

2019年8月28日に佐賀県に大雨をもたらした線状降水帯の予測可能性に関する研究

清水 慎吾*・加藤 亮平*・前坂 剛*

Predictability of Quasi-Stationary Line-Shaped Precipitation System Causing Heavy Rainfall Around Saga Pref. on 28th August 2019

Shingo SHIMIZU, Ryohei KATO, and Takeshi MAESAKA

**Storm, Flood and Landslide Research Division,
National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, Japan
shimizus@bosai.go.jp*

Abstract

We developed a new forecast system for accumulated rainfall caused by a quasi-stationary line-shaped precipitation system (QSLP) and applied it to the case of heavy rainfall on 28th August 2019 around Saga Prefecture, Japan. The accuracy of forecasted amount of rainfall from the new forecast system was validated using surface observation and compared with the prompt version of the operational short-range precipitation forecast system. To forecast 2-hour rainfall amount, the new system employs a simple blending forecast model combined with nowcasting in the first hour and numerical weather prediction with 1 km resolution in the subsequent hour. We applied a maximum filter to the forecasted 2-hour rainfall to avoid underestimation based on displacement error information. The maximum filter is defined as the maximum of all grid points within a local region around a grid point. Our results showed better predictability than the operational short-range precipitation forecast, especially in the first half of the QSLP developing stage. By contrast, the results were overestimated in the subsequent half of the developing stage. Thus, blending forecast with a maximum filter based on displacement error information can accurately predict 2-hour accumulated rainfall in the early development stage of QSLP.

Key words: Quasi-stationary line-shaped precipitation system, Blending forecast with maximum filter

1. はじめに

2019年8月28日に低気圧に伴う前線の通過により大雨をもたらされ(図1), 同日午前5時50分に大雨特別警報が佐賀県, 長崎県, 福岡県の3県に発表された。死者4名, 住家被害は, 全壊87棟, 半壊110棟, 一部損壊14棟, 床上浸水1,645棟, 床下浸水4,513棟に達する甚大な被害が報告されている(総務省消防庁)。佐賀県の佐賀市と杵島郡白石町においては, 1時間雨量が100 mmを超え, 3時間雨量で200 mm以上, 6時間雨量で250 mm以上を記録し, それぞれ同時に歴代1位となった(気象庁,

2019)。特に佐賀市では12時間雨量と24時間雨量においても歴代1位となった。1時間積算雨量と3時間積算雨量の記録が更新された午前4時40分から6時10分(日本標準時, 以後すべて日本標準時で表記)にかけて, 佐賀市と杵島郡白石町(佐賀市から約20 km)では, 1時間雨量と3時間雨量が周辺の佐賀県内の観測地点の2倍程度となっていた。こうした数時間程度に局地的にもたらされる大雨は, 多くの場合, 線状降水帯の存在が指摘されている(Kato, 2020, Hirokawa, 2020)。平成30年7月豪雨(櫻井ほか, 2020, Tsuguchi *et al.*, 2019)や平成29年7月九州北

* 国立研究開発法人 防災科学技術研究所 水・土砂防災研究部門

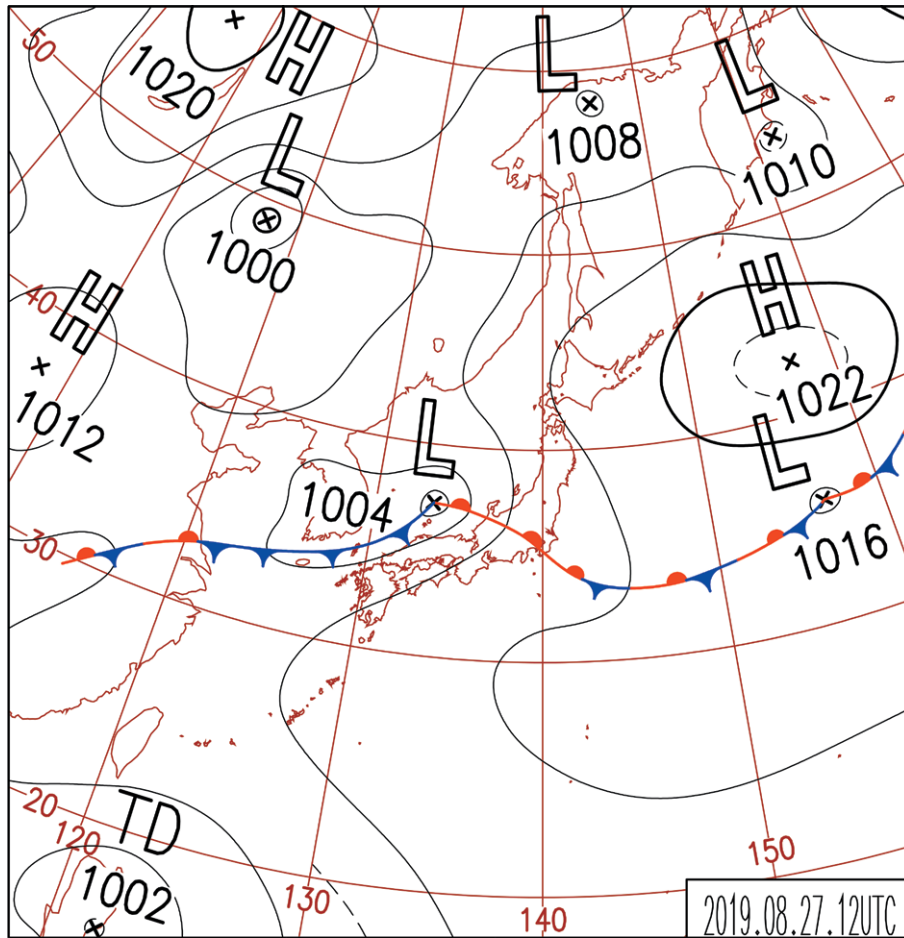


図1 2019年8月27日21時における天気図(気象庁)
 Fig. 1 Surface pressure chart on 21 JST on 27th AUG, 2019 (Japan Meteorological Agency).

部豪雨 (Kato *et al.*, 2018a, Takemi, 2018, Kawano and Kawamura, 2020) のような大規模水災害事例では、線状降水帯の存在が指摘されている。線状降水帯については、これまでの予測研究の総括 (Kato, 2020) や、統計的特徴の研究 (Hirokawa *et al.*, 2020) が進められており、そのメカニズムや統計的特徴が明らかになりつつある。一方、現業予測モデルの格子解像度 (5 km) は線状降水帯の予測に十分でないことが知られており (Kato, 2020)、線状降水帯を予測するために必要な高解像度数値実験を用いた研究が進められている。

2017年7月九州北部豪雨の線状降水帯に対して Takemi (2018) では 167 m の水平格子間隔で、2013年の伊豆大島での線状降水帯に対して Oizumi *et al.*, 2018 は 250 m の水平格子間隔で、2014年の広島豪雨での線状降水帯に対して、加藤ほか (2016) は 500 m という水平格子間隔を用いることで、それぞ

れ線状降水帯の正確な雨量予測が可能と報告している。加藤ほか (2016) では、水平格子間隔を 5 km, 2 km, 1.5 km, 1 km, 750 m, 500 m と変更した実験を順次行い、高解像度になるほど精度の向上が確認され、少なくとも 1 km 以下の水平格子間隔を用いることで線状降水帯の定量的降水予測が可能となることを明らかにした。しかし、解像度 500 m 以下の高解像度予測には大きな計算リソースが必要なため、リアルタイムでの予測への適用は難しくなる。

