

省エネルギー型床吹出し空調システムの開発 (その2)

— 低床化に対応した吹出口風量分布均一化手法の開発 —

藤田尚志 富家貞男
宮川保之 酒井寛二

Underfloor Air Distribution System for Reduced Energy Consumption (Part 2)

— Improvement of Uneven Distribution of Outlet Air Flow Rates from Shallow Air Plenum —

Hisashi Fujita Sadao Tomiie
Yasuyuki Miyagawa Kanji Sakai

Abstract

The objective of this study is to develop a method of improving the uneven distribution of outlet air flow rates from a pressurized shallow air plenum of underfloor air distribution system. The measurements in a mock-up of the underfloor system have revealed that a vortex or one-directional air flow around the outlet causes the outlet air flow rate to be less than predicted. However, this can be improved by guide plates set around the outlet. Numerical simulation was carried out to predict the distribution of outlet air flow rates from an air plenum of any shape. The calculation results were good, only when the legs supporting the floor panels were included in the mesh-dividing process. The outlet air flow rate distribution was worked out with practical accuracy from the calculated static pressures and the adjusting procedure derived from the experimental analysis.

概 要

床下チャンパー加圧型の床吹出し空調方式において、チャンパー高さの低減を図り、それに伴う吹出口風量の不均一等の欠点を、省エネルギー的に許容範囲内に収める手法の開発を研究目的とする。実大二重床スラブ模型での測定の結果、床吹出口まわりでの1)渦の発生、2)ほぼ一方方向に流れる気流(一方気流)が吹出口風量を減少させることを見出した。1)、2)の両要因に対し、床吹出口まわりに設置した整流板が風量回復効果があった。また任意のチャンパー形状で吹出口風量の予測を可能にするため、チャンパー内気流の数値解析を行い、測定結果を再現するためには、床パネル支柱を数値解析のメッシュ分割に組み込むべきことを示した。この数値解析の静圧分布計算結果を基に、測定データ解析から導かれた予測計算フローを使うことで、吹出口風量の計算結果が実用上十分な精度となった。

1. はじめに

床下チャンパー内全体を加圧することで床吹出口から室内へ給気、天井面から還気する、床下チャンパー加圧型床吹出し空調方式において、前報¹⁾では室内温度分布を予測するモデルを提案した。本報では、吹出口風量分布の均一化に有用な手法を開発することを目的とする。なお、チャンパーとその中の気流がほぼ等温であることを前提とする。

床下チャンパー高さを低くできれば(低床化)、階高ひいては建物高さが低減され、建設コストの減少につながる反面、吹出口風量の不均一、送風系の抵抗増加による給気ファンの消費エネルギー増加が予想され、チャンパー高さとのバランスを取る必要がある。そのため本報では、チャンパー高さを低く設定した条件で、吹出口風量のばらつきを許容範囲内に収めることを意図する。

本報の構成はFig. 1に示すように、実大二重床模型で

の測定と、測定結果を再現するための数値解析とに大別される。またFig. 1は本文中の各節間の関係をも示す。

2 実大二重床模型実験

2.1 実験模型概要

実験に用いた二重床模型のシステム図、平面図をFig. 2, Fig. 3に示す。平面寸法約7m×約6mの二重床模型全体はビニルシート小屋組みで覆われる。床下チャンパーは、下面がコンクリートスラブ、上面が珪酸カルシウム製床パネル(裏面は平滑)で構成される。チャンパーの有効高さは可変で、40mm、150mmの2通りに設定した。給気導入口の幅は1000mm、高さは床下チャンパー有効高さと同じである。

空調機からの空気は給気導入口から床下チャンパーに導入された後、9個の床吹出口(F01~F09と呼称)から床パネル上の空間に吹出し、ビニルシート小屋組み上部に

接続されたダクトを通して空調機に全量還気される。床吹出口1個当たりの吹出口風量が平均約130m³/hとなるよう空調機ファン能力を設定した。

床吹出口は旋回流型(φ200mm)を使った(Fig. 4)。床吹出口直下には、バスケットが有/無、または浅型バスケットに置換(Fig. 5)の3通りの条件を設定した。

2.2 測定方法

吹出口風量をファン付きフードで測定した。JIS A 1431に準じ、測定時に床吹出口をフードで覆うことによる圧力損失をファンにて相殺した。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予め求めておき、差圧を精密微差圧計で測定することで風量に換算した。

