

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

山口 弘誠¹・河谷 能幸²・中北 英一³

¹正会員 京都大学准教授 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

E-mail: yamaguchi.kosei.5r@kyoto-u.ac.jp

²学生会員 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8530 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: kawatani.yoshiyuki.67e@st.kyoto-u.ac.jp (Corresponding Author)

³正会員 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

E-mail: nakakita@hmd.dpri.kyoto-u.ac.jp

近年、線状対流系豪雨による被害が頻発しているものの、その勃発メカニズムは明らかにされておらず、発生予測は未だ困難を極めている。特に、必然的要因と偶然的要因を区別して議論されることはほとんどなかった。そこで本研究ではそれぞれの要因を区別し、勃発メカニズムを解明することを目的として、乱れを陽に計算し、偶然性が存在する中で必然性・偶然性の評価ができる LES(Large-Eddy-Simulation)を用いて数値実験を行った。その結果、淡路島の地形による山岳波が六甲山南部に低温位の領域を形成することで別の暖かい空気塊の上昇に寄与していることを示した。また、温位の初期値にランダムノイズを与えたアンサンブル実験を行うことで、偶然的要因による発生への影響が存在することが示唆された。

Key Words: Line-shaped convective systems, Large eddy simulation, mountain waves

1. はじめに

(1) 研究背景

近年、日本では線状降水帯による水害が増加している。特に、バックビルディング現象により自己組織化を伴う線状降水帯を本研究では線状対流系と呼び、対象とする。線状対流系は同じ場所に比較的長時間停滞し、中小河川における洪水・氾濫等の大規模な被害をもたらす。

被害の低減には、その勃発機構の解明が必要であるが、勃発機構は解明されておらず、発生予測は困難である。これは地形などの必然性由来の要因と、確率過程によってのみ表現できる自然の揺らぎ等の偶然性由来の要因が存在することによる。本研究では、「勃発」は偶然的要因が関連する可能性のある降水セルの発生と定義する。

中北ら(2000)¹⁾は立体観測情報により那須豪雨が線状対流系による降水システムであることを明らかにし、その生起時刻が内部重力波の位相に合うことを示した。検証

のために数値計算を行い、事例を増やすことが望ましい。

数値モデルを用いた研究として、高咲ら(2013)²⁾は線状対流系の再現実験を行い、メソβスケールの環境場を解析した。また、Min et al.(2021)³⁾は事例解析を行い、線状対流系の発生について大気場や地形など大局的な観点から解析した。これらの研究では微視的な視点からの解析が行われておらず、またそれらの研究は RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes)に基づいており、偶然的要因の評価に適していない。勃発機構を解明するためには必然・偶然的要因をより正確に表現する必要がある。

これを満たす手法として、計算格子より大きい渦変動は直接解析を行う LES(Large-Eddy-Simulation)がある。Varble et al.(2020)⁴⁾は、LESによりスコールラインを対象としてその運動量輸送に下降気流が寄与することを示し、また、大泉ら(2020)⁵⁾は、広島での線状対流系を例として高解像度計算の有効性を示した。線状対流系の勃発メカニズムを解明する研究はほとんど無い。

表-1 CReSS の計算条件設定

項目	設定値
計算期間	2012 0814 0000JST ~0814 0900JST
初期値及び境界値	MSM の予報値
海面水温	NEAR-GOOS(2012/8/14)
水平解像度	1000m
鉛直解像度	平均 250m
格子数	299(東西)×299(南北)×61(鉛直)

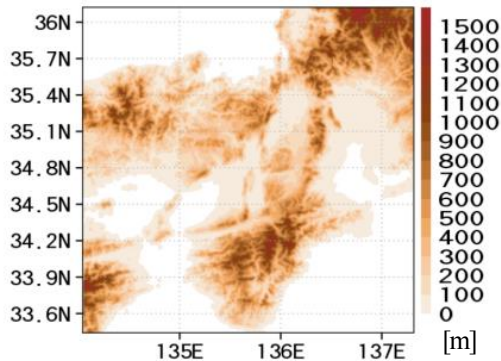


図-1 計算対象領域. 陰影は標高[m]を示す.

