

同様な PMV が保たれた場合における 壁放射暖房とエアコン暖房の上下温度差に関する研究

崔軍*, 湊政樹**

Study on Vertical Temperature Distribution of Wall Radiation Heating and Air Conditioner Heating when Same PMV is Maintained

Jun CUI and Masaki MINATO

Synopsis

Although the buildings which use a wall radiation heating system have been increasing recently, there are few papers about it. When indoor PMV was kept a constant value, the vertical temperature distribution of wall radiant heating and the air conditioner heating was examined by experiments, and the following results were shown in this paper.

(1)When indoor PMV is maintained by the same value, vertical temperature distribution of wall radiant heating (panel surface temperature 41°C and 45°C) is larger than air conditioner heating (setting room temperature 22°C and 24°C). (2)Air conditioner heating tends to produce horizontal temperature distribution than wall radiant heating. (3)Vertical temperature distribution of wall radiant heating is almost fixed regardless of the temperature of a radiant panel.

Keywords: Wall radiant heating, Air conditioner heating, Vertical temperature distribution, PMV

1. はじめに

エアコンによる対流式暖房は、吹出し温度が室内空気温度より高いため上下温度差が生じ、コールドドラフトなどの問題が発生しやすいとされている。居住者の不満足率は空気の上下温度差に影響され、頭部と足部の温度差が 4K 以上になると不満足者率が 10%を超え、その差が 6K 以上になると不満足者率が 20%を上回る¹⁾。放射暖房は室内空気を直接加熱して快適環境を作るのではなく、赤外線が直接人体に作用して温冷感を刺激することで得られる。最も普及している放射暖房システムとしては、床暖房や天井暖房が挙げられる。古くから使われている床暖房システムは、室内上下温度差を作らずに快適な暖房方式として、それに関する研究開発が盛んに行われている。

一方、近年、壁放射冷暖房システムの採用例が増えつつあるが、それに関する詳細な研究報告は床暖房の場合に比べ少ないのが現状である。森・直井ら^{2,3)}は、十分なパッシブ手法の施された室に 25°C 程度の冷水を通した壁放射パネルを設置し、室内の上下温度差、パネルの除去熱量および被験者の皮膚温、被験者申告から放射パネルの冷房効果について調べた。瀬沼⁴⁾らは、壁放射暖房および天井と壁を併用した放射暖房について実験を行い、壁を放射面にしたときの立ち上がりの 1~2 時間は部屋の上下温度差が大きくなる傾向にあることを指摘した。佐々木⁵⁾は、パネルラジエーターを採用した体育館のアリーナ部分の上下温度を測定し、床上 50mm の位置から観客席上部までの上下温度差は 1K 以内に収まっていることを報告した。安沢ら⁶⁾は、鉛直面に設置した放射パネ

*近畿大学工学部建築学科
**戸田建設株式会社

*Department of Architecture, Faculty of Engineering, Kinki University
**TODA Corporation

表 1 放射冷暖房実験室の壁体構成と熱貫流率

壁			天井			床		
構成 (室内側から)	厚さ mm	熱伝導率 W/(m·K)	構成 (室内側から)	厚さ mm	熱伝導率 W/(m·K)	構成 (室内側から)	厚さ mm	熱伝導率 W/(m·K)
石膏ボード	21	0.213	石膏ボード	9	0.213	タイル	3	0.187
モルタル	10	1.087	半密閉空気層	—	0.083 (抵抗)	モルタル	20	1.087
半密閉空気層	—	0.083 (抵抗)	コンクリート	200	1.637	コンクリート	150	1.637
モルタル	10	1.087	タイル	3	0.187	グラスウール保温板	25	0.048
石膏ボード	21	0.213	半密閉空気層	—	0.083 (抵抗)	防湿シート	0.15	0.187
			鉄板	3	48.05	砂利	150	0.612
			絨毯	5	0.133			
熱貫流率=1.919 W/(m ² ·K)			熱貫流率=1.649 W/(m ² ·K)			熱貫流率=0.996 W/(m ² ·K)		

注：外壁がないため、総合熱伝達率を9W/(m²·K)とする。隙間風がないものとして、熱損失係数は7.611 W/(m²·K)となる。

ルによる冷房は通常の対流型空調に比べて 10～20%の空調負荷の低減効果がある結果を提示した。鈴木ら⁷⁾は、置換換気を行う病室に放射パネルを病床の傍に鉛直設置した場合の上下温度差を測定し、放射パネルの表面温度が高いほど上下温度差が大きく、温度成層が明確に形成されることを報告した。

