

冷暖房放射パネルの冷暖房能力評価条件の検討

白土 博康

Study on Evaluation Conditions of Heat Capacity for Radiation Panels

Hiroyasu SHIRATO

抄 録

ヒートポンプを熱源として従来よりも低温で通水する場合の放射パネルの暖房能力、冷房能力試験手法の規程作成を目標として、放射パネルに循環する温度や流量等をパラメータとした放射パネルの冷暖房能力の評価試験を行い、評価条件を明らかにした。その結果、放射パネルの暖房能力は、暖房温度差の影響を受けるため、実際に運転する領域で測定するのが望ましいこと、冷房時は冷房温度差が最大20K程度と小さく、冷房温度差と冷房能力の性能曲線を未実験領域に外挿しても精度が維持できることが分かった。また、放射パネルの冷暖房能力の正確な測定のためには、放射パネルに一定以上の流量で冷温水を循環させ、放射パネル内の水の配流を均一化させることが望ましいこと、放射パネルの結露時の潜熱冷房能力は、結露時の冷房能力と非結露時の冷房能力の差で示すことが可能であることが分かった。

キーワード：放射パネル，冷暖房能力，評価条件，結露

Abstract

Cooling and heating capacity for radiation panels was measured in various circulation temperature and flow rates of the radiation panels aiming to set up the precise evaluation methods of the cooling and heating capacity of the radiation panels that are for heating in low circulation temperature and for cooling by using heat pumps as heat sources. The heating capacity of the radiation panels should be measured during practical operating temperature since it is affected by the heating temperature differences. The accuracy of the cooling capacity is maintained even if the characteristics curves for the heat capacity to the cooling temperature differences are extrapolated. The reason is that the cooling temperature differences are less than 20K in the cooling operation. The distribution of the water flow in the panels should be uniformed by circulating water in more than sufficient flow rate to carry out the accurate measurements of the cooling and heating capacity. The latent heat capacity of the panel can be the difference between the cooling capacity of the panel with condensation and without condensation.

KEY-WORDS : Radiation panels, Cooling and heating capacity, Measurement conditions, Condensation

1. はじめに

放射冷暖房システムは、エアコンディショナーのような主に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」を体感できるため、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。従来のJIS規格では、システムで使用する放射パネルの暖房能力測定条件は、代表室温20℃、定格温水平均温度（放射パ

ネル出入口の平均温度）を70℃、出入口温度差を10℃としている¹⁾が、近年の高断熱・高气密住宅では40℃以下の循環温度で十分であり、JIS規格のデータを外挿すると誤差が発生する懸念がある。また、放射パネルに循環する流量もJIS規格と実際の運転時で乖離があり、暖房能力に相違が発生する懸念がある。

一方、冷房時の冷房能力については、これまでのところJIS等の規格はない。このため、筆者らは冷房時の冷房能力評価

事業名：公募研究

課題名：低負荷住宅に対応する放射ラジエータの放熱能力評価手法の確立

条件として、暖房能力測定に関するJIS規格¹⁾を基に、代表室温27℃、非結露状態、定格冷水平均温度9.5℃、出入口温度差を5℃とした独自の評価方法を設定して試験を実施してきた²⁾⁻³⁾。しかしながら、放射パネルに循環する流量は暖房時と同様にJIS規格と実際の運転時で乖離がある。また、冷房時においては放射パネル上で結露させ、除湿をすることができるが、他の空調機器と併せて室内の空調設計をするため、放射パネルの潜熱分の冷房能力を把握し、顕熱分と潜熱分の冷房能力の両者を分離して評価したい業界の要望がある。

以上の現状を踏まえ、本研究では実機の運転方法に即し、高断熱・高气密住宅に対応できる放射パネルの高精度な冷暖房能力の評価手法を確立することを目的として、放射パネルに循環する冷温水の温度、流量条件を変え、放射パネルの冷暖房能力の測定条件について考察した。

2. 放射パネルの冷暖房能力の計測システム

2.1 試験室の概要⁴⁾

図1に試験室の概要と室温制御システムのフローを示す。試験室の大きさは、床面積2.7×3.6 m、天井高さ2.2 mで床面積9.72 m²、内容積21.4 m³である。試験室は木造で、床、天井、壁は、厚さ100 mmのスチレンフォームで断熱した。天井と壁の内装はスレート板とし、壁と床の内装は表面をアクリルウレタン樹脂塗装で仕上げている。室温制御用として放射パネルが扉部分を除く周囲壁面、床面に設置されている。ここで使用した放射パネルは幅850 mm、高さ1700 mm、厚さ12 mmの床暖房用金属製パネル（以下金属製パネル）であり、配管材に直径8 mmの円形銅管が、表面材に厚さ0.6 mmの鋼板が使われている。なお、鋼板表面はアクリル樹脂塗料で塗装されており、この塗料の全放射率は0.96である。天井面には断熱材の上に架橋ポリエチレン管を施工し、その上にアルミ板、天井仕上げ材で覆っている。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、架橋ポリエチレン管へ常時循環される。タンク内不凍液温度は、試験室内温度を温度センサで検出し、連続運転した冷凍機とヒータのオン・オフにより所定温度に制御される。

