

事務所ビル街区における屋上緑化の蒸発散量と そのヒートアイランド緩和効果およびCO₂削減 効果のシミュレーション評価

平野 勇二郎¹・谷川 寛樹²・戸川 卓哉³・藤田 壮⁴・孫 穎⁵

¹正会員 主任研究員 独立行政法人国立環境研究所 社会環境システム研究センター 環境都市システム研究室 (〒305-8506 つくば市小野川16-2)

E-mail: yhirano@nies.go.jp

²正会員 名古屋大学教授 大学院環境学研究科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町D2-1)

³正会員 特別研究員 独立行政法人国立環境研究所 社会環境システム研究センター 環境都市システム研究室 (〒305-8506 つくば市小野川16-2)

⁴正会員 センター長 独立行政法人国立環境研究所 社会環境システム研究センター (〒305-8506 つくば市小野川16-2)

⁵正会員 准教授 横浜国立大学 国際社会科学研究院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-4)

本研究の目的は事務所ビル街区における屋上緑化を対象とし、蒸発散のために必要な水量を考慮してヒートアイランド緩和効果とCO₂削減効果を評価することである。本研究では、まず都市キャノピー・ビルエネルギー連成モデルCM-BEMを用いて、屋上緑化によるヒートアイランド緩和効果や冷房エネルギーのCO₂削減効果のシミュレーション評価を行った。次に、屋上面熱収支の計算結果から得られた潜熱フラックスから蒸発散のために必要な水量を算出した。また、その水量を水道水による散水より供給した場合に生じるCO₂排出量を計算し、冷房エネルギーのCO₂削減効果とのバランスから、屋上緑化のCO₂削減効果を明らかにした。

Key Words : rooftop greening, heat balance, evapotranspiration, watering, urban heat island, meteorological simulation, CO₂ emission

1. はじめに

夏季の冷房用エネルギー消費は年々増え続けているため、建物内の冷房需要削減は地球温暖化対策として重要度が高い。一方、都市域においては都市化による高温化、すなわち都市ヒートアイランド現象が深刻化しており、都市空間の快適性損失や冷房需要の増大が深刻な問題となっている。したがって、都市域における熱環境改善は地球環境と都市環境の両方に結びつく重要な課題である。

都市熱環境の改善策の一つとして屋上緑化が挙げられる¹⁻³⁾。植生には蒸散により気温を低下する効果があることはよく知られているものの、都市域では地上緑化を行う余地が限られているため⁴⁻⁵⁾、近年は屋上緑化がとくに注目されている。屋上緑化によるヒートアイランド緩和効果やその冷房用エネルギー削減効果を検証した研究事例も多く、有効なヒートアイランド対策であると考えられる。ただし、その一方で屋上緑化についての批判

的な意見も多いため⁶⁻⁷⁾、今後さらに詳細な評価が必要である。

従来から屋上緑化を対象とした熱環境緩和効果の評価研究は数多く行われてきた。ただし実測に基づく評価事例の多くは、試験体を屋根面に設置して観測した評価⁸⁻¹⁵⁾や、実建築を対象とした実測¹⁶⁻¹⁹⁾に基づいており、現状では単体の建物における評価に限定されている。したがって、今後の政策的導入により多数の建物へ導入された場合の効果を実測により定量化し難いため、行政の意思決定に貢献する知見としては限定的にならざるを得ない。また、こうしたスケールの実測では熱フラックスや表面温度については詳細な知見が得られるものの、冷房用エネルギー消費やそれによるCO₂排出などへの影響を明らかにすることは難しく、前述した地球温暖化対策の観点では施策評価に直接結び付けることは難しい。

一方、政策的な大規模導入の効果を評価する際には、都市・街区スケールの気象シミュレーションによる手法

が有益である。すでにCM-BEM^{20~21)}、AUSSSM²²⁾、UCSS²³⁾、RAMS²⁴⁾などの種々のモデルを用いて、局地気象と空調負荷計算を結び付けたシミュレーションが行なわれ、屋上緑化によるヒートアイランド緩和や冷房用エネルギー消費削減の評価が行なわれている。ただし、こうした評価は地域の気候条件や気象条件の影響が大きく、また緑化の種類や建物構造にも依存するため、今後さらに評価事例の蓄積が必要である。また、こうした街区スケールでのシミュレーション評価の事例は表面の湿潤度を蒸発効率や蒸発比、植生群落コンダクタンスなどの形で固定値としてパラメタライズしており、設定したパラメータと大気や表面の諸条件から潜熱フラックスを計算している。このため、水量を考慮せずに無限に蒸発散が続く前提で計算が行なわれることが一般的であるが、現実には建物の屋上という閉鎖的な環境では、水の供給側の制約の方が支配的である場合が多い。こうした環境において屋上緑化の効果を評価する際には、蒸発散のために必要となる水量を同時に把握する必要がある。

