

神田川上流域における地物データGISを用いた 1時間単位の蒸発散モデルの開発

高山 亮輔^{1*}・天口 英雄²・河村 明³・古賀 達也⁴

¹学生会員 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

E-mail: takayama-ryosuke@ed.tmu.ac.jp

²正会員 首都大学東京助教 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

E-mail: amaguchi@tmu.ac.jp

³正会員 首都大学東京教授 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

E-mail: kawamura@ed.tmu.ac.jp

⁴(株)建設技術研究所 (〒103-8430 東京都中央区日本橋浜町3-21-1 日本橋浜町Fタワー)

E-mail: t-koga@ctie.co.jp

本論文では、土地利用種別毎の浸透特性と土壌水分量の違いによる蒸発散量を1時間単位で計算できる蒸発散モデルを開発し、高度に都市化が進展した神田川上流域に適用した。推定した年蒸発散量を神田川上流域における文献値と比較することによりその妥当性について評価するとともに、対象流域での土地利用種別の違いが蒸発散量および地表面温度の空間分布に及ぼす影響について検討した。開発モデルの1時間単位の計算により、地表面温度の高い夏季日中時における地表面温度空間分布を定量的に推定できることを示した。

Key Words : *Evapotranspiration, Earth's surface temperature, Urban Landscape GIS delineation, Heat balance, Soil water content, Kanda river upper basin*

1. はじめに

都市域におけるコンクリートやアスファルトで覆われた不浸透域の増加は、都市の熱環境に多大な影響を与えている。東京都では都市部が周辺部より高温域となるヒートアイランド現象により、過去100年の間に約3.0℃の気温上昇が観測されている¹⁾。ヒートアイランド現象は、夏期の生活環境の快適性を損なうだけでなく、熱中症およびストレスの増加などの人への健康や植物の開花時期の早期化など生態系にも影響を及ぼすことから世界の大都市において喫緊の課題となっている。東京都の「東京における自然の保護と回復に関する条例」では都市部のヒートアイランド緩和策として、敷地面積1000m²以上の新築時において屋上緑化計画が義務付けられている²⁾。都市化の進展は都市の熱環境に影響を与えるだけでなく、緑地や裸地などの浸透域の減少は地下水位の低下や河川平常時流量の枯渇を、不浸透域の増大は集中豪雨時の都市型水害を発生させている³⁾。豪雨時の流出抑制対

策としては、雨水浸透ます、浸透トレンチ、透水性舗装などを設置する事例が増えており、これらの施設は洪水流出の抑制効果と平常時の河川流量を確保し、地下水の維持と湧水の保全だけでなく、熱環境の改善も期待されている⁴⁾。海外の事例として欧州連合では、都市を構成する宅地等からの雨水排水対策として持続的雨水管理の観点から自然地およびオープンスペースなどの緑地をネットワーク化し、土壌の保水力により雨水を浸透・貯留させるグリーンインフラ整備が推進されている⁵⁾。アメリカ合衆国環境保護庁では、このようなグリーンインフラの機能に植物による蒸発散機能を組み込んだ適応策が提案され、米国ポートランド市などで実践されている⁶⁾。生態系インフラストラクチャーの活用は日本でも東日本大震災以降の復旧・復興の中で進められている⁷⁾。

都市域における流出抑制施設およびグリーンインフラなどの効果をシミュレーションモデルにより評価するためには、浸透域および不浸透域の分布を表現できることが重要であり、このような土地利用情報としては道路、

建物および緑地などの具体的な都市構造をできる限り忠実に表現できる地物データが必要であろう。既往の水循環過程を対象とするシミュレーションモデルでは、入手可能なデータ制約上の理由やモデル構築の容易さなどからグリッド型が多用されている⁹⁻¹⁰。土地利用情報は住宅用地、商業用地、工業用地などの土地利用用途に基づく情報により作成されているので、グリッド型のモデルに適用するには、先ず土地利用用途毎に不浸透面積率を設定し、それを水循環過程に用いる計算グリッド毎に適用してしている。しかしグリッド型ではその性質上、建物、道路、駐車場等の地物を個別に表現するのは困難であるため、実際の不浸透面積率からある程度の誤差は避けられない¹¹。

これまで著者らは、基礎的地物データを基に都市の地表面を構成する地物（建物、道路、駐車場、緑地など）を浸透特性で分類し、土地利用種別毎に微小要素に分割したポリゴン型の土地利用データを高度な地物データGIS¹²と定義し、これを用いて、地表面地物要素毎の浸透特性と土壌水分量の違いによる蒸発散量を熱収支式により表現した蒸発散モデル、TET (Tokyo EvapoTranspiration) Model を構築¹³し、神田川上流域におけるその妥当性の評価¹⁴、そしてヒートアイランド緩和策の検討¹⁵などを行ってきている。しかしながら既往モデルは、都市域の蒸発散量を長期的に評価するための日単位シミュレーションモデルとして開発したので、例えば夏季の晴天が連続する状況下において、日射量が最大となる時刻のヒートアイランド緩和策を評価することは出来ない。

