

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快適性の評価 Evaluation on Thermal Comfort in the Room Equipped with the 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

Not only air temperature and air velocity, but radiant temperature affects indoor thermal comfort. Therefore in CFD simulation, radiant heat transfer should be consider. In this paper, thermal environment in a room equipped with a radiant panel cooling system was estimated by radiation-coupled CFD. In order to introduce radiant heat transfer into CFD, the distribution factor was used. The results of that was compared to CFD simulation without radiant heat transfer. That comparison showed that effect of radiation worked heat source and wall temperature, and make differences in air velocity distribution.

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。室内の快適性の評価をするにあたって、気温、風速だけでなくこの 6 つの指標を考慮する必要がある。温熱環境の基準として、MRT, PMV, SET*, といい指標が存在し、SET*はこれらの 6 要素をすべて考慮した指標である。

伝熱には、熱伝導、対流熱伝達、放射の 3 形態がある。放射空調は、放射伝熱を利用した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、省エネルギーや室内の快適性の向上などがあげられる¹⁾。

CFD シミュレーションを用いて室内の温熱環境を評価することに関しては、多くの既往研究がある。Catalina et al.²⁾は、測定実験結果の温度を境界条件に固定された温度として与えた CFD シミュレーションを行い、放射空調を利用した室内では、室内の快適性が向上することを示した。このように CFD による室内温熱環境評価では、境界面に固定された温度を与えた条件でのシミュレーションも多く使われるが、実際には境界面の温度は壁面内部での熱伝導、対流熱伝達、放射熱伝達のバランスによって決まるため、熱負荷はそれぞれの地点で異なり、そのため実環境とシミュレーションで結果が異なる可能性がある。より実環境に近い快適性を評価するためには、壁面内の熱伝導及び放射伝熱を正確に解くことが必要である。

Gilani et al.³⁾は、熱源を含む置換換気が行われる室内における空気温度分布、速度分布の推定に CFD を用いた。天井面で形態係数を用いた放射熱伝達を計算したが、放

射による熱伝達の計算には課題があると示した。

そこで本研究では、分配係数を用いた放射モデルを組み込んだ CFD シミュレーションを利用し、室内の快適性を評価することを目的としている。

1. 放射モデル

本研究においては、OpenFOAM-4.0 を利用し CFD シミュレーションを行った。OpenFOAM-4.0 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、固体の放射率や反射率を考慮できない。そこで本研究では、放射率を考慮することのできる分配係数放射モデルを利用した。

形態係数放射モデルは、放射伝熱する面の間の幾何学的な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。式(1)での変数の定義を、表-1、図-1 に定義を示す。

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

表-1 式(1)での変数の定義

変数	定義	[単位]
F_{ji}	形態係数	[-]
A_i	面 i の面積	[m ²]
θ_j, θ_i	面 i, 面 j を結ぶ直線と法線のなす角度	[rad]
r	面 i, 面 j の距離	[m]

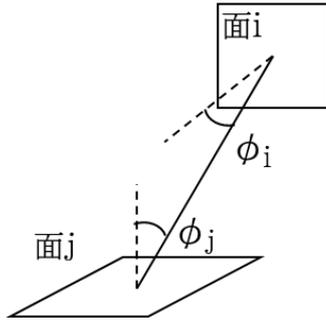


図-1 式(1)におけるφの表す角度

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する。このモデルでは、放射、吸収、反射、透過、外部から入る放射の5つの成分を考慮することが出来る。本研究では長波放射のみを対象とするため、放射、吸収、反射の3つを考慮している。

放射率が変動しないと仮定し、式(2)、(3)に示す関係式から吸収率、反射率を算出した。式(4)は面 i から出射される放射熱流束を表している。式(5)は面 i に入射する放射熱流束を表している。式(6)に示すように面 i が受ける正味放射熱流束は式(4)と式(5)の差で表される。

式(5)で使用した D_{ji} が分配係数行列であり、式(7)はその定義式を表している。この式は、反射による影響が定常になるまで繰り返し計算を行うことが必要である。式(8)は反射放射熱流束の算出、式(9)は反射係数行列の算出を示している。式(9)においても式(7)同様の繰り返し計算が必要である。各式の変数の定義を表-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図-2に示す。

