

# 天井放射空調システムの新たな解析手法の開発

－「S-ラジシステム・ライト」を対象として－

三浦 靖弘

(技術研究所)

## Development of New Simulation Methods for Shimizu Ceiling Radiant Cooling System Light

Nobuhiro Miura

本論文では、清水建設オリジナルの天井放射空調システムの一つである「S-ラジシステム ライト」を対象とした新しい解析手法を解説する。この放射空調システムは、二つの重要な要素を有しており、一つは天井に敷設された有孔パネル、一つは天井裏内に設置されたパッシブ型チルドビームである。有孔天井パネルは、対流・放射伝熱すると共に天井裏内の冷気が孔を通して移流することで空調を行う役割を持つ。また、パッシブ型のチルドビームの冷却能力は、周囲の環境により変化する。今回開発した新しい解析手法は、これらの現象をモデル化することを可能とした。この手法の解析精度を、実験室内および実建物における実測値と比較し検証した。

This paper describes new simulation methods for one of Shimizu's ceiling radiant cooling systems, S- Radi System - Light. This radiant system has two important components, perforated panels installed on ceiling and passive chilled beams installed in the ceiling plenum. The perforated panels are for radiant heat transfer and advective heat transfer of the chilled air that flows through them. The cooling capacity of the passive chilled beams is adjusted according to environmental conditions. The newly developed simulation methods are able to model these physical phenomena. Their accuracy is verified by investigating the discrepancy between simulated values and those measured in the laboratory and in a real building.

### 1. はじめに

CFD(Computational Fluid Dynamics)を用いて天井内冷却式放射空調「S-ラジシステム ライト」の温熱環境を精度良く解析するには、有孔天井パネル(PCP: Perforated Ceiling Panel)とパッシブ型チルドビーム(PCB: Passive Chilled Beam) という 2 つの重要な構成要素を如何に精度良くモデル化できるかが鍵となる。図-1 に「S-ラジシステム ライト」に関する熱移動現象の概要を示す。

有孔天井パネルPCPは、パネル表面からの対流・放射伝熱および内部での熱伝導だけでなく、パネル表裏間の空気の移流による熱移動も同時に考慮しなければならない。しかしながら、使用しているCFDソフトには、これらの4成分を同時に考慮できるモデルが存在しない。そこで、パネル表裏間の空気の移流による熱移動量は外部モジュールで解析し、パネル表面の対流・放射伝熱および内部の熱伝導はCFDソフトの機能で解析することにした。

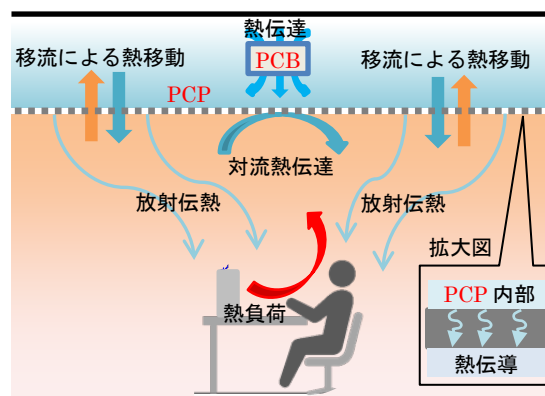


図-1 「S-ラジシステム ライト」に関する熱移動現象の概要

第2章で、移流による熱移動量予測手法の概要を解説し、予測するにあたり必要となるPCPの圧力損失特性を、CFDを用いて算出し精度の検証を行ったので合わせて報告する。

次に、パッシブ型チルドビーム PCB 内の流れは浮力という弱い力のみで駆動されるため、PCB のフィンによる圧力損失特性を正しく把握できなければ、精度の良い解析は望めない。このような圧力損失特性は実験により算出することが一般的であるが、低風速領域の小さな圧力損失の場合、実験の精度を確保することは難しい。そこで第3章で、CFD を用いた PCB の圧力損失特性の算出手法を解説し、求めた特性を適用した CFD 解析と断熱 BOX 内での PCB 単体実験とを比較することで精度の検証を行った。さらに、第4章では、実験室オフィスを対象に、PCP と PCB 両者を含めた解析を実施し、実験結果と比較検証したので報告する。

さらに、PCB は冷却能力が、その置かれた周囲環境により変化することが特徴である。そこで第5章では、PCB の新しい冷却能力の予測手法について検討し、予測式を求めたので報告する。

第6章では、第2章から第5章までのすべての手法を実オフィスに適用し、実測結果と比較検証したので報告する。

## 2. 有孔天井パネル PCP 表裏間移流量予測手法

### 2.1 PCP 表裏間移流量予測手法の概要

PCP 表裏間の空気の移流は、駆動力が浮力による圧力のみで、その圧力と PCP の圧力損失とがバランスするという考え方で算出する。式(1)にそのバランス式を示す。左辺が PCP の圧力損失  $\Delta p$ 、右辺が浮力である。圧力損失  $\Delta p$  は、風速の2乗に比例する慣性項と風速に比例する粘性項の和として表現できる。比例定数  $a, b$  は、2.2 節で解説する手法を用いて決定する。右辺の浮力にはブジネスク近似を適用する。図-2 に式(1)の概念図を示す。

$$(\Delta p = av_i^2 + bv_i) = \{\rho g \beta (T_0 - T_{ref})\} V_0 / A_i + \{\rho g \beta (T_1 - T_{ref})\} V_1 / A_i \quad (1)$$

ここで、

- $a$  : 比例定数 [kg/m<sup>3</sup>]、 $b$  : 比例定数 [kg/m<sup>2</sup>s]
- $v_i$  : 風速 [m/s]、 $\rho$  : 空気の密度=一定 [kg/m<sup>3</sup>]
- $g$  : 重力加速度 [m/s<sup>2</sup>]、 $\beta$  : 体積膨張率 [1/K]
- $T_0$  : パネル上温度 [K]、 $T_1$  : パネル下温度 [K]
- $T_{ref}$  : 参照温度 [K]、 $A_i$  : 面積 [m<sup>2</sup>]
- $V_0$  : パネル上セル体積 [m<sup>3</sup>]
- $V_1$  : パネル下セル体積 [m<sup>3</sup>]
- $i$  : セル No.

