

東京23区を対象とした建物間気温への 人工排熱影響に関する数値実験

田村 英寿¹・水鳥 雅文²

¹正会員 工修 (財)電力中央研究所 環境科学部 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

²正会員 工博 (財)電力中央研究所 企画部 (〒100-8126 東京都千代田区大手町1-6-1)

建物群の効果を考慮して建物間気温を予測できる都市キャノピーモデルを開発するとともに、このモデルを組み込んだ三次元数値モデルにより、真夏日の東京23区を対象とした熱環境シミュレーションを実施した。その結果、日中の建物間においては、都心の北西側のみならず人工排熱密度が極めて高い都心や副都心でも気温が高くなるという解析結果が得られた。続いて、人工排熱が建物間気温に及ぼす影響について解析を行った。その結果、人工排熱量を一律に50%削減した場合、日中の建物間の気温は建物直上よりも約2倍低下しやすいこと、建物間に放出される人工排熱量の50%を建物直上に放出させた場合でも、日中の都心の建物間では、人工排熱量を50%削減した場合の半分程度気温が低下することが示唆された。

Key Words : heat island, anthropogenic heat, urban canopy, Tokyo 23 wards

1. はじめに

東京23区を中心とした首都圏でのヒートアイランド現象は古くから知られており¹⁾、夏場の冷房エネルギー消費を増大させる要因として懸念されている。一方で、こうしたエネルギー消費増に伴う人工排熱量の増大がヒートアイランド現象の一因にもなっており、夏場のエネルギー消費増と気温上昇の間に悪循環が起こる可能性が指摘されている²⁾。

大都市圏のヒートアイランド解析を目的とした三次元数値シミュレーションは、筆者らの既往の研究^{3), 4)}も含め、これまでも数多く行われてきている^{5), 6), 7)}など。しかしながら、広域的なヒートアイランド現象の実態把握が重要である一方で、既往の実測および数値実験結果^{8), 9), 10)}などからも示唆されているように、建物による放射の遮蔽や上空への熱輸送変化の影響を考慮して都市の地上付近の熱環境をきめ細かく予測することも重要と考えられる。このため最近では、建物群の効果を考慮できるとともに、広域を対象としたモデルにも適用可能な一次元都市キャノピーモデルの開発も進められてきている¹¹⁾など。しかしながら、このような都市キャノピーモデルを実際の大都市域に適用した解析事例は、数少ない。

本報では、筆者らが開発した都市キャノピーモデ

ルを組み込んだ三次元数値モデルを真夏日の東京23区に適用し、建物群の存在下での地上、すなわち建物間の気温に主に着目して、人工排熱が気温に及ぼす影響について考察を行うものである。

2. 都市キャノピーモデルおよび計算条件の概要

(1) 都市キャノピーモデルの開発

解析に使用したモデルは筆者らがこれまでに開発した三次元数値モデル⁴⁾がベースとなっており、地表面熱収支の計算に、筆者らが今回開発した都市キャノピーモデルを用いている。この都市キャノピーモデルは、全球規模を対象とした気候モデルで植物を有する地表の熱収支計算に用いられる植生キャノピーモデル¹²⁾などを参考にして構築したものであり、図-1に概念的に示すように、水平メッシュ内で平均化された建物群として建物を扱うことで、数百m程度の水平メッシュサイズのモデルに適用できる。本モデルで考慮される建物群の効果として、以下が挙げられる。

- ・風の遮蔽とそれに伴う上空との熱交換係数の変化
- ・日射の遮蔽および多重散乱
- ・壁・道路間の長波放射の相互作用

計算に用いられる主要な基礎方程式は表-1に示す通りであり、建物間気温と屋上・壁・道路毎の表面温度を計算できる。建物間の気温・比湿は、道路面や壁面から建物間大気に放出される顕熱・潜熱と建物間大気から上空大気に受け渡される顕熱・潜熱とがバランスする熱収支式が満たされる温度・比湿として決定される。真夏日の気象条件下での計算により、日中は道路よりも屋上、夜間は屋上よりも道路の方が表面温度が高くなることや、日中に建物間気温が建物上空よりも高くなるといった既往の実測

