

放射環境における対流・放射・総合熱伝達率の測定結果と 床冷房時の結露防止手法に関する研究

STUDY ON CONVECTIVE, RADIANT AND TOTAL HEAT TRANSFER COEFFICIENT IN RADIANT ENVIRONMENT AND CONDENSATION CONTROL TECHNIQUE IN THE CASE OF FLOOR COOLING

長谷川 弘*, 赤林 伸一**, 坂口 淳***

Hiroshi HASEGAWA, Shin-ichi AKABAYASHI and Jun SAKAGUCHI

This study is composed of two parts. One is the measurement results of the convective, radiant and total heat transfer coefficient, and the other is the study of condensation control technique in the case of floor cooling. Two studies are tested by the environment test chamber, which controls the each surfaces temperature of the floor, wall and ceiling, using cold and warm water radiation panel. The results of the measurement are as follows: (1) Both vertical and horizontal temperature distribution is 21 - 22 °C when floor heating, and the temperature distribution is uniform. (2) The temperature differences by the heating air conditioner are larger than by floor heating. (3) The radiant heat transfer of the floor is the 19.3W/m² in case of floor surface temperature sets 40°C, the ceiling and walls temperature set 30°C. (4) The calculating method to prevent condensation at cooling floor is made by parameters of temperature of dehumidification coil entrance water and the area of heat exchanger.

Keywords : Environmental test chamber, Radiation, Convection heat-transfer coefficient, Total heat-transfer coefficient, Condensation
環境試験室, 放射, 対流熱伝達率, 総合熱伝達率, 結露

1. はじめに

室内温熱空気環境を制御する場合には、エアーハンドリングユニットやファンコイル、ヒートポンプなどの空調装置を用いて、空気の温湿度や清浄度を制御する方法が広く採用されている。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。放射型冷暖房は、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、暖房時には人体との熱の授受を直接放射で行うため、対流暖房よりも空気温度を相対的に低くでき、上下温度分布が少ないこと等、多くの利点が報告されている^{1), 2)}。一方、放射型冷暖房時の床、壁表面からの放熱量の計算手法や負荷の算出法等については、対流熱伝達率や放射熱伝達などに対して定量的に評価した研究例は極めて少ないため^{3) 4) 注1)}、経験と勘によって設計されている現状である。特に放射型冷房では、冷放射パネル面での結露が問題が生じるため、これらに対して検討した研究は極めて少ない^{5) 6) 注2)}。

本研究では、放射冷暖房性状を解析するため、試験室の床面、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し、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. 放射制御型環境試験室の概要

2.1 放射制御型環境試験室

従来の環境試験室^{注3)}では、屋外環境を再現できる環境試験室内に、実験対象となる試験室を設置し、屋外環境や試験室の断熱性能、気密性能を変化させた場合の室内温熱環境の変化を測定、解析する手法が一般的である。これは、図1に示すように熱伝導経路は異なるものの、実験対象となる試験室の壁面温度を直接制御することとほぼ同様であると考えられる。本研究では、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し、表面温度を変化させた場合における室内温度分布および各種熱伝達率について実験を行う。放射制御型環境試験室の壁面は、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、窓等も再現できるように作成する。また、室内にエアコンを設置し、エアコンから冷温風を供給することにより室温を制御することが可能である。表1に壁・床・天井の分割方法、図2に試験室の概要を示す。

* 新潟大学大学院自然科学研究科 大学院生

** 新潟大学大学院自然科学研究科 教授・工博

*** 県立新潟女子短期大学生活科学科 助教授・博士(工学)

Graduate Student, Graduate School of Science and Technology, Niigata Univ.

Prof., Graduate School of Science and Technology, Niigata Univ., Dr. Eng.

Assoc. Prof., Dept. of Human Life and Environmental Science, Niigata Women's College, Dr. Eng.

