# 詳細な陸面過程を組み込んだ雲解像モデル による練馬豪雨に対する都市の影響評価

EFFECTS OF URBAN HEATING ON DEVELOPMENT OF THE NERIMA HEAVY RAINFALL BY A CLOUD RESOLVING MODEL COUPLED WITH A PRECISE LAND SURFACE MODEL

伊藤 洋太郎<sup>1</sup>・茂木 耕作<sup>2</sup>・相馬 一義<sup>1</sup>・萬 和明<sup>1</sup>・田中 賢治<sup>3</sup>・池淵 周一<sup>4</sup> Yotaro ITO, Qoosaku MOTEKI, Kazuyoshi SOUMA, Kazuaki YOROZU, Kenji TANAKA and Shuichi IKEBUCHI

<sup>1</sup>学生会員 京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町) <sup>2</sup>非会員 博(理) 海洋研究開発機構 地球環境観測研究センター (〒 237-0061 神奈川県横須賀市夏島町) <sup>3</sup>正会員 博(工) 京都大学助手 防災研究所水資源環境研究センター (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄) <sup>4</sup>フェロー 工博 京都大学教授 防災研究所水資源環境研究センター (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

In this study, effects of urban heating on development of the Nerima heavy rainfall on 21 July 1999 in Tokyo were investigated by a coupled model of a cloud resolving model CReSS and a precise land surface model SiBUC (CReSiBUC). Four numerical simulations were carried out for the rainfall event. The first simulation had realistic land cover, second one had imaginary land cover (urban area is changed into paddy field), the third one had imaginary land cover (urban area is enlarged) and forth one had realistic land cover and imaginary anthropogenic heat. From those simulation, it was found that changes of distribution of urban and anthropogenic heat amount greatly affected on the positions and amounts of rainfall.

Key Words : land-atomosphare interaction, heat island, heavy rainfall, urban canpy model, anthropogenic heat, CReSiBUC

## 1. 序論

近年「都市型豪雨」とよばれる都市域での局地的な 短時間強雨が問題になっている.このような都市域に おける集中豪雨は,地下室の浸水や交通網の麻痺など の被害が特徴であり,人口密集地でのこういった被害 はその地域に大きな混乱をもたらす.都市域における 集中豪雨の頻発については,都市域の気温がその周辺 に比べて上昇するヒートアイランド現象との関連が疑 われているが,はっきりとした答えは出されていない.

ヒートアイランドと降水の関連については,Shepherd ら (2003)<sup>1)</sup>が,ヒューストンやテキサスなどの海沿いの 大都市において,都市における人為的な影響から発生 するヒートアイランドが降水や落雷の頻度の増加を引 き起こしていることを観測解析結果から指摘した.日 本では,小林ら(2003)<sup>2)</sup>が,夏季東京周辺においてレー ダー観測データをもとに積乱雲の検出を行い,その結 果,東京周辺の平野部では一度積乱雲が発生すると発 達しやすく,また,積乱雲の発生メカニズムが山岳の 斜面上昇によるものとは異なっていることをつきとめ, 積乱雲発生とヒートアイランドの関係を指摘した.ま

た,藤部 (2003)<sup>3)</sup>は,国外の研究<sup>4)5)</sup>などから,アメ リカなどのいくつかの都市では,その風下側を中心と して夏の対流性降水の増加傾向が見出されており,そ の傾向は午後に著しいことを報告した.それに対して, 日本においては首都圏における広域的な都市効果によ る昇温が収束を強め,東京都心の強い降水の増加をも たらしている可能性を示唆した.しかしながら,降水 の分布や頻度は様々な自然要因によっても変動するの で,都市の影響の有無については未だ議論の余地が残 されている.このことから,降水に対する都市の影響 の有無について自然要因による変動を取り除いてより 明確な議論を行うためにも,観測データによる解析に 加えて気象モデルを用いた解析を行う必要があると考 えられる.神田ら (2000)<sup>6)</sup>は,環八雲と呼ばれる東京 の環状八号線に沿うように列をなす積雲に対する数値 シミュレーションを行い都市の影響を検討したが,日 本の都市において,激しい降水を伴う積雲に対しては 都市の影響評価はほとんど行われていない.

