

神田川上流域を対象とした屋上緑化・保水性舗装による ヒートアイランド緩和効果の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 ○高塚 亮丞
 首都大学東京 都市環境科学研究科 正会員 河村 明
 首都大学東京 都市環境科学研究科 正会員 天口 英雄
 (株)建設技術研究所 正会員 古賀 達也

1. はじめに

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℃の気温上昇が観測されている。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には屋上緑化計画の義務づけを実施するなど、ヒートアイランド緩和策を推進している。これらのヒートアイランド緩和策を推進していくためには、行政部局による都市流域でのヒートアイランド対策の施策評価を実施する必要がある。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を用いた評価が重要である。

著者らはこれまでに、高度な地物データ GIS²⁾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壤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)モデルを提案している³⁾。

本研究では高度に都市化の進展した神田川上流域において個別の地表面地物要素の土地利用種別を用いることにより、建物の屋上緑化および道路の保水性舗装化のヒートアイランド緩和策を実施したシナリオを想定し、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、地表面地物要素の土地利用種別の改変による地表面地物要素毎の地表面温度変化および流域平均地表面温度の変化を算定するとともに、屋上緑化および保水性舗装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シミュレーション評価した。

2. 蒸発散モデル(TETモデル)の概要

TETモデルは熱収支を考慮し、地表面地物要素毎の土地利用および土壤水分量の違いを表現可能な蒸発散モデルであり、地表面の熱収支式の基礎方程式を用いて、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。また、浸透域においては土地利用種別毎の蒸発散係数および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を算定し、これから求まる潜熱、顕熱を用いることにより土地利用種別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である³⁾。土壤水分量評価については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として SMPT(Soil Moisture Parameter Tank Model)⁴⁾モデルによる浸透域モデルを構築している。また、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) 神田川上流域における高度な地物データGISの特性

本研究では、図-1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-2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。ここでは本流域の全地物を 20の土地利用種別に分類している。

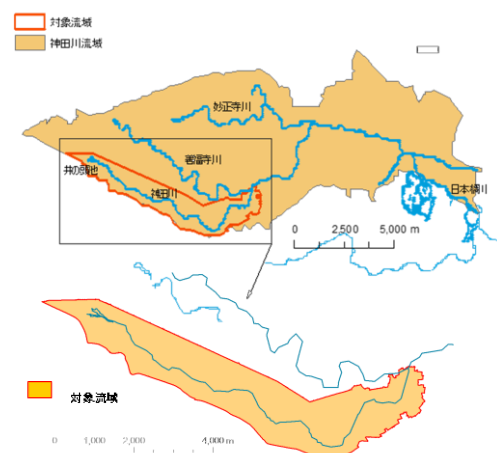


図-1 対象とした神田川上流域

キーワード 熱収支, 蒸発散, 地表面地物要素, 土壤水分量, ヒートアイランド緩和策

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: takatsuka-ryousuke@ed.tmu.ac.jp

表-1 に高度な地物データ GIS による地表面地物要素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 105,458 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。

(2) METROS (Metropolitan Environmental Temperature and Rainfall Observation System)⁵⁾ データ

本研究では、気象データとして METROS 観測データを用いる。METROS は東京都環境科学研究所と首都大学東京が共同で都内 126 地点に設置している気象観測機器・システムである。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、本研究では METROS 観測データの 2004 年の気象データを用いる事とした。図-3 に神田川上流域周辺の METROS 観測所の位置関係を示す。本研究では、簡便のため図-3 に示すティーセン分割を行い、各地表面地物要素毎に、観測地点のティーセンエリアに対象領域が含まれる St.1 ～St.9 の異なる気温データを与えることとした。なお、図-3 の範囲内には気象庁アメダス観測所は存在しておらず、METROS データの活用により地域毎に異なる気温状況を表現することができる。

表-2 に 9 観測地点の 2004 年の月平均および年平均気温を示す。観測地点毎に大きな気温変化は見られないが、表-2 の月平均気温より St.8 が夏場に最も高温で St.1 が最低となっており、年間平均気温で見ると St.8 が 17.36℃ に対し、St.1 の年間平均気温は 16.37℃ であり約 1℃ の差がある。

4. ヒートアイランド緩和策評価

(1) 計算条件

本研究では 2004 年の 1 月～12 月の 1 年間を対象に、TET モデルを用いて日単位の潜熱、顕熱を算定するとともに、それらを用いて地表面地物要素毎の蒸発散量および地表面温度を推定した。バルク式に用いる日平均気温については、地表面地物要素毎の位置に応じて図-3 に示した St.1～St.9 のそれぞれの観測値を用いた。風速については、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、METROS100 および METROS20 では観測されていないため、アメダス「東京」における観測値を用いた。なお、全天日射量は数 km の範囲で大きく異なる値ではないため、蒸発散量の推定に与える影響は無視できると考えられる。大気放射量については、近藤の提案する手法⁶⁾により算出した。