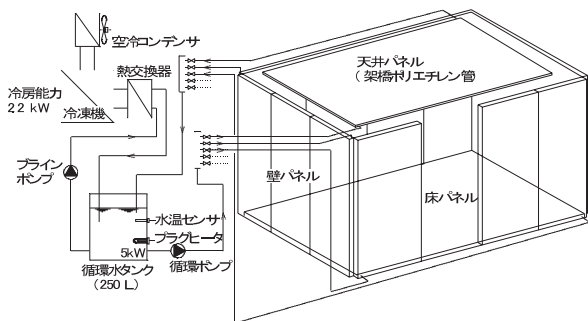


図1 試験室の概要と室温制御システムのフロー

2.2 冷温水循環システム、試験放射パネルの概要

図2に放射パネルの能力評価に用いた冷温水循環システムの概要を示す。冷温水タンク内の調温した水を放射パネルに循環させる。調温の熱源として冷凍機と投げ込みヒータを用いた。冷暖房能力測定用として循環ライン内にパルス発信付き流量計と、放射パネル出入口、室内中央床上750 mmに白金測温抵抗体（JIS A級）を設置した。また、結露を許容する冷房試験を行う際は、放射パネル表面上に発生した結露水を重力で落下させて、ドレインパン、ビーカの順に受け、台秤で重量を自動計測できる構造とした。表1に評価に使用した放射パネルの概要を、図3に外観を示す。放射パネルは、JIS規格での暖房能力がほぼ同等である樹脂管柵状^{3), 5)-7)}、鋼板柵状を使用した。

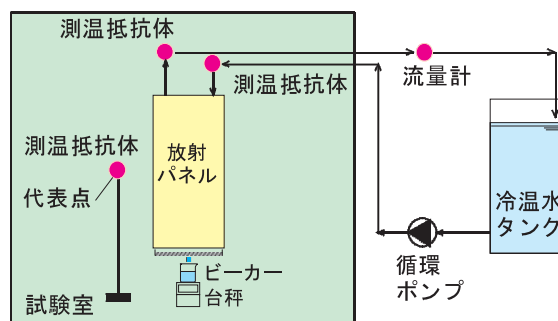


図2 冷温水循環システムの概要

表1 評価に使用した放射パネルの概要

放射パネル種類	樹脂管柵状	鋼板柵状
横幅 [mm]	410	530
縦 [mm]	1200	1200
奥行 [mm]	59	135
外表面積 (伝熱面積) [m ²]	2.01	1.37
投影面積 [m ²]	0.492	0.636
伝熱面積/投影面積 [-]	4.09	2.15



図3 放射パネルの外観（左：樹脂製、右：金属製）

3. 放射パネルの冷暖房能力評価方法

3.1 放射パネルの冷暖房能力評価方法

以下、本論文では温度差の単位を K、温度の単位を℃で記す。表2に評価項目を、図4に評価個所の平面図を示す。放射パネルの冷暖房能力測定、室内空気温度分布、壁・天井・床表面温度分布の各測定項目はJIS規格¹⁾に準拠した。

放射パネル、壁・床・天井に各条件でそれぞれ冷温水を循環させ、表2の各項目について、データロガーで30秒ごとに計測した。各温度が±0.1℃未満の変動であることを確認後、10分間データを取得し、それぞれの平均値を算出した。結露時には定常状態である30分間の結露水の重量データを併せて取得している。

暖房時および非結露時の冷房能力は、JISの暖房能力の算出式¹⁾に倣い、式(1)により算出する。

$$Q = Cp_w \times M_w \times |(T_{wo} - T_{wi})| \quad \dots\dots(1)$$

ここで、Qは暖房または冷房能力[W]、Cp_wは水の比熱[J/(g・K)]、M_wは放射パネルを循環する水の質量流量[g/s]、T_{wo}は出口水温[℃]、T_{wi}は入口水温[℃]である。ただし、|(T_{wo}-T_{wi})|の単位は温度差であるので本論文ではKで示す。

