

換気－放射ラジエータ複合型住宅用放射冷暖房システムに関する研究

白土 博康, 保科 秀夫, 富田 和彦

Study on a Ventilation- Radiator combined Radiant Cooling and Heating System for Residential Use

Hiroyasu SHIRATO, Hideo HOSHINA, Kazuhiko TOMITA

抄 録

冷暖房兼用ヒートポンプ、プラスチック製の放射ラジエータ、及び空気熱交換器を付与した換気システムで構成される換気－放射ラジエータ複合型の放射冷暖房システムの基本概念の提案を行い、以下の知見を得た。

- (1)空気熱交換器を開発し、その熱交換性能・除湿性能を評価した結果、冷房時に十分な除湿能力があること、暖房時に快適性を保つ吹き出し空気温度が確保できることを確認し、住宅用として十分に利用できることがわかった。
- (2)ラジエータ上方から垂直に換気空気を吹き出す手法を検討した結果、送風量に最適値があり、この手法が暖房時の温熱環境の改善に寄与することがわかった。
- (3)本放射冷暖房システムの制御手法として、夏期には、最初に室内湿度を検知し、電磁弁により空気熱交換器流路を開閉し、顕熱負荷の変動にはヒートポンプのオンオフにより室温制御する手法を提案した。冬期にはラジエータだけでも十分顕熱負荷に対応できるため、空気熱交換器は使わなくても良いが、外気温が低く、さらに換気による顕熱負荷が大きい時には空気熱交換器に通水し、プレヒートを行うこともできる。

キーワード：放射冷暖房システム、プラスチック製放射ラジエータ、空気熱交換器、垂直吹き出し

Abstract

We proposed a concept of a radiant cooling and heating system that is composed of a heat pump, radiators made of plastic pipes, a ventilation system with an air-liquid heat exchanger.

First of all, we developed the air-liquid heat exchanger for air dehumidification and preheat of houses. In cooling mode, the rooms can be dehumidified. In warming mode, the suitable temperature of blowing air from the exchanger can be maintained. These results show the exchanger works well for residential use. Next, we studied on the optimization of the vertical air blowing of the ventilation system above the radiators. The optimum value of the air volume was found. The method contributes to improvement of the indoor thermal environment. Finally, we proposed a system control of the radiant cooling and heating system. In summer, first of all, humidity of the room is detected for the control of the electromagnetic valve of the exchanger. Next, the heat pump is controlled by on-off operation for the change of the sensible heat load. In winter, we don't have to use the exchanger because the heat release of the radiators are enough for the sensible heat load. When the sensible heat load is larger because of the lower temperature of outside, we can preheat the ventilation air by using the exchanger.

KEY-WORDS : Radiant cooling and heating system, Radiator made of plastic pipes, Air-liquid heat exchanger, Vertical air blowing

1. はじめに

放射冷暖房システムは、放射効果により室温と熱媒温度の差を小さくでき、省エネルギー性が高いシステムである。また、ちり・ほこりを拡散せず、気流感を与えないことから快適な室内環境を与える。これらのことから、北海道では多くの新築住宅に暖房用として採用されている。しかしながら、本州以南の地域では、放射冷房のニーズが高いにも関わらず、特に住宅では普及していない。その理由としては以下の点が挙げられる。

- ①大量生産され、低コストなエアコンが住宅の冷暖房機器として主流である。一方、放射パネルは結露受けのパンや排水管が必要なこともあり、受注生産になりやすく、コストが高い。
- ②従来の放射パネルは一般に鋼板製であり、冷温水と接触する内面側の腐食だけでなく、冷房の場合は、結露による外面腐食の懸念がある。

本報告では、これらの課題を解決する換気-放射ラジエータ複合型の住宅用放射冷暖房システムについて概説するとともに、各部材の特性評価や複合システムの制御方法について報告する。

2. システムの概要

図1に本研究で提案する放射冷暖房システムの概要を示す。本システムは、冷暖房兼用ヒートポンプと冷暖房に対応する放射放熱体（以下ラジエータと呼ぶ）で室内の顕熱負荷に対応するとともに、同一ヒートポンプを熱源とし、夏期には潜熱負荷の除去、冬期には換気空気の前熱を目的として、給気口空気熱交換器を付与した換気システムで構成される。

ヒートポンプは空気熱源・地中熱源等、場所・コストに応じて使い分けが可能である。換気システムには、給気押し込み型の第一種または第二種が利用できる。排気型の第三種を使用する場合は、居室空気を別途熱交換器に循環させる方式を採用する。本空気熱交換器は、デシカント（吸着材）に水分を吸着させ、ヒータにより再生する従来のデシカント空調機に比べ、高い省エネルギー性を確保できる。本研究では換気量120m³/hにおいて、夏期の30℃相対湿度80%（21.67g/kgDA）の外気を26℃相対湿度60%（12.69g/kgDA）に調整することを想定し、システム全体で除湿速度を1165g/h（除湿量を8.98g/kgDA相当）とすることを目標としている。

