

都市街路空間の熱環境計測とヒートアイランドシミュレーション

Measurement of Urban Thermal Environment and Simulation of Urban Heat Island

齋藤 武雄*¹ 伊藤 智*² 山田 昇*³
Takeo S. Saitoh Satoshi Ito Noboru Yamada

*¹ハービマンエネルギー戦略研究所 HARBEMAN Energy Strategic Institute
*² 東北大学大学院環境科学研究科 School of Environmental Studies, Tohoku University
*³ 長岡技術科学大学 Nagaoka University of Technology

Corresponding author: Takeo S. SAITOH, harbeman.sharon@topaz.plala.or.jp

ABSTRACT

This paper describes a field measurement of urban thermal environment and a three-dimensional simulation of urban heat island in Tokyo metropolitan area. The field measurement results show that the present status of ambient temperature, relative humidity, and radiative heat flux in an urban street canyon in typical summer condition. The simulation results show that the maximum ambient temperature increase up to 45.5°C in 2031, and also show that the effect of “Tokyo wall” which is a cluster of high-rise buildings. The ambient temperature increase around the Tokyo wall is less than 0.1°C.

キーワード: ヒートアイランド, 熱的快適性, 熱ふく射, 移動観測, 数値シミュレーション

Key Words : Urban heat island, Thermal comfort, Radiation flux, Field measurement, Computer simulation

1. 緒言

近年, 地球温暖化問題をはじめ, 異常気象, オゾン層の破壊等, 人間をとりまく環境は徐々に悪化しつつある. また, それらに起因する食糧不足などの問題は, 健康被害のみならず, 多くの生命を奪うことが予想される.

このような地球規模の環境問題に加えて, 身近な生活環境の悪化も大きな問題である. ヒートアイランド(都市温暖化)⁽¹⁾や光化学スモッグなどの問題は, その被害者にとっては地球温暖化問題より大きな問題と映るかもしれない.

“地球”環境問題と“地域”環境問題. これらは明確な区別なく用いられることが多いが, どちらに焦点を絞るかによって, その対策は大きく変わってくることもある. 例えば, 自動車の燃料に関する各国の取り組みを見ると, その考え方の違いが明確に表れている. 日本では『ディーゼル車=黒煙』のイメージが強く, 一般的にディーゼル車は敬遠されている⁽²⁾. これは, 局地的な大気汚染防止のためである. しかし, ヨーロッパの一部の国ではガソリン車に比べて二酸化炭素排出量の少ないディーゼル車が歓迎されている⁽³⁾. これは, 地球温暖化問題に焦点が置かれているためである.

本研究では, “地域”環境問題の中でも, とくに都市温暖化の問題に焦点を絞り, 観測と数値シミュレーションを行った. 都市温暖化は地球温暖化と組で取り上げられること

が多いが, 先の例と同様にその対策は異なる. しかし, 都市温暖化対策を対症療法的ではなく, その原因を解消するという方向性を持って実施していくことができるのであれば, 地球温暖化対策にもなり得る.

本論文では, 地球温暖化と対比するため, とくに気温上昇を主に問題視する場合は都市温暖化(Urban warming)という用語を用い, 郊外と比較して都市部の温度が上昇している現象として捉える場合はヒートアイランド(Urban heat island)という用語を用いることにする.

都市は, 人間が利便性を追求した結果生まれたものである. そのため, 都市には必然的に「人」「金」「物」「情報」「エネルギー」などが集中しており, 特に大都市と呼ばれる地域では, それらの過度な集中が問題となってきた.

以前より, 都市の気温は郊外に比べて高い傾向があったが, 近年になって熱中症患者数の急増などにより, “都市温暖化問題”として多くの人々に認識されるようになった. 以下に都市温暖化の主要な成因を示す.

- (1) エネルギーの集中的消費⁽⁴⁾⁽⁵⁾
- (2) コンクリートやアスファルト等の地表面性状改変
- (3) 都市構造物による周辺大気との熱交換の減少
- (4) 大気汚染物質による温室効果

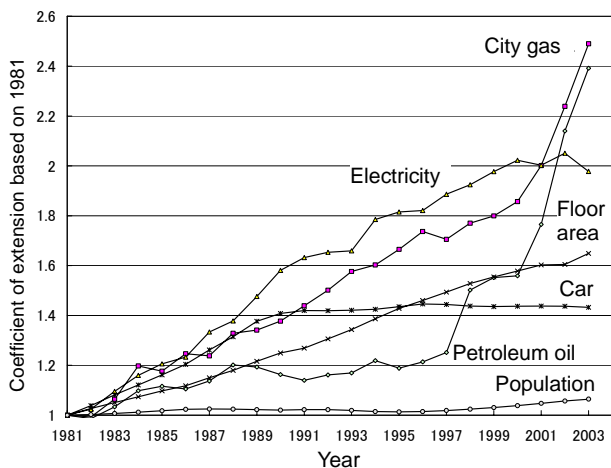


図1 東京における年間エネルギー消費量の推移

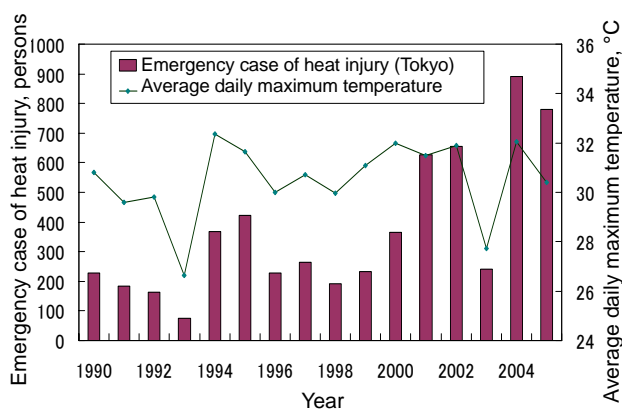


図2 日最高気温の月平均値と熱中症患者数の関係(東京)

これらの成因がそれぞれどの程度都市温暖化に寄与しているかは明確には分かっていないが、(1)は都市温暖化の最大の要因と考えられている。図1に東京における年間エネルギー消費量の推移を示す。ここでは1981年を基準値1とした伸び率を示した。1981年の都市ガス、石油(揮発油、軽油、灯油)、電力の合計年間エネルギー消費量は492.8PJである。図1には参考のために人口、延べ床面積、自動車台数の変化も示した。また、エネルギー消費と関連して、夏期の冷房排熱の増加も都市温暖化に大きな影響を与えている。ヒートアイランドは本来、冬期に観測されることが多かったが、東京などの大都市では夏期にもはっきり現れることが確認されており⁽⁶⁾、冷房排熱がその一助となっていることは明らかである。この排熱によりさらに温度が上昇し、冷房消費量をさらに増大させるという悪循環を引き起こしていることも考えられる。

このような都市温暖化問題では気温のみが注目されがちであるが、人体に与える影響を考える上では気温以外の要素も重要である。図2は東京消防庁管内における夏期の日最高気温の7月および8月の平均値と熱中症救急患者数の関係⁽⁷⁾を表しており、最高気温の変化と熱中症患者数には確かに相関があるが、つまり、熱中症の発症、ひいては人間が感じる熱的な不快感には、気温だけではなく熱ふく射や

湿度などの要素も影響していると考えられる。

これらのことを踏まえ、本研究ではふく射環境に着目した観測を行って現況を明らかにするとともに、ヒートアイランドの3次元シミュレーションモデル⁽⁶⁾を用いて、東京における都市温暖化の予測を行った。シミュレーションでは、“東京ウォール”と呼ばれる汐留地区の超高層ビル群による海風遮断効果の一検証を行って見た。

2. 自動車による広域移動観測

ヒートアイランドは局地性の高い現象である。そのため、気象庁で観測されたデータのみではその現象を把握することができないため、さまざまな観測が行われてきた。

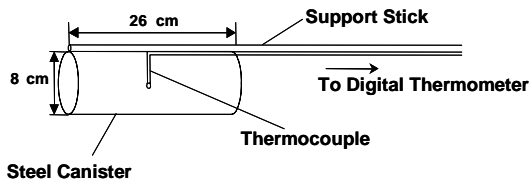
ヒートアイランド現象の観測については、定点観測網の代表例として、東京都環境科学研究所と東京都立大学が共同で設置したMETROS⁽⁸⁾が挙げられる。この観測網は都内126点において気温や風などの連続観測を行っており成果を挙げている。定点観測では、周囲の建物などの影響が小さい小学校などの百葉箱内に観測装置が設置されており、ヒートアイランドの気温分布を得るには適しているが、実際に人々が生活している局所的な環境の気温を計測するには、移動観測が適している。

ヒートアイランドは風の弱い冬の深夜に最も顕著に現れることが知られているが、ヒートアイランドが最も問題になってくるのは熱帯夜などに象徴される夏の夕刻から夜半にかけての不快感である。そこで、都市で生活する人々の実感とより近い観測結果を得るべく、道路という人間の屋外での活動圏から近い場所での気温と相対湿度の移動観測を行なった。

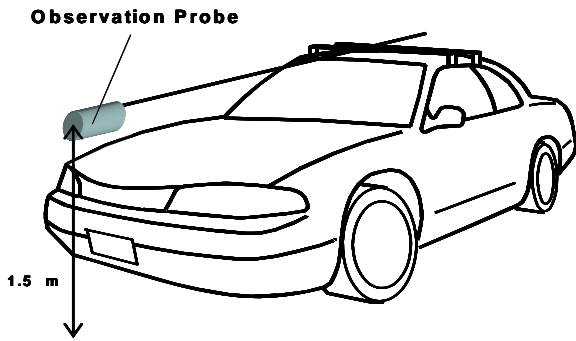
2.1 観測装置と測定方法

図3(a),(b)に測定プローブと観測車の概要を示す。Cu-Co熱電対とデジタルメータで気温を、デジタル湿度計で相対湿度の観測を行った。移動観測の方法については、佐橋⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾および河村⁽¹¹⁾の報告を参考にした。測定プローブは、底を抜いた筒に入れ、筒にはアルミ箔を巻いてふく射を避け、かつ温まりにくいようにして自動車に取り付けた。図では熱電対のみが表記されているが、湿度センサーも同様に組み込んだ。

