

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

MODELING THE EVAPOTRANSPIRATION OF INDIVIDUAL LAND-SURFACE FEATURES CONSIDERING HEAT BALANCE AND SOIL MOISTURE, AND ITS APPLICATION TO AN ACTUAL RIVER BASIN

古賀達也¹・河村明²・天口英雄³

Tatsuya KOGA, Akira KAWAMURA and Hideo AMAGUCHI

¹正会員 工修 (株) 建設技術研究所 (〒103-8430 東京都中央区日本橋浜町3-21-1)

²正会員 工博 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)

³正会員 博(工) 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)

In this study, an evapotranspiration model that can express the amount of evapotranspiration accounting for differences in soil moisture and penetration characteristics of individual land-surface features is proposed. The model is composed of two components; the infiltration area model based on SMPT model to represent the infiltration process of the surface soil, and the impervious area model considering depression storage in impervious areas. Furthermore, the infiltration 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 upstream basin of Kanda River, and the impacts of differences in land use on the spatial distribution of evapotranspiration and land surface temperature was analyzed.

Key Words : *heat balance, evapotranspiration, individual land-surface features, soil moisture, advanced GIS delineation*

1. はじめに

都市流域では、山地流域とは異なり、雨水が浸透しない建物・道路などの人工的な構造物と公園・グラウンドなどの浸透域が複雑に分布している。また、道路の側溝や雨水・下水道管路など河川に至る流出経路には、貯留浸透施設や治水施設などが整備されており、その形態は絶えず変化しているため、都市流域の雨水流出プロセスは非常に複雑となっている。

都市流域の水循環過程を解明するには、雨水を受ける地表面の浸透特性が都市化の影響によりどのような状態にあるのか、すなわち浸透・不浸透域の分布状況を正確に表現可能であることが重要であり、このような土地利用情報を入力データとして利用できる分布型水循環モデルが必要である。また、都市域における地下水浸透過程を解明するためには、土地利用情報に基づいた蒸発散量が算定可能なモデルが重要である。さらに、行政部局による都市流域におけ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において、効果検証が可能

なモデルが望まれている。そのためには、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の開発が望まれている。

浸透域において蒸発散量は明らかに土壌水分の影響を受けるが、蒸発散量の計算に一般的に用いられるHamon式¹⁾、Thornthwaite式²⁾等を用いた手法は、気象条件のみから可能蒸発散能を推定し、経験的な係数を乗じることにより蒸発散量を算定する方法であり、蒸発散に土壌水分は考慮されていない。また土壌水分は流出にも影響を及ぼすため、これらの相互関係を十分に考慮した上で蒸発散量が推定される必要があるが、上記の式では土地利用の浸透・不浸透域における蒸発散量の違いや、浸透域における土地利用区分毎の土壌水分量が蒸発散へ与える影響について考慮できない。これに対し竹下らは、集中型モデルを用いて土地利用を考慮したHamon式による蒸発散モデルの構築を行っている³⁾が、これまで地表面地物要素毎の土地利用状況を反映した蒸発散量の違いを表

現できるモデルは見あたらない。また、*Hamon*式などは熱収支的側面についても考慮しておらず、地表面温度の算定を精度良く行うためには、熱収支式を用いて求まる潜熱・顕熱により蒸発散量の推定を行う必要がある⁴⁾。

都市域のモデル作成に用いるデータについては、近年GISデータの整備が目覚ましい。これまで、都市流域は人工的要素を含むため詳細な空間情報の記述が容易ではなかったが、これらの地物データを忠実に表現可能なベクター型土地利用情報を用いることで、特定の建物、道路といった詳細な空間情報を抽出することが可能となった。しかし、現在利用可能な基礎的地物データGISには、浸透特性に基づいた林地、緑地、グラウンドなどの土地利用種別の情報が含まれていない。これまで著者らは基礎的地物データGISをベースに、独自に調査した浸透域に関する情報を新たに組み込むことにより、都市を形成している土地利用を浸透特性で分類するGISを構築してきている⁵⁾。そして、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データを「高度な地物データGIS」と定義し、神田川上流域を対象として土地利用の詳細な判別を行い、その高度な地物データGISを構築する方法を述べている⁶⁾。また、この高度な地物データGISを用いて家屋、道路、緑地等の個別地物を忠実に反映した都市流域洪水解析モデル(TSRモデル: Tokyo Storm Runoff Model)を提案している^{7,8)}。