そこで本研究では,1999年7月21日に発生した練 馬豪雨を事例として取り上げ,都市が陸面過程として 降水に及ぼす影響を,観測データによる解析に加えて



図-1 アメダスによる 1999 年 7 月 21 日 12 JST~14 JST の平 均気温・風分布.



図-2 レーダーアメダスによる 1999 年7月 21日 15 JST~18 JST のの3時間積算降水量分布.

詳細な陸面過程を組み込んだ雲解像モデル CReSiBUC を用いた数値実験により検討する.練馬豪雨は1999年 7月21日に東京都練馬区を中心に発生した集中豪雨で, 1時間に100 mm 以上の降水量を記録している短時間 かつ,局所的にもたらされた強雨である.観測解析で は、レーダーアメダスによる降水量分布とアメダスに よる気温分布,地表風分布から練馬豪雨当日の大気場 の状態を明らかにする.数値実験では,土地利用分布 に対する感度実験と,都市域における人工排熱量に対 する感度実験を行い,その出力結果を用いて解析を進 める.

## 2. 練馬豪雨当日の観測的特徴

本研究で取り上げる練馬豪雨は,1999年7月21日 午後,東京都練馬区を中心とした地域において発生し た豪雨災害である.この豪雨は,アメダスによると15 JST~18 JST の3時間積算降水量が130 mm に達し, 特に16 JST までの1時間に90 mmの降水量を記録し た短時間集中型の豪雨であるといえる.

図-1 にアメダスによる 21 日 12 JST~14 JST の平 均気温・風分布を示す.本研究では,現実の土地利用分 布において都市域の割合が 30 %を越える領域を「都市 部」と便宜的に定義した.この領域は,図-1,図-2,及 び図-7 以降の図において赤実線で囲まれている.本研





図-3 都市キャニオン. 図-4 建物要素集合体. 表-1 図-3, 図-4 で用いられている定数・変数.

記号	意味	単位
$F_{ob}$	直達光	${\rm W}~{\rm m}^{-2}$
bw	建物の幅	m
k	建物の階数	
$h_o$	一階あたりの高さ	m
skyw	壁面の天空率	rad
skyg	路面の天空率	rad
θ	直達光の入射率	rad

究において定義した「都市部」においては33 以上の 気温を観測しているのに対し,郊外ではほとんどの観 測点で31 以下であり,その差は2 以上となってい る.この顕著な温度差は,ヒートアイランド現象によ るものだと考えられる.また,地表風の分布に注目す ると,周囲よりも気温が高い地域,すなわち「都市部」 を中心に風が収束する傾向が見られる.

図-2 にレーダーアメダスによる 21 日 15 JST~18 JST の 3 時間積算降水量分布を示す.ここで,練馬豪雨 に伴う 3 時間積算降水量で 50 mm 以上の強雨域に注目 すると,その強雨域は「都市部」における約 50 km 四 方の非常に狭い領域に集中していることがわかる.こ の強雨域の形成位置は,先に示したヒートアイランド に伴う局所的な高温域と地表風の収束域に一致してい る.このことから,練馬豪雨はその発生において都市 の影響を受けている可能性が示唆される.

## 3. 数値モデル CReSiBUC の概要

本研究では,名古屋大学地球水循環研究センターで 開発されている気象モデル CReSS(Cloud Resolving Storm Simulator)<sup>7)</sup>に,京都大学防災研究所水資源環 境研究センターで開発が進められている陸面過程モデル SiBUC(Simple Biosphere including Urban Canopy)<sup>8)</sup> を組み込んで,より細かく地表面の状態を表現できるよ うにした雲解像の非静力学数値気象モデル<sup>9)</sup>を用いる.

CReSS は, 雲スケールからメソスケールの現象の高 精度シミュレーションを行うことを目的として開発され た, 雲解像の非静力学数値気象モデルである.CReSS は大規模な並列計算機で効率よく実行できるように設 計され,その並列計算により雲の詳細な時間発展のシ ミュレーションを行うことができるモデルとなってい る.支配方程式系は,運動方程式(地球の回転を考慮 したナビエ・ストークス方程式),熱力学方程式,圧縮 形の連続方程式,水蒸気混合比の式,雲・降水粒子の 混合比の式,雲・降水粒子の数密度の式で記述される.

