

東京大学院新領域創成科学研究科

環境システム学専攻

平成 30 年度

修士論文

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 2 月 20 日提出

指導教員 大島 義人 教授

山口 里奈



# [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]

目次	ページ番号
<b>第1章 序論</b> .....	1
1.1 大学実験室の実態 .....	1
1.2 大学実験室の特徴 .....	2
1.3 大学実験研究の環境安全に関する取り組み .....	3
1.3.1 実験研究現場の設備環境 .....	4
1.3.2 労働安全衛生法 .....	4
1.3.3 作業環境測定 .....	5
1.4 実験研究の安全構造とシステム学的アプローチ .....	6
1.5 室内気流解析による空気環境改善の既往研究例 .....	6
1.6 本研究の目的 .....	7
参考文献 .....	8
<b>第2章 検討手法</b> .....	10
2.1 PIV 解析による室内気流の解析 .....	10
2.1.1 PIV（粒子画像流速測定法；Particle Image Velocimetry）解析の概要 .....	10
2.1.2 PIV 解析の原理 .....	10
2.1.3 PIV の解析設定 .....	12
2.2 CFD 解析による室内気流の解析 .....	15
2.2.1 CFD（数値流体力学；Computational Fluid Dynamics）解析の原理 .....	15
2.2.2 CFD 解析の概要 .....	16
参考文献 .....	17
<b>第3章 1/10 スケール実験室における実験室内気流の再現性に関する検討</b> .....	18
3.1 緒言 .....	18
3.2 実験の目的 .....	19
3.3 解析及び実験方法 .....	19
3.4 実験結果 .....	28
3.4.1 フルスケールと 1/10 スケール実験室における気流の相似性の検討 .....	28
3.4.2 1/10 スケール実験室における実測と CFD 計算結果の整合性の確認 .....	31
3.4.3 換気装置の稼働状況が室内気流に与える影響の検討 .....	37

3.4.4 実測によるフルスケールと 1/10 スケール実験室における局所の状態の再現性 ...	41
3.5 まとめ .....	45
参考文献 .....	46
<b>第 4 章 実験者の動きが室内気流に与える影響の検討</b> .....	<b>47</b>
4.1 緒言 .....	48
4.2 実験の目的 .....	48
4.3 解析及び実験方法 .....	48
4.4 実験結果.....	52
4.4.1 人体モデルの移動速度の違いによる影響の検討 .....	52
4.4.2 人体モデルの移動が気流に与える影響範囲の検討 .....	54
4.4.3 ヒュームフード稼働時における人体モデルの移動が気流に与える影響の検討 .....	61
4.5 まとめ .....	70
参考文献 .....	71
<b>第 5 章 実験者が熱源として室内気流に与える影響の検討</b> .....	<b>72</b>
5.1 緒言 .....	72
5.2 目的 .....	72
5.3 解析及び実験方法 .....	73
5.4 実験結果.....	74
5.5 まとめ .....	78
参考文献 .....	78
<b>第 6 章 実験室内空気環境と実験者行動の複合的な解析</b> .....	<b>79</b>
6.1 緒言 .....	79
6.2 解析方法.....	79
6.3 解析結果.....	80
6.4 結言 .....	85
参考文献 .....	85
<b>第 7 章 結論</b> .....	<b>86</b>
7.1 まとめ .....	86
7.2 今後の展開 .....	87
<b>Appendix</b> .....	<b>88</b>



(A) 人体モデルが部屋の隅に向かって移動したときの PIV 測定結果 .....	89
(B) ヒュームフード前を平行に横切ったときの PIV 測定結果 .....	91
(C) 垂直断面 (Z-X 平面) の PIV 測定結果.....	93
<b>謝辞</b> .....	95

# 第1章 緒言

## 1.1 大学実験室の実態

大学の実験室では多種多様な化学物質を用いている。実験者や管理者は全ての化学物質は何らかの危険性・有害性を有しているものとして扱っているが、化学物質に係る事故は頻繁に発生している。

大阪大学安全衛生管理部の学内事故データ<sup>[1]</sup>によると、薬品に関わる事故の約6割が、薬品が体にかかることによる薬傷事故であり、次いで発火事故が報告されている。教員が薬品に関わる事故のリスクに対する印象としては、火災・爆発の危険性、薬傷の危険性、そして漏えいした場合の環境影響の順にリスクが高く、化学物質の吸引による体調不良（急性の影響）に対する意識が低いと推察されている。事故発生の頻度も、実験準備や実験後の後始末段階で起こる事故が多く、実験中以外の作業におけるトラブル発生率が高いことが報告されている。また、実際の実験室内空気の汚染は、ロータリーエバポレーターなどに接続された真空ポンプの排気や廃溶媒タンクの口、実験後のポリ洗瓶を使った器具洗浄など、実験作業とは捉えにくいところで発生すると報告されている。事故発生の頻度も、実験準備や実験後の後始末段階で起こる事故が多数報告され、実際に要する時間を考慮すると、実験中以外の作業におけるトラブル発生率が高いといえる。したがって、実験作業のリスクを考える場合、実験中は反応の暴走やそれに伴う火災・爆発のリスクが高く、実験者の健康に影響するばく露の危険性は、実験そのものよりも後片づけの段階で高くなる可能性がある<sup>[1]</sup>。

実験研究が行われる場に関する国際的（欧州大陸、中国、日本の実験者を含む）なアンケート調査によると、実験室の環境は、実験者が思っているほど安全ではないと報告されている<sup>[2]</sup>。回答を寄せた実験者約2400人のうち約86%は自分の実験室は安全な場であると考えているが、回答者の半数近くが、動物に噛まれたり、化学物質を吸い込むなど、様々な事故の経験があると答えている（Fig.1-1, Fig.1-2）<sup>[2]</sup>。

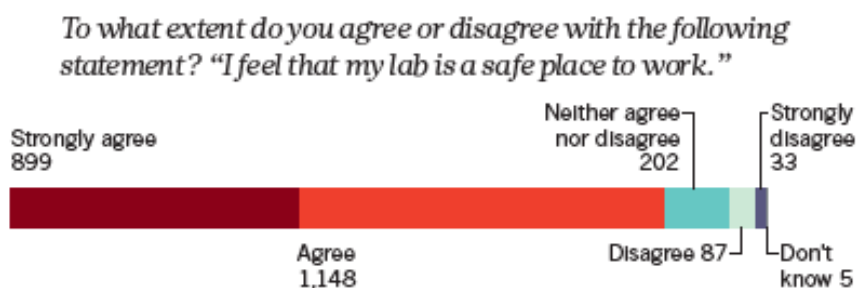


Fig.1-1 アンケート調査結果<sup>[2]</sup>



Fig.1-2 回答者が経験した負傷<sup>[2]</sup>

この調査結果から安全性の基準が厳守されていない場合が多いことが明らかとなり、研究チームの安全性文化に対する意識を強く持っているわけではない可能性が浮き上がった。安全訓練や査察、安全規則の価値に対して、実験者たちは「安全訓練の重点が、実験室の安全性向上ではなく、コンプライアンスの規則の訓練にある。」と感じることが多く、「実験室の安全性規則が研究の生産性を損なっている」といった答えもあった<sup>[2]</sup>。米国アカデミー科学技術委員会は、行動学の研究者と共同で、実験室における高度な安全性文化を構築する方法について、実用的な手引書を作る計画をたてるなど、対策を講じている<sup>[2]</sup>。

日本国内にとどまらず、世界的にも実験室の安全性について注目が高まっている。

## 1.2 大学実験室の特徴

大学の構成員は学部生、大学院生、研究員、教員、学外からの共同研究者と多岐にわたっており、国際化が進み、人の流動性も高い。また、教育研究のテーマが多様であるだけでなく、新規性、専門性が高く、学際化も促進されているため、取り扱う化学物質や研究活動に伴い、リスクも複雑多様化している。このような複雑な状況を持つ大学において、個人、組織として環境安全に対して取り組む必要がある。

大学における学術研究は、あらゆる学問分野を対象とする知的創造活動であり、研究者の知的好奇心と自由な発想を発揮し、真理の探究を目指すものである<sup>[3]</sup>。大学の実験室では、学生がそれぞれ与えられた研究テーマに沿って実験を進め、具体的な作業内容は毎日変化するため、必然的に非定常な作業で構成される。一方、企業における生産現場である工場は、それぞれの作業場所で定まった作業が行われ、また、生産性を向上させるために、工場内の各作業はある程度全体のタイミングに合わせた状態で行われる。すなわち、定常作業を中心とした作業であるといえる。大学の実験室と工場ではスペースと時間の使い方が異なる。工

場では、比較的広い工場内の空間が作業ことに分割され、それぞれの作業場所に専門の作業員が配置される。それに対して、大学の実験室では、狭い空間に実験台や局所排気装置が配置されており、実験台に対して学生が配置されることが多く、多数の実験者が空間を共有しているといえる。

リスクを考える上で、工場のような空間分離型作業場では、個々の作業について、危険有害性を特定し、それらの総和をとることで、工場全体のリスクをある程度正確に見積もることができる。それに対して、実験室のような空間共有型作業場では、個々の実験の危険有害性が他者へ大きく影響することが考えられ、実験室内で行われる実験の組み合わせによって、実験室のリスクが大きく変動することが予測される<sup>[1]</sup>。化学系を主とした大学の実験室は、有害蒸気を発する有機溶剤、容易に発火や爆発する高い反応性をもつ物質など、多種多様な化学物質が様々な用途で使用されている<sup>[4]</sup>。また、一般の居住区間とは異なり、高温の測定装置や局所排気装置などが設置されている。例えば、局所排気装置の位置関係によって、室内の気流は全く異なる挙動を示し、化学物質の室内への拡散にも非常に大きな影響を与えることが報告されている<sup>[5]</sup>。

実験室の空気環境においては、換気扇やエアコン、局所排気装置といった部屋に固定・設置されている給排気に加え、室内の人の位置や移動、化学物質の発生源の場所・時間・濃度、室内レイアウト、扉の開閉、熱源の位置や稼働状況など、実験作業の非定常性に起因する大学実験室特有な要因が複雑に絡んでいる。実験室の空気環境や作業者の非意図的な化学物質ばく露防止を考えるためには、実験室内の非定常作業を考慮に入れた、よりきめの細かい時間・空間的な分布や変化まで考慮したリスクアセスメントを行う必要がある<sup>[6]</sup>。

### 1.3 大学実験研究の環境安全に関する取り組み

近年、安全・安心への関心が高まる中、大学の実験研究においても安全が重要視されている。産業界の製造工程とは異なり、大学の実験研究では新規性や先端性を追求することで、目標に向かって進める個々の実験作業に、研究者の自由度や創意工夫が盛り込まれている。必然的に、それまで誰も行ったことがない手法で実験を行うこともあるし、既知の手法で新しい対象に適用して実験を行うこともある。また、これまで誰も行っていないことを初めて見つけ、それを実証することに研究の価値がある。そこには、試行錯誤的な探索もあり、失敗もつきものである。特に、過去に誰もやったことがない実験では、何が起こるのか正確に分からない以上、リスクが伴うことは避けられない。このように、自由に創造性を発揮し、研究を進めていく中で、いかにして実験者の安全を担保するかが求められている。実験者が自らの研究においてリスクの存在を認識し、リスクがどこに存在し、それをどのようにして低減するかといったリスク管理が実践できることが望ましいと考える<sup>[7]</sup>。

### 1.3.1 実験研究現場の設備環境

大学などの研究設備の環境安全は、その実現に実験設備などのハード面からの支援が必要である。大学実験室では、実験者の研究目的や計画している実験手法に基づいて、実験装置の構成やレイアウトが決められる。その際に、実験者の安全や健康が優先的に考慮される必要があるが、一方で、部屋の面積や人数、明るさといったハード面での制約が多い。これらの制約条件の下で、実験室のユーザーがどのような実験室を作るか判断するのは、ハード面のみを考慮して最適な実験室を作ることは容易なことではない。

また、実験施設の安全性は、その初期状態だけで決まるものではなく、運用状況に依存する。特に、大学の実験研究では、研究分野やテーマ、実験内容の多様化が進んでおり、実験施設にはそれらに対応できる柔軟性を持ち合わせなければならない。

これらのことから、個々の実験室における安全な設備環境の実現と、それぞれの制約や要求との両立を、画一的な方法論だけで対応するのは難しく、施設面のみの対策で満たすことは非常に困難である。したがって、実験施設の環境安全を考えるうえで、ハード面からの支援を行うことに加え、そこで何がどのように何のために行われているのかといった、研究内容や実験室の使用方法的要因も併せて議論する必要がある。一方で、実験施設を使用するユーザー側も、実験室の安全において施設設備の意義や管理運用の重要性を認識しながら、自身の実験研究の自由度や実験室が抱える制約をうまくバランスを取りながら行う必要がある。これを実現していくために、機器を提供するサプライヤー、大学内の設備担当者、実験を行う研究者や実験者が、それぞれの立場から独立に実験室の理想化を目指すのではなく、個別に異なる実験作業の内容を理解し、相互に連携をとりながら、安全な実験環境に向けた最適化を図ることが重要となる<sup>[7]</sup>。

### 1.3.2 労働安全衛生法

2004年に国立大学が法人化され、大学の教育・研究業務に対して労働安全衛生法（以下、安衛法）が適用された。安衛法とは職場における労働者の安全と健康を確保するとともに、快適な職場環境を形成する目的で制定された法律である<sup>[8]</sup>。これにより、多くの国立大学は、多くの学内の組織が大幅に変更され、安衛法に対応するために設備変更や管理体制の改善を求められることになった。

安衛法の適用により大きく影響を受けた一つに、化学物質の扱いが挙げられる。例えば、有機溶剤中毒予防規則（有機則）や特定化学物質障害予防規則（特化則）に該当する化学物質を使用する際、局所排気装置の設置、使用物質や有害性の表示・掲示、作業環境測定、健康診断の実施などの対応が必要になった。有機則や特化則に該当する化学物質は、大学の実験研究において日常的に使用されているものも多く、この法律の施行に合わせて、必然的に多くの局所排気装置が設置されることになった。有害な化学物質を使用する際の作業環境が改善されるという意味では、局所排気装置の設置数が増えたことは望ましい。しかし、設

置数ばかりに注意が向いており、ただ設置すればいいだけでなく、化学物質を使用する実験現場における好ましい使い方、そして、それを設置する立場にある施設担当者の局所排気装置の目的や正しい使い方など、きちんと理解する必要がある。例えば、実験の目的や使用している化学物質の危険性を考慮して実験室の正負圧を制御する必要があり、それに見合った給気と排気のバランスをとることや、実際の稼働状況に合わせてファンの台数や能力を決めることが省エネの観点から望ましいこと、など個別の事情に応じた対策が必要である。しかし、現状としてはこのような観点を取り入れた事例はあまり多くないというのが実態であり、対策を講じる必要がある<sup>[7]</sup>。

### 1.3.3 作業環境測定

有害物質による健康被害リスクを把握するためには、作業者のばく露状況の把握が必要である。ばく露状況の把握については、労働安全衛生法によって作業環境測定に基づいて行うことが義務づけられている。作業環境測定とは、作業環境の実態を把握するため空気環境その他の作業環境について行うデザイン、サンプリング及び分析のことをいい、A 測定と B 測定の2つの方法がある。A 測定は、作業場に等間隔で5箇所以上の気中濃度を等時間間隔で1時間以上かけて測定し、それらの結果から作業場の定常的な有害物質の濃度分布を推定する。この場合、測定は作業を行っている状態で実施することが前提であり、作業環

境測定は定常的に化学物質を使用している作業場に適している。B 測定は、A 測定を補完するための測定で、有害物資の発散原に近隣する場所における作業のうち、有害物質濃度が最も高くなると思われる時間に、その作業が行われる位置において測定を実施するものである (Fig.1-3) <sup>[9]</sup>。

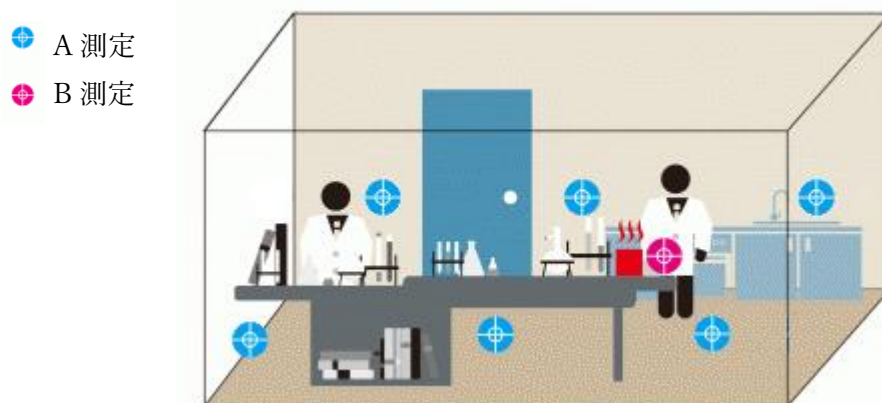


Fig.1-3 作業環境測定の概略図<sup>[10]</sup>

しかし、作業環境測定は大学等における化学物質の使用状況と作業者のリスクを把握する上では必ずしも有効ではない可能性があるとは指摘されている<sup>[11]</sup>。作業環境測定は有害物質を「大量、長時間、継続的」に使用する状況を想定して設計されたものである。大学の実

験室における化学物質の使用は短時間で間欠的な場合が多く、「少量、短時間、間欠的」な化学物質を使用する実験室において、リスクを検出できない可能性が指摘されている<sup>[12]</sup>。作業環境測定を行っている時間帯のみ有害物質を取り扱っている場合は、作業場の健康障害リスクを過大評価する可能性があり、逆に作業環境測定を行っている時間帯以外でも間欠的に有害物質を取り扱っている場合は、過小評価となる可能性がある。厚生労働省による職場における化学物質管理の今後のあり方に関する検討会報告書でも、間欠的な作業を対象とした作業環境測定の問題点が指摘されている<sup>[13]</sup>。

## 1.4 実験研究の安全構造とシステム学的アプローチ

実験室のような実験が行われる「場」には、作業を行う「人」や、作業に必要となる「モノ」が存在する。大学で行われる実験研究において、危険がこれらの組み合わせで決まるのであれば、実験室をその中に存在する人やモノ、情報などを構成する要素とする一つのシステムとして捉え、安全構造解析に向けたアプローチが重要となる。

実験室は、そこで何もしなければただの「空間」であり事故は起きないが、その中で「人」がどのようなモノをどのように扱っているか、「人」が何をしているかによって事故が起きたり起こらなかったりする。実験室で起こる事故を考える上で、実験者である「人」が実験を行う「場」である実験室や研究室の状況も、作業環境として実験作業や実験者の状態、または実験作業と実験者との相対関係に大きく影響すると考えられる。

任意性や非正常性の高い実験研究現場において、安全性を向上させるためには、それぞれ独立に議論するのではなく、実際の研究現場における人の行動、モノの移動、場の状態との関係性を論理的に整理し、実験室システムの構造の中で明らかにすることが重要である。安全に関する従来の考え方では、実験作業をする人、作業に用いられる器具、実験室内に置かれている物の配置などについて、安全のためにあるべき姿がそれぞれ独立に議論される傾向にあったが、各要素の最適値がシステム全体の最適解を与えるとは限らない。実験室で作業を行う際の危険個所をシステムの脆弱性として捉え、脆弱性を与える要因をシステムの中から抽出し、それを最小にすることで、システムを最適化できると考えられる。これらによって、多様性や非正常性を前提とした実験研究現場の安全構造に関する理解を深めることで、新たな安全管理の方法論として貢献できると期待される<sup>[6]</sup>。

## 1.5 室内気流解析による空気環境改善の既往研究例

私たちは一日中の多くの時間を建物や車等、何かに囲まれている室内で過ごしており、室内環境が健康や生活の質に大きな影響を与えている。安心して過ごすことができる安全で快適な空間でありながら、地球環境に優しい省エネルギー性の高い室内環境を創出することが望ましい。これまで、室内空気環境の改善を目的とし、様々な室内を対象に気流解析が

なされてきた。例えば、車室内を対象とした研究では、片岡らは、車外から侵入する排ガスや埃、室内で発生する体臭や VOC を取り除くことを、室内気流によるコントロールを目指して研究を行っている<sup>[14]</sup>。飲食店のタバコ煙に着目した研究では、坂口らは、タバコ煙の拡散状況を CFD 解析というシミュレーション手法を用いて明らかにし、効率的な喫煙席の配置計画の提案を行っている<sup>[15]</sup>。また、病院内を対象とした研究では、阿久津らは、各ベッドの新鮮空気の効率的な供給や汚染物質の迅速な除去を考慮にいたした空調計画の提案を行っている<sup>[16]</sup>。これらの気流解析を通じた室内環境の研究は、適切なレイアウト設計や効果的な室内情報を提供するために、室内空間で起きている事象を明らかにすることで、快適性や効率性、安全性、省エネ性などの向上に繋がると期待されている。

大学実験室を対象とした気流解析の研究では、鍋島らは、実験中の実験者が自身の使用しない化学物質に実験室内でばく露するといった報告をしており、空間を共有することに起因する実験者の非意図的なばく露が懸念されている<sup>[4]</sup>。また、采女らは、部屋の換気のための給排気口と局所排気装置の位置関係によって、室内気流は全く異なる挙動を示し化学物質の拡散に大きな影響があることが報告している<sup>[5]</sup>。これらの研究のほとんどが、気流解析手法の 1 つである CFD シミュレーションによって静的な状態を仮定して行われているが、大学実験室を対象とし、非定常で動的な要素を取り入れた研究報告はない。

## 1.6 本研究の研究目的

本研究では、実在する実験室の 1/10 スケールのモデル実験室を用いて、非定常性や共有性といった実験室の特徴を踏まえた実験室内の気流解析を行った。本論文流れとしては、(I) 1/10 スケール縮尺モデルの再現性に関する検討、(II) 縮尺モデルによる室内全体の気流性状、(III) 人の縮尺モデルを用いた実験室内気流への人の影響評価を行った。

気流解析に、CFD (Computational Fluid Dynamics) を用いた計算手法と、PIV (Particle Image Velocimetry) 測定による流体の移動をベクトルに変換する実験的手法を用いた。



## 参考文献

- [1] 山本仁: 大学にフィットした合理的な化学物質リスクアセスメントのあり方, *環境と安全*, **6**(3), 165-168(2015).
- [2] Richard, V N ; "Safety survey reveals lab risks," *Nature*, **10**(4), 2013, pp.9-10.
- [3] 研究振興局学術機関課. “学術研究の推進体制に関する審議のまとめ-国立私立大学等を通じた共同利用・共同研究の推-(報告)” 文部科学省,(参照 2018-12-10).
- [4] 鍋島優輝, *東京大学大学院修士論文*, (2015).
- [5] Uneme K., Nezu Y., Yamamoto H., Oshima.: Analysis on the Influence of Laboratory Design and Operations on Airflow in experimental Laboratory, *Journal of Environment and Safety* **6**(2), 111-114, 2015.
- [6] 大島義人:実験研究の安全構造に関する科学的アプローチの重要性, *環境と安全*, **8**(3),83-89(2017).
- [7] 大島義人:産と学の協創による実験研究現場の環境安全に関する取り組み, *環境と技術*, **45**(9), 25-31(2018).
- [8] 厚生労働省.”快適職場”. [http://anzeninfo.mhlw.go.jp/yougo/yougo11\\_1.html](http://anzeninfo.mhlw.go.jp/yougo/yougo11_1.html), (参照 2019-02-19).
- [9] 一般財団法人全日本労働福祉協会. “環境測定”. <http://zrf.or.jp/measurement/work>, (参照 2018-12-06).
- [10] 株式会社環境管理センター. “作業環境測定”.  
<https://www.kankyo-kanri.co.jp/products/299.html>, (参照 2018-12-06).
- [11] 萩野博幸, 中村修, 名古屋俊士: 座談会 大学におけるこれからの作業環境管理と日測協の役割, *作業環境*, **31**(3), 4-22(2010).
- [12] 厚生労働省: 職場における化学物質管理の今後のあり方に関する検討会報告書: 2010.

- [13] 中村修, 青木隆昌, 松原孝, 木間富士子, 松浦有高, 進藤拓, 関根守, 武田誠, 後藤裕之, 柏木保人, 榊原洋子, 鈴木雄二, 長谷川紀子: 大学等の化学物質取り扱い作業場のばく露管理における個人ばく露測定とリスクアセスメントの有効性について, *環境と安全*, **4**(1), 15-24(2013).
- [14] 片岡拓哉, 加藤健一, 熊田辰巳, 水野安浩: 特集 車室内空調快適性の最新技術, *デンスーテクニカルレビュー*, **10**(1), 58-64(2005).
- [15] 坂口敦, 赤林伸一, 鍛冶紘子, 都丸恵理: レストランにおける受動喫煙に関する基礎的知識, *日本建築学会環境系論文集*, **74**(635), 39-45(2009).
- [16] 阿久津太一, 加藤信介, 浅井万里成, 井田寛, 佐藤昌之: 4床病室における空調方式の評価(第1法) CFD解析による室内環境と換気効率の評価, *空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集*, 193-196(2007).

## 第 2 章 検討手法

### 2.1 PIV 解析による室内気流の解析

#### 2.1.1 PIV（粒子画像流速測定法；Particle Image Velocimetry）解析の概要

空気の流れは普通は目に見えないものである。この流れを、トレーサと呼ばれるマーカを挿入することによって見えるようにする技術が流れの可視化の一つの方法である。この流れの可視化技術にデジタル画像処理技術を融合し、流れ場の瞬時・多点の速度情報を抽出する方法を粒子画像流速測定法（Particle Image Velocimetry；以下 PIV）といい、実用化されている。

建築分野におけるレーザーを用いた流れの可視化に関する研究は多く行われている。例えば、朱らはチャンバー内にサーマルマネキンを設置し PIV 測定により人体呼吸域の流れ場を明らかにしており、山中らは風洞実験により通風量の解析及び建物周りの気流分布の解析を行っている。これらのように、建築分野では可視化の対象とする流体は空気の場合がほとんどで、一般的に使用されている PIV システムは、比較的狭い範囲を対象としている<sup>[1]</sup>。本研究では、FlowExpert2D という 2 次元流体計測ソフトウェアを用いて PIV 解析を行った。

#### 2.1.2 PIV 解析の原理

PIV は、流体中に目印となる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方法の総称であり、風速の計測方法の一つである。PIV は熱線風速計等による従来の風速測定と異なり、流れに対して非接触で、多数の空間位置で同時に気流速度情報が得られる利点があるため、従来の風速計では測定が困難な流れ場に対して、有力な流れの解析手法である。

PIV 測定の原理を図 2-1 に示す。流れに微細なトレーサ粒子を混入し、これをパルスレーザーなどの光源で瞬間的にシート状に照明する。照明は流れの面内で少なくとも 2 時刻（時刻  $t_0$  と時刻  $t_1$ ）で行われる。トレーサ粒子からの散乱光は CCD 素材などの撮影装置を介して 2 時刻の瞬間的な粒子画像として記録される。連続する 2 時刻の画像上のトレーサ粒子像からその画像上の移動量  $\Delta X$  を求め、これと画像入力の間隔  $\Delta t (=t_1-t_0)$  および画像の変換係数  $\alpha$  を用いて、流れ空間の局所の速度  $u$  を式より求める。

$$u = \alpha \frac{\Delta X}{\Delta t} \quad (1)$$

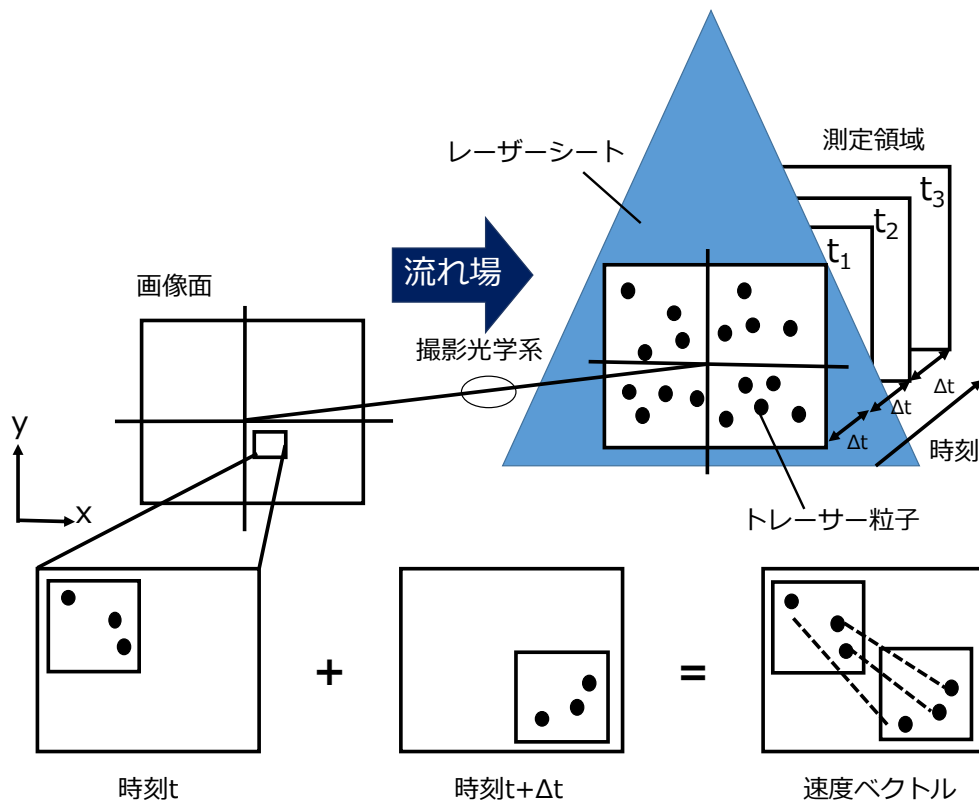


Fig.2-1 PIV 測定の原理<sup>[2]</sup>

画像解析手法については、大別して画像相関法と粒子追跡法の2種類がある。画像相関法は、数個から十数個のトレーサ粒子が含まれる検査領域を設け、検査領域内の粒子分布状態を判断基準として、次時刻の粒子群像の移動先を求める。画像相関法の解析手法の一つである直接相互相関法は、異なる2時刻の画像間で、初めの時刻に取得した画像中の検査領域と最も濃度パターンの類似する領域を次時刻の画像中の探査範囲内から探し出し、風速ベクトルを算出する手法であり、現在のPIV測定の主要な処理法の一つである（図2-2）。一方で、粒子追跡法は、ある時間間隔で画像中の各トレーサ粒子の移動を自動的に追跡し、流れ場を計測する方法である<sup>[3]</sup>。

