

# 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の温熱環境と居住者の快適性の推定

## Evaluation of indoor thermal environment and the degree of comfort of radiant cooling system using radiation-coupled CFD

○青野 真和 (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)

Masakazu AONO\*<sup>1</sup> Tomohito MATSUO\*<sup>1</sup> Hikari SHIMADERA\*<sup>1</sup> Akira KONDO\*<sup>1</sup>

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

Radiant cooling ceiling systems have been proven to potentially provide an improved thermal comfort environment. In this paper, two different CFD simulations were conducted: one had a radiant cooling system and the other didn't have it. The results of CFD simulation with the radiant cooling system was generally consistent with existing experimental data. The indoor thermal environments were evaluated from the viewpoints of both thermal comfort and energy consumption by comparing the two CFD simulations. The results showed that the radiant cooling system could decrease Mean Radiant Temperature (MRT) and had the potential to reduce energy consumption.

### はじめに

居住者の温熱環境は、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。このうち後者2つは居住者側のパラメータであるため、空調機器は残りの4つを制御する。温熱環境の基準として、MRT、PMV、SET\*、といった指標が存在する。これらの基準を満たし、より快適な温熱環境を実現するために空調設備の重要性が増しているが、従来の対流式の空調では着衣量と運動量に加えて、放射温度もほとんど制御できない。

放射空調は、放射伝熱を利用して冷房を行う空調システムである。放射空調の利点は、室内の鉛直温度勾配が小さいこと、対流空調でみられる吹出し風が直接当たることで発生する熱的不快感が発生しないこと、室内の放射温度を低下させることができるためそれほど気温を下げなくても快適性を確保できることがあげられる<sup>1)2)</sup>。そのため、新しい空調システムとして、放射温度を制御できる放射空調の利用が検討されている。

本研究では、放射空調の使用時と非使用時における室内温熱環境を、CFDを用いてシミュレーションし、比較することで、快適性とエネルギー消費の2つの観点から放射空調の効果を定量的に評価する。

### 1. モデルの検証

#### 1.1 計算条件

本研究では Catalina et al.<sup>1)</sup>による測定実験(以下、文献)を参考にモデルを作成した。室内の大きさは

3.1m×3.1m×2.4m で外側を壁に覆われており、天井面には低温の放射冷房パネルが設置されている。Fig.1 に形状モデルと計算メッシュを示す。

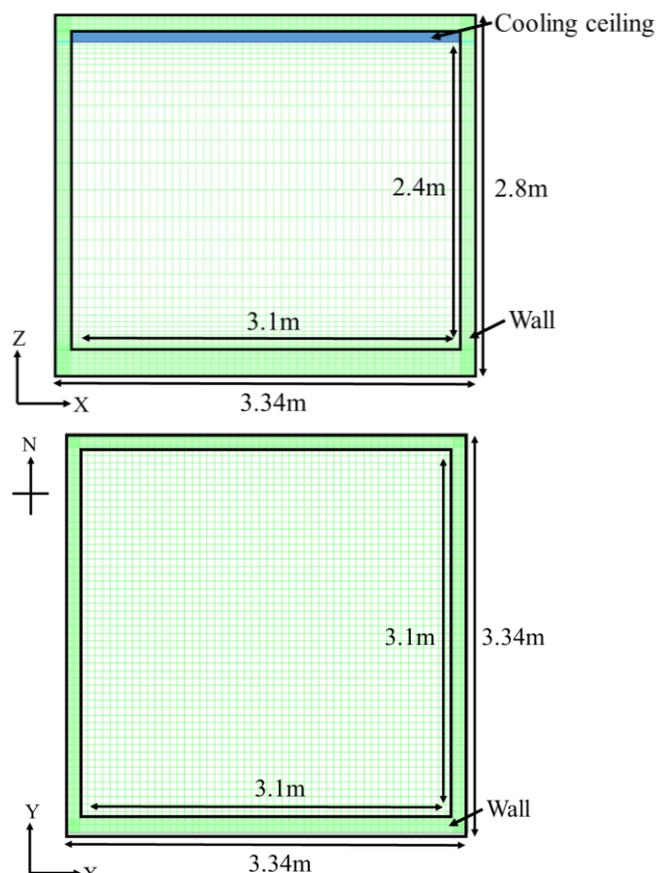


Fig. 1 The shape of the room and grid setting

吸い込み、吹き出し口は存在しない。モデルの室内に熱負荷はないが、壁面外側の温度を固定することで、壁面を通じた貫流熱が存在する。壁の厚みや物性値は文献の値を用いた。総メッシュ数は427,128（室内120,000）である。CFDシミュレーションにはOpenFOAM4.0を使用した。壁面（固体）と室内空気（流体）を連成し、流体については圧縮性定常流れ、層流を仮定し、壁面については放射熱伝達を考慮した。計算条件は、壁面の平均表面温度が文献によるものと等しくなるように、壁面外側の境界温度を44°C、放射パネルと天井の間の温度を17.6°Cに設定し、壁面の放射率は1.0とした。

