

LESを用いた線状対流系豪雨に対する 乱流による偶然性の影響評価

Effects of Turbulence-Induced Contingency on Line-Shaped Rain Bands Using LES

河谷能幸⁽¹⁾・山口弘誠・中北英一

Yoshiyuki KAWATANI⁽¹⁾, Kosei YAMAGUCHI and Eiichi NAKAKITA

(1) 国立研究開発法人 情報通信研究機構

(1) National Institute of Information and Communications Technology, Japan

Synopsis

In recent years, heavy rainfall disasters caused by line-shaped rain bands have become frequent. However, predicting their occurrence remains challenging. It is considered that contingency factor is associated. Therefore, in this study, improvements to the Large-Eddy Simulation (LES) model were made to analyze the influence of contingency factor on line-shaped rain bands. As a result, variations in rainfall amount and shifts in the position of rainfall areas were outputted depending on how turbulence was introduced. This suggests that turbulence plays a crucial role in the occurrence of line-shaped rain bands. In the future, we will analyze in detail the mechanism through which turbulence develops.

キーワード: 線状対流系, 乱流, 偶然性, LES

Keywords: Line-shaped rain band, turbulence, contingency, LES

1. 研究背景

近年, 日本では線状対流系による豪雨災害が激甚化している. 線状対流系はバックビルディング現象により自己組織化を伴い, 強雨域が比較的長時間停滞することにより, 土砂災害や河川氾濫等の被害をもたらす. こうした性質を持つことから, 災害軽減のためには正確な予測とそれに資するための詳細な物理的解析が必要不可欠である.

線状対流系に関する研究は, 多くの観点から行われている. 発生環境場については事例解析が重ねられてきている (e.g. Kawano and Kawamura 2020; Min et al. 2021, Araki et al. 2021). 風速場については低気圧の存在や鉛直風向シア等が, 水蒸気については下層が湿潤であること等が示されており, その要素は多岐にわたるものの, 防災上重要な情報を提供して

いる. こうした事例解析を受けて, 多数の事例に対する環境場の統計的解析を行った研究として, Kato et al. (2020) がある. 彼らは過去の線状対流系事例を対象に, 風速場や水蒸気の発生しやすい環境場を6つの条件にまとめている. また, Unuma and Takemi (2016) は, 線状対流系を含めた多数の停滞性対流クラスタに対して, 環境場の解析を行った結果, 線状の雨域については明確な鉛直シアを持つことが明らかにされている. 以上から, 線状対流系の発生及び維持には風速場が重要な役割を果たすことが示唆される.

気象現象は様々な時空間スケールが存在し, 類似の現象でも時空間スケールによって分類することが重要である. 小坂田ら (2020) は, 降雨域の時空間スケールと梅雨前線の位置関係から, 線状対流系を2つのタイプに分類した. 1つは梅雨前線に近い位置で発

生する時空間スケールの大きい前線付随型，もう一方は梅雨前線から離れた場所で発生する時空間スケールの小さい孤立局所型である．前者は梅雨前線による収束域が明らかで線状対流系の予測は比較的容易である一方，後者は局所的な収束域によるもので，小さな揺らぎにも影響を受けやすいため，その予測は難しい．本研究では偶然性の影響を受けやすいと考えられる後者を対象とする．

予測の難しさについてはカオス性 (Lorenz 1963) によるものであると考えられる．この性質により，乱流などの偶然的な要因により初期値が微小に変化することでその後の運動が大きく変化する．線状対流系についてもその予測は難しいものであることが示されている．Hatsuzuka et al. (2022) は，気象庁降水短時間予報を用いた線状対流系に伴う3時間雨量の予測精度検証を行い，2時間以降の予報は有用な結果を得ることは難しいと結論付けている．これは線状対流系形成段階における外挿予報の精度が低いことが原因とされており，偶然性の作用も関連していると考えられる．これに関連して，数値シミュレーションによる線状対流系の再現性にわずかな設定の変更によって，その再現性が変化することも示されている (Oizumi et al. 2018; Oizumi et al 2020)．

こうした予測の難しさを解決に導くためには，線状対流系の持つ構造を明らかにしたうえで，その構造への偶然性の働きかけを知ることが重要である．気流構造については多数の事例解析が行われているものの，統一された気流構造は未だ提案されていない．大屋・山田(2020) は気象レーダーにより水平方向に軸を持つ渦管 (水平渦管) に着目し，水平渦管が存在する領域には同時に強雨域が存在することが示されている．そこで，本研究でも水平渦管に着目した理想的な数値実験を行い，それに対する偶然性の作用について解析を行った．

第2章では研究手法を，第3章では計算結果を，第4章ではその解析及び考察を，第5章では結論を述べる．

2. 研究手法

2.1 理想実験の実験設定

本研究では，山口ら (2016) が開発したLES気象モデルを使用した．計算対象領域をFig. 1に示す．初期・境界値として，山口ら (2022) と同様，大阪平野で水平収束が発生する条件を与えた．また，乱流スキームとして，山口ら (2023) が導入したSmagorinskyモデル (Smagorinsky, 1963) と Bardina モデル (Bardina et al., 1983) を混合したモデルを使用した．

