

衛星リモートセンシングによる都市の地表面熱慣性の導出手法

平野 勇二郎, 稲村 實, 外岡 秀行, 井村 秀文

An estimation method of urban thermal inertia using satellite remote sensing data

Yujiro HIRANO, Minoru INAMURA, Hideyuki TONOOKA and Hidefumi IMURA

Abstract : The purpose of this research is to propose an estimation method for thermal inertia of urban land surface. We developed a one-dimensional surface heat-budget and heat-conduction model and determined the thermal inertia, using satellite-derived temperature data. Surface thermal inertia parameters obtained in this study have been incorporated into the Colorado State University Mesoscale Model, and a realistic meteorological simulation was conducted.

Keywords : 都市熱環境(urban thermal environment), 地表面温度(surface temperature), 熱慣性(thermal inertia), 衛星リモートセンシング(satellite remote sensing)

1. はじめに

大気シミュレーションによる都市ヒートアイランドや大気汚染の予測を高精度化するためには地表面における蓄熱や熱フラックスなどの熱収支計算を高精度化することが重要である。一般に海陸風などの局地循環は、まず地表面のアルベドや熱慣性などの物理特性に空間分布があり、このため日射を受けた時の表面温度の空間的なばらつきが生じ、これにより気圧の勾配が生じ、風が生じるというメカニズムで生じる。したがって、局地気象モデルで局地循環を的確に再現するためには、地表構成物の物理特性の設定や地表面熱収支の計算を高精度に行なうことが不可欠である。実際、著者らは既に衛星リモートセンシングから得られた植生分布を局地気象モデルの地表面に組み込む方法を提案し、気象シミュレーションを高精度化できることを実証した(平野ほか, 2004; Hirano et al., 2004)。しかしながら従来の多くの研究では、地表面の物理特性をあらわすパラメータ(地表面パラメータ)は、地表面被覆と完全には対応していない土地利用データなどで与えること

が一般的であった。著者らの既報(平野ほか, 2004; Hirano et al., 2004)においても、土地被覆カテゴリーごとに地表面の物理特性を表現するパラメータを固定するという点は従来法と同様であり、シミュレーション結果は設定値に依存するという問題点があった。一方、衛星リモートセンシングを用いて地表面熱収支を算定した既往研究は多いが(例えば, Boegh et al., 2000; Kato and Yamaguchi, 2005 など), その多くは衛星観測による表面温度と経験的なパラメータ等を用いた解析的な研究である。この方法では衛星データ取得時以外では算定ができないため、時々刻々と変化する地表面熱収支や温度の動態を解明するには必ずしも十分ではない。そこで本研究は、地表面の蓄熱特性を表現するパラメータである熱慣性に着目し、衛星リモートセンシングと1次元熱収支・熱伝導モデルとを結びつけることにより、現実的なパラメータを取得する手法を提案する。

2. 本研究における提案手法

本研究の手法では1次元熱収支・熱伝導モデルを構築し、シミュレーションにより得られる地表面温度と、日中と夜間の衛星観測による地表面温度データとを合わせることでパラメータを取得する。この手法

平野 : 〒464-8603 愛知県名古屋市中千種区不老町
名古屋大学大学院環境学研究科
E-mail: hirano@urban.env.nagoya-u.ac.jp

