

# 放射モデルの精度評価および壁面放射率が居住者の熱的快適性に与える影響の解析

## Validation of Radiation Model and Model Analysis of the Effect of Wall Emissivity on Thermal Comfort of Occupants

○山尾 佳菜子 (大阪大学) 西本 啓祐 (大阪大学) 松尾 智仁 (大阪大学)  
相澤 直樹 (高砂熱学工業) 大迫 孝輔 (高砂熱学工業) 嶋寺 光 (大阪大学)  
近藤 明 (大阪大学)

Kanako YAMAOKA\*1 Keisuke NISHIMOTO\*1 Tomohito MATSUO\*1 Naoki AIZAWA\*2  
Kosuke OSAKA\*2 Hikari SHIMADERA\*1 Akira KONDO\*1  
\*1 Osaka University \*2 Takasago Thermal Engineering Co. Ltd.

Accurate estimates of mean radiant temperature (MRT), as well as air temperature, wind velocity and relative humidity, are essential for evaluating the thermal comfort in a room. However, the most of conventional methods to calculate MRT do not take into account detailed radiation processes such as the distribution of surface temperature and reflection. This study used a computational fluid dynamics (CFD) model incorporating a radiation model in order to simulate the thermal comfort in an experimental chamber under different wall emissivity conditions. The simulation results revealed that the change in emissivity has significant effects on the distribution of thermal comfort indices such as Predicted Mean Vote (PMV).

### 1. はじめに

室内の熱的快適性は、予想平均温冷感申告 (PMV) などの指標を用いて評価される。それらの指標は気温、相対湿度風速、放射温度 (MRT)、着衣量、代謝量の6要素によって決定される。室内の快適性の評価の際にはこれらのすべての要素を考慮して評価する必要がある<sup>1)</sup>。従来の多くの放射計算では放射率、反射率を厳密に考慮しておらず、壁面で生じる多重反射等が考慮できていない。そのため、放射空調使用時など、室内の壁面温度に大きな分布がある場合に、放射温度、ひいては室内の熱的快適性を正しく評価できていない可能性がある。

そこで本研究では、反射率を考慮する Gebhart の吸収係数放射モデル<sup>2)</sup>を用いたCFD解析と測定実験を比較することでモデルの精度評価を行うとともに、側壁面の放射率の変化が居住者の熱的快適性に与える影響の解析を行う。

### 2. 実験条件

測定実験に供した実験チャンバー寸法は2.0m×2.0m×2.0mであり、厚さ3.0cmの発泡スチロールで外側を覆うことで断熱した。実験チャンバーの概要をFig.1に示す。Fig.1における手前側の壁面は、実験室内への出入り口を設けるために熱電対を設置していない。天井中央には冷熱源として0.6m×0.6mの放射パネルを9枚

設置し18℃の冷水を供給し、床面中央には発熱源として同放射パネルを1枚設置し65℃の温水を供給した。対象領域の立面図、放射パネルの位置をFig.2からFig.4に示す。測定実験で使用した熱電対の設置個所をFig.5からFig.7に示す。実験では壁面温度、放射パネルに供給する冷媒温度、放射パネルの表面温度、室内気温を測定した。



Fig.1 Outline of experiment chamber

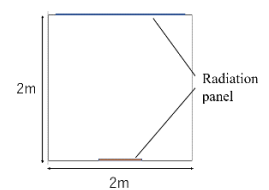


Fig.2 Elevation

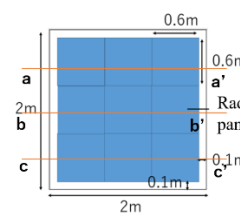


Fig.3 Ceiling plan

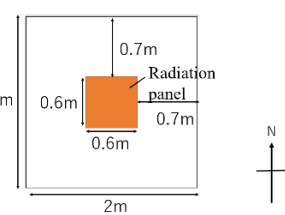


Fig.4 Floor plan

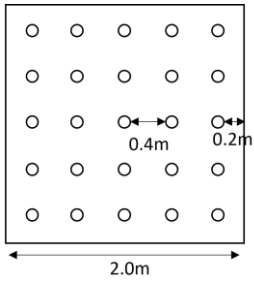


Fig.5 Location of thermocouple (wall, ceiling, floor)

