

壁面放射率に注目した人体—壁間のふく射伝熱制御に関する基礎研究

熊野 智之 (神戸市立工業高等専門学校 機械工学科, tkumano@kobe-kosen.ac.jp)

若林 英信 (京都大学 大学院工学研究科, wakabayashi.hidenobu.8n@kyoto-u.ac.jp)

Fundamental study on control of radiative heat transfer between human body and surrounding walls based on wall surface emittance

Tomoyuki Kumano (Department of Mechanical Engineering, Kobe City College of Technology, Japan)

Hidenobu Wakabayashi (Graduate School of Engineering, Kyoto University, Japan)

要約

室内の快適性は、気温のみならず、湿度、気流、ふく射など様々な要因によって決まる。特に夏場や冬場においては、人体と壁とのふく射伝熱が快適性に大きく関与する。ふく射による放熱量を調整するふく射冷暖房と空調を上手く組み合わせることで、オフィスなどにおいて快適な室内環境が省エネルギーで実現できる可能性がある。本研究では、壁面のふく射特性に着目し、放射率の違いによるふく射冷暖房効果への影響を解明することを目的とする。まず、等温の壁で形成される閉空間内に人体が存在するモデルにおいて、ふく射伝熱量と壁の放射率との関係を理論的に検討した。その結果、ふく射伝熱量は、閉空間のサイズが小さくなるにつれて放射率に大きく依存することが明らかとなった。このことから、狭い個室やパーテーションで区切られた小スペース（タスクエリア）では、放射率の制御が有効であることが示された。次に、タスクエリアにおいて、壁がアルミニウム面と黒体塗料面の場合におけるふく射冷暖房効果の違いを模擬実験によって検証した。ここで、アルミニウム面の半球放射率はふく射流束計を用いて測定した。その結果、暖房時には壁の温度を高く／壁の放射率を小さくし、冷房時には低く／大きくすることで、冷暖房効果が向上することが示された。また、完全な閉空間でない場合や人体が完全に収まっていない場合にも、同様の効果が得られる可能性が示唆された。

キーワード

ふく射伝熱, ふく射冷暖房, 半球放射率, 擬似黒体, タスクエリア

1. はじめに

電力を安定的に供給するという観点から、需要が集中する夏場および冬場における節電・省エネルギーが社会的な課題となっている。これらの時期に電力需要が高まる主な原因として、エアコン (Air Conditioner) の使用が挙げられる。近年エアコンの省エネルギー性は高まっているものの、普及の拡大を背景に消費電力は増加傾向にある (経済産業省, 2015)。一方、体感温度は、気温のみならず、湿度、気流、ふく射など様々な要因に左右される。特に、熱容量の大きい壁や床、天井と人体とのふく射伝熱は、体感温度に大きな影響を及ぼす。これは、発汗のない静穏な室内環境において、人体からのふく射による放熱量が、対流による放熱量の倍程度であることから裏付けられる (加藤, 2011)。よって、人体と周囲の固体とのふく射伝熱を制御することで、エアコンよりも即効性 (応答性) に劣るものの、効率的で程よい冷暖房効果が実現できる。このようなふく射による冷暖房を、オフィスビルにおいてセントラル空調システムの補助として活用 (潜熱・顕熱分離空調) することで、空調負荷の低減による消費電力の削減が期待される (伊藤他, 2011, 和田・田辺, 2011)。

ふく射冷暖房 (放射空調と称されることもある) システムは、建築分野においてすでに活発に研究開発が行われており、特にこの10年ほどの間に、家庭やオフィス、商業施設などでの施工例や実証実験が多数報告されている (木村他, 2011)。オフィスにおいては、天井に敷き詰められた放射パネルの温

度を変化させることにより、人体とのふく射伝熱を制御する方法が一般的である。ここで、パネル温度は背面に設置された配管に流す水の温度によって調節され、冬場においても人体の表面温度 (約33℃) よりも低い。例えば、夏場は20℃、冬場は26℃の水を流すことが想定されている (氏原, 2011)。よって、人体から壁に向かうふく射伝熱を抑えることによって暖房効果を得るという点で、温水式床暖房や温水ラジエーターとは異なる。これまでの実施例においては、全てパラメータとしてパネル温度のみが扱われており、パネル材のふく射特性については注目されていなかった。

本研究では、パネル表面の放射率が冷暖房効果に及ぼす影響について明らかにし、ふく射冷暖房において最適なパネル温度と放射率の組み合わせを明らかにすることを目的とする。そこで、等温壁で形成された閉空間に、人体に見立てたより高温の発熱体が存在する伝熱モデルにおいて、壁面の放射率および温度とふく射伝熱量との関係を理論的および実験的に検証した。