データ¹³⁾などに見られる特徴が、定性的に正しく再現されることを確認した。

(2) 計算条件の概要

今回対象とした計算領域は図-2に示す通りであり、都市キャノピーモデルを適用したのは領域中央部の東京23区を含む35km四方である。地表メッシュは、図-3(1)に概念的に示す方法により、市街域と非市街域（緑地・裸地等）毎に熱収支が計算され、都市キャノピーモデルは市街域の熱収支計算に適用される。なお、水平計算メッシュは大気中1km、地表500mである（図-3(2)参照）。

都市キャノピーモデルに必要な建物群の幾何条件については、国土地理院¹⁴⁾より各水平メッシュ内の用途建物・道路の占有率を計算し、東京都都市計画局¹⁵⁾を参考に用途毎の平均的な建物の幅と高さを仮定することによって、各メッシュ内の平均的な建物高さ・建物幅・道路幅を設定した。500mメッシュ

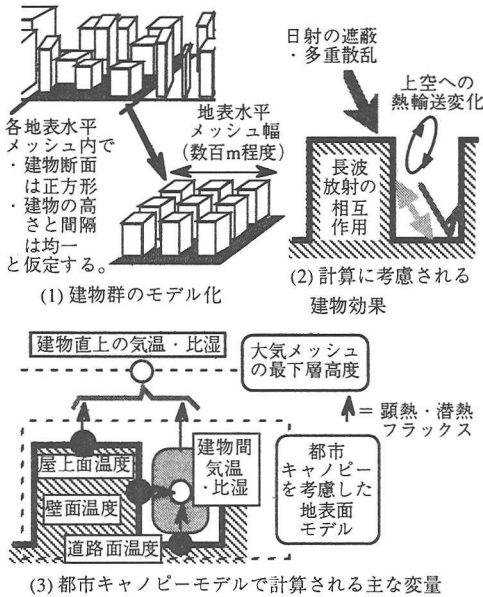


図-1 地表メッシュのモデル化および都市キャノピーモデルの概要

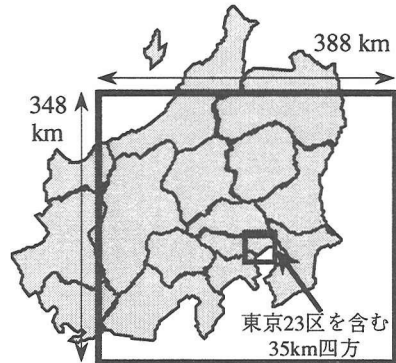


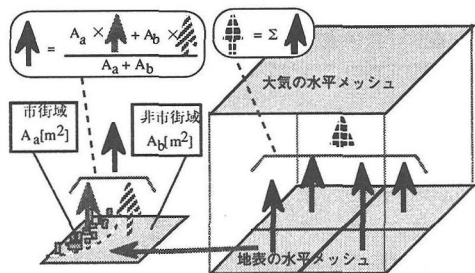
図-2 水平計算領域（大気中は分解能1～4kmの変可メッシュ）

表-1 都市キャノピーモデルの主要な式

$$\begin{aligned}
 & \text{[建物屋上高さ・建物間の風速]} \quad u_h = \frac{u_{ca}}{\kappa} \Psi_{Mca}(h-d) \quad u_c = u_h \cdot \sqrt{\frac{\exp(0.5Ch) - \exp(-0.5Ch)}{\exp(Ch) - \exp(-Ch)}} \\
 & \text{[顕熱フラックス]} \quad H_{ra} = \rho_c \cdot \left(0.01 \sqrt{\frac{u_h}{W_b}} \right) \cdot (\theta_r - \theta_a) + Q_{ra} \quad H_{wc} = \rho_c \cdot \left(0.01 \sqrt{\frac{u_c}{W_b}} \right) \cdot (\theta_w - \theta_c) + Q_{wc} \quad H_{sc} = \rho_c \cdot \frac{\kappa^2 u_c}{\Psi_{Msc} \Psi_{Hsc}} \cdot (\theta_s - \theta_c) + Q_{sc} \\
 & \text{[建物間大気の熱収支^(E1)]} \quad (W_r^2 + 2W_r W_b) \cdot H_{ca} = (W_r^2 + 2W_r W_b) \cdot H_{sc} + 4W_b h \cdot H_{wc} \\
 & \text{[建物間と大気最下層との間の熱輸送量]} \quad H_{ca} = 0.32 \cdot \rho_c \cdot \left(\frac{u_h + u_c}{2} \right) \cdot (\theta_c - \theta_a)
 \end{aligned}$$

C: 建物群による風の抵抗および鉛直拡散スケールより算定される関数, c_p : 大気熱容量, d: 地表からゼロ変位面までの高さ, H_{ca} : 建物間から建物直上への顕熱輸送量, H_{ra} ・ H_{wc} ・ H_{sc} : 屋上・壁・道路からの顕熱フラックス, h: 建物高さ, Q_{ra} ・ Q_{wc} ・ Q_{sc} : 屋上・壁・道路から大気中に放出される排熱（顕熱）, u_c : 建物間の代表風速, u_h : 建物屋上高さでの風速, u_{ca} : 建物群・建物直上大気間の摩擦速度, W_b ・ W_r : 建物・道路幅, κ : カルマン定数, θ_a ・ θ_c : 建物直上・建物間の気温, θ_r ・ θ_w ・ θ_s : 屋上面・壁面・道路面の表面温度, ρ : 大気密度, Ψ_{Msc} ・ Ψ_{Hsc} : 運動量・熱の乱流普遍関数（道路面-建物間大気間）, Ψ_{Mca} : 運動量の乱流普遍関数（建物間大気-上空大気間）

