

都市・街区群スケールのヒートアイランド緩和とCO₂排出削減のシミュレーション

平野 勇二郎¹・藤田 壮²

¹正会員 (独) 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 研究員
(〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)
E-mail: yhirano@nies.go.jp

²正会員 (独) 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 室長
(〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

本研究では都市・街区群におけるヒートアイランド緩和・冷房エネルギー軽減方策を対象とし、その効果について評価を行なった。具体的には都市キャノピーモデルと建物の空調負荷計算モデルを連成した都市熱環境モデルを用い、事務所街区群、耐火造住宅街区群、木造住宅街区群の3通りの街区群タイプにおいて、例えば緑化や高アルベド化などの種々の施策のヒートアイランド緩和効果や省エネルギー効果、CO₂削減効果を明らかにした。また、この評価方法を事例地域として川崎市へ適用したところ、今回の計算条件では緑化や高アルベド化では冷房負荷軽減により300~400[t-CO₂/日]のCO₂削減効果が得られるという結果を得た。ただし、本研究で想定した施策導入シナリオは必ずしも各施策を対等に比較し得る導入条件とは言えないため、今後シナリオ設定については検討が必要である。

Key Words : *energy saving, urban heat island, air-conditioning load, urban thermal simulation*

1. はじめに

低炭素型の都市・街区群を実現するためには、気候や土地利用などの様々な地域条件を考慮する必要がある。とくに空調用エネルギー消費によるCO₂排出は都市・街区群におけるCO₂排出量の中で比較的大きな割合を占めており、対策が急務である。一方、都市においてヒートアイランド現象が深刻化しており、街路空間の快適性を損なうばかりでなく、夏季の冷房用エネルギー消費の増大や電力ピーク負荷の増大といったインパクトを及ぼすと考えられる¹⁾。したがって都市・街区群における暑熱環境の対策は地球温暖化対策とヒートアイランド対策の両方に結びつく重要な課題である。そのための方策として、個々の冷房負荷軽減や暑熱環境緩和の方策に関しては数多くの研究が行なわれてきた。しかしながら、実際に導入する場合には、効果は土地利用・建物用途や気候などの様々な地域条件に依存することや、外気温変化による冷房用エネルギーの変化などの間接的な効果が生じることを考慮する必要がある²⁾。したがって、地域特性を考慮した詳細な評価が必要である。また現状では地域内のCO₂排出量を把握する方法として原単位法などの単

純な推計手法が用いられているが³⁾、この場合は地域条件を踏まえて的確に評価することは難しいことや、施策導入の効果を事前に定量的に予測することが難しいといった問題がある。したがって今後は施策導入の効果を物理的に表現したシミュレーション評価を組み込んでいく必要があると考えている。

こうした背景から、本研究では熱環境シミュレーションにより都市・街区群スケールでのヒートアイランド緩和とその冷房の省エネルギー効果・CO₂排出削減効果を評価することを目的とした。とくに本研究では、局地気象モデルと空調負荷計算モデルの連成計算により、屋外温熱環境とのインタラクションも含めて施策導入の効果を評価した。

2. 計算条件

本研究では街区群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都市キャノピー・ビルエネルギー連成モデル⁴⁾⁶⁾⁷⁾を用いた。都市キャノピーモデルは、街区や街区群を平均建物幅、平均建物間隔、

鉛直方向の建物密度分布などでパラメタライズし、均一な街区形状が水平方向に連続している状況を鉛直1次元の多層モデルで表現した局地気象モデルである。ビルエネルギーモデルは空調負荷計算モジュールであり、都市キャノピーモデルに組み込むことにより外気とのインタラクションも含めた街区群スケールでの空調負荷計算が可能である。

本研究では対象地域として川崎市を選択し、格子間隔500mの計算グリッドに分割した。本研究のシミュレーションはこのグリッド単位で行う。計算対象とする街区群タイプは、事務所街区群、耐火造住宅街区群、木造住宅街区群を選択した。本研究において対策導入ケースと比較するための標準ケースは、基本的には文献⁶⁾の計算条件に従って設定した。本研究では計算対象日は2002年7月29日とし、助走計算期間を2日間とした。

施策導入ケースは緑化（建物表面の60%と道路の20%に導入可能）、高アルベド化（建物表面および道路の60%に導入可能）、内部発熱削減（機器発熱の20%を削減）、高断熱化（次世代省エネ基準相当）の導入シナリオを想定した。緑化および高アルベド化は、地面、屋上、壁面を検討対象とし、最終的な評価の際の導入部位については後述する。内部発熱削減は、室内の省エネルギーにより照明・動力などの機器発熱を削減するケースである。本研究ではこの室内の機器の省エネルギーは固定値として20%と設定し、機器発熱削減による冷房用エネルギー削減分のみを評価対象とする。

