

東京大学院新領域創成科学研究科

環境システム学専攻

令和2年度

修士論文

実物大モデル実験室を用いた
ラミナー給排気システムに関する検討

2021年3月1日提出

指導教員 大島 義人 教授

飯塚 啓太郎

目次	
目次.....	1
第1章 緒言.....	4
1.1 実験室における化学物質曝露.....	4
1.2 実験室で使用される化学物質.....	4
1.3 大学実験室における化学物質管理の取り組み.....	5
1.4 大学実験室の特徴と非意図的曝露のリスク.....	6
1.5 実験室内の気流へ影響する要因.....	8
1.6 本研究の目的.....	8
第2章 検討手法.....	10
2.1 PIV(Particle Image Velocimetry：粒子画像流速)解析 [28].....	10
2.1.1 気流の可視化と PIV 解析技術.....	10
2.1.2 PIV 解析の原理.....	11
2.1.3 PIV における画像解析手法の種類.....	12
2.1.4 本研究における PIV 解析条件.....	14
2.1.5 具体的な PIV ソフトウェア操作手順.....	15
2.2 風速計による風速測定.....	18

第3章 全面給排気下における給排気量ごとのラミナーフロー成立についての検討	19
3.1 実物大モデル実験室	19
3.2 本実験室モデルのラミナー性について	24
3.3 全面給排気条件における給排気量の変化ごとのラミナーフロー成立についての検討	25
3.4 まとめと考察	29
第4章 ラミナーフローに対する外乱の影響に関する検討	30
4.1 ラミナーフローに影響を及ぼす外乱についての考察と実験方針	30
4.2 モノの存在による気流性状への影響の検討	30
4.2.1 実験条件	30
4.2.2 結果	32
4.2.3 まとめと考察	32
4.3 人の歩行による乱れの範囲・持続時間に関する検討	34
4.3.1 実験条件	34
4.3.2 結果	35
4.3.3 まとめと考察	35
4.4 FH 稼働時の気流性状に関する検討	37

4.4.1	実験条件.....	38
4.4.2	結果.....	40
4.4.3	まとめと考察.....	42
第5章	結言.....	43
	参考文献.....	44
	Appendix.....	46
(A)	実験方法・内容.....	46
(B)	1/10スケール実験室模型におけるトレーサー粒子の自重の影響に関する考察..	48
(C)	1/10スケール実験室模型における一部給気・全面排気条件でのPIV測定結果.	49
(D)	1/10スケール実験室模型における全面給気・半面排気条件でのPIV測定結果.....	49
(E)	1/10スケール実験室模型における全面給排気・モノの存在条件でのPIV測定結果....	51
	謝辞.....	52

第 1 章 緒言

1.1 実験室における化学物質曝露

実験室では日々多種多様な化学物質が使用されている。化学物質による曝露による被害には瞬間的な大量曝露による急性中毒症状はもちろんのこと、長期間低濃度の化学物質を曝露し続けることによつての健康被害も存在する。特に塩素系有機溶剤(ジクロロエタンなど)の継続的な曝露経験後、10年以上の期間を開けて癌を発症する事例も報告されている [1]。大学実験室においても実験者に十分に認識されていない溶剤揮発プロセスや [2]、全体換気装置のみの実験室でホルムアルデヒドが大量に使用されることによる管理区分超過 [3]などが報告されているが、長期的な健康状態の追跡データが少ないこと、実験作業の非定常性(後述)により正確な曝露量の推定が困難なことなどから、化学物質の曝露に関するリスク評価は十分でないとの指摘がある [4]。

大阪大学安全衛生管理部が収集した学内事故データによると [5]、2004年から2013年に大阪大学で報告された実験中の事故755件のうち薬品関連のものが261件に及ぶと報告されている。薬傷事故がその6割を占め、次いで発火事故が多い。この事故件数と教員が持つ事故リスクへの印象とは対応関係にあると考えられ、そのような事故に対する強い意識は持っているものの、報告事例件数の少ない「化学物質の吸引による体調不良(急性の影響)」に対する意識は低いとの推察もなされている [5]。急性影響に対する意識でさえ低いならば長期的な曝露による健康影響への意識はなおのこと低くなると考えられる。

1.2 実験室で使用される化学物質

大学実験室で具体的にどのような化学物質が使用されるのかについては、R.Hayashiらが2010年度に東京大学で使用された試薬の上位30種類をまとめている [6]。それ

によると上位 10 品目はアセトン・ヘキサン・ジクロロメタン・クロロホルム・酢酸エチル・エタノール・メタノール・2-プロパノール・アセトニトリル・ジエチルエーテルであり、全て汎用的な有機溶媒であることがわかる。また 11 位以下においてもトルエンやテトラヒドロフランがみられ、反応溶媒、抽出溶媒として非常に広範かつ大量に使用されていることが推測できる。これらの有機溶媒の特徴としては、室温で揮発しやすい物質が多く、揮発後の蒸気は比重が大きいことがあげられる。

このように大学実験室において日常のかつ多量に使用されている有機溶媒だが、たとえば先に挙げたヘキサンは、SDS（安全データシート、和光） [7]によると国内では曝露限界が 40 ppm, 140 mg/m³, skin と定められているが、急性毒性としては 5000 ppm でのめまいの報告にとどまるが、長期的な毒性としては 58 ppm 前後で末梢神経の変化が生じるとの推定がある [8]。

低濃度曝露によっても毒性が示された有機溶媒もあるものの [1] [9]、実際には曝露濃度測定や溶剤使用記載の不十分さから、十全に有機溶剤へのリスク評価がなされたとは言えず、特に有害性の第一段階として麻酔作用が生じるような物質では、近年問題となっているメンタルヘルス不全で現れる症状と重なるために、曝露による症状と認識するのに時間がかかる懸念も報告されており、化学構造の類似性から既知の報告がなくても有機溶剤にはおおむね麻酔作用が出現すると推測されるため、そうとみなしたリスクアセスメントを勧める意見もある [10]。

1.3 大学実験室における化学物質管理の取り組み

先に挙げた有機溶媒のみならず他のものも含め、化学物質はその取扱いに十分注意を要するものが多いために、化学物質に対して取り扱いに関する規制や厳密かつ効率的な管理を求める声は大きく、大学においても薬品管理システムが次々と導入されている [11] [12]。化学物質の購入、保管に対しての管理に加えて、排出についても法令に従った処理が求められており、例えば東京大学では環境安全研究センターが作成し

たフローチャートに従って廃液を分類し、分別された廃液ごとに集め、内部もしくは外部業者で処理される。

化学物質の使用環境に関しても、平成 16 年度に労働安全衛生法の大学への適用が始まったことにより、半年に一度作業環境測定が義務付けられたことや、有機溶剤中毒予防規則や特定化学物質障害予防規則に則る形で局所排気装置が新たに設置されたことから、化学物質の使用環境は改善傾向にあると考えられる。しかしながら、作業環境測定についてはもともと化学物質を「大量、長時間、継続的」に使用する傾向を持つ産業界を念頭に置いてあるため、「少量、短時間、間欠的」に使用する傾向を持つ実験室環境においてはリスク評価として必ずしも有効ではないとの指摘が多数から報告されている [13] [14] [15]。

1.4 大学実験室の特徴と非意図的曝露のリスク

実験室内の気流環境について考えていく。先に挙げたように労働安全衛生法が大学へと適用されたことにより、実験室においても建築物環境衛生管理基準 [16] (表 1-1) を満たすような換気が、また有機溶剤や特定化学物質を扱う実験室においては加えてそれぞれ有機溶剤中毒予防規則と特定化学物質障害予防規則の基準 [17] (表 1-2) を満たす換気性能を持つ機器の設置が義務付けられている。

表 1-1 空調調和設備を設けている場合の空気環境の基準 [16]

ア 浮遊粉じんの量	0.15 mg/m ³ 以下
イ 一酸化炭素の含有率	100万分の10以下(=10 ppm以下) ※特例として外気がすでに10ppm以上ある場合には20ppm以下
ウ 二酸化炭素の含有率	100万分の1000以下(=1000 ppm以下)
エ 温度	(1) 17℃以上28℃以下 (2) 居室における温度を外気の温度より低くする場合は、その差を著しくしないこと。
オ 相対湿度	40%以上70%以下
カ 気流	0.5 m/秒以下
キ ホルムアルデヒドの量	0.1 mg/m ³ 以下(=0.08 ppm以下)

表 1-2 空調調和設備を設けている場合の空気環境の基準 [17]

		囲い式フード
	有機溶剤中毒予防規則	0.4 m/s 以上
特定化学物質障害予防規則	ガス状	0.5 m/s以上
	粒子状	1.0 m/s以上

その一方で、実験室は研究者の知的好奇心に基づく真理の探究が為される場であるため、産業界の生産工程のように定常的な作業というものは少なく、実験室特有の性質としてモノの仕様の任意性・室内レイアウトの多様性・実験作業の非定常性・複数実験者による場の共有性が考えられる [18]。特に場の共有性がもたらす問題点として、ある実験者が使用した化学物質が室内気流に乗ることで他の実験者への曝露をもたらすという「非意図的曝露」の可能性が当研究室の既往研究で報告されており [19] 曝露リスクが懸念されている。

1.5 実験室内の気流へ影響する要因

実験室内の気流へ影響する主な要因としては、①窓・装置による気流発生（換気扇・扉・窓・FH等の局所排気装置・エアコン）②熱源による上昇・下降気流の発生 [20] [21]（実験装置・エアコン・人の体温・天井、床や壁面）③人やモノの存在及び移動による気流のかく乱 [22] [23] [24]が挙げられ、これらが独立かつ非定常的に作用しているために、実験室の空気環境の安全性を担保するには、これらの外乱を考慮に入れた部屋全体の気流の設計が必要と考えられる。

1.6 本研究の目的

そこで本研究では実験室全体でラミナーフロー（一様で低風速なダウンフロー）を成す給排気システムを導入し、その実現の可否並びに外乱による影響の範囲・程度を検討することで、実験者への化学物質曝露リスク低減のための知見獲得を狙った。このシステムは、下方に向かう一様な気流が化学物質の拡散・暴露を防止し、かつ低風速な気流のために実験作業への影響が低減されるため、実験室において理想的であると考えられる。気流設計された屋内の先例としてクリーンルームがあげられるが、一方向への気流形式を採用する形式のクリーンルームでは平均気流速度は最低でも 0.2 m/s 以上であり [25]、実験室へは導入・ランニングコストや高い風速・騒音による実験作業への影響という観点から実験者への負荷が大きいため、一般的な実験室への導入という点では本システムの方がよいと考えられる。

当研究室の既往研究 [26]や 1/10 スケール模型での予備実験（Appendix に記載）において、全面給排気条件でのラミナー性や給排気面積の変化による渦の発生などを確認したが、実物大モデル実験室を対象にした研究はまだなされていない。ラミナーフローに関する既往の成果などに関しても、医薬品製造工程での粉碎機器での粉体輸送に

における活用 [27]や解剖台における台から天井方向へのラミナーフローユニットを持つ商品 [28]などしか例がなく、室内規模かつ上から下方向へのラミナーフローに関する既往の検討はなされていない。

本研究では実物大モデル実験室を対象に、ラミナーフローの成立条件並びにそのロバスト性についてPIV解析を用い、全面給排気条件における給排気量の変化ごとのラミナーフロー成立についての検討を行うとともに、(1)モノの存在による気流性状への影響の検討 (2)人の歩行による乱れの範囲・持続時間に関する検討(3)FH稼働時の気流性状に関する検討について検討した結果を報告する。

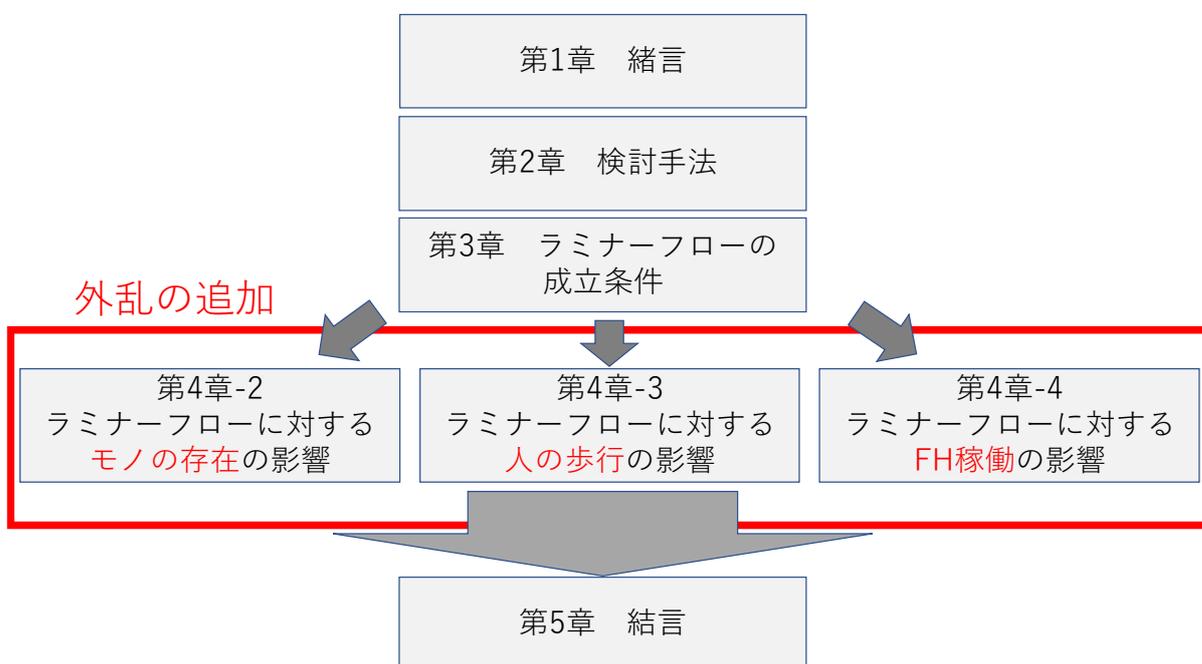


図 1-1 本論文の構成

第2章 検討手法

2.1 PIV(Particle Image Velocimetry：粒子画像流速)解析 [29]

2.1.1 気流の可視化と PIV 解析技術

基本的に気流は目に見えないものであり、スモークやその他の細かい粒子をトレーサーとして挿入し、それを目に見える形にすることで流れを可視化させることができる。トレーサーとして熱や有機溶媒などの化学物質濃度の時間・空間的推移を推測する手法もあるが、それよりも直接的にレーザーを照射して可視化する手法が広く用いられている。

