

## TETモデルを用いた神田川上流域における地表面地物要素毎の時間地表面温度の推定

首都大学東京 都市環境学部 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

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であり、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、畑地等の浸透域を正確に表現できる高度な地物データGIS<sup>1)</sup>を活用することが有効である。古賀ら<sup>2)</sup>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<sup>3)</sup>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。夏季において晴天が連続する場合のヒートアイランド緩和策を検討するには、時間分解能をさらに細かくした時間単位の評価が必要となる。

そこで本研究ではTETモデルを用いて、時間単位の神田川上流域における2004年の地表面地物要素毎の地表面温度の推定を行った。

### 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<sup>4)</sup>。土壌水分量を評価する浸透域モデルでは、SMPT (Soil Moisture Parameter Tank) モデル<sup>5)</sup>により土地利用種別毎に浸透特性と土壌水分量を算出する。また、不浸透域では窪地貯留2mm<sup>6)</sup>を考慮している。

TETモデルを用いた時間地表面温度の推定では、時間単位の大気放射量と地中伝達熱を以下のように求めた。大気放射量はAMeDASデータを用いた時間別大気放射量の推定手法<sup>7)</sup>により算定し、地中伝達熱は、日単位での解析では無視できるが、時間単位の場合は時事刻々と変化する値を設定することが必要であり、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推定<sup>8)</sup>した。

地表面の熱収支式を用いて、地表面温度および蒸発散量の推定を行う<sup>9)</sup>。式(1)は熱収支式の基礎方程式からの変形式、式(2)は入力放射で示される熱収支式、式(3)および(4)はバルク式より与えられる式である。

ここに、入力放射 $R$  (W/m<sup>2</sup>)、 $H$  : 顕熱伝達量(W/m<sup>2</sup>)、 $\ell E$  : 潜熱伝達量(W/m<sup>2</sup>)、 $G$  : 地中熱伝達量(W/m<sup>2</sup>)、 $\sigma$  : ステファン・ボルツマン定数(5.67×10<sup>-8</sup>W/m<sup>2</sup>・K<sup>4</sup>)、 $T_s$  : 地表面温度(K)、 $\varepsilon$  : 射出率(無次元)、 $\alpha$  : 地表面の反射率アルベド(無次元)、 $R_{glob}$  : 全天日射量(W/m<sup>2</sup>)、 $L_{sky}$  : 大気放射量(W/m<sup>2</sup>)、 $c_p$  : 空気の定圧比熱(1005J/kg/K)、 $\rho$  : 空気密度(kg/m<sup>3</sup>)、 $C_H$  : 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)、 $\ell$  : 水の気化潜熱(2.5×10<sup>6</sup>J/kg)、 $\beta$  : 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)、 $q$  : 大気比湿(無次元)、 $k$  : 土地利用種別毎の蒸発散係数、 $\lambda_x$  : 土壌水分係数である。

$$R = \varepsilon\sigma T_s^4 + H + \ell E + G \quad (1)$$

$$R = (1 - \alpha)R_{glob} + L_{sky} \quad (2)$$

$$H = C_p\rho C_H U(T_s - T) \quad (3)$$

$$\ell E = \ell\rho\beta C_H U(q_{SAT} - q) \quad (4)$$

$$\beta = 1 - \frac{2}{1 + \exp(-k \times \lambda_x)} \quad (5)$$

$L_{sky}$  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。

$R$ 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 $\ell E$ と $H$ を求めることができ、式(4)より算出された $\ell E$ より蒸発散量 $E$ の推定を行う。

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

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

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モデルを用いて地表面地物要素毎の土壤水分量から式(5)より逐次算定される蒸発効率 $\beta$ 、および土地利用種別毎に与えたアルベド $\alpha$ によって、土地利用の違いを表現できる。