本論文では、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を構築した。以下、本モデルをTET(Tokyo Evapotranspiration)モデルと呼ぶ。TETモデルの構築にあたり、まず表層土壌への浸透過程を表現するモデルとしてSMPTモデル(Soil Moisture Parameter Tank Model)⁹⁾による浸透域モデルを構築し、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た。浸透域に対しては、地表面地物要素毎の土地利用の違いおよび土壌水分量の状態を考慮し、バルク式による熱収支式を用いて潜熱・顕熱を算定できるモデルとした。さらに、算定された潜熱・顕熱を用いて地表面地物要素毎の蒸発散量時系列と同時に地表面温度変化を表現できるモデルとした。次に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、2011年の1年間の地表面地物要素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TETモデルの妥当性を確認するとともに、神田川流域内の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. 蒸発散モデルの構築

(1) 熱収支式による潜熱・顕熱評価モデル

地表面の熱収支式の基礎方程式である式(1)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¹⁰⁾。

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

ここで、 R_n : 正味放射量(W/m²), ℓE : 潜熱伝達量(W/m²), H : 顕熱伝達量(W/m²), G : 地中熱伝達量(W/m²)である。また R_n は放射収支では以下の式で表される。

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

ここで、 α : 地表面の反射率(アルベド), R_{glob} : 地表面での全天日射量(W/m²), L_{sky} : 大気放射量(W/m²), L_{soil} : 地表面放射量(W/m²)である。 R_{glob} は大気圏外日射量 R_{out} と日照時間 n , 可照時間 N とから以下のように求められる。

$$R_{glob} = R_{out}(0.25 + 0.5n / N) \quad (3)$$

ここで、 R_{out} : 大気圏外日射量(W/m²), n : 日照時間(h), N : 可照時間(h)である。 N は測定地点の緯度, 計算する日の積算日数(1月1日から積算した日数)等から計算される。

地表面放射 L_{soil} はステファン・ボルツマンの法則に従い、地表面温度 T_s から計算される。

$$L_{soil} = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (4)$$

ここで、 σ : ステファン・ボルツマン定数(5.67×10⁻⁸ W/m²・K²), T_s : 地表面温度(K : ケルビン), ε : 射出率(地表面ではほぼ1.0)である。

式(4)より L_{soil} は地表面温度が10°C変化すると50W/m²程度異なるため、それに伴い R_n は近傍であってもおよそ50W/m²程度の差が生じる。 R_n は通常各所で観測されていないため、式(3)の代わりに入力放射 $R (=R_n + L_{soil})$ を用いた熱収支式(5)を使う。

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

一方 R は熱収支式(1)に式(4)を考慮すると式(6)となる。

$$R = \varepsilon \sigma T_s^4 + H + \ell E + G \quad (6)$$

R と L_{sky} は数m~数kmの範囲なら場所によって大きく変化しないため、熱収支式としては式(6)が通常用いられている¹¹⁾。式(6)の左辺 R は観測値であるため既知である。右辺の H , ℓE についてはバルク式により(7)および(8)で与えられる。

$$H = c_p \rho C_H U (T_s - T) \quad (7)$$

$$\ell E = \ell \rho \beta C_H U (q_{SAT} - q) \quad (8)$$

ここに、 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, T : 大気気温(K), ℓ : 水の気化潜熱(2.50×10⁶J/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)である。 ρ については次式より求める¹²⁾。

$$\rho = 1.293 \frac{273.15}{273.15 + T} \times \frac{p}{1013.25} \left(1 - 0.378 \frac{e}{p} \right) \quad (9)$$

ここに、 p ：気圧(hPa)、 e ：水蒸気圧(hPa)である。なお、式(9)での大気気温 T の単位は(°C)である。 p については観測される値であり、 T の時の e は観測値の湿度と T より算定可能な飽和水蒸気圧より算定できる。

