

タスク域空調を目的とした床吹出口の開発と気流性状の測定

旋回流型床吹出口の概要および PIV を用いた可視化による旋回効果の測定

DEVELOPMENT OF FLOOR MOUNTED AIR DIFFUSER FOR TASK SPACE AIR-CONDITIONING AND MEASUREMENTS OF AIRFLOW CHARACTERISTIC

Outline of the floor mounted air diffuser with swirl flow type and measurements of effects of swirl flow with PIV

伊藤 優*, 村江 行忠*, 鈴木 孝彦*, 三浦 寿幸**, 岡本 隆司***
Yu ITO, Yukitada MURAE, Takahiko SUZUKI, Toshiyuki MIURA and Takashi OKAMOTO

This paper describes the Experiments on Floor mounted air diffuser for task space air conditioning. The Experiments were conducted for floor mounted air diffuser for task area made as an experiment, with a Swirl-vane of different angle, without swirl-vane. Evaluation criteria were air temperature, wind speed, turbulent flow and prediction of draught risk. Then the airflow characteristics are analyzed the data obtained from PIV measurements. The vertical and horizontal distribution of velocity vector and turbulent energy, relationships between length from air diffuser and wind speed ratio and entrainment ratio were compared with the air flow from non-swirl type air diffuser. The following results were obtained.

1. From the result of measurements at evaluation points, if temperature difference is large, turbulent intensity with swirl-vane have a tendency to be smaller than without. Suitable task environment might be able to be built with a floor mounted air diffuser for task with swirl-vane.
2. In view of the pictures of the distribution of wind velocity vector and turbulent energy, the air flow from swirl type air diffuser expanded to the whole of space with drawing surrounding air more than non-swirl type.

Keywords: Floor mounted air diffuser, Task space air-conditioning, Airflow characteristics, Effects of swirl flow, PIV
床吹出口, タスク域空調, 気流性状, 旋回効果, PIV

1. はじめに

近年, ネットゼロエネルギービル(ZEB)の実現に向けた取り組み, CO₂排出量の削減, 節電対策など省エネルギー対策への要求が急速に高まりつつある。その中でオフィス環境においては, 省エネルギーなどを目的としてタスク域とアンビエント域を分けて環境を制御する手法が注目されている。タスク・アンビエントシステムについては照明分野において古くから取り組みがなされてきているが, 上記のような省エネルギー化への要求の高まりとともに, 空調分野においても, アンビエント(全体)空調とタスク空調を別々に行う手法が注目されてきている。

上記背景のもと, タスク域の環境制御手法として, 在室者の近くから吹出すことができる床吹出空調システムに着目し, タスク空調用の床吹出口を試作した。続いて, 試作した床吹出口に対して, 温度分布およびタスク域の気流性状を測定した。吹出口の旋回流に関しては, 半澤ら¹⁾により旋回羽根の角度で旋回の強さが変わり, 気流性状に大きく影響されることが示されている。本研究では, 試作した床吹出口の旋回羽根の角度の違いに対して実験的に検討した。さらに, 近年建築分野において室内などの気流性状の検討に多く活用されるようになったPIV (Particle Image Velocimetry; 粒子画像流速測定法)²⁾を用いて吹出口周辺の気流の空間分布を測定した。連続的な気

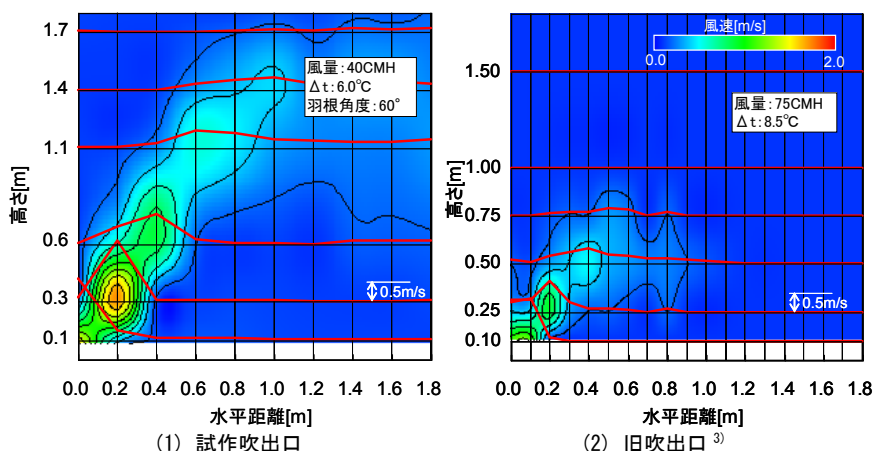
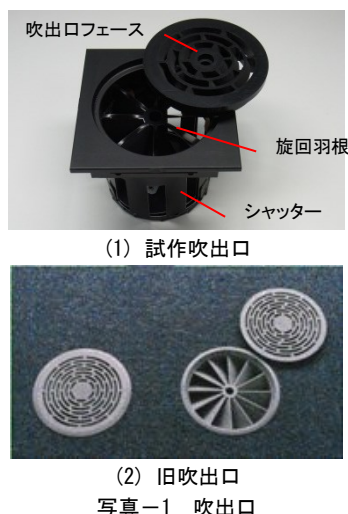


図-1 風速鉛直分布の比較

* 戸田建設(株)技術研究所 修士(工学)