2. 等温の閉空間における人体—壁間のふく射伝熱

2.1 人が存在しない場合 (熱平衡状態の系)

温度 T の不透明な壁で囲まれた閉空間におけるふく射を考える (図1)。壁面における外来照射および射度 (外来照射の反射と壁自身からの放射との和) をそれぞれ G, J [W/m^2] とする。系は熱平衡状態にあるため、壁面での正味のふく射流束 $G - J$ は0である。また、この時 G および J の値は黒体の全放射能 $E_b(T) = \sigma T^4$ [W/m^2] に等しい。これは、射度が一定となるように放射と反射がバランスすることを意味しており、壁面の放射率や材質とは無関係に成り立つ。つまり、この関係は (ガ

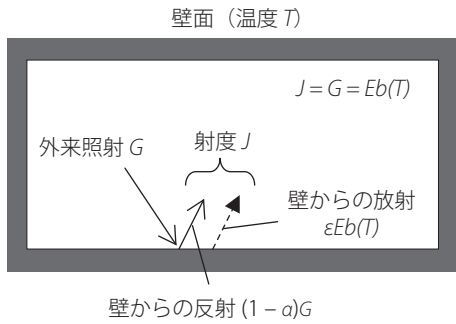


図1：等温壁で囲まれた閉空間内におけるふく射モデル

ラスなどの透過性物質を除く) 異種類の壁が混在する場合においても成り立つ。よって、等温の壁で囲まれた空間内は、壁面の放射率や材質に依らず、壁面温度に対応する黒体ふく射で満たされる。

2.2 人が存在する場合 (非熱平衡状態の系)

次に、温度 T_1 の壁に囲まれた閉空間内における、人体と壁とのふく射伝熱を考える (図2)。人体の表面温度 T_2 は T_1 よりも高い ($T_2 > T_1$) ものとし、人体と壁への伝導伝熱や人体と空気との対流伝熱、発汗 (人体からの水の蒸発) による放熱はないと仮定する。この時、壁面において $G - J > 0$ であり、系は非熱平衡状態にある。人から壁への正味ふく射伝熱量 (人体のふく射による正味放熱量) $Q_{2 \rightarrow 1}$ [W] は (1) 式で求められる (Incropera et al., 2007)。 ϵ_1 は半球放射率 (以後、放射率とはこの半球放射率を指す) である。ここで、壁の総面積 A_1 が人体の表面積 A_2 に対して十分大きい場合、 $A_2/A_1 = 0$ とおくことで (2) 式が得られる。よって、 $A_1 \gg A_2$ であれば $Q_{2 \rightarrow 1}$ は壁面の放射率 ϵ_1 には依存しない。また、(1) 式から、 $\epsilon_1 = 1$ とする (壁を黒体面とみなす) 場合には面積比に関係なく (2) 式が導かれる。つまり、 $Q_{2 \rightarrow 1}$ は、 $A_1 \gg A_2$ であれば ϵ_1 に、 $\epsilon_1 = 1$ であれば A_2/A_1 にそれぞれ無関係となる。

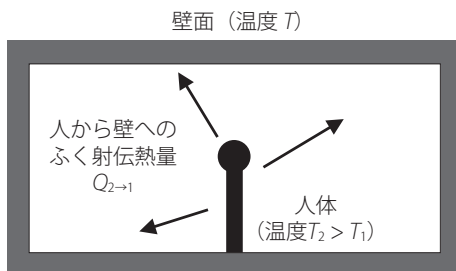


図2：等温壁で囲まれた閉空間内における人体-壁間のふく射伝熱モデル

$$Q_{2 \rightarrow 1} = \frac{\sigma(T_2^4 - T_1^4)A_2}{\left\{ \frac{1}{\epsilon_2} + \left(\frac{1}{\epsilon_1} - 1 \right) \frac{A_2}{A_1} \right\}} \quad (1)$$

$$Q_{2 \rightarrow 1} = \epsilon_2 \sigma(T_2^4 - T_1^4) A_2 \quad (2)$$

一般に、ふく射冷暖房における人体とパネルの温度差 $T_2 - T_1$ は 20°C 以下である。また、 $G - J = Q_{2 \rightarrow 1}/A_1$ であるから、 $A_1 \gg A_2$ であれば $G - J \approx 0$ となり、系全体では熱平衡に近い状態となることが分かる。つまり、閉空間が人体に対して十分大きい場合、人体の影響は小さく、空間内は等温壁間のふく射伝熱が支配的となる。