こうして可視化した流れに対しデジタル画像処理を行い、流れ場の瞬時かつ複数点の速度ベクトルを抽出する方法が P I V解析手法であり、レーザー光源の普及、撮影機器の発達、画像処理技術の高度化・高速化などが非常に進んだことから、流れの可視化技術の中で現在最も標準的に使用されている。



図 2-1 レーザー照射による気流可視化の一例

2.1.2 PIV 解析の原理

PIV 解析原理の概略図を図 2-2 に示す。対象とした流れの中にトレーサー粒子を混入させ、レーザーをシート状に照明する。照明は少なくとも 2 時刻において必要である。(t₀,t₁)トレーサー粒子からの散乱光が撮影装置により 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ー粒子像から移動量 ΔX が、また画像入力の時間間隔 Δt(=t₁-t₀)が定義され、これらと画像の変換係数 α とを用いて流れ空間の局所速度 u が次の式より求められる。なお、α は(2-2)式で与えられる。M は撮像系の横倍率であり、α´ は単位換算係数である。

$$u = \alpha \frac{\Delta X}{\Delta t} \quad (2-1)$$

$$\alpha = \frac{\alpha'}{M} \quad (2-2)$$

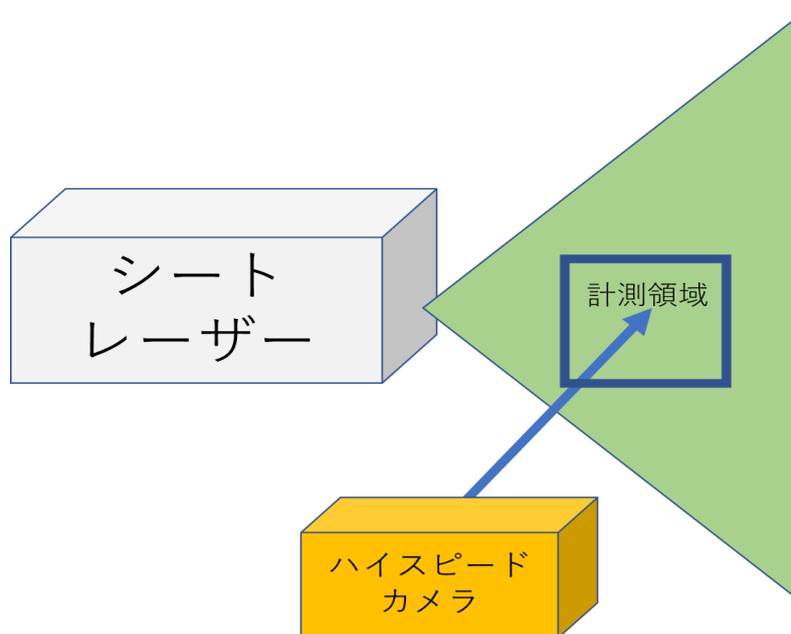


図 2-2 PIV の原理

2.1.3 PIV における画像解析手法の種類

PIV における画像解析手法は、大きく分けて「画像相関法(density correlation method)」と「粒子追跡法(Particle Tracking Velocimetry :PTV)」の2種類がある。表 2-1 に両者の特徴を比較した。

表 2-1 画像相関法と粒子追跡法の比較

PIV解析手法	画像相関法	粒子追跡法
測定原理	輝度値パターンの移動追跡	個々の粒子像の移動追跡
測定対象領域	2次元	2次元、3次元
解析対象画像	濃淡画像	二値画像、濃淡画像
粒子数密度	高数密度	低数密度
使用画像枚数	1~2枚	2~4枚
測定点の設定	任意、正方格子が一般的	粒子像位置
空間解像度	低解像度	高解像度

画像追跡法は、画像を検査領域という小領域に分割し、その領域内の輝度値パターンを用いて領域内の平均移動量を算出する方法である。画像上の輝度変化を用いて解析することになるため、個々の粒子像の分別の必要性がなく、粒子追跡法と比較して低解像度でも可能である。

粒子追跡法は画像から個々の粒子像を抽出しその移動を追跡する。粒子数密度が中程度以下の粒子画像が2~4時刻分必要であり、また個々の粒子像の追跡を基本とするため速度ベクトルを得られる点が粒子像位置に限定されるが、速度勾配が大きな領域に対して正確に測定できるという利点もある。

この二つの方法からさらにいくつかに分かれていく。有名な解析手法について表 2-2 にまとめた。以下のパラメータの項目を考慮しこれらのうちどの手法が適切であるかを判断する。

- ① 作動流体（気流 or 液流 or その他）
- ② 速度成分（2 成分 or 3 成分）
- ③ 速度情報（平均値、瞬時値、乱気流、変動成分）
- ④ 領域サイズ（ μm ~ m ）
- ⑤ 流速条件（最大/最小流速のオーダー）
- ⑥ 領域次元（2 次元 or 3 次元）
- ⑦ 時間解像度（定常、準定常、非定常）
- ⑧ 空間解像度

表 2-2 主な解析手法

画像相関法	解析手法
	直接相互相関法
	FFT相互相関法
	自己相関法
	レーザスペckル法
	輝度差異累積法
	オプティカルフロー
	再帰的相関法
粒子追跡法	4時刻追跡法
	二値化相関法
	3時刻パターンマッチング法
	バネモデル法
	ガンマンフィルタ法

2.1.4 本研究における PIV 解析条件

本研究では、対象領域がおよそ $1\text{m} \times 1\text{m}$ と広く低解像度であること、またトレーサー粒子としてスモークを採用したために濃淡画像を用いる手法が望ましいことから、画像相関法の直接相互相関法を採用した。表 2-3 に本実験で PIV 解析に使った実験装置の仕様について記載する。なお、スモークの粒径は十分に小さく流れへの追従性は確保されている [30]。表 2-4 に本実験の PIV 測定パラメータを記載する。

表 2-3 本実験で使った PIV に関する実験装置の仕様

実験装置の仕様	
カメラ	USB光速度カメラ (カトウ光研)
レーザー	Green DPSS Laser
	SANCTITY LASER ; SSL-532-3000-10TM-90L
	波長 532nm
	出力 3W
ソフトウェア	カメラ制御 : k-2Ex/k4 Software for CL-USB3
	PIV解析 : Flow-Expert64 ver1.2.13.0 (カトウ光研)
トレーサー粒子 (スモーク)	発生器 : PORTA SMOKE PS-2006 (Dainichi)
	スモーク能力 : $10 \sim 31\text{m}^3/\text{時}$ (可変)
	スモーク平均粒径 : $10\ \mu\text{m}$
	スモーク成分 : プロピレングリコール
	トリプロピレングリコール
	1,3-ブチレングリコール
	精製水
香料	

表 1-4 PIV 測定パラメータ

PIV測定のパラメータ	
PIV解析手法	画像相関法—直接相互相関法
画像サイズ	$1024 \times 1024\ \text{pixel}$
フレームレート	100 fps
検査領域	$32\ \text{pixel} \times 32\ \text{pixel}$

2.1.5 具体的な PIV ソフトウェア操作手順

PIV 解析ソフトウェア上では大まかに 3 つの工程で解析が進行する。(1)前処理 (2)速度ベクトルの計算 (3)後処理

それぞれの詳しい内容を以下に示す。

(1) 前処理

1. キャリブレーションの実行

解析に使用する画像とは別途撮った校正用画像 (図 2-3) を読み込み、その画像中の既知の長さを入力することで画像上の長さを実空間との長さとの比を簡易キャリブレーションによって求める。

2. 連続前処理

撮影した粒子画像を読み込み、画像の輝度を「乗算」により増幅する。今回は 10 倍の乗算を用いた。(図 2-4)

3. マスク画像の作成

壁面の汚れ・FH の白色部分・レーザーが照射されていない部分といった計測領域内の不要な部分をマスクし、正確な解析ができるようにする。

(2) 速度ベクトルの計算

1. 比較フレームの設定

「計測間隔の時間」、「比較画面間隔の時間」、「結果表示用の単位」の欄の数値を粒子画像取得時の設定や求める結果に基づいて調整する。

2. 計測領域の設定

粒子画像から測定したい範囲をドラッグし、選択する。

3. 検査領域の設定

検査領域サイズを 32 pixel×32 pixel に、探査領域サイズを 52 pixel×52pixel に設定する。

4. 2D2PIV の実行

前述のとおり直接相互相関法を採用したため、それを実行する。なお今回は、「計算時に無効データを 3~4 近傍の有効データで補完する」の輝度パラメータなどを、計算結果を見ながら調整していった。

(3) 後処理

1. 過誤ベクトルの除去

検査領域内において計算誤差とみられるベクトルを相関係数の値を基準にして除去する。

2. ベクトルの平均化 ベクトルリスト→編集から平均ベクトルを作成し、カラーマップの最大・最小値やベクトルの形状などを微調整する。



図 2-3 簡易キャリブレーションに用いる校正用画像の一例

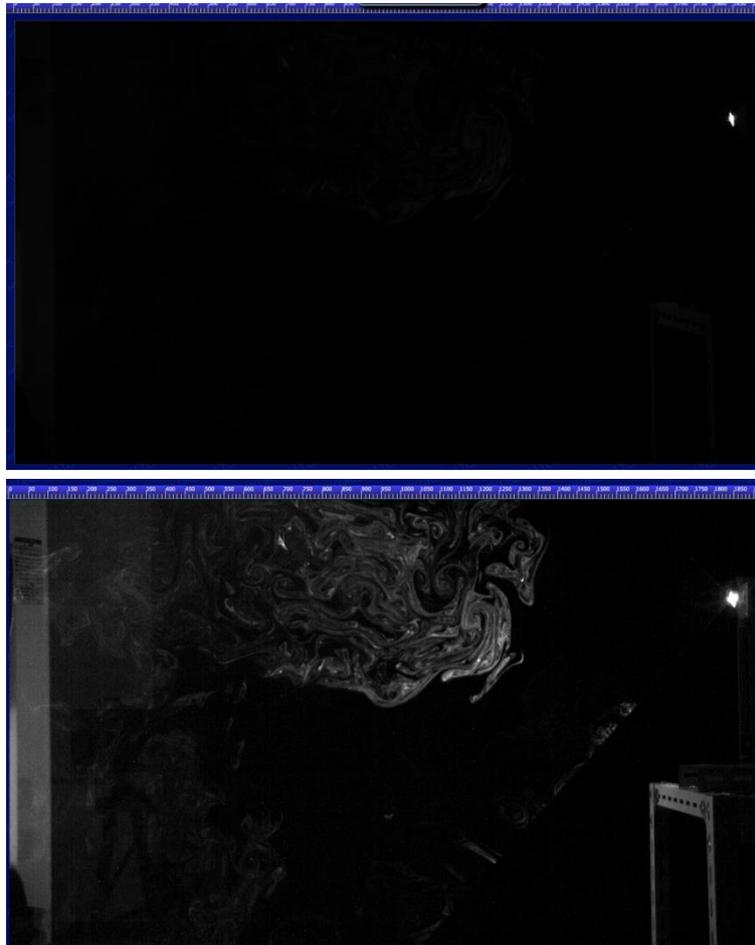


図 2-4 上：連続前処理前の画像の一例
下：連続前処理後の画像の一例

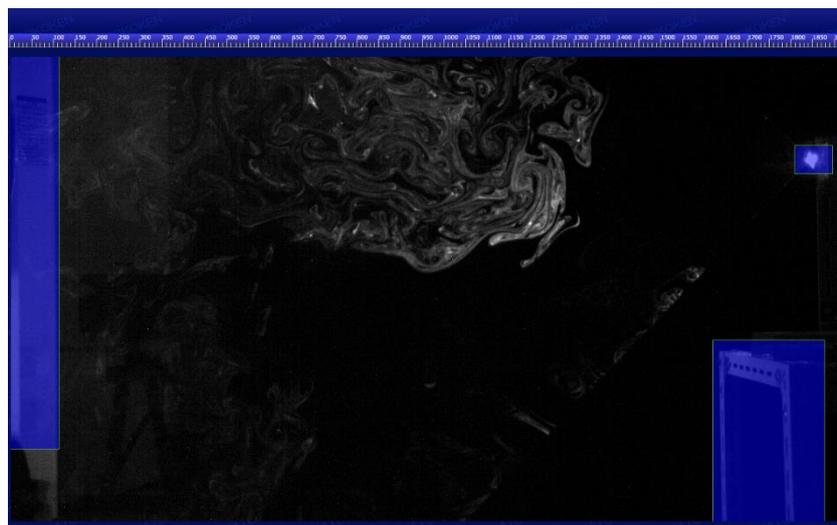


図 2-5 マスキング後の画像の一例

2.2 風速計による風速測定

今回の PIV 測定において、粒子画像撮影の際に背景色を黒にできない領域（FH など）については PIV 解析を行っても有効な気流ベクトルを取得しづらい。これを補う情報として、熱線風速計による風速測定を合わせて行った（図 2-6）。使った機器の仕様を表 2-5 に記載する。

