

開放型循環方式放射冷房のパネル配置が室内温熱環境におよぼす影響の CFD 解析

CFD analysis of panel layout impact on thermal environment in open-type installation of CRCP systems

○西本 啓祐 (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)

Keisuke NISHIMOTO*¹ Tomohito MATSUO*¹ Hikari SHIMADERA*¹ Akira KONDO*¹

*¹ Osaka University

Cooling radiant ceiling panel (CRCP) systems have been proven to potentially provide an improved thermal comfort environment. In this study, three types of radiant panel layout for open-type installation of CRCP systems were compared from the view point of cooling capacity and thermal uniformity using computational fluid dynamics (CFD) simulations. Slit panel layout gave the highest cooling capacity, and multi panel layout has the most uniform temperature distribution. However, the effect of the layout on thermal uniformity is much smaller than that of cooling capacity. Thus, in most case, slit panel layout is optimal for CRCP systems.

1. はじめに

現在の冷房システムは、室内の空気を冷却して循環させる対流空調が主流になっているが、こうした冷房方式では冷風が直接体に当たることが多く、不快感を生じさせる原因となっている。また、吹き出し口から発生する騒音や、室内の温度ムラも課題として挙げられている。こうした問題に対する解決策の一つとして、放射冷房が注目されている¹⁾。中でも、通常では天井に直接設置される天井放射冷却パネルを、天井と隙間を開けて設置することで、パネルが空気に面している面積を増加させて自然対流による熱輸送を促進させる開放型循環方式放射冷房が、従来の放射冷房と比較しても高い冷却能力を持つことが確認されている²⁾。

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。パネル配置は放射冷房の性能に大きな影響を与えるため、これまでも多くの研究が行われてきた³⁾⁻⁵⁾。しかし、パネル配置に注目した既往研究の多くは従来型の放射冷房に焦点を当てており、開放型循環方式におけるパネル配置の研究はほとんど行われていない。また、結露の発生を避ける必要性からパネル温度の設定には制限があるため、同じパネル温度で高い冷却能力を持つパネル配置を研究することは重要であると言える⁴⁾。

本研究では、開放型循環方式の放射冷房において、放射パネルの配置を変更することで放射パネルの冷却能力と室内温度の均一性がどのように変化するかを解析、評価することを目的とする。

2. 方法

2.1 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。

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。式(1)、(2)での変数の定義を、Table.1、Fig.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), (2)

| Variable | Definition | Unit |
|----------------------|--|------------------------------------|
| F_{ji} | View Factor | [-] |
| A_i | Area of surface i | [m ²] |
| θ_j, θ_i | 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] |
| σ | Stefan-Boltzmann constant | [W/m ² K ⁴] |
| T | Surface temperature | [K] |
| Q | Heat transfer | [W] |

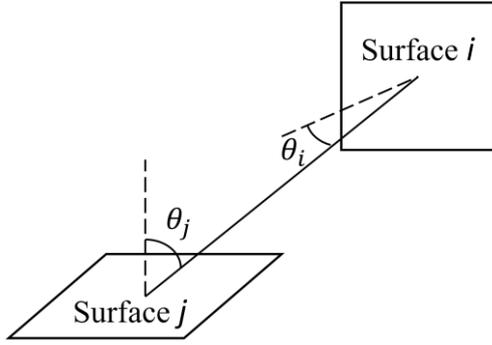


Fig.1 Angle represented by ϕ in equation (1)

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用いており、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_{ji} 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。分配係数を利用した場合に考慮される放射について Fig.2 に示す。

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

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

$$Q_{Ei} = \epsilon_i \sigma T_i^4 \quad (5)$$

$$Q_{Ii} = \sum_j \left(\frac{A_i}{A_j} D_{ji} Q_{Ej} \right) \quad (6)$$

$$Q_{Ni} = Q_{Ii} - Q_{Ei} \quad (7)$$

$$D_{ji} = \alpha_j F_{ij} + \sum_{k=1}^N D_{kj} \rho_k F_{ik} \quad (8)$$

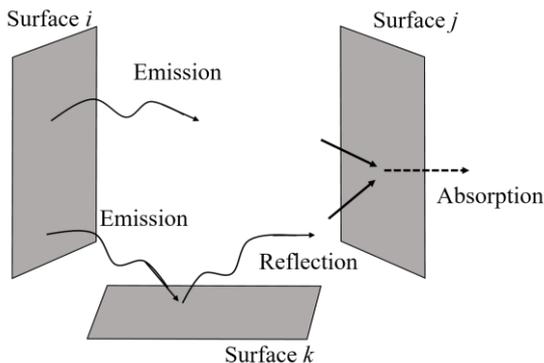


Fig.2 Radiation model

Table.2 Definition of the variable in equation (3)~(8)

