

11. 名古屋市域を対象とした熱環境対策導入効果の数値実験

NUMERICAL EXPERIMENT FOR EVALUATION OF COUNTERMEASURES FOR THERMAL ENVIRONMENT IN NAGOYA CITY AND ITS SUBURBS

田村 英寿*・平口 博丸*・水鳥 雅文*・丸山 康樹*

Hidetoshi TAMURA, Hiromaru HIRAKUCHI, Masafumi MIZUTORI, Kohki MARUYAMA

ABSTRACT ; An urban heat island phenomenon is feared for raising a peak of energy demand in summer. Therefore, effective countermeasures against this phenomenon are desired to improve not only local environment but also global environment. In our previous study, a three-dimensional numerical model to simulate this phenomena was developed in Nagoya city and its suburbs, and the good performance of this model were confirmed by comparison of numerical results with in-situ data. The purpose of this study is to evaluate some measures against the heat island phenomenon for protecting the thermal environment in Nagoya City and its suburbs by using the numerical model. In this study, four measures are considered: one is to conserve energy demand, to whiten roofs, and two other measures are to plant trees and grass/vegetation on roofs. Numerical experiments are carried out with and without each measures, and the space and temporal variations of the surface air temperatures and heat fluxes are compared with each other. From the simulated results, the effects and characteristics of each measures are described and evaluated.

KEYWORDS ; urban heat island , numerical simulation , energy conservation , Nagoya City

1. はじめに

都市域が郊外よりも高温化するヒートアイランド現象は、夏場の都市の環境やアメニティーを損なうものとして懸念されている。一般に、人口の多い大都市ほど郊外と較べて気温が高くなりやすいことが知られている¹⁾が、大都市の中心部では特に昼間に人口が集中することが多いため、ヒートアイランド現象が夏の冷房需要を増大させ、エネルギーの無駄遣いや電力需要ピークの先鋭化をもたらしている可能性がある²⁾。

都市の気温変化と電力消費量とを実際に関連づけた試算結果としては、米国内各地における8つの主要都市を対象とした事例³⁾がある。これによれば、1℃の気温上昇が上記の8都市の平均で、年間エネルギー消費量を約1%、ピーク電力負荷を約3%増加させるという試算結果が得られている。このことは、効果的な熱環境対策を検討することが、地域環境の改善に加えて、地球環境への負荷の低減やエネルギー供給システムの改善といった側面からも意義深いものであることを示唆している。

こうした背景のもと、筆者らは既報⁴⁾において、1km程度の水平分解能で、気温・風速等を非定常的に予測できる三次元数値モデルを開発するとともに、真夏日の名古屋市域を対象とした再現計算を行い、実測データとの比較検討を通じてモデルの適用性を検証した。今回は、同じく名古屋市域を対象として、具体的な熱環境対策の導入を想定した数値実験を行い、各対策の気温低下効果を検討した結果について報告する。

2. 数値モデルの概要

数値実験に使用したモデルは、既報⁴⁾で用いたモデルに若干の改良（本章の末尾に記述）を加えたものであり、数10～100km四方の領域を対象に、上空約5000mまでの気温・風速等の空間分布や一日の時間変化を計算する三次元モデルである。本モデルによる計算の概要は以下の通りである。

* (財)電力中央研究所環境科学部 Environmental Science Department, Central Research Institute of Electric Power Industry, Abiko 1646, Abiko-shi, Chiba, Japan 270-1194

(1) 地表面 : 日射・長波放射・人工排熱等を考慮して、土地被覆毎(市街地・緑地・水面等)の熱特性パラメーター(粗度長・蒸発効率・熱容量・熱伝導率等)に応じて、大気への熱・比湿フラックス、地中伝導熱量を計算する。また、地表面熱収支式から地表面温度を計算する。

