

空気式暖房システムにおける放射効果及び室内温熱環境に関する研究 A Study on the Radiation Effect and the Indoor Thermal Environment with Air Supplied Heating Systems

正会員 ○申 喆雯 (名古屋大学)
技術フェロー 奥宮 正哉 (名古屋大学)

技術フェロー 齋藤 輝幸 (名古屋大学)
正会員 飯塚 悟 (名古屋大学)

1. 序論

従来のエアコンは室内の空気を循環させることによって冷暖房する為、室内の水平方向の温度ムラが大きい、風が直接に体に当たり不快感や気流を感じるなどの問題がある。一方、水式の放射システムは直接気流を発生させない為、不快感や気流感の問題はなくなり、室内の温度ムラも緩和される。しかし、日本の夏は湿度が高い為に、水式の放射システムは表面に結露しやすく、冷却能力が足りないなどの問題がある。そのため、日本の気候に合うような空気式の放射システムとして全空気誘引整流放射空調システム（以下誘引放射空調と呼ぶ）が開発され、様々な施設に導入された。特に、従来のエアコンと比べ足元を寒く感じにくくなり、より快適な環境を提供でき、搬送動力の低減などによる省エネ性も期待できる。

しかし、誘引放射空調とエアコンは同様に空気を吹き出す為、何故室内の快適性に大きな違いがあるのかはあまり明確ではない。誘引放射ユニットの放射面は天井面の10%しかなく、両者の差違の原因を明らかにする必要がある。

2. 研究対象

2.1 誘引放射暖房システムの概要

暖房時は給湯器からの温水を天井裏に設置されたファンコイルユニットへ送る。吸い込まれた室内還気と外気はファンコイルにより暖められ、室内の誘引放射ユニットに分配される。

図1に誘引放射ユニットの断面図を示す。①ファンコイルユニットから給気し、②圧力差で室内空気を誘引し、③給気と誘引された空気を混合して、④放射プレートを加熱・冷却した後、⑤整流して吹き出しつつ放射する。特徴として

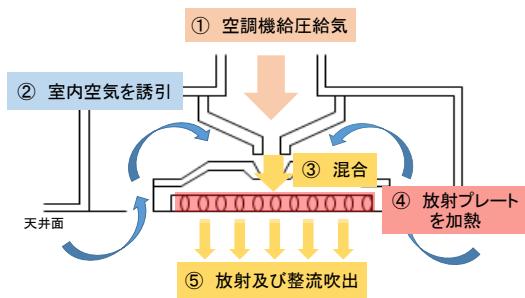


図1 誘引放射ユニット（空気式システム）^{注1}

表1 誘引放射ユニットの仕様

SLM-200M	
標準風量/範囲	200m ³ /h(180~240m ³ /h)
誘引混合風量	330m ³ /h
給気温度	冷：13~16℃ 暖：40~42℃
誘引混合温度	冷：+6~+5℃ 暖：-4~-6℃
標準能力	冷：1.3KW 暖：1.2 KW



図2 実験室の写真



図3 パネルの写真及び寸法^{注2}

は、従来の設計より 40℃-42℃の高温送風、30%少風量で室内に給気することで送風動力を30-40%削減できる。表 1、図 3 に本研究で用いた実験室に設置された誘引放射ユニットの概要を示す。

2.2 研究対象建物

対象建物は名古屋大学工学部 5 号館にある実験室である。概要を図 2 に示す。実験室の寸法は 3.75m(w)×7.5m(d)×2.6m(h)であり、北側に窓を持つ。誘引放射ユニット 3 台、排気口 1 つ、照明 3 台が設置されている。

3. シミュレーション

3.1 対象物及び空調システムのモデル化

実験を行った実験室をモデル化した。実験室モデルの寸法、北側の外皮の寸法、窓の寸法を図 4、5 に示す。日射の影響は考慮しない。

図 6 に誘引放射ユニットをモデル化した寸法を表した。吹き出し口、誘引口のサイズを計算の為にメッシュサイズに合わせて調整した。実験で使ったエアコン^{注 3}は商品カタログより吹き出し口の面積を 0.06m²、吸い込み口面積を 0.18m²とした。

3.2 シミュレーションの概要

本研究で用いた汎用熱流体ソフトは OpenFoam(ver.2.2.0)であり、標準 k-ε の乱流モデルにより、非定常解析を行った。放射環境も同時に解析する。放射モデルは DOM (Discrete Ordinate 法) 有限体積離散座標法モデルである。

