

# 省エネルギー型床吹出し空調システムの開発（その1）

## —— 室内温度プロフィール予測モデルの構築 ——

藤 田 尚 志      酒 井 寛 二

### 概 要

床吹出し空調方式において、室内温度分布と、吹出口風量・温度、また室内熱負荷との関係をモデル化できれば、室内上下温度差を有効に利用して省エネルギーに寄与できる。本報告では、床吹出口タイプ、吹出口風量、室内熱負荷を変えた時の室内温度分布測定結果と、その解析を基に導いた温度プロフィールの予測モデルの概要及びその適用例を示す。考案した予測モデルは、水平方向に2領域（居住域、吹出し気流域）、高さ方向に3領域（誘引域、拡散混合域、ピストンフロー域）から成る。測定結果にモデルを適用して解析し、温度プロフィール予測計算に必要な各種係数の値を算出した。これらの値を用いた予測計算結果の精度は、実用上十分なことを確認した。また試算結果から、室内一様拡散の場合と比較して、床吹出し方式が省エネルギー的であり、かつ熱負荷の増加に対しても居住域の温度上昇を抑制することを示した。

## 1. はじめに

床吹出し空調方式は実用的な空調方式として認知され、近年は室内温熱環境を満足させつつ、いかにしてインシャルコストを抑えエネルギー消費量の小さいシステムを設計するかという点に研究の流れが移ってきた。室内温度分布と、システム設計上の拘束条件となる床吹出口風量・温度、また室内熱負荷との関係をモデル化できれば、室内上下温度差を有効に利用して省エネルギーに寄与できる。本研究は床吹出し空調方式において、床吹出口タイプ、吹出口風量、室内熱負荷の各種条件から、室内温度プロフィールを予測するモデルを構築することを目的とする。なお、予測には数値計算（CFD）による方法もあるが、入力が煩雑で適用範囲にも限界があるので、簡易に予測計算のできるモデルを開発対象とした。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験室

Fig. 1, 2に実験室平面図、断面図を示す。断熱材を内包する44mm厚SUSサンドイッチパネルで囲われた中の、約5m×約6m×2.7m高さの実験室を測定対象とする。室内へは8個の床吹出口で給気され、天井埋込みの蛍光灯器具の隙間等から天井裏経由で還気される。照明器具直下の温度測定点では放射遮蔽用に、床上235～270cmの各点の上1cm離して、4cm×4cmのアルミホイルを水平に置いた。

### 2.2 実験条件

実験条件のパラメータの内、床下への導入給気温を19℃、

漏気量を0に設定し、床吹出口タイプ・風量、室内熱負荷の三つを変化させた。室内熱負荷は、照明、人体熱負荷模型、OA熱負荷模型とから成る。人体熱負荷模型は服地を着せられた電気毛布、またOA熱負荷模型は穴明きアクリル箱内に光が漏れぬよう黒色鉄板で覆われた2個の100W電球できていている。どちらも電圧を変化させることで発生熱を調整できる。設定した実験条件ごとにCASE-□□-□□□の呼び名で表現した。Fig. 3に実験条件とCASE名との対応を示す。床吹出口タイプ2種類（H, R）×風量3種類（7, 0, 3）×室内熱負荷7種類（100, 101, 102, 110, 111, 112, 200）= 42種類の実験条件を設定した。

### 2.3 測定方法

床下チャンバーへの給気導入ダクト出口で、ピトー管と精密微差圧計にて風速を5×5箇所測定し、風量へ換算した。また床吹出口風量測定用にファン付フードを製作した。測定時のフードの圧力損失はファンにて相殺される。フード部と出口縮流部との差圧に対する風量の関係式をあらかじめ求めておき、差圧を測定することで風量に換算した。温度測定にはCC熱電対を用いた。同一条件下で室内を放置し（3時間以上）、室内温度が定常に達したとみなされた後、1分間隔で30回、温度を記録し平均した。室内熱負荷は熱負荷種類ごとに積算電力量計を付け計測した。

## 3. 測定結果

### 3.1 床吹出口風量と漏気量

いずれのCASEでも、全床吹出口の風量が均等（差が1m<sup>3</sup>/h個以内）であることを確認した。

二重床パネルの合わせ目を下面よりテープで密封することで、漏気量を極力抑えた。床下への導入給気量と床吹出口風量合計との差は、いずれの CASE でも±2%に留まっており、漏気量はほとんど無視できると言える。