既往の研究報告のなかでは、壁放射暖房の上下温度差に関するものがあつた。しかしながら、それらはパネル表面温度と上下温度差の関係を中心に述べたもので、室内に一定の快適性が保たれた場合、壁放射暖房の上下温度差がどの程度生じるかについては触れていない。また、同様な快適性が保たれた場合、壁放射暖房とエアコン暖房の上下温度差の違いに関する研究報告も見当たらない。

そこで、今回は、床座の生活スタイルを想定して、床上0.5m、壁放射パネルから0.5～1.5mの範囲内のPMVが一定値に保たれた場合において、壁放射暖房とエアコン暖房の上下温度差について調べた。また、壁放射パネルの表面温度が安定してからの室内上下温度差の経時変化についても検討した。その結果を報告する。

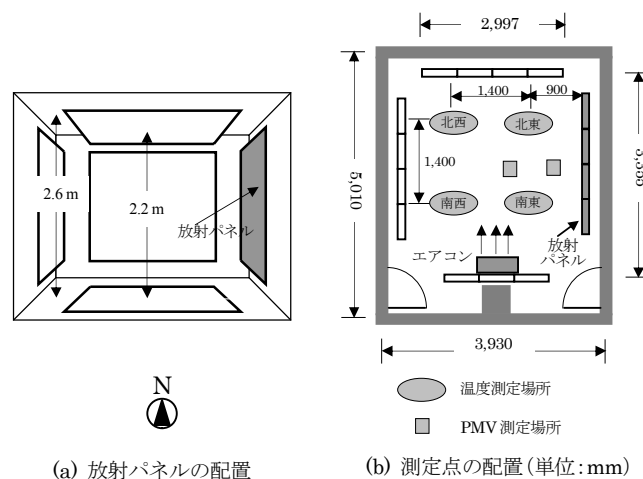
2. 実験条件

実験は放射冷暖房実験室を利用して行う。図1に示すように、放射冷暖房実験室は、大学の研究棟(RC造、3階建て)の1階の北側に位置し内壁に囲まれており、外界気象条件の影響を直接に受けない。その周りに他の実験室や廊下があるが、実験当時、他の実験室は使用されていない。

放射冷暖房実験室の詳細は図2に示す。室内には東側、西側、北側、天井、床にそれぞれ4枚、南側に3枚の計23枚の放射パネル(1,600H×600Wmm)が設置されている。実験室の天井高は2.6mで、床放射パネルから天



図1 放射冷暖房実験室の位置



(a) 放射パネルの配置 (b) 測定点の配置(単位:mm)

図2 放射冷暖房実験室

井放射パネルまでの距離は2.2mである。東パネルの下端は、床面から0.43m、床パネルから0.36m離れている。

今回の実験は、東側の4枚のパネルだけを使って行った。他のパネルには温水を流していない。アルミで作られたパネル表面に白色のペイントで塗装されている。

エアコン暖房実験では、T社のインバータ付冷房・暖房兼用型ルームエアコンを使用した。暖房能力は2.2(0.7~3.6) kWである。エアコンは、南パネルの上部、東西パネルの中心に設置されている。吹出し口と吸込み口の高さはそれぞれ1.95mと2.15mである(図2(b))。エアコンからPMV計までの水平距離は約2mである。

放射冷暖房実験室の壁体構成を表1に示す。放射冷暖房実験室は、研究棟の中にあり外界気象条件の影響を直接に受けけないため、壁と天井が断熱されていない、通常の外気にさらされている建物に比べ断熱性能が低い。また、実験中に実験室東・西側の扉が閉まっているため、隙間風がないものとする。放射冷暖房実験室の熱損失係数は、室内の総合熱伝達率を $9W/(m^2 \cdot K)$ 、壁体の熱貫流率を表1に示した値として計算した結果、 $7.611W/(m^2 \cdot K)$ となった。

測定項目と測定点は表2と図2に示す。上下温度を測定するため、実験室内の北東、北西、南西および南東に、高さ方向にそれぞれ7点の熱電対を設置した。測定位置の詳細は図2(b)に示す通りである。また、床パネル上0.5m、東パネルから0.5mと1.5m離れたところにPMV計2台を、東側パネルに熱電対4点を設置した。熱電対の測定時間間隔は10秒、PMV計の測定時間間隔は1分とした。

今回は、放射暖房とエアコン暖房についてそれぞれ2パターンの実験を行った。放射暖房実験ではパネル表面温度を41°C、45°C、エアコン暖房実験では、室温を22°C、24°Cに設定した。実験条件の詳細は表3に示す。

