

集中豪雨をもたらす線状降水帯 ～基礎研究が生み出した防災用語～

“SENJO-KOUSUITAI” INDUCING HEAVY RAINFALL;
DISASTER PREVENTION TERMINOLOGY CREATED
FROM FUNDAMENTAL RESEARCH

加藤輝之¹

Teruyuki KATO

¹ 気象庁気象研究所台風・災害気象研究部 (〒305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1)

E-mail: tkato@mri-jma.go.jp

1. はじめに

日本では3時間降水量 200 mm を超える集中豪雨がしばしば観測され, 大規模な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¹⁾⁴⁾. 線状降水帯は気象庁の用語集での記述のように, 「次々と発生する発達した雨雲(積乱雲)が列をなした, 組織化した積乱雲群によって, 数時間にわたってほぼ同じ場所を通過または停滞することで作り出される, 線状に伸びる長さ 50 ~ 300 km 程度, 幅 20 ~ 50 km 程度の強い降水をとまなう雨域」として定義されている. この定義からもわかるように, ほぼ同じ場所に強雨が持続することから, 気象レーダーでみられる, 寒冷前線などに伴って移動する線状の雨域(降雨バンド)は線状降水帯を作り出さない. また, 気象学的に厳密な定義はなされておらず, 量的にも厳密な定義はない. 特に, 量的な定義は, 集中豪雨同様に災害に直結し, 気象庁が大雨警報(洪水)の判断基準に用いているキキクルで考慮されている直前までの降水量や地域特性も鑑みる必要があるために避けるべきである. ただ, 学術的に線状降水帯の発生に関わる研究を行う際には, 第3章で述べるように適切な閾値を設定する必要がある. 参考までに気象庁の用語集では, 集中豪雨は「同じような場所で数時間にわたり強く降り, 100 mm から数百 mm の雨量をもたらす雨」と説明されている.

さらに, 線状降水帯の適切な英訳も存在せず, レビュー論文⁴⁾では, 日本語の発音のまま, “senjo-kousuitai” と

記載されている. これは, 既存の線状の降雨域として用いられている英語表記(例えば, quasi-linear convective systems)を用いるとその現象がイメージされ, 線状降水帯の大雨に対するイメージからかけ離れるためである. なぜなら, 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⁵⁾)ではほぼ発生していないと考えられるので, そもそも適切な英語表記が存在しないためである.

集中豪雨は数時間にわたってほぼ同じ場所で降る降水によってもたらされるが, 大雨には「ゲリラ豪雨」と報道され, 1時間程度で局所的に大雨が降る局地的大雨とよばれる短期間強雨もある. 局地的大雨は「数十分の短時間に狭い範囲に数十 mm 程度の雨量をもたらす雨」と気象庁の用語集では説明されている. ここで使われている「ゲリラ」とはゲリラ戦(遊撃戦)とよばれる不正規戦闘を行なう兵士のことであり, 臨機に奇襲や待ち伏せを行なうことから, 不意打ちで予想できない大雨という意味で使われている.

「ゲリラ豪雨」は事前の予測が困難な局地的大雨に対して, 1969年に気象庁の職員が初めて使った用語であるが, 最近では予測できていた大雨も「ゲリラ豪雨」として報道では取り上げられることもあり, 本来の理由付けで必ずしも用いられているわけではなさそうである. 局地的大雨の特徴は, 団塊状の降水域が複数散在して見られることが多く, 1つの降水域の長さ・幅とも 20 ~ 30 km 程度であり, それぞれでの降水の持続時間は最大1時間程度で, 100 mm 以上の大雨をもたらすこともある. この大雨によって都市部で内水氾濫がたびたび引き起こされる.

2. 線状降水帯という用語の由来

1980年代に気象庁が全国展開する20か所の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、1989年にはアメダス等の雨量計で補正した面的な1時間降水量を示すことができる解析雨量が作成されるようになり、その分布から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」という用語については2000年前後に気象研究所の研究者が、九州の地形に由来する線状に伸びる降雨域⁶⁾を対象に用いはじめ、2007年発行された教科書「豪雨・豪雪の気象学」¹⁾で現在とほぼ同様の定義がなされた。その後、2012年の平成24年新潟・福島豪雨の発生要因として、気象研究所からの報道発表の中で初めて用いられ、2014年8月20日の広島での大雨後に多くの報道機関でも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。参考までに、「集中豪雨」という用語は1953年8月14日に京都府南部で発生した南山城水害を報道した新聞紙面上で初めて使われ、その水害は降水分布⁷⁾から線状降水帯による大雨だったと考えられる。