^(E1) 建物間に放出される顕熱と建物間から上空大気に受け渡される顕熱ととのバランスより建物間気温を決定



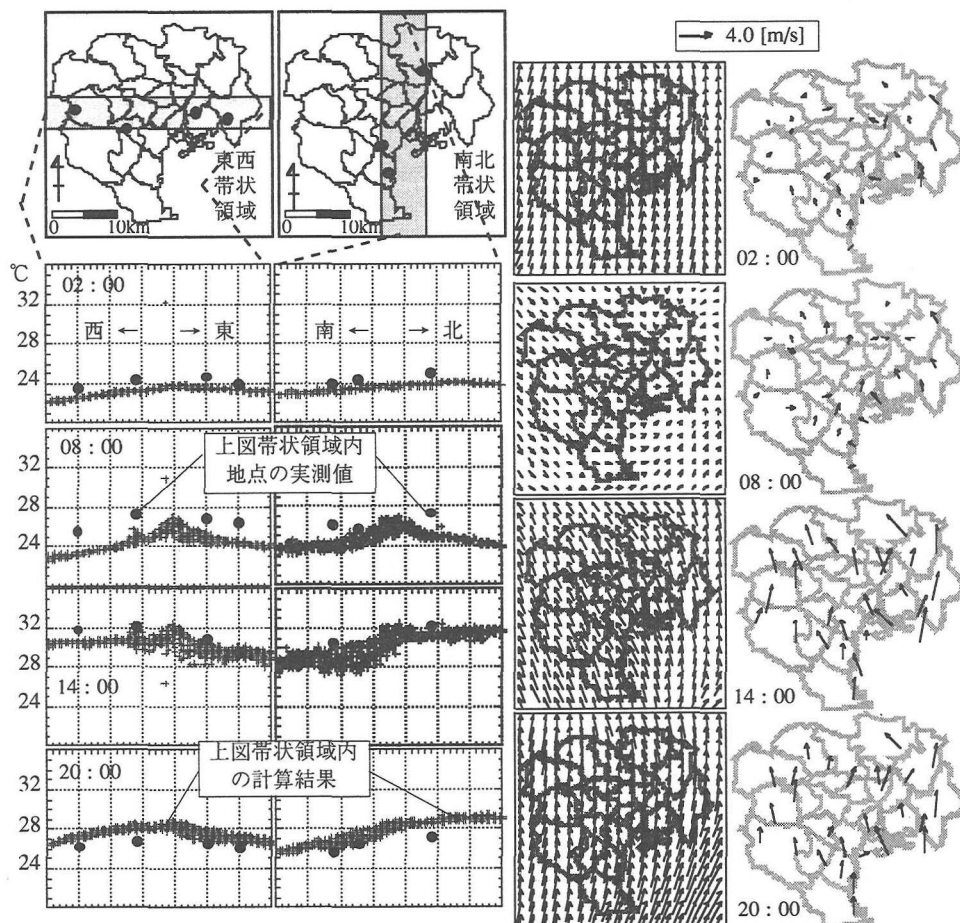
(1) 市街域・非市街域
毎の熱収支計算方法

(2) 大気より高分解能で
の熱収支計算方法

図-3 地表面熱収支計算方法の概略

内でのこれら3つの概略値は、都心で15m・50m・20m、郊外で6m・20m・5m程度である。

それ以外の計算条件として、標高分布や各メッシュ内の緑地（森林・草地等）・水面・建物道路用地の占有率は国土地理院^{16), 17)}をもとに設定した。人工排熱については、国土地理院¹⁴⁾、東京都都市計画局¹⁸⁾から各メッシュ内の商業業務用地・工業用地・住宅等の用途別建物床面積および道路面積を算定し、一ノ瀬ら¹⁹⁾、空気調和・衛生工学会²⁰⁾によるエネルギー消費原単位をもとに、エネルギー源毎、1時間毎の分布を設定した。さらに、計算対象となる1996年時点での分布を設定するため、対象年8月の東京23区のエネルギー源別総消費量^{21), 22)}に一致するように、エネルギー源毎に原単位を定数倍する方法で設定した。



(1) 東西・南北の带状領域内の建物間気温（実測は建物間で測定された地点のデータのみをプロット）

(2) 風速（計算(左)は地上高度45mの結果、実測(右)は対数則により高度45mに換算）

図-4 計算結果と実測データ²⁰⁾との比較検討結果

設定方法の詳細については文献²³⁾を参照されたい。各メッシュの人工排熱は建物直上の大気層（大気メッシュの最下層、ここでは屋上の数m～10m上空を指す）と建物間大気に分けて放出されるとし、各水平メッシュの建物と道路の面積比率に応じて、建物直上大気層への放熱量は建物占有率に、建物間大気への放熱量は道路占有率に比例して振り分けた。都心において、大気層と建物間大気に放出される人工排熱量はほぼ同量となる。また、人工排熱の放出形態は、名古屋市内での試算結果²⁴⁾をもとに、顕熱と潜熱の比を9対1（場所によらず一律）と仮定した。

3. 真夏日を対象とした建物間気温分布の解析

(1) 建物間気温の計算結果の検証

前章で述べたモデルにより、晴天弱風の真夏日であった1996年8月22日の気象条件下で、建物間気温等の数値シミュレーションを行った。6時間毎の建物間気温の計算結果を実測データ²⁵⁾と比較検討した結果が図-4(1)である。ただし、実測データは建物間で測定されたもののみを比較検討に用いている。建物間気温の分布については、8時の計算結果が実測よりも全体的に約2℃低い。一因として、水蒸気の凝結に伴う熱放出が本モデルでは考慮されておらず、早朝に結露が発生するような気象条件下での気温場までは十分に再現できていないことが考えられる。ただし、それ以外の時間帯での誤差は最大で1℃程度であり、実測に見られる気温分布の傾向も、8時の結果を含め