放射冷暖房実験室の暖房システム系統図を図3に示す。電気温水器からの温水と放射パネルからの還りの温水が電動三方弁で混合され放射パネルへ送水される。今回使用した暖房システムは、放射パネルの表面温度を直接制御するものではなく、放射パネルへの送水温度を電動三方弁で制御することによって間接的にパネル表面温度を制御する方式をとっている。そのため、実験の途中にパネル表面温度が変動する可能性がある。その場合は、送水温度設定値を変更させることによってパネル表面温度の安定を図っている。

エアコン暖房実験では、通常のエアコン使用状態に近い状態で実験を行うため、エアコン吹き出し口の自動スイング機能を使用し、吹き出し風量をエアコンの自動制御系に任せている。また、エアコンの室温制御用センサーはエアコンの吸込口にある(市販エアコンを特に改造していない)。

3. 実験結果および考察

表2 測定項目

測定項目	測定点	測定点の位置
上下温度	北東 北西 南西 南東 4×7=28点	FL=+0.0m (床パネル表面)
		FL=+0.1m
		FL=+0.5m
		FL=+0.85m
		FL=+1.5m
		FL=+2.1m
		FL=+2.2m (天井パネル表面)
パネル表面温度	7点	東パネル4点、南・西・北パネル各1点
外気温度	1点	室外
送水温度	2点	行き還り各1点(白金抵抗体)
エアコン	2点	吹出し口、吸込み口各1点
PMV計	2点	FL=+0.5m、東パネルから0.5m、1.5m(着衣量: 1.0clo、代謝量: 1.0met)

注: 温度センサー: T型熱電対、φ0.32mm

表3 実験条件

パターン	暖房方式	日時(2010年)	温度設定値
Panel-41	放射暖房	3月12日 9:45~18:11	パネル 41°C
Panel-45	放射暖房	3月16日 9:30~18:20	パネル 45°C
AC-22	エアコン暖房	3月17日 9:37~18:22	室温 22°C
AC-24	エアコン暖房	3月18日 9:25~18:23	室温 24°C

表4 実験結果(実験中の平均値)*

パターン	パネル °C	気温 °C	湿度 %	風速 m/s	MRT °C	PMV -
Panel-41	41.0	21.4	35.3	0.07	21.1	-0.64
Panel-45	45.2	24.4	35.4	0.07	24.1	0.15
AC-22	22.2	23.4	26.9	0.28	22.2	-0.53
AC-24	23.0	24.5	28.3	0.27	23.1	-0.23

*注: ①10:30~18:00間の平均値である。

②気温、湿度、風速、MRT、PMVは2台のPMV計で測定した結果の平均値である。

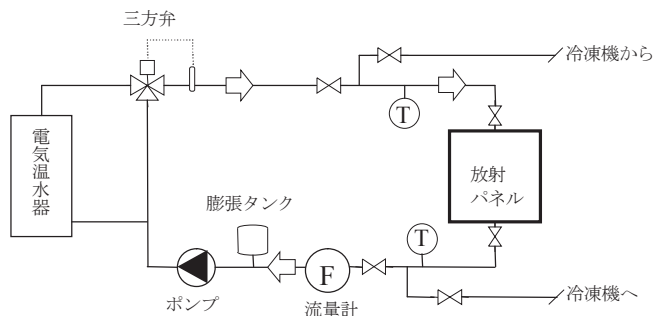


図3 放射冷暖房実験室の暖房システム系統図

3.1 放射暖房時のパネル表面温度と室温

放射暖房実験期間中のパネル表面温度と室温を図4、5に示す。実験開始約1時間後、パネル表面温度は設定値に達した後、ほぼ定常状態となる(図4)。10:30~18:00のパネル表面平均温度は、Panel-41では約41.0°C、Panel-45では約45.2°Cとなっているため(表4)、実験

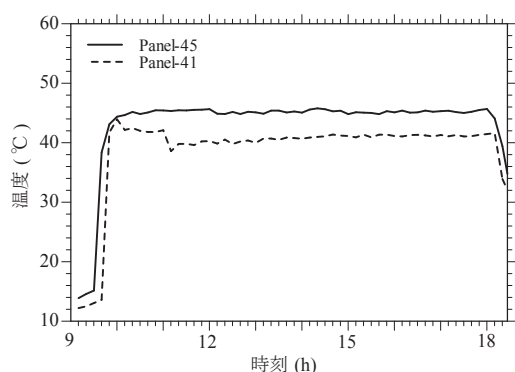


図4 放射暖房実験時の東パネル温度
(熱電対より測定)

