

水冷媒放射空調システム用パネルの性能評価手法に関する研究  
 (その4) CFD解析を用いた各種放射パネル性能の評価  
**Evaluation of Radiant Ceiling Panel using Water Medium**  
**(Part 4) Performance of Various Panel in CFD Analysis**

○竹内 慎 (大阪大学)                      山中 俊夫 (大阪大学)  
 甲谷 寿史 (大阪大学)                      松崎 眞子 (大阪大学)  
 氏原 正志 (株式会社サクラ)  
 Shin TAKEUCHI\*<sup>1</sup> Toshio YAMANAKA\*<sup>1</sup> Hisashi KOTANI\*<sup>1</sup>  
 Mako MATSUZAKI\*<sup>1</sup> Masashi UJIHARA\*<sup>2</sup>  
 \*<sup>1</sup> Osaka University \*<sup>2</sup> SASAKURA ENGINEERING CO.,LTD.

While radiation cooling and heating are spreading widely, radiant panel manufacturers have developed various panels. However, the detailed performance measurements have not been conducted sufficiently and the performance evaluation method has not been established yet. In this study, the purpose is to measure the performance of panels with various shapes, which are used in ceiling radiation air conditioning system. In this paper, the results of thermal performance Measurement of three panels in environmental test chamber and reproduction of the experiments in CFD analysis are reported.

1. はじめに

近年、インテリアゾーンの快適性が近年高く求められている。そこで、注目されているのが、放射空調である。放射空調の普及が進む中で、放射パネルメーカーは、各々様々なパネルを開発してきた。石井ら<sup>[1]</sup>はヨーロッパで放射パネルの評価手法として規定されているEN14240<sup>[2]</sup>を参考にして、環境試験室実験を行い、表面がフラットな天井放射パネルの熱性能について検証した。しかし、パネル形状によって放熱性能が異なることも報告されており、放射パネル敷設空間において、様々な室内環境が予想される。これらの経緯から本研究では、様々な室内環境下にて、放射パネル形状が放熱特性に与える影響について検討した。本報では、前報での室内温度の検討に加え、放熱特性に焦点を当て、各パネル使用時のパネル放熱量を放射・対流に分離し、その特性について見た。また、CFD解析によって、室内環境のより詳細な再現、およびパネル性能の把握をした。以上の結果を報告する。

2. 実験概要

実験概要については、前報で述べたため割愛する。本研究で用いた波型パネル、フラット型パネル、スリット付きフラット型パネルをFig.1～3に示す。以下、波型、フラット型、スリット型と省略する。

2.1 熱伝達率の算出

各パネル、各実験条件ごとに放射熱伝達率、対流熱伝達率、総合熱伝達率を算出する。Fig.4に熱流セ

ンサーを用いた放射・対流の切り分け概念図を示す。放射パネル面に放射率の異なる2つの熱流センサーを貼付し、測定を行うことで対流と放射を切り分けることが可能となる。本実験では、放射率0.86の熱流センサーと放射率0.05のアルミ蒸着熱流センサーを用いた。また、本研究で用いた3つのパネルの放射率はすべて0.98である。

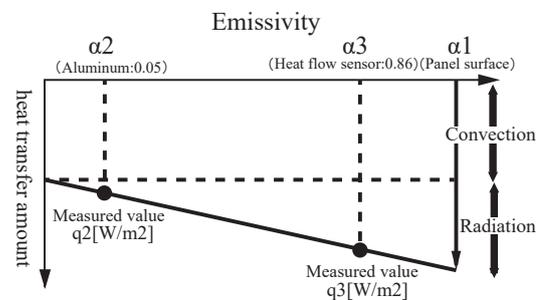


Fig.4 Concept of Separation to Radiation and Convection

Fig.4にて直線の傾きと直線の切片を求めることができる。それらを用いて、以下を算出する。

単位放射熱伝達量 [W/ m<sup>2</sup>] : 直線の傾き × α1

単位対流熱伝達量 [W/ m<sup>2</sup>] : 直線の切片

上の値をパネルと室内MRT、または空気温度との温度差で除したものがパネルの熱伝達率となる。Table1～3に各パネル、各条件ごとの放射熱伝達率、対流熱伝達率、総合熱伝達率を示す。また、それらの値を全条件について平均した値をTable4に示す。