### 3.2 室内温度分布

(1) 測定点の分類 測定された温度プロフィールを全測定点で比べると、実験条件に依らず次の5通りに分類できた。同じ分類の中では測定点同士、値はほぼ等しい。

- 1) 吹出し気流域 (Fig. 1 の P4, P5)
- 2) 居住域 (P1, P3, P6, P8, P11, P12)
- 3) 混合域 (P2, P7, P15, P16, P17); 居住域と比べ、吹出し気流の影響を受け温度の低い部分がある。
- 4) 机上域 (P13, P14); 居住域と比べ、机直上のみ温度が高い。

5) 熱気団域 (P9, P10); 熱負荷上のため居住域と比べ、どの高さでも温度が高い

以降の解析では P4 と P5, P6 と P8 をそれぞれ吹出し気流域、居住域を代表する測定点とし、平均した値を代表プロフィールとして用いた。

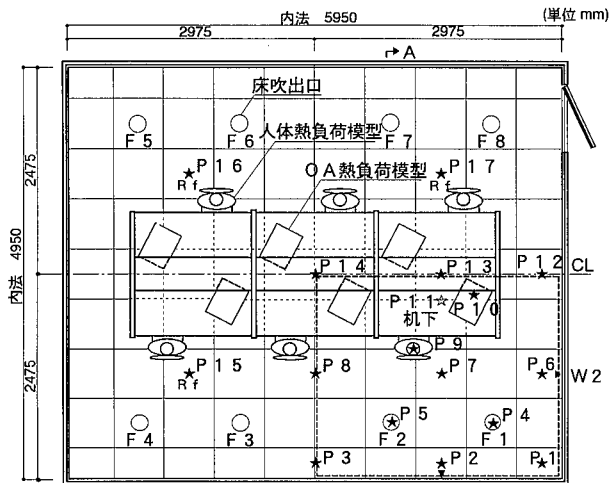
(2) 温度プロフィールと実験条件との関係 吹出し気流域と居住域の代表プロフィールを実験条件ごとに比べたところ、Table 1 に示すように5タイプに分類できた。各タイプと実験条件 (吹出口風量, 熱負荷) との関係を Table 2 及び Table 1 の「温度プロフィールの特徴」欄に示す。

(3) 室内気流性状の推定 5タイプに分類した温度プロフィールの各々の特徴から気流性状の推定を試みた。推定結果を Table 1 の右2列に示す。タイプBで吹出し気流の一部が室内空気と完全に混合する前に還気されている点が注目される。

### 4. 温度プロフィールの予測モデル

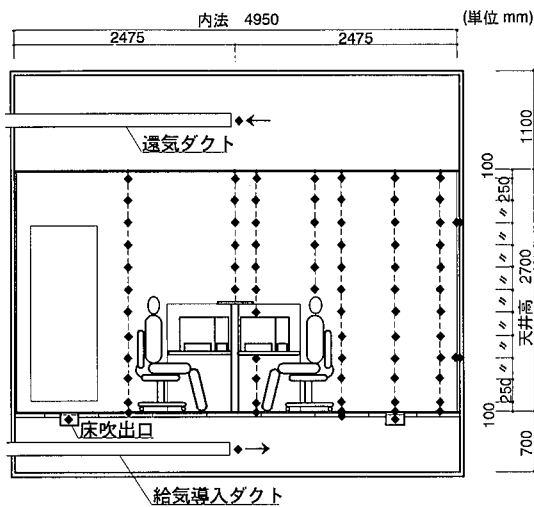
Table 1 に示される気流性状5タイプを包括的に表すことができるよう予測モデルを考案した。Fig. 4 にその模式図を示す。モデルは水平方向に2領域 (吹出し気流域, 居住域), 高さ方向に11層から成る。1領域の1層 (セルと呼称) 内では温度均一とする。層厚さは温度測定値との照合のため、温度測定点をほぼ中央に含むよう原則 25cm 厚とした。気流性状の特徴により11層を次の3領域に分ける。

