

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面温度の推定

古賀 達也^{1*}・河村 明²・天口 英雄²・田内 裕人²

¹株式会社建設技術研究所 (〒103-8430東京都中央区日本橋浜町3-21-1)

²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: 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表現できる蒸発散モデルを、高度に都市化が進展した神田川上流域に適用し、推定された蒸発散量を神田川流域における実測値と比較することによりその妥当性を検証するとともに、対象流域での気温および土地利用の違いが蒸発散量および地物表面温度の空間分布に及ぼす影響について評価した。実流域への適用にあたっては、東京都内で密に観測が行われているMETROSデータから作成した気温分布を土地利用種別地物毎に与え、日単位計算による地物毎の蒸発散量および地表面温度を推定した。その結果、気温により異なる土地利用種別毎の潜熱、顕熱および蒸発散量を推定できることを確認し、空間的な蒸発散量の違いおよび地物表面温度の空間分布について把握することができた。

Key Words : *Evapotranspiration, Land-surface temperature, Land use type, Soil moisture, METROS*

1. はじめに

都市部において周辺部より高温域になる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、熱中症や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、生態系へも影響を及ぼすことから世界の大都市部での喫緊の課題であり、東京都においても過去100年の間に約3.0°Cの気温上昇が観測されている¹⁾。ヒートアイランド緩和策の推進は急務であり、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1,000m²以上の敷地における新築時は屋上緑化計画の義務づけを実施しているなど、ヒートアイランド緩和策を推進している。これらの緩和策を推進していくためには、行政部局によるヒートアイランド対策として屋上緑化等を行う場合の施策評価をシミュレーションモデルによる予測により実施する必要がある。しかしながら、ヒートアイランド緩和策に対するシミュレーション評価はこれまで多く行われているが、その多くはグリッド型の土地利用情報を用いた広域での緩和策評価（たとえば神足ら²⁾、Ashie and Kono³⁾）や詳細な街区単位の緩和策評価（たとえば田村ら⁴⁾）、または実証実験による局所的な評価等である。ヒートアイランド緩和策を推進し

ていくためには、対策の施策評価を実施する必要があるが、個々の土地利用状況の改変による気温抑制効果を評価するためには、グリッド単位の代表土地利用による表現では無く、個々の地物の土地利用改変を表現できるモデルが必要である。著者らが知る限り、個別の土地利用種別の特性を表現した地表面地物要素毎のヒートアイランド緩和策評価とこれらの流域単位への効果を同時に評価可能なモデルは見あたらない。こうした背景のもと、道路や建物の建設状況など、具体的な都市化の進展状況をできる限り忠実にモデル化することが可能で、屋上緑化等による蒸発散量の変化に伴う気温上昇抑制効果を個々に検証・予測できるシミュレーションモデルが切望されている。

著者らはこれまでに、高度な地物データGISを用いて地表面を浸透域と不浸透域に分類し、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を考慮して表現できる蒸発散モデルであるTET (Tokyo EvapoTranspiration) モデルを提案しており⁵⁾、このモデルでは算定された地表面地物要素毎の地表面温度を用いて潜熱・顕熱を求め、地表面地物要素毎の蒸発散量時系列を表現可能である。なお、「高度な地物データGIS」とは著者らが基礎的地物データGISをベースに浸透域に関

する情報を新たに組み込み、都市を形成している土地利用を浸透特性で分類するGISデータであり、分布型洪水流出モデルに適用できる地物形状を忠実に反映したGISデータのことであり⁶⁾。著者らは、この地表面温度変化を表現できるTETモデルを用いて、屋上緑化および保水性舗装等による土地利用の改変が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して与える影響についてもシミュレーション評価を実施している⁷⁾。

しかしながら、対象流域である神田川上流域内および近傍には気象庁アメダス観測所が存在しないため、十分な気象データを用いたTETモデルの実流域での検証ができていなかった。その一方、東京都区内には、2002年～2004年度のプロジェクトで(公財)東京環境科学研究所が首都大学東京と共同で126カ所という高密度で設置していた、首都圏環境温度・降雨観測システムであるメトロス (METROS: Metropolitan Environmental Temperature and Rainfall Observation System)⁸⁾の観測データが存在していた。METROSデータは貴重なデータであるにも関わらず一般公開されていないため、あまり活用されてこなかったが、本研究では東京都環境科学研究所と共同研究契約を締結しMETROSデータを手に入れることができたため、このMETROSデータを用いてTETモデルを実流域へ適用することにより、TETモデルの検証が可能となった。著者らの既往研究⁷⁾ではMETROSデータを用いてヒートアイランド緩和策としての土地利用改変シナリオを想定したシミュレーション評価を実施しているが、土地利用改変による地表面温度変化の比較を目的としていたため、METROSデータの実測気温をもとにしたシミュレーションに与える気温分布として簡易的な方法(ティーセン分割)により気温分布を与えた。本論文ではMETROSデータの実測気温をもとに気温分布を詳細に設定し全地表面地物要素毎に与えることにより、地物毎に異なる土地利用種別毎の蒸発散量と地物地表面温度の分析を目的としている。