2.2 BGM法を用いたアンサンブル実験

線状対流系に対する偶然性の作用を明らかにするために，前節の設定で行った計算をCtrl計算とし，風に関する摂動を与えるアンサンブル実験を行った．

摂動の作成には，アンサンブル予報で一般的に用いられる Toth and Kalnay (1997) の Breeding of growing modes (BGM) 法を用いた．アンサンブル予報におけるBGM法とは，過去から予報開始時刻までの間に摂動の大きさのスケールダウンを繰り返しながら発展させた摂動を予報開始時刻の解析値に与えて初期アンサンブルメンバーを作成する手法である．すなわち，前書記時刻の解析値に摂動を足しこんだ予測と足しこまない予測から解析時刻まで計算して得られた予報摂動に対して解析時刻においてスケールダウンを行い，再び摂動を解析値に足しこんで時間発展を計算するという育成サイクルを繰り返す (Fig. 2)．この育成サイクルによって特に誤差が成長しやすいモードを優先して成長させている．このサイクルを通じて，過去において非線形モデルの中で成長してきた誤差を摂動とするため，非線形の効果も取り入れることができる．本研究では偶然性としての乱流の成長モードを作成することを目的とし，摂動を与えないCtrl計算を上記における解析値と読み替え，Ctrl計算開始後18,000秒における摂動の育成を行った．

計算開始後18,000秒における摂動は，スケールダウンの回数を変えることで，異なるものを作成する．

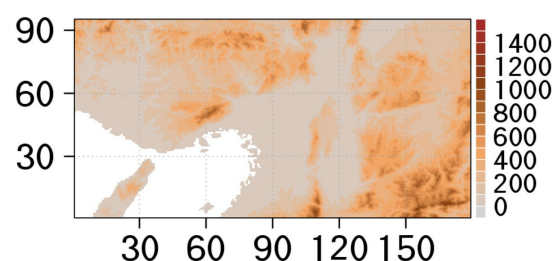


Fig. 1 Calculation domain.

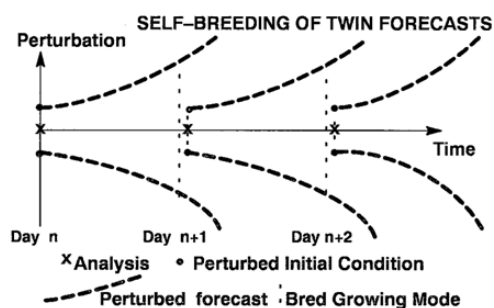


図 5.6 BGM 法の概念図 (Toth and Kalnay (1997) より引用)。

Fig. 2 Schematic diagram of BGM (Cited from Toth and Kalnay, 1997).

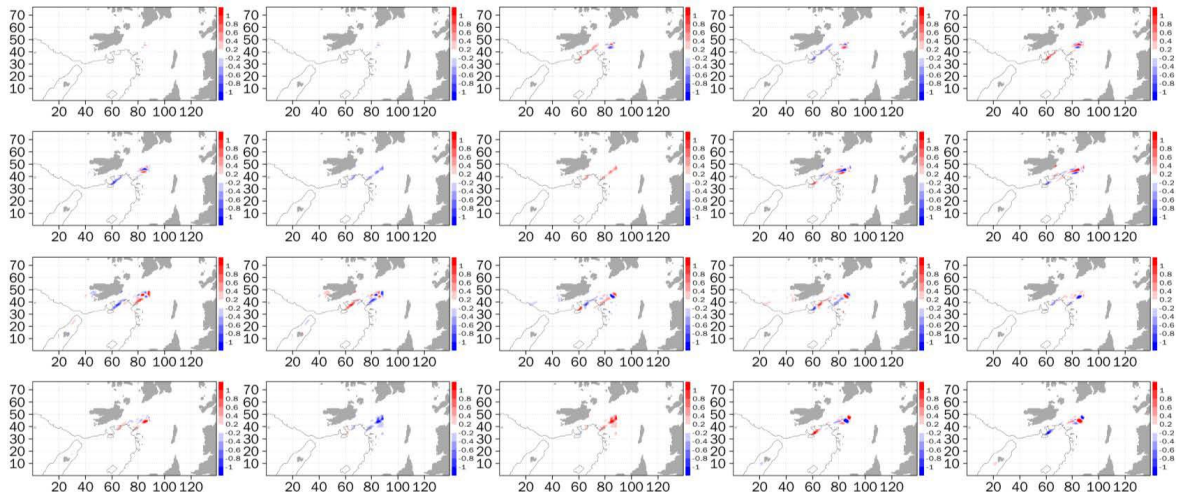


Fig. 3 Wind velocity perturbations [m/s] generated by BGM.

