ヒートアイランド緩和方策が夏季と冬季の都市熱環境へ及ぼす影響の数値解析
夏季・冬季の都市気候特性の分析及び緑化と高アルベド化の効果の検討NUMERICAL STUDY ON EFFECTS OF COUNTERMEASURES FOR URBAN HEAT ISLAND
IN SUMMER AND WINTER

The characteristic of urban climate and effects of greening and high albedo surface

佐藤大樹^{*1}, 村上周三^{*2}, 大岡龍三^{*3}, 吉田伸治^{*4}原山和也^{*5}, 近藤裕昭^{*6}

Taiki SATO, Shuzo MURAKAMI, Ryoza OOKA, Shinji YOSHIDA,

Kazuya HARAYAMA and Hiroaki KONDO

Various Countermeasures against urban heat island in the summer season have been proposed such as greening and high albedo surface etc. However, the effects of these countermeasures in winter season have not yet clarified. In order to evaluate the effects of countermeasures, it is necessary to make clear the impacts of these countermeasures in each season. In this paper, the authors have simulated the urban scale climate in summer and winter. The structure of thermal environment in each season was analyzed based on an "Urban Heat-Balance Model". In this analysis, the mechanism of diurnal changes of air temperature and absolute humidity was examined. Furthermore, the environmental influence by greening and high albedo surface was analyzed in each season. In the summer season, these countermeasures have great impact on urban thermal environment. On the other hand, although high albedo surface reduces temperature, there are less impact in the winter season.

Keywords: Meso-scale Climate Model, Urban Heat Island, Urban Heat-Balance Model, Greening, High Albedo Surface

メソスケール気候モデル、ヒートアイランド現象、都市の熱収支モデル、都市緑化、高アルベド化

1. はじめに

夏季のヒートアイランド現象により都市の気温が高くなる頻度と期間の増加は、エネルギー使用量の増大、熱中症患者の増加、光化学スモッグの増加等を引き起こすことが指摘されている^{*1)}。この問題は、最も解決が急がれている環境問題の一つであり、近年は数値シミュレーション^{*2),3)}や実測^{*4),5)}により多様な対策技術が検討されている。一方、冬季における電力やガスの気温感応度^{*6),7)}は気温の上昇により需要が低下する特性を持っており、ヒートアイランド現象は、冬季の暖房エネルギー消費の削減に寄与するという、夏季とは相反する効果を有していると考えられる。そのため、ヒートアイランド緩和方策が及ぼす環境影響を総合的に評価するためには、夏季のみならず年間を通じた分析が必要である。

しかし、建築環境の分野における都市気候の数値解析に関する研究は、夏季のヒートアイランド現象の数値予測に集中しており、冬季における影響に関する解析例^{*8)}は少ない。一方、気象研究の分野では、冬季における都市気候解析が行われてきた。これらは、メソスケール解析手法に基づく大気汚染物質の拡散性状^{*9)}や光化学反応を考慮した2次的大気汚染の解明^{*10)}に大きな貢献を果たしてきたが、建築環境の視点

から都市の熱環境を論じたものではない。

そこで本研究では、メソスケール数値解析手法により、冬季についても夏季解析同様の都市熱環境のシミュレーションを行い、ヒートアイランド緩和方策が各季節の都市熱環境へ及ぼす影響を分析する。まず、東京首都圏を中心に3段階のnested gridを設定した夏季と冬季のシミュレーションを行い、各季節の都市気候特性を詳しく分析する。さらに、ヒートアイランド緩和方策として導入が検討されている都市緑化と都市構造物の高アルベド化が、東京首都圏の熱環境へ及ぼす影響を、各々の季節について分析する。これらの分析には、シミュレーション結果を活用した都市の熱収支モデル^{*11)}を用いて行う。

2. 解析概要

2.1 数値気候モデルの概要

本研究では、静力学近似をした基礎方程式を持つメソスケール気象モデルを用いた。乱流モデルにはMellor-Yamadaモデルlevel2.5^{*12)}を使用した。また、地形の起伏を考慮するための地形に沿った境界適合格子を採用しており、鉛直方向に座標変換を施した方程式を用いている。乱流モデルの詳細は、文献12、13を参照されたい。ここでは、本研究で特に重

^{*1} 慶應義塾大学大学院 大学院生^{*2} 慶應義塾大学理工学部 教授・工博^{*3} 東京大学生産技術研究所 助教授・博士(工学)^{*4} 福井大学工学部 講師・博士(工学)^{*5} 東京大学大学院 大学院生・修士(工学)^{*6} 産業技術総合研究所環境管理研究部門
大気環境評価研究グループ グループ長・理博Graduate Student, Graduate School of Science and Technology, Keio University
Prof., Faculty of Science and Technology, Keio University, Dr. Eng.

Assoc. Prof., Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Dr. Eng.

Lecturer, Faculty of Engineering, University of Fukui, Dr. Eng.

Graduate Student, University of Tokyo, M. Eng.

Group Leader, Atmospheric Environment Study Group, Institute for Environmental
Management Technology, A.I.S.T., Dr. Sci.