3. 集中豪雨と線状降水帯の発生頻度の特徴

集中豪雨と線状降水帯の発生頻度の特徴については、解析雨量を用いて24時間および3時間で積算した降水量分布からそれぞれの閾値（年平均降水量12%、130mm/3h）を定義することで調査されている^{4),8)}。その調査では、24時間以内、直線距離で150km以内のものは同一事例として除外され、最大3時間降水量の観測時での降水量50mm以上の領域分布の縦横比で線状降水帯であるかどうか判断されている。その結果をみると、集中豪雨事例は太平洋側で数多く抽出されているが、北海道や東北地方を含む北日本でもそれなりの数の事例が抽出されている。また、集中豪雨事例に対する線状降水帯の割合は約半分であり、台風・熱帯低気圧本体付近（中心から500kmの領域）を除くと約3分の2に達する（表-1）。特に、九州を含む南日本では集中豪雨事例のほとんどが線状降水帯による。

東日本および南日本での集中豪雨事例数における月別の推移（図-1）をみると、東日本での線状降水帯は9月に一番多く発生し、それらの多くは台風・熱帯低気圧の遠隔（中心から500km～1500kmの領域）での発生事例である。このような領域で発生する大雨はPRE（Predecessor Rain Event）⁹⁾とよばれることがあり、日本列島のはるか南海上に台風が存在している際、秋雨前線の南側にあたる日本列島の太平洋側でたびたび発生する。2000年9月11

表-1 1995～2009年の暖候期（4-11月）に発生した集中豪雨における領域別の線状降水帯とその他の事例数⁸⁾
台風・熱帯低気圧本体（台風・熱帯低気圧の中心から500km以内）で発生した集中豪雨は除く。また、領域は図-1に示す。

	北日本	東日本	西日本	南日本	合計
線状降水帯	25	38	45	60	168 (64.4%)
その他	32	38	16	7	93 (35.6%)
合計	57	76	61	67	261

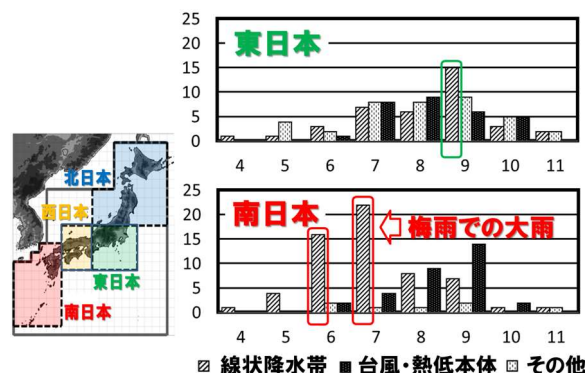


図-1 1995～2009年における月別の東日本と南日本での台風・熱帯低気圧本体（台風・熱帯低気圧の中心から500km以内）、台風・熱帯低気圧本体を除く線状降水帯、およびその他の要因による集中豪雨の発生事例数⁸⁾

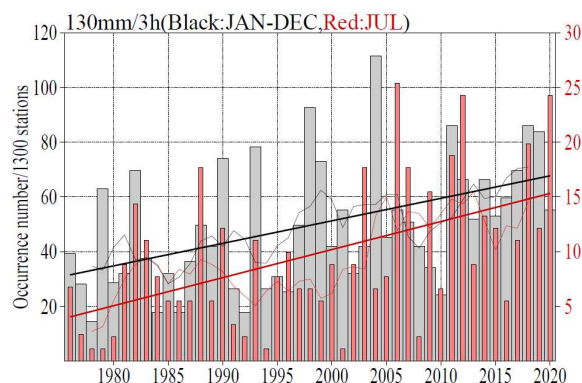


図-2 アメダス3時間積算降水量130mm以上の1300地点当たりの年単位（黒）と7月（赤）の発生回数の経年変化¹⁰⁾。細線は5年移動平均、太線は長期変化傾向。

～12日に発生した東海豪雨や2015年9月9～10日に発生した関東・東北豪雨が代表例である。南日本では、梅雨期である6～7月に線状降水帯が多発し、梅雨前線付近で発生する集中豪雨事例のほとんどが線状降水帯によってもたらされている。

上述の集中豪雨の閾値130mm/3hを用いて、1976年から2020年のアメダスデータから調査した、年単位および7月の集中豪雨の発生数の経年変化¹⁰⁾を図-2に示す。年単位の変化では、気象庁の気候変動監視レポート¹¹⁾で示さ