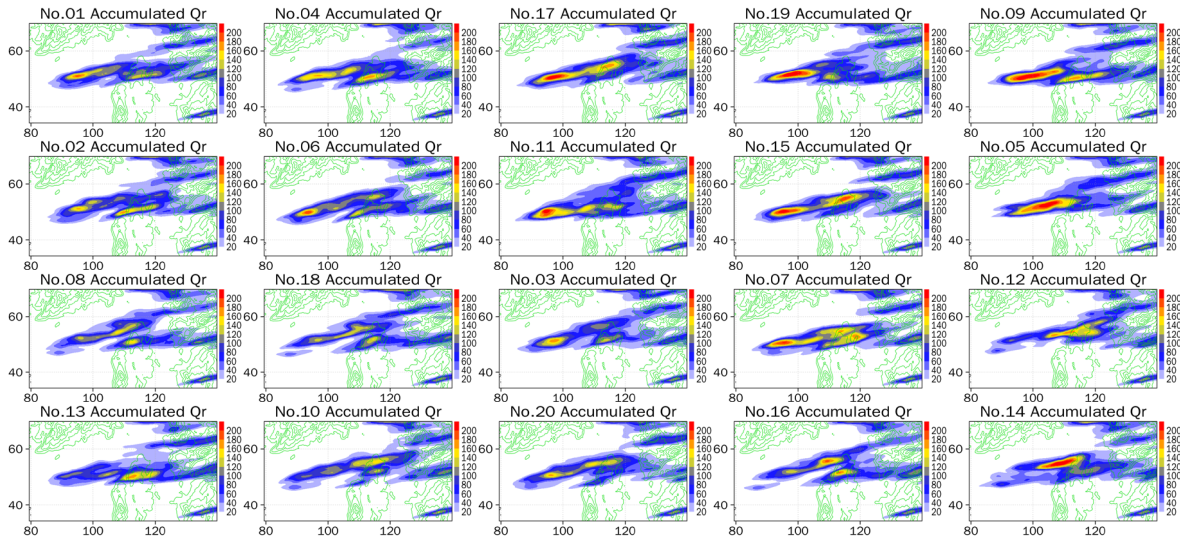


Fig. 4(a) Accumulated rainwater mixing ratio [g/kg] on surface (ensemble simulation).

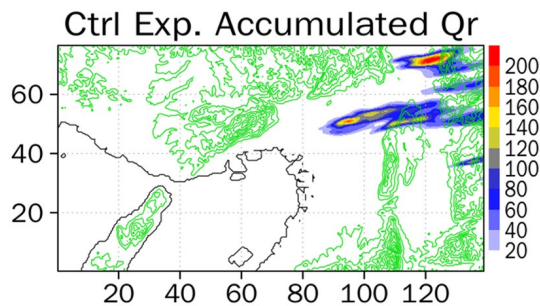


Fig. 4(b) Accumulated rainwater mixing ratio [g/kg] on surface (Ctrl simulation).

また、摂動を与えないメンバーを全メンバーの平均に設定するため、1つの摂動に対してプラスに摂動を与えるメンバーの他にマイナスに摂動を与えるメン

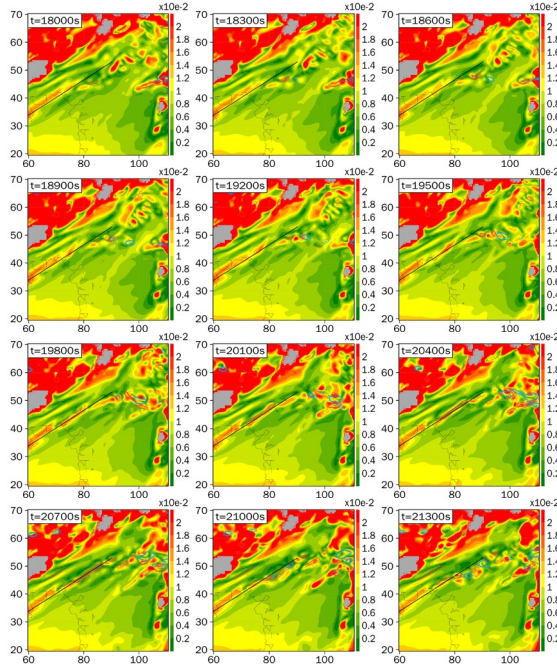
バーも作成する。このようにして、それぞれの書記時刻に対して20メンバーの摂動を作成した。Ctrl実験との風速の差をFig. 3に示す。

3. 計算結果

前章に示した設定で行ったアンサンブル計算による地上での雨水混合比をFig. 4(a)に示す。また、Ctrl計算による地上での雨水混合比をFig. 4(b)に示す。全てのメンバーで線状対流系が発生したものの、雨量の増減や位置の変化が見られた。

この要因を調べるために、Ctrl計算を用いてその気流構造の解析を、アンサンブル計算結果を用いて気流構造に対する偶然性の作用の解析を行った。

(a) Horizontal section (??km altitude)



(b) Vertical section

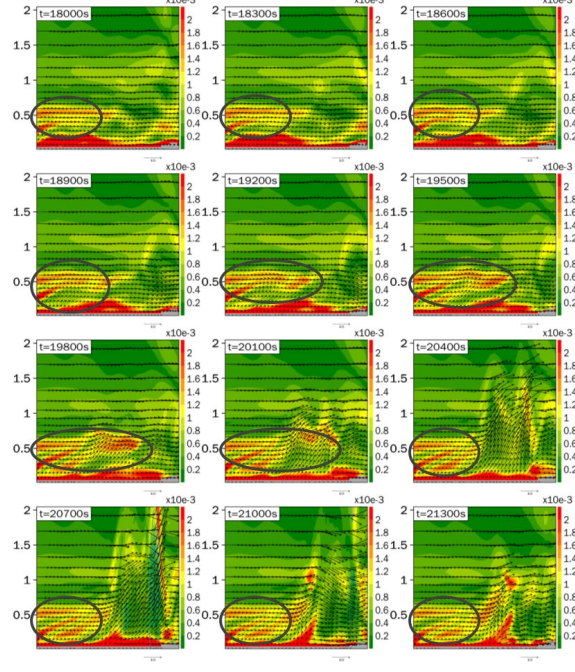


Fig. 5 Magnitude of horizontal vortex tube [m/s²] during occurrence of line-shaped rain band. Blue and red contour represents rain water mixing ratio[g/kg] and upward velocity [m/s].