オフィスビルにおいては、日照の影響を著しく受けるペリメーターゾーンや、空調による鉛直方向の温度斑などがなければ、部屋の中は熱平衡に近い状態とみなせることが多い。さらに、実際にふく射冷暖房を利用する際は、常時あるいは部屋を使用する以前からパネル表面を予め所定の温度に保っておく必要がある。その場合、天井 (の一部) の放射パネルだけでなく、周囲の壁面も徐々にその温度に近づき、図1に示した等温の閉空間に近い状況が生じる。人体の大きさに対し十分広い ($A_1 \gg A_2$) オフィス空間 (アンビエントエリア) に放射パネルが設置された事例において、経験的に壁面のふく射特性が注目されていないのは、以上の理由によると考えられる。

2.3 壁面放射率がふく射伝熱に影響する閉空間のサイズ

具体的なケースにおいて、 ϵ_1 の違いが $Q_{2 \rightarrow 1}$ に有意に影響する閉空間のサイズについて明らかにする。人体については、表面温度 $T_2 = 33^\circ\text{C}$ 、表面の半球放射率 $\epsilon_2 = 0.97$ 、表面積 $A_2 = 1.2 [\text{m}^2]$ とする (牧野, 2009)。一方、閉空間については、高さを $2.7 [\text{m}]$ 、床を一辺の長さが $L [\text{m}]$ の正方形とする。図3に、閉空間サイズに対する $Q_{2 \rightarrow 1}$ の推移を示す。図の縦軸は (2) 式に対する (1) 式の値の比として表している。このため、(3) 式に示すように ($T_2 > T_1$ であれば) 図3の結果は壁の温度 T_1 には関係しない。図より、 L が $10 [\text{m}]$ 以上 (天井、床、壁の総面積が $300 [\text{m}^2]$ 以上) 程度の場合には、 ϵ_1 が変化しても、閉空間内のふく射伝熱量は殆ど変化しないことが分かる。一方 $L < 10 [\text{m}]$ の場合には、空間のサイズが小さくなるに連れ、 $Q_{2 \rightarrow 1}$ が ϵ_1 によって大きく変化することが分かる。このことから、例えば会議室などの比較的狭い部屋では、パネル放射率の制御によるふく射冷暖房効果の向上が見込めることが示された。

$$\frac{Q_{2 \rightarrow 1}}{Q_{2 \rightarrow 1} \Big|_{A_2 \gg A_1}} = \frac{1}{\epsilon_2 \left\{ \frac{1}{\epsilon_2} + \left(\frac{1}{\epsilon_1} - 1 \right) \frac{A_2}{A_1} \right\}} \quad (3)$$

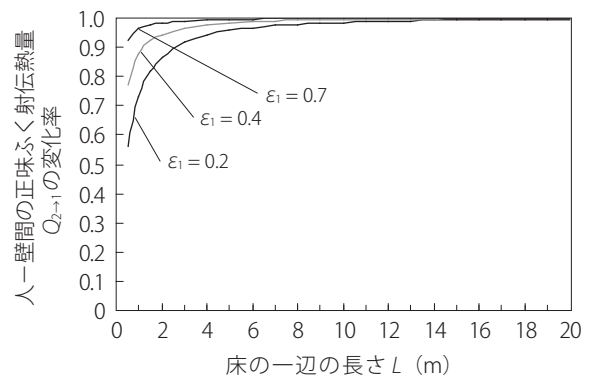


図3：人体のふく射放熱量と壁面放射率の関係

3. 全半球放射率の測定

壁面の放射率により人体のふく射放射熱量を制御する場合、物質の全半球放射率 ϵ を把握することが重要となる。そこで、若林・牧野(2011)の手法に基づき、パネル材料の一例としてアルミニウム材の全半球放射率を測定した。

図4に全半球放射率測定装置の概要を示す。ふく射流束計(Capteec社製RF-30)と試料とをABS樹脂製のスペーサーを介して1[mm]離して対面させ、ふく射流束 q [W/m²]を測定する。ふく射流束計は、ペルチェ素子を用いた電子冷却器を用いて背面より冷却し、表面温度を約10℃に保つ。ふく射流束計はふく射流束 q に比例した電圧 V (= aq)を出力する。 a は流束計個別の感度定数であり、銅板表面に黒体塗料(ジャパセンサ-社製JSC-3号： $\epsilon_b = 0.94$)を塗布した面を対象に(4)式を用いて予め求める。

$$a = \frac{V}{q} = \left(\frac{1}{\epsilon_b} + \frac{1}{\epsilon_b} - 1 \right) \frac{V}{\sigma(T_b^4 - T_s^4)} \quad (4)$$