屋上緑化を維持するために散水が行なわれている場合には、ポンプ動力などによる新たな環境負荷が発生する点にも留意する必要がある。この点について平均的なデータにより概算した検討事例があるが^{25~26)}、屋上緑化によるヒートアイランド緩和や冷房エネルギー削減効果を対象とした多数の既往研究と比較し、屋上緑化の環境負荷を対象とした研究事例は非常に少ない。

実際には、散水が行なわれている場合、潜熱フラックスはほぼ蒸発散量のみ関数であるから、その散水量を熱量換算することができる。また空気の体積熱容量もほぼ既知とみなせるので、潜熱フラックスが増大した分だけ顕熱フラックスが減少すると仮定すれば、散水量に対する温度低下効果は大気の拡散の場だけに依存する。平野ほか²⁷⁾はこの点に着目し、地上散水(打ち水)を対象とし散水量と気温低下効果の関係を導いた。ただしこの研究²⁷⁾ではメソスケールモデルによる数十kmスケールでの評価のみを行っており、街区スケールでの詳細な気温低下効果やそれに伴う冷房用エネルギー削減については言及していない。また、この研究²⁷⁾では地上散水のみを対象としており、建物の屋上という人為的な散水により水が供給される環境下において、同様のスタンスの研究事例が見当たらない。したがって、屋上緑化を対象とした熱環境緩和効果に関する研究事例は非常に多いが、大半の既存研究では水の供給量は不明のまま表面熱収支や表面温度のみを導いており、今後は屋上面における散水量や蒸発散量を考慮した詳細かつ包括的な評価事例の蓄積が必要である。

そこで本研究の目的は、都市熱環境のシミュレーションにより、事務所ビル街区における屋上緑化のヒートアイランド緩和効果とCO₂削減効果を定量化することであ

る。とくに、潜熱フラックスから蒸発散量を計算し、必要な散水量を踏まえて評価を行なう点に本研究の特徴がある。従来の多くのシミュレーションでは、蒸発効率などの設定値に結果は依存していたが、前述した通り潜熱フラックスはほぼ水量のみ関数であるから、蒸発散に用いられた水量と潜熱フラックスとを直接結びつけて評価すれば、より物理的に明確な関係を導くことができる。また、散水量を把握することによってポンプ動力によるCO₂排出量や、水道水の利用によるCO₂排出量などを検討対象に加えることができる。本研究ではこれを踏まえて、屋上緑化によるヒートアイランド緩和効果とCO₂削減効果を定量化した。

2. シミュレーションの概要

本研究で用いたモデルは、産業技術総合研究所により開発された都市キャノピー・ビルエネルギーモデル連成モデルCM-BEM^{20~21,28~30)}である。このモデルでは、鉛直一次元の局地気象モデルと建物の空調負荷計算モデルを連成し、街区内の建物の熱負荷や空調によるエネルギー消費量、気温変動を予測することが可能である。

このモデルでは植生面において植生群落コンダクタンスを固定値として設定し、その設定値と大気等の諸条件から蒸発効率を算出する。本研究でもこの計算スキームはそのまま用いる。ただし、あくまで散水により表面の湿潤状態が保たれているという前提で固定値を用いており、熱収支計算から得られた潜熱フラックスから必要な水量を算定する点に本研究の特徴がある。

本研究において評価対象とした街区モデルを図-1に示す。この街区モデルは東京における平均的な事務所街区の建物形状に基づいて設定した。屋上緑化の想定は、屋根面積の0%、50%、100%の3段階とした(それぞれ、緑化なしケース、50%緑化ケース、100%緑化ケースと記す)。その他、壁面の構造や熱源機器構成、空調運転スケジュール、人体発熱パターン、空調以外の機器発熱パターンなどの詳細は全て平野ほか²¹⁾の典型事務所街区

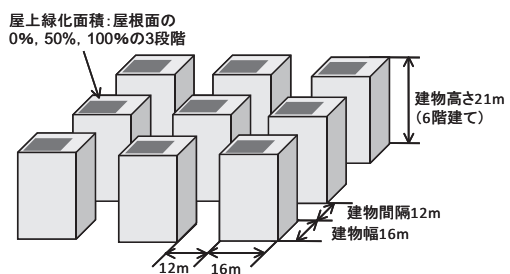


図-1 本研究における建物モデルの設定

と同様に設定した。計算対象日は平野ほか²¹⁾と同様に東京において夏季の晴天日が連続した2002年8月8～10日とした。このうち始めの2日間を助走計算期間とし、3日目を解析に用いた。CO₂排出原単位は電力は0.371 [kg-CO₂/kWh]とし、都市ガスは2.08[kg-CO₂/m³]および単位体積当たりの発熱量44.8 [MJ/m³]とした。

