

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 3 月修了予定 環境システム学専攻 47-146681 鍋島優輝

指導教官： 大島義人 教授

keywords: 大学実験室、気流解析、CFD、PIV、化学物質、リスク評価

1. 緒言 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]。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^[3]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。

大学の実験室は、局所排気装置 (ヒュームフード)、実験台、分析機器などの実験什器などが配置されているが、これらのレイアウトは研究やスペースの都合で自由に配置される。また実験者は各々の研究の目的に合わせて実験を行うなど、時間や作業内容において非定常性を有し、複数の実験者が実験室を共有して作業を行っている。このような特徴を有する大学実験室の気流環境を部屋の一部といった局所を理解するだけでなく、部屋全体を総合的に理解することができれば、さらなる化学物質のリスク低減に繋がる知見が得られることが期待される。

本研究では、気流解析に基づいて、大学実験室の室内気流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。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て、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た。

2. 計算及び実験方法

1) CFD シミュレーション CFD とは、流体の支配方程式をコンピュータ上で計算し流体の流れを再現するシミュレーション手法である。与えた境界条件下での、空気の流れや物質濃度などの物理量を可視化することができる。使用したソフトウェアは Flowdesigner (アドバンスドナレッジ研究所)、乱流モデルは高レイノルズ型 $k-\epsilon$ モデルを用い、モデルのメッシュ分割数は約 100,000 に設定した。実際の実験室を参考に、CAD でモデリングし、その内部におけるシミュレーションを行った。対象実験室を、図 1 に示す。室内換気に加え、ヒュームフードが設置されている。室内換気は、一対の給気口と排気口を有し、ヒュームフードに対しても給気設備がある。それらの位置関係は、ヒュームフードの前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。CFD 計算の境界条件を、表 1 に示す。ヒュームフードの面風速は 0.50 m/s に設定した。両者を稼働した際の換気回数は約 5.6 回/h となる。化学物質はアセトン进行想定し、発生面は机の高さを想定し部屋中央の高さ 1.1 m の位置とした。モニタリング領

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 (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 (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 (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 (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 1 CFD 計算境界条件

域を人の呼吸域を想定し高さ 1.5 m に 5 つ（図 1(b)の A~E）を設定した。

2) 気流可視化、PIV 解析 空気中にスモークを焚き、シートレーザー（Sanctity）の照射によって、実験室内の気流を可視化し、可視化した気流を高速度カメラ（カトウ光研）で画像データ化し、PIV によって数値化し解析した。PIV とは、連続する粒子画像同士の輝度分布の相関から、流体の移動をベクトルに変換する手法である。ソフトウェアは FlowExpert2D2C を用いた。可視化気流測定の大略図を、図 2 に示す。

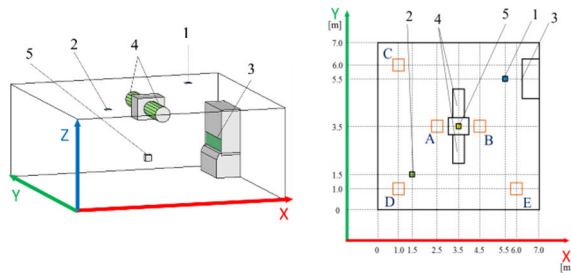


図 1 対象実験室レイアウト

(a) 俯瞰図 (b) 上面図

1/2. 室内換気給気口/排気口 3/4. ドRAFT排気面/給気面
5. 化学物質発生源 A~E. モニタリング領域

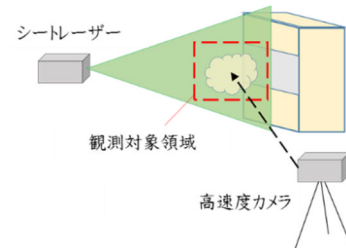


図 2 気流の可視化、記録

3. 結果と考察

3-1. 実験室レイアウトによる気流の変化に関する検討

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た。

ヒュームフードのみ稼働、ヒュームフード・室内換気ともに稼働の条件で、ヒュームフードの位置を変えて CFD 定常計算を行った。室内空気環境を評価する指標として、空気余命^[4,5]を用いた。空気余命とは、任意の領域内の空気が排出されるまでの相対時間であり、この値が高いほど室内に滞留しやすい空気であることを表す。ヒュームフードのみ稼働のときの高さ 1.1 m（物質発生の高さ）での空気余命分布を、図 3 の左 2 図に示す。ヒュームフード給気の吹出し方向に対して平行な分布となっており、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。

さらに、室内換気を稼働した場合（図 3 の右 2 図）、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的作用を果たしている。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を考慮して、滞留が起こらないレイアウトを目指し図 4 のレイアウトを考案し、CFD 計算を行った結果、空気余命の偏りが減少した。このように、

