

# 都市気象 LES モデルを用いた豪雨の種となる 熱的上昇流と渦管の組織化の解明

\*千賀幹太<sup>1</sup>, 山口弘誠<sup>2</sup>, 中北英一<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 京都大学大学院工学研究科, <sup>2</sup> 京都大学防災研究所),

## 1. 研究の背景と目的

近年豪雨による災害が頻繁に報告される。その一つに2008年神戸都賀川での水難事故をもたらしたゲリラ豪雨による災害がある。ゲリラ豪雨とは、突如発生・発達する積乱雲がもたらす局地的な豪雨のことであり、人命に被害を及ぼす危険性がある。ゲリラ豪雨を引き起こす積乱雲(図1)に対し、過度を用いた豪雨の早期探知[1]など、降水粒子生成後に焦点をあてた研究が多くなされてきた。さらに現在、レーダーでは部分的にしか観測できない降水粒子生成前に焦点を当てた研究も新たになされてきている。この段階を豪雨の「種」と呼び、山口ら[2]が開発した都市気象 LES(Large Eddy Simulation)モデルによって豪雨の「種」である熱的上昇流や渦管の発生や境界層突破のメカニズムが明らかになりつつある。しかし、境界層を突破した熱的上昇流が積雲や積乱雲の生成につながる部分、つまり降水粒子生成につながる部分の詳しいメカニズムが明らかでない(図2)。ここでは、上昇流や渦管の組織化が起きていると考える。よって本研究では、この部分での熱的上昇流と渦管の組織化のメカニズムを明らかにすることを目的とする。

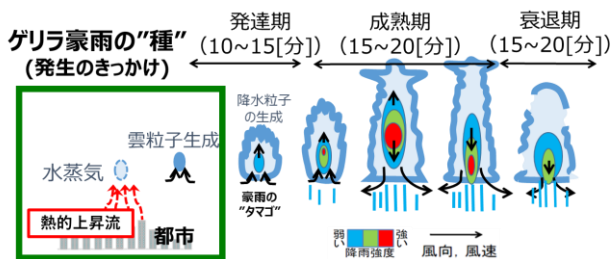


図1：積乱雲の一生の模式図

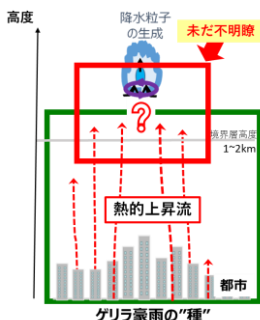


図2：研究対象

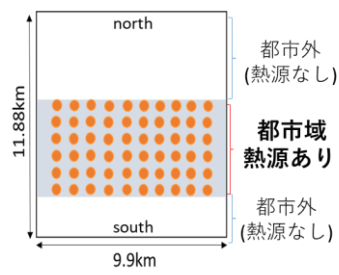


図3：モデル模式図

## 2. 組織化のメカニズム解明のための理想実験の設定

本研究では、境界層を突破した上昇流と渦管が境界層付近とその上層で組織化が起きているのではないかと考え、そのメカニズム解明を目指し、都市気象 LES モデルを用いた理想実験を行った。豪雨の「種」が発生しやすい神戸市を対象として、南から流入する暖湿流が神戸の都市効果によって熱的上昇流として持ち上がり積雲・積乱雲へと成長する過程を計算した。まず、モデル設定について述べる(図3)。地形や建物を考慮しないフラットな地表面を設定し、格子間隔は水平方向、鉛直方向ともに60mとした。東西、南北、鉛直の順に165×198×133格子で、9.90km × 11.88km × 7.98kmの計算領域とした。境界条件は東西を free-slip, 南側を流入境界、北側を放射境界とした。また、先行研究で解析された上昇流と同程度の強さ、大きさ、発生間隔のものを発生させられるように、都市域にのみ熱源を定常的に、等間隔に与えた。初期境界値、流入境界値は、2017年から2019年の3年間の8月のうち、兵庫県で午後ゲリラ豪雨が発生した日の12時の気象庁メソ数値予報モデルデータの中で、南風が卓越する9日間を参考に、その平均的な状態として、南北風、温位、水蒸気混合比を水平一様に与えた。この計算を Ctrl とする。

さらに、大気の状態が上昇流の組織化に与える影響と組織化が上昇流自体に与える影響を評価するために感度実験を行った。影響を及ぼす大気の状態として(1)大気中の水蒸気量(2)大気の安定度(3)流入風の鉛直シアを考え、これらについて積乱雲がより発達するように変更した計算(Run1,2,3)を行った(表1)。

表1：感度実験

	Ctrl	Run1	Run2	Run3
大気中の水蒸気量	平均	多い	平均	平均
大気の安定度	平均	平均	不安定	平均
流入風の鉛直シア	平均	平均	平均	大きい