なお、本研究のモデルは既に電力供給のデータとの比較による事務所ビル街区の電力気温感応度の検証³⁰⁾や、住宅の空調負荷計算ソフトとの比較による再現性の検証³⁰⁾が行なわれている。また、本研究の計算条件では、街区内の気象観測による屋外気象要素の再現性の検証³¹⁾、エネルギー消費原単位データとの比較による冷房用エネルギー計算の妥当性の検証²¹⁾などが行われているため、本研究では再現性の検証は省略する。

3. ヒートアイランド緩和効果の評価

まず緑化なしケースと100%緑化ケースを対象として、前述した計算条件下で算出された屋上の表面温度を図-2に示す。比較のため、屋上レベルでの気温も加えた。ただし、各ケースの気温差は最大でも0.24℃程度であり、表面温度の差と比較して非常に小さいため、ここでは3ケースの平均気温のみを示した。各ケースの気温差については後述する(図-4参照)。この図-2から、植生面とコンクリート面では日中に20℃近い温度差が生じており、屋上緑化による表面温度低下効果が大きく生じていることが分かる。日中はコンクリート面では日射を受けて表面温度が50℃以上に上昇しているのに対して、植生面では35℃程度と、気温よりも若干高い程度である。夜間はコンクリート面では早朝のごく一部の時間以外は常に気温を上回っているが、植生面は気温より4℃程度低温となっており、放射冷却の効果や日中の蓄熱量の差が反映されていると考えられる。なお、50%緑化ケースについても、植生部分とコンクリート部分とを区別して同様の

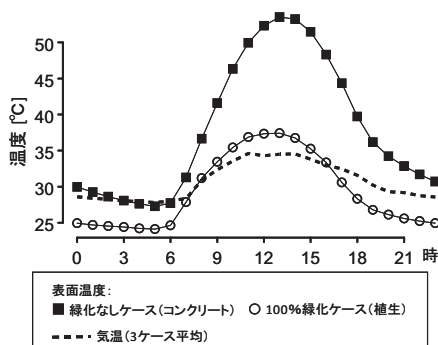


図-2 屋上におけるコンクリートおよび植生の表面温度

検討を行なったが、50%緑化ケースのコンクリート面は緑化なしケースと、50%緑化ケースの植生面は100%緑化ケースとほぼ一致しており、その差は日平均で0.1℃未満であった(図省略)。屋上緑化の導入面積によって屋上付近の気温や湿度が異なるため、表面温度にも若干の差異は生じるが、実際にはその効果は表面温度の変化幅全体に対して非常に小さいと言える。

次に緑化なしケースと100%緑化ケースを対象として、屋上面の表面熱収支を図化した(図-3)。ここでは表面に熱が入る方向を正とした。この図から、100%緑化ケースでは正味放射のほとんどが潜熱フラックスとして大気へ放出されていることが分かる。また、50%緑化ケースについても植生面、コンクリート面の両方について同様の検討を行ったが、前述した表面温度の解析結果からも予想される通り、植生面は100%緑化ケース、コンクリート面は緑化なしケースの結果とほぼ一致するという結果となった(図省略)。図-3の結果は、地表面を対象とした熱収支シミュレーションの結果³²⁻³⁹⁾と比較すると、潜熱フラックスが大きいと思われる。これは、本研究において設定した植生群落コンダクタンスから算出された蒸発効率が0.6～0.8付近の比較的大きな値となったためである。ただし、著者らがメソ気象スケールモデ