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（水域

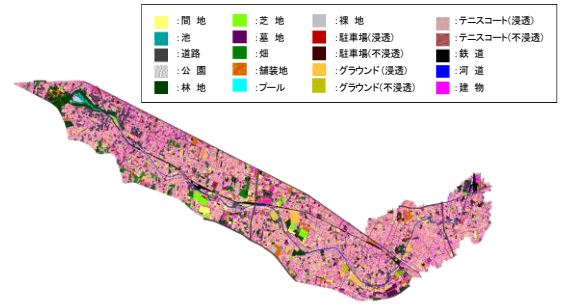


図-2 神田川上流域の高度な地物データ

表-1 高度な地物データ GIS による要素数及び面積率

| 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 | 34,392 | 3,382,235 | 29.40 |
| 2 | 駐車場(浸透) | 184 | 60,351 | 0.52 |
| 3 | 駐車場(不浸透) | 649 | 207,213 | 1.80 |
| 4 | グラウンド(浸透) | 571 | 225,656 | 1.96 |
| 5 | グラウンド(不浸透) | 48 | 23,288 | 0.20 |
| 6 | 林地 | 3,297 | 1,041,020 | 9.05 |
| 7 | 芝地 | 423 | 171,526 | 1.49 |
| 8 | 畑 | 508 | 188,587 | 1.64 |
| 9 | 公園 | 287 | 90,538 | 0.79 |
| 10 | 墓地 | 173 | 70,392 | 0.61 |
| 11 | 舗装地 | 1,194 | 379,521 | 3.30 |
| 12 | 鉄道 | 574 | 149,388 | 1.30 |
| 13 | 間地 | 17,028 | 3,429,321 | 29.81 |
| 14 | テニスコート(浸透) | 114 | 54,613 | 0.47 |
| 15 | テニスコート(不浸透) | 62 | 30,383 | 0.26 |
| 16 | 裸地 | 119 | 52,714 | 0.46 |
| 17 | プール | 27 | 11,750 | 0.10 |
| 18 | 道路 | 45,379 | 1,785,662 | 15.52 |
| 19 | 池 | 114 | 50,402 | 0.44 |
| 20 | 河川 | 315 | 99,704 | 0.87 |
| 計 | | 105,458 | 11,504,265 | 100.00 |

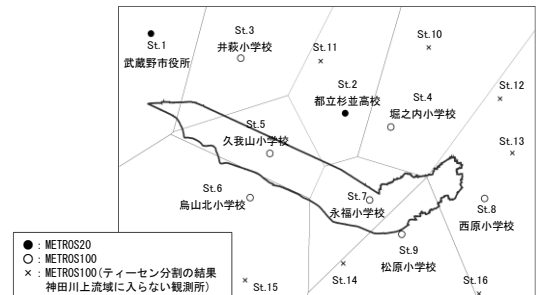


図-3 対象流域周辺の METROS 設置位置

表-2 観測点毎の月平均および年平均気温

| 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(℃) | | | | | | | | | |
| 1 | 5.17 | 5.39 | 4.99 | 5.55 | 5.59 | 5.61 | 5.13 | 5.90 | 5.66 |
| 2 | 7.43 | 7.61 | 7.28 | 7.77 | 7.81 | 7.82 | 7.36 | 8.27 | 7.92 |
| 3 | 8.88 | 9.13 | 9.29 | 9.59 | 9.50 | 9.11 | 9.33 | 9.79 | 9.29 |
| 4 | 15.51 | 15.80 | 16.04 | 16.32 | 16.09 | 15.94 | 16.12 | 16.60 | 16.05 |
| 5 | 18.87 | 19.17 | 19.53 | 19.73 | 19.51 | 19.34 | 19.68 | 19.94 | 19.52 |
| 6 | 23.11 | 23.33 | 23.68 | 23.83 | 23.50 | 23.45 | 23.68 | 24.01 | 23.52 |
| 7 | 27.73 | 28.15 | 28.57 | 28.83 | 28.35 | 28.35 | 28.55 | 29.01 | 28.46 |
| 8 | 26.19 | 26.62 | 26.97 | 27.21 | 26.85 | 26.89 | 26.94 | 27.43 | 26.90 |
| 9 | 24.21 | 24.61 | 24.81 | 25.13 | 24.89 | 24.96 | 24.93 | 25.38 | 24.94 |
| 10 | 16.44 | 16.75 | 16.78 | 17.05 | 16.75 | 16.88 | 16.73 | 17.34 | 16.87 |
| 11 | 14.40 | 14.69 | 14.34 | 14.85 | 15.14 | 14.61 | 14.23 | 15.21 | 14.80 |
| 12 | 8.47 | 8.80 | 8.47 | 8.76 | 8.98 | 8.60 | 8.21 | 9.32 | 8.87 |
| 年平均(℃) | 16.37 | 16.68 | 16.74 | 17.06 | 16.92 | 16.80 | 16.75 | 17.36 | 16.91 |

