

TETモデルを用いた神田川上流域における 時間単位地表面温度・蒸発散量の推定

高山 亮輔^{1*}・天口 英雄¹・河村 明¹・古賀 達也²

¹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）

²(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: takayama-ryosuke@ed.tmu.ac.jp

本論文では高度な地物データ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、熱収支式より日蒸発散量を算出できる蒸発散モデルとしてTET (Tokyo Evapotranspiration)モデルを用いて、時間単位の地表面地物要素毎の地表面温度および蒸発散量を推定した。対象流域は神田川上流域とし、2004年のMETROSデータを用いて、クリギング法による各地物の気温分布を作成し推定に適用した。また、各地物の気温の違いによる地表面温度および蒸発散量を推定することで、本モデルが気象の影響を細かに表現および評価することができ、かつ年間の総蒸発散量の算出から時間単位においても本モデルが妥当であると検討することができた。

Key Words : *evapotranspiration, earth's surface temperature, advanced feature data GIS, heat balance, soil water content, kanda river upper basin*

1. はじめに

世界では都市化が進んでおり、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、畑地等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。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及び蒸発散量の推定を行った。

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る。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⁴⁾。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⁵⁾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2mm⁶⁾を考慮している。ただし、TETモデルでグループ分けしている、河川、池、プール等是不浸透地物に分類されているが、常に水がある状態であることを考慮し、降雨がなくとも蒸発散があるように設定した。

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⁷⁾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⁸⁾した。

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

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

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

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

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

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⁹⁾。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)および式(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^2)、 H ：顕熱伝達量(W/m^2)、 ℓE ：潜熱伝達量(W/m^2)、 G ：地中熱伝達量(W/m^2)、 σ ：ステファン・ボルツマン定数($5.67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)、 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/m^2)、 L_{sky} ：大気放射量(W/m^2)、 c_p ：空気の定圧比熱($1005 \text{J/kg} \cdot \text{K}$)、 ρ ：空気密度(kg/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/s)、 T ：大気気温(K)、 ℓ ：水の気化潜熱($2.5 \times 10^6 \text{J/kg}$)、 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 ℓE と H を求めることができ、式(4)より算出された ℓE より蒸発散量 E の推定を行う。

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 α によって、土地利

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、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。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、METROSデータ（概ね4km²に1観測所）を用いることで地表面地物毎の蒸発散量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-2はその気温分布の一例（7月21日13時）を示している。

4. 神田川上流域における時間蒸発散量の推定

(1) 解析条件

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蒸発散量を推定する。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

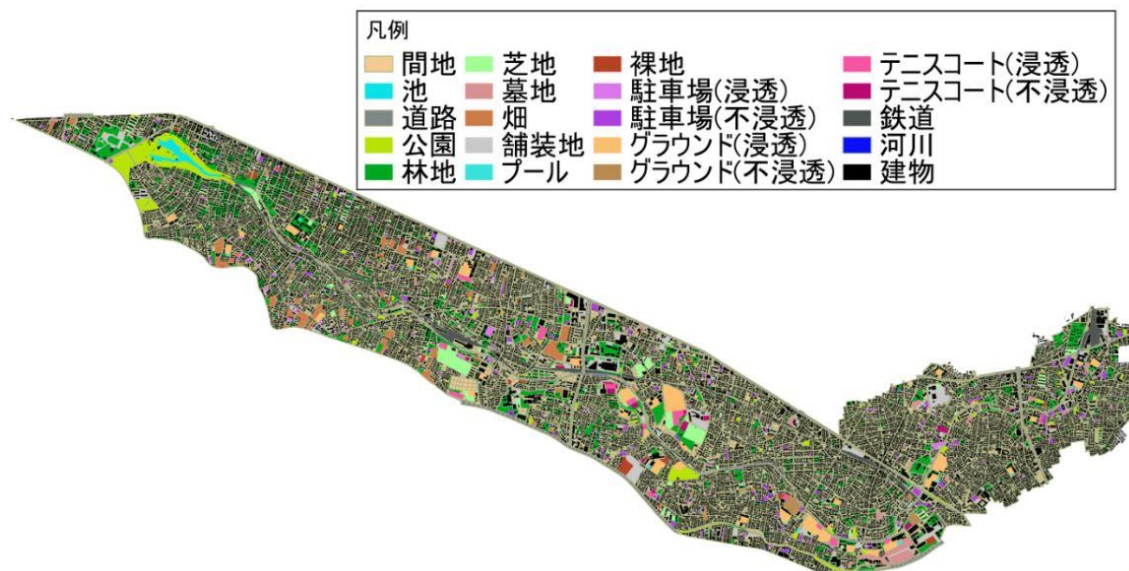


図-1 対象流域における高度な地物データ GIS

タGISでは、表-1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（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。