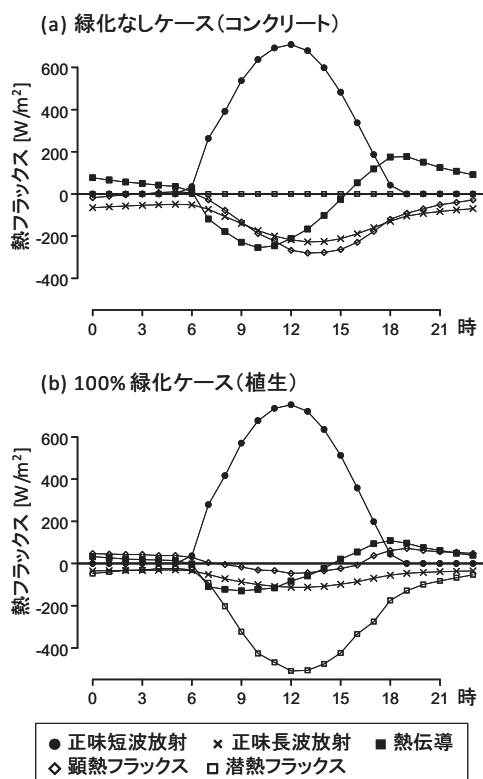


図-3 屋上面における表面熱収支

ルを用いて蒸発効率を段階的に変化させて行なった数値実験では、夏季晴天時において蒸発効率0.5付近を超えると正味放射のほとんどが潜熱フラックスとして大気に放出されるという結果を得ており²⁷⁾、表面が十分に湿潤状態であると仮定できれば整合性がある。したがって、今回は灌水された屋上緑化を前提としているため、常に表面の湿潤が保たれているものとすれば、概ね妥当な結果であると考えられる。なお、著者らが灌水後の屋上セダム緑化面において実測した結果では、蒸発効率は0.2程度、潜熱フラックスが日中に300~400W/m²程度であった¹⁹⁾。この実測はセダム植栽を対象とし、日中には灌水しないという条件下であるから本研究とは対等に比較できないが、植生群落コンダクタンスの設定値については今後精査が必要であると考えている。

各ケースの地上3mおよび屋上レベルの気温と、それらの各緑化ケースと緑化なしケースとの差を図-4に示す。この結果、50%緑化ケースと比較し100%緑化ケースではより大きな気温低下効果が生じていることが分かる。また、いずれのケースも、気温低下効果は屋上レベルと地上3mではほぼ同程度であるという点も興味深い。本研究では屋上のみを緑化しているため、都市キャノピー内において鉛直方向に概ね均一に拡散されていることが推察される。ただし気温低下効果は100%緑化ケースでも日中に約0.2℃であり、気温の変動幅全体と比較し小さい。平野ほか²¹⁾の計算では、同じ気象条件下での事務所街区における緑化の気温低下効果は日平均0.5℃であったが、本研究では地面や壁面は緑化しない想定であるため、さらに小さい値となった。

次に図-3に示した潜熱フラックスから蒸発散量を算出した。図-5に各緑化ケースにおける建物1棟あたりの蒸発散量を示す。この結果、前述した気温低下効果を得る

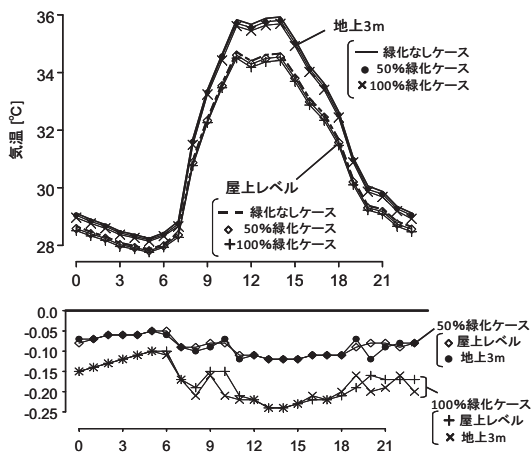


図-4 各ケースにおける気温およびその緑化なしケースとの差
(各緑化ケースー緑化なしケース)

ためには1棟あたりで100%緑化ケースでは1.80[m³/日]、50%緑化ケースでは0.91[m³/日]の水量が必要であるという結果となった。これらは街区面積あたりの蒸発散量ではそれぞれ2.32[mm/日]、1.16[mm/日]である。

図-5に示した蒸発散量と図-4に示した気温低下効果（各緑化ケースー緑化なしケース）の計算結果を用いて、両者の関係を時刻別にプロットした（図-6）。なお、ここでは気温低下効果は地上から屋上までの高さの層の平均値とした。蒸発散量は街区全体の面積あたりに換算した値を用いた。また便宜的に7~18時を日中、19~6時を夜間として区別した。この結果、ケース間を比較すると、いずれの時刻も100%緑化ケースでは50%緑化ケースのほぼ2倍の気温低下効果が生じた。前述した通り潜熱フラックスはほぼ蒸発散量のみの関数であるため、大気の拡散の場が等しければ、気温低下効果が蒸発散量にほぼ比例することは妥当な結果である。一方、同じケース内で異なる時刻を比較した場合は、大気の拡散の場が異なることや、気温低下効果は前の時刻までの影響が含まれることから、必ずしも比例関係にはならない。図-6では、日中の方が蒸発散量および気温低下効果が大きいものの、蒸発散量あたりの気温低下効果は夜間と比較して小さい傾向が顕著に生じた。これは日中の方が蒸発散量が多いが、大気が上空に拡散されやすいためである。

