

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の均一性の評価

Evaluation of uniformity of indoor thermal environment in radiant cooling system using radiation-coupled CFD

学生会員 ○青野 真和 (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)

Masakazu AONO*¹ Tomohito MATSUO*¹ Hikari SHIMADERA*¹ Akira KONDO*¹

*¹ Osaka University

Radiant cooling ceiling systems have been proven to potentially provide uniform thermal environment and improved thermal comfort environment. In this paper, in order to evaluate the impact of radiant cooling system on indoor thermal environment, 9 different CFD simulations were conducted: inlet air temperature 20, 25 and 30 °C and ceiling temperature 18, 23 and 28 °C. The indoor thermal environments were evaluated from the viewpoints of uniformity of thermal environment. The results showed that air temperature was influenced by inlet air temperature and radiant cooling system had the potential to provide both vertical and horizontal uniform thermal environment.

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さが増しているが、従来の対流式の空調では、空調の吹き出し口付近では、直接風が当たることによる不快感や鉛直方向の温度差による不快感など、局所的な不快感が生じる可能性がある。

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り、省エネに向けた新しい空調システムとして利用が検討されている。放射空調の利点としては、省エネルギーだけでなく、室内温熱環境の均一性を高めることがあげられる。室内の鉛直温度勾配が小さく、対流空調でみられる吹き出し風による局所的な温度勾配が発生しないため、室内の温熱環境がより均一になり、快適性が向上するとされている^{1)~3)}。

本研究では、放射空調利用による室内温熱環境の均一化効果を定量的に評価するため、冷房を行う条件で、対流空調の吹き出し温度と放射パネルの有無、設定温度を変化させて室内温熱環境の CFD シミュレーションを行い、結果を比較することで、室内の放射空調の温熱環境均一化効果を評価した。

1. 計算条件

本研究で用いた室内の形状を図-1に示す。室内の大きさは3.1m×3.1m×2.4mで側面は0.12mの壁に覆われている。床と天井には0.2mの厚みがある。天井には2つの吹き出し口と1つの吸い込み口が設置されている。吹き出し口の大きさは0.31m×0.31mであり、吸い込み口は0.31m×0.62mである。吹き出し速度は鉛直下向き方向に0.5m/sで、吹き出し温度は20~30°Cで変化させた。

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。南面を除く側面と床面の外側は28°C、南の壁面外側は日射を想定して、50°Cに設定した。天井の外側温度は放射パネルを想定して18~28°Cで変化させた。28°Cの時は放射空調を使用していない状態を示している。表-1に計算条件の設定を示す。表-2に本研究における計算ケースを示す。

床と壁の物性値はコンクリートの値を使用した。天井は境界条件を28°Cに設定している場合は、放射空調なしを想定しているためコンクリート、そのほかの時は放射パネルを想定して、アルミニウムの物性値を使用した。放射率はすべて1.0とした。

計算に用いたメッシュを図-1に示す。総メッシュ数は438,080である。CFDシミュレーションにはOpenFOAM version-4.0を使用した。壁面(固体)と室内空気(流体)を連成しており、流体については層流を仮定している。また、壁面の放射熱伝達を考慮している。計算は圧縮性非定常流れを仮定しているが、結果については準定常状態到達後の結果を時間平均して求めた。

