

B53 都市圏の資源・エネルギー循環と都市構造に係わる温暖化防止対策技術に関する研究

(3) 都市気候モデルによる建築及び市街地の熱特性評価に関する研究

② 都市キャノピー内の熱収支の解明とモデル化に関する研究

研究代表者 気象研究所環境・応用気象研究部 花房龍男

気象庁気象研究所

環境・応用気象研究部

花房龍男

環境・応用気象研究部 第2研究室

千葉 長・栗田 進・牧 広篤

佐藤純次

気象衛星・観測システム研究部 第4研究室

小林隆久

平成9年～11年度合計予算額 7,428千円

(平成11年度予算額 2,486千円)

[要旨] 都市キャノピー内の熱収支を解明し、これをパラメタライズするために、新宿副都心の高層ビル街において各種気象要素、日射量及びビル壁面の放射温度分布の観測を実施した。またこの観測と同時に多種類の土地利用形態における地表面温度分布を得るために、一連の航空機観測を実施した。都市気象のシミュレーションの地表面初期値を作成するために、航空機観測によって得た各種地表面における温度分布を国土数値情報の土地利用形態と照合した。都市域における地表面熱収支を量的に評価するために、地表面過程のパラメタリゼーションを行い、局地気象モデルの改良を行った。地表面温度分布、都市域の地表面における物理量フラックスの特徴を改良モデルによって把握した。

[キーワード] 熱収支、地表面、パラメタリゼーション、シミュレーション

1. はじめに

都市域では人口集中の進行に伴うエネルギー消費の増大に起因する人工廃熱や都市開発による緑地帯の減少、コンクリート等の人工被覆物による地表面からの水分の蒸発散の抑制等に起因する高温化が指摘されて<sup>1)</sup>以来、数多くの気象モデルが数値的にヒートアイランド現象を表現してきた。しかしながら、都市キャノピー内における放射、顕熱輸送等を包括した熱収支のモデルやパラメタリゼーションは依然として行われていない。その最も重要な理由は都市キャノピー内が複雑な構造を持っているために一般化し難いためであると考えられる。都市キャノピー内における熱収支の解明は気象の分野だけでなく、大気汚染、気候や建築の分野からも切望されている事柄である。今までにこの問題に対して最も共通的に行われて来た手法は地表面変移といわれる手法であり、現実的な都市の地表面の構造を無視し、熱などの流れは屋根の高さに関連づけて取り扱ってきた。しかし一方では、ビルに囲まれた限定された空間ではあるが、そこにおける熱収支を把握しようとする努力もなされてきた。Munez and Oke<sup>2)</sup>は並行した壁面間の空間における熱収支を詳細に測定しており、Mills<sup>3)</sup>及び Mills and Arnfield<sup>4)</sup>は建物に囲まれた空間内の熱収支をモデルによって調べている。しかし、

限られた空間において詳細に熱収支を把握しても、これらの結果を都市域全体に拡張するには、都市構造の複雑さという問題が依然として残されている。この限られた空間における詳細な熱収支を参照し、これを多様な空間に適応出来るようにパラメタライズすることも一つの方法である。Kobayashi<sup>5)</sup>は都市域の建物を理想化し、その面積率や高さに関連した上向き放射フラックスに与える建造物の配列の効果をモンテカルロ法を用いて調べた。一方、Kimura<sup>6)</sup>は複雑な土地利用形態の地表面における熱フラックスを推定するための簡略的なパラメタリゼーションを提案し、さらにKimura and Takahashi<sup>7)</sup>は東京首都圏における土地利用形態とエネルギー消費から求めた人工廃熱が地表面温度に与える効果をこの簡略的なパラメタリゼーションを用いた数値モデルによって調べ、簡略的なパラメタリゼーションがかなり良好な結果を与えることを示した。また、栗原ほか<sup>8)</sup>は都市の人工廃熱が関東地域の風の局地循環に与えるインパクトを数値モデルによって調べ、人工廃熱の排出源の高さによってインパクトが異なることを示した。都市キャノピー内におけるエネルギー収支は都市大気を形成する最も重要な要素である。従って、野外観測に基づいた都市キャノピー内の熱収支の解明及びこの結果をパラメタ化することによって都市気象モデルへ取り入れることは、都市大気を表現する数値モデルの精緻化及びその進展を促す上でも重要な事柄である。