図1 解析領域

表1 計算領域、メッシュ分割数、メッシュ幅

	計算領域 x[km]×y[km]×z[km]	メッシュ分割	水平方向 メッシュ幅[km]
Grid1	480×400×9.6	60×50×49	8
Grid2	232×200×9.6	58×50×49	4
Grid3	96×96×9.6	48×48×49	2

表2 初期条件、気象条件

	夏季計算	冬季計算
解析対象日	1999/8/6	1999/1/13
初期温位(地表付近)	26.0℃	4.4℃
温位勾配	5.0K/km(0~5km) 4.0K/km(5~9.6km)	4.4K/km(0~9.6km)
上空風速(風向)	2.0m/s (S)	5.5m/s (NNW)
地表付近の相対湿度	70%	40%
可降水量	1.3cm	0.88cm
海面温度 (固定)	東京湾: 28℃ 太平洋: 25~27℃ 日本海: 25℃	東京湾: 13℃ 太平洋: 12~16℃ 日本海: 9℃
雲量(10分比)	3.0	1.7

要な地表面境界条件についてまとめる。地表面温度 T_G は地表面熱収支式((1)式)と地中の非定常熱伝導方程式を解くことで与えている^{注1)}。

$$R_{SG} + R_{LG\downarrow} - R_{LG\uparrow} - (H_G + LE_G + C_G) + aA_G = 0 \quad (1)$$

R_{SG} : 地表面の短波吸収量 (流入が正)

$R_{LG\downarrow}$: 地表への長波放射量 (流入が正)

$R_{LG\uparrow}$: 地表からの長波放射量 (流出が正)

H_G : 地表面からの対流による顕熱輸送量 (流出が正)

LE_G : 地表面からの蒸発散による潜熱輸送量 (流出が正)

C_G : 地表面から地中への熱伝導量 (流出が正)

A_G : 人工排熱量 (流入が正)

a : 人工排熱のうち地中に与えられる量の割合

実際の解析に際しては Software Platform^{※15)}のメソスケール解析機能を使用した。

2.2 解析領域とメッシュ分割

図1に解析領域を示す。関東地方を中心に東西480km、南北400km、鉛直方向は地中1m、大気部9600mまでを対象とする。この領域内に表1に示す3段階のネスティング領域を設定した。鉛直方向は各領域とも共通で、大気部、地中を不等間隔に、各々47メッシュ、5メッシュに分割している。大気中地上第1セルのセル幅は20m、地中第1セルのセル幅は2cmである。

表3 地表面パラメータ

土地利用分類	C.V.内の 面積割合 (%)	蒸発効率		アルベド		粗度長 [m]		温度拡散係数 [$\times 10^6 \text{m}^2/\text{s}$]		熱容量 [$\times 10^6 \text{J}/\text{m}^2 \text{K}$]	
		夏季	冬季	夏季	冬季	夏季	冬季	夏季	冬季	夏季	冬季
田	0.9	0.50	0.05	0.20	0.20	0.05	0.01	0.67	0.40	3.0	2.0
畑	2.2	0.30	0.05	0.10	0.20	0.01	0.01	0.40	0.40	2.0	2.0
果樹園	0.1	0.30	0.05	0.20	0.20	1.00	0.30	0.30	0.30	1.8	1.8
その他の樹木	0.1	0.30	0.05	0.20	0.20	0.50	0.50	0.30	0.30	1.8	1.8
森林	0.9	0.30	0.05	0.15	0.20	2.00	2.00	0.15	0.15	2.0	2.0
原野(荒地)	1.0	0.30	0.05	0.20	0.25	0.01	0.01	1.40	1.40	1.9	1.9
建物用地	70.1	0.00	0.00	0.10	0.10	1.00	1.00	2.30	2.30	2.1	2.1
幹線交通用地	6.3	0.00	0.00	0.10	0.10	0.01	0.01	2.00	2.00	2.0	2.0
その他の用地	13.8	0.30	0.05	0.10	0.10	0.01	0.01	1.00	1.00	2.0	2.0
河川地及び湖	4.4	1.00	1.00	0.03	0.03	0.001	0.001	0.15	0.15	4.2	4.2
海浜	0.1	0.60	0.60	0.25	0.25	0.005	0.005	0.74	0.74	2.9	2.9

2.3 解析条件

計算は対象日前日の午前6時からスタートし、その後42時間の時間積分を行った。結果の評価は計算開始18時間後の解析対象日0時から42時間後の24時までとした^{注2)}。表2に夏季、冬季の解析の初期条件、気象条件をまとめて示す。夏季の計算条件についての詳細は文献3、13を参照されたい。一方、冬季については今回新たに設定したものであるため、以下に説明を加える。

