1/10 スケール模型を用いた
実験室の気流環境に対する人の影響の解析

2019 年 3 月修了　環境システム学専攻　47-176686　山口里奈
指導教官：大島義人　教授

Keywords：実験室、1/10 スケール模型、PIV 解析、CFD シミュレーション

1. 緒言

室内気流に関する研究は、室内環境の安全性や快適性、換気の効率性や省エネ性等の向上を目指し、様々な対象について研究が行われてきた。例えば、車室内で VOC を取り除くための室内気流のコントロール[1]や、飲食店でタバコの拡散状況を考慮に入れた効率的な喫煙席の配置計画の提案[2]、病院内で汚染物質の迅速な除去を考慮に入れた空調計画の提案[3]などが挙げられる。大学等の実験室においても、実験者の安全や健康保護の観点から、室内の空気環境について規制や基準が設けられている。特に化学系の実験室では、多種多様な化学物質を用いて様々な研究が行われているため、定期的な作業環境測定の実施や局所排気装置の面風速に関する基準などの形で、空気環境の維持が図られている。

実験研究は各々の研究者の目的に合わせて実験が行われるため、その作業内容や実施のタイミングが頻繁かつ任意に変更されうるといった非定常性や、複数の実験者が実験室を共有して別々の作業を同時に行うといった共有性を特徴としている。さらに、実験室を構成するヒュームフード（以下 FH）や作業台、高温装置など、気流に影響を与えうる実験什器の配置は実験室によって様々であり、作業場所も任意性が高い。これらの結果として、実験室内の化学物質の濃度分布に関しては、実験中の実験者が自身の使用しない化学物質に非意図的に曝露する可能性[4]や、爆発や引火の引き金にもなる可能性が指摘されている。実験室の空気環境の安全性を担保するためには、実験作業の特徴である非定常性や共有性を考慮して室内気流を解析し、その気流の特徴を明らかにすることが必要であり、気流の観点から実験室における化学物質拡散リスクの低減に繋がる知見を獲得することが可能となると期待される。

本研究では、実在する実験室の 1/10 スケールの縮尺模型を用いて、実験室内の人が室内気流に及ぼす影響を中心に解析を行った。フルサイズの実験室における気流は、実測により観測することが容易でないため、定常的な気流を計算によって解析するにとどまっているのが現状である。一方で、実験室の全てを一定の割合で縮小した縮尺模型を活用すれば、実験室全体の気流の可視化に加え、実験室内のレイアウト変更の影響、実験室内での人の動きの影響などの可視化が可能となると考えた。本研究では、（Ⅰ）1/10 スケール模型の再現性に関する検討、（Ⅱ）縮尺模型による部屋全体の気流性状の実測、（Ⅲ）人の縮尺模型を用いた実験室内気流への人の影響評価を行った。具体的には、相似則を適応して設定した流速を境界条件とした CFD 計算と PIV 解析による 1/10 スケール模型とフルサイズ実験室内の気流の相似性の確認、FH や室内換気の稼働状況が室内気流に及ぼす影響の実測、熱源体としての実験者や実験者の移動といった実験作業に起因する非定常性が室内気流に与える影響について解析した結果を報告する。

2. 実験及び解析方法

2.1 測定対象の概要

検討の対象として、2 つの実験室を取り上げた。それぞれ 1/10 に縮尺したモデル実験室 1（X:0.72×Y:0.70×Z:0.50 m^3）、モデル実験室 2（X:0.52×Y:0.66×Z:0.30 m^3）の概略図を図 1 に示す。モデル実験室 1 では、実験室内の換気も考慮しており、実際の実験室により近い状況を再現している。モデル実験室 2 には、解析の簡単化のため、FH のみが設置されている。

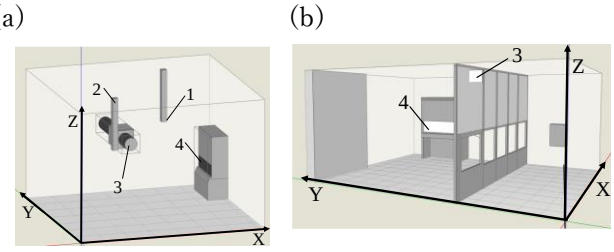


図 1. 対象実験室のレイアウト
(a) モデル実験室 1 (b) モデル実験室 2
1:室内給気 2:室内排気 3:FH 給気 4:FH 排気

1/10 スケール模型の FH の面風速や室内換気の流速は、流体の流れに関する無次元数であるフルード数（$Fr=U/\sqrt{Lg}$、U:流速、L:代表長さ、g:重力加速度）を一致させることで決定し、実測においては流速を、CFD 計算においては流速および流量を設定値とした。具体的には、モデル実験室 1 の室内換気は流速 0.79 m/s、流量 1.9×10^{-2} m^3/min、FH はモデル実験室 1、2 とも流速 0.16 m/s、流量 6.1×10^{-2} m^3/min とした。