そこで本研究では、土地利用種別毎の蒸発散量および地表面温度を推定することができるTETモデルを用いて、日単位計算では考慮する必要のなかった地中伝導熱の計算を新たに組み込み、1時間単位での計算に対応した蒸発散モデルを構築することを目的としている。そして、構築したTETモデルを神田川上流域に適用し、2004年の1時間単位のMETROS¹⁶による気温データおよび気象庁の気象データを用いて蒸発散量および地表面温度を推定した。得られた解析結果に対しては、Landsat 7による熱画像データを用いて評価を行うと共に、対象流域内の気温および地表面地物要素の土地利用種別の違いが蒸発散量および地表面温度に与える影響について検討を行った。

2. 1時間単位の蒸発散モデルの開発

地表面の熱収支の基礎式である式(1)～(3)を用いて、潜熱、顕熱および地中伝導熱を評価して求められた潜熱により蒸発散量の推定を行う¹⁷。

$$R_n = H + \ell E + G \quad (1)$$

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

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

$$\beta = 1 - \frac{2}{1 + \exp(-k \times \lambda_x)} \quad (4)$$

ここに、 R_n ：正味放射量($W \cdot m^2$)、 ℓE ：潜熱伝達量($W \cdot m^2$)、 H ：顕熱伝達量($W \cdot m^2$)、 G ：地中熱伝達量($W \cdot m^2$)、 T_s ：地表面温度(K)、 c_p ：空気の定圧比熱($1005 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)、 ρ ：空気密度($kg \cdot m^{-3}$)、 C_H ：顕熱輸送のバルク係数(無次元)、 U ：観測地点の風速($m \cdot s^{-1}$)、 T ：気温(K)、 ℓ ：水の気化潜熱($2.5 \times 10^6 J \cdot kg^{-1}$)、 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。浸透性地物の土壌水分量評価については、浸透特性と土壌水分量の違いによる蒸発散量を考慮したSMPT (Soil Moisture Parameter Tank) モデル¹⁸による浸透域モデルを、不浸透性の地物においては窪地貯留を考慮した不浸透域モデルを構築している。

式(1)の地表面の熱収支式において、 R_n は波長の異なる短波放射(日射)と長波放射(大気放射と地面からの赤外放射)とをまとめた物理量で式(5)により算定される¹⁹。

$$R_n = (1 - \alpha) R_{glob} + L_{sky} - L_{soil} \quad (5)$$

ここに、 α ：地表面の反射率(アルベド)、 R_{glob} ：地表面の全天日射量($W \cdot m^2$)、 L_{sky} ：大気放射量($W \cdot m^2$)、 L_{soil} ：地表面放射量($W \cdot m^2$)である。また、地表面放射量 L_{soil} はステファン・ボルツマンの法則に従い $L_{soil} = \varepsilon \sigma T_s^4$ により求めることができ、 σ はステファン・ボルツマン定数($5.67 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$)、 ε は射出率(地表面ではほぼ1.0)である。

式(5)における大気放射量 L_{sky} は、近藤ら¹⁹により雲量を用いた式(6)～(10)を用いて推定する。

$$L_{sky} = \sigma T_{\bar{h}}^4 \left\{ 1 - \left(1 - \frac{L_{hf}}{\sigma T_{\bar{h}}^4} \right) C_h \right\} \quad (6)$$

$$L_{hf} = (0.74 + 0.19x + 0.07x^2) \sigma T_{\bar{h}}^4 \quad (7)$$

$$x = 0.0315 TD_{\bar{h}} - 0.1836 \quad (8)$$

$$TD_{\bar{h}} = (TD_{h-1} + TD_h) / 2 \quad (9)$$

$$C_h = \begin{cases} 0.457SD_{\bar{h}} + 0.179SD_d + 0.352 (0 < SD_d < 1) \\ 0.24 & (SD_d = 0) \\ 0.14 & (\text{降雨時}) \\ 1.00 & (SD_d = 1) \end{cases} \quad (10)$$

ここに、 $T_{\bar{h}}$ ：連続する2時間の平均気温(K)、 L_{hf} ：快晴時の大気放射量の推定値($MJ \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)、 C_h ：雲の影響を表すファクタ(無次元)、 $TD_{\bar{h}}$ ：連続する2時間の地上における平均露点温度(K)、 $SD_{\bar{h}}$ ：時間毎の日照率、 SD_d ：日平

均の日照率である。夜間の C_h は二宮らの手法²⁰⁾にならない、式(10)で推定した日入直前の C_h と日出直後の C_h を直線補間する。ただし、夜間に降雨があった場合には日入直前と降雨時および降雨時と日出直後との C_h をそれぞれ直線補間する。なお、式(6)で求めた L_{sky} を式(5)に代入する際には単位を $W \cdot m^2$ に変換する。

