

## 放射率の変化が室内の温熱快適性に及ぼす影響の CFD 解析

## CFD Analysis of the Effect of Emissivity Change on Indoor Thermal Comfort

○学 西本 啓祐<sup>\*1</sup>, 松尾 智仁<sup>\*1</sup>嶋寺 光<sup>\*1</sup>, 正 近藤 明<sup>\*1</sup>Keisuke NISHIMOTO<sup>\*1</sup>, Tomohito MATSUO<sup>\*1</sup>,Hikari SHIMADERA<sup>\*1</sup> and Akira KONDO<sup>\*1</sup><sup>\*1</sup> 大阪大学 Osaka University

Not only air temperature and humidity, but also radiant temperature affects indoor thermal comfort. Therefore, radiant heat transfer should be considered in computational fluid dynamic (CFD) simulation. In this paper, thermal environment in a room equipped with cooling radiant ceiling panel (CRCP) system was estimated by radiation-coupled CFD. In order to introduce radiant heat transfer into CFD, the distribution factor was used. Two calculation cases with different emissivity were evaluated using the predicted mean vote (PMV), a measure of thermal comfort. Case of this paper, the value of PMV increases by 1.19 in the case of emissivity of 1.0 compared to the case of emissivity of 0.9. Therefore, it is important to properly consider the effect of emissivity when evaluating thermal comfort by CFD simulation.

**Key Words** : CFD, Radiation, CRCP, PMV, Thermal comfort

## 1. 緒 言

放射空調は放射による伝熱を利用する空調システムであり、従来の空調システムよりもエネルギー消費を低減し、室内の快適性を向上させられることから、新しい空調システムとして近年注目されている<sup>(1)</sup>

居住者の熱的快適性は、気温、相対湿度、風速、放射温度、着衣量、運動量の6要素から構成される。そのため、居住者の熱的快適性を評価する際は、単なる気温や湿度だけでなくこれらの6要素を考慮する必要があり、特に放射空調システムにおいては、放射温度の影響を正確に考慮することが重要である。

室内の温熱環境を CFD シミュレーションで評価することについては、既に多くの研究が行われている。

Catalina et al.は、実測によって得た温度を境界条件として用いて CFD シミュレーションを実施し、放射空調を用いた室内では、熱的快適性が向上することを示した<sup>(2)</sup>。しかし、その際に熱的快適性の評価に用いられた放射温度の数値は、放射率による影響が考慮されていないため、実環境とシミュレーションで差異が生じている可能性がある。青野らは、放射空調使用時の条件下において、放射率の変化を考慮して CFD シミュレーションを実施することで、壁面温度や室内の放射温度に影響を与えることを確認した。しかし、熱的快適性の指標を用いた評価は行っておらず、居住者の熱的快適性に与える定量的な影響については示されていない<sup>(3)</sup>。

そこで本研究では、放射率の変化を考慮できる、分配係数放射モデルを用いて CFD シミュレーションを実施し、室内の熱的快適性を評価することを目的とした。

## 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、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適用し、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。

分配係数放射モデルは、形態係数を用いて分配係数を算出して用いており、放射、吸収、反射、透過などを考慮に入れて計算することができる。本研究では長波放射のみを対象とするため、透過率を 0 として計算を行った。放射率が波長によらず一定であると仮定し、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  $i$  に入射する放射熱流束を表しており、ここで使用した  $D_{ij}$  が分配係数行列である。各式の変数の定義を表 1 に示す。

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

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

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

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

$$Q_{Li} = \sum_j \left( \frac{A_i}{A_j} D_{ij} Q_{Ej} \right) \quad (5)$$

Table 1 Definition of the variables in equation

Variable	Definition	Unit
$F_{ij}$	View Factor	[-]
$A_i$	Area of surface $i$	[m <sup>2</sup> ]
$\theta_{ij}, \theta_{ji}$	Angles formed by the line connecting the surface $i$ and $j$ and normal lines of surface $i$ and $j$	[rad]
$r$	Distance between surface $i$ and $j$	[m]
$\sigma$	Stefan-Boltzmann constant	[W/(m <sup>2</sup> ·K <sup>4</sup> )]
$T$	Surface temperature	[K]
$Q_{ij}$	Heat transfer	[W]
$\varepsilon$	Emissivity	[-]
$\alpha$	Absorptivity	[-]
$\rho$	Reflectivity	[-]
$Q_{Ei}$	Radiative heat flux emitted from surface $i$	[W/m <sup>2</sup> ]
$Q_{Li}$	Incident radiative heat flux to surface $i$	[W/m <sup>2</sup> ]
$D_{ij}$	Distribution Factor	[-]

