

機関番号：82101  
 研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2008～2010  
 課題番号：20710022  
 研究課題名（和文） 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  
 研究課題名（英文） Estimation of Evapotranspiration in Urban Areas Using Thermal Remote Sensing Data and a Surface Heat Balance Model  
 研究代表者  
 平野 勇二郎（HIRANO YUJIRO）  
 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・NIES 特別研究員  
 研究者番号：70436319

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は衛星リモートセンシングと地表面熱収支モデルを用いて都市域の地表面蒸発散量を推定することである。このため、衛星観測された日中・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地表面のパラメータを取得し、シミュレーションを行なう手法を提案した。この手法と従来法である植生指標による手法を用いて市街地、住宅地、緑地において蒸発散による潜熱フラックスを算出した。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is to estimate evapotranspiration in urban areas using satellite remote sensing data and a surface heat balance model. In this research, we proposed an estimation method to determine surface parameters, and to simulate surface heat-balance in urban areas. As a result, characteristics of latent heat fluxes in built-up areas, green areas and residential areas were well represented by this method in conjunction with the conventional method using vegetation index data.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,300,000	690,000	2,990,000

研究分野：都市熱環境

科研費の分科・細目：環境学・環境影響評価・環境政策

キーワード：衛星リモートセンシング、地表面温度、熱赤外バンド、気象モデル、蒸発散

#### 1. 研究開始当初の背景

植生を含む地表面からの蒸発散量の広域推定は、近年の環境問題の深刻化に伴います重要視されてきている。とくに都市域においては近年、ヒートアイランド現象が顕著に生じており、植生の蒸散による温度低下効果が注目されている。また、よりマクロな視点では地球温暖化やそれに伴う水不足・食糧不足が危惧されている昨今の状況下で、炭素・水循環の解明や気候変動の将来予測を行うためには蒸発散量推定が不可欠である。広

域の地表面を人工衛星から観測する衛星リモートセンシングの技術を用いて蒸発散量を算定する研究は過去にも多く行われているが、こうした既往研究の多くは可視・近赤外域のデータから算出した植生指標に基づいている。この方法では、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。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行なわれているが、そ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把握することは難しい。

## 2. 研究の目的

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により蒸発散量の推定を行うことである。とくに著者らが開発を進めている熱赤外域のデータと熱収支モデルを結びつけた蒸発潜熱フラックス計算手法を汎用的な手法として完成させ、これと従来法である植生指標を用いた手法も併用することにより、信頼性のある蒸発散量推定を行う点に特徴がある。本研究の成果は例えば植生による都市ヒートアイランド緩和効果の評価等へ応用できると考えている。また本研究において構築する手法は汎用的であり、よりマクロな大気・水循環の解明や気象シミュレーションの高精度化などへの貢献も期待できる。

## 3. 研究の方法

本研究では著者らが開発を進めている熱赤外リモートセンシングを用いた手法と、従来法である植生指標を用いた手法により蒸発散量の推定を行なう。

本研究における提案手法である熱赤外リモートセンシングを用いた手法では、1次元熱収支・熱伝導モデルを基本とし、顕熱・潜熱フラックスはバルク式、地中熱伝導は熱伝導方程式を用いて、地表面の物理特性を示すパラメータを決定し、熱収支計算から蒸発散による潜熱フラックスを得る。入力データは衛星観測による地表面温度と気象庁の地上気象観測データである。未知のパラメータは蒸発効率、バルク輸送係数、熱慣性である。ただし、地中熱伝導を計算する上で必要となる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、これを連立方程式として解くことはできない。したがってこの条件では表面温度から解析解としてパラメータを得ることは現実的には困難である。反対に、先に各パラメータを設定しておけば、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。そこで、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はパラメータ同定が可能である。本研究ではこの方法で、連続した日中と夜間の表面温度データを用いてパラメータを決定した。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、蒸発効率とバルク輸送係数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蒸発効率を0としてバルク輸送係数を算出し、次に緑地と住宅地において、バルク輸送係数は市街地と同じであると仮定して蒸発効率を算出した。

植生指標を用いた手法では、可視・近赤外バンドから算出した正規化植生指標 (NDVI) から緑被率を算出し、これをメソスケール気象モデルの地表面部分に組み込むことにより、現実的な植生分布を反映したシミュレーションを行なった。また緑化した場合のシナリオに従ったシミュレーションも行なった。また、この方法では植生の水平投影面積のみを衛星リモートセンシングで与えており、植生面の蒸発効率は固定値として設定する必要がある。ただし蒸発効率を精緻に設定することは難しいため、本研究では感度解析として、蒸発効率を変化させた場合の蒸発散による潜熱フラックスの変化や、その気温低下効果との関係についても検討した。

