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

Reduction in CO₂ Emissions from the Building by use of High Light-Reflective and High Heat-Emissive Paint and by introducing Low Light-Reflective and Low Heat-Emissive Outer Surface

> 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 吉 IHARA Tomohiko YO 半田隆志 松 HANDA Takashi MA 石谷久 ISHITANI Hisashi

吉田 好邦 YOSHIDA Yoshikuni 松橋 隆治 MATSUHASHI Ryuji

1 はじめに

近年の地球温暖化を取り巻く情勢に伴い,多くの CO₂ 排出削減方策が提案されている.民生部門の対策の大半は 建築物に関するものであるが,建築物に容易に導入できる CO₂ 排出削減方策として高反射高放射塗料が挙げられる. 高反射高放射塗料は,日射を高反射し熱を高放射する塗料 であり,それを建築物外表面に塗装することは,ヒートア イランド対策に有効である[1]が,一方で,建築物自身の 冷房需要の削減も見込める[1,2].

しかし,高反射高放射塗料の導入は,冬期の暖房需要を 増大させてしまう可能性があり,住宅のように暖房需要が 冷房需要を上回る可能性がある場合は,却って,年間 CO₂ 排出量を増加させてしまう.このとき,夏期のみ高反射高 放射塗料を導入し,冬期・中間期は標準外表面のままにす る,という方策が考えられる.さらに,現在は開発されて いないが,低反射低放射性の外表面にして暖房需要を削減 するという方策もありうる.

さて,建築物の冷房需要を求めるには,年間通して時刻 別の熱負荷を算出するのが専らである.非定常熱負荷計算 手法は多々あるが,本研究では将来のパッシブな建築外表 面技術の評価を考慮し,汎用性の高い差分法を用いる.具 体的には,宇田川の熱負荷計算理論[3,4]を改良して,一 連のシミュレーションモデルに用いる熱負荷計算群を作成 し,それを元に独自にシミュレーションモデルを開発する. なお,解法に関しては,宇田川の方法を用いず,独自にア ルゴリズムを開発し,計算速度の高速化をはかる.

開発したモデルを用いて冷暖房需要を算出し,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 CO₂ 排 出削減効果の評価をおこなう.

2 熱負荷計算理論

2.1 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に分けられる.なお,ここでは, 重

量壁はいわゆる壁を,軽量壁はガラス窓などを指す.

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.

壁については,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)中央にも同じように熱 点を設定する.つまり,重量壁は2個の壁面 $S \ge N_L$ 個の 壁層Lから構成され,壁層境界ごとに熱点を設定するので, $N_P = N_L + 1 \ge x a_3 - m_5$,軽量壁は2個の壁面 $\ge N_L$ 個の 壁層から構成される.軽量壁層は熱容量がなく,また壁層 間ごとに空気層 L_a が挟まれる.そして熱点は壁層中央に 設定するので, $N_P = N_L = N_{L_a} + 1 \ge x a_3$.

それぞれの熱点ごとの熱平衡を1次元熱伝導方程式で表し、それを連立させ解くことによって、各熱点の温度もしくは除去熱量を算出する.なお、紙面の制約上,室の熱平 衡式(熱伝導方程式)のみ、数式・図を用いて説明する. 2.2 数式に用いる記号

本研究ではオブジェクト指向プログラミング (OOP) 言語 によりシミュレーションモデルを記述する.それに伴い, 以下の理論説明で用いる数式も OOP 風の記述となってい る.数式中に含まれる記号を,あらかじめ説明する.

2.2.1 用い方

例えば, $C_p\Big|_{R[i]}$ 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. 2.2.2 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)

P[i] : i 番目の熱点

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

2.2.3 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.



$$L_c\Big|_{R[i]} = L_{c0}\Big|_{R[i]} + l_{cR}\Big|_{R[i]}\theta\Big|_{R[i]P}$$
(2.1)

2.3 熱平衡式

2.3.1 室

i 室(R[i])の熱平衡式(熱平衡は図2.1参照)は,以下の通りとなる. 左辺がストック,右辺がフローであり,左辺は熱容量×温度変化となっている.右辺は,それぞれ隣接壁からの熱伝達,隣接室との換気による熱交換,外気との換気による熱交換,室内発熱対流成分,除去熱量である.