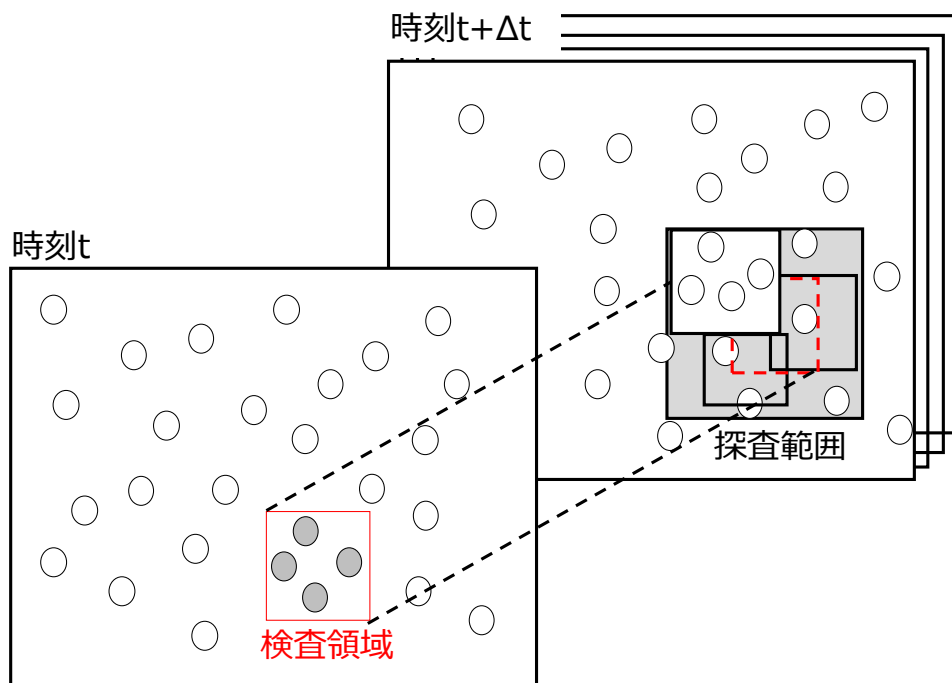


Fig.2-2 直接相互相関法の概要

### 2.1.3 PIV の解析設定

気流の可視化および撮影の概略図を図 2-3 に示す。撮影する方向に高速度カメラを設置し、観測する範囲にトレーサ粒子を散布し、可視化するためにレーザーを照射した。

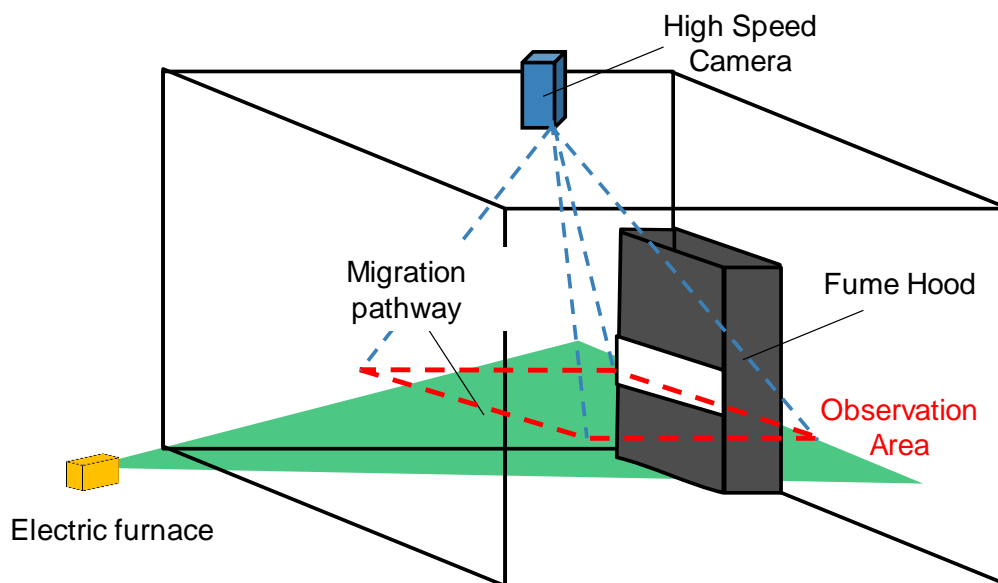


Fig.2-3 PIV 測定の概要

表 2-1 に実験装置の仕様を、表 2-2 に PIV 測定のパラメーターを示す。本実験では、トレーサに平均粒径 12 nm の粉末を使用した。出力 1000 mW のレーザーを可視化領域全体に照射した。

Table2-1 実験装置の仕様

実験装置の仕様	
Camera	USB 高速度カメラ K4 (カトウ光研)
Laser	DPSS Laser SANCTITY LASER ; SSL-532-1000-10TM-30L 波長 532 nm、出力 1000 mW
Soft Ware	カメラ制御 k-2Ex/k4 Software for CL-USB3 ver1.27 PIV 解析 Flow-Expert64 ver1.2.17
Tracer Particle	AEROSIL200CF 平均粒径 12 nm 組成 SiO <sub>2</sub> 99.9 %以上 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0.01 %以下 TiO <sub>2</sub> 0.01 %以下 備考 分散性、良

Table2-2 PIV 測定のパラメーター

PIV 測定のパラメーター	
Image correlation method	Direct cross-correlation method
Image size	1024 × 1024 pixel
Flame rate	150 fps
Interrogation region	32 pixel × 32 pixel
Search region	± 52pixel × ± 52 pixel

本研究では画像相関法を用いて流れの性状の解析を行った。解析の手順は大まかに撮影画像の画質評価・改善（前処理）、画像の相互相関処理による粒子速度ベクトルの算出、撮影条件や誤ベクトルを考慮した流速データの算出（後処理）の3つの工程で行われる。本研究で行ったPIV解析の手順を以下に示す。

## (1) 前処理

### (1-1) キャリブレーションの実行

校正用画像を読み込み、簡易キャリブレーションによって距離単位の設定を行った。

### (1-2) 連続前処理

撮影した粒子画像を読み込み、画像の濃度を「乗算」と「減算」、画像のコントラストや明るさ調節は「明るさ」「コントラスト」「ガンマ」によって調節を行った。

### (1-3) マスク画像の作成

障害物などの計測領域の不要な箇所を計測値障害とする処理を行った。

## (2) 速度ベクトル計算

### (2-1) 比較フレームの設定

「計算間隔時間」と「比較画面間隔の時間」を測定した動画のフレーム数や、測定した対象の速度に合わせて数値を入力した。

### (2-2) 計測領域の設定

「Fit to Image」から測定したい範囲を選択する。

### (2-3) 検査領域と探索領域の設定

「検査領域」32 pixel×32 pixelは「探索領域」±52pixel × ±52 pixel に設定した。

## (3) 後処理

### (3-1) 過誤ベクトルの除去

入力した相関係数の数値を基準に、検査領域内においてその値を下回るベクトルを除去した。

### (3-2) ベクトルの補完

(3-1)で除去したベクトルを、近傍8領域から補間した。

### (3-3) ベクトルのスムージング

領域サイズ3×3において平均値からスムージング処理を行った。

## 2.2 CFD 解析による室内気流の解析

### 2.2.1 CFD（数値流体力学；Computational Fluid Dynamics）解析の原理

計算流体力学（以下、CFD）とは、流れ場を支配する基礎方程式群（Navier-Stokes の方程式、Euler 方程式、連続の式など）を、与えられた境界条件のもと、コンピュータを用いて数値的に近似解を求める手法である<sup>[4]</sup>。室内気流は、3次元の複雑な渦運動を伴う乱流現象であり、詳細な予測・解析は容易ではないが、CFD は3次元で詳細な室内気流の予測・解析手法としては唯一のものである。また、室内の汚染質濃度の空間分布を把握する手段として、室内気流解析に絶大な能力を発揮する。CFD はさまざまな条件の下での複雑な流れ場解析も柔軟に行う能力をもつもので、その実用性の高さから近年、流体现象に関連する各種の工学分野で急速に用いられるようになってきている<sup>[5]</sup>。CFD の概念図を図 2-4 に示す。

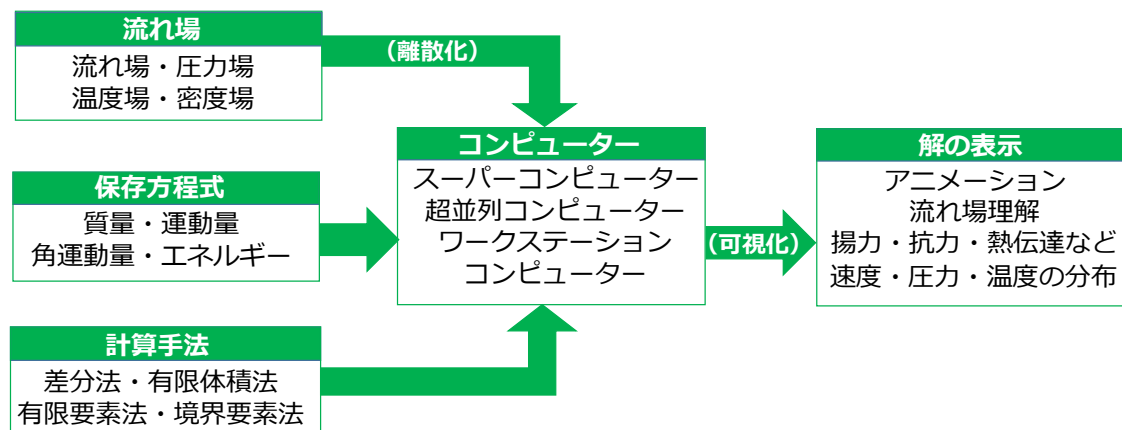


Fig. 2-4 CFD の概念



CFD 解析を実施する場合の大まかな手順を以下に示す<sup>[6]</sup>。

#### ① 基礎方程式の決定

対象となる流れの現象に対してどの基礎方程式を用いるのか決める。また、必要に応じて物理モデル（乱流モデル、化学反応モデルなど）を選択し、数値計算を行う基礎方程式（偏微分方程式や積分形微分方程式、境界条件）を決定する。

#### ② 偏微分方程式の離散化

偏微分方程式を離散化し、数値解析を行う代数方程式を導く。離散化とは、もともと連続な分布を離散点上の値で置き換え、偏微分方程式を計算上で扱える四則演算で表現された代数方程式に変換することである。主な離散化の方法として、差分法（finite different method:FDM）、有限体積法（finite volume method:FVM）、有限要素法（finite element method:FEM）の3種類がある。

#### ③ コンピュータ上での数値解析

導出された代数方程式に対して境界条件や各種数値解析手法を決め、利用する計算機に適したプログラムを作成し解析を行う。

#### ④ 計算結果の出力

得られた数値解析結果から、必要となる物理現象を引き出すため物理分布のグラフ化や可視化などを行い流れの現象把握を行う。

### 2.2.2 CFD 解析の概要

本研究では、Flowdesigner2019（アドバンスドナレッジ研究所）というソフトウェアを用いて CFD 解析を行った。表 2-3 に CFD 解析の概要を示す。

Table2-3 CFD 解析概要	
CFD 解析概要	
Soft Ware	Floedesigner2019 (アドバンスナレッジ研究所)
Turbulence model	高レイノルズ型 $k-\varepsilon$ モデル
Number of mesh	200,000

## 参考文献

- [1] Akabayashi S., Oshima T., Arinami Y., Okubo H., Ysmg X., Sakaguchi J., “Air flow Measurments in a Scale model of Method Selection of Seeding with Tracer Paricles,” *Transactions of AIJ. Journal of environmental engineering*, **78**(690), 631-638(2013).
- [2] 赤林伸一, 大鶴拓也, 有波裕貴, 大久保肇, 楊曉韻, 坂口淳, “室内気流模型を対象としたシーディング手法の検討及び測定結果,” *日本建築学会環境系論文集*, **78**(690), 631-638(2013).
- [3] 可視化情報学会編, PIV ハンドブック, (2002).
- [4] 加藤信介, “室内空気汚染の時間的空間的変動特性とその検出,” *計測と制御*, 46巻8号, 2007年8月.
- [5] 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, *PLAIN* センターニュース, **127**(2004).
- [6] J.H. Ferziger, M. Perić(2002), “Computational Methods for Fluid Dynamics,” Springer-Verlag Berlin Heidelberg(J.H. ファーツィガー, M. ペリッチ, 小林敏雄・大島伸行・坪倉誠(訳)(2012), “コンピュータによる流体力学,”丸善出版).

## 第3章 1/10 スケールモデル実験室における

### 実験室内気流の再現性に関する検討

#### 3.1 緒言

近年の室内気流の主な解析手法としては、CFD 解析と PIV 測定が挙げられる。

CFD 解析は空調計算や室内の温熱環境の評価を行う上での「空気の流れ」を把握するための一般的なツールとして広く普及している。しかしながら、実際の室内気流分布では、空間内に複雑な気流が形成されており、定性的な評価の範囲内においても疑問が生じる結果となる場合も否定できないのが実情であり、実際の気流性状との整合性を確認する必要があると報告<sup>[1]</sup>されている。また、CFD 解析は膨大な計算時間を要するため、実用レベルの活用は、室内の温熱・空気環境の 3 次元的な空間分布が生じやすい大空間建築や定常状態を対象とした解析に限定されることが多い<sup>[2]</sup>。一方で、PIV 測定は実際の流れ場に対して、多数の空間位置で同時に気流速度情報が得られることから、有力な解析手法の一つであり、実際に実大実験室の PIV 測定の課題を明らかにするために室内模型を対象に気流解析が行われている<sup>[3]</sup>。フルスケールモデル実験室における気流の実態を把握する上で、実測により観測することは容易ではない。そこで、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ツールとしての活用や、実際の実験室では容易にできない室内レイアウトの変更、実験室特有の非定常性について検討することが可能となる。

また、室内の気流分布を予測することは建築計画上重要である。その予測手段として有効だと言われている一つに、模型実験がある。室内気流を知るためには実寸大を対象に実測を行うことが最も信頼性が高いが、設計段階の建物の性状を知るために実物大の模型を用いることは現実的に不可能である<sup>[4]</sup>。そこで、実物大をダウンサイジングさせた模型を用いることによる、空間全体の流れ場を再現する予測手段があり、現在までに展示場や工場などの大空間を対象とした予測事例、実測との比較による妥当性の確認があり、その有効性はほぼ確立されている<sup>[5]</sup>。1/10 スケールモデル実験室が室内環境の有効な予測手段になれば、計画・設計の初期段階において、実験室を利用する実験室ユーザーや機器を提供するサプライヤーらが、十分な意志の疎通を図り、共通認識を確立し、総合的に判断できるツールとして期待できる。

### 3.2 実験の目的

この章では、1/10 スケールモデル実験室を用いて実測データの取得による気流の実情把握を目的とする。フルスケールの実験室に加え、1/10 スケールの縮尺模型を用いてフルスケールの実験室の状況を再現し、これらを用いて実測と計算の両面から実験室全体を統合的に解析する。具体的には、(Ⅰ) 縮尺の違いによる気流への相似則の適応性、(Ⅱ) 縮尺模型における気流性状、(Ⅲ) 実測におけるフルスケールと縮尺模型の再現性について検討を行った。

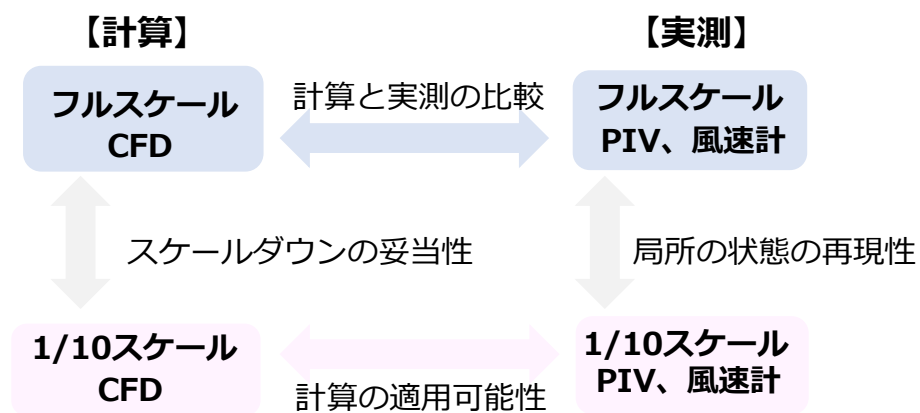


Fig.3-1 研究方針

### 3.3 解析及び実験方法

#### ●測定対象の概要

新領域：環境棟内のある実験室（2018年の改装前）を対象とし、1/10に縮小したモデル実験室と、フルスケール実験室の両方を用いた。モデル実験室の概略図を図3-2に示す。換気設備として室内換気装置、ヒュームフードが備わっている。それらの位置関係は、ヒュームフードの前に給気口があり対角線上に反対側に排気口がある。CFD解析の境界条件を表3-1に示す。1/10スケールモデル実験室のヒュームフード、室内換気の流速は、室内気流における空気分布の相似則で重要なフルード数を一致させることで決定し、PIV解析による実測においては流速で、CFD解析においては流速および流量を設定値とした。1/10モデルの室内換気は流速  $0.79 \text{ m/s}$ 、流量  $1.9 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{min}$ 、ヒュームフードは流速  $0.155 \text{ m/s}$ 、流量  $6.1 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{min}$  で、フルスケール実験室の室内換気は流速  $2.5 \text{ m/s}$ 、流量  $6.0 \text{ m}^3/\text{min}$  で稼働するとした。実験条件は、ヒュームフードのみ、室内換気のみ、そのどちらも稼働時の計3条件で行った。

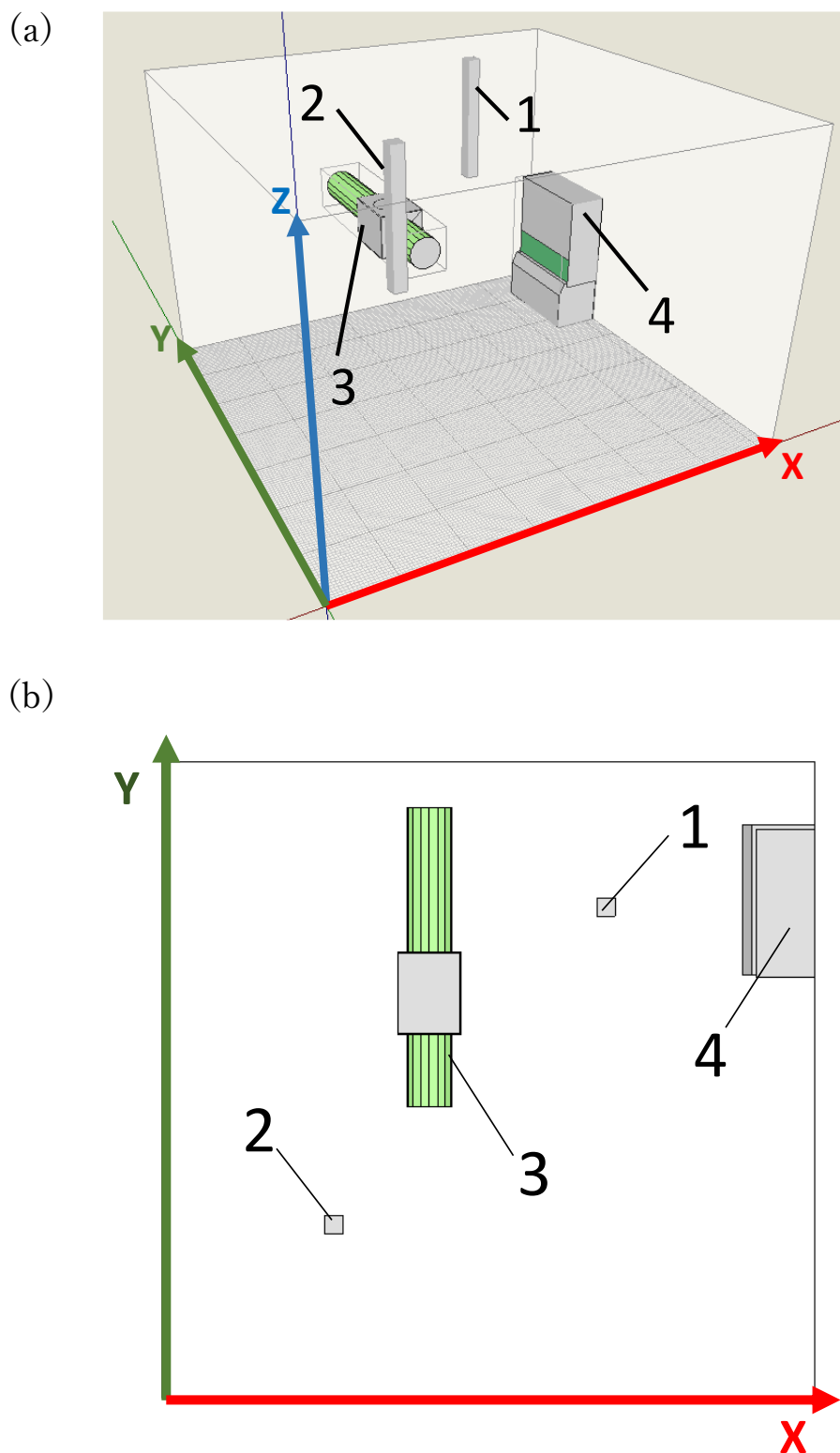


Fig. 3-2 対象実験室レイアウト

(a) 概観図 (b) 上面図

1. 室内換気給気口 2. 室内換気排気口 3. ヒュームフード排気 4. ヒュームフード給気

Table3-1 CFD 解析の境界条件

境界条件	フルスケール実験室	1/10 スケール実験室
実験室サイズ	X:7.2×Y:7.0×Z:5.0 m <sup>3</sup>	X:0.72×Y:0.70×Z:0.50 m <sup>3</sup>
室内換気装置給排気量	2.5 m/s (6.0 m <sup>3</sup> /min)	0.79 m/s (1.9×10 <sup>-2</sup> m <sup>3</sup> /min)
ヒュームフード給排気量	0.5 m/s (19.8 m <sup>3</sup> /min)	0.155 m/s (6.1×10 <sup>-2</sup> m <sup>3</sup> /min)
室温	20.0°C (一定)	
相対湿度	55.0% (一定)	

### ●1/10 スケールモデル実験室の概要

1/10 スケールモデル実験室における相似則の検討に関しては、図 3-3 に示す模型を用いた。模型はアクリル板で作成されており、寸法はフルスケール実験室を 1/10 に縮小した 720×700×500 mm である。給排気はブロワー（オリエンタルモーター社製：MB520-B）を使用し、開口面積を制御することで風量の調節を行った。壁面にパイプが通るくらいの穴を開け、ヒュームフードと室内換気の給排気は模型外部から風を送り出している。実験台やヒュームフードなどの什器類は 3D プリンターによって作成することで再現した。

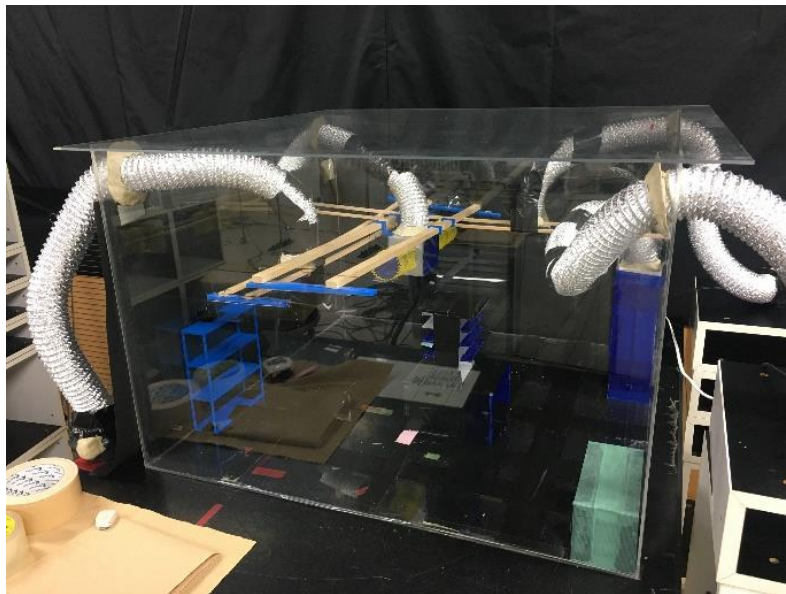


Fig.3-3 1/10 スケールモデル実験室

## ●模型における気流の相似則

一般に模型実験においては、幾何学的相似のまま長さの縮尺を変えたとき、それに応じて二系間のその他の基本的な量を相似にするための検討が必要になる。例えば、縮尺模型を用いた実験を行う際に、実寸大レベルの気流と同じ気流性状を得るためにはどの無次元数を満たせばいいのかといった検討である。縮尺模型を用いる際の相似則に関する研究は古くから行われている<sup>[6]</sup>。

### (1)温度場に関する模型実験

空間内部の流れ場・温度場に関するものは、流体の基礎方程式を代表値で無次元化することで得られるパラメーターを実物と模型で一致させる必要がある。空間の流れを支配する基礎方程式（連続の式、運動方程式、エネルギー方程式）を平均流で表し、室内環境形成にあずかる代表的な基準の速さ、基準の長さ、基準の温度差により各方程式を無次元化して次式を得る<sup>[7]</sup>。

連続の式

$$\frac{\partial U_i^*}{\partial x_i^*} = 0 \quad (1)$$

運動方程式

$$\frac{\partial U_i^*}{\partial t^*} + \frac{\partial U_i^* U_j^*}{\partial x_j^*} = -\frac{\partial P^*}{\partial x_i^*} + \frac{\partial}{\partial x_j^*} \left\{ \left( \frac{1}{Re_t} + \frac{1}{Re} \right) \left( \frac{\partial U_i^*}{\partial x_j^*} + \frac{\partial U_j^*}{\partial x_i^*} \right) \right\} - Ar \Delta \theta^* \delta_{i\varepsilon} \quad (2)$$

エネルギー方程式

$$\frac{\partial \Delta T^*}{\partial t^*} + \frac{\partial U_j^* \Delta T^*}{\partial x_j^*} = \frac{\partial}{\partial x_j^*} \left\{ \left( \frac{1}{Re_t \sigma_t} + \frac{1}{Re \sigma} \right) \frac{\partial \Delta T^*}{\partial x_j^*} \right\} \quad (3)$$

ここで、以上の3つの方程式から以下の5つの無次元数が与えられる。

アルキメデス数

$$Ar = \frac{g \beta \Delta T_0 L_0}{U_0^2} \left( = \frac{Gr}{Re^2} \right) \quad (4)$$

レイノルズ数

$$Re = \frac{U_0 L_0}{\nu} \quad (5)$$

プラントル数

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (6)$$

乱流レイノルズ数

$$Ret = \frac{U_0 L_0}{\nu_t} \quad (7)$$

乱流プラントル数

$$Prt = \frac{\nu_t}{\alpha_t} \quad (8)$$

記号表

$U_j^*$ : $j$ 方向の無次元平均風速 $u_j^* = U_j / U_0$	$u$ : 変動風速
$U_0$ : 代表風速 (吹出平均風速) m/s	$\Delta T^*$ :無次元平均温度差 $\Delta T^* = \Delta T / \Delta T_0$
$L_0$ :代表長さ m	$\Delta T_0$ :代表温度差 (吹出平均温度と室内平均温度の差) °C
$\nu$ :分子動粘性係数 $m^2/s$	$\alpha$ :分子温度拡散係数 $m^2/s$
$\nu_t$ :渦動粘性係数 $m^2/s$	$\alpha_t$ :渦温度拡散係数 $m^2/s$
$g$ :重力加速度 $m^2/s$	$\beta$ :体膨張係数(空気) $1/^\circ C$
$\gamma$ :密度(空気) $Kg/m^3$	

これらの無次元数の模型と実物での一致が模型実験において、流れ場の相似を与えるための主な条件となる。空気を用いて模型実験を行う場合、プラントル数式 (6) の一致は自明である。レイノルズ数に関しては、大縮尺 (一般に 1/10 以下) の模型と実物での一致は困難である。通常の室内気流においては壁面近傍の境界層部を除く室の大部分が乱流域で、 $Re \gg Ret$  が成り立っており、レイノルズ数が非常に大きいため無視できる。すなわち、レイノルズ数が十分に大きいことが大切な実験条件の一つとなる。

乱流レイノルズ数と乱流プラントル数に関しては、次元解析から次式の関係が成立する。

$$\nu_t \propto \sqrt{u^2} \ell \quad (9)$$

$$\alpha_t \propto \sqrt{u^2} \ell \quad (10)$$

室内気流のうち、壁面近傍のごく薄い境界層を除いて大部分が十分に発達した乱流であり、その領域内では次の関係が成り立つことは、ある程度自明のことと考えられる。

$$\sqrt{u^2} \propto U_0 \quad (11)$$

$$\ell \propto U_0 \quad (12)$$



これより、

$$v_t \propto U_0 L_0 \quad (13)$$

$$\alpha_t \propto U_0 L_0 \quad (14)$$

すなわち、 $Re_t$ 、 $\sigma_t$ は $U_0$ 、 $L_0$ によらず常に一定値となり模型と実物で自動的に一致する。よって、実験ではアルキメデス数の一致のみ考慮すればいいことになる。アルキメデス数とは、浮力の作用する室内流のパターンを決定する指標として用いられる。幾何学的形状とアルキメデス数が与えられれば、流体力学的には気流パターンが推定できる<sup>[4]</sup>。模型と実物のアルキメデス数の一致を示す式を以下に示す。

$$\left( \frac{g\beta\Delta\theta_0 L_0}{U_0^2} \right)_{model} = \left( \frac{g\beta\Delta\theta_0 L_0}{U_0^2} \right)_{prototype} \quad (15)$$

空調が行われている場合の相似条件は、代表値である $L_0$ 、 $U_0$ 、 $\Delta\theta_0$ は通常それぞれ空間の天井高さ、吹出風速、吹出温度差が選ばれる。これらの実物に対する縮率を、それぞれ $n_u$ 、 $n_l$ 、 $n_\theta$ と表すと式(15)より各諸量に関する関係式が求まる<sup>[8]</sup>。

$$\frac{n_l n_\theta}{n_u^2} = 1 \quad (16)$$

本研究では、実寸大の長さの1/10にスケールダウンしたものをを用いるので、 $n_l = 1/10$ となる。また、 $g$ 、 $\beta$ 、 $\Delta\theta$ が等しいと仮定すると、以下の関係式が導かれる。

$$n_u = \frac{1}{\sqrt{10}} \quad (17)$$

以上より、フルスケールモデル実験室、1/10スケールモデル実験室の基準速さをそれぞれ $u_1$ 、 $u_2$ と置くと、相似則から導かれる模型内の速さは以下のようになる。

$$u_2 = \frac{u_1}{\sqrt{10}} \quad (18)$$

以上の相似則は、室内が十分に発達した乱流であり、吹き出し・吸い込み口を伴う室内気流場に適用する。

## (2) 等温の模型実験

流体の流れを支配する方程式はナビエ・ストークス方程式と呼ばれ、この方程式を解くと流体の動きを把握することができる。

流れ場の代表長さを  $L$ 、代表速度を  $U$ 、時間の代表を  $L/U$ 、圧力の代表を  $\rho U^2$  とする。これらを無次元化すると以下の式で表せる。

$$x^* = \frac{x}{L} \quad (19)$$

$$u^* = \frac{u}{U} \quad (20)$$

$$t^* = \frac{t}{L/U} \quad (21)$$

$$p^* = \frac{p}{\rho U^2} \quad (22)$$

$$g_x^* = \frac{g_x}{g} \quad (23)$$

以上より、ナビエ・ストークス方程式は式(24)のように無次元変数で表せる(x方向のみ示す)。

$$\frac{Du^*}{Dt^*} = \left(\frac{Lg}{U^2}\right) g_x^* - \frac{\partial p^*}{\partial x^*} + \left(\frac{\mu}{\rho UL}\right) \left(\frac{\partial^2 u^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 u^*}{\partial y^{*2}} + \frac{\partial^2 u^*}{\partial z^{*2}}\right) \quad (24)$$

ナビエ・ストークス方程式を無次元化すると、フルード数とレイノルズ数の2つの無次元数が現れ、これが流体の動きを決定しているとも言え、流れの性質が決まる。この2つの無次元数が等しければ方程式は全く同じになる。

