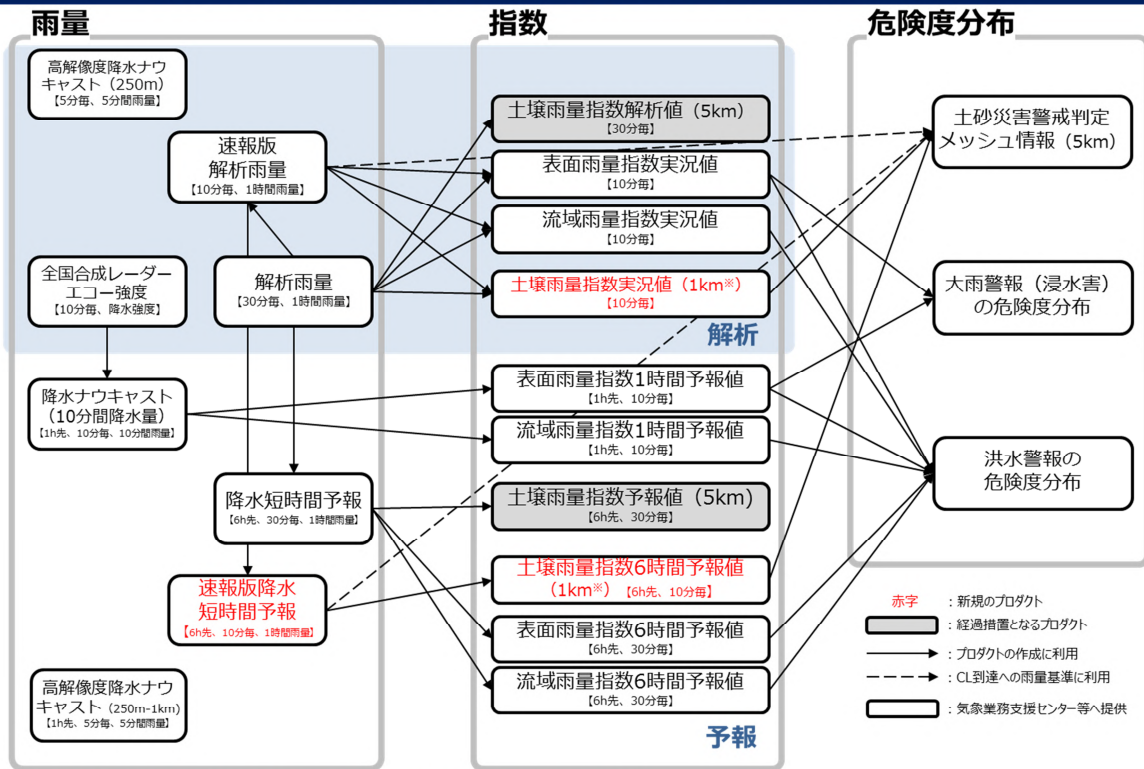
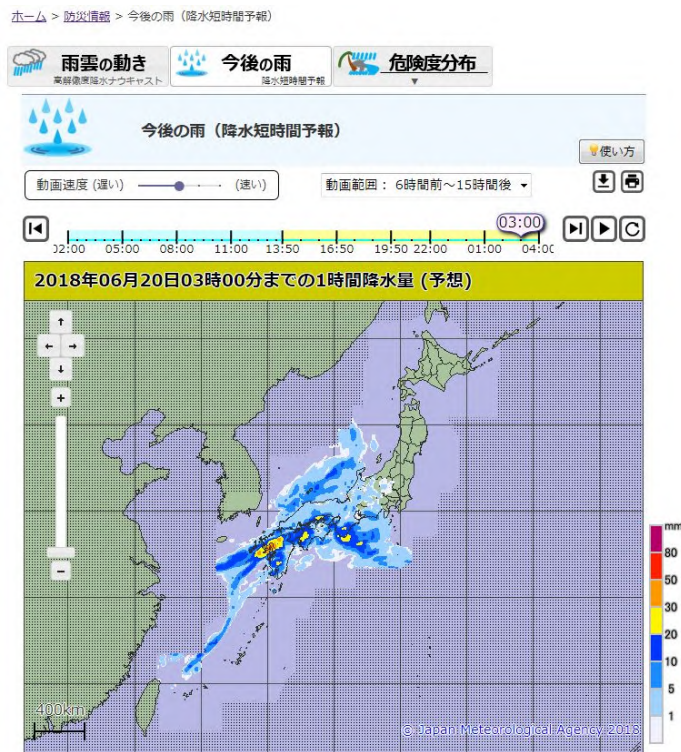


雨量・指数・危険度分布の主なプロダクト (H30.3時点)



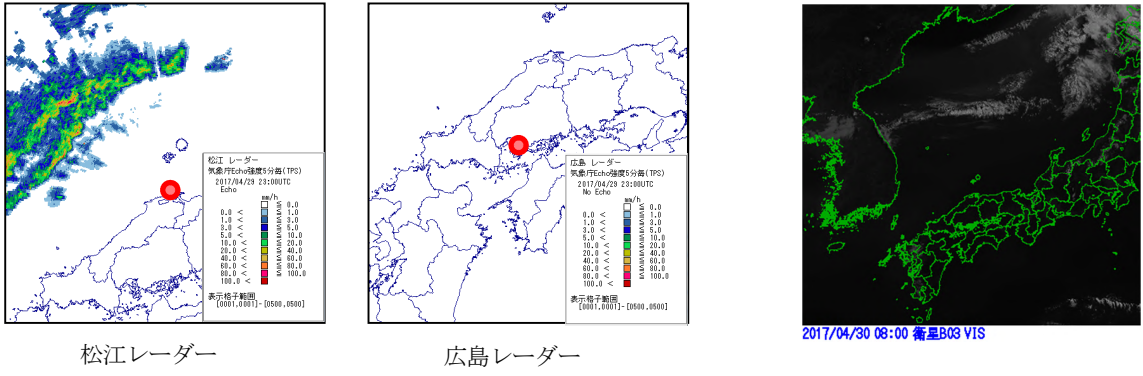
※「土壌雨量指数実況値・6時間予報値(1km)」の5km格子内は同じ値

第 7.1.2 図 解析雨量・降水短時間予報を用いた主なプロダクトと利用データの流れ



第 7.1.3 図 「今後の雨 (降水短時間予報)」 ページの表示例 (2018 年 6 月 19 日 13 時 50 分 (JST) 初期値)

解析雨量、速報版解析雨量、速報版降水短時間予報、降水 15 時間予報をシームレスに表示。



第 7.2.1 図 2017 年 4 月 30 日 08 時 00 分 (JST) の松江と広島のリレー降水強度 (左図) と衛星可視画像 (右図)

7. 2 解析雨量と降水短時間予報の改善

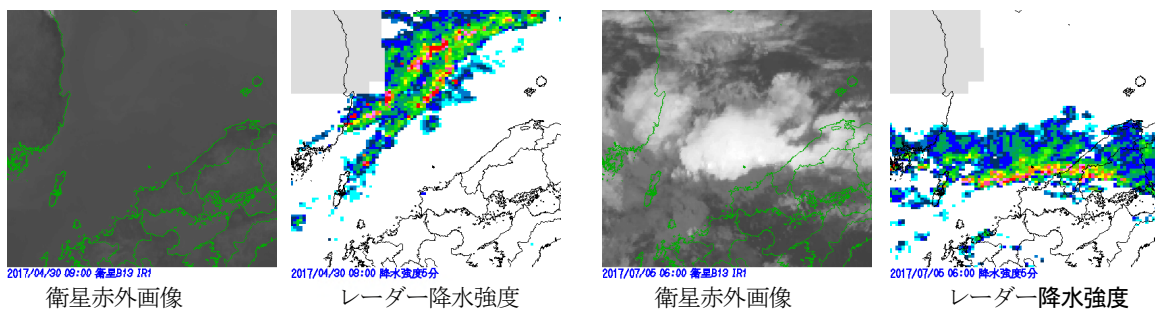
7. 2. 1 解析雨量の改善 (2018 年 5 月 23 日) *

気象レーダー観測では、アンテナから送信された電波が雨滴によって反射される割合を測定することにより降水の強さを観測する。電波は雨滴以外の山や建物、大気中を飛ぶ鳥や虫、海面などによっても反射されるため、実際には降水がないにもかかわらず、見かけ上降水があるように観測される事がある。これを「非降水エコー」という。特に春には、大気の状態により電波が屈折して海面で顕著に反射され、解析雨量や降水短時間予報において遠方の海上で過大な降水が表示されることがある。

一例として、第 7.2.1 図に 2017 年 4 月 30 日 08 時 00 分 (JST) の事例を示す。松江レーダーでは日本海に強度の強いエコーがみられるが、広島レーダーでは、同じ場所にエコーはみられない。衛星の可視画像でも同領域に明瞭な雲はみられない。

このような非降水エコーを軽減するため、まず高解像度降水ナウキャストに、2017 (平成 29) 年 11 月 1 日から、海上の非降水エコーを対象にした品質管理を導入した。続いて解析雨量 (正規版/速報版とも) にも、2018 (平成 30) 年 5 月 23 日に同様の処理を導入した。この品質管理の具体的方法について、以下に述べる。

衛星の赤外画像では、雲頂高度が低いほど輝度温度が高くなり、地上・海面温度に近づく。輝度温度が地上温度・海面水温に近いことは、発達した雲がないこと、即ち同じ場所にレーダーで観測された強いエコーは非降水エコーである可能性が高いことを意味する。そこで衛星赤外画像を利用して、海上の非降水エコーの強度を弱めることができる。



第 7.2.2 図 衛星赤外画像とレーダー降水強度

左側の 2 枚の図のように、レーダー画像でエコーがある場所で衛星赤外画像による輝度温度が高い場合はエコーが非降水エコーであるとみなして降水強度の上限値を小さくする。一方、右側の 2 枚の図のように、レーダー画像でエコーがある場所で衛星赤外画像による輝度温度が低い場合はエコーが本物とみなして、降水強度の上限値を大きくする。

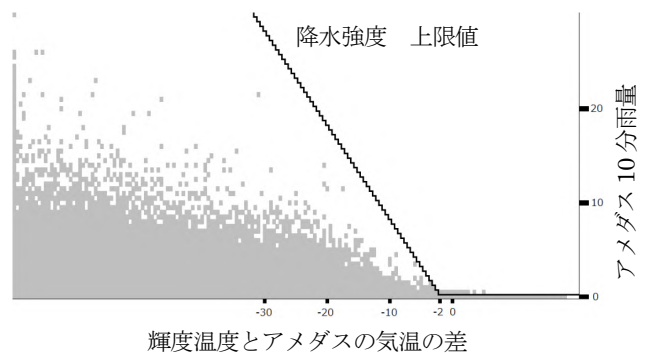
*永田 和彦 (気象庁予報部予報課)

具体的には、気象衛星ひまわりの赤外 1 チャンネル（バンド 13、波長 $10\mu\text{m}$ ）の輝度温度と海面水温の差とアメダス 10 分雨量を比べて、アメダス 10 分雨量を上回るように降水強度上限値を設定する。即ち、赤外面像の輝度温度が低いときは、降水強度上限値を大きく（第 7.2.2 図の右図）、海面水温と等しいときは上限値をゼロに設定（同左図）する。この上限値でレーダーの降水強度を切り捨て処理することにより、雲に対応しない非降水エコーの強度を弱めることができる。

衛星で観測された赤外輝度温度と降水強度上限値の関係式を、2011 年 1 月から 2015 年 6 月までのアメダス 10 分雨量と、輝度温度とアメダスの気温の差の分布から導出した（第 7.2.3 図）。アメダス観測点を中心とした 24km 四方の領域内で最も低い輝度温度とアメダスの気温の差と、アメダス 10 分雨量の散布図を作成して、降水イベントが全て含まれるように降水強度上限値を設定した（第 7.2.3 図）。地形の起伏によりアメダス気温が周囲の地上気温を代表していない場合や、霧などの場合には、10 分雨量が最も小さい 0.5mm の階級において降水強度上限値を超えることがある（全体の 0.01%）が、10 分雨量が大きいときには降水強度上限値を超えないことがわかる。こうして得られた地上における関係式を用いて降水強度を弱める非降水エコーの除去処理を、顕著な非降水エコーの生じうる海上の格子点において適用する。また、この関係式にあてはめる海面水温は季節変動・年々変動することを考慮し、格子点毎に過去 20 日間に観測された赤外輝度温度の最大値を求め、その温度を海面水温の推定値とする。

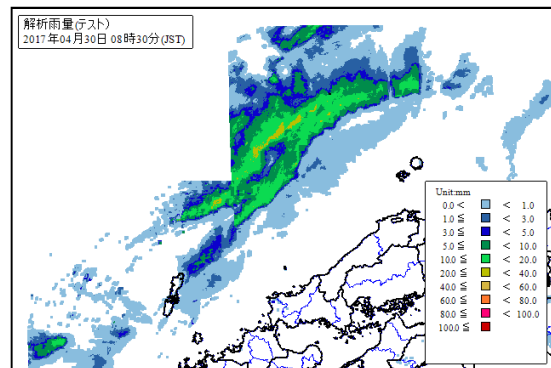
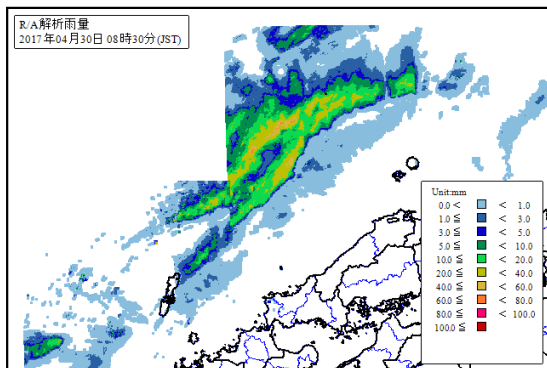
衛星赤外面像を用いた降水強度上限値として、高解像度降水ナウキャストと解析雨量で共通のものを利用する。解析雨量では、レーダーサイト毎に観測された降水強度を積算して 1 時間降水強度を作成するため、当該非降水エコー除去処理は、降水強度の積算の前に、5 分毎の降水強度観測値に対して行う。

第 7.2.4 図に衛星赤外面像による降水強度上限値を適用した解析雨量の例を示す。日本海西部に広がっていた強い非降水エコーにより、多いところで 60mm 程度の雨量が解析されていたが、上限値適用後は、最大 30mm 程度に抑制されたことがわかる。しかし、海面水温と輝度温度に差があったことから、完全に消去することは難しい。



第 7.2.3 図 降水強度上限値の求め方

2011 年 1 月～2015 年 6 月の全ての降水事例を、灰色の点として示した。



第 7.2.4 図 降水強度上限値を適用した解析雨量の例（2017 年 4 月 30 日 08 時 30 分（JST））

左図は改良前、右図は改良後。図中の雨量は全て非降水エコーによるもの。

7. 2. 2 降水短時間予報の改善*

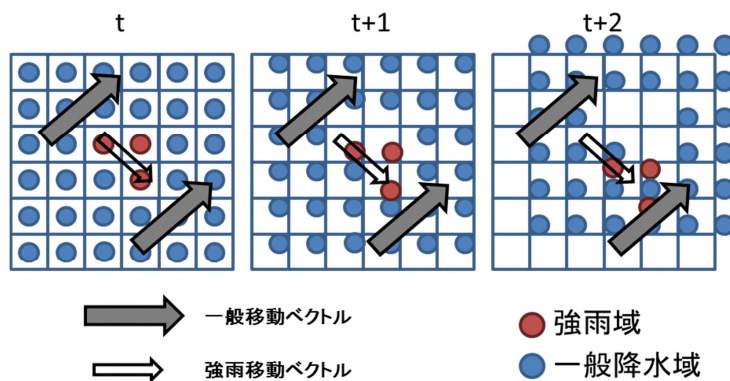
降水短時間予報は、実況補外型予測による降水量予測値（EX6：実況補外）と、数値予報モデルの MSM 及び LFM の降水量予測値を合成したもの（BLD：ブレンド）を、更に合成（MRG：マージ）して予報を作成している。ここでは平成 28 年度予報技術研修テキスト以降に実施した降水短時間予報の改善について、7.2.2.1 では実況補外型予測 EX6 内での予測の改善について、7.2.2.2 では EX6 予測値と BLD 予測値を合成する MRG 処理での改善について簡単に解説する。なお、ここで述べる内容は、正規版／速報版降水短時間予報いずれにも共通の改善項目である。

7. 2. 2. 1 強雨予測及び降水域の移動手法の改善（2017 年 6 月 26 日）

(1) 強雨域の予測改善

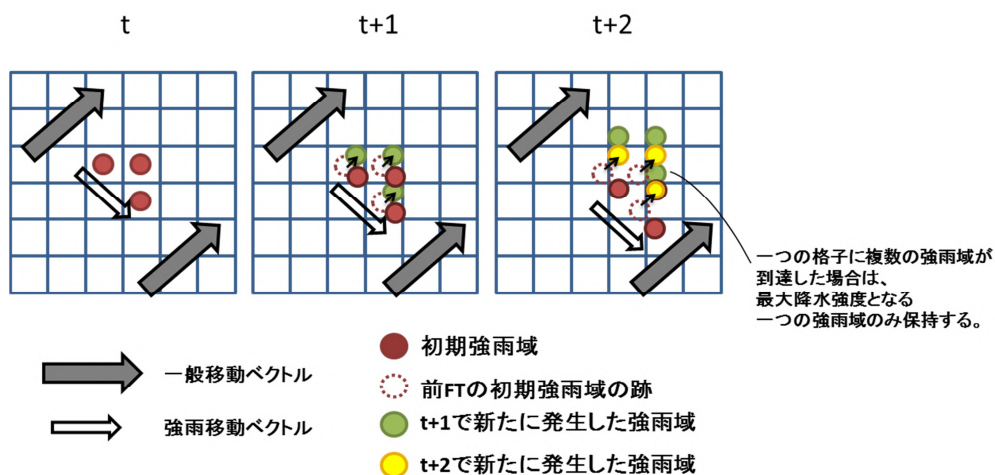
実況補外型予測 EX6 では降水域の予測を、強雨域（10mm/h 以上：強雨ベクトル 1、30mm/h 以上：強雨ベクトル 2）と一般降水域（一般移動ベクトル）とで別々の移動ベクトルを算出して行っている。

第 7.2.5 図に典型的な強雨域と一般降水域での降水予測の模式図を示した。実況補外型予測 EX6 の予測は強雨域と一般降水域を移動ベクトルによって移動させ、各格子点での積算値を予測するというものである。強雨が存在する事例では、強雨が新たに発生したり消滅したりすることにより、強雨移動ベクトルと一般移動ベクトルは通常は一致しない。それにより時間経過とともに両者のずれが目立ってくることになる。通常、



強雨移動ベクトルの絶対値は小さいので初期値（降水強度）があまり移動せず、結果として強い降水積算値を予測する。一方、一般移動ベクトルは絶対値が大きいため 1 格子の滞在時間が短くなるので積算値も小さくなる。このことは原理どおりでよいのだが、両者の移動方向や速さに大きな違いがある場合、結果的に予測降水域の分断

第 7.2.5 図 実況補外型予測 EX6 における強雨域と一般降水域の動きの違い
大きな矢印は一般移動ベクトル、中程度の矢印は強雨移動ベクトルを表す。



第 7.2.6 図 強雨かつ動きの遅い降水域に対する強雨の分布変化のモデル化

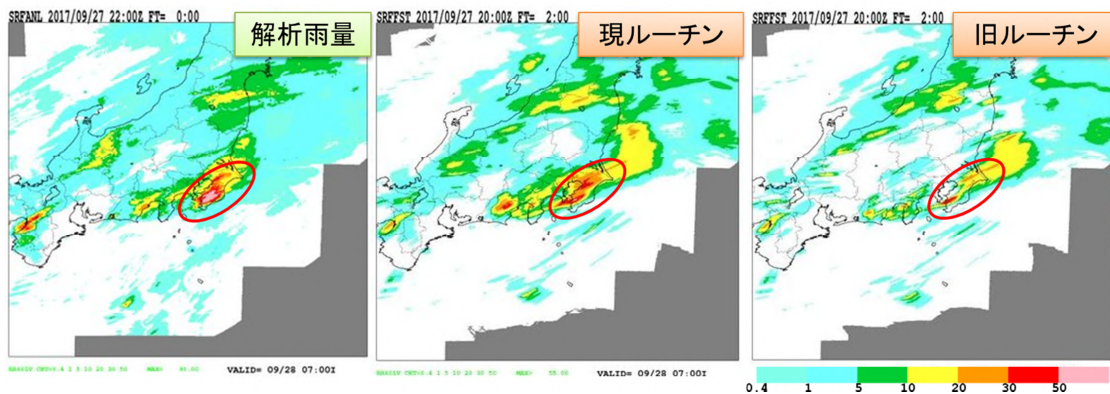
*辻村 豊（気象庁予報部予報課）

や無降水域を出現させることがある。

そこで、周辺の弱い降水域の移動を考慮した強雨分布変化モデルを導入することとした。これを簡潔に述べれば、「一般降水域中にある強雨かつ動きの遅い降水域」に対して、強雨ベクトルと一般移動ベクトルの差で生じる空白域を埋めるように新たな強雨域を発生させるというものである。

第 7.2.6 図にその概念図を示した。「強雨かつ動きの遅い降水域」²を強雨ベクトルで移動させ（左）、前時刻に強雨のあった場所で新たに強雨域を発生させて一般移動ベクトルで移動させる（中央）。更に次の時刻で再び前時刻に強雨のあった場所で新たに強雨域を発生させて移動させることを繰り返す（右）。もちろん、いつまでも強雨を発生させ続ければ降水予測を過大にし、予測精度も改悪するのは明らかなので、「発生した降水域は時間経過とともに 5km 平均降水強度に漸近させる（＝発生させた強雨域を周囲の一般降水域に馴染ませる）」ようにしている。また、第 7.2.6 図の図中にも書いたように「複数の強雨域が同一の格子に到達した場合には最大強度のもの一つだけを残す」ようにしている。後者の条件により、強雨ベクトルと一般ベクトルの差違が大きくないような場合には強雨域を発生させたとしても重なりが多くなるだけなので、あまり過大にならないことが期待できる。

強雨予測の改善の顕著な例として 2017 年 9 月 28 日 07 時 00 分 (JST) の例を示す。第 7.2.7 図の解析雨量(左)で、房総半島付近にはおよそ 70mm 前後の降水域が広がっているが、その 2 時間前の 2017 年 9 月 28 日 05 時 00 分 (JST) 初期値の実況補外型予測 EX6 の 2 時間先予測値 (FT2)³ の現ルーチン(中央)と旧ルーチン(右) を比較すると、旧ルーチンでは強雨域が狭くて周辺に無降水域がみられるのに対し、現ルーチンでは強雨域が房総半島に広がり実況に近い。すなわち、今回導入したメカニズムがうまく機能しているのがわかる。なお、第 7.2.7 図の新旧ルーチン比較では、岐阜県や神奈川県、福島県などに、現ルーチンでの山越え評価(詳しくは蟻坂(2017)を参照)の再調整結果による違いがみられる。



第 7.2.7 図 強雨かつ動きの遅い降水域に対する強雨予測の改善例

2017 年 9 月 28 日 07 時 00 分 (JST) の解析雨量(左)、05 時 00 分 (JST) 初期値による実況補外型予測 EX6 の 2 時間先予測値 FT2 の現ルーチン(中央)、旧ルーチン(右) : 赤丸領域での強雨予測の改善が顕著。

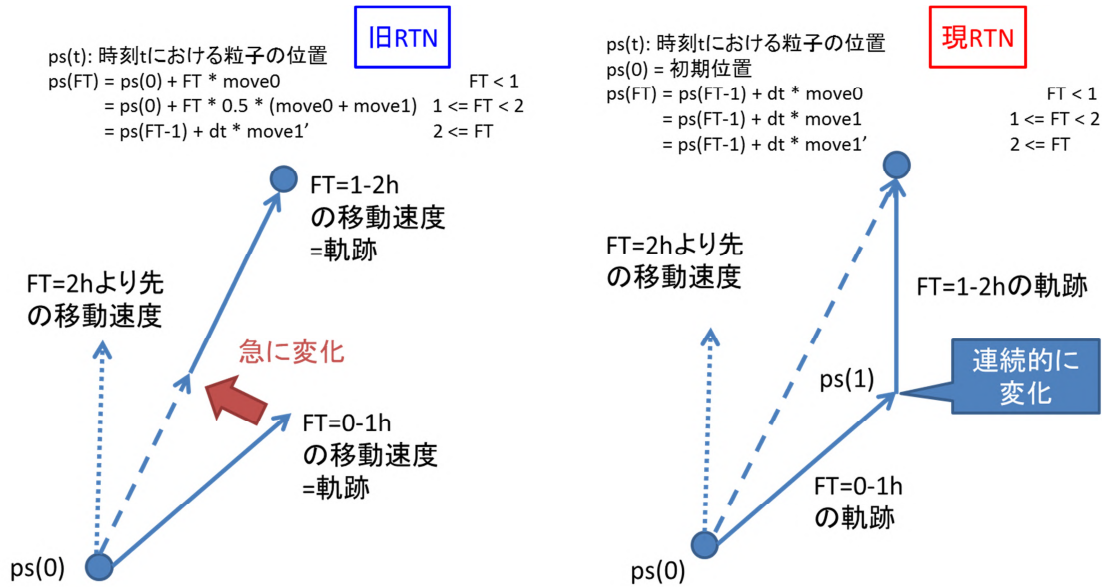
(2) 降水域の移動手法の改善

従来の実況補外型予測 EX6 では、移動ベクトルが大きく変化する場において、降水域が不自然な移動をする事例があったが、これを滑らかに移動するよう改良した。

²対象とする「強雨かつ動きの遅い降水域」は以下の条件を満たすものとしている：

$$| \text{一般移動速度} - \text{強雨移動速度} | \geq 1 \text{ [km/h]} \quad \text{かつ} \quad \text{降水強度} / \max(1, |\text{強雨移動速度}|) \geq 0.2 \text{ [mm/km]}$$