また、暖房、冷房温度差はJISの暖房温度差の算出式¹⁾に準拠し、式(2)により算出する。さらに暖房時、非結露時の暖房能力と暖房温度差、または冷房能力と冷房温度差には式(3)の関係がある。

$$\Delta T = |T_w - T_a| \quad \dots\dots(2)$$

$$Q = B(\Delta T)^n \quad \dots\dots(3)$$

ここでΔTは暖房または冷房温度差[K]、T_wは放射パネルの出入口平均水温[℃]、T_aは代表点(室内中央床750mm)の空気温度[℃]である。また、Bとnは各放射パネルで実験により決定できる定数である。

ここで、結露時の冷房能力は、非結露時の冷房能力と同様に式(4)から求めることができる。一方、JISのエアコンディショナーの試験方法⁸⁾では、式(4)により結露時の顕熱冷房能力は結露時の冷房能力から潜熱冷房能力(除湿能力)を差し引いた差として定義されている。

$$Q = Q - Q_L \quad \dots\dots(4) \quad \text{したがって} \quad Q_L = Q - Q_s \quad \dots\dots(4')$$

ここで、Q_sは顕熱冷房能力[W]、Q_Lは潜熱冷房能力[W]であり、顕熱冷房能力は非結露時の冷房能力と同義である。

さらに、潜熱冷房能力は、結露水の質量測定から得られる除湿速度と凝縮潜熱を乗じて求めることができ、式(5)で示される。

$$Q_L = G_w \times r_w \quad \dots\dots(5)$$

ここでG_wは除湿速度[g/s]、r_wは水の凝縮潜熱[J/g]である。

本論文では、(4)'式と(5)式から潜熱冷房能力を求め、両者を比較することにより、放射パネルにおいて、結露時と非結露時の冷房能力の差から潜熱冷房能力を求められるか検証した。

表2 評価項目

測定目的	測定項目	センサ
放射パネルの冷暖房能力測定	放射パネル冷温水入口水温	測温抵抗体
	放射パネル冷温水出口水温	測温抵抗体
	室内中央代表点(床750mm)空気温度	測温抵抗体
	放射パネルへの水の循環流量	パルス発信付き流量計
室内空気温度分布、代表点温度の把握	室内中央空気温度(床50mm、500、1500、床2150mm)	T型熱電対
	室内中央代表点(床750mm)空気温度	湿度センサ
	A、B、C、D点空気温度(床750、1500mm)	T型熱電対
	室内中央床・天井表面温度	T型熱電対
試験室内の測定環境の把握	壁・天井・床循環不凍液入口液温、壁E、F、G、H出口液温、天井・床出口液温	シースT型熱電対
	壁E、F、G、H、天井、床循環流量	パルス発信付き流量計

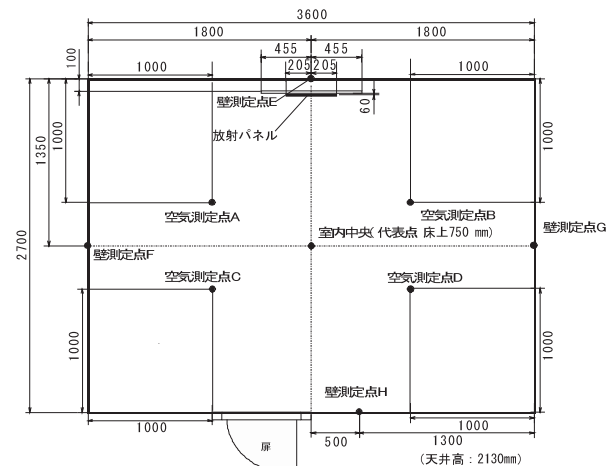


図4 評価個所の平面図

3.2 測定条件

表3、表4に暖房時、冷房時の実験条件を示す。暖房時には、放射パネルの定格流量条件である2 L/min、および平均温水温度が35℃、70℃の時に放射パネルの出入口温度差が所定値となる流量条件で放射パネルに水を循環させた。予備試験での室内空気温度の変動を考慮し、壁・床の金属製パネルの配管材である銅管、天井に設置した架橋ポリエチレン管に連続的に一定流量(1 L/min)で不凍液を循環させることにより、代表点の空気温度は20.0±0.1℃とした。冷房時(非結露)の場合は、放射パネルの定格流量条件である2 L/min、および平均冷水温度が17℃、9.5℃の時に放射パネルの出入口水温差が所定値となる流量条件で放射パネルに水を循環させた。代表温度は26.0または27.0±0.1℃とした。冷房時(結露)の場合は、冷房時(非結露)条件のNo.6の放射パネル流量条件で、出入口平均水温が10℃の時、相対湿度を50~90%に、出入口平均水温が13℃の時、相対湿度を60~90%に、出入口平均水温が17℃の時、相対湿度を70~90%に10%毎で調整して測定を行った。