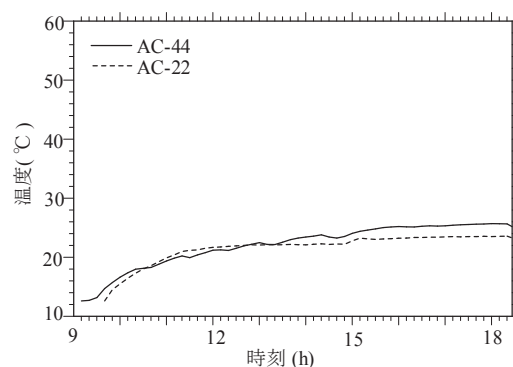


図6 エアコン暖房実験時の東パネル温度
(熱電対より測定)

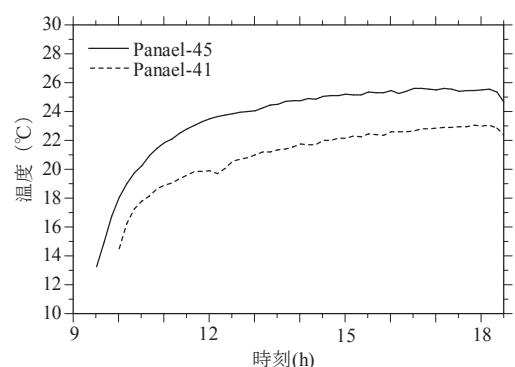


図5 放射暖房実験時のPMV計付近の室温
(PMV計より測定)

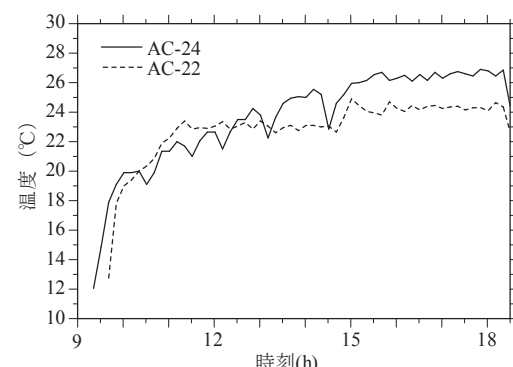


図7 エアコン暖房実験時のPMV計付近の室温
(PMV計より測定)

条件として予定されているパネル表面温度が達成できている。

これからの検討は、パネル表面温度が設定値に安定している10:30から18:00までのデータを用いて行う。

放射暖房実験では、室内空気温度差への影響を避けるためエアコンを停止しており、実験期間中、室温が時間の経過に伴って上昇している(図5)。

3.2 エアコン暖房時のパネル表面温度と室温

エアコンを使って暖房を行うときのパネル表面温度と室温を図6、7に示す。東パネルに温水を流していないため、パネル表面温度が放射暖房時より低く室温の影響を受けて変動している(図6)。

床上0.5mに設置した2台のPMV計により測定した室温の平均値を図7に示す。エアコンの設定室温を22°Cにした場合、PMV計付近の空気温度が20°C~24°Cの間を推移している。設定室温を24°Cにした場合、PMV計付近の空気温度が上昇し19°C~27°Cとなった。今回の実験で使用した市販エアコンの室温制御は、吸込口に設置された温度センサーによって、室内平均温度が設定値になるように自動的に行われているものであり、とくにPMV計付近の温度を制

御するものではないため、このような結果となった。

エアコン暖房時の吹出し・吸込み空気温度を図8に示す。設定室温が22°Cの場合、吹出し空気温度は約38°C、吸込み空気温度は約24°Cであった。吸込み空気温度は設定室温より約2°C高かった。設定室温が24°Cの場合、15時以降の吹出し空気温度は約43°C、吸込み空気温度は約27°Cとなった。吸込み空気温度は設定室温より約3°C高かった。

今回の実験では、使用したエアコンの吸込み空気温度が設定室温より約2~3°C高く、それによってPMV計付近(床上0.5m)の空気温度も設定室温に比べ約2~3°C高くなったが、本研究は、壁放射暖房とエアコン暖房を