³ FT2 のように書いた場合は 2 時間先の 1 時間積算値を表す。FT1~2h 等と書いた場合には予測時刻 FT の時間範囲 $1 \leq \text{FT} \leq 2$ を表す。

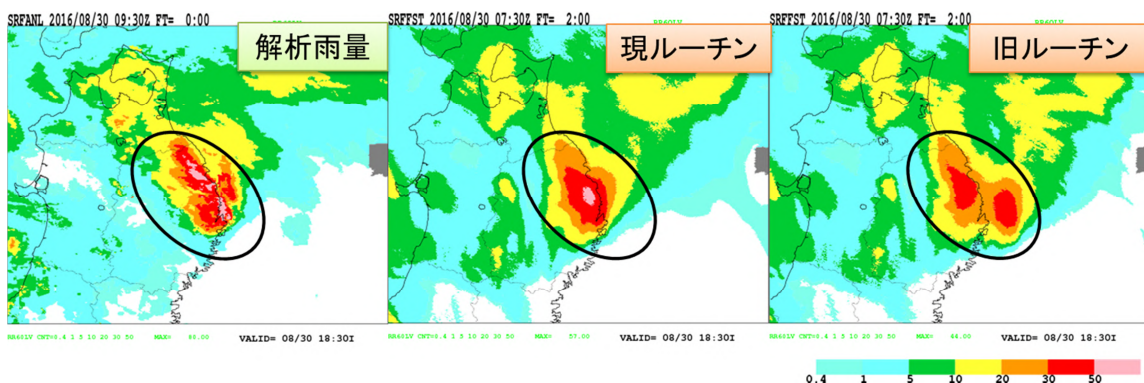


第 7.2.8 図 実況補外型予測 EX6 での移動ベクトルの利用方法の改善

図中の {前期ベクトル move0、中期ベクトル move1、move1' } 等の詳細については熊谷(2015)を参照。

具体的には第 7.2.8 図に示したように旧ルーチンでは $FT=1\sim 2h$ の部分を「線形補外」予測の遷移期間と位置づけて、同じ初期位置 $ps(0)$ から移動させて予測するようにしていたが、現ルーチンでは $FT=1\sim 2h$ の部分を $FT=1h$ での移動先の位置 $ps(1)$ を起点として計算するように改めた。実はこのような移動先の位置から順次計算するやり方は 2006 年以來 $FT=2h$ 以降で用いられていた方法⁴であるが、計算時間・精度等の制約もあって $FT=2h$ までの計算では採用していなかった。今回様々なアルゴリズムを見直して計算処理の高速化を図り、滑らかな予測への改善・保守の容易さなどから、全ての予報時間 $FT=0\sim 6h$ で 1km 格子かつ初期時刻から移動ベクトルを追いながら各予報時刻の降水域の位置を決めていく形式に改めた。

第 7.2.9 図は、2016 年 8 月 30 日 16 時 30 分 (JST) 初期値の台風第 10 号の事例である。変更前の旧ルーチンでみえる三陸沖の海上の降水域は、旧ルーチンのアルゴリズムに則って $ps(0)$ の初期位置から移動させた結果、陸地から離れた経路を通して海上に降水を予測した。一方、変更後の現ルーチンでは移動先の位置 $ps(1)$ を起点としたため陸地に近い経路を通り、別の降水域の予測値と重なった結果、実況に近い強い予測値となった。今回の移動手法の改善の効果がよくあらわれている事例である。



第 7.2.9 図 2016 年 8 月 30 日 16 時 30 分 (JST) 初期値の事例検証

左: 解析雨量 18 時 30 分 (JST)、中: 現ルーチン、右: 旧ルーチン。予測値はいずれも予報 2 時間目の $FT2$ で、解析雨量は予報時刻に対応する時刻を示す。

⁴ 高速化のために計算格子も「 $FT=2h$ 以降で 2km 格子」に粗くして計算していた。

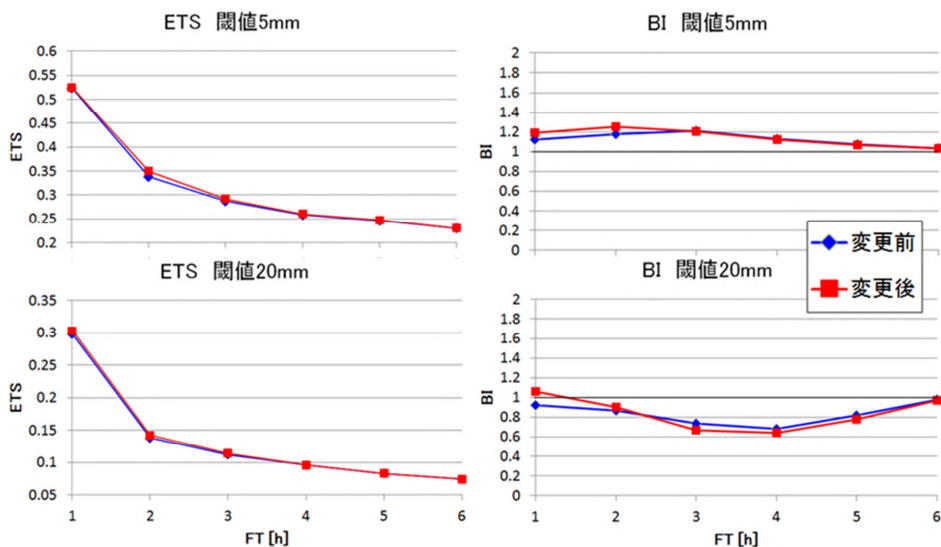
(3) 統計検証結果

第 7.2.10 図に、統計検証結果として、7.2.2 項の改善を実施する前後の ETS⁵及び BI⁶を示す。検証では、真値に解析雨量を利用し、陸域を対象として 5km 格子平均で比較を行った。

第 7.2.10 図を見ると、5mm・20mm 閾値ともに、予報 2 時間目 FT2 までにおいて、ETS は若干改善していることがわかる。BI は若干増加し、改善前に比べて 5mm 以上の降水予測の頻度は過大、20mm 以上は適切となった。個々の事例（図略）を見ると、BI 増加に伴う空振り事例よりも、捕捉事例の増加の方が多く、予測精度の改善が確認できた。3 時間目 FT3 以降の予測について、5mm 以上の降水予測は ETS、ともにほぼ変わらない。20mm 以上について、BI は減少傾向であるものの、ETS は従来とほとんど変わらず予測精度は従来と同等である。

(4) 業績指標：降水量比スコア

第 7.2.11 図に統計検証結果の一つとして降水量比スコア⁷を示した。2013～2017 年の 5 年計画の業績指標目標（第 7.2.12 図の赤線）は、閾値 20mm の降水量比スコア 5km 格子平均 FT3 の値で 0.52（2012 年は 0.47）であったので、7.2.2 項のルーチン変更に伴う+0.9 ポイント改善は業績指標の達成にとって重要であった。



第 7.2.10 図 解析雨量を真値とした 5km 格子平均値の陸域による統計検証

期間は 2016 年 1 月 1 日～31 日、2016 年 6 月 1 日～30 日、2016 年 8 月 16 日～31 日。

上段は閾値 5mm、下段は閾値 20mm。左列は ETS、右列は BI。

各グラフの横軸は予報時間[h]、青線が変更前の旧ルーチン、赤線が変更後の新ルーチン。

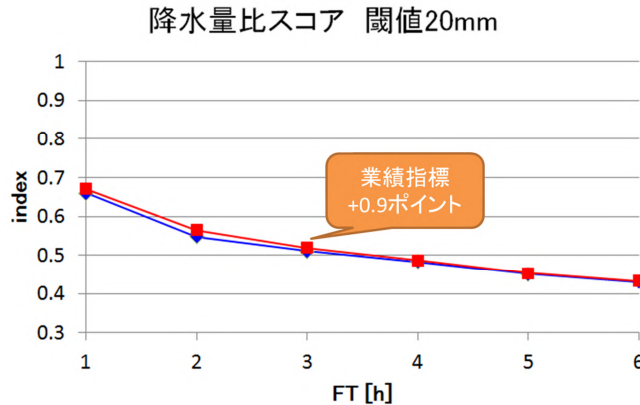
⁵ ETS：エクイタブルスレットスコア。降水予測が適中した割合を示し、最大値の 1 に近くなるほど予測精度が高い。

⁶ BI：バイアススコア。降水の予測頻度の指標を示し、1 のとき予測頻度が実況頻度と一致、1 より小さいとき予測頻度が実況頻度より過小、1 より大きいとき予測頻度が実況頻度より過大を意味する。ともに、詳しくは小林(2018)を参照。

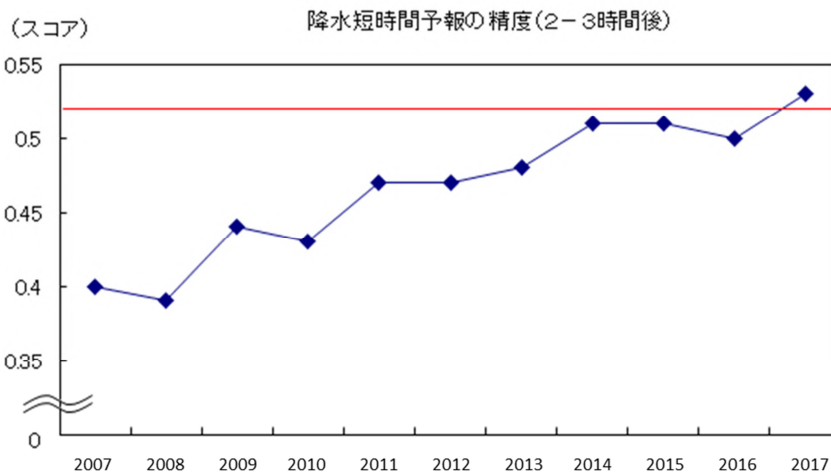
⁷ 降水量比スコアは実況値と予測値の和が閾値以上の場合に大きい方で小さい方を割った値として以下のように定義される：
例えば、<降水量比スコア 閾値 20mm> とは 解析雨量+当該時刻の降短 \geq 20mm の時

$$\text{降水量比スコア} \equiv \frac{\text{解析雨量と降短の降水量が小さい方}}{\text{解析雨量と降短の降水量が大きい方}}$$

降水量比スコア=0.5 のシステムならば、予測値は実況値の概ね半分～2 倍の範囲内と期待される。降水量比スコアは降水短時間予報の業績目標として 2005 年以来用いられており、システム開発の目標の一つとなっている。



第 7.2.11 図 解析雨量を真値とした 5km 格子平均値の陸域による統計検証 (降水量比スコア、閾値 20mm)
 期間は 2016 年 1 月 1 日～31 日、2016 年 6 月 1 日～30 日、2016 年 8 月 16 日～31 日。
 青線が変更前の旧ルーチン、赤線が変更後の新ルーチン。FT3 の値が業績指標で、0.01 を 1 ポイントとする。この場合、0.510 ⇒ 0.519 に改善したので+0.9 ポイント。



第 7.2.12 図 業績指標の推移：降水量比スコア 5km 格子平均での FT3 の値 (閾値 20mm)
 赤線は 2017 年の目標値 (0.52)。

なお、7.2.2.2 のマージ処理の改善 (2016 年 11 月) とこの強雨予測等の改善 (2017 年 6 月) を施した結果、2017 年の業績指標は 0.53 となり、5 年計画の目標をクリアすることができた。

筆者(辻村)が以前に降水短時間予報を担当していた 2007 年当時に比べて現在の降水短時間予報は格段に精度が向上しているのが見て取れる。一方でスコアの改善幅が徐々に小さくなってきており、更なる改善が難しくなっていることもわかる。危険度分布も含め防災気象情報に対する精度向上の要望は益々強くなっているため、2018～2022 年の業績指標の目標 (2022 年で 0.55) に向けて更に努力する必要がある。

7.2.2.2 マージ処理の改善 (2016 年 11 月 29 日)

近年の数値予報モデルの精度向上に伴い、数値予報モデルの BLD 予測値を従来よりも大きな比率で合成できるように変更した。これにより、降水短時間予報の主に予報 2～3 時間目の予測精度が向上した。

(1) マージ処理とは

降水短時間予報は、過去から現在までの降水域の動きを追跡して予測する実況補外型予測 EX6 と、物理法則に基づいて予測する数値予報モデルの MSM と LFM をその時々々の予測精度に応じて重み付き平均した降水量予測値 BLD とを合成(マージ処理)したプロダクトである。

第 7.2.13 図に ETS を示した。EX6 は、予報 1 時間目の予測精度は非常に高いものの、予報時間が進むに

つれて急速に精度が低下する。一方、BLD は、予報 1 時間目の予測精度は EX6 に比べて低いものの、予報時間が進んでも精度がわずかに低下しない。予報時間の初めは EX6 の利用率を大きくし、予報時間が進むにつれて徐々に BLD の利用率を大きくすれば、両者の強みを最大限引き出せると考えられる。ただ、BLD の予測精度は事例による変動が大きいいため、両者の合成比率も事例毎に EX6 と BLD の予測精度を比較しつつ調整することになっている。即ち、予報 2 時間目以降は、初期時刻における BLD の予測精度が高いときほど BLD の利用率を大きくしている。

(2) 変更の概要

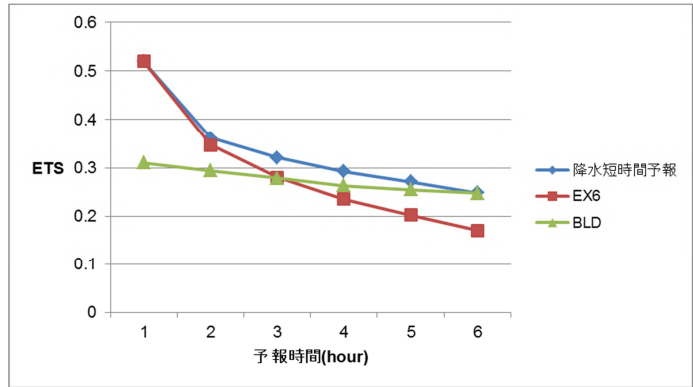
近年の数値予報モデルの精度向上により、主に低気圧や台風に伴う広範囲の降水において、予報 2 時間目でも BLD が EX6 の予測精度を上回る場合がみられるようになった。そこで、3 時間前の初期時刻において EX6 よりも BLD の予測精度（解析雨量との類似度）⁸がよい場合には、早い予報時間帯の BLD の利用率を従来よりも大きくするよう変更した。逆に、BLD よりも EX6 の精度がよい場合は、従来と同じく EX6 の利用率を大きくして合成を行っている。

具体的な EX6 の重みを第 7.2.14 図に示した。EX6 と BLD の精度が同等であれば BLD 信頼度=0.5 となり、第 7.2.14 図の点線の割合で EX6 と BLD をマージする。相対的に BLD の精度が高い（=EX6 の精度が低い）場合は、BLD 信頼度は 0.5~1.0 となり、予報時間の早い段階から BLD の利用率が大きく（EX6 の利用率は小さく）なる。ただし、予報 1 時間目までは、BLD 信頼度にかかわらず全て EX6 が使われる。比率は予報時間 10 分毎に決められており、その比率で EX6 と BLD を加重平均した 10 分間降水量を積算して、最終的な降水短時間予報（1 時間降水量予測値）を作成している。

(3) 変更の効果

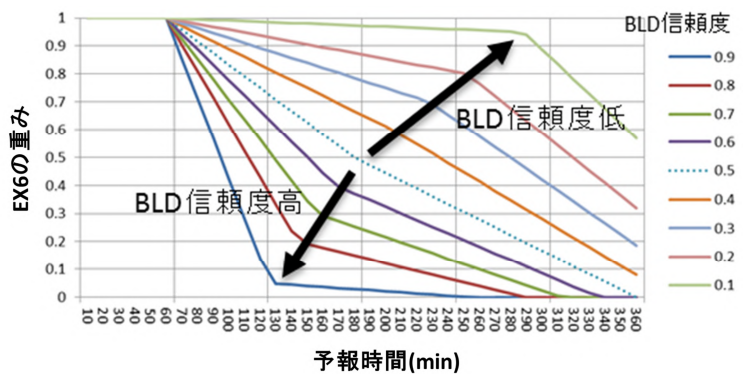
今回の変更前後の降水短時間予報の精度を比較するため、ETS 及び BI の変化を第 7.2.15 図に示した。

第 7.2.15 図を見ると、5mm 以上の雨に対しては、変更後(赤)は変更前(青)に比べて主に予報 3 時間目で ETS は向上し BI も 1 に近付いていることから改善となっていることがわかる。20mm 以上の強い雨に対しては、予報 3 時間目以降で予測頻度が実況頻度より過少となる傾向が強まるものの ETS は向上していることから、降水予測の適中という観点では主に予報 2~3 時間目に変更前より変更後がよい結果になっていること



第 7.2.13 図 降水短時間予報と EX6、BLD の精度比較

グラフは、2014 年 5 月の閾値を 5mm とする 5km メッシュ平均降水量の ETS。全ての予報時間において、降水短時間予報の精度が最もよい結果になっている。



第 7.2.14 図 実況補外型予報 (EX6) の重み

BLD 信頼度によって設定線が引かれる。BLD 信頼度は

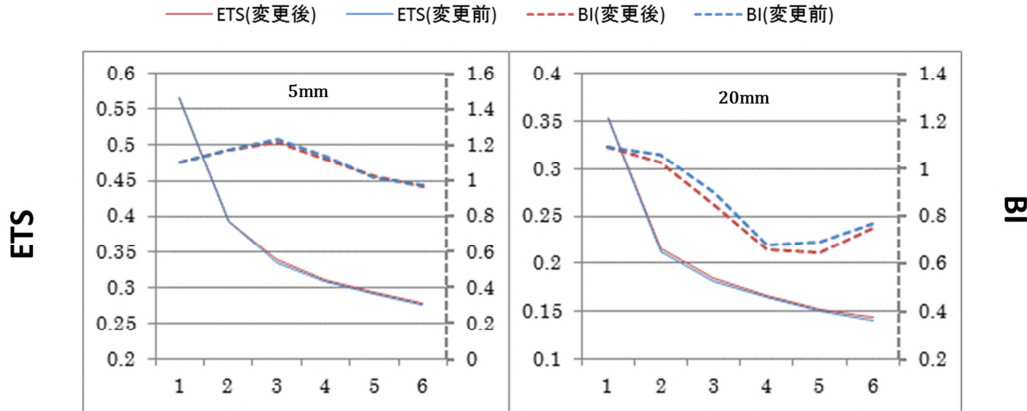
$$\text{BLD 信頼度} = \text{Score (BLD)} / \{\text{Score (BLD)} + \text{Score (EX6)}\}$$

と定義される。

⁸ (位置誤差×量誤差) をスコア化している。スコアは、閾値 (10mm, 20mm) をより重視。詳しくは熊谷 (2014) を参照。

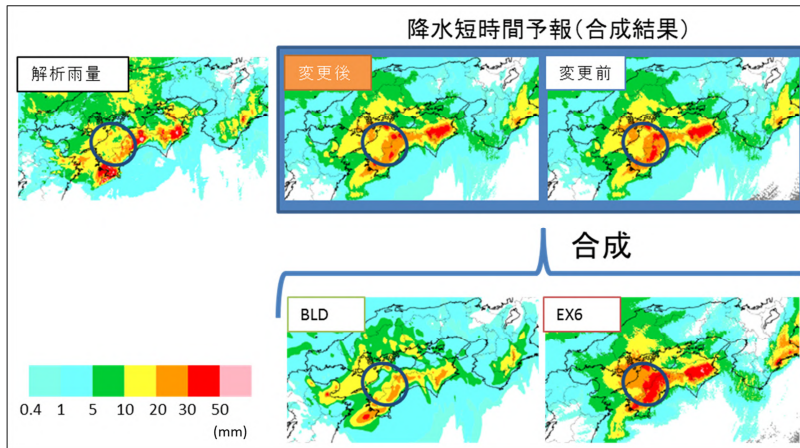
がわかる。

第 7.2.16 図に、今回の変更による降水短時間予報の改善例として、2014 年 10 月 13 日 10 時 00 分 (JST) 初期値の予報 3 時間目を対象とした事例 (台風第 19 号接近時) を示した。EX6 は実際の降水よりも強い予想をしている部分があり (青丸部分)、一方で、BLD は降水量が十分でない部分もあるものの、降水パターンとしての確かな予想をしている。このように、今回の変更によって BLD の重みを大きくすることにより、変更前よりも第 7.2.16 図の青丸部分の過大値を抑えて予測を改善している。



第 7.2.15 図 降水短時間予報の ETS と BI

陸上付近の 5km メッシュ平均降水量を対象とした期間集計スコア (期間は 2014~2016 年の出水期での 38 日間) 各グラフ上部の数値 mm はスコアの閾値。各グラフの横軸は予報時間 (1~6h) を表し、グラフの実線 (青: 変更前、赤: 変更後) は ETS (左軸)、点線 (青: 変更前、赤: 変更後) は BI (右軸) を示す。

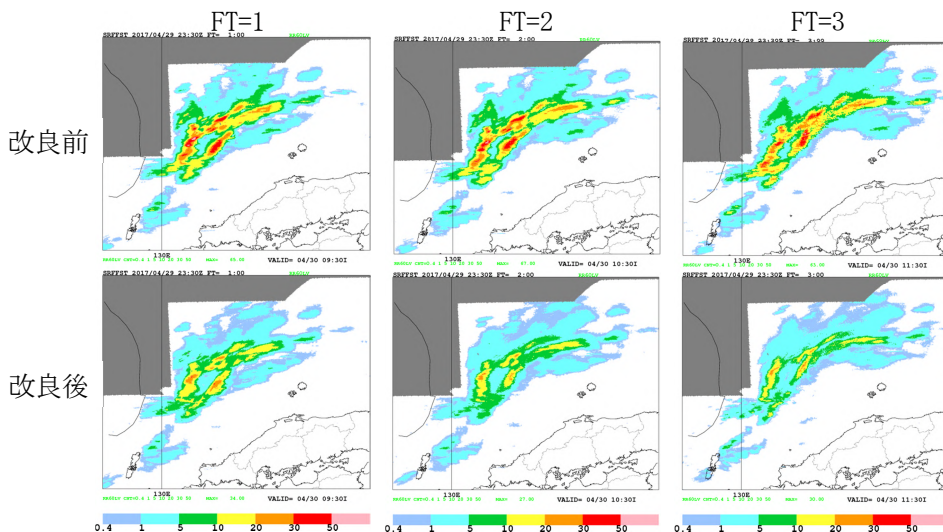


第 7.2.16 図 2014 年 10 月 13 日 10 時 00 分 (JST) 初期値の降水短時間予報 (予報 3 時間目)

上左図: 解析雨量 (実際の降水分布)。下中図: BLD、下右図: EX6。BLD と EX6 の合成結果が降水短時間予報 (合成結果) となり、上中図は変更後で、上右図は変更前。

7. 2. 2. 3 降水強度上限値の利用 (2018 年 5 月 23 日)

解析雨量と同様に、降水短時間予報 (正規版/速報版とも) の初期値にも、7.2.1 項で説明した衛星赤外面像による降水強度上限値を適用した。即ち、海上のエコーにおいて降水強度が上限値を超えた場合には、上限値で頭切りする。第 7.2.17 図に、衛星赤外面像による降水強度上限値を適用した降水短時間予報の例を示す。改良前は日本海の広い範囲で非降水エコーが広がっており、降水短時間予報でも多いところで 60mm 程度の雨量が予想された。しかし、降水強度上限値を適用すると、多いところでも 30mm 程度になった。



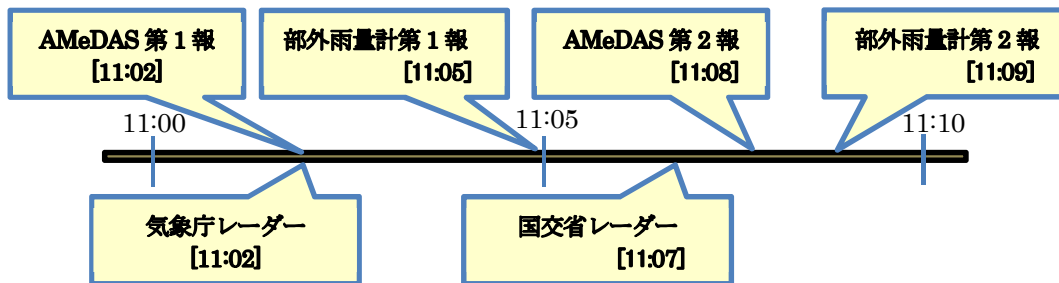
第 7.2.17 図 降水強度上限値を適用した降水短時間予報（2017 年 4 月 30 日 08 時 30 分（JST）初期値）
 図中の雨量は全て非降水エコーによるもの。

7. 3 速報版解析雨量と速報版降水短時間予報の改善

7. 3. 1 速報版解析雨量*

7. 3. 1. 1 速報版解析雨量の処理

現在、正規版解析雨量の計算開始時刻は観測時刻から 9 分後、計算が終了して各気象台に送られるのが観測時刻から 15 分後程度である。解析雨量の下流プロダクトである、土壌雨量指数などが各気象台に送られる時刻はさらに遅くなり、観測の約 20 分後になる。20 分のうち概ね半分は、雨量計データとレーダーデータの入電待ちに費やされる。