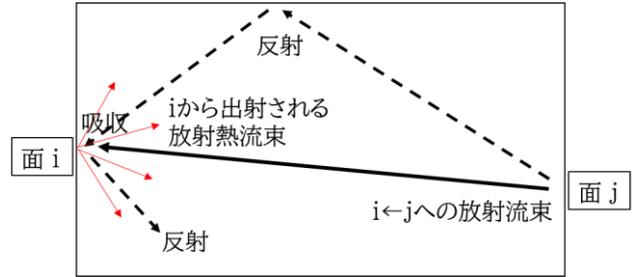


図-2 分配係数モデルで考慮する放射要素

表-2 式(2)~(9)での変数の定義

変数	定義	[単位]
ε	放射率	[-]
α	吸収率	[-]
ρ	反射率	[-]
σ	ステファンボルツマン定数	[W/(m ² K ⁴)]
T	温度	[K]
Q_{Ei}	面 i から出射する放射熱流束	[W/m ²]
Q_{Ii}	面 i に入射する放射熱流束	[W/m ²]
Q_{Ni}	面 i が受け取る正味放射熱流束	[W/m ²]
A_i	面 i の面積	[m ²]
D_{ji}	分配係数行列の転置	[-]
F_{ji}	形態係数行列	[-]
Q_{Ri}	面 i での反射放射熱流束	[W/m ²]
R_{ji}	反射係数行列	[-]

$$\varepsilon = \alpha \quad (2)$$

$$\alpha + \rho = 1 \quad (3)$$

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

$$Q_{Ii} = \frac{A_i}{A_j} D_{ji} Q_{Ej} \quad (5)$$

$$Q_{Ni} = Q_{Ii} - Q_{Ei} \quad (6)$$

$$D_{ji} = \alpha_j F_{ij} + \sum_{k=1}^N D_{kj} \rho_k F_{ik} \quad (7)$$

$$Q_{Ri} = \frac{A_i}{A_j} R_{ji} Q_{Ej} \quad (8)$$

$$R_{ji} = \rho_j F_{ij} \left(1 + \sum_{k=1}^N R_{jk} \right) \quad (9)$$

2. CFD シミュレーション

2.1 計算条件

室内の形状を図-3、図-4に示す。点線は、結果で示した断面の位置を表している。室内の大きさは6.0m×10.0m×2.6mで、南側に1.7m×6.0mの窓があり、天井面に3.6m×4.4mの放射パネルが二つ設置されている。換気に関しては、0.4m×0.4mの吹き出し口と吸い込み口が一か所ずつ存在している。室内の熱源は、窓からの日射によるものと、人体からの発熱によるものを考慮している。人体からの発熱は、人体(座位)を想定した0.4m×0.2m×1.2mの16個の直方体を室内に作成し、その表面から発熱するとした。発熱量は37.5W/m²である。窓の日射による発熱に関しては、窓にロールスクリーンが設置されていると仮定し、窓面から160W/m²の貫流熱があると仮定した。合計で約1000Wの総発熱量である。

作成した計算格子を図-5に示す。格子数は約1,300,000で、壁面近傍で細くなるようにした。

境界条件に関しては、外部温度を固定値として与え、壁面の厚み、熱伝導率により、計算領域の境界温度分布が算

出される。熱伝導によって決まる壁面温度に寄与する対流熱伝達、放射を考慮して熱収支を解いた。境界条件の仕組みを模式的に表したものを図-6に示す。

流体部分の計算は非圧縮性定常流れを仮定して行った。夏季に放射パネルを使い冷房を行っている状況を想定し、具体的な境界条件の設定値は表-3に示す。外部温度に関して、南側外壁面は外気温を与え、対象とする部屋の隣室、上下階は空調が行われていると仮定し室温を与えた。北側には非空調の廊下があることを仮定した。換気に関しては、居住者一人当たりの占有面積割合を利用し流量を決定した。

シミュレーションは、放射計算による結果への影響を評価するため、分配係数を用いて放射を考慮したものと、放射を考慮せず熱伝導と対流熱伝達のみを考慮したものの2つのケースで行った。