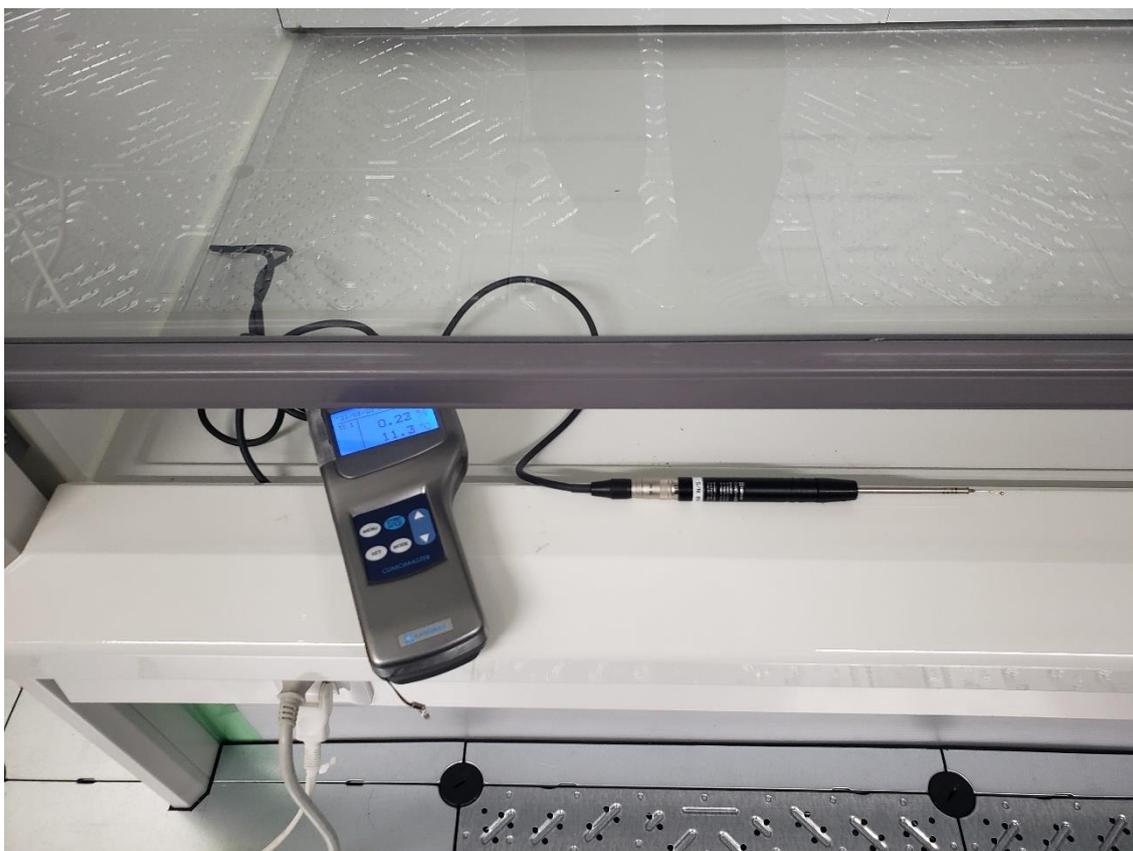


図 2-6 風速計による風速測定例

表 2-5 風速計の仕様

風速計仕様	
商品名 モデル	CLIMOMASTER MODEL6501series(KANOMAX)
種類	多機能型風速計
原理	放射熱量計測
測定可能範囲	0.01 m/s~30.0 m/s

第3章 全面給排気下における給排気量ごとの ラミナーフロー成立についての検討

3.1 実物大モデル実験室

本研究で対象とした実物大モデル実験室(X:5.2 m, Y:4.3 m, Z:2.6 m)の俯瞰図を図3-1に、写真を図3-2,3-3,3-4に示す。給気は天井近傍のソックダクトから行われ、排気はパンチングされた床面とFH（稼働時のみ）から行われる。パンチング床面は図3-4に示すように微細な穴が開いており、床下に設けられた空間を陰圧にすることによって均一に排気が為されるようになっている。ソックダクトは片方の壁面からパイプがつながっており、送り込まれた風がダクトを満たしながら白いカバーに空いた微小な穴から染み出すことで室内へ風が供給される仕組みである(図3-5)。室温は20°Cとし、ソックダクトから給気される風も20°Cとなるよう設定した。なお、背景色を黒色にしてPIV解析の精度を向上させることを目的に黒い紙を壁面に貼っている。

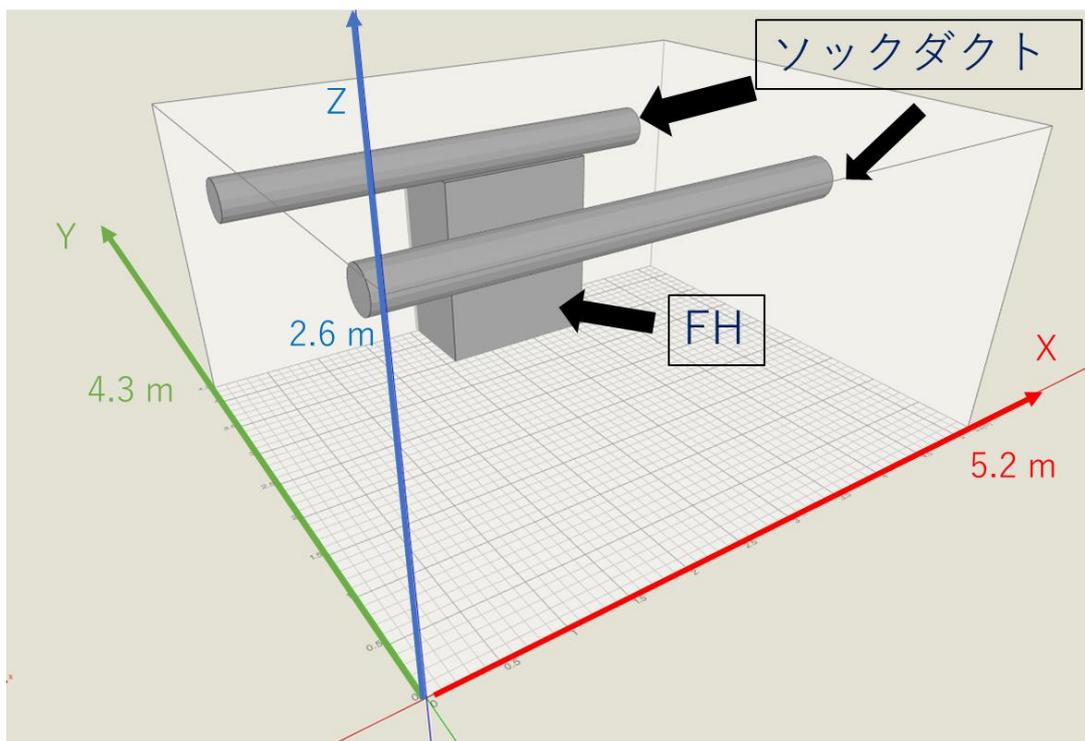


図 3-1 実物大モデル実験室の図



図 3-2 実物大モデル実験室の写真



図 3-3 ソックダクト写真

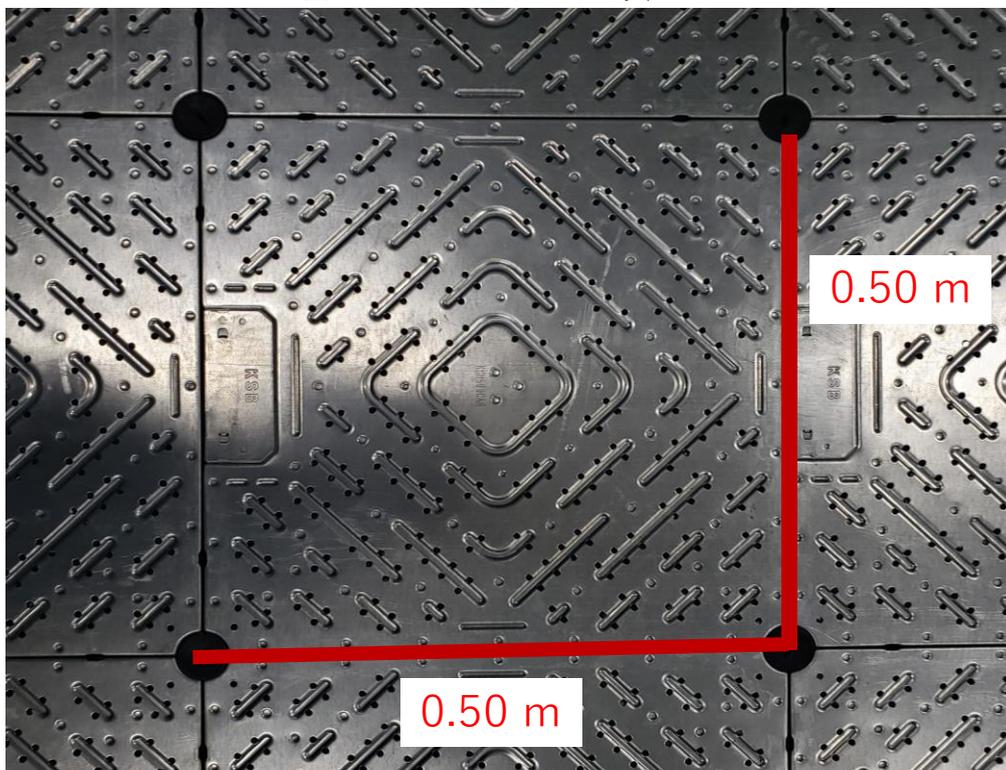


図 3-4 パンチング床面写真

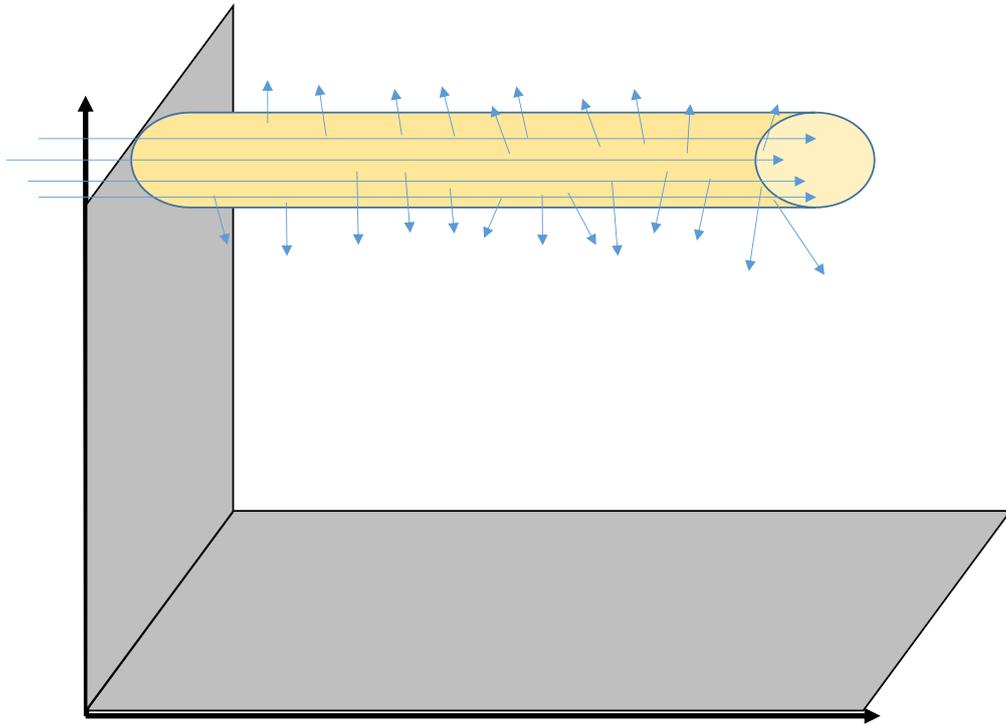


図 3-5 ソックダクト気流イメージ

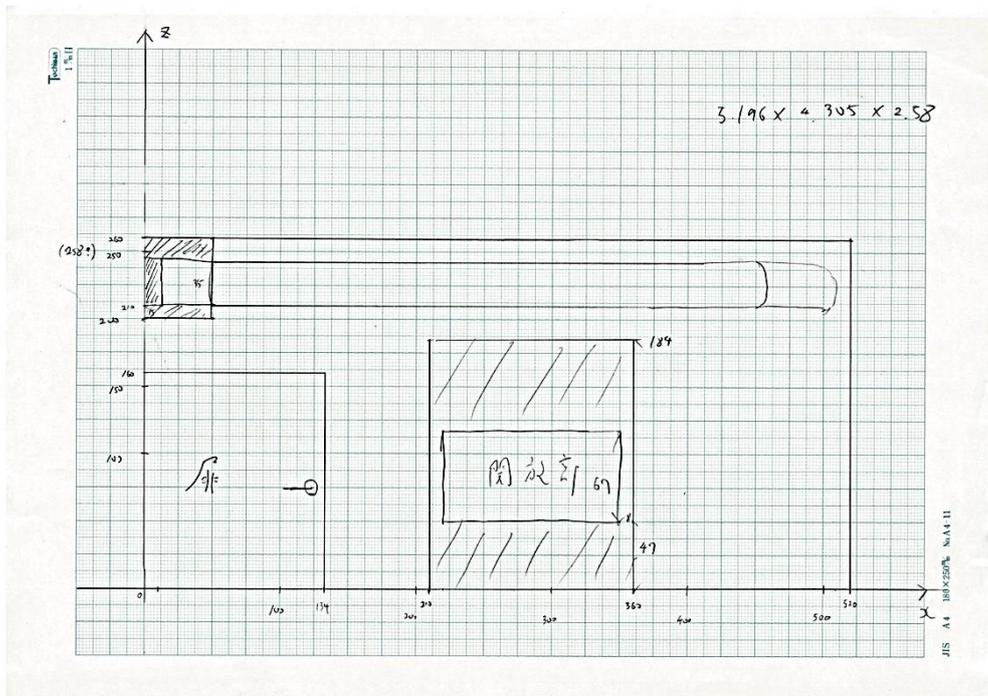


図 3-6 XZ 断面での寸法

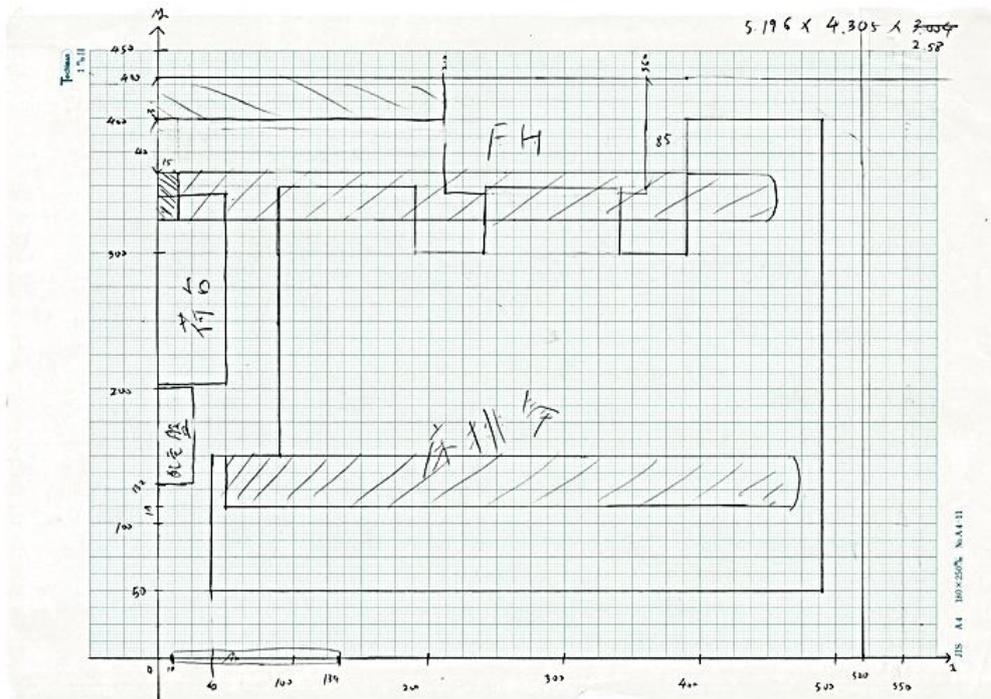


図 3-7 XY 断面での寸法

3.2 本実験室モデルのラミナー性について

ある流れが層流か乱流かを評価する際には Re 数（レイノルズ数）が用いられる。

Re は次の 3-1 式で表される。U₀は代表風速、L₀は代表長さ、νは動粘性係数である。

$$Re = \frac{U_0 L_0}{\nu} \quad (3-1)$$

さて、全面給排気条件において給排気量 2200 m³/h の時、

U₀=0.01~0.02 m/s（高さ 1.0 m の中空での実測値）

L₀=4.3 m（Y 軸方向の部屋の長さ）

ν=1.579×10⁻⁵ m²/s（空気での動粘性係数）

を代入すると、

Re=2723~5447 と求められる。

Re が 2000~4000 を超えると乱流と判定されるが、著しい乱流ではなく上から下方向の流れが乱されるほどではない値と考えられる。以下給排気量 2200 m³/h 以下の条件で検討していく。

