

神田川上流域の地表面地物要素を用いた 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

首都大学東京 都市環境科学研究科 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

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、熱環境に多大な影響を与えている。東京都では過去100年間に約3.0℃の気温上昇が観測されており、これは全地球における地球温暖化に伴う平均気温上昇0.6℃の約5倍に相当し、都市部が周辺部より気温が高くなるヒートアイランド現象の進行によるものとされている。ヒートアイランド現象は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、人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樹木を中心とした芝、多年草等の緑地を確保するため、敷地面積1,000㎡以上の新築、改築、増築時に「地上部の緑化」をはじめ、建築物の屋上や壁面等の「建築物上の緑化」および道路に接する部分の「接道部の緑化」が義務付けられている¹⁾。また、ヒートアイランド対策として保水性舗装に関しては、東京都型保水性舗装を2020年までに遮熱性舗装と併せて約180kmを実施する計画となっている。このように都市の熱環境を改善させるため、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。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による熱環境の改善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る。

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GISを高度な地物データと定義し、作成している。また古賀ら²⁾は地表面地物要素毎の浸透特性と土壌水分量の違いによる蒸発散量を熱収支式により表現した日単位の蒸発散モデル(以降、日単位モデル)、TET(Tokyo EvapoTranspiration)モデルを構築しており、神田川上流域におけるモデルの妥当性評価およびヒートアイランド緩和策の検討³⁾などを行ってきている。しかし日単位モデルでは、例えば夏季の晴天が連続する状況において、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ため、著者らは時間単位で蒸発散量を算出することができるTETモデル(以降、時間単位モデル)を構築し、その妥当性を示した⁴⁾。

本検討では高度な地物データGISおよび時間単位モデルを用いて、ヒートアイランド緩和策として建物の屋上緑化および道路の保水性舗装化を実施したシナリオを想定し、夏季における時間単位の地表面温度および蒸発散量を推定した。またヒートアイランド緩和策が都市流域の地表面地物要素に対して与える影響、並びに流域平均地表面温度および蒸発散量の変化についてシミュレーション評価を行った。

2. 時間単位のTETモデル概要

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⁵⁾を行う。ここで、 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⁶⁾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。地表面地物要素毎の土壌水分量から式(4)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

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

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

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

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

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

キーワード 神田川上流域、高度な地物データGIS、時間単位蒸発散モデル、土壌水分量、熱収支

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

用の違いが表現されている。式(1)の地表面の熱収支式における正味放射量 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 τ 時間単位の大気放射量 L_{sky} は、雲量を用いたAMeDASデータの時間別大気放射量の推定手法により算定し^{8),9)}、時間単位の中伝達量 G は、土地利用種別により異なる熱慣性および前時間の最大値と最小値より地表面温度 T_s の振幅を用いて算定した¹⁰⁾。ここで、 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 $L_{soil} = \epsilon \sigma T_s^4$ 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。

3. 神田川上流域の流域特性

図-1は、神田川の井の頭池から善福寺川合流点までの面積約11.5km²、流路延長約9kmを対象流域として設定した神田川上流域の高度な地物データGISを示しており、土地利用情報は2004年時点のものである。地表面地物データの要素数は104,342個で、表-1は土地利用種別毎の面積および面積率を示している。建物の面積率は約30%を占めており、続いて道路16%、林地9%の順となっており、これらの合計で全体の約54%を占めている。表-2は、高度な地物データGISにおける20グループの土地利用種別について示したもので、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ける流域全体の蒸発散量が妥当なものとなるように竹下ら¹¹⁾、藤田ら¹²⁾および荒木ら¹³⁾の値を参考として、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、飽和土壌水分量等のパラメータを設定した。熱慣性は、川本ら¹⁴⁾が土地利用種別に設定した値を用いた。なお、不浸透性地物の窪地貯留高は一般的な値の2mmと設定した。またプール、池、河川については水域とした。

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。土地利用情報との整合性を考え、本研究では2004年の観測データを用いて、時間単位（1時間）の気温は地表面地物毎にクリギング法¹⁵⁾により8,784時間分を作成した。