- 1) 誘引域; 吹出し気流が居住域の空気を誘引
- 2) 拡散混合域; 吹出し気流域の空気が居住域へ流れ



凡例: ★ = 空間温度測定点 (P1~P14) ★ = 参照温度測定点 (P15~P17)  
▽ = 壁面温度測定点 (W1~W2) ○ = 床吹出口 (F1~F8)  
□ = 代表領域

Fig. 1 実験室平面図  
Test Room Plan



凡例: ◆ = 温度測定点  
Fig. 2 実験室 A-A 断面図  
Test Room Cross Section at A-A in Fig. 1

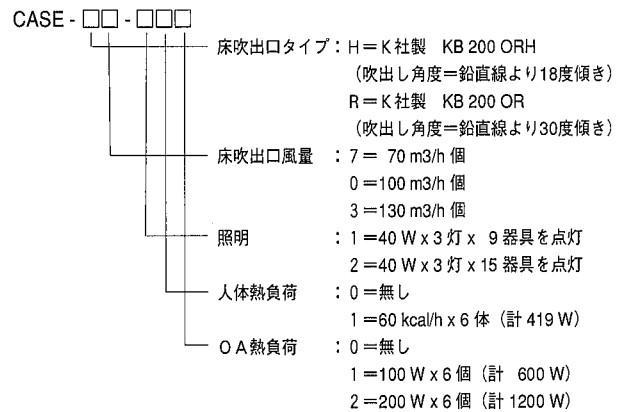


Fig. 3 実験条件と CASE 名との対応  
Experiment Cases

Table 2 温度プロフィールタイプと実験条件との関係  
Relationship between Temperature Profiles and Experiment Cases

実験条件	CASE	床吹出口タイプH 小←吹出口風量→大			床吹出口タイプR 小←吹出口風量→大		
		H7-	H0-	H3-	R7-	R0-	R3-
小	1 00	A1	A1	A1	A1	A1	A1
↑	1 10	A2	A1	A1	C2	C2	A1
熱負荷	1 01	C1	B	B	C2	C2	C2
↓	1 11	C1	C1	B	C2	C2	C1
	1 02	C1	C1	B	C2	C2	C1
大	1 12	C1	C1	C1	C2	C2	C1
	2 00	A2	A1	A1	A2	A1	A1

Table 1 温度プロファイルの分類と気流性状の推定  
Classification of Temperature Profiles and Estimated Room Air Flow Patterns

タイプ	温度プロファイルの特徴	温度プロファイル例	気流性状の推定	気流性状の概念図
A1	<ul style="list-style-type: none"> <li>吹出し気流域：床上85～135cm以上で居住域の温度とほぼ等しい</li> <li>居住域：高さにかかわらず、ほぼ温度一定</li> <li>熱負荷が小さい時に生じる</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>居住域温と吹出口気流温の差が小さ過ぎ、床上85～135cm以上では温度差が観察できないため、気流性状が推定できない</li> </ul>	
A2	<ul style="list-style-type: none"> <li>吹出し気流域：床上85～135cm以上で居住域の温度とほぼ等しいが、天井直下で居住域の温度より高くなる</li> <li>居住域：下部ではほぼ温度一定、天井直下で緩やかな温度上昇</li> <li>タイプA1より吹出口風量が小さいか、やや熱負荷が大きい時に生じる</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>吹出し気流が天井面まで到達し、天井直下で生じる若干の下降気流が、熱を下方に運ぶ</li> </ul>	
B	<ul style="list-style-type: none"> <li>吹出し気流域：どの高さでも居住域の温度より低い(等しくならない)</li> <li>居住域：下部ではほぼ温度一定、上部では上へいくほど温度上昇率大きい</li> <li>床吹出口Hで吹出口風量が大きく、熱負荷が大き過ぎない時に生じる</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>吹出し気流は居住域の空気と完全に混合する前に天井に達し、一部はそのまま還気される(ショートサーキット)</li> </ul>	
C1	<ul style="list-style-type: none"> <li>吹出し気流域：ある高さから上で居住域温度とほぼ等しい</li> <li>居住域：下部ではほぼ温度一定、中部では上ほど温度上昇率大きく、吹出し気流域温度と差がなくなってから上では上ほど温度上昇率小さい</li> <li>熱負荷がある程度以上ある時但し床吹出口Rでは、かつ吹出口風量の大きい時に生じる</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>吹出し気流は下部で居住域の空気を誘引、中部で居住域側に流出しつつ止まり、以降は上向きのピストンフローとなる</li> </ul>	
C2	<ul style="list-style-type: none"> <li>吹出し気流域：ある高さから上で居住域温度とほぼ等しい</li> <li>居住域：ある高さまでほぼ温度一定、吹出し気流域温度がその温度に近づいて差がなくなり、それから上では上へいくほど温度上昇率小さい</li> <li>床吹出口Rで吹出口風量が大きくなく、かつ熱負荷がある程度以上ある時に生じる</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>吹出し気流は下部で居住域の空気を誘引後すぐに居住域側に流出して止まり、以降は上向きのピストンフローとなる</li> </ul>	