(2) 研究の目的

本研究では山口ら(2016)⁶⁾が開発した LES モデルを用いて、2012 年 8 月の宇治豪雨を対象に、線状対流系の勃発メカニズムの解明を目的とする。また、線状対流系の勃発に関する感度実験により、RANS では評価できない必然的要因と偶然的要因の影響を LES により評価する。

2. 雲解像モデル CReSS を用いた再現実験

本章では LES 計算の前段として、1) 次章の LES 計算で着目する物理変数の決定、2) LES での計算時に初期・境界条件として用いるためのデータの取得という 2 つを目的として、メソスケール数値気象モデルの 1 つである雲解像モデル CReSS⁸⁾を用いた再現計算を行う。

(1) 計算条件の設定

宇治豪雨では、対象とする線状対流系が 14 日の 2 時ごろから発生したため、少し前の時刻を初期時刻に設定した。表-1 に示す設定で CReSS の再現計算を行った。また、計算領域は図-1 に示した通りである。

(2) 降雨域の再現性の検証

モデルの再現性を検証するために、CReSS による再現計算の結果と XRAIN による観測の比較を図-2 に示す。雨域の発生位置や大きさ、分布形状はおおよそ一致していることから、おおむね再現できているものとした。

(3) 降水セルの勃発と温位変動の関係性

CReSS による再現計算の結果、バックビルディング現

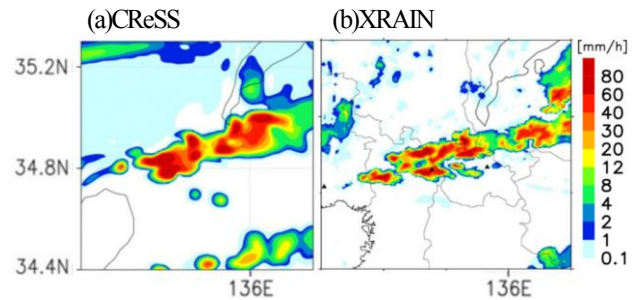


図-2 地上降水強度の比較. (a)CReSS の再現計算における 2012 年 8 月 14 日 3 時 35 分, (b)XRAIN で観測された 2012 年 8 月 14 日 2 時 48 分

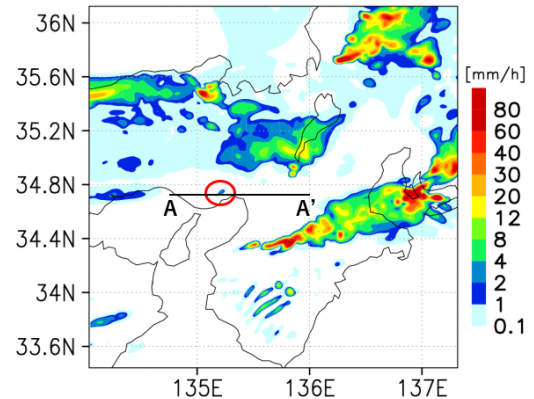


図-3 最初のセルが発生した時刻の地上降水強度[mm/h].

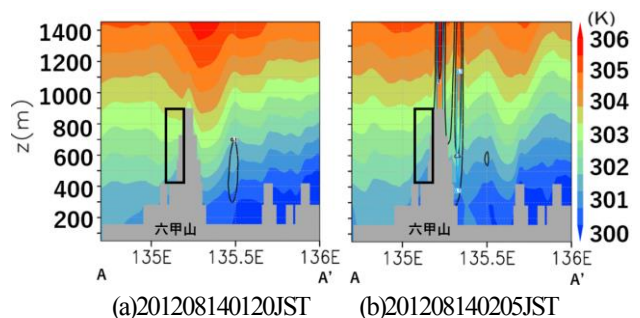


図-4 断面 A-A'における温位[K]の断面図. 黒色、青色の等値線はそれぞれ雲水、雨水混合比[g/kg]を示す.

