

都市熱環境を考慮した高反射高放射塗料導入による建築物のCO₂排出削減効果の評価

Evaluation of CO₂ Emissions Reduction Effect from the Building by Introducing High Light-Reflective and High Heat-Emissive Paint considering Urban Thermal Environment

東京大学 大学院工学系研究科

東京大学 大学院新領域創成科学研究科

慶應義塾大学 大学院政策・メディア研究科

井原 智彦

IHARA Tomohiko

半田 隆志

HANDA Takashi

石谷 久

ISHITANI Hisashi

相田 洋志

AIDA Hiroshi

松橋 隆治

MATSUHASHI Ryuji

吉田 好邦

YOSHIDA Yoshikuni

1 はじめに

近年、地球温暖化問題への認識の変化とあいまって、民生部門においても多くのCO₂排出削減方策が提案されるようになってきている。

ところで、建築に対するCO₂排出削減方策を評価する際、従来は、非定常熱負荷計算を主体とした建築物におけるエネルギー需給シミュレーションを用いてきた。しかし、ヒートポンプや屋上緑化、高反射高放射塗料などは大量に導入した場合、都市環境にも影響を与えるので、効果を正しく評価するためには都市環境をも含めて評価する必要がある。

本研究では、都市環境に影響を与えるCO₂排出削減方策として高反射高放射塗料 [1] を採りあげる。高反射高放射塗料はヒートアイランド現象に対して有効である [2] が、建築物のCO₂排出削減方策ともなりうる [3]。まず、同方策を東京に大規模に導入した場合の気温低減効果を都市熱環境シミュレーションによって算出し、次に、算出した気温を用いて非定常熱負荷シミュレーションをおこなうことで、高反射高放射塗料の、都市環境を考慮した建築物からのCO₂排出削減量を算定する。

2 都市熱環境シミュレーションモデル

本研究では、ヒートアイランドの評価に用いるメソスケールモデル [4, 2] を用いて、高反射高放射塗料の導入が都市熱環境に与える影響を評価する。

採用するメソスケールモデルは、

- 風速場および大気中での3次元熱・水蒸気移流拡散モデル
- 地表面（海水面）での熱収支モデル
- 土壌層（海水層）での1次元熱伝導モデル

の3つのサブモデルから構成される。

2.1 3次元熱・水蒸気移流拡散モデル

概略 大気層の6個の物理量 (u, v, w, P, θ, q) について、非圧縮性流体の基礎方程式および Boussinesq 近似より6本の方程式を導出し、連立させて解く。

記号 本モデルでは、以下の記号を用いる。

u, v, w : x, y, z 軸方向の各風速

t : 時間

θ, Θ : 温位, 平均温位 $\theta = T \left(\frac{P_0}{P} \right)^{R/c_p}$

T : 気温

P, P_0 : 気圧, 基準気圧

R : 大気気体定数

c_p : 大気比熱

q : 水蒸気量

ρ : 大気密度

g : 重力定数

f : Coriolis パラメータ

Q_A : 単位体積あたりの生成熱

K_{Hm}, K_{Vm} : 水平, 鉛直乱流粘性係数

K_{Hh}, K_{Vh} : 熱・水蒸気の水平, 鉛直乱流拡散係数

数式

- 連続方程式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.1)$$

- 運動方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{Hm} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{Hm} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{Vm} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + fv \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial vu}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{Hm} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{Hm} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{Vm} \frac{\partial v}{\partial z} \right) - fu \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial wu}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial y} + \frac{\partial ww}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{Hm} \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{Hm} \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{Vm} \frac{\partial w}{\partial z} \right) - g \frac{\theta}{\Theta} \end{aligned} \quad (2.4)$$

● 熱輸送方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial \theta u}{\partial x} + \frac{\partial \theta v}{\partial y} + \frac{\partial \theta w}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{Hh} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{Hh} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{Vh} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \frac{Q_A}{c_p \rho} \end{aligned} \quad (2.5)$$

● 水蒸気輸送方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial qu}{\partial x} + \frac{\partial qv}{\partial y} + \frac{\partial qw}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{Hh} \frac{\partial q}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{Hh} \frac{\partial q}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{Vh} \frac{\partial q}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2.6)$$

