

(64) 熱赤外リモートセンシングを活用した 都市域の地表面熱収支シミュレーション手法

平野勇二郎^{1*}・藤田 壮¹・外岡秀行²

¹独立行政法人国立環境研究所アジア自然共生研究グループ (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

²茨城大学工学部情報工学科 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1 S1棟708)

* E-mail: yhirano@nies.go.jp

本研究の目的は都市域を対象とし、衛星リモートセンシングを活用した地表面熱収支のシミュレーションを行う手法を提案することである。既往研究では都市熱環境のシミュレーションを行う際に土地利用データ等を用いて地表面の物理特性を設定することが一般的であったが、土地利用データは現実の土地被覆とは一致しておらず、計算結果はパラメータの設定に依存するという問題点があった。このため本研究では、1次元熱収支・熱伝導モデルを構築し、これと衛星観測された地表面温度とを結びつけることにより、経験式ではなく物理的な計算によりパラメータを取得しシミュレーションを行う手法を提案した。この手法により東京における典型的な市街地、住宅地、緑地においてシミュレーションを行った結果、従来の熱収支モデルでは表現することが難しかった市街地での蓄熱の効果などを再現することができた。

Key Words : urban thermal environment, surface temperature, thermal inertia, satellite remote sensing, heat flux

1. はじめに

近年、ヒートアイランド現象などにより都市熱環境が悪化しており、それに伴い熱中症増加、空調エネルギー需要増大、街路空間の快適性の損失などのさまざまな問題が指摘されている^{1,2}。こうした都市熱環境の問題について、詳細な実態解明や有効な対策を検討するために局地気象モデルが重要な役割を果たしており、今後さらなる高精度化が求められている。

気象モデル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地表面熱収支を精緻に把握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、大気の流れ場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により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^{3,4}。衛星リモートセンシングの技術では広域の現実的な土地被覆状況を把握できるため、例えば住宅地内の庭木や道路用地内の街路樹など、土地利用データでは把握できない詳細な植生の効果を気象モデルに組み込んだことが、気象シミュレーションの精度向上に結び付いたと考えている。しかしながら、気象モデルを用いた多くの既往研究では、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、実際の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に行われている（例えば、Ichinose et al.⁵, Kusaka et al.⁶, Dhakal and Hanaki⁷など）。また、実際には著者らの既報^{3,4}においても、衛星リモートセンシングを用いることにより、土地利用データを用いた場合と比較的に確に実際の土地被覆の分布を反映しているものの、土地被覆カテゴリ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った。このため、シミュレーション結果はパラメータの設定値に依存するという問題点は依然として残されている。

一方、衛星リモートセンシングによる地表面温度データを用いて地表面熱収支を直接計算する研究も数多く行なわれている（例えば、Boegh et al.⁸, Kato and Yamaguchi⁹

など)。衛星リモートセンシングでは現実的な広域の地表面温度分布の情報が得られるため、こうした研究事例には地上観測のみでは得難い有益な知見が数多く含まれている。ただし、こうした研究事例の多くは、地表面温度と経験式や経験的なパラメータなどとを結びつけ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地表面温度の動態を解明する上で必ずしも十分ではない。また、計算結果は利用した経験式や経験的なパラメータに依存するという問題点がある。

そこで本研究では衛星リモートセンシングによる地表面温度データを活用し、より現実的な地表面パラメータの取得と地表面熱収支のシミュレーションを行う手法を提案することを目的とした。具体的には、まず1次元熱収支・熱伝導モデルを構築し、これと衛星観測による表面温度分布とを結びつけて熱収支シミュレーションを行う。その際にパラメータ同定を行い、経験式ではなく物理的な計算に基づいてパラメータを取得する点に本研究の提案手法の特徴がある。本研究では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。ただし衛星データ取得時のノイズ等の影響を軽減するため、いずれも目視判読により概ね均質な地表面被覆であると判断されるエリアを抽出し、解析にはそのエリアの平均値を用いた。

2 本研究における提案手法

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式(1)～(5)に示す。本稿では熱収支解析を行う際の熱フラックスの符号は、地表面から熱を放出する方向を正とする。したがって短波・長波放射や顕熱・潜熱フラックスは上向きが正、地中熱伝導は下向きが正である。

