

放射を利用した室内環境調整技術に関する研究

F03G541H 大竹秀雄
 指導教員 赤林伸一教授

1 研究目的

室内温熱空気環境を制御する場合には、空調装置を用いて空気の温湿度や清浄度を制御する方法が一般的である。一方、快適性の観点から床や天井、壁などの表面温度を制御する放射型冷暖房が近年普及し始めている。この方式は主に寒冷地や準寒冷地における住宅で採用されてきたが、最近では病院や老人保健施設、保育園などでも採用されるようになってきている。

放射で室内温熱環境を制御する手法は人体との熱の授受を直接放射で行うため空気温度を相対的に低く出来ること、上下の温度分布が少ないこと等多くの利点がある。しかし、放射型冷暖房時の床、壁表面からの放熱量の計算手法、負荷の算出法等は未だ確立されておらず、経験と勘によって設計されているのが現状である。又、放射型冷房では、冷放射パネル面での結露が問題となる。しかしながらこれらを定量的に評価した研究例は極めて少ない。

本研究では、放射冷暖房を解析するため、試験室の床

表1 壁・床・天井の分割方法

部位	詳細	温度制御の精度
壁	4面のうち2面は3系統に分割し、低温または高温に制御できる部分を設置し、窓を再現可能	±0.5 (返り管水温)
床	1系統	
天井	2系統	
エアコン	室内空気温度制御	
床下チャンバー	架橋ポリエチレンパイプ等を収納	

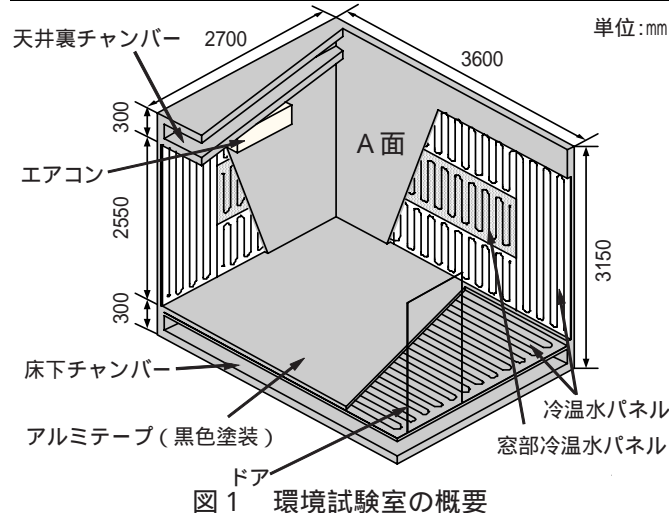


図1 環境試験室の概要

面、壁面、天井面の表面温度を冷温水放射パネルによって直接制御する放射型環境試験室を開発する。この環境試験室を用いて、床暖房時の床面からの放熱量の算出方法の検討、さらに、床冷房時に結露を防止する方法を検討することを目的とする。

2 放射型環境試験室の開発

2.1 試験室の製作

2.1.1 試験室の概要

既成のプレハブ型冷凍庫の床面、壁面(4面)、天井面に冷温水放射パネルを取り付けた放射制御型環境試験室を製作する。特に壁面は4面のうち2面を3分割し、系統別に温度制御を行うことにより、窓等の断熱性能の低い部分を再現できるものとする。また、エアコンによって冷温風を供給することにより空気温度も制御できるシステムとする。表1に壁・床・天井の分割方法、図1に試験室の概要を示す。

2.1.2 各部位の詳細

試験室本体

試験室本体は、3600mm × 2700mm × 3150mm(高さ)の冷凍庫を使用する。冷凍庫の内壁には放射パネルを固定するため、40mmの柱を45.5mm間隔で設置する。また、試験室の上下にはチャンバーを設け、床下チャンバーには架橋ポリエチレンパイプを収納する。図2に平面図、図3に断面図を示す。