放射ラジエータには、安価で耐食性を有する縦型のプラスチック製のラジエータ¹⁻³⁾を使用する。縦型放射ラジエータは意匠性があり、圧迫感が少なく冷暖房に兼用できるが、自然対流条件下では暖気が上昇し、室内上方で滞留しやすい。しかしながら、換気システムを併用し、上部暖気を下降させる空気の流れを形成すれば、これを改善できる。予備実験で、

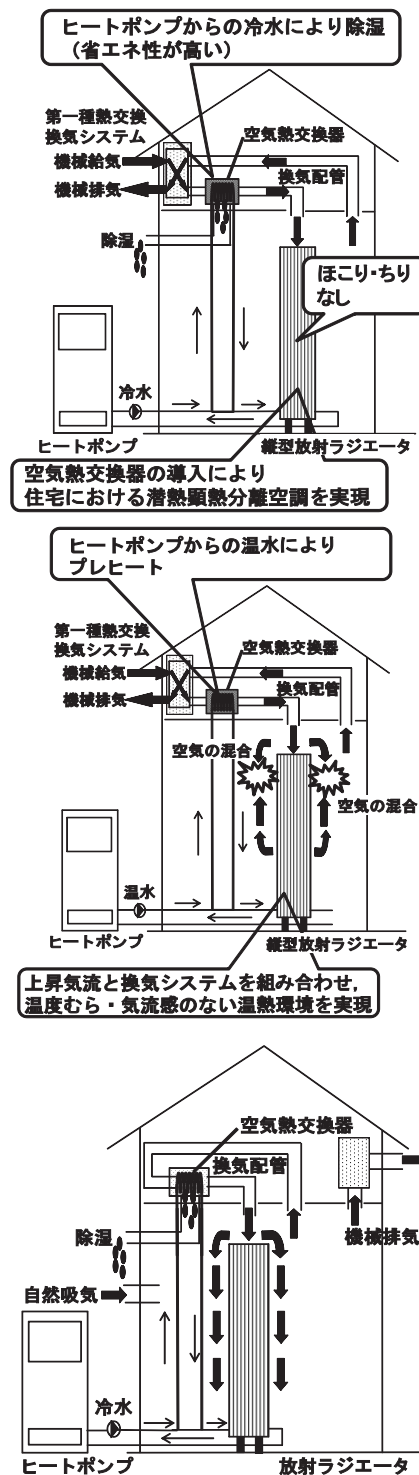


図1 換気-放射ラジエータ複合型放射冷暖房システムの概要（上；第一種換気型冷房時、中；第一種換気型暖房時 下；第三種換気型）

放射ラジエータに対し、水平よりも垂直に吹き出すことによって室内環境を改善できると判断できたため、本研究では、換気システムをラジエータに垂直に吹き出した場合の放熱能力の評価と給気吹きだし方法の最適化を行った。

3. 空気熱交換器の概要と評価

3.1 空気熱交換器の概要

図2に開発した空気熱交換器の外観を示す。空気熱交換器は、給気・排気口、冷温水出入口による熱交換コイル、ドレイン等で構成されており、寸法は830（横）×144（高さ）×214（奥行）mmである。除湿量の拡大、製作の容易さを得るため、筒内の長手方向に冷温水コイルを配置することにより熱・湿度交換効率を上げる等の工夫を施している。

3.2 熱交換器の性能評価方法

3.2.1 試験室の概要

図3に試験室の概要を示す。水冷密閉型環境試験室（外室）内に、床面積2400mm×1800mm、天井高さ2000mmの内室（試験室）が設けられており、内室の周囲壁はポリプロピレンシート、天井はアルミ製パンチングメタルである。その外周囲に加湿器と扇風機を配備し、試験室中央、床上750mmの位置に配置した湿度センサーと温度制御装置により恒温恒湿に自動制御される。なお、暖房実験では特に部屋の湿度制御は行っていない。

3.2.2 冷温水循環システムの概要

冷温水循環のシステムの概要を図4に示す。冷温水タンク中の不凍液を循環恒温槽、ヒータで温度調整し、空気熱交換器に通水する。なお、除湿能力試験時には、熱交換器のコイル表面に結露を発生させて除湿を行うため、結露受けとしてビーカー、結露水の重量測定用に台はかり（パソコンで自動計測）が配置される。また、熱交換器は24Kグラスウールで覆われている。