$$\begin{pmatrix} C_{p} \Big|_{R[i]} + c_{a} \Big|_{R[i]} \rho_{a} \Big|_{R[i]} V \Big|_{R[i]} \end{pmatrix} \frac{d\theta \Big|_{R[i]P}}{dt} \\ = \sum_{j=0}^{N_{s}} \alpha_{c} \Big|_{R[i]S[j]} A \Big|_{R[i]S[j]W} \left(\theta \Big|_{R[i]S[j]P} - \theta \Big|_{R[i]P} \right) \\ + \sum_{\substack{j=0\\R[j]\neq R[i]}}^{N_{k}-1} c_{a} \Big|_{R[j]} \rho_{a} \Big|_{R[j]} Q_{R[j]\rightarrow R[i]} \left(\theta \Big|_{R[j]P} - \theta \Big|_{R[i]P} \right) \\ + c_{ao}\rho_{ao} Q_{o} \Big|_{R[i]} \left(\theta_{o} - \theta \Big|_{R[i]P} \right) + \left(L_{c0} \Big|_{R[i]} + l_{cR} \Big|_{R[i]} \theta \Big|_{R[i]P} \right) - H \Big|_{R[i]}$$
(2.2)

2.3.2 壁

式は省略するが,単位壁面あたり [W/m²] の熱平衡式で はなく,総熱量 [W] での熱平衡式を作成する(理由は後 述). どちらにせよ,すべて θ |_{P[i]} に関する式となる. 2.4 微分方程式の連立 以上の微分方程式を熱点ごとに作成し,連立させる.

3 連立熱平衡式の解法

3.1 行列式の作成

微分方程式である熱平衡式を後退差分化 ($\frac{d\theta}{dt} \rightarrow \frac{\theta^{K} - \theta^{K-1}}{\Delta t}$) し,未知数である θ^{K} について整理,そして全ての式を連立 させると,式 (3.1) が作成できる.なお,日射や時点 K-1の 温度など既知である数は全て定数項としてまとめて v_i で, θ^{K} の係数は全て m_{ij} で表現している.すなわち,M は定数 係数行列,V は定数項ベクトルである.

$$\left[M \right] \left\{ \left. \theta^{K} \right|_{P[i]} \right\} = \left\{ V \right\}$$
(3.1)

これを解くには, M の逆行列 M⁻¹ を求め,

$$\left[\left.\theta^{K}\right|_{P[i]}\right\} = \left[\left.M\right]^{-1}\left\{V\right\}$$
(3.2)

とすればよいが, *M* の次元数が大きい場合, *M*⁻¹ を求める にはかなりの計算量を要する.年間計算の場合には,この 逆行列演算が少なくとも 10,000回以上必要となる.

たとえば,図 3.1 のような簡単な建築モデルを考えて みる.室内相互換気は *R*[0] から *R*[1] の方向とし,各壁体 *W*[*i*] は *L*[0] ~ *L*[2] の 3 層の壁層から構成されるとする.

このような簡単な建築モデルでさえ熱点 P を設定する と,熱点数つまり M の次元数は 30 におよぶ(表 3.1 参照). 実際の建築図面を考えた際は, M の次元数はとても大きく なることが容易に想像できよう.

ここで,図 3.1 の場合の係数行列 M について,行列要素 を非ゼロ要素とゼロ要素とで書き分けてみると,図 3.2 の ようになる.



図 3.1 サンプル建築平面図

表 3.1 サンプル図面に含まれる熱点

構造体	熱点 <i>P</i>	熱点数
室 R[i]	R[i]P	$1 \times 2 = 2$
壁 W[i]	$W[i]P[0] \sim W[i]P[3]$	$4 \times 7 = 28$
計		30

3.2 提案する計算手法

まず, *M* や *V* を室に関する部分(0)と壁に関する部分 (1)に分離すると,式(3.3)となる(*M* は図 3.3と対応).

 $\begin{pmatrix} M_{00} & M_{01} \\ M_{10} & M_{11} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \boldsymbol{\theta}_0^K \\ \boldsymbol{\theta}_1^K \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{V}_0 \\ \boldsymbol{V}_1 \end{pmatrix}$ (3.3)



図 3.2 初期の行列



図 3.3 4 個の大規模疎行列

式 (3.3) を展開,整理すると,

$$\boldsymbol{\theta}_{0}^{K} = \left\{ M_{00} - \left(M_{01} M_{11}^{-1} \right) M_{10} \right\}^{-1} \left\{ \boldsymbol{V}_{0} - \left(M_{01} M_{11}^{-1} \right) \boldsymbol{V}_{1} \right\}$$
(3.4a)

$$\boldsymbol{\theta}_{1}^{K} = M_{11}^{-1} \left(-M_{10} \boldsymbol{\theta}_{0}^{K} + \boldsymbol{V}_{1} \right)$$
(3.4b)

となり, θ_0^K , θ_1^K の順に解が求められる.ここで, θ^K を求めるのに必要となる式 (3.4a) および式 (3.4b) に着目する.