### 3. 計算条件

本研究では、図 1 に示す形状モデルを作成し、これを用いて CFD シミュレーションを行った。室内の大きさに 6m×10m×2.9m で、外側を壁に囲まれている。外壁面温度は固定されており、壁面の厚さ、熱伝導率から一次元熱伝導方程式を解き、計算領域の壁面温度が算出される。内壁面温度は、算出された壁面温度と、室内空気との対流熱伝達、室内壁面との放射熱伝達を考慮して熱収支を解くことで、算出される。本研究における壁面の物性値と外壁面温度を表 2 に示す。室内には人を想定した 0.4m×0.2m×1.2m の直方体を 16 個配置した他、机の天

板部分を想定した  $1.6\text{m}\times 0.8\text{m}\times 0.1\text{m}$  の直方体を 8 個、 $2.0\text{m}\times 0.8\text{m}\times 0.1\text{m}$  の直方体を 1 個配置した。人を模した直方体からは  $39.5\text{W}/\text{m}^2$  の発熱が発生する。換気の風量は  $0.5\text{m}^3/\text{s}$  とし、吹き出し温度は  $29^\circ\text{C}$  とした。

放射パネルの表面温度は  $18^\circ\text{C}$  とし、開放型循環方式を再現するために、放射パネルは天井から  $30\text{cm}$  離して設置している。計算では非圧縮性定常流れを仮定し、計算格子サイズは 1 辺  $5\text{cm}$ 、格子数は約 140 万とした。

また、放射率の変化が熱的快適性に与える影響について評価するために、各壁面、物体の放射率が  $0.9$  の計算ケースと  $1.0$  の計算ケースの 2 種類を用意し、それぞれのケースについて CFD シミュレーションを行った。

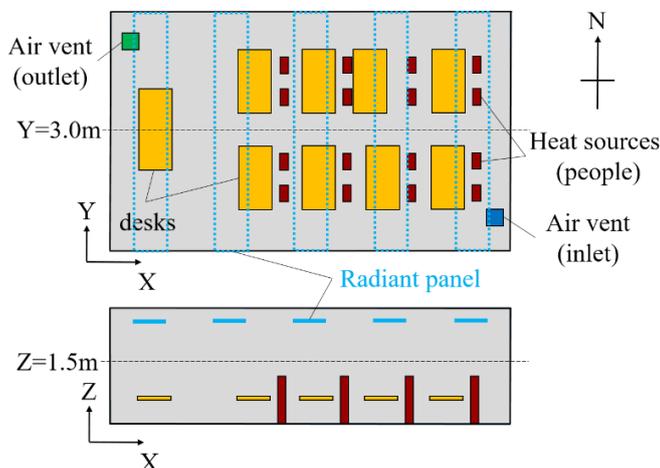


Fig. 1 Geometric model

Boundary	Temperature of Outer Wall [ $^\circ\text{C}$ ]	Thermal Conductivity [ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ]	Thickness [m]
South	50	1.2	0.219
North	30	0.6	0.181
East	26	0.8	0.111
West	26	0.6	0.121
Ceiling, Floor	26	1.4	0.2

Table 2 Boundary condition of walls

#### 4. 快適性指標

本研究では、熱的快適性の指標として PMV (Predicted Mean Vote) を評価に用いた。これは、暑い～寒いまでの人の温熱感を  $+3$  から  $-3$  の数値で表すもので、 $\text{PMV}=0$  であればその温熱環境に不満足・不快さを感じる人の割合は  $5\%$  となる。また、PMV の絶対値が  $0.5$  以内であれば、不満足・不快さを感じる人の割合は  $10\%$  となる。PMV を算出する際は、気温、気流、放射温度には CFD 計算により算出した値を用いたが、相対湿度、着衣量、代謝量はそれぞれ  $50\%$ 、 $1\text{clo}$ 、 $1\text{met}$  と定数で与えた。

#### 5. 結果と考察

解析を行った結果について、 $X=3.0\text{m}$  平面と  $Z=1.5\text{m}$  平面における放射温度 (MRT) の分布を図 2、PMV の分布を図 3 に示す。いずれのケースも、高温の南壁面では放射温度・PMV の値が高くなり、低温の放射パネル付近では低くなる傾向が見られたが、放射率が  $1.0$  のケースの方が放射温度・PMV の値が全体的に高くなることが確認できた。それぞれのケースの全領域における放射温度の平均値は、放射率が  $0.9$  のケースで  $18.7^\circ\text{C}$ 、放射率が  $1.0$  のケースで  $26.3^\circ\text{C}$  となり、 $7.6^\circ\text{C}$  の差が生じる結果となった。また、PMV の平均値については、放射率が  $0.9$  のケースで  $-0.80$ 、放射率が  $1.0$  のケースで  $0.39$  となり、 $1.19$  の差が生じる結果となった。一方で、室内の平均気温はいずれのケースも  $26.3^\circ\text{C}$  であり、気流にも大きな違いは見られなかった。従って、PMV の算出に用いる 6 つ