3.3 全面給排気条件における給排気量の変化ごとのラミナーフロー

成立についての検討

以下、基本的に座した際の呼吸域（床面からの高さ 0.7m~1.2m）におけるラミナー性を議論する。

全面給排気かつモデル実験室に何も無い条件において、給排気量を変更しながら呼吸域の気流性状並びに速度について PIV 解析を行った。対象とした断面を図 3-8 に示す。また換気回数換算表を給排気量 600、1100、2200 m³/h の条件について表 3-1 に載せる。

表 3-1 給排気量と換気回数の換算表

給排気量 (m ³ /h)	600	1100	2200
換気回数 (回/h)	10.4	19.1	38.1

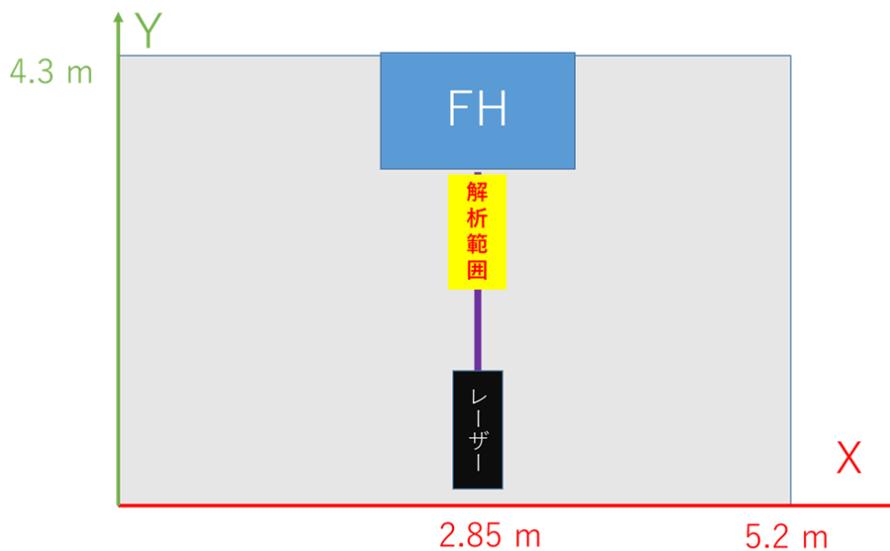


図 3-8 計測した断面

図 3-9-a~c にそれぞれ、給排気量 600、1100、2200 m³/h 条件下の X=2.85 m における PIV 解析結果 (YZ 断面の流速ベクトル分布) を示す。

(a) 給排気量 600 m³/h 条件 (図 3-9-a) では、特に定まった方向性を持ったベクトルは観測されず、追試での再現性もなかった。部屋全体に影響を及ぼすほどの給排気量ではなかったと考えられる。

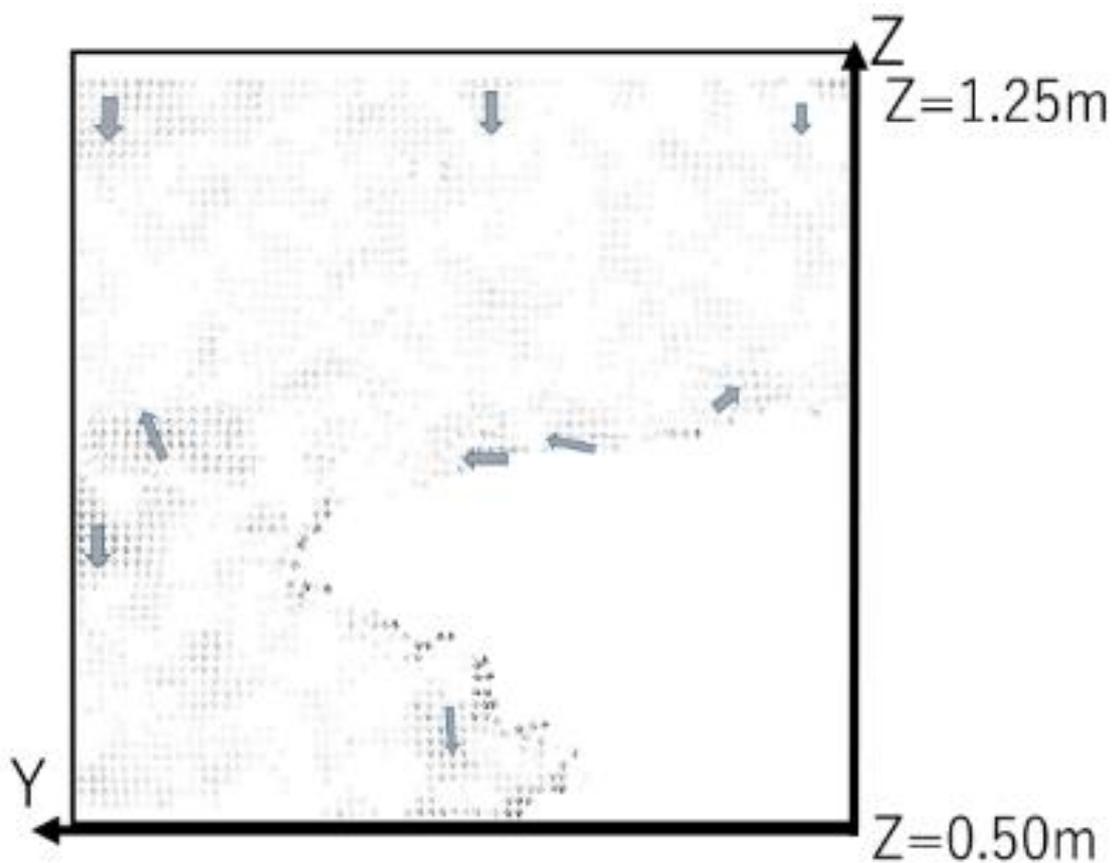
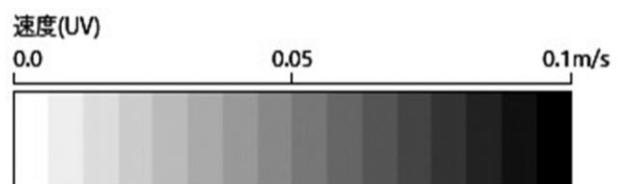


図 3-9-a 給排気量 600 m³/h (X=2.85 m)



(b) 給排気量 $1100 \text{ m}^3/\text{h}$ 条件下 (図 3-9-b) では、大まかに上から下へのダウンフローが見られたものの、渦を巻く場所も観測された。他の断面でのトレーサー粒子の目視調査から、モデル実験室壁面と室温との温度差により下降気流が生じ、それが床面で跳ね返っていることが確認されている。それによりラミナー性が阻害されていると考えられる。このように「意図せぬ」外乱によって乱される程度の強さのため、不適當とした。

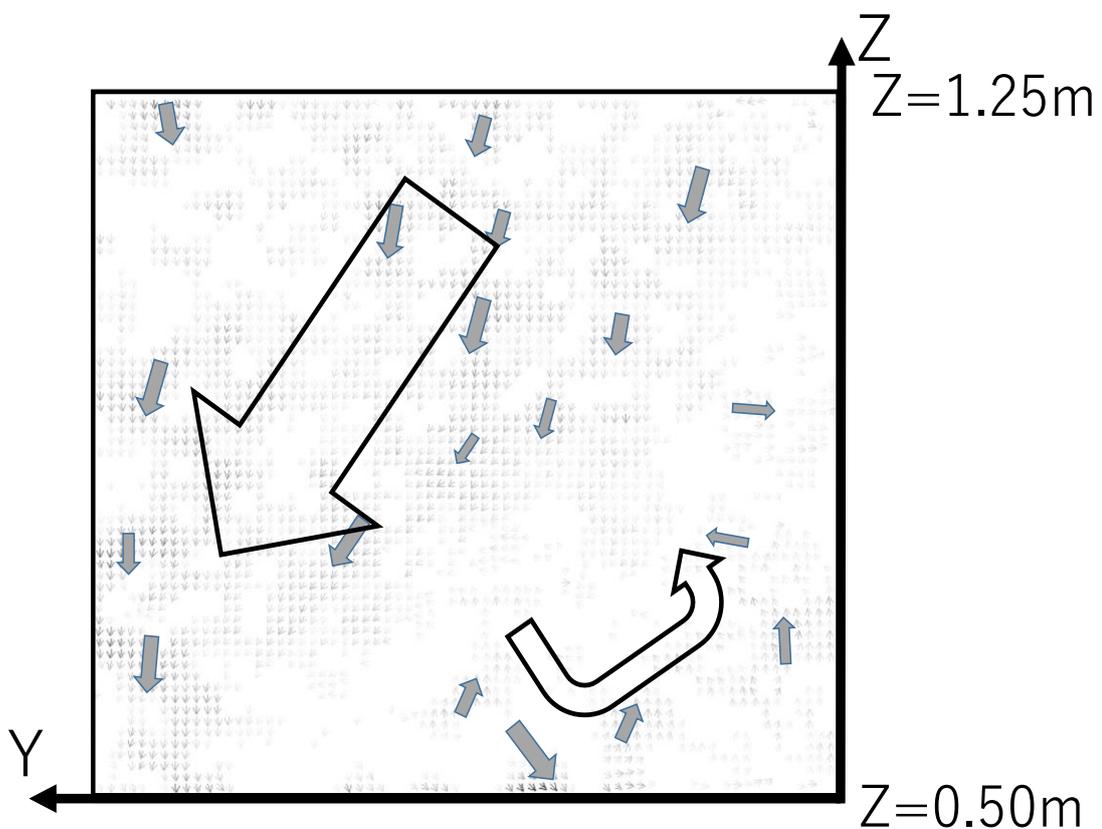
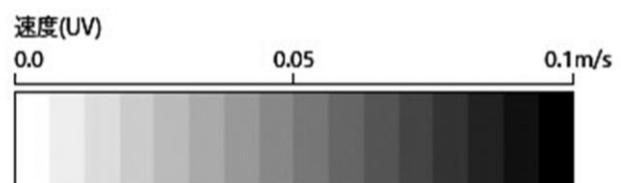


図 3-9-b 給排気量 $1100 \text{ m}^3/\text{h}$ ($X=2.85 \text{ m}$)



(c) 給排気量 $2200 \text{ m}^3/\text{h}$ の時、YZ 断面の流速ベクトル分布を図 3-9-c に示す。上から下へ $0.01\sim 0.04\text{m/s}$ 程度のダウンフローが形成されていることが見て取れる。他の断面でも同様に上から下へのダウンフローが観測され、この条件下でラミナーフローが成立していることが確認された。

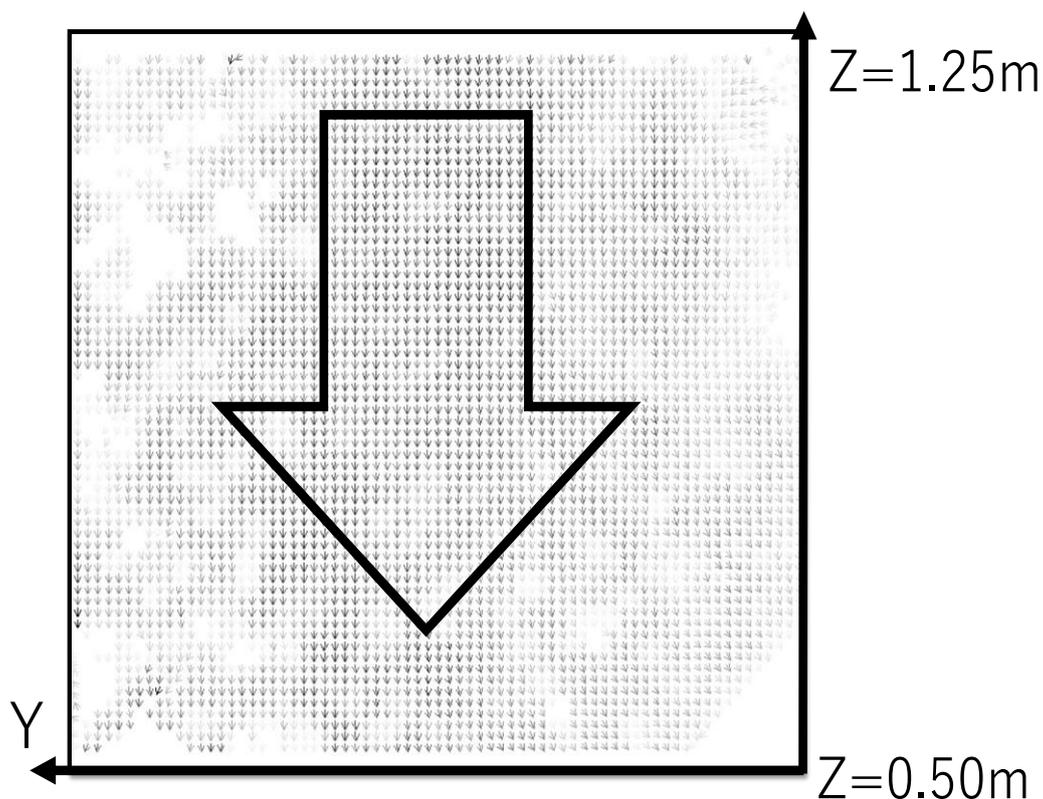
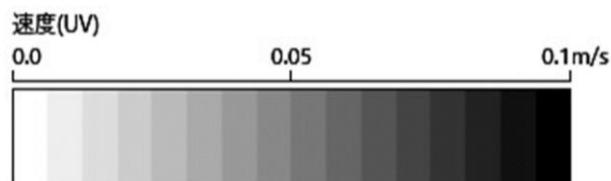