れている1時間降水量 50 mm および 80 mm 以上の発生数と同様に、集中豪雨の発生数は信頼水準 99 %以上で増加傾向を示し、45 年間で約 2.2 倍の長期増加傾向になっている。月別の変化では、梅雨期での集中豪雨の増加傾向が顕著で、7月の発生頻度が45年間で約3.8倍（信頼水準95%以上）に増大している。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^{4,8)}が示されていることから、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ことが考えられる。参考までに、年間の発生数が集中豪雨とほぼ一致するように68 mm/hとした1時間降水量、すなわち短時間強雨の発生数の45年間の経年変化では、通年で2.0倍、7月で2.8倍となり、同様の傾向がみられるものの、集中豪雨の増加傾向の方がより顕著であることがわかる。

4. 線状降水帯の形成・維持過程

(1) 破線型とバックビルディング型形成

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、積乱雲が前線上で同時発生して線状に連なるようになる破線型と、下層風の風上側に新しい積乱雲が次々発生し、既存の積乱雲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(図-3)。破線型形成の例として、2013年台風第26号に伴う伊豆大島での大雨事例(図-4)を示す。台風接近時に関東平野で先行降雨があり、その降雨に伴う雨粒の蒸発によって作り出された冷氣外出流が南西方向に向かって海上に流出し、台風周辺の南東方向から流入する下層暖湿流と衝突することで房総半島から伊豆大島を横切るように局地前線が形成されている。その局地前線上に線状降水帯が形成し、24時間で最大824 mmの降水量となった。この大雨は伊豆大島の地形の影響が大きかったことが数値シミュレーションの結果から確認されている¹³⁾。

BB型形成の例として、2014年8月の広島での大雨事例(図-5)を示す。地上天気図をみると、広島市は東シナ海から日本海上にかけて停滞していた前線の約300 km南側で、その前線を内包して存在していた上空の湿った領域(梅雨期の湿舌¹⁴⁾に対応)の南端に位置していた。この前線と大雨域との位置関係は梅雨期に大雨が発生する多くの事例と類似している。また大雨をもたらした下層水蒸気は豊後水道から流入したことが報告されている¹⁵⁾。この下層水蒸気流入が継続したことで、下述するように、広島県と山口県との県境付近から降雨域が北東方向に伸びて停滞し、3時間に200 mmを超える大雨となった。

(2) BB型による線状降水帯の形成・維持メカニズム

2014年8月の広島での大雨事例(図-6)を用いて、BB

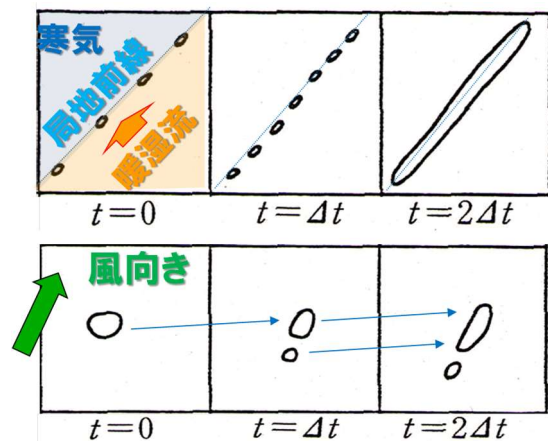


図-3 線状降水帯の形成パターン。(上図)破線型と(下図)BB型。(上図)の破線は局地前線、(下図)の矢印は積乱雲の移動を示す。12)に加筆。

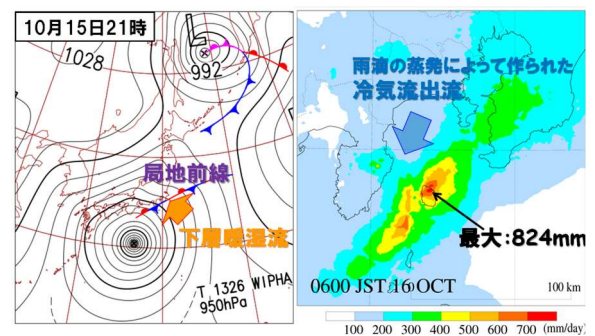


図-4 破線型形成による線状降水帯の例(2013年台風第26号に伴う伊豆大島での大雨)。(左図)10月15日21時の地上天気図と(右図)16日06時までの24時間積算解析雨量。