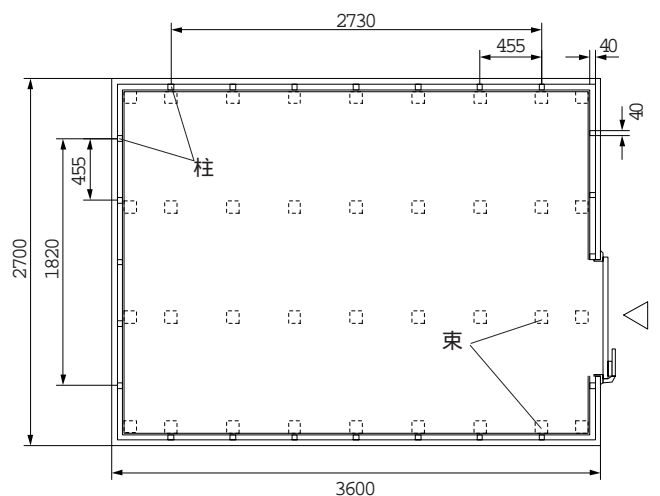


図2 平面図

単位:mm

放射パネル

設置する放射パネルは、スノコ状に組んだ木材と型に成型したアルミ板、架橋ポリエチレンパイプ（外径8.5mm、内径6.0mm）の3つを重ね合わせて作製する。またパネルの表面には、黒色塗装のアルミテープを貼り付ける。

制御システム

冷温水の温度制御システムフローを図4に示す。システムは1次側と2次側の二つに分けられる。1次側では、2次側配管内の温度を検知し、三方弁により熱源から熱交換器への冷温水流入量を制御することで放射パネル内の冷温水の温度をコントロールする。2次側では熱交換器により設定水温に制御された冷温水が冷温水放射パネル中を循環する。また温水系は2系統とし、高温と中温の二つの温度に制御可能とする。

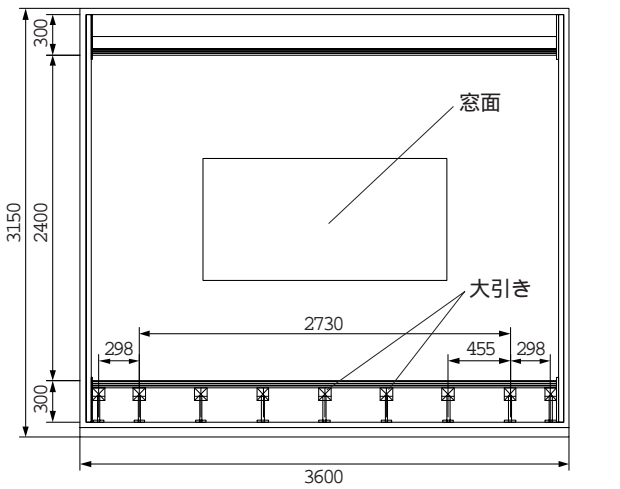


図3 断面図 単位:mm

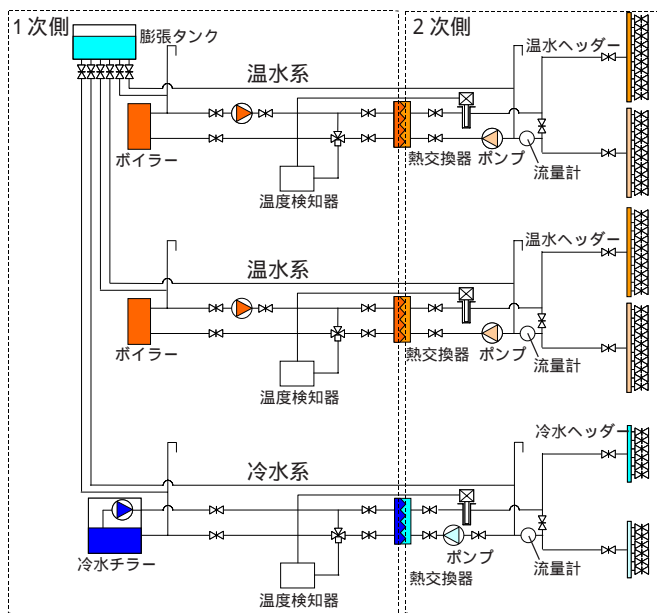


図4 冷温水の温度制御システムフロー

性能の確認

夏季及び冬季においてMRT(平均放射温度)が同等な環境を対流と放射の両方によって再現し、室内温度分布等を測定して両者の比較を行う。

測定項目は、温度(壁・床・天井表面温度35点、空間の乾球温度57点、計92点)、グローブ温度及び湿度(室内中央各1点)、冷温水ヘッダーの戻り水温(各ヘッダー1点、計3点)の計98点で、それぞれ熱電対を用いて1分毎に測定する。なお、冷温水ヘッダーの行き水温は測温抵抗体で、流量は積算流量計を用いて測定する。

