

光高反射熱高放射塗料導入による 建築-都市連成環境におけるCO₂排出削減効果の評価

Evaluation of CO₂ Emissions Reduction Effect of Building-Urban Area by Introducing High Light-Reflective and High Heat-Emissive Paint

井原 智彦^{*}・松尾 雅子^{**}・吉田 好邦^{***}・松橋 隆治^{****}・近藤 裕昭^{*****}

Tomohiko Ihara Masako Matsuo Yoshikuni Yoshida Ryuji Matsuhashi Hiroaki Kondo

High light-reflective and high heat-emissive paint is known as one of technologies for reducing buildings' cooling load and mitigating heat island phenomenon. In case high reflective paint is introduced, one needs to assess the extents of decrease in its reflectivity by urban air pollution, and the extents of improvement regarding CO₂ emissions in the building-urban environment.

We evaluated the extents of decrease in the reflectivity of paint by outdoor exposure experiment, and found that its average reflectivity was 0.75 during five years, a guaranteed period for its effectiveness.

Next, we developed an environmental evaluating model composed of both buildings' heat load and urban thermal environment simulation models, through calculating artificial exhaust heat from building and estimating temperature outside throughout year. Based on this model, high reflective paint is effective as a heat island mitigating measure but not as a CO₂ reducing measure. Installed to all buildings in the commercial sector in the Tokyo area, CO₂ emissions will increase by 0.9%, and in the residential sector by 0.5%. This is above a 0.6% increase for individual building, and the difference is due to effects on the temperature outside. When paint is introduced in April to October, we expect an 11.8% decrease, the extent of which is more than 10.7% for individual building. Thus, high reflective paint is helpful for the buildings equipped with new-type air-conditioning or the current intelligent buildings. These buildings that are concentrated in a certain area should be installed with such paint first.

Keywords: High Light-Reflective Paint, Building Heat Load, Heat Island Phenomenon, CO₂ Emissions

1. はじめに

近年、地球温暖化およびヒートアイランド現象の問題化より、光高反射熱高放射塗料（遮熱塗料）が注目されている。光高反射熱高放射塗料を建築外表面に塗装することで、日射を高い割合で反射できるため、室内冷房負荷の低減や地上気温の低下が見込める。また、他の省エネルギー技術と異なり、施工後の建築物に対しても容易に導入できるのが特徴である。

実際に高反射塗料を導入するためには、導入した場合の大気汚染による反射率の劣化や通年での効果を評価する必要があるが、従来の評価は夏期の数値計算のみにとどまっていた。本稿では、実験をおこなって反射率の劣化データを作成するとともに、通年での建築-都市での環境改善効果を評価する。

2. 高反射高放射塗料に関する長期屋外暴露実験

東京大学工学部 4 号館屋上（東京都文京区）に 1[mm]厚の SUS304 板を用いて作成した一辺 1.2[m]の立方試験体に、高反射塗料を塗装し、試験体外表面の日射反射率および各部位（室内中央および内外表面）の温度ならびに気象要素（日射量、外気温湿度、風向・風速、雨量）を長期（2002 年 11 月 -2003 年 10 月）にわたって計測した¹⁾。長短波放射の計測には