## 2. 研究目的

今までに都市域を含む多数の局地気象モデルがヒートアイランド現象を解明するために開発されてきた。これらの殆どは地表面熱収支を数キロメートルの格子間隔で平均的に表現している。しかし都市キャノピーは複雑な構造を持っており、都市キャノピー内におけるエネルギー収支を量的に把握し、解明することが重要である。そこで都市の大気境界層を表現する精度を向上させるために、野外観測に基づいてメソスケール気象モデルの地表面過程を改良する。そして都市大気にインパクトを与える地表面状態、特にサブグリッドスケールにおける多様な土地利用形態やそれに伴う地表面過程をパラメタ化することにより都市域を含むメソスケール気象モデルの予測精度の精緻化を行い、都市キャノピー内における熱収支構造モデルの開発に活用する。

## 3. 研究手法

都市キャノピー内の熱収支を量的に把握するために、都市の高層ビルに囲まれた限られた都市キャノピー空間を対象に各種気象要素、放射収支、ビル壁面温度分布、顕熱輸送等の時間変動の観測を実施した。この観測結果から都市キャノピー空間内における熱収支及び放射収支の特徴を把握した。さらにこれらを広域化するために航空機による多様な土地利用形態における地表面温度の観測を実施し、土地利用形態カテゴリー毎における地表面温度のヒストグラムの特徴を得た。これらの観測結果を通じて多様な土地利用形態から構成される1格子内における地表面熱収支のパラメタ化を図ることにより、局地気象モデルにおいて地表面過程のパラメタリゼーションによる精緻化を行った。改良した局地気象モデルを用いた数値シミュレーションにより都市域における気温、地表面温度分布や地表面からの顕熱、水蒸気、運動量等のフラックス等の特徴を把握した。

## 4. 結果

ヒートアイランド現象と呼ばれる都市の高温化は都市域における人工廃熱だけでなく、都市の構造に起因する地表面エネルギー収支に大きく左右される。従って都市キャノピー内の熱収支を把握

するには、地表面におけるエネルギー収支を精度良く見積もることが必要である。ここでの地表面とはビルの壁面等も含んだ、大気と接触している地面、地物の表面を意味する。しかし、ビルや家屋等はその内部で冷暖房のための温度制御をしており、そのための廃熱を放出するばかりでなく、壁面から大気に熱が供給されている。これらの建築物内部から外部大気への廃熱に関する詳細なメカニズムについては建築の熱環境負荷予測モデル（建築研究所）によって評価されている。従ってこの研究では人工廃熱は考慮せずに、都市構造による地表面の熱収支に重点をおいた観測、パラメタリゼーション及びモデルの改良と都市域の気象シミュレーションを行った。