3.2.3 試験方法

熱交換器の冷温水入口に所定の温度、流量で不凍液を循環させ、試験室の中心、床上750mmを代表点とし、代表点の温湿度が所定値となるように、試験室の壁を加温・冷却し、加湿器により加湿した。なお、熱交換器の熱交換能力 Q_{ex} [W]は、平均水温に対する不凍液の比熱 C_{pw} [J/(g・°C)]、平均水温に対する不凍液の比重 ρ [g/L]、不凍液の循環流量 f_w [L/s]、熱交換器の入口温度 $T_{wi,ex}$ [°C]、熱交換器の出口温度 $T_{wo,ex}$ [°C]の実測値により、式(1)で求められる。

$$Q_{ex} = C_{pw} \times \rho \times f_w \times |(T_{wo,ex} - T_{wi,ex})| \quad (1)$$

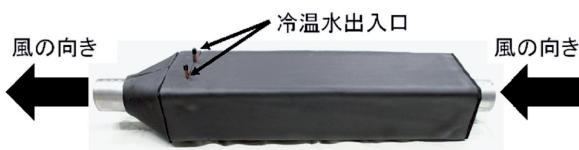


図2 空気熱交換器の外観

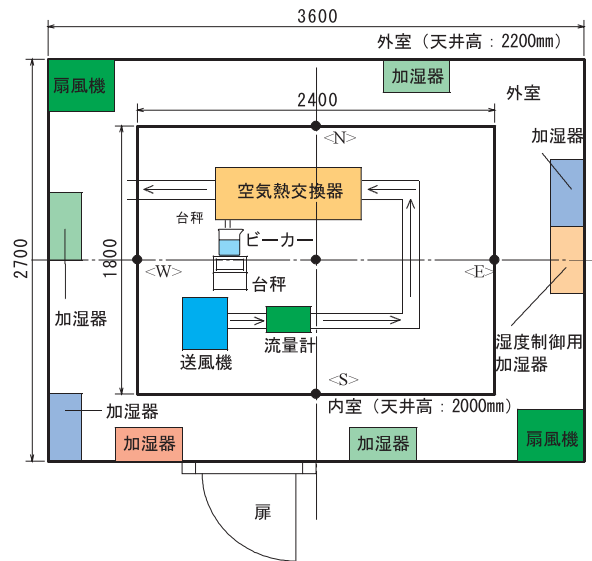


図3 試験室の概要

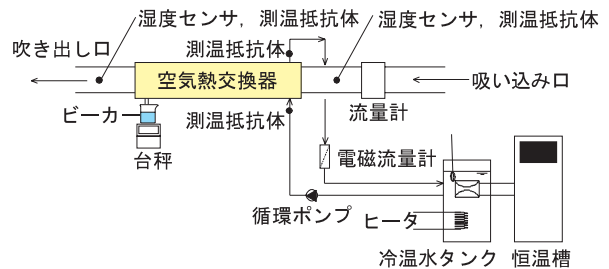


図4 冷温水循環のシステムの概要

さらに、熱交換器試験時にはビーカーに溜まった結露水重量を1分間隔で測定し、安定した状態下における30分間の重量変化の傾きから除湿速度を算出した。

冷房能力、暖房能力の各試験条件を表1、表2に示す。冷房能力の試験では、全熱交換型第一種換気システムと第三種換気システムを想定した給気空気温湿度27°C、70RH%の実験と、第二種換気システムを想定した35°C、70RH%の実験を行った。風量は20~150m³/h、入力設定冷水流量は0.8~4.5L/minとした。暖房能力の試験では、第一種、第三種換気システムを想定して、給気空気温度を20°C、風量を20~120

表1 冷房能力試験条件

冷水入力温度 [°C]	設定流量 [L/min]	風量 [m³/h]	給気空気温度 [°C]	給気空気湿度 [RH%]
10	0.8、2、4	20、40、80、120	27	70
	2、3.5、4.5	100、120、150	35	70

表2 暖房能力試験条件

温水入力温度 [°C]	設定流量 [L/min]	風量 [m³/h]	給気空気温度 [°C]
30、40	2、3.5、4.5	20、40、80、100、120、150	20
		100、120、150	10、0

m³/hとした実験とそれに加え第二種換気システムを想定して、給気空気温度を0, 10℃, 風量を100~150m³/hとし実験を行った。入力設定温水流量は2~4.5L/minとした。

4. 熱交換器の性能評価結果

4.1 冷房実験

図5に給気空気温湿度をそれぞれ27℃, 70RH%, 風量を20~120m³/hとした場合の冷水流量と熱交換量, 除湿速度, 吹き出し空気の温湿度の関係について風量をパラメータとして示す。同様に図6に給気空気温湿度をそれぞれ35℃, 70RH%, 風量を100~150m³/hとした場合について示す。冷水

