

TETモデルおよび熱画像データを用いた神田川上流域における地表面温度特性について

首都大学東京 都市環境科学研究科 学生員 ○高山 亮輔
 首都大学東京 都市環境科学研究科 正会員 天口 英雄
 首都大学東京 都市環境科学研究科 正会員 河村 明
 (株)建設技術研究所 正会員 古賀 達也

1. はじめに

2030年、先進国の多くが都市部に人口の8割が集中すると予想されている。都市部において周辺部より高温域となるヒートアイランド現象は世界的課題となっており、局地的な異常気象の一因となっている。東京都内では過去100年の間に約3.0℃の気温上昇が観測されている。都市流域の熱環境を含めた水循環過程を解明するには、都市流域の複雑に形成された個々の建物、道路および公園、畑、芝地等の浸透域を正確に表現できる高度な地物データGIS¹⁾を活用することが有効である。古賀ら²⁾は地表面地物要素毎の浸透特性と土壌水分量の違いを考慮し、熱収支式より蒸発散量を算出できる蒸発散モデルとしてTET (Tokyo Evapotranspiration)モデルを提案し、その妥当性を評価した。TETモデルを用いたヒートアイランド緩和策の検討³⁾では、建物屋上緑化および保水性舗装化を実施した場合の日蒸発散量および日平均地表面温度についての推定が行われている。

一方、伊東ら⁴⁾は都市の地表面温度分布を客観的に評価しており、航空機による熱画像等が用いられている。本検討で対象とする熱画像データとしては、TETモデルの解析結果との比較が可能な撮影日のデータが入手可能であることやデータ取得の容易さの条件を勘案し、米国地質調査所(United State Geological Survey : USGS)のLandsatの撮影データを用いることが妥当であると考え、本検討ではTETモデルおよび熱画像データを用いて、神田川上流域における2004年の地表面温度特性について評価を行った。

2. TETモデルの概要

TETモデルは、地表面地物要素毎の土地利用および土壌水分量の違いを表現可能な熱収支を考慮した蒸発散モデルであり、土地利用種別毎の地表面の熱収支に関する基礎方程式を用いて蒸発散係数および土壌水分量からバルク式における蒸発のしやすさを表す蒸発効率を求めて潜熱および顕熱を算定し、潜熱から蒸発散量を推定するモデルである⁵⁾。時間単位の大気放射量はAMeDASデータの時間別大気放射量の推定手法⁶⁾により算定し、地中伝達熱は土地利用種別により異なる熱慣性および地表面温度の振幅から求め⁷⁾、地表面の熱収支を満たす地表面温度および蒸発散量として推定している⁸⁾。熱収支式の基礎方程式からの変形式を式(1)、入力放射で示される熱収支式を式(2)、バルク式より与えられる顕熱伝達量と潜熱伝達量を式(3)および式(4)に示す。

ここに、入力放射 R (W/m²)、 H : 顕熱伝達量(W/m²)、 ℓE : 潜熱伝達量(W/m²)、 G : 地中熱伝達量(W/m²)、 σ : ステファン・ボルツマン定数(5.67×10⁻⁸W/m²・K⁻⁴)、 T_s : 地表面温度(K)、 ε : 射出率(無次元)、 α : 地表面の反射率アルベド(無次元)、 R_{glob} : 全天日射量(W/m²)、 L_{sky} : 大気放射量(W/m²)、 c_p : 空気 の定圧比熱(1005J/kg/K)、 ρ : 空気密度(kg/m³)、 C_H : 顕熱輸送のバルク係数(無次元)、 U : 観測地点の風速(m/s)、 T : 大気気温(K)、 ℓ : 水の気化潜熱(2.5×10⁶J/kg)、 β : 蒸発効率(無次元)、 q_{SAT} : 地表面温度 T_s に対する飽和比湿(無次元)、 q : 大気 の比湿(無次元)、 k : 土地利用種別毎の蒸発散係数、 λ_x : 土壌水分係数である。

L_{sky} は気温(K)、降水量(mm)、気圧(hPa)、水蒸気圧(hPa)、日照時間(h)を用いて $R = \varepsilon \sigma T_s^4 + H + \ell E + G$ (1)

推定し、 G については前時間の T_s の最大値と最小値を用いて振幅を算出し、熱慣性によって土地利用種別毎の違いを表現した。 $R = (1 - \alpha) R_{glob} + L_{sky}$ (2)

R は式(1)および式(2)で表現される。式(2)の右辺は L_{sky} の推定値および観測値等から算出されるため R は既知となり、式(3)、式(4) および G の推定値より式(1)は T_s のみの関数と表され、 T_s について解くことができる。また、 T_s から ℓE と H を求めること $H = C_p \rho C_H U (T_s - T)$ (3)

