

東京都心部における夏季の植生の 暑熱環境緩和効果の評価

EVALUATION OF THE MITIGATION EFFECTS ON SUMMER THERMAL STRESS
BY URBAN VEGETATION IN TOKYO METROPOLITAN AREA

平野勇二郎¹・安岡善文²・一ノ瀬俊明³
Yujiro HIRANO, Yoshifumi YASUOKA and Toshiaki ICHINOSE

¹ 正会員 博(工) (独)国立環境研究所地球環境研究センター 流動研究員(〒305-8507 つくば市小野川 16-2)

² 工博 東京大学教授 生産技術研究所(〒153-8505 目黒区駒場 4-6-1)

³ 正会員 工博 (独)国立環境研究所地球環境研究センター 主任研究員(〒305-8507 つくば市小野川 16-2)

This study aims to evaluate the mitigation effects on summer thermal stress by the current distribution of urban vegetation in Tokyo Metropolitan Area using an urban climate simulation. In previous urban climate researches, land use data were used generally to generate physical characteristics of ground surface. In contrast with them, this paper emphasizes on making use of vegetation coverage ratios calculated from satellite remote sensing data, which make it possible to assess the effects of small vegetation such as roadside trees that are unable to discriminate from land use data. The result shows that air temperature is decreased 1.5 °C due to vegetation during daytime on a typical summer day in Tokyo. Vertical distribution and diurnal variation of cooling effects, and direction and velocity of wind are also analyzed.

Key Words: urban climate simulation, vegetation, cooling effects, urban environment

1. はじめに

都市において植生は都市高温化を抑制する効果があり、夏季の暑熱環境緩和に重要な役割を果たしている。とくに最近では環境省や各自治体においてヒートアイランド対策が始まっており、都市緑化や緑地保全の施策が進められている。したがって今後植生の都市気候緩和効果をよりの確に評価し、現実的な都市環境の計画・管理に結び付けていくことが重要である。

都市域の熱環境評価に関して様々な研究が行われてきたが、都市計画や土木・建築計画等への応用という観点では予測評価が重要であるため、数値シミュレーションの手法は有用である。とくにヒートアイランド現象は海陸風・山谷風などのメソスケールの気象現象の影響を強く受けるので、メソスケール気象モデルに都市の効果を組み込むことが一般的に行われている¹⁾。東京周辺において植生の気候緩和効果をメソスケール気象モデルにより評価した例として、緑化シナリオによる効果の評価^{2),3)}、緑地配置パターン⁴⁾や緑被率⁵⁾に着目した数値実験などがあげられる。ただしこ

れらの評価事例はいずれも仮想的なシナリオを設定して評価したものであり、こうしたスケールでの現状評価は必ずしも十分になされているとは言い難い。

街区や都市キャノピーのスケールでは詳細な樹木のモデル化が行われているが⁶⁻⁸⁾、都市全体のスケールではこうした詳細な評価は困難である。このためメソスケール気象モデルによる多くの研究では、土地利用データを用いてモデルの地表面の物理特性を設定する方法が一般的に用いられている^{2),9-11)}。しかしこの方法では、土地利用データと現実の土地被覆の不一致が誤差要因になる。とくに都市域では街路樹や宅地内の植木などの土地利用データでは把握できない植生が多く存在するため、この誤差は無視できないものであると予想される。

一方、植生の分布を広域的に把握する技術として、近年は人工衛星や航空機によるリモートセンシング技術の進展が目覚ましい。したがって、これらの技術を活用すれば、より現実に即した植生の熱環境評価が可能であると考えられる。このため著者らはリモートセンシングにより得られた緑被率データをメソスケール気象

モデルの地表面の設定に適用する手法の開発を行っている¹²⁾。そこで本研究は、リモートセンシングによる緑被率データとメソスケール気象モデルを用い、東京都心部における現状の植生の熱環境緩和効果を評価することを目的とした。

2. 現状再現計算と検証

(1) 解析概要

本研究の対象地域を図-1に示す。この領域を約2km×2kmのグリッドで15(東西方向)×18(南北方向)に分割した。ただし周辺の局地循環を再現するため、計算領域は約500km×500kmの領域を設定し、対象地域から離れるほど格子間隔が粗くなる不等間隔格子とした。