雨量が正確に予測できたとしても、降水の予測位置のズレや発生時間のズレは生ずることが多い (Ebert and McBride, 2000)。Kato *et al.* (2018a) では解像度 1 km の数値実験で Fraction Skill Score (FSS) と呼ばれる、「予測雨量の位置ズレを許容した場合の予測精度の評価指標」を用いて、2017年九州北部豪雨において、6時間積算雨量が 50 mm 以上の雨域を対象に予測精度を評価した。水平方向に 5 km から

50 km 程度までの位置ズレを許容することで、許容する距離の増加とともに FSS のスコアが上昇することを明らかにした。25 km 程度の位置ズレを許容することで、有用な予測の指標である $FSS > 0.5$ (Skok and Roberts, 2016) を満たす予測が可能であると明らかにした。こうしたズレを把握し、許容できる範囲であれば、積極的に予測の位置誤差情報を予測に取り込むことで予測精度が向上する可能性がある。

予測改善のもう 1 つの鍵は適切な初期値の選択にある (Kato, 2020)。ある現象の予測を行う場合に、その現象が発生した時刻の直前の初期値を使うことが多いが、Kawano and Kawamura (2020) では、2017 年九州北部豪雨において、直前の初期値ではなく、36 時間前の初期値を用いることで、正確な雨量予測を成功させた。このように初期値の選択によって予測の結果は異なるが、近年では、より客観的に最適な初期値を作成するためのデータ同化による初期値作成が行われる。Yoshida *et al.* (2020) は、2014 年広島豪雨での線状降水帯の予測において水蒸気ライダーに関する観測システムシミュレーション実験を行い、雨量の定量的予測において、初期値改善の重要性を明らかにした。このように、線状降水帯予測には、1 km 以下の高い水平分解能を用いた上で、データ同化などを用いて最適な初期値を設定し、線状降水帯の代表的な時間スケールである数時間程度の予測を行うことが必要である。さらに予測には誤差が伴うため、予測された降水の位置ズレを考慮した予測を行うことで、ピンポイントでの予測は不可能であっても、ある範囲において発生する可能最大予測雨量を提供することも重要な取り組みであると言える。

こうした背景を受けて、戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) の中で、格子解像度 1 km の分解能で、リアルタイムで利用可能なあらゆる観測データを用いたデータ同化手法により最適な初期値を設定し (Shimose *et al.*, 2017)、数値予報とナウキャスト予測をブレンドすることで 2 時間先までの降水予測を行い、さらに、予測精度に基づく最適な位置ズレ許容距離を設定し、その位置ズレを考慮した最大可能予測雨量を推定する予測システムを開発している (以後、BLEND 予測と呼ぶ)。

本研究は 2019 年 8 月 28 日の佐賀県に発生した線状降水帯を検証事例として、開発中の SIP 予測システムの精度を初期解析として検証する。

2. 解析手法

予測モデルは雲解像数値モデル CReSS (Tsuboki and Sakakibara, 2002) を用いる。水平解像度は 1 km、九州地方全域を含む 464×480 格子で、鉛直方向には 50 層 (モデルトップの高度は 20.6 km) で予測を行った (図 2)。初期値の第一推定値作成には気象庁メソモデル (Mesoscale Model: MSM) の 3 時間毎の出力を利用する。時間方向に線形内挿を行い、10 分毎の初期値の第一推定値を作成した。降水粒子の初期値の作成方法は、Kato *et al.* (2017a) の方法に従い、国土交通省 XRAIN (Maesaka *et al.*, 2011) の反射強度データを用いて行った。XRAIN データの動径風や気象庁のアメダスの風向・風速を Shimose *et al.* (2017) の 3DVAR 法で同化した。データ同化に用いる背景誤差共分散行列や観測誤差は、Shimose *et al.* (2017) と同じものを用いた。得られた初期値から 2 時間先までの予測を防災科研の防災情報イノベーションプラットフォーム (Cray CS500) を用いて計算した。2 時間先までの予測計算において、384 コアを使用した並列計算を行うことで 10 分以内に計算を完了させることが可能である。

Kato *et al.* (2017a) が示した方法で、レーダ動径風のみならず、反射強度を同化することで、CReSS を用いた予測は、メソ γ スケール (数 km から数十 km の水平スケール) の局地的大雨に対して、複数の事例で数十分後に気象庁高解像度ナウキャスト (Kigawa, 2014ab) の予測精度を上回ることが確認された (Kato *et al.*, 2017a, Kato *et al.*, 2018b)。一方、本研究が対象とするメソ β スケール (数十 km から数百 km の水平スケール) の線状降水帯に対して、最適なブレンディング係数は十分に研究されていない。そこで、本研究では、初期解析として、まずは最初の 1 時間をナウキャスト法で、後半の 1 時間を数値予測で得られた降水量を利用する。最適なブレンディング係数の検討については今後の課題とする。

BLEND 予測で得られた雨量は必ずしも正確ではなく、実際の雨域との強度および位置のズレが発生する (福原ほか, 2018)。福原ほか (2018) では、BLEND 予測によって得られる雨量から浸水予測を行い、鉄道の安全運航に資する予測情報の提供を試みた。雨量予測の位置ズレによる浸水予測の過小評価を防ぐために、各格子点での降水予測量を、その格子点の周辺数 km の降水量の最大値とする処理

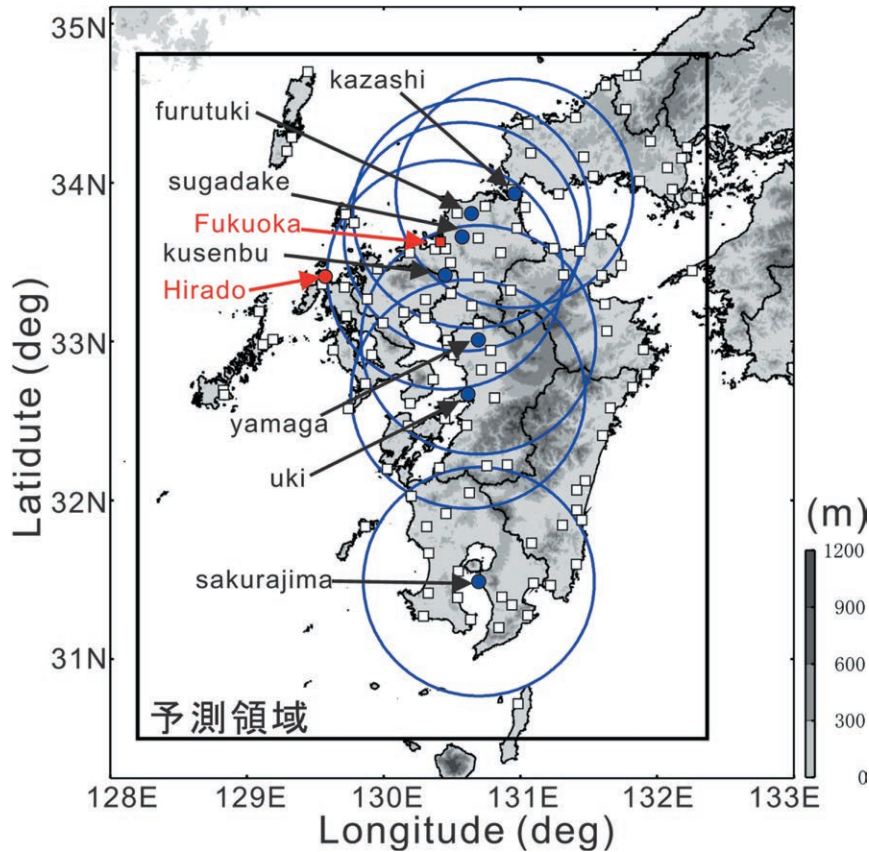


図2 予測計算領域とデータ同化に用いた観測機器. 太い実線の四角は予測計算範囲を示す. 青い丸はXRAINのレーダの位置と青い円はその観測範囲を示す(半径80 km). 白い四角はアメダス観測点である. 赤い丸は、平戸におけるウィンドプロファイラー観測で、赤い四角は、福岡におけるゾンデ観測である. ゾンデ観測とウィンドプロファイラーデータはデータ同化には用いていない.

