

実習工場の換気性能に関する実験的評価

稲垣 歩¹・大隈 悠也¹・清家 玲里¹・米津 裕人²

¹機械工学科, ²技術部

近年の新型コロナウイルスの影響で感染症対策のため換気性能が注目されており、今後は室内の気流も設計の対象になると考えられる。本校の実習工場でも、感染症対策のために効果的な換気方法が求められることに加えて、新型コロナウイルス以前より作業中の二酸化炭素濃度の上昇による集中力低下が問題となっていた。しかし、換気特性に関する研究はオフィスや家庭を対象としたものが中心で実習工場に関する報告はほとんどなく、例外的な構造物は個別に調査されているものが多い。したがって、本研究では本校の実習工場の換気特性を把握し効率的な換気方法を提案するため、フォグマシンを用いた実験的評価を行った。

キーワード： 実習工場, 換気性能, 可視化計測, 二酸化炭素濃度, 感染症対策

1. 緒言

背景として、以前より実習工場の機械実習で、二酸化炭素濃度の上昇による集中力低下が原因と考えられるポカミスの増加や作業効率の低下による実習時間の間延びが発生していた。室内の二酸化炭素濃度を減少させるためには換気が重要であり、加えて近年の新型コロナウイルスの感染症対策のためにも効果的な換気が必要とされている。

室内の換気性能については様々な研究⁽¹⁻⁴⁾がされているものの、オフィスや家庭を対象としたものが中心となり、一般化されたものも多い。それに対して博物館⁽⁵⁾や船舶⁽⁶⁾、鉄道車両⁽⁷⁾と言った例外的な構造物は個々に検証されており、換気特性はそれぞれの状況で異なると言える。

したがって本研究では、本校の実習工場の換気特性を把握するため、工場内に煙を充満させ時間変化を計測することで換気性能の評価を行った。一般的に換気とは外気を取り入れて内部の空気を排出することであるが、本実験では外部とやり取りされる空気量について計測できていない。しかし実習工場は十分な体積を有することから内部空気の循環が促されることでも換気効果が期待できると考え評価を行った。本内容は令和3年度の大分高専機械工学科のエンジニアリングデザインで学生が行った実験結果をまとめたものである。

(1) 室内空間の二酸化炭素濃度

室内の二酸化炭素濃度については、厚生労働省の建築物環境衛生管理基準で1000ppm以下に適合するように努めなくてはならないと定めている。また学校に対しては文部

科学省による学校環境衛生管理マニュアル⁽⁸⁾より、教室等の換気基準として二酸化炭素は1500ppm以下であることが望ましいとされており、基準を超えた場合には換気を行うようにすること、と記されている。本校の実習工場についてもこれらの基準に従うものと考えられる。

実習工場の作業中の二酸化炭素濃度について、ロボコン部10名程度の技術支援時に計測した値を図1に示す。この結果は窓を閉めた状態のもので、作業開始から60分程度で1000ppmを超えることが明らかとなった。実際の機械実習ではさらに条件が厳しく15名程度で180分間作業を行うため、この値と同等かそれ以上の二酸化炭素濃度になると考えられる。また、二酸化炭素濃度は作業台上に置いた計測器が示した値であり、一般的に二酸化炭素は空気よりも重いため床付近にたまるイメージを持たれているものの、作業者の顔付近でも濃度が高いことが示された。このことについては、日本建築学会が呼吸域の高さで二酸化炭素濃度が高くなること⁽⁹⁾をまとめており、天井の高い実習工場では室内空気の循環だけでも二酸化炭素濃度を低下させる効果があると考えられる。

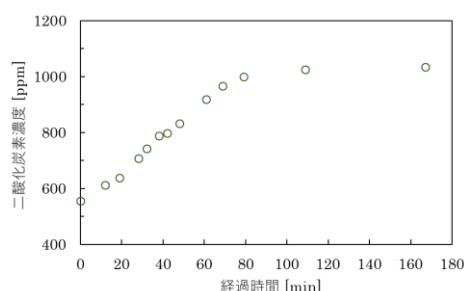


Fig.1 作業中の二酸化炭素濃度変化

(2) 感染症対策

感染確率は比較的簡単なモデル式^(10,11)から予測できるとされるが、この中には吸込ウイルス量や感染に至るウイルス量という不確定な数値が含まれている。この不確定な数値には換気流量や換気回数が関係しており、この値を下げることで感染確率を低減するため、結果として換気が重要という結論に至る。