## 4. 研究成果

まず衛星観測による表面温度と一次元熱収支・熱伝導モデルにより計算される表面温度とを合わせるによりパラメータ同定を行なった。本研究では対象地域として東京都心部、利用衛星データは Terra 衛星 ASTER データを選択した。解析対象日は、ASTER により連続して夜間、日中の良好なデータが取得された 2001 年 9 月 22~24 日とし、熱赤外バンドから表面温度分布を得た (図 1)。

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。地表面のパラメータとして用いるアルベドおよび射出率は ASTER データから得た。この計算条件で、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。この方法により取得された蒸発効率のパラメータは住宅地では 0.11、緑地では 0.30 となった。地表面温度と地表面熱収支のシミュレーション結果をそれぞれ図 2、3 に示す。

計算対象とした気象条件では緑地における蒸発散による潜熱フラックスは日中に  $200[\text{W}/\text{m}^2]$  となっており、種々の地上観測による研究事例との整合性が確認された。また、この地表面熱収支の計算結果は都市キャノピーモデルを組み込んだ地表面熱収支シミュレーションの研究事例とも概ね整合することが確認され、とくに従来 of 1 次元熱収支

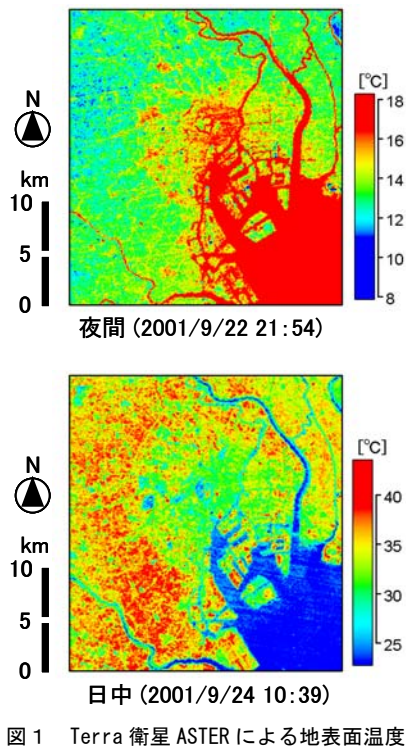


図1 Terra衛星ASTERによる地表面温度

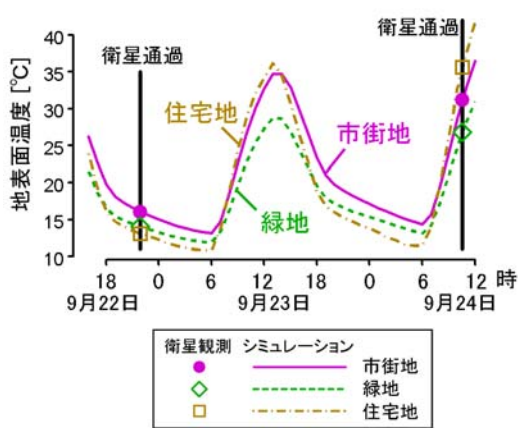


図2 衛星観測およびシミュレーションによる地表面温度の日変化

モデルでは難しかった市街地での蓄熱特性も的確に再現することができた。

本研究で得られた地表面熱収支を検証するため、Moriwaki and Kanda (2004, *J. Appl. Meteor.*) により高さ 29m のタワーから観測された顕熱フラックスおよび潜熱フラックスと、本研究における計算結果とを比較した(図4)。この結果、顕熱フラックスについてはいずれも日中のピークが 200~300 [W/m<sup>2</sup>] 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 30~40 [W/m<sup>2</sup>] 程度であるから、地表面熱収支全体の変動幅と比較すれば非常に小さい誤差であり、概ね妥当な結果で

