

# 放射モデルの精度評価および壁面放射率の違いが壁面熱収支に与える影響の解析

## Validation of Radiation Model and Analysis of The Impact of All Emissivity Differences on Wall Heat Balance

○学生会員 山尾 佳菜子 (大阪大学) 正会員 松尾 智仁 (大阪大学)  
正会員 嶋寺 光 (大阪大学) 正会員 近藤 明 (大阪大学)  
Kanao YAMAOKA\*1 Tomohito MATSUO\*1  
Hikari SHIMADERA\*1 Akira KONDO\*1  
\*1 Osaka University

Most 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 to simulate thermal comfort under different wall emissivity conditions. The model was validated to reproduce the experimental result using a chamber equipped with radiation panels. In this study, an analysis was conducted of how different wall emissivity rates affect heat transfer on the wall surfaces.

### 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、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>が、従来の多くの室内温熱環境シミュレーションでは放射率、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、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熱的快適性に与える影響の解析を行う。

また、前報<sup>3)</sup>では放射モデルの再現性向上のため、乱流モデルを変更し、乱流モデルごとでの比較を行った結果、標準 k-ε モデルが最も再現性が高くなることがわかった。よって、本稿では標準 k-ε モデルを用いつつ、より詳細な実験条件の再現を行うことで放射モデルの精度評価を行い、壁面放射率の違いが室内の熱的快適性に与える影響の解析を行う。

### 2. CFD 計算条件

#### 2.1 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しない。そこで本研究では、各面の放射率や吸収率に応じて各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用いて計算を行った。

#### 2.2 計算条件

本研究の CFD シミュレーションには OpenFOAM ver-4.1 を用いた。非圧縮性定常流れを仮定し、浮力の影響を考慮するため Boussinesq 近似を導入した。乱流モデルには標準 k-ε モデル、放射計算には Gebhart の吸収係数放射モデルを用いた。

計算対象領域、計算条件は前報<sup>3)</sup>の測定実験にもとづいて定めた。対象領域の立面図を図 1 に、天井の平面図を図 2 に、床面の平面図を図 3 に示す。測定実験は約 2 m 立方の断熱されたチャンバーを用いて行い、チャンバー内壁面は塗料を用いて放射率 0.94 とした。また、チャンバー上部に 9 枚と底部に 1 枚、30 四方の放射パネルを設置し、測定実験の結果に基づき上部は約 23.0°C、底部は約 45.0°C に制御した。壁面の室外温度は測定値 (24.7°C) で固定した。測定実験時には床面の放射パネルに温水を供給するホースから 60W の熱が漏れていたため、シミュレーションでも同量の発熱を与えた。図のホースの部分の 0.1m の高さまでの空間に合計 60W の熱を与えてシミュレーションを行った。また、測定実験と同様に、すべての壁面を放射率 0.94 とした基本ケースと西側の壁面のみ放射率を 0.08 にした反射ケースの 2 ケース設定した。

モデルの精度評価においては、チャンバー内の空気温度分布およびパネル、壁面の表面温度分布を測定実

験の結果と比較した。

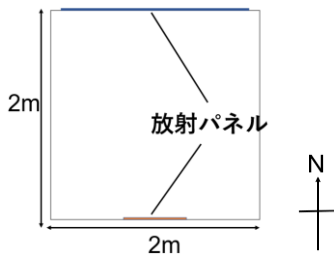


図1 立面図

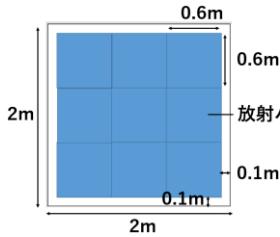


図2 天井面の平面図

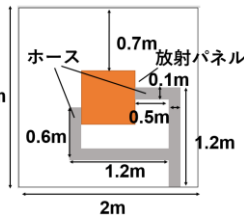


図3 床面の平面図

### 3. 結果

#### 3.1 測定結果、計算結果、精度評価

CFD 計算結果の検証のため、測定実験結果との比較を行う。

図4 にチャンバー内の気温の鉛直分布を示す。測定実験の値と今回の計算値に加え、前報<sup>9)</sup>の計算結果を示している。前報と本報の計算結果の差は、本報ではホースからの熱の漏れを再現したことに由来する。前報の計算値は測定結果と 1~1.5°Cの差が生じていたが、本報では測定結果との差は 0.5°C未満となり、再現性が向上したことが確認できた。床面に熱源を設置し、天井面には冷熱源を設置しているため高さが高くなるにつれて気温が低くなり床面に近づくにつれて気温が上昇することが予想される。しかし、計算結果では床面に近づくにつれて温度が上昇するという傾向を再現することができたが、放射パネル近くの大きな変動がある領域と床面に近づくにつれて温度が上昇するという傾向の再現性が低くなった。測定値と本報における計算値の RMSE は基本ケースが 0.34°C、反射ケースが 0.39°Cとなった。