試験室本体は、3600mm×2700mm×3150mm(高さ)の冷凍倉庫を使用する。冷凍倉庫の内壁には放射パネルを固定するため、40mmの角材を45.5mm間隔で設置し、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冷温水ヘッダー及び架橋ポリエチレンパイプを収納する。図3に平面図、図4に断面図を示す。設置する放射パネルは、スノコ状に組んだ木材とΩ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^{注4)}を貼付する。

冷温水の温度制御システムフローを図5に示す。システムは1次



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	
床下チャンパー	ヘッダー及び架橋ポリエチレンパイプを収納	

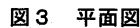
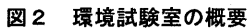


图3 平面图

单位: mm



单位: mm



	対流	放射
夏季	エアコンによる冷房	床冷房
冬季	エアコンによる暖房	床暖房

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、冷水系は1系統とし、高温・中温・低温の3つの温度に制御可能とする。表2に夏季及び冬季における室内環境の制御方法を示す。

2.1.3 測定系統

試験室は、温度(壁・床・天井表面温度35点、室内の乾球温度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、流量は水道用積算流量計を用いて測定する。

2.2 試験室の温度特性

試験室の温度特性を評価するため、夏季及び冬季においてMRT(平均放射温度)^{注5)}がほぼ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。

2.2.1 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戻り管水温及び表面温度の測定結果を表3に示す。暖房時においては、床面を除く全ての面で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℃)に比較して大幅に高い温度となっている。これは放射によって壁面、床面、天井面が相互に熱交換を行っているためと考えられる。冷房時においては、暖房時とは逆に、床面を除く全ての面で表面温度が戻り管水

表3 設定温度と各表面温度

※ポンプによる循環のみ

部位	床面			壁面、天井面			窓面		
	設定水温 [℃]	戻り管水温 [℃]	表面温度 [℃]	設定水温 [℃]	戻り管水温 [℃]	表面温度 [℃]	設定水温 [℃]	戻り管水温 [℃]	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