## 1.2 計算結果

計算によって得られた、各壁面の表面温度と、室内の気温と風速（ベクトルの大きさ）の鉛直分布を文献の結果と比較することにより、作成したモデルの検証を行った。Fig.2に各壁面の表面温度の比較、Fig.3, Fig.4に気温と風速の鉛直分布をそれぞれ示す。

CFDでは、放射伝熱に対して床面内の熱伝導を過大評価している可能性、また室内の不安定な流れの影響により、室温を過小評価している可能性があるが、壁面の表面温度はほぼ一致しており、全体として文献の結果の傾向をとらえることができた。

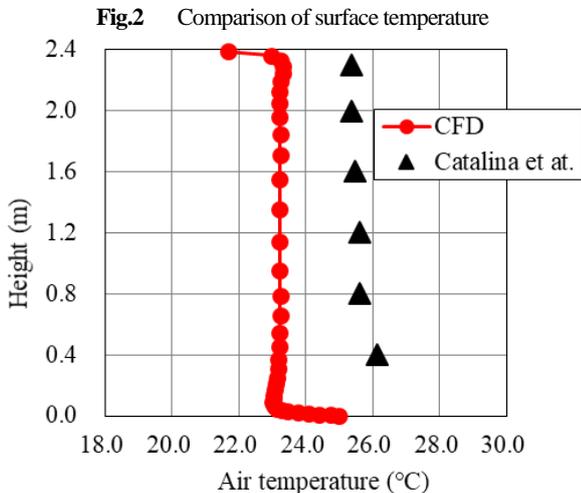
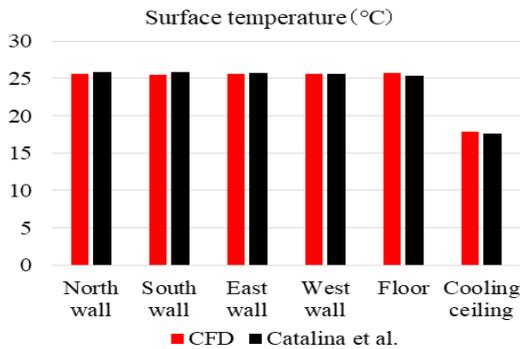


Fig.3 Comparison of vertical air temperature distribution

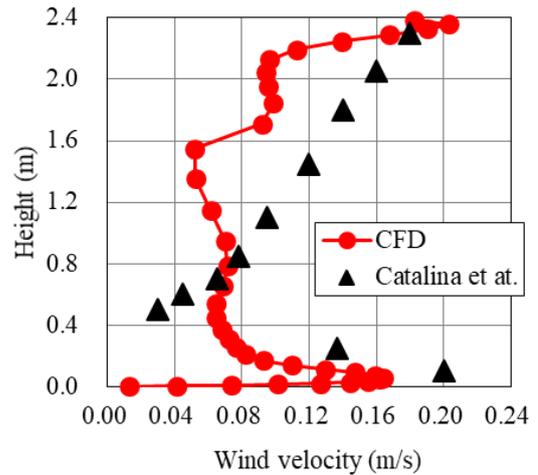


Fig.4 Comparison of vertical wind speed distribution

## 2. 放射空調使用時と非使用時の比較

### 2.1 計算条件

1. で述べたモデルを一部変更し、Fig.5に示す二つの吹き出し口（inlet）と吸い込み口（outlet）を組み込んだ。吹き出し口からは、壁に向けて下方に45°で吹き出している。放射空調使用時（radiant）と、非使用時（no-radiant）の比較を行うために、天井の温度と、吹き出し空気の温度を変化させた。