測定結果

2.3.1 室内表面温度

夏季、冬季の対流と放射それぞれによる冷暖房時の室内壁面、天井面、床面、窓面各冷温水パネルの設定水温と戻り管水温及び表面温度の測定結果を表2に示す。暖房時には、床面を除く全ての面で戻り管水温が設定温度を、表面温度が戻り管水温を上回っている。特に窓部の表面温度は、床暖房時に14.7、温風暖房時に16.2と戻り管水温(約7)に比較し大幅に高い温度となっている。これは床暖房時は放射によって壁面、床面、天井面が、温風暖房時には対流によって空気と窓面が、相互に熱交換を行っているためと考えられる。冷房時に

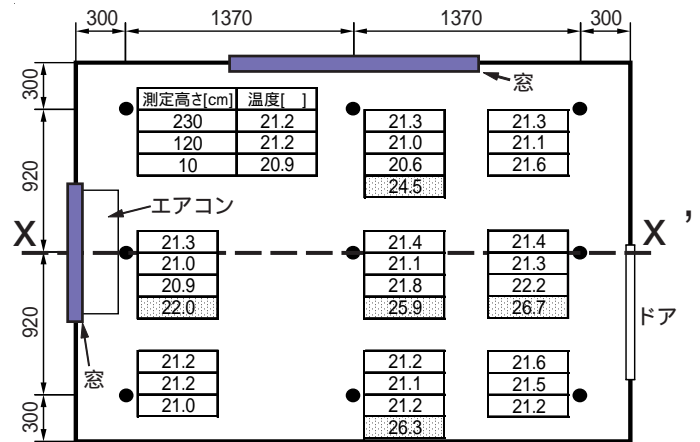


図5 床暖房時室内温度分布 (網掛け部分: 床表面温度、単位:mm)

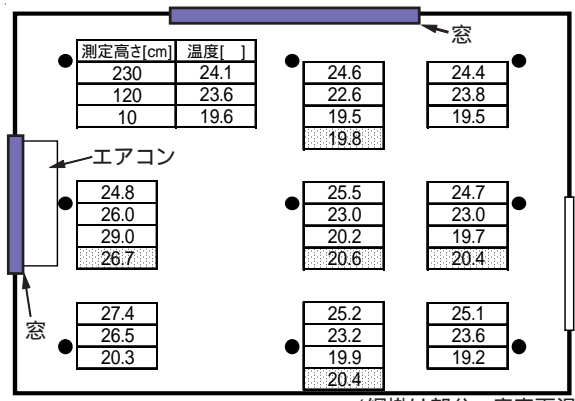


図6 温風暖房時室内温度分布 (網掛け部分: 床表面温度)

おいては、暖房時とは逆に、床面を除く全ての面で配水管水温が設定温度(壁面:30、窓面:35)を、表面温度が配水管水温(壁面:約29、窓面:約34)を下回っている。

暖房時の床面表面温度を図5、6に示す。暖房時には窓面下部の床面表面温度はその他の測定点と比較して床暖房時で最大4.7、温風暖房時で最大7.0低温となる。

2.3.2 垂直温度分布

床暖房及び温風暖房時の垂直温度分布を図7に、床冷房及び冷風冷房時の垂直温度分布を図8に示す。

床暖房時は、床上10cm～230cmの各点で約21～22となり均一な温度分布になっている。温風暖房時は床付近が天井付近に比べ低く、上下温度差が極めて大きい。エアコン吹出口付近の測定点では、温風が下方に吹出されるため床付近ほど温度が高い。

