スリットを有する天井放射パネルユニットの熱性能に関する研究

STUDY ON HEAT PERFORMANCE OF A CEILING SLIT PANEL UNIT FOR RADIANT COOLING AND HEATING

塩谷正樹*, 郡 公子**, 鬼頭則夫***
Masaki SHIOYA, Kimiko KOHRI and Norio KITO

In the design of a ceiling radiant cooling and heating system, it is important to calculate the indoor thermal radiant environment and heat performance of a ceiling radiant panel. From the results of heat performance experiment, we clarified the radiative and convective heat transfer coefficient of a ceiling panel. And we developed the heat exchange equation model of a ceiling radiant panel using fin efficiency. The calculated values of the heat quantity using this model give close agreement with the actual measured values. Therefore, this model can be used to design ceiling radiant panels.

Keywords : Radiant cooling and heating system, Radiant panel, Radiative heat, Convective heat, Heat exchange equation

天井放射空調システム, 放射パネル, 放射熱, 対流熱, 熱交換式

1. はじめに

天井放射空調システムは, 室内の放射環境を制御する熱的快適性と, 低エクセルギー熱利用による熱源システムの高効率運転や, 地中熱や太陽熱などの再生可能エネルギー直接利用, 熱搬送効率の向上など高い省エネルギー性を兼ね備えた空調システムとして, 導入事例が増加している^{1)~5)}。放射パネルは室内の顕熱負荷を処理するとともに, パネル表面温度によって快適性の高い放射環境とすることが可能であり, 設計時において放射パネル熱量や室内の放射環境を考慮しながら, 放射パネルの配置や送水条件などを計画することが重要である。石野⁶⁾は放射による効果を評価するために, 室内設計条件を作用温度とし, 室内空気温度と表面温度を区別して, 熱負荷や放射パネルの熱量を計算する手法を提案している。天井放射パネルの熱性能に関しては, 代表的なパネル形状の表面熱伝達率や熱抵抗の算出式⁷⁾があり, さらにこれまでに多くの実験が行われている。瀬沼ら⁸⁾は実験により対流, 放射熱伝達率を求め, 有限要素法によってパネル表面温度や熱量の検討を行っている。糸井川ら⁹⁾は実験により冷却時の放射, 対流熱伝達率や, 送水往温度と室温の差を基準とした熱性能の検討を行っている。伊藤ら^{10)~12)}はパネル上下面から放熱する放射パネルについて, 今川ら^{13)~14)}は種々の放射パネルや配管接続方式による熱性能の検討を行っている。しかし, これらの結果は限定された実験条件下や放射パネル固有のものであり, 設計においては, 任意の送水条件やパネル周囲の環境温度に応じた放射パネル熱量が算出可能な実用的な熱交換式が必要である。熱交換式に関して, 岡本ら¹⁵⁾や三村ら¹⁶⁾は平板のパネルに配管を接続し, 天井内側を断熱した天井放射パネルをモデルとして熱交換式を導出して

る。しかし, 熱量は室内空気温度と送水温度の差で評価するため, 放射パネルからみた平均放射温度(以降PRT)による影響は考慮されていない。

本研究では, スリットを有することで, フィン付き配管独立構造となる天井放射パネルを対象として, 設計手法を確立する上で必要となる熱性能を実験により把握し, 任意の送水条件と, 放射パネル周囲の空気温度とPRTの影響を考慮した環境温度から, 放射パネルの熱量や表面温度の予測が可能な熱交換式を構築することを目的とする。

2. 天井放射パネル熱性能実験の概要

2.1 天井放射パネル

図1に対象となる天井放射パネルを示す。放射パネルは1ユニット

図1 天井放射パネル

* 三建設備工業(株)技術本部技術研究所 修士(工学)

** 宇都宮大学大学院工学研究科 准教授・工博

*** 三建設備工業(株)技術本部技術研究所

Research Engineer, Sanken Setsubi Kogyo Co., Ltd., M. Eng.
Assoc. Prof., Graduate School of Engineering, Utsunomiya Univ., Dr. Eng.
Research Engineer, Sanken Setsubi Kogyo Co., Ltd.