冬季の解析対象日は、天気図及び AMeDAS 等の観測データから冬季の典型的な晴天日である西高東低の気圧配置で、期間中の気象条件の変動の小さかった1999年1月12日~13日の42時間を選定した。初期温位は地表付近で4.4℃とし、地中も含めた鉛直方向については、館野の高層気象データより算出した温位勾配(4.4K/km)を与えた。上空風向、風速については、高層気象データのみでは1日の観測回数が少ない、観測時間によるばらつきが大きいなどの問題点があるため、ケーススタディを重ね観測データとの比較により適切な値を設定した。さらに地表付近の初期風速は評価対象領域として着目する東京の観測値に一致するように、東京管区気象台の観測対象期間の観測値(観測高さ74.6m、平均3.6m/s)を用いて、鉛直方向に分布を与えた。海面温度は、日本海洋データセンター水温統計、及び神奈川県水産総合研究所海峡図データベースから、解析対象日の値を参考に設定した。人工排熱は直接大気中に放出されるものとし、大気中の熱輸送方程式中の発生項として組み込んだ^{注3)}。土地利用分類別の地表面パラメータ値は、文献3、15、16、17を参考に表3のように決定した。土地利用分布は国土数値情報を基に、現状の土地利用に対応させている。ここで蒸発効率の値については、田、畑、原野については冬季においては乾燥裸地に近いと想定し、文献15に示す土壌の体積含水率と蒸発効率の関係から体積含水率の低い場合の値を採用した。また、森林等の値については、文献15、17を参考に0.05とした。

2.4 都市の熱収支モデルの概要とその適用範囲

都市の熱収支モデル^{※14)}は、都市域内での熱のフローを分析するモデルであり、都市を仮想的閉空間領域(Control Volume:以下C.V.)と考えた場合に、そのC.V.内に流入する熱、発熱、蓄熱の収支に基づいて都市環境を評価するものである。本研究ではこの熱収支を数値気候モデルによる解析結果から推定する。これにより熱環境評価を都市の熱収支構造の分析という視点から定量的に行うことができる。本研究では、都市大気部における移流による熱の流入を算出する場合は、

(1) 気温(C.V.内の高さ 10m における水平面平均値)

(2) 大手町の絶対湿度 (高さ 10m)

図2 冬季の気温と絶対湿度の時間変化

図3 冬季の温位の鉛直方向分布 (大手町)

(1) 夏季 (解析結果、高さ 10m)

(2) 冬季 (解析結果、高さ 10m)

図4 気温分布 (15:00、単位:°C)

(3) 冬季 (観測値)

(1) 夏季 (解析結果、高さ 10m)

(2) 冬季 (解析結果、高さ 10m)

図5 風速ベクトルの水平分布 (15:00)

(3) 冬季晴天日の観測値^{文19)}

C.V.内の各時刻の平均気温と平均絶対湿度を各々顕熱と潜熱の基準値とした。

また、図1に示すように、本解析では、都市の熱収支を算出するための仮想閉空間 (C.V.) の設定領域を、水平方向には東京23区に対応する30km(東西)×28km(南北)の領域 (水平面積 $8.4 \times 10^8 \text{ m}^2$) とした。鉛直方向には大気鉛直高さ方向80m、地中方向1mまでとした。

3. 夏季と冬季の都市気候特性

本章では、冬季解析の予測精度の検証^{文4)}及び、夏季と冬季の東京都区部の気候特性の分析を行う。

3.1 冬季解析の予測精度の検証

(1) 気温・絶対湿度の時間変化

図2(1)に、東京23区部に対応する領域 (図1参照) の気温の高さ10mにおける水平面平均値の時間変化を示す。ここでは予測精度の検証に、1999年1月13日の東京23区内にあるAMeDAS観測値 (4地点) の平均値を用いた。計算値は、大気中地上第1セル (セル幅20m) のセル中心 (高さ10m) における23区内の水平面平均値を用いた。解析結果について、気温は4~11°C (図2(1)) 程度の日変化を示し、観測値と比較すると6時頃に若干大きい値を示すものの、一日を通じて概ね対応している。

図2(2)に、絶対湿度の時間変化を示す。計算値は大手町を含むメ

ッシュの高さ10mにおける値であり、観測値は大手町にある東京管区気象台における観測値から算出した値である。計算値は2~3g/kg (図2(2)) の値となり、観測値と比較すると6時以降やや大きな値を示すものの、日変化が小さい傾向をよく再現できている。

(2) 温位の鉛直分布

図3に大手町を含むメッシュの各時刻の温位の鉛直分布を示す。夜間から6時頃までは、地表から高さ200~300mにかけて温位勾配が大きい層が見られるが、これは接地逆転層によるものである。一方9時以降では、加熱された地表付近の大気の浮力により対流混合層が発達し15時頃に最も厚くなる様子が確認できる。以上より、本解析は晴天日の陸上にできる典型的な大気境界層の日変化^{文16,18)}が再現できたと考えられる。

(3) 気温・風速の水平分布

図4に夏季と冬季の15時 (計算開始から33時間後) の関東地方の高さ10mにおける気温の水平分布を示す。図4(3)に、冬季の解析対象日 (1999/1/13) のAMeDAS観測値を示す。夏季 (図4(1)) は、東京23区の北部から埼玉方面にかけて高温域が分布していることが分かる。一方、冬季 (図4(2)) は、解析領域全体で10~11.5°C程度で、地点ごとの気温差が見られない。図4(3)の観測値を見ても、冬季のこの時間帯では、東京23区内の気温差は約1°C程度と小さくなっていることが分かり、計算結果はこの傾向に対応している。

図5(1)(2)に夏季と冬季の15時の関東地方の風速ベクトル分布(高さ10m)を示す。図5(3)は本解析の気象条件に近い冬季の晴天日のAMeDAS観測データから作成された同時刻の風速ベクトル分布である⁵⁾¹⁹⁾。解析結果、観測値ともに関東北西部から都心に向けて風が流入しており、風速も4~5m/s程度の値を示し、よく対応している。

