

東京大学新領域創成科学研究科
環境システム学専攻

平成 27 年度
修士論文

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

2016 年 2 月 24 日提出

指導教員 大島 義人 教授

鍋島 優輝

目次

第1章 緒言	1
1.1 大学実験室内の特徴	1
1.2 化学物質の取り扱いを取り巻く情勢	2
1.3 リスクアセスメント	3
1.4 作業環境測定	4
1.5 化学物質の持つリスク	5
1.6 室内気流解析による、室内環境改善の先行研究	6
1.7 研究目的	7
第2章 検討手法	9
2.1 モデルとした実寸実験室 (Full スケールモデル実験室)	9
2.2 CFD (計算流体力学 ; Computational Fluid Dynamics)	11
2.2.1 CFD の原理	11
2.2.2 CFD 計算概要	12
2.2.3 CFD シミュレーション対象とした Full モデル実験室	13
2.2.3 (a) 実験室設計	13
2.2.3 (b) 拡散物質物性等設定	13
2.2.3 (c) 物理量変化モニタリング領域設定	13
2.2.4 CFD 計算上の気流の安定性についての検討	20
2.2.5 CFD 計算における拡散物質の気流追従性	23
2.2.5 (a) 検討条件	23
2.2.5 (b) 拡散物質の高さ方向への拡散に関する検討	24
2.2.5 (c) 拡散物質密度が物質拡散状態に与える影響の検討	25
2.2.6 CFD 計算結果に用いる単位について	32
2.3 気流の可視化	33
2.4 PIV (Particle Image Velocimetry)	35
2.4.1 PIV の原理	35
2.4.2 PIV 解析設定	36
2.5 換気に関する指標	38

2.5.1 換気回数（換気量）	38
2.5.2 換気効率指標（Scale of Ventilation Efficiency ; SVE）	39

第3章 CFDによる実験室レイアウトが

室内空気環境に与える影響の検討 42

3.1 換気装置周辺の気流の観察	42
3.1.1 給気口・排気口における気流分布	42
3.1.2 ヒュームフード給気の給気設計	46
3.2 換気装置の稼働状況が室内気流に与える影響の検討	49
3.2.1 ヒュームフードのみ稼働時の室内気流	50
3.2.2 室内換気のみ稼働時の室内気流	51
3.2.3 ヒュームフード、室内換気ともに稼働時の室内気流	51
3.2.4 室内換気設備稼働についての考察	54
3.3 換気装置の位置が室内気流に与える影響の検討	55
3.3.1 ヒュームフードの位置が室内気流に与える影響の検討	55
3.3.1 (a) ヒュームフードのみ稼働時の空気環境評価	55
3.3.1 (b) ヒュームフード、室内換気ともに稼働時の空気環境評価	56
3.3.2 ヒュームフード給気の位置が室内気流に与える影響の検討	62
3.3.2 (a) ヒュームフードのみ稼働時の空気環境評価	62
3.3.2 (b) ヒュームフード、室内換気ともに稼働時の空気環境評価	65
3.4 レイアウトによる室内空気環境改善についての検討	68

第4章 CFDによる実験室の作業環境の特徴が

空気環境に与える影響の検討 70

4.1 実験作業に起因する環境変化が、室内環境に与える影響の検討	70
4.1.1 ヒュームフードのサッシ開閉	70
4.1.1 (a) 検討条件	71
4.1.1 (b) 部屋全体の空気環境に与える影響についての考察	72
4.1.1 (c) 局所領域の空気環境に与える影響についての考察	74
4.1.1 (d) サッシ開閉が、空気環境に与える影響についてのまとめ	81
4.1.2 実験室出入り扉の開閉	82
4.1.2 (a) 検討条件	82
4.1.2 (b) 扉の開閉に伴う空気環境の変化	83

第1章 緒言

1.1 大学実験室内の特徴

化学系をはじめとする大学の実験室では多種多様な化学物質を様々な用途で用いており、それらの室内空気中への拡散により実験室内の実験者は化学物質のばく露を日常的に受けている。大学の実験室は大量ばく露による中毒症状はもちろん、揮発性有機化合物(VOC)のように低濃度ばく露であっても体内に蓄積し長期的に見た人体への健康被害^[1]も起こりうる場である。しかし、大学の実験室においては長期的な健康状態の追跡データも少なく、化学物質のばく露に関するリスク評価は未だに十分でないことが指摘されている^[2,3,4]。また実験中の作業者が自身では使用していない有機溶剤にばく露しているという報告^[4]もあり、実験室に定常的に置かれている廃液タンク、サンプルなどの薬品類や洗瓶などを使った簡単な洗浄作業といったことに由来する物質拡散により、ばく露リスクはもちろんのこと、爆発・引火リスクもあると考えられる。このようなことから実験室内の定常濃度や拡散の状況を把握することが重要といえる。

大学の実験室における作業(実験)の目的は、真理の探究にあると言える。もちろん外部からの要請に応える形で研究が進められるにしても、そこに研究者の自主性や創造性が発揮されているはずである。それが意味するところは、実験室においては一定の作業を繰り返して行われるということは少なく、各実験者の目的に沿って日々実験内容が変化するということである。一方で、産業界の生産活動現場における作業の目的は、顧客のニーズに応えることにあり、作業をプロセス化し効率的に運用していくことが重要視される。

大学の実験室では、さまざまな目的で多様な化学物質が用いられている。一部の大学が公表している環境報告書^[5,6,7]によると、ノルマルヘキサン、ジクロロメタン、クロロホルムなどの有機溶剤が大学では多量使用されていることがわかる。これらは、反応溶媒、抽出溶媒、カラムクロマトグラフィなど、各物質によって傾向はあるものの、幅広い用途で用いられている^[7]。有機溶剤は常温では液体だが、一般に揮発性が高いため、蒸気として作業者に経口吸収されやすい。また脂溶性なので皮膚からも吸収されるという特徴を持っている^[8]。揮発性の高い化学物質は、使用時や廃棄時に室内空気中に揮発して拡散している。これらはたとえ低濃度暴露であっても体内に蓄積され、人体に悪影響を及ぼすことがわかっている。化学物質の拡散によるリスクを管理し、作業安全衛生作業環境の実現が求められている。

研究対象としている大学の実験室は、単一的でなく複雑な気流を形成する作業場であるという特徴を持つと考えられる。その理由はまず、実験室では多数の作業者が同時に、各自の実験プランに従って恣意的に作業を行っているという点にある。またもう一点は、気流に影響を与えると予想される実験装置や局所排気装置（ヒュームフード）が、各自の実験の目的に沿って恣意的に設置されているという点にある。このように、さまざまな要因が混在して気流が形成されると考えられ、大学実験室は工場やデータセンターのような一定の作業を想定して全体の換気環境も含めて設計されている作業場とは異なっている。拡散方程式が示すように、化学物質の拡散係数に比べ気流の速度が大きい場では化学物質は気流の様子（流れ場）に依存して拡散していくと考えられ、実験室における気流の解析が化学物質の拡散を理解するために重要である。

大学のような教育研究機関における実験室では多種の化学物質が使用されているが、1回での使用量・時間がわずかであることが多く、研究目的によって柔軟に作業内容が変更されるため、従来の作業環境測定での評価の限界について示唆されてきた⁹⁾。実際に、作業場内に管理濃度基準を超える気中濃度となっている領域の存在や、特に揮発性の強い物質では間欠的な暴露が問題となっている可能性が指摘されている。

毎年大学では化学物質の暴露が原因と考えられる事故についての報告はされるが、一般の実験室での使用化学物質の実験室内濃度の高低と関連付けた報告はほとんどない。

1.2 化学物質によるリスク

化学物質は一定量の接種やばく露によって人体への有害性や危険性が表れる。例えば日常生活の中でも多く使われており、大学実験室においても頻繁に多様な用途で用いられる化学物質に有機溶剤がある。

有機溶剤とは、油やロウ、樹脂、ゴム、塗料など水に溶けないものを溶かす有機化合物を指す。一般に、室温で揮発しやすい物質が多く、その蒸気は比重が大きいことが知られている。大学の実験室では、反応溶媒、抽出溶媒など多様な用途で一般的に用いられており、必要不可欠な物質である。

有機溶剤は脂溶性が高い物が多く、低濃度のばく露であっても体内に蓄積し人体に悪影響を及ぼすと言われている。例えば、東京大学で最も取り扱われた化学物質（2014年度）であるノルマルヘキサン（作業環境測定管理濃度：40 ppm^[11]）は、強い神経毒をもつことが知られており、多量のばく露による急性中毒のみではなく、かなり低い濃度のばく露でも振動覚や下肢の神経伝導速度に有意な低下を与えることが推定されている^[12]。

有機溶剤には低濃度でのばく露によっても発がん性などの有害性があることが有意に示されている物質もあるが、実際には暴露濃度測定や溶剤使用記載の不十分さから、その詳細が明らかにされているとは言えない。ましてや、大学の実験室を対象として、大学での有機溶剤の使用が与える影響が検討された例はなく、そのリスクは未知である。

1.3 化学物質の取り扱いを取り巻く情勢

環境問題や人体の健康問題に社会的関心が高まっている現代社会において、化学物質の扱いは重要なテーマの1つとして扱われてきた。化学物質はわれわれの生活に欠かせない物である反面、取り扱いを誤れば甚大な事故につながる存在である。化学物質の適正に管理することによって環境と調和した社会を形成していくことが、これからの社会にとっても求められている。

国際的には、1992年のリオデジャネイロでの国際会議で採択された「アジェンダ 21：持続可能な発展のための行動計画」で「有害化学物質の環境上適切な管理」が盛り込まれ、持続可能な社会を実現するために、化学物質の管理が必要であることが認識されるに至った。その行動をさらに強化するために、2002年首脳会議では「2020年までに化学物質の製造・使用に伴う人及び環境への著しい悪影響を最小化する」という目標が立てられた。この潮流の中で各国、地域で化学物質の使用や排出の出入りを厳格に規制する取り決めがなされてきた。

日本では、大正～昭和の時代に化学物質を原因とする大きな公害が全国で発生した。高度経済成長のさなか、化学物質による汚染が環境や人の生活が脅かすという事実が衝撃を与えた。そこから、1971年には環境庁（現在の環境省）が設置されるなど、日本において環境問題への意識が高まっていった。化学物質の取り扱いに関する法律としては、2001年に「PRTR制度（特定化学物質の環境への排出量の把握等及び管理改善の促進に関する法律）」が施行された。特定化学物質を扱う事業所に化学物質の出入りを管理・把握させることを目的とする内容であり、大学もその事業所として指定され、各研究者の自主的な管理に任せるのだけでなく、大学として総括的な管理を要するようになった。そのため、大学でも各研究者が各自購入や排出した化学物質を、各大学のシステムに登録するようになっている。本学でも UTCRIS という薬品管理システムによって各研究室で扱われる化学物質の流れを管理することが目指されている。また、コンプライアンスとして、多くの大学が環境報告書という形で毎年扱った化学物質の取扱量、排出量を公に報告するようになっている。化学物質の取り扱いを適切に行うことは、社会からも強く要請されるようになっ

てきていると言える。

2004年には、国立大学の行政法人化に伴い、大学の研究室等にも労働安全衛生法（以下、安衛法）が適用されるようになった。従来から大学の自治は大学の構成員によって行われており、安全衛生の管理も各々の自主性に任せられてきた側面もあり、安衛法の適用は大学に安全衛生に対する認識を再考させる契機となった。これまで大学の実験室が労働現場とみなされていなかったため安全対策は十分に取られていなかった上に、主な構成員である学生は数年のサイクルで入れ替わるため長期的な視点に立った教育や化学物質を原因とする疾病の情報収集はなされていないという状態であった。現在も対策が必ずしも万全であるとは言えず、トライアンドエラーで対策を模索している段階である。一方で、一般の産業環境に適用される基準が研究教育機関である大学の実験室にフィットするののかという課題も存在している。つまり、常に創造性が求められ未知の事象に挑んでいくことも必要とされる大学実験室において、産業現場のようにプロセス化された作業をコントロールされた場で行うことが目指される現場に適用される一律の基準をそのまま当てはめることが適切なのかどうかという課題である。このような状況を受けて、これまでに化学物質を扱う大学の作業者に関する環境安全が議論されてきた。大学が持つ自由な創造性と、実験者の環境安全衛生管理の両立が、大学の実験室に求められている。

1.4 リスクアセスメント

化学物質におけるリスクアセスメントとは、「化学物質、化学物質を含有する製剤その他の物で労働者の危険又は健康障害を生ずるおそれのあるものによる危険性又は有害性等の調査」^[13]のことを指す。

リスクアセスメントの方法は、厚生労働省が示した指針^[14]をまとめると、具体的なステップとして、以下の3つの段階に分けられる。

化学物質等による危険性・有害性の特定（業務に使用している化学物質を洗い出し、安全データシート（SDS）に即して危険性または有害性を特定する）

→危険性・有害性のリスクの見積もり（特定した化学物質によって生じるおそれのある疾病・負傷の重篤度と発生可能性の度合の組み合わせにより行う）

→リスク低減措置の内容の検討（リスクに優先度を設定し、危険性・有害性の低い物質への代替などのリスク軽減措置を検討する）

平成28年6月1日に施行される改正労働安全衛生法により、一定の危険・有害性のある化学物質（640物質）について、事業場におけるリスクアセスメントが事業者には義務付

けられるなど、環境安全衛生管理を強化する見通しとなっている^[15,16]。

その背景には、化学物質に起因する災害に対する関心の高まりがあるといえる。化学物質による労働災害（休業4日以上）は年間600~700件発生しており、全体の労働災害数は減少傾向にある中で発生数が横ばいとなっている^[17]。そのうち、化学物質による業務上疾病が毎年200~300件程度（休業4日以上）発生しており、こちらもほぼ横ばいの推移を見せている。従来のリスクアセスメントは、転倒や転落といった外傷として現れるリスクに対するものが中心で、有害な化学物質を摂取することによる健康被害に対するリスク認識は広くは共有されていなかった。しかし例えば大阪の印刷事業所における、印刷作業に用いた有害物質（1,2-ジクロロプロパンなど）が原因と推定される胆管癌の発症について労働災害請求がなされる事故などが起こった。近年でも、オルトトルイジンを含む有害物質を扱う事業所において5人の作業者に膀胱がんが発症するという有害物質の長期ばく露が原因だと推定される事故^[18]や、洗浄中のタンクが破裂した際に噴出した窒素化合物によると推定される中毒死事故^[19]が発生している。このような事故を通して、有害化学物質のリスク管理問題が近年顕在化してきたと考えられる。

また、使用する化学物質の多様化に伴い、その危険性や有害性が多様化してきたこともその背景にある。厚生労働省資料によると、事業所で使用される化学物質は約6万種類存在し、毎年約1,200物質が新規に製造・輸入届出がなされている^[17]。人体への影響が未知の物質に起因する潜在的なリスクに備えて、自主的にリスクを発見して対策を講じることが事業者の急務となってきている。

1.5 作業環境測定

大学における環境衛生を取り巻く現状として、平成16年度の国立大学法人化にあたって、安衛法が大学にも適用され、一般の事業者と同様に法に基づいた衛生管理が義務付けられた。試薬やガスの使用による実験環境への影響を管理することを目的として、リスクアセスメントを行うのだが、そのために作業環境測定が実施される。大学の実験室では、半年に1回の作業環境測定が行われている。

安衛法に基づいた作業環境測定^[20]には、作業場中の無作為に定めた測定点における化学物質濃度を測定するA測定と、作業間に最も空气中濃度が高まると思われる時間において、作業が行われる位置で測定が行われるB測定がある。A測定は作業場の平均的な環境を判断するための測定である。しかし、平均的作業環境を測定するA測定では、労働者の一時的な有害物質への大きなばく露を見逃す場合がある。このため、瞬間的な高濃度ばく露の

可能性のある環境を測定する B 測定を行うことによって補完する。作業環境測定のプロフローチャートを、図 1-1 に示す。

作業環境測定で客観的な測定結果を得るためには、作業場の諸条件（測定対象物質、測定日・時間帯、測定点位置など）に即した測定計画を立てる必要がある。専門知識を持つ作業環境測定士によってその計画は立てられ、測定点の適切な抽出やデータの統計的処理によって客観性が保たれている。

測定方法についてより詳細に述べる。A 測定は単位作業場の平均的な作業環境を把握するために行う測定であるので、測定点は単位作業場に均一に分布するように設定される。具体的には、5 つ以上の測定点が等間隔になるように位置を決定する。空气中物質のサンプリング時間は、定量の精度を得るために 10 分間以上になるようにする。

B 測定は、有害物質の発生源に近接する場所において作業が行われる場合に行う必要があり、A 測定に加えて、物質濃度が最も高くなると判断される作業位置と時間において濃度測定を行う。測定時間は継続した 10 分間とする。

これらの測定は、作業場の環境が定常的であること、つまり一定の作業、危険性・有害性が既知の化学物質の使用といった環境変化が少ないことを想定したものである。そのため、日々の実験や作業内容が変化する、未知の化学物質を扱う場合があるなど非定常性の高い大学実験室に作業環境測定の手法を適用させるには実験室の特徴を考慮することが必要だと考えられる。

1.6 室内気流解析による、室内環境改善の先行研究例

労働安全衛生法などの法令によって、建築物空気環境衛生管理基準が定められている。大学の実験室を含めてすべての建築物はこれらの基準を満たすように、設計されなければならない。その際に、ザイデルの式^[21]（後述）と呼ばれる式を用いて、適切な換気回数（1 時間当たりに室内空気が入れ替わる回数）を設定し、それに従った設計がなされることが多い。しかし、換気回数による空気環境管理は、物質が室内に均一に瞬時拡散するという非現実な仮定の下成り立っており、換気回数と室内の物質濃度が必ずしも反比例の関係にないことが報告されている^[22,23]。また、省エネ、室内気流流速の上昇による作業環境悪化という観点からも、換気回数の増加によって室内空気環境を管理するのは望ましくない。

人が 1 日のうち室内で過ごす時間の割合は 80~90%と言われ^[24]、室内環境が人の生活や健康状態に影響を大きく与える要因であると言われている。そのため、室内で発生する有害な化学物質を効率的に排気することを目的とした室内設計の研究が進められている。

有害物質の流れを左右するのは室内の気流であり、室内気流のコントロールを通じて、室内で発生する、または流入する有害物質を効果的に排出することを目的とする研究が進められており^[25~28]、特に建築分野においては建造物設計や室内設計にその知見は活用されている。

また、ある有害物質に着目し特定の状況を想定した検討も行われている。例えば、M. Santamouris ら^[29]は、教室内 CO₂ 濃度の実測によって窓の開放と室内環境の変化の関係を明らかにしている。たばこの煙に着目した研究として、岩永ら^[30]は同一空間の分煙化をパーティションや室内設計の工夫、給気の脈動化などによって目指しており、林ら^[31]はシミュレーションとサーマルマネキンを用いて受動喫煙の研究を行っている。無菌室における室内空气中微粒子に着目した研究では、片山ら^[32]は粒子濃度が極めて低く、実測による空気評価が難しい無菌室においてシミュレーションによる評価の有用性を示している。蓬田ら^[33]は高校の教室における空気環境改善のための換気・空調方式の検討を実測と CFD シミュレーションによって行っている。

これらの気流解析を通じた室内環境の研究の手法は、大きく 2 つに分かれている。気流や拡散物質濃度の実測という手法と CFD というシミュレーション手法である。これらのどちらか、もしくはともに活用することで、不可視な気流を解析し、室内環境の改善が目指されている。

1.7 研究目的

本研究では、大学実験室の特殊性を考慮した室内気流の解析を行いその特徴を明らかにし、実験室での化学物質拡散によるリスクを合理的に理解することを目的とする。また、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の獲得を目指す。

気流解析に、CFD (Computational Fluid Dynamics) を用いた計算手法と、実際の空気の流れを可視化し、PIV (Particle Image Velocimetry) 解析によって気流をベクトル変換するといった実験的手法を用いる。

レイアウトの自由度、実験作業に起因する非定常性や実験室の共有性といった大学実験室の特殊性が、空気環境に与える影響について検討し、化学物質拡散の挙動について理解を試みる。

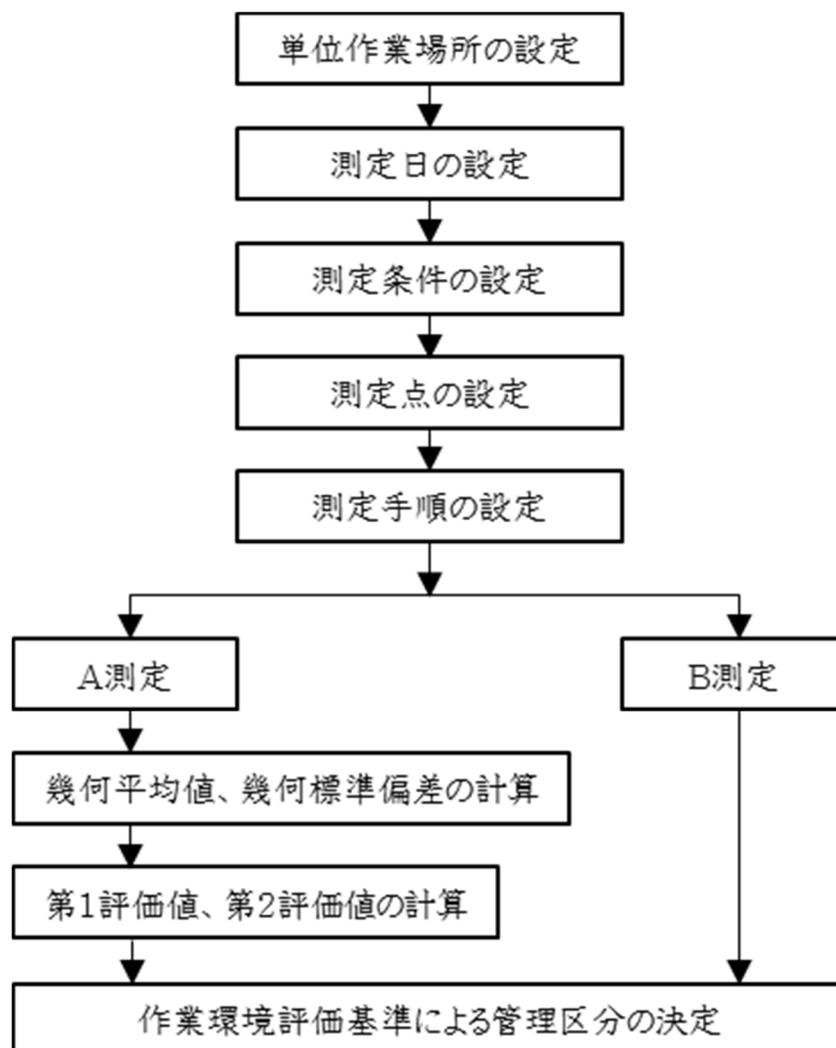


図 1-1 作業環境測定チャート^[18]

第 2 章 検討手法

2.1 モデルとした実寸実験室 (Full スケールモデル実験室)

実際の実験室で形成されている気流を観測するために、本学に実存する実寸実験室（以下、Full モデル実験室）の室内を用いて気流可視化実験を行う。

Full モデル実験室には、VAV システム (Variable Air Volume system) を備えたヒュームフードが 1 台設置されている。VAV とは、可変風量方式のことで、開口面積に依らず面風速を一定に保つことで、適切な排気量を維持することができ、開口面積に関わらず風量が一定となる CAV システム (Constant Air Volume system; ; 定風量方式) に比べ、封じ込め性能やエネルギー効率性などの面から優位である点に特徴がある。排気面の開口面積により排気量が変化するが、その変化をセンサーによって感知し給気量を調整することで給排気のバランスを取っている。

室内の換気を目的に、ヒュームフード前方に給気口、その対角側に排気口がそれぞれ 1 つずつ設置されている。(本論文では、この設備を、室内換気と呼ぶこととする。また、ヒュームフード、室内換気をまとめて、換気装置と呼ぶこととする。)

CAD で描いた対象 Full モデル実験室の俯瞰図を、図 2-1 に示す。本研究の検討のために一般の実験室より天井が高くなっており (5.0 m)、室内換気の給気口、排気口は高さ 3.0 m の位置につり下がったようになっている。室内に設置されている什器類は、室内中央付近に実験台がある他に、壁付近に試薬棚や机が設置されている。

ヒュームフードとヒュームフード給気、室内換気の給気と排気はそれぞれ連動しており、同時に稼働または停止するように設計されている。ヒュームフードの排気量はフードのサッシの開閉幅に比例しており、その変化をセンサーが感知し給気量が調整され給排気バランスが取られる仕組みとなっている。ヒュームフード、ヒュームフード給気、室内換気給気・排気口を、図 2-2 に示す。

設置されているヒュームフードの詳細について、以下に示す。

- ・機種： DF-11AK (ダルトン)
- ・サイズ： W : 1800 mm × D : 835 mm × H : 2350 mm
- ・開口面の幅： 1650 mm

- 風量方式： VAV（CAV への切替も可能）
- VAV 使用時の排気面風速： 0.50 m/s

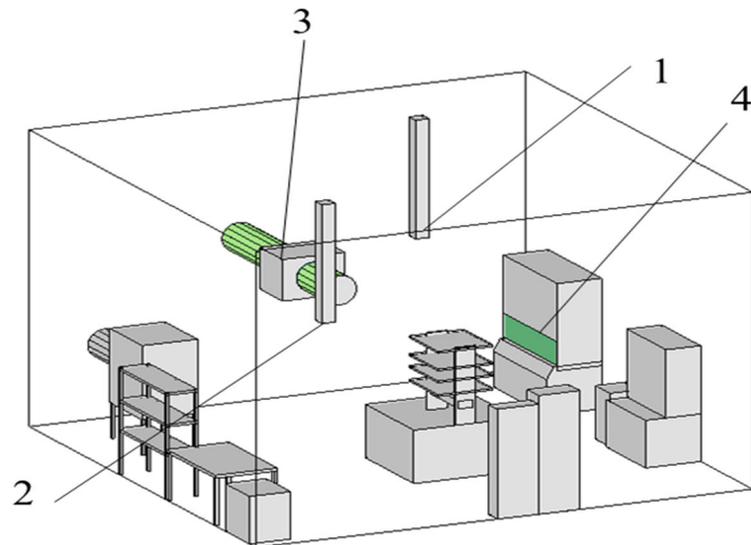


図 2-1 Full モデル実験室

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



図 2-2 Full モデル実験室給排気装置

- 左上:ヒュームフード
- 左下:ヒュームフード給気装置
- 右:室内換気給気・排気口

2.2 CFD（計算流体力学；Computational Fluid Dynamics）

2.2.1 CFD 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 の方程式と呼ばれる偏微分方程式を基礎とする方程式、状態方程式など）を、与えられた境界条件の下に計算アルゴリズムを用いて解を求める手法である^[34]。本来、流速・熱・運動量・物質濃度などの物理量は、不可視な量であり、流れの方程式を解くのは大変難しいが、CFD によるシミュレーションを用いることにより、近似的に計算でき、可視化した量として扱うことが可能となる。

CFD は 1970 年代に台頭した手法で、近年のコンピュータの発達によって飛躍的に発展を遂げ、様々な分野で実用的に活用されるに至っている^[35,36]。

CFD の概念図を、図 2-3 に示す。

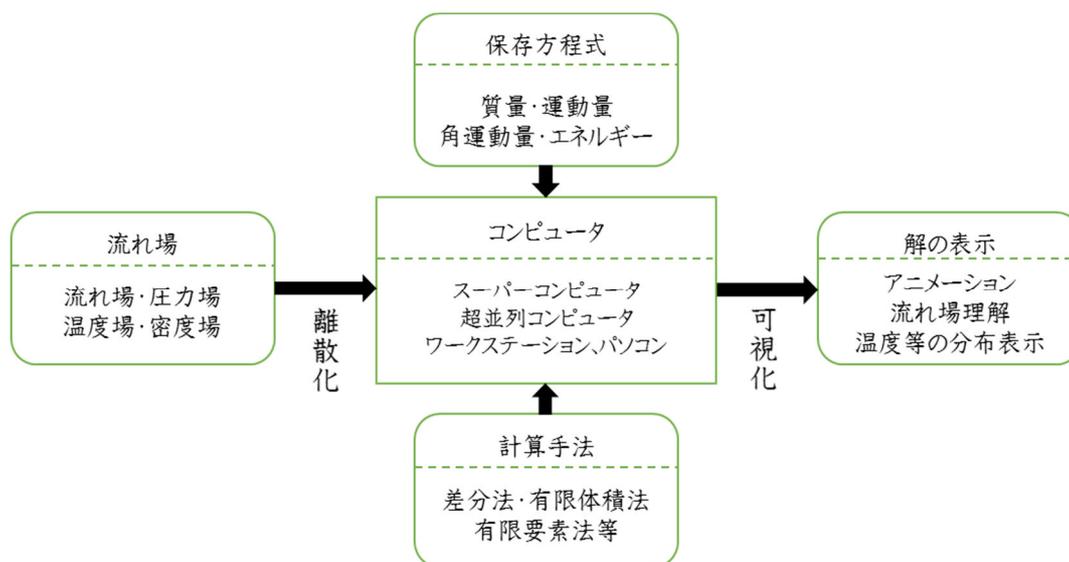


図 2-3 CFD 概念^[27]

CFD シミュレーションの大まかな手順を、以下に示す。

① 計算の対象とする基礎方程式の決定

対象となる流れの現象に対して、その物理量の流れの観測に適した、かつ効率的な基

礎方程式を選択する。

② 偏微分方程式の離散化

偏微分方程式を離散化することで、コンピュータで計算できる代数方程式に変換する。離散化とは、連続的な分布を持つ情報を非連続的な値に分割することで、近似的に計算を可能にすることをいう。

③ 境界条件等の設定

離散化して得られた代数方程式を解くための境界条件や数値解析手法を入力する。

④ 得られた計算結果の出力

計算して得られた流れ場の情報を、グラフや3次元画像として出力して、可視化する。

2.2.2 CFD 計算概要

本研究では、Flowdesigner（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 シミュレーションを行った。概要を、表 2-1 に示す。

表 2-1 CFD 計算概要

計算概要	
CFDソフト	Flowdesigner13 (アドバンスドナレッジ研究所)
乱流モデル	高レイノルズ型 $k-\varepsilon$ モデル
壁関数	対数則 + Spalding則
メッシュ分割	99,984メッシュ (62(X) × 62(Y) × 26(Z))

2.2.3 CFD シミュレーション対象とした Full モデル実験室

2.2.3 (a) 実験室設計

本研究の、シミュレーション対象とした実験室モデルを CAD で描いた俯瞰図、上面図、側面図および初期条件をそれぞれ、図 2-4、図 2-5、表 2-2 に示す。X 軸、Y 軸、Z 軸は、図 2-4 のように決めた。2.1 で記した、実際に本学に存在する研究室を参考にして、室内サイズや給排気量の初期設定を行った。実験室サイズは 7.0 m×7.0 m×高さ 3.0 m で、ヒュームフード、室内換気装置という 2 種類の換気装置が設置されている。天井に室内換気が設置されており、一对の給気口と排気口を有する。加えて、ヒュームフードが 1 台設置されており、その排気量と同量の空気を給気するヒュームフード給気も置かれている。ヒュームフード排気面の面風速は 0.50 m/s に設定した。ヒュームフード給気は、給気をはじめにメッシュ状になっている側面を持つ円筒の中に吹き込まれ、円筒側面から放射状に吹き出される給気装置を模したモデルとなっている (図 2-6)。側面のメッシュの開口率は 40% に設定した。どちらの換気装置も、給気・排気が対となっており、同時に稼働することで給排気のバランスを取るようになっている。

換気装置の位置は、ヒュームフードの前方に室内換気の給気口があり、対角線上反対側に排気口がある。両者を稼働した際の換気回数 (=換気量÷室内体積) は約 5.6 回/h となる。

2.2.3 (b) 拡散物質物性等設定

化学物質が発生することを想定して、0.20 m 四方の拡散物質発生源を設置した。上面を発生面として均等に拡散物質が発生するモデルとなっている。初期位置は、部屋中央床上 (Z 方向) 1.0 m の位置とし、発生源となる面は高さ 1.1 m で床に水平になっている。発生物質は洗浄用に使われることの多いアセトン进行を仮定し、物性は蒸気密度 2.5 kg/m³、拡散係数 1.0×10⁻⁵ m²/s と設定し^[37]、発生源の上面からの発生量は 0.76 g/h とした。

2.2.3 (c) 物理量変化モニタリング領域設定

CFD による非定常計算では、室内の各所の平均流速や拡散物質濃度などの物理量のモニタリングする領域を設定した。これにより、気流に関する評価を定量的・定性的に行うことができる。モニタリング領域は部屋全体領域、領域 A~E の 5 つ、領域 Lhigh、Lmiddle、Llow、Rhigh、Rmiddle、Rlow の 6 領域と、計 12 領域を設定した。モニタリング領域を、

図 2.7 に示す。詳細なサイズと位置座標は、表 2-3 に示す。部屋全体領域を観測することで、室内全体での傾向を知ることができると考えた。また、領域 A~E では、室内中央（領域 A、B）と隅（領域 C~E）をモニタリングすることで、水平方向での空気環境変化を観測できると考えた。領域 Lhigh らによって、垂直方向での空気環境変化を観測できると考えた。

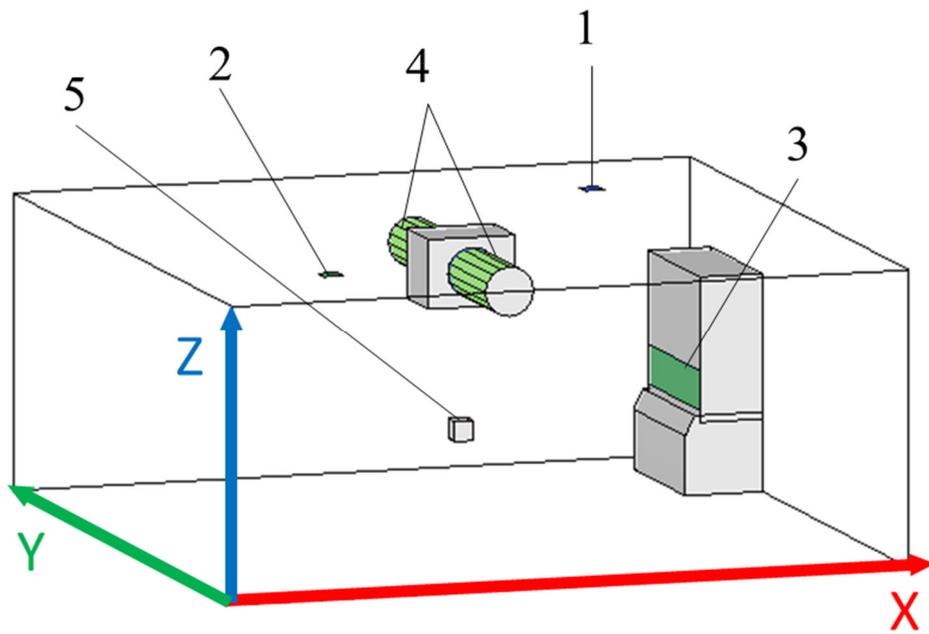


図 2-4 CFD 対象実験室モデル俯瞰図

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面
4. ヒュームフード給気
5. 化学物質発生源

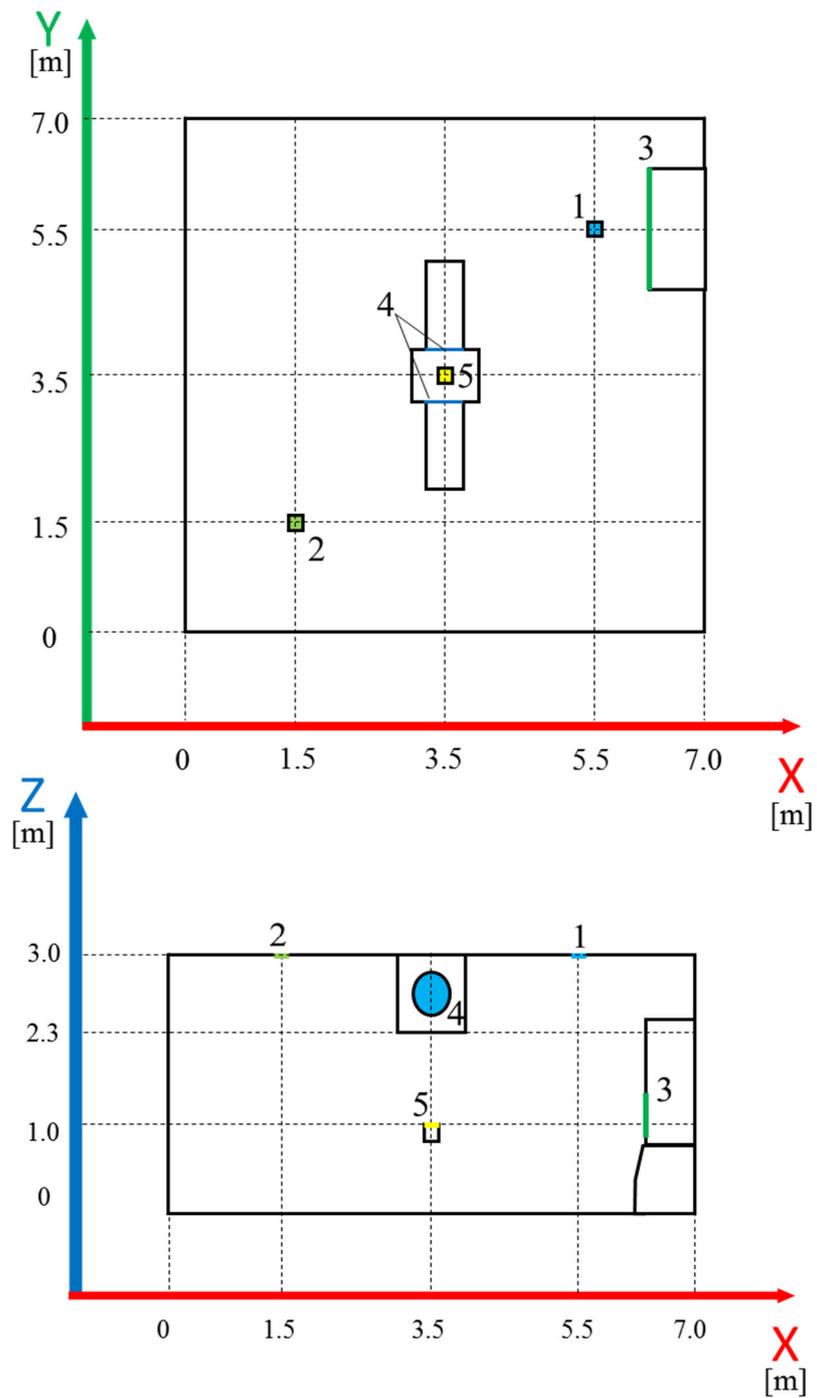


図 2-5 CFD 対象実験室モデル俯瞰図

上:上面図(Z断面) 下:側面図(Y断面)

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面
4. ヒュームフード給気面
5. 化学物質発生源

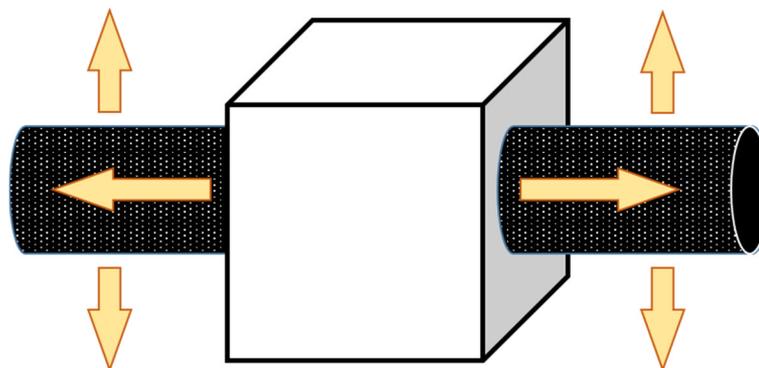


図 2-6 ヒュームフード給気モデルと給気の流れ

表 2-2 CFD 計算初期境界条件

境界条件		設定値
実験室サイズ		X:7.0×Y:7.0×Z:3.0 m ³
室内換気	排気	開口面積 0.040 m ² (20 cm ² 四方)
		給気量 (面風速) 6.0 m ³ /min (2.5 m/s)
	給気	開口面積 0.040 m ² (20 cm ² 四方)
		排気量 (面風速) 6.0 m ³ /min (2.5 m/s)
ヒュームフード	排気	開口面積 0.66 m ² (横幅165 cm, 開口幅40 cm)
		排気量 (面風速) 19.8 m ³ /min (0.5 m/s)
	給気	給気量 19.8 m ³ /min
拡散物質	発生源面積 0.040 m ² (20 cm ² 四方)	
	密度 2.5 kg/m ³	
	拡散係数 1.0×10 ⁻⁵ m ² /s	
室温		20.0 °C (一定)
相対湿度		55.0% (一定)

表 2-3 モニタリング領域設定

領域	サイズ	
部屋全体領域	X: 7.0 m	Y: 7.0 m Z: 3.0 m

	サイズ	座標 (X,Y,Z) [m]
領域A		(2.5, 3.5, 1.5)
領域B	X: 0.50 m	(4.5, 3.5, 1.5)
領域C	Y: 0.50 m	(1.0, 6.0, 1.5)
領域D	Z: 0.40 m	(1.0, 1.0, 1.5)
領域E		(6.0, 1.0, 1.5)
領域Lhigh		(2.5, 3.5, 1.5)
領域Lmiddle	X: 0.50 m	(2.5, 3.5, 1.0)
領域Llow	Y: 0.50 m	(2.5, 3.5, 0.2)
領域Rhigh	Z: 0.40 m	(4.5, 3.5, 1.5)
領域Rmiddle		(4.5, 3.5, 1.0)
領域Rlow		(4.5, 3.5, 0.2)