(2) 妥当性の検討

2004年間を通して本モデルが表現できているか確認するため、土地利用種別毎の年間蒸発散量を検証する。表-2は20グループの土地利用種別毎における2004年間の年間蒸発散量、蒸発散量の比率、面積率を示したものである。年間蒸発散量は大きい順に、面積率が大きくかつ浸透地物の間地、蒸発散係数の大きい林地、次いで面積率の大きい建物となった。間地の蒸発散量の比率は30.4%と大きく林地22.4%に対して+8%となっている。間地の面積率は林地の約4倍に相当するので設定されている林地の蒸発散係数の大きさが影響していると考えられる。他の土地利用種別も同様に考察すると、年間を通してパラメータ設定が反映されている。

次に総蒸発散量の妥当性を検討する。林地の年間蒸発散量について、日本の森林の一般的な蒸発散量は500～1,000mm/yearのオーダーであるのに対し、本モデルで算定した林地の蒸発散量は789mm/yearであり、概ね妥当な結果が得られていると考えられる。次に神田川上流域の全体の水収支の観点からの推定を試みる。METROS20都



図-2 クリギング法による気温分布

例：7月21日13時

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 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

立杉並高校における2004年の年間総雨量は1,750mmであり、流域全体の総雨量ボリュームに換算すると20,619千m³である。これに対し、本モデルで得られた全地物からの年間総蒸発散ボリュームは3,528千m³であるため蒸発散比は17.1%となる。一方、神田川全流域の流域平均雨量と年間蒸発散量は1,512mm/yearおよび231mm/year程度¹⁴⁾、東京都全域の年間雨量と蒸発散量は1,405mm/yearおよび412mm/year程度¹⁵⁾となっている。年間総雨量に対

表-2 土地利用種別毎の2004年間の各値

No	土地利用種別	年間蒸発散量(千 m^3)	蒸発散量の比率(%)	面積率(%)
1	建物	537	15.2	29.5
2	駐車場(浸透)	28	0.8	0.5
3	駐車場(不浸透)	33	0.9	1.8
4	グラウンド(浸透)	105	3.0	2.0
5	グラウンド(不浸透)	4	0.1	0.2
6	林地	789	22.4	7.6
7	芝地	80	2.3	1.5
8	畑	103	2.9	1.6
9	公園	127	3.6	2.4
10	墓地	33	0.9	0.6
11	舗装地	60	1.7	3.3
12	鉄道	24	0.7	1.3
13	間地	1072	30.4	29.8
14	テニスコート(浸透)	26	0.7	0.5
15	テニスコート(不浸透)	5	0.1	0.3
16	裸地	21	0.6	0.5
17	プール	15	0.4	0.1
18	道路	281	8.0	15.5
19	池	50	1.4	0.3
20	河川	137	3.9	0.9
合計		3528	100.0	100.0

する蒸発散比は15%から29%程度のオーダーであると考えられ、本モデルで得られた蒸発散比17.1%は、神田川全流域での概算値に近く妥当な値となっている

5. 時間蒸発散量の推定結果

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)の蒸発散量及び地表面温度特性について考察する。

(1) 時間変動

図-3は蒸発散量およびMETROS20都立杉並高校における降雨量を、図-4は地表面温度および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。図-3より、最大蒸発散量は大きい順に、降雨のあった6月30日は建物に次いで道路と河川、そして林地、裸地となり、無降雨の7月1日は河川、林地、裸地の順で、道路と建物の蒸発散量は0mmとなっている。図-4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・河川となり、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は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。河川は、不浸透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ので、浸透地物と同様の地表面温度変特性を持っている。

6月30日において、すべての土地利用種別で蒸発散量があった。対して、7月1日は道路・建物の蒸発散量がなかった。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

