

## 吹出口の違いによる局所冷却性能の評価

創造理工学専攻 環境都市コース 6164110056-0 藤田 理緒  
(指導教員 近本智行)

### 1. はじめに

従来の空調方式は部屋全体が均一環境となるように制御をしている。しかし非居住域の空調や個人の快適性の無視など最適な空調システムとはいえない。

本研究ではこれまでユニット単位で流量や温度を調整することができるビル用マルチエアコンを用いた省エネ性と快適を両立する空調システムについて検討<sup>文1)</sup>を行ってきた。

既往研究<sup>文2)</sup>においてもビル用マルチエアコンを用いたパーソナル空調は省エネルギー性と快適性を両立する可能性が示されたが、課題として天井からの気流が拡散することが挙げられた。

効率のよいパーソナル空調を行うには、気流を拡散させずにターゲットへと届ける必要がある。このため気流の拡散性を考慮した、冷却性能を考慮する必要がある。

空調機吹出口は用途によって様々な形状があるが、拡散性と冷却効果を一律に検証、比較した研究は殆どなされていない。

本研究では特徴のある3種類の空調機吹出口についてコンピュータによる流体解析(以降CFD解析)を用いて吹出口の形状による拡散性を考慮した冷却性能について検証する。

### 2. 研究概要

#### 2.1 解析概要

本研究では異なる形状の吹出口を選定し形状の違いによる気流の性状について考察を行う。解析対象空間を図1に示す。解析空間は障害物のない自由空間とする。非等温の解析については解析空間が26°C前後となるように床面に発熱量を与えた。吹出口上部には気流を整えるためにダクトが接続されておりダクト内の速度の分布が一定となる長さとした。メッシュ分割については、壁面の壁座標 $y_+$ が概ね30以上となるように分割を行った。

#### 2.2 解析ケース

本研究ではノズル型パンカールーパー吹出口(以降ノズル吹出口)、アスペクト比の大きい長方形型吹出口(以降ライン型吹出口)、水平吹出専用多層コーン型吹出口(以降アネモ型吹出口)の計3種類の吹出口を再現し解析を行う。図2に解析に使用した吹出口を、表2に解析ケースを記す。

### 3. 解析結果

解析結果から気流の性状を考察する。次に一定面積を通過する熱量を算出し、熱量の変化傾向と乱れの分布の関係性を考察する。

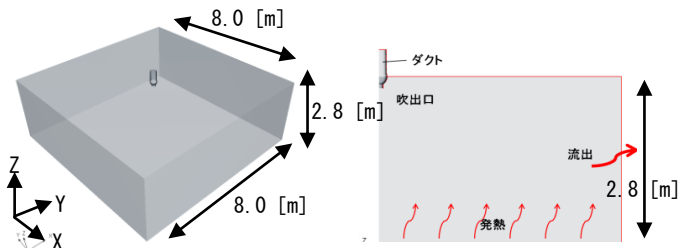


図1 解析空間

表1 解析条件

解析領域	8.0m(X)×8.0m(Y)×2.8m(Z)
要素分割数	ノズル型:約100万メッシュ ライン型:約200万メッシュ アネモ型:約210万メッシュ
温度条件	吹出温度 : 10[°C]、16[°C] 床面発熱条件 : 8.0[W/m <sup>2</sup> ]、12.8[W/m <sup>2</sup> ]、 12.1[W/m <sup>2</sup> ]、19.3[W/m <sup>2</sup> ]
移流項スキーム	2次精度風上差分
乱流モデル	標準 $k-\epsilon$ モデル
壁面条件	天井・床:壁面対数則、X-max・X-min・Y-min : free-slip条件、Y-max : 流出条件
流入条件	Q=154[m <sup>3</sup> /h]、232[m <sup>3</sup> /h]、ダクト上部に流入風量を与える。 また吹出気流に乱流統計量 <sup>注1)</sup> を与える。
流出条件	流量規定:Q=154[m <sup>3</sup> /h]、232[m <sup>3</sup> /h]、 Y-max 壁面に流出条件