このような仕様の観測車を2台用意し、18:10に六本木を同時に出発して内回り、外回りの2コースに別れて東京の広域移動観測を行った。コースによって多少の時間差はあったが、ほぼ22:30に観測を終えた。図4に測定点を示す。測定点は200点である。移動観測においては、観測中に現象が変化するという大きな問題が生じる。今回の観測には4時間20分を要し、その間に気温は約2.8°C減少し、相対湿度は約22%上昇⁽¹²⁾した。そのため、気象庁の定点観測データ(東京)を基に時間変化による誤差補正を行い、18:00における推定気温と湿度を求めた。



(a) 測定プローブ



(b) 観測車

図3 観測装置の概要

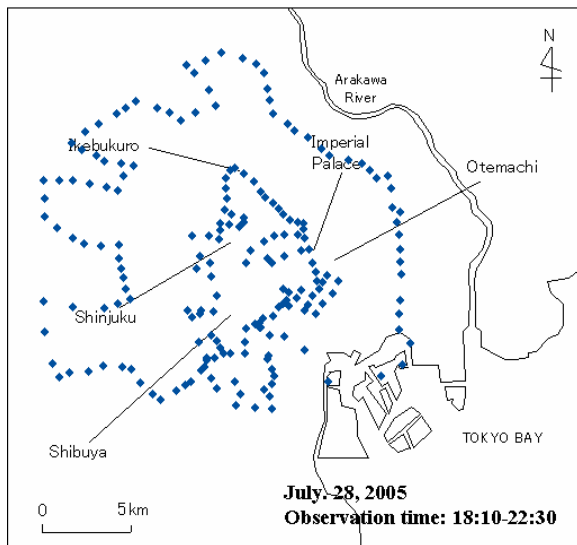


図4 東京における広域移動観測点

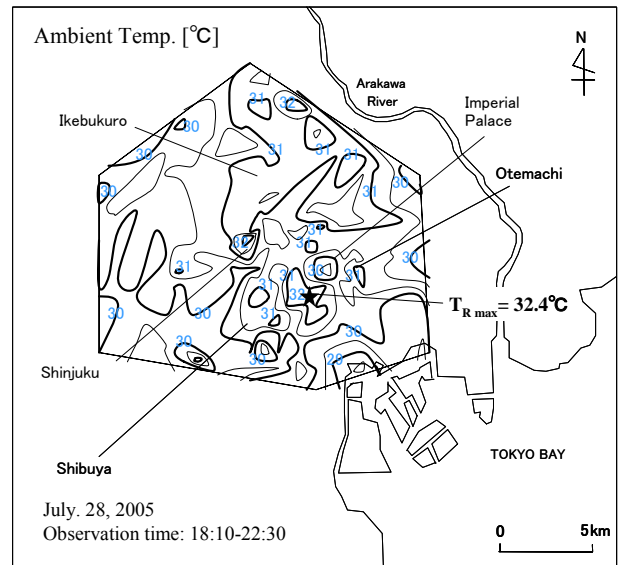
2.2 広域移動観測結果

図5に2005年7月28日の夕方から夜にかけて(18:10~22:30)行った気温と相対湿度の移動観測の結果を示す。なお、観測日の2005年7月28日は、一日中よく晴れた典型的な夏の日で、東京管区気象台によると18:00における東京(大手町)の気温は29℃、相対湿度は58%であった⁽¹²⁾。観測結果における気温・相対湿度は、全て時間補正後の値である。

気温は、六本木、新宿、赤羽周辺で高くなっており、用賀周辺、皇居、港湾部で低くなっていることがわかる。皇居周辺には、皇居を中心として気温の低い部分(クールアイランド)が形成されている。最高気温は永田町付近で32.4℃となっており、最低気温はレインボーブリッジ上で

28.4℃となった。港湾部を除く最低気温は、用賀付近で29.0℃であった。都市部と郊外の最大気温差をヒートアイランド強さ(Heat island intensity)というが、このときの観測領域では気温補正後の正味のヒートアイランド強さ(港湾部を除く)は3.4℃となった。

一方、相対湿度は北から南に向かって高くなっていることがわかる。これは、東京湾や多摩川からの湿分によるものであると考えられる。最高相対湿度はレインボーブリッジ上で63.7%となり、最低相対湿度は王子付近で37.6%であった。港湾部を除く最高相対湿度は、用賀付近で59.0%であった。



Tokyo: 29°C, Hachioji: 27.2°C (JMA) 18:00

図5 東京の広域気温分布

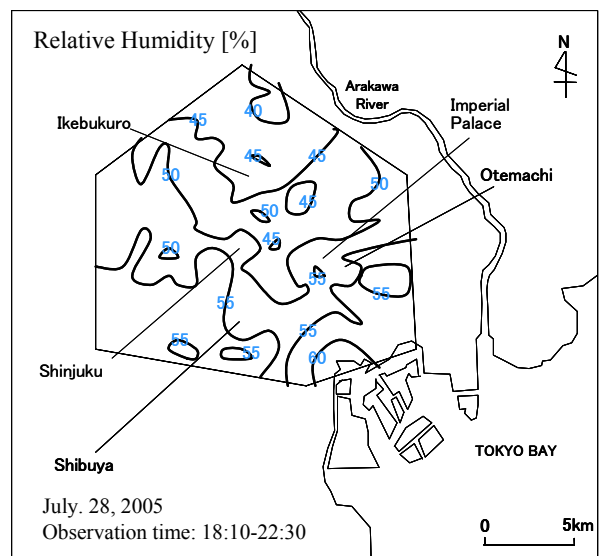


図6 東京の広域相対湿度分布

3. 都市街路空間における歩行観測

都市の屋外空間の熱的快適性は、人工排熱の増加やコンクリートやアスファルトといった熱容量の大きい建築部材による地表面被覆材の改変等により、以前より悪化していると言えるであろう。この熱的な不快感は、多くの人々が感じていることではあるが、その不快感の因子を定量的にとらえることはできていない。熱中症に代表されるとおり、熱的不快感には気温以外の様々な因子があると考えられ⁽¹³⁾、その中でも熱ふく射や湿度は熱的不快感に大きな影響を及ぼしていると考えられる。本研究ではとくにふく射環境に着目した観測を行う。

3.1 CPC型ふく射熱流束計

屋外空間では、人体は強い日射にさらされる可能性が屋内空間に比べて格段に高く、建物・路面などからの日射反射、日射により加熱された建物・路面からの熱ふく射、建物・路面の相互ふく射、そして空調や自動車排熱などの影響も大きく、屋内空間とは全く性質を異にしているものと考えられる。これまでの熱ふく射環境（注：建築学、空調冷凍工学などの分野では「ふく射」のかわりに「放射」を用いる）の測定においては、主にグローブ温度計（黒球温度計、Globe thermometer）⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾が用いられていた。風速が速いほどグローブ温度は気温に近づくため、微風速域で使用することが望ましく、また、球内における空気熱容量のために応答性が遅いという欠点があり、外乱の大きい屋外でのふく射環境の測定には不向きである。また、ふく射の指向性を把握できない⁽¹⁷⁾。

そのため、本研究では不均一ふく射場を計測するために、本研究室で開発されたCPC型ふく射熱流束計⁽¹³⁾を用いた。図7に、ふく射熱流束計の外観を示す。このふく射熱流束計は、ふく射熱流束センサーと回転複合法物面集光（CPC: Compound Parabolic Concentrator）型リフレクタからなる計測ユニットを正12面体に配置することにより、12方向からの等価ふく射強度を計測することができる。ふく射熱流束計で得られた各方向からのふく射熱流束値から人体などの任意形状物体が受けるふく射熱流束を近似計算することが可能である。

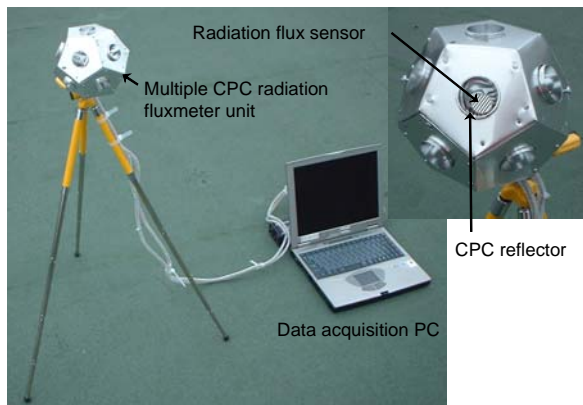


図7 CPC型ふく射熱流束計の概観

3.2 歩行観測結果

前述のふく射熱流束計のほかに日射計、気温・相対湿度計を用いて、歩行観測を行った。日射計では水平面全天日射量を測定した。測定地点は、立教大学池袋キャンパス付近、東京都渋谷駅付近であり、2005年7月28日の昼間（池袋：12:10～13:10、渋谷：14:45～15:30）に行った。

立教大学池袋キャンパス付近での観測結果を図8～10に、東京都渋谷駅付近での観測結果を図11～13に示す。ただし図は、ふく射熱流束、気温、湿度の順となっている。ふく射熱流束値は、正12面体形状物体に対する平均ふく射熱流束である。なお、観測日の2005年7月28日は、一日中よく晴れた典型的な夏の日で、東京管区気象台によると最高気温が33.0℃であり、日平均風速は3.3m/sであった。また、12:00～16:00の全天日射量は1時間当たり2.09～3.15MJ/m²（509～875W/m²）であり、相対湿度は39～43%であった。