### 3. 神田川上流域の流域特性

本研究では、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11.5km<sup>2</sup>、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を示している。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。本研究で用いている神田川の高度な地物データGISの基礎となっている基礎的地物データGISは2004年時点の土地利用のGISデータであるため、本研究では2004年のMETROS観測データを用いる。神田川上流域周辺の観測所は、METROS20では2地点、METROS100では7地点の計9地点が存在している。図-1の範囲内には、気象庁アメダス観測所（概ね300Km<sup>2</sup>に1観測所）は存在しておらず対象流域の気温分布を考慮することはできないが、METROSデータ（概ね4Km<sup>2</sup>に1観測所）を用いることで地表面地物毎の地表面温度の違いを算定することができる。104,342個のそれぞれの地表面地物毎の気温は、2004年の観測所時間平均を用いてクリギング法により時間毎に異なる等気温分布図を1年間分作成し、図-3はその気温分布の一例（7月21日13時）を示している。

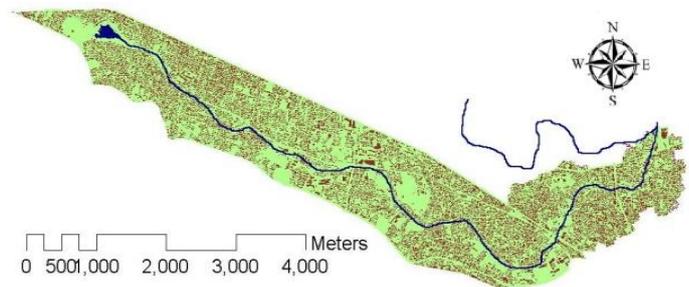


図-1 神田川上流域

### 4. 神田川上流域における時間地表面温度の推定

本研究では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。バルク式に用いる時間平均気温については、地表面地物要素毎の位置に応じてMETROS 9地点のそれぞれの観測値を用い、時刻別大気放射量の推定に用いる時間平均気温は、METROS20の都立杉並高校における観測値を用いた。風速、気圧、降雨量についてもMETROS20の都立杉並高校における観測値を用いた。全天日射量及び水蒸気圧については、METROSでは観測されていないため、気象庁「東京」における時間観測値を用いた。日照時間は、AMeDAS府中観測所の観測値を用いた。高度な地物データGISでは、表-1に示す通り20の土地利用種別に分類しており、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<sup>10</sup>、藤田ら<sup>11</sup>および荒木ら<sup>12</sup>の値を参考として、土壤水分を考慮した蒸発散モデル適用のために蒸発散係数、飽和土壤水分量等のパラメー

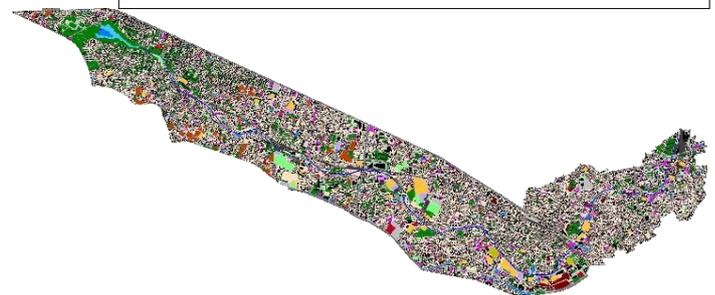


図-2 対象流域における高度な地物データGIS

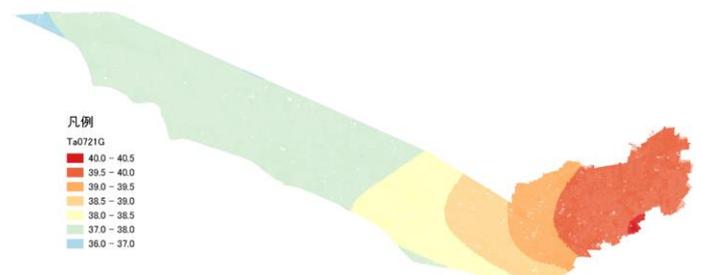


図-3 クリギング法による気温分布例(7月21日13時)

