

# 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2報） －パネル表面のぬれ性が除湿能力に与える影響－

富田 和彦, 白土 博康, 保科 秀夫

## Study on Cooling Performance of Radiant Cooling Panel with Condensation (part II) －Effect of Wettability on Dehumidifying Capacity－

Kazuhiko TOMITA, Hiroyasu SHIRATO, Hideo HOSHINA

### 抄 録

パネル面のぬれ性が除湿能力に与える影響を明らかにするため、除湿型放射冷暖房パネルのエレメントを使った実験的検証を行った。その結果、除湿能力はパネル面の飽和絶対湿度と室内の絶対湿度の差に比例して増加するが、パネル面のぬれ性にはほとんど影響を受けないこと、また、パネル面のぬれ性向上は落水開始時間の短縮につながることを、さらに、標準および撥水供試体は滴状凝縮、親水供試体は膜状凝縮の形態を取ることが分かった。

キーワード：放射冷暖房パネル方式、結露、冷房能力、除湿、ぬれ性

### Abstract

Experimental studies on the dehumidification capacity of radiant type heater/cooler panels have been performed to verify the effect of the wettability of panel surface by using elements of the dehumidification panel.

It is experimentally indicated that dehumidification capacity of the panel increases in proportion to the difference between saturation absolute humidity of the surface of the panel and the absolute humidity of the ambient, and it is little or not influenced by the wettability of the panel surface.

Moreover, it is also indicated that increase of wettability of the panel surface shorten the onset of the condensed water droplet falling, and standard test-piece and the test-piece which gave the water repellency show drop-wise condensation state, and the hydrophobic test-piece shows film condensation state.

KEY-WORDS : radiation-panel cooling and heating system, vapor condensation, cooling capacity, dehumidifying, wettability

### 1. はじめに

除湿型放射冷暖房パネルは、冷房時に冷水を流すことで、パネル表面が露点温度以上では顕熱負荷を、露点温度以下ではこれに結露水による除湿（潜熱）負荷を加えた冷房負荷を処理するものである。前報<sup>1)</sup>では、市販の除湿型放射冷暖房

パネルを用いた冷房能力および除湿能力を把握する試験を、JISの暖房用放熱器の試験方法<sup>2)</sup>に倣って行い、結露時の冷房能力は非結露時の顕熱冷房能力と結露時の除湿能力の和として表されること、また除湿能力は室温の絶対湿度とパネル内平均水温の飽和絶対湿度の差の関数として表されることを示した。また、パネル面上での結露水の発生状況等を観察し、

事業名：一般試験研究

課題名：除湿型放射冷暖房パネルの冷房能力評価に関する研究

相対湿度が高いほど結露水量が多く、それに伴い付着量、落水量も大きくなることを確認した。結露水は、美観や室内への再蒸発を防ぐ上から、速やかに室外に排出させることが望ましく、その対策の一つとしてパネル面のぬれ性を向上させ、結露水の落下を促進させることが考えられる。しかしながら、ぬれ性の向上は凝縮形態が滴状凝縮に比べ熱伝達率に劣る膜状凝縮になると予想されるため、これによる除湿能力の低下が懸念される。

そこで本研究では、結露水の凝縮形態を支配するパネル面のぬれ性が、除湿能力や結露水の落下促進にどのような影響を及ぼすかを明らかにするため、除湿型放射冷暖房パネルの要素を使った実験的検証を行った。

## 2. 試験装置および方法

### 2.1 供試体のぬれ性

試験に供したパネル要素は、P社の鋼板製除湿型放射冷暖房パネル（さく形）の構成要素で、寸法は幅70mm×高さ1000mm、厚さ7mmであり、上下端に出入口用のホース接手が取り付けられている。このパネル要素を3枚用意し、1枚目は標準塗装のパネル要素（供試体名：標準）、2枚目は標準供試体の表面にR社の撥水性塗料を塗布したパネル要素（供試体名：撥水）、3枚目は標準供試体の表面にN社の超親水性塗料を塗布したパネル要素（供試体名：親水）である。これら供試体のぬれ性を調べるため、水に対する接触角を接触角測定装置（Drop Master300；協和界面科学㈱）を用いて測定した（図1）。