4. 気流構造と偶然性の影響

4.1 線状対流系が持つ気流構造

本節では、アンサンブル計算において線状対流系に対する偶然性の作用を調べるために、Ctrl計算を用いて気流構造を明らかにする。Fig. 5(a)に水平渦度の大きさの水平断面を示す。線状対流系発生前に、上昇流とそれに沿う水平渦管が明確に存在し、時刻が進むにつれて増大する。また、Fig. 5(a)に示した鉛直断面における水平渦管の大きさを描いたものがFig. 5(b)である。時刻が進むにつれて進行方向に水平渦管が伸びていることが分かる。

以上を踏まえて、水平渦度の増大の要因として、水平渦管の引き伸ばしに着目した。渦度方程式は、

$$\frac{\partial \omega_x}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \omega_x = \omega_x \frac{\partial u}{\partial x} + \omega_y \frac{\partial u}{\partial y} + \omega_z \frac{\partial u}{\partial z}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \omega_y}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \omega_y = \omega_x \frac{\partial v}{\partial x} + \omega_y \frac{\partial v}{\partial y} + \omega_z \frac{\partial v}{\partial z}, \quad (2)$$

となる。このうち、(1)式の右辺第1項、(2)式の右辺第2項については渦度の伸縮項にあたり、渦が引き伸ばされると強度が強まることを示す。

さらに、水平渦度の方向に関わらず伸縮項の効果を得ることを目的として、次の操作を行う。(1)式に対して $(\omega_x \cdot)$ を、(2)式に対して $(\omega_y \cdot)$ を左から作用さ

せることで次の式 (伸縮項のみ記述)が得られる。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \omega_x^2 \right) = \omega_x^2 \frac{\partial u}{\partial x}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \omega_y^2 \right) = \omega_y^2 \frac{\partial v}{\partial y}, \quad (4)$$

これらを足し合わせると、

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{1}{2} (\omega_x^2 + \omega_y^2) = \omega_x^2 \frac{\partial u}{\partial x} + \omega_y^2 \frac{\partial v}{\partial y} = A, \quad (5)$$

が得られる。右辺は水平渦度の2乗の時間変化に対する寄与を表し、正になれば水平渦度の伸長を、負になれば水平渦度の収縮を向きに関わらず示す。次元を渦度の大きさと合わせるために、符号と保ったまま平方根をとったものについて、Fig. 5(a)と同じ水平断面で描いたものがFig. 6(a)である。これより、水平渦管が強まっている場所では、水平渦管の伸長が行われていることが分かる。また、Fig. 5(b)と同じ鉛直断面における水平渦管の伸長を描いたものがFig. 6(b)である。黒丸を付けた水平渦管が確かに伸長されている。

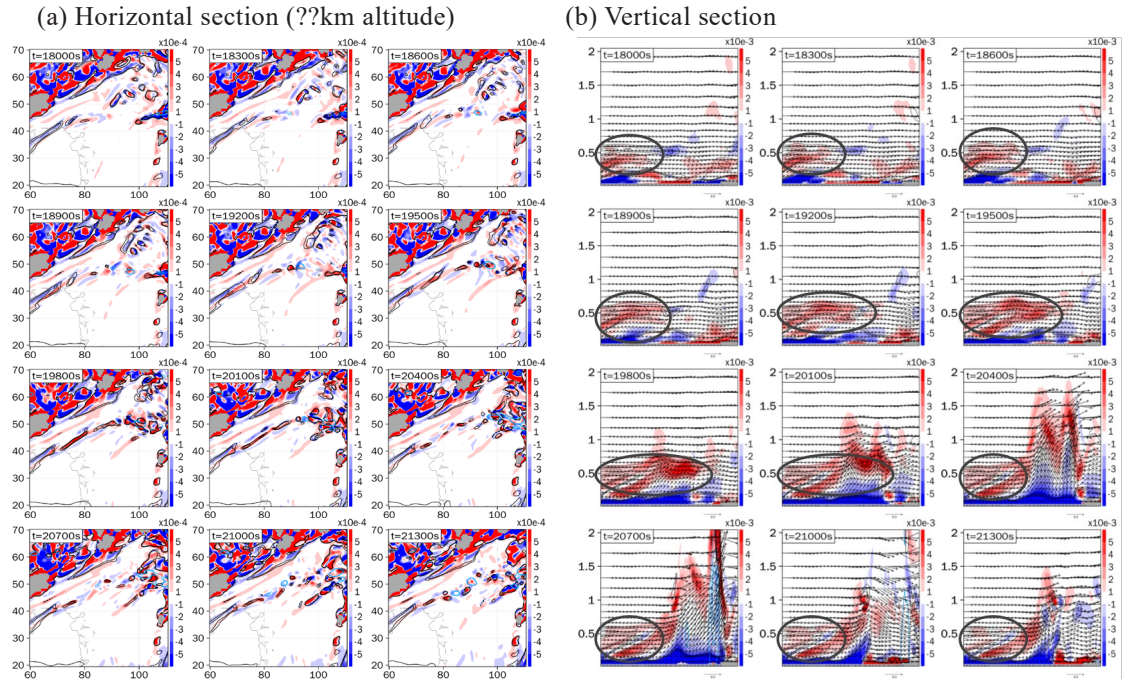


Fig. 6 Stretch of horizontal vortex tube [m/s²] during occurrence of line-shaped rain band. Blue and red contour represents rain water mixing ratio[g/kg] and upward velocity [m/s].