2.2 CFD 計算

CFD（数値流体解析）とは、流体の支配方程式をコンピューター上で計算し、流体の流れを再現するシミュレーション手法である。与えた境界条件下での、空気の流れや温度、濃度分布の状況など不可視な量を可視化した量として扱うことが出来る。本解析では、乱流モデルに高レイノルズ数 k-ε モデルを採用し、図 1 に示す各実験室の室内気流シミュレーション（ソフトウェア：Flowdesigner2019）を定常計算で行った。

2.3 PIV 解析・風速測定

PIV（粒子画像流速測定法）とは、微細なトレーサ粒子を混入してその動きを時系列で撮影し、得られた画像をデジタル処理して速度ベクトルを得る手法である。流れ場の瞬間構造や多点の速度情報を抽出することができる。測定したい箇所にトレーサ粒子である AEROSIL200CF（平均粒径 12 nm）を散布し、シートレーザー（Shanghai Sanctity Laser Technology 、1 W、532 nm）の照射によって実験室内の気流を可視化し、高速度カメラで撮影し、PIV 解析（ソフトウェア：FlowExpert2D）を行った。模型内の風速は風速計（KANOMAX model6501、I 型プローブ 0965-03）を用いて測定を行った。

3. 実験結果と考察

3.1 1/10 スケール模型における室内気流の再現性に関する検討

モデル実験室 1 を対象に、1/10 スケールの縮尺模型を用いた場合のフルサイズの実験室の気流の再現性について、実測と計算の両面から比較した。フルード数を用いた相似則を仮定すると、1/10 スケール模型における FH および換気扇の流速は、フルサイズの流速の $1/\sqrt{10}$倍となる。FH のみを稼働させた場合、室内換気のみを稼働させた場合、両方とも稼働させた場合の 3 通りについて、CFD 計算によって、1/10 スケールとフルサイズの実験室内全体の気流を比較したところ、いずれの場合においても流れの方向や流速において両者が概ね一致することが確認された。吹き出しの流速を $1/\sqrt{10}$倍以外の値にして計算したところ、両スケールの気流のプロファイルが明らかに異なったことから、フルード数による相似則の適用が、ある程度妥当なものであることが示された。

また、FH 開口部前方の局所的な範囲で測定したフルサイズ実験室の PIV 解析結果と、その範囲に対応する 1/10 スケール模型の PIV 解析結果を比較したところ、FH のみ、室内換気のみ、両方稼働のいずれの場合も、流れの方向がほぼ一致した。これらの結果より、1/10 スケール模型によって、フルサイズの実験室の気流がほぼ再現可能であることが確認された。

3.2 1/10 スケール模型を用いた実測と計算の比較と室内気流に及ぼす排気装置の影響

風速計を用い、1/10 スケール模型内の換気扇給気口（床上 300 mm）から垂直に高さ 50、100、200 mm の各位置における風速を実測し、同じ点における CFD 計算によって得られた風速値と比較したところ、両者は概ね一致した値を示した。室内換気のみ稼働した場合について、Y= 540 mm における流速ベクトル分布の PIV 解析と CFD 定常計算の結果を図 2 に示す。結果を比較すると、両者とも室内給気口から吹出しされた給気は、床に垂直に吹き降ろされ、床に衝突後床を這うように室内に伝わっていく点で、類似性が確認された。このように、1/10 スケール模型における実測は、流速や流れの傾向において、CFD 計算の結果と概ね一致する結果となった。ただし、PIV 解析の結果（図 2(a)）では、FH の前や FH 給気の下方を中心に、CFD 計算では現れなかった渦の発生が観察された。この渦は、FH のみ稼働した場合には観察されないことから、室内換気装置が稼働したことによる室内気流への影響と考えられる。またこの渦は、空間的な空気の淀みを表しており、仮に室内に化学物質蒸気が存在した場合にはある領域で滞留するリスクがあることを示唆している点で、有用な情報である。渦の発生場所や数、渦の大きさについては、PIV 解析結果と CFD 定常計算では異なる結果となったことについては、非定常状態の CFD 計算による検討とともに、FH や換気扇の給排気の位置などを変更