*** 戸田建設(株)設備設計部

** 筑波技術大学 産業技術学部 教授・博士(工学)

(元 戸田建設(株)技術研究所)

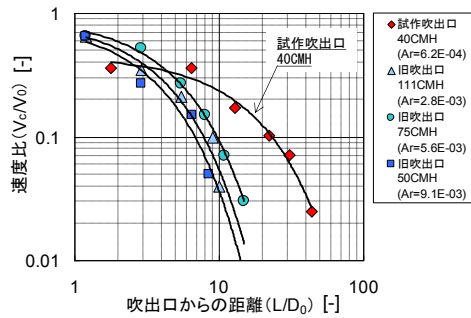


図-2 吹出口からの距離(距離比)と風速比の関係の比較

流分布の時系列データを分析し、非旋回流型と比較することで、旋回流型吹出口における気流特性の把握を試みた。

本報告では、試作した旋回流型吹出口を概説するとともに、熱・気流性状の測定結果について述べる。

2. 試作吹出口の概要

2.1 吹出口の概要

今回試作した床吹出口(写真-1(1))は、既報^{3,4)}にて報告した床吹出口(写真-1(2))。以下、旧吹出口)をタスク空調用に小型化したものであり、より少ない風量で着席時の頭部以下における環境制御を狙いとしている。内蔵の旋回羽根により旋回流を得てドラフトを軽減するとともに、気流に方向性を持たせるために角度をつけた回転が可能な吹出口フェースと、風量調整を行うことが可能なシャッターを設けることで、レイアウトや個人の好みに対して自由度と可変性を確保した。

2.2 吹出口の基本特性

後述する実験とは別に、試作吹出口の基本特性を測定した。風速分布および無次元化した吹出口からの距離^{注1)}と速度比^{注2)}との関係を旧吹出口と比較し、それぞれ図-1、図-2に示す。

図-2より、試作吹出口は旧吹出口と比べて距離と風速の関係において異なる特性を有している。今回タスク域空調のための風量は100m³/h以下の少風量を想定しているが、旧吹出口は風量が少ない場合には到達距離や高さ方向の影響範囲が不十分であるものと思われた。一方、試作吹出口は旧吹出口に比べ、風量が少ないにも関わらず到達距離が長く、FL+1,100mmまで気流の影響範囲があることが、図-1からも期待できる。

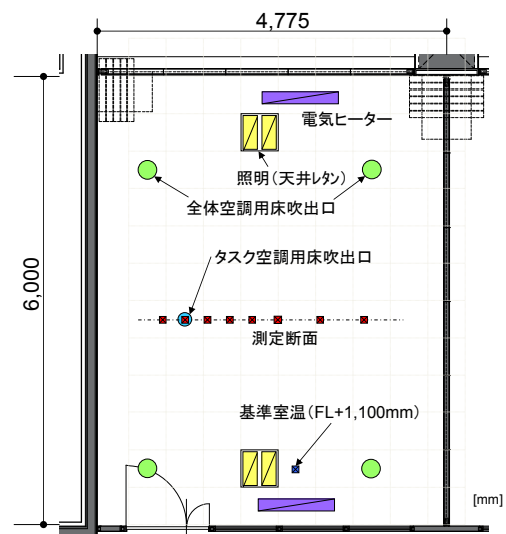
3. 実験概要

3.1 実験条件

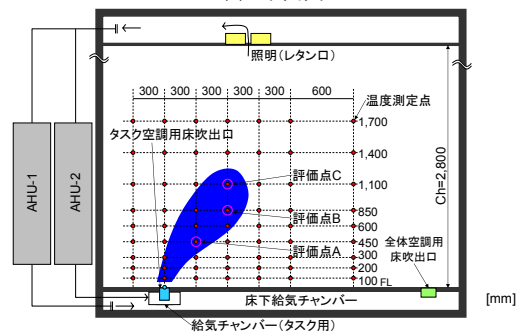
実験条件を表-1に、実験室の平面図および測定断面を図-3にそれぞれ示す。実験は、茨城県つくば市にある戸田建設(株)技術研究所内の約29m²のオフィスを想定した室内環境実験室で行った⁵⁾。実験室内には内部負荷として電気ヒータ(1000W×2)を設置し、全体空調として床下を給気チャンバーとした4隅の床吹出口(合計風量約300m³/h)により室温が28℃になるように空調(冷房)を行った。評価対象となる試作吹出

表-1 実験条件

項目	条件等
空調条件	・全体空調 設定室温: 28℃ 風量: 約 300m ³ /h (床吹出口 4 個)
	・タスク空調 吹出温度: 22℃ (ΔT=6℃) 吹出風量: 40m ³ /h
	・熱負荷 パネル式電気ヒータ 1000W×2 台
測定項目	・風速: 熱線式風速計、無指向性プローブ (カノマックス製) 測定時間: 1sec×60=60sec
	・風速分布: PIV 測定時間: 1/100sec×500=5sec
	・温度: T 型熱電対 測定時間: 10sec×6=60sec
	・風量: 風量測定器 (コーナー札幌製)