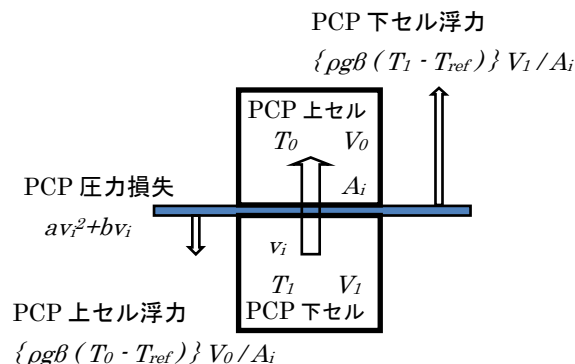


図-2 概念図

PCP に隣接する各計算セルに対して、式(1)を PCP 通過風速  $v_i$  に対する 2 次方程式と見なして解くことにより、各セルにおける風速  $v_i$  が算出でき、移流量は  $v_i A_i$  として決定される。ところが、式(1)中には未知数の参照温度  $T_{ref}$  が存在し、それが決まらなければ移流量は確定できない。そこで、参照温度  $T_{ref}$  を決めるために、室内側から天井裏への移流量と天井裏から室内側への移流量は同じとなるという質量保存則(2)式を用いる。

$$\sum_i \rho v_i A_i = 0 \quad (2)$$

式(2)を拘束条件として参照温度  $T_{ref}$  を調整する収束計算を行うことで、参照温度  $T_{ref}$  を決定する。これにより、PCP 隣接各セルでの移流量  $v_i A_i$  も確定する。以上を外部モジュールで実行するが、さらに CFD 内の各セルの質量保存の式、運動方程式、エネルギー方程式に対して与える、質量ソース、運動量ソース、エネルギーソースを算出し CFD ソフトに受け渡すことで、CFD 解析内での PCP 表裏間の移流による熱移動を模擬する。それらのソースを式(3)、(4)、(5)に示す。

$$Mass_{source} = \rho v_i A_i \quad (3)$$

$$Momentum_{source} = \rho v_i^2 A_i \quad (4)$$

$$Energy_{source} = \rho v_i A_i C_p T_i \quad (5)$$

ここで、

$$C_p : \text{定圧比熱 [J/kg-K]}$$

## 2.2 PCP 圧力損失特性の算出

PCPの圧力損失特性は、実物と同一の孔径、孔配置を再現したPCPモデルを作成し、その上下流に各ダクトを設置して、CFD解析により算出する。図-3にPCPの概要を示す。本報でのPCPモデルは厚みを無視している。

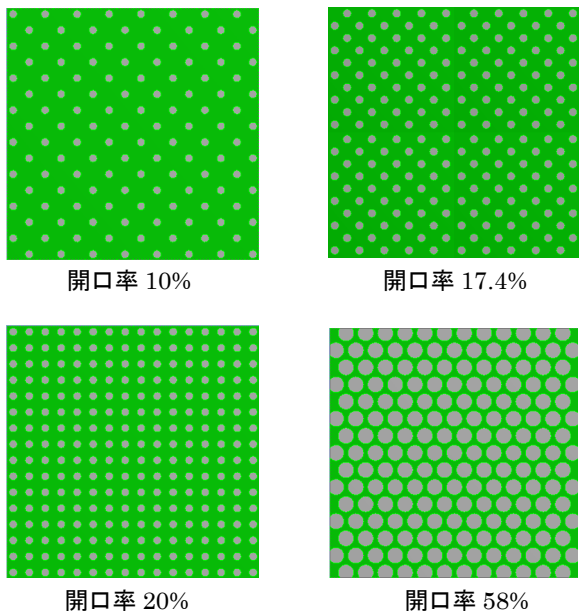


図-3 PCPモデルの概要

解析には標準k-εモデルを使用し、風速を変化させたときの圧力損失をグラフ化することによりPCPの圧力損失特性を把握する。図-4に開口率毎の解析結果を示す。図中の2次の多項式による近似式が式(1)の左辺となる。

算出した圧力損失特性を見ると、2次の慣性項が主要な特性であり、1次の粘性項はほとんど無視できることが分かる。このため算出した圧力損失特性の妥当性を検証するために、2次の慣性項に含まれる抵抗係数C2(比例定数  $a = \rho C2 / 2$ )を過去の実験値とと比較検証した。図-5に比較結果を示す。解析結果から求めたC2が青マーカーで示し、それらを累乗近似した近似曲線が実線、赤マーカーが過去の実験値である。これを見ると、実験値は近似曲線上に良く乗っており、CFDによる圧力損失特性の近似式の妥当性が確認できた。これらの値を使用することで、2.1節で示した手法から、PCP表裏間の移流による熱移動が精度良く予測できると考えられる。第4章で実験室オフィスに適用した結果、第6章で実オフィスに適用した結果を示し、精度検証を行っている。