トあたりが $600 \times 1,800$ のアルミ製で、各パネル部の断面は曲面形状となっており、パネル上下面から放熱する。また、放射パネル間にはスリットが設けられ、室内と天井内の間で空気が流動する。

2.2 実験概要

図2に実験室、表1、表2に実験条件と測定項目を示す。実験室は

図2 実験室平面図と断面図

表1 実験条件

実験対象	室中央放射パネル600×1,800×2枚	
実験年月	冷房 2011/7~8	暖房 2011/12~2012/2
冷房	温度[℃]	16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24
	送水条件 流量[L/min]	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
暖房	温度[℃]	18, 20, 22.5, 25, 27.5, 30, 32.5, 35, 37.5, 40
	送水条件 流量[L/min]	0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10

※送水流量は放射パネル1枚あたり

表2 測定項目

測定項目	測定機器	測定点
送水温度	测温抵抗体 Pt100	各放射パネル往還：4点
送水流量	電磁流量計	各放射パネル：2点
空気温度	サーミスタ温度計	室内：12点、天井内：6点
表面温度	T型熱電対 赤外線サーモグラフィ	室内壁：20点、床：9点、対象放射パネル：14点 天井板、非対象放射パネル：14点 天井内壁：12点、天井スラブ：9点 天井内梁、ダクト：3点
表面熱流	熱流計	室内壁：6点、床：1点、対象放射パネル：4点 天井板：1点、天井内壁：4点、天井スラブ：1点

図3 冷房時における時刻変動 (2L/min時)

表3 熱伝達率の算出に関する式

放射パネル熱量 [W]	
$q_p = C_p \rho Q t_{wi} - t_{wo} $	・・・(1)
放射パネル放射熱伝達量 [W]	
$q_r = \sigma A_i \varepsilon_i \sum g_{ij} T_i^4 - T_j^4$	・・・(2)
放射パネルからみた平均放射温度 (PRT) [K]	
$PRT = \sqrt[4]{\sum g_{ij} T_j^4}$	・・・(3)

C_p : 水の比熱 [J/(kg・K)] ρ : 水の密度 [kg/m³] Q : 放射パネル送水流量 [m³/s]
 t_{wi} : 放射パネル送水往温度 [℃] t_{wo} : 放射パネル送水還温度 [℃]
 σ : Stefan - Boltzmann 定数 5.67×10^{-8} [W/(m²・K⁴)] A_i : 放射パネルの水平投影面積 [m²] ε_i : 放射パネルの放射率 [-] g_{ij} : Gebhart 放射吸収係数 [-]
 T_i : 放射パネルの表面温度 [K] T_j : 面jの表面温度 [K]

5,000 × 6,000 で、14 枚の天井放射パネルを設置している。本実験では室中央部の放射パネル 2 枚に、表 1 に示す送水温度と送水流量を組み合わせて測定する。解析に用いた条件は冷房時 82 ケース、暖房時 106 ケースである。測定は、送水温度と流量、空気温度、表面温度、表面熱流を 30 秒間隔で行う。さらに、赤外線サーモグラフィにより放射パネル直下からパネル表面温度分布を測定する。なお、実験中の熱供給は放射パネルのみとし、室内温度は成り行きとする。また、暖房時は送水温度と室内環境温度の差が小さい条件を測定するために、送水温度下限を 18℃程度とする。測定例として、図 3 に冷房時における時刻変動を示す。

3. 天井放射パネルの放射、対流熱伝達率

実験結果より、放射パネル表面の放射熱伝達率と対流熱伝達率を算出する。表 3 に熱伝達率算出に用いた式を示す。放射パネル熱量を式 (1) より求め、パネル上下面の熱流計測定値の割合から室内側、天井内側への熱量に分ける。室内側、天井内側への放射熱伝達量は式 (2) より求める。Gebhart 放射吸収係数¹⁷⁾は、室内形状や天井内ダクトをモデル化し、モンテカルロ法により求める。図 4 に天井内側のモデルを示す。なお、放射率は天井スラブ、ダクト表面を 0.6、その他の表面を 0.9 とし計算する。表 4 に対象放射パネルにおける Gebhart 放射吸収係数を示す。対流熱伝達量は室内側、天井内側への熱量と放射熱伝達量の差によって求める。また、各表面熱伝達率を