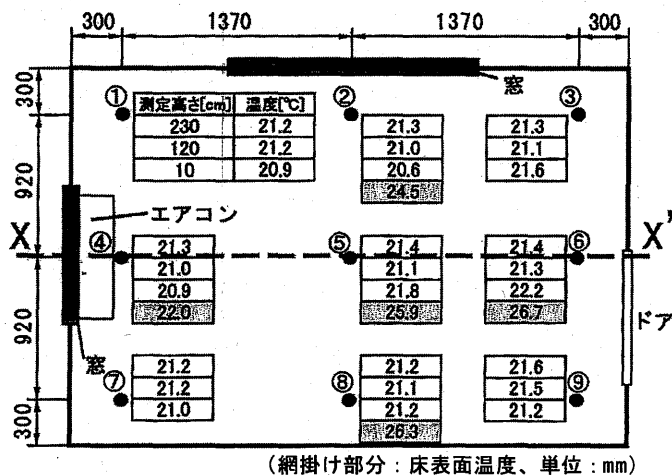


図6 床暖房時室内温度分布・床表面温度

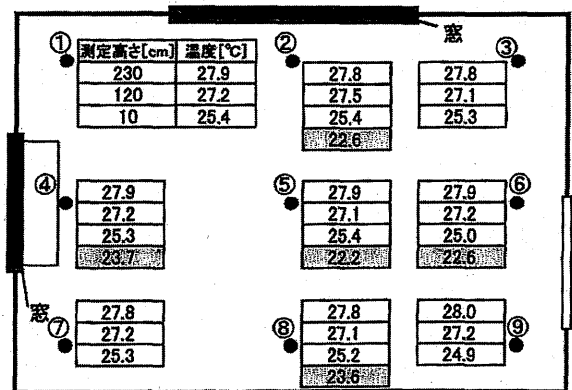


図8 床冷房時室内温度分布・床表面温度

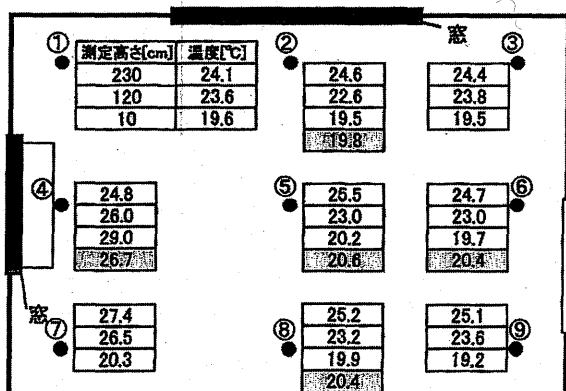


図7 温風暖房時室内温度分布・床表面温度

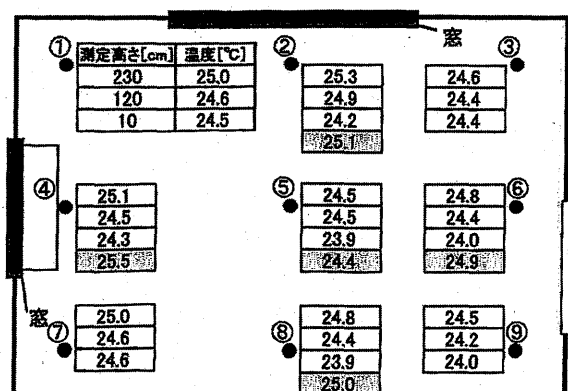


図9 冷風冷房時室内温度分布・床表面温度

温(壁面：約29℃、窓面：約34℃)を下回っている。

床暖房時、温風暖房時の床面表面温度をそれぞれ図6、7、床冷房時、冷風冷房時の床面表面温度をそれぞれ図8、9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℃^(注6)、温風暖房時で最大7.0℃低い温度となる。

2.2.2 MRT (平均放射温度)

表4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。

2.2.3 室内温度分布

床上10cm、120cm、230cm各測定点の床暖房時の室内温度分布を図6、温風暖房時の室内温度分布を図7、床冷房時の室内温度分布を図8、冷風冷房時の室内温度分布を図9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。温風暖房時はエアコン付近で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。床冷房時は、各測定高さではほぼ均一な温度分布になっている。冷風冷房時は、各測定点で24～25℃の間の値となり、均一な温度分布になっている。

表4 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	26.9	26.3

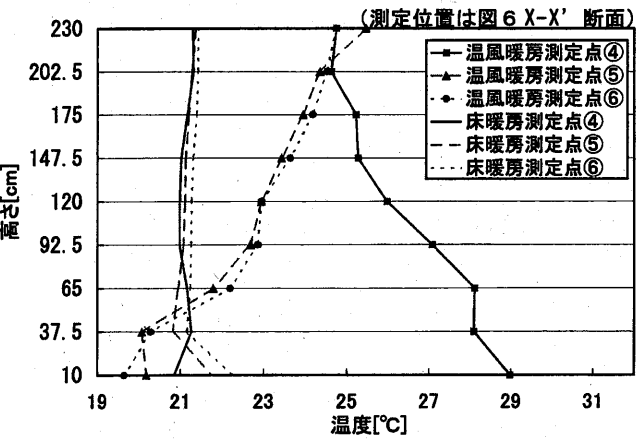


図10 床暖房時及び温風暖房時の垂直温度分布

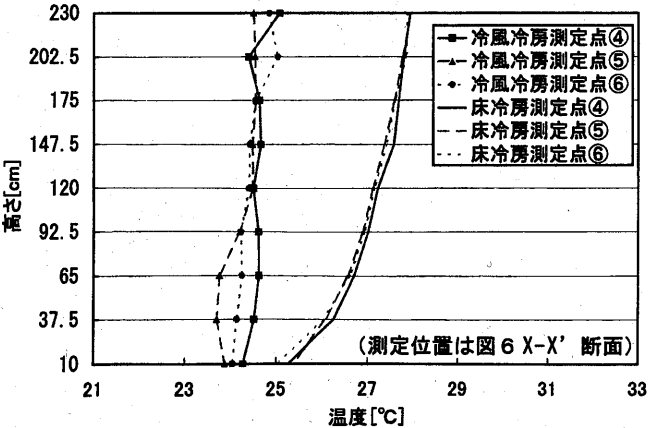


図11 床冷房時及び冷風冷房時の垂直温度分布

2.2.4 垂直温度分布

床暖房時及び温風暖房時の垂直温度分布を図10に、床冷房時及び冷風冷房時の垂直温度分布を図11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く、最大で約5℃の差がある。エアコン吹出口付近の測定点では、温風が下方に吹き出されるために床付近ほど温度が高くなっている。

