

メカニズム解明に向けた 線状対流系過去事例群の統合的物理解析

Integrated Physical Analysis of Past Line-shaped Convective Systems for Mechanisms Investigation

仲ゆかり・福田果奈⁽¹⁾・中北英一

Yukari NAKA, Kana FUKUDA⁽¹⁾, and Eiichi NAKAKITA

(1) 京都大学大学院工学研究科

(1) Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

The purpose of our research is to investigate the environmental conditions for the occurrence and development of line-shaped convective systems associated with stagnant Baiu front by comprehensively analyzing past events and considering spatio-temporal scale. As a result, type-A, which is large scale, long duration, and occurs near convergence of Baiu front, occurs due to large convergence of the front, so the environmental condition of type-A is not necessarily idealized. In contrast, type-B, which is small scale, short duration, and occurs far from Baiu front, occurs at more limited and idealized environment than type-A. This strict condition contributes to occurrence and self-organized development of the first convective cloud. We also show that requirements for the first cloud are convective instable, large CAPE and vertically big change of direction of wind. Moreover, our results bring that the constant ratio of buoyancy to turbulence is important for occurrence and development.

キーワード: 線状対流系, 時空間特性, 梅雨前線, 自己組織性

Keywords: line-shaped convective system, spatio-temporal scale, Baiu front, self-organization

1. はじめに

1.1 研究背景

我が国の梅雨期において、停滞前線に伴う線状のメソ対流系（以下、線状対流系）に起因する災害が多発している。また、その被害が年々甚大なものとなっている。令和2年7月豪雨では、空間スケールの大きな線状対流系が発生した。熊本県の一級河川である球磨川が氾濫し、その流域において堤防決壊や住家の浸水が発生し、人的被害も確認された。非常に局所的な線状対流系が確認された平成29年7月九

州北部豪雨では、福岡県及び大分県で大雨が降り、国土交通省九州地方整備局内で初めて「大雨特別警報」が発令された。また、筑後川を含む九州北部の3水系では、氾濫危険水位を超える洪水が発生した。さらに、平成26年8月豪雨においても局所的なスケールの線状対流系が発生した。その結果、広島県内で大規模な土砂災害が起こり、住家の倒壊に加えて死者も出た。このように、顕著な大雨事例及び大規模な災害が線状対流系によって引き起こされている。線状対流系とは、次々と発生する積乱雲が線状に列を成し、組織化した積乱雲群として、数時間にお

たつてほぼ同じ場所に停滞することによって形成される強い降雨域を指す。その長さは50kmから300km程度、幅は20kmから50km程度であり、メソβスケールに分類される現象である。

また、線状対流系の中には、時空間特性と梅雨前線による収束域と雨域との位置関係に基づいて、前線付随型のAタイプと、孤立局所型のBタイプに分類できることが明らかとなっている（小坂田ら，2020）。AタイプはFig.1(a)で示すように、梅雨前線へと向かう大規模な収束付近で発生し、比較的空間スケールが大きく、半日から一日継続するような豪雨である。一方、BタイプはFig.1(b)のように、梅雨前線から南へ約100km離れた位置に発生し、局所的で空間スケールが小さく、数時間にわたって雨をもたらす豪雨である。このように、豪雨の時空間スケールが異なることから、発生する時刻や場所はもちろん、例えばAタイプでは大河川の氾濫、Bタイプでは突発的で局所的な土砂災害のように、発生する災害の特徴も異なる。そのため、豪雨の時空間スケールも、災害の被害を抑える防災・減災の観点において重要である。

また、予測の観点において、Bタイプは前線から離れた位置で発生することから、前線近くで発生するAタイプよりも予測が困難な可能性が示唆される。そのため、予測精度向上のためにも、各タイプの線状対流系の発生・発達メカニズムを解明することは喫緊の課題であると言える。しかし、線状対流系の発生条件や強化・維持のメカニズムは、発生に必要な水蒸気量、大気的不安定度、各高度の風などの要素が複雑に結びついているため、未解明な点が多い。まして、AタイプやBタイプにおけるメカニズムの違いは明らかになっていない。

1.2 既往研究の概要

線状対流系に関する既往研究は多数存在する。特に、発生・発達における環境場の研究として、中北ら（2000）は1998年に福島県と栃木県の県境である那須地域で発生した線状対流系による集中豪雨を対象に、豪雨の発生・伝播の特徴を大気場の環境から推定される力学的指標を用いて解析した。力学的指標の水平分布図から、線状対流系の発生位置あたり収束があり、周囲よりもCAPE（Convective Available Potential Energy）が相対的に高く、パルクリチャードソン数（以下、BRN）が30前後の値であることが示された。CAPEは大気的不安定度を、BRNは浮力による不安定と風のシアの比を表す指標である。また、鉛直シアが線状対流系の維持・発達域で強くなるということも示された。鉛直シアについては、積乱雲群の形成や形状にも関係しているこ

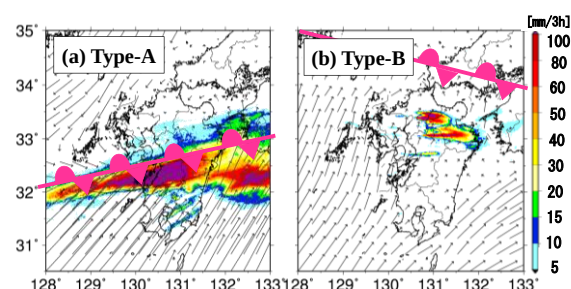


Fig.1 Spatial distribution of 3-hour rainfall obtained from Rader-AMeDAS: (a) example of type-A, heavy rainfall in July 2020, (b) example of type-B, heavy rainfall in northern Kyushu in July 2017. Pink line shows Baiu front, and black solid arrows show ground surface water vapor flux based on MSM.