解法 数値計算において、3次元熱・水蒸気移流拡散モデルを記述する6本の微分方程式を解く場合、離散化する必要があるが、本研究では有限体積法を用いる。離散化された式は、各格子（control volume）ごとに連立させると解けるが、それぞれ隣接格子にしか影響されないため、線順法で解く。

しかし、運動方程式は圧力 P が右辺に含まれるため、陽には解けない。そこで、SIMPLE (semi-implicit method for pressure-linked equations, 圧力結合方程式の半陰解法) を採用し、スタッガード格子に組み替えた上で、収束計算によって解く。

2.2 熱収支モデル

概略 地表面で熱平衡が成立していると仮定し、左辺に地表面の熱容量とその温度変化、右辺に熱の流入・流出を記述する（式(2.7)参照）。

記号

- C_t : 地表面熱容量
- T_G : 地表面温度
- R : 太陽からの正味入力放射量
- A : 人工排熱
- H, IE : 顕熱, 潜熱フラックス
- G : 地中への熱伝導フラックス
- R_S : 太陽からの短波放射
- R_L^\downarrow : 大気からの長波放射
- R_L^\uparrow : 地表面からの長波放射
- α : アルベド
- A_p : 大気の透過率
- m : エアマス
- R_0 : 太陽定数
- Z : 天頂角
- χ : $\chi = \log_{10} \omega$

- ω : 全有効水蒸気量
- T_Z : 平均気温
- ε : 射出率
- σ : Stefan-Boltzmann 定数

数式

$$C_t \frac{\partial T_G}{\partial t} = R + A - H - IE - G \quad (2.7)$$

右辺中、特に R は式(2.8)により算出している。

$$R = R_S + R_L^\downarrow - R_L^\uparrow \quad (2.8)$$

式(2.8)の右辺の各項は次の通り。

$$R_S = (1 - \alpha) A_p^m R_0 \cos Z \quad (2.9)$$

$$R_L^\downarrow = (0.73 + 0.2\chi + 0.006\chi^4) \sigma T_Z^4 \quad (2.10)$$

$$R_L^\uparrow = \varepsilon \sigma T_G^4 \quad (2.11)$$

2.3 1次元熱伝導モデル

概略 土壌層は鉛直方向の熱伝導が卓越している。海水層は海流による拡散が存在するが、本研究では湾内しか取り扱わないため、計算コストを考え、ともに鉛直1次元の熱伝導モデルを採用する。

記号

- T_S : 土壌層温度
- k_S : 土壌層熱伝導率
- ρ_S : 土壌層密度
- C_S : 土壌層熱容量

数式

$$\frac{\partial T_S}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z_S} \left(\frac{k_S}{\rho_S C_S} \frac{\partial T_S}{\partial z_S} \right) \quad (2.12)$$

2.4 モデルの計算フロー

図2.1の通り、各サブモデルを順に計算し、各モデル内の温度・圧力などをそれぞれ算出する。

3 建築熱負荷シミュレーションモデル

建築物の空調需要を求めるために、通年での非定常熱負荷計算をおこなう。既に汎用性の高い差分法を用いた OOP によるシミュレーションプログラム [5] を開発しており、それを用いる。

概略 建築物は、 N_R 個の室 (R) と N_W 個の壁 (W) から構成され、壁は重量壁と軽量壁 (ガラス窓など) に分けられる。

室は均質な空気で満たされると仮定し、1室に1点ずつ熱点 (温度点) P を設定する。壁は構成材料ごとに壁層として分割し、各壁層境界 (軽量壁では各空気層境界) 中央に熱点を設定する。