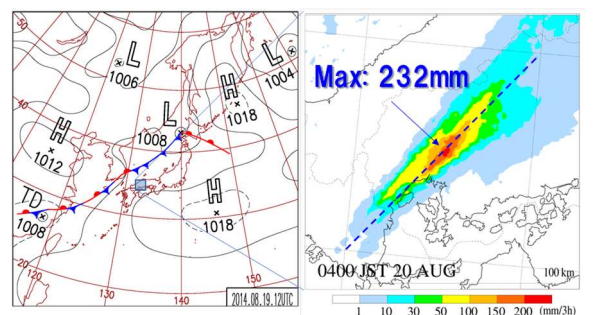


図-5 BB型形成による線状降水帯の例(2014年8月20日の広島での大雨)。(左図)8月19日21時の地上天気図と(右図)20日04時までの3時間積算解析雨量。

型による線状降水帯の形成・維持メカニズムを図解説する。まず形成過程について、10分ごとの降水強度分布の時系列(上図)から説明する。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16 km(対流圏界面)に達している(中図)。積乱雲群Bの形成過程に着目すると、19日23時40分頃に発生した積乱雲⑤が北東に動きつつ、その南西側に次々と積乱雲⑥~⑨が発生して積乱雲群Bを形成していることがわかる。このように積

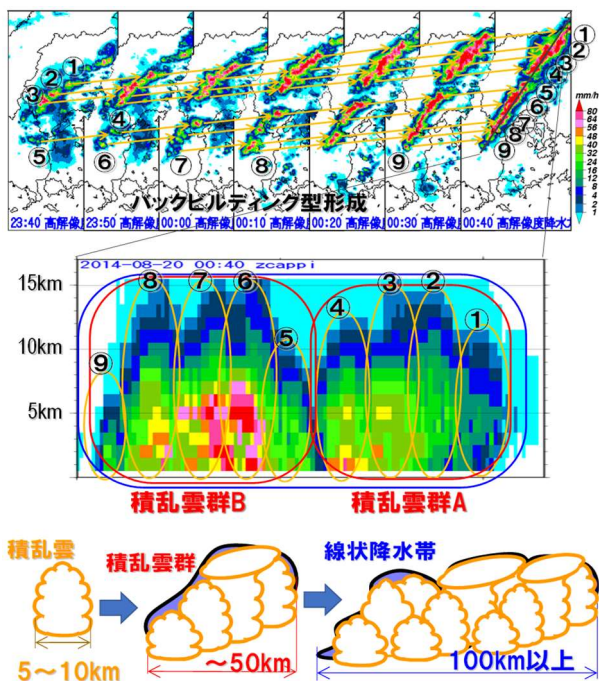


図-6 (上図) 2014年8月19日23時40分～20日00時40分(10分毎)の降水強度分布(mm/h)、(中図)(上図)の20日00時40分の線分上の南西-北東鉛直断面図と(下図)線状降水帯の階層構造の模式図⁴⁾。

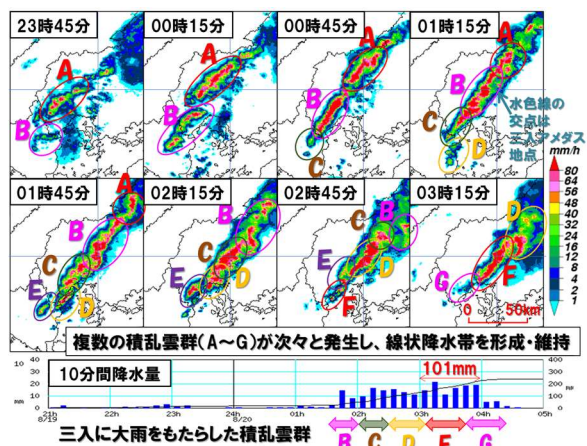


図-7 (上図) 2014年8月19日23時45分～20日03時15分(30分毎)の降水強度分布(mm/h)。(下図)8月19日21時～20日05時の広島市三入アメダス地点の10分降水量(棒グラフ)と積算降水量(折れ線グラフ)の時系列⁴⁾。

乱雲が進行方向の上流側(逆側)で次々と発生して、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から、BB型形成であることが確認できる。また、2つの積乱雲群AとBが連なっているように、複数の積乱雲群が連なることで線状降水帯が形成されており、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(下図)。

