

水の蒸発散能力が持つ都市熱環境緩和・抑制効果の 定量的評価に関する研究

加藤 拓磨
Takuma KATO

東京のヒートアイランド現象は世界の都市の中でも特に顕著に現れている。2002年8月13日付けのニューヨークタイムズで“Heat Island' Tokyo is in Global Warming's Vanguard. (ヒートアイランド化した東京は地球温暖化の最前線に立っている!)”と表現された。東京の年平均気温はこの100年間で約3.0°C上昇し、近年、地球温暖化による気温上昇量は100年間で0.74°Cと考えられていることから東京都の気温上昇がいかにか著しいかわかる。東京は地球温暖化によって気温上昇しているのではなく、逆に東京が地球を温めているといっても過言ではない。2004年に年10個の台風が上陸し、2008年はゲリラ豪雨が多数発生し、兵庫県都賀川、東京都の下水管内の事故、2008年8月末豪雨では多くの人命・資産を奪うほどの惨事となった。単に地球温暖化現象がこれら上記現象を発生させた主要因とはいきれないが、現象の助長をさせていると多くの科学者が指摘している。地球温暖化により気候バランスが崩れ始め、地域、局所での降雨形態が変化している。場所によっては豪雨となり、場所によっては渇水になる。地球温暖化現象とヒートアイランド現象によって発生しやすくなったといわれるこのような突発的かつ局所的な降雨の発生件数が増加傾向にある。発生が予測できないことからゲリラ豪雨と呼ばれてメディアに取り上げられることも多くなった。このような雨に対しての防御力は都市機能にはなく、逃げることでしか減災することはできないが突発的なために逃げることも難しい。

ヒートアイランド現象が顕著である東京都、大阪府などの都市圏の行政、国土交通省、環境省は多岐にわたる緩和策の検討を行ってきている。例えば東京都を例に挙げると2002年1月に策定した「東京都環境基本計画」の中で、特に取り組みを強化すべき5つの戦略プログラムの一つとして、ヒートアイランド対策を位置づけた。戦略プログラムのうち、建物敷地の舗装対策や都道での保水性舗装の試験施工、都庁舎グリーン化プロジェクトなどのパイロット事業や、ヒートアイランド観測網整備などの施策はすでに実施に移されている。また、昭和通りにおいて路面温度を抑える舗装技術について、民間と共同実験を実施するなど、民間の先端的な技術を生かす意欲的な施策を展開している。

地球温暖化は温室効果ガスの排出量増加、ヒートアイランドは保水性の地表面と水辺の減少に伴う気化熱量の減少が大きく起因していると考えられる。これは世界中の近代化する上で仕方がなかったことであるが、今後は地球環境問題を考えた上でこれらに対して逆行していく必要がある。もちろんのこと地球温暖化に対しては温室効果ガス排出量抑制と吸収する必要がある。気温の上昇を食い止めるには現存する温室効果ガスを削減する必要があるからである。これには従来から逸脱した新しい技術の革新が求められる。ヒートアイランドは人工排熱を抑制することも重要であるが、都市部全体に緑と水辺、保水性舗装を増加させることで地圏に水を保持し気化熱を誘発させ、熱を奪うのが施策の柱である。そもそも明治以前の時代では地表面のほとんどは土や緑、家屋にしても木造が多く、水分が保持される構造であったが、近代化によりコンクリート、アスファルトが地表面を覆いかぶさり、水気がなくなっていったことを考えると昔の状態に近づけるのがその政策の意図であるといえる。水を0から100°Cまで上昇させるのに必要な熱量は $4.2\text{J/g}\cdot\text{K}\times 100\text{K}=420\text{J/g}$ であるのに対して水を蒸発させるのに必要な熱量 2250J/g と5倍以上必要であり、このエネルギーを十二分に利活用することがヒートアイランド現象緩和・抑制に資する。東京電力の試算では夏場に東京の気温が1度上昇すると、約170万kWの電力需要増加する。ここで東京電力の原子力発電所の1基の標準的な出力は110万kWであり、大きなエネルギーであることが窺える。ヒートアイランド現象緩和で気温を下げることは電気使用量を削減するだけではなく二酸化炭素排出