| Variable | Definition | Unit |
|------------|---|---------------------|
| ϵ | Emissivity | [-] |
| α | Absorptivity | [-] |
| ρ | Reflectivity | [-] |
| Q_{Ei} | Radiative heat flux emitted from surface i | [W/m ²] |
| Q_{Ii} | Incident radiative heat flux to surface i | [W/m ²] |
| Q_{Ni} | Net incident radiative heat flux to surface i | [W/m ²] |
| D | Distribution factor matrix | [-] |

2.2 計算条件

本研究では Fig.3 に示す形状モデルに対して、Fig.4 に示す単一パネル型、マルチパネル型、スリットパネル型の3種類のパネル配置をそれぞれ実装し、CFD シミュレーションを行った。室内の大きさは 6m×10m×2.9m で、外側を壁に囲まれている。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。その概要を Fig.5 に示す。冷房期の室外からの貫流熱を表現するため、壁面の外部温度は南側を 35℃、東西は 30℃、北側を 25℃ とした。

また、放射パネルは天井から 30cm 離して設置しており、単一パネル型は 4.0m×6.0m×0.1m の放射パネルを 1 枚、マルチパネル型は 2.0m×3.0m×0.1m の放射パネルを 4 枚、スリットパネル型は 6.0m×0.4m×0.1m の放射パネルを 10 枚設置しており、いずれのパネル型でもパネル面積の合計が 24m² になるように調整した。放射パネルの表面温度は 18℃で、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 1.6m×0.8m×0.1m の直方体を 8 個、2.0m×0.8m×0.1m の直方体を 1 個配置した。人を模した直方体からは 39.5W/m² の発熱が発生する。

非圧縮性定常流れを仮定し、計算格子サイズは 1 辺 5cm、格子数は約 140 万とした。

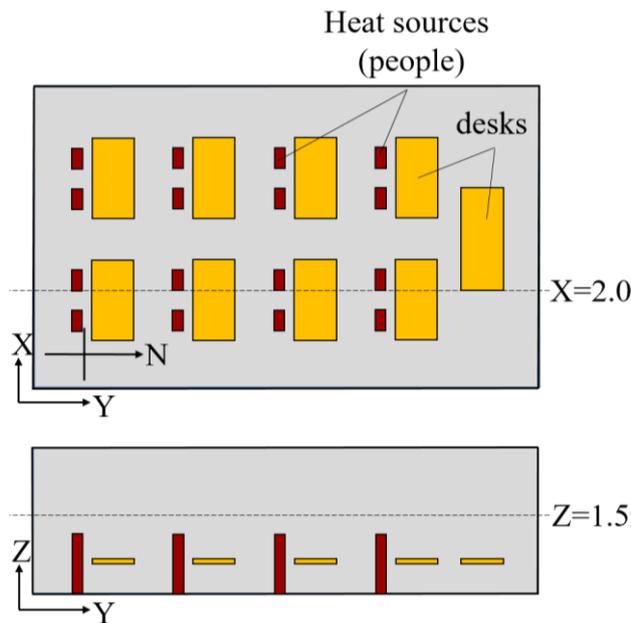


Fig.3 Geometric model

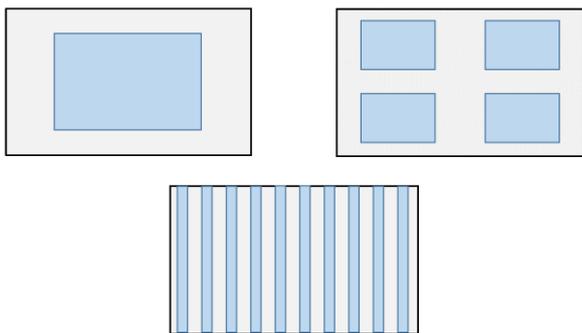


Fig.4 Panel layouts

(Upper left : Single-panel-layout, Upper right : multi-panel layout,
Bottom : Slit-panel-layout)