(2) 大気中 : Kimura etc.(1991)⁵⁾を参考に地形を考慮した座標系を設定し、静力学近似とブジネスク近似のもと、地表からの熱・比湿フラックスを受け、大気中の風速・気温・比湿(水蒸気量)等を三次元的に計算する。なお、鉛直方向には地形に沿った座標系を設定する。

(3) 地中・海中 : 鉛直方向のみの熱拡散を考慮し、地中・海中各層の温度を計算する。

なお、既報⁴⁾のモデルからの改良点として、今回使用したモデルでは、地表と大気の水平分解能が同一でなくても、地表から大気への熱や比湿のフラックスが計算できる。例えば、大気中は水平分解能1kmで、地表面熱収支は大気中の半分の500mで計算され、地表の4つ(2×2)のメッシュからのフラックスを足しあわせたものが大気に受け渡される。この方法では、大気分解能以下の小スケールの熱循環等までは考慮されないが⁶⁾、計算時間を大幅に増大させることなく、地表付近の気温を高分解能で予測することが可能である。

3. 計算対象領域および各種計算条件設定の概要

今回の計算では、既報⁴⁾と同様、静穏な晴天日が続いた1990年8月3～9日の7日間の平均日を計算対象日とした。設定した計算対象領域および各種計算条件の概要は以下の通りである。

3. 1 計算対象領域および計算境界条件

計算対象領域は、図-1に示す東西89km×南北120kmとした。水平分解能は、図-1中に示す領域中央部では大気中1km、地表面500mとし、その外側では大気、地表面とも1～2kmの可変メッシュとした。鉛直方向については、大気中は最下層を地上約10m、最上層を標高5400mとして下層ほど密に15層を設定し、地中、海中はそれぞれ深さ0.5m、2.0mまでに等間隔に5層を設定した。計算境界条件については、大気の側方は一回微分ゼロとし、大気の上層、地中・海中の最下層でそれぞれ一定値を設定した。

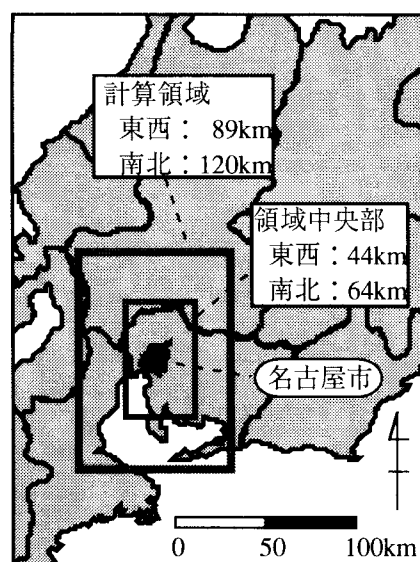


図-1 水平計算対象領域

3. 2 初期気象条件の設定

計算対象日の気象条件については、気象庁高層気象データ(潮岬・輪島・米子)、名古屋地方気象台における日射量データ、伊勢湾中央部と名古屋港内における中部電力(株)の海水温実測データなどをもとに設定した。また、風については、藤部(1981)⁷⁾を参考に、7日間の各日の平均海面気圧から中部日本スケールの地上地衡風を推定したところ、8月9日は約7m/sとやや強かったものの、それ以外の6日間はいずれも5m/s程度以下と予測されたため、今回は大規模風を設定しなくても概ね問題ないと判断した。

3. 3 標高・土地被覆・人工排熱密度分布の設定

標高分布は分解能約1kmの国土数値情報標高メッシュデータから、土地被覆分布は、分解能約100mの国土数値情報土地利用区分メッシュデータからそれぞれ設定した。人工排熱密度分布については、今回の検討では中部電力(株)が別途作成した排熱マップを使用した。この排熱マップは、顕熱と潜熱の二種類の人工排熱について、それぞれ1時間毎の毎正時の値の空間分布が設定されているもので、数値モデルの中では、顕熱は地表面の加熱源、潜熱は地表直上大気に輸送される水蒸気としてそれぞれ評価した。