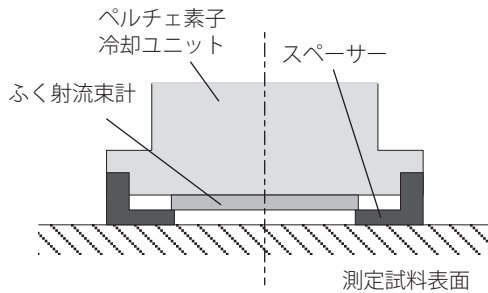


図4：全半球放射率測定装置の概要

ここで、 q には無限灰色平板間における式を用いた。また、 T_s および T_b はそれぞれ、ふく射流束計の温度(約10℃)および擬似黒体面の温度である。ふく射流束計の放射率 ϵ_s は若林・牧野の研究(2011)を参考に0.58とし、 T_b によって q を変化させた際の出力電圧 V との関係を図5に示す。近似直線の傾きから、用いたふく射流束計においては $a = 7.78 \times 10^{-6}$ [V/(W/m²)]であることが明らかになった。

図6に、全半球放射率測定におけるふく射伝熱モデルを示す。図6(a)において、各表面を灰色体面と仮定し、全半球

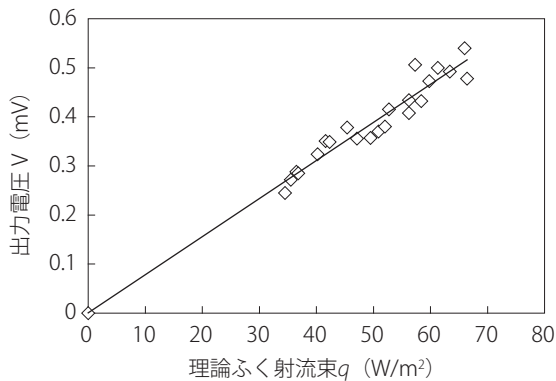
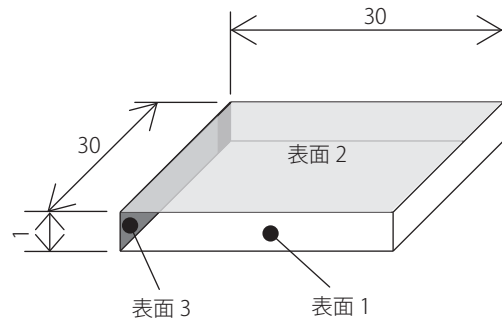
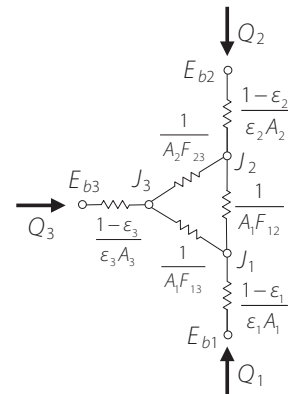


図5：使用したふく射流束計の出力特性

放射率は温度に依存しないものとする。図6(b)はこのモデルにおける等価電気回路図である。図中の記号における添え字は、各灰色体面(1：測定試料、2：ふく射流束計、3：スペーサー)を示す。 Q [W]は輸送されるふく射エネルギーであり、等価回路においては電流に相当する。 J 、 E_b はそれぞれ射度、黒体の全放射能であり、節点における電位に対応している。 $(1 - \epsilon_i) / \epsilon_i A_i$ 、 $1 / (A_i F_{ij})$ はそれぞれ表面抵抗、空間抵抗である。ここで、 F_{ij} は2面間における形態係数(面 i から放射されたふく射のうち面 j に到達する割合)である。この等価回路において、節点 J_1 、 J_2 、 J_3 を流れる電流 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 に対して(5-1)から(7-2)までの6つの式が成り立つ。ここで、電流の向きが図中の矢印と反対であれば、 Q の値は負になる。各面の表面温度 T_1 、 T_2 、 T_3 を測定する(T_2 は約10℃に固定)ことで、 $E_{b1}(T_1)$ 、 $E_{b2}(T_2)$ 、 $E_{b3}(T_3)$ は既知量となる。また、形態係数は各面の寸法と系の対称性から $F_{12} = F_{21} = 0.948$ 、 $F_{13} = F_{23} = 0.052$ 、 $F_{31} =$