表 3 暖房時の実験条件

実験No.	1	2	3	4	5
放射パネル温水温度条件	$T_w=30, 35, 40, 50^\circ\text{C}$		$T_w=50, 70, 80^\circ\text{C}$		
放射パネル流量設定条件	$T_w=35^\circ\text{C}$ $T_{wi}-T_{wo}=5\text{K}$		2.00L/min	$T_w=70^\circ\text{C}$ $T_{wi}-T_{wo}=5\text{K}$	$T_w=70^\circ\text{C}$ $T_{wi}-T_{wo}=10\text{K}$
放射パネル流量測定条件	2.00L/min	0.35L/min (樹脂管柵状のみ測定)	2.00L/min	2.42L/min (樹脂管柵状のみ測定)	1.02L/min
暖房温度差	$\Delta T=10, 15, 20, 30\text{K}$		$\Delta T=30, 50, 60\text{K}$		
代表温度	20.0°C				
備考					JIS規格準拠

表 4 冷房時の実験条件

実験No.	6	7	8	9	10
放射パネル冷水温度条件	$T_w=10, 13, 17, 20^\circ\text{C}$	$T_w=8, 9.5, 13^\circ\text{C}$	$T_w=10, 13, 17, 20^\circ\text{C}$	$T_w=8, 9.5, 13^\circ\text{C}$	$T_w=10, 13, 17^\circ\text{C}$
放射パネル流量設定条件	$T_w=17^\circ\text{C}$ $T_{wo}-T_{wi}=1\text{K}$	$T_w=9.5^\circ\text{C}$ $T_{wo}-T_{wi}=5\text{K}$	放射パネル定格		$T_w=17^\circ\text{C}$ $T_{wo}-T_{wi}=1\text{K}$
放射パネル流量測定条件	1.25L/min	0.57L/min	2.00L/min		1.25L/min (樹脂管柵状のみ)
冷房温度差	$\Delta T=6, 9, 13, 16\text{K}$	$\Delta T=14, 17.5, 19\text{K}$	$\Delta T=6, 9, 13, 16\text{K}$	$\Delta T=14, 17.5, 19\text{K}$	$\Delta T=9, 13, 16\text{K}$
代表温度	26.0°C	27.0°C	26.0°C	27.0°C	26.0°C
相対湿度条件	30%以下(非結露)				50, 60, 70, 80, 90% ($T_w=10^\circ\text{C}$) 60, 70, 80, 90% ($T_w=13^\circ\text{C}$) 70, 80, 90% ($T_w=17^\circ\text{C}$)
備考		道総研規格準拠			

4. 実験結果と考察

4.1 放射パネルの暖房能力、冷房能力

図5に各条件における樹脂管柵状放射パネルの暖房能力の測定結果を、図6に測定結果から算出した暖房温度差(ΔT)と暖房能力の関係(実験No.1, 3のみ)を示す。図6は高断熱・高气密住宅への設置を考慮して ΔT を30Kまでとした。実験No.1, 3, 4では測定温度域に関わらず、同等の暖房能力となった。しかしながら、JIS規格での測定である実験No.5の暖房能力は実験No.3, 4と比較して低く、 $\Delta T=50\text{K}$ では実験No.3の暖房能力に対して82.5%である。また、実験No.2の暖房能力は $\Delta T=15\text{K}$ では実験No.3の暖房能力に対して62.6%である。以上のことから暖房能力の正確な測定のためには、放射パネルに一定以上の流量で温水を循環させ、放射パネル内の水の配流を均一化させることが望ましい。また、図6から $\Delta T=15\text{K}$ では実験No.1に対して実験No.3の暖房能力は8.9%低く、暖房温度差の測定領域によって結果が異なることが分かる。このため、カタログ値掲載やシステム設計の際には、実際に運転する領域で測定

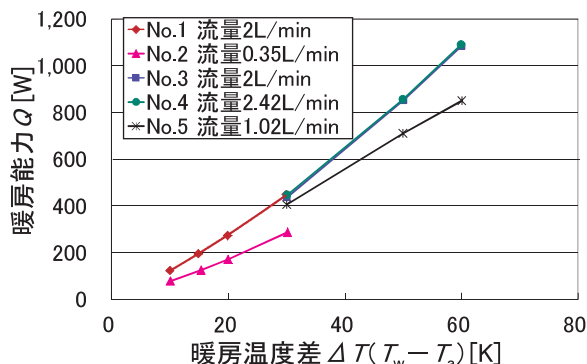


図5 樹脂管柵状放射パネルの暖房能力(実測値)