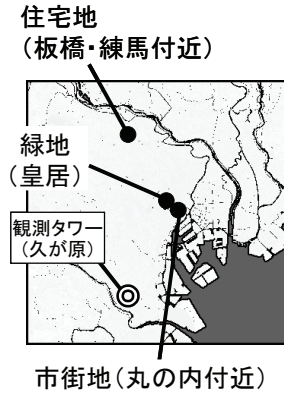


図1 本研究の対象地域

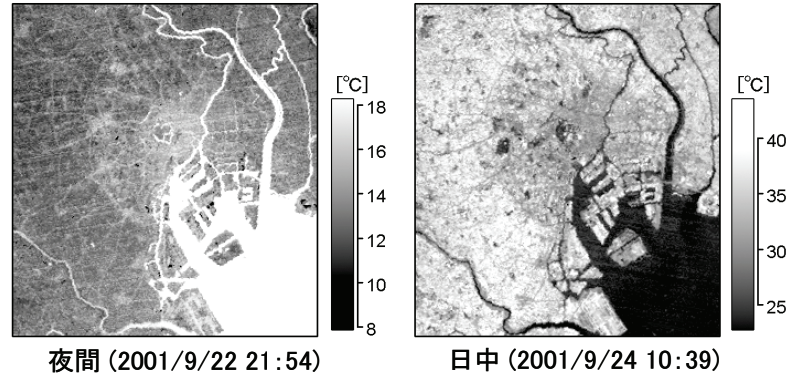


図2 Terra 衛星 ASTER/TIR による地表面温度

では、経験式ではなく物理的な計算によりパラメータを得る点に特徴がある。

本研究で構築した1次元熱収支・熱伝導モデルの基礎方程式を次に示す。

$$(1 - \text{ref})S^{\downarrow} + \varepsilon(\sigma T_s^4 + L^{\downarrow}) + H + IE + G = 0 \quad (1)$$

$$H = c_p \rho C_H U (T_s - T_a) \quad (2)$$

$$IE = l \rho \beta C_H U (q_{SAT} - q) \quad (3)$$

$$G = -\lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial z} \quad (4)$$

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = \frac{\lambda_g}{c_g \rho_g} \frac{\partial^2 T_g}{\partial z^2} \quad (5)$$

連続した日中と夜間の表面温度データを用いることで、熱収支シミュレーションによる地表面温度と衛星リモートセンシングによる地表面温度とを合わせる形で2パラメータの同定が可能である。この方法では地表構成物の体積熱容量 $c\rho$ と熱伝導率 λ とを個別に同定することができないが、地表面の蓄熱特性を表現する上では熱慣性 ($\sqrt{c_g \rho_g \lambda_g}$) が得られれば必要十分である。また、顕熱フラックスと潜熱フラックスは類似した日変化パターンを示すため、本研究の方法では蒸発効率 β とバルク輸送係数 C_H とを個別に同定することは困難である。そこで本研究では簡便法として、まず植生がほとんど存在しない市街地において $\beta = 0$ として C_H を算出し、次に緑地と住宅地において、 C_H は市街地と同じであると仮定して β を

算出した。したがって C_H 、 β の分離には誤差が含まれる可能性があるが、顕熱・潜熱フラックスと地中熱伝導の日変化パターンは大きく異なるため、熱慣性については概ね安定した値が得られることは感度解析により確認済みである。

3. パラメータ同定の結果

前述の手法に従い、以下の通りにパラメータ同定を行なった。対象地域は東京都心部とし、図1の通りに典型的な市街地、緑地、住宅地としてそれぞれ丸の内付近、皇居、板橋・練馬付近を選択した。解析対象日は、Terra 衛星 ASTER により連続して夜間、日中の表面温度データ(図2)が取得された2001年9月22日～24日とした。モデルの入力パラメータとなるアルベドおよび射出率は Terra 衛星 ASTER データより取得した(それぞれ図3, 図4)。射出率の算出は、温度－放射率分離により TIR データから算出した各バンドの分光射出率に Ogawa et al. (2002)の方法を適用することで行なった。モデルの境界条件となる日射量や気温等の気象条件は気象庁による観測データを用いた。下向き長波放射はブランドの式を用いて算出した。

パラメータ同定の結果、熱慣性は市街地では 2.96、緑地では 3.71、住宅地では 1.91 (いずれも $[\text{kWs}^{1/2}/\text{m}^2/\text{K}]$) を得た。また前述した条件下で市街地ではバルク輸送係数は $C_H = 0.0037$ 、蒸発効率は緑地では $\beta = 0.30$ 、住宅地では $\beta = 0.03$ を得た。ただし C_H と β の分離については、まだ多くの検討の余地があることは、ここで再度念を押しておく。ここでコ