各熱点における熱平衡を1次元熱伝導方程式で表し、それを差分・連立させて解き、各熱点における温度もしくは除去熱量を算出する。

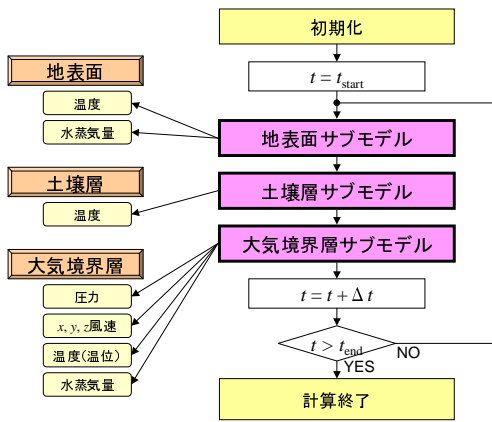


図 2.1 メソスケールモデルの計算フロー

記号 例えば、 $C_p|_{R[i]}$ と記述すれば「 i 室の室内顕熱容量 C_p 」を表す。添字がオブジェクトを表し、変数がメンバを表す。

オブジェクト 室や壁体などメンバを持つオブジェクトの記法を説明する。

- $R[i]$: i 室 (建築物において第 i 番目の室)
- $R[i]P$: i 室の熱点
- $R[i]S[j]$: i 室に隣接する中で j 番目の壁面
- $R[i]S[j]P$: i 室に隣接する中で j 番目の壁面上の熱点
- $R[i]S[j]W$: i 室に隣接する中で j 番目の壁面を含む壁

一般的な変数 単値しか持たない変数の記法については以下の通り。

- α_c : 室側表面对流熱伝達率 [W/m^2K]
- ρ_a, ρ_{ao} : 空気, 外気の密度 [kg/m^3]
- $\theta, \theta_e, \theta_o$: 温度, 相当外気温度, 外気温度 [$^{\circ}C$]
- A : 面積 [m^2]
- c_a, c_{ao} : 空気, 外気の比熱 [$J/kg \cdot K$]
- C_p : 顕熱容量 [J/K]
- H : 除去顕熱量 [W]
- L_c : 室内発熱の対流成分 [W]
- $L_c|_{R[i]} = L_{c0}|_{R[i]} + l_{cR}|_{R[i]} \theta|_{R[i]P}$
- L_{c0} : (基準値 ($0[^{\circ}C]$)) [W]
- l_{cR} : (室温によって変動する値) [W/K]
- N_R : 室数 [-]
- N_S : 壁面数 [-]
- Q : 流入する空気量 [m^3/s]
- Q_o : 外気流入量 [m^3/s]
- V : 容積 [m^3]

数式 室を例として採り上げる。

室 i 室の熱平衡式は式 (3.1) の通り。左辺が室内熱容量とその温度変化、右辺が熱の流出入である。

$$\begin{aligned}
 & \left(C_p|_{R[i]} + c_a|_{R[i]} \rho_a|_{R[i]} V|_{R[i]} \right) \frac{d\theta|_{R[i]P}}{dt} \\
 &= \sum_{j=0}^{N_S|_{R[i]}-1} \alpha_c|_{R[i]S[j]} A|_{R[i]S[j]W} \left(\theta|_{R[i]S[j]P} - \theta|_{R[i]P} \right) \\
 &+ \sum_{\substack{j=0 \\ R[j] \neq R[i]}}^{N_R-1} c_a|_{R[j]} \rho_a|_{R[j]} Q_{R[j] \rightarrow R[i]} \left(\theta|_{R[j]P} - \theta|_{R[i]P} \right) \\
 &+ c_{ao} \rho_{ao} Q_o|_{R[i]} \left(\theta_o - \theta|_{R[i]P} \right) + \left(L_{c0}|_{R[i]} + l_{cR}|_{R[i]} \theta|_{R[i]P} \right) - H|_{R[i]} \quad (3.1)
 \end{aligned}$$

解法 微分方程式である熱平衡式を後退差分法し、行列を作成して解く。ただし、行列 (係数行列) の次元が大きくなるため、室と壁体に分けた 4 個の小行列とし、さらに行列を解く際スカイライン法を導入するなどの解法を用いて高速化している [5]。

4 気温低減効果の評価

まず、メソスケールでの都市熱環境シミュレーションをおこない、高反射高放射塗料導入による気温低減効果を評価する。

4.1 計算条件

解析対象領域 東京を中心とした東西 80km・南北 60km の領域 (図 4.1) とし、東京近辺の 22km 四方のみ 1km 間隔、他の領域は 2km 間隔の不等間隔格子とする。鉛直方向は 2km まで解析対象とし、地表面付近ほど間隔を細かくした不等間隔格子を採用する。地下方向は、土壌層は 0.8m ごと地下 4m まで、海水層は 0.4m ごと水深 2m まで計算をおこなう。