3. 計算結果

(1) 緑化および高アルベド化の導入部位の検討

緑化と高アルベド化の対策は屋上、壁面、地面のそれぞれに導入可能であるが、どの部位に対策を導入するかによって得られる効果は異なる。そこで対策適用部位について検討した。ここでは事務所街区群の例を示す。

まず標準ケースにおける室内熱収支の計算結果を図-1に示す。この図において除去顕熱量、除去潜熱量が空調機器により除去された熱量を示しており、事務所街区群における空調負荷パターンの特徴がよく再現されていると考えられる。

次に、緑化と高アルベド化の適用部位によって図-2の通りに7通りの組み合わせについて対策導入ケースのシミュレーションを行い、結果を比較した。図-2では標準ケースの室内熱収支（図-1）との差について、日平均値を示した。図-2から、緑化ケースではいずれも熱負荷は減少していることが分かる。とくに屋上面・壁面を緑化した場合の貫流熱の減少が顕著である。一方、換気侵入熱は緑化により増大している。これは主に、気温低下に

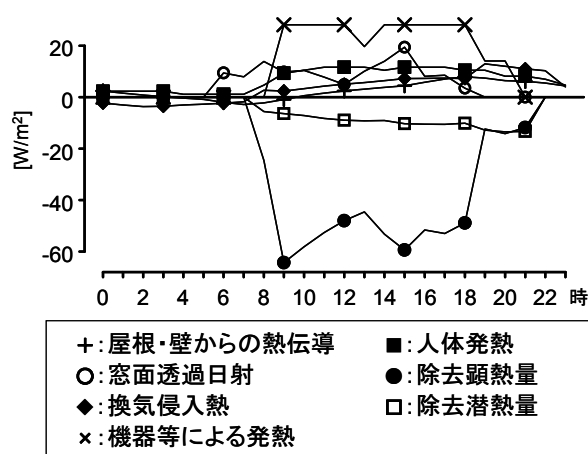


図-1 室内熱収支の計算結果

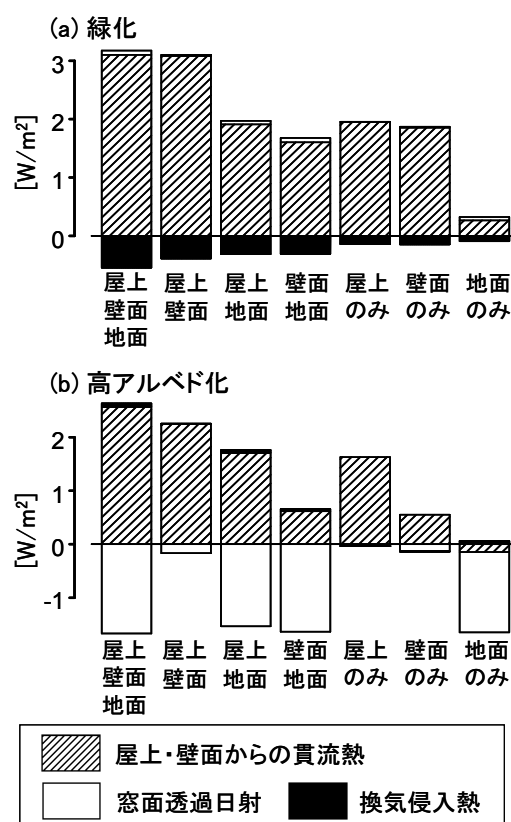


図-2 緑化・高アルベド化による熱負荷削減量

よる顕熱負荷軽減よりも湿度上昇による潜熱負荷増大の方が大きいためである。高アルベド化ケースでは、とくに屋上・壁面を高アルベド化したケースで貫流熱量が大きく減少している。一方、窓面透過日射はいずれの組み合わせでも増大している。とくに地面を高アルベド化したケースでの窓面透過日射の増大は顕著に生じており、熱負荷増大要因となっている。これらの検討結果から、本研究の評価では緑化ケースは屋上・壁面・地面へ適用したケース、高アルベド化ケースは屋上・壁面へ適用したケースを代表事例として取り上げる。

