

CFD 解析を用いた居住空間を効率的に冷却する放射冷房のパネル配置の検討

Research into panel layout of CRCP systems that efficiently cools living space using CFD analysis

学生会員 ○西本 啓祐 (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)
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 environment. This system has been shown to increase cooling capacity by open-type installation of CRCP systems. In this study, three types of radiant panel layout for open-type installation of CRCP systems were compared from the view point of average temperature in the entire room and living space using computational fluid dynamics (CFD) simulations. As a result of this research, the following was found. In a situation where people are crowded in a part of the room, placing the radiation panel in the living space can cool the living space more efficiently than evenly placing it.

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、送風の過程で発生する騒音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解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、日本のような湿度の高い地域では、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⁾。

また、放射冷房についての多くの研究¹⁾⁻⁵⁾は部屋全体の気温に着目したものであると言える。室内の一部でのみ作業を行うような部屋（一部のオフィスや講義室）において、居住空間の温度を集中的に下げることが目的とした研究は少なく、特に開放型循環方式の放射冷房について研究した例は確認できなかった。

そこで本研究では、解放型循環方式の放射冷房において、人が室内の一部に密集している条件下でパネル配置を変更することで、人が主に活動する空間を集中的に冷却することが可能であるか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、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、Fig.1、Table.1 に示す。

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

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

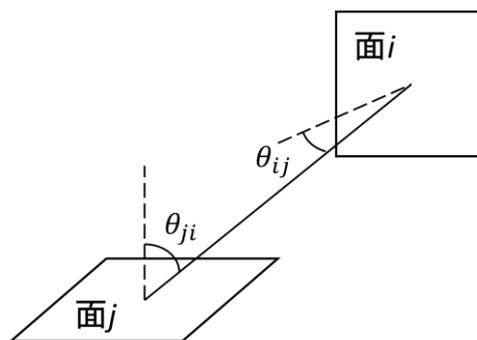


Fig.1 Angle represented by θ in equation (1)

Table.1 Definition of the variables in equation (1), (2)

Variable	Definition	Unit
F_{ij}	View Factor	[-]
A_i	Area of surface i	[m ²]
θ_{ij}, θ_{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]
σ	Stefan-Boltzmann constant	[W/m ² K ⁴]
T	Surface temperature	[K]
Q_{ij}	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 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_{ij} 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。

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

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

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

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

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

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

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

Variable	Definition	Unit
ε	Emissivity	[-]
α	Absorptivity	[-]
τ	Transmissivity	[-]
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_{ij}	Distribution Factor	[-]

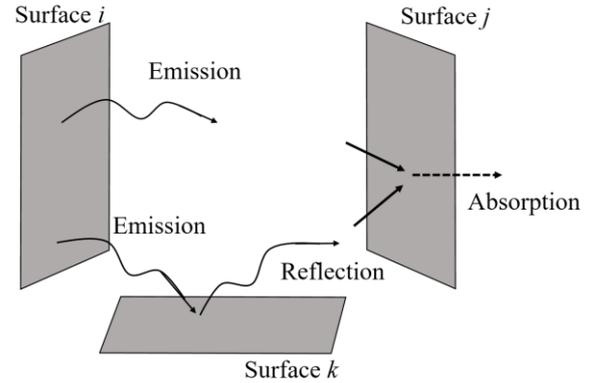


Fig.2 Radiation model

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4種類のパネル配置を組み合わせた **single-uniform case** と **single-biased case** と **slit-uniform case** と **slit-biased case** をそれぞれ作成し、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。外壁面温度は固定されており、内壁面温度は、壁内の一次元熱伝導、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。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50℃、東西は26℃、北側を30℃とした。室内には人を想定した0.4m×0.2m×1.2mの直方体を0≤Y≤5.8[m]の領域に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。

また, 細長い形状のパネルを複数用いることで, 1 枚の大きなパネルを用いるよりも自然対流の成分が大きくなり, 冷却能力が高くなることがわかっているため⁵⁾, 本研究でも Fig.4 の slit-uniform case と slit-biased case のようなパネル配置を用いて計算を行い, single-uniform case と single-biased case との比較を行った。slit-uniform case と slit-biased case では 0.8m×6m×0.1m の放射パネルを 5 枚設置しており, single-uniform case と single-slit case では 4m×6m×0.1m の放射パネルを 1 枚設置している。