図 3-9-c 給排気量 $2200 \text{ m}^3/\text{h}$ ($X=2.85 \text{ m}$)



3.4 まとめと考察

全面給排気条件において給排気量ごとの気流性状及び速さを PIV 解析し、検討を行うことでラミナーフローが成立する条件を調べた。

給排気量 600 m³/h 条件では再現性のある気流が観測されなかった。

給排気量 1100 m³/h 条件ではダウンフローも観測されたものの、壁面温度が低かったためか壁面近辺での強い下降気流の影響の結果、一様なダウンフローは観測されなかった。

給排気量 2200 m³/h 条件では、全体的にダウンフローが観測され、ラミナーフローが成立していることが分かった。

今後の厳密な議論のためには壁面近辺の下降気流が発生しないように対処をする必要があるものの、給気量 600~2200m³/h の条件について調べることで、給排気量と気流の速さとの対応関係やラミナーフローが成立する限界の給排気量といったデータが獲得できると考えられる。

第4章 ラミナーフローに対する外乱の影響に関する検討

4.1 ラミナーフローに影響を及ぼす外乱についての考察と実験方針

1.5 で述べたように、実験室内の気流へ影響する主な要因として

- ①窓・装置による気流発生（換気扇・扉・窓・FH等の局所排気装置・エアコン）
 - ②熱源による上昇・下降気流の発生（実験装置・エアコン・人の体温・天井、床や壁面）
 - ③人やモノの存在及び移動による気流のかく乱
- が挙げられる。

以下これらを外乱と呼称する。本論文では①と③に注目し、この外乱がどのくらいの範囲に、どのくらいの時間にわたってラミナーフローに影響を及ぼすのかを調べていく。

4.2 モノの存在による気流性状への影響の検討

4.2.1 実験条件

モデル実験室中央に天板の大きさ 1.5 m×0.75 m、高さ 0.70 m で下部に空間のある机を設置し（図 4-2-1）、給排気量 2200 m³/h・全面給排気条件で PIV 解析を行い気流性状の変化を調べた。解析対象とした断面を図 4-2-2 に示す。机の上部と下部について別々に調査した。机を設置した部分についてもパンチング床面により排気されている。



図 4-2-1 机を設置した状態のモデル実験室

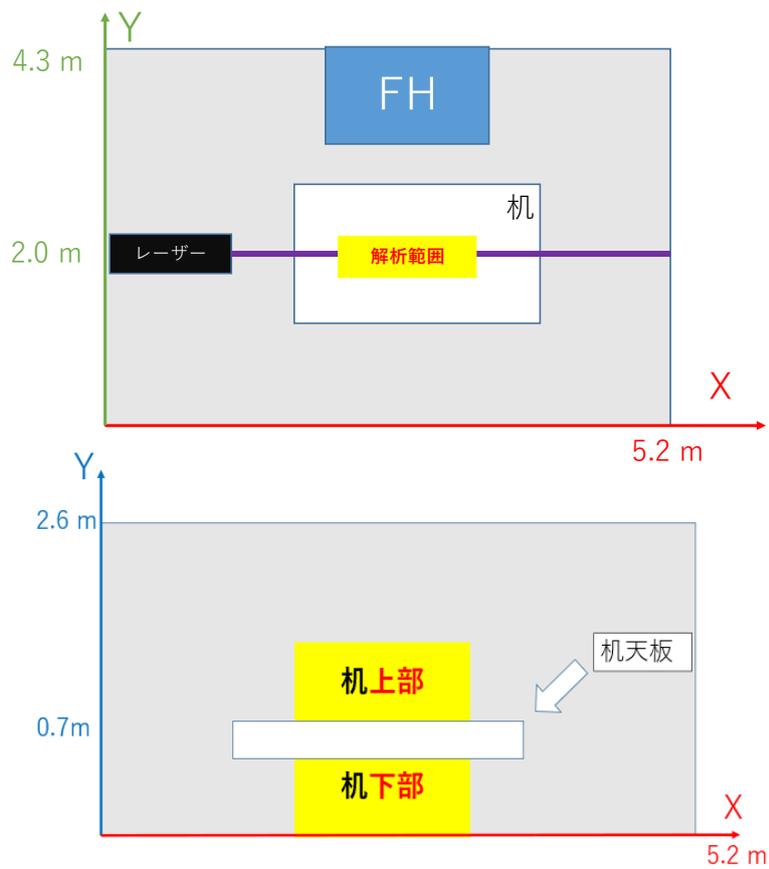


図 4-2-2 計測断面

4.2.2 結果

図 4-2-3、4-2-4 に、机上部及び下部における Y=2.00 m での PIV 解析結果 (XZ 断面の流速ベクトル分布) を示す。なお、机の横の気流は前条件下と比べ、向き、速さともに特筆すべき変化は見られず、上から下方向へのダウンフローが見られた。机上部では、天井から机天板上部 30cm あたりまではダウンフローが観測され、そこから天板に沿うように分離する気流が見られた。YZ 断面でも直接観察により同様な気流が見られた。机下部では、天板近くで渦を巻くような気流が見られ、床面近傍 10cm 程度の範囲で床へ吸い込む気流が見られた。

4.2.3 まとめと考察

ラミナフローが成立している環境に対して外乱として机を設置し、その影響を実験・検討した。

机の上部では天板に沿った跳ね返りのない気流が観測された。机の下部では一部で渦が観測された。

結果から、この条件において机天板に化学物質を置く限りでは呼吸域が天板より高い位置にある限り実験者への化学物質曝露リスクは非常に小さいことが明らかになった。

また机下部のスペースに廃液タンクなどを置いた場合、普段の呼吸域にまで化学物質が到達することはないものの、そのスペース付近に化学物質が残存している可能性が示唆され、机下部近辺でしゃがみこんでの作業は化学物質曝露リスクを増大させる場合があることがわかった。

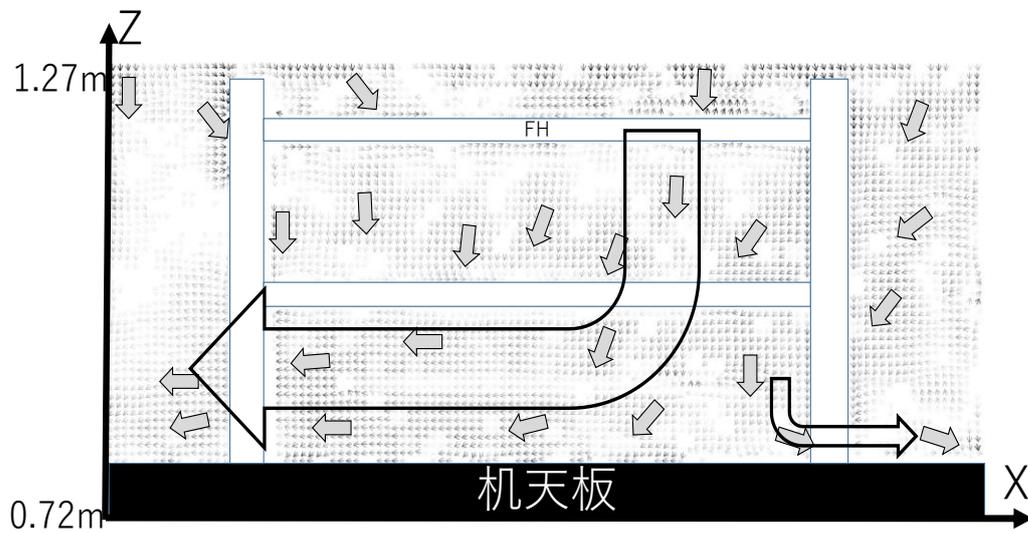


図 4-2-3 机上部の流速ベクトル分布 (Y=2.00 m)

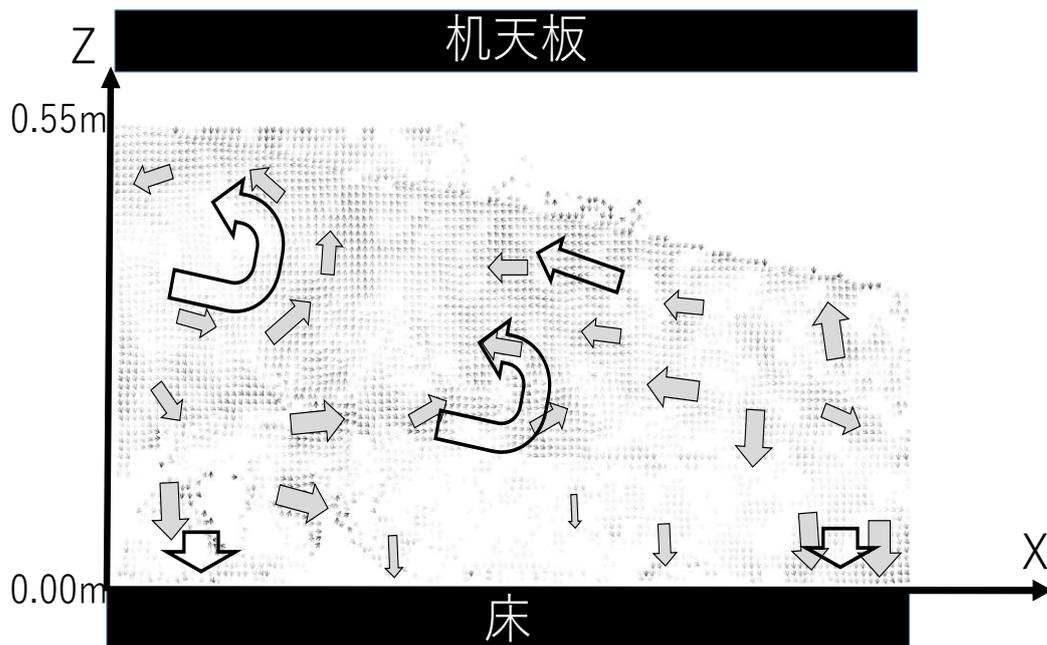
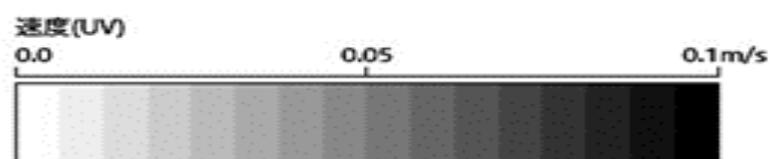


図 4-2-4 机下部の流速ベクトル分布 (Y=2.00 m)



4.3 人の歩行による乱れの範囲・持続時間に関する検討

4.3.1 実験条件

モデル実験室の地点 $(X,Y)=(1.00\text{ m},2.50\text{ m})$ から $(5.00\text{ m},2.50\text{ m})$ まで、身長1.7m程度の人が1.0 m/s程度の速さで歩き、それによる気流への影響を観察した。解析対象とした断面を図4-3-1に示す。

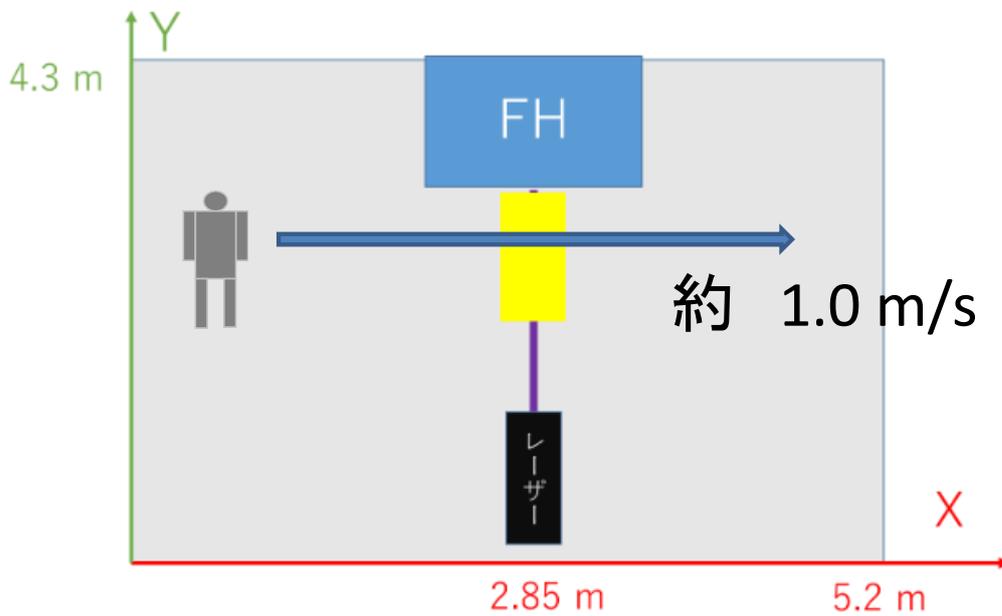


図 4-3-1 計測断面

4.3.2 結果

給排気量 $2200 \text{ m}^3/\text{h}$ 、全面給排気条件での $X=2.80 \text{ m}$ 断面の PIV 結果を図 4-3-2, 4-3-3, 4-3-4, 4-3-5 に示す。 $t=0 \text{ s}$ のとき人は移動を行っておらず (図 4-3-2) 第 3 章の時と同様にラミナーフローが観測されたことを確認した。 $t=1.5 \text{ s}$ のとき (図 4-3-3)、歩行者はレーザー断面を横切る直前の位置に存在しており、移動により空気が押された結果 Y 軸負の向き $0.05\sim 0.10 \text{ m/s}$ 程度の気流が観測された。またこの影響が及んだ Y 軸方向の範囲を見ると、今回の PIV 測定領域全てにみられ少なくとも 0.70 m 以上であることが観測された。 $t=2.5 \text{ s}$ のとき (図 4-3-4)、歩行者はレーザー断面を通過し終えており、今度は歩行者が通過した空間に空気が吸い寄せられる気流が見て取れ、特に腕が通過した付近では 0.10 m/s を超えるような気流が観測された。それから乱れた気流がしばらく観測された後、 $t=12 \text{ s}$ のとき (図 4-3-5)、おおむね元通りの気流となった。

4.3.3 まとめと考察

ラミナーフローが成立している環境に対して外乱として人を歩行させ、その影響を実験・検討した。

人の移動により少なくとも人から 0.7m 遠くの場所までラミナーフローが乱されることが明らかになった。またその影響は 10 秒程度で収まることが分かった。

これらの結果から、実験室において他の実験者が歩行する瞬間には非意図的曝露のリスクが高まることが示唆された。

さらに歩行者から遠い位置や、移動の向きに平行な断面の影響などについて実験を行うことで、人の歩行がラミナーフローに与える影響についてより精度の高い評価が期待される。