平均ふく射熱流束の値が最も大きかったのは、井の頭通り入り口交差点（渋谷）付近で902W/m²となった。この地点は幅の広い南北道路であり、また東西に高い建物が建っているため日射の影響を大きく受けているものと考えられる。平均ふく射熱流束は、広場や幅の広い道路でしかも日射を遮るような建物がない場合に高くなっており、それに大気放射を含めた熱ふく射の影響が加わると、全天日射量を上回る値となってしまふ。より詳細な観測および評価を行うには、日射（短波長）と熱ふく射（長波長）に分けた観測が必要と思われる。また各地点での日変化なども詳細に考慮する必要がある。

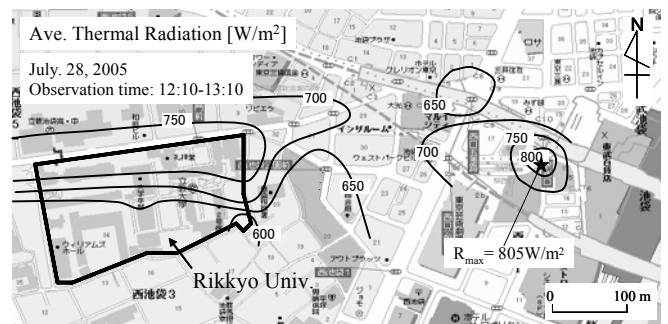


図8 立教大学池袋キャンパス付近におけるふく射熱流束分布

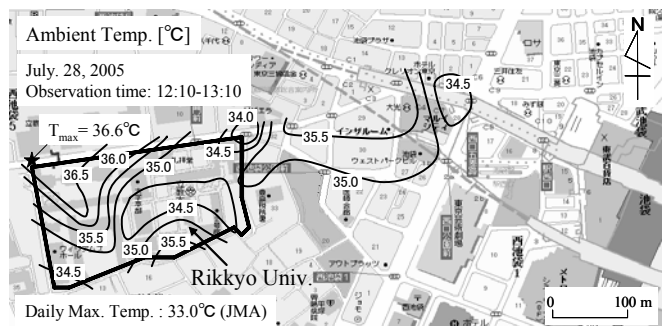


図9 立教大学池袋キャンパス付近における気温分布

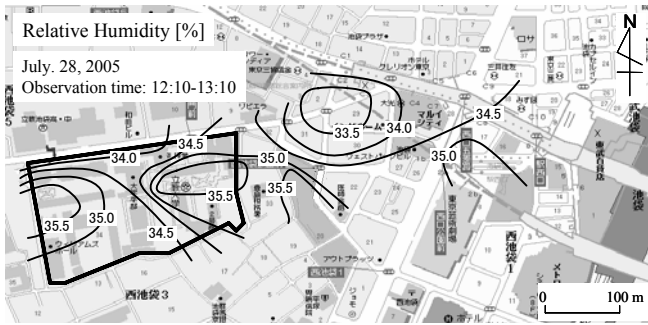


図 10 立教大学池袋キャンパス付近における相対湿度分布

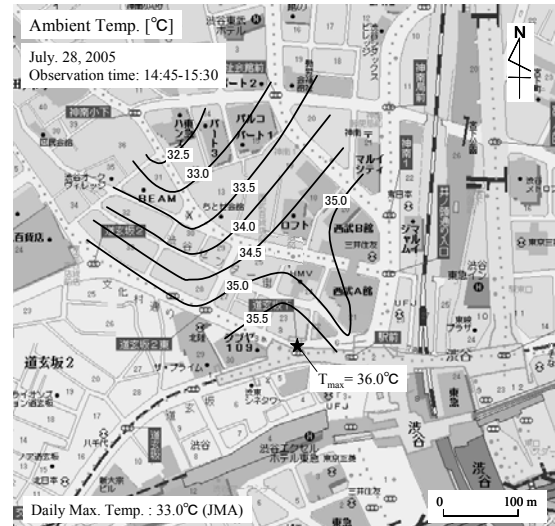


図 12 東京都渋谷駅付近における気温分布

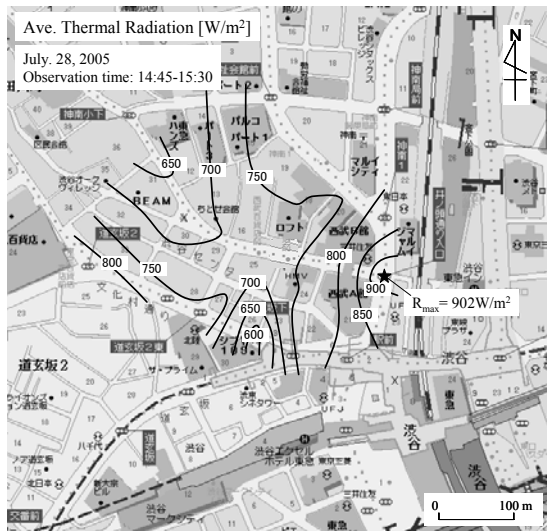


図 11 東京都渋谷駅付近におけるふく射熱流束分布

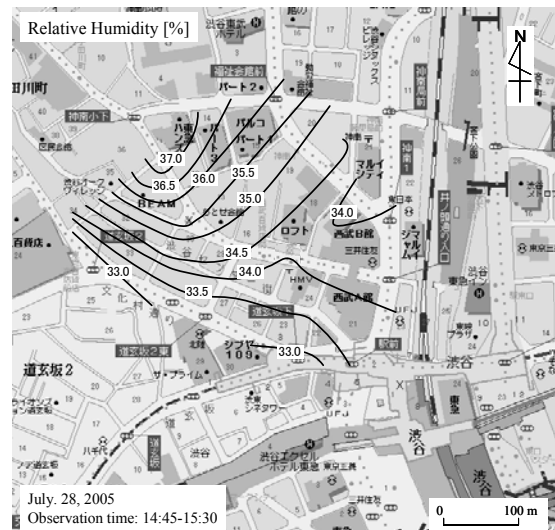


図 13 東京都渋谷駅付近における相対湿度分布

気温は全般的に気象庁発表の最高気温よりも高かった。この結果は定点観測だけではなく、実際の生活環境に近いところでの移動観測の重要性を示している。最高気温は立教大学（池袋）の北西端 T 字路付近で 36.6°C となった。ここは比較的交通量が多く、地面はアスファルトでその周辺にはレンガの塀があったため、日射によって高温になったそれらの表面からの伝熱現象により高い気温になったものと考えられる。気温も直射日射の影響を大きく受けており、高い建物の影ではその周囲に比べて低い値を示していた。立教大学構内では、気温は低くなっているが平均ふく射熱流束は周囲と比較して低くなっていないという分布が現れている。この箇所の地表面は芝生や並木道であった。

相対湿度は全ての測定地点において気象庁発表の値よりも低かった。また、気温が高いところは相対湿度が低く、相対湿度が高いところは気温が低くなっている。これは、相対湿度が水蒸気圧の飽和水蒸気圧に対する比であり、水蒸気圧が等しい場合、気温が高いほうが相対湿度は低くなるという性質を持っているためであると考えられる。

3.3 実測による熱環境評価

この歩行観測結果から、ふく射熱流束計の特徴を用いて人体形状物体が受けるふく射熱流束の分布を求めた。人体

モデルのメッシュ要素数は 5548 であり、表面積は 2.9m² である。人体形状のような複雑形状物体の場合、股下や脇の下などのように物体自身の要素間のふく射熱交換を考慮する必要がある。しかしながら、本研究では、周囲からどれくらいのかのふく射が人体表面に入射するのかわかりやすくすることを目的とするため、人体表面温度とふく射率を一定値に仮定し、以下の方法によって近似的に各要素が受けるふく射熱流束を求めた。

まず、モデル要素の重心から、CPC型ふく射熱流束計と同じ 12 方向に光線を放射する。このとき要素の表に放射される光線についてのみ追跡し、他の要素に遮蔽されなければ、その要素はその方向からのふく射熱流束 E_n を受けるものとみなす。他の要素による遮蔽があった場合は、式(1)によって求められるふく射熱流束 E_n をその方向から受けるものと仮定する。

$$E_n = \pi I_h \sin^2 \theta_a \quad (1)$$

ここで、 I_h は人体表面を灰色拡散面と仮定した場合のふく射強度であり、式(2)で計算できる。本解析では人体の全表面において ε_h を0.9、 T_h を32°Cと仮定した。

$$I_h = \frac{\varepsilon_h \sigma T_h^4}{\pi} \quad (2)$$

今回の観測における平均ふく射熱流束が最大となった地点での測定値に基づく解析結果を図14に示す。ただし、人体は真南を向いているものとした。表1に測定地点における測定日時、気温、水平面全天日射量、12面体における平均ふく射熱流束、人体表面における平均および最大ふく射熱流束を示した。この条件では、12面体形状が受けるふく射よりも人体形状が受けるふく射が約200W/m²小さい。また、人体形状の平均ふく射熱流束は693W/m²、最大値は1154W/m²で、平均値の約1.76倍となった。通常、熱環境の評価において熱ふく射を考慮する場合、平均的な値を用いることが多いが、局所的にふく射熱流束が大ききときには、不快感が発生することも考えられる。また、ある程度以上の熱ふく射が局所的にではあっても人体に照射された場合、水ぶくれや火傷など、人体における部分的な不快感も発生してしまう。今後、ふく射環境と生理現象などを詳細に調査研究することが望まれる。