本研究では暖房時を対象にした。室内発熱である照明及び人体と湿度に関する計算は考慮していない。表 2 に解析条件を示す。吹き出し口に流入条件の乱流エネルギー k、k の散逸率 ε を計算し、与えた。ここで、U は吹き出し風速、Cu=0.09、Lm は 0.07L の値とした。

3.3 検討ケース

①放射ユニットの放射面または暖められた天井面からの放射効果をシミュレーションにより確認する。②誘引放射空調を、より天井高さが高い建に導入した場合の室内環境について検討する。③天井高さが高い建物に導入する場合、

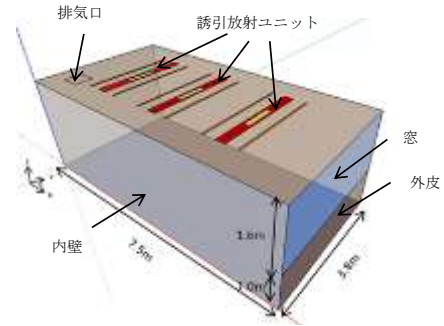


図 4 実験室モデル_誘引放射空調

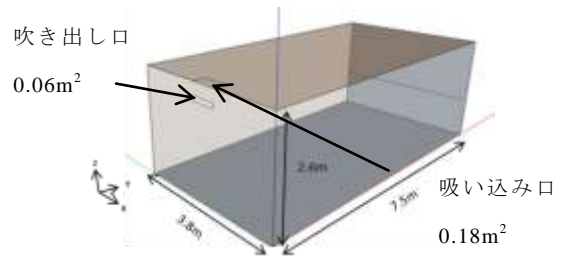


図 5 実験室モデル_エアコン

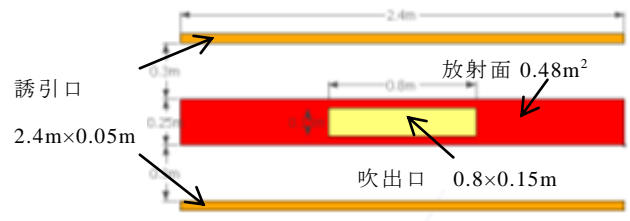


図 6 誘引放射ユニットモデル (標準モデル)

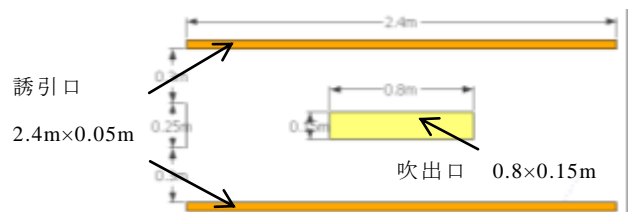


図 7 誘引放射ユニットモデル (放射面無のモデル)

表 2 解析条件

1	解析領域	7.5m (X) × 3.8m (Y) × 2.6m/3.1m/3.6m (Z)	
2	メッシュ数	75×38×26=74100/88350/102600	
3	移流項の差分スキーム	1次精度風上差分	
4	放射モデル	DOM有限体積離散座標法	
5	乱流モデル	標準 k-εモデル	
6	吹き出し境界条件	風速 (U)	各ケースによる
		温度	各ケースによる
		k	(3/2)×(U×I) ²
		ε	Cu ³ (3/4)×k ³ (3/2)/Lm
		p_rgh	0勾配条件
7	誘引境界条件	風速/温度	0勾配条件
		p_rgh	101325Pa
8	排気境界条件	風速	各ケースによる
		温度	0勾配条件
		p_rgh	101325Pa
9	壁面境界条件	温度	各表面に熱貫流率を与える。 窓: 2.9W/m ² ·K; 内壁: 3.1W/m ² ·K; 天井: 1W/m ² ·K; 床: 0.8W/m ² ·K; 外皮: 0.8W/m ² ·K
		気流解析	対数則
I=0.1; Lm = 0.07*L; Cu = 0.09			

誘引放射とエアコンによる室内温熱環境の違いを比較する。以上の目的の為、表 3 に示したように検討ケースを設定した。

3.4 モデルの再現性の検証

誘引放射空調、エアコンのシミュレーション結果（0.5h 後の結果）を、実験で計測した 8 ケ所の上下温度と比較し、図 8 に示す。計測値との温度差は若干あるが傾向は同様であり、室内の温度環境をおおよそ再現できると考える。