(1) 平面図



(2) 断面図

図-3 実験室概要



写真-2 旋回羽根角度

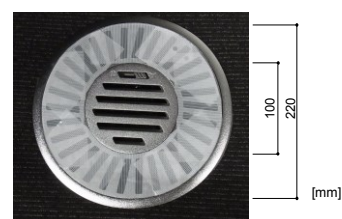


写真-3 非旋回流型吹出口

口は別途設けたチャンバーを介し、吹出温度を 22°C ($\Delta t=6^{\circ}\text{C}$)、吹出風量を $40\text{m}^3/\text{h}$ とした。

3.2 実験ケース

実験ケースを表-2 に示す。今回試作した旋回流型吹出口の旋回羽根角度を 30° 、 45° 、 60° (写真-2) と旋回羽根なしを加えた 4 条件を Case1 とし、非旋回流型の吹出口を Case2 とし、計 2 ケース 5 条件測定した。なお、旋回流型吹出口の旋回羽根角度については 30° 、 45° 、 60° 、旋回羽根なしの順に吹出気流の旋回が強いものと考えられる。また、非旋回流型吹出口(写真-3)には、丸型床吹出口(空研工業製, SKF-220TW 型)を用い、外周側開口部分を目張りすることで、中央部のスリット状開口から指向性のある気流のみが吹出るようにした。

大別して 2 種類の実験を行った。はじめに、旋回流型吹出口の角度を変えた場合の温度分布と、タスク域における評価点における気流性状を測定した。次に、気流の分布を可視化し、詳細データを分析することで吹出口の旋回流の効果を測定した。表-2 中にそれぞれの実験における対象測定ケースを示す。

3.3 測定点・測定概要

(1) 熱・気流性状測定

図-3 に示すように、試作吹出口の中心を通る鉛直断面において、T 型熱電対で空気温度分布を測定した。また吹出流の影響が及ぶと考えられる範囲内の着席者の位置を想定した点を、評価点 A(距離比 $L/D_0=9.58$)、B(距離比 $L/D_0=18.44$)、C(距離比 $L/D_0=22.2$) と設定し、各評価点における風速を、無指向性プローブを有する熱線風速計により 1 秒間隔で 1 分間測定した。

(2) 可視化実験

図-4 に可視化実験概要図、表-3 に PIV 測定概要をそれぞれ示す。床下に設けたチャンバー内にてトレーサガスを空調の気流に混合させて室内に吹出し、吹出流にレーザーを当ててことで気流を可視化した。撮影対象は、吹出口の中心を含む鉛直断面と、床からの高さ 300mm における水平面の 2 面とし、それぞれ別々に測定を実施した。撮影対象領域の大きさは、鉛直断面を $1,500\text{mm}\times 1,500\text{mm}$ 、水平面を $900\text{mm}\times 900\text{mm}$ とし、それぞれの垂直方向からハイスピードデジタル CCD カメラで可視化した気流を撮影した。1/100 秒間隔で 500 枚(5 秒間)撮影し、各画像データを分析した。

4. 測定結果

4.1 熱・気流性状の測定結果

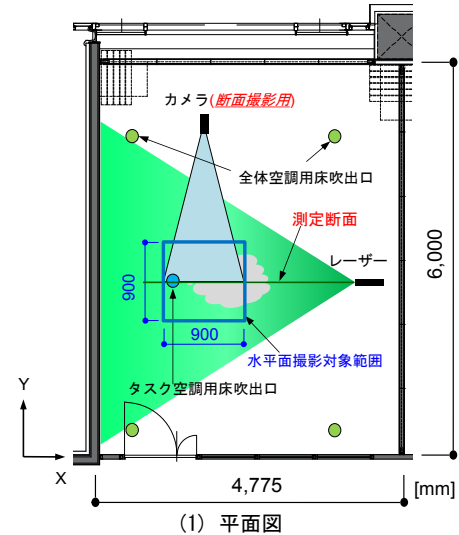
以下に、旋回流型吹出口の Case1-1~1-4 を対象に、測定断面における温度分布および評価点 A~C において熱線風速計を用いて測定した平均風速、風速の標準偏差、乱流強度の比較を示す。なお測定に用いた無指向性プローブは直交方向の 2 次元的な流れを測定するものであり、測定結果には 3 次元的な流れは加味されているものではない。

(1) 温度分布

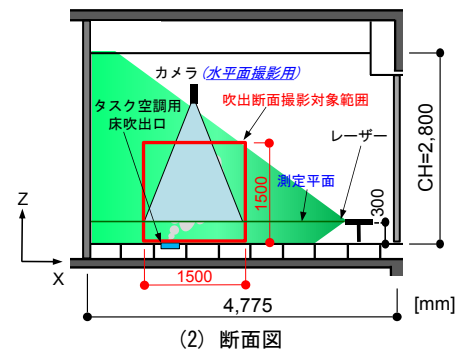
基準室温に対する補正温度分布^{注 3)}を図-5 に、評価点および吹出口における温度差比^{注 4)}を図-6 に示

表-2 実験ケース

Case 名	吹出口 種類	旋回羽根 角度	熱・気流 性状測定	可視化 実験
Case1-1	旋回流型	30°	○	○
Case1-2	旋回流型	45°	○	×
Case1-3	旋回流型	60°	○	×
Case1-4	旋回流型	羽根無し	○	○
Case2	非旋回流型	—	×	○