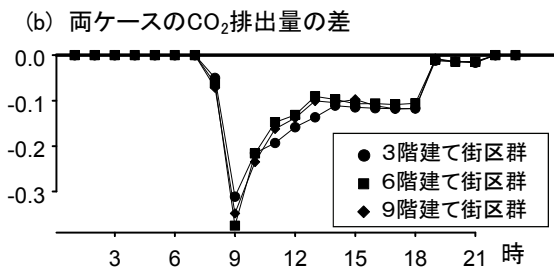
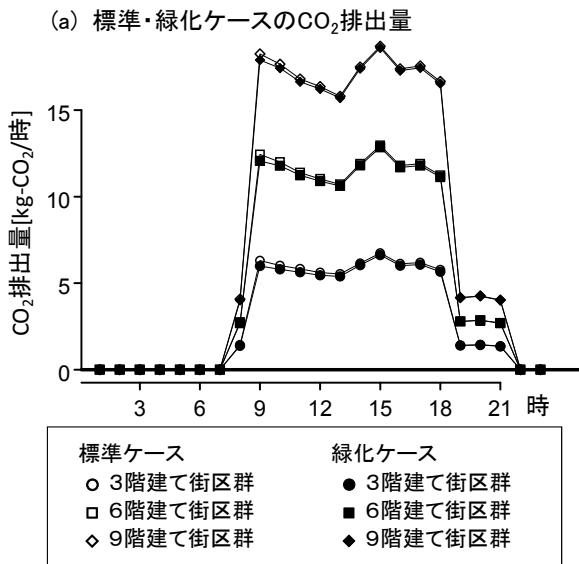


図3 標準ケースおよび緑化ケースの冷房によるCO₂排出量および両ケースの差

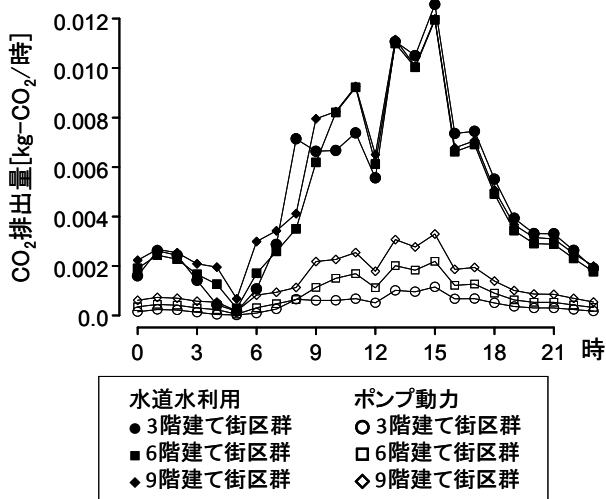


図4 緑化ケースにおける散水によるCO₂排出量

(2) 屋上緑化における散水のCO₂排出量

屋上や壁面を緑化する場合、水の供給側の制約の方が支配的になるため、人為的に散水を行なう際のCO₂排出量についても配慮が必要である。このため、事務所街区群を対象とし、散水によるCO₂排出量と、その冷房負荷軽減によるCO₂削減量のバランスについて検討した。こ

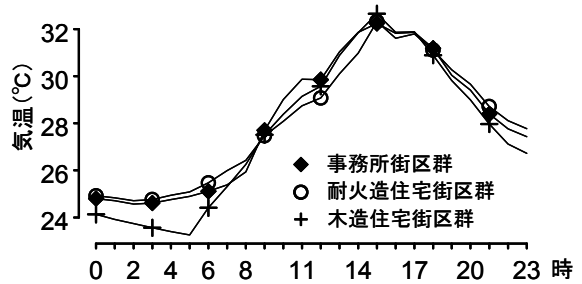


図5 典型街区群における地上気温の計算結果

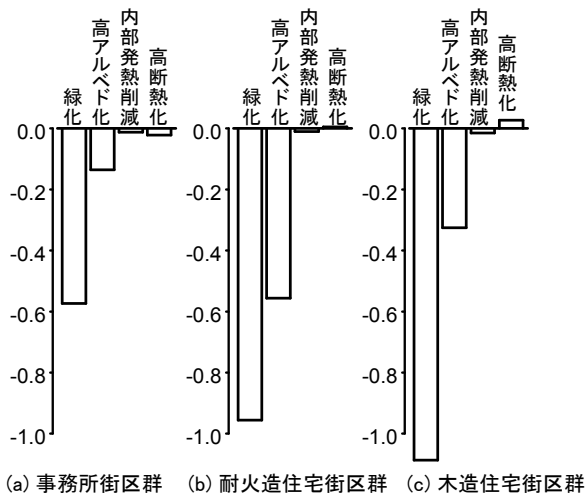
こでは屋上への揚水ポンプ動力と、水道水の利用による浄水、送水、配水等のCO₂排出量を評価対象とした。ただし、揚水ポンプ動力は建物の高さにより異なるため、様々な高さの建物が混在した街区群では結果の解釈が難しい。そこで、ここでは全建物の高さを均一とし、3階建て街区群、6階建て街区群、9階建て街区群とした。また、壁面緑化に関する検討は省略し、屋上緑化を導入したケースを検討対象とした例のみを示す。