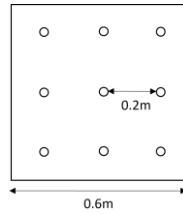


Fig.6 Location of thermocouple (radiation panel)

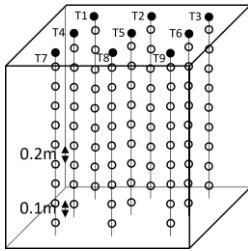


Fig.7 Location of thermocouple

本研究では放射パネルを除く壁面の放射率をすべて0.94とした吸収ケースと、吸収ケースから西側の側面のみを放射率0.08とした反射ケースの2種類の実験を行った。

### 3. 測定実験結果

吸収ケース、反射ケースの壁面温度分布、およびその差分を Fig.8 に示す。反射ケースの西壁では壁面温度分布が小さくなっている。これは、低放射率の壁面では熱源や冷熱源からの放射を反射する割合が大きいためと推測される。差を示したものでは、北壁、東壁では吸収ケースより反射ケースのほうが壁面温度が高くなっている。

次に、吸収ケースと反射ケースの気温分布、およびその差分を Fig.9 に示す。まず室内全体の平均気温について比較すると、吸収ケースは 26.3°C、反射ケースは 26.5°C となり、反射ケースにおいて平均気温が 0.2°C 高くなった。差分より、反射ケースのほうが、室内全体で気温が高くなっている。ある一壁面の放射率を低くした場合、その壁面における放射熱の反射成分が増加するため、気温が上昇し、壁面温度も同様に上昇したと考えられる。

次に、放射パネルの表面温度を Table.1 に示す。パネル温度の平均値は天井面、床面ともに反射ケースのほうが高くなった。室内平均気温の差は 0.3°C 程度だったが、天井面の放射パネルも同じような差となっている。床面の放射パネルの温度は反射ケースのほうが 1.0°C 高くなっている。床面の放射パネルは、気温や天井面の放射パネルと比べた時に著しく気温差があるため、床面からの熱供給は相対的に放射の寄与が大きくなるため、壁面放射率が低い場合、床面からの放射伝熱が減少し、床面パネルの温

