

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

○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 相澤 直樹 (高砂熱学工業) 正会員 大迫 孝輔 (高砂熱学工業)
正会員 嶋寺 光 (大阪大学) 正会員 近藤 明 (大阪大学)

Kanako YAMAOKA*1 Tomohito MATSUO*1 Naoki AIZAWA*2

Kosuke OSAKO*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。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、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。

2. 実験条件

測定実験に供した実験チャンバー寸法は $2.0\text{m} \times 2.0\text{m} \times 2.0\text{m}$ 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図1に示す。図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 $0.6\text{m} \times 0.6\text{m}$ の放射パネルを9枚設置し 18°C 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°C 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図2から図4に測定実験で使用した熱電対の設置個所を図5から図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。



図1 実験室概要

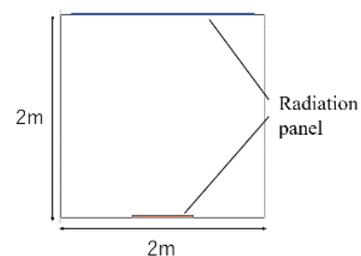


図2 立面図

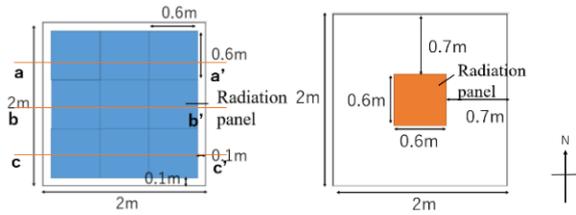


図3 天井面の平面図

図4 床面の平面図

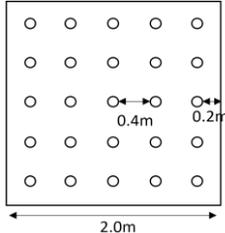


図5 熱電対の設置箇所
(床面、壁面)

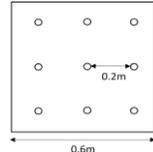


図6 熱電対の設置箇所
(放射パネル)

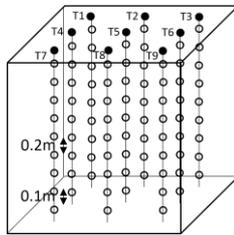


図7 熱電対の設置箇所 (気温)

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、そこ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. CFD 計算条件

(1) 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。対象領域や放射パネルの位置は測定実験と同様とした。

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、シミュレーション内で壁体内の熱伝導を考慮することで室内側表面温度を求めた。天井/床面パネルの表面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。

(2) 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。

分配係数放射モデルでは、形態係数に加えて各面の放射率、吸収率、反射率を用いて分配係数を算出している。式(1)は面 i から出射される放射熱流束を表している。式(2)は面 i に入射する放射熱流束を表している。式(2)で使用した D_{ij} 分配係数行列であり、式(3)はその定義式を表している。各式の変数の定義を表1に示す。

$$Q_{Ei} = \varepsilon_i \sigma T_i^4 \quad (1)$$

$$Q_{ii} = \sum_j^N \frac{A_i}{A_j} D_{ji} Q_{Ej} \quad (2)$$

$$D_{ij} = \alpha_j F_{ij} + \sum_{k=1}^N D_{kj} \rho_k F_{ik} \quad (3)$$

表1 式 (1)~(3) での変数の定義

| 変数 | 定義 | [単位] |
|----------|--------------------|--------------------------------------|
| T_i | 面 i の表面温度 | [K] |
| σ | ステファンボルツマン定数 | [W/(m ² K ⁴)] |
| A_i | 面 i の面積 | [m ²] |
| Q_{Ei} | 面 i から出射する放射熱流束 | [W/m ²] |
| Q_{ii} | 面 i に入射する放射熱流束 | [W/m ²] |
| Q_{Ni} | 面 i が受け取る正味放射熱流束 | [W/m ²] |
| D_{ji} | 吸収係数行列の転置 | [-] |
| F_{ji} | 形態係数行列 | [-] |

(3) 乱流モデルの変更

本研究では乱流モデルには標準 k-ε モデルを用いたが、realizable k-ε モデル、RNGk-ε モデルに変更し CFD シミュレーションを行った。

4. 結果

(1) 測定結果、計算結果、精度評価

まず、放射パネルの表面温度を表2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。

次に、壁面温度の計算結果、測定結果を共に反射ケースから吸収ケースを引いたものを図 8 に示す。これらは高さごとで平均値を算出し示してある。測定結果は、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。放射率を変更した西側の壁面では、熱源に近い床面に近づくにつれて反射ケースのほうが温度が低くなっていることが確認でき、吸収ケースのほうが温度が高くなった。三壁面とも、天井面に近づくにつれて両ケースの差が大きくなっていることが確認できる。冷却を行っている天井面に近づくにつれて反射ケースのほうが温度が高くなっていることより、反射ケースのほうが放射空調の影響が小さくなっていることがわかる。この傾向は計算結果でも同様の傾向がみられたが、放射率を変更していない壁面では両ケース間で大きな温度差が生じなかった。放射率を変更した西壁面は、高さが高くなるにつれて差が正の方向に大きくなっていく傾向は計算結果でも再現できたが、放射パネル付近の大きな変動がある領域の再現はできなかった。また、乱流モデルによる違いは壁面温度の計算においては大きな差は現れなかった。