ノズル型

ライン型

アネモ型

図2 解析対象吹出口

#### 3.1 気流性状の確認

床面からの一定高さごとの気流の鉛直速度分布を図3に示す。

##### (1) ノズル型 (CASE1-1) における気流分布

ノズル型の速度分布は、吹出口直径と比較して水平方向への拡散半径が小さいことがわかる。

(2) ライン型 (CASE3-1) における気流分布

ライン型は長辺方向と短辺方向で異なる傾向を示している。長辺方向は長辺長さと比較して水平方向への広がりはあまり見られないが、短辺方向は吹出口のスケールに対して速度が増加している領域が広がっており、気流が拡散していると考えられる。

(3) アネモ型 (CASE5-1) における気流分布

アネモ型は水平方向に広く拡散し、床上高さ 0.8[m] においては気流の分布がかなり小さくなっている。

3.2 通過熱量の算出

局所冷却性能の評価として、吹出口直下のある一定面積を通過する熱量 (以降通過熱量) について検証する。

算出方法を表 3 に示す。

一定面積の決定については、人体のスケールを考慮し、2 パターンを定めた。人体の頭部大を想定した 0.2[m] × 0.2[m] の領域 (以下 0.04[m<sup>2</sup>] 領域)、人体の肩幅を考慮した 0.4[m] × 0.4[m] の領域 (以下 0.16[m<sup>2</sup>] 領域) を定めた。

また吹出口から離れるごとに通過熱量がどのような推移をしていくか検証を行う。そのため床上 0.8、1.0、1.2、1.4、1.6、1.8、2.0、2.2、2.4[m] の高さにおいてそれぞれ通過熱量を算出した。通過熱量は非等温解析全 12 ケースについて算出したが本論文では各吹出口につき 1 ケースずつ掲載する。流量 154[m<sup>3</sup>/h]、吹出温度 16°C の CASE1-2、CASE3-2、CASE5-2 の床上高さごとの通過熱量の推移を図 4 に示す。

0.16[m<sup>2</sup>] 領域の通過熱量をみるとノズル型が最も高く、ライン型、アネモ型の順に低下している。

高さごとの推移ではノズル型は床面に近づくにつれて 0.04[m<sup>2</sup>] 領域と 0.16[m<sup>2</sup>] 領域における通過熱量に差が生じている。通過面積が増すごとに通過熱量が増加していることから気流の拡散が進んでいると考えられる。

ライン型については床上 2.4[m] の地点から 0.16[m<sup>2</sup>] 領域の方が 0.04[m<sup>2</sup>] 領域よりも通過熱量が大きい。このため吹出口近傍において既に拡散していると考えられる。また床上高さ 1.4[m] まで 0.16[m<sup>2</sup>] 領域において通過熱量が増しているのは、誘引気流による速度の増加が要因であると考えられる。この傾向はノズル型でも見られたがライン型において顕著であった。

アネモ型についても、吹出口近傍で拡散が進んでいるためライン型と同じく 0.04[m<sup>2</sup>] よりも 0.16[m<sup>2</sup>] における通過熱量のほうが大きい結果となっている。また誘引気流もライン型と比べると小さく、より拡散性が高いことが考えられる。