とも、明らかとなっている（加藤，2015；加藤，2016；瀬古，2010；Seko and Nakamura，2005）。Unuma and Takemi（2016）は、線状対流系を含む準停滞性降水システム発生時の環境を統計的に明らかにするために、環境場の解析を行った。その結果、降水システムの発達において、対流圏全体が湿潤であることや、対流不安定であること、鉛直シアが強いことの重要性が示された。加えて、降水システム発生時には、CAPEが大きくなっており、より不安定な状態になることも示された。

また、時空間特性に着目した研究として、小坂田ら（2020）は、A・Bタイプの分類を、5km解像度の気候モデルであるRCM05のデータから得た将来の梅雨豪雨事例と、国土交通省のXRAIN（eXtended Radar Information Network）から得た過去の梅雨豪雨事例に対して行い、梅雨豪雨の強雨継続時間と積算雨量についての解析を行った。その結果、過去事例と将来事例に共通して、Aタイプは長時間継続すること、Bタイプは堰差雨量が多い傾向にあることが示された。加えて、将来気候においては、これらのタイプの降雨強度が増すことも示された。この研究によって、異なる時空間特性を持つ線状対流系を区別して扱うことの重要性が示された。しかし、線状対流系におけるタイプ間の時空間スケールや前線との違いがある理由については解明されておらず、今後着目すべき観点と言える。

1.3 本研究の目的

前節で示したように、線状対流系の発生・発達の環境場に関する研究は精力的に行われており、線状対流系が発生・発達する環境の必要条件は明らかになりつつある。しかし、線状対流系は1.1節でも述べたように予測が難しく、線状対流系に起因する大災害が毎年のように起こっているのが現状である。

加えて、小坂田ら（2020）によって、将来気候において線状対流系の強度が増すと示されていることから、現象そのもののメカニズム解明の重要度はますます高くなっている。

そこで本研究では、上記の研究背景及びこれまでの研究の流れを踏まえ、停滞前線性の線状対流系において、前線付随型のAタイプと孤立局所型のBタイプの違いに着目した。ただし、停滞前線に伴い、自己組織的にも発達し得るような孤立した一つのシステムとしての線状対流系事例に着目するため、台風などの他の気象現象の影響を受けている雨域や、単なる形状が線状になった雨域については研究対象から除外した。そして、XRAIN運用開始前の時期を含めた過去の事例を網羅的に解析し、それぞれの豪雨の発生場所、発生・発達環境場の違いを明らかにして、線状対流系のメカニズムの解明に資することを目的とする。

2. 解析手法

2.1 使用データ

線状対流系の過去事例群の解析にあたり、気象庁の解析雨量のデータを用いた。解析雨量とは、気象レーダーによる観測データと地上の雨量計のデータを組み合わせて、1時間の降水量分布を解析したデータであり、空間解像度と出力時間間隔の発展についてTable 1で示す。ただし、本研究においては、最も解像度の高い2006年以降のデータを使用し、データの抽出の間隔を1時間とした。

A・Bタイプの分類や環境場指標の水平分布の解析には、水平解像度が5km、三次元データのみが10kmである気象庁のメソ数値予報モデル（以下、MSM）の解析値を用いた。MSMは、日本とその近海を計算領域とし、1日から2日程度先までの大雨や暴風などの災害をもたらす現象を予測するために運用されている。MSM解析値の予報サイクルの時間間隔が3時間毎であるのに対し、本研究における解析雨量の抽出間隔は1時間であり、時間の間隔にずれが生じている。そこで、本研究においては、各事例における発生時直前のMSM解析値が、豪雨発生時の大気場を表現しているという仮定の下、例えば、解析雨量で12時、13時、14時に抽出された事例については、いずれも12時のMSM解析値を用いて大気場の解析を行った。

加えて、大気鉛直構造の解析においては、気象庁55年長期再解析（以下、JRA-55）のデータを用いた。JRA-55とは、気象庁が2回目の長期再解析として、より精密化された数値予報システムと過去の観測データを使用し、新たに整備して作成されたデ

Table 1 Spatial resolution and output time interval in Radar-AMeDAS

Data Period	Spatial resolution	Output time interval
1988.4-2001.3	5km	1hour
2001.4-2003.5	2.5km	1hour
2003.6-2005.12	2.5km	30minutes
2006.1-	1km	30minutes

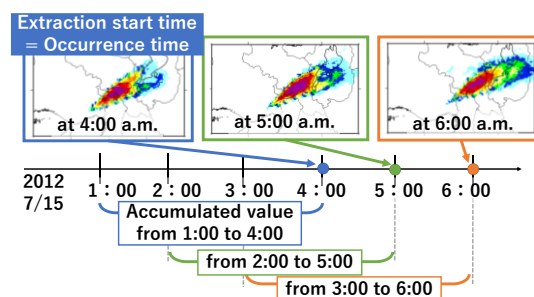


Fig.2 Extraction image at hourly intervals for previous 3-hour rainfall based on Radar-AMeDAS in heavy rainfall in Kameoka, Kyoto, in 2012.

ータセットである。本研究で用いた等圧面データは6時間前のもので、空間解像度は1.25度というように、MSMよりも粗い。しかし、配信データが16層分であるMSMよりも多い、1,000hPaから100hPaまでの27層分の鉛直層データを利用できることから、大気鉛直構造の解析に用いた。

2.2 楕円雨域の抽出・分類の流れ

(1) 楕円雨域の抽出手法

まず、解析雨量のデータを用いて、1時間ごとに前3時間積算降水量に対して抽出を行った。2012年京都府亀岡豪雨における抽出例をFig.2に示す。また、本研究では、2006年から2020年までの15年間における6月から8月を抽出対象期間と定めた。

雨域の抽出では、辻本ら（2017）の楕円による近似を参考に、線状対流系の長さ、幅、傾きなどの形状特性を、楕円で近似した場合の長軸、短軸、方位角によって定量化した。線状対流系を構成する各メッシュの座標から、東西方向の分散 σ_x と南北方向の分散 σ_y 、及び東西方向と南北方向の共分散 σ_{xy} を算出し、式(1)から式(5)によって、長軸 l 、短軸 s 、回転角 θ を得る。ただし、式(3)及び式(4)の C は95%確率長円を表す2.448を用いている。線状対流系抽出と楕円近似のイメージをFig.3で示す。

また、本研究では、辻本ら（2017）のように雨域の移動速度や停滞の定量的な閾値を設けず、Table 2で示す降雨の閾値を楕円の抽出基準として楕円状の雨域（以下、楕円雨域）を全て抽出した。

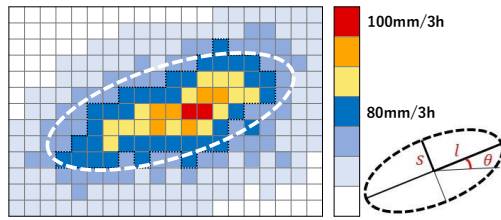


Fig.3 Image of line-shaped convective system extraction and quantification by elliptical approximation.