栄弘精機製長短波放射計MR-40を使用した。

計測した日射反射率の経時劣化データを図 1 に示す。

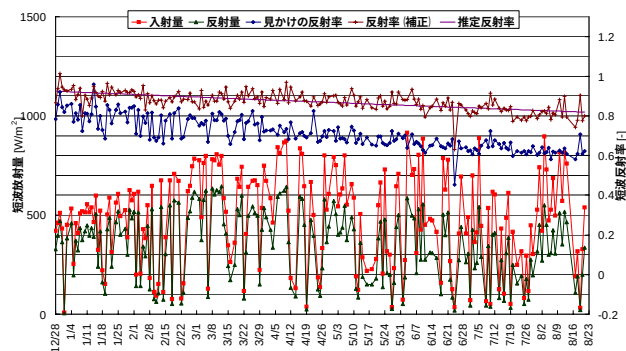


図 1 短波反射率の計測結果

図 1 に示した「見かけの反射率」は、試験体外表面から放射される短波放射量を、入射する短波放射量で割った値であるため、長短波放射計自身の日影や周辺環境の影響を含んでおり、そのため、曇天時は反射率が低く算出されてしまっている。そこで、試験体周辺をCGモデル化し、光線追跡法を用いて解析をおこなうことで、反射率を補正した。図 1 に「反射率(補正)」として示す。補正した反射率より経時劣化推定式を作成したところ、反射率は 5 年（寿命）平均で 0.75 と算出された。この値は二階堂²⁾による計測結果とおおむね一致する。

3. 建築熱負荷計算による建築物からのCO₂排出削減効果

次に、前節で求めた塗料導入時の反射率を用いて、塗料を住宅および業務ビルの各外表面に導入した場合のCO₂排出

* 東京大学大学院工学系研究科地球システム工学専攻

e-mail ihara@globalenv.tu-tokyo.ac.jp

*** 東京大学大学院工学系研究科地球システム工学専攻 助手

**** 東京大学大学院新領域創成科学研究科環境学専攻 助教授

〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 東京大学工学部 4 号館

** 東京大学大学院工学系研究科環境海洋工学専攻

〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 東京大学工学部 3 号館

***** (独) 産業技術総合研究所環境管理研究部門 グループ長

〒305-8569 茨城県つくば市小野川 16-1 産総研つくば西事業所

削減量を算出した。

3.1 建築熱負荷計算モデル

使用した建築熱負荷計算モデルは、著者らが開発した多数室熱負荷シミュレーションプログラム³⁾である。壁体熱伝達は、熱伝導方程式を後退差分化することによって記述されている。

3.2 計算条件

住宅に関しては、建築仕様は「住宅用標準問題」⁴⁾（木造）、スケジュールは「住宅における生活スケジュールとエネルギー消費」⁵⁾付属のスケジュール作成プログラムを使用した。業務ビルに関しては、建築仕様（熱源機器構成（表1）を含む）・スケジュールともに電力中央研究所による「モデルビル（新築・中規模）」⁶⁾に準拠した。

表1 冷暖房熱源機器の設定（業務ビル）

	種別	機器	燃料	COP	シェア[%]
冷房	1	ビルマルチ	電力	3.1	33.7
	2	冷温水発生器	都市ガス	1.07	25.6
	3	ターボ冷凍機	電力	4.1	40.7
	-	冷房平均	-	2.99	100.0
暖房	1	ビルマルチ	電力	3.5	33.7
	2	冷温水発生器	都市ガス	0.85	25.6
	3	ボイラー	都市ガス	0.85	40.7
	-	暖房平均	-	1.74	100.0

