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

COMPARISON BETWEEN THE CALCULATION METHOD FOR ESTIMATING HEAT FLUXES OF RADIATION AND CONVECTION OF CEILING RADIANT PANELS AND EXPERIMENT DATA

岡本 茂*, 三浦光城**, 山口弘雅**, 尾本和夫***
高岡昌史****, 岡 建雄*****

Shigeru OKAMOTO, Mitsuki MIURA, Hiromasa YAMAGUCHI,
Kazuo OMOTO, Masafumi TAKAOKA and Tatsuo OKA

In this paper, we have developed a calculation method for estimating heat fluxes of radiation and convection of ceiling radiant panels, using piping density in panels and the temperature difference between the room and the supply water. And we have measured heat fluxes of panels in some cases in an environmental test room. By comparing the values estimated by the calculation method to the experiment data, the calculated values closely match the values obtained from experiments, which means that this calculation method is practical in estimating the radiant panel performance in the design phase.

Keywords: Ceiling radiant panels, Calculation method, Piping density in panels, Surface temperature measurements,
Radiant and convective heat flux

天井放射冷暖房パネル、計算方法、配管密度、表面温度実測、放射対流熱流

はじめに

放射冷暖房は、在来の室内空気を攪拌して室温を調整する空調方式に比して、温度、風速、PMVなどの室内分布が小さく¹⁾²⁾、快適性が高い空調方式である³⁾⁴⁾⁵⁾。また、在来空調方式よりも少ない熱量で同等の快適性が得られるため⁶⁾、放射パネルに供給する水温を在来空調方式よりも、冷房時に高く暖房時に低くすることが可能であり、熱源機器の成績係数の向上が期待される⁷⁾。このことから、放射冷暖房は快適性と省エネルギー性を達成できる可能性のある空調方式と言える。

このような優れた特徴があるにもかかわらず、国内での放射冷暖房の採用件数は在来空調方式に比べてまだ少ない。その理由の一つとして、放射パネルの放熱特性に関するデータが少ないことがあげられる。既往の研究では、パネルサイズ、配管仕様、断熱仕様などを限定してパネルの放熱特性を評価した事例⁸⁾¹⁰⁾はあるが、一般に普及している天井材や配管材を組み合わせたパネルに関する報告は少ない。

本研究では、配管・パネル接着型の天井放射冷暖房パネルについて、単位面積当たりの配管長さである配管密度と空気温度および通水温度の差を用いて性能予測計算方法を導出した。また、実際に市場に普及しているアルミパンチングメタル製天井パネル材¹¹⁾に一般

的な配管材であるポリエチレン管を接着させた天井放射冷暖房パネルを製作し、環境試験室内で冷房時、暖房時における放熱特性を実験により測定した。実験結果から、予測計算方法により算出したパネル性能と実験により得られたパネルの性能が比較的良好に一致したので、今後の放射冷暖房の設計資料として供することが可能と考え、各実験常数等とともに報告するものである。

1. 実験の概要

1.1 実験システム

実験は室内空気温度を一定に保つことが可能な環境試験室内で行い、周囲温度一定下におけるパネルの放熱特性を測定した。実験に用いた空調システムを図1および実験装置を写真1に示す。

1.2 計測方法

実験に使用した計測器を表1に、パネルへの計測器取り付け状況を写真2に示す。パネル表面には表面温度測定のための熱電対、熱流測定のための熱流センサーおよび放射センサーを設置した。対流成分は熱流センサーの測定値および放射センサーの測定値の差を求めることで算出した。また、パネル直下に熱電対を設置し床表面温度を測定した。

* (株)東畑建築事務所環境計画室 工修

** 関西電力(株)土木建築室 工修

*** (株)きんでん京都研究所 工修

**** (株)オクジュエ企画推進室

***** 宇都宮大学工学部建設学科 教授・工博

Environmental Planning Section, Tohata Architects & Engineers, Inc., M. Eng.
Civil Engineering and Building Section, Kansai Electric Power Co., Inc., M. Eng.

Kyoto Research & Development Centre, Kinden Corporation, M. Eng.

Project Promotion Section, Okuju Corporation

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Utsunomiya University, Dr. Eng.

