HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	平均ふく射温に及ぼす壁面ふく射率の影響
Author(s)	持田, 徹
Citation	北海道大學工學部研究報告, 113, 67-77
Issue Date	1983-02-28
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41785
Type	departmental bulletin paper
File Information	113_67-78.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学工学部研究報告
第113号（昭和58年）

Bulletin of the Faculty of Engineering,
Hokkaido University, No. 113 (1983)

平均ふく射温に及ぼす壁面ふく射率の影響

持田　徹

（昭和57年9月30日受理）

The Effect of Wall Emissivity on Mean Radiant Temperature

Tohru MOCHIDA

(Received September 30, 1982)

Abstract

Radiant temperature is a factor which governs the heat loss by radiation from the human body surface and the influence on man's thermal sensation can not be ignored. Although mean radiant temperatures weighted with wall area ratios or with angle factors have been used, these temperatures can not evaluate the effect of the surface emissivities of the surrounding walls.

The present author has derived and has proposed both a mean radiant temperature and a radiative heat transfer coefficient under a new concept by extending Gebhart' s absorption factor method on the radiation heat exchange and by applying it to the space between the human body and walls and by linearizing from raising the radiation to the fourth power. The characteristic feature of the new mean radiant temperature weighted with absorption factors is that considerations are made not only to the geometric position of the human body in a room but also for the emissivity of each wall surface. The comparison of the mean radiant temperature derived in the present study with the mean radiant terperatures used hitherto is made and the results are reported.

1．緒　　言

室気温が低い場合でも，周壁が暖まっていればあまり寒さを感じないし，逆に気温が高くても周囲の壁面温が低い時には寒く感じる。これらの現象は夏期のデパートでみられる花氷の前や、燃焼中のボイラと言った特殊例を待つまでもなく，例えば寒冷期のオフィスや学校の教室で外に面した窓近くに座っている人が感じる冷ふく射や，反対に盛夏の太陽によって熱せられた窓や壁からのいわゆる暖壁効果などは日常よく経験するところである。これらは人が自身よりも温度の低い物体に対しては正味のふく射熱を放散し，逆に自分より高温の物体からは差し引き熱を受け入れるという物理現象に起因している。以上のように，人の温熱感や快適感に対して熱ふく射は重要な意味を持ち，ふく射効果やふく射感についての実験的な研究報告も数多くなされている。

ふく射による熱伝達量は，物体表面における絶対温度の4乗の差により算定されるが，暖冷房計画では，人体のふく射相手であるふく射温として，各壁の表面温を何らかの方法で平均化した

衛生工学科　産業環境工学講座

温度が用いられている。この平均化には，従来，各壁面温をその面積比率や角関係によって重み付けするのが一般であったが，本論文では人体と周壁との間の absorption factor によって加重平均する新しい概念の平均ふく射温について論及する。

壁の面積比で加重平均するふく射温は，在室者が室内の何処に居ようと同じ値を示し，ふく射効果の度合を評価できないと言う欠点を有しており，他方，角関係加重の平均ふく射温は面積比平均の短所を取り除いてはいるが，両者とも壁面の大きさや人と壁面との位置関係のみで定まるふく射温である。これに対し，本論文で導く absorption factor加重の平均ふく射温は，在室者と周壁との幾何学的な位置関係は勿論，熱量平衡を考慮した結果として各壁面のふく射率をも含む平均化式であり，その誘導過程と特性および既存の平均化手法によるふく射温との比較検討した結果を報告する。

2．absorption factor（吸収係数）によって加重平均するふく射温

一般に物体は表面の絶対温度の 4 乗に相当するふく射エネルギを有し，そのふく射率に応じたふく射熱を周囲に放散する。閉じた空間内において，面と面との間でなされるふく射授受に関する表示法は，Eckert & Drake, Sparrow, Hottel, Gebhart などによってそれぞれに特徴的な形式が提案されてえる[1]。上記の中で，或る面から射出されたエネルギのうち他の面に吸収されるエネルギの割合を示す absorption factor（吸収係数）と言う新しい係数を導入した Gebhart[2] の方法は，各壁面間の直達ふく射とともに，間接の多重ふく射をも考慮した詳算法で，注目面でのふく射熱バランスから，系の熱平衡と各要素における吸収係数の算出を次の 2 式でまとめている。

$$Q_j = R_j S_j - \sum_{k=1}^{n} B_{kj} R_k S_k \qquad (1)$$

$$B_{kj} = \Phi_{kj} \varepsilon_j + \sum_{i=1}^{n} \Phi_{ki} \rho_i B_{ij} \qquad (2)$$

ただし，Q_j：j 面から失なわれる正味のふく射エネルギ〔Kcal／h〕

R_j ：j 面での単位面積・単位時間あたりのふく射エネルギ（$\equiv \varepsilon_j \sigma (273+T_j)^4$）〔Kcal／m²h〕

R_k ：k 面での単位面積・単位時間あたりのふく射エネルギ（$\equiv \varepsilon_k \sigma (273+T_k)^4$）〔Kcal／m²h〕