4. 熱環境対策の導入効果予測

先章で設定した条件の下で、名古屋市内に熱環境対策を導入したときの気温低下量を予測するための数値実験を行った。

4. 1 基準ケースとしての現状の再現計算

熱環境対策の効果予測に先立って、比較のための基準ケースとなる現状の再現計算を実施した。計算は、午前8時を開始時刻として40時間分の非定常計算を行い、計算開始から16時間後以降の24時間分を考察の対象とした（次節で述べる対策導入ケースについても同様である）。5時と15時の気温分布について計算結果と実測とを比較したものを図-2に示す。早朝は名古屋市内に高温域が現れ、日中は市内中心部よりも内陸で気温が高くなるなどといった特徴が、本モデルで概ね正しく再現されているものと考えられる。

4. 2 熱環境対策導入の設定

今回検討対象とした熱環境対策導入ケースは、表-1にも示す通り、以下の4つである。

CASE1（芝地による都市緑化促進）：平屋根を有する屋上面のうちの20%相当の面積を芝地で緑化した場合を想定する。計算では、緑化した場所で蒸発効率が0.0から0.1になるとともに、地表熱容量が1／5に減少するものとする。緑化導入面積率の分布は図-3に示した通りである。

CASE2（樹木による都市緑化促進）：CASE1と同じ面積を樹木で緑化した場合を想定する。変化する計算パラメーターの種類はCASE1と同じであるが、蒸発効率が0.0から0.2になるとともに、地表熱容量も1／2に減少するものとする。

CASE3（屋上面の白色化）：CASE1と同じ面積の屋上面を白色化した場合を想定する。計算パラメーターとしては、日射の反射率が高くなる（0.12→0.45）ものとする。

CASE4（省エネや潜熱化技術導入による顕熱排熱削減）：業務、住宅用ヒートポンプのうちの20%について、機器効率を現状の2倍に向上させるとともに、水冷式熱交換器により業務の12%、店舗の10%、文化運動施設の16%の顕熱排熱を潜熱化させた場合を想定する。計算においては、顕熱排熱の一部（約15%）が削減され、一部（約5%）が潜熱化すると仮定する。14時における顕熱排熱削減量の分布を図-3に示す。