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。

3. 床暖房時の床面からの放熱量

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。

$$q = \alpha(T_s - T_a) \dots (1)$$

但し、 q :放熱量[W/m²]
 α :総合熱伝達率 [W/m²K]
 T_s :固体表面の温度 [K]
 T_a :室温^(注7) [K]

総合熱伝達率 α は、対流と放射の熱伝達を簡易的に評価した熱伝達率であり、床暖房のように床表面温度が相対的に室温、壁、天井の表面温度より高い輻射環境では、総合熱伝達率 α を放射熱伝達率 q_r と対流熱伝達率 α_c とに分離し、個々の熱伝達量を計算する必要があると考えられる。

そこで、本研究では床暖房時に床面、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 α_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率と対流熱伝達率を明らかにする。

3.2 熱伝達率の測定方法

表5に熱伝達率測定のための実験条件を示す。床表面温度を40℃に設定し、壁および天井面の表面温度を5℃から30℃まで変化させた場合の各熱伝達率を測定する。窓面は壁面と同一温度で設定する。各壁面放射パネル出入口水温差と系統別流量を測定し、パネル毎の受熱・放熱量を算出する。放射熱伝達率は表6(2)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率と対流熱伝達率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率を

表5 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

引いた分を対流熱伝達量として表7(3)、(4)式から対流熱伝達率を求め、さらに(1)式より総合熱伝達率を算出する。

3.3 放射熱伝達量・対流熱伝達率算出結果

表8に床面から壁・天井面へ伝わる放射熱伝達量を示す。Case1(設定温度：床面40℃、壁・天井30℃)では157W(単位床面積あたりの放射熱伝達量19.3W/m²)、Case6(設定温度：床面40℃、壁・天井面5℃)では421.7W(51.7W/m²)である。図12に対流熱伝達率と各表面と室温^{注7)}の温度差の関係を示す^{注8)}。放射熱伝達量とは逆に、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。床面に関しては同様の傾向がある。図13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

表6 放射熱伝達量の計算式

面*i*から他の面へ伝わる放射熱伝達量 q_i [W]は

$$q_i = S_i \sum_j g_{ij} \varepsilon_i C_b \left\{ \left(\frac{T_i}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_j}{100} \right)^4 \right\} \quad \dots \dots (2)$$

但し、 g_{ij} :面*i*から発した放射のうち面*j*で吸収される割合 (Gebhalt の吸収係数)

ε_i :面*i*の放射率

C_b :黒体の放射定数 5.67 [W/m²K]

T_i :面*i*の絶対温度 [K]

T_j :面*j*の絶対温度 [K]

S_i :面*i*の面積 [m²]

表7 対流熱伝達量の計算式

$$q_c = q - q_r \quad [W] \quad \dots \dots (3)$$

但し、 q_r :放射熱伝達量 [W]

q_c :対流熱伝達量 [W]

q :各面の室内に供給される放熱量[W]

$$q_c = \alpha_c (\theta_s - \theta_f) S \quad [W] \quad \dots \dots (4)$$

但し、 q_c :対流熱伝達量 [W]

α_c :対流熱伝達率 [W/m²K]

θ_s :壁体の表面温度 [℃]

θ_f :室温^{注7)} [℃]

S :伝熱面積 [m²]

れ、本実験と同じ温度差の範囲内では、総合熱伝達率を用いて簡略的に放受熱量を計算できる。

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14に結露防止システムの概要を示す。放射制御型環境試験室の室内に除湿・再熱用ファンコイルユニットを設置し、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。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 airflow を再熱するコイルとして使用する。本

