れ、15 分未来予測においても面積の増減はあるものの赤色の格子が予測されていることが分かる。



第 4.1.9 図 東京都目黒区（2013 年 7 月 23 日）に 1 時間 100mm を超す大雨の事例



第 4.1.10 図 長野県南木曾町（2014 年 7 月 9 日）に土石流災害をもたらした大雨

南木曾町は X バンドの観測範囲外であるが近傍まで観測データがある。X バンドの高い雨量値推定精度が X バンドの観測範囲の外側まで波及することを考えると、高解像度降水ナウキャストは土石流をもたらした領域での強雨を捉えることができたといえる。

4.1.10 おわりに

高解像度降水ナウキャストは、詳細かつ高精度なレーダー画像と降水量予測を提供するプロダクトである。現状では積乱雲がもたらす局地的な大雨を高い精度で予測するレベルには至っていないものの、15 分未来の 30 分間積算降水量のように「急な強い雨」の実用的な予測を実現している。

積乱雲がもたらす気象現象は、特に屋外で活動する人にとって危険なものであることから、気象庁ホーム

ページを通じた高解像度降水ナウキャストの提供では、屋外での携帯端末による利用も想定して、最も少ない操作でわかりやすく情報を取り出すことができる工夫を盛り込んでいる。積乱雲がもたらす災害から身を守るための知識（リーフレット：<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/index.html>）と合わせて、安全確保の行動に役立てていただきたい。

参考文献

- Simpson, J., R.H.Simpson, D.A.Andrews and M.A.Eaton, 1965: Experimental cumulus dynamics. *Reviews of Geophysics*, 3, 387-431.
- Simpson, J., and V. Wiggert, 1969: Models of precipitating cumulus towers. *Monthly Weather Review*, 97, 471-489.
- 山岸米二郎, 1973:1 次元対流モデルの特性の検討. 気象研究所研究報告, 24-1, 79-109.

4.2 降水短時間予報の改善*

降水短時間予報は、1988年に予報3時間目までを対象とした実況補外型予測(以下、EX6)として始まった(予報部予報課, 1991)。その後、メソモデル(以下、MSM)との結合処理(以下、MRG)を導入することにより、2001年には予報時間を6時間まで延長することが可能となった(荒木, 2000)。また、2013年にはMSMに加えて局地モデル(以下、LFM)も用いることによって、MRG部分に改良が施された(熊谷, 2014)。

本節では、2014年5月に行ったEX6の変更について述べる。

4.2.1 移動ベクトルの改良

EX6では、過去の降水分布のパターンマッチングによって降水域の移動ベクトルを求めており、移動ベクトルには第4.2.1表に示す3種類がある。

表中の「テンプレートサイズ」とは、パターンマッチングで利用する降水分布の正方領域の大きさのことである。また、パターンマッチングでは2枚のテンプレートを比較しており、このうち1枚は初期時刻の降水分布、もう1枚は表中の「マッチング時間差」に示した時間分過去に遡った時刻の降水分布を利用している。

第4.2.1表 降水域の移動ベクトル算出時のパラメータ

移動ベクトルの種類	一般移動ベクトル	強雨1移動ベクトル	強雨2移動ベクトル
降水の閾値	0.4mm/h	10mm/h	30mm/h
テンプレートサイズ	200km	100km	50km
マッチング時間差	1,2,3時間	1,2時間	0.5,1時間

第4.2.1表中の3種類の移動ベクトルを求めた後、強雨1,2移動ベクトルを一般移動ベクトルに埋め込み、平滑化を経て1km格子ごとに配置したものを基本移動ベクトルとしてEX6で利用している(永田他, 2007)。