放射パネルの表面温度は 18℃ 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 30cm 離して設置している。また, 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 5cm, 格子数は約 140 万とした。

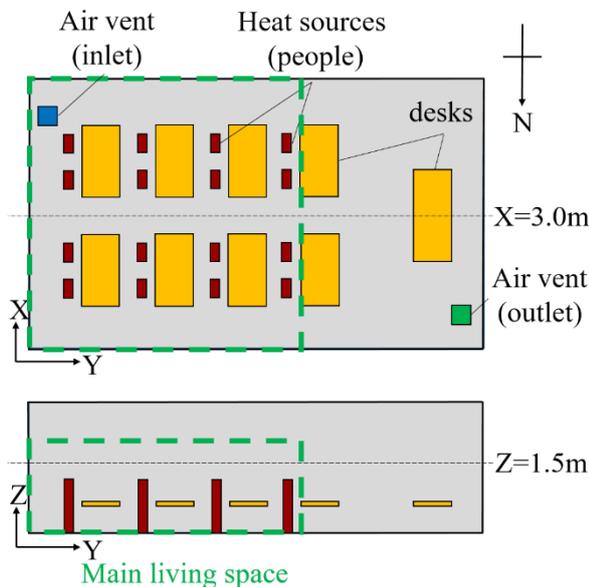


Fig.3 Geometric model

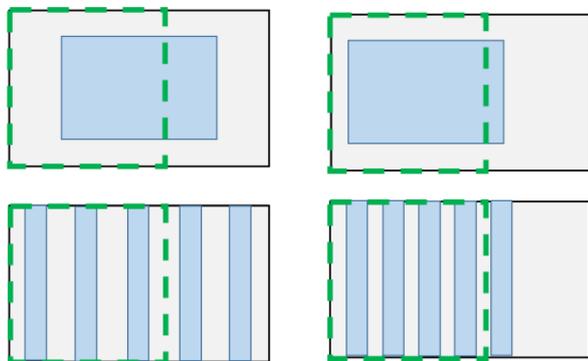


Fig.4 Panel layouts

(Upper left : single-uniform case, Upper right : single-biased case,
Bottom left : slit-uniform case, Bottom right : slit-biased case)

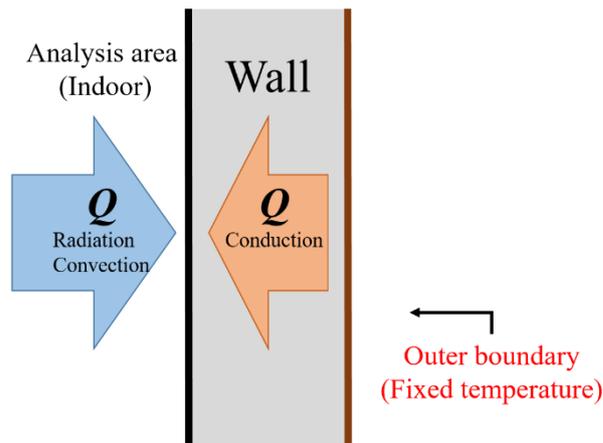


Fig.5 Boundary condition of walls

3. 結果と考察

解析を行った結果について, それぞれのケースにおける Z=1.5m 平面上の温度分布を Fig.6 に, X=3.0m 平面上の温度分布を Fig.7 に, X=3.0m 平面上の空気の流れを Fig.8 に示す。また, 各ケースにおける室内全体の平均気温と, 0 ≤ Y ≤ 6.0 [m], 0 ≤ Z ≤ 2.0 [m] (以後居住空間と呼称する) における平均気温を Fig.9 に示す。

まず, Fig.6 と Fig.7 の結果から, single-uniform case と slit-uniform case では部屋の西側が東側より室温が高くなっていることが確認できる。これは, 部屋の西側に発熱源や換気の吐き出し口があるためであり, 均一なパネル配置では西側の方が温度が高くなるのがわかる。それに対し, single-biased case と slit-biased case では部屋の東側が西側より室温が高くなっており, 居住空間における熱負荷を選択的に除去できていることがわかる。

また, Fig.7 から Fig.8 の結果から, 気温が低くなっている場所と下降気流が生じている場所に相関が見られることがわかる。また, single-biased case と slit-biased case は居住空間上で強い下降気流が生じていることが確認できる。

