

30. 都市暑熱環境における緩和効果のシミュレーション

王 雅静^{1*}・成 岱蔚¹・綿貫 翔¹・山田 正²

¹中央大学理工学研究科都市環境学専攻（〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27）

²中央大学理工学部都市環境学科（〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27）

* E-mail: wangyajing@civil.chuo-u.ac.jp

ヒートアイランド現象は人工廃熱及び宅地化や道路舗装といった人工被覆面による放射・顕熱の増加、緑地や水面域の喪失に伴う潜熱の減少、ビルの乱立などによる弱風域の形成等の影響で都市域の気温が郊外に比べて高くなることである。この現象を抑えるため、河川と緑地を冷源として期待されている。本研究は地表被覆面の違いによる緑地と都市水域からの冷氣放出量及び道路と高層ビルからの熱放出量を移流拡散で計算した。皇居を中心として周辺環境の熱変化量を計算した。

その結果、都市水域及び緑地が周辺に冷却効果を与えることが見られた。そして、ビルから熱放出量が少ないことがわかった。

Key Words : advection-diffusion equation, heat island, heat budget

1. はじめに

気象庁のヒートアイランド監視報告によると、100年間で東京は約1.9℃気温が上昇している。この原因として、ヒートアイランド現象が一つの要因として考えられる。ヒートアイランド現象とは、都市の気温等温線が都市部を中心とした島の形状になること、即ち、郊外に比べて気温が高くなっていることである。その具体的な原因は、人工廃熱及び宅地化や道路舗装といった人工被覆面による放射量・顕熱輸送量の増加、緑地や水面域の喪失に伴う潜熱輸送量の減少、ビルの乱立などによる弱風域の形成等である。

ヒートアイランド現象を緩和するため、東京都は緩和策の検討を行っている。例えば、建物敷地の舗装対策や都道での保水性舗装の試験施工等である。

都市内の大規模緑地では日中を中心にクールアイランドが形成される。この冷氣が四方の周辺市街地に向かって流れ出る現象を冷氣の「にじみ出し現象」と呼ばれる。「にじみ出し現象」は、風によって緑地や水域内の冷氣が風下側の市街地へ移流・拡散する現象とは全く異なる。

この冷氣の「にじみ出し現象」はヒートアイランドを緩和する効果が注目されている。これらの河川の暑熱環境緩和効果を実証するために、実際の河川を対象に様々な観測や研究が報告されてきている。例えば、村川ら¹⁾

は広島の大田川周辺において、橋本ら²⁾は名古屋の堀川・新堀川において、加藤ら³⁾は東京・荒川の周辺地域において気温・湿度と風向風速の観測を行って、河川が存在が周辺地域に冷氣を移動する影響を報告している。武若ら⁴⁾、池田ら⁵⁾は荒川とその河川敷で、成田ら⁶⁾は東京隅田川において熱収支観測を実施し、河川の大気冷却効果の範囲を検討した。

河川と同様に冷源として期待される緑地についても多くの研究がある。例えば、森脇ら⁷⁾は明治神宮で、成田ら⁸⁾は新宿御苑において大規模緑地の熱収支を明らかにした。原田ら⁹⁾は堀川に面した大規模公園において微気象観測を行った。

また、保水性舗装の試験施工の緩和効果を検討し、浅枝・藤野¹⁰⁾はアスファルト及びコンクリート舗装面と土壌面の蓄熱特性を明らかにしている。

2. 緩和効果気温分布の理論的表現

本研究は、都市水域及び緑地が周辺に与える冷却効果の提案を行う。まず、都市環境における冷氣の広がり移流拡散方程式に基づくと考え¹¹⁾。そこで、河川からの冷氣の放出を点源からの冷氣の放出の重ね合わせと考え、周辺の気温分布を理論的に表現する。

点源から冷気が時間的に放出されている時の冷気分布の解析解を導出する二次元乱流拡散方程式の基礎式 (2-1) は

$$\frac{\partial q}{\partial t} + U \frac{\partial q}{\partial x} = k \left(\frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} \right) \quad (2-1)$$

で表される。ここで U : 風速 [m s^{-1}], k : 拡散係数 [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$] である。風速は定常状態かつ x 方向を想定する。

$$\begin{aligned} \text{I.C.} \quad q &= m\delta(r) \quad \text{at } t = t_0 \\ \text{B.C.1} \quad q &= \text{finite} \quad \text{at } t = +\infty \\ \text{B.C.2} \quad q &= \text{finite} \quad \text{at } t = +\infty \end{aligned} \quad (2-2)$$