床冷房時は、床付近が天井付近に比べ低く、上下温度差は約3である。冷風冷房時は各点で約22～23の値で均一な温度分布になっている。

2.3.3 室内の空間温度分布

各測定点(床上10cm、120cm、230cm)の床暖房時の室内温度分布を図5、温風暖房時の室内温度分布を図6に示す。

床暖房時は、各測定点で21～22の範囲に入り、均一な温度分布になっている。温風暖房時のエアコン付近で

は吹出温風の影響により他の測定点に比べ高温になっており、温度差は最大で10である。

2.3.4 MRT(平均放射温度)

表3に各暖冷房時のMRTを示す。暖冷房それぞれで、MRTの値はほぼ同様であり、対流と放射により同等の体感温度が再現されていると言える。

2.4 まとめ

実験対象となる試験室の壁面温度を冷温水放射パネルによって直接制御することにより、屋外環境の室内環境への影響を再現できる環境試験室を製作した。

冷温水パネルの配水管水温と表面温度が異なっているのは、各面の表面で生じる相互放射と対流によって極めて大きな熱交換が行われているためと考えられる。

床暖房時は垂直温度分布、室内温度分布共に21～22の値になり、床暖房の均一な温度分布が再現されている。エアコンによる温風暖房時は室内上下に大きな温度差が生じ、温風暖房の特徴を再現できている。

暖房時における窓面下部の床表面温度の低下は窓部からのコールドドラフトと考えられ、冬季暖房時の窓を再現することが可能である。

3 床暖房時の床面からの放熱量の算出方法の検討

3.1 床暖房時の放熱量の計算方法

固体表面からの放熱量は通常次式で求められる。

$$q = \alpha(T_s - T_A)$$

但し、 q :放熱量[W/m²]

α :総合熱伝達率[W/m²K]

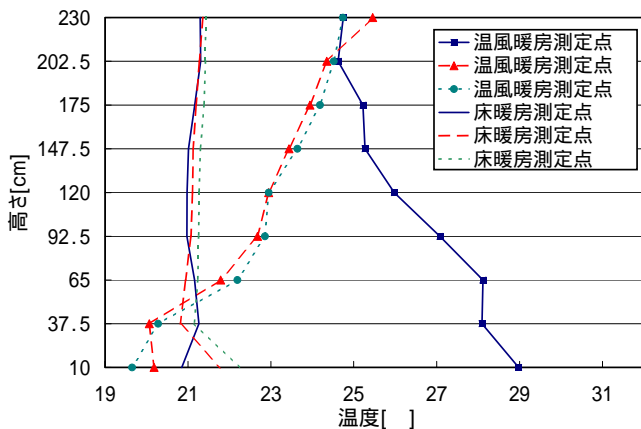


図7 床暖房時及び温風暖房時の垂直温度分布
(測定位置は図5 x-x'断面)

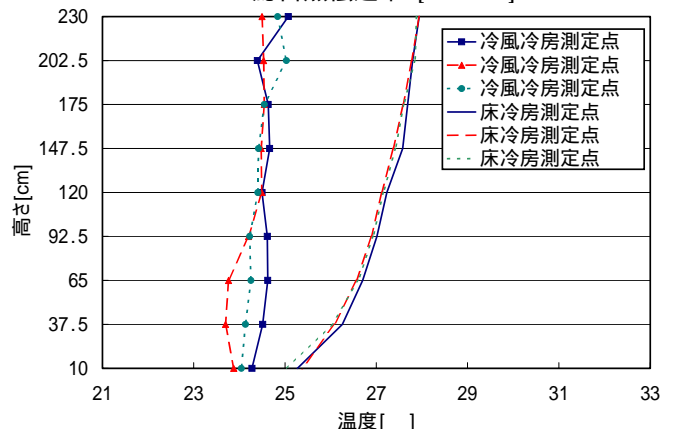


図8 床冷房時及び冷風冷房時の垂直温度分布
(測定位置は図5 x-x'断面)

表2 設定温度と各表面温度

部位	床面			壁面、天井面			窓面		
	設定水温 []	配水管水温 []	表面温度 []	設定水温 []	配水管水温 []	表面温度 []	設定水温 []	配水管水温 []	表面温度 []
床冷房時	15	16.0	22.8	30	29.2	27.7	35	33.8	30.2
冷風冷房時	なし	11.9	24.9	30	28.9	26.4	35	33.8	28.8
床暖房時	43	41.1	25.8	20	20.4	20.5	5	6.9	14.7
温風暖房時	15	23.4	21.5	15	17.1	20.5	5	7.0	16.2

ポンプによる循環のみ

T_s : 固体表面の温度 [K]

T_a : 空気温度 [K]