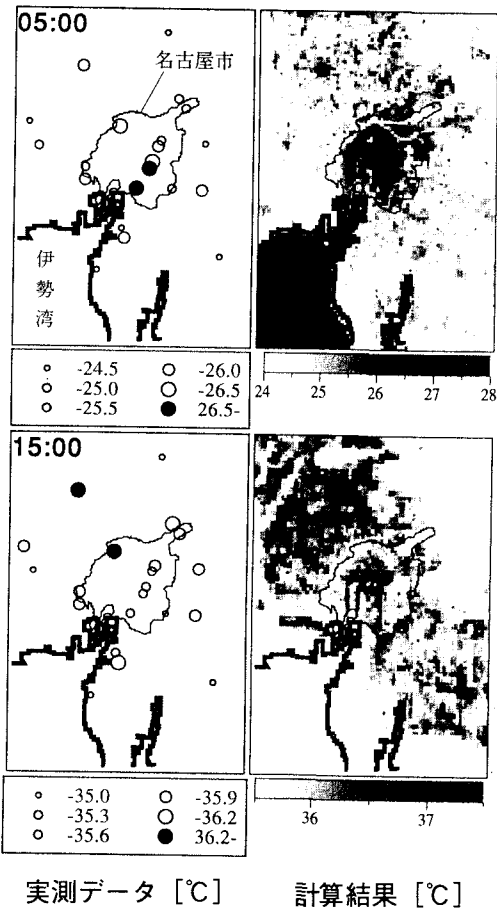


図-2 地上気温分布の実測と計算結果
（図の範囲は東西44km×南北64km）

表-1 熱環境対策導入に関する設定の概要

ケース	対策技術	導入量	導入場所での変量の変化
CASE1	芝地による都市緑化促進	平屋根を有する屋上面の20%相当の面積（市内中心部で約7%、市内平均で約2%）に導入する	蒸発効率：0.0 → 0.1 地表熱容量：市街地の1/5
CASE2	樹木による都市緑化促進	同上	蒸発効率：0.0 → 0.2 地表熱容量：市街地の1/2
CASE3	屋上面の白色化	同上	反射率：0.12 → 0.45
CASE4	省エネ、潜熱化技術導入による排熱削減	a) 業務、住宅用ヒートポンプのうちの20%について機器効率を現状の2倍に向上させる b) 水冷式熱交換器により業務の12%、店舗の10%、文化運動施設の16%の顕熱排熱を潜熱化する	市内中心部における顕熱排熱について a) により約15%を削減 b) により約5%を潜熱化

CASE1～4と4. 1で述べた基準ケース（CASE0）との計算結果の差分として、5、14時における地上気温差の分布を図-4に、名古屋市内中心部における気温差の時間変化を図-5にそれぞれ示す。各熱環境対策の導入効果に関する予測結果は、以下のようにまとめられる。

4. 3 都市緑化促進（CASE1,CASE2）による効果

午後～夕方にかけて、市内中心部では、CASE1で0.1℃、CASE2で0.2℃程度の気温低下が見られる。また、CASE1,2ともに夜間も0.2℃の気温低下が見られ、逆に午前中は気温低下量が小さいと予測されている（図-5）。

各パラメータ（蒸発効率と地表熱容量）が熱環境に及ぼす特性を調べるため、蒸発効率だけをCASE2の条件に変えたケースについて計算を行い、基準ケースとの気温差を示したものが図-6である。これより、日中の気温低下は主に蒸発効率によるものと考えられるが、それ以外の時間帯は、熱容量変化の影響が気温に現れていると考えられる。すなわち、熱容量が小さくなったために、夕方から夜間は表面温度が低下しやすく、気温が上昇する午前中には表面温度が上がりやすくなったと考えられる。

また、日中14時において、名古屋市域の北側と東側に気温差の増減が激しい場所がある（図-4）。この時間帯におけるこれらの場所では、対策導入前後で風向や風速が局所的に大きく変化しているという計算結果が得られており、これに伴って地表からの顕熱輸送量に増減が見られたためと考えられる。他の検討ケース（CASE3,4）についてもこれと同じことがいえる。

4. 4 屋上面の白色化（CASE3）による効果

昼～夕方の気温低下量は緑化の場合よりも小さく、日中の躯体内への蓄熱量の減少に伴う夜間の気温低下もほとんどないと予測された（図-5）。

緑化の場合と比較するため、CASE2とCASE3について、市内中心部における基準ケースからの熱収支の変化を示したものが図-7である。基準ケースと較べて、CASE2では日中の潜熱が約25W/m²増え、その多く（約20W/m²）が顕熱の減少に寄与している。CASE3についても、白色化で日射の反射が増えた

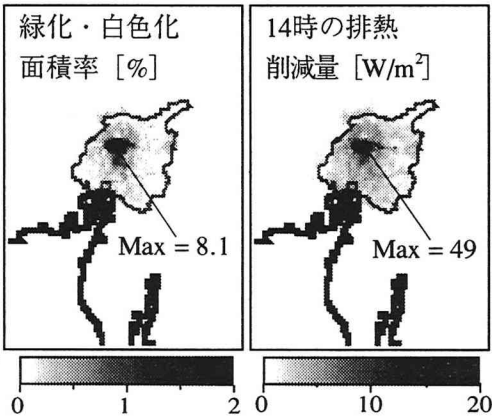


図-3 熱環境対策導入の分布
(図の範囲は東西44km×南北64km)