4. ヒートアイランド緩和策のシミュレーション評価

(1) ヒートアイランド緩和策シナリオ

ヒートアイランド緩和策が地表面地物要素に対して与えるシミュレーション評価を行った。現状の土地利用状況をcase 0とし、3ケースの緩和策シナリオを想定し、case 1は屋上緑化対策を実施したシナリオ、case 2は保水性舗装化対策を実施したシナリオ、case 3はcase 1の屋上緑化とcase 2の保水性舗装化双方を実施したシナリオとした。屋上緑化を実施した建物は全建物の45.4%(1,544,692m²)、保水性舗装を実施した道路は全道路の91.9%(1,641,427m²)であり、図-2に緩和策を実施した地表面地物を示す。以下に屋上緑化および保水性舗装を実施する地表面地物要素の設定条件を説明する。

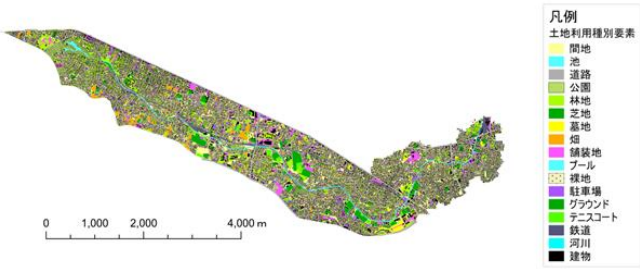


図-1 神田川上流域の高度な地物データGIS

表-1 土地利用種別毎の面積および面積率

土地利用種別	面積 (m ²)	面積率 (%)	土地利用種別	面積 (m ²)	面積率 (%)
建物	3,382,235	29.40	舗装地	379,521	3.30
駐車場 (浸透)	60,351	0.52	鉄道	149,388	1.30
駐車場 (不浸透)	207,213	1.80	間地	3,429,321	29.81
グラウンド (浸透)	225,656	1.96	テニスコート (浸透)	54,613	0.47
グラウンド (不浸透)	23,288	0.20	テニスコート (不浸透)	30,383	0.26
林地	1,041,020	9.05	裸地	52,714	0.46
芝地	171,526	1.49	プール	11,750	0.10
畑	188,587	1.64	道路	1,785,662	15.52
公園	104,735	0.91	池	36,205	0.31
墓地	70,392	0.61	河川	99,704	0.87

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)	地下水分量 (mm)	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

① 屋上緑化を実施する設定条件

屋上緑化のシナリオでは、「東京都における自然の保護と回復に関する条例¹⁾」を参考に「(a)耐火、準耐火および防火構造である建物」, 「(b)敷地面積が1,000㎡以上（国及び地方公共団体が有する敷地の場合は250㎡以上）」の両者に合致する建物地表面地物要素に対して設定した. 一般的には「屋上を緑化する際に, 可能性の高い建物は, 躯体構造の種別が木造などに比べて堅固なコンクリート造や重量鉄骨造が挙げられる」とされている. そこで本研究においても, 東京都GISを基に(a)を満たす建物を選別した. また(b)において, 敷地面積は国土数値情報の土地利用データより土地利用毎の建ぺい率を適用し, 敷地面積の内最大限まで建物を建てたという仮定の下（建物面積）×100÷（建ぺい率）により算出した. また条件(a)(b)に合致した建物に関して, 敷地面積が5,000㎡未満（国及び地方公共団体が有する敷地の場合は1000㎡未満）の場合は（敷地面積－建築面積）×0.2以上を, 敷地面積が5,000㎡以上（国及び地方公共団体が有する敷地の場合は1000㎡以上）の場合は（敷地面積－建築面積）×0.25以上を緑化することが定められているが, 屋上緑化のシナリオでは建物地表面地物要素に対して緑化を建物面積全てに行ったと仮定し, 林地の蒸発散パラメータを適用した.