毛糸を糸の端に付けた風向測定具を床パネルの測定口から挿入し、糸の流れる方向で平均風向を判定した。風向確認後、同開口に熱線風速計の測定部を入れ、チャンパー高さ中央にて風向方向の平均風速を測定した。

チャンパー内平均静圧は、床パネル上の空間の大気圧を基準として精密微差圧計で測定した。

2.3 床下チャンパー内風向風速・静圧分布と吹出口風量の測定結果

床下チャンパー高さ150mm、バスケット有の場合の、チャンパー内風向風速・静圧測定結果をFig. 6に示す。チャンパー内には、時計回りの大きな渦とそれとは逆方向の小さな渦(床吹出口F03付近)が生じている。静圧分布は全体として変化が小さいが、チャンパー中心付近で最も低く、隅では高い。但しF03近くの隅で若干低い。

Fig. 7に周囲静圧(床吹出口中心から600mm離れた2個または4個の測定点での静圧測定値の平均)と吹出口風量の関係を示す。床吹出口F01~F05が床吹出口特性線(周辺気流が静穏な場合の周囲静圧~吹出口風量の関係線)から外れ、吹出口風量が減少している。なお床吹出口特性線を求める測定では、吹出口まわりに渦等の無い静穏な流れをつくるため、整流板を設置した(Fig. 8)。

各床吹出口まわりの風向風速を詳細に測定した結果をFig. 9に示す。床吹出口F01, F02は給気導入口に近いため、風速の大きい一方向気流(床下チャンパー内でほぼ同一方向に流れる床吹出口周囲の気流)を受けている。また、F03~F05では床吹出口の周囲を旋回する気流(渦)が生じている。このことから、床吹出口まわりに生じた渦と一方向気流が吹出口風量減少の原因と推察された。

2.4 吹出口風量への渦の影響

床吹出口F03中心からの距離と、静圧・全圧の関係をFig. 10に示す。全圧は床吹出口に近づくると若干減少するがほとんど一定である。一方、静圧は床吹出口に近づくに伴い大きく低下する。したがって、静圧低下の主原因は動圧の増加、すなわち風速の増加である。

また、床吹出口まわりの気流が円運動していると仮定すると円運動による静圧勾配 $\partial P_s / \partial r$ は次式で表現できる(各記号の説明はTable 1参照)。

$$\partial P_s / \partial r = \rho v_r^2 / r \quad \dots(1)$$

この計算式に $r=0.15\text{m}$ と 0.25m における風速値を代入すると、求まる静圧勾配(図中の直線)は静圧測定値の傾きにほぼ一致した。したがって、気流は円運動に近い流れと言える。以上より、床吹出口まわりに渦が発生し、床吹出口に近づくほど渦の風速が大きいため静圧低下が生じたと結論づけられる。

2.5 吹出口風量への一方向気流の影響

Fig. 11に示す風路(Fig. 3の模型の床下を間仕切る)において、設定した床吹出口の周囲静圧ごとに一方向気流風速を段階的に変え、吹出口風量を測定した。

床吹出口が一方向気流をほとんど受けず、まわりに渦の発生もない時、床吹出口特性線は(2)式で表されるが、床吹出口が一方向気流を受けた時、ある一方向気流風速値 v_c 以上において、 $(V/b)^{1/a}$ の値が、 P_s 一定の場合は v に、逆に v 一定の場合は P_s にほぼ1次的に比例することを見出した。この関係は(3)式で表現できる。係数 $\alpha_1 \sim \alpha_3$ は、測定データから回帰分析により求められる。

$$V = b P_s^a \quad \dots(2)$$

$$(V/b)^{1/a} = \alpha_1 P_s v + \alpha_2 P_s + \alpha_3 v \quad \dots(3)$$

また、 $v < v_c$ の時は次式で近似する。これは $v=0$ で $(V/b)^{1/a} = P_s$ 、かつ $v=v_c$ で任意の P_s で連続となるよう定めた。

$$(V/b)^{1/a} = (\alpha_1 + (\alpha_2 - 1)/v_c) P_s v + P_s + \alpha_3 v \quad \dots(4)$$

(3)式、(4)式による計算値は、測定値をよく表す(Fig. 12)。図中、風量差比率とは、基準吹出口風量(床吹出口特性線で周囲静圧に対応する吹出口風量)と吹出口風量測定値の風量差を基準吹出口風量で除した値である。他3種類の床吹出口仕様でもこの近似方法が有効なことを確認した。