象による線状対流系の自己組織化が確認できた。その勃発の特性に着目するため、一つ目のセルが発生した場所、時刻での下層における温位について解析する。図-3 は線状対流系へと成長する一つ目のセルが発生した時刻における地上降水強度を示したものである。赤丸で囲んだセルが発生する要因を調べるため、図-3 に示したセルの発生地点を含む断面 A-A'において、セルが未発生 of 1 時 20 分と、一つ目のセルの発生直前の 2 時 5 分の温位の鉛直断面を比較したものが図-4 である。図中の黒い四角で囲んだ部分の温位分布に着目すると、発生直前の時刻である(b)では、(a)と比較してより高い高度に低温位の空気が存在している。そのため、西から伝播する温位の高い空気塊が、温位の低い領域によって持ち上げられる

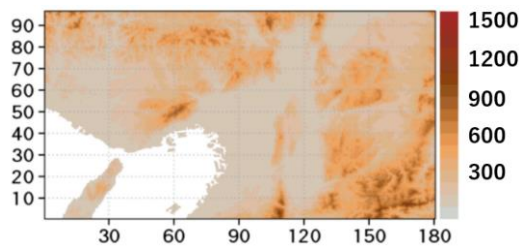


図-5 計算対象領域. 陰影は標高[m]を示す.

表-2 LES の計算条件設定

項目	設定値
計算期間	32,400 秒
初期値及び境界値	CReSS 再現実験における東経 135.276 度及び北緯 34.652 度の鉛直分布を補正
地表面温度	CReSS の出力値
水平解像度	480 m
鉛直解像度	平均 120 m
計算領域の大きさ	180 km(東西)×96 km(南北)×15 km(鉛直)

ことで降雨が発生する可能性が考えられる.

しかし, CReSS では RANS を用いているため, 乱流を正確に表現できない. また, 現実的な空間分布を初期・境界条件として与えており, 大気に擾乱を引き起こす要因が非常に多く, この再現実験は一般性を持ったメカニズムの解明が困難である. したがって, 次章以降ではより一般化した環境場の条件を与え, LES により線状対流系を表現し, その勃発メカニズムに関する解析を行う.

3. LES を用いた数値実験

(1) 計算条件の設定

表-2 に示す設定で LES 計算を行った(以降, Ctrl 実験と呼ぶ). 計算領域を図-5 に示す. 国土地理院基盤地図情報の, 10m メッシュ数値標高モデルを空間平均することで標高データを作成した. 初期・境界条件は前述した CReSS の再現実験の出力値を, 1)初期状態で雲が発生しないよう相対湿度を補正, 2)大阪平野北部で収束値が増大するよう補正した風速場を設定した. それ以外の物理変数については水平一様に与えている. 今回は計算機資源の制約から, LES にはは高くない解像度での計算を

表-3 感度実験名

実験名	変更点
Run1	淡路島を除去
Run2	六甲山を除去
Run3-1~Run3-8	温位の初期値に異なるホワイトノイズを加える

行っており, 高解像度化は今後の課題である.

また, 表-3 に示す必然性・偶然性に関する感度実験を行った(理由は 3. (3), (4)にて後述). Run1 及び Run2 では初期条件としてそれぞれ淡路島と六甲山の標高を 0.1 m とし, それ以外の計算条件は Ctrl 実験と同じものとした. 地形を取り除いた部分では風速については線形補間, 他の物理変数については水平一様に与えた.

Run3-1~Run3-8 については, LES で多用される手法を活用したアンサンブル実験を行った. すなわち, 水平一様場の LES 計算の常套手段として, 乱れの効果を計算するためにごく微小な乱数を物理変数に与えて自然の揺らぎとする方法があり, 本研究では 0.1 K から 0.1 K までの一様分布乱数という性質を持ったホワイトノイズを温位の初期値に与えた. そして, 本感度実験では計算毎に異なるノイズを与えた.