(1) 平面図



(2) 断面図

図-4 可視化実験概要図

表-3 PIV 測定概要

項目	機器・条件等
カメラ	ハイスピード CCD カメラ
レーザー	PIV Laser G4000 出力: 4W
トレーサガス	PORTA SMOKE PS-2002
ソフトウェア	カメラ制御: Ditect k-II Software 画像解析: Ditect Dipp-Flow
測定間隔	10msec (100fps)
撮影対象領域	吹出断面: $1500\text{mm}\times 1500\text{mm}$ 水平面: $900\text{mm}\times 900\text{mm}$
画像サイズ	$1024\text{pixel}\times 1024\text{pixel}$
測定時間	5 秒間
測定点数	吹出断面: 15 点 $\times$ 15 点(100mm 間隔) 水平面: 19 点 $\times$ 19 点(45mm 間隔)
検査領域	吹出断面: $\pm 33\text{pixel}\times \pm 33\text{pixel}$ 水平面: $\pm 26\text{pixel}\times \pm 26\text{pixel}$
探查範囲	吹出断面: $\pm 15\text{pixel}$, 水平面: $\pm 26\text{pixel}$

す。図-5を見ると、旋回羽根が無いCase1-4では設定室温よりも低い範囲がFL+1.7m以上に及んでいた。旋回羽根の角度による違いについては補正温度分布においては顕著な差は見られなかった。しかしながら図-6を見ると、評価点Aでは旋回強度が強い順に温度差比が大きくなり、評価点CにおいてもCase1-1(羽根角度 30°)では他のケースよりもわずかに高い傾向が見られた。評価点Bでの傾向は異なっていたが、評価点Cとの吹出気流の主軸と距離による違いと考えられる。

(2) 平均風速

評価点および吹出口での平均風速を図-7に示す。吹出口においては風速の差がほとんど無いが、各評価点においては、旋回羽根の無いケースの風速が遅く、30°のケースはやや高めの傾向であった。図-5の補正温度分布を見ると旋回羽根のある場合と旋回羽根の無い場合では吹出し気流の主風向が若干異なっていることが考えられ、そのため、固定された評価点では必ずしも風速の大きい箇所を測定できていなかったことが考えられる。

(3) 風速の標準偏差

評価点および吹出口における、風速の60秒間の標準偏差を図-8に示す。評価点B、Cで同等であったが、吹出口では旋回羽根のある場合に比べ、旋回羽根が無い場合の標準偏差が小さく、評価点Aでは逆に大きくなっていった。これは吹出口においては旋回羽根の無いケースでは乱れが小さい層流に近い流れになっているが、評価点A付近では乱流に移行して乱れが大きくなり、さらに離れた評価点B、C付近ではその差が無くなるものと考えられた。

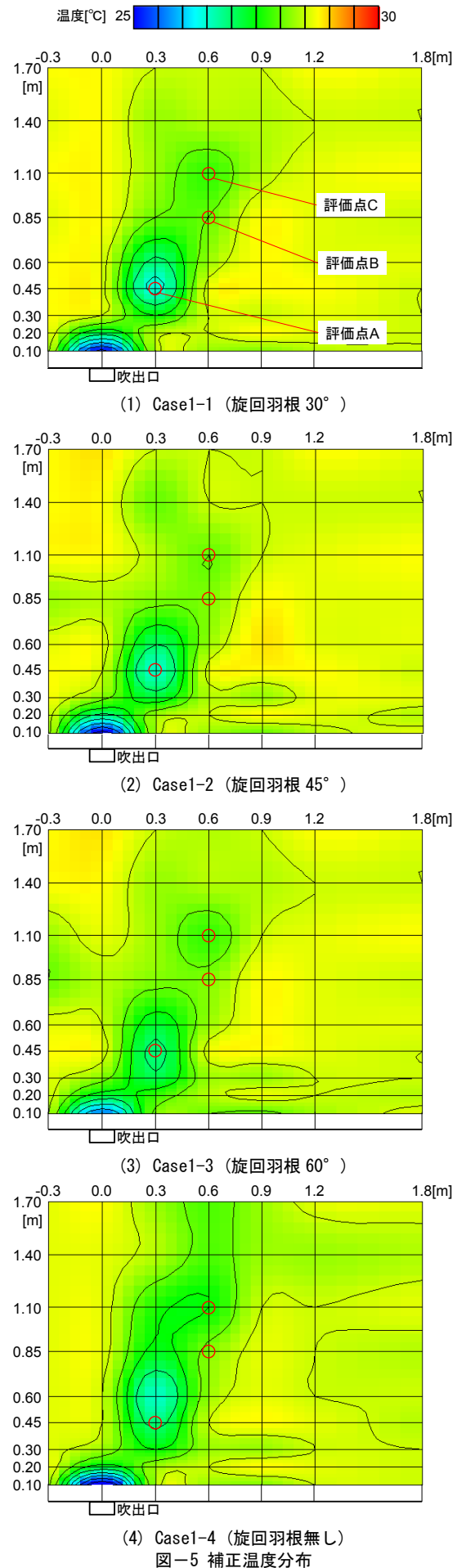
(4) 乱流強度

標準偏差を平均風速で除して求めた乱流強度^{注5)}を図-9に示す。吹出口では旋回羽根がないCase1-4の乱流強度が小さく、評価点A・Bにおいては旋回羽根がある方が小さくなった。既往の研究⁷⁾により乱流強度が大きいとドラフトによる不快者率が高くなることが示されており、旋回流による乱流強度が小さい気流が形成されれば、不快なドラフトを軽減できるものと考えられた。