$C_H U$ は顕熱輸送の交換速度と呼ばれ、風速 U と安定度の関数であり、観測地点の高度および風速を用いて算定され、土地利用毎に算定時の定数が設定されている¹³⁾。 β は地表面の蒸発のしやすさを表す蒸発効率(湿潤度と呼ぶこともある)であり0~1の値をもつものであり、この β を後述の地表面地物要素毎の土地利用と土壤水分量から逐次設定することにより、潜熱および顕熱に地表面地物要素毎の土地利用と土壤水分量を考慮するものとした。土地利用状況によって異なる変数としては上記の他、 α についてである。まとめると顕熱輸送の交換速度 $C_H U$ 、蒸発効率 β およびアルベド α が土地利用の違いを表現する変数となる。

q_{SAT} は T_S の関数である飽和水蒸気圧 e_{SAT} を用いて式(10)で与えられる¹⁴⁾。

$$q_{SAT} = 0.622 e_{SAT} / (p - 0.378 e_{SAT}) \quad (10)$$

ここに e_{SAT} ： T_S の時の飽和水蒸気圧である。 e_{SAT} についてはTetensの式(11)¹⁵⁾を用いて算定した。定数については水上を想定した定数を用いた。なお、式(11)での地表面温度 T_S の単位は(°C)である。

$$e_{SAT} = 6.11 \times 10^{\frac{7.5 T_S}{T_S + 237.3}} \quad (11)$$

これらより、式(8)の q_{SAT} は T_S の関数となる。以上まとめると式(6)の左辺は式(5)より既知であり、式(7),(8)は全て T_S だけの関数となり、 T_S について解くことにより潜熱伝達量 LE と顕熱伝達量 H について求めることとなる。

G は陸地面において毎日同じような気象条件が続いている場合は日中・夜間でプラス・マイナスとなる。本論文では日平均状態を対象とするため、 G については0としている。

(2) SMPTモデルによる土壤水分量評価

実現象の蒸発散量は土地利用や土壤の水分状態、および気象条件に影響されている。そのため、図-1に示すような地表面地物要素の浸透特性と土壤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構築すべく、まず表層土壤への浸透過程を表現するモデルとしてSMPTモデル⁹⁾による浸透域モデルを構築し、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することとした。SMPTモデルにおける浸透域モデルは表層土壤モデルと地下水層モデルの2つから構成されているが、本論文では著者らの従来⁹⁾のモデル⁹⁾によるものとし、表層土壤モデルのみを採用し簡易な表層土壤浸透モデルとしている。表層土壤浸透モデルからの浸透量は、系外に

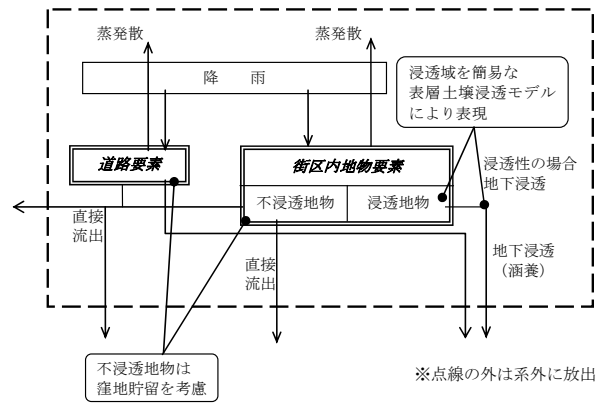


図-1 本論文における蒸発散モデルの概念

放出するものとした。

(3) 蒸発散モデルの構築

土地利用毎の蒸発散係数、土壤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 β を算定し、これを用いて潜熱、顕熱を算定することにより土地利用区分の違いによる土壤水分を考慮した蒸発散量の推定を行うモデルを構築する。

式(8)における蒸発効率 β は可能蒸発散能と実蒸発散量の比として定義されるが、その β について土壤水分量の関数(0~1)とし、土壤水分率 $\lambda_w = 0$ のとき $\beta = 0$ 、 $\lambda_w = 1$ のとき $\beta = 1$ となるような関係性を竹下らが提案している関係式³⁾を参考として式(12)で表現する。この β を用いて土地利用区分毎の蒸発散係数、最大保水量に対する土壤水分量を考慮することにより、土地利用種別の違いおよび土壤水分量の違いによる蒸発散量を β による表現する蒸発散モデルとした。

$$\beta = 1 - \frac{2}{1 + \exp(-k \times \lambda_x)} \quad (12)$$

ここに、 k ：土地利用種別毎に設定する蒸発散係数(無次元)、 λ_x ：土壤水分係数である。土壤水分係数 λ_x は土壤水分率 λ_w を用いて以下の式で表現する。

$$\lambda_x = 1 - \frac{1}{(1 - \lambda_w)} \quad (13)$$

ここに、 λ_w ：土壤水分率(飽和土壤水分量 S_{sat} に対する土壤水分量：無次元)

