

都市緑化によるヒートアイランド緩和効果とその省エネルギー効果の検討 Mitigation of Heat Island Effects and Energy Saving by Means of Urban Greening

平野勇二郎¹、泉 岳樹²、柴崎亮介³、一ノ瀬俊明⁴
Yujiro HIRANO¹, Takeki IZUMI², Ryosuke SHIBASAKI³ and Toshiaki ICHINOSE⁴

ABSTRACT: This paper describes the effects of urban greening on heat island phenomenon and energy consumption level for air conditioning in Tokyo during summer. Vegetation cover ratio was estimated using the normalized difference vegetation index (NDVI) derived from satellite remote sensing data in the Tokyo Metropolitan Area. The scenario for greening was proposed and vegetation cover ratio after greening was calculated. Using these vegetation cover ratio data for surface boundary condition of meso-scale meteorological model, urban heat island phenomenon was simulated. The results showed that the surface temperature will decrease around 1°C after greening. The amount of energy consumption was then estimated based on these simulated surface temperature. By comparing these results, the effects of urban greening on the energy consumption level was revealed. The result implies that heat island mitigation by urban greening can reduce energy consumption for air conditioning by 4-7% in the Tokyo Metropolitan Area in summer.

KEYWORDS: Urban Greening, Heat Island, Energy Consumption, Meso-scale Meteorological Model.

1 はじめに

今日、東京においてヒートアイランド現象がきわめて顕著に生じており、深刻な問題となっている¹⁾。ヒートアイランド現象に関しては、夏季の冷房用エネルギー消費量の増大、電力ピーク負荷の増大、熱帯夜の増加、集中豪雨の増加などさまざまなインパクトが指摘されており、今後、適切な緩和策を行っていく必要があると言える。しかしながら東京の気候では、ヒートアイランド現象により冬季の暖房用エネルギー消費量が減少する効果が大いという指摘もあり²⁾、緩和策に関しては慎重な検討が必要である。このため、主に夏季に強い効果が得られるヒートアイランド緩和策として、落葉樹による緑化が有効であると考えられる。

そこで本研究は東京都心部を対象とし(図1)、都市緑化によるヒートアイランド現象の緩和効果とその省エネルギー効果を算定することを試みる。

2 緑被率の推定

まず衛星リモートセンシングにより東京の現状の緑被率を推定した。

緑被率の推定手法は数多く提案されているが、本研究では最も一般的な手法の一つとして、NDVI (Normalized difference vegetation index; 正規化植生指標) を用いた線形回帰による手法³⁾を選択した。NDVIの計算式を式1に示す。



図1 本研究の対象地域

¹ 東京大学工学系研究科社会基盤工学専攻

² 東京大学工学系研究科都市工学専攻

³ 東京大学空間情報科学研究センター

⁴ 国立環境研究所 地球環境研究センター

Department of Civil Engineering, University of Tokyo

Department of Urban Engineering, University of Tokyo

Center for Spatial Information Science, University of Tokyo

CGER, National Institute for Environmental Studies

$$NDVI = \frac{IR - VIS}{IR + VIS} \quad (1)$$

IR: 近赤外バンド

VIS: 可視バンド

本研究で用いたリモートセンシングデータは1997年7月5日に取得されたJERS-1 (Japanese Earth Resources Satellite-1) によるOPS (Optical Sensors) のデータ (以下、衛星データと呼ぶ) である。都市の複雑な地表面構成を把握するために利用できる解像度であり、また1シーンで図1の対象地域を包含するデータとしてこれを選択した。