3.3 通過熱量のピーク

通過熱量の推移にはピークが存在している。このピーク周辺において気流がどのような性状となっているか乱れの指標である乱流エネルギーと対比させる。

(1) ノズル型 (CASE1-2) における乱れの分布

0.04[m<sup>2</sup>] 領域における通過熱量のピークは床上 2.2[m] の高さであった。この時乱流エネルギーのピーク (図 5 (a)) が

表 2 解析条件

ケース	吹出口	流入条件	温度	発熱量
CASE1-1	ノズル型	154[m <sup>3</sup> /h]	等温	8.0[W/m <sup>2</sup> ]
CASE1-2		$k_{in}=1.8 \times 10^{-3}$ [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	16°C	
CASE1-3		$\epsilon_{in}=6.6 \times 10^{-4}$ [m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]	10°C	12.8[W/m <sup>2</sup> ]
CASE2-1		232[m <sup>3</sup> /h]	等温	19.3[W/m <sup>2</sup> ]
CASE2-2		$k_{in}=4.1 \times 10^{-3}$ [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	16°C	
CASE2-3		$\epsilon_{in}=4.4 \times 10^{-3}$ [m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]	10°C	
CASE3-1	ライン型	154[m <sup>3</sup> /h]	等温	8.0[W/m <sup>2</sup> ]
CASE3-2		$k_{in}=1.6 \times 10^{-2}$ [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	16°C	
CASE3-3		$\epsilon_{in}=1.9 \times 10^{-1}$ [m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]	10°C	12.8[W/m <sup>2</sup> ]
CASE4-1		154[m <sup>3</sup> /h]	等温	19.3[W/m <sup>2</sup> ]
CASE4-2		$k_{in}=3.5 \times 10^{-2}$ [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	16°C	
CASE4-3		$\epsilon_{in}=6.4 \times 10^{-1}$ [m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]	10°C	
CASE5-1	アネモ型	154[m <sup>3</sup> /h]	等温	8.0[W/m <sup>2</sup> ]
CASE5-2		$k_{in}=2.3 \times 10^{-2}$ [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	16°C	
CASE5-3		$\epsilon_{in}=5.7 \times 10^{-2}$ [m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]	10°C	12.8[W/m <sup>2</sup> ]
CASE6-1		232[m <sup>3</sup> /h]	等温	19.3[W/m <sup>2</sup> ]
CASE6-2		$k_{in}=5.3 \times 10^{-2}$ [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	16°C	
CASE6-3		$\epsilon_{in}=3.8 \times 10^{-1}$ [m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]	10°C	

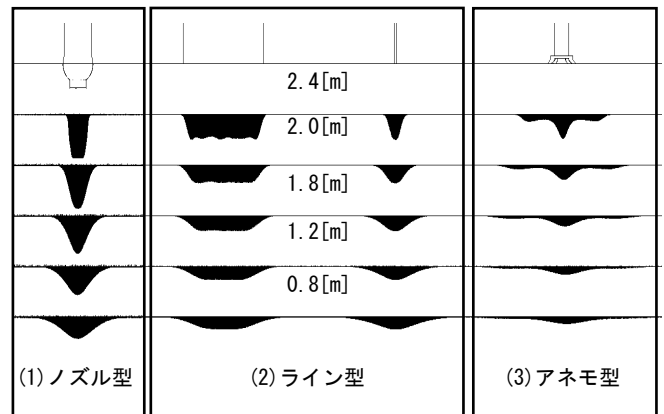


図 3 気流速度分布

表 3 通過熱量算出方法

通過熱量は以下の式を定義し算出した。

$$Q=S \times V_x \times (T_e - T_x) \times C_p \times \rho$$

Q: 通過熱量[W]

V<sub>x</sub>: 断面における速度平均[m/s]

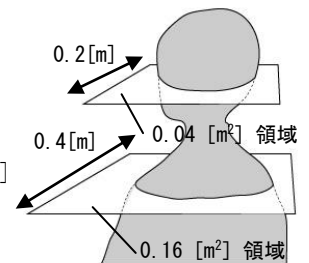
S: 断面積[m<sup>2</sup>]

T<sub>e</sub>: 空間平均温度[°C]

T<sub>x</sub>: 断面における平均温度[°C]

ρ: 空気密度 1.2[kg/m<sup>3</sup>]

C<sub>p</sub>: 定圧比熱 1.006[KJ/(kg・K)]