図4 天井内側モデル

表4 対象放射パネルにおける Gebhart 放射吸収係数

(a) 放射パネル 1 天井内側		(b) 放射パネル 2 天井内側	
部位	g_{ij}	部位	g_{ij}
天井スラブ	0.29	天井スラブ	0.21
梁	0.16	梁	0.15
天井内東壁	0.00	天井内東壁	0.05
天井内南壁	0.01	天井内南壁	0.02
天井内西壁	0.06	天井内西壁	0.00
天井内北壁	0.01	天井内北壁	0.01
非対象放射パネル	0.09	非対象放射パネル	0.09
対象放射パネル	0.06	対象放射パネル	0.06
ダクト	0.24	ダクト	0.33
天井板・照明	0.08	天井板・照明	0.08
(c) 放射パネル 1 室内側		(d) 放射パネル 2 室内側	
部位	g_{ij}	部位	g_{ij}
床	0.48	床	0.47
東壁	0.03	東壁	0.11
東窓	0.02	東窓	0.09
南壁	0.12	南壁	0.12
西壁	0.14	西壁	0.04
西窓	0.05	西窓	0.01
北壁	0.12	北壁	0.12
非対象放射パネル	0.02	非対象放射パネル	0.02
天井板・照明	0.02	天井板・照明	0.02

求める際、PRT は式 (3) より求め、室内空気温度はFL+2,000 以下の平均値を用い、天井内空気温度はFL+3,100 以上の平均値を用いて、放射パネル表面温度との差を求める。

図 5, 6 に冷房時における天井内側, 室内側への放射, 対流熱伝達

図 5 冷房時天井内側放射・対流熱伝達量

図 6 冷房時室内側放射・対流熱伝達量

図 7 暖房時天井内側放射・対流熱伝達量

図 8 暖房時室内側放射・対流熱伝達量

表 5 放射パネル表面熱伝達率

		放射熱伝達率 [W/m²K]	対流熱伝達率 [W/m²K]
冷房	天井内側	5.4	$2.9 t_p - t_a ^{0.16}$
	室内側	5.4	$2.3 t_p - t_a ^{0.43}$
暖房	天井内側	5.3	$2.9 t_p - t_a ^{0.39}$
	室内側	5.2	$2.2 t_p - t_a ^{0.25}$

※ t_p はパネル表面温度, t_a は空気温度を示す

量を示す。各温度差と熱伝達量は高い相関がみられる。放射熱伝達量は温度差が大きくなるにつれてほぼ一定の割合で増加する。対流熱伝達量は温度差が大きくなるにつれて増加する割合が大きくなり、温度差あたりの熱伝達量は室内側の方が大きい傾向がみられる。

図 7, 8 に暖房時における天井内側, 室内側への放射, 対流熱伝達量を示す。暖房時においても各温度差と熱伝達量は高い相関がみられ、放射熱伝達量は温度差が大きくなるにつれて、一定の割合で増加し、対流熱伝達量は温度差が大きくなるにつれて、増加する割合が大きくなる傾向がみられる。温度差あたりの対流熱伝達量は天井内側の方が大きい。これらの結果の近似式の傾きより、表 5 に示す各表面熱伝達率が得られる。

4. 天井放射パネルの熱交換モデル

対象とした天井放射パネルの熱量を実用的な計算式から推定するために、放射パネルの熱量をフィン効率¹⁸⁾を用いてモデル化し、放射パネルの熱貫流率を導く。図 9 に天井放射パネルのモデルと記号を示す。なお、熱貫流率を導くにあたり、放射パネルの配管を放熱性能が等価で、外表面温度 t_{p0} の仮想配管に置き換える。

4. 1 配管内部の熱伝達量

配管内部の熱伝達は配管のみの部位と、配管とパネルが接続されている部位の熱伝導の違いを考慮する。

配管内の水から配管外表面への熱伝達量は式 (4) である。

$$q_p = (K_{p1} A_{m1} + K_{p2} A_{m2}) \cdot (t_w - t_{p0}) \quad \dots (4)$$

ここに、 K_{p1} , A_{m1} は、配管のみの部位の熱伝達率 [W/m²K] と平均熱伝達面積 [m²], K_{p2} , A_{m2} は、配管とパネルが接続されている部位

