

1. 線状降水帯のレビューと今後の課題

加 藤 輝 之*

1. はじめに

日本では3時間積算降水量200mmを超える集中豪雨がしばしば観測され、災害につながる地滑りや洪水をもたらす。そのような事例は主に、「線状降水帯」と名付けられたほぼ停滞する線状の降水システムによってもたらされる(吉崎・加藤 2007; 津口 2016; Kato 2020)。適切な英訳も存在せず、線状降水帯のレビュー論文である Kato (2020) では、日本語の発音のまま、“senjo-kousuitai”と記載している。これは、線状降水帯による集中豪雨が日本周辺以外(朝鮮半島南部では発生している可能性は高い)ではほぼ発生していないと考えられるので適切な英語表記がないためである。今までの線状のメソ対流系についての研究の多くは気象レーダー観測のスナップショットに基づく分類であり、基本的には移動する線状の降水システムを対象としている一方、線状降水帯は積算降水量分布で認知される大雨である。

2. 線状降水帯という用語の由来

1980年代に全国に展開する気象レーダーのデータがデジタル化され、それを合成することで全国の雨雲レーダーが運用されるようになった。その後、1990年代にはアメダス等の雨量計データで補正した1時間降水量分布(解析雨量)が作成され、そのデータを用いることで集中豪雨の多くは線状の降水域でもたらされることがわかってきた。「線状降水帯」という用語は2000年前後に気象研究所の研究者の中で、九州の地形に由来する線状に伸びる降雨域を対象に用いられていたが、2007年発刊された教科書「豪雨・豪雪の気象学」(吉崎・加藤 2007)で現在とほぼ同様の内容が定義さ

れた。その後、平成23年(2011年)7月新潟・福島豪雨の発生要因として、気象研究所からの報道発表資料の中で初めて用いられ、2014年8月の広島での大雨後に多くの報道機関で使われるようになり、2017年の流行語大賞にノミネートされたこともあり、世間に認知されるようになった。

3. 集中豪雨と線状降水帯の出現特徴

集中豪雨と線状降水帯の発生特性については、津口・加藤(2014)や Kato (2020) が3時間降水量130mm以上、最大3時間降水量観測時での降水量50mm以上の領域分布の縦横比等を用いて調査している。それらの結果(第1表)では、集中豪雨に対する線状降水帯事例の割合は約半分であり、台風・熱帯低気圧本体周辺を除くと約3分の2に達する。特に総観場別では停滞前線に伴う線状降水帯事例の発生数が多く、次いでPRE(Predecessor Rain Event)とよばれることがある台風・熱帯低気圧遠隔での事例である。1976年から2020年のアメダスデータを用いた、梅雨期の集中豪雨事例の発生数の経年変化(加藤 2022)では顕著な増大

第1表 1989-2015年の暖候期(4-11月)における総観場別の集中豪雨・線状降水帯事例の発生数と線状降水帯事例の割合(Kato 2020)。

総観場：擾乱との 距離関係	集中豪雨 事例数：A	線状降水帯 事例数：B	割合(%)： B/(A+B)
低気圧：500km 以内	97	45	46
寒冷前線：200km 以内	43	31	72
停滞前線：500km 以内	159	108	68
台風・熱帯低気圧本 体：500km 以内	229	75	33
台風・熱帯低気圧遠 隔：500km~1000km 以内	124	76	61
上記以外	63	23	37
合計	715	358	50

