

## 天井裏・床下空間に設置した樹脂製放射パネルの暖房時における放熱特性

白土 博康, 保科 秀夫  
櫻庭 高光\*, 嘉賀 通倫\*, 井浦 奉昭\*

Heat Release Characteristics of Radiation Panels  
Combined with Plastic Pipes in Ceiling or Floor Chamber

Hiroyasu SHIRATO, Hideo HOSHINA  
Takamitsu SAKURABA\*, Michinori KAGA\*, Tomoaki IURA\*

## 抄 録

天井裏・床下に設置する樹脂製放射パネルを開発し、微少気流を与えられる送風機と組み合わせた放射冷暖房システムを提案した。送風をしない場合、天井裏や床下に設置した放射パネルの暖房時における放熱量は、居住空間に設置したJIS規格での試験とほぼ同等の値を示し、高い輻射放熱量、良好な室内環境が得られた。送風する場合、輻射放熱量は損なわれるが、放射パネルの放熱量は最大で21～30%増加した。以上のことから、立ち上げ時に風量を多くして素早く室温を上げ、その他の時間帯では送風しないことが最適な運転方法と考えられる。

キーワード：天井裏・床下設置式樹脂製放射パネル、放熱量、送風、室内環境

## 1. はじめに

放射冷暖房システムは、エアコンのような対流熱伝達による冷暖房と比較して、同じ室内空気温度で「暖かさ」「涼しさ」を感じやすいため、室内空気温度と熱媒温度の差を小さくでき、高い省エネルギー性が得られる。また、システム運転時における気流は、一般に自然対流かそれに準じるものであるため、人体に不快感を与えず、快適な室内環境を与える。

しかしながら、エアコンが冷暖房システムの主流である地域では、室内の景観の良さや利用可能な空間確保を優先しがちなため、ユーザーが居住空間内に放射パネルを置くことに抵抗感がある。このため、間仕切り内や天井面への設置も見られるが、いずれも建築工事を伴い、コスト高となるほか、建物全体の工期も延長する。以上のことから、特に住宅への放射冷暖房システムの普及には、建築工事と設備工事を分離し、施工性を向上させる低コストな手法が必要である。

本研究は、以上の課題を解決するため、これまでに室内設置用として開発した樹脂製放射パネル<sup>1)~4)</sup>を天井裏・床下埋設(設置)用に人手による加工部位を減らすなど低コスト化し、その運用方法を明らかにすることによって、特に住宅への放射冷暖房システムの普及促進に貢献することを目的とし

ている。

本報では、工業試験場内の環境試験室<sup>5)</sup>(輻射暖房試験室)内に模擬天井または模擬床を配置し、そこに放熱量あたりの重量が鋼板製よりも小さい樹脂製放射パネルを設置して、パネルの放熱量評価、模擬天井板、模擬床表面からの放熱量評価、室内環境の測定を行い、システムの適切な運転方法を明らかにする。また、模擬床や模擬天井に一部開口部を設け、気流を与えることによる模擬天井、模擬床表面からの放熱量や室内環境への影響も明らかにする。

## 2. 放射パネル天井裏・床下設置式冷暖房システム

## 2.1 既往システムの概要

図1に筆者らの既往研究における放射冷暖房システムの概要を、図2にこのシステムで使用している樹脂製放射パネルの外観を示す。ヒートポンプを熱源とし、居住空間に設置した樹脂製放射パネルに冷温水を循環させる。冷房時における放射パネルの冷水温度は高め(16℃以上)とし、別のヒートポンプを熱源に天井裏と床下に設置した空気熱交換器(除湿コイル)により潜熱を除去する。

\* 株式会社テスク, \* TSC Co., Ltd.

事業名: 一般共同研究

課題名: 天井・床下埋設型潜熱顕熱分離式放射冷暖房システムに関する研究

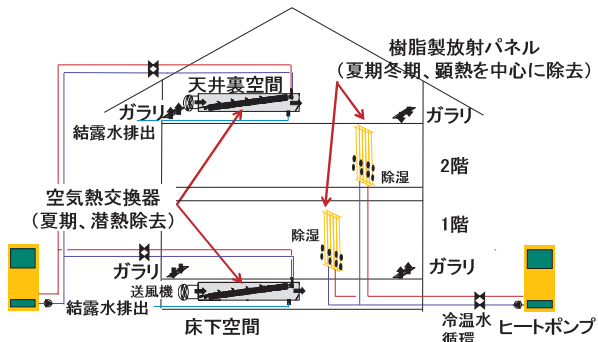
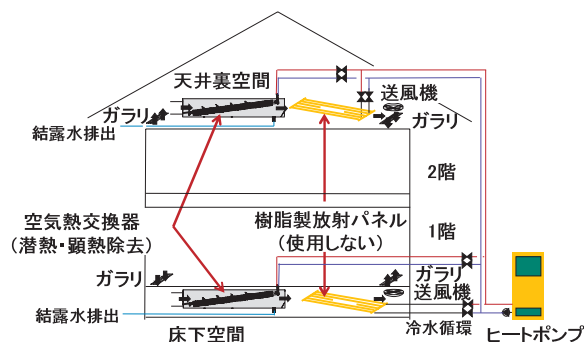