出ると共に、拡散混合により両領域間に熱交換がある(単位高さ当たりの熱交換量は温度差に比例すると仮定し比例定数を拡散混合係数と定義)

3) ピストンフロー域;吹出し気流域と居住域との温度差がなくなり空気は上向きに様に流れる。

さらに Table 1 のタイプ C1, C2 において吹出し気流域と居住域の温度差がほとんどなくなる (0.2℃以内と設定した) 最小床上高さを気流到達高さとして定義する。

セル内の熱バランス式を領域ごとに Table 3 に示す。これらの式は行列式  $At = q$  の形にまとめられる。ここで  $t$  は、 $t_{o(m)}$  と  $t_{a(m)}$  とから成り、 $q$  は  $Q_{a(m)}$  から成る。A と  $q$  が与えられれば、A の逆行列により  $t$  を算出できる。A と  $q$  の各要素を求める計算フローを Fig. 5 に示す。計算フローは上述の予測モデルを基に、測定された温度プロフィールの解析結果 (後述) からまとめた。

## 5. 測定された温度プロフィールの解析結果

(1) 誘引域高さ誘引風量 誘引域では居住域から吹出し気流域へ空気が流れ、それ以外の熱移動は無視できると仮定した。この仮定から、誘引域では居住域温一定と導ける。ほとんどすべての実験 CASE において測定された居住域温が 0.3℃ 差以内を判断基準として、誘引域高さ 72.5cm (3 層) を得た。この 3 層の居住域温の平均値を居住域床上温と以下呼称する。また熱バランス式と温度測定値から層ごとの誘引風量が算出できる。床吹出口タイプ H では、誘引風量合計が吹出口風量にほぼ比例することが見出せた (Fig. 6)。床吹出口タイプ R では誘引風量合計値のばらつきが大きいものの、平均値から、吹出口風量に拘わらず誘引風量合計が一定 (280m<sup>3</sup>/h 個) とみなせた。

(2) 居住域床上温 吹出し気流温から居住域床上温への温度上昇に各熱負荷がどの程度寄与するかを温度上昇寄与率にて表した。これは、温度上昇を従属変数、熱負荷温度差(熱負荷すべてが吹出口風量分の空気に与えられたと仮定した時の温度上昇) 3 種 (照明、人体、OA) を独立変数とて回帰分析した時の、各独立変数の係数と定義できる。回帰分析結果を Fig. 7 に示す。

(3) 吹出し気流温の推定 Fig. 8 に、床下チャンバーへの導入給気温、吹出し気流温、居住域床上温の関係を示す。本実験室の構造では、居住域床上温と吹出し気流温との温度差 1 に対し、吹出し気流温と導入給気温との温度差が約 0.3 である。この関係を用い、導入給気温が既知の場合、温度上昇寄与率から吹出し気流温が推定できる。

(4) 気流到達高さ 居住域床上温を用いてアルキメデス (Ar) 数が計算できる。Fig. 9 より、気流到達高さは Ar 数の (-1/2) 乗にほぼ比例するといえる。

(5) 風量の算出 誘引域では居住域から吹出し気流域へ、拡散混合域では吹出し気流域から居住域へと空気が流れるが、各領域で単位高さ当たりの流量一定と仮定すれば、風量バランスから全セル間の風量が計算できる。