1時間単位の地中伝達量 G は、熱慣性および地表面温度 T_s の振幅から式(11)および式(12)を用いて算定した²¹⁾。

$$G = G_1 \cos\left(\omega t - \phi + \frac{\pi}{4}\right) \quad (11)$$

$$G_1 = A_1(\omega c_g \rho_g \lambda_g)^{1/2} \quad (12)$$

ここに、 G_1 :地中熱伝達熱の変動の振幅($W \cdot m^2$)、 ω :日変化の値($0.727 \times 10^{-4} s^{-1}$)、 ϕ :地表面温度変化の位相、 A_1 :地表面温度の変動の振幅(K)、 $c_g \rho_g \lambda_g$:熱慣性($J^2 \cdot s^{-1} \cdot K^2 \cdot m^4$)である。また本研究では、地表面温度の変動の振幅 A_1 は、前24時間における地表面温度の最大値と最小値を用いて設定した。

3. 神田川上流域の流域特性

(1) 流域の概要

本研究では、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-1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。表-1より地表面地物データの要素数は104,342個で、間地(建物以外の敷地部分)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。

(2) 気象データ

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、相対湿度、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10分間隔で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300km²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、図-2のMETROSデータ(9観測所)を用いることで地表

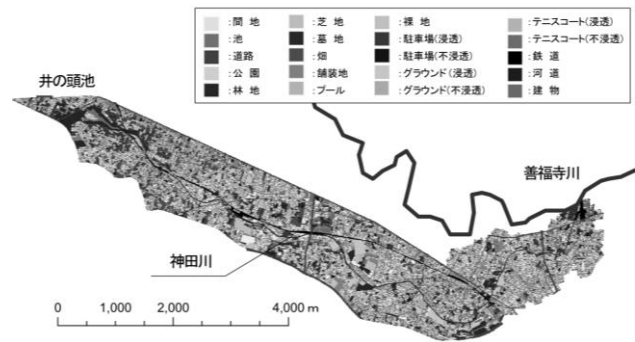


図-1 神田川上流域の高度な地物データ GIS¹⁵⁾

表-1 高度な地物データ GISによる要素数および面積率¹⁵⁾

No	高度な地物データGISによる土地利用種別	要素数	面積 (m ²)	面積率 (%)
1	建物	34,054	3,382,235	29.40
2	駐車場(浸透)	177	60,351	0.52
3	駐車場(不浸透)	635	207,213	1.80
4	グラウンド(浸透)	568	225,656	1.96
5	グラウンド(不浸透)	48	23,288	0.20
6	林地	3,185	1,041,020	9.05
7	芝地	409	171,526	1.49
8	畑	483	188,587	1.64
9	公園	310	104,735	0.91
10	墓地	171	70,392	0.61
11	舗装地	1,157	379,521	3.30
12	鉄道	570	149,388	1.30
13	間地	16,765	3,429,321	29.81
14	テニスコート(浸透)	108	54,613	0.47
15	テニスコート(不浸透)	62	30,383	0.26
16	裸地	117	52,714	0.46
17	プール	27	11,750	0.10
18	道路	45,104	1,785,662	15.52
19	池	85	36,205	0.31
20	河川	307	99,704	0.87
計		104,342	11,504,265	100.00

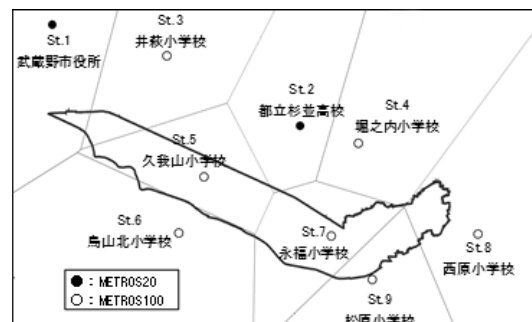


図-2 対象流域周辺のMETROS設置位置

面地物毎の蒸発散量の違いを算定することができる。

4. 1時間単位の蒸発散量の推定

(1) 解析条件

本研究では、2004年を対象に地表面地物要素毎の時間蒸発散量を推定する。METROSでは観測されていない、全天日射量は気象庁「東京」、日照時間はAMeDAS府中観測所の観測値を用いた。METROS20の都立杉並高校における観測値は、風速、気圧、降水量、相対湿度を用いたほか、式(6)の大気放射量の推定では時間平均気温を用いた。バルク式に用いる104,342個の地表面地物毎の気温は、METROSデータ(9観測所)を用いKriging法²²⁾により1時間毎に異なる等気温分布図を8,784時間(1年間)分

表-2 土地利用種別毎のパラメータ

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})
建物	不浸透	-	-	-	-	-	0.12	0.04
駐車場(浸透)	浸透	92	74	0.8	64	0.34	0.10	0.06
駐車場(不浸透)	不浸透	-	-	-	-	-	0.12	0.03
グラウンド(浸透)	浸透	92	74	0.8	64	0.34	0.10	0.04
グラウンド(不浸透)	不浸透	-	-	-	-	-	0.12	0.04
林地	浸透	138	110	0.8	97	4.38	0.15	0.03
芝地	浸透	92	74	0.8	64	0.34	0.10	0.03
畑	浸透	104	83	0.8	73	0.55	0.23	0.04
公園	浸透	92	74	0.8	64	0.34	0.10	0.03
墓地	浸透	92	74	0.8	64	0.34	0.10	0.06
舗装地	不浸透	-	-	-	-	-	0.12	0.04
鉄道	不浸透	-	-	-	-	-	0.12	0.04
間地	50%浸透	92	74	0.8	64	0.34	0.10	0.03
テニスコート(浸透)	浸透	92	74	0.8	64	0.34	0.10	0.04
テニスコート(不浸透)	不浸透	-	-	-	-	-	0.12	0.03
裸地	浸透	80	64	0.8	56	0.13	0.10	0.04
プール	不浸透	-	-	-	-	-	0.12	0.03
道路	不浸透	-	-	-	-	-	0.12	0.03
池	不浸透	-	-	-	-	-	0.12	0.06
河川	不浸透	-	-	-	-	-	0.12	0.03