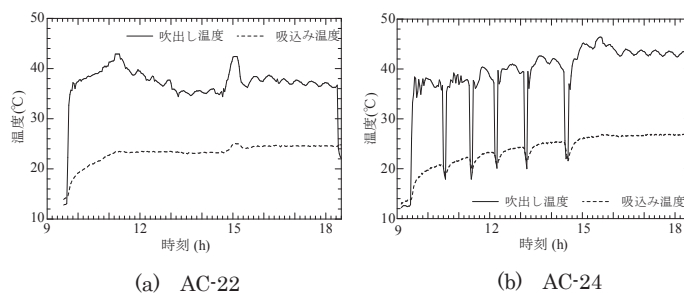


図8 エアコン暖房時の吹出し・吸込み空気温度

用いて、居住者にとって同様な温冷感を保っている場合、それぞれの暖房方式の上下温度差を比較することを目的としているため、PMV 計付近の空気温度が設定室温にならないことは予定されていた実験条件が達成できなかったというものではない。

3.3 実験期間中の PMV について

東パネルから 0.5m と 1.5m 離れたところ(床上 0.5m)に PMV 計をそれぞれ 1 台設置している。今回は、壁放射暖房とエアコン暖房における PMV 計付近の PMV が同じ値になるように、パネル表面温度やエアコン設定室温を変更させながら予備実験を行った。

実験期間中の 2 台の PMV 計の平均値を図 9 に示す。15:30 から 18:00 までの間に、パネル表面温度 41°C の放射暖房 (Panel-41) と設定室温 22°C のエアコン暖房 (AC-22)、およびパネル表面温度 45°C の放射暖房 (Panel-45) と設定室温 24°C のエアコン暖房 (AC-24) の PMV がほぼ一致している。このことから、15:30~18:00 の間に予定していた実験条件が達成できたことがわかる。これから、PMV 計を設置している場所の PMV が同様に保たれている 15:30~18:00 の間のデータを用いて、放射暖房とエアコン暖房の上下温度差 (Panel-40×AC-22、Panel-45×AC-24) について考察する。

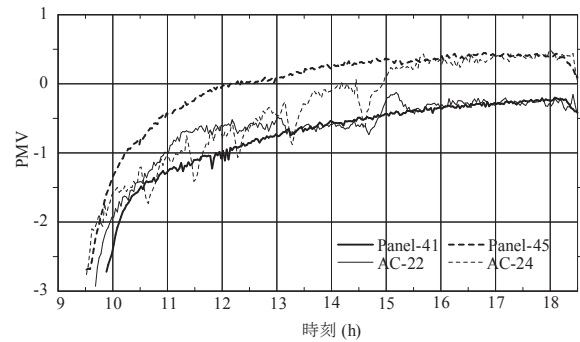


図 9 PMV 計付近の PMV (2 台の平均値)

3.4 外気温度と放射冷暖房実験室周辺の(室内)空気温度

実験期間中の外気温度と放射冷暖房実験室周辺の(室内)空気温度を図 10、11 に示す。外気温度と放射冷暖房実験室周辺の空気温度の測定場所を図 1 に示す。外気温度センサー(熱電対)は、研究棟の北側、地面から 1.5m のところに設置されている。放射冷暖房実験室周辺の(室内)空気温度は、市販の温湿度測定器 3 台を使って 1 分間隔で測定した。3 箇所の温度差は 1K 以下に収まっている。それらの平均値を図 11 に示す。3 台の温湿度測定器の設置高さを床上 1.5m とした。

実験期間中、日時によって外気温度は変動するが、ほぼ 5°C~13°C の範囲内で推移している。3 月 12 日の放射暖房 (Panel-41) 時と 3 月 17 日のエアコン暖房 (AC-22) 時の外気温度の変動パターンがよく似ている。

放射冷暖房実験室周辺の(室内)空気温度は、今回の実験にとって実質的な「外気」温度と考えられる。実験期間の前半(3 月 12 日と 3 月 16 日)は、測定機器の不備で放射冷暖房実験室周辺の(室内)空気温度を測定できなかったため、後半(3 月 17 日と 3 月 18 日)だけの測定結果を図 11 に示す。図 11 から、3 月 17 日と 3 月 18 日の両日に外気温度の変動パターンが異なっても放射冷暖房実験室周辺の(室内)空気温度には大きな違いが出ていないことがわかる。これは、熱容量の大きい RC 造建物の北側室の室温が外界気象条件の影響を受