(6) 与熱量合計 セル間の風量と温度測定値から各層の熱バランスを考えると層ごとの与熱量が求まる。与

熱量合計と各熱負荷との関係を与熱量寄与率にて表した(温度上昇寄与率と同様の概念)。与熱量寄与率は吹出口風量に依らず、床吹出口タイプ H (または R) で、照明; 19 (17) %, 人体; 83 (80) %, OA; 88 (94) % となった。

(7) 与熱量%プロフィール 各層への与熱量を与熱量合計で割った百分率 (%) を与熱量% と定義し、そのプロフィールを与熱量%プロフィールとする。与熱量%プロフィールを Fig. 10 に示す形で近似する。すなわち、拡散混合域では与熱量%は高さによらず一定、またピストンフロー域では高さに伴って減少する。ピストンフロー域の与熱量%の合計は、Ar 数の (-1/2) 乗にほぼ比例する (Fig. 11) ので、この関係を用いて、与熱量%プロフィールを設定できる。

(8) 拡散混合係数 拡散混合係数を床上高さによらず一定と仮定し、温度測定結果を最もよく表す値を求めると床吹出口タイプ H (または R) で、70 (130) W/m<sup>2</sup> 個となった。

## 6. 温度プロフィールの予測計算

(1) 予測計算の精度 予測モデルによる計算の精度を調べるため、実験 CASE と同じ条件で温度プロフィールを計算し測定データと照合した。結果の例を Fig. 12 に示す。この例のように計算値は、測定されたプロフィールをおおむね良く表した。また Fig. 13 に、居住域の床上高さ 10cm と 185cm の温度差を、計算値と測定値とで比較した結果を示す。どの CASE でも誤差が 0.5℃ 以内にとまった。

(2) 試算条件 床吹出口タイプ H において、照明・人体からの発生熱量をそれぞれ 170, 52W/ 個と設定して試算した結果を Fig. 14, 15 に示す。Fig. 14 は居住域の床上高さ 10cm と 185cm の温度差、また Fig. 15 は両者の平均値 (吹出し気流温基準) である。

(3) 室内一様拡散との比較 Fig. 15 と同条件、ただし室内一様拡散の場合の室内温度 (吹出し気流温基準) を Fig. 16 に示す。Fig. 15 との比較で次のことがわかる。

1) いずれの OA 熱負荷・吹出口風量条件でも、床吹出し方式の方が一様拡散の場合より温度が低い。すなわち、同じ室内設定温を拘束条件とすると、床吹出し方式の方が、同じ吹出口風量であれば給気温度を高くでき、同じ給気温度であれば吹出口風量を少なくできる。換言すれば、床吹出し方式の方が、居住域内で処理すべき熱負荷量が少なく、省エネルギー的である。

2) 同じ吹出口風量では、OA 熱負荷が大きくなると、床吹出し方式の方が温度上昇が緩やかである。すなわち、一様拡散の場合に比べて床吹出し方式は、熱負荷の増加に対して居住域の温度上昇を抑制する。

## 謝 辞

本研究を実施するに当たり、東京大学大学院工学系研究科 鎌田元康教授より御指導いただきました。ここに記して謝意を表します。

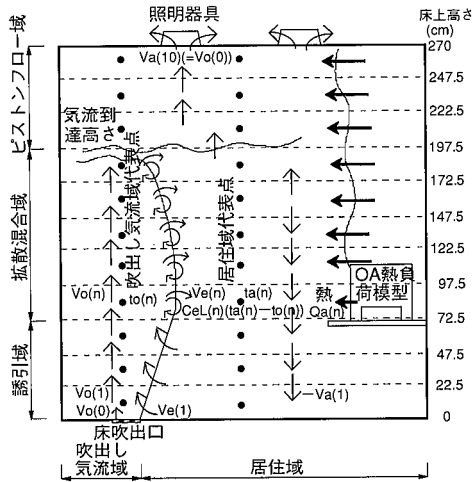


Fig. 4 温度プロファイル予測モデルの模式図  
Model for Temperature Profiles

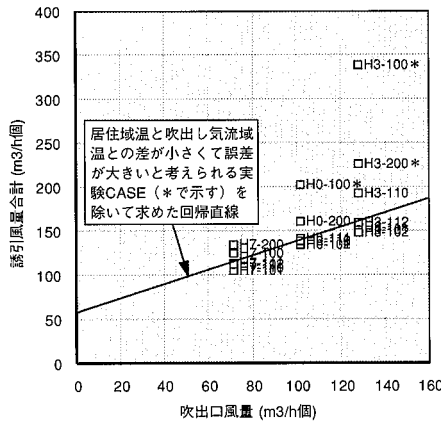


Fig. 6 誘引風量合計と吹出口風量との関係  
Relationship between Total Entrained Air Flow Rate and Initial Jet Flow Rate