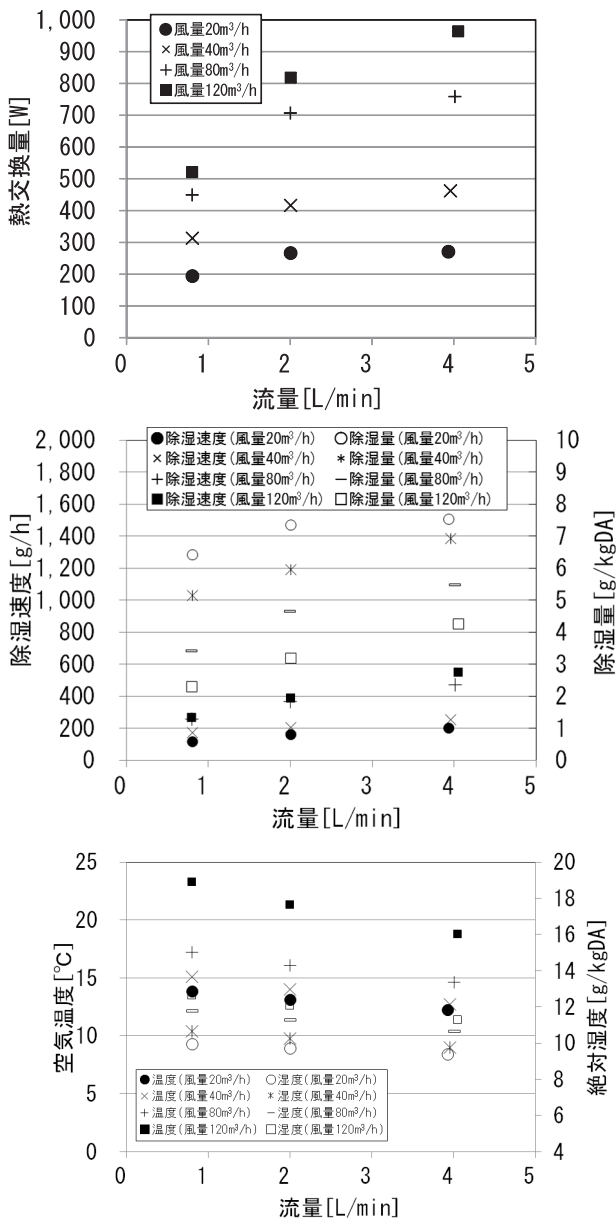


図5 冷水流量と各物性値の関係(上;熱交換量,中;除湿速度,下;吹き出し空気温度,給気空気温度27℃,70RH%)

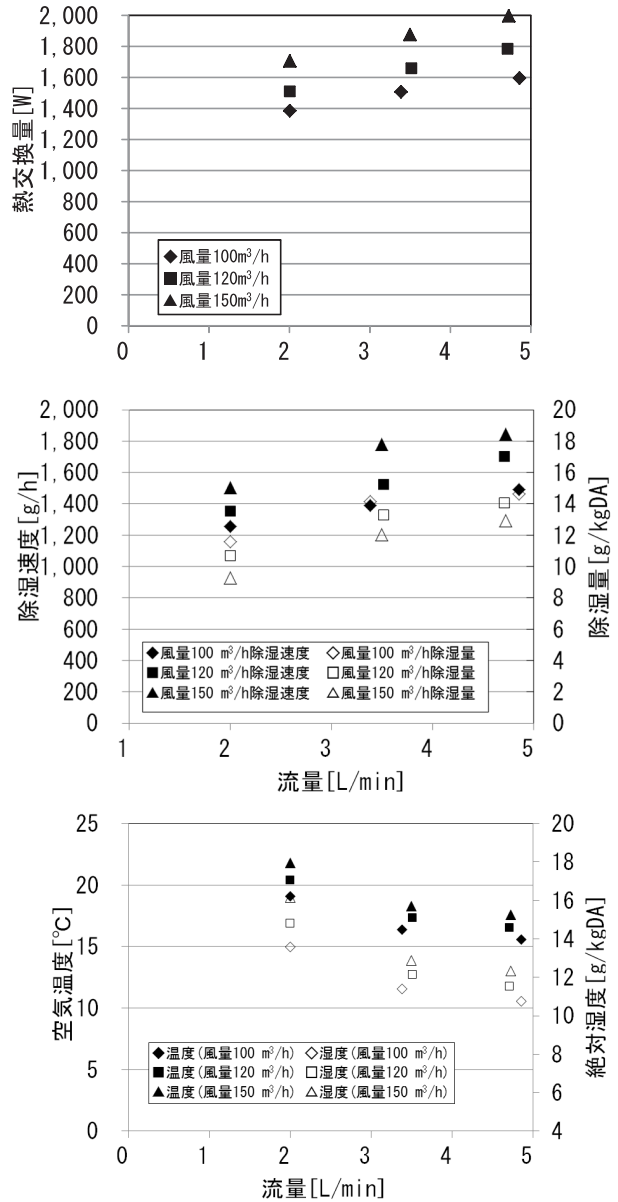


図6 冷水流量と各物性値の関係(上;熱交換量,中;除湿速度,下;吹き出し空気温度,給気空気温度35℃,70RH%)

