

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

京都大学大学院工学研究科
京都大学防災研究所
京都大学防災研究所

学生会員 ○千賀 幹太
正会員 山口 弘誠
正会員 中北 英一

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，渦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」である熱的上昇流と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こっていると考える．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．

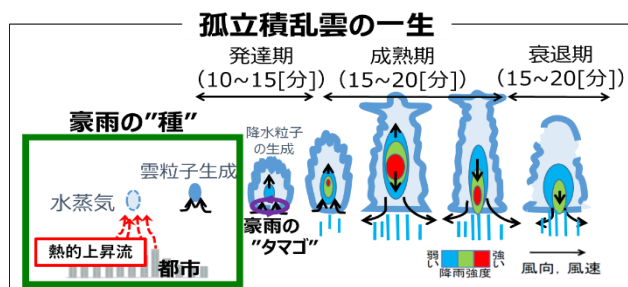


図1 積乱雲の一生の模式図.

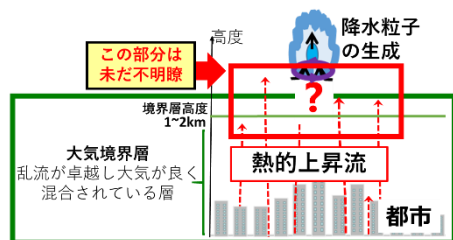


図2 研究対象領域

2. 併合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併合化が起こっ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 格子とり，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，兵庫県で午後に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や渦管の併合化に与える影響を定性的に評価するために感度実験を行った．表 1 に示すように，(1) 大気中の水蒸気量(2)大気の安定度(3)流入風の鉛直シアの大きさをより積乱雲が発達するように変更した計算(Run1,2,3)を行った．

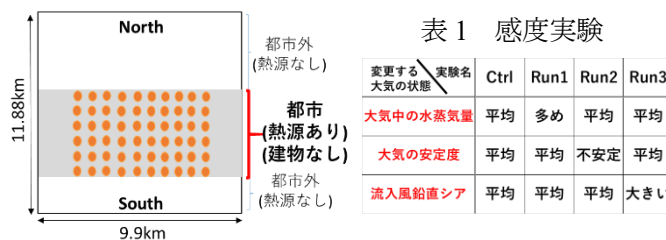


図3 モデル模式図

表 1 感度実験

変更する大気の状態	実験名	Ctrl	Run1	Run2	Run3
大気中の水蒸気量		平均	多め	平均	平均
大気の安定度		平均	平均	不安定	平均
流入風鉛直シア		平均	平均	平均	大きい

キーワード ゲリラ豪雨，LES モデル，乱流，組織化，熱的上昇流，渦管

連絡先 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄防災研究所 中北研究室 TEL 07-7438-4264

3. 解析結果

(1) 併合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併合化したのが見られた。このプロセスを微視的に解析することで、図4のように、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併合化していくことが確認された(赤点線の丸)。すなわち、図(a)で、併合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。東側の上昇流も正の渦管循環により、反時計回りの風の流れが生じ、西側に移動し、やがて併合化する。さらに、初めて渦管の併合化も確認された(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併合化が、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) 大気の状態が併合化に与える影響の評価

Run1,2,3 どの計算も Ctrl より併合化が起きやすかったが、特に大気中の水蒸気量が多い条件の計算(Run1)で併合化が起きやすく、併合化によるスケールアップの規模が大きかった。これは、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、併合化しやすくなったためと考えられる。

(3) 併合化が上昇流の発達へ与える影響の評価

併合化が上昇流の発達に寄与するのかどうかについて考察した。Run2 においてかなり高い高度(5km)まで発達した3つの上昇流に着目し、ここまで発達するまでに併合化しているのかどうか調べた。図5にある上昇流の鉛直風速分布の東西断面図を時系列順に示す。矢印で示した上昇流に着目されたい。図(b)において境界層上部とそれより少し高い高度にかけて併合化していることがわかる。約500s後の図(c)では併合化しスケールアップした上昇流が、その勢力を強め発達していった。他の2つの上昇流に関しても同様で、発達した上昇流は下層で併合化していた。すなわち、発達した上昇流は必ず併合化プロセスを経ていたものであった。併合化の有無が上昇流の発達の新たな指標となることが期待される。

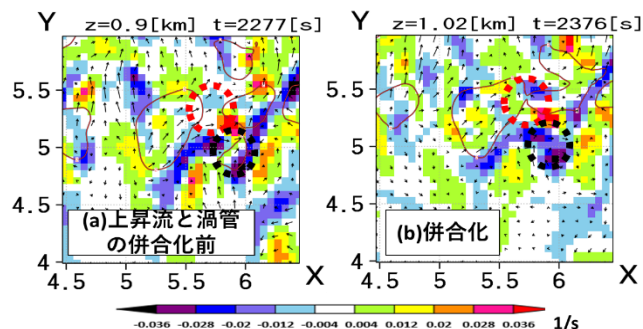


図4 時系列順に示した鉛直渦度の水平断面図。

暖色系が正、寒色系が負の鉛直渦度を示す。

赤色のコンターが2m/s以上の上昇流を示す。

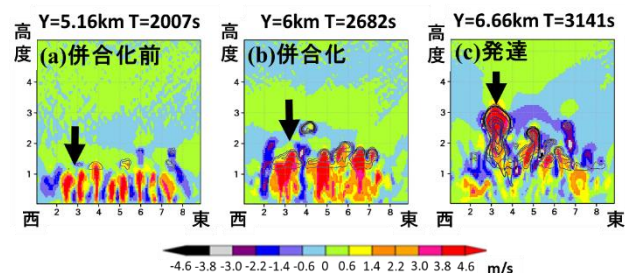


図5 時系列順に示した鉛直風速の東西断面図。

暖色系が強い上昇流を表す。

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併合化を再現した。そして、渦管による熱的上昇流周りの気流の流れが併合化の重要なファクターであると結論付けた。さらに、併合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。また、発達した上昇流は必ず併合化プロセスを経ていたものであるとわかった。今回併合化した上昇流のスケールは1km程度であり、現実の発達した積乱雲につながる上昇流の水平スケールより小さいと考える。よって、スケールアップした上昇流や渦管が集合化し、再び併合化するというプロセスを繰り返していくことで発達する積乱雲へ組織化すると想定される。現段階ではこのような段階的な併合化はみられていないが、併合化の有無と発達具合の定量的な評価と合わせて検証しているところである。

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.