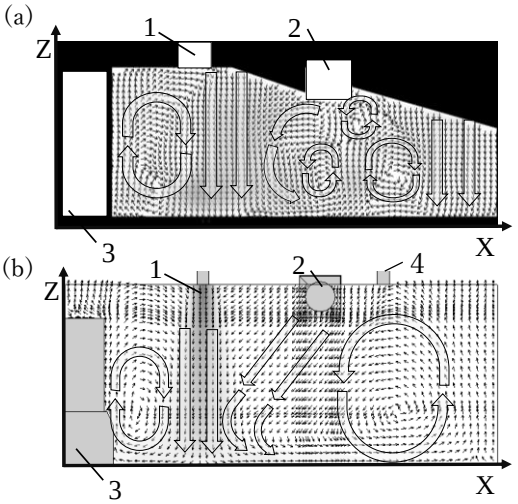


図 2 流速分布計算結果比較（Y = 540 mm）
(a) PIV 解析結果 (b) CFD 定常計算
1:室内給気 2:FH 給気 3:FH 排気 4:室内排気

する実験を行うなど、気流形成の過程をさらに詳細に検討していく必要がある。

3.3 人の縮尺模型を用いた室内気流への人の影響

モデル実験室 2 および 1/10 サイズの人形を用いて、室内気流に対する 1)実験中の人の移動の影響、2)発熱体としての人の影響について検討を行った。人形の高さは 15.5 cm であり、リモコンで操作可能な車輪付き架台の上に人形をセットして、遠隔操作で模型内を移動させた。また、人形にヒーターを巻き付け、人形表面の温度を変えた実験を行った。

3.3 1)人の移動による室内気流の変化に関する検討

FH を稼働させない状態で、人形を FH 面に垂直な方向から FH に向かって 0.64 m/s と 0.40 m/s の 2 つの速度で動かし、それぞれの室内気流への影響を観察した。結果を図 3 に示す。人形の動きによる部屋全体の気流への影響(図 3(a))を見ると、人形が移動した後に流れ込む気流が人体モデルの後ろに追随する流れを作る一方で、壁に達した流れが跳ね返る様子が見られる。この際の部屋全体の気流速度の平均は 0.01～0.02 m/s 程度であった。同じ速度での人形の移動について、観測範囲を狭め、人形の軌跡近傍に拡大(図 3(b))すると、周辺空気が人形の移動軌跡に誘引される状況がさらにはっきり観察されるとともに、移動完了後から 3 秒が経過している段階でも、壁からの跳ね返りなどの影響で複雑な気流を作っていることがわかった。また、この時の観測範囲での気流速度の平均は約 0.05 m/s であった。人形の移動速度を変えた実験(図 3(c))との比較から、人形の移動速度が速い時の方が遅い時に比べて気流に与える影響が大きいことがわかった。これらのことから、人形の移動は移動完了後もしばらくの間、特に局所的な範囲において気流に大きな攪乱を与えることが示唆された。

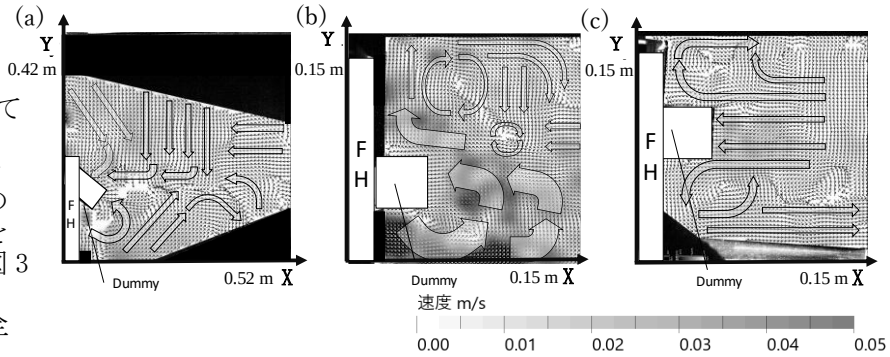


図 3. 人形が直線移動した際の移動完了後 3 秒後の流速ベクトル分布(Z= 140 mm)
(a) 室内全体(0.64 m/s) (b) 局所的な範囲 (0.64 m/s) (c)局所的な範囲(0.40 m/s)