図-3に各街区群における標準ケース（緑化なし）および緑化ケースの建物1棟あたりの冷房によるCO₂排出量および両ケースの差を示す。この計算ケースではビルの屋上のみを緑化した想定であるため、削減効果は建物全体のCO₂排出量に比べて大きいとは言えず、せいぜい数%となった。また、建物全体のCO₂排出量は階数に概ね比例しているものの、削減幅は階数によらずに概ね一定となった点も興味深い。

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。ポンプ動力については、ポンプ効率を0.6とし、揚程は屋上の高さまでとして計算した。水道水については、玄地ほか⁸⁾による算定結果に基づき、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CO₂排出量を図-4に示す。この図から、屋上緑化による冷房のCO₂削減効果（図-3下段）と比較し、散水によるCO₂排出量は非常に小さく、散水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確認された。次節以降では散水によるCO₂排出量は無視し、冷房によるCO₂削減効果のみを評価対象とする。

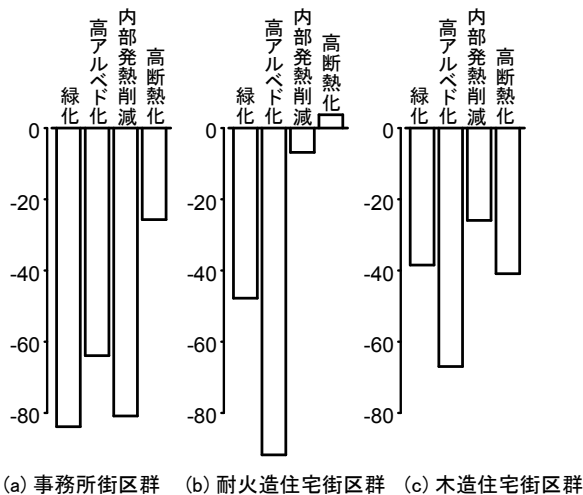
(3) 地上気温の計算結果

典型街区群における地上気温の計算結果を図-5に示す。この図から、事務所街区群や耐火造住宅街区群は木造住宅街区群と比較して気温日変化幅が小さく、とくに夜間の気温が高めになっていることが分かる。これは建物の熱容量が大きいことや、天空率が小さいために夜間の放射冷却が抑制されることなどによるものであり、一般的なヒートアイランド現象の特徴がよく再現されていると



各種対策ケース - 標準ケース [°C]

図-6 各施策による気温低下効果



各種対策ケース - 標準ケース [kJ/m²/日]

図-7 各施策による省エネルギー効果 (床面積あたり)

言える。

次に各対策ケースにおける気温低下効果を図-6に示す。この結果、いずれの街区群タイプも緑化ケースの気温低下効果が最も大きく、日平均0.6~1°Cに及んでいる。また高アルベド化ケースは0.1~0.5°C程度となり、緑化ケースと比較すると小さいという結果となった。他のケースでは明確な変化は読み取れなかった。

(4) 省エネルギー・CO₂排出削減の計算結果

各対策ケースにおける省エネルギー効果を比較した(図-7)。ここでは、典型街区群における省エネルギー効果を床面積あたりで示した。この結果、今回の計算条

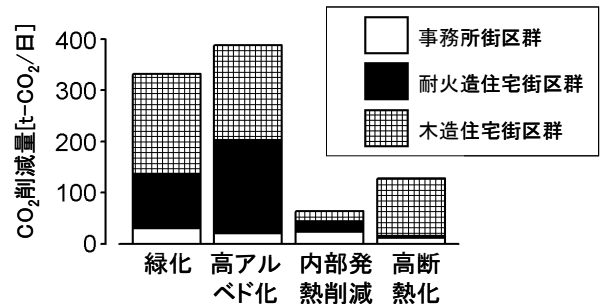


図-8 川崎市におけるCO₂排出量削減効果の計算結果

件では、事務所では主に緑化や内部発熱削減、住宅では高アルベド化の効果が大きいという結果となった。ただし、今回設定したシナリオでは、必ずしも各ケースを対等に比較できる設定とは言えないため、どの対策が最も有益かといった各対策間の比較評価はここでは避ける。内部発熱削減ケースは住宅街区群ではほとんど効果は得られないが、事務所街区群では大きな効果が得られている点も特徴的である。これは室内のエネルギー消費量が多い事務所では、冷房負荷の要因として内部発熱が大きいためであり、室内の省エネルギーは冷房用エネルギー削減のためにも重要であると言える。また、高断熱化の効果は、本研究では冷房のみを対象としたため、大きいとは言えない。とくに、耐火造住宅街区群では窓面透過日射や内部発熱により冷房負荷が生じる効果の方が大きく、今回の計算条件ではむしろエネルギー消費が増大するという結果となっている。もちろん暖房を含めれば省エネルギー効果が大きいことは十分に予想できるため、今後は暖房を含めた通年評価が必要である。