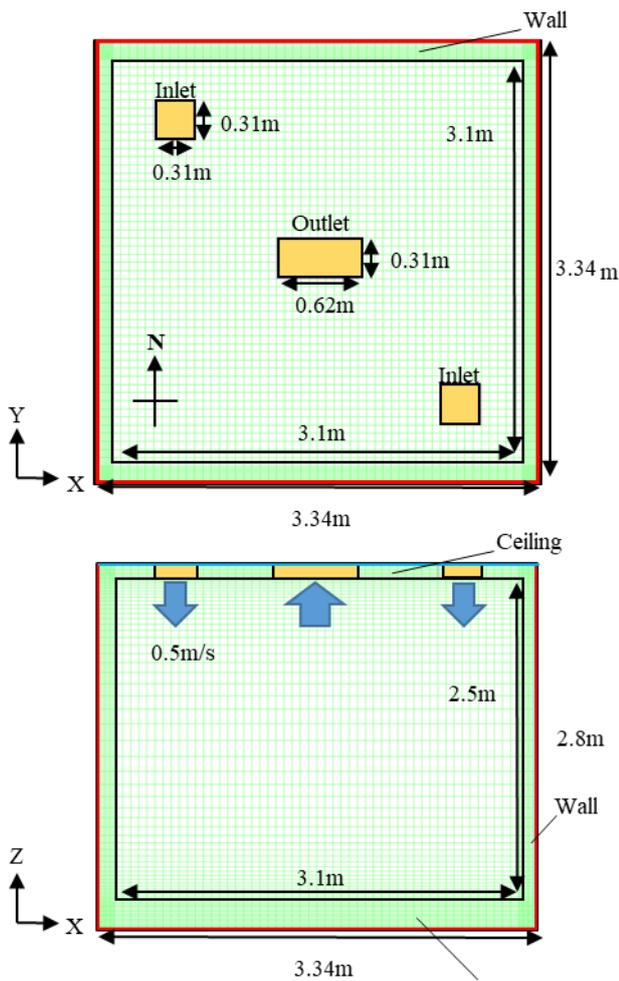


図-1 The shape of the room and grid setting

表-1 Calculation condition

	temperature(°C)	velocity(m/s)
Ceiling	18~28	
South wall	50	
North wall		
West wall	28	
East wall		
Floor		
Inlet	20~30	0.5

表-2 Calculation case

	Ceiling temperature(°C)	Inlet temperature(°C)
Case.1	18	
Case.2	23	20
Case.3	28	
Case.4	18	
Case.5	23	25
Case.6	28	
Case.7	18	
Case.8	23	30
Case.9	28	

2. 結果, 考察

2.2 気温分布

Case.1, Case.3, Case.7, Case.9, の結果のみを示す。平均気温と、気温の標準偏差の値を表-3 に示す。Case.1, 3 と Case.7, 9 の平均気温には大きく差があった。このことから、室内の気温は吹き出し空気の温度に大きく依存していることがわかる。

図-2 に東側の吹き出し口での YZ 断面 (X=2.75) での気温分布の比較を示す。

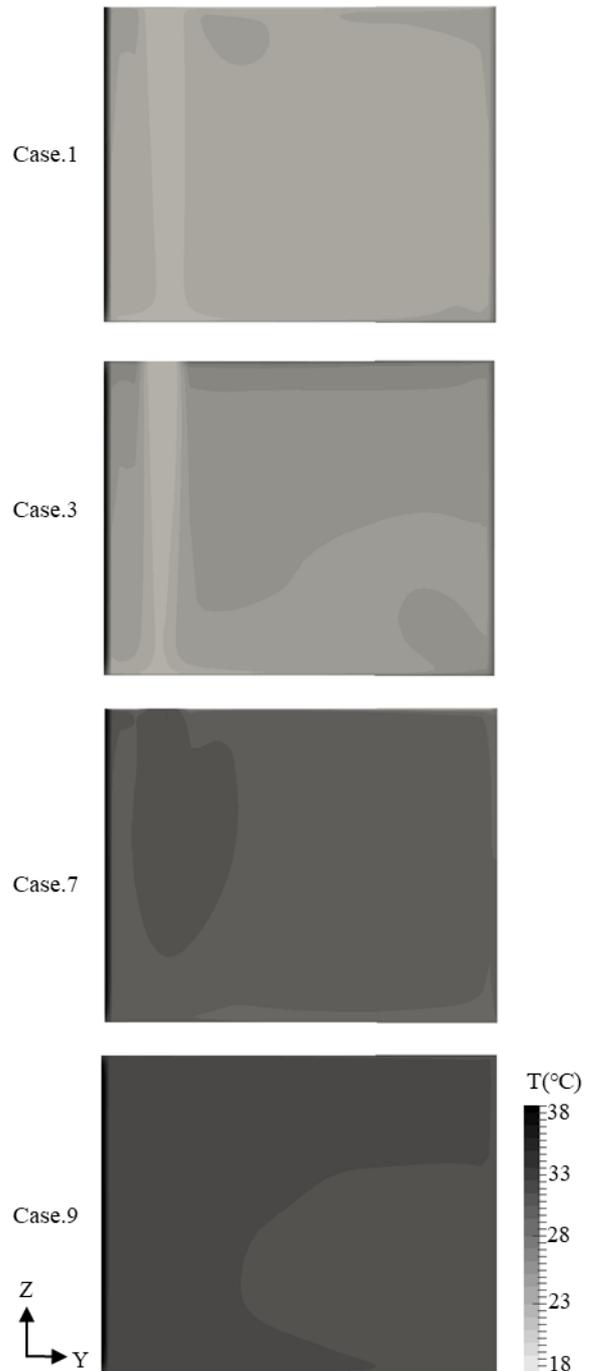


図-2 Temperature distribution at under the east inlet section

表-3 Average temperature and standard deviation

	T (°C)			
	Case.1	Case.3	Case.7	Case.9
Average	21.7	22.8	28.2	30.0
SD	0.4	0.5	0.3	0.1

Case.7 と Case.9 のように、気温と吹き出し温度の差が小さいと均一性は高いが、冷房効果は少ない。Case.3 のように吹き出し温度を下げて冷房を行った場合では、気温を下げることはできるが、放射空調を併用した Case.1 に比べて室内の気温の均一性は低い結果になった。