q_p : パネル熱伝達量 [W] h_w : 配管内熱伝達率 [W/m²K] R : 配管-パネル間接触抵抗 [m²K/W] λ_1 : 配管熱伝導率 [W/mK] λ_2 : パネル熱伝導率 [W/mK] α_{r1} : 天井内側放射熱伝達率 [W/m²K] α_{r2} : 室内側放射熱伝達率 [W/m²K] α_{c1} : 天井内側対流熱伝達率 [W/m²K] α_{c2} : 室内側対流熱伝達率 [W/m²K] v : 配管内流速 [m/s] η : パネルフィン効率 [-] r_1 : 配管内半径 [m] r_2 : 配管外半径 [m] r_3 : 配管中心からパネル表面までの距離 [m] ℓ_{p1} : 配管内面弧長 (パネル未接触部) [m] ℓ_{p2} : 配管外面弧長 (パネル未接触部) [m] ℓ_{p3} : 配管内面弧長 (パネル接触部) [m] ℓ_{p4} : 配管外面弧長 (パネル接触部) [m] ℓ_{p5} : 配管-パネル接触部の弧長 [m] ℓ_n : 天井内側配管部からパネル先端までの長さ [m] ℓ_n : 室内側配管部からパネル先端までの長さ [m] w_1 : 配管部の水平幅 [m] w_2 : パネル部の水平幅 [m] w_3 : パネルの水平幅 [m] L : 送水方向長さ [m] t_w : 水の温度 [°C] t_{p0} : 配管外表面温度 [°C] t_1 : 天井内空気温度 [°C] PRT_1 : パネルからみた天井内平均放射温度 [°C] t_2 : 室内空気温度 [°C] PRT_2 : パネルからみた室内平均放射温度 [°C] t_e : パネル環境温度 [°C]

図 9 天井放射パネルモデルと記号

の熱伝達率 [W/m²K] と平均熱伝達面積 [m²] であり、式 (5) ～ (8) で表せる。

$$K_{p1} = \frac{1}{\frac{1}{h_w} + \frac{r_2 - r_1}{\lambda_1}} \quad \dots(5)$$

$$A_{m1} = \frac{(\ell_{p2} - \ell_{p1})L}{\ln(\ell_{p2}/\ell_{p1})} \quad \dots(6)$$

$$K_{p2} = \frac{1}{\frac{1}{h_w} + \frac{r_2 - r_1}{\lambda_1} + \frac{r_3 - r_2}{\lambda_2} + R} \quad \dots(7)$$

$$A_{m2} = \frac{(2\ell_{p4} + \ell_{p3} - \ell_{p3})L}{\ln\{(2\ell_{p4} + \ell_{p3})/\ell_{p3}\}} \quad \dots(8)$$

$$h_w = (1663 + 24t_w)^{0.8}/(2r_1)^{0.2} \quad \dots(9)^{19)}$$

よって、式 (4) は式 (10) で表せる。

$$q_p = \left[K_{p1} \frac{\ell_{p2} - \ell_{p1}}{\ln(\ell_{p2}/\ell_{p1})} + K_{p2} \frac{2\ell_{p4} + \ell_{p3} - \ell_{p3}}{\ln\{(2\ell_{p4} + \ell_{p3})/\ell_{p3}\}} \right] L(t_w - t_{p0}) \quad \dots(10)$$

4. 2 配管・放射パネル表面と周囲環境間の熱伝達量

配管、パネル表面と周囲環境間の熱伝達式を導くにあたり、放射熱伝達に有効な面積は水平投影面積として近似する。

配管部の外表面と周囲環境間の熱伝達量 q_{pp} は式 (11) である。

$$q_{pp} = \alpha_{r1} w_1 L(t_{pop} - PRT_1) + \alpha_{c1}(\ell_{p2} + 2\ell_{p4})L(t_{pop} - t_1) \quad \dots(11)$$

t_{pop} : 配管部の外表面温度

ここで、

$$h_p = \alpha_{r1} + \frac{\ell_{p2} + 2\ell_{p4}}{w_1} \alpha_{c1} \quad \dots(12)$$

$$te_p = \frac{\alpha_{r1} PRT_1 + \frac{\ell_{p2} + 2\ell_{p4}}{w_1} \alpha_{c1} t_1}{h_p} \quad \dots(13)$$

とすると、式 (14) となる。

$$q_{pp} = h_p w_1 L(t_{pop} - te_p) \quad \dots(14)$$

天井内側パネル部表面と周囲環境間の熱伝達量 q_{pf} は、フィン効率を用いると式 (15) で表せる。

$$q_{pf} = \alpha_{r1} 2w_2 L \eta(t_{pof} - PRT_1) + \alpha_{c1} 2\ell_{f1} L \eta(t_{pof} - t_1) \quad \dots(15)$$

t_{pof} : パネル根元温度

ここで、

$$h_f = \alpha_{r1} + (\ell_{f1}/w_2) \alpha_{c1} \quad \dots(16)$$

$$te_f = \frac{\alpha_{r1} PRT_1 + (\ell_{f1}/w_2) \alpha_{c1} t_1}{h_f} \quad \dots(17)$$