度が上昇したと推測できる。よって、気温や壁面温度が上昇したと推測される。

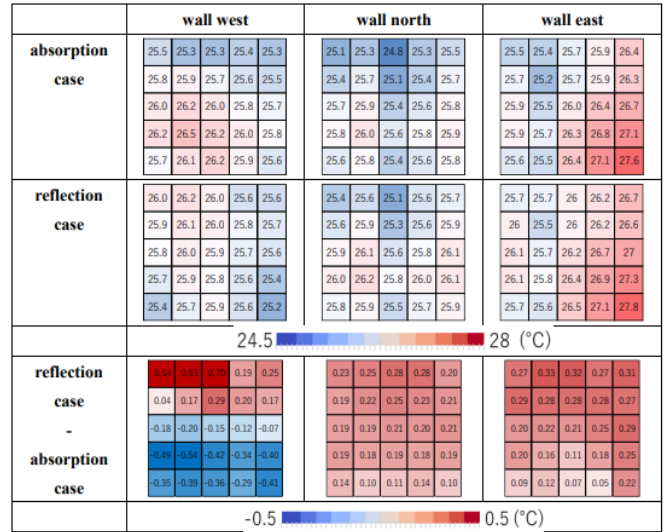


Fig.8 Wall temperature distribution

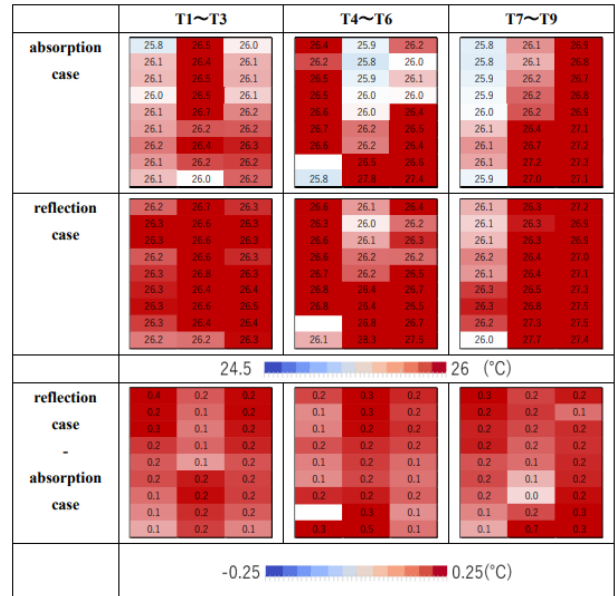


Fig.9 Spatial distribution of air temperature

Table.1 Radiated panel temperature

	Ceiling radiation panel	Floor radiation panel
absorption case	22.9°C	44.8°C
reflection case	23.2°C	45.8°C

### 4. CFD 計算条件

#### 4.1 放射モデル

本研究では、OpenFOAM-4.1 を利用し CFD シミュレーションを行った。OpenFOAM-4.1 には形態係数を用いた放射モデルが搭載されているが、このモデルでは、固体の吸収率や反射率を考慮できない。そこで本研究では、面の

幾何学的位置関係、放射率、吸収率、反射率、面での多重反射を考慮することのできる分配係数放射モデルを開発し、これを用いて計算を行った。

形態係数放射モデルは、放射伝熱する面の間の幾何学的位置関係を表す形態係数を求めることによって放射による熱輸送量を求める手法である。形態係数は式(1)によって定義され、ある面  $j$  から出射される全放射流束のうち、別の面  $i$  に到達する放射流束の割合を表す。また、放射によって生じる熱伝達は形態係数を用いて式(2)で求めた。式(1)、(2)での変数の定義を、Table.2 に示す。

$$F_{ji} = \frac{1}{A_j} \int_{A_j} \int_{A_i} \frac{\cos \theta_j \cos \theta_i}{\pi r^2} dA_i dA_j \quad (1)$$

$$Q_{ji} = \sigma \times A_j \times F_{ji} \times (T_j^4 - T_i^4) \quad (2)$$

Table.2 Definition of the variables in equation (1) and (2)

Variable	Definition	Unit
$F_{ji}$	View Factor	[-]
$A_i$	Area of surface $i$	[m <sup>2</sup> ]
$r$	Distance between surface $i$ and $j$	[m]
$\sigma$	Stefan-Boltzmann constant	[W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ]
$T$	Surface temperature	[K]
$Q$	Heat transfer	[W]

分配係数放射モデルでは、形態係数を用いて分配係数を算出しており、放射、吸収、反射を考慮に入れて計算することができる。放射率が既知であり、かつ波長による変動がないと仮定し、式(3)、(4)に示す関係式から吸収率、反射率を算出した。式(5)は面  $i$  から出射される放射熱流束を表している。式(6)は面  $i$  に入射する放射熱流束を表している。式(7)に示すように面  $i$  が受ける正味放射熱流束は式(5)と式(6)の差で表される。式(6)で使用した  $D_{ij}$  が分配係数行列であり、式(8)はその定義式を表している。この式は循環方程式であるため、分配係数行列を求めるには繰り返し計算を行うことが必要である。各式の変数の定義を Table.3 に示す。

$$\varepsilon = \alpha \quad (3)$$

$$\alpha + \rho = 1 \quad (4)$$

$$Q_{Ei} = \varepsilon_i \sigma T_i^4 \quad (5)$$

$$Q_{Ii} = \sum_j \left( \frac{A_i}{A_j} D_{ji} Q_{Ej} \right) \quad (6)$$

$$Q_{Ni} = Q_{Ii} - Q_{Ei} \quad (7)$$

$$D_{ji} = \alpha_j F_{ij} + \sum_{k=1}^N D_{kj} \rho_k F_{ik} \quad (8)$$

Table.3 Definition of the variable in equation (3)~(8)