スカイライン法 *M* を分割して生成された 4 つの小行 列 *M*₀₀, *M*₀₁, *M*₁₀, *M*₁₁ はいずれも大規模疎行列であり,特 に *M*₁₁ はスカイライン行列である(図 3.3 参照). 壁の熱 平衡式を総通過熱量 [W] で作成したので, *M*₁₁ は対称行列 となっている.

そこで, M_{11}^{-1} を求める演算で, LDL^{T} 分解をおこなう際,スカイライン法を適用できる.なお,室・壁を実際の隣接順に入力すれば, M_{11} のプロフィルは小さい.

行列構造の解析 これらの行列にはもう 1 つ特徴がある.いずれも非ゼロ要素の位置は変化しないということである.そのため,あらかじめ行列構造の解析をおこなっておけば,行列積や行列・ベクトル積の演算(つまり内積計算を必要とする演算)をおこなう際,非ゼロ要素のみ演算すればよいので高速化が望める.たとえば,図 3.1 の場合, $M_{10}\theta_0^K$ を求めるのに必要な演算量は,乗算 56 回 + 加算28 回ではなく,乗算8回 + 加算0回となる.

3.3 温度もしくは除去熱量の算出

実際には,温度が既知で除去熱量が未知,という状況も 存在する(空調スケジュール内で自然室温が設定範囲外).

温度を既知,除去熱量を未知に置換することによって, M, Vともにそれぞれ M_X, V_X に変化する. ここで, M_X の各小行列および V_X の小ベクトルに着目す ると,変化するのは, $M_{X00}, M_{X10}, V_{X0}, V_{X1}$ である.つまり M_{X11} はなおスカイライン行列である.また,変化する小行 列も非ゼロ要素の場所が固定的である点は同じであり,前 述したような解析の手法は有効である.

3.4 まとめ

以上の手順で演算をおこなうと,問題や行列ライプラリの設計にもよるが,宇田川の方法に比べ,少なくとも数倍の高速化がはかれる.住宅用標準問題[5]の場合,行列積 演算の高速化を簡易にとどめた場合*¹でも,5倍程度高速化された.

4 高反射高放射塗料もしくは低反射低放射性外 表面の評価

開発した多数室室温計算プログラムを用いて,高反射高 放射塗料を住宅の外壁に塗装したとき,あるいは低反射低 放射性外表面に切り替えたときの冷房需要の削減効果につ いて算定する.

4.1 各種建築外表面

高反射高放射塗料(計測実験) 高反射高放射塗料とは, 光を高反射,熱を高放射する塗料であり,ヒートアイラン ド対策・冷房需要削減を目的として,実用化されている.

現実の物性値を知るため,東京大学工学部4号館(東京 都文京区)の屋上にて,市販されている高反射高放射塗料 (塗料A)を塗装したベニヤ板(計測対象物)を長短波放射 計(栄弘精機製 MR-40)および熱電対を用いて計測した. 測定項目は以下の通り.

- 短波入射量,短波反射量,長波放射量
- 機器センサー部温度,計測対象物表面温度

短波入射量と短波反射量より,短波反射率を算出する.また,長波放射量・機器センサー部温度・計測対象物表面温度 および黒体放射の式より,長波放射率を算出する [1].

低反射低放射性の外表面 低反射低放射性を示す物体と しては,太陽熱集熱器などによく用いられている,いわゆる 選択反射吸収性の表面が挙げられる.本研究では,選択反 射吸収性の表面として代表的な物質である黒色クロムメッ キを,低反射低放射性の外表面として採り上げる.

物性値 高反射高放射塗料については実験値を用いる. 他の建築外表面に関しては文献を引用する.図4.1の通り. なお「標準建築外表面」とは,前出の教科書[6]を始め,熱 負荷計算の解説書において広くデフォルト値として採用さ れている値である.



図 4.1 日射吸収率・長波放射率の設定



図 4.2 住宅用標準問題(木造)平面図(左:1F/右:2F)

4.2 計算条件

以下のように条件を設定し,非定常熱負荷計算をおこ なって冷暖房需要を算出する.