本研究で用いた気象モデルはPielke¹³⁾を原型とし、地表面パラメータの高解像度入力と人工排熱の入力を可能にしたコロラド州立大学メソスケールモデル(CSU-MM)である。このモデルはすでに数多くの都市気候シミュレーションに用いられているため^{2), 4), 9-11)}、説明は省略する。モデルの詳細に関しては文献¹⁰⁾を参照されたい。

シミュレーションを行う解析対象日は、夏季の典型日と考えられる1999年7月29日～8月1日を選択した。ただし日による気象条件のばらつきを除去するため、この期間の平均値により初期条件を設定した。設定した初期条件を表-1に示す。相対湿度および地上気圧は気象庁の東京における観測値を用いた。地上気温は東京周辺のAMeDAS観測データの平均値である。また温度勾配および風向・風速は高層気象観測年報の館野の観測値により設定した。海面水温は日本海洋データセンターによる水温統計により設定した。なお本研究ではこれらの初期値の水平空間分布は与えていない。現状再現性を重視すれば客観解析データ等を用いてより現実的な初期値を設定することが望ましいが、この場合は後述する植生がないケースとの比較実験を行う際に、対応する初期値の設定が困難になる。このため単純化した初期条件から計算開始し、現状に近づくまでの助走計算を行うという方法が適切であると判断した。本研究では計算開始時刻は午前0時とし、1日分の助走計算を行った後、計算が概ね安定する2日目の値を解析に用いた。

また、人工排熱は泉ほか¹¹⁾の研究と同様に建物用地、交通用地に日平均30W/m²とし、図-2に示した時刻別変化パターンを与えた。

(2) 緑被率データを用いた地表面パラメータの設定

前述した通り、著者らはリモートセンシングにより得られた緑被率データをメソスケール気象モデルの地表面に組み込む手法の開発を行っている¹²⁾。この手法に関しては今後、検証・改良を行い完成度を高める予

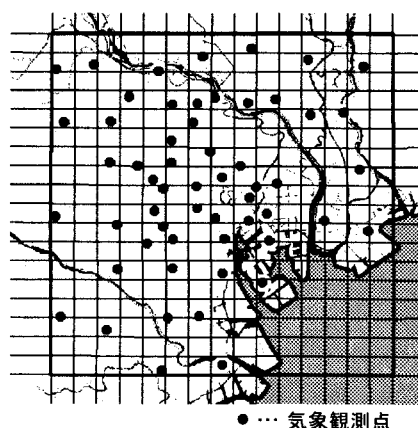


図-1 対象地域と計算グリッド

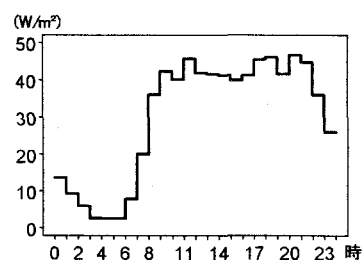


図-2 人工排熱の時刻別変化パターン

表-1 初期条件

解析対象日	1999年7月29日 ～8月1日
地上気圧(hPa)	1010.4
海面水温(°C)	27.6
地上気温(°C)	27.2
温度勾配(K/m)	0.0042
相対湿度(%)	73.0
風向	SSW
風速(m/s)	4.97

(風向・風速は地衡風である。)

定であるが、既報¹²⁾の検討結果からすでに汎用的な手法として利用可能な段階であると考えている。そこでこの手法により緑被率データを用いてモデルの地表面の設定を行った。以下にその概要を説明するが、手法の詳細については文献¹²⁾を参照されたい。

メソスケール気象モデルでは地表面を平板と見なし、グリッドに分割し、各グリッドに地表面パラメータを設定することにより地表面被覆を表現することが多い。地表面パラメータとは、例えば比熱や蒸発効率、アルベド、粗度などの地表面の物理特性をあらわすパラメータである。ただし、実際にはこうした地表面パラメータの分布を正確に得ることは困難である。そこで土地利用カテゴリーごとに地表面パラメータを設定し、土地利用データによりこれらの分布を得ることが一般的に行われている^{2), 9-11)}。しかしながら、この方法では土地利用データと実際の土地被覆の不一致が誤差要因となる。この問題に関しては、例えば皇