作成した。

高度な地物データGISでは、表-2に示す通り20グループ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、日単位モデルとして構築した既往のTETモデルにおけるパラメータ値¹⁹⁾を用い、時間単位のモデルとして新たに導入した地中伝導熱の算定で用いる熱慣性は表-2に示す川本ら²⁰⁾の値を設定した。

(2) 年蒸発散量について

上記の解析条件を用いて、2004年の神田川上流域における1時間単位計算による地表面地物要素毎の蒸発散量の推定を行った。本研究により得られた結果は、2004年の8,784時間分に対して全土地利用種別の値があるが、以下では先ず年蒸発散量についての結果と考察を述べる。

表-3は、土地利用種別の年蒸発散量について、本研究で開発した1時間単位での計算値および既往モデルの1日単位での計算値¹⁹⁾を示したものである。1時間単位で計算した年蒸発散量は、建物、道路などの不浸透性の地物では日単位の計算値よりも5~10%少ないが、林地、芝地などの浸透性の地物では日単位の計算値よりも約5~10%多くなっている。流域全体の蒸発散量は、1時間単位の計算値が日単位のそれよりも約2%とわずかに多い。蒸発散量の実測値による評価は困難のため文献資料によれば、神田川全流域の流域平均雨量と年蒸発散量は1,512mm/yearおよび231mm/year程度²⁴⁾で、年総雨量に対する蒸発散比は約15%と評価されている。2004年の降水量は1,750mmであり、流域の年蒸発散量および年蒸発散比は1時間単位では282mmおよび16%、日単位では276mmおよび15%となっている。神田川上流域は中・下流域と比較すれば緑地等の分布が多く浸透域の分布が多いので、1時間単位で計算した年蒸発散量は日単位とほぼ同量で概ね妥当な値であると考えられる。

表-3 年蒸発散量の比較

土地利用別	年蒸発散量(mm/year)		土地利用別	年蒸発散量(mm/year)	
	時間単位	日単位		時間単位	日単位
建物	139	150	舗装地	143	150
駐車場(浸透)	437	374	鉄道	143	150
駐車場(不浸透)	143	150	間地	288	262
グラウンド(浸透)	437	374	テニスコート(浸透)	437	374
グラウンド(不浸透)	143	150	テニスコート(不浸透)	143	150
林地	862	814	裸地	362	278
芝地	438	374	プール	1271	1208
畑	505	457	道路	138	150
公園	437	375	池	1267	1195
墓地	439	375	河川	1270	1206
			合計	282	276

(3) 熱画像データによる地表面温度の評価

開発モデルにより得られた1時間単位の地表面温度に対して、熱画像データを用いた評価を行う。本研究では、2004年の熱画像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²⁵⁾を用いた。

a) 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、航空写真では得られない広域の地表面の様子をスペクトル帯ごとに撮影することで、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(Band6:10.40~12.50μm)撮影データを輝度温度に変換することによって得られる。撮影データは幅185kmの30mメッシュ画像であり、各メッシュ当たりDN値(無次元)が与えられている。DN値λを式(13)によりスペクトル放射輝度 L_{λ} (mW·m⁻²·sr⁻¹)に変換し、さらに式(14)で輝度温度T(K)が求められる²⁶⁾。

$$L_{\lambda} = (MULT \times \lambda) - ADD \quad (13)$$

$$T = \frac{1282.71}{\ln\left(\frac{666.09}{L_{\lambda}} + 1\right)} - 273.15 \quad (14)$$

ここで、MULT:放射輝度変換式の傾き(Radiance Multiplier: 0.067mW·m⁻²·sr⁻¹/DN)、ADD:放射輝度変換式の切片(Radiance Add: -0.06709mW·m⁻²·sr⁻¹)を示している。

b) 地表面温度特性

2004年の神田川上流域において熱画像は午前10時頃に撮影されており、23ヶ日のうち上空に雲がない10ヶ日(1/20, 2/5, 2/21, 3/8, 4/9, 4/25, 5/11, 9/16, 10/2, 12/21)におけるデータを使用した。図-3は代表例として示した神田川上流域における1月20日10時の温度空間分布図であり、(a)は熱画像地表面温度、(b)はKriging法により作成した気温および(c)は開発モデルにより得られた地表面温度(以降、TET地表面温度)である。