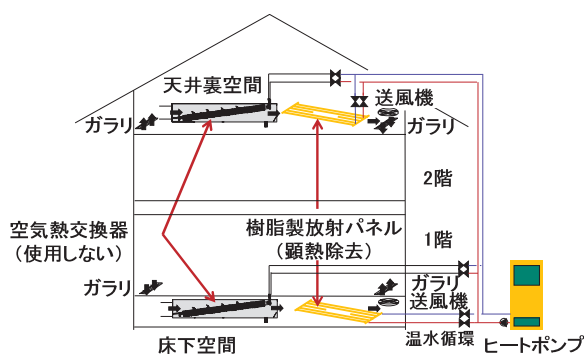
図1 既往研究における放射冷暖房システムの概要



図2 樹脂製放射パネルの外観



(a) 冷房時



(B) 暖房時

図3 天井、床下空間設置式冷暖房システムの概要

## 2.2 本システムの概要

図3に本研究における放射パネル天井裏、床下空間設置式冷暖房システムの概要を示す。ヒートポンプを熱源とした冷温水を天井裏及び床下に設置した樹脂製放射パネルに循環させる。室内端部に吸込口、吹出口を、吹出口には送風機を設け、天井裏や床下と居住空間の空気を攪拌する。既往システムと同様に冷房時における放射パネルの冷水温度は高め（16℃以上）とする。空気熱交換器も同様に天井裏及び床下に設置する。

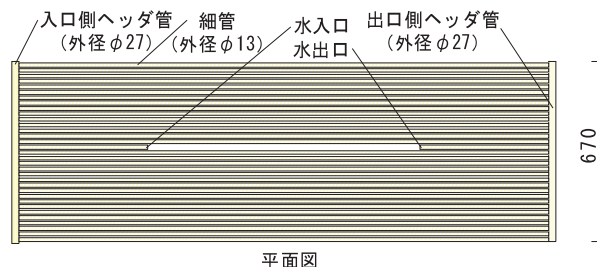
## 2.3 放射パネルと送風機

図4に開発した天井裏・床下設置式樹脂製放射パネルの外観と概要図を示す。放射パネルは横型670×2000mmである。φ27mmのヘッダ管に20mmピッチで孔を開け、そこにφ13mmの細管を33本熱融着させている。冷温水は、中央の細管下部から導入され、入口側ヘッダ管、他の細管、出口側ヘッダ管を経由して中央の細管上部から排出される。なお、内部の管にエアが滞留することを抑制するため、出口側を50mm持ち上げている。

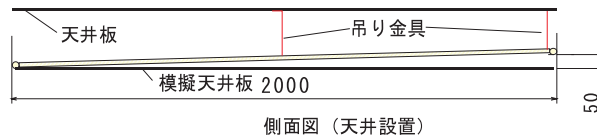
また、これまでの居住空間用の放射パネルは、図5のように設置スペースと放熱量の兼ね合いから、2枚のパネルを重ね合わせ別の管で熱融着して接合させているが、この工程は機械でなく職人が行っている。このため今回の天井裏・床下用の放射パネルは、重ね合わせによる接合の必要がない分、



(a) 外観



平面図



側面図 (天井設置)

(b) 概要

図4 天井裏・床下設置式樹脂製放射パネルの外観と概要

製造コストが抑えられる。

図6に送風機の外観を示す。送風機として、本用途に開発されたデルタ電子製を用いた。寸法は50×250×240mmである。リモコンにより風量を25, 30, 50, 100 m<sup>3</sup>/hに調整できる。