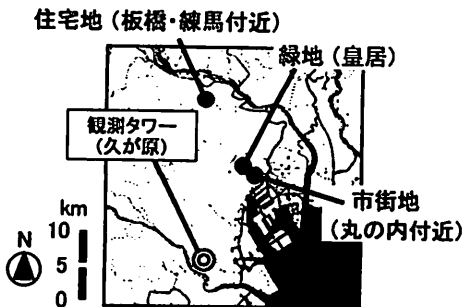


図-1 本研究の対象地域

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

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

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

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

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

式(1)は地表面の熱収支式である。式(1)の放射収支以外の項である顕熱フラックス、潜熱フラックス、地中熱伝導がそれぞれ式(2)～(4)で表現される。この式(2)、式(3)はそれぞれ顕熱、潜熱のバルク式である^{9,10)}。式(4)は温度勾配から熱伝導を算出する式である。ただし、地表面では $T_g = T_s$ である。ここで、式(2)～(4)はいずれも地表面温度 T_g の関数となっており、衛星観測による T_g や気象庁による地上観測データから、式(1)を満たすように未知のパラメータ(C_H , β , λ_g)が求まればよい。しかしながら、式(4)の地中の温度勾配の計算には地中温度が必要であるが、地中温度はパラメータではなく時間変化する上、時間変化が把握できる観測値データが存在しない。このため、衛星データのシーン数を増やしても、その時間の地中温度が未知数として加わるため、式(1)～(4)のみでは、これを連立方程式として解くことはできない。そこで地中温度は式(5)に示した熱伝導方程式から算出することを考える。この場合、式(5)は非定常計算となるため、衛星観測された表面温度 T_g から各パラメータの解析解を得ることは現実的には困難であるが、反対に、まず各パラメータを固定しておき、それに応じた衛星通過時の表面温度を算出することは可能である。したがって、パラメータを少しずつ振って多数のシミュレーションを行い、算出される表面温度と衛星観測による表面温度が合うパラメータを抽出するという手順でパラメータ同定が可能である。ただしこの方法では、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、蒸発効率 β とバルク輸送係数 C_H とを個別に精度よく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。実際には市街地においても街路樹などの微細な植生や土壌面からの蒸発散が生じうることや、市街地と住宅地や緑地とでは幾何形状が異なるため C_H に違いがあることなどが誤差要因となるため、この点は今後検討が

必要である。また厳密には β や C_H は地表面における蒸発散や気流性状によって時間的にも変化する可能性があるが、手法の制約から、本研究では固定値として扱う。 β は植生や土壌などの状態が極端に変化しないような短期間であれば固定値として扱ってよいと考えられる。 C_H についても支配要因は地表面のラフネスであるから、固定値として用いることは、第一近似としては妥当な仮定であると考えている。実際、著者らが従前に建物の屋上緑化面において熱収支観測を行なった結果、観測方法によるばらつきは大きいものの、信頼性のある観測方法による計測値は β 、 C_H とも概ね安定していることを確認している¹²⁾。また、式(5)を加えることで未知のパラメータとして地中の体積熱容量 $c_g \rho_g$ が加わるが、これは本研究では熱伝導率 λ_g と合わせて熱慣性^{13~16)} ($\sqrt{c_g \rho_g \lambda_g}$) という一つのパラメータで表現する。熱慣性は、熱物理係数¹⁰⁾の平方根により定義され、地表面の温まりにくさ、冷めにくさを示す。本研究の手法では、熱伝導率 λ_g と体積熱容量 $c_g \rho_g$ を個別に得ることができないため地中温度の鉛直プロファイルを再現することはできないが、地表面熱収支の解析や地表面温度を算定する上では熱慣性が得られれば必要十分である。これらの前提により、未知のパラメータは市街地では C_H と熱慣性、緑地と住宅地では β と熱慣性となり、いずれの計算ケースも2つとなる。そこで、連続した日中と夜間の表面温度データを用いれば、2パラメータを同時に同定することが可能である。なお、用いる衛星データのシーン数を増やせば同定できるパラメータ数は増やせるが、前述した通り顕熱フラックスと潜熱フラックスは日変化パターンが類似しているため、この方法では C_H と β を精度よく分離することはやはり困難であると考えている。一方、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。なお、熱慣性については文献¹⁷⁾、バルク輸送係数、蒸発効率の詳細については文献^{10, 11)}を参照されたい。