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad (2-3)$$

ここで, r : 拡散点との距離 [m] である。式 (2-1) の解析解を式 (2-4) で表す。冷気は原点から一定強度で連続的に排出されている。 m : 冷気排出強度 [W m^{-1}], t_0 : 排出時刻 [s] である。

$$\begin{aligned} q(x, y, t) &= \frac{m}{\{4k\pi(t-t_0)^{3/2}\}} \\ &\times \exp \left[-\frac{\{x-u(t-t_0)\}^2 + y^2}{4k(t-t_0)} \right] \end{aligned} \quad (2-4)$$

上式を排出時刻から一時間まで積分すると, 式 (2-5) になる。

$$\begin{aligned} D(x, y) &= \frac{m}{2k\pi^{3/2}r} \exp \left(\frac{Ux}{2k} \right) \\ &\times \int_{r/2\sqrt{kt}}^{\infty} \exp \left\{ -r^2 - \frac{U^2 r^2}{16k^2 r^2} \right\} dt \end{aligned} \quad (2-5)$$

これにより, 点源から冷気が時間的に放出されている時の冷気分布がわかる。その結果を図-1で示す。

3. 水面と陸地における熱収支

次に地表面温度を推定する。地表面熱収支¹²⁾は次式 (3-1) で与えられる。

$$\begin{aligned} (1 - \text{ref}) S^{\downarrow} + L^{\downarrow} &= \\ H + \iota E + G + \sigma T_s^4 + \text{Heat} \end{aligned} \quad (3-1)$$

ref : アルベド [-], $S^{\downarrow}$: 水平面日射量 [W m^{-2}], $L^{\downarrow}$: 大気放射量 [W m^{-2}], H : 顕熱輸送量 [W m^{-2}], ιE : 潜熱輸送量 [W m^{-2}], G : 貯熱量 [W m^{-2}], σ : ステファン・ボルツマン定数 [$= 5.670 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$], T_s : 地表面温度 [$^{\circ}\text{C}$], Heat : 人口排熱量 [$\text{KJ/m}^2 \cdot \text{h}$] である。また、顕熱と潜熱の輸送量は次のバルク式¹²⁾ (3-2) で表される。

$$\begin{aligned} H &= c_p \rho C_H U (T_s - T_a) \\ \iota E &= \iota \rho C_H U (q_s - q_a) \end{aligned} \quad (3-2)$$

ここで c_p : 空気 の定圧比熱 [$\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$], ρ : 空気 の密度 [kg m^{-3}], C_H : バルク輸送係数 [-], T_a : 気温 [$^{\circ}\text{C}$], ι : 水の気化熱 [$= 40.6 \text{ KJ mol}^{-1}$], β : 蒸発効率 [-], q_s : 地表面温度に対する飽和比湿 [kg/kg], q_a : 大気比湿 [kg/kg] である。

4. 使用データ

気象庁の東京地上気象観測所の 2014 年 8 月 6 日 12 時の気温、気圧、風速、全日射量、雲量の値を使用した。人口排熱量の値は環境省の報告書¹³⁾を参考にした。それを表-1に示す。

土地利用類型は、国土地理院の「細密数値情報 (10 m メッシュ土地利用)」データを用い、4 種類に分けた。皇居周辺 8 km $\times$ 6 km の土地利用は図-2で示す。各パラメータは表-2で示す。

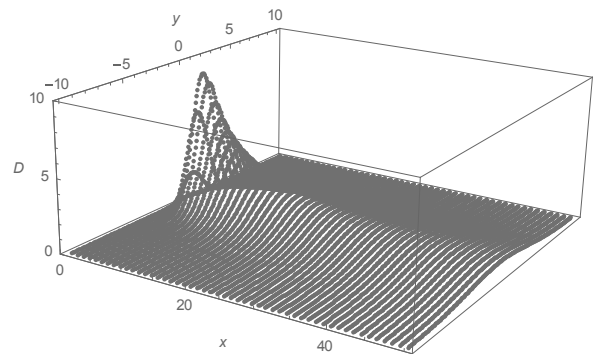


図-1 有風時瞬間点源冷気放出量分布の一例

表-1 使用データ

現地気圧(hPa)	1001.2
降水量(mm)	—
気温(°C)	34.6
蒸気圧(ha)	28.1
風速(m/s)	5.9
風向	南
日照時間(h)	1.0
全天日射量(MJ/m ²)	3.34
雲量	0+
低層建築人口排熱量(KJ/m ² ・h)	285
高層建築人口排熱量(KJ/m ² ・h)	335

表-2 土地利用区分と各種パラメータ

	水域	緑地	低層建築	高層建築
<i>ref</i>	0.06	0.23	0.25	0.18
<i>C_H</i>	0.0016	0.008	0.0015	0.0015
<i>β</i>	1.02	0.50	0	0
<i>G</i> (W・m ²)	564	82	109	161
<i>Heat</i> (KJ/m ² ・h)	0	0	285	335