本論文では、SMPTモデルによる簡易な表層土壤浸透モデルをもとに、飽和土壤水分量 S_{sat} と計算ステップ毎の土壤水分量 $S(t)$ から土壤水分率 λ_w を算定することにより、蒸発効率 β を算定するモデルとした。また、対象流域内では高度な地物データGISを20の土地利用種別に分類しているが¹⁶⁾、浸透域については土地利用種別毎の蒸発散係数 k 、飽和土壤水分量 S_{sat} を設定することにより、土地利用種別毎の蒸発散量の算定が可能モデルとした。

不浸透地物においては、著者らの従来⁹⁾のモデル⁹⁾を用いることとし、 $\beta = 1$ の場合の蒸発散量である可能蒸発散能 $E_p(t)$ に補正係数の0.6(鴨下ら¹⁷⁾を参考に設定)を乗じた

ものと窪地貯留の水量を比較し、窪地貯留の水量を上限として実蒸発散量 $E(t)$ とした。

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、図-2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-3に対象とする神田川上流域の高度な地物データ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による面積および面積率を示すが、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%の順となっている。

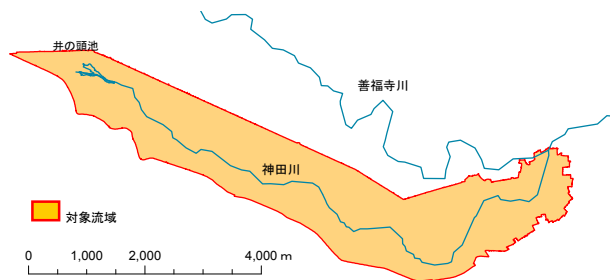


図-2 対象とした神田川上流域位置図

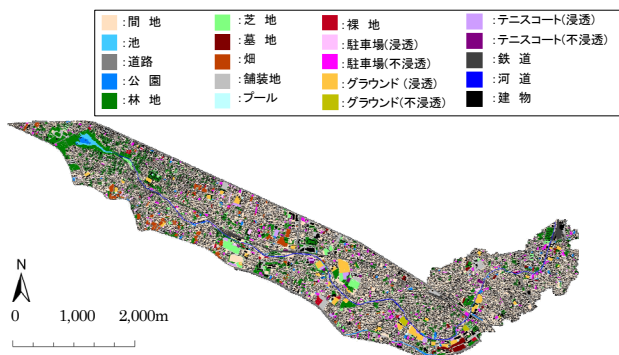


図-3 神田川上流域の高度な地物データGIS

表-1 土地利用種別毎面積、面積率、蒸発散パラメータ

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 (mm)	最小含水量 (mm)	地下水涵養定数 (1/s)	初期水量 (mm)	最大蒸発散比	蒸発散係数	アルベド	定数が同値の区分※
1	建物	不浸透	3.38	29.39	-	-	-	-	-	-	0.12	区分5
2	駐車場(浸透)	浸透	0.06	0.52	92	74	0.8	64	1.0	0.34	0.10	区分3
3	駐車場(不浸透)	不浸透	0.21	1.80	-	-	-	-	-	-	0.12	区分5
4	グラウンド(浸透)	浸透	0.23	1.96	92	74	0.8	64	1.0	0.34	0.10	区分3
5	グラウンド(不浸透)	不浸透	0.02	0.20	-	-	-	-	-	-	0.12	区分5
6	林地	浸透	1.04	9.05	138	110	0.8	97	1.2	4.38	0.15	区分1
7	芝地	浸透	0.17	1.49	92	74	0.8	64	1.0	0.34	0.10	区分3
8	畑	浸透	0.19	1.64	104	83	0.8	73	1.0	0.55	0.23	区分2
9	公園	浸透	0.10	0.91	92	74	0.8	64	1.0	0.34	0.10	区分3
10	墓地	浸透	0.07	0.61	92	74	0.8	64	1.0	0.34	0.10	区分3
11	舗装地	不浸透	0.38	3.30	-	-	-	-	-	-	0.12	区分5
12	鉄道	不浸透	0.15	1.30	-	-	-	-	-	-	0.12	区分5
13	間地	50%浸透	3.43	29.83	92	74	0.8	64	1.0	0.34	0.10	区分3
14	テニスコート(浸透)	浸透	0.05	0.47	92	74	0.8	64	1.0	0.34	0.10	区分3
15	テニスコート(不浸透)	不浸透	0.03	0.26	-	-	-	-	-	-	0.12	区分5
16	裸地	浸透	0.05	0.46	80	64	0.8	56	1.0	0.13	0.10	区分4
17	プール	不浸透	0.01	0.10	-	-	-	-	-	-	0.12	区分5
18	道路	不浸透	1.79	15.52	-	-	-	-	-	-	0.12	区分5
19	池	不浸透	0.04	0.31	-	-	-	-	-	-	0.12	区分5
20	河道	不浸透	0.10	0.87	-	-	-	-	-	-	0.12	区分5