流量, 風量が大きくなると, 熱交換量, 除湿速度が増加する。冷水流量が大きくなると, 熱交換量が増えることから, 吹き出し空気温度, 絶対湿度は低下する。風量が大きくなると熱交換される空気量も多くなることから, 吹き出し空気温度, 絶対湿度は上昇する。いずれの場合も冷水流量を5L/min程度確保できれば必要な除湿(吹き出し空気絶対湿度12g/kgDA以下)は可能と推定できる。

4.2 暖房実験

図7に給気空気温度を20℃, 温水入力温度を30℃とした場合の温水流量と熱交換量, 吹き出し空気温度の関係について, 風量をパラメータとして示す。実験の範囲では温水流量の明

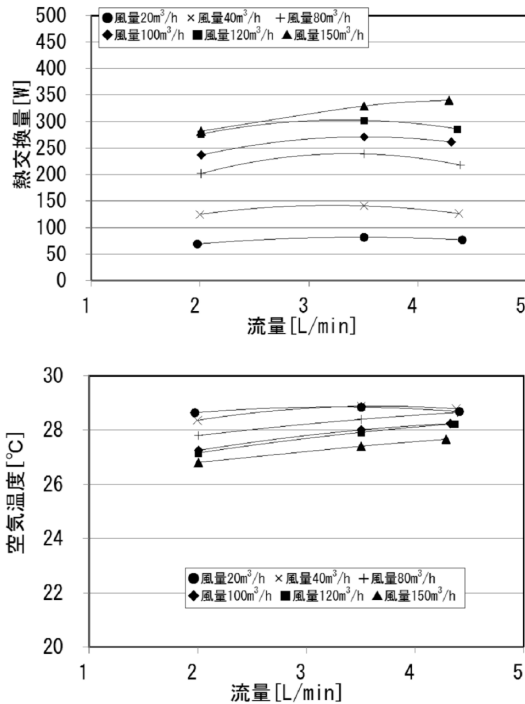


図7 温水流量と熱交換量, 吹き出し空気温度の関係 (上; 熱交換量, 下; 吹き出し空気温度, 給気空気温度20°C, 温水入力温度30°C)

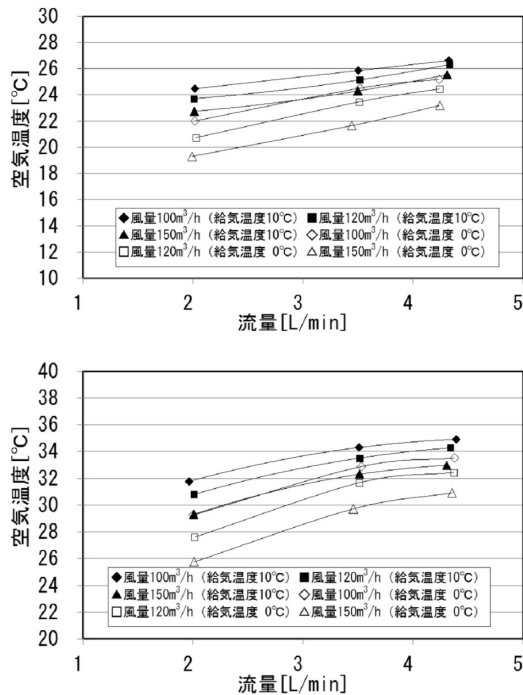


図8 温水流量と吹き出し空気温度の関係 (上; 温水入力温度30°C, 下; 温水入力温度40°C, 給気空気温度10°C, 0°C)

快な依存性は見られず, 給気空気温度を10°C, 0°Cとした場合でも同様の傾向が見られた。風量が大きくなると熱交換される熱量も多くなることから, 吹き出し空気温度は低下するが, 26°C以上である。図8に温水入力温度を30°C, 40°C, 給

気空気温度を10°C, 0°Cとして, 風量を100~150m³/hとした場合の温水流量と吹き出し空気温度の関係について風量をパラメータとして示す。温水入力温度30°Cで給気空気温度が0°Cの場合, 吹き出し空気温度が20°Cを下回る。外気温度が0°C以下で第二種換気システムと本空気熱交換器を用いる場合, 温水入力温度を40°Cとするなどの設定が必要となると考えられる。この場合, 外気温度が0°C, 温水流量2~4.4 L/minで熱交換量は818~1228Wであり, 暖房負荷が大きい北海道でも放射ラジエータと併用することで十分に機能する。

