

# 建物省エネルギー化のための内装仕上げに関する研究 (その1)

——省エネルギー効果の定量的検討——

宮川 保之

## Studies of Finishing of Inside Wall Surfaces of Buildings for Energy Conservation (Part 1)

——Quantitative Studies on Effect of Energy Conservation——

Yasuyuki Miyakawa

### Abstract

In buildings with comparatively high ceiling such as factories, sports halls and various entrance halls, reductions in emissivities of inside wall surfaces will result in energy conservation by controlling mean radiant temperatures which affect comfortable conditions of the room to almost the same degree as room temperatures. In this report, the energy conservation effect of reduction of emissivity is studied numerically, and furthermore, the method of optimum design for emissivity of each inside wall surface is described.

### 概 要

工場、各種建物エントランスホール、体育館等、天井が比較的高く隙間風が多い建物では建物内装仕上材の放射率を小さくすることにより室温と同程度に快適環境に影響する平均ふく射温度をコントロールでき、建物断熱以上にかなりの省エネルギー化がはかれる。本報告は建物各部の内装仕上材の放射率の変化による省エネルギー効果を数値的に検討するとともに各部放射率の最適設計法について述べたものである。

### 1. はじめに

天井高が比較的高くまた隙間風の多い建物では断熱性を高めることも必要であるけれども空調の対象が人間であることを考慮すれば建物内装仕上材の放射率を小さくすることにより、暖房時には壁面冷ふく射の減少、建物内部発熱体からの熱ふく射の多重反射による利用等により平均ふく射温度 (MRT) を上げることができ室温が低くても同等の快適度が得られる。また冷房時においても外界の日射・外気温により加熱された壁体からの熱ふく射を減少させることができ、かなりの省エネルギー効果が期待できる。本報告ではまず形状複雑な内部発熱体から人体への多重反射を考慮した平均ふく射温度算定法を導くとともに、建物各部内装仕上材の放射率を小さくすることによる省エネルギー効果を数値的に検討する。さらに非線形最適化手法として有用な SUMT を用いた各部放射率、断熱厚、壁厚等の建築計画面上における室内構成部材の最適設計法について言及する。

### 2. 建物内部発熱体から人体への直接・間接ふく射を考慮した平均ふく射温度 (MRT) の計算法

いま人体を小球と考え  $m$  個に壁面分割された室内で壁面放射率  $\varepsilon$  が大きい場合は人体に対する MRT は近似的に次のように表わせる。

$$MRT = \frac{\sum_{k=1}^m \varepsilon_k \cdot P_{0k} \cdot \theta_k}{\sum_{k=1}^m \varepsilon_k \cdot P_{0k}} \quad \dots\dots\dots(1)$$

壁面と人体との直接・間接ふく射を考慮した MRT は射場本、持田氏により次のように定義されている<sup>3)</sup>。なお吸収係数  $B_{0k}$  を用いることにより壁面放射率  $\varepsilon$  の大小にかかわらず正確な MRT がもとまる。

$$MRT = \frac{\sum_{k=1}^m B_{0k} \cdot \theta_k}{\sum_{k=1}^m B_{0k}} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ところが内部発熱体から人体へのふく射熱が大きい場合はこの影響を無視できず、この分を考慮した MRT を以下の如く導く。いま例えば内部発熱体として照明白熱

灯が大空間に多数均等設置されている場合、照明器具の上向・下向ふく射分、対流分の比率を既知とするとこれらの比率と発熱体—各壁面形態係数を用いれば照明器具から出て各壁面に向かうふく射熱量  $RQ_1 \dots RQ_m$  は容易にもとまり最終的に第  $i$  面で吸収されるふく射熱量  $AQ_i$  は、Gebhart の吸収係数  $B_{ki}$  を用いて次のようになる。ここで  $m$  は室内壁面全分割数、 $\bar{\epsilon}$  は白熱灯スペクトルに対する放射吸収率を表わす。

$$AQ_i = \bar{\epsilon}_i \cdot RQ_i + \sum_{k=1}^m B_{ki}(1 - \bar{\epsilon}_k) \cdot RQ_k \dots\dots\dots(3)$$