3. パラメータ同定と熱収支解析の結果

前述の手法に従い、衛星観測による表面温度と前述のモデルにより計算される表面温度とを合わせることにによりパラメータ同定を行なった。本研究では利用衛星データはTerra衛星ASTERデータを選択した。著者らはすでに、夏季の大阪市域において衛星・地上同期観測によりASTERによる地表面温度を検証しており、概ね良好な結果を得ている¹⁸⁾。ASTERは熱赤外バンド(TIR)のデータが5バンドに分光されて取得されているため、こ

れらを用いて地表面放射率の影響を比較的軽減して良好な地表面温度のデータが得られるという利点がある。また、一般に人工衛星データは、空間分解能と時間分解能がトレードオフの関係にあるため、都市域の熱環境解析に利用できる高空間分解能のセンサならば、観測頻度は少なからざるを得ない。これに対し、ASTERは地上からの操作でセンサの観測方向を変えるポインティング機能があるため、大都市などの重要地域においては他と比較して観測頻度を上げた観測がなされていることなどから、本研究の目的ではASTERが最適であると判断した。ASTERの大気補正にはWVSアルゴリズム¹⁹⁾を用いた。ASTERの地表分解能はバンドにより異なっており、地表面温度算出に用いたTIRは地上解像度90mである。ただし前述した通り、本研究ではノイズ等の影響を軽減するため、各地点について10画素以上の連続したエリアを抽出し、その平均値を用いた。

解析対象日は、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22~24日とした。本研究の手法が適用可能な気象条件として、衛星データ取得時は晴天であることと、2回の衛星通過

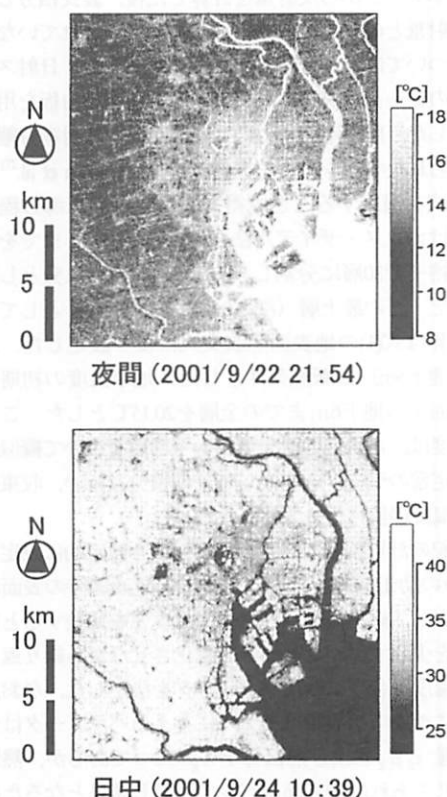


図-2 Terra衛星ASTER/TIRによる地表面温度

の間は無降雨であることは必要条件である。2回の衛星通過の間に雲の影響が生じた場合も、的確な気象データが得られれば本手法は適用可能であるが、気象条件に対する頑健性については今後検討が必要である。本研究では夜間、日中の2度の衛星通過の間は晴天が続いており、熱収支シミュレーションを行う上では攪乱要因が少ない良好な気象条件であった。ただし、9月21日～22日の朝には若干の降雨があったため、衛星データ取得時までの助走計算を行う際には誤差要因となり得る。9月22日の日中は晴天であったため、本研究ではこの影響は無視するが、今後検証が必要である。

モデルの境界条件となる気象条件は気象庁による地上気象観測データから得た。具体的には、気温は気温観測値、短波放射は日射量の観測値をそのまま用いた。比湿は気温、相対湿度、気圧から算出した。長波放射はプランクの式²⁹⁾に基づいて気温と蒸気圧から算出した。地表面のパラメータとして用いるアルベド α_g および射出率 ε は ASTER データから得た。まずアルベドについては、可視・近赤外域の反射率から得た。ただしこのデータは3バンドに分光して取得されているため、標準的な日射スペクトルのデータを用いて、各バンドについて分光反射率データから反射量を計算した後、波長積分した上で入射量との比をアルベドとした。観測されていない波長については、最近隣のパンドで代用した。日射スペクトルのデータは快晴日に分光光度計と標準白板を用いて観測した。射出率 ε については、温度・放射率分離により得られた各バンドの分光射出率に、Ogawa et al.²⁹⁾ が示した式を適用することで得た。式(5)の熱伝導方程式の解法はガウス・ザイデル法を用い、鉛直6m までを不等間隔格子で30層に分割し、タイムステップ1分として計算した。この最上層（深さ0m）では $T_g = T_s$ として、上端境界は式(1)の地表面熱収支式により設定した。最下層（地下6m）は断熱条件とした。地中温度の初期値は、地表面から地下6m までの全層を20.15℃とした。この初期温度は、本研究の対象期間の平均値を用いて擬似的な周期定常のデータを作成して長期積分を行い、収束した地中温度の値により設定した。