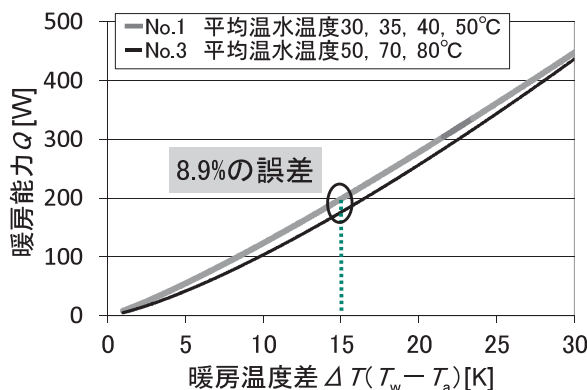


図6 樹脂管柵状放射パネルの暖房能力(計算値)

(高温と低温の温水使用に分けて評価)するのが望ましい。

図7に各条件における鋼板柵状放射パネルの暖房能力の測定結果を、図8に測定結果から算出した暖房温度差(ΔT)と暖房能力の関係を示す。本パネルの予備試験と樹脂管放射パネルの実験結果を踏まえて、条件No.1, 3, 5のみ実験した。流量が低い実験No.5の暖房能力は、 $\Delta T=50\text{K}$ でNo.3の暖房能力に対して90.9%である。また、図8から $\Delta T=15\text{K}$ では実験No.1に対して実験No.3の暖房能力は92.5%であり、樹脂管放射パネルと同様の結果が得られた。

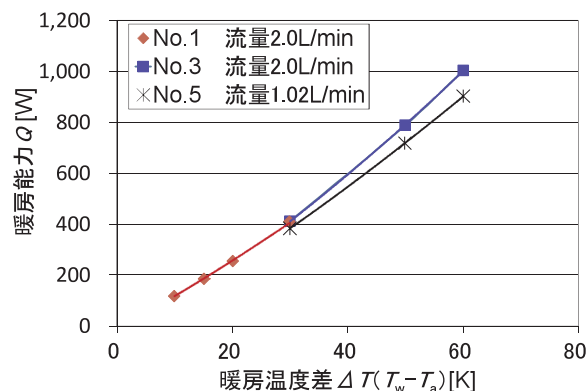


図7 鋼板柵状放射パネルの暖房能力(実測値)

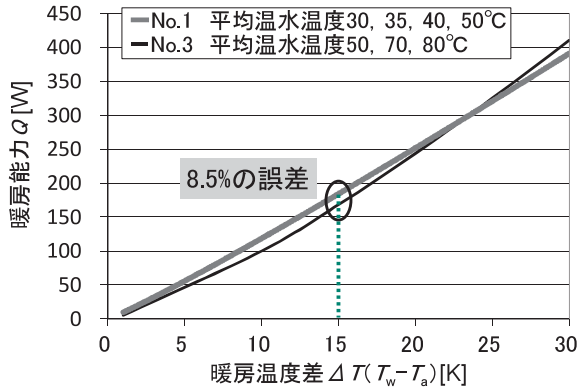


図8 鋼板柵状放射パネルの暖房能力（計算値）

4.2 放射パネルの冷房能力（非結露時）

図9に非結露時の各条件における樹脂管柵状放射パネルの冷房能力の測定結果を、図10に測定結果を拡大した冷房温度差と冷房能力の関係（実験No. 8, 9のみ）を示す。流量が低い実験No. 7はやや低い冷房能力となったものの（冷房温度差17 Kにおける実験No. 6の冷房能力に対して、89.7%）、実験No. 6, 8, 9では測定温度域に関わらず、同等の冷房能力となった。図10から同じ流量条件である実験No. 8と実験No. 9において、平均冷水温度13~20°C（冷房温度差6~13 K）で測定して算出した冷水温度10°Cでの冷房能力は、平均冷水温度8~13°C（冷房温度差14~19 K）で測定して算出した冷房能力に対して2.9%大きい。

同様に図11に各条件における鋼板柵状放射パネルの冷房能力の測定結果を、図12に測定結果を拡大した冷房温度差と冷房能力の関係を示す。鋼板柵状パネルでも樹脂管柵状パネルと同様の傾向がみられる。流量が低い実験No. 7の冷房能力は冷房温度差17 Kにおける実験No. 6の冷房能力に対して、98.9%、平均冷水温度13~20°C（冷房温度差6~13 K）測定して算出した冷水温度10°Cでの冷房能力は、平均冷水温度8~13°C（冷房温度差14~19 K）で測定して算出した冷房能力に対して99.3%であった。冷房時には冷房温度差が最大20 K程度と小さく、冷房温度差と冷房能力の性能曲線を未実験領域に外挿しても十分に精度が維持できると考えられる。