タを設定したものを表-1に示している。熱慣性は、川本ら<sup>13)</sup>が土地利用種別に設定した値を用いた。

5. 時間地表面温度の推定結果

本研究により得られた結果は2004年の1時間毎に全土地利用種別の値があるが、ここでは5種類の土地利用種別(道路、林地、裸地、河川、建物)を中心に、蒸発散量が多く地表面温度が高かった6月30日から7月1日の時間変動に加え、夏季(7月から9月)の地表面温度特性について考察する。

(1) 地表面温度の時間変動

図-4および図-5は蒸発散量と地表面温度を示したものである。図-4より最大蒸発散量は大きい順に、降雨の有る6月30日は建物に次いで道路・河川、そして林地、裸地で、7月1日は河川、林地、裸地の順で、道路・建物の蒸発散量は0となっている。図-5より最大地表面温度は高い順に、6月30日は建物、裸地、林地、道路・河川で、7月1日は建物、道路、裸地、林地、河川となっている。特に、晴天時の建物の地表面温度50℃以上と降雨時の30℃と比べてかなり高く、その差は他と比べて最も大きい。また、河川は不浸透地物に分類されているが、水が常にある状態であるから、浸透地物と同様の傾向がみられる。図-4および図-5より、6月30日はすべての土地利用種別の地表面温度が最大の時に蒸発散量も最大をとっているが、7月1日では道路・建物の蒸発散量が無いものの、その他は6月30日と同様の傾向がみられた。これは、降雨の有無により浸透と不浸透の蒸発散特性による影響を再現しているものと考えられる。つまり不浸透地物においては、降雨時(地表面に水がある時)に地表面貯留された雨水のみが蒸発するが、浸透地物は降雨時に浸透した土壌水分からの蒸発散があるので降雨の無い7月1日の日中でも地表面温度があまり上昇していない。また本研究では、表-1に示した飽和土壌水分量、最小容水量、蒸発散係数を用いており、蒸発散量および地表面温度の大小は、特に林地は大きく、裸地は小さくパラメータ値を設定したことが大きく影響しており、蒸発散量と地表面温度の関係は相対的に小さい。

(2) 夏季の地表面温度特性

表-2は7月から9月における土地利用種別毎の最高地表面温度、最低地表面温度、平均地表面温度、標準偏差、METROS100久我山小学校(神田川上流域のほぼ中心に位置する)における気温を示したものである。最高地表面温度は建物が特に高く、河川は水が常に多量にある状態のため最も低くなった。最低地表面温度、平均地表面温度、標準偏差は建物を除き、他の地物は近い値であった。つまり、夏季において建物の地表面温度の変動が著しく大きいことが分かる。

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(1/s)	初期水量(mm)	蒸発散係数	アルベド	熱慣性(cal・cm <sup>-3</sup> ・k <sup>-1</sup> ・s <sup>-1/2</sup> )
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	0.10	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