Variable	Definition	Unit
$\varepsilon$	Emissivity	[-]
$\alpha$	Absorptivity	[-]
$\rho$	Reflectivity	[-]
$Q_{Ei}$	Radiative heat flux emitted from surface $i$	[W/m <sup>2</sup> ]
$Q_{Ii}$	Incident radiative heat flux to surface $i$	[W/m <sup>2</sup> ]
$Q_{Ni}$	Net incident radiative heat flux to surface $i$	[W/m <sup>2</sup> ]
$D$	Distribution factor matrix	[-]

#### 4.2 計算条件

本研究の CFD シミュレーションには OpenFOAM ver-4.1 を用い、放射計算には Gebhart の吸収係数放射モデルを用いた。対象領域や放射パネルの位置は測定実験と同様の条件とした。

また、測定実験と同様、吸収ケースと反射ケースを設定した。壁面の室外温度は測定値 (24.7°C) で固定し、壁体内の熱伝導及び室内側表面の熱伝達はシミュレーションで求めた。天井/床面パネル温度には測定実験で得た値を用いた。CFD シミュレーションで風速、温度、MRT を求め、湿度 50%、着衣量 0.6clo、代謝量 1.0met を仮定して PMV を算出した。

#### 5. 結果と考察

吸収ケースと反射ケースの壁面温度分布、正味の放射熱流束とその差分を Fig.10、Fig.11 に示す。低放射率の壁面で温度分布が小さくなっており、他の面では正の値を示しているなど、測定実験と同様な傾向をとらせることができた。低放射率の壁面では熱の出入りが緩やかであり、放射伝熱が少ない。

吸収ケースと反射ケースの気温分布、MRT 分布、PMV 分布、および両ケースの差分を Fig.12、Fig.13、Fig.14 に示す。気温分布は、CFD シミュレーションでは温度差が ±0.25°C 程度しか生じなかった。MRT 分布の差分は正の値を示している箇所がみられ、反射ケースのほうが MRT が高い。また、低放射率であった西側のほうが差は大きいため、壁面放射率が変化すると MRT 分布も変化することが確認できた。本研究では領域内で気流が小さく、また気流・気温に顕著な分布が無いため、PMV は主に MRT 分布の影響を受けており、PMV も MRT 同様に反射ケースのほうが高い値となった。PMV は ±0.05 程度の変化がみ