図1 実験システム

1.3 放射パネル詳細

基礎実験は、(A)蛇行配管型パネルおよび(B)渦巻配管型パネルの2種類を製作して行った。各パネルの仕様を表2および図2に示す。

1.4 実験項目

実験は室温、流量を一定とし、送水温度をパラメータとして冷房4通り、暖房3通りの計7通りの測定を行った。パネル上部の断熱仕様は、天井内空間を断熱することをモデル化した空気層設置（空気層100mm+発泡スチロール50mm（写真3））およびグラスウール（（24K）25mm）をパネル上に直接載せる方法の2種類で行った。表3に実験条件と測定項目を示す。測定は各項目とも室温および送水温度が安定した後、1分間隔で60分間実施した。

写真1 実験装置全景

表1 計測機器

測定項目	測定機器	機器名
送水量	電磁流量計	キーエンス (FD-M10T)
放熱量	熱流計	英弘精機 (MF-190)
放射量	放射センサー	CAPTEC (RF)
パネル表面温度・往き還り水温・床表面温度	熱電対	JIS-T型
データ収録	データロガー	横河電機 (DA-100)

写真2 パネル下面計測機器設置状況

表2 実験用パネルの仕様

パネル	材質:アルミバンチングメタル 厚み:0.6mm、放熱面有効寸法:583mm×583mm 開口率:17.45%、床面からの高さ:1.0m
パイプ	材質:ポリエチレン管（金属強化型） 管径:内径10.1mm、外径14.1mm 有効配管長: (A)蛇行配管型パネル:4.10m (B)渦巻配管型パネル:7.88m

図2 実験用パネル詳細

写真3 空気層の断面（実験中は密閉した）

表3 実験条件と測定項目

	Case	室温	水温	流量	パネル上部 断熱仕様	測定項目			
		℃	℃	L/min		パネル 表面温度	サーモ カメラ	熱流量	放射量
冷房	Case-01	28.0	12.0	2.5	空気層	—	—	○	—
	Case-02		15.0		空気層	—	—	○	—
	Case-03		18.0		空気層	○	○	○	○
	Case-04		GW25		○	○	○	○	
暖房	Case-11	18.0	36.0	2.5	空気層	○	○	○	—
	Case-12		33.0		空気層	○	○	○	○
	Case-13		GW25		○	○	○	○	

※ 表中、水温は送水設定温度を表す。

2. 冷房実験結果

冷房時の実験は室温28℃、送水量2.5L/minにおける放熱特性について、送水温度3種類（12℃、15℃および18℃）および断熱仕様をパラメータとして4通りの実測を行った（Case-01～04）。

2.1 送水温度とパネル放熱量

Case-01～03を用いて、断熱仕様を空気層として送水温度ごとに放熱量の平均値を算出し、グラフ化したものを図3に示す。いずれのケースでも、送水温度が低いほど放熱量は大きく、配管密度の大きい渦巻配管が蛇行配管よりも放熱量が大きかった。

2.2 放射熱量と対流熱量

Case-03～04における放射熱量と対流熱量の平均値を図4に示す。いずれの配管形状でも放射成分が約60%、対流成分が約40%の比率であり、断熱仕様による差異はほとんど見られなかった。

2.3 パネル表面温度

Case-03～04 でパネル表面に設置した熱電対による表面温度の平均値を図5に、Case-03 のサーモカメラによる熱画像を図6に示す。

表面温度は配管密度の比較的大きい渦巻配管が蛇行配管より低くなる傾向が見られた。熱画像データからは、パネルが面状に発熱する傾向が確認され、渦巻配管では配管が密な部分で均一な温度分布状態が形成されていることが認められたが、パネル中央および隅角部に周囲よりも温度が高い部分が認められた。断熱仕様による差はほとんど見られなかった。

図3 各ケースの平均放熱量
(冷房時、設定室温:28°C、断熱仕様:空気層)

図4 Case-03～04の放熱量の内訳
(冷房時、設定室温:28°C、送水温度:18°C)

図5 Case-03～04のパネル表面温度測定値の平均
(冷房時、設定室温:28°C、送水温度:18°C)

図6 Case-03(設定室温:28°C、送水温度:18°C)の熱画像
(蛇行(左)、渦巻(右))

3. 暖房実験結果

暖房時の実験は室温 18°C、送水量 2.5L/min における放熱特性について、送水温度 2 種類 (36°C および 33°C) および断熱仕様をパラメ

ータとする実測を行った (Case-11～13)。

3.1 送水温度とパネル放熱量

Case-11～12 における放熱量の平均値を算出し、グラフ化したものを図7に示す。各ケースとも、送水温度が高いほど放熱量が大きく、同一ケースでは配管密度の大きい渦巻配管が蛇行配管よりも放熱量が大きくなる傾向が見られた。

3.2 放射熱量と対流熱量

Case-12～13 における放射熱量と対流熱量の平均値をグラフ化した図8に示す。全放熱量のうち放射成分の占める割合は、いずれの配管形状でも冷房時よりも大きく、蛇行配管で 74～80%、渦巻配管で 69～71%であった。また、冷房時と同様に断熱仕様による差異は見られなかった。