て概ね正しく再現されているものと考えられる。また、地上付近の風速（図-4(2)）についても、朝方に風が弱まり日中に海風が発達する特徴が概ね正しく再現されている。

(2) 日中における気温分布の特徴

建物直上と建物間について、早朝5時、日中14時における気温分布を示したものが図-5である。これより、以下が示唆される。

- ・建物直上において東京23区内で最も高温になる地域は、早朝は都心であるが、日中は都心の風下側にあたる北西部である。
- ・日中の建物間では、建物直上よりも全体的に気温が高くなる。また、都心の北西部だけでなく、都心や新宿副都心でも気温が高くなる。これらは、周辺域と比べて人工排熱密度が極めて高い地域であり、風が弱まり上空との熱交換が促進されにくい建物間で人工排熱の影響が気温に現れやすかったためと考えられる。

4. 建物間気温に及ぼす人工排熱影響の解析

最後に、人工排熱が建物間気温に及ぼす影響を感度解析的に調べるため、以下に示す2つのケースについて、それぞれ前章で検討した基準ケースからの気温の変化を調べた。

- ・「排熱削減ケース」：エネルギー源や用途に関係なく一律に人工排熱量の50%分を削減した場合。

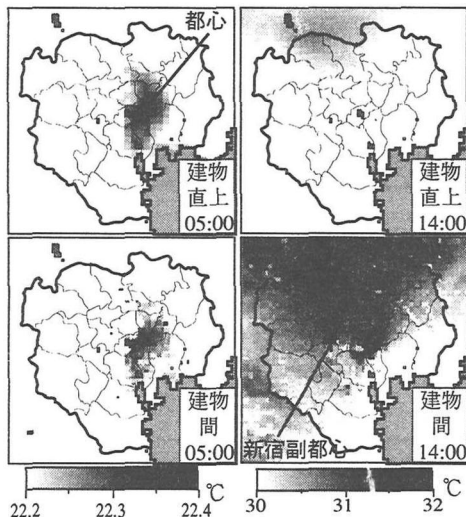


図-5 建物直上および建物間の気温分布

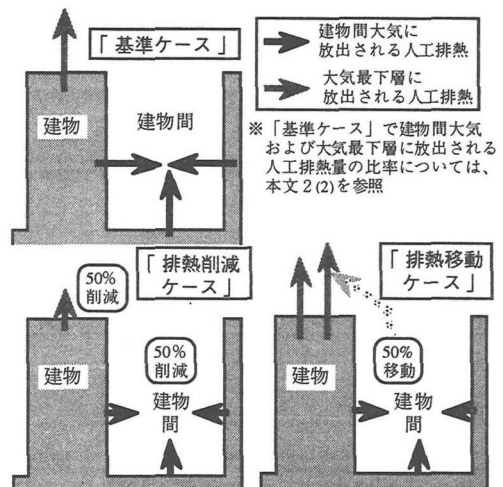


図-6 人工排熱設定方法の概念図

- ・「排熱移動ケース」：建物間で放出される人工排熱量のうちの50%を建物直上の大気に直接放出した場合（壁側のエアコン室外機の屋上への移動等を想定）。ただし、各水平メッシュの総人工排熱量は基準ケースと同じである。

各ケースの人工排熱設定を概念的に示したものが図-6である。計算結果として、建物直上および建物間における基準ケースとの気温差の分布を5時、14時それぞれについて示したものが図-7である。これより、以下が示唆される。

- ・「排熱削減ケース」では、日中の建物間の気温は建物直上よりも約2倍低下しやすく、日中の人工排熱密度が際立って高い都心における建物間気温の低下量は、早朝約1℃、日中約1.5℃である。
- ・一方の「排熱移動ケース」では、建物直上での気温低下はほとんど見られないが、日中の都心における建物間では「排熱削減ケース」の半分程度の気温低下が見られる。