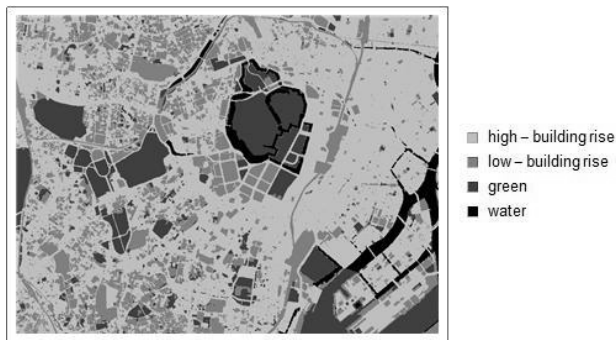


図-2 皇居周辺 8 km × 6 km 土地利用

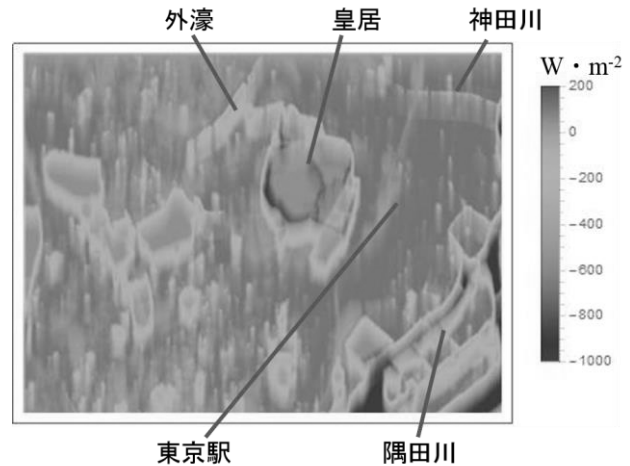
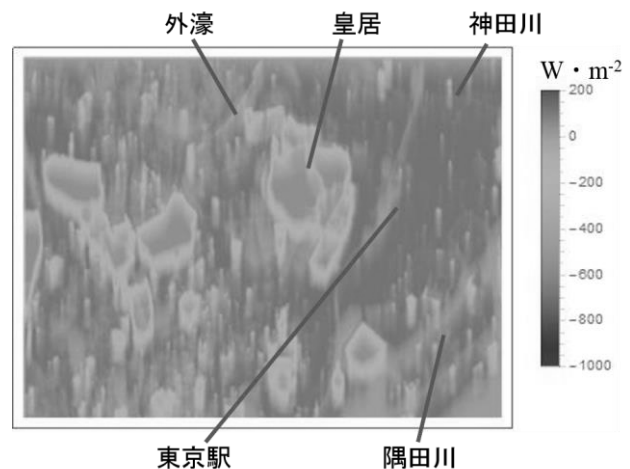
5. 熱量の計算結果

地表面熱収支で計算結果は表-3で示す。水面温度は気温より低い、緑地表面温度が気温と大体同じと見られる。建築群がある地域で地表面温度が高い。

表-3 区域地表面温度の推定値 (°C)

	水域	緑地	低層建築	高層建築
<i>T_s</i>	22.10	34.47	44.12	46.28

拡散係数は等方的な定数であるとした。冷気拡散量は a 倍の地表面温度差と考えられる、 a : 拡散係数修正パラメータ [-]。 $k = 0.4$ を与え、冷気放出量は皇居周辺 8 km × 6 km の範囲で計算した。図-3で示す計算結果は実際熱輸送量推定値の a 倍である。現在、区域地表面温度と気温分布の観測値は欠如しているため、 a は決められないが、ここで、 a は 1 をして計算した。

図-3 区域 a 倍の熱輸送量 (W・m²) 分布図-4 水域の冷却効果を見捨てる場合区域 a 倍の熱輸送量 (W・m²) 分布

計算により、「にじみ出し現象」は四方の周辺市街地に向かって流れ出る冷気が多いの緑地周辺に明らかである。例えば、明治神宮や新宿御苑、皇居において大規模緑地の周辺暑熱緩和効果が多い。外濠や隅田川等都市河川の上空大気は大幅冷気を受け入れる、周辺冷気に約幅 200 m 拡散される。隅田川周辺に比べて、神田川周辺「にじみ出し現象」が弱い。

皇居東側の丸の内街区内で冷気の流入はなく、熱の放出

が見られる。熱放出量は皇居からの冷気流入量より多い。

次に都市水域が低層建築を対象として仮定し、区域冷気放出量を計算した。図4で示す計算結果は水域の冷却効果を見捨てる場合、熱輸送量推定値の a 倍である。

図4は図3に比べて、区域全体的冷気放出量が減っている。冷気放出量は最大値の発生点が隅田川から皇居に変わった。外濠の風向流下方向 100 m の範囲で冷却効果は大幅に削減した。神田川上空は、熱変化量はほぼゼロである。建築群がある丸の内街区は、熱流出が変わらない。

