

気流解析および動線解析アプローチによる 大学実験室の空気環境とその利用様態に関する解析手法の検討

2018年3月修了 環境システム学専攻 47-166646 采女勝紀
指導教官： 大島義人 教授

キーワード：実験室空気環境、室内気流、実験室レイアウト、化学物質拡散、実験者動線

1. 緒言

近年、産業現場のみならず、大学実験室のような研究現場においても安全管理が重視されてきており、知的好奇心や創造性を十分に活かす必要のある研究活動において、いかにして安全を考えていくか、つまり、創造性と安全性の両立が課題となっている。創造性をより活かそうとすれば、必然的に活動の自由度は大きくなり、実験室の利用様態や実験室環境が多様で複雑なものになるため、安全管理が容易でない。そこで、研究活動の創造性を制限しすぎることなく安全を担保するためには、実験室という多様で複雑な「場」の状態を把握し理解することが必要であると考えられる。

化学系実験室を主として、実験室ではさまざまな化学物質が使用されており、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。この影響については、実験者の健康状態の長期的な追跡データも少なく、リスク評価が十分でない^[1]とされている。また、実験中の実験者が自身の使用しない化学物質に実験室内でばく露する^[2]という報告もある。このようなことから実験室内の化学物質の拡散挙動を把握することが重視され、気流解析によって実験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に関する合理的理解を目指した研究^[3]も行われている。このように、実験室内の空気環境やレイアウトなど、実験室環境を部屋全体として総合的に理解することで、より高度な実験室管理の可能性が大きくなると考えられる。一方で、化学物質の存在位置や使用場所、実験室内での実験者の実験作業や移動経路による化学物質拡散挙動への影響等を考慮した実験室環境の解析報告はあまりない。実験室の利用実態を考慮した実験室環境を把握し理解するためには、レイアウト等の静的データのみならず、実験室内における実験者や化学物質等の実際の動向、実験装置等の利用状況等に関する動的データの解析が必要であり、それらのデータを組み合わせることによって実験室という場の複合的解析が可能になると考えられる。

室内における人物の行動様態を解析する手法の一つとして、動線解析がある。動線を解析し、主要な行動パターンを抽出することにより、室内環境の快適性、作業の効率性、安全性等の向上を目指した適切なレイアウト設計やリアルタイムでの効果的な室内情報の提供が可能になるとされている^[4]。実験室の作業動線は、実験室レイアウトや実験シナリオに大きく影響を受け得るため、実験室における実験者の動線情報を取得し解析することによって、実験者行動に関する知見が得られると考えられる。

本研究では、実験室を構成する要素の中から、空気環境に関わる室内気流と実験室の利用様態に関わる実験者の動線を取り上げた。室内気流の解析では、数値流体力学 (CFD) シミュレーションを用いて、実際の実験室で起こり得ると考えられるいくつかのケースを想定し、モデル実験室に対して計算を行った。また、実験者の動線解析では、実際の実験の様子をビデオカメラで記録し、その映像を観察することによって動線情報の取得および実験行動の推察を試みた。

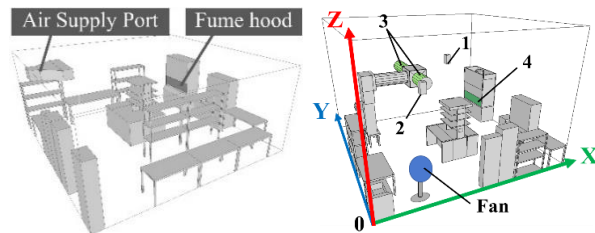


図1. モデル実験室1

図2. モデル実験室2

2. 解析手法

a) 室内気流の解析

本解析では、FlowDesigner2017 (アドバンスドナレッジ研究所) というソフトウ

エアを用いて CFD シミュレーションによる計算を行った。解析対象としたモデル実験室 1 (7.0×7.0×3.0 m)、モデル実験室 2 (X:7.0×Y:7.0×Z:5.0 m) の概観図をそれぞれ図 1、図 2 に示す。まず、モデル実験室 1 を用いて、ヒュームフード (以下、FH) 用給気装置の設置位置を変え、気流の向き及び FH 近傍に設置した化学物質発生源 (アセトン、15.76 g/h で発生) からの化学物質の拡散挙動を解析した。次に、モデル実験室 2 を用いて、室内気流の安定性という観点で、気流速度の時間変化を調べた。換気設備として、室内換気用の給・排気装置 (1、2) と FH 用給・排気装置 (3、4) を設け、その他実験設備として、実験台、収納棚等を設置した。室内換気は流速 2.5 m/s、流量 6.0 m³/min、FH 排気装置は流速 0.5 m/s、流量 19.8 m³/min で稼働している。モニタリング点を X、Y、Z の 3 方向に 1 m 間隔で 8×8×6 (=384) か所に設定し、モニタリング時間は、給排気開始を t=0 とし、t=480 min までとした。また、外乱発生後の室内気流の再生能力、すなわちロバスト性を評価するために、風速 3.0 m/s のプロペラ式ファン 1 台を高さ 70 cm の位置に設置した。

