

## 研究解説

## 数値気候モデルによる関東地方の都市気候解析

—建物の albedo の変化による影響—

Numerical Simulation of Urban Climate in Kanto Plane

—Effects of increased albedo for building area—

金 相 璣\*・村 上 周 三\*・持 田 灯\*・大 岡 龍 三\*

Sangjin KIM, Shuzo MURAKAMI, Akashi MOCHIDA and Ryoza OOKA

建物の色彩等の変更により都市表面の日射反射率 (albedo) を増加させた時の夏季の温熱環境改善効果について、数値気候モデルに基づく数値解析により検討した。建物用地の albedo を現状に対応する値の 0.1 から 0.3 に増加させると晴天時の 8 月上旬の午後 3 時における都心部の地表面温度が約 2℃、高さ 10m の SET\* が約 1℃減少する結果となった。

## 1. はじめに

著者らはこれまでに数値気候モデルに基づく数値解析により都市の土地利用の変化が都市気候に及ぼす影響を検討してきた。特に、緑地面積の変化等に伴う都市の地表面の蒸発効率の変化や粗度長の変化等の影響に関して詳しく分析してきた<sup>1, 2)</sup>。本稿では建物表面の色彩の変更等により albedo (日射反射率) を増加させた場合の夏季の温熱環境の変化を検討した。

## 2. 解析概要

## 2.1 計算ケース

現状の都心を想定して建物用地の albedo を 0.1<sup>3)</sup> としたケース (Case 1) と建物用地の albedo を 0.3 に変更したケース (Case 2) の 2 つのケースを比較する。ここで、Case2 は建物表面の色彩を albedo の高い白または淡色に変更した場合を想定している<sup>4)</sup>。

## 2.2 乱流モデル

複雑地形に適用可能な形に拡張された Mellor-Yamada モデルのレベル 2.5 を利用<sup>1, 5)~8)</sup> した (注 1)。

## 2.3 解析領域・メッシュ分割

関東地方の海陸風は周辺山岳地域の影響を強く受けており、海陸風を正確に再現するには解析領域を周辺山岳域を含む数 100 km の範囲に取る必要がある。図 1 に解析領域を示す。解析領域は水平方向に 480 km × 400 km、鉛直方向に 5 km の解析領域を設定した。特に詳細な解析を必要とする領域ではメッシュを順次細かくする nested grid 手法

を利用している。本解析では 3 段階の nested grid を用いて解析する。表 1 に各解析領域、メッシュ分割、水平方向のメッシュ幅等を示す。鉛直方向には地表面から高度 5 km までの大気を 15 メッシュに、地表より地下は深さ 50 cm までを 5 メッシュに分割した。Grid 1 ~ 3 とともに、地表に接する大気側のメッシュの鉛直方向の幅は 20 m で共通である。

## 2.4 初期条件および境界条件

表 2 に本解析に用いた現状の土地利用分類 (図 2) によるパラメータの設定値を示す。地表面温度の境界条件は文献 1) と同様に 1 次元熱収支モデルから算出した。初期地表面温度と地中温度は図 3 のように設定した。ただし、地