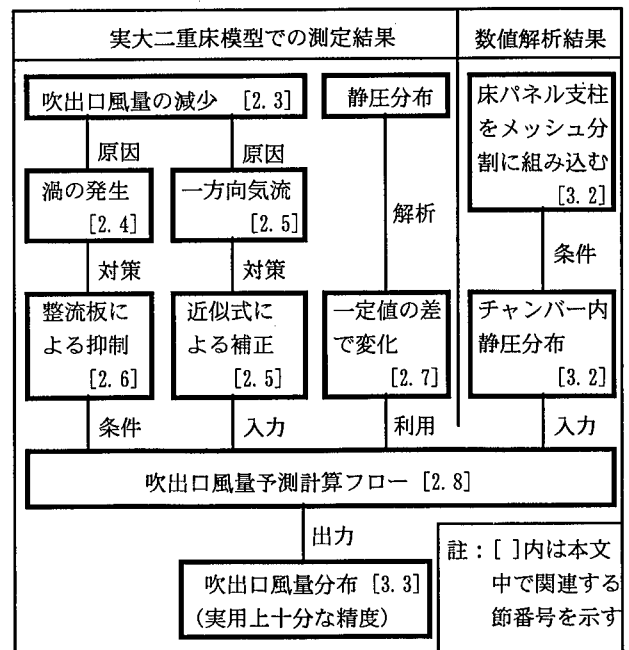


Fig.1 本文の各節間の関係
Relationship between Paragraphs

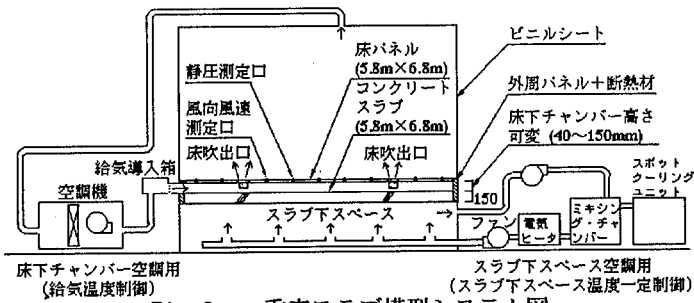


Fig. 2 二重床スラブ模型システム図
System of Experimental Underfloor Air Chamber

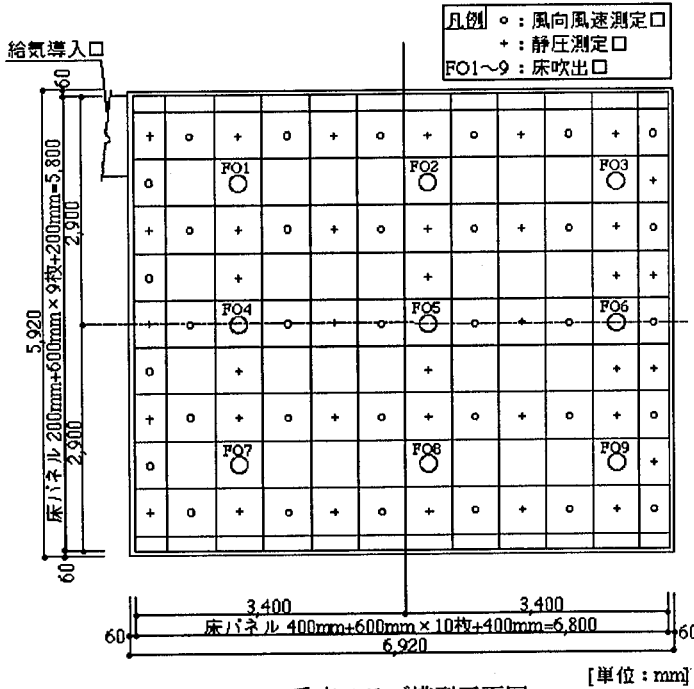


Fig. 3 二重床スラブ模型平面図
Plan of Experimental Underfloor Air Chamber

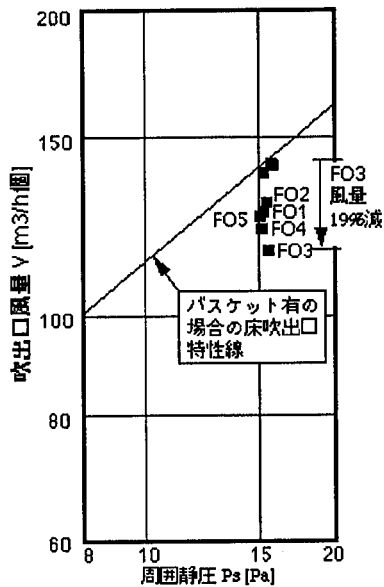


Fig. 7 周囲静圧と吹出口風量の関係
Relationship between Static Pressure and Outlet Flow Rate

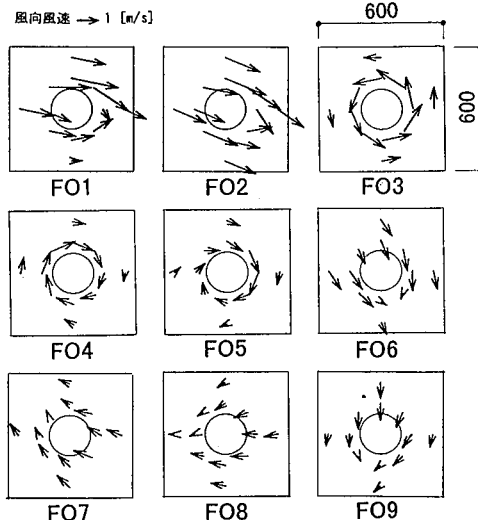


Fig. 9 床吹出口まわりの風向風速分布 (バスケット有の場合)
Mean Velocity Vectors around Outlet with Basket