(a) 灰色体間の伝熱モデル



(b) 等価回路

図6：全半球放射率測定装置におけるふく射伝熱モデル

$$Q_1 = \frac{E_{b1} - J_1}{\frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1 A_1}} \quad (5-1)$$

$$Q_1 = \frac{J_1 - J_2}{\frac{1}{A_1 F_{12}}} + \frac{J_1 - J_3}{\frac{1}{A_1 F_{13}}} \quad (5-2)$$

$$Q_2 = \frac{E_{b2} - J_2}{\frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2 A_2}} \quad (6-1)$$

$$Q_2 = \frac{J_2 - J_1}{\frac{1}{A_2 F_{21}}} + \frac{J_2 - J_3}{\frac{1}{A_2 F_{23}}} \quad (6-2)$$

$$Q_3 = \frac{E_{b3} - J_3}{\frac{1 - \epsilon_3}{\epsilon_3 A_3}} \quad (7-1)$$

$$Q_3 = \frac{J_3 - J_1}{\frac{1}{A_3 F_{31}}} + \frac{J_3 - J_2}{\frac{1}{A_3 F_{32}}} \quad (7-2)$$

$F_{32} = 0.389$ である。 Q_2 は、ふく射流束計の出力電圧から $Q_2 = A_2 q_2 = (A_2 / a) V$ として求められる。よって、 ε_2 、 ε_3 が既知であれば未知数は ε_1 、 Q_1 、 Q_3 、 J_1 、 J_2 、 J_3 の6つとなる。したがって、6つの式を連立して解くことにより ε_1 の値が算出できる。ここで、 ε_3 については、スパーサーと同じABS樹脂の板を試料として測定し、 $\varepsilon_1 = \varepsilon_3$ として未知数を1つ減らすことで予め求めておく。本研究では、10回の測定の平均値から、スパーサーの放射率 ε_3 を0.86とした。

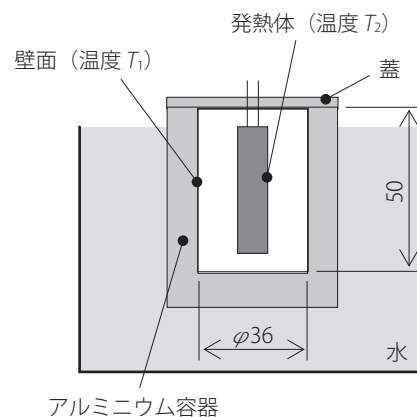
以上の方法で、黒体塗料面の全半球放射率が公称値通り0.94となることを確認し、約50℃のアルミニウム材（アルマイト処理なし）について測定を行った。一般に、金属材料は放射率が小さいため出力電圧のSN比が小さく、測定が難しい。このため、増幅回路により出力電圧を100倍に増幅した。10回の測定の平均値から、アルミニウムの全半球放射率は $\varepsilon_{al} = 0.18$ であることが明らかとなった。ただし、最大値/最小値がそれぞれ0.28 / 0.13であるなど不確かさが大きく、小数点第二位の値の信頼性が低いことから、アルミニウムの放射率は0.2とみなすものとする。

4. 狭い空間を対象としたふく射冷暖房の模擬実験

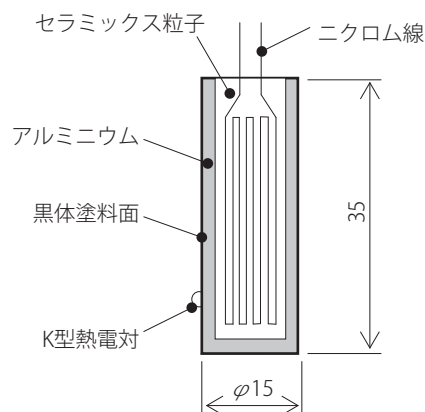
2.3において、閉空間サイズが小さいほどふく射冷暖房効果が壁面放射率に大きく依存することが示唆された。オフィスにおける最も小さな空間として、パーティションで囲まれたタスクエリア（机の周囲などのワークスペース）が考えられる。このエリアにおけるふく射冷暖房については、デスクパーティションに放射パネルを付設し、温度を制御する例が報告されている（伊藤他, 2011）。本研究では、パネル放射率の制御が有効なケースとしてタスクエリアに注目し、放射パネルをパーティションとして用いることを念頭に置く。そこで、タスクエリアを想定した閉空間において、ふく射冷暖房の2種類の模擬実験を行った。