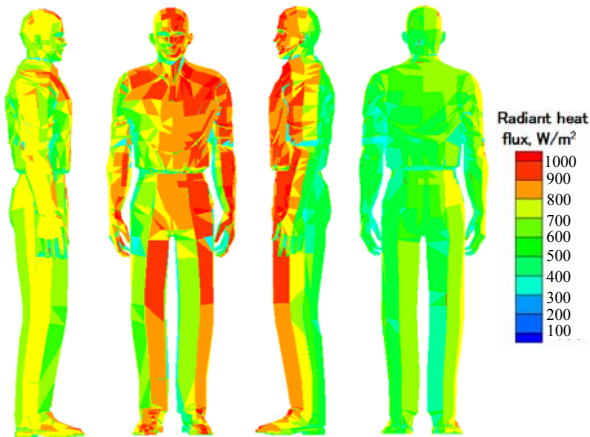


図14 平均ふく射熱流束最大地点でのふく射熱流束分布

表1 平均ふく射熱流束最大地点における解析結果

測定場所 Place	井の頭通り入り口 交差点付近 (渋谷) Shibuya
測定日 Date	July 28, 2005
測定時刻 Time	14:57
気温 Temperature	35.3 °C
水平面全天日射量 Horizontal total solar radiation	824 W/m ²
平均ふく射熱流束 (12面体) Ave. radiation flux (on dodecahedron)	902 W/m ²
平均ふく射熱流束 (人体) Ave. radiation flux (on human body)	693 W/m ²
最大ふく射熱流束 (人体) Max. radiation flux (on human body)	1154 W/m ²

4. ヒートアイランドシミュレーション

地表面性状の改変や人工排熱の増加などにより、都市の熱環境は悪化の一途をたどっている。特に近年のIT化による人工排熱の増加は、都市温暖化をさらに進展させていると考えられる。また、東京都汐留駅付近の超高層ビル群(東京ウォール)が都市熱環境をさらに悪化させるとも指摘されている⁽¹⁸⁾。

そこで、本研究ではとくに夏期の東京を対象とし、3次元シミュレーションにより将来の気温分布を予測するとともに、東京ウォールが都市熱環境に与える影響を解析する。

4.1 基礎方程式

基礎方程式は、Saitoh *et al.*⁽¹⁹⁾によって開発された3次元Navier-Stokes方程式、および連続の式を渦度ベクトル-速度ベクトルポテンシャルに変換した方程式系を用いる。Navier-Stokes方程式と連続の式から、速度ベクトルおよび圧力を直接求める速度・圧力法は、圧力項が他の項と比べ倍のオーダーとなるため、その項で桁落ちが生じ、実際に計算を行うと、大きな誤差を生じ、不安定になり発散し易いのに対比、渦度ベクトル-速度ベクトルポテンシャル法は、圧力が方程式系から消えるため、長時間安定して計算できる。また、浮力の効果も直接、かつ簡単に考慮できるため、都市温暖化の解析に適している。

以下に基礎式(3)~(25)を示す。

渦度方程式：

$$\frac{\partial \boldsymbol{\omega}}{\partial t} + (\boldsymbol{v} \cdot \nabla) \boldsymbol{\omega} - (\boldsymbol{\omega} \cdot \nabla) \boldsymbol{v} = [(\nabla \mathbf{K}) \cdot \nabla + \mathbf{K} \nabla^2] \boldsymbol{\omega} + \mathbf{D} + \mathbf{B} + \mathbf{C} \quad (3)$$

浮力項：

$$\mathbf{B} = \left\{ \frac{\partial \theta}{\partial y} \beta g, -\frac{\partial \theta}{\partial x} \beta g, 0 \right\} \quad (4)$$

コリオリ力項：

$$\mathbf{C} = \left\{ f \frac{\partial u}{\partial z}, f \frac{\partial v}{\partial z}, -f \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right\} \quad (5)$$

拡散項：

$$\mathbf{D} = \{D_x, D_y, D_z\} \quad (6)$$

$$D_x = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial K_h}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial K_h}{\partial z} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial K_h}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial K_h}{\partial z} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial K_M}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{\partial K_M}{\partial z} \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

$$D_y = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial K_h}{\partial z} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial K_h}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial K_h}{\partial z} \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial K_h}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial K_M}{\partial z} \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial K_M}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial z} \right)$$

$$D_z = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial K_h}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial K_h}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial K_h}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial K_h}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial K_M}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial K_M}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (7)$$

エネルギー方程式：

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \theta = [(\nabla \kappa) \cdot \nabla + \kappa \nabla^2] \theta + \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)_{heat} \quad (8)$$

湿分拡散方程式：

$$\frac{\partial q}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) q = [(\nabla \kappa) \cdot \nabla + \kappa \nabla^2] q + \left(\frac{\partial q}{\partial t} \right)_{evap} \quad (9)$$

渦度ベクトルと速度ベクトルポテンシャルの関係式：

$$\nabla^2 \mathbf{\Gamma} = -\boldsymbol{\omega} \quad (10)$$

速度ベクトルとポテンシャルの関係式：

$$\mathbf{v} = \nabla \times \mathbf{\Gamma} \quad (11)$$

$\boldsymbol{\omega}$, $\mathbf{\Gamma}$, \mathbf{v} は、それぞれ、渦度ベクトル、速度ベクトルポテンシャル、速度ベクトルであり、次式で表される。

$$\boldsymbol{\omega} = (\xi, \eta, \zeta), \quad \mathbf{\Gamma} = (\Gamma_x, \Gamma_y, \Gamma_z), \quad \mathbf{v} = (u, v, w) \quad (12)$$

また、演算子 ∇ , ∇^2 は、単位ベクトル (i, j, k) を用いて、それぞれ式で表す。

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} i + \frac{\partial}{\partial y} j + \frac{\partial}{\partial z} k, \quad \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (13)$$

なお、渦度方程式において、 $\boldsymbol{\omega}$, \mathbf{v} は局所体積平均値である。また、エネルギー方程式において温位の表現を用いたが、温度と温位の関係は、次式であらわされる。

$$\theta = \frac{T}{\pi} \quad (14)$$

ただし、 π はエクスナー関数(Exner function)である。

エネルギー方程式の右辺第2項は、都市大気の下層における地表面からの顕熱輸送量および人工排熱量による大気加熱項である。また、湿分拡散方程式(9)の右辺第2項は、地表面からの湿分輸送量による寄与項である。

以上の基礎式に対する主な境界条件は、次の通りである。

$x = 0, L$:

$$\xi = 0, \quad \eta = \frac{\partial u}{\partial z}, \quad \zeta = -\frac{\partial u}{\partial y}, \quad \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{\partial q}{\partial x} = 0$$

$y = 0, L$:

$$\xi = -\frac{\partial v}{\partial z}, \quad \eta = 0, \quad \zeta = \frac{\partial v}{\partial x}, \quad \frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{\partial q}{\partial y} = 0$$

$z = 0, L$:

$$\xi = -\frac{\partial v}{\partial z}, \quad \eta = \frac{\partial u}{\partial z}, \quad \zeta = 0$$

$$\theta = \text{transient} \quad (z = 0)$$

$$\theta = \text{constant} \quad (z = L)$$

(15)

以上の基礎式は、既に次の無次元変数を用いて無次元化してある。(ただし、+記号は省略)

$$t^+ = \frac{a}{H^2} t, \quad (x^+, y^+, z^+) = \frac{1}{H} (x, y, z),$$

$$(\xi^+, \eta^+, \zeta^+) = \frac{H^2}{a} (\xi, \eta, \zeta), \quad (\Gamma_x^+, \Gamma_y^+, \Gamma_z^+) = \frac{1}{a} (\Gamma_x, \Gamma_y, \Gamma_z),$$

$$(u^+, v^+, w^+) = \frac{H}{a} (u, v, w), \quad \theta^+ = \frac{\theta_h - \theta}{\theta_h - \theta_c}$$

(16)

乱流モデルには、Mellor-Yamadaモデル(level 2)⁽²¹⁾⁽²²⁾を用いて、鉛直方向の渦拡散係数を求めた。このモデルは、実際の地形上の流れ場に適用される例が多く報告されており、大気の流れ予測には信頼性の高いモデルである。

本シミュレーションで対象とするのは、皇居を中心とした20 km×20 kmの領域で、大手町、新宿、渋谷、池袋などの主要地域が含まれており、これを500m正方形メッシュで1600要素に分割した。本モデルでは一般風は与えず、ラージスケールの自然対流熱伝達のシミュレーションモデルとなっているが、水平方向拡散係数などのチューニングにより、海浜域から都心方向へ卓越する典型的夏期快晴時の風系を再現できることを確認している。地表面の熱収支については、東京都土地利用現況に基づいて土地利用状況を考慮した非定常熱収支式を解く。図15に示すように各解析メッシュの土地利用を建物用地、交通用地、緑地、水面(河川・湖沼・海水域)、その他の5つの土地利用区分に分類し、各種パラメータを表2のように設定した。各要素のカテゴリごとに、以下の非定常熱収支式を解くことにより、面積重み付けによる正味の顕熱輸送量および湿分輸送量を得る。なお、鉛直方向の計算領域は高度3 kmまでとした。

地表面における土地利用区分 i における非定常熱収支式は、人工エネルギー消費量を考慮しており、式(4.17)で表される。

$$\rho_i c_i h_s \frac{dT_i}{dt} = S_i + Q_{ai} - Q_{ei} - G_i - H_i - IE_i \quad (17)$$

ここで、 S_i は日射量、 Q_{ai} は大気ふく射量、 Q_{ei} は自身の赤外ふく射量、 G_i は建物および路面内部への熱伝導量、 H_i は表面での対流による熱輸送量である。これら各項は以下の式によって求める。

$$S_i = \alpha_{Si} (I + D) \quad (18)$$

$$Q_{ai} = \alpha_{Li} \varepsilon_{sky} \sigma T_a^4 \quad (19)$$

ここで、快晴時(雲量 0)のときの大気平均放射率 ε_{sky} は、Berdahl and Martin⁽²³⁾の実験式より、露点温度 T_{dp} より以下のように求められる。

$$\varepsilon_{sky} = 0.711 + 0.56 \times 10^{-2} T_{dp} + 0.73 \times 10^{-4} T_{dp}^2$$