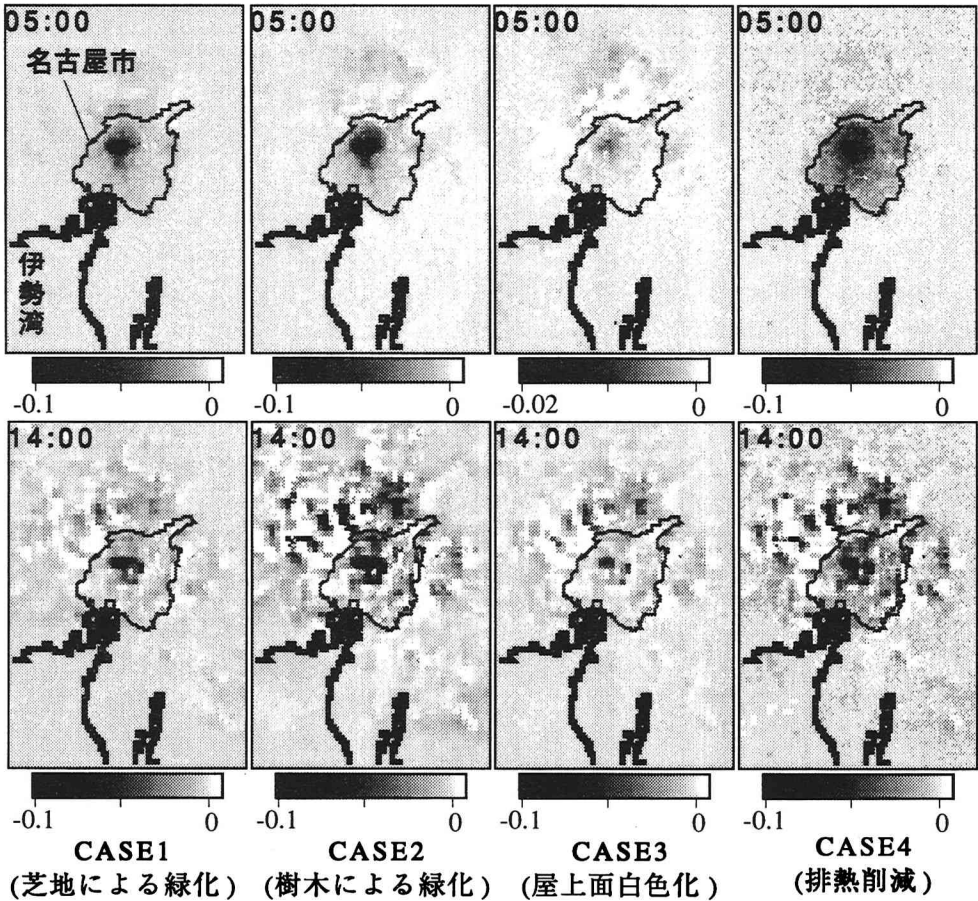


図-4 5,14時における熱環境対策の導入に伴う気温変化量の計算結果〔℃〕
(基準ケース（CASE0）との差、図中の黒い部分が気温低下量大、
図の範囲は東西44km×南北64km)

