

都市気象 LES モデルを用いたゲリラ豪雨の種の解析

Analysis of Convection Genesis by urban Meteorological Model Based on Large Eddy Simulation

山口弘誠・土橋知紘⁽¹⁾・中北英一・高見和弥⁽²⁾

Kosei YAMAGUCHI, Tomohiro TSUCHIHASHI⁽¹⁾, Eiichi NAKAKITA, and Kazuya TAKAMI⁽²⁾

(1) 京都大学工学研究科

(2) 鉄道総合技術研究所

(1) Graduate School of Engineering

(2) Railway Technical Research Institute

Synopsis

Convective genesis is subject of our research. The aim is understanding which factor is the most strong on the generating process and how strong urban areas have influence on convective genesis. Cumulus clouds above urban areas on summer were simulated by our model. The pair of vortex tubes that produce cloud droplet were analyzed. As a result, backward facing step flow and vertical wind shear came up behind buildings. They made horizontal vortex tubes. In addition, anthropogenic heat and sensible heat from surface and forced ascent by convergence of horizontal wind made upward flow and then vertical vortex tubes rises up with moisture.

キーワード : ゲリラ豪雨, 水平渦管, 鉛直渦管, 上昇流

Keywords : Torrential rainfall, Horizontal vortex tube, Vertical vortex tube, Updraft

1. はじめに

1.1 研究背景

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，その結果近年都市に重大な被害をもたらしている．特に数10分から1時間の間に発生，急激に発達し地上に被害をもたら

すという時間スケールの小ささは，避難，対策が間に合わず被害を発生させる大きな要因となっている．ゲリラ豪雨をもたらす孤立的に発達する積乱雲は，台風や前線による集中豪雨のものと異なり気象モデルによる予測が難しい．この時間・空間スケールの小さい豪雨の予測に対し，中北ら（2010, 2013）は豪雨をもたらす積乱雲の発達過程のうち気象レーダに

よって発見できる最早単位を豪雨のタマゴと呼び、XRAIN (Xバンド偏波レーダネットワーク網) を用いて豪雨をもたらす積乱雲の早期探知を試みてきた。孤立積乱雲の一生は大きく分けて発達期、成熟期、衰退期の3つに分類され、発生から30分ほどで成熟期となり地上に豪雨をもたらす (Fig.1, 白石ら, 2009)。

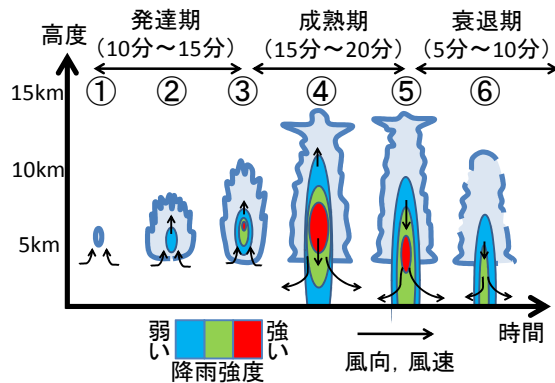


Fig. 1 Schematic Figs of developing process of an isolated cumulonimbus cloud.

ゲリラ豪雨の予測に関して、これまで気象レーダやビデオゾンデなどを用いた積乱雲発生後に雲中の上空で降水粒子が生成される段階である豪雨のタマゴ、またタマゴからの成長時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段階が新たな着眼点となっている。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、またその水蒸気を持ち上げる上昇流はレーダではとらえることができない現象である。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も依然未解明である。この観測、モデルのどちら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。

1.2 研究の目的

上で述べたように豪雨の「種」となる現象は観測においても依然未解明な部分が多い。都市では土地利用が多岐にわたり、熱、水蒸気の水平分布が一様でなく、かつ建物群によって乱れの影響が高高度まで及ぶため定点観測では事象の解析が困難である。また都市の熱による上昇流が水蒸気を運ぶ過程やできたばかりの雲粒は気象レーダでは捉えられない。豪雨の「種」に対する観測からのアプローチとしては、エアロゾルなどの微粒子を捉えることで熱プルームの捕捉ができる境界層レーダによる観測やさら

に上空ではミリ波レーダによって従来のセンチ波を用いた気象レーダによるより早い段階の現象の観測が試みられている。このような観測からのアプローチに加え、観測では得られない情報を補完できる数値モデル計算からのアプローチが必要となる。

豪雨の「種」となる現象をモデルで捉えるため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。そのため山口ら (2016) は乱流を格子スケールで陽に解ける LES モデルを開発した。本研究では山口らが開発した都市気象 LES モデルを用いたゲリラ豪雨の種の解析を行う。

ゲリラ豪雨をもたらす積乱雲について最も影響が大きい要因は山地の強制上昇、都市の熱、風速のシアのいずれなのか、または乱流が最も支配的で予測は不可能なのか、このゲリラ豪雨予測にあたっての最大の疑問を解決することが将来的な大目標である。

2. 計算条件

2.1 LESモデル

2.1.1 LESモデルの概要

本研究で使用するモデルは前章で述べたLESモデルである。またモデルの概要をTable1に示し、本研究において重要な部分を次項以降で解説する。

Table 1 Outline of LES model

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)

2.1.2 地形、都市形状の表現

関西の都市域は、関東平野を中心に広がっている

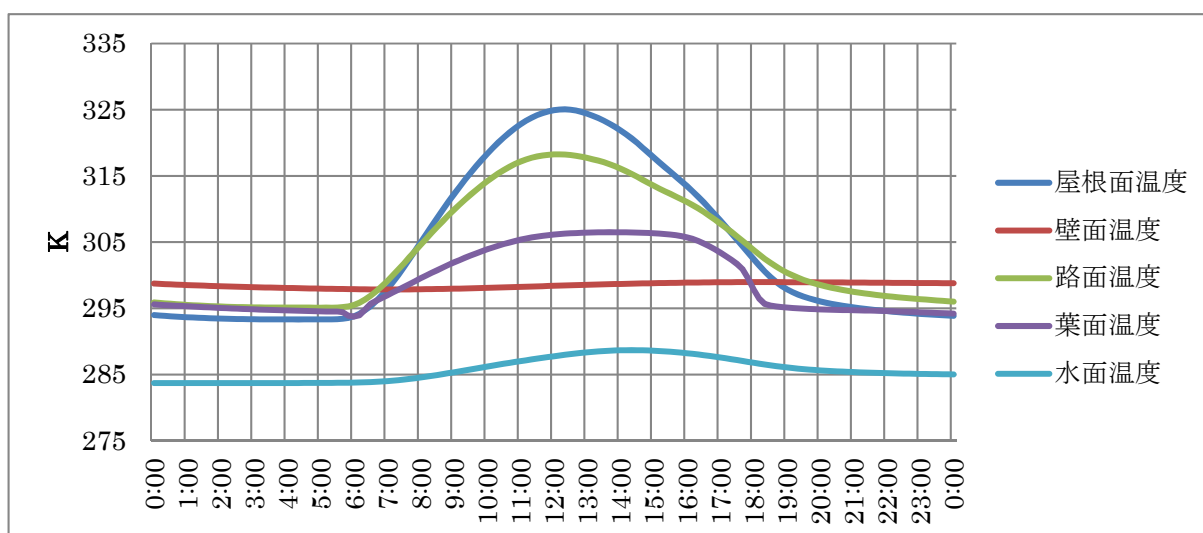


Fig.3 Time variation of surface temperature disaggregated by covering on sunny day in summer

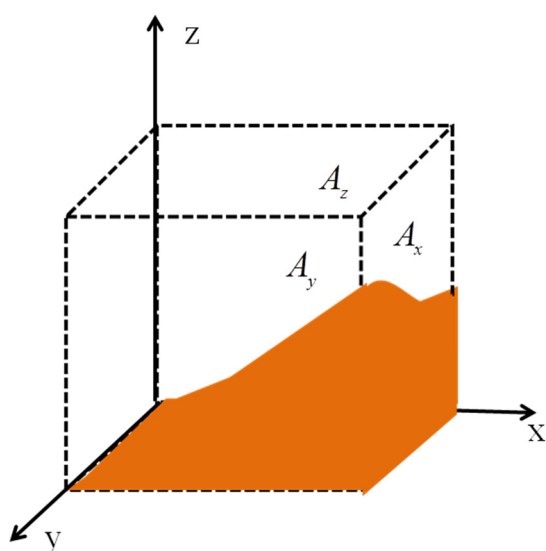


Fig.2 Directions of area ratio

東京周辺の都市域に比べ起伏に富んだ地形を特徴とする．特に本研究が対象とする神戸市は海と六甲山に挟まれた数kmの範囲に都市域が集中している．そのため神戸市に関して都市の降水に与える効果を議論するためには，地形の勾配と都市の形状の双方を表現することが必要となる．山口ら(2016)は都市の形状を出来るだけ詳細に再現しながら積雲の生成への影響を調べるために，座標系は直角直交格子を採用し，かつ地形を表現するためにFAVOR法

(Fractional Area Obstacle Representation Method)を用いている．(Hirt, C. W.,1992)