ことができ、式(4)より算出された ℓE より蒸発散量 E の推定を行う。 $\ell E = \ell \rho \beta C_H U (q_{SAT} - q)$ (4)

推定される地表面温度 T_s および蒸発散量 E は、観測地点の高度および風速を用いて算定される $C_H U$ 、浸透域モデルとしてSMPTモデル⁹⁾を用いて地表面地物要素毎 $\beta = 1 \frac{2}{1 + \exp(-k \times \lambda_x)}$ (5)

キーワード 熱収支 土壌水分 高度な地物データGIS 地表面温度 神田川上流域 熱画像データ

連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1 首都大学東京 E-mail takayama-ryosuke@ed.tmu.ac.jp

の土壌水分量から式(5)より逐次算定される蒸発効率 β ，および土地利用種別毎に与えたアルベド a によって，土地利用の違いを表現できる．

3. 神田川上流域における時間地表面温度の推定

(1) 神田川上流域の流域特性

本検討では，図-1に示す神田川の井の頭池から善福寺川合流点までの上流域約11.5km²，流路延長約9kmを対象流域として設定した．図-2は対象とする神田川上流域の高度な地物データGISを示しており，土地利用情報は2004年時点のものである．地表面地物データの要素数は104,342個で，間地と建物の面積率はそれぞれ約30%を占めており，道路16%，林地9%の順となっており，これらの合計で全体の約84%を占めている．

METROSは東京都環境科学研究所と首都大学東京が共同で実施した2002年～2004年のプロジェクトであり，METROS20とMETROS100の2種類からなる気象観測機器・システムである．METROS20は都区内20ヶ所のビルの屋上等で6つの気象要素（風向，風速，気温，湿度，降水量，気圧）を，METROS100は23区内106ヶ所の小学校の百葉箱に設置された小型温湿度計により気温と湿度を計測したものである．土地利用情報との整合性を考え，本研究では2004年の観測データを用いて，時間単位の気温は地表面地物毎（104,342個）にクリギング法により8640時間分を作成した．

(2) TETモデルによる時間単位地表面温度の推定

本検討では2004年を対象に，TETモデルを用いて地表面地物要素毎の時間地表面温度を推定する．風速，気圧，降雨量についてはMETROS20の都立杉並高校における観測値を用いた．全天日射量および水蒸気圧，日照時間については，METROSでは観測されていないため，前者2項目は気象庁「東京」における時間観測値を，後者はAMeDAS府中観測所の観測値を用いた．表-1は，高度な地物データGISにおける20の土地利用種別を示したもので，それぞれに浸透域または不浸透域（水域を含む）の設定を行っている．なお，間地（戸建て敷地内の建物以外）については，サンプル調査の結果をもとに50%を浸透域として設定した．これらの土地利用種別において，ここでは流域全体の蒸発散量が妥当なものとなるように竹下ら¹⁰⁾，藤田ら¹¹⁾および荒木ら¹²⁾の値を参考として，土壌水分を考慮した蒸発散モデル適用のために蒸発散係数，飽和土壌水分量等のパラメータを設定したものを表-1に示している．熱慣性は，川本ら¹³⁾が土地利用種別に設定した値を用いた．

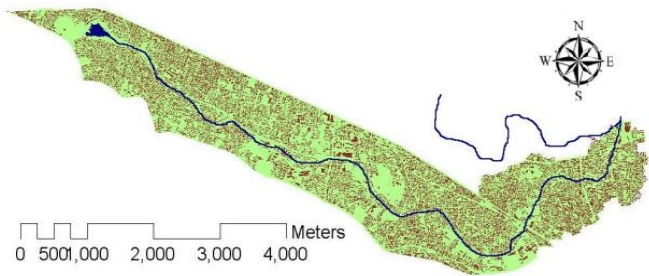


図-1 神田川上流域

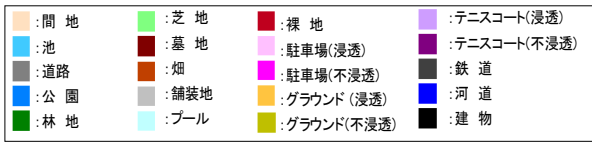


図-2 対象流域における高度な地物データGIS

4. 熱画像データによる地表面温度の計算

Landsat衛星は1972年にLandsat1号が打ち上げられ，航空写真ではわからない地球の地表面の様子をスペクトル帯ごとで，熱画像データによる地表面温度評価をはじめ，農作物の分布状況，森林や湖水の調査，地形の測量，金属資源の探査といった目的のために世界中で利用されている．熱画像データは熱赤外(Band6:10.40～12.50[μm])のスペクトル帯で得られ，各メッシュ当た