(2) Ctrl 実験の計算結果

a) 線状対流系の形成に関する検討

Ctrl 実験の結果, 得られた雨水混合比の時間変化を図-6 に示す. ここで線状対流系の定義を, 津口・加藤(2014)⁹⁾を参考にして「長軸・短軸比 3.0 以上で 20 km 以上連続し(雨域の不連続区間が 2 km 以下のとき連続とみなす)」, かつ, 山口ら(2018)¹⁰⁾を参考にして「その風上側に $0.007 [s^{-1}]$ 以上の収束がある」雨域とする. 図-6 (c), (d)の矢印で指す雨域の風上側で収束が大きくなり, 緑丸で囲んだ部分で上述した定義を満たす雨域が発生したため, 線状対流系であるとした. その勃発に着目するため時間を遡ると計算開始後 7,680 秒で雨域の勃発(図-6(a))を, 9,780 秒でセルが増加により雨域の拡大(図-6(b))を確認できた. 以上の 2 つの時刻をそれぞれ Preset-1, Preset-2 と名付け, メカニズムの解析を行った.

b) Preset-1 と山岳波の関連

Preset-1 において, 雨域は標高の低い場所で発生している. 下層における温位のもたらす空気塊の上昇への影響を確かめるため, 高度 208 m における温位の水平分布

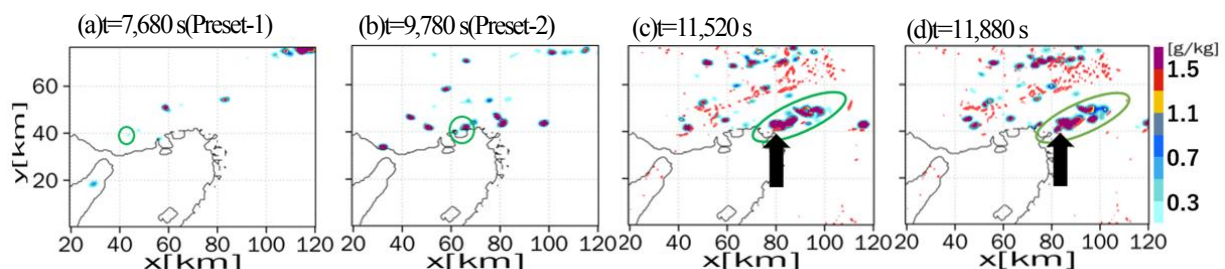


図-6 地上での雨水混合比[g/kg]の時間変化. (c), (d)における赤色域は $7.0 \times 10^{-3} [s^{-1}]$ の収束を示す.