3.3 パネル表面温度

Case-11～13 において、パネル表面に設置した熱電対による表面温度測定結果を図9に、Case-12の熱画像を図10に示す。

表面温度は配管密度の比較的大きい渦巻配管が蛇行配管より高くなる傾向が見られた。渦巻配管ではパネル中央部および端部に表面温度が低い部分が形成されるため、最高温度と最低温度との差が大きくなる傾向が見られたが、蛇行配管では差が小さく、比較的均一な温度分布が形成されていることがわかった。断熱仕様による差は認められなかった。

図7 各ケースの平均放熱量
(暖房時、設定室温:18°C、断熱仕様:空気層)

図8 Case-12～13の放熱量の内訳
(暖房時、設置室温:18°C、送水温度:33°C)

図9 Case-11～13のパネル表面温度測定値の平均
(暖房時、設定室温:18°C、送水温度 Case-11:36°C、Case-12～13:33°C)

図 10 Case-12(設定室温:18℃、送水温度:33℃)の熱画像
(蛇行(左)、渦巻(右))

4. 熱伝達率の分析

実験データからパネルの熱伝達率を算定し、放射熱伝達率および対流熱伝達率ごとに分析を行う。

4.1 放射熱伝達率

放射熱伝達率の算定結果を図 11 に示す。放射熱伝達率は平均で冷房時 6.04W/m²K、暖房時 5.66W/m²K で、配管密度の大きい渦巻配管が蛇行配管を 5～7%程度上回った。糸井川¹²⁾らによる実測(冷房時)では 4.5～6.0W/m²K、瀬沼¹³⁾ら(冷房時)では 4.8W/m²K であり比較的近い値を示した。

図 11 各ケースにおける放射熱伝達率の算定結果

4.2 対流熱伝達率

対流熱伝達率の算定結果を図 12 に示す。本来、渦巻配管、蛇行配管とも対流熱伝達率は同じ値になるはずであるが、パネル表面温度の計測値が、配管との距離などにより左右されるため、対流熱伝達率は渦巻配管の方が蛇行配管よりも冷房時 10～13%、暖房時 21～40% 大きい値を示した。平均では冷房時 2.54W/m²K、暖房時 1.69W/m²K であり、糸井川¹²⁾らの実測(冷房時 3.0～8.0W/m²K)と比べてやや小さい値であった。

図 12 各ケースにおける対流熱伝達率の算定結果

4.3 総合熱伝達率

総合熱伝達率では、平均で冷房時 8.57W/m²K、暖房時 7.34W/m²K であった。蛇行配管は渦巻配管に比して冷房時 8%、暖房時 11～15% 小さい値を示した。

5. パネル性能予測計算方法

図 13 のようなパイプ・パネルが接合されたモデルにおいてパネルからの放熱量を数式化する。ここで、パネルの単位面積当たりの配管長さを配管密度 ρ として定義する。

- $q(x)$: x における微小空間 dx に流入する熱量 [W]
- $q(x+dx)$: 微小空間 dx から流出する熱量 [W]
- $q_{air1}(x)$: 微小空間 dx から下向きに周囲空気に流出する熱量 [W]
- $q_{air2}(x)$: 微小空間 dx から上向きに周囲空気に流出する熱量 [W]
- $\theta(x)$: x におけるパネル表面温度 [℃]
- θ_{air} : 周囲の空気温度 [℃]
- θ_s : パイプ内表面温度 [℃]
- θ_w : 水温 [℃]
- L : パネルの長さ [m]
- δ_{panel} : パネルの厚み [m]
- δ_{ins} : 断熱材の厚み [m]
- A : パネルの断面積 $= L \delta_{panel}$ [m²]
- λ_{panel} : パネルの熱伝導率 [W/mK]
- λ_{ins} : 断熱材の熱伝導率 [W/mK]
- α_o : 周囲空気の熱伝達率 [W/m²K]
- K_1 : パネル表面～パネル上面空気間の熱貫流率 $= 1 / (\delta_{ins} / \lambda_{ins} + 1 / \alpha_o)$ [W/m²K]
- v : 管内流速 [m/s]
- d_i : 管径 [m]
- l : パネルの放熱有効幅 $= 1 / \rho$ [m]
- ρ : 配管密度 [m/m²]