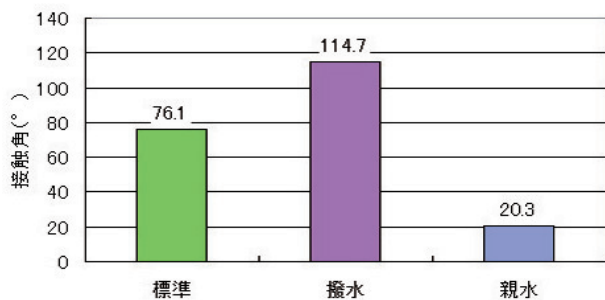


図1 供試体のぬれ性

### 2.2 試験装置および方法

試験装置の外観を図2に、冷水のフローを図3に示す。前報<sup>1)</sup>と同様、試験室に床面積2400mm×1800mm、天井高さ2000mmの恒温恒湿室を、冷水の製造に冷却能力1.2kWの低温循環装置を使用した。供試体は、試験室中央付近に三方弁を介してバイパス管と並行して垂直に配置し、供試体の下には、パネル面から落下する結露水の重量を自動計測するため、ピーカと電子天秤を設置した。また、パネル面の結露状態を観察

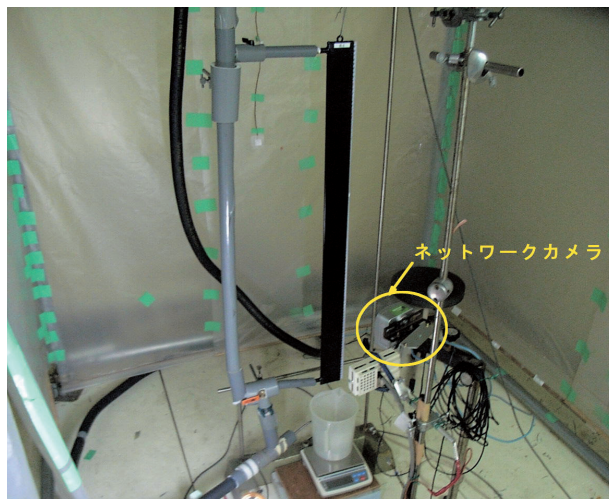


図2 試験装置の外観

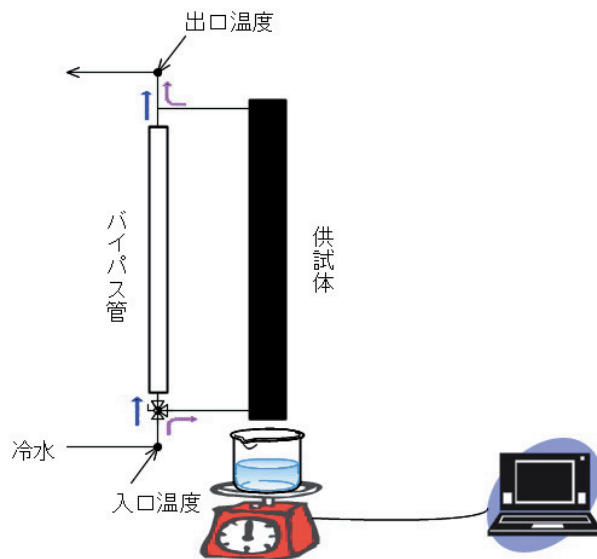


図3 冷水フロー

するため、パネル前方にネットワークカメラ（視野：パネル下端から270mm～400mm）を配置し、さらに供試体内の冷水温度測定のため、出入口配管内にシース型白金測温体温度センサーを挿入した。