パネルとパネルの接合部

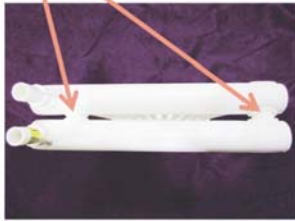


図5 居住空間用樹脂製放射パネル接合部の外観

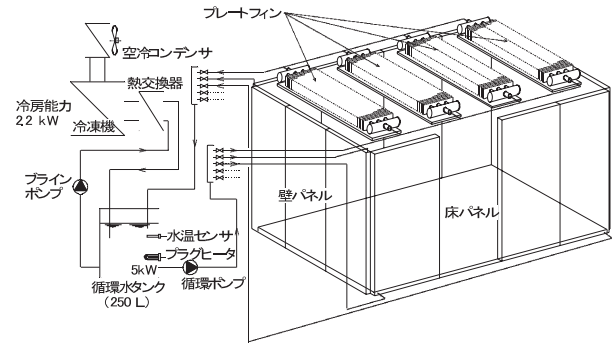


図6 送風機の外観

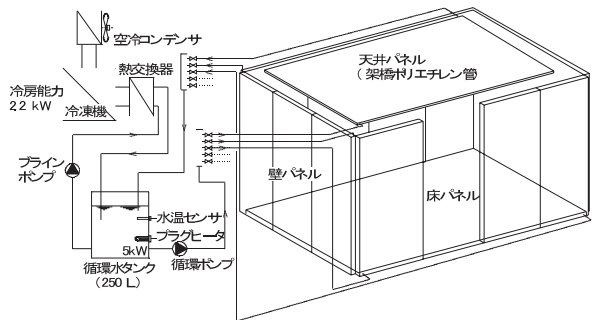
### 3. 放射パネルの天井裏・床下への設置

#### 3.1 環境試験室

天井裏・床下設置式放射パネルの放熱特性評価は工業試験場の環境試験室で実施した。図7に試験室及び室温制御システムの概要を示す。試験室の寸法は3600×2700×2200mm(天井高さ)である。木構造で、試験室の天井、試験室の床、壁は、厚さ100mmのスチレンフォームで断熱し、試験室の天井と壁の内装はスレート板(内装は表面をアクリルウレタン樹脂塗装仕上げ)、試験室の床は塩化ビニルシート仕上げである。室温制御用として幅850mm、高さ1700mm、厚さ12mmの床暖房用金属製パネル(以下金属製パネル)が扉部分を除く周囲壁面、試験室の床面に設置されている。金属製パネルには、配管材に直径8mmの円形銅管が、表面材に厚さ0.6mmの鋼板が使われている。なお、鋼板表面を放射率向上のためアクリル樹脂塗料で塗装した。この塗料の全放射率は0.96である。床下設置式放射パネルを評価する際には、天井近傍に設置した4つのプレートフィンコイルにより、放射パネルからの放熱を吸収する。天井裏設置式放射パネルを評価する際には、試験室の天井表面がより均質な温度に維持されていることが望ましいことから、プレートフィンコイルを撤去し、断熱材の上に架橋ポリエチレンパイプを1回路で施



(a) 床下設置式放射パネルを評価する場合



(b) 天井設置式放射パネルを評価する場合

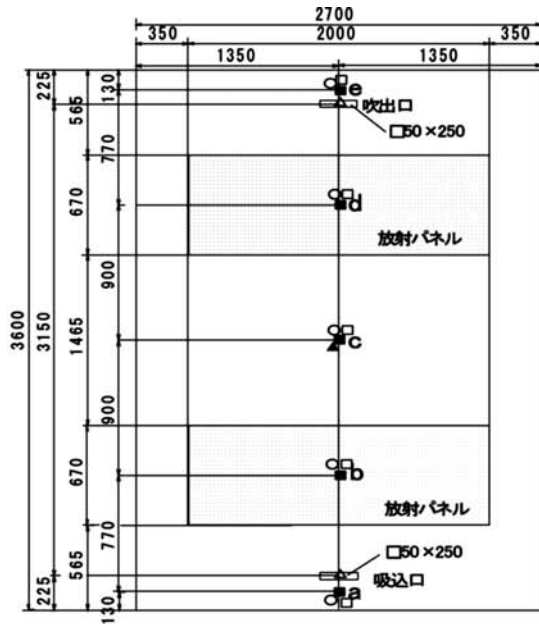
図7 試験室及び室温制御システムの概要

工し、その上にアルミ板、仕上げ材で覆い、模擬天井とした。金属製パネル、架橋ポリエチレンパイプには常時不凍液を循環させ、試験室内温度を温度センサで検出して、タンク内不凍液温度を制御する。なお、タンク内不凍液温度は冷凍機を連続運転し、ヒータのオン・オフにより所定温度に制御される。タンク内の不凍液はヘッドで6系統に分岐され、同一温度で試験室内の壁、試験室の床、試験室の天井の各金属製パネル、架橋ポリエチレンパイプへ送られる。