乱流強度と温度差比の関係を図-10に示す。乱流強度と温度差比の間には負の相関が見られたが、旋回羽根があるCase1-1~3とないCase1-4では傾向が異なっていた。旋回羽根があるケースの方が、温度差比が大きくても乱流強度が小さい傾向にあり、旋回羽根の無いケースに比べドラフトの少ないタスク環境が創れる可能性があると思われた。

(5) 不快者率予測

ドラフト予測評価モデル⁶⁾による不快者率予測^{注6)}を試みた。このモデルの温度に対する適用範囲は20℃以上26℃以下であり、本実験条件(設定温度28℃)では適用できないため、補正温度分布(前述)と同様の方法により設定26℃で補正を行った。また風速についても、各評価点での風速比(前述)を求め、設定風量(40m³/h)と吹出口の有効開口面積から求めた理論吹出し風速を基準に補正を行った。予測結果を



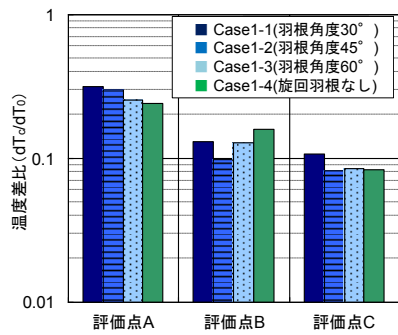


図-6 温度差比

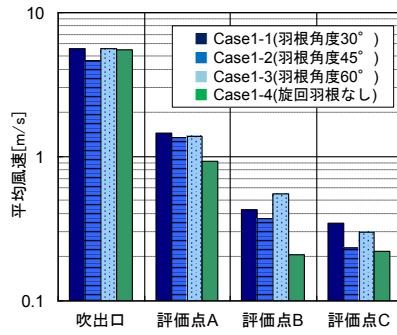


図-7 平均風速

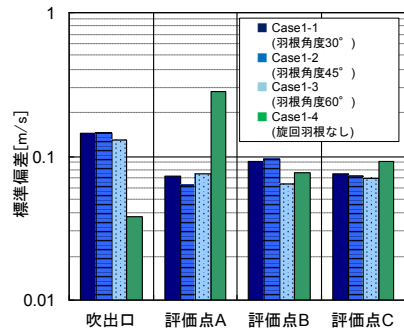


図-8 風速の標準偏差

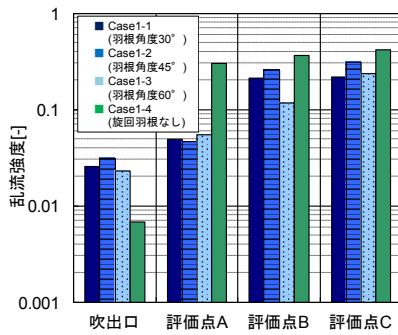


図-9 乱流強度

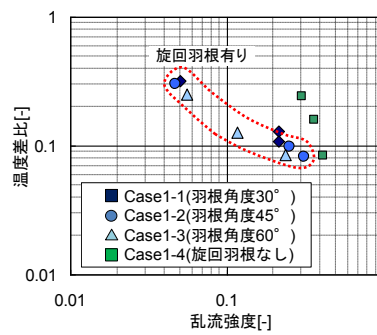


図-10 乱流強度と温度差比の関係

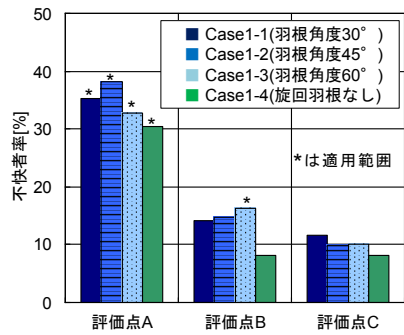


図-11 予測不快者率

図-11 に示す。評価点 A および B の一部で適用範囲外となったが、何れの評価点においても旋回羽根が無いケースの不快者率が低くなった。これは旋回羽根無しの場合の風速が小さいことによると思われるが、前述したように、測定位置の問題もあり詳細の検討が必要である。また、本予測モデルは全身に対するドラフトを対象にしているのに対して、今回の実験条件は部分的なドラフトである。快適とされる温度よりも室温が高い環境における部分的なドラフトについては、必ずしも不快にはならないと予想され、被験者実験などによる検討が必要と考えられる。

4.2 可視化による吹出口の旋回効果の確認

可視化測定結果については、旋回流型吹出口の旋回羽根がある場合(羽根角度 30°)および羽根が無い場合と、非旋回流型の計 3 ケースを比較した。なお、旋回流型と非旋回流型では吹出口の開口面積が異なるので、風量が同程度でも吹出風速に違いが生じるため、結果は無次元化した値にて比較する。

(1) 無次元平均風速ベクトル分布

図-12 に、吹出断面と高さ 30cm の水平面における無次元平均風速ベクトル分布^{注2)}をそれぞれ示す。(1)吹出断面より、Case2(非旋回流型)では吹出口付近の風速が大きく、拡散範囲が狭いま上昇している。これに対し Case1(旋回流型)は 2 ケースとも非旋回流型と比べて風速は大きくないものの、気流が撮影対象範囲全体に広がりながら上昇している。水平面の図から、吹出中心軸($y/D_0=0$)における $V_0/V_0=0.10[-]$ 程度の風速が比較的大きい部分を比較すると、Case1(旋回流型)は Case2(非旋回流型)より吹出口から遠い位置にあり、気流の広がる様子がわかる。また、旋回流型の 2 ケースでは、全体的に時計回りの流れが見られた。