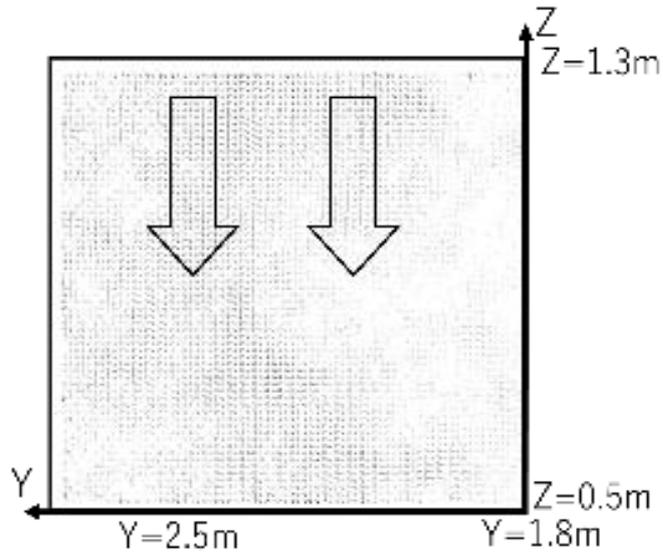


図 4-3-2 t=0 のときの流速ベクトル分布(X=2.80 m)

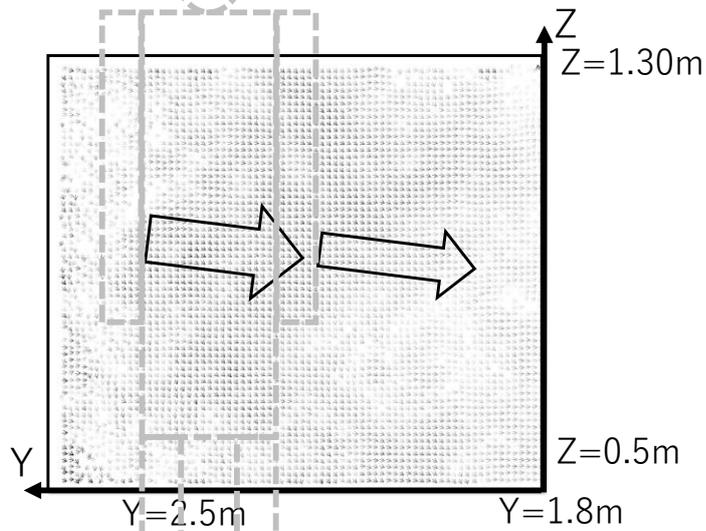
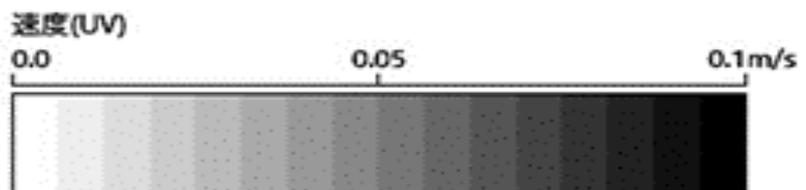


図 4-3-3 t=1.5 s のときの流速ベクトル分布(X=2.80 m)



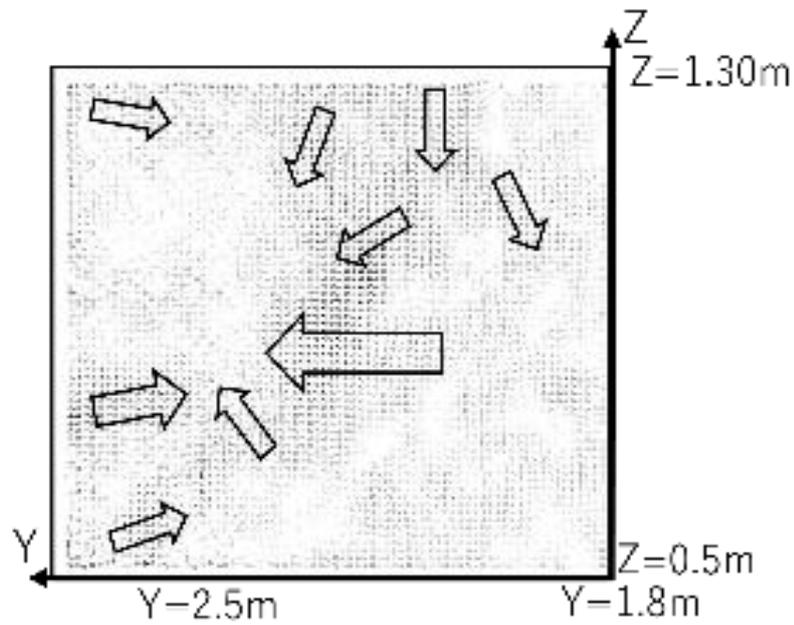


図 4-3-4 $t=2.5\text{ s}$ のときの流速ベクトル分布($X=2.80\text{ m}$)

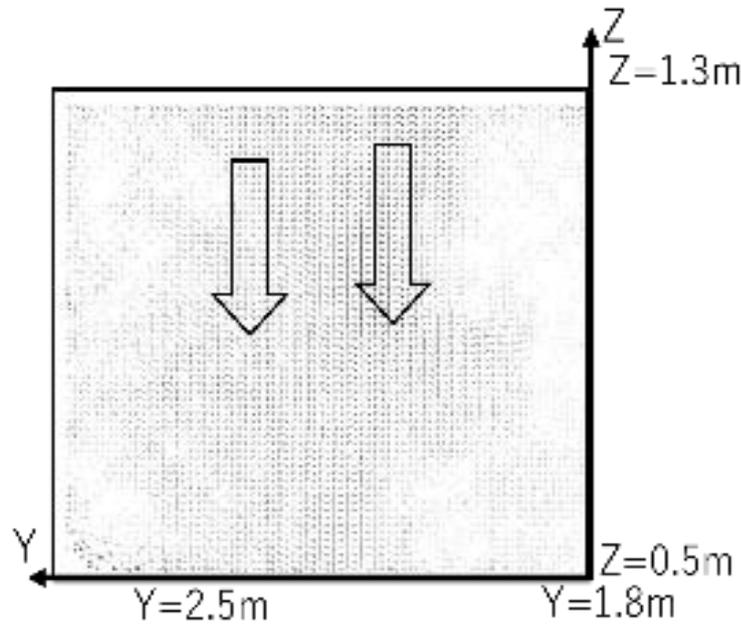


図 4-3-5 $t=12\text{ s}$ のときの流速ベクトル分布($X=2.80\text{ m}$)



4.4 FH稼働時の気流性状に関する検討

4.4.1 実験条件

モデル実験室のFHを稼働させFH排気面に垂直となるYZ断面($X=2.80\text{ m}$)で、表4-4-1のようにFH開放長さごとに実験を行った。FH開放面の底の高さは 0.47 m である。なお、このFHは(b)の条件での使用が想定されている。解析対象とした断面を図4-4-1の黒線として示す。また、(a),(b),(c)それぞれのFHの写真を図4-4-2に載せる。

表 4-4-1 実験条件

	(a)	(b)	(c)
ソックダクト給気量(m^3/h)		2200	
床面排気量(m^3/h)		1048	
FH排気量(m^3/h)		1152	
FH開放高さ(m)	0.07	0.4	0.67



(a)0.07 m



(b)0.40 m



(c)0.67 m

図 4-4-2 実験条件ごとの FH の状態

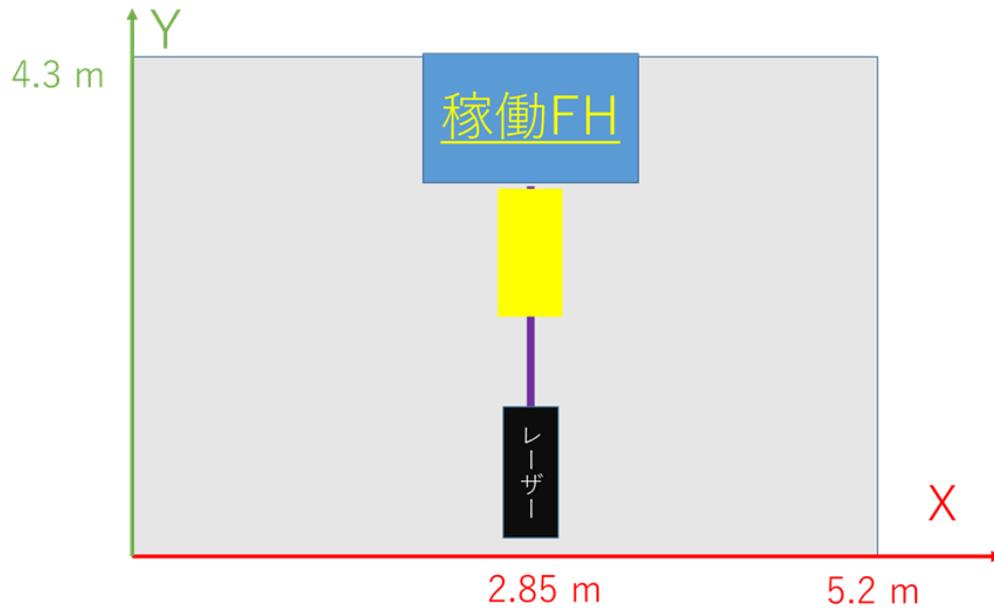


図 4-4-1 計測断面

4.4.2 結果

結果を図 4-4-3,4-4-4,4-4-5 に示す。(a)の条件では、FH 近くでダウンフローの速さが増加しているものの高さ 0.5 m 以上の範囲では横方向成分を持つ気流は見られなかった。(b)の条件では FH 開放面近辺では FH に吸い寄せられているものの、おおむね上から下向きへのダウンフローが保たれていた。(c)の条件では FH 開放面上部での吸引の結果高さ 0.5~1.0 m 付近で上向きの気流が生じていることが確認された。

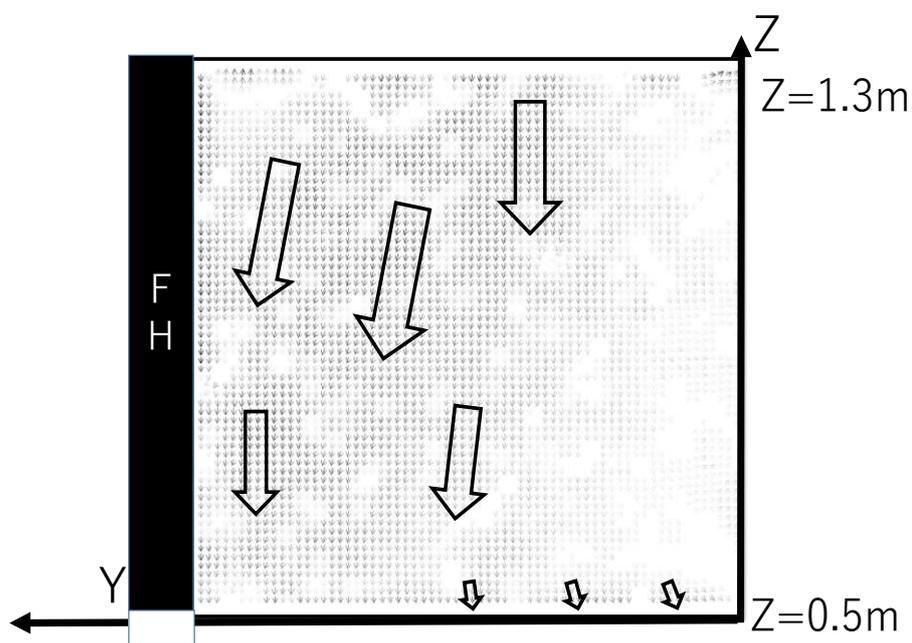


図 4-4-3 (a)の条件における FH 稼働時の流速ベクトル分布(X=2.80 m)

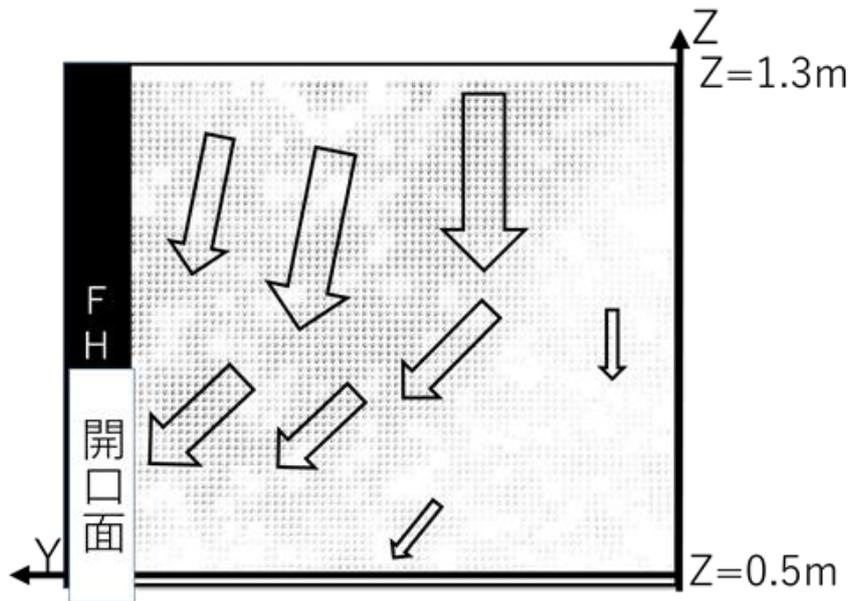


図 4-4-4 (b)の条件における FH 稼働時の流速ベクトル分布(X=2.80 m)