次に空間温度の計算結果、測定結果ともに反射ケースから吸収ケースを引いたものを図 9 に示す。T5、8、9 では上昇気流がみられほかの測定点とは違う特徴があったため、これらの平均を取ったグラフとそれら以外の T1、2、3、4、6、7 で平均を取ったもので表示している。まず測定実験での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。乱流モデルによる差は上昇気流がみられなかった測定点では、標準 k-ε モデルが一番測定値に近い値を示したが、各乱流モデル間で大きな差は見られなかった。どの乱流モデルを用いた場合でも温度差は ±0.1°C 以下とほとんどみられなかった。上昇気流がみられた測定点では、realizable k-ε モデルが測定値から一番気温に近い値を示したが床面付近で大きく外れた値を示した。標準 k-ε モデルは傾向としては一番再現性が高く相関係数も一番高い値を示していたことより、標準 k-ε モデルが一番再現性の高い乱流モデルであると考えられる。

表 2 放射パネル温度

| | 天井放射パネル | 床面放射パネル |
|-------|---------|---------|
| 吸収ケース | 22.9°C | 44.8°C |
| 反射ケース | 23.2°C | 45.8°C |

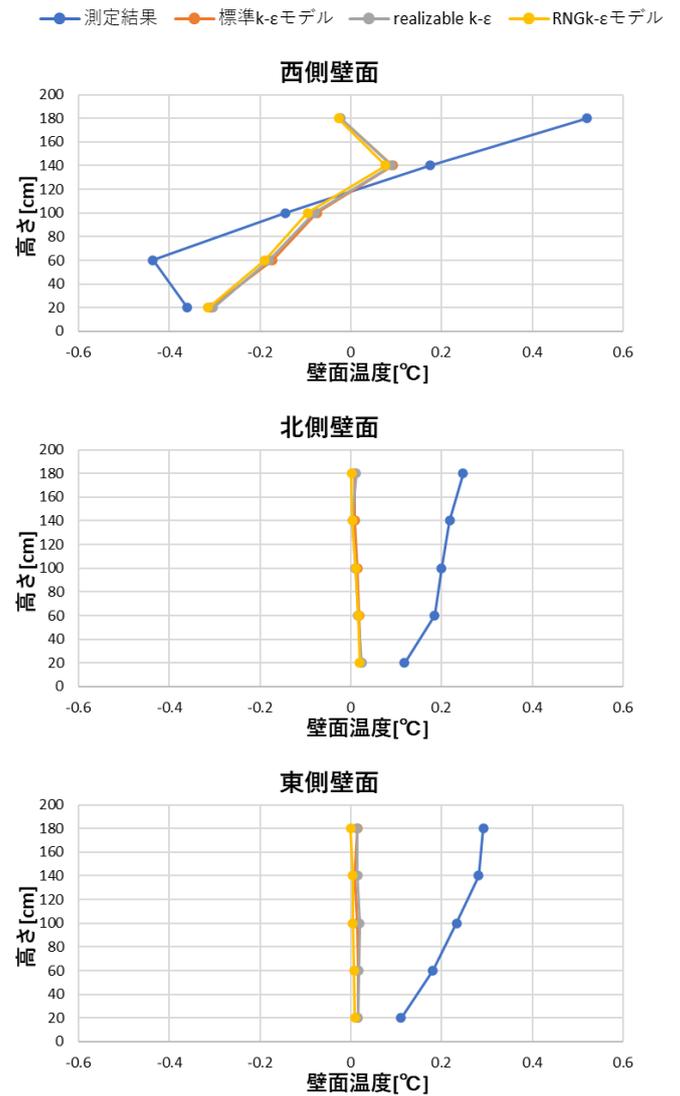


図 8 壁面温度分布

(1) 快適性評価

前述より標準 k-ε モデルを用いて、MRT 計算、PMV 計算を行った。吸収ケースと反射ケースの MRT 分布、PMV 分布、および両ケースの差分を図 10、図 11 に示す。これらは図 3 のように、各放射パネルの中央をとるように切断された断面図である。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ので、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ので、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。