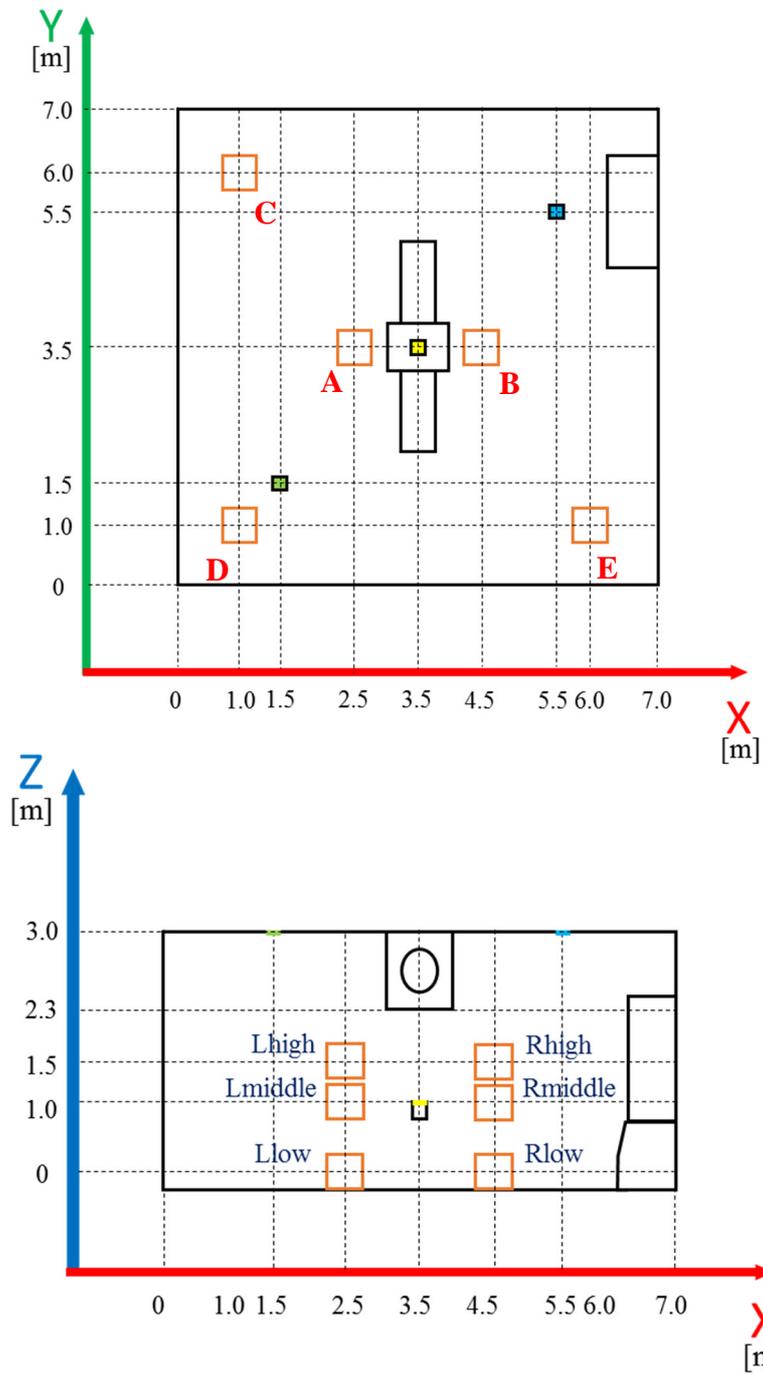


図 2-7 モニタリング領域

上： 領域 A ~ E

下： 領域 L 群、領域 R 群

2.2.4 CFD 計算上の気流の安定性についての検討

気流に影響を与える要因の発生によって気流は生成され、各要因が複合的に影響を及ぼし気流が形作られる。いずれにせよ、ある状態が定まると、不安定な状態が一定時間存在し、その後定常状態に至ると考えられる。不安定状態であることがもたらす解析誤差の情報を得るために、気流が安定状態に至るまでの挙動について検討した。

シミュレーションの境界条件を、以下に示す。

- ・ヒュームフード：稼働
- ・室内換気：非稼働
- ・計算条件
 - (i)・計算時間：24 時間
 - ・計算間隔：5.0 分刻み
 - (ii)・計算時間：2.0 時間
 - ・計算間隔：15 秒刻み

(i)の検討によって得られた、部屋全体領域における平均流速の時間変化を、図 2-8 に示す。図 2-8 は、24 時間経過しても実験室内の流速が低下傾向にあることを示している。また、換気開始から数十分の時間帯において、流速の大きな変動が確認された。一方で、5.0 分刻みによるシミュレーション結果であるため、誤差が存在していると考えられる。

そこで、より計算間隔を短くして換気開始から 2.0 時間におけるシミュレーションを行い、詳細な平均流速の変化を計算した。

(ii)の検討によって得られた、部屋全体領域、領域 A、領域 B における平均流速の時間変化を、図 2-9 に示す。部屋全体で見ると、開始 15 分間で流速の上昇が見られたあと、0.90 m/s に落ち着いていることが確認できた。一方、領域 A、領域 B といった、実験室の一部の領域に注目すると、15 分以降も流速のぶれが見られた。しかし、1.0 時間経過後は流速の変動が小さくなることが確認された。

本項の検討により、実験室の気流は気流への影響因子の出現により平均流速のぶれが起き、1.0 時間ほどの時間経過により安定的な分布になることが示された。実験室においては、実験者が各自で恣意的に作業しているという非定常性により、実験室は間欠的に気流

への影響因子が出現する場と考えられるため、気流が安定期に入るまでの変化を検討することも必要であることを示唆している。

本研究において非定常状態の CFD シミュレーションでは、換気開始 1.0 時間経過以降は気流分布が定常状態に至っているものと考えて検討を進めた。

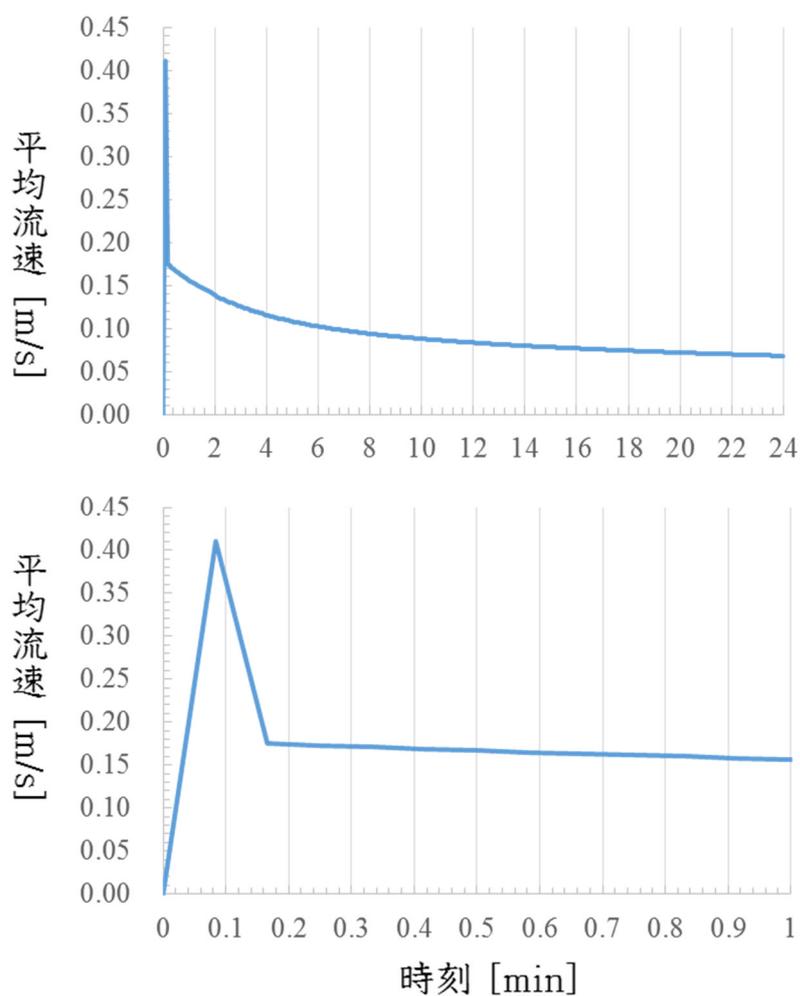


図 2-8 条件(i)における部屋全体領域における平均流速変化

上: 24 時間

下: 初めの 1.0 時間だけ拡大表示

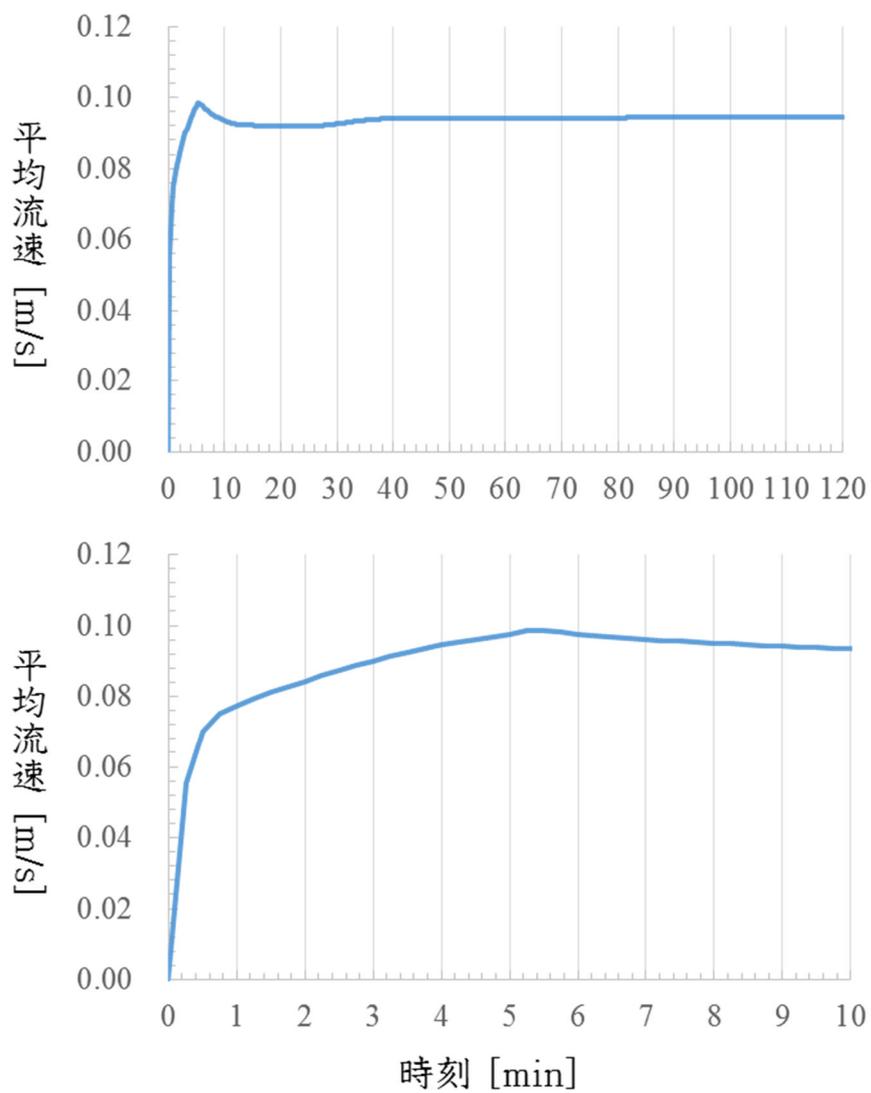


図 2-9 条件(ii)における部屋全体領域における平均流速変化

上: 2.0時間

下: 初めの10分間だけ拡大表示

2.2.5 CFD 計算における、拡散物質の気流追従性についての検討

2.2.5 (a) 検討条件

有機溶剤は大学の実験室において、広い用途で用いられており、使用頻度も高い。これらは一般に空気に対する蒸気比重が大きい物質が多いことが知られている。例えば、大学の実験室での使用量が多いノルマルヘキサン、ジクロロメタン、クロロホルムの蒸気の空気比重はそれぞれ 3.00、2.95、4.15 である。一方で、水素（空気比重： 6.94×10^{-2} ）のように空気に比べ軽いガスも使用した実験や分析装置も多い。実験室で用いられる物質は多種に渡りその密度も様々であるため、密度の違いが物質の拡散状態に与える影響を検討し、化学物質の気流への追従性について考察することは、気流のコントロールによる物質拡散のコントロールを目指す上で重要な情報である。

本項では CFD によって、物質の密度による拡散状態の変化について検討を行った。シミュレーションの条件を、以下に示す。4.0 時間（0～240 min）の時間経過を考えた。シミュレート開始から 4.0 時間経過までのタイムスケジュールを、図 2-10 に示す。前半の 2 時間（0～120 min）はヒュームフードと室内換気が稼働しており、気流状態の安定を待つ時間とした。時刻 2:00 にて拡散物質が発生し始め、時刻 4:00 まで定常的に発生し続ける設定となっている。換気装置はともに定常的に稼働し続ける。

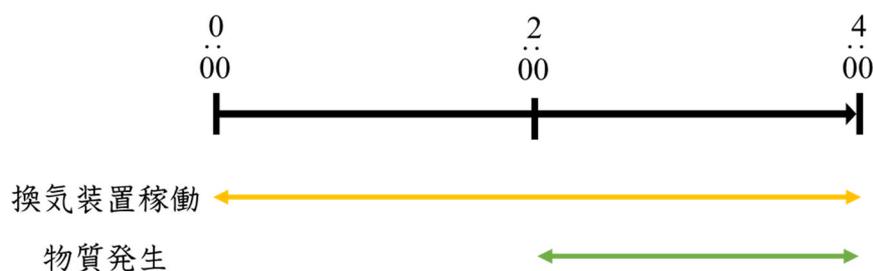


図 2-10 2.2.5 における、CFD 計算タイムスケジュール

モニタリング領域は全 7 カ所で、部屋全体領域の 1 つと、領域 Lhigh、Lmiddle、Llow、Rhigh、Rmiddle、Rlow の 6 領域をモニタリングした。

拡散物質の物性のうち拡散物質密度を、一般に実験室で使われる化学物質蒸気の空気比

重を参考に、 $0.10\sim 6.0\text{ kg/m}^3$ の範囲で変化させた（空気の気体密度： 1.205 kg/m^3 （ $20\text{ }^\circ\text{C}$ 、 1 気圧 ）^[37]）。拡散係数は、 $1.0\times 10^{-5}\text{ m}^2/\text{s}$ に固定した。また、ppm の単位で濃度を比較するため、拡散物質発生速度は密度に比するように変化させている。入力条件は、以下に示す。

- ・ 拡散物質の定義

- ・ 拡散物質密度（発生速度）：

- 0.10 kg/m^3 （ 0.030 g/h ）,

- 1.0 kg/m^3 （ 0.30 g/h ）

- 2.5 kg/m^3 （ 0.76 g/h ）,

- 4.0 kg/m^3 （ 1.2 g/h ）

- 6.0 kg/m^3 （ 1.8 g/h ）

（参考： 空気の密度 1.205 kg/m^3 （ $20\text{ }^\circ\text{C}$ 、 1 気圧 ）^[37]）

- ・ 拡散物質拡散係数： $1.0\times 10^{-5}\text{ m}^2/\text{s}$ （一定）

- ・ 境界条件

- ・ 拡散物質の物性以外については、初期条件と同条件

2.2.5 (b) 拡散物質の高さ方向への拡散に関する検討

上下方向での拡散物質の拡散を検討するために、拡散物質密度 2.5 kg/m^3 のときの L_{high} 、 L_{middle} 、 L_{low} 、 R_{high} 、 R_{middle} 、 R_{low} 領域における、平均流速、拡散物質濃度の時間変化を、図 2-11、12 に示す。床からの高さが高い領域ほど、濃度が高くなっていることが確認できた。また、流速が速いほど濃度は低くなっており、流速が空気がよく入れ替わっていることを指し示していると思われる。

一般に、比重の大きい有機溶剤については、足下にたまりやすいと認識されている。しかしこの結果は、実験室のように換気による気流が存在する室内では、気流による拡散が起こり、床付近よりも実験者の呼吸域付近の方が濃度が高くなっているケースがありうることを示している。

そこで、物質の密度によって物質拡散状態が気流から受ける影響に違いがあるのかを次項で検討した。

2.2.5 (c) 拡散物質密度が物質拡散状態に与える影響の検討

各拡散物質密度ごとの、Lhigh 領域、Rhigh 領域における平均流速、拡散物質濃度の時間変化の比較を、図 2-13、14 に示す。平均流速については、拡散物質密度に依らずほぼ完全に一致しており、物質密度が気流の形成に影響を与えていないことが確認された。一方で、図 2-14 では拡散物質の濃度分布は異なっていることが示されている。高密度（比重が 1.0 以上）である 6.0、4.0、2.5 kg/m³ のとき、それぞれの領域における濃度変化の傾向には大きな違いはないと言える。低密度（比重が 1.0 以下）の 1.0、0.10 kg/m³ のとき、それぞれの領域での変化挙動が重い物質の場合とは異なっており、R 領域においては高密度のときと比べ低濃度となる結果となった。空気の密度を基準にして低密度の物質と高密度の物質では拡散挙動が違っていると考えられる。

そこで、密度による拡散状態の違いを立体的に表現するため、濃度を等値面により立体空間に表現することで検討を行った。初めに、拡散物質発生源を設置している Z=1.1 m 面における流速ベクトル分布を、図 2-15 に示す。Z=1.1 m における流速ベクトルは、ヒュームフード（もしくは室内給気）に向かう方向を持っており、物質が気流に追従する場合、ヒュームフードに向かっていくことが予想された。実際、高密度の物質は図 2-16 に示すとおりヒュームフードに向かい、室内給気の吹き出しにより室内に拡散していることが確認され、その分布が密度にかかわらず同じであることがわかった。それに対し、低密度の物質はその場の気流には従わず上方に向かっており（図 2-17）、結果ヒュームフード給気に引き寄せられ、ヒュームフード給気によって室内に広がっていくことが確認された。

以上の結果から、実験室で頻繁に使用される高密度の有機溶剤については、気流に追従することがわかり、気流を把握しコントロールすることで化学物質の拡散自体を総括的にコントロールできる可能性があることが示唆された。水素のような軽い気体については室内上方に向かっていくであろうことが示されており、比重の大きい有機溶剤とは別の管理方法を検討する必要がある。

本研究の検討では、拡散物質密度 2.5 kg/m³ を統一して採用しシミュレーションを行ったため、拡散物質は気流によく追従しているという前提に立って検討を進める。

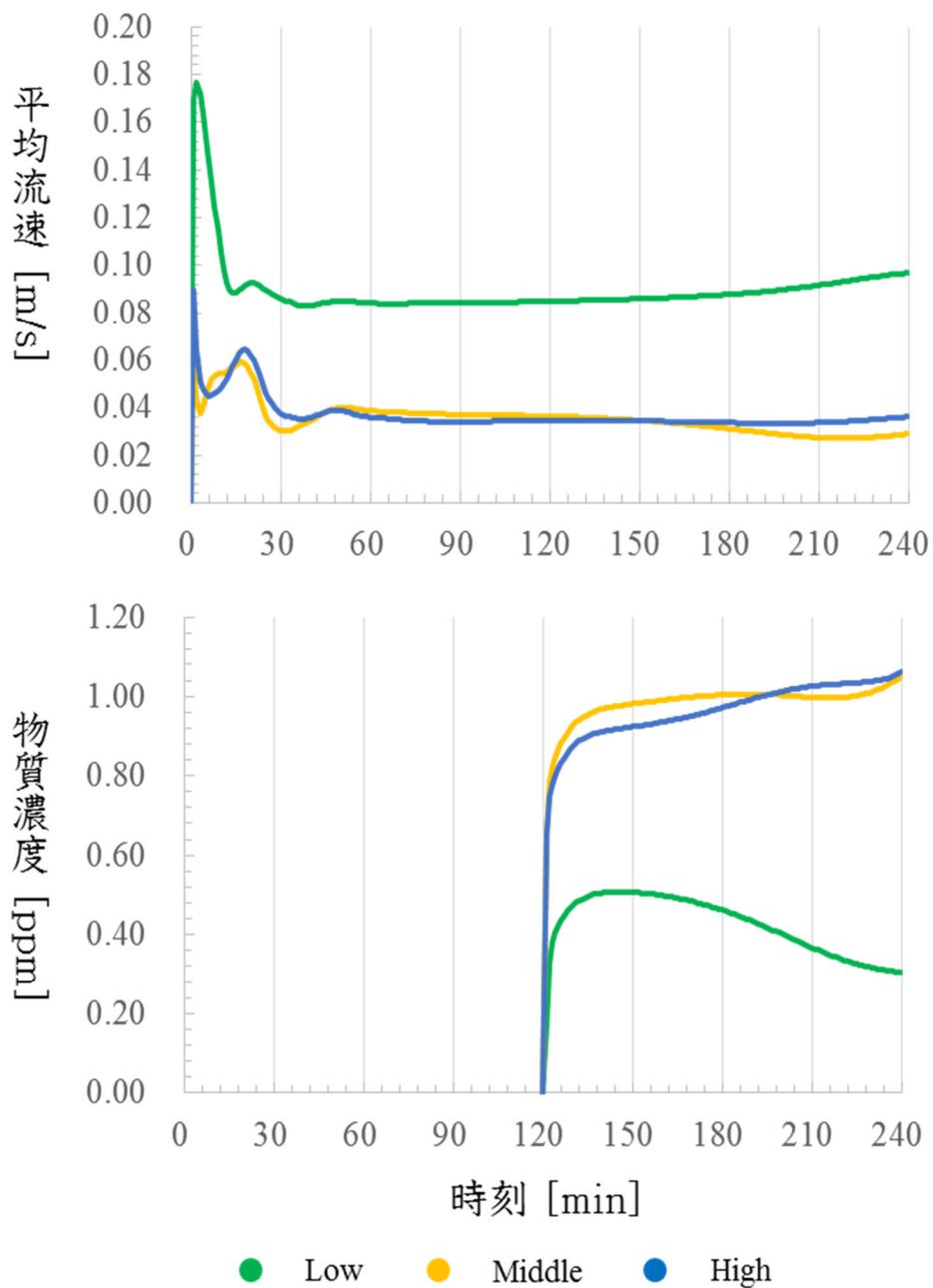


図 2-11 拡散物質密度 2.5 kg/m^3 のときの、右側の各領域における
 上： 平均流速変化の比較
 下： 拡散物質濃度変化の比較

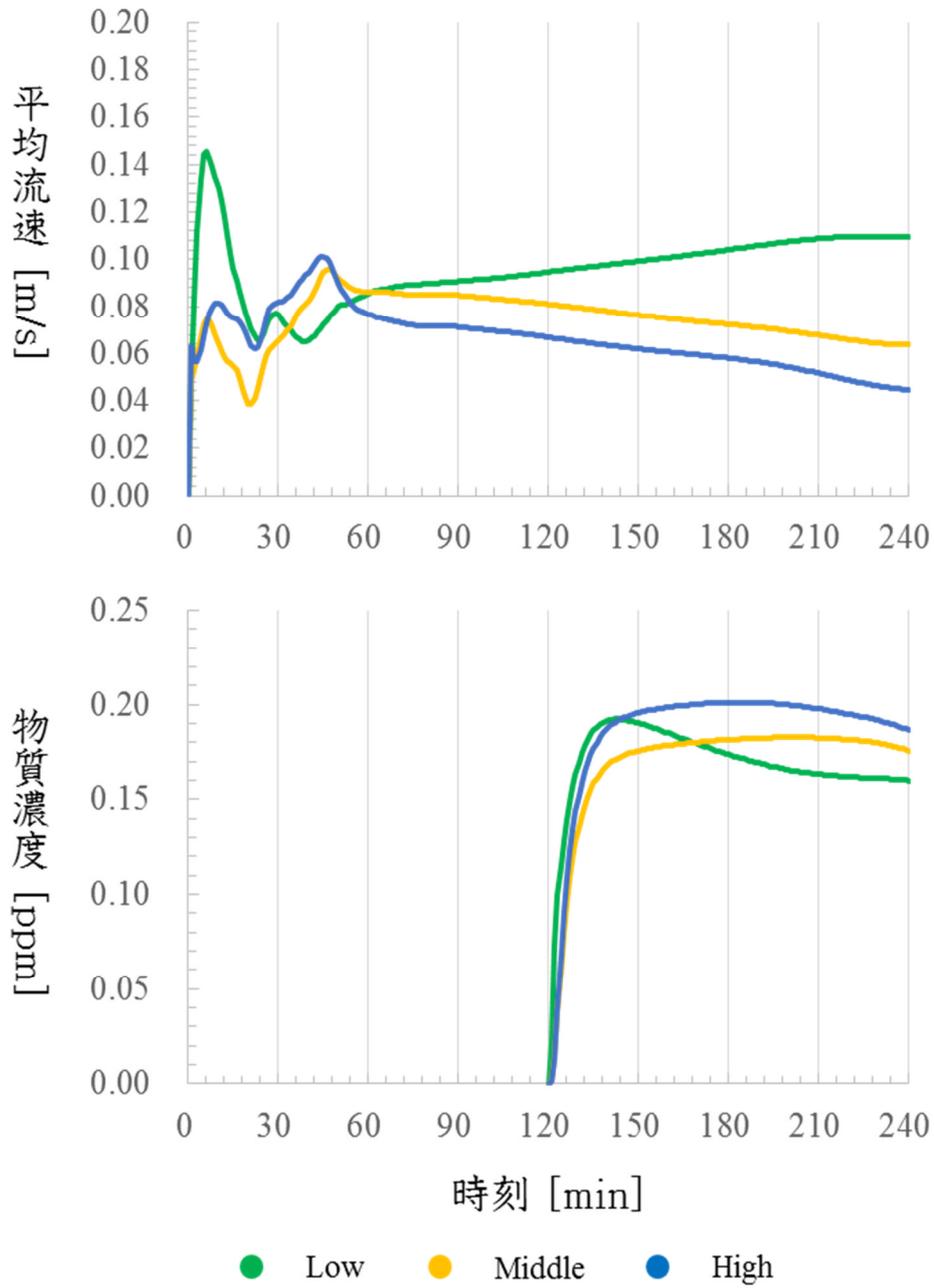


図 2-12 拡散物質密度 2.5 kg/m^3 のときの、左側の各領域における
 上： 平均流速変化の比較
 下： 拡散物質濃度変化の比較

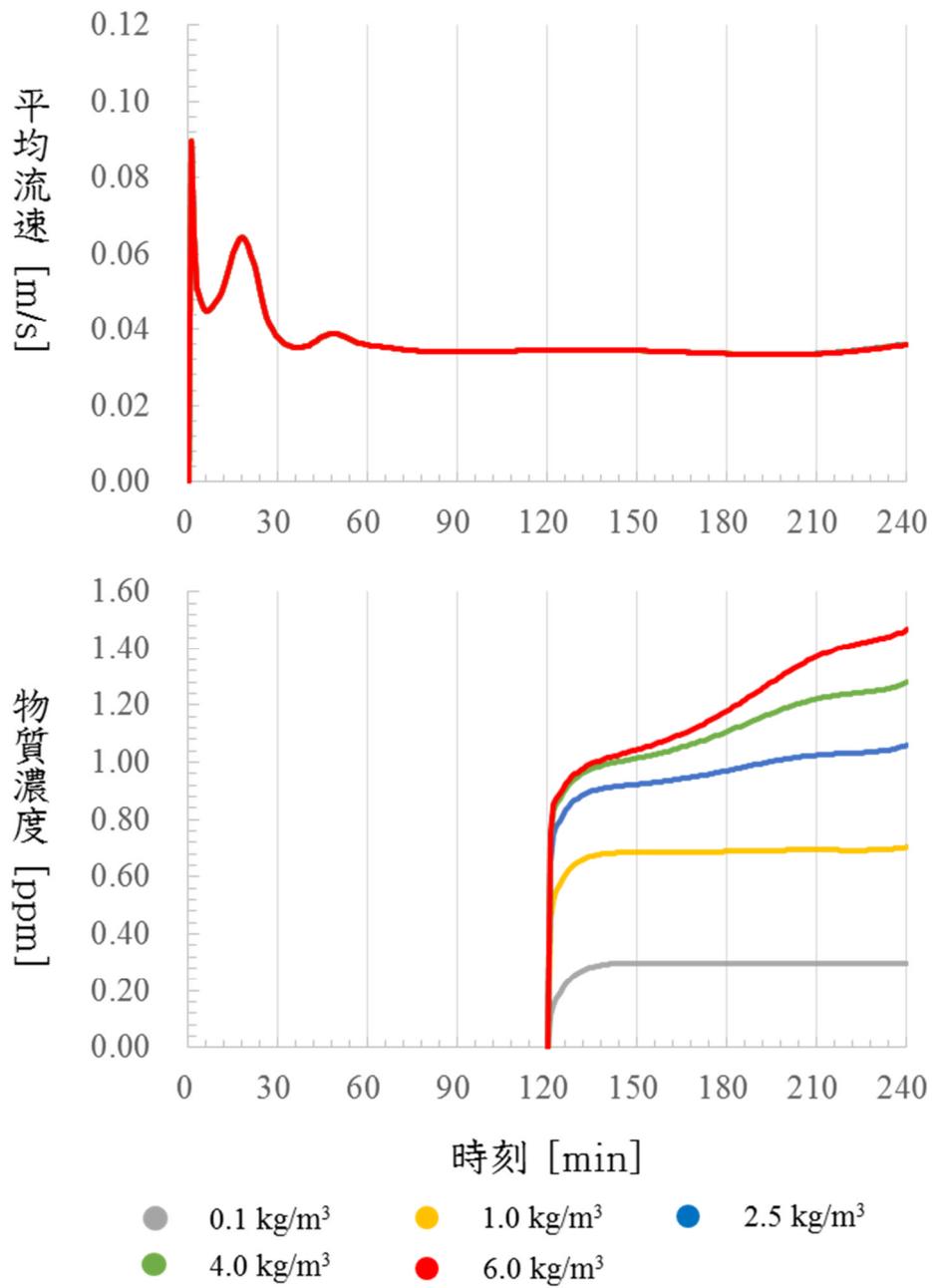


図 2-13 右 High 領域における、各拡散物質密度ごとの
 上： 平均流速変化の比較
 下： 拡散物質濃度変化の比較

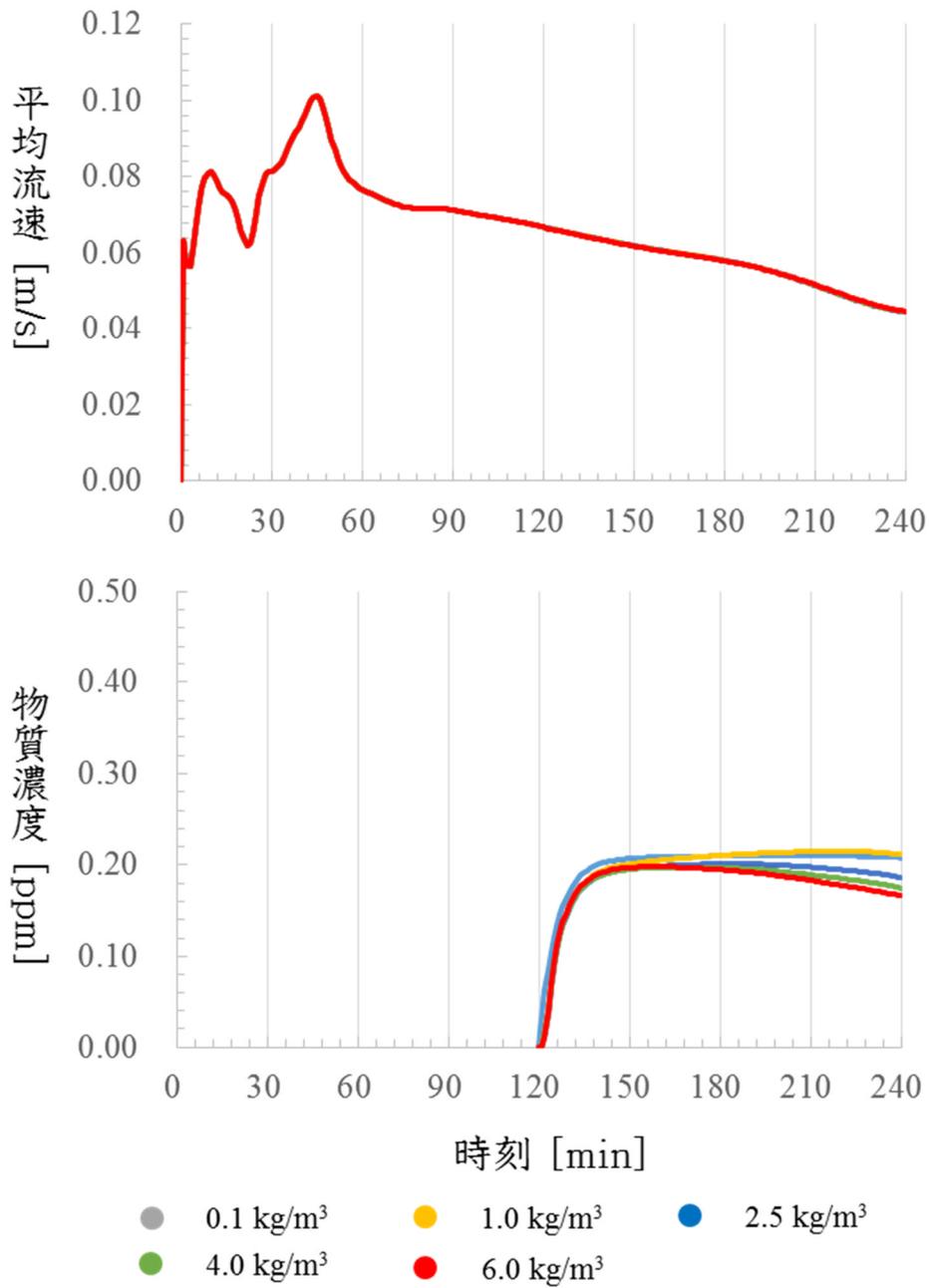


図 2-14 左 High 領域における、各拡散物質密度ごとの
 上： 平均流速変化の比較
 下： 拡散物質濃度変化の比較

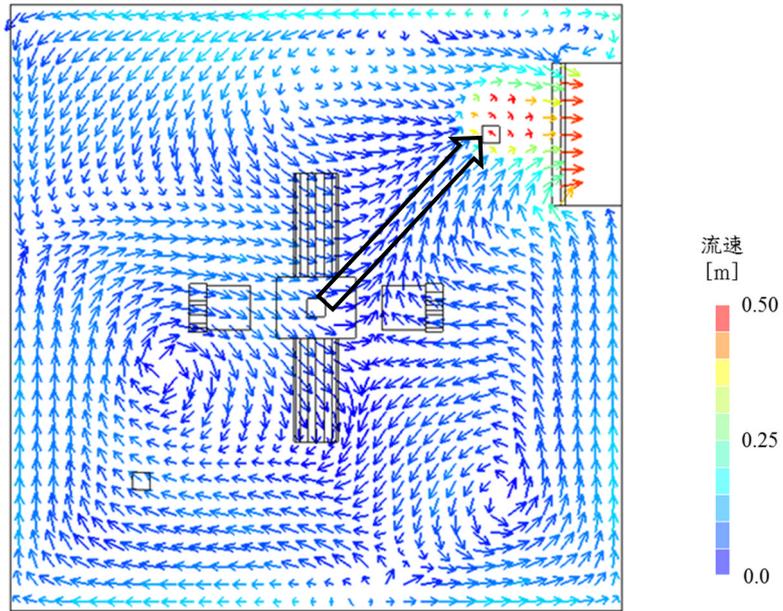


図 2-15 Z = 1.1 cm 断面における流速ベクトル分布

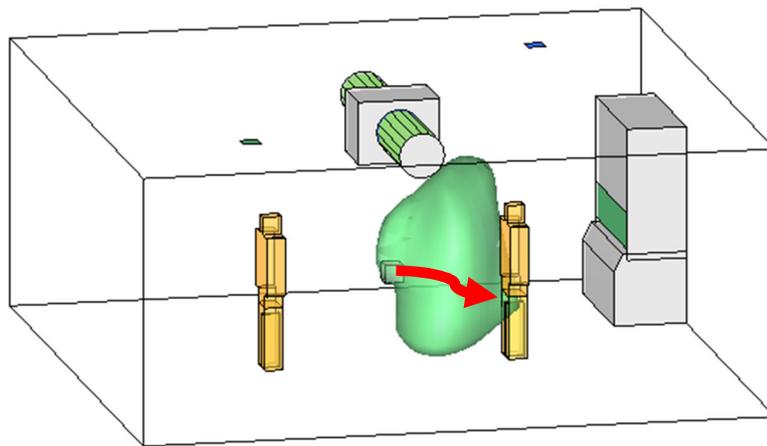


図 2-16 拡散物質密度 6.0 kg/m^3 のときの濃度等値面 (0.50 ppm)

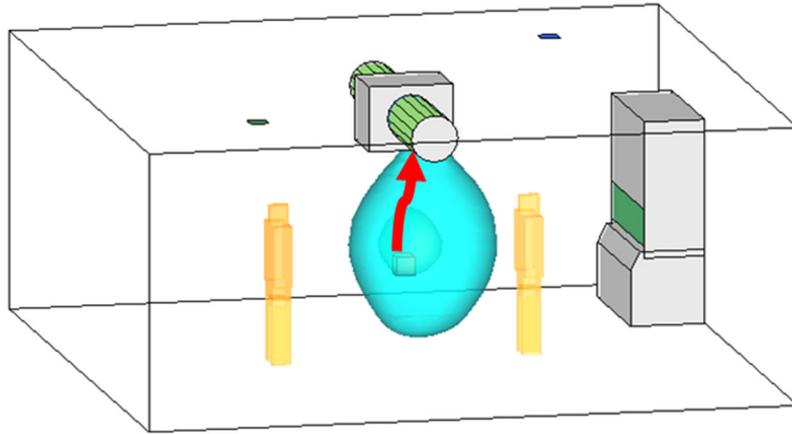


図 2-17 拡散物質密度 0.10 kg/m^3 のときの濃度等値面 (0.30 ppm)

2.2.6 CFD 計算結果に用いる単位について

本研究では、CFD 計算による拡散物質濃度の単位は、百万分率「ppm」に統一している。室内環境を考える際には「ppm」が用いられることも多く、また労働安全衛生法の管理濃度などの法制度でも「ppm」表記であることが多いためである。以下の式を用いることで、「ppm」から「g/m³」に変換することができる。

$$\text{g}/\text{m}^3 = \text{ppm} \times \rho \times 1/1000$$

ρ [kg/m³]は、拡散物質の密度を表す。

2.3 気流可視化

気流は空気の動きであり、我々の目ではその動きを認識することができない。そのため、流れにトレーサ粒子を混入させることで可視化させるという手法を用いて、気流解析を行う。

トレーサ粒子による可視化によって、気流の全体像を視認できるだけでなく、レーザーシートでそのトレーサ粒子を照射することで流れの断面像を得ることができる（図 2-18）。連続する画像の光度の相関性を解析し、流れを速度ベクトルに変換する手法である PIV によって、気流の流速ベクトルや渦度などを得ることが可能で、不可視だった気流を数量化できる。PIV については後述する。

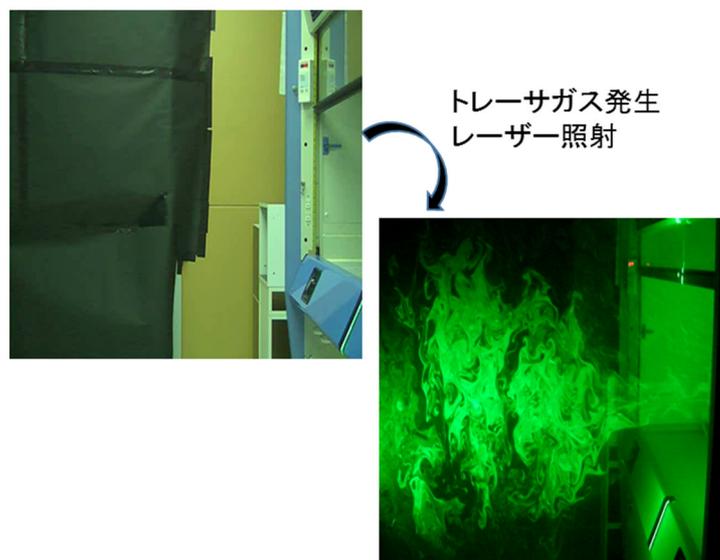


図 2-18 気流可視化の様子

トレーサ粒子は、スモーク液を煙発生器によって蒸気化させたものを用いる。

用いたトレーサ粒子の詳細を、以下に示す。スモーク液の組成は、GC-FID によって定性・定量分析を行った結果、トリエチレングリコール、プロピレングリコール、1,3-ブチレングリコールの水溶液であることが判明した。

- ・スモーク液： Rosco Clear Fog Fluid (Rosco)
- ・スモーク液組成： 水 50wt%

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%

- ・トレーサ粒子直径： 0.50~60 nm
- ・煙発生器： Delta 3000 (Rosco)

気流に対するトレーサ粒子の追従性は、直径 300 nm 以下の粒子に対して確認がされている^[38]。つまり、本実験で用いたトレーサ粒子は、十分に小さい直径であるため、可視化されたトレーサ粒子の流れを気流と解してよいと本研究では判断した。

また、気流の可視化に使用した機器について、以下に示す。

- ・シートレーザー： DPSS Laser (SANCTITY LASER ; SSL-532-1000-10TM-30L)
波長： 532 nm
出力： 1,000 mW
- ・高速度カメラ： USB 高速度カメラ K4 (カトウ光研)
撮影速度： 30, 60, 250 fps(frames per second)

気流の可視化および撮影の概略図を、図 2-19 に示す。

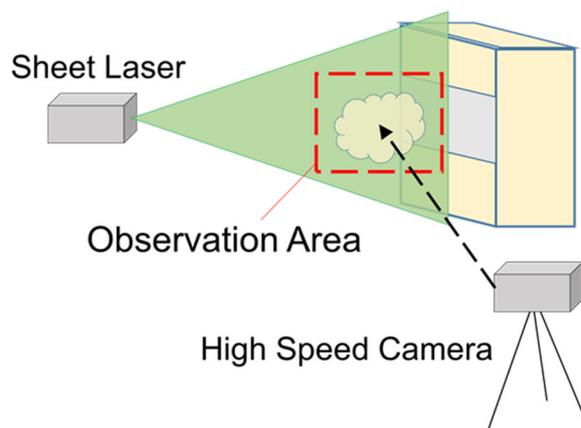


図 2-19 気流可視化、撮影

2.4 PIV (Particle Image Velocimetry)

2.4.1 PIV の原理

PIV は粒子画像の処理に基づく流速計測法の総称である。流れにトレーサ粒子を混入させ、その動きを画像として出力し解析することで、流れをベクトル化することが可能となる^[39] (図 2-20)。