FAVOR法では複雑境界上の流れにおいて，流体と固体が混在するグリッドを考え，格子の体積のうち流体の占める体積率を V_f ，また x_i 方向に垂直な

断面において流体の占める開口率を A_{x_i} とおくこと

で地形の形状を表現する (Fig.2)．体積力は V_f に

比例し，断面を通る運動量の輸送は A_{x_i} に比例す

る．次に標高・都市形状のデータであるが，標高データは国土地理院の基盤地図情報10mメッシュDEMを用いて，内挿処理により必要な解像度のデータを作成している．GIS データには建物の二次元座標や階数のデータが含まれており，10mメッシュで区切って建物があると判定されたグリッドにおいて平均建物階数と建蔽率を求めたものが使用されている．また，土地利用は山地，都市，海の3種類に分類している．このうち都市については六甲山以南の標高100m以下の部分としている．都市内部は建物の面積率と，それを除いた道路の面積率が1つのグリッドに混在して表現されている．

2.1.3 都市における熱的効果の表現

都市の気象に与える影響として最もよく議論されるのがヒートアイランドによる熱的効果である．都市の熱的効果としては，アスファルトやコンクリートなどによって表面温度が上がる人工土地被覆の効果と，空調や自動車などからの人工排熱の効果が考慮されている．

土地利用を山地，都市，海の3種類に分類し，都市内は建物と道路を面積率で表現している．そのため被覆ごとの表面温度として，屋根面温度，壁面温度，路面温度，葉面温度，水面温度の5つを用いている．本研究では山口らに従って，典型的な夏季晴天日の表面温度を被覆ごとの時系列で与える．Fig.3は気象

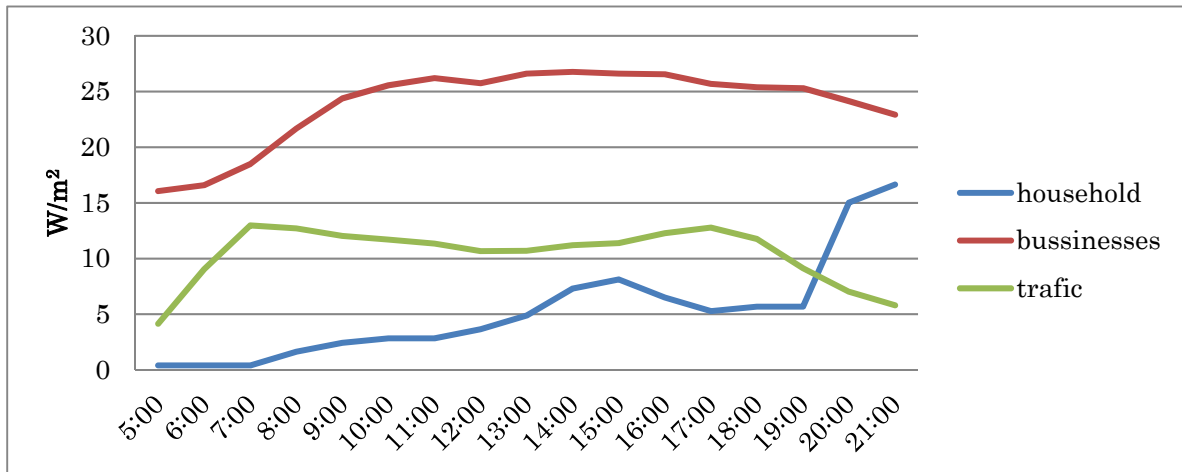


Fig.4 Time variation of anthropogenic sensible heat disaggregated by category during the day

庁天気図及び神戸・大阪・姫路の日照時間から選択された夏季晴天日(2012年8月3日)について、大気陸面結合モデル CReSiBUC(Souma et al.,2013)で人工排熱を除いた計算結果より、東経 134~136 度、北緯 34~36 度で被覆ごとの領域平均値をとったものである。さらに、Fig.3 の温度変化に、本研究の計算開始時間の気象庁メソ客観解析データについて地表面付近の値を東経 134~136 度、北緯 34~36 度で平均をとり、CReSiBUC の地表面付近の値の領域平均との差を引くことで修正したものを用いて被覆ごとの表面温度の時間変化を与える。また、都市内部の向上きの表面温度に関してはグリッド内の屋根面と道路面の割合を屋根面、道路面の表面温度にかけることで計算される。

人工排熱として部門別(民生家庭部門、業務・産業部門、交通運輸部門)にわけて時系列で推定された人工排熱顕熱量分布(野依ら, 2013)を用いる。国土数値情報平成 21 年度土地利用メッシュにおいて建物用地あるいは道路が 4 次メッシュ内に存在する場合に推定は行われ、平成 17 年国勢調査に基づく地域メッシュ統計人口に経済産業省資源エネルギー庁による「平成 25 年度エネルギーに関する年次報告」(エネルギー白書 2014) の最終エネルギー消費の構成比(2012 年度)及び総務省統計局による「日本の統計 2015」の総人口(2012 年度)より算出された全国平均一人当たり部門別エネルギー消費量をかけて各部門の排熱量が算出されている。民生家庭部門は一ノ瀬ら(1994)による 1 時間ごとの熱負荷(戸建住宅・冷房)、業務・産業部門は関西電力による 2012 年について平均した時間帯別電力消費量、交通運輸部門は平成 22 年度道路交通センサスによる神戸市での時間帯別交通量調査結果を用いて 1 時間毎の値にされている。Figure.4 は上記の推定値の空間分布に対し、

土地利用において都市と判定される領域で平均をとった人工排熱の日中の分野別時間変化である。

本研究では Fig.4 の時間変化を用いて人工排熱を表現する。都市内は建物と道路の 2 種類で区別されたため Fig.4 の民生家庭部門、業務・産業部門の合計を建物由来の人工排熱、交通運輸部門を道路由来の人工排熱として温位の方程式に対し、

$$\frac{\partial \rho_0 V_f \theta}{\partial t} = F_\theta + \frac{AHS_{build} A_{roof}}{C_p \Pi V} + \frac{AHS_{road} A_{road}}{C_p \Pi V}, \quad (1)$$

として人工排熱による加熱項を加えている。ここで、

AHS_{build} : 建物由来の人工排熱 $[W/m^2]$, AHS_{road} :

道路由来の人工排熱 $[W/m^2]$, A_{roof} , A_{road} : グリッ

ド内の屋根面、路面の表面面積 $[m^2]$, V : グリッ

ド内の流体の体積 $[m^3]$ である。

2.2 計算条件の設定

Fig.5 に示す領域で計算を行った。神戸市周辺かつ六甲山系西域が含まれるように西側に広く取ったことに加えて、南側の海域についても少し広く設定した。これは海から流入してくる南風の距離を長くすることでより乱流状態に近づくことを狙った設定である。ただし本来は乱流駆動部を作成し、十分に乱流状態となった風を流入させるべきであるが、これは今後の課題とする。また六甲山系西域を含めた意図は 3 章で詳しく述べる。

格子間隔について、水平方向には 60m、鉛直方向には地表面では細かく高度が高くなるにつれて粗くなるようストレッチさせ、4~60m とした。格子数

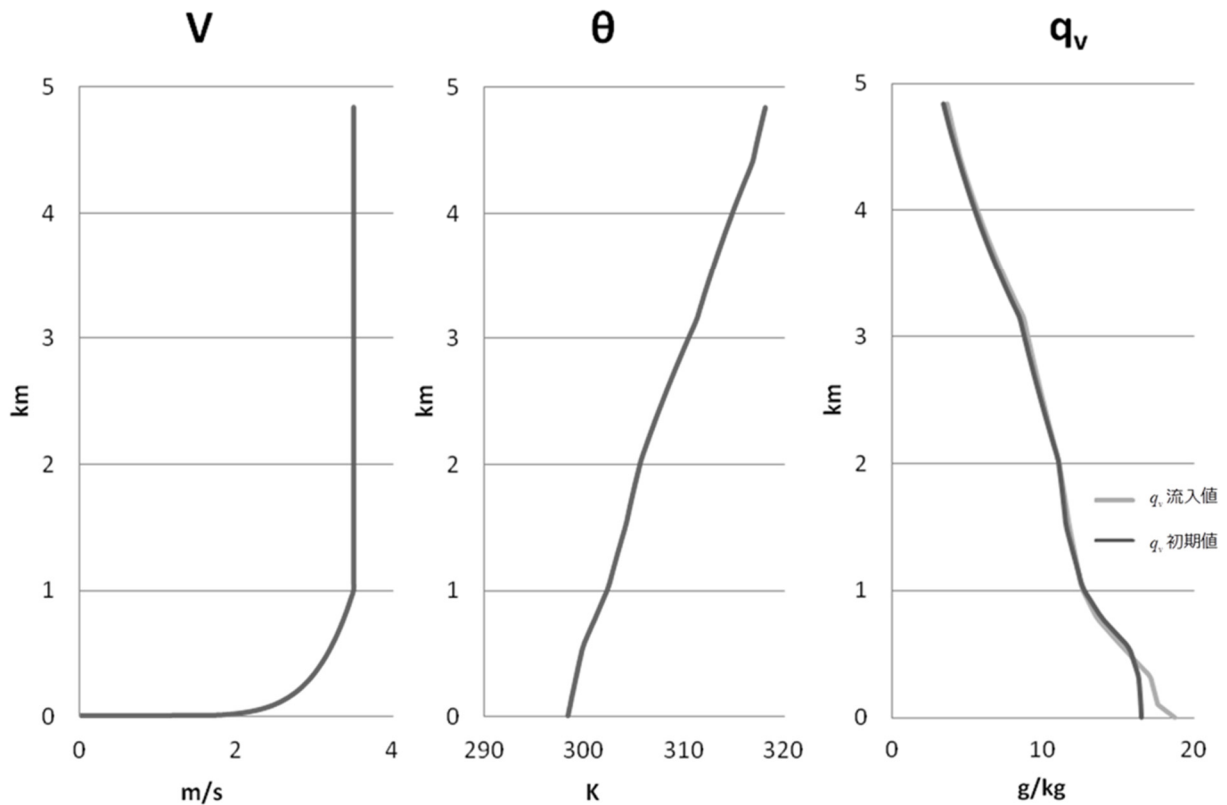


Fig.6 Initial conditons v: meridional wind θ:potential temperature qv:water mixing ratio