照明器具は壁面同志のふく射を妨げないと仮定し壁面吸収係数  $B_{ik}$  をもとめたうえでさらに第  $i$  面と照明器具との等価吸収係数  $B_{il}$  を考えれば  $B_{il}$  はごく小さいので  $\sum B_{ik} + B_{il} = 1.0$  としてよいため次式が成り立つ。ただし(3)式よりもとめた発熱体から第  $i$  面への到達ふく射熱を以下では便宜的にすべて長波長ふく射におきかえる。

$$B_{il} = -AQ_i / \{\epsilon_i \cdot C_b \cdot RK_{il}(\theta_i - \theta_l) \cdot A_i\} \dots\dots\dots(4)$$

ここで  $\theta_l$  は照明器具等価温度である。 $B_{il}$  の相反則、 $B_{li}$  の総和則を用いれば次式が成り立つ。 $A_l$  としては照明器具下向投影面積としてよい。

$$\begin{aligned} & - \frac{\{\epsilon_i \cdot RQ_i + \sum_{k=1}^m B_{ki}(1 - \epsilon_k) \cdot RQ_k\}}{\epsilon_i \cdot A_l \cdot C_b \cdot RK_{il}(\theta_i - \theta_l)} + \dots \\ & \dots + \frac{- \{\epsilon_m \cdot RQ_m + \sum_{k=1}^m B_{km}(1 - \epsilon_k) \cdot RQ_k\}}{\epsilon_l \cdot A_l \cdot C_b \cdot RK_{ml}(\theta_m - \theta_l)} = 1.0 \end{aligned} \dots\dots\dots(5)$$

(5)式で  $RK_{il} \dots$  の初期値を仮定しはさみうち法で  $\theta_l$  を計算し反復収束計算を行えば  $\theta_l$  がもとまり(4)式から、 $B_{il} \dots$  がもとまる。ただし  $\theta_l^n = (\theta_l^{n-1} + \theta_l^{n-2})/2$  としなければ発散する。収束計算は数回程度で収束する。次に射場本、持田の人体の扱いにならない人体は壁面同志のふく射を妨げないとすれば、人体と照明器具との等価吸収係数  $B_{ol}$  は、

$$B_{ol} = \sum_{k=1}^m P_{ok}(1 - \epsilon_k) \cdot B_{kl} + P_{ol} \cdot \epsilon_l \dots\dots\dots(6)$$

ここで  $P_{ol} = P_{o1}(A_l/A_1)$

$P_{o1}$  は人体と天井面との形態係数、 $A_1$  は天井面積である。結局人体に対する MRT は、

$$\begin{aligned} MRT = & \left( \sum_{k=1}^m B_{ok} \cdot \theta_k + \frac{RK_{ol}}{RK_{oc}} \cdot B_{ol} \cdot \theta_l \right) / \left( \sum_{k=1}^m B_{ok} \right. \\ & \left. + \frac{RK_{ol}}{RK_{oc}} \cdot B_{ol} \right) \dots\dots\dots(7) \end{aligned}$$

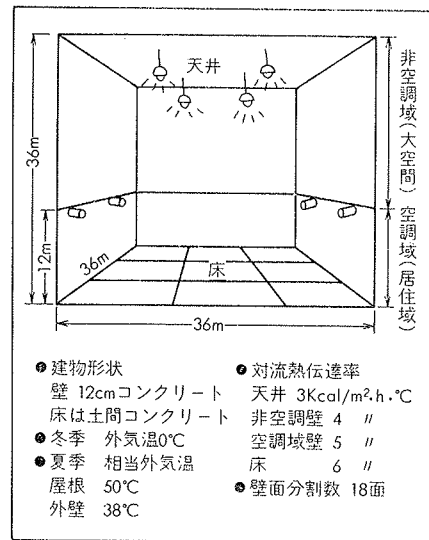
ただし  $RK_{ol}$  は人体と照明器具温度係数、 $RK_{oc}$  は人体と壁面平均温度係数を表わす。以上に述べた MRT 計算法は発熱体の形状が各壁面に比して小さく  $B_{il}$  もごく小さい事実に基づいているが発熱体が大きくなるに従いがい、壁面同志のふく射も妨げられるので発熱体各面も含めた