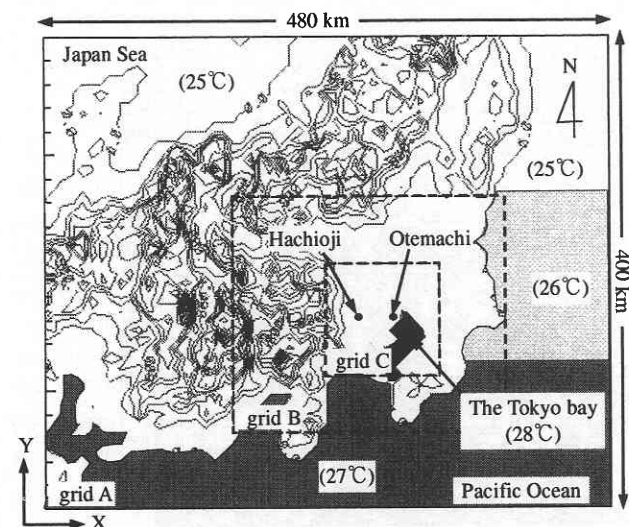


図 1 解析領域

\*東京大学生産技術研究所

表面 (A 点) から地中 50 cm (B 点) の間は A 点の温位の初期値から換算した温度を設定した。この場合、大手町の地中温度は地下 50 cm で 26.1℃ になるように設定した。温位分布の初期値は高さ方向に 5 K/km となるように与えた。海水面温度は図 1 に示すように南北方向で分布を与えた。相対湿度の初期値は 3 km までは McClatchey の大気モデルを用い、3 km 以上の上空では 0% とした (図 4)。人工排熱は東京都のエネルギー消費関連資料<sup>3)</sup>を参考に分布を与えた。上空の風向、風速は南風 2 m/s とし、数値安定化のため地表面より 1000 m 以上の上空において Nudging (注 3) を施した<sup>7)</sup>。図 5 に計算条件として与えた地表面の albedo の分布 (grid 内平均値) を示す。建物用地の albedo を現状に対応する値 (0.1) とした Case1 では、都心部における albedo の grid 平均値は 0.1 程度となる。これに対して建物用地の albedo を 0.3 に変更した Case2 の場

表 1 計算領域、メッシュ分割、メッシュ幅

	計算領域 (X)×(Y)×(Z)	メッシュ 分割	水平方向の メッシュ幅
grid A	480 km×400 km×5 km	60×50×15	8 km
grid B	232 km×200 km×5 km	58×50×15	4 km
grid C	96 km×96 km×5 km	48×48×15	2 km

表 2 土地利用分類によるパラメーターの設定値

土地利用	蒸発効率 $\beta$	Albedo $\alpha$		粗度長 $z_0$ (m)	熱容量 (J/m <sup>2</sup> ・°C)
		Case1	Case2		
Rice pad	0.5	0.2		0.05	3.0 E+6
Farming	0.3	0.1		0.01	2.0 E+6
Orchards	0.3	0.2		1	2.0 E+6
Orchard 2	0.3	0.2		0.5	2.0 E+6
Forest	0.3	0.15		2	2.0 E+6
Vacant land	0.3	0.2		0.01	2.0 E+6
building	0	0.1	0.3	1	2.1 E+6
Paved road	0	0.1		0.01	1.4 E+6
Other land	0.3	0.2		0.01	2.0 E+6
River site	1.0	0.03		0.001	4.2 E+6
Coast	0.6	0.3		0.005	1.3 E+6
Ocean	1.0	0.03		0.001	4.2 E+6

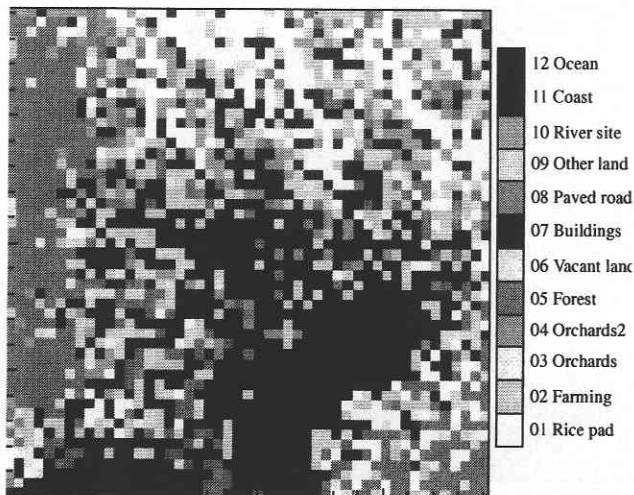


図 2 土地利用状況 (2 km mesh, grid C)