次に鉛直方向の平均気温分布を考える。ASHRAE によって定められる快適な室内環境の基準⁴⁾によると、高さ 0.1m と 1.7m で気温の差が 3°C 以内の状態が推奨されている。図-3 に鉛直方向の平均気温分布を示す。今回の計算条件では、すべてにおいて ASHRAE の基準を満たしていた。

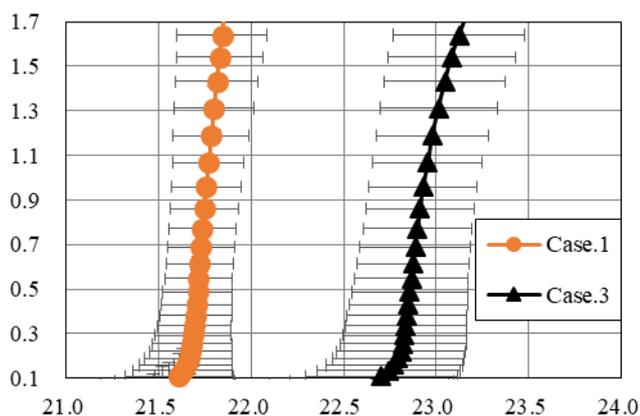


図-3 Vertical distribution of average air temperature

吹き出し温度を下げた Case.1 と Case.3 を比較すると放射空調を併用した Case.1 は鉛直方向の温度差は小さくなった。さらに鉛直方向だけでなく水平方向にも温度差は小さくなった。Case.7 については放射空調を併用してい

るが、Case.1 に比べ鉛直方向の温度差が大きい。このことから、放射空調による天井面の設定温度と吹き出し空気の関係により鉛直方向の気温の均一性は変化するといえる。

2.2 SET*分布

温熱環境の指標として、気温、相対湿度、風速、放射温度、着衣量、運動量の 6 要素を考慮した SET*の分布を算出した。ASHRAE によると快適な SET*の範囲は 22.2°C~25.6°C と定められている⁴⁾。本研究では、相対湿度 50%、clo 値 0.4 clo、代謝量 1.1 met、仕事量 0J を固定値で与えた。気温、風速、放射温度を計算値から入力し SET*を算出した。表-4 に平均 SET*と、SET*の標準偏差を示す。Case1, Case.3 のように吹き出し空気を下げると、SET*の不均一性は高まり、Case7, Case.9 標準偏差が大きくなるといえる。さらに、Case.3 では標準偏差が大きくなっていることから、放射空調を併用することにより室内の SET*の均一性が高まっているといえる。

表-4 Average SET* and standard deviation

	SET* (°C)			
	Case.1	Case.3	Case.7	Case.9
Average	21.7	23.5	27.3	29.5
SD	0.9	1.1	0.2	0.4

東側の吹き出し口での YZ 断面 (X=2.75) での SET* 分布を図-4 に示す。吹き出し口の下では、吹き出し気流の影響で SET*が小さくなった。そのため Case.1, Case.3 では吹き出し口の下部に局所的に不快な場所が生まれている。ここから、吹き出し空気の温度を下げることによって、吹き出し風による局所的な温度勾配が大きくなるのがわかる。Case.7 では吹き出し風による局所的な温度勾配が小さくなったことから、放射パネルの温度が低く、吹き出し温度が高い条件の場合に局所的な温度勾配が最も小さくなるといえる。

図-5 に鉛直方向の平均 SET*分布を示す。気温に加えて風速、放射温度を考慮した SET*でも気温の分布同様放射空調を併用した Case.1 では Case.3 に比べ鉛直方向の温度差は小さくなった。

3. 結論

冷房を行う条件で、吹き出し温度、天井放射パネルの有無とその温度を変化させた場合の比較を行った結果、以下のことが示された。

- 吹き出し空気の温度を下げると、室内の気温を大幅に下げることが出来るが、不均一性が増す。
- 放射空調を併用した場合、鉛直方向の温度差を減らし、局所的不快感を緩和する。