Fig. 2 Forecast domain (solid square) and the instruments used for data assimilation. Observational ranges of X-band dual-polarization radars (sakurajima, uki, yamaga, kusenbu, sugadake, furutuki, and kazashi) overlay on the topographical map of the numerical simulation domain. The maximum range of the radars is 80 km. White squares are AMeDAS observation sites. Red square indicates the operational sounding observation site at Fukuoka. Red circle indicates the operational wind profiler at Hirado.

(以後、最大値フィルターと呼ぶ)を行い、浸水予測の入力とした。周辺の最大値を探索する円の半径を1, 3, 5, 10 km と変更したところ、5 km の範囲で最大値の探索を行えば、極端に過大にもならず、過小評価がなくなることを明らかにした。福原ほか(2018)の研究は1時間先までの予測雨量に対して評価を行ったものであり、2時間先までの予測については、より広範囲で位置ズレが起きる可能性がある。本研究では、Kato *et al.* (2018a)と同じ計算領域と計算設定を用いて、Kato *et al.* (2018a)では利用していないGPS可降水量とXRAINデータを同化し予測精度を可能な限り改善した後の、1時間から2時間先までの積算雨量の予測精度の評価を行い、最適な位置ズレ許容範囲を以下の通りに決定した(詳細につ

いてはAppendixに記載した)。1時間先までの予測を行うナウキャストについては7 km×7 km四方で最大値探索を行い、1時間から2時間先までの予測を行う数値予測については、11 km×11 km四方で最大値探索を行う。上記の設定は今後の改善で見直しが必要である可能性もあるが、本研究では初期解析として上記の設定で予測を行い、現業予測と比較して、現時点での優位・不利な点を整理することを目的とする。

最後に検証に用いる観測データとして、気象庁の地上アメダス雨量とレーダアメダス解析雨量を用いる。環境場の調査においては、気象庁の福岡のゾンデと平戸のウィンドプロファイラーを用いた(図2)。

3. 観測・解析の結果

線状降水帯が発生した6時間前の福岡におけるゾンデ観測結果を図3にまとめる。最下層から気塊を持ち上げたとき998 hPa(高度100 m)で凝結高度に達し、764 hPa(高度2.4 km)で自由対流高度となり、浮力を失う高度は505 hPa(高度5.8 km)であった。こうした気温成層における対流抑制は 94 J Kg^{-1} となり、対流有効位置エネルギーは 153 J Kg^{-1} となった。可降水量は63.8 mmであった。逆転層の上端の高度350 mから高度4.4 kmまでの気温減率は 5.8 K km^{-1} となっており、湿潤断熱減率に近い値を示した。こうした状況から大気は非常に湿潤であるが、気温減率や対流有効位置エネルギーの観点から見ても、特に不安定な成層とは言えない。図3bのホドグラフにおいて、高度4 kmに強い西風(28 m s^{-1})が見られ、地上から4 kmまでの鉛直シア率は $6.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ と比較的大きな値を示した。

Kato (2020) が提唱した線状降水帯の発生しやすい6条件について調べる。まずは、(1)高度500 mにおける水蒸気フラックスであるが、 $211 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ となり、下限条件として提示されている $150 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を大きく上回った。(2)次に「高度500 mから自由対流高度までの距離」は1 km以上あり、条件を満たさない。(3)500 hPaと700 hPa高度における相対湿度は、それぞれ83%と95%となっており、下限条件である60%以上となるので条件を満たしている。(4)図3bのホドグラフにおいて、ストームの移動を高度6 mまでの密度重み付き平均で求め、地表から高度3 kmまでの風速を用いてストームリラティブヘリシティ(SReH)を計算すると、 $126 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ となり、下限条件の $100 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ 以上となり条件を満たした。(5)鉛直流についてはゾンデデータから計算できないので評価しない。(6)浮力が無くなる高度は3 km以上となり条件を満たす。このように、すべての条件を満たし

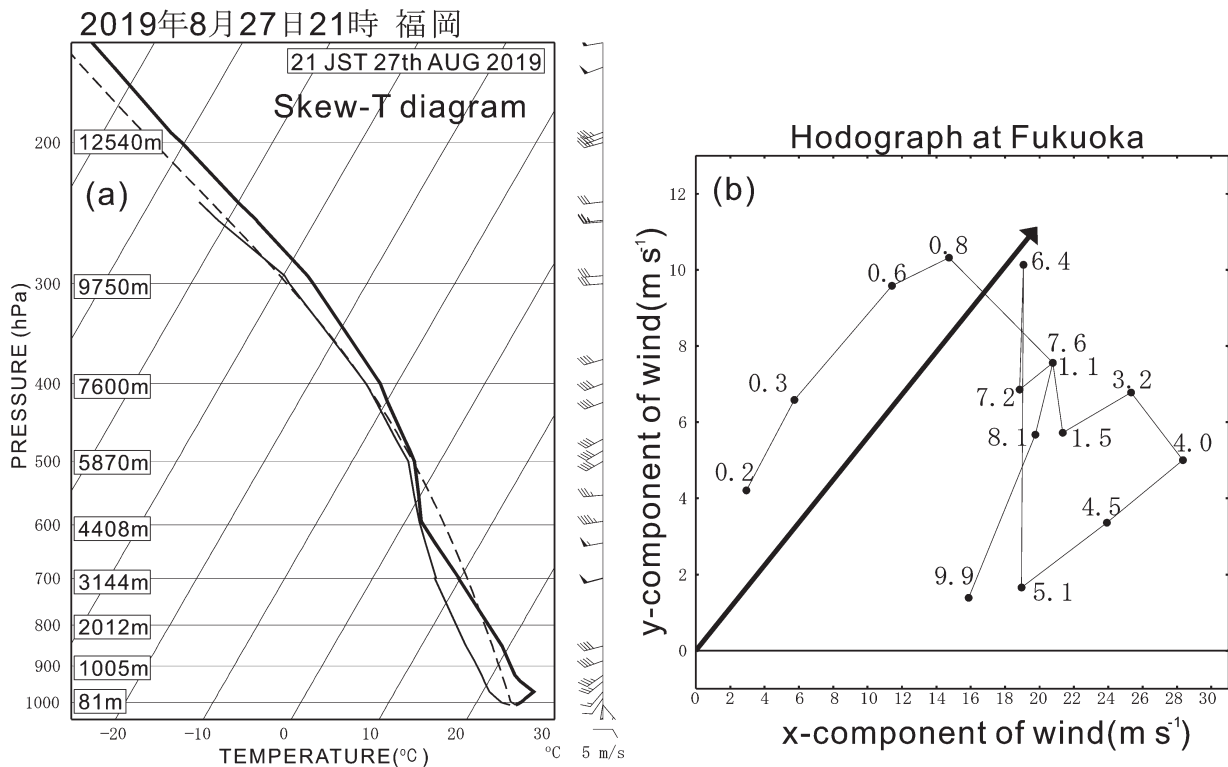


図3 福岡における8月27日21時のゾンデデータから作成したSkew-Tグラフ(a)とホドグラフ(b)。Skew-T表示において、太実線が気温、灰色実線が露点温度、灰色破線が地上から持ち上げたパーセルの気温。矢羽根は風向・風速を示す。短矢羽根、長矢羽根、旗矢羽根はそれぞれ 2.5 m s^{-1} 、 5 m s^{-1} 、 25 m s^{-1} の風速を示す。ホドグラフでは、高度別の風の成分を示す。太い実線は地上から高度6 kmまでの密度の重み付き平均で計算した平均風速を示す。

Fig. 3 (a) Vertical profile of the temperature (thick solid line), dew point temperature (grey line), and wind speed and direction (on the left) on a skew T-logP diagram, from the sounding at Fukuoka at 21 JST on 27th August 2019. One pennant, a full barb, and a half barb denote 25 , 5 , and 2.5 m s^{-1} , respectively. The dashed line indicates the temperature of the air parcel lifted from the surface. (b) Hodograph at 21 JST obtained from the Fukuoka sounding (on the right). The solid vector indicates storm motion from sounding data between the surface and 6 km above sea level.