4.1 閉空間における模擬実験

実験装置の概要を図7に示す。水に浸したアルミニウム容器の中に、人体に見立てた電気加熱式の発熱体を挿入する。発熱体表面と容器内壁の面積比は、ローパーティションにより囲まれる空間（1×1×1.2[m]）を想定して $A_2 / A_1 \approx 0.2$ とした。これは、図3において $L = 0.5$ [m]とした場合の面積比に相当する。容器の温度 T_1 は水温により調節し、発熱体の温度 T_2 は容器挿入前の時点で約37℃となるようにニクロム線（ $\phi 0.23$ [mm]、32 [Ω/m]）への印加電圧を調整した。容器は、内壁がアルミニウム面（ $\varepsilon_1 = 0.2$ ）と黒体塗料面（ $\varepsilon_1 = 0.94$ ）の2種類とした。また、人体表面は擬似黒体面であると仮定できるため、発熱体表面は黒体塗料面（ $\varepsilon_2 = 0.94$ ）とした。冷暖房効果は、発熱体が装置に挿入される前に置かれていた温度環境によって異なる。このため、挿入前の発熱体は、温度を調節した別の容器内で保管した。保管温度は、夏（冷房）および冬（暖房）を想定した実験時にはそれぞれ30℃、15℃とした。発熱体を実験装置内へ移した後、発熱体温度 T_2 の時間変化を定常状態（5分間での温度変化が0.2℃以下）になるまで測定した。温度の測定は、アルミニウム表面に押し当てたK型熱電対素線の溶接した測温接点を、アルミニウム箔で覆ってテ



(a) 実験装置全体図



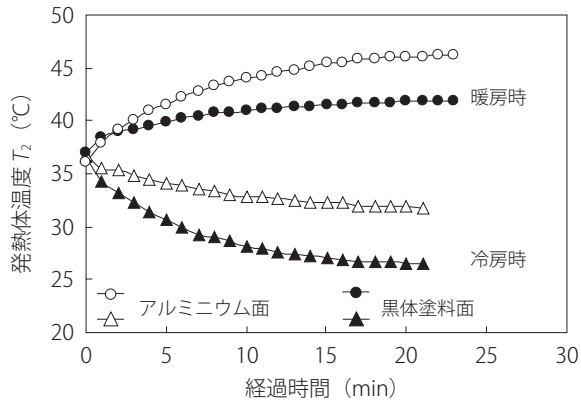
(b) 発熱体の構造

図7：ふく射冷暖房模擬実験装置の概要

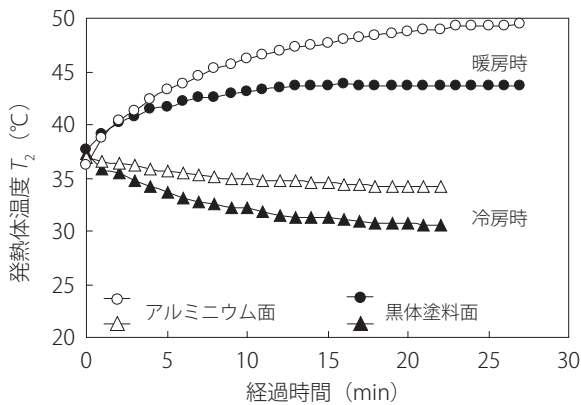
プで固定して行った。擬似黒体面の場合は、アルミニウム箔の上から黒体塗料を塗布した。

図8に、 T_1 が19℃および22℃の場合における、アルミニウム容器内に挿入した時点からの発熱体温度の時間変化を示す。○●は暖房時、△▲は冷房時であり、黒色/白色は容器内壁が黒体塗料面/アルミニウム面である場合を表す。 T_1 および冷暖房に関わらず、発熱体の到達温度はアルミニウム面の時に黒体塗料面の時よりも高くなっている。これは、発熱体から放射されるふく射が、放射率が0.2と小さい（全半球等強度入射・半球反射率が0.8程度と大きい）アルミニウム面ではより反射され、ふく射による正味の放熱量が抑制されるためである。また、図8 (a)と(b)の比較から、暖房時の到達温度は $T_1 = 22$ ℃の方が高く、冷房時の到達温度は $T_1 = 19$ ℃の方が低いことが分かる。よって、暖房時には T_1 を高くするとともに ε_1 を小さくし、冷房時には T_1 を低くするとともに ε_1 を大きくすることで、ふく射冷暖房効果を高められることが示された。