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-3に示す。なお、浸透域については、土地利用種別は10タイプ存在するが、大きく4グループに分類し、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タイプ、グループ4は裸地とした。また、不浸透域の水域(河道、池、プール)以外である8タイプ(表-3参照)はグループ5とし、不浸透域からの直接流出発生高(窪地貯留高)は一般的な値を採用し2mmと設定した。さらに、河道、池、プールの3タイプは不浸透域の水域であり、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に示すような一般的な値を採用した。

表-3 土地利用種別毎のパラメータ

| 定数が同地の区分 | 土地利用種別 | 浸透特性 | 飽和土壤水分量 (mm) | 最小容水量 (mm) | 地下水涵養定数 (1/s) | 初期水量 (mm) | アルベド α | 蒸発散係数 k |
|----------|--|------|--------------|------------|---------------|-----------|---------------|---------|
| グループ1 | 林地 | 浸透 | 138 | 110 | 0.8 | 97 | 0.15 | 4.38 |
| グループ2 | 畑 | 浸透 | 104 | 83 | 0.8 | 73 | 0.23 | 0.55 |
| グループ3 | 駐車場(浸透)、芝地、グラウンド(浸透)、公園、墓地、間地、テニスコート(浸透) | 浸透 | 92 | 74 | 0.8 | 64 | 0.10 | 0.34 |
| グループ4 | 裸地 | 浸透 | 80 | 64 | 0.8 | 56 | 0.10 | 0.25 |
| グループ5 | 建物、道路、舗装地、駐車場(不浸透)、鉄道、グラウンド(不浸透)、テニスコート(不浸透) | 不浸透 | - | | | | | |
| グループ6 | 河道、池、プール | 不浸透 | - | | | | | |

表-4 ヒートアイランド緩和策シナリオの想定ケース

| case | 想定シナリオ | 対策面積 | 適用 |
|--------|-------------|--------------------|-----------------|
| case 0 | 現状土地利用 | - | - |
| case 1 | 建物屋上緑化 | 1.9kr ² | 建物屋上を林地と想定 |
| case 2 | 保水性舗装化 | 1.8kr ² | 窪地貯留高8mm |
| case 3 | 屋上緑化+保水性舗装化 | 3.7kr ² | case 1 + case 2 |

(2) ヒートアイランド緩和策シナリオの想定

地表面地物要素への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を実施するにあたり、表-4に示す4ケースの緩和策シナリオを想定した。case 0を現状の土地利用状況とし、case 1は屋上緑化対策(実施が難しい独立住宅を除く、集合住宅や庁舎、学校などの全建物地表面地物要素への屋上緑化)を実施したシナリオとした。case 2は保水性舗装化対策(東京都が進める東京都型保水性舗装を対象とし、国道を除く全道路の保水性舗装化)を実施したシナリオとした。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。屋上緑化のシナリオでは、建物地表面地物要素に対して林地の蒸発散パラメータを適用した。保水性舗装化のシナリオでは、保水性舗装の空隙として8mmを想定し⁷⁾、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。

(3) シミュレーション結果の評価

上記の計算条件および想定シナリオをもとに、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および地表面温度の算定を行った。図-4には、現状(case 0)の観測地点の支配面積が最大であるSt.5の気温を与えた領域における、日平均地表面温度時系列をグループ毎に示している。なお、図-4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。図-4より、特にグループ5(建物、道路等)の日平均地表面温度は、St.5の日平均気温と比較すると、夏期にかなり高くなることがわかる。浸透域の中で蒸発散量が最大となるグループ1(林地)においては、St.5の日平均気温と同程度となることがわかる。水域であるグループ6(河道)においては、St.5の日平均気温と同程度かそれよりも低くなる傾向がみられる。

図-5には、現状の土地利用であるcase 0でのグループ5(建物および道路)の日平均地表面温度時系列(図-4建物(グループ5)と同じ)と、ヒートアイランド緩和策を適用したcase 1、case 3での屋上緑化後の建物地物の日平均地表面温度時系列、case 2、case 3での保水性舗装化後の道路地物の日平均地表面温度時系列を示す。この図より、屋上緑化による日平均地表面温度の低下が、保水性舗装化と比較し、特に夏期において顕著であることが示された。例えば7月7日では、屋上緑化(case 1、case 3)により建物地物の日平均地表面温度は約10℃低下しているが、保水性舗装化(case 2、case 3)による道路地物の日平均地表面温度の変化は見られない。