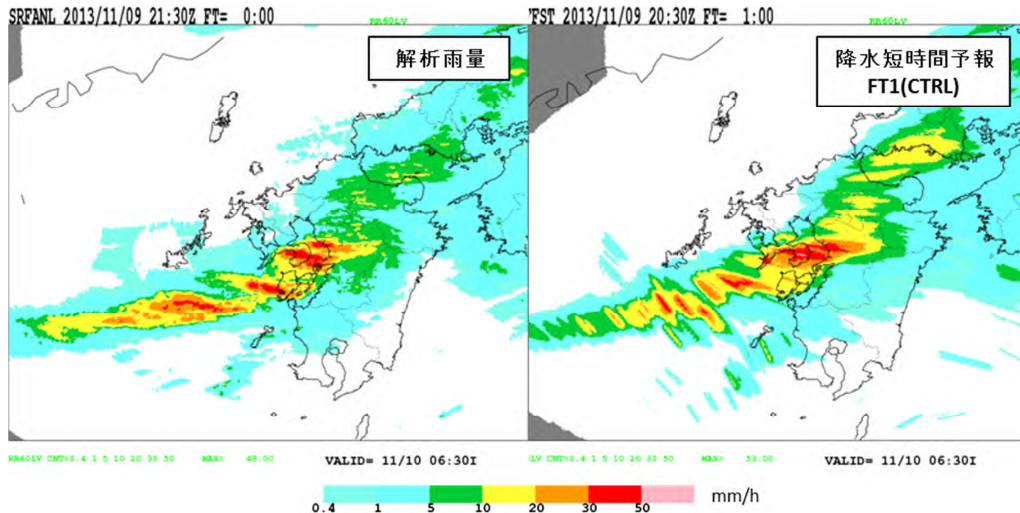
今回の変更では、以下に示す降水セルの移動ベクトルと第4.2.1表よりも長い時間スケールに対応した移動ベクトルを上記の移動ベクトルに加えることでプロダクトの精度向上を目指した。

なお、新たな移動ベクトルの導入に伴い、今後、基本移動ベクトルを降水域の移動ベクトルと呼ぶこととする。

4.2.1.1 降水セルの移動の考慮

従来の降水域の移動ベクトルの算出方法では、細かい降水セルの集合体である降水域に着目した移動ベクトルに主眼を置いていた。そのため、降水セルと降水域の移動方向が大きく異なる場合に予報積算値の走向が不自然となることがあった。走向が不自然となった事例(2013年11月9日20:30UTC 初期時刻)の予報1時間目の前1時間積算降水量分布を第4.2.1図に示す。この事例では、九州から九州西方の海上に寒冷前線がかかり、降水域は前線帯の南下の影響を受けて南下していた。一方、降水域に含まれる個々の降水セルは概ね中層の風に流されて東進していたため(図略) 解析雨量の降水の走向は東西方向となっていた。しかし、従来の予測(CTRL)では、降水域の移動ベクトルのみで初期値を移動させるため、南下成分が卓越して不自然な走向となっていた。

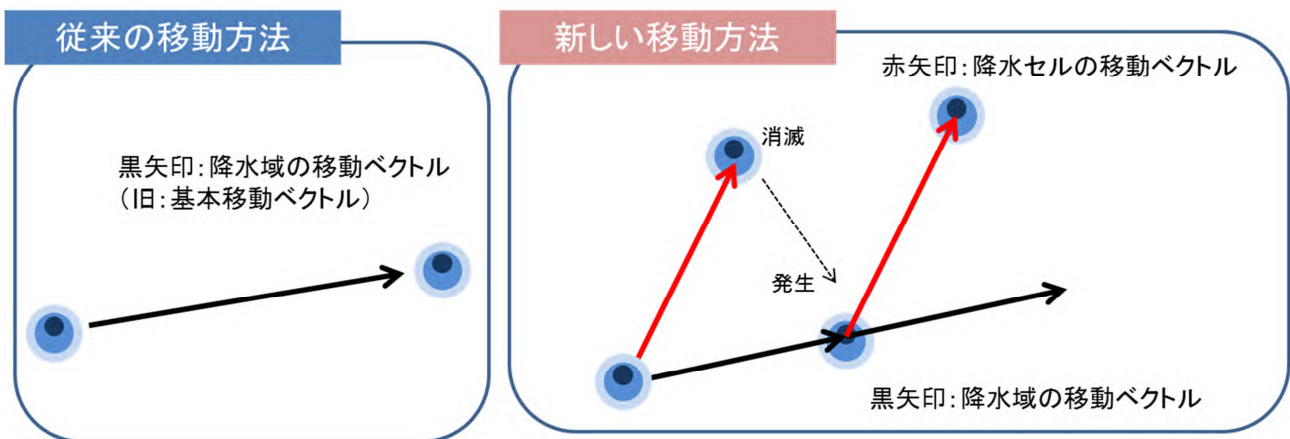
*熊谷 小緒里(気象庁予報部予報課)