レイノルズ数

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (25)$$

フルード数

$$Fn = \frac{U^2}{Lg} \quad (26)$$

レイノルズ数は粘性力と慣性力の比を表しており、レイノルズ数が高いほど流れが乱

れ、層流から乱流へ遷移する。フルード数は慣性力と重力の比を表しており、フルード数が大きいほど浮力に比べて慣性力が大きいことを意味し、流れは乱れる。レイノルズ数の定義からわかるように、模型と実室内とのレイノルズ数を合わせようとする場合、同じ空気を流体としていると、模型のスケール分だけ速度を大きくする必要があり、模型実験でそのような速い速度を実現するのは非常に難しい。また同時に、その速度で模型のフルード数を計算すると、実室内のフルード数よりも大きくなってしまう。すなわち、両方の無次元数を合わせることは、殆どの場合には不可能である。以上の理由により、レイノルズ数を合わせることはあきらめ、フルード数を合わせた速度設定とする。レイノルズ数は模型と実室内とは異なることになる<sup>[9,10]</sup>。

模型と実物のフルード数の一致を示す式を以下に示す。

$$\left(\frac{U^2}{Lg}\right)_{model} = \left(\frac{U^2}{Lg}\right)_{prototype} \quad (27)$$

代表値である  $L$ 、 $U$  はそれぞれ空間の天井高さ、吹出風速とし、これらの実物に対する縮率をそれぞれ  $n_u$ 、 $n_l$  と表すと式(27)より各諸量に関する関係式が求まる。

$$\frac{n_u^2}{n_l} = 1 \quad (28)$$

本研究では、実寸大の長さの 1/10 スケールダウンしたものをを用いるので、 $n_l = 1/10$  となる。また、 $g$  が等しいと仮定すると、以下の関係式が導かれる。

$$n_u = \frac{1}{\sqrt{10}} \quad (29)$$

以上より、フルスケールモデル実験室、1/10 スケールモデル実験室の基準速さをそれぞれ  $u_1$ 、 $u_2$  と置くと、相似則から導かれる模型内の速さは以下ようになる。

$$u_2 = \frac{u_1}{\sqrt{10}} \quad (30)$$

本実験では、1/10 スケール実験室とフルスケール実験室内の気流条件を揃えるために、フルード数を用いた相似則に基づき、ヒュームフードと換気扇の流速を境界条件として設定し、室内気流の PIV 解析と CFD 計算を行った。

### 3.4 実験結果

#### 3.4.1 フルスケールと 1/10 スケール実験室における気流の相似性の検討

1/10 スケール実験室とフルスケール実験室内の気流条件を揃えるために、フルード数を用いた相似則に基づき、ヒュームフードと換気扇の流速を境界条件として設定し、室内気流の CFD 計算を行った。

CFD 計算によって求めた、フルモデル実験室と 1/10 スケールモデル実験室の流速分布をヒュームフードのみ、室内換気のみ、そのどちらも稼働時における 3 条件で比較した結果を図 3-4、図 3-5、図 3-6 にそれぞれ示す。これらの結果から、流れる方向や流速において一致することを確認した。今後の研究では、1/10 スケールモデル実験室の室内換気設備の流速はフルード数を適用した数値を用いて検討を進める。

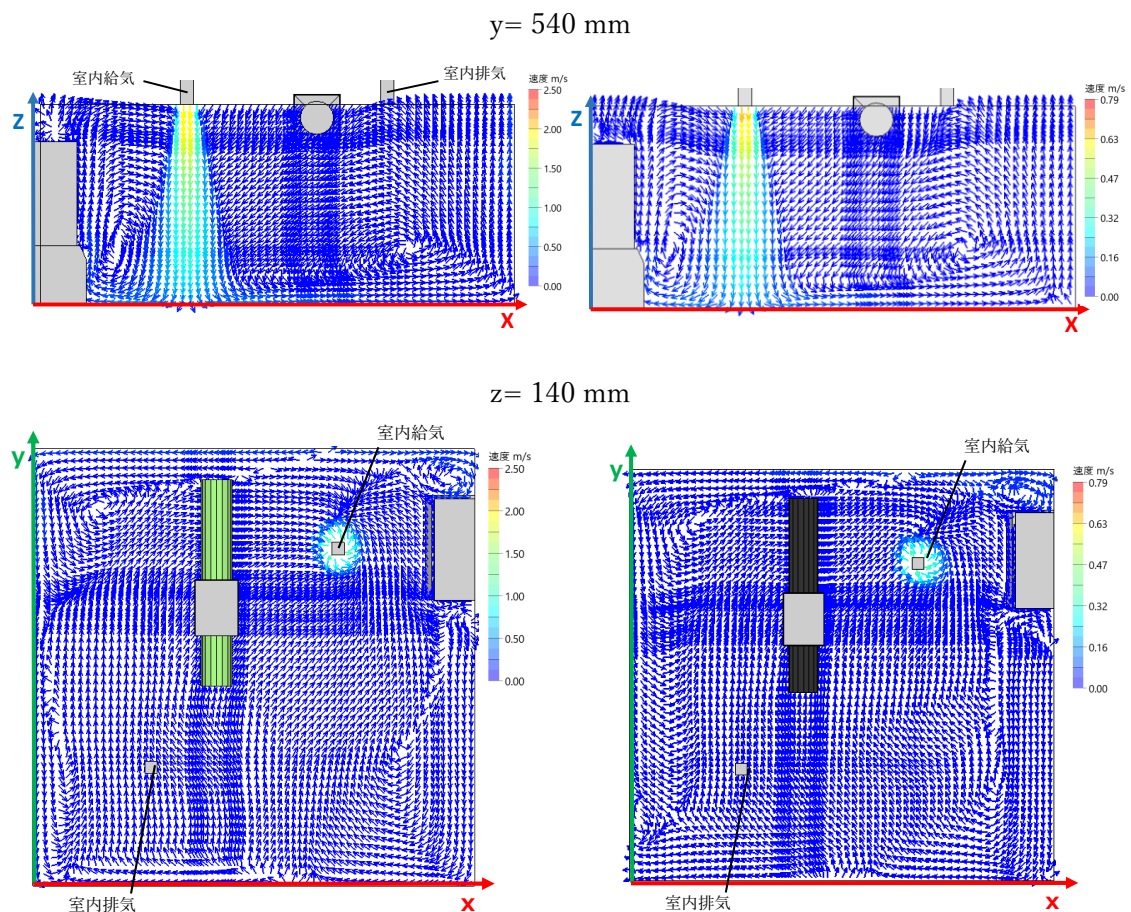


Fig.3-4 室内換気のみ稼働時の流速分布計算結果の比較  
左：フルモデル実験室 右：1/10 スケールモデル実験室  
上から  $y = 540 \text{ mm}$ 、 $z = 140 \text{ mm}$  の断面

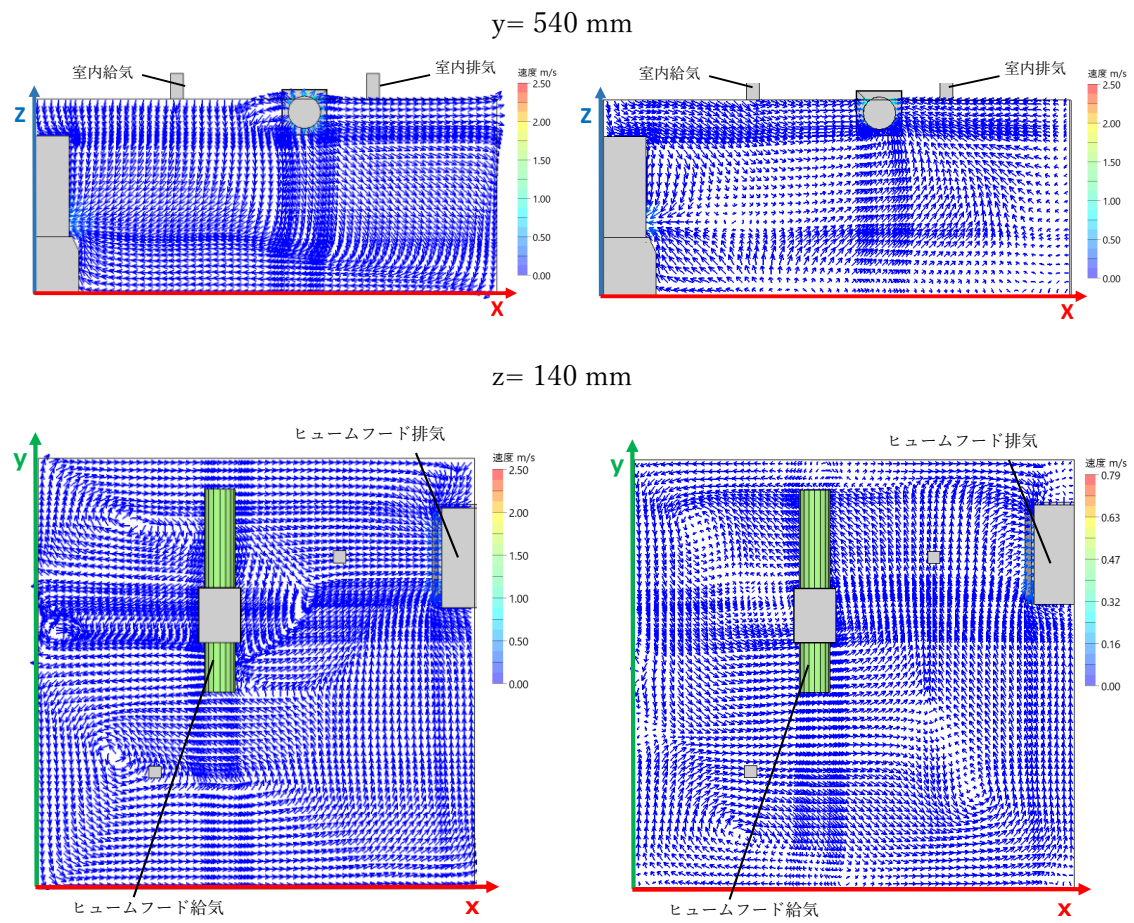
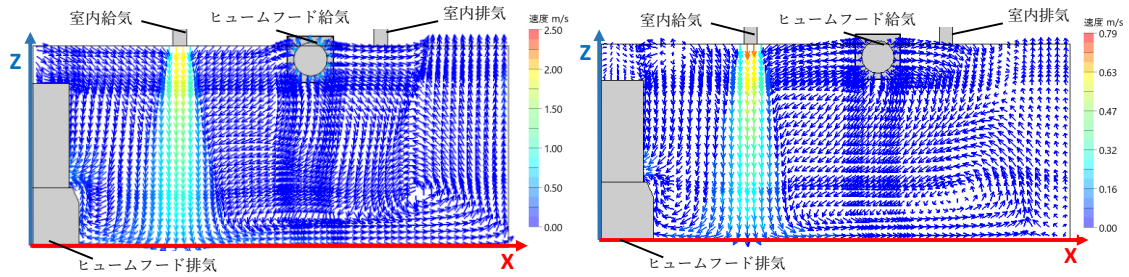


Fig.3-5 ヒュームフードのみ稼働時の流速分布計算結果の比較

左：フルモデル実験室 右：1/10 スケールモデル実験室

上から  $y = 540 \text{ mm}$ 、 $z = 140 \text{ mm}$  の断面

y= 540 mm



z= 140 mm

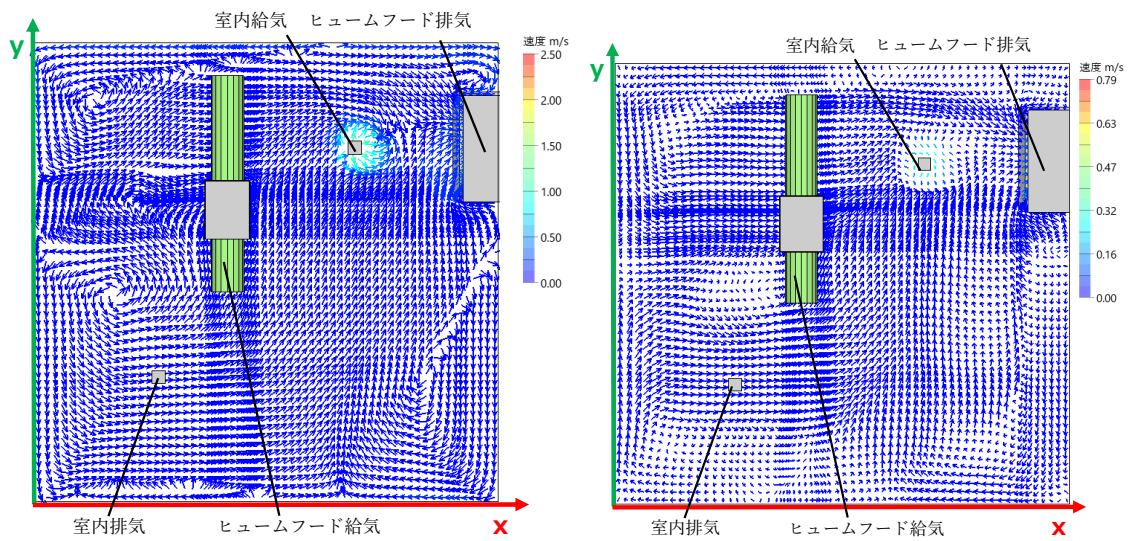


Fig.3-6 ヒュームフード、室内換気ともに稼働時の流速分布計算結果の比較

左：フルモデル実験室 右：1/10 スケールモデル実験室

上から y= 540 mm、z= 140 mm の断面

### 3.4.2 1/10 スケール実験室における実測と CFD 計算結果の整合性の確認

ここでは、1/10 スケールモデル実験室による気流性状の把握を行うとともに、同一条件下における気流性状について PIV 解析による実測と CFD 解析による計算結果との整合性を確認する。

#### ●1/10 スケール実験室における風速測定結果の比較

1/10 スケール実験室における PIV 解析と CFD 解析および風速計による整合性が得られるか検討を行った。換気のみ稼働させた時において、模型内の換気扇給気口(床上 300 mm)から垂直に 200、100、50 mm ごとに風速を測定した。測定箇所を図 3-7 に、PIV 解析と CFD 解析および風速計による風速値を表 3-2 に示す。

その結果、室内の全体的な流速は、CFD 計算とポイント測定である風速計の測定結果はほぼ一致した値を示す一方で、PIV 解析結果の方がそれらよりも低流速になっていることが分かった。この原因として、PIV 測定に適した濃淡画像が得られていないこと、が考えられる。可視化手法において重要な点は明瞭な画像を撮影することであり、画像の鮮明度は画像解析の精度を大きく左右するため、トレーサ粒子の選定は可視化を行うにあたって重要である。可視化手法は、トレーサは十分微細で中立浮遊であり周囲の流体に追従すること、画像のトレーサ粒子濃度が適切であること、撮影画像からトレーサの輝度が画像背景の輝度よりも大きい必要がある<sup>[10]</sup>。トレーサとしてトリエチレングリコール 20wt%、プロピレングリコール 10wt%、1,3-ブチレングリコール 20wt%の水溶液である Rosco Clear Fluid(Rosco)を用いて同条件における PIV 解析を行った結果、Aerosil200CF (平均粒径 12 nm、組成 SiO<sub>2</sub> 99.9 %以上)を用いたときよりも低流速の値を示した。これは、スモークによる煙は粒子密度が高いことや、エチレングリコールが高い粘性を持つため風速ベクトルが正しく算出されなかったと考えられる。室内給気口付近のような比較的風速が速い場所においては、どのトレーサを用いた場合でも流れ場の主流部分では比較的速い風速ベクトルが算出できた。

本実験では、トレーサ粒子として Aerosil200CF を使用する。また、今回作製した 1/10 スケールモデル実験室を用いて、模型と CFD 計算による解析結果の比較についてある程度妥当性があるという前提条件の下で、CFD 計算と PIV 解析を行った。



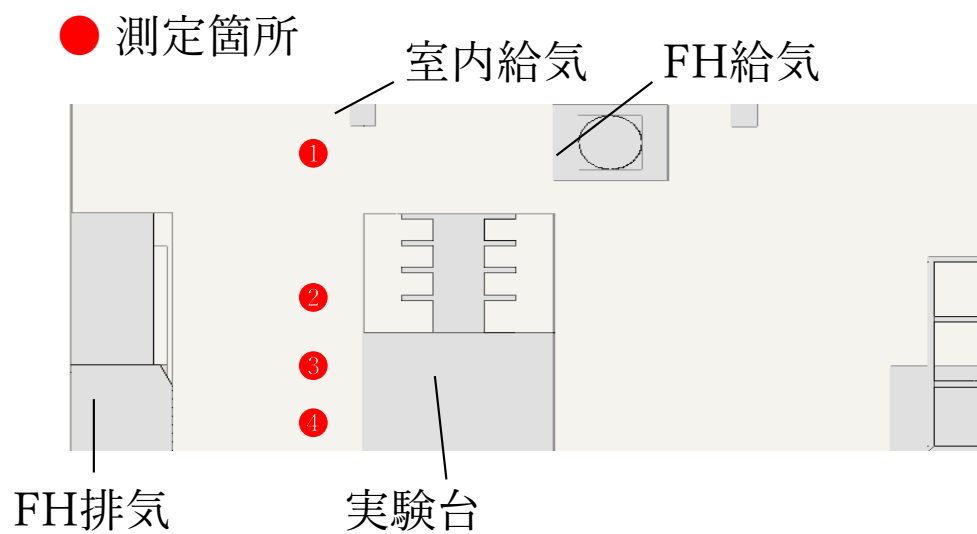


Fig.3-7 風速測定箇所

Table3-2 PIV 解析と CFD 解析および風速計の測定結果

測定位置	PIV 解析[m/s]	CFD 解析[m/s]	風速計[m/s]
① 室内給気付近 (Z=200 mm)	0.04	0.47	0.45
② 室内給気付近 (Z=150 mm)	0.02	—	0.15
③ 室内給気付近 (Z=100 mm)	0.02	0.30	0.31
④ 室内給気付近 (Z=50 mm)	0.01	0.25	0.27

## ●1/10 スケール実験室内気流の PIV 解析結果と CFD 解析結果の比較

1/10 モデル実験室内気流に関して、可視化気流の PIV 解析結果から得られる情報と CFD 解析によって得られる情報の一致性について検討した。

図 3-8 に室内換気のみ稼働した場合について、 $y=540\text{ mm}$  における流速ベクトル分布の結果を PIV 解析と CFD 定常計算の結果を示す。

図 3-8 の結果を比較すると、両者とも室内給気口から吹き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こと、また、ヒュームフード前に大きな渦が発生していることが確認され、実測と計算がある程度一致する結果となった。これは、部屋全体の気流を実測することが、フルサイズの実験室では困難であることから、1/10 スケール模型を用いることで部屋全体の気流を一度に実測することが可能となったことに意義があるといえる。一方で、PIV 解析では CFD 定常計算では現れなかった渦の発生が確認された。この渦は、発生するタイミングや場所が一定ではなく、室内換気装置の稼働状況によっても発生状況が変化するという非定常な現象として観察された。

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、現段階で我々が採用している計算手法では予測ができないので、その気流形成の過程をさらにヒュームフードや換気扇の給排気の位置など変更するなど、実験的に検討していく必要があると考える。

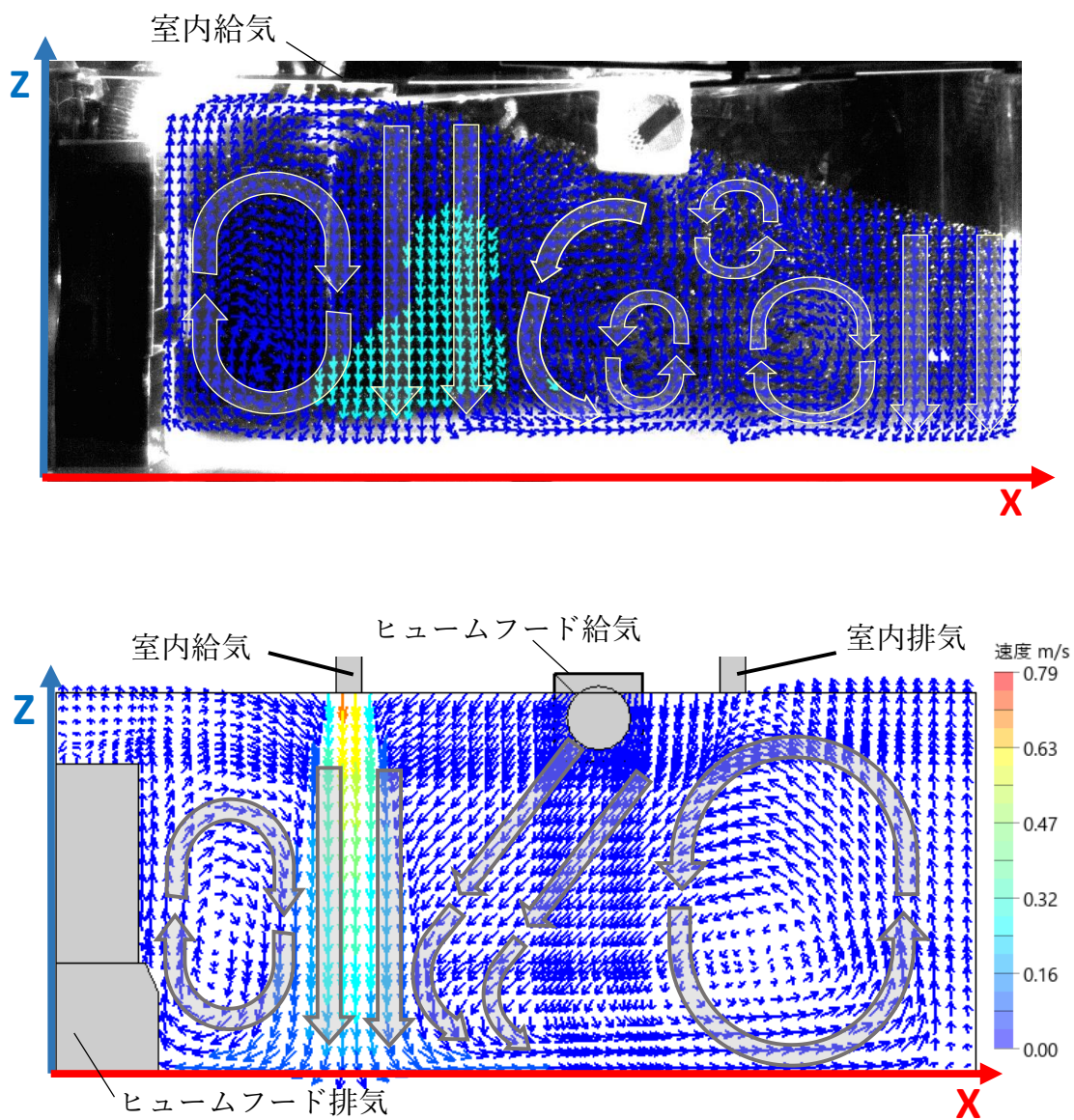


Fig.3-8 室内換気のみ稼働時の流速分布計算結果の比較  
上：PIV 解析結果 下：CFD 定常計算

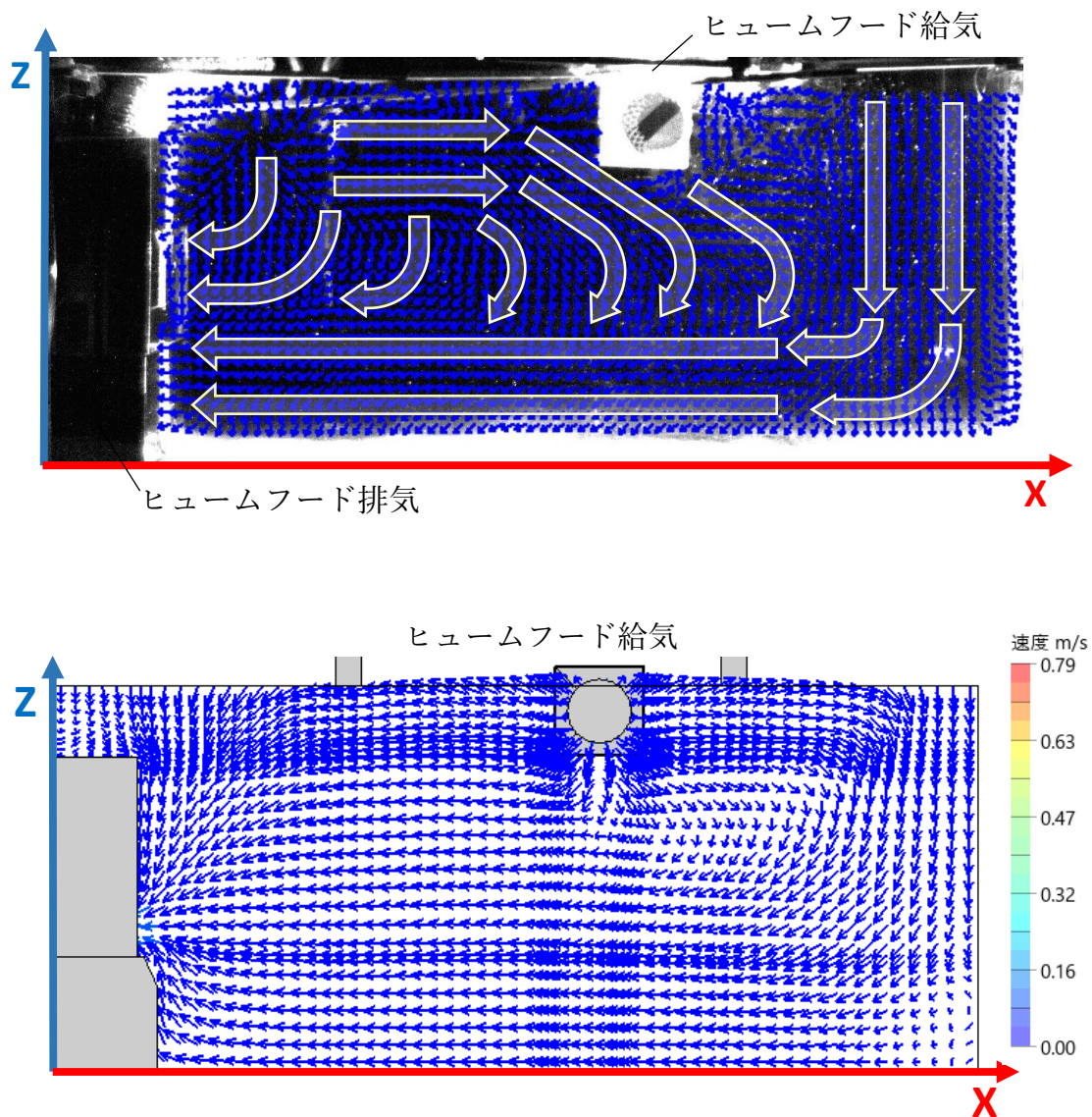


Fig.3-9 ヒュームフードのみ稼働時の流速分布計算結果の比較  
上：PIV 解析結果 下：CFD 定常計算

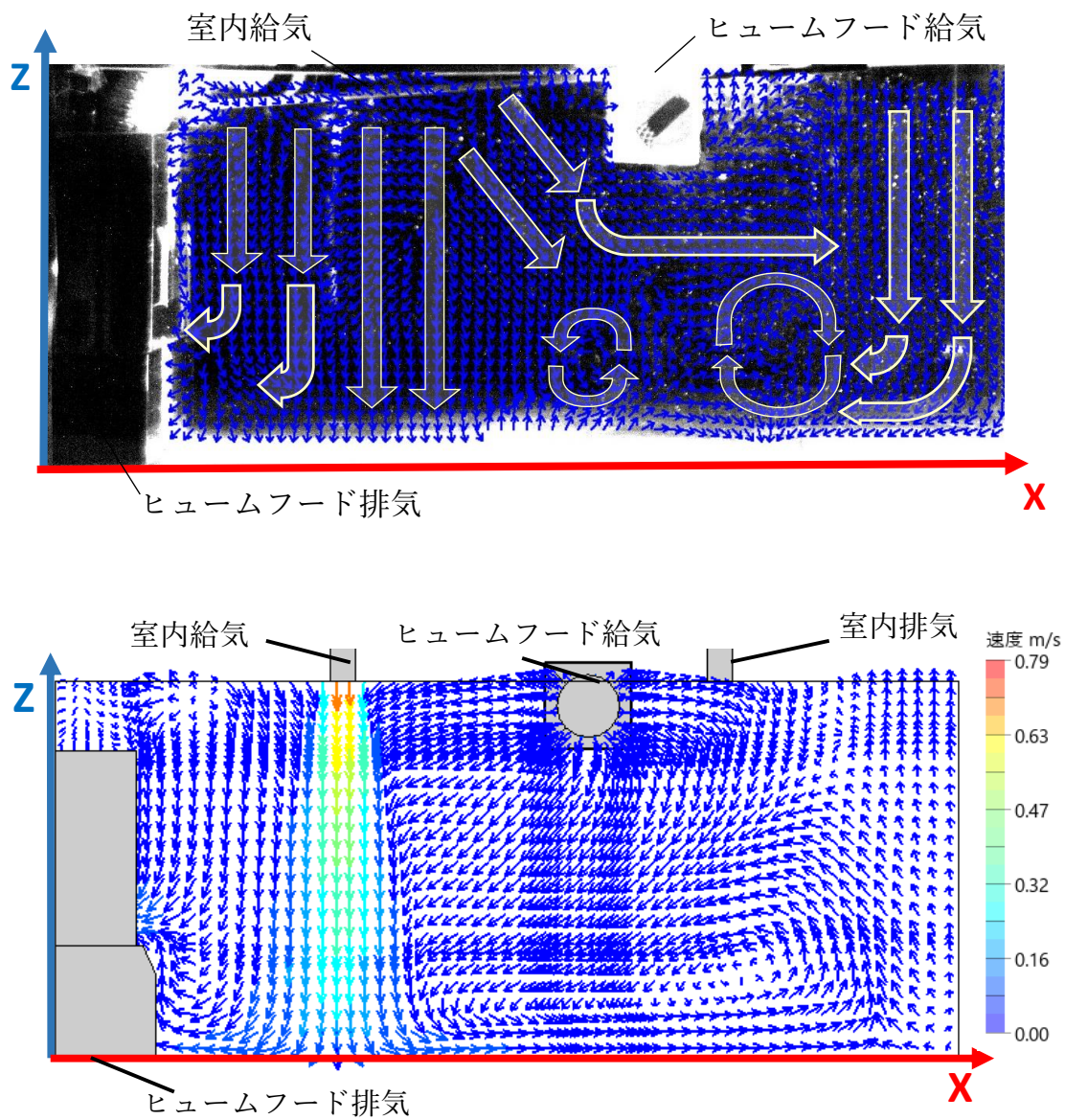


Fig.3-10 ヒュームフード、室内換気ともに稼働時の流速分布計算結果の比較  
上：PIV 解析結果 下：CFD 定常計算



### 3.4.3 換気装置の稼働状況が室内気流に与える影響の検討

図 3-9 にヒュームフードのみ稼働した場合について、図 3-10 に室内換気とヒュームフードともに稼働した場合について、 $y=540\text{ mm}$  における流速ベクトル分布の結果を PIV 解析と CFD 定常計算の結果を示す。

ヒュームフードのみ稼働させた場合は、図 3-9 より、ヒュームフード排気によって室内全体の気流が吸い込まれるような気流を形成していることが確認できる。ヒュームフードは、研究実験・試験・分析などの操作・作業に伴って発生する有害ガスや有害物質を囲い込んで排気することで、研究者が有害ガスや有害物質を吸引しないようにし、かつ周囲に拡散させないことを目的としているため、その役割を果たしているといえる。ヒュームフードと室内換気ともに稼働させた場合は、図 3-10 より、それぞれの換気装置の効果を踏まえると、お互いの気流の影響を受けていると見られる。ヒュームフードのみ稼働した場合に渦の発生が観察されたことがないことから、図 3-8、図 3-10 に示された渦の発生は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。この渦は、空間的な空気の淀みを表しており、化学物質蒸気が滞留するリスクがあることを示唆している。従って、実験室の共有に際して、実験者に非意図的なばく露が生じる直接的な要因である可能性があり、渦の発生や消失といった現象や時間変化等についてさらに検討することが重要である。