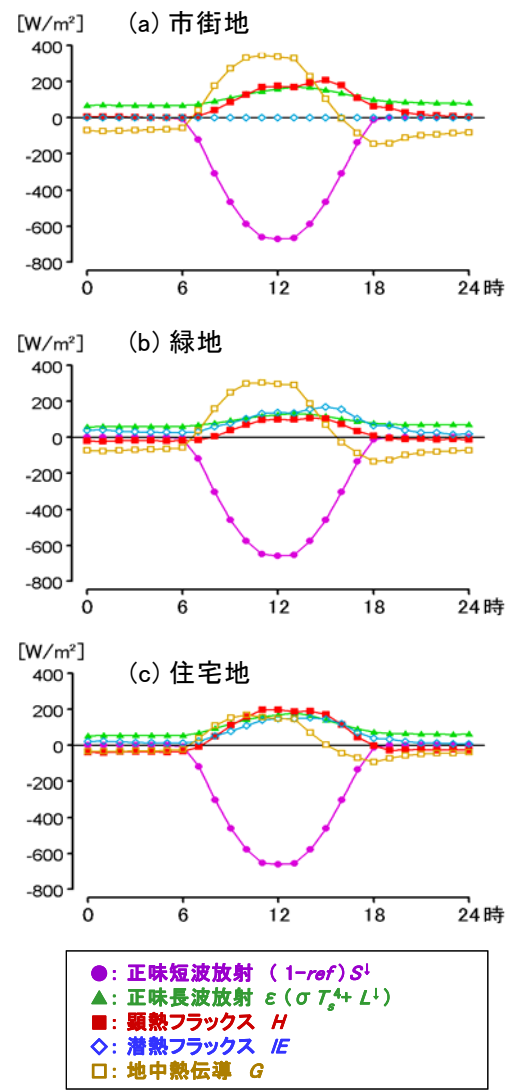


図3 地表面熱収支のシミュレーション結果

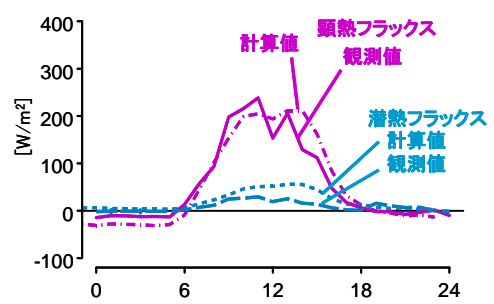


図4 タワー観測およびシミュレーションによる潜熱・顕熱フラックス

あると判断できる。

次に植生指標を用いた手法によりシミュレーションを行なった。ここでは、NDVI から推定した緑被率データを Hirano et al. (2004, *Theor. Appl. Climatol.*) の方法に従い、メソスケール気象モデルの地表面部分に組み込んだ。この方法では、蒸発効率やアルベドなどの気象モデルにおける地表面の物理特

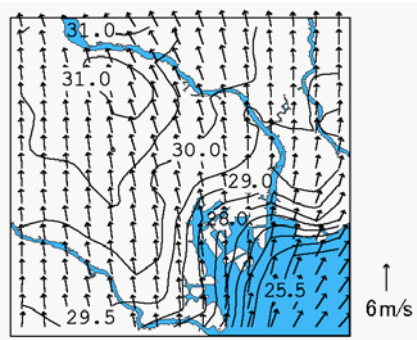


図5 シミュレーション結果の例(晴天条件、15:00)

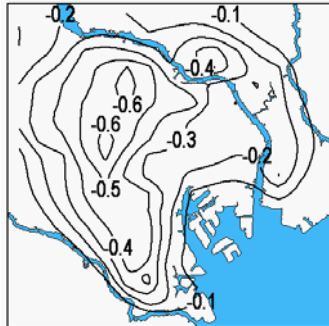


図6 緑化による気温低下効果(緑化ケース - 現状ケース、°C、15:00)

性を緑被率に応じて設定することにより、詳細な植生の分布を反映した気象シミュレーションが可能である。利用衛星データは多時期のデータが利用可能であった JERS-1 OPS を選択した。気象モデルはコロラド州立大学メソスケールモデル(CSU-MM)を用いた。このシミュレーションは月別に、晴天条件と曇天条件に分けて行なった。シミュレーション結果の7月、15時の例を図5に示す。これらの計算結果について、気象庁の AMeDAS データとの比較により再現性が確認された。

同様の緑被率データの組み込み手法で、緑化により緑被率を増やした場合を想定し、シミュレーションを行なった。緑化シナリオは、東京都の都市計画GISによる建物ポリゴンデータから算出した非建蔽地と、衛星リモートセンシングによる緑被率から、緑化可能面積を割り出して設定した。7月のシミュレーション結果の現状ケースと緑化ケースの気温差を図6に示す。前述の晴天条件と曇天条件の両者についてシミュレーションを行なったが、各気象条件の出現頻度により加重平均した結果のみを図化した。この図から、主に東京都区部の北西部において気温低下効果が大きく、沿岸部は内陸部と比較して気温低下効果が小さいという傾向が生じた。