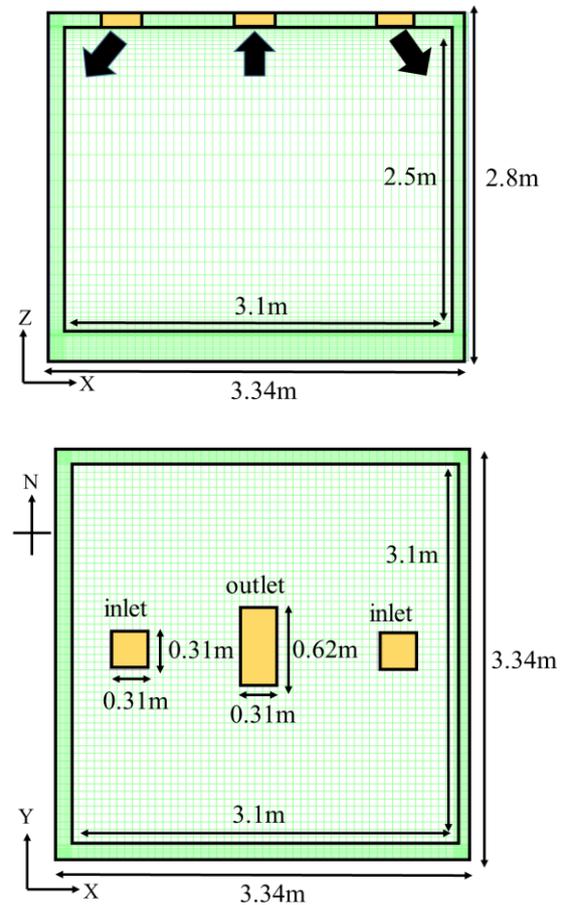


Fig.5 Inlet, outlet and grid setting

radiant では放射冷房パネルを仮定して、天井の温度を 17.6°C とし、吹き出し温度を 20.0°C に決定した。no-radiant は、室内の平均気温が radiant の結果と等しくなるように吹き出し温度の条件を変更し、18°C に決定した。以上の条件で radiant と no-radiant の比較を行った。

## 2.2 計算結果

2つのシミュレーションの結果、室内の平均気温は放射空調使用時に 20.8°C、非使用時に 21.0°C であり、ほぼ等しい状態にすることが出来た。その時の室内の中央断面での気温の分布、風速（ベクトルの大きさ）の分布を、Fig.6-9 に示す。Fig.6, 7 は、放射空調使用時、非使用時の気温の結果、Fig.8, 9 は放射空調使用時、非使用時の風速の結果である。放射空調使用時、非使用時ともに室内に大きな気温の差はみられなかったが、放射空調使用時は壁面近くの気温が低くなっていることがわかる。風速は、どちらも吹き出し口と吸い込み口以外ではほとんど流れが無かった。

Fig.10 に鉛直方向の平均気温の分布を比較したものを示す。ASHRAE によって定められる快適な室内環境の基準<sup>3)</sup>によると、高さ 0.1m と 1.7m で気温の差が 3°C 以内と定められている。その基準は両方のシミュレーションで満たされており、気温の鉛直分布は均一であるといえるが、放射空調使用時のほうが鉛直方向の温度差は小さかった。Fig.11 には鉛直方向の平均風速分布の比較を示す。高さ 0.3m~2.0m までは差がみられなかったが、床と天井付近では、放射空調使用時には非使用時に比べ風速が小さくなるという結果が得られた。



Fig. 7 Temperature distribution at central section of the room (no-radiant)

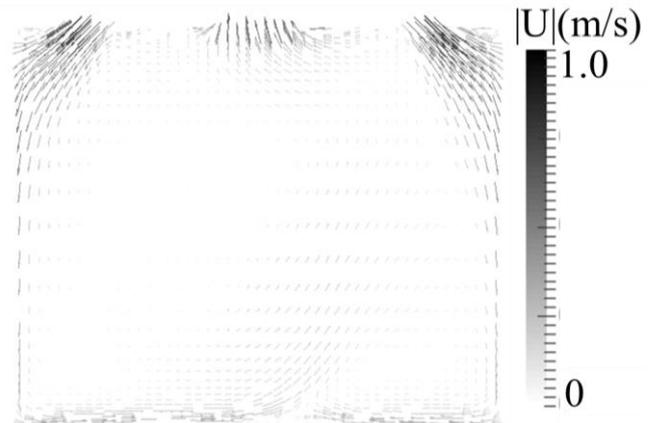


Fig. 8 Wind speed distribution at central section of the room (radiant)



Fig. 6 Temperature distribution at central section of the room (radiant)



Fig. 9 Wind speed distribution at central section of the room (no-radiant)