上記の計算条件で、各パラメータを暫定的に設定して5日分の助走計算を行なった後に衛星通過時の表面温度を算出し、衛星観測された表面温度とを比較するという作業を少しずつパラメータを変化させながら繰り返し、表面温度が合うようにパラメータを決定した。なお、熱慣性については実際はモデルに与えるパラメータは体積熱容量 $c_g \rho_g$ および熱伝導率 λ_g の2つであるが、熱慣性が同じであれば地表面レベルでは同じ結果となるため、どちらを振っても熱慣性は一つの値に定まる。

パラメータ同定の結果、熱慣性は市街地では 2.583、

緑地では 3.322、住宅地では 1.456（いずれも $[kWs^{1/2}/m^2K]$ ）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 $C_H=0.0027$ 、蒸発効率は緑地では $\beta=0.30$ 、住宅地では $\beta=0.11$ 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。 β について文献値³⁰⁾と比較すると、森林で0.1～0.3、牧草地で0.2～0.4であるから、概ね矛盾しない値である。 C_H は文献値³⁰⁾では森林で0.005、牧草地で0.003であるため、矛盾しない値であることが分かる。ただし C_H は風速の観測高度等に依存するため、ここでの検討はあくまでオーダーチェックである。次にコ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1.89、0.99程度（いずれも $[kWs^{1/2}/m^2K]$ ）なので、本研究の計算結果では市街地において熱慣性が非常に大きな値となっていることが分かる。ここで、素材の体積熱容量と熱伝導率から計算した熱慣性とは、地表面が平坦で一様なコンクリートやアスファルトであった場合の熱慣性を意味する。これに対し、市街地では地表面の起伏による蓄熱量の増大などの都市キャノピーの効果が生じるため、素材の熱慣性よりも大きな値となったものと考えられる。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、熱慣性が大きな値となったと推察される。

シミュレーションの結果得られた地表面温度を図-3に、地表面熱収支を図-4に示す。衛星観測による表面温度では日中は市街地と比較して住宅地の方が高温であったが（図-2参照）、図-3では日中のピークの表面温度がほぼ同程度となっている点が興味深い。住宅地は熱慣性が小さいため、表面温度の日較差が大きく日中は高温となるが、その一方で、市街地は蒸発効率が小さいため平均的に温度が高く、結果としてピークの温度はほぼ同程度となった。これに対し、衛星観測による表面温度を比較した場合には、市街地では熱慣性が大きいいためタイムラグが生じ、昇温時である衛星データ取得時は相対的に住宅地の方が高温であったと解釈できる。したがって、衛星通過時の表面温度のみから算出する従来法^{8,9)}を用いた場合は、日中は市街地よりも住宅地の方が高温化するという結果となることが予想されるが、本研究の方法では時々刻々と変化する表面温度のパターンをよりの確に比較することが可能となった。

図-4より、市街地や緑地では地中熱伝導が300～400 $[W/m^2]$ に及ぶことも興味深い。これは都市キャノピーモデルを組み込んだ地表面熱収支解析²⁹⁾と比較しても整合性がある。従来は地表面を平板と仮定した1次元熱収支モデルでは都市キャノピーモデルと比較して地中熱伝導を過小評価しがちであったが、本研究の方法では都市