以上の結果から、建物間では局所的な人工排熱の影響が気温に反映されやすいこと、人工排熱量自体が同量であっても放出先を移動することで建物間の気温が低下することが示唆された。

5. おわりに

本研究では、建物間の気温を予測できる都市キャノピーモデルを組み込んだ三次元数値モデルにより、真夏の東京23区内を対象とした数値シミュレーション

を実施した。その結果、建物が密集し人工排熱密度の高い都心では、建物間が日中に高温化しやすい反面、人工排熱削減等の施策が気温低下に寄与しやすいことが示唆された。

謝辞：本研究を実施するにあたって、(株)アーク情報システムの鈴木宏氏には、数値シミュレーションの実施に際し多大なご協力を戴いた。また、人工排熱分布や建物幾何条件の設定には、建設省国土地理院において作成された土地利用に関する細密数値情報資料（首都圏原データファイル、第4時期）を使用するとともに、東京都都市計画局のスタッフには、平成3,4年度東京都基礎調査現況データ・ポイントサンプリング集計のデータを使用させていただいた。

参考文献

- 1) 河村武：都市気候の分布の実態、気象研究ノート、第133号、日本気象学会、pp.26-47、1977。
- 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) 田村英寿、平口博丸、水鳥雅文、丸山康樹：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、第7回地球環境シンポジウム講演論文集、pp.95-100、1999。
- 4) 田村英寿、水鳥雅文、丸山康樹、大西正記、榎元慶子、岩坪哲四郎：大阪市域における熱環境改善策導入効果の数値実験、環境システム研究、vol.27、pp.637-642、1999。