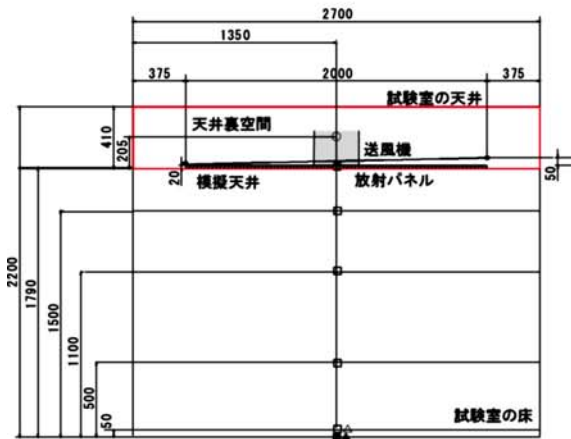
#### 3.2 放射パネルの設置

図8に放射パネルの設置図(4章記載の測定点を含む)を示す。天井裏設置の場合は、試験室の天井の下に410mmの空間を空け、模擬天井を設置し、その上に図4の放射パネルを2枚設置した。床下設置の場合は、試験室の床面の上に410mmの空間を空け、模擬床を設置するとともに、試験室の床面の金属製パネル上に図4の放射パネルを2枚設置した。模擬天井材、模擬床材は合板24mm、12mm 1枚ずつとした。図4の側面図左のヘッド管以外は模擬天井、又は試験室の床に接していない。模擬天井又は模擬床面積に対する放射パネルの敷設面積は28.6%である。また、床下設置の実験条件として放射パネルからの反射や試験室の床面の断熱効果を見込み、放射パネルに対して幅、奥行き方向に150mmずつ大きい遮熱断熱材(アキレス製アキレスボード、厚み30mm、熱伝導率0.024W/(m・K))を敷いた設置と、敷かない設置を行った。放射パネルを天井裏に設置する場合、遮熱断熱材は

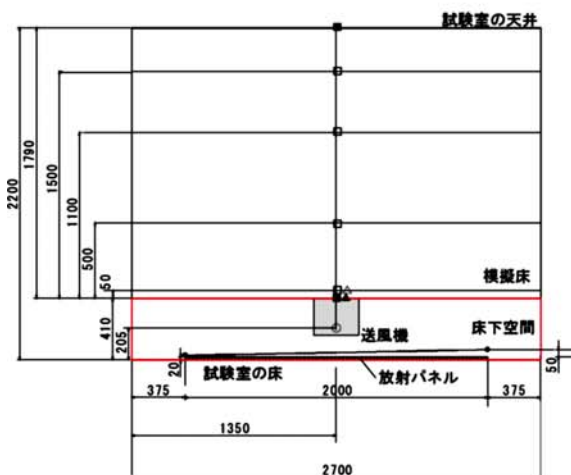




(a) 平面図



(b) 側面図 (放射パネル天井裏設置)



(c) 側面図 (放射パネル床下設置)

- 室内空気温度
- 天井裏あるいは床下空間内空気温度
- △吹出、吸込口空気温度
- 模擬天井あるいは模擬床表面温度

図8 放射パネルの設置図

使用しない。図9に放射パネルの天井裏設置状況を、図10に放射パネルの床下設置状況を示す(図10は遮熱断熱材を敷いた状態)。



(a) 模擬天井設置前 (b) 模擬天井設置後

図9 放射パネルの天井裏設置状況



(a) 模擬床設置前 (b) 模擬床設置後

図10 放射パネルの床下設置状況

#### 4. 放射パネルの放熱特性評価方法

表1に測定内容の概要を、表2に測定条件を示す。試験室内での定常条件における放射パネルの放熱量、模擬天井、模擬床面から室内への熱流、室内、床下温熱環境を評価した。具体的には、タンク内で調温した水を放射パネルに循環させ、室内の代表点(放射パネルを天井裏に設置する場合は室内中央試験室の床上1100mm、放射パネルを床下に設置する場合は室内中央模擬床上1100mm)を $20^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ となるように壁、試験室の床の金属製パネルと架橋ポリエチレンパイプ(天井裏設置式のみ)、プレートフィンコイル(床下設置式のみ)の入口温度を調整した。以降代表点の空気温度を代表温度と呼ぶ。その流量は1 L/minである。2つの放射パネルの通水出入口は直列に繋がっており、本報ではその合計の放熱量を算出している。測定は30秒間隔で行い、各温度、流量、熱流が定常と考えられる状態になってから10分間の平均値を算出した(風速は1秒間隔で30分間の平均を算出)。測定パラメータは放射パネルへの入力温度、遮熱断熱材の有無(床下設置式のみ)、送風量である。