第 7.3.1 図 観測データの入電時刻（11 時の例）

解析雨量の計算で用いるデータのうち、気象庁レーダーと AMeDAS 第 1 報の入電時刻が観測時刻から約 2 分後である。部外雨量計第 1 報の入電時刻は観測時刻から約 5 分後だが、第 1 報に間に合う部外雨量計の数は少ない。一方、国交省レーダーは観測時刻から約 7 分後、部外雨量計第 2 報は観測時刻から約 9 分後であり（第 7.3.1 図）、観測時刻の約 5 分後に提供する速報版解析雨量の計算は、国交省レーダーと部外雨量計第 2 報を待たずに始めている。そこで、利用可能なデータで可能な限り正規版解析雨量と同等な精度を確保するよう、処理にいくつかの工夫を行っている。正規版解析雨量と速報版解析雨量の主な違いは以下のとおりである。

(1) 気象庁レーダー及び国交省レーダーの積算値

前述のとおり、気象庁レーダーは観測時刻 2 分後に全時刻の観測データを手に入れるが、国交省レーダーの最後の時刻の観測値が入手できるのは観測時刻 7 分後になる。観測時刻の約 5 分後に提供する速報版解

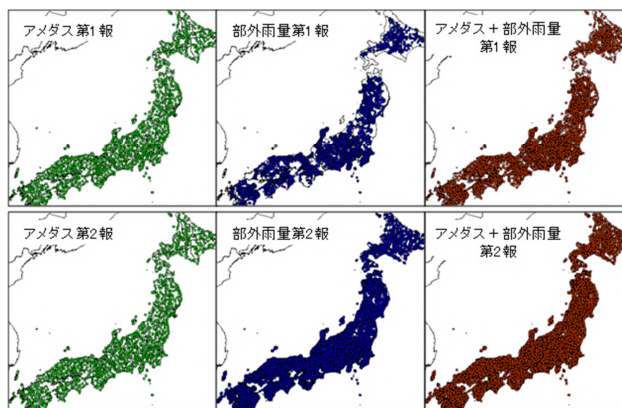
*永田 和彦（気象庁予報部予報課）

析雨量では、全ての観測時刻のデータの入電を待って降水強度の1時間積算値を作成することができないため、初めの50分間と最後の10分間に分けて、それぞれ解析雨量を計算する。初めの50分間については、観測データがそろっているので正規版解析雨量と同様なアルゴリズムで降水強度の50分積算値を計算する。一方、最後の10分間については、気象庁レーダーは、解析雨量と同様な方法で降水強度の10分間積算値を作成する一方、国交省レーダーについては、最後の時刻のデータがないため、最後の時刻から5分前のエコーを降水ナウキャストの移動ベクトルを用いて移動させたものを、仮のデータとして用いて、降水強度の10分間積算値を作成する。

(2) 雨量換算係数

雨量換算係数は、雨量計観測値を使って降水強度の1時間積算値の分布を実際の1時間降水量に相当する分布に補正するための係数である。雨量換算係数の精度は雨量計の数に依存するため、できるだけ多くの雨量計を使い作成することが望ましい。雨量計は、アメダスが全国約1300箇所、部外雨量計が約9000箇所設置されており、第7.3.1図で示すタイミングで配信される。正規版解析雨量は、アメダス、部外雨量計とも、ほぼ全ての観測データが出揃う第2報を待って雨量換算係数を作成する。第7.3.2図は2011年6月17日15時のアメダスと部外雨量計第1報、第2報の入電状況の違いを示す。第2報は、第1報の配信時刻までに集信できなかった雨量計と第1報で報じられた雨量計をあわせて配信される。アメダスでは第1報と第2報にほとんど違いがないが、部外雨量計では違いがはっきりわかる。

観測データがそろっていない最後の10分間については、解析雨量と同様な方法で計算した10分前の時刻の降水強度の1時間積算値と1時間降水量を使って雨量換算係数を計算し、それを降水強度の10分間積算値にかけることで10分間解析雨量を作成する。すなわち、10分前の時刻における前1時間の全データを利用して雨量換算係数を計算し、それを直近10分間のレーダー積算降水強度に適用する。この10分

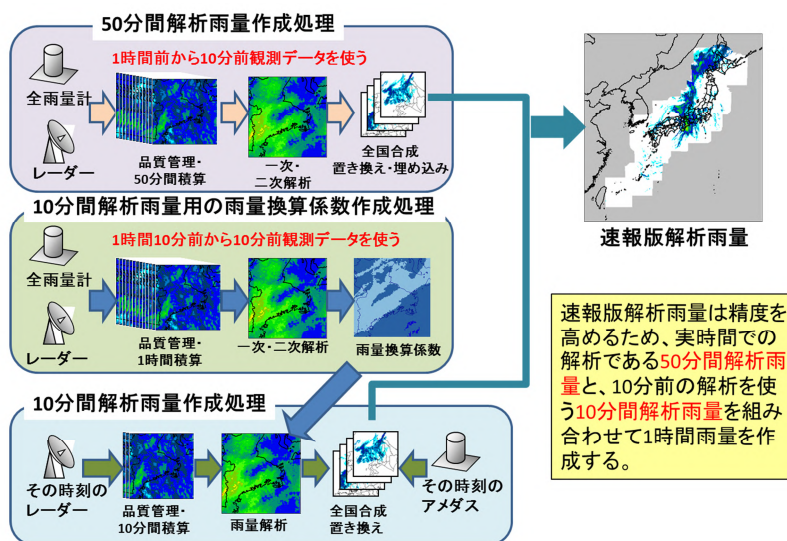


第7.3.2図 部外雨量計第1報と第2報に含まれる雨量計の配置

間ずらした雨量換算係数適用の考え方は、全国合成レーダーエコー強度における処理と同様であるが、全国合成レーダーエコー強度では、雨量換算係数を観測時刻のレーダーエコー強度（瞬間値）に適用する点異なる。

(3) 置き換え・埋め込み処理

解析雨量では、最終処理として雨量計観測値での置き換え・埋め込み処理を行っている。「置き換え」は解析値より雨量計の降水量が大きい



第7.3.3図 速報版解析雨量の作成方法概要

ときに、当該メッシュを雨量計の値に置き換える処理である。「埋め込み」は、レーダーで観測できない低層のみに存在する雨雲による弱い降水を表現するために、雨量計の値を使った雨量分布を埋め込む処理である。速報版解析雨量では、アメダス第1報と部外雨量計第1報のみ置き換え・埋め込み処理に利用する。速報版解析雨量作成の流れを第7.3.3図にまとめたので、参考にしていただきたい。

7.3.1.2 速報版解析雨量の歴史

ここでは、速報版解析雨量の改良について歴史的経緯をまとめる。

(1) 高頻度速報版解析雨量 (2012年5月29日試験運用開始、2016年9月28日運用終了)

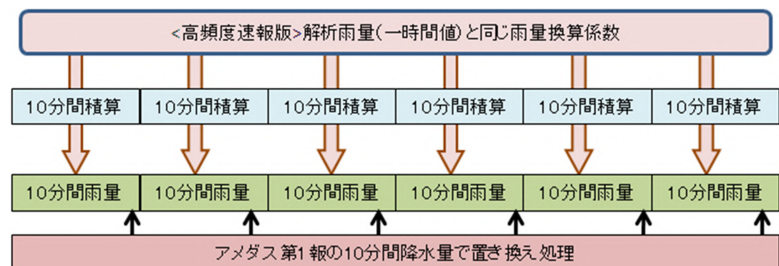
高頻度速報版解析雨量は、いち早く解析雨量に準ずるデータを提供するために2012年度に開発された。大まかな作成手法は以下のとおりである。

- ・10分前までのレーダー1時間積算降水強度と雨量計の1時間雨量を使い雨量換算係数を作成する。
- ・当該時刻のレーダー1時間積算強度を作成し、これに7.3.1.1(2)の雨量換算係数を乗じ、全国合成を行う。
- ・全国合成した解析結果より大きいアメダス雨量が存在する格子について置き換え処理を行う。

これらの処理により高頻度速報版解析雨量は解析時刻から約5分後に配信することが可能となった。しかし、高頻度速報版解析雨量は10分前の解析結果を基にしているため、急速に発達や衰弱等の変化をする場合や、降水減衰によりレーダーエコーが弱まっている場合などに雨量換算係数の誤差が大きくなる場合がある点に注意が必要であった。

(2) 10分間解析雨量

10分間解析雨量は高頻度速報版解析雨量のデータを利用して作成する。まず、レーダー10分間積算降水強度を算出し、それぞれに高頻度速報版解析雨量で作成した雨量換算係数を掛ける。最後に、アメダス第1報の10分間降水量による置き換え処理を行う。1つのファイルの中に6時刻分の10分間解析雨量が含まれている(第7.3.4図)。



第7.3.4図 10分間解析雨量の概要

(3) 旧速報版解析雨量

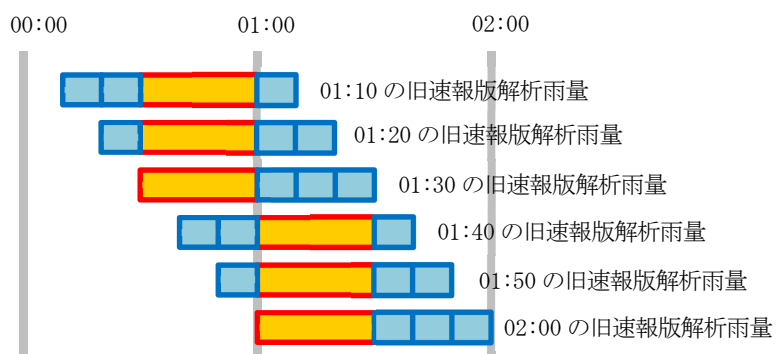
(2016年9月28日運用開始、
2017年7月4日運用終了)

旧速報版解析雨量は、解析雨量の計算の際に作成される30分解析雨量(同時刻の30分間積算降水強度と30分間雨量から作成される)と

(2)と同様の方法で作成した10分間解析雨量を使用して作成する。

第7.3.5図に示すように、利用可能な最新の30分解析雨量を利用し、残りの30分は10分解析雨量を積算して1時間降水量を作成する。

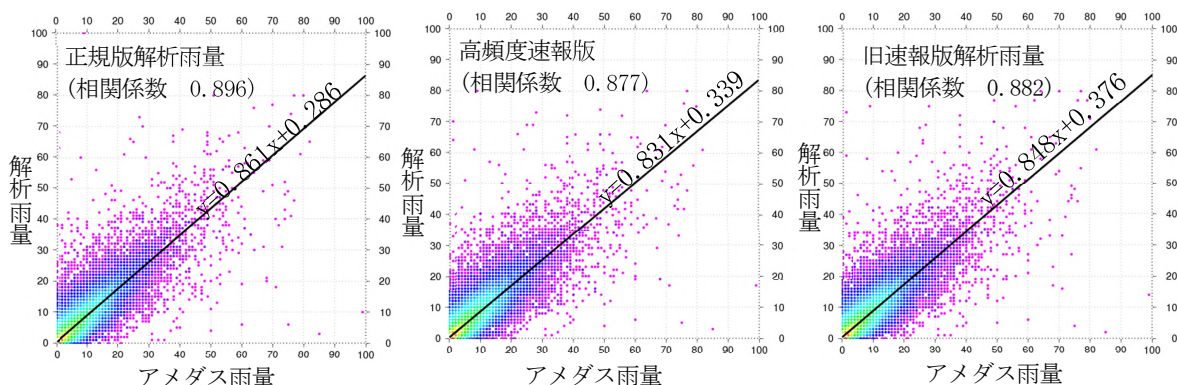
旧速報版解析雨量は、1時間積算のうち半分が通常解析雨量と同様に利用可能な全ての観測データを用



第7.3.5図 旧速報版解析雨量の概要(0時~2時の例)

黄色い四角は30分解析雨量、青い四角は10分間解析雨量を示す。

い、同時刻の雨量換算係数を使っているため、(1)の高頻度速報版解析雨量と比べ、精度向上が期待できる。実際、複数のアメダス地点を除外して解析し、除外したアメダス地点(独立資料)で精度を検証すると、高頻度速報版解析雨量より精度は高くなっている(第7.3.6図)。しかし、残り半分は高頻度速報版と同様に前の時刻の雨量換算係数を使っていたり、置き換え処理がアメダスのみとなっているため、高頻度速報版解析雨量と同様の注意が必要であった。



第7.3.6図 旧速報版解析雨量の精度

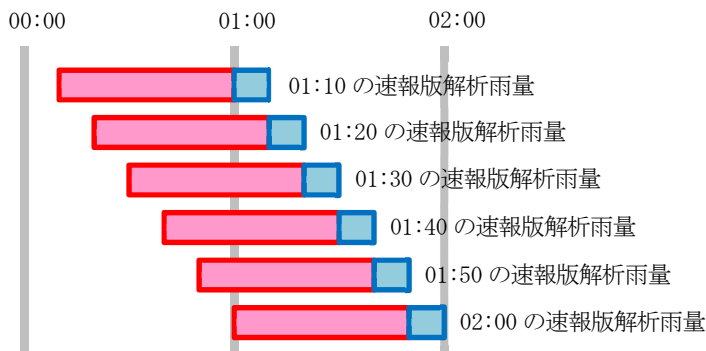
2014年1月～12月の期間について、アメダス200地点を除外して毎正時のみを解析し、除外したアメダス地点で検証した結果。y切片は若干高いが、傾き、相関係数ともに正規版と高頻度速報版の間の精度を示している。

(4) 速報版解析雨量 (2017年7月4日部外提供開始)

解析雨量と同様に利用可能な全ての観測データと同時刻の雨量換算係数を用いて作成する10分前の時刻までの50分間解析雨量と、(2)で述べたのと同じ方法で作成した観測時刻の前10分間解析雨量を足し合わせて前1時間解析雨量とする(第7.3.7図)。

現在の速報版解析雨量はこの方法で作成されている(詳しくは、7.3.1.1で説明済み)。前10分間解析雨量は、

解析時刻の降水強度の10分間積算値に10分前までの降水強度の1時間積算値と1時間雨量から算出した雨量換算係数をかけて作成するので、急速な発達や衰弱などエコーの変化が大きい場合には誤差が大きくなることがある。実際に、10分間解析雨量に過大値があらわれることがあったため、その上限値を55mm/10min(アメダス10分間降水量の歴代最大値50mmに10%上乗せした値)とし、この上限値で10分間解析雨量を頭切りしている。



第7.3.7図 速報版解析雨量の概要(00時～02時の例)

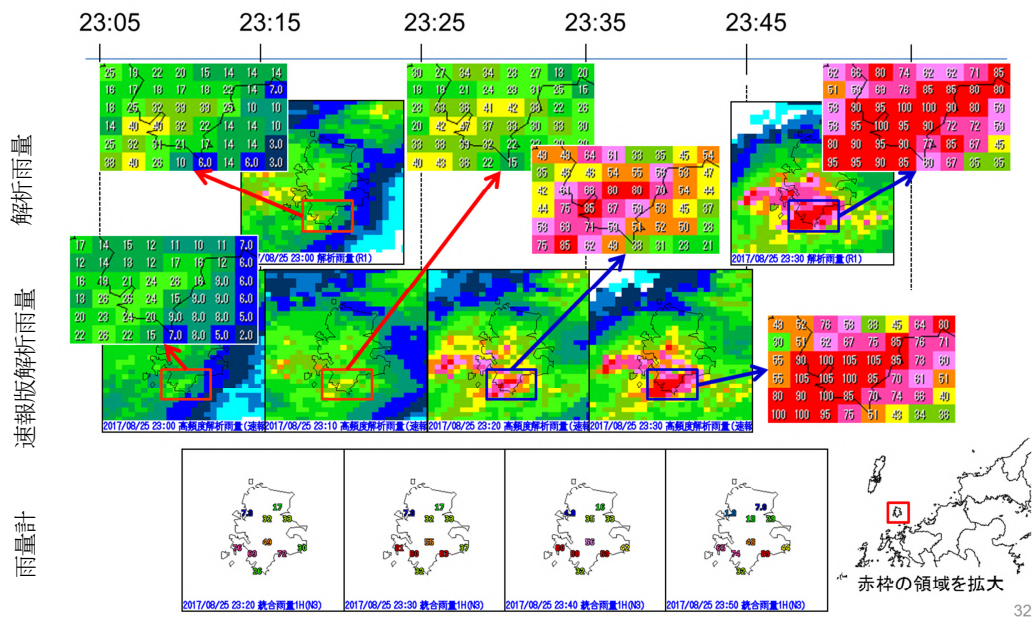
赤い四角は50分解析雨量、青い四角は10分間解析雨量を示す。

7.3.1.3 事例

第7.3.8図は2017年8月25日23時00分から23時40分までの長崎県壱岐地方での降水を速報版解析雨量と正規版解析雨量それぞれの発表時系列(JST)に沿って比較したものである。各解析雨量の図の左端が発表時間に対応する。壱岐南西部では23時10分頃までの積算値が40mm程度だったのに、図下の1時間雨量が示すように23時20分頃には70mm超、23時30分頃には80mm超となっている。正規版解析雨量で100mm以上を示す23時30分の解析値が入手できるのは23時45分頃であるのに対して、速報版解析雨量では80mm超を示す23時20分の解析値は23時25分頃に、100mm以上を示す23時30分の解析値は23時35

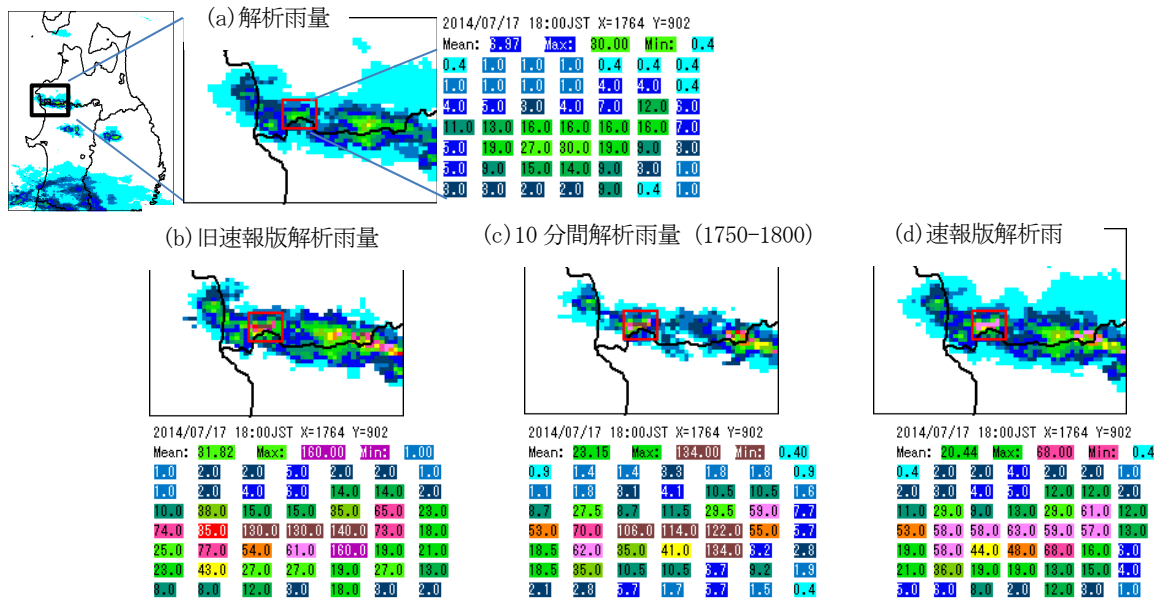
分項に入手できる。速報版解析雨量は、利用可能データに制限があるため、正規版解析雨量に比べて若干の精度低下は避けられない（7.3.1.4 参照）が、高頻度化・速報化によるメリットは大きいといえる。

第 7.3.9 図に、10 分間解析雨量に上限値を導入した効果を示す。2014 年 7 月 17 日 18 時の正規版解析雨量(a)、旧速報版解析雨量 (b)、上限値で頭切りする前の 10 分間解析雨量(c)、上限値導入後の速報版解析雨量 (d)である。赤い四角で囲んだ範囲内の雨量の最大値は、正規版解析雨量では 30mm であるが、旧速報版解析雨量では 160mm と大きな差があった。この過大値の原因は、10 分間解析雨量が 134mm と過大だったことである。10 分間解析雨量に上限値を導入した速報版解析雨量では、最大値が 68mm となり、過大値が抑えられていることがわかる。



第 7.3.8 図 速報版解析雨量導入の効果 (2017 年 8 月 25 日 23 時 05 分-23 時 50 分)

上段が解析雨量、中段が速報版解析雨量、下段が雨量計による雨量。



第 7.3.9 図 10 分間解析雨量上限値導入の効果 (2014 年 7 月 17 日 18 時 00 分)

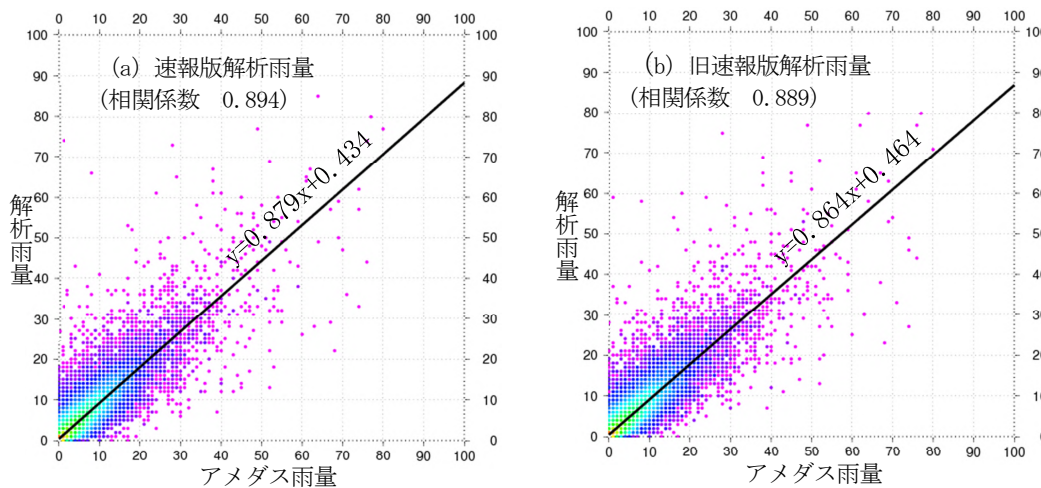
図(a)は解析雨量、図(b)は旧速報版解析雨量、図(c)は上限値をかけない 10 分間解析雨量、図(d)は速報版解析雨量を示す。各図の赤い四角の部分拡大した箇所の降水量を各図の右側または下側に示す。

7.3.1.4 精度評価

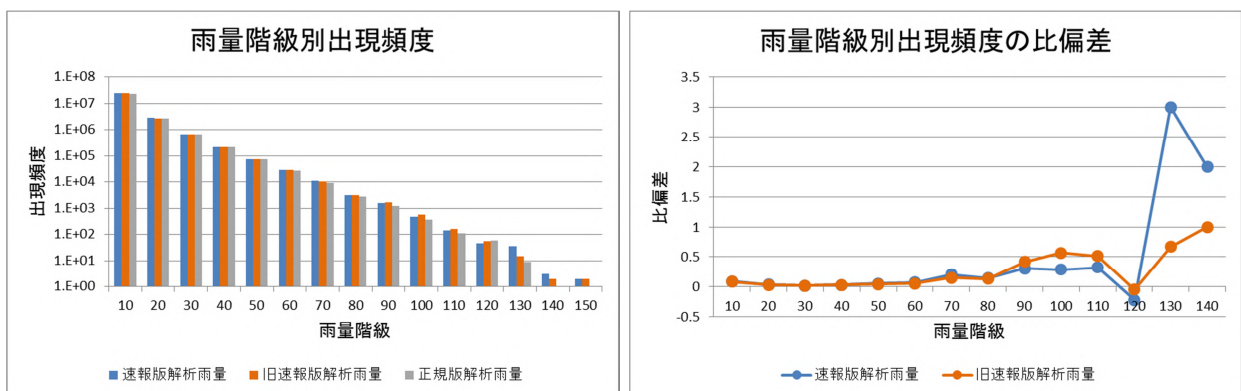
速報版解析雨量と旧速報版解析雨量について、2014年5月1日から10月31日までの間、アメダス地点のうち200地点を除いて毎正時のみ解析を行い、そのアメダス地点の雨量とそれが含まれる格子の解析雨量を比較した(第7.3.10図)。相関係数、傾き、y切片ともに速報版解析雨量が旧速報版解析雨量の精度を上回った。

第7.3.11図は、10mm刻みの雨量階級に分けて降水の出現回数を集計したものである(2014年5月1日～10月31日:毎正時)。図(a)は、出現頻度を対数表示したもの、図(b)は、正規版解析雨量を基準にして雨量階級別出現数の比偏差を示したものである。概ね速報版解析雨量の方が旧速報版解析雨量よりも正規版解析雨量に出現回数に近い。

第7.3.12図に2014年5月1日から10月31日の期間(毎正時)における、旧速報版解析雨量(オレンジ線)と速報版解析雨量(水色線)の正規版解析雨量に対する平方根平均二乗誤差(RMSE、左図)と平均誤差(ME、右図)を、解析雨量の階級別に示す。ほとんどの階級で速報版の誤差が旧速報版よりも小さい。