次に Fig.9 の結果について考察する。まず室内全体の平均気温について, 左側の 2 ケースと右側の 2 ケースを比較すると, 細長い形状のパネルを複数用いることで, 1 枚の大きなパネルを用いるよりも冷却能力が高くなるのが改めて確認できる。

また, パネルを西側に寄せた 2 つのケースでは, 寄せないケースに対して, 全体の平均気温と居住空間の平均気温の両方において気温が低くなるという結果となった。このことから, パネルの配置を調整することで, 人が主に活動する空間を集中的に冷却し, より多くの熱負荷を除去できることがわかった。

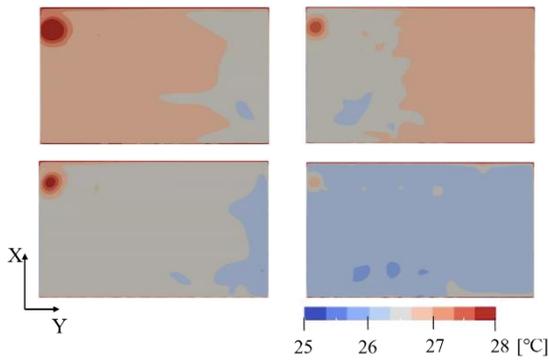


Fig.6 Temperature distribution in Z=1.5m plane

(Upper left : single-uniform case, Upper right : single-biased case,
Bottom left : slit-uniform case, Bottom right : slit-biased case)

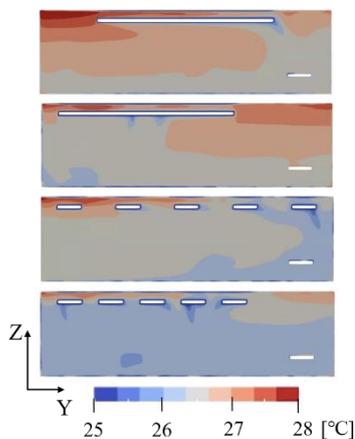


Fig.7 Temperature distribution in X=3.0m plane

(Top : single-uniform case, second : single-biased case,
Third : slit-uniform case, Bottom : slit-biased case)

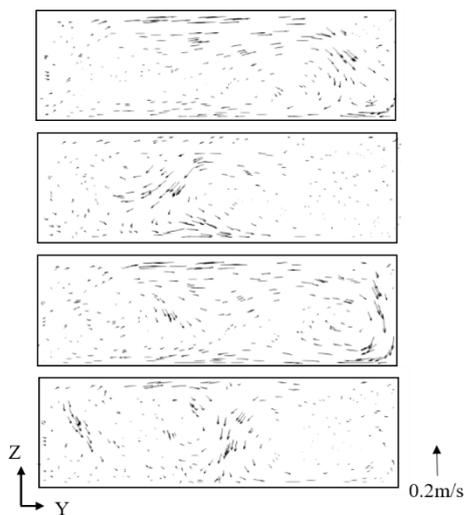


Fig.8 Air flow in X=3.0m plane

(Top : single-uniform case, second : single-biased case,
Third : slit-uniform case, Bottom : slit-biased case)

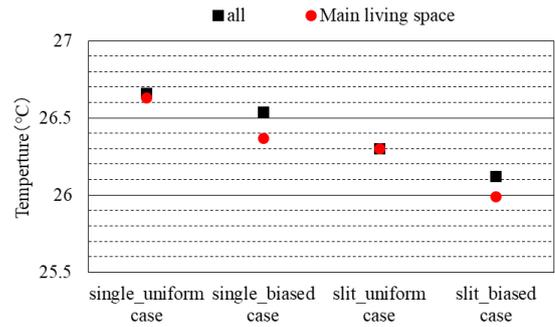


Fig.9 Average temperature

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、人が室内の一部に密集している条件下で放射パネルの配置を変更することで、人が活動する空間を集中的に冷却することが可能であるか評価を行った。以下にその結果を示す。

- 人の集中する空間の上に放射パネルを配置することで、居住空間を選択的に冷却することができる
- 熱源付近に集中的に放射パネルを配置することで、より多くの熱負荷を取り除くことができる

今後の課題としては、空気温度ではなく放射温度で比較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*, 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) 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) 西本啓祐, 松尾智仁, 近藤明, 嶋寺光: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, 第49回空気調和衛生工学会近畿支部学術研究発表会, 2020