※種別が同じ熱源を組み合わせると1つの熱源システムとする。

気象条件としては、「拡張アメダス気象データ」⁷⁾の東京・標準年のデータを使用した。

ただし、建築仕様のうち、建築外表面は、標準状態と塗料導入ケースの2種類を計算した（表2参照）。

表2 建築外表面の設定

建築外表面	日射吸収率[-]	長波放射率[-]
標準建築外表面	0.80	0.90
高反射高放射塗料	0.25	0.90

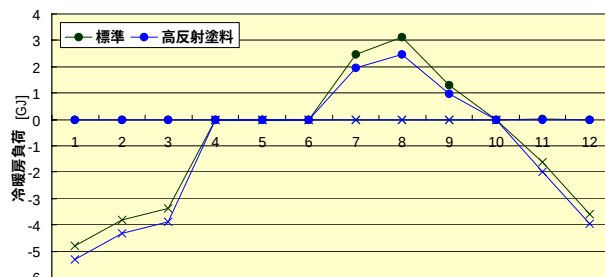
3.3 計算結果

上記の条件の下、高反射塗料を住宅および業務ビルに導入した場合の冷暖房負荷の増減・CO₂排出削減効果を評価した。冷暖房負荷の増減をそれぞれ図2、図3に示す。

図2より、住宅では、21.4%以上の冷房負荷を削減する一方、暖房負荷を13.3%増大させてしまうことがわかった。その結果、熱源機器の設定よりCO₂排出量を求めると、暖房需要が冷房需要より大きいため、4.5%のCO₂排出増を招く。

一方、業務ビル（図3）では、塗料の通年導入は、19.4%の冷房負荷を削減し、33.1%の暖房負荷を増加させた。その結果、0.6%増とわずかながら空調需要起源CO₂排出量が増加してしまう結果となった（図4参照）。

住宅と異なり、冷房負荷が暖房負荷を卓越している業務ビルにおいてさえ、冷房負荷を低減する高反射塗料がCO₂排出の増大を招くのは、表1に示すように、暖房熱源のCOPが冷房熱源のCOPを大きく下回るためと考えられる。



●:冷房, ×:暖房, 縦軸は正が冷房・負が暖房

図2 月別冷暖房負荷（住宅）

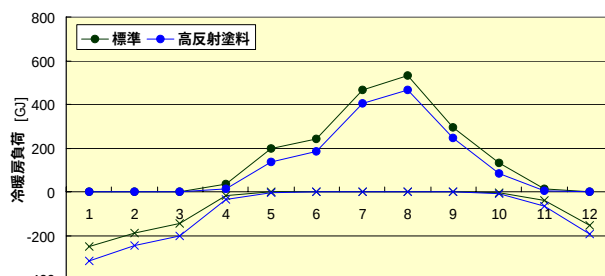


図3 月別冷暖房負荷（業務ビル）

冷房負荷が夏期・中間期に、暖房負荷が冬期に集中するので、4-10月のみ選択的に高反射塗料塗装の外表面を用いれば、高反射塗料はCO₂排出削減方策たりえると考えられる。季節別の外表面切り替えは、標準建築外表面に対し、特定季節のみ高反射塗料を塗装したシールを貼ったりシートで覆ったりという方策が考えられる。切り替え手法を採った場合は、塗料は10.7%ものCO₂排出を削減することがわかった。

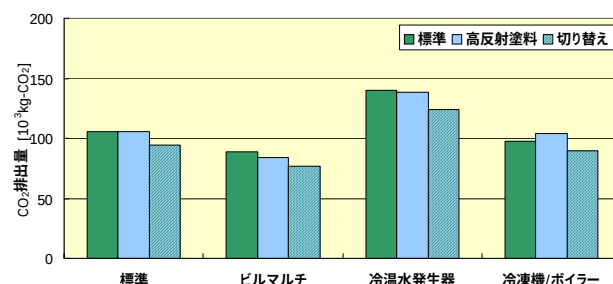


図4 熱源の違いによるCO₂排出量の比較（業務ビル）

また、前述したように熱源機器の設定によってCO₂排出の増減は変化する（図4）。比較すると、通年導入でも、ビルマルチでは5.2%、冷温水発生器では1.3%のCO₂排出量を削減した。一方、ターボ冷凍機+ボイラーの組み合わせでは、6.7%増となった。業務ビルの場合、熱源によっては、効果的なCO₂排出削減方策となる可能性がある。

紙面の都合上、詳細は掲載しないが、冷房負荷の増大を招くOA化についても同様のシミュレーションをおこなった。そのところ、1人PC2台（デスクトップ+ノート）にまでOA化が達した場合、通年導入でも効果があるだけでなく、冷房月がほとんどとなるため、季節別導入の必要すらなくなることがわかった。