合、都心部における grid 平均値が 0.2～0.25 程度まで増加する。他の境界条件、初期条件については文献 8) の Case5 と同じ。

### 3. 計算結果

#### 3.1 地表面温度分布

8 月上旬の太陽高度に基づき午前 6 時から計算を開始し、その後 33 時間の時間積分を行った。図 6 に午後 3 時の地表面温度分布を、図 8 に大手町と八王子の地表面温度の時間変化を示す。又、図 9 に大手町における地表面熱収支を示す。建物の albedo を増加させた Case 2 (図 6 (2)) では Case 1 (図 6 (1)) に比べて日中の地表面温度が都心中心部で約 2℃ 低下する。正午付近では Case 2 (図 8 (2)) は Case1 (図 8 (2)) に比べて都心部 (大手町) の地表面温度が 2℃ 程度、郊外 (八王子) では 1℃ 程度低下している。これは図 9 (1) と 9 (2) に示すように、Case 2 では建物用地の albedo を 0.1 から 0.3 に増加させたため、地表面に入射する正味の短波放射量が Case 1 に比べて約 200 W/m<sup>2</sup> 減少したためである。一方、日射の影響のない夜間では、当然のことながら Case 2 と Case 1 の差は非常に小さい (図 8 (1), (2))。

#### 3.2 気温分布

図 7 に午後 3 時の高さ 10 m における気温分布を示す。図 6 に示すように地表面温度の低下の影響を受け、高さ 10 m の気温は全般的に 0.5～1℃ 程度低下している。図

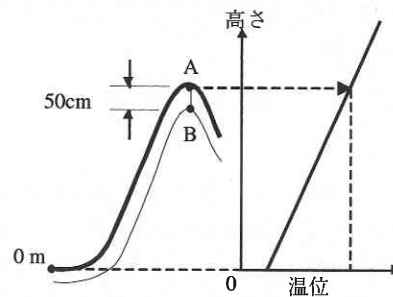


図 3 地表面温度と地中温度の初期設定

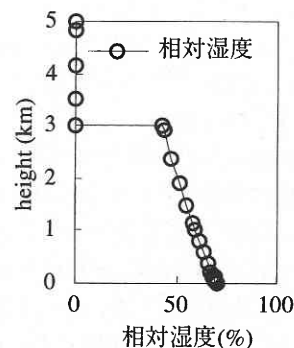


図 4 相対湿度の初期鉛直分布

10 に大手町と八王子の高さ 10 m の気温の日変化を示す。地表面温度の低下の影響を受け、現状の Case1 に比べ、albedo を増加させた Case 2 では日中大手町で約 1℃、八王子で約 0.5℃ 気温が低下する。また、地表面温度と同様に夜間の気温はほとんど差が見られない。

### 3.3 風速の変化

図 11 に両ケースの午後 3 時における風速の変化率  $((\text{Case 2 の風速})/(\text{Case 1 の風速}) \times 100)$  を示す。この時

間帯は発達した海風が内陸部に吹き込む時間帯であるが、建物用地の albedo を増加させた Case 2 では、地表面温度が低下するために陸地と海面の温度差が小さくなり海風の駆動力も弱くなることによって、風速が Case 1 に比べて都心中心部で数% 低下する。

### 3.4 SET\* の分布

図 12 に高さ 10 m における午後 3 時の SET\* (Standard Effective Temperature)<sup>11)</sup> の分布を示す (注 4)。Case 2