日時 都市熱環境シミュレーションで通年計算をおこない、その結果を建築熱負荷シミュレーションに渡すのが望ましいが、計算コストの関係上、メソスケールモデルの通年計算は困難であるので、季節ごとに代表日を算出し (表 4.1)、快晴条件 (日照率 1) と平均気象条件 (平均日照率) の 2 通りを計算した上で、代表日の結果を各季節の全日にわたって適用する (適用方法は第 4.3.2 節参照)。なお、本稿では、快晴時理論全日射量 (式 (2.9)) に対する実全日射量の比を日照率と定義する。

地表面物性値 図 4.1 中メッシュの地表面物性値は、「土地利用メッシュデータ」(1991 年, 1/10 細分メッシュ) (国土交通省) および土地利用区分ごとの地表面物性値 (表 4.2) より作成する。表 4.2 の

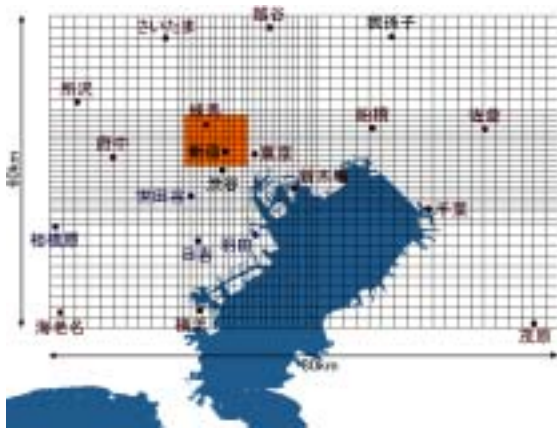


図 4.1 解析対象領域

表 4.1 季節代表日ごとの条件設定

季節 (月)	計算 代表日	初期条件			人工排熱 (夏に対する比)	
		快晴時		通常時	民生 [-]	業務 [-]
		気温 [°C]	気温 [°C]	日照率 [-]		
12-2	2/1	14.3	5.0	(0.90)	0.789	0.709
3-5	5/1	19.0	13.3	(0.69)	0.687	0.806
6-8	8/1	30.0	25.0	(0.58)	1	1
9-11	11/1	22.6	18.2	(0.74)	0.687	0.806

値は文献によるが、アルベド・射出率のみ、ASTER (人工衛星 TERR に搭載された地球観測センサー) による観測データを、市販電子地図(「でんぱつ地図ソフト」)にマッチングすることで算出した [2]。

人工排熱 夏期の人工排熱メッシュデータ(家庭・業務・産業・運輸の4部門別)は、古川ら [4] による。冬期・中間期に関しては空衛学会データ [6] を参考に一律等倍した(表 4.1)。時刻別排熱曲線(部門別)は文献 [6, 4] より作成した。

4.2 高反射高放射塗料の導入

導入地域 本研究では、CO₂ 排出削減方策として、新宿・練馬地区(2次メッシュコード 5339-45, 東京西部)の約 10km 四方(図 4.1 中、網塗りの箇所)の建築物に対して集中的に高反射高放射塗料を導入する。この導入策を評価する理由は次の通り。

- 導入の容易な技術であるといえども、近い将来に東京近郊全体に導入される可能性は低い。
- ヒートアイランド緩和効果も期待できるので、広く薄く導入するよりも、現象が顕著な地域に限定して集中的に導入した方が効果的。
- ヒートアイランド現象が顕著な地域として、臨海部でなくかつ河川・緑地も少ない新宿や渋谷

表 4.2 地表面物性値

記号	用途	土壌層	
		熱伝導率 [W/m·K]	熱容量 [kJ/m ² K]
1	田	1.0878	1940
2,G	その他の農用地, ゴルフ場	1.0878	1940
5	森林	1.0878	1940
6	荒地	1.0878	1940
7	建物用地	2.1757	1940
7*	建物用地(高反射高放射塗料)	2.1757	1940
9	幹線交通用地	2.1757	1940
A	その他の用地	2.1757	1940
B,E,F	河川地及び湖沼, 海浜, 海水域	1.0878	4184