S_j ：j 面の表面積〔m²〕

S_k ：k 面の表面積〔m²〕

B_{kj} ：k 面と j 面との間の absorption factor（吸収係数）〔－〕

Φ_{ki} ：k 面と i 面との間の shape factor（形態係数）〔－〕

Φ_{kj} ：k 面と j 面との間の shape factor（形態係数）〔－〕

ε_j ：j 面のふく射率〔－〕

ε_k ：k 面のふく射率〔－〕

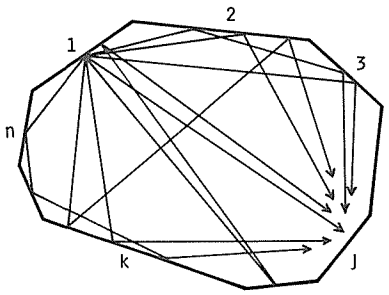
ρ_i ：i 面の反射率（$= 1 - \varepsilon_i$）〔－〕

σ ：Stefan-Boltzmann 定数（$=4.88\times10^{-8}$）〔Kcal／m²hK⁴〕

T_j ：j 面の表面温〔℃〕

T_k ：k 面の表面温〔℃〕

なお，absorption factor（吸収係数）は shape factor（形態係数）と類似した表－1 の特徴を有する。



図－1　多重ふく射
Fig. 1　Multiplex thermal radiation

表－1　absorption facter（吸収係数）と shape factor（形態係数）の類似性
Table 1　Similarity of absorption factor and shape factor

absorption factor（吸収係数）	shape factor（形態係数）
$\sum B_{ij}=1$	$\sum \Phi_{ij}=1$
$\varepsilon_i S_i B_{ij}=\varepsilon_j S_j B_{ji}$	$S_i \Phi_{ij}=S_j \Phi_{ji}$
$B_{ii} \neq 0$	$\Phi_{ii}=0$

Gebhart によって提案された吸収係数法は，室内などの壁面同志のふく射熱交換を主な対象としているが，筆者[3]は以前この手法を拡張して，人体と壁面との間にも応用しふく射の4乗則から線形化を試みた結果，全く新しい概念の平均ふく射温ならびにふく射熱伝達率が導かれたので，これらについて概説する。

閉じた空間内の任意の位置に微小要素化した人体を想定すれば，ふく射によって各面との間でなされる熱授受は，多重ふく射を考慮した式（1）を形式的に拡張適用して，次式で示される。

$$Q_r = R_s A_s - \sum_{i=1}^{n} b_{is} R_i S_i \qquad (3)$$

ただし，Q_r：ふく射によって人体から失なわれる正味のエネルギ〔Kcal／h〕

R_s　：人体表面からの単位面積・単位時間あたりのふく射エネルギ（$\equiv \varepsilon_s \sigma (273+T_s)^4$）〔Kcal／m²h〕

R_i　：i 面での単位面積・単位時間あたりのふく射エネルギ（$\equiv \varepsilon_i \sigma (273+T_i)^4$）〔Kcal／m²h〕

A_s　：人体の有効ふく射面積〔m²〕

S_i　：i 面の表面積〔m²〕

b_{is}　：i 面と人体との間の absorption factor（吸収係数）〔－〕

ε_s　：人体表面のふく射率〔－〕

ε_i　：i 面のふく射率〔－〕

T_s　：人体の表面温〔℃〕

T_i　：i 面の表面温〔℃〕

上式に，$R_s=\varepsilon_s\sigma(273+T_s)^4$, $R_i=\varepsilon_i\sigma(273+T_i)^4$ の関係および表－1に示した吸収係数の特性である，$\sum b_{si}=1$かつ$b_{si}\varepsilon_s A_s = b_{is}\varepsilon_i S_i$ を代入して展開すれば，結局，式(4)が得られる。

$$\begin{aligned}
Q_r &= \varepsilon_s\sigma(273+T_s)^4 A_s - \sum_{i=1}^{n} b_{is}\varepsilon_i\sigma(273+T_i)^4 S_i \\
&= \sum_{i=1}^{n} b_{si}\varepsilon_s\sigma(273+T_s)^4 A_s - \sum_{i=1}^{n} b_{is}\varepsilon_i\sigma(273+T_i)^4 S_i \\
&= \sum_{i=1}^{n} b_{si}\varepsilon_s\sigma(273+T_s)^4 A_s - \sum_{i=1}^{n} b_{si}\varepsilon_s\sigma(273+T_i)^4 A_s \\
&= \varepsilon_s\sigma k\left(\sum_{i=1}^{n} b_{si}T_s - \sum_{i=1}^{n} b_{si}T_i\right) A_s \\
&\equiv h_r(T_s - T_r) A_s
\end{aligned} \qquad (4)$$