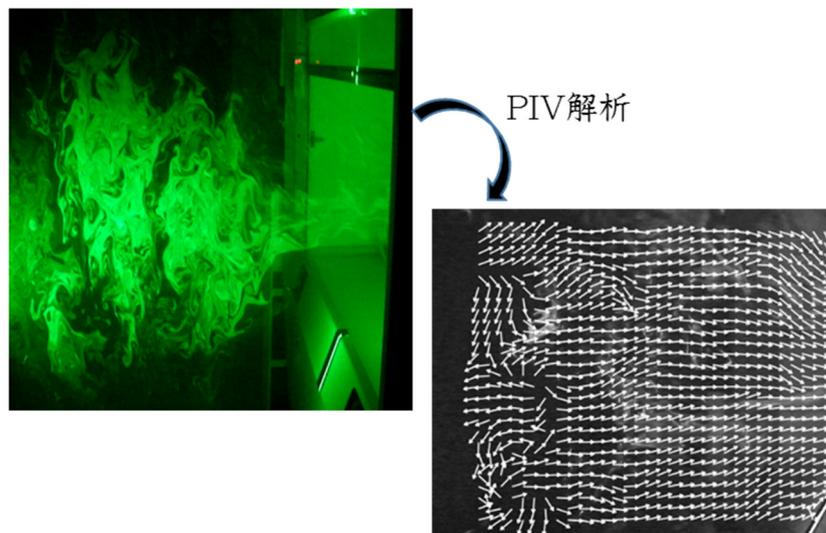


図 2-20 PIV 解析による気流のベクトル変換

流速を測定する方針としては、流れの可視化に用いられるトレーサ粒子が微小時間 Δt に移動する ΔX を何らかの画像計測アルゴリズムによって求め、その移動距離を Δt で除して流速を間接測定するというものである。画像計測で移動量ベクトル $(\Delta X, \Delta Y)$ が得られると、処理上の変換係数を α とすると、式 (2-1) で速度ベクトル (u, v) を得ることができる。

$$(u, v) = \alpha(\Delta X, \Delta Y) \quad (2-1)$$

PIV 解析で移動量ベクトル $(\Delta X, \Delta Y)$ を得る手法は、大別すると画像相関法と粒子追跡法の、2 種類の手法に分かれる。PIV における移動量ベクトル取得の概念図を、図 2-21 に示す。画像相関法とは、画像を検査領域と呼ばれる小領域に分割して、分割された領域内の輝度値パターンを用いて、2 時刻における画像のパターン相関から領域内平均移動距離

を算出する方法である。図 2-21 でいうと、破線で囲った位置へと領域が移動したと考える手法である。一方、粒子追跡法とは、初めに画像の輝度から個々の粒子像を抽出し、それぞれの粒子像の移動を解析する手法となる。図 2-21 でいうと、1つ1つの粒子に関する移動を考える手法である。これらの手法の使用基準となるパラメータとして、粒子数密度（単位面積当たりの粒子像数）を挙げることができる。画像相関法には粒子像パターンの区別が付きやすい高数密度の画像が適しており、粒子追跡法には粒子像の誤追跡が生じにくい低密度の画像が適している。

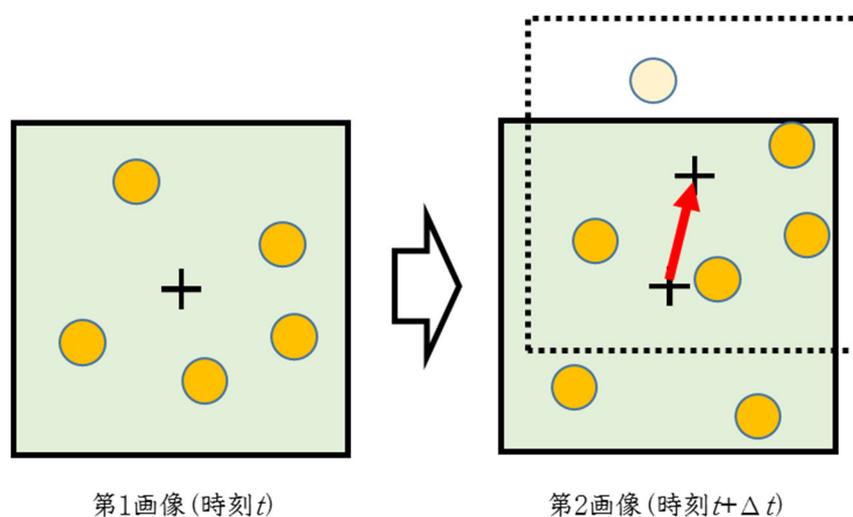


図 2-21 移動量ベクトル取得

2.4.2 PIV 解析設定

本研究で用いるトレーサ粒子は粒子径が小さく高数密度であるため、画像相関法によって PIV 解析を行った。

得られた生データのベクトルは後処理を行うことで、その妥当性を判断するとともに、流れ場の瞬間の構造や統計量を評価することができる。本研究における PIV 解析で、生データに対して行った後処理を、以下に示す。

① 誤ベクトルの検出と除去

相関係数 0.50 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検出し除去した。

② データ欠落部分へのベクトル補間

①で除去したベクトルを、近傍の8領域の平均値から補間した。

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。

(④ 平均ベクトルの算出)

必要に応じて、指定時間域のベクトルに対して平均値を計算して、平均ベクトルを算出した。

PIV解析の概要を、表2-4に示す。

表 2-4 PIV 解析概要

PIV概要	
PIVソフト	FlowExpert2D2C (カトウ光研)
画像解析	画像相関法
メッシュ数	約1,000メッシュ
検査領域	32 pixel×32 pixel

2.5 換気に関する指標

2.5.1 換気回数（換気量）

室内の換気設計の際に必要な換気特性を示す指標として、換気量（換気回数）を取り扱うことが一般的である。

室内空気汚染の改善は換気の目的の一つである。室内空気が汚れた場合、換気を行い汚染物濃度を許容値以下に低減させる必要がある。汚染物発生量、換気量が一定だとすると最終的には定常状態になると考えると、室内汚染物質濃度について物理的検討を行うことが可能である。

図 2-22 に示す室内において、時間を t 、物質の室内濃度変化を $C(t)$ とする。また、外気濃度を C_0 (=const.)、室内での汚染物質発生量を M (=const.)、換気量を G (=const.) とし、一定とする。このとき、室内における汚染物質の物質収支を取り、時間の微分方程式を解くことにより、式 (2-2) が得られる。

$$C(t) = C_0 + \left(\frac{M}{G}\right)(1 - e^{-nt}) \quad (2-2)$$

n は換気回数を表し、室内容積を換気量で除した値である。

定常状態に達したのちに室内での汚染物質の発生が停止したとき、濃度が減衰していく。その時間変化は、式 (2-3) で表せる。

$$C(t) = C_0 + \left(\frac{M}{G}\right)e^{-nt} \quad (2-3)$$

式 (2-2)、(2-3) は、ザイデル (Saidel) の式と呼ばれる^[21]。この式から、例えば換気回数 1 回で 1 時間の換気をした場合、 $nt=1$ より $C=1-1/e=1-1/2.718 \approx 63\%$ となることがわかる。つまり、換気前濃度より 63% の濃度減少が見込まれることがわかる。

ザイデルの式より、汚染物質の濃度が許容濃度を下回るように最低換気量を決定することができ、それに従い換気設計がなされている。一方で、ザイデルの式による換気量計算は室内が完全混合状態であることを仮定しているため、室内の物質拡散の特徴を反映させた指標とは必ずしも言えない。実際、換気量と室内発生物質の気中濃度は正比例の関係にないことは知られており^[22,23]、エネルギー消費量の増大、流速の増大が発生するという観点からも、換気量の増加による拡散物質排気の促進は望ましくない。

つまり、大学実験室のように、一定の作業が想定されておらず、拡散物質発生源が局所

的に分布する室内において、換気量という指標では実験室内の換気状態を表現できていないと考えられる。

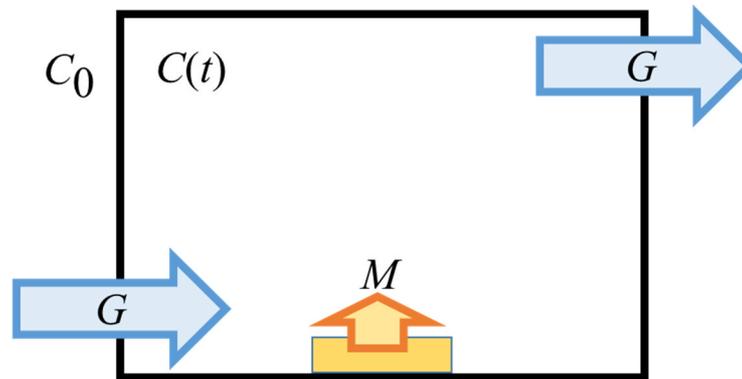


図 2-22 室内濃度

2.5.2 換気効率指標 (Scale of Ventilation Efficiency ; SVE)

加藤らによって提唱された換気効率指標 (Scale of Ventilation Efficiency ; SVE) とは、室内各地点の換気状況を表現する指標である^[40,41,42]。本論文では、空気齢 SVE3、空気余命 SVE6、吹出口環境形成寄与率 SVE4、吸込口環境形成寄与率 SVE5 の 4 指標について言及する。

空気齢 (SVE3) は、任意の領域において、室内に流入した空気が到達するまでの相対的な時間を表し、この値が大きいほど室内に流入した空気が到達しにくい領域であることを示す^[43]。言い換えると、その領域が、室内で通過した地点の化学物質濃度の履歴に影響を受け、化学物質による汚染を受けた空気が到達しやすい領域であるかどうかを解析する指標といえる。実際の計算は、室内に拡散物質の定常一様な発生を仮定した計算を行い、定常状態における各領域の拡散物質濃度を、瞬時一様拡散濃度で除して相対化するというプロセスになっている。空気齢の計算式を、以下の式 (2-4) に示す。

$$\text{空気齢 SVE3}(x) = \frac{C'(x)}{C_S} \quad (2-4)$$

$C'(x)$: 換気量 Q [m^3/s] の室内一様に総量 q [g/s] の拡散物質発生がある場合に、輸送方程式を解いて得られる位置 x における濃度

C_S : 瞬時一様拡散濃度(= q/Q)

空気齢と対となる解析として、空気余命 (SVE6) という指標がある。この指標は、任意の領域における、空気が排出されるまでの相対的な時間を示しており、この値が大きいほど、その領域の空気は排出されにくいと判断できる。つまり、空気余命は、発生した拡散物質が室内に滞留しやすい領域かどうかを判断する指標だと考えられる。実際の計算は、空気齢とは逆向きの流れ (排気口から給気口に向かう仮想的な流れ場) を想定した上で、空気齢と同様の計算を行っている。空気余命の計算式を、以下の式 (2-5) に示す。

$$\text{空気余命 SVE6}(x) = \frac{C''(x)}{C_S} \quad (2-5)$$

$C''(x)$: 換気量 Q [m^3/s]の室内一様に総量 q [g/s]の拡散物質発生がある場合に、輸送方程式を逆時間方向に解いて得られる位置 x における濃度

その他の指標として、吹出口環境形成寄与率 SVE4、吸込口環境形成寄与率 SVE5 がある。複数の吹出口・吸込口が設置されているときに、ある吹出口・吸込口が任意の地点にどの程度影響を具体的に評価することを可能にする。ある領域における、ある吹出口の吹出口環境形成寄与率が高いほど、その領域にその吹出口からの気流が到達しやすいことを表している。吸込口環境形成寄与率は、吹出口環境形成寄与率 SVE4 と対をなす概念で、その値が高いほど、その領域の空気はその吸出口から排出されやすいことを表している。吹出口・吸出口が室内に1つのみの場合は、当然すべての領域に対して、吹出口環境形成寄与率、吸出口環境形成寄与率は1となる。吹出口環境形成寄与率、吸出口環境形成寄与率の計算式を、以下の式 (2-6)、(2-7) に示す。

$$\text{吹出口環境形成寄与率 SVE4}(x, n) = \frac{C'(x, n)}{C_0(n)} \quad (2-6)$$

x : 空間座標

n : 吹出口番号

$C'(x, n)$: n 番吹出口より q [m^3/s]のトレーサーガスの発生がある時の、位置 x での濃度

$C_0(n)$: n 番吹出口より q [m^3/s]のトレーサーガスの発生がある時の、吹出し気流濃度

$$\text{吸込口環境形成寄与率 SVE5}(x, n) = \frac{C''(x, n)}{C_0(n)} \quad (2-7)$$

n : 吸出口番号

$C''(x, n)$: n 番吸込口濃度 $C_0(n)$ の条件で、濃度輸送方程式を逆時間方向に解いて得られる位置 x での濃度

これらの換気指標は、CFD によって計算することができ、定常状態でのみ算出される。本研究でも、定常状態での室内換気状況を表現し特徴付けることができる指標として適していると考え用いることとする。

第3章 CFDによる実験室レイアウトが

空気環境に与える影響の検討

3.1 換気装置周辺の気流の観察

3.1.1 給気口・排気口における気流分布

実験室に備わる主な換気装置は、室内換気と局所排気装置の一種であるヒュームフード（ドラフトチャンバー）がある。

室内換気は一般的な居室に設置されているものと同じで、室内の用途に合わせた必要換気量を満たすように、別々に設置された給気口・排気口によって換気がなされるようになっている。室内換気が室内空気質に与える影響は、特に建築設計分野で検討項目とされてきた^[37,38]。

続いて、大学実験室において有害物質を扱う場合に設置がなされているヒュームフードについて、特徴や評価基準に関して述べておく。ヒュームフードの性能の一つとして、封じ込め性能がある。ヒュームフード内の有害ガスがヒュームフード外に排出していないかを示す指標である。実験者の安全性を確保につながるだけでなく、省エネ効果も期待できるため、封じ込め性能の向上が求められており、ヒュームフード内部および排気面付近における気流の検討がなされてきた。アメリカで適用されている ANSHI・ASHRAE という定量的な基準もあり、スモークテスト・面風速測定・トレーサーガステストからなるテストによって性能検査をする場合がある。日本でも、労働安全衛生法の「有機溶剤中毒予防規則」「特定化学物質障害予防規則」によって、「全開時の面風速 0.5 m/s 以上」といったヒュームフードの安全性を確保するための基準が定められている。また近年では、ヒュームフード内の気流を制御することで、より少ない流量で高い封じ込め性能を実現する低風量ヒュームフードの開発も進んでいる。

本研究は実験室「全体」の気流の特徴、ひいてはそれに伴う化学物質拡散の特徴を明らかにしていくことを目的とするが、まず実験室に備わる「個々の換気装置」近辺で起きている現象についての検討を試みた。

Full モデル実験室内での気流可視化実験および CFD によるシミュレーションによって、それぞれの換気装置近辺の気流を確認した。ヒュームフードのみを稼働（室内換気は非稼働）、または室内換気のみ（ヒュームフードは非稼働）を稼働という状態で計算を行った。（CFD シミュレーション上の換気装置「非稼働」とは、換気量 $0 \text{ m}^3/\text{min}$ のこととし、空気の入りが無い設定とした）

ヒュームフード、ヒュームフード給気の周辺における、流速分布のシミュレーション結果を、図 3-1、3-2 に示す。ヒュームフードのみを稼働している。まず、ヒュームフードの排気面（図 3-1）では、面を中心として流速ベクトルが層状に分布していることがわかる。ヒュームフード給気（図 3-2）に関しては、円筒の先端の方から上下左右に対称性のある高流速の空気が吹出していることがわかる。

次に、室内給気、室内排気の給排気面周辺における、流速分布のシミュレーション結果を、図 3-3、3-4 に示す。室内換気のみを稼働したときの結果である。室内給気（図 3-3）では、室内に吹出された瞬間に最大流速は 2.5 m/s （=流量 $6.0 \text{ m}^3/\text{min} \div$ 開口面積 $0.040 \text{ m}^2 \div 60 \text{ min/s}$ ）に達しており、これは労働安全衛生法が定める「室内気流流速 0.5 m/s 以下」を超過した値であり、近辺での作業者が寒さなどの不快さを感じる可能性があることを示している。さらに、吹出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がわかる。最後に、室内排気（図 3-4）では、室内給気に比べると穏やかな気流が周囲に形成されていることが読み取れる。

本項の検討により、それぞれの換気装置が持つ能力が確認できた。それらが混在している実験室において、相互の能力や位置関係が室内気流に与えている影響の検討を進めていきたい。

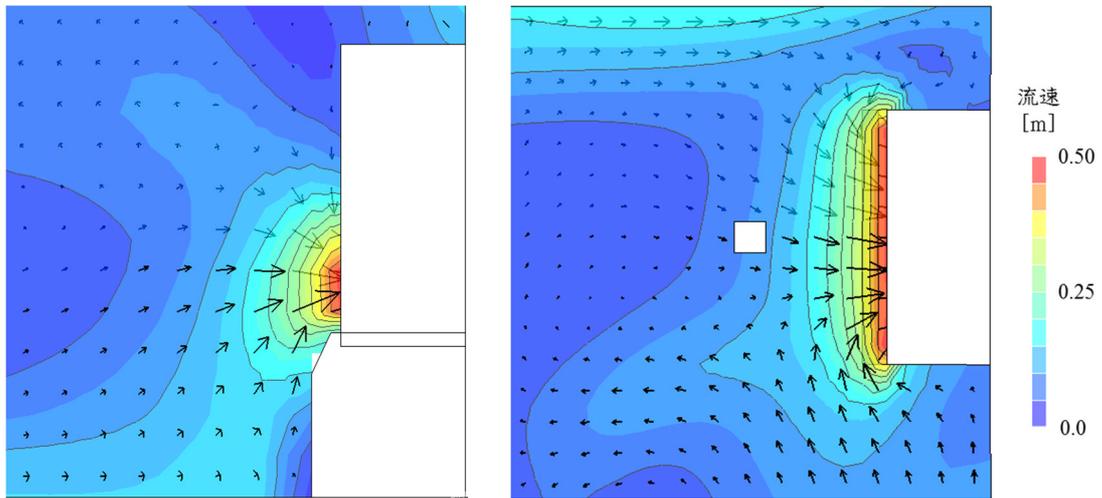


図 3-1 ヒュームフード周辺気流分布
 左 : Y=5.5 m 断面 右 : Z=1.0 m 断面

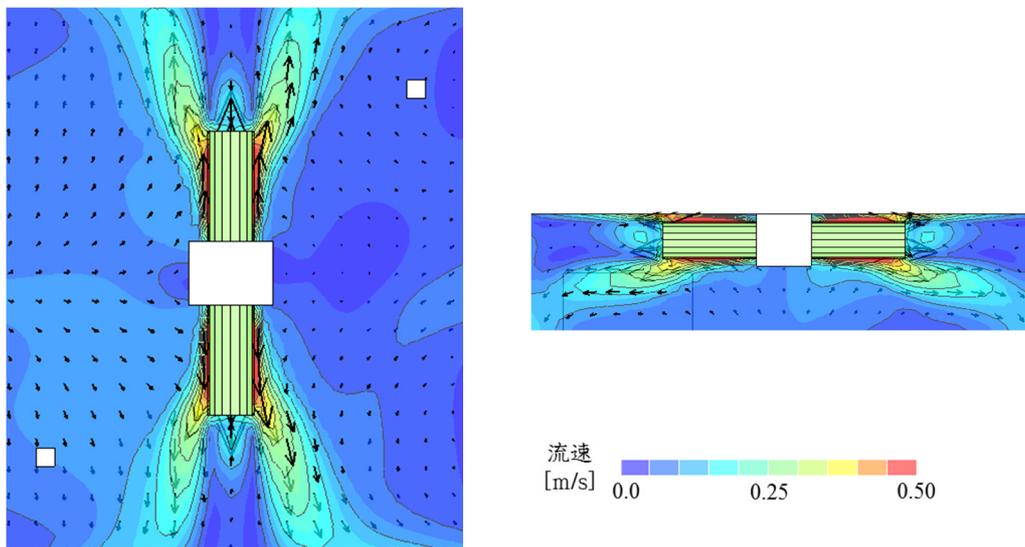


図 3-2 ヒュームフード給気周辺気流分布
 左 : Z=2.65 m 断面 右 : X=1.0 m 断面

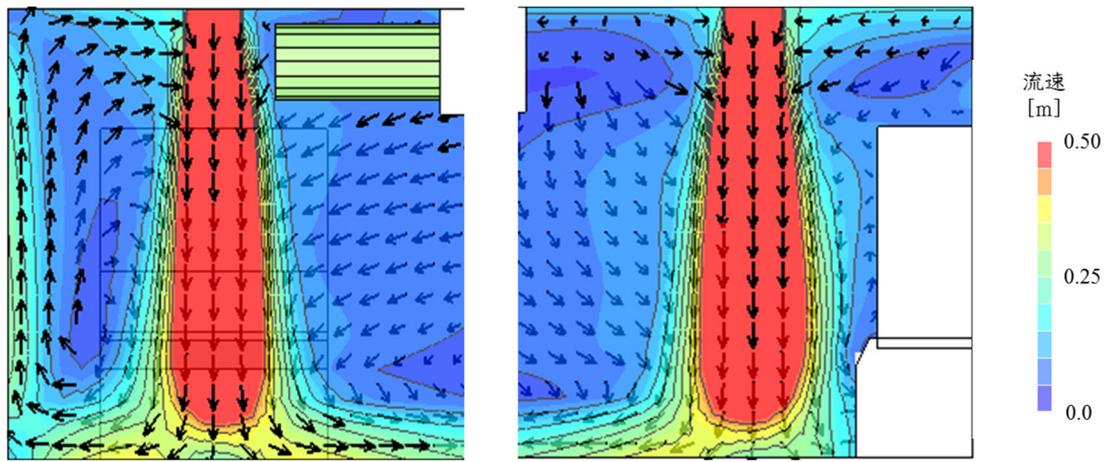


图 3-3 室内换气给气口周边气流分布
左: X=5.5 m 断面 右: Y=5.5 m 断面

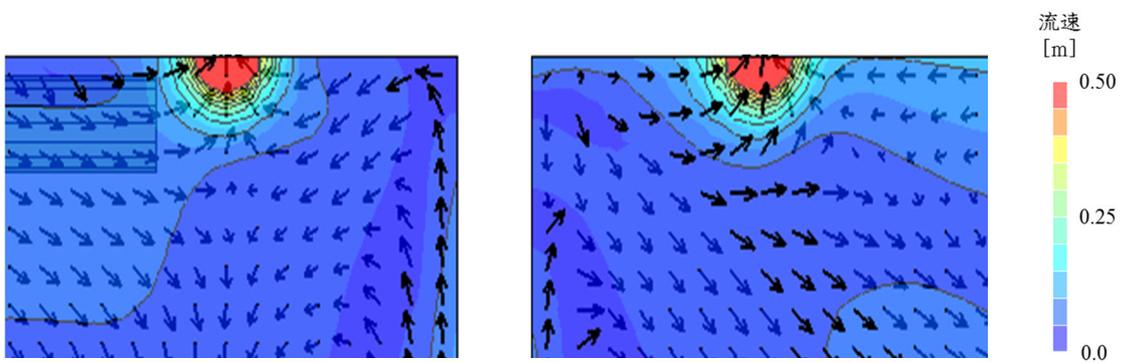


图 3-4 室内换气排气口周边气流分布
左: X=1.5 m 断面 右: Y=1.5 m 断面

3.1.2 ヒュームフード給気の給気設計

ヒュームフードによって排気された量の空気を補うヒュームフード給気的设计について考察を行った。ヒュームフード給気の概略図は、図 2-6 (前掲) に示した。ヒュームフードの排気面の面風速は 0.50 m/s で一定とすると、40 cm の開口で 19.8 m³/min の換気量を有し、これは室内換気の 6.0 m³/s を大きく上回る量であるため、排気のみでなく給気も室内気流に影響を与えていると推測される。

ヒュームフードのみ稼働 (室内換気未稼働) の場合の、Y、X 軸方面から見たヒュームフード給気からの給気の流れを、図 3-5 に示す。8 方向に向かって円筒のメッシュから流出していることがわかった一方で、給気は両端から高流速で吹き出し壁に向かう気流となっていることも判明した。そのため、図 3-6 のヒュームフード給気付近の流速ベクトルが示すように、ヒュームフード給気の下方の領域では圧力が減少し、ヒュームフード給気に向かう上昇気流が形成されている。

物質の濃度の等値面は拡散物質濃度の等しい地点をつないだ面であり、物質の拡散の様子を示しており、立体的に拡散状態を確認することを可能とする表現である。部屋中央で発生した拡散物質の濃度分布の等値面 (0.50 ppm) を、図 3-7 に示す。本条件では、気流の状態に影響を与える要因はヒュームフードによる排気と給気だと考えられるが、拡散物質はヒュームフード給気による吸い込みを大きく受けていることが確認された。吸い寄せられた拡散物質は、両端からの吹き出しにより部屋全体へ拡散されるということが推測される。

以上の検討により、実験室にヒュームフードを設置する際に排気能力などヒュームフードの排気側の性能が検討されがちであるが、実験室内の空気環境という点から見ると、ヒュームフード給気の設定位置や給気方法も考慮すべきことであると言えるだろう。

本項までに、ヒュームフード、ヒュームフード給気、室内換気による給気がそれぞれ室内気流に与える影響を検討を行いその特徴を明らかにした。次項では、それらのレイアウトを変化させ相互関係を整理し、レイアウトの指針となる情報を得ることを目指した。

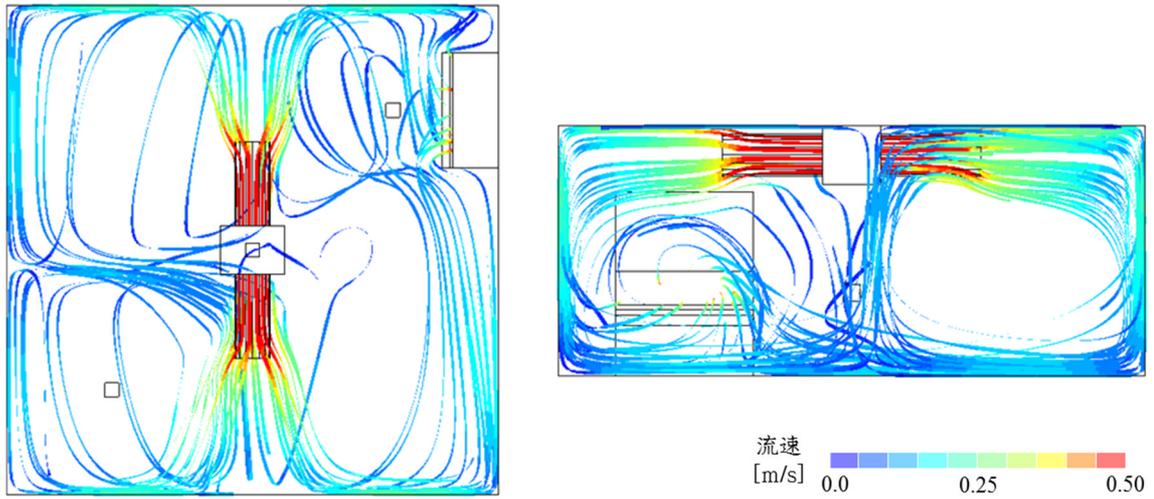


図 3-5 ヒュームフード給気からの気流の流線
 左:部屋上方から(Z断面) 右:部屋側面から(X断面)

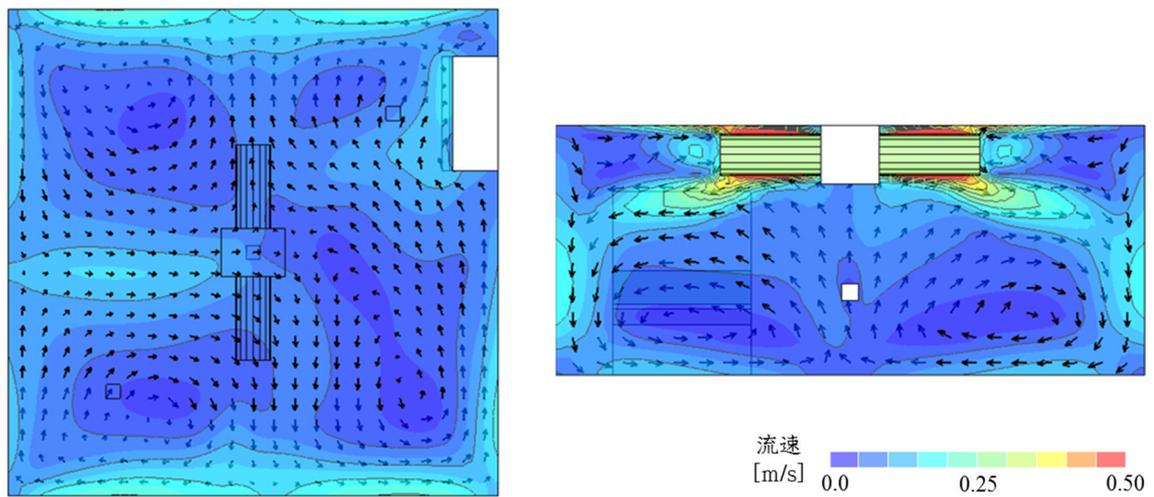


図 3-6 ヒュームフード稼働時の室内気流
 左:Z=1.0 m断面 右:X=3.5 m断面

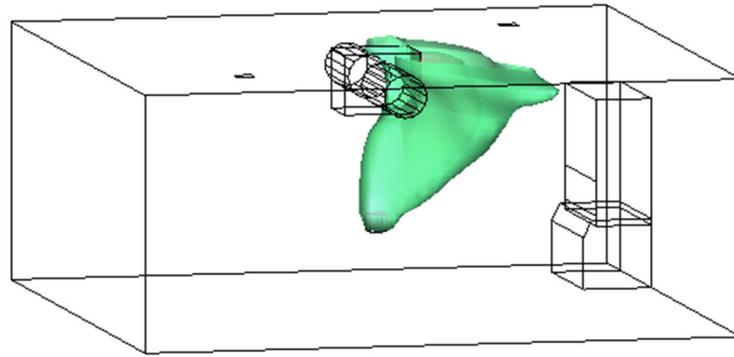


図 3-7 ヒュームフードのみ稼働時の拡散物質濃度等値面 (0.50 ppm)

3-2 換気装置の稼働状況が室内気流に与える影響の検討

実験室は、設計段階では実験室として利用されることが計画されていない場合がある。つまり、実験室は元々一般的な居室と同様の設計がなされており、利用者の目的に沿って実験装置やヒュームフードなどが設置された部屋である場合があるということである。そのため、実験室には室内換気装置とヒュームフードという2種類の給排気システムが混在している場と考えることができる。

室内換気の設置目的は、局所的な不快居住環境が発生させないための室内空気環境全体の均質化にある。一方、ヒュームフードなどの局所排気装置の場合はその名の通り局所的に発生した有害物質を効率的に排出することに目的が置かれている。目的の異なる2種類の給排気システムの混在という特徴を持つ実験室で、それぞれが室内の気流に影響を与えているのかを対象として検討を行った。

ヒュームフード、室内換気のそれぞれを稼働/非稼働と切り替えたときの気流の変化について、シミュレーションを行い解析した。また、部屋中央から拡散物質が発生していることを想定し、物質拡散の挙動についても解析を行った。ヒュームフード、室内換気の稼働状況の状況を、以下の表3-1に示す。

表 3-1 PIV 解析条件

	ヒュームフード	室内換気
換気量	19.8 m ³ /min	6.0 m ³ /min
稼働状況		
	稼働	非稼働
	非稼働	稼働
	稼働	稼働

3.2.1 ヒュームフードのみ稼働時の室内気流

ヒュームフードのみ稼働時の、ヒュームフード給気から吹出される気流の流線を、前項の図 3-5（前掲）で示した。部屋中央のヒュームフード給気から吹き出された給気によって気流が形成され、対称性の高い気流が室内全体を循環していることが見て取れる。また、拡散物質発生源周辺からの流線を、図 3-8 に示す。流線が拡散物質の拡散の様子を表していると考え、拡散物質は発生してから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ることができる。

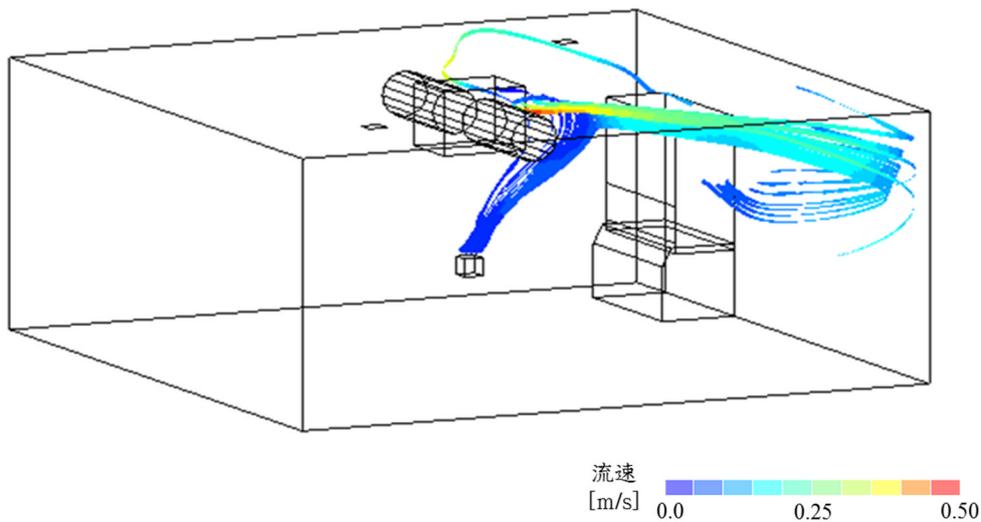


図 3-8 ヒュームフードのみ稼働時の、拡散物質発生源周辺の気流流線

3.2.2 室内換気のみ稼働時の室内気流

室内換気のみ稼働時の、室内給気から吹出される気流の流線を、図 3-9 に示す。図 3-3 (前掲) で示したように、室内給気からの吹き出し気流の流速が 0.50 m/s を越えており、床への下降気流により床を這う高流速の気流が形成されていることがわかった。その結果、床付近より高い位置の空気は下降気流に向かっていく気流となっており、周辺の空気は下降気流に近づいていき床に吹き付けられ、床を伝って室内に広がっていった。そして、壁に衝突し、室内空間の中央に向かうという循環となっていた。拡散物質の拡散の様子(図 3-10)を確認すると、拡散物質は室内給気の作り出す気流の循環に従い、室内全体に広がっていた。これらは、室内の空気を均質化するという室内換気の役割が表れた結果であろう。

3.2.3 ヒュームフード、室内換気ともに稼働時の室内気流

それぞれの換気装置の効果を念頭に置き、ヒュームフードと室内換気をともに稼働した場合の気流と拡散物質の拡散について考察を行った。ヒュームフード給気と室内給気から吹出す気流の流線を図 3-11 に、拡散物質発生源周辺の気流の流線を図 3-12 に示す。流線はお互いの気流の影響を受けたと見え、乱れの少なかったヒュームフード給気にも図左上、右下の領域に乱れが観測された。部屋中央で発生した拡散物質の拡散については、室内給気の下降気流に引き込まれて床を伝って部屋全体に広がるという点で、室内換気のみを稼働したときと同じ傾向を示している。ヒュームフード、室内換気ともに稼働時には、室内換気のみを稼働したときと同様に、室内給気が生み出している下降気流が大きな影響を与えていると考えられる。ヒュームフード排気量が $19.8 \text{ m}^3/\text{s}$ であるのに対し、室内換気の換気量はその約 $1/3$ の $6.0 \text{ m}^3/\text{s}$ と少量であるということを考慮すると、この結果は報告しているように^[44]実験室内気流を考えるにあたり換気量だけを必要十分にすることが、実験室の適切な換気設計を直接的に実現することとはならないことを示唆している。

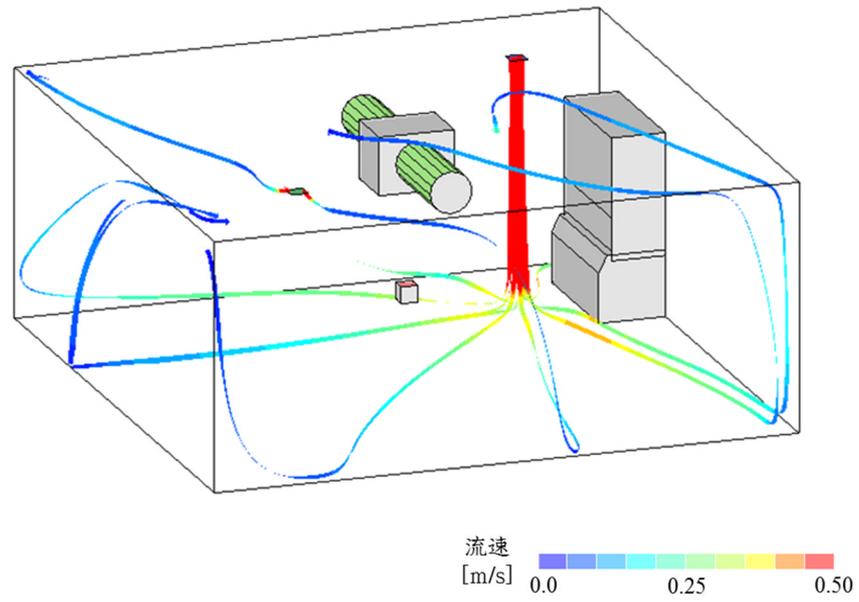


図 3-9 室内換気のみ稼働時の、室内換気給気口からの気流流線

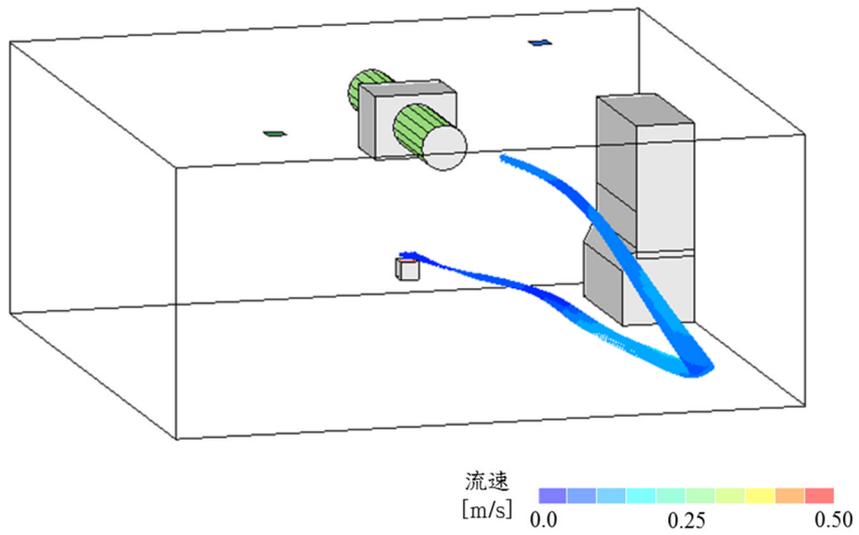


図 3-10 室内換気のみ稼働時の、拡散物質発生源周辺の気流流線

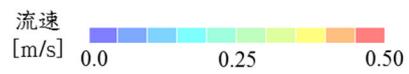
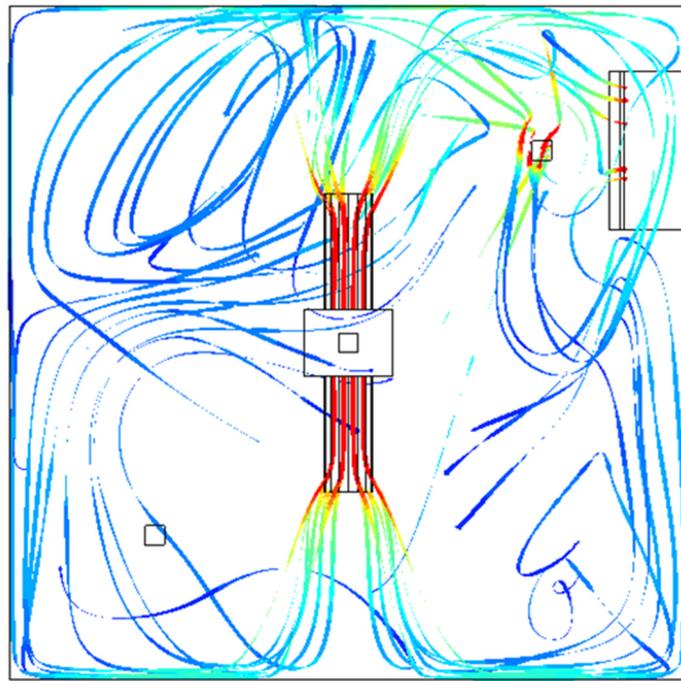


図 3-11 ヒュームフード、室内換気ともに稼働時の、それぞれの給気からの気流流線

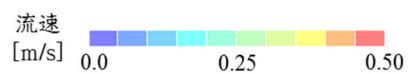
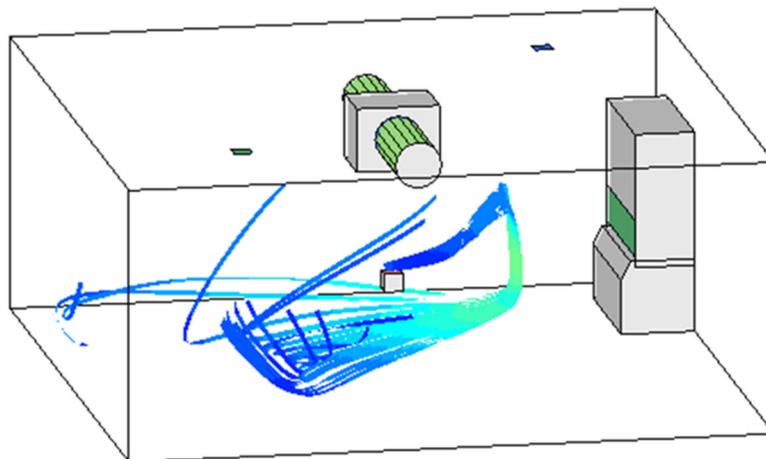