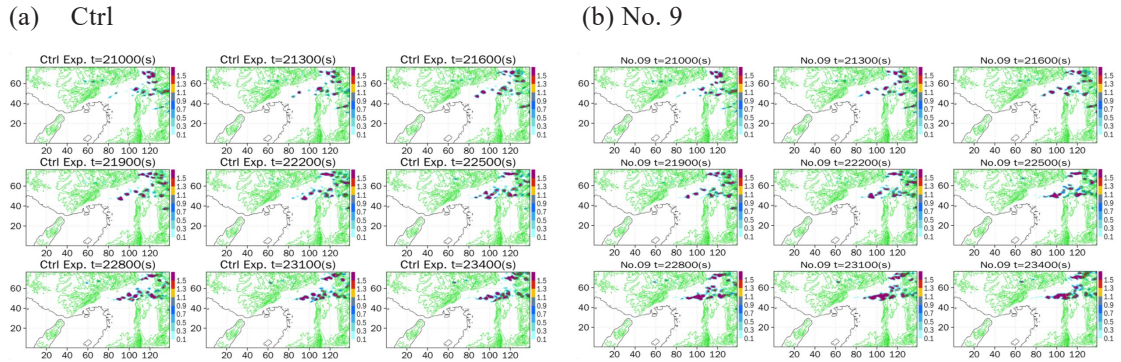


Fig. 7 Comparison of rainwater mixing ratio [g/kg] at surface.

4.2 水平渦管構造に対する偶然性の作用

本節では前述のアンサンブル計算において、線状対流系の降雨強度の変化や雨域のずれについて、水平渦管の振舞に着目する。特に、雨量増加、雨量減少、雨域ずれの事例として、それぞれNo.09, No.13, No.14の3事例について統計的な解析を行う。

4.2.1 雨量の増加事例

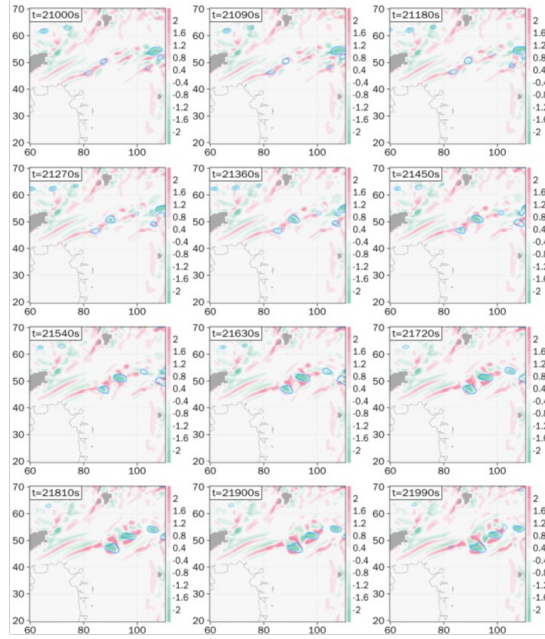
雨量の増加事例であるNo. 09について、その気流構造の解析を行う。

Ctrl実験との降雨の差を確認するため、地上における雨水混合比を描いたものがFig. 7である。Ctrl計算と比較するとNo. 09でより大きな雨域が計算開始後22,500秒ごろから存在している。その後も線状によ

り強く発達することから、雨量増加の要因として、この雨域の成長過程に焦点を当てて解析を行った。

高度500mにおける上昇流の水平断面図を比較したものがFig. 8である。No. 09で強く発達した雨域は、上流側に存在する上昇流によって発生したものである。Ctrl実験とNo. 09の間で、高度1km~2kmにおける水平渦管と上昇流を統計的に比較したものがFig. 9である。ここでは降雨が開始し、より上空での気流構造が重要になるため、Fig. 10の平行四辺形で示す領域における高度1km~2kmでの水平渦度及び上昇流に着目している。計算開始後21,500秒ごろにそれぞれの上昇流のピークが存在するが、雨量が増大したNo. 09がより大きな上昇流を持つことが確認された。そして、それに対応するように水平渦度のピークも存在している。

(b) Ctrl



(b) No. 9

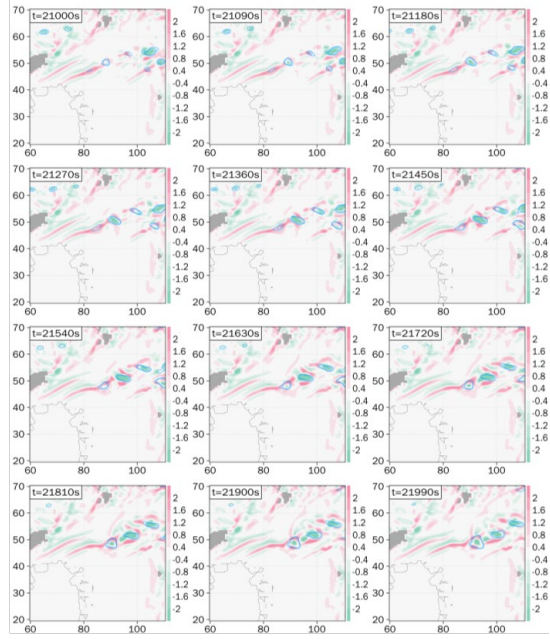


Fig. 8 Comparison of upward velocity [m/s] during occurrence of line-shaped rain band. Blue contour represents rainwater mixing ratio [g/kg].

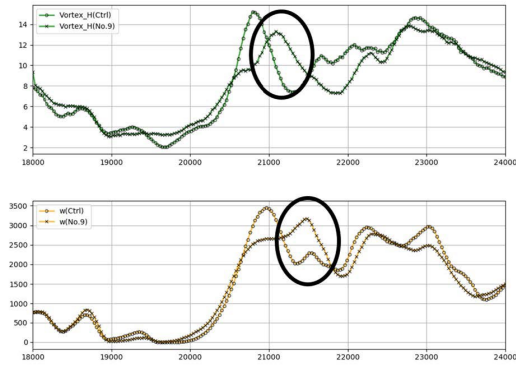


Fig. 9 Time series of stretch of horizontal vortex tube, magnitude of horizontal vortex tube, and upward velocity in analysis domain.