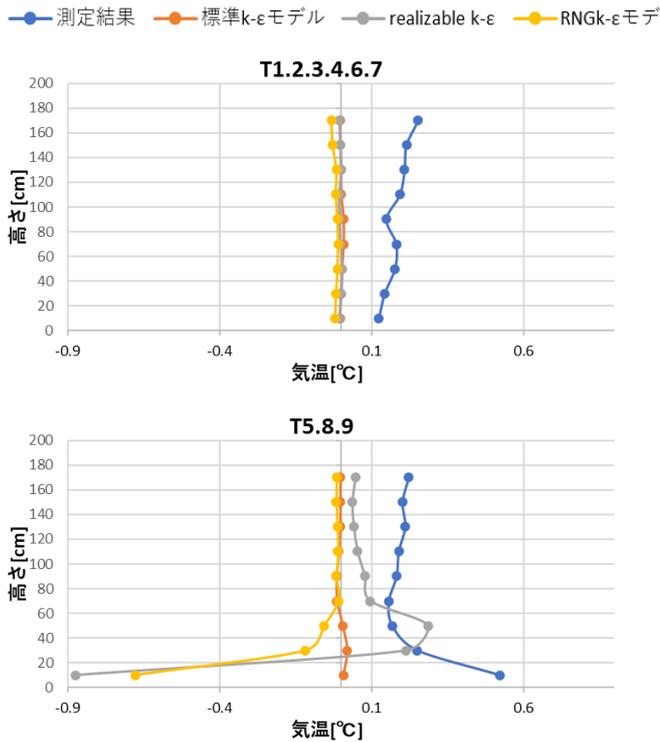


図9 空間温度分布

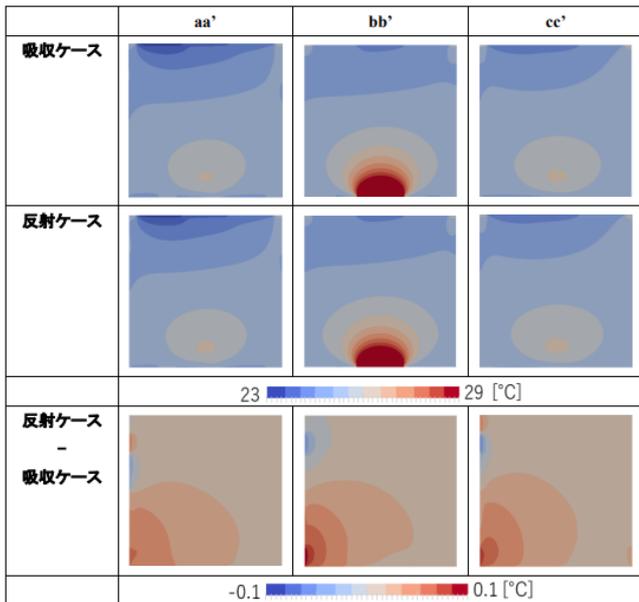


図10 MRT 分布

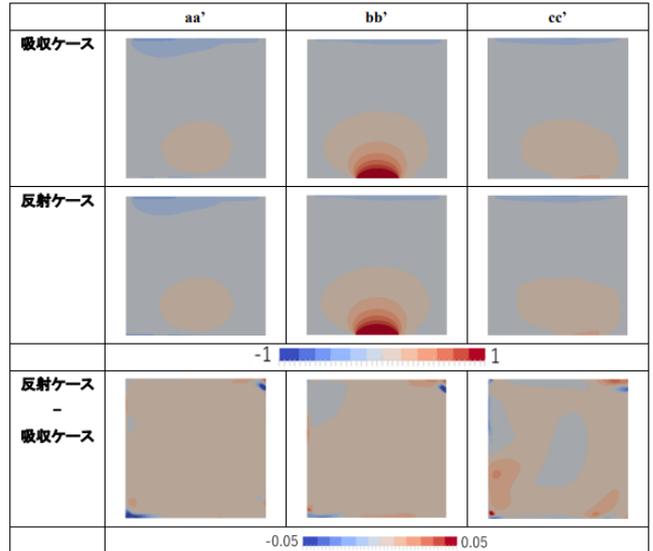


図11 PMV 分布

5. 結論

本研究の結論を以下にまとめる。

- 1) 反射率を考慮する 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。
- 2) CFD シミュレーションにおいて乱流モデルによる計算結果は壁面温度ではほとんど差が生じず、空間温度分布は標準k-εモデルが最も再現性が高かった。
- 3) 放射率が低い壁面を含む空間では、放射空調の影響が小さくなるという結果が得られた。
- 4) 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は最大0.1°C程度、PMVには平均0.02程度の差が生じた。

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