図 3-12 ヒュームフード、室内換気ともに稼働時の、拡散物質周辺の気流流線

3.2.4 室内換気設備稼働状況についての考察

さらに、それぞれの換気装置稼働状況のときの拡散物質の濃度等値面を見ると、室内換気のみを稼働したとき、換気量が少ないこともあり室内全体が高濃度状態になっていることがわかる。ヒュームフードのみを稼働したとき、ヒュームフードの上部あたりを中心に一定の箇所に集中していることがわかる。それらに対し、ともに稼働したとき、濃度は低いものの室内換気の形成する気流により、部屋全体に広がる傾向が見られた。ヒュームフードによる広い範囲への拡散をさせない拡散物質の排気を、室内給気によって妨げられ室内拡散が促されていると解釈することができる。

本項での検討結果は、

- ① 室内気流は給気的位置や向きに大きく影響を受ける場合があること
- ② ヒュームフード、ヒュームフード給気と室内換気的位置関係を考慮した実験室のレイアウトが重要であること
- ③ 実験室においてはむしろ拡散物質の拡散を促進させ悪化させる可能性があるということ
を指し示していると考えた。

①は、空気が給気の吹出しに引き込まれることから、気流ができていることから導かれたことである。排気口に向かって空気は進み排気されていると考えがちだが、給気口的位置こそ給気の形成を考えるうえで重要であることを示していると言える。

②については、一般に、室内換気装置は実験室にはじめから備わった境界条件であり移動するなどの変更をすることはできない。使用者にとって、その境界条件の中でヒュームフードをいかに設置するかを考えることが室内環境の向上に必要であり、設置場所を決める指針となる情報が提供されるべきである。

③については、室内の換気を行う際、換気量を増やすことが換気の促進につながると直感的には考えられることに反する結論となった。換気装置を稼働することによる換気回数の増加が、局所的に見ると空気環境の改善にはつながっていないことを示している。

3.3 換気装置の位置が室内気流に与える影響の検討

実際の実験室は、初めから実験室として利用されることを想定されて設計されたわけではない部屋が使用されていることが多い。つまり、大学実験室は、すでに居室などと変わらない形で室内換気が設置してある部屋に、ヒュームフードなどの局所排気装置を設置している場だと言える。そのため、部屋の設計者と実験室の利用者の間で、室内気流について相互理解ができておらず、室内換気と局所排気装置のレイアウトがそれぞれにとって都合よいように設計され、総合的に見ると室内空気環境にとって悪影響となっている場合があることが考えられる。

3.2 の検討で、換気装置の稼働状況で室内の気流状態が大きく変わることが確認された。本項では、ヒュームフード、ヒュームフード給気の位置を変化させ、空気環境の変化について検討した。その結果から得られた知見を活かして、望ましい室内レイアウトの実現の可能性について検討した

3.3.1 ヒュームフードの位置が室内気流に与える影響の検討

ヒュームフードの位置を変化させて、ヒュームフードの設置位置が気流に与える影響を検討した。

5つのヒュームフード位置（フード位置A～E）における検討を行った。図3-14に、検討したヒュームフード位置を示す。計算はすべて定常状態計算で行った。

3.3.1 (a) ヒュームフードのみ稼働時の空気環境評価

ヒュームフード稼働、室内換気非稼働時の、 $Z=1.5\text{ m}$ における空気余命の分布を図3-15に、部屋上方から見た室内気流の流線を図3-16に示す。ヒュームフード給気の設置向きに平行に、空気余命が分布していることが読み取れる。これはヒュームフード給気の給気設計によるものであり、ヒュームフード給気が室内全体の空気の滞留の傾向を作り出していると読むことができる。ヒュームフードが存在しない側の領域の空気は室内にとどまる時間が長くなることが示されており、ヒュームフード給気が形成する流線も鑑みるに、そこで発生した化学物質はその領域に滞留することが予想される。

3.3.1 (b) ヒュームフード、室内換気ともに稼働時の空気環境評価

次に、ヒュームフード稼働、室内換気ともに稼働時の、 $Z=1.5\text{ m}$ における空気余命の分布を図 3-17 に、部屋上方から見た室内気流の流線を図 3-18 に示す。室内換気非稼働時に比べて、室内全体として見たとき空気余命の偏りは減少し、室内空気環境を均質化するという室内換気の役割を果たしていることがわかる。また、高い空気余命となる領域をそれぞれ見ると、フード位置 A、B のレイアウトにおいて図の左上の領域、フード位置 C、D のレイアウトにおいて右上の領域が該当している。フード位置 A、B のレイアウトに関しては、ヒュームフードがある右半分や室内排気がある左下に比べると相対的に左上の領域はそれら排気装置の影響を受けにくい上に、ヒュームフード給気を作る気流によって左上の領域内を循環してしまっていることが理由だと考えられる。フード位置 C、D のレイアウトに関しては、室内給気に近い領域が空気滞在の長期化が起きていると見ることができ、室内給気の吹き出しが室内全体への拡散を促していることが理由と考えられる。

これらの結果は、ヒュームフードの排気から最も離れた領域が最も排気されにくい領域になるわけではないことを示しており、ヒュームフードの位置だけでは室内空気環境を決定することができないことを示していると言える。室内換気装置の一方だけでなく、それぞれの位置関係が室内空気環境を考える上で重要であるといえる。

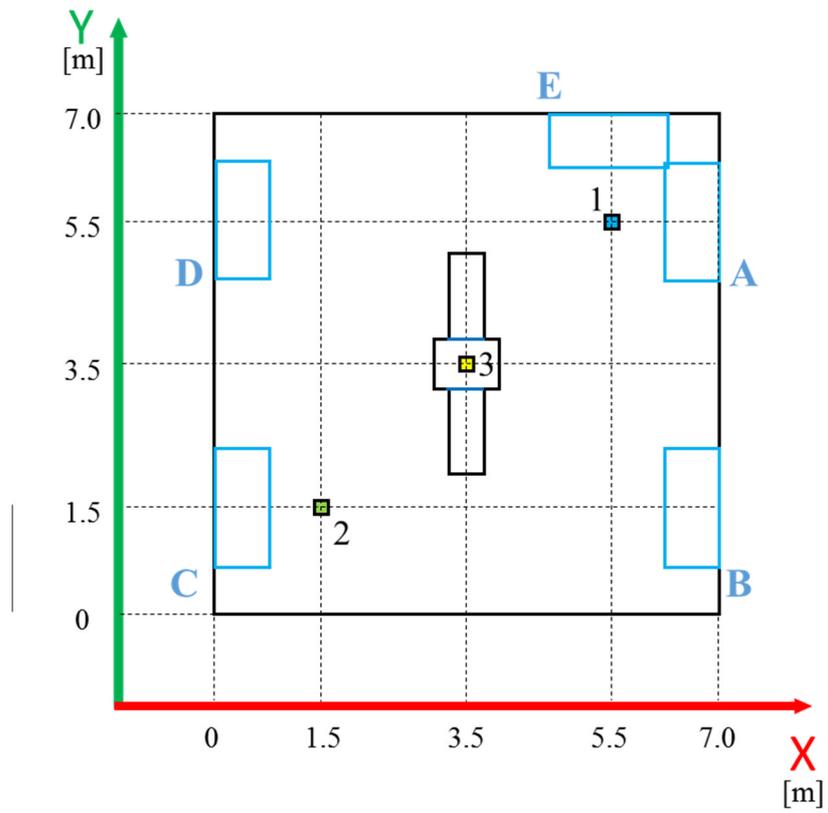


図 3-14 ヒュームフード位置 A~E(上面図)

1. 室内換気給気口
2. 室内換気排気口
3. 化学物質発生源

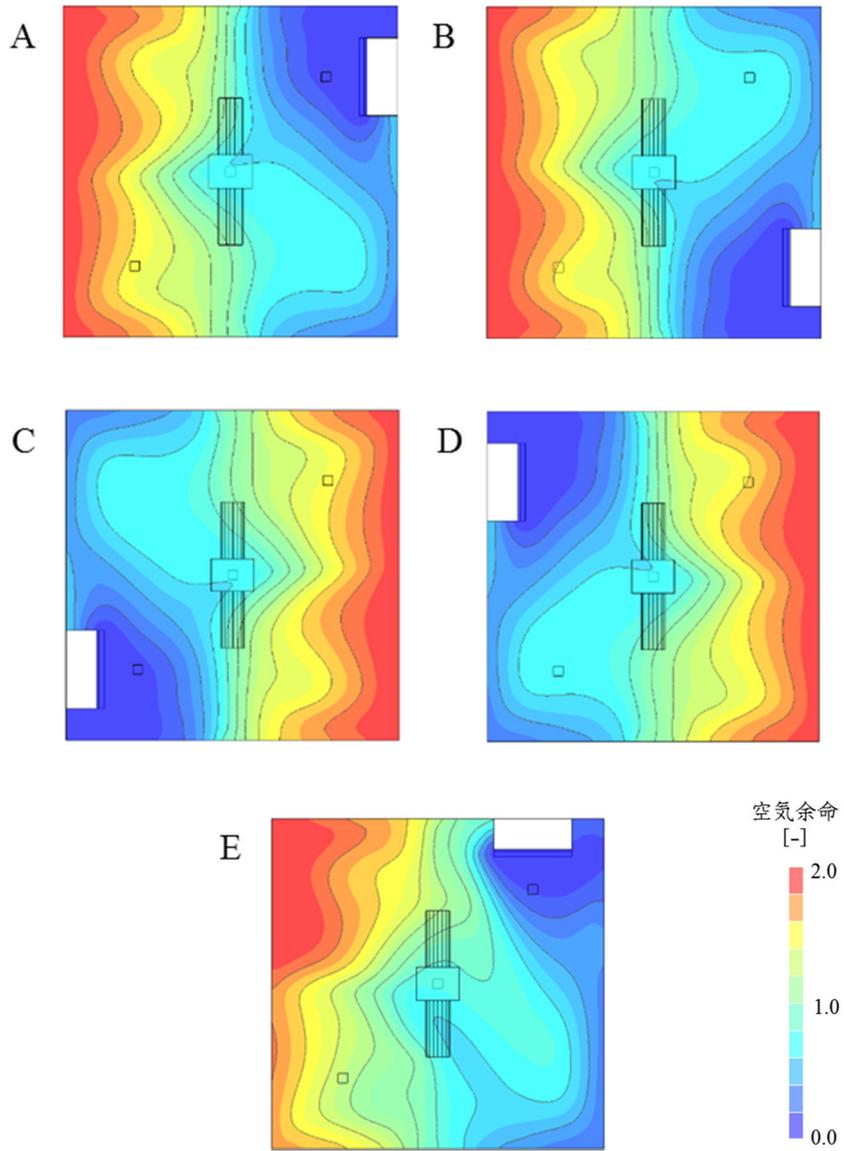


図 3-15 フード位置 A ~ E での、ヒュームフードのみ稼働時の空気余命分布 (Z=1.5 m)

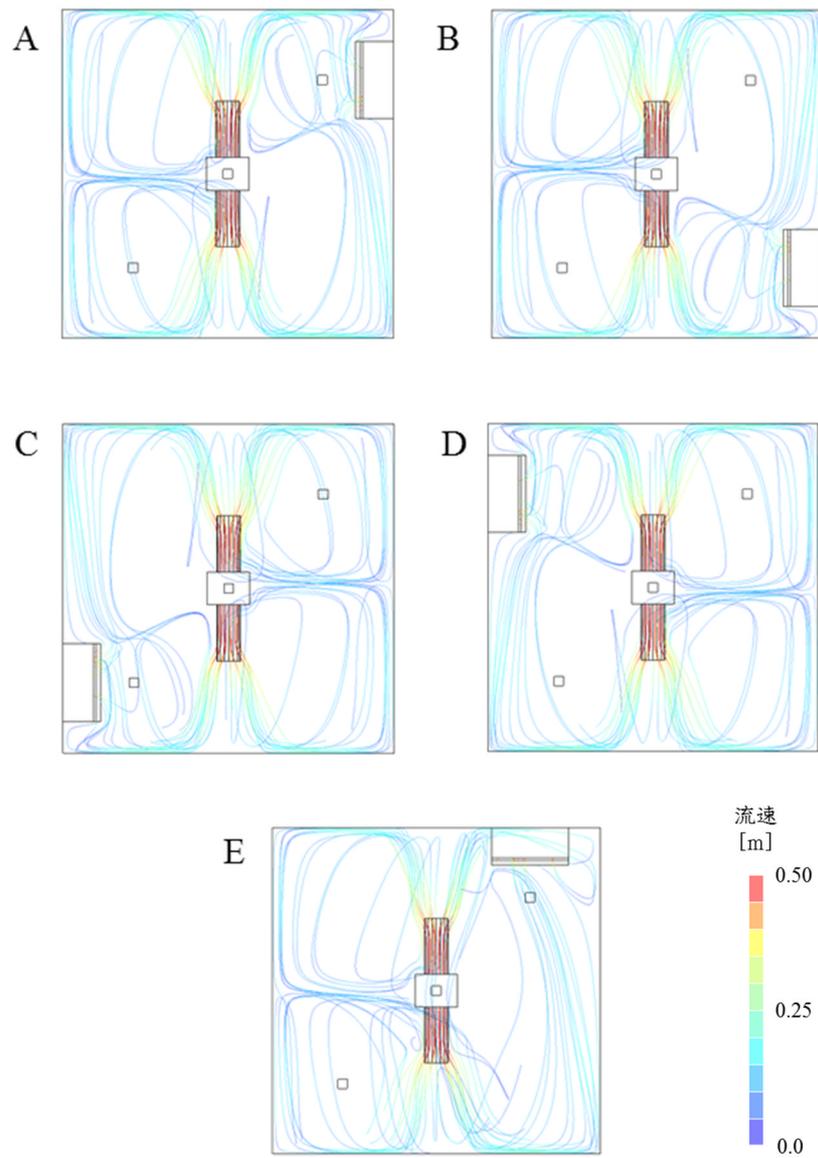


図 3-16 フード位置 A ~ E での、ヒュームフードのみ稼働時の流線(部屋上方から)

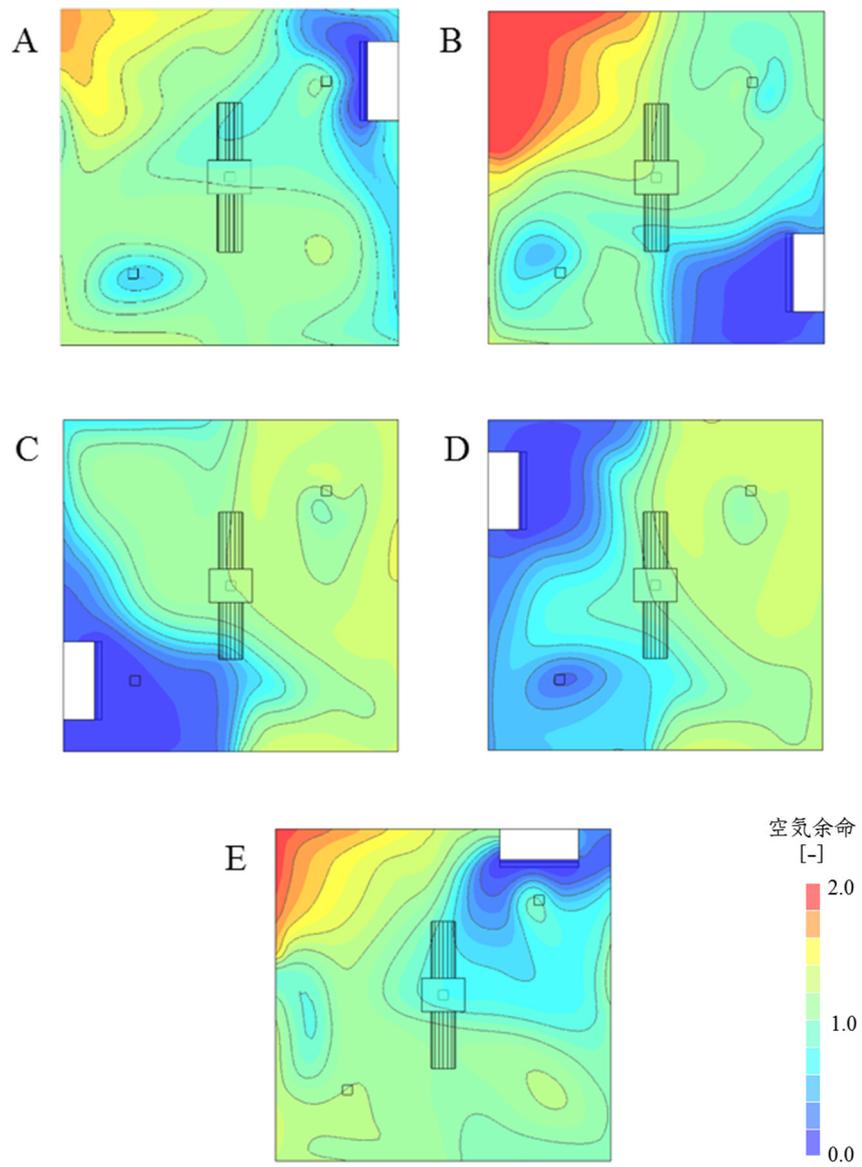


図 3-17 フード位置 A~E での、ヒュームフード、室内換気ともに稼働時の
空気余命分布 (Z=1.5 m)

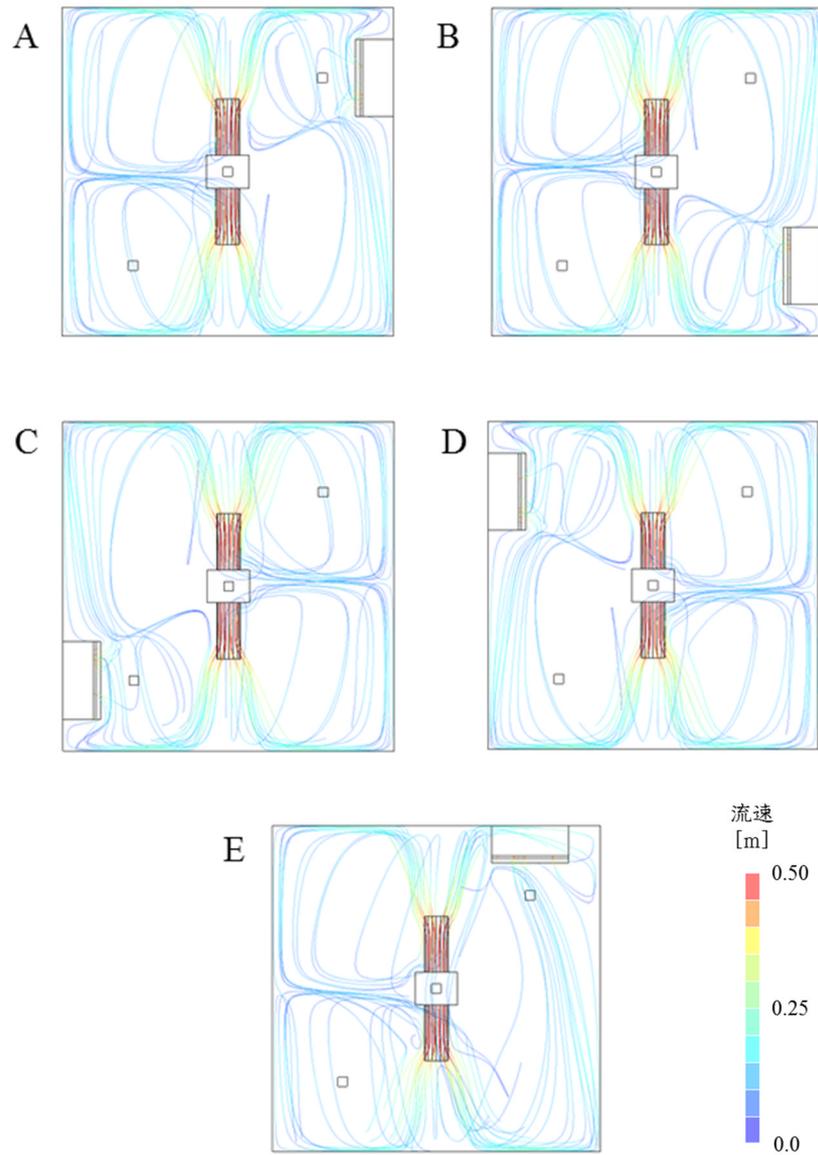


図 3-18 フード位置 A ~ E での、ヒュームフード、室内換気ともに稼働時の
 流線 (部屋上方から)

3.3.2 ヒュームフード給気の位置が室内気流に与える影響の検討

大学実験室にヒュームフードを設置するにあたって、その排気能力や省エネ性に注目する場合が多い。しかし、**3.2**の検討で明らかにしたように、ヒュームフードの給気は室内全体の気流の傾向を決定づける影響を持つ可能性がある。本項では、ヒュームフード給気的位置を変化させて、ヒュームフードの設置位置が気流に与える影響を検討した。

5つのヒュームフード給気位置（フード給気位置 A'～E'）における検討を行った。以下に、検討したヒュームフード給気位置の情報を示す。

- ・ヒュームフード給気位置（フード給気中心の座標(X, Y, Z)[m]）
 - ・フード給気位置 A' (3.50, 3.50, 2.65)
 - ・フード給気位置 B' (3.50, 5.45, 2.65)
 - ・フード給気位置 C' (3.50, 1.55, 2.65)
 - ・フード給気位置 D' (1.50, 5.45, 2.65)
 - ・フード給気位置 E' (5.50, 1.55, 2.65)

ヒュームフードのみ稼働時と、ヒュームフード、室内換気ともに稼働時という状況を想定した。換気量は初期条件に等しい。計算はすべて定常状態計算で行った。

3.3.2(a) ヒュームフードのみ稼働時の空気環境評価

ヒュームフードのみ稼働時の、Z=1.5 mにおける空気余命分布の計算結果、部屋上方から見た流線の様子を、それぞれ図 3-19、3-20 に示す。空気余命の分布からフード給気を中心に四方に空気の質が分断されていると読み取ることができる。例えば、図 3-19 のフード給気位置 A'において、ヒュームフードの設置方向と平行に空気余命分布の層ができています。また、フード給気位置 B'、C'から A'同様に図の左において空気余命が高いが、フード給気から遠く流速も遅くなっている側（B'における左下、C'における左上）がより相対的に高くなっていることから、フード給気が室内全体の空気質の傾向の決定に大きく寄与していると言える。

また、フード給気が四方に空気を分断するという事は、フード給気を中心に四方にエアカーテンができていくということもできる。フード給気位置 E'の結果が示すのはフード給気からの気流がヒュームフードからの排気を妨げていることであり、フード給気によ

るエアカーテンが排気と交差しないように設置することが設計において必要であることを示唆している。その点で、フード給気位置 D'はフードの正面に給気が設置されておりフードの排気を妨げておらず、空気余命の均質性が高いという結果になった。

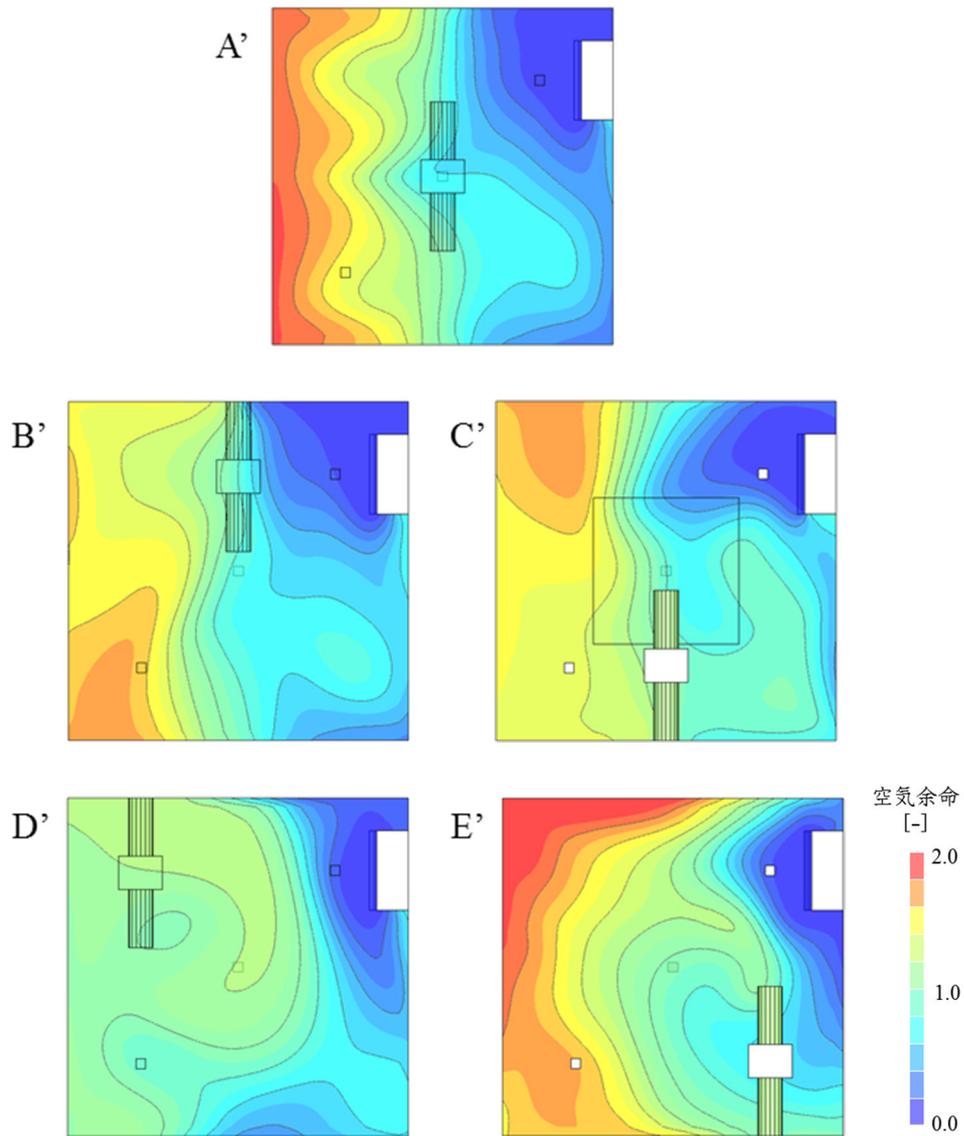


図 3-19 フード給気位置 A'~E'での、ヒュームフードのみ稼働時の空気余命分布 (Z=1.5 m)

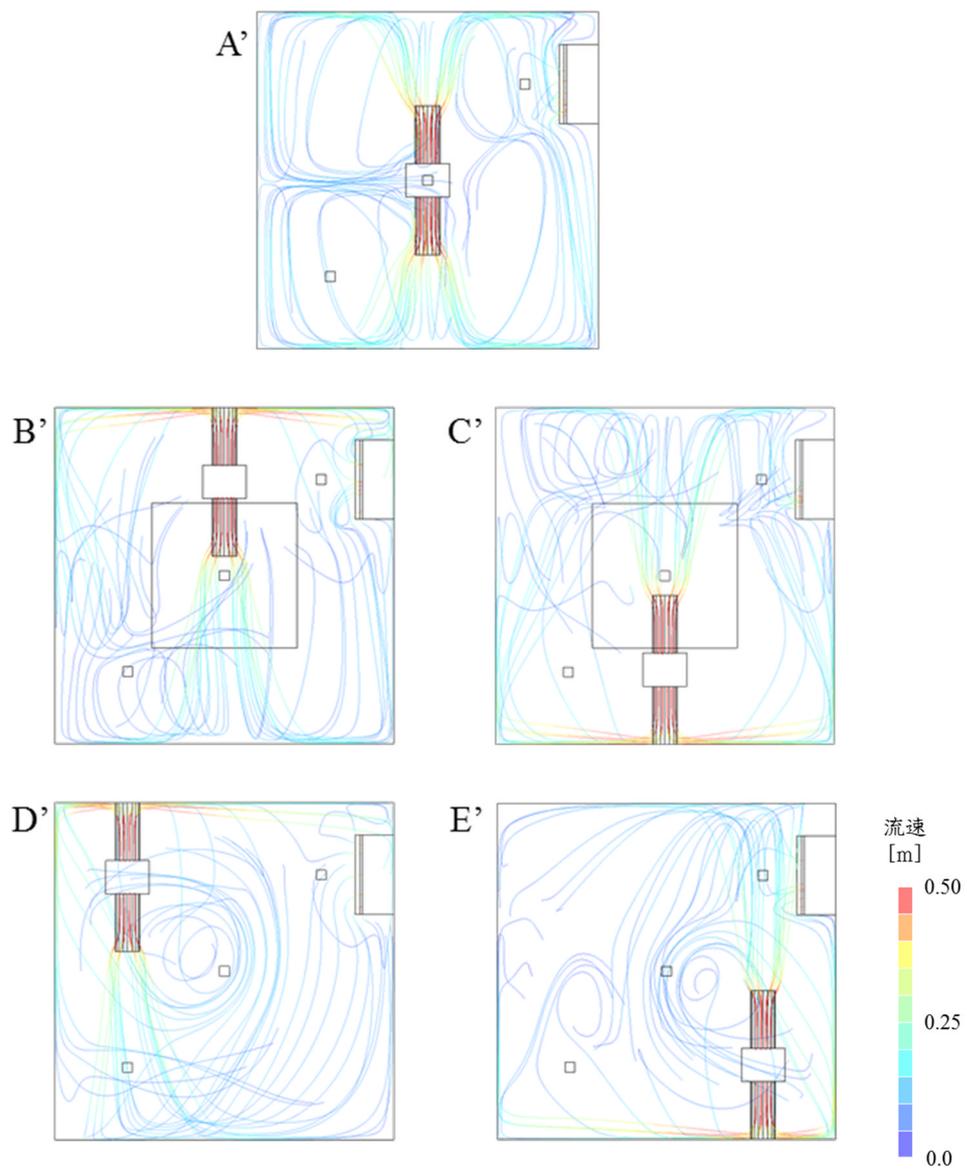


図 3-20 フード給気位置 A'~E'での、ヒュームフードのみ稼働時の流線(部屋上方から)

3.3.2(b) ヒュームフード、室内換気ともに稼働時の空気環境評価

ヒュームフード、室内換気ともに稼働時の、 $Z=1.5\text{ m}$ における空気余命分布の計算結果を、図 3-21 に示す。フード給気位置 A'、B'、C'、E'において 3.3.1 の検討での結果と同様に、室内換気の稼働により室内空気質の均質化が促進されフードのみ稼働時に比べ（図 3-19）空気余命の偏りは減少した。一方で、D'の結果を比較すると（図 3-22）室内換気を稼働することで、むしろ空気余命の上昇が確認された。これはヒュームフード前の室内給気の吹出しがフードからの排気を妨害していることで、室内換気非稼働時にスムーズに形成されていた排気経路が乱されたことが原因だと考えられる。これらの結果は、室内空気の均質化を図ることを目的に室内換気は使用されるが、レイアウトによっては室内換気の稼働によって空気の滞留が増加することがあることを示しており、ヒュームフード、フード給気、室内換気のそれぞれの特徴を理解したうえで、レイアウト（相対的な位置関係）をデザインすることが、室内の空気環境改善や保全に役立つということが明らかになった。

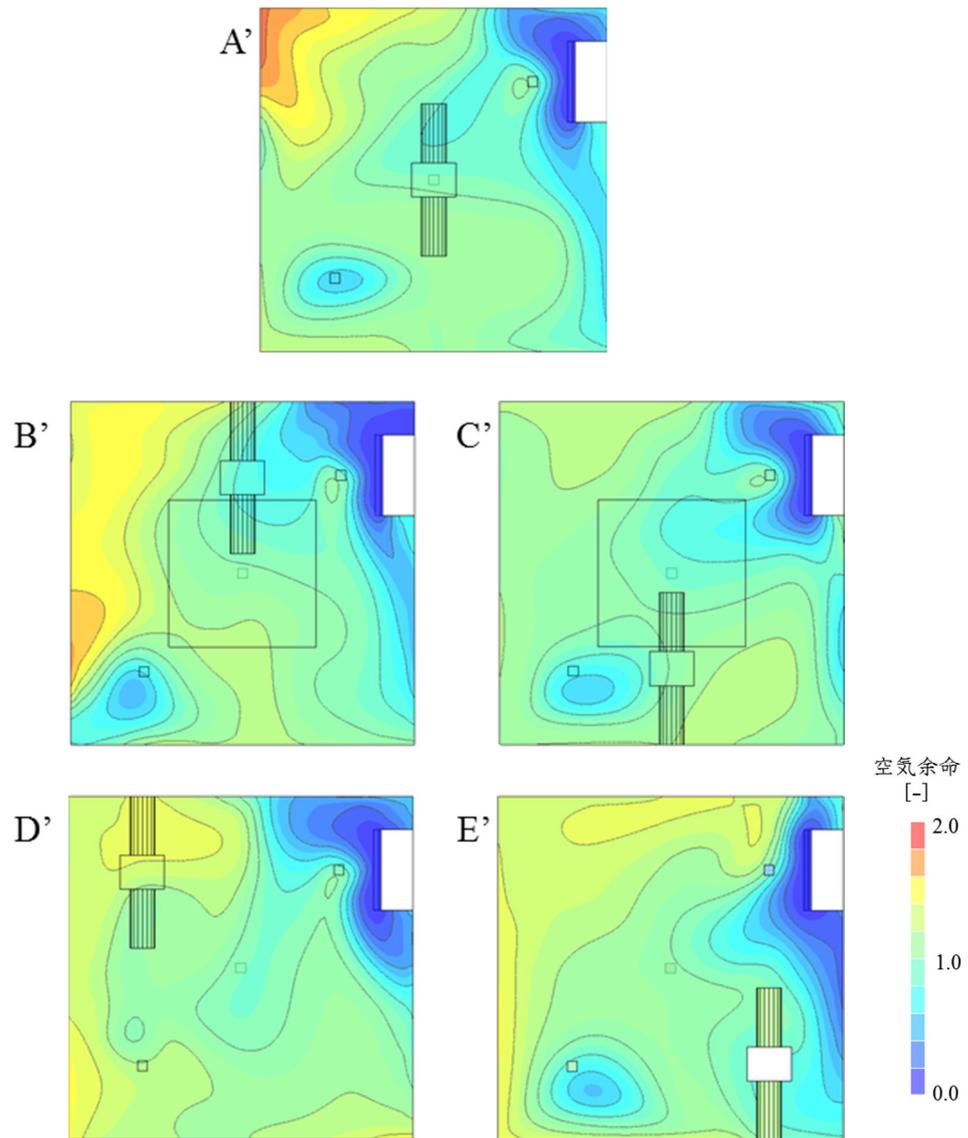


図 3-21 フード給気位置 A' ~ E'での、ヒュームフード、室内換気ともに稼働時の空気余命分布 (Z=1.5 m)

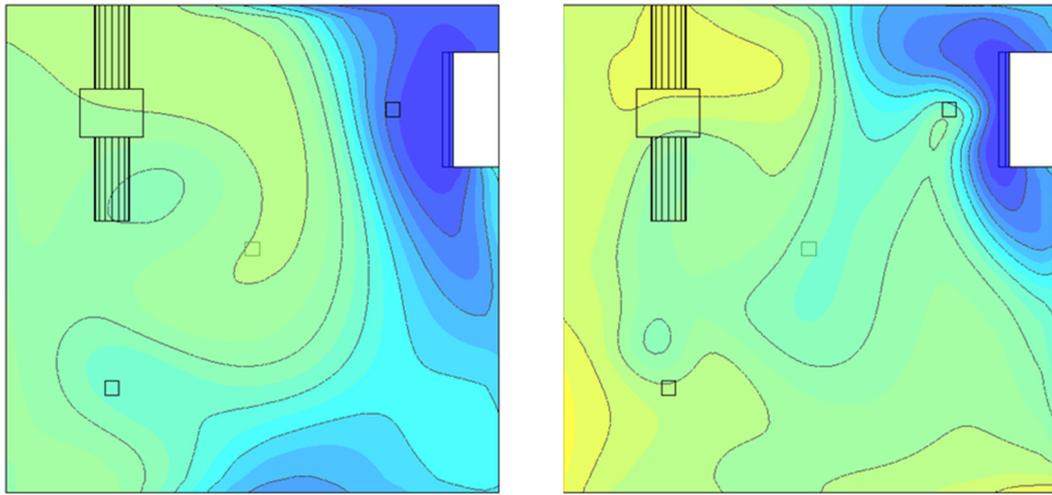


図 3-22 フード給気位置 D'のときの空気余命分布 (Z=1.5 m)

左:ヒュームフードのみ稼働

右:ヒュームフード、室内換気ともに稼働

3.4 レイアウトによる室内空気環境改善についての検討

大学実験室のレイアウトは自由度が高く、換気装置一つとっても様々なレイアウトが存在する。レイアウトは定常的な気流の状態を左右する境界条件となるため、大学実験室に備わるヒュームフード、室内換気という 2 種の換気装置の位置関係および稼働状況による実験室内気流への影響を検討してきた。

本章の検討結果から以下のような実験室の換気装置に関する特徴を得られた。

- ①給気を中心にエアカーテンが発生し室内空気を四方に分断している。また、高空気余命の領域で発生した物質は気流の滞留によって一部の領域にとどまって高濃度を示す範囲が広がっていることも確認した。
- ②空気余命の偏りが減少し、空気環境の均一化という室内換気の役割を果たしている。一方で、ヒュームフード前の空気余命は悪化しており、室内給気によって排気の阻害が起これ、ヒュームフード排気の勢力範囲に室内給気を設置すべきでないことを示唆している。

得られた 2 種の換気装置の特徴①②を考慮して、滞留が起こらない（空気余命の偏りが少ない）レイアウトを目指し図 3-22 のレイアウトを考案した。考慮した点は、ヒュームフード前に室内給気やヒュームフード給気などの高流速の吹き出しがある装置を設置しないこと、ヒュームフード給気が空気を 4 方向に分け排気の偏りを作ってしまうように得屋の隅のほうに設置するということである。

CFD 定常計算を行った結果、空気余命の偏りが減少した（図 3-23）。

このように、CFD 計算から室内レイアウトによる空気余命の変化を比較することにより、化学物質が滞留しやすい場所の予測が可能であり、同時に得られる換気装置が持つ気流への影響の与え方を気流環境の改善に利用可能であることが示された。

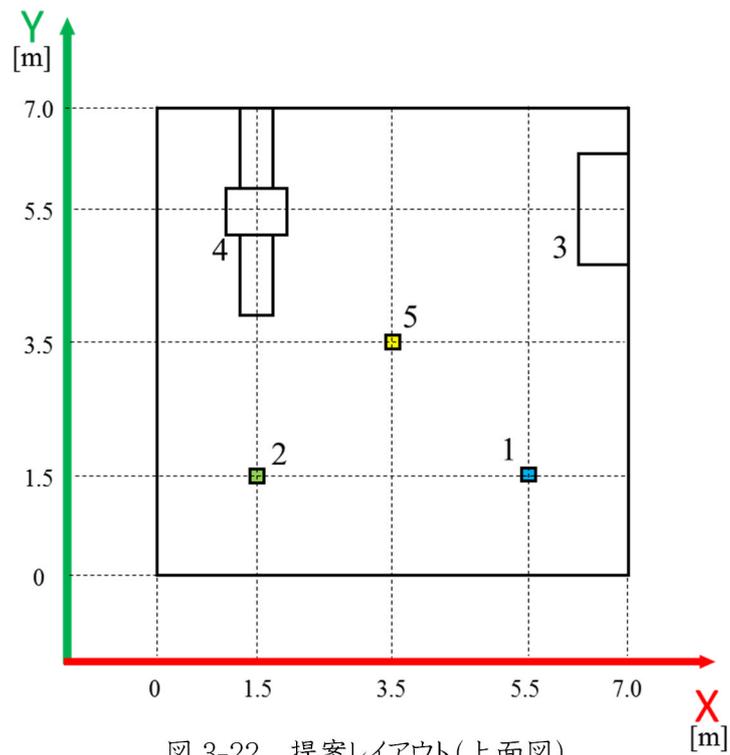


図 3-22 提案レイアウト(上面図)

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面
4. ヒュームフード給気面
5. 化学物質発生源

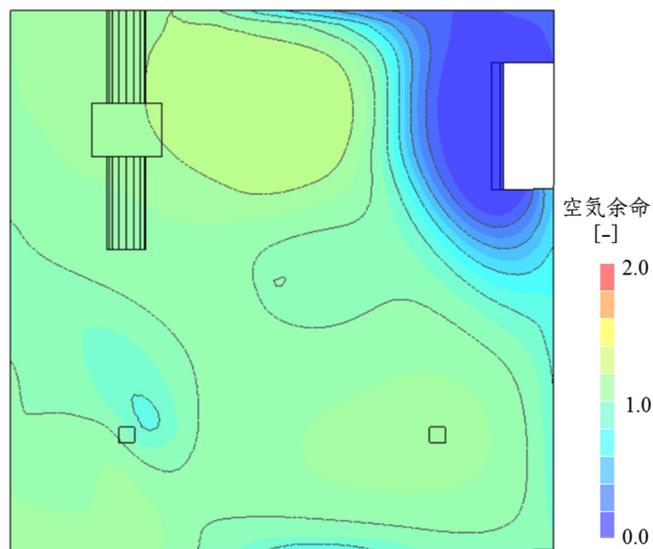


図 3-23 提案レイアウトにおける空気余命分布 (Z=1.1 m)

第4章 CFDによる実験室の作業環境の特徴が

空気環境に与える影響の検討

4.1 実験作業に起因する環境変化が、室内環境に与える影響の検討

実験室という場の持つ特徴として、「非定常性」、すなわち実験者の実験作業によって場の環境が変化するという性質がある。本項では、1) ヒュームフードのサッシの開閉、2) 実験室出入り扉の開閉の想定しうる作業をシミュレーション上でモデル化し計算した結果を示し、その作業が気流や物質拡散に及ぼす影響について論じたい。