4.2.1 建築条件・各種使用スケジュール

- 建築物に関しては,住宅用標準問題[5](木造)を対象
 とする.総2階の戸建住宅である(図4.2参照).
- ・ 在室スケジュールなどに関しても標準問題通り.空調
 設定範囲は 20-27[℃].
- 短波吸収率および長波放射率は、図 4.1 の通りに設定する.標準状態として「標準建築外表面」の値を用い、高反射高放射塗料もしくは低反射低放射性の外表面(黒 色クロムメッキ)を導入した場合とを比較する.
- 対象期間は 2001 年1月1日から12月31日まで(初期値を考慮し,計算は 2000 年12月1日から開始).

4.2.2 気象条件

- 拡張アメダス気象データ[7](以下, EA気象データ)の東京・標準年を用いる.
- 太陽位置は,山崎の計算式[8]を用いて求める.
- 全天日射量の直散分離は Erbs モデル [9] による.ま

^{*1} *C* = *AB* という行列積をおこなう際, *A* のみ構造解析をおこなった 場合.

図 4.3 除去熱量の削減効果

た,斜面合成は Perez モデル [10] による.

 地中温度は,林らの水分移動を無視した地中温度計算 モデルを使用.計算対象となる建築物から1[m]離れ た地点の温度を,建築物の存在にかかわらず温度が不 変と仮定し,その地点の温度を求め,計算に利用する. なお,本研究での地中温度の実際の計算には,EA気象 データに付属のプログラム GTWin を用いた.

4.3 計算結果

4.3.1 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 4.3のようになった.

高反射高放射塗料を住宅の全壁面に通年で導入 すると、冷房需要を 18.8%削減する (-1.98[GJ] 増減, 10.6[GJ]→8.59[GJ]) ことが分かった.反面,暖房需要は 10.2%増大する (1.34[GJ] 増減, 13.2[GJ]→14.5[GJ]).

一方,低反射低放射性外表面を通年で用いた場合は,冷房需要は11.9%増加し(1.26[GJ] 増減, 10.6[GJ]→11.8[GJ]),暖房需要は10.6%減少(-1.40[GJ] 増減, 13.2[GJ]→11.8[GJ])するという結果が得られた.

なお,導入面積あたりの削減量を,屋根面のみに導入した 場合(70.4[m²])と外壁面のみに導入した場合(201[m²]), 全壁面に導入した場合を比較すると,屋根面のみの場合は 他の場合に比べて,数%ほど削減量が大きくなった(高反 射高放射塗料の冷房需要および低反射低放射性外表面の暖 房需要).これより費用対効果を考えて限定的に対策を導 入する場合は,屋根面のみに導入するのが望ましいといえ る.ただし,高反射高放射塗料に関しては,屋根面のみに 導入すると,暖房需要の増大量も数%ほど他の場合より大 きくなってしまう(低反射低放射性外表面の場合の冷房需 要の増大量については,他の場合より却って小さい).

以下,全壁面に対して施した場合について評価する.

表 4.1 空調機器の単位需要あたり CO₂ 排出量

種別/空調方式	COP	燃料	CO ₂ 排出原単位	
	[-]		[kg-CO ₂ /MJ]	
ルームエアコン(冷房)	2.50	電力	0.040	
ルームエアコン(冷暖)	2.50	電力	0.040	
標準冷房機器	-	_	0.040	
			0.0.0	
ルームエアコン(冷暖)	2.50	電力	0.040	
ルームエアコン(冷暖) 温風ヒーター	2.50 1.00	電力 都市ガス	0.040 0.050	
ルームエアコン(冷暖) 温風ヒーター 温風ヒーター	2.50 1.00 1.00	電力 都市ガス LPG	0.040 0.050 0.070	
ルームエアコン(冷暖) 温風ヒーター 温風ヒーター 石油ストープ	2.50 1.00 1.00 1.00	電力 都市ガス LPG 灯油	0.040 0.050 0.070 0.070	

図 4.4 CO₂ 排出量の削減効果

4.3.2 CO₂ 排出量

省エネルギーや CO₂ 排出削減について評価するには,冷 暖房機器それぞれの COP の設定が必要となる.本研究で は,家庭における各種空調機器の普及状況[11]を考慮し, 各燃料の CO₂ 排出原単位より,標準空調機器の単位需要あ たりの CO₂ 排出量を表 4.1 のように設定する.

図 4.3 に表 4.1 の原単位を乗算し,住宅の空調起源 CO₂ 排出量を算出すると,図 4.4 のような結果が得られた.

CO₂ 排出量の観点で見ると,高反射高放射塗料を通年に わたって導入すると,年間で0.6%だけ CO₂ 排出量が増大 してしまい,CO₂ 排出削減方策とはならないことがわかっ た.一方,低反射低放射性外表面を導入すると,3.2%だけ CO₂ 排出量を削減できることが分かった.このことから 住宅は暖房需要の方が上回っており,暖房需要を削減する 対策ならば CO₂ 排出削減方策として利用できることが分 かる.

