

都市気象 LES モデルと境界層レーダーを用いた大気境界層を突破する熱的上昇流の発見

京都大学工学部 学生員 〇小西 大 京都大学防災研究所 正会員 山口 弘誠
京都大学防災研究所 正会員 中北 英一 京都大学院工学研究科 学生員 土橋 知絃

1. 背景と目的

近年都市における局地的豪雨（ゲリラ豪雨）は時間・空間スケールの小ささから予測が困難で、都市に重大な被害をもたらしており、積乱雲発生初期の段階である豪雨のタマゴに焦点を当てた研究・観測が行われてきた。その研究の新たな段階として、積乱雲の発生する前のステージが新たな着眼点となっている。都市における熱的上昇流がどのような条件で境界層を突破し積雲を生成するかを解析し、ゲリラ豪雨の解明に繋げていく。本研究は山口ら（2016）が開発した都市気象 LES モデルを用いて熱的上昇流が境界層を突破する要因解析を目的とし、上昇流を観測可能な境界層レーダーによる検証を行う。

2. モデルの概要

上昇流をモデルで捉える為には都市の建物群の形状をできるだけ陽に解像し、上昇流と渦の関係や建物群から生じる乱れの効果を詳細に解ける乱流モデルを用い、また都市キャノピー内部から積雲が生成する境界層上空までシームレスに扱えることが必要となる。開発したモデルの概要は以下のようになっている。（表 1）

表 1:LES モデルの概要

基礎方程式系	非静力準圧縮系
予報変数	$u \ v \ w \ p \ \theta \ q_v \ q_c \ q_r$
座標系	直角直交座標系
計算格子	スタッガード格子
離散化法	有限差分法 (FAVOR法)
時間離散化法	2次精度Adams-Bashforth法
空間離散化法	2次精度中心差分 移流項:3次精度風上差分
音波の扱い	HE-VI法
SGSモデル	Smagorinsky-Lilly (Smagorinsky, 1963; Lilly, 1966)
境界条件	側方:周期, 勾配なし, free-slip, 放射 上空:free-slip
壁面の取り扱い	パルク (Louis,1979)
雲物理モデル	暖かい雨のパルク (Kessler, 1969)

3. 境界層レーダーの概要

今年度神戸市長田区に設置した LQ-7 という小型のウィンドプロファイラーレーダー(WPR)を使用する。中心周波数が 1357.5MHz でアンテナはアクティブフ

ェーズドアレイを使用する。この小型の WPR により対流圏下層の風速・風向をリアルタイムで 3 次元的に捉える事ができる。大気境界層からその上空までを包括的に捉える事により境界層を突破する上昇流の観測が可能となった。

4. 解析

4.1 計算条件

今回の解析対象は夏季晴天日且つ境界層レーダー周辺に積雲が生成していた日とし、2017 年 8 月 18 日 12 時を初期値として計算を開始した。格子数は東西（x 方向）、南北（y 方向）、鉛直方向（z 方向）の順に 198×298×100 で最上端が 4871m である。格子間隔は東西南北に 60m、鉛直方向に 4~60m であり、高解像度である事から熱的上昇流 1 つ 1 つを捉える事ができる。境界条件は東西が free-slip、南側が流入境界、北側が放射境界とした。初期値については気象庁 MSM-GPV のデータを空間平均し、南北風、温位、水蒸気混合比を水平一様に与える。都市における熱的效果の表現は人工土地被覆の効果と人工排熱の効果が考慮されている。

4.2 境界層高度の推定

始めに熱的上昇流が境界層を突破するかの議論をするために、境界層の高度推定を行った。境界層の特徴として、乱流が卓越する事と日中の境界層の高度変化する事が挙げられる。境界層の特徴から特に温位と乱流エネルギーから境界層高度推定を行うが、本研究で都市における境界層高度は計算開始から 1 時間後からは 1.2km であった事から、境界層高度を 1.2km と推定した。

4.2 境界層レーダーとの比較

図 1 に示すようにレーダーとモデルによる計算結果を比較する。赤で示す上昇流と青で示す下降流が交互に見られる事や、境界層を突破した熱的上昇流が上手く捉える事ができ、モデルの妥当性を評価できた。

キーワード：都市気象 LES、大気境界層、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 0774-38-4264

4.3 境界層を突破する熱的上昇流

次に境界層レーダー周辺の都市域に着目し、境界層を突破する熱的上昇流の特徴を捉える。本研究では突破した2つのケースを発見した。ケース1では図2に示すように青丸で示す熱的上昇流が強い熱的浮力を持っていた。強い熱的浮力によって他の熱的上昇流よりもより高い高度まで熱的上昇流が到達したと考える。また、別事例において、下層における熱的上昇流の組織化が見られ、熱的浮力の大きくなる要因の1つと考える。ケース2では、図3に示すように黒丸で示す先行する熱的上昇流が上層に存在する温位勾配の大きな安定層を解消し、青丸で示す後続の熱的上昇流がその隙間を通して境界層を突破した。よって狭い範囲で高頻度で発生した事による空間・時間スケールに左右される事が明らかとなった。つまり、熱的上昇流が境界層を突破する要因は熱的浮力という内的要因と、組織化や別の熱的上昇流による安定層という外的要因が存在する事が分かった。