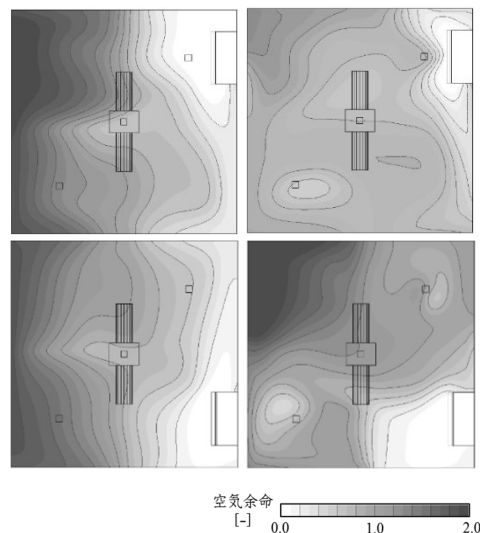


図 3 高さ 1.1 m における、空気余命分布

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

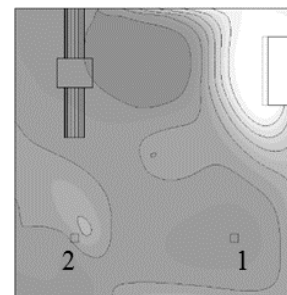


図 4 高さ 1.1 m における、空気余命分布

ヒュームフード、室内換気ともに稼働

1: 室内換気給気口

2: 室内換気排気口

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。

3-2. 実験作業に起因する環境変化が、気流や化学物質拡散に与える影響の検討 大学実験室の作業場としての特徴として、複数の実験者がそれぞれの研究目的に従って作業しており、作業環境の非定常性や場の共有といった特徴がある。ここでは、実験中の 1) ヒュームフードの開閉、2) 実験室出入口扉の開閉、3) 実験室の共有を想定して、作業場にある非定常性が室内空気環境に与える影響についての検討内容を述べる。計算開始 60 分後に発生源から拡散物質が発生、120 分後にそれぞれの環境変化が発生するという設定で合計 4 時間を非定常計算した。その間の室内気流の平均流速、拡散物質平均濃度変化をモニタリングした。

1) ヒュームフードの開閉 ヒュームフードは使用時に適宜サッシが開閉される。本検討では、 $t=120$ 分にドラフトのサッシが下げられ、開放幅が 40 cm ($19.8 \text{ m}^3/\text{min}$) から 5 cm になり、ヒュームフードの換気量が 1/8 に減少するという VAV 型 (Valuable Air Volume) を想定した。ドラフトの開閉によって気流状態が大きく変化しており、安定状態に移行するまでに 30~60 分の遷移期があることがわかった (図 5)。その間に濃度ピークを迎える領域もあり実験作業が気流に大きく影響を与えていることを確認できた。また、高濃度を示す領域が開閉により変化しており、物質濃度管理のモニタリング位置の決定にもヒュームフードの開閉による気流への影響を考慮する必要があることを示している。

2) 実験室出入口扉の開閉 $t=120\sim125$ 分に、扉が 5 分間だけ開放されるという設定の非定常計算を行った。扉からは空気の流入があり、その量は $12.0 \text{ m}^3/\text{min}$ とし、その間ヒュームフードの給気量を等量減少させることで室内の換気バランスを取り、扉の開閉に関わらず、換気量、物質発生量は一定とした。

扉開放の間、室内全体の流速が低下していることがわかる (図 6)。室内の扉周辺以外の箇所でも同じ傾向が見られた。また、濃度変化を見ると、扉開閉から約 30 分経過後室内全体で濃度が上昇した。これら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挙動が変化している可能性を示唆している。

3-3. 実験室の共有に関する検討

同一実験室内にいる 3 人の作業員 A~C について、作業員 A が化学物質を使用しており、部屋中央で B が、A から最も離れた隅で C が作業しているという想定で各作業員の呼吸域の化学物質濃度について検討を行った (図 7)。

作業員 A、B、C の呼吸域 (高さ 1.5 m) での濃度変化 (図 8) を見ると、B で最も高い濃度、C で最も高い濃度上昇速度が確認された。室内気流と物質拡散の関係を確認すると (図 9)、風上になる A ではなく、室内給気口からの気流に乗りまず C に届き、上昇し B に滞留していることがわかった。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、気流の観点から実験室を共有する他者からの化学物質ばく露の可能性³⁾を説明するこ

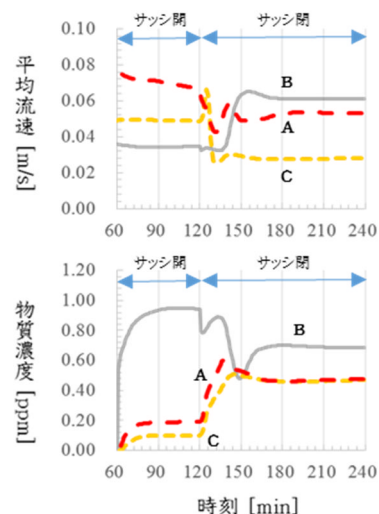


図 5 領域 A、B、C における、平均流速変化と物質濃度変化 ($t=120$ min でドラフト開放幅 40 cm \rightarrow 5.0 cm)