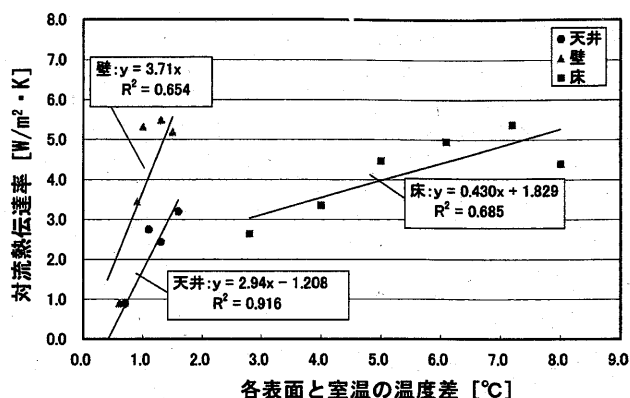


図12 対流熱伝達率と各表面と室温の温度差の関係

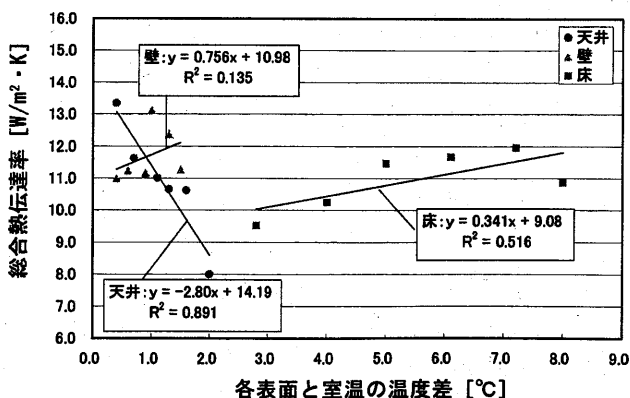


図13 総合熱伝達率と各表面と室温の温度差の関係

表8 床面から壁・壁面へ伝わる放射熱伝達量

	天井表面温度 [℃]	壁① 表面温度[℃]	壁② 表面温度[℃]	壁③ 表面温度[℃]	壁④ 表面温度[℃]	床表面 温度 [℃]	室温 [℃]	床面から 壁・天井へ伝わる 放射熱伝達量 [W]	単位床面積あ たりの放射熱 伝達量[W/m ²]
Case1	29.1	29.3	29.4	29.1	29.1	32.3	29.5	157.0	19.3
Case2	24.9	25.0	25.2	24.9	25.0	29.6	25.6	224.8	27.6
Case3	21.0	20.9	21.2	21.0	21.2	27.1	22.1	285.5	35.0
Case4	16.9	16.7	17.1	17.0	17.2	24.3	18.2	334.1	41.0
Case5	12.6	12.3	12.7	12.6	12.9	21.4	14.2	386.0	47.4
Case6	8.7	8.4	8.8	8.8	9.2	18.7	10.7	421.7	51.7

壁面の位置(①~④)は、図3参照

実験のファンコイルユニットはダイキン床置型ファンコイルユニット[FWVM3B]を使用する。

4.2 実験方法

表9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、300g/h)を与え、ファンコイルの風量及び冷水チャ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 実験結果

(1) 表面温度及び露点温度の測定結果

表9に各ケースの測定温湿度を示す。ファンコイル弱運転時は、除湿コイルの水温を上げていくにつれて室内の露点温度が高くなる。Case3、4、5は床パネル出口水温が露点温度以下になるため、床パネル配管表面で結露していると考えられる。

ファンコイル強運転時では、弱運転時と比較して、室温、床表面温度が約1℃低くなる。これは、風量が増加したことにより、顕熱負荷をより多く除去しているためと考えられる。また、露点温度は弱運転時と同様に除湿コイルの水温を上げていくと高くなる。