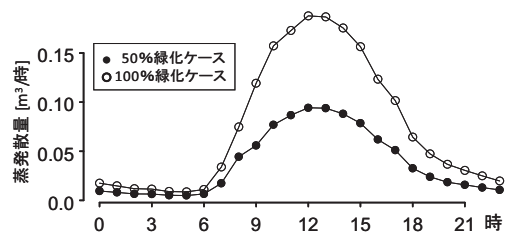


図-5 各緑化ケースにおける蒸発量

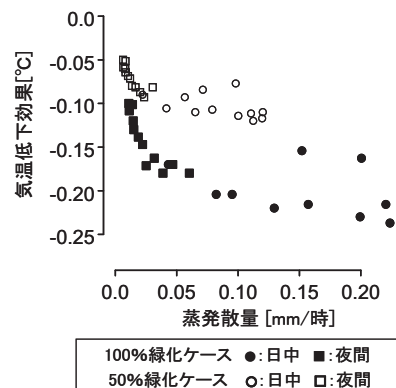


図-6 蒸発散量と気温低下効果の関係

4. CO₂削減効果の評価

次に屋上緑化によるCO₂削減効果を評価した。まず各ケースの冷房用エネルギー消費によるCO₂排出量と、これらの差（各緑化ケースー緑化なしケース）を図化した（図-7）。なお、ここでは分かりやすさを考慮し、建物1棟あたりのCO₂排出量を示した。ただし、現実にはこの規模の事務所ビルでは単一の建物において電気・ガスの熱源機器を保有しているケースは多くはなく、図-7はあくまで街区全体の平均値を建物1棟あたりで示したものである。この図から、冷房負荷が大きい朝の運転開始時にCO₂排出量と緑化によるCO₂削減量がピークとなっていることが分かる。日積算値では100%緑化ケースでは5.13[kg・CO₂/日]、50%緑化ケースでは2.65[kg・CO₂/日]のCO₂削減効果となった。ただし今回の計算ケースでは、6階建てのビルの屋上のみを緑化した想定であるため、建物全体では100%緑化ケースでせいぜい2.4%のCO₂削減効果である。

これらの省エネルギーおよびCO₂削減効果の要因を定量化するため、緑化なしケースと100%緑化ケースを対象とし、それぞれの室内熱収支および両者の差（100%緑化ケースー緑化なしケース）を図化した（図-8）。50%ケースは両者の中間的な値となった（図省略）。ここでは熱が室内に流入する方向を正とした。負で表現された除去顕熱量、除去潜熱量が、それぞれ顕熱負荷、潜熱負荷として空調機器により除去された熱量である。この図-8(c)に示した2ケースの差の図から、屋上緑化により壁面・屋根面からの熱貫流がとくに減少していることが分かる。また、除去熱量は負値であ

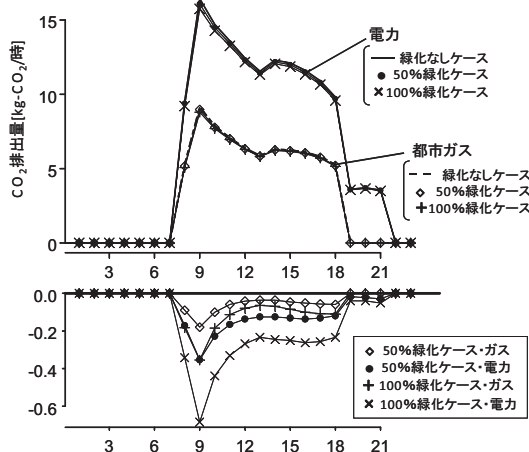


図-7 各ケースにおけるCO₂排出量およびその緑化なしケースとの差（各緑化ケースー緑化なしケース）

るから、差の図において値が正であれば負荷が減少したことを示す。したがって、図-8(c)から熱貫流の減少に伴い除去顕熱量が減少していることが分かる。一方、除去潜熱量はわずかに増大している。これは、屋上緑化により外気の湿度が上昇したためである。換気侵入熱はわずかに増大しており、本研究の計算条件では気温低下による顕熱負荷の低下よりも湿度上昇による潜熱負荷の増大の方が大きく生じたことを示している。ただし、この屋上緑化による除去潜熱量は増大は、前述した除去顕熱量の減少の効果と比較すると明らかに小さい。したがって貫流熱と換気侵入熱を合わせて比較すると、屋上緑化により冷房負荷が減少していることが分かる。

次に、蒸発散に必要な水量を全て水道水による散水によりまかなう場合に生じる散水のCO₂排出量を算出した。ここでは屋上への揚水のポンプ動力のCO₂排出量と、水道水の利用によるCO₂排出量を計算対象とした。ポンプ動力については、ポンプ効率を0.6とし、揚程は屋上の