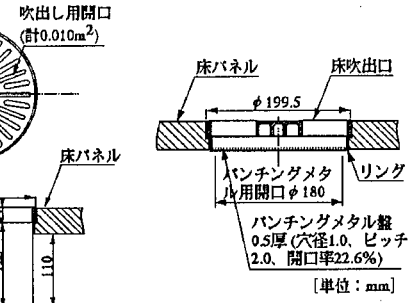


Fig. 4 床吹出口平面断面図
Plan and Cross-section of Floor-mounted Outlet

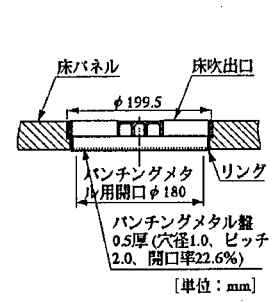


Fig. 5 浅型バスケット断面図
Cross-section of Shallow Basket

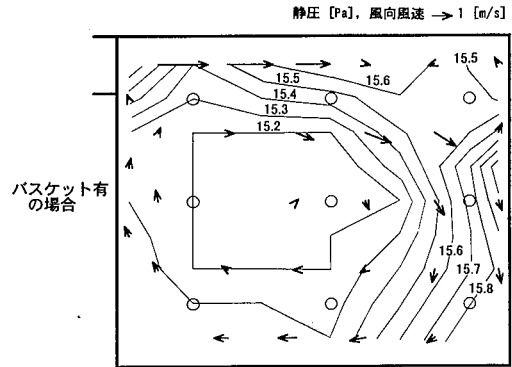


Fig. 6 床下チャンバー内風向風速・静圧分布測定結果
Measured Mean Velocity Vectors and Static Pressure Field in Underfloor Air Chamber

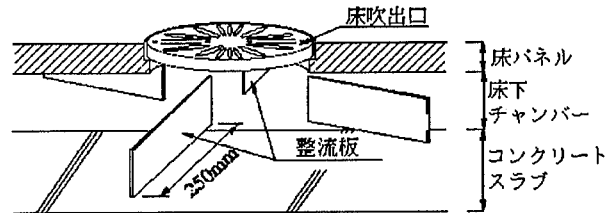


Fig. 8 渦抑制用整流板
Guide Plates for Restraint of Vortex

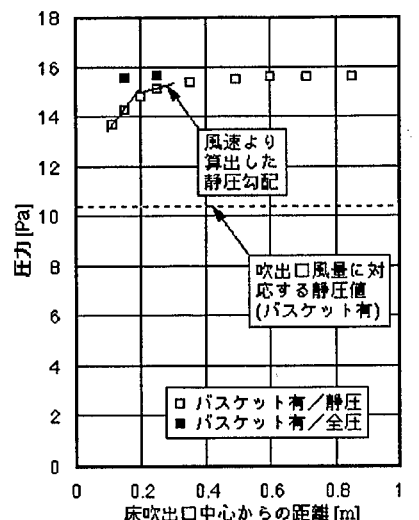


Fig. 10 床吹出口F03中心からの距離と圧力の関係
Relationship between Pressure and Distance from Outlet F03 Center