$$\sigma_l = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + \sigma_{xy}^2}}{2}, \quad (1)$$

$$\sigma_s = \frac{\sigma_x + \sigma_y - \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + \sigma_{xy}^2}}{2}, \quad (2)$$

$$l = C\sqrt{\sigma_l}, \quad (3)$$

$$s = C\sqrt{\sigma_s}, \quad (4)$$

$$\tan\theta = \frac{\sigma_l - \sigma_x}{\sigma_{xy}}. \quad (5)$$

さらに、次の三つの場合を1事例と定義した。一つ目は、Fig.2のように、1時刻毎の楕円雨域が全て連続して抽出されていた場合である。二つ目は、1時刻毎の楕円雨域が途中1時刻分のみ欠けているものの、抽出の欠けた時刻の前後1時間において、解析雨量の1時間降水量の30分毎の分布を確認し、同じ積乱雲群での雨域であると目視にて判断できたものである。三つ目は、1時刻分のみ楕円雨域が抽出されていたものの、解析雨量の1時間降水量の分布の30分毎の変化において、目視にて定性的に雨域の停滞性が確認できたものである。本研究において、豪雨継続時間は、いずれの場合においても、楕円雨域の抽出開始時刻と抽出時刻終了の差と定義した。Fig.2においては、抽出開始時刻が4時、抽出終了時刻が6時であることから、継続時間は2時間である。

(2) A・Bタイプへの分類

前項で述べた楕円雨域抽出後、前線位置を推定し、前線と楕円雨域との位置関係を踏まえた上で、豪雨の発生が前線の収束起因かを目視にて確認するという流れで、各事例を前線付随型のAタイプと孤立局所型のBタイプに分類した。

前線位置の推定には、各日午前9時における気象庁の過去の地上天気図に加えて、MSMを用いて作成した地表面水蒸気フラックスの空間分布図と、850hPa面における相当温位の空間分布図を使用した。これら二つの空間分布図を使用した理由は、梅雨前線の収束域は、地表面水蒸気フラックスの収束域及び850hPa面における相当温位の傾度が大きい領域と対応しており、3時間間隔で得られるMSM解析値か

Table 2 Criteria for rain area and ellipse extraction in ellipse approximation

Rainfall thresholds
- Grid > 80mm/3h - Maximum > 100mm/3h
Ellipse criteria
200km² < rain area < 12,500km² - Major axis > 35km - Axial ratio (l/s) > 2.5

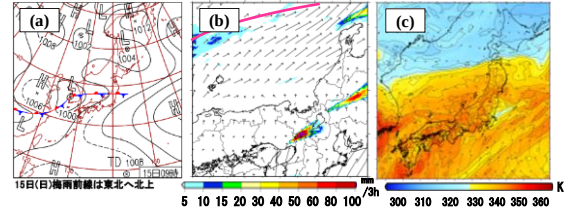


Fig.4 In heavy rainfall in Kameoka, Kyoto, in 2012, (a) weather map at 9:00 a.m., (b) spatial distribution of 3-hour rainfall obtained from Rader-AMeDAS, ground surface water vapor flux based on MSM (black arrows) and estimated front position (c) spatial distribution of equivalent potential temperature at 850hPa and contours per 4K (black lines) based on MSM.

ら作成した図も併せて用いることで、より正確な前線の収束域を推定できるからである。また、午前9時が抽出開始時刻の事例については、過去の地上天気図上に示された前線位置の正確さを保証するために、上記二図も併せて用いている。

Fig.4はBタイプへの分類例を示している。Fig.4(b)及び(c)からは、地表面水蒸気フラックスの収束域や相当温位の傾度が大きい領域の判断が難しいものの、Fig.4(a)より前線が石川県能登半島の北上に位置していることを踏まえ、Fig.4(b)で示した桃色実線を前線の位置と推定した。そして、雨域が前線による収束帯上なく、南へ離れたところに位置していることから、Bタイプに分類した。ただし、前項で述べたように、抽出段階においては、楕円状の雨域が全て含まれているため、梅雨前線のような停滞前線による降雨以外の事例も含まれている。そこで、台風による事例や前線を伴わない事例については、目視にて除外するという形をとった。

2.3 発生・発達環境場の解析の流れ

(1) 収束に関する解析手法

線状対流系の各タイプにおける地表面風収束の違いを確認するために、地表面風速のMSM解析値を用いて、発生時刻を楕円の抽出初期時刻と見なした上で、雨域及び地表面風の空間分布を、楕円雨域の中心を原点として、平均化操作を施した。

Table 3 Classification of CAPE and BRN, respectively

Five-level classification of CAPE	
Category-1	Less than 750 J/kg
Category-2	750-1,250 J/kg
Category-3	1,250-1,750 J/kg
Category-4	1,750-2,250 J/kg
Category-5	More than 2,250J/kg
Three-level classification of BRN	
○	Almost equal to 32
△	Around 32 and not classify “×”
×	Not equal to 32 clearly

(2) 大気の鉛直構造の解析手法

次に、各タイプの鉛直構造の違いを確認するため、水蒸気混合比及び相当温位の鉛直プロファイルを作成した。水蒸気混合比とは水蒸気の密度と乾燥大気の密度の比を表す。相当温位の高度変化は、対流不安定な層であるかの判断に用いられる。対流不安定とは、飽和していないときには安定であった空気が、層全体が上昇して飽和に達した際に、大気中に内在していた不安定が顕在化した状態を指す。対流不安定な状態下では、積乱雲などが発達しやすい。

本解析は、2006年から2019年までの14年間のJRA-55のデータにおいて、各事例の発生時刻における楕円中心の最近傍グリッドのデータを使用した。また、対流不安定の判断には、925hPa面から700hPa面の層における $d\theta_e/dz$ の値を用いた。