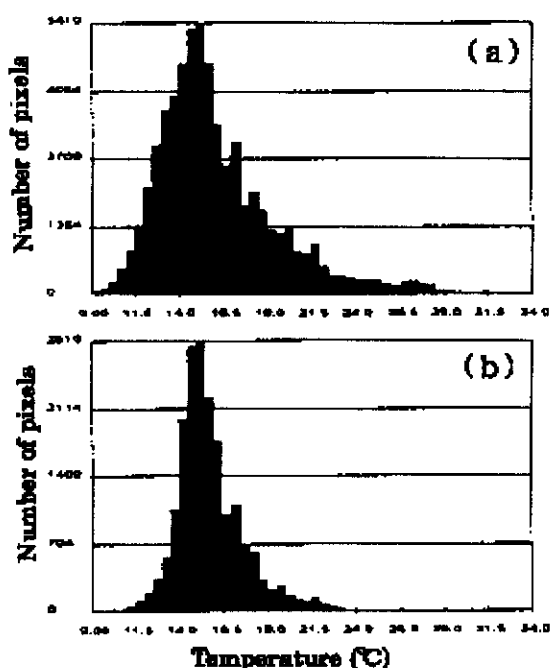


図1 1999年3月6日15:48に航空機観測で得られた地表面温度ヒストグラム。 (a)は新宿、(b)は明治神宮の森

### (1) 地表面温度観測

航空機による地表面温度分布の観測は都市構造の複雑性を反映している。約500m×400mの面積を撮影したサーモレーサーの一画面中に収まっている西新宿の高層ビル街付近における地表面温度のヒストグラムは非常に広範囲な温度分布を示しており、その範囲は約15℃にも達している(図1(a))。このことは都市域では1画面の中にも色々な表面温度を持った構造物が複雑に存在することを示している。市街地では地表面ヒストグラムは平均値を中心にして、高温側に尾を引く非対象の分布を示している。しかし、明治神宮の森などのほぼ一様な地表面状態(葉面)では温度範囲が約4℃程度のシャープで平均値を中心にはほぼ対象な分布である(図1(b))。図で縦軸は画素数、横軸は温度(℃)を示している。

### (2) モデルの改良とシミュレーション

この研究で設定したモデルの領域は図2に示したように東京湾を中心とし、その周辺の都市域を含んだ60km×46kmの領域を1kmの格子間隔でカバーしており図2において縦軸と横軸はそれぞれ格子点の番号である。陰影の濃いところはビル等の建物による地表面粗度の大きいところを表している。地形データは50mメッシュのデータから作成した。また1kmの格子内に占める土地利用形態のヒストグラムを100mメッシュの土地利用データを用いて、最多頻度と加重平均の2つの土地利用データセットを作成し、両者をそれぞれに採用したシミュレーションによって感度解析を行った。その結果、加重平均を用いた方が気温の予測精度が良いことが分かった。

局地気象モデル(LAS)の地表面過程はDeardorff<sup>9)</sup>によるフォース・レストア法(強制復元法)と呼ばれる手法を用いており、この手法では地表面温度は土壌においては日変化の及ばない深さにおける温度、比熱、熱伝導率、外力としての短波放射、長波放射、そして地表面における潜熱及び顕熱フラックスによって決定される。また潜熱フラックスは土壌の比湿に、顕熱フラックスは地表面状態に依存する。これらの地表面過程を土地利用形態に対応するように改良し、土壌の比湿及び

地表面粗度が地表面温度の時間変化に及ぼす感度解析を行った。その結果、一般的には土壌の比湿が低く、地表面粗度が小さいほど地表面温度の時間変化の振幅が高くなることが分かった。

新宿副都心の高層ビル街にある工学院大学において都市キャノピー内の温度場の観測と航空機観測を同時に1999年3月中旬に実施した。この観測期間内に当たる3月12日から図2に示した領域で48時間の局地気象シミュレーションを行った。図3は新宿における気温の時間変化をモデルと観測値を比較したものである。横軸は3月12日1時からの通算時間を示している。モデルの気温は地上15mにおけるものであり、観測値は新宿御苑の国設一般大