実験室の稼働状況から、室内気流に変化を与えていることが、実測で確認できた。

### ●CFD 解析によるフルスケール実験室内と風速計によるフル実験室内の風速値の比較

CFD 解析によるフルスケール実験室内の風速値と、熱式風速計による実際の実験室内の風速値の一致性が得られるのか検討を行った。 $Z=150\text{ cm}$  の位置に 9 個の風速計を設置した。風速計の設置箇所を図 3-11、風速計による風速値と CFD 解析による風速値を表 3-3、熱式風速計によるフルスケール実験室内の風速経時変化を、室内換気のみ稼働した場合を Fig.3-12、ヒュームフードのみ稼働した場合を Fig.3-13、室内換気とヒュームフードともに稼働した場合を Fig.3-14 に示す。

室内の全体的な流速は、風速計でポイント測定した風速結果と CFD 解析から得られた風速値を比較すると、概ね一致する値を示した。このことから、CFD 解析による解析結果の風速値についてはある程度妥当性があるといえる。

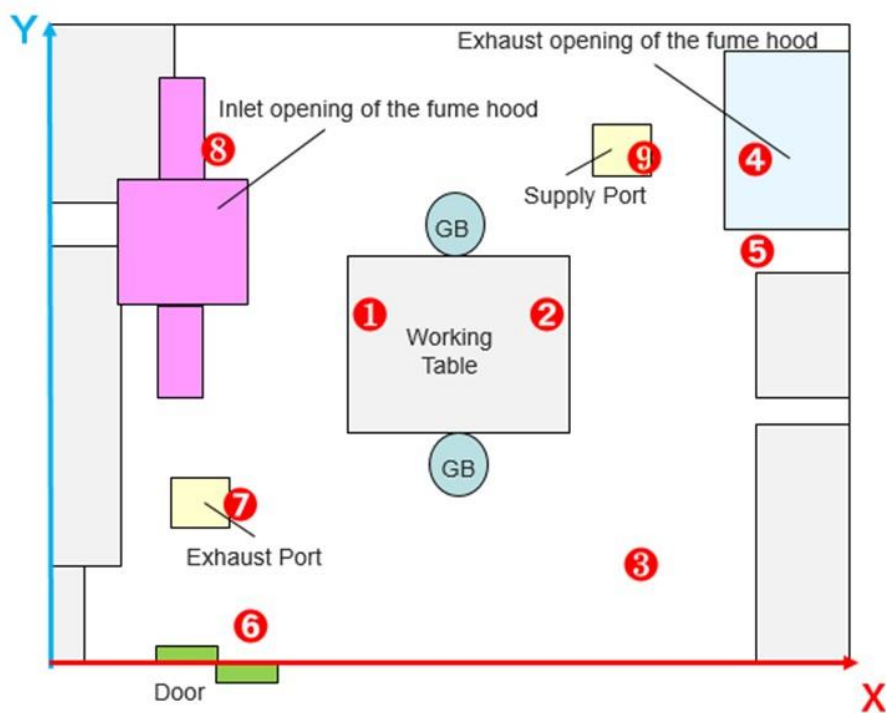


Fig.3-11 風速計設置箇所

Table3-3 風速計と CFD 解析による風速値

測定位置	熱式風速計 [m/s]	CFD 解析 [m/s]
CH1	0.01	0.03
CH2	0.02	0.03
CH3	0.01	0.01
CH4	0.07	-
CH5	0.04	0.02
CH6	0.00	0.03
CH7	0.01	0.02
CH8	0.02	0.04
CH9	1.36	1.35

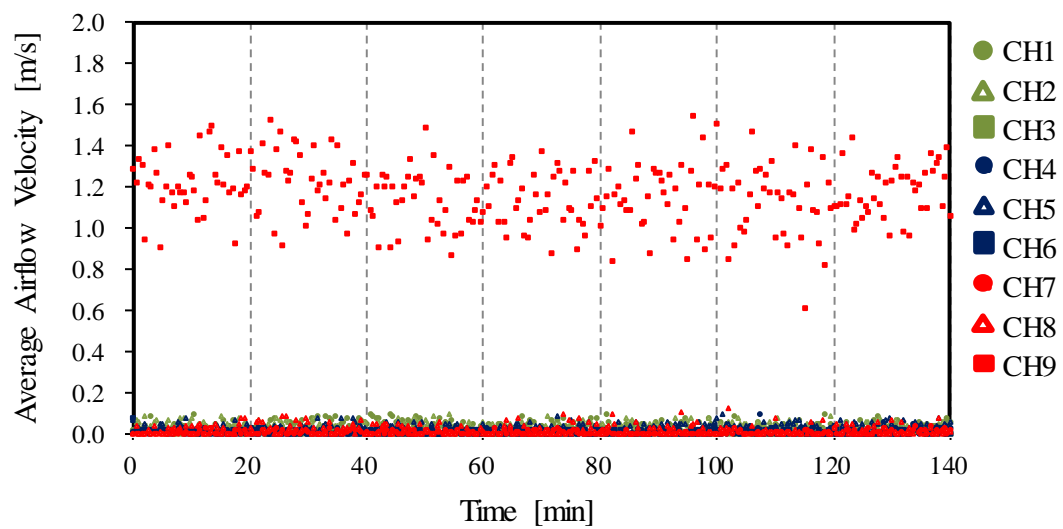


Fig.3-12 室内換気のみ稼働した場合の風速経時変化

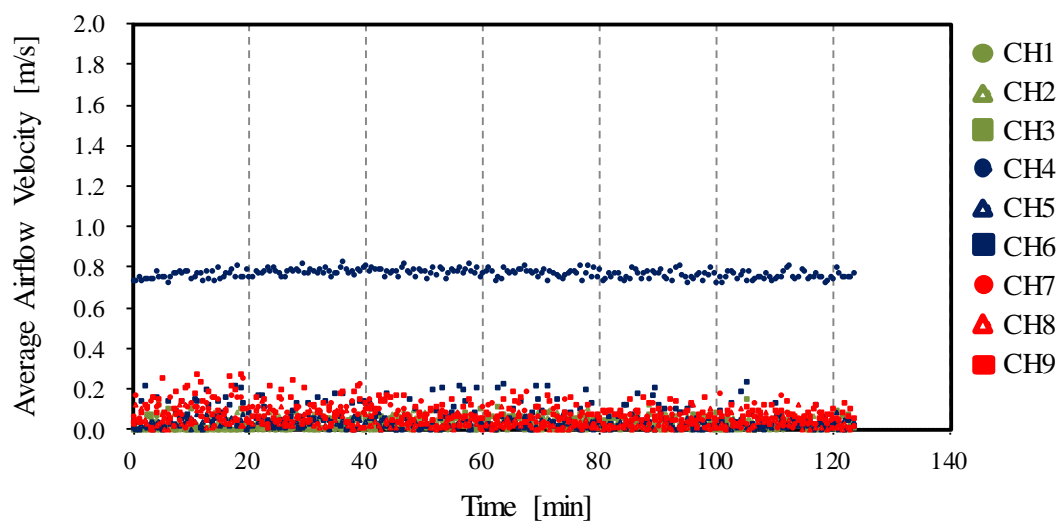


Fig.3-13 ヒュームフードのみ稼働した場合の風速経時変化



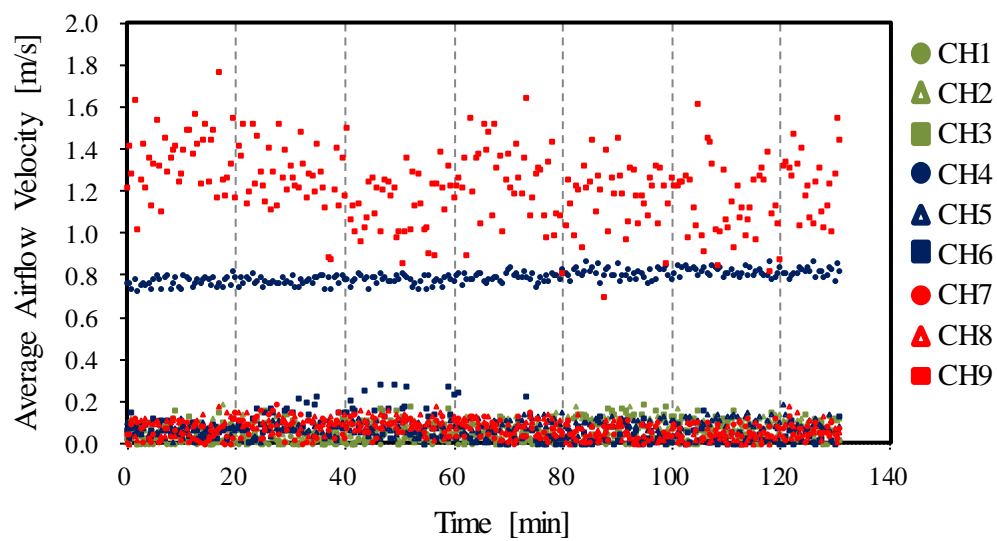


Fig.3-14 室内換気とヒュームフードともに稼働した場合の風速経時変化

#### 3.4.4 実測によるフルスケールと 1/10 スケール実験室における局所の状態の再現性

現在一般的に使用されている PIV システムは、比較的狭い範囲を対象としており、実大の室内気流分布を PIV で実測することは難しい。そのため、局所的な範囲で実測によりフルスケール実験室を測定し、1/10 スケール実験室との比較を行った。

Fig.3-15 に室内換気のみ、Fig.3-16 にヒュームフードのみ、Fig.3-17 に室内換気とヒュームフードともに稼働した場合について、1/10 スケール実験室とフルスケール実験室の流速ベクトル分布の PIV 解析結果を示す。結果を比較すると、室内換気のみ稼働した場合は、室内給気から吹き出された気流が床に衝突し、ヒュームフード前に大きな渦を形成しているのが見られる。ヒュームフードのみ稼働した場合は、ヒュームフード排気面に向かって気流が流れているのが見られる。室内換気とヒュームフードともに稼働した場合は、ヒュームフード排気面に吸い込まれている流れと、室内給気から吹き出された流れが見られる。いずれの場合も、1/10 スケール実験室とフルスケール実験室の気流性状はよく似た傾向を示している。これらのことから、換気装置周辺の気流の再現性が取れていることが分かり、1/10 スケールモデル実験室を用いて気流の影響を検討することは妥当性が与えられたと考えられる。

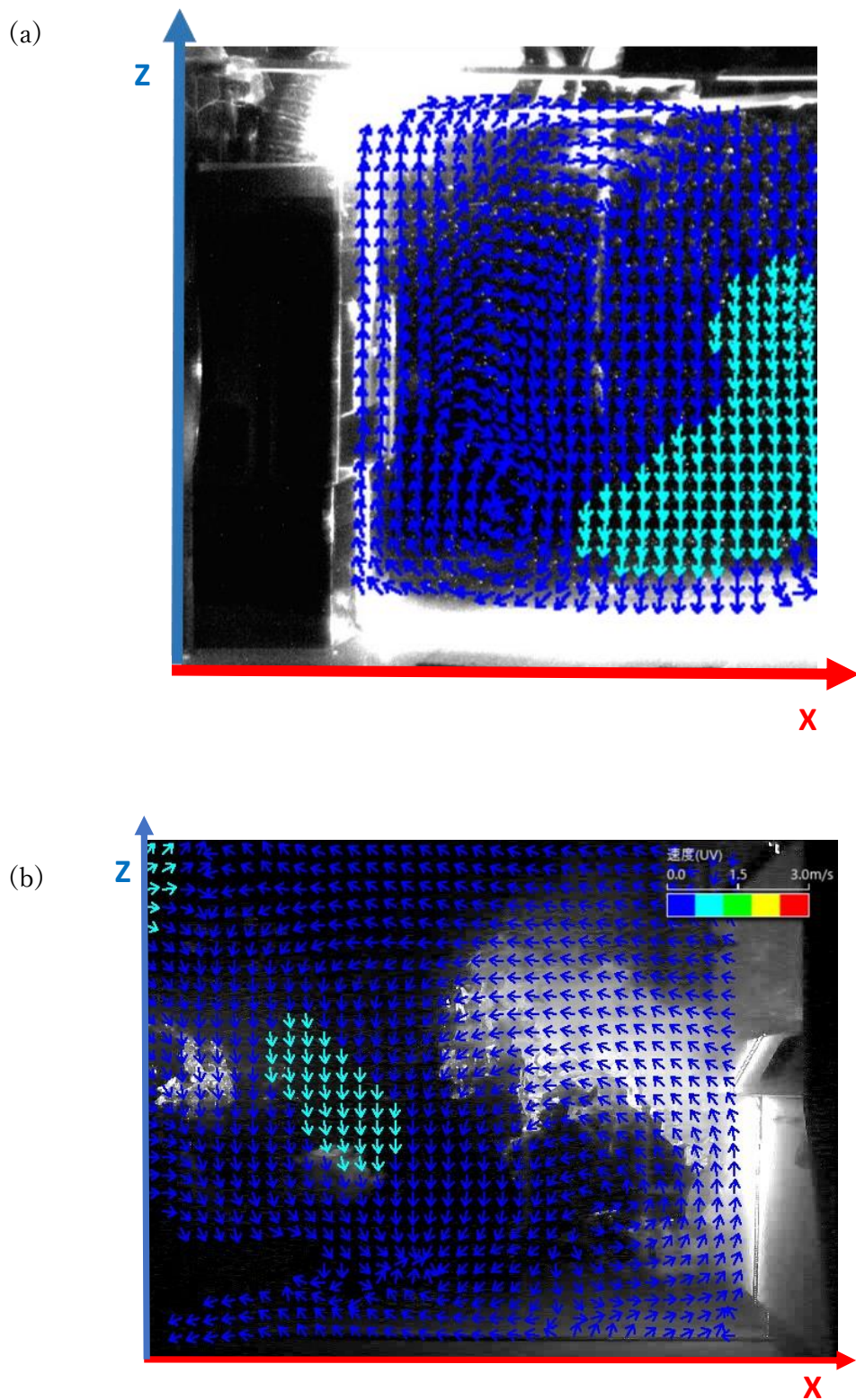


Fig.3-15 室内換気のみ稼働時の流速分布計測結果の比較  
 (a)1/10 スケール実験室 (b)フルスケール実験室

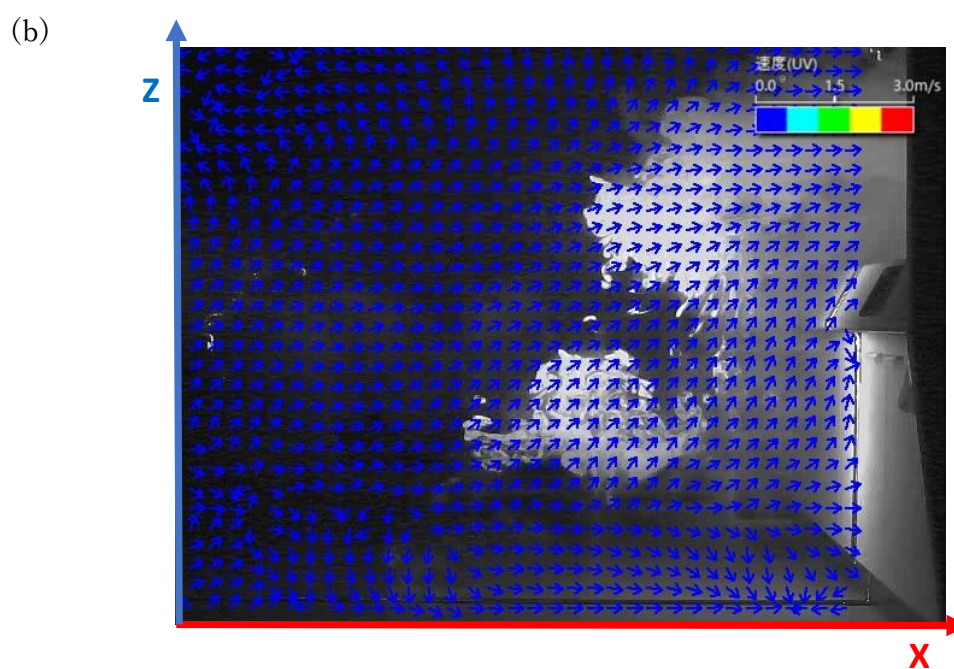
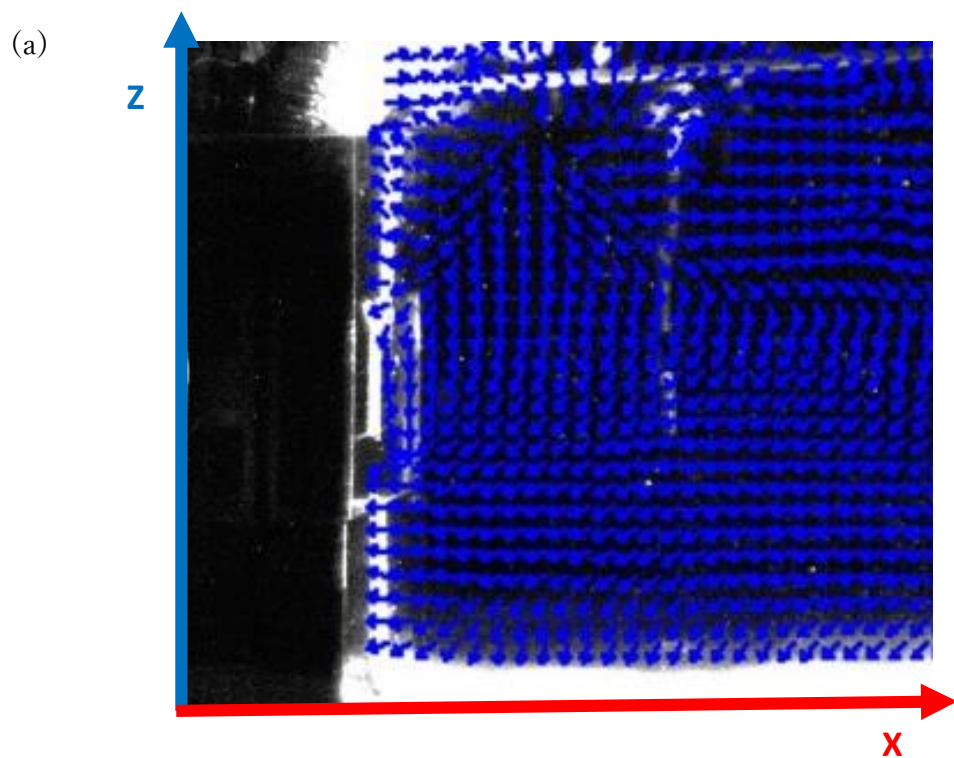
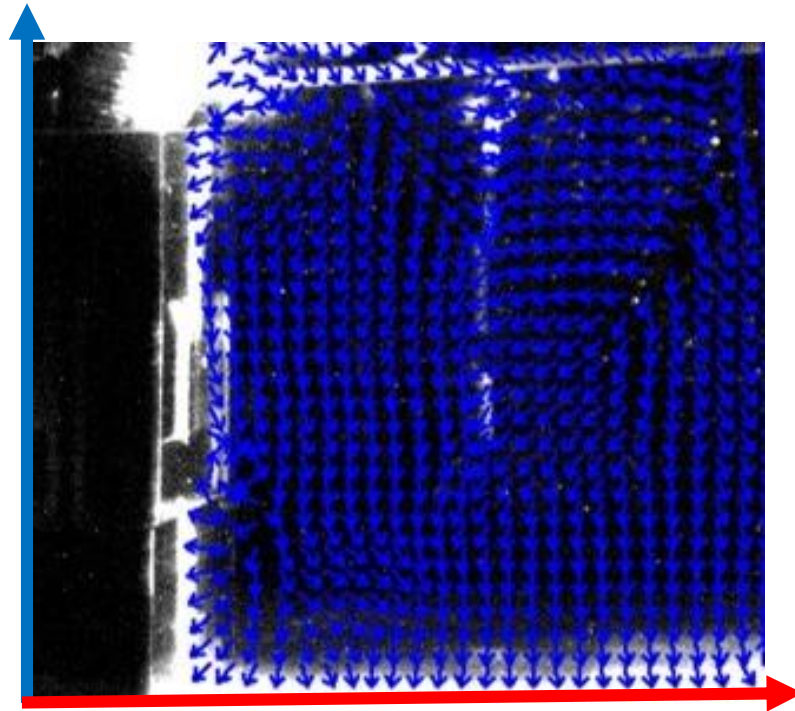


Fig.3-16 ヒュームフードのみ稼働時の流速分布計測結果の比較  
 (a)1/10 スケール実験室 (b)フルスケール実験室



(a)



(b)

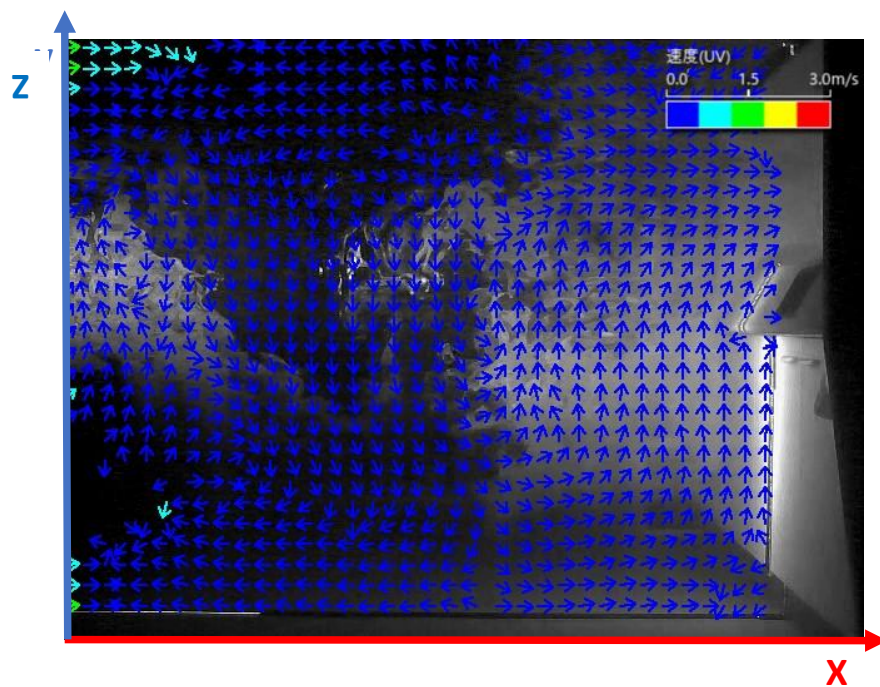


Fig.3-17 室内換気、ヒュームフードともに稼働時の流速分布計測結果の比較  
(a)1/10 スケール実験室 (b)フルスケール実験室

### 3.5 まとめ

1/10 スケール模型の再現性に関する検討および 1/10 モデル実験室による部屋全体の気流性状の実測を行った。

#### (a) 確認できたこと

①実物と模型の相似条件は、空間内部の流れ場・温度場に関するものは、流体の基礎方程式を代表値で無次元化することで得られるパラメーターを実物と模型で一致させることである。今回のような代表温度差（吹き出し平均温度と室内平均温度）が等しいと仮定した場合、実物と模型の相似条件はフルード数を一致させることで、流れる方向や気流の一致性を確認できた。

②1/10 スケールモデル実験室を用いることで、室内換気の稼働状況が室内全体における気流状態に変化を与えていることが、実測で確認できた。

③1/10 スケールモデル実験室は、実際の実験室では容易にできない室内レイアウトの変更や、作業者の移動といった実際の実験室を模した室内の気流を再現し可視化することができる手法となりえることが示唆された。

#### (b) 課題・改善点など

1/10 スケールモデル実験室を用いて、同条件において PIV 測定と CFD 解析を行った結果、渦の発生場所や数、渦の大きさが異なった。これは、今採用している計算手法では予測ができないので、その気流形成の過程を、さらにヒュームフードや換気扇の位置などを変更し、実験的に検討していく必要がある。また、1/10 モデル実験室壁面の材質のもつ電熱性隙間風の影響を CFD 計算に反映させることが必要であると考ええる。

## 参考文献

- [1] 竹本裕人ら, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 5(2013)157-160.
- [2] 城戸英彰ら, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 5(2014)129-132.
- [3] 赤林伸一, 坂口淳: 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知識 その1 給気・排気口位置を変化させた場合の PIV 測定, 空気調和・衛生工学大会学術講演論文集, pp.169-172、2011.9.
- [4] 銚井 修一, 池田哲郎, 新田勝通 (2006)「エース建築工学Ⅱ-熱・湿気・換気-」朝倉書店.
- [5] 村上周三, 加藤信介, 孔鉄男, 中川浩之:大架構建築内の温熱・空気環境に関する研究—模型事件による予測法—, 生産研究, 39(9),361-370(1987).
- [6] 劉康, 山中俊夫, 甲谷寿史, 東本文明: 置換換気室内の温度・汚染物濃度分布予測における模型実験法 (その1) 置換換気室の縮小模型実験を目的とする相似則の整理, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.727-728、2001.9.
- [7] 村上周三, 加藤信介, 中川浩之:大空間の室内気候に関する模型実験, 生産研究, 41(2),103-112(1989).
- [8] 勝田高司, 土屋喬雄: 室内空気分布の模型実験法に関する研究 第1報—室内空気分布の実測的相似則, 空気調和・衛生工学会論文集, 17, 1-10(1981).
- [9] 松井亨介, 金井亮浩: 第2章水槽試験とその活用, 「セーリングショットと帆走性能」シンポジウム, pp.23-41、2010.8.
- [10] 藪下和樹、防衛大学修士論文,(2001).
- [11] 禰津家久, 阿部崇, 志村拓也, 中山忠暢: PTV 法による副団面開水路流れの時空間相関解析, 土木学会論文集, 539(2), pp.89-98, 1995.

## 第 4 章 実験者の動きが室内気流に与える影響の検討

### 4.1 緒言

近年、室内空気質の向上を目指して、室内気流に関する研究が多くなされてきた。大学実験室を対象にした気流解析に関して、当研究室ではヒュームフードと室内換気という 2 種類の換気装置のレイアウトは室内気流に大きな影響を与えることや、揮発性の高い化学物質が実験台に置かれた場合、発生源側の実験台前よりも実験台をはさんで反対側の方が、化学物質濃度が一時的に上昇する<sup>[1]</sup>といった知見が得られており、それらの研究では空間に動的な要素がない静的な状態を仮定していた。しかし、室内空気質の研究は人の健康維持を目的としているため、人の存在を考慮するべきである。特に、実験者の活動の有無が室内気流に与える影響は大きいと考えられる<sup>[2]</sup>。第 1 章でも述べた通り、大学実験室の特徴として「非定常性」が挙げられる。実験者は自身の行う研究内容に基づいて作業が行われるが、そこには実験者の自由度が盛り込まれている。それに伴って場の環境が変化するということが起こりうる。

人の移動が気流に与える影響に関しては、これまでもさまざまな研究が行われてきた。例えば、置換換気による空調・換気が行われている室内において、居住者の動きによる攪乱が室内の換気性能に与える影響を検討した研究<sup>[3]</sup>、人の歩行を室内気流の発生源として塵埃の飛散を検討した研究<sup>[4]</sup>、CFD シミュレーションを用いて人の移動を伴い汚染室から非汚染室への汚染物質輸送性状を検討した研究<sup>[5]</sup>、業務厨房内における CFD 解析に調理者の動きに着目して、攪乱が厨房内の温熱・空気環境へ与える影響について検討した研究<sup>[6]</sup>などである。以上のように、CFD 解析結果によって移動物体の室内気流場への影響が検討されているが、実験室を対象に実測によって人の歩行等の動的な要素を考慮した研究は少ない。人の歩行を 1/10 スケールモデル実験室を用いて実験的に解析することができれば、室内気流の観点から大学実験室環境の管理や室内設計の指針を得るための知見を獲得することができる。



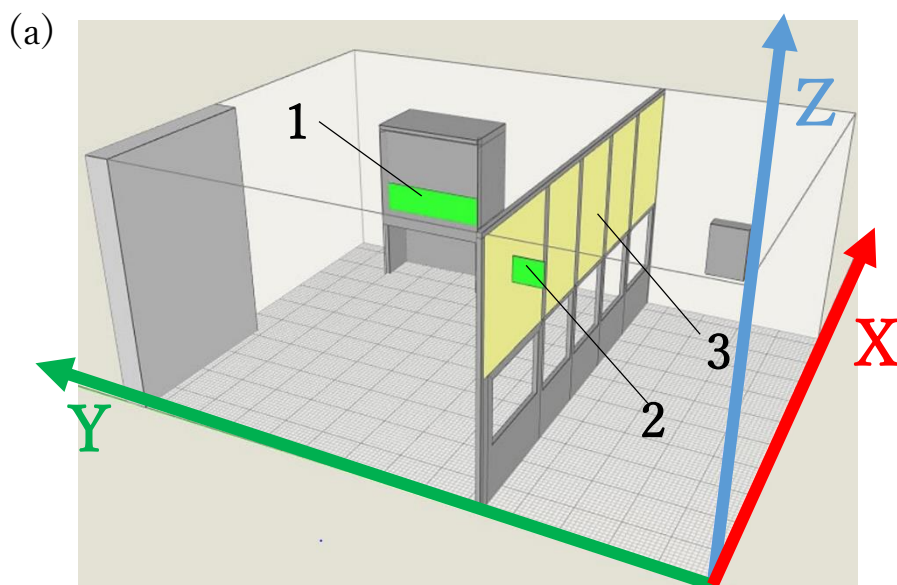
## 4.2 実験の目的

この章では、1/10 スケールモデル実験室を用いて人の移動による攪乱が室内気流場を与える影響について検討を試みた。具体的には（Ⅰ）人体モデルの移動速度の違いによる影響の検討（Ⅱ）影響範囲についての検討（Ⅲ）ヒュームフード稼働時における人体モデルの移動が気流に与える影響の検討についてである。

## 4.3 解析及び実験方法

### ●測定対象の概要

環境棟の地下1階021号室の実験室を対象とし、1/10に縮小したモデル実験室を用いた。モデル実験室の概略図を Fig.4-1 に示す。換気設備としてヒュームフードが備わっており、壁面には25 mm×30 mm の給気口が設けられている。給気口から吹き出された風は、ルーバーにより透過し部屋全体に流れるような仕組みになっている。1/10 スケールモデル実験室のヒュームフードの流速は、第3章で述べたように相似則で重要なフルード数を一致させることで決定し、PIV 解析による実測においては流速を設定値とした。ヒュームフードは流速 0.16 m/s で稼働した。表 4-1 に各測定ケースの詳細を示す。実験①では縮尺室内模型内に縮尺 1/10 の人体モデルを移動させ、より実物に近い空間を再現する。人体モデルの近傍と、実験室部屋全体を測定対象とする2パターンの条件で実験を行った。実験②では、ヒュームフードのみ稼働時と、ヒュームフードを稼働した条件下における人体モデルが移動したときで計2パターンの条件で行った。