ここに，$k \equiv [(273+T_s)^2+(273+T_i)^2][(273+T_s)+(273+T_i)]$ (5)

$$h_r \equiv \varepsilon_s \sigma k \quad (6)$$

$$T_r \equiv \sum_{i=1}^{n} b_{si}\, T_i \quad (7)$$

ただし，Q_r：ふく射熱伝達量〔Kcal／h〕

k ：ふく射に関する温度係数〔K^3〕

h_r ：ふく射熱伝達率〔Kcal／$m^2h^\circ C$〕

T_r ：平均ふく射温〔°C〕（この平均ふく射温を他と区別する為に，「環境ふく射温」と呼称する）

b_{si} ：人体と i 面との間の absorption factor（吸収係数）〔－〕

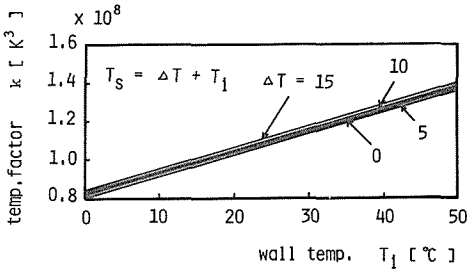
式（5）の温度係数 k は，図－2に示すようにその変化が緩やかであり室内環境のように温度範囲が限られる場合には，ほぼ一定値と扱うことができる。また，通常の室内における熱ふく射では長波長が主な領域となるので，一般の在室物体は灰色体と見做され，かつ皮膚や衣服の表面もその色には関係なく黒体に近いふく射率を有する。従って，日常の居住域を想定した温度範囲では，式（6）に示すように $\varepsilon_s\sigma k$ を一括して定数と扱うことが可能となるので，この h_r を新たにふく射熱伝達率と定義する。式（6）の形で定められたふく射熱伝達率の実数値としては，通常の状態では表－2に示すような，ほぼ $h_r = 4 \sim 5$ Kcal／$m^2h^\circ C$ 程度が算出される。しかし，温度範囲が上記と著しく異なる場合には，それに応じた値で修正して用いなければならない。なお，ふく射熱伝達率としては式（8）[4]，（9）[5]に示す形のものが一般に使われているが，この2式に共通した特徴は，自身の中に射出相手のふく射率 ε_i を含むことであり，これは直達ふく射のみに着目して導いたことに起因している。

$$h_r = \varepsilon_s \varepsilon_i \sigma k \quad (8)$$

$$h_r = 4\, \varepsilon_s \varepsilon_i \sigma T_m^3 \quad (9)$$

ただし，T_m：平均温度〔°C〕

新しく導かれた式（6）の形をとるふく射熱伝達率と在来の式（8），（9）とを比較すると人をとりまく各々の壁面が黒体に近くて同一，あるいはほぼ等しいふく射率を有している時には両者の差は殆ど無視できようが，ふく射率の大きく異なるいくつかの壁で作られている場合には式（8），（9）は ε_i に代えて，何らかの方法で平均化した別個のふく射率 $\bar{\varepsilon}_i$ を使用しなければならず，平均化の仕方によってはふく射計算に誤差を生む原因となる[6]。序ながら，人体に関するふく射熱



図－2 温度係数 k の変化
Fig. 2 Change of temperature factor k

表－2 日常の居住領域におけるふく射熱伝達率の値
Table 2 Values of radiative heat transfer coefficient h_r in the temperature range of every day life.

σ[Kcal/m²hK⁴]	4.88×10^{-8}					
ε_s[－]	0.9	0.9	0.9	0.95	0.95	0.95
k[K³]	$1.00^{\times10^8}$	1.05	1.10	1.00	1.05	1.10
h_r[Kcal/m²h°C]	4.39	4.61	4.83	4.64	4.87	5.10

伝達率として，式（8）又は式（9）にふく射熱伝達に拘る割合，すなわち全体表面積に対する実際にふく射熱交換に関与する体表面積の比率を乗じた形式[7]，あるいはふく射伝熱に拘る面積を乗ずる形式[8]も見られるが，本論文では有効ふく射面積A_sを切り離した形で取り扱うことにする。

一方，式（4）で導かれた$\Sigma b_{si}T_i$は，人をとりまく各面との間に吸収係数で重み付けする一種の平均ふく射温を示しており，後述のような各種の平均ふく射温との混同を避ける為，これを式（7）で表わして，環境ふく射温と呼ぶことにする。

3．平均ふく射温の種類とその特徴

本章では，今迄に提案されている各種の平均ふく射温を紹介し，その形式や特徴などについてふれる。

3－1　単純な算術平均

これは各壁面温の総和を壁数で除した単純平均式（10）で表わされるが，この形式によれば，人が室内の何処に居ようと常に同じ値をとることになり，暖・冷壁の影響を評価することができない。

