

研 究 解 説

都市キャノピーモデルを組み込んだメソスケールモデルによる
関東地方の都市気候解析

Study on urban climate analysis based on meso-scale model incorporated with the Urban Canopy Model

原 山 和 也*・大 岡 龍 三**・村 上 周 三***・
吉 田 伸 治****・瀬 戸 島 政 博**・近 藤 裕 昭*****

Kazuya HARAYAMA, Ryoza OOKA, Shuzo MURAKAMI, Shinji YOSHIDA, Masahiro SETOJIMA and Hiroaki KONDO

1. は じ め に

都市の熱環境問題としてヒートアイランド現象が注目されている。これはこの現象が熱帯夜の増加、熱中症患者の増加、エネルギー消費の増大などの諸問題を生じさせている原因と考えられるからである。ヒートアイランド現象の緩和方策の検討手法のひとつに数値シミュレーション技術を用いた都市気候解析があり、筆者らはこの解析手法を用いて東京首都圏を中心としたメソスケール（数十 km から数百 km）の気候分析を行ってきた^{1,2)}。これらの解析では、地表近傍の建物や樹木などの流体力学的影響を粗度長の値によってモデル化していた。この粗度長を用いたモデル化では、図 1(1) に示すように設定した粗度長の高さよりやや上層の流れに着目したものであるため、鉛直方向の格子分割を数十 m 以下にすることができない。そのため、従来の解析における快適性や熱収支の評価領域は実際の人間が活動する領域に比べてかなり広範囲のものとなり、厳密な意味での都市内における温熱環境評価とはなっていない。本研究では、人間が実際に活動している都市空間の温熱環境を再現可能な都市キャノピーモデル（図 1(2)）をメソスケール気象解析の地表付近の境界条件に組み込んだ解析手法を開発することを目的としている。本報では、

従来のモデルに都市キャノピーモデルを組み込む改良方法、および 3D GIS (Geographic Information System) を用いた精緻な建物・地表面データの作成と利用について示す。

2. 都市キャノピーモデルの組み込み

都市キャノピーの建物群がメソスケール気候解析モデルに及ぼす効果としては次の 5 つが考えられる（図 2）。

- (1) 建物群による風速低減効果
- (2) 建物群による乱れの増大効果
- (3) 建物群による短波放射の伝達効果
- (4) 建物群による長波放射の伝達効果
- (5) 建物表面からの顕熱、潜熱放散

(1) と (2) は風環境に関するもの、(3) と (4) は放射環境に関するもの、(5) は気温と湿度に関するものである。また、都市キャノピー内には街路樹、庭木など、多様な植生群も存在する。本研究ではこれら植生群の効果として次の 4 つを組み込んだ（図 2）。