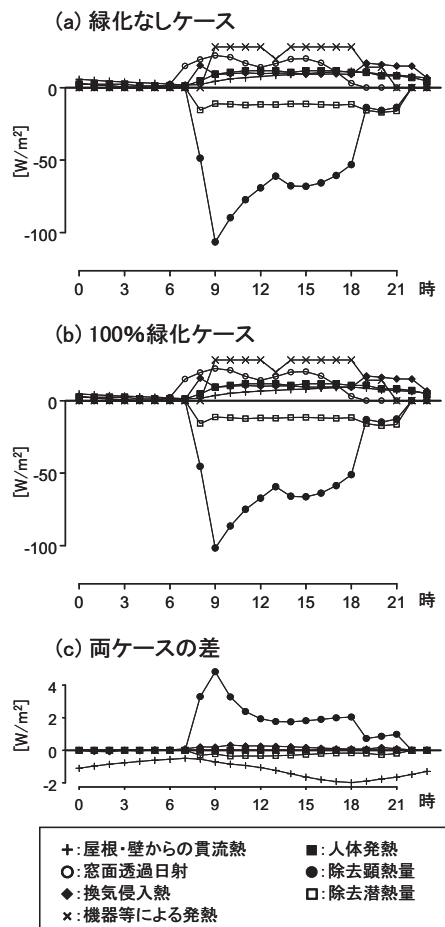


図-8 緑化なしケースおよび100%緑化ケースにおける室内熱収支の計算結果および両ケースの差

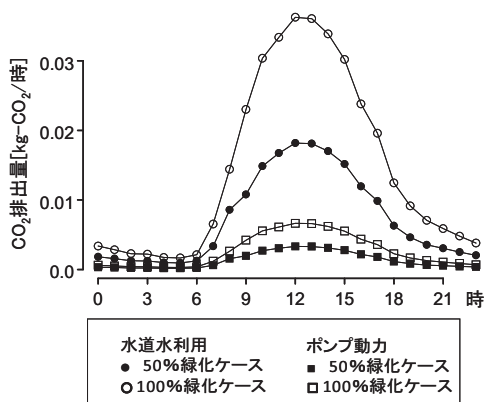


図-9 各ケースにおける灌水によるCO₂排出量

高さまでとして計算した。水道水については、玄地ほかによる算定結果に基づき浄水、送水、配水等により生じるCO₂排出量を0.193 [kg-CO₂/m³]として計算した。これらの結果得られた各ケースのCO₂排出量を図-9に示す。図-9から、ポンプ動力によるCO₂排出量と比較し、水道水利用によるCO₂排出量は大きな値を示していることが分かる。ポンプ動力によるCO₂排出量は、100%緑化ケースで0.064[kg-CO₂/日]、50%緑化ケースで0.032[kg-CO₂/日]となった。また水道水の利用によるCO₂排出量は100%緑化ケースで0.35[kg-CO₂/日]、50%緑化ケースで0.18[kg-CO₂/日]となった。これらは屋上緑化による冷房のCO₂削減効果（図-7下段）の8%程度であるため、本研究の計算条件では散水によるCO₂排出を考慮しても屋上緑化によりCO₂削減効果が得られることが分かる。

5. まとめ

本研究ではCM-BEM²⁸⁻³⁰を用いて、必要水量を考慮して事務所ビルの屋上緑化のヒートアイランド緩和効果とCO₂削減効果を評価した。

まず、屋上緑化のヒートアイランド緩和効果を評価した結果、本研究の計算条件では屋上緑化を大規模導入した場合の気温の低下は0.1～0.2℃程度であった。また、この気温低下効果と蒸発散量との関係を明らかにした。

次に屋上緑化のCO₂削減効果を評価について、とくに本研究では冷房エネルギーによるCO₂削減と散水によるCO₂排出の両方を踏まえて評価したところ、表面温度低下による直接的な効果では前者の方が明らかに大きく、屋上緑化を導入した建物ではCO₂削減効果が得られることが示された。

今後の検討課題として、降水や土層の保水効果を考慮した詳細な水収支モデルを組み込むことが挙げられる。

これまでの多くの都市熱環境のシミュレーションモデルでは表面の湿潤度を固定値としてパラメタライズしており、気象条件に応じて無限に蒸発が続く前提でのシミュレーションが行われてきた²⁰⁻²⁴。しかしながら、建物の屋上という閉鎖的な環境では、散水や降水による水の供給量が蒸発散の制約条件となる場合が多い。そこで、本研究では蒸発潜熱フラックスから必要な水の供給量を算定し、水量とのバランスによって、より物理的に屋上緑化の効果を定量化することができた。これは、多くの既往研究では人為的な散水がなされる建物の屋上においても、水の供給量が不明のまま熱収支計算が行われてきたことを考慮すれば、十分に有益な手法であったと考えている。しかしながら、既往研究¹⁹でも指摘した通り、実際には植生の有無にかかわらず、人為的に散水を行えば蒸発散量を増やせることは自明であるため、本研究の計算のみでは屋上緑化の価値を示したとは言えない。これに対し、現状の都市の地表面被覆を考慮すれば、屋根面に保水能力を持たせることには意義があり、既往研究¹⁹においても保水性により自然の降水を利用して蒸発散量を増大させることを前提とした評価を行なっている。ただし既往研究¹⁹では、大規模導入した場合の気温低下効果やCO₂削減効果については評価できていないため、今後は本研究において用いた熱環境シミュレーションのモデルに、降水や保水効果を組み込むことにより、屋上緑化部位の水収支を考慮したさらに詳細な評価を行なうことが必要である。