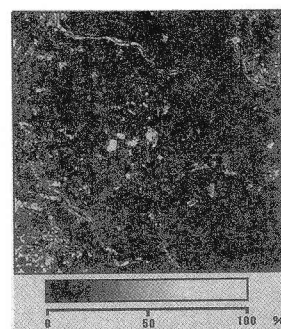
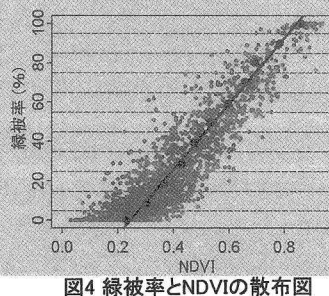
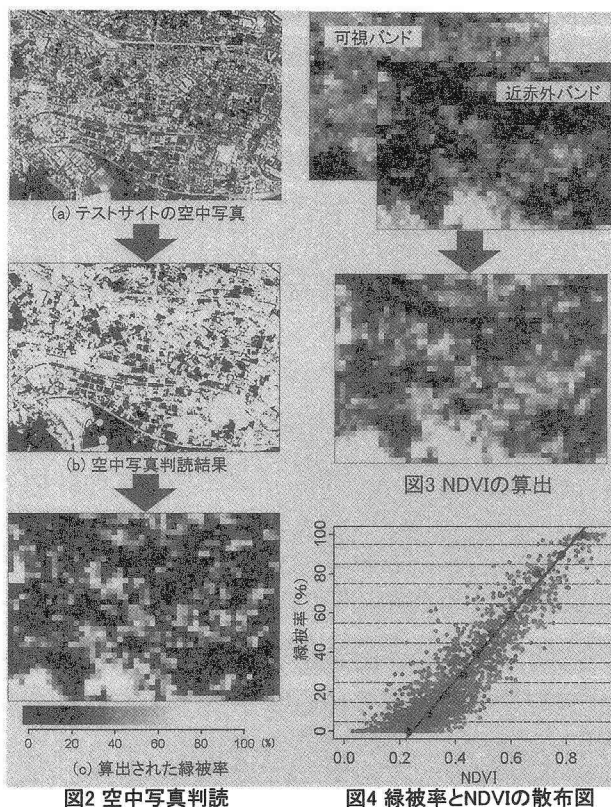
まず、地上解像度を40mと設定し、この衛星データの幾何補正を行った。また放射伝達モデルMODTRAN3.7を用い、大気補正を行った。

次に緑被率の推定式作成および精度検証のためにテストサイトを設定し、空中写真判読により算出した緑被率とNDVIの分布との関係を調べた。空中写真は衛星データが取得された翌日の1997年7月6日に撮影されたものである。空中写真判読結果を図2、NDVIを図3、これらの散布図を図4に示す。NDVIの計算には、可視バンドはBand2、近赤外バンドはBand3を用いた。図4から、このテストサイトは緑被率が低い方に点の分布が偏っているため、このまま回帰式を作成すると緑被率が高い点における誤差が大きくなる可能性がある。そこで図4に点線で示した通りこれを11の階級に分け、各階級ごとに緑被率およびNDVIの平均値を計算した (図4黒丸)。その結果、概ね直線的な分布であることが分かった。この階級別の平均値を用いて回帰式を作成し、

$$y = -38.03 + 162.80 x \quad (2)$$

y: 緑被率(%) x: NDVI

を得た。この回帰式を対象地域を含む衛星データに適用し、緑被率を推定した (図5)。ただし、NDVIは画素内の緑被以外の部分の影響を受けやすいと言われているため、緑被率が低い都心部では誤差が生じやすいと考えられる。したがって、今後はより厳密な精度検証と高精度化を行う必要がある。



3 緑化シナリオの設定

ここでは評価対象とする緑化のシナリオを設定した。本来なら現実的な東京の緑化可能性を踏まえて設定すべきであるが、これに関して厳密な検討を行うことは困難である。このため本研究では、前述した土地利用データで「宅地」に含まれるカテゴリーについて、岩尾ら⁹⁾による建物用途別の緑化可能面積の調査結果を参考に、表1の通りに最大緑被率を設定した。この表1に従い、図5の推定緑被率よりも表1の方が値が大きいメッシュを表1の値と置き換え、これを緑化シナリオとした(図6)。なお、土地利用データは商業用地と業務用地が区別されておらず、また岩尾ら⁹⁾の調査ではオフィスビル等のデータがないため、商業・業務用地はすべてスーパーの値を用いた。商業・業務用地の法定建ぺい率は主に60～80%であり、東京都の条例の原則的基準に従い非建ぺい地の20%が緑化されると仮定すれば、これは概ね妥当な値であると考えられる。また、岩尾ら⁹⁾は公共施設などについても緑化可能面積の調査を行っているが、土地利用データでは建物用途を特定できないので、本研究では用いていない。

ただし、岩尾ら⁹⁾による調査結果は熊本市の大規模施設を対象に調査したものである。このため本来は東京にこのまま適用することは適切ではないが、あくまで概算値としてこのデータを用いた。この緑化シナリオはあくまで本研究で評価を試みるために仮定したものあり、現実の東京の緑化可能性に関しては、さらに詳細な調査が必要である。

4 気象モデルと計算領域

本研究では、前述した現状および緑化後のそれぞれの緑被率データを用い、気象モデルによりヒートアイランド現象のシミュレーションを行う。気象モデルは、Pielke⁹⁾を原型としたコロラド州立大学メソスケールモデル(CSU-MM)に、都市の影響の的確な再現のため、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ものである。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¹⁰⁾⁾、説明は省略する。モデルの詳細に関しては文献1)を参照されたい。