- (6) 植生群による風速低減効果
- (7) 植生群による乱れの増大効果
- (8) 植生群による放射の吸収
- (9) 植生群による地表面日射吸収量の減少

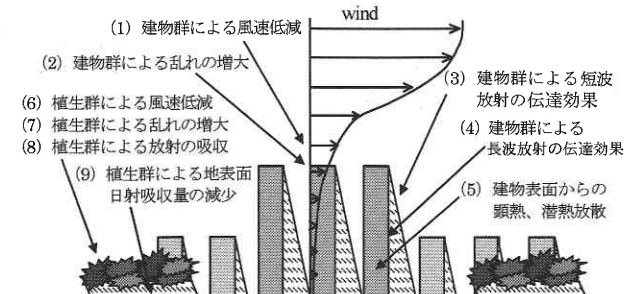


図 2 都市キャノピーモデルを組み込んだ都市気候解析モデルの概念図

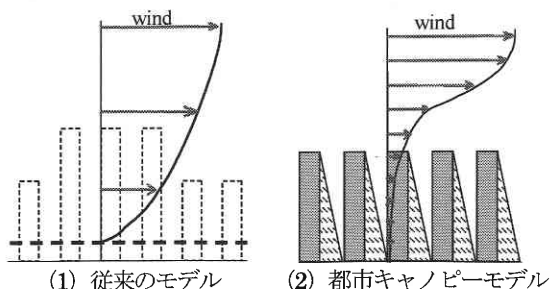


図 1 モデルの違いの概念図

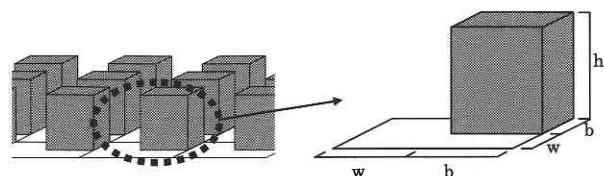


図 3 建物群のモデル化

*東京大学大学院工学系研究科

**東京大学生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター

***慶應義塾大学理工学部

****福井大学工学部

*****産業技術総合研究所

(8) 植生群による放射の吸収

(9) 植生群による地表面日射吸収量の減少

以下、これらについての説明を示す。

2.1 建物群のモデル化

メソスケールの解析を行う場合に、都市の建物を1つ1つ表現することは計算格子の分解能の観点から不可能である。そのため3D GISデータを用いて街区内の建物群を統計的に扱うことが一般的である。ここでは、メソスケール解析の1メッシュ内に図3に示すような均等街区が存在すると仮定し、平均建物間隔 (w)、平均建物幅 (b)、平均建物高さ (h) の3つのパラメータでモデル化する。そのため、底面が正方形 ($b \times b$)、高さ h の建物が均等配置された街区となる。本解析における街区モデルのパラメータの設定方法については次章で詳述する。

2.2 建物群、植生群が流れ場に及ぼす影響の組み込み

1) 風速低減効果の組み込み

樹木キャノピーモデル^{文3)}を参考に、(1)式でモデル化される抵抗を平均流の運動方程式に付加する。

$$-\eta C_d a \langle u_i \rangle \sqrt{\langle u_i \rangle^2} \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 η ：建物や樹木を含むメッシュの水平面積のうち建物や樹木で覆われている水平面積の割合 [-]、 C_d ：建物群や樹冠の抵抗係数 (建物：0.1、樹木：0.2) [-]、 a ：建物群の面積密度^{注1)} or 樹冠の葉面積密度 [m^2/m^3]

2) 乱れの増大効果の組み込み

(1)式の運動方程式の抵抗項に対応させて、乱流エネルギー $q^2/2$ と乱れ長さスケール $q^2 l$ の方程式にそれぞれ (2)式、(3)式の項を負荷する。

$$+ 2\eta C_d a \left(\langle u_i \rangle^2 \right)^{\frac{3}{2}} \dots \dots \dots (2)$$

$$+ 2\eta C_d a l \left(\langle u_i \rangle^2 \right)^{\frac{3}{2}} \dots \dots \dots (3)$$

ただし、 l ：乱れ長さスケール [m]

2.3 放射計算による都市の表面温度の算出

2.1節に示すように、本解析では街区の幾何形状を明確にモデル化する。そのため、従来では定義が曖昧であった表面温度についても、地表面、建物屋上面、側壁面の各々について熱収支式を解くことにより、各表面温度の差異を表現可能となる。この場合、各面における熱収支式の各項のうち、各壁面に入反射する放射量については地表面、屋上面、側壁面、天空間の複雑な熱交換を考慮する必要がある。本解析では近藤らが文献4や文献5に示す計算手法を用いて解析を行った。

2.4 植生による放射の吸収

植生の取り扱いとして植生による短波放射の吸収とそれに伴う地表面温度の低下を考慮した。

本来、植生が吸収した短波放射量は植生の葉表面の温度を上昇させ、周辺の気温や湿度の上昇に寄与する。ここでは植生の熱容量を0と仮定し、植生が吸収した短波放射量によって対象セルの気温や湿度が上昇するとした。また、