図15にファンコイルユニットを使用せずに床冷房を行った時(以下Case0)とCase1の垂直温度分布を示す。双方を比較すると、Case0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、Case1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16に弱運転時、図17に強運転時の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。一方、弱運転時では、除湿コイルの除去熱量のうち潜熱が約2割、顕熱が約8割であるのに対して、強運転時には、潜熱が約1割、顕熱が約9割となる。

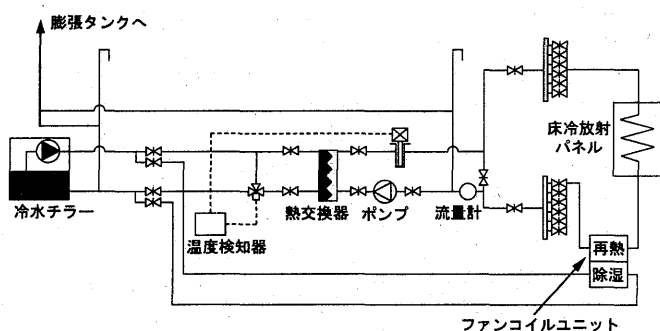


図14 床冷房結露防止システム

(2) 床面の結露を防止する露点温度の算出

表10にファンコイルユニットの除湿量の計算式を示す。(5)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露点温度を算出する。図18に弱運転時の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、

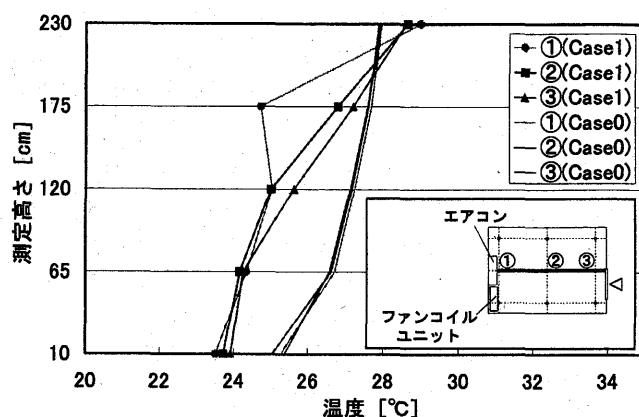


図15 Case0, Case1の垂直温度分布

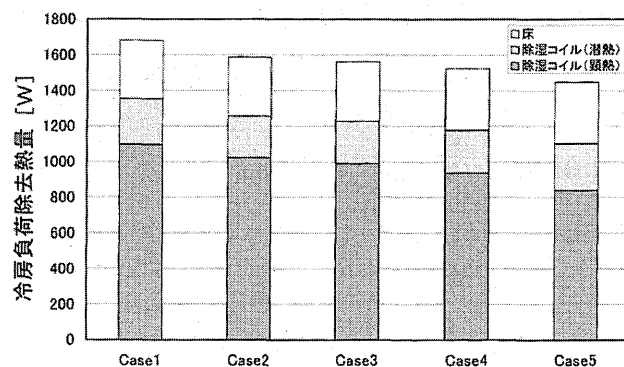


図16 弱運転時の冷房負荷除去熱量の割合

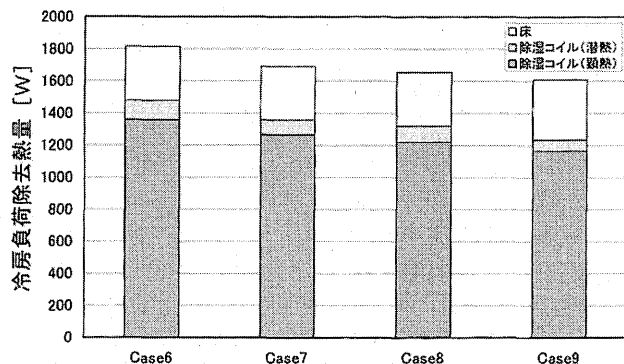


図17 強運転時の冷房負荷除去熱量の割合

表9 各ケースの設定温度と測定温湿度

	ファンコイル 風量	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	冷水チャラー						
Case1	弱運転	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
Case6	強運転	35	13	7	25.1	48.4	21.3	13.5	13.1	14.7
Case7		35	13	8	25.1	49.5	21.2	13.8	13.1	14.7
Case8		35	13	9	25.3	51.0	21.3	14.4	13.2	14.8
Case9		35	13	10	25.1	53.4	21.2	14.9	13.9	15.7