図5、6 に基本ケースと反射ケースの壁面温度分布を示す。両ケースともに東側の壁面の南側の方角で温度上昇がみられるが、これは熱源に温水を供給するホースから漏れている熱が原因と考えられる。その点は計算結果でも再現することができたが、計算結果は測定結果より 1°C程度低い結果となった。これは、条件設定の際に漏れ出した熱量を冷熱供給量から概算したが、測定実験では概算よりも多くの熱が漏れ出ていることが予想され、その影響であると考えられる。

北、西の壁面では天井に近い領域では壁面温度が低くなり、床面に近い領域では温度上昇がみられるといった傾向が再現された。しかし、測定結果ほどの大きな分布は

再現できておらず、計算結果の方が一様な温度になっていることがわかる。これは、計算条件のほうが測定実験よりも供給される熱量の設定が少なかったため壁面に伝わる熱が少なくなっていることが原因として考えられる。

以上より、CFD モデルはチャンバー内の温度分布の傾向を再現していることが確認できた。

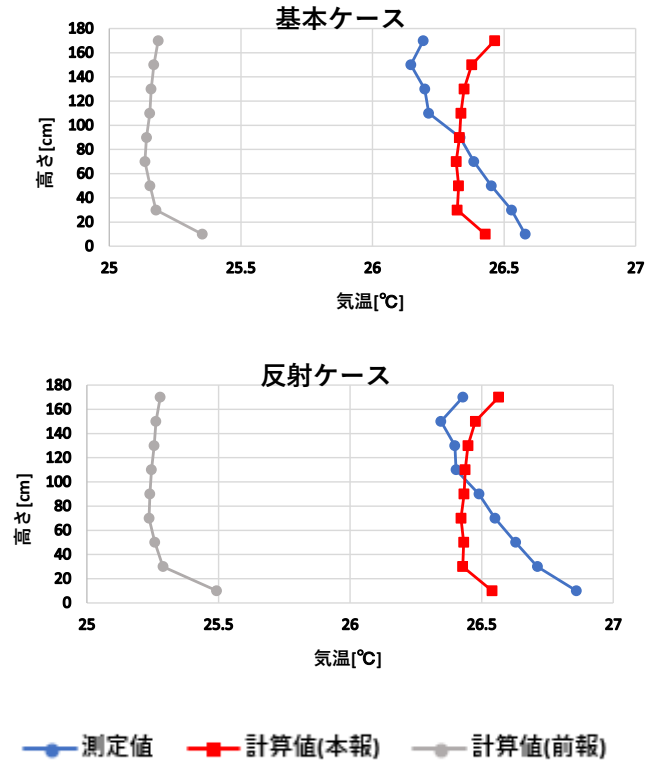


図4 空間温度分布

		基本ケース									
		測定結果					計算結果				
西側壁面 温度 [°C]		25.5	25.3	25.3	25.4	25.3	25.3	25.2	25.2	25	25
		25.8	25.9	25.7	25.6	25.5	25.4	25.4	25.4	25.3	25.2
		26	26.2	26	25.8	25.7	25.5	25.6	25.6	25.5	25.4
		26.2	26.5	26.2	26	25.8	25.6	25.7	25.8	25.7	25.5
		25.7	26.1	26.2	25.9	25.6	25.4	25.5	25.6	25.5	25.4
北側壁面 温度 [°C]		25.1	25.3	24.8	25.3	25.5	24.9	25.0	25.1	25.2	25.3
		25.4	25.7	25.1	25.4	25.7	25.2	25.3	25.3	25.4	25.4
		25.7	25.9	25.4	25.6	25.8	25.4	25.6	25.6	25.6	25.5
		25.8	26	25.6	25.8	25.9	25.5	25.7	25.8	25.7	25.6
		25.6	25.8	25.4	25.6	25.8	25.4	25.5	25.6	25.5	25.4
東側壁面 温度 [°C]		25.5	25.4	25.7	25.9	26.4	25.3	25.2	25.3	25.5	25.8
		25.7	25.2	25.7	25.9	26.3	25.3	25.3	25.3	25.5	25.8
		25.9	25.5	26.0	26.4	26.7	25.5	25.5	25.6	25.8	26.0
		25.9	25.7	26.3	26.8	27.1	25.5	25.7	25.8	26.0	26.1
		25.6	25.5	26.4	27.1	27.6	25.4	25.5	25.6	25.9	26.0
		24  27									