地表面に到達する短波放射量は植生が吸収する分を差し引くことにより、地表面温度の低下を表現した。

2.5 人工排熱の取り扱い

東京23区に関しては、人工排熱データを東京都のエネルギー消費関連資料^{文6)}を参考として、文献7に従い民生、産業、交通の3要素に分類し、それぞれ地表面、屋上面、壁面熱収支式へ組み込む割合と大気中の流体セルに放出する割合を考慮して取り扱った。東京23区以外の領域では全て大気中に放出することとした。

また、従来の都市キャノピーモデルを利用しないモデルでは地表面熱収支式と大気第1セルに排熱量を与えていたが、都市キャノピーモデルの導入に伴い、屋上面、壁面の熱収支式と建物高さ全般に及ぶセルに排熱量を与えるようにしている。

更に、水冷式空調機と空冷式の空調機に対応させるため、それぞれ顕熱排熱と潜熱排熱にわけられるモデルとしている。ただし、後に示す解析では全て顕熱による排熱としている。

3. GISを用いた地表境界条件に関するパラメータの算定

モデル改良に伴い、新たに建物高さデータが必要になるため、ここでは航空機レーザープロファイラで取得したデータより算出した (3.1節参照)。また、従来、地表境界条件の作成には国土地理院が発行している国土数値情報を用いていたが、それは25,000分の1の地図を0.4mmピッチでデジタイズしているため、幅員10m以下の道路や内水地が正しく再現されていない可能性がある。従って、土地利用分類に関しては東京都の都市計画地理情報システムを利用した (3.2節参照)。

3.1 DSM, DEMを用いた平均建物高さの算出

解析領域の中心である東京23区に関して、航空機レーザープロファイラで取得した約2m間隔の計測データをフィルタリング処理したDSM (数値表層モデル：Digital Surface Model) とDEM (数値標高モデル：Digital Elevation Model) の2データを用い、メッシュ毎の平均建物高さを算出した。図4にDSMとDEMの差より求めた東京を中心とする2kmメッシュにおける平均建物高さの分布を示す。なお、23区以外の領域は全てのメッシュで6mとした。大手町や新宿を中心として高層街区が再現されていることがわかる。

3.2 都市計画地理情報システムを用いたパラメータの算定

同様に、東京23区に関して、東京都都市計画局が作成した平成8・9年度土地利用現況^{文8)}を用いて、精緻な土地利用データを作成し、本解析の境界条件とした。土壤に関するパラメータは表1に示すように土地利用毎に設定し、それを東京23区では本データ、それ以外の領域では国土数値情報から得られた数値を面積平均して、メッシュ毎のパラメータを決定した。ただし、東京都の分類は国土地理院の分類と名称が異なるため、表2のように適応させた^{文9)}。地表面パラメータの一例として、図5にアルベド

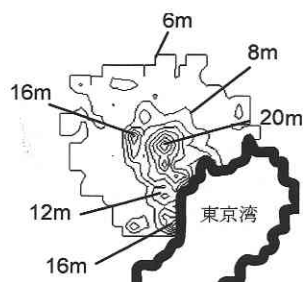
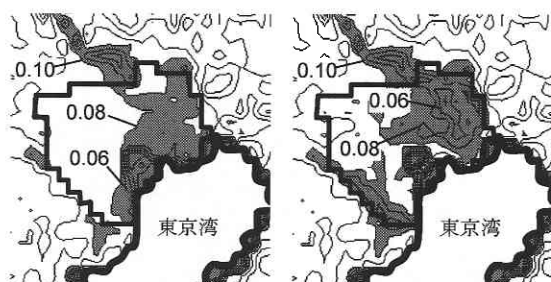


図4 平均建物高さ
(=DSM - DEM)
(2 km メッシュ)