(2) 無次元乱流エネルギー分布

図-13 に吹出断面と高さ 30cm の水平面における無次元乱流エネルギー 2 次元成分の分布^{注7)}をそれぞれ示す。なお、乱流エネルギーは、吹出風速の理論値の 2 乗 V_0^2 を用いて無次元化した。

吹出断面を見ると、どのケースも吹出口近傍で乱流エネルギーが大きい。上部になると k'/V_0^2 が 0 でない範囲が Case2(非旋回流型)では狭くなっており、気流はほぼ一定に上昇していると考えられる。一方、Case1-1(旋回流型、羽根 30°)ではその範囲が 3 ケースの中で最も広がっており、旋回羽根によって流れが拡散するという効果があると考えられる。水平断面においても、Case2(非旋回流型)では主流方向 $x/D_0=10$ を超えると乱れがなくなってしまうが、Case1(旋回流型)の 2 ケースは更に乱れが広がった。

(3) 吹出気流の誘引効果

吹出断面における吹出口からの距離と吹出軸方向の速度比^{1),注8)}の関係を図-14 に、また吹出口からの距離と、吹出周辺気流の誘引効果を表すエントレーメント比^{1),注9)}の関係を図-15 に、それぞれ示す。

いずれのケースも吹出口からの距離が大きくなるに従って速度比が減衰傾向にあるが、特に Case2 においては $L/D_0=10\sim11$ 付近を境に再度速度比が増加した。これは、PIV 撮影対象領域の中心部において、トレーサガスの濃度とレーザー光の関係で輝度が高くなり、画像解析の際に気流の移動を十分に捉えられなくなった影響が考えられる。若干ではあるが Case2 より Case1-1・1-4 の方が、吹出口から遠い位置の速度比が小さく、エントレーメント比が大きい。これにより、旋回流型の床吹出口では、非旋回流型に比べて周辺の気流を誘引しながら前進・上昇するという効果が期待できる。また Case1-1 と 1-4 とでは、