てはいないが、4つの条件を満たしていた。

次に平戸における水平風の時間変化を図4に示す。図3の27日21時のゾンデデータで示された高度4 km付近に 28 m s^{-1} 以上の強い西風は、ウィンドプロファイラー観測では、27日21時から28日1時まで高度4 kmから6 kmまでに 25 m s^{-1} を越える西風として顕著に観測されており、鉛直シアーが大きな環境は維持されていた。鉛直シアーは高度500 mから1 kmの間の任意の高度を下限として1つ選び、同様に高度4から6 kmの間の任意の高度を上限として1つ選ぶすべての組み合わせの中から、最大となる値を計測すると、27日21時から28日0時までは $1.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ から $4.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ と次第に鉛直シアーが大きくなり、0時から2時までは $1.2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ から $2.9 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ の範囲で変動し、降水が開始する3時頃は強い降雨により風速観測が不可能であったが、3時20分から4時50分にかけて $1.6 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ から $4.4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ の範囲で変動し、5時以降は高度4 km以上の西風は弱くなり、鉛直シアーは小さくなった ($0.9 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 以下)。

気象庁の解析雨量による30分毎の1時間積算雨量の分布の時間変化を図5に示す。午前2時30分以降、佐賀県南部に30 mm以上の降水が広がり、午前3時以降に、白石アメダス観測地点の北側で、60 mmを越える1時間雨量が観測された。3時30分以降には、90 mmを越える強い降水が佐賀アメダス観測地点まで広がり、4時から5時までの1時間雨量で見ると、同じ位置に停滞し続けた。4時30分以降の1時間雨量は徐々に弱まり、5時以降は75 mmを越える雨量は佐賀市のみとなった。図6に3時から6時までの3時間積算雨量を示す。線状降水帯の定義は研究毎に異なるが、多くの研究で3時間積算雨量を判断に用いている。Hirokawa *et al.* (2020)では、3時間積算雨量が80 mm以上で、その面積が500 km²以上となり、その内部の最大値が100 mmに達する雨域を強雨域と定義し、強雨域の縦横比が2.5以上のものを線状降水帯と定義している。辻本ほか(2017)では、降水強度が20 mm h⁻¹以上の領域を強雨域とし、その縦横比が2.0以上のものを線状降水帯と定義されている。最初に定義を行った津口・

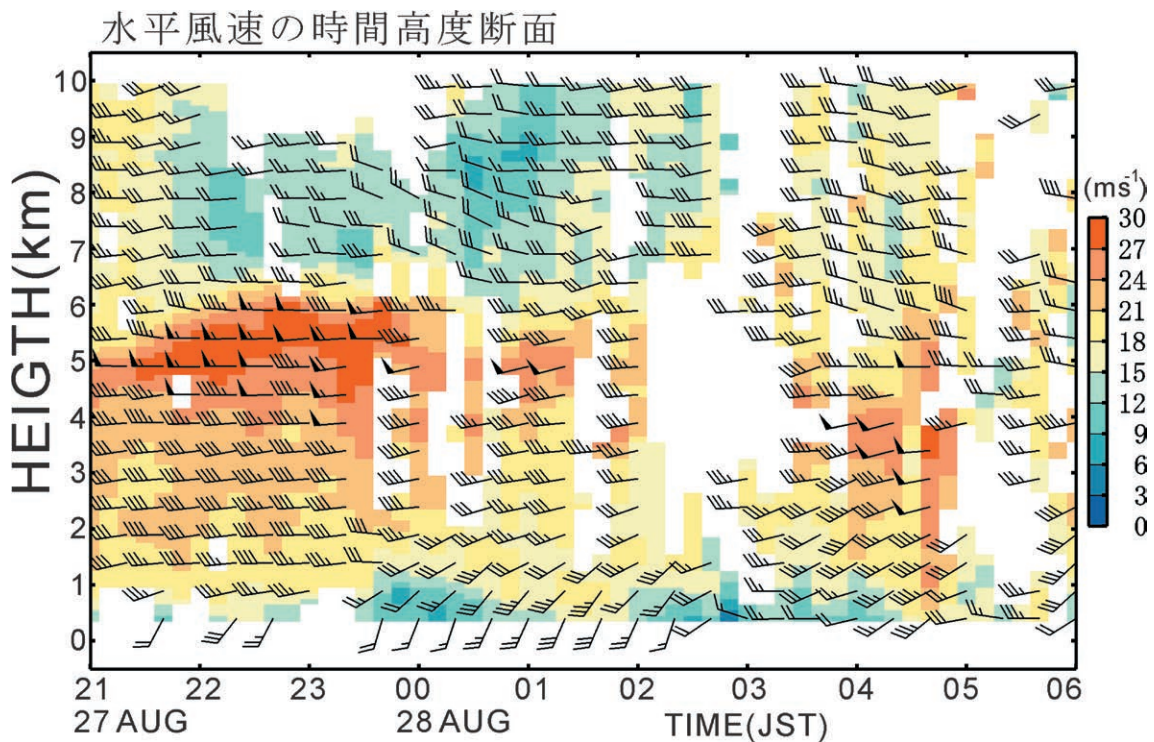


図4 平戸のウィンドプロファイラーによって観測された8月27日21時から8月28日6時までの風向・風速の時間高度断面。カラーは風速の絶対値を示す。短矢羽根が 2.5 m s^{-1} 、長矢羽根が 5 m s^{-1} 、旗矢羽根が 25 m s^{-1} を示す。
 Fig. 4 Time-height cross section of horizontal wind velocity obtained from 21 JST on 27th August to 06 JST on 28th August 2019 observed by the wind profiler at Hirado. One pennant, a full barb, and a half barb denote 25, 5, and 2.5 m s^{-1} , respectively.