られた。

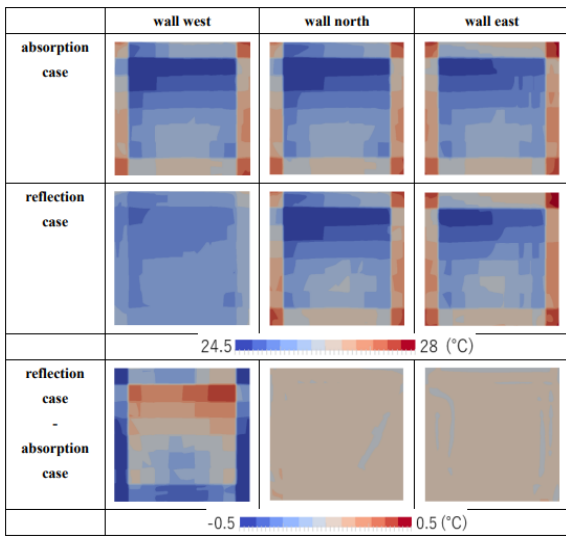


Fig.10 Wall temperature distribution

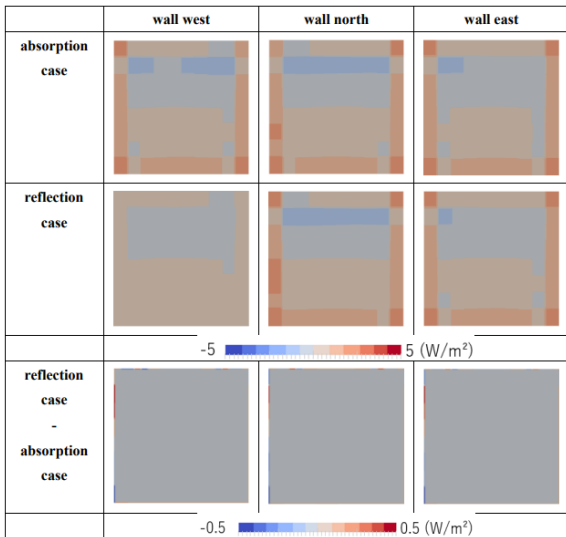


Fig.11 Radiant heat flux distribution

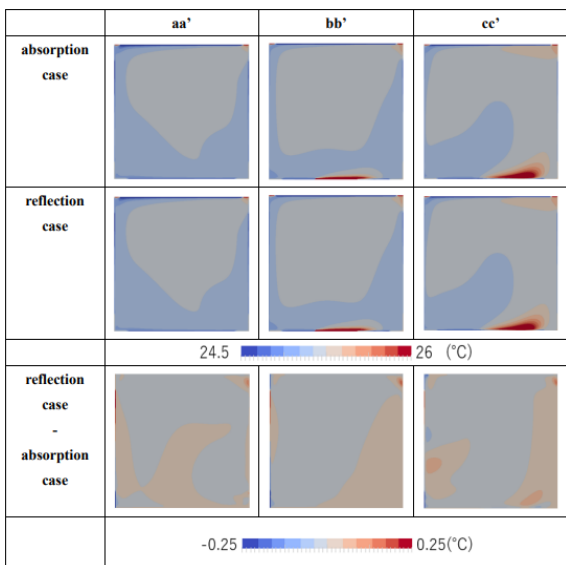


Fig.12 Air temperature distribution

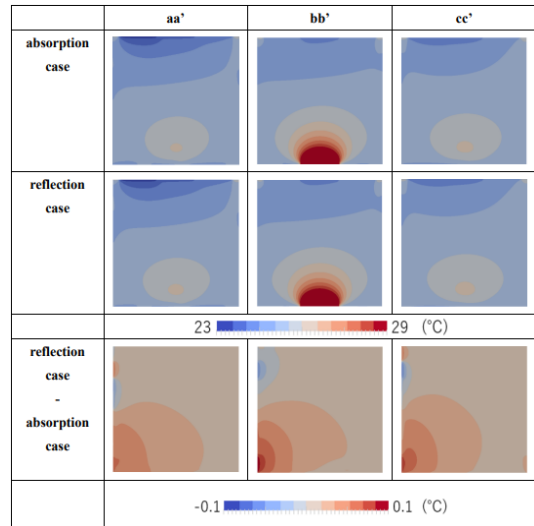


Fig.13 MRT distribution

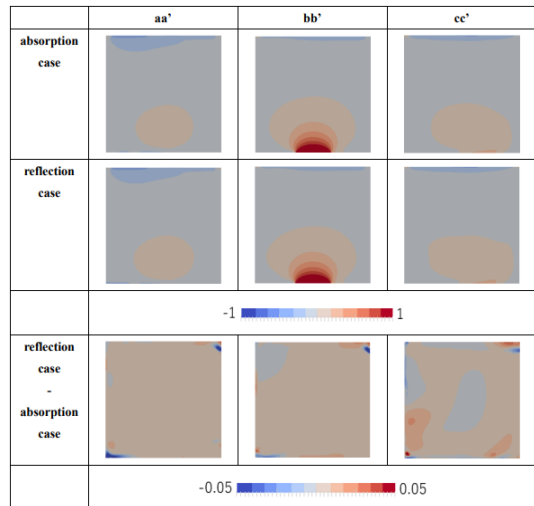


Fig.14 PMV distribution

## 6. 結論

本研究では、反射率を考慮する Gebhart の吸収係数放射モデルを用いたCFD解析と測定実験を比較することでモデルの精度評価を行うとともに、側壁面の放射率の変化が居住者の熱的快適性に与える影響の解析を行った。CFD シミュレーションにより、壁面温度分布において測定実験と同様の傾向を再現することができた。また、本研究の条件では、全面の放射率を0.94としたものと一面のみ0.08にさせたケースを比較すると、MRTは±0.1程度、PMVに±0.05程度の差が生じた。

## 参考文献

- 1) American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ASHRAE Standard Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, Ga.:The Society, 1992.
- 2) Gebhart, B. Heat Transfer, 2nd edition, McGraw-Hill Book Company, New York, USA, 1971