シミュレーションを行うグリッドとして図1の対象地域を15(東西方向)×18(南北方向)に分割し、約2km×2kmのグリッドとした。また、この領域の外側は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で、海陸風などの局地循環を再現するために十分な範囲として、約500km×500kmの領域を設定した。また、鉛直方向は上空4km、地下50cmまでを不等間隔格子でそれぞれ17層、11層に分割した。

5 緑被率データの気象モデルへの組み込み

ここでは、気象モデルに前述した緑被率データを組み込む方法について説明する。

まず既往研究¹⁰⁾⁾において用いられている地表面パラメータのデータセットを表2に示す。従来、こうしたパラメータを設定し、土地利用データを用いてこれらの分布を得るという方法が一般的に行われている。本研究ではこれらの土地利用項目は、表2に土地被覆カテゴリーとして記し

表1 緑化後の緑被率の設定

土地利用項目	岩尾ら ⁹⁾ による調査の区分	最大緑被率
工業用地	工場倉庫	6.3 %
商業・業務用地	スーパー	4.8 %
一般低層住宅 密集低層住宅	戸建住宅	36.5 %
中・高層住宅地	住宅団地	13.0 %

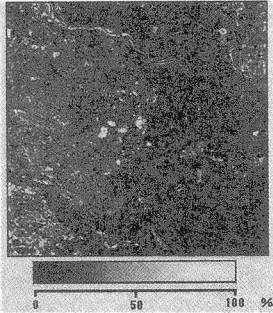


図6 緑化シナリオによる緑被率

た通りに読み替え、土地被覆別のパラメータとして用いる。なお「 」をつけて表記してある語句は、ここで便宜的に用いた土地被覆カテゴリーの呼び名である。

既往研究では、土地利用データとして国土数値情報を用いた例が多い。これは約100m程度のメッシュサイズで日本全国をカバーする土地利用データである。しかしながら、本研究では前述した衛星データによる推定緑被率と対応させる必要があるため、このデータの分解能では不十分であると判断した。そこで、より高分解能である土地利用データとして細密数値情報による10mメッシュ土地利用データ（1994年）を用いた。これを4×4メッシュの最頻値により40mメッシュのデータとし、緑被率のデータにメッシュを対応させた。

これに前述した緑被率データを適用するため、表3の通りに各土地利用項目に対して、土地被覆カテゴリーの組み合わせを設定した。なお、農地と水域に関しては緑被率のデータを用いず、従来通り表2の土地利用別地表面パラメータを適用した。農地に関しては、緑被面は主に農作物であるから「樹木」のパラメータを与えることは不適切である。また農作物の地表面パラメータを得ることは困難であった。そこで平均化された値として、表2の土地利用別パラメータをそのまま用いることが適切であると判断した。河川・湖沼等のカテゴリーには河川敷も含まれるが、これも適切な地表面パラメータの設定が困難であったため、すべて水面のパラメータを用いた。これらは誤差要因となるが、本研究の対象地域では農地や河川敷の面積はきわめて小さいため、この影響は無視できると考えられる。

これらを用いて、地表面パラメータの分布を設定した。まず表3に従い、土地利用データを用いて各40mメッシュの緑被面・非緑被面の土地被覆カテゴリーの組み合わせを設定し、これらの面積比を図5、図6の緑被率データで与えた。この各カテゴリーの面積比を集計することにより、数値モデルの各グリッドについて土地被覆率を算出した。その上で表2の各土地被覆カテゴリーの地表面パラメータを土地被覆率により加重平均した。ただし、この衛星データでは1シーンで計算領域全体を扱うことはできないので、対象地域を含むシーン（PATH:064 ROW:241）の範囲外では従来の方法と同様に国土数値情報を用い、表2の土地利用別パラメータにより設定した。

6 シミュレーション結果とエネルギー消費量推定

前章で設定した地表面パラメータを用いてCSU-MMによる気象シミュレーションを行った。対象日は太平洋高気圧に覆われた夏季の晴天日が連続した期間として、1998年7月3～7日を選択した。ただし本研究は特定の1日の気象現象の再現をすることを目的にしているわけではないので、