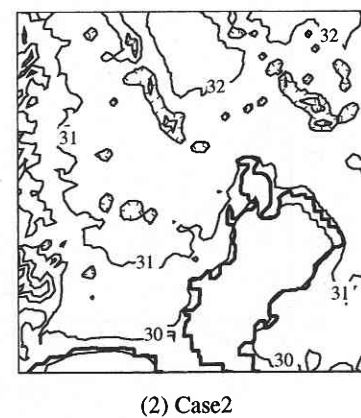
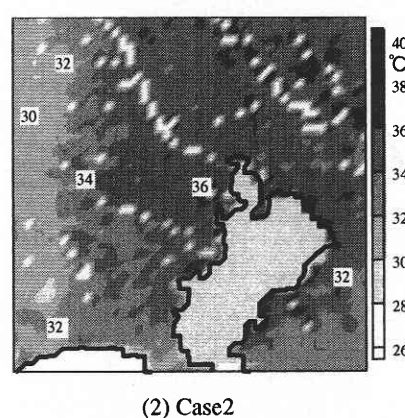
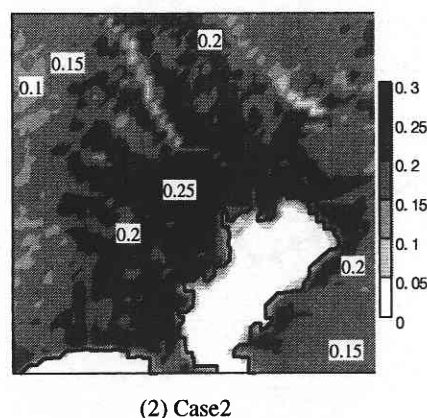
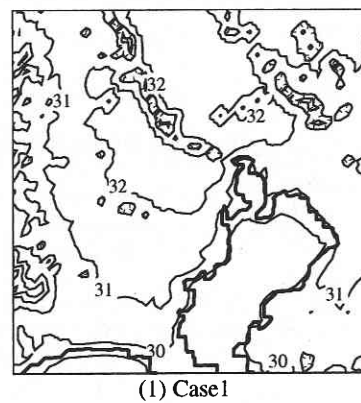
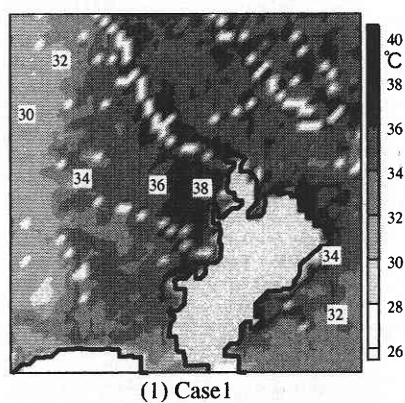
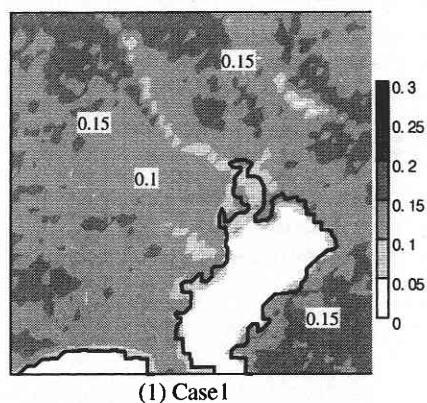


図 5 albedo の水平分布 (gird C)

図 6 地表面温度分布  
(午後 3 時, gird C)

図 7 気温分布  
(午後 3 時, gird C 高さ 10 m)

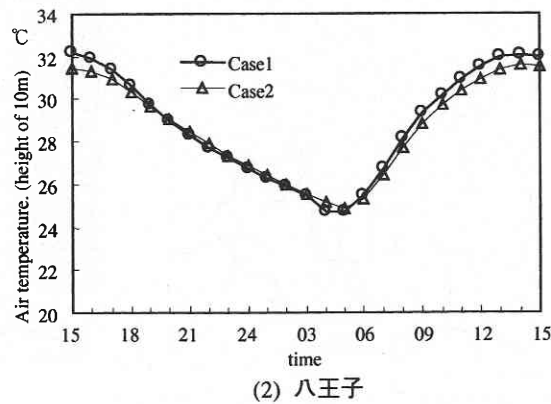
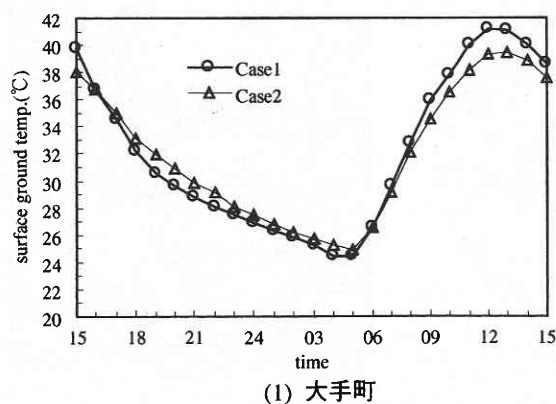


図 8 地表面温度の時間変化

(albedo = 0.3) では Case1 (albedo = 0.1) に比べ SET\* が 43℃ 以上の領域が縮小し、都心中心部では SET\* が約 0.5℃ 低下している。すなわち、メソスケールのレベルで全体的に見れば、建物の albedo を増加させることにより、昼間の屋外の温熱環境を緩和させることができるという結果となっている (注 5)。