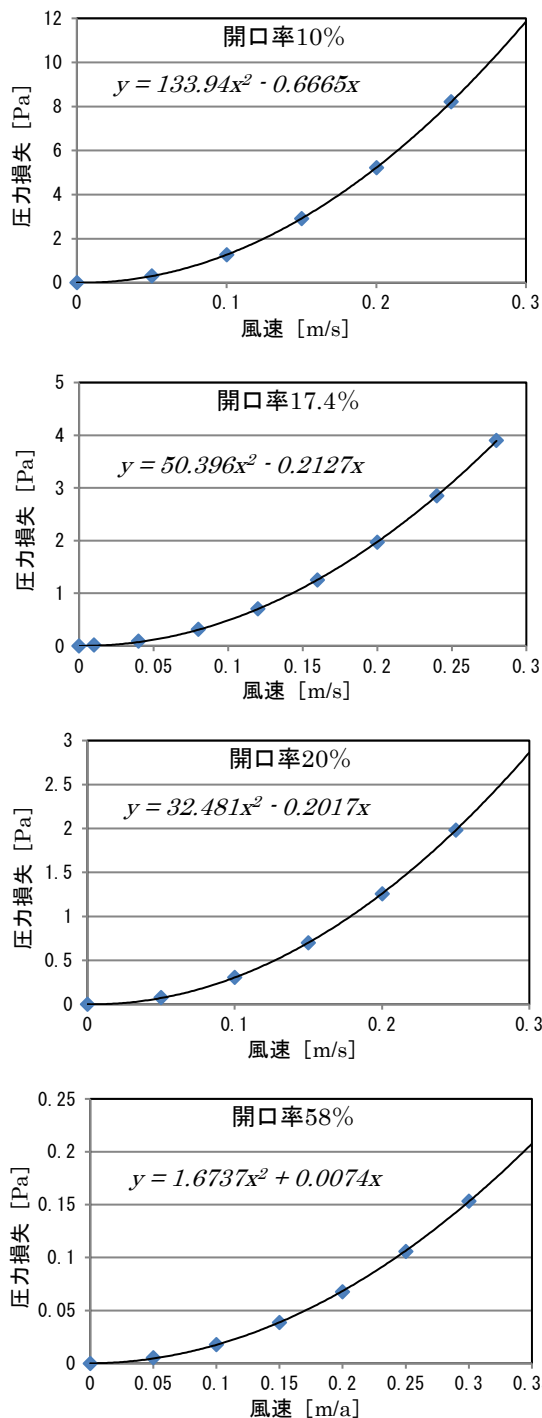


図-4 開口率毎のPCP圧力損失特性

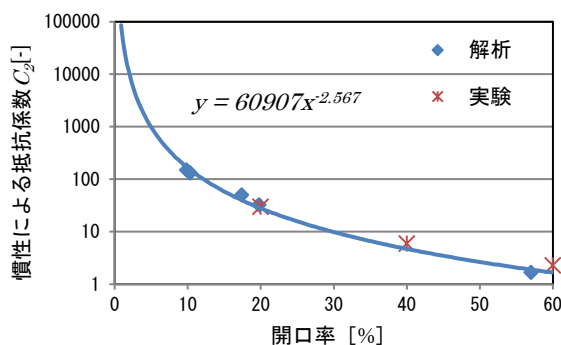


図-5 慣性による抵抗係数C2の比較

### 3. パッシブ型チルドビーム PCB の圧力損失特性

#### 3.1 PCB 圧力損失特性解析モデルの概要

図-6 に圧力損失特性解析モデルの概要を示す。PCB は実物と同一の外形と間隔を持ったフィンを再現し、フィンの厚み、冷水配管は無視した。PCB の上下流に、静圧が十分回復する程度に角ダクトを設け解析を行った。また、ダクト壁面での剪断応力をゼロとすることで、ダクトによる圧力損失の影響を排除した。フィン間隔を代表長さとして、チルドビーム内部の  $Re$  数は大きくても 200 程度であり、今回は層流解析を行った。

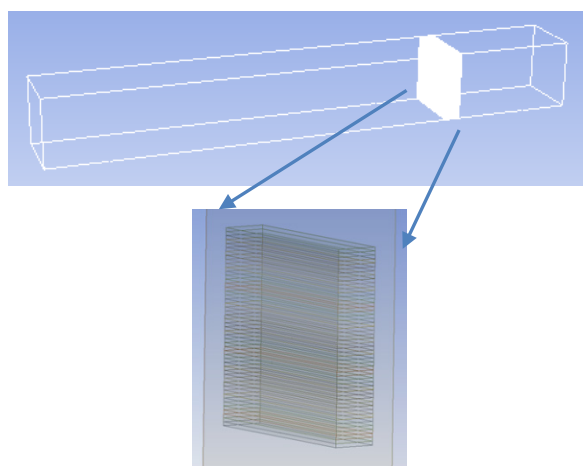


図-6 圧力損失特性解析モデルの概要

#### 3.2 PCB 圧力損失特性の算出

風速を変化させて解析し、ダクト出入口の静圧差をプロットしたものを図-7 に示す。同時に図中に 2 次の多項式による近似曲線とその近似式を示す。2.1 節で述べたように、圧力損失  $\Delta p$  は慣性項と粘性項の和となるが、PCB は CFD ソフト内部で解析されるため、比例定数の構成要素が必要となる。詳細な  $\Delta p$  は式(6)で示される。

$$\Delta p = C2 (\rho / 2) v^2 + (1/a) \mu v \quad (6)$$

ここで、

$v$ : 風速[m/s]、 $\rho$ : 空気の密度[kg/m<sup>3</sup>]

$C2$ : 慣性による抵抗係数[-]

$a$ : 浸透率[m]、 $\mu$ : 空気の粘性[Pa·s]

図-7 中に示した 2 次の多項式による近似式が式(6)に対応し、これらの比較から算出した慣性による抵抗係数  $C2$  および浸透率  $a$  を CFD ソフトに設定し解析を行う。

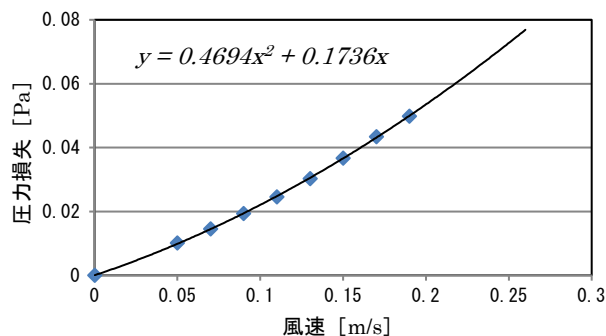


図-7 PCB 圧力損失特性

#### 3.3 PCB 圧力損失特性の精度検証

PCB の圧力損失特性の精度検証を行うため、PCB 単体実験<sup>2)</sup>と比較検証を行った。図-8 に実験に使用した PCB 本体、断熱 BOX 内に設置された PCB の様子と解析モデルを示す。断熱 BOX は内寸 2000mm×2000mm×3800mm で、壁は押出法ポリスチレンフォーム保温板 100mm である。PCB は高さ 3050mm に設置してある。PCB の圧力損失特性の精度検証のため、天井パネルは敷設していない。断熱 BOX は前後左右対称のため、解析モデルは 1/4 モデルとした。床面に内部負荷として 50W/m<sup>2</sup> の発熱体を設置し、それに見合った処理熱量を PCB に与えた。PCB は 3.2 節で得られた圧力損失特性を持つ多孔質媒体とした。すなわち、フィンそのものはモデル内部に再現せず、圧力損失特性だけを与える。乱流モデルは標準  $k-\epsilon$  モデルを使用し、浮力はブジネスク近似を用いた。