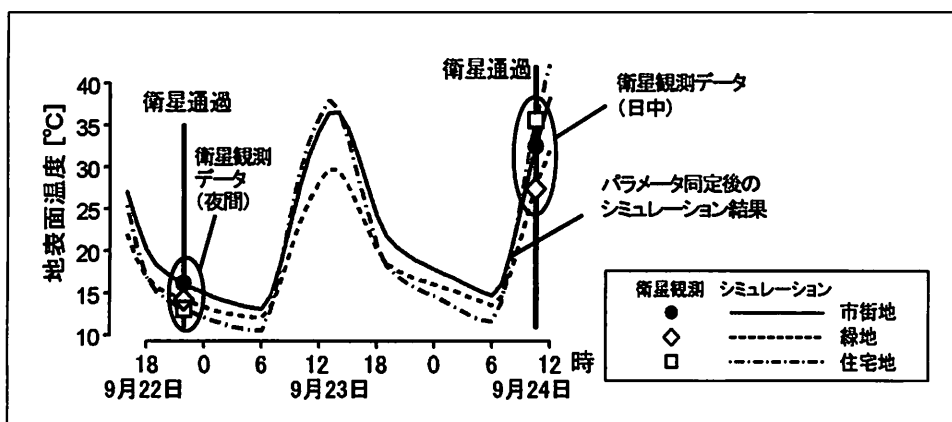


図3 衛星観測およびシミュレーションによる地表面温度の日変化

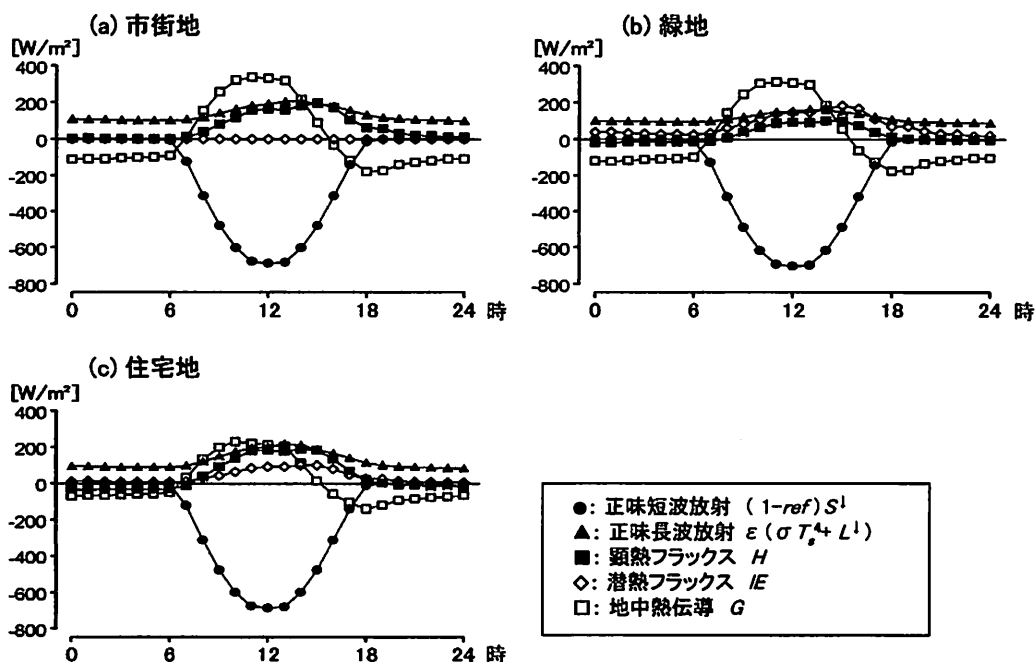


図4 地表面熱収支のシミュレーション結果 (2001年9月23日)

キャノピーの効果を含んだエリアの平均的な熱慣性を得られるため、都市表面の蓄熱特性がよりの確に表現できたと考えられる。

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 Moriaki and Kanda²⁰⁾ により久が原 (東京都大田区久が

原) に設置された高さ29mのタワー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 LE 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)。久が原は庭木などの植生を含む典型的な低層住宅地である (平均建物高さ73m, 建ぺい率48%, 緑被率22%)。この観測サイトおよび観測データの詳細は文献²⁰⁾を参照されたい。パラメータ同定の結果、久が原では熱慣性は $1.453 \text{ [kWs}^{1/2}/\text{m}^2/\text{K}]$, 蒸発効率率は $\beta = 0.05$ となった。図-5から、顕熱フラックスについてはいずれも日中のピーク