この総合熱伝達率は、固体表面と室内空気の温度差が比較的小さく、かつ各表面温度の差も小さい場合を想定しているため、床暖房時のように床表面温度と室内空気温度、壁、天井の表面温度との温度差が大きい場合に適用することには問題がある。

表面温度と各部位の温度差が大きい場合には、総合熱伝達率を放射熱伝達率 q_r と対流熱伝達率 q_c とに分離し、個々の熱伝達量を計算する必要がある。

そこで、床暖房時に床面、壁面、天井面の温度を変化させた場合の放射熱伝達率 q_r 、対流熱伝達率 q_c を実験的に明らかにすることにより、床表面からの放射熱伝達量と対流熱伝達量の比率を明らかにする。

3.2 熱伝達率の算出方法

表4に熱伝達率測定のための実験条件を示す。各壁面放射パネル出入口水温と系統別流量を測定し、各パネル毎の受熱・放熱量を算出する。放射熱伝達量は表5(1)式より計算で求める。各パネルの受熱・放熱量が床からの放射熱伝達量と室内空気からの対流熱伝達量の和であることから、各パネルの受熱・放熱量から放射伝達量を引いた分を対流熱伝達量として表6(1)、(2)式からそれぞれの熱伝達率を求める。

表3 各暖冷房時のMRT

MRT[]	暖房		冷房	
	床暖房	温風暖房	床冷房	冷風冷房
	21.2	21.9	26.6	26.3

表4 熱伝達率測定のための実験条件

	設定温度[]	
	壁・天井	床
Case1	30	40
Case2	25	40
Case3	20	40
Case4	15	40
Case5	10	40
Case6	5	40

表5 放射熱伝達量の計算式

面1から面2への放射熱伝達量 q_{12} [W]は

$$q_{12} = \frac{1}{2} C_{12} \{ (T_1/100)^4 - (T_2/100)^4 \} S_1$$

 但し、 C_{12} : 面1からみた面2の形態係数
 f_1 : 面1の放射率
 f_2 : 面2の放射率
 C_b : 黒体の放射定数 5.67[W/m²・K]
 T_1 : 面1の絶対温度[K]
 T_2 : 面2の絶対温度[K]
 S_1 : 面1の面積[m²]

表6 対流・放射熱伝達量の計算式

$$Q_c = q_c (T_s - T_a) S [W] \dots (1)$$

但し、 Q_c : 対流熱伝達量[W]
 q_c : 対流熱伝達率[W/m²・K]
 T_s : 壁体の表面温度[]
 T_a : 空気温度[]
 S : 伝熱面積[m²]

$$Q_r = q_r (T_s - T_a) S [W] \dots (2)$$

但し、 Q_r : 放射熱伝達量[W]
 q_r : 放射熱伝達率[W/m²・K]

3.3 各熱伝達率算出結果

図9に放射熱伝達率と各表面と室温の温度差の関係を示す。表面温度と室温の温度差が大きくなるほど天井面、壁面の熱伝達率の値が小さくなる。また、床面は床面と室温の温度差に関係なく約6.0 W/m²となる。

図10に対流熱伝達率と各表面と室温の温度差の関係を示す。放射熱伝達率とは逆に、表面温度と室温の温度差が大きくなるほど天井面、壁面の熱伝達率の値が大きくなる。床面についても同様の傾向がある。

図11に総合熱伝達率と各表面と室温の温度差の関係を示す。天井面と床面に関しては、表面温度と室温の温度差にある程度の相関関係がみられるので、実験と同じ温度差の範囲内では、総合熱伝達率を用いて放受熱量を計算できる。

3.4 まとめ

床暖房時にも適用できる放射熱伝達率、対流熱伝達率総合熱伝達率を実験的に明らかにした。

床面では、放射熱伝達率は表面温度と室温の温度差に関係なく、約6.0 W/m²の一定値となる。

天井面・壁面では、対流熱伝達率と、表面温度と室温の温度差の間に正の相関がみられる。これは、温度が大きくなるほど室内空気の対流速度が大きくなることが原因であると考えられる。