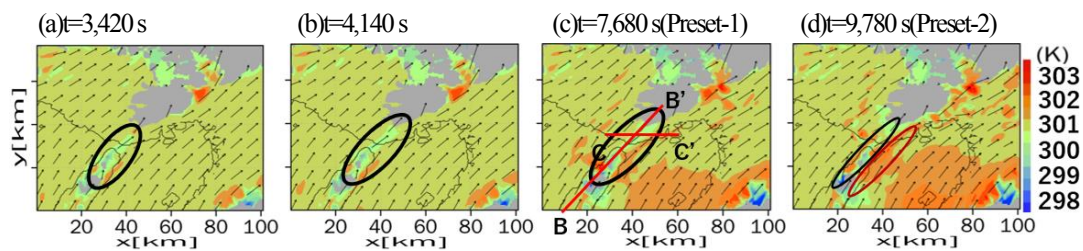


図-7 高度 208 m における温位[K]の水平分布の時間変化。ベクトルは水平風速[m/s]を示す。

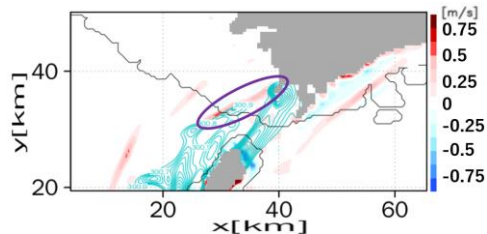


図-8 淡路島北端周辺での 112 m 高度における上昇流の分布。青色の等値線は 301 K 以下の低温位を示す。

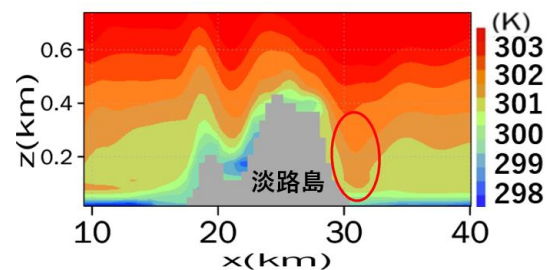


図-10 淡路島を横切る温位[K]東西方向の鉛直断面

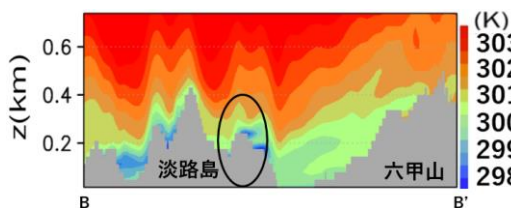


図-9 $t=6,840$ s での断面 B-B' での温位[K]の鉛直分布。

の時間変化を図-7 に示す。図中の黒色楕円で囲んだ領域において淡路島で温位の低い領域が発生し、風向に沿って伝播し、計算開始からおよそ 4,140 秒後に六甲山に到達しており、これが空気塊の持ち上げに寄与した可能性が考えられる。そのことを確認するため、淡路島北端周辺の高度 112 m における、Preset-1 より少し前の時刻の上昇流の水平分布を図-8 に示す。確かに図中の丸で囲んだ部分で低温位領域に沿った上昇流が発生しており、空気塊が低温位領域に持ち上げられていることが確認できる。低温位領域の鉛直分布を調べるため、図-7(c)に示す断面 B-B' における Preset-1 より少し前の時刻の温位分布を図-9 に示す。淡路島の風下側で温位分布を通して波動の伝播がみられたため、山岳波が発生していると考えられる。淡路島の北端から低温位塊は六甲山を上昇するように分布しており、これが雨域を発生させた。この低温位領域の形成過程については後述する。

以上をまとめると、淡路島で生成された低温位領域が六甲山の地形とともに空気塊を持ち上げ、対流を引き起こすことがわかった。

c) Preset-2 と山岳波の関連

続いて、Preset-2 における雨域の拡大要因について解析を行う。図-7(d)の Preset-2 における温位の水平分布において、六甲山周辺に着目すると、図中の左側の黒色楕円で示すように淡路島の北部から伝播した低温位領域が存在する。一方、右側の赤色楕円で示すように淡路島の東側において発生した温位の高い領域が存在し、六甲山

の東側まで伸びている様子がわかる。低温位領域については、Preset-1 同様、淡路島から伝播した低温位空気塊が六甲山にぶつかって拡大するとともに、それを降雨による冷氣プール効果が強化していた。一方、高温位領域は淡路島の東側で発生したものが気流に乗って移流してきたものである。それら温位の異なる気塊が六甲山の東側で衝突したこと、高温位塊が下層に侵入して大気不安定になったことで、雨域は拡大した。

最後に、なぜ淡路島の東側で高温位領域が生成されたのかを述べる。図-10 は淡路島を東西方向に横切る断面における温位の鉛直分布である。温位分布が地形に沿って波動形状を呈しており、淡路島の東側で高温位塊が波動によって低い高度まで落ちてきている様子がわかる。これは Preset-1 のときと同様山岳波であると考えられる。そして、下層の南西風によって淡路島の東側から六甲山の東側へと移流したと考えられる。

以上をまとめると、Preset-1 と同様に、淡路島から六甲山への低温位領域の伝播が起こり、六甲山にぶつかって東に回り込むと同時に、淡路島の山岳波によって淡路島の東側で生じた高温位塊が六甲山の東部へと移流し、低温位と高温位の空気塊が衝突したことによって対流が発生したことが明らかになった。

(3) 地形を取り除く感度実験

a) 淡路島を取り除いた感度実験 (Run1)