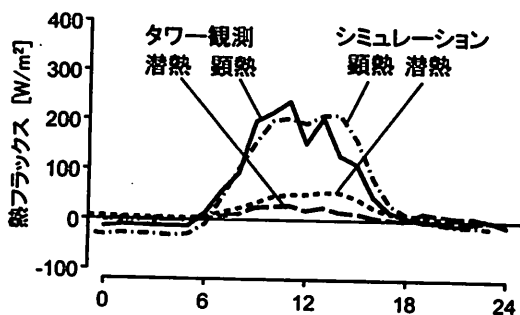


図-5 タワー観測およびシミュレーションによる
潜熱・顕熱フラックスの日変化

が $200 \sim 300 \text{ [W/m}^2\text{]}$ に及んでおり、概ね一致する結果となった。一方、潜熱フラックスについては相対値では本研究の計算結果の方が若干大きい、実際にはこの差は $30 \sim 40 \text{ [W/m}^2\text{]}$ 程度であるから、地表面熱収支全体の変動幅(図-4参照)と比較して大きいとは言えない。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ため、検証方法による誤差も含まれている。元来、熱収支観測は誤差要因が多く精緻な値を得ることが非常に難しいと言われており¹⁾、より詳細に地上観測を行なった既往研究^{23, 24)}においても観測方法によって $100 \text{ [W/m}^2\text{]}$ 程度の差は生じていることから、図-5は概ね妥当な結果であると判断できる。

5. まとめ

本研究では衛星リモートセンシングデータを用いて地表面の物理特性に関するパラメータを取得し、地表面熱収支のシミュレーションを行なう手法を提案した。とくに日中・夜間の表面温度分布と1次元熱収支・熱伝導モデルとを結びつけることにより、経験式ではなく物理的な計算に基づいてパラメータを取得した点に本研究の手法の特徴がある。このため、まず1次元熱収支・熱伝導モデルを構築し、モデルによる地表面温度の計算結果と衛星観測データを合わせることでパラメータ同定を行った。この結果、代表的な土地被覆形態について熱収支に関する各パラメータが得られた。また、この熱収支シミュレーションにより、現実 に即した地表面温度や地表面熱収支の日変化パターンを再現した。こ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、妥当性を確認した。

本研究の手法により局地気象モデルの地表面物理特性

の設定を精緻化し、大気シミュレーションの高精度化に貢献できる可能性が高い。気象モデルの地表面部分に都市キャノピーモデルを組み込むことにより気温の再現性が向上することが知られているが²⁾、実際には都市キャノピーモデルを組み込むためにはモデル構築の労力や計算時間などの制約がある。これに対し、本研究の手法では都市キャノピーの効果も含んだエリアの平均的な熱慣性のパラメータが得られるため、一次元熱収支モデルであっても都市キャノピーモデルとほぼ同程度の地中熱伝導の値が得られた。したがって、本研究の手法により得られる平均的な熱慣性のパラメータを気象モデルの地表面物理特性の設定に用いれば、モデル構造は平板のままでも地表面の蓄熱特性をよりの確に表現し、シミュレーションを精度向上できる可能性が高いと考えている。

衛星リモートセンシングによる地表面温度データには、地上観測のみでは得難い有益な知見が数多く含まれている。例えば地表面温度は地表構成物に依存するため、気温と比較して非常に局所的であり、地上観測では広域の空間分布を把握することが難しい。これは地表面温度に依存する顕熱・潜熱フラックスも同様である。実際、気象庁による地上気象観測や、大気汚染常時監視測定局などの多くの気象観測データでは、気温や湿度など大気に関しては長期間・多地点の非常に膨大な観測データの蓄積があるものの、地表面温度については地上で観測した体系的な観測データは皆無に等しい。これに対し熱赤外域の衛星リモートセンシングデータを用いれば、広域的な地表面温度の空間分布を詳細に把握することができる。また、都市キャノピーや植生キャノピーが存在し幾何形状が複雑である場合、地上観測では各構成要素の詳細な表面温度を把握することが可能であるが、前述した局地気象モデルへの適用という目的では空間スケールのミスマッチが生じる。これに対し、衛星リモートセンシングでは都市キャノピーや植生キャノピーの効果も含めたエリアの平均的な地表面温度を得ることができる。もちろんこれは日影や多重反射、蓄熱といった表面の幾何形状の影響を含めた平均的な地表面温度であるから、各構成要素の表面温度とは解釈が異なる点は留意する必要があるが、前述した気象モデルとの対応を考えれば地上観測では得難い貴重な情報であると言える。本研究の手法は、こうした衛星リモートセンシングの利点を活かした手法であると言える。その一方で、衛星リモートセンシングでは、例えば本研究で用いた Terra 衛星などのような太陽同期準回帰軌道の衛星では、回帰日数がせいぜい十数日となる上、天候に左右されるため、データの取得可能性によって適用性が制限されるという問題がある。この問題は本研究の手法においても制約条件となり得る。しかしながら、本研究の方法では1事例であっても信頼性