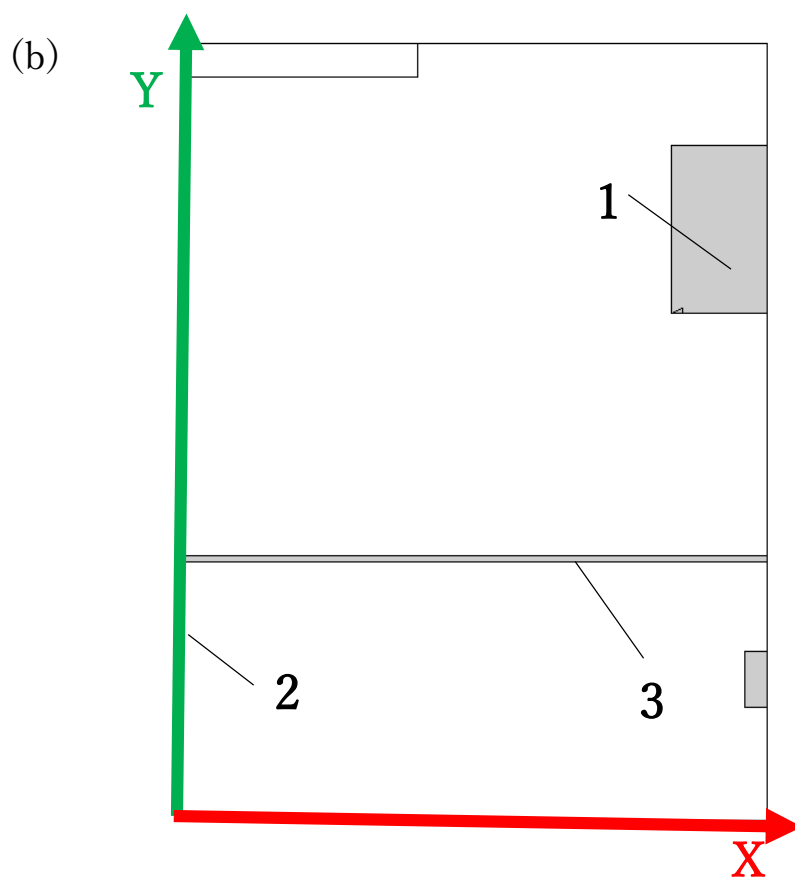


Fig.4-1 対象実験室レイアウト

(a) 概観図 (b) 上面図

1. ヒュームフード排気 2. ヒュームフード給気 3. ルーバー

Table4-1 各測定ケースの詳細

		測定範囲	FH 稼働の有無	人体モデル移動の有無	人体モデルの速度
実験(I)	Case1	15 mm×15 mm	無	有	0.40 m/s
	Case2	15 mm×15 mm	無	有	0.64 m/s
実験(II)	Case3	42 mm×52 mm	無	有	0.64 m/s
	Case4	15 mm×15 mm	無	有	0.64 m/s
実験(III)	Case5	15 mm×15 mm	有	無	0.64 m/s
	Case6	15 mm×15 mm	有	有	0.64 m/s
	Case7	15 mm×15 mm	有	有	0.64 m/s

### ●1/10 スケールモデル実験室の概要と人体モデル

実験室の特殊性が室内気流に与える影響についての検討は、Fig.4-2 に示す模型を用いた。模型はアクリル板で作成されており、ルーバーやヒュームフードは3D プリンターによって作成することで再現した (Fig.4-3)。寸法はフルスケール実験室を 1/10 に縮小した 520×690×300 mm である。ヒュームフードの給気ファンと排気ファンを高性能直流安定化電源装置 (アズワン株式会社) で制御することで流速の調整を行った。

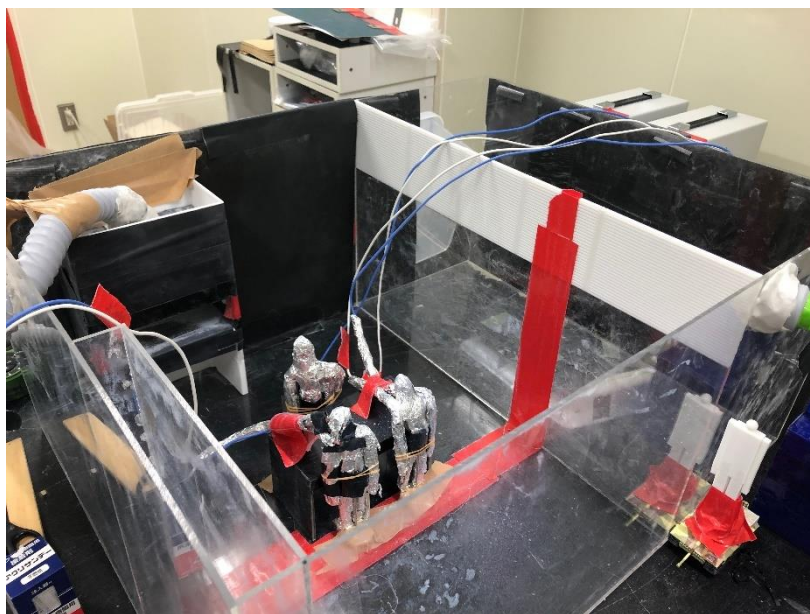


Fig. 4-2 1/10 スケールモデル実験室

(a)



(b)



Fig.4-3 1/10 スケールサイズ  
(a) ヒュームフード (b) ルーバー

本実験で使用した人形モデルを Fig.4-4 に示す。実在空間における身長 155 cm の人体を想定し、高さ 15.5 cm で移動速度は 0.63 m/s、0.43 m/s で動く人体モデルを、リモートコントロールにより操作した。呼吸により人が汚染物質に被害された場合は多いため、本研究は人の鼻と口がある高さ  $Z=14\text{cm}$  の位置における水平断面の分布に注目した。



Fig.4-4 1/10 スケールのモデル人形

表 4-1 に PIV 解析の解析条件を示す。

Table4-1 PIV 解析のパラメーター

PIV 解析のパラメーター	
Image correlation method	Direct cross-correlation method
Image size	1024 × 1024 pixel
Flame rate	150 fps
Interrogation region	32 pixel × 32 pixel
Search region	± 52pixel × ± 52 pixel

## 4.4 実験結果

### 4.4.1 人体モデルの移動速度の違いによる影響の検討

#### ● 人体モデルの移動速度が遅い場合（実験(I) case1)

Fig.4-5 に人体モデルを速さ 0.40 m/s で動かし、ヒュームフード（以下、FH）に達してから 3 秒後の PIV 測定結果（X-Y 平面）を示す。人体モデル後方に追従する流れと、人体モデルがヒュームフード前に達した際の前方の気流が壁に跳ね返ることによって形成された流れが見られる。

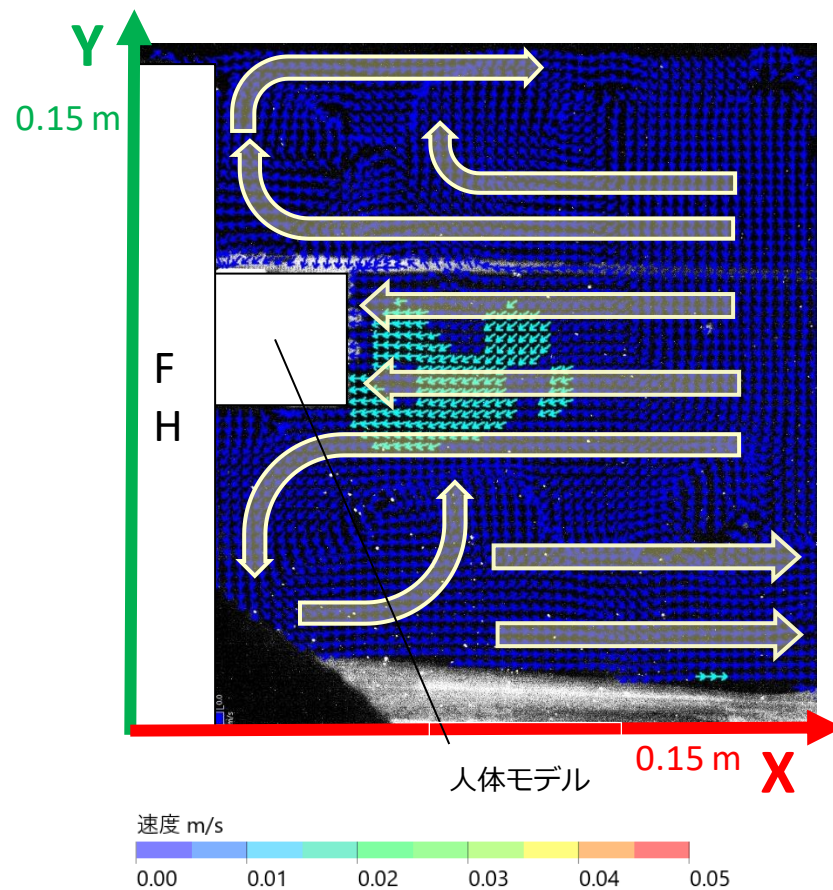


Fig.4-5 移動完了 3 秒後における流速ベクトル分布



### ● 人体モデルの移動速度が速い場合（実験(I) case2)

Fig.4-6 に人体モデルを速さ 0.64 m/s で動かし、ヒュームフードに達してから 3 秒後の PIV 測定結果を示す（詳しくは 4.4.2 で述べる）。

人体モデルの移動速度が遅い場合（Fig.4-5）と比較すると、移動速度の大きさに関わらず、気流性状は周辺空気が人体モデル後方へ誘引される状況が確認できた。一方で、移動速度が速い時（最高速度 0.05 m/s）の方が遅いとき（最高速度 0.028 m/s）に比べて、風速値が大きい。そのため、壁への跳ね返りによる影響が大きく、気流を乱す影響も大きいと考えられる。

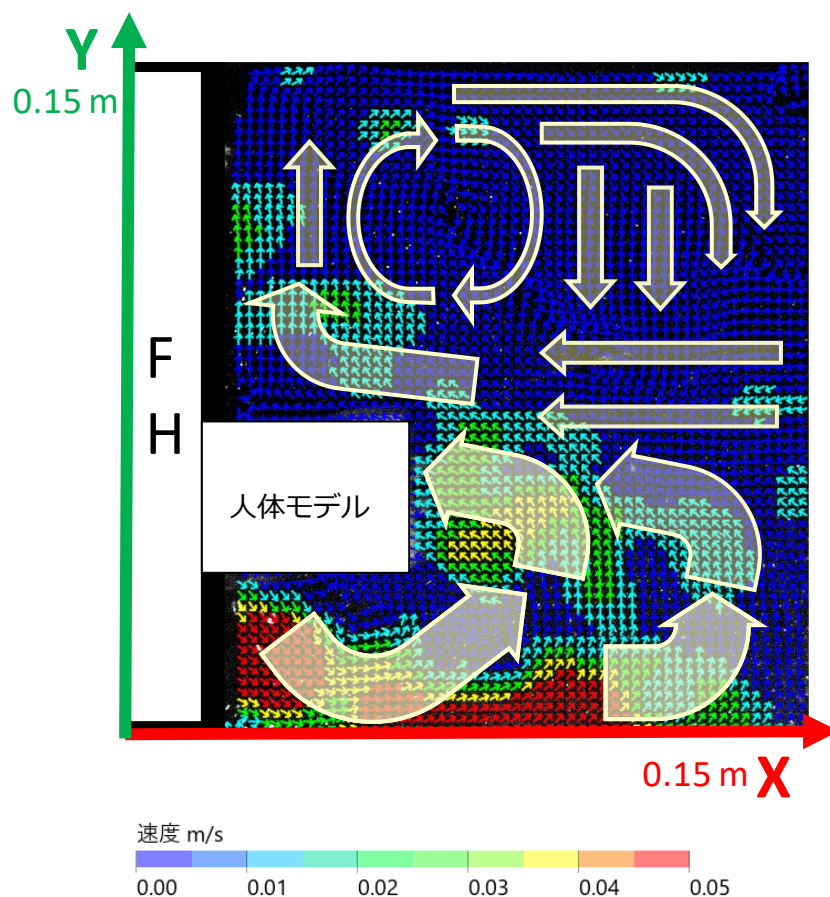


Fig.4-6 人体モデル移動 3 秒後における流速ベクトル分布

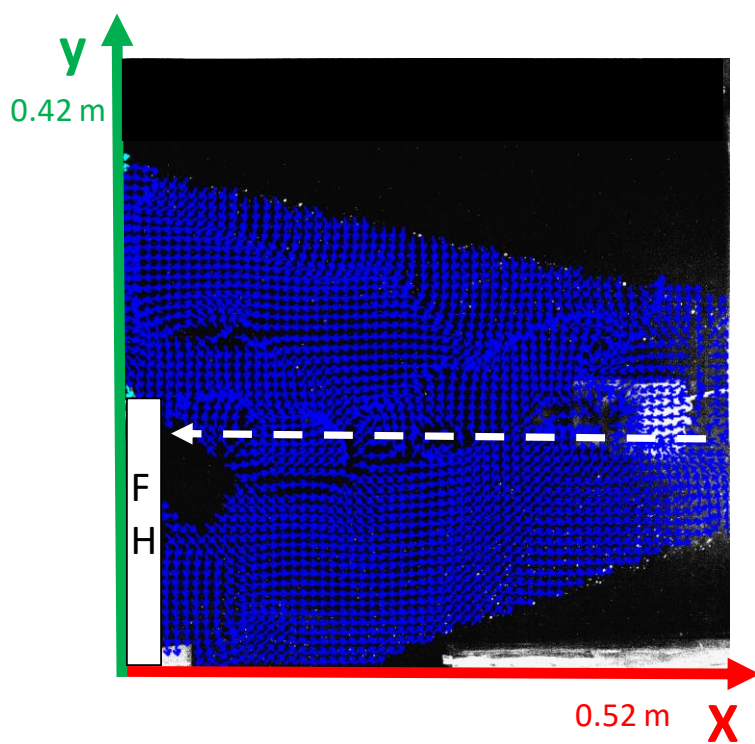
#### 4.4.2 人体モデルの移動が気流に与える影響範囲の検討

##### ● 室内全体領域で PIV 測定した場合（実験(Ⅱ) case3)

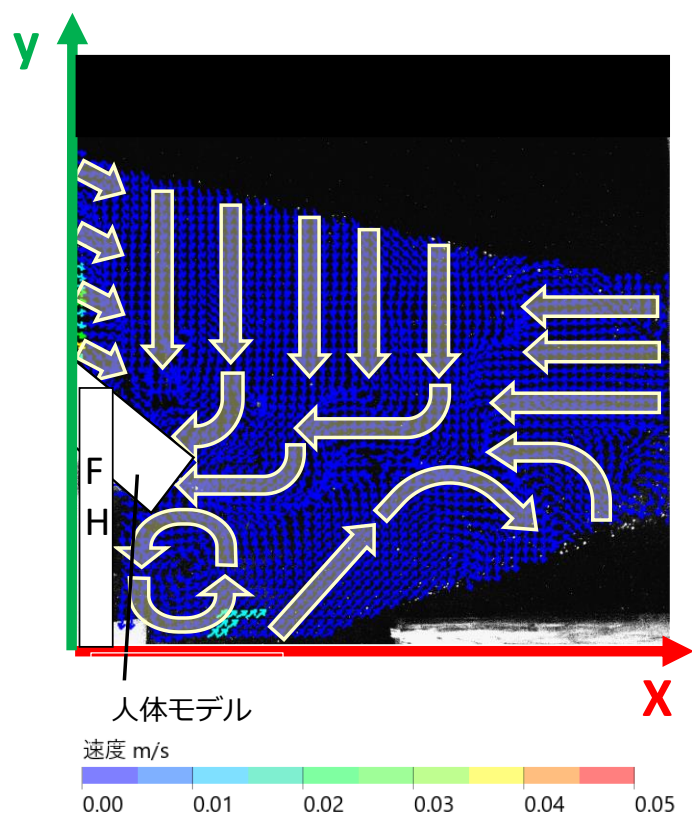
図 4-7 に人体モデル移動経路内における部屋全体での PIV 測定結果（X-Y 平面）を示す。3 秒後の結果（Fig.4-7(b)）を見ると、人体モデルが移動した後に流れ込む気流が、人体モデルの後ろに追従する流れを作っている。すなわち、人体モデルの移動によって、周辺空気がモデル後方へ誘引される状況が見られる。5 秒後の結果（Fig.4-7(c)）を見ると、左上の領域と左下の領域では、人体モデルがヒュームフード前に達した際に誘引された気流が壁に跳ね返るような流れが見られる。また、左下の領域では渦が形成されている。10 秒後の結果（Fig.4-7(d)）では、互いに打ち消し合い局所乱流が見られる。

各時間における部屋全体の平均風速は、0.01~0.02 m/s 程度であった。ヒュームフード排気を稼働した際の面風速は 0.16 m/s であり、人が歩いた時よりも速度が大きい。従って、部屋全体に対する気流への影響は、室内換気設備の方が人の移動に比べて支配的だと考えられる。

(a)

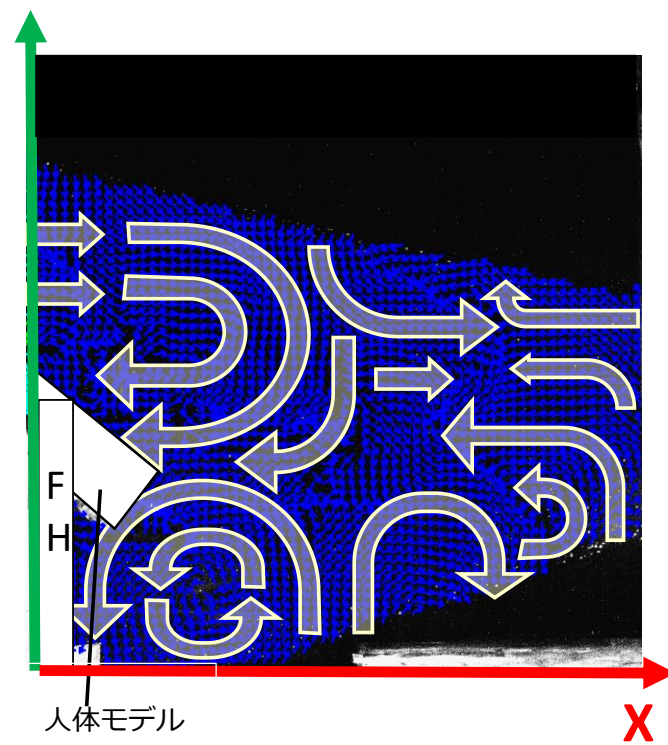


(b)





(c)



(d)

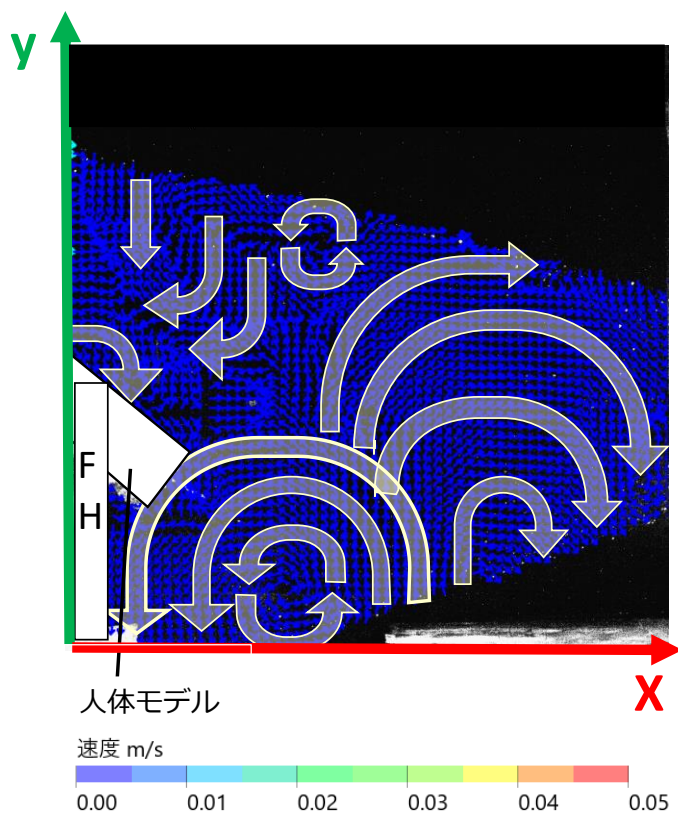


Fig.4-7 室内全体領域における流速ベクトル分布の比較  
(a) 歩行前 (b) 3 秒後 (c) 5 秒後 (d)10 秒後

## ●人体モデル移動軌跡周辺で PIV 測定した場合（実験(Ⅱ) case4)

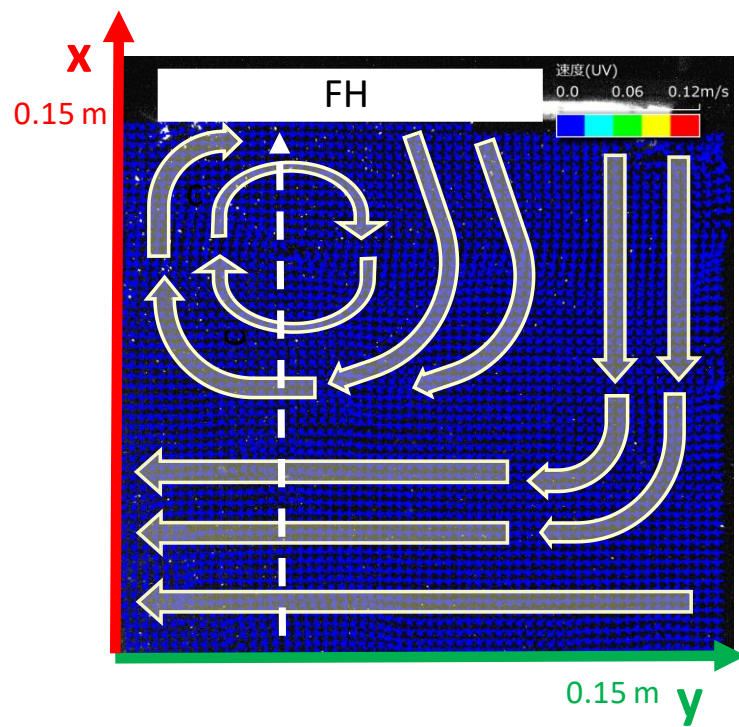
Fig.4-8 に人体モデル移動経路内における局所的な範囲での PIV 測定結果 (X-Y 平面) を示す。3 秒後の結果 (Fig.4-8(b)) を見ると、人体モデルがヒュームフードに到達直後は、大きな局所乱流がある。左半分の領域において、人体モデル側面近傍に人体モデルの移動によって押された流れが、壁面に衝突することで生じた流れが見られる。また、ヒュームフード前に達する際に誘引された気流が人体モデル後方に見られる。5 秒後の結果 (Fig.4-8(c)) を見ると、3 秒後 (Fig.4-8(b)) の結果と気流性状は大きく変わらないが、右半分の領域と左下の領域において渦の形成が見られた。10 秒後の結果 (Fig.4-8(d)) では、大きな気流の乱れは消失し、穏やかな流れをとっているが、右半分の領域において人体モデルが移動したことによる影響がまだ残っているのが見られる。

各時間における平均風速を、人体モデル近傍の左上 (Area1)、人体モデル近傍の左下 (Area2)、人体モデル近傍の右半分 (Area3) に分けて算出した結果を Fig.4-10 に示す。この結果から、平均風速は Area1、Area2、Area3 の順に大きく、時間が経つにつれて風速が小さくなっている。Fig.4-8(a)の結果からも人体モデル近傍で風速が大きい領域が顕著である。

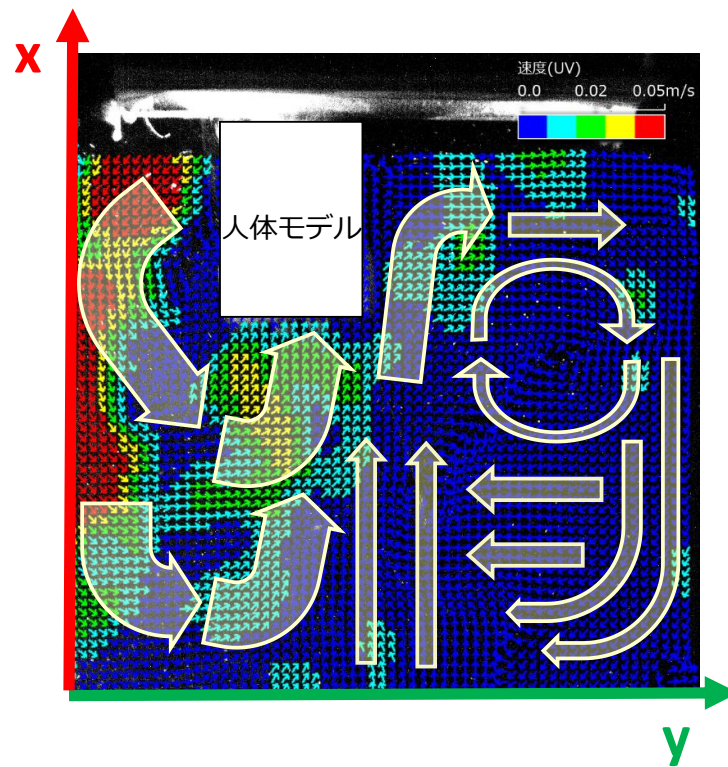
乱流場の捉え方として、乱流場は大きさの異なる多くの塊（渦と称される）から構成され、渦は一団となって動き、周囲と異なった性質を持つ。気流の変動は多くの渦が平均流に乗って互いに不規則に移動することにより生じる。従って、気流の乱れは渦の大きさや代表的な速度に依存するところが大きい<sup>[7]</sup>。人体モデルが移動した直後は、大きな気流の乱れが生じており、人体モデルの移動による攪乱が室内気流場に大きく影響を与えることが示唆された。この現象は、化学物質の拡散挙動に大きく影響することが考えられる。

以上の結果から、実験室の空気環境や作業者の非意図的な化学物質ばく露防止について検討する際は、人の動きを考慮に入れた議論を行う必要があると考えられる。

(a)

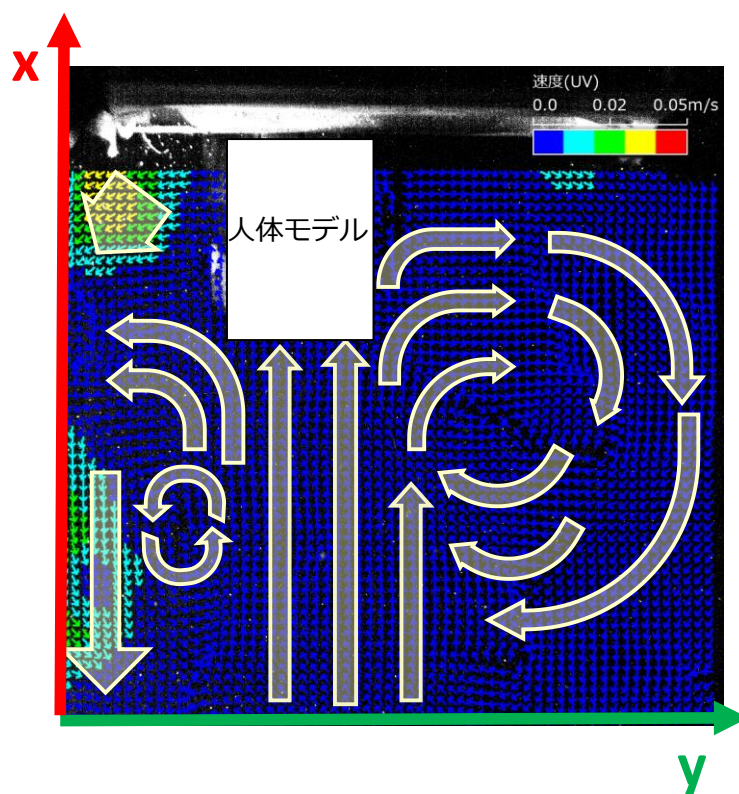


(b)





(c)



(d)

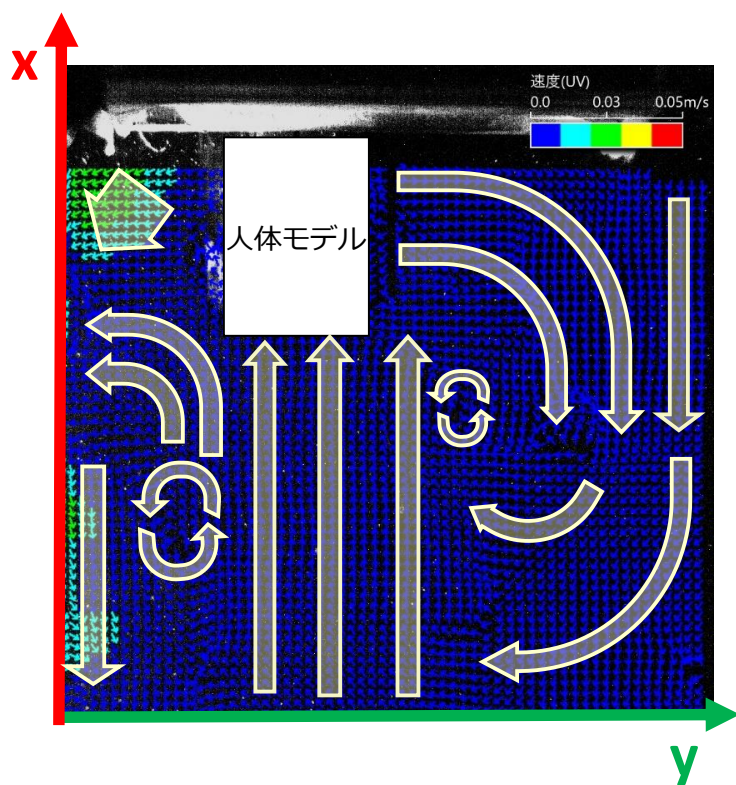


Fig.4-8 人体モデルの軌跡周辺における流速ベクトル分布の比較  
(a)歩行前 (b) 3 秒後 (c) 5 秒後 (d)10 秒後

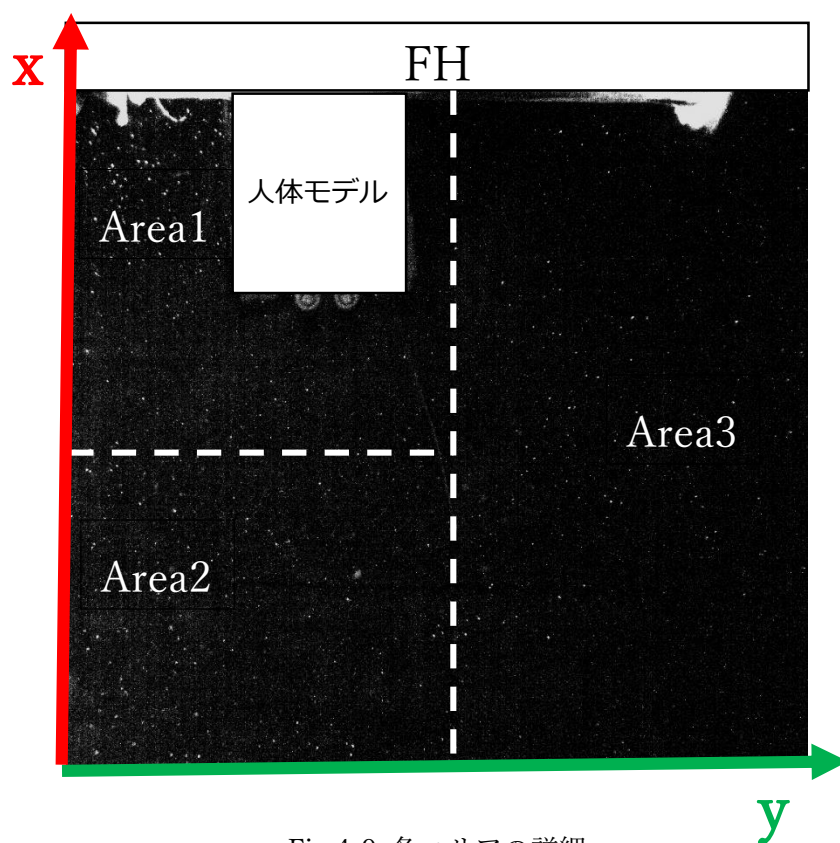


Fig.4-9 各エリアの詳細

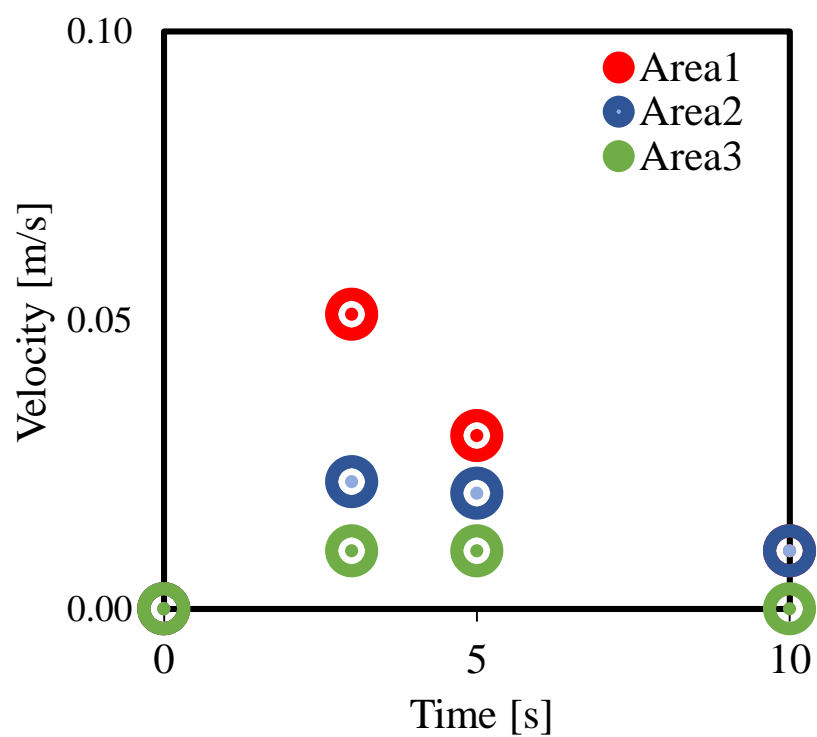


Fig.4-10 各エリアにおける平均風速変化

#### 4.4.3 ヒュームフード稼働時における人体モデルの移動が気流に与える影響の検討

##### ●ヒュームフードのみ稼働した際の室内気流への影響（実験(Ⅲ) case5）

Fig.4-11 にヒュームフードのみ稼働時の局所的な範囲における PIV 測定結果(X-Y 平面)を示す。ヒュームフード給気から吹き出された気流がルーバーを透過して-y 方向に流れ、ヒュームフード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。この結果から、ヒュームフード稼働時は気流が乱れることなくヒュームフードに向かい排気されていると考えられる。