表-5には、流域全体での各シナリオに対する平均地表面温度を示す。表中には流域全体での内全地表面地物要素からの年間蒸発散量も併記している。この表より、年平均地表面温度は case 0（現状）と比較して、case 1（屋上緑化）、case 2（保水性舗装化）、case 3（屋上緑化および保水性舗装化）で、それぞれ約 0.4℃、0.1℃、0.5℃の地表面温度の低下となっており、保水性舗装化よりも屋上緑化による地表面温度低減効果が高いことがわかる。次いで、St.1～St.9の全ての観測地点における平均気温が 20℃以上となった6月～9月の4ヶ月間の平均地表面温度は、case 1、case 2、case 3で、それぞれ約 0.7℃、0.2℃、0.9℃の地表面温度の低下となり、年平均地表面温度の低下より case 3で約 0.4℃大きくなっている。さらに、ヒートアイランド緩和効果が最大となった7月3日では、case 1、case 2、case 3で、それぞれ約 1.6℃、1.4℃、3.0℃の地表面温度低下の効果となった。なお、St.5において最高気温となった7月21日では、case 1で 1.4℃の地表面温度の低下が見られるものの、case 2では変化が見られなかった。これは、無降雨期間が続き保水性舗装化した道路の地表面水分量が減少し、蒸発散量が増加しなかったためである。

5. むすび

本研究では、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ヒートアイランド緩和策の複数の想定シナリオ（屋上緑化、保水性舗装化）に対し 2004 年 1 年間の地表面地物要素毎の潜熱、顕熱、蒸発散量、地表面温度および流域平均地表面温度を算定した。その結果、現状の建物や道路地物は、特に夏期に日平均気温よりもかなり高くなることを示した。また、流域全体の地表面温度は、屋上緑化による地表面温度低減効果が保水性舗装化よりも大きくなることや、ヒートアイランド緩和効果が最大となった日では、約 3.0℃の地表面温度低減効果となることを示した。

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) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 近藤純正：地表面に近い大気科学, p.141, 2000.
- 7) 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

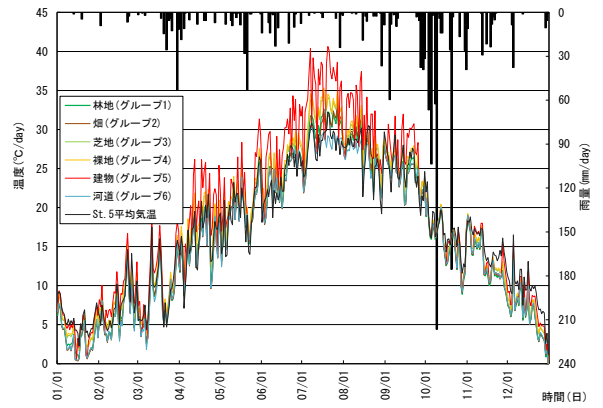


図-4 土地利用グループ毎の日平均地表面温度 (St. 5 の気温を与えた領域 : case 0)

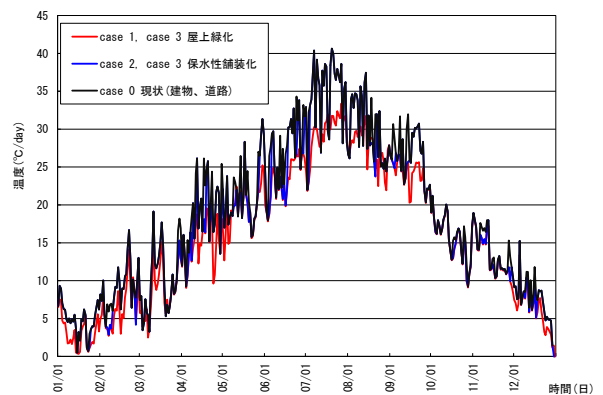


図-5 屋上緑化および保水性舗装による日平均地表面温度の変化 (St. 5 の気温を与えた領域)

表-5 各シナリオによる流域全体の平均地表面温度および年間総蒸発散量

| 項目 | 月日 | case0 | case1 | case2 | case3 | 備考 |
|------------------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|
| 年平均地表面温度 (°C) | | 17.9 | 17.5 | 17.8 | 17.4 | |
| 6-9月平均地表面温度 (°C) | | 29.0 | 28.3 | 28.8 | 28.2 | |
| 日平均地表面温度 (°C) | 7月3日 | 29.7 | 28.1 | 28.3 | 26.7 | 緩和効果最高時 |
| | 7月21日 | 37.8 | 36.4 | 37.8 | 36.4 | 気温最高時 |
| 年間総蒸発散量 (m³) | | 2,965,848 | 4,002,733 | 3,320,961 | 4,357,847 | |