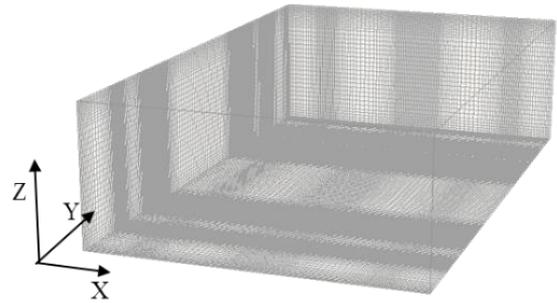


図-5 計算格子

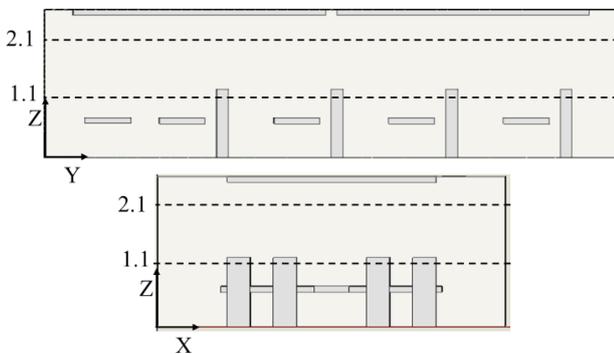


図-3 形状モデル (立面図)

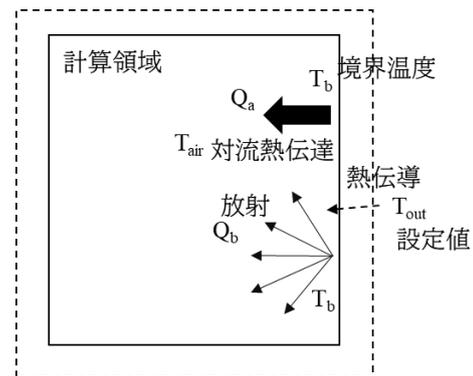


図-6 壁面境界の模式図

表-3 境界条件の値

境界	数値	[単位]
外側壁面温度 (南側)	35	[°C]
外側壁面温度 (北側)	30	[°C]
外側壁面温度 (その他の面)	26	[°C]
放射パネル温度	18	[°C]
換気流量	0.08	[m³/s]
換気流入気温	32	[°C]
窓近傍での発熱量	73.2	[W/m²]
人体からの発熱量	37.5	[W/m²]
放射率	0.98	[-]

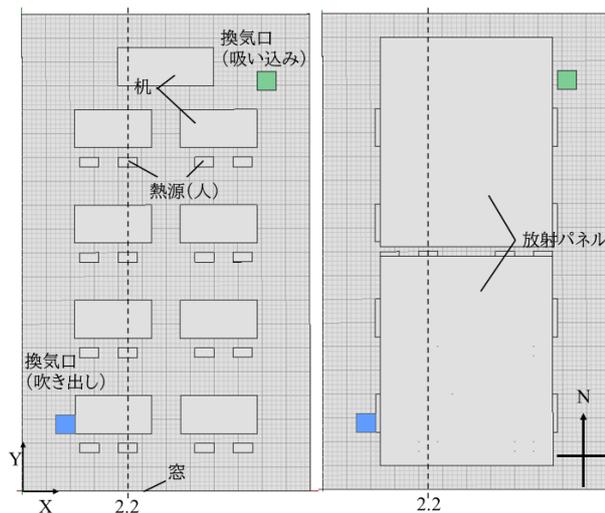


図-4 形状モデル (平面図)

2.2 結果、考察

以下に分配係数モデルを用いて、CFD シミュレーションを行ったものの結果を示す。図-3、図-4で示した点線での断面図での温度分布、速度分布について評価した。

Z = 1.1 mにおける気温の分布を図-7に示す。南面は窓による発熱で高い温度になっている。吹き出し口の下部も換気の影響で高い温度となった。人体の付近は周りよりも低い温度であり、放射パネルの影響で表面温度が下がっているといえる。