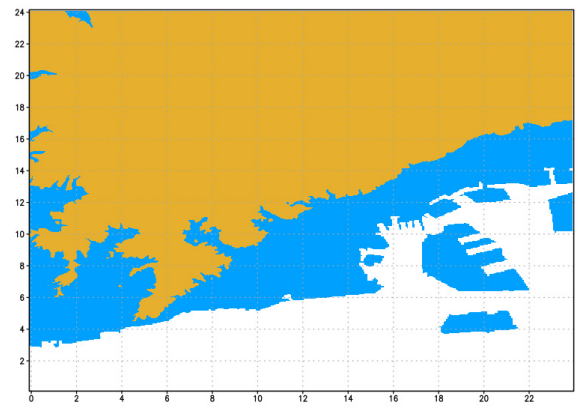


Fig.5 Computational area

white: sea aqua: city flesh color: mountain

は東西, 南北, 鉛直方向の順に $398 \times 398 \times 100$ をとり, $23.880 \times 23.880 \times 4.871$ km の計算領域を設定した. 時間積分間隔として, 音波に関連する項の計算を $\Delta \tau = 0.06$ [s] とし, それ以外を $\Delta t = 0.3$ [s] とした.

2015 年 8 月 3 日の午前 10 時を初期値として, 1 時間の計算を行った. 初期条件として, 温位, 湿度に気象庁 MSM-GPV の初期値を時間・空間平均した午前 10 時における水平一様の値を与え, 南北風に計算領域

の南側に位置する MSM-GPV の点の初期値を時間平均したものについて高度 1km の値を 1km より高い高度では一定, 1km より低い高度では 1/7 乗則に従うとして与えた (Fig.6). 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表現するため南北風の初期値で用いた MSM-GPV の点の水蒸気混合比の鉛直分布 (Fig.6) を流入値として用いた. 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.

3. 積雲生成の起源となる渦管の解析

3.1 解析の着眼点

積雲や積乱雲の発生メカニズムにおいて空気塊の上昇, すなわち上昇流は最も重要なファクターの一つである. 本研究において着目している神戸市・六甲山系エリアでは, 大阪湾から流入してくる暖湿流が六甲山によって強制的に持ち上げられ, その結果積乱雲のタマゴが発生しやすい場所である. 事実, 2008 年の都賀川豪雨事例におけるタマゴは六甲山系西域の上空で発生していた. しかし都賀川豪雨事例でタマゴが発生した六甲山系西域は, 六甲山系の中でも標高が低い地域であり, この地域の地形による

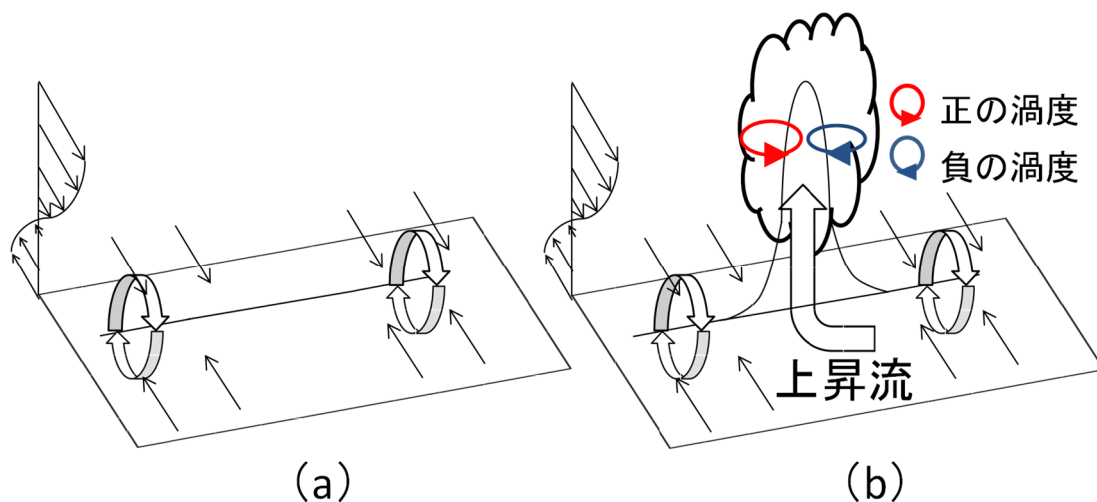


Fig.7 Schematic figures of formation of vertical vortex tubes. Circular arrows show circulations of horizontal vortex tube.

強制上昇は六甲山系東域に比べてかなり小さいはずである。それにもかかわらずこの地域でタマゴが発生したということはここで地形による強制上昇以外のタマゴ発生メカニズムが存在する可能性が示唆される。そのうちのひとつとして推測されるのが神戸市という都市による影響である。

そこで本研究では、2章で示した領域において数値計算と解析を行う。計算結果から、地形による強制上昇の効果、都市による熱や乱流の上空輸送の効果、そしてそれらが重なり合って形成される鉛直渦管による積乱雲の生成と発達維持効果、これらの効果がどのように作用して豪雨の種からタマゴへと成長していくメカニズムを明らかにしていく。

3.2 渦管解析の方針

中北ら(2016)はXバンドMPレーダのドップラー速度を用いた解析により、Joseph B, Klemp(1987)などで挙げられるスーパーセルの発達初期に見られる渦管の立ち上がり(Fig.7)と同様の構造がゲリラ豪雨をもたらす積乱雲においても確認できることを示した。さらに、発達する積乱雲にはその成長初期段階において高い鉛直渦度を示すことを明らかにした。そして本数値実験において解析した全ての事例で積雲が生成した地点においてFig.7のような鉛直渦管の正負ペアがみられた。ここで、鉛直渦管とは鉛直渦度が鉛直方向に伸びたものを意味し、鉛直渦度の正負によって正の鉛直渦管(もしくは負の鉛直渦管)と呼ぶこととする。同様に、水平風の鉛直シアによって形成される水平渦度が水平方向に伸びたものを水平渦管と呼ぶこととする。さて本研究において、積雲生成に至る鉛直渦管の起源をたどることによって水平渦管が生成され立ち上がり鉛直渦管となるメ

カニズムを解析することが本解析の主たる着眼点である。

また本研究では、都市の上空に生成した積雲事例を都市事例として、六甲山南側山麓部の上空で生成した積雲事例を山地事例として選択し、解析を行った。

3.3 都市上空で生成された積雲の渦管解析

立ち上がった鉛直渦管の起源を解析するにあたり、まず立ち上がった段階での鉛直渦管のペアの位置を把握するため、Fig.8にはポートアイランド上空580m高度において計算開始1230s後に生成した積雲のもととなった鉛直渦管のペアの水平断面図を示す。上述のとおり鉛直渦管のペアを確認できる。なお本解析では積雲が生成されたかどうかに着目し、雲水量の量的評価は行わないものとする。

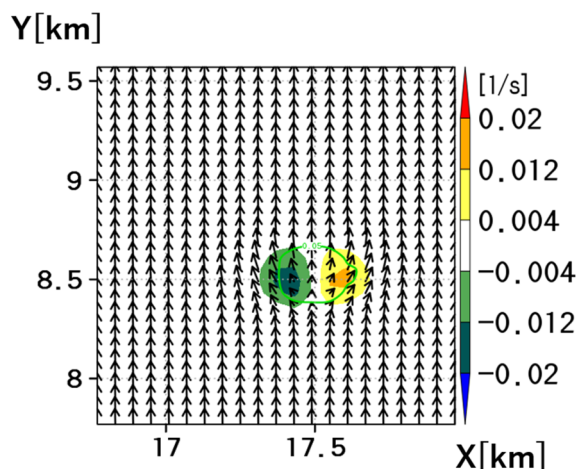


Fig.8 Vertical vorticity in horizontal sectional view
Contour : cloud mixing ratio (g/kg)