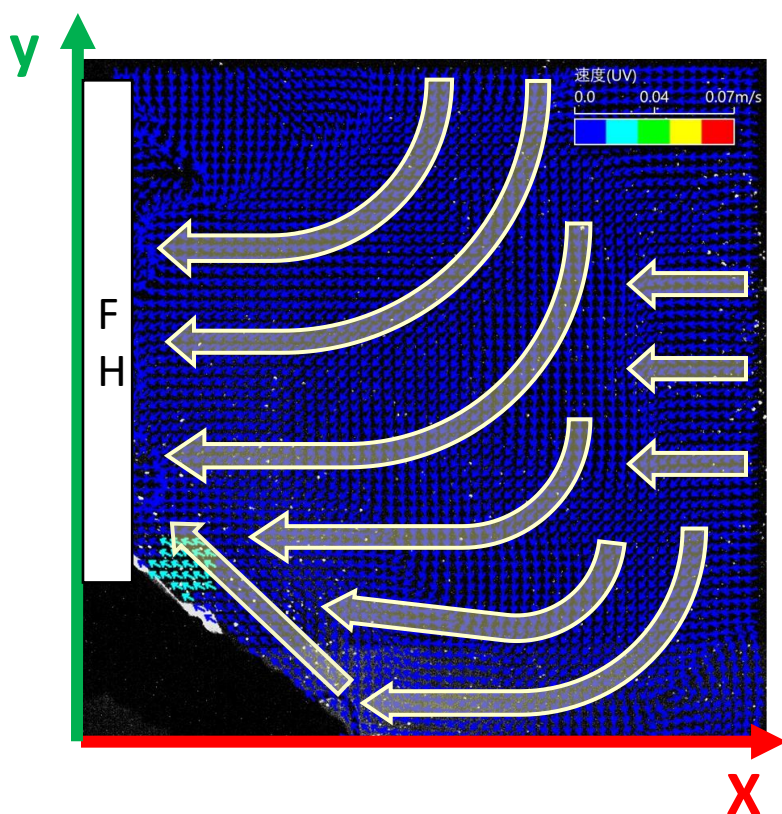


Fig.4-11 ヒュームフードのみ稼働時の流速ベクトル分布

## ●ヒュームフード稼働時の人体モデル移動軌跡周辺における室内気流への影響

### (実験(Ⅲ) case6)

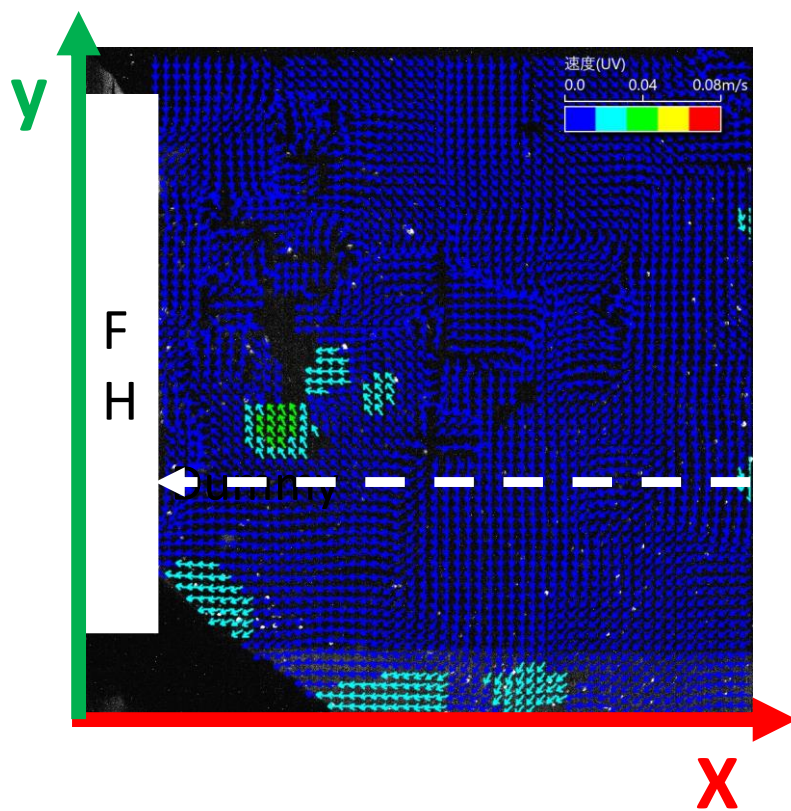
Fig.4-12 にヒュームフード稼働時の人体モデル移動経路内における局所的な範囲での PIV 測定結果 (X-Y 平面) を示す。1 秒後 (Fig.4-12(b)) と 3 秒後 (Fig.4-12(c)) の結果を見ると、ヒュームフードに達する際に誘引された気流が人体モデル後方に見られる。また、上半分の領域ではヒュームフード給気によって生じた気流の流れが見られる。5 秒後の結果 (Fig.4-12(d)) を見ると、3 秒後の結果と比較して人体モデル移動による影響が弱まり、一方で、ヒュームフード稼働によってヒュームフード排気面に向かって流れる様子が見られる。10 秒後の結果 (Fig.4-12(e)) では、人体モデル後方において、人体モデルの移動による気流への影響がまだ残っているのが見て取れる。

各時間における平均風速を人体モデル近傍の左下 (Area1)、人体モデル近傍の右下 (Area2)、人体モデル近傍の右上 (Area3) に分けて算出した結果を Fig.4-14 に示す。3 秒後のヒュームフード稼働時による気流速度の大きさは  $0.01 \text{ m/s}$  位であり、人体モデル移動による気流速度は  $0.045 \text{ m/s}$  位であった。動きによる気流速度の大きさは、換気に比べて約  $1/4$  に過ぎないことが判明された。以上の結果から、ヒュームフード稼働時における人の移動は室内気流に大きな影響を与え、乱す要因であることが示唆された。

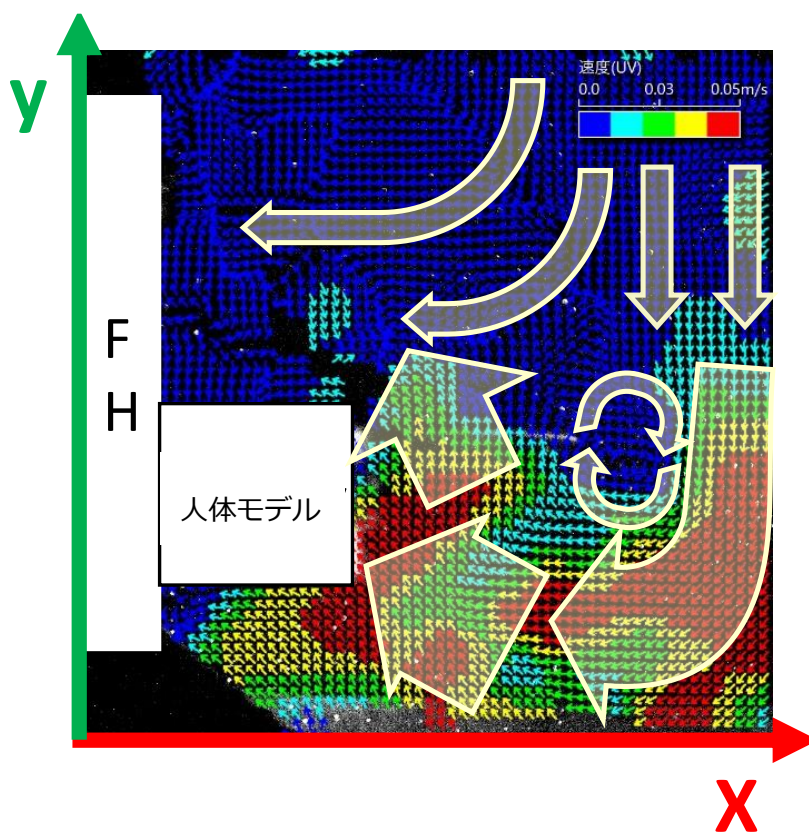
一部の測定点において、風向・風速が周囲の測定点と大きく異なった誤ベクトルやデータが欠損している部分が見られた。これは、可視化を行う際に十分にトレーサ粒子を撒くことが出来ず、有効なデータ数が不足したためと考えられる。本研究のような複雑な気流場である場合は測定範囲全体にトレーサ粒子を撒くことが難しく、PIV において有効な可視化が難しい。また、後処理として誤ベクトル削除を行っているが、可視化が不十分である場合は誤ベクトルの判断が難しく、適切な後処理が出来ていない。また、人体モデルがレーザーの照射を遮断しているため、可視化が出来ていないことも考えられる<sup>[8]</sup>。



(a)

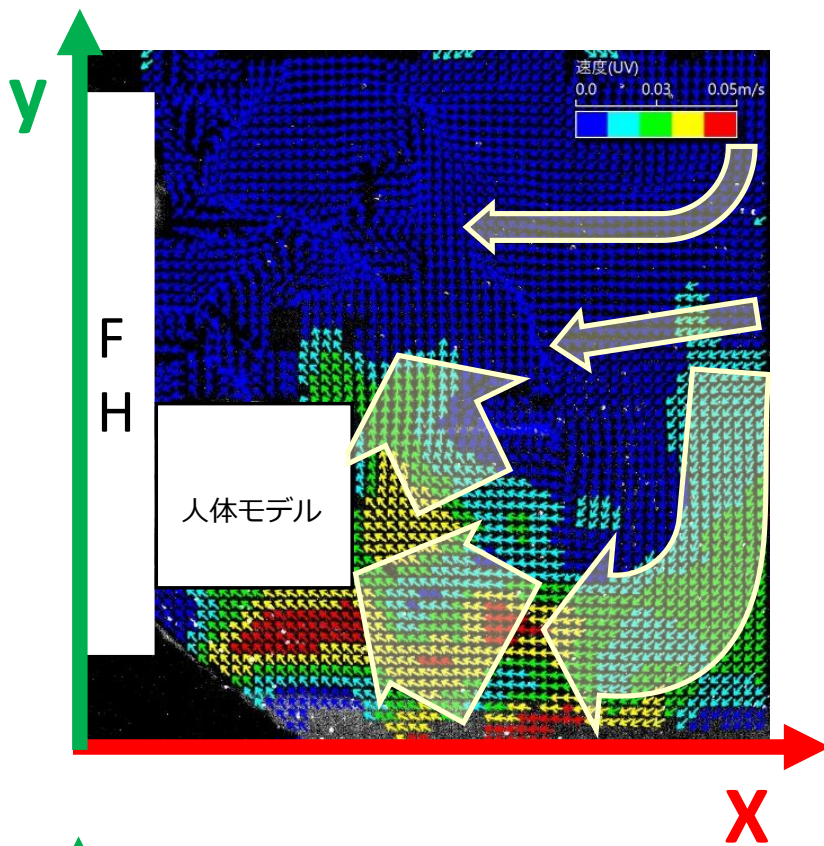


(b)

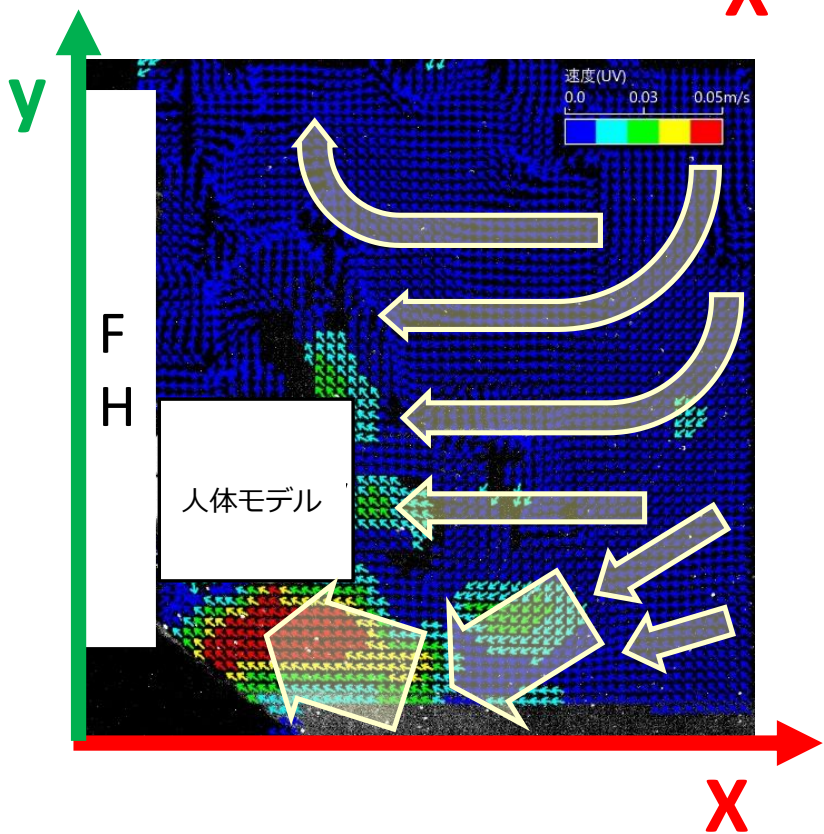




(c)



(d)



(e)

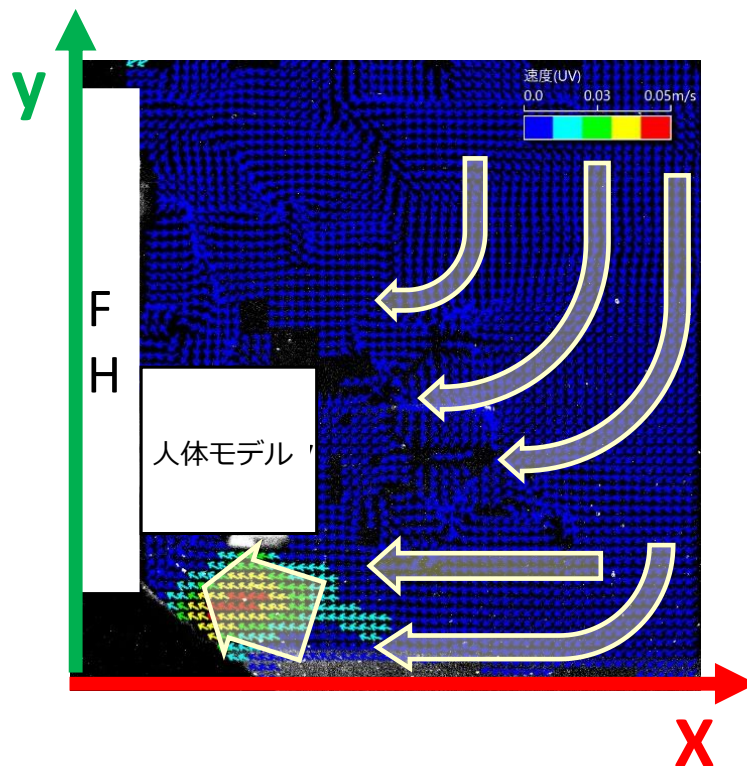


Fig.4-12 ヒュームフード稼働時における人体モデルの  
軌跡周辺流速ベクトル分布の比較  
(a)歩行前 (b)1 秒後 (c) 3 秒後 (d) 5 秒後 (e)10 秒後

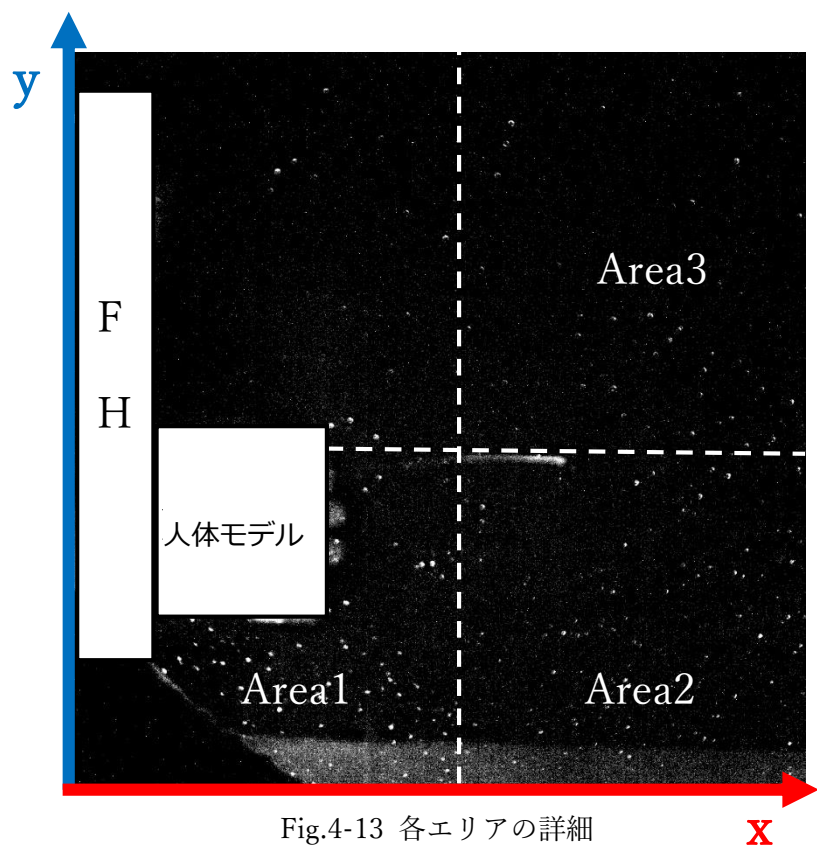


Fig.4-13 各エリアの詳細

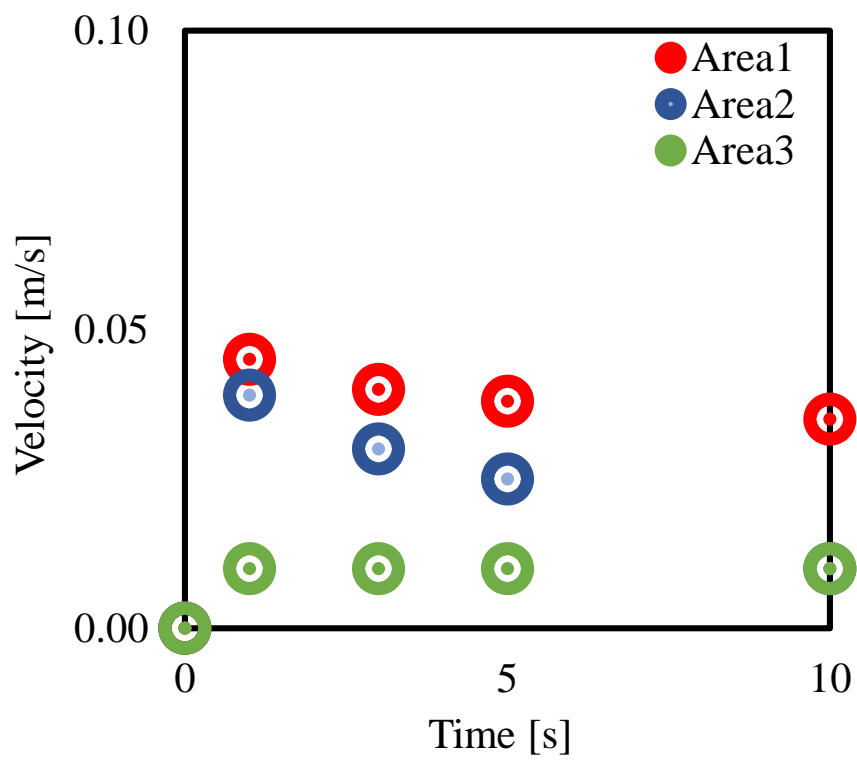


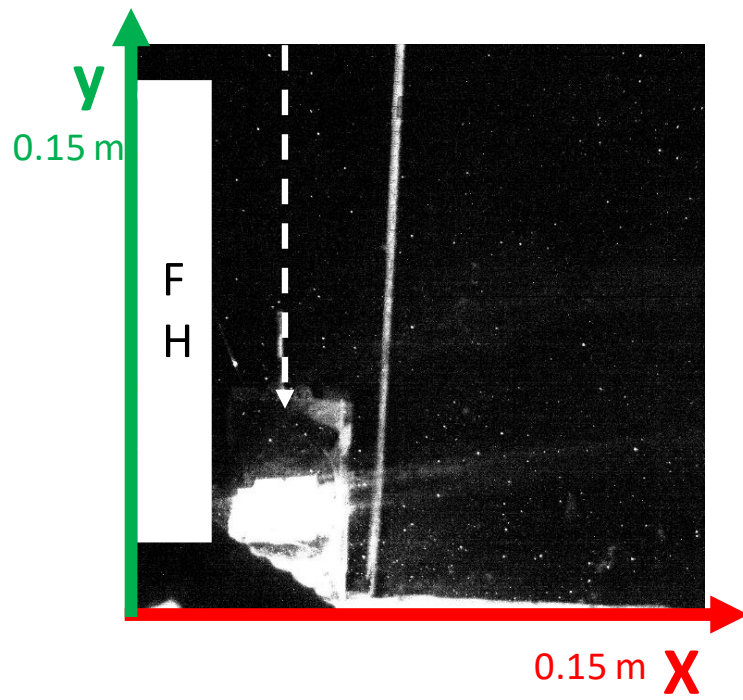
Fig.4-14 各エリアにおける平均風速

### ●ヒュームフード稼働時におけるヒュームフード前を平行に横切る際の室内気流への影響（実験Ⅲ） case7）

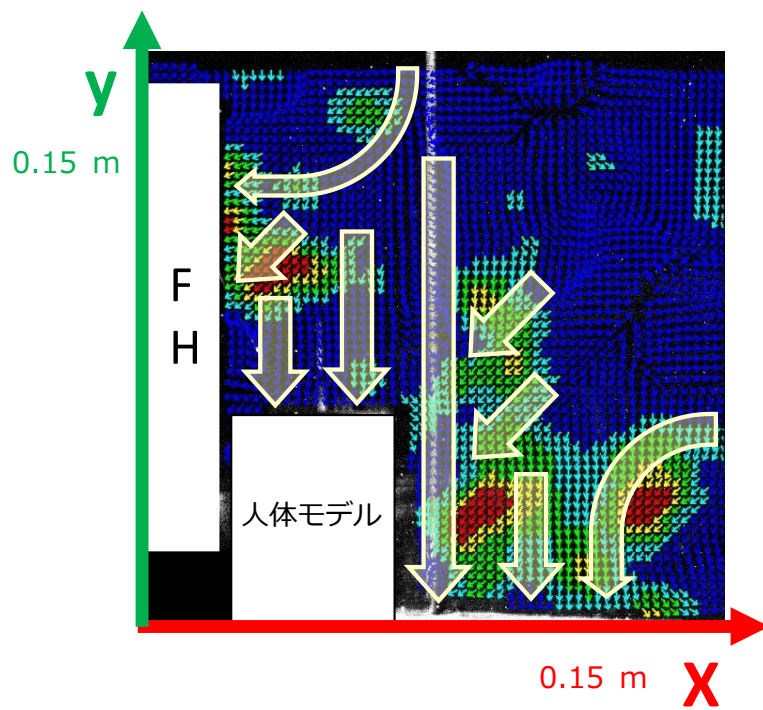
Fig.4-15 にヒュームフード稼働時における人体モデルをヒュームフード面を平行に通過した際に、気流に与える影響について、PIV 測定した結果を示す。3 秒後（Fig.4-15(b)）の結果を見ると、歩行者通過後 3 秒間に渡り歩行者側へ引かれるように流れ、フード外に漏洩・拡散する様子が確認された。5 秒後（Fig.4-15(c)）の結果を見ると、空気の流れはヒュームフード排気面に吸い込まれるような流れを示し、人体モデルの動きによる漏洩は消失することが分かった。また、壁際に達した際に、壁からの跳ね返りなどの影響で左側に渦が生じている。10 秒後（Fig.4-15(d)）の結果からは、人が動いたことによる影響よりもヒュームフード排気による影響の方が大きいことが分かった。局所排気装置におけるフード、とりわけ外付け式フードの吸引能力は、その周辺に乱れ気流（フードの吸引気流方向とは異なる向きに流れる別の気流）が存在した場合、容易に低下し、このようなフードの能力低下は、本来吸引・補修されるべき有害物質を環境中に拡散させるため、作業環境の悪化と作業員への不測のばく露を引き起こす原因になり得ると報告されている<sup>[9]</sup>。

本実験により、1/10 スケール実験室を用いた実測により、歩行による乱れ気流がヒュームフード排気性能を阻害している可能性が示唆された。一回の歩行通過で生じる乱れ気流の持続時間はごく短い、仮に頻繁な通行が予想される通路近傍などにフードが設置された場合は、継続的に漏洩が続くため有害物質が周囲に拡散し、環境を悪化させる可能性があることも考えられる。

(a)

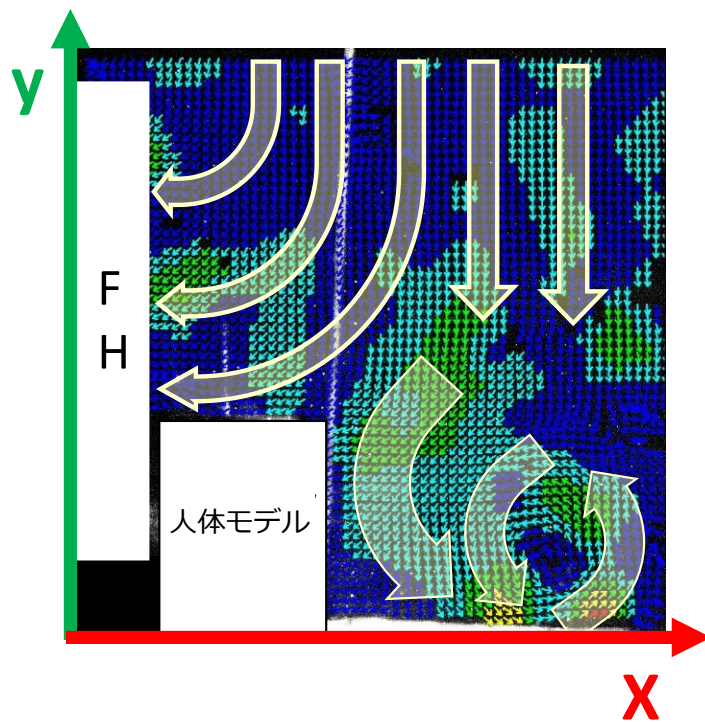


(b)





(c)



(d)

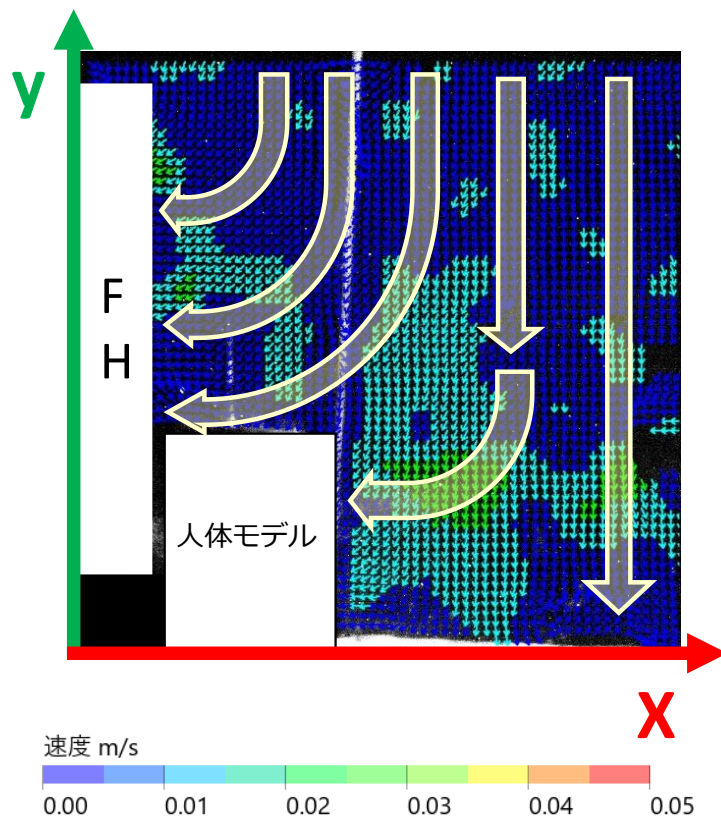


Fig.4-15 ヒュームフード側方を通過後の流速ベクトル分布の比較  
(a)歩行前 (b) 3 秒後 (c) 5 秒後 (d)10 秒後

## 4.5 まとめ

移動経路内および人体モデル周辺の気流分布を PIV 測定により解析した。

### (a) 確認できたこと

①ヒュームフードを稼働させない状態で、人体モデルをヒュームフードに垂直な方向からヒュームフードに向かって  $0.64 \text{ m/s}$  と  $0.40 \text{ m/s}$  の 2 つの速度で動かし、移動速度の違いによる室内気流への影響を観察した。その結果、移動速度が速いときの方が遅いときに比べて、与える影響が大きいことが分かった。

②人体モデルの動きによる室内全体への攪乱の影響を見ると、人体モデルの軌跡近傍に、周辺空気が移動軌跡に誘引される状況がはっきりと観察されるとともに、壁からの跳ね返りなどの影響で複雑な気流を形成していることがわかった。

③ヒュームフード稼働時における人体モデルの移動が気流に与える影響は、ヒュームフードに向かって人体モデルが動く際に、ヒュームフード全面においてヒュームフード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唆された。

### (b) 課題・改善点など

①人体モデルの操作上、常に一定の速さ ( $0.64 \text{ m/s}$  と  $0.40 \text{ m/s}$ ) で動かした。しかし、実際の人間の移動は歩き始めから段階的に速度を上げていき、止まるときは速度を徐々に落としていく。また、手足を互い違いに振り歩行するのが、一般的な歩き方である。より現実に近い状態を再現するのであれば、このような動きを模擬する人体モデルを用いて検討を行う必要がある。

②本実験では、全て真上から撮影した上面図 (X-Y 平面) の PIV 測定結果を示した。ヒュームフード面に垂直な方向からヒュームフードに向かって  $0.64 \text{ m/s}$  で動かした際の、側面 (Z-X 平面) の PIV 測定を行った (Appendix 参照)。その結果、トレーサ粒子の重みによって生じた流れが現れ、人体モデルの動きによる気流への影響を解析できなかった。トレーサ粒子の必要条件としては、作用流体に対する追従性が最も重要となるため、より平均粒径が小さいものを用いると PIV 解析に適していると考ええる。しかし、撮影する範囲を広く取り、かつカメラの解像度が低い場合は、1 画素の中に粒子像が埋没してしまうことから、注意が必要である。

## 参考文献

- [1] 鍋島優輝, 大学実験室の特殊性を考慮した実験室空気環境に関する解析, 平成粘土東京大学大学院修士論文, (2017).
- [2] 陳石, 加藤信介, 姜允敬, 中尾圭佑: 人の直線移動による部屋間の気流に与える影響に関する CFD 解析, 生産研究, **65**(1), 9-12(2013).
- [3] 高橋秀一, 向坂哲也, 松本博: 置換換気された室内における人体の移動が室内空気分布に及ぼす影響に関する研究 (その 8) 置換換気システムの換気性能に関する CFD シミュレーション, 日本建築学会大会学術講演便覧集, D-2, pp.1181~1182, 2006.9.
- [4] 本多宏輝, 辻紀子, 加藤直朗, 中山司: 人の歩行による室内塵埃の飛散の 3 次元解析のための数値計算法, 中央大学理工学部研究所論文集, **22**, pp. 17-29 (2016).
- [5] 陳石, 加藤信介: 人の直線移動による部屋間の気流の影響に関する CFD 解析 (その 2) 移動による汚染物質の輸送性状, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.121-124, 2013.9.
- [6] 吉野龍平, 近藤靖史, 吉野一: 業務厨房における調理作業に伴う攪乱の CFD モデリング (その 3) 液体占有率を利用した移動物体の解析例, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.1091-1094, 2009.9.
- [7] 飯野由香利, 倉淵隆, 高橋潤, 遠藤智行: 実測に基づく屋上風と痛風および空調風の気流特性に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第 589 号, pp.9-14, 2005.3.
- [8] 近藤靖史, 中島裕史: 移動物体による室内気流場への影響に関する実験と CFD 解析, 日本建築学会環境系論文集, **77**(681), 863-871(2012).
- [9] 小嶋純: 歩行による乱れ気流が排気フードの補修能力に及ぼす影響の検証, 産衛誌, **53**, pp.162-162(2011).