表 1 測定内容の概要

測定内容	測定項目	測定器
放射パネルの放熱量	放射パネルに循環される水の出入口温度	測温抵抗体
	放射パネルに循環される水の流量	パルス発信付き羽根車式流量計
室内環境	代表空気温度	測温抵抗体
	室内、床下空間空気温度	T熱電対補償導線(ねじり)
	吹出口、吸込口空気温度	T熱電対補償導線(ねじり)
	床表面温度	T熱電対補償導線(ねじり)
	風速	風速センサ、風速計

表 2 放射パネルの測定条件

実験No.	放射パネルへの入力水温[°C]	遮熱断熱材	風速[m³/h]	流量[L/min]
1	28、32、36、40、50	あり	0	0.5、1、2、3
2		なし		
3	28、32、40、50	あり	100	2
4		なし		
5	36	あり	0、30、50、100	2
6		なし		

## 5. 放射パネルの放熱特性評価結果

### 5.1 暖房時の放熱特性

図11に暖房時の放射パネル出入口の平均温水温度と代表温度の差に対する放熱量(送風なし)を示す。放射パネルの放熱量は(1)式で求めた。

$$Q_{pro} = C_{pw} \times p_w \times f_w \times (T_{win} - T_{wout}) / A_{pro} \quad [W/m^2] \quad (1)$$

ここで、 $Q_{pro}$ ：放射パネルの投影面積あたりの放熱量  $[W/m^2]$ 、 $C_{pw}$ ：水の比熱：4.179  $[J/(g \cdot K)]$ 、 $p_w$ ：平均水温に対する水の密度  $[g/L]$ 、 $f_w$ ：水の流量  $[L/s]$ 、 $T_{win}$ ：放射パネルの入口水温  $[K]$ 、 $T_{wout}$ ：放射パネルの出口水温  $[K]$ 、 $A_{pro}$ ：放射パネル2枚の投影面積：2.68  $[m^2]$

本試験方法で得た平均温水温度と代表温度の差に対する放熱量は、試験室の空間内に設置したJIS規格<sup>6)</sup>の試験による累乗の近似式 ( $y = 4.5456x^{1.3185}$ ) と比較してほぼ同等となった。床下設置式では、遮熱断熱材があるときよりもない方が、放熱量がやや大きい値となった。遮熱断熱材により試験室の床の金属製パネルからの放熱が損なわれることが原因と考えられる。

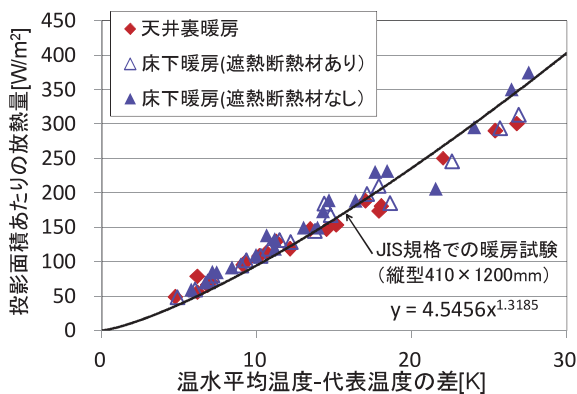


図11 暖房時の放射パネル出入口の平均温水温度と代表温度の差に対する放熱量

図12に送風時の風量に対する放射パネルの放熱量を、図13に送風時の風量に対する放射パネルの総括熱伝達係数を示す。いずれも放射パネル入口水温を36°C、流量2 L/minとした測定条件のものである。放射パネルの総括熱伝達係数は(2)式で求めた。

$$Q_{pro} = U \times A_{ex} \times (T_{s\text{ave}} - T_a) / A_{pro} \quad [W/m^2] \quad (2)$$

ここで、 $Q_{pro}$ ：放射パネルの投影面積あたりの放熱量  $[W/m^2]$ 、 $U$ ：放射パネル表面から代表空気温度測定点への総括熱伝達率  $[W/(m^2 \cdot K)]$ 、 $A_{ex}$ ：放射パネル2枚の外表面積：5.38  $[m^2]$ 、 $T_{s\text{ave}}$ ：放射パネルの平均表面温度  $[K]$ 、 $T_a$ ：代表空気温度  $[K]$ 、 $A_{pro}$ ：放射パネル2枚の投影面積：2.68  $[m^2]$