$$T_r=\frac{\sum_{i=1}^{n}T_i}{n} \tag{10}$$

ただし，n　：壁面の数〔－〕

3－2　壁の面積比による加重平均

従来，平均ふく射温と言えばこの形式を指すごとく一般に用いられてきた平均化式で，各壁温とそれらの面積比率によって加重平均した次式で与えられる。

$$T_r=\frac{\sum S_i\,T_i}{\sum S_i} \tag{11}$$

しかし，この形式も前式（10）と同様，室内における人体の存在位置による差を表現できず，ふく射効果の分布を評価できない大きな欠点を有している。

3－3　角関係による加重平均

式（10）や（11）のように，場所の関数とならない平均ふく射温の短所を取り除く為に，壁面との間の角関係により加重平均する式（12）が考えられる。

$$T_r=\frac{\sum\varphi_i\,T_i}{\sum\varphi_i} \tag{12}$$

ただし，φ_i　：人体と壁面との間の角関係〔－〕

角関係の主体をどのようにとらえるか，すなわち実際の人体に関する角関係を用いるか，あるいは微小要素化して考えるか，さらに人体を抽象化して球と見做すか，あるいは円筒と考えるかによって，算出される値は多少異なるが，いずれにしても本式によればふく射効果の分布を評価することはできる。しかし，その由来から多重ふく射は考慮されていない。なお，射場本・西は他の定義式と区別する目的で，この平均化式を周囲ふく射温[9]と呼称している。また，上述の微小要素とは単なる点という意味ではなく，それ自体は大きさを持たないが，ふく射の方向性は考慮

することであり，換言すれば，照明工学で微小光源と受照面とが平行の場合と直角の場合とでは照度計算が異なるのと同じ考えである。さらに，人体を微小要素と扱うことは，壁と壁との間のふく射熱交換を妨げないものと取り扱う意味も含んでいる。

3－4 角関係とふく射率の積による加重平均

これは上記の周囲ふく射温（12）に壁面のふく射率 ε_i を乗じた形の式（13）あるいは式（14）で示され，ふく射効果の分布を測れる点は周囲ふく射温と同様であるが，導き出された理論的な背景が不明である。なお，壁面のふく射率が全て1の時には式（13）と式（12）は等しくなり，また，ふく射率が1でなくとも全て等しい場合には，式（14）と式（12）が一致する。

$$T_r = \frac{\sum \varepsilon_i \varphi_i T_i}{\sum \varphi_i} \tag{13}$$

$$T_r = \frac{\sum \varepsilon_i \varphi_i T_i}{\sum \varepsilon_i \varphi_i} \tag{14}$$

3－5 吸収係数による加重平均

人体と壁面との間の角関係は，幾何学的な形状や位置関係のみにより定まる量である。これに対し吸収係数には角関係とともに，直達および間接の多重ふく射による熱量平衡を考慮した結果として各壁面のふく射率が内蔵されており、吸収係数で重み付けする平均化式（7）は，ふく射効果の分布を評価できるのは勿論，壁面の特性をも測り知ることもできる。吸収係数の総和は1であるから，式（10）～(14）に準えれば，式（7）は式（15）で書き換えられる。なお，各面のふく射率にあまり違いの無い時には，角関係で加重平均する式(12)と吸収係数による加重式(15)とでは，大きな差が現われないが，壁のふく射率が極端に異なる場合には，式（12）ではもはや適切な対応が不可能であり，式（15）によらなければならない。ただし，式（15）では，角関係を求めた以後に吸収係数を算出しなければならず，この手順を踏むことが式（12）に比べ難点ではあるが，コンピュータを用いれば計算は容易に行なうことができる。

$$T_r = \frac{\sum b_i T_i}{\sum b_i} \tag{15}$$

ただし，b_i ：人体と壁面との間の absorption factor（吸収係数）〔－〕
式（7）の b_{si} を以後，b_i と略記する。

4．環境ふく射温の特性

室内における人体と壁との位置関係とともに，壁面のふく射率をも同時に配慮する環境ふく射温の特徴を，具体的な例によって考察し他の平均化式とも実数値の比較を行なう。

例1 図－3に示す16 m×8 m×4 mの直方体の部屋で，人体と6つの壁との間の吸収係数を求めると，評価体としての人体を床中心上1 mの位置における円筒要素と見做せば円筒要素に関する角関係[9]は表－3のように得られる。また，壁同志の形態係数[10]は表－4で与えられる。人体要素を第0番目の壁と見做し，各壁（要素も含めて）でのふく射エネルギの平衡を考えれば，人体を微小要素化したので壁面から人体を見込む角関係は，$\varphi_{10} = \varphi_{20} = \cdots\cdots = \varphi_{60} = 0$ となり，式（2）を援用して整理すると次式が得られる。ただし，壁面のふく射率は全て0.9と仮定する。