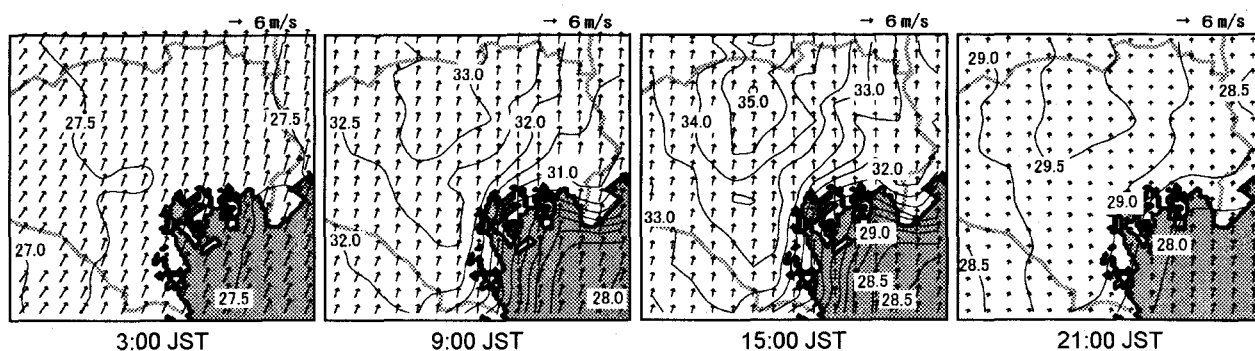


図-4 現状再現計算の結果

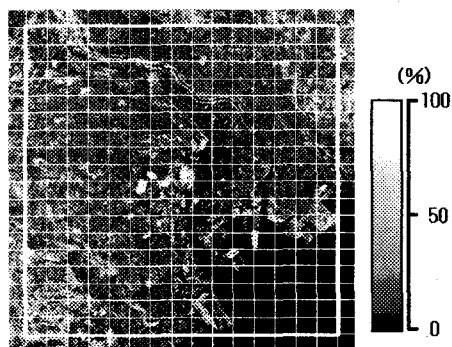


図-3 リモートセンシングによる緑被率データ¹⁶⁾

居を緑地と読み替えるなどの個別の対処をしているケースがあるが¹⁰⁾、この方法では労力や情報源の制約から詳細な設定は困難である。より現実に即した地表被覆の情報として、土地利用データではなく衛星データによる土地被覆分類データを用いた例がある^{14), 15)}。しかしながら、画素ごとのカテゴリーな分類では街路樹や庭木などの小さな植生までを把握することが困難である。

これに対し著者らが提案している手法では、緑被率データと土地利用データを併用し、以下に説明する手順で地表パラメータを設定する。まず植生と植生以外の被覆カテゴリーのそれぞれについて、土地被覆カテゴリー別の地表パラメータを設定する。また、土地利用データの各メッシュについて非緑被面の被覆カテゴリーを土地利用データにより仮定する。また、混在する植生面の割合を緑被率データにより得る。その上で、植生と植生以外の被覆カテゴリーの各パラメータを面積加重平均することにより土地利用メッシュごとの平均化されたパラメータを得る。これを気象モデルのグリッドごとに集計することにより各グリッドのパラメータの分布を得るという手順である。

本研究において実際に用いたパラメータの値は文献¹²⁾と同様であるため、ここでは省略する。ただし緑被率データは文献¹²⁾ではリモートセンシングのNDVI (Normalized Difference Vegetation Index; 正規化植生指標) から線形式により推定したが、実際にはNDVIは緑被率に対し非線形であることや、NDVIは画

素内の非緑被部分の影響を受けやすいことなどの問題点があった¹⁶⁾。このため著者らはこれらの点を改善した緑被率推定手法を開発し、東京都心部の緑被率データを作成している¹⁶⁾。本研究ではこの緑被率データを用いた(図-3)。なお、図-3は対象地域周辺のみを図化した。実際にはこの衛星データの対象地域を含むシーン(PATH:064 ROW:241)のほぼ全域に相当する72km×60kmの領域(以下、緑被率データ適用範囲と呼ぶ)をモデルに組み込んでいる。また、この領域の外側は従来法と同様に土地利用データのみにより設定した。本研究では土地利用データは文献¹²⁾と同様に、緑被率データ適用範囲では高分解能データである細密数値情報10mメッシュ土地利用データ、その外側は計算領域を包含するデータである国土数値情報の1/10細分区分土地利用データを用いた。