第 4.2.1 図 不自然な走向の例

2013 年 11 月 9 日 20:30UTC 初期時刻の予報 1 時間目の前 1 時間積算降水量分布。左図は予報対象時刻の解析雨量、右図は従来の降水短時間予報。

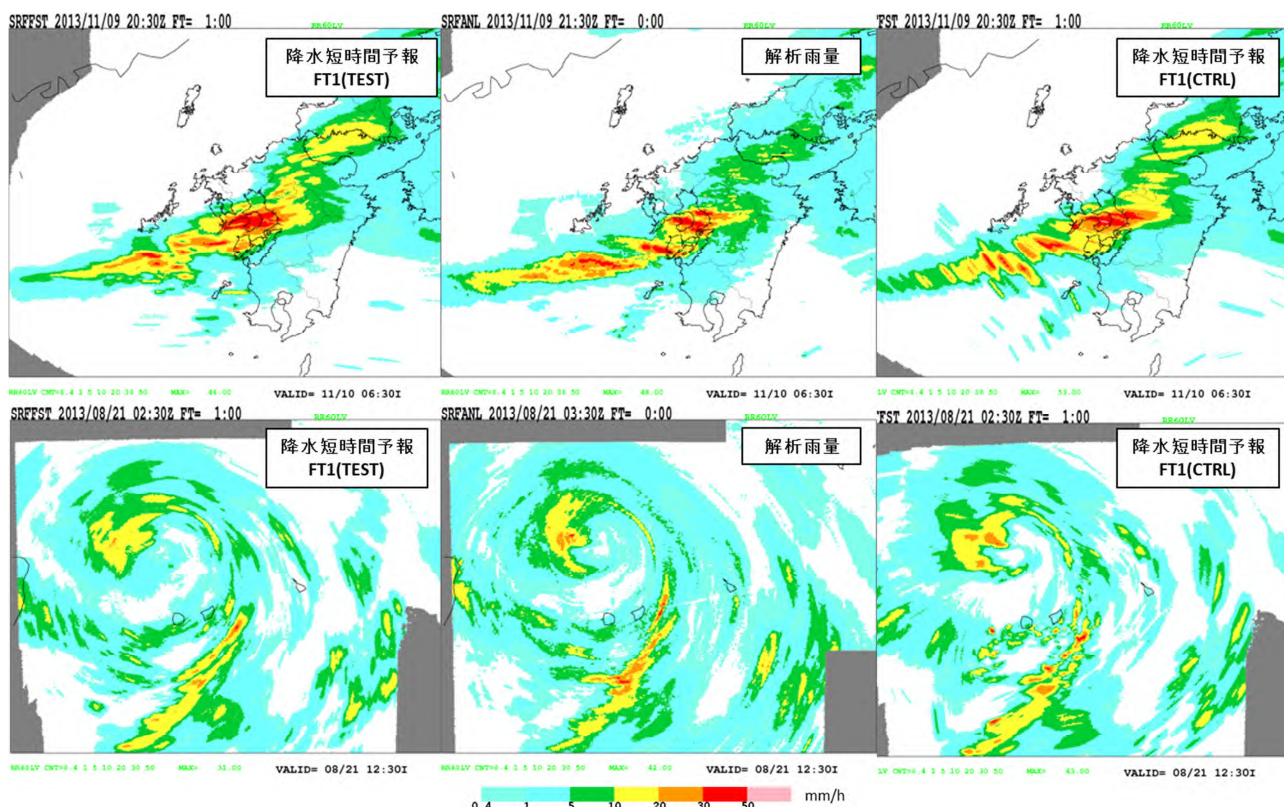
この問題を解消するには、降水セルと降水域という時空間スケールの異なる現象それぞれに適した移動アルゴリズムの導入が必要である。そこで、新たに降水セルの移動と寿命を考慮することで、より短い時間スケールの現象を表現することを可能とした。この概念を第 4.2.2 図に示す。ここで、降水セルの移動ベクトルとしては MSM の中層(700hPa)の風を用いる。従来の移動方法(第 4.2.2 左図)では、降水域の移動ベクトルに沿って降水セルを移動させながら積算することで前 1 時間積算降水量を作成していた。一方、新しい移動方法(第 4.2.2 右図)では、降水セルは、始めに降水セルの移動ベクトルである中層の風に流され、寿命を終えると再度降水域の移動ベクトル系路上に発生するという過程を繰り返し、降水セルの移動ベクトルに沿った経路でのみ積算降水量に加算される。