$$
\left.\begin{aligned}
&-b_i+\varphi_{01}\rho_1B_{1i}+\varphi_{02}\rho_2B_{2i}+\varphi_{03}\rho_3B_{3i}+\varphi_{04}\rho_4B_{4i}+\varphi_{05}\rho_5B_{5i}+\varphi_{06}\rho_6B_{6i}=-\varphi_{0i}\varepsilon_i\\
&\varphi_{10}\rho_0b_i-B_{1i}+\Phi_{12}\rho_2B_{2i}+\Phi_{13}\rho_3B_{3i}+\Phi_{14}\rho_4B_{4i}+\Phi_{15}\rho_5B_{5i}+\Phi_{16}\rho_6B_{6i}=-\Phi_{1i}\varepsilon_i\\
&\varphi_{20}\rho_0b_i+\Phi_{21}\rho_1B_{1i}-B_{2i}+\Phi_{23}\rho_3B_{3i}+\Phi_{24}\rho_4B_{4i}+\Phi_{25}\rho_5B_{5i}+\Phi_{26}\rho_6B_{6i}=-\Phi_{2i}\varepsilon_i\\
&\varphi_{30}\rho_0b_i+\Phi_{31}\rho_1B_{1i}+\Phi_{32}\rho_2B_{2i}-B_{3i}+\Phi_{34}\rho_4B_{4i}+\Phi_{35}\rho_5B_{5i}+\Phi_{36}\rho_6B_{6i}=-\Phi_{3i}\varepsilon_i\\
&\varphi_{40}\rho_0b_i+\Phi_{41}\rho_1B_{1i}+\Phi_{42}\rho_2B_{2i}+\Phi_{43}\rho_3B_{3i}-B_{4i}+\Phi_{45}\rho_5B_{5i}+\Phi_{46}\rho_6B_{6i}=-\Phi_{4i}\varepsilon_i\\
&\varphi_{50}\rho_0b_i+\Phi_{51}\rho_1B_{1i}+\Phi_{52}\rho_2B_{2i}+\Phi_{53}\rho_3B_{3i}+\Phi_{54}\rho_4B_{4i}-B_{5i}+\Phi_{56}\rho_6B_{6i}=-\Phi_{5i}\varepsilon_i\\
&\varphi_{60}\rho_0b_i+\Phi_{61}\rho_1B_{1i}+\Phi_{62}\rho_2B_{2i}+\Phi_{63}\rho_3B_{3i}+\Phi_{64}\rho_4B_{4i}+\Phi_{65}\rho_5B_{5i}-B_{6i}=-\Phi_{6i}\varepsilon_i
\end{aligned}\right\}\quad(16)
$$

ただし，b_i（$=b_{0i}$）：人体と壁面との間の absorption factor（吸収係数）〔−〕

B　：吸収係数（壁面と壁面）〔−〕

φ　：角関係（人体と壁面）〔−〕

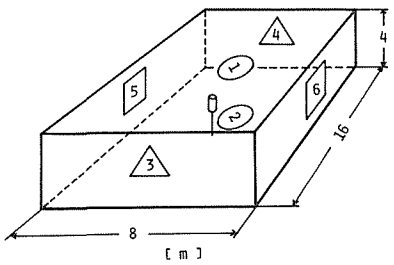
Φ　：形態係数（壁面と壁面）〔−〕

ε　：ふく射率〔−〕

ρ　：反射率（$=1-\varepsilon$）〔−〕

7元1次の連立方程式（16）に与えられた設定値を代入して解けば，表−3，表−4の吸収係数b_i，B_{ki}が算出される。

表−3および表−4の結果を見ると，角関係と吸収係数の値は微妙な差が現われているが，以下の例に示すように，各壁面のふく射率が異なる時には，両者の違いはさらに歴然としてくる。



図−3　モデル室
Fig. 3　Sketch of a model room

表−3　算出された人体と壁との間の角関係 φ_i（円筒要素）と吸収係数 b_i の値

Table 3　Calculated values of angle factors φ_i and absorption factors b_i between the human body and walls.

$\varphi_1=0.212$	$b_1=0.215$
$\varphi_2=0.388$	$b_2=0.381$
$\varphi_3=0.045$	$b_3=0.048$
$\varphi_4=0.045$	$b_4=0.048$
$\varphi_5=0.155$	$b_5=0.154$
$\varphi_6=0.155$	$b_6=0.154$

表−4　算出された壁との間の形態係数 Φ_{ki} と吸収係数B_{ki}の値

Table 4　Calculated values of shape factors Φ_{ki} and absorption factors B_{ki} between walls.

$\Phi_{11}=0$	$B_{11}=0.040$	$\Phi_{21}=0.500$	$B_{21}=0.468$	$\Phi_{31}=0.320$	$B_{31}=0.316$
$\Phi_{12}=0.500$	$B_{12}=0.468$	$\Phi_{22}=0$	$B_{22}=0.040$	$\Phi_{32}=0.320$	$B_{32}=0.316$
$\Phi_{13}=0.080$	$B_{13}=0.079$	$\Phi_{23}=0.080$	$B_{23}=0.079$	$\Phi_{33}=0$	$B_{33}=0.008$
$\Phi_{14}=0.080$	$B_{14}=0.079$	$\Phi_{24}=0.080$	$B_{24}=0.079$	$\Phi_{34}=0.040$	$B_{34}=0.044$
$\Phi_{15}=0.170$	$B_{15}=0.167$	$\Phi_{25}=0.170$	$B_{25}=0.167$	$\Phi_{35}=0.160$	$B_{35}=0.158$
$\Phi_{16}=0.170$	$B_{16}=0.167$	$\Phi_{26}=0.170$	$B_{26}=0.167$	$\Phi_{36}=0.160$	$B_{36}=0.158$
$\Phi_{41}=0.320$	$B_{41}=0.316$	$\Phi_{51}=0.340$	$B_{51}=0.334$	$\Phi_{61}=0.340$	$B_{61}=0.334$
$\Phi_{42}=0.320$	$B_{42}=0.316$	$\Phi_{52}=0.340$	$B_{52}=0.334$	$\Phi_{62}=0.340$	$B_{62}=0.334$
$\Phi_{43}=0.040$	$B_{43}=0.044$	$\Phi_{53}=0.080$	$B_{53}=0.079$	$\Phi_{63}=0.080$	$B_{63}=0.079$
$\Phi_{44}=0$	$B_{44}=0.008$	$\Phi_{54}=0.080$	$B_{54}=0.079$	$\Phi_{64}=0.080$	$B_{64}=0.079$
$\Phi_{45}=0.160$	$B_{45}=0.158$	$\Phi_{55}=0$	$B_{55}=0.016$	$\Phi_{65}=0.160$	$B_{65}=0.158$
$\Phi_{46}=0.160$	$B_{46}=0.158$	$\Phi_{56}=0.160$	$B_{56}=0.158$	$\Phi_{66}=0$	$B_{66}=0.016$