記号	地表面				
	熱容量 [J/m ² K]	蒸発効率 [-]	粗度長 [m]	アルベド [-]	射出率 [-]
1	83680	0.10	0.01	0.33	0.95
2,G	83680	0.05	0.05	0.33	0.95
5	209200	0.10	0.40	0.33	0.95
6	83680	0.05	0.05	0.28	0.92
7	418400	0.02	0.40	0.39	0.96
7*	418400	0.02	0.40	0.85	0.96
9	418400	0	0.40	0.32	0.91
A	418400	0.02	0.40	0.32	0.91
B,E,F	41840	0.50	0.01	0.10	0.93

表 4.3 建築外表面の日射吸収率・長波放射率

建築外表面	日射吸収率	長波放射率	注記
標準建築外表面	0.80	0.90	文献値
高反射高放射塗料	0.15	0.91	実験

が挙げられる。付近に拡張アメダス気象データ [7] (EA 気象データ) の集計地点(新木場や練馬など、図 4.1 参照)がある新宿の方が渋谷よりも評価しやすい。

地表面物性値(計測実験) 高反射高放射塗料を建築物に導入することにより、地表面物性値のうちアルベド・射出率が変化する。本研究では、現実の物性値を知るため、計測実験をおこなった [2]。物性値は図 4.3 の通り(他の物性値は文献値)。

表 4.3 の日射反射率・長波放射率を、それぞれ高反射高放射塗料導入後のアルベド・射出率とする。改訂後の建物用地の地表面物性値は、表 4.2 に「7* 建物用地(高反射高放射塗料)」として示す。

4.3 計算結果

4.3.1 気温

新宿(練馬) 8月・2月の日気温変動を図 4.2 に示す。導入後、夏期では快晴時の日中気温が最大 2.99(3.78)[°C]・平均 1.03(1.31)[°C] も低下、日照率

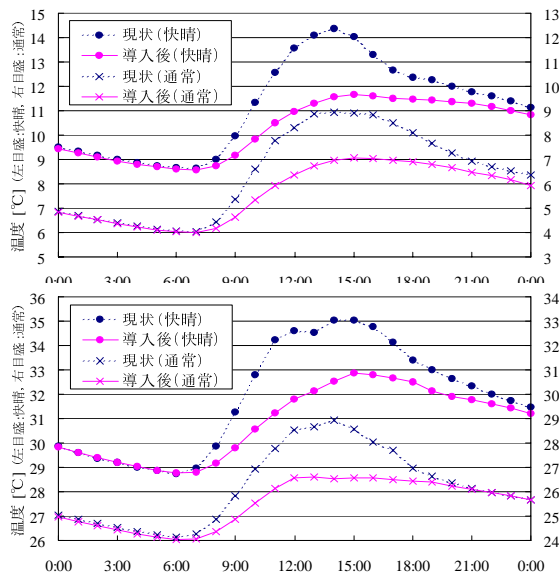


図 4.2 日気温変動（新宿）（上:2月/下:8月）

0.58 程度の場合においても最大 2.41(2.31)[°C]・平均 0.72(0.83)[°C] 低下することが分かった。一方、冬期においては快晴時の気温低下が最大 2.79(2.92)[°C]・平均 0.94(1.13)[°C]、日照率 0.90 の場合では最大 2.12(2.39)[°C]・平均 0.83(0.98)[°C] となった（括弧内は練馬）。冬期の方が気温低下幅が小さいのは、主に日射量が少ないことによると考えられる。

渋谷 塗料を導入していない渋谷でも、付近の新宿の気象変化に伴い、8月快晴時に最大 0.87[°C] の気温低下がもたらされた（グラフは省略）。

4.3.2 気温低減効果

EA 気象データのある練馬における気温低減効果を図 4.3 に示す。日照率が 0 のときは気温低下幅は 0 となるので、3 組の日照率 σ ・気温変化 $\Delta\theta$ のデータより $\Delta\theta = a\sigma^2 + b\sigma + c$ （ただし $\Delta\theta \leq 0$ の制約付き）として回帰、日照率を入力すれば季節別時刻別に塗料導入後の気温低減効果が求まるようにした。