本論文では、TETモデルを高度に都市化の進展した神田川上流域に適用し、METROSによる観測気温データを用いて、2004年の1年間の土地利用種別毎の日蒸発散量および日平均地表面温度の算定を行った。これより、流域の年単位の蒸発散量を算定し、実測の年蒸発散量との比較により蒸発散パラメータの妥当性を確認するとともに、神田川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の空間分布、および地物表面温度の空間分布に及ぼす影響について評価した。

2. 蒸発散モデル (TETモデル) の概要⁵⁾

地表面の熱収支式の基礎方程式である式(1)～(3)を用

いて、熱収支式により潜熱、顕熱を評価し、求められた潜熱より蒸発散量の推定を行う⁹⁾。式(4)は蒸発効率 β の算定式である。なお、式(3)中の q_{SAT} は地表面温度 T_S の関数であり、式(2)、(3)を式(1)の熱収支式に代入して T_S について解いた後、式(2)、(3)より潜熱伝達量 ℓE と顕熱伝達量 H について求めることとなる。

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

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

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

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

ここに、 R_n : 正味放射量 (W/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)、 T_S : 地表面温度 (K: ケルビン)、 c_p : 空気の定圧比熱 ($1005 J/kg/K$)、 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 ($2.50 \times 10^6 J/kg$)、 β : 蒸発効率 (無次元)、 q_{SAT} : T_S に対する飽和比湿 (無次元)、 q : 大気の比湿 (無次元)、 k : 土地利用種別毎に設定する蒸発散係数 (無次元)、 λ_x : 土壌水分係数 (無次元)である。土壌水分量評価については地表面地物要素の浸透特性と土壌水分量の違いによる蒸発散量を表現できる蒸発散モデルとしてSMPTモデル (Soil Moisture Parameter Tank Model)¹⁰⁾による浸透域モデルを構築している。不浸透域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。

3. 神田川上流域の流域特性

(1) 神田川上流域の概要

本論文では、神田川の井の頭池から善福寺川合流点までの上流域約11.5 km^2 、流路延長約9 kmを対象流域として設定した(図-1)。図-1に対象とする神田川上流域の高

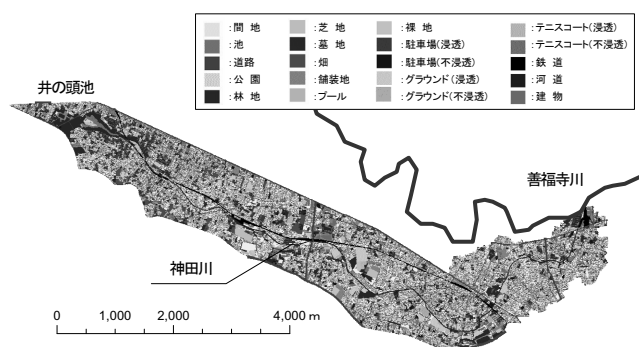


図-1 神田川上流域の高度な地物データ GIS⁷⁾

度な地物データGISを示すが、本流域の全地物を20の土地利用種別に分類している。

(2) 高度な地物データGISの特性

表-1に高度な地物データGISによる地表面地物要素数(ポリゴン数)および面積率を示す。表-1より、地表面地物データの要素数は104,342個であり、面積率では間地と建物がそれぞれ約30%を占めており最も多く、次いで道路の約16%、林地の約9%の順となっており、間地、建物、道路および林地の4土地利用種別で全体の約84%を占めている。