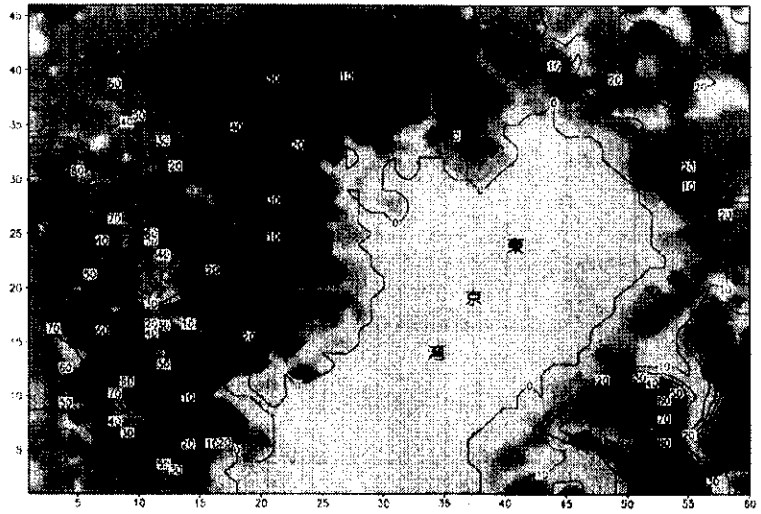


図2 この研究で用いたモデル領域における地形の標高分布（等高線）と地表面粗度分布（陰影）

気環境観測局における地上25mにおけるデータである。モデルでは夜間における気温と明け方の最低気温は低めに評価している。これは人工廃熱の効果を考慮していないことによると思われる。都市域の下層大気は人工廃熱の供給によって夜間における気温の低下が抑制されていると考えられ、実際にOke and Maxwell<sup>10)</sup>はモントリオールとバンクーバーにおいて自動車によって気温を測定し、都市域と郊外における日没後の冷却率に相違があること、すなわち都市域では夜間においても都市構造や人工廃熱によって気温の低下が抑制されることを示した。この研究では都市の複雑な地表面における熱収支を詳細に考慮したパラメタリゼーションを目的としており、これに対応した人工廃熱の詳細な情報は建築の熱環境負荷予測モデル(建築研究所)の結果とリンクすることにより夜間の気温等の予測制度の向上が見込まれる。

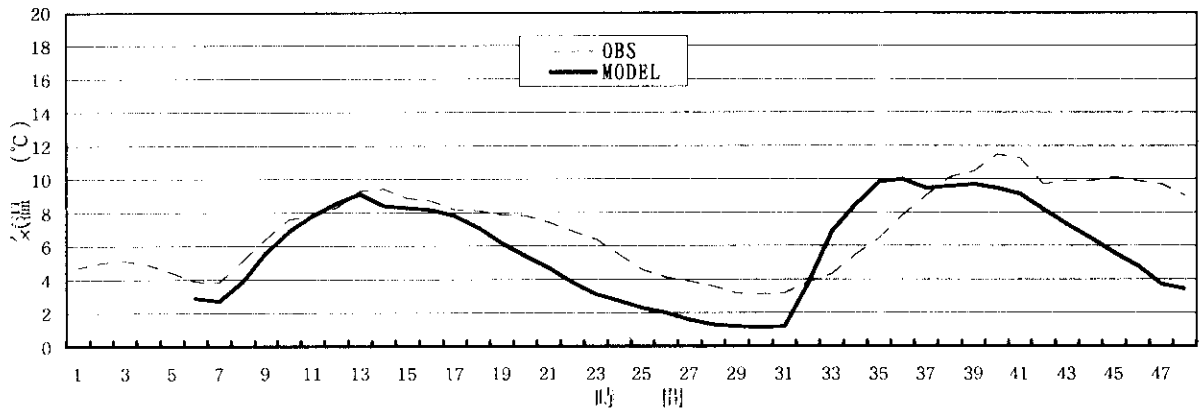


図3 新宿における気温の時間変化の測定値とモデルの比較

計算領域内で3月13日14時の地上15mの気温と風の水平分布をそれぞれ等温線と矢印で図4に示した。横軸と縦軸の数値はそれぞれ東西方向と南北方向の格子番号を表している。都心部の地表面粗度の大きいところ、すなわちビル街において気温が高くなっていることが分かる。この高温部は夜間には消滅してしまい、翌日の日中に再度出現する。しかし、これらのビル街からの人工廃熱を考慮すると夜間においても高温部が存続することも予想される。この日の地衡風は北西であったが、この気温の高いところに向かって風が吹き込んできており、海風の進入と相まって海風前線を形成している。一方、東京湾北部沿岸では海風前線はこの時間では海岸線に留まっており、都心の高温部が海風前線を内陸に浸入しやすい場を形成していることが示唆され