4.1.1 ヒュームフードのサッシ開閉

ヒュームフードは、一般に使用時にサッシを開放し、未使用時は閉じられるという使用われ方がなされており、日中頻繁に開閉されると考えられる。ヒュームフードの換気量は室内換気に対し多量である（本検討対象の実験室における実測では室内換気の換気量 $6.0\text{m}^3/\text{min}$ であるのに対し、ヒュームフードの換気量は $19.8\text{m}^3/\text{min}$ と 3.3 倍を観測している）ため、開閉のたびに室内全体の換気量の増減が起き室内気流に影響があると推測される。第3章での CFD 定常状態計算による検討からも、ヒュームフードの稼働時と非稼働時では実験室内の気流は大きく異なることが明らかになっている。ヒュームフードの開閉をシミュレーション上で再現して、その影響について検討を行った。

4.1.1 (a) 検討条件

シミュレーションの条件を、以下に示す。4.0時間の時間経過を考えた。シミュレーションのタイムスケジュールを、図4-1に示す。

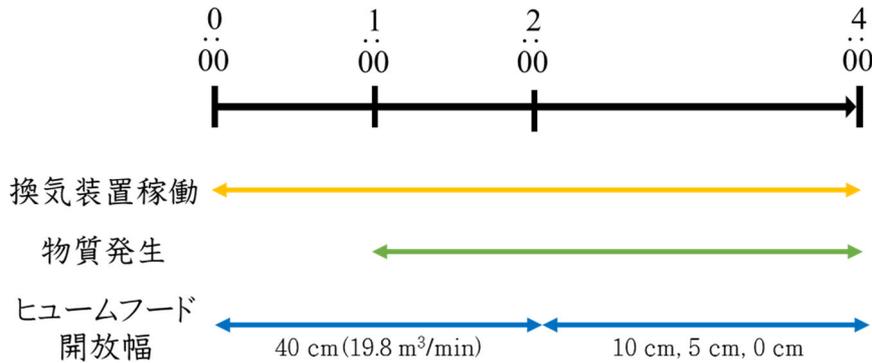


図 4-1 4.1における、CFD 計算タイムスケジュール

前半の2時間（0～120 min）はヒュームフードが稼働して全開（40 cm）になっていて、後半（120～240 min）はその幅が狭まり、「10 cm」、「5.0 cm」、「0 cm」（完全閉鎖）の状態稼働しているという想定となる。また、化学物質拡散の変化の検討のために、時刻1:00で拡散物質（密度：2.5 kg/m³、拡散係数：1.0×10⁻⁵ m²/s）が定常的に発生するという設定となっている。

表 4-1 モニタリング領域設定

領域	サイズ	
部屋全体領域	X: 7.0 m	
	Y: 7.0 m	
	Z: 3.0 m	
	サイズ	座標 (X,Y,Z) [m]
領域A		(2.5, 3.5, 1.5)
領域B	X: 0.50 m	(4.5, 3.5, 1.5)
領域C	Y: 0.50 m	(1.0, 6.0, 1.5)
領域D	Z: 0.40 m	(1.0, 1.0, 1.5)
領域E		(6.0, 1.0, 1.5)

4.1.1 (b) 部屋全体の空気環境に与える影響についての考察

部屋全体における平均流速、拡散物質濃度変化の、開口幅による計算結果の比較を、図 4-2 に示す。平均流速は全開時は 0.10 m/s 程度であり、サッシを閉めると開口幅に関わらず流速は落ち 0.80 m/s 程度で安定している。開口幅にかかわらず約 0.80 m/s 以下に低下することなく収束したのは、室内気流に対する室内換気によって形成される気流の寄与が大きいからで、ヒュームフードの給排気が流速には影響力が相対的に小さいからだと考えられる。しかし、拡散物質濃度は開口幅が狭いほど上昇していた。ヒュームフードのサッシを下げるにしたがって換気量が落ちていることを考えると、平均流速が低下し、換気量の低下とともに濃度が上昇しているのは想定されうる結果であった。

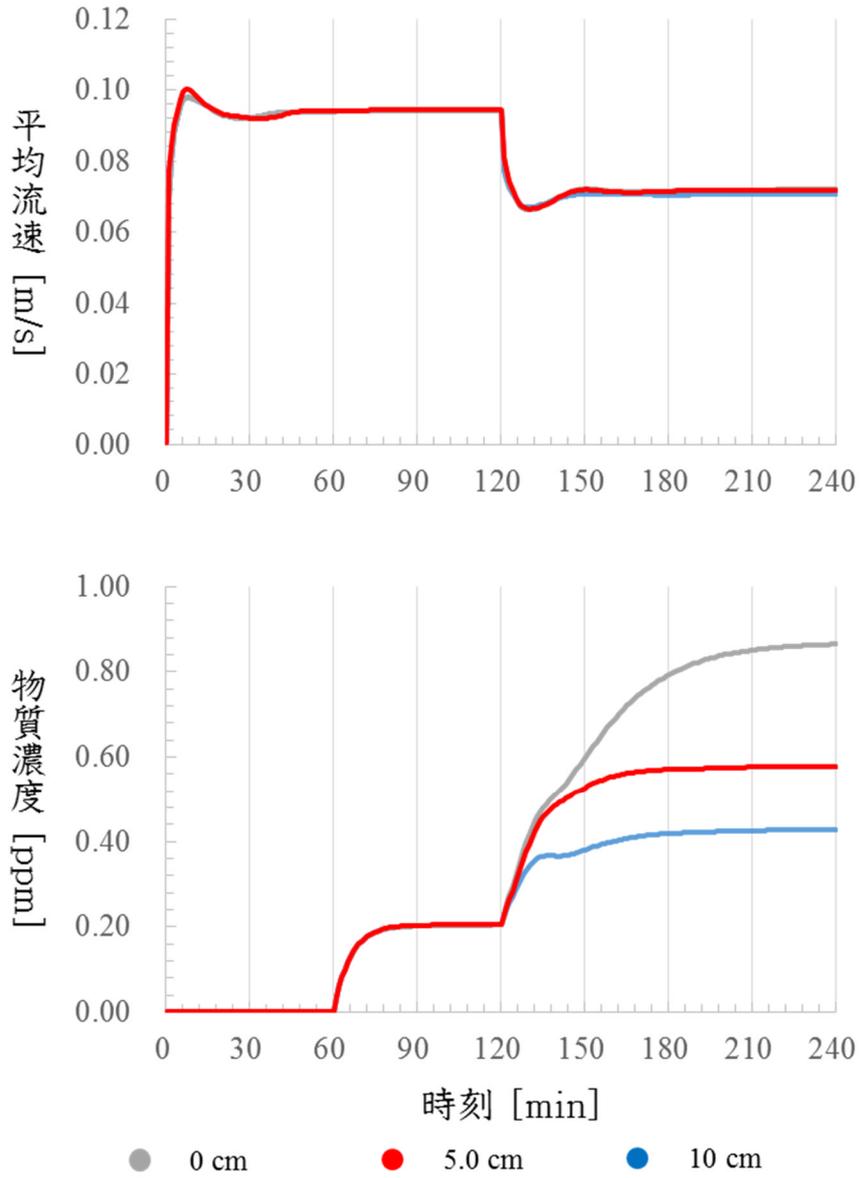


図 4-2 ドラフト開口幅 (t=120 分 ~) による、
部屋全体領域における平均流速と拡散物質濃度の時間変化

4.1.1 (c) 局所領域の空気環境に与える影響についての考察

領域 A～E における平均流速の、開口幅による比較を、図 4-3～7 に示す。多くの場合で、時刻 2:00 にヒュームフードが閉まるのに連れて、平均流速は安定した状態に至るまで（以下、「遷移期」と呼ぶ）に変動があることがわかった。遷移期は領域によって異なり、30 分から 60 分ほどであるということが示されている。領域 B を除いて、その他の領域ではヒュームフードを閉めることにより、遷移期に一時的な平均流速の上下動があり、より低い流速で安定していることがわかった。領域 B では、遷移期の上下動は確認できるが、安定時の流速はヒュームフード面解放時と領域 A、B、E においては先に急速な降下ののちに上昇が起こり、領域 C、D においては先に流速の急速な上昇ののちに降下が発生している。その遷移期間の流速の上下動幅を見てみると、開閉前後における安定時の流速より大きくなる場合と小さくなる場合があることがわかった。

※0～120 min では、すべての条件で 40 cm の開口幅（換気量：19.8 m³/min）でヒュームフードは稼働しているため、本来であればその間の平均流速・拡散物質平均濃度の挙動は等しくなるはずである。しかし、各領域で誤差があった。これは CFD の境界条件を設定した際に、ヒュームフードの開閉を表現するために、40cm の開口幅のある面のうち、ヒュームフード排気面を常に排気する面と時刻 2:00 において排気を停止する面の 2 面に分割したことが原因だと考えられる。モデリング上の問題であるため、本検討では 0～120 min の各条件による誤差については考察対象としていない。

続いて、そのような流速変化に伴う、各領域における拡散物質濃度の変化を解析した。領域 A～E における拡散物質濃度変化の、開口幅による比較も、先ほどの図 4-3～7 に示した。領域 B を除いた領域ではヒュームフードの開口度を下げるとより高い濃度を記録するようになった。これは室内全体の換気量が低下していることから予想される結果である一方で、領域 B においては同程度またはより低い濃度が記録される結果となった。その理由は、ヒュームフードを全開時の気流が拡散物質発生源から領域 B に向かうベクトルを持っていたが、ヒュームフードの給排気が弱まることで気流のベクトルが別の方向に変化したことと考えられる。発生源に近い領域だとベクトルの変化によって濃度の変動が大きくなることを示唆している。また、遷移期に着目すると、4 時間のシミュレーションにおける濃度ピークを遷移期に迎える場合があることがわかった（開口幅 0 cm のときの領域 B；開口幅 5 cm のときの領域 A、D；開口幅 10 cm のときの領域 B、D）。これらの領域においては、遷移期を経て安定した状態よりも遷移期の間の方が拡散

物質濃度が高まっており、ヒュームフードのサッシを下げるという作業をしてから 20 分～50 分経過の間、高濃度の状態が続いていることが確認できた。

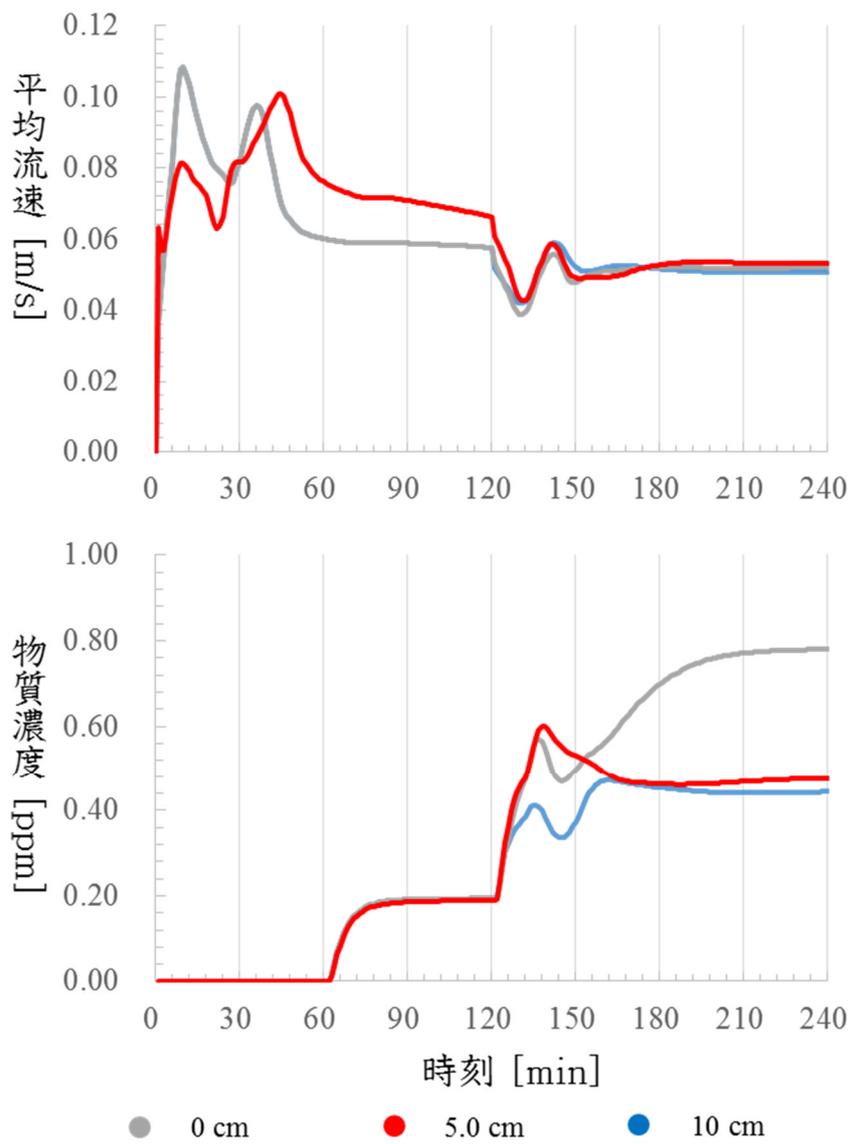


図 4-3 ドラフト開口幅 (t=120 分 ~) による、
領域 A における平均流速と拡散物質濃度の時間変化

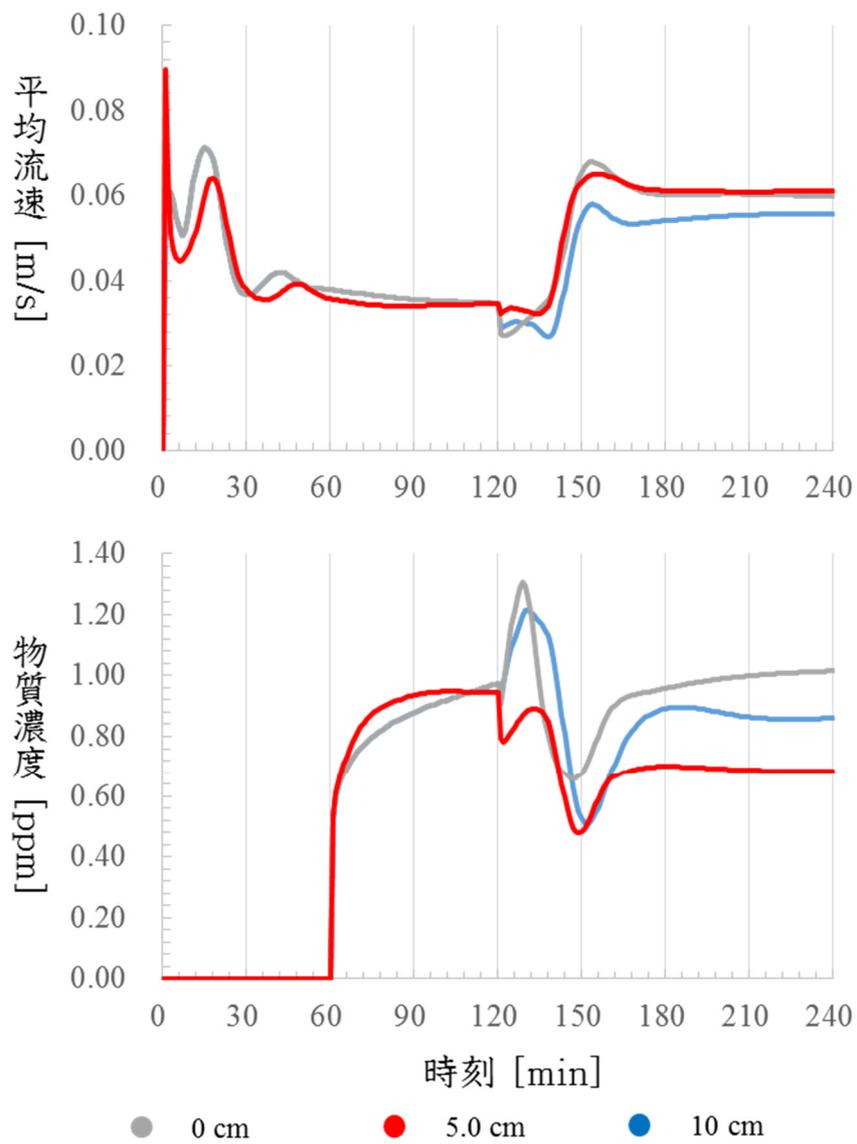


図 4-4 ドラフト開口幅 (t=120 分 ~) による、
領域 B における平均流速と拡散物質濃度の時間変化

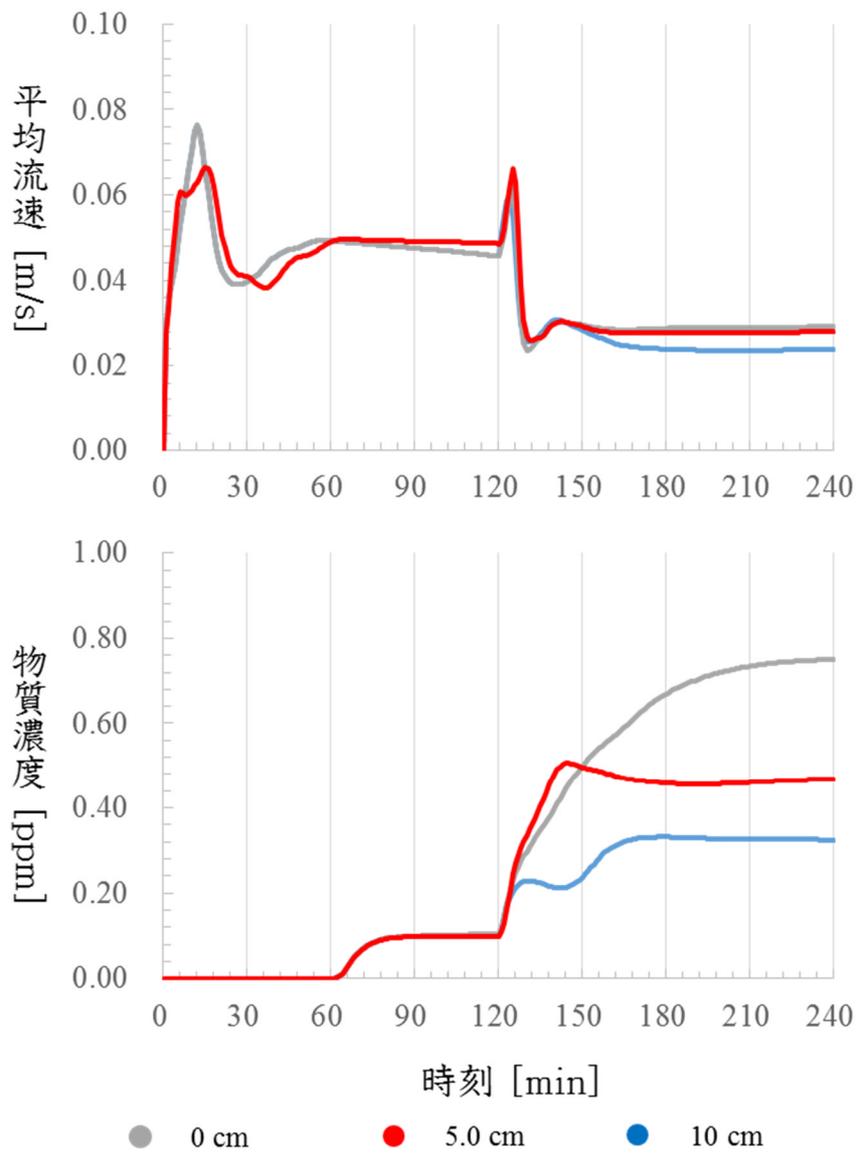


図 4-5 ドラフト開口幅 (t=120 分 ~) による、
領域 C における平均流速と拡散物質濃度の時間変化

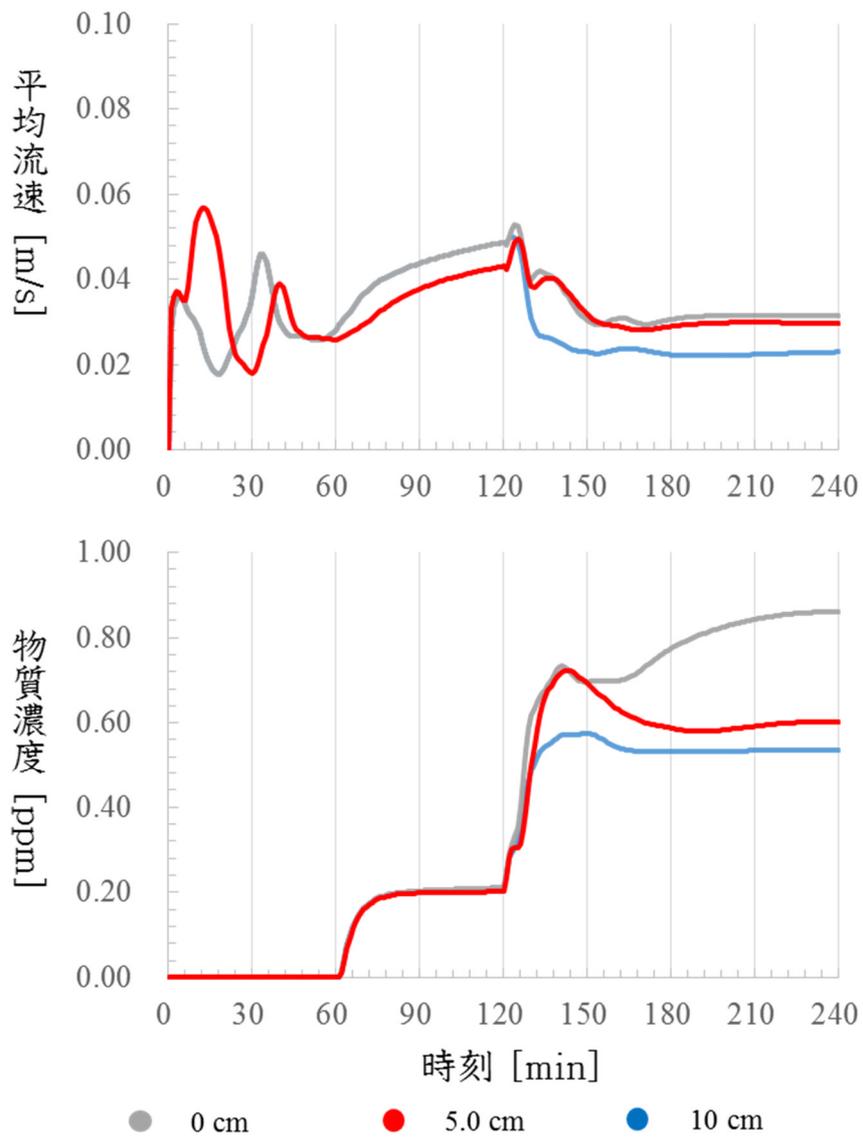


図 4-6 ドラフト開口幅 (t=120 分 ~) による、領域 D における平均流速と拡散物質濃度の時間変化

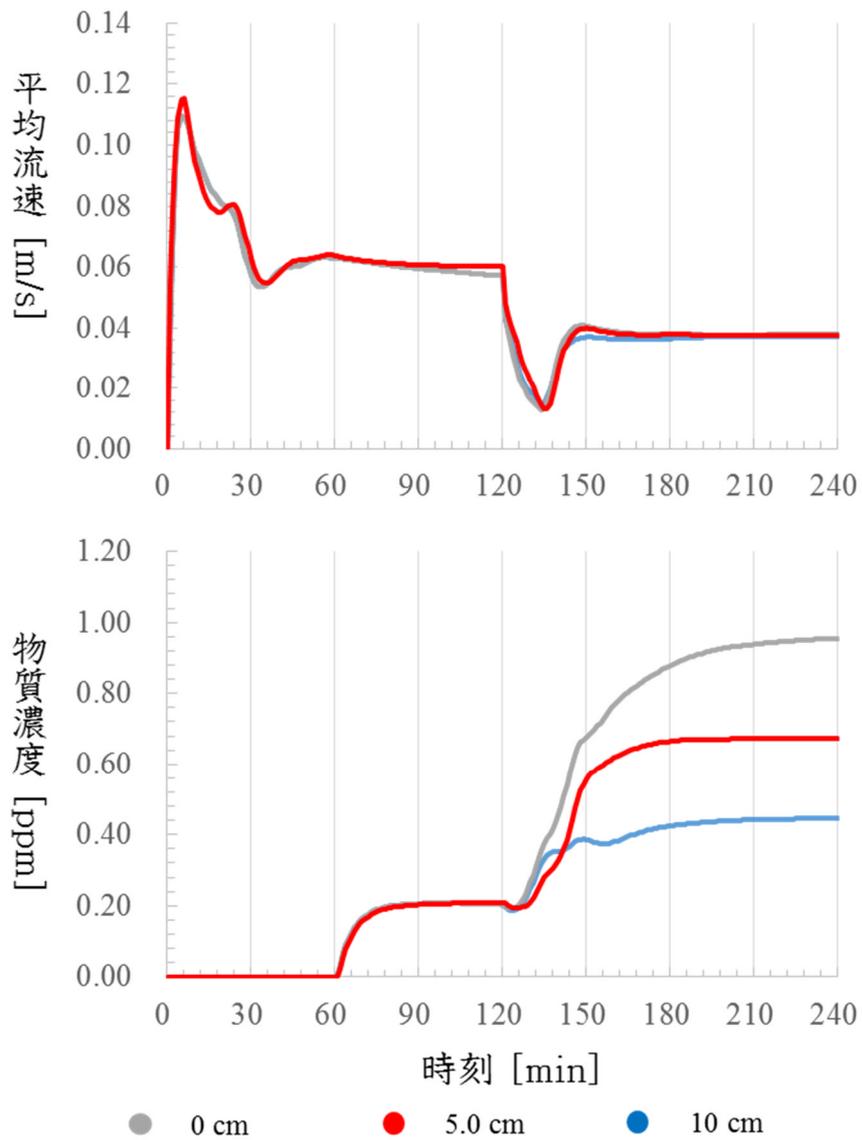


図 4-7 ドラフト開口幅 (t=120 分 ~) による、
領域 E における平均流速と拡散物質濃度の時間変化

4.1.1 (d) サッシ開閉が、空気環境に与える影響についてのまとめ

ヒュームフードは有害物質の封じ込めや省エネの観点から、未使用時はこまめに閉じておくことが推奨されている。その一方で、本項の検討結果が示すのは、ヒュームフードの換気量の変化は室内気流にインパクトを持っており、日常的なヒュームフードの開閉が化学物質の拡散状態に変化をもたらしていることを示唆している。また、開閉後に安定状態に至るまでの遷移期に、安定時より高濃度の状態が続いている領域があるという、定常状態の気流を観察するだけでは想定できない暴露リスクが潜在していることを明らかにした。

今後の課題として、遷移期における平均流速（拡散物質濃度）の上下動がどのような原因によって起こるのかを明らかにし、特に遷移期に高濃度を示す領域の持つ特徴と合理的に紐づけていくことがあげられる。潜在的な暴露リスクを実験室利用者が把握できるための情報を提供していくことにつながると考えられる。そのためには今回検討した以外のレイアウトの実験室で同様の検討を進めることで、領域の特徴と気流の挙動の関係性を整理していく必要がある。

また、ヒュームフードの開閉による気流への影響を緩和する方法を検討することで、非定常的な風の吹込みによって不安定な室内空気環境になりにくい実験室を設計していく指針になりうると考えている。

本検討では VAV システム（ヒュームフードの排気面風速が一定）を採用したヒュームフードで検討を行ったが、CAV システムのヒュームフードでは総換気量が一定で、ヒュームフードの開口面積に反比例した排気面流速となっているため、CAV の特徴を反映させた計算を行うことで、より汎用的なヒュームフードの利用方法について考える指針が得られるだろう。

4.1.2 実験室出入り扉の開閉

実験室の特徴として、実験室を利用する実験者が複数人いて、頻繁に出入りしていることがあげられる。化学系などの実験室は陰圧であることが多いため、人の出入りのたびに出入り口の扉は開閉し外気が流入しており、出入り口は間欠的な給気口の役割を果たしていると考えられる。実験室が持つ非定常性の1つとして、実験室出入り扉の開閉を検討対象として、外部からの吹込みの室内気流への影響を検討した。

4.1.2 (a) 検討条件

シミュレーションの条件を、以下に示す。ヒュームフード開閉の影響の検討と同様に、4.0時間 ($t=0\sim 240$ min) の時間経過を考えた。時間軸を、図 4-8 に示す。時刻 2:00 から 5 分間 ($t=120\sim 125$ min) 実験室の扉が開放されているケースを想定した。扉の開放面積は 1.0 m^2 (幅 $0.50\text{ m}\times$ 高さ 2.0 m) で、面風速 0.20 m/s (流量： $12.0\text{ m}^3/\text{min}$) と設定した。その間、ヒュームフード給気の給気量が等量減少することで、室内の給排気量バランスを取っている。

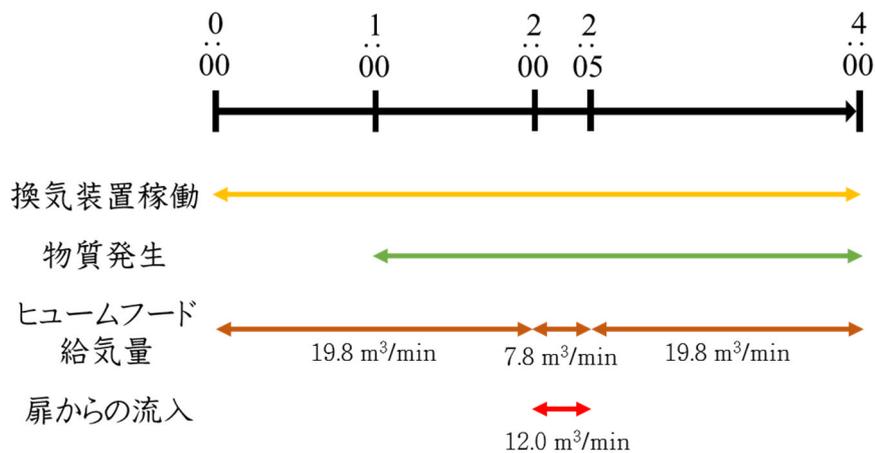


図 4-8 4.1.2における、CFD 計算タイムスケジュール

平均流速および拡散物質濃度の変化のモニタリングも、部屋全体領域と領域 A~E において行った。

4.1.2 (b) 扉の開閉に伴う空気環境の変化

時刻 2:00 (扉開放直前)、時刻 2:05 (扉閉鎖直前)、時刻 2:10、時刻 2:30、時刻 3:00 における扉前方 (X=1.5 m 断面) の流速分布を、図 4-9 に示す。分布の経時変化から、時刻 2:00 (図 4-9 (a)) のとき、定常的な流速分布になっていることを確認した。扉を開けると (図 4-9 (b))、扉からの水平な気流が流れ込み、扉近辺に見られた上向きの気流は水平方向に押し流されている (Y=0~2.0 m ; 図 4-9 (b) の右側)。それに合わせるように、その反対側の領域 (Y=5.0~7.0 m ; 図 4-9 (b) の左側) は流速が低下していることが読み取れる。扉を閉めると (図 4-9 (c) ~ (e))、徐々に扉開放前の流速分布に戻っていったが、開放前と同じ状態に安定するまで開放してから 30 分~1 時間ほどかかっていた。

続いて、気流の変化に伴い、部屋中央で発生した拡散物質が水平方向、垂直方向にどのように拡散しているかを観察するために、時刻 2:00 (扉開放直前)、時刻 2:05 (扉閉鎖直前)、時刻 2:10、時刻 2:30、時刻 3:00 における Z=1.0 m 断面の拡散物質濃度時間変化を追った。結果を、図 4-10 に示す。(図中のベクトルは流速ベクトルであり、濃度の高低はコンターによって表されている。)

4.1.2 (c) 部屋全体の空気環境に与える影響についての考察

部屋全体領域における平均流速、拡散物質濃度変化 (すなわち、室内平均濃度変化) の結果を、図 4-11 に示す。扉の開放の間、平均流速は低下を続けていることがわかる。扉を閉めると上昇を始めるが、元の水準に戻るまで 1 時間近く要していることが確認された。これにより、図 4-9 で確認したこととの一致が取れた。拡散物質の室内平均濃度は、扉の開放自体で大きく変化することはなかったが、扉を閉めてから濃度上昇が始まり、扉を開けて 30 分後の時刻 2:30 ごろにピークを迎えていることがわかる。この結果は、定常的な作業環境であれば観測されないような高濃度が、実験室で頻繁に行われる扉の開閉のような瞬間的な空気の出入りによって引き起こされている可能性があることを示している。

4.1.2 (d) 局所領域の空気環境に与える影響についての考察

部分的な領域における変化を観察するために、領域 A~E における平均流速、拡散物質濃度変化の結果を、図 4-12~16 に示す。平均流速の変化に関しては、扉の正面である領

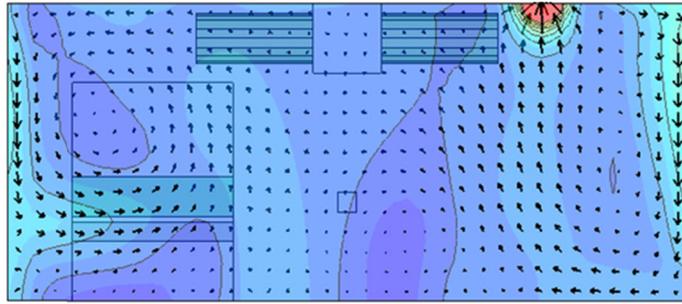
域 D を除いた領域（領域 A、B、C、E）で、扉を開放している間平均流速の低下が見られた。この結果は、部屋全体の平均で見られた流速の低下は局所的な流速の低下に強く影響を受けた結果ではなく、室内で全体的に流速の低下が広く起こっていたことの結果であったことを示唆している。

4.1.2 (e) 扉の開閉が空気環境に与える影響についてのまとめ

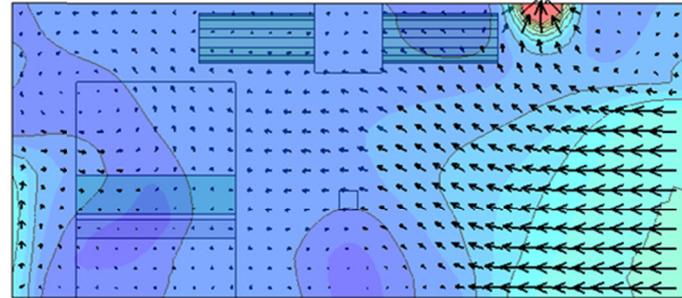
室内全体の傾向として流速が低下しており、扉からの吹込みにより室内気流の滞留が起きていると考えることができ、扉閉鎖後 30 分ほどで部屋全体としての濃度のピークも上昇していた。

扉の 5 分間だけの開閉によって室内の空気環境が大きく変わることは換気量からだけでは把握できない現象であり、より詳細な現象の理解が必要であるが、扉の開閉前後では実験室内の拡散リスク箇所が変化している可能性を示唆している。

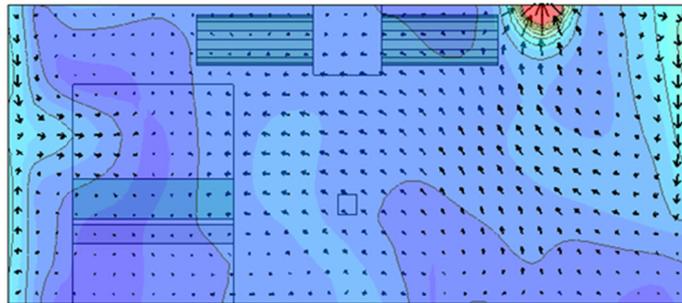
時刻2:00
(扉開放直前)



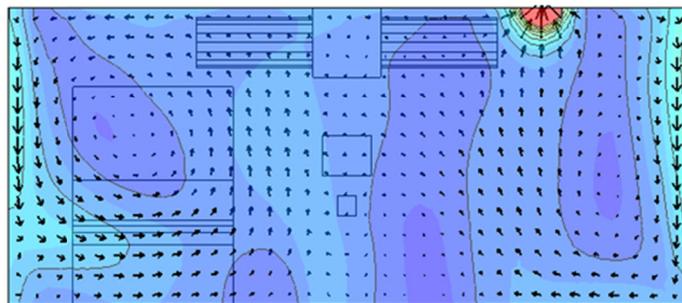
時刻2:05
(扉閉鎖直前)



時刻2:10



時刻2:30



時刻3:00

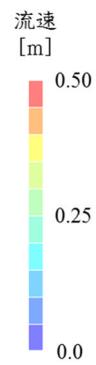
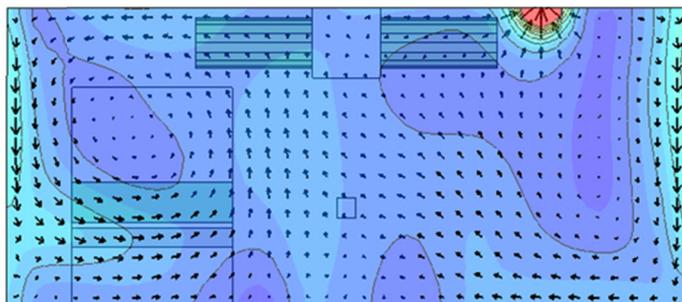
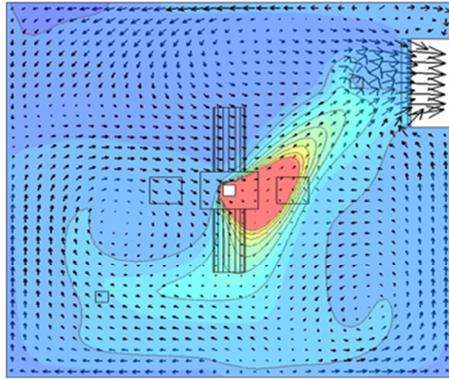
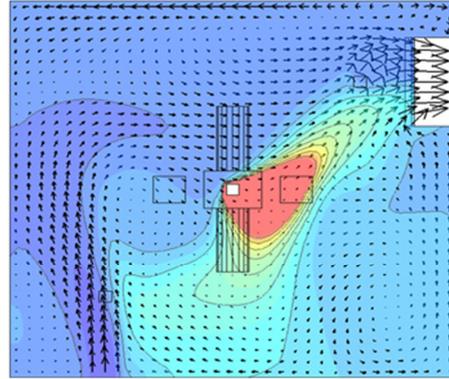


図 4-9 扉前方 (X=1.5 m)における流速分布の時間変化

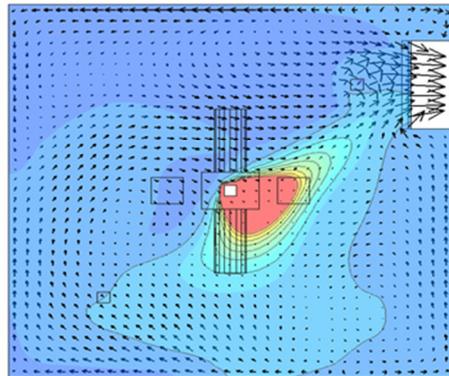
時刻2:00
(扉開放直前)



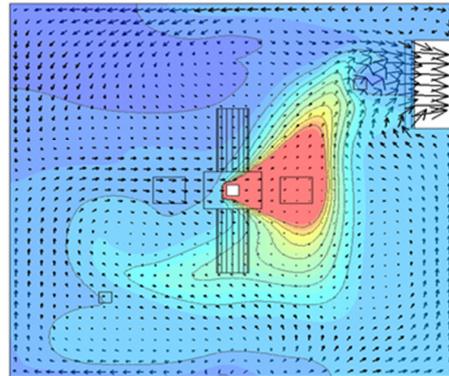
時刻2:05
(扉閉鎖直前)



時刻2:10



時刻2:30



時刻3:00

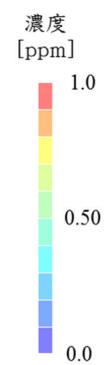
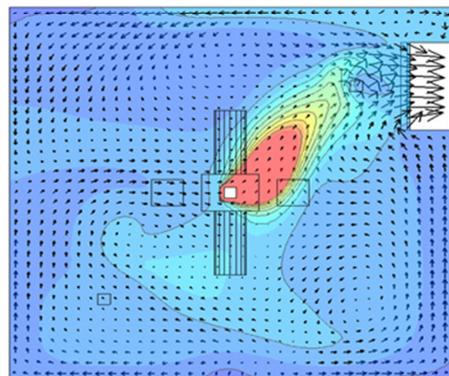


図 4-10 Z=1.0 m における拡散物質濃度分布の時間変化
(ベクトルは、流速を表す)