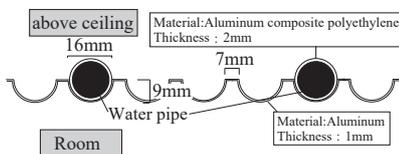


Fig.1 Detail of Corrugated Panel

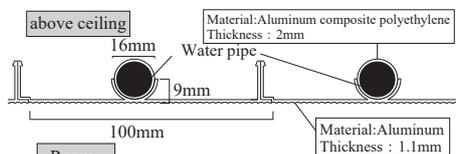


Fig.2 Detail of Flat Panel

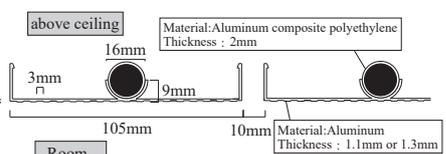


Fig.3 Detail of Flat with Slit Panel

Table1  $\alpha_r$  of Each Panel

Radiative heat transfer coefficient $\alpha_r$			
	Corrugated	Flat	Flat with Slit
Standard	4.0	5.3	4.0
Center load	3.6	4.8	3.6
Chilled wall	3.9	5.3	3.9
Heated wall	3.8	5.4	3.8
Low load	3.9	5.0	3.9
Low convection	4.0	5.3	4.0
High convection	3.4	5.4	3.4

Table2  $\alpha_c$  of Each Panel

Convective heat transfer coefficient $\alpha_c$			
	Corrugated	Flat	Flat with Slit
Standard	5.1	3.6	4.2
Center load	6.7	4.3	4.3
Chilled wall	5.0	4.4	4.2
Heated wall	5.4	4.0	4.2
Low load	4.6	3.8	4.0
Low convection	6.4	3.9	4.6
High convection	10.0	7.0	7.6

Table3  $\alpha$  of Each Panel

Total heat transfer coefficient $\alpha$			
	Corrugated	Flat	Flat with Slit
Standard	8.8	8.9	8.2
Center load	10.4	9.1	7.9
Chilled wall	8.6	9.7	8.1
Heated wall	9.2	9.4	8.0
Low load	8.5	8.8	7.9
Low convection	9.5	9.2	8.5
High convection	14.5	12.4	11.0

Table1を見ると、各パネルについて実験条件による差異は小さいことが確認できる。パネルごとに見ると、フラット型が他のパネルに比べて、値が大きいことが読み取れ、放射成分が大きいことが推測される。

Table2を見ると、各パネルについて実験条件による差異は、対流大条件のみ他より非常に大きくなっていることが分かる。また、波型については、負荷中心条件と対流小条件も大きくなっており、対流現象を促進することで、パネルの対流熱伝達率が增大することが推測される。パネルごとに見ると、波型が全体的に値が大きく、対流成分が大きいことが推測される。

Table3を見ると、各パネルに実験条件による差異は、やはり対流大条件で他より非常に大きくなっていることが分かる。パネルごとに見ると、どのパネルも同様の値を示しており、特筆すべき差異は見られない。

Table4を見ると、上で述べたようにフラット型の放射熱伝達率が大きいことが分かる。そして、波型の対流熱伝達率が大きいことが分かる。スリット型は総合熱伝達率が他より小さい。これは室内の温度が他のパネル使用時より低いと推測される。

## 2.2 熱伝達量の算出

上で算出した熱伝達率にパネル面積とパネルと室内MRT、または空気温度との温度差を掛けたものが、パネル熱伝達量となる。また、パネルの天井裏側面にも熱流センサーを貼付しており、その測定値から天井裏側熱伝達量も算出した。以上の放射熱伝達量、対流熱伝達量、天井裏側熱伝達量を合計したものがパネル放熱量である。