各部の熱平衡式が必要となり複雑になる。例えば図—1の大空間建築において天井面付近に64.8kWの照明発熱（上向ふく射20%，下向ふく射，対流それぞれ40%）がある場合、 $A_l/A_1$  のとり方による影響度を表—1に示す。表から明らかなように  $A_l/A_1$  のとり方をかえても MRT 増加分は同じになる。冬季、夏季において図—1の建物で天井付近に同様に64.8kWの照明発熱がある場合、照明器具—人体へのふく射を考慮しない場合と考慮した場合の床上1.5mでの小球に対する MRT 分布を比較して図—2，図—3に示す。

### 3. 壁面放射率の室内冷暖房負荷に与える影響

#### 3.1. 環境指標温度を設計条件とした熱負荷計算法

室内に居住する人間の温熱環境に影響を与える因子のうち気流速度、湿度等を適正にすれば熱負荷計算のための室内温熱環境設計指標として居住域室温と平均ふく射温の相加平均である環境指標温度  $\theta_d$ （作用温度 Opera-



図—1 モデル建物

	等価吸収係数 $B_{ol}$	等価照明器具温度 $\theta_l$	照明器具—人体へのふく射による室中央 MRT 増加分
$A_l/A_1 = 0.01$ とした場合	0.00083	226°C	0.39°C
$A_l/A_1 = 0.005$ "	0.00042	309°C	0.39°C

天井、壁の壁面放射率  $\epsilon = 0.9$  の場合

	等価吸収係数 $B_{ol}$	等価照明器具温度 $\theta_l$	照明器具—人体へのふく射による室中央 MRT 増加分
$A_l/A_1 = 0.01$ とした場合	0.00410	226°C	1.95°C
$A_l/A_1 = 0.005$ "	0.00206	309°C	1.94°C

天井、壁の壁面放射率  $\epsilon = 0.1$  の場合

表—1  $A_l/A_1$  のとり方を変えた場合の MRT 増加分の比較（夏季、照明発熱 64.8kW、図1の建物中央床上1.5mでの MRT、 $\epsilon_l = 1.0$ 、ただし照明発熱による壁面温上昇による MRT 増加分は除く）

tive Temperature, 合成温度 Dry Resultant Temperature とほぼ同義) を用いることができ, さらに進んだ環境設計となる。いま図-1の大空間建築において壁面①におけるn時の熱平衡式は

$$\begin{aligned} & \left( -\sum_{j=0}^{\infty} Y_j \cdot \theta_{a,n-j} + \sum_{j=0}^{\infty} Z_j \cdot \theta_{l,n-j} \right) + \alpha_{e1}(\theta_{l,n} - \theta_{u,n}) \\ & + \varepsilon_1 \cdot C_b \cdot \sum_{k=1}^m B_{1k} \cdot RK_{1k,n} (\theta_{l,n} - \theta_{k,n}) - AQ_{l,n}/A_1 = 0 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(8)$$

室内設計条件として  $\theta_d$  を定数とすれば

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \left\{ \left( \sum_{k=1}^m B_{0k} \cdot \theta_{k,n} + \frac{RK_{0l,n}}{RK_{0e,n}} \cdot B_{0l} \cdot \theta_l \right) / \left( \sum_{k=1}^m B_{0k} \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{RK_{0l,n}}{RK_{0e,n}} \cdot B_{0l} \right) + \theta_r \right\} = \theta_d \quad \dots\dots\dots(9) \end{aligned}$$

冷房時非空調大空間における熱平衡式は

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^l \alpha_{ck} \cdot A_k (\theta_{k,n} - \theta_{u,n}) + HQ_{u,n} - C_p \cdot \gamma \cdot V_u \cdot (d\theta_{u,n}/dt) \\ & - C_p \cdot \gamma \cdot V_u \cdot \bar{K} (\theta_{u,n} - \theta_r,n) = 0 \quad \dots\dots\dots(10) \end{aligned}$$