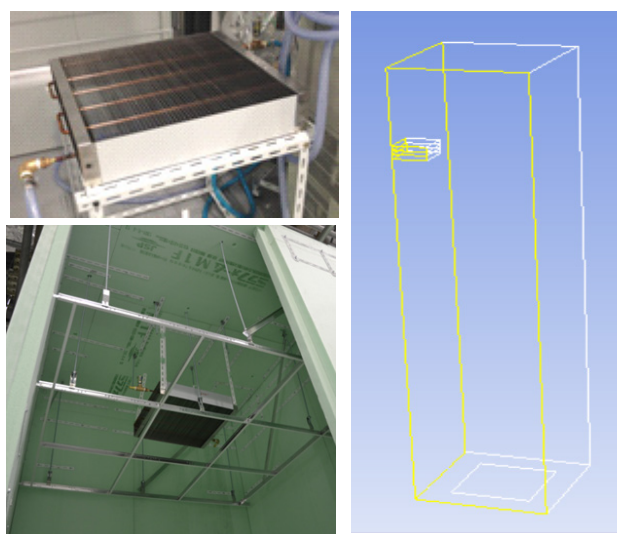


図-8 PCB 本体と設置の様子および解析モデル

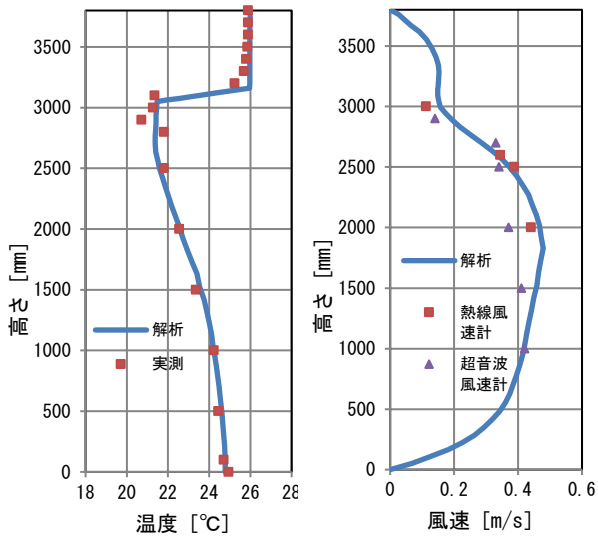


図-9 垂直温度分布と垂直風速分布(BOX 中心)

図-9 に断熱 BOX 中心における垂直温度分布、垂直風速分布を示す。それぞれ実線が解析結果、マーカーが実測結果である。温度は熱電対での測定結果、風速は熱線風速計と超音波風速計での測定結果を載せている。結果を見ると、温度分布はほぼ実測結果と一致している。また、風速は熱線風速計の値とは良く一致しているが、超音波風速計の値とはやや外れている。これは、中心部に熱電対と熱線風速計が設置してあり、超音波風速計を中心線から 100mm 程度離れた場所にしか設置できず、真の中心部を測定できなかったことが原因と考えられる。このように、温度、風速ともに実測結果と良く一致しており、CFD を用いた PCB の圧力損失特性の算出精度は高いと考えられる。

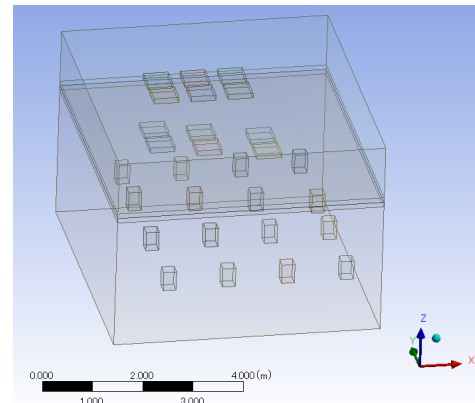


図-10 実験室オフィス解析モデルの概要

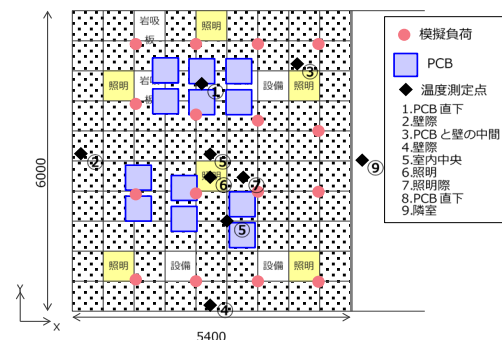


図-11 実験室天井伏図、PCB 位置および測定点

#### 4. 実験室オフィスによる精度検証

##### 4.1 実験室オフィスの概要

2章、3章で示した予測手法および圧力損失特性を、実験室オフィスに適用し精度検証を行った。図-10 に実験室オフィスの解析モデルの概要を示す。また、図-11 に実験室の天井伏図、PCB 設置位置