試験は、通水開始からの過渡状態を含め定常状態までの除湿能力を測定するため、温度7℃の冷水を予めバイパス管（断熱材で保温）に流量1L/minで通水させておき、供試体温度が室温にほぼ等しいと見なせる状態から三方弁を切り替え、供試体に通水させることで測定を開始し、結露水重量の時間変化（傾き）が一定となる定常状態が得られるまで行った。この間、結露水重量を60秒間隔で測定し、パネル面の結露状態をネットワークカメラにより120秒間隔で観測し、試験室中心部の床上750mmにおける室温、湿度、供試体出入口冷水温、冷水流量、試験室周囲壁面温度等をデータロガーを

用いて15秒間隔で測定した。なお、試験室の温湿度条件は、室温27℃一定、湿度は50、60、70、80%の4条件とした。供試体は標準、撥水、親水、各1体とした。

### 3. 試験結果および考察

#### 3.1 落下結露水の重量変化

湿度50、60、70、80%における標準、撥水、親水各供試体のパネル面から落下する結露水の重量変化を図4.1～図4.3に示す。図4.1に示すように、湿度80%の標準供試体の場合、通水開始およそ34min経過後に結露水重量を感知し、その後、

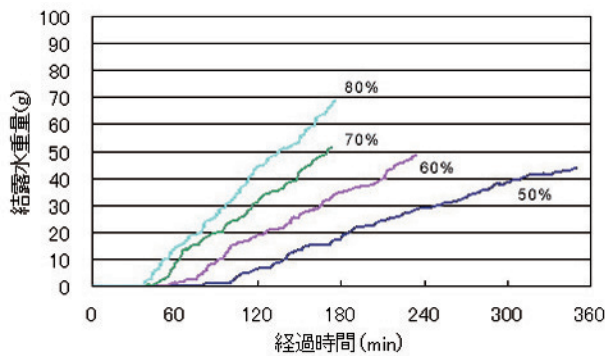


図4.1 標準供試体の結露水重量変化

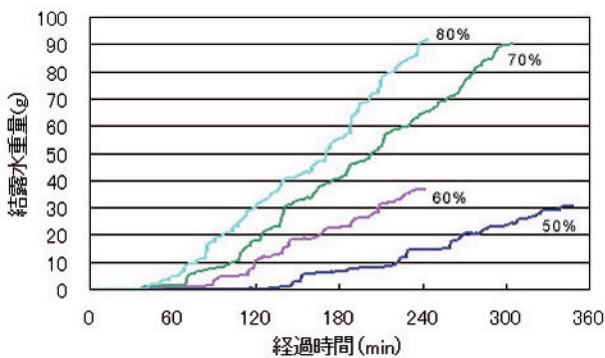


図4.2 撥水供試体の結露水重量変化

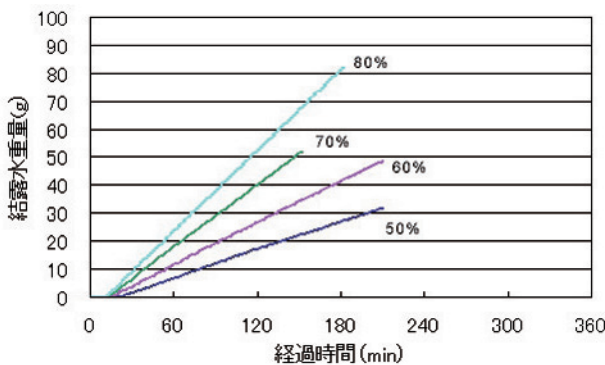


図4.3 親水供試体の結露水重量変化

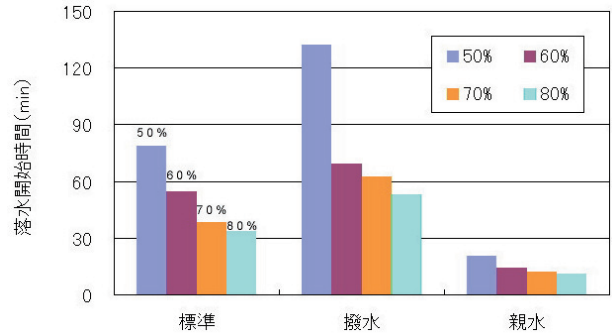


図5 落水開始時間

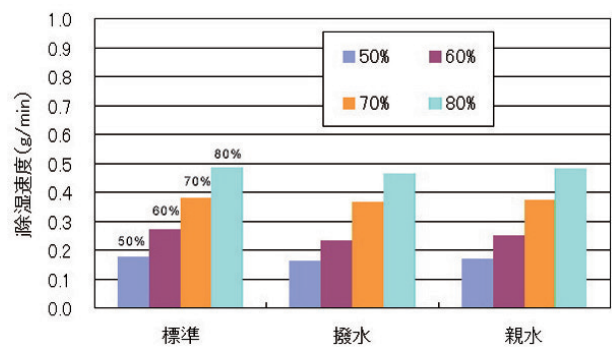


図6 除湿速度

時間と共に直線的に増加している様子が分かる。この通水開始から結露水を感知するまでの間（以後、落水開始時間と呼ぶ）、結露水はパネル面に滞留した状態にあると考えられ、後述のカメラ観察からも確認される。また湿度が低いほど、落水開始時間が長く（落水開始時刻が遅く）なること、さらに、結露水の発生速度（除湿速度）を示す直線の傾きは緩やかであり、結露発生量の少ないことが分かる。