冷房時空調域除去熱量  $q_{r,n}$  は

$$\begin{aligned} q_{r,n} = & \sum_{k=l+1}^m \alpha_{ck} \cdot A_k \cdot (\theta_{k,n} - \theta_r,n) + HQ_{e,n} - C_p \cdot \gamma \cdot V_e \\ & \times (d\theta_{r,n}/dt) + C_p \cdot \gamma \cdot V_u \cdot \bar{K} (\theta_{u,n} - \theta_r,n) \quad \dots\dots\dots(11) \end{aligned}$$

暖房時では部分空調方式により上下室温分布を一定とすると室温の未知数は  $\theta_{r,n}$  のみとなり(10)式は消え, 空調域除去熱量  $q_{r,n}$  は

$$\begin{aligned} q_{r,n} = & \sum_{k=1}^m \alpha_{ck} \cdot A_k (\theta_{k,n} - \theta_r,n) + HQ_{u,n} + HQ_{e,n} \\ & - C_p \cdot \gamma \cdot (V_u + V_e) \cdot (d\theta_{r,n}/dt) \quad \dots\dots\dots(12) \end{aligned}$$

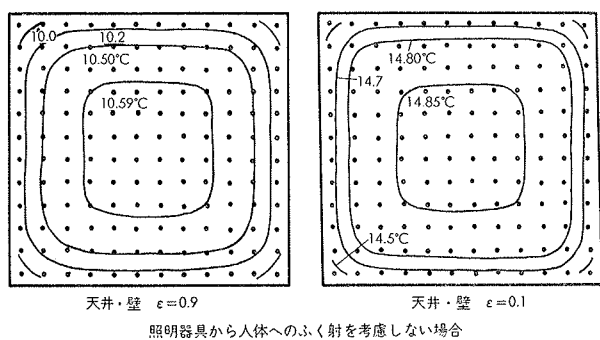


図-2 冬季暖房時における MRT 分布の比較

$B_{ki}, B_{ok}$ ; 壁面同志, 人体-壁面吸収係数
$B_{oe}$ ; 人体-内部発熱体吸収係数
$\theta_e, A_e$ ; 内部発熱体等価温度, 表面積
$RK_{ik}$ ; 壁面-壁面温度係数
$P_{ok}, P_{oe}$ ; 人体-壁面, 人体-内部発熱体形態係数
$\varepsilon_i, C_b$ ; 放射率, 放射常数
$AQ_i$ ; 内部発熱のうち最終的に第 i 面に吸収されるふく射量 (Kcal/h)
$q_{nu}$ ; 非空調域熱取得 (Kcal/h)
$HQ_u, HQ_e$ ; 非空調域, 空調域での内部発熱対流熱取得 (Kcal/h)
$\alpha_{ci}, A_i$ ; 対流熱伝達率, 壁面積
$Y_j, Z_j$ ; 室内側表面励振レスポンスファクター
$\theta_k, \theta_u, \theta_r$ ; 壁表面温, 非空調域室温, 空調域室温
$\theta_a, \theta_o$ ; 相当外気温, 吹出温
$C_p, \gamma, \bar{K}$ ; 空気の比熱, 比重, 仮想熱移動係数
$\theta_d, V_u$ ; 環境指標温, 非空調域体積
$m, l$ ; 室内壁面全分割数, 非空調域分割数