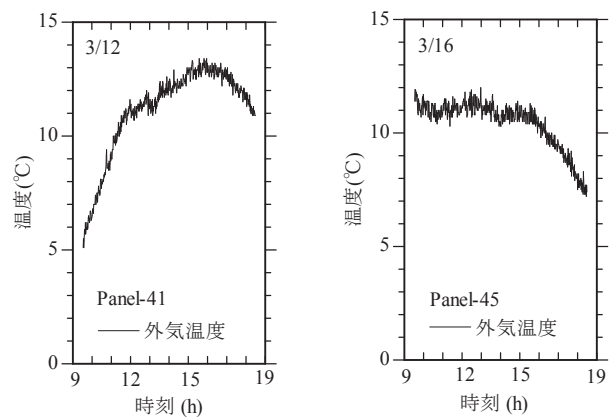


図 10 放射暖房実験時の外気温度

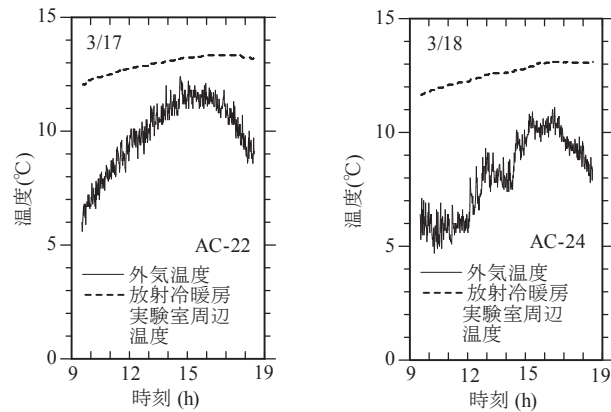
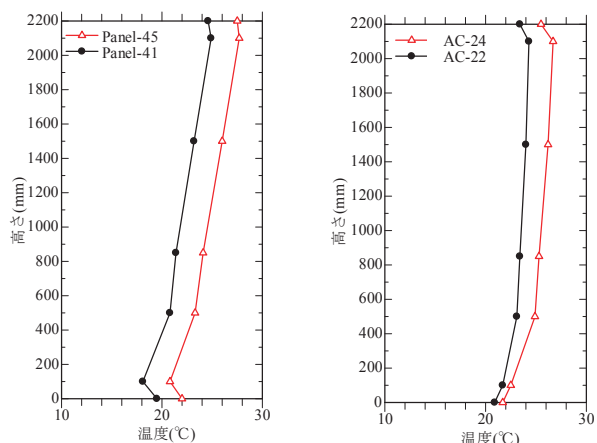


図 11 エアコン暖房実験時の外気温度、実験室周辺温度

けにくいためである。3 月 12 日と 3 月 16 日に、放射冷暖房実験室周辺の(室内)空気温度は測定できなかったが、上記のことから、その温度は 3 月 17 日と 3 月 18 日の両日と大差ないと考えられる。

3.5 壁放射暖房とエアコン暖房の上下温度差について

PMV が同じ値に保たれている場合の放射暖房時とエアコン暖房時の上下温度差 (15:30~18:00 の平均値)



(a) 放射暖房 (b) エアコン暖房

図 12 室内の上下温度分布 (15:30~18:00の平均値)

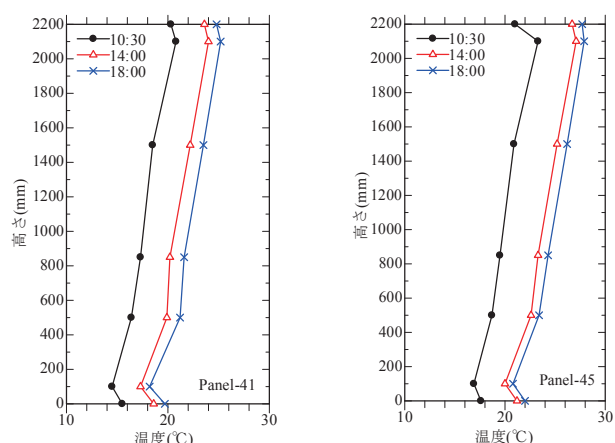


図 15 放射暖房時の上下温度差の経時変化 (測定場所:北東、北西、南西、南東の平均値)

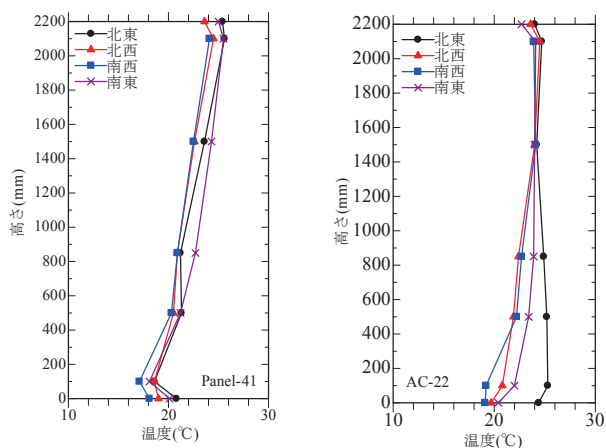


図 13 測定場所毎の上下温度分布 (Panel-41×AC-22, 15:30~18:00の平均値)