の要素のうち、放射温度以外の要素では放射率が 0.9 のケースと 1.0 のケースに差異が見られないことから、室内の放射温度が高くなったことが原因で、PMV の平均値に大きな差異が生じたと考えられる。

このことから、放射率を変化させることで室内の放射温度、温熱環境に大きな影響を与えることが確認できたため、CFD シミュレーションによって熱的快適性を評価する際は、放射率による影響を適切に考慮して放射計算を行うことが重要であると言える。

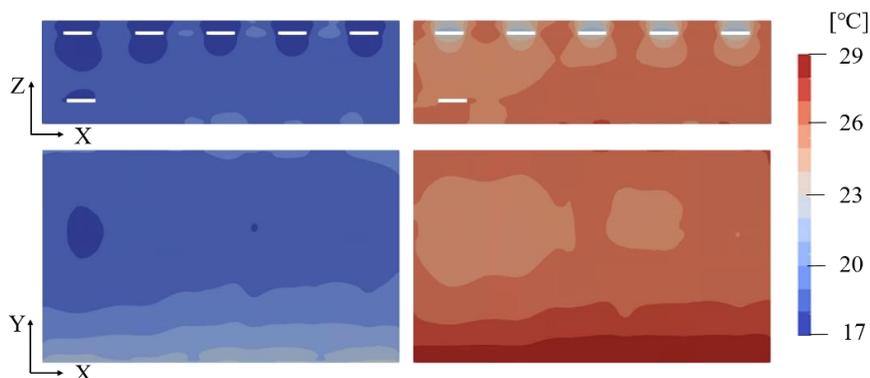


Fig. 2 MRT distribution (Left : emissivity = 0.9, Right : emissivity = 1.0)

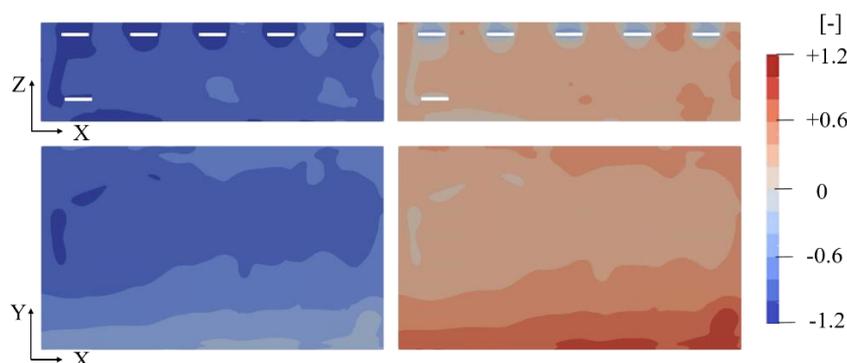


Fig. 3 PMV distribution (Left : emissivity = 0.9, Right : emissivity = 1.0)

## 5. 結 語

放射率の変化を考慮できる分配係数放射モデルを用いて CFD シミュレーションを実施し、室内の熱的快適性の評価を行った。その結果、放射率を変化させることにより、熱的快適性指標である PMV の平均値が大きく変化することが確認できた。従って、CFD シミュレーションによって熱的快適性を評価する際は、放射率による影響を適切に考慮して放射計算を行うことが重要であると言える。

## 文 献

- (1) Rhee, K., and Kim, K., “A 50 year review of basic and applied research in radiant heating and cooling systems for the built environment”, *Building and Environment*, Vol 91 (2015), pp. 166-190.
- (2) Catalina, T., Virgone, J., Kuznik, F., “Evaluation of thermal comfort using combined CFD and experimentation study in a test room equipped with a cooling ceiling”, *Building and Environment*, Vol 44, No.8 (2009), pp. 1740-1750.
- (3) 青野真和, 近藤明, 嶋寺光, 松尾智仁, “放射モデルを組み込んだ CFD モデルによる放射空調使用時の室内快適性の評価”, 空気調和・衛生工学会令和元年度大会 (札幌) 学術講演論文集, 温熱環境評価編, Vol. 6 (2019), K-71.