5. 換気システムの放射放熱器吹き出し方法の検討

5.1 実験方法

5.1.1 試験室及び冷温水システム

図9に実験の模式図を, 図10にその外観を示す。本実験には恒温恒湿室を2室使用した。片方の恒温恒湿室で空気熱交換器からの出口の温度を模擬した所定温度の空気を作成した。もう一方の恒温恒湿室を試験室とし, 試験室内に縦型放射ラジエータ (縦1000mm, 横410mm, 奥行き60mm) を設置し

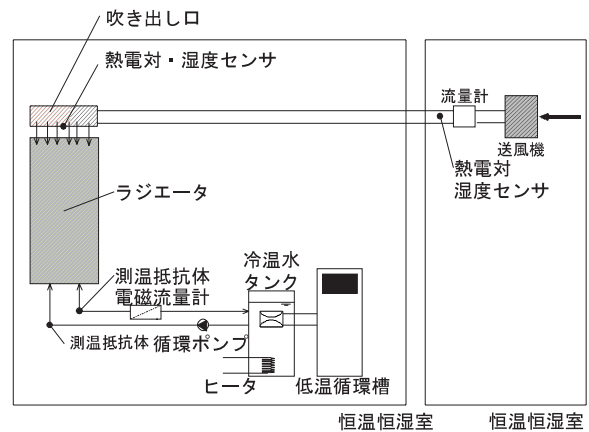


図9 実験装置の模式図

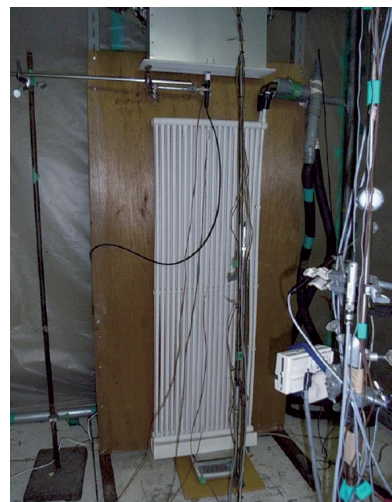


図10 実験装置の外観

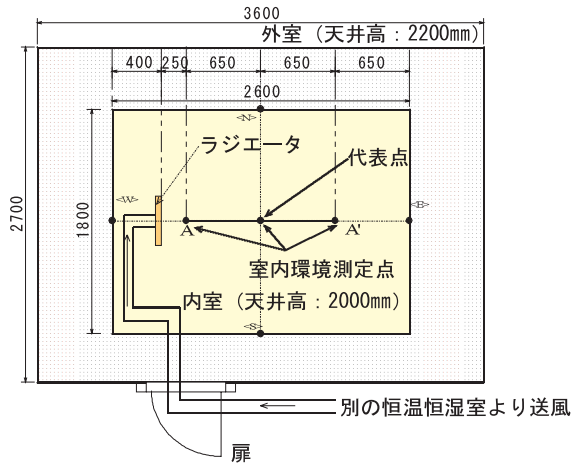


図11 試験室の概要

た。放射ラジエータから150mm上部には恒温恒湿室で作成した空気の吹き出し口を設けた。試験室，冷温水システムの概要は3.2.1及び3.2.2と同様である。なお，本実験は暖房実験であるので特に試験室内の湿度制御は行っていない。冷温水タンク中の不凍液を循環恒温槽，ヒータで温度調整し，放射ラジエータに通水する。図11に試験室の概要を示す。室内環境測定点はラジエータ正面250 (A点)，900,1550mm (A'点)とし，床上100, 500, 1000, 1500, 2000mmに熱電対を設置した。

5.1.2 試験方法

放射ラジエータに所定の温度，流量で不凍液を循環させ，試験室の中心，床上750mmを代表点とし，代表点の温度が20℃となるように，試験室の壁を加温・冷却した。放射ラジエータの熱交換能力 Q_{ra} [W] は，平均水温に対する不凍液の比熱 C_{pw} [J/(g・℃)]，平均水温に対する不凍液の密度 ρ [g/L]，不凍液の循環流量 f_w [L/s]，放射ラジエータの入口温度 T_{wi} [℃]，出口温度 T_{wo} [℃] の実測値により，式(2)で求められる。なお，通水流量は2L/min，入力温水温度29.4, 34.2, 39.0℃，吹き出し口風量を0, 20, 40, 60m³/hとした。なお，入力温水温度は空気熱交換器に2L/minで通水した時の空気熱交換器出口温水温度である。