とすると、式 (18) となる。

$$q_{pf} = h_f 2w_2 L \eta(t_{pof} - te_f) \quad \dots(18)$$

式 (14), (18) より、天井内側放射パネルと周囲環境間の熱伝達量 q_{p1} は式 (19) である。

$$\begin{aligned} q_{p1} &= q_{pp} + q_{pf} \\ &= h_p w_1 L(t_{pop} - te_p) + h_f 2w_2 L \eta(t_{pof} - te_f) \end{aligned} \quad \dots(19)$$

ここで、

$$h_1 = (w_1/w_3)h_p + (2w_2/w_3) \eta h_f \quad \dots(20)$$

$$t_{p01} = \frac{(w_1/w_3)h_p te_p + (2w_2/w_3) \eta h_f te_f}{h_1} \quad \dots(21)$$

$$te_1 = \frac{(w_1/w_3)h_p te_p + (2w_2/w_3) \eta h_f te_f}{h_1} \quad \dots(22)$$

とすると、式 (23) となる。

$$q_{p1} = h_1 w_3 L(t_{p01} - te_1) \quad \dots(23)$$

一方、室内側放射パネルと周囲環境間の熱伝達量 q_{p2} は式 (24) で表せる。

$$q_{p2} = \alpha_{r2} w_3 L \eta(t_{pof} - PRT_2) + \alpha_{c2} 2\ell_{f2} L \eta(t_{pof} - t_2) \quad \dots(24)$$

ここで、

$$h_2 = \alpha_{r2} + (2\ell_{f2}/w_3) \alpha_{c2} \quad \dots(25)$$

$$te_2 = \frac{\alpha_{r2} PRT_2 + (2\ell_{f2}/w_3) \alpha_{c2} t_2}{h_2} \quad \dots(26)$$

とすると、式 (27) となる。

$$q_{p2} = h_2 w_3 L \eta(t_{pof} - te_2) \quad \dots(27)$$

よって、放射パネル表面とパネル周囲環境間の熱伝達量 q_p は、式 (23), (27) より、式 (28) で表せる。

$$\begin{aligned} q_p &= q_{p1} + q_{p2} \\ &= h_1 w_3 L(t_{p01} - te_1) + h_2 w_3 L \eta(t_{pof} - te_2) \end{aligned} \quad \dots(28)$$

ここで、

$$h = h_1 + \eta h_2 \quad \dots(29)$$

$$t_{p0} = \frac{h_1 t_{p01} + \eta h_2 t_{pof}}{h} \quad \dots(30)$$

$$te = \frac{h_1 te_1 + \eta h_2 te_2}{h} \quad \dots(31)$$

とすると、式 (32) となる。

$$q_p = h w_3 L(t_{p0} - te) \quad \dots(32)$$

4. 3 放射パネルの熱伝達量

式 (10), (32) を整理すると、放射パネルの熱伝達量は式 (33) で表せる。

$$q_p = K L(t_w - te) \quad \dots(33)$$

ここに、

$$K = \frac{1}{\frac{1}{K_{p1}(\ell_{p2} - \ell_{p1})/\ln(\ell_{p2}/\ell_{p1})} + \frac{1}{K_{p2}(2\ell_{p4} + \ell_{p3} - \ell_{p3})/\ln\{(2\ell_{p4} + \ell_{p3})/\ell_{p3}\}}} + \frac{1}{h w_3}} \quad \dots(34)$$

式 (33) において、送水温度と環境温度の差は対数平均温度差であり、式 (35) で表せる。

$$t_w - te = \frac{t_{w1} - t_{w0}}{\ln\{(t_{w1} - te)/(t_{w0} - te)\}} \quad \dots(35)$$

式 (33) が放射パネルの熱交換式であり、放射パネルへの送水温度

表 6 放熱量の計算条件

r ₁ [m]	0.006	ℓ _n [m]	0.054
r ₂ [m]	0.008	ℓ _{i2} [m]	0.058
r ₃ [m]	0.010	λ _{i1} [W/mK]	0.47
ℓ _{p1} [m]	0.014	λ _{i2} [W/mK]	210
ℓ _{p2} [m]	0.018	冷房	α _{r1} [W/m ² K] 5.4
ℓ _{p3} [m]	0.024		α _{c1} [W/m ² K] 2.9 t _p -t _a ^{0.16}
ℓ _{p4} [m]	0.013		α _{c2} [W/m ² K] 5.4
ℓ _{p5} [m]	0.012		α _{c2} [W/m ² K] 2.3 t _p -t _a ^{0.43}
w ₁ [m]	0.019	暖房	α _{r1} [W/m ² K] 5.3
w ₂ [m]	0.044		α _{c1} [W/m ² K] 2.9 t _p -t _a ^{0.39}
w ₃ [m]	0.108		α _{c2} [W/m ² K] 5.2
L [m]	8.9		α _{c2} [W/m ² K] 2.2 t _p -t _a ^{0.25}