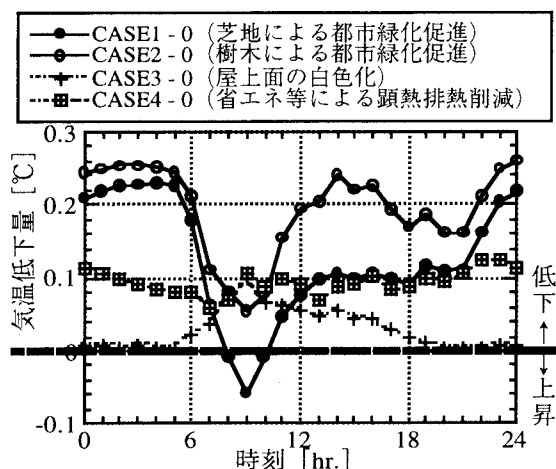


図-5 名古屋市内中心部における熱環境対策導入時の気温低下量の時間変化

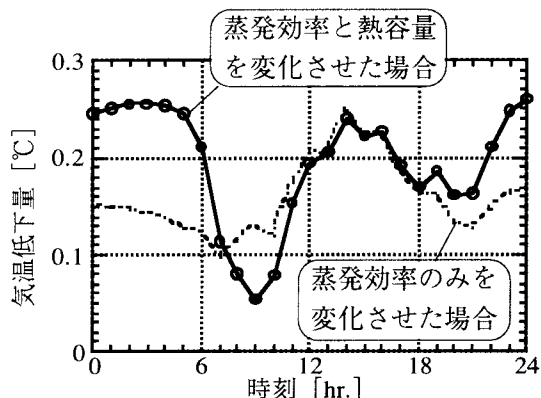


図-6 緑化パラメータと気温低下量の関係 (CASE2、名古屋市内中心部)

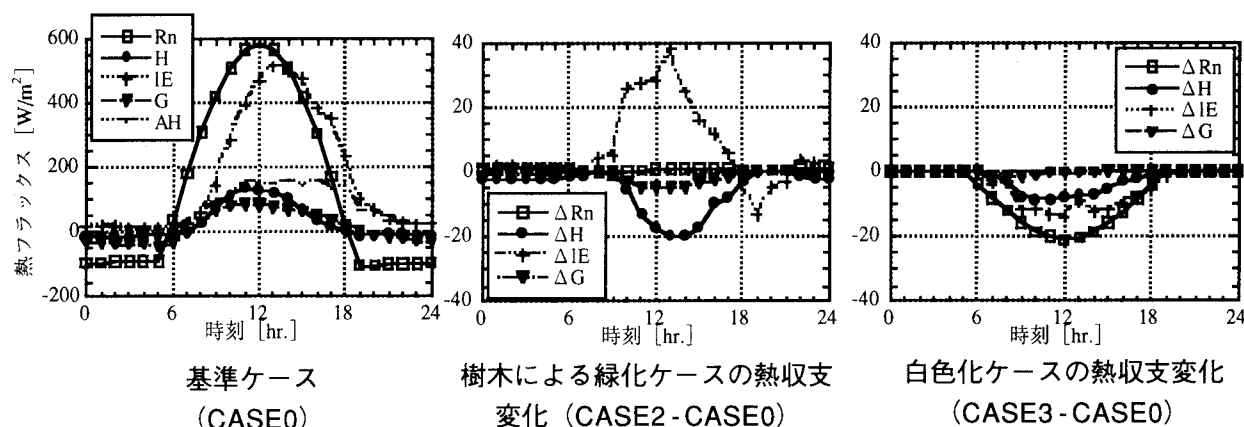


図-7 名古屋市内中心部における地表面熱収支の比較
(Rn: 正味放射↓、H: 顕熱↑、IE: 潜熱↑、G: 地中伝熱↓、AH: 人工排熱)

ために正味放射が約 20W/m^2 減少しているが、その半分以上は潜熱の減少に使われており、顕熱の減少分は緑化の半分以下の約 7W/m^2 となっている。

4. 5 省エネ等の技術導入による排熱削減 (CASE4) による効果

名古屋市内中心部では、日中の排熱削減量は早朝の数倍にもなるにもかかわらず、気温低下量は一日を通じてほぼ一定である (0.1°C 程度) と予測されている (図-5)。

この原因としては、時間的な「排熱削減量の違い」と「排熱削減効果の気温への現れ方の違い」とが相殺しあったためと推察される。後者に関して早朝と日中の効果の違いを調べるため、名古屋市内を対象として、5時と14時について排熱削減量と気温低下量の関係をプロットしたものが図-8である。同じ排熱変化量であっても、気温への影響度は日中よりも早朝の方がはるかに大きいことがわかる。これは、地表からの熱が、混合層が発達する日中には上空に拡散されやすいのに対して、静穏で大気が安定している夜間には地上気温に現れやすいためと考えられる。なお、本来このような考察を行う場合、熱の水平移流の影響や日中の混合層