なお、こうした大気グリッドに対して地表面の空間分解能が細かい場合には、地表面パラメータを平均して地表面熱収支を計算する方法と、土地被覆ごとに熱収支を計算してからフラックスを平均する方法の二通りが考えられる¹⁷⁾。緑被率データ適用手法はいずれの方法にも対応しうが、本研究では主に著者らがCSU-MMを用いてこれまでに行った一連の研究⁹⁻¹²⁾を踏襲し、前者の方法を採用した。ただし後者の方法の方が精度がよいという報告もあるので¹⁸⁾、今後改良する必要があると考えている。

(3) 現状再現計算と検証

前述した計算条件におけるシミュレーション結果の3、9、15、21時の例を図-4に示す。図-4から対象地域内に高温域が形成されており、都市高温化が再現されているものと考えられる。この高温域は、夜間は東京都心部全体が若干温度が高い程度であるが、日中は対象地域北部を中心とし局所的である。また日中は東京湾の沿岸は海風の影響で温度差が非常に大きく生じている点も特徴的である。

計算結果の現状再現性を検証するため、図-4に示した3、9、15、21時の計算値を用い観測値との比較を行った。観測値は図-1に黒丸で示した高密度都市気候観測網¹⁹⁾の気温観測データを用いた。ここでは現状

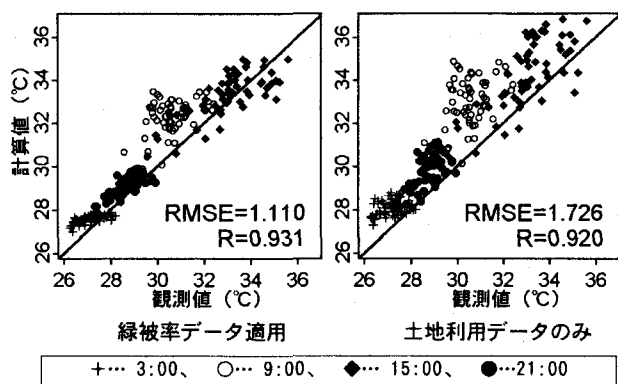


図-5 観測値と計算値の散布図

再現性を従来法と比較するため、既往研究^{2), 9-11)}と同様に土地利用データのみにより地表面パラメータを設定し、シミュレーションを行った。また計算精度を表現するため Root Mean Square Error (RMSE)と相関係数を算出した。前者は絶対値としての一致の程度、後者は時間変化・空間分布パターンの類似の程度を示すものである。

図-5に計算値と観測値の散布図およびRMSE、相関係数を示す。図-5から緑被率データの適用により現状再現性が向上していることが分かる。したがって従来法と比較し、植生の効果がよりの確に再現されていることが確認された。

3. 植生の気候緩和効果の評価

次に植生の気候緩和効果について評価する。ここでは比較のために植生が存在しない場合を想定してシミュレーションを行い、これと前述した計算結果との差により緑地の効果を評価した。植生が存在しないケースは、緑被率データの全てのメッシュを緑被率0%とし、これに前述した手法を適用し地表面パラメータの分布を作成した。ただし農地は荒地のパラメータを用いた。また緑被率データ適用範囲の外側は変更していない。

この植生が存在しないケースと前章の現状ケースの計算結果の差により、植生の気温低下効果を算出した(図-6)。この結果から、対象地域西部の広い範囲で、植生により日中に気温が約1.5℃低下していることが分かる。この地域は、対象地域の中では低層住宅地が多く、比較的緑被率が高いためこうした結果になったと考えられる。一方、対象地域東部ではこの気温低下効果は0.5℃程度となっており、西部と比較して小さい。この地域は都心部の密集市街地や下町地区の密集住宅、東京湾の埋立地などが含まれるため、緑被率が低いことがこの一つの要因として考えられる。また、この分布形から海風も影響していると思われる。

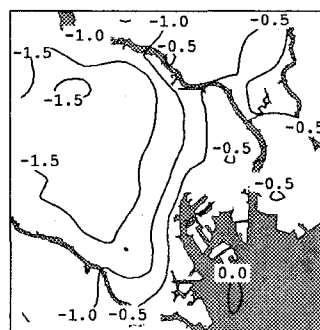


図-6 植生による気温低下効果 (15時、高さ4.5m)