② 保水性舗装を実施する設定条件

保水性舗装化のシナリオでは, 国道を除く全道路を対象とし, 東京都型保水性舗装を想定し, 供試体の保水量は降水量換算で7～8mm相当の保水量と推定されている¹⁶⁾ことから, 保水性舗装の空隙として8mmとし, この値を直接流出発生高（窪地貯留高）として用いることにより蒸発散量の増加によるヒートアイランド緩和効果を表現した.

（2）TETモデルによるシミュレーション評価

本検討では2004年の夏季（6～9月）を対象に, 時間単位モデルを用いて地表面地物要素毎の地表面温度および蒸発散量を推定する. 風速, 気圧, 降水量, 相対湿度についてはMETROS20の都立杉並高校における観測値を用いた. 全天日射量, 日照時間については, METROSでは観測されていないため, 前者は気象庁「東京」における時間観測値を, 後者はAMeDAS府中観測所の観測値を用いた.

図-3には, 上から都立杉並高校における降水量, 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, および気象庁「東京」における全天日射量を示しており, 図-3(a)はシナリオ毎(case 0～3)における流域平均の蒸発散量および地表面温度の時刻変化を示している. 図-3(b)はヒートアイランド緩和策を実施していない建物および道路（case 0）, ヒートアイランド緩和策を実施した屋上緑化（case 1, case 3）および保水性舗装（case 2, case 3）の時間単位蒸発散量と地表面温度の時刻変化を示している. なお, 7月1日は2004年で最も蒸発散量が多かった日であり, 降水のある6月30日を含めて示している.