(1) 都市計画地理情報システム利用 (2) 国土数値情報のみ
図5 アルベドの分布 (2 km メッシュ)
(灰色部は0.1以下の領域)

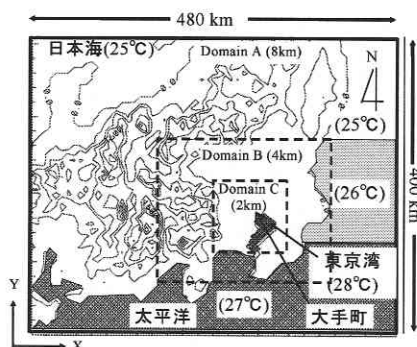


図6 解析領域

表1 地表面パラメータ

	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 [$\times 10^3 \text{J/m}^2\text{K}$]	蒸発効率 [-]
田	0.20	0.050	0.67	3.0	0.5
畑	0.10	0.010	0.40	2.0	0.3
果樹園	0.20	0.050	0.30	1.8	0.3
森林	0.15	0.050	0.15	2.0	0.3
荒地	0.20	0.010	1.40	1.9	0.3
建物用地	0.10	0.050	2.30	2.1	0.0
幹線交通用地	0.10	0.010	2.00	2.0	0.0
その他の用地	0.10	0.010	1.00	2.0	0.3
内水地	0.03	0.001	0.15	4.2	1.0

表3 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]
Domain A	480×400×9.6	60×50×49	8
Domain B	232×200×9.6	58×50×49	4
Domain C	96×96×9.6	48×48×49	2

表2 東京都の分類と国土地理院による分類の適応表

東京都		国土地理院
分類	土地建物主用途	分類
公共用地	官公庁施設など	建物用地
商業用地	事務所建築物など	建物用地
住宅用地	独立住宅など	建物用地
工業用地	専用工業など	建物用地
空地	屋外利用地など	その他
	未利用地など	荒地
道路		幹線交通用地
鉄道・港湾など		幹線交通用地
農業用地	農林漁業施設	建物用地
農用地	田	田
	畑	畑
	樹園地	果樹園
	採草放牧地	その他
水面・河川		河川地及び湖沼
林野	原野	荒地
	森林	森林
その他		その他

の分布を示す。本データを用いると0.1以内の微量ではあるが、全体的に国土数値情報のみを用いた場合と比べて増加する傾向になった。また、建物に関して、平均建物幅(b)、平均建物間隔(w)は建物用途現況^{文10)}から建物数を用いて算出した。東京23区以外は平均建物幅bを10mとし、平均建物間隔は国土数値情報から算出した。

4. 解析概要

太平洋高気圧が張り出した典型的な夏季の気候であった1995年7月24日の24時間を評価対象日とした。計算は7月23日午前6時からスタートした。解析には、3段階のネスティング手法を用いた。図6に解析対象領域、表3にメッシュ分割を示す。メッシュ分割は水平方向には等間隔、鉛直方向には不等間隔なメッシュ分割(地上第1メッシュ幅は4m)として、歩行者高さの熱環境を評価できるようにした。

5. 解析結果

1) 地表面温度分布

図7に7月24日13時の地表面温度分布を示す。また、図8(3)に人工衛星から見た地表面温度分布を示す^{文11)}。地表面温度分布は観測値に比べて全体的に5°C程度低温に

なった。これは図13(2)が上空から見た建物屋上などを含めた表面温度観測結果であるのに対し、図12が実際の地表面温度を示しており、地表面では建物や樹木による影が存在するためと考えられる。

2) 表面温度分布

上記の理由から、人工衛星や航空機からの熱画像と対応を可能とするため、建物屋上面などを含めた表面温度の解析結果を図8(2)に示す。屋根温度、植生部上端の気温、並びに地表面温度をそれぞれメッシュ毎の面積比で重みづけたものである。また図8(1)に従来の地表面熱収支モデルを用いた場合の地表面温度を示す。従来の方式では、比較的高温となる都心部でも34°C程度であり、図8(3)の観測値に比べて非常に低い値を示す。都市キャノピーモデルを組み込んだ今回の計算では、都心では55°C以上の高温域が出現し、観測値に近い結果となった。