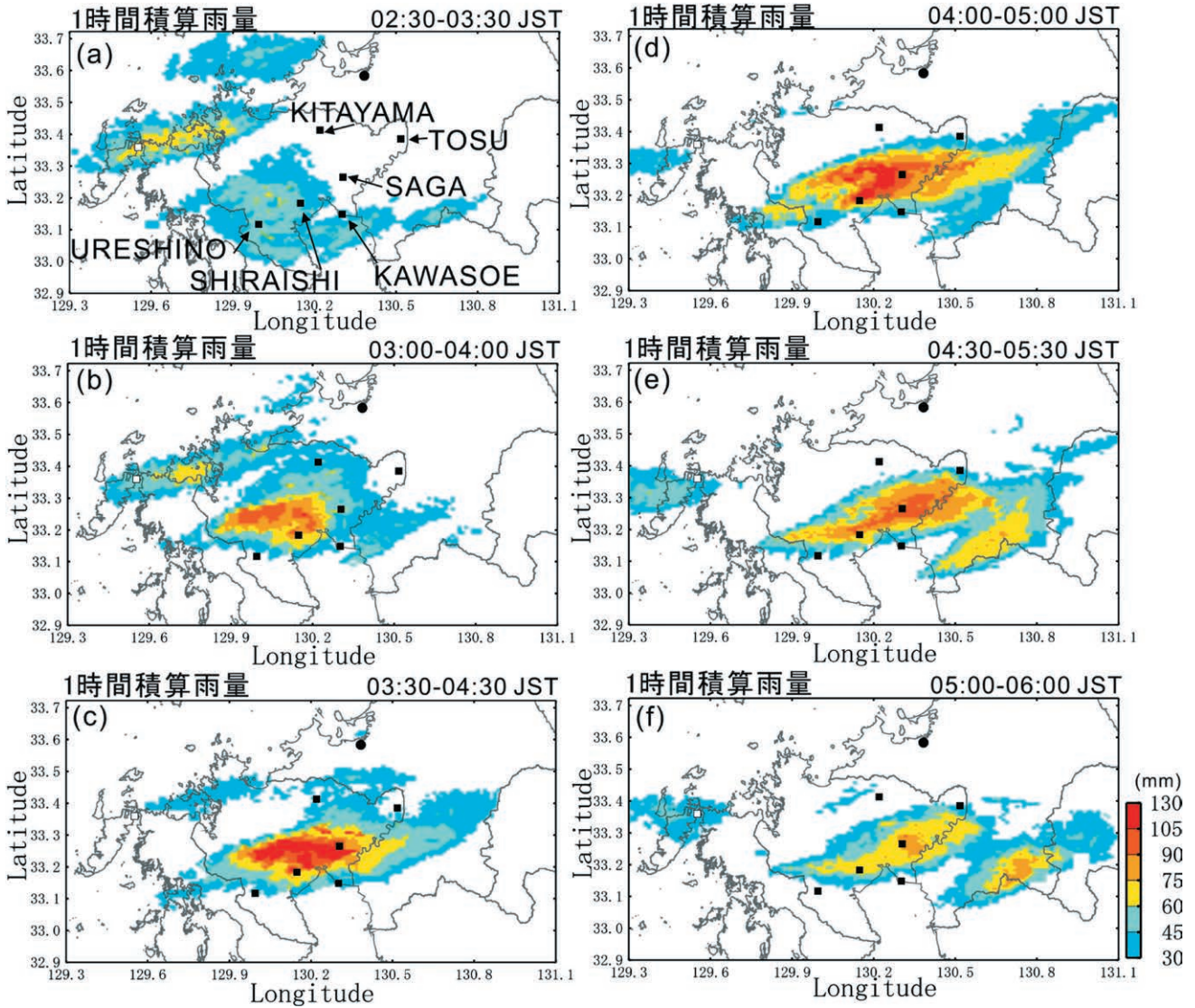


図5 気象庁解析雨量の時間変化. 3時30分から6時までの30分毎の前1時間積算雨量を示す. 黒い四角はアメダス観測点を示す(北山, 鳥栖, 佐賀, 川副, 白石, 嬉野の6カ所). 白四角は平戸のウィンドプロファイラーの位置を, 黒丸を福岡のゾンデ観測位置を示す.

Fig. 5 1-hour rainfall distributions from 3:30 to 6:00 JST every 30 minutes from the Radar-Raingauge Analyzed Precipitation of JMA. Closed squares indicate the AMeDAS cites (Kitayama, Tosu, Saga, Kawasoe, Shiraiishi, and Ureshino). Closed circle indicates the sounding cite at Fukuoka. Open square indicates the wind profiler cite at Hirado.

加藤 (2014) では, 3 時間積算雨量が 50 mm 以上で縦横比が 3 以上のものを線状降水帯としている. 3 つの定義の本質的な意味に大きな差はないが, 定義が一律でないため, 先行研究の結果との定量的な比較が難しい状況にあることは, 線状降水帯の研究における問題点の 1 つである. 本研究では, Hirokawa *et al.* (2020) の定義に従うと, 図 6 では 80 mm を超える領域が存在し, その面積は 1,500 km² 以上となり, 最大値は 200 mm を超えているので, 線状降水帯が

存在したと言える. 図 6 において, 80 mm を超える強雨域, すなわち線状降水帯は佐賀と白石のアメダス観測点を含んでおり, 線状降水帯により 1 時間と 3 時間積算雨量で 2 地点の観測史上 1 位の記録を更新したと言える. 一方, その他のアメダス観測点は 80 mm の境界付近に存在しており, 3 時間以下の積算雨量で記録更新が無かったことと整合する.

図 7 に各アメダス地点の降水の時系列を示す. 図 5 および図 6 で示した解析雨量と整合して, 3 時

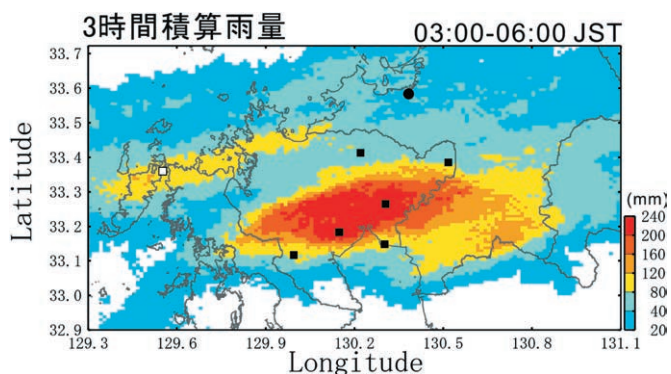


図6 気象庁解析雨量の3時から6時までの3時間積算雨量を示す。

Fig. 6 3-hour rainfall distributions from 3:00 to 6:00 JST from the Radar-Raingauge Analyzed Precipitation of JMA. Closed squares indicate the AMeDAS cites (Kitayama, Tosu, Saga, Kawasoe, Shiraishi, and Ureshino). Closed circle indicates the sounding cite at Fukuoka. Open square indicates the wind profiler cite at Hirado.

から6時まで、佐賀と白石のアメダス地点において3時間で200 mm以上の大雨が観測されている。その他の観測地点では積算雨量の時間変化は緩やかであった。

4. 予測計算の結果

本研究では10分毎に2時間先の積算雨量の予測を行った。8月26日から29日の期間で最大の3時間降水量が観測された佐賀のアメダス観測地点(気象庁, 2019)における2時間積算雨量を真値として予測の精度を評価する。本研究の予測は、位置ズレを考慮し最大可能積算雨量を高精度に予測することを目指した手法であるため、第一歩として最も積算雨量が大きかった佐賀での積算雨量を正確に予測できたかを検証し、スレットスコア等を用いた定量評