陸面過程モデル SiBUC は,生物圏だけでなく都市・ 水体をも表現可能な点が他の陸面過程モデルと大きく 異なる点である.また,大気モデルの一格子に対して複 数の土地利用の影響を反映させることができるモザイ クスキームを導入しているため,日本のような狭い平 野部に都市や水田などが混在する地域における地表面 気象要素を正確に表現するために非常に有効であると 考えられる.またSiBUCにおいて都市域は,図-3に示 すように道路とそれに面したビルの壁面で構成される 建物要素の集合体として表現される(図-4).個々の建 物要素では,2次元の都市キャニオンを考えることで, 都市キャニオンへ入ってくる日射の入射角による違い, 壁面及び路面での反射,射出等を考慮している.都市 には様々な高さのキャニオンが存在するが,まず同じ高 さのキャニオンに関して放射収支を求め,屋根面高度 分布 r(k) を用いて積分し,都市全体として屋根面,壁 面,路面に配分されたエネルギー量を計算する.ここ で,屋根面高度分布 r(k) は,1 グリッドを考えたとき に,建物全体に対して k 階建ての建物の占める割合の ことで, $k = 1 \sim n$ をとる(本研究ではn = 4).また, 冷暖房など建物に起因する建物排熱,自動車走行に伴 う自動車排熱などの人工排熱を考慮することができる.

#### 4. 数値モデルを用いた感度実験

本研究では,観測解析で示唆された,練馬豪雨に対 する都市の影響を評価するため,数値モデルを用いた 感度実験を行う.感度実験では,土地利用分布を変化 させた実験と,都市域における人工排熱を導入した実 験を行い,それぞれ再現される降水量の違いを調べた.



図-5 計算領域.

## (1) 数値実験の設定

今回の実験では,練馬豪雨発生当日の1999年7月21 日について,図-5の小さい方の領域で09JSTから21 JSTまで10秒毎のタイムステップで12時間の計算を 行った.この領域は,水平・鉛直格子間隔はそれぞれ 5km,0.3kmで,格子数は100×100×45,領域の 中心座標は東経140.0°,北緯36.5°である.初期値, 境界値については気象庁領域スペクトルモデル(RSM: Regional Spectral Model,格子数129×129×20,格 子間隔20km)による図-5の大きい方の領域における 1時間毎の出力結果 (風・温度・湿度・気圧)を使用した.解析には1時間毎の出力結果を用いた.

主なオプションについては,降水過程として3種類の氷相(雲氷,雪,雹・霰)を含む微物理パラメタリ ゼーションを,乱流過程として乱流運動エネルギーに 基づいた1.5次クロージャースキームを,放射過程は 雲量・太陽の天頂角,地表面付近の気温と水蒸気圧を 用いて計算するオプションを,大気境界層内の鉛直拡 散については Mellor and Yamada の turbulent closure model の level 2をそれぞれ選択して計算した.<sup>7)</sup>

5 km 四方の各グリッドには7つのカテゴリー (水体, 混合林,草地,畑地,水田,裸地,都市域)の土地利用 面積率を与えた.土地利用分布は100 m グリッドで15 分類されている国土数値情報 (KS-202) を用いて 7 カ テゴリに再分類し,5km四方を各カテゴリーの面積が 占める割合を土地利用面積率とした.土壌タイプの情 報には, FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations)  $\mathcal{O}$  Digital Soil Map of the World のデータ (空間分解能約 10 km) を使用し,オリジナル の1000種以上の分類から砂,ローム,シルトの構成比 に基づいて 11 種 (sand, loamy sand, sandy loam, silt lorm, loam, sandy clay loam, silty clay loam, clayloam, sandy clay, silty clay, clay) に再分類したデータセット を用いた.屋根面高度分布については,低層住宅が多 い分布を便宜的に与えている.(Tanaka(2004)<sup>8)</sup>)東京 の幾何パラメータは必ずしも低層住宅が多い分布とは 言えないと考えられるが,本研究では都市の熱的影響 を議論の対象としているため,差し支えないと判断し た.また,地表面温度の初期値については,参照レベ ル(高度100m)の気温を与えている.