表2 地表面パラメータ¹⁾²⁾⁷⁾と土地被覆カテゴリーの設定

土地利用区分	粗度 (cm)	蒸発効率	アルベド	密度 (g/cm ³)	比熱 (cal/g/K)	熱拡散係数 (cm ² /s)	土地被覆 カテゴリー
田	10	0.50	0.17	1.8	0.28	0.0053	「田」
畑	10	0.30	0.17	1.8	0.28	0.0053	「畑」
果樹園	50	0.30	0.16	1.8	0.28	0.0053	
その他畑	50	0.30	0.16	1.8	0.28	0.0053	
森林	50	0.35	0.16	1.8	0.28	0.0053	「樹木」
荒地	15	0.20	0.14	1.8	0.28	0.0053	「土壌」
建物用地	50	0.00	0.18	2.4	0.21	0.0072	「人工構造物」
交通用地	5	0.00	0.18	2.1	0.21	0.0038	「道路」
その他の用地	20	0.03	0.18	1.8	0.28	0.0035	
河川・湖沼	0	1.00	0.08	1.0	1.00	0.0033	
海浜	5	0.25	0.18	1.8	0.28	0.0053	
海面	0	1.00	0.08	1.0	1.00	0.0033	「水面」

表3 土地被覆カテゴリーの設定

細密数値情報の 土地利用項目	土地被覆カテゴリーの 組み合わせ (緑被面+非緑被面)
山林・荒地等、造成地、 公園・緑地等	「樹木」+「土壌」
田	「田」
畑・その他の農地	「畑」
宅地、その他の公共公 益施設用地、その他	「樹木」+「人工構造物」
道路用地	「樹木」+「道路」
河川・湖沼等、海	「水面」

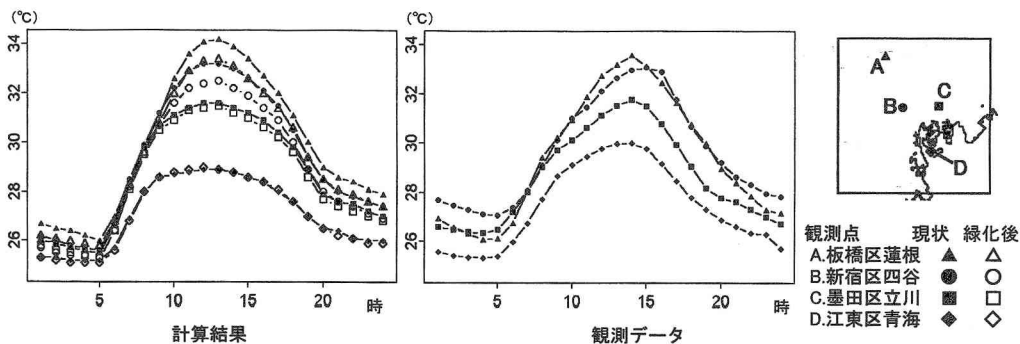


図7 気温日変化の計算結果と観測データ

夏季の典型的な気象条件として、この5日間の平均値により初期値を作成した。設定した初期条件を表4に示す。

この計算結果の妥当性を検証するため、高密度都市気候観測網[®]の気象観測点のうち4箇所を選択した。これらの点における計算結果および観測データを図7に示した。この図から、午前中の昇温パターンや夜間の温度分布などに若干の相違があるが、他の傾向は概ね一致していることが分かる。そこでこれはほぼ妥当な結果であると判断した。

表4 初期条件

対象日	1998年 7月3～7日
地上気圧(hPa)	1005
地上気温(°C)	28.75
海水面温度(°C)	24.0
温位勾配(k/m)	0.0046
相対湿度(%)	58.7
風向	SW
風速(m/s)	3.8

この計算結果の9、15、21時の例を図8に示す。図8から、緑化シナリオの適用により、都心部では約1°Cのヒートアイランド緩和効果が生じていることが分かる。東京湾の埋立地付近は海風の冷却効果のために気温が低く、緑化による変化はほとんど見られない。また、風速は緑化した場合の方がわずかに減少している。これは地表面と海面の温度差が小さくなったことによると考えられる。