※区分5は不浸透域で、直接流出開始高を2mmに設定

4. 神田川上流域への適用

(1) 計算条件

本論文では、2011年の1月～12月の1年間を対象に、今回提案したモデルを用いて日単位の潜熱、顕熱の算定およびそれらを用いて算定ができる、個別地物の地表面温度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、風速については対象流域近傍の気象庁アメダス「府中」における観測値を用いた⁴⁾。全日射量については府中観測所では観測されていないため、「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¹⁸⁾により算出した。本論文では地物毎の蒸発散量および地表面温度の相対比較を目的としているため、全地物の気象条件は府中、および東京で観測された観測値を用いて一様に与えることとし、 β の違いによる蒸発散量の感度を見ることとする。

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の設定を行っている。なお間地の浸透特性については50%浸透と設定しているため、残り50%の面積は不浸透域として扱った。これらの土地利用種別において、土壌水分法による蒸発散モデル適用のために蒸発散係数、飽和土壌水分量 S_{sat} 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、土地利用種別毎の実測蒸発散量を用いたキャリブレーションにより設定することが望ましいが、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³⁾、藤田ら¹⁹⁾および荒木ら¹⁶⁾の値を参考として、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区分され、それぞれの区分内の土地利用種別ごとのパラメータは同様とした。区分1は林地のみ、区分2は畑のみ、区分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)、間地の50%面積、区分4は裸地とした。また、不浸透域である建物、駐車場(不浸透)、グラウンド(不浸透)、舗装地、鉄道、間地の50%面積、テニスコート(不浸透)、プール、道路、池、河道については区分5とし、直接流出発生高(窪地貯留高)は一般的な値²⁰⁾を採用し2mmと設定した。また、アルベドについても同様に5区分とし、土地利用種別毎に一般的な値²¹⁾を採用した。

(2) 計算結果

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2011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結果を図-4に示す。図-4には、入力条件として与えた府中観測所の日雨量、日平均気温の時系列変化を示している。浸透域については蒸発散モデルパラメータが同値であれば同様の蒸発散量であるため、図-4には浸透域4区分のそれぞれの代表土地利用種