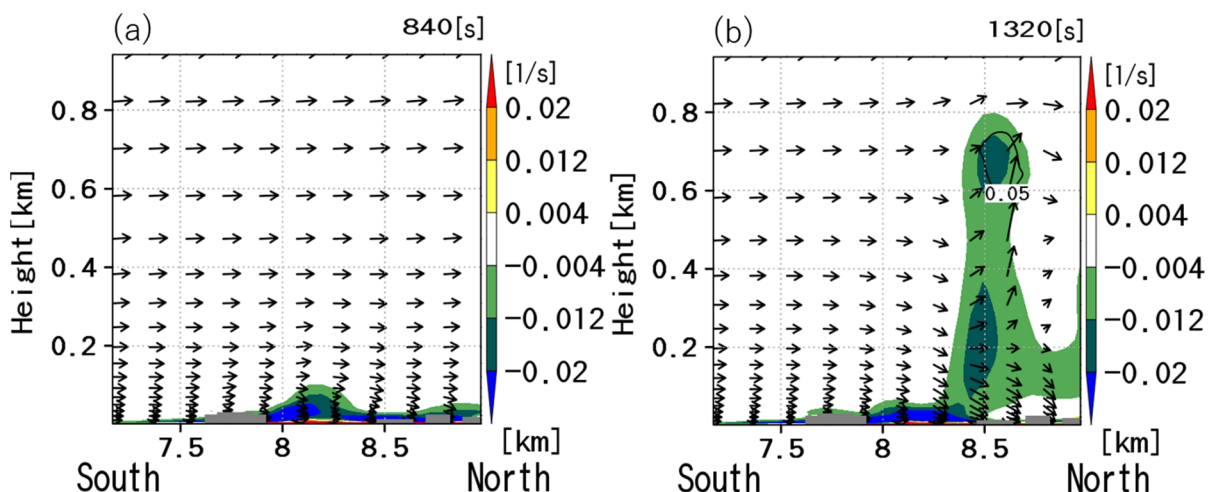


Fig.9 Vertical vorticity in vertical sectional view Contour : cloud mixing ratio(g/kg) (a)T=840s (b)1320s

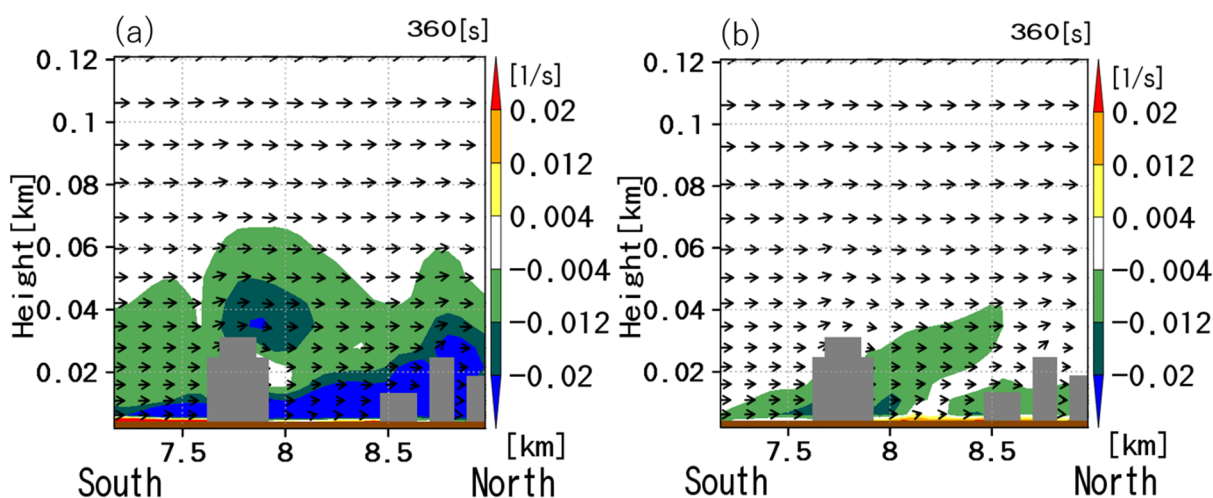


Fig.10 (a) Horizontal vorticity in vertical sectional view (b) Vertical vorticity in vertical sectional view

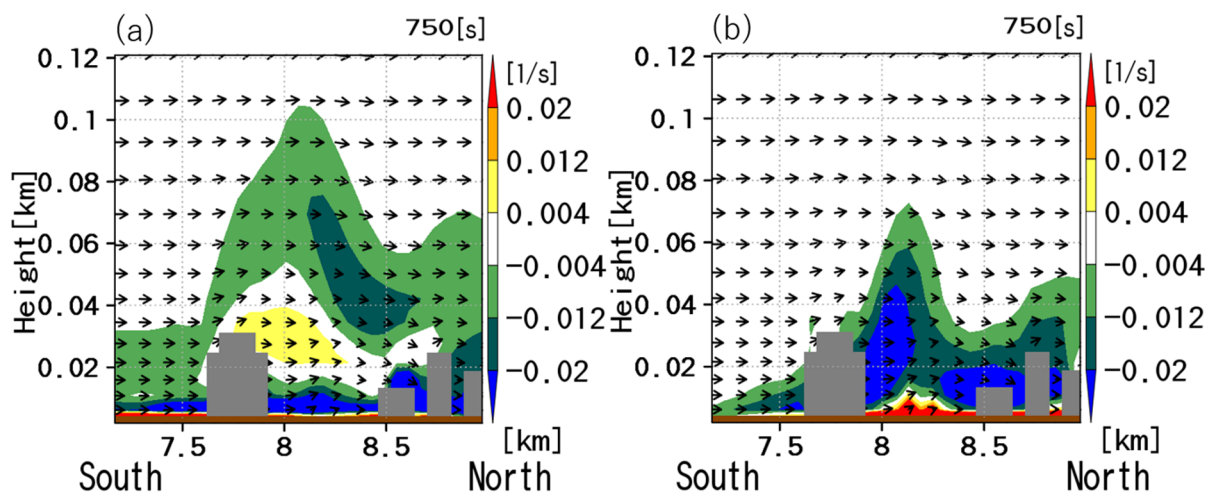


Fig.11 (a) Horizontal vorticity in vertical sectional view (b) Vertical vorticity in vertical sectional view

次に鉛直渦管が上空に持ち上げられながら雲粒が生成されるまでの流れについて、鉛直断面図を用いて確認していく。解析対象とする鉛直渦管のペアの

うち負の鉛直渦管（以降鉛直渦管①とする）の南北断面図を地表面から都市境界層までの比較的大きなスケールで示した図が Figure.9 である。以降の図に

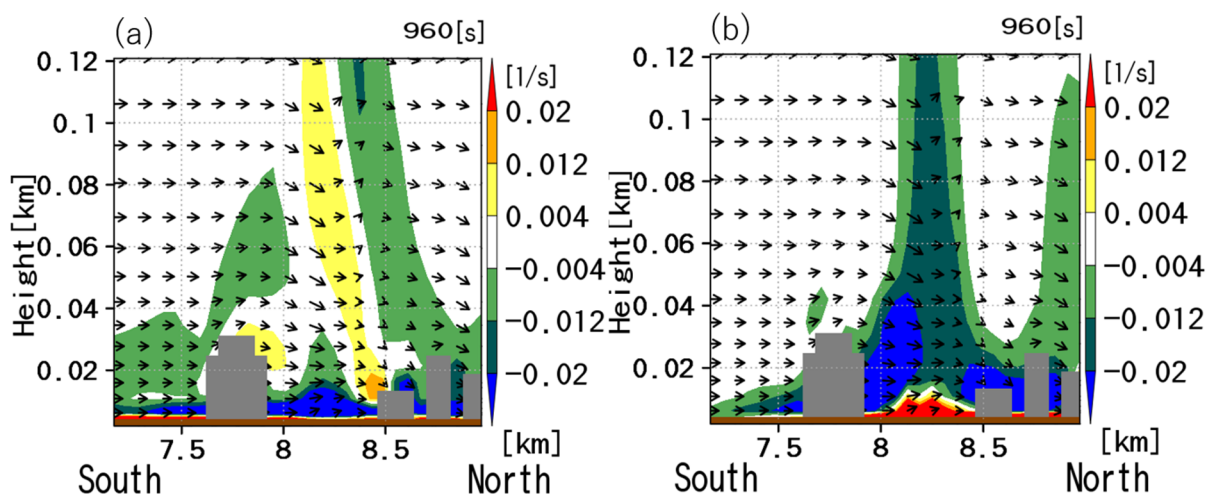


Fig.12 (a) Horizontal vorticity in vertical sectional view (b) Vertical vorticity in vertical sectional view

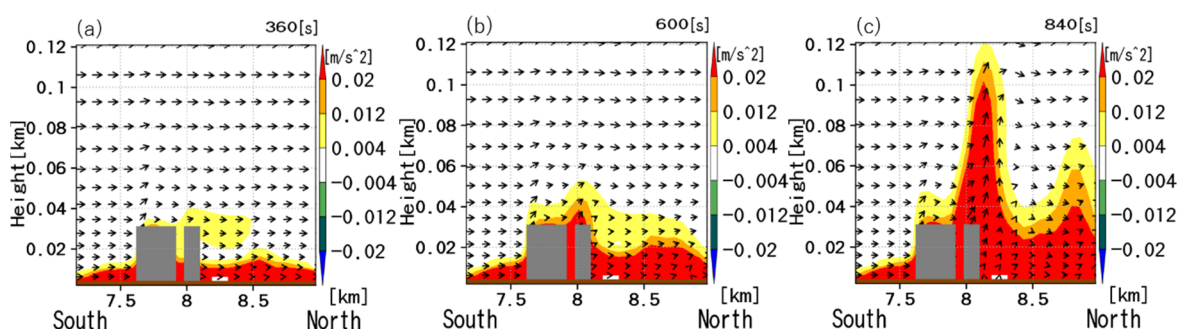


Fig.13 Member of thermal ascending force in vertical sectional view (a) T=360s (b) T=600s (c) T=840s