(3) 環境場指標の水平分布の解析手法

本研究では、環境場指標としてCAPEとBRN (Bulk Richardson Number) を用いた。CAPEとは、大気的不安定さを表す指標である。上層への寒気の流入や下層の水蒸気量の増加によって値が大きくなり、値が大きいほどより不安定となる。CAPEは、空気塊がLFC (自由対流高度) からLNB (浮力中立高度) へと上昇していく全ての高度 z に対する温位 $\theta_c(z)$ 、及び周りの大気の不飽和時における温位 $\theta_{env}(z)$ を用いて、式(6)で定義される (Bluestein and Jain, 1985)。一方、BRNとは、浮力と下層と中層の鉛直シアの比を表し、不安定成層下におけるBRNは式(7)で定義される。ただし、高度 z kmにおける風速の成分を、 $\bar{u}_z, \bar{v}_z$ とした。また、BRNの値によって発現する降水システムのタイプへ形状の規定が可能である。15 < BRN < 35はスーパーセル、40 < BRNはマルチセル、そして32程度ではバック形成型になると言われている (Bluestein and Jain, 1985)。日本の線状対流系の多くはバック形成型である (Seko and nakamura, 2005 ; 瀬古, 2010) ことから、本研究では32という値を基準に解析を実施した。

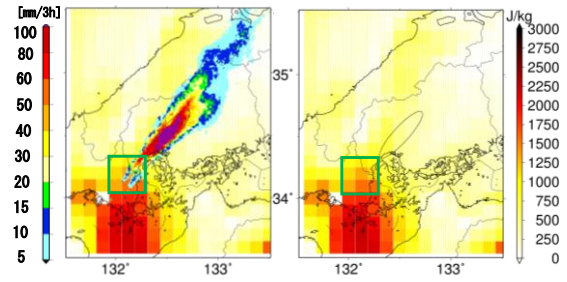


Fig.5 Spatial distribution of CAPE obtained from MSM in heavy rainfall in Hiroshima in August 2014. Left figure is drawn it with 3-hour rainfall based on Rader-AMeDAS. Green square shows estimated occurrence position of heavy rainfall.

$$CAPE = \int_{LFC}^{LNB} g \left(\frac{\theta_c(z) - \theta_{env}(z)}{\theta_{env}(z)} \right) dz, \quad (6)$$

$$BRN = \frac{CAPE}{\frac{1}{2} [(\bar{u}_6 - \bar{u}_{0.5})^2 + (\bar{v}_6 - \bar{v}_{0.5})^2]}. \quad (7)$$

環境場指標の空間分布の傾向を捉えるため、それぞれの環境場指標に対して、MSM解析値を用いて空間分布図を作成した。そして、各事例の抽出初期時刻における線状対流系を構成する積乱雲群で、新たに積乱雲が発生する側の位置 (以下、発生位置) に着目し、環境場指標の値を目視にて確認した。発生位置は、バック形成型かバックサイド形成型という成因の違いを考慮して一意に定めることが難しいため、各事例発生時刻における前3時間積算降水量の空間分布図における雨域の端と風向を基準に目視にて判断することによって、正確性の担保に努めた。その後、Table 3の通りCAPEを5段階、BRNは中北ら (2000) やBluestein and Jain (1985) でも示された32という値を基準に、MSMの時空間解像度及び目視での発生位置特定の限界を踏まえ、ファジーさを持たせた3段階に分類した。特に、“△”へ分類した事例は、具体的に以下の三つである。一つ目は、32と目視で確認できるものの、MSM解析値の予報サイクルの出力間隔の関係で、実際の空間分布との間にずれが生じたと考えられる事例である。二つ目は、32と目視で確認できるものの、MSMの空間解像度の問題で、実際の空間分布との間にずれが生じたと考えられる事例である。三つ目は、目視による値の判断結果が25や40といった32に近い値が発生位置と考えた領域内全体に広がっていた事例である。

Fig.5は広島県にて発生した平成26年8月豪雨での前3時間積算降水量及びCAPEの空間分布図である。この事例において、線状対流系の発生位置は、Fig.5中の緑色の四角で示した山口県あたりであると考え

られることから、発生位置領域内でのCAPEの大きさを読み取ると、分類3相当となった。全事例に対して同様の手順でCAPE及びBRNの空間分布図から値の大きさを読み取り、分類した。

さらに、線状対流系の各タイプにおける環境場指標の平均的な空間分布を確認するために、各々の指標の空間分布を、楕円雨域の中心を原点として、平均化操作を施した。

(4) 風の変化に関する解析手法

風の鉛直シアとは、2つの高度における風ベクトルの差のことである。前項で示したBRNの定義式である式(7)の分母に下層と中層における鉛直シアの項が含まれていることから、鉛直シアが線状対流系の発生・発達環境場に与える影響を考えるために、JRA-55のデータを用いてホドグラフを描いた。ただし、本解析で用いたデータも2.3節(2)項のものと同様に、2006年から2019年までの14年間に於いて、各事例の発生時刻における楕円中心の最近傍グリッドのデータを使用した。

次に、ホドグラフ作成時に用いたデータをもとに、中北ら(2000)やBluestein and Jain(1985)でも示されたBRNが32となることの検証を実施した。検証にあたり、両タイプにおいてBRNを32と仮定し、鉛直方向の風速情報からCAPEの値を算出し、環境場の水平分布との整合性を確認した。前項で示したCAPEの水平分布の解析結果との矛盾が見られた場合は、BRNが32という仮定が間違いであるという結論を導くという流れをとった。式(7)においては、0.5kmと6kmという高度間での鉛直シアを考えていることから、CAPEの算出においては、それらの高度に対応している950hPa(高度約0.5km)及び500hPa(高度約5.8km)面での風速を用いた。

3. 抽出・分類の結果及び統計的解析

3.1 抽出・分類の結果

抽出と分類の結果、2006年から2020年の6月から8月において、Aタイプが174事例、Bタイプが68事例となった。また、Fig.6に各事例の発生時刻における楕円雨域のプロットを示す。A・Bタイプ共に九州地方での発生が多いことが明らかである。加えて、Aタイプは太平洋側・日本海側ともに発生しており、Bタイプは主に太平洋側で発生していることがわかる。特にBタイプについては、四国地方や東海地方で多く発生しているものの、鹿児島県を含む九州地方の南側ではあまり発生していないことがわかる。以上より、Aタイプは全国的に発生するのに対し、

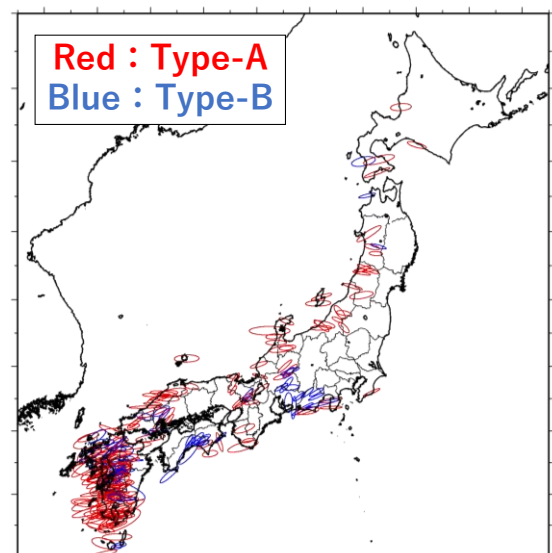


Fig.6 Map of Japan plotted occurrence location detected by ellipse approximation. Red represents type-A and blue represents type-B, respectively.