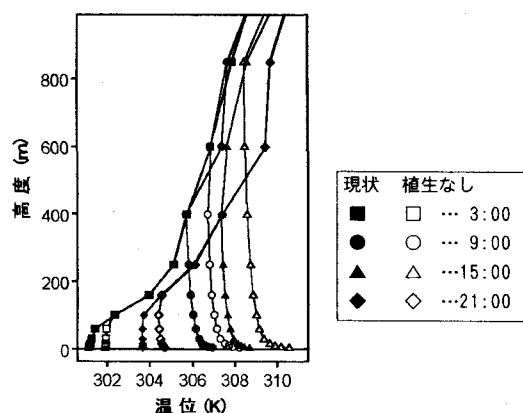


図-7 温度の鉛直分布 (練馬のグリッドの例)

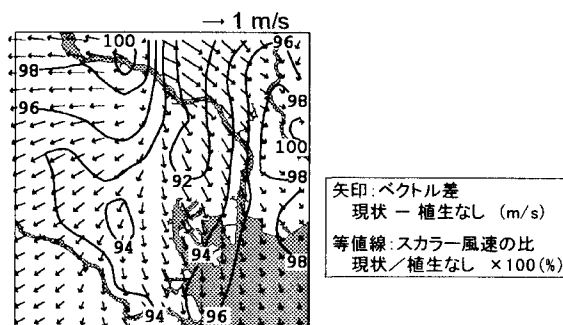


図-8 風向・風速の変化 (15時、高さ100m)

この気温低下効果の鉛直高度について検討するため、気温低下効果が大きく生じた練馬付近のグリッドについて、温度の鉛直分布を図-7示す。この図から植生による気温低下効果は、日中は上空800mまで及んでいることが分かる。これは対流混合層に発達により植生の効果が上空に拡散されているためであると考えられる。一方、夜間は植生の効果が及ぶのは上空100m程度である。これは逆転層の形成により大気は安定しているためであると考えられる。

次に植生が風向・風速に与える影響について考察する。現状ケースと植生が存在しないケースの風速比(スカラー風速)および、ベクトル差を図-8に示す。風速比を見ると、大半のエリアが100%以下であることから、植生は風速を弱める方向へ作用していることが

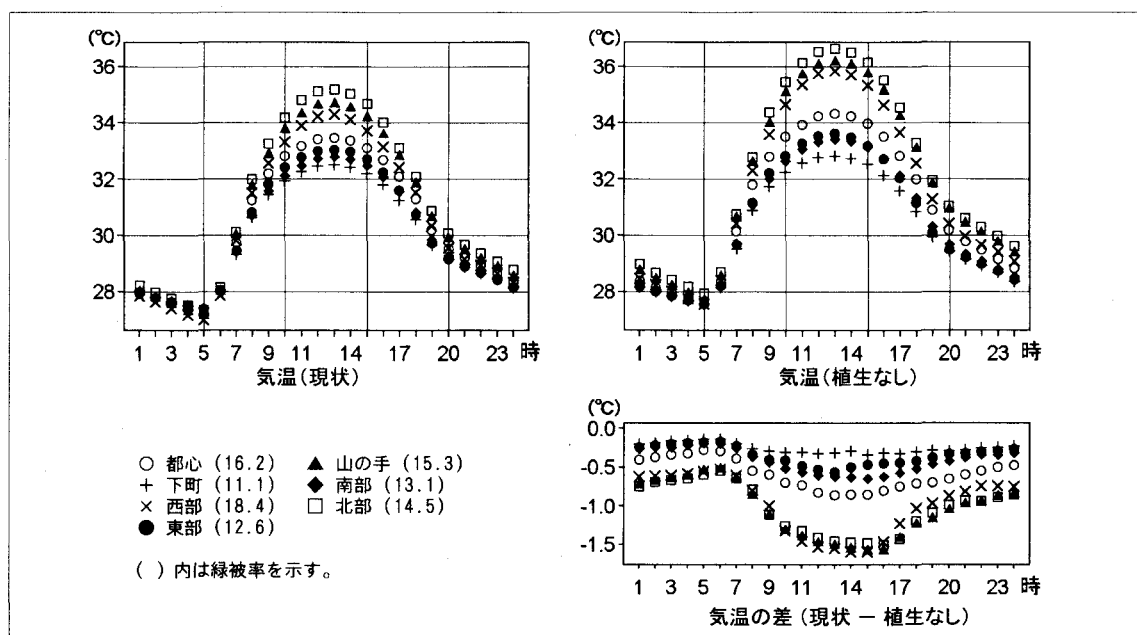


図-10 ブロック別の気温日変化とその差

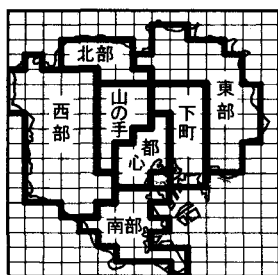


図-9 各ブロックとグリッドの対応

分かる。これは主に気温低下にともなう海風の減退によると考えられる。またベクトル差から、対象地域北部を中心とし相対的に発散の成分が強まっていることが分かる。これは植生の気温低下効果により、都市の高温化に伴う風の収束の成分が弱められているためであると解釈できる。