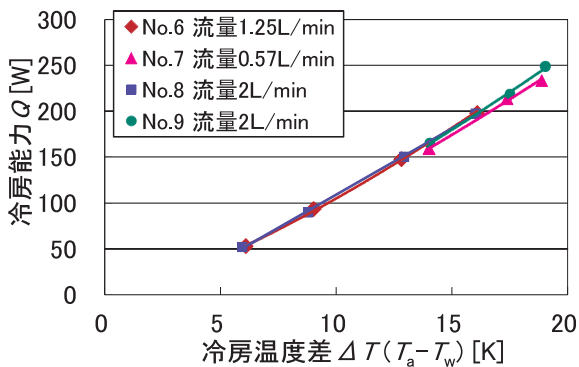


図9 樹脂管柵状放射パネルの冷房能力（非結露時）

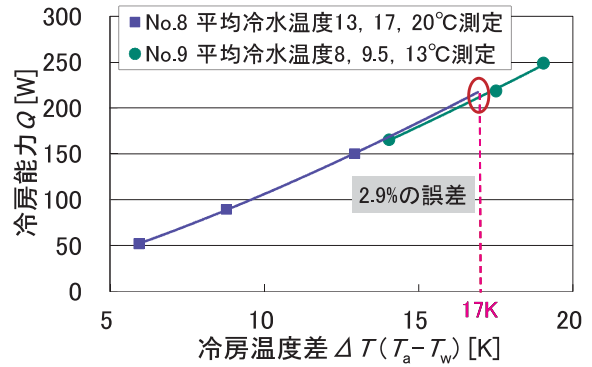


図10 樹脂管柵状放射パネルの冷房能力（非結露時）

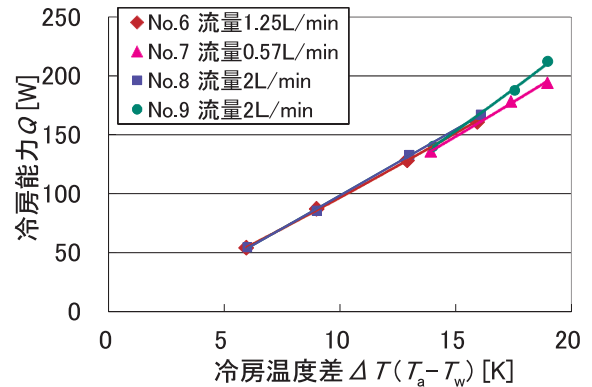


図11 鋼板柵状放射パネルの冷房能力（非結露時）

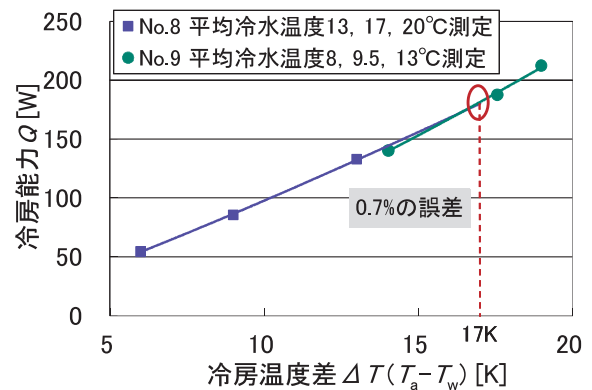


図12 鋼板柵状放射パネルの冷房能力（非結露時）

4.3 放射パネルの冷房能力（結露時）

図13, 図14に樹脂管柵状放射パネル, 鋼板柵状放射パネルの結露時の代表点の相対湿度に対する冷房能力をそれぞれ示す。相対湿度が高くなるほど、冷房能力は高くなることから分かる。代表点の相対湿度と冷房能力はほぼ比例関係にあり、測定していない相対湿度での冷房能力は推定可能と考えられる。

図15に樹脂管柵状放射パネルの冷房温度差に対する冷房能力の関係を、図16に図13の結露時の冷房能力から非結露時の冷房能力を差し引いた潜熱冷房能力と結露水の熱量から求めた潜熱冷房能力を比較したものを示す。結露を許容した冷房時の冷房能力と結露を許容しない冷房時の冷房能力の差は、