2.6 整流板の吹出口風量回復効果

整流板設置による床吹出口まわりの渦発生の抑制効果を調べるため、渦が観測された床吹出口F03において、整流板の枚数(1, 2, 4枚), 高さ(50, 110, 150mm), 底板 \square 500mm(有, 無)の条件を変えて吹出口風量を測定した。結果をまとめたFig. 13から次のことが読み取れる。

1) 整流板に底板を付けても、整流板4枚のみの場合に比べ吹出口風量はほとんど変わらない。

2) 整流板4枚の場合に比べ2枚では吹出口風量はやや少ないが、整流板高さ110mm以上でほとんど差がない。

3) 整流板が無い場合に比べると、整流板1枚の設置でも吹出口風量はかなり回復する。

床下チャンバー高さ40mm, バスケット無に設定し、整流板(高さ40mm, 床吹出口当たり4枚)の設置条件を次のように変えて吹出口風量の違いを測定した。

a) 整流板を付けない

b) 予備測定にて渦が観測された床吹出口(F03, F04, F09)と吹出口風量の変動が著しく測定が困難な床吹出口(F05, F08)に整流板を設置

c) 全床吹出口に設置

結果をFig. 14に示す。吹出口風量の不均一率(=最大風量-最小風量/平均風量)²⁾は、a) 40%, b) 49%, c) 22%である。b)がa)より不均一率が大きいのは、渦が観測された床吹出口で整流板設置により風量が回復した結果、他の床吹出口、特にF01で風量が減少したためである。c)では一方向気流の影響を受けるF01でも風量が回復し、不均一率が大きく改善された。これは、整流板が一方向気流の影響に対しても抑制効果があることを示す。

2.7 床下チャンバー内風向風速・静圧分布の比較

床下チャンバー形状と床吹出口配置が同一の条件で、床吹出口特性の違いによるチャンバー内の風向風速・静圧分布の変化を調べるため、チャンバー高さ150mmでバスケット有/無の2ケースで比較した。両ケースとも床吹出口F03~F05に整流板を付けている。

比較の結果、風向風速分布はほとんど同じであったが、静圧分布は、両ケースの対応する測定データが傾き1の直線上に分布する(Fig. 15)ので、場所によらずほぼ一定値の差があることがわかる。この変化の特徴は他3種類のチャンバー形状での実験でも確認された。

2.8 床吹出口特性を変えた場合の吹出口風量予測

以上の知見を用い、床下チャンバー形状と床吹出口配置が同一、かつ床吹出口まわりの渦発生が抑制されている条件下で、床吹出口すべてを別特性のものに入れ替えた場合の吹出口風量を予測する計算フローをまとめた(Fig. 16)。入力すべき値は床吹出口(旧)での床吹出口周囲静圧と一方向気流風速、床吹出口(新)の特性値(a, b, v_c , α_1 , α_2 , α_3)である。計算フローの内容は、床吹出口(旧)における周囲静圧を一定値 ΔP_s だけ加減算し、その ΔP_s の調整により床吹出口(新)の風量合計を設定給気量に合わせる。

チャンバー高さ40mmにおいてバスケット無の場合の周囲静圧データから、浅型バスケット有の場合の吹出口風量を予測した試算結果をFig. 17に示す。比較のため図には、実際の吹出口風量測定値と、一方向気流の影響を無視した場合の計算結果も並べた。床吹出口F01で一方向気流の影響のため、測定された吹出口風量は他の床吹出口に比べ小さい。「一方向気流無視」では、この風量減少が表れない。「一方向気流考慮」で測定値に近づき、吹出口風量の不均一率の値も測定結果32%に対し、一方向気流無視/考慮で9%/26%となる。

3. 数値解析

3.1 数値解析概要

k- ϵ 型2方程式乱流モデルを基にした流体解析ソフトウェアを使って床下チャンバー内気流の数値解析を試みた。チャンバー全体を数値解析対象としてメッシュ分割した。計算負荷軽減のため、床吹出口 ϕ 200mmを \square 200mm(3 \times 3分割)で近似した。床パネルの支柱の気流への影響を無視できないことが判明した(詳しくは後述)ので、支柱を平面 \square 30mm(2 \times 2分割)の角柱で表現した。隣り合うメッシュの寸法差を最大2倍までとし、チャンバー高さ150mmの場合でチャンバー内を138 \times 121 \times 10メッシュに分割した。また床吹出口特性の測定結果を、床吹出口面での静圧差 \sim 風速の関係として与えた。