表 7 計算ケース

	冷房/暖房	接触抵抗R [m ² K/W]	フィン効率η [-]
CASE1-1	冷房	0.001	0.60
CASE1-2			0.70
CASE1-3			0.79
CASE1-4		0.01	0.70
CASE1-5			0.79
CASE1-6			0.90
CASE2-1	暖房	0.001	0.55
CASE2-2			0.65
CASE2-3			0.79
CASE2-4		0.01	0.65
CASE2-5			0.79
CASE2-6			0.90

図 10 冷房時放射パネル熱量計算値と実測値

図 11 冷房時放射パネル表面温度計算値と実測値

と流量，熱伝達率，パネル周囲環境温度，および放射パネルのフィン効率から放射パネルの熱量を推定することができる。

5. 放射パネルのフィン効率の推定

対象とした放射パネルのフィン効率を推定するため，熱交換式において，フィン効率，接触抵抗を仮定し，送水往温度，送水流量，空気温度，PRT 実測値から式(1)，式(33)より，放射パネル熱量とパネル表面温度を算出し，実測値と比較する。

表 6 に計算条件を示す。熱交換式において各表面熱伝達率は，実測により得られた値を用い，表 7 に示す接触抵抗とフィン効率を与えて算出する。

図 10，11 に冷房時における放射パネル熱量，室内側パネル表面温度の計算値と実測値を示す。フィン効率が高くなるにつれて，放射パネル表面温度は送水温度に近い値となり，放射パネル熱量は多くなる。この傾向は送水温度と環境温度の差が大きくなるにつれて顕著になる。また，接触抵抗が大きくなると放射パネル熱量は少なくなり，CASE1-2 と CASE1-5 の放射パネル熱量と表面温度計算値は実測値と概ね一致する傾向がみられる。

図 12，13 に暖房時における放射パネル熱量，室内側パネル表面温度の計算値と実測値を示す。冷房時と同様に放射パネル熱量は，フィン効率が高くなるにつれて多くなるが，接触抵抗が大きくなると少なくなる。CASE2-2 と CASE2-5 の放射パネル熱量と表面温度計算値は実測値と概ね一致する傾向がみられる。

一方で，フィン効率 η は式(36)で表せる。

$$\eta = \frac{t_p - t_e}{t_{pof} - t_e} \quad \dots(36)$$

赤外線サーモグラフィによる放射パネル表面の熱画像より，放射

図 12 暖房時放射パネル熱量計算値と実測値

図 13 暖房時放射パネル表面温度計算値と実測値

(a) 冷房 (b) 暖房

図 14 熱画像解析によるフィン効率

パネル全体の平均表面温度 t_p と根元温度 t_{pof} を求め，式(36)からフィン効率を算出することを試みる。図 14 に熱画像から算出したフィン効率を示す。フィン効率は冷暖房時ともに概ね約 0.79 となる。したがって，熱交換式において対象放射パネルは接触抵抗を $0.01\text{m}^2\text{K/W}$ ，フィン効率を 0.79 とすると，放射パネル熱量と表面温度を精度良く予測できると考えられる。

6. 放射パネル熱伝達性能に関する要因の影響評価

熱交換式において，配管の熱伝導率，フィン効率，送水条件が，放射パネル単位長さあたりの熱貫流率 K に及ぼす影響度を検討する。なお，放射パネルの環境温度は室内側，天井内側ともに，冷房時は 28°C ，暖房時は 20°C とし，放射パネル条件は，検討項目以外は表 6，及び表 7 の CASE1-5，CASE2-5 に示す条件で固定する。

図 15 に配管熱伝導率と熱貫流率の関係を示す。熱貫流率は，配管熱伝導率により $1 \sim 2\text{W/mK}$ となり，配管熱伝導率の影響を大きく受けるが，配管熱伝導率が 10W/mK 以上となると，ほぼ一定となる。

図 16 にフィン効率と熱貫流率の関係を示す。フィン効率が高くなるにつれて，熱貫流率はほぼ一定の割合で大きくなり，フィン効率 $0.5 \sim 1.0$ の範囲では，熱貫流率は約 $1.1 \sim 1.7\text{W/mK}$ で，フィン効率 0.1 の変化に対し，熱貫流率は約 10% 変化する。