まず図-3(a)より流域平均においては, 6月30日は7時から14時にかけて7.5mmの降水があり, 降水中の蒸発散量お

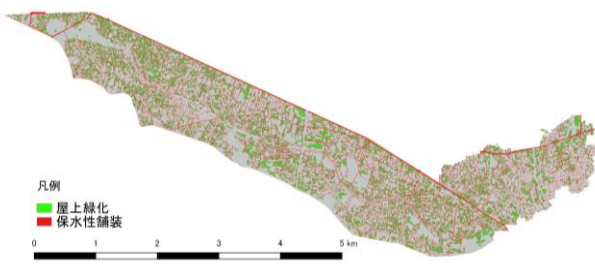


図-2 ヒートアイランド緩和策を実施した地物

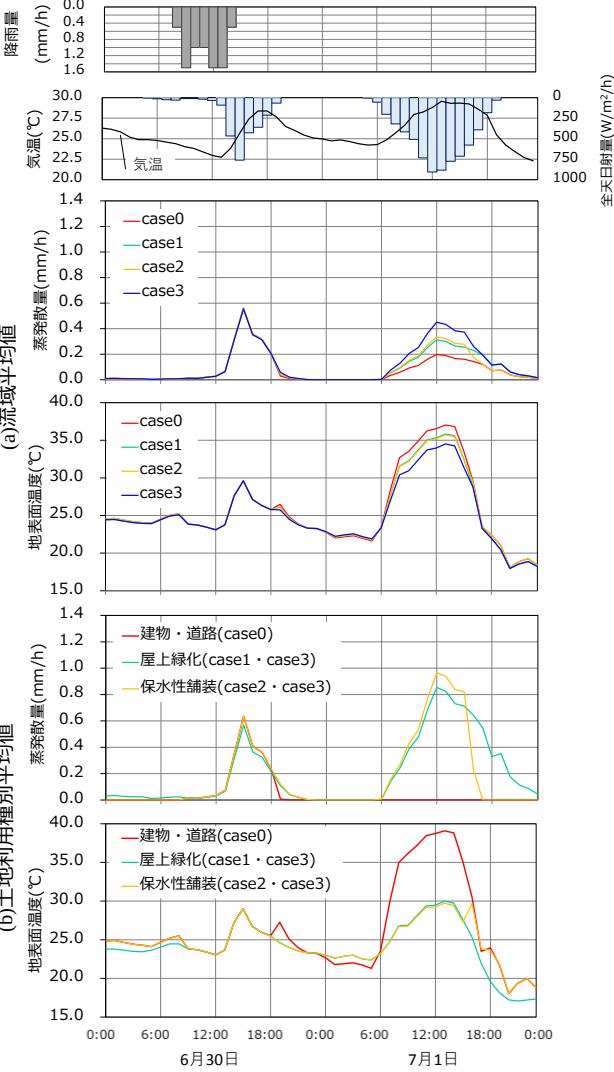


図-3 時間単位蒸発散量および地表面温度の時刻変化

(a)屋上緑化と保水性舗装, (b)流域平均

表-3 7月1日における最大蒸発散量
および最高地表面温度

		12時 (最大蒸発散量時)	13時 (最高地表面温度時)
流域 平均 値	case 0	0.20	37.0
	case 1	0.31	35.8
	case 2	0.34	35.7
	case 3	0.45	34.5
建物・道路(case 0)		0.00	39.1
屋上緑化(case 1, case 3)		0.85	30.0
保水性舗装(case 2, case 3)		0.97	29.7

よび地表面温度はどのシナリオも同等の値であった。晴天であった7月1日において、12時に蒸発散量が最大、13時に地表面温度が最高となっており、表-3は、この時の蒸発散量と地表面温度を土地利用種別および流域平均について示している。case 1とcase 2はcase 0と比べ地表面温度が約1℃低下、case 3については2.5℃低下している。よって保水性舗装が機能している条件下で、case 3は高いヒートアイランド緩和策効果があると示された。次に、図-3(b)の土地利用種別平均値について述べる。6月30日については、降水中の蒸発散量および地表面温度はどの土地利用種別も同等の値となっている。15時以降は降水が無く、19時に建物・道路(case 0)の窪地貯留量がゼロになったため蒸発散量も0mmとなり、その直後から地表面温度が上昇している。保水性舗装(case 2, case 3)においては窪地貯留を8mmに設定したことを反映し、蒸発散は次の日の17時まで継続している。また、屋上緑化(case 1, case 3)は浸透性地物としているので、常に蒸発散がある。7月1日において、図-3(a)と同様、12時に蒸発散量が最大、13時に地表面温度が最高となり、表-3より屋上緑化(case 1, case 3)、保水性舗装(case 2, case 3)は、建物・道路(case 0)と比べて地表面温度が約9℃低下し、保水性舗装(case 2, case 3)の地表面温度が最も低くなっている。17時以降、保水性舗装(case 2, case 3)は蒸発散量が0mmとなり、屋上緑化(case 1, case 3)と比べて地表面温度が上昇している。以上からヒートアイランド緩和策効果としては、窪地貯留が無くなるまでは保水性舗装(case 2, case 3)が最も地表面温度上昇の抑制効果があり、窪地貯留が無くなった後は、継続的に蒸発散する屋上緑化(case 1, case 3)が最も効果がある。

5. むすび

本研究では、都市流域において複雑に形成された地表面地物の浸透特性を正確に表現できる高度な地物データGISを活用し、土地利用種別毎の浸透特性と土壌水分量の違いを考慮した時間単位の蒸発散モデルを神田川上流域に適用し、ヒートアイランド緩和策のシミュレーション評価を行った。建物の屋上緑化および道路の保水性舗装化を実施したシナリオを想定し、2004年の夏季における時間単位の地表面温度および蒸発散量を推定した。蒸発散量が最も多かった6月30日から7月1日において、流域全体のヒートアイランド緩和策の地表面温度低減を時間毎で示され、最大2.5℃の高い地表面温度低減効果が示された。そして、降水時から窪地貯留が無くなる間において、保水性舗装が最も地表面温度上昇の抑制効果があり、窪地貯留が無くなった後は継続的に蒸発散が発生する屋上緑化が最も効果があることを示した。

参考文献

- 1) 東京都環境局：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/g10113670
- 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) 高山亮輔, 天口英雄, 河村明, 古賀達也：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, 土木学会論文集G(環境), pp. I-339~I-346, Vol.73, No.5, 2017.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 小作好明, 鶴田隆生, 宇野久実子：12. 保水性舗装に散水した場合の気温・湿度への効果, 平20. 都土木技術センター年報