次に、図4.2に示すように、標準供試体よりも接触角の大きい、ぬれ性の低い撥水供試体の場合、どの湿度においても標準供試体に比べ落水開始時間は長くなっているが、除湿速度を示す直線の傾きについてはほぼ同様な値を示している。一方、図4.3に示すように、標準供試体よりも接触角の小さい、ぬれ性の高い親水供試体の場合、落水開始時間は標準供試体より短く、湿度50%の条件で親水が20min、標準が79minであり、標準供試体の4分の1程度である。また、直線の傾き（除湿速度）は、標準供試体や撥水供試体にほぼ等しいが、凹凸の無い直線を示していることから、結露水はパネル面を淀みなくスムーズに流れ落ちていくものと思われる。

#### 3.2 結露開始時間および除湿速度

前述の結露水重量変化から得られる落水開始時間と除湿速度について整理した結果を、図5、図6に各々示す。

図5より、落水開始時間は、いずれの供試体においても湿

度が高くなるほど短くなること分かる。また、供試体間の比較では、ぬれ性の高い（接触角 $20.3^\circ$ ）親水供試体の落水開始時間がこの中で最も短く、11~21min、次にぬれ性の低い（接触角 $76.1^\circ$ ）標準供試体が34~79min、そしてぬれ性の最も低い（接触角 $114.7^\circ$ ）の撥水供試体が53~132minとなっている。これらの結果より、パネル面のぬれ性を高めることは、落水開始時間の短縮につながり、パネル面で発生する結露水を室外に速やかに排出させることが可能で、室内への再蒸発を防ぐことになる。特に超親水性塗料を塗布した親水供試体の場合、ぬれ性に極めて優れることから、通水開始時や湿度変動を伴う除湿負荷の小さな低湿度環境下で有効に

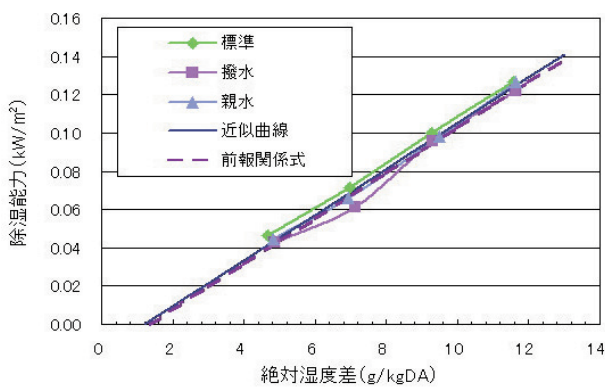


図7 絶対湿度差と除湿能力の関係

作用すると考えられる。

除湿速度は、パネル面のぬれ性には影響を受けず、標準、撥水、親水いずれの供試体もほぼ同様な結果を示し、湿度に正比例して増加することが分かる（図6）。

### 3.3 除湿能力

除湿能力（潜熱冷房能力）は、前述の除湿速度に結露水の凝縮潜熱を乗じて求めることができる。除湿能力 $q_t$  [kW/m<sup>2</sup>]はパネル面のぬれ性に影響を受けないため、前報<sup>1)</sup>同様、凝縮熱伝達率を同定し、絶対湿度差との関係式を導出した。図7に、絶対湿度差と除湿能力の関係（標準、撥水、親水の全データの近似曲線）を示す。これより、得られる関係式は、