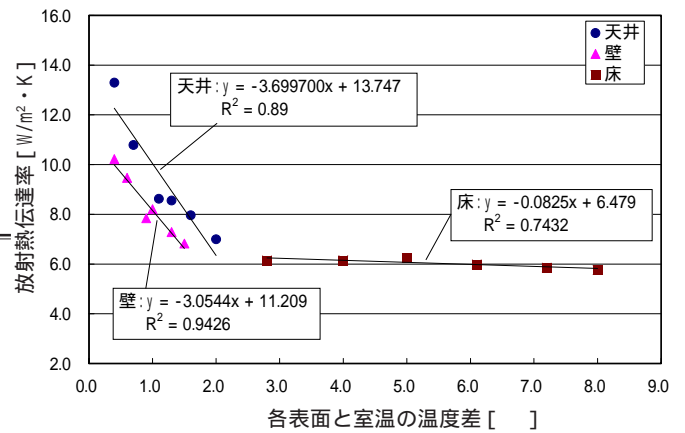


図9 放射熱伝達率と各表面と室温の温度差の関係

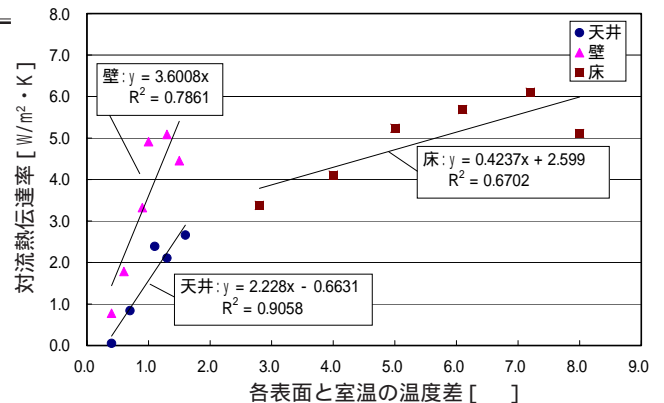


図10 対流熱伝達率と各表面と室温の温度差の関係

水平面については、総合熱伝達率と表面温度と室温の温度差に相関関係がみられるので、実験と同じ温度差の範囲内では、総合熱伝達率を用いて放熱量を計算できる。垂直面については相関関係がみられず、放射と対流に分けて計算する必要があると考えられる。

4 床冷房時の結露防止システムの検討

4.1 結露防止システムの概要

図12に結露防止システムを、図13に放射制御型環境試験室の様子と除湿・再熱用ファンコイルユニットの写真を示す。上下に連結させたファンコイルユニットの下段のコイルを除湿コイルとして使用し、冷水を供給することで室内の除湿を行い、結露の防止を図る。一方、上段のコイルはファンコイルからの吹き出し空気温度を下げ過ぎないように、床冷放射パネルを通り室内の冷房負荷を除去して戻ってくる冷水を用い、吹き出し気流を再熱するコイルとして使用する。なお、今回の実験では、ダイキンの床置型ファンコイルユニット[FWVM3B]を使用した。

4.2 実験方法

表7に各ケースの設定温度を示す。夏季の室内温熱環境再現時に、潜熱負荷(加湿器)を与え、冷水チラーの設定温度を変化させた場合の室内温度分布、床パネル出入口水温等を測定し、床放射パネル配管の結露状況を確認する。

4.3 測定結果

表7に各ケースの測定温湿度を示す。除湿コイルの水温を上げていくと室内の露点温度が高くなる。Case 3、4、5は床パネル出口水温が露点温度以下になるため、

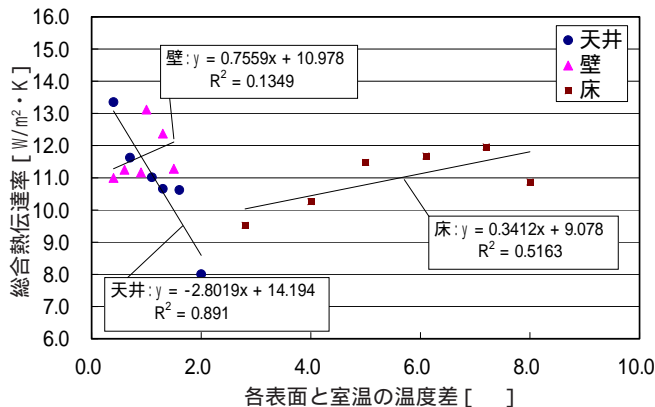


図11 総合熱伝達率と各表面と室温の温度差の関係

表7 各ケースの設定温度と測定温湿度

	設定温度[]			室温 []	湿度 [%]	床表面温度 []	露点温度 []	床パネル入口 水温[]	床パネル出口 水温[]
	天井・壁	床	冷水チラー						
Case1	35	13	7	25.8	46.9	22.0	13.6	13.0	14.6
Case2	35	13	8	25.8	48.1	22.0	14.0	13.0	14.6
Case3	35	13	9	25.9	49.8	23.9	14.6	13.0	14.6
Case4	35	13	10	26.1	51.9	22.2	15.4	13.0	14.6
Case5	35	13	11	26.0	55.1	22.4	16.3	13.1	14.7