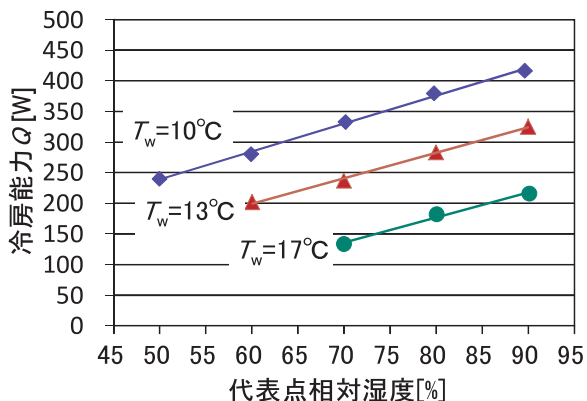


図 13 樹脂管柵状放射パネルの代表点相対湿度に対する冷房能力（結露時、実測値）

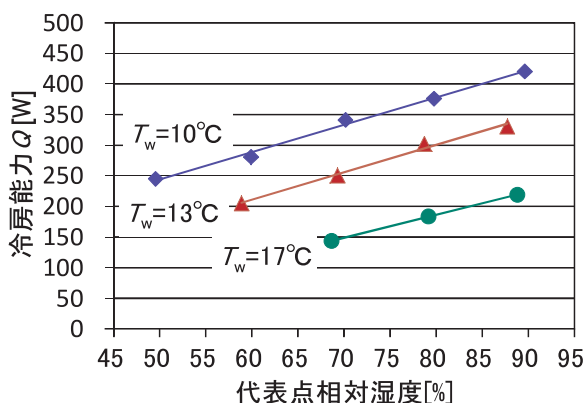


図 14 鋼板柵状放射パネルの代表点相対湿度に対する冷房能力（結露時、実測値）

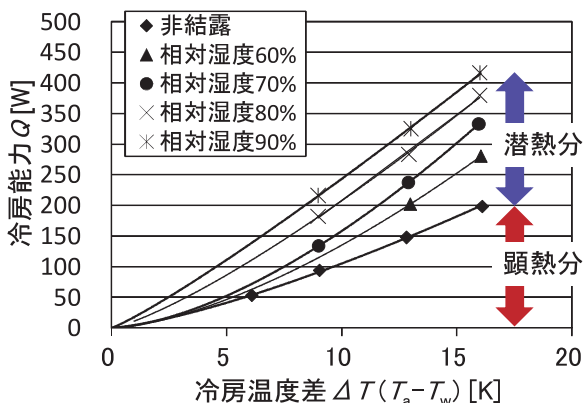


図 15 結露時における樹脂管柵状放射パネルの冷房温度差に対する冷房能力の比較（実測値）

結露水重量と水の潜熱の積とほぼ同等であることが確認できる。このことから、放射パネルの結露時の潜熱冷房能力は、結露時の冷房能力と非結露時の冷房能力の差とできることが分かった。

4.4 放射パネルの水温が室内温度分布に与える影響

図17に暖房時の室内中央の垂直温度分布を示す。各実験条件の定格温度である放射パネル出入口平均温水温度35、70℃

の条件で比較した。放射パネル出入口平均温水温度70℃の場合、床上50mmから2150mmまでに最大5℃程度の温度差が発生する。建物の冷暖房負荷に対して必要な熱量を確保できるのであれば平均温水温度は低温とする方が室内温熱環境は良好である。図18に冷房時の室内中央の垂直温度分布を示す。各実験条件の定格温度である放射パネル出入口平均冷水温度17、9.5、20℃の条件で比較した。床パネルに温水を循環させているにもかかわらず、冷気が滞留していることが確認でき、平均冷水温度が低い方がその傾向が顕著である。暖房時、冷