各パネルの熱伝達量を各実験条件ごとにまとめた図を Fig.5 に示す。Fig.5において、Coは波型、Flはフラット型、Slはスリット型を示している。

Fig.5において、パネルごとに傾向を見ると、フラット型の放射熱伝達分の比率が大きいことが分かる。また、波型とスリット型の対流熱伝達分の比率が大きいことが言える。さらに、スリット型は天井裏熱伝達分の比率が大きいことが分かる。条件ごとに傾向を見ると、多くの実験条件で波型の放熱量が一番大きい。逆に、多くの実験条件で、フラット型の放熱量が一番小さい。しかし、全体的な傾向として、各パネルごとに放熱量に大きな差異はないことが確認できる。

Table4 Average Heat Transfer Coefficient of Each Panel

Average heat transfer of all condition			
	Corrugated	Flat	Flat with Slit
Radiative heat transfer coefficient	3.8	5.2	3.8
Convective heat transfer coefficient	6.2	4.4	4.7
Total heat transfer coefficient	9.9	9.6	8.5

## Detail of panel heat transfer amount [W]

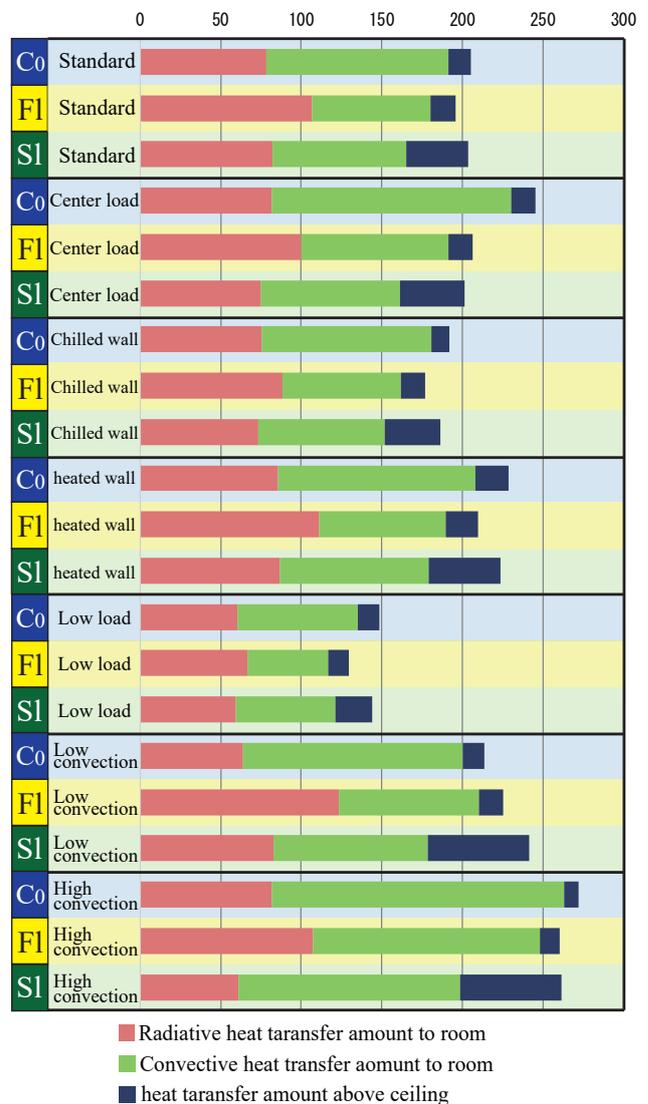


Fig.5 Detail of Panel Heat Transfer Amount

パネルごとに放熱量に大きな差異はないにも関わらず、試験室内の空気温度がパネルごとに異なることから、パネル放熱量の放射と対流、また天井裏への放熱分、それらの比率によって室内がどれだけ冷やされるかが変化することが推測される。