数値解析の設定条件は、チャンバー高さ40mm/150mm, バスケット有/無/浅型バスケット有, 整流板の有/無, 床パネル支柱の有/無を組み合わせた。

3.2 数値解析結果

チャンバー高さ150mm, バスケット有, 整流板無, 支柱有/無の条件での数値解析計算結果から測定点と同一位置のデータを抽出して、風向風速・静圧分布をFig. 18に示す。

風向風速分布では、1)床吹出口F03まわりの渦の大きさ、2)全体の風速の減少状況に関して「支柱有」が「支柱無」より測定結果を良く再現している。すべての静圧測定位置における静圧測定値と計算値との対比では「支柱無」では規則性が捉えられないのに比べ、「支柱有」ではプロット点が傾き=1の分布を示した。これは2.7節で述べた、床吹出口特性を変えた場合の変化と同傾向である。

3.3 数値解析による吹出口風量予測

前述のように、吹出口風量に1)渦、2)一方向気流が影響する。本数値解析では床吹出口形状を近似しているため、これらの影響が正確に定量化される保証がない。しかし数値解析においても、床吹出口に整流板を設けることで渦の影響を抑え、またFig. 16の吹出口風量予測計算フローを使うことで、一方向気流の影響が評価できる。

その検証のため、チャンバー高さ40mm, 浅型バスケット有, 整流板有(床吹出口F03~5, F08, F09)に設定し、

Table 1 記号の説明
Nomenclature

a, b: 床吹出口特性式の乗数、係数	v_c : 一方気流中の床吹出口特性を分ける境界風速 [m/s]
P_s : 床吹出口の周囲の平均静圧 [Pa]	v_R : 円接線方向の平均風速 [m/s]
r: 床吹出口中心軸からの水平距離 [m]	$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$: 一方気流中の床吹出口特性を規定する係数、定数
V: 吹出口風量 [m ³ /(h個)]	Δ : 変化量
v: 一方気流風速 [m/s]	ρ : 流体(空気)密度 [kg/m ³]

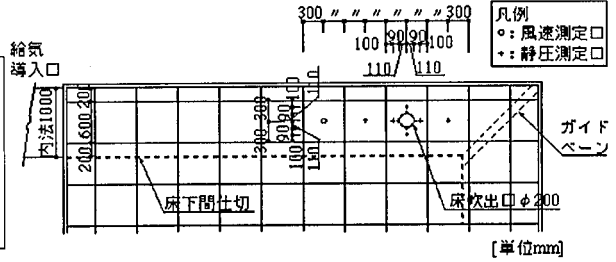


Fig. 11 一方気流中の床吹出口特性測定用風路
Wind Channel for Measurement of Characteristics of Outlet in One-directional Air Stream

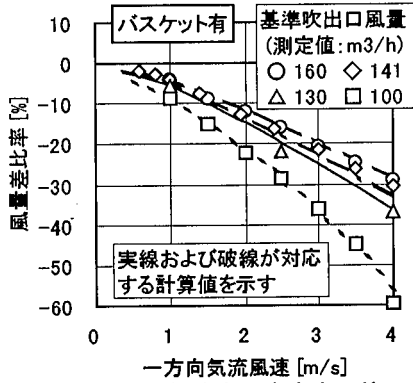


Fig. 12 一方気流中の床吹出口特性の近似

Approximation of Characteristics of Outlet in One-directional Air Stream

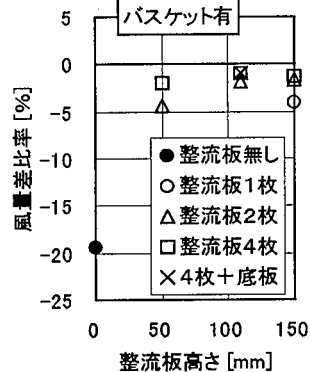


Fig. 13 整流板形状と吹出口風量回復効果の関係

Relationship between Guide Plate Configuration and Effect on Outlet Air Flow

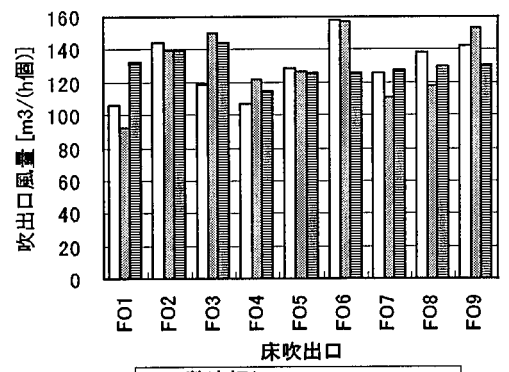


Fig. 14 整流板設置による吹出口風量の変化

Change in Outlet Air Flow in Relation to Guide Plates



Fig. 15 静圧分布の比較(測定～測定)