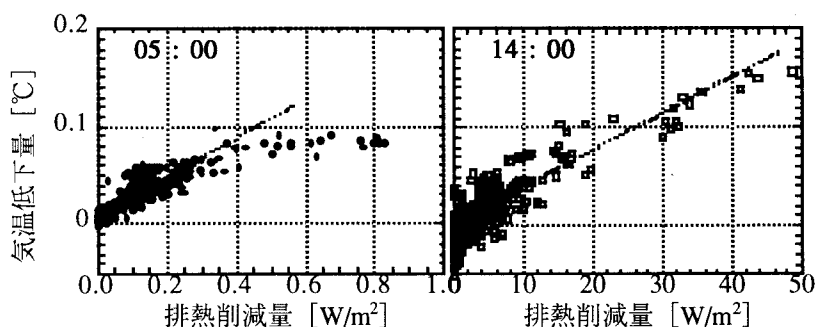


図-8 名古屋市内における排熱削減量と気温低下量の関係

厚などが場所毎に異なることも考慮する必要があるが、日中14時の排熱削減量が 10W/m^2 以上に及ぶ地域が市内中心部の5km四方に集中しているため（図-3参照）、図-8のグラフの原点近傍を除けば、場所毎のこれらの差異は小さいものと考えた。

また、図-8において、日中は排熱と気温の変化量の関係がほぼ直線的であるのに対して、早朝は排熱削減量が多いほど気温変化量が頭打ちになっている。都市気象の簡略モデルを用いた解析⁸⁾によれば、地上気温変化が、混合層が発達する日中は地表からの熱量変化の1乗、大気が安定する夜間は1/2乗に比例することが示されており、今回得られた結果は、これと矛盾しないものと考えられる。

5. おわりに

三次元数値モデルにより、名古屋市域に各種熱環境対策の導入を想定した数値実験を行った。その結果、対策毎の効果について、時間帯別の現れ方の特徴や対策毎の相違に関する予測結果を得た。

今回実施したのは、都市の地上に存在する建物群の効果を抵抗係数的に扱ったいわゆる「粗度モデル」を用いた広域的な予測である。今後は、人間の感覚や街区スケールの熱環境を評価するため、建物群の凹凸を考慮しつつ、風道などの局所的な対策を考慮できる手法の検討を進めていく予定である。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、（株）アーク情報システムの鈴山宏氏には、数値モデルのプログラミング等に多大なご協力をいただいた。なお、本研究は、中部電力株式会社と（財）電力中央研究所との共同研究によって得られた結果を再構成したものである。

参考文献

- 1) Oke,T.R. : City size and the urban heat island, Atmospheric Environment, Vol.7, pp.769-779, 1973
- 2) 水鳥雅文：ヒートアイランド現象とエネルギー問題、電気協会雑誌、9年2月号、pp.32-36, 1997
- 3) Meier,A., and Taha,H. : Mitigation of urban heat islands:Meteorology, energy, and air quality impacts, International symposium on monitoring and management of urban heat island, proceedings, Research Project on "Monitoring and Management System on Urban Heat Island", pp.124-163, 1998
- 4) 水鳥雅文・田村英寿・丸山康樹：名古屋市とその周辺地域における熱環境シミュレーション、環境システム研究、vol.22、pp.292-299、1994
- 5) Kimura,F. and Takahashi,S. : The effects of land-use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo metropolitan area : a numerical experiment : Atmospheric Environment,Vol.25B,No.2, pp.155-164, 1991
- 6) 葛葉泰久・早野美智子・岸井徳雄：潜熱・顕熱フラックスの領域平均値とPatch Scaleの関係、水工学論文集、第43巻、pp.1103-1108、1999
- 7) 藤部文昭：海陸風の季節的特性、天気、Vol.28、No.6、pp.27-35、1981
- 8) 近藤純正：水環境の気象学、第12章 都市大気のシミュレーション（木村富士男、pp.281-307）、朝倉書店、350p.、1994