風量50  $m^3/h$ までは投影面積あたりの放熱量はやや増加するが、それ以上では顕著に変わらなかった。同一温水入力条件では床下暖房の方が高い放熱量、総括熱伝達係数を示した。天井裏暖房の場合、暖気が上部に滞留しやすいことが原因と考えられる。

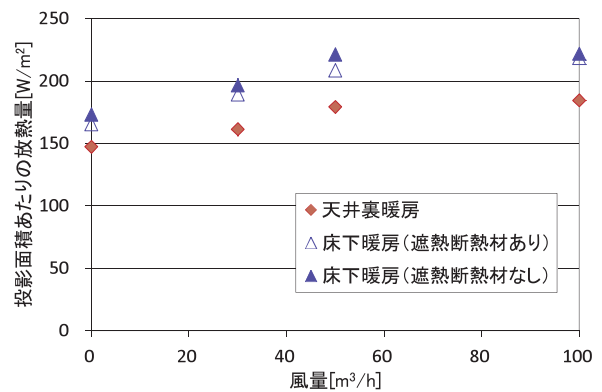


図12 送風時の風量に対する放射パネルの放熱量

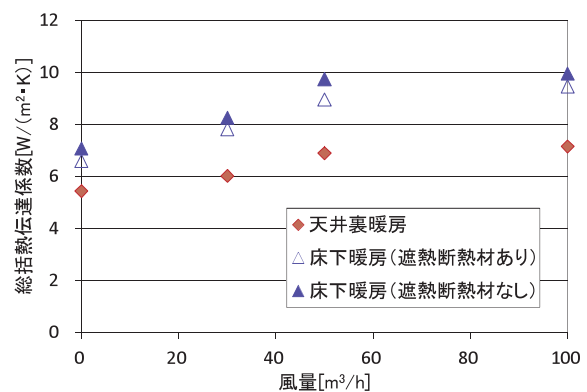


図13 送風時の風量に対する放射パネルの総括熱伝達係数

図14に風量に対する天井裏又は床下から室内へ吹き出す空気の放熱量を示す。その放熱量は(3)式で求めた。

$$Q_{air} = C_{p\text{air}} \times p_{\text{air}} \times f_{\text{air}} \times (T_{\text{air}} - T_{\text{airin}}) / A_{pro} \quad [W/m^2] \quad (3)$$

ここで、 $Q_{air}$ ：放射パネルからの吹き出し空気の投影面積あたりの放熱量  $[W/m^2]$ 、 $C_{p\text{air}}$ ：吹き出し空気の比熱：1.007

[J/(g・K)],  $\rho_{air}$  : 平均水温に対する水の密度[g/m<sup>3</sup>],  $f_{air}$  : 吹き出し空気の流量[m<sup>3</sup>/s],  $T_{air out}$  : 吹出口の空気温度[K],  $T_{air in}$  : 吸込口の空気温度[K],  $A_{pro}$  : 放射パネル2枚の投影面積: 2.68[m<sup>2</sup>]

天井裏又は床下から室内へ吹き出す空気の放熱量は、風量の増加に伴って増えることが確認でき、放射パネルの放熱量全体に対する割合は、風量100 m<sup>3</sup>/hでそれぞれ20.7, 29.7, 29.1%であった。