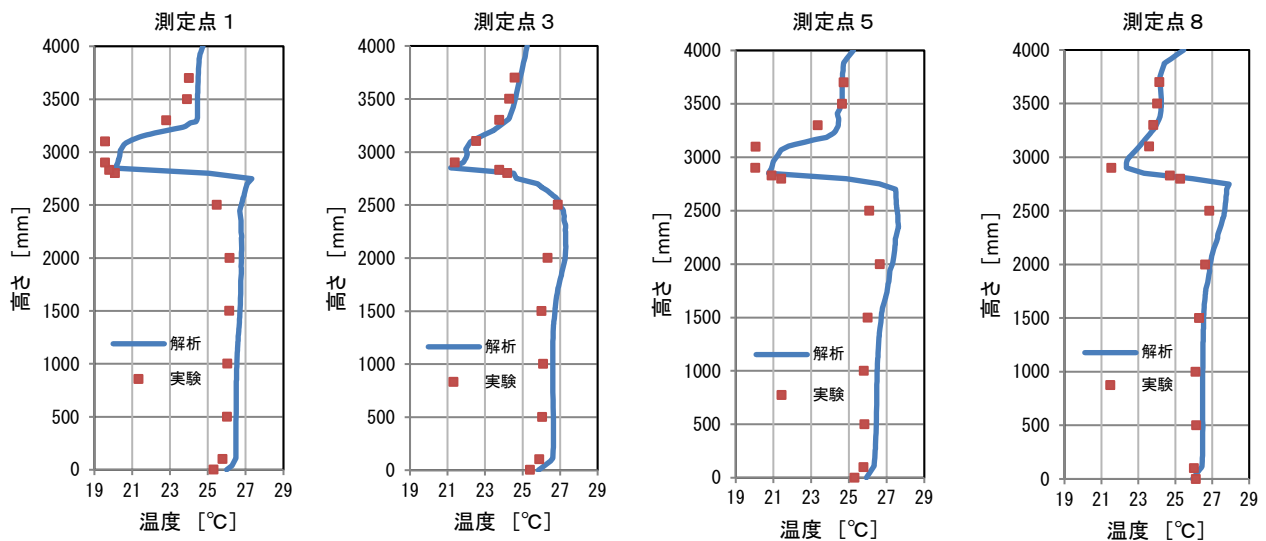


図-12 各測定点における垂直温度分布

および測定点<sup>3)</sup>を示す。PCB、PCP、照明、模擬負荷をできるだけ現実に合わせて配置した。CFDソフト上ではPCPは内部壁の設定で空気は流通しないが、2章で開発したモジュールにより模擬的に空気の流通を再現する。PCPの圧力損失特性は開口率17.4%のものを使用し、PCBについては3章で求めた特性を与えている。模擬負荷は52.3W/m<sup>2</sup>、照明負荷は7.7W/m<sup>2</sup>を与え、全体負荷として60W/m<sup>2</sup>とした。照明負荷は室内：天井裏＝4：6の割合で分割した。外気導入は無しとした。流れ場は自然対流支配で、模擬負荷周辺以外は風速が0.1m/s以下になる領域が広くあり、部分的に層流化していると考えられる。そこで、今回はRNG k-εモデルを採用し、低Re数領域での有効粘性係数の過大評価を抑える補正オプションを使用した。

#### 4.2 解析結果と検証

図-12に実験室オフィスの測定点における垂直温度分布を示す。測定点として1：PCB直下、3：PCBと壁の間、5：室内中央、8：PCB直下を選択し表示した。実線が解析結果、マーカーが実測値である。実測値と比較すると、解析結果は全体的にやや高めの温度となっている。特に天井付近の熱だまりにおける空気温度の誤差が大きくなってはいるが、天井裏、居住域においては0.5℃以下の差である。さらに、放射環境に影響を与える天井表面温度もほぼ実測値と一致しており、温熱環境の予測には十分な精度であると考えられる。本報で提案した移流量予測手法の有効性とCFD解析による圧力損失特性の把握の妥当性が、実験室オフィスを対象とした解析で確認できた。

### 5. パッシブ型チルドビーム PCB の冷却能力予測手法

#### 5.1 CFDと熱回路網の連携

PCBの冷却能力を予測するには、冷却能力とPCBへの供給冷水温度、流量およびPCBの吸込空気温度、速度との関係を明らかにする必要がある。CFDの特徴として、PCBの冷却フィン表面近傍に適切なメッシュを張ることで、フィンからの対流熱伝達量、すなわち冷却能力を正確に解析できることが挙げられる。しかしながら、設定条件として与えられる供給冷水までを含めた全体モデルを解析するにはかなりのコストがかかり、CFDでモデル化することは現実的ではない。一方で熱回路網は供給冷水からPCBまでを含めた全体のモ

デル化も容易にできる。ところが、熱回路網モデル内には経験則から与える対流熱伝達率という状態量が存在し、この値の与え方次第で冷却能力の解析結果が異なるという問題点がある。そこで本予測手法ではCFDと熱回路網を連携することにより、それぞれの弱点を補い合うことで全体モデルを低コストで精度良く解析することを可能にした。図-13にCFDと熱回路網の連携フロー図を示す。連携方法は、まず熱回路網解析にCFD、熱回路網の共通の境界条件としてのPCB吸込空気温度・速度と単独の境界条件としての供給冷水条件、さらにフィン表面对流熱伝達率の初期値 $HTC_{fin}$  (Heat Transfer Coefficient)を与えて解析を行い、フィン表面温度および冷却能力 $Q_{nets}$ を算出する。次にCFD解析に、共通の境界条件に加え、熱回路網解析より算出されたフィン表面温度を与えて冷却能力 $Q_{cfd}$ を算出する。 $Q_{cfd}$ と $Q_{nets}$ を比較し、一致しなければフィン表面对流熱伝達率を修正( $HTC_{fin}^*$ )し、熱回路網解析に戻り解析を繰り返す。その修正式を式(7)に示す。

$$HTC_{fin}^* = HTC_{fin} \{ 1 + (Q_{cfd} - Q_{nets}) / Q_{nets} \} \quad (7)$$

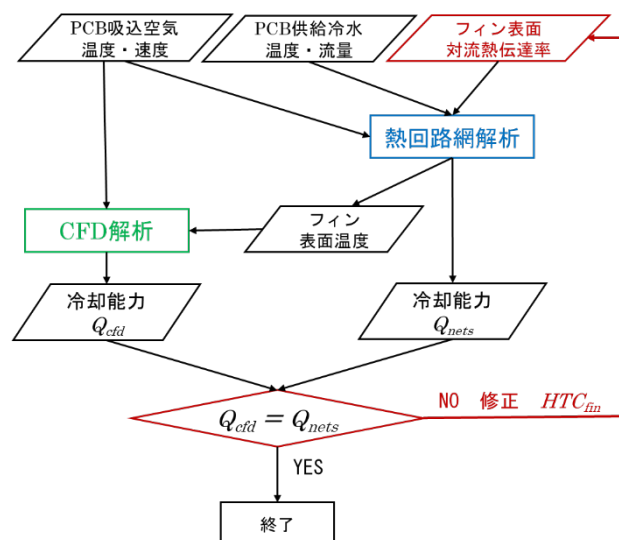


図-13 CFDと熱回路網の連携フロー図

#### 5.2 PCB解析モデルの概要

本予測手法では、解析コスト削減のため、PCBの一つの流路を対象にモデル化を行っている。図-14にCFDモデル、図-15に熱回路網モデルの概要を示す。CFDモデルは、冷水配管の上部と下部に2分割した冷却フィンのみとし、冷水配管は無視している。フィン全体高さは100mm、間隔は4.5mmである。図には使用したメッシュを含めて

表示している。フィン表面からの対流熱伝達量を正確に解析するため、表面近傍第一メッシュは、フィン表面流れ場の線形領域である粘性底層内に入るようおよそ0.2mmと設定した。一方、熱回路網モデルは供給冷水、冷水配管、PCB冷却フィン、フィン間通過空気までモデル化している。フィンは冷水配管の上下左右4分割し、さらにそれぞれの部位を9分割している。両モデルの予測冷却能力が一致するように、図-13に示したフローを繰り返し実行するが、修正は連携外部モジュールを作成し、自動収束計算をさせた。