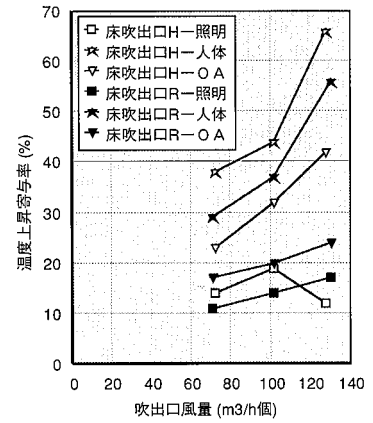


Fig. 7 温度上昇寄与率  
Contributing Ratios to Entrainment Zone Occupied Area Temperature

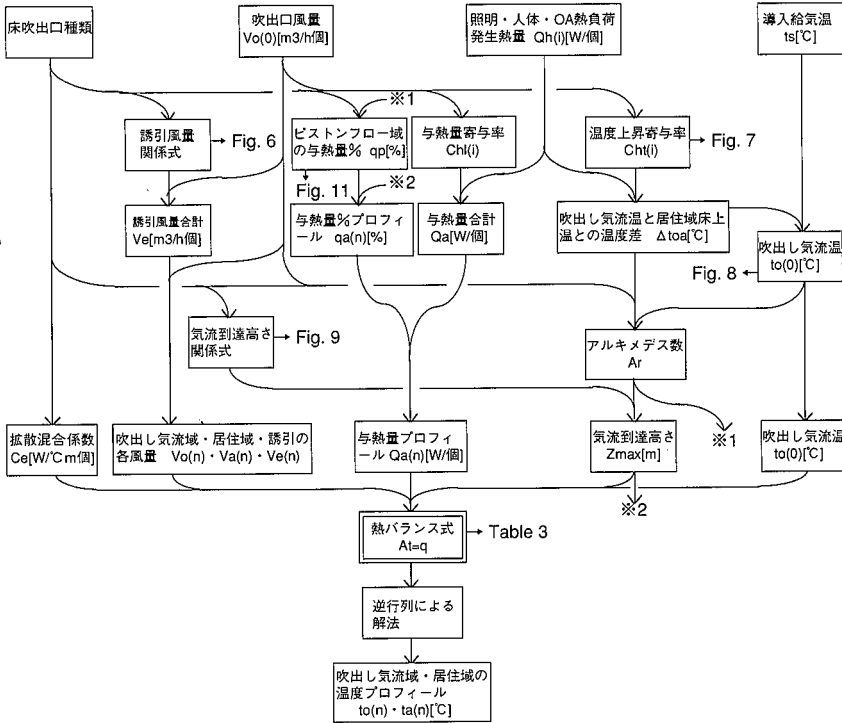


Fig. 5 温度プロファイルの計算フロー  
Calculation Flow for Temperature Profiles

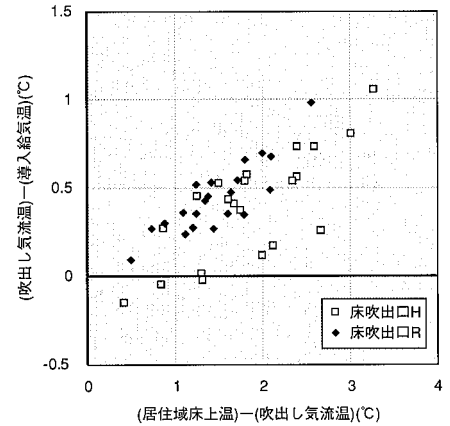


Fig. 8 導入給気温～吹出し気流温～居住域床上温の関係  
Relationship in Temperatures between Air Introduced to Chamber, Initial Jet Flow and Entrainment Zone Occupied Area