- 放射空調を用いた場合の均一性を上げる効果は、吹き出し空気の温度とパネルの温度の関係によって変化する。

以上のことから、放射空調を併用することで、室内の均一な温熱環境を生み出し、局所的不快感を緩和する可能性があるといえる。

今後、Case.1, 3, 7, 9 以外の条件での結果との比較を行うことで、吹き出し温度、パネルの温度と室内の温熱環境の関係性をさらに解析することが出来る。

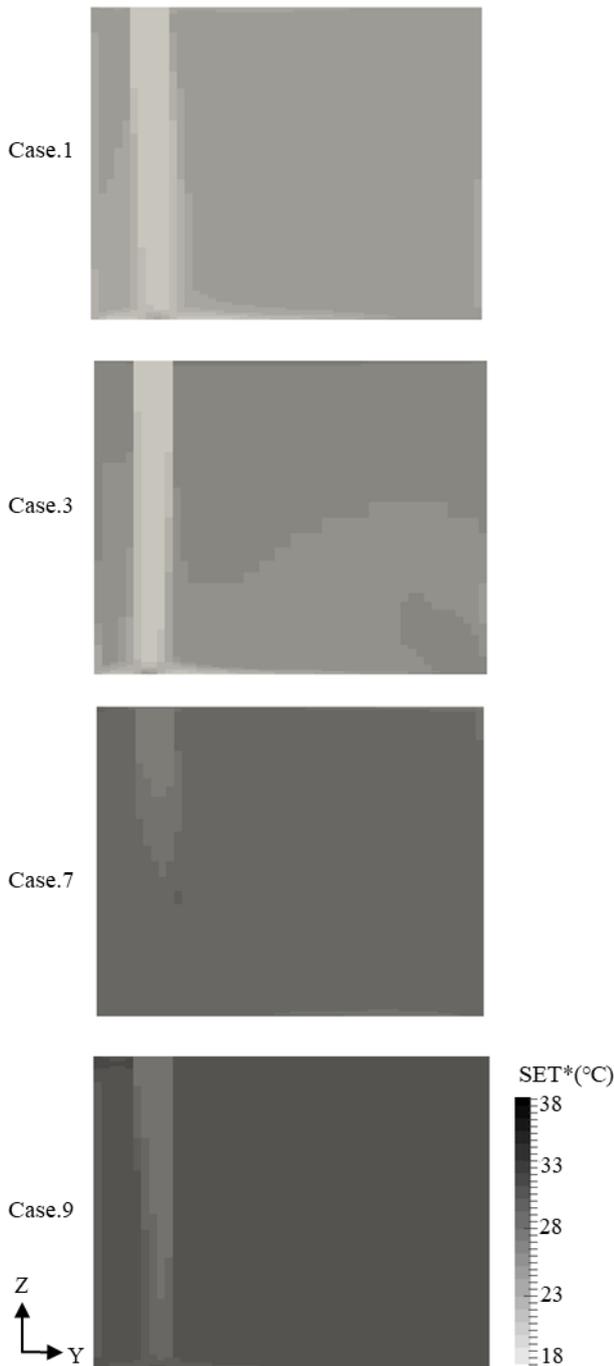


図-4 SET* distribution at under the east inlet section

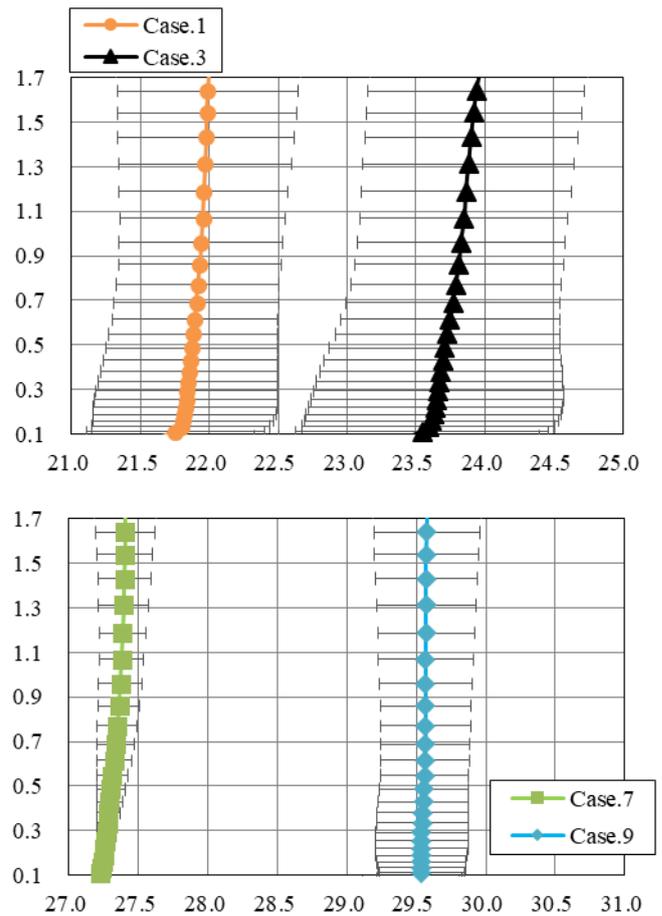


図-5 Vertical distribution of average SET*

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) Rhee K, 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, pp.166-190, 2015
- 4) ASHRAE. ASHRAE fundamentals handbook. American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Inc.; 2009.