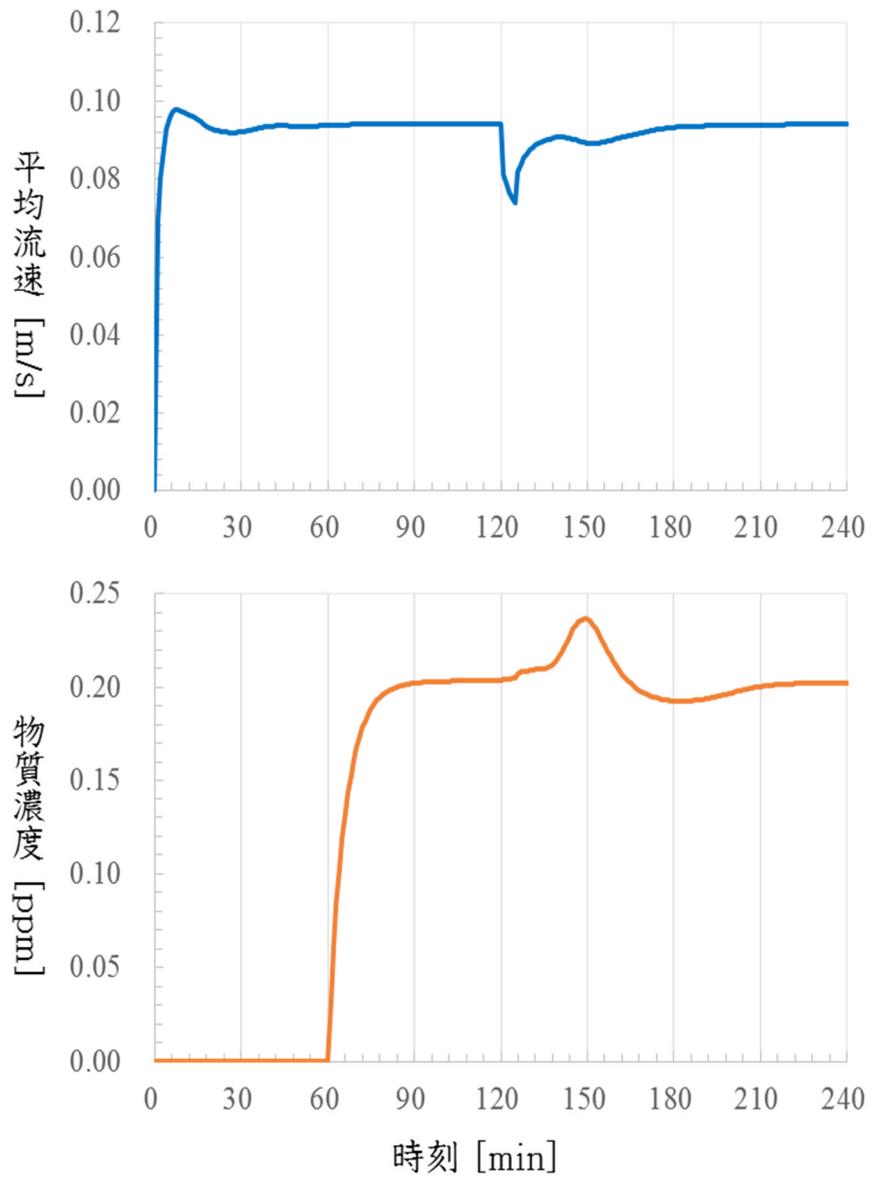


図 4-11 部屋全体領域における
 上: 平均流速変化 下: 拡散物質濃度変化

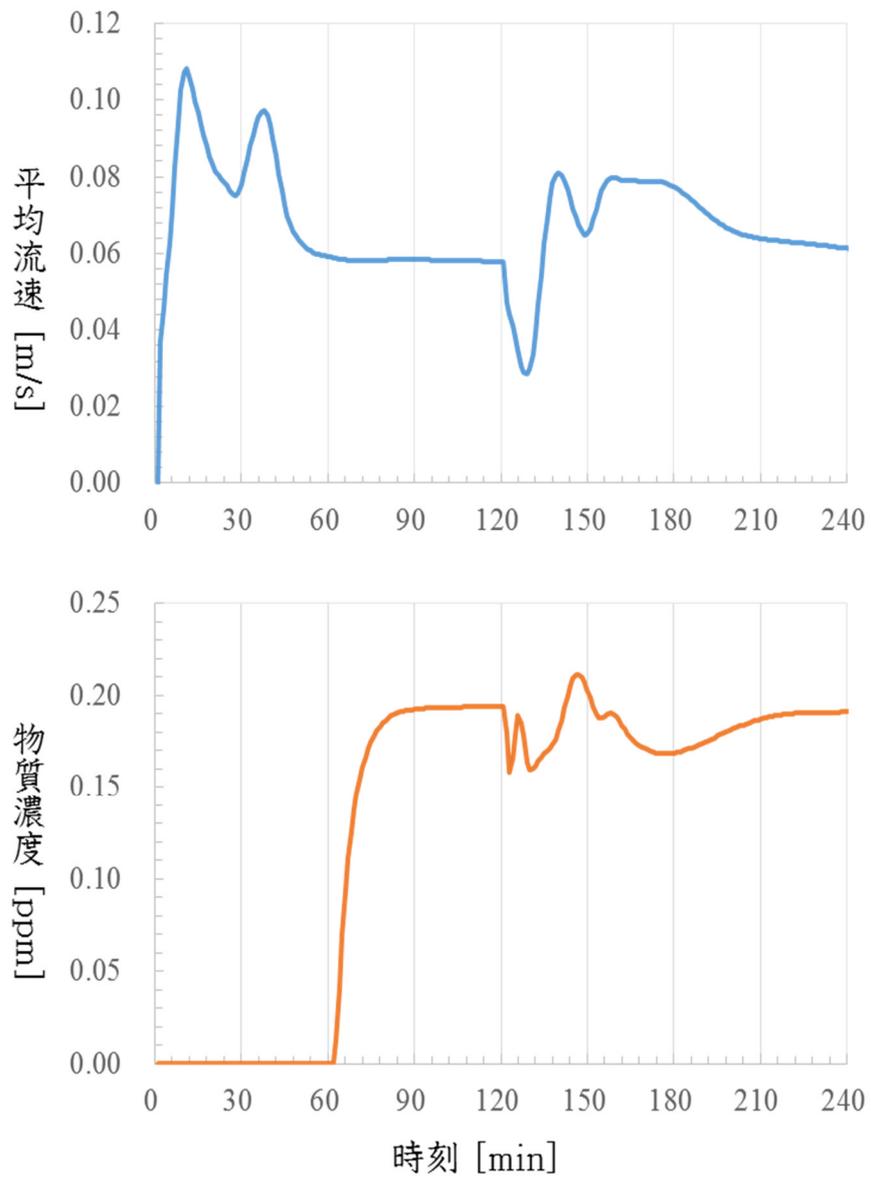


図 4-12 領域 A における
 上： 平均流速変化 下： 拡散物質濃度変化

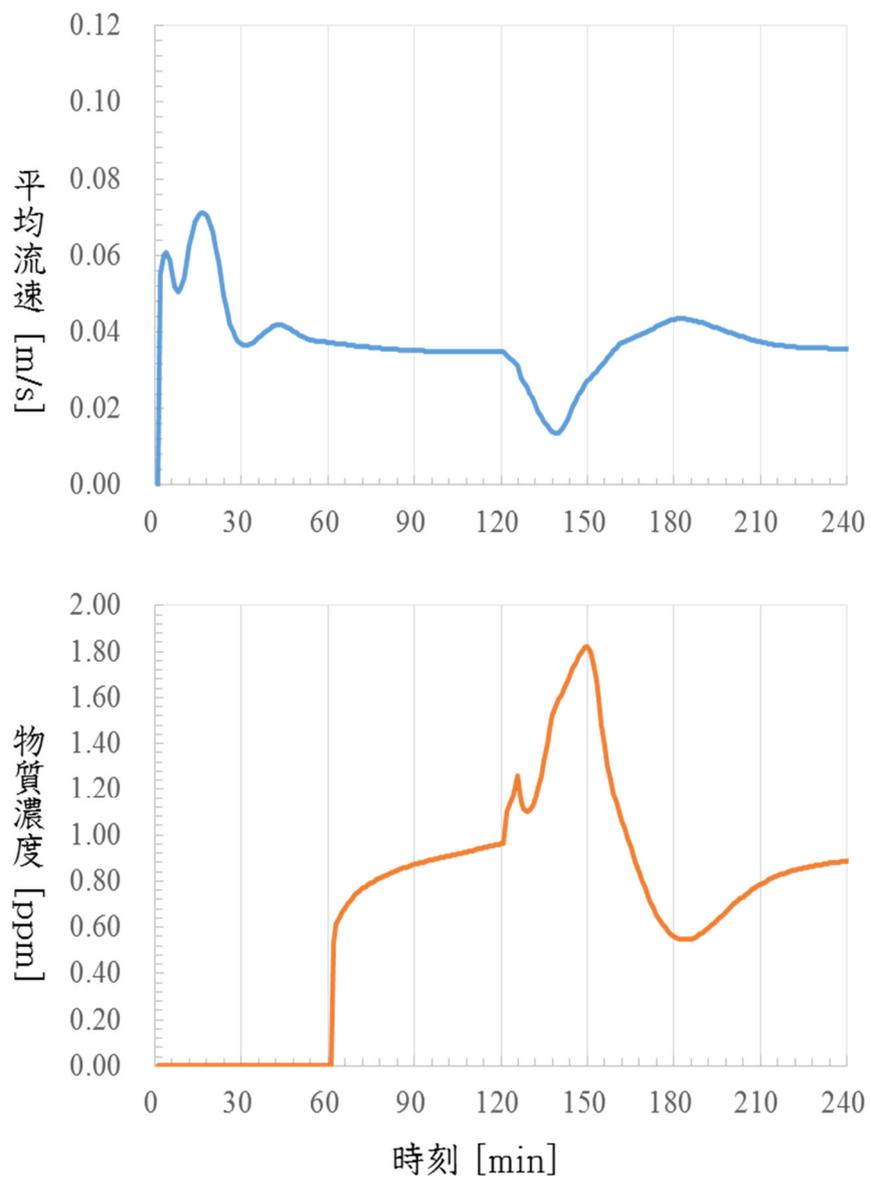


図 4-13 領域 B における
 上： 平均流速変化 下： 拡散物質濃度変化

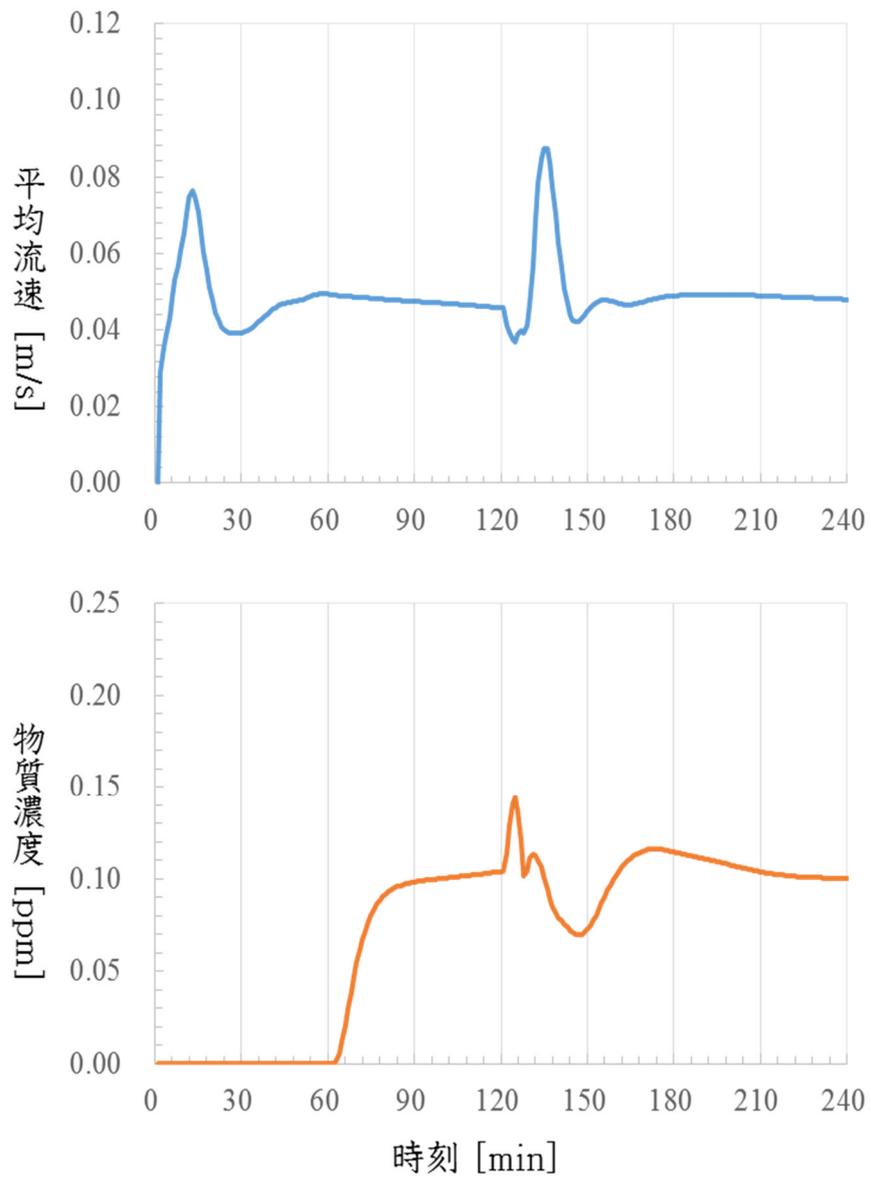


図 4-14 領域 C における
 上: 平均流速変化 下: 拡散物質濃度変化

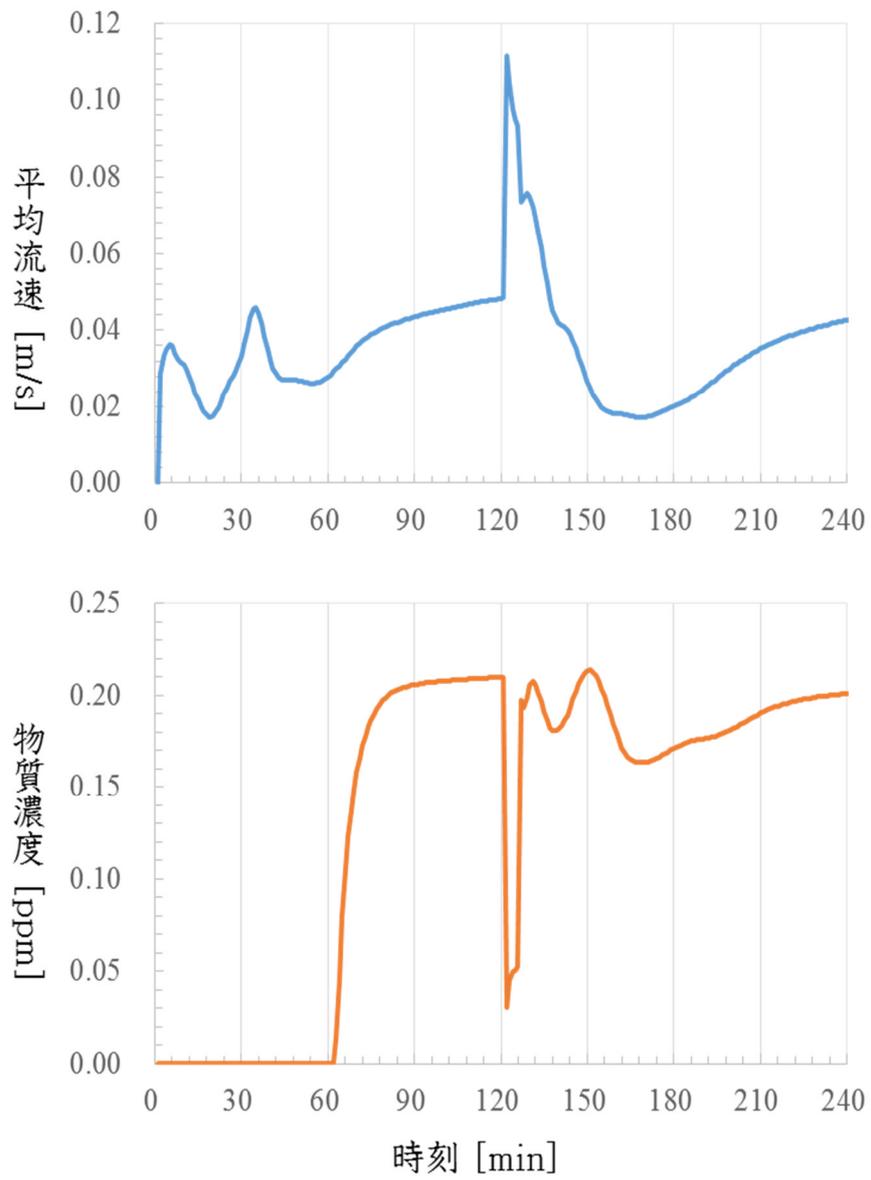


図 4-15 領域 D における
 上: 平均流速変化 下: 拡散物質濃度変化

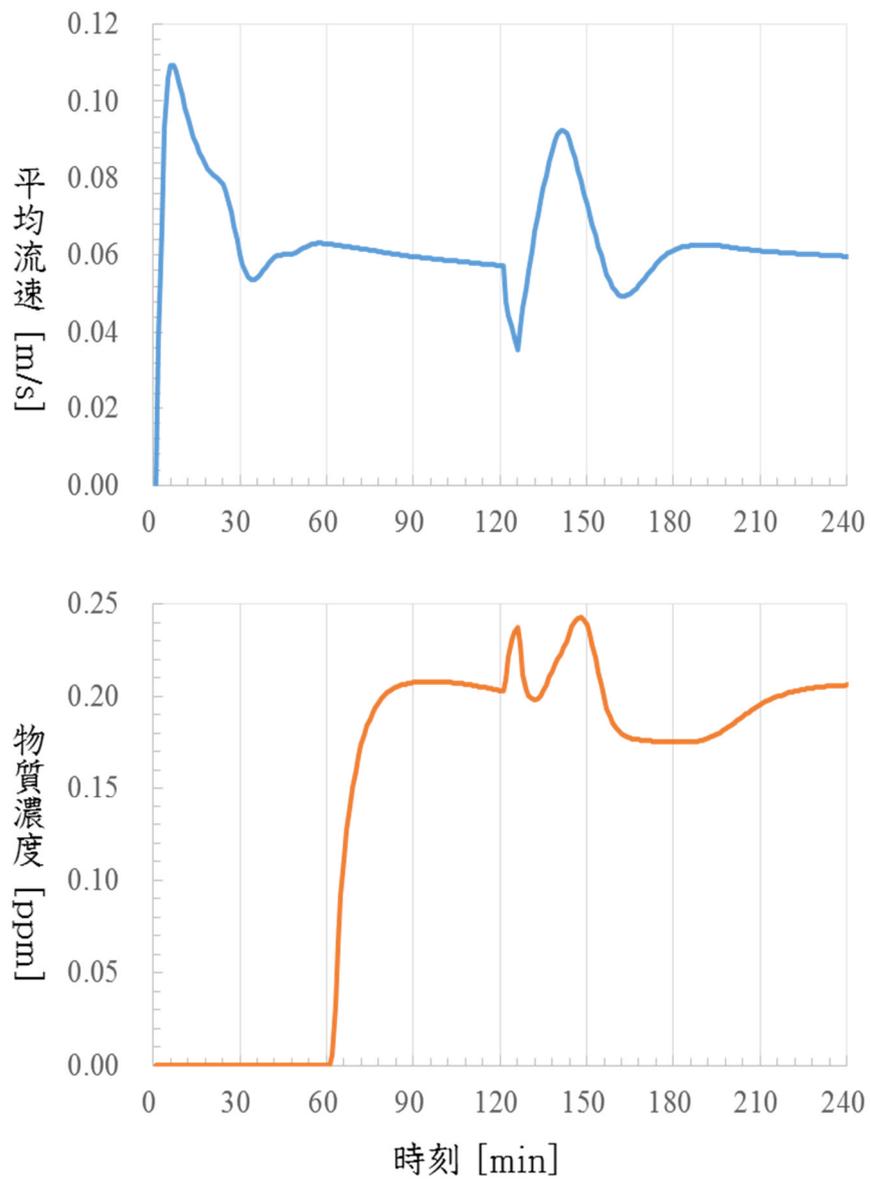


図 4-16 領域 E における
 上: 平均流速変化 下: 拡散物質濃度変化

4.2 実験室の複数人での共有が、室内環境に与える影響の検討

実験室の特徴として、複数の実験者が同時進行で各自の作業を行うという、場の共有性がある。根津の研究^[4]によると、同室で実験をする2人の実験者に対して各々が実験等で使用していたアセトン、ジクロロメタンの個人ばく露測定を行った結果、一方の実験者による有機溶剤の使用によって未使用の実験者もその有機溶剤のばく露を受けていることが明らかにされた。また、ばく露量は使用時間に必ずしも相関していないことも報告している。これらの報告は、複数の実験者がそれぞれに化学物質を使用することが他の実験者のばく露にも影響を与えていることを暗示しており、実験室には使用した化学物質が滞留し、ばく露しやすい領域が存在していることも示している。このようなばく露が起こる原因を、実験室内の気流の観点から解明したい。

場の共有性という特徴は実験室でのリスクを評価する際に考慮すべきであると考えられる。一般的に工場などの作業場におけるリスクアセスメントで採用されている手法として、個人の化学物質の使用量から個人のばく露量を推定または測定するという手法があるが、実験室の場の共有性を考慮するとその手法では他の実験者の使用する化学物質によるばく露量を過小評価することになってしまう。正しく実験室のリスクを認識するために、場の共有性と拡散物質の拡散の関係性を理解することを目的として、複数の実験者が実験室に存在することを想定したシミュレーションを行った。

4.2.1 検討条件

想定したケーススタディの室内状況を、図 4-17、4-18 に示す。化学物質を扱う作業は実験機を中心に、試薬棚付近やドラフト付近など実験室の様々な箇所で行われている。本検討では、実験者 A が図 4-17 で示した箇所で化学物質を使用しているということを想定している。**3.1.1** の検討から室内給気周辺の空気は吹き出しの下降気流に引き込まれ床を伝って 8 方向に広がり部屋中央に舞い上がってきていることを確認したことから、部屋中央では物質濃度が上昇しやすいと考え、実験者 B を部屋中央にいたとした。また、最も実験者 A から離れていて、ヒュームフードからも離れそれらの影響を受けにくいと考えられる箇所に実験者 C がいるとした。実験者 B、C は化学物質を使用しない作業をしているという状況を想定して、非定常状態の計算を行った。入力した境界条件は初期条件と同じで、拡散物質発生源の位置のみが異なっている。実験者 A、B、C の呼吸域ということで、各実験者正面の高さ 1.5 m の位置にそれぞれ、0.50×0.50×0.40 m のモニタリング領域 α 、 β 、 γ を設定した (図 4-18)。また、シミュレーションのタイムスケジュールを、図 4-19 に示

す。

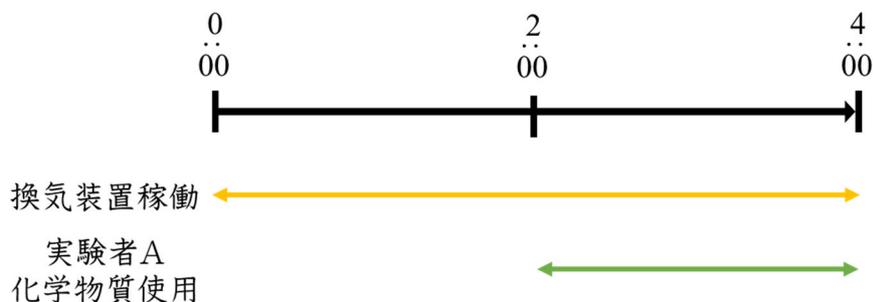


図 4-19 4.2における、CFD 計算タイムスケジュール

※ 想定した状況を示すために図 4-17 には人体が存在させているが、計算時には境界条件として入力していないため、人の存在はシミュレーション結果に影響は与えていない。

4.2.2 検討結果についての考察

前項までの検討から、拡散物質は発生後室内給気の下降気流に引き込まれ、床に沿って室内全体に広がり壁付近に達すると上昇すると予想され、実際に、拡散物質の拡散状態(図 4-20)はそのようになっていた。図 4-21 に示したように Y 断面を見ると、気流に引き込まれ気流に追従し拡散していることが確認できた。

各実験者付近の平均流速と拡散物質濃度の時間変化を、図 4-22 に示す。時刻 4:00 において、達した濃度の高い順に、実験者 B、C、A となった。B が最も高くなったのは、流れてきた拡散物質がたどり着きやすく、流速も遅く空気の入れ換えが少ない滞留しやすい領域であったことが理由であると考えられる。一方、A では、ヒュームフード給気による比較的汚染されていない空気が達する地点であり、結果拡散物質を遠ざける方向に気流が形成されていることが、濃度が低くなった理由であると考えられる。また、拡散物質が発生した時間からの拡散物質の上昇速度(時刻 2:00 における濃度変化の傾き)を比較すると、上昇速度が速い順に、実験者 C、B、A となった。C が最も早くなった原因は、室内給気の吹出しに混入した拡散物質が最も早く領域であることにありと思われる。

このケーススタディの結果は、拡散物質を使用している実験者 Aの方が、実験者 B、C

に比べて、良い空気環境にあることを表している。言い換えると、化学物質を使用していない、場の共有者である他者の方がばく露リスクが高くなることを表していると言える。リスクアセスメントでは個人の使用する化学物質によるばく露リスクを評価しているので、本来であれば実験者 B、C はゼロリスクと勘定されるだろう。しかし、実験室においては実験室を共有している実験者の使用によるリスクも考えるべきであることを示している。

また、緒言で述べたように大学実験室において、他者の使用する化学物質のばく露や室内で定常的に発生している化学物質のばく露が報告されていたが、その化学物質に暴露するまで化学物質がどのように拡散してきたのかは不明であり、ばく露の度合いについて系統的に説明することが難しかったが、本検討のように実験室内の気流を理解することで、室内に拡散している物質のばく露の度合いを合理的に説明できるようになる可能性を示した。

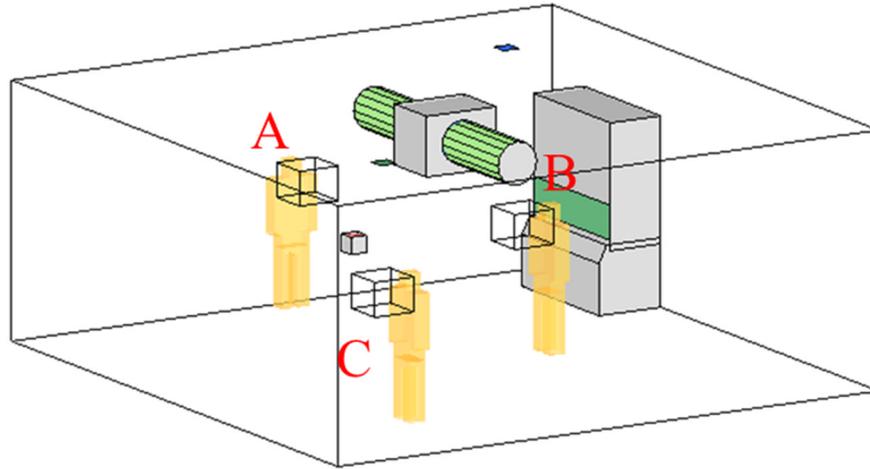


図 4-17 ケーススタディ状況俯瞰図

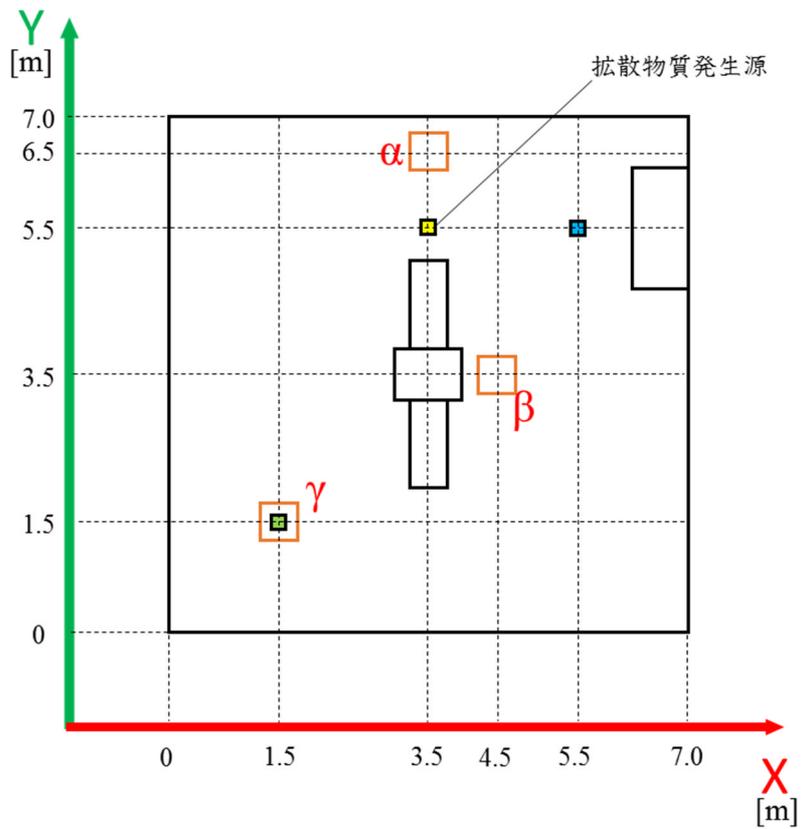


図 4-18 ケーススタディ状況上面図
およびモニタリング領域 α 、 β 、 γ

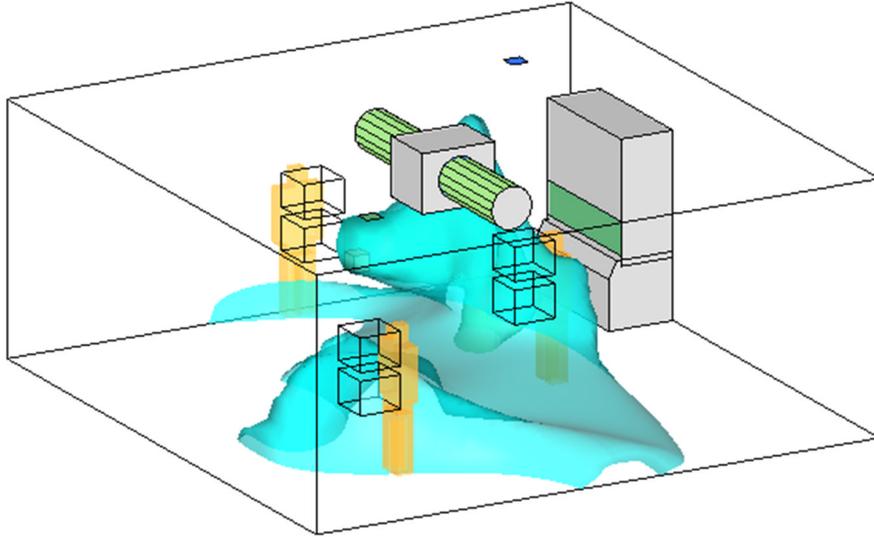


図 4-20 拡散物質濃度等値面 (0.30 ppm) 俯瞰図

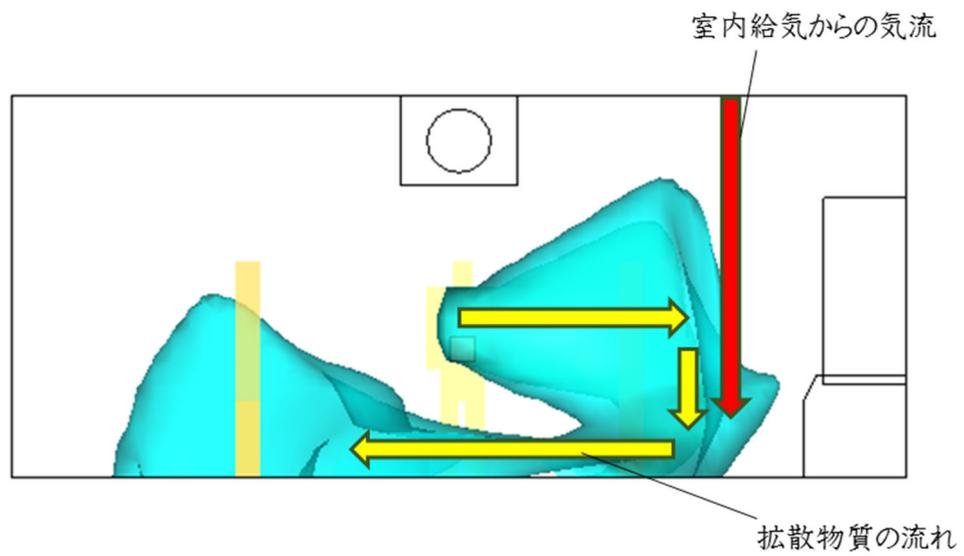


図 4-21 拡散物質濃度等値面 (0.30 ppm) Y 断面

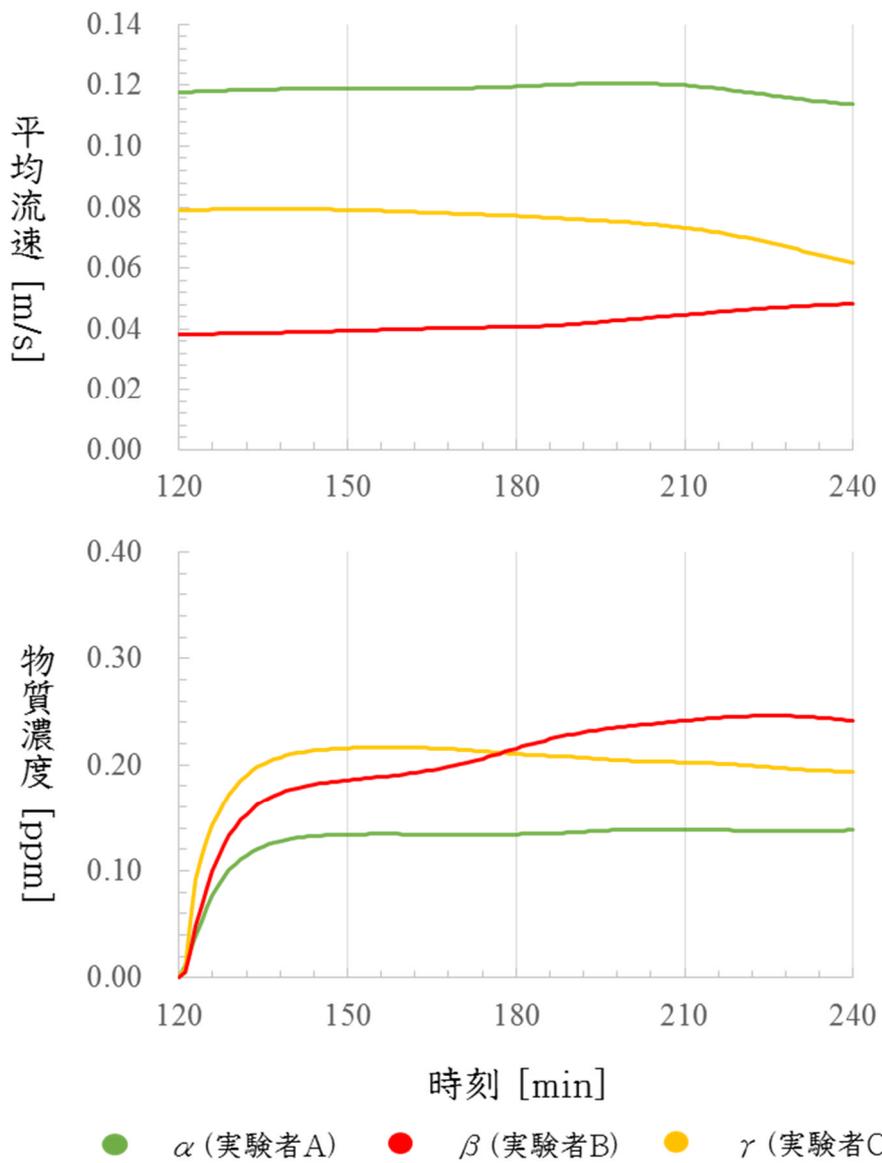


図 4-22 各実験者呼吸域(領域 α 、 β 、 γ)における、
平均流速と拡散物質濃度の時間変化

第5章 気流の可視化実験および PIV による解析

5.1 Full モデル実験室における気流の可視化

Full モデル実験室内の気流は同時にすべてをトレーサガスによって可視化し PIV で解析することはできない。そのため一部の気流を測定することで、全体の気流を推測しなければいけない。まず初めに、Full モデル実験室内の換気装置の周辺の気流を可視化・PIV 解析し、気流の情報を流速ベクトルとして得ることを目指した。続いて、その結果が CFD による計算結果とどの程度一致しているかを確認して、CFD 計算の妥当性を検討した。

5.1.1 室内空気環境に関する測定および検討条件

実際の大きさの実験室（以下、Full モデル実験室）における気流可視化について述べる。

実寸の実験室で形成されている気流を観察するため、実際の大きさの実験室（以下、Full モデル実験室）を使用し、気流可視化実験を行った。Full モデル実験室における換気条件を示す。流量は流速計を用いて実測によって算出した。実測値を、表 5-1 に示す。CAD でモデリングした、Full モデル実験室の俯瞰図、上面図は、図 2-1（前掲）にて示した。

実験室の換気装置の稼働状況は、ヒュームフード、室内換気ともに稼働とした。特徴的だと考えられるヒュームフード排気面、室内給気、室内換気周辺の気流をトレーサ粒子とシートレーザを用いて可視化し、高速度カメラによって撮影した。

5.1.2 可視化気流の PIV 解析結果

可視化気流の撮影画像群からのキャプチャ画像と、撮影画像の PIV 解析により定量化した流速の一定時間における平均ベクトルを、図 5-1、5-2 に示す。実際の実験室内気流を可視化し、その画像から流速ベクトルに変化することができた。視覚的に見られた気流と PIV 解析で得られた流速ベクトルは感覚的に大差なかったため、不可視だった室内気流を定量的なベクトルデータとして得ることに成功したと考える。

一方で、測定期間ごとの誤差は大きくあるため、測定時間や設定などを標準化していくことが、信頼のおける気流データを得るために必要だと考えられる。また、誤差の原因として、気流の可視化にあたって、トレーサガスが均一に拡散できていないということがあ

りガス発生方法を改善するなどして、PIV解析結果の信頼度をあげることができると考えられる。

表 5-1 Fullモデル実験室内測定結果

測定対象		実測値
実験室サイズ		X:7.2×Y:7.0×Z:5.0 m ³
室内 換気	排気	開口面積 (20 cm ² 四方)
		面風速
	給気	開口面積 (20 cm ² 四方)
		面風速
ヒュームフード 排気	開口面積 (横幅165 cm, 開口幅40 cm)	
	面風速	
室温		14.0 ~ 20.0 °C
相対湿度		50 ~ 60%

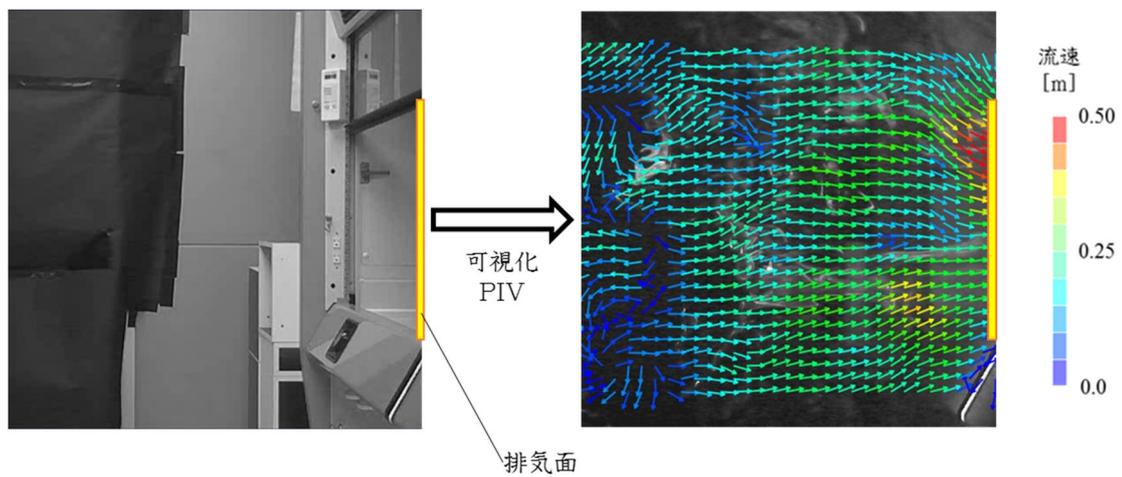


図 5-1 PIV 解析によって得られた、ヒュームフード前気流の流速ベクトル

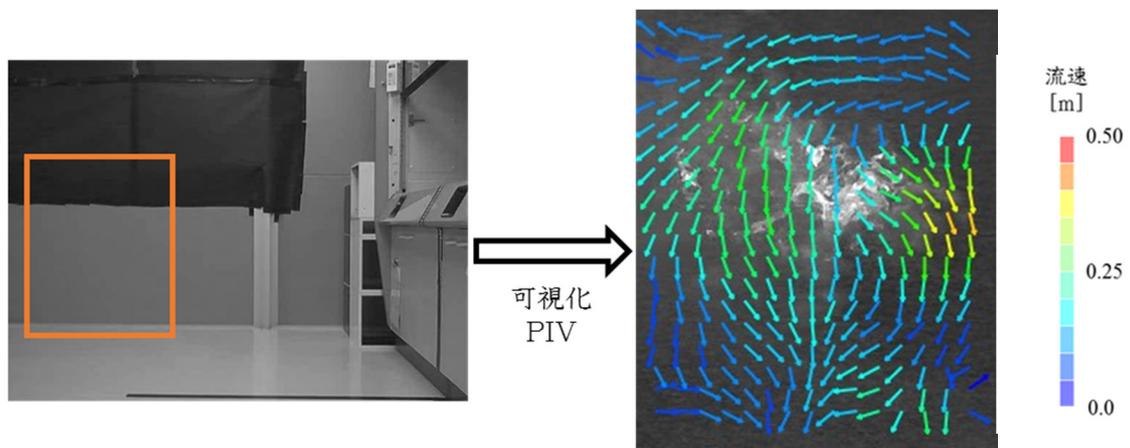


図 5-2 PIV 解析によって得られた、室内給気下方気流の流速ベクトル

5.1.3 PIV 解析結果と CFD 計算結果の比較

実際の気流は様々な要因から影響を受けて構成されていると考えられる。そのため、CFD のような想定しうる条件のみを入力した理想計算ではすべての要因を考慮できているとは言えない。そのため、CFD 計算で起きている現象が必ずしも実際の気流でも起きているとは限らないことに留意する必要がある。

得た気流の流速ベクトルを、同条件を入力した CFD シミュレーション結果と比較を行い、一致している点、異なっている点について考察を行い、どの程度までの再現性を CFD 計算によって得られているのかの検討を行った。

ヒュームフード、室内換気の稼働状況を変更して、それぞれの状況における換気装置周辺の気流を PIV 解析した。PIV 解析した領域と同じ領域を CFD によって計算して、流速ベクトルの分布について比較した。CFD 計算の入力境界条件は、初期条件である。

ヒュームフードのみ稼働時のヒュームフード前気流の CFD と PIV の解析結果の比較をして、CFD 計算の妥当性を検討した。

CFD によるとヒュームフード排気面に向かって層状に流速が分布していることが示された。PIV 解析結果は同様の傾向を示しており CFD の計算で実際の気流を再現できていることを確認できた。よって、CFD シミュレーションで得られた知見は一定の現実性が保証されたと言える。

一方で、大きな流れからそれた細かな流れを再現できていない部分もあり、どのような要素が効いているのかを検討することで、より再現性が増し、大学実験室の複雑性を表現するためのより高度で複雑な条件下でのシミュレーションによる検討にも耐えうると考えている。