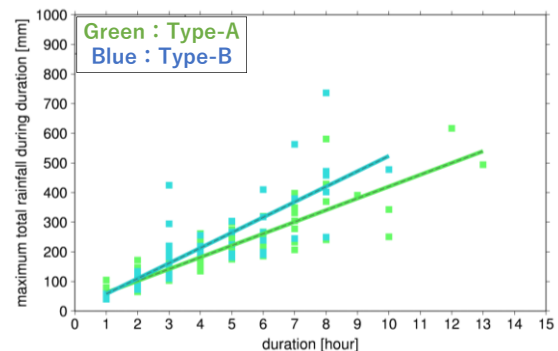


Fig.7 Relationship between duration and accumulated rainfall. x-axis shows duration time and y-axis shows accumulated rainfall. Green represents type-A and blue represents type-B, respectively.

Bタイプは太平洋側の限られた地域で発生すると言える。Bタイプが限られた地域で発生する一要因としては、南方からの水蒸気が、前線の収束域に到達する前に地形などの影響で小さな収束を生じて、Bタイプ発生のきっかけになった可能性が考えられる。このような発生における地域性については、今後注目すべき観点の一つと言える。

3.2 強雨継続時間と積算雨量の解析

小坂田ら(2020)が着目していた強雨継続時間と積算雨量の関係について、Fig.7で示す。ただし、本解析においてのみ、継続時間が0時間となる1時刻分のみ楕円雨域が抽出された事例を除外した結果を示す。Aタイプは回帰直線の傾きが小さいことに加え

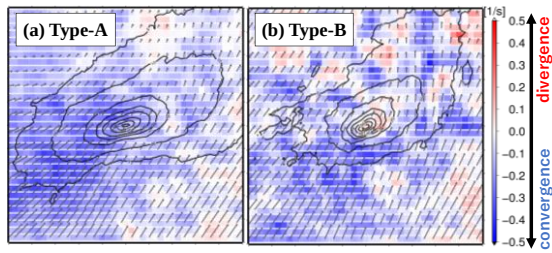


Fig.8 Spatial distribution of average convergence of ground surface wind obtained from MSM (a) in type-A and (b) in type-B. arrows represent direction of wind and contours represent average 3-hour rainfall area based on Radar-AMeDAS.

て、その長さがより長い。一方Bタイプは、傾きは大きいものの、長さが短い。すなわち、Aタイプは、積算雨量は少ないものの継続時間が長く、Bタイプは、継続時間は短いものの積算雨量が多く強度が大きいと言える。したがって、小坂田ら（2020）の結果との整合性があると確認され、目視による線状対流系の分類であっても、現象の特徴を捉えることが可能であると示唆された。

4. 発生・発達環境場の解析結果

4.1 収束に関する解析結果

各タイプの地表面風収束の全事例平均をFig.8に示す。Aタイプは全体的に収束を示す青色の領域が広がっており、特に雨域の南西端で色が濃くなっている。また、風向からも雨域まわりの収束を確認できる。すなわち、Aタイプは幅の広い収束域上に雨域が存在しており、特に雨域の南西端で収束が強いとわかる。一方でBタイプは、収束域と発散域が点在しており、風向からも明確な収束域が見られない。また、風向は南西から北へと吹いていることから、前線の位置が雨域よりも北側であることも読み取れる。これらを踏まえると、Bタイプは前線による大規模な収束が雨域まわりには見られないと言える。

4.2 大気の鉛直構造の解析結果

Fig.9に水蒸気混合比及び相当温位の鉛直プロファイルを示す。ただし、2006年から2019年までの6月から8月にかけての事例数は、Aタイプが158事例、Bタイプが61事例であった。

水蒸気混合比の鉛直プロファイルを見ると、両タイプに共通して、下層でより湿っていると読み取れる。また、Aタイプは高度3,000m前後の中層において、Bタイプよりも湿っていることがわかる。すなわち、Aタイプは中層までより湿潤であり、Bタイ

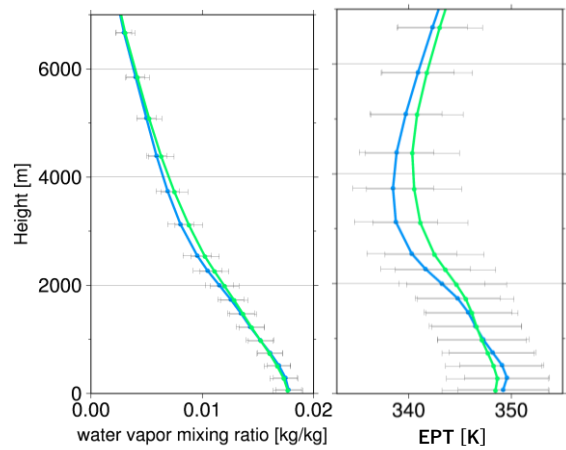
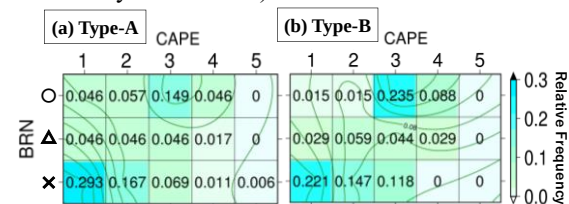


Fig.9 Average vertical profile of (a) water vapor mixing ratio and (b) equivalent potential temperature obtained from JRA-55. x-axis shows each value and y-axis shows height. Green represents type-A and blue represents type-B, respectively.

