

# 放射を考慮する CFD モデルを用いた平均放射温度の空間分布が居住者の熱的快適性に与える影響の評価

## Assessment of the Impact of Spatial Distribution of Mean Radiant Temperature on Participants' Thermal Comfort by Using a Radiation-Coupled CFD Model

○望月 大地 (大阪大学) 松尾 智仁 (大阪大学)  
嶋寺 光 (大阪大学) 近藤 明 (大阪大学)

Daichi MOCHIZUKI\*<sup>1</sup> Tomohito MATSUO\*<sup>1</sup> Hikari SHIMADERA\*<sup>1</sup> Akira KONDO\*<sup>1</sup>

\*<sup>1</sup> Osaka University

Thermal comfort in a room is evaluated with environmental factors such as air temperature, mean radiant temperature (MRT), wind velocity and relative humidity. Conventional evaluation methods, however, usually use the spatially uniform MRT calculated by the area-weighted mean surface temperature or view factor. In this study, indoor thermal comfort was evaluated with the spatially distributed MRT using Computational Fluid Dynamics (CFD). The results showed that the MRT distribution has large influence on the distribution of thermal comfort indices such as Predicted Mean vote (PMV).

### はじめに

温熱環境による室内の居住者の快適性は、気温、相対湿度、気流、放射温度 (MRT)、着衣量、代謝量の 6 要素によって決定される。室内の快適性は、気温、気流だけではなく、これらの要素をすべて考慮して評価をする必要がある<sup>1)</sup>。例えば従来の対流式の空調は主に気温を制御するが、相対湿度や放射温度は必ずしも制御できない。そのため、室内気温が一様に制御されている場合でも、局所的に不快な場所が生じている可能性が考えられている。あるいは、冷暖房の吹出し気流が直接居住者に当たる場合、それが熱的に不快である場合がある<sup>2)</sup>。そのような場合、放射空調の利用による風速の抑制と放射温度の制御が、温熱快適性の向上に寄与すると考えられ、放射空調の利用が検討されている。

室内温熱環境の評価によく用いられる快適性指標には例えば PMV が存在し、これは 6 要素をすべて考慮している。気温、気流は測定や CFD により取得したデータを入力することが多いが、MRT、相対湿度、着衣量、代謝量は固定の値を入力する場合がある<sup>3)</sup>。着衣量と代謝量を除く要素には空間分布が存在するため、温熱快適性の空間分布を正確に評価するためには、気温分布だけではなく MRT などのすべての要素について、同様に空間分布を考慮する必要がある。また、放射冷房はその性質上、部屋に放射パネルを設置する必要がある。パネル配置は MRT 分布に大きな影響を与える。Maxime et al<sup>4)</sup>は、放射パネルの配置やサイズが快適性や温度場に与える影響を調査したが、パネル配置による放射温度の空間分布の変化が、快適性分布に与える影響については明らかになっていない。そのため、放射冷房が室内温熱環境に与える影響を正確に評価するためには、パネル配置の影響

についても検討する必要がある。

本研究では、放射冷房使用時における MRT の空間分布の変化が室内快適性の分布に与える影響について、MRT 計算手法による影響とパネル配置による影響の観点から検討する。

### 1. 方法

#### 1.1 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り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 1 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 1 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  $D$  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 2** 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 2** 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	[-]

本研究での MRT の定義式を式(9)に示す。MRT はセルと壁の幾何学的位置のみを考慮したものが使われることもあるが、式(9)の MRT では、幾何学的位置に加え、壁面での反射放射熱流束を考慮する。この MRT は持田ら<sup>9)</sup>によって示された Absorption Factor で加重平均したふく射温式と同じ意味をもち、放射率の影響が反映されている。式(10)は反射放射熱流束の算出、式(11)は反射係数行列の算出を示している。式(11)においても式(8)同様の繰り返し計算が必要である。

$$MRT_i = \left( \frac{\sum_{j=1}^n F_{ji} (Q_{Ej} + Q_{Rj})}{\sigma} \right)^{1/4} \quad (9)$$

$$Q_{Ri} = \sum_j \frac{A_i}{A_j} R_{ji} Q_{ij} \quad (10)$$

$$R_{ij} = \rho_j F_{ij} \left( 1 + \sum_{k=1}^N R_{jk} \right) \quad (11)$$

**Table 3** Definition of the variable in equation (9)~(11)

Variable	Definition	Unit
$MRT_i$	mean radiant temperature in cell $i$	[°C]
$Q_{Ej}$	Radiative heat flux emitted from surface $j$	[W/m <sup>2</sup> ]
$Q_{Rj}$	Reflected radiant heat flux at surface $j$	[W/m <sup>2</sup> ]
$R_{ji}$	Reflection factor matrix	[-]