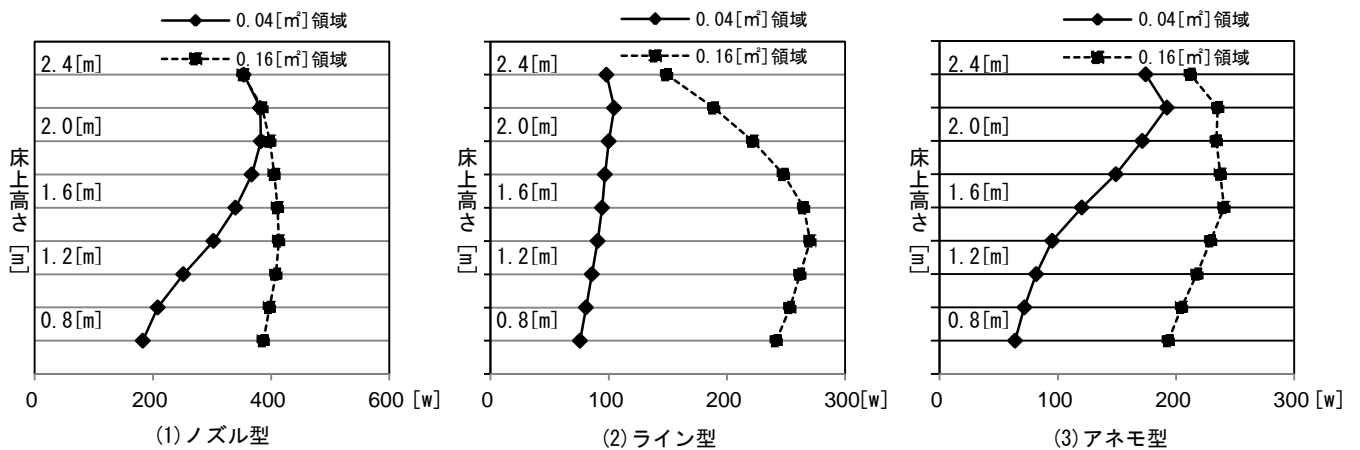


図4 通過熱量推移

0.04[m<sup>2</sup>]領域のごく近傍に存在しており、このため床上2.2[m]以下の点において拡散が進んだと考えられる。

0.16[m<sup>2</sup>]領域においては目立ったピークはなかったもの(図5 (b))、床上1.4~1.2[m]において乱流エネルギーの値が徐々に上昇しているため通過熱量が緩やかに減少している。

### (2) ライン型 (CASE3-2) における乱れの分布

ライン型は吹出口の長辺方向と短辺方向で乱流エネルギーの分布が異なる。長辺方向の乱流分布は0.04[m<sup>2</sup>]と0.16[m<sup>2</sup>]のいずれの領域においても水平方向の変化がほとんどないため、乱流エネルギーの分布の変化は短辺方向に着目して検証する。

0.04[m<sup>2</sup>]領域のピークにおいて、領域境界をまたがって高い乱流エネルギーの分布が見られた。(図6) このため0.04[m<sup>2</sup>]の領域において拡散が進み通過熱量が下がったと考えられる。しかし0.16[m<sup>2</sup>]領域のピークである床上1.4[m]の地点については乱流エネルギーの変化がみられなかった。

### (3) アネモ型 (CASE5-2) における乱れの分布

アネモ型についても同様の傾向があり、通過熱量のピークの地点において、各領域の境界を跨って高い乱流エネルギーの分布(図7)が見られた。このためピーク以下の点では拡散が進み、通過熱量が低下したと考えられる。

## 3.4 Koestel の噴流式との比較

解析結果と実際の噴流に大きな差異がないかを Koestel の噴流式<sup>文3)</sup>によって確認を行った。

ケステルの噴流式では等温吹出における速度分布を算出することができる。Koestel の噴流式に用いる吹出口係数  $K$  は CASE1-1 (ノズル型) については算出し、CASE3-1 (ライン型) については文献値<sup>文3)</sup> から  $K=4$  を用いて速度分布を算出・描画した。アネモ型については、同式の適応が困難であったため、本研究では検証を見送った。

CASE1-1 の解析結果と Koestel の式から算出された値はよく対応しており解析結果は妥当であると考えられる。

CASE3-1 においては解析結果よりも Koestel の式から算出された値の方が大きいものの、その差は 0.1[m/s] 以下であり概ね一致していると考えられる。