### 3 CFD 解析の概要

#### 3.1 解析方法

本解析は、前報、本報で述べた実験を再現することを目的としている。よって解析空間は試験室を精密に再現した。パネル面については、実験で配管によって冷やされている部分を温度規定部分として再現した。解析空間平面図、AA' 断面図、フラット型パネル再現図、スリット型パネル再現図を Fig.6 ~ 9 に示す。尚、波型については詳細に再現しようとする、メッシュ数が膨大になり、計算が困難だったため、CFD 解析による波型の再現は行っていない。

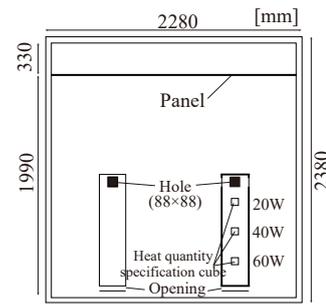
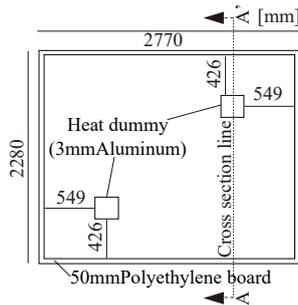


Fig.6 Plan in Analysis

Fig.7 A-A' Cross Section in Analysis

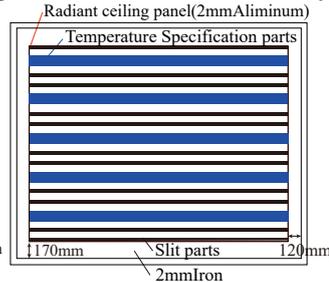
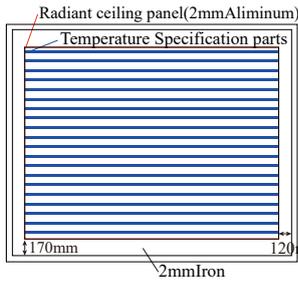


Fig.8 Flat Panel in Analysis

Fig.9 Flat with Slit Panel in Analysis

本研究における CFD 解析は汎用熱流対解析ソフト PHOENICS ver.4.3 を使用した。Table5 に解析条件、Table6 に実験を再現するための境界条件を示す。

Table5 Analysis Condition

Analysis condition		
CFD code	PHOENICS ver.4.3	
Turbulent model	Standard k-ε Model	
Algorithm	SIMPLE	
Discretization scheme	QUICK	
Wall	Enhanced Wall Treatment	
Density	Boussinesq Approximation	
Radiation model	Immersol	
Mesh		
Case name	X × Y × Z	Total mesh amount
Standard	95×115×78	852,150
Center load	98×121×78	924,924
Chilled wall	95×115×78	852,150
heated wall	95×115×78	852,150
Low load	95×115×78	852,150
Convection	129×115×86	1,275,810

Table6 Boundary Condition in Analysis

Boundary condition				
Case name	Panel set temperature	Boundary temperature	Heat load	Layout
Standard	20°C	25°C	240W	
Center load	20°C			
Chilled wall	20°C	23°C	160W	
heated wall	20°C	27°C		
Low load	19°C	23°C		
Convection	20°C	25°C	240W	