の抑制につながり、またそれは地球温暖化現象の緩和にもつながる。

熱環境問題に対して世界中、政府・科学者から個人レベルまで産学官の力を持って影響評価・緩和・適応をしていく試みが広がってきているがその定量的評価が難しいのが現状である。IPCCは地球温暖化によってここ100年で 0.74°C の気温上昇をしているとの報告があるがそれは地球全球の平均気温のことでありグローバルの気温変動は平均化された値であり小さいがそれぞれの都市の気温変動は非常に激しく、気温上昇の傾向を捉える定性的な評価は容易いが、定量的な評価は難しい。しかし行政が掲げる政策を定量的に評価しなければ無作為な計画が立てられるばかりとなる。そこで本研究では熱環境自体とそれを緩和させる効果を持つ森林や水辺を対象に定量的評価を行うものである。

第1章では、本研究の背景、既往の研究の整理を踏まえた上での本研究の意義、本研究の目的および本論文の章ごとの流れを示した。地球温暖化・ヒートアイランド現象による熱環境問題は今後数十年、数百年と人類が立ち向かっていかなくてはならない重要問題であり、その現状とそれによって助長されている災害、そして熱環境問題への取り組みについて取りまとめた。現状で熱環境の悪化原因と緩和要素の分類化は進んでいるがその土地利用、都市形状、諸現象それぞれの定量的評価ができていないために熱環境対策として有効な手段が見出せていない。本章では健全な都市環境創造のために必要な定量的な評価の困難さとその重要性について論じている。

第2章では、この研究の根幹をなす水の蒸発現象そのもののメカニズムの解明を行った。水の蒸発は目に見える現象ではなく、観測することが困難であることから蒸発メカニズムに関する基礎的実験を行った。蒸発は水があれば至る所で起こる現象であるが海洋ならば水が無限大にあるためポテンシャル蒸発量は安定する。土壌環境を踏まえた蒸発量の算定には土壌の乾燥などで不確実な要素がたくさんあるためにその算定は容易ではない。特に複雑な構造を持つ都市部における蒸発は隣接する表面を通過してきた空気が性状の異なる小規模スケールの地表面・水面を通過するときに発生する局所移流における蒸発(leading-edge 効果)の足し合わせとみなすことができ、その算定は困難である。そこで本稿では蒸発の基本構造を理解するため、蒸発の問題をシンプルにし、水面のみが存在するときの小規模スケールでの水の蒸発の基本的な挙動・メカニズムの解明を行った。

気流温度制御による理論・実験蒸発フラックスと水温変化をみると、気流温度上昇とともに線形的に理論・実験蒸発フラックスは増加する。風洞内で境界層が成立していない本実験でバルク理論を適応させるとバルク交換係数 0.011 に対して、実験蒸発フラックスはバルク理論の蒸発速度の $2\sim 3.5$ 倍となっている。流入部からの水面の長さで蒸発フラックスの関係をみると流入部からの水面の距離の拡大とともに蒸発面が長くなることで1秒あたりの蒸発量が上昇する。各水面区間の単位面積あたりの蒸発フラックスをみると上流から下流方向に蒸発フラックスが減少している。気流が下流に行くに従い、乾燥度が低くなっていることからleading-edge 効果の現象が起こっていると考えられる。これらの事実から都市のような小スケールの蒸発が多い場所では蒸発量の算定方法を変化させる必要がある。