(20)

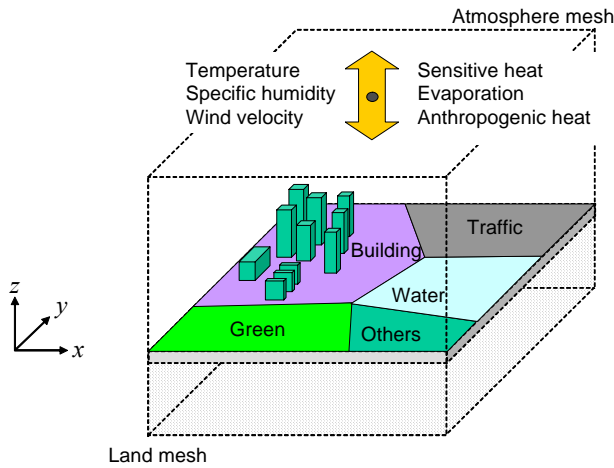


図 15 地表面付近の解析モデル

表 2 土地利用区分と各種パラメータ

土地利用区分 Land-use	建物用地 Building	交通用地 Traffic	水面 Water	緑地 Green	その他 Others
アルベド Albedo α [-]	0.2	0.1	0.1	0.15	0.2
放射率 Emissivity ε [-]	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
蒸発効率 Moisture efficiency β [-]	0.0	0.0	1.0	0.5	0.2
熱伝導率 Thermal conductivity λ [W/mk]	1.7	0.7	0.63	1.05	1.05
温度伝導率 Thermal diffusivity a [m ² /s]	0.81	0.50	0.15	0.57	0.57

$$Q_{ei} = \varepsilon_i \sigma T_i^4 \quad (21)$$

$$G_i = \lambda_i \frac{T_i - T_{under}}{dz} \quad (22)$$

ここで、地中への熱伝導 G は、地下 50cm において温度の日変化はないものとして、1次元熱伝導方程式によって解く。

$$\frac{\partial T_{under}}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T_{under}}{\partial z^2} \quad (23)$$

さらに、対流による熱輸送量と水分蒸発による潜熱輸送量は、接地境界層の仮定に従って、次式により求めた。

$$H_i = \rho_a c_p C_H (T_i - T) U \quad (24)$$

$$LE_i = l \rho_a \beta C_H (q_{si} - q) U \quad (25)$$

4.2 人工排熱

本シミュレーションモデルの主な入力データは、土地利用区分と人工排熱であり、出力結果はこれらに大きく依存

している。土地利用区分の未来予測は非常に困難であるため東京都の最新(平成13年度)の都市計画地理情報システムのデータを使用し、人工排熱のみ未来予測を行った。

人工排熱データは、Saitoh *et al.*による1991年夏の電力、ガスおよび石油類(揮発油、灯油、軽油)のメッシュ調査データを1991年から計算対象年までの電力、ガスおよび石油類の消費量の伸び率に基づいて外挿したものに、電力消費量の30%を冷房によるものと仮定し、冷房機器の平均COPを3.0として冷房排熱量を加算したものである。なお、各種消費量の解析には東京都統計年鑑のデータを用いた。

東京都統計年鑑の最新データは2003年であるため、それ以降の各種消費量は予測しなければならない。筆者らはこれまでは床面積増加の予測を行い、その結果を基に人工排熱を割り出していたが、近年のIT化に伴う急激な電力需要の増加により、床面積と人工排熱の相関が薄れてきたものと考えられるため、単に人工排熱データのみに着目し予測を行った。予測に際して、1974~2003年の人工排熱データを用い、単純に3次近似を行った。人工排熱量の経年変化を図16に示す。

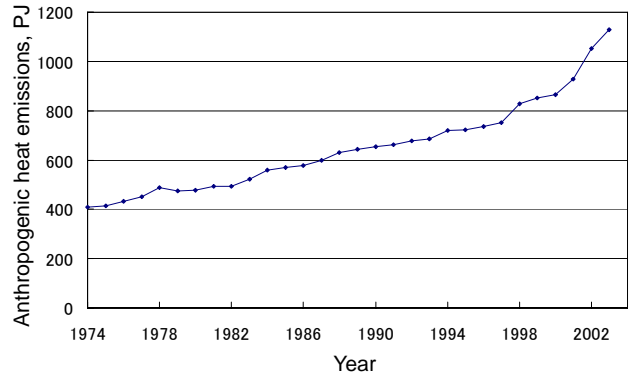


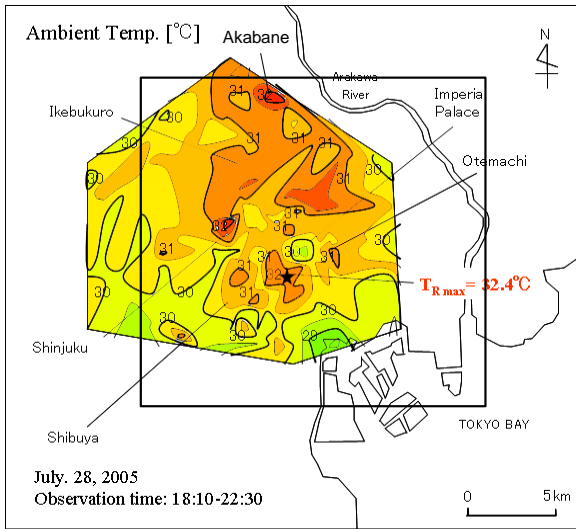
図 16 東京における人工排熱量の経年変化

4.3 広域移動観測結果との比較

本シミュレーションモデルの妥当性を検討するために、広域移動観測との比較を行った。シミュレーションは、広域移動観測の条件と同様、2005年7月28日18時において行った。このとき、人工排熱は2003年と比較して約1.07倍となるように設定した。広域移動観測の結果との比較を図17に示す。その結果、六本木、大手町、新宿、赤羽での高温域と、皇居周辺や港湾部での低温域がよく再現されていることがわかった。

4.4 都市温暖化の未来予測

本シミュレーションモデルを用いて、2011年、2021年、2031年の8月1日におけるシミュレーションをおこなった結果を図18~図20(a), (b)に示す。ただし、(a)は12時、(b)は18時の結果である。また、各時間での最高気温の経年変化を図21に示す。このとき、人工排熱はそれぞれ2003年と比較して、約1.65倍、3.16倍、5.70倍となるように設定



Tokyo: 29°C, Hachioji: 27.2°C (JMA) 18:00

図 17 (a) 広域移動観測結果 (図 5 をカラー化したもの)