Table 4 Relative frequency of CAPE and BRN (a) in type-A and (b) in type-B (Solid lines: contours with relative frequencies every 0.04, x-axis: CAPE, y-axis: BRN)



プはAタイプと比較すると、水蒸気が可能に溜まった状態にあると言える。

相当温位の鉛直プロファイルより、両タイプで下層において高度と共に相当温位が現象していると読み取れる。特に、Bタイプにおいて相当温位の変化量が大きく、高度の低下に伴って変化している。従って、下層への水蒸気流入によって両タイプで対流不安定となっており、特にBタイプがより強い対流不安定場であると言える。

4.3 環境場指標の水平分布の解析結果

(1) 環境場指標の水平分布の分類結果

Table 4に発生位置におけるCAPEとBRNの値をTable 3に基づいて分類し、その結果を組み合わせで相対度数で表したものを示す。ただし、相対度数の値を背景色でも表現し、相対度数が0.04毎の等値線を引くことによって、各タイプにおける相対度数の分布の特徴の違い、特に等値線の間隔から分布の集中度合いを表現した。

まず、横軸のCAPEに着目すると、Aタイプは、

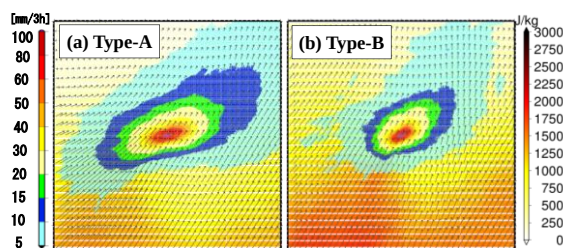


Fig.10 Spatial distribution of average CAPE obtained from MSM, and average 3-hour rainfall area based on Radar-AMeDAS. (a) in type-A and (b) in type-B at occurrence time. Black solid arrows show average ground surface water vapor flux by MSM.

“Category-1”から“Category-3”が全体の9割強であり、特に一番小さい“Category-1”が全体の4割近くを占めた。対するBタイプは，“Category-1”から“Category-3”が全体の9割弱を占めているものの、CAPEが1,500J/kg前後の“Category-3”が全体の4割を占めた。従って、Bタイプの方がAタイプよりも大きいCAPEで発生していると言える。

次に、縦軸のBRNに着目する。“○”に着目すると、Aタイプでの割合よりもBタイプでの割合の方が高い。また、MSMの時空間解像度や発生位置の判断限界を考慮して32に近い値を持つと判断できる“△”の割合も合わせると、Aタイプは半分未満であるのに対し、Bタイプは半分以上を占めた。すなわち、Bタイプの方が、中北ら（2000）やBluestein and Jain（1985）でも示された32という値に近く、線状対流系が発生・発達しやすい環境が実現されていると考えられる。ただし、“△”や“×”に分類した事例には、BRNの値が32よりも小さい事例が約9割を占めていたことを分類時に確認している。

そして、この二つの指標を組み合わせると、両タイプにおいて、“CAPE：Category-1かつBRN：×”及び“CAPE：Category-3かつBRN：○”での相対度数が大きいことが読み取れる。しかし、“BRN：×”は、BRN≧32以外を全て含むカテゴリーであり、同じ相対度数であっても、BRN=32を意味する“○”とは物理的な特徴の限定度合いが異なるため、後者は前者よりも環境場として限定されている。また、前者の分類からは、「CAPEが小さく、BRNが32から外れた環境場」においても線状対流系が発生している可能性が考えられる。しかし、相対度数が高くなった要因として、そのような環境場が存在すること以外に、MSMの時空間解像度が原因で、線状対流系の発生時刻や発生位置における環境場指標の空間分布が正しく捉えることができていない可能性も考えられる。そのため、以降の議論においては、環境場としての限定度合いが高いだけでなく、中北ら

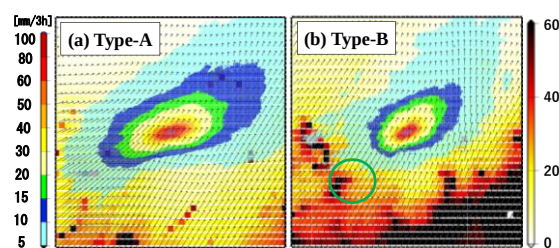


Fig.11 Spatial distribution of average BRN obtained from MSM, and average 3-hour rainfall area based on Radar-AMeDAS. (a) in type-A and (b) in type-B at occurrence time. Black solid arrows show average ground surface water vapor flux by MSM.

（2000）やBluestein and Jain（1985）の研究との関連を考慮できる後者に着目する。前者に分類された事例については、事例を個々に確認して、どのような状況で起こったのかを考察し、解明していくことを今後の課題としていきたい。後者の相対度数が高くなった結果の考察にあたり、“BRN：○”の行に着目する。Aタイプは“Category-3”を中心として、相対度数の分布が“Category-1”から“Category-4”にかけてなだらかに広がりを持つと読み取れる。一方でBタイプは、“Category-3”における背景色が濃く、等値線が密となっていることから、分布の集中が顕著であると言える。すなわち、BタイプはAタイプと比較すると、CAPEが1,500J/kg前後かつBRNがほぼ32という値を持つという限られた環境で発生していることが示唆される。一方でタイプは、Bタイプほど発生環境場の限定度合いが大きくはなく、CAPEが小さい環境やBRNが32ではない環境においても多く発生すると言える。

(2) 環境場指標の水平分布の全事例平均結果

Fig.10にCAPE、Fig.11にBRNを全事例平均した空間分布図を示す。空間分布図内には、前3時間積算降水量の雨域及び地表面水蒸気フラックスも併せて示している。

Fig.10及びFig.11において、雨域については、Aタイプの方がBタイプよりも広いという特徴が見られ、Aタイプの方が空間スケールの大きい豪雨であることが確認できる。また、地表面水蒸気フラックスに着目すると、Aタイプでは雨域に対して南側からの流入が激しいことがわかる。一方Bタイプは、南側から雨域を通り越す矢印の様子が確認できる。これらを踏まえると、4.1節でも述べたように、BタイプはAタイプほど大規模な収束域がはっきりとは見られないと言える。Fig.10のCAPEの空間分布からは、雨域の南西端で両タイプ値が大きくなっていること

が読み取れる、また、Bタイプにおいては、より強雨の領域まで1,500J/kg前後の大きさを持ったCAPEが入り込むような分布の特徴を確認できる。さらに、前項で見られたAタイプよりもBタイプにおいて、CAPEの値が大きいという特徴も見られる。一方でBRNに関しては、Fig.11を見ると、Bタイプでは図中の丸で示す雨域の南西端あたりで値が32程度を示す赤みがかったオレンジ色をしているのに対し、AタイプではBタイプほどBRNの値が大きくないと読み取れる。また、Fig.10ではCAPEの分布が滑らかに変化しているのに対し、Fig.11のBRNの分布は滑らかな変化であるとは言い難い。