3.4 排熱計算

著者らが開発した熱負荷計算プログラムは、建築物の各領

域の代表温度を算出しているの、各領域の熱容量と合わせると、毎時刻の建築物の保有熱量が計算可能であり、さらに毎時刻の建築からの排熱量が計算可能である。

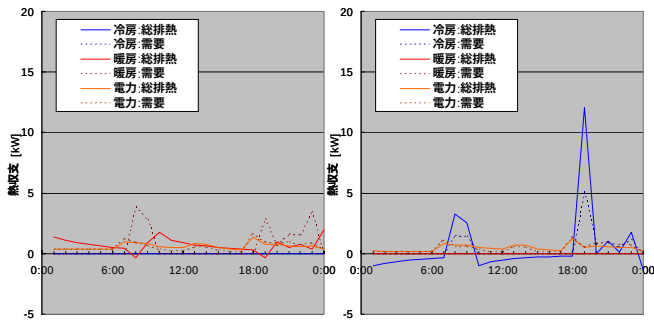


図5 排熱曲線(住宅) 左:2月平日(平均),右:8月平日(平均)

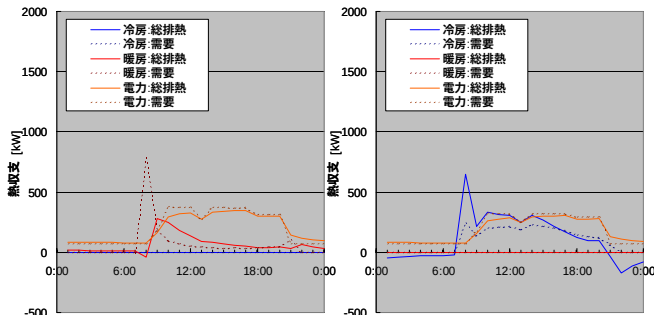


図6 排熱曲線(業務ビル) 左:2月平日(平均),右:8月平日(平均)

上記の計算手法を用いて、住宅・業務ビルそれぞれの排熱曲線を作成した。需要曲線と比較すると、電力需要・排熱で時間遅れの影響が表現できている。冷暖房需要・排熱では、さらにヒートポンプの効果のため、排熱曲線と需要曲線は、特に空調開始直後の時間帯では全く別となるのがわかった。8月昼間は、冷房排熱は需要を常に上回っている。

4. 都市熱環境計算による気温低減効果

次に、実験で求めた反射率と前節で求めた人工排熱値を用いて、塗料を東京圏すべての業務ビルの各外表面に導入した場合の気温低減効果を算出した。

4.1 都市熱環境計算モデル

近藤らが開発したメソスケールレベルのシミュレーションプログラムAIST-MM^(8),9)を使用する。Boussinesq近似の静水圧モデルであり、気象庁GPVによるデータ同化をおこなう。

4.2 計算条件

本来ならば通年計算が望ましいが、計算コストから困難である。そこで、1年365日を気圧配置・空調期間によって6季節に分類し、季節ごとに代表日1日のみ計算をおこなう(表3)。

地表面条件としては、標準状態と東京圏すべての業務ビルに塗料を導入した場合とを用意した。民生部門の人工排熱のうち、冷房・暖房・電力による排熱(時刻配分率)は前節で求めた排熱データをそれぞれ用いた。地表面物性値は、東京圏すべての業務ビルに塗料を導入した場合、「建物用地A」がすべ

て業務ビルであると仮定し(用地中30%が建築物)、アルベドを向上させた。「建物用地B」はそのままとした(表4)。

表3 計算対象日の選定

計算日	天気図(気圧配置)	空調期間	計算結果の適用期間
2003/02/01	冬型	冬期	1,2,12月
2003/03/21	春・秋型	冬期	3,11月
2003/04/18	春・秋型	中間期	4,5月
2002/06/17	梅雨・秋雨型	中間期	6,10月
2002/08/01	夏型	夏期	7,8月
2002/09/12	梅雨・秋雨型	夏期	9月