3.2 夏季の気候特性の分析

(1) 気温・絶対湿度の時間変化

図6に夏季における気温、絶対湿度のC.V.全体の空間平均値(鉛直方向高さ80m)の時間変化を示す。気温は朝6時頃24.5℃の最低値を示し、14時に31.5℃の最高値となる。これに対して、絶対湿度は夜間(3時頃)に18.5g/kg程度の最高値を示した後、日中急速に低下し15時頃15g/kg程度の最低値となり、気温とは対照的な推移を示す。次節以降では、これらの変化が生じる要因について、都市の熱収支モデルに基づく大気部の顕熱・潜熱収支を通じて分析する。

(2) 都市大気部の顕熱収支の時間変化

図7は都市の熱収支モデルを用いてC.V.の顕熱収支の時間変化を分析したものである。ここで、図7(1)は熱の流入方向別に収支を取ったものであり、図7(2)は移流、乱流拡散といった熱移動現象毎に収支を取ったものである。乱流拡散成分には、地表面と大気間の対流による顕熱、潜熱の流入を含む。また、各図において正值はC.V.への熱の流入を、負値はC.V.からの熱の流出を示している。熱の流入方向別の収支に着目すると、日中においては人工排熱(××)による流入熱を主として南北方向(▲)に放出していることがわかる。しかし、南北方向への放熱量は14時頃にピークを迎えて徐々に減少するのに対し、鉛直方向への放熱量は18時頃にピークを迎えており、両者

図6 気温と絶対湿度の時間変化(夏季)

(1) C.V.大気部の各方向別収支の時間変化

(2) 移流、乱流拡散の成分別収支の時間変化

図7 顕熱の流入の1時間積算値の時間変化(夏季)

に差異がみられる(図7(1))。これらの差異は図7(2)に示す放熱に寄与する熱移動現象の差異によるものである。つまり、南北方向成分の殆んどは移流(—)によるものであり、これは12時以降降達する海風が海上の冷涼な空気を都心へ輸送することにより生じている。一方、鉛直方向成分については乱流拡散(---)の収支と対応することから、日中の混合層の発達に伴う乱流拡散による上方への活発な顕熱輸送がC.V.上端で生じるためと考えられる。

(3) 都市大気部の潜熱収支の時間変化

図8は図7と同様な分類によって潜熱収支の時間変化を分析したものである。図8(1)に示す熱の流入方向別の収支に着目すると、鉛直方向については8~17時の時間帯において放熱を表す負値を示し、8~13時頃とりわけ大きな負値となる。これは、図8(2)の乱流拡散成分の収支に対応している。一方、南北方向については9時頃より徐々に潜熱の流入を示す正值を示しており、16時頃ピークを迎える。これは移流成分の収支と対応していることから、高湿な海風が都心へ流入することにより生じたものと考えられる。東西方向成分(—■)は顕熱同様、その値は小さい。これらの分析結果により、図6に示した日中の絶対湿度の変化は、午前中の鉛直方向への潜熱流出と午後の湿った海風の流入によるものと説明できる。

3.3 冬季の気候特性の分析

(1) 気温・絶対湿度の時間変化

冬季における気温、絶対湿度のC.V.全体の空間平均値の時間変化を図9に示す。気温は3.5~10.5℃程度の値で推移しており、気温の日較差は夏季と大差が無い。これに対して、絶対湿度は2.0~3.3g/kg程度の値で推移しており、1日を通じて大きな変化が見られない。また、C.V.の各側面の境界面における気温の面内平均値について各方向別に従って差をとったもの(北面気温-南面気温、西面気温-東面気温)を図10に示す。南北面の気温差(—▲)を見ると、全般を通じて南面に比べて北面の温度が低いことを示す負値となるものの、日中12時~16時頃においてはその値が小さくなる。また、東西面の気温差(—■)では、午前中においては西側の気温が高い値を示すが、13時頃を境として逆に東側の気温が高い値となる負値を示す。この各面の気温差は次節で示す移流による顕熱の流入に影響している。

(1) C.V.大気部の各方向別収支の時間変化

(2) 移流、乱流拡散の成分別収支の時間変化

図8 潜熱の流入の1時間積算値の時間変化(夏季)

図9 気温と絶対湿度の時間変化 (冬季)

図10 C.V.境界面の方向別の気温差 (冬季)

(1) C.V.大気部の各方向別収支の時間変化

(2) 移流、乱流拡散の成分別収支の時間変化

図11 顕熱の流出入の1時間積算値の時間変化 (冬季)

(1) C.V.大気部の各方向別収支の時間変化

(2) 移流、乱流拡散の成分別収支の時間変化

図12 潜熱の流出入の1時間積算値の時間変化 (冬季)