4.4 渦管解析

境界層を突破する熱的上昇流に関して渦管の解析を行った。ケース1では大きな鉛直渦度は見られず、ケース2では大きな鉛直渦度が見られた。この事から熱的浮力と渦度の強さの関係が示唆された。また、場の風速の鉛直シアが高度0.1kmから0.6kmでは負、高度0.6kmでは正であり正負が逆である事から、水平渦管の回転の方向が逆になり、その結果図4に示すように水平渦管が熱的上昇流によって立ち上げられて形成された正負の立ち位置の異なる鉛直渦管が2つ見られた。

5. 結論

本研究では都市気象LESモデルと境界層レーダーによって熱的上昇流が境界層を突破する要因の解析を行った。レーダーと比較して境界層を突破する熱的上昇流の再現が再現でき、モデルの妥当性が評価できた。そして境界層を突破する要因として強い熱的浮力と先行する熱的上昇流による安定層の解消の2つがみられた。また渦管解析に関して、先行研究では正負の立ち位置が同じ鉛直渦管のペアしか見られなかったが、本研究では風速の鉛直シアが高度毎に異なる事から立ち位置が逆になる鉛直渦管のペアが見られた。またケース1、ケース2によって鉛直渦度の強さと熱的浮力の強さの関係性が示唆された。そ

の2つ関係性を明らかにしていく事が今後の課題である。

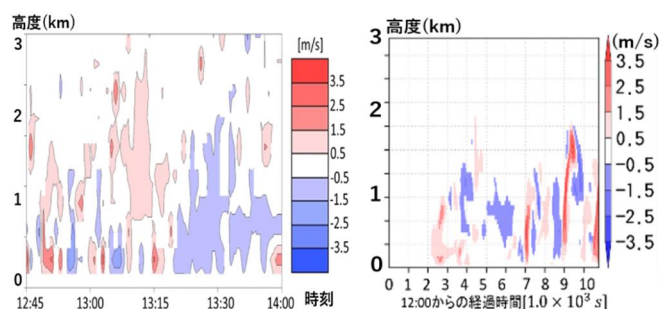


図1：境界層レーダー上空の上昇流(左図)とモデルによる境界層レーダー付近の上昇流の時間変化

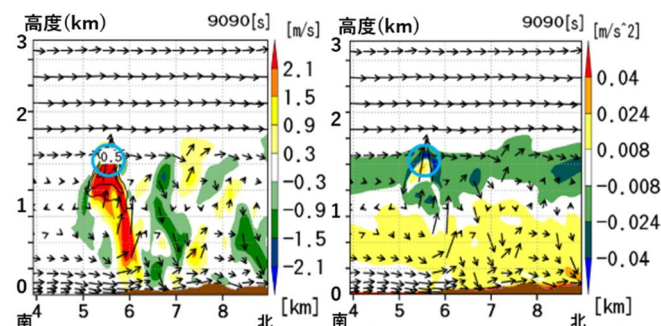


図2：熱的上昇流(左図)と熱的浮力(右図)の鉛直断面

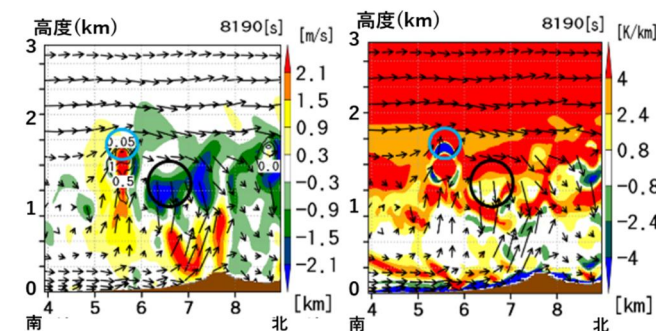


図3：熱的上昇流(左図)と温位の鉛直勾配(右図)の鉛直断面

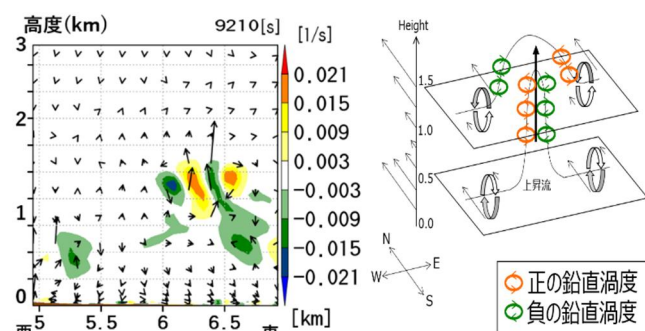


図4：左図が鉛直渦度の鉛直断面、右図がその模式図

参考文献：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)，第72巻，pp.205-210, 2016.3.