図5 壁面温度分布 (基本ケース)

		反射ケース									
		測定結果					計算結果				
西側壁面 温度 [°C]		26	26.2	26	25.6	25.6	25.6	25.6	25.6	25.5	25.3
		25.9	26.1	26	25.8	25.7	25.6	25.6	25.7	25.6	25.5
		25.8	26	25.9	25.7	25.6	25.6	25.6	25.6	25.6	25.5
		25.7	25.9	25.8	25.6	25.4	25.5	25.6	25.6	25.6	25.5
		25.4	25.7	25.9	25.6	25.2	25.5	25.5	25.5	25.5	25.4
北側壁面 温度 [°C]		25.4	25.6	25.1	25.6	25.7	25.1	25.1	25.2	25.3	25.4
		25.6	25.9	25.3	25.6	25.9	25.3	25.4	25.5	25.5	25.5
		25.9	26.1	25.6	25.8	26.1	25.6	25.7	25.7	25.7	25.7
		26	26.2	25.8	26	26.1	25.7	25.8	25.9	25.9	25.7
		25.8	25.9	25.5	25.7	25.9	25.5	25.7	25.7	25.7	25.5
東側壁面 温度 [°C]		25.7	25.7	26.0	26.2	26.7	25.4	25.3	25.4	25.6	25.9
		26.0	25.5	26.0	26.2	26.6	25.4	25.4	25.4	25.7	26.0
		26.1	25.7	26.2	26.7	27.0	25.6	25.6	25.7	25.9	26.1
		26.1	25.8	26.4	26.9	27.3	25.7	25.8	25.9	26.1	26.2
		25.7	25.6	26.5	27.1	27.8	25.5	25.6	25.8	26.0	26.1
		24  27									

図6 壁面温度分布 (反射ケース)

#### 4.1 面放射率の違いによる熱環境の解析

壁面放射率を変更した場合のチャンパー内の熱輸送の変化を詳細に確認するため、西側壁面の放射率が 0.94 にしたケース (基本ケース) と 0.08 にしたケース (反射ケース) について、放射熱流束の放射成分と反射成分と吸収成分ごとに示したものを図7に示す。反射ケースでは、基本ケースと比較して放射成分と吸収成分が著しく小さくなり、反面反射成分は 20~40W/m<sup>2</sup>から 400 W/m<sup>2</sup>程度に著しく増加している。これは吸収率 (反射率) の差によるものであり、反射ケースでは西側壁面における放射熱輸送による熱の出入りが小さくなっている。これは、図8に示す西側壁面の対流熱流束と放射熱流束と壁面温度をからも確認できる。基本ケースでは天井の低温放射パネルと床面の高温放射パネルにより、西側壁面の放射熱流束には大きな分布が見られ、これが壁面の表面温度分布にも影響を与える。他方、放射熱流束が小さい反射ケースではより均一な温度分布になっている。

図9に放射率を変更していない東側の壁面の対流熱流束と放射熱流束と壁面温度を示す。図10と図11に天井面と床面の対流熱流束と放射熱流束を示す。反射ケースでは放射熱流束が床面に近い部分で正の値を示している領域が大きくなっている。これは、西側壁面で吸収されず反射した熱が入射したためと考えられる。一方、天井面の近くでは冷熱の増加が予想されたが、結果は異なった。これは、境界条件の放射パネルの温度が測定結果によるものであり、反射ケースの方が 0.3°C程度高いことが要因として考えられる。