$$q_t = 12.0 \times 10^{-3} ((X_s - X_a) - 1.27) \quad (1)$$

ここに、 $X_a$ ：代表室温の絶対湿度 [g/kgDA]

$X_s$ ：平均水温における飽和絶対湿度 [g/kgDA] である。前報<sup>1)</sup>で求めた関係式は(2)式に示すとおりであり、

$$q_t = 11.9 \times 10^{-3} ((X_s - X_a) - 1.37) \quad (2)$$

図7からも分かるように、両関係式はほぼ一致することから、パネルエレメントを用いた実験が除湿型冷暖房放射パネル製品を用いた実験を裏付ける再現性のある結果となっている。

### 3.4 パネル面の結露状況

ネットワークカメラを用いて観察した、湿度80%における通水開始から120minまでの30min間隔のパネル面結露状況

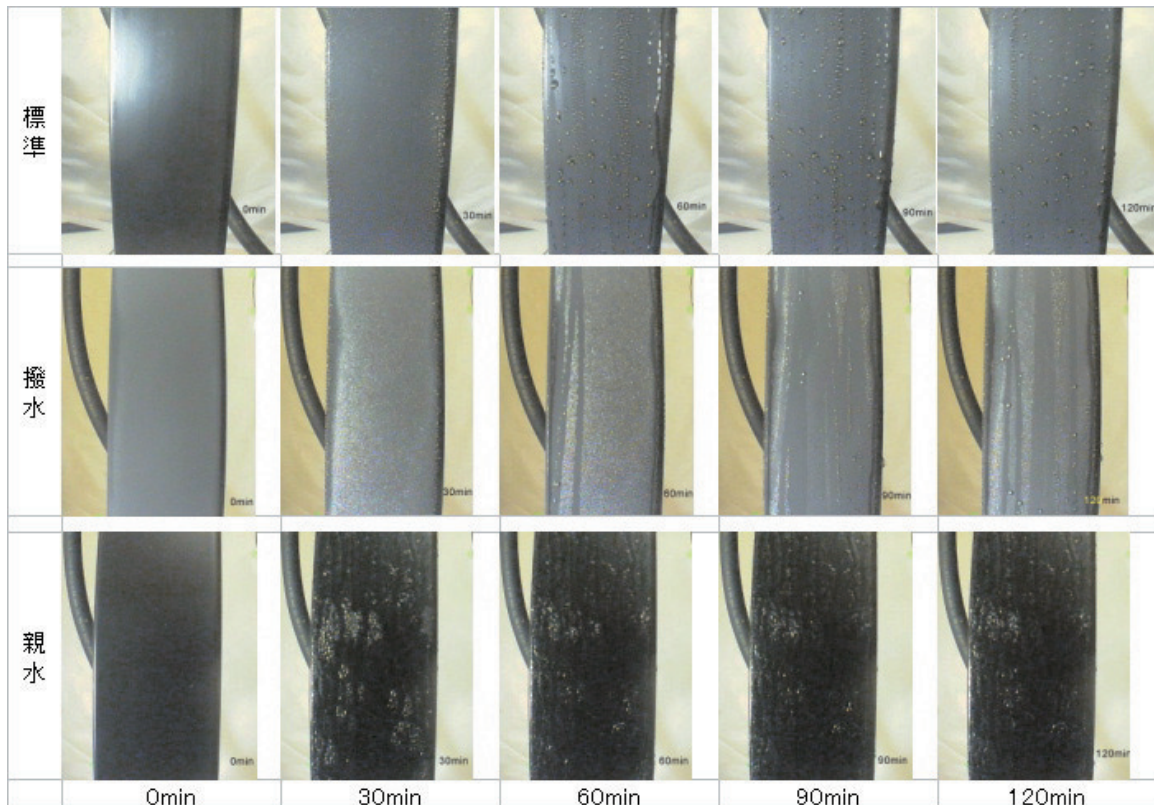


図8 パネル面の結露状況（室温 $27^\circ\text{C}$ 、湿度80%）

を、標準、撥水、親水の各供試体について、図8に比較して示す。図8の画像全体から、標準および撥水供試体と親水供試体では結露水の凝縮形態に大きな相違のあること、つまり前者は滴状凝縮、後者は膜状凝縮になっていることが分かる。

通水30min後の画像を見ると、標準と撥水はパネル面に細かな水滴が付着し、標準では水滴が部分的に結合し大きな水滴になっているものの落下するまでに至っていない。これに対し親水は、結露水の発生段階で微細な水滴をつくるが、間もなく隣接する水滴同士が結びついてパネル面全体に水膜を形成（通水開始から30minまでの画像から観察される）し、通水30min後には既に落水状態にあることが分かる。また、通水60min以後の画像については、標準と撥水は結露水が筋状になって流れ落ち、それによって現れた乾き面の随所で、水滴が新たに発生・成長・落下する様子が繰り返し観察される。これに対し親水供試体は、全面薄い水膜を形成し、ぬれたままの状態にあり、結露水はパネル全面を伝わって落下しているものと思われる。