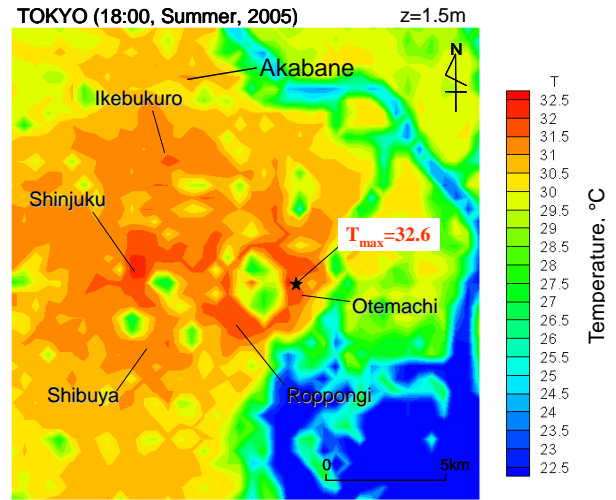


図 17 (b) シミュレーション結果

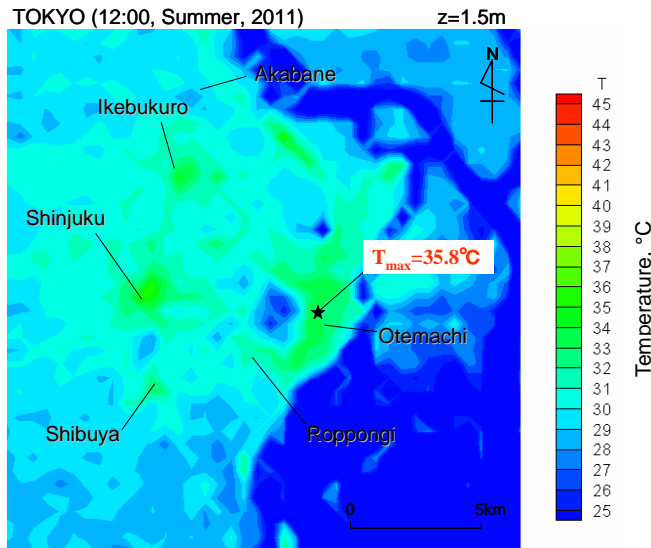


図 18 (a) 2011 年の 12 時における気温分布

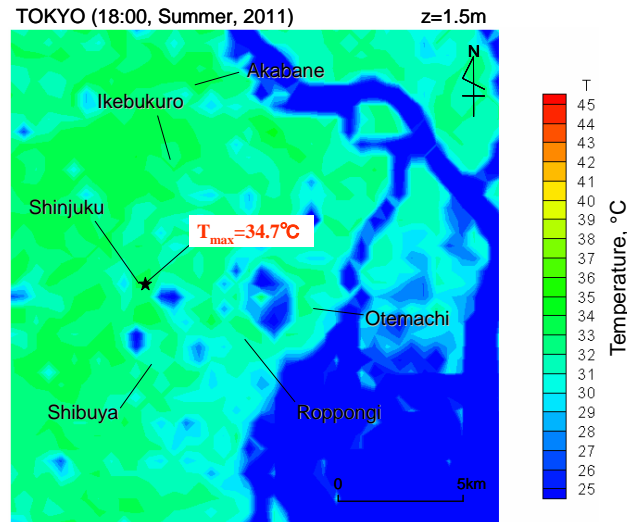


図 18 (b) 2011 年の 18 時における気温分布

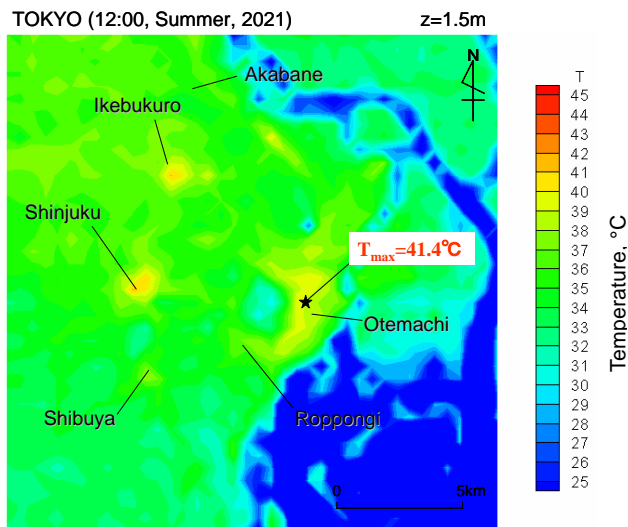


図 19 (a) 2021 年の 12 時における気温分布

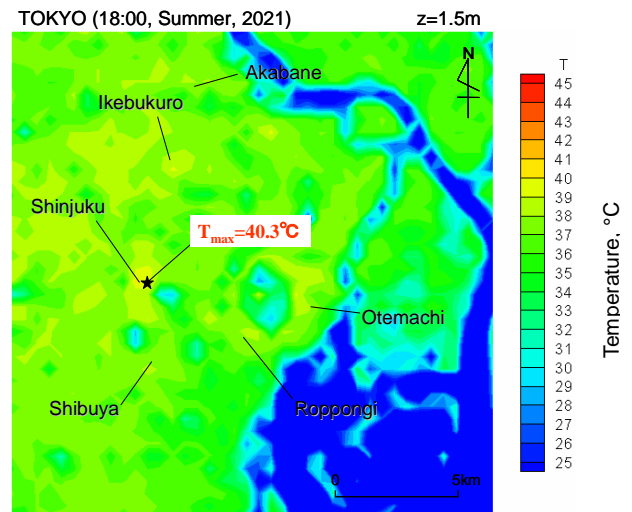


図 19 (b) 2021 年の 18 時における気温分布

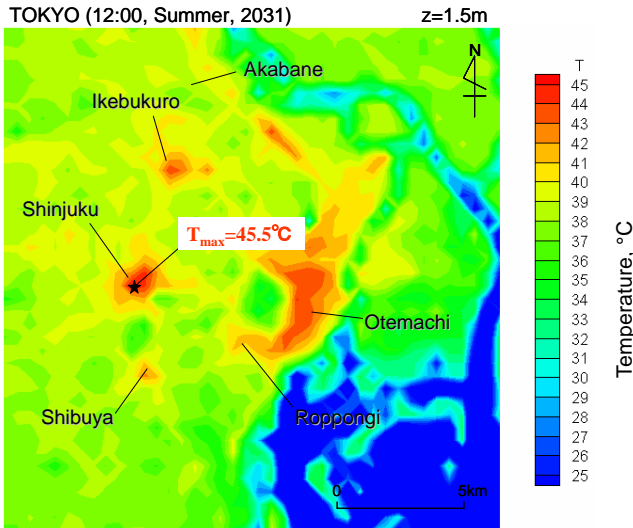


図 20 (a) 2031 年の 12 時における気温分布

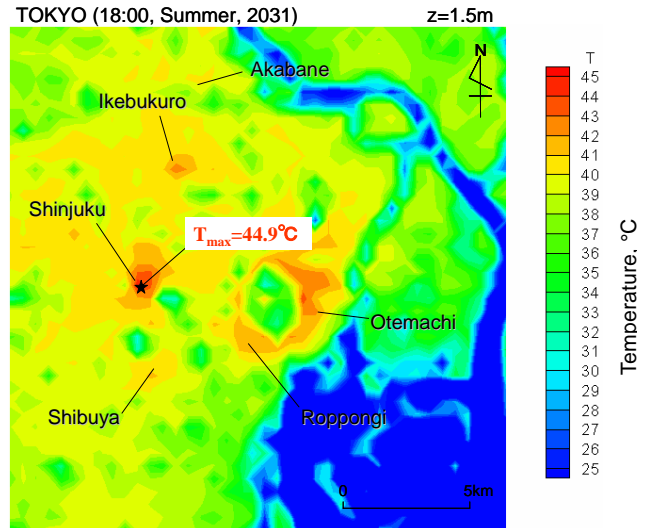


図 20 (b) 2031 年の 18 時における気温分布

した。筆者らの過去の計算結果では、2031 年の 18 時における最高気温は大手町および新宿付近で 44.6°C となるという予測が出ているが、今回は同条件で最高気温は 44.9°C となった。これは、主に人工排熱の予測方法の違いによるものであると考えられる。ヒートアイランドは夜に顕著に発生するといわれているが、シミュレーション結果より昼間もしっかり現れている。これは主に人工排熱の影響であり、人工排熱がヒートアイランド現象に及ぼす影響が大きいことを示している。また、2011 年、2021 年、2031 年の 12 時の最高気温はそれぞれ 35.9°C、41.2°C、45.5°C となっており、人工排熱が現在のペースで増加した場合、都市の熱環境はますます苛酷なものとなることが予想される。

4.5 東京ウォールの影響

東京都汐留駅付近の超高層ビル群（東京ウォール）の幅が現状では、およそ 1km、高さが 200m 程度であるが、品川から新橋、日本橋に至る 10km 程の建物群も考慮すると、その影響は比較的広範囲にわたることが予想される。

これらの影響をシミュレーションで考慮するため、ビル群の簡単なモデルを仮定した。幅 500m 四方、高さ 200m のブロックを最小単位とし、それを 3 つ連ねたものをウォールの簡略モデルとした。また、将来的な建設を念頭に置き、ブロックを 5 つ連ねたものについても解析を行った。2005 年 8 月 1 日 12 時におけるシミュレーション結果を図 22(a), (b) に示す。ただし、この図は東京ウォールがある場合とない場合との差分温度の分布図であり、東京ウォールのモデル形状は図の通りである。また、図 22 の東京ウォール付近におけるそれぞれの拡大図を、図 23(a), (b) に示す。ただし、1 メッシュ 500m である。この結果より、東京ウォールの有無が 20km スケールの都市温暖化に与える影響のポテンシャルは小さく、現状を模擬した 3 ブロックモデルがもたらす気温上昇は、最大で 0.03°C 程度あり、5 ブロックモデルにおいても気温上昇は 0.05°C 程度であった。

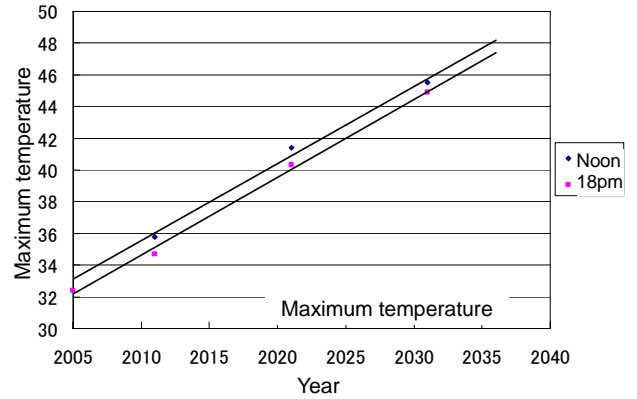


図 21 最高気温の経年変化

(2005 年 18 時の最高気温は実測値をプロットした)

また、5 ブロックモデルにおいて、南北方向にブロックが 2 つ並ぶ箇所における南北方向の断面における風速分布を図 24 に示す。ただし、この図も東京ウォールがある場合とない場合との風速差分表示であり、表示領域の高さは地上 500m まで、幅は 5km である。また、図において左が南であり、海風は左側から吹いている。この結果より、東京ウォールの風下方向（北側）では海風の流入減少による地表面温度の上昇に伴い上昇気流が発生しているが、その範囲は東京ウォールの背後にとどまり、またその大きさは最大で 0.02m と小さいものであることがわかった。ただし、本シミュレーションモデルでは、1 メッシュサイズが 500m であるため、マイクロスケールの微気象への影響については今後の研究が必要である。

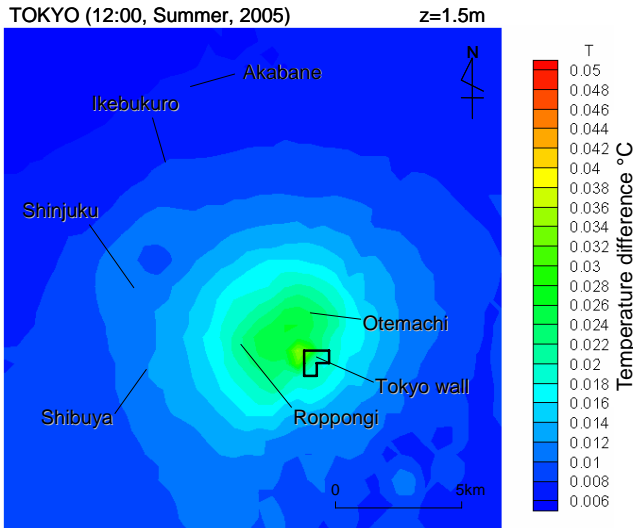


図 22 (a) 3 ブロックモデルによる東京ウォールの温度分布への影響 (ウォールが無い場合との差分温度)