3) 気温と風速ベクトル分布

図9(1)に1985年夏季のAMeDASの平均値^{文12)}、図9(1)に7月24日13時における地上2mの気温と地上70mの風速ベクトルの水平分布の計算値を示す。沿岸の強風や内陸の弱風がよく再現されている。また、東京湾と相模湾からの南風が東京23区北部でぶつかり、その周辺で気温が高くなっている。

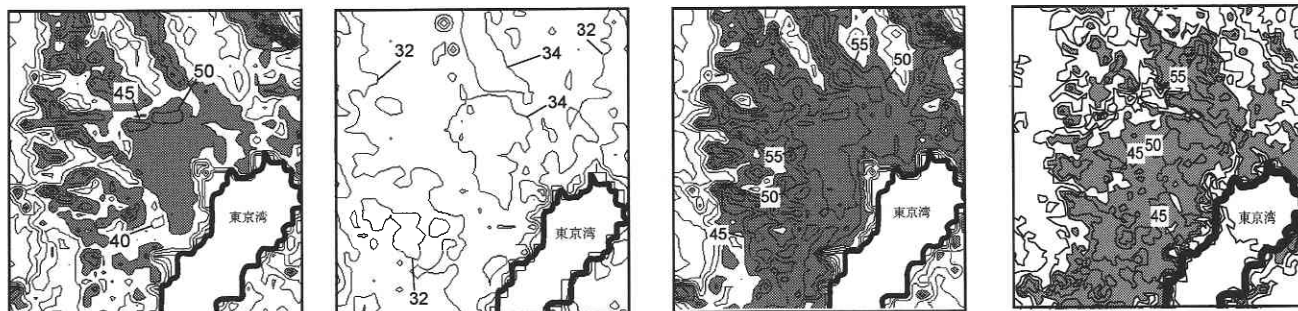
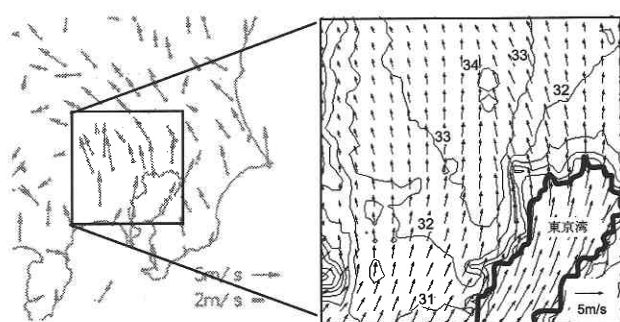


図7 地表面温度分布 [°C]
(7月24日13:00)
(灰色部は45°C以上の領域)

(1) 従来のモデルを用いた計算結果 (2°C間隔等温線)
(2) 本モデルを用いた計算結果 (5°C間隔等温線)

(3) 観測値^{文11)}
(5°C間隔等温線)

図8 表面温度分布 [°C] (7月24日13:00) (灰色部は45°C以上の領域)



(1) 観測値^{文12)}

(2) 計算値

図9 気温と風速ベクトル分布 [°C]
(7月24日13:00)

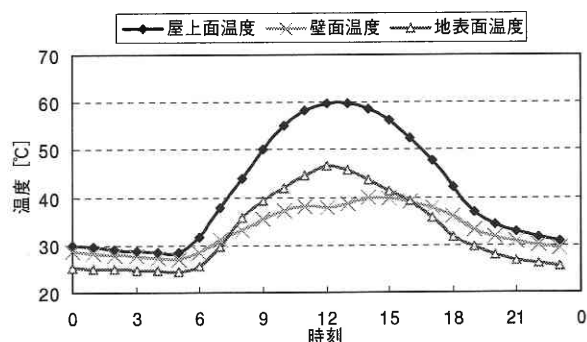


図10 各表面温度の時間変化 (7月24日, 大手町) [°C]