(2) 都市大気部の顕熱収支の時間変化

図11は冬季の顕熱収支の時間変化を図7と同様に分類したものである。図11(1)の熱の流出入方向別の収支に着目すると、鉛直方向成分(—○—)については夜間から10時頃まではC.V.への熱の流入を表す正值を示しており、特に日の出直後の8~9時に値の増加が見られる。これ以降は放熱を示す負値となる。これらの変化は夏季同様、乱流拡散成分の日変化と概ね対応している(図11(2))。8~9時頃の流入熱の増加は、地表面の日射の吸収に伴い急激に表面温度が上昇し、地表面から大気部へ顕熱が流入するにも関わらず、大気部全体はまだ安定度の高い静穏な状態であり、C.V.上端からの熱の放出が伴わないためである。その後は気温の上昇に伴い、C.V.上端からの熱放出が促進される結果として鉛直方向成分の収支は負値となる。南北方向(—▲—)については、全般を通じて負値を示すが、12~16時頃の時間帯は比較的その絶対値が小さい。この時間帯は図5(2)に示す北西からの季節風の移流効果による冷気の流入が生じているものの、この時間帯の内陸部(北側)と都内(南側)の気温差が小さいため(図4(2)、図10)、その効果が小さいと考えられる。一方、夜間には内陸部と都内の気温差が大きく、冷気の流入は大きい。また、東西方向(—■—)については午前中から15時頃までは正值を、15時以降は負値を示す。これは図10に示す東西面の温度差の変化に対応しており、北西の季節風が内陸(西側)の熱を東側へ輸送する過程で生じた結果と考えられる。

(3) 都市大気部の潜熱収支の時間変化

図12は冬季の潜熱収支の時間変化を図8と同様に分類したものである。夏季に比べ、各成分ともに絶対値が小さく、日変化も小さい。これは地表面からの水蒸気発生量が少ないことが原因と考えられる。

つまり、冬季は夏季に比べ地表面温度が低いため地表面の飽和水蒸気圧が小さく、結果として大気と地表面の水蒸気圧差が小さい。さらに植生域の蒸発効率の値も小さくなるため、地表面からの水蒸気の発生が抑制される。その結果、大気中の水蒸気量自体が減少するため、地点毎の絶対湿度差が小さくなる。そのため、図5(2)に示すような季節風が卓越していても、これにより輸送される潜熱は少なくなる。また、鉛直方向への熱輸送についても日中に大気を持つ乱流拡散能力(乱流拡散係数)自体は夏季と大差が無いものの、絶対湿度の勾配自体が小さいために結果として殆ど潜熱輸送が生じない。そのため、図9に示した絶対湿度の1日を通じての変化は非常に小さくなると考えられる。

4. ヒートアイランド緩和方策が夏季と冬季の都市熱環境へ及ぼす影響の検討

本節では、前節の都市気候特性を踏まえ、ヒートアイランド緩和方策を行った場合に引き起こされる都市の熱収支構造の変化を分析し、対策が夏季と冬季の都市熱環境へ及ぼす影響を考察する。

4.1 検討ケース

表4に検討ケースを示す。Case1-1、Case2-1はそれぞれ夏季と冬季について、現状の土地利用に対応する地表面境界条件を与えたケースである。これらに対して、Case1-2、Case2-2は東京23区の建物用地を全面緑化した状況を想定しており、建物用地の蒸発効率を夏季には0.00から0.30へ、冬季には0.00から0.05へ増加させている。また、Case1-3、Case2-3は東京23区の建物用地を高アルベド化したケースであり、建物用地のアルベドを0.1から0.6に変更している^{注5)}。

4.2 夏季の場合

(1) 気温・絶対湿度の時間変化

図 13 に夏季の C.V.内における気温・絶対湿度の 1 時間毎の空間平均値の時間変化を示す。Case1-1 は一日を通じて気温は 25.5~31.5℃ (図 13(1))、絶対湿度は 15~19g/kg (図 13(2)) 程度の値で推移する。これに対して Case1-2 では緑化に伴う潜熱発生により、一日を通して気温は低下、絶対湿度は増加している。特に昼間の差が大きく、気温が最大で約 1℃低下、絶対湿度は最大で 1.2g/kg 程度増加している。一方、Case1-3 でも、アルベドの増加により地表面の日射吸収量が減少するため、日中 Case1-1 より気温が低い値となる。絶対湿度については地表面の蒸発効率が変化しないにも関わらず、Case1-2 に比べ小さいものの日中に Case1-1 より増加する。このような気温、絶対湿度の変化を分析するため、次節以降では、C.V.内の都市大気部の顕熱、潜熱の流入について考察する。

(2) 都市大気部の顕熱収支の時間変化

図 14 は夏季の都市大気部の顕熱収支を移流、乱流拡散、人工排熱の

表 4 検討ケース

	検討 ケース		建物用地のパラメータ	
			蒸発効率	アルベド
夏 季	Case1-1	現状の土地利用	0.00	0.1
	Case1-2	建物用地の緑化	0.30	0.1
	Case1-3	建物用地の高アルベド化	0.00	0.6
冬 季	Case2-1	現状の土地利用	0.00	0.1
	Case2-2	建物用地の緑化	0.05	0.1
	Case2-3	建物用地の高アルベド化	0.00	0.6

図 13 気温・絶対湿度の時間変化 (夏季)

図 14 都市大気部の顕熱収支の時間変化 (夏季)

図 15 都市大気部の潜熱収支の時間変化 (夏季)

各成分について示したものである。図 14 並びに後に示す図 15、17、18 において正の値は大気部への熱の流入を示している。縦軸は C.V.全面における各値の 1 時間毎の積算値である。また図 14(2)、図 17(2) には、人工排熱による顕熱の流入を併せて示した。これは夏季 3 ケース、冬季 3 ケースでそれぞれ共通の値である。