$$Q_{ra} = C_{pw} \times \rho \times f_w \times |(T_{wo} - T_{wi})| \quad (2)$$

5.2 実験結果

図12に放射ラジエータ入力温水温度29.4℃における図11のA-A'断面の温度分布を示す。換気風量がない場合は床表面近傍に冷気が滞留していることがわかる。これに対し風量20 m³/hの場合は，垂直温度分布の改善が見られる。さらに風量40,60m³/hとすると，上方に熱気が滞留することが確認できる。この結果から，温熱環境を改善する送風量に最適値があり，この手法が暖房時の温熱環境の改善に寄与することがわかった。放射ラジエータは一般住宅で6枚程度設置する設計となっており，換気システムの風量が120m³/hとすると，

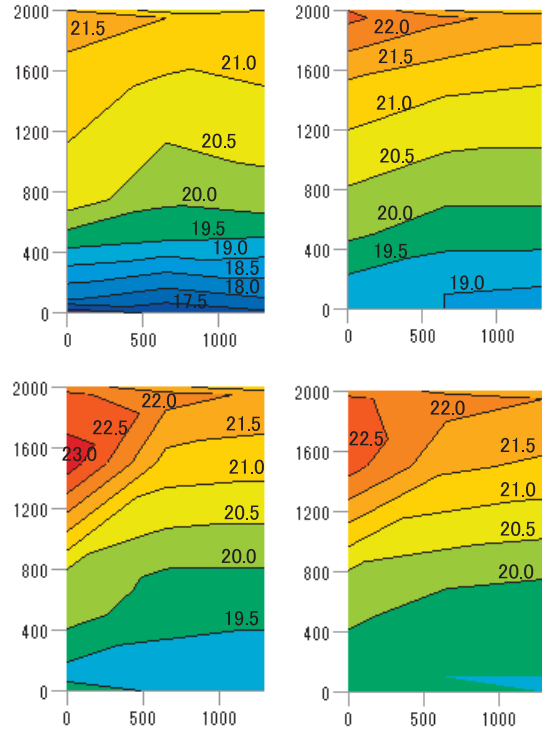


図12 A-A'断面の温度分布 (入力温水温度29.4℃，左上，上右，下左，下右の順に風量0, 20, 40, 60m³/h)

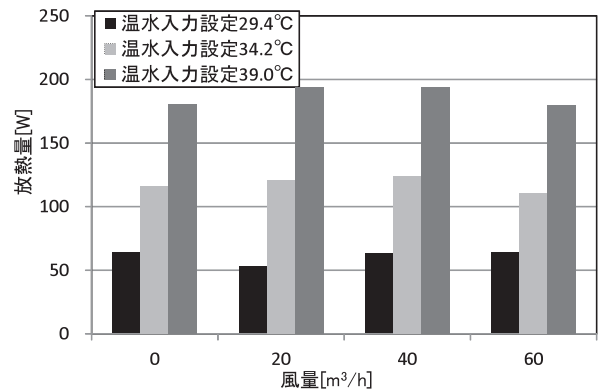


図13 放射ラジエータの放熱量

ほぼ最適な吹き出し風量が得られる。換気システムの風量が最適化されない場合は，放射ラジエータに吹き出す口数を調整することによって対応する。

図13に入力温水温度29.4, 34.2, 39.0℃における放射ラジエータの放熱量を示す。ラジエータの放熱量は，入力温水温度の影響は受けるが，吹き出し風量に依存せずほぼ同等であった。

6. システム制御

6.1 システム制御手法

図14に本研究で提案する放射冷暖房システムの制御手法の模式図を示す。夏期には，最初に室内湿度を検知し，電磁弁

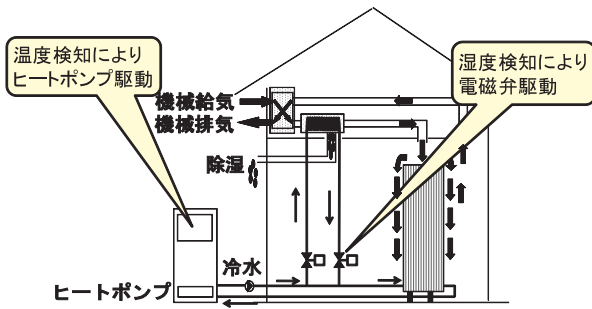


図14 システム制御の模式図

により空気熱交換器流路を開閉する。顕熱負荷の変動にはヒートポンプのオンオフにより室温制御する。冬期には、ラジエータだけでも十分顕熱負荷に対応できるため、空気熱交換器は使わなくても良いが、外気温が低く、さらに換気負荷が大きい時には空気熱交換器に通水し、プレヒートを行うこともできる。