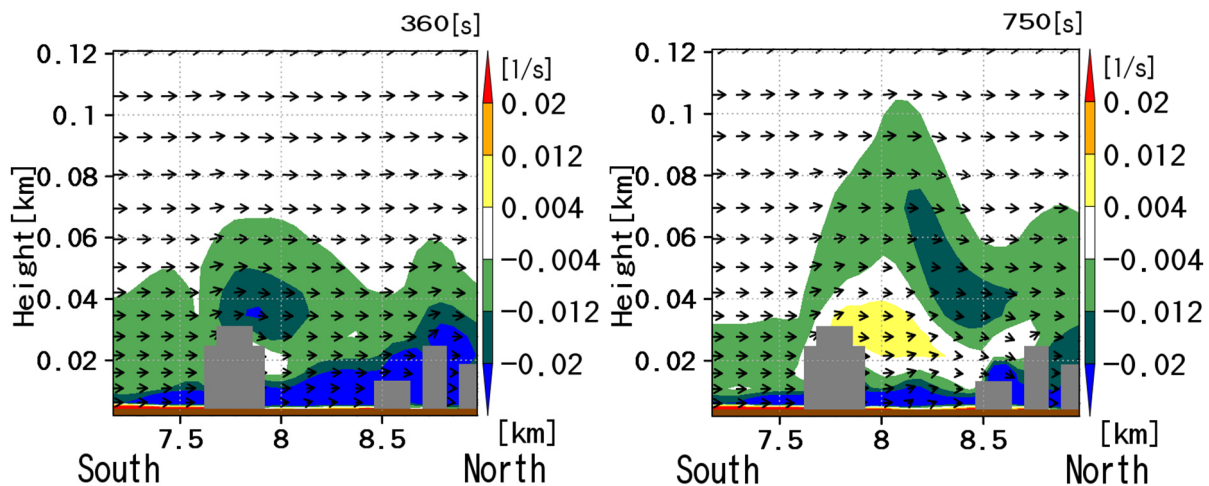


Fig.14 Horizontal vorticity in vertical sectional view (a) T=360s (b) T=750s

において灰色部分が建物を表し、茶色部分が地形を表す。鉛直渦管①の挙動を観察すると T=840s に X=8km 付近から上昇し始め(Figure.9 (a)), T=1320s には鉛直渦管①は高度 600m を超え雲粒が生成するという一連の流れが確認できる。次に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し、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。

Fig.10～Fig.12 には Fig.9 と同じ南北断面において、水平渦度、鉛直渦度の時間変化を地表面付近のより小さいスケールで示す。時間が経過するにつれて建物付近で乱れが生じ、それに伴い鉛直渦度が発生、さらに鉛直渦管が上昇する様子が確認できる。次に Fig.13 に Fig.10～12 において水平渦管が立ち上がった部分の東側の南北断面における鉛直方向の運動方

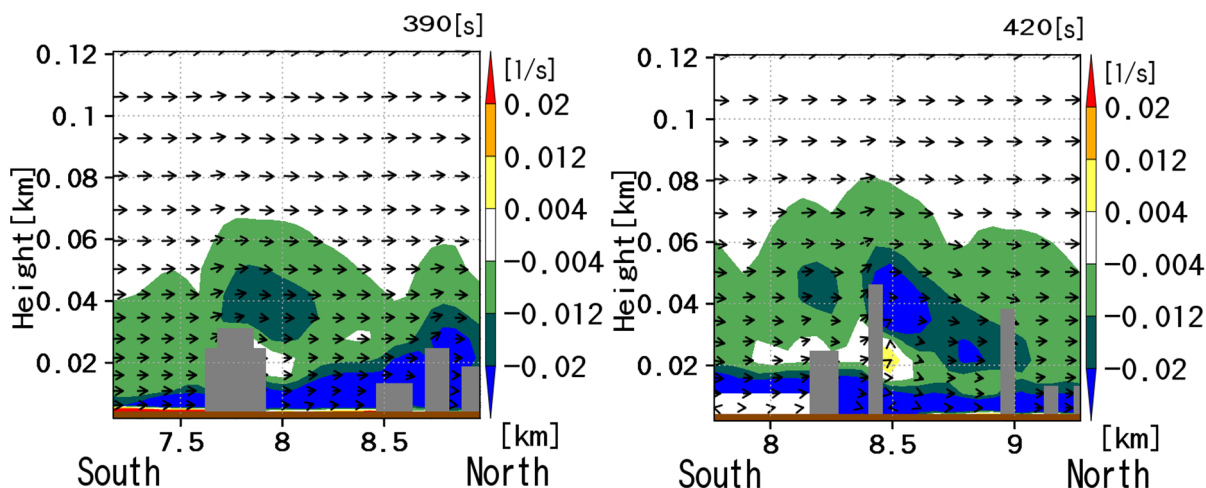


Fig.15 Horizontal vorticity by different building in vertical sectional view

程式の熱的浮力項 $\frac{\theta'}{\theta}$ の時間推移を示す．東側の断面を選択した意図としては Fig.7 の模式図のように上昇流は鉛直渦管のペアの間で確認されるからである．

また Fig.14 は、Fig.10 (a) ~Fig.12 (a) と同じ断面における水平渦度の推移を示した図である．この断面における水平渦管の挙動を観察し、Fig.10~Fig.13 での挙動を踏まえると、

- (i) 建物のバックステップ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、
- (ii) 負の水平渦度を持つ水平渦管が発生、
- (iii) 建物付近に発生する主に熱的因子で発生する上昇流により水平渦管が持ち上げられ、
- (iv) その結果、鉛直渦管が立ち上がる、

というメカニズムが今回都市上空において確認された．このメカニズムにおいて都市の顕熱・潜熱フラックスおよび人工排熱による熱的浮力がどの程度上昇流に影響を与えているかを Fig.13 において観察すると、時間経過とともに浮力の影響が上方に伝播し、また屋根からの人工排熱と建物表面温度によって建物の屋根付近で上昇流が発生している様子が確認された．また Fig15 では異なる高さの建物のバックステップ流の結果発生する水平渦度の比較である．Fig15(right)では X=8.5 付近にある高さ約 45m の建物から発生した水平渦管と Fig15(left)では X=7.7 付近にある高さ約 30m の建物から発生した水平渦管の水平渦度を比較したところ、高度 45m から発生した渦度の方が大きいことが分かった．これはモデル内では高度が高くなるにつれて南北風速が大きくなるように初期値の設定をしているため、バックステップ流による風下側の風速差が大きくなったと考えられる．しかし今回確認した事例において渦管形成のも

ととなる水平ロール渦の強さと立ち上がった渦管の鉛直渦度の強さの関係は一定ではなく、今のところ相関関係は確認されていない．

3.4 山麓部上空で生成された積雲の渦管解析

ここでは、山地による強制上昇が渦管形成プロセスにどのように寄与しているのかに着目していく．ただし、2 章で述べたように本計算では標高 100m 以上の領域は簡略化のため全て山地として取り扱っており、建物としての熱情報を与えていない．そのため渦管が立ち上がる場所付近が標高 100m 以下か以上によって挙動に大きな違いがあることを考慮し、解析を進めていく．

さて、山地における特徴としては計算開始直後から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る (Fig.16)．ここに何らかの原因で上昇流が起こった時、鉛直渦管が立ち上がり雲水生成に

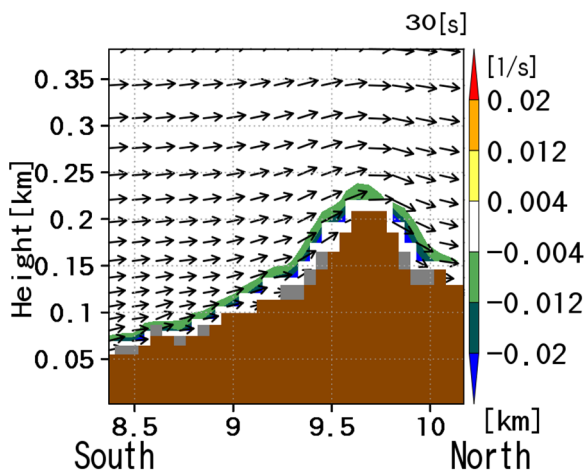


Fig.16 Horizontal vorticity in vertical sectional view

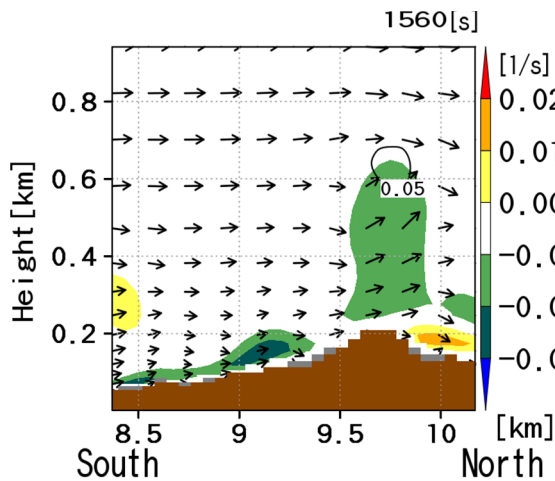


Fig.17 Vertical vorticity in vertical sectional view
Contour: cloud mixing ratio (g/kg)

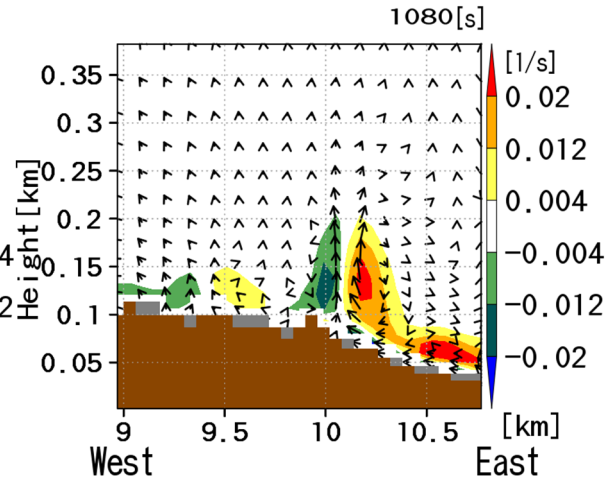


Fig.18 Vertical vorticity in vertical east-west sectional view

至る (Fig17). 都市の場合と比較すると水平渦管生成の過程が異なることがわかった.