図 14(1) より移流は主に午後負値を示していることから気温低下に寄与していることが分かる。これは、12 時以降冷却効果を持つ海風が発達することが主因であるが、Case1-2、Case1-3 では、C.V.内の気温低下に伴い、海風との気温差が小さくなり、移流による冷却効果が小さくなっている。また、図 14(2) に示す乱流拡散による熱の流入は、3 ケース共午前中に蓄熱、午後に放熱の傾向を示すものの、その値については Case1-2、1-3 の午前中の蓄熱量が Case1-1 に比べ小さくなっている。これは対策による地表面温度の低下に伴い、地表面からの顕熱発生量が減少しているためであると考えられる。

(3) 都市大気部の潜熱収支の時間変化

図 15 は夏季の都市大気部の潜熱収支を、移流、乱流拡散の各成分について示したものである。図 15(1) の移流による潜熱収支において、Case1-1 では海風の発達に伴い蓄熱量が増加し 17 時頃ピークを迎える。一方、Case1-2 では、緑化に伴う地表面からの潜熱発生量の増加の結果、海風と C.V.内の絶対湿度の差がほとんど無くなるため、大幅に蓄熱量が減少する。また、Case1-3 でも、Case1-1 に比べて午後の潜熱の流入量が小さな値となる。これは都心の気温の低下により海風の風速が低下したためである。図 15(2) の乱流拡散による潜熱収支については、Case1-1 では日中大きな負値を示す。これは不安定成層が発達し、上

図 16 気温・絶対湿度の時間変化 (冬季)

図 17 都市大気部の顕熱収支の時間変化 (冬季)

図 18 都市大気部の潜熱収支の時間変化 (冬季)

空への潜熱流出が大きくなるためである。Case1-2 では、これと同時に地表面からの大きな潜熱発生があるため、収支を取るとその値は他のケースと比べて小さくなる。また、Case1-3 についても、この日中の流出量が Case1-1 より小さくなる。これは、都市大気部の気温が低下し上向き風速が弱まるため、対流混合層の厚さが小さくなり、鉛直方向の乱流拡散係数が減少して、上空への潜熱放散が減少するためと考えられる。Case1-3 の絶対湿度が Case1-1 に比べ増加した (図 13(2)) のは、この乱流拡散による潜熱流出の減少が移流による蓄熱の減少を上回ったためである。

4.3 冬季の場合

(1) 気温・絶対湿度の時間変化

図 16 に冬季における気温、絶対湿度の C.V. 全体の空間平均値の時間変化を示す。気温は $3.5 \sim 10^\circ\text{C}$ (図 16(1)) 程度の値を示す。昼間に Case2-3 で気温が若干低い値を示すものの、各ケース間の差は夏季に比べ小さい。絶対湿度の日変化は小さく、 $2.0 \sim 3.3 \text{ g/kg}$ (図 16(2)) で推移しており、ケース間の差はほとんどみられない。

(2) 都市大気部の顕熱収支の時間変化

夏季同様に、図 17 に冬季の C.V. 内の都市大気部の顕熱収支について移流、乱流拡散、人工排熱の 1 時間毎の積算値の時間変化を示す。

Case2-2 では、Case2-1 に比べほとんど変化が見られない。これは、冬季の蒸発効率が小さいために、Case2-1 に比べ地表面熱収支がほとんど変化しないためであると考えられる。一方、Case2-3 は他のケースに比べ、日中 (8 時～16 時頃) において移流成分が若干大きくなり (図 17(1))、正の値をとっている。これは、図 4(2)、図 10 で示したよ

うに、冬季の日中には C.V. 内外の気温差が非常に小さいため、Case2-3 の C.V. 内の気温が他のケースより低下したことで (図 16(1) 参照)、C.V. 周囲より気温が低くなったためと考えられる。また、乱流拡散成分については、午前中において Case2-3 の値が、地表面からの顕熱発生量の減少に伴い、Case2-1、2-2 に比べて若干小さく (より大きな負値に) なる。建物用地を高アルベド化した Case2-3 の乱流拡散成分が低下する傾向は、夏季 (Case1-3) に類似しているものの、冬季の場合は移流による顕熱流入が生じるため、夏季に比べ現状 (Case2-1) からの気温低下が小さくなると考えられる。以上のように、高アルベド化を施した Case2-3 と他の 2 ケースの間に差異がみられるものの、その大きさは夏季に比べ非常に小さくなる。

(3) 都市大気部の潜熱収支の時間変化

図 18 に潜熱収支を示す。ケース間の差は殆どみられず、蒸発効率が夏季に比べ小さいため、今回の方策による潜熱収支への影響が小さいことが分かる。これは、図 12 (2) で示したように、冬季には移流拡散による潜熱輸送がほとんど生じないためであると考えられる。

5. まとめ

- (1) 数値気候モデルにより、夏季と冬季の典型的な晴天日を対象とした都市気候解析を行った。解析結果は観測値によく対応していた。さらに、解析結果に都市の熱収支モデルを適用し各季節の都市気候特性、及び、建物用地の緑化、高アルベド化の 2 つの技術導入が夏季と冬季の首都圏の熱環境へ及ぼす影響を詳しく分析した。
- (2) 夏季においては、気温は日中に高温、夜間に低温となるのに対し