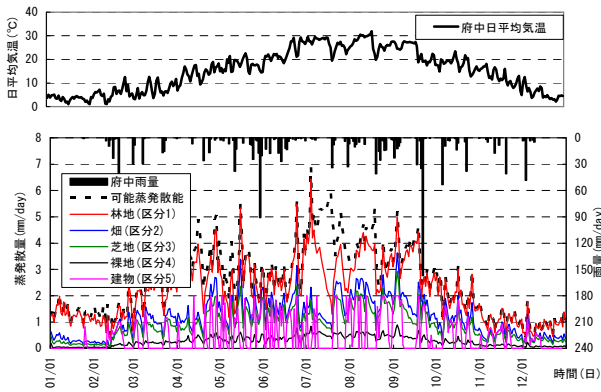


図-4 土地利用種別毎の蒸発散量

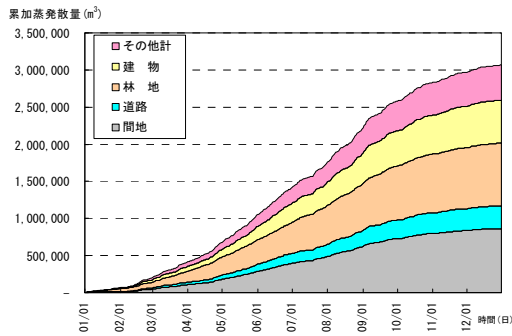


図-5 土地利用種別毎の蒸発散ボリューム累加図

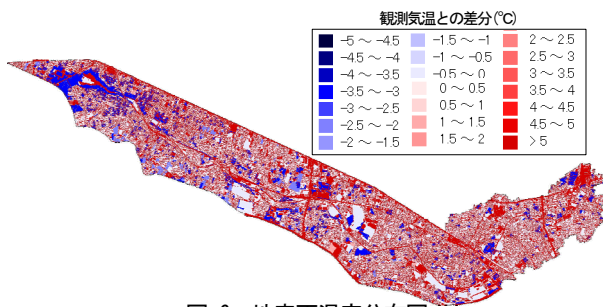


図-6 地表面温度分布図

別として林地(区分1), 畑(区分2), 芝地(区分3), 裸地(区分4)の4種と不浸透域の代表土地利用として建物(区分5)の5土地利用種別の蒸発散量時系列を示している。また, 熱収支より算定される区分3の可能蒸発散能についても併記している。府中観測所の日平均気温は, 7月~8月が約30°Cとピークであり, 熱収支より算定される可能蒸発散能は最大で約7mm/dayである。図-4より7月中旬では可能蒸発散能に対して林地の蒸発散量は可能蒸発散能に対して小さい。これは7月は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 が小さくなっていくことによるものである。不浸透域である建物については, 窪地貯留高が2mmでありそれ以上の降雨が発生した場合は直接流出となるため, 最大蒸発散量は2mm/dayとなっている。年間の総蒸発散量は, 林地817mm/year, 畑427mm/year, 芝地333mm/year, 裸地103mm/year, 建物170mm/yearとなっており, 裸地が建物より小さい結果となっている。建物等の不浸透域は窪地貯留の水量を上限として最大2mm/dayが蒸発すると仮定

している。一方裸地は砂礫地, 荒地等の土地利用であり, 土壌水分率が80%程度まで蒸発効率 β が可能蒸発散能に対し2割以下となっているため, 建物より蒸発散量が小さくなっている。なお, 裸地の土地利用面積率は0.5%と微小なため全体の蒸発散量に占める影響は小さい。

図-5には, 土地利用種別毎の蒸発散ボリュームの累加図を示す。単位面積当たりの蒸発散量が同値でも土地利用種別毎に対象流域における面積が異なっているため, それに伴い蒸発散ボリュームは変化することとなる。ここでは, 蒸発散ボリュームが大きい間地, 道路, 林地, 建物の4種の土地利用種別とその他16種別は合計とし計5種を示している。間地, 道路, 林地, 建物の4土地利用で, 全地物の合計蒸発散ボリュームの85%を占めており, その内訳はそれぞれ間地(28%), 道路(10%), 林地(28%), 建物(19%)となっている。道路および建物は不浸透域であり単位面積あたりの年間蒸発量は170mm/yearと小さいが, それぞれの面積率が道路(16%), 建物(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。間地についても単位面積あたりの年間蒸発散量252mm/yearであるが面積率が29%と大きくこのような結果となっている。一方, 林地については面積率は9%と小さいが, 単位面積あたりの年間蒸発散量が817mm/yearと大きい結果として蒸発散ボリュームが大きな割合を占めることとなっている。

5. 考察

(1) 実測値との比較

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500~1,000mm/yearのオーダーであるのに対し, TETモデルで算定した林地の蒸発散量は982mm/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推定を試みる。府中の2011年の年間総雨量は1,428mmであり, 流域全体の総雨量ボリュームに換算すると16,825千 m^3 である。これに対し, TET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3,068千 m^3 であるため蒸発散比は約20%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²²⁾, 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²³⁾となっており, 雨量に対する蒸発散比は15%および29%程度のオーダーであると考えられ, TETモデルで得られた蒸発散比20%は妥当な値となっている。これより, TETモデルでは従来評価されていなかった土地利用毎の浸透特性および土壌水分量を考慮した蒸発散量の推定が可能となると考えられる。以上の結果は表-1に示す蒸発散モデルパラメータによる結果であり妥当な蒸発散量が算定されているが, より詳細な地物毎の蒸発散モデルパラメータについては実測蒸発散量とのキャリブレーション