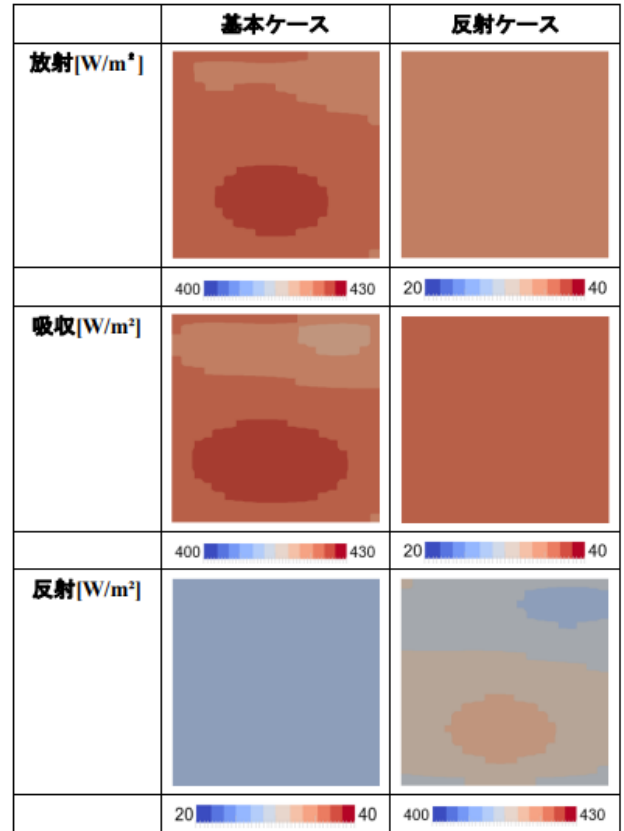


図7 西側壁面の放射熱流束分布

(放射と反射は放出する向きが正、吸収は入射する向きが正)

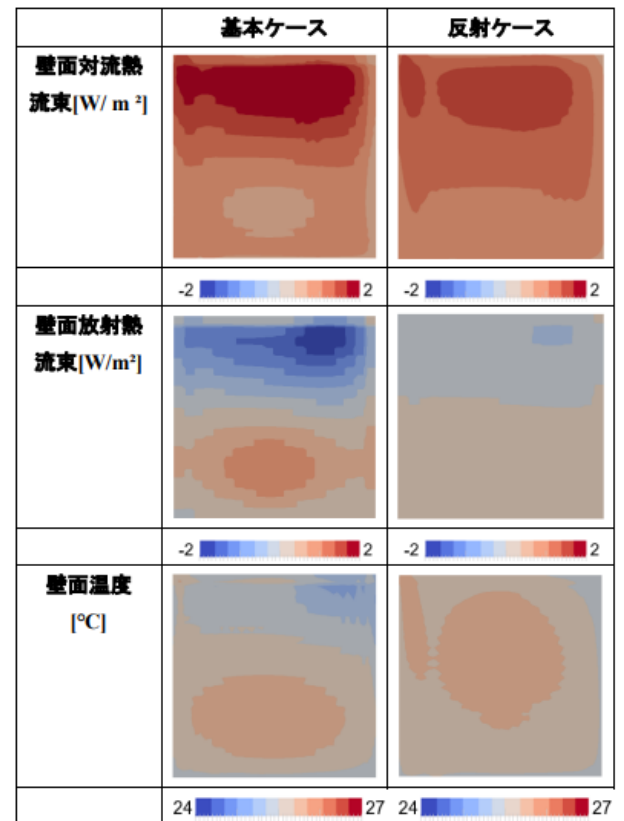


図8 西側壁面の熱流束分布、壁面温度分布

(対流、放射熱流束ともに壁面が熱を吸収する向きを正)

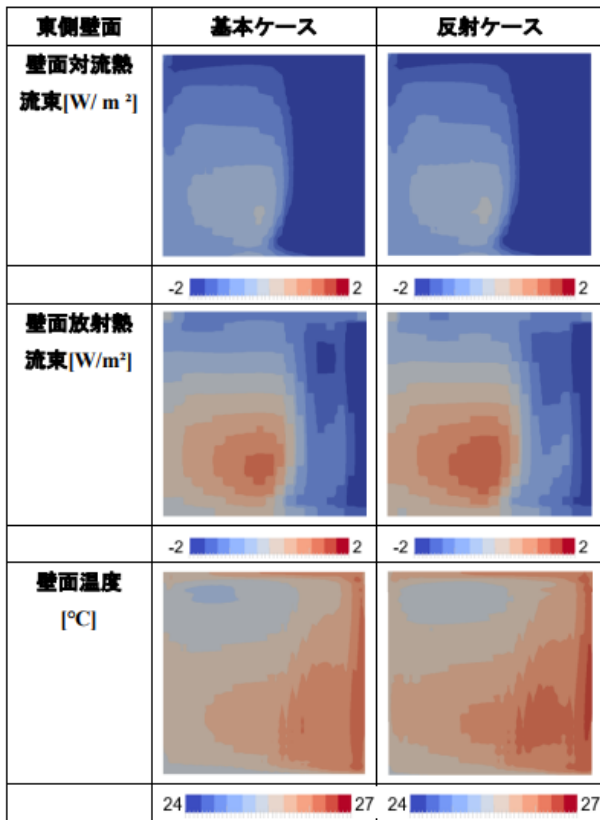


図9 東側壁面の熱流束分布  
(対流、放射熱流束ともに壁面が熱を吸収する向きを正)