例2 例1と同じ部屋(壁面のふく射率は全て0.9)で，人の位置の違いによる吸収係数の変化を見ると，式(16)において角関係 φ_{0i} のみ値を変更して再度計算すればよいから，結局，表－5（人の位置は図－4，5，6を参照）が求まる。

表－5から，壁面 6 に近ずくと b_6 の値は大きくなり，離れるにつれて b_6 の値が小さくなる様子がわかる。なお，Ⓑ点とⒸ点は中心線に対して対象なので，Ⓑ点から面 6，5 をみるのと，Ⓒ点から面 5，6 をみるのとは，壁面のふく射率が全て0.9だから，吸収係数の値が当然等しくなっている。しかし，壁面のふく射率が異なると，人と壁との位置関係は同じでも，すなわち角関係が等しくても，もはや吸収係数の値は異なり，例えば $\varepsilon_1 \sim \varepsilon_5 = 0.9$ で ε_6 のみ0.5の場合，表－6に示すように対象の位置同志でも b_5，b_6 の値は異なってくる。

表－5 人体の存在位置の移動と吸収係数の変化（$\varepsilon_1 \sim \varepsilon_6 = 0.9$ の場合）

Table 5 Values of absorption factors at positions Ⓐ, Ⓑ and Ⓒ (in case of $\varepsilon_1 \sim \varepsilon_6 = 0.9$)

	Ⓐ 点	Ⓑ 点	Ⓒ 点
b_1	0.215	0.211	0.211
b_2	0.381	0.373	0.373
b_3	0.048	0.036	0.036
b_4	0.048	0.036	0.036
b_5	0.154	0.096	0.248
b_6	0.154	0.248	0.096

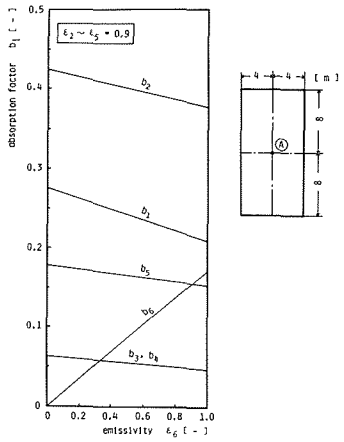
表－6 人体の存在位置の移動と吸収係数の変化（$\varepsilon_1 \sim \varepsilon_5 = 0.9$，$\varepsilon_6 = 0.5$ の場合）

Table 6 Values of absorption factors at positions Ⓐ, Ⓑ and Ⓒ (in case of $\varepsilon_1 \sim \varepsilon_5 = 0.9$ and $\varepsilon_6 = 0.5$)

	Ⓐ 点	Ⓑ 点	Ⓒ 点
b_1	0.243	0.249	0.226
b_2	0.399	0.410	0.386
b_3	0.054	0.044	0.039
b_4	0.054	0.044	0.039
b_5	0.165	0.115	0.254
b_6	0.085	0.138	0.056

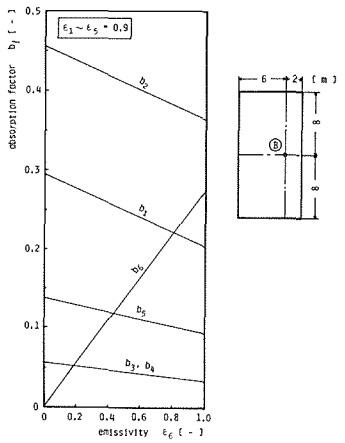
例3 例1，2と同室で，壁面 6 のふく射率 ε_6 を0から1まで変化させた場合の吸収係数は再び式（16）を解いて，図－4，5，6の結果が得られる。

これらの図から，壁面 6 のふく射率が大きくなるにつれて b_6 の値が増え，その影響で他の $b_1 \sim b_5$ が相対的に減少していくのが知れる。なお，ふく射率が0の時には，その壁