(3) METROSデータ

METROS(メトロス)は東京都環境科学研究所と首都大学東京が共同で都内126地点に設置している気象観測機器・システムであり、METROS20とMETROS100の2種類の観測システムに分けられる。METROS20は都区内20ヶ所のビルの屋上部等で、風向、風速、気温、湿度、降水量、気圧を計測しており、METROS100は、23区内106ヶ所の小学校の百葉箱内に設置された小型の温湿度データロガーによる観測システムで温度、湿度が記録されている⁸⁾。METROSは2002年~2004年度のプロジェクトで観測が実施されており、一方、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、本論文ではMETROS観測データの2004年の気象データを用いる事とした。

図-2 a)に神田川上流域周辺のMETROS観測所の位置関係を示す。神田川上流域周辺ではMETROS20の観測所は2地点、METROS100の観測所は7地点の計9地点が存在している。なお、図-2 a)の範囲内には気象庁AMeDAS観測所(概ね300km²に1観測所)は存在しておらず、METROSデータ(概ね4km²に1観測所)の活用により神田川上流域でのTETモデルの検証が可能となっている。また、図-2 a)にはこの9観測所の気温について標高による補正は行わず、観測値を用いて簡便法により作成した蒸発散量が最大となる7月1日の気温分布図(式(2)におけるTに相当)を示している。本論文では、2004年の観測所日平均気温を用いてクリギング法¹¹⁾により日毎に異なる等気温分布図を1年間分作成し、104,342個のそれぞれの各地表面地物要素毎に異なる気温データを与えており、図-2 b)はその気温分布図を示している。図-2 a)に示す簡便法による気温分布と図-2 b)を比較すると、境界部の不連続性が解消され、より現実的な気温分布となっていることが分かる。

表-2に観測地点毎の月平均及び年平均気温を示す。表-2の月平均気温よりSt.8が夏場に最も高温でSt.1が最低

表-1 高度な地物データ GISによる要素数および面積率⁷⁾

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

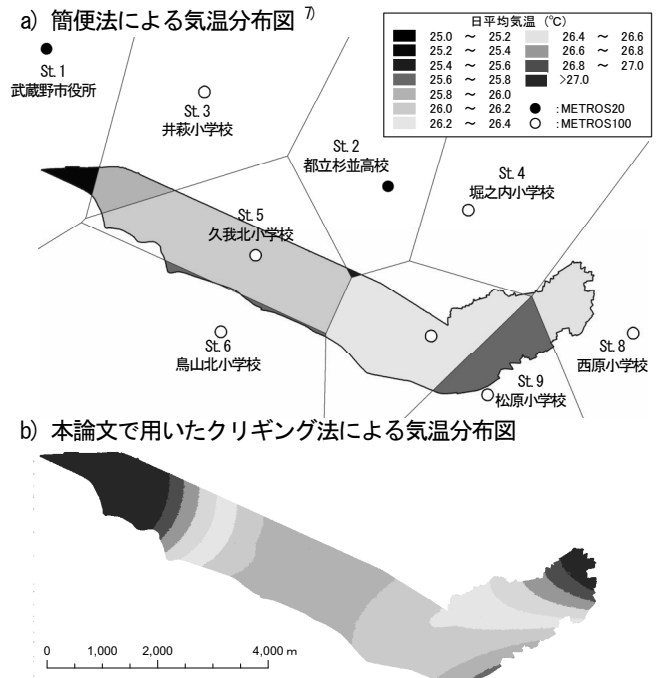


図-2 対象流域周辺のMETROS設置位置と7月1日の気温分布図、a)簡便法による⁷⁾、b)本論文で用いたクリギング法による

表-2 観測点毎の月平均および年平均気温⁷⁾

月	観測地点								
	St. 1	St. 2	St. 3	St. 4	St. 5	St. 6	St. 7	St. 8	St. 9
日平均気温の月平均(°C)									
1	5.2	5.4	5.0	5.5	5.6	5.6	5.1	5.9	5.7
2	7.4	7.6	7.3	7.8	7.8	7.8	7.4	8.3	7.9
3	8.9	9.1	9.3	9.6	9.5	9.1	9.3	9.8	9.3
4	15.5	15.8	16.0	16.3	16.1	15.9	16.1	16.6	16.1
5	18.9	19.2	19.5	19.7	19.5	19.3	19.7	19.9	19.5
6	23.1	23.3	23.7	23.8	23.5	23.4	23.7	24.0	23.5
7	27.7	28.1	28.6	28.8	28.4	28.3	28.5	29.0	28.5
8	26.2	26.6	27.0	27.2	26.8	26.9	26.9	27.4	26.9
9	24.2	24.6	24.8	25.1	24.9	25.0	24.9	25.4	24.9
10	16.4	16.7	16.8	17.0	16.7	16.9	16.7	17.3	16.9
11	14.4	14.7	14.3	14.9	15.1	14.6	14.2	15.2	14.8
12	8.5	8.8	8.5	8.8	9.0	8.6	8.2	9.3	8.9
年平均(°C)	16.4	16.7	16.7	17.1	16.9	16.8	16.7	17.4	16.9