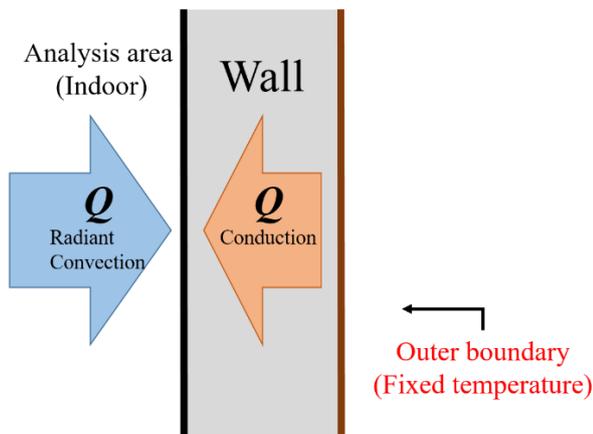


Fig.5 Boundary condition of walls

3. 結果と考察

解析を行った結果について、それぞれのパネル配置における $Z=1.5\text{m}$ 平面上の温度分布を Fig.6 に、 $X=2.0\text{m}$ 平面上の温度分布を Fig.7 に、 $X=2.0\text{m}$ 平面上の空気の流れを Fig.8 に示す。また、各温度分布の平均値と標準偏差をグラフとして表したものを Fig.9 に示す。

まず、Fig.6 と Fig.7 の結果から、どのパネル配置においても部屋の南側が北側より室温が高くなっていることが確認できる。これは、壁面の外部温度が南側の方が高くなっているためである。そのため、パネル配置によって多少の差異は見られるものの、室内では南側の壁面で暖められた空気が上昇し、冷却パネルによって冷やされ、北側で下降する形で空気の循環が起こっている。このことは Fig.8 から確認できる。

また、Fig.9 の全体の平均気温において、スリットパネル型が単一パネル型より 0.81°C 、マルチパネル型より 0.54°C 温度が低くなっていることから、3 種類のパネル配置の中で最も冷却能力が高いのはスリットパネル型であるということがわかる。これは、単一パネル型では部屋を一周する形で空気の流れができていないのに対し、マルチパネル型やスリットパネル型ではパネルの切れ目から天井付近の冷気の下降が起こり、対流による熱輸送が活発に起こるためと考えられる。特に、スリットパネル型はパネルの開口部が最も細かく分散しているため、部屋の様々な場所で天井付近の冷気の下降が起こっていることが Fig.8 から確認できる。

従って、スリットパネル型のパネル配置を採用することで、パネル内の冷却水の温度が同じでも他のパネル配置を採用した場合より部屋の温度を下げる事ができることから、省エネルギーや結露の防止などの効果が期待できる。

さらに、全体の平均気温の標準偏差はマルチパネル型が最小値を取るが、パネル配置の違いによる差は最大でも 0.06°C しかなかったため、放射パネルの配置を変えても温度分布の均一性への影響は限定的であると言える。これは水平面、鉛直面についても同様である。スリットパネル型のパネル配置では、マルチパネル型よりわずかに温度分布の均一性に劣るものの、平均気温を他の 2 種類のパネル配置より大きく下げることができたため、本研究の結果ではスリットパネル型が最も優れたパネル配置であると言える。

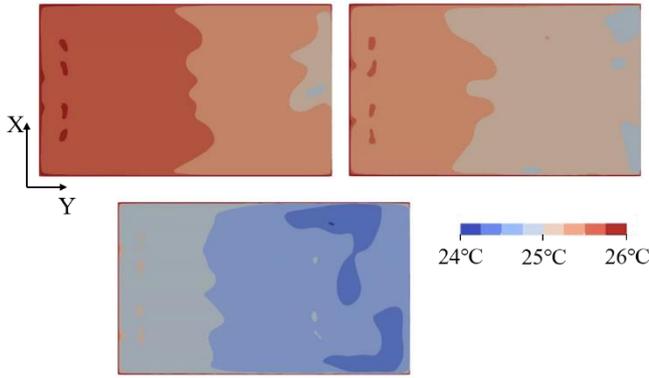


Fig.6 Temperature distribution in $Z=1.5\text{m}$ plane
(Upper left : Single-panel-layout, Upper right : multi-panel layout,
Bottom : Slit-panel-layout)