熱画像データに縞状の欠損が生じているのは、2003年にスキャン位置補正用装置が故障したため、その欠損位置は全撮影日において異なっている。図-3(a)~(c)の

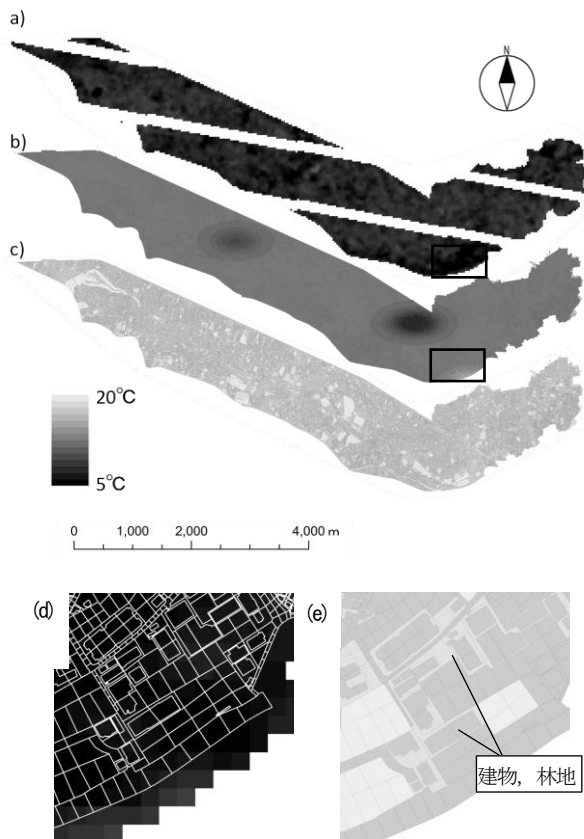


図-3 神田川上流域の1月20日10時の各種温度分布，(a)熱画像地表面温度，(b)kringingによる気温分布および(c)TETモデルによる地表面温度の解析結果，(d)熱画像地表面温度の一部を拡大(地物)，(e)TET地表面温度の一部拡大

平均温度はそれぞれ 11.14℃、7.54℃、および 7.20℃で高い方から TET 地表面温度、気温、熱画像地表面温度の順になっている。

都市域における日中の熱画像地表面温度と気温の相関は、ビル群の日陰が地表面温度の上昇を妨げているため弱いことが指摘されている²⁷⁾。開発モデルでは地物の真上から日射を与えているが、実測の熱画像データには日陰による影響を受けている。図-3(a)において熱画像地表面温度が低い口で囲った区域を拡大した図-3(d)は10階程の建物と林地が並んで存在しており、図-3(e)の TET 地表面温度でも建物や緑地部分の低い領域が多く見られる。

図-4は全撮影日における各平均値のグラフであり、開発モデルによる蒸発散量と地表面温度、気温、熱画像データおよび水蒸気圧を示している。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る傾向があるため、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ている。水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ために低くなっていることが考察される。また4月9日および4月25日を比較すると、TET地表面温度は前者の方が後者よりも高い

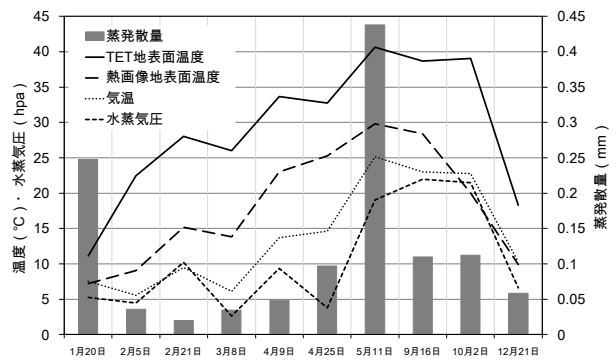


図-4 熱画像地表面温度と TET モデルによる地表面温度および蒸発散量の特徴

が、気温と熱画像地表面温度は逆に前者の方が低くなっている。4月25日の水蒸気圧は低く、熱収支において蒸気圧と顕熱伝達量は反比例の関係があることを考えると、水蒸気圧が小さいことで顕熱伝達量が大きくなったため TET 地表面温度が低くなったと考えられる。

(4) 夏季の蒸発散量および地表面温度の特徴

夏季の蒸発散量および地表面温度の特徴については、4種類の土地利用種別(林地、裸地、河川、建物)を中心に、蒸発散量が多くかつ地表面温度の高い6月30日から7月1日および2004年の最高気温を記録した7月21日の時間変動を考察する。

図-5は6月30日～7月1日における都立杉並高校における降水量、蒸発散量、神田川上流域のほぼ中心に位置する久我山小学校における気温、および解析により得られた地表面温度を示したものである。図-6は7月21日における図-5と同様の図である。

図-5より、最高地表面温度が算定された6月30日時刻15時の蒸発散量を反映して、裸地では蒸発散量0.3mmに対し地表面温度は33℃、建物、林地および河川では蒸発散量0.6mmに対し地表面温度は約29℃となっている。7月1日においては、12時に地表面温度が最高、13時に蒸発散量が最大となり、この時の地表面温度と蒸発散量の値はそれぞれ、河川は30℃および約1.0mm、林地は30℃および0.8mm、裸地は35℃および0.4mm、建物は40℃および0mmとなっている。本研究では、表-2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、特に蒸発散係数について、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いる。河川は、不透水性地物に分類されているが、常に水がある状態を仮定しているため、浸透性地物と同様の地表面温度変化特性を持っている。建物は蒸発散量0mmが反映され、地表面温度は40℃と降雨時の30℃と比べて高く、その差は他の地物と比較して最も大きい。6月30日の蒸発散量の時刻変化を見ると、7時から14時にかけて7.5mmの降水があり、その後