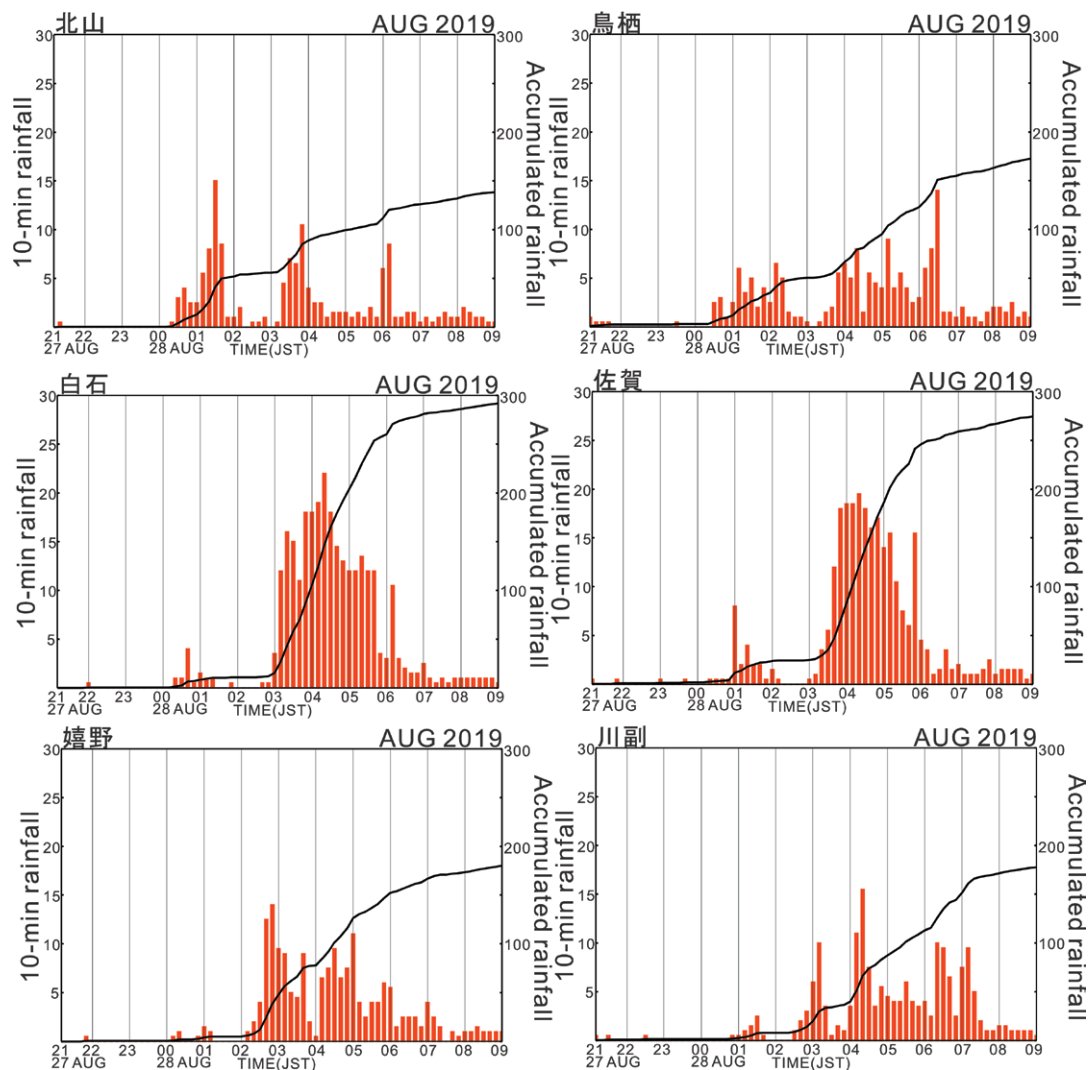


図7 アメダス雨量の時間変化(左上から北山, 白石, 嬉野, 右上から鳥栖, 佐賀, 川副). 8月27日21時から28日9時までの10分間雨量の時間変化を赤い棒グラフで示す。実線で21時からの累積雨量を示す。

Fig. 7 Time series of 10 min rainfall from 21 JST 27th AUG to 09 JST 28th AUG observed at the six AMeDAS sites shown in Fig. 5.

値は今後の課題とする。図8では、降水開始前の午前2時を初期値とし、2時間先までの積算雨量を予測し、佐賀アメダス観測地点における観測値と比較した。以後、10分毎に初期値を変更し、それぞれ2時間先までの積算雨量を同様に比較し、午前5時を初期値とする予測まで評価を行った。現業の予測として、10分毎の予測情報を提供する気象庁速報版降水短時間予測(永田, 2018: 以後, JMA-SRPF (short-range precipitation forecast) と呼ぶ)と比較する。

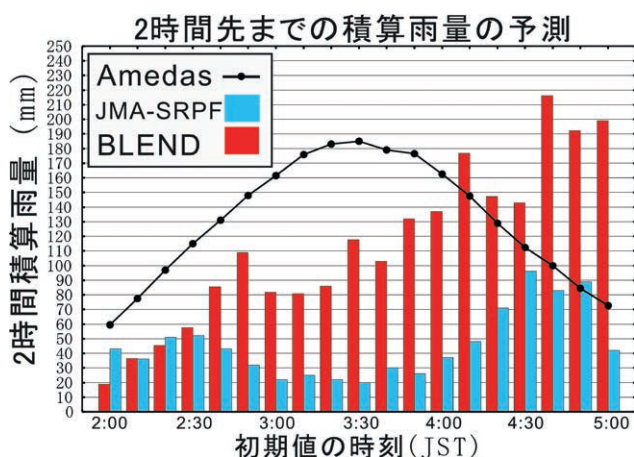


図8 2019年8月28日2時から5時までの10分毎の初期値で予測した、BLEND法(赤い棒グラフ)と気象庁速報版降水短時間予測(JMA-SRPF: 水色の棒グラフ)で予測された2時間先までの積算雨量と、実際に観測された2時間先までの積算雨量を黒い実線で示す。

Fig. 8 Time series of 2-hour integrated rainfall from AMeDAS observation (solid line), BLEND forecast (red bar), and JMA-short-range precipitation forecast (blue bar) from 2 to 5 JST.

図7の佐賀のアメダス観測点で降水が観測された2時30分以前の予測において、BLEND予測とJMA-SRPF予測に大きな差はない(図8)。観測された積算雨量に対しては、2つの予測は概ね観測値の50%となり、過小評価となっている(例外として、2時におけるJMA-SRPF予測は観測値の72%となり、BLEND予測の精度を大きく上回った)。2時30分から4時の初期値の予測では、両者の差が明確となった。BLEND予測の予測雨量は過小評価であるが、2時30分以降で観測値の46%を下回らず、3時30分から4時において、観測値の57%から84%となった。一方、JMA-SRPF予測による予測雨量は、2時30分から4時までにおいて、観測値の11%か

ら22%となり、大きな過小評価となっている。4時10分から4時30分までは、BLEND予測による予測雨量は観測値の114%から126%となっており、過大ではあるが、比較的適切に予測できたと言える。4時30分以降にBLEND予測は過大の傾向を強め、観測値の114%から徐々に数値が増加して5時には観測値の274%となった。一方、JMA-SRPF予測における予測雨量では、4時から4時30分にかけて、観測値の22%から85%に増加し、過小評価が大きく改善された。さらに4時40分から5時までにおいても、JMA-SRPF予測における予測雨量は観測値の83%、115%、58%と比較的適切な予測ができていた。

以上の比較から、BLEND予測は降水開始時から急激な降水が開始するまでにおいて、現業予測を上回る積算雨量を予測できることが分かったが、降水の衰退期においては過大な予測を行うことがあるため、更なる改善が必要である。降水開始の1時間前の2時頃の初期値の予測では両者の明確な差はみられなかった。

最後にBLEND予測が比較的高い精度で積算雨量が予測できた4時を初期値とする予測において、気象庁速報版降水短時間予測以外の予測法との比較を図9で行う。午前4時から6時までの解析雨量から求めた2時間積算雨量とBLEND予測や気象庁の様々な予測モデルの予測を比較した。BLEND予測では、観測と比べて全体的に過小評価となっているが、佐賀のアメダス観測点周辺に110 mmを超える雨域を予測できた。また、90 mm以上の雨域は観測された90 mmの雨域に比べてやや東側にずれているが、同様の水平スケールとなり、局所的な線状降水帯による降水域を再現できている。一方、降水短時間予測では、4時を初期値する場合、速報版ではない降水短時間予測が利用可能であるため、すべての雨量計を用いた解析雨量に基づく降水短時間予測の結果を図9では示している。降水短時間予測では、佐賀のアメダス観測地点の北側に降水域を予測しており、佐賀のアメダス観測地点では大幅な過小評価となっている。MSMの予測では、午前3時の初期値の予測を用いて、4時から6時までの2時間積算雨量を図示しているが、佐賀のアメダス観測地点の東側に降水域を予測している。同様に、局地予測モデル(Local Forecast Model: LFM)の予測では、4時