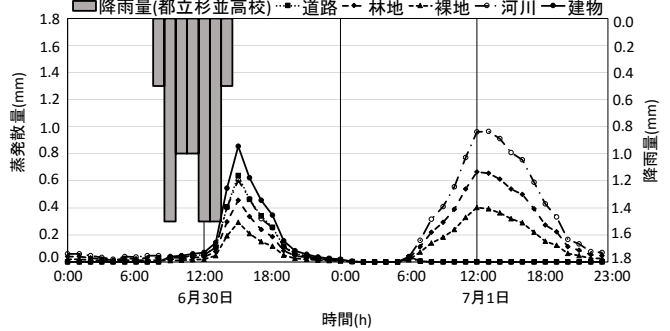


図-3 蒸発散量の時間変化

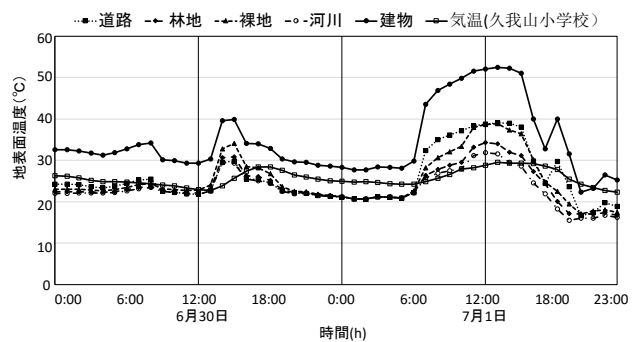


図-4 地表面温度の時間変化

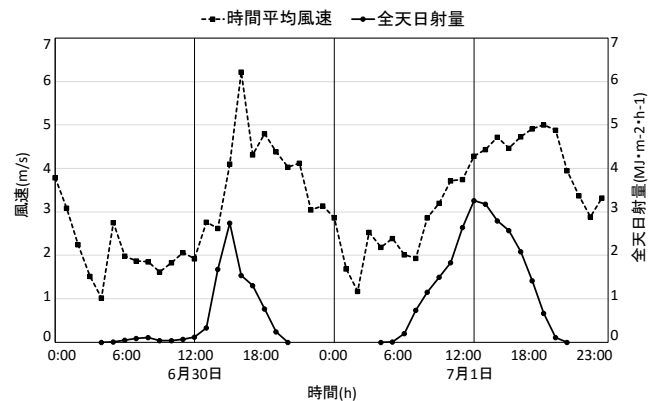


図-5 風速及び全日射量の時間変化

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いると考えられる。

図-5は風速および全日射量の時間変化を示したものである。全日射量の最大値は、6月30日では降雨があったため15時、7月1日では正午にとっている。図-3に示す蒸発散量において、蒸発散量と全日射量のピーク時

間が両日ともに一致していることが分かる。同様に図-4に示す地表面温度において、6月30日は地表面温度と全天日射量のピーク時間が一致している。7月1日は、建物、道路に加え裸地と気温において地表面温度のピーク時間が全天日射量から1時間遅れた。裸地を除いた浸透地物と河川はピーク時間が一致した。このことから、全天日射量による温度への影響の早さが大気、地物の特徴（パラメータ設定、河川の特長）で違いが表現されていると考えられる。また6月30日の特徴として、浸透・不浸透に関わらず地表面温度は全天日射量のピーク時間と一致している。これより、降雨の有無が不浸透地物の地表面温度のピーク時間のずれに関係すると考えられる。

図-5より、全天日射量変動を追う形で風速が変動していることが分かる。日中、全天日射量が上昇すれば、地表面温度も上昇している。それによる大気圧の変化が生じ、風速が日射量の変動から時間差で最大になっていると考えられる。結果的に、全天日射量が減少している時に風速が速くなる。また、6月30日と7月1日を比べると全天日射量が急上昇するほど、風速も急上昇していることが分かる。そして、風速は地表面温度の上昇を抑制する要素であり、式(1)、式(3)および式(4)より表現されている。そこで6月30日において、全天日射量と全地物の地表面温度のピーク時間が一致した理由として以下が考えられる。降雨が終わったため、全天日射量が急激に上昇し、風速が速くなった。つまり、不浸透地物の地表面温度が通常最大値をとる時間に風速が速く、地表面温度がすぐ減少変動になったからであると考えられる。対して、7月1日は、全天日射量がなだらかな増加であったため、地表面温度と全天日射量のピーク時間のずれが表現されたと考えられる。以上より、降雨後に風速の影響が顕著に出ると考えられる。

(2) 夏季特性

夏季特性は7月から9月において考察を行う。表-3は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、河川は特性上、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。標準偏差は林地が最も小さくなり、これより、浸透地物かつ各パラメータが大きいものほど地表面温度の変動が小さくなることが分かった。そして、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-4は土地利用種別毎の最大蒸発散量、最小蒸発散量、平均蒸発散量および標準偏差を示したものである。最大蒸発散量について、各パラメータが小さい裸地が最も小さくなり、他に河川、建物、林地、道路の順で大きな