6.2 システム制御例

ここで、温度30℃相対湿度80%の外気に対し、本システムによって居住空間を26℃相対湿度60%とすることを考える。図15にその空気線図を示す。温度30℃相対湿度80%の外気(点A)は、温度交換効率75%、湿度交換効率65.6%、換気量120m³/hの全熱交換第一種換気システムで26℃相対湿度60%の室内空気と温湿度交換すると式(3)、(4)により27.0℃相対湿度70% (点B) が得られる。

$$\text{温度交換効率}[\%] = (T_A - T_B) / (T_A - T_D) \times 100 \quad (3)$$

$$\text{湿度交換効率}[\%] = (X_A - X_B) / (X_A - X_D) \times 100 \quad (4)$$

ここで T は各点での空気温度[℃], X は絶対湿度[kg/kg(DA)]である。この空気を温度26℃相対湿度60% (点D) とする際の除湿速度、全熱交換負荷は、換気量 F 、各点での絶対湿度 X 、比エンタルピー h [kJ/kg(DA)], 比容積 V [m³/kg(DA)]により(5)、(6)式で411g/h、322Wと算出できる。

$$\text{除湿速度}[\text{g/h}] = F \times (X_B / V_B - X_D / V_D) \quad (5)$$

$$\text{全熱交換負荷}[\text{W}] = F \times (h_B / V_B - h_D / V_D) / 3600 \quad (6)$$

その除湿速度に対応するため、流量2.43L/minで冷水を空気熱交換器に循環させると、除湿空冷により相対湿度がほぼ100%となり(点C)、居室に吹き出す。点Cから点Dまでは、顕熱が余剰しているが、開口部や断熱部による顕熱負荷で空気温度が上昇する。それ以上の顕熱負荷にはラジエータからの放熱で調整し、顕熱負荷が小さい場合にはヒートポンプを停止させる。また、換気量120m³/h、30℃相対湿度80%の外気を26℃相対湿度60%とする際に必要な除湿速度は1165g/hであるから、第三種型の場合は冷水温度10℃、4.4L/minの流量を2台の熱交換器に循環させると換気による潜熱負荷は賅える。

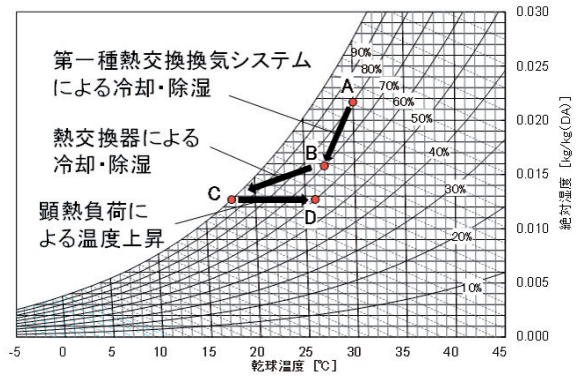


図15 本システムにおける空気線図

まとめ

冷暖房兼用ヒートポンプ、プラスチック製の放射ラジエータ、熱交換器を付与した換気システムで構成される換気-放射ラジエータ複合型の放射冷暖房システムの基本概念の提案を行った。次に、空気熱交換器の開発と熱交換特性の評価及び換気システムのラジエータ上方からの吹き出し方法の最適化、システム制御について検討を行い、以下の知見を得た。

- (1)開発した空気熱交換器の冷房時における熱交換性能・除湿性能を評価した結果、冷房時には十分な熱交換能力、除湿能力があることを確認した。また、暖房時にも十分な熱交換能力があり、快適性を保つ吹き出し空気温度が確保できることを確認した。これらの結果、この空気熱交換器は住宅用として十分に利用できることが分かった。
- (2)ラジエータ上方から垂直に換気空気を吹き出す手法を検討した結果、送風量に最適値があり、この手法が暖房時の温熱環境の改善に寄与することが分かった。
- (3)本放射冷暖房システムの制御手法として、夏期には最初に、室内湿度を検知し、電磁弁により空気熱交換器流路を開閉し、顕熱負荷の変動にはヒートポンプのオンオフにより室温制御する手法を提案した。冬期はラジエータだけでも十分顕熱負荷に対応できるため、空気熱交換器は使わなくても良いが、外気温が低く、さらに換気負荷が大きい時には空気熱交換器に通水し、プレヒートを行うこともできる。

参考文献

- 1) 白土博康他：空気調和・衛生工学会論文集，158，(2010-5)，pp.15-21
- 2) 白土博康他：空気調和・衛生工学会論文集，164，(2010-11)，pp.49-54
- 3) 白土博康他：空気調和・衛生工学会論文集，189，(2012-12)，pp.47-54