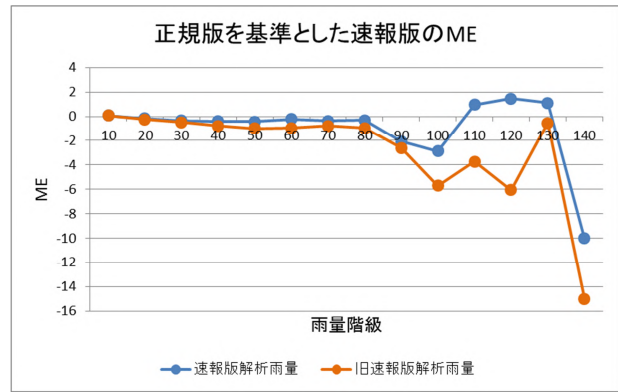
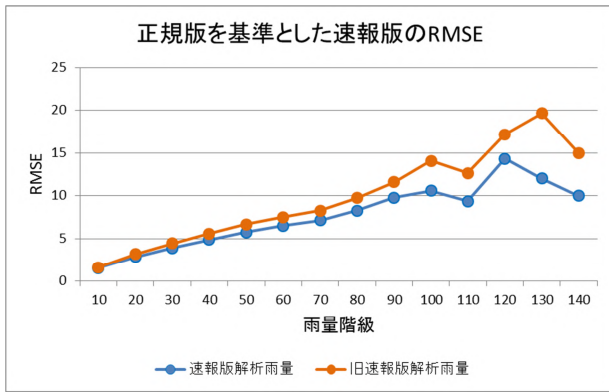


第7.3.10図 速報版解析雨量と旧速報版解析雨量の比較
(統計期間:2014年5月1日から10月31日)



第7.3.11図 各雨量階級における降水の出現状況(統計期間:2014年5月1日から10月31日)

左図は出現頻度を片対数グラフで示したもの、右図は正規版解析雨量を基準にして雨量階級別出現頻度の比偏差を示したものの。



第 7.3.12 図 各雨量階級における正規版解析雨量に対する各速報版解析雨量の RMSE (左図) と ME (右図)
(統計期間：2014 年 5 月 1 日から 10 月 31 日)

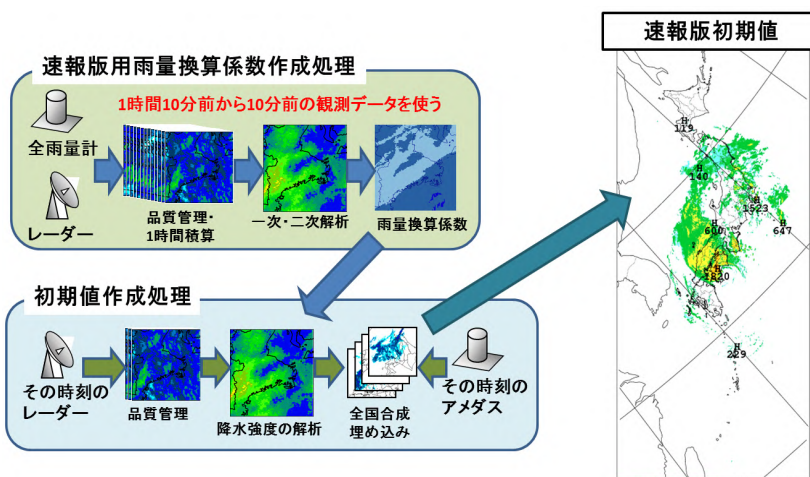
7. 3. 2 速報版降水短時間予報*

2018 年 3 月 5 日より新たに運用を開始した速報版降水短時間予報は、従前の降水短時間予報を高頻度化（作成頻度が 30 分間隔から 10 分間隔に）かつ迅速化（観測時刻後約 18 分後発表から約 8 分後発表に）したものである。現在、大雨注意報・警報（土砂災害）や土砂災害警戒情報の基準となる土壌雨量指数の予測値の計算に利用されている（第 7.1.2 図参照）。

予測手法は、従前の降水短時間予報と基本的には変わらないが、速報性を実現するために初期値の作成方法が異なり、予測特性が従前の降水短時間予報とやや異なる。ここでは、速報版降水短時間予報の予測手法の変更点と特徴について述べる。更に、2018 年 6 月 7 日に行った過大な予測を防ぐための変更点についても解説する。

7. 3. 2. 1 速報版降水短時間予報の初期値

降水短時間予報の初期値の降水強度は、レーダーで観測した降水強度を雨量換算係数によって補正することで作成している。速報版降水短時間予報では、速報版解析雨量のように工夫して初期値を作成し、観測後の迅速な提供を図っている。



第 7.3.13 図 速報版初期値の作成方法概要

第 7.3.13 図に作成方法の概要を示す。速報版降水短時間予報の初期値は、初期時刻の約 5 分後に作成する速報版解析雨量と同時に作成される。正規版降水短時間予報では、初期時刻から過去 1 時間前までの期間の雨量換算係数を利用しているが、初期時刻の約 5 分後にはまだ計算できておらず、速報版の初期値作成には間に合わない。そのため、速報版の初期値作成には、速報版解析雨量を作成する際

に計算している 1 時間 10 分前から 10 分前までの 1 時間で作成した雨量換算係数を用いている。また、初期時刻から約 5 分後の時点で気象庁レーダーのデータはそろっており、初期時刻の降水強度を利用することが

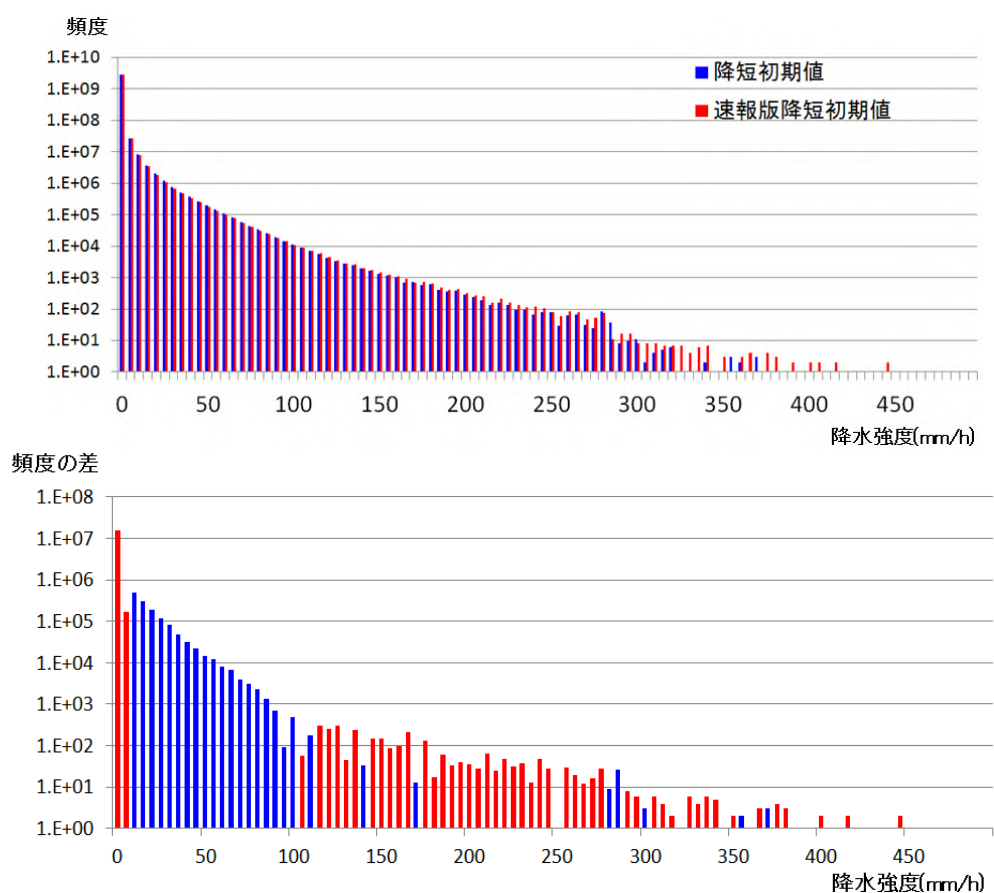
*一川 孝平（気象庁予報部予報課）

できるが、国交省レーダーについては、初期時刻のデータが未入電のため、初期時刻から5分前のエコーを降水ナウキャストの移動ベクトルで動かすことで初期時刻の降水強度を作成する。

速報版の初期値と正規版の初期値（降水強度）を各 1km 格子について、全格子を対象に積算した降水強度毎の出現頻度を第 7.3.14 図に示す。対象期間は以下の大雨事例を中心とした 25 日間である（かつこ内は期間中の主な事例）。

- 2017 年 7 月 20～23 日（梅雨前線）
- 2017 年 8 月 5～7 日（台風第 5 号）
- 2017 年 8 月 16～19 日（不安定性降水）
- 2017 年 9 月 10～19 日（低気圧、前線、台風第 18 号）
- 2017 年 9 月 26～29 日（低気圧、前線）

第 7.3.14 図（下）に示した頻度の差を見ると、速報版の初期値は約 10mm/h 未満と約 100mm/h 程度以上の降水強度の頻度が正規版の初期値に比べて高く、約 10～100mm/h は正規版の初期値の方がより頻度が高い。速報版の初期値は正規版の初期値に比べて、弱い・強いがやや極端な分布となっているといえる。これは速報版初期値を作成する際に用いる雨量換算係数が 10 分前のものであることが影響して、初期値の特性が変化していると考えられる。この速報版の極端な特性を抑えるため、運用開始時は利用する初期値の強度に 400mm/h の上限を設定（400mm/h 以上の格子は 400mm/h として計算）していたが、予測特性を正規版に近づけるため、2018 年 6 月 7 日から初期値の上限設定を 200mm/h に下げる変更を行った。



第 7.3.14 図 初期値（降水強度）の出現頻度比較

（上）降水短時間予報の計算対象となる全格子について、1km 格子毎に降水強度を 5mm/h 単位でそれぞれ積算。赤が正規版の初期値、青が速報版の初期値。縦軸は常用対数。

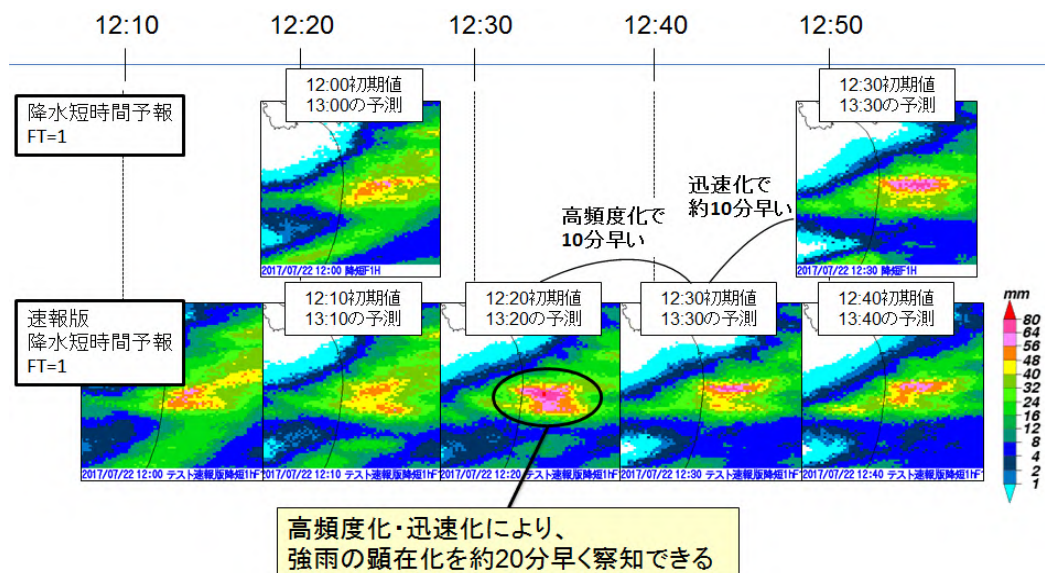
（下）上図の差分の絶対値。速報版（正規版）の頻度がより高いときは、赤（青）で着色。縦軸は常用対数。

7. 3. 2. 2 速報版降水短時間予報の移動ベクトル

降水短時間予報では、パターンマッチングにより複数の移動ベクトルの候補を計算し、その中から時空間連続性を考慮して移動ベクトルを選出している。この移動ベクトルの候補には当該初期時刻の移動ベクトルの候補に加えて、30分前の初期時刻の移動ベクトルの候補も入っている。正規版は30分毎に予報を計算しているため、30分前の移動ベクトルを候補に入れているが、速報版では、10分毎に予報を作成するメリットを活かし、10分前の移動ベクトルを候補に入れるように設定した。なるべく近い時刻のベクトルを引き継ぐことで時間的に滑らかに予測を変化させる効果があると考えられる。

7. 3. 2. 3 事例検証

第7.3.15図に2017年7月22日の秋田県での梅雨前線による大雨の予報事例を示す。各予報を取得できる時刻の順に並べている。正規版は12:30初期値で強雨が顕在化する予想が初めてあらわれるが、速報版では12:20初期値の予想で強雨の予想があらわれている。この予想を利用することで、高頻度化・迅速化により、強雨が顕在化する可能性があることを従前より約20分早く察知できる。



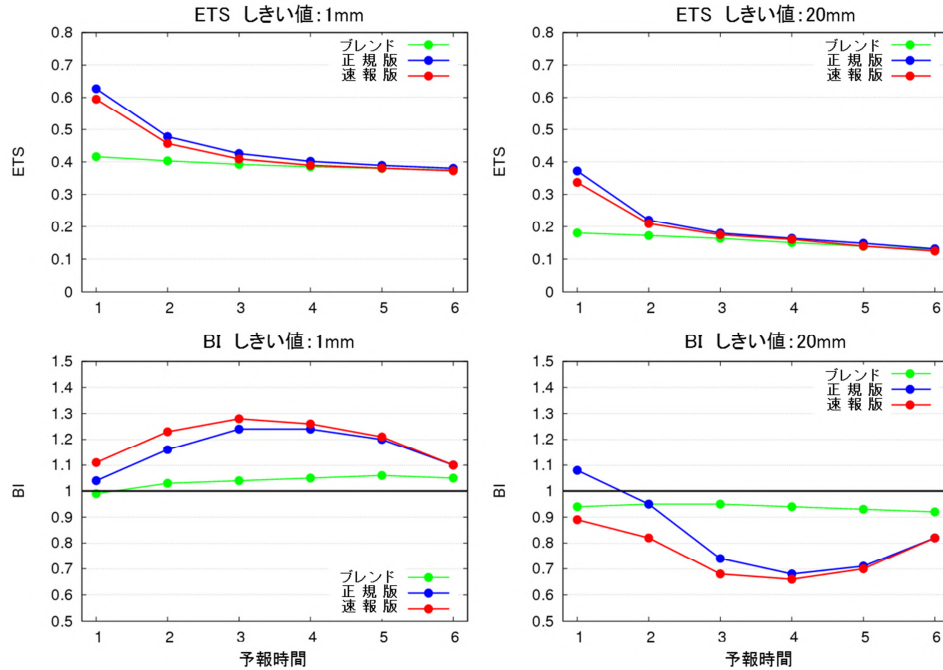
第7.3.15図 正規版降水短時間予報と速報版降水短時間予報の予報発表時系列

2017年7月22日の秋田県での梅雨前線による大雨事例における各FT=1の予報結果。横軸は予報が入手できるおおよその時刻(JST)で各画像の左端の位置が概ねの作成時刻を表している。

7. 3. 2. 4 統計検証

統計検証は、解析雨量を真値として全国の陸上における5km格子陸上平均値を対象として行った。検証期間は7.3.2.1で示した期間と同じ25日間である。

第7.3.16図にETSとBIの検証結果を示す。ETSを見ると、1mm以上、20mm以上ともに、予報初期で速報版は正規版に比べて精度がやや悪いが、速報版・正規版で共通に利用しているブレンド降水の占める比率が大きくなる予報期間の後半になるにつれてその差が小さくなっている。BIを見ると、1mm以上の降水は、速報版が正規版に比べてやや予測頻度が増加している。一方20mm以上の降水では、反対に速報版の予測頻度が低下している。これは速報版の初期値で10mm/h未満の弱い降水強度の頻度が正規版に比べて高く、10~100mm/hの頻度が低いことを反映しているためである。ETSと同様に予報期間の後半になるにつれて、それらの速報版と正規版の差は小さくなっている。



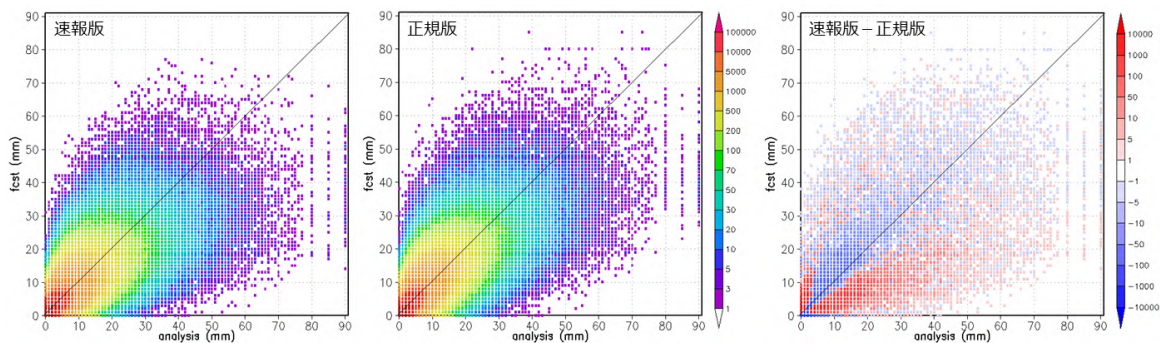
第 7.3.16 図 速報版降水短時間予報と正規版降水短時間予報の精度比較

上段は ETS、下段は BI。左列は 1mm 以上、右列は 20mm 以上の降水をそれぞれ対象としている。グラフの横軸は予報時間(時)、縦軸は各指標。赤線が速報版、青線が正規版、緑線がブレンド降水を表している。

次に、第 7.3.17 図に 1 時間先の予測値と解析値の散布図を示す。速報版、正規版それぞれの分布を比較すると大きな差は無いが、速報版は 70mm 以上を予測する格子が正規版に比べて少ないことがわかる。右の差分の図を見ると、速報版は正規版に比べて $y=x$ 付近の予測値が解析値に近い格子の数が減っていることがわかる。これに伴い、解析値に比べて過大または過小な予測が増えているが、過大な予測に比べて過小な予測の増加が大きい。これは初期値の特性と初期値の上限設定の違いが主に影響していると考えられる。

以上の結果についてまとめると、以下のようなになる。

- 速報版降水短時間予報と正規版降水短時間予報の精度比較を行ったところ、予報期間の初期では、速報版は正規版に比べてやや精度が低いが、期間後半になるにつれて正規版との差は小さくなる。
- 1 時間 20mm 以上の強い雨では、速報版初期値の特性により速報版降短のバイアスコアが正規版に比べてやや低い。
- 一方で正規版より早く取得できることから、防災情報のリードタイムをより長く取ることができるという大きなメリットがある。



第 7.3.17 図 1 時間先の予測値と解析値の散布図

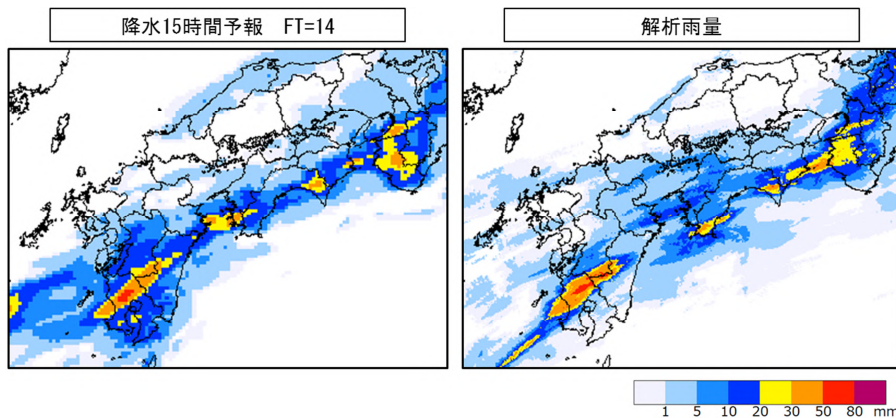
左：速報版、中：正規版、右：速報版と正規版の差分（速報版－正規版）

横軸が解析値、縦軸が予測値で、陸上全格子（5km 格子平均値）の頻度をプロット。

利用するうえでは、正規版と速報版含めてその時点で手に入る最新の予報で最も精度の高い予測が期待できる。ただし、ここまで述べた正規版と速報版の両者の予測特性の違いにも留意して利用する必要がある。

7. 4 降水 15 時間予報*

台風等により夜間から翌日の明け方に大雨となる可能性がある地域を夕方の時点で把握できるようにすることなどにより、現状より早い段階で市町村長の避難準備・高齢者等避難開始や住民の自主避難の判断を支援するため、降水短時間予報の先にあたる 7~15 時間先の降水量予測を提供する「降水 15 時間予報」の開発を行い、2018 年 6 月 20 日から提供を開始した（第 7.4.1 図）。本節では、この降水 15 時間予報の予測手法や予測事例、利用上の留意点などを紹介する。



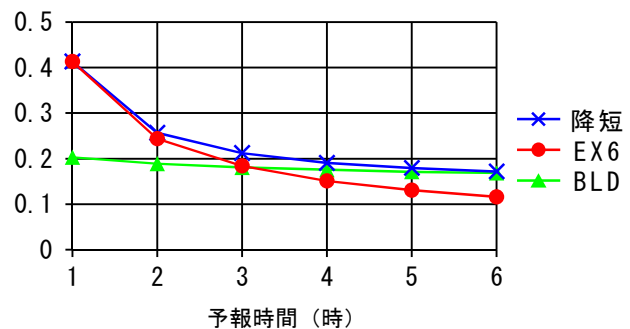
第 7.4.1 図 降水 15 時間予報の予報事例

（左）2018 年 6 月 19 日 18 時（JST）初期値の 14 時間先の予報、（右）2018 年 6 月 20 日 08 時の解析雨量。20 日の朝、九州地方から近畿地方に強雨域がかかることを前日 19 日の夕方時点で予想している。

7. 4. 1 降水 15 時間予報の算出に用いる資料

降水短時間予報は、EX6（実況補外型予測）と BLD（MSM 及び LFM の降水量予測を重み付け平均して算出）の重み付け平均で算出している。第 7.4.2 図に降水短時間予報の 2017 年におけるスレットスコアを示す。EX6 は予報時間の経過につれ精度が低下するため、降水短時間予報で 6 時間先の予報はほとんど BLD が用いられている。そのため、7~15 時間先の降水量予測を提供する降水 15 時間予報では実況補外型予測を利用せず、数値予報資料のみで作成することとした。

降水 15 時間予報は、早い段階での避難判断を支援するため、一格子一格子を正確に当てることを目指すよりも、全体の傾向として降水分布をとらえ、見逃しや大外れが少ない予測となるように設計した。具体的に、MSM の降水量予測や MSM の降水ガイダンス、LFM の降水ガイダンスを用いて重み付け平均を行うための重みを算出する際、位置ずれを許容したスコア FSS（Fractions Skill Score）を用いている。FSS の算出方法は次項で説明を行う。降水ガイダンスについては白山(2018)を、FSS の詳細については Roberts and Lean(2008)または幾田(2010)を参照いただきたい。



第 7.4.2 図 降水短時間予報のスレットスコア (2017 年)

5km 格子平均で 10mm 以上の降水を対象としている。EX6 は実況補外型予測、BLD は MSM と LFM の降水量予測を重み付け平均して算出したもの。横軸は予報時間 (時)、縦軸はスレットスコアを表す。

*橋口 祥治 (気象庁予報部予報課)

7. 4. 2 FSS について

FSS は位置ずれを考慮し、一定の範囲内の降水量分布の適切さを示す指標で、完全予報では 1、無意味な予報では 0 になる。以下、第 7.4.3 図を例にして、位置ずれの違いを考慮する FSS と、格子毎に予報を評価するスレットスコアの違いを説明する。

第 7.4.3 図の観測と予測は概ねよく一致しているようにみえるが、詳細に見ると全ての格子がずれている。そのため、一格子一格子を正確に当てることを評価するスレットスコアを算出すると 0 になってしまい、全体の降水パターンをおおまかに見た時の印象とは異なる結果となる。しかし、格子ずれを許容する FSS は異なる評価となる。例えば、2 格子ずれを許容する FSS を算出する場合、赤枠□を付けた格子を検証する際にその周囲の青枠□を付けた 5×5 格子内の格子数を比較する。この場合、赤枠□を付けた格子は観測と予測で一致していないが、周囲の青枠□を付けた 5×5 格子内のしきい値を超える格子数はともに 8 で一致している。この様な比較を全ての格子に対して行い、FSS を算出すると約 0.50 となり、観測と予測が概ねよく一致しているという感覚とも一致する。すなわち、全体の傾向として降水分布を捉えて評価する場合に適した指標と考えられる。以下に FSS の算出方法を示す。

観測値と予測値について、しきい値を超過する場合 1、超過しない場合 0 と二値化することができる。これは、任意のしきい値を q として、観測値 O_r 、予測値 F_r について次のように表せる。

$$I_o = \begin{cases} 1 & (O_r \geq q \text{ のとき}) \\ 0 & (O_r < q \text{ のとき}) \end{cases}, \quad I_F = \begin{cases} 1 & (F_r \geq q \text{ のとき}) \\ 0 & (F_r < q \text{ のとき}) \end{cases}$$

この I_o と I_F に m 格子ずれの空間スケールを考慮し、 $(2m+1) \times (2m+1)$ 格子の領域平均値 $O(m)_{i,j}$ 、 $F(m)_{i,j}$ を算出する。添え字の i, j は x 軸方向及び y 軸方向の格子番号である。