次に、FH 稼働時における Z=140 mm の XY 平面における気流速度分布の経時変化を図 4 に示す。人形の移動前(図 4(a))は、ルーバーから給気された空気が FH 排気に吸い込まれるような流れを形成しているのが見て取れる。人形の移動完了後 3 秒後の結果(図 4(b))からは、FH に達する際に誘引された気流が人形の移動軌跡後方に見られるとともに、特に FH 前面において大きな局所乱流が見られた。移動完了後 5 秒後の結果(図 4(c))を見ると、3 秒後の結果と比較して人形の移動による影響が弱まる一方、人形の移動前に形成された FH 給排気による流れが徐々に回復している様子が見られる。移動完了後 10 秒後(図 4(d))には、本来の FH 給排気による流れがさらに回復し、人形の移動による気流への影響は多少残っているもののあまり大きくないことがわかる。なお、FH 稼働による気流(図 4(a))の平均速度は約 0.01 m/s であるのに対し、人形の移動によって生じた気流速度は約 0.05 m/s であった。これらのことから、FH に向かって人形が動く際に、FH 前面において FH 換気による気流を上回る気流の乱れを生じさせ、その影響は数秒間続く可能性が示された。

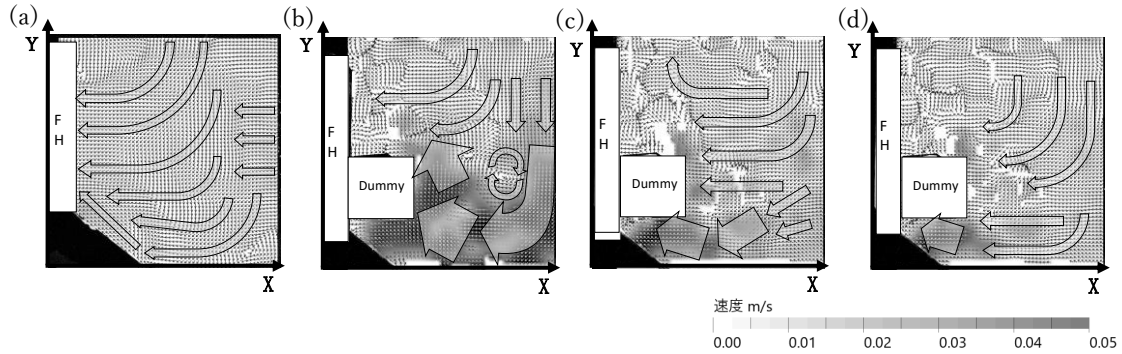


図 4. FH 稼働時における人形の移動による流速ベクトル分布の経時変化(Z= 140 mm)
(a) FH のみ稼働 (移動前) (b) 移動完了後 3 秒後 (c)5 秒後 (d)10 秒後

3.3 2)人が熱源として室内気流に与える影響の検討

室内温度 12℃の模型内に、同じ人形 3 体を実験台を挟んで配置した。人形の表面温度は、非発熱時は室温と同じ 12℃、発熱体を模擬する際は 36℃になるように電圧調整器で電圧調整を行った。図 5 に X=320 mm における気流の流速ベクトル分布の PIV 測定と CFD 定常計算結果を示す。図 5(b)と図 5(c)の結果を比較すると、両者ともに人形の肩と頭上から人からの発熱により生じる上昇気流が見られ、天井に衝突して左右に小さな渦が生じていること、また、人形周辺の平均流速は 0.03 m/s であることが確認された。一方で、人形の側面については、PIV 測定では下向き気流であるのに対し、CFD 解析では上向き気流が生じている。これは、室内気温と人形の表面の温度が等しい場合（図 5(a)）にも下向きの流れが観察されたことから、トレーサ粒子の重みによって生じた流れだと考えられる。また、室温を 12℃として計算した結果（図 5(c)）と 25℃として計算した結果（図 5(d)）の比較から、人形の表面温度と室内温度との相対的な温度差が大きいほど、上昇気流が強まり、生じる渦の発生場所が異なることがわかった。