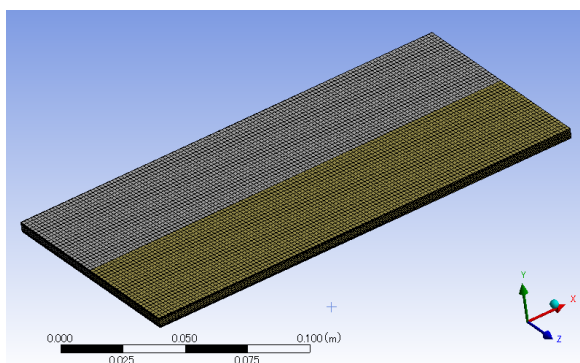


図-14 CFDモデルの概要

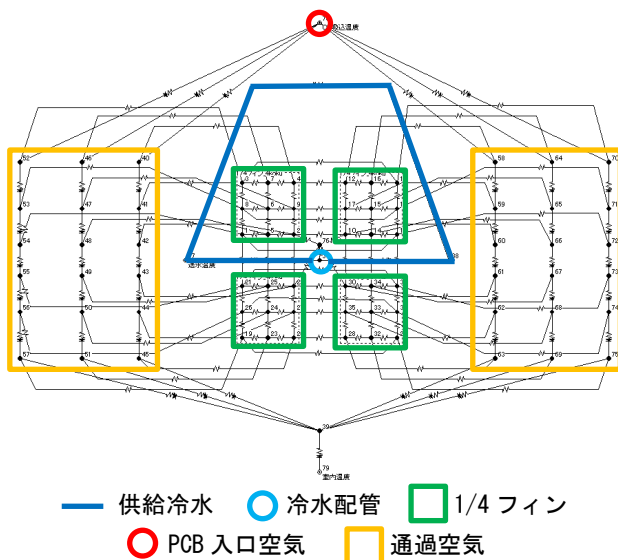


図-15 熱回路網モデルの概要

### 5.3 PCBの冷却能力の予測結果

PCB冷却能力の解析条件は、本報では供給冷水については条件固定で、平均冷水温度  $T_w$  17℃、流量 10L/min、冷水管内対流熱伝達率  $9000\text{W/m}^2\text{K}$  とした。PCBの入口条件については、温度  $T_a$  を冷水温度  $T_w$  との温度差  $\Delta T (=T_a - T_w)$  として3ケー

ス (9、15、21℃)、風速  $v_a$  も3ケース (0.02、0.04、0.06m/s)、合わせて9ケースとした。図-16にPCB全体のサイズを示す。コイルは1740mm×800mm×100mmで、コイル下部にスカートがついている。表-1にPCB1台当たりの冷却能力  $q_c$  W/台の解析結果を示す。また、図-17に冷却能力、温度差、風速の3次元グラフを示す。

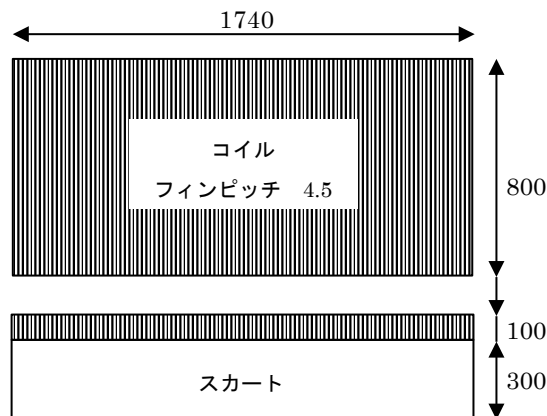


図-16 PCBの全体サイズ (mm)

表-1 PCB1台当たり冷却能力  $q_c$  W/台の解析結果

		温度差 $\Delta T$ [°C] ( $=T_a - T_w$ )		
		9	15	21
風速 $v_a$ [m/s]	0.02	331.6	563.3	788.1
	0.04	669.6	1115.9	1562.3
	0.06	994.5	1657.4	2320.3

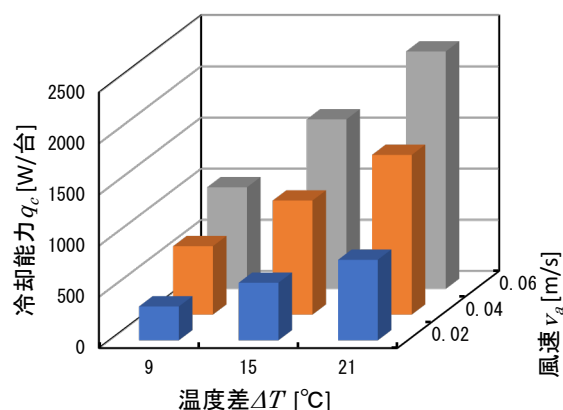


図-17 CB1台当たりの冷却能力  $q_c$  のグラフ

これらを見ると冷却能力  $q_c$  は、風速  $v_a$  および温度差  $\Delta T$  両者に対して線形な関係にあることが分かる。このことから、これらをまとめる方法として式(8)の形を検討した。

$$q_c = \alpha v_a \Delta T \quad (8)$$

ここで、

$\alpha$  : 比例定数[kgm/s<sup>2</sup>K]

図-18に各ケースにおける比例定数  $\alpha$  と  $v_a \Delta T$  との関係グラフを示す。

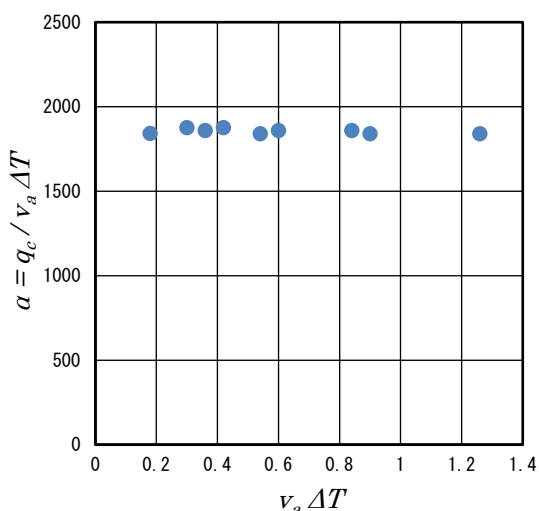


図-18 比例定数  $\alpha$  と  $v_a \Delta T$  との関係

図-18を見ると各ケースの  $\alpha$  は、ほぼ一致していることが分かる。このことから、本報で対象にした PCB1 台あたりの冷却能力予測式は、 $\alpha$  を平均化し式(9)とした。

$$q_c = 1855.6 \times v_a \Delta T \quad (9)$$

以上のように、CFD と熱回路網を連携することで、実験によらない PCB の冷却能力予測が可能であることが分かった。6章では、本章で求めた予測式および第2章から第4章で述べた手法を実オフィスに適用した結果を報告する。