Fig.8 Flat Panel in Analysis

Fig.9 Flat with Slit Panel in Analysis

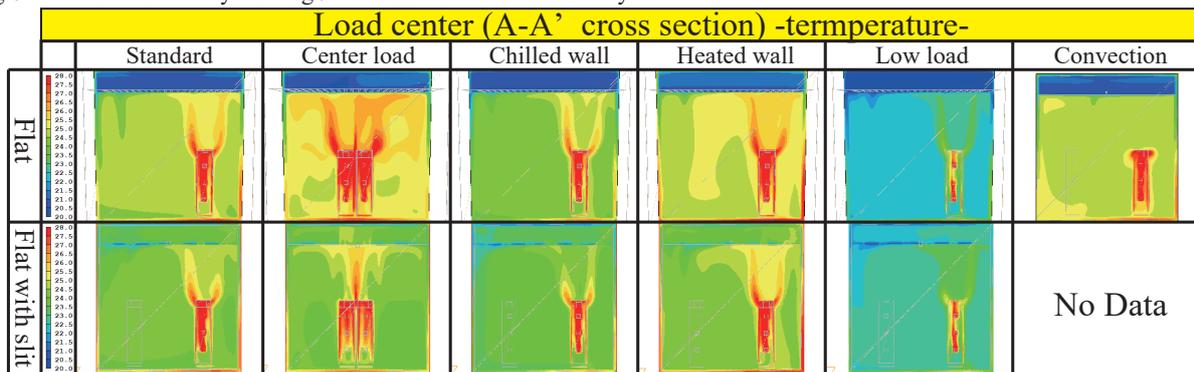


Fig.10 Temperature Contour of Each Panel

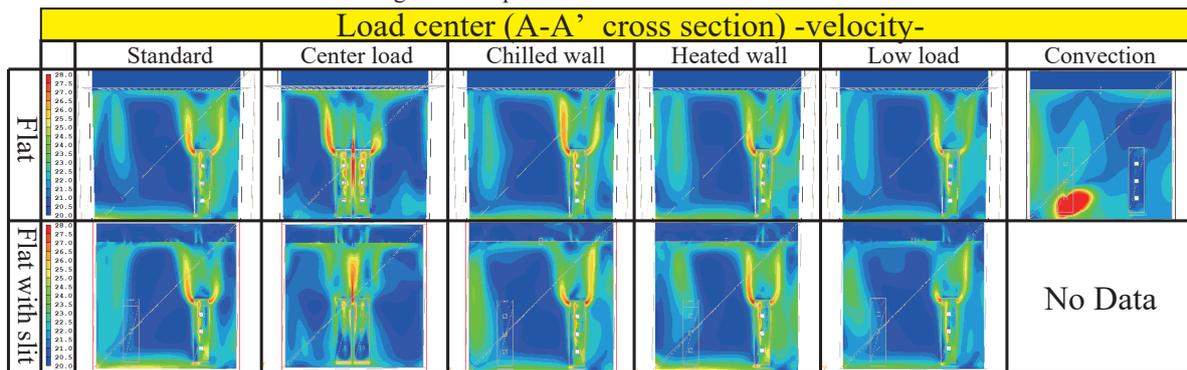


Fig.11 Velocity Contour of Each Panel

### 3.2 解析結果

#### (1) 温度・風速

Fig.10、Fig.11 に熱負荷体中心断面における温度コンター図と風速コンター図を示す。Fig.10を見ると、フラット型では天井裏が非常に冷えていることが分かる。それに対して、スリット型では、天井裏空気温度は居室側空気温度とあまり差異はないことが分かる。しかし、フラット型に比べスリット型は居室側空気温度が低いことが分かり、フラット型で天井裏で冷やされていた空気がスリット型ではスリットにより居室側に流れ込んでいることが推測される。Fig.11を見ると居室空間の気流の傾向としては両パネルとも大きな差異はないことが確認できるが、スリット型について、壁際の風速が大きいことが分かる。また天井裏空間については、フラット型は全く気流が起きていないが、スリット型については居室空間からの空気の流入が見て取れる。

Fig.12、Fig.13 にフラット型、スリット型使用時の基準条件実験の測定温度と CFD 解析結果の温度に比較図を示す。Fig.12を見ると、居室側空気温度と壁面温度について、実験値が解析より最大で1°C程度高いことが分かる。天井裏空気温度、床面と上スラブ表面温度については、ほぼ同値を示している。