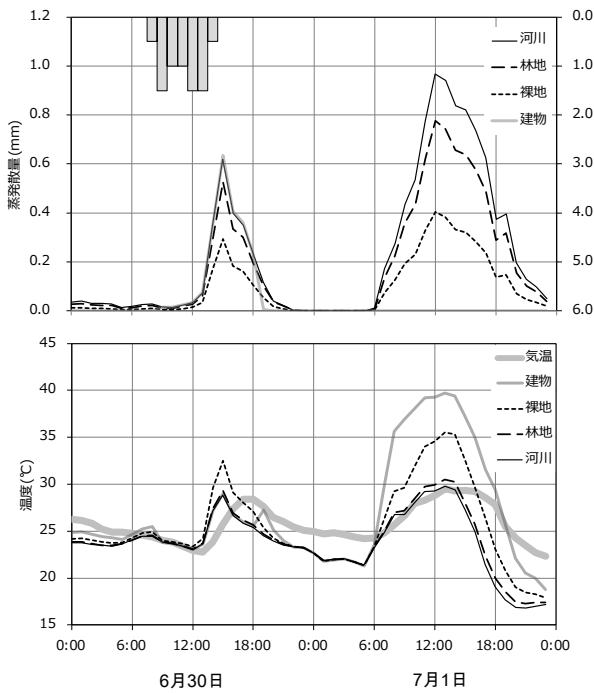


図-5 土地利用種別毎の蒸発散量および地表面温度

表-4 日単位および時間単位の日平均と地表面最高温度

土地利用別	7月1日		7月21日	
	日単位	時間単位の日平均	日単位	時間単位の日平均
林地	24.5	23.6(25.8, 30.5)	32.5	32.2(36.1, 43.1)
裸地	27.8	25.7(28.9, 35.5)	33.7	32.3(36.4, 43.5)
河川	23.7	23.2(25.3, 29.8)	27.3	27.7(29.0, 33.4)
建物	35.0	28.9(33.5, 39.7)	40.2	33.3(37.5, 43.3)

※()内は日中の平均気温、最高値

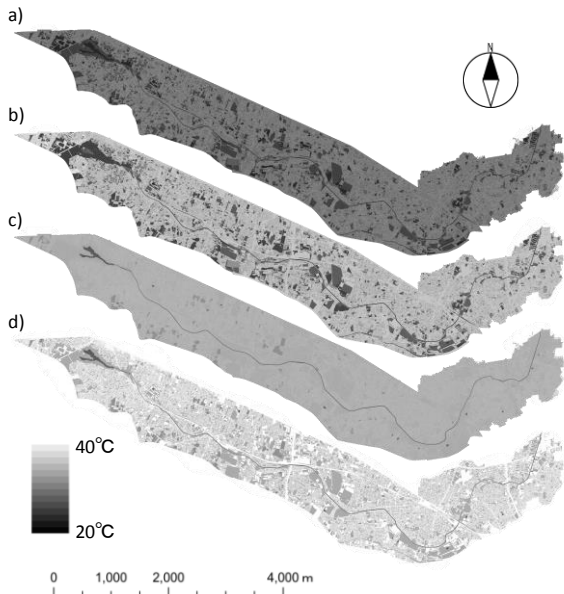


図-7 対象流域の日平均地表面温度分布図, (a) 1時間単位計算による日平均値(7月1日), (b) 日単位計算による結果(7月1日), (c) 1時間単位計算による日平均値(7月21日), (d) 日単位計算による結果(7月21日)

は全ての土地利用種別で蒸発散量が見られるが, 19時に建物からの蒸発散が無くなり建物の温度は僅かながら上昇している. 不浸透性地物においては, 降雨時(地表面に水がある時)に貯留された全雨水が蒸発した直後から

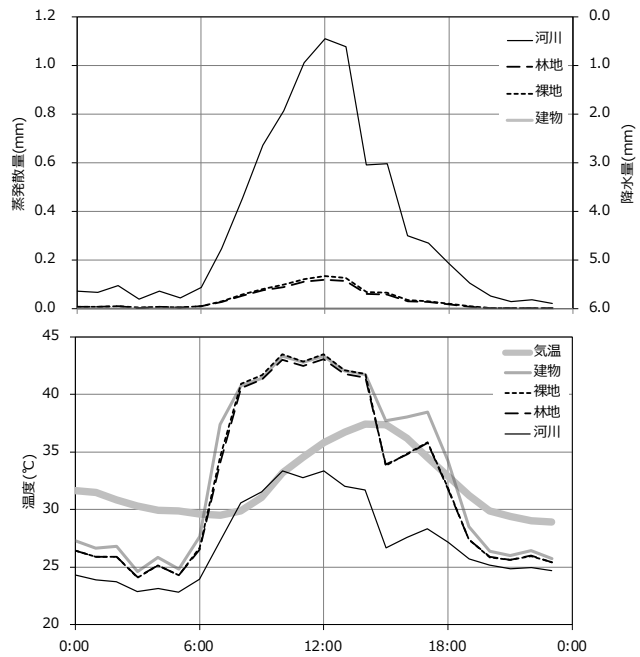


図-6 土地利用種別毎の蒸発散量および地表面温度(7月21日)

a)