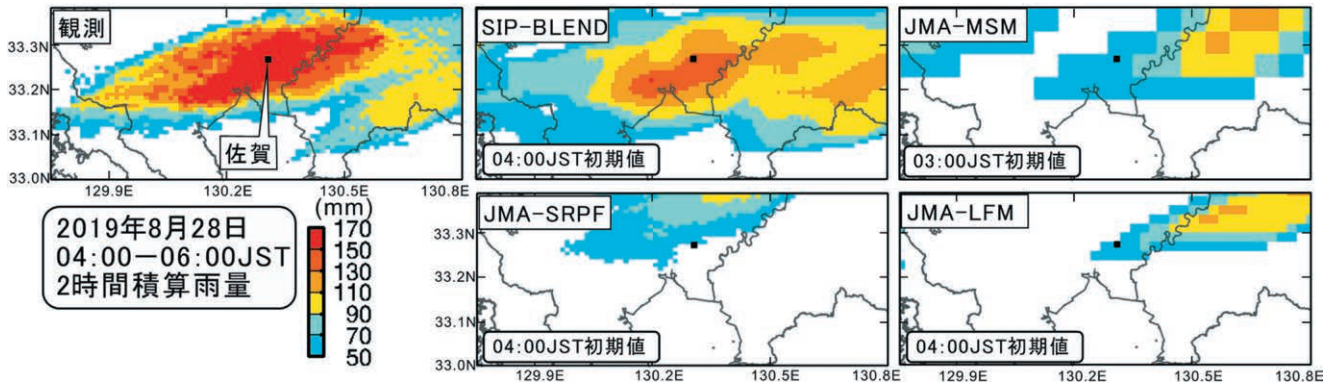


図9 2019年8月28日4時を初期値とした2時間先までの積算雨量の予測分布. 左上が観測, 中上がBLEND法, 中下が気象庁降水短時間予測(JMA-SRPF), 右上が気象庁メソスケールモデル(JMA-MSM), 右下が気象庁局所モデル(JMA-LFM)

Fig. 9 Comparison between observed and forecasted 2 h-integrated rainfall distributions from 4 to 6 JST. Observed rainfall distribution is shown at upper-left corner. BLEND (upper-middle), JMA short-range forecast (lower-middle), JMA-MSM (upper-right), and JMA-LFM (lower-right) are shown.

の初期値を用いて4時から6時の2時間積算雨量を図示した。LFMはMSMと同様に降水域を東側に予測したため、佐賀のアメダス観測地点では過小評価となっている。LFMやMSMの予測は、110 mm以上の強い雨域が発生することは予測できたが、位置のズレがあり、こうした予測の補正が必要である。LFMは1時間毎に、MSMは3時間毎に更新されることから急発達する線状降水帯の予測には必ずしも十分な更新頻度であるとは言えない。本研究は初期解析であるため、予測時間に最も近い初期値の予測のみを解析したが、スピナップも考慮して異なる初期時刻の予測精度についても検証を今後の課題として進める。速報版降水短時間予測は10分毎に予測を更新するので、急発達する線状降水帯の予測に対応できるが、本研究では大幅な過小評価となっていた。BLEND予測は位置ズレを考慮し最大可能積算雨量の予測に特化した手法であるため、急激に発達する局所的な大雨の発達期には、線状降水帯を見逃さないという観点で有用な手法であるが、発達期から衰退期においては過大に雨量を予測するという課題も明確になった。こうした課題の改善にむけた、最適なブレンド法の開発と、最適な最大値フィルターの作成が次の優先順位の高い開発項目となる。また同時にデータ同化において水蒸気データを採用することで、リードタイムの延長を図ることも今後の課題としてあげられる。

5. まとめ

2019年8月28日に低気圧に伴う前線が佐賀県を通過する時に線状降水帯が発生した。本研究では、線状降水帯の積算雨量を高精度に予測するための降水予測システムを試作し、初期解析として2019年8月27日の佐賀県で発生した線状降水帯の予測精度を現業予測と比較することで、開発した予測システムの特徴を明らかにした。開発した予測システムは、ナウキャスト予測で1時間先までの予測を行い、後半の1時間の予測を数値予測で得られる結果に置き換える簡便なブレンド法を採用した。さらに、予測された雨量について、雨量予測の位置ズレによる積算雨量予測が過小とならないように捕捉率を高める最大値フィルターを適用した。最大値フィルターとは、各格子点での降水予測量を、その格子点の周辺数kmの降水量の最大値とする処理を指す。周辺数kmの探索範囲については、ナウキャスト予測では7kmとし、数値予測では11kmとした。

上記の予測システムで2時間先までの積算雨量を降水開始前の午前2時から降水衰退期に入る5時までの3時間にかけて10分毎に予測を行い、気象庁速報版降水短時間予測と精度を比較した。開発した予測手法は、線状降水帯の発達期(図7の佐賀アメダス観測で10分間雨量が急激に増大した3時から5時をここでは発達期とする)を初期時刻とした予測において、発達期前半(3時から4時までを初期値とする予測)のBLEND予測は、速報版降水短時

間予測に対して、大幅に過小評価を改善した。一方で、線状降水帯の発達期後半(4時から5時を初期値とする予測)においては、速報版降水短時間予測に比べて大幅に過大な予測を行った。数値モデルのMSMやLFMと比べても積算雨量の広がりや積算雨量のピークにおいて開発した予測の優位性を示した。MSMやLFMに比べて大幅に更新頻度が高いことから、本研究で開発した予測システムは、急激に発達する線状降水帯の積算雨量予測において有効であると考えられる。

今後の課題として、発達期の線状降水帯の積算雨量を捕捉する能力を損なわずに、衰退期の過大な積算雨量を予測することを軽減できるような、最大値の探索範囲を検討し、また最適なブレンディング方法を模索する。

本災害により被災された方々に心よりお見舞い申し上げます。

謝辞

日本気象協会の安部氏に速報版降水短時間予測のデータを提供して頂いた。

本研究は内閣府CSTI戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「国家レジリエンス(防災・減災)の強化」(管理法人:防災科研)によるものである。

Appendix 最大値探索の範囲の決定法

最大値探索範囲の決定を行うための予測の位置ズレ評価は、Kato *et al.* (2018a)と同じ予測モデルと予測範囲で行い、2017年九州北部豪雨の事例を対象に行った。GPS等の観測データの同化による予測精度の改善が最もよく見られた2017年7月5日13 JSTのLFMを初期値とする予測で行った。今回は初期解析であるため、1つの実験結果から推定した結果を用いるが、本来はより統計的な調査が必要であるので今後の課題として引き続き検討する。福原ほか(2018で利用された最大値フィルターを予測された1時間積算雨量に対して様々な探索範囲(1, 5, 11, 15, 21, 31 kmの6通り)で処置した後、観測された1時間積算雨量と比較し、Critical Success Index (CSI)という指標で予測精度を評価した。11 kmの最大値探索を行った結果で、最も大きなCSIを示した。同じ初期値を用いた予測を5時間先まで延長して同様に11 kmの最大値探索を行った上で評価を

行ったが、3時間以降の予測ではCSIがほぼ0となったため、高い予測精度を担保できる2時間先までの予測を高頻度(10分)で更新することにした。高解像度ナウキャストについては、7 kmの最大値探索を行うことで、13 JSTの初期値の実験において、1時間以内の予測が改善され、2時間先までの積算雨量の予測精度向上に貢献した。