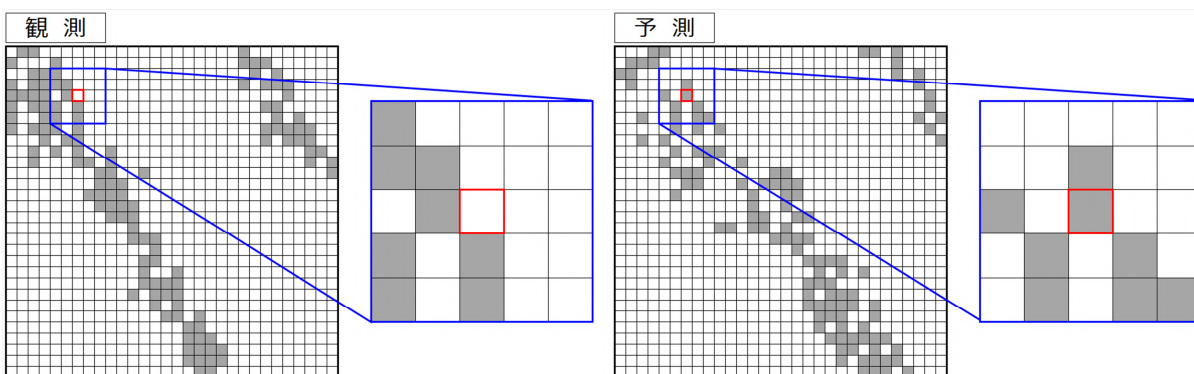
$$O(m)_{i,j} = \frac{1}{(2m+1)^2} \sum_{k=-m}^m \sum_{l=-m}^m I_{o\ i+k,j+l}$$

$$F(m)_{i,j} = \frac{1}{(2m+1)^2} \sum_{k=-m}^m \sum_{l=-m}^m I_{F\ i+k,j+l}$$

この $O(m)$ と $F(m)$ によって、二乗平均誤差 $(MSE(m))$ が算出される。 N_x と N_y は検証領域の x 方向と y 方向の格子数であり、簡単のため検証領域を矩形領域と仮定している。

$$MSE(m) = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} [O(m)_{i,j} - F(m)_{i,j}]^2$$

また、観測と予測の二乗和の平均値を参照値 $(MSE(m)_{ref})$ として算出する。これは、格子ずれを許容しても



第 7.4.3 図 FSS の精度評価の特性を理解するための降水分布例

しきい値を超過しているセルを塗りつぶしており、青枠で囲った部分を拡大して表示している。この例でスレットスコアは 0 だが、2 格子ずれを許容する FSS はおよそ 0.50 となる。

予報が外れている場合の二乗平均誤差に相当する。

$$\text{MSE}_{(m)\text{ref}} = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} [O^2(m)_{i,j} + F^2(m)_{i,j}]$$

さらに、完全に予報が実況と一致している場合の二乗平均誤差 ($\text{MSE}_{(m)\text{perfect}}$) は 0 となることを用いて、 $\text{FSS}_{(m)}$ は以下のとおり定義される。

$$\text{FSS}_{(m)} = \frac{\text{MSE}_{(m)} - \text{MSE}_{(m)\text{ref}}}{\text{MSE}_{(m)\text{perfect}} - \text{MSE}_{(m)\text{ref}}} = 1 - \frac{\text{MSE}_{(m)}}{\text{MSE}_{(m)\text{ref}}}$$

この式からも明らかなように、FSS は 0 から 1 の値をとる。

7. 4. 3 予測手法

降水 15 時間予報の算出方法について述べる。降水 15 時間予報は、以下の手順で算出を行う (第 7.4.4 図)。

- ① MSM の 1 時間降水量予測値 (FRR) を用いて MSM の平均降水量ガイダンス (MRR3)、3 時間最大降水量ガイダンス (RMAX33)、3 時間内 1 時間最大降水量ガイダンス (RMAX31) を 1 時間値に変換する (MRR3→MRR、RMAX33→RMAX13、RMAX31→RMAX11)。MRR3 は 3 時間降水量予測値のため、FRR に応じた比例配分を行う。RMAX33 も同様の手法で 1 時間値に変換する。一方、RMAX31 は 3 時間内で最大となる 1 時間降水量予測値のため、RMAX31 に FRR の当該時刻の予測値と 3 時間内の最大予測値の比率を乗じる。例えば、FT=3h のときの MRR と RMAX11 は、以下のようになる。

$$\text{MRR}(\text{FT3}) = \text{MRR3} \times \frac{\text{FRR}(\text{FT3})}{\sum \text{FRR}(\text{FT1} \sim 3)}$$

$$\text{RMAX11}(\text{FT3}) = \text{RMAX31} \times \frac{\text{FRR}(\text{FT3})}{\text{MAX}(\text{FRR}(\text{FT1} \sim 3))}$$

- ② 数値予報資料を格子内平均の降水量を予測している FRR、MRR からなるグループ 1 と格子内最大の降水量を予測している RMAX13、RMAX11、RMAX1 からなるグループ 2 に分け、降水 15 時間予報の初期時刻における解析雨量と各予報との FSS を算出し、スコアが一番よい予測をグループ毎に選出する。なお、グループ 2 の RMAX1 は LFM の最大降水量ガイダンスである。グループ 1 で選出された予測とそのスコアを Fcst1、FSS1、グループ 2 で選出された予測とそのスコアを Fcst2、FSS2 とする。グループ 1 とグループ 2 で選出された予測を使って降水 15 時間予報を作成する。
- ③ グループ 1 とグループ 2 で選出された予測を線形結合させるために、FSS を基に重みを算出する。

$$\text{weight} = \text{FSS1} / (\text{FSS1} + \text{FSS2})$$

- ④ グループ 1 とグループ 2 で選出された予測の重み付け平均を行い、降水 15 時間予報を算出する。このとき、重みは全 FT、全領域で共通とする。また、最大降水量ガイダンスは陸域周辺のみを予測しているため、予測範囲外は重みによらずにグループ 1 の予測を用いる。

$$\text{F15H} = \text{Fcst1} \times w1 + \text{Fcst2} \times w2$$

$$[w1 = \text{weight}, w2 = 1 - \text{weight}]$$

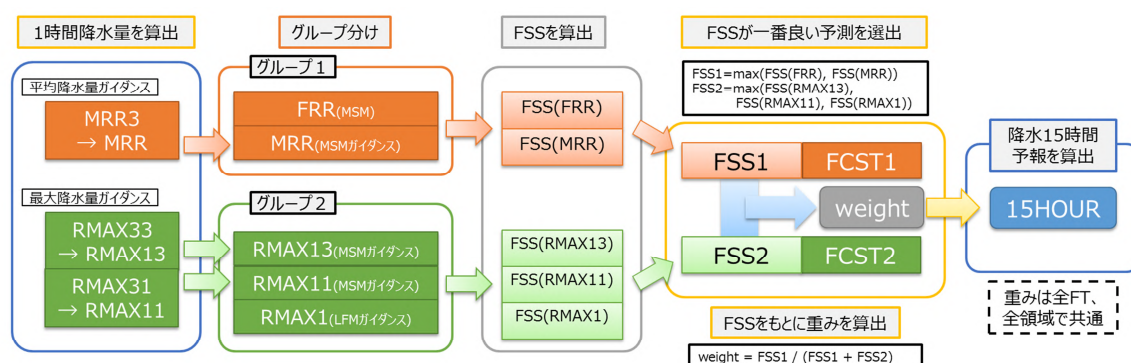
- ⑤ グループ 2 から LFM の最大降水量ガイダンス (RMAX1) を選出している場合、LFM の予報最終時刻は 9 時間であるため、それ以降のデータがない。LFM の予報最終時刻 (降水 15 時間予報では FT=8h もしくは FT=7h) は次の予報時刻とのギャップを小さくするため、RMAX1 の重みを下げ ($w2'$) つつ、下げ

た分の重みはグループ 2 の 2 番目のスコアがよい予測 (Fcst2') の加算に用いる。

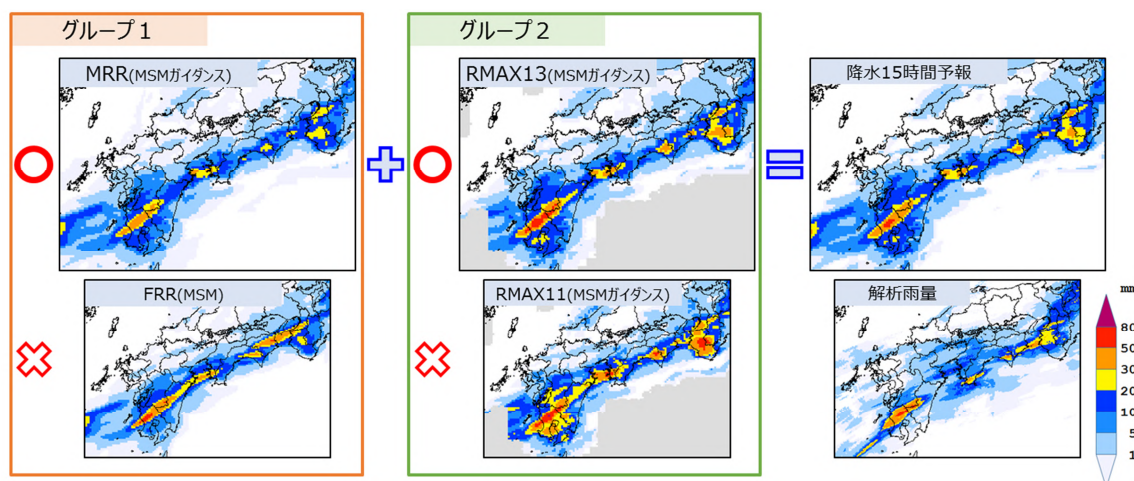
$$F15H = Fcst1 \times w1 + Fcst2 \times w2' + Fcst2' \times (w2 - w2')$$

それ以降はグループ 1 の 1 番スコアがよい予測とグループ 2 の 2 番目にスコアがよい予測の重み付け平均で降水 15 時間予報を算出する。

どのような数値予報資料が選択されて降水 15 時間予報が構成されているか、第 7.4.1 図の事例により示す (第 7.4.5 図)。グループ 1 は MRR、グループ 2 は RMAX13 を選択しており、どちらも弱めの予測を採用することで実況に近い予測となっていることがわかる。



第 7.4.4 図 降水 15 時間予報の構成手順



第 7.4.5 図 降水 15 時間予報の数値予報資料選択例

2018 年 6 月 19 日 18 時初期値の 14 時間先 (20 日 08 時) の予測。MSM、MSM ガイダンスは 19 日 15 時初期値の 17 時間先の予測。グループ 1 では、MRR の方が FRR よりもスコアがよかったため、MRR が採用された。また、グループ 2 では RMAX13 の方が RMAX11 よりもスコアがよかったため RMAX13 が採用された。

7. 4. 4 降水 15 時間予報の予測事例と利用上の留意点

第 7.4.1 図は降水 15 時間予報が実況に近い事例である。本項では、降水 15 時間予報の他の予測事例として、以下の事例を示す。

- 初期時刻によって予測が変化する場合
- 強度、位置、時間のずれが生じる場合
- 降水の予測ができない場合
- 降水短時間予報と降水 15 時間予報にギャップが生じる場合

① 初期時刻によって予測が変化する場合

降水 15 時間予報は MSM、MSM の降水ガイダンスを用いていることから、MSM の初期値が 3 時間毎に変わ

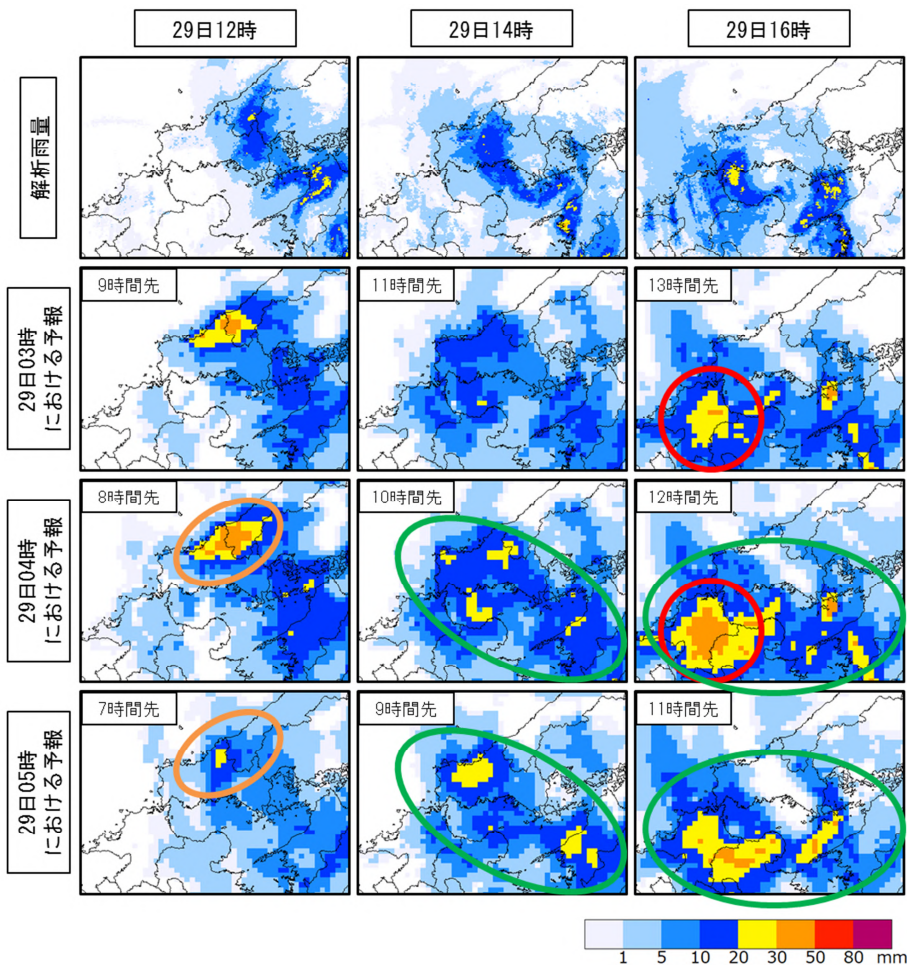
るタイミングで予測が大きく変化する場合がある。また、算出に用いる（選択される）数値予報資料が初期時刻毎に変わることによって予測が変化する場合もある。このような事例を第 7.4.6 図に示す。初期値が変わる毎に予測に変化が生じているが、それぞれ以下のような理由による。

- 03 時初期値に比べ、04 時初期値の予測では 16 時時点の福岡県付近の予測が強まっている（赤色の丸）。これは、03 時初期値は RMAX13 を選択しているのに対し、04 時初期値は RMAX11 を選択しているためである。
- 04 時初期値に比べ、05 時初期値では 12 時時点の山口県付近の予測が弱まっている（オレンジ色の丸）。これは、05 時初期値は RMAX1 を選択しているためである。
- 04 時初期値と 05 時初期値の 14 時時点、16 時時点の予測も異なっている（緑色の丸）。これは、予測に用いる MSM が変更され、ともに選択している MRR や RMAX11 の予測結果も異なるものとなったためである。

このように、初期時刻によって予測が大きく変化する場合がある。一般的には予報時間が短いほど精度は高くなるため、最新の予報を利用いただきたい。

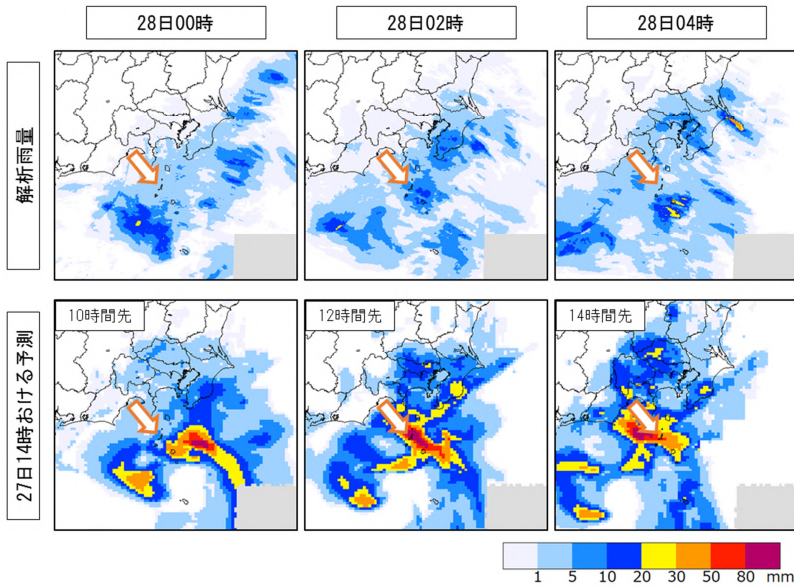
②強度、位置、時間のずれが生じる場合

降水 15 時間予報は、実際の雨量と比較すると降水量や降水域の位置、降水域のかかる時間などにずれが生じる場合がある。第 7.4.7 図に、降水量に大きなずれが生じている事例を示す。



第 7.4.6 図 降水 15 時間予報の予測が初期時刻によって変化する事例

1 段目：解析雨量、2 段目：2018 年 7 月 29 日 03 時初期値の予測、3 段目：29 日 04 時初期値の予測、4 段目：29 日 05 時初期値の予測。図中の丸については、本文を参照のこと。

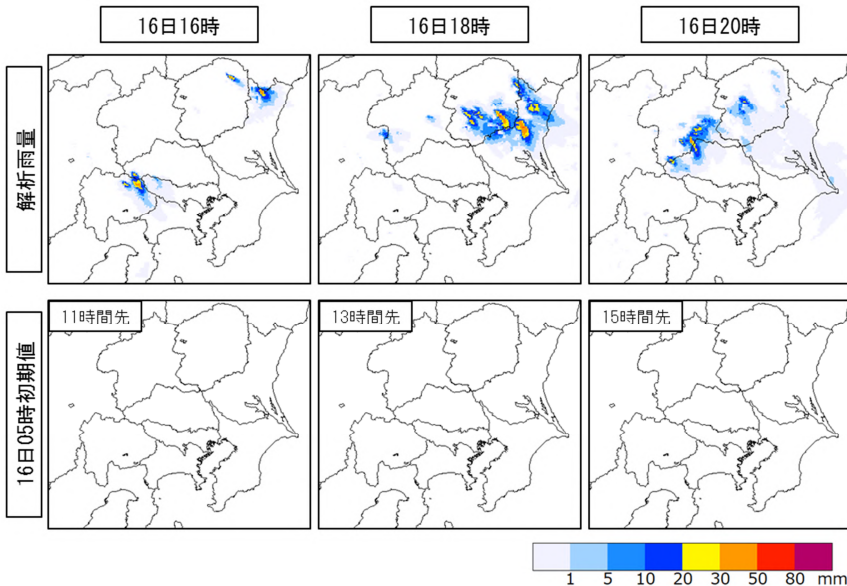


第 7.4.7 図 降水 15 時間予報が過大予測となった事例

上：解析雨量、下：2018 年 7 月 27 日 14 時初期値の予測。オレンジ色の矢印は新島を示す。

してくる過程で、外側の強雨域が伊豆諸島や関東地方にかかるというものであるが、初期時刻の 27 日 14 時ごろでは台風周辺や外側の強雨域は解析雨量の範囲外であり、解析雨量と数値予報資料との比較ができなかったことも適切な予測を選択できなかった要因の一つと考えられる。

③降水の予測ができない場合



第 7.4.8 図 局地的な大雨を予測できない事例

上：解析雨量、下：2018 年 7 月 16 日 05 時初期値の予測。

④降水短時間予報と降水 15 時間予報にギャップが生じる場合

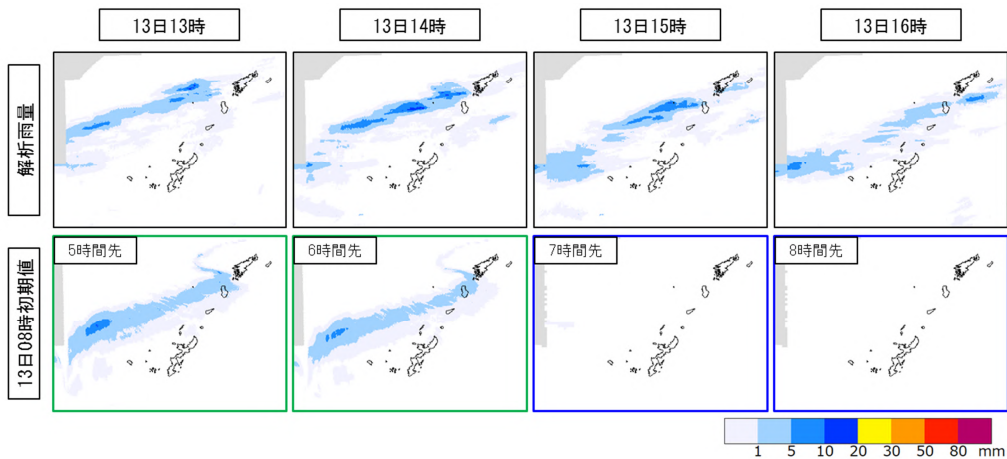
降水短時間予報と降水 15 時間予報は予報手法が異なるため、降水短時間予報の 6 時間先の予報と降水 15 時間予報の 7 時間先の予報にギャップが生じる場合がある。第 7.4.9 図と第 7.4.11 図に降水短時間予報の 6 時間先と降水 15 時間予報の 7 時間先の予測にギャップが生じる事例を示す。

降水短時間予報は 6 時間先の予測では MSM と LFM の降水量予測を重み付け平均した BLD の予測が主と

27 日 14 時初期値の降水 15 時間予報では 28 日未明に新島（オレンジ色の矢印）付近で約 130mm の猛烈な雨を予測しているが、解析雨量では 10mm 未満となっており、かなり過大な予測となっている。MSM の降水量予測（FRR）が最大で 150mm 近い降水量を予測するなど過大な予測していることから、最大降水量ガイダンスは RMAX11、RMAX13 とともに過大となった。一方、平均降水量ガイダンスもかなり過大ではあるものの、最大で 80mm 程度であり、MSM の降水量予測（FRR）に比べるとピークを抑えて予測している。この事例は、台風が北上

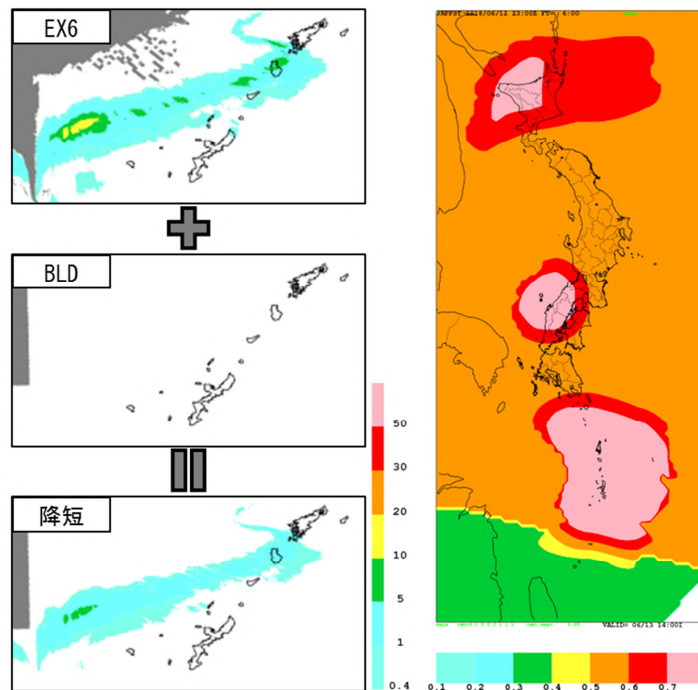
降水 15 時間予報で降水の予測ができなかった事例を第 7.4.8 図に示す。16 日午後、関東地方では局地的に強い降水域がかかっているが、降水 15 時間予報では降水域を予測することができていない。このように、大気不安定による局地的な大雨等で、MSM や LFM が降水を予測していない場合、それらに基づく降水 15 時間予報も降水の予測ができない。

なるが、第 7.4.9 図の事例では、第 7.4.10 図に示すように実況補外型予測 (EX6) が 6 時間先の予測でも用いられており、数値予報資料のみで作成する降水 15 時間予報とギャップが生じたものである。この事例では実況補外型予測を用いた降水短時間予報は実際のライン状の降水分布をよく表現できており、降水 15 時間予報では予測することができていない。上述のとおり降水短時間予報の 6 時間先の予測で用いる数値予報資料は MSM と LFM の降水量予測であるが、降水 15 時間予報は MSM の降水量予測、降水量ガイダンス、LFM の降水量ガイダンスを用いており、算出手法も降水短時間予報と降水 15 時間予報では異なっている。そのため、第 7.4.11 図のように 6 時間先の予測と 7 時間先の予測でギャップが生じることがある。この事例では、降水 15 時間予報は最大降水量ガイダンスの RMAX11 を高い比率で採用しており、降水短時間予報よりも強い降雨域が青森県に近いところで広がる予測となっている。



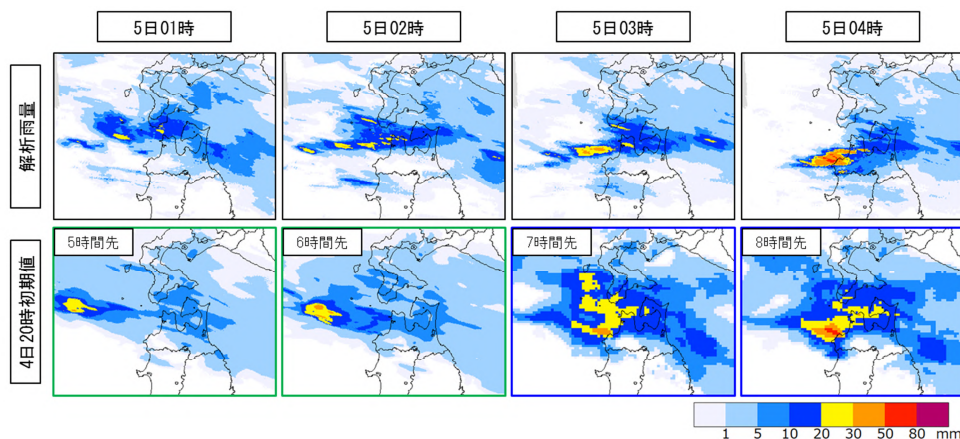
第 7.4.9 図 降水短時間予報の EX6 が残り降水 15 時間予報とギャップが生じる事例