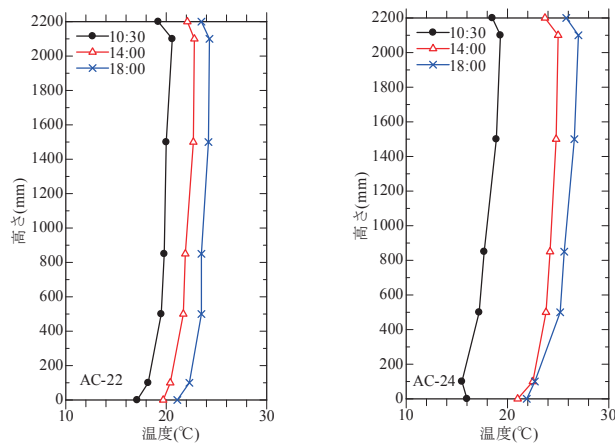


図 16 エアコン暖房時の上下温度差の経時変化 (測定場所:北東、北西、南西、南東の平均値)

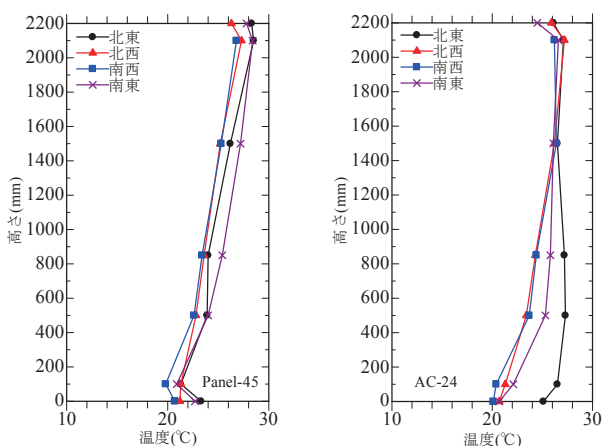


図 14 測定場所毎の上下温度差 (Panel-45×AC-24, 15:30~18:00の平均値)

を図 12 に示す。AC-22 の上下温度差 (本文では、床上 2.1m と床上 0.1m での気温差で表す) が約 3.5K に対し、Panel-41 の上下温度差は約 7.0K に達している。AC-24

の上下温度差が約 4.0K に対し、Panel-45 の上下温度差は約 7.0K に達している。これは、エアコン吹き出し口の自動スイング機能が一定の室温均一化効果を有し、また壁パネルを利用した放射暖房では室内風速がほとんどなく温度の高い空気が天井付近に滞留しやすいためである。

図 12 は実験期間中における各測定場所 (南東、北東、南西、北西) の上下温度差の平均値を示したのに対し、図 13、14 は測定場所毎の上下温度差を示したものである。

図 13 から、Panel-41 では、いずれの測定場所でも上下温度差に大きな違いが見られないが、AC-22 では、測定場所によって上下温度差に大きな違いが見られる。測定場所南西では、上下温度差が 5K に達している。AC-24 では、測定場所南西の上下温度差がさらに拡大し 6K に達し (図 14)、Panel-41 と Panel-45 の上下温度差である 7K に近づいている。また、壁放射暖房の場合、どの高さでも空気温度の水平温度差がおおよそ 1~2K 以内

に収まっているが、エアコン暖房の場合は高さによって水平温度差が異なり、床上 1.5m 以上では水平温度差がほぼ無いが、床上 1.5m 以下では水平温度差が顕著に生じている。AC-22 と AC-24 において、南西と北東の床上 0.1m の温度差は約 6.5K に達している。これは、エアコン吹き出し口の自動スイング機能を利用しても風がよく届く場所とそうでない場所の間に生じる水平温度差を完全に解消することが難しいことを意味している。

今回の実験において、室内（ある場所）の PMV が同じ値に維持されたとき、パネル表面温度 41℃と 45℃の壁放射暖房の上下温度差は、設定室温 22℃と 24℃のエアコン暖房より大きかった。また、エアコン暖房の場合は、壁放射暖房の場合に比べ床上 1.5m 以下では水平温度差が生じやすい結果となった。