4) 建物屋上面, 建物側壁面, 地表面温度の時間変化

図10に大手町に相当するメッシュ(図6参照)の建物屋上面, 建物側壁面, 地表面温度の時間変化を示す。屋上表面は日中でも影ができないため, 午前中に急速に表面温度が上昇し, 12時頃には最高の60°C程度になる。側壁表面温度は東西南北4面の平均値のため日中緩やかに上昇するが, 蓄熱効果により夕方まで高温を保っている。地表面は建物の影の影響で日中45°C程度までしか上昇しない一方, 夜間には放射冷却で25°C程度まで低下する。

5) 気温の時間変化

図11に図10と同じメッシュにおける気温の時間変化について計算結果と観測値としてAMeDASのデータ^{文13)}を示す。計算結果は観測値と比べて日較差が小さく最高気温

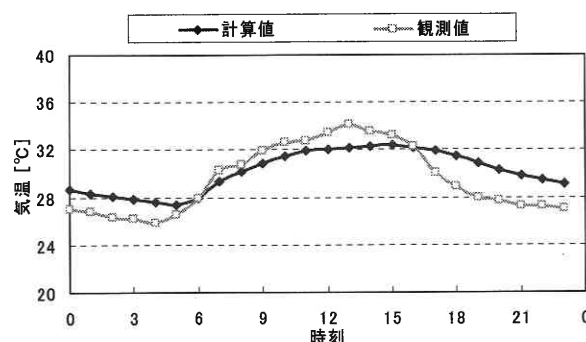


図11 気温の時間変化 (7月24日, 大手町) [°C]

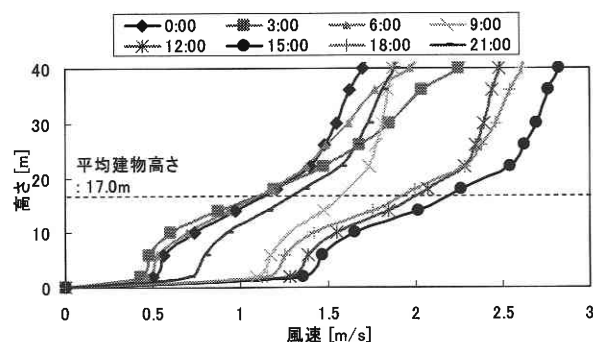


図12 スカラー風速の鉛直分布 (7月24日, 大手町) [m/s]

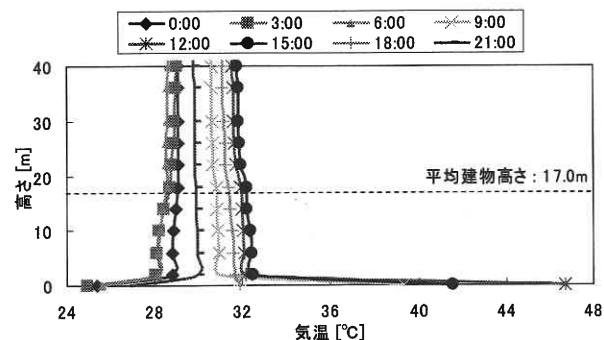


図13 気温の鉛直分布 (7月24日, 大手町) [°C]

や最低気温となる時間が遅くなっている。また, 気温の時間変化が図10に示す建物側壁面温度の時間変化に追従し

た傾向になっている。この理由は都市キャノピー内の気温に建物の持つ熱容量などの影響が顕著に表れたためと考えられる。

6) 風速の鉛直分布

図 12 に図 10 と同じメッシュにおける 3 時間毎の風速の鉛直分布を示す。このメッシュは平均建物高さが 17.0 m であるため、それより下部では 0.5 ~ 2.0 m/s 程度の弱風となり、キャニオン空間内の風速プロファイルが再現できている。