4. 解析結果と考察

各ケースの 1800 秒後における MRT^{注 4}、天井面からの熱放射量、誘引放射ユニットの放射面からの熱放射量（負の値は熱放射することを意味し、正の値は熱放射の吸収を意味する）、室内の居住域を代表する室中央 FL+1.1m の室温、風速によって PMV 値を求め、上下温度差（ISO-7730 における推奨値は、FL+0.1m-1.1m の温度差が 3℃以内）より考察する。但し、PMV の計算は相対湿度 50%、1.0clo、1.2 met の前提である。

4.1 誘引放射ユニットの放射面の影響

誘引放射ユニットの放射面の影響を case2.6_有と case2.6_無との比較によって示す。

表 4 に示すとおり、case2.6_無は対流により空気へ与える熱量が多いが、上部の空気の温度が高くなると共に、熱損失が大きくなってしまい、下部（FL+1.5m 以下）の温度がより低くなっていた。その結果、室中央 FL+1.1m における室温が 3℃程度低くなった。

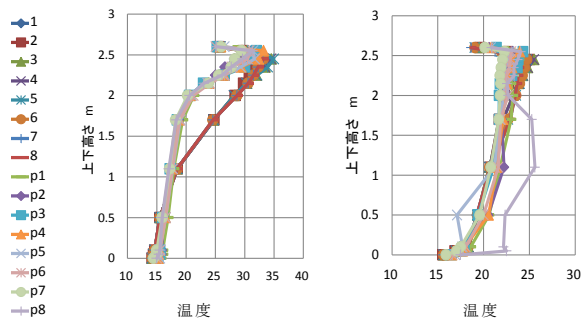
一方、case2.6_有は case2.6_無に比べ、放射面の影響によって、MRT が 0.1℃高くなった。投入熱量が同じでも、放射面があると、同じ解析時間において、室中央 FL+1.1m における PMV が高くなりやすいと言える。

図 9 に、室中央における上下温度分布を示す。case2.6_有の上下温度差は、この時点で推奨された 3℃を超えてしまい、足元はより寒く感じる可能性がある。

図 10 に、解析から 1800 秒後の case2.6_有における各表面からの熱放射量を示す。表 4 に示

表 3 検討ケース

誘引放射空調	吹出温度℃	放射面温度℃	風速m/s	天井高さm	放射ユニット	計算時間s
case2.6_有	41	41	0.3	2.6	標準モデル	1800
case2.6_無	41	-	0.337	2.6	放射面無モデル	1800
case3.1_44	44	44	0.3	3.1	標準モデル	1800
case3.6_47.2	47.2	47.2	0.3	3.6	標準モデル	1800
case3.1_41	41	41	0.35	3.1	標準モデル	1800
case3.6_41	41	41	0.4	3.6	標準モデル	1800
エアコン	吹出温度℃	風向	風速m/s	天井高さm		
case2.6_0	36	水平方向	1.68	2.6		1800
case3.6_0	40	水平方向	1.8	3.6		1800



1—8 の値は計算値であり、P1—P8 の値は計測値である。

図 8 計測値との比較

表 4 1800 秒後の結果

	温度℃	PMV	MRT℃	放射面の熱放射量w	天井面の熱放射量w	上下温度差℃
case2.6_有	18.5	-0.7	17.5	-160.2	-1168.1	3.8
case2.6_無	15.7	-1.1	17.4	無	-1399.7	1.7
case3.1_44	14.3	-1.3	17.6	-183.1	-1394.8	0.5
case3.1_41	14.3	-1.3	17.4	-160.7	-1289.0	0.5
case3.6_47.2	14.1	-1.3	17.7	-206.8	-1479.0	0.4
case3.6_41	14.1	-1.3	17.3	-160.0	-1263.6	0.4
case2.6_0	20.7	-0.6	16.1	無	-395.5	2.3
case3.6_0	15.4	-1.3	15.3	無	-503.9	1.3