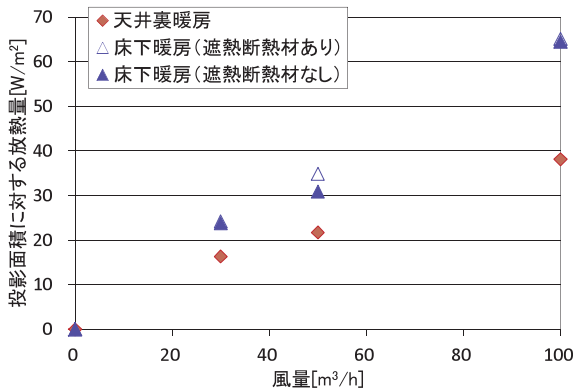


図14 風量に対する天井裏または床下から室内へ吹き出す空気の放熱量

### 5.2 暖房時の室内温熱環境

図15に天井裏設置放射パネル運転時における図8のa～e点の模擬天井表面温度を、図16に床下設置放射パネル運転時における模擬床表面温度を示す。同様に図17に天井裏設置放射パネル運転時における図8のa～e点の垂直温度分布を、図18に床下設置放射パネル運転時（遮熱断熱材がない場合）における垂直温度分布を示す。いずれも放射パネルへの温水入力温度36℃、流量2 L/minの実験条件とした。放射パネル上部とその他の箇所のいずれも風量が増加すると模擬天井または模擬床表面温度は低下する。この原因は、風量が増加すると天井裏または床下空気温度の低下や放射パネル表面温度の低下がおこるためと推察される。天井裏設置放射パネル運転時の模擬天井表面温度の方が床下設置放射パネル運転時の模擬床表面温度よりも高く、両者の代表温度が同じであることから、輻射熱伝達量が高いことが確認できる。この原因は、放射パネルと模擬天井板の距離が、模擬床板との距離よりも近いためと考えられる。床下設置放射パネル運転時の遮熱断熱材は、放射パネル直上の表面温度上昇に寄与しているものの、他の測定点では、有意な効果がないと考えられる。放射パネルを天井裏あるいは床下のどちらに設置しても、送風なしで大きな垂直温度分布は認められず、室内環境は良好と言える。送風すると吹出口位置の温度が高くなるが、特に放射パネルを床下に設置した場合に、床下内の熱溜まりの解消が確認できる。結論として、送風をしない方が輻射熱伝達量を確保でき、良好な室内環境が得られる。

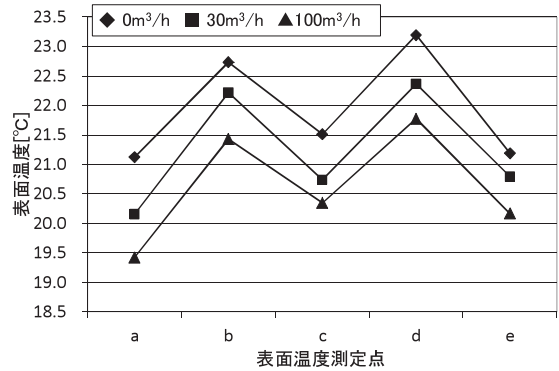


図15 a～e点の模擬天井表面温度 (天井裏設置放射パネル運転時)

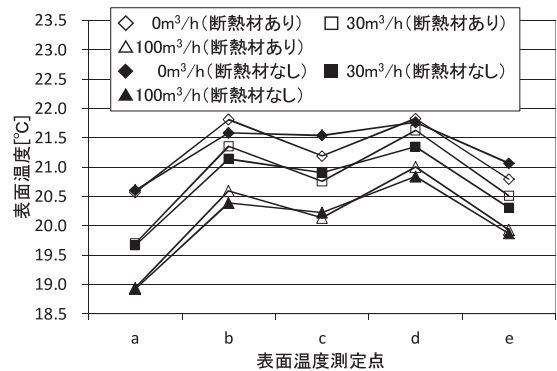
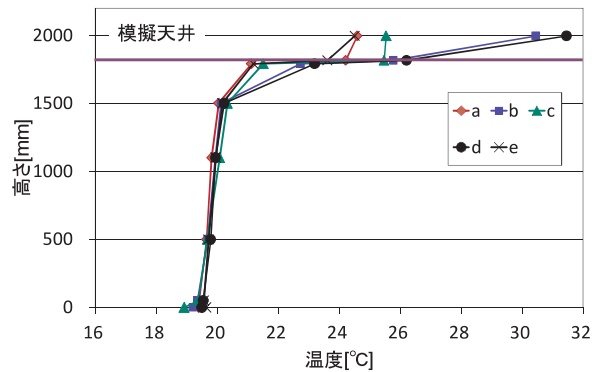


図16 a～e点の模擬天井表面温度 (床下設置放射パネル運転時)