て、絶対湿度は、日中に低湿、夜間に高湿という全く逆の変化を示す。これらの変化は水平・鉛直各方向への顕熱・潜熱輸送が相互に影響して生じたものであり、水平方向成分については海風を持つ移流効果が、鉛直方向成分については乱流拡散による効果が大きいことが明らかになった。

- (3) 冬季については、気温は日中高温、夜間に低温となり1日の変化が夏季に類似するのに対して、絶対湿度は全般を通じて低い値で推移する結果となった。これらの要因として気温の変化は鉛直方向の乱流拡散と北西の季節風による水平方向への移流効果が影響した結果である。また、絶対湿度については、大気部の水蒸気量が少ないため、大気の移流・拡散による潜熱輸送自体が少なくなった結果生じたものである。
- (4) 建物用地の緑化は、夏季の気温を低下させた点で効果が見られたが、日中の絶対湿度が上昇した。そのため都市居住者の快適性を損なう可能性がある。冬季は、緑地の蒸発効率が小さいために影響は小さかった。
- (5) 建物用地の高アルベド化は、夏季の気温を低下させたものの、絶対湿度の増加は大きくなかったため、夏季のヒートアイランド緩和方策としては効果があると考えられる。しかし、冬季の日中の気温をやや低下させるため、暖房エネルギー使用量を増加させる可能性がある。

謝辞

本研究の遂行にあたり持田灯助教授（東北大学）、佐々木澄氏（東北大学）には甚大な御協力と御助言を頂きました。記して謝意を表します。

注

注1) 地表面熱収支式の各項は以下の式で評価している。

$$R_{SG} = (1 - \alpha) C_i I_0 \cos Z \{ 0.57 - 0.01 \epsilon_m - 0.06 \log_{10} e_m + (0.43 + 0.01 \epsilon_m) 10^{-0.13 / \cos Z} \}$$

$$R_{LG\downarrow} = \sigma T_m^4 (0.74 + 0.19x + 0.07x^2)$$

$$R_{LG\uparrow} = -\epsilon \sigma T_g^4 + (1 - \epsilon) R_{LG\downarrow}$$

$$H_G = \rho_a C_p u^* T^*$$

$$LE_G = \rho_a L u^* Q^*$$

$$C_G = \lambda_{11} (T_g - T_{il}) / DZ_{il}$$

ただし、 C_G は以下の地中の非定常熱伝導方程式を解くことに与えられる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

ここで、 R_{SG} 、 $R_{LG\downarrow}$ は近藤による実験式^{2,14)}であり、 R_{SG} は雲量により決まる日照時間を変数として、地表面の日射反射率（アルベド）に応じて、日射反射量を差引いて与えられる。また、 H_G 、 LE_G は、モニン・オブコフの相似則に基づき、 u^* 、 T^* 、 Q^* を用いて以下のように与えられる。

$$u^* = V_g(z) \kappa \{ \ln \{ (z+z_0)/z_0 \} - \Psi_m \}^{-1}$$

$$T^* = (\Theta(z_i) - \Theta_G) (Pr_f / \kappa)^{-1} \{ \ln \{ (z_i+z_0)/z_0 \} + 2 - \Psi_h \}^{-1}$$

$$Q^* = \beta (Q(z_i) - Q_m) (Sc_f / \kappa)^{-1} \{ \ln \{ (z_i+z_0)/z_0 \} - \Psi(\zeta_i) \}^{-1}$$

ただし、 Q^* は β 法によって与えられ、蒸発効率 β が大きいほど、地表面からの水蒸気発生量が増加する。

注2) 計算開始時刻、助走計算時間等を様々なに変更したケーススタディを行い、計算値と観測値の比較した結果、観測値に対応しており数値予測として満足できる計算値が得られる設定として、本計算条件を選定した。