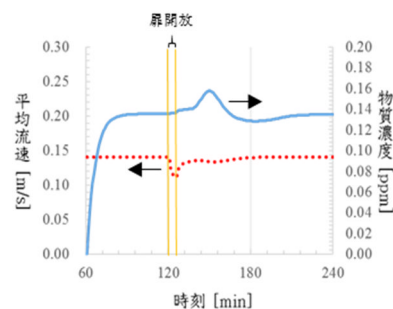


図 6 室内全体における、平均流速変化と拡散物質濃度変化 ($t=120\sim125$ min で扉開放)

とができることが示された。

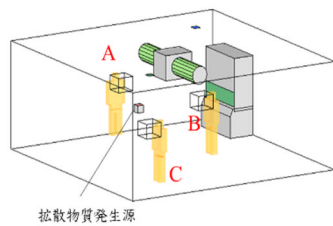


図7 作業者と物質発生源の配置

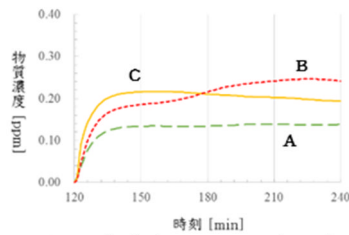


図8 作業者 A、B、C 呼吸域
における拡散物質濃度変化

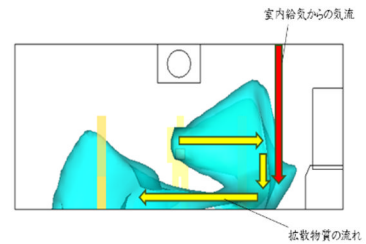


図9 室内給気と物質拡散の関係

3-4. 1/10 スケール実験室モデルの作製および気流の可視化・PIV 解析 室内全体の気流を観測するために 1/10 スケールの縮小モデルを作製した (図 10)。模型と実際の実験室内の気流条件を揃えるために、アルキメデス数を用いた相似則^[6]に基づき、換気設備の流量を設定し、模型内で実際の気流を再現することを可能にした (図 11)。さらに、ヒュームフードの位置を変化させて気流解析を行った。実験室には局所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。これらのことから 1/10 モデルでは換気装置や什器類の位置を自由に配置するなどの室内環境設定が容易であり、給排気量の不一致や作業者の移動といった実際の実験室を模した室内の気流を再現し可視化することができる手法となりえる。

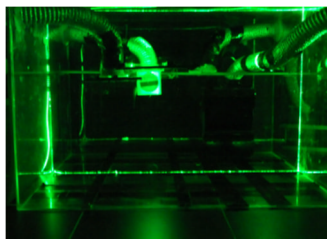


図10 1/10 モデル実験室

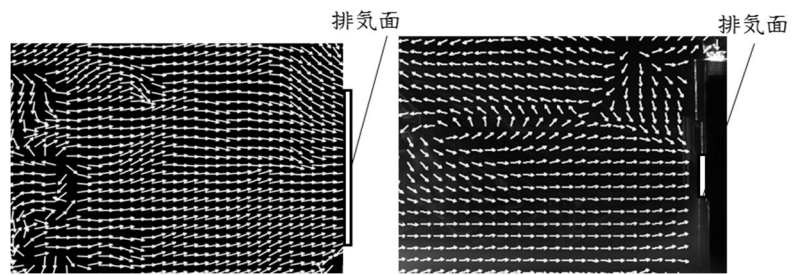


図11 実際の実験室(上)と1/10 モデル実験室(下)の気流の
PIV 解析結果比較

4. 結言 大学実験室の、自由度や非定常性といった特徴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 モデル内での気流解析、CFD シミュレーションによって検討を行った。

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。実際の実験作業を想定することで、非定常性や場の共有といった特徴を検討して、その特徴は空気環境に大きな影響を与えていることがわかった。作業が気流に影響を与えた後、数十分というスケールで不安定状態が続き、その間に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。

本研究では、従来の作業場に適用される、換気回数という指標や作業環境測定という手法だけでは、大学実験室という非定常な場の評価には不十分であることを示した。非定常性や場の共有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期待される。

参考文献 [1] 竹内康浩ら, *Jap. J. Ind. Health*, **22** (1980) 470-457 [2] 野村直史, 京都大学, (2007) [3] 根津友紀子, 東京大学博士論文, (2014) [4] 小林光ら, *空気調和・衛生工学会論文集*, **68** (1998) 29-36 [5] 村上周三ら, *空気調和・衛生工学会論文集*, **32** (1986) 91-102 [6] 勝田高司ら, *空気調和・衛生工学会論文集*, **17** (1981) 1-10