## 6 実オフィスへの適用

### 6.1 実オフィス解析モデルの概要

本報で求めた冷却能力予測式を適用した実オフィスは、「S-ラジシステム ライト」を採用した支店オフィスで、香川県高松市に所在する。延床面積が約 2500m<sup>2</sup>、4階建て、RC造のオフィスである。解析対象は、3階居室で、西側の窓はエコボイドに面している。図-19に CFD 解析モデルの概要を示す。PCB は 28 台で、室内負荷として、人

体発熱 60W/人×60人、PC 発熱 38W/台×30台とした。外気条件として、外気温 33℃、薄曇りを想定し窓面積あたり 50W/m<sup>2</sup>の拡散日射負荷を与え、日射負荷の窓ガラス透過率は 0.8、吸収率は 0.2 とした。図-20に窓面の場所、PCB の番号(No.)の配置と実測点を示す。

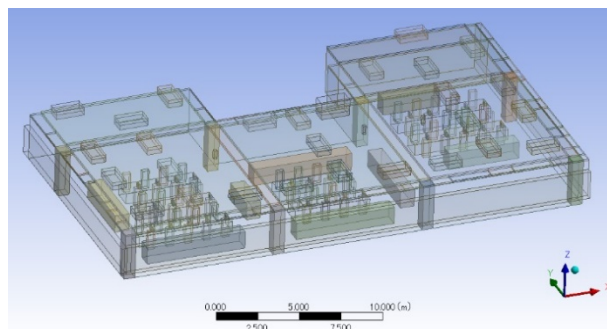


図-19 CFD 解析モデルの概要

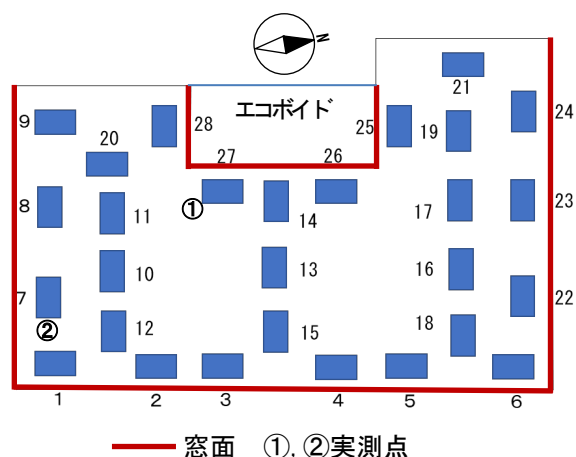


図-20 窓面、PCB 番号(No.)の配置と実測点

表-2 各 PCB の冷却能力の解析結果

No.	冷却能力[W/台]	No.	冷却能力[W/台]
1	-533.0	15	-558.6
2	-586.2	16	-544.5
3	-621.1	17	-556.2
4	-552.3	18	-554.1
5	-552.2	19	-513.6
6	-563.2	20	-576.2
7	-544.5	21	-562.2
8	-574.2	22	-568.0
9	-554.5	23	-569.5
10	-540.0	24	-572.2
11	-557.8	25	-559.1
12	-562.4	26	-596.8
13	-590.7	27	-598.2
14	-617.7	28	-545.3
		合計	-15824.1



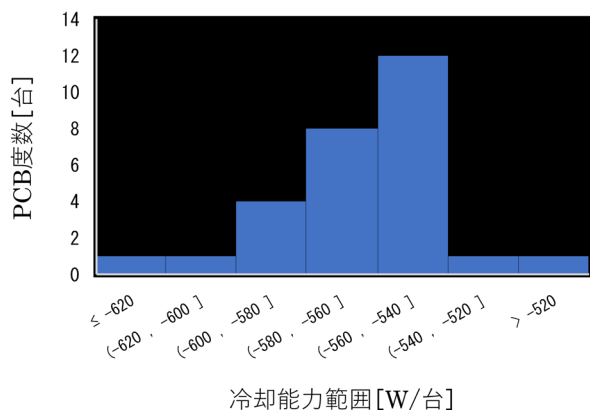


図-21 冷却能力範囲別の PCB 度数

## 6.2 解析結果と検証

表-2 に各 PCB の冷却能力の解析結果を示す。合計は約 16000W で、約 45W/m<sup>2</sup> の負荷を処理したことになる。また、図-21 に冷却能力範囲別の PCB 台数のヒストグラムを示す。70%以上の PCB では冷却能力が -580~-540W/台の範囲に収まっている。しかしながら、最大の冷却能力は -621.1 W、最小の冷却能力は -513.6W と 20%以上の能力差がある。また、冷却能力は場所により偏りがあるわけではなく、付近の PCB とかなり能力差がある場合も存在する。このことから、PCB を含んだ空調においては、一律に冷却能力を与えて解析を行ったのでは、解析精度が落ちる可能性があることが分かった。図-22 に南北断面の温度分布を、図-23 に PCP 表面温度分布を示す。南北断面の温度分布では、PCB から冷気が室内に下降する様子が見られ、2章で示した外部モジュールによる PCP 表裏間の熱移動量の解析がうまく働いていることが分かる。また、PCP 表面温度は、PCB 直下で約 23℃、非直下で約 26℃となり、実測で得られた PCB 直下 21℃~23℃、非直下 26℃~28℃に近い値が得られた。

次に、図-24 に実オフィスの実測点①、②における垂直方向室内温度分布<sup>4)</sup>を比較して示す。これを見ると、定性的には室内下部から上部まで温度差が少ないという特徴は一致しているが、全体的に解析結果の方が低い値を示し、PCP 表面温度で 1~2℃、居住域で 2℃程度の差が見られる。これは、実オフィスでは室温を見て PCB への供給冷水流量の調整がなされる制御を行っており、中には完全に停止している PCB も存在するが、本解析では PCB28 台すべてが稼働している条件で行ったことが原因と考えられる。また、PCB 冷却能力予測式を求めるにあたり、供給冷水条件を固定で与