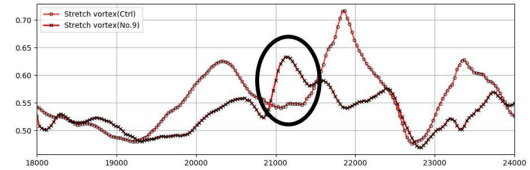


Fig. 11 Time series of stretch of horizontal vortex tube, magnitude of horizontal vortex tube, and upward velocity in analysis domain.

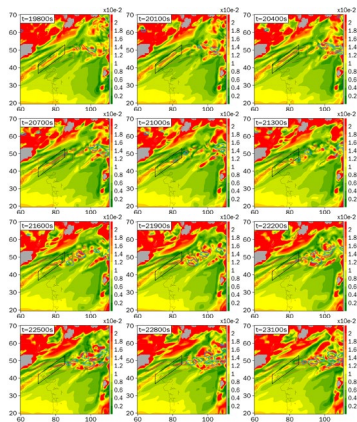


Fig. 10 Analysis domain of horizontal vortex.

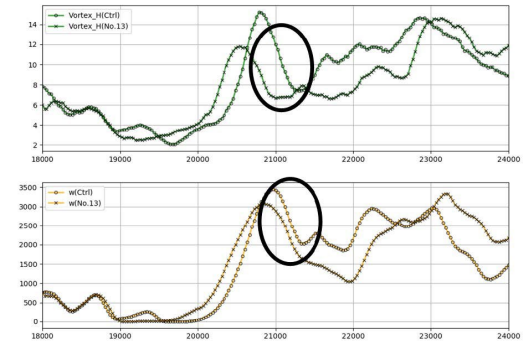


Fig. 12 Time series of stretch of horizontal vortex tube, magnitude of horizontal vortex tube, and upward velocity in analysis domain.

上空におけるこうした渦管と上昇流の要因として、下層における渦管の引き伸ばしが考えられる。そこで、高度100m~300mにおける下層の水平渦度の引き伸ばし項の和をFig. 11に示す。黒丸の部分において、下層での水平渦管の引き伸ばしが発生することによ

り、後の時刻において上空での水平渦管と上昇流が増大したと考えられる。

4.2.2 雨量の減少事例

雨量の現象事例であるNo. 13について、その気流構造の解析を行う。

Ctrl実験とNo. 13の間で、前節と同様の領域で高度1km~2kmにおける水平渦管と上昇流を統計的に比較したものがFig. 12である。雨量や上昇流に差がでる計算開始後21,000秒ごろ~22,000秒ごろでは、確かに上昇流が弱まっており、水平渦度についても同様である。

また、前節と同様の領域で下層の水平渦管の引き伸ばしについて統計的に調べたものがFig. 13である。黒丸で囲んだ部分で渦管の引き伸ばしが弱いことが分かる。

4.2.3 雨域ずれ事例

雨域ずれ事例であるNo.14について、Ctrl実験との比較を行う。Fig. 14にNo.14とCtrl実験の地上における雨水混合比の時系列を示す。Ctrl実験と比較して線状対流系が北東にずれた位置で生じていることが確認される。そしてその雨域の初期発生位置もCtrl実験と比較して北に存在する。

この要因を調べるために、高度300mにおける水平渦度をFig. 15に示す。Ctrl実験同様水平渦管は存在するものの、やはり北側に水平渦管が存在する。また、Fig. 16に示すように、水平渦度の伸長についても同様に北へと経路が変化していることから、雨域の北東へのずれは偶然性として入力した摂動が水平渦管の伸長方向を変化させることで線状対流系の発生位置を北東へと変化させたと考えられる。

5. 結論

本研究の目的は、偶然性としての乱流が線状対流系に豪雨に対してどのような影響を与えるのかにつ

いて、評価を行うことであった。

乱流の影響を正確に表現するためにLESモデルを用いて線状対流系の理想実験と、それに対してBGM法を用いたアンサンブル実験を行った。Ctrl計算及びアンサンブルの各メンバーで線状対流系が発生したものの、線状対流系の雨の強度や発生位置のずれが確認された。

Ctrl計算ではその気流構造に関する解析を行い、線状対流系周辺で水平方向に軸を持った渦管(水平渦管)が確認された。さらに、地形による水平収束と鉛直方向のシアによって発生した水平渦管は水平シアによって引き伸ばされて強まる様子が確認された。この水平渦管が線状対流系を生み出す主たる気流構造であることが示唆された。

そして、アンサンブル計算結果では水平渦管の振舞に着目し、その雨量増加、雨量減少、雨域ずれの要因を調べた。雨量の増減には水平渦管の伸長の強弱が、雨域のずれには水平渦管構造の空間的なずれが影響したものと思われる。これらの概念図をFig. 17に示す。

以上述べたように、本研究では線状対流系の気流構造とそれに対する偶然性の作用について調べた。今後は実際にこの気流構造が存在しているのか、そしてそれは引き伸ばしを受けているのか、より一般性を高めていくことが必要である。また、偶然性が水平渦管に対してどのようなメカニズムで影響を与えるのかを調べる必要がある。

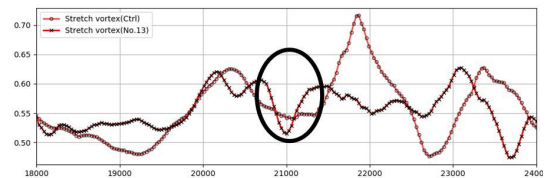


Fig. 13 Time series of stretch of horizontal vortex tube, magnitude of horizontal vortex tube, and upward velocity in analysis domain.