表-2 記号表

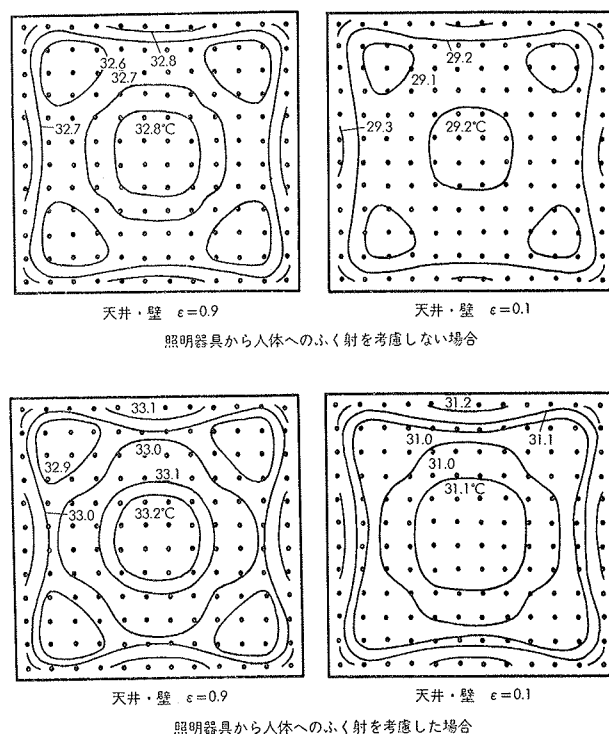


図-3 夏季冷房時における MRT 分布の比較

結局、冷房時では

$$[A] \cdot [X] = [B]$$

暖房時では

$$[A'] \cdot [X'] = [B'] \dots\dots(13)$$

$$[X] = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \vdots \\ \theta_m \\ \theta_u \\ \theta_r \end{bmatrix} \quad [X'] = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \vdots \\ \theta_m \\ \theta_r \end{bmatrix}$$

また(10)式の2層分割時仮想熱移動係数  $\bar{K}$  は

$$\bar{K} = 0.27 \left( \sum_{k=1}^l \alpha_{ck} \cdot A_k / V_u \right) \cdot (16.13e^{-0.1455x} + 6.8e^{-0.71x} + 33.0e^{-2.5x}) \dots\dots(14)$$

ただし  $X = (q_{r,n} / q_{nu,n}) \left( \frac{\theta_{u,n} - \theta_{0,n}}{\theta_{r,n} - \theta_{0,n}} \right)$

$$q_{nu,n} = \sum_{k=1}^l \alpha_{ck} \cdot A_k (\theta_{k,n} - \theta_{u,n}) + H Q_{u,n} - C_p \cdot \gamma \cdot V_u \cdot (d\theta_{u,n} / dt)$$

### 3.2. 壁面放射率の変化による建物省エネルギー効果

壁面放射率を表一3のごとく変化させた場合の省エネルギー効果、すなわち室内冷暖房負荷の変化を図一4、図一5に示す。想定建物は図一1に示す大空間建築であり、表一3に示すように廊下、ホール等の空調隣室がある場合とない場合の2つのケースを考えている。室内内部発熱は天井面付近に白熱灯照明194.4kW(コールドミラー型として上向ふく射、対流各々40%、下向ふく射20%)を想定している。冷暖房負荷の変化をみると、内部発熱が小さい場合(ない場合も含める)は夏冬を通して壁面放射率  $\epsilon$  が小さいほど省エネルギー的となる。内部発熱が大きい場合は冬では壁面放射率が小さくなるほどその省エネルギー効果は大きくなるが夏の場合はわずかではあるが逆効果となる。それ故、内部発熱が大きい場合は年間を通して最適な放射率の決定が必要となり次節のSUMTを用いることになる。一般的に通常の吹抜

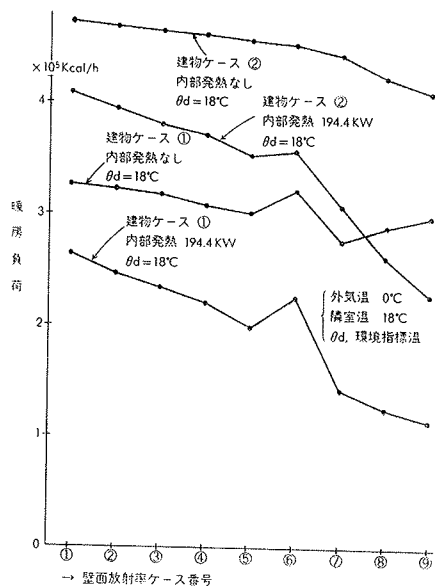
け空間の多い工場では夏は天井のルーフベンチレータによる排熱、冬はパネルヒータによるふく射暖房方式が多用され特に冬の効果的な暖房が重視されるが図一4に示すように暖房時では壁面放射率を小さくすることにより工作機械、照明発熱等のふく射熱を効果的に人間への暖房に利用でき相当の省エネルギー化が可能となり、放射率を小さくすることによる夏の多少の発熱体多重反射による逆効果は優に相殺できる。また天井高の高いエントランスホールのような隙間風、煙突効果が大きい場所でもその省エネルギー効果は顕著である。なお放射率の小さい内装仕上材としてはすでにモミ銀、模様入り銅箔等があるが今後、耐久性があり鏡面反射性が小さくデザイン上も優れた材料の開発が課題である。