のあるパラメータを算出できれば、他の気象条件においてもシミュレーションが可能であるから、衛星通過時の表面温度のみから算出する従来法^{8,9)}と比較すれば汎用性があると考えられる。

ただし、本研究では C_H と β とを分離することには課題が残されている。この点については、季節や気象条件によるボーエン比の違いを利用して C_H と β を分離できる可能性があると考えている。本研究では日中と夜間の衛星データをペアで用いる必要があったため利用可能なデータが限定されたが、本研究で得られた熱慣性を用いれば、単独の衛星データのみで同様の熱収支解析が可能である。そこで今後はマルチテンポラルデータに本研究の手法を適用することを検討する予定である。また、パラメータ同定の作業を自動化することも今後の重要な研究課題である。現在は手作業でパラメータを少しずつ変化させながら表面温度が合うようにパラメータを決定しているため、必ずしも効率的とは言えない。このため本研究では代表的な土地利用のエリアのみを解析対象としたが、現段階では空間分布が得られるリモートセンシングの特性を十分に活かしているとは言えない。今後、気象モデルの精緻化のために本手法を活用する際には、パラメータ同定のプロセスを自動化し、全グリッドについて個別にパラメータを取得することを可能にすることも、重要課題である。

謝辞： 本研究で用いた久が原のタワー観測データは愛媛大学准教授の森脇亮氏からご提供頂きました。本研究は、文部科学省科学研究費補助金・若手研究(B)「熱赤外リモートセンシングと地表面熱収支モデルを併用した都市域の蒸発散量推定」(課題番号：20710022)の支援により実施されました。心からお礼申し上げます。

記号

$S^{\downarrow}$ ：地表面への短波の入射(負値) [W/m^2], $L^{\downarrow}$ ：地表面への長波の入射(負値) [W/m^2], α_{sf} ：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 [-], $q_{s\sigma}$ ：表面温度に対する飽和比湿 [kg/kg], q ：比湿 [kg/kg], T_g ：地中(または地表面)温度 [K], z ：深さ [m], c_{pg} ：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

- 1) 一ノ瀬俊明: 土木環境システムとしてのヒートアイランド研究の来しかた行くすえ, 環境情報科学, Vol.32, No.3, pp.8-12, 2003.
- 2) 持田灯: 都市気候変動, 日本建築学会総合論文誌, No.1, pp.128-133, 2003.
- 3) Hirano, Y., Yasuoka, Y. and Ichinose, T.: Urban Climate Simulation by Incorporating Satellite-Derived Vegetation Cover Distribution into a Mesoscale Meteorological Model, *Theoretical and Applied Climatology*, Vol.79, pp.175-184, 2004.
- 4) 平野勇二郎, 安岡晋文, 一ノ瀬俊明: 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, Vol.17, No.5, pp.343-358, 2004.
- 5) Ichinose, T., Shimodozono, K., Hanaki, K.: Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo, *Atmospheric Environment*, Vol.33, pp.3897-3909, 1999.
- 6) Kusaka, H., Kimura, F., Himakuchi, H., Mizutori, M.: The effects of land-use alteration on the sea breeze and daytime heat island in the Tokyo Metropolitan Area, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol.78, pp.405-420, 2000.
- 7) Dhakal, S. and Hanaki, K.: Improvement of urban thermal environment by managing heat discharge sources and surface modification in Tokyo, *Energy and Buildings*, Vol.34, pp.13-23, 2002.
- 8) Boegh, E., Schelde, K. and Soegaard, H.: Estimating transpiration rates in a Danish agricultural area using landsat thermal mapper data, *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, Vol.25(7-8), pp.685-689, 2000.
- 9) Kato, S. and Yamaguchi, Y.: Analysis of urban heat-island effect using ASTER and ETM+ Data: Separation of anthropogenic heat discharge and natural heat radiation from sensible heat flux, *Remote Sensing of Environment*, Vol.99, pp.44-54, 2005.
- 10) 近藤純正 編著: 水環境の気象学 一地表面の水収支・熱収支一, 朝倉書店, 350p, 1994.
- 11) 近藤純正: 地表面に近い大気の科学, 東京大学出版会, 324p, 2000.
- 12) 平野勇二郎, 一ノ瀬俊明: 屋上セダム緑化面の熱収支特性に関する実測評価, 環境工学研究論文誌, Vol.43, pp.661-672, 2006.
- 13) 酒井 敏, 伊藤 文, 飯澤 功, 梅谷和弘, 小野耕作, 鮎村尚起, 矢島新: 京都市気象観測: 熱慣性から見た都市部の熱的構造(大気境界層), 日本気象学会大会講演予集集 89, p.131, 2006.
- 14) 川本陽一, 大岡龍三: 地表面パラメータ設定の改良, 及び人工排熱影響の組み込み MMSを用いた都市気候解析モデルの構築(その1), 日本建築学会環境系論文集, No.631, pp.1125-11132, 2008.
- 15) 三木博史, 安田永昌, 荒井紀之, 稲葉 力: 熱慣性法による風化花崗岩切取斜面の弾性率評価, 土木学会第50回年次学術講演会, pp.646-647, 1995.