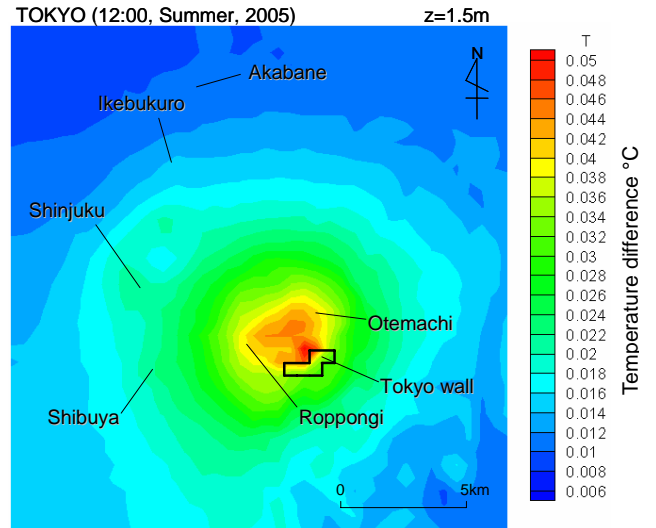


図 22 (b) 東京ウォール (5 ブロックモデル) の温度分布への影響 (ウォールが無い場合との差分温度)

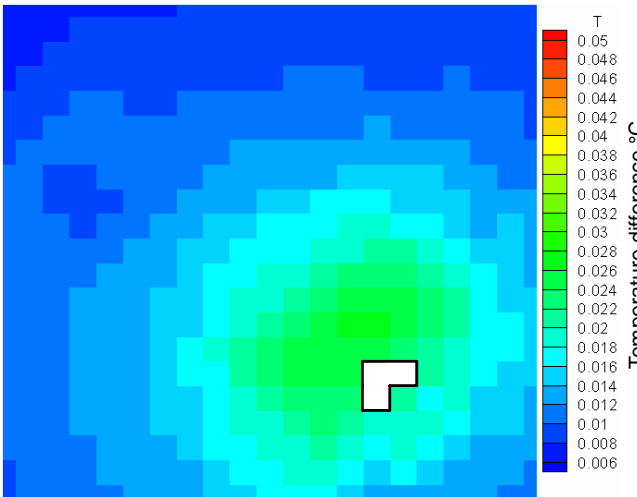


図 23 (a) 3 ブロックモデルの拡大図

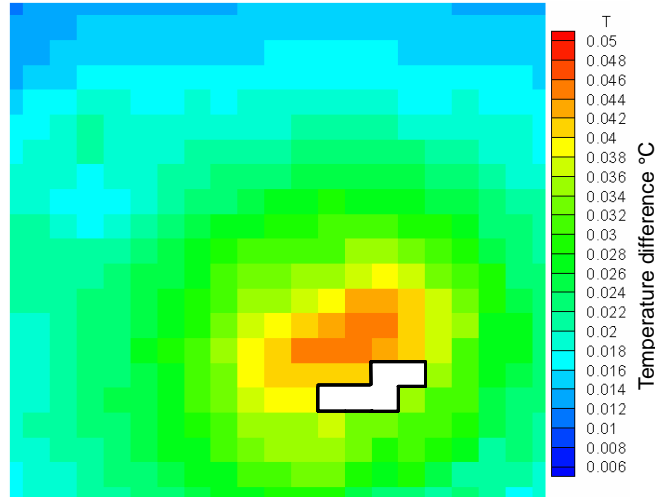


図 23 (b) 5 ブロックモデルの拡大図

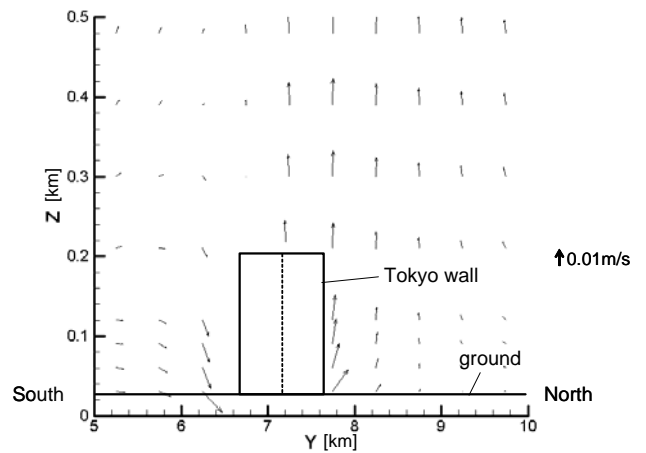


図 24 東京ウォールの風速分布への影響

1. 結 言

本研究では、年々深刻さを増している都市温暖化（ヒートアイランド）を研究テーマとして、まず、従来から行われている温度・相対湿度の移動観測を行い、さらにCPC型ふく射熱流束計によるふく射環境の実地計測を行い、熱環境の現状を定量的に把握するとともに、人体が受けるふく射熱流束を近似的に明らかにした。また、東京を対象とした3次元シミュレーションにより気温分布の未来予測を行い、また、東京都汐留駅付近の超高層ビル群（東京ウォール）が都市温暖化に与える影響を算出した。

本研究では都市温暖化の軽減方策に関しては言及していないが、本研究がその解決の一助となることを望む。解決策の一つとして挙げられる地表面の高アルベド化は、導入箇所によっては、日中の人体へのふく射熱流束を増加させることが考えられる。また、最近開発されている水分蒸発装置の濫用は、湿分増加による都市気候の変動や、水の循環による細菌の繁殖などの懸案事項がある。このように、都市温暖化の対症療法に万能なものはないため、人工排熱の増加や地表面性状の改変という大元の原因に目を向ける必要がある。しかし、この熱的な不快さと引き換えに手に入れた便利さをすぐに手放すことは不可能であり、対症療法と根本治療を並行して行うことが肝要であると考えられる。

以下に本研究における主要な知見を述べる。

- (1) 従来の移動観測および歩行観測による気温および湿度などの計測により、都市空間における熱環境の現状を明らかにした。
- (2) 全球方向からの熱ふく射を12方向からの熱ふく射に分割近似できるCPC型ふく射熱流束計を用いて、東京において実地計測を行い、都市空間におけるふく射環境を定量的に把握した。その結果、渋谷駅周辺では平均ふく射熱流束が最大約 900W/m^2 に達していることがわかった。
- (3) 東京都区部を対象とした都市温暖化の3次元シミュレーションを行い、シミュレーションの妥当性の検証と、未来予測を行った。これにより、未来の東京の熱環境の苛酷さが明らかとなり、とくに2031年頃の夏の夕刻6時の最高気温が 44°C を超えることを示した。
- (4) 東京ウォールが都市温暖化に及ぼす影響を、3次元シミュレーションを行い明らかにした。その結果、その影響は 0.1°C 未満のオーダーであることがわかった。シミュレーションモデルや計算条件、計算自体の誤差を勘案しても、結果的に“東京ウォール”が周囲の平均的な気温を上昇させる効果はあまり顕著ではない。

記号表：

a	温度伝導率	m^2/s
B	浮力項	-
c_i	各土地区分の比熱	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
C	コリオリ力	-
c_p	定圧比熱	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
C_H	バルク係数	-
D	散乱日射量	W/m^2
D	拡散項	-
E	ふく射熱流束	W/m^2
E_i	蒸発速度	$\text{Kg}/\text{s}/\text{m}^2$
f	コリオリパラメータ	rad/s
g	重力加速度	m/s^2
G_i	熱伝導量	W/m^2
h_i	各土地利用区分の厚さ	m
H	鉛直方向スケール	m
H_i	対流熱交換量	W/m^2
I_h	人体要素の拡散ふく射強度	$\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{sr}$
K	拡散係数	-
K_h	水平方向拡散係数（運動量，熱，物質）	-
K_M	鉛直方向拡散係数（運動量）	-
l	水の蒸発潜熱	-
L	水平方向スケール	m
q	比湿	kg/kg
q_{si}	T_i に対する飽和比湿	kg/kg
Q_{ai}	大気ふく射量	W/m^2
Q_{ei}	面要素 i 自身が周囲へ射出する赤外ふく射量	W/m^2
S_i	日射量	W/m^2
t	時間	s
T	温度	K
T_a	気温	K
T_{dp}	露点温度	K
T_i	各土地利用区分の表面温度	K
T_{under}	土壌温度	K
U	日平均風速	m/s
x,y,z	座標	-
u,v,w	x,y,z 方向の風速	m/s
i,j,k	単位ベクトル	-
ギリシヤ文字		
α_i	各土地利用区分のアルベド	-
β_i	各土地利用区分の蒸発効率	-
ε	放射率	-
ε_i	各土地利用区分の放射率	-
ε_{sky}	大気放射率	-
Γ	速度ベクトルポテンシャル	-
θ	温位	-
θ_a	許容入射半角	rad
θ_c	代表最低温度	K
θ_h	代表最高温度	K
π	円周率	rad
λ_i	熱伝導率	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
ρ_a	空気の密度	kg/m^3
σ	ステファン・ボルツマン定数	$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$
v	速度ベクトル	m/s
ω	渦度ベクトル	$1/\text{s}$