謝辞：本研究を進めるにあたり岡山理科大学准教授の大橋唯太氏、国立環境研究所社会環境システム研究センターの一ノ瀬俊明氏にご指導を頂きました。本研究は環境研究総合推進費（課題番号：1E-1105, 2RF-1303）および科学研究費補助金（課題番号：24760438）の支援により実施されました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省住宅局住宅生産課：環境共生住宅市街地モデル事業における屋上緑化の推進，IBEC, No.132, pp.26-27, 2002.
- 2) 西田裕子：ヒートアイランド対策－東京都の取り組み，緑の読本，シリーズ 66, pp.65-69, 2003.
- 3) 薄木三男，高村 聡：大阪市の屋上緑化に関する取り組み，エネルギー・資源，Vol.25, pp.240-243, 2004.
- 4) 坪松 学，深沢竹彦：航空機撮像データによる屋上緑化可能面積の評価に関する研究，環境情報科学論文集，Vol.16, pp.399-404, 2002.
- 5) 泉 岳樹，松山 洋：東京都23区における屋根面積の実態把握と屋上緑化可能面積の推計，日本建築学会計画系論文集，No.581, pp.83-88, 2004.
- 6) 田中俊六：屋上緑化は都市のヒートアイランド化防止に役立つか，建築設備と配管工事，Vol.41, No.12, pp.20-23, 2003.