b) 作業動線の解析

本解析で対象とした実験室 (8.5×7.2×3.0 m) のレイアウト平面図を図 3 に示す。4 台のビデオカメラを室内に設置し、対象実験室で日常的に実験を行っている学生 (修士課程 2 年) の実験中の様子を映像記録した。実験中の映像 (約 11.5 時間) の中から実験室での連続滞在時間が比較的大きい部分 (2,515 秒間) を抜粋し、その時間における実験者の存在位置の記録と実験者行動の観察を行った。また、対象者が行う実験のシナリオについて、聞き取り調査による情報取得を行った。

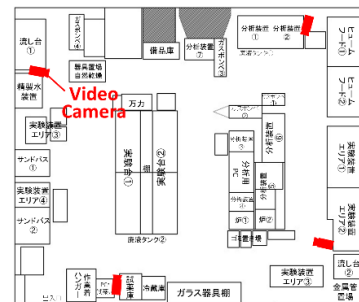


図 3. 実験室レイアウト平面図

3. 解析結果及び考察

a-1) FH 用給気位置による化学物質拡散挙動への影響

FH 近傍高さ 30 cm の地点に揮発性化学物質 (アセトン) 発生源を設置し、室内の化学物質濃度を CFD で計算した。FH 用給気装置の位置が P、Q の場合の高さ 45 cm での化学物質の濃度分布をそれぞれ図 4(a)、4(b) に示す。給気位置 P の場合、FH 近傍で発生した化学物質は FH で即排気されるのではなく、室内に大きく広がるように拡散する結果となった。一方で、給気位置 Q の場合では、FH に即排気され、部屋全体には拡散せず局所的な拡散に留まる結果となった。これらは、給気装置と室内壁・FH との位置関係による主要な室内気流の向きの変化が要因であると考えられる。従って、実験室内で化学物質を発生させる際には、室内全体の気流と化学物質の使用場所との関係性を考慮することが重要である。

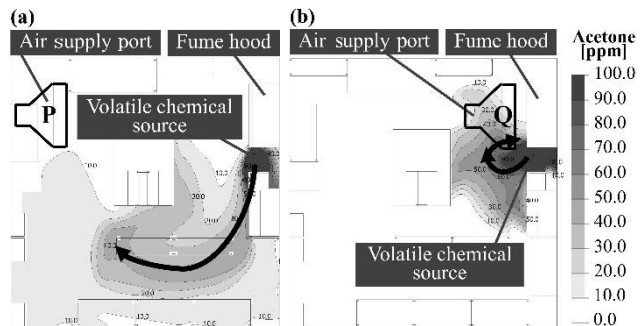


図 4. アセトンの拡散挙動 (高さ 45 cm、定常状態)
(a) 給気位置 P (b) 給気位置 Q

室内換気設備稼働時、外乱発生時の室内気流の安定性、ロバスト性

a-2) 換気設備稼働時、外乱発生時の室内気流の安定性、ロバスト性

室内気流の安定性について、各 Z 座標における平均流速を用いて検討した。まず、換気設備稼働開始時か

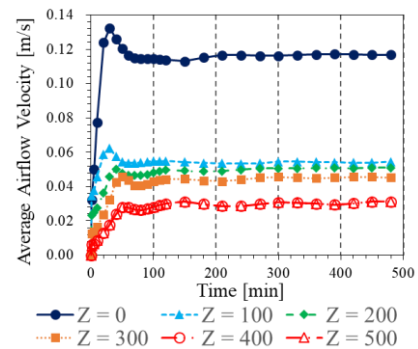


図 5. 各高さでの平均流速の経時変化 (室内換気・FH 稼働)