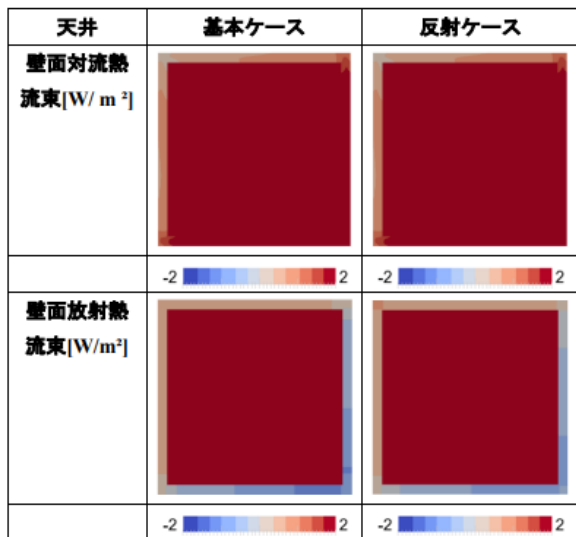


図10 北側壁面の熱流束分布  
(対流、放射熱流束ともに壁面が熱を吸収する向きを正)

また、図11、12より床面と天井面からは壁面と比べるとより大きな熱の出入りがあることが確認できた。天井面では両ケースとも9枚の放射パネルの表面温度が低いいため、対流熱流束、放射熱流束ともに多くの熱を吸収していることがわかる。床面では近くの気温が高いことより対流熱流束は吸収する方向に熱が動いているが、熱源などがあり表面温度が高いため放射熱流束は放出する方向

が大きいことが確認できる。

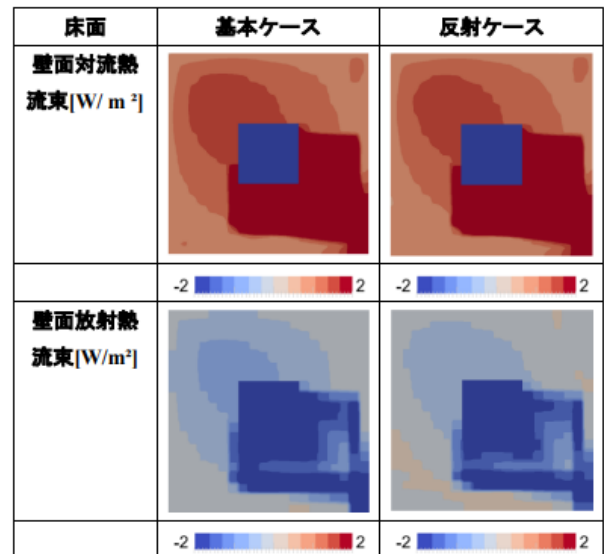


図11 南側壁面の熱流束分布  
(対流、放射熱流束ともに壁面が熱を吸収する向きを正)

#### 4. 結論

本研究では Gebhart の吸収係数放射モデルを用いた CFD モデルを測定実験との比較によって精度検証した。また壁面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。結論を以下にまとめる。

- 1) CFD シミュレーションにおいて空間温度分布、壁面温度分布ともに傾向を再現することはできたが、温度変化が大きくなる部分の再現性が低くなった。
- 2) 本研究の条件では、放射率が低い壁面では放射熱伝達、対流熱伝達がともに小さくなり壁面温度が一樣になる。さらに、低放射率である壁面以外の壁面では特に放射熱伝達での熱の吸収が大きくなることがわかった。さらに、壁面温度の上昇に伴い空間温度の上昇も確認できた。

謝辞：本研究は JSPS 科研費 21K14303 の助成を受けたものです。

#### 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
- 3) 山尾ら.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. 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 (CD-ROM). 2022. ROMBUNNO.A-63.2022