ファンコイルの風量と室内の在室人数及び除湿コイル入口水温より室内空気の露点温度を簡易に求めることが可能である。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。

5. まとめ

本研究では、放射冷暖房方式の室内温度分布および各種熱伝達量を測定するため、放射型環境試験室を開発し、この環境試験室の基本性能を報告するとともに、各種熱伝達量および床冷房時に結露を防止する方法について明らかとした。結果は以下のとおりである。

- 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。
- ③床面から壁・天井面へ伝わる放射熱伝達量は、設定温度が床面 40℃、壁・天井 30℃では 157W、設定温度が床面 40℃、壁・天井面 5℃の場合 421.7W である。
- ④天井面・壁面の対流熱伝達率と、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。

表 10 除湿量の計算式

$$G_w = h_D A (X_a - X_s) \quad \dots (5)$$

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]

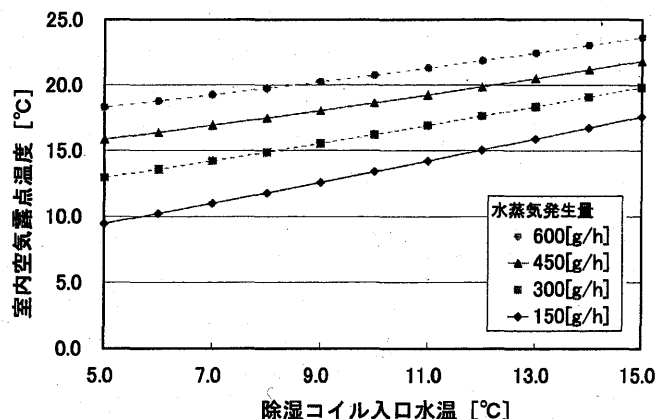


図 18 室内発生水蒸気量毎の除湿コイル入口水温と室内空気露点温度の関係(弱運転時)

⑤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。

⑥風量を弱運転とした場合、除湿コイルの除去熱量のうち潜熱が約 2 割、顕熱が約 8 割であるのに対して、強運転時には潜熱が約 1 割、顕熱が約 9 割となり、風量を増加すると、顕熱負荷除去量が增加する。

⑦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。

⑧今後、CFD を利用した放射冷暖房時の熱・空気環境の解析を行う予定である。

注

注 1) 参考文献 3)、4) などの小林らの一連の研究では、実大部屋模型または壁取合い部の部分模型により、冷房時の各面の熱伝達率について実験を行っている。本研究では床暖房時の対流熱伝達率、放射熱伝達率、総合熱伝達率について解析を行っている点が小林の研究と異なり、特色がある。

注 2) 中原ら⁵⁾の研究では、インテリジェントオフィスのペリメーターゾーンの放射冷房を行うため、壁掛け型結露型放射パネルの冷放射特性(パネル近傍の風速分布、快適性)について明らかにしている。李ら⁶⁾の研究では、韓国で普及している温水式オンドルを利用し、温水の代わりに冷水を供給することにより、床放射冷房を検討している。本研究は李らのシステムと同様の温水式床暖房システムに冷水を供給する点は同じ着眼点であるが、床暖房時の総合熱伝達率および対流熱伝達率について算出した点、床面結露の評価において室内発生水蒸気量を含めて検討している点が特徴である。

注 3) 従来の環境試験室にはさまざまな種類のものが考えられるが、ここでは、石川ら⁷⁾の人工気象室や空調衛生工学学会編:「快適な温熱環境のメカニズム 豊かな生活空間をめざして」(1997 年 12 月発行) pp154、の環境試験室を想定している。この環境試験室は、試験室の外部を包む形で、外気スペースの空間が設置されており、試験室の仕様を変化させることにより、建物シェルター性能と室内上下分布の関係を明らかとしている。