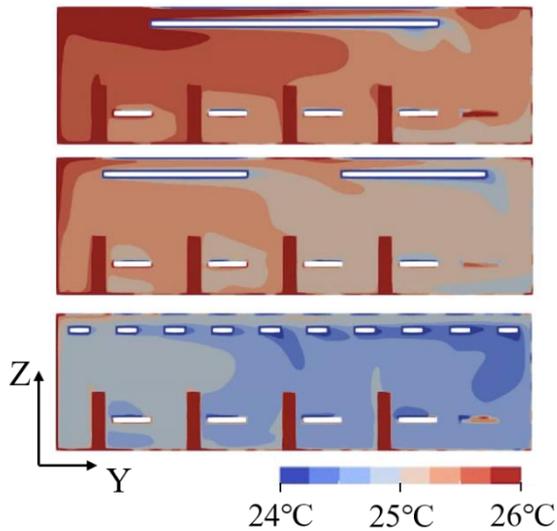


Fig.7 Temperature distribution in $X=2.0\text{m}$ plane
(Upper : Single-panel-layout, Middle : multi-panel layout,
Lower : Slit-panel-layout)

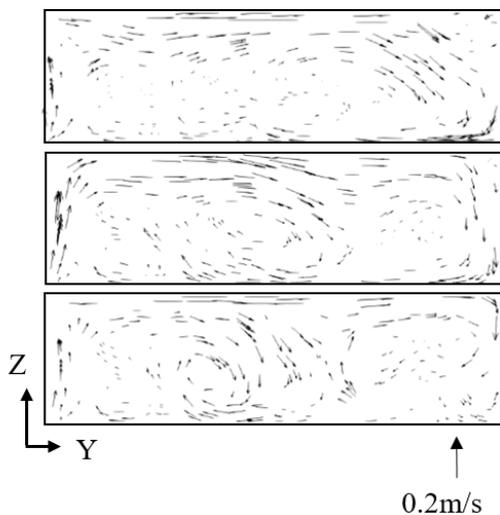


Fig.8 Air flow in $X=2.0\text{m}$ plane
(Upper : Single-panel-layout, Middle : multi-panel layout,
Lower : Slit-panel-layout)

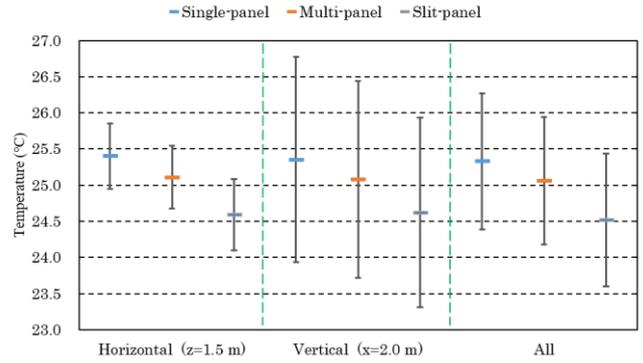


Fig.9 Average temperature (Error bars are standard deviation)

4. 結論

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、解放型循環方式の放射冷房において放射パネルの配置を変更することで、放射パネルの冷却能力と室内温度の均一性がどのように変化するか解析し、評価を行った。以下にその結果を示す。

- スリット状のパネルを多数設置した開放型循環方式の放射冷房を使用することで、パネル面積当たりの冷却能力を高めることができる。
- 放射パネルの配置を変えても、部屋の温度分布の均一性への影響は限定的である。

今後の課題としては、エネルギー消費の観点からも放射パネルの配置を評価する必要があることや、気温だけではなく快適性の指標を用いて評価を行うことが挙げられる。

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*, Vol44, 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) Shin M S, Kyu N-R, Sang H-P, Myong S-Y, Kwang W-K-S: Enhancement of cooling capacity through open-type installation of cooling radiant ceiling panel systems, *Building and Environment*, Vol 148, pp.417-432, 2019
- 4) 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
- 5) Khan Y, Vaibhav R-K, Jyotirmay M, Mahabir B: Performance evaluation of radiant cooling system integrated with air system under different operational strategies, *Energy and Buildings*, Vol97, pp.118-128, 2015