第3章では、打ち水による熱環境緩和効果について示した。打ち水実験は2004年8月18日から25日までの8日間、東京都墨田区東向島いわゆる下町で町会、商店街組合を中心として、打ち水に意欲的に参加・協力し。地元町内会、組合による事前の呼びかけ、当日の町内放送により実験地域内で最大限に打ち水をする事となった。ヒアリング調査から得られた散水面積は約 8500 m^2 、散水量は約 6.3 m^3 、散水に使用した水の温度は平均で約 30.0°C であった。実験地域内面積約 299000 m^2 に対しての散水面積の割合は約3%、実験地域内道路面積約 83200 m^2 に対しては約11%であった。打ち水実験では住民により最大限に散水されたが全体面積の約3%に対して我々の想定していた全体面積の約40%には到底及ばなかった。2004年8月18日が水曜日であり平日12時頃では出

勤のため自宅にいない、昼食の時間であることなどから想定したような打ち水ができないと考える。9:00, 11:55, 16:00 それぞれの時間帯に打ち水を行ったところ、いずれの時間帯に打ち水をしてこの地域では気温低下効果0.5で1時間程度の効果であった。どの時間に散水を行っても打ち水効果期間がかわらないと仮定すれば、気温のピークを抑える日中に打ち水をする効率が良い。サーモグラフィで観測した打ち水前、打ち水後の人と地面の表面温度を比較すると打ち水前、地面は約50°C、人の表面温度は約36°Cである。打ち水後の状態を見ると地面の温度が約39°C、人の表面温度は約30°Cとなり、地面の温度が10°C、人の表面温度が6°C以上低下した。地面からの放射量を黒体放射と仮定すると、打ち水前の地面からの長波放射量は約620W/m²、打ち水後の地面の長波放射量は510W/m²となり、その差は110W/m²となる。つまり水を撒くことにより地面から放出される熱エネルギーを抑制し、人の表面に与える熱エネルギーが減少したことにより人の表面温度が低下したと考えられる。

打ち水による熱環境緩和作用として大きく分けて「気温の低下もしくは上昇の抑制」と「輻射の抑制」の二つの効果があることがわかった。

第4章では、大河川・都市中小河川の気候冷却効果について示した。都市の熱環境緩和効果について都市内河川の気候冷却効果に注目した観測が多く行なわれている。しかし河川の幅、堤防の形状、河川周辺の土地利用などにより河川の熱環境緩和効果は大きく異なり、その影響を定量的に評価するには多くの長期にわたる観測結果を蓄積することが必要であるが既往の研究では長期間の観測例はほとんどない。そこで本研究では都市においてクールスポット、クールラインとして期待される河川がその周辺に与える熱環境緩和の定量的評価を目的に荒川の川口・赤羽地区、小松川地区、目黒区の目黒川周辺で微気象観測を行った。

大河川として対象とした荒川において河川からの距離と解析対象日の14時における平均気温の関係をみると、河川付近の気温が最も低く、河川からの距離が遠くなるほど気温が高く、河川からの気候冷却の影響距離は長くても1.5kmくらいだと判断できる。各ラインの気温分布の回帰直線(気温勾配)を引いてその値を取りの日変化をみるとラインAは0~3.8°C/km、Bは0.7~2.3°C/km、Cは0.8~3.3°C/kmの値を示す。朝は気温勾配が小さく日中になると大きくなる傾向が見られる。これは日中、日射量が大きくなったとき堤内地は気温が著しく上昇し、河川内は河川の熱環境緩和効果により気温が上がりづらくなっているためと考える。

風通しが悪い道の気温は風通しがよい道の気温よりも最大で2°C高く、風通しの善し悪しが熱環境に与える影響を示した。また、その差は昼間ほど大きかった。堤内地では日射により気温が上昇するが、風通しの良い道は冷涼な空気が流入するため気温の上昇が抑えられるためと考えられる。また河川水際における気温の鉛直分布から、河川水際の気温は地表面の土地利用形態と風通しの善し悪しが影響していることがわかった。