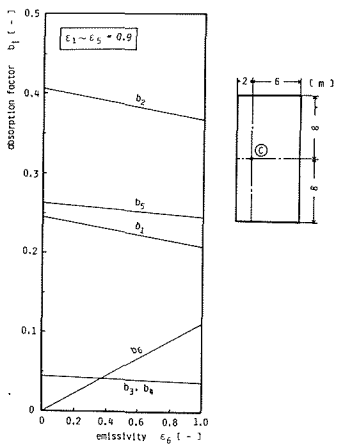
図－4 Ⓐ点における人体と壁との間の吸収係数

Fig. 4 Absorption factors $b_1 \sim b_6$ between the human body and walls at position Ⓐ



図－5 Ⓑ点における人体と壁との間の吸収係数

Fig. 5 Absorption factors $b_1 \sim b_6$ between the human body and walls at position Ⓑ



図－6 Ⓒ点における人体と壁との間の吸収係数

Fig. 6 Absorption factors $b_1 \sim b_6$ between the human body and walls at position Ⓒ

に関する吸収係数も0であり，壁面がいかなる温度を有していてもふく射熱は射出されず，例5で見るように，環境ふく射温に与える影響の大きいことがわかる。

例4　断熱性能があまり良くなく，かつ建物の角に図－3の室がある場合を想定し，床中心上1mにおける各種平均ふく射温の値を求めると，それぞれの定義に従って算出した値は表－7の結果となる。ただし，各壁面のふく射率は $\varepsilon_1 \sim \varepsilon_6 = 0.9$，室内側の壁面温は $T_1 = 30^\circ C$，$T_2 = 10^\circ C$，$T_3 = 25^\circ C$，$T_4 = 5^\circ C$，$T_5 = 20^\circ C$，$T_6 = 5^\circ C$ と仮定する。

表－7　各種平均ふく射温の比較
（$\varepsilon_1 \sim \varepsilon_6 = 0.9$ の場合）

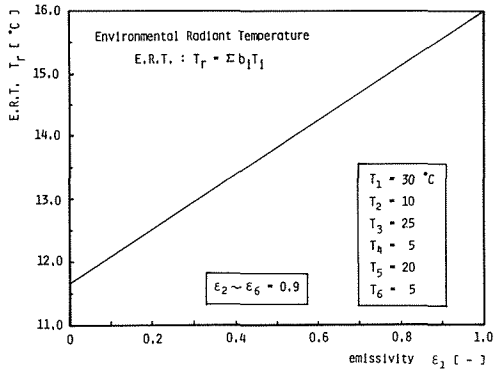
Table 7　Comporison of various kinds of mean rediant temperatures.

平均化の種類	定　　義	算出値[℃]
単純平均	$\frac{\sum_{i=1}^{n} T_i}{n}$	15.83
面積平均	$\frac{\sum S_i T_i}{\sum S_i}$	17.13
角関係	$\frac{\sum \varphi_i T_i}{\sum \varphi_i}$	15.46
ふく射率・角関係	$\frac{\sum \varepsilon_i \varphi_i T_i}{\sum \varphi_i}$	13.91
ふく射率・角関係	$\frac{\sum \varepsilon_i \varphi_i T_i}{\sum \varepsilon_i \varphi_i}$	15.46
吸収係数	$\frac{\sum b_i T_i}{\sum b_i}$	15.55

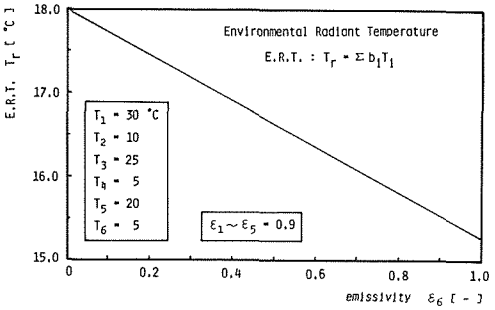
表－7の結果を比較すると，環境条件が同じであっても平均ふく射温の定義の違いにより実数値に差のあることが読み取れる。前述のように，単純平均と面積平均では，在室者の存在位置等関係なく表－7の値となるが，その他は人の居る場所によって角関係が異なるので算出される値は異なってくる。また，本例では偶々，単純平均と角関係や吸収係数による加重平均が比較的近い値を示し，面積平均は離れた値となっているが，状況によっては逆の場合や各々が全く異なった値を呈することもある。

例5　例4の室で，壁面 1 と壁面 6 のふく射率がそれぞれ変化した場合の影響を知る為に，式（7）＝式（15）の定義に従って，環境ふく射温を算出した結果は図－7および図－8となる。

壁面 1 のふく射率を変化させた場合，図－7で見るように $\varepsilon_1 = 0$ の時は壁面 1 が $T_1 = 30^\circ C$ と一番高い温度を有しているにもかかわらず，ふく射率が0の為にふく射が期待で