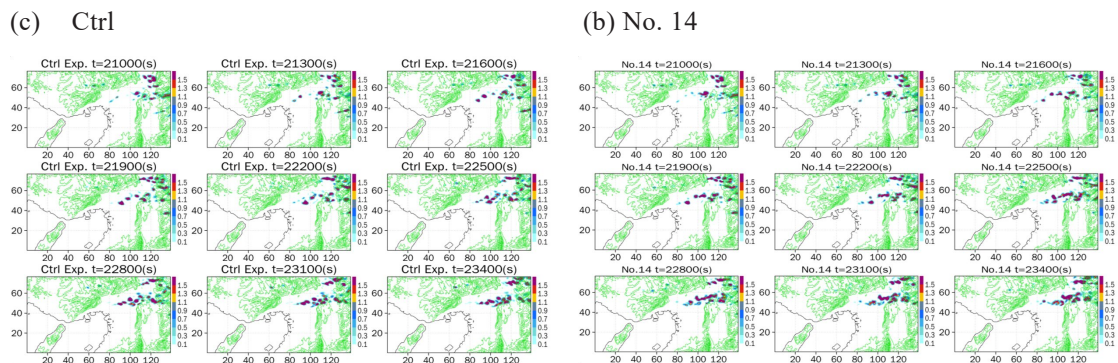
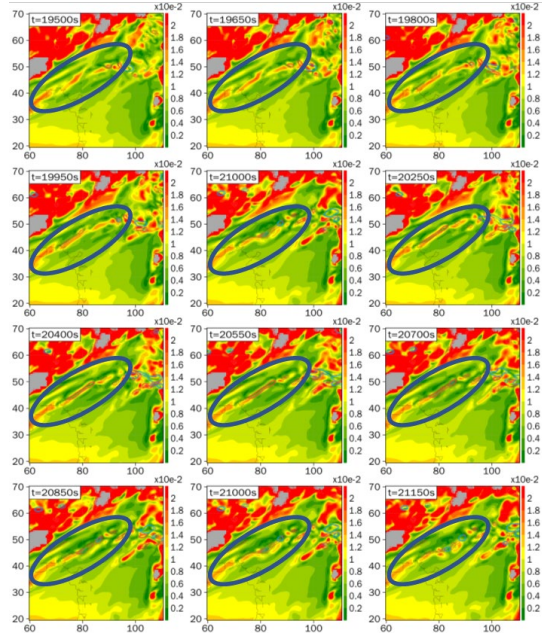


Fig. 14 Comparison of rainwater mixing ratio [g/kg] at surface.

(a) Ctrl



(b) No. 14

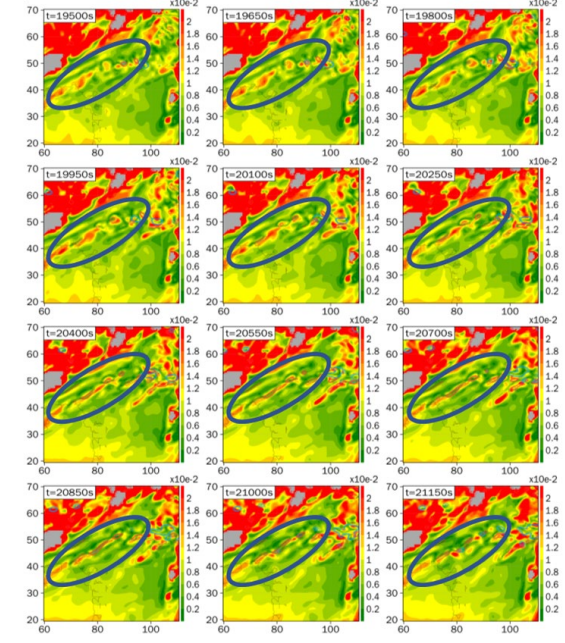
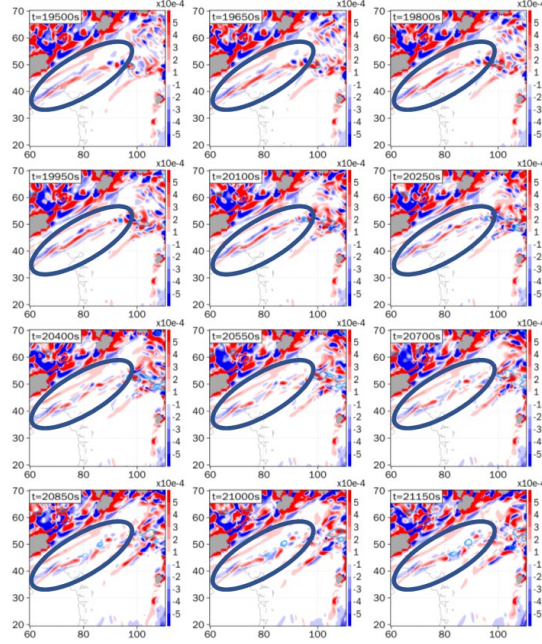


Fig. 15 Magnitude of horizontal vortex tube [m/s^2] during occurrence of line-shaped rain band. Blue and red contour represents rain water mixing ratio [g/kg] and upward velocity [m/s].