Table 3 セル内の熱バランス式  
Heat Balance Equation in Each Cell

	吹出し気流域	居住域
ピストンフロー域	$(C \gamma / 3600)(ta(n)Va(n) - ta(n-1)Va(n-1)) = Qa(n)$	
拡散混合域	$(C \gamma / 3600)(to(n)Vo(n) - to(n-1)Vo(n-1) - to(n)Ve(n)) + CeL(n)(to(n) - ta(n)) = 0$	$(C \gamma / 3600)((ta(n) \leftrightarrow ta(n+1))Va(n) - (ta(n-1) \leftrightarrow ta(n))Va(n-1) + to(n)Ve(n)) + CeL(n)(ta(n) - to(n)) = Qa(n)$
誘引域	$(C \gamma / 3600)(to(n)Vo(n) - to(n-1)Vo(n-1) - ta(n)Ve(n)) = 0$	$(C \gamma / 3600)(ta(n+1)Va(n) - ta(n)Va(n-1) + ta(n)Ve(n)) = 0$

C : 空気の比熱 [J/°Ckg]       $\gamma$  : 空気の密度 [kg/m<sup>3</sup>]      n : 層の番号 (床直上の層でn=1)  
 to(n) : 吹出し気流領域の温度 [°C]      Vo(n) : 吹出し気流領域の風量 [m<sup>3</sup>/h個]      ta(n) : 居住域温度 [°C]  
 Va(n) : 居住域風量 [m<sup>3</sup>/h個]      Ve(n) : 誘引風量 [m<sup>3</sup>/h個]      Ce : 拡散混合係数 [W/m<sup>2</sup>°C個]  
 L(n) : 層厚さ [m]      Qa(n) : 層への与熱量 [W/個]      「個」は床吹出口1個当たりを表わす  
 (ta(n) ↔ ta(n+1))Va(n) は Va(n) ≥ 0 の時 ta(n)Va(n)、また Va(n) < 0 の時 ta(n+1)Va(n) を意味する

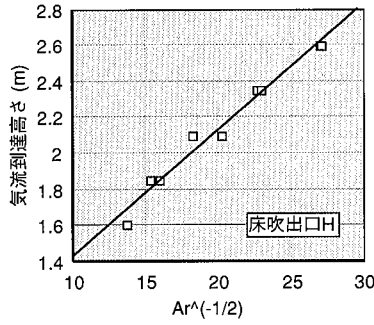


Fig. 9 気流到達高さとの関係  
Relationship between Maximum Height of Jet and Archimedes Number

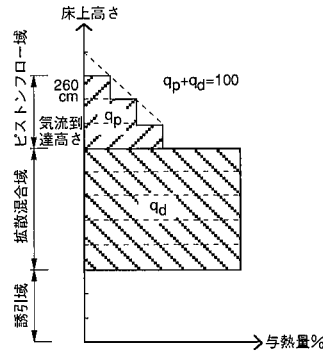


Fig. 10 与熱量%プロフィールの設定  
Modelled Heat Load Percentage Profile

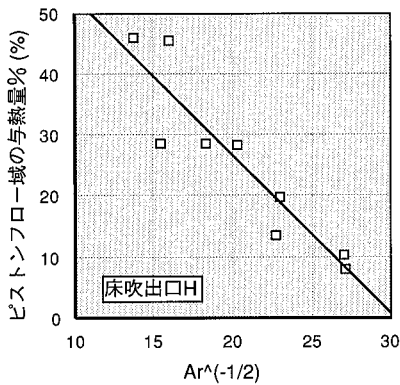


Fig. 11 ピストンフロー域の与熱量%とAr数との関係  
Relationship between Heat Load Percentage in Piston Flow Zone and Archimedes Number

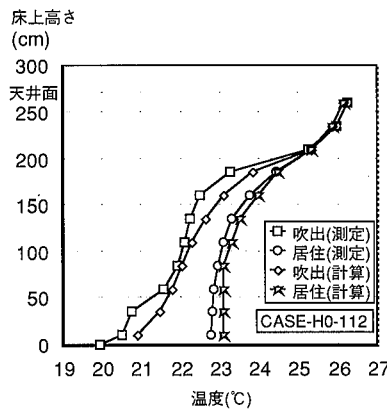


Fig. 12 温度プロフィールにおける計算値～測定値の比較  
Comparison in Temperature Profile between Calculation and Measurement