となっており、年間平均気温で見るとSt.8が17.4°Cに対し、St.1の年間平均気温は16.4°Cであり約1°Cの差がある。

4. 蒸発散量の推定

(1) 計算条件

本論文では、2004年の1月～12月の1年間を対象に、TETモデルを用いて地表面温度の算定および、それらを用いて算定できる土地利用種別毎の日単位の潜熱、顕熱および蒸発散量の解析を行った。バルク式に用いる日平均気温については、土地利用種別毎の地表面地物要素の位置に応じて、クリギング法により作成した空間分布の気温を与えた。風速についてはMETROS100の観測地点では観測されていないため、風速が観測されているMETROS20のSt.2における観測値を用いた。全天日射量についてはMETROSでは観測されていないため、AMeDAS「東京」における観測値を用いた。大気放射量については、近藤の提案する手法¹²⁾により算出した。

高度な地物データGISでは、表-3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、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 k 、飽和土壌水分量 S_{sat} 等を設定する必要がある。浸透域についての上記パラメータについては、20の土地利用種別のうち浸透域である10種の土地利用種別についてパラメータを設定した。なお、土地利用種別は10種存在するが大きくは4グループに分類され、各グループの土地利用種別毎のパラメータは同様とした。グループ1は林地、グループ2は畑、グループ3は駐車場(浸透)、グラウンド(浸透)、芝地、公園、墓地、テニスコート(浸透)、間地(浸透域分)の7種別、グループ4は裸地とした。蒸発散パラメータの設定については既往研究における文献値をほぼそのまま用いた。具体には、グループ1とグループ2の蒸発散係数 k と飽和土壌水分量設定 S_{sat} については竹下と高瀬¹³⁾の値、グループ4の蒸発散係数 k と飽和土壌水分量設定 S_{sat} については藤田ら¹⁴⁾の値を用い、グループ3についてはグループ2と4の平均値とした。ただし、グループ3の蒸発散係数 k については藤田ら¹⁴⁾の値である0.13を用いた場合に裸地の年間蒸発散量が不浸透域より小さくなる不具合があったため⁵⁾、本論文では0.25へと見直しを行っている。最小容水量 S_n および初期水量 $S(0)$ については荒木ら⁹⁾の設定方法を参考として S_{sat} の0.8倍および0.7倍とした。地下水涵養定数 γ についても荒木ら⁹⁾の設定値を用いた。また、不浸透域の水

域以外である建物、駐車場(不浸透)、グラウンド(不浸透)、舗装地、鉄道、間地(不浸透域分)、テニスコート(不浸透)、道路の8種別はグループ5とし、直接流出発生高(窪地貯留高)は一般的な値¹⁵⁾を採用し2mmと設定した。不浸透域の水域であるプール、池、河道の3土地利用種別についてはグループ6とした。以上6グループの蒸発散パラメータを表-3に示す。また、アルベドについても同様に6グループに分類し、土地利用種別毎に表-3に示す一般的な値¹⁶⁾を採用した。

(2) 計算結果とその考察

上記の計算条件をもとに、対象流域である神田川上流域において2004年の1年間の日単位計算による地物毎の蒸発散量の算定を行った。図-3に代表例として流域内に位置するSt.5の近傍における土地利用種別毎の可能蒸発散能と土壌水分量を考慮した実蒸発散量時系列をグループ毎に示している。なお、図-3には入力条件として与えたSt.2の日雨量、St.5の日平均気温の時系列変化も併記している。St.5の日平均気温は、7月～8月が約30°Cと