- 16) 宮崎ひろ志, 客野尚志: 熱慣性画像を用いた都市の熱容量分布推定手法に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, p.695-696, 2004.
- 17) 資源・環境観測解析センター: 新編リモートセンシング用語辞典, 291p, 1996.
- 18) 平野勇二郎, 大橋唯太, 亀井川幸浩, 畔柳秀匡, 重田祥範, 高根雄也, 外岡秀行, 井村秀文: 衛星観測・地上気象観測・都市気象モデル・建物エネルギーモデルを統合した都市域の熱環境解析, 日本建築学会中国支部研究報告集 (CD-ROM), Vol.32, 2009.
- 19) Tonooka, H.: Accurate atmospheric correction of ASTER thermal infrared imagery using the Water Vapor Scaling method, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol.43, No.12, pp.2778-2792, 2005.
- 20) 田中俊六, 足立哲夫, 武田 仁, 土屋喬雄: 最新 建築環境工学[改訂2版], 井上書院, 317p, 1999.
- 21) Ogawa, K., Schmugge, T., Jacob, F. and French, A.: Estimation of broadband land surface emissivity from multi-spectral thermal infrared remote sensing, *Agronomie*, 22, pp.695-696, 2002.
- 22) Kusaka, H., Kondo, H., Kikegawa, Y. and Kimura, F.: A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi-layer and slab models, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol.101, p.329-358, 2001.
- 23) Moriwaiki, R. and Kanda, M.: Seasonal and diurnal fluxes of radiation, heat, water vapor and CO₂ over a suburban area, *Journal of Applied Meteorology*, Vol.43, 1700-1710, 2004.
- 24) 吉田伸治, 村上周三, 成田健一, 高橋岳生, 大岡龍三, 持田 灯, 富永禎秀: 団地内キャニオン空間内における夏期の屋外温熱環境の実測, 日本建築学会計画系論文集, No.552, pp.69-76, 2002.
- 25) Kusaka, H. and Kimura, F.: Thermal Effects of Urban Canyon Structure on the Nocturnal Heat Island: Numerical Experiment Using a Mesoscale Model Coupled with an Urban Canopy Model, *Journal of Applied Meteorology*, Vol.43, pp.1899-1910, 2004.

(2010. 5. 21 受付)

A Simulation Method of Surface Heat Balance in Urban Area Using Thermal Remote Sensing Data

Yujiro HIRANO¹, Tsuyoshi FUJITA¹ and Hideyuki TONOOKA²

¹Asian Environment Research Group, National Institute for Environmental Studies

²Dept. of Computer & Information Sciences, College of Engineering, Ibaraki University

The purpose of this research is to propose an estimation method to determine surface parameters, which represent physical characteristics such as the thermal inertia and the evaporation efficiency, and to simulate surface heat-balance in urban area. Although land-use data are not necessarily in agreement with actual land-cover conditions, land-use data are used to represent the urban land-cover in numerical models in the most of previous studies. On the other hand, surface parameters can be obtained directly from remote sensing data by the method proposed in this study. First, we developed a one-dimensional surface heat-balance and heat-conduction model, and then determined surface parameters using satellite-derived temperature data as reference. From the results of numerical simulations, characteristics of surface heat fluxes and temperatures in built-up areas, green areas and residential areas were well represented by the model.