Comparison between Measured Static Pressures

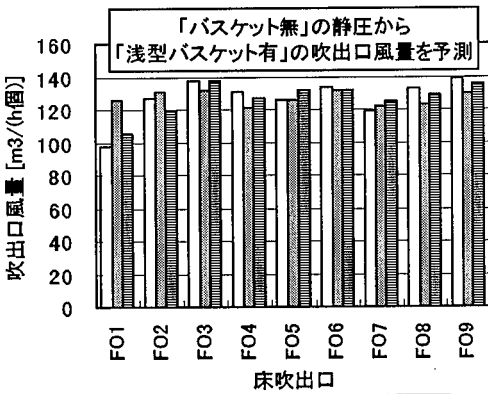


Fig. 17 周囲静圧測定値から別特性の吹出口の風量予測

Prediction of Outlet Flow Rate with Different Outlet Characteristics from Measured Static Pressure

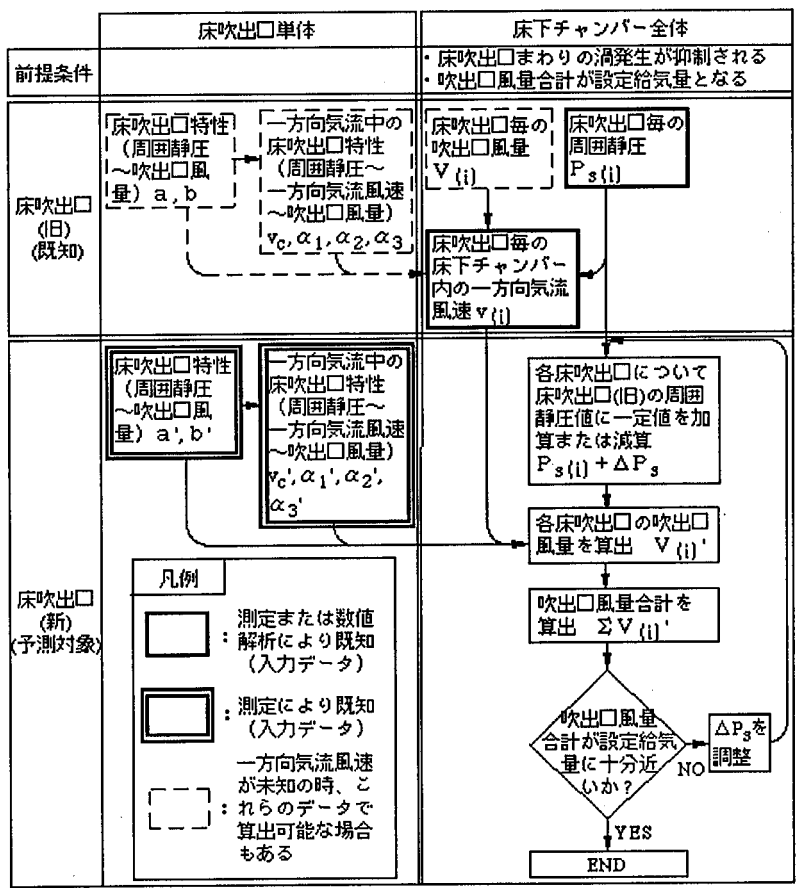


Fig. 16 床吹出口特性を変えた場合の吹出口風量予測計算フロー
Predictive Calculation Flow for Outlet Flow Rate after Change in Outlet Characteristics