表4 地表面物性値(アルベド)の設定

	土地利用区分	アルベド[-]
7	建物用地A	0.13
7'	建物用地A(高反射塗料)	0.30
8	建物用地B	0.15

アルベド上昇: $(0.75-0.2) \times 30\% = 0.17$

4.3 計算結果

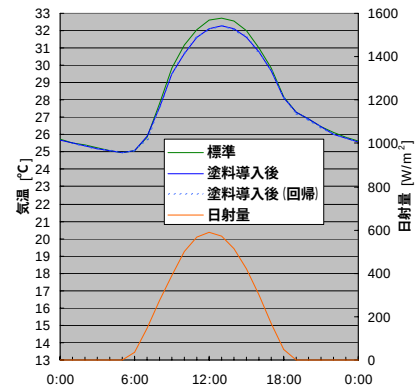


図7 気温の推移(東京, 2002/08/09)

計算結果の例として、「夏型+夏期」における東京の気温を図7に示す。図7のみならず、いずれの季節においても、塗料の導入は、日中において0.5[K]程度の気温低下を招くことがわかった。また、季節によっては気温低下が昼間だけではなく、夜間においても確認された。

4.4 気温低減効果の定式化

前節の結果を利用して、計算日(季節)ごとに日射量および前時刻の気温低下より気温低減効果を推定する数式(回帰式)(1)を作成した。「夏型+夏期」の推定式による回帰結果は図7に掲載した。

$$(\Delta\theta)^K = \Delta_I I_G^K + \Delta_{(\Delta\theta)} (\Delta\theta)^{K-1} \quad (1)$$

$\Delta\theta$: 気温低下, I_G : 水平面全天日射量, Δ_I : 日射量による気温低下係数, $\Delta_{(\Delta\theta)}$: 前時刻気温低下による気温低下係数。

この気温低減効果を通年に適用させることで、塗料が大規模に導入された場合の年間気温データを作成した。

5. 気温低減効果を考慮した建築物からのCO₂排出削減効果

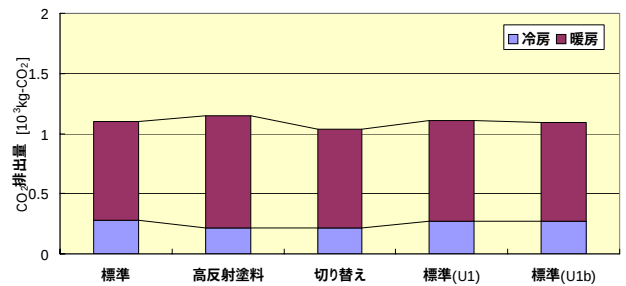
前節の結果を用い、シミュレーションをおこなうことで、東京

図すべての業務ビルに高反射塗料を導入した際の、都市-建築の相互作用を考慮した、建築物におけるCO₂排出削減効果を算出した(計算条件は表 2, 表 5 参照)。

表 5 気象データの設定	
種別	データ
標準状態の気温	EA 気象データ[気温]
高反射高放射塗料を東京圏すべての業務ビルに導入した場合の気温	EA 気象データ[気温] + 気温低減効果(季節,時刻,日射量)

結果、業務ビルでは、年間 0.8%増と、単体導入時の 0.6%増よりもCO₂排出量が増大した(図 9 参照)。のみならず、標準外表面のままの住宅においても 0.9%のCO₂排出増を招いた(図 8 参照)。

一方、4-10 月のみ塗料を大規模に導入した場合には、逆に 11.8%ものCO₂排出量を削減することがわかった。これもビル単体で導入した場合の 10.7%減を上回り、さらに住宅のCO₂排出量を 0.5%削減していることが注目される。



U1:東京圏すべての業務ビルに通年塗料導入, U1b:4-10 月のみ

図 8 空調需要起源CO₂排出量 (住宅)