表-1 土地利用種別毎のパラメータ

No	土地利用種別	浸透特性	飽和土壌水分量 (mm)	最小容水量 (mm)	地下水涵養量 (l/s)	初期水量 (mm)	蒸発散係数	アルベド	熱慣性 (cal・cm ⁻³ ・k ⁻¹ ・s ^{-1/2})
1	建物	不浸透	-	-	-	-	-	0.12	0.04
2	駐車場(浸透)	浸透	92	74	0.8	64	0.34	0.10	0.06
3	駐車場(不浸透)	不浸透	-	-	-	-	-	0.12	0.03
4	グラウンド(浸透)	浸透	92	74	0.8	64	0.34	0.10	0.04
5	グラウンド(不浸透)	不浸透	-	-	-	-	-	0.12	0.04
6	林地	浸透	138	110	0.8	97	4.38	0.15	0.03
7	芝地	浸透	92	74	0.8	64	0.34	0.10	0.03
8	畑	浸透	104	83	0.8	73	0.55	0.23	0.04
9	公園	浸透	92	74	0.8	64	0.34	0.10	0.03
10	墓地	浸透	92	74	0.8	64	0.34	0.10	0.06
11	舗装地	不浸透	-	-	-	-	-	0.12	0.04
12	鉄道	不浸透	-	-	-	-	-	0.12	0.04
13	間地	50%浸透	92	74	0.8	64	0.34	0.10	0.03
14	テニスコート(浸透)	浸透	92	74	0.8	64	0.34	0.10	0.04
15	テニスコート(不浸透)	不浸透	-	-	-	-	-	0.12	0.03
16	裸地	浸透	80	64	0.8	56	0.13	0.10	0.04
17	プール	不浸透	-	-	-	-	-	0.12	0.03
18	道路	不浸透	-	-	-	-	-	0.12	0.03
19	池	不浸透	-	-	-	-	-	0.12	0.06
20	河川	不浸透	-	-	-	-	-	0.12	0.03

りDN値(無次元)が与えられている。式(6)はDN値からスペクトル放射輝度への変換式であり、式(7)によって輝度温度が求められる。

ここに、 L_λ : スペクトル放射輝度($\text{mW}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$)、 λ : DN値(無次元)、 T : 輝度温度(K)、MULT: 放射輝度変換式の傾き(Radiance Multiplier: $0.067[\text{mW}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})/\text{DN}]$)、ADD: 放射輝度変換式の切片(Radiance Add: $-0.06709[\text{mW}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})/\text{DN}]$)であり、MULTおよびADDは撮影データをダウンロードした際、メタデータとして付随している。

求められた輝度温度は地表面温度としてとらえることができるが、大気中には水蒸気等の吸収物質があり、吸収および再放射が生じるため、地表面温度と等しいとは言えない。

本検討で対象とするLandsat7号ではETM+(Enhanced Thematic Mapper Plus)と呼ばれるセンサが搭載されており、他のLandsatシリーズと比べ、熱画像データの画像分解能が60mと改善されている。USGSの検索サイトであるEarth Explorer¹⁴⁾から神田川上流域を含む幅185kmの30mメッシュ画像である撮影データ(Path:107, Row:35)をダウンロードした。2004年の撮影日は23日あり、すべて午前10時頃に撮影されている。23日の内、神田川上流域上空に雲がない10日(1月20日、2月5日、2月21日、3月8日、4月9日、4月25日、5月11日、9月16日、10月2日、12月21日)における撮影データを使用した。ただし、2003年にスキャン位置補正用装置が故障したため、撮影データに縞状の欠損が生じ、その欠損位置は全撮影日において異なっている。図-3に1月20日における地表面温度変換後の神田川上流域を含む撮影データを例として示す。

5. 結果考察

(1) 地表面温度特性

図-4は全撮影日における各平均値のグラフであり、TETモデルによる蒸発散量の平均値および地表面温度(以降、TET地表面温度とする)の平均値、クリギングにより各地物に与えている気温の平均値、熱画像データによる地表面温度(以降、熱画像地表面温度とする)の平均値およびAMeDAS大手町の風速を示している。またTET地表面温度は、熱画像データとの整合性を考慮し、各地物で得られた値を30mメッシュに換算し、平均値を求めた。東京都の昼間において、巖ら¹⁵⁾は熱画像地表面温度と気温は相関が弱いと示しており、ビル群の日陰が地表面温度の上昇を妨げているためだとしている。図-4において、太陽の位置による日影が考慮されている熱画像データに対し、TETモデルは計算上真上からの日射を与えているため、TET地表面温度は熱画像地表面温度より全撮影日において高い傾向が見られる。また、そのような傾向をとる大きな要因の一つとして、大気の水蒸気等の吸収物質により熱画像地表面温度は本来より低くな

$$L_\lambda = (\text{MULT} \times \lambda) - \text{ADD} \quad (6)$$

$$T = \frac{1282.71}{\ln\left(\frac{666.09}{L_\lambda} + 1\right)} - 273.15 \quad (7)$$