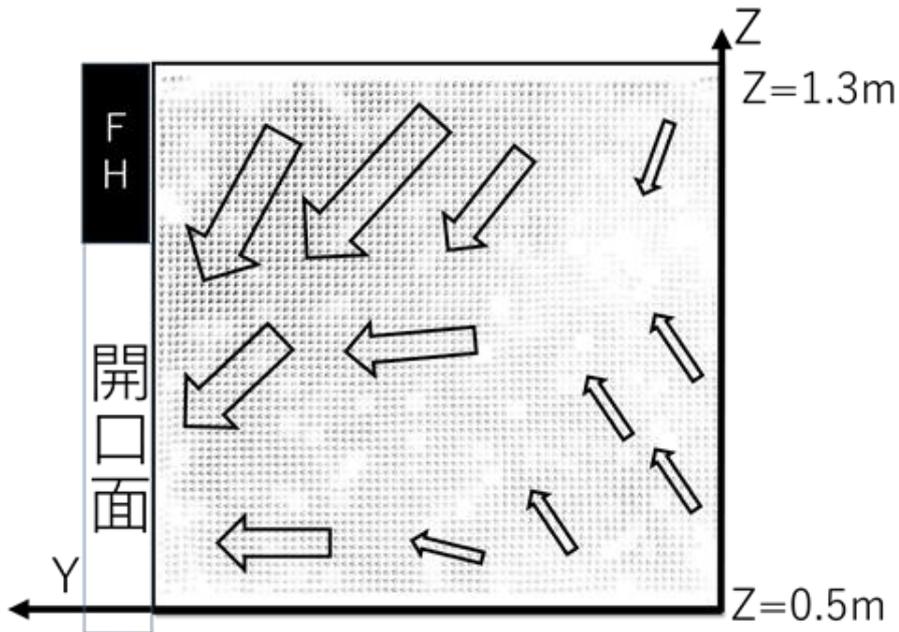
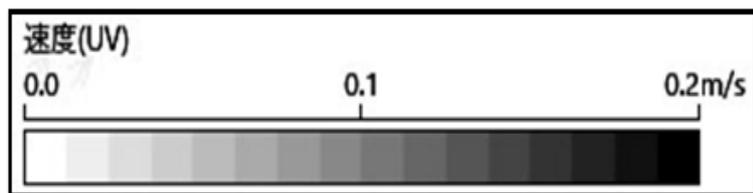


図 4-4-5 (c)の条件における FH 稼働時の流速ベクトル分布(X=2.80 m)



4.4.3 まとめと考察

ラミナーフローが成立している環境に対して外乱としてFHを稼働させ、開口面の広さごとの影響を実験・検討した。

FHを締め切った時は呼吸域のラミナーフローへの影響はほとんどなく、長さ0.4m開放するとFHへ吸い寄せられる気流がかなり見られた。また、FHを全開にすると呼吸域の高さにおいても床から天井方向へのベクトルが見られた。

これらの結果から、開口部の面積が小さい(a)(b)の条件においては意図しない曝露リスクは小さいが、全面開放のような開口部面積が大きい(c)のような条件においては、横向きや上向きの気流が生じるため、例えば床に置いた廃液タンクから発生する化学物質への曝露リスクが生じ、危険であることが明らかになった。

第 5 章 結言

実験室における非意図的曝露の低減を目的とし、ラミナーフロー給排気システムの成立条件並びにそのロバスト性について検討した。結果から以下のことが明らかになった。

- (1) 給排気量 $2200 \text{ m}^3/\text{h}$ の条件では一様なラミナーフローが観測された
- (2) モノの存在によりラミナーフロー給排気システム内でも渦が生じうる
- (3) 人の歩行によるラミナーフローへの影響は少なくとも 0.7 m 以上に及び、 10s 程度で収まる
- (4) FH が全開に近いと、非意図的曝露リスクの高い気流が生じうる

本研究では実物大実験室モデルを使用したため、無次元数の都合上縮小モデルでは厳密な再現が難しい Re 一致条件下でのモノの移動の影響について実際の実験室環境に近い結果を得ることができたと考えられる。今後の展望として、同じく縮小モデルでは再現が難しい Re 一致条件下での温度差による影響について有力な知見獲得が期待される。

参考文献

- [1] 藤吉俊尚ら, “印刷業に従事し塩素系有機溶剤に曝露の既往がある労災認定された胆管癌の 1 例,” 日本消火器病学会雑誌 第 111 巻 12 号 p2346-2354, 2014.
- [2] 野村直史, “大学における化学物質の管理状況の把握と実験室環境のリスク評価手法に関する研究,” 京都大学博士論文, 2007.
- [3] 中村 修ら, “東北大学における化学物質の作業環境測定結果に,” 2010 年 1 巻 2 号 41-49, 2010.
- [4] 根津友紀子, “実験研究現場における化学物質のリスク低減を目指した作業者の危険性意識及び実験作業行動の解析,” 東京大学博士論文, 2015.
- [5] 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 2015 年, Vol6 No.3 p.165-168, 2015.
- [6] R.Hayashi, “Analysis and Application of Chemical Stock and Release Data for Accident Prevention in University,” Asia Pacific Symposium on Safety 2011, Jeju (Korea), 2011.
- [7] 富士フィルム和光純薬株式会社, 富士フィルム和光純薬株式会社, 2020 (改定日) .
- [8] 竹内康浩ら, “n-ヘキサンの毒性と量・反応関係,” 産業医学 22 巻, Jap. j.Ind.Health, Vol22, p470-487, 1980.
- [9] 厚生労働省, “発がんのおそれのある有機溶剤の今後の対応,” 化学物質のリスク評価討論会, 2013.
- [10] 上. 晋, “化学物質 (金属・有機溶剤) の毒性学と産業医としての対応,” 産業医科大学雑誌 第 35 巻 特集号 『産業医と労働安全衛生法四十年』: 91-96, 2013.
- [11] 山口佳宏ら, “大学の薬品管理における薬品管理システムの有用性,” 環境と安全, 2011 年 2 巻 1 号 p. 51-59, 2011.
- [12] 山口佳宏, “熊本大学薬品管理支援システム YAKUMO の運用状況について,” 熊本大学環境安全センターニュース, Vol.2, 4-5, 2008.
- [13] 萩野博幸ら, “座談会 大学におけるこれからの作業環境測定と日測協の役割,” 作業環境, 31(3)、4-22, 2010.
- [14] 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.
- [15] 中村修ら, “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.

- [16] 厚生労働省, “建築物環境衛生管理基準について,” [オンライン]. Available: <https://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/seikatsu-eisei10/>. [アクセス日: 20 1 2021].
- [17] TSCP 産学連携研究会, ドラフトチャンバー施設における省エネ方策検討 WG, “化学系実験施設におけるドラフトチャンバー導入ガイドライン,” 3 2016. [オンライン]. Available: http://www.tscp.u-tokyo.ac.jp/documents/TSCPguidelines_about_draft_chamber_000.pdf. [アクセス日: 1 2021].
- [18] 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.
- [19] 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,” 東京大学修士論文, 2015.
- [20] 黄孝根ら, “機器単体からの対流・放射放熱に関するシミュレーション解析,” 生産研究, 66 巻 1 号, 47-51, 2014.
- [21] Houghten ら, “Indices of Air Distribution,” ASHVE Transaction No.959, pp261-276, 1933.
- [22] 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関する人の影響の解析,” 東京大学修士論文, 2019.
- [23] アブリティブ アブライティ, 移動物体手法による喫煙室の煙濃度移流拡散解析 その 1 スライド式ドア・ヒンジ式ドアの喫煙室シミュレーション, 空気調和・衛生工学会, 2019.
- [24] 松平晏明, スイング式ドア開閉によるクリーンルーム内の空気流動, 2004.
- [25] 経済産業省, クリーンルームの設計及びスタートアップ, JIS, B9919, 2004.
- [26] 中野翔太, “化学実験室におけるラミナー給排気システムに関する検討,” 東京大学修士論文, 2020.
- [27] 横川豊和, “微粉碎, 分級, 粒子複合化を中心とした粒子設計加工による薬物の高機能化,” 薬剤学, 68 (3), 209-216, 2008.
- [28] 株式会社 加藤萬製作所, [オンライン]. Available: <http://www.katoman.co.jp/kaiboudai/ramina-huro-yunitto.php>. [アクセス日: 1 2021].
- [29] 可視化情報学会, PIV ハンドブック, 2002.
- [30] 流れの可視化学会編, 新版流れの可視化ハンドブック, 1986.

Appendix

予備実験としての 1/10 スケールモデル実験室におけるラミナー性の検討結果について

(A) 実験方法・内容

本論文の実験以前に予備実験として 1/10 スケールのモデル実験室を対象に検討を行った。その結果を記載する。対象としたモデル実験室を図 App-1 に載せる。モデルは本論文で対象にしたものと同じであり、壁面は厚さ 3mm のアクリル板を、床面・天井面には直径 3.5mm の穴が等間隔に空いた塩ビパンチング板を使用し作成した。大きさは X:0.52m Y:0.48m Z:0.30m である。床面からファンによる排気を行い、天井からは自然給気として給気量と排気量が同一になるようにした。表 App-1 に実験条件を載せる。なお本模型における流量 $0.02 \text{ m}^3/\text{s}$ は Re 数一致条件で実物大における換気回数 12 回/時の条件を想定した。

表 App-1 実験条件

実験	流量(m^3/s)	レーザー断面	給気面積	排気面積
①	0	XZ平面	全面	全面
②	0.005	YZ平面	全面	全面
③	0.02	XZ平面	全面	全面
④	0.02	XZ平面	10%	全面
⑤	0.02	XZ平面	40%	全面
⑥	0.02	XZ平面	全面	50%
⑦※	0.02	YZ平面	全面	全面

※ 机の模型設置

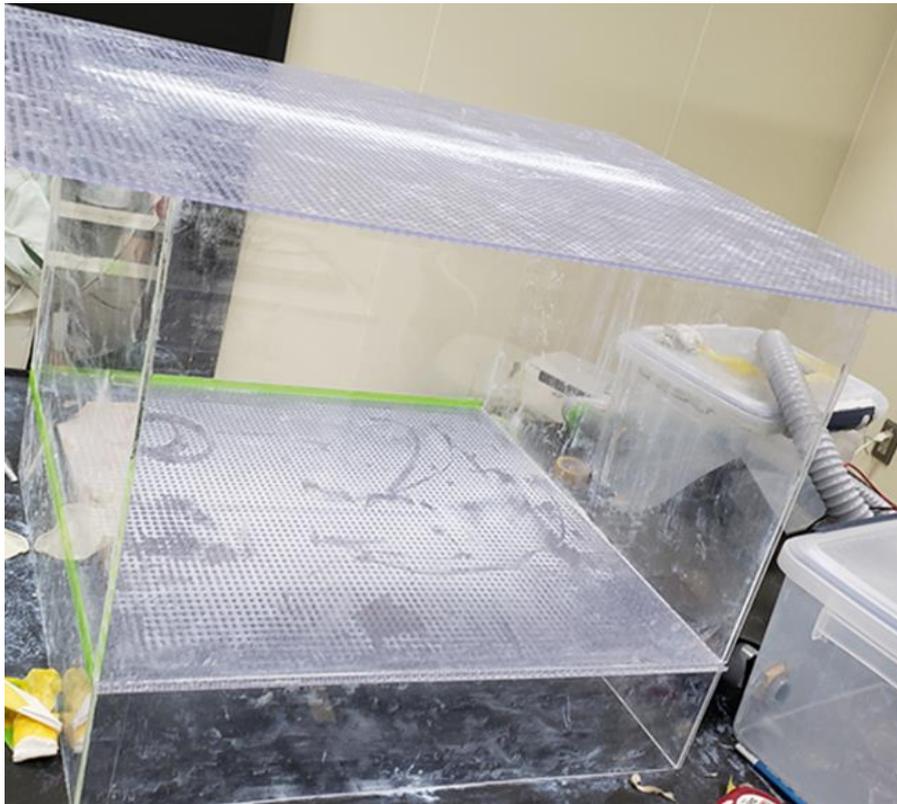
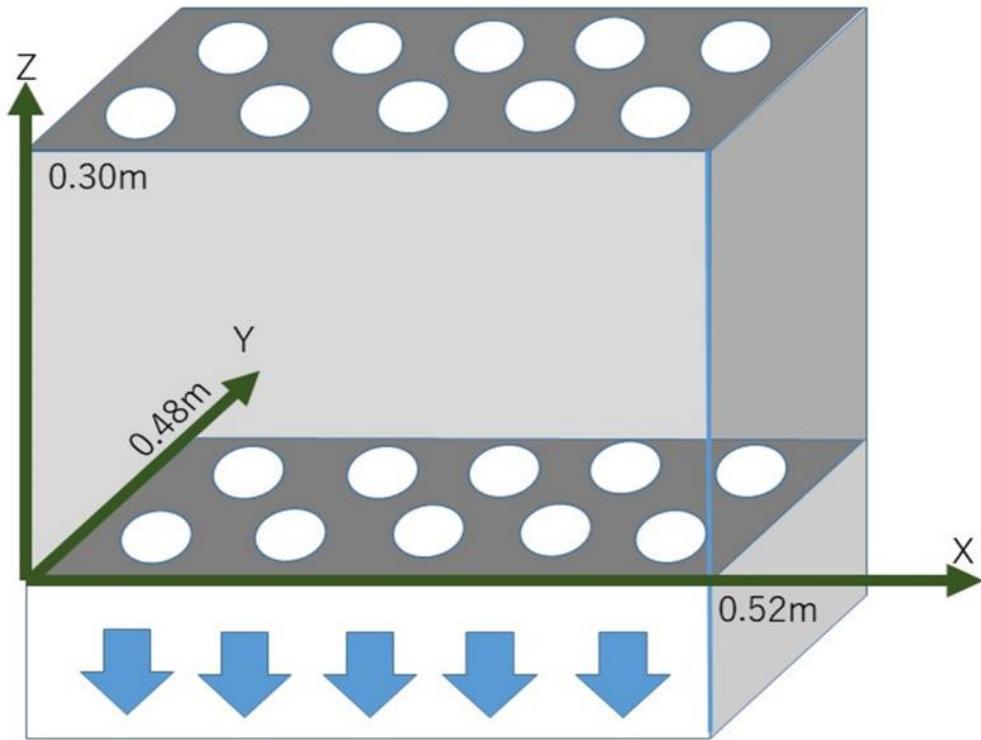


図 App-1 1/10 スケールモデル実験室

(B) 1/10 スケール実験室模型におけるトレーサー粒子の自重の影響に関する考察

この実験ではトレーサー粒子に RY300（比表面積 $191 \text{ m}^2/\text{g}$ 、一次粒子径 7 nm 、表面処理：トリメチルシリル処理、主組成： SiO_2 ）を使用した。トレーサー粒子の自重による自由落下が確認されたため、その影響について検討した。

①流量 $0 \text{ m}^3/\text{s}$ （給排気なし）の時の PIV 解析結果は、おおむね下方向へのベクトルが観測され、その速さは 0.01 m/s 程度であった。これはトレーサー粒子が自重により落下しているため、下方向へのベクトルが広く現れたと考えられる。

②流量 $0.005 \text{ m}^3/\text{s}$ の時は、一様な下向きベクトルが観測されたもののその速さは $0.02\sim 0.05 \text{ m/s}$ 程度であり粒子自重の影響が不明瞭なため、この条件でラミナーフローが成立しているとは言い切れない。