豪雨に対する都市の存在の影響を調べるために,こ こでは表-2に示すように3種類の土地利用分布データ を作成して実験を行った.実際の土地利用分布データ を与えた実験(図-6(a),以下 CTL と呼ぶ),都市域を 水田に置き換えた実験(図-6(b),以下 PDY と呼ぶ), 「都市部」における土地利用を,陸域は全て都市域に置 き換え,都市を現実の土地利用分布よりも過密にさせ た実験(図-6(c),以下 UBN と呼ぶ)である.

また,都市域における人工排熱の効果についても考 察するために, CTL と同じく現実の土地利用分布を モデルに与えた上で,さらに人工排熱を都市域におい て 400 Wm<sup>-2</sup> 与えた実験(以下 AHD と呼ぶ.CTL, PDY, UBN では0 Wm<sup>-2</sup> としている)を行った.妹 表-2 実験の種類.

実験名	土地利用分布	人工排熱
CTL	現実	考慮しない
PDY	都市を水田に置き換え	考慮しない
	వ	
UBN	都市の割合が 30% 以上	考慮しない
	のグリッドを陸域のみ	
	全て都市とする	
AHD	現実	400 Wm <sup>-2</sup> 考慮



図-6 各実験における土地利用分布面積率.解析領域についてのみ示す.左図:都市域の面積率,右図:水田の面積率。

尾ら  $(2004)^{10}$ によると,8月の東京都における人工排 熱量は,都心の地域で最も大きく,郊外では都心の人工 排熱量の 10~20%程度である.時間帯別にみると,都 心では 06 JST において 30~50 Wm<sup>-2</sup>,12 JST にお いて 200 Wm<sup>-2</sup> を超え,特に多い場所では 300 Wm<sup>-2</sup> に達する.このように実際には人工排熱量は時間変化 するが,本研究では都市域の土地利用においては全て 400 Wm<sup>-2</sup>の熱量が定常的に排熱されるものとして実 験を行った.今回8月の人工排熱データを参考に挙げ たのは,練馬豪雨発生当日である 1999 年7月 21 日は, 都市部における最高気温が 33 を超えており,梅雨の 影響で冷房等によるエネルギー消費が少ない7月の月 平均人工排熱量データよりも,8月のデータの方が現実 に近いと考えられるからである.

## (2) 練馬豪雨発生に対する都市の分布の影響

CTL の観測解析結果を図-7 に示す.CTL の積算降 水量分布(図-7(a))を観測解析結果(図-2)と比較する と,概ね練馬豪雨の特徴を再現したといえる「都市部」 において約50km四方の局所的な強雨域が形成されて おり,下層の温度および収束量の分布を見ても「都市 部」にヒートアイランドと収束域が再現されている(図-7(b),(c)).降水分布に関しては,観測された強雨域に 比べると,その形成位置はやや南にずれており,絶対量



図-7 CTL の解析結果 . (a) 15~18 JST の積算降水量分布 (黒太線の矩形で囲まれた部分は平均雨量を算出した領 域),(b) 12~14 JST の高度 100 m における平均気温 分布,(c) 16~18 JST の高度 100 m~1900 m の層に おける平均下層風収束分布.

もやや小さい.これらは CReSiBUC の解像度などの問題以外に初期値,境界値の精度にも依存していると考えられる.本研究では,降水に対する都市の影響を評価するために「都市部」において局所的な強雨域が形成されることが重要であるので,それらの条件を満足している CTL の結果は,概ね成功しているといえる.

そこで,次にPDYとCTLの比較を行う.図-8(a)に示すように,PDYでは,CTLよりも降水域が西側にずれ,都市部では3時間積算で15mm以上の降水はほとんど生じていない.また「都市部」には顕著な高温域は消滅しており,ヒートアイランドの特徴は失われている(図-8(b),(d)).CTLでは顕著であった「都市部」を中心とする収束場が,PDYでは発散場になっており,CTLと比べて収束量は $5 \times 10^{-4}$ s<sup>-1</sup>以上減少している.それに伴って西側山岳域の収束が顕著に表れており(図-8(c),(e)),この地域はPDYにおける降水域にほぼ同じ領域である.