### 4. 各壁面放射率の最適化計算

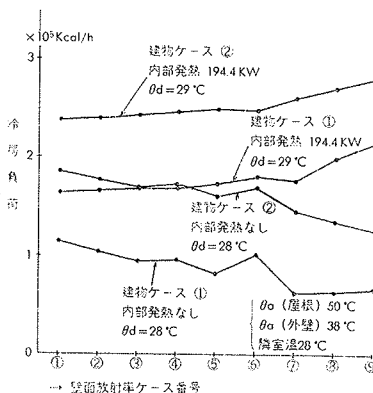
与えられた建物形状、気象条件、内部発熱量等の設計条件に対して最も省エネルギー化がはかれる室内壁面各部の放射率の組み合わせの検討が必要となる。さらには各部断熱材厚さとの組み合わせにおいても各々の最適値の予測が不可欠になる。これらの設計変数の最適値を誤りなく明快にもとめるため各種の数値計画法の適用が考えられるが、ここでは非線形最適化手法として有用なSUMT(Sequential Unconstrained Minimization Technique)を用いる。SUMTは次式で示すP関数の最小化を考えるものであり  $f(x)$ ,  $g(x)$ ,  $h(x)$  はそれぞれ目的関数、不等式制約式、等式制約式である。

$$P(x, r) = f(x) + r \cdot \sum_{i=m'} 1/g_i(x) + r^{-1/2} \cdot \sum_{k=n'} h_k^2(x)$$

ここで  $r$  は摂動パラメータであり、各々の  $r$  に対する



図一4 壁面放射率の変化によるピーク時暖房負荷の変化(冬季, 外気温 0°C)



図一5 壁面放射率の変化によるピーク時冷房負荷の変化(夏季,  $\theta_a$  は屋根面 50°C, 外壁面 38°C)

● 壁面放射率ケース	
①	壁面すべて $\epsilon = 0.9$
②	天井 $\epsilon = 0.4$ 他は $\epsilon = 0.9$
③	天井 $\epsilon = 0.1$ 他は $\epsilon = 0.9$
④	天井、非空調域壁 $\epsilon = 0.4$ 他は $\epsilon = 0.9$
⑤	天井 $\epsilon = 0.1$ 非空調域壁 $\epsilon = 0.4$ 他は $\epsilon = 0.9$
⑥	天井、すべての壁 $\epsilon = 0.4$ 、床 $\epsilon = 0.9$
⑦	天井、非空調壁 $\epsilon = 0.1$ 、他は $\epsilon = 0.9$
⑧	天井、非空調壁 $\epsilon = 0.1$ 空調壁 $\epsilon = 0.3$ 、床 $\epsilon = 0.9$
⑨	天井、すべての壁 $\epsilon = 0.1$ 、床 $\epsilon = 0.9$
● 建物ケース	
①	空調域壁が空調隣室に接している場合(空調隣室温、夏 28°C、冬 18°C)
②	外壁すべて外気に接している場合

表一3 壁面放射率、建物ケース

最適化計算は一種の共役勾配法であるDavidon-Fletcher-Powell法を用い、また一変数の最小化は黄金分割法による。SUMTでは最適化計算を段階ごとに進めるので収束に近づく過程が逐一、観察でき目的函数にそれほど影響を与えない挙動変数は一時固定し、あとで反復収束計算で修正できる利点があり、解析的に表わすと非常に複雑になる変数をうまく処理できる。不等式制約式は各変数の動く範囲であり等式制約式は各壁面温、室温等の挙動変数を規定する(9)式の熱平衡式群である。ところで等式制約式を含めた最適化計算は一般的に解きにくいので以下の如く処理して等式制約式を消す。まず設計変数が(9)式中の[B]のみに含まれる場合は[X]=[A]<sup>-1</sup>・[B]となり目的函数、不等式制約式中に代入して等式制約式を消し設計変数のみとする。また設計変数が[A],[B]両方に含まれる場合は(9)式を設計変数D<sub>i</sub>で偏微分して