5.2 1/10 モデル実験室における気流の可視化

CFD を用いた計算結果の現実的な妥当性は、模型実験によって検証がなされる。それは、CFD はあくまで理想的な仮定条件の下での近似計算であるからである。CFD による大空間の空気環境の検討事例は多く、詳細な空間分布が把握可能な点が長所であるが、実際の気流の再現度への信頼性は模型実験の方が優れており、両者を相補的に用いていくことが理想的だと考えられる^[48]。

模型実験は、実寸の模型ではなく、縮小した室内模型内で行われることが一般的である。縮小モデルを用いることにより、境界条件の操作が容易になり、よりコントロールされた条件下での検討が可能となるからである。

本研究でも、シミュレーション結果の妥当性の検討および室内環境の変化が室内気流に与える影響の検討を行うために、実際の実験室の 1/10 スケールの模型（以下、1/10 モデル実験室）を作製し、気流可視化実験を行い検討した。

可視化実験に用いたトレーサ粒子は、Full モデル実験室における可視化実験に用いたものと同じで、Rosco Clear Fog Fluid (Rosco) を煙発生器によって蒸気化させたものである。トレーサ粒子はドラフト給気を通じて室内に導入した。その他の用いた装置も、Full モデル実験室における可視化実験と同じであるため省略する。

Full モデル実験室における気流全体を同時に観測することは容易ではない。そのため、その気流を 1/10 モデル実験室内で再現することができれば、条件によって変化する Full モデル実験室内の気流の変化を 1/10 モデル実験室内で同様の検討実験を行うことで比較的容易に観測することが可能になる。縮小モデルを使って風洞実験をすることで、実寸の室内での気流を予測し現象を理解するという手法は、CFD と並んで一般に室内設計に取り入れられている。

1/10 モデル実験室を活用することで、実際の実験室では容易にはできない室内レイアウトの変更を行うことができる。また、実際の室内には外気との温度差や隙間風のような微小な茎の出入りなど複雑な要因が重なり合うことで気流は形成されているが、それらの想定に入れることの難しい要素をいったん排除した条件コントロールのしやすさも、気流を理解する助けになると考えられる。

1/10 モデル実験室を作製し、それを用いて室内気流を検討するのが妥当なのかの検討を行った後に、実際に室内レイアウトを変化させたときの気流の変化を 1/10 モデル実験室

内で観測した。

5.2.1 1/10 モデル実験室の作製

1/10 モデル実験室の設計に関わる値を、表 5-2 に示す。作製した 1/10 モデル実験室を、図 5-3 に示す。サイズは Full モデル実験室の寸法の 1/10 となっている。給排気はブロワ（オリエンタルモーター社製；MB520-B）を用いており、開口面積を調整することで、その量を可変に扱うことができるようにした。また、ヒュームフード、室内換気は模型外部からパイプを引くことにより、換気装置自体は固定せずに設置できる仕組みにしたため、換気装置の位置は取り外し変えることが可能な作りになっている。机などの什器類も同様に 3D プリンターによって作成したミニチュアで再現しており、自由に移動をさせることができる。そのため、作製した 1/10 モデル実験室は、室内のレイアウトを自由に変更させて検討に用いることが可能である。

各換気装置の流速（流量）については、実際の実験室の流量の 1/10 の相似となっていない。流速の設定については、5.2.2 で検討を行っているので後述する。

これにより、自由に室内レイアウトを設計し、換気状況などの条件の制御も容易である 1/10 モデル実験室をツールとして検討に用いることができる可能性がある。次項から検討を行うに適したモデルとなっているかを検討する。

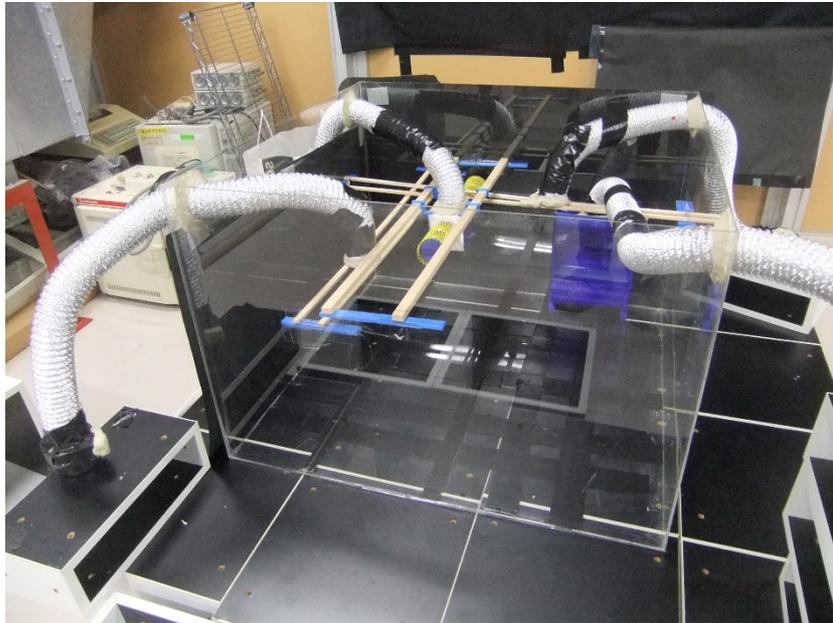


図 5-3 1/10 モデル実験室

表 5-2 1/10 モデル実験室設計値

設計対象		設計値
実験室サイズ		$X:0.72 \times Y:0.70 \times Z:0.50 \text{ m}^3$
室内換気給気	開口面積	$4.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ (2.0 cm 四方)
	面風速 (給気量)	0.79 m/s ($6.0 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{min}$)
室内換気排気	開口面積	$4.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ (2.0 cm 四方)
	面風速 (排気量)	0.79 m/s ($6.0 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{min}$)
ヒュームフード 給気	給気量	$6.0 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{min}$
ヒュームフード	開口幅	$6.6 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ (横幅16.5 cm, 開口幅4.0 cm)
	面風速 (排気量)	0.155 m/s ($6.0 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{min}$)

5.2.2 1/10 モデル実験室における設定条件の検討（相似則の検討）

緒言で前述したように、CFD 計算は複雑な偏微分方程式を近似的に解いた解であるため、現実の気流との一致性の検証を持ってその妥当性を確保することが一般に行われる^[45]。実験室という場の空気環境を再現するために 1/10 モデル実験室を採用することができるかを検討した。

5.2.2 (a) 模型における気流の相似則の理論

相似な 2 つの空間内における、気流の流速分布が近似しているとき、気流が相似していると定義する。幾何学的に相似な空間において、気流が相似するための条件の検討が必要となる。例えば大型の設備における気流性状を得るために、その幾何学的に縮小させた模型で実験を行い、そこで得られた気流性状を縮尺させた分だけ拡大すればよいのかという検討である。これまでに気流の相似則は検討されており、幾何学的な相似のみでは不十分であり、2 つの系における無次元数の一致が必要条件であることが知られている^[46,47,48]。

吹出し・吸込みを伴う室内気流における空気分布の相似条件は、レイノルズ数 Re 、アルキメデス数 Ar 、ペクレ数 Pr の 3 つの無次元数が、実寸室内における値と模型内における値とで等しくなることであると報告されている^[46,47,48]。この 3 つの無次元数を、以下の式 (5-1~3) に示す。

$$\text{レイノルズ数} \quad Re = UL/v_t \quad (5-1)$$

$$\text{アルキメデス数} \quad Ar = g\beta\Delta\theta L/U^2 = Gr/Re^2 \quad (5-2)$$

$$\text{ペクレ数} \quad Pe = UL/a_t \quad (5-3)$$

g : 重力加速度 [m/s²]
 β : 流体膨張率 [K⁻¹]
 $\Delta\theta$: 基準温度差 [K]
 L : 基準長さ [m]
 U : 基準速さ [m/s]
 ν_t : 渦動粘性係数 [m²/s]
 a_t : 渦温度拡散係数 [m²/s]
 Gr : グラスホフ数 [-]
 Re : レイノルズ数 [-]

ところで、乱流が十分発達した領域において、式 (5-4) が成立する。

$$\nu_t \propto UL, a_t \propto UL \quad (5-4)$$

このとき、式 (5-3) (5-4) より $Re = \text{const.}$, $Pe = \text{const.}$ となり、自動的にレイノルズ数 Re 、ペクレ数 Pr の 2 数は一致することになる。そのため、アルキメデス数 Ar が模型実験におけるもっとも重要な相似条件となる。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用いられる無次元数である。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^[21]。

また、 U 、 L 、 $\Delta\theta$ の、実物のそれらに対する縮率を、 n_u 、 n_l 、 n_θ で表すと式 (5-5) の関係式が得られる。

$$\frac{n_l n_\theta}{n_u^2} = 1 \quad (5-5)$$

式 (5-5) において、本研究では 1/10 スケールモデルの実寸に対する縮率 $n_l = 1/10$ である。さらに、 $\Delta\theta$ が等しいと仮定すると $n_\theta = 1$ となり、以下の関係式 (5-6) が導かれる。

$$n_u = \frac{1}{\sqrt{10}} \quad (5-6)$$

実寸 (Full モデル実験室)、1/10 スケールの基準速さをそれぞれ u_1 、 u_2 と置くと、

基準速さの縮率 $n_u=u_2/u_1$ より、基準速さの関係は以下の式 (5-7) に示される。

$$n_2 = \frac{n_1}{\sqrt{10}} \quad (5-7)$$

以下の 2 つの内容で、式(5-7)から導かれる流速を用いる妥当性の検討を行った。

- ① CFD シミュレーションによる、Full モデル実験室内と 1/10 モデル実験室内の気流の比較 (5.2.2 (b))
- ② 1/10 モデル実験室内気流の PIV 解析結果と CFD シミュレーション結果の比較 (5.2.2 (c))

5.2.2 (b) CFD シミュレーションによる、Full モデル実験室内と 1/10 モデル実験室内の気流の比較

初めに、CFD 計算を用いて、理論上、相似則に従うことで、Full モデル実験室と 1/10 モデル実験室内の気流の一致性が得られるかの検討を行った。

Full モデル実験室の気流シミュレーションの境界条件には、表 5-1 で示した実測測定結果を参考に設定した。表 5-2 に示す。Full モデル実験室の俯瞰図、上面図は、図 5-4、5-5 に示す。設定①では 1/10 モデル実験室の気流シミュレーション上の境界条件は、表 5-3 に示す。サイズに関しては Full モデル実験室の 1/10 の値、流速（面風速）に関しては相似則の適用により Full モデル実験室における実測値の $1/\sqrt{10}$ の値に設定した。そのため、流量は Full モデル実験室の値に対して $1/100\sqrt{10}$ の設定値となる。比較のため、設定②として、流速に Full モデル実験室での値の 1/10 の値を入力した場合の計算も行った。

CFD 計算によって求めた、Full モデル実験室内気流、1/10 モデル実験室内気流（設定①、②）の流速分布の比較（Y=2.0 m、Y=5.5 m、X=3.6 m、Z=1.5 m 断面）を、図 5-6～9 に示す。（1/10 モデル実験室の結果は、Full モデル実験室における断面と対応する断面の結果を示している。以下も同様とする。）

比較の結果、相似則に従い流速を Full モデル実験室の $1/\sqrt{10}$ の値にした方（設定①）が、1/10 モデル実験室内での気流の再現性が向上することがわかった。設定①が換気条件を変化させた場合も通用するのかを検討するために、ヒュームフードのみ稼働時、室内換気のみ稼働時における気流を、Full モデル実験室、1/10 モデル実験室（設定①）それぞれで、CFD 計算を行い、結果を比較した。ヒュームフードのみ稼働時、室内換気のみ稼働時における、流速分布の CFD 計算結果（X=3.6 m、Y=3.5 m、Z=1.5 m 断面）を、図 5-10、5-11 に示す。

これらの換気条件における検討においても室内の全体的な気流の傾向が再現できた。今後の 1/10 モデル実験室内でのシミュレーションは、表 5-2 の設定①を入力条件として検討を進める。

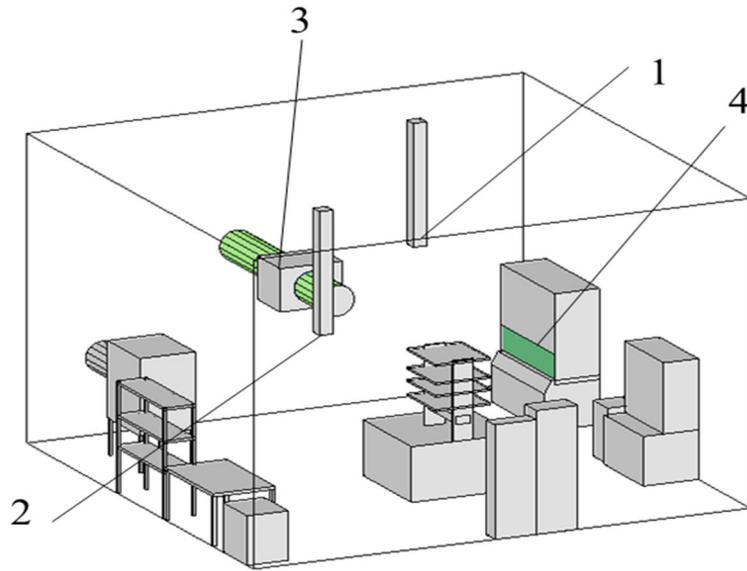


図 5-4 CFD 計算の対象とした Full モデル実験室俯瞰図

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

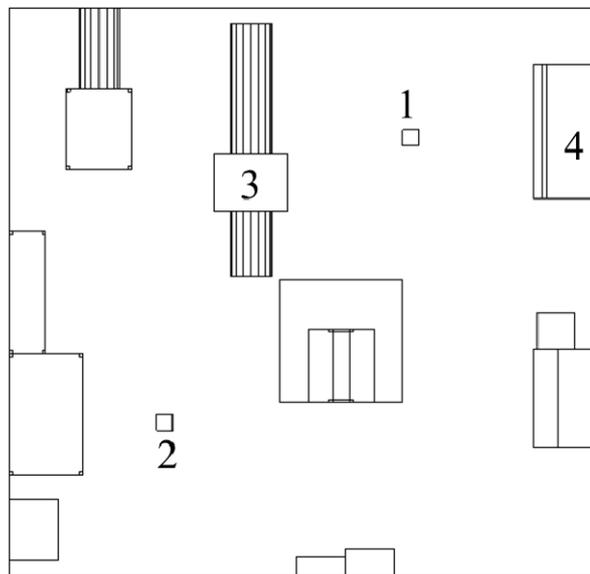


図 5-5 CFD 計算の対象とした Full モデル実験室上面図

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

表 5-2 Full モデル実験室内における CFD 計算の境界条件

測定対象		実測値
実験室サイズ		X:7.2×Y:7.0×Z:5.0 m ³
室内 換気	排気	開口面積 (20 cm ² 四方)
		面風速
	給気	開口面積 (20 cm ² 四方)
		面風速
ヒュームフード 排気	開口面積 (横幅165 cm, 開口幅40 cm)	
	面風速	
室温		20.0 °C (一定)
相対湿度		55% (一定)

表 5-3 1/10 モデル実験室内における CFD 計算の境界条件

設計対象		設計値		
		設定①	設定②	
実験室サイズ		X:0.72×Y:0.70×Z:0.50 m ³		
室内 換気	排気	開口面積	4.0×10 ⁻⁴ m ² (2.0 cm ^{四方})	
		面風速 (給気量)	0.79 m/s (1.9×10 ⁻² m ³ /min)	0.25 m/s (6.0×10 ⁻³ m ³ /min)
	給気	開口面積	4.0×10 ⁻⁴ m ² (2.0 cm ^{四方})	
		面風速 (排気量)	0.79 m/s (1.9×10 ⁻² m ³ /min)	0.25 m/s (6.0×10 ⁻³ m ³ /min)
	ヒューム フード	排気	開口面積	6.6×10 ⁻³ m ² (横幅16.5 cm, 開口幅4.0 cm)
			面風速 (排気量)	0.155 m/s (6.1×10 ⁻² m ³ /min)
給気		給気量	6.1×10 ⁻² m ³ /min	2.0×10 ⁻² m ³ /min
拡散物質	発生源面積		0.040 m ² (20 cm ^{四方})	
	密度		2.5 kg/m ³	
	拡散係数		1.0×10 ⁻⁵ m ² /s	
室温		20.0 °C (一定)		
相対湿度		55.0% (一定)		

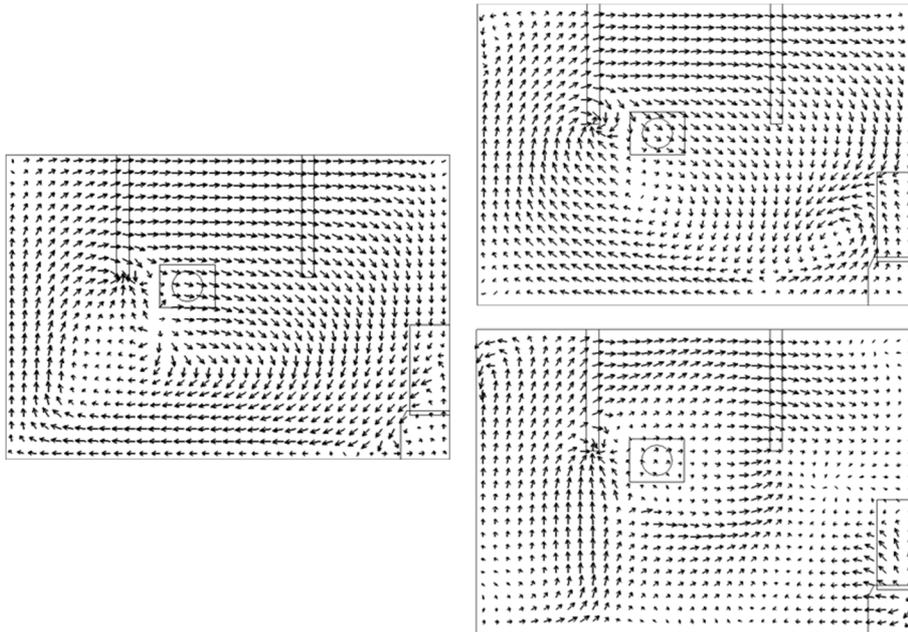


图 5-6 流速分布計算結果比較 (Y=2.0 m 断面)
 左:Full 右上:1/10(設定①) 右下:1/10(設定②)

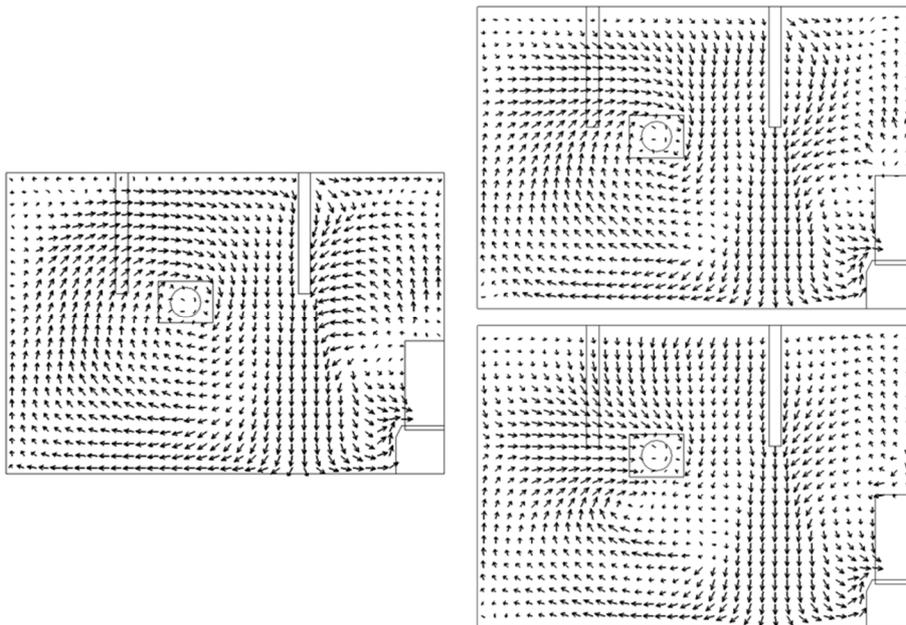


图 5-7 流速分布計算結果比較 (Y=5.5 m 断面)
 左:Full 右上:1/10(設定①) 右下:1/10(設定②)

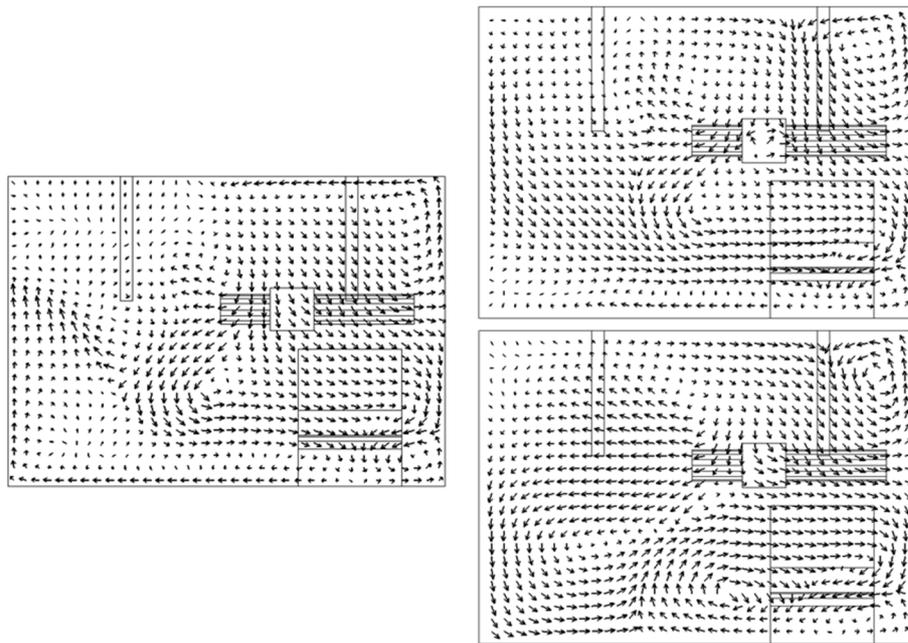


图 5-8 流速分布計算結果比較 (X=3.6 m 断面)
 左:Full 右上:1/10(設定①) 右下:1/10(設定②)

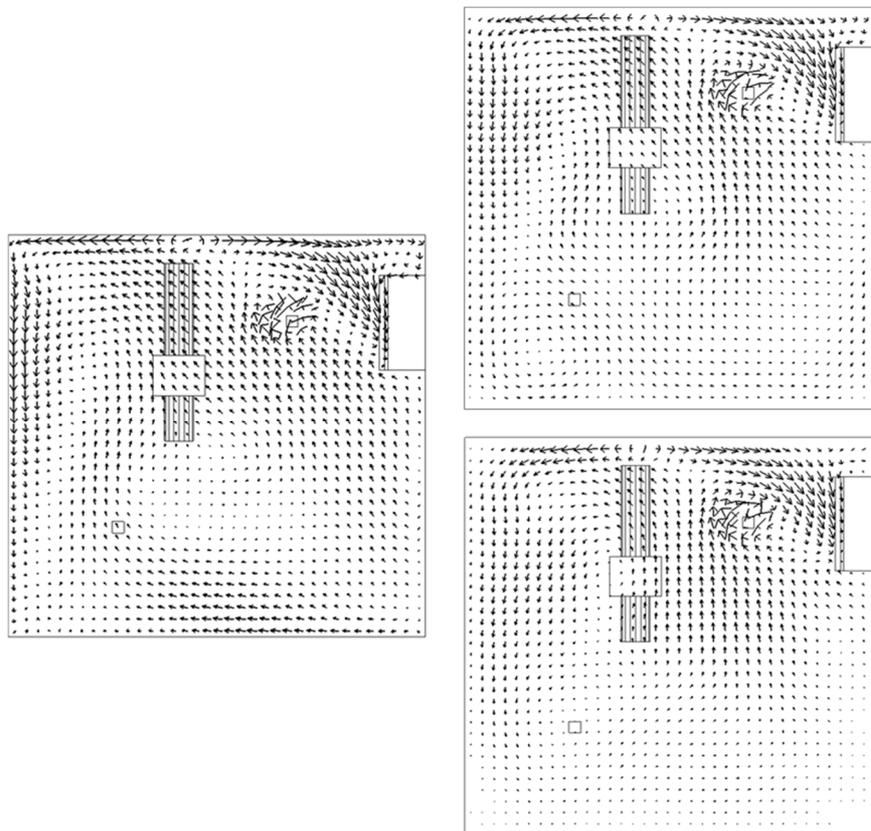


图 5-9 流速分布計算結果比較 (Z=1.5 m 断面)
 左:Full 右上:1/10(設定①) 右下:1/10(設定②)

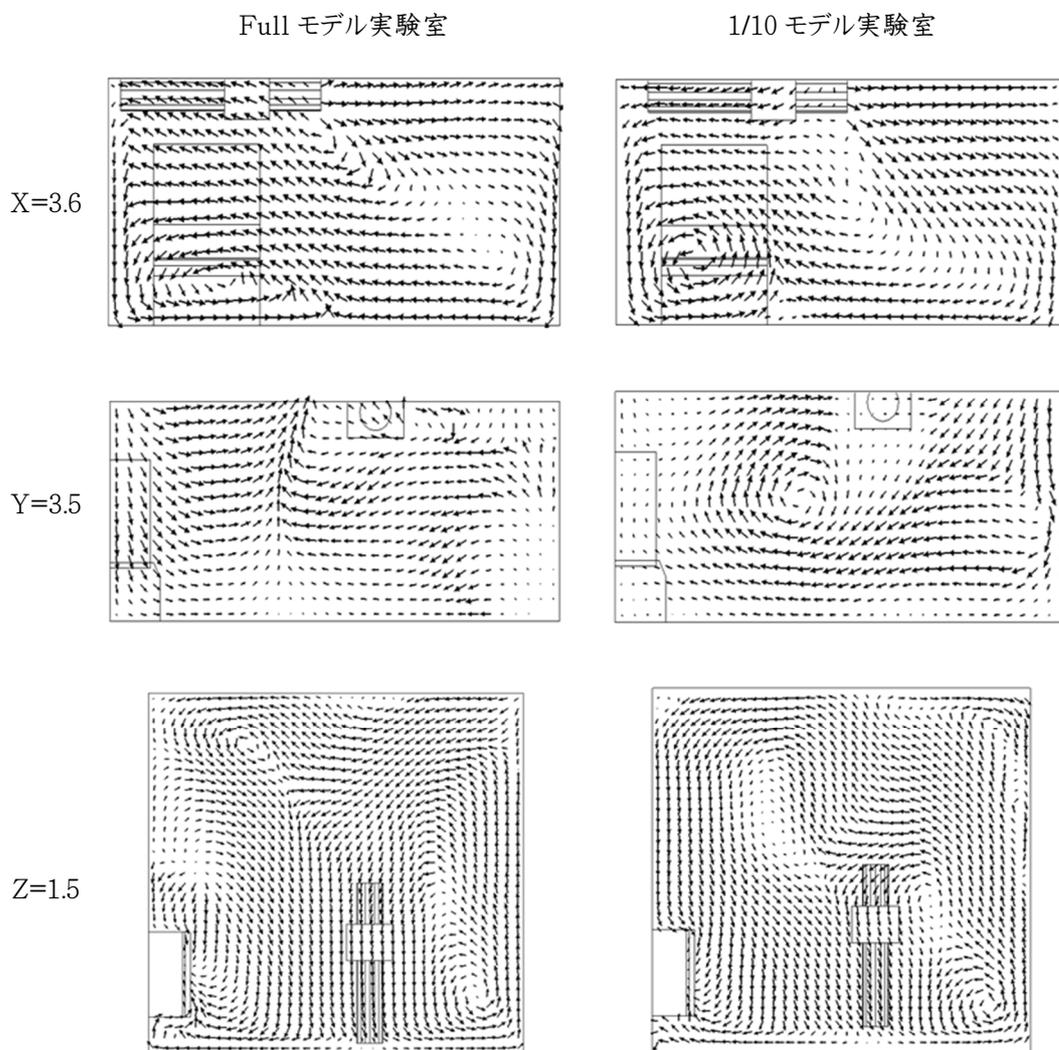


図 5-10 ヒュームフードのみ稼働時の流速ベクトル分布比較

左:Full 右:1/10

上から、X=3.6 m、Y=3.5 m、Z=1.5 m の断面

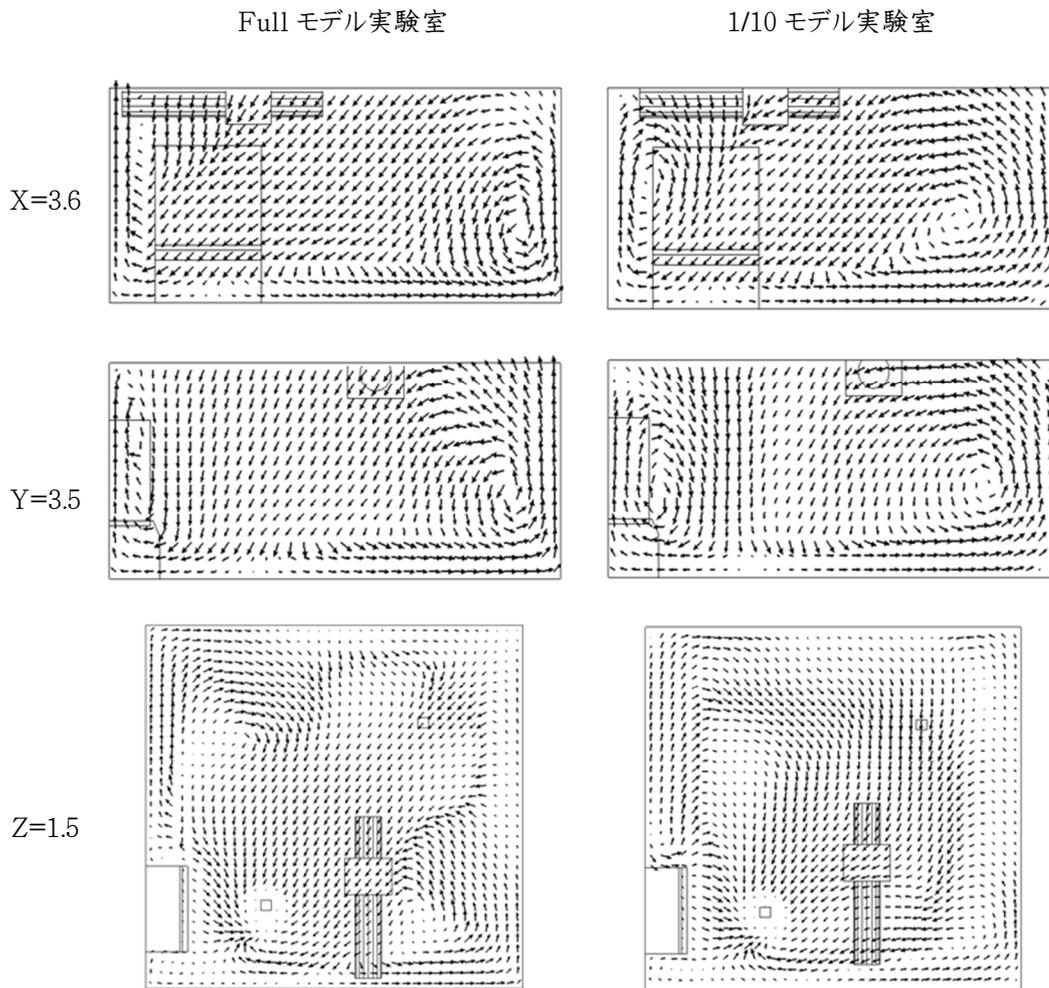


図 5-11 室内換気のみ稼働時の流速ベクトル分布比較

左:Full 右:1/10

上から、X=3.6 m、Y=3.5 m、Z=1.5 m の断面

5.2.2 (c) 1/10 モデル実験室内気流の PIV 解析結果と CFD シミュレーション結果の比較

先ほどの 5.2.2 (b) の検討によって、相似則を適用すると Full モデル実験室と 1/10 モデル実験室内の気流の一致性は良好となることが確認された。続いて、1/10 モデル内気流に関して、可視化気流の PIV 解析から得られる情報と CFD シミュレーションによって得られる情報の一致性について検討した。1/10 モデル内において、シミュレーションの結果が実際の気流を再現している結果なのかを確認するためである。

CFD 計算における境界条件は、表 5-2 (前掲) で示した、1/10 モデル実験室で設定した境界条件に揃えた。室温に関して、1/10 モデル実験室内の数カ所における測定によって、モデル内に温度勾配は確認されなかったため、CFD 計算においても室内等温と仮定した。気流の可視化および PIV 解析に用いた装置等は、第 2 章で述べたものを用いており、Full モデル実験室に対して用いた装置と同じである。

ヒュームフードのみ稼働時、ヒュームフード、室内換気ともに稼働時の 2 つの状況について PIV 解析を行い、同条件を入力して計算した CFD 計算結果を比較した。

比較対象は、室内の X、Y 断面におけるベクトル分布であり、その位置は X=0.15 m、0.36 m、0.57 m、Y=0.20 m、0.35 m、0.55 m の 6 面である。断面位置を示した室内俯瞰図を、図 5-12 に示す。

ただし、作製した 1/10 モデル実験室、CFD 計算の対象としたモデル実験室ともに、部屋の高さ (床から天井までの距離) は 0.50 m であるが、本項の検討では高さ Z=0.0~0.30 m の範囲における結果を示す。0.30 m 以上の領域が開放されていることの影響は出てくると考えられるが、本来天井によって仕切られており存在しない領域にあたること、設計の都合上 PIV 解析を行うに十分な精度の実測が困難であったことが理由である。

ヒュームフードのみ稼働時の結果比較を、図 13 に示す。また、ヒュームフード、室内換気ともに稼働時の結果比較を、図 14 に示す。流速の絶対値について、どちらの場合にも、CFD 計算結果に比べて実測の PIV 解析結果は流速が低くなるという結果を得た。これは相似則によって求めた流速が過大であること、1/10 モデル実験室内の圧力上昇により流速が設定値よりも過少になっていることなどが理由だと考えられる。相似則の検討の際に室内が等温であることを仮定したが、より精密に 1/10 モデル内の温度を測定することでより正確に相似則を適用させることが必要だと考えられる。その他に、1/10 モデル実験室壁面の材質の持つ伝熱性やトレーサガスの性質などを CFD 計算に反映させることにより一致性の向上を図っていくことが今後の課題である。

流速ベクトルの方向性について見てみると、流速が速い範囲では一定の一致が得られていた。一方で流速の遅い範囲ではベクトルが一致していないケースが見られた。特に、室内給気からの吹出し（図 5-14 の $Y=0.55$ m 断面結果）に関しては、床に吹き付けられた後の気流が CFD 計算では床を伝っているが、実測ではすぐに上昇する気流になっていることが確認された。CFD 計算に浮力の影響が過少評価されていることが考えられ、流速の絶対値の不一致改善により改善されると考えられる。

以上より、1/10 モデル実験室において、流速の速い範囲については実測の PIV 解析結果と CFD 計算結果は一定の一致が得られたと言える。

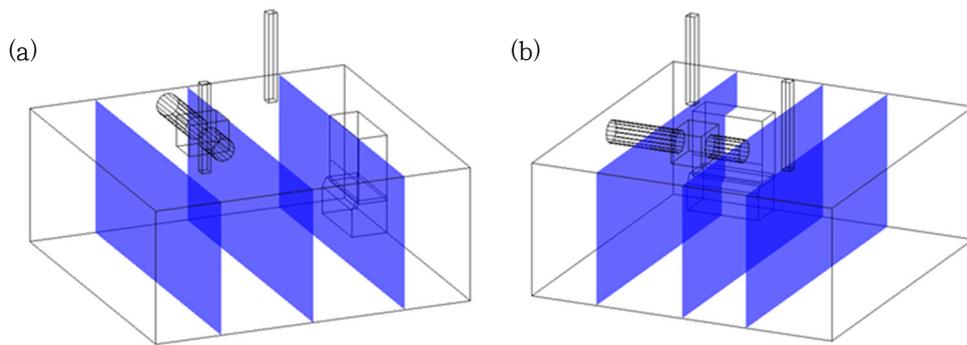


図 5-12 結果表示断面位置

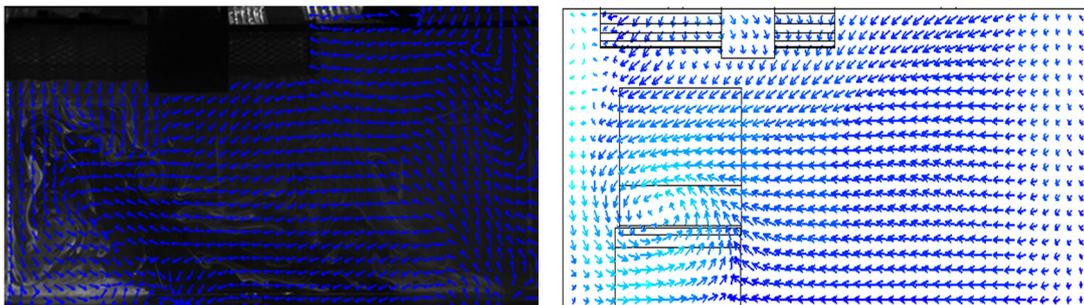
(a) X 断面 (左から $X=0.15$ m、 0.36 m、 0.57 m)

(a) Y 断面 (左から $X=0.20$ m、 0.35 m、 0.55 m)

PIV 解析結果

CFD 計算結果

$X=0.57$



$X=0.36$

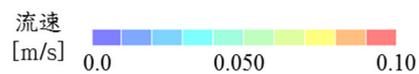
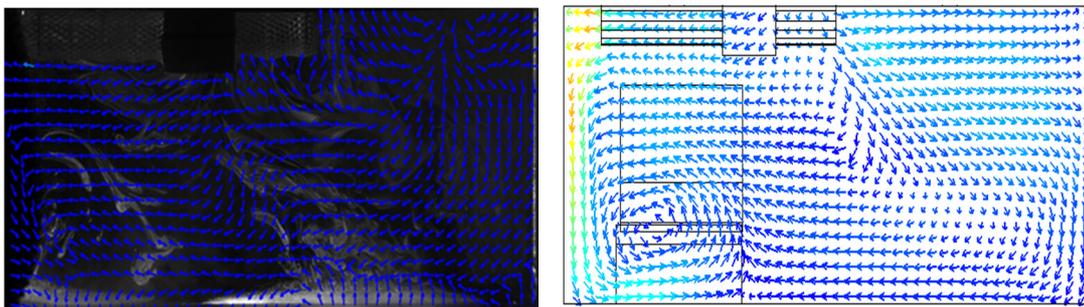


図 5-13 ヒュームフードのみ稼働時の流速分布結果比較

左:PIV 解析結果 右:CFD 計算結果

上から、 $X=0.57$ m、 $X=0.36$ m の断面

PIV 解析結果

CFD 計算結果

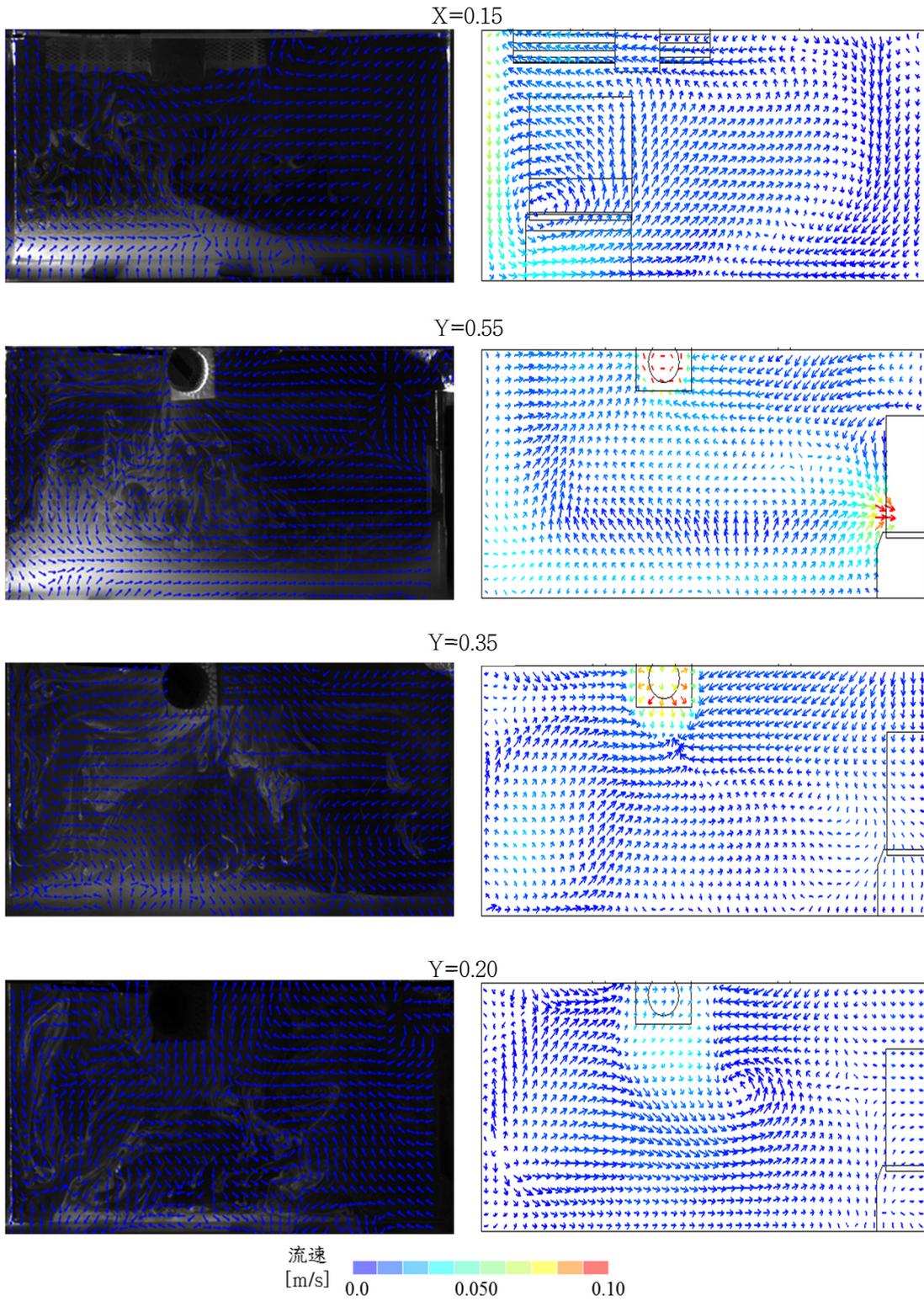


図 5-13 ヒュームフードのみ稼働時の流速分布結果比較

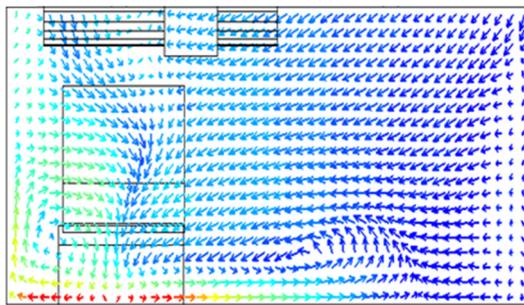
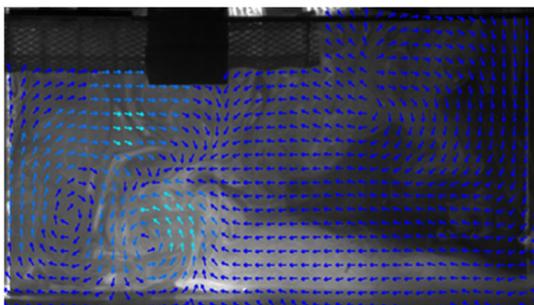
左:PIV 解析結果 右:CFD 計算結果