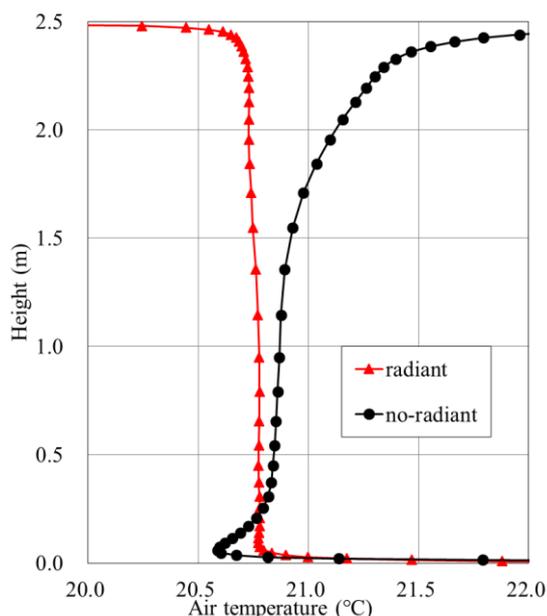


Fig. 10 Vertical distribution of average air temperature

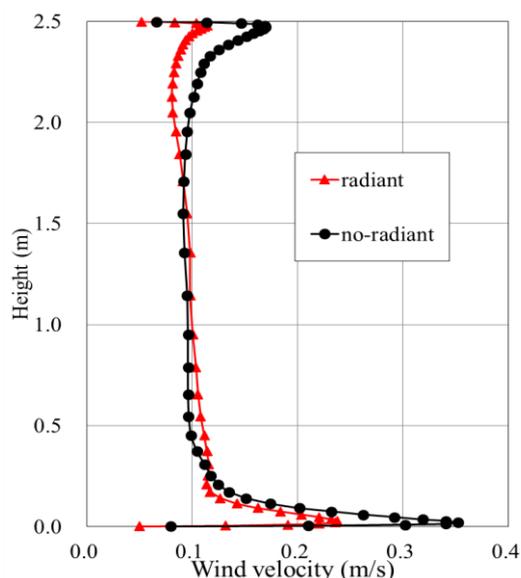


Fig. 11 Vertical distribution of average wind speed

次に、各壁の表面温度を面積で重み付き平均することで、平均放射温度である MRT (Mean Radiant Temperature) を算出し比較した。その結果を **Table.1** に示す。放射空調使用時は、放射パネルからの放射伝熱により、壁面や床面が冷やされるため、MRT が放射空調非使用時に比べ、約 6°C 低くなった。これにより、2 つの結果の室温はほとんど等しいが、放射空調使用時の居住者はより涼しく感じることができる。またその時の冷房による除去熱量を算出し比較した結果を **Table.2** に示す。除去熱量は、放射空調使用時は 427.2 W、非使用時は 619.0 W であり放射空調使用時のほうが小さかった。

**Table.1** Surface temperature and MRT

	Surface(Area)	radiant	no-radiant
Surface temperature (°C)	Floor (9.61m <sup>2</sup> )	23.6	27.4
	Northwall (7.75m <sup>2</sup> )	23.6	28.6
	Southwall (7.75m <sup>2</sup> )	23.6	28.5
	Eastwall (7.75m <sup>2</sup> )	23.6	28.4
	Westwall (7.75m <sup>2</sup> )	23.6	28.5
	Ceilig (9.61m <sup>2</sup> )	17.7	27.9
MRT (°C)		22.5	28.0

**Table.2** Removed heat by cooling system

		radiant	no-radiant
Removed heat by cooling ceiling (W)	Radiation	297.1	-
	Convection	50.9	-
Removed heat by supply air (W)		79.2	619.0
Total (W)		427.2	619.0

### 3. 結論

冷房時に室内の平均気温を等しくする条件で、放射空調システム使用時と非使用時を比較した結果、以下のことが示された。

- 放射空調システムを使用時と非使用時では室内の温度分布はどちらも均一であり、鉛直方向の気温の差もほとんど見られない。
- 放射空調システムは、従来の対流式空調と異なり放射温度を下げる効果がある。
- 放射空調システム使用時のほうが、冷房による除去熱量が小さい。

以上のことから、対流空調に加えて放射空調を使用することで、より効率的に快適な室内温熱環境が得られる場合がある。

今後の課題としては、室温の過小評価の改善を考慮する必要がある。また、MRT に加え快適性指標での比較を行うことで、居住者の快適性を定量的に評価することができる。

### 参考文献

- 1) 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, pp.1740-1750, 2009
- 2) Chiang W-H, Wang C-Y, Huang J-S: Evaluation of cooling ceiling and mechanical ventilation systems on thermal comfort using CFD study in an office for subtropical region, *Building and Environment*, Vol 48, pp.113-127, 2012
- 3) ASHRAE. ASHRAE fundamentals handbook. American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Inc.; 2009.