淡路島を取り除くことで低温位及び高温位空気塊の侵入がなくなり、線状対流系が勃発しなくなることを期待して Run1 を行った。

Preset-1 における高度 208 m での温位の水平分布を図-11 に示す。Ctrl 実験の結果(図-7(c))と比較すると、淡路島周辺では低温位及び高温位領域は存在しない。この結果からも、着目していた低温位及び高温位空気塊はやはり

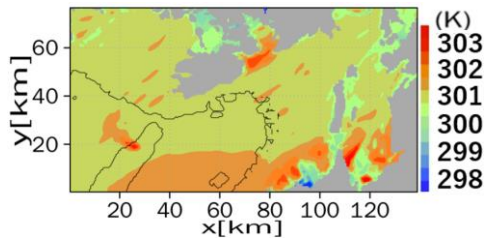


図-11 淡路島を取り除く感度実験における Preset-1 での
温位の水平分布(高度 208 m).

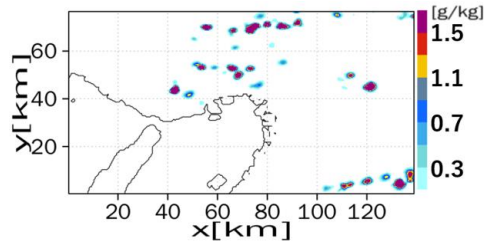


図-12 淡路島を取り除く感度実験における, $t=11,820$ s
での地上の雨水混合比[g/kg]を示す.

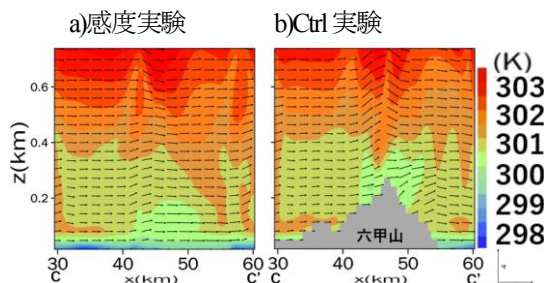


図-13 断面 C-C'における Preset-1 での温位分布の比較.

淡路島によって形成されていたことを意味する.

また, 図-6(d)と同じ時刻における雨域の様子を図-12に示す. 大阪平野北部での降雨は Ctrl 実験と比較して大変少なく, その後も Ctrl 実験のような降雨は発生しなかったことから, 淡路島の重要性がよく示された.

b) 六甲山を取り除いた感度実験 (Run2)

次に六甲山が及ぼす雨域の発生に対する影響を評価する. 淡路島を取り除いた場合と同様に, 六甲山のみを取り除いた地形を作成した.

本感度実験と Ctrl 実験に関して, 図-7(c)に示した断面 C-C'における温位の鉛直分布を比較したものを図-13に示す. 301 K 以下の低温位領域は高度約 200 m までしか達しておらず, Ctrl 実験の約半分の高度までの侵入であったため, 低温位塊の位置する高度が低く, 西側から移流してきた空気塊が十分に上昇しなかったと考えられる. さらに六甲山の地形による強制上昇効果が全く働かないため, 上昇流が継続しなかったと考えられる. また, 図-6(d)と同じ時刻における雨域の様子を図-14に示す. 大阪平野北部での降雨は Ctrl 実験と比較して大変少なく, 六甲山の重要性が示された.

低温位領域がどのように形成されたのかを小倉 (1997)¹¹⁾を参考に, 解析的に示す. 図-9と同じ時刻, 断

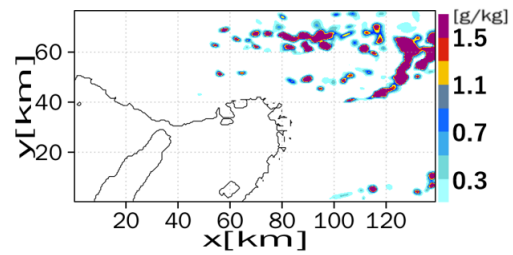


図-14 六甲山を取り除く感度実験における, $t=11,820$ s
での地上の雨水混合比[g/kg]を示す.