図17に送水条件と熱貫流率の関係を示す。冷暖房時ともに送水往温度と環境温度の差が大きくなるにつれて熱貫流率が大きくなる。これはパネル表面温度と環境温度の差が大きくなり、対流熱伝達率が増加するためと考えられる。また送水流速が0.5m/s以下では熱貫流率が僅かに変化するが、0.5m/s以上ではほぼ一定となる。

7. 放射パネル直列接続時における熱量の検討

対象とした放射パネルを直列接続した場合における熱量を熱交換式を用いて算出する。図18に計算条件を示す。放射パネル7枚を直列に接続し、各放射パネルの環境温度を室内側、天井内側ともに、冷房時は28℃、暖房時は20℃として、送水条件を変化させて、各放射パネル熱量を算出する。

図19に送水往温度と環境温度の差が12Kの場合における各放射パネルの設置面積あたりの熱量を示す。各放射パネルの熱量は配管内の流速が小さくなるにつれて、下流側の放射パネルの熱量が少なくなる。これは、配管内の流速、すなわち送水流量が少なくなるにつれて、各放射パネル出入口の温度差が大きくなり、下流側の放射パネルへの送水温度と環境温度の差が小さくなるためである。これらの結果をもとに7枚直列接続時の設置面積あたり放射パネル平均熱量を算出すると、図20のような熱量特性が得られる。平均熱量は低流速時において流速の影響が大きい、流速が速くなるにつれて流速による影響は小さくなり、送水往温度による影響が大きくなることから分かる。

8. まとめ

スリットを有し、フィン付き配管独立構造である天井放射パネルの熱性能について、実験により冷暖房時における表面熱伝達率を求

め、放射パネルの熱交換式を導いて熱量特性を検討した。得られた知見は以下の通りである。

- 1) 実験より求めた放射パネル表面における放射熱伝達率は、冷房時が5.4W/m²K、暖房時が5.3W/m²K、室内側対流熱伝達率は、冷房時が $2.3|t_p - t_a|^{0.43}$ W/m²K、暖房時が $2.2|t_p - t_a|^{0.25}$ W/m²K、天井内側対流熱伝達率は、冷房時が $2.9|t_p - t_a|^{0.16}$ W/m²K、暖房時が $2.9|t_p - t_a|^{0.39}$ W/m²Kであった。
- 2) 天井放射パネルの熱量をフィン効率を用いて、送水条件と、パネル周囲の空気温度とPRTの影響を考慮した環境温度から評価できる熱交換式を導いた。
- 3) 熱交換式による放射パネル熱量と表面温度を実測値を比較した結果、対象とした放射パネルは、接触抵抗を0.01m²K/W、フィン効率を0.79とした場合に実測値と概ね一致した。
- 4) 熱交換式から配管熱伝導率、フィン効率、送水温度と流量について、放射パネル単位長さあたりの熱貫流率に及ぼす影響を解析した結果、配管の熱伝導率による影響が特に大きく、送水温度や流量による影響は比較的小さいことが分かった。
- 5) 直列接続した場合における放射パネルの熱量を熱交換式で試算し

図18 直列接続時の放射パネル熱量計算条件

(a) 冷房時 (b) 暖房時

図19 各放射パネル熱量

図15 配管熱伝導率と熱貫流率 図16 フィン効率と熱貫流率

図17 送水温度、流速と熱貫流率

図20 7枚直列接続時における放射パネル熱量

た結果、放射パネルの平均熱量は、流速が速くなるにつれて流速による影響が小さくなり、送水往温度による影響が大きくなることが分かった。

提案した熱交換式は、送水条件や直列接続枚数による放射パネルの熱量、および放射パネル表面温度による室内放射環境評価などの検討を行う上で利用でき、室内空気温度と周囲表面温度を区別し、天井放射空調システムの特徴である放射環境を考慮した設計手法を確立する上で有用であることを示唆した。配管とパネルを接続する型式の放射パネルは、パネルや配管の形状や材質、フィン効率と配管パネル間の接触抵抗が分かれば、熱交換式における放射パネル固有の熱貫流率が分かり、熱量特性が推定可能と考えられる。フィン効率と接触抵抗は、熱交換式による放射パネルの熱量と表面温度を実測値と比較することにより簡易的に求めることが可能である。

今後は熱交換式の簡易化を検討し、様々な熱負荷条件下で適用し、天井放射パネルの熱量特性とスリットがあることによる室内側への放熱量移動効果や、形成される室内温熱環境を解析する予定である。