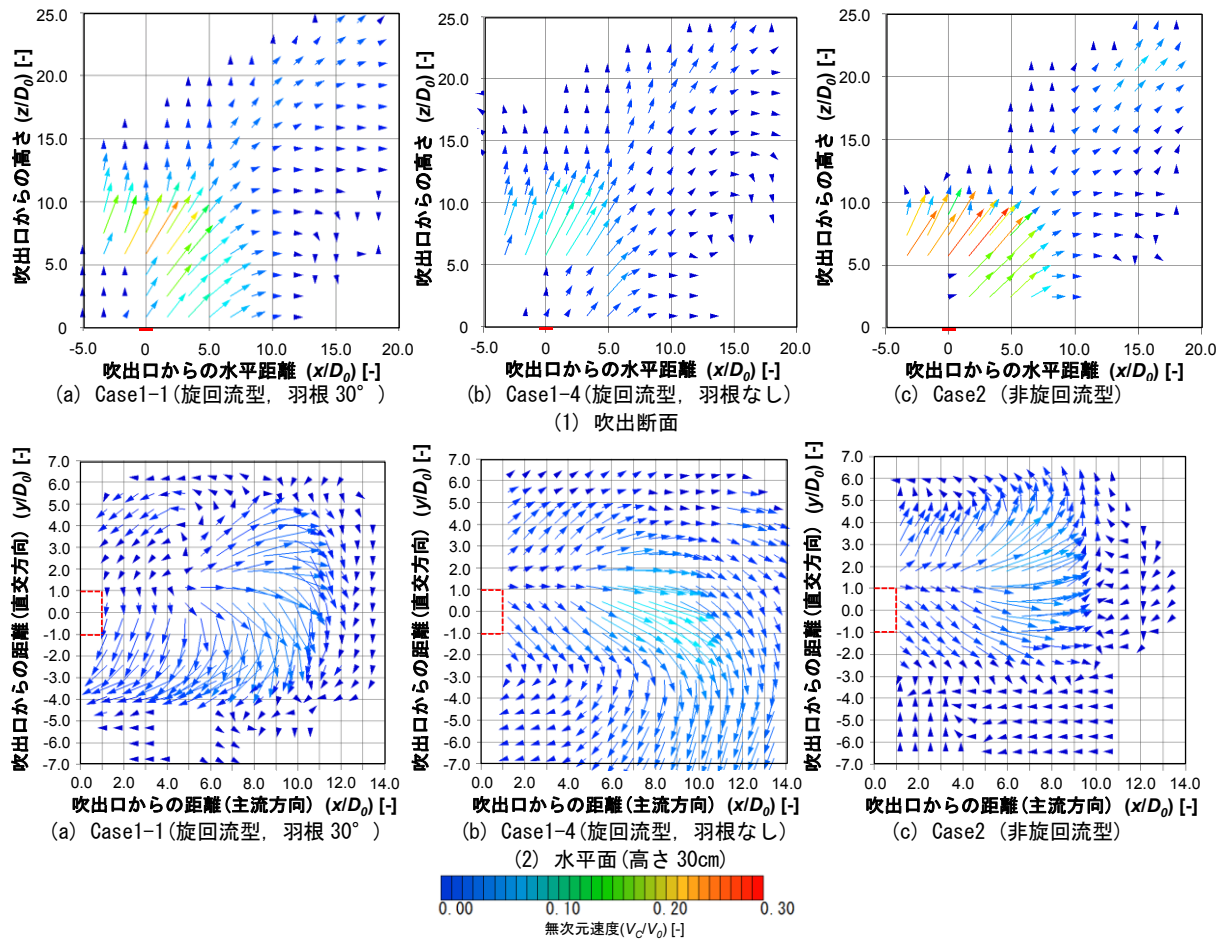


図-12 無次元風速ベクトル分布

Case1-1(旋回羽根 30°)の方が、速度比が大きく、エン
トレメント比が小さくなった。

5. まとめ

タスク域空調を目的として試作した旋回流型床吹出口について概説した。また、吹出口内蔵の旋回羽根角度を変えて温度分布測定や評価点の風速値測定、PIV を用いた可視化実験により空間の気流性状を分析し、以下の知見が得られた。

- 1) 吹出口の小型化により小風量で気流の影響範囲を高くできることが期待できた。また、タスク域の各評価点における測定から、旋回流によりドラフトを軽減して環境を制御できる可能性があることがわかった。
- 2) 可視化実験により得た風速ベクトル分布および乱流エネルギー分布から、非旋回流型と比べて旋回流型床吹出口は室内空間により拡散する気流を吹出す傾向が見られた。
- 3) 旋回羽根がついた吹出口では、旋回効果によって周辺の気流を誘引しながら吹出している様子が見られた。

吹出口の旋回効果の在室者に対する影響は、今後被験者実験を行って確認する必要がある。

注釈

- 注 1) 吹出口からの距離(距離比)[-]
吹出口からの距離(L)/相当直径(D0)

※相当直径 D_0 : 吹出口の有効開口面積に相当する円の直径

注 2) 速度比[-]

測定点の風速(V_c)/吹出風速(V_0)

※可視化実験における吹出風速 V_0 は、吹出風量を吹出口の相当直径 D_0 で除して算出した。

注 3) 補正温度[°C]

設定温度(28°C)-温度差比×設定吹出温度差(6°C)

注 4) 温度差比[-]

基準室温と測定点温度の差(dT_c)/吹出温度差(dT_0)

注 5) 乱流強度[-]⁶⁾

風速変動の標準偏差(SD)/平均風速(V)

注 6) 予測不快者率[%]⁷⁾

$$PD=3.143(34-T_a)(V-0.05)^{0.6223}+0.3696VT_a(V-0.05)^{0.6223} \quad (1)$$

T_a : 空気温度[°C], T_u : 乱流強度

注 7) 乱流エネルギー-2 次元成分[m²/s²]⁸⁾

$$\text{吹出断面: } k'_{\text{断}} = \frac{\langle u'^2 \rangle + \langle w'^2 \rangle}{2} \quad (2)$$

$$\text{水平面: } k'_{\text{水}} = \frac{\langle u'^2 \rangle + \langle v'^2 \rangle}{2} \quad (3)$$

k' : 乱流エネルギーの 2 次元成分[m²/s²],

u, v, w : 風速の主流方向成分, 直交方向成分, 鉛直方向成分[m/s],

$\langle f'^2 \rangle$: 変数 f の変動成分の 2 乗平均

注 8) 吹出軸速度比[-]

風速の吹出軸方向成分(V'_c)/吹出風速(V_0)