渦管が立ち上がる際の上昇流の原因を解明するためには上昇流が起こった場所と時間を正確にとらえる必要がある. Fig.18 に水平渦管が立ち上がり鉛直渦管となった瞬間の東西断面を示す. この図では $X=10.1$ km で立ち上がった正負の鉛直渦管のペアが確認でき, 特にペアの間で強い上昇流が確認できる. このことは前節のスーパーセル初期の渦管の立ち上がる Fig.7 ととも一致する.

次に先ほど鉛直渦管のペアの間で発生していた上昇流の起源について調べる. Fig.19 は Fig.18 と同じ時刻 $T=1080$ s の $X=10.1$ km 付近での南北断面での熱的浮力項を示した図である. この図から $X=10.1$ 付近で起こった上昇流は熱的浮力と関係していることがうかがえる.

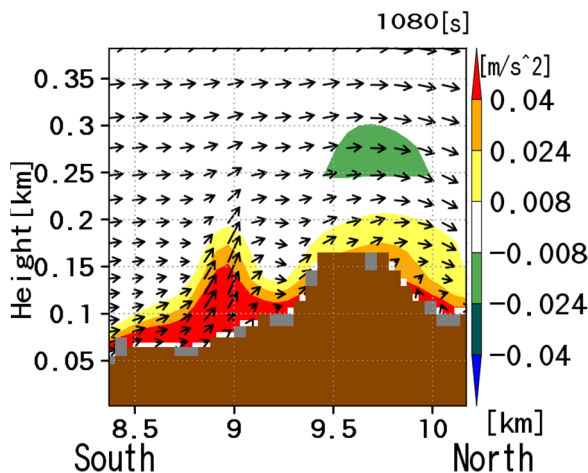


Fig.19 Member of thermal ascending force in vertical sectional view $T=1080$ s

次にこの熱的浮力がどこから発生したかを調べる. Fig.19 において $X=8.7$ 付近にある建物の人工排熱や表面温度による顕熱がこの熱的浮力の原因となっていることが分かる. 以上のことから比較的標高の低い山岳地帯では上昇流に対して建物が持つ熱的效果が影響を与える可能性があることが示唆された. 今回解析した他の事例においても渦管が立ち上がる地点が標高 100m 以下かつその付近に建物がある場合建物付近から発生する熱的浮力によって上昇流が発生し, それに伴い渦管が立ち上がるという挙動が観察された.

また渦管が立ち上がった瞬間の周辺の風速場の挙動として確認されたことは, 立ち上がった渦管のペアの間に上昇流が発生しペアの外側は逆に下降流が観察されるというものである (Fig18). この下降流は下層の空気が上昇したことで起こる補償流だと考えられる. 同様の挙動は都市で立ち上がった渦管においても確認された.

山麓部上空における鉛直渦管解析をまとめると, 六甲山による作用として, 強制上昇による効果だけではなく, 六甲山が障壁となり南北風の鉛直シアが大きくなることで水平渦管が形成されていたことが, 都市域上空の解析とは大きく異なっていた. ただし, 上昇流のきっかけは, 地表面からの熱的浮力をきっかけとして持ち上げられていることが明らかになった.

3.5 上昇流の要因

渦管が立ち上がるという現象において上昇流は非常に重要なファクターである. その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. 前節でも述べたように渦管が立ちあが

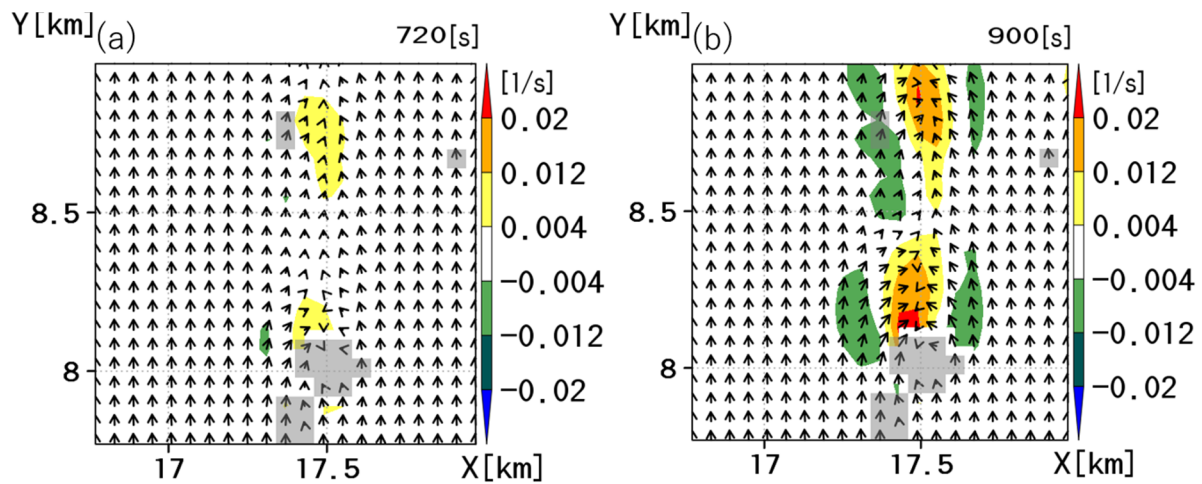


Fig21 Horizontal convergence at 15-meter altitude in horizontal sectional view (a) T=720s (b) T=900s

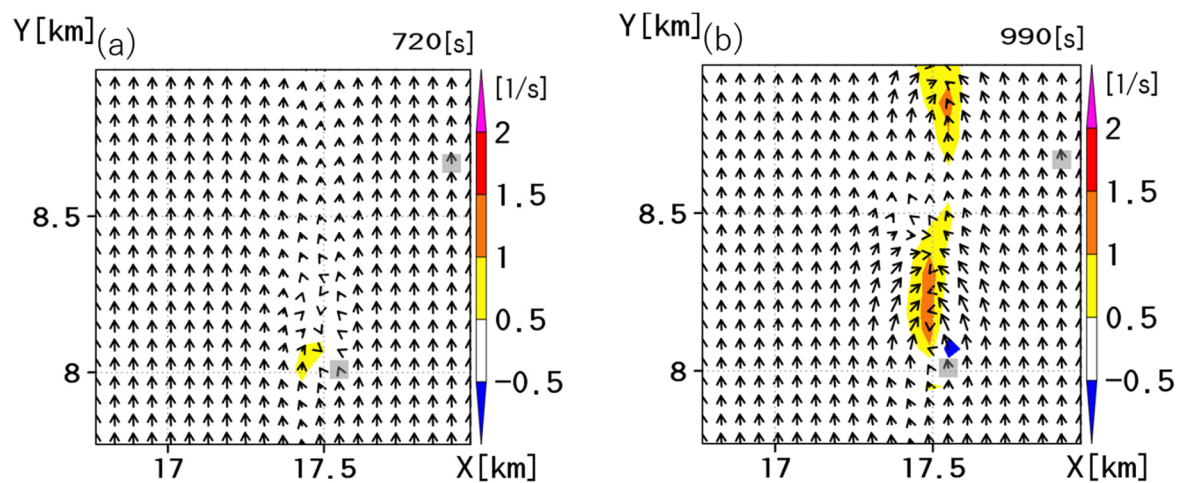


Fig22 Updraft at 15-meter altitude in horizontal sectional view (a) T=720s (b) T=990s

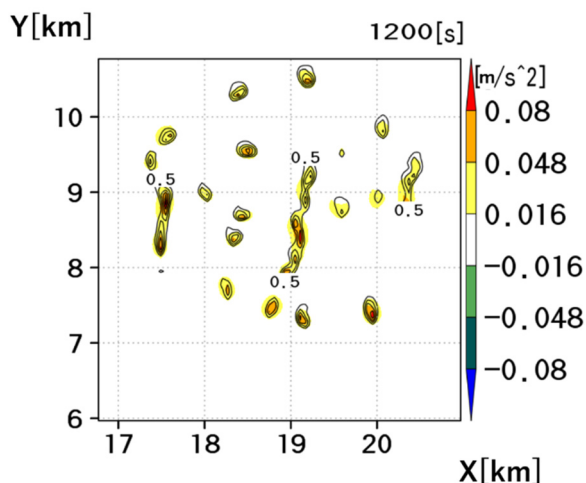


Fig.20 Member of thermal ascending force above Port Island in horizontal sectional view Contour : updraft(m/s)