注 4) 黒色塗装のアルミテープ(㈱サンヨウバリア製 ALGC 粘着テープ・黒つや消)の放射率($\epsilon=0.98$)は、3M 製黒体テープ($\epsilon=0.94$)を同じ壁面に貼り付け、放射温度計(NEC 三栄 TH5104)で観察し確認した。

注 5) 本研究の MRT(平均放射温度)は、次式のように求めた表面積による重み付けをした表面温度である。

$$MRT = \frac{\sum_i A_i \theta_{si}}{\bar{A}} \quad \dots (6)$$

A_i : 床・壁・天井各面の面積[m²]

θ_{si} : 床・壁・天井各面の表面温度[°C]

\bar{A} : 室内全表面積[m²]

注6) 本環境試験室は、放射パネルに温冷水を流して表面温度を制御している。各面の表面温度の分布を小さくするため、温冷水パイプを逆Ω型のアルミ板で固定して放熱しているが、放射温度計で確認すると、パイプ直上とそれ以外の部分で温度分布が生じている。②と④の床表面温度を比較すると、②の測定点は冷温水パイプ直上に測定点があり、④の測定点では冷温水パイプと冷温水パイプの間に測定点があるため床表面温度に違いが生じている。なお、本環境試験室では構造上、表面温度に若干の分布が生じるため、解析で用いる表面温度は、各面で測定した表面温度の平均値を用いている。

注7) 本研究で用いている室温は、床上10cm、120cm、230cmごとに9点測定した、合計27温度測定点の平均空気温度を表す。

注8) 床暖房時の室内自然対流は、極めて静穏な流れ場であり、超音波風速計で測定した床上120cmの気流速度は室内のどの測定点においても0.05m/s以下と極めて静穏な環境であった。対流熱伝達率は壁面近傍風速との関係が高いことが知られているが、本研究では、実環境における対流熱伝達率と総合熱伝達率を求めるため、実大実験室を作成し、室温と壁面温度および各種熱伝達率の測定を行った。

謝辞

本研究を行うにあたり、環境試験室の設計・施工では、進展工業(株)の方々にご協力頂きました。また、データの集計及び解析においては、新潟大学大学院生 大竹秀雄氏(当時)のご協力を得ました。

ここに記して深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 空気調和・衛生工学会編：「暖房と冷房 わかりやすい住宅の設備」，オーム社，1999年6月
- 2) B.W.Olesen and J.Thorshauge: Difference in Comfort Sensations in Space Heating by Different Methods: Danish Experiments, Indoor Climate, pp.649, 1978
- 3) 小林定教：「建築物の室内側熱伝達特性に関する実験的研究 第一報」，日本建築学会計画系論文集，第282号，pp139-147, 1978年8月
- 4) 小林定教，萩原文雄：「放射温度計による室内各面取合いの対流熱伝達率の測定法について 室内各面取合いの対流熱伝達率に関する実験的研究 その1」，日本建築学会計画系論文集，第517号，pp-7-13, 1999年3月
- 5) 中原信生，祝 家燕，伊藤尚寛，李 克欣，榎本 賢：「結露型放射パネルを用いた空調システムの環境特性に関する研究」，日本建築学計画系論文集，第469号，pp35-44, 1995年3月
- 6) Seung-Bok Leih, Suckho Hwang, Doosam Song：「オンドルを利用した床放射冷房システムに関する研究」，空気調和・衛生工学会論文集，No. 99, pp19-30, 2005年6月
- 7) 石川善美，四戸英男，田代侃，大沼正昭，佐々木睦史：「東北工業大学人工気象室の概要」，日本建築学会1999年大会学術講演梗概集，D-2, pp899-900, 1999年9月

(2005年7月8日原稿受理，2005年11月28日採用決定)