7) 気温の鉛直分布

図 13 に図 10 と同じメッシュにおける 3 時間毎の気温の鉛直分布を示す。屋上面の高さに相当する地上 17.0 m において、日中は屋上面や側壁面からの顕熱放散によりキャニオン空間より上空に比べて気温が若干高温となっている。これは従来のモデルでは表現できなかったものである。

4. ま と め

- (1) 既存のメソスケール解析手法の地表付近の境界条件に都市キャノピーモデルを組み込み、建物や樹木の取り扱いを粗度長から変更した。
- (2) 精緻な解析を行うため、東京 23 区においては 3D GIS データを利用した。
- (3) 東京を中心とした都市の熱環境解析を行い、従来の解析結果では表現できなかった都市の表面温度を算出し、観測値とよい対応をしていることを示した。
- (4) メソスケール解析手法を用いてキャニオン空間内の風速鉛直プロファイルや気温の鉛直プロファイルを再現した。

注

- 1) 植生キャノピーモデルにおいて葉面積密度としてきた建物表面積密度 a は $\frac{4b}{(b+w)^2} [\text{m}^2/\text{m}^3]$ とする。これは、1 区画の面積が $(b+w)^2 [\text{m}^2]$ 、建物 1 辺の長さが $b [\text{m}]$ より、この領域内にある全建物の周長は $4b [\text{m}]$ となる。従って、建物群の表面積密度は $\frac{4bh}{(b+w)^2 h} [\text{m}^2/\text{m}^3]$ 、つまり $\frac{4b}{(b+w)^2} [\text{m}^2/\text{m}^3]$ ($[1/\text{m}]$) となる。

謝 辞

都市計画情報は東京都より借用させていただきました。本研究の遂行にあたり今井靖晃氏（国際航業株式会社）には甚大なご協力とご助言をいただきました。記して謝意を表します。

(2003 年 11 月 25 日受理)

参 考 文 献

- 1) 村上, 持田, 金, 大岡, 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, 日本建築学会計画計論文集, No. 491, pp. 31-39, 1997. 1
- 2) 金, 村上, 持田, 大岡, 吉田, 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, 日本建築学会計画計論文集, No. 534, pp. 83-88, 2000. 8
- 3) 吉田, 大岡, 持田, 富永, 村上, 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熱環境緩和効果の検討, 日本建築学会計画計論文集, No. 536, pp. 87-94, 2000. 10
- 4) 近藤, 劉, 1 次元都市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, 33(3), pp. 179-192, 1998
- 5) NEDO 提案公募研究開発事業研究成果報告書 H 10 年度・11 年度, 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), 2000. 3
- 6) 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方法の開発, 1997
- 7) 吉田, 大岡, 村上, 原山, CFD 解析による人工排熱が都市のヒートアイランドに及ぼす影響の検討, 第 18 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, pp. 499-502, 2002. 1
- 8) 東京都都市計画局総合計画部, 東京都都市計画情報システム, 平成 8・9 年度土地利用現況, 1998. 10
- 9) 原山, 大岡, 村上, 東京都心のヒートアイランド現象のメカニズム解析 (その 1), 日本建築学会学術講演会梗概集, D-1, pp. 649-650, 2003. 9
- 10) 東京都都市計画局総合計画部, 東京都都市計画情報システム, 平成 8・9 年度建物用途現況, 1998. 10
- 11) 資源環境技術総合研究所, 大都市における夏季高温化対策技術の評価手法の開発, 研究資料 97-1, 1997. 3
- 12) 桑形, 近藤, 東北南部から中部地方までのアメダス地点における地表面粗度の推定, 天気, pp. 55-59, 1990. 3
- 13) 気象庁ホームページ
http://www.jma.go.jp/JMA_HP/jma/index.html