参考文献：

- [1] 齋藤武雄, ヒートアイランド～灼熱化する巨大都市～, 講談社(1997)
- [2] <http://www2.kankyo.metro.tokyo.jp/jidousya/diesel/>
- [3] <http://www.isuzu.co.jp/technology/randd/project2/02.html>
- [4] 道川内亮, ヒートアイランドの実態調査と緩和対策, 東北大学工学部卒業論文(2003).
- [5] 齋藤武雄・島田達哉, 都市におけるエネルギー消費と都市温暖化への影響, 日本機械学会通常総会講演会講演論文集 B 編, 69(1992), pp.498-499.
- [6] 山田昇, 構造物等を含む都市温暖化モデリングと都市3次元空間の熱環境評価に関する研究, 東北大学大学院工学研究科博士学位論文(1999).
- [7] http://www.tfd.metro.tokyo.jp/lfe/kyuu-adv/heat_dis.htm
- [8] <http://www2.kankyo.metro.tokyo.jp/kankyoken/research/heatland/1st.htm>
- [9] 佐橋謙, 自動車による移動観測における観測誤差—とくに自動車の影響を中心に—, 天気, 30-10 (1983), pp.21-26.
- [10] 佐橋謙, 移動観測による気温水平分布の観測値に含まれる誤差について, 岡山大学教育学部研究収録第81号別刷 (1989), pp.1-8.
- [11] 河村武, 自動車による気温の移動観測について, 天気, 4-11 (1957), pp.13-16.
- [12] <http://www.data.kishou.go.jp/etrn/index.html>
- [13] 山田昇・齋藤武雄, 不均一ふく射場の簡易計測のためのふく射流束計の提案, 日本機械学会論文集 73-730 B 編(2007), pp.89-96.
- [14] 堀越哲美・小林陽太郎・土川忠浩, 温熱環境計測器としてのグローブ温度計の成立に関する研究, 日本建築学会計画系論文報告集, 420 (1991), pp.1-6.
- [15] T.Bedford and C.G.Warner, The globe thermometer in studies of heating and ventilating, Journal of Hygiene 35(1935), pp.458-473.
- [16] J.A.Duffie and W.A.Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, second ed., John Wiley & Sons, Inc., New York (1991).
- [17] T.Bedford and C.G.Warner, The globe thermometer in studies of heating and ventilating, Journal of Hygiene 35(1935), pp.458-473.
- [18] 池田直樹, 汐留・環状二号线新橋周辺再開発地域における風環境の風洞実験研究, 早稲田大学理工学部卒業論文(2004)
- [19] T.S.Saitoh, T.Shimada and H.Hoshi, Modeling and Simulation of Tokyo Heat Island, Atmospheric Environment, 30-20 (1996), pp.3431-3442.
- [20] T.S.Saitoh and N.Yamada, Experimental and Numerical Investigation of Thermal Plume in Urban Surface Layer, Experimental Thermal and Fluid Science, 24 (2004), pp.585-595.
- [21] G.L.Mellor and T.Yamada, A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers, J. Atmos. Sci., 31 (1974), pp.1791-1806.
- [22] G.L.Mellor and T.Yamada, Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, Rev. Geophys. Space Phys., 20 (1982), pp.851-875.
- [23] M.Martin and P.Berdahl, Summary of Results from Spectral and Angular Sky Radiation Measurement Program, Solar Energy, 33-3/4 (1984), pp.241-252.
- [24] 東京都都市計画地理情報システム
- [25] 齋藤武雄・遠藤光緑; 都市型ヒートアイランドの3次元シミュレーション, 日本機械学会論文集 B 編, 49-445 (1983), pp.2035-2040.
- [26] T.S.Saitoh and K.Fukuda, Three-dimensional simulation of urban heat island, Bull. JSME, 28-235 (1985), pp.101-107.
- [27] 齋藤武雄・千葉秀樹, 都市大気における汚染物質および道路粉じんの3次元挙動とヒートアイランド, 天気, 34-3 (1987), pp.195-204.
- [28] 齋藤武雄, 都市温暖化の現状, 日本機械学会誌 (1991.4), pp.11-15.
- [29] 齋藤武雄, 地球と都市の温暖化, 森北出版(1992).
- [30] 齋藤武雄, 地球環境時代の都市とエネルギー, 日本機械学会誌(1992.1), pp.33-39.
- [31] 齋藤武雄, 都市温暖化から見た未来の東京, 太陽エネルギー学会誌, 18-4 (1992), pp.10-19.
- [32] 齋藤武雄, 温暖化時代の空調・冷凍技術, 冷凍, 68 - 783 (1993), pp.20-25.
- [33] 齋藤武雄, 都市の温暖化・大気汚染, 環境伝熱, 32 - 125 (1993), pp.1-8.
- [34] 齋藤武雄, 地球と都市の温暖化シミュレーション, 日本機械学会誌(1995.7), pp.29-32.
- [35] T.S.Saitoh et al., Modeling and simulation of Tokyo heat island, Atmospheric Environment, 30-20 (1996), pp.3431-3442.
- [36] 齋藤武雄, 都市気候のシミュレーション, 空気調和・衛生工学, 70-11 (1996), pp.1-5.
- [37] 齋藤武雄, 都市温暖化と大気汚染の改善のためのマスタープラン, 冷凍, 72-836 (1997), pp.26-32.
- [38] 藤部文昭, 東京都市域における降水量・降水頻度の増加傾向. 日本気象学会大会講演予稿集, 69 (1996), p.43.
- [39] 甲斐憲次・宇田川満 他, 環八雲の発生条件に関する気候学的研究, 東京都環境科学研究所年報 (1994), pp.27-34.
- [40] S.Hassid et al., The effect of the Athens heat island on air conditioning load, Energy and Buildings, 32-2 (2000), pp.131-141.

- [41] H.Saaroni et al., Spatial distribution and microscale characteristics of the urban heat island in Tel-Aviv, Israel, *Landscape and Urban Planning*, 48-1/2, 20 (2000), pp.1-18.
- [42] V.Deosthali, Impact of rapid urban growth on heat and moisture islands in Pune City, India, *Atmospheric Environment*, 34-17 (2000), pp.2745-2754.
- [43] E.Dupont, Comparison between the atmospheric boundary layer in Paris and its rural suburbs during the ECLAP experiment, *Atmospheric Environment*, 33-6 (1999), pp.979-994.
- [44] R.Bornstein and Q.Lin, Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta: three case studies, *Atmospheric Environment*, 34-3 (2000), pp.507-516.
- [45] 村上周三・大岡龍三, 都市の温暖化とその抑制対策, *Heat and Environment* (1998.6), pp.1-7.
- [46] 新しい国語 1, 文部科学省検定済教科書(中学校国語用) (2001.2.20), pp.106-111.
- [47] I.Uno, H.Ueda, and S.Wakamatsu, Numerical modeling of the nocturnal urban boundary layer, *Boundary-Layer Meteorology*, 49 (1989), pp.77-98.
- [48] 村上周三・持田灯 他, 数値モデルによる関東地方の都市気候の研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (1997), 09E.
- [49] T.Ichinose et al., Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo, *Atmospheric Environment*, 33 (1999), pp.3897-3909.
- [50] 森山正和・竹林英樹, ランドサット TM データを用いた制約条件付き最小二乗法による土地被覆解析と緑被環境評価, 日本建築学会技術報告集, 12 (2001), pp.145-150.
- [51] 玄地裕, 土壌熱源型ヒートポンプ式地域冷暖房システムの西新宿地区におけるフィジビリティと夏季廃熱削減効果, *エネルギー・資源*, 20-6 (1999), 562-569.
- [52] A.Yoshida, Two-dimensional numerical simulation of thermal structure of urban polluted atmosphere, *Atmospheric Environment (Part B: Urban Atmosphere)*, 25-1 (1991), pp.17-23.
- [53] Y.Ashie et al., Building canopy model for the analysis of urban climate, *J. Wind Eng. and Industrial Aerodynamics*, 91 (1999), pp.237-248.
- [54] 梅干野晃・飯野秋成 他, サイドルッキング航空機 MS S データを用いた丘陵開発地域のヒートアイランドポテンシャルの計量および土地被覆との関係の検討. 日本建築学会計画系論文報告集, 471 (1995), pp.29-37.
- [55] H.Yoshikado, Interaction of the sea breeze with urban heat islands of different sizes and locations, *Meteorological Society of Japan*, 72-1 (1994), pp.139-143.
- [56] F.Kimura and S.Takahashi, The effect of land-use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo metropolitan area: A numerical experiment, *Atmospheric Environment*, 25-B (1991), pp.155-164.
- [57] K.Noto and H.Okamoto, Thermal plume from a heat source in thermally stable stratified air: Fundamental characteristics of heat island phenomenon, *Energy and Buildings*, 15-16 (1990/91), pp.183-190.
- [58] 近藤明・山口克人 他, 2次元大気境界層モデルから導かれた都市キャノピ形状とヒートアイランド強度との関係, *大気環境学会誌*, 34 (1999), pp.422-434.
- [59] I.Saito, O.Ishihara, Investigation on distribution of air temperature and land-cover in urban area, *Preprints of Conference on Urban Thermal Environment* (1992), pp.97-98.
- [60] 渡辺浩文 他, リモートセンシング・データと数値情報利用による広域都市の地表面温度分布図の作成に関する研究, 日本建築学会計画系論文報告集, 443 (1993), pp.21-29.
- [61] 中村泰人, 建築都市空間における熱放射環境計測のための環境放射束計の提案, 日本建築学会計画系論文報告集, 383 (1988), pp.16-23.
- [62] 成田健一, 都市の熱環境と緑地の効果に関する長期観測, *CUTE10-UCN24 発表論文集* (1997), pp.6-9.
- [63] 浅枝隆・藤野毅, 都市及び周辺領域の熱環境解析, *日本風工学会誌*, 75 (1998), pp.67-72.
- [64] 鄭梶元・堀越哲美 他, 都市の街路および開放空間における熱放射環境が人体におよぼす影響, 日本建築学会計画系論文報告集, 493 (1997), pp.77-84.
- [65] 石井昭夫・片山忠久 他, 屋外気候環境における快適感に関する実験的研究, 日本建築学会計画系論文報告集, 386 (1988), pp.28-37.