上：解析雨量、下：2018 年 6 月 13 日 08 時初期値の予測。5 時間先と 6 時間先は降水短時間予報（緑色の枠）、7 時間先と 8 時間先は降水 15 時間予報（青色の枠）の予測。



第 7.4.10 図 第 7.4.9 図の事例における降水短時間予報の構成

左：2018 年 6 月 13 日 08 時初期値の 6 時間先の降水短時間予報を構成する EX6 と BLD、右：同時刻の EX6 の比率。南西諸島では 6 時間先の予測でも EX6 の比率が大きくなっている。



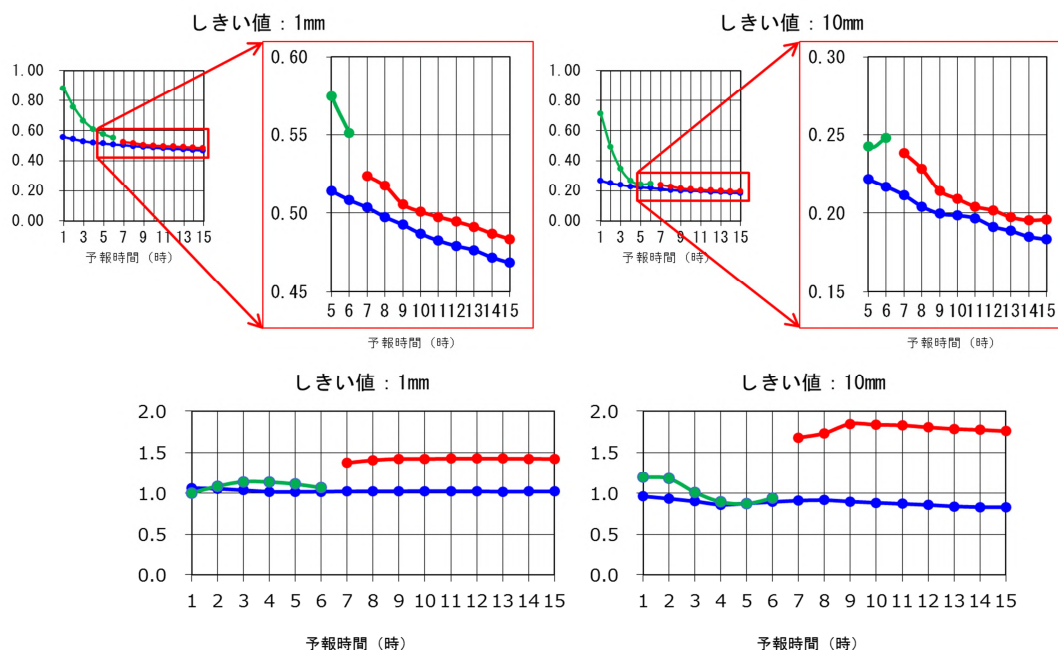
第 7.4.11 図 用いる数値予報資料の違いで降水短時間予報と降水 15 時間予報にギャップが生じる事例

上：解析雨量、下：2018 年 8 月 4 日 20 時初期値の予測。5 時間先と 6 時間先は降水短時間予報（緑色の枠）、7 時間先と 8 時間先は降水 15 時間予報（青色の枠）の予測。

7. 4. 5 統計検証結果

2017 年 7 月、2017 年 10 月、2018 年 1 月の 3 ヶ月間を対象として統計検証を行った。5km 格子、陸域周辺格子で解析雨量を真値として FSS とバイアスコアを算出する。FSS の算出においては、6 格子ずれを許容する。これは、約 65km 四方で、概ね富山県程度の広さで比較することに対応する。検証対象は降水 15 時間予報、MSM の平均降水量ガイダンス（MRR）、降水短時間予報（参考として 6 時間先まで 5km 格子平均）である。

第 7.4.12 図に FSS とバイアスコアの結果を示す。降水 15 時間予報の精度は降水短時間予報の予報時間後半と同程度かやや低くなっている。予報期間を通して降水 15 時間予報は MSM の平均降水量ガイダンスより FSS の値は大きく、MSM の平均降水量ガイダンスに比べ全体の傾向として降水分布をよりよくとらえていることを示している。バイアスコアは 1 よりやや大きくなっており、頻度がやや高く、見逃しが少ないことを示唆している。



第 7.4.12 図 降水 15 時間予報、降水短時間予報、MSM 平均降水量ガイダンスの FSS (上) とバイアスコア (下)

左：1mm 以上、右：10mm 以上の降水を対象。上図は赤色の枠で囲った部分を拡大している。各グラフの横軸は予報時間（時）、縦軸は各スコアを表す。赤は降水 15 時間予報、青は MSM 平均降水量ガイダンス、緑は降水短時間予報を表す。

7. 4. 6 降水 15 時間予報の利用について

一般のユーザーにも降水 15 時間予報を利用していただけるよう、気象庁ホームページの「今後の雨」ページで解析雨量、降水短時間予報、降水 15 時間予報を連続して確認できるようにしている。

降水 15 時間予報を用いることで、これまで降水短時間予報による 6 時間先までだった降水量予測を 15 時間先まで確認することができるようになる。そのため、例えば台風等により夜間から明け方のいつ頃、どこで大雨となる見込みかについて前日夕方の時点で把握できるようになり、夜間に大雨警報（土砂災害）が発表される可能性が高い状況の場合、土砂災害警戒区域等に住んでいる方の避難準備や避難開始の判断、自治体の「避難準備・高齢者等避難開始」の判断に活用できる。また、日常生活においても、朝出かける前に夜までの雨の予報を確認して傘を持っていくかどうかを判断する、休日前の夜に翌日午前中の雨の予報を確認して休日の予定を変更するなど、幅広く利用することができる。

7. 5 竜巻発生確度ナウキャストの改善*

7. 5. 1 経緯

竜巻発生確度ナウキャストは、2010 年に運用を開始して以来（瀧下，2011）、概ね 2 年毎に改善を行ってきた。2014 年にはメソサイクロン検出の改善を行った（以下、Ver3.4 と呼ぶ）（中里他，2017）。2016 年 12 月 15 日には、竜巻注意情報の一次細分区域単位での発表開始にあわせて国土交通省 X バンドレーダの活用（木川他，2017）、新しい予測指数の導入、リードタイムの調整等の改善を行った（以下、Ver4.0 と呼ぶ）（中里・西村，2017）。このときの改善では、予測に使用する統計式（突風危険指数）の作成方法の変更なども行い、統計式の閾値の設定と予測精度検証を自動で行うことができるようにした。

統計式の作成方法の変更で、より合理的な開発が可能となったが、Ver4.0 ではそれまで表面化していなかった課題が顕在化し、結果的に次の 3 点について技術的な改悪となることが明らかになった。

- Ver3.4 以前の統計式を作成したときよりも少ない突風事例を用い、多くの予測指数を使って統計式を作成したことによって過学習が生じた。
- メソサイクロン検出結果を統計式に含めて判定する方式に変更したことによって、3 つの突風危険指数の閾値が一樣になり、竜巻型（TR 型）による突風判定が増加した。
- 統計式に低めの閾値が適用されていた。過学習した統計式は従属資料に対しては低い閾値でも発表回数が増加しないことから、閾値を下げて捕捉率を上げるように閾値の自動最適化プログラムで低めの閾値が選ばれていた。

これに伴い、Ver4.0 運用開始前に行った従属資料による精度検証では、見かけの予測精度が大幅に向上したが、実際には上記 3 点の影響が大きく、精度向上には至らなかった。そこで 2018 年 10 月からこれらの改悪点を修正するとともに、Ver4.0 に含めることができなかった改善点を追加した（以下 Ver4.1 と呼ぶ）。

本節では、竜巻発生確度ナウキャスト Ver4.1 における改善点と予測精度の検証結果について説明する。内容は次のとおりである。

7.5.2 項 竜巻発生確度ナウキャスト Ver4.0 の予測精度

7.5.3 項 課題と Ver4.1 における改善の内容

7.5.4 項 Ver4.1 の予測精度評価

*中里 真久、笠原 真吾（気象庁予報部予報課）

7. 5. 2 竜巻発生確度ナウキャスト Ver4.0 の予測精度

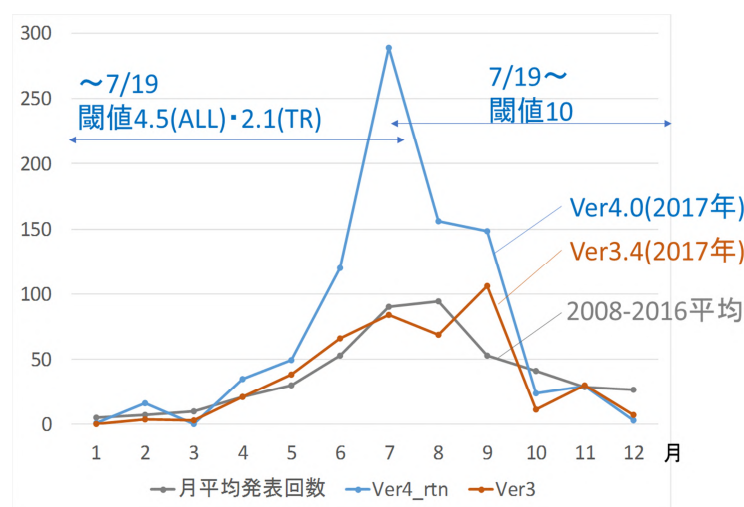
第 7.5.1 表は竜巻注意情報の予測精度（実績値）の推移である。Ver4.0 が運用された 2017 年は捕捉率が高かったものの、発表回数が増加し、適中率は低めであった。発表回数が増加した理由は、閾値が低めに設定されていたためである。第 7.5.1 図は 2017 年の月毎の竜巻注意情報の発表回数を 2008-2016 年（9 年間）の平均値と比較したものである。5 月まではほぼ例年並みであったが、6 月から急激に発表回数が増加した。これを受けて同年 7 月 19 日に TR 型及び突風の種類を区別しない ALL 型の突風危険指数の閾値（それぞれ 2.1 と 4.5）を 10 に引き上げた。このことにより、8 月の発表回数は 7 月に比べて減少したが、9 月まで発表回数が多い状況は続き、2017 年の発表回数は例年の約 2 倍の 909 回となった。

Ver4.0 の開発段階では、従属資料を用いて自動で閾値の最適化を行うとともに予測精度を評価しており、独立資料を用いた予測精度の検証は行っていなかった。このため、独立資料を用いた場合、Ver4.0 の突風危険指数では予測精度がどうなるのか、2015-2017 年の 3 年分のデータを用い、TR 型と ALL 型の閾値を 10 から 30 の間で変化させて評価した（第 7.5.2 表）。その結果、Ver3.4 と比較して発表回数が多くなり、捕捉率は高くなるが適中率が低くなっていることがわかった。また、閾値を 25 に引き上げることにより、Ver3.4 と同程度の予測精度になることがわかった。この結果に基づいて、2018 年 3 月 29 日に Ver4.0 の閾値を 25 に引き上げた。

第 7.5.1 表 竜巻注意情報の予測精度の推移

	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年*	2017年*
適中率 (括弧内)は 最大瞬間風速 20m/s以上の事例 を含めた適中率	9% (22%)	5% (30%)	5% (26%)	1% (18%)	3% (25%)	4% (24%)	2% (22%)	4% (24%)	4% (25%)	2% (18%)
捕捉率 【括弧内】は F1以上の捕捉率	24% [31%]	21% [67%]	34% [67%]	21% [20%]	32% [40%]	42% [38%]	27% [33%]	35% [78%]	34% [50%]	40% [36%]
発表回数	172	128	490	589	597	606	604	402	372	909
突風回数 【括弧内】は F1以上の回数	70 [13]	34 [6]	67 [6]	39 [5]	50 [10]	59 [21]	37 [6]	48 [9]	44 [14]	45 [11]

※2016年と2017年は速報値。



第 7.5.1 図 2017 年の月毎の竜巻注意情報の発表回数

第 7.5.2 表 独立資料を用いた竜巻発生確度ナウキャスト Ver4.0 の予測精度

	Ver4.0					Ver3.4
	閾値10	閾値15	閾値20	閾値25	閾値30	
発表回数	779回	603回	499回	424回	377回	389回
適中率	2.27 %	2.60 %	2.67 %	3.06 %	3.18%	3.60 %
捕捉率	44.9 %	40.6 %	34.8 %	32.6 %	30.4%	32.6 %
F1以上の捕捉率	55.6 %	55.6 %	47.2 %	44.4 %	38.9 %	50.0 %
F2以上の捕捉率	60.0 %	60.0 %	60.0 %	60.0 %	60.0 %	40.0 %

7. 5. 3 課題と Ver4.1 における改善の内容

従属資料を使った精度評価では高い値が出たにもかかわらず、独立資料を使った場合の予測精度は従来と変わりがなく閾値が低めに設定された原因は、突風危険指数の係数に過学習の影響が含まれていたためである。過学習が生じた理由は、1) 従来の突風危険指数の作成では 60 ヶ月分のデータを使っていたが、Ver4.0 では半分の 30 ヶ月分であったこと、2) 新しい予測指数を多数導入したため多数の説明変数で突風危険指数が作成され、従属資料に特化した統計式が作られてしまったこと、の2点である。この過学習の影響がある突風危険指数を使って自動で閾値の最適化を行うと、閾値を下げてでも発表回数はあまり増加せず（適中率が低下せず）、一方で閾値を下げるにより捕捉率は上がるため、閾値を過剰に下げないように調整される。こうして決められた突風危険指数と閾値を独立資料に対して適用したことから、予測精度は従属資料を用いた評価とは異なり、発表回数が増加して適中率が低下した。

また、Ver4.0 では複合判定をなくしたため、Ver3.4 で信頼性が高くなったメソサイクロン検出結果が Ver4.0 では相対的に重視されなくなり、閾値が低かったこととあわせて発表回数が増加した一因になっていたと考えられる。

Ver4.0 に含まれるこれらの課題を改善し、その他の改善点とあわせて、竜巻発生確度ナウキャスト

第 7.5.3 表 竜巻発生確度ナウキャストのバージョン間比較

	Ver4.1	Ver4.0	Ver3.4	備考
データ期間	60ヶ月 (2012～2016年)	30か月 (2012～2014年)	60ヶ月 (2008～2012年)	Ver4.1は過学習対策
説明変数の選択方法	赤池情報量基準(AIC)と逸脱度 ※予測式の係数が負になった説明変数は使用しない。	赤池情報量基準(AIC)と逸脱度	赤池情報量基準(AIC)と逸脱度	Ver4.1は過学習対策
複合判定	使用	不使用	使用	Ver4.1は発表回数抑制策
独立資料を用いた精度検証	あり (2017年4月～2017年12月)	なし	なし	
突風リストの扱い	・現象の種類を再評価 ・降水が全くない事例を使用しない	そのまま使用	そのまま使用	Ver4.1は突風危険指数の改善策
突風あり事例のサンプリングの時刻	突風発生の70分前から突風発生時刻までの間で、 ・メソサイクロンが検出された時はその時刻。 ・メソサイクロンが検出されなかった時は、鉛直積算雨量が最大になった時刻	突風発生の15分前	突風発生時刻	
ダウンバースト型突風危険指数の扱い	・ダウンバースト型突風危険指数を更新して使用	実質的に突風判定に使用せず	Ver.3.0と同じものを使用	Ver4.1は、現象の種類再評価の結果、DB型突風危険指数の作成に使用可能な事例が増加したため
降水強度条件 (発生確度2を表示する条件)	$iemx/(LEL/ZEL) \geq 10$ (概ね季節によって変化する)	100mm/h以上	100mm/h以上	冬季に、突風判定があったにもかかわらず、発生確度2が出ないことがあることに対する対策
Xバンドメソサイクロン	メソサイクロン指数として使用	メソサイクロン指数として使用	使用せず	
新突風関連指数	・説明変数に活用 ・閾値を設定	・説明変数に活用 ・閾値を設定	使用せず	

Ver4.1 の開発を行った。Ver4.1 における改善点は第 7.5.3 表に示すとおりである（表に記載されている指数については、第 7.5.4 表を参照）。以下では、第 7.5.3 表の各項目について解説する。

(1) データ期間

Ver4.0 におけるデータ期間は、国交省 X バンドレーダのデータを利用でき、気象庁レーダー20 基がドップラー化された 2012 年 4 月から 2014 年 9 月までの 30 か月であり、事例数が少なかったことが過学習の要因の一つになっていた。Ver4.1 では、突風危険指数の作成に用いたデータ期間を 2012 年 4 月から 2017 年 3 月までの 5 年間とした。期間中のデータ数については「4) 突風リストの扱い」を参照。

(2) 新突風関連指数の扱い及び説明変数の選択（過学習対策）

Ver4.1 でも Ver4.0 と同じ数の突風関連指数を説明変数候補として、ロジスティック回帰分析と赤池情報量基準（AIC）による変数選択を行って統計式の作成を行った。一方、Ver4.0 では新しい予測指数を導入し説明変数候補の数が増加したことが、過学習が生じた原因の 1 つであるため、Ver4.1 では説明変数の選択の方法を工夫した。

突風関連指数には、突風が発生しやすい時に値が増加するものと値が減少するものの 2 種類がある。このため、正しく作成された統計式の係数の符号は前者ではプラス、後者ではマイナスになることが期待される。これに対して過学習した統計式では、説明変数の数が多く、係数の符号が期待されるものとは逆符号になっているものを含むという特徴がある。このような特徴を踏まえて、係数の符号が期待されるものとは逆符号になっている説明変数がある時はその説明変数を除いて再度ロジスティック回帰分析を行うことを複数回繰り返すことにより、統計式を最適化する手法を採用した。

このようにして選択された Ver4.1 における突風危険指数の説明変数を第 7.5.4 表に示す（説明変数の意味については、瀧下(2011)と中里・西村(2017)を参照）。Ver4.1 の説明変数の数は TR 型 14 個、ダウンバースト型（DB 型）8 個、ALL 型 13 個であり、Ver3.4 と同程度になった。

第 7.5.4 表 竜巻発生確度ナウキャスト Ver4.1 の説明変数

説明変数			
型判別	hemx, r_vil, TVPEz, PTORS, DBVw, DnstTR, DnstDB		
TR型	iemx, hemx, zmax, dbz2, rsvil, SSIm, TTIm, MLCAP3, SREH, BRNsh, VGP, TVPO, PTORS, VILen		
DB型	zmax, pzt10r, dbz5R, svil, TTIm, BRNsh, LEL, RMC		
ALL型	iemx, hemx, vil, zmax, k01r7, dbzE, SSIm, TTIm, MLCAP3, BRNsh, TVPO, LEL, VILen		
記号	説明変数名称(レーダー・調査資料)	記号	説明変数名称(数値モデル)
iemx	レーダー降水強度	SSIm	ショワルター安定指数
hemx	レーダーエコー頂高度	TTIm	トータル・トータルズ指数
zmax	レーダー最大反射強度	MLCAP3	地上から高度1000mの平均空気塊を持ち上げて計算したCAPE
vil	鉛直積算雨量	SREH	ストームに相対的なヘリシティ
r_vil	鉛直積算雨量比(vil比)	VGP	渦生成パラメータ
svil	鉛直シアを考慮したvil	BRNsh	バルクリチャードソン数シア
rsvil	鉛直シアを考慮したvil比	TVPEz	竜巻風速パラメータ(エネルギー保存)
dbz2	高度2km反射強度	TVPO	竜巻風速パラメータ(中層鉛直シアなし)
dbz5R	高度5km反射強度	PTORS	竜巻の種の発生確率予想値
dbzE	高度14km反射強度	VILen	降水分布の長さ予想値
k01r7	周辺内1mmh ⁻¹ 以上の個数	RMC	高度1kmの積乱雲半径予想値
pzt10r	-10°C面エコー強度	DBVw	ウェットダウンバースト予想風速
DnstTR	竜巻の突風密度	LEL	平衡高度までの積算雨量予想値
DnstDB	ダウンバーストの突風密度		

(3) 複合判定

Ver3.4 までの突風判定では、メソサイクロン検出と ALL 型突風危険指数を用いた複合判定、及び TR 型と DB 型の指数単独判定の 2 つの判定を用いていた。Ver3.4 以前はメソサイクロン検出結果を重視し ALL 型突風危険指数の閾値を低めに設定していたため、メソサイクロンの誤検出がある場合は空振りが増える傾向にあったが、Ver3.4 でメソサイクロン検出の誤検出が減少し信頼性が向上したことから、複合判定による発表回数の減少に寄与していた。Ver4.0 では、国交省 X バンドメソサイクロン検出が 6 段階のレベル値として提供されたことと従属資料による精度検証の結果を踏まえて、複合判定をなくしたうえでメソサイクロン検出結果を他の予測指数と同じく突風危険指数の説明変数として利用し、全て単独判定（ALL 型、TR 型、DB 型）とした。しかし実際には、降水強度が極めて大きくなる場合は発生確度 2 が出やすくなり空振りの増加につながった。これをふまえて、Ver4.1 では複合判定を再び採用することにした。なお、国交省 X バンドメソサイクロン検出結果は、統計式の説明変数としての活用がしやすいため、Ver4.1 においても Ver4.0 と同様に統計式の説明変数に含めて利用している。

(4) 突風リストの扱い

気象庁では、突風による被害が発生した際に気象台職員が現地調査を行い、現象の種類やその強さなどの調査結果を取りまとめ、突風リストとして整理している。突風危険指数の作成においては、この突風リストを用いて目的変数（突風の有無）を作成している。Ver3.4 以前は、突風リストに記載されている積乱雲に伴う突風事例（現象の種類が「不明」と評定されたものを含む）をそのまま統計式の作成と予測精度の検証に使用していた。しかし、Ver4.1 では次の 3 つの場合について突風リストを修正したうえで、統計式の作成及び予測精度の検証に使用した。

①じん旋風が疑われるものの証拠不十分で現象の種類が「不明」と評定された事例

竜巻発生確度ナウキャストの予測対象は、竜巻、ダウンバースト、ガストフロントなどの積乱雲に伴う突風であるため、じん旋風は統計式の作成には使われていないが、現地調査で現象の種類が不明と評定されたものの中には、じん旋風が疑われるものの証拠不十分で不明とされたものが含まれている。従来の突風危険指数の作成では、このような事例が含まれていた可能性があるため、Ver4.1 では降水がないなどレーダーによる観測データから見て積乱雲に伴う突風の可能性が低い事例については統計式の作成及び予測精度検証に使用しないこととした。

②ほぼ同時刻に近い場所で複数の突風が発生した事例

ほぼ同時刻に近い場所で複数の突風が発生することがあるが、これらを別個に評価するのは適切でない。このため、同一の 10km 格子で発生し発生時刻差が 10 分以内の事例については、後続の突風事例を統計式の作成及び予測精度検証に使用しないこととした。

③統計式の作成を目的とした突風現象の分類

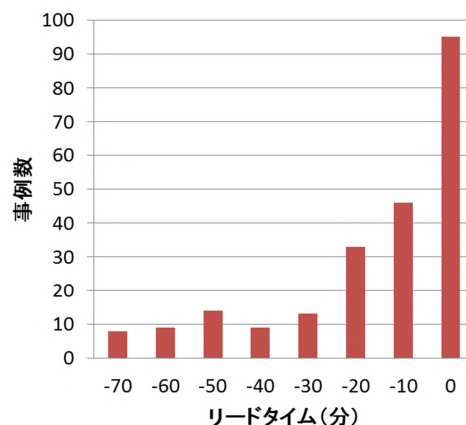
統計式の作成に用いるデータ期間中における現象の種類毎の事例数は、単独判定（瀧下，2011）用の突風危険指数（TR 型、DB 型）の良し悪しに大きな影響があるが、現地調査における現象の種類の評定で「不明」と評定された事例が相当数ある一方で、ダウンバーストと評定された事例は少ない。Ver4.0 の DB 型突風危険指数の作成時には、従属資料期間中のダウンバーストの事例数が 11 事例しかなかったため、実質的に有効な DB 型突風危険指数は作成されなかった。そこで、単独判定用の突風危険指数の作成に使用できる事例数を増やして予測精度を改善するために、突風リストに記載の全ての事例について、レーダー観測や数値予報から計算される突風関連指数から見て「竜巻らしいもの」と「ダウンバーストらしいもの」に便宜上の分類を行い、TR 型突風危険指数と DB 型突風危険指数の作成ではこの結果を用いることとした。「ガストフロント」については「ダウンバーストらしいもの」に分類した。

その結果、データ期間中の事例 409 事例に対して、統計式の作成及び精度検証に使用した従属資料の事例数は 227 事例となった。内訳は、「竜巻(らしいもの)」は 180 事例、「ダウンバースト(らしいもの)」は 47 事例となった。

(5) 突風あり事例のサンプリングの時刻(リードタイム調整)

Ver4.0 では、突風が発生した時刻よりも 15 分前の説明変数をサンプリング(中里・西村, 2017)して統計式を作成することにより、リードタイムを調整した。しかし、実際は突風が発生する兆候があらわれるタイミングは様々であり、一律に 15 分前の値を基にして統計式を作成すると閾値が低めに設定されがちになってしまう。