る際の上昇流に対して都市と山地の両方の事例において熱的浮力の影響が確認された。Fig.20 では典型

的な都市上空の挙動としてポートアイランドの高度58mの高さの水平断面における熱的浮力と鉛直風との関係を表している。この事例からも熱的浮力項が上昇流に対して強い作用を持っていると考えられる。その熱的浮力項に対して都市における人工排熱と表面温度のどちらが強い影響を持つかは今後の解析が必要であるが、Fig.13 において地表面付近と人工排熱が顕熱フラックスとして与えられている建物の屋根面付近との熱的浮力項を比較すると単純な値の大きさとしては地表面温度が熱的浮力項に与えている影響の方が人工排熱が与えている影響より大きいと考えられる。

一方、風の水平収束の上昇流に対する影響に関してまず都市における事例について解析する。今回水平収束による強制上昇の上昇流への影響に着目するため、上昇流の水平断面を水平収束の水平断面より少し高い高度でとっている。Fig.21 は都市上空高度15mの水平断面における風の水平収束の時間変化を

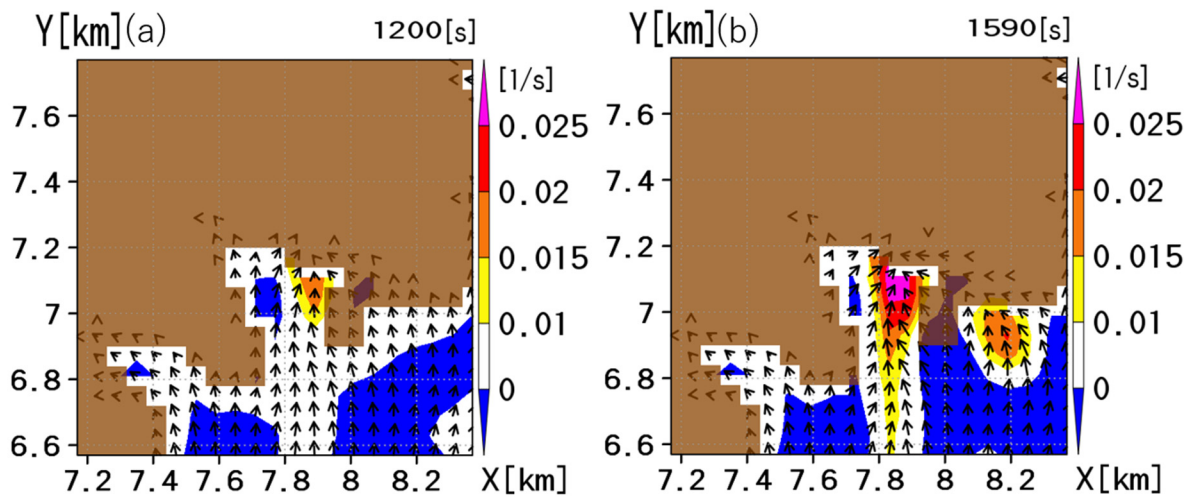


Fig.23 Horizontal convergence at 92-meter altitude in horizontal sectional view (a) T=1200s (b) T=1590s

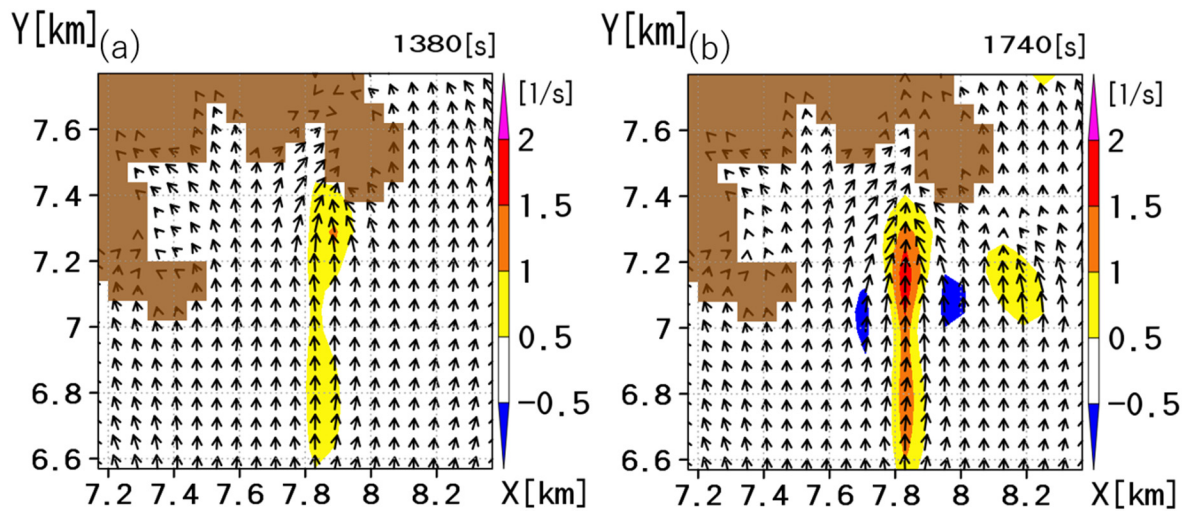


Fig.24 Updraft at 137-meter altitude in horizontal sectional view (a) T=1380s (b) T=1740s

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．そして Fig.22 は高度 35m の水平断面における上昇流の時間変化を示した図である．収束による強制上昇の結果、Fig.21 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る．

次に山地における水平収束の上昇流への影響に関してだが都市事例と同様の手法で議論を進めていく Fig.23 は山地の斜面付近高度 92m の水平断面における風の水平収束を示した図である．山地の形状に影響を受け、風が斜面付近で収束していることが分かる．Fig.24 は高度 137m の水平断面における上昇流の時間変化を示している．都市事例と同様に Fig.23 において水平収束が発生していた地点の上空で強い上昇流が確認された．さらに Fig.23, 24 において 2 箇所が発生した水平収束とそれによる上昇流の比較を行う．Fig.23(b) は高度 92m の水平断面における水平

収束を、Fig.24(b) は高度 137m の水平断面における上昇流をそれぞれ表した図である． $X=7.8\text{km}$, $Y=7.1\text{km}$ における水平収束と上昇流（以後収束①，上昇流①とする）と $X=8.2\text{km}$, $Y=7\text{km}$ における水平収束と上昇流（以後収束②，上昇流②とする）の比較を行う．まず収束①と②に関して Fig.23(b) から収束①の方が強いことが分かる．次に上昇流①と②を Fig.24(b) において比較するとこちらも上昇流①の方が強いことが分かる．このように上昇流のオーダーとその要因となった水平収束のオーダーには相関性が見られた．以上のことから水平収束による強制上昇も上昇流に対して熱的浮力と同様に強い影響を持つことが確認された．また上空に上昇流がある際の地表面近くへもぐり込む流れが確認された事例では、熱的浮力と同等の作用が働き強い上昇流を形成することがわかる (Fig.25)．このような街区スケールの流れの場においても、収束やもぐり込む流れが大きな意味を持つことは興味深い．今後の課題としては、収束やも

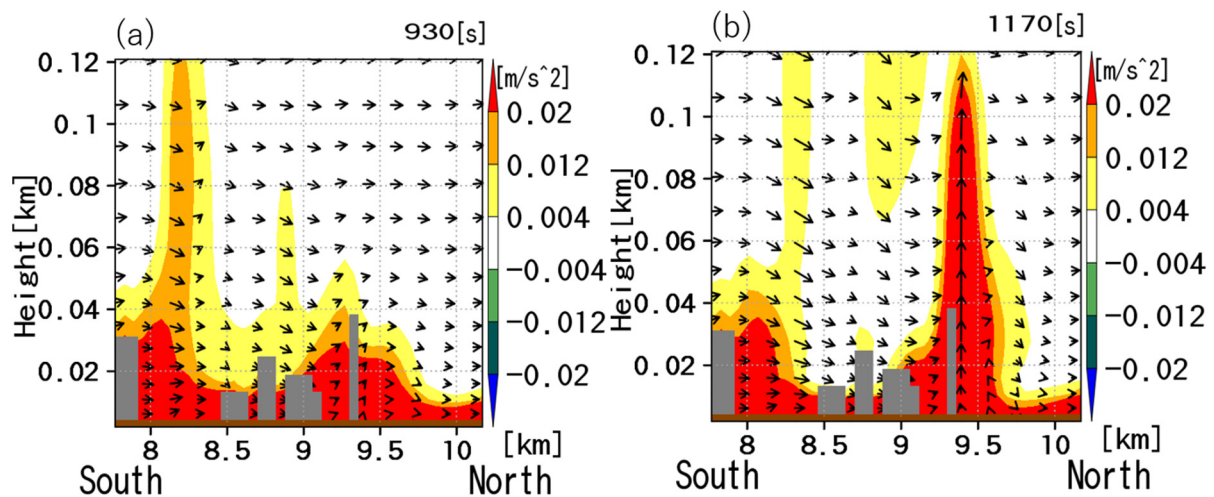


Fig.25 Member of thermal ascending force in vertical sectional view (a) T=930s (b) T=1170s

