

都市気象 LES モデルを用いた大気境界層を突破する熱的上昇流の発見と渦管解析
 Study of Thermals and Vortex Tubes Breaking through Atmospheric Boundary Layer
 by Urban Meteorological Based on Large Eddy Simulation

○山口弘誠・小西大・土橋知紘・中北英一

○Kosei YAMAGUCHI, Dai KONISHI, Tomohiro TSUCHIHASHI, Eiichi NAKAKITA

It is aimed to analyze under what conditions thermals generated by the heat and shape effect of the city break through the atmospheric boundary layer. I used the urban meteorological Large Eddy Simulation model and the thermals over Kobe City are our targets. As a result, three factors were confirmed on the thermals which break through the atmosphere boundary layer. One factor is strong thermal buoyancy, and second factor is elimination of the stabilizing layer by another thermal and last factor is vapor amount. In addition, we could confirm the assembly of vortex. The assembly occur by vertical shear of horizontal wind. It is possible that the assembly strengthen each vortex. At last, I analyzed which factor is important for generating cumulus cloud.

1. 背景と目的

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、近年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あてた研究・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。本研究では、積雲生成のトリガーの1つである都市の熱や地形・建物による強制上昇によって発生する熱的上昇流に注目して、ゲリラ豪雨の解明に繋げていく。山口（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とそれに伴う渦管の挙動の解析を目的とする。

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	$u \ v \ w \ p \ \theta \ qv \ qc \ qr$
座標系	直角直交座標系
計算格子	スタagger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	バルク (Louis, 1979)
雲物理モデル	暖かい雨のバルク (Kessler, 1969)

3. 解析

3.1 計算条件

解析対象は夏季晴天日且つ神戸市上空に積雲が生成していた日とし、2017年8月18日12時から計算を行った。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。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。

3.2 境界層を突破する熱的上昇流

本研究では突破した3つのケースを発見した。なお、境界層高度は1.2 kmと推定した。ケース1では図1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た事が要因となり、青丸で示す後続の熱的上昇流が境界層を突破した。つまり狭い範囲かつ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。ケース2では図2の青丸で示すように熱的上昇流が強い熱的浮力を持っている事が要因となり、高度2.1kmまで熱的上昇流が到達した。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3では、ケース1, 2 どちらの要因も効いていることに加え、図3の灰丸で示すように境界層内上層に水蒸気が多く溜まり、凝結量が多い事が要因となり、青丸で示す熱的上昇流が境界層を突破した。豊富な水蒸気により凝結熱が大きく、ケース1, 2 と比べてもより高い高度3 km弱まで到達した。つまり、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解消、境界層上層の水蒸気量という外的要因が存在することが分かった。

3.3 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。本研究では、先行研究で見られた鉛直渦管のペアに加え、図4に示すような鉛直渦管の集合体が見られた。これは、場の風速の鉛直シアが高度毎に異なる事により、上下で発生した回転方向の異なる水平渦管が発生し、上昇流によって押し上げられできた鉛直渦管のペアが2つずつ並んだものである。集合体になる事によって、渦管同士を強め合うのか、またそれが積雲生成に関係しているのか、それは今後の課題とする。

4. 結論

本研究では都市気象LESモデル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。突破する要因として熱的浮力と先行する熱的上昇流による安定層の解消、また境界層上層の水蒸

気量の3つが効いている事が分かった。また渦管解析に関して、風速の鉛直シアが高度毎に異なる事から発生した鉛直渦管の集合体が見られた。

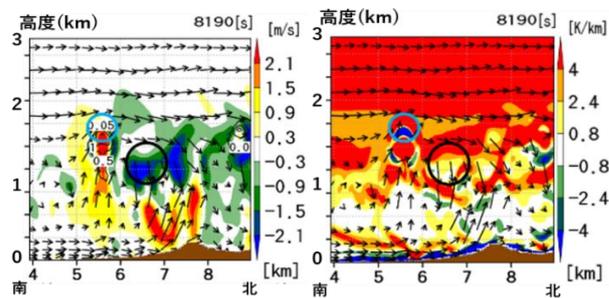


図1：熱的上昇流(左図)と温位の鉛直勾配(右図)の鉛直断面

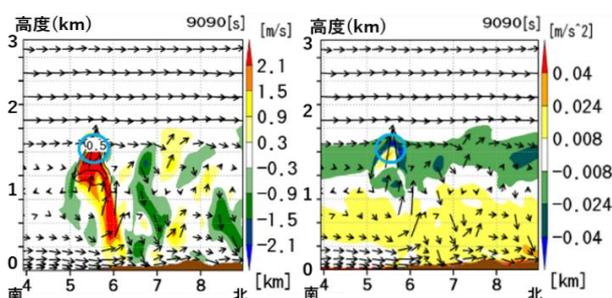


図2：熱的上昇流(左図)と熱的浮力(右図)の鉛直断面

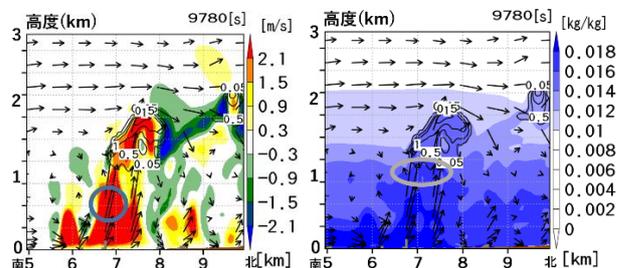


図3：熱的上昇流(左図)と水蒸気混合比(右図)の鉛直断面

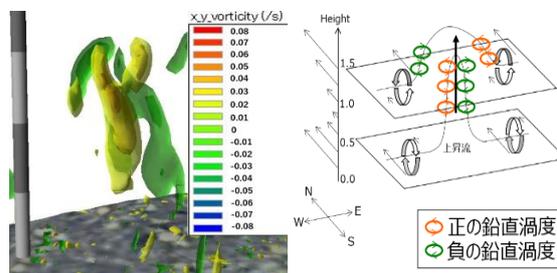


図4：左が鉛直渦度の3D図、右がその模式図

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.