図3 Terra 衛星 ASTER/VNIR による
地表面アルベド

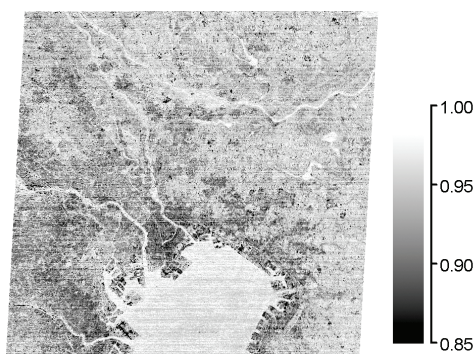


図4 Terra 衛星 ASTER/TIR による
地表面射出率

ンクリートとアスファルトについて素材の体積熱容量と熱伝導率から熱慣性を計算すると、それぞれ 1.88, 0.98 程度(いずれも $[kW s^{1/2}/m^2/K]$)なので、市街地では都市キャノピーの効果により熱慣性が非常に大きな値となっていることが分かる。緑地については、緑葉の樹冠は表面積が大きく、また水分を多く含むため、蓄熱の効果が生じやすいことから、大きな値となったと推察される。

4. タワー観測データとの比較

本研究で得られた地表面熱収支を検証するため久が原に設置された高さ 29m のタワー (Moriwaki and Kanda, 2004) から観測された顕熱フラックス H および潜熱フラックス IE と、本研究における久が原付近の計算結果とを比較した(図 5)。この結果、顕熱・潜熱フラックスとも日中のピークの大きさや午前中の上昇過程など、全体的な傾向としては計算結果は観測値と非常によく一致していると言える。ただし顕熱・潜熱フラックスのいずれも午後に計算結果の

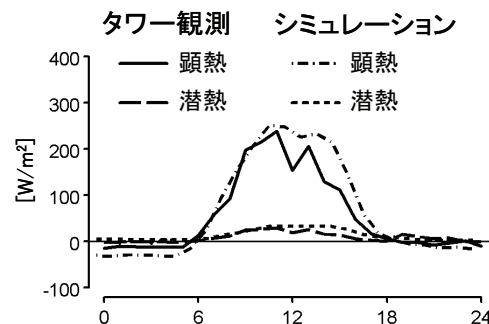


図5 タワー観測およびシミュレーションによる
潜熱・顕熱フラックスの日変化

方が過大であったため、今後原因究明する必要がある。またこの検証方法は、タワーから観測した熱フラックスのソースエリアと地表面熱収支の計算エリアとを完全に対応させることが難しいという問題点があるため、今後より正確な検証を行う予定である。

5. 気象シミュレーションへの適用例

前述の1次元熱収支・熱伝導モデルでは大気側の境界条件は観測値を用いたが、得られたパラメータを気象モデルに適用することで、大気のシミュレーションについても高精度化が期待できる。そこでこれらのパラメータをメソスケール気象モデル CSU-MM の地表面部分に組み込み、気象シミュレーションを試みた(図 6)。ここでは計算対象日は東京における夏季の典型的な晴天日とした。この計算結果の検証のため、気象庁による気温観測データと比較した(図 7)。この図から計算値は観測値と比較して日中の気温はやや低めであるものの、地域性は概ね表現されていることが分かる。ただし気象シミュレーションについてはまだ試行段階であり、実際には地表面熱収支の解法やグリッド内に複数の土地被覆が混在した場合のパラメタリゼーション方法などについて、今後改良が必要である。

6. まとめ

本研究では衛星リモートセンシングを活用して地表面熱慣性のパラメータを取得する手法を提案した。この手法は、1次元熱収支・熱伝導モデルを構築し、これと日中・夜間の衛星データとを用いて、経験式ではなく物理的な計算によりパラメータ同定を行なう点

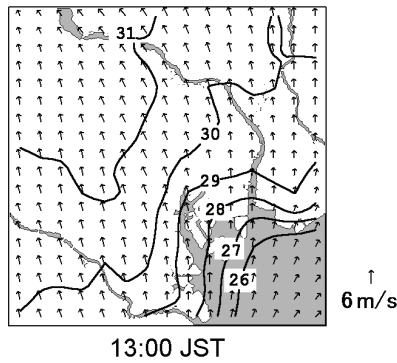


図6 CSU-MMによるシミュレーション結果
(地上 6m, 13時の例)