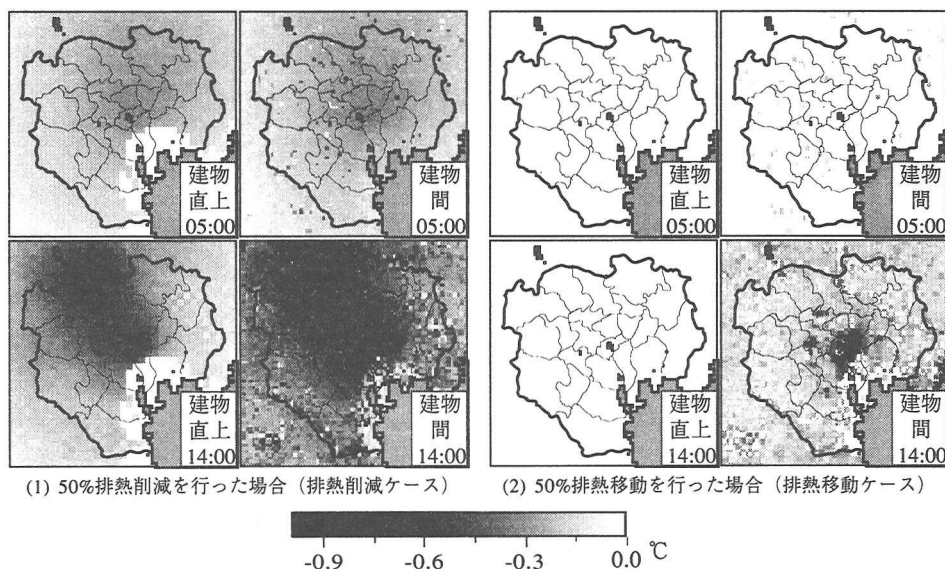


図-7 早朝5時および日中14時における建物直上・建物間の気温低下量分布（黒い部分ほど低下量は大きい）

- 5) Kimura, F. and Takahashi, S : The Effects of Land-use and Anthropogenic Heating on the Surface Temperature in the Tokyo Metropolitan Area, *Atmospheric Environment*, Vol.25B, No.2, pp.155-164; 1991.
- 6) 藤野毅, 浅枝隆, 和気亜紀夫, 藤野愛子: 埼玉県南部における温暖化機構の解析, 環境システム研究, vol.21, pp.1-6, 1993.
- 7) Urano, A., Ichinose, T. and Hanaki, K. : Thermal environment simulation for three dimensional replacement of urban activity, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 81, pp.197-210, 1999.
- 8) Oke, T.R. : Canyon Geometry and the Nocturnal Urban Heat Island : Comparison of Scale Model and Field Observation, *Journal of Climatology*, Vol.1, pp.237-254, 1981.
- 9) 吉田篤正, 森山正和, 宮崎ひろ志, 兵頭美和, 足永靖信: 市街地形態が異なる街区の熱環境形成に関する実測的研究, 第31回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 1巻, pp.379-381, 1994.
- 10) 大塚順基, 中村泰人: 風洞実験による建物群模型の対流熱伝達率の特性把握, 日本建築学会計画系論文集, 第520号, pp.83-90, 1999
- 11) 近藤裕昭, 劉発華: 1次元キャノピーモデルによる都市の熱環境に関する研究, 大気環境学会誌, 第33巻, 3号, pp.179-192, 1998.
- 12) Gordon, B.B. : A Land Surface Model (LSM version 1.0) for Ecological, Hydrological, and Atmospheric Studies : Technical Description and User's Guide, *NCAR Technical Note*, NCAR/TN-417+STR, 150pp., 1996.
- 13) 財津知享, 渋谷昌史, 池田駿介: 都市キャニオンの熱環境, 第3回地球環境シンポジウム講演集, pp.263-268, 1995.
- 14) 建設省国土地理院: 細密数値情報-首都圏土地利用(第4時期) (TDS-113)
- 15) 東京都都市計画局: 東京の土地利用-平成3年東京都区部一, 1993.
- 16) 建設省国土地理院: 数値地図1kmメッシュ標高 (FD版)