※吹出軸方向: 風速ベクトル分布の平均傾斜角の方向

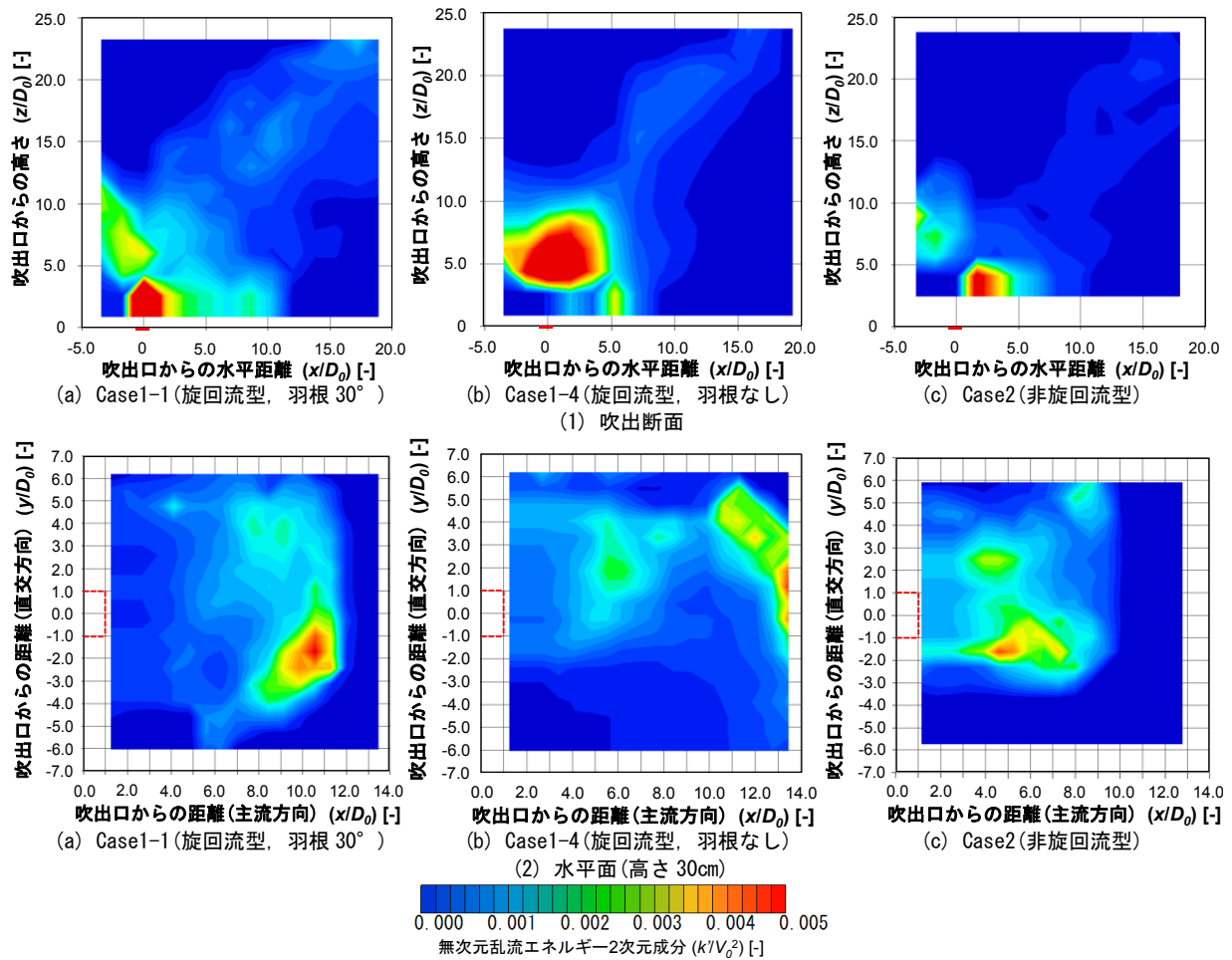


図-13 無次元乱流エネルギー2次元成分の分布

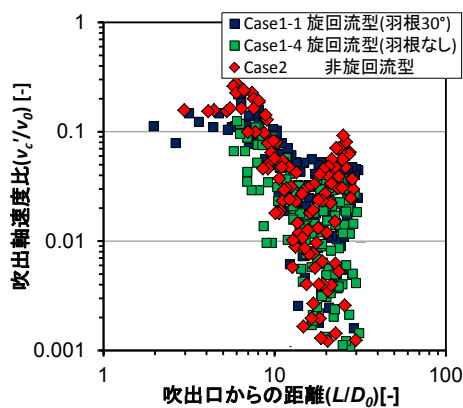


図-14 吹出口からの距離と速度比の関係

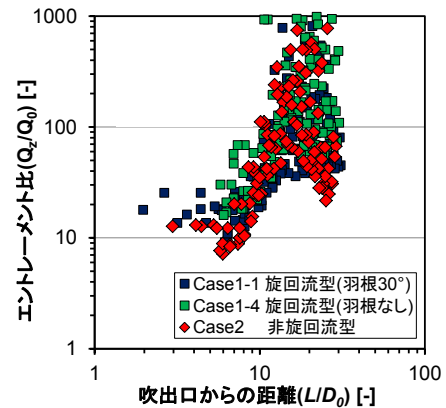


図-15 吹出口からの距離とエントレメント比の関係

注 9) エントレメント比 $[-]^3$

$$\text{誘引後の風量}(Q_z)/\text{吹出風量}(Q_0)=2 \cdot V_0/V_c$$

※速度比の逆数の関係

謝辞

本研究を行うにあたり、吹出口の試作、基本特性の測定などにおいて、空調技研工業中島氏、空研工業大成氏にご協力頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 半澤 他: オフィスビルにおける二重床空調方式の研究(その 1) 試作床吹出し口による室内環境の検討, 空気調和・衛生工学会学術論文集(那覇), pp853-856, 1988.9
- 2) 可視化情報学会編: PIV ハンドブック, 森北出版, 2002

- 3) 村江 他: 床吹出し空調システムに関する実験研究(その 1) 床吹出し口の特性概要と室内環境, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D, 環境工学, pp1107-1108, 1991
- 4) 村江 他: 床吹出し空調システムに関する実験研究(その 2) モデルルームにおける被験者実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D, 環境工学, pp1469-1470, 1992
- 5) 伊藤 他: オフィスを対象とした室内環境に関する研究(第 1 報) 実験室の概要と吹出口周りの気流性状に関する基礎的検討, 空気調和・衛生工学会学術講演梗概集, pp3009-3012, 2012.9
- 6) 半澤: 室内環境におけるドラフト評価指標, 日本建築学会学術講演梗概集 D, 環境工学, pp723-724, 1988
- 7) 半澤: 室内気流の乱流強度とドラフト, 空気調和・衛生工学会学術論文集, 1987
- 有浪 他: 粒子画像流速測定法(PIV)を用いた室内気流測定に関する基礎的研究その 2, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集(札幌), pp309-312, 2012.9