## 1.2 計算条件

本研究は、**Fig.1** に示す形状モデルに対して、**Fig.2** に示す3種類のパネル配置を検討し、CFD シミュレーションを行った。室内の大きさは 6 m × 10 m × 2.9 m で、外側を壁に覆われている。内壁面温度は、温度が固定された外壁面からの一次元熱伝導、室内での対流熱伝達、放射を考慮して熱収支を解くことで、算出される。外部温度は日射が当たると仮定した南面を 50°C、その他壁面を 26°C、放射パネルを 18°C とした。給気口からは 34°C の外気が鉛直下向きに 0.61 m/s で吹き込んでいく。

本計算は非圧縮性定常流れを仮定し、計算格子サイズは 1 辺 10 cm、格子数は約 17 万とした。

MRT は 2 つの手法で算出された。1 つ目は均一な空間を想定し、各壁面温度の面積加重平均により、1 つの MRT を算出する手法である。この手法では MRT の分布を考慮できない。2 つ目はセルごとに各面から受ける放射熱流束を算出する手法で、幾何学的位置に加え、壁面での反射放射熱流束を考慮する。この 2 つの MRT 算出方法

での比較を south ケースで行った後、セルごとに MRT を算出する方法で south、center、north ケースの比較を行う。

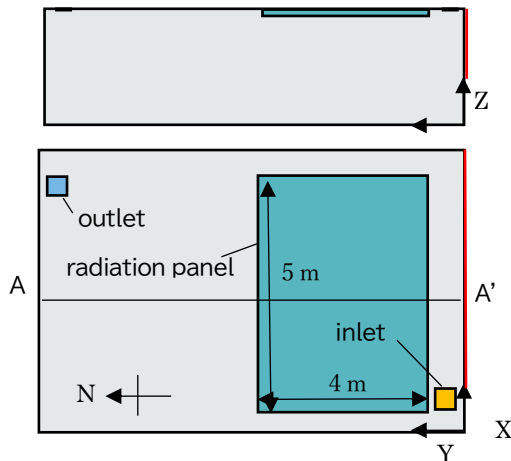


Fig.1 Geometric model (south-case)

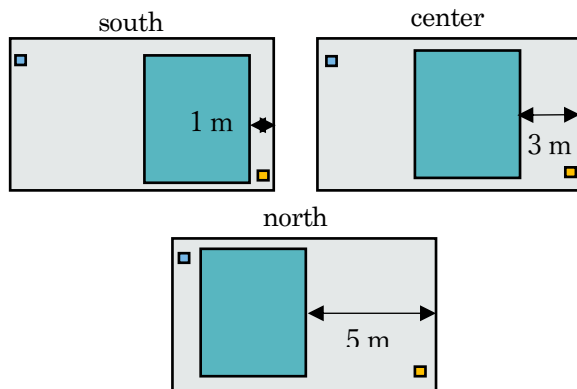


Fig.2 Panel layouts

## 2. 結果と考察

MRT の算出方法を変更した際と、その算出方法でパネル位置を変えた際の、室内快適性への影響を評価した。

Fig.3 に、気温と風速とセルごとに算出した MRT (以下セル MRT) を示す。気温の分布では、外気が流入している南側上部では気温が高い。風速の分布では、換気の給気口から天井付近に風速の影響が確認できる。共に居住域には分布が少ないため、影響は居住域まで及ばないと考えられる。セル MRT 分布では、南面と放射パネルからの熱が面に対して放射状に伝播しており、縦に温度分布が形成されている。また、セル MRT の平均は 24.5°C であった。Table 4 に示す通り、各壁面の平均温度の面積加重平均をとった場合の MRT (以下均一 MRT) は 26.1°C であった。Fig.4 にセル MRT, 均一 MRT を利用して算出した PMV を示す。相対湿度, 代謝量, 着衣量はそれぞれ定数で与え, 50%, 1.0 met, 0.6 clo とした。PMV に大きな影響を与えているのは MRT 分布であることが示され, またセル MRT を使用した結果では PMV に顕著な空間分布が見られた。