床パネル配管表面で結露していると考えられる。

図14にCase 1の垂直温度分布を示す。図8の床冷房の垂直温度分布と比較すると、図8では低温になっているのが床面近傍のみであるのに対して、図14では低温部分が上方まで広がっている。これは、ファンコイルユニットが室内の空気を攪拌しているためと考えられる。

図15に冷房負荷除去熱量の割合を示す。各ケースとも床による除去熱量が2割、除湿コイルによる除去熱量が8割程度となっている。

4.4 床面の結露を防止する露点温度の算出

表8にファンコイルユニットの除湿量の計算式を示す。(1)式と実験データを用いて、除湿量と除湿コイル入口水温をパラメータとした室内空気の露点温度を算出した。その結果として、図16に除湿コイル入口水温と室内空気露点温度の関係を示す。人体からの一人当たりの水蒸気発生量(軽動作、環境温度25)は約150g/hであることから、室内の在室人数と除湿コイル入口水温を決めれば、図16から、その時の室内空気の露点温度を簡易に求めることができる。床に供給する冷水の温度を露点温度以上に設定すれば結露を防止することができる。

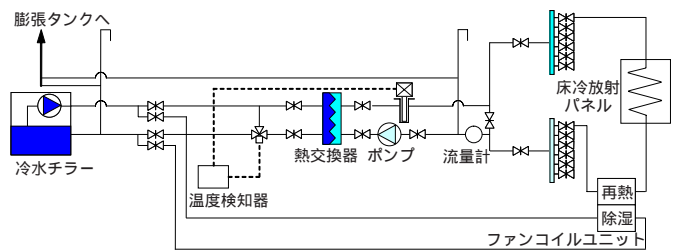


図12 床冷房結露防止システム



図13 放射制御環境試験室の様子と除湿・再熱用ファンコイルユニット

4.5 まとめ

床冷房時に床面の結露を防止するシステムを提案し、実験でその有効性を検討した。

床冷房時には、床面での結露を防止するため、室内の除湿が必要不可欠であるが、室内の除湿と同時に顕熱負荷を除去してしまうことになるため、床が結露しない程度に除湿した場合、ファンコイルが除去する冷房負荷は全体の約8割であり、床が除去する負荷は全体の2割程度と相対的に少ない。

床冷房時にファンコイルユニットを用いて除湿すると室内の空気が攪拌されて、室内垂直方向の温度分布が解消される。

室内の水蒸気発生量と除湿コイル入口水温をパラメータとした床面での結露を防止する計算法を開発し、床冷房の設計資料として提案した。

5 まとめ

- (1) 実験対象となる試験室の壁面温度を冷温水放射パネルによって直接制御することにより、屋外環境の室内環境への影響を再現できる環境試験室を製作した。
- (2) 夏季と冬季の温熱環境を対流と放射によってそれぞれ再現し、室内温度分布を測定した結果、それぞれの冷暖房の特徴を再現できており、環境試験室として十分な性能を持っていることを確認した。
- (3) 床暖房時にも適応できる対流熱伝達率、放射熱伝達

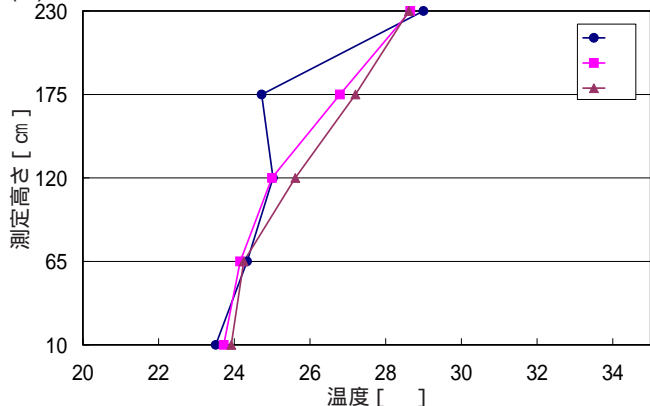


図14 Case1の垂直温度分布 (測定位置は図5 x-x'断面)