次に、200mmを超える大雨に至った要因について、線状降水帯の維持過程から説明する。30分毎の降水強度分布(図-7)をみると、複数の積乱雲群(A～G)が約30分

毎に山口県と広島県の県境付近で次々と発生し、北東に移動しながら南西から北東方向に線状に伸び、それらが連なることで長さ約100kmの線状降水帯を形成・維持していたことがわかる。このように積乱雲群もその進行方向の上流側(逆側)で次々と発生し、積乱雲群のBB型形成で線状降水帯を構成している。すなわち積乱雲から線状の積乱雲群、積乱雲群から線状降水帯の2つの発生過程はどちらもBB型形成である。

ここで、200mm以上の降水量が観測された広島市三入アメダス地点(図-7の水色線の交点)での雨の降り方を見てみる。10分降水量の時系列(下図)をみると、次々と発生した5つの積乱雲群(B・C・D・F・G)が三入上空を通過して、それぞれの積乱雲群が20～30分の間に10分降水量10～20mmの降水をもたらし、途切れることなく強雨が持続していることがわかる。このように、積乱雲群が次々と発生して線状降水帯が停滞したことで大雨に繋がった。

5. 線状降水帯の予測可能性

前章で紹介した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るかを示す。図-8は、水平解像度5km(気象庁メソモデルに対応)、2km(気象庁局地モデルに対応)、1kmおよび250mの数値モデルが予測した2014年8月20日4時の前3時間降水量分布である(以降、水平解像度5kmの数値モデルを5kmモデルのように記述する)。5kmモデルでは、線状の降水域の予測も不十分な上、最大降水量が32mm/3h程度であり、この資

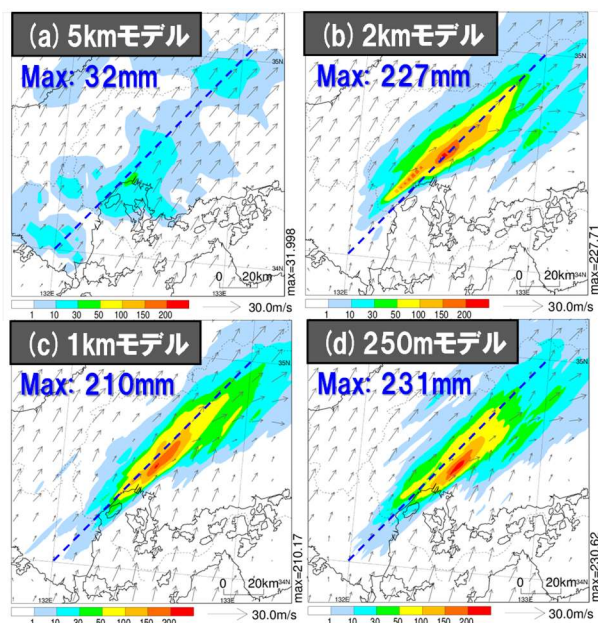


図-8 (a) 2014年8月20日4時までの水平解像度(a)5km、(b)2km、(c)1kmと(d)250mの数値モデルが予測した3時間積算降水量分布(初期値:19日18時)⁴⁾

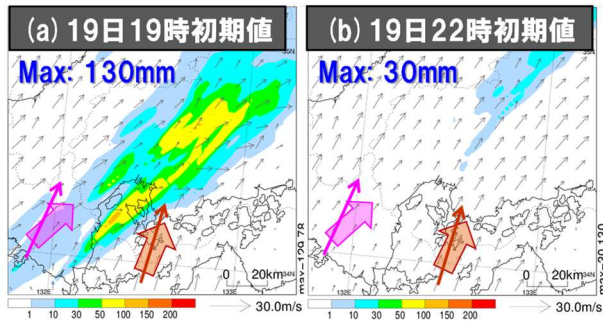


図-9 図-8bと同じ、ただし初期値は(a)19日19時と(b)19日22時初期値。太い矢印は予想風向で、細い矢印は19日18時初期値の予想結果。

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にずれているものの、実況(図-5右図)とほぼ同じ最大降水量をもつ線状降水帯を見事に予測することができている。局地モデルは、予報結果が初期値の1時間後に利用できるように運用されているので、8月19日19時過ぎ(大雨発生の6時間前)には“予報結果を信用すれば”大雨を予測できていたことになる。ここでは、現業運用されている数値モデルの予測結果を予報結果とよぶことにする。1 km や 250 m モデルではより実況に近い降水量分布が予想されているが、本ケースでは 2 km モデルを用いることで線状降水帯による大雨の予測は可能である。