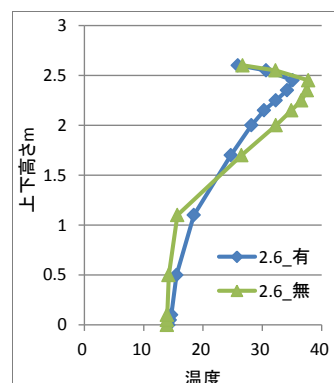


図 9 室中央における上下温度分布の比較

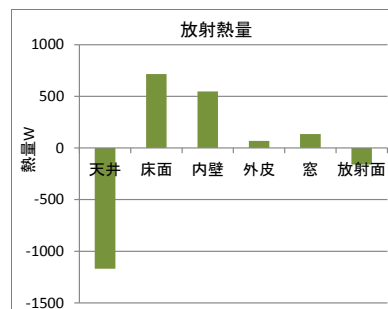


図 10 case2.6_有における各表面からの熱放射量

したように天井面、放射面がそれぞれ-1168.1w、-160.2wで放射し、他の面より放射を吸収する。熱放射量は位置、面積の違いによって異なる。1800 秒の時点の天井面と放射面の放射熱量の比較で、大体 9 倍大きいと分かった。面積が小さいパネルより天井面の温度は低い放射影響が大きいと言え、天井面からの熱放射影響を期待できると考える。

4.2 異なる空気式暖房の比較

表 4 に示したように、誘引放射空調に比べ、エアコンは居住域の空気を直接暖める為、立ち上がりが早い表面を暖めにくい。その結果、室中央 FL+1.1mにおける室温が 2.2℃高くなったが、天井面からの熱放射量が少なく、MRT が 1.4℃低い為、より寒く感じられる環境が形成された。

室中央における上下温度差については、エアコンに比べ、誘引放射空調は上下温度差が大きくなり、推奨温度差 3℃を超えてしまったが、本計算はまだ立ち上がりの段階の結果のため、更に検討が必要である。

4.3 天井が高い建物への導入の比較

表 4、図 11 の結果より、天井高さに伴う負荷の変化に対して、吹き出し温度により調整したケースは吹き出し温度が高くなるため、天井面及び放射面からの放射量が多くなり、MRT が 0.4℃高くなったが、室中央 FL+1.1mにおける室温、PMV は同じである。同程度の天井高さの変化に対して、風速の調整あるいは吹き出し温度の調整による室内の温熱環境はほとんど変わらなかった。

より天井が高い建物に導入した場合、エアコンに比べ誘引放射空調の立ち上がりが遅い為、室中央 FL+1.1mにおける室温はやや低いが、MRT が 2.3℃高くなった。そのため、誘引放射空調は比較的暖かく感じる温熱環境が形成できると考えられる。

表 5 に誘引放射空調における、600 秒、900 秒、1800 秒ごとの床面が受け取る熱放射量及び天井全体からの熱放射量を示す。天井高さを問

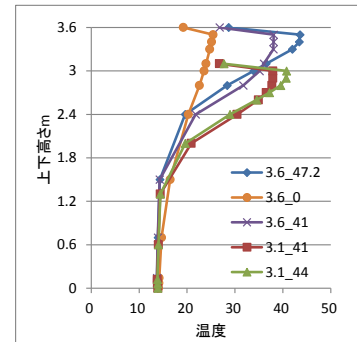


図 11 室中央における上下温度分布の比較

表 5 床面及び天井全体からの熱放射量

項目 時間	床面の熱放射量W			天井全体からの熱放射量W		
	600s	900s	1800s	600s	900s	1800s
case3.1_44	722.6	735.3	750.0	-1584.9	-1583.3	-1577.9
case3.1_41	674.7	689.2	706.8	-1462.0	-1460.9	-1449.8
case3.6_47.2	681.9	696.2	712.3	-1687.1	-1684.6	-1685.8
case3.6_41	600.4	626.1	636.4	-1437.4	-1430.8	-1423.6

わず、同じ吹き出し条件であるケースにおける天井全体からの熱放射量はほぼ同じであるが、床面が受け取る熱放射量は天井が高い方がやや少なくなった。case3.6_47.2 と case3.1_41 における天井全体からの熱放射量の差が最も大きいですが、床面の熱放射量はほぼ同じであった。

床面の面積が同様の場合は、天井が高くなるほど相対的に壁面の面積が大きくなり、床面に届く熱放射量が減ることになるため、MRT が下がり、寒く感じてしまう。その為、特に天井が高い建物に導入する場合は、建物の良い断熱性が必要になる。

5. 結論

本研究では、対流・放射連成解析を用いて、暖房時を対象とし、空気式空調における放射効果の検討を行った。

誘引放射ユニットの放射面より、暖められた天井面の放射影響が大きいことが分かった。エアコンの場合も天井面からの放射はあるが、誘引放射空調は MRT が高いので、より快適な室内温熱環境が形成され、立ち上がり時に注意を要するものの、天井が高い建物にも適用可能と思われる。

注 1、2：木村工機株式会社 HP、注 3：三菱電機 HP、

注 4：MRT=各面積×表面温度/総面積