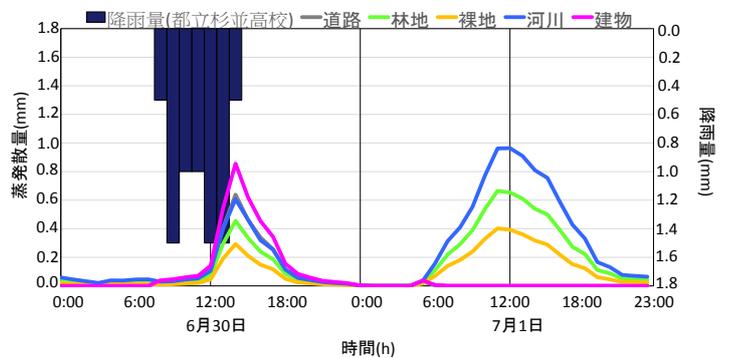


図-4 蒸発散量の時間変化

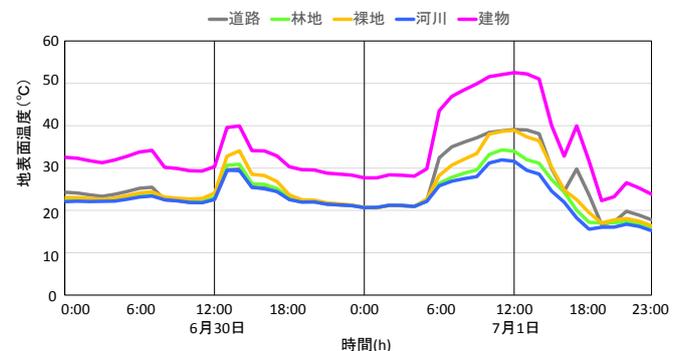


図-5 地表面温度の時間変化

表-2 土地利用種別毎の地表面温度特性

土地利用種別	道路	林地	裸地	河川	建物	気温(久我山小学校)
最高地表面温度(°C)	72.8	60.7	61.4	41.0	97.6	30.3
最低地表面温度(°C)	11.8	11.9	11.8	11.9	15.8	18.2
平均地表面温度(°C)	25.9	25.9	26.8	26.9	36.7	24.8
標準偏差	7.21	6.96	7.75	7.85	11.00	2.65

図-6は土地利用種別毎で一日における最高地表面温度に達する時間帯の頻度を示したグラフである。太陽高度が最も高くなる12:00の頻度が高く、土地利用別でみると建物、道路、林地、裸地は12:00と13:00の頻度が多いが、河川は10:00と11:00が多い。地表面温度が最高となる時刻が太陽の昇っていない1:00, 朝方8:00, 夕方15:00となる場合も頻度は少ないものの発生しており、時間変化を詳しく見ると高地表面温度に達する最も頻度の高い時間帯12:00になる前からの降雨、ほぼ無風状態の影響であることが原因として考えられた。

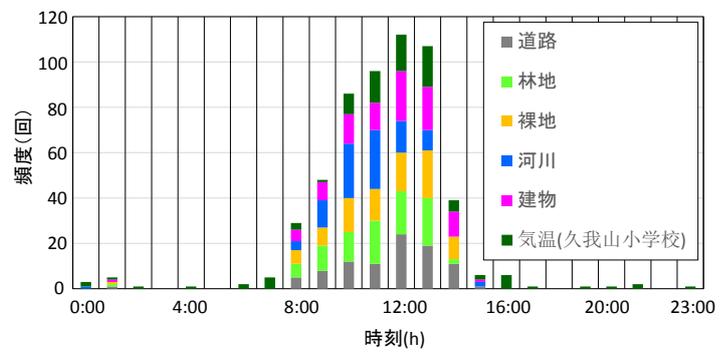


図-6 最大地表面温度の時間頻度分布

## 6. むすび

都市流域において非常に複雑に形成された個々の建物、道路などの不浸透域、および公園、畑地などの浸透域を正確に表現できる高度な地物データ GIS を活用し、地表面地物要素毎の浸透特性と土壤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 TET モデルを用いて、神田川上流域における 2004 年の地表面地物要素毎の時間単位の地表面温度の推定を行った。その結果、土地利用種別毎の地表面温度、潜熱、顕熱および蒸発散量を推定できることを確認し、地表面温度とそれぞれ、蒸発散量、降雨および風速の土地利用種別毎の関係性も確認することができた。

## 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.I\_505-I\_510,2009.
- 2) 古賀達也，河村明，天口英雄：熱収支及び土壤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) 高塚亮丞，河村明，天口英雄，古賀達也：神田川上流域を対象とした屋上緑化・保水性舗装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，土木学会論文集B1,2015.
- 4) Hamon,W.R.：Estimating Potential Evapotranspiration, ASCE, HY3, paper 2817, 1961.
- 5) Thornthwaite,C.W.：An approach toward a rational classification of climate, Geographical Review, Vol. 38,1948 .
- 6) 二宮秀與，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) 都市小流域における雨水浸透，「流出機構の定量的解明」研究会：都市域における水循環系の定量化手法—水循環系の再生に向けて—，第二編 技術解説，p.58, 2000.
- 8) 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, No3, p.265-275, 1992.
- 9) 近藤純正：地表面に近い大気科学，東京大学出版会,2000.
- 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.