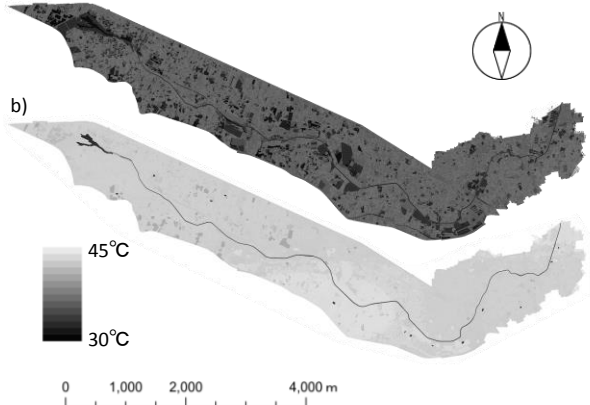


図-8 対象流域の12時における地表面温度分布図, (a) 7月1日12時の結果, (b) 7月21日12時の結果

地表面温度が上昇する. 浸透性地物においては, 降雨終了後においても土壌水分量からの蒸発散が継続するため地表面温度は不浸透性地物ほど上昇しない.

図-6より, 建物, 裸地および林地の蒸発散量は6時から上昇し, 12時に0.13mmで, 19時にゼロとなっている. 建物, 裸地および林地の地表面温度は6時から8時にかけて25°Cから40°Cに上昇し, 14時にかけて最高約44°Cが算定されている. 不浸透性地物と同程度の地表面温度上昇となったのは, 7月21日まで10日連続無降水であったことが影響し, 浸透性地物の土壌水分量の減少により蒸発散量が少なかったものと考えられる.

表-4は7月の1日および21日における, 日単位および時間単位の日平均値, 日中の平均値(6時~18時)および最高値を示したものである. 図-7は対象流域の地表面温度分布図であり, 7月1日の日単位計算値を(a), 1時間単位計算による日平均値を(b), 7月21日の日単位計算値を

(c), 1時間単位計算による日平均値を(d)に示したものである。図-8は12時における地表面温度分布図で, 7月1日を(a), 7月21日を(b)に示したものである。

日単位と時間単位の日平均値とを比較すると, 河川は同程度の温度となっているが, 浸透性地物の場合, 浸透量の多い7月1日は林地で約1°C, 裸地で約2°C, 浸透量の少ない7月21日は林地で0.3°C, 裸地で約1°C日単位の方が高い。不浸透性地物の建物はいずれの日も日単位の方が7°C高くなっている。時間単位の6時から18時までの平均値を用いた場合には, 日単位の値に概ね近い値となっている。日単位の地表面温度が時間単位の値より大きくなる原因として, 入力気象観測データのうち昼間と夜間のデータのばらつきの多い風速が影響しているものと考えられる。すなわち, 7月1日の風速の日平均値は2.9m/sであるが, 夜間(19時から5時)は2.2m/s, 昼間(6時から18時)は3.5m/sであり, 時間単位での計算では日射量の多い昼間の風速を用いたことにより地表面温度が日単位よりも小さくなったのではないかと思われる。

図-8において, 7月1日(a)と7月21日(b)の12時の地表面温度分布は, 日単位計算により得られた日平均値よりもそれぞれ流域平均で約7.5°C, 約6.5°C高い結果が得られている。開発モデルの1時間単位の計算により, 地表面温度の高い夏季日中時における地表面温度空間分布を定量的に推定できることが分かった。

5. むすび

本研究では, 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壌水分量の違いを考慮し, 1時間単位で計算する熱収支式に基づく蒸発散モデルを開発した。開発モデルを神田川上流域に適用し, 2004年の地表面地物要素の1時間単位の地表面温度および蒸発散量の推定を行った。年蒸発散量は既往の日単位モデルの計算値より約2%の増加となり, 既往文献での推定値とほぼ同様の傾向が得られていることが分かった。推定された地表面温度を同時刻の熱画像データとの比較により, 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。また, 夏季の蒸発散量および地表面温度の特性評価から, 土地利用種別毎の気温の違いによる地表面温度, 潜熱, 顕熱および蒸発散量を推定できることを確認し, また開発モデルの1時間単位の計算により, 地表面温度の高い夏季日中時における地表面温度空間分布を定量的に推定できることが示された。