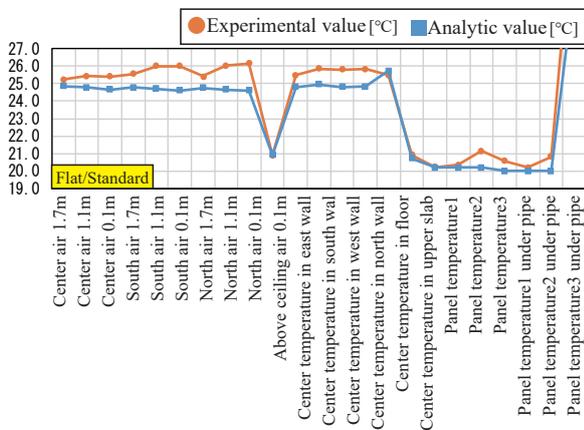


Fig.12 Comparison between Experiment and Analysis in Flat

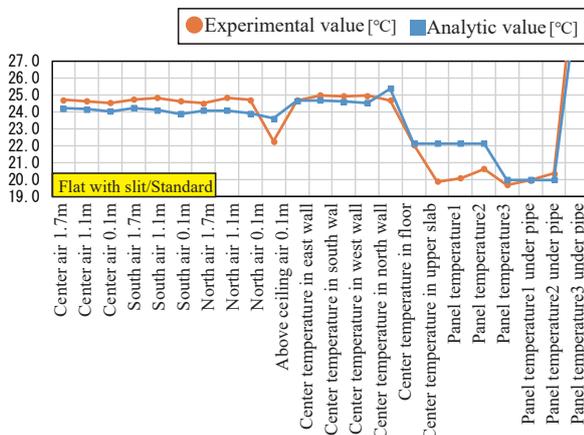


Fig.13 Comparison between Experiment and Analysis in Flat with Slit

Table7 Comparison between Flat and Flat with Slit in Experiment and Analysis

Heat transfer amount [W]	Flat	Flat with slit	Difference in analysis	Difference in experiment
	Analysis (Experiment)	Analysis (Experiment)		
Standard	264(191)	258(187)	6	4
Center load	265(197)	265(181)	0	16
Chilled wall	229(174)	225(172)	4	2
Heated wall	299(203)	292(215)	7	12
Low load	194(124)	165(117)	29	7
Convection	264(221)	No Data(232)	No Data	11

る。パネル表面温度については、実験値の方が高い。Fig.13を見ると、フラット型と同様に居室側空気温度、壁面温度は実験値の方が高いが、その差異はスリット型の方が小さい。しかし、天井裏空気温度については1°Cほど解析値が高く、解析では居室空間と天井裏空間の相互換気が積極的に行われたことが推測される。パネル面温度に関しては、配管直下のパネル表面温度は実験値と解析値がほぼ同値だが、配管直下でない部分には最大2°Cの差異が見られる。

#### (2) 放熱量

Table7 にフラット型とスリット型の解析値の放熱量の比較、および実験値の放熱量の比較を示す。Table7を見ると、実験におけるパネル放熱量より解析における放熱量が大幅に大きいことが分かる。Fig.12、Fig.13において、解析における居室側空気温度が低かったのはこのためだと考えられる。しかし、フラット型とスリット型の解析による放熱量の比較を見ると、負荷小を除き、差異が小さいことが分かる。実験における放熱量の比較でも、同様に差異が小さい。つまり、実験と解析の結果について、放熱量の大きさは異なるが、フラット型とスリット型の放熱量に差異があまりないことは一致し、実験結果の正しさを解析によって証明できたことが言える。

#### 4. おわりに

本報では、3つの異なる形状を持つ水冷媒式放射空調システム用パネルについて、放熱特性に焦点を当て、各パネル使用時のパネル放熱量を放射・対流に分離し、その特性について見た。形状によってパネル放熱量は変化しないが、対流成分・放射成分・天井裏側放熱成分の比率が変化し、それにより室の状況が異なることが分かった。また、CFD解析によって、室内環境のより詳細な再現、およびパネル性能の把握をした。パネルの表現方法に改善の余地があることが分かったが、パネル放熱量について、実験と同様の結果を得た。

#### 【謝辞】

本研究は(株)ササクラとの共同研究によるものであり、実験にご協力いただいた方々に心より感謝申し上げます。

#### 【参考文献】

- 1) 石井義章, 加藤駿, 宮下陽, 山北聡, 岩田博樹, 田辺新一: 環境試験室実験における天井放射パネル熱性能の把握, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, 第3巻, pp.57-60, 2015.9
- 2) EN14240.2004.Ventilation for building-Chilled ceiling-Testing and rating, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium