

京都大学工学部地球工学科 学生会員 ○土橋 知紘
 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
 鉄道総合技術研究所 非会員 高見 和弥

1. 背景

局地的豪雨（ゲリラ豪雨）はその時間・空間スケールの小ささから予測が困難であり，特にヒートアイランドの影響がある都市域に重大な被害をもたらしている．Nakakita *et al.* (2017) は，ゲリラ豪雨の発達過程のうち降水レーダによって発見できる最早単位を豪雨のタマゴと呼び，タマゴが成長する段階では鉛直渦管構造が積乱雲発達に寄与していることを示した．しかし雲粒を伴わない水蒸気から雲の発生に至るプロセスやその水蒸気を持ち上げる上昇流は降水レーダでは捉えることができず，また積乱雲の発達に影響していると考えられている渦の生成，発達の仕方やその影響の詳しいメカニズムについて依然未解明である．観測，モデルのいずれにおいても知見の少ない豪雨のタマゴの起源に関して，本研究では豪雨の「種」と呼びその解明を目的とする．

2. モデルの概要

都市は土地利用が多岐にわたり熱や水蒸気の水平分布が一樣でなく，かつ建物群によって乱れの影響が高高度まで及ぶ．そのため豪雨の種となる現象をモデルで表現するには都市の建物群の形状を陽に解像し，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，また都市内部から積雲が生成する境界層より上空までをシームレスに扱えることが必要となる．山口(2016)は乱流を格子スケールで陽に解ける LES モデルの開発に着手しており，本研究でもこのモデルを用いた(表 1)．

3. 実験設定

格子間隔は水平方向に 60m，鉛直方向に 4～60m，格子数は 398×398×100 で最上端が 4871m とした．積分時間間隔は音波関連項を 0.06 秒，それ以外を 0.3 秒とした．神戸市を対象として夏季晴天日の午前 10 時から 1 時間の計算を行った．初期条件は温位，水蒸気に気象庁 MSM-GPV を用いて水平一様の値を与

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)

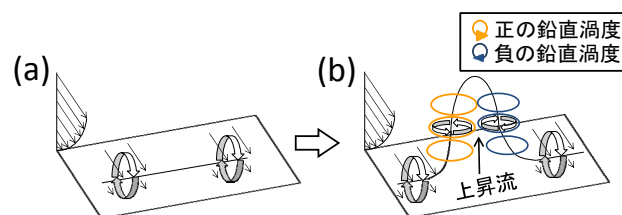


図 1 積乱雲発達初期の鉛直渦管生成メカニズム

(a) 水平渦管の生成, (b) 上昇流による鉛直渦管の生成

え，南北風は高度 1km 以上を一定，それ以下は 1/7 乗則に従うとして与えた．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．南側の流入境界では南北風，圧力を固定し，湿潤な空気の侵入を設定した．また，乱流を駆動させるために温位に ± 0.1 [K] の擾乱を与えた．地表面温度は陸面過程モデルで別途計算して与え，また人工排熱も考慮した (Sounma *et al.*, 2013)．

4. 都市と山地における渦管生成メカニズム

図 1 は積乱雲発達初期に見られる鉛直渦管生成の模式図である．今回の解析は積雲が生成した場所に存在する鉛直渦管の起源が都市由来か山地由来かに分類し，水平渦管が立ち上がって鉛直渦管へ変化していく際の挙動を観察，鉛直渦管がどのようにして生成したのかを明らかにする．

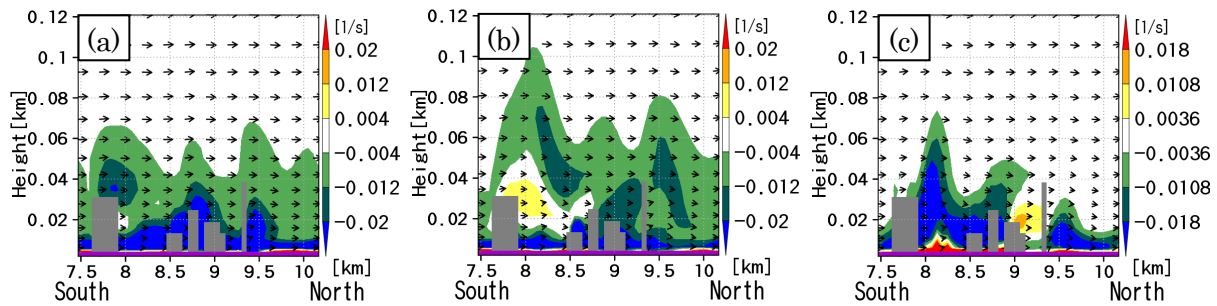


図2 南北鉛直断面における (a) $t=360[s]$ の水平渦度, (b) $t=750[s]$ の水平渦度, (c) $t=750[s]$ の鉛直渦度
灰色部分は建物を, 紫部分は地形を表す.