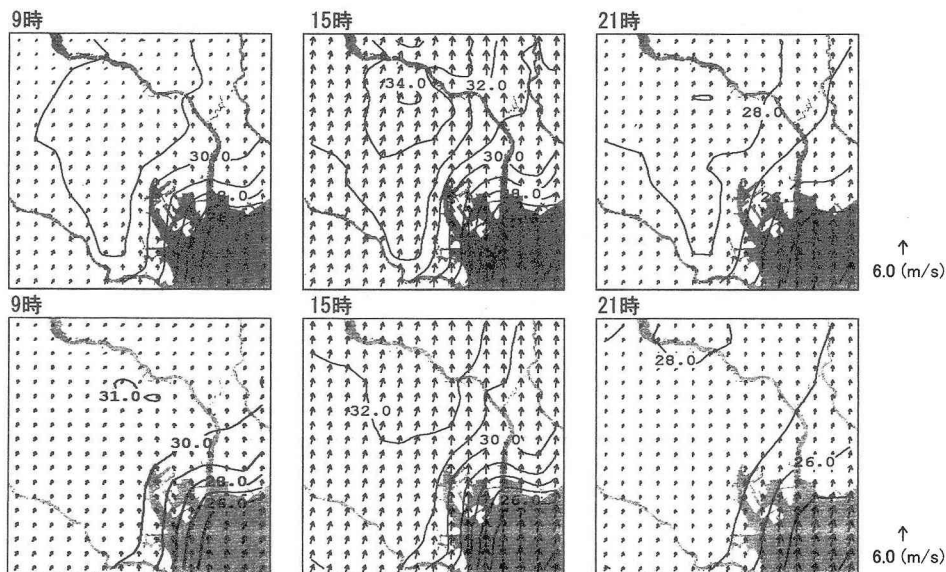


図8 シミュレーション結果（上段：現状、下段：緑化シナリオ適用）

次にこの計算結果を用い、予想される冷房用エネルギー消費量を算出した。計算方法やデータは全て文献3)と同様である。算出されたエネルギー消費量の時刻別パターンを図9に示す。この結果、業務部門では4%、家庭部門では7%程度、冷房用エネルギー消費量が減少していることが分かる。今後はこの結果の詳しい解析を行う予定である。

7 まとめ

本研究では東京都心部を対象とし、都市緑化によるヒートアイランド現象の緩和効果およびその省エネルギー効果を算定を試みた。このため、まず衛星リモートセンシングにより、対象地域における現状の緑被率を推定した。また、土地利用形態別に緑化可能性を仮定し、緑化シナリオを設定した。次にこの現状の緑被率および緑化シナリオに基づく緑被率をメソスケール気象モデルの地表面境界条件として用い、ヒートアイランド現象のシミュレーションを行った。この結果、緑化により日中に1℃程度のヒートアイランド緩和効果が生じた。次にこのシミュレーション結果から対象地域の冷房用エネルギー消費量を推定し、緑化による省エネルギー効果を明らかにした。

ただし、緑被率推定結果や緑化シナリオなどに関してはまだ多くの課題が残されているため、今後はさらに詳細な検討を行う必要がある。また、最終結果に関して、今後さらに詳細な解析を行う予定である。

なお、本研究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）の一環として行われた。

参考文献

- 1) 一ノ瀬俊明・下堂蘭和宏・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.
- 2) Ichinose, T. Shimodonzono, K. and Hanaki, K. : Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo, *Atmospheric Environment*, 33, pp.3897-3909, 1999.
- 3) 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，pp.83-96，1999.
- 4) 本條 毅・高倉 直：植生指数（Vegetation Index）を用いた都市における緑被率の推定，*造園雑誌*，Vol.52，No.5，pp.283-287，1989.
- 5) 岩尾 襄・萩島 哲・文 泰憲：大規模施設の緑被面積と接道緑被長さの施設用途別特性について，*日本建築学会計画系論文集*，No.460，pp.109-119，1994.
- 6) Pielke, R.A. : A three dimensional numerical model of the sea breezes over South Florida, *Monthly Weather Review*, Vol.102，pp.115-134，1974.
- 7) 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.
- 8) 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.

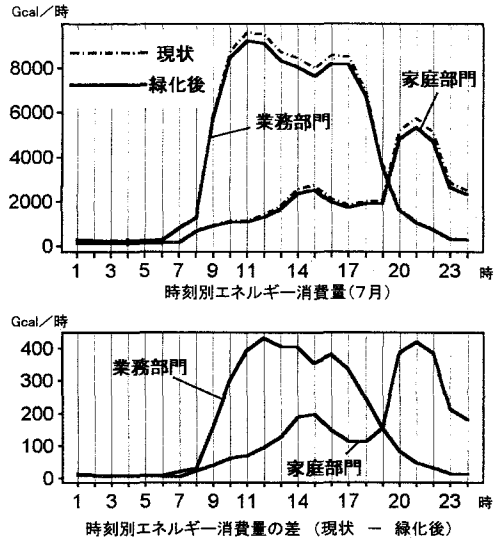


図9 冷房用エネルギー消費量算定結果