第 4.2.2 図 降水セル移動の概念図。丸印は降水セルを示す。

第 4.2.3 図の上段に第 4.2.1 図で示した事例を新しい予測 (TEST) 結果とともに再掲する。先に述べたように、この事例では降水セルは概ね東進しているが、強雨域としては南下しており、降水セルが降水域の移動に支配される従来の予測(CTRL)では、積算値の走向が解析雨量と大きく異なっている。一方、TEST は降水セルの移動と寿命を考慮しているため、CTRL よりも解析雨量に近い自然な分布となっている。さらに、第

4.2.3 図の下段に台風の事例(初期時刻は 2013 年 8 月 21 日 02:30UTC)の予報 1 時間目の前 1 時間積算降水量分布を示す。この事例では、降水セルの移動を考慮していない CTRL では台風を中心を回るような降水分布は表現できなかった。一方、TEST では、降水域の移動方向とは別に降水セルを中層の風で流すことができるため、台風中心を回るような降水分布を表現可能となっている。



第 4.2.3 図 2013 年 11 月 9 日 20:30UTC(上)と 8 月 21 日 02:30UTC (下) 初期時刻の予報 1 時間目の前 1 時間積算降水量分布。

左図(TEST)は降水セルの移動を考慮した降水短時間予報、中央は予報対象時刻の解析雨量、右図(CTRL)は従来の降水短時間予報。

4.2.1.2 長い時間スケールに対応した移動ベクトルの導入

第 4.2.1.1 項では従来の移動ベクトルよりも短い時間スケールの現象である降水セルの移動を考慮することで、時間スケールの表現幅が広がり、実況に近い降水分布を予測可能になった点について述べた。

一方、降水の予測を数時間先まで行うには、降水をもたらすシステムがどのように動いていくか、という情報も重要である。例えば台風の事例では、降水域は台風周辺の風に近い動きをしながら発生・消滅を繰り返す、降水システムとしては東進しているような場合が多々ある。このような降水システムの動きを表現するには、従来よりも長い時間スケールに重点を置いた移動ベクトルの導入が必要である。そこで、従来の移動ベクトルを短時間移動ベクトル、従来よりも長い時間スケールの移動ベクトルを長時間移動ベクトルと名づけ、短時間移動ベクトルは 1 - 2 時間程度の、長時間移動ベクトルは 2-3 時間程度の時間スケールの移動予測に適した移動ベクトルとなることを目指した。

短時間移動ベクトルと長時間移動ベクトルのマッチング時間差は第 4.2.2 表のように設定した。なお、長時間移動ベクトルの閾値とプレートサイズについては第 4.2.1 表に示した短時間移動ベクトルの値と同