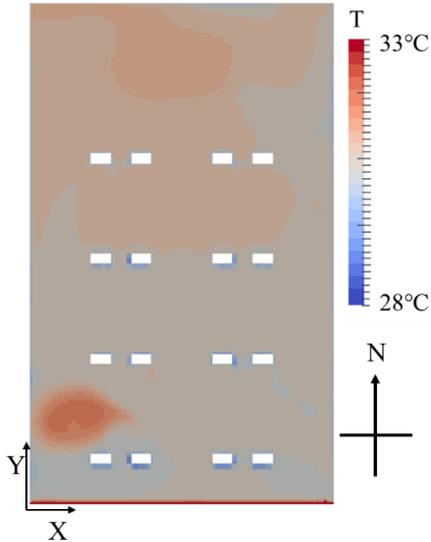


図-7 Z = 1.1m断面での気温の水平分布

分配係数モデルを使用し、放射計算を考慮した結果と、放射計算を考慮していない結果の比較を行った結果を図-8、図-9示す。

図-8は、X = 2.2 mの断面図でのZ = 0 m ~ 2.1 mの気温の鉛直分布を比較したものである。放射を考慮した場合は、放射パネルによる冷房効果が大きくなり、平均気温が約3°C下がった。放射を考慮しなかった場合、人からの発熱の影響で、人付近の気温が高くなっているが、放射を考慮した場合それが見られない、人の表面温度が放射の影響で下がっていることがわかる。また上下温度差が、放射を考慮した場合大きいことから、天井に放射パネルがあることにより、放射で床面の表面温度が下がっているといえる。図-9は、X = 2.2 mの断面図での速度分布を比較したものである。放射を考慮しない場合、人の上部に上向きの流れが生まれているが、放射を考慮した場合はそれが存在していない。図-8、図-9より、室内の熱源周辺では、放射による影響が大きいことがわかる。

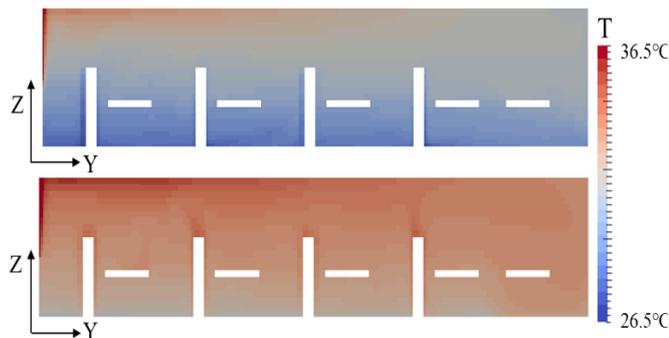


図-8 X = 2.2 m 断面での気温の鉛直分布の比較
(上：放射あり，下：放射なし)

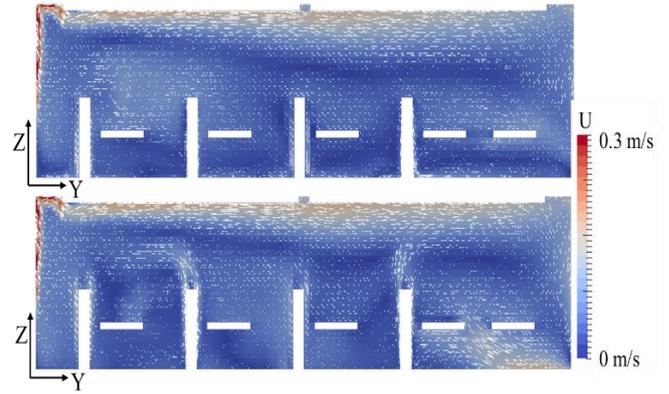


図-9 X = 2.2m 断面での速度の鉛直分布の比較
(上：放射あり，下：放射なし)

3. 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もとに温熱環境評価を行った。

冷房条件で放射空調を使用した場合に、放射を考慮した場合と考慮しない場合の比較を行うことで、以下の違いが見られた。

- 分配係数を使用し放射を考慮したシミュレーションを行うことで、放射を考慮しない場合と比較すると壁面の温度が低く、それに伴って室内の気温も低い結果が得られた。
- 熱源付近では特に放射による影響が大きく、表面温度の変化に伴い、異なる流れがみられた。

以上のことより、分配係数を使用し、放射伝熱を考慮して CFD シミュレーションを行うことで、結果の温度分布、速度分布に変化がみられることを示すことが出来た。

謝辞

本研究で用いた放射計算モジュールの開発には、株式会社 IDAJ の塩島史哉氏に多大な協力を頂いた。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) Gilani S, Montazeri H, Blocken B: CFD simulation of stratified indoor environment in displacement ventilation: Validation and sensitivity analysis, Building and Environment, Vol 95, pp.299-313, 2016