* Teruyuki KATO, 気象庁気象研究所。

© 2023 日本気象学会

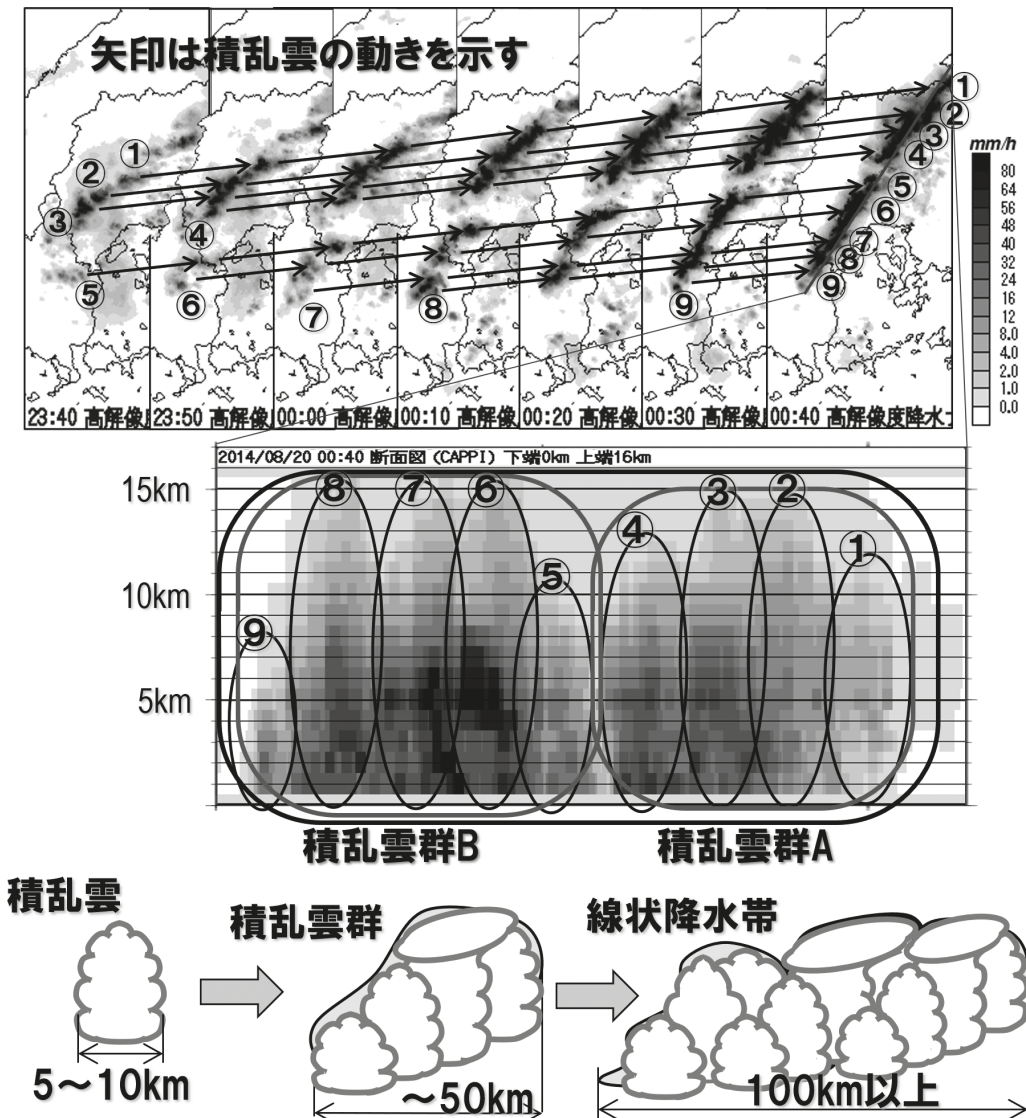
傾向を示し、梅雨期の集中豪雨事例の大半が線状降水帯によるものであることから同時期の線状降水帯による大雨も顕著な増加傾向にあるものと考えられる。

4. 線状降水帯の形成・維持過程

線状降水帯の形成過程としては主に、暖湿流がほぼ停滞している局地前線に流入することで、対流セル（積乱雲）が前線上で同時に発生する破線型と、下層風の風上側に新しい対流セルが繰り返し発生し、既存の

セルとともに線状に組織化するバックビルディング（BB）型の2つに分類される。ここでは、2014年8月の広島での大雨事例を用いて、BB型による線状降水帯の形成・維持メカニズムを解説する。

10分ごとの降水強度分布の時系列（第1図上図）をみると、20日00時40分には①～④、⑤～⑨の複数の積乱雲で構成されている2つの線状の積乱雲群AとBが存在し、発達した積乱雲は高度16km（対流圏界面）に達している（第1図中図）。積乱雲群Bに着目すると、