表-3 土地利用種別毎面積、面積率、蒸発散パラメータ⁷⁾

No	土地利用種別	浸透特性	面積(km ²)	面積率(%)	飽和土壌水分量 S_{sat} (mm)	最小容水量 S_n (mm)	地下水涵養定数 γ (1/s)	初期水量 $S(0)$ (mm)	蒸発散係数 k	アルベド α	定数が同値の区分※
1	建物	不浸透	3.38	29.39	-	-	-	-	-	0.12	グループ5
2	駐車場(浸透)	浸透	0.06	0.52	92	74	0.8	64	0.34	0.10	グループ3
3	駐車場(不浸透)	不浸透	0.21	1.80	-	-	-	-	-	-	グループ5
4	テニスコート(浸透)	浸透	0.23	1.96	92	74	0.8	64	0.34	0.10	グループ3
5	テニスコート(不浸透)	不浸透	0.02	0.20	-	-	-	-	-	-	グループ5
6	林地	浸透	1.04	9.05	138	110	0.8	97	4.38	0.15	グループ1
7	芝地	浸透	0.17	1.49	92	74	0.8	64	0.34	0.10	グループ3
8	畑	浸透	0.19	1.64	104	83	0.8	73	0.55	0.23	グループ2
9	公園	浸透	0.10	0.91	92	74	0.8	64	0.34	0.10	グループ3
10	墓地	浸透	0.07	0.61	92	74	0.8	64	0.34	0.10	グループ3
11	舗装地	不浸透	0.38	3.30	-	-	-	-	-	-	グループ5
12	鉄道	不浸透	0.15	1.30	-	-	-	-	-	-	グループ5
13	間地	50%浸透	3.43	29.83	92	74	0.8	64	0.34	0.10	グループ3
14	テニスコート(浸透)	浸透	0.05	0.47	92	74	0.8	64	0.34	0.10	グループ3
15	テニスコート(不浸透)	不浸透	0.03	0.26	-	-	-	-	-	-	グループ5
16	裸地	浸透	0.05	0.46	80	64	0.8	56	0.25	0.10	グループ4
17	プール	不浸透	0.01	0.10	-	-	-	-	-	-	グループ5
18	道路	不浸透	1.79	15.52	-	-	-	-	-	-	グループ5
19	池	不浸透	0.04	0.31	-	-	-	-	-	-	グループ5
20	河道	不浸透	0.10	0.87	-	-	-	-	-	-	グループ5

※グループ5は不浸透域(水域以外)で、直接流出開始高を2mmに設定

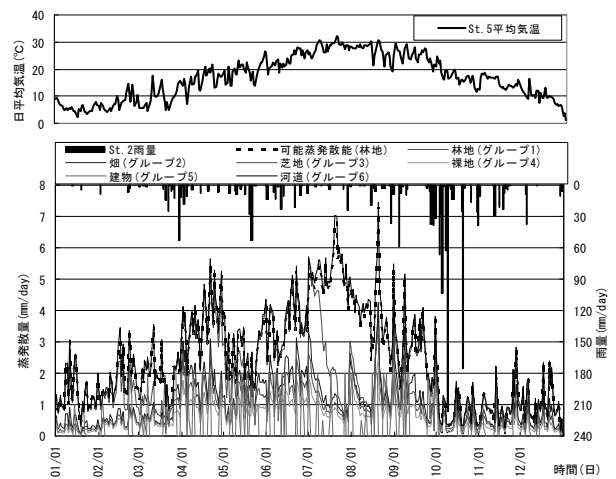


図-3 土地利用グループ毎の蒸発散量 (St.5の近傍地物)

ピークであり、熱収支式より算定される可能蒸発散能は土地利用種別に関わらず最大で約7 mm/dayとなっている。図-3より林地(グループ1)および畑(グループ2)では7月下旬の実蒸発散量は可能蒸発散能に対してかなり小さくなっている。これは7月に降雨が少なく蒸発により土壌水分が減少していくことにより、蒸発効率 β が小さくなるためである。一方、不浸透域では図-3より建物等(グループ5)については、窪地貯留高を2 mmと設定しているため、それ以上の降雨が発生した場合は直接流出となり、最大蒸発散量は2 mm/dayとなっている。河道等(グループ6)では、実蒸発散量を可能蒸発散能としているため、実蒸発散量は全土地利用種別中で最大となっている。

表-4には20種の土地利用種別毎の年間蒸発散ボリュームと流域全体の蒸発散ボリュームに対する比を示している。本論文では10万以上の個々の地表面地物要素にそれぞれ異なる気温を与えており、各地表面地物要素毎に異なる蒸発散量を算定することができ、表-5には6種の土地利用グループ毎の年間蒸発散量の平均、最大、最小、標準偏差およびSt.5の近傍の地表面地物要素の蒸発散量を示している。表-4より、間地、林地、建物、道路の4土地利用で全地物の合計蒸発散ボリュームの81%を占めている。表-5より道路および建物の単位面積あたりの年間蒸発散量の平均は約162 mm/yearと小さいが、それぞれの面積率が道路(約16%)、建物(約29%)と大きい結果として蒸発散ボリュームが大きくなっている。表-5より、例えば河道等のグループ6では流域内で最大と最小で年間約33 mm/yearの蒸発散量の違いが生じており、与えている気温分布の違いにより同流域内における蒸発散量の変化を分析できることが分かる。