参考文献

- 1) 瀬沼央，武田仁：長期実測による井戸水利用天井放射冷房システムの評価，日本建築学会環境系論文集，No.623，pp.31-38，2008.1
- 2) 瀬沼央，武田仁：長期実測による太陽熱利用天井放射暖房システムの評価，日本建築学会環境系論文集，No.627，pp.599-606，2008.5
- 3) 迫博司，高橋幹雄，塩谷正樹，桑原亮一：放射環境を考慮した自然エネルギー利用のオフィス空調システムの構築，日本建築学会技術報告集，No.34，pp.1041-1044，2010.10
- 4) 桑原亮一，塩谷正樹，大倉俊雄，大谷光幸：ゼロエネルギー・ビルを目指した建築設備技術に関する研究 その1 システム概要と放射空調システムの設計計画，日本建築学会大会学術講演梗概集，環境工学Ⅱ，pp.1309-1310，2010.9
- 5) 中村駿介，佐々木邦治，小野景子，三木光範，高益，鄭新源，宗方淳，川瀬貴晴：LED 知的照明システム・輻射空調システムを導入した「低炭素型実証オフィス」の運用実績 その1 施設概要および輻射空調システム性能評価，日本建築学会大会学術講演梗概集，環境工学Ⅱ，pp.1071-1072，2010.9

- 6) 石野久彌：輻射冷暖房方式の設計用熱負荷計算法の提案 第2報 定常計算法と計算適用例，日本建築学会大会学術講演梗概集，環境工学Ⅱ，pp.161-162，1997.9
- 7) ASHRAE：ASHRAE Handbook, HVAC Systems and Equipment(SI)，pp.6.2-6.6，2008
- 8) 瀬沼央，武田仁：輻射冷暖房パネルの熱特性実験と数値解析，日本建築学会計画系論文集，No.500，pp.15-21，1997.10
- 9) 糸井川高穂，羽山広文，絵内正道，山岸浩，山北聡，菊田弘輝：病室を対象とした天井放射冷房の性能評価に関する実験的研究－負荷の日変動の再現実験－，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.1153-1156，2006.9
- 10) 伊藤清，川島実，荒井義人，鈴木道哉，村上宏次，野部達夫：天井放射空調システムの熱的性能評価実験及び被験者による温熱環境評価実験，日本建築学会技術報告集，No.38，pp.243-248，2012.2
- 11) 川島実，郷正明，荒井義人，鈴木道哉，村上宏次，伊藤清，野部達夫：放射空調システムの検討 その4 対流促進型放射パネルを設けた天井放射空調システム構成と熱的性能評価実験内容，日本建築学会大会学術講演梗概集，環境工学Ⅱ，pp.1287-1288，2011.8
- 12) 伊藤清，郷正明，川島実，荒井義人，鈴木道哉，村上宏次，野部達夫：放射空調システムの検討 その5 対流促進型放射パネルを設けた天井放射空調システムの熱的性能評価実験結果，日本建築学会大会学術講演梗概集，環境工学Ⅱ，pp.1289-1290，2011.8
- 13) 今川裕二，中村仁秋，岸本卓也，木虎久隆，岡本茂，岡建雄：天井放射空調システムに関する研究 第1報 放射パネルの単体性能評価，日本建築学会大会学術講演梗概集，環境工学Ⅱ，pp.1281-1282，2011.8
- 14) 岸本卓也，木虎久隆，岡本茂，今川裕二，中村仁秋，岡建雄：天井放射空調システムに関する研究 第2報 実験室の概要と空調方式比較，日本建築学会大会学術講演梗概集，環境工学Ⅱ，pp.1283-1284，2011.8
- 15) 岡本茂，三浦光城，山口弘雅，尾本和夫，高岡昌史，岡建雄：天井放射冷暖房用パネルの性能予測計算方法と実験値の比較，日本建築学会環境系論文集，No.624，pp.221-227，2008.2
- 16) 三村渉，羽山広文，菊田弘輝，山岸浩：天井放射パネルの熱伝達特性の検討，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.1131-1134，2010.9
- 17) 空気調和・衛生工学会：空気調和衛生工学便覧第14版 1基礎編，pp.88-89，2010
- 18) 日本機械学会：伝熱工学資料改訂第4版，p.202，1986
- 19) 空気調和・衛生工学会：空気調和衛生工学便覧第14版 1基礎編，p.77，2010

(2012年7月10日原稿受理，2012年9月27日採用決定)