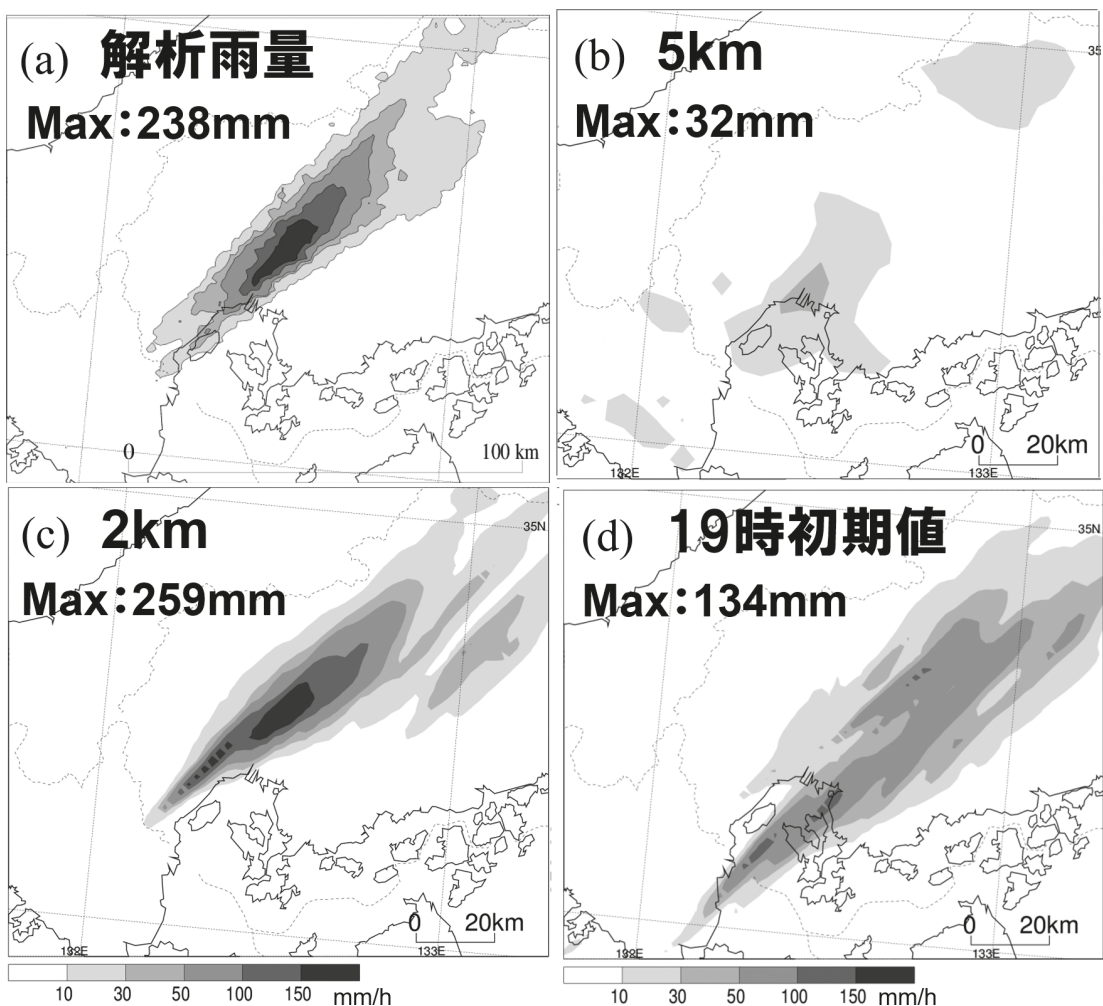


第1図 (上図) 2014年8月19日23時40分～20日00時40分(10分毎)の降水強度分布(mm/h), (中図)(上図)の20日00時40分の線分上の南西-北東鉛直断面図と(下図)線状降水帯の階層構造の模式図(Kato 2020)。

19日23時40分頃に発生した積乱雲⑤が北東に動き、その南西側に次々と積乱雲⑥～⑨が発生して積乱雲群 B を形成している。このように積乱雲が進行方向の上流側（逆側）に次々と発生して、3～5 個程度の積乱雲で構成された線状の積乱雲群を形成していることが確認できる。また、複数の積乱雲群が連なることで線状降水帯が形成され、線状降水帯には積乱雲→積乱雲群という階層構造がみられる（第 1 図下图）。また、複数の積乱雲群が約30分ごとに山口県と広島県境付近で次々と発生し、北東に移動しながら線状に伸び、それらが連なって長さ100km 以上の線状降水帯が形成・維持されていた。

5. 線状降水帯の予測可能性

広島での大雨事例で、数値モデルがどの程度の大雨を予想できたかを紹介する。解析雨量および水平解像度 5 km（気象庁メソモデルに対応）と 2 km（気象庁局地モデルに対応）の数値モデルが予測した2014年 8 月20日 4 時30分の前 3 時間積算降水量分布を第 2 図に示す。5 km モデル（第 2 図 b）では、線状の降水域の予測も不十分な上、最大降水量が32mm 程度であり、この資料からだけでは大雨を予測するには無理がある。2 km モデル（第 2 図 c）では、山口県と広島県境付近の強い降水域の位置が北側に僅かずれているものの、実況（第 2 図 a）とほぼ同じ最大降水量を予測することができている。ただ、1 時間後（19日19時）の



第 2 図 (a) 2014年 8 月20日 4 時30分までの (a) 解析雨量と19日18時初期値の水平解像度 (b) 5 km, (c) 2 km と (d) 19時初期値の 2 km の数値モデルが予測した 3 時間積算降水量分布 (Kato 2020).