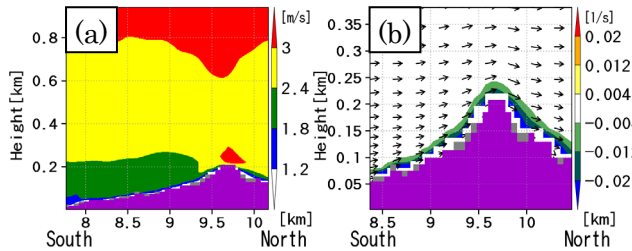


図3 (a) 斜面付近の風速の鉛直断面図
(b) 南北鉛直断面における水平渦管

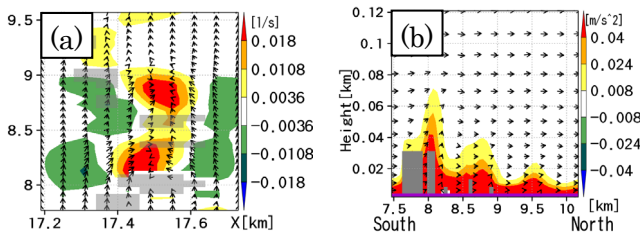


図4 (a) 都市上空水平断面における水平風の収束
(b) 都市における熱的浮力項 $(\theta' / \bar{\theta}) g$

図2は都市における鉛直渦管生成メカニズムを示している。まず建物の後流により南北風の鉛直シアが強化され, また建物の風下側で下降流成分が発生負の水平渦度を持つ水平渦管が発生 (図2(a), $X=7.7$ 付近) 建物付近に発生する熱的因子やビル風の収束で発生する上昇流により水平渦管が持ち上げられ, (図2(b))その結果, 鉛直渦管が立ち上がる。(図2(c))

一方, 山地における渦管生成メカニズムの特徴としては山地の斜面付近で風速が減衰し, 鉛直シアが生じ, 斜面に沿った形で負の水平渦管が存在していることが挙げられ, (図3(b)) 上昇流により鉛直渦管が立ち上がり雲水生成に至る。都市の場合と比較すると水平渦管生成の過程が異なっており, また上昇流のきっかけは, 都市と同様地表面からの熱的浮力や斜面での風の収束が作用していることが分かった。

6. 上昇流の要因

次に, 渦管生成において重要な役割を持つ上昇流の要因として都市では熱的浮力と風の収束による強制上昇が考えられる。図4(a)は都市における熱的浮力項を示した図であり, 熱的浮力の上昇流への作用が確認できる。

一方, 風の水平収束図4(b)は都市上空高度15mの水平断面における風の水平収束を示した図である。この図から風が $X=17.5\text{km}$, $Y=8\text{km}$ と $X=17.5\text{km}$, $Y=8.6\text{km}$ 付近にある建物の影響を受け建物の風下側で収束していることが分かる。収束による強制上昇の結果, 図4(b)において収束が発生していた地点の上空で強い上昇流が発生していることが確認された。山地における水平収束の上昇流への影響も同様に観察され, 水平収束と上昇流のオーダーに相関性も確認された。

7. 結論

都市と山地において水平渦管の生成過程が異なることが明らかになった。また上昇流に対して熱的浮力だけでなく, 街区スケールの風の収束も影響を与えていることが確認された。今後豪雨の種の観測を実施し, より定量的に解析を進めていく。

参考文献

- Souma, *et al.*: A comparison between the effects of artificial land cover and anthropogenic heat on a localized heavy rain event in 2008 in Zoshigaya, Tokyo, Japan, *Journal of Geophysical Research*, 118, pp.11,600-11,610, doi:10.1002/jgrd.50850, 2013.
- 山口ら, 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.
- Nakakita, *et al.*: 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, 2017.