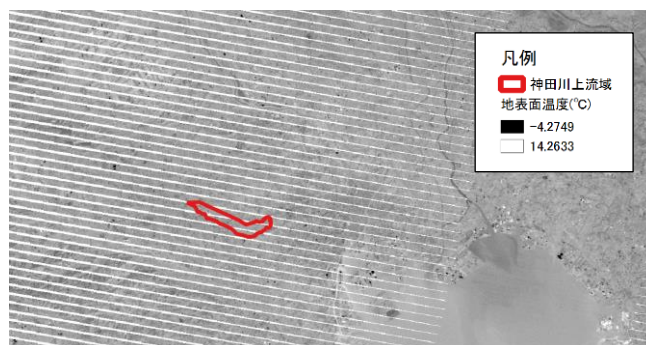


図-3 1月20日における地表面温度変換後の神田川上流域を含む撮影データ

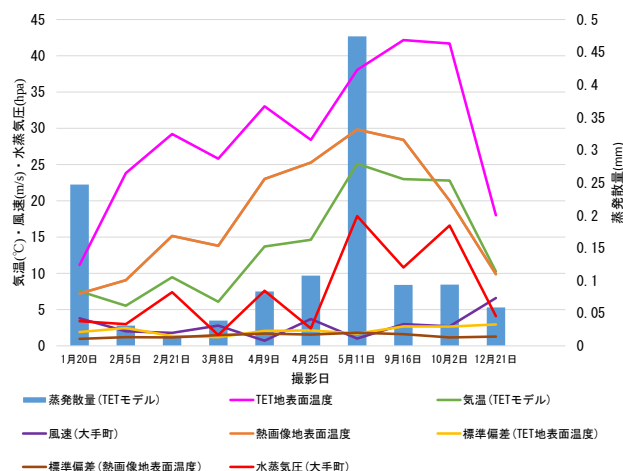


図-4 全撮影日における各平均値

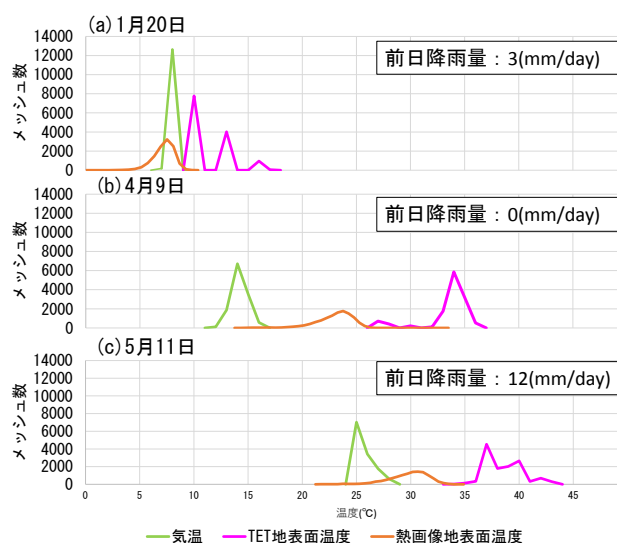


図-5 TETモデルおよび熱画像データの地表面温度の度数分布

る傾向があることも考えられる。蒸発散量が多い1月20日および5月11日は、前日に降雨があったために、常に蒸発散量のある浸透地物に加えて、雨水が不浸透地物の地表面からも蒸発したためであると考えられる。4月9日および4月25日では、気温と熱画像地表面温度は上昇しているのに対し、TET地表面温度は低下している。これは、熱収支において蒸気圧と顕熱伝達量は反比例の関係により、蒸気圧が小さいことで顕熱伝達量が大きくなったためであると考えられる。また蒸気圧および気温が同程度の1月20日と2月5日を比較すると、1月20日のTET地表面温度は、蒸発散量が多いので大幅に低くなっていることが考察される。