- 7) 村上周三: 屋上緑化の将来展望; 解析・評価ツール, 政策判断ツールの整備を, エネルギー・資源, Vol.25, pp.264-266, 2004.
- 8) 梅干野 晃, 何 江, 堀口 剛, 王 革: 芝生葉群層の熱収支特性に関する実験研究 屋上芝生植栽の熱環境調整効果 第1報. 日本建築学会計画系論文集, No.462, pp.31-39, 1994.
- 9) 堀口 剛, 梅干野 晃, 何 江: 芝生植栽の水収支特性に関する実験研究 屋上芝生植栽の熱環境調整効果 第2報, 日本建築学会計画系論文集, No.483, pp.73-79, 1996.
- 10) 石原 修, 張 晴原, 下山和美: 屋上芝生植栽の熱特性と水分収支に関する実験的研究, 日本建築学会計画系論文集, No.484, pp.17-24, 1996.
- 11) 香川治美, 林 徹夫, 谷本 潤, 片山忠久: 芝生植栽が都市熱環境に及ぼす影響に関する研究 第1報 土壌の含水状態を考慮した芝生植栽の蒸発散特性の定量的特定, 日本建築学会計画系論文集, No.507, pp.7-12, 1998.
- 12) 垣鏑 直, 溝口 忠, 雨海清一郎, 石橋龍吉: 薄層屋上緑化ユニットの熱的性能に関する実験的研究, 日本建築学会環境系論文集, No.578, pp.79-84, 2004.
- 13) 山本奈美, 川島茂人, 村上暁信, 渡辺達三: メキシコマンネングサを用いた屋上緑化において植栽密度及び灌水の有無が屋上の熱環境に与える影響, ランドスケープ研究, Vol.67, No.5, pp.443-446, 2004.
- 14) 山田宏之, 養父志乃夫, 中島敦司, 中尾史郎: 屋上緑化による熱遮蔽効果の解析, ランドスケープ研究, Vol.67, No.5, pp.453-456, 2004.
- 15) 一ノ瀬雅之, 石野久彌, 郡 公子, 永田明寛: ヒートアイランド低減手法としての屋上緑化の実測評価, 日本建築学会環境系論文集, No.605, pp.47-54, 2006.
- 16) 三坂育正: ステップガーデンを有する建物周辺の温熱環境実測評価, IBEC, No.132, pp.11-13, 2002.
- 17) 萩島 理, 成田健一, 谷本 潤, 三坂育正, 松嶋 篤, 尾上真弓: 大規模な階段状緑化屋根を有する建築物周辺の微気象に関する実測調査, 日本建築学会環境系論文集, No.577, pp.47-54, 2004.
- 18) 福岡義隆, 松本 太, 後藤真太郎: さいたま新都心「けやきひろば」の屋上緑化の温熱緩和効果に関する研究, 環境情報科学論文集, Vol.16, pp.411-416, 2002.
- 19) 平野勇二郎, 一ノ瀬俊明: 屋上セダム緑化面の熱収支特性に関する実測評価, 環境工学研究論文集, Vol.43, pp.661-672, 2006.
- 20) 亀卦川幸浩, 玄地 裕, 近藤裕昭, 花木啓祐: 街区構造に応じた高温化対策の導入が都市空調エネルギー需要に及ぼす影響, エネルギー・資源, Vol.23, pp.200-206, 2002.
- 21) 平野勇二郎, 大橋唯太, 亀卦川幸浩, 近藤裕昭, 玄地裕: 都市キャノピー・ビルエネルギー連成モデルを用いた東京都心部のヒートアイランド対策と冷房負荷削減策の評価, 環境システム研究論文集, Vol.33, pp.179-188, 2005.
- 22) 萩島 理, 谷本 潤, 片山忠久, 大原健志: 改良・建築一都市一土壌連成系モデル(AUSSSM)による都市高温化の構造解析 第2報 数値実験による都市高温化要因の定量化, 日本建築学会計画系論文集, No.553, pp.91-98, 2002.
- 23) 尹 聖皖, 足永 靖信: 地方沿岸都市における緑化による夏季熱環境緩和効果に関する数値シミュレーション: 逗子市におけるケーススタディ, 日本建築学会環境系論文集, No.577, pp.41-46, 2004.
- 24) 渡辺 貴典, 泉 岳樹, 松山 洋: 屋上緑化による気温暖和効果に関する研究—メソ気象モデルを用いた東京 23 区の事例— 土木学会論文集 G (環境), Vol.67, No.2, pp.101-113, 2011.
- 25) 玄地 裕, 東 貴博, 大橋唯太, 亀卦川幸浩, 稲場 敦: ヒートアイランド対策技術のライフサイクルアセスメント. 第 23 回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集, pp.265-268, 2004.
- 26) 山口和貴, 山田耕治, 川口雅幸, 村山和義, 井原智彦, 玄地裕: 都市気象・ビルエネルギー連成モデルを活用した建物緑化のライフサイクル CO₂ 分析, 第 37 回環境システム研究論文発表会講演集, pp.247-252 2009.
- 27) 平野勇二郎, 一ノ瀬俊明, 井村秀文, 白木洋平: 打ち水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, 水工学論文集, Vol.53, pp.307-312, 2009.
- 28) 近藤裕昭, 劉 発華: 一次元都市キャノピーモデルによる都市の熱環境に関する研究, 大気環境学会誌, Vol.33, pp.179-192, 1998.
- 29) 亀卦川幸浩: 熱環境と空調エネルギー需要の相互作用を考慮した都市高温化対策の評価, 東京大学博士論文, 2001.
- 30) 亀卦川幸浩, 玄地 裕, 吉門 洋, 近藤裕昭: 建築物空調エネルギー需要への影響を考慮した都市高温化対策評価手法の開発, エネルギー・資源, Vol.22, pp.235-240, 2001.
- 31) 大橋唯太, 平野勇二郎, 玄地 裕, 近藤裕昭, 亀卦川幸浩, 吉門洋: 都市気象・ビルエネルギー連成モデルを用いた事務所街区内気温の数値シミュレーション, 水工学論文集, Vol.48, pp.133-138, 2004.
- 32) 平野勇二郎, 安岡善文, 一ノ瀬俊明: 衛星リモートセンシングとメソスケール気象モデルを用いた都市緑地のヒートアイランド緩和効果の評価, 環境科学会誌, Vol.17, No.5, pp.343-358, 2004.
- 33) 平野勇二郎, 藤田壮, 外岡秀行: 熱赤外リモートセンシングを活用した都市域の地表面熱収支シミュレーション手法. 環境工学研究論文集, Vol.47, pp.537-544, 2010.

(2013. 7. 19 受付)

NUMERICAL SIMULATION OF EVAPOTRANSPIRATION FROM ROOFTOP VEGETATION AND ITS EFFECTS OF URBAN HEAT ISLAND MITIGATION AND CO₂ REDUCTION IN OFFICE BUILDING AREAS

Yujiro HIRANO, Hiroki TANIKAWA, Takuya TOGAWA, Tsuyoshi FUJITA and
Ying SUN

This research evaluates evapotranspiration from rooftop vegetation and its effects of urban heat island mitigation and CO₂ reduction in office building areas. First we conducted urban microclimate and air conditioning load simulation by using a coupled urban-canopy and building energy model (CM-BEM). Next, we calculated evapotranspiration on rooftops from latent heat flux derived from surface heat balance simulated by CM-BEM. From calculated evapotranspiration result, we determined required water volume and CO₂ emissions for sprinkling water. Then, we quantified the CO₂ reduction effects of rooftop greening by comparing the CO₂ emissions for sprinkling water and the CO₂ reduction by cooling energy savings calculated from air-conditioning load simulation.