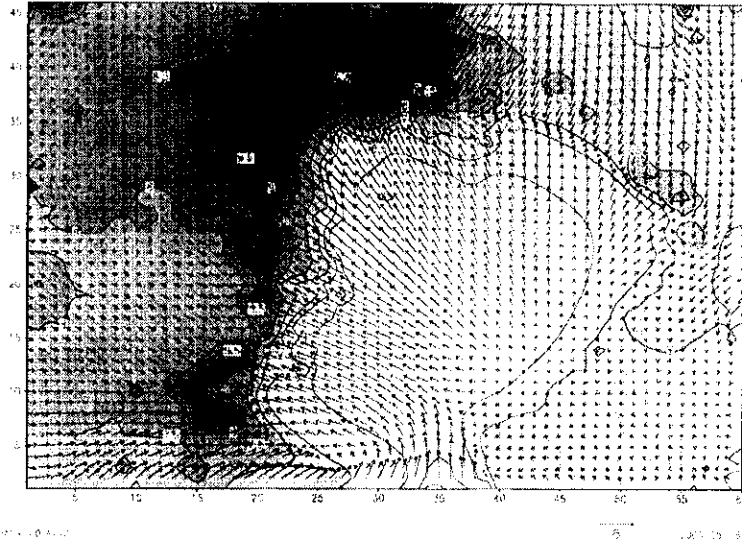


図4 改良モデルによる地上15mの風と気温分布

る。南北方向の格子番号  $J = 33$  における東西断面上の風の南北成分を図5に示した。都心部の高温部における海陸風の鉛直構造がこの図によって詳細に示されている。図において正は南風（海風）負は北風（陸風）成分を表している。海風の厚さは800m~1000mであり、これより上層は地衡風の北西風である。

人工廃熱や都市構造によって都市域が高温となるヒートアイランド現象は既に明らかにされており、気温の高い都市に向かって風が進入することも知られている。都市域全域に人工廃熱を与えて関東地域の局地循環へのインパクトを気象庁の数値予報モデルである日本領域スペクトルモデル（JSM）を3重ネスティングすることによって空間分解能を密にして調べた栗原らの研究でも都市域に向かう風の循環系が確認されている。しかしこれらの研究の多くは都市域全体を一様な高温域としてそのインパクトを調べたものである。本研究の特徴は都市をさらに小さいスケールに分割して都市構造を可能な限り表現し、そのスケールに対応した熱収支を考慮したところにあり、都市域内の風や温度場の構造をさらに詳細にみれる

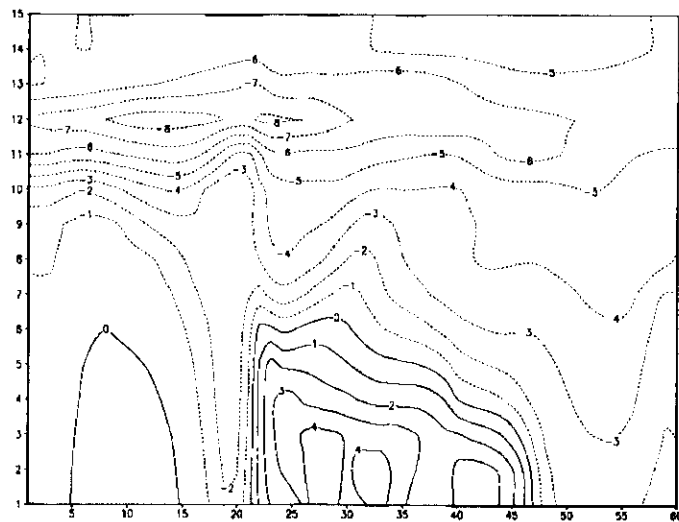


図5 風の南北成分の  $J = 33$  における鉛直断面

ようにすることが目的である。図4でも見られるように東京湾の西岸地域で気温の高いところが帯状に見られ、海風前線は14時においてこの気温の高いところに位置している。前線の東側で海風が卓越し、その厚さは約1000mに達しており、その上層は北風成分である。東京湾から海風が進入して、14時頃には気温が最も高い副都心部に前線が到達している。この日は一般風が北西であり、海風前線はこれより北上しないで時間の経過と共に消滅している。前述したように、この研究では人工廃熱を考慮していないので、夜間における高温域が存在しない結果となっている。もし、人工廃熱を考慮することによって夜間においても高温域が存続しているようであれば、夜間における風の場合このシミュレーション結果とは多少異なってくることが予想される。