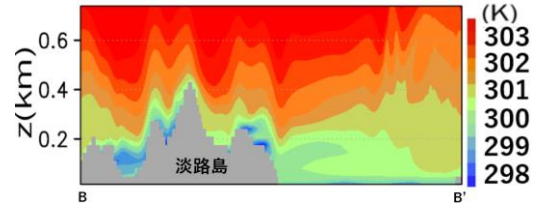


図-15 $t=6,840$ s での断面 B-B'での温位[K]の鉛直分布.

面の温位の鉛直分布を図-15に示す. 図-9と比較するとその跳躍の高度は小さいが, 六甲山がない場合にも風下で温位の跳躍がみられることから, 六甲山による強制上昇とともに気流と山岳の関係が要因になっていると考えられる. 図-9の黒丸で囲んだ部分を山岳であるとする, Froude 数はおおよそ 0.18, 無次元化した山頂の高さはおおよそ 0.73 となり, 山岳の下流で定常的な風下ジャンプが起こる. したがって, 低温位領域は気流と淡路島の山岳の関係により形成されたものであると示された.

(4) 偶然性に関する感度実験の検討 (Run3-1~Run3-8)

本研究の将来的な目標の一つは, 線状対流系の勃発について偶然性と必然性のどちらの性質が強いのかを明らかにすることである. その性質を検証するために, Run3-1~Run3-8の感度実験を行った.

その結果として, それぞれの計算においてバックビルディングを伴い, 雨域が最も線状を呈する時刻における地上での雨水混合比を図-16に示す. 時刻や発生場所は異なるが, 図に楕円で囲んだように, 線状対流系が発生している事例は 5 事例見られた. 一方で, 4 事例は線状対流系が発生しなかった.

降雨をもたらす要因となった, 第 3 章で述べた淡路島から伸びる低温位領域はどの事例でも確認された. また, その低温位領域における温位初期値に与えたホワイトノイズの効果を確認するため, Ctrl 実験での雨域発生地点付近の温位の領域平均値を同じ時刻・場所でそれぞれの計算について求めた. その結果, 最大値を記録した計算と最小値を記録した計算の差は 0.05 K となり, 初期値に与えた 0.2 K というホワイトノイズの幅よりも小さいことから, 必然性の強い現象であることが明らかとなった. 翻って, 勃発から自己組織化するまでの過程において偶然性が大きく関わる可能性が示唆された.

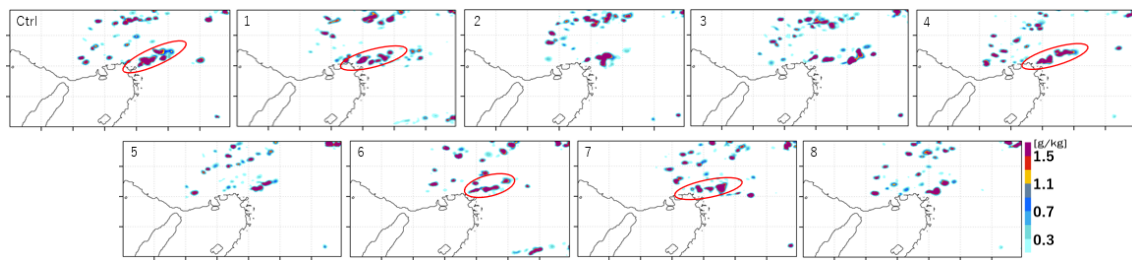


図-16 各計算における雨水混合比[g/kg]を示す。

4. 結論

本研究では、LESを用いて線状対流系を表現し、勃発メカニズムを解析した。必然的要因については、淡路島北部で山岳波が発生し、六甲山での強制上昇により低温位空気塊がより高い高度まで持ち上げられたため高温位塊が上昇し、雨域が発生した。その後、発生時と同様の効果で雨域が拡大し、淡路島での東西方向の山岳波により降下した高温位空気塊が低層に侵入することで大気不安定となり、雨域がさらに拡大した。従って、線状対流系の発生に対する山岳波の重要性が明らかになった。