ー方 UBN では,図-9(a) に示すように,CTL に比べ て強雨域の位置が東側に 20~30 km ずれている.また, 図-9(b),(d) の温度分布で示されているように「都市部」 の高温域が CTL よりも拡大しており,ヒートアイラン ドはより顕著になっている.下層風は温度上昇が見ら れる「都市部」を中心として収束する方向に変化が見 られ,CTL と比べて一部では  $5 \times 10^{-4}$  s<sup>-1</sup> 以上の増加 となっている(図-9(c),(e)).そして,その地域と UBN の強雨域の位置は一致している.

また,都市域にどの程度の降水量が生じるのかを検討するために,図-7(a)で示した黒太線で囲まれた矩形



図-8 PDYの解析結果.(a) 15~18 JST の積算降水量分布,
(b) 12~14 JST の高度 100 m における平均気温分布,
(c) 16~18 JST の高度 100 m~1900 m の層における
平均下層風収束分布,(d) 12~14 JST の高度 100 m に
おける平均気温の CTL との差異分布,(e) 16~18 JST
の高度 100 m~1900 m の層における平均下層風収束
の CTL との差異分布.

領域において,各実験ごとに15~18 JSTの3時間積算 で領域平均降水量を算出した.この矩形領域は,対象 とする時間帯において都市部に生じた降水をほぼ捉え られるような範囲に設定した.CTL,PDY及びUBN ではそれぞれ24.2 mm,3.7 mm,24.5 mmの領域平均 降水量となり,CTLやUBNの方がPDYと比べて都 市部により大きな量の降水をもたらしたことがわかる.

このように, PDY と UBN の結果は,都市の存在が ヒートアイランド効果を通して下層風の収束場を変化 させ,強雨域の形成位置に影響を及ぼすことを示して いる.都市の有無や存在密度によってヒートアイラン ド効果を通した下層大気加熱の度合いが変化し,それ が下層風の収束場の変化を引き起こし,結果として強 雨域の形成位置を変化させたと考えられる.

#### (3) 練馬豪雨発生に対する人工排熱の影響

図-10(a) に示すように, AHD では CTL に比べて強 雨域が東西に広がっていることがわかる.図-10(b),(d)



に示した温度分布をみると「都市部」の高温域が UBN よりもさらに強化されており, ヒートアイランドの特徴 はいっそう顕著になっているといえる.下層風は UBN と同様温度上昇が見られる「都市部」を中心として収 束する方向に変化が見られる.ただし, CTL と比べて AHD では 1×10<sup>-4</sup> s<sup>-1</sup> 以上の増加が見られる領域が

束する方向に変化が見られる.ただし,CTLと比べて, AHD では  $1 \times 10^{-4}$  s<sup>-1</sup> 以上の増加が見られる領域が UBN よりも広く,最も顕著なところでは  $10 \times 10^{-4}$  s<sup>-1</sup> 以上の増加となっており,UBN よりもさらに下層風の 収束が強化されたことがわかる(図-10(c),(e)).つまり, 人工排熱が都市のヒートアイランド現象をより促した 結果,都市部での下層風の収束が強まったと考えられ, 結果として CTL よりも大きな降水量をもたらす降水域 の形成に寄与したといえる.

土地利用分布に対する感度実験と同様に,図-7(a)で 示した領域において,15~18 JST の3時間積算で領域 平均降水量を算出した.CTLでは24.2 mmの領域平均 降水量なのに対し,AHDでは33.0 mmを生じている. さらに,1時間積算降水量が最大で7 mm程度増加し ており(図示せず),これらの解析結果から,人工排熱 を導入したことによって都市部にもたらされる降水量 は増加し,降水強度も大きくなっているといえる.