### 3. 解析結果

#### (1)組織化のメカニズム解明

Ctrl の計算で、境界層付近とその上層で東西方向に上昇流が組織化した。このプロセスを組織化前後の鉛直渦度の水平断面図(図4)を用いて微視的に説明する。カラーバーの暖色系が正、寒色系が負の鉛直渦度を示し、赤色のコンターが2m/s以上の上昇流を示す。上昇流の組織化のメカニズムは、上昇流に伴う渦管により生じる風の流れによって上昇流が移動し組織化していくというものである(赤点線の丸)。組織化する西側の上昇流の南東側にある負の渦管循環により、時計回りの風の流れが生じる。この流れによって上昇流が東に移動する。東側の上昇流も、南西側にある正の渦管循環により、反時計回りの風の流れが生じ、上昇流が西に移動し、やがてこれらが組織化する。さらに、初めて渦管の組織化も確認された(黒点線の丸)。正負両方の渦管が相互作用し、それぞれが強め合い周辺の風の循環を変化させることで渦管が移動し新たな大きな循環が生じる。そして、こうした上昇流や渦管の組織化が、積乱雲の一生における雲粒子の生成から降水粒子の生成の段階へのスケールアップに重要な役割を果たすことを確認した。

#### (2)大気の状態が組織化に与える影響

Ctrl と Run1,2,3 について組織化具合を定量的に調べた。各 Run で上昇流が、東西方向に組織化している上昇流と接する表面積を調べ、頻度分布で示す(図5)。大気中の水蒸気量が多い条件の計算(Run1)でかなり表面積が大きい、つまり組織化具合が大きいことがわかる。他の計算に関しては、大きな差はない。さらに、熱的浮力も調べ、Run1 で熱的浮力が大きいことがわかった。以上より、Run1 で組織化具合が大きいのは、水蒸気量が多いことで、広い範囲で雲生成時の潜熱放出量が増え、広い範囲で新たに正の熱的浮力が生じ、上昇流の幅が太くなり、組織化しやすかったためと考える。

#### (3) 上昇流の組織化が上昇流自体に与える影響

組織化によって上昇流自体がどのように変わったかを調べた。組織化している部分の表面積が大きいということは、上昇流の体積に比べて相対的にエントレインメントする表面積が小さくなり、熱的浮力が増加すると考えられるため、組織化前後の熱的浮力を比較する。Ctrl と Run1 の組織化前後の熱的浮力を比較すると、両計算ともに組織化により熱的浮力が大きくなり、組織化具合の大きい Run1 のほうがその増加量が大きかったことがわかった。以上より、組織化によって熱的浮力が増加し、上昇流自体の勢力が維持されると考える。

### 4. 結論と今後の課題

都市気象 LES モデルを用いた理想実験により上昇流と渦管の組織化を再現した。そして、渦管による熱的上升流周りの気流の流れが組織化の重要なファクターであると結論付けた。さらに、組織化が積乱雲の一生における雲粒子の生成から降水粒子の生成の段階へのスケールアップに重要な役割を果たすことを確認した。

今回、組織化が起こると上昇流がスケールアップし成長することがわかったが、成長した上昇流全てで組織化が起こっていたわけではなかった。そこで、これからの課題として、組織化以外の要因解析を進めていく。さらに、今回の成果と合わせて、積乱雲生成のトリガースキームとしてパラメタライズしてメソ気象モデルの精緻化へ還元していきたいと考える。

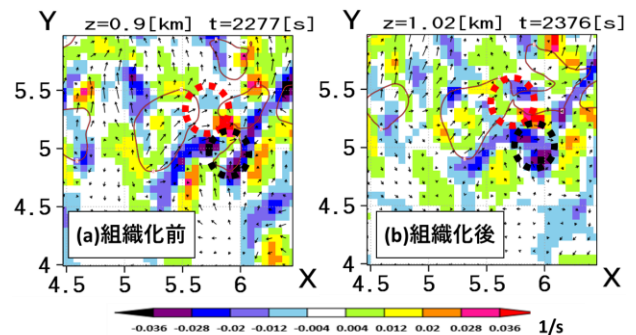


図4：組織化前後の鉛直渦度の水平断面図

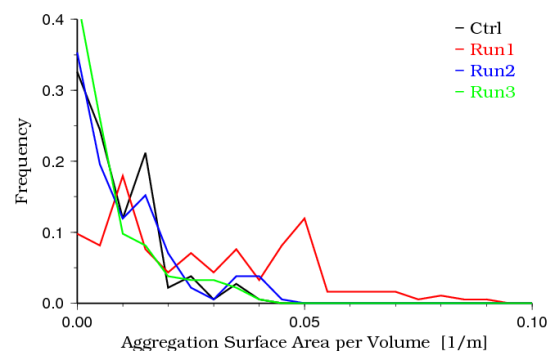


図5：各 Run の組織化具合の頻度分布

#### 参考文献

- [1] Nakakita, Eiichi et al. (2017), Early Detection of Baby-Rain-Cell Aloft in a Severe Storm and Risk Projection for Urban Flash Flood, *Advances in Meteorology*, 15pp., Article ID 5962356.
- [2] 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), 第72巻, pp.I\_205-I\_210.