## 5. 本研究によって得られた成果

- 1) 高層ビルに囲まれた都市キャノピー内における放射と熱環境に関するデータを取得、解析によってビルの壁面では壁面の持つ温度と射出率に対応した長波放射ばかりでなく、対面した建物からの長波を鏡体反射していることが赤外画像データの解析から分かった。長波放射射出率の角度に対する依存性を考慮すると射出率を一定とした場合よりも上向きのフラックスがかなり減少することなどの特徴が得られた。これらの詳細については平成9年度報告書に記載してある。
- 2) 航空機観測により多様な土地利用形態における広域地表面温度データを取得し、地表面温度のヒストグラムの分布型の分類から地表面温度分布の特徴を把握した。
- 3) サブグリッドスケールの土地利用形態毎に地表面熱収支過程をパラメタライズすることにより局地気象モデルの精度向上が認められ、都市の風や温度場の詳細な構造がモデルによって表現可能となった。

## 6. む す び

局地気象モデルによる都市気象の予測精度の向上と精緻化を目的として都市キャノピー内のエネルギー収支の把握とパラメタ化を観測や既存のデータを用いて行った。高層ビル街の空間における温度場やビルの壁面放射の特性を得るための観測を実施した。これらの観測結果を広域化するための航空機による地表面放射温度の測定を実施した。この観測結果を踏まえて局地気象モデルにおける地表面熱収支の改良とパラメタ化を行い、東京を中心とした都市域における気象のシミュレーションを実施した。その結果、都市域内部における風や温度場の詳細な構造が表現出来るようになった。

この研究において今後に残された問題点は人工廃熱を加味することであり、これによって都市気象の予測精度がさらに向上すると思われる。

## 7. 参考文献

- 1) Atwater, M. A.: Thermal effects of urbanization and industrialization in the boundary layer: A numerical study. *Boundary-Layer Met.*, **3**, 229-245, 1972.
- 2) Munez, M. and T. R. Oke: The energy balance of an urban canyon. *J. Appl. Met.*, **16**, 11-19, 1977.
- 3) Mills, G. M.: Simulation of the energy budget of an urban canyon-I. Model structure and sensitive test. *Atmos. Environ.*, **27B**, 157-170, 1993.

- 4) Mills, G. M. and A. J. Arnfield: Simulation of the energy budget of an urban canyon-II. Comparison of model results with measurements. *Atmos. Environ.*, **27B**, 171-181, 1993.
- 5) Kobayashi, T. : Upward long wave radiation from a non-black urban canopy. *Boundary-Layer Met.*, **69**, 201-213, 1994.
- 6) Kimura, F.: Heat flux on mixture of land-use surface: Test of a new parameterization. *J. Met. Soc. Japan*, **67**, 401-409, 1989.
- 7) Kimura, F. and T. Takahashi: The effects of land-use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo metropolitan area. A numerical experiment. *Atmos. Environ.*, **25B**, No. 2, 155-164, 1991.
- 8) 栗原和夫、栗田進、牧広篤、佐藤純次：都市における人工廃熱の局地循環への影響。日本気象学会1998年春季大会予稿集、p 183, 1998.
- 9) Deardorff, J. W.: Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation. *J. Geophys. Res.*, **83**, 1889-1903, 1978.
- 10) Oke, T. R. and G. B. Maxwell: Urban heat island in Motreal and Vancouver. *Atmos. Environ.*, **9**, 191-200, 1975.

#### 研究成果の発表状況

##### 口頭発表

- 1) 栗田進、佐藤純次、栗原和夫：日本気象学会1997年春季大会（1997）  
「都市のビルの壁面の射出率の角度依存性の上向き放射への影響」
- 2) 栗原和夫、佐々木秀孝、栗田進、佐藤純次：日本気象学会1997年春季大会（1998）  
「1996年8月1日の関東地方の局地循環におけるビル壁面の長波放射のインパクト」
- 3) 栗原和夫、栗田進、牧広篤、佐藤純次：日本気象学会1998年春季大会（1998）  
「都市における人工廃熱の局地循環への影響：放出位置のインパクト（1996年8月1日の事例）」
- 4) Maki, H.: The 13th AMS Symposium on Boundary Layer and Turbulence. (1999)  
"Statistical analysis of AMeDAS data for parameterization of boundary layer"
- 5) 栗田進：第15回生研NSTシンポジウム（2000）  
「都市キャノピー内熱輸送の風洞実験」