ンが必要である。

(2) 地表面温度の空間分布

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の他に、地物地表面温度の推定が可能である。

図-6には夏場の8月18日における地物地表面の観測気温との差分分布を示している。図-4より林地の蒸発散量が最も大きく潜熱輸送量が大きいことが確認できる。

図-6より林地では観測気温よりも約3℃程度地表面温度が低いことが分かる。蒸発散量が小さく潜熱輸送量が小さい不浸透地物等では観測気温よりも地表面温度が5℃以上程度高くなっていることが確認できる。

6. むすび

本論文は、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、バルク式による熱収支式を用いて個別地物毎の土地利用の違いおよび土壌水分量の状態を考慮した潜熱、顕熱を算定できる TET モデルを構築したものである。次いで、神田川上流域において 2011 年の 1 年間の個別地物毎の潜熱、顕熱および蒸発散量の算定を行った。その結果、個別地物毎の潜熱、顕熱および蒸発散量を推定できることを確認し、実測値との比較によりその妥当性を確認した。また、神田川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。

本論文では地物は平面的に扱っており、大気層との鉛直方向の熱のやりとりは考慮していない。都市流域における蒸発散量を精度良く推定するためには、街路樹等の詳細な地物区分の影響評価や建物壁面による放射の多重反射等についての反映も必要である。また、本論文では対象流域内の観測所が1箇所のみであったため、気温、風速等の気象条件の面分布については一様と仮定としており、土地利用が同様であれば蒸発散量等に違いが無い結果となっている。今後は本論文で提案した蒸発散モデルの基本構造を踏襲しつつ、大気層との熱の移動の考慮、複数地点での実測との比較等を行い都市流域における蒸発散量を精度良く推定し、土地利用の変化による気温抑制効果を評価可能なモデルの構築を行う予定である。

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。ここに記して深謝申し上げます。

参考文献

- 1) Hamon, W.R. : Estimating Potential Evapotranspiration, ASCE, HY3, paper 2817, 1961
- 2) Thornthwaite, C.W. : An approach toward a rational classification

of climate, Geographical Review, Vol. 38, pp. 55-94, 1948

- 3) 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.
- 4) 古賀達也, 河村明, 天口英雄：高度な地物データGISを用いた都市流域における蒸発散モデルの構築とその適用, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.69, No.4, pp.I_1771-I_1776, 2013.
- 5) 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都市洪水流出解析モデルの提案, 土木学会論文集, Vol.63, No.3, pp.206-223, 2007.
- 6) 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, 河川技術工学), Vol.68, No.4, pp.I_505-I_510.
- 7) 天口英雄・河村明・高崎忠勝・中川直子：個別の地物情報を考慮した密集市街地におけるTokyo Storm Runoff Modelの提案, 水工学論文集, 第55巻, pp.S517-S522, 2011.
- 8) Amaguchi, H., Kawamura, A., Olsson, J. and Takasaki, T., Development and testing of a distributed urban storm runoff event model with a vector-based catchment delineation, Journal of Hydrology, No.420-421, pp.205-215, 2012.
- 9) 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
- 10) 近藤純正：地表面に近い大気の科学, pp.137-145, 2000.
- 11) 10)に同じ, p.141, 2000.
- 12) 10)に同じ, p.5, 2000.
- 13) 10)に同じ, p.143, 2000.
- 14) 10)に同じ, p.3, 2000.
- 15) 水文・水資源学会：水文・水資源ハンドブック, p.43, 1997.
- 16) 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.
- 17) 鴨下泰典, 藤村和正, 高崎忠勝：井の頭池における水文観測地下水位解析：土木学会年次学術講演会講演概要集, 第63巻, No.02, pp.11-12, 2008.
- 18) 10)に同じ, p.75, 2000.
- 19) 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.
- 20) 「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.
- 21) 10)に同じ, p.41, 2000.
- 22) 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.
- 23) 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.

(2013. 9. 30受付)