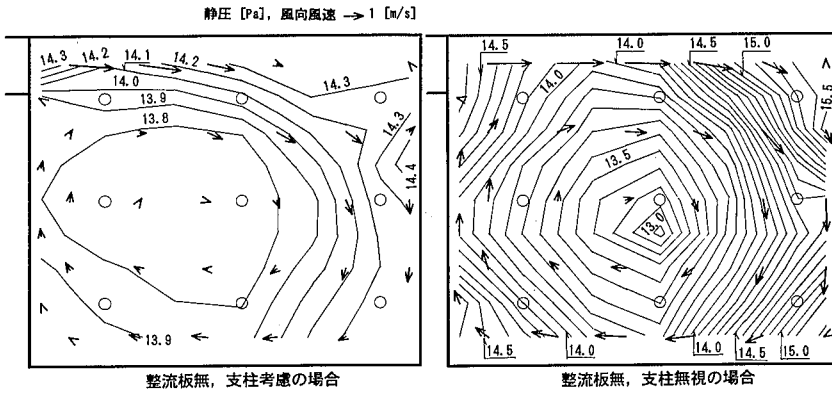


Fig. 18 床下チャンパー内風向風速・静圧分布計算結果

Calculated Wind Direction/Velocity and Static Pressure in Underfloor Air Chamber

次の予測方法で求めた吹出口風量を同条件の吹出口風量測定結果と照合した (Fig. 19)。

- a) 数値解析の床吹出口面を通過する風速の計算結果から算出
- b) 数値解析の静圧計算結果 (周囲静圧) と床吹出口特性から算出 (一方向気流の影響無視)
- c) 数値解析の静圧計算結果 (周囲静圧) を基に、予測計算フローと床吹出口特性を使い算出 (一方向気流の影響考慮)

吹出口風量の不均一率は、測定結果32%に対し、a) 14%、b) 10%、c) 25%である。a)、b)とも大差なく、特に床吹出口F01で測定結果との差が大きい。c)では一方向気流による風量減少が表された結果、床吹出口F01でも吹出口風量が測定値に最も近くなり、不均一率も近く、吹出口風量の予測精度としては実用上十分と考える。

4. まとめ

平面約7m×約6mの二重床模型にて、チャンパー形状、床吹出口状態等を各種設定し、等温条件にてチャンパー内風向風速・静圧分布、吹出口風量等を測定した。測定・解析結果は次のとおりである。

- 1) 床吹出口の周囲静圧と吹出口風量との関係が、周辺気流が静穏な状態で求まる関係線 (床吹出口特性線) から外れ、吹出口風量が少ないことがあり、その原因が床吹出口まわりでの1) 渦の発生、または2) 一方向気流であることを見出した。
- 2) 一方向気流による吹出口風量の変化を表す近似式を、測定データの回帰分析から導出した。
- 3) 渦が生じている床吹出口のまわりに放射状に1~4枚の整流板を設置し、吹出口風量が回復することを確認した。
- 4) この整流板は、一方向気流を受ける床吹出口に設置しても、ある程度吹出口風量の回復効果があった。
- 5) 床下チャンパー形状と床吹出口配置が同一の条件

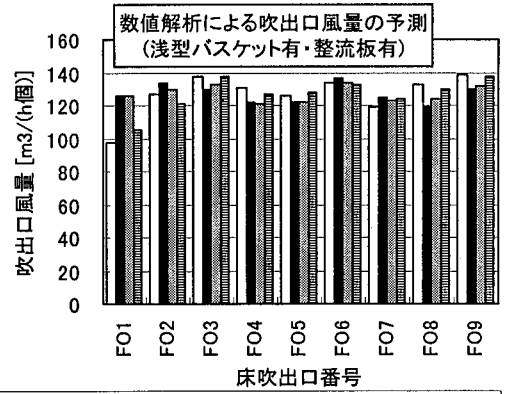


Fig. 19 吹出口風量の比較 (計算～測定) Comparison between Calculated and Measured Outlet Flow Rates

で、すべての床吹出口を別特性のものに替えた場合、風向風速分布はほとんど同じ、静圧分布は場所に依らずほぼ一定値だけ増減した。

6) 床吹出口まわりの渦発生が抑制されている条件下で、すべての床吹出口を別特性のものに替えた場合の吹出口風量の予測計算フローをまとめた。

k-ε型2方程式乱流モデルを基にした流体解析ソフトウェアにより、チャンパー内気流の数値解析を行い、同条件の測定結果の再現を試みた。結果は次のとおりである。

- 1) 測定結果を再現するためには、メッシュ分割において床パネルの支柱を組み込む必要がある。
- 2) 床パネル支柱を考慮し、渦発生の抑制を前提とした上で、上述の予測計算フローを使い一方向気流風速による補正を加えることで、吹出口風量の計算結果が測定結果に近づき、実用上十分な精度と考える。

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。

参考文献

- 1) 藤田, 他: 省エネルギー型ダクトレス空調システムの開発 (その1) 室内温度プロファイル予測モデルの構築, 大林組技術研究所報 No. 54, p. 59~64, (1997)
- 2) 羽山, 他: チャンパー吹出し方式における空調気流の検討 (その1 チャンパーの静圧損失と一様吹出しについて), 日本建築学会大会学術講演梗概集 4204, p. 407~408, (1985)