次に植生の気温低下効果の日変化パターンについて分析する。ここでは空間分布形は省略し、図-9に示した各ブロックの平均値のみの検討とする。なおこのブロック分けは、東京都の経年的な緑被率調査の資料²⁰⁾に合わせて設定したものである。また若干のタイムラグはあるが、各ブロックの植生の状況や緑化施策についても東京都により報告されている²¹⁾。

各ブロックの気温および気温低下効果を図-10に示す。この図から気温低下効果は日中に生じていることが分かる。植生による気温低下効果は主に潜熱輸送量の増大という形で生じるため、気温が高い日中に気温低下効果が強まっているものと解釈できる。都市域では夏季の日中は空調用エネルギー消費や電力ピーク負荷とも関連して暑熱環境が最も深刻な問題となるため、植生の気候緩和効果は熱環境改善に貢献して

いると言える。

またそれぞれのブロックを比較すると、気温低下効果は下町、東部、南部ブロックでは小さく、西部、北部、山の手ブロックでは大きい。この分布形から、前述した通り海風の影響が大きいことが推察される。そこでこうした地域条件による植生の影響の生じやすさについて明らかにするための実験として、緑被率を全て均一に15%として同様のシミュレーションを行った(図-11)。このケースでは、緑被率データ適用範囲の水域以外のメッシュを全て緑被率15%とした。図-11から、緑被率を均一にしても下町、東部、南部ブロックが小さいことから、やはり海風の影響が大きいと思われる。植生の効果が地域条件により大きく異なるということは都市緑化や緑地保全の施策を進める上で重要な知見である。ただしこの理由に関しては、沿岸域では風上が海であるため移流に植生の影響が含まれていないこと、風速が大きいため上空へ拡散されやすいこと、相対的に気温が低いため潜熱輸送が生じにくいことなど多数考えられるため、解明には今後さらなる検討が必要である。

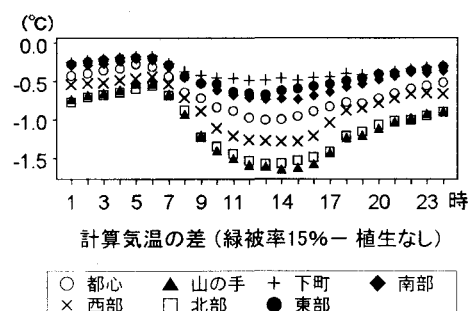


図-11 緑被率を全て15%とした場合

4. まとめ

本研究ではメソスケール気象モデルにより東京における植生の気候緩和効果について評価した。とくに衛星リモートセンシングにより作成した緑被率データを用い、街路樹などの土地利用データでは判別できない植生を反映した形で評価した点に本研究の特徴がある。

まず夏季の典型日を選択してシミュレーションを行い現状再現性を検証した。この結果、従来法である土地利用データのみのシミュレーションと比較し、緑被率データ適用により植生の効果がよりの確に再現されていることが確認された。

次に植生の気候緩和効果を明らかにするため、植生が存在しない場合を想定して同様の計算を行い結果を比較した。この結果、夏季の典型日において植生により日中に約1.5℃の気温低下効果が生じていることが明らかになった。この気温低下効果の鉛直分布や日変化パターン、風向・風速への影響についても明らかにした。

本研究により植生は暑熱環境の緩和に大きく貢献していることが検証された。今後は都市緑化や緑地保全施策について、熱環境改善効果の評価や緩和策の提案を行っていく予定である。また本研究では緑被率のみに従って植生面の地表面パラメータを設定しているが、実際には植生の種類や分布状況、気象条件による植生の生理的機能の違いなど様々な要因が影響していると考えられる。したがってこうした点の改良が今後の課題として残されている。