- 17) 建設省国土地理院: 国土数値情報-1/10細分区画土地利用データ (KS202-1)
- 18) 東京都都市計画局: 都市計画地理情報システム, 1991.
- 19) 一ノ瀬俊明, 花木啓祐, 松尾友矩: 細密地理情報にもとづく都市人工排熱の時空間分布の構造解析, 環境工学研究論文集, 31, pp.263-273, 1994.
- 20) 空気調和・衛生工学会: 都市ガスによるコージェネレーションシステム計画・設計と評価, pp.137-142, 1994.
- 21) 東京都: 東京都統計年鑑, 1996.
- 22) 通商産業省大臣官房調査統計部: 石油類消費構造統計表-商工業工業一, 1996.
- 23) 水鳥雅文, 田村英寿: 東京23区人工排熱分布の経年変化と他都市との比較, 第8回地球環境シンポジウム, pp.199-204, 2000.
- 24) 田村英寿, 平口博丸, 丸山康樹: 熱環境省エネ手法の開発(その3)-計算の高精度化と熱環境改善策の導入効果予測-, 電力中央研究所報告, U96301, pp.12, 1996.
- 25) 東京都環境保全局大気保全部: 大気汚染常時測定局測定結果報告(平成9年度), 1998.

NUMERICAL EXPERIMENT FOR EFFECT OF ANTHROPOGENIC HEAT ON THERMAL ENVIRONMENT IN RAVINES OF BUILDINGS IN TOKYO 23 WARDS

Hidetoshi TAMURA and Masafumi MIZUTORI

In urban area, large amount of anthropogenic heat affects the heat environment in ravines of buildings. In order to predict the heat environment in urban areas minutely, an 'urban canopy model' was developed which can predict the air temperature in ravines of buildings. This model was connected with the numerical model for predicting wind and atmospheric temperature distribution three dimensionally developed by authors.

The numerical simulation on Tokyo 23 wards in a tropical day showed that the air temperature in ravines of buildings in central Tokyo tends to be high in addition to inland area of Tokyo 23 wards in daytime. It was found that, in ravines of buildings, the anthropogenic heat affects the air temperature more sensitively than the temperature above roofs of buildings.