(2) 地表面温度の度数分布

図-5はTETモデルおよび熱画像データの30mメッシュに換算した地表面温度の度数分布を、気温と共に示したものである。図-5において、前日に降雨の有る(a)1月20日および(c)5月11日は近い分布特性を、前日に降雨が無い(b)4月9日は他の撮影日とほぼ同様の分布特性を示した。先ず前日に降雨の無い図-5(b)のTET地表面温度に注目すると、地表面温度は35℃付近にメッシュが集中している。これらのメッシュには間地、建物、道路、芝地が多く占めることが確認できた。前日が無降雨の場合、不浸透地物である間地、建物、道路からの蒸発散量は無く、浸透地物である芝地は高度な地物データGISのパラメータ設定により最も蒸発散量が発生しにくい条件であるため地表面温度が高くなったと考えられる。また、27℃付近と30℃においてもメッシュが集中している。前者は林地が、後者は畑が多く占めるメッシュであることが確認でき、両者とも浸透地物であるためパラメータ設定によって蒸発散量が区別され、分布特性に影響したと考えられる。(a)および(c)においては、前日に雨が降っていたため、不浸透地物においても蒸発散量がある状態であり、不浸透地物のTET地表面温度が上がらないと考えられ、地表面温度の小さい順に道路・建物・林地、間地・畑、芝地が多く占めるメッシュの度数分布であることが確認できた。熱画像地表面は分解能の影響等により顕著な分布特性を示さなかった。

6. むすび

本検討では、地表面地物要素毎の土地利用および土壌水分量の違いを表現可能な熱収支を考慮した蒸発散モデルであるTETモデルおよび熱画像データを用いて、神田川上流域における2004年の地表面温度特性について評価を行った。熱画像地表面温度は大気の水蒸気等の吸収物質の影響により、TET地表面温度より低い値を取る傾向が確認できた。さらに太陽の位置による日影が考慮されている熱画像データに対し、TETモデルは計算上真上からの日射を与えていることも理由として挙げられる。また、TET地表面温度は各地物で地表面温度特性が区別されており、蒸気圧および蒸発散量の影響も細かに表現されていることが確認でき、今後は太陽位置の考慮が課題である。

参考文献

- 1) 天口英雄, 河村明, 荒木千博, 高崎忠勝: 神田川上流域の地物データを用いた洪水流出モデルの構築とその適用, 河川技術論文集(河川技工学), Vol.68, No.4, pp.1_505-1_510, 2009.
- 2) 古賀達也, 河村明, 天口英雄: 熱収支及び土壌水分を考慮した地表面地物要素毎の蒸発散モデルの構築と実流域への適用, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.70, 2014.
- 3) 古賀達也, 河村明, 天口英雄: 都市流域の地表面地物要素へのヒートアイランド緩和策に対する実流域シミュレーション評価, 土木学会論文集B1, Vol.71, 2015.
- 4) 伊藤大悟, 森田真一, 田中勝哉, 後藤圭二, 清水桐郎, 三笹晶子: 熱画像データを用いた地表面温度と暑熱環境に関する分析, 日本ヒートアイランド学会論文集, Vol.9, 2014
- 5) Hamon, W.R.: Estimating Potential Evapotranspiration, ASCE, HY3, paper 2817, 1961.
- 6) 二宮秀典, 赤坂裕, 松尾陽: AMeDASのデータを用いた時刻別大気放射量の推定法, 空気調和・衛生工学論文集, No.60, 1996.
- 7) 近藤純正: 地表面温度と熱収支の周期解及びその応用, 農業気象, Vol.48, No.3, p.265-275, 1992.
- 8) 近藤純正: 地表面に近い大気の科学, 東京大学出版会, 2000.
- 9) Thornthwaite, C.W.: An approach toward a rational classification of climate, Geographical Review, Vol. 38, 1948.
- 10) 竹下伸一, 高瀬恵次: 蒸発散サブモデルを導入した長期間流出モデルの開発, 水文・水資源学会誌, Vol.16, No.1, pp.23-32, 2003.
- 11) 藤田光一, 伊藤弘之, 小路剛志, 安間智之: 国土技術政策総合研究所資料第299号水物質循環モデルを活用した水環境政策評価～霞ヶ浦とその流域を対象として～, p.34, 2006.
- 12) 荒木千博, 河村明, 天口英雄, 高崎忠勝, 須藤正大: 神田川流域の地物データGISを用いた地下水涵養モデルの構築とその適用, 河川技術論文集, 第15巻, pp.371-376, 2009.
- 13) 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, 日本建築学会環境系論文集, Vol.73, NO631, pp.1125-1132, 2008.
- 14) Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), 閲覧日2016年11月21日
- 15) 巖綱林, 三上岳彦: ランドサットTM熱画像による輝度温度と地上気温との関係の分析, 地学雑誌, 111(5), p.695-710, 2002