Ver4.1 では、竜巻注意情報の有効時間と発表作業に要する時間を考慮し、突風発生 70 分前から突風発生時刻までの間で v_{il} が最大となる時刻の値を使用することにした。このため、サンプリングされた時刻は個々の事例毎に異なる。サンプリングされた時刻の分布を第 7.5.2 図に示す。分布の平均値、すなわち期待されるリードタイムは 16 分であった。



第 7.5.2 図 サンプルされた時刻の分布

(6) DB 型突風危険指数の扱い

ダウンバーストは竜巻に比べて事例数が少ないため、DB 型突風危険指数の作成のためにはデータ期間を長くし、事例数を確保する必要がある。Ver3.4 では DB 型突風危険指数の作成は見送られ Ver3.0 と同じものが使用された。Ver4.0 では、DB 型突風危険指数の作成が行われたが、データ期間が短かったため閾値が TR 型や ALL 型に比べて高く設定され、実質的には DB 型突風危険指数による判定が行われないような設定となっていた。

この課題に対処するために、4)で修正した突風リストを用いて DB 型突風危険指数の作成を行った。1)で説明したようにデータ期間を 5 年とし、4)で説明した突風現象の分類により、DB 型突風危険指数の作成に使える突風事例の数が増加したため、有効な DB 型突風危険指数の作成が可能となった。

(7) 降水強度条件

竜巻発生確度ナウキャストでは、捕捉率を上げるために突風判定があった格子を中心とする半径 40km 以内に発生確度 2 背景を設定し、降水強度条件を課すことにより発生確度 2 を解析している。この降水強度条件としては、これまで「発生確度 2 背景内の各格子点において、降水強度 20mmh^{-1} 以上かつ半径 20km 以内に降水強度 100mmh^{-1} 以上の格子があること」(以下、降水強度条件 A)を採用していた。しかし、寒候期については大気中の水蒸気が少ないため、この条件は厳しいものになっていた。突風判定があっても、この条件によって発生確度 2 が解析されず、見逃しとなる例がみられたため、大気状態に応じて条件を変化させる方法を試みた。具体的には、「発生確度 2 背景内の各格子点において、降水強度 20mmh^{-1} 以上かつ半径 20km 以内に次の式で表される降水強度以上の格子があること」(以下、降水強度条件 B)とした。

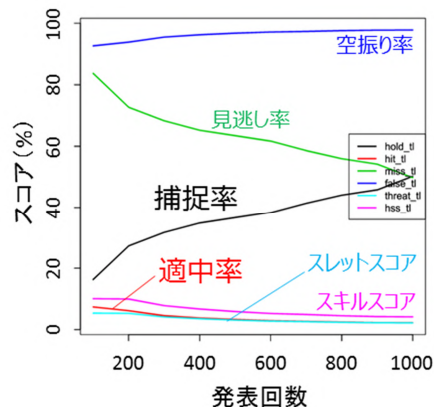
$$iemx/(LEL/ZEL) \geq 10$$

ここで、 $iemx$ (mmh^{-1}) と LEL (kgm^{-2}) は第 7.5.4 表のとおりであり、 ZEL は地上から高度 500m までの平均した空気塊を持ち上げたときの平衡高度の高さ (km) である。上式右辺の数値は、水の密度と雨粒の終端速度で決まる次元を持つ。なお、実際にどちらの降水強度条件を採用するかは、7.5.4 項の独立資料を用いた評価結果に基づいて決めた。

7. 5. 4 Ver4.1の予測精度評価

7. 5. 4. 1 従属資料を用いた評価

第7.5.3図は、3つの突風危険指数（TR型、DB型、ALL型）の閾値を自動的に最適化するプログラム（中里・西村，2017）を用いて、指定した発表回数に対する予測精度（捕捉率、適中率等）をグラフにしたものである。閾値を自動的に最適化する計算は、3つの突風危険指数の閾値として高い値を初期値として与え、「3つの閾値のそれぞれで捕捉数が1増えるまで仮の閾値を下げ、そのときの発表回数を比較し、発表回数の増加が最も小さい突風危険指数の閾値だけを実際に下げる」という動作を繰り返すことにより行う。この計算結果を用いると、発表回数を指定すれば、3つの突風危険指数の閾値とそのときの予測精度が決まる。この計算で得られる予測精度と閾値を基にして、7.5.4.2の「独立資料を用いた評価」のための計算条件を決めた。



第7.5.3図 従属資料を用いた予測精度の評価結果

7. 5. 4. 2 独立資料を用いた評価

独立資料を用いた予測精度の評価を行うために、2017年4月～12月（9ヶ月間）の竜巻発生確度ナウキャストを計算し、予測精度を評価した。精度評価は、降水強度条件（7.5.3項7）で説明した降水強度条件A又はB）と複数の突風危険指数の閾値を組合せることにより、条件を変えて行った。発表回数が300～400回程度となった4通りの解析手法に対する結果を第7.5.5表に示す。ここで、3つの突風危険指数（TR型、DB型、ALL型）の閾値の組合せは、従属資料を用いて最適化された閾値（第7.5.3図）を参考にした。降水強度条件Bを課した場合は、降水強度条件Aを課した場合より発表回数が少し増加するが、捕捉数と適中数が増加することにより予測精度が向上する。Ver4.1では、発表回数が年間300回程度になり適中率ももっとも高い解析手法4を採用することとした。解析手法4の予測精度は、捕捉率約33%、適中率約4%である。なお、Ver4.1の予測精度をVer3.4の予測精度と比較するには、第7.5.5表の解析手法2（解析手法4とは閾値のみが異なる）とVer3.4を比較する。捕捉率と適中率ともに解析手法2の方が大きいことから、Ver4.1の予測精度が向上していることがわかる。7.5.3項1)及び2)の過学習対策を採用したことにより、

第7.5.5表 独立資料を用いた予測精度の評価結果

解析手法	1	2	3	4	Ver3.4
計算条件					
降水強度条件	iemx \geq 100mm/h	iemx/(LEL/ZEL) \geq 10	iemx \geq 100mm/h	iemx/(LEL/ZEL) \geq 10	iemx \geq 100mm/h
TR型閾値	15	18	24	24	31
DB型閾値	40	12	40	40	36
ALL型MC背景閾値	22	11	35	35	14
ALL型MC現在閾値	27	13	38	38	16
予測精度					
発表回数	419	440	306	319	432
捕捉数	17	18	13	15	17
適中数	15	16	12	14	15
捕捉率	37.8	40.0	28.9	33.3	37.8
適中率	3.58	3.64	3.92	4.39	3.47
突風事例数	45	45	45	45	45

作成した突風危険指数には過学習の影響がなくなったため、独立資料を用いた予測精度の評価結果は従属資料を用いた評価結果と概ね一致した。

7. 6 雷ナウキャストの改善*

雷ナウキャストは、1km 格子単位で雷の激しさや雷の可能性を解析し、10 分毎に 1 時間先までの予測とあわせて提供する図形式の解析・予測プロダクトである（笠原，2010;笠原，2011）。情報は 10 分毎に最新のものを提供し、雷の発生可能性と激しさを 4 つの階級で表現している（第 7.6.1 図）。

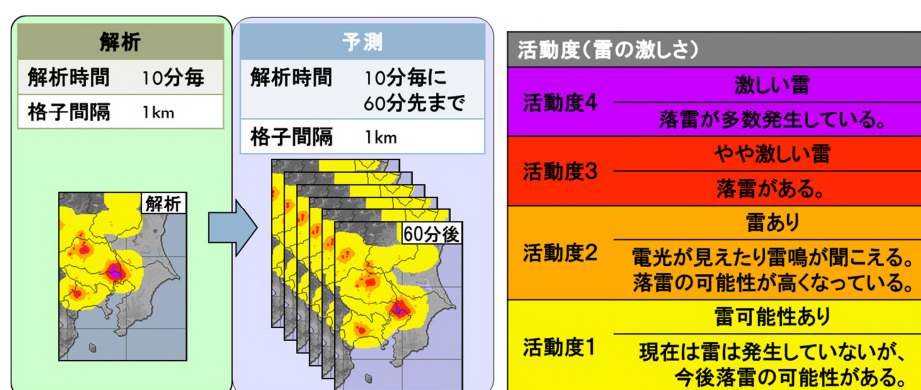
活動度 1 は、“現在発雷に至っていないが、今後 1 時間以内に発雷に至る可能性がある”領域を広く解析することが目的である。2010 年の雷ナウキャスト提供開始時は、雷注意報とレーダーエコー強度により活動度 1 を解析していたが、2011 年の改善によりレーダー指数など複数の指標で解析する手法（雷可能性の解析）を導入した（笠原，2011）。

雷可能性の解析の導入後、以下に示す課題があった。

(A) 活動度 1 は、30 分後の発雷の 95%以上を捕捉する一方で、検出過多で適中率が低めである。

(B) 夏季の熱雷のように急激に発達する雷雲は、レーダー観測により明瞭に捉えられてから発雷するまでの時間が短く、十分なリードタイムを確保することが難しい。

これら課題の解決のため、(A)については、レーダー観測等の利用方法を見直すことにより適中率を改善する手法を 2016 年 12 月に導入した。(B)については、気象衛星ひまわりの高頻度観測データ（以下、ひまわり観測データ）を用いて、発雷に至る可能性がある積雲を早期に検出する手法を開発し、2017 年 7 月に適用した。これらの改善の手法について、7.6.1 項及び 7.6.2 項で解説する。



第 7.6.1 図 雷ナウキャストの概要

7. 6. 1 レーダーエコーを用いた雷ナウキャスト活動度 1 の改善（課題（A）への対応）

課題(A)への対応のため、発雷捕捉精度を維持しつつ、より領域を絞り込んだ活動度 1 の解析を可能とする改善を行う。活動度 1 の解析手法の概要と変更点を第 7.6.2 図に示す。

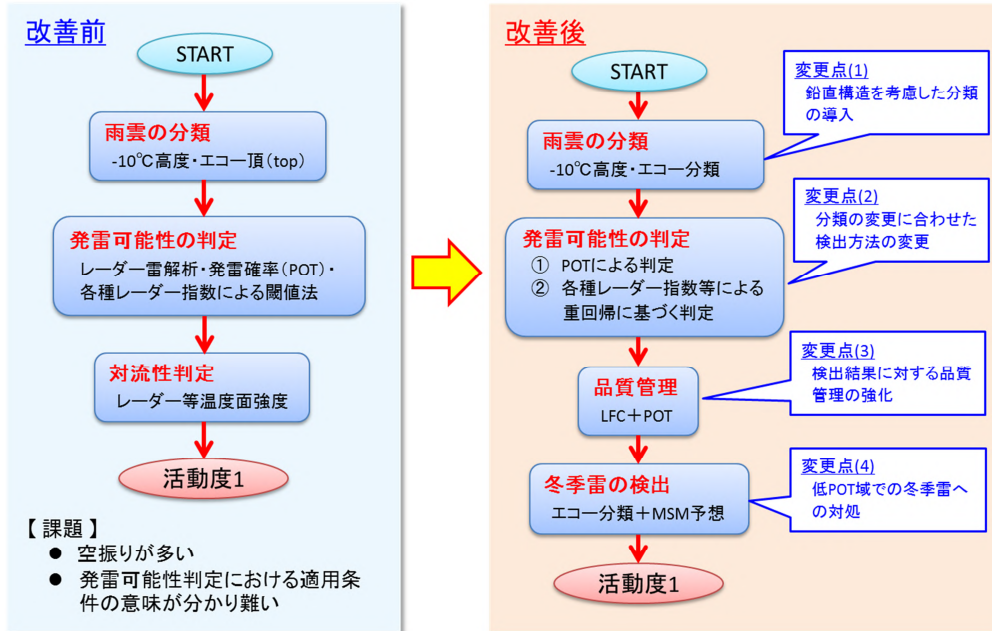
この変更は、2016 年 12 月 15 日に現業化したものである。7.6.1.1～7.6.1.4 では、図に示した(1)～(4)の 4 つの変更点をそれぞれ解説する。

7. 6. 1. 1 雨雲の分類の変更 ～鉛直構造を考慮した分類の導入～

これまでは、雨雲の発達度合を示すレーダーエコー頂高度（TOP）、及び発雷機構の季節性を考慮するためのメソモデル（MSM）の -10°C 高度（以下、 -10°C 高度）を用いて雨雲を分類していた。しかし、雷の発生

*金井 祐樹（気象庁予報部予報課）、傍嶋 明（気象庁予報部予報課気象防災推進室）

予測において、TOP による雨雲の分類は簡易的なものであり、活動度 1 が広めに出る原因の 1 つになっていた。このため、新手法では TOP に代わりレーダー3次元観測から得られる鉛直構造に着目し、発雷との対応に基づいた①発雷をもたらす雨雲にみられる上空の霰・氷晶などの層の厚さ、②エコー強度の鉛直変化の大きさを評価する手法を導入した（第 7.6.3 図）。

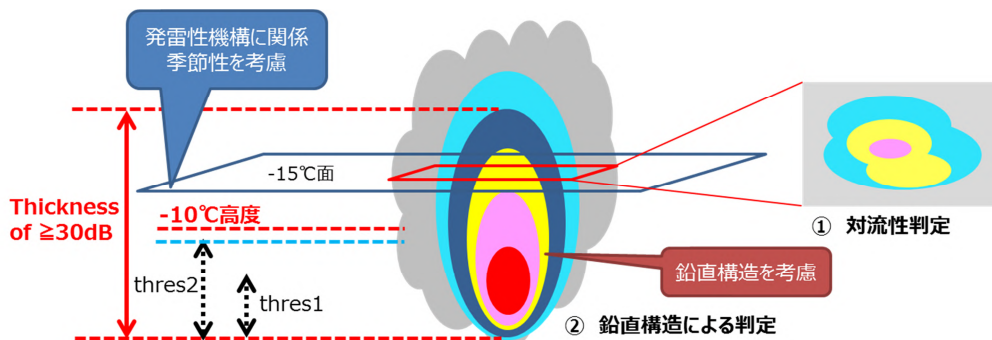


第 7.6.2 図 雷活動度 1 の解析手法の流れと従来と新手法の比較

①の指標として、レーダー3次元観測（15層 CAPPI）の 30dB 以上の深さ（層数）を計算し、②の指標として、各層のエコー強度から得られる以下の指数（ver_index）を導入した（鉛直判定）。

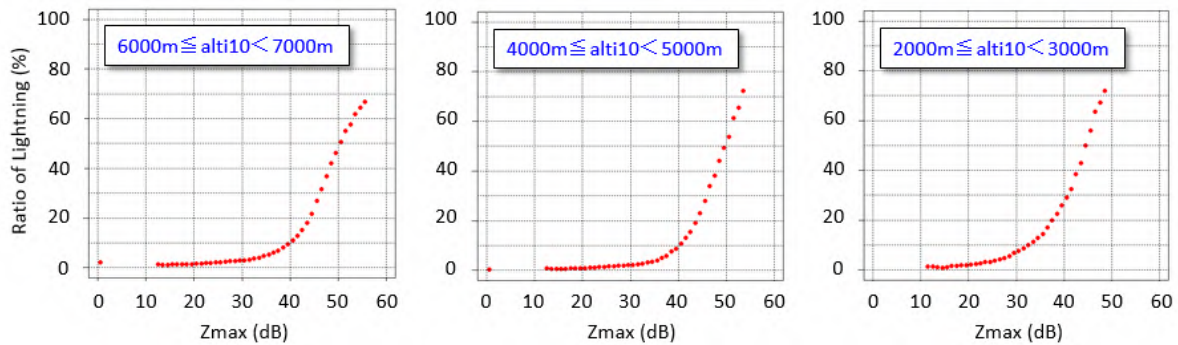
$$ver_index = \exp\left(\frac{ZMAX}{20.0}\right) - \exp\left(\frac{mean}{20.0}\right)$$

ここで、ZMAX は最大エコー強度、mean は TOP 以下の高度面から求めた平均エコー強度である。エコー強度を 20.0 で規格化するのは、最大エコー強度が 20dB を下回る場合には発雷がほとんどみられないという調査に基づく。季節にかかわらず、この指数が大きいほど発雷率が高まるということが統計的調査で得られていることから（第 7.6.4 図）、30dB 以上の層数が一定以上（第 7.6.3 図の閾値 thres2 との比較による）の場合に、-10°C 高度毎に設定した閾値によって発雷可能性が高いか、またはそうでないかの判定に用いる。



第 7.6.3 図 レーダーエコー分類の模式図

レーダーエコー強度の鉛直構造を解析することによって雨雲の分類を行う。図中の thres1 と thres2 はレーダー3次元観測の反射強度が 30dB 以上の層数の閾値を表す。thres2 は下層から-10°C 高度程度までの 30dB 以上の層数、thres1 は thres2 の半分程度の層数である。



第 7.6.4 図 レーダー最大エコー強度と発雷率の関係

図中の alti10 は MSM-10°C 高度を表す。横軸は最大エコー強度 (dB) を、縦軸は降水強度 > 0mm/h 以上のエコー域における、実況を含む後 60 分以内の発雷率を示す。「発雷あり」は周囲 10km 以内に雷ナウキャスト解析における活動度 2 以上が出現した場合とした。統計期間は 2011 年～2013 年。季節にかかわらず、最大エコー強度が 20dB 未満では発雷率は非常に低く、30dB 付近を境に発雷率が増加することがわかる。

加えて、エコーを対流性、または非対流性に分類する (対流性判定)。対流性判定は、従来の活動度 1 解析手法で用いられた手法 (笠原, 2011) と同一のエコーの先鋭度を評価するものであり、ブライトバンドの影響を除くため -15°C 高度面のエコー強度を用いる。

ここまでで得た鉛直判定と対流性判定を組み合わせることで、降水エコー域を、発雷可能性をある程度考慮して 8 種類へ分類することが可能となる (第 7.6.1 表 (左))。これに、従来から用いる -10°C 高度による 7 層 (1~2km、2~3km、…、6~7km、7km~) の分類 (第 7.6.1 表 (右)) を組合せて、降水エコー域を季節や雨雲の鉛直構造に応じて計 56 種類に分類する。以上により、従来よりも雷の発生機構をより反映した分類が可能となった。

第 7.6.1 表 雨雲の 8 分類 (左) と鉛直判定に用いる閾値 (右)

左は 30dB の層の数と ver_index、対流性判定結果の組合せと 8 種類の分類の関係を示す。ID は各区分に対応する識別番号である。右は -10°C 高度別に設定されている閾値であり、統計的調査に基づき決定したものである。

ID	30dB 以上の層数	ver_index	対流性判定	-10°C 高度 (m)	ver_index 閾値	thres2	thres1
8	thres2 ≤	閾値以上	対流性	7000 ≤	3.0	6	4
7			非対流性	6000 ≤ < 7000		5	3
6		閾値未満	対流性	5000 ≤ < 6000	2.5	4	2
5			非対流性	4000 ≤ < 5000		3	
4	thres1 ≤ < thres2	非適用	対流性	3000 ≤ < 4000	2.0	2	1
3			非対流性	2000 ≤ < 3000			
2	< thres1		対流性	< 2000			
1			非対流性				

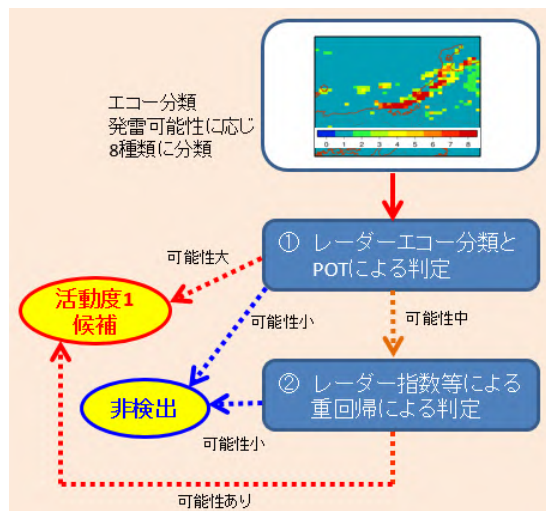
7.6.1.2 発雷可能性判定の変更

発雷可能性の判定方法は、従来は TOP と -10°C 高度の値の組合せで分類された区分毎に判定条件 (POT (MSM 発雷確率ガイダンス)、レーダー雷解析が閾値以上か、等) を適用していた (笠原, 2011) が、7.6.1.1 の分類変更を受け、判定に用いるデータ及び判定方法を変更した。以下に変更後の流れを述べる (第 7.6.5 図)。

7.6.1.1 で述べた変更点は概ねレーダー観測のみによる分類であり、環境場は基本的に考慮されていないため、POT を利用することにより環境場を評価する。このため、7.6.1.1 で 56 種類に分類された各区分にお

いて、POT の閾値をそれぞれ設定し、「Level-2（発雷可能性大）」「Level-1（発雷可能性中）」「Level-0（発雷可能性小）」の3段階に判定する。POT の閾値は、見逃しを排除しつつ、実況を含む60分後までの捕捉率を一定以上満たすように決定している。発雷可能性大と見なされるレーダーエコー分類であれば、POT が低値でも Level-2（活動度1候補）とする。逆に、発雷可能性小のレーダーエコー分類では、POT が高い値でない限り Level-0 と判定する。

①のレーダーエコー分類と POT による判定で Level-1 とされた格子については、レーダー3次元指数と POT を説明変数としたロジスティック回帰分析に基づく判定指数により、発雷可能性をより詳細に評価する（図中の②の判定）。ここでは、季節及び地域毎に閾値を設定し、活動度1候補とするか否かを判定する。ロジスティック回帰における説明変数として、TOP・ZMAX・VIL（鉛直積算）・IRR（降水強度）・RAD10（-10°C面エコー強度）の5つのレーダー指数、及びPOTの計6変数を用いる。



第7.6.5図 レーダー雷解析で検出されなかった領域における判定の流れ

7.6.1.3 LFCとPOTを用いた品質管理

活動度1判定領域の絞り込みを目的として、MSM予想で自由対流高度(LFC)が存在しない領域について、活動度1候補として妥当か品質管理を行う。具体的には、数値モデルの予想には空間的・時間的なずれが

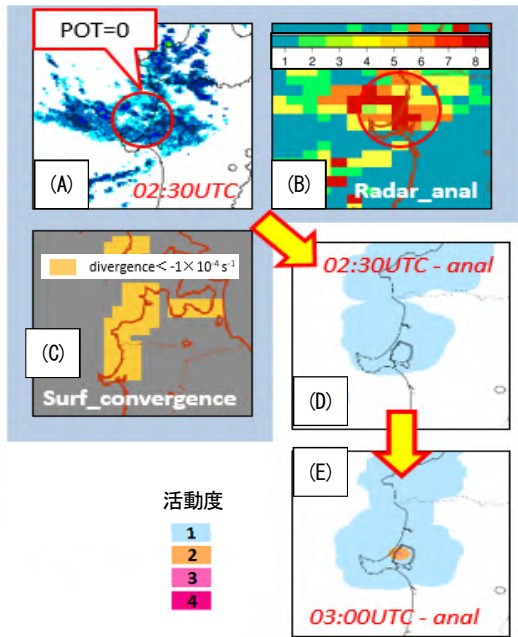
第7.6.2表 自由対流高度(LFC)とPOTによるfiltering条件

-10°C高度(alti10)	LFC + POT filtering条件
$4000 \leq alti10$	LFCなし & POT < 1
$alti10 < 4000$	LFCなし & POT < 3

存在することを考慮し、“LFCが存在せず、かつPOTが十分小さい”条件(第7.6.2表)を満たした場合のみ、7.6.1.2で検出された活動度1の領域を候補から除外する。条件は、-10°C高度により場合分けし、LFCが存在しない場合におけるPOTと実際の発雷率から統計的に決定した。

7.6.1.4 冬季雷の検出

冬季雷(特に強い寒気場で発生する一発雷)の捕捉は簡単ではなく、発雷ポテンシャルが特段高くなくとも発生する場合も多く、十分な捕捉精度が得られないことがある。7.6.1.1~7.6.1.3の判定・品質管理で検出されなかった場合でも、冬季雷の見逃しを防ぐ目的で、次の方法によって活動度1の解析を行う(第7.6.6図)。-10°C高度が2000m未満において、7.6.1.1のエコー分類でID(識別番号)が8と分類され、MSMの地上収束が明瞭である場合には、下層の収束により対流が発生し、かつ相当量の氷晶・霰が雲内に存在していると思われ、その領域ではPOTの値にかかわらず活動度1格子とする。



第 7.6.6 図 沿岸収束とレーダーエコー分類による冬季雷の解析例

評価に用いる資料（青色塗り背景）と実際の雷ナウキャストの解析（2014 年 12 月 15 日の事例）。(A) レーダーエコーの様子。赤丸の領域は POT=0。(B) レーダーによる雨雲の分類（数字は第 7.6.1 表の ID（識別番号）である）。赤丸は ID=8 と多く区分される領域を示す。(C) 下層収束域があると判定される領域（橙色領域）。(D) 改善された活動度 1（雷可能性あり）解析。(E) 30 分後に落雷（活動度 3）が解析されている。

7.6.1.5 精度評価

2014～2015 年の 2 年間における活動度 1 の統計精度検証を行った結果を第 7.6.3 表に示す。発雷捕捉精度は従来と同程度を維持しながら活動度 1 の面積が減少し、適中率は向上している。

第 7.6.3 表 統計精度検証結果（2014～2015 年）

捕捉率は、活動度 2 以上の捕捉率を意味する。「適中」の定義は、解析時刻から 60 分以内・周囲 0.05 度以内に活動度 2 以上が一度以上出現した場合とした。

	30分予報全発雷捕捉率(%)		適中率(%)		改善前を基準とした活動度1面積変化率(%)
	改善前	改善後	改善前	改善後	
12～2月	96.6	97.4	11.2	11.6	-1.4
3～5月	97.3	97.4	12.2	13.4	-9.0
6～8月	98.7	98.7	14.6	17.4	-16.7
9～11月	98.2	98.4	15.9	16.8	-5.3
全期間	98.1	98.3	13.9	15.5	-10.1