また、地形の影響を確認するため、淡路島や六甲山を取り除いた結果、どちらも線状対流系は形成されなかったため、発生にはこれら地形が重要であると示された。

さらに偶然的要因の影響について調べるため、温位の初期値にノイズを与えて感度実験を行った。解析の結果、低温位領域の形成は必然的な現象であり、自己組織化までにそれ以外の偶然性が寄与する可能性が示唆された。

参考文献

- 1) 中北英一, 矢神卓也, 池淵周一: 1998 年那須集中豪雨の生起・伝播特性, 水工学論文集, Vol.44, pp.109-114, 2000.
- 2) 高峯良規, 渡来靖, 吉崎正憲: 平成 20 年 8 月末豪雨をもたらした線状降水帯に関する領域気象モデルを用いた解析, 日本地理学会発表要旨集, Vol.84, pp.110, 2013.
- 3) Min, K.-S., Tsuboki, K. Yoshioka M.K., Moroda Y. and Kanada S: Formation mechanism of a stationary line-shaped precipitation system in the Kinki District, Japan—Case study on 1 September 2015 event—, J.Meteor. Soc. Japan, Vol.99, No.2, pp.357-377, 2021.
- 4) Varble, A., Morrison, H., & Zipser, E.: Effects of Under-Resolved Convective Dynamics on the Evolution of a Squall Line, Monthly Weather Review, Vol.148, No.1, pp.289-311, 2020.
- 5) Oizumi, T., Saito, K., Duc, L., Ito, J.: Ultra-high Resolution Numerical Weather Prediction with a Large Domain Using the K Computer. Part2: The Case of the Hiroshima Heavy Rainfall Event on August 2014 and Dependency of Simulated Convective Cells on Model Resolutions, Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol.98, No.6, pp.1163-1182, 2020.
- 6) 山口弘誠, 高見和弥, 井上実, 須崎純一, 相馬一義, 中北英一: 豪雨の種を捉えるための都市気象 LES モデルの開発と積雲の生成に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第 59 号 B, pp.256-297, 2016.
- 7) 山口弘誠, 高見和弥, 井上実, 中北英一: 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), Vol.72, pp.205-210, 2016.
- 8) Tsuboki, K. and Sakakibara, A.: Large-Scale Parallel Computing of Cloud Resolving Simulator, *ISHPC 2002: High Performance Computing*, pp.243-259, 2002.
- 9) 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・特徴に関する統計解析, 天気, Vol.61, No.6, pp.19-33, 2014.
- 10) 山口弘誠, 堀池洋祐, 中北英一: 平成 29 年 7 月九州北部豪雨における線状降水帯の予測可能性と発達機構の解析, 土木学会論文集, B1(水工学), Vol.74, pp.277-282, 2018.
- 11) 小倉義光: メソ気象の基礎理論, pp.52-54, 東京大学出版会, 1997.

(Received May 31, 2022)

(Accepted September 1, 2022)

OUTBREAK MECHANISM IDENTIFICATION OF LINE-SHAPED CONVECTIVE SYSTEMS USING LES FOCUSED ON POTENTIAL TEMPERATURE FLUCTUATION BY MOUNTAIN WAVES

Kosei YAMAGUCHI, Yoshiyuki KAWATANI and Eiichi NAKAKITA

Recent years, there is a lot of disasters from line-shaped convective systems. The mechanism of outbreaks has not been clarified, and it is difficult to predict it. Necessity and contingency factors were rarely discussed separate. In this study, numerical experiments were conducted using LES (Large-eddy-simulation), which can exactly calculate turbulence and evaluate necessity and contingency in the presence of contingency, in order to distinguish each factor and to elucidate the detailed mechanism of outbreak. The result indicates that mountain waves caused by the topography of Awaji Island form a low-temperature region in the southern part of Mt. Rokko, contributing to the rise of other warm air masses. In addition, an ensemble experiment with random noise in the initial value of potential temperature suggested the existence of an influence of contingency factors on occurrence.