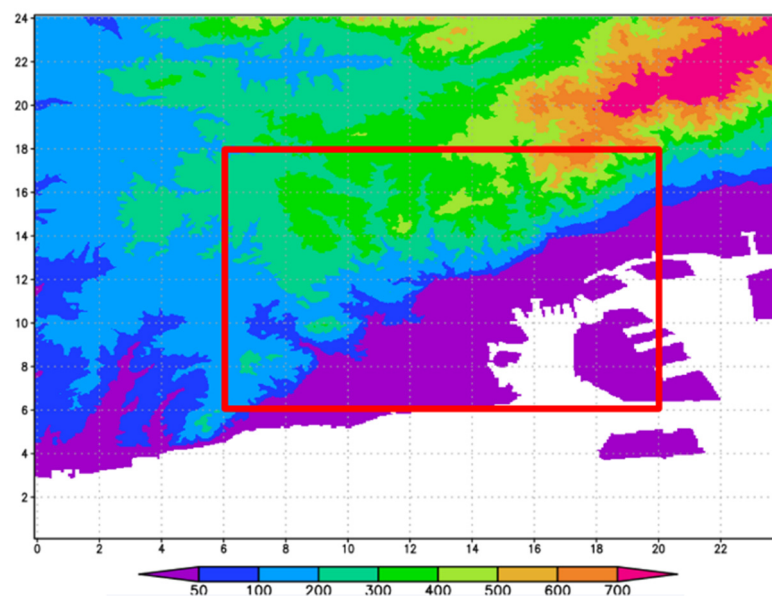


Fig.26 Target area (boxed area by red lines)

ぐり込み流れの由来を解析していくこと、および、熱的浮力と風の収束やもぐり込み流れの寄与度を評価することが挙げられる。

さて、ここで神戸市に導入される境界層レーダ（中北ら，2015）についても触れておきたい。境界層レーダは鉛直風を計測する測器であり，従来のウィンドプロファイラーにレンジイメージング技術を加えることにより空間解像度を数十 m まで向上させたものである。加えて境界層レーダ上空の水平気流を捉えるドップラーライダーも設置予定である。これら気流に関する測器群を用いて，本節で解析した上昇流の要因について観測とモデルを連携させた解析が今後期待され，モデル化や検証がますます進むと考えている。

3.6 積雲生成数の比較

ここまでの解析では定性的な議論を中心に進めてきたが，都市と山地の積雲生成に関してどちらが起こりやすいのかを評価するための1つの定量的な解析として，Fig.26 の赤枠で囲んだ領域における都市上空で生成した積雲と山地上空で生成した積雲の発生数を比較した。本節における都市と山地の区別として，Fig.26 の領域において斜面勾配が急になる標高 50m 以上のグリッドを山地とし，海以外の標高 50m 以下のグリッドを都市とした。領域内における山地（標高 50m 以上）のグリッド数は 28293，都市（海以外の標高 50m 以下）のグリッド数は 14718，海のグリッド数は 4023 である。また標高 50m 以上のグリッドの上空で生成した積雲の中にも建物由来の水平渦管が立ち上がり生成した事例が確認された

が、山の効果に加わっているかどうかまで詳しく解析ができていないため、それらの事例は今回山地上空で生成したものと分類した。

結果は Table 2 に示すように領域内で都市上空と山地上空で生成した積雲の個数が同じになったが、単位面積当たりの積雲生成数は山地上空に比べ都市上空の方が約 2 倍多いことが分かる。本節の解析は積雲の発生個数であり雲水量や積雲の規模に関しての定量的評価は行っていないため得られた結果はあくまで 1 つの指標に過ぎないが、単位グリッドあたりの生成した積雲個数は都市の方が多く確認されたことは本研究において非常に意義深い。今後は大気の状態が積雲生成に及ぼす影響や積雲の発達に着目した定量的解析を行うことが望まれる。

Table 2 Amount of cumulus cloud in target area

	山地上空	都市上空
積雲生成数	108事例	108事例
単位面積あたりの積雲生成数	0.00381	0.00734

4. 結論

ゲリラ豪雨に対するメカニズム解明や予測に向けた新たなステップとして、気象レーダでは捉えられない、豪雨のタマゴの起源となる雲粒を伴わない水蒸気の上昇を豪雨の「種」と呼び、都市気象 LES モデルを用いて種からタマゴへの成長過程を明らかにすることを研究目的とした。

先行研究から計算領域を拡大し六甲山系西域を含んだ神戸市周辺における積雲シミュレーションを行い、風の収束や地形による強制上昇の効果、都市による熱や乱流の上空輸送の効果、そしてそれらが重なり合って形成される鉛直渦管による積乱雲の生成と発達の維持効果、これらの効果がどのように作用して豪雨の種からタマゴへと成長していくメカニズムを明らかにしていく解析を行った。

その結果、都市上空で発生する渦管に関して、i) 建物のバックステップ流により水平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し、ii) 負の水平渦度を持つ水平渦管が発生し、iii) 建物付近に発生する主に熱的因子で発生する上昇流により水平渦管が持ち上げられ、iv) その結果、鉛直渦管が立ち上がる、というメカニズムを発見した。一方

で、山地上空で発生する渦管に関しても都市とほぼ同様のメカニズムが起こっていたが、水平渦管を生成する過程が都市の場合とは異なり、山地では地形による強制上昇と障壁効果が相まって水平風の鉛直シア形成が起こっていることを示した。また、単位面積あたりの積雲発生数で比較すると、都市のメカニズムによる積雲生成が山地よりも約 2 倍多く発生していることが確認された。

さらに、鉛直流の最初のきっかけとして、都市の熱的效果や街区スケールの風の水平収束による強制上昇が働いていることや、その両方が重なることで、かなり強い上昇流が発生することを明らかにした。

今後の課題として、標高 100m 以上の建物や日陰日向の取り扱いなど熱的效果の改善に取り組み、より精緻に都市と降水との関係を明らかにすることを目標として挙げ、本論文の結論とする。

謝辞

本研究は行うにあたり研究室の方々にご助力いただいた。また本研究は JSPS 科研費 15H05765（基盤研究 S「ストームジェネシスを捉えるための先端フィールド観測と豪雨災害軽減に向けた総合研究」、研究代表者：中北英一）の助成を受けたものです。

この場を借りて深く感謝申し上げます。

参考文献

- 一ノ瀬俊明・花木啓祐・松尾友矩(1994)：細密地理情報にもとづく都市人工排熱の時空間分布の構造解析，環境工学研究論文集，31，pp.263-273.
- 白石栄一（2009）：局地的な降雨観測・予測技術の動向，科学技術動向，文部科学省科学技術政策研究所科学技術動向研究センター，95，pp.34-45.
- 中北英一・西脇隆太・山邊洋之・山口弘誠(2013)：ドップラー風速を用いたゲリラ豪雨のタマゴの危険性予知に関する研究，土木学会論文集，B1(水工学)，第 69 巻，pp.325-330.
- 中北英一・山口弘誠・大石 哲・大東忠保・橋口浩之・岩井宏徳・中川勝広・相馬一義・増田有俊・小川まり子・坪木和久・鈴木賢士・川村誠治・鈴木善晴(2015) 積乱雲の生成・発達を捉えるためのマルチセンサーによる RHI 同期観測実験，京都大学防災研究所年報，第 58 号 B，pp.232-236, 2015.
- 中北英一・佐藤悠人・山口弘誠(2016)：ゲリラ豪雨のタマゴ生成時における渦管構造の基礎的解析，水工学論文集，第 60 巻.
- 野畑亮介・相馬一義・末次忠司・田中賢治・大石哲・

- 中北英一・市川温(2013)：観測解析と雲解像モデルを用いた 2011 年大阪における局地的大雨発生の要因分析, 水文・水資源学会 2013 年研究発表会要旨集, pp.14-15.
- 山口弘誠・高見和弥・井上実・須崎純一・相馬一義・中北英一(2016)：豪雨の「種」を捉えるための都市気象 LES モデルの開発と積雲の生成に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第 59 号 B, pp.256-297.
- 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.
- Hirt, C. W.(1992): Volume-fraction techniques: Powerful tools for wind engineering, *Journal of Wind Engineering*, No.52, pp.333-344.
- Kessler, E., Kessler, E.(1969): On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulation, *Meteorological Monographs*, 32, American Meteorological Society, pp.82-84.
- Klemp, J. B.(1987): Dynamics of Tornadoic Thunderstorm, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 19, pp.369-402.
- Lilly, D. K.(1966): On the application of the eddy viscosity concept in the inertial subrange of turbulence, Manuscript No. 123, National Center for Atmospheric Research, boulder.
- Louis, J. F.(1979): A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere, *Boundary-Layer Meteorology*, 17.2, pp.187-202.
- Nakakita, Eiichi, Hiroto Sato, Ryuta Nishiwaki, Hiroyuki Yamabe, and Kosei Yamaguchi (2016), 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.
- Smagorinsky, J.(1963): General circulation experiments with the primitive equations: I. the basic experiment*, *Monthly weather review* 91.3, pp. 99-164.
- Souma, K., Tanaka, K., Suetsugi, T., Sunada, K., Tsuboki, K., Shinoda, T., Wang, Y., Sakakibara, A., Hasegawa, K., Moteki, Q., and Nakakita, E(2013): 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.

(論文受理日：2017 年 6 月 13 日)