(a) 送風なし

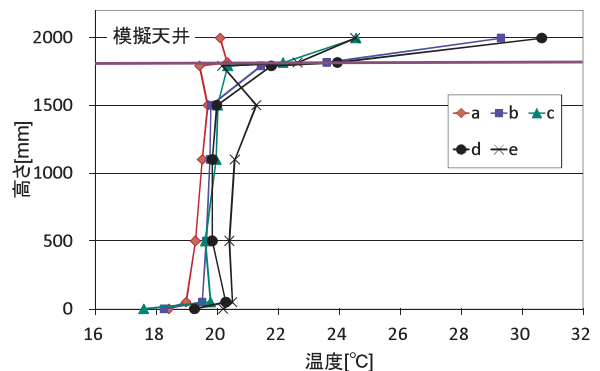
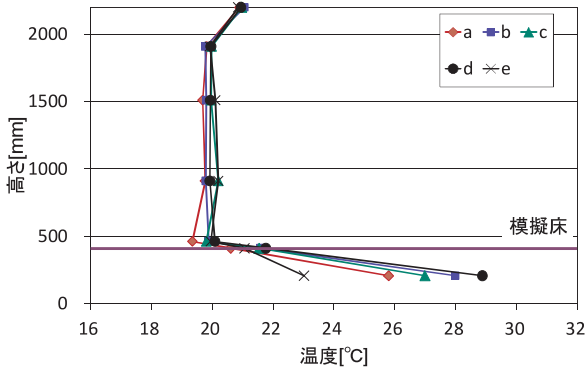
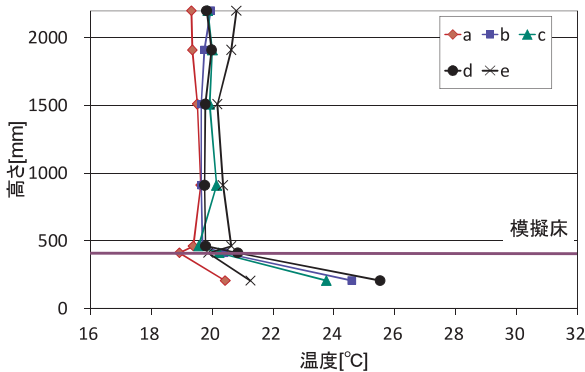


図17 a～e点の垂直温度分布 (天井裏設置放射パネル運転時)



(a) 送風なし



(b) 風量 100 m<sup>3</sup>/h

図18 a～e点の垂直温度分布  
(床下設置放射パネル運転時、遮熱断熱材なし)

表3に図8のc, e点の風速分布(放射パネルを床下設置時は遮熱断熱材がない場合)を示す。吹出口近傍の地点eでは、風量100 m<sup>3</sup>/hの場合、模擬床上50～1500mm(4測定点)における最大平均風速が天井裏設置の場合1.60m/s、床下設置の場合1.39m/sであり、送風しない場合と比較して気流があるが、中央のc点では、0.3m/s未満であった。送風した場合、放射パネルからの放熱量は高くなることから、暖房時の最適な運転方法として、立ち上げ時に風量を高くして素早く室温を上げ、その他の時間帯では、送風しないなど使い分けることが考えられる。

表3 風速分布

放射パネル設置方式	測定箇所	風量[m <sup>3</sup> /h]		
		0	100	
		平均風速[m/s]		
天井裏	c点中央	床上1500mm	0.00	0.13
		床上1100mm	0.00	0.13
		床上500mm	0.01	0.14
		床上50mm	0.02	0.26
	e点端部	床上1500mm	0.00	1.60
		床上1100mm	0.01	0.97
床下	c点中央	床上1500mm	0.05	0.07
		床上1100mm	0.04	0.11
		床上500mm	0.05	0.07
		床上50mm	0.07	0.16
	e点端部	床上1500mm	0.07	0.48
		床上1100mm	0.07	0.21
		床上500mm	0.05	1.39
		床上50mm	0.07	0.95

## 6. まとめ

本研究で得た知見を以下にまとめる。

- (1) 環境試験室内の天井裏または床下に設置した放射パネルの暖房時における放熱量は、居住空間に設置するJIS規格での試験とほぼ同等の値を示した。
- (2) 送風しない場合、高い輻射放熱量が得られ、良好な室内環境が得られる。
- (3) 風により放射パネルの放熱量は増加し、全体の放熱量に対する送風による放熱量は最大で21～30%となった。
- (4) 暖房時の最適な運転方法として、立ち上げ時に風量を高くして素早く室温を上げ、その他の時間帯では、送風しないなど使い分けることが考えられる。

## 引用文献

- 1) 富田和彦・保科秀夫：北海道立工業試験場報告，No.293, pp.85-93, (1994)
- 2) 白土博康・富田和彦・黒田邦臣：空気調和・衛生工学会論文集, 158, pp.15-21, (2010)
- 3) 白土博康・富田和彦・黒田邦臣・井浦奉昭：空気調和・衛生工学会論文集, 164, pp.49-54, (2010)
- 4) 白土博康・富田一彦・保科秀夫・井浦奉昭：空気調和・衛生工学会論文集, 189, pp.47-54, (2012)
- 5) 白土博康・富田和彦・保科秀夫・櫻庭高光・井浦奉昭：空気調和・衛生工学会論文集, 233, pp.11-18, (2016)
- 6) JIS A1400 (2007)