図 13 パイプ・パネル接合モデル

5.1 パネル温度分布の算定

図 13 において、配管中心から x の位置におけるパネル表面温度 $\theta(x)$ は表 4 式(6)～(8)で表現される。

表 4 パネル温度分布

$$\begin{aligned}
 q(x) &= q(x+dx) + q_{air1}(x) + q_{air2}(x) \quad \dots (1) \\
 \text{ここに、} \quad q(x) &= -\lambda_{panel} A \frac{d\theta}{dx} \quad \dots (2)^{14)} \\
 q(x+dx) &= -\lambda_{panel} A \left(\frac{d\theta}{dx} + \frac{d^2\theta}{dx^2} dx \right) \quad \dots (3)^{14)} \\
 q_{air1}(x) &= \alpha_o L dx (\theta(x) - \theta_{air}) \quad \dots (4) \\
 q_{air2}(x) &= K_1 L dx (\theta(x) - \theta_{air}) \quad \dots (5) \\
 \text{境界条件を } x=0 \text{ で } T=T_0, \quad x=l/2 \text{ で } \frac{dT}{dx} &= 0 \text{ とし、これを解いて、} \\
 T &= \left(\frac{e^{\beta x}}{1 + e^{\beta l/2}} + \frac{e^{-\beta x}}{1 + e^{-\beta l/2}} \right) T_0 = \frac{\cosh[\beta(x - l/2)]}{\cosh \beta l/2} T_0 \quad \dots (6)^{14)} \\
 \text{ここに、} \quad \beta &= \sqrt{\frac{\alpha_o + K_1}{\lambda_{panel} A}} L \quad \dots (7) \\
 T &= \theta(x) - \theta_{air} \quad \dots (8)
 \end{aligned}$$

図 14 Case-01～03 の実験値と計算値の比較
(冷房、断熱仕様:空気層、実験時の設定室温:28℃)

図 16 Case-04 実験値と計算値の比較
(冷房、断熱仕様:GW25、実験時の設定室温:28℃)

図 15 Case-11、12 の実験値と計算値の比較
(暖房、断熱仕様:空気層、実験時の設定室温:18℃)

図 17 Case-13 実験値と計算値の比較
(暖房、断熱仕様:GW25、実験時の設定室温:18℃)

表 8 実験値と計算値の比較

		冷房					暖房				
		空気層				GW-25	空気層				GW-25
		Case-01	Case-02	Case-03	全体	Case-04	Case-11	Case-12	全体	Case-13	
送水温度(℃)		12.0	15.0	18.0	-	18.0	36.0	33.0	-	33.0	
蛇行配管	平均放熱量	54.7	45.0	35.5	45.1	35.8	64.7	53.4	59.0	51.5	
	実験値平均(a)	54.8	44.6	33.1	44.1	32.5	60.3	50.8	55.6	48.6	
	計算値平均(b)	1.000	1.011	1.071	1.021	1.102	1.072	1.050	1.062	1.060	
	(a)/(b)	2.46	2.41	2.86	2.58	3.61	5.75	3.49	4.76	3.68	
渦巻配管	平均放熱量	74.9	59.9	43.4	59.4	43.7	90.7	73.9	82.3	70.2	
	実験値平均(a)	78.7	64.0	48.3	63.7	47.7	83.7	70.7	77.2	68.4	
	計算値平均(b)	0.951	0.935	0.899	0.933	0.916	1.084	1.045	1.067	1.027	
	(a)/(b)	5.16	4.99	4.86	5.00	4.33	8.41	4.51	6.74	4.10	

7. 結語

配管・パネル接着型放射冷暖房パネルについて、一般に市場に普及しているアルミパンチングメタル製パネルとポリエチレン管を組み合わせた放射パネルを製作し、冷房時および暖房時の実験を行った。また、放射パネルの性能予測計算方法を導出し、以下の知見を得た。

- 1) 冷房時、暖房時とも、パネルからの放熱量は配管密度が大きいくほど大きくなった。冷房時は送水温度が低いほど、暖房時は高いほど、パネル放熱量は増加した。断熱仕様による差異は見られなかった。
- 2) パネル放熱量のうち、放射成分の占める割合は、配管密度にかかわらず冷房時 60%、暖房時 70～80%であった。
- 3) パネル表面温度は配管密度が大きいくほど、冷房時は低く、暖房時は高くなる傾向が見られた。配管密度の大きい渦巻配管では、配管が密な部分は均一な温度分布が形成されたが、配管が疎となる部分との温度差が大きかった。特に、暖房時は配管密度の小さい蛇行配管の方が、パネル表面の温度差が少なく比較的均