このことから,さらに将来的に人工排熱が増大した 場合,ヒートアイランドが現在よりもさらに強化され て,より強い豪雨の発生を引き起こしうることが示唆





### 5. 結論

本研究では,観測データの解析及び,詳細な陸面過 程を組み込んだ雲解像モデルCReSiBUCによる数値実 験を行い,1999年7月に発生した練馬豪雨に対する都 市の影響評価を試みた.観測解析からは,練馬豪雨の 際に「都市部」の高温域と地表風の収束,局所・短時間 強雨の形成位置が対応していたことが示唆された.ま た,土地利用分布に対する感度実験からは,都市の分布 の変化が降水域の形成位置に対して影響を及ぼすこと が明らかになり,人工排熱を導入した感度実験からは, 人工排熱は降水量の水平規模,降水量の増大に影響を 及ぼすことが明らかになった.以上のことから,練馬 豪雨のような短時間で局所的な強雨現象において,都 市の陸面過程としての効果が降水に影響していること が示唆される.

本研究では人工排熱量について,都市において空間 的に一様で時間変化しない条件で数値実験を行ったが, 今後は妹尾ら(2004)<sup>10)</sup>が算出したような人工排熱の空 間分布や時間変化が短時間で局所的な強雨現象に対し て与える影響についても検討していく必要がある.

また,本研究では練馬豪雨当日のみについて検討を

行ったが,都市の熱的影響が降水に影響しやすい大規 模な大気場の条件を考えるために,練馬豪雨当日のみ ではなく,一夏を通じたシミュレーションで統計的に 解析する必要があると考えられる.

謝辞:本研究では,名古屋大学地球水循環研究センター 坪木和久助教授,ならびに財団法人高度情報化学技術 研究機構 榊原篤志氏によって開発された雲解像モデル CReSS を使用させて頂きました.ここに謝意を表しま す.また,RSMの解析データを提供していただいた気 象研究所の加藤輝之博士には心より御礼申し上げます. 本研究は京都大学防災研究所 COE の一環として行われ ました.

#### 参考文献

- Marshall J. Shepherd and Steven J. Burian : Detection of Urban-Induced Rainfall Anomallies in a Major Coastal City, Earth Interactions. Vol. 7, No. 4, pp. 1-17., 2003.
- 2) 小林文明: ヒートアイランドが降水におよぼす影響 東 京周辺における積乱雲の発達 - , 天気, 51, pp. 115-117, 2003.
- (3) 藤部文昭: ヒートアイランドが降水におよぼす影響 -夏の対流性降水を中心にして - , 天気 , 51 , pp. 109-115 , 2003 .
- Stanley A. Changnon Jr. : METROMEX : A review and summary, Meteor. Monogr., 40, Amer. Meteor. Soc., pp. 181, 1981.
- 5) Marshall J. Shepherd, Harold Pierce and Andrew J. Negri : Rainfall Modification by Major Urban Areas: Observations from Spaceborne Rain Radar on the TRMM Satellite, Journal of Applied Meteorology, Vol. 41, No. 7, pp. 689-701, 2002.
- 6)神田学・井上祐史・鵜野伊津史:"環八雲"の数値シミュレーション,天気,47,pp.83-96,2000.
- 7) 坪木和久・榊原篤志: CReSS ユーザーズガイド第二版, 2001.
- 8) Kenji TANAKA : Development of the new land surface scheme SiBUC commonly applicable to basin water management and numerical weather prediction model, doctoral dissertation, Kyoto University, 2004.
- 9) Qoosaku MOTEKI, Yotaro ITO, Kazuaki YOROZU, Kazuyoshi SOUMA, Atsushi SAKAKIBARA, Kazuhisa TSUBOKI, Teruyuki KATO, and Kenji TANAKA : Estimation for Effects of Urban on Development of Cumulonimbus Clouds Using Atomosphere-Land Coupled Model of CReSiBUC, Annuals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No. 48C, in press, 2005.
- 10) 妹尾泰史・神田学・木内豪・萩島理: 潜熱割合を考慮した 人工排熱時空間分布の推計と局地気象に対する影響,水 工学論文集,第48号,pp. 169-174, 2004.

(2005.9.30受付)