次に、(1)式より見積もった発熱体の放熱負荷（挿入直後の放熱量 Q_{rad} ）を表1に示す。 T_2 は37℃のままとみなすため、 T_1 が同じであれば、 Q_{rad} は冷房時と暖房時で等しい。一方、装置挿入前の放熱量は夏場：0.078 [W]、冬場：0.23 [W]である。よって、 $T_1 = 19$ ℃における挿入前後での放熱負荷の変化は、アルミニウム面では冷房時1.3倍/暖房時1/2.3倍、黒体塗料



(a) 壁面温度 $T_1 = 19(^{\circ}\text{C})$



(b) 壁面温度 $T_1 = 22(^{\circ}\text{C})$

図8：等温のアルミニウム面／黒体塗料面で形成される閉空間挿入後における発熱体の温度変化(閉空間の系)

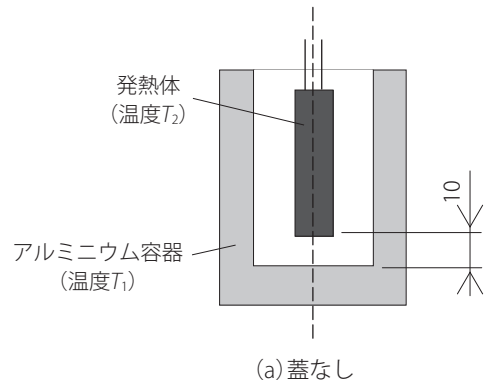
表1：放熱負荷の評価

T_1	挿入直後の発熱体放熱量 Q_{rad} [W]	
	アルミニウム面 ($\epsilon_1 = 0.2$)	黒体塗料面 ($\epsilon_1 = 0.94$)
19°C	0.10	0.19
22°C	0.09	0.16

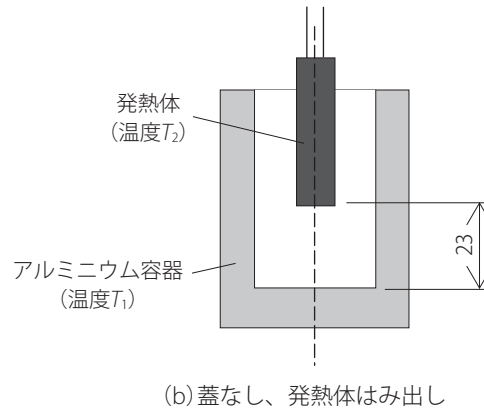
面では冷房時2.4倍／暖房時1/1.2倍と見積られる。また、 $T_1 = 22^{\circ}\text{C}$ の場合には、アルミニウム面では冷房時1.2倍／暖房時1/2.6倍、黒体塗料面では、冷房時2.1倍／暖房時1/1.4倍である。これらの値は挿入前の温度環境に依存するため一例にすぎない。しかし、冷房効果と暖房効果が同程度となるように T_1 および冷暖房時の ϵ_1 を決定することで、壁面温度の設定値を季節に依らず固定することが可能であることが分かる。

4.2 一部が解放された空間における模擬実験

パーテーションで仕切られたタスクエリアは、完全な閉空間ではない。そこで、アルミニウム容器における蓋を外し、一部が解放された状態を模擬した実験を行った。開放する閉空間の面積は全体の14%である。発熱体の位置は、図9(a) (b) に示すように、発熱体全体が容器内に収まっている場合(図7(a)において蓋を外したのみの場合)と、一部が容器外にある場合の2種類とした。図9(b)は、パーテーションで囲まれ