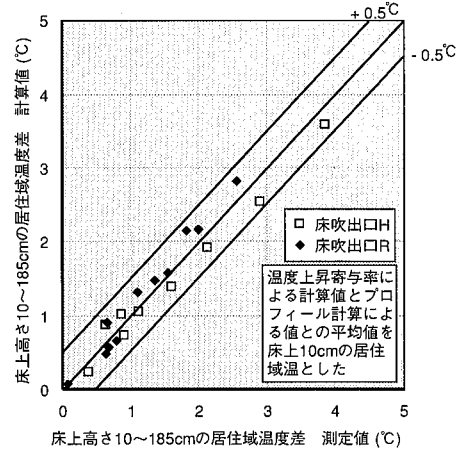


Fig. 13 床上高さ10 cmと185 cmの居住域温度差における計算値～測定値の比較  
Comparison in Occupied Area Temperature Difference of 10 cm and 185 cm Above Floor between Calculation and Measurement

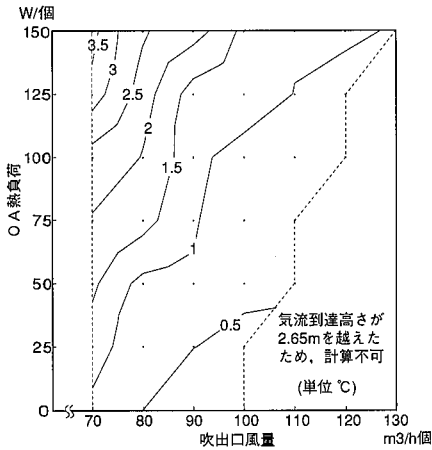


Fig. 14 床上高さ10 cmと185 cmの居住域温度差計算値  
Calculated Occupied Area Temperature Difference between 10 cm and 185 cm Above Floor

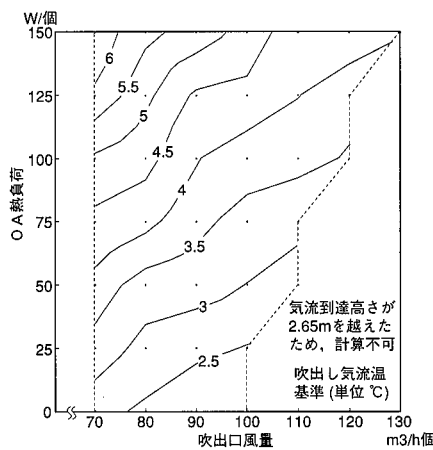


Fig. 15 床上高さ10 cmと185 cmの居住域温度平均計算値  
Average of Calculated Occupied Area Temperatures of 10 cm and 185 cm Above Floor

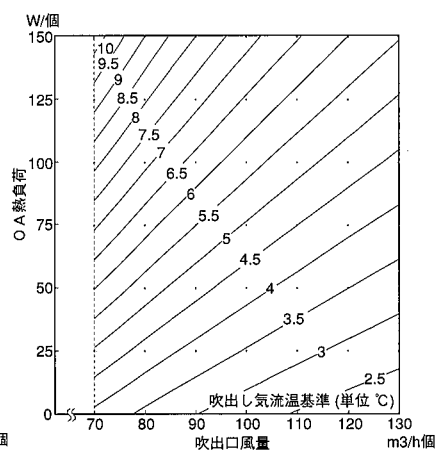


Fig. 16 室内一様拡散時の温度計算値  
Calculated Room Air Temperature in Case of Uniform Temperature Throughout Room

参考文献

- 1) 伊藤：床吹き出し空調システムの省エネルギー性，床吹き出し空調シンポジウム，日本建築学会・環境工学委員会，p. 5～17，(1993)
- 2) 伊藤，他：軸流型吹き出し口を用いた床吹き出し空調システムの室内温度分布特性，日本建築学会計画系論文報告集，Vol. 452，p. 27～35，(1993)
- 3) 平山，他：床吹き出し空調方式の研究(その1～)，日本建築学会大会学術講演梗概集，p. 1183～，(1989～)