“予報結果を信用すれば”と前述した。これは、この予測を導いた初期値が最適だったためで、本事例では初期値が新しくなるにしたがって予報結果がかなり変わっていた。一例として、1時間後(19日19時)の初期値を用いた 2 km モデルの予測結果を図-9aに示す。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になると、予測降水量はさらに減っていた(図-9b)。このように初期値に存在する僅かな違いが予報結果(風向の差など)に大きく影響する。1つの予報結果だけで、警報を出すかどうかを判断する難しさがここにある。このように下層風の僅かなずれが線状降水帯の予測に影響することは、2004年福井豪雨の再現実験でも指摘されている¹⁶⁾。

6. 線状降水帯が発生しやすい条件

線状降水帯が発生するためには、第4章で述べたように、繰り返し積乱雲が発生・発達して、同じ場所で強雨が続き続ける必要がある。そのためには、まず大雨のもとになる、大量の水蒸気が継続して大気下層に流入することが線状降水帯の発生しやすい条件①になる(図-10)。大量の水蒸気の流入量は水平風速と水蒸気量の積であり、単に風速が大きいだけでは必ずしも積乱雲は発生しない。積乱雲が発

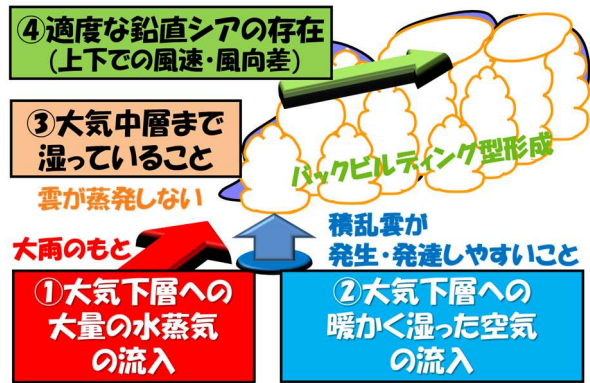


図-10 線状降水帯が発生しやすい条件

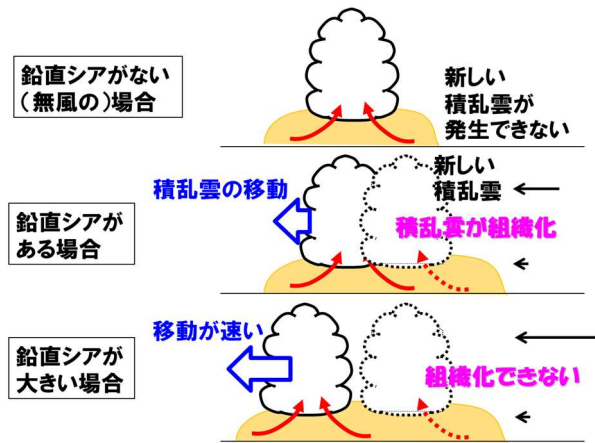


図-11 積乱雲の組織化と鉛直シアの関係

生・発達するためには、流入する空気が暖かく湿っていることが必要であり、それが条件②となる。また、積乱雲は上空に向かって発達していくが、大気中層が乾燥していると雲が蒸発してしまい、積乱雲の発達が抑制されることになる。背の高い積乱雲が発達するためには大気中層が湿っている必要があり、これが条件③となる。

図-6で示したように、線状降水帯は複数の積乱雲によって構成・組織化されている。この組織化には適度な鉛直シア(大気下層と上空の風速・風向差)が必要であり、この鉛直シアによって、BB型形成の線状降水帯が作り出される。この適度な鉛直シアの存在が条件④である。図-11を用いて、鉛直シアの役割を簡単に説明する。鉛直シアがない、無風の場合では、一つ積乱雲が発生するとその周囲の水蒸気の多くを降水に変え、積乱雲が繰り返し発生できない。逆に鉛直シアが大きい、大気下層に比べて上空の風速が相当大きい場合では、発達した積乱雲の移動が大きくなり、次々と積乱雲が発生しても既存の積乱雲と組織化することができない。以上から、積乱雲が組織化するには適度な鉛直シアが必要であることになる。

線状降水帯が発生しやすい条件としては、数百 km スケールでみて、上空が上昇流場であることや、大気中層に暖かい空気の流入がないことなどの条件も見出されている

18). これらの条件と、上述の4つの条件と合わせて、線状降水帯を診断的に予測するための6条件^{17), 18)}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. 大雨時の線状降水帯の寄与率