図-4は土地利用種別が林地である3,185個の地表面地物要素の年間蒸発散量の頻度分布図を示している。林地の年間蒸発散量の平均値は表-5より696 mm/yearであるが、692~694 mm/yearが最頻値である事が分かり、今回気温分布を詳細に与えることにより、このような頻度分布による分析も可能となった。

TETモデルでは、個別地物毎の潜熱・顕熱輸送量および蒸発散量を求めるために、地物地表面温度(式(2)における T_s)を算定している。図-5は各地表面地物要素毎の地表面温度を示している。図-5 a)には実蒸発散量が最大となる7月1日(図-3参照)、図-5 b)にはどの観測地

表-4 土地利用種別毎の年間蒸発散ボリューム

土地利用種別	年間蒸発散 ボリューム(m ³)	全体比率	土地利用種別	年間蒸発散 ボリューム(m ³)	全体比率
建物	547,515	18.6%	舗装地	61,406	2.1%
駐車場(浸透)	19,175	0.6%	鉄道	24,191	0.8%
駐車場(不浸透)	33,548	1.1%	間地	823,056	27.9%
グラウンド(浸透)	71,738	2.4%	テニスコート(浸透)	17,342	0.6%
グラウンド(不浸透)	3,770	0.1%	テニスコート(不浸透)	4,917	0.2%
林地	724,284	24.5%	裸地	12,186	0.4%
芝地	54,457	1.8%	プール	10,889	0.4%
畑	72,381	2.5%	道路	289,042	9.8%
公園	33,323	1.1%	池	33,058	1.1%
墓地	22,479	0.8%	河道	92,204	3.1%

点においても最も気温が高い7月21日における地表面温度を示している。図-5 c)には簡便な気温分布⁷⁾を設定した場合の7月21日における地表面温度の算定結果(図-2 a)の方法により気温分布を与えた場合)を示して

表-5 土地利用グループ毎の年間蒸発散量

年間 蒸発散量 (mm)	土地利用種別					
	林地 (グループ1)	畑 (グループ2)	芝地等 (グループ3)	裸地 (グループ4)	建物等 (グループ5)	河道等 (グループ6)
平均	696.4	383.8	317.7	231.6	161.9	925.1
最大	710.2	386.4	324.1	235.6	162.9	946.1
最小	690.5	380.5	314.9	229.5	161.2	913.2
標準偏差	4.4	1.1	2.1	1.7	0.4	9.0
St.5近傍	701.0	386.7	319.2	232.6	161.7	928.3

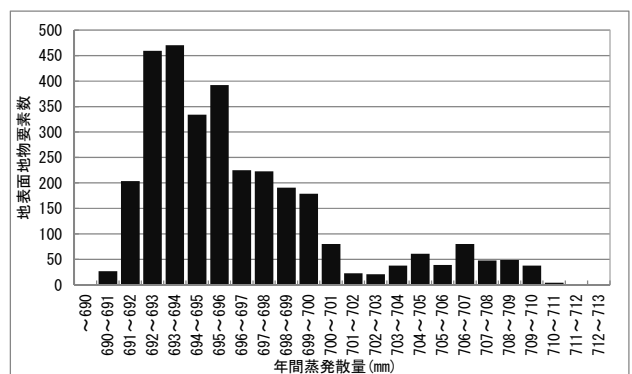


図-4 年間蒸発散量の頻度分布図(林地)