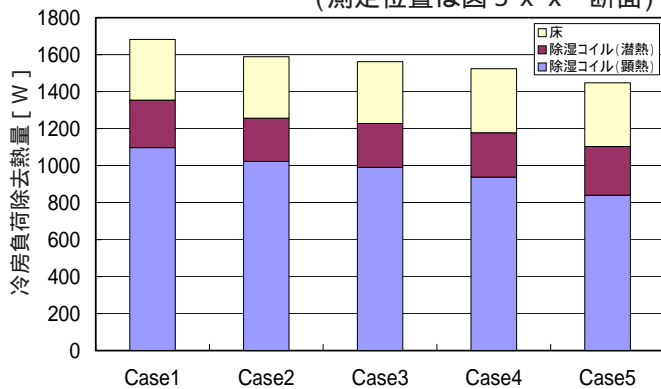


図15 冷房負荷除去熱量の割合

率を実験的に明らかにした。

- (4) 床面では、放射熱伝達率は表面温度と室温の温度差に関係なく、約 6.0 W/m^2 の一定値となる。
- (5) 天井面・壁面では、対流熱伝達率と、表面温度と室温の温度差の間に正の相関がみられる。これは、温度が大きくなるほど室内空気の対流速度が大きくなるのが原因であると考えられる。
- (6) 水平面については、総合熱伝達率と表面温度と室温の温度差に相関関係がみられるので、実験と同じ温度差の範囲内では、総合熱伝達率を用いて放熱量を計算できる。垂直面については相関関係がみられず、放射と対流に分けて計算する必要があると考えられる。
- (7) 床冷房時に床面の結露を防止するシステムを開発し、実験でその有効性を検討した。
- (8) 床冷房時には、床面での結露を防止するため、室内の除湿が必要不可欠であるが、室内の除湿と同時に顕熱負荷を除去してしまうことになるため、床が結露しない程度に除湿した場合、ファンコイルが除去する冷房負荷は全体の約8割となり、床冷房が除去する負荷は全体の約2割と相対的に少ない。
- (9) 床冷房時に室内に気流を与えると室内の空気が攪拌されて、垂直方向の温度分布が解消される。
- (10) 除湿コイル入口水温と室内発生水蒸気量をパラメータとした床面での結露を防止する計算法を開発し、床冷房の設計資料として提案した。

表8 除湿量の計算式

$$G_w = h_D A (X_a - X_s) \dots (1)$$

但し、 G_w : 除湿量[kg/h]

h_D : 伝熱面の物質伝達率[kg/m²h]

A : 伝熱面総面積[m²]

X_a : 空気入口平均絶対湿度[kg/kg(DA)]

X_s : 伝熱面平均温度に対応する空気飽和絶対湿度[kg/kg(DA)]

$$h_D = h/C_p$$

h : 顕熱の意味の熱伝達率[W/m²K]

C_p : 空気の比熱[J/kgK]

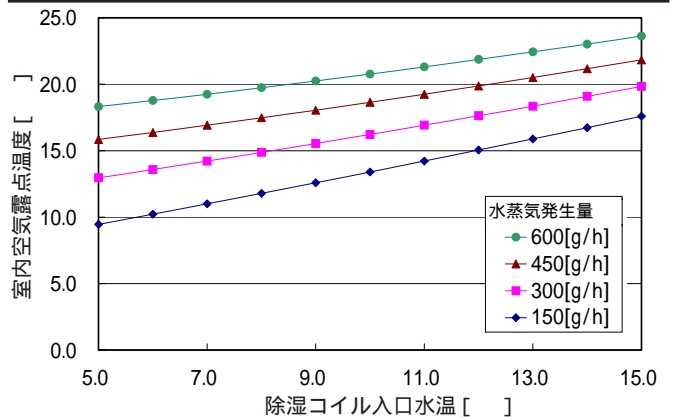


図16 室内発生水蒸気量毎の除湿コイル入口水温と室内空気露点温度の関係