#### 4. 結 論

- (1) 建物用地の albedo を 0.1 から 0.3 に増加させた場合、午後 3 時の都心部の地表面温度が約 2℃ 程度低下した。
- (2) 一方、albedo を増加させた case では、海風の駆動力

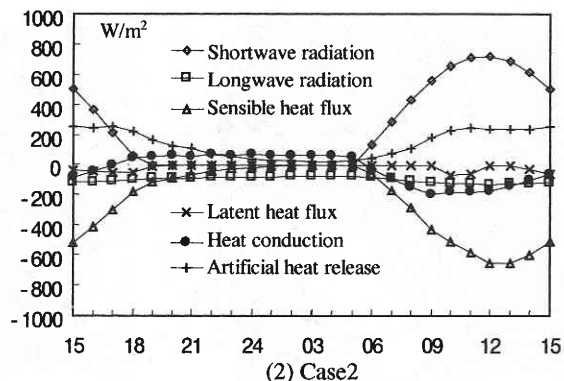
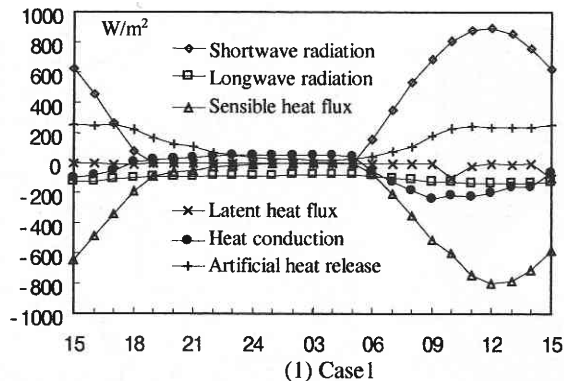


図 9 地表面熱収支の時間変化 (大手町)

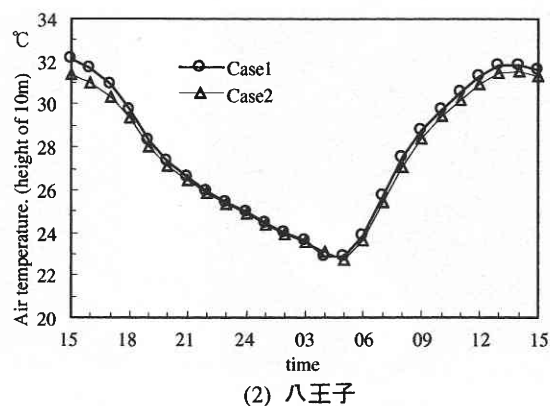
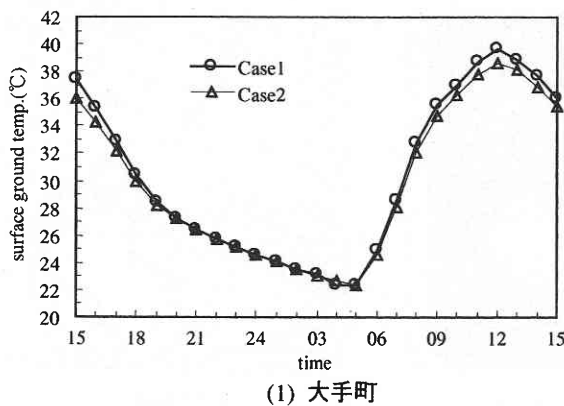


図 10 気温の時間変化 (高さ 10 m)