初期値を用いた 2 km モデルの予測結果 (第 2 図 d) をみると、最大降水量は約半分になり、降水域も南側にかなりずれている。さらに新しい初期値では、予測降水量はさらに減っていた (図略)。このように初期値に存在する僅かな違いが予報結果に大きく影響する。

6. 線状降水帯が発生しやすい 6 条件

線状降水帯の発生を診断的に予測するために、線状降水帯の発生しやすい条件として、過去の集中豪雨事例における大気環境場の統計的調査から 6 つの条件が構築されている (加藤 2015; 加藤 2016; Kato 2020)。

500m 高度データ (モデル地表面高度が 300m 以上の地点では地表面高度 +200m のデータを用いる, Kato 2018) をベースに判断する下層水蒸気場を代表して、(1) 大量の水蒸気フラックス量 ($>150\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$) と (2) 自由対流高度までの距離が短いこと ($<1000\text{m}$) の 2 つの条件を選択した。ほかの 4 つとして、(3) 中層 (500hPa と 700hPa) の相対湿度が高い ($>60\%$)、(4) ストームに相対的なヘリシティで判断する大きな鉛直シア ($>100\text{m}^2 \text{s}^{-2}$)、(5) 総観スケール (700hPa で空間 400km 平均) の上昇流場で判断する上昇流域と (6) 700~850hPa に度々みられる暖気移流を除外するための平衡高度が 3000m 以上の条件を選択した。なお、6 条件は見逃しがないように設定しているの、空振りが多く、6 条件以外に 500m 高度の相当温位の値や下層収束場の状況を把握するなどして複合的に利用する必要がある。また、6 条件は線状降水帯による大雨発生の判断材料の 1 つとして、2016 年 5 月 30 日から気象庁の予報現業で利用されている。

7. 今後の課題

過去の線状降水帯事例における発生機構の研究では、典型的な破線型や BB 型でない複雑な形成過程が存在し、発生要因としては地形、上空の寒気、雨滴の蒸発、下層風速場やメソ低気圧の存在などの影響が指摘されている。このように線状降水帯発生機構は多種多様であることから、事例解析の蓄積が重要であり、データベース化などの整理や典型的な線状降水帯事例での詳細な解明が必要であろう。データベース化に際しては、線状降水帯の抽出方法を基本的には Hirockawa *et al.* (2020a, b) に統一するなどの対応が欠かせない。

線状降水帯の予測に関しては、数値予報による発生予測精度の低いケースがあり、特に前線等による下層収束場の影響が弱い梅雨前線帯の南縁 (地上天気図に解析されている梅雨前線の南側 100~300km) 付近の予想は難しい。この予測の改善には、数値モデルの高分解能化に加えて、メソアンサンプルの利活用と診断的予測手法等の組み合わせが必要である。また、診断的予測手法の高度化に関しては、線状降水帯発生 6 条件に新たな条件を追加することも検討すべきであろう。

参考文献

- Hirockawa, Y., T. Kato, H. Tsuguti and N. Seino, 2020a: Identification and classification of heavy rainfall areas and their characteristic features in Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, **98**, 835-857.
- Hirockawa, Y., T. Kato, K. Araki and W. Mashiko, 2020b: Characteristics of an extreme rainfall event in Kyushu district, southwestern Japan in early July 2020. *SOLA*, **16**, 265-270.
- 加藤輝之, 2015: 線状降水帯発生要因としての鉛直シアと上空の湿度について。平成 26 年度予報技術研修テキスト, 114-132. <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/yohkens/20/chapter6.pdf> (2023.2.27 閲覧)。
- 加藤輝之, 2016: メソ気象の理解から大雨の予測について~線状降水帯発生条件の再考察~。平成 27 年度予報技術研修テキスト, 42-60. <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/yohkens/21/chapter2.pdf> (2023.2.27 閲覧)。
- Kato, T., 2018: Representative height of the low-level water vapor field for examining the initiation of moist convection leading to heavy rainfall in East Asia. *J. Meteor. Soc. Japan*, **96**, 69-83.
- 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.
- 加藤輝之, 2022: アメダス 3 時間積算降水量でみた集中豪雨事例発生頻度の過去 45 年間の経年変化。天気, **69**, 247-252.
- 津口裕茂, 2016: 線状降水帯。天気, **63**, 727-729.
- 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**, 455-469.
- 吉崎正憲, 加藤輝之, 2007: 豪雨・豪雪の気象学, 朝倉書店, 187pp.