Table 4 mean wall temperature in south-case

	mean temperature[°C]	area[m <sup>2</sup> ]
ceiling	27	39.68
floor	25.9	60
north	26.4	17.4
east	26.2	29
west	26.2	29
south	33.4	17.4
panel	18.2	20
entire wall	26.1	212.48

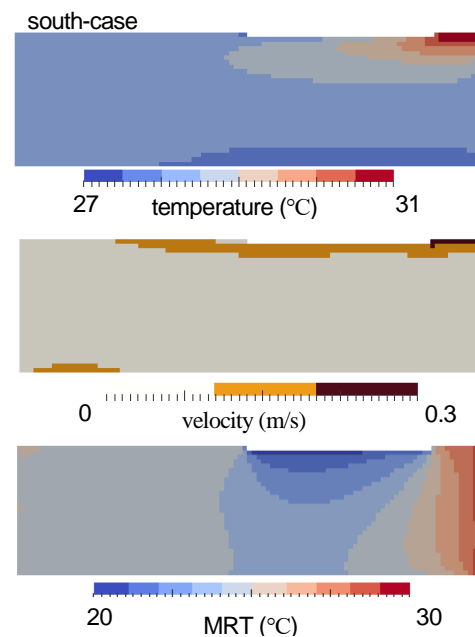


Fig.3 Distributions of temperature, wind velocity, and MRT in south-case (AA' section in Fig.1)

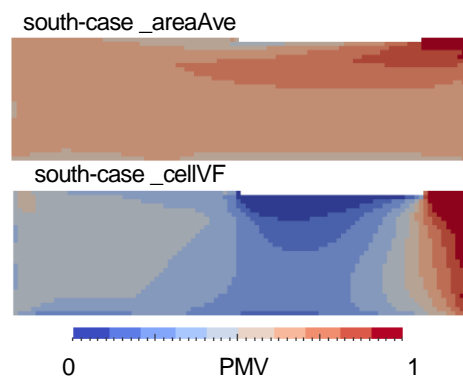


Fig.4 PMV distributions (AA' section in Fig.1)

次にパネル位置を変更したケースの気温, 風速, MRT 分布を Fig.5-6 に示す。気温と風速では, 放射パネルが北へ移動するに従って影響域が拡大している。MRT 分布を見ると south, center, north ケースの順に高温壁面からの

高温域が拡大しており, Fig.7 では平均 PMV がそれぞれ, 0.43, 0.47, 0.51 と MRT 分布に準じて大きくなっている. また, 放射パネルの下は冷やされているが, south ケースでは MRT の低温域のエリアが小さい一方, north ケースでは低温域のエリアが大きく, MRT もより低い値を取っている. このことから, パネルを高温壁面に近づけた south ケースでは, パネルが高温壁面からの放射熱を打ち消すはたらきをしたということが出来る. これは south ケースの放射パネルが高温壁面の MRT 緩和に寄与したことで快適なエリアの拡大に繋がったと考えられる.

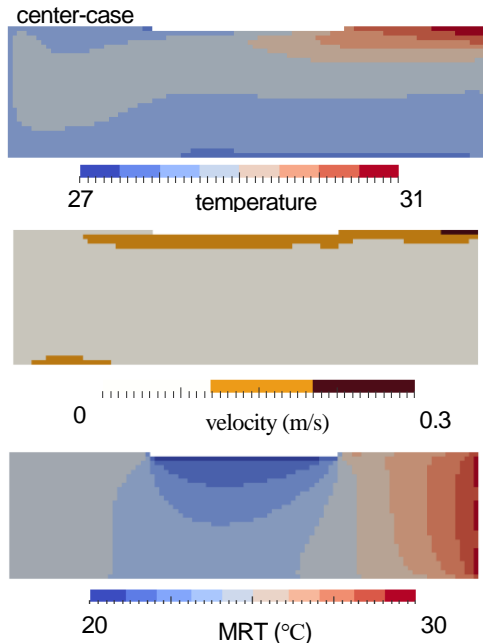


Fig.5 Distributions of temperature, wind velocity and MRT in center-case (AA' section in Fig.1)