4.3.3 外表面の切り替え

図 4.3 から分かるように,冷房需要は夏期に,暖房需要 は冬期に集中するので,季節別に切り替えることができれ ば,高反射高放射塗料の導入は,CO2 排出削減方策になる と考えられる.外表面の切り替えは実現化されていない機 構だが,建築外表面に藤棚のような仕組みを作っておき, 季節が到来した時点で,藤棚に高反射高放射塗料を塗装し

図 4.5 断熱性と CO₂ 排出削減量の関係

たシートを被せれば切り替え可能であるので,技術的に不可能ではないと考えられる.

そこで,標準外表面の住宅に対して夏期だけ高反射高放 射塗料を導入するという方策を考えた.さらに,冬期・中 間期には低反射低放射性外表面,夏期には高反射高放射塗 料を導入という方策も評価した.結果は図 4.4 の通り.

結果より,単独では不利になる高反射高放射塗料も夏季に限定して導入すれば4.5%のCO₂排出削減が見込め,CO₂ 排出削減方策として有効であることがわかった.また,低 反射低放射性外表面の場合に,高反射高放射塗料を導入す ると,実に10.3%ものCO₂排出削減となった.

4.3.4 建築物の断熱性との関係

最後に,建築物の断熱性との関係を調べてみた.標準問 題は 50[mm] のグラスウール (24K) を用いて断熱をおこ なっているが,グラスウールの厚みを変化させて,外表面 対策(冬期・中間期が低反射低放射性外表面,夏期は高反 射高放射塗料)の効果を見た結果が,図4.5 である.低断 熱ほど効果的であり,高度に断熱対策が施された建築物に 対してはあまり有効ではないといえる.ただし,高断熱で も削減率はそれほど悪くないこともわかった.

5 おわりに

後退差分法による多数室室温計算手法を提案し,その手 法をもとに開発したプログラムを用いて高反射高放射塗料 もしくは低反射低放射性外表面による CO₂ 排出削減効果の 評価をおこなった.

住宅に関しては,高反射高放射塗料を導入すると,夏期 の冷房需要を削減できるものの,冬期の暖房需要を増大さ せてしまい,却って CO₂ 排出量を増加させてしまう.しか し,夏季に限定して高反射高放射塗料を用いれば,CO₂ 排 出削減方策として有効に機能することがわかった.また, 現在は未開発である低反射低放射性外表面を冬期・中間期 に用いることによって,10%を超える空調需要起源の CO₂ 排出量が削減できることも分かった.

これらの方策は,断熱材が入っていない建築物に関して は効果的な対策といえる.建築施工時にしか導入できない 断熱材に比べ,施工後も導入可能であるこれらの対策は, 既存の非断熱・低断熱住宅の CO₂ 排出削減方策として有効 であると考えられる.

参考文献

- [1] 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, 2002.
- [2] 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.
- [3] 宇田川光弘,木村建一.多数室室温変動の実用的計算手法と断熱雨戸の熱的効果の検討例.日本建築学会論文報告集, No. 265, pp. 125–132, 1978.
- [4] 石田建一,宇田川光弘. 換気および壁面相互ふく射を考慮した多数室室温・熱負荷計算法. 日本建築学会計画系論文報告集, No. 381, pp. 46–55, 1987.
- [5] 宇田川光弘.標準問題の提案(住宅用標準問題).日本 建築学会環境工学委員会熱分科会第15回熱シンポジ ウム, pp. 23–33, 1985.
- [6] 松尾陽, 横山浩一, 石野久禰, 川元昭吾. 空調設備の動 的熱負荷計算入門.(社)建築設備技術者協会, 第1版, 1980.
- [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] 山崎均. 日照環境のための基礎計算式. 日本建築学会 論文報告集, No. 288, pp. 139–147, Feb 1980.
- [9] D. G. Erbs, S. A. Klein, and J. A. Duffie. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-avarage global radiation. *Solar Energy*, No. 4, pp. 293–302, 1982.
- [10] 曽我和弘,赤坂裕,二宮秀與. 全天日射量から斜面日射 量を推定する各種モデルの比較. 日本建築学会計画系 論文集, No. 519, pp. 31–38, May 1999.
- [11] (財)日本エネルギー経済研究所(編). EDMC/エネ ルギー・経済統計要覧(1999年版).(財)省エネル ギーセンター,第1版,1999.