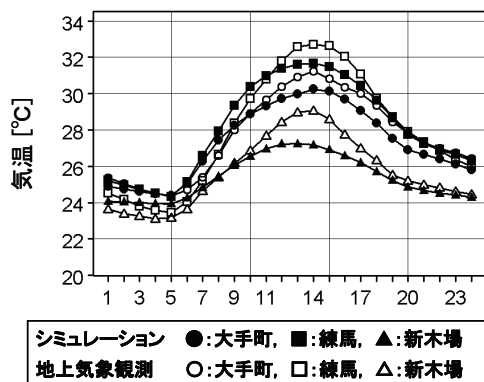


図7 地上気象観測およびシミュレーション
による気温の日変化

に特徴がある。このパラメータ同定の際の熱収支シミュレーションとタワー観測のデータとを比較した結果、よく一致することが確認された。次に得られたパラメータをメソスケール気象モデルCSU-MMの地表面部分に組み込み、気象シミュレーションを行なった。ただし、これについては地表面のパラメタリゼーション方法などにまだ多くの問題が残されており、今後改良が必要である。

謝辞 本研究を進めるにあたり群馬大学大学院工学研究科修士課程の斉藤秀樹氏にご協力を頂いた。本研究は、地球環境研究総合推進費「低炭素型都市づくり施策の効果とその評価に関する研究」(代表者:井村秀文)および文部科学省科学研究費補助金・若手研究(B)(課題番号:20710022)の支援により実施された。ここに記して謝意を表します。

記号 $S^{\downarrow}$: 下向き短波放射 [W/m^2], $L^{\downarrow}$: 下向き長波放射 [W/m^2], ref : アルベド [-], σ : ステファンボルツマン係数 ($=5.670 \times 10^{-8}$) [$\text{W/m}^2/\text{K}^4$], ε : 地表面の射出率 [-], T_s : 表面温度 [K], H : 顕熱フラックス [W/m^2], LE : 潜熱フラックス [W/m^2], G : 地中熱伝導 [W/m^2], c_p : 空気の定圧比熱 [J/kg/K], ρ : 空気密度 [kg/m^3], C_H : 顕熱のバルク輸送係数 [-], U : 風速 [m/s], T_a : 気温 [K], l : 水の気化潜熱 [J/kg], β : 蒸発効率 [-], q_{SAT} : 表面温度に対する飽和比湿 [kg/kg], q : 比湿 [kg/kg], T_g : 地中温度 [K], z : 深さ [m], $c_g \rho_g$: 地中の体積熱容量 [$\text{kJ/m}^3/\text{K}$], λ_g : 地中の熱伝導率 [W/m/K], t : 時間 [sec]

参考文献

- 平野勇二郎・安岡善文・一ノ瀬俊明 (2004) 衛星リモートセンシングとメソスケール気象モデルを用いた都市緑地のヒートアイランド緩和効果の評価, 環境科学会誌, 17(5), 343-358.
- Boegh, E., Schelde, K. and Soegaard, H. (2000) Estimating transpiration rates in a Danish agricultural area using landsat thermal mapper data, *Phys. Chem. Earth (B)*, 25(7-8), 685-689.
- Hirano, Y., Yasuoka, Y. and Ichinose, T. (2004) Urban climate simulation by incorporating satellite-derived vegetation cover distribution into a mesoscale meteorological model, *Theor. Appl. Climatol.*, 79, 175-184.
- Kato, S. and Yamaguchi, Y. (2005) Analysis of urban heat-island effect using ASTER and ETM+ Data: Separation of anthropogenic heat discharge and natural heat radiation from sensible heat flux, *Remo. Sens. Environ.*, 99, 44-54.
- Moriwaki, R. and Kanda, M. (2004) Seasonal and diurnal fluxes of radiation, heat, water vapor and CO_2 over a suburban area. *J. Appl. Meteor.*, 43, 1700-1710.
- Ogawa, K., Schmugge, T., Jacob, F. and French, A. (2002) Estimation of broadband land surface emissivity from multi-spectral thermal infrared remote sensing, *Agronomie*, 22, 695-696.