った。顕著に差が出たのは平均蒸発散量であった。最大蒸発散量において建物、道路は多かったが、平均蒸発散量では少なくなった。これは全体を通して不浸透地物の蒸発散量は降雨によるという表現ができているといえる。また、河川は特性上、平均蒸発散量は高い値になった。標準偏差は裸地が最も小さくなり、これより、浸透地物かつ各パラメータが小さいものが最も蒸発散量の変動が小さくなることが分かった。

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。全体の頻度でみると、13時の頻度が多い。土地利用種別でみると建物、道路、裸地、気温は13時の頻度が多く、河川は12時が多い。これは、夏季を通して図-4および図-5と同様の傾向が多いことを示していると考えられる。また、最高地表面温度に達する時間帯に広がりがあったのは、降雨と風速の影響であると考えられる。地表面温度が最高となる時刻が太陽の昇っていない1時、朝方8時、夕方15時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最高地表面温度に達する最も頻度の高い時間帯13時に重なる時間帯の降雨、かつ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-7は7月から9月の土地利用種別毎で最大蒸発散量に達する時間帯の頻度分布を示したものである。林地、裸地、河川は13時前後に顕著に集中していることが分かる。また、道路、建物はばらつきがあることが分かった。つまり、夏季を通して不浸透域である道路・建物は降雨によって蒸発散量が左右されることが表現され、蒸発散量

表-3 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)
最大温度(℃)	72.8	60.7	61.4	41.0	97.6	30.3
最小温度(℃)	11.8	11.9	11.8	11.9	15.8	18.2
平均温度(℃)	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

表-4 土地利用種別毎の蒸発散量特性

土地利用種別	道路	林地	裸地	河川	建物
最大蒸発散量(mm)	0.79	0.97	0.45	1.06	1.05
最小蒸発散量(mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
平均蒸発散量(mm)	0.02	0.10	0.06	0.22	0.03
標準偏差	0.08	0.15	0.07	0.26	0.11

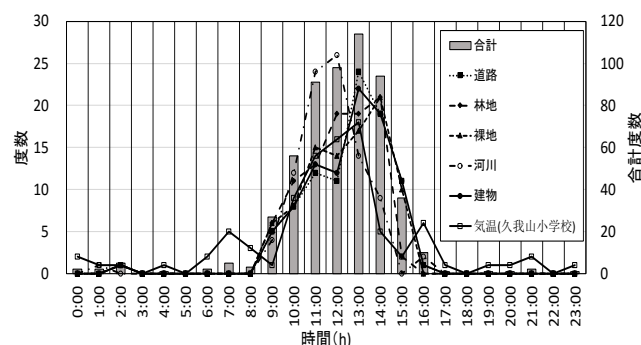


図-6 最大地表面温度の時間頻度分布

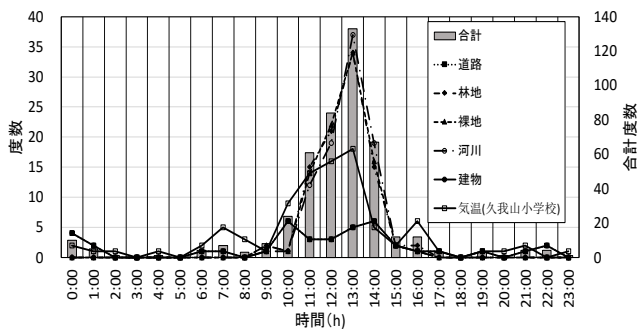


図-7 最大蒸発散量の時間頻度分布

が発生する時間帯は不定期であることが分かる。浸透域である林地・裸地，常に水がある河川は降雨の有無は相関が小さく，図-4および図-5と同様の傾向が表現されている。図-7と比べると，地表面温度が最大に達する時間帯の頻度と合致はしないことが分かった。このことから降雨や風速による影響は蒸発散量よりも地表面温度の方が大きいように表現されていると考えられる。

7. 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および蒸発散量の推定を行った。その結果，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，地表面温度および蒸発散量とそれぞれ，降雨，風速，全天日射量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) 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-I_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) 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) 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.
- 7) 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.
- 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, No.3, p.265-275, 1992.
- 9) 近藤純正：地表面に近い大気の科学，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.
- 14) 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，p.5, 2003
- 15) 東京都都市計画局都市づくり政策部広域調整課：東京都水循環マスタープランの概要，p. 2