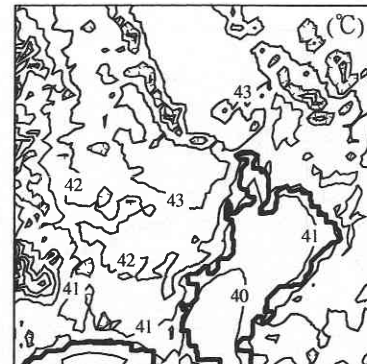
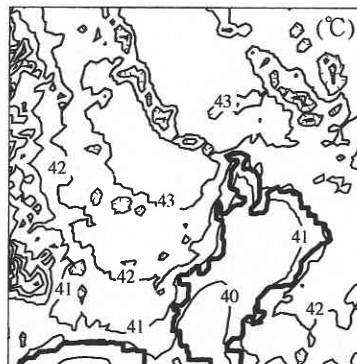
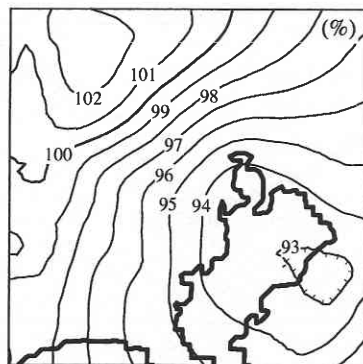


図 11 風速の変化率 (午後 3 時, 高さ 100 m)  
((Case 2 の風速)/(Case 1 の風速)×100)

図 12 SET\* の分布 (午後 3 時, 高さ 10 m, grid C)

となる陸地と海面の温度差が減少するため、日中の海風の風速は現状の case1 に比べて数%低下する。

- (3) SET\* の分布を比較すると、albedo を増加させた場合、午後 3 時の都心部で現状の case1 に比べて約 1℃低下している。これより albedo の増加による都市の温熱環境緩和効果が認められる。

注 1) 解析は山田等が開発した HOTMAC<sup>6)</sup> に対して著者らがいくつかの改良<sup>5)</sup>を加えたソフトを使用した。山田等の開発した HOTMAC 4.5 に対する主な改良点は以下の通りである。①初期水蒸気分布、②地表面の比湿の与え型(注 2)、③上空面の境界条件<sup>5)</sup>等。

注 2) Yamada 等により開発された HOTMAC では土壤湿度から地表面の水蒸気量を与える以下のような方法が採用されている<sup>6)</sup>。

$$q_G = Rh \times q_s \quad \dots\dots\dots (1)$$

$q_G$  : 地表面の総水分混合比

$Rh$  : 土壤湿度 (地表面に接する大気の相対湿度)

$q_s$  : 飽和状態の総水分混合比

この場合、土壤湿度を正しく設定するための参考となるデータが少ない。本研究では気象学分野で使用例が多く<sup>9, 10)</sup>、種々のデータが報告されている  $\beta$  法を用いて地表面の水蒸気量を評価する形にプログラムを改造した。本解析では各土地利用に対応する蒸発効率  $\beta$  は文献 9), 10) 等を参考に表 1 のように設定した。ここで、地表面の比湿  $q_G$  を次式より与えた。

$$q_G = q(z) + \beta(q_{sat} - q(z)) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$q_G$  : 地表面の比湿 (kg/kg)

$\beta$  : 地表面の蒸発効率<sup>9, 10)</sup>

$q(z)$  : 高さ  $z$  での比湿 (水蒸気混合比, kg/kg)

$q_{sat}$  : 地表面初期温度に対する飽和比湿

本解析ではこれを  $\beta$  法を用いて地表面の水蒸気量を評価する形にプログラムを改造した ((2) 式)。

注 3) 本来 Nudging とは、観測データと数値計算を組み合わせる、いわゆる 4 次元同化手法を行う際の観測データの組み込む方法を示すもので、運動方程式の右辺に、次式で下線を施した項を追加する<sup>6)</sup>。

$$\frac{DU}{Dt} = \sim + G(U_{obs} - U) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{DV}{Dt} = \sim + G(V_{obs} - V) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$\sim$  : 通例の運動方程式の右辺、

$G$  : Nudging parameter

$U_{obs}, V_{obs}$  : 観測データ

Nudging を本モデルの開発者の山田哲司に倣って、数値計算の安定化手法のためにも利用する。本研究では、元々 Nudging を施さない計算を行っていたが、高さ 2 km より上空において無視し得ぬ数値振動が生じたため、計算安定化のため Nudging 手法を導入した。ここで、(3), (4) 式の  $U_{obs}, V_{obs}$  は、本研究で上空 (高さ 5 km) で南風 2 m/s ( $U_{obs} = 0$  m/s,  $V_{obs} = 2$  m/s) とした。(3), (4) 式中の Nudging parameter  $G$  については、山田等は経験的に 0.0005 を用いているが、本研究ではいくつかの試行実験ののち、高さ 1 km で 0.0001, そこから高さに対して線形に増加し、高さ 5 km で 0.0005 とした。即ち、低い高度では Nudging の影響を小さく、高度が増加するにつれ、大きくなるように設定した。 $G$  の設定法に関しては今後さらに検討する必要がある。