じである。

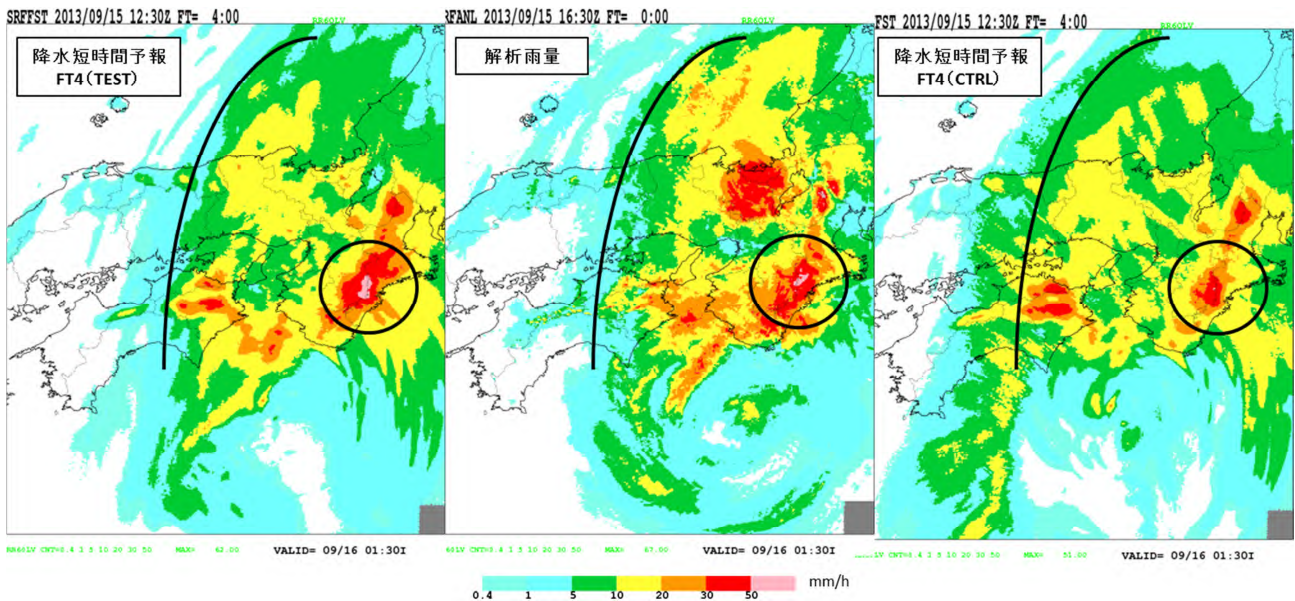
第 4.2.2 表 短時間移動ベクトルと長時間移動ベクトルのマッチング時間差

移動ベクトルの種類	一般移動ベクトル	強雨 1 移動ベクトル	強雨 2 移動ベクトル
短時間移動ベクトル	1,2,3 時間	1,2 時間	0.5,1 時間
長時間移動ベクトル	2,3 時間	2,3 時間	1,2 時間

このように、従来よりも長い時間スケールに着目して求めた 3 つの移動ベクトルを、短時間の降水域の移動ベクトルと同様に、一般移動ベクトルに強雨 1,2 移動ベクトルを埋め込むことで長時間の降水域の移動ベクトルを作成する。

さらに、長時間の降水域の移動ベクトルの導入に伴い、従来は予報時間経過に伴い MSM 中層風へ漸近していた短時間の降水域の移動ベクトル（永田他、2007）を、予報 2 時間目にかけて長時間の降水域の移動ベクトルへと漸近するように変更した。なお、予報後半は MRG によって EX6 の重みが低下するため、本変更では、長時間の降水域の移動ベクトルは予報 6 時間目までそのまま利用することとした。

第 4.2.4 図に長時間移動ベクトル導入の有無（無:CTRL,有:TEST）による予測の違いを示す。2013 年 9 月 15 日 12:30UTC 初期時刻の予報 4 時間目では、台風がゆっくりと東進するステージにあり、強雨域は徳島県以東に存在していた。四国東部から紀伊半島付近では南東風が卓越していたため、CTRL では降水域が北西方向へと移動しており、岡山県全域にも 5mm/h 以上の降水が流れ込んでいる。一方、TEST では、台風の東進を表現できるため、図中の曲線で西端を示した 10mm/h 以上の強雨域は徳島県以東へと移動し、岡山県西部には 5mm/h 未満の降水のみが残り、紀伊半島（図中の丸で囲った部分）には 50mm/h 以上の降水を予測できている。



第 4.2.4 図 長時間移動ベクトル導入有無による予測の違い。

2013 年 9 月 15 日 12:30UTC 初期時刻の予報 4 時間目の前 1 時間積算降水量。左図(TEST)は、長時間移動ベクトルを導入した降水短時間予報、中央は予報対象時刻の解析雨量、右図(CTRL)は従来の降水短時間予報。