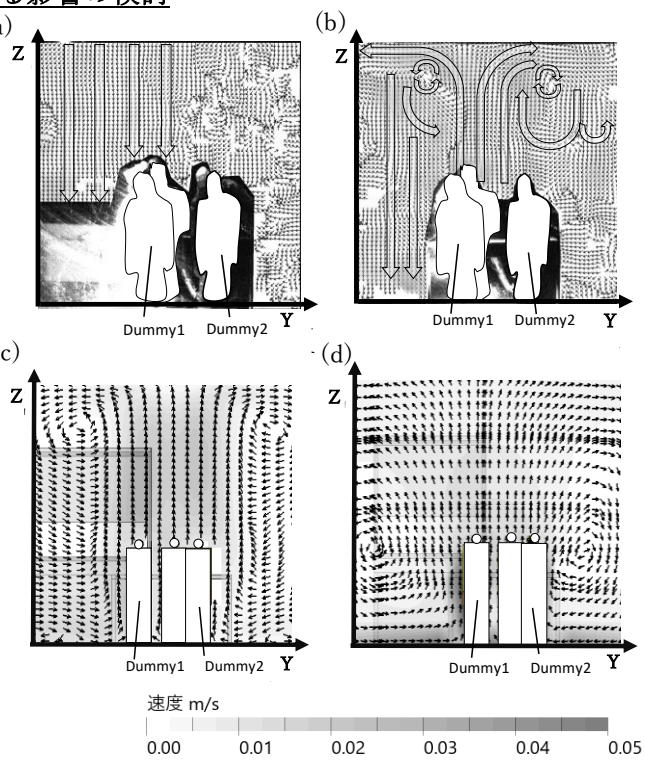


図 5. 流速分布計算結果比較（X=320 mm）
(a)非発熱時の PIV 解析結果 (b)発熱時の PIV 解析結果
(c)発熱時の CFD 定常計算結果（室温 12℃）
(d)発熱時の CFD 定常計算結果（室温 25℃）

人体自身が引き起こす自然対流の室内空気環境に与える影響については、手術室の空調において全体に揃った下降気流を作り出すことが困難である原因の一つとして、在室者に生ずる自然対流が挙げられる[5]といった例が報告されている。本解析の結果も同様に、人体周辺の自然対流は室内気流に対する影響が無視できない可能性を示すものであり、実験室で化学物質を使用する場合に、人体の発熱による上昇気流の流れに伴って拡散する可能性があることが示唆された。

4. 結言

非定常性や共有性といった実験室の特徴を踏まえた気流環境の解析を目的として、1/10 スケール模型を用いて、実験的手法である PIV 測定および計算手法である CFD 計算によって検討を行った。実験および計算の結果から、1/10 スケール模型によってフルサイズの実験室をある程度精度良く再現できる可能性が示された。また、1/10 スケール模型を用いた実験的検討により、実験室内における FH や室内換気の稼働状況によって、渦の生成の可能性が示された。1/10 スケールに縮小した人形を用いた検討から、人の移動による攪乱が室内気流場に与える影響は大きく、特に人の移動経路直近・直後においては局所乱流が発生すること、熱源としての人の存在が室内の気流に影響を与えうることなどを明らかにした。これらの結果は、実験室内での化学物質のばく露リスク低減を考える上で、人の移動や熱源の存在を考慮することが重要であることを示唆していると考えられる。

このように 1/10 スケール模型は、実験室全体の気流の可視化、容易なレイアウト変更、非定常な動きが多い実際の実験室における室内気流の再現可能性など、実験室の空気環境の解析において有効な手段となりうる可能性が示された。今後、実験室特有の非定常性や動的な活動に関する解析を積み重ねることで、室内気流のより高度な理解や有効な予測手段となれば、実験室計画・設計の初期段階におけるリスク評価ツールとして期待される。

参考文献：[1]片岡拓哉ら, *デンソーテクニカルレビュー*, **10(1)**, 58-64(2005). [2]坂口敦ら, *日本建築学会環境系論文集*, **74(635)**, 39-45(2009). [3]阿久津太一ら, *空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集*, 193-196(2007). [4]Y.Nabeshima, et al., *Journal of Environment and Safety*, **6(2)**, 111-114(2015). [5]本間宏ら, *日本建築学会計画系論文報告集*, pp. 39-48(1987).