参考文献

- 1) 東京都環境局: ヒートアイランド対策ガイドライン, p.2, 2005.
- 2) 東京都: 東京における自然の保護と回復に関する条例, http://www.reiki.metro.tokyo.jp/reiki_honbun/g1011367001.html (最終アクセス日, 2017年4月5日) .
- 3) 後藤恵之輔: 都市水害における地下事故二題, 土木学会誌, 第85巻, 第6号, pp.66-69, 2000.
- 4) 国土交通省 都市・地域整備局下水道部 国土交通省河川治水課: 雨水浸透施設の整備促進に関する手引き(案)~浸透能力の低減を見込んだ効果把握及び維持管理の考え方について~, pp.66-67, 2010.
- 5) L.W. Sussams, W.R. Sheate, R.P. Eales: Green infrastructure as a climate change adaptation policy intervention: Muddying the waters or clearing a path to a more secure future?, *Journal of Environmental Management*, Vol. 147, pp.184-193, 2014.
- 6) 福岡孝則, 加藤禎久: ポートランド市のグリーンインフラ適用策事例から学ぶ日本での適用策整備に向けた課題, *ランドスケープ研究*, 78(5), 777-782, 2015.
- 7) 統合生物学委員会・環境学委員会合同 自然環境保全再生分科会: 復興・国土強靱化における生態系インフラストラクチャー活用のすすめ, 日本学術会議, 2014.
- 8) Yangwen Jia, Nobuyuki Tamai: Water and heat balances in the middle-reach catchment of Tama river and sensitivity analysis, *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, JSCE, Vol.42, pp.151-156, 1998.
- 9) 神足洋輔, 村上和男, 伊藤一正: 気象モデル WRF を用いた 関東平野における土地利用が夏季の都市気象に与える影響, *水工学論文集*, 第52巻, pp.229-234, 2008.
- 10) Ashie Y., Kono T.: Urban-scale CFD analysis in support of a climate-sensitive design for the Tokyo Bay area, *International Journal of Climatology*, Vol. 31, pp.174-188, 2011.
- 11) T., Koga, A., Kawamura, H., Amaguchi and H., Tanouchi: Assessing impervious area ratios of grid-based land-use classifications on the example of an urban watershed, *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 61, pp. 1728-1739, 2016.
- 12) 天口英雄, 河村明, 高崎忠勝: 地物データ GIS を用いた新たな地物指向分布型流出解析モデルの提案, *土木学会論文集 B*, Vol.63, No.3, pp.206-223, 2007.
- 13) 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, No.4, pp.I_319I_324, 2014.
- 14) 古賀達也, 河村明, 天口英雄, 田内裕人: 神田川上

- 流域における土地利用種別毎の蒸発散量および地表温度の推定, 土木学会論文集 G (環境), Vol.71, No.5, pp.I_311-I_317, 2015.
- 15) 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(水工学), Vol.71, No.4, pp.I_253-I_258, 2015.
- 16) 三上岳彦, 大和広明, 広域 METROS 研究会: 広域 METROS による首都圏高密度気温観測とその都市気候学的意義, 地学雑誌, 120(2), 317-324, 2011.
- 17) 近藤純正: 地表面に近い大気科学, 初版, 東京大学出版会, pp. 137-145, 2000.
- 18) 安藤義久, 虫明功臣, 高橋裕: 丘陵地の水循環機構とそれに対する都市化の影響, 第 25 回水理講演会論文集, pp.197-208, 1981.
- 19) 近藤純正, 中村亘, 山崎剛: 日射量および下向き大気放射量の推定, 天気, 38-1, 2001.
- 20) 二宮秀興, 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・衛生工学会論文集, No.60, 1996.
- 21) 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.
- 22) Couckuyt, I., Forrester, A., Gorissen, D., De Turck, F., Dhaene, T.: Blind Kriging: Implementation and performance analysis, *Advances in Engineering Software* (Elsevier), Vol.49, No.3, pp. 1-13, 2012.
- 23) 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.
- 24) 健全な水循環系構築に関する関係省庁連絡会議: 神田川流域水循環系再生構想検討報告, 2003.
- 25) Earth Explorer(<https://earthexplorer.usgs.gov/>), (最終アクセス日 2017年4月6日).
- 26) NASA: Landsat 7 Science Data Users Handbook (https://landsat.gsfc.nasa.gov/wp-content/uploads/2016/08/Landsat7_Handbook.pdf), (最終アクセス日 2017年4月6日).
- 27) 巖網林, 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), pp. 695-710, 2002.

(2017.4.7 受付)

DEVELOPMENT OF AN HOURLY EVAPOTRANSPIRATION MODEL USING THE URBAN LANDSCAPE GIS DELINEATION OF THE UPPER KANDA RIVER WATERSHED

Ryosuke TAKAYAMA, Hideo AMAGUCHI, Akira KAWAMURA
and Tatsuya KOGA

In this study, an hourly evapotranspiration model that can express the amount of evapotranspiration accounting for differences in soil moisture and infiltration characteristics of individual land-surface features is developed. The model is composed of two components; the pervious area model based on SMPT model to represent the permeation process of the surface soil, and the impervious area model considering depression storage in impervious areas. Furthermore, the pervious area model takes into account the state of the soil moisture and differences in land use of the land-surface features, and estimates the latent and sensible heat using a heat balance equation based on the bulk formula. The model was applied to the highly urbanized upper Kanda River watershed, and the impacts of differences in land use on the spatial distribution of evapotranspiration and land-surface temperature was analyzed.