注3) 夏季の人工排熱は、空調機を通しての大気部と構造体との熱のやり取りが多いことを考慮した手法^{2,3)}を用いた。

注4) 夏季の精度検証は、文献3)、13) で詳しく行っている。

注5) Reflective Coating や White Paint 等を想定している^{2,20)}。

記号表

添え字 i: 微小要素 i	$w_{a,i}$: 可降水量 [cm]
A_i : 微小要素 i の面積 [m ²]	x : 大気中の水蒸気に関する関数 (= $\log_{10} w_{a,i}$)
C_i : 日照時間の関数 (= $0.3 + 0.7 (1 - C_{am})$)	Z : 太陽天頂角 [rad]
C_{am} : 雲量 (= $0.0 \sim 1.0 [-]$)	z_0 : 運動量に対する粗度長 (0.1[m])
C_p : 気体の定圧比熱 [J/kgK]	z_{0t} : 温度に対する粗度長 ($\ln(z_0/z_0)=2$ [m])
DZ_{il} : 表面から第1層目の定義点までの距離 [m]	z_{0v} : 水蒸気に対する粗度長[m]
e_m : 地表付近の水蒸気圧 [hPa]	α : 地表面のアルベド (日射反射率) [-]
I_0 : 太陽定数 (= 1370 [W/m ²])	ϵ : 地表面の長波放射率 [-]
Pr_f : 中立時の乱流 Prandtl 数 (1[-])	Θ : 温度 [°C]
Q^* : 摩擦比湿 [kg/kg]	Θ_G : 地表面温度 [°C]
Q_{sat} : 地表面温度に対する飽和比湿 [kg/kg]	κ : Karman 定数 (0.4[-])
S_{ct} : 中立時の乱流 Schmidt 数 (1[-])	λ_{11} : 熱伝導率 [W/mK]
T^* : 基準温度スケール [°C]	ρ_a : 空気密度 [kg/m ³]
T_g : 表面温度 [°C]	σ : ステファンボルツマン定数 (5.67×10^{-8} [W/m ² /K ⁴])
T_{il} : 1層目の温度 [°C]	Ψ_m, Ψ_h : Panofsky の安定度による補正項 [-]
T_m : 地表面付近の大気温度 [°C]	
u^* : 摩擦速度 [m/s]	
V_g : 水平方向のスカラー風速 [m/s]	

参考文献

- 1) ヒートアイランド実態解析調査検討委員会, 平成 13 年度環境省請負業務報告書, 平成 13 年度ヒートアイランド対策手法調査検討業務報告書, 2002.3
- 2) 吉田伸治, 大岡龍三, 持田灯, 富永禎秀, 村上周三, 樹木モデルを組み込んだ対流・放射・湿気輸送連成解析による樹木の屋外温環境緩和効果の検討, 日本建築学会計画論文集, No.536, 87-94, 2000.10
- 3) 吉田伸治, 大岡龍三, 村上周三, 原山和也, CFD による人工排熱が都市のヒートアイランド現象に及ぼす影響の検討, 18 回エネルギー・経済・環境コンファレンス論文集, 499-502, 2002
- 4) 小栗健, 梅干野晃, 白井一義, 奥田知康, 蒸発冷却機能を持つ孔あきレンガ壁体により形成される微気候の予測に関する研究, 日本建築学会計画論文集, No.532, 101-108, 2000.6
- 5) 成田健一, 植村明子, 三坂育正, 都市気候に及ぼす河川水の影響に関する実測研究 - 隅田川における熱収支と周辺影響の検討 -, 日本建築学会計画系論文集, No.545, 71-78, 2001.7
- 6) 山本博士, 増川隆久, 気象と電力需要予測, 電気評論, Vol.81, No.12, 19-22, 1996
- 7) 上井光裕, 都市ガスの安定供給と危機管理, 東京工業大学原子炉工学研究所平成 14 年度公開講座, 2002
- 8) 平野勇二郎, 茅陽一, 柴崎亮介, 都市ヒートアイランド現象の空調・給湯用エネルギー消費への影響評価, 土木学会論文集, No.629/VII-12, 83-96, 1999.8
- 9) 近藤裕昭, 水野建樹, NO_x 濃度はなぜ 12 月に高くなるか, 公害, 25, 25-34, 1990.
- 10) 大原利真, 鶴野伊津志, 房総前線出現時の局地気流と NO_x 高濃度汚染の数値シミュレーション, 天気, Vol.44, 855-874, 1997
- 11) 大岡龍三, 吉田伸治, 原山和也, 村上周三, 持田灯, 都市の熱代謝に基づく熱環境評価に関する研究 (その 1), 都市の熱代謝モデルの提案と東京都区部の熱環境評価への適用, 日本建築学会学術講演梗概集, D1, 901-902, 2002.8
- 12) Tetsuji Yamada and Susan Bunker, 1989, A Numerical Model Study of Nocturnal Drainage Flows with Strong Wind and Temperature Gradients, Journal of Applied Meteorology, Vol.28, 545-554.
- 13) 金相璠, 村上周三, 持田灯, 大岡龍三, 吉田伸治, 数値気候モデルによる都市化がもたらす関東地方の気候変化のメカニズムの解析, 日本建築学会計画系論文集, 534 号, 83-88, 2000.8
- 14) 近藤純正, 水環境の気象学・地表面の水収支・熱収支-, 1994.4, 朝倉書店
- 15) 持田灯, 村上周三, 金相璠, 近藤裕昭, 島田昭男, 大岡龍三, ヒートアイランド現象の解析とその対策技術の総合的評価のための Software Platform の開発(その 1), 日本建築学会学術講演梗概集, D1, 1099-1102, 2000.9
- 16) 近藤裕昭, 人間環境の気象学, 2001.6, 朝倉書店
- 17) 環境庁地球環境研究総合推進費「気候・物質循環モデルによる気候変動の定量的評価に関する研究 - 森林生態系・大気間のエネルギー交換のモデル化に関する研究 -」(研究代表者, 渡辺力) 研究成果報告書, 2000
- 18) 新田尚他, キーワード気象の事典, 朝倉書店, 2002.1
- 19) 吉門洋, 近藤裕昭, 冬季静夜安定層上部の大気構造: (3) 関東平野の風系, 公害, 21, 97-106, 1981
- 20) Pacific Gas and Electric Company, High Albedo (Cool) Roofs - Codes and Standards Enhancement (CASE) Study-, 2000

(2003年7月9日原稿受理, 2003年12月16日採用決定)