(a) Ctrl



(b) No. 14

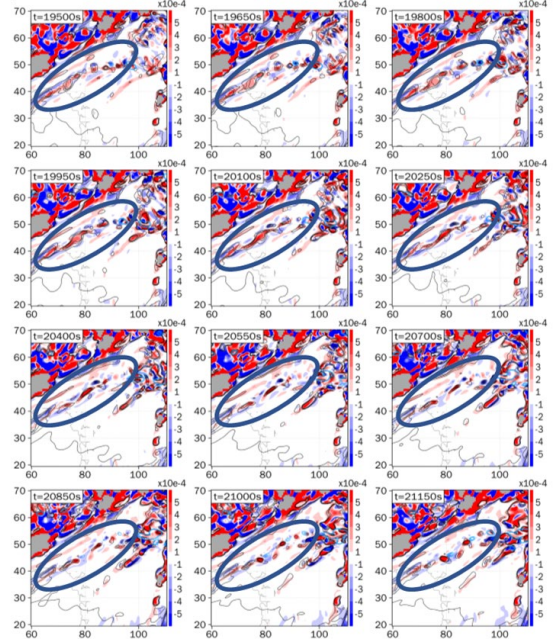


Fig. 16 Stretch of horizontal vortex tube [m/s^2] during occurrence of line-shaped rain band. Blue and red contour represents rain water mixing ratio [g/kg] and upward velocity [m/s].

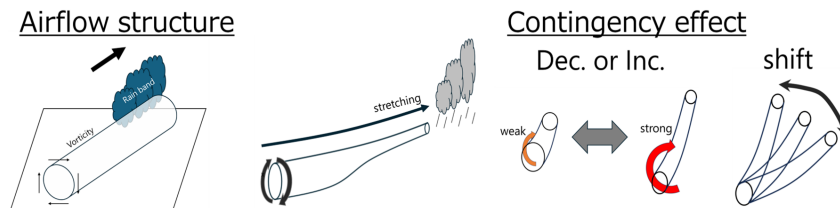


Fig. 17 Schematic diagram of airflow structure and contingency effect.

参考文献

- 大屋祐太・山田朋人 (2020) : 2014年9月に北海道で発生した線状降水帯における鉛直渦構造と降水強度の関係, 土木学会論文集B1(水工学), **76**, 2, pp.193-198.
- 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), **76**, 2, pp.7-12.
- 山口弘誠・高見和弥・井上実・中北英一 (2016) : 豪雨の「種」を捉えるための都市効果を考慮するLES気象モデルの開発, 土木学会論文集B1(水工学), **72**, 4, pp.205-210.
- 山口弘誠・河谷能幸・中北英一 (2022) : 山岳波がもたらす温位変動に着目したLESによる線状対流系の勃発メカニズムの解明, 土木学会論文集B1(水工学), **78**, 2, pp.361-366.
- 山口弘誠・河谷能幸・中北英一 (2024) : 豪雨発生の偶然性評価を目的としたスケール相似則モデルのLESへの適用, 京都大学防災研究所年報, 第66号B, pp. 230-237.
- Araki, K., Kato, T., Hirockawa, Y., and Mashiko, W. (2021): Characteristics of atmospheric environments of quasistationary convective bands in Kyushu, Japan during the July 2020 heavy rain fall event, SOLA. **17**, pp. 8-15.
- Bardina, J., Ferziger, J., Reynolds, W. (1983): Improved turbulence models based on large-eddy simulation of homogeneous incompressible turbulent flows, Tech. Rep. TH-19, Department of Mechanical Engineering Stanford University, 97.
- Hatsuzuka, D., Kato, R., Shimizu, S. and Shimose, K. (2022): Verification of forecasted three-hour accumulated precipitation associated with “Senjo-Kousuitai” from very-short-range forecasting operated by the JMA. Jour. of Meteor. Soc. Japan, **100**, 995–1005.
- Kato, T. (2020): Quasi-stationary band-shaped precipitation systems, named “senjo-kousuitai”, causing localized heavy rainfall in Japan, Jour. of Meteor. Soc. Japan, **98**, pp. 485-509.
- Kawano, T. and Kawamura, R. (2020): Genesis and maintenance pocesses of a quasi-stationary convective band that produced record-breaking precipitation in northern Kyushu, Japan on 5 July 2017, Jour. of Meteor. Soc. Japan, **98**, pp. 673-690.
- Lorenz, E.N. (1963): Deterministic nonperiodic flow, Jour. Atmos. Sci., **20**, pp.130-141.
- Min, K.-S., Tsuboki, K., Yoshida, M. K., Moroda Y. and Kanada, S. (2021): Formation mechanism of a stationary line-shaped precipitation system in the Kinki District, Japan—Case study on 1 September 2015 event—, Jour. of Meteor. Soc. Japan, **99**, pp. 357-377.
- Oizumi, T., Saito, K., Duc, L., and Ito, J., (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, Jour. of Meteor. Soc. Japan, **96**, pp.25–54.
- Oizumi, T., Saito, K., Duc, L., and Ito, J., (2020): Ultra-high resolution numerical weather prediction with a large domain using the K computer. Part 2: The case of the Hiroshima heavy rainfall event on August 2014 and dependency of simulated convective cells on model resolutions, Jour. of Meteor. Soc. Japan, **98**, pp.1163–1182.
- Smagorinsky, J. (1963): General circulation experiment with the primitive equations, I. the basic experiment*, Mon. Wea. Rev., **91**, 3, pp.99-164.
- Toth, Z. and Kalnay, E. (1997): Ensemble Forecasting at NCEP and the Breeding Method, Mon. Wea. Rev., **125**, 12, pp.3297-3319.
- Unuma, T. and Takemi, T. (2016): A role of environmental shear on the organization mode of quasi-stationary convective clusters during the warm season in Japan, SOLA. **12**, pp. 111-115.

(論文受理日 : 2024年8月31日)