次にこの計算を川崎市全域に適用し、対象エリア全体でのCO₂削減効果を算出した(図-8)。この結果、今回の計算条件では緑化や高アルベド化では300~400[t-CO₂/日]の削減効果が得られるという結果となった。床面積あたりの省エネルギー効果は事務所街区群においても比較的大きく生じたが(図-7参照)、川崎市全域では既存の建築ストック数の違いが反映され、住宅街区群におけるCO₂削減効果が大きいという結果となった。ただし本研究では夏季晴天日の一日のみを評価対象としており、街区群タイプによる冷房期間の違いの影響が反映されていないため、今後は通年評価が必要である。

4. まとめ

本研究では、都市・街区群スケールでの熱環境シミュレーションにより、ヒートアイランド緩和とその冷房の省エネルギー効果・CO₂排出削減効果を評価することを目的とした。具体的には外気温と室内の空調負荷を同時

に計算できる都市キャノピー・ビルエネルギー連成モデルを用いて、種々のヒートアイランド緩和策や冷房負荷削減策として、緑化、高アルbedo化、内部発熱削減、高断熱化の効果を検討した。屋上緑化については、屋根面水収支の観点から散水量を定量化し、水道水利用やポンプ動力によるCO₂排出量も算定し、冷房負荷軽減によるCO₂削減量と比較し十分に小さいことを確認した。これらの結果、現状および各種対策ケースでの地上気温や室内熱収支、空調負荷パターンの特徴が明らかになった。また、屋外温熱環境との相互作用も含めて施策導入によるCO₂排出削減効果を定量化することができた。ただし、本研究では夏季の冷房のみを評価対象としたが、より定量的に省エネルギー・CO₂削減効果を把握するためには、暖房も含めた通年評価を行なう必要がある。また、本研究で想定した施策導入シナリオは各施策を対等に比較し得る導入条件とは言えないため、今後シナリオ設定については精査が必要である。

謝辞：本研究は環境研究総合推進費E-1105「低炭素社会を実現する街区群の設計と社会実装プロセス」（代表：加藤博和）の支援により実施されました。ここに深謝の意を表します。

参考文献

1) 平野勇二郎; ヒートアイランド緩和策の気温低下効果

- とそのエネルギー消費量への影響 東京都心部の地上緑化を対象とした夏季・冬季のケーススタディー. 日本建築学会環境系論文集, No.591, pp.75-82, 2005.
- 2) 平野勇二郎, 藤田 壮, 高橋俊樹: 全国主要都市の家庭における CO₂ 排出量の構造分析とエネルギー用途の推定手法. 環境システム研究論文集, Vol.38, pp.309-316, 2010.
- 3) 平野勇二郎, 亀卦川幸浩, 玄地 裕, 近藤裕昭: 事務所および住宅における空調・給湯用エネルギー消費量の気温感応度算定に関する各種手法の相互比較. エネルギー・資源, Vol.27, pp.218-224, 2006.
- 4) 環境省;地球温暖化対策地方公共団体実行計画（区域施策編）策定マニュアル（第1版）, 2009.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.

(2012.5.7 受付)

URBAN AND NEIGHBORHOODS SCALE SIMULATION OF URBAN HEAT ISLAND MITIGATION AND CO₂ REDUCTION

Yujiro HIRANO and Tsuyoshi FUJITA

We investigated the cooling energy saving and CO₂ reduction effects of measures for mitigating urban heat islands, such as urban greening and high-albedo painting. To simulate the city-block-scale interaction between outdoor air and cooling energy demands, we used a coupled urban-canopy and building-energy model. We adopted scenarios that allowed for greening to be planted on rooftops, walls, and roads. Moreover, we assessed other typical energy conservation methods such as reducing internal heat sources and increasing insulation. In this study, we selected a target study region in the city of Kawasaki. The results from the large-scale assessment show that urban greening or increasing albedo achieved the highest energy savings, of up to 400 t-CO₂/day, over the entire study region.