5 建築物からの CO₂ 排出削減効果の評価

メソスケールモデルより得られた都市気温の低下幅（日照率別）を用いて、塗料を大規模に導入した場合の気温データを作成する（改訂気温データ）。

続いて、気温データおよび改訂気温データを用い、非定常建築熱負荷シミュレーションにより時刻別熱負荷を計算し、高反射高放射塗料導入による空調需要削減量および CO₂ 排出削減量を算出、その効果を評価する。

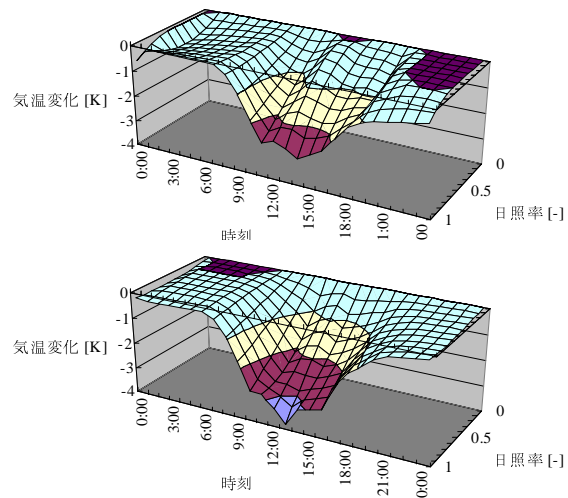


図 4.3 日照率別気温低減効果（練馬）（上:2月/下:8月）

5.1 計算条件

非定常熱負荷計算の条件は次のように設定する。建築物 評価する建築物（および付随する各種スケジュールデータ・熱源機器）は、文献 [8] 記載の「新築・中規模モデルビル」とする。同ビルは階構成 B1/F10/P1・延床面積 10,089[m²] であり、近年建設された標準的な中規模事務所ビルとなっている。空調設定範囲は 22-26[°C]。土日完全週休 2 日制が導入されている。熱源は冷温水発生器（燃料:都市ガス, COP:冷房 1.07/暖房 0.85）である。建築外表面は表 4.3 記載の「標準建築外表面」とする。

本来ならば遮蔽物を考慮すべきであるが、適当な標準値が整備されていないため、今回は無視した。

日時 1995 年 1 月 1 日から 12 月 31 日までを計算対象期間とする。

気象条件 標準状態の気象データとして、EA 気象データの練馬・1995 年を用いる。

5.2 高反射高放射塗料の導入・都市熱環境の考慮
建築物 全建築外表面に高反射高放射塗料を塗装した（表 4.3）として、導入状態の評価をおこなう。

気象条件 大規模に導入し、都市熱環境を考慮する場合の評価には、EA 気象データ（気温・日照率）から練馬での気温低下（図 4.3）を引いた気温データ（改訂気温データ）を作成し、気象条件とする。

5.3 計算結果

5.3.1 冷暖房需要

算出された冷暖房需要（除去熱量）を季節別に見ると、図 5.1 のようになった。

高反射高放射塗料をオフィスビルに導入した場

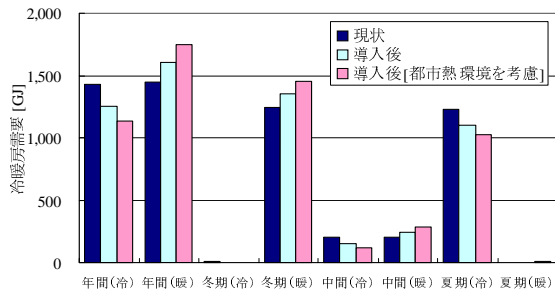


図 5.1 冷暖房需要の削減効果

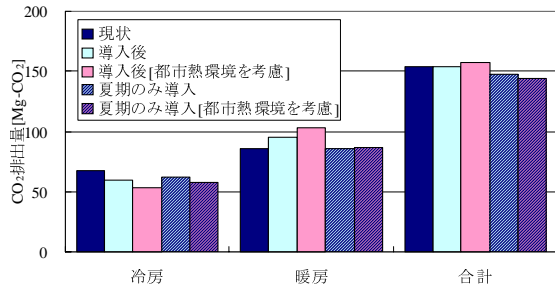


図 5.2 空調需要由来 CO₂ 排出量の削減効果

合、建築熱負荷計算のみで評価すると、冷房需要を 12.5% 削減し、反面、暖房需要を 10.6% 増大させる。しかし、今回のように大規模に導入した場合は都市熱環境への影響も評価するべきであり、改訂気温データを用いて計算すると、冷房需要を 20.5% 削減、暖房需要を 20.4% 増大と、熱負荷計算のみの評価よりも、効果が大きく算出されることがわかる。