謝辞： 本研究を進めるにあたり、多大なご協力と貴重なご指導を頂きました東京大学都市工学研究科の花木啓祐教授、東京都立大学の泉岳樹助手に深く感謝の意を表します。

なお、本研究において初期値作成に用いた気象庁の観測データ（地上気象観測原簿データ、AMeDASデータ、高層気象観測データ）はいずれも気象庁より提供を受けたものである。また検証に用いた高密度都市気候観測網のデータは、科学技術振興事業団戦略的基礎研究プロジェクト「都市ヒートアイランドの計測制御システム」（代表者 久保幸夫）による観測結果である。

参考文献

- Kimura, F. and Takahashi, S. : The effects of land-use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo metropolitan area: a numerical experiment, *Atmos. Environ.*, Vol.25B, No.2, pp.155-164, 1991.
- 渡辺晃久: ヒートアイランド緩和策がエネルギー消費へもたらす影響について, 1998年度 東京大学卒業論文, 1999.
- 三上岳彦, 若林明子, 宇田川満, 伊藤政志: 東京のヒートアイランドに関する研究(その2) -ヒートアイランド改善対策とその効果-, 東京都環境科学研究所年報, pp.49-56, 1997.
- 村上祐二, 岡部篤行, 貞広幸雄, 泉 岳樹: 緑地配置によるヒートアイランド緩和効果, 地理情報システム学会 講演論文集, Vol.7, pp.41-46, 1998.
- 村上周三, 持田 灯, 金 相 璉: 都市気候モデルによる関東地方の流れ場、温度場の数値解析(その1) 緑被率の変化の影響に関する検討, 1994年度 日本建築学会 関東支部研究報告集, pp.77-80, 1995.
- 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熱環境緩和効果の検討, 日本建築学会計画系論文集, No.536, pp.87-94, 2000.
- 大橋征幹, 渡辺一正, 中村泰人, 平岡久司: 住宅地における樹木の風環境調節効果に関する研究(その1) 樹木を含む都市キャンピーモデル, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.795-796, 1993.
- 浦野 明, 稲井康弘, 花木啓祐: 街区における熱環境改善計画の効果に関する熱収支・エネルギー解析, 環境システム研究論文集, Vol.29, pp.253-262, 2001.
- Ichinose, T., Shimodozono, K. and Hanaki, K.: Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo, *Atmos. Environ.*, Vol.33, pp.3897-3909, 1999.
- 一ノ瀬俊明, 下堂 薫和宏, 鶴野伊津志, 花木啓祐: 細密地理情報にもとづく都市気候数値シミュレーション地表面境界条件の高精度化, 天気, Vol.44, pp.785-797, 1997.
- 泉 岳樹, 岡部篤行, 貞広幸雄, 花木啓祐, 一ノ瀬俊明: 首都機能移転による熱環境変化の予測, 環境システム研究, Vol.27, pp.171-178, 1999.
- 平野勇二郎, 泉 岳樹, 柴崎亮介, 一ノ瀬俊明: 衛星リモートセンシングによる緑被率データを用いた都市気候数値シミュレーション, 第16回 風工学シンポジウム論文集, pp.125-130, 2000.
- Pielke, R. A.: A three-dimensional numerical model of the sea breezes over South Florida, *Mon. Weath. Rev.*, Vol.102, pp.115-139, 1974.
- 大濱隆司, 金子慎治, 上野賢仁, 井村秀文: 三次元クロージャーモデルによる都市熱環境構造の解析 -福岡市周辺地域への適応-, 環境システム研究, Vol.23, pp.214-221, 1995.
- 亀卦川幸浩: 熱環境と空調エネルギー需要の相互作用を考慮した都市高温化対策の評価, 東京大学博士論文, 2001.
- 平野勇二郎, 安岡善文, 柴崎亮介: 都市域を対象としたNDVIによる実用的な緑被率推定, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.22, No.2, pp.163-174, 2002.
- 近藤裕昭: 人間空間の気象学, 朝倉書店, 2001.
- Kimura, F. : Heat flux on mixtures of different land-use surface: test of a new parameterization scheme, *J. Meteor. Soc. of Japan*, Vol.67, pp.401-409, 1989.
- 科学技術振興事業団 戦略的基礎研究「ヒートアイランドの計測制御システム」(代表者 久保幸夫) 中間報告書, 1999.
- 東京都環境保全局: 平成10年度 東京都環境白書(資料集), 1999.
- 東京都環境保全局: '91東京都緑の倍增計画, 1991.

(2002. 9. 30受付)