7.6.2 ひまわり観測データを用いた雷ナウキャスト活動度1の改善（課題（B）への対応）

夏季日中の陸上雷（主に熱雷）に対し、ひまわり観測データの利用により、従来よりも早い段階で活動度 1（発雷可能性あり）を解析することを目指して、処理の改善を行った。これにより、活動度 1 の解析から発雷までの時間（リードタイム）が短かった発雷事例で、全体に早い段階で活動度 1 の解析が可能となることが確認された（2015 年及び 2016 年の 7～8 月を対象とした精度検証結果）。本改善は、2017 年 7 月 19 日に現業化した。

以降、本改善に用いる手法を説明する。流れの概要は以下のとおりである。

- (1) ひまわり観測データを用いた着目すべき雲の抽出（Step1～2）
- (2) ひまわり観測データと MSM 予想データを併用した発雷可能性のある雲の判定（Step3）

7.6.2.1 Step1：データの準備

・MSM 熱雷指数

CAPE、SSI と下層気温減率から算出する指数であり、成層不安定な条件下で地表面加熱が発生・発達の特リガーとなる熱雷を捕捉する目的で、Step2 のひまわり観測データによる下層積雲の検出、及び Step3 の

ひまわり観測データによる活動度 1 判定で用いる（以降、MSM_index とも表す）。これらの変数は、POT の説明変数の一部であり（白山, 2015）、計算を簡略化し、主に熱雷に感度を持たせた指数である。

・ひまわり観測データ

ひまわり 8 号の運用開始に伴い、2.5 分間隔の日本域の高頻度観測が得られることになり、雷ナウキャストへの衛星観測データの利用が可能となった。本改善では、急速に発達する前の下層積雲を抽出するために、ひまわりに搭載される 16 バンド（志水他, 2017）のうち可視・赤外を含む計 7 バンドを利用する（第 7.6.4 表に示す 6 バンド及び B15）。以下、利用するバンド及びパラメータについて述べる。

第 7.6.4 表 ひまわり観測データによる活動度 1 の判定に用いるパラメータ

B13 時間変化（2.5 分）は単独で、その他は層別化や回帰式の説明変数として Step3 にて利用する。

Parameters	Purpose
B03 – B05	雲相推定
B07 reflectivity	雲相推定
B10 – B08	対流層の深さの評価
B13	発達段階の把握
B13 standard deviation	雲システムの不均質性評価
B13 time trend (2.5min)	雲の成長率(≒上昇流の強さ)の推定

- B03 (0.64 μ m) と B05 (1.6 μ m) 反射率の差分 (B03–B05) は、主に雲頂付近の相変化を捉える目的で利用する。雲頂付近に氷粒子が卓越することにより B05 の吸収の効果が強くなることから、電荷の発生に必要な氷晶・霰の生成により B03–B05 が増加する特性を利用する。
- B07 (3.9 μ m) 反射率は、主に雲頂付近の相変化を捉える目的で利用する。B07 は太陽放射と赤外放射の両者をあわせて観測し、雲頂上昇（温度低下）の効果を除くため赤外放射成分を除去し、太陽放射成分（反射率）を計算する（Oku et al, 2010）。氷粒子の生成により B07 反射率が低下する特性を利用する。
- B10 (7.2 μ m) と B08 (6.2 μ m) の差分は、雲頂の上昇を捉えることを目的とする。B10 と B08 はともに水蒸気バンドであるが、B08 の方が水蒸気による吸収が強いため、雲頂上昇に伴って雲頂よりもさらに上層の水蒸気吸収の効果の差が不明瞭となり、B10–B08 が次第に減少する特性を利用する。
- B13 (10.4 μ m) は、積雲の発達度合を評価するために利用する。後述のひまわり観測データ等を用いた判定指数の説明変数として利用するだけでなく、発達度合に応じた層別化にも利用する。また、B13 の標準偏差を計算することで、発達する積雲の雲頂付近にみられる不均質性の評価に用いる。類似の手法は、ひまわり 8 号による積乱雲プロダクト（Sumida et al, 2017）でも導入されている。

7. 6. 2. 2 Step2： ひまわり観測データによる下層積雲の抽出

ひまわり観測データで解析対象とする下層積雲を抽出する。効率的な処理のため、10km 格子単位で衛星データ適用領域の抽出を行う。処理の流れの概要を第 7.6.7 図に示す。

「適用領域の抽出処理」において適用する条件は第 7.6.5 表に示しており、全てを満たしたものを適用領域とする。Condition6~7 のように、ひまわり観測データに基づくパラメータだけでなく、MSM 熱雷指数が一定以上、かつレーダーの微弱エコーの存在（0 $^{\circ}$ C面高度強度 Rad00）も条件として課すことにより品質管理を行う。なお、ひまわり観測データの利用は B13 輝度温度が 10 $^{\circ}$ C以下かつ-15 $^{\circ}$ C以上に限定する。

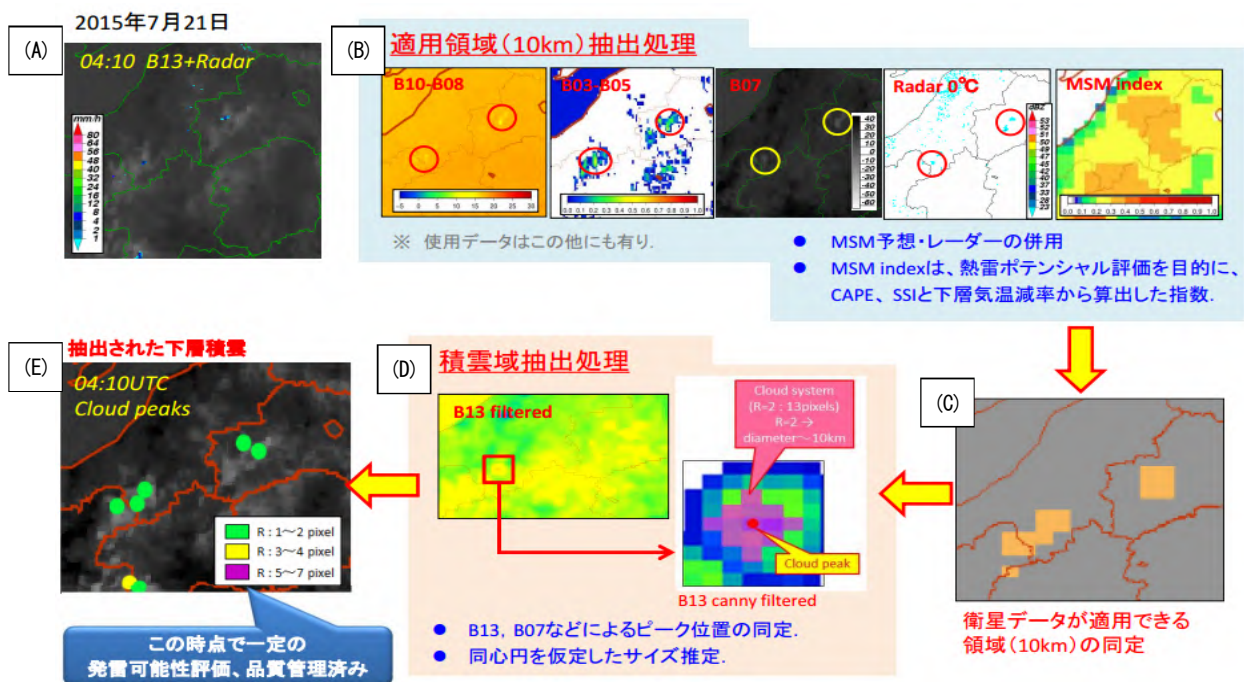
この理由は、B13 輝度温度が-15 $^{\circ}$ C以下の発達に至る積雲は、概ねレーダーで明瞭に捉えられるものが多

く、10°C以上であれば晴天域または発達を始める前の積雲であると判断できるためである。抽出されたひまわり観測データ適用領域について、B13 や B07 等を用いた画像処理（メジアンフィルターによる平滑化等）を経て、輝度温度の最も低い点を中心とした領域（積雲システム）を決定する。

	Conditions	データ種別
0	陸上	-----
	太陽天頂角 ≤ 80deg	-----
	-10°C 高度 ≥ 5500m	NWP (MSM)
1	-15°C ≤ B13_BT ≤ 10°C	Himawari-8 (B03/05/07 /08/10/13/15) B05/B10は 新センサー
2	B07_BT ≤ 23°C	
3	$0.2 \leq (B03_A - B05_A) / \cos\theta$	
4	B13_BT - B15_BT ≤ 2°C	
5	B10_BT - B08_BT ≤ 20°C	
6	Rad00 ≥ 10dB or 0mm/h < IRR	Radar (JMA C-band)
7	0.05 ≤ MSM_index	NWP (MSM)

第 7.6.5 表 ひまわり観測データ利用可能領域 (10km) 判定に用いる条件

表中、BT は輝度温度を、A は反射率を示す。例として、B03_A は B03 の反射率を表す。B03_A 及び B05_A は $\cos\theta$ (θ は太陽天頂角) で除することで、太陽天頂角による変化を補正する。また、Rad00 は-0°C面のエコー強度、IRR はレーダーより得られる降水強度である。



第 7.6.7 図 ひまわりデータによる下層積雲の抽出手法の概要

(A)のような例に対して、10km メッシュ単位で(B)の抽出処理を行い、適用領域を同定する(C)。この領域に対して、(D)の処理で輝度温度の最低点を中心とした領域（積雲システム）を決定する(E)。

7. 6. 2. 3 Step3: ひまわり観測データによる活動度1判定

判定の流れは、第 7.6.8 図に示すとおり大きく 3 段階で行う。①から判定を開始し、各段階における判定結果が真であれば、発雷可能性あり（活動度 1）とする。結果が偽であれば次の②・③の判定に進む。

① B13 輝度温度時間変化の評価

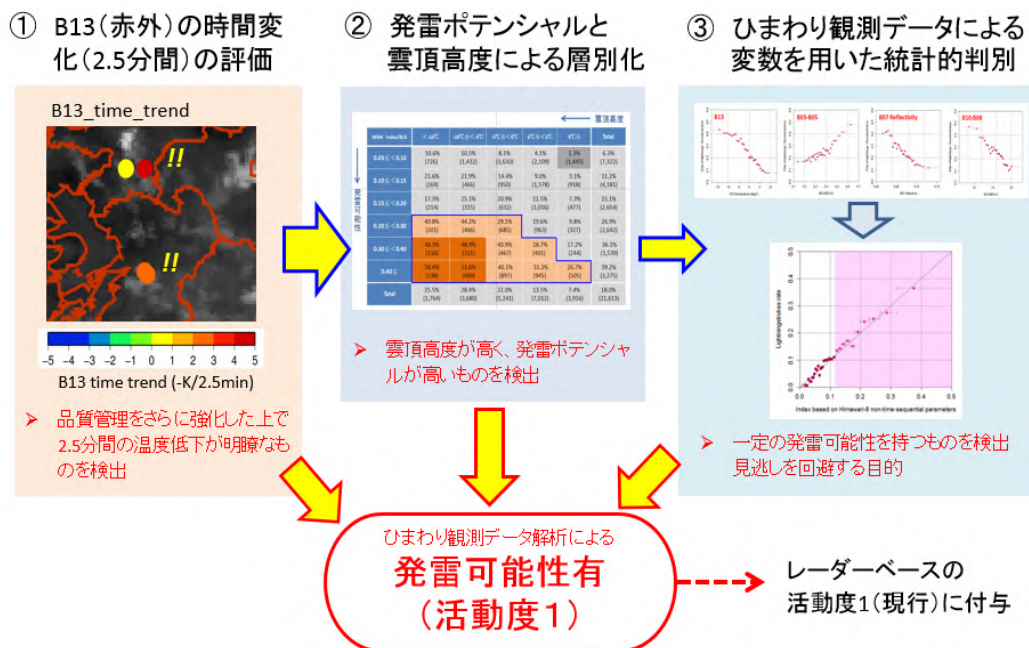
急速な雲頂上昇が認められる積雲を、間もなく発雷に至る可能性が高いと判定し、「発雷可能性あり」（活動度 1）とする。現在時刻と 2.5 分前の雲システムの類似度が高いことを前提とし、2.5 分前との温度差 ($dT_{2.5}$) 及び 5 分前との温度差 ($dT_{5.0}$) を用いて温度低下の継続性を評価する。判定に用いる条件は “ $dT_{2.5} \leq -2^{\circ}\text{C}$ かつ $dT_{5.0} \leq -3^{\circ}\text{C}$ ” であり、経験的に決定したものである。これは、米国の CI (Convective Initiation) ナウキャストで用いられる $-4^{\circ}\text{C}/15$ 分という値 (例えば、Sieglafl et al (2011)) と比しても大きな温度変化といえる。

②発雷ポテンシャルと雲頂高度による判別

雲頂温度と発雷ポテンシャルを示す MSM 熱雷指数の関係により、発雷可能性を統計的に評価する。この統計処理に用いるテーブルは 2015 年夏季のデータを用いた統計に基づくものである (第 7.6.6 表)。第 7.6.6 表から、同じ MSM 熱雷指数でも雲頂温度が低い場合は高い場合に比べ発雷に至りやすく、また同じ温度帯でも MSM 熱雷指数が高い方が発雷率は高いことがわかる。発雷率が 20%を超える区分に該当する場合には、その時点で「発雷可能性あり」とする。

③ひまわり観測データによる変数を用いた統計的判別

ここでは、第 7.6.4 表に示した B13 時間変化以外の衛星パラメータ及び MSM 熱雷指数を用いて、ロジスティック回帰により計算する指数 (以下、判定指数) によって判定を行う。対象は第 7.6.6 表の青枠内の区分に属するものに限定し、B13 輝度温度が 0°C 以上の場合と 0°C 未満の場合それぞれにおいて、実況で発雷がないデータに対する解析時刻から 30 分以内の発雷率 (活動度 2 以上があらわれる確率) を目的変数に、Step1 で述べた 6 変数を説明変数として採用し、閾値を上回る場合は「発雷可能性あり」（活動度 1）、下回る場合は「発雷可能性低」（活動度 1 としない）とする。



第 7.6.8 図 ひまわり観測データによる活動度 1 判定フローの概略図

図中の赤枠と青枠の矢印は、それぞれ評価結果が真/偽であった場合の流れを示す。

第 7.6.6 表 B13 温度（雲頂温度）と発雷ポテンシャルによる判定（層別化）

標本期間は 2015 年 7 月 16 日から 8 月 15 日。各カテゴリの数値は実況で発雷がない積雲数に対する後 30 分以内の発雷率を示す。発雷の有無は活動度 2 以上の有無とした。括弧内の数はサンプル総数を示す。赤枠で囲んだものは発雷確率が 20%を超えるもので②発雷ポテンシャルと雲頂高度による判別で発雷可能性ありとされる。青枠内は③ひまわり観測データによる変数を用いた統計的判別で統計的判別に用いられるものである。

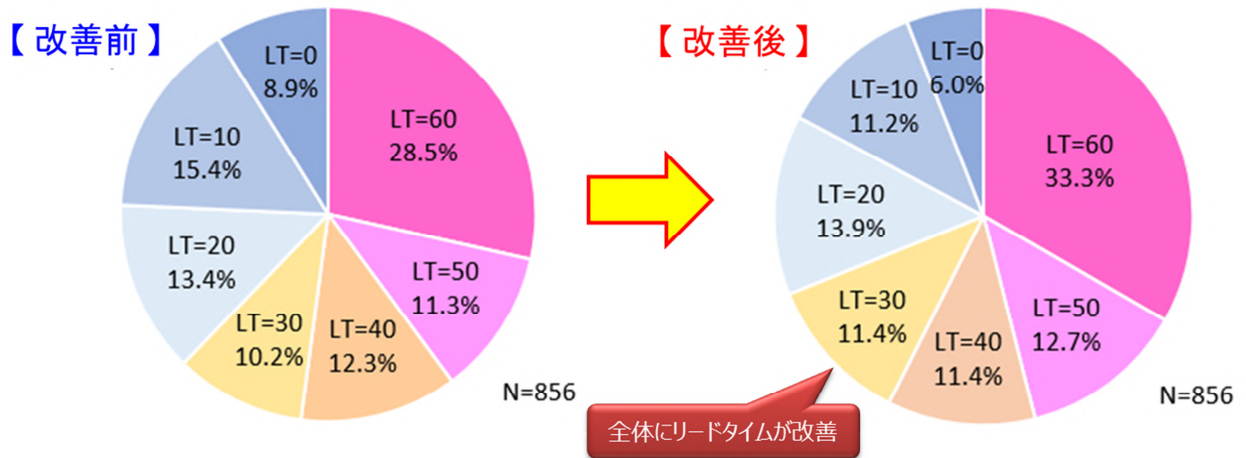
MSM index/B13	<-10°C	-10°C≤<-5°C	-5°C≤<0°C	0°C≤<5°C	5°C≤	Total
0.05 ≤ < 0.10	6.6% (593)	4.2% (1,201)	4.4% (1,304)	3.3% (1,795)	1.5% (1,319)	3.6% (6,212)
0.10 ≤ < 0.15	10.5% (181)	10.9% (338)	9.9% (689)	6.0% (1,213)	3.5% (765)	7.0% (3,186)
0.15 ≤ < 0.20	10.9% (137)	17.1% (210)	15.2% (374)	9.5% (768)	6.4% (423)	10.9% (1,912)
0.20 ≤ < 0.30	29.9% (117)	30.7% (277)	23.2% (469)	15.6% (745)	7.2% (291)	19.3% (1,899)
0.30 ≤ < 0.40	35.1% (97)	46.2% (264)	35.3% (306)	29.6% (324)	17.3% (214)	32.9% (1,205)
0.40 ≤	48.3% (259)	45.7% (676)	33.1% (871)	29.6% (945)	26.0% (488)	34.9% (3,239)
Total	19.3% (1,384)	21.5% (2,966)	17.1% (4,013)	12.1% (5,790)	7.4% (3,500)	14.4% (17,653)

7. 6. 2. 4 検証

7.6.2.3 までの変更を適用した雷ナウキャストの統計検証結果を示す。

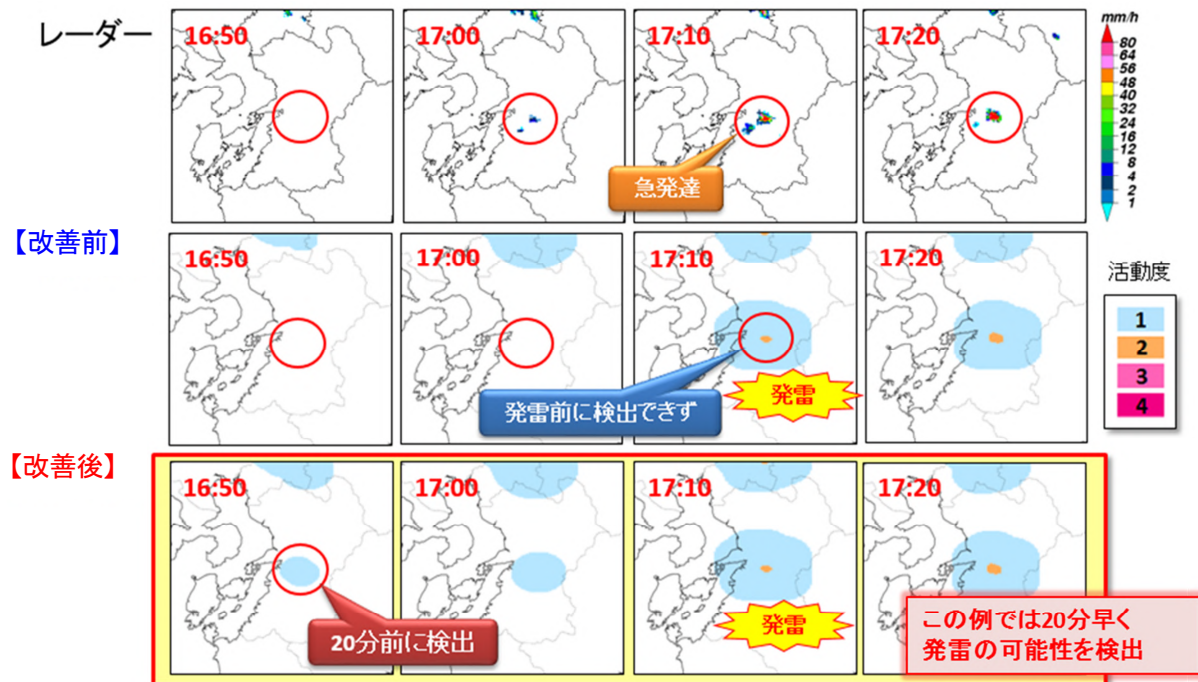
第 7.6.9 図は、夏季日中の陸上で発生した雷について、適用前後のリードタイムの分布を示したものである。これによると、リードタイムが 30 分以上の割合が改善前は約 62%であるのに対し、改善後は約 69%に向上するなど、リードタイムの延長に繋がることがわかる。この一方で、適用前後の活動度 1 の適中率はほぼ不変であり（2016 年 8 月陸上日中の検証では、改善前：25.4%、改善後：25.2%）、適中率の維持と早期検出精度を両立させている。

また、夏季日中の熱雷を本改善により早期に捉えた事例を第 7.6.10 図に示す。



第 7.6.9 図 統計的検証結果

検証に用いたサンプルは、2015 年 7 月 16 日～8 月 31 日・2016 年 7 月 1～31 日の日中の陸上で発生した雷である。LT はリードタイム（分）を表す。



第 7.6.10 図 実事例による改善例 (2015 年 8 月 6 日、時刻は JST)

7. 6. 3 雷ナウキャストの利用について

改善後の雷ナウキャストの利用上の注意点としては、従来から大きな変更はない。雷に関する気象情報、雷注意報、雷ナウキャストの段階的な利用が、雷から身を守るために有効である。

雷注意報が発表されている場合に活動度 1 が出現した場合には、雷ナウキャストから詳細な状況を把握するとともに、周辺の空の様子に注意する。雷注意報が発表されていない場合でも、雷ナウキャストの活動度 1 が出現した場合には周辺の空の様子に留意する。

これらの情報は、気象庁ホームページでも提供されており、レーダー・ナウキャストのコンテンツの一つとして、降水（レーダー実況、降水ナウキャスト）と竜巻発生確度ナウキャストと切り替え可能な形で掲載されている。また、雨雲の動き（高解像度降水ナウキャスト）のページでは、降水や竜巻発生確度、また雷の実況（LIDEN による前 5 分間の観測）とともに重ねて表示可能であり、雷雨の監視や危険性の把握に有効である。

参考文献

- 蟻坂隼史, 2017: 降水短時間予報の改善. 平成 28 年度予報技術研修テキスト, 気象庁予報部, 79-83.
- 幾田泰醇, 2010: 高分解能モデルの降水予報精度評価に適した検証手法. 平成 22 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 11-17.
- 笠原真吾, 2010: 雷ナウキャスト. 平成 21 年度予報技術研修テキスト, 気象庁予報部, 116-135.
- 笠原真吾, 2011: 雷ナウキャストにおける雷の解析・予測技術と利用方法. 測候時報, 78. 3, 95-140.
- 木川誠一郎, 杉原 良, 青木大佳, 武樋落子, 2017: 国土交通省 X バンド MP レーダと気象庁気象ドップラーレーダーの複合利用によるメソサイクロン検出について. 平成 28 年度予報技術研修テキスト, 気象庁予報部, 57-59.
- 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.
- 熊谷小緒里, 2015: 降水短時間予報の改善. 平成 26 年度予報技術研修テキスト, 気象庁予報部, 87-93.
- 小林大輝, 2018: 数値予報課報告・別冊で用いた表記と統計的検証で用いる代表的な指標. 数値予報課報告・別冊第 64 号, 気象庁予報部, 242-246.
- 志水菊広, 齋藤幸太郎, 山本幹人, 2017: ひまわり 8 号・AHI の 16 バンド画像の特性. 気象衛星センター技術報告 第 62 号, 39-71.
- 白山洋平, 2015: 発雷確率ガイダンスの改良. 平成 27 年度数値予報研修テキスト, 64-72.
- 白山洋平, 2018: 降水ガイダンス. 数値予報課報告・別冊第 64 号, 95-118.
- 瀧下洋一, 2011: 竜巻発生確度ナウキャスト・竜巻注意情報について. 測候時報, 78, 57-93.
- 中里真久, 西村建志, 吉田公一, 田中恵信, 2017: 竜巻注意情報の改善. 平成 28 年度予報技術研修テキスト, 気象庁予報部, 48-56.
- 中里真久, 西村建志, 2017: MSM 突風関連指数とレーダーエコー指数の改善. 平成 28 年度予報技術研修テキスト, 気象庁予報部, 60-78.
- Oku, Y., M. Kajino, and H. Ishikawa, 2010: Estimation of the cloud effective particle radius using MTSAT-1R data. *International Journal of Remote Sensing* 31(20): 5439-5447.
- Roberts, N.M. and H. W. Lean, 2008: Scale-Selective Verification of Rainfall Accumulations from High-Resolution Forecasts of Convective Events. *Monthly Weather Review*, 136, 78-97
- Sieglaff, J. M., L. M. Counce, W. F. Feltz, K. M. Bedka, M. J. Pavolonis, and A. K. Heidinger, 2011: Nowcasting convective storm initiation using satellite-based box-averaged cloud-top cooling and cloud-type trends. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 50, 110-126.
- SUMIDA Yasuhiko, SUZUE Hiroshi, IMAI Takahito, and SOBAJIMA Akira, 2017: Convective Cloud Information derived from Himawari-8 data. 気象衛星センター技術報告 第 62 号, 19-37.