4.2.2 ブレンド降水変化率の利用

降水短時間予報では、2013年からMSM予測降水とLFM予測降水をブレンドして求めたブレンド降水を用いている(熊谷, 2014)。このブレンド降水とEX6による予測降水を初期時刻・領域毎の精度によって決めた重みで、重み付き平均したものが降水短時間予報の予測値である。しかしながら、重み付き平均だけでは数値予報資料の示す情報を十分に生かし切れないのが現状である。例えば、EX6とブレンド降水の予報位置がずれていたり、EX6の盛衰が不十分であったりする場合には改善の余地が大きい。

本変更では、数値予報資料のさらなる活用の第1歩として、ブレンド降水変化率を利用開始することとした。

ここで、ブレンド降水変化率を第4.2.1式のように定義する。

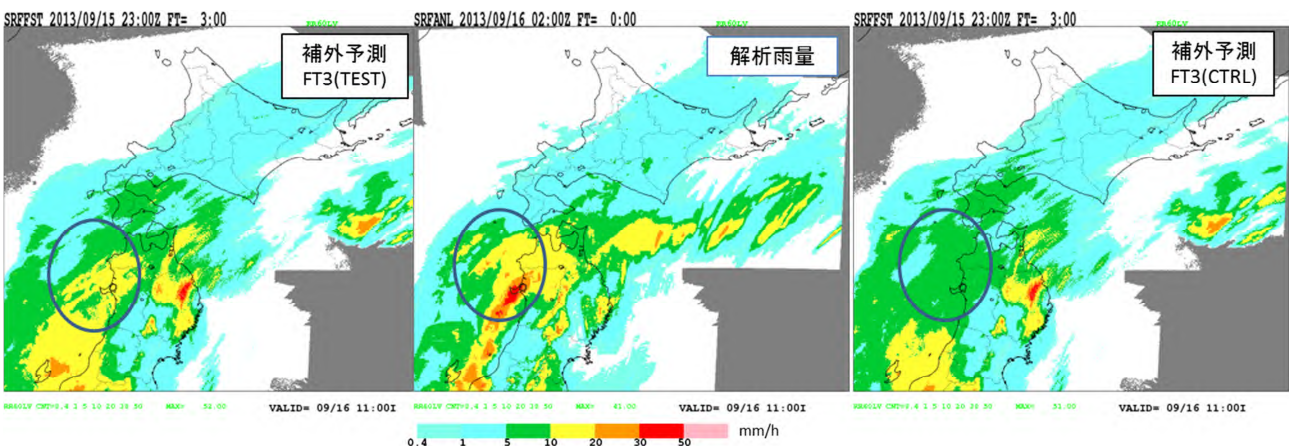
$$\text{ブレンド降水変化率}(FT, x, y) = \frac{\text{ブレンド降水の非地形性降水}(FT, x, y)}{\text{ブレンド降水の非地形性降水}(FT_0, x_0, y_0)} \text{ ---- (4.2.1)}$$

第4.2.1式中のFTは予報時間、(x,y)はFTでの座標、FT₀は初期時刻、(x₀,y₀)は初期時刻での座標である。非地形性降水とは、地形の影響を受けずに風下へ移動していく降水のことであり、地形の影響を受けて停滞する降水のことは地形性降水と呼び区別している。ここでブレンド降水の非地形性降水だけを用いるのは、地形性降水には地形性降水に特化した別処理があるためである(宮城他, 2013)。なお、ブレンド降水の非地形性降水としては周辺約100km四方で平均した値を用いる。EX6の初期値は、(x₀,y₀)の位置から降水地域の移動ベクトル及び降水セルの移動ベクトルによって(x,y)へと移動しながら、第4.2.1式のブレンド降水変化率によって盛衰する。この変化率を用いたEX6の予測値は、第4.2.2式のように書くことができる。

$$\text{EX6の予測値}(FT, x, y) = \text{初期値}(x_0, y_0) \times \text{ブレンド降水変化率}(FT, x, y) \text{ ---- (4.2.2)}$$

なお、予報2時間までは主に解析値の盛衰傾向を利用した盛衰パラメータ(宮城他, 2013)によって盛衰し、徐々にブレンド降水変化率による盛衰へと変化していくように設定した。EX6の予測値を求めた後は、従来通りにブレンド降水とMRGする。