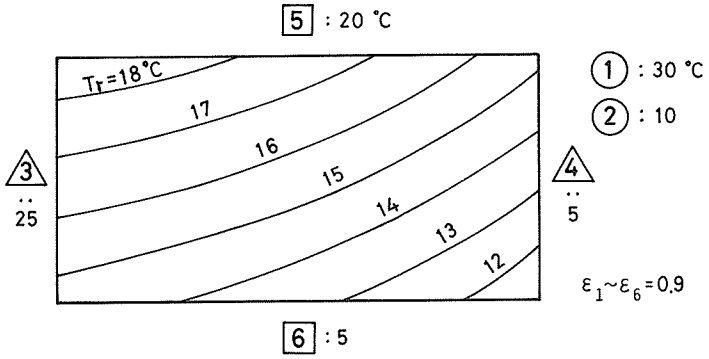
図－7　Ⓐ点における環境ふく射温の変化
Fig. 7　Relationship of E. R. T. at position Ⓐ to change of wall emissivity ε_1



図－8　Ⓐ点における環境ふく射温の変化
Fig. 8　Relationship of E. R. T. at position Ⓐ to change of wall emissivity ε_6

きないので，環境ふく射温T_rは11.7°Cに留る。しかし，ε_1が大きくなるにつれて，T_rも高くなり，$\varepsilon_1=1$の時には$T_r=16.0$°Cと最大値に達する。また，一番低い表面温を有する壁面[6]が与える影響は，図－7とは逆の傾向を示し，$\varepsilon_6=0$の時には冷たい壁面[6]の影響が無い為，$T_r=18.0$°Cと一番高いが，ε_6の値が大きくなるにつれて壁面[6]からの冷ふく射が参加することになって平均値は小さくなり，$\varepsilon_6=1$では最低温の$T_r=15.3$°Cを示す。このように，壁面のふく射率の値によっては平均ふく射温に与える影響を無視しえないことがわかる。

例6　例4と同じ室かつ同じ環境条件の時，室内における環境ふく射温の分布を求めると，計算の結果をまとめて図－9が得られる。
この図から，衣服や作業状態，あるいは気温や風速などの環境条件が同じであれば，一般に冷壁面④，[6]に近い人は，暖壁面③，[5]に近い人より寒く感じることになる。



図－9　環境ふく射温の分布
Fig. 9　Distribution of E. R. T.

5．結　言

環境における熱ふく射効果を評価する手立の一つとして平均ふく射温があるが，平均化の仕方の違いにより数種の形式が提案されている。筆者はふく射熱伝達の記述法のうち，直達ふく射と間接ふく射の，いわゆる多重ふく射を考慮したGebhartのabsorption factor（吸収係数）法に着目し，これを人体と壁面間に対して拡張適用したところ，全く新しい概念のふく射熱伝達率と平均ふく射温が導かれたので，その誘導と特性について論及した。本論文で導いた平均ふく射温を他の平均化手法との混同を避ける為，環境ふく射温と名付けたが，その形式は各壁面温を人体と壁面間のabsorption factor（吸収係数）によって加重平均するものである。また，環境ふく射温の質的な特色は，室内での居住者と壁面との位置関係は勿論、多重ふく射による熱バランスを考慮した結果として，周壁のふく射率の影響を評価できることであり、この点が従来の平均化式にない特徴である。環境ふく射温の特徴をさらにはっきりと見る為に，各種平均ふく射温の分析と比較を行なうとともに，モデル室を想定して実数値の検討を試みたところ，在室者の室内での位置や壁面の特性が平均ふく射温に及ぼす影響の大きいことがわかった。この結果は，無菌室など精密な空気調和を必要とする時や，大気圏外での宇宙船内の温度調節を行なう場合に有効な応用手段となることが予想される。

人体と壁面間の absorpion factor（吸収係数） b_i で重み付けする平均ふく射温：

環境ふく射温　$T_r = \sum_{i=1}^{n} b_i T_i$

ふく射率 ε_s，Stefan-Boltzmann 定数 σ，温度係数 k の積で表われるふく射熱伝達率：

ふく射熱伝達率　$h_r = \varepsilon_s \sigma h$

引 用 文 献

1）W. Ibele ： Modern Development in Heat Transfer, Academic Press, P. 181
2）B. Gebhart : A New Method for Calculating Radiant Exchanges, ASHRAE Trans.,Vol. 65, P. 321,1959
3）持田徹・射場本勘市郎：熱ふく射効果の評価法に関する研究 —— absorption factor 加重の平均ふく射温，空気調和・衛生工学会論文集，No2, P. 47, 1976
4）斉藤平蔵：建築気候，共立出版，P.15, 1973
5）木村建一：建築設備基礎理論演習，学献社，P. 47, 1971
6）持田徹：人体に関する対流およびふく射熱伝達率，日本建築学会論文報告集，第 258 号，P. 63, 1977
7）A. P. Gagge : Standard Operative Temperature, A Generalized Temperature Scale, Applicable to Direct and Partitional Calorimetry, American J. of Physiol., Vol. 131, P. 93, 1940
8）C. -E. A. Winslow, L. P. Herrington and A. P. Gagge : Physiological Reations of the Human Body to Varying Environmental Temperatures, American J. of Physiol., Vol. 120, No.1 P. 1, 1937
9）射場本勘市郎・西安信：体感温に及ぼす気湿の影響とその暖冷房への応用，空気調和・衛生工学，Vol.42, No. 3, p. 1, 1968
10）渡辺要：建築計画原論II，丸善，P.20, P21, 1972