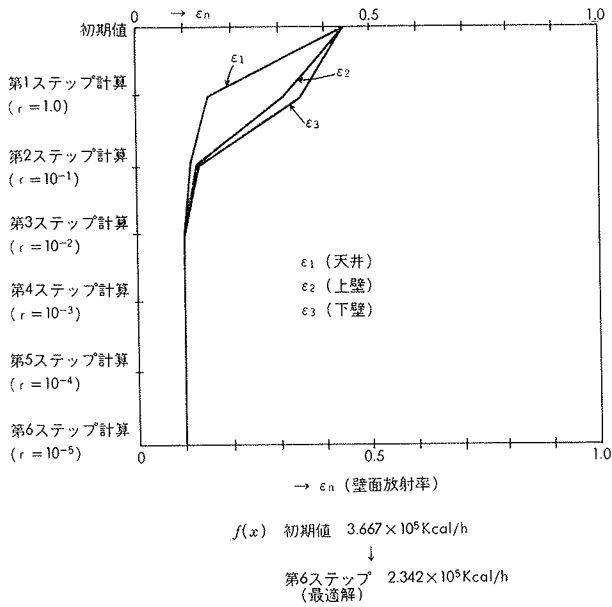


図-6 SUMTによる壁面放射率の最適化計算  
(冬季暖房時、照明発熱 194.4 kW,  $0.1 \leq \epsilon_n \leq 0.9$ )

$$\frac{\partial}{\partial D_i} [X] = [A]^{-1} \cdot \left\{ \frac{\partial}{\partial D_i} [B] - \frac{\partial}{\partial D_i} [A] \cdot [X] \right\} \dots\dots (15)$$

よって

$$\frac{\partial P}{\partial D_i} = \frac{\partial f(D_i)}{\partial D_i} + \left( \frac{\partial f(\theta_1)}{\partial D_i} + \dots \right) + r \left\{ \sum_{i=1}^n \left( 1 / \left| \frac{\partial g_i(D_i)}{\partial D_i} \right| \right) + \sum_{i=1}^n \left( 1 / \left( \frac{\partial g_i(\theta_1)}{\partial D_i} + \dots \right) \right) \right\} \dots\dots (16)$$

一変数の最小化のとき例えば  $\theta_m$  の項には

$$\frac{\partial \theta_m}{\partial D_i} \cdot \frac{\partial P}{\partial D_i} + \dots\dots + \frac{\partial \theta_m}{\partial D_n} \cdot \frac{\partial P}{\partial D_n} \text{ を代入する。}$$

計算例として図-1の建物で冬季暖房負荷を最小にする室内各部放射率  $\epsilon_n$  の最適値の計算結果を図-6に示す。一時固定変数は最適化計算を小幅に進める前提での壁面熱平衡式中の吸収係数  $B_{ik}$  であるが(9)式中の  $B_{ok}$  は影響が大きなので固定せず、

$$\frac{\partial}{\partial D_i} [\bar{X}_j] = [\bar{A}_j]^{-1} \cdot \left\{ \frac{\partial}{\partial D_i} [\bar{B}_j] - \frac{\partial}{\partial D_i} [\bar{A}_j] \cdot [\bar{X}_j] \right\}$$

ただし

$$[\bar{X}_j] = \begin{bmatrix} B_{0j} \\ B_{1j} \\ \vdots \\ B_{mj} \end{bmatrix} \dots\dots (17)$$

### 5. おわりに

高天井で隙間風の多い建物では壁面放射率のコントロールが建物断熱以上に建物省エネルギー化に大きく寄与することを述べたが今後は実際の建築物に適用できる耐久性のあるデザイン上も満足のいく放射率の小さい内装材の開発を研究課題としたい。なおSUMT計算プログラミングにあたり当研究所安楽職員より御教示を得た。謝意を表する次第である。

### 参考文献

- 1) 木村建一：建築設備基礎理論演習，学献社
- 2) J. コワリック他：非線形最適化問題，培風館
- 3) 射場本，持田：ふく射環境の評価法，空調学会秋季学術講演会論文集，(1974)