第4.2.5図に2013年9月15日23:00UTC初期時刻の予報3時間目のブレンド降水変化率利用有無(無:CTRL, 有:TEST)によるEX6の違いを示す。青森県から秋田県の日本海側で、解析雨量では強雨域が存在する(図中の丸で囲った部分)が、ブレンド降水変化率を利用していないCTRLのEX6では表現できていない。一方、ブレンド降水変化率を利用しているTESTでは、EX6の不十分な発達を補っている。

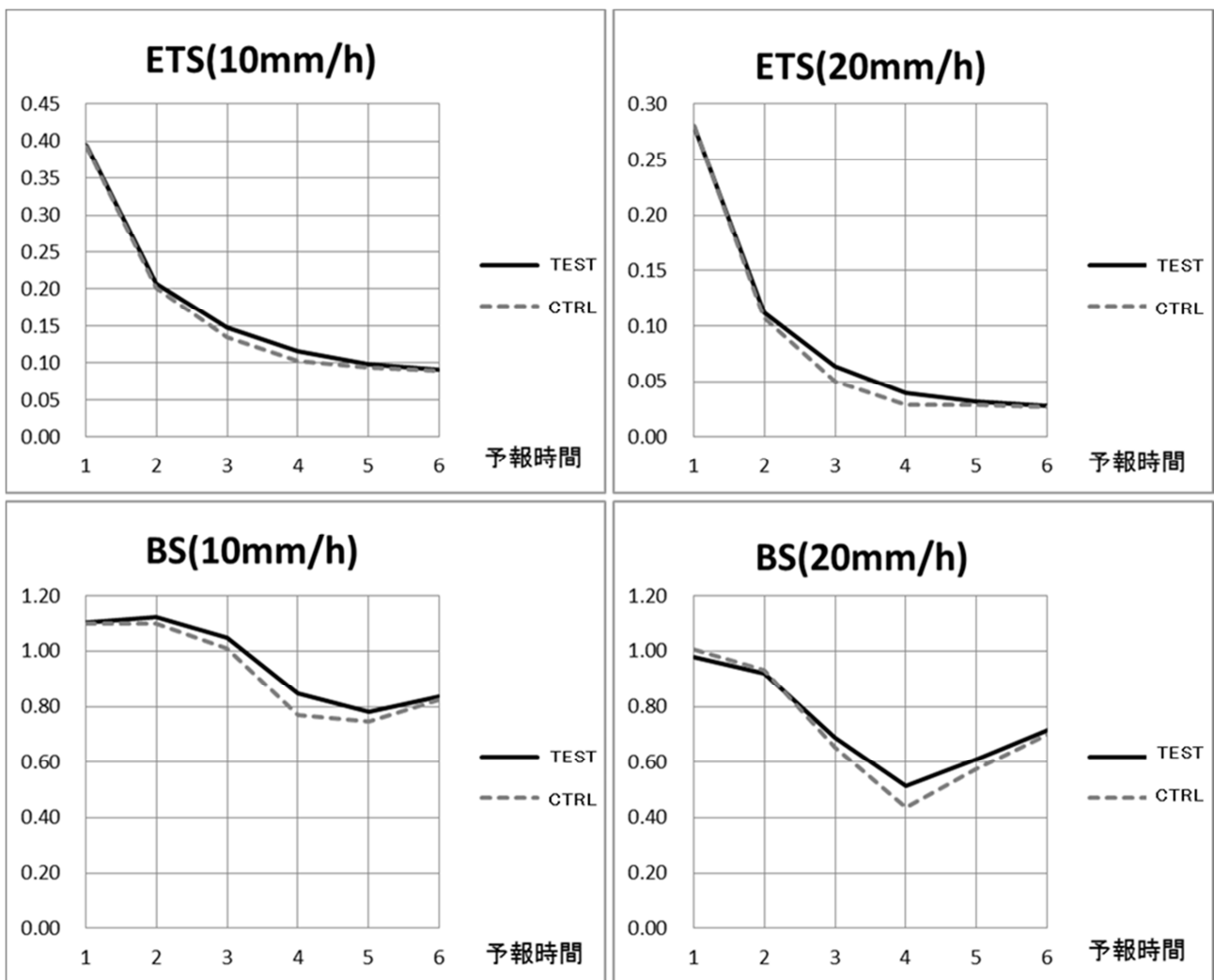


第4.2.5図 ブレンド降水変化率利用有無によるEX6の違い。

2013年9月15日23:00UTC初期時刻の予報3時間目の前1時間積算降水量分布。左図(TEST)はブレンド降水変化率利用したEX6、中央は予報対象時刻の解析雨量、右図(CTRL)はブレンド降水変化率を利用していないEX6。