## 第5章 実験者が熱源として室内気流に与える影響の検討

### 5.1 緒言

大学実験室には、排熱を伴う実験装置が存在しており、熱源からの上昇気流は室内気流に大きな影響を与えうると考えられる。熱源に関する既往研究例として、Houghten らは強制換気を行う部屋の必要換気量に関する実験で、二酸化炭素や水蒸気の室内における流動に人体周辺の対流が影響していることを言及している<sup>[1]</sup>。Ma は下向ラミナールーム型の手術室の空調において全体に揃った下向気流を作り出すことが困難となることの原因の第一に在室者や壁面に生ずる自然対流が空調によって意図している気流パターンを台無しにすると説明している<sup>[2]</sup>。Daws は室内気流に関するメタルアルデヒドの線毛状結晶による可視化実験で、人体は対流熱放射量 30w 程度の熱源であるにも関わらず、室内においてその発生する対流は驚く程強いと指摘し、これは 100 W の点熱源の 1.8 m 上部に生ずる対流に相当すると説明している<sup>[3]</sup>。このように人体自身が引き起こす自然対流が室内空気環境に与える影響が指摘されており、実験室内においても、多数の実験者が比較的狭い実験室空間を共有して研究を行っているため、実験者が熱源として室内気流に与えること、また、非定常性に起因する要因の一つだと考えられる。そこで、本章では、人が熱源として室内気流に与える影響について 1/10 スケールモデル実験室を用いて検討を行った。

### 5.2 実験の目的

本章では、1/10 スケールモデル実験室を用いて、実測と計算の両面から解析を行い、静穏条件下における人体が発熱体として室内流れ場に与える影響について検討する。

### 5.3 解析及び実験方法

この章で使用したモデル実験室は、第 4 章で使用したのと同じ縮尺模型を用いて検討を行った。本実験で使用したモデル人形を Fig.5-1 に示す。高さ 15.5 cm の人形に、均一温度分布になるようヒーターを巻き付けアルミホイルで覆った。電圧調整器（スライダック）を用いてモデル人形の表面温度の調節を行った。CFD 解析および PIV 測定を行った箇所を Fig.5-2 に示す。実験室内にモデル人形 3 体を実験台を挟んで設置し、実験台周辺で作業している状態を想定し、解析を行った。



Fig.5-1 1/10 サイズのモデル人形

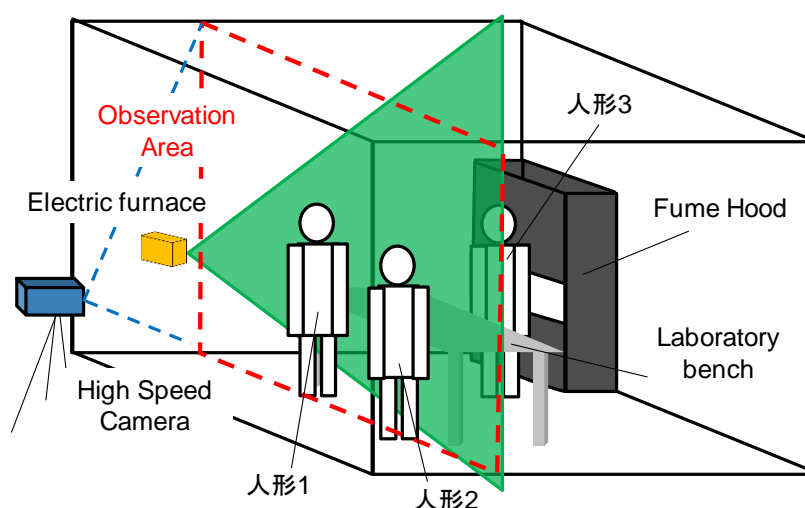


Fig.5-2 解析対象

## 5.4 実験結果

室内温度が 12 °C、人体モデルの表面温度が 36 °C における流速ベクトル分布の PIV 測定と CFD 解析結果を Fig.5-3(b) と Fig.5-4(b) に示す。室内全体にほぼ静穏であるが、人体モデル表面の加熱により熱上昇流が生じている。室上半部では人体モデルの熱上昇流が天井に衝突した後、左右に小さな渦を形成し、両側の壁面に沿って下降している。この上昇流の最大風速が 0.03 m/s である。この風速値は、人体自身が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と思われ、実験室で使用する化学物質によっては、人体発熱による上昇気流の流れに伴って拡散する可能性が示唆された。また、実験者が化学物質発生源を持って移動するケースを想定すると、人体発熱により生じる熱上昇流が実験者の呼吸空気質に与える影響が考えられ、暴露する可能性が示唆された。

実測によって室内温度を調整することが難しいため、CFD 計算によって室内温度が 25 °C といった一般的な温度に設定して解析を行った (Fig.5-4(c))。Fig.5-3(b) の解析結果と比較すると、人体モデル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確認された。実験においては、作業台周辺など同じ場所にとどまって一定時間作業することも多く、また、複数の実験者が存在する時間帯も多いことから、人からの発熱によるこれらの気流も、実験室の気流環境に与える可能性があることが示唆された。

一方で、人体モデルの側面は、PIV 測定 (Fig.5-3(b)) では下向き気流であるのに対し、CFD 解析 (Fig.5-4(b)) では上向き気流が生じている。これは、Fig.5-3(a) の室内温度と人体モデルの温度を等しくした際も同様に、下向きの流れが見られることから、対流によって生じるものではなく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。

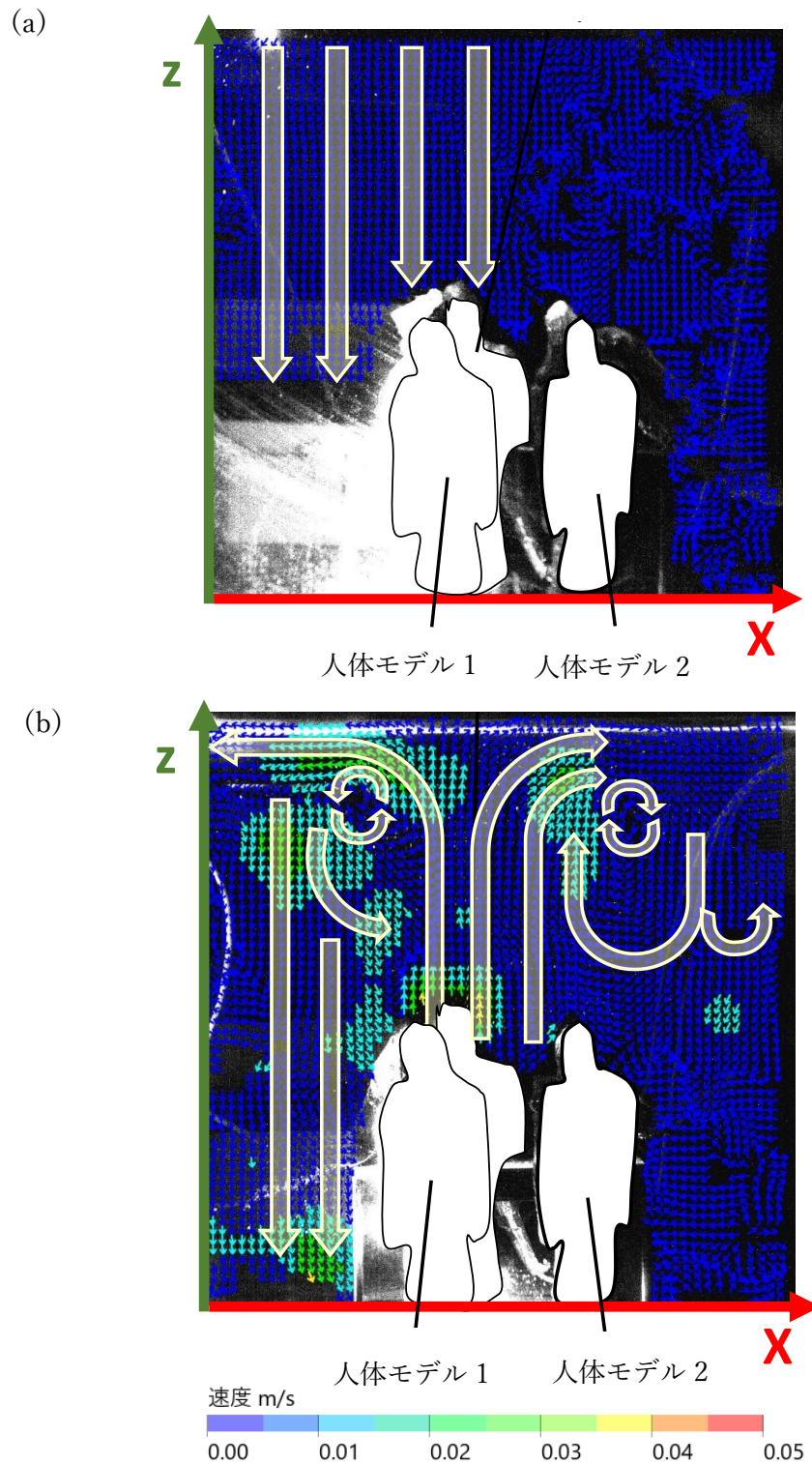
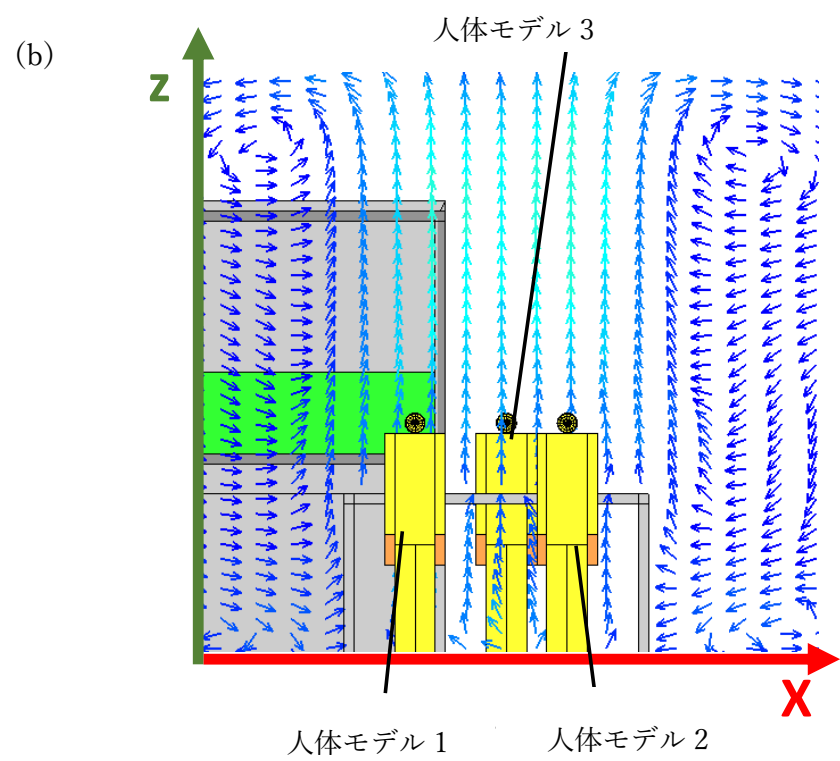
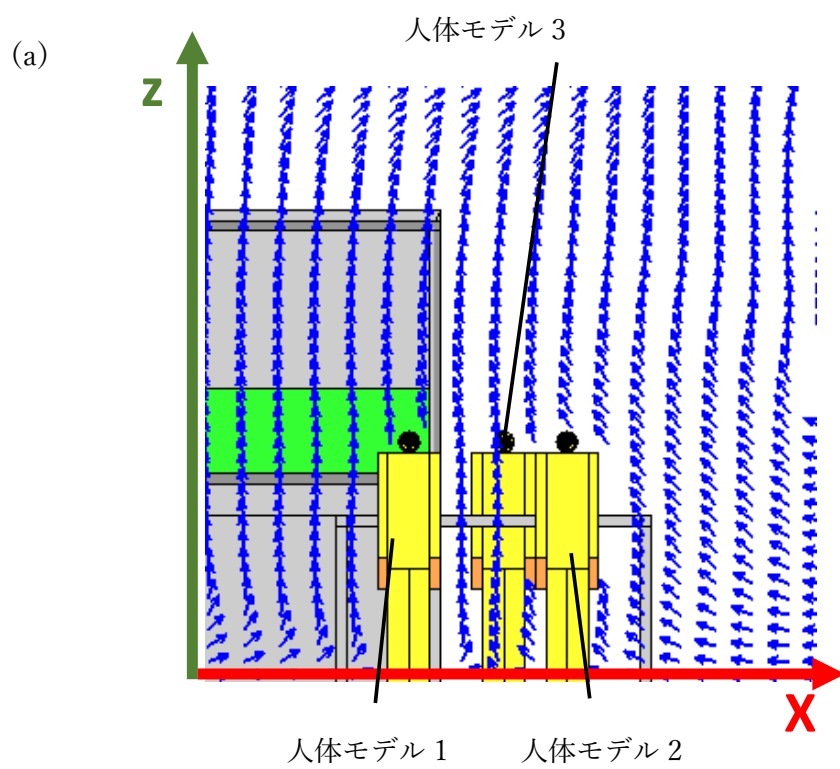


Fig.5-3 PIV 解析結果

(a) 非発熱時の PIV 解析結果 (体温 : 12 °C、室内温度 : 12 °C)

(b) 発熱時の PIV 解析結果 (体温 : 36 °C、室内温度 : 12 °C)



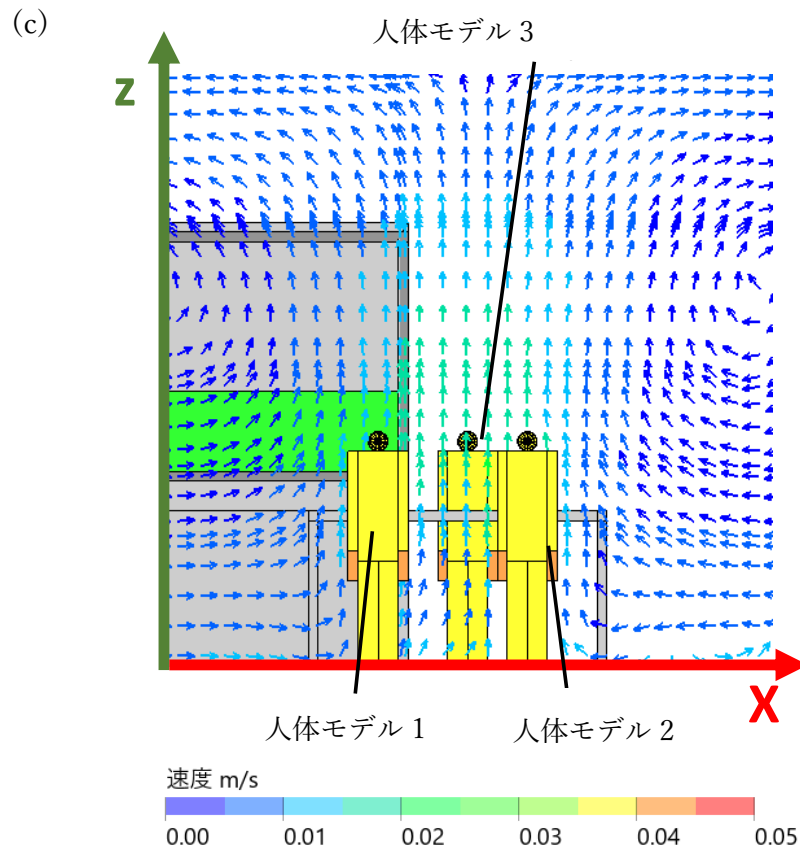


Fig.5-4 CFD 計算結果比較

- (a) 非発熱時の CFD 定常計算結果 (体温 : 12 °C、室内温度 : 12 °C)
- (b) 発熱時の CFD 定常計算結果 (体温 : 36 °C、室内温度 : 12 °C)
- (c) 発熱時の CFD 定常計算結果 (体温 : 36 °C、室内温度 : 25 °C)

## 5.5 まとめ

1/10 スケールモデル実験室内に、実験者を模擬した人体モデルを換気稼働の無い静穏な状態で、部屋の中央に設置した場合の気流に与える影響について試みた。

### (a) 確認できたこと

①1/10 スケールモデル実験室を用いることで、より現実的な実大室内空間における実験者を発熱体として気流に与える影響について気流性状を把握し、基礎データを取得することができた。

②人体モデルの肩と頭上から人体発熱により生じる上昇気流が見られ、天井に衝突し、両面の壁面に沿って下降している流れが確認できた。これは、人体周辺の自然対流が、実験者が化学物質を持って移動する際に、実験者に化学物質暴露が生じる直接的な要因である可能性が示唆された。

### (b) 課題・改善点など

①今回は、人体モデル表面温度を 36 °C と均一に保ち実験を行ったが、現実には人体皮膚温は必ずしも均一ではない。実験室内で作業する場合、作業着や白衣を着用するため、人体表面に温度分布が生じる。より人体モデルを精度よく再現するとなれば、人体モデルに温度分布を持たせた場合の検討が必要である。

## 参考文献

[1] Houghten, F.C. et al. : Indices of Air Distribution , ASHVE Transaction No.959, pp.261-276, 1933.

[2] Ma, Wm. Y.L. : air-conditioning Design for Hospital Operating Rooms, JIHVE Sept., Vol.27, pp.272-294, 1952.

[3] Daws, L.F. ; Movement of Air Indoors, JIHVE Feb., pp. 244-253, 1970.

## 第6章 実験室内空気環境と実験者行動の複合的な解析

### 6.1 緒言

これまで第4章、第5章を通して、室内気流への人の影響について、1/10 スケール模型を用いた実験的検討の結果を説明してきた。これらの知見をもとに、実際の実験室内での人の動きに適用した場合のケーススタディを行う。

### 6.2 解析方法

実際の実験室内での人の動きについては、当研究室で過去に行った、ビデオ映像による実験者の動線解析のデータを引用する。本学に存在する実験室にて日常的に化学工学系実験を行う、平成29年度修士課程2年の学生1名を対象とし、流通式装置を用いた有機合成実験および1台の分析装置を用いた分析実験で構成された実験であった<sup>[1]</sup>。動線解析の結果によると、この実験者はFig.6-1のAで示されている実験台とFig.6-1のBで示されている実験装置の間を、実験中に何度も往復している。今回の1/10スケール模型を用いた実験から得た知見をもとに、その1回の移動によって、気流がどのように影響されたことによるのかを解析した。実験台Aの横を通り、ガスボンベに向かって歩いた時は、FH面に垂直な方向からFHに向かって動いた時の結果を使用した。ガスボンベからFH排気面に向かって歩き、実験装置Bに至るまでの動きについては、FH面に対して平行に移動した時の結果を使用した。実験装置Bの前でしばらく停止している時は、人を発熱体として検討した結果を使用した。

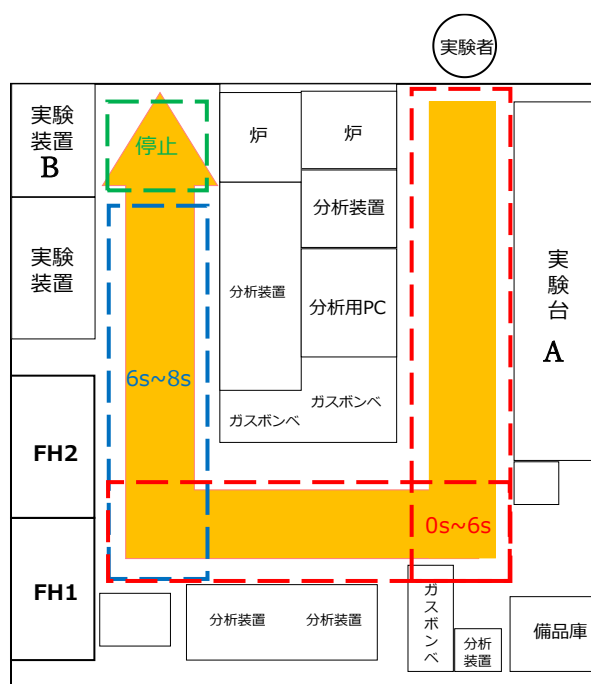


Fig.6-1 実験者の動線



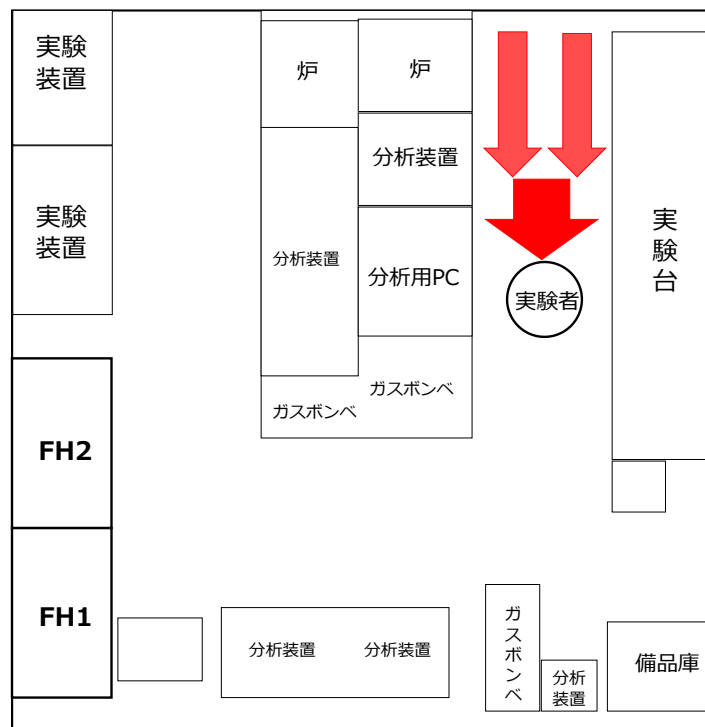
### 6.3 解析結果

Fig.6-2 に実験者の移動 1 回分が、室内気流に与える影響について時系列的に示す。  
この結果から、人の動きが室内気流に与える影響の範囲や大きさを容易に可視化することが可能となることが示唆された。

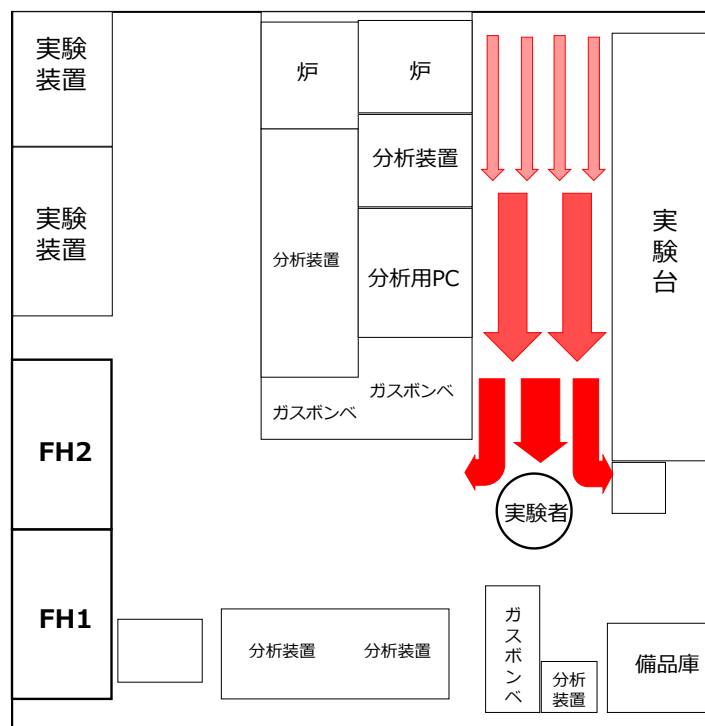
この動線解析から得られた結果の特徴として、実験中に実験者は FH の前を何度も通過していることが挙げられる<sup>[1]</sup>。既往研究では、人の通過移動による装置内からの汚染物質の漏洩の可能性が報告<sup>[2]</sup>されており、今回の 1/10 スケール模型を用いた実測によっても人形通過後 3～5 秒にわたり人形へ引かれるように流れていることが明らかになった。また、実験者は分析装置の状態や進捗の確認作業に伴い、場所によって比較的長く滞在することも特徴の一つとしてあげられる<sup>[1]</sup>。その場合、今回の 1/10 スケール模型から得られた結果より、時間が経過することで人の動く影響よりも人体周辺の自然対流による影響の方が強くなると考えられる。

これまで 1/10 スケール模型で得られた室内気流に与える影響についての結果と、実験的に得られた動線解析のデータを組み合わせることで、実験室内のリスクの存在を理解し、把握することが可能になった。

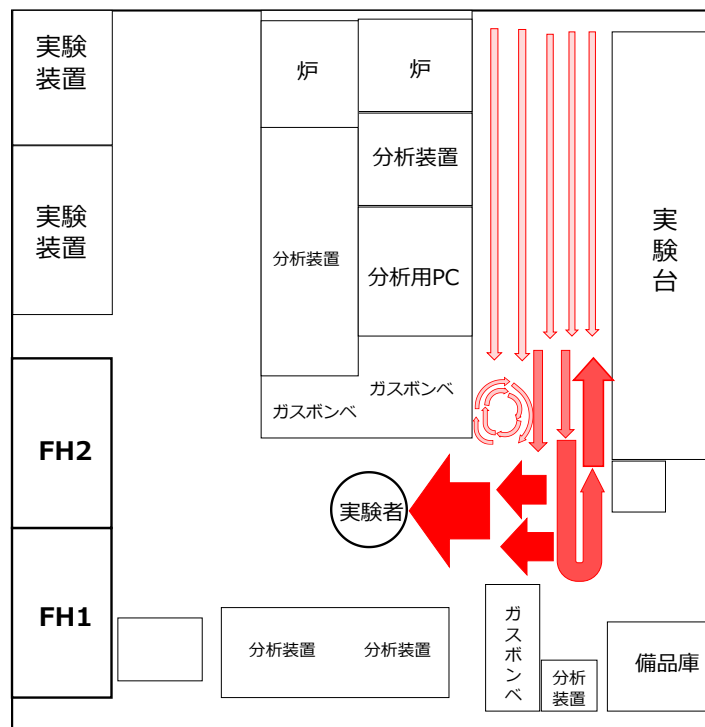




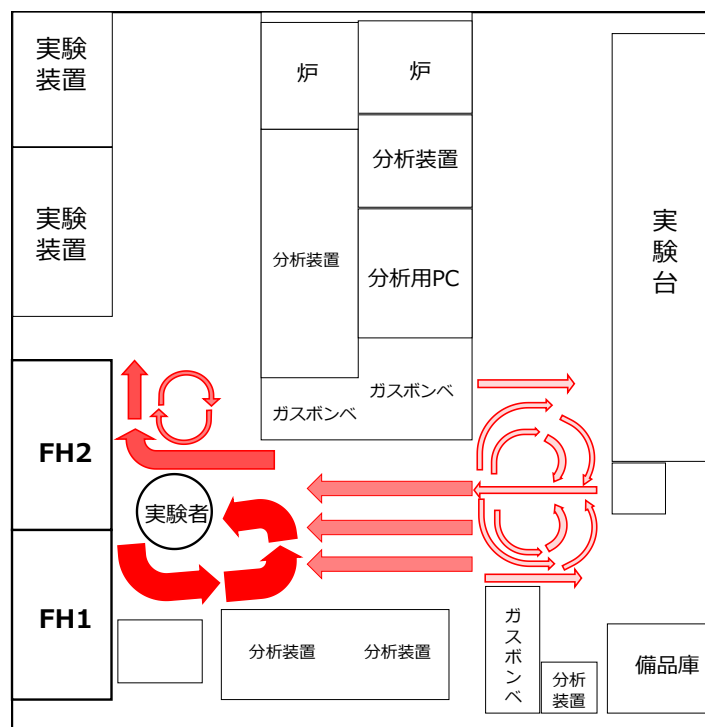
2 秒後



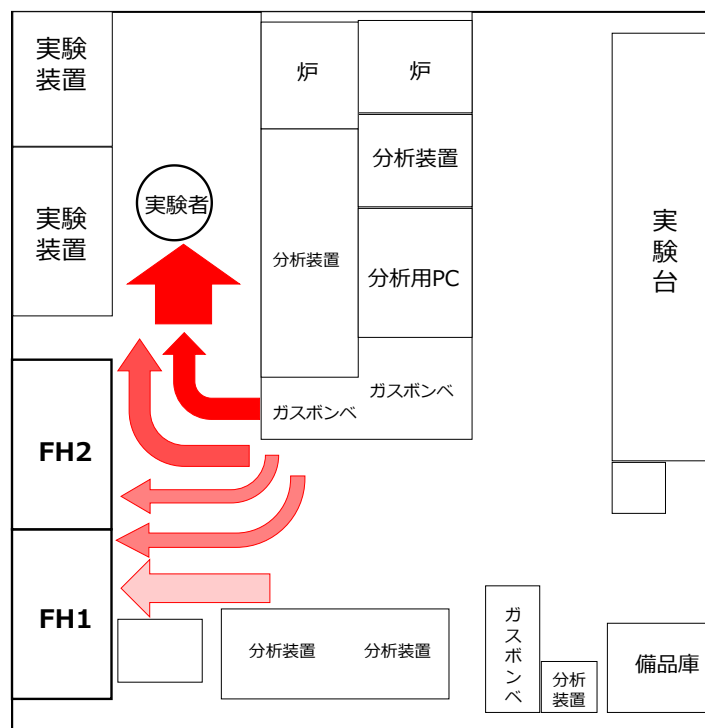
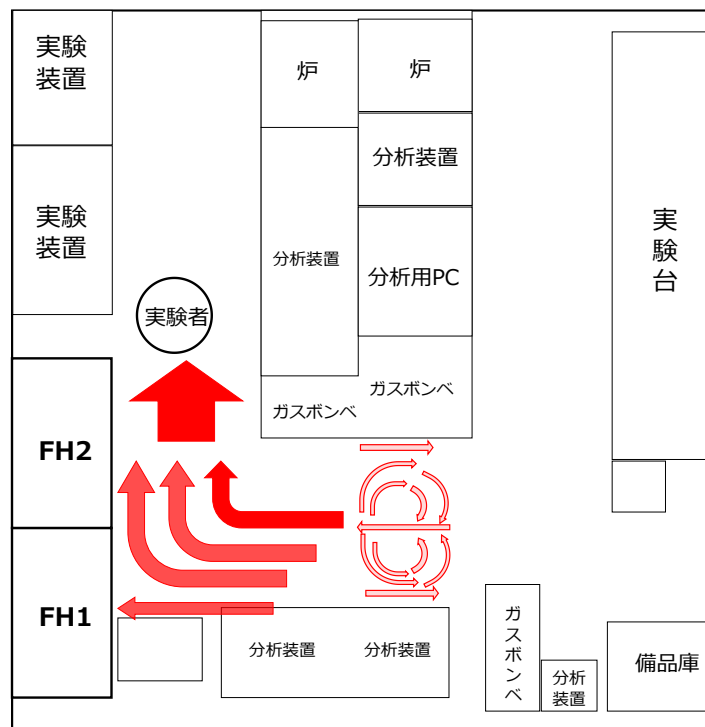
3 秒後