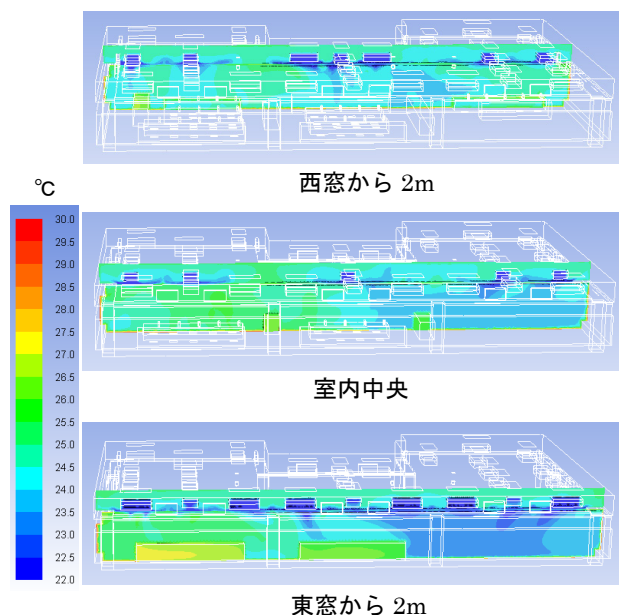


図-22 南北断面温度分布

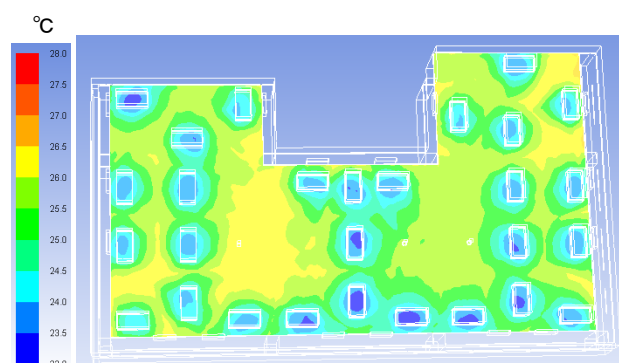


図-23 PCP 表面温度分布

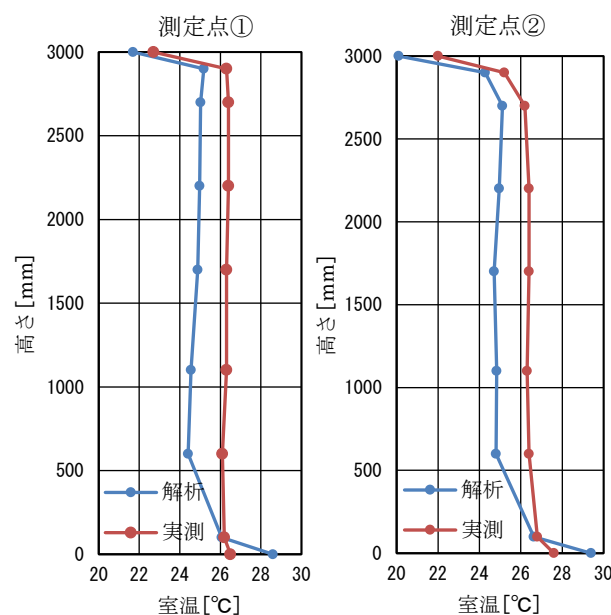


図-24 垂直方向室内温度分布

えたことも原因であると考えられる。また、実オフィスの室内負荷や外気条件、日射条件等についても、解析と現実とを完全に一致させることは難しい。今後は、制御条件等を取り入れた解析が必要と考えられる。

## 7. まとめ

本報では、天井内冷却式放射空調「S-ラジシステム ライト」に対する新しい解析手法について解説し、実測結果等と比較することにより精度の検証を行った。以下にそれぞれをまとめて記す。

- (1) 有孔天井パネル PCP の表裏間移流量を、浮力と PCP の圧力損失特性に基づいて予測する新たな手法を提案した。解析は開発した外部モジュールで実行し、解析結果を CFD ソフトに対して質量ソース、運動量ソース、エネルギーソースとして受け渡すことで、CFD 解析内で PCP 表裏間の移流による熱移動を模擬することが可能となった。
- (2) 過去の実験値と比較して、CFD を用いて求めた PCP の圧力損失特性は十分な精度を持っていることが確認できた。
- (3) パッシブ型チルドビーム PCB の圧力損失特性を CFD を用いて算出した。断熱ボックス内 PCB 単独実験と解析結果を比較し、求めた圧力損失特性が十分な精度であることが確認できた。
- (4) 実験室オフィスに対して、PCP 表裏間移流量予測手法と CFD で求めた圧力損失特性を適用し解析を行った。解析結果と実験結果を比較すると、室内発熱、PCB 冷却能力が明らかかな実験室オフィスの解析では、十分な精度で解析できることが確認された。
- (5) パッシブ型チルドビーム PCB の特徴である周囲環境により冷却能力が変化することを、CFD 内で再現することを試みた。CFD 解析と熱回路網解析を連携し、PCB 全体モデルを精度良く解析可能とする手法を提案し、実オフィスで使用されている PCB に対する冷却能力予測式を求めた。
- (6) 実オフィスに対して、PCP 表裏間移流量予測手法、CFD で求めた圧力損失特性および PCB 冷却能力予測式を適用し、解析結果と実測結果を比較した。定性的には一致する部分もあるが、全体的に 2℃程度の差が見られ解析精度はあまり良くなかった。

(7) 最後に、実オフィスの解析を通して、解析精度向上のために判明した今後の課題を記す。

- ・ パッシブ型チルドビーム PCB は、BEMS (Building Energy Management System) により室内温度計測値から、供給冷水の流量制御がなされており、この制御系の働きを取り入れる必要がある。
- ・ 解析条件として与える室内負荷、外気条件、日射条件等を、如何に現実に即して与えるか、その手法を検討する必要がある。

## <参考文献>

- 1) 空調調和衛生工学便覧第 14 版 3 空調調和設備編,p186
- 2) 雨宮ほか：パッシブチルドビームを用いた天井内冷却式放射空調の基礎検討,空調調和・衛生工学会大会学術講演論文集,pp473-476, 2014
- 3) 雨宮ほか：パッシブチルドビームを用いた天井内冷却式放射空調の基礎検討(第2報),空調調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 2015
- 4) 川上ほか：四国支店新社屋における省エネ施策の効果と夏期室内環境実態評価, 清水建設研究報告, Vol.95, pp163-169, 2018