らの室内気流の平均流速の経時変化（8時間）について、①室内換気のみ稼働、②FHのみ稼働、③室内換気・FH稼働の3条件で検討した。結果の例として条件③について図5に示す。3条件全てについて、どの高さにおいても、約100min経過後に平均流速のぶれが約10%以内に収まることが示された。また、無限時間経過後の定常状態との平均流速の差の経時変化を①～③の各条件について計算したところ、Z=100cmにおいては、条件①、②の場合よりも条件③の場合の方が、約180min経過後、その差の値が小さくなった。これは、室内換気とFHを単独で稼働させるよりも、両方同時に稼働させる方が、室内気流の流速がより安定する領域が存在することを表している。次に、外乱発生時における室内気流のロバスト性を評価するために、条件③のモデル上にファンを設置し、t=180minから30分間稼働させ、その場合における各Z座標での平均流速の経時変化を計算した。ファン30分間稼働後、各高さにおいて室内気流の再生速度は異なり、Z=100cmにおいては、ファン停止後に平均流速は増加し、ファン非稼働の場合よりも約20%大きくなり、ファン停止後270min経過時でも約15%大きい結果となった（図6）。このことから、実験作業や実験者の移動などの外乱によって気流が受ける影響は、外乱発生直後だけでなく、中長期的に影響することが示唆された。

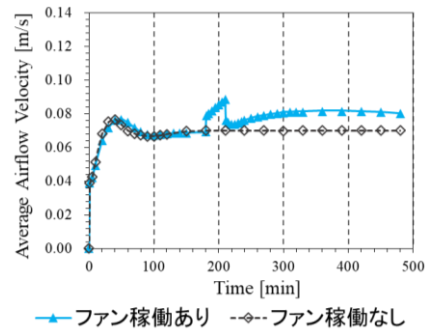


図6. 外乱発生時の平均流速の経時変化 (Z=100cm)

b-1) 実験シナリオ上の合理的仮想動線と実際の動線の比較

対象実験者が最初に実験室に入室した時刻を $t=0$ とすると、最後に退室した時刻は $t=40,947$ sであった。解析対象時間は $t=12,484$ s～ $14,999$ sの2,515秒間とした。聞き取り調査により情報取得した対象時間内の実験シナリオについて表1に示す。実験シナリオ上の合理的な移動シナリオを想定する上で、実験室内に設定した計101個の地点を結ぶ線分上を実験者が移動し、各移動において最短経路を選択すると仮定した。但し、解析対象時間中に、実験台②—実験装置①間を移動する際には、最短である実験装置⑤前を通過する経路ではなく、ヒュームフード前を通過する経路が必ず選択されていた。これに従って、合理的な移動シナリオに対する動線は図7のようになった。図7のように、実験者の主要な存在位置をAからEの5エリアに分けて考えるとすると、対象時間中の合理的なエリア遷移は、{D,E,C,A,B,A,C,D,C,A,C,E,D}（計12遷移）となり、合計作業・移動時間は978秒となった。すなわち、残りの1,637秒間は主要な作業を行わない時間となる。これに対し、実際の動線は図8のようになり、合理的な移動シナリオよりも遷移回数が明らかに多く、遷移回数が92回という結果となった。ビデオ観察により、実験シナリオ以外の行動が実験時間中に非常に多く見られたことから、シナリオ以外の非合理的な行動を解析することで、より広範囲な実験者行動の把握・理解につながると考えられる。

表1. 対象時間内の実験シナリオ詳細

手順	作業内容(作業場所)
1	実験サンプルの回収(@ ヒュームフード②)
2	実験装置①およびシリジジポンプ設定条件の変更(@ 実験装置①、②エリア、30～40分安定待ち)
3	検量線用溶液の作製(@ 実験台②)
4	検量線用溶液の分析開始(@ 分析装置③)
5	実験サンプルの溶媒希釈(@ ヒュームフード②)
6	検量線用溶液の作製、バイアル瓶組み立て(@ 実験台②)
7	実験装置①の状態記録(@ 実験装置①エリア)
8	実験サンプルの回収(@ ヒュームフード②)