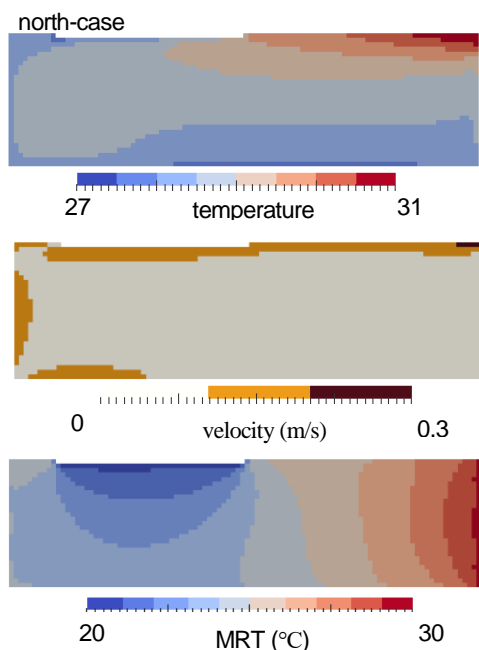


Fig.6 Distributions of temperature, wind velocity and MRT in north-case (AA' section in Fig.1)

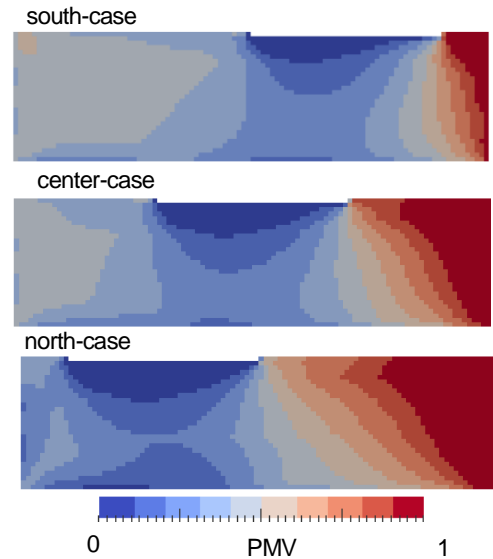


Fig.7 PMV distributions in each cases (AA' section in Fig.1)

### 3. まとめ

分配係数を用いて放射を考慮した CFD シミュレーションを行い, 放射冷房使用時における MRT の空間分布の変化が室内快適性の分布に与える影響について, MRT 計算手法による影響とパネル配置による影響の観点から評価を行った. 以下にその結果を示す.

- 各格子の形態係数を用いて MRT 分布を正確に求めることで, PMV 分布をより正確に評価できた.
- パネル位置を高温壁面に近づけると壁面の MRT が減少し, PMV が冷涼側に遷移した.

### 参考文献

- 1) 空気調和・衛生工学会編：新版 快適な温熱環境のメカニズム, 豊かな生活空間を目指して, 2006
- 2) Feustel HE, Stetiu C: Hydronic radiant cooling preliminary assessment. Energy and Building, 22, pp.193-205, 1995
- 3) 今野雅, 桑沢保夫, 赤嶺嘉彦: 暖房方式による室内気流分布を考慮した暖房負荷補正方法に関する検討 その 1 ルームエアコンディショナー及びセントラル空調による室内温熱環境の CFD 解析, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, D-25, 2017
- 4) Maxime T-G. et al. : Comfort and energy consumption of hydronic heating radiant ceilings and walls based on CFD analysis, Building and Environment, 54, pp.1-13, 2012
- 5) 持田徹, 射場本勘市郎: 熱ふく射効果の評価法に関する研究-AbsorptionFactor 加重の平均ふく射温-, 空気調和・衛生工学会論文集, No.2, 1976