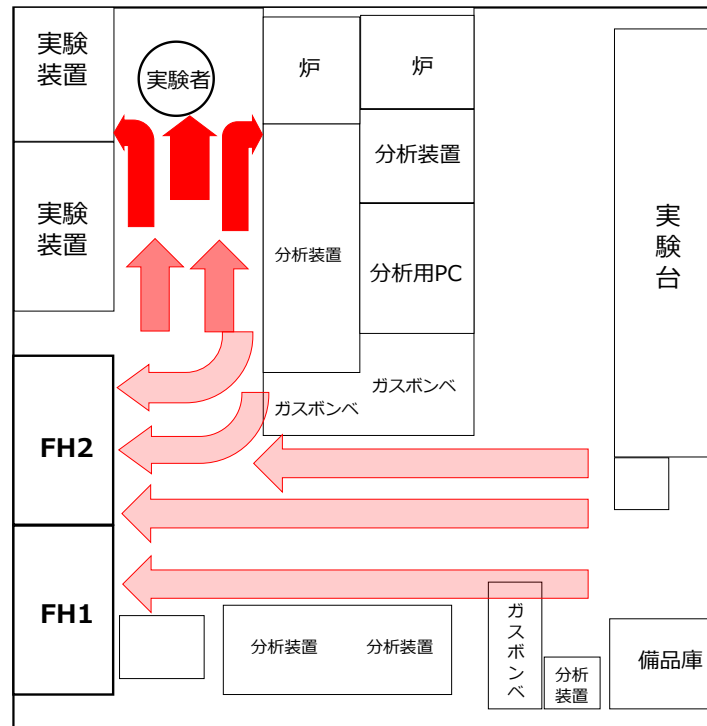


4 秒後



5 秒後





8 秒後



停止

Fig.6-2 実際の実験者行動が室内気流に与える影響

## 6.4 結言

実際の実験室内での実験者の移動経路といった実験研究の特徴を踏まえた気流環境について解析を行った。

### (a) 確認できたこと

①実験室内の実際の人の動きと今回の実験的検討結果を組み合わせることによって、人の移動が気流に及ぼす影響の範囲や大きさを可視化することが可能となることが示唆された。

②1/10 スケール模型を用いることで、化学物質による空気環境汚染のリスクに関わる具体的な情報を与えてくれるといった点において、非定常性や共有性を特徴とする実験室の気流解析に有用な手段なることが期待される。

### (b) 課題・改善点など

①1/10 スケール模型内で行った実験は、実験室内に FH 排気装置のみが置かれているが、本解析で用いた動線解析データは高温の分析装置や実験台などが配置されている。今回の複合解析ではレイアウトによる気流への影響が考慮されていないため、引き続き詳細に検討する余地がある。

②実際の実験者の動きは、実験台 A と実験装置 B の間を短い時間で何度も往復している。より実験者の動きに合わせた移動を再現することで、人の移動が室内気流に与える影響を検討する必要がある。

## 参考文献

[1] 采女勝紀, 気流解析および動線解析アプローチによる大学実験室の空気環境と実験者行動に関する解析手法, 平成 29 年度東京大学修士論文,(2018).

[2] 小嶋純: 歩行による乱れ気流が排気フードの補修能力に及ぼす影響の検証, 産衛誌, 53, pp.162-162(2011).

## 第7章 結論

### 7.1 まとめ

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 スケールモデル実験室を用いて、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 スケールモデル実験室によってフルサイズの実験室をある程度精度よく再現できる可能性が示された。また、1/10 スケールモデル実験室を用いた実験的検討により、実験室内におけるフェームフードや室内換気の稼働状況によって、渦の生成の可能性が示唆された。大学実験室という非定常な場において室内気流を理解する上では、PIV 測定や CFD 計算のみでは不十分であり、1/10 スケールモデル実験室を用いることで室内全体を観測し、実際の実験室を模した室内の気流を再現し、解析できることが明らかとなった。

1/10 スケールに縮小した人体モデルを用いた検討から、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、熱源として人の存在が室内の気流に与えることなどを明らかにした。その間は定常状態では起こらない化学物質ばく露が起こりうる可能性があり、実験室内での化学物質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 スケールモデル実験室は、実験室全体の可視化、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唆された。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。



## 7.2 今後の展開

本研究では、ヒュームフードや室内換気の稼働状況が室内気流に及ぼす影響、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ているという現象を捉え、気流の観点から現象の理解は進んだ。今後は、実験室で起こっている化学物質拡散と気流の流れを関連付けて、リスク解明に近づく知見を更に得る必要があると考える。1/10 スケールモデル実験室を用いて検討を行うにあたって以下の検討項目を挙げる。

### ①実験者が動く熱源として室内気流に与える影響

本研究では、人が熱源として気流に与える影響について定常的な状態だけを想定した解析と、人の動きが室内気流に与える影響について検討を行った。しかし、実際の実験室内では人が熱を持った状態で、実験作業に伴って実験者が室内を移動するという状況が考えられる。人を熱源としてみた際に、動く熱源としてどの程度影響を与えるのか観測する必要がある。

### ②実測による化学物質拡散の挙動解析

本研究では、化学物質拡散挙動について検討しなかったが、先行研究例ではフルスケール実験室を用いて、CFD 計算により実験室内で化学物質が発生することを想定し、換気装置の稼働状況が与える影響について検討を行っていた。1/10 スケールモデル実験室は動的な活動に関する解析に有効な手段であるため、実験者が化学物質を持って移動することを想定した、すなわち化学物質の発生源が動いたことによる実験室内への拡散の影響を検討することができると思う。

実験室の特徴が室内気流に与えている影響について、それぞれ優先して注目すべきポイントはどこにあるのか整理し、何が最も影響を与えている要素なのか、影響の大きさを定量的に把握し勘案することが必要であると思う。

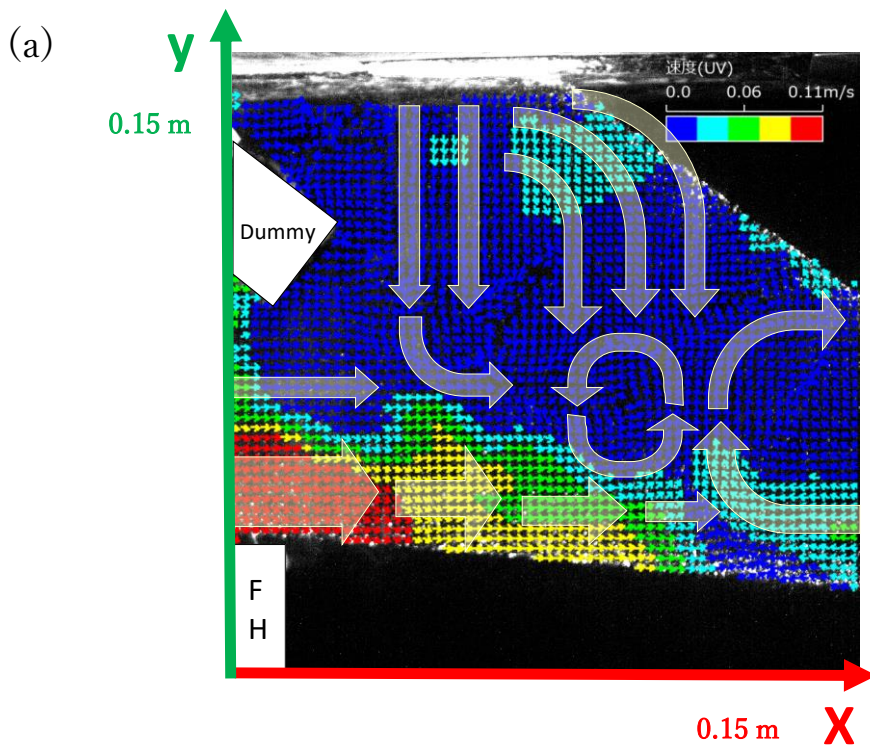
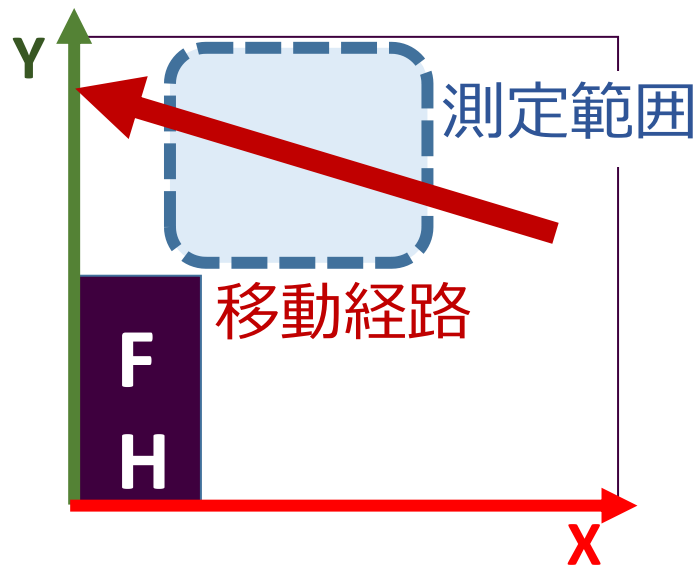
## Appendix

### 人体モデルの移動が室内気流に与える影響の PIV 測定結果

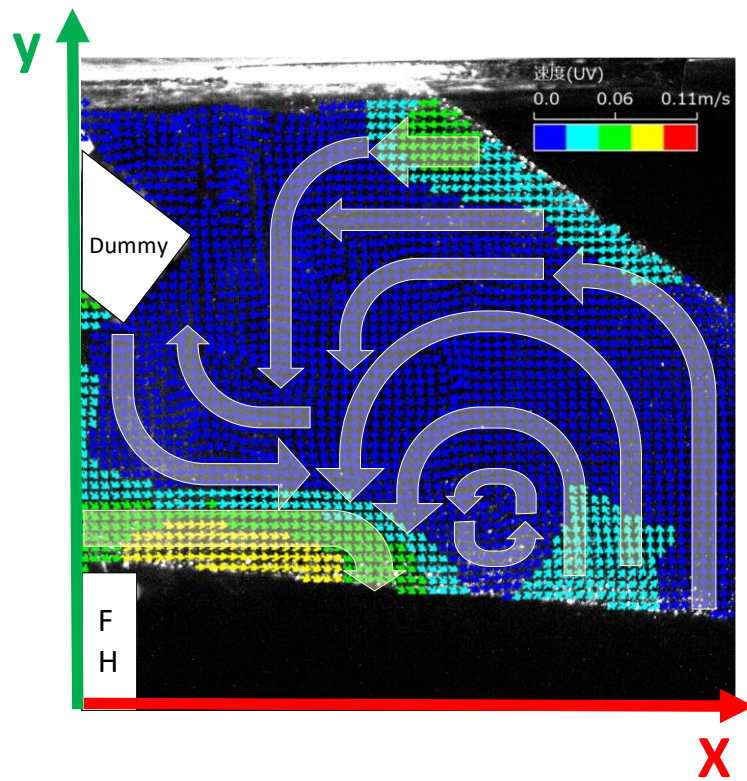
- (A) 人体モデルが部屋の隅に向かって移動したときの PIV 測定結果
- (B) ヒュームフード前を平行に横切ったときの PIV 測定結果
- (C) 垂直断面 (Z-X 平面) の PIV 測定結果

(A) 人体モデルが部屋の隅に向かって移動したときの PIV 測定結果

人体モデルを速さ 0.64 m/s で部屋の隅に向かって直線に動かした際の、気流に与える影響について PIV 解析した結果を示す。この時、ヒュームフードは稼働せず、高さ  $Z=14\text{ cm}$  の位置からレーザーシートを照射した。



(b)



(c)

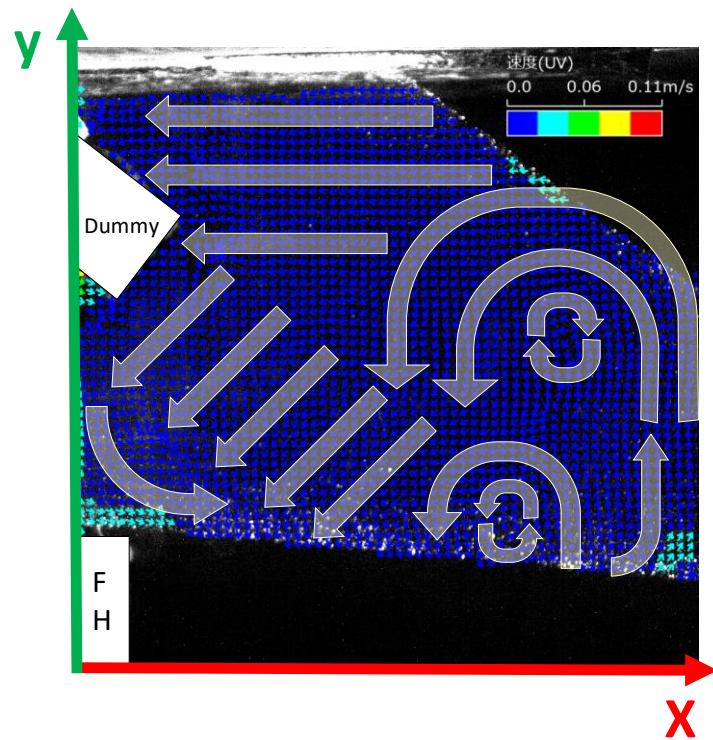
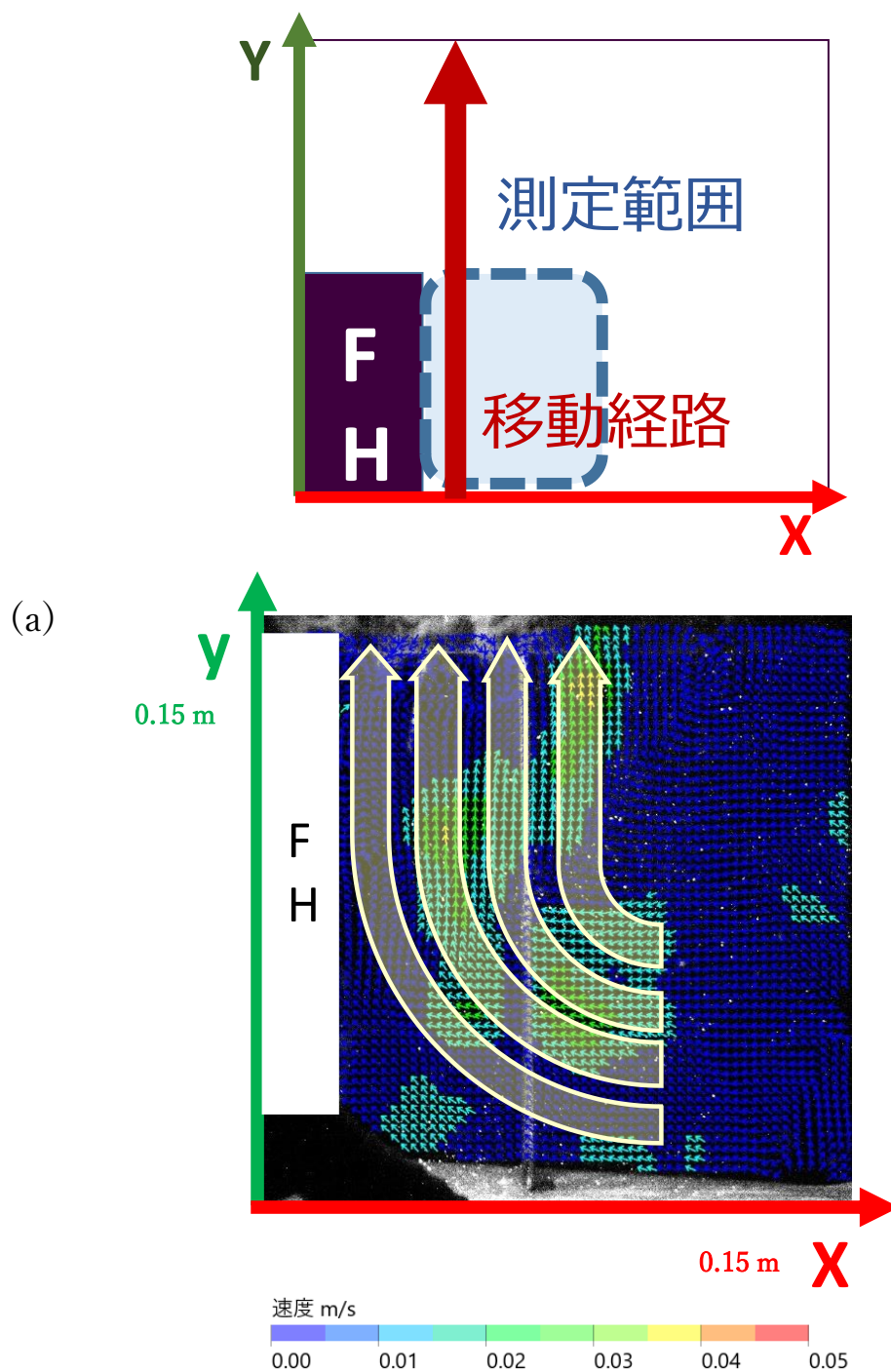


Fig.1 人体モデル移動後の流速ベクトル分布  
(a) 移動完了後 3 秒後 (b) 5 秒後 (c) 10 秒後

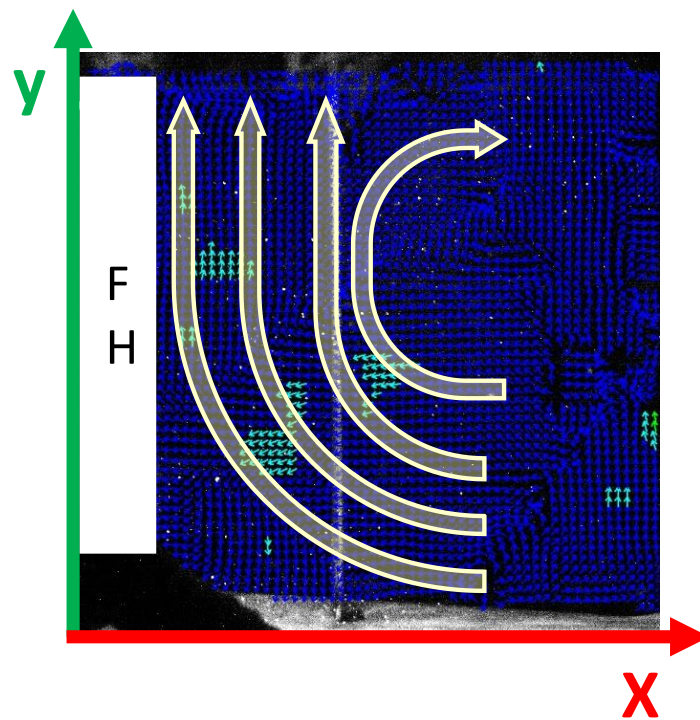
(B) ヒュームフード前を垂直に横切ったときの PIV 測定結果

第4章 4.4.3 にてヒュームフード稼働時における人体モデルがフード側方を通過した際に生じる乱れ気流を、PIV 解析によって検討を行った結果を示した。ここでは、ヒュームフードを稼働させない状態で、人体モデルを 0.64 m/s でヒュームフード側方を平行に動いた PIV 解析した結果を示す。





(b)



(c)

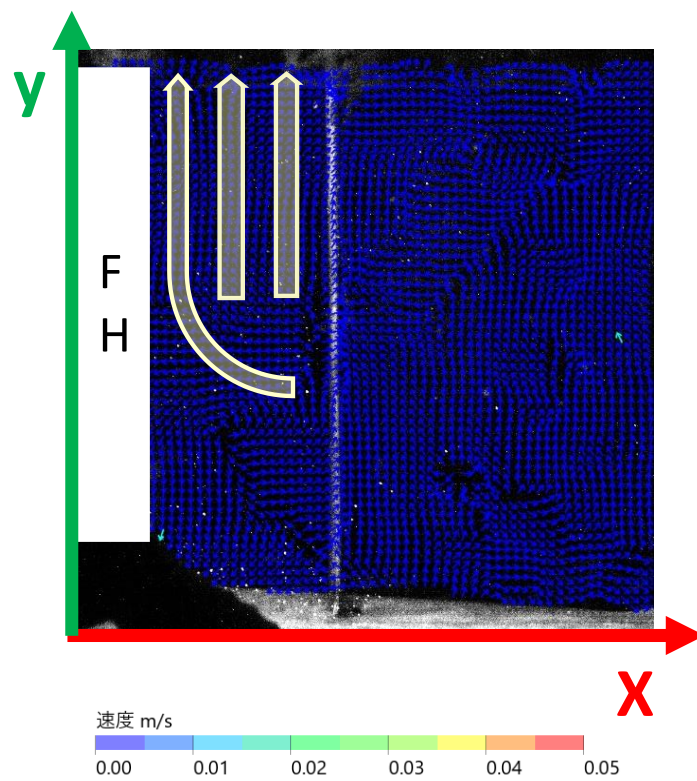
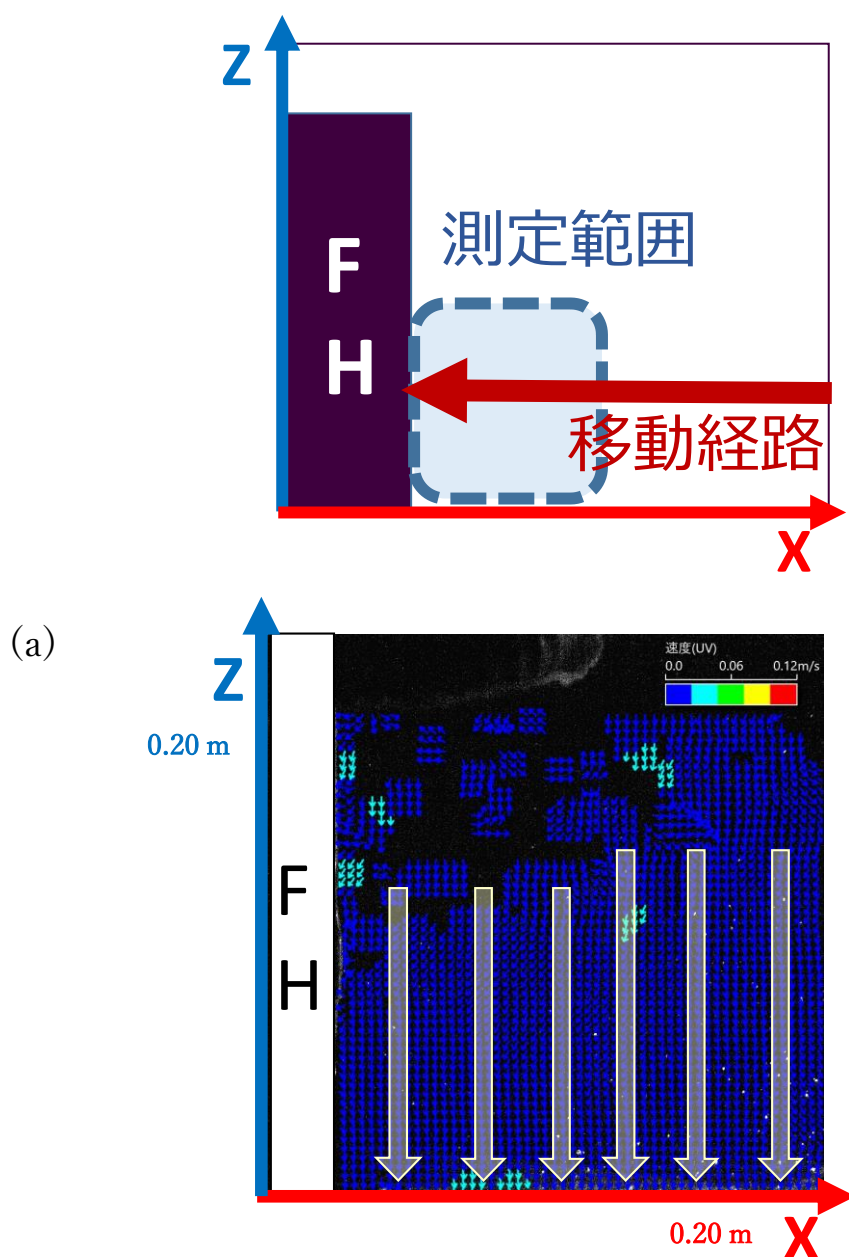


Fig.2 ヒュームフード側方を通過後の流速ベクトル分布の比較  
(a) 移動完了後 3 秒後 (b) 5 秒後 (c) 10 秒後

### (C) 垂直断面 (Z-X 平面) の PIV 測定結果

人体モデルを速さ 0.64 m/s でヒュームフード面に向かって動かした際の、気流に与える影響について PIV 解析した結果を示す。測定断面は人体モデルの移動経路内における Z-X 鉛直断面である。移動完了 3 秒後 (図 3(b)) の結果から、全体的に下向きの流れが見られ、人体モデルの足元に相当する部分においては誘引される状況が見られる。下向きの流れについては、移動前 (図 3(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。





(b)

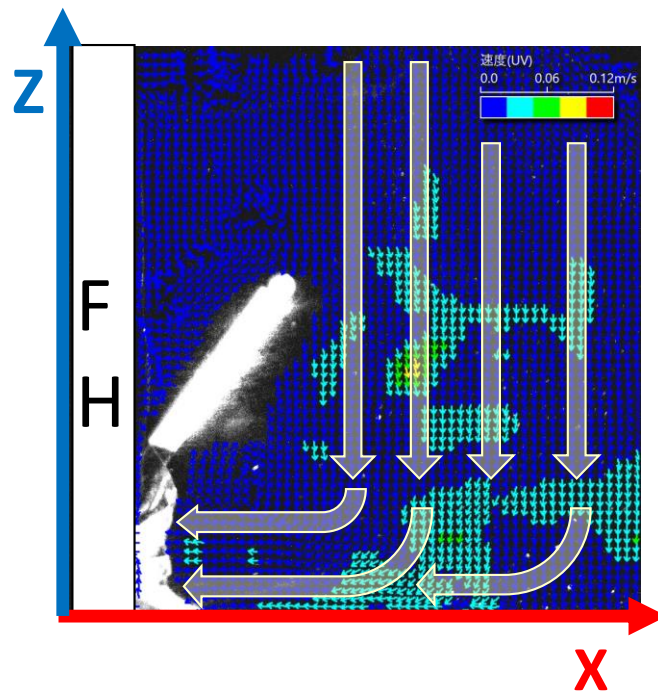


Fig.3 人体モデル移動後の流速ベクトル分布  
(a) 移動前 (b) 移動完了後 3 秒後

## 謝辞

本研究に取り組むにあたり、指導教員であります大島義人教授には、研究全般において的確なご指導、ご助言をいただきました。未熟な私に多くの学ぶ機会や成長する場を与えてくださいました。大島先生に教わったことは数知れません。この場を借りて深く感謝を申し上げます。

大阪大学理学研究科高分子科学専攻の山本仁教授には、PIV 解析の測定技術などに関して専門的なアドバイスをしていただきました。心より感謝申し上げます。

本研究の副査であります徳永朋祥教授には、研究の根本に対して鋭いコメントをいただき、自分の立ち位置を再考する機会を与えてくださいました。心より感謝申し上げます。

本専攻の大友順一郎准教授には、ゼミでの議論を通じて研究を進める上で欠かせないご意見やご助言をいただきました。ありがとうございます。

大島研究室のスタッフであります根津友紀子研究員には、特にお世話になりました。幾度に渡り議論の場をもち、毎回理解の遅い私に根気強くお付き合いいただき、ありがとうございました。いつも親身に相談に乗ってください、また、体調、精神面でも気にかけてくださり大変感謝しております。

本専攻の秋月信講師には、ゼミでの議論を中心に大変お世話になりました。心より感謝申し上げます。

同じく大島研究室のスタッフであります主原愛さん、中村聡子さんにはゼミや普段の研究室生活において大変お世話になりました。ありがとうございます。

大島大友研究室の先輩方、同期のみなさまには研究面においても生活面においても大変お世話になりました。この2年間、家族以上に長い時間をみなさまと過ごしましたが、みなさまがいなければ本日まで研究をやり抜くことができませんでした。ありがとうございます。

社会文化環境学専攻の Freeman John Mark 先生には、proceedings 投稿時にご丁寧に添削してくださいました。ありがとうございました。

柏の葉キャンパス環境棟4階の皆さまにも大変お世話になりました。環境システム学専攻の行事や普段の生活においてみなさまが懇意して下さったことが、同期の少ない環境において大変ありがたく、精神的に大変支えになりました。

最後になりますが、この2年間で応援し経済的にも支えてくれた両親に深く感謝します。

2019年2月

山口 里奈