(a) 蓋なし



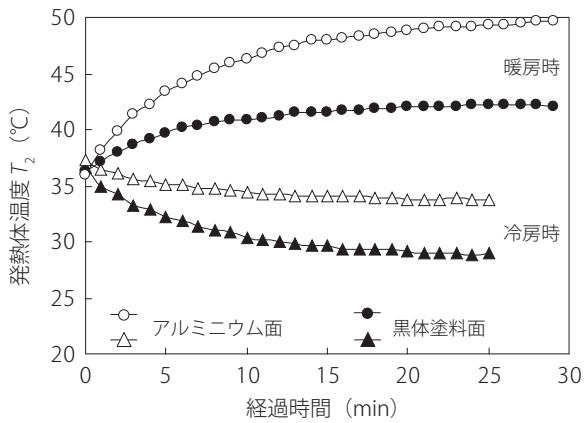
(b) 蓋なし、発熱体はみ出し

図9：一部が解放された系における発熱体の位置

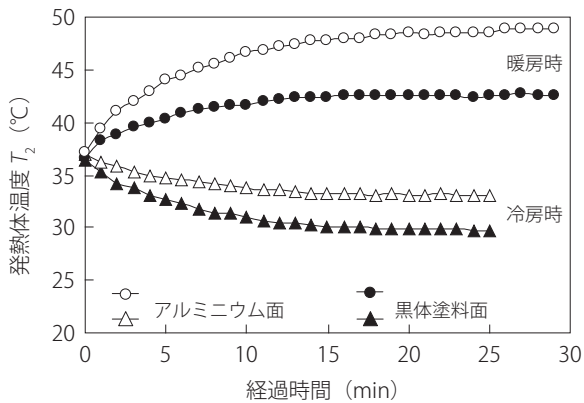
た仮想空間内に人体が完全には収まっていない場合を想定している。ここで、容器外にある発熱体の表面積は全体の28%である。図10に、 $T_1 = 22^{\circ}\text{C}$ の場合における結果を示す。図8(b)との比較から、図9(a) (b) いずれの場合においても、発熱体温度の推移に顕著な違いが現れていない。また、発熱体の温度はアルミニウムの熱伝導性から一様とみなされるため、本結果は熱電対の位置とは無関係であると考えられる。したがって、閉空間モデルにおける理論計算および模擬実験の結果は、条件によっては実際のタスクエリアにおいても適用可能であることが示された。

5. 応用への展望

オフィスにおいて、アンビエントエリアには微弱な空調を、タスクエリアには放射率を制御した効果的なふく射冷暖房を適用することで、全体として省エネルギーかつ快適性の高い環境が実現できる可能性がある。しかし、具体的な放射率の変更方法や、パーテーションや壁の露出面積が少ない場合の対処など、実用化に当たっては問題点も多い。また、人体の皮膚は擬似黒体面と仮定できるが、実際には衣服の影響を考慮する必要がある。一方、家庭においては、狭い個室で衣服の影響がないケースとして、浴室が挙げられる。近年では特に、ヒートショックが原因とされる高齢者の浴室での事故が問題となっている。温風による浴室暖房なども普及しているが、ヒートショック防止の観点からは、壁の温度および放射率をコントロールする方が直接的であるためより効果が高い。よって、本研究の結果は、浴室暖房にも応用できると考えられる。



(a) 壁面温度 $T_1 = 22$ (°C) (蓋なし)



(b) $T_1 = 22$ (°C) (蓋なし、発熱体はみ出し)

図10：等温のアルミニウム面／黒体塗料面で形成される閉空間挿入後における発熱体の温度変化(一部が解放された系)

6. まとめ

等温の壁で囲まれた狭い閉空間内においては、人体一壁間のふく射伝熱量が壁面の放射率によって制御できることが理論および実験の両面から明らかとなった。また、パーティションで区切られた小スペースにおいて、パーティションの温度と放射率の組み合わせを最適化することで効果的なふく射冷暖房が実現できる可能性が示された。

謝辞

実験装置の製作および実験に際して神戸高専専攻科生由良拓也氏、神戸高専機械工学科学生田邊貴裕氏、秋元雄太氏の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

引用文献

- Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L. and Lavine, A. S. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Sixth Edition. John Wiley & Sons.
- 伊藤剛・大澤明廣・間瀬亮平・中山和樹 (2011). 放射パネルを用いるタスク・アンビエント空調. 建築設備と配管工事, 652, Vol. 49, No. 2, 39-45, 日本工業出版.
- 加藤信介 (2011). 巻頭言：適用増える放射空調. 建築設備と

- 配管工事, 652, Vol. 49, No. 2, 1-7, 日本工業出版.
- 経済産業省 (2015). <http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2010html/>.
- 木村博則・関根能文・寺島聡 (2011). 天井放射空調システムの設計事例. 建築設備と配管工事, 652, Vol. 49, No. 2, 13-19, 日本工業出版.
- 牧野俊郎 (2009). 室温の測定・暑い／寒い・ふく射伝熱. 伝熱, Vol. 48, No. 205, 14-19.
- 氏原正志 (2011). 水冷媒放射空調システムと外気処理兼用調湿器及び事例. 建築設備と配管工事, 652, Vol. 49, No. 2, 64-71, 日本工業出版.
- 和田一樹・田辺新一 (2011). タスク・アンビエント対応の放射冷房システム. 建築設備と配管工事, 652, Vol. 49, No. 2, 27-32, 日本工業出版.
- 若林英信・牧野俊郎 (2011). 室温の表面の全半球放射率測定器の開発. *Thermal Science & Engineering*, Vol. 19, No. 1, 37-42.

(受稿：2015年8月5日 受理：2015年8月19日)