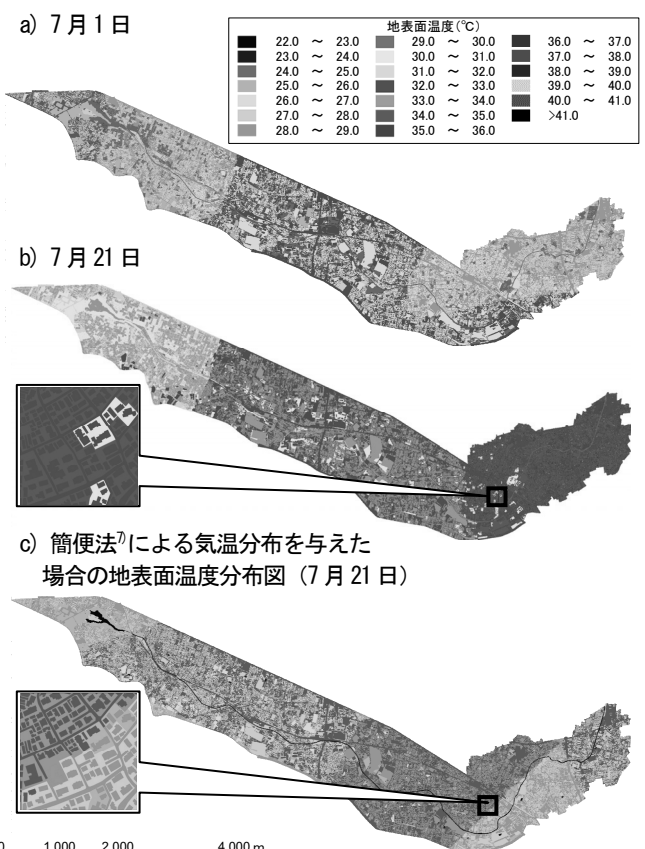


図-5 地表面温度分布図, a)7月1日, b)7月21日, c)簡便法⁷⁾による地表面温度分布図(7月21日)

おり、図-5 c) の拡大領域では与えている気温分布が変化する箇所において現実にはあり得ない不連続な温度変化が生じているが、本論文で算定した図-5 b) の拡大領域に示す地表面温度は不連続が無く現実的な地表面温度が算定されている事が分かる。図-6は各地表面地物要素毎の地表面温度を、観測気温との差として示している。図-6 a), b)には図-5 a), b)と同様に7月1日および7月21日の算定結果を示している。図-2 b) より7月1日は流域の東端および西部で相対的に日平均気温が高く、この気温を用いて蒸発散量を算定している領域では潜熱輸送量が大きく蒸発散も大きくなり、特に林地の蒸発散量が大きくなるため、図-6 a) に示すように林地では地表面温度が気温より3℃以上低くなっている。同じ林地の土地利用でも流域中流部では-1℃～-2℃となっており、気温の分布を詳細に与える事により、気温の違いによる蒸発散量および地表面温度変化の変化を表現できている。7月21日の気温分布については図示していないが、流域の東端が約33℃、西端が約31.5℃の分布となっていることを確認しており、図-6 b) より同じ林地の土地利用種別でも流域の東部では地表面温度が気温より1℃以上低いのにに対し、流域中流部および流域西部では気温とほぼ同等の地表面温度となっている。また、図-6 a) と b) の比較より、例えば不浸透域である建物等(グループ5)の地表面温度は7月1日は気温より6℃～7℃高いのに対し7月21日は8℃以上高いといったように、流域全体的に7月1日が地表面温度が低いことが分かる。これは、図-3より最高気温日である7月21日の可能蒸発散量は最大の約7 mm/dayであるが、7月の無降雨期間に土壌水分量が減少し実蒸発散量が1～2 mm/day程度となっているため、地表面の気温低減効果が小さくなることによる。

(3) 推定結果の妥当性の検証

以上の結果より、TETモデルで算定した蒸発散量の妥当性について確認してみる。まずは林地の蒸発散量についてであるが日本の森林の一般的な蒸発散量は500～1,100mm/yearのオーダー¹⁷⁾であるのに対し、TETモデルで算定した林地の蒸発散量は約700 mm/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検証を試みる。2004年の年間総雨量は1,757 mmであり、流域全体の総雨量に換算すると2,021万 m³となる。これに対し、TETモデルで算定された全地表面地物要素からの年間総蒸発散量は295万 m³となっている。すなわち、蒸発散の割合は約15%となる。一方、東京都公表資料¹⁸⁾によれば東京都全域の年間雨量と蒸発散量は1,405 mm/yearおよび412 mm/year程度と示されており、雨量に対する蒸発散の割合は29%程度のオーダーである。また、神田川流域水循環計再生機