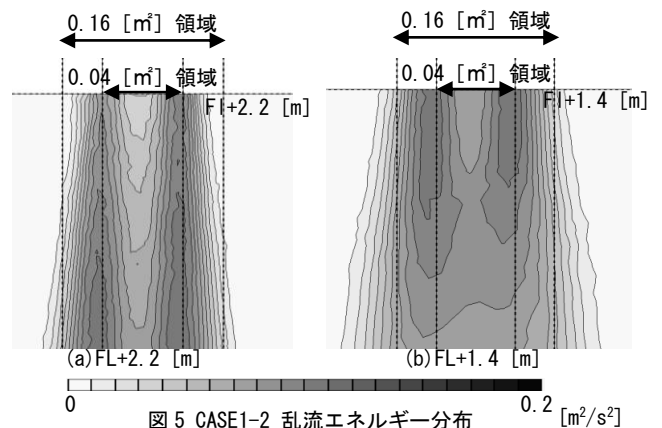


図5 CASE1-2 乱流エネルギー分布

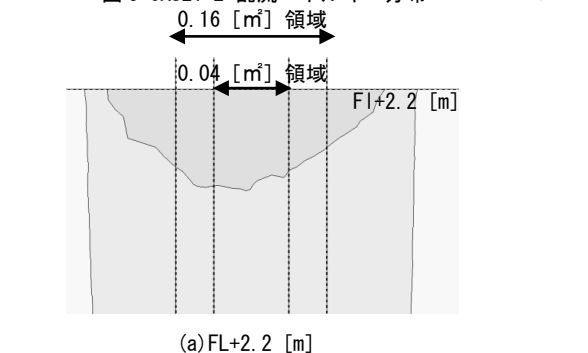


図6 CASE3-2 乱流エネルギー分布

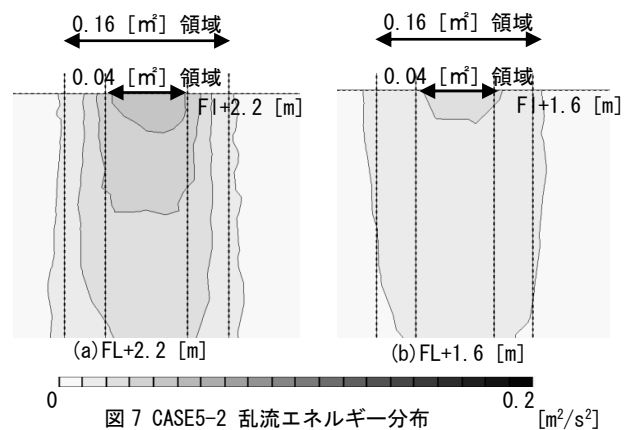


図7 CASE5-2 乱流エネルギー分布

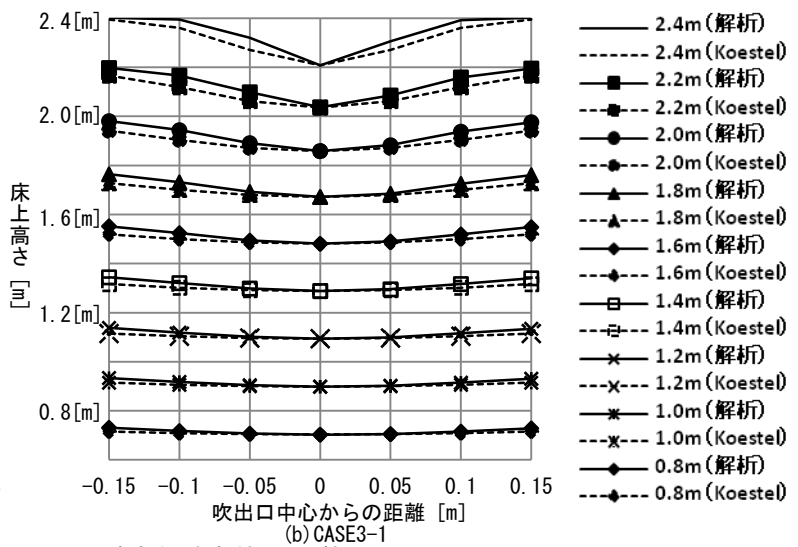
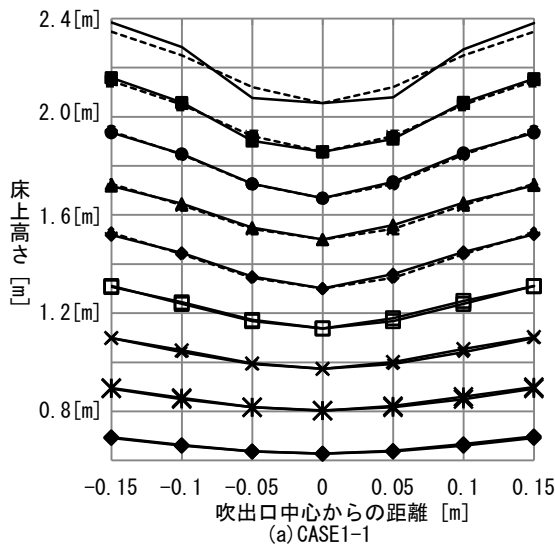