ただし前述の緑被率データを用いたシミュレーション手法は、植生の空間分布はリモートセンシングデータにより現実的に与え

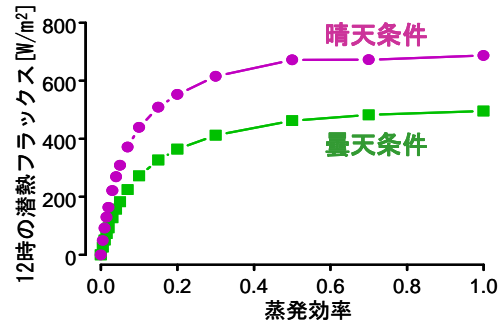


図7 蒸発効率と潜熱フラックスの関係

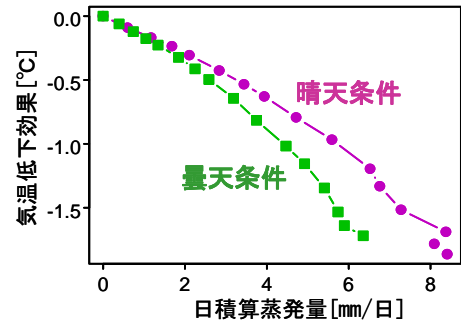


図8 蒸発量と気温低下効果の関係

ているものの、植生部分の蒸発効率を固定値としてモデルに与えるため、計算結果はその設定に依存するという問題がある。そこで、蒸発効率を条件変化パラメータとした感度解析を行なった。まず大気側の条件による蒸発散量最大ケースとして、約 10km 四方を全て完全湿潤面としてシミュレーションを行なったところ、気温低下は約 2°C にも及んだ。ただし、この計算ケースに必要な水分蒸発量を算出した結果、10km 四方の地表面を1日間、完全湿潤面とするためには約 670,000m<sup>3</sup>の水が必要であり、人為的な通常の散水の水量では広域の都市の暑熱環境を緩和することは困難であるという結果となった。このケースにおいて蒸発散量は 8.4 [mm/日]であった。次に、蒸発効率を変化させた場合の日中の潜熱フラックスの変化を確認した(図7)。この図から、関係は曲線的であり、潜熱フラックスは蒸発効率 0.4 程度でほぼ頭打ちになっていることが分かる。一般に蒸発効率は、地表面温度に対する飽和比湿と大気の比湿の差と蒸発散量との比例定数であるから、比湿や地表面温度が不変ならば蒸発効率と潜熱フラックスは比例する。これに対し、実際には蒸発散により表面温度が低下するため曲線的な関係になったと解釈できる。この蒸発効率を変化させた場合の計算結果を用いて、日積算蒸発散量と日平均の気温低下効果の関係を図8に示した。この結果、今回の計算条件では日平均気温を 1°C 低下させるのに必要な蒸発散量は約 4[mm/日]となった。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ① 平野勇二郎、藤田壮、外岡秀行：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、環境工学研究論文集、査読有、47、2010年、pp. 537-544
- ② 平野勇二郎、濱野裕之、田上浩孝、藤田壮：都市キャノピー内における夏季の温熱環境の観測、環境情報科学論文集、査読有、24、2010年、pp. 435-440
- ③ 平野勇二郎、井村秀文：落葉樹による都市の暑熱環境緩和策効果と省エネルギー効果の通年評価、環境情報科学論文集、査読有、23、2009年、pp. 179-184
- ④ 平野勇二郎、一ノ瀬俊明、井村秀文、白木洋平：打ち水によるヒートアイランド緩和効果のシミュレーション評価、水工学論文集、査読有、53、2009年、pp. 307-312

[学会発表] (計4件)

- ① 平野勇二郎、藤田壮、文屋信太郎、井上剛：低炭素都市への展開を目指した都市・街区単位の各種施策導入効果の検討、環境科学会2010年会、2010年9月16日、東洋大学(東京都)
- ② 平野勇二郎、一ノ瀬俊明、井村秀文：打ち水によるヒートアイランド対策の広域評価、日本ヒートアイランド学会 第4回全国大会、2009年8月23日、東京工業大学(神奈川県)
- ③ 平野勇二郎、井村秀文、一ノ瀬俊明：都市緑化による大気・熱環境改善と省エネルギー効果について、土木学会 第45回環境工学研究フォーラム、2008年11月29日、大阪工業大学(大阪府)
- ④ 平野勇二郎、稲村實、外岡秀行、井村秀文：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、地理情報システム学会 第17回研究発表大会、2008年10月24日、東京大学・生産技術研究所(東京都)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

平野 勇二郎 (HIRANO YUJIRO)  
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・NIES 特別研究員  
研究者番号：70436319

### (2) 研究分担者

該当なし

### (3) 連携研究者

該当なし