平成29年7月九州北部豪雨、令和2年7月豪雨、と2021年8月11日～14日の大雨時の期間降水量に対する線状降水帯の寄与率を図-12に示す。寄与率は線状降水帯による降水量/大雨時の期間降水量で算出した。線状降水帯の抽出は気象庁が「顕著な大雨に関する情報」を発表する際の条件ではなく、付録に記載した19)、20)の論文の方法による。平成29年7月九州北部豪雨では、2つの線状降水帯が抽出され、それらの寄与率は70%を超え、線状降水帯主体の集中豪雨事例であったことがわかる。令和2年7月豪雨では、9つの線状降水帯が九州に抽出され、広範囲で大雨になったにもかかわらず寄与率は30～70%と高く、線状降水帯が大きく寄与していた。

一方、2021年8月11日～14日の大雨では、九州北部に7つと東海地方に1つ抽出された線状降水帯の寄与率は最大30%強である。この寄与率は上述の2つの豪雨事例での値に比べて小さく、2021年8月の記録的な大雨は停滞前線による長雨が主体であった。ただ、線状降水帯発生とはほぼ同時にして特別警報が発表されるなど、災害に結び付く要因になることが多いので安心はできない。また、国土技術政策総合研究所が行った土砂災害をもたらした集中豪雨事例の調査では、線状降水帯によって半数以上の事例が引き起こされ、1事例当たりの人的被害は線状降水帯によるものがそうでないものに比べて3～4倍多いことが示されている。

8. おわりに

線状降水帯は第2章で説明したように、2000年以降に集中豪雨に関わる基礎研究によって生み出された防災用語である。本報告のおわりとして、気象庁のホームページにある専門家向け資料集からダウンロードできる教科書²¹⁾の中で、線状降水帯の説明の注釈として記載されている内容を下に転記させていただく。

「集中豪雨と同様に、線状降水帯の統一的な定義はないが、1時間～数時間の積算降水量分布で明瞭に認識できるものである。“線状”と“帯”という同意義的な言葉が繰り返されており、違和感を持たれるかもしれないが、上述のように限定された降雨域のイメージを一般の方に持ってもらい、防災に役立ててもらいたいという思いが込められている。」

付録（線状降水帯の抽出条件）

19)、20)の論文の抽出条件と気象庁が「顕著な大雨に関する情報」を発表する条件をそれぞれ**太字**と**斜字**で示す。細字は共通条件。なお、第3章で紹介した線状降水帯の統計的研究^{4), 8)}では下記と異なる条件で抽出している。

- ① 解析雨量(5kmメッシュ)の前3時間積算降水量が**80 mm(100 mm)**以上の分布域の面積が**1000～15000 km²(500 km²以上)**
- ② **①が5時間以上ほぼ同じ位置に停滞**
- ③ ①の形状が線状(長軸・短軸比2.5以上)
- ④ ①の領域内の前3時間積算降水量最大値が**100 mm(150 mm)**以上
- ⑤ ①の領域内の土砂キキクル(大雨警報(土砂災害)の危険度分布)において土砂災害警戒情報の基準を実況で超過(かつ大雨特別警報の土壌雨量指数基準値への到達割合8割以上)又は洪水キキクル(洪水警報の危険度分布)において警報基準を大きく超過した基準を実況で超過

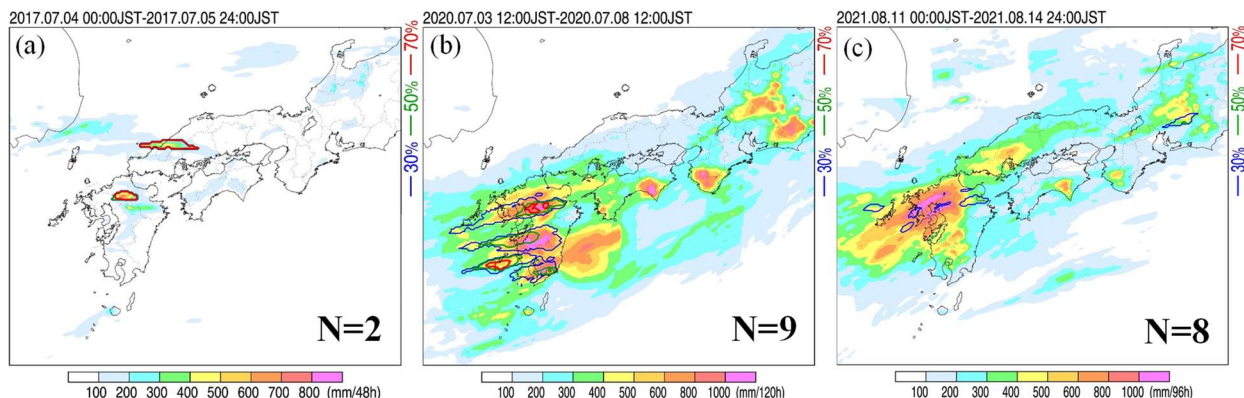


図-12 (a) 平成29年(2017年)7月九州北部豪雨、(b) 令和2年(2020年)7月豪雨、と(c) 2021年8月11日～14日の大雨時の期間降水量(カラー)に対する線状降水帯の寄与率(等値線)。図中の数値は抽出された線状降水帯の数。廣川康隆氏(気象研究所)作成。