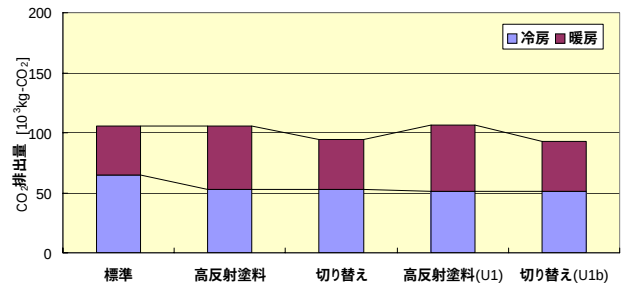


図 9 空調需要起源CO₂排出量 (業務ビル)

6. おわりに

塗料が現実導入された場合のCO₂排出削減効果について分析した。まず、実験をおこない、塗料の反射率は、導入後の劣化を考慮すると、0.75 程度であることを確認した。

次に、建築排熱計算・気温低減効果計算を導入することで、建築-都市の疑似連成モデルを構築し、塗料導入によるCO₂排出量の変化を算出した。そのところ、塗料の導入はヒートアイランド対策としては有効であるが、冬期の暖房負荷増大に伴い、CO₂排出量の増大を招くことがわかった。一方、新しい空調システムが導入されているビルやOA化が進んだビルに対しては、CO₂排出削減方策となりうることを示した。そして、季節

別導入が実現した場合には、標準的なビルにおいて 10%以上の空調需要起源CO₂排出量が削減できる。

建築外表面技術は選択的にしか導入できないため、他の技術の評価もおこなった上で、最も効果的と判断した技術が導入されるのが望ましい。高反射塗料は、新しい空調システムが採用されているビルやOA化が進んでいるビルから優先的に、かつ地域集中的に導入していくのが望ましいと考えられる。

謝辞

本研究にあたり、光高反射熱高放射塗料の提供を鹿島建設(株)から受け、同社の二階堂稔氏および大日本塗料(株)の水野民雄氏には、塗料の物性に関してアドバイスを頂いた。

また、都市熱環境計算の実行および入力データの整備にあたっては、(独)産業技術総合研究所の玄地裕、大橋唯太の両氏ならびに(株)富士総合研究所の亀卦川幸浩氏に多大なるご助力を頂いた。関係各位に対しここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 松尾雅子,井原智彦,吉田好邦,松橋隆治; 高反射・高放射塗料を用いた建築物の省エネルギー方策に関する研究, 第 22 回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集, (2003), 289-294.
- 2) 二階堂稔,寺内伸; 構造物の温度上昇を抑制する光高反射・熱高放射塗料, 鹿島建設技術研究所年報, 47, (1999), 153-158.
- 3) 井原智彦,半田隆志,松橋隆治,吉田好邦,石谷久; 行列計算を改良した多数室室温計算手法の提案と高反射高放射塗料によるCO₂排出削減効果の評価, 電学論C, 123-8, (2003), 1493-1501.
- 4) 宇田川光弘; 標準問題の提案(住宅用標準問題), 第 15 回日本建築学会環境工学委員会熱分科会 熱シンポジウム, (1985), 23-33.
- 5) 空気調和・衛生工学会 住宅設備委員会 住宅のエネルギー消費シミュレーション小委員会; 住宅における生活スケジュールとエネルギー消費, 空気調和・衛生工学会シンポジウム, (2000).
- 6) (財)電力中央研究所 有識者会議 第 2 研究グループ; 事務所ビルの省エネルギー -東京都区部における可能性と必要コストの評価-, 電力中央研究所報告書, (1985).
- 7) 日本建築学会(編); 拡張アメダス気象データ, 初版,丸善, (2000).
- 8) 近藤裕昭; 公害資源研究所メソスケールモデルについて, 公害資源研究所報告, 44, (1989).
- 9) 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, 東京大学博士論文,(2001).