一な温度分布になっていた。

- 4) 熱伝達率の平均値は、総合熱伝達率で冷房時 8.57W/m²K、暖房時 7.34W/m²K、放射熱伝達率で冷房時 6.04W/m²K、暖房時 5.66W/m²K、対流熱伝達率で冷房時 2.54W/m²K、暖房時 1.69W/m²K であった。
- 5) 配管・パネル接着型放射パネルについて、配管密度 ρ 、周囲空気温度 θ_{air} と平均水温 θ_w の差によってパネル放熱量を次式のようにな数式表現した。これが放射パネルの性能予測計算式である。

$$q = \frac{C_1 C_2 C_3}{C_1 C_2 + C_2 C_3 + C_3 C_1} (\theta_w - \theta_{air}) \quad \cdots (19) \text{(再掲)}$$

(C_1 、 C_2 、 C_3 は表5～6参照)

- 6) 実験値と性能予測計算式による値を比較した結果、比較的良好な一致が見られた。性能予測計算方法は周囲空気温度 θ_{air} と平均水温 θ_w の差が冷房時に 10℃程度、暖房時に 15℃程度の実用的範囲であれば、アルミパンチングメタル製パネルとポリエチレン管を用いた配管・パネル接着型放射冷暖房パネルの能力を十分予測し得るものと判断された。
- 7) 本研究で提案した配管パネル接着型放射パネルの性能予測式は伝熱工学の観点から理論的に導いたものであり、本実験で得られたアルミパンチングメタル製パネルとポリエチレン管を用いた放射パネルの性能実験結果と比較して、実用に耐え得る精度と判断したが、他のパネルについては、本研究では比較を行っておらず、汎用性を実証したとは言い難い。汎用性については、今後、実験を重ねて検討していく予定である。

謝辞

本研究を行うにあたり、技術協力をいただいた(株)きんでん京都研究所江川正人氏、水野慶蔵氏および(株)オクジュー伊藤育次氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 田辺新一、泉水紀子、北川晃一、早野ひろ子：天井放射の熱的快適性に与える影響、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp.993-996, 1994.1
- 2) 瀧ヶ崎薫、義江龍一郎、河原博之、高橋賢治：天井面放射冷暖房システムに関する研究（その1）冷暖房時における温熱環境実測結果、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp.477-480, 2005.8
- 3) Naoko Matsuki, Yukio NAKANO, Toshiyuki MIYANAGA, Noriyoshi YOKOO, Tatsuo OKA : Performance of radiant cooling system integrated with ice storage, Energy and Buildings, Vol.30, pp.177-183, 1999
- 4) 工藤奈津美、李周妍、磯田憲生：天井冷房の快適性評価に関する研究、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp.1341-1344, 2001.9
- 5) 葉袋寿紹、中村聡：輻射暖房時の室内温熱環境と快適性に関する実験的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、D, pp.897-898, 1989.10
- 6) 武田仁、瀬沼央、久保田康彦：天井輻射冷暖房システムに関する研究 同一建物仕様における天井輻射冷暖房と在来冷暖房の比較、日本建築学会技術報告集、第11号、pp.145-150, 2000.12
- 7) ダイキン工業(株)・(株)ダイキンアプライドシステムズ：ダイキン技術資料・セントラル空調編、2005
- 8) 鬼頭則夫、桑原亮一、塩谷正樹：放射空調システムの設計法に関する研究（第1報）天井放射パネルの性能試験（冷房時）、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp.469-472, 2005.8
- 9) 塩谷正樹、桑原亮一、鬼頭則夫：放射空調システムの設計法に関する研究（第2報）実験値と数値解析の比較、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp.473-476, 2005.8
- 10) 塩谷正樹、桑原亮一、鬼頭則夫、小倉利之：放射空調システムの設計法に関する研究（第3報）暖房時の天井放射パネル性能試験と数値解析、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp.1933-1936, 2006.9
- 11) (株)オクジュー：技術資料、2003
- 12) 糸井川高徳、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
- 13) 瀬沼央、武田仁、世良伸彦：天井輻射冷房システムの開発その2パネル性能の理論解析、日本建築学会大会学術講演梗概集、D, pp.1449-1450, 1992.8
- 14) J.R.ホールマン：伝熱工学・上、丸善、pp.34-35, 1982
- 15) 空気調和・衛生工学会編 空気調和・衛生工学便覧第12版1 丸善(1995)、p.151
- 16) 積水化学工業(株)：技術資料、2005
- 17) J.R.ホールマン：伝熱工学・上、丸善、p.44, 1982
- 18) 住友スリーエム(株)：技術資料、2006

(2007年7月9日原稿受理、2007年10月17日採用決定)