図8 Koestelの噴流式と解析結果の比較

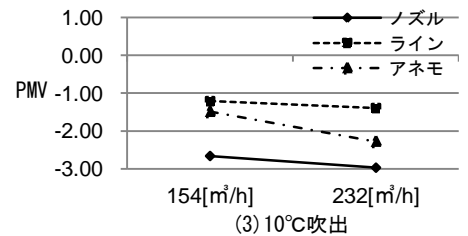
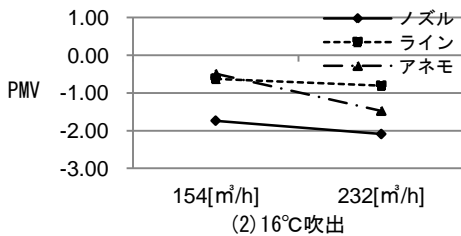
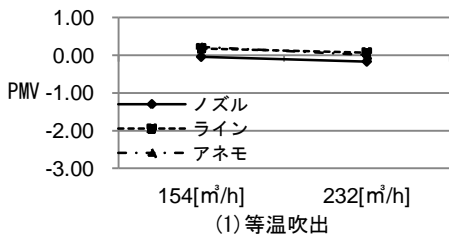


図9 PMVの推移

#### 4. 人体冷却効果の検証

吹出気流の人体への冷却効果の検証として温冷感指標であるPMVを使用する<sup>注2)</sup>。PMVには流速がパラメータとして含まれている。そのため同じ吹出温度のケースにおいて吹出流量が増加した時にPMVがどれだけ変化したかによって、吹出口ごとの気流の残風速の評価を行う。

##### (1) 等温吹出

154[m<sup>3</sup>/h]のケースにおいて、PMVはノズル型、ライン型、アネモ型の順で低い値を示した。流量が増加した232[m<sup>3</sup>/h]のケースにおいてはアネモ型がライン型よりもわずかに低い値を示した。これはアネモ型の中央部の噴流による影響が大きいと考えられる。

##### (2) 16°C吹出

等温吹出における変化傾向が更に顕著となった。

154[m<sup>3</sup>/h]のケースにおいてはノズル型、ライン型、アネモ型の順でPMVは低い値を示したが、232[m<sup>3</sup>/h]のケースにおいてアネモ型のケースがライン型よりも低いPMVを示した。

##### (3) 10°C吹出

154[m<sup>3</sup>/h]のケースにおいてライン型よりもアネモ型のケースの方がPMVは低い値となった。流量が増加した時の変化傾向は等温吹出、16°C吹出のケースと同じであった。

#### 5. まとめ

本研究では吹出口の拡散性と冷却性能について、一定面積を通過する熱量の算出、乱流エネルギー及び速度分布との比較、吹出流量の変化によるPMVの感度確認を行った。その結果乱流エネルギーがごく狭い範囲に分布し、また速度分布の広がり比較的小さいノズル型が最も通過熱量が高いことがわかった。PMVの値については、拡散傾向が低いノズル型が最も低い値を示した。変化量についてはアネモ型が最も高く、これは中心の自由噴流が関係していると考えられる。

以上からノズル型が最も乱れが少なく効率的に熱量を輸送することがわかった。本研究においては気流の吹出方向は鉛直下向きのみであったが、今後は吹出角度を設定した検討を行い、実際の空調機吹出気流を想定した検討を行う。

#### 注釈

注1) 流入口の乱流統計量の算出にあたり以下の値を使用した。

$$k = (UI)^2 \times 3/2 [m^2/s^2]$$

$$\varepsilon = 0.09^{3/4} \times k^{3/2} \div L [m^2/s^3]$$

流速  $U [m/s] = \text{流量} / \text{ダクト面積}$

乱流強度  $I = 0.05$

乱流の長さスケール  $L = \text{ダクト直径} \times 0.07$

注2) 吹出口直下の床上1.2[m]の地点における流速、温度を使用し、clo値を0.7[clo]、相対湿度を55[%]としてPMVを算出した。

#### 参考文献

- 文1) 近本、西村、福田、橋本、西野：オフィスにおける室内熱・気流分布考慮型の空調第一報-天井カセット型ビル用マルチ空調を用いたパーソナル空調の検討、空気調和・衛生工学会論文集、No. 147 (2009年6月)、pp9~pp16 文2) 藤田、近本、秋元、橋本、西野、石黒：居住域空調の温熱環境・省エネルギー性に関する研究(その10) 天井カセット方式ビル用マルチエアコンによる局所気流制御の性能検証、空気調和・衛生工学会学術講演論文集(2011年9月)、pp1403~pp1406 文3) 社団法人空気調和衛生工学会：空地調和・衛生工学便覧(第14版)-3. 空気調和設備編-