4.2.3 統計検証

第 4.2.6 図に第 4.2.3 表期間の統計検証結果を示す。上段がエクイタブルスレットスコア (ETS) で下段がバイアスコア (BS) である。TEST はこれまで述べた全ての変更を加えた降水短時間予報のスコアで、CTRL は変更前のスコアである。主に予報 3,4 時間で TEST の ETS が CTRL の ETS を上回っていることから本変更の精度向上が確認された。また、予報 4 時間目を中心に TEST の BS が CTRL の BS と比べて若干高い。この原因として以下の 2 点が考えられる。1 つは、第 4.2.4 図の例のように長時間移動ベクトルによって降水システムの動きを表現できるようになり、風下に流れにくくなったために風上での強雨の予測が増えたこと、もうひとつは、CTRL の閾値 20mm/h の BS が 1 より小さいことから、CTRL に強雨の予測頻度が観測頻度に比べて少ない特性があり、ブレンド降水変化率利用によって補正していることである。また、予報 1 時間目で TEST の閾値 20mm/h の BS が CTRL の BS より減少しているのは、降水セルの移動を考慮することで強雨域がやや広がりにくくなったことが主な原因と考える。



第 4.2.6 図 統計検証結果

解析雨量に対する全国陸上の 5km 格子平均値を用いた閾値 10(左),20(右)mm/h のエクイタブルスレットスコア(上)とバイアスコア(下)。横軸は予報時間。TEST は変更後、CTRL は変更前の降水短時間予報。

第4.2.3表 統計検証に用いた降水短時間予報の初期時刻(UTC)

2013/06/18/11:00-2013/06/20/14:30	2013/06/25/13:00-2013/06/26/07:30
2013/07/02/20:00-2013/07/07/07:30	2013/07/11/20:30-2013/07/15/06:30
2013/07/25/00:00-2013/07/30/02:30	2013/08/05/01:30-2013/08/05/13:30
2013/08/08/10:00-2013/08/09/04:30	2013/08/22/15:00-2013/08/25/02:30
2013/08/29/12:00-2013/08/31/11:30	2013/09/03/06:00-2013/09/04/23:30
2013/10/19/16:00-2013/10/20/13:30	2013/11/09/14:00-2013/11/10/08:30
2013/11/24/15:00-2013/11/25/19:30	2013/12/09/05:00-2013/12/09/23:30
2014/02/14/04:00-2014/02/15/03:30	

4.2.4 まとめと今後の予定

従来の降水域の移動に加えて、降水セルの移動と寿命を考慮するように変更した。さらに、従来よりも長い時間スケールの移動ベクトルを導入した。これによって、表現可能な現象の時間スケールの幅が広がり、より多彩な事例への対応が可能となった。なお、降水セルのような時空間スケールの小さい現象の予測に関しては、今後、高解像度降水ナウキャストとの連携を図る予定である。また、数値予報資料のさらなる活用の第1歩として、ブレンド降水変化率の利用を開始した。これによって、EX6の盛衰を若干補うことができるようになったが、今後、ブレンドする前のMSM, LFMそのものの予測降水量の変化傾向や、各種要素の利用などの検討も必要である。

参考文献

- 荒木 公仁, 2000 : 降水6時間予報, 平成12年度数値予報研修テキスト 数値予報課報告・別冊47号 合併号, 気象庁予報部, 36-41.
- 熊谷 小緒里, 2014 : 降水短時間予報の改善, 平成25年度予報技術研修テキスト, 気象庁予報部, 67-71.
- 宮城他, 2013 : 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, 102-115.
- 永田 和彦, 辻村 豊, 2007 : 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年度量的予報研修テキスト, 気象庁予報部, 9-24.
- 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, 測候時報, 58(3), 189-207.