以上の考察を踏まえると、Bタイプは、平均化操作をした結果、どちらの指標の空間分布においても、雨域の南西端あたりで局所的な変化は見られると言える。また、Bタイプは、雨域の南西端あたりでCAPEが1,500J/kg前後かつBRNが32程度の大きさを持つという、前項での結果と整合性が確認できることから、平均的に見ると、雨域の南西端が線状対流系の発生位置と対応していることがわかる。すなわち、Bタイプが起こる環境下において、線状対流系の発生位置における環境場指標の空間分布の局所的な変化が重要であると考えられる。対するAタイプは、指標の空間分布にBタイプほどの局所的な変化は見られないものの、地表面水蒸気フラックスの収束域や4.1節を踏まえると、前線による大規模な収束が空間的な特徴の一つであり、前線による収束が発生にも影響を及ぼしていることが示唆される。ただし、全事例に対して平均的な操作を行っているため、海と陸の位置関係やあらゆる走向・風向を持つ事例を平均化したときに、個々の事例で見られた特徴が打ち消されてしまった可能性も考えられる。そのため、発生位置や形状特性などを捉えた上で平均化操作を施すということも、今後の解析において重要な着眼点であると言える。

4.4 風の変化に関する解析結果

Fig.12に各タイプのホドグラフを示す。Aタイプは中層から上層にかけて鉛直シアが大きい。一方でBタイプは、大きさの変化はAタイプほど大きくないものの、風向の変化が大きいことが読み取れる。この変化は上昇流の鉛直方向の風向変化を表し、積乱雲の発達及び組織化に影響を及ぼすと考えられる。ここで、積乱雲の発達過程を考える。積乱雲内で降水粒子が生成された際、その荷重によって下降流も発生する。このとき、上昇流の鉛直方向の風向変化小さいと、上昇流と下降流が衝突して打ち消し合うため、次々と積乱雲が発生しづらい状態、すなわち組織化しづらい状態になってしまう（中北ら、

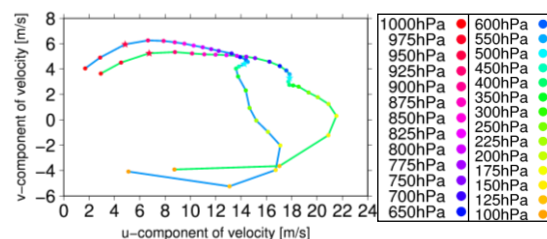


Fig.12 Average hodograph based on JRA-55. x-axis shows east-west component of wind velocity and y-axis shows north-south component. Green represents type-A and blue represents type-B, respectively.

2017)。そのため、積乱雲の寿命が短くなるだけでなく、線状のシステム維持が困難となる。対して、風向変化が大きい場合においては、上昇流と下降流とがぶつからないため、積乱雲が発達しやすい環境が持続して組織化しやすいと考えられる。以上のことから、Bタイプの方が、上昇流と下降流とが衝突しづらく、自己組織的な発達を続けやすい風向であると示唆される。

また、BRNを32と仮定し、CAPEを算出すると、Aタイプは2,025.5J/kg、Bタイプは1,455.4J/kgで、BタイプがAタイプよりもCAPEが小さく、前節とは大小関係が矛盾した結果となった。しかし、BタイプのCAPEの値は“Category-3”相当であり、前節の結果とは整合である。それに対して、Aタイプは“Category-4”相当で、前節の結果とは整合的でないことから、BRNが32という仮定自体がAタイプにとって適切ではないと示唆される。このように考えると、前節でBRNが“×”に分類される事例が半数以上を占めてこととも整合性がとれ、AタイプでCAPEが小さいことも考慮すると、Aタイプが発生しやすい環境において、BRNが32よりも小さい値をとると考えられる。

5. 環境場の統合的理解

前章までの解析を踏まえ、線状対流系の各タイプにおける発生・発達環境場のまとめをFig.13に示す。

5.1 Aタイプ：前線付随型

前線付随型のAタイプで確認された特徴として、全国的に発生すること、前線による大規模な収束帯上に雨域が存在すること、時空間スケールが大きいことが挙げられる。また、鉛直方向・水平方向に着目して環境場の特徴を列举すると、大気の中層までより湿潤であること、Bタイプよりも対流不安定の度合いが小さく、CAPEも小さい、そして、鉛直方向の風向変化も小さいことが、前章までの結果より

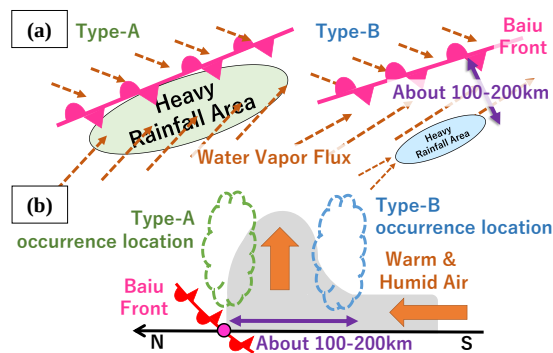


Fig.13 Image of (a) horizontal and (b) vertical cross sections for each type.

明らかである。加えて、4.4節でも述べたように、BRNが32よりも小さい環境場においても発生することが多いと推定される。

Bタイプほど環境場が限定されていないにもかかわらず、線状対流系が発生する大きな要因に、Bタイプとの顕著な違いである前線による強い収束の存在が挙げられる。自己組織的な線状の雨域の維持に必要な環境場の条件よりも、前線による大規模収束が支配的で、その収束が外部からの強制力となり、線状に並んだ積乱雲群が形成されることが考えられる。その結果、継続時間が長く、空間スケールの大きな線状対流系が、発生地域が限定されず全国的に形成し、維持されることが考えられる。

5.2 Bタイプ：孤立局所型

孤立局所型のBタイプで見られた特徴として、太平洋側の限られた地域で発生すること、時空間的なスケールが小さく局所的であること、Aタイプのような大規模収束が見られないということが挙げられる。さらに、下層より水蒸気が溜まった状態で対流不安定度が強い、CAPEが1,500J/kg前後で、BRNは32という値をとること、鉛直方向の風向変化が大きいことも環境場の特徴として前章までに確認できた。