5.3.2 CO₂ 排出量

熱源機器 COP および燃料別 CO₂ 排出原単位を用い、空調需要由来 CO₂ 排出を算出した (図 5.2)。

モデルビルでは内部発熱が大きくないためまた暖房 COP が冷房 COP より低いため、高反射高放射塗料を導入すると、通年で 0.5% の CO₂ 排出増をもたらす。都市熱環境を考慮した計算の場合には 2.4% 増となってしまう。

ただし、夏期のみ限定して高反射高放射塗料を導入すると、3.7% の CO₂ 排出減となり、都市熱環境を考慮した場合、ヒートアイランド現象の緩和効果 (都市気温低下) のフィードバックもあるため、1.6 倍超の 6.1% もの排出減となることがわかった。

6 おわりに

建築物の CO₂ 排出削減方策を評価するにあたって、大規模に導入した場合は都市熱環境を考慮する

べきだと提案し、例として高反射高放射塗料を新宿・練馬 10km 四方に導入する場合を採りあげた。

まず、メソスケールレベルでの都市熱環境の変化を評価したところ、塗料の導入は、夏期で最大 2.99[°C]、冬期では 2.79[°C] の気温低下をもたらすことがわかった。同時に日照率を変化させてシミュレーションをおこない、快晴時以外の気温低下も算出できるようにした。

そして、建築熱負荷計算にて塗料導入を評価した。建築熱負荷計算のみでは CO₂ 排出量は 3.7% 減となるが、実際には 6.1% 減であることがわかった。

今回のシミュレーションでは遮蔽物や都市キャニオン空間における気候を無視しており、またメソスケールの計算結果の通年データ化も簡易的な手法を用いている。今後は以上の点を考慮したモデルを開発し、シミュレーションをおこなう予定である。

参考文献

- [1] 近藤靖史, 長澤康弘, 入交麻衣子. 高反射率塗料による日射熱負荷軽減とヒートアイランド現象の緩和に関する研究. 空気調和・衛生工学会論文集, No. 78, pp. 15-24, Jul 2000.
- [2] 半田隆志, 松橋隆治, 石谷久, 吉田好邦, 井原智彦, 六川修一, 風間祐介. 建物用塗料の塗布によるヒートアイランド緩和および冷暖房負荷削減方策. エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, Vol. 18, pp. 493-498, Jan 2002.
- [3] T. Ihara, Y. Yoshida, T. Handa, R. Matsushashi, and H. Ishitani. Effect on CO₂ reduction of installation of outer skin surface technologies in houses and office buildings. *Proceedings of International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*, Vol. 6, , Oct 2002.
- [4] 古川道信, 川崎智央, 石谷久, 松橋隆治, 吉田好邦, 六川修一, 間宮敦. 関東圏における三次元数値解析モデルを用いたヒートアイランド現象の分析とその緩和策の研究. エネルギー・資源, Vol. 21, No. 2, pp. 78-85, Mar 2000.
- [5] 井原智彦, 吉田好邦, 半田隆志, 松橋隆治, 石谷久. 高反射高放射塗料もしくは低反射低放射性外表面導入による建築物からの CO₂ 排出削減効果. エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集, Vol. 21, pp. 163-168, Jun 2002.
- [6] (社) 空気調和・衛生工学会 (編). 都市ガスによるコージェネレーションシステム計画・設計と評価. 丸善, 初版, 1996.
- [7] 日本建築学会 (編). 拡張アメダス気象データ. 丸善, 初版, 2000.
- [8] 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, (財) 電力中央研究所, Mar 1995.