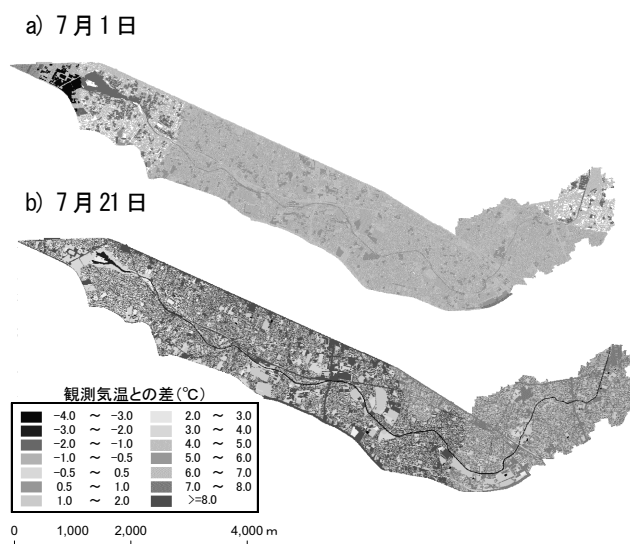


図-6 観測気温と地表面温度差分布図, a)7月1日, b)7月21日

構検討報告¹⁹⁾では神田川全流域の流域平均雨量と年間蒸発散量は1,512 mm/yearおよび231 mm/year程度と記載されており、雨量に対する蒸発散の割合は15%となる。なお、これらの蒸発量について推定方法の詳細が不明であるため、あくまで参考値として扱わざるを得ないが、東京都全域に比べて神田川流域が15%と低いのは、神田川流域は都市化が進んでおり蒸発散量が大きい林地等が少ないことによるものと考えられる。神田川上流域においてTETモデルで算定された15%の蒸発散割合は、神田川全体の蒸発散割合と同じであり、妥当な値となっている。

5. むすび

本論文では、高度な地物データGISと熱収支式を用いて、地表面地物要素毎の土地利用種別の違いおよび土壌水分量の状態を考慮して潜熱、顕熱を算定できるTETモデル活用し、神田川上流域において2004年1年間の土地利用種別毎の地表面温度および蒸発散量を推定した。この場合、神田川上流域近傍にはAMeDAS観測所が存在しないため、流域内外に密に存在しているMETROS観測所の気温データを有効に活用することにより、同じ土地利用種別でも気温により蒸発散量が異なる現象を表現することが可能となった。具体的にはAMeDAS観測所データを用いた既往研究⁹⁾では、土地利用種別が同じであれば流域内のどの地点においても同様の蒸発散量および地表面温度が算定されていたが、本論文では場所毎に異なる地表面温度の変化や地表面地物要素毎の蒸発散量の頻度分布等の分析が可能となった。その結果、地表面地物要素に与える気温を場所毎に変化させた場合の神田川上流

域での空間的な蒸発散量の違いおよび地物表面温度の空間分布について把握することができた。

謝辞

本研究を遂行するにあたって、東京都アジア高度研究「アジア都市圏における水問題解決のための適応策に関する研究」(代表：河村明)の補助を受けました。また、METROSデータについて、東京都環境科学研究所よりデータ提供頂きました。ここに記して深謝申し上げます。

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) 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期の都市気象に与える影響，水工学論文集，第52巻，pp.229-234，2008.
- 3) Ashie, Y. and 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.
- 4) 田村英俊，平口博丸：都市街区内の部分緑化による地上気温低減効果に関する数値実験，土木学会論文集，No.804，VII-37，pp.804_51-804_63，2005.
- 5) 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_319-I_324，2014.
- 6) 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.
- 7) 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

- 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.
- 8) 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.
 - 9) 近藤純正：地表面に近い大気の科学，初版，東京大学出版会，pp.137-145，2000.
 - 10) 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.
 - 11) 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.
 - 12) 9)と同じ，p.305，2000.
 - 13) 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.
 - 14) 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.
 - 15) 「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.
 - 16) 近藤純正：地表面に近い大気の科学，初版，東京大学出版会，p.41，2000.
 - 17) 近藤純正：地表面に近い大気の科学，初版，東京大学出版会，p.205，2000.
 - 18) 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.2，1999.
 - 19) 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.

(2015.4.7 受付)

ESTIMATION OF EVAPOTRANSPIRATION AND LAND-SURFACE TEMPERATURE FOR EACH LAND USE TYPE IN THE UPPER KANDA RIVER WATERSHED

Tatsuya KOGA, Akira KAWAMURA, Hideo AMAGUCHI and Hiroto TANOUCHI

In this study, an evapotranspiration model that can express the amount of evapotranspiration accounting for differences in soil moisture and permeation characteristics of individual land-surface features is proposed. 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.