注 4) 今回の SET\* の算出における放射受熱量の計算において人体形状は微小球体であると仮定した。天空からの長波放射は下向き大気放射量より、地表面からの長波放射は地表面温度より算定した。着衣量を 0.5 clo, 人体の代謝量は 1.5 Met とした。

注 5) 今回の計算では albedo を増加させた場合のメソスケールの気候への影響について検討した。建物外表面全ての albedo を増加させると建物からの照り返しが増加し、居住者レベルの屋外環境はかえって悪化する可能性がある。今後、建物周辺の micro climate の解析も行い、建物表面の albedo を増加させた時の市街地内部の温熱環境についても検討していく予定である。

## 謝 辞

本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の平成 10 年度新規産業創造型提案公募事業「高効率の熱交換・熱拡散促進型の省エネ都市形成手法の開発」(研究代表者: 村上周三, メンバー: 持田灯, 近藤裕昭, 島田昭男, 吉門洋, 玄地裕, 伊香賀俊治, 大岡龍三, 金相 璉) の一環として NEDO との共同研究により行った。

(1999 年 11 月 15 日受理)

## 参 考 文 献

- 1) 村上周三, 持田灯, 金相 璉, 大岡龍三, 関東地方における土地利用状況の変化と流れ場・温度場の関係—Mellor-Yamada 型の都市気候モデルによる局地気象解析—, 日本建築学会論文報告集, No.491 (1997), 31-39.
- 2) 持田灯, 村上周三, 金相 璉, 大岡龍三, 数値気候モデルによる関東地方の都市気候の研究—粗度長の相違による緑地の気温低減効果の変化—, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (1998), 917-918.
- 3) 資源環境技術総合研究所環境影響予測部, 大都市における夏季高温化対策技術の評価手法の開発, 環境影響予測部研究資料 97-1, p. 311 (1997).

- 4) H.Taha, S.Douglas and J.Haney, Mesoscale Meteorological and Air Quality Impacts of Increased Urban Albedo and Vegetation, *Energy and Buildings*, 25 (1997), 169-177.
- 5) 金相 璣, 大岡龍三, 持田灯, 村上周三, 数値気候モデルによる関東地方の局地気象の解析—初期温位分布, 海水面温度, 地中の熱容量及び人工排熱量の影響の検討—, 東京大学生産技術研究所所報, 50 卷 1 号 (1998), 86-93.
- 6) T. Yamada. and S. Bunker., A Numerical Model Study of Nocturnal Drainage Flows with Strong Wind and Temperature Gradients, *Journal of Applied Meteorology*, Vol.28 (1989), 545-554.
- 7) T. Yamada., C.J. Kao and S. Bunker., Airflow and Air Quality Simulations over the Western Mountainous Region with a Four-dimensional Data Assimilation Technique, *Atmospheric Environment*, Vol.23, No.3 (1989), 539-554.
- 8) 金相 璣, 村上周三, 持田灯, 大岡龍三, 数値モデルによる関東地方の都市気候の解析—海風の進入と気温の関係—, 第 11 回数値流体力学シンポジウム (1997), 295-296.
- 9) 福岡, 張, 鳥居, 水田と畑における熱収支の違い, 中国・四国の農業気象, 第 3 号 (1990), 1 ~ 9.
- 10) 大上, 田頭, 大槻, 丸山, 水田, 畑地, 裸地, アスファルト舗装面における熱収支特性と温度環境, 農業土木学会論文集, 164 号 (1993), 97 ~ 104.
- 11) A.P.Gagge et al., A Standard Predictive Index of Human Response to the Thermal Environment, *AHSRAE Transactions*, 92(1) (1986), 709-731.