参考文献

- 1) 気象庁(2019): 前線による大雨 令和元年(2019年)8月26日~8月29日。
https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/2019/20190826/jyun_sokuji20190826-0829.pdf (2020年10月27日参照)
- 2) Kato T. (2020): Quasi-stationary band-shaped precipitation systems, named “Senjo-Kousuitai”, causing localized heavy rainfall in Japan, *J. Meteor. Soc. Japan.* **98**, 485-509.
- 3) Hirokawa Y., T. Kato, H. Tsuguchi, and N. Seino (2020): Quasi-stationary band-shaped precipitation systems, named “Senjo-Kousuitai”, causing localized heavy rainfall in Japan, *J. Meteor. Soc. Japan.* **98**, 835-857.
- 4) 櫻井南海子・清水慎吾・前坂剛・下瀬健一(2020): 平成30年7月豪雨時に発生した線状降水帯と大雨特別警報発表の時間的関係. 防災科学技術研究所主要災害調査, **53**, 39-48.
- 5) Tsuguchi, H., N. Seino, H. Kawase, Y. Imada, T. Nakaegawa, and I. Takayabu (2019): Meteorological overview and mesoscale characteristics of the heavy rain event of July 2018 in Japan, *Landslides*, 16:363. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-1098-6>. (2020年10月27日参照)
- 6) R. Kato, K. Shimose, and S. Shimizu (2018a): Predictability of precipitation caused by linear precipitation systems during the July 2017 Northern Kyushu heavy rainfall event using a cloud-resolving numerical weather prediction model, *J. Disaster Res.*, **13**(5), 846-859.
- 7) Takemi T. (2018): Importance of terrain Representation in Simulating a Stationary Convective System for the July 2017 Northern Kyushu Heavy Rainfall Case, *SOLA*, **14**, 153-158.

- 8) Kawano T. and R. Kawamura (2020): Genesis and maintenance processes of a quasi-stationary convective band that produced record-breaking precipitation in northern Kyushu, Japan on 5 July 2017, *J. Meteor. Soc. Japan.* **98**, 673-690.
- 9) Oizumi T., K. Saito, J. Ito, T. Kuroda, and L. Duc (2018): Ultra-high-resolution numerical weather prediction with a large domain using the K computer: A case study of the Izu Oshima heavy rainfall event on October 15-16, 2013. *J. Meteor. Soc. Japan.* **96**, 25-54.
- 10) 加藤亮平・下瀬健一・清水慎吾 (2016) : 雲解像数値モデルによる2014年広島豪雨の予測可能性－水平解像度と数値粘性に対する感度－. 防災科学技術研究所研究報告, **82**, 1-16.
- 11) Ebert E.E. and J. L. McBride (2000): Verification of precipitation in weather systems: determination of systematic errors, *J. Hydrol.* **239**, 179-202.
- 12) Skok G. and N. Roberts (2016): Analysis of Fractions Skill Score properties for random precipitation fields and ECMWF forecasts, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **142**, 2599-2610.
- 13) Yoshida S., S. Yokota, H. Seko, T. Sakai, and T. Nagai (2020): Observation System Simulation Experiments of Water Vapor Profiles Observed by Raman Lidar using LETKF System, *SOLA*, **16**, 43-50.
- 14) K. Shimose, S. Shimizu, R. Kato, and K. Iwanami (2017): Analysis of the 6 September 2015 tornadic storm around the Tokyo metropolitan area using coupled 3DVAR and incremental analysis updates, *J. Disaster Res.*, **12**(5), 956-966.
- 15) Tsuboki K. and A. Sakakibara (2002): Large-scale parallel computing of cloud resolving storm simulator, High Performance Computing, H. P. Zima *et al.*, eds., Springer, 243-259.
- 16) Kato R., S. Shimizu, K. Shimose, and K. Iwanami (2017a), Very short time range forecasting using CReSS-3DVAR for a meso- γ -scale, localized, extremely heavy rainfall event: Comparison with an extrapolation-based nowcast, *J. Disaster Res.*, **12**, 967-979.
- 17) Maesaka T., M. Maki, K. Iwanami, K. Kieda, and A. Hoshi (2011). Operational rainfall estimation by X-band MP radar network in MLIT, Japan. In Proceedings of 35th Conf. on Radar Meteorology, 26-30 September 2011. Pittsburgh, PA. <https://ams.confex.com/ams/35Radar/webprogram/Paper191685.html>. (2020年10月27日参照)
- 18) Kigawa S. (2014a), Techniques of precipitation analysis and prediction for high-resolution precipitation nowcasts. (in Japanese) http://www.jma.go.jp/jma/en/Activities/Techniques_of_Precipitation_Analysis_and_Prediction_developed_for_HRPNs.pdf (2020年10月27日参照)
- 19) Kigawa S. (2014b): Techniques of precipitation analysis and prediction for high-resolution precipitation nowcasts, *Weather Serv. Bull.*, **81**, 22. (in Japanese) <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/sokkou/81/vol81p055.pdf> (2020年10月27日参照)
- 20) Kato R., S. Shimizu, K. Shimose, and K. Iwanami (2018b): Nowcast for Meso- γ -Scale, Localized, Extremely Heavy Rainfall by Blending Extrapolation and Model Forecasts: Event on 24 August 2016. American Geophysical Union, Fall Meeting 2018, abstract #A54H-19. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018AGUFM.A54H..19K/abstract>
- 21) 福原隆彰・高見和弥・鎌田慈 (2018) : 小規模河川における浸水予測の過小評価を防ぐ予測降水量評価方法. 鉄道総研報告, **32** (7), 5-10. (in Japanese)
- 22) 辻本浩史・増田有俊・真中朋久 (2017) : 現業レーダデータを用いた土砂災害事例における線状降水帯の抽出. 砂防学会誌, **6**, 49-55. (in Japanese)
- 23) 津口裕茂・加藤輝之 (2014) : 集中豪雨事例の客観的な抽出とその特性・特徴に関する統計解析. *天気*, **61** (6), 19-33. (in Japanese)
- 24) 永田和彦 (2018) : 降水短時間予報等の改善. 平成30年度予報技術研修テキスト, 142-163. (in Japanese) <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/yohkens/24/chapter7.pdf> (2020年10月27日参照)
- (2020年10月30日原稿受付,
2020年11月20日改稿受付,
2020年11月20日原稿受理)

要 旨

本研究では、線状降水帯の積算雨量を高精度に予測するための降水予測システムを試作し、初期解析として2019年8月27日の佐賀県で発生した線状降水帯の予測精度を現業予測(気象庁による速報版降水短時間予測)と比較することで、開発した予測システムの特性を明らかにした。開発した予測システムは、ナウキャスト予測で1時間先までの予測を行い、後半の1時間の予測を数値予測で得られる結果に置き換える簡便なブレンディング法を採用した。さらに、予測された雨量について、雨量予測の位置ズレによる積算雨量予測が過小とならないように捕捉率を高める最大値フィルターを適用した。最大値フィルターとは、各格子点での降水予測量を、その格子点の周辺数 km の降水量の最大値とする処理を指す。開発した予測手法は、線状降水帯の発達期前半(3時から4時を初期値とする予測)において速報版降水短時間予測に対して、大幅に過小評価を改善した。一方で、線状降水帯の発達期後半(4時から5時を初期値とする予測)においては、速報版降水短時間予測に比べて大幅に過大な予測を行った。本研究で開発した予測システムは、急激に発達する線状降水帯の積算雨量予測において有効であると考えられる。

キーワード：線状降水帯，最大値フィルターを併用したブレンディング予測