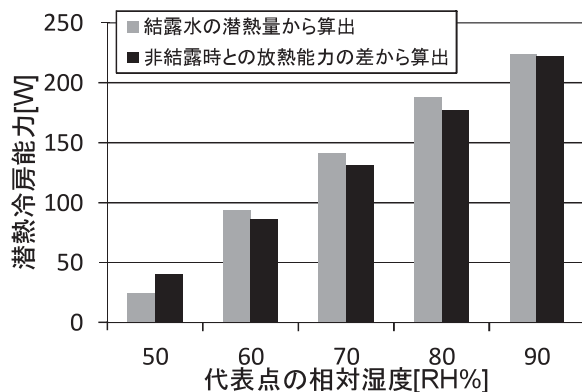


図 16 樹脂管柵状放射パネルの算出方法の違いによる潜熱冷房能力の比較

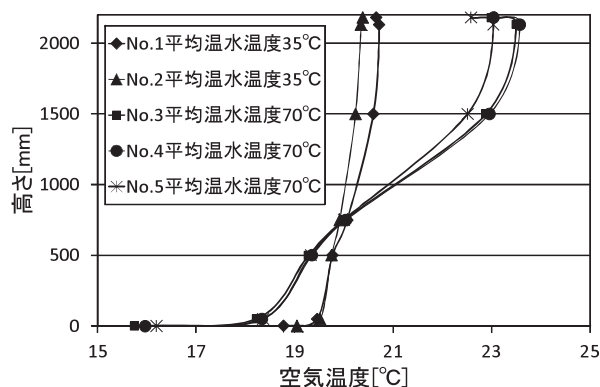


図 17 樹脂管柵状放射パネルの暖房時の室内中央空気の垂直温度分布

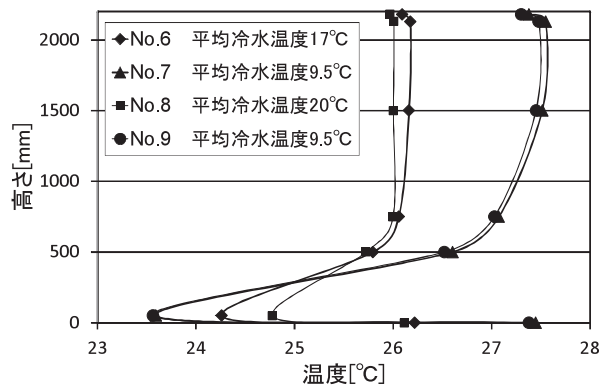


図 18 樹脂管柵状放射パネルの冷房時の室内中央空気の垂直温度分布

房時ともに放射パネルに循環する水温と空気温度との差を小さくして運転する方が良好な室内温熱環境を得られることが本測定で確認できる。

5. 結言

ヒートポンプを熱源として低温で循環する場合の放射パネルの暖房能力、冷房能力試験手法の規程作成を目標として、放射パネルに循環する冷温水の温度、流量条件を変え、放射パネルの冷暖房能力の測定条件について検討した。以下に得られた知見をまとめる。

- (1) 放射パネルの暖房能力は、暖房温度差の影響を受けるため、実際に運転する領域で測定（高温と低温の温水使用に分けて評価）するのが望ましい。
- (2) 冷房時は冷房温度差が最大20 K程度と小さく、冷房温度差と冷房能力の性能曲線を未実験領域に外挿しても精度が維持できる。
- (3) 放射パネルの冷暖房能力の正確な測定のためには、放射パネルに一定以上の流量で冷温水を循環させ、放射パネル内の水の配流を均一化させることが望ましい。
- (4) 放射パネルの結露時の潜熱冷房能力は、結露時の冷房能力と非結露時の冷房能力の差とできる。

謝辞

本研究は公益財団法人LIXIL住生活財団 調査研究助成「低負荷住宅に対応する放射ラジエータの放熱能力評価手法の確立」によりました。関係者に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) JIS A1400 (2007)
- 2) 富田和彦・白土博康・保科秀夫：除湿型放射冷暖房パネルの冷房能力評価に関する研究 第3報 除湿型放射冷暖房パネルの冷房能力試験方法，北海道立工業試験場報告，No.310，pp.61-65 (2011)
- 3) 白土博康・富田和彦・黒田邦臣・井浦奉昭：プラスチック製ラジエータに関する研究 第2報 除湿型ラジエータの冷房能力の評価，空気調和・衛生工学会論文集，No.164，pp.49-54 (2010)
- 4) 富田和彦・保科秀夫：簡易放射暖房試験室によるパネルラジエータの放熱量測定，北海道立工業試験場報告，No.293，pp.85-93 (1994)
- 5) 白土博康・富田和彦・黒田邦臣：プラスチック製パネルラジエータに関する研究 第1報 温水暖房パネルラジエータとしての材料耐久性と放熱能力の評価，空気調和・衛生工学会論文集，No.158，pp.15-21 (2010)
- 6) 白土博康・富田和彦・保科秀夫・井浦奉昭：プラスチック製ラジエータに関する研究 第3報 プラスチック製ラジエータ設置住宅における室内温熱環境の評価，空気調和・衛生工学会論文集，No.189，pp.47-54 (2012)
- 7) 白土博康・富田和彦・保科秀夫・櫻庭高光・井浦奉昭：プラスチック製ラジエータに関する研究 第4報 換気システムを統合した住宅用放射冷暖房システムの提案：空気調和・衛生工学会論文集，No.233，pp.11-18 (2016)
- 8) JIS B 8615-1 (2013)