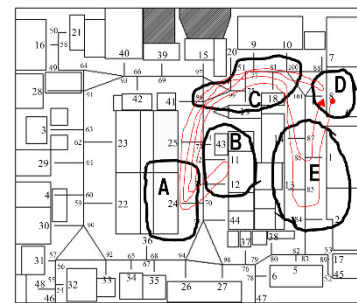


図7. 合理的シナリオにおける仮想動線

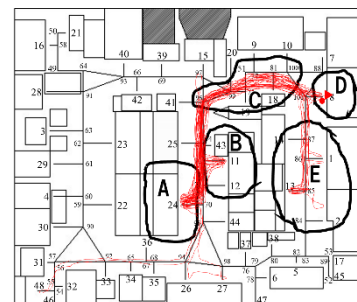


図8. 実際の実験者の動線

b-2) 実験シナリオ以外の非合理的行動

全エリア遷移 92 回中 80 回あった実験シナリオ以外の非合理的エリア遷移を表 2 のように 10 通りの遷移群に分類した。10 種類の移動のうち、移動①の出現回数が最多となったことについては、拠点エリア A と分析装置③のあるエリア B が隣接しており、装置状態や分析進捗の確認が容易であったために、確認作業が頻繁に行われたことが要因として考えられる。また、出現回数が 2 番目に多かった移動②については、エリア C には使用中の装置が存在しないことから、作業としての目的のない行動であると推測される。次に、非合理的行動のうち、エリア A~E に 10 秒以上連続滞在した場合を非合理的エリア滞在とし、それらの頻度と合計滞在時間を算出した。非合理的エリア滞在の合計時間は 1,521 秒であり、解析対象時間の 60.4%に相当した。中でも、滞在時間が 1,140 秒で最長であったエリア A においては、実験シナリオ以外の行動として、実験ノートの閲覧・書き込み (6 回、671 秒)、休憩 (1 回、303 秒)、その他 (7 回、166 秒) が記録映像から観察された。

表 2. 非合理的移動の遷移群分類

No.	Transitions	Count	Total Time [s]
①	A → B → A	7	25
②	A → C → A	5	18
③	A → C → D → C → A	3	39
④	A → C → E → C → A	3	32
⑤	A → B → C → E → C → A	2	40
⑥	A → B → C → B → C → A	1	23
⑦	A → C → D → C → B → A	1	22
⑧	A → C → D → E → C → E → C → A	1	34
⑨	A → 48 → A	1	6
⑩	A → 26, 27 → A	1	9

b-3) 室内空気環境に影響し得る実験者行動

対象実験室のように、化学物質を使用する実験室には FH が設置されている場合が多い。これは、化学物質を使用する作業を FH 内で行うことによって、室内での化学物質拡散を抑制するためである。一方で、排気装置前を実験者が横切ることによって排気装置内から汚染物質が室内に漏洩する危険性がある⁴⁾ことが報告されている。本解析では、{C,E}または{E,C}の遷移を FH 前通過の移動とすると、実験シナリオ中で 2 回、シナリオ以外で 14 回の移動が見られ、全遷移中の 17.4%を占める結果となった。FH 内からの汚染物質漏洩の危険性を減らすための対策として、利用装置の位置変更や人や物の存在による進路妨害の削減を行うといった作業環境的アプローチ、装置の改善等により確認作業等の頻度を低下させ、シナリオ以外の移動を制限するといった実験者行動的アプローチなどが考えられる。

4. 結言

実験室という多様で複雑な「場」の構成要素の中から、空気環境に関わる室内気流と実験室の利用様態に関わる実験者の動線を取り上げ、各々の解析手法について検討した。

室内気流の解析では、CFD 計算により、実験室レイアウトが室内気流及び化学物質の拡散挙動に与える影響と、室内気流の安定性・ロバスト性について調べた。その結果、換気装置と室内壁の位置関係によって主要な室内気流が変化するため、化学物質の拡散挙動も変化することが示唆された。実験室内で化学物質を使用する際には、その使用場所を室内全体の気流を考慮して定めることが重要だと考えられる。

実験者の動線解析では、実際の実験の様子を記録したビデオを用いて、動線情報の取得および実験行動の観察を行った。実験シナリオから想定される合理的な仮想動線と比べて、実際の動線は遷移回数が非常に多いものとなった。この要因は、非合理的と考えられるシナリオ以外の行動の頻出であることが記録映像から観察された。

本研究では、実験室という場を理解する上では、室内気流などの各構成要素の単一的解析のみでは不十分であり、室内気流や実験者行動などの複合的な解析が重要であることが明らかになった。本検討に、室内での化学物質の動向や実験装置の状態変化に関する解析を加え、複合的解析を積み重ねることで、実験室形態のより高度な理解に繋がると期待される。

参考文献 [1] 野村直史, 京都大学博士論文, (2007). [2] 根津友紀子, 東京大学博士論文, (2014). [3] Y. Nabeshima, et al., *Journal of Environment and Safety*, **6**(2), 111-114 (2015). [4] 小磯貴史ら, *IPSJ SIG Technical Report*, **2003**(115(2003-UBI-002)), 61-66 (2003). [5] L-C. Tseng, et al., *Industrial Health*, **45**, 199-208 (2007).