3.6 パネル表面温度と上下温度差の経時変化について

壁放射暖房が立ち上がった直後の 1~2 時間に部屋の上下温度差が大きくなる傾向にあることが指摘されている⁴⁾。本文では、これまで、壁放射暖房とエアコン暖房の上下温度差を比較するため、同様な PMV が維持されることを前提条件としたが、これからは、実現した室内の PMV にこだわらず、パネル表面温度が安定してから壁放射暖房とエアコン暖房の上下温度差の経時変化について調べる。

今回の実験では、放射暖房が立ち上がったから約 1 時間後（10:30）にパネル表面温度が安定することが図 4 からわかる。そこで、本文では、パネル温度が安定し始めた時刻 10:30、実験終了直前の時刻 18:00 およびそれらの中間時刻 14:00 を選んで上下温度差の経時変化について考察する。

放射暖房時の上下温度差の経時変化を図 15 に示す。Panel-41 の場合より表面温度の高い Panel-45 の場合は各時刻の室温が高くなるが、上下温度差は、暖房運転時間の経過またはパネル表面温度と関係なくほぼ 7.0K と一定であった。

今回の実験では、パネル表面温度が安定した後に暖房運転時間が経過しても壁放射暖房の上下温度差はほぼ一定であるという結果が得られた。また、パネル表面温度が 41℃から 45℃に変わっても上記の結果は変わらない。

3.7 エアコン設定温度と上下温度差の経時変化について

エアコン暖房の時刻毎の上下温度差を図 16 に示す。エアコン設定室温を 22℃とした場合、各時刻の上下温度差が約 2K~3K と小さく、暖房運転時間の経過とほぼ関係なく一定であった。エアコン設定室温を 24℃とした場合、各時刻の上下温度差は、約 3K~4K と少し大きくなり暖房運転時間の経過に伴って大きくなる傾向にあることが図 16 からわかる。

4. おわりに

本文では、室内のある特定範囲内の PMV が一定値に保たれた場合において、実験室実験を用いて壁放射暖房とエアコン暖房の上下温度差、および壁放射パネルの表面温度が安定してからの放射暖房の上下温度差の経時変化について検討し、以下の知見を得た。

- 1) 今回の実験において、室内（ある場所）の PMV が同じ値に維持された場合、パネル表面温度 41℃と 45℃の壁放射暖房の上下温度差は、設定室温 22℃と 24℃のエアコン暖房より大きい。
- 2) 今回の実験において、室内（ある場所）の PMV が同じ値に維持された場合、エアコン暖房の場合は、壁放射暖房の場合に比べ床上 1.5m 以下では水平温度差が生じやすい結果となった。
- 3) パネル表面温度が設定温度に安定した後から、壁放射暖房の上下温度差は、暖房運転時間の経過と関係なくほぼ一定である。
- 4) エアコン暖房の設定室温を 24℃とした場合、上下温度差は暖房運転時間の経過に伴って大きくなる傾向にある。

参考文献

- 1) 社団法人空気調和・衛生工学会：新版 快適な温熱環境のメカニズム、p.153、丸善株式会社、2006.3
- 2) 森一顕、直井隆行、伊澤康一、高橋達、宿谷昌則：放射冷却パネルによる採冷の研究、その 1 パネルの自作と実測結果、日本建築学会大会学術講演梗概集、環境工学Ⅱ、pp.457-458、2001.9
- 3) 直井隆行、森一顕、伊澤康一、高橋達、宿谷昌則：放射冷却パネルによる採冷の研究、その 2 温冷感・快適感に関する被験者実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、環境工学Ⅱ、pp.459-460、2001.9
- 4) 瀬沼央、武田仁：放射冷暖房システムの開発 その 3 放射面が天井・壁・床にある実験室製作と暖房実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、環境工学Ⅱ、pp.1025-1026、2001.9
- 5) 佐々木隆：江刺市体育館の冬季環境調査結果、日本建築学会大会学術講演梗概集、環境工学Ⅱ、pp.1223-1224、2002.8
- 6) 安沢智明、山中俊夫、甲谷寿史、樋口祥明：吹き出し冷風を利用した放射冷房方式に関する研究、室内熱環境予測に基づく省エネルギー性の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、環境工学Ⅱ、pp.1071-1072、2003.9
- 7) 鈴木智也、相良和伸、山中俊夫、甲谷寿史、岩村集、山下植也：置換換気と放射冷暖房を併用した病室のセミパーソナル空調に関する研究、その 8 放射パネルが室内温度・汚染物濃度分布に及ぼす影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、環境工学Ⅱ、pp.1303-1304、2007.8