謝辞:本報告に際しては、気象庁気象研究所の廣川康隆氏に資料を提供していただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 吉崎正憲, 加藤輝之: 豪雨・豪雪の気象学, 朝倉書店, 187pp, 2007.
- 2) 津口裕茂: 線状降水帯, 天気, 63, 727-729, 2016.
- 3) 加藤輝之, 集中豪雨と線状降水帯, 朝倉書店, 168pp, 2022.
- 4) Kato, T.: Quasi-stationary band-shaped precipitation systems, named “senjo-kousuitai”, causing localized heavy rainfall in Japan, J. Meteor. Soc. Japan, 98, 485-509, 2020.
- 5) Jeong, J.-H., D.-I. Lee, C.-C. Wang, and I.-S. Han: Characteristics of mesoscale convective-system-produced extreme rainfall over southeastern South Korea: 7 July 2009, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 16, 927-939, 2016.
- 6) 加藤輝之, 手柴充博, 梅本泰子, 橋口浩之, 柴垣佳明, 吉崎正憲, 金田幸恵: 地形性メソスケール降水系の研究, 気象研究ノート, 208, 97-150, 2005.
- 7) 京都府砂防協会: 京都府の昭和28年災害. 京都府砂防協会, 192pp, 2004.
- 8) 津口裕茂, 加藤輝之: 集中豪雨事例の客観的な抽出とその特性・特徴に関する統計析, 天気, 61, 455-469, 2014.
- 9) 北島尚子: PRE (Predecessor Rain Event) . 天気, 59, 171-172, 2014.
- 10) 加藤輝之: 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, 2022.
- 11) 気象庁: 気候変動監視レポート
(<https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/monitor/index.html>, 2022.9.11 閲覧)
- 12) Bluestein, H. B., and M. H. Jain: Formation of mesoscale lines of precipitation: Severe squall lines in Oklahoma during the spring. J. Atmos. Sci., 42, 1711-1732, 1985.
- 13) 気象研究所報道発表資料: 平成25年台風第26号にともなう伊豆大島の大雨の発生要因～局地前線の停滞と伊豆大島の地形による強化～, 2013. (https://www.mri-jma.go.jp/Topics/H25/press/20131202/press20131202_T1326heavyrainfall.pdf, 2022.9.11 閲覧)
- 14) 加藤輝之: 湿舌, 天気, 57, 917-918, 2010.
- 15) 気象研究所報道発表資料: 平成26年8月20日の広島市での大雨の発生要因～線状降水帯の停滞と豊後水道での水蒸気の蓄積～, 2014. (https://www.mri-jma.go.jp/Topics/H26/260909/Press_140820hiroshima_heavyrainfall.pdf, 2022.9.11 閲覧)
- 16) Kato, T., and K. Aramami: Formation factors of 2004 Niigata-Fukushima and Fukui heavy rainfalls and problems in the predictions using a cloud-resolving model, SOLA, 1, 1-4, 2004.
- 17) 加藤輝之: 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, 2015.
(<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/yohkens/20/chapter6.pdf>, 2022.9.11 閲覧)
- 18) 加藤輝之: 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, 2016.
(<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/yohkens/21/chapter2.pdf>, 2022.9.11 閲覧)
- 19) Hirockawa, Y., T. Kato, H. Tsuguti, and N. Seino: Identification and classification of heavy rainfall areas and their characteristic features in Japan. J. Meteor. Soc. Japan, 98, 835-857, 2020.
- 20) Hirockawa, Y., T. Kato, K. Araki, and W. Mashiko: Characteristics of an extreme rainfall event in Kyushu district, wouthwestern Japan in early July 2020, SOLA, 16, 265-270, 2020.
- 21) 加藤輝之: 図解説 中小規模気象学, 気象庁, 316pp, 2017. (https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/expert/pdf/textbook_meso_v2.1.pdf, 2022.9.11 閲覧)

(2022. 10. 21 受付)