第5章では、都市内緑地とその周辺の気象因子の空間構造について示した。本研究は都市内緑地の微気象環境を明らかにし、それらの持つ熱環境緩和作用を定量的にすることを目的としている。都市内緑地の気温と湿度の鉛直構造特性と緑地とその周囲における気温と湿度の水平分布の特徴について解明した。

都市内緑地の気象因子の鉛直分布をみると、群落内の大気層では日中は樹冠部の気温が最も高く、比湿についても、正午前後において、極めて高い値を示した。樹冠部は日射を受けて、日傘として気温が上がると同時に光合成によって比湿が上がる。気象因子の水平分布をみると、夜間において小石川後楽園内は園外より気温は低く観測地点内で最大約1.7°Cの差がある。日中においてはその傾向は顕著になり観測地点内での気温差は最大で約5°Cとなった。晴天日、曇天日のいつの時間帯においても園内外での気温分布は小石川後楽園と道路の境界で明瞭に分かれている。園内の気温が道路よりも低く塀を境界にして気温差がくっきりしている。既往の研究事例(三上ら)である新宿御苑の気温の平面分布では新宿御苑から冷気が滲み出している様子が窺える。小石川後楽園が高さ3mほどの塀があるのに対して新宿御苑は塀がない。森林内で冷やされた大気は周りの大気より重いため地表

面付近を這うように存在し、塀があることにより外部に滲み出しづらくなり気温の境界ができると考えられる。熱環境対策を盛り込んだ都市計画を策定する際には冷気を閉じ込める方法として塀の有無を考慮する必要がある。

第6章では、河川・森林の微気象モデルを用いた再現計算について示した。上記の章では計測された観測結果から得られたデータを普遍的で定量的評価した。本章ではそれらのデータを数値計算にフィードバックし、再現計算を行い、現状の都市の熱環境の問題点の洗い出し、そして仮想的・理想的な水辺都市空間のあり方について検討を行った。

河川を都市における冷源と位置づけその冷源の広がりへの解析解を求めた。河川に沿うような風が生じたときの冷源の拡散の様子を捉えることができた。また河川の微気象モデルを用いて冷源と都市形状による風の道効果そしてそれに伴う冷気の滲み出し効果を表現することができた。これら結果から各々の土地利用、気象条件に適応した風の道を利用した都市の理想形状の理解が深まった。

森林の微気象モデルを用いたシミュレーションでは葉の茂り方、地面の貯熱などの変化に対する森林内の気象環境の変化をみた。同じ葉の量にも関わらず、その茂り方により樹木全体のアルベドや蒸散量が大きく異なるため林内環境は大きく異なった。地域・ポイントに合わせた樹木の設定が都市熱環境問題解決に重要であることを示した。

第7章では、本研究の全体のまとめである。以上に列挙したように、本研究では都市における社会活動・整備による環境変化の中で都市の熱環境特性のような未だ不明な点が多々残り、都市計画に筋道を立てられずにいる。熱環境の特性解明のために気象観測をするものめまぐるしく変わる土地利用、都市計上、人間活動により都市部における代表気温計測地点の設置することすら困難を極める中、ベストミックスな計測方法を研究、開発してきた。また熱環境特性を変える要因としての気化熱を発生させる水の蒸発の基礎的実験を行い、小スケールの水域における蒸発メカニズムの解明を試み、蒸発量の精度を向上させた。さらに数値解析により河川・森林による効果の定量評価した。その上で適応・解決に向けた今後の展開に関する考察・提案を行った。しかしながら、人類が今後立ち向かっていかななくてはならない熱環境問題解決への道は開かれたばかりであり、今後も新たに発生する可能性がある。このような問題に対する抜本的な解決には、対策としての普遍性が不可欠である。本研究は都市熱環境における社会問題を誘発する環境変化に対して普遍性を有した対策の構築のための一端を担うことができると考えており、これら成果が都市計画の一助となることを望む。