③流量 $0.02 \text{ m}^3/\text{s}$ 条件（図 App-2）では一様な下向きベクトルが観測され、その速さは 0.10 m/s 程度であった。給排気無し条件の時より明らかに速いため自重による影響は無視でき、ラミナーフローが成立していると考えられる。

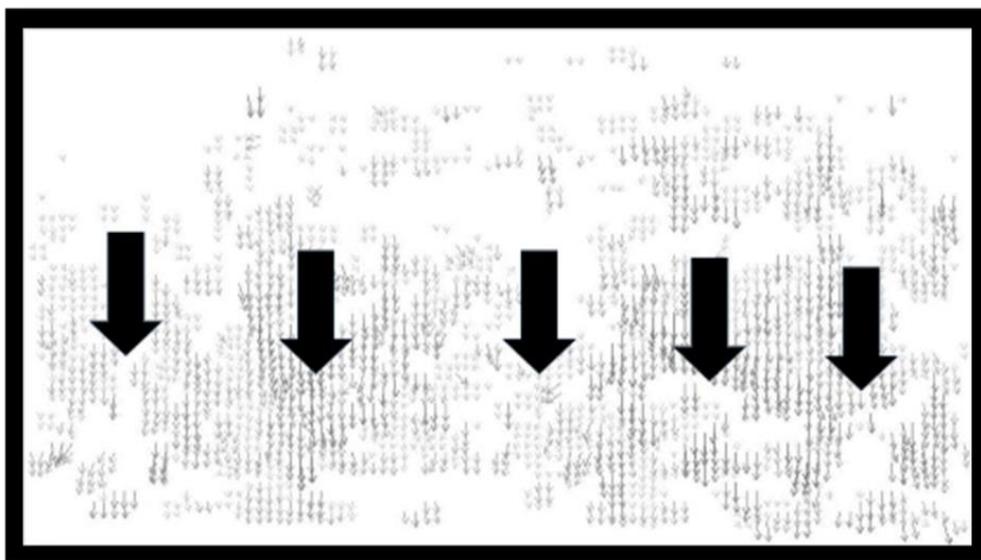


図 App-2 流量 $0.02 \text{ m}^3/\text{s}$ 全面給排気条件

(C) 1/10 スケール実験室模型における一部給気・全面排気条件での PIV 測定結果

天井のパンチング板を厚紙で塞ぎ給気面積を狭めた条件での気流を検討した。

④給気面積 10%・全面排気条件（図 App-3）では開放面から強烈な下降気流が起き、それに引きずられるように模型全体に壁面に沿った渦が 2 つ形成された。

⑤一方給気面積 40%・全面排気条件（図 App-4）では開放面から比較的緩やかな気流が生じ、模型上部でおおむね扇型に拡散し、その後下降していく気流がみられた。この結果からラミナーフロー成立の要素として、換気扇のような送風範囲が狭いものではなくソックダクトのような広いものを使用する必要があると示唆される。

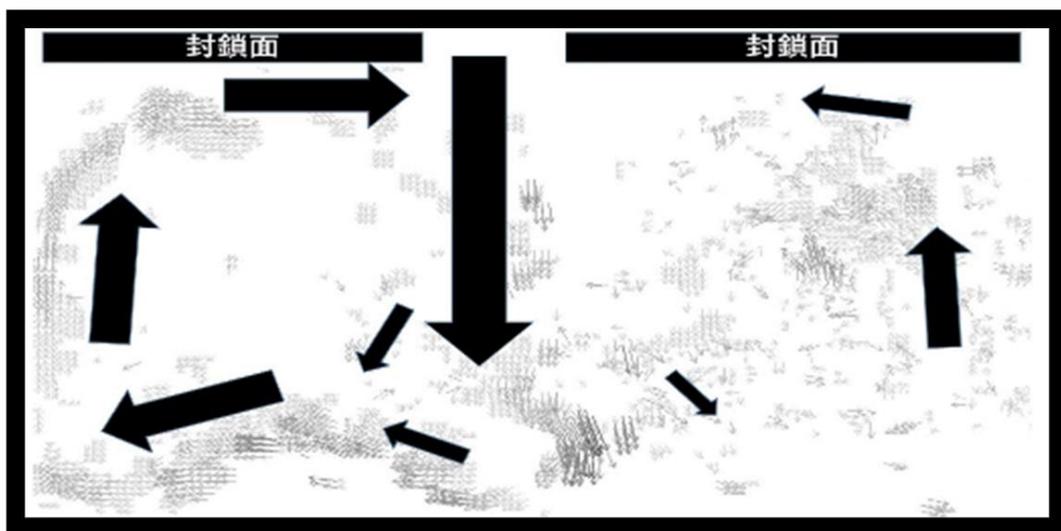


図 App-3 流量 $0.02 \text{ m}^3/\text{s}$ 給気面積 10% 全面排気

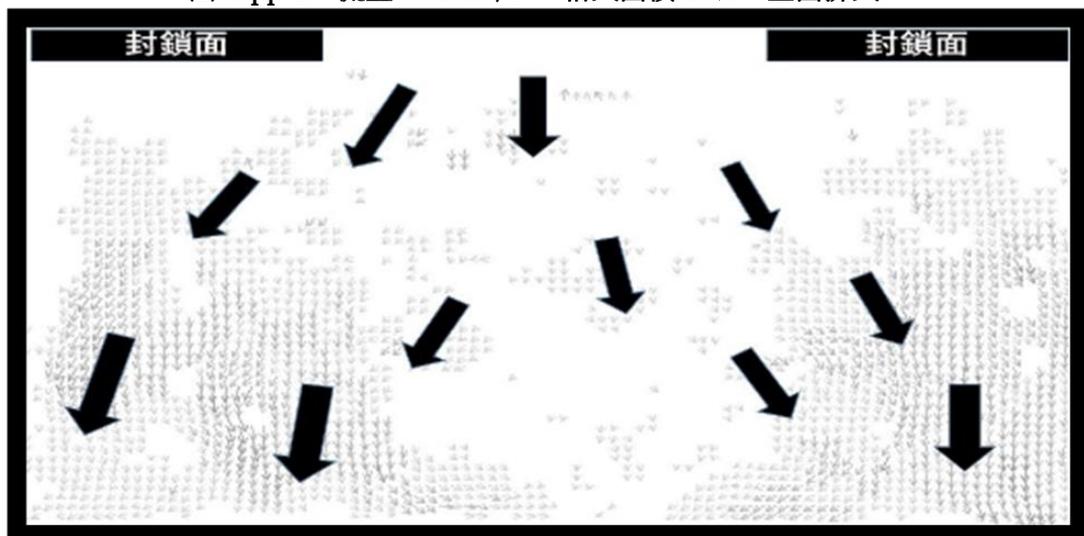


図 App-4 流量 $0.02 \text{ m}^3/\text{s}$ 給気面積 40% 全面排気

(D) 1/10 スケール実験室模型における全面給気・半面排気条件での PIV 測定結果

床のパンチング板を厚紙で塞ぎ排気面積を狭めた条件での気流を検討した。

⑥全面給気・半面排気条件（図 App-5）では床面近傍において、封鎖面から開放面方向への気流が見られたが、その範囲は境界近傍のみであった。また場所による明確な風速の違いも見られなかった。（C）の結果と比較すると、床面排気面積の縮小は天井給気面積の縮小と比べラミナー性への影響は少ない可能性が示唆される。

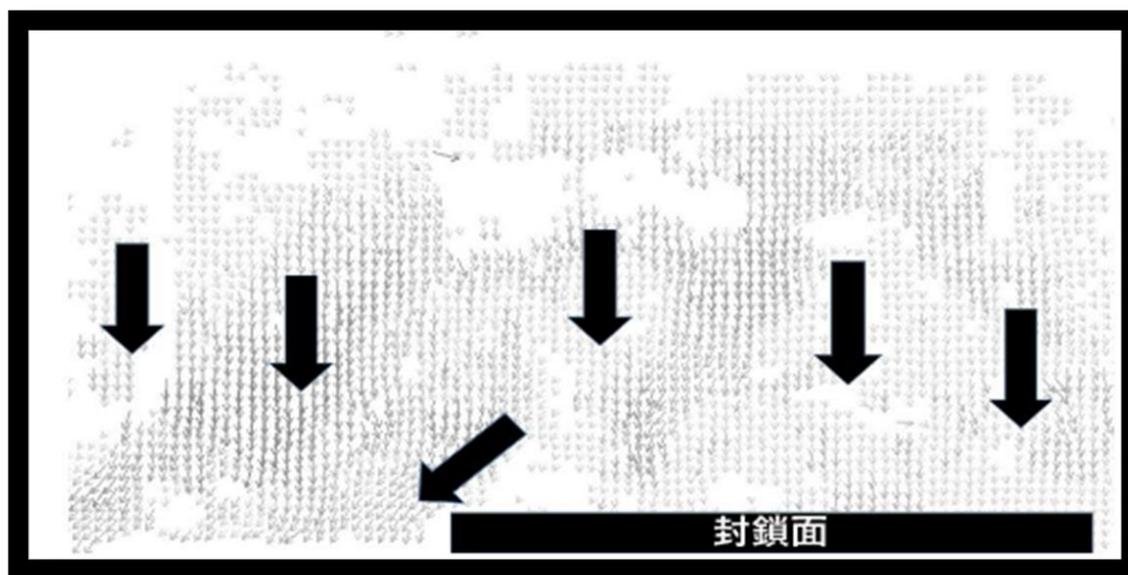


図 App-5 流量 $0.02 \text{ m}^3/\text{s}$ 全面給気 排気面積 50%

(E) 1/10 スケール実験室模型における全面給排気・モノの存在条件での PIV 測定結果

全面給排気条件においてモノの存在がラミナー性に及ぼす影響を検討した。

⑦全面給排気かつ実験機模型を配置した条件（図 App-6）では、机の遠方ではラミナーフローが成立していた。机上部での気流ベクトルを考察するとその速度は遠方より明らかに遅く、(B)で検討したようにここで観測された下向き方向への速さが気流によるものか自重によるものかの峻別ができないものの、机上部においては遠方のようなラミナー性は担保できない可能性が示唆された。

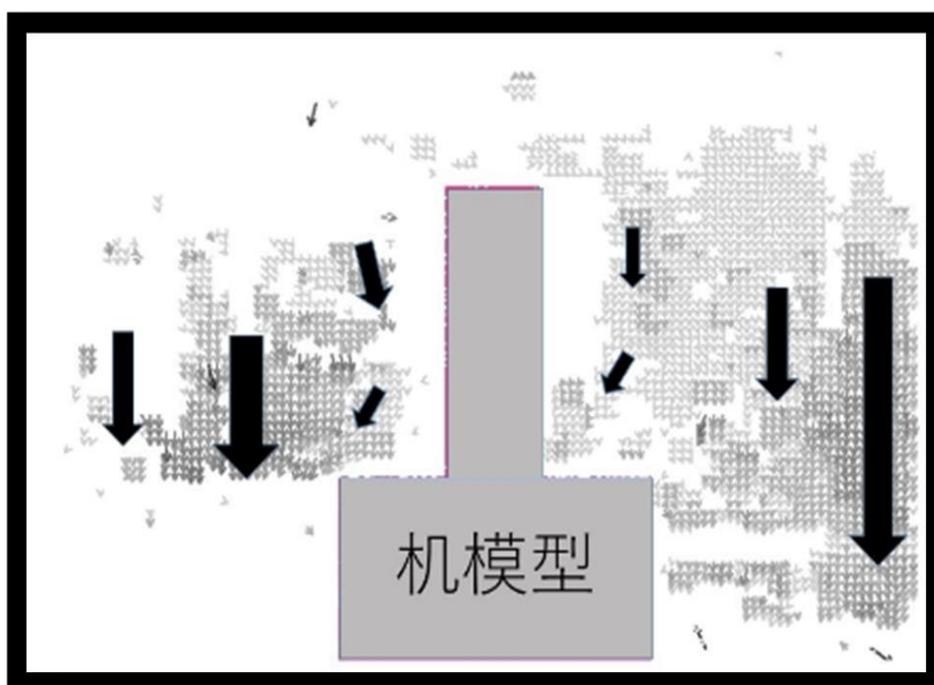


図 App-6 流量 $0.02 \text{ m}^3/\text{s}$ 全面給排気 机の模型設置

謝辞

本論文は、東京大学新領域創成科学研究科環境システム学専攻修士論文として、大島研で行った研究をまとめたものです。様々な方々からのご支援、ご協力がなければ本論文はおそらくこうして形にはなっていなかったことでしょう。書き上げることができたことに心から謝意を述べさせていただきたく思います。

指導教官の大島義人教授には研究の奥深さを教わりました。日ごろのゼミ・サブゼミやディスカッションの場で数え切れぬほどのご助言をいただき、進むべき方向を常に示してくださいました。また締め切り直前になっても進捗がなく提出書類も揃わない未熟な私に対しても、親身になってのご指導・ご支援をいただいております、言葉に尽くせないほどの感謝に堪えません。秋月信講師にはゼミの場での本質を突く鋭いご助言はもちろん、研究生活の面でも日程調整や機材の管理・差配などでお世話になりました。大変感謝しております。副査の田部田先生には流れの専門家の目線から、たとえ報告できる進捗があまりない段階であってもこれからの方針や気を付けるべき点において的確なご助言を多数いただきました。深く感謝いたします。特任研究員の根津さんにはゼミやディスカッションの場だけではなく、ちょっとしたデータの解釈・方向性の確認、さらには実験の技術的な指導・課題解決・機材調達などありとあらゆる時・場面でご助言とご支援をいただきました。本当にお世話になりました。環境安全系の主原愛さん、吉本一貴くん、徐芹さん、周睿くん、張宛瑩さん、大田礼哉くん、そしてご卒業された山口里奈さん、寥智総さん、斎藤陵賢さん、中野翔太にも様々なサポート、アドバイスをいただきました。ありがとうございました。

研究室外の方々にも大変お世話になりました。大阪大学の山本仁教授には折に触れて技術的・方針的なご助言をいただきました。また共同研究先企業である大林組さんには、そもそもの研究テーマ源流の提案並びに専門家の目線から本研究への技術的なアドバイスをいただきました。お世話になりました。

本研究室での学生生活においても、先輩、同輩、後輩の方々にご支援いただきました。途中で大きな時世の変化もありましたが、学部時代も含めた3年間は日々の生活も充実したものでした。特にまさに今、一月現在の締め切りに追われている期間は人生で最も密度の濃い時間だと感じています。お世話になりました。

最後になりますが、遠くから私を支えてくれた家族への感謝を示し、謝辞をしめくらせていただきます。ありがとうございました。

飯塚啓太郎