これらを踏まえると、Aタイプのような強い収束が見られないBタイプは、一度積乱雲が発生すると、その後は自ら次々と積乱雲を生み出し続けるという自己組織性が強いと考えられ、その結果、局所的な線状対流系が形成される。

この自己組織的な発達においては、最初の積乱雲が発生・発達し、維持されることが重要で、そのための必要条件が揃った理想的な環境場が必要であると考えられる。最初の積乱雲の発生において、下層への集中的な水蒸気の流入によって対流不安定度が強まる。その結果、CAPEが大きくなって、地形などによって強制上昇した気塊が浮力を得て、さらに上昇を続けて発達する。また、鉛直方向の風向が変化することで、上昇流と下降流の衝突を避けること

が可能となり、積乱雲が発達しやすい環境が持続し、次々と積乱雲が発生・発達するような自己組織化しやすい環境場が実現されると考えられる。このような積乱雲の発生・発達の流れを踏まえると、対流不安定度の強さ、CAPEが大きいこと、鉛直方向の風向の変化が大きいことが、Bタイプの発生・発達において重要かつ必要条件と言える。

また、Bタイプの発生・発達時のBRNが32をとることについては、CAPEと鉛直シアのバランスについて様々な状況を考えることによって、値の重要性を示す。例えば、上層の風が弱く、鉛直方向の風向変化が小さい場合は、4.4節で述べた通り、発生した積乱雲の寿命は短く、自己組織的な発達を続けることが難しいと考えられる。その上、上層の風が弱く、積乱雲の移動速度が小さくなってしまったため、たとえCAPEが大きく浮力を得やすい状況下であっても、雲が風に乗って移動できずに発生位置に留まってしまう様子が考えられる。その結果、新たに積乱雲が生み出される空間がなくなって、線状ではなく団塊状となってしまうと示唆される。一方で、上層の風が強く鉛直方向の風向変化も大きい場合、積乱雲自体は発生・発達しやすいと考えられる。ただし、上層の風が強すぎた場合、発生・発達した積乱雲の移動速度が大きくなることが想定される。積乱雲の移動速度が大きい場合において、CAPEが小さいと、新たな積乱雲の生成が追いつかず、積乱雲が途切れ途切れとなり、線状にはならない。このように、CAPEと鉛直シアがある一定のバランスを保てていない場合は、線状で自己組織的に発生・発達できないということを示唆していると考えられる。従って、積乱雲の形成・維持において、CAPEと鉛直シアの比、すなわち、BRNが一定となることが重要であると言える。ただし、32という値をとる意味については、本研究では解明できなかった。今後、風速や風向、他の気象現象との違いを踏まえた研究を進め、32という値の意味も考えていきたい。

6. おわりに

本研究の目的は、豪雨の時空間特性に基づいた観点から、停滞前線に伴う線状対流系過去事例の分類を行った上で、それぞれの豪雨の発生場所や発生・発達環境場の違いを明らかにして、線状対流系のメカニズム解明に資することであった。解析の結果から、前線付随型のAタイプは、梅雨前線に伴う大規模な収束が外部強制力として働き、線状に並んだ積乱雲群を形成すると示された。一方で孤立局所型のBタイプは、最初の積乱雲が発生し、自己組織的な発達を続けていくために、必要条件の揃った理想的

な環境場が重要であると言える。発生の必要条件として、対流不安定の度合い、CAPEの大きさ、自己組織的な維持・発達の条件に、鉛直方向の風向の変化が挙げられる。さらに、BRNが一定値をとることから、特に孤立局所型の線状対流系の発生・発達において、CAPEと鉛直シアのバランスが一定であることの重要性を示した。

本研究では、異なる時空間スケールにおける線状対流系の発生・発達環境場の違いを明らかにした。同時に、環境場の解析においても、時空間特性の違いを考慮する重要性を示すことができた。

今後は、2006年以前のデータも用いることで事例数を増やしていき、本研究では解明しきれなかった地域性や発生場所、海陸との位置関係という空間的な特徴の違いに加えて、発生時刻や発生時期などの時間的な特徴にも着目して、定量的かつ統計的に解析を進める予定である。また、梅雨前線そのものの構造の違いや、AタイプとBタイプが線状になる組織化構造そのものにも着目し、それぞれの必要条件と十分条件を整理していくことが重要である。さらに、過去事例に加えて将来事例も扱うことで、地球温暖化に伴って線状対流系の発生・発達環境場がどのように変化するかということや、過去から未来にかけてのトレンドを確認し、地球温暖化が与える影響及び将来変化についての理解を深めていきたいと考える。

謝 辞

本研究は、JSTムーンショット型研究開発事業(JPMJMS2283)の助成を受けました。

参考文献

小坂田ゆかり・中村葵・中北英一(2020)：梅雨期集中豪雨の時空間特性を考慮した強雨継続時間と積算

雨量の将来変化の統計分析, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.76, No.2, I_7-I_12.

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, 気象庁予報部, pp.114-132.

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, 気象庁予報部, pp.42-60.

瀬古弘(2010)：中緯度のメソ β スケール線状降水系の形態と維持機構に関する研究, 気象庁研究時報, Vol.62, pp.1-74.

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, No.6, pp.49-55.

中北英一・佐藤悠人・山口弘誠(2017)：ゲリラ豪雨予測の高精度化に向けた積乱雲の鉛直渦管生成メカニズムに関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第60号B, pp.539-558.

中北英一・矢神卓也・池淵周一(2000)：1998那須集中豪雨の生起・伝播特性, 水工学論文集, 第44巻, pp.109-114.

Howard, B. B. and Michael, H. J. (1985): Formation of Mesoscale Lines of Precipitation: Severe Squall Lines in Oklahoma during the Spring, JOURNAL OF THE ATMOSPHERIC SCIENCES, Vol.42, No.16.

Seko, H. and Nakamura, H. (2005): Analytical and numerical studies on meso- β scale precipitation bands observed over southern Kyushu on 7 July 1996, Papers in Meteorology and Geophysics, Vol.55, No.3/4, pp.55-74.

Unuma, T. and Takemi, T. (2016): Characteristic and environmental conditions of quasi-stationary convective clusters during the warm season in Japan, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 142, pp.1232-1249.

(論文受理日：2023年8月29日)