上から、X=0.15 m、Y=0.55 m、Y=0.35 m、Y=0.20 m の断面

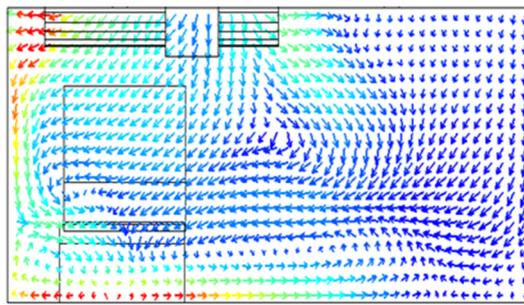
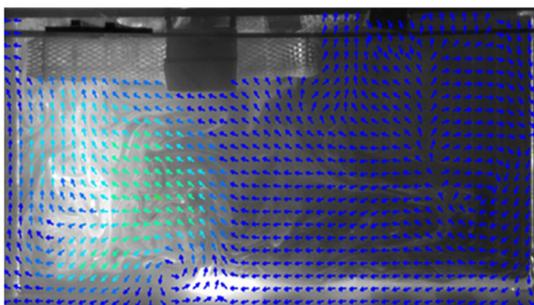
PIV 解析結果

CFD 計算結果

X=0.57



X=0.36



X=0.15

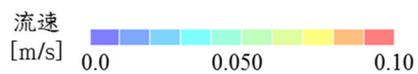
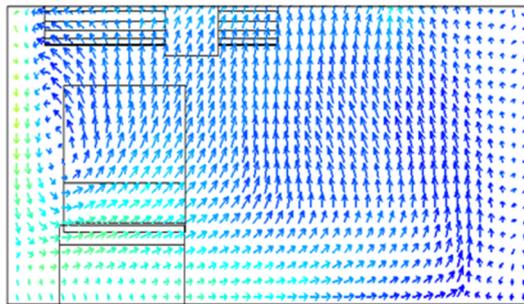
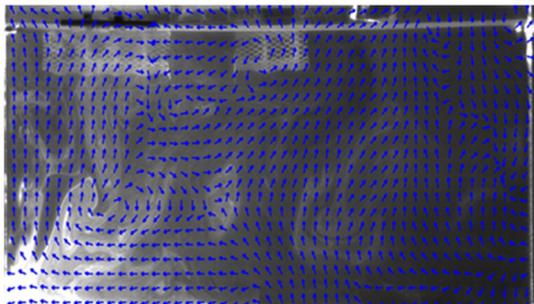


図 5-14 ヒュームフード、室内換気ともに稼働時の流速分布結果比較

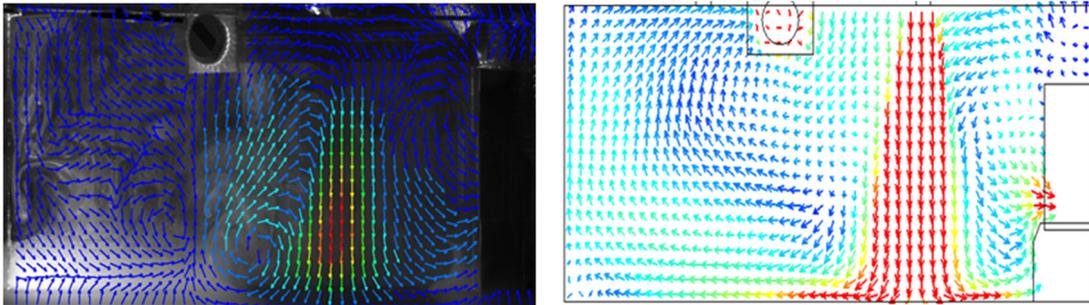
左:PIV 解析結果 右:CFD 計算結果

上から、X=0.57 m、X=0.36 m、X=0.15 m の断面

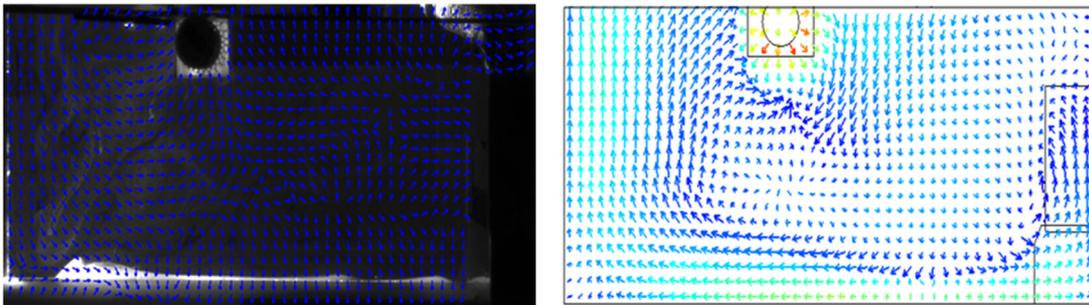
PIV 解析結果

CFD 計算結果

Y=0.55



Y=0.35



Y=0.20

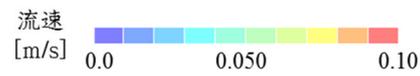
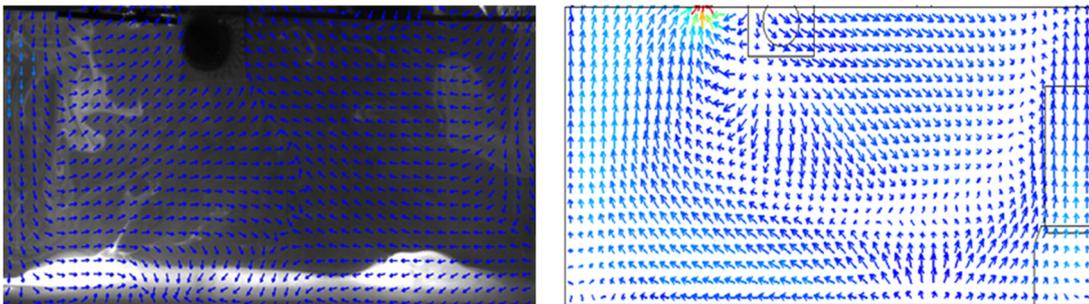


図 5-14 ヒュームフード、室内換気ともに稼働時の流速分布結果比較

左:PIV 解析結果 右:CFD 計算結果

上から、Y=0.55 m、Y=0.35 m、Y=0.20 m の断面

5.2.3 1/10 モデル実験室内気流と Full モデル実験室内気流の PIV 解析結果比較

1/10 モデル実験室を作製した目的は、容易には全体を測定・解析できない Full モデル実験室内の気流を再現し観測することにある。そのため、断片的に測定できる Full モデル実験室の PIV 解析結果と対応する 1/10 モデル実験室内の領域の気流の PIV 解析結果を比較し、1/10 モデル実験室による Full モデル実験室内気流の再現性について検討した。

ヒュームフードのみを稼働したときの、ヒュームフード排気面前の PIV 解析結果を、図 5-15 に示す。流速の絶対値についてはスケールの違いから一致しないため、流速ベクトルの向きのみについて議論する。Full モデル実験室においても、1/10 モデル実験室においても、排気面に向かう乱れの少ない流れを形成していることが確認された。これにより、換気装置周辺の気流の再現性が取れていることがわかり、1/10 モデル実験室を用いて気流の影響を検討することに妥当性が与えられたと考えられる。

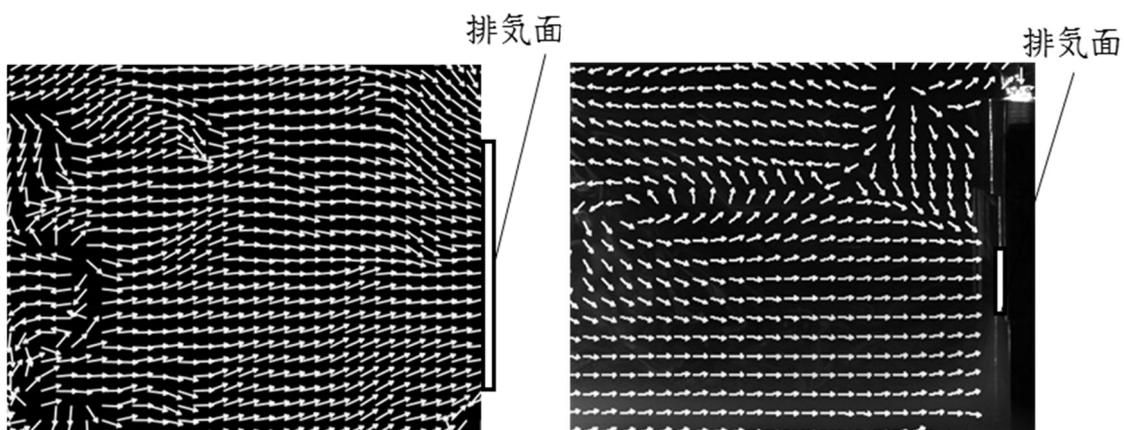


図 5-15 ヒュームフード排気面前の PIV 解析結果

ヒュームフードのみ稼働

左: Full モデル実測 右: 1/10 モデル実測

5.2.4 1/10 モデル実験室内におけるヒュームフードの位置による気流変化の検討

本項では、1/10 モデル実験室内において、ヒュームフードの位置を移動させたときに室内気流がどのように変化するかを検討した。ヒュームフードの位置変化の検討自体は3.3.1の検討で行ったが、その検討はCFDによる計算結果、つまり様々な仮定の下成り立っている結果であるため、実際のFullモデル実験室の気流で同じ現象が起こることを保証するものではない。自由なレイアウトや境界条件を設定でき、室内全体の気流を可視化できる1/10モデル実験室は、様々な実験室内の要素が気流に与える影響を観察するのに適している。前項で、1/10モデル実験室における検討で、室内気流の変化を検討することの妥当性が得られている。

検討したヒュームフードのレイアウトを、図5-16に示す。また本検討では、ヒュームフードの位置による影響を観察するため、什器類は除外し換気装置のみのシンプルな設計としている。

ヒュームフード、室内換気ともに稼働したときの気流のPIV解析を行った。

ヒュームフード位置Aのときの気流の各断面の流速ベクトルを、図5-17に示す。

ヒュームフード位置Bのときの気流の各断面の流速ベクトルを、図5-18に示す。

ヒュームフード位置Cのときの気流の各断面の流速ベクトルを、図5-19に示す。

実験室には局所的排気のためにヒュームフードは設置されているが、室内全体気流状態にも変化を与えていることが、実測で確認できた。

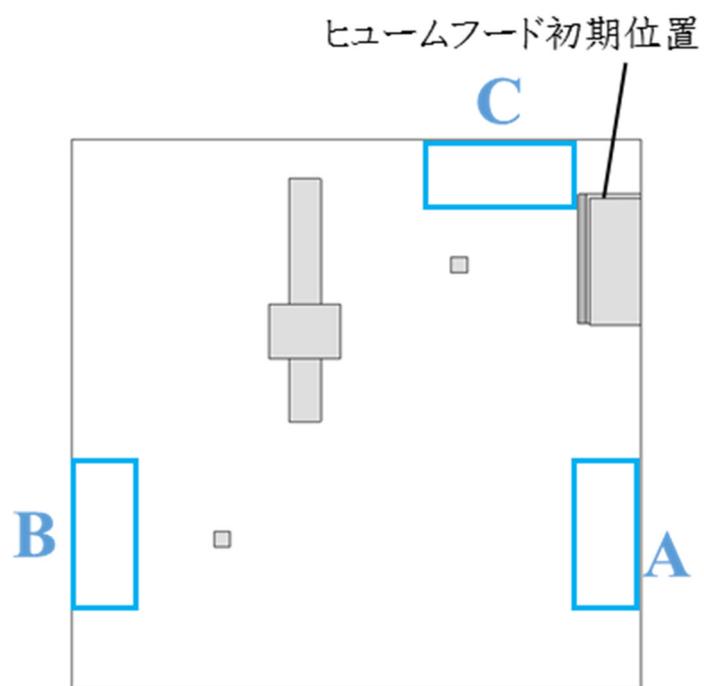
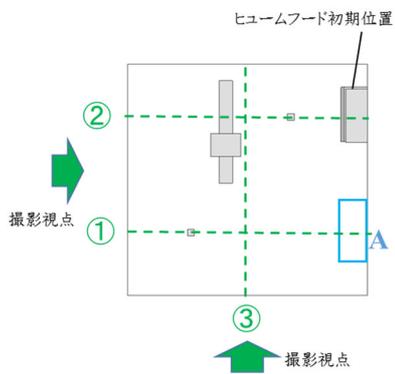
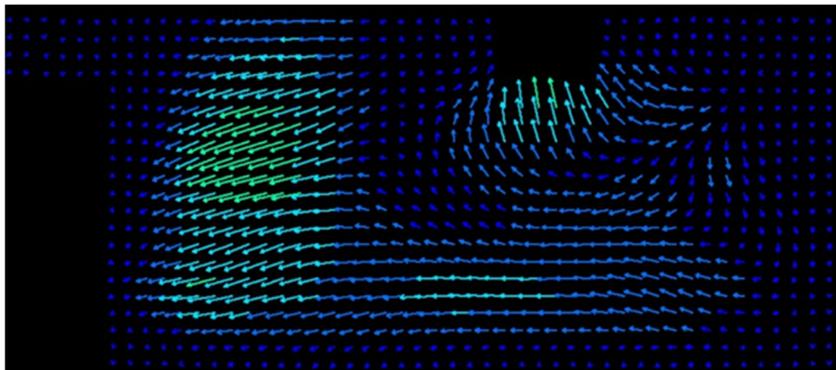


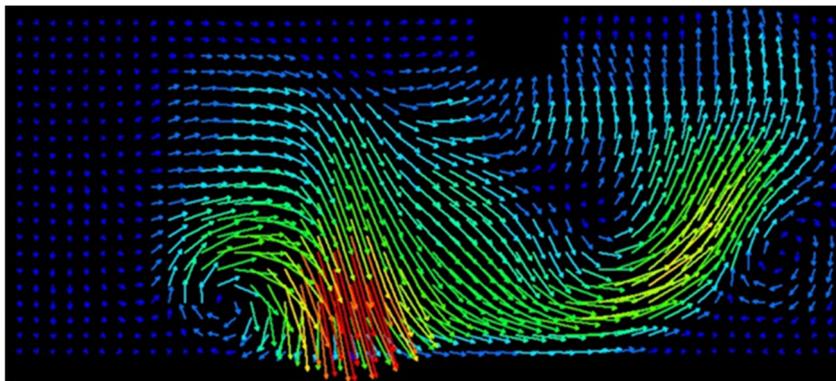
図 5-16 ヒュームフード検討位置



①



②



③

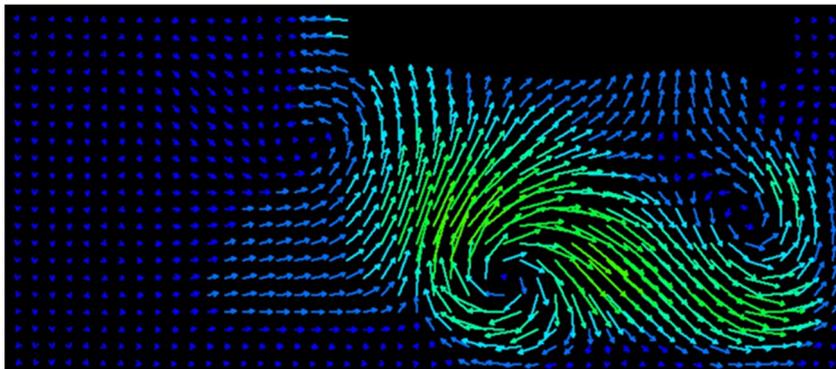


図 5-17 ヒュームフード位置 A の PIV 解析結果

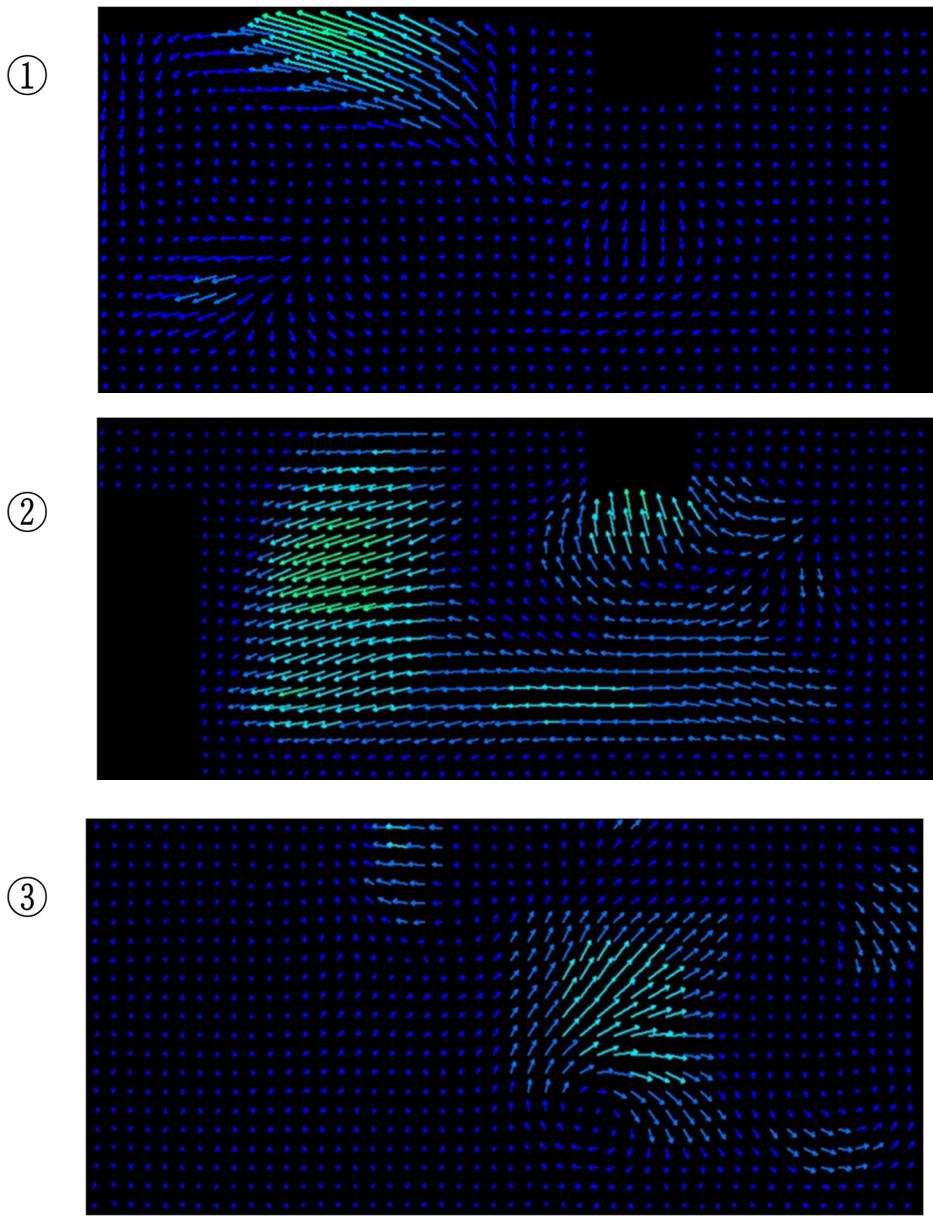
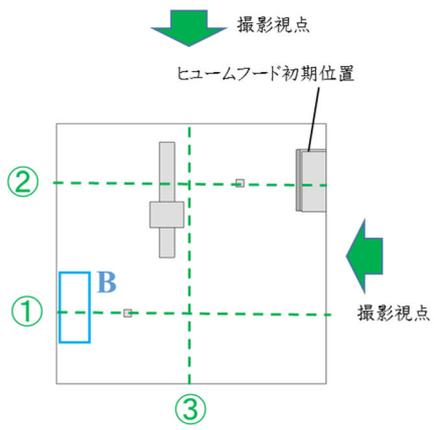


図 5-18 ヒュームフード位置 B の PIV 解析結果

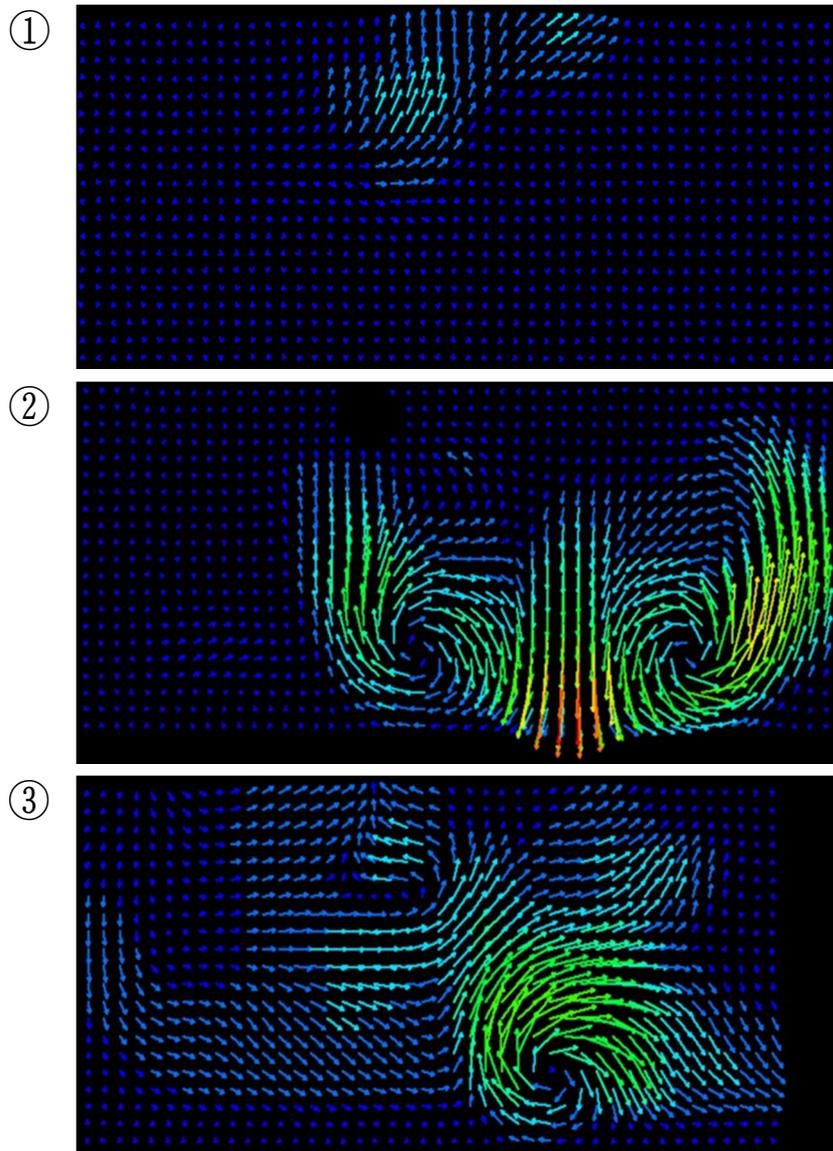
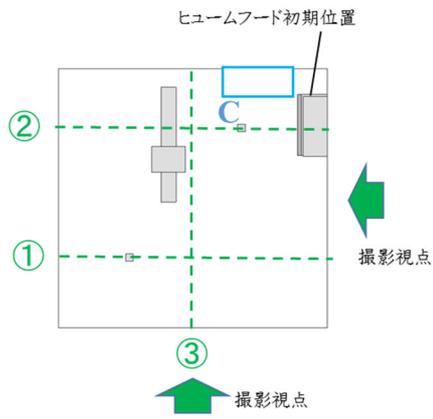


図 5-19 ヒュームフード位置 C の PIV 解析結果

第6章 結言

6.1 本研究のまとめ

大学実験室の持つ自由度や非定常性といった特殊性が室内の空気環境に与える影響を明らかにすることを目的として、実際の実験室の気流解析、1/10 スケール模型内での気流解析、CFD を用いたシミュレーションという手法を用いて検討を行った。

実験室に混在するヒュームフードと室内換気という2種類の換気装置のそれぞれの室内気流への影響を検討し、それらのレイアウトは室内気流を特徴づける要素であり、相互の役割や能力を考慮した室内設計が必要であることを明らかにした。換気回数が同じであったとしてもレイアウトによりその効果は異なっており、空気の排気のされづらさを示す指標である空気余命 (SVE6) を用いることで、室内に定常的に起きている空気の滞留と室内レイアウトの関係を整理した。その知見を活用して空気環境改善を目指したレイアウトを考案し、空気質の偏りの少ない室内空気環境を設計することができた。

大学実験室の非定常な実験作業の例として、ヒュームフードの開閉、人の出入りに伴う出入り扉の開閉という状況を想定して、CFD により非定常計算をして検討した。実験作業に伴う空気環境の変化によって、気流の状態が変化し状態が安定するまでに数十分の不安定な期間 (遷移期) を経ることがわかった。その間に、化学物質の濃度が上昇する時間帯や領域が変化していることがわかり、定常状態では起こらない化学物質のばく露が起これることが確認された。これらの現象は定常状態での気流環境の測定では察知できない可能性があり、より詳細な理解を解析によって進めていくべきである。

また、大学実験室の場としての特殊性として、複数の作業による場の共有をあげて、その特徴が室内空気環境に与えている影響について CFD 計算によって検討した。ある実験者が使用した化学物質が気流に乗り室内に拡散し、化学物質を使用していない作業の方が高濃度のばく露を受けていることがあることを明らかにした。化学物質の発生源から離れた地点に物質は蓄積しており、報告にあるような、実験室を共有する他者の化学物質の使用や室内に置かれている化学物質の拡散などに起因するばく露の可能性を気流の観点から説明できることが示された。

気流をシミュレーションによって仮想的に再現するだけでなく、実際の気流を可視化し

PIV解析することによって現実の大学実験室の空気環境に起きている現象の理解を試みた。実際に実存する大学実験室である Full モデル実験室における気流の可視化を行い、PIV 解析により気流に関する情報を得られた。CFD シミュレーションとの大まかな一致も確認し、CFD シミュレーションの妥当性も確認した。さらに、1/10 モデル実験室を作製し、アルキメデス数の相似則などの検討により、1/10 モデル実験室内において Full モデル実験室の気流の再現性を得ることに成功した。そこで、1/10 モデル実験室内でレイアウトや換気装置の稼働状況を変化させたときの気流の変化を解析し、実際の気流でも換気装置の影響で大きく変化することを確認した。

本研究では、大学実験室という非定常な場の評価には定常的な状態だけ想定した化学物質管理では不十分であることを示した。実験室の特殊性を考慮した気流解析によって、大学実験室に起こっている化学物質拡散について理解を深め、リスク解明に近づく知見が得られた。

5.2 今後の展開・課題

本研究では、実験作業が室内空気環境に影響を与えているという現象をとらえ、気流の観点から説明を試み現象の理解は進んだが、起こっているリスク増大を予測した時にどのように解決するのかという対策の面からはまだ知見が不足している。気流制御による拡散物質拡散のコントロールを行うには、実験室の持つ特殊性が与えている影響の大きさを比較し勘案し優先して注目すべきポイントなどを抽出していくべきであると考えられる。

実験室レイアウトに関しては、ヒュームフードの給気方法に対する検討が望まれる。ヒュームフードは実験室の設置にあたっては、排気能力が検討されがちであるが、本研究で明らかになったようにヒュームフード給気が室内気流へ及ぼしている影響は大変大きかったことを考えると室内空気環境を左右していると言えるので、研究室の使用状況に合わせた適切な給気設計が求められる。

実験室での非定常作業についての検討がまだ不十分である。例えば、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。人体の動きが気流に与える運動量は室内気流に大きな影響を与えることが報告されている^[49,50,51]。本研究で用いた CFD ソフトのプログラム上、人体の移動をシミュレートすることはできなかった。しかし 1/10 モデル実験室において実寸気流の再現性の向上をすることにより、1/10 モデル実験室内で人体の動きを模してその影響を検討できると考えられる。

また、実験室には排熱を伴う実験装置が存在している。人体から発せられる熱の影響を検討した結果の通り、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。実験装置は定常的に一定箇所に設置されることを考えると、実験室レイアウトの一部として、室内気流との相互関係を整理していくべきだと考える。

本論文の CFD による検討では、室内を等温で温度勾配がないという仮定の下に検討を進めた。しかし、自然換気は室内で発生した熱によってできた高さ方向への温度勾配を利用した換気方法であるように、実際には室内に温度勾配があり空気環境を考えるうえで重要な要素になりうる^[52]。本論文では化学物質による空気汚染によるリスクに着目して検討を深めてきたが、熱環境の改善も室内環境の改善に貢献する。

実験室レイアウトが定常的な気流に与える影響や非定常な実験作業が与える環境変化に関する知見を積み重ねることで、大学実験室の自由度を失うことなく、実験室全体としての化学物質のリスク低減に繋がる実験室の設計や利用を達成するための指針の確立につながっていくと考えられる。

参考文献

- [1] Seto H, Saito I, Survey and Health Effects Caused by Chemicals in Indoor Air, *Annual Report of The Tokyo Metropolitan Research Laboratory of Public Health*, **53** (2002) 179-190
- [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, (2007)
- [3] 中村修, 色川俊也, 東北大学における化学物質の作業環境測定結果に基づく大学の環境衛生の課題について,
- [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, 平成 25 年度東京大学博士論文, (2014)
- [5] 東京大学, 東京大学環境報告書 2015, (2015)
- [6] 京都大学, 京都大学環境報告書 2015, (2015)
- [7] 名古屋大学, 名古屋大学環境報告書 2015, (2015)
- [8] 東京労働安全衛生センターHP, <http://www.jca.apc.org/etoshc/25yukiyouzai.html>
- [9] 東京大学事故・災害事例
http://utsmis.adm.u-tokyo.ac.jp/UT_Anei_User/Report/Accident/Accident_Case.aspx
- [10] 中央労働災害防止協会, 労働衛生のしおり平成 21 年度, (2009)
- [11] 竹内康浩, 久永直見, 小野雄一郎, n-ヘキサンの毒性と量・反応関係, *Jap. J. Ind. Health*, **22** (1980) 470-457
- [12] 中村修, 青木隆昌, 松原孝至ら, 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**, 115-123 (2013)
- [13] 厚生労働省, 職場における化学物質管理の今後の在り方に関する検討会 報告書, (2010)
- [14] 厚生労働省, 化学物質等による危険性又は有害性等の調査等に関する指針, (2006)
- [15] 経済産業省 HP; 「政策について▶政策一覧▶安全安心▶化学物質管理」
http://www.meti.go.jp/policy/chemical_management/index.html
- [16] 厚生労働省, 第 12 次労働災害防止計画, (2013)
- [17] 厚労省, 新規化学物質製造・輸入届出状況 (グラフ)
<http://www.mhlw.go.jp/bunya/roudoukijun/anzeneisei06/pdf/09-01.pdf>
- [18] 末崎毅, 北川憲一, 化学工場 5 人膀胱がん 発がん性物質扱う, *朝日新聞*, 2016-12-19

朝刊 p.1

- [19] 化学工場 男性 2 人中毒死 洗浄中にタンク破裂, *朝日新聞*, 2015-1-4 朝刊 p.36
- [20] 日本作業環境測定協会, 作業環境測定ガイドブック「0」総論編 (第 4 版), (2010)
- [21] 銚井修一, 池田哲朗, 新田勝通, エース建築環境工学Ⅱ－熱・湿気・換気－, 朝倉書店,(2002)
- [22] I.P. Chung, D. Dunn-Rankin, Using numerical simulation to predict ventilation efficiency in a model room, *Energy and Buildings*, **28** (1998) 43-50
- [23] Mingang Jin *et al.*, Experimental study of ventilation performance in laboratories with chemical spills, *Building and Environment*, **57** (2012) 327-335
- [24] Muramatsu S, Study of Indoor Air Pollution, *J. Japan Soc. Air Pollut.*, **21** (1986) 236-252
- [25] 平山嵩, 野村豪, 室内空気分布に関する研究, *日本建築学会論文集*, **63** (1959) 81-84
- [26] Mochida A, Yoshino H, Takeda T, *et al.*, Methods for controlling airflow in and around a building under cross-ventilation to improve indoor thermal comfort, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic*, **93** (2005) 437-449
- [27] Ruining Z, Xiangdong L, Jiyuan T, CFD study of the effects of furniture layout on indoor air quality under typical office ventilation schemes, *Building Simulation*, **7** (2014) 263-275
- [28] Panagopoulos I.K., Karayannis N.K., Kassomenos P, *et al.*, A CFD Simulation Study of VOC and Formaldehyde Indoor Air Pollution Dispersion in an Apartment as Part of an Indoor Pollution Management Plan, *Aerosol and Air Quality Research*, **11** (2011) 758-762
- [29] M. Santamouris, A. Synnefa, *et al.*, Experimental investigation of the air flow and indoor carbon dioxide concentration in classrooms with intermittent natural ventilation, *Energy and Buildings*, **40** (2008) 1833-1843
- [30] 岩永正裕, 杉山明ら, 同一空間を分煙化するための換気システムの開発, *日本機械学会論文集*, **77** (2011) 1641-1651
- [31] 林立也, 加藤信介ら, CFD を用いた人体周辺微気象解析による受動喫煙の研究, *日本建築学会計画系論文集*, **533** (2000) 17-21
- [32] 片山博仁, 加藤滋雄, 医薬品製造無菌室の気流の数値流体力学 (CFD) を使ったコンピュータシミュレーションと実測空中微粒子濃度、実測 3 次元気流の結果比較と考察, *化学工学論文集*, **34** (2008) 452-457

- [33] 蓬田央, 岩瀬友紀ら, 都立高校教室における室内空気環境の実測と CFD 解析による換気・空調方式の検討, *日本建築学会技術報告集*, **17** (2011) 583-587
- [34] 棚橋隆彦, CFD の基礎理論, アイピーシー株式会社, (1999)
- [35] 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)
- [36] 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, **128** (2004)
- [37] 中村克孝, 檀和秀, 佐藤紳二ら共著, 水力学・流体力学公式・資料集, パワー社, (2004)
- [38] I.P. Chung, D. Dunn-Rankin, In Situ Light Scattering Measurements of Main stream and Sidestream Cigarette Smoke, *Aerosol Science and Technology*, **24** (1996) 85-101
- [39] 可視化情報学会編, PIV ハンドブック, (2002)
- [40] 村上周三, 加藤信介, 新たな換気効率指標と三次元乱流数値シミュレーションによる算出法: 換気効率の評価モデルに関する研究, *空気調和・衛生工学会論文集*, **32** (1986) 91-102
- [41] 小林光, 村上周三, 加藤信介, 不完全混合室内における換気効率・温熱環境形成効率評価指標に関する研究: 第1報-CFDに基づく局所領域の換気効率評価指標の開発, *空気調和・衛生工学会論文集*, **68** (1998) 29-36
- [42] 加藤信介, 梁禎訓, 複数の吹出・吸込がある室内における CFD による着目吹出3の空気齢及び吸込口の空気余命の分布性状解析, *生産研究*, **98** (2005) 11-17
- [43] アドバンスドナレッジ研究所, FlowDesigner12 リファレンスガイド, (2014)
- [44] Nabeshima Y, Nezu Y, Yamamoto H, Oshima Y, Analysis on the Influence of Laboratory Design and Operations on Airflow in Experimental Laboratory, *Journal of Environment and Safety*, **6(2)** (2015) 111-114
- [45] Jiang Y., Allocca C., Chen Q., Validation of CFD Simulation for Natural Ventilation, *International Journal of Ventilation*, **2** (2004) 359-370
- [46] 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** (1989) 103-112
- [47] 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-室内空気分布の実用的相似則, *空気調和・衛生工学会論文集*, **17** (1981) 1-10
- [48] 穴井俊博, 倉渕隆, 小林信行, 屋内競技施設の空調に関する CFD と縮尺模型実験による検討, *日本建築学会大会学術講演梗概集*, (1998) 1137-1138
- [49] 陳石, 加藤信介, 姜允敬, 人の動きによる室内気流の影響に関する CFD 解析, *日本建築学会大会学術講演梗概集*, (2012) 613-614

- [50] 陳石, 加藤信介, 姜允敬ら, 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** (2013) 9-12
- [51] Kondo Y, Nakajima H, Experiments and CFD Simulation on Influence of a Moving Body on Indoor Air Flow, *J. Environ. Eng.*, **681** (2012) 863-871
- [52] 沼野雄志, 新やさしい局排設計教室 (第 4 版), 中央労働災害防止協会, (2010)

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、大島義人研究室において行った2年間の研究をまとめたものです。さまざまな方々からのご支援・ご協力のもと、本論文を書き上げることができました。謝意を述べさせていただきたいと思えます。

指導教官の大島義人教授には、日頃のゼミやディスカッションにおいて的確な助言や深い考察をいただき、研究の奥深さを教わりました。未熟な私に学部時代から3年間、たくさんの学ぶ機会や成長する場を与えてくださり本当にありがとうございました。大島先生や大島研から学んだことは私の財産です。深く感謝申し上げます。本専攻の大友順一郎准教授には、ゼミで研究目的などの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いつも与えてくださりました。怖さもありましたが、それ以上に思慮が足りなかった部分に気づける知的に楽しい経験でもありました。副査の戸野倉賢一教授には、副査としてのディスカッションの他に、レーザーや空気中の化学物質観測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。特任研究員の根津友紀子さんは、一番近いところで親身に私を支えてくださりました。強情な私をときに前から引っ張り、ときに後ろから後押しし、向かうべき先が見えない時期であっても一步一步進む力を私に与えてくれました。また、秋月信助教には、学部の卒業論文で指導していただいたときから3年間お世話になりました。研究に対する姿勢や観察眼の持ち方を秋月さんから学んだから、研究の面白さや楽しさを感じて最後まで研究ができたと思っています。本研究室の環境安全グループの、伊藤通子先生、藤井瑠美子さん、主原愛さん、小淵喜一さんにも深く感謝しています。研究室の少数派の研究テーマであったため相談相手もあまりおらず常に不安を持っていた私ですが、皆お忙しい中私に気をかけてくださったおかげで、一人で研究をしているわけでないと感じながら前を向いていられました。秘書の長尾玲圭さんには、蔭から研究をできる環境を支えていただきました。尊敬できる方々の下、修士の研究をできたことをたいへん嬉しく感じております。

研究を進めていくうえで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、本研究室OBでもある名古屋大学の富田賢吾教授には、環境安全研究の現場に同僚させていただいたり、研究指針に関するアドバイスを賜ったりと、遠方から多大なご支

援をいただきました。また、春原伸次様をはじめとするダルトン株式会社の方々には、実験室の換気設備に関する専門的な知見やご意見をいただきました。静岡でのヒュームフード気流可視化実験に参加させていただいたことは、以後の実験方法を考える上で大変参考になりました。お礼申し上げます。本専攻が属する環境棟を管理されている大星ビル管理株式会社の佐藤英夫様には、幾度も実験室の設備や設計に関することをお尋ねしました。いつも快くご協力くださり、ありがとうございました。大変感謝しています。

本研究室での研究生活において、多くの方にご支援いただきました。大島研究室での学部時代も含めた3年間は日々の生活も充実したものでした。本研究室の皆さんにはゼミで多彩なコメントをしていただき、日頃の生活でも様々な面からお世話をしていただきました。数多くの先輩方には、様々な場面で面倒をおかけしました。特に、松本祐太さん、横哲さん、下田絵里子さん、大友研の高坂文彦特任助教には大島研に配属されたころから、親切にしていただきました。研究への熱意を抱き突き詰めていく皆さんの姿に憧れ、それを追い求めていく中でここまで来られたのだという気がします。同期、同居室の大島研の中井佑輔君、加藤進介君、岳磊君、藤岡奈々恵さん、李夢婷さん、大友研の小城元君、橋北直人君、吉永研の守屋克俊君とは、研究テーマも修了後の進路も違っていました。そういった差異を越えて苦楽を共にし思いを共有できる仲間でした。特に、卒論配属から3年間一緒の中井君とは、ともに切磋琢磨して研究を行うことができ、彼の存在や姿勢が本研究へ取り組むなによりの励みとなりました。また、研究室の後輩の皆さんには研究室での生活を様々な方面から支えてもらっていたのだと思っています。見本を示してあげられるような先輩ではなかったと思いますが、皆さんのおかげで楽しく研究生活を過ごせました。決して楽なことばかりではない研究でしたが、先輩、同期、後輩の皆さんの存在があって修士課程2年間懸命に取り組むことができました。心より感謝申し上げます。ありがとうございました。

最後になりますが、ろくに連絡も寄越さない私のような息子を信じて遠くから常に支えてくれた両親をはじめ、このすばらしい環境での生活をご支援してくださったすべての方々に厚くお礼申し上げます。ありがとうございました。

2016年2月

鍋島 優輝