以上の観測結果および除湿能力の測定結果から、標準と撥水の供試体は滴状凝縮の形態、親水供試体は膜状凝縮の形態を取るが、この凝縮形態の相違による除湿能力の差異は認められない。その理由として、結露水量が少ないため液膜は非常に薄く、その熱抵抗は無視できると考えられる。なお、本研究で扱う湿り空気は、水蒸気+空気（不凝縮ガス）の不飽和混合気体の系であるのに対し、膜状凝縮に比べ滴状凝縮が高い熱伝達を示すといわれる系は単一成分の飽和蒸気である<sup>3)</sup>。湿り空気は、不凝縮ガスである空気成分がほとんどで水蒸気量は極めて少ないことから、大量の凝縮液を扱う単一成分の凝縮理論をそのまま適応できないと思われる。

#### 4. まとめ

パネル面のぬれ性が除湿能力に与える影響を明らかにするため、除湿型放射冷暖房パネルのエレメントを使った実験的検証を行った。以下に結果を要約する。

- (1) 市販パネルエレメント（標準）及びその表面に撥水性塗料と親水性塗料を塗布した3種類を供試体として使用した。
- (2) ぬれ性の評価指標である接触角は、標準供試体が76.1°、撥水供試体が114.7°、親水供試体が20.3°である。
- (3) 除湿能力は、パネル面と室内の絶対湿度差に比例して増加するが、パネル面のぬれ性にはほとんど影響を受けない。
- (4) パネル面のぬれ性向上は、落水開始時間の短縮につながり、通水開始時や湿度変動を伴う除湿負荷の少ない低湿度環境下で有効である。
- (5) パネル面の観察から、標準および撥水供試体は滴状凝縮、親水供試体は膜状凝縮の形態を取る。

- (6) 凝縮熱伝達率を同定し、除湿能力を求める関係式を導出した。このパネルエレメントによる関係式は、前報の除湿型冷暖房放射パネル製品による関係式とほぼ一致した。

#### 謝辞

本研究を行うにあたり、ピーエス工業㈱より供試パネルの提供を頂きました。ここに記して感謝いたします。

#### 引用文献

- 1) 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，北海道立工業試験場報告，No.308，pp.15-21，(2009)
- 2) JIS A1400-2007 暖房用自然対流・放射形放熱器－性能試験方法
- 3) 藤井哲：膜状凝縮熱伝達，九州大学出版社，264PP., (2005)