6. 考察

東側の丸の内街区をはじめとして高密度市街地に接しており、皇居からの冷気供給による夏季の暑熱緩和効果は微弱なことである。逆に、高層ビルが集まり、熱流の重なりで気温が上がる可能性がある。

図の色の变化から見ると、暑熱緩和効果は、風向流下方向に強くなる。

図4から見ると、特に、冷気が一番減少している隅田川河口の周辺は、冷気放出量が変わる。丸の内街区から熱気流が流入し、浜離宮恩賜庭園の暑熱緩和効果を重ね、冷気供給による夏季の暑熱緩和効果は削減した。

7. まとめ

本研究は年々深刻になってきたヒートアイランド現象を抑えるため、都市暑熱環境における水域と緑地の緩和効果シミュレーションを行った。地表面被覆による地表面温度差は冷気拡散量の倍数に基づくと考え、点源から冷気拡散量の重なりを区域全体冷気放出と仮定して、計算した。

本研究で得られた成果は以下の通りである。

- (1)多くの緑地周辺で「にじみ出し現象」を見られる効果が得られた。例えば、本シミュレーションモデルで計算により、明治神宮や新宿御苑、皇居において大規模緑地の周辺暑熱緩和効果が多いといえる。
- (2)幅が広い隅田川周辺で冷気放出量が多い。神田川の緩和効果は大幅に削減した、隅田川の周辺が多い緩和効果が見られる。
- (3)低層建築周辺に比べて、高層建築を流れる河川の暑熱緩和効果は河川幅によって異なる。河川幅が大体同じ神田川と外濠周辺で熱量は異なる。外濠より神田

川周辺で熱量が多い。

本シミュレーションモデルの未定パラメータ a の妥当性を検討するために、広域移動観測との比較を行う必要がある。ここで、都市温暖化の軽減方策に関しては言及していないが、本研究がその解決の一助となることを望む。

参考文献

- 1) 村川三郎，関根毅，成田健一，西名大作：都市内河川が周辺に温熱環境に及ぼす効果に関する研究(続報)，日本建築学会計画系論文報告集，第415号，19909
- 2) 橋本剛，船橋恭子，堀越哲美：海風の運河遡上による都市暑熱環境の緩和効果—名古屋市の堀川及び新堀川における事例—，日本建築学会計画系論文集，Vol.545，pp.65-70，2001.
- 3) 加藤拓磨，土屋修一，渡邊暁人，蛸原雅之，前村良雄，森久保司，山田正：河川の大気冷却作用による熱環境緩和効果，水文・水資源学会研究発表会要旨集，pp.38-39,2007.
- 4) 武若聡，池田駿介，平山孝浩，萱場祐一，財津知亨：都市内河川による大気冷却効果—都市内河川内外の夏期の熱環境および気象観測—，土木学会論文集，No.479/II-25，pp.11-20，1993.
- 5) 池田駿介，財津知亨，館健一郎：感潮河川の熱特性に関する研究—荒川における測定—，土木学会論文集，Vol.503/II-29，pp.207-213，1994.
- 6) 成田健一，植村明子，三坂育正：都市気候に及ぼす河川水の熱的影響に関する実測研究—隅田川における熱収支と周辺影響の検討—，日本建築学会計画系論文集，Vol.545，pp.71-78，2001.
- 7) 森脇亮，神田学，横山仁，高柳百合子，浜田崇：「神宮の森」の蒸散活動と熱収支 1996 年夏期集中観測，水工学論文集，Vol.41，pp.43-48，1997.
- 8) 成田健一，三上岳彦，菅原広史，本條毅：新宿御苑における蒸発効率と温熱環境の実測，環境情報科学論文集，Vol.18，pp.253-258，2004.
- 9) 原田守博，高木智之，手嶋健浩，鈴木宏佳：都市河川による暑熱環境の緩和効果に関する微気象観測，水工学論文集，第 vol.53, pp.301-306, 2009.
- 10) 浅枝隆，藤野毅：舗装面の熱収支と蓄熱特性について，水文・水資源学会誌，Vol.5，No.4，pp.3-7，1992.
- 11) 平岡正勝，田中幹也（編著），1994：移動現象論，朝倉書店，253pp
- 12) 近藤純正（編著），1994：水環境の気象学，朝倉書店，348pp.
- 13) 国土交通省・環境省：平成 15 年度都市における人工排熱抑制によるヒートアイランド対策調査報告書，pp.113，2004.