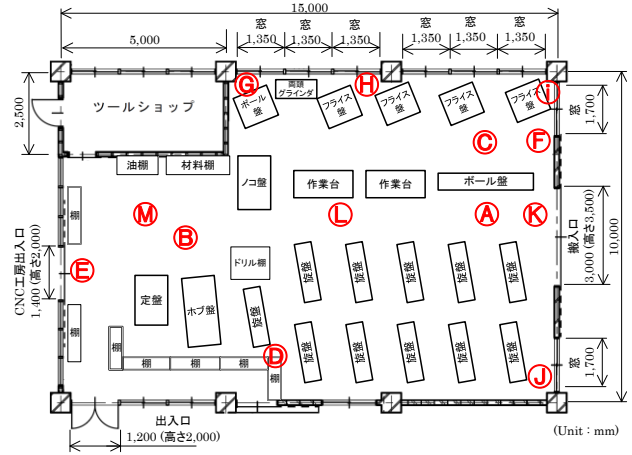
換気の効果としては、室内全体の感染確率を3分の1程度へ減少させることが可能⁽¹⁰⁾と示されている一方で、外部と空気の入れ替えが無い場合にはエアコン気流により感染が増加したとの事例⁽¹¹⁾や微風条件がむしろ感染リスクを高める可能性がある⁽¹²⁾との指摘もある。換気による室内気流による影響はさらなる調査が必要と言えるが、吸込ウイルス量を減らすために飛沫を早期に拡散させること、風下を作らずに空気を循環させることが必要とされている。

2. 実習工場の配置および実験方法

実習工場の配置を図2に示す。実習工場は10m×15mで天井の高さは約5mとなっている。図左上に位置するワークショップは予備の工具などを保管する部屋となっており、個別に仕切られているため実習工場との空気の出入りは存在しない。実習工場が有する開口部は、図右側に幅3.0m×高さ3.5mの搬入口は、図左下に通常の出入口となる幅1.2m×高さ2.0mのドアが、図左側にマシニングセンターなどを配置するCNC工房へつながる幅1.4m×高さ2.0mのドアが存在する。また、窓は図上側に幅1.35m×高さ1.2mのものが6箇所、搬入口の横に幅1.7m×高さ1.2mのものが2箇所配置されている。それぞれの窓は床から1.2mの位置に設置されており、スライド式のため開口時には半分の幅で空気の出入りが行われる。

実習工場に設置されている空気循環システムは、⑤の位置の天井にエアコン(最大流量70m³/min)が設置され、⑧~⑩の位置の天井付近(床から4mの位置)に外から内向きへ空気が流入するように換気扇が設置されている。また、追加の空気循環システムとして、⑥の位置に工場中央の天井方向に向けてサーキュレーター(流量2.6m³/min)を配置している。⑫~⑭は今回の実験のために配置した送風機(流量77m³/min)の位置を示しており、常設はされていない。

本実験では、①②の位置に2台のステージ演出用fogマシン(アンタリ製Z800-II)を配置し、工場中央に向かって3分間fogを発生させた。fogのリキッドには、滞留時間の異なるものが用意されているが、本実験では通常10~15分で霧散するとされる比較的滞留時間の短いもの(アンタリ製FLR)を使用した。この充満させたfogの様子を動画で10分間撮影し換気性能を評価した。換気性能の評価は、動画の輝度変化より求めており図3(a)に示す丸で囲った背景の黒い部分に対して、図3(b)に示すfog充満時の輝度との差を求めることで行った。



- ① ②: 煙発生装置 (ANTARI Z-800 II)
- ③: ビデオカメラ
- ④: 撮影対象
- ⑤: エアコン
- ⑥: サーキュレーター (VORNADO 723DC)
- ⑧~⑩: 換気扇
- ⑫~⑭: 送風機 (Monotarou MJPBS-300)

Fig. 2 実習工場の配置図



(a) 通常時



(b) フォグ充満時

Fig. 3 換気性能の計測方法

3. 結果および考察

(1) 開口部の違いによる換気性能の評価

開口部の比較条件を表1に示し、条件ごとに①~⑥の番号を付している。ここでは室内空間に対して開口部を増やすことによる換気性能と、換気扇やエアコンの天井付近の空気循環システムを稼働させた際の換気性能を比較した。実験の都合上、すべての計測において図1左下の通常出入口は開放した状態で計測している。

撮影した動画より切り取った計測位置の画像と輝度値 L を図4に示す. この輝度値を元に, 各時刻の輝度値 L の減少を統一的に評価するため, 計測前の値を基準の輝度値 L_{min} とし無次元化することで比較した. この時, 撮影開始から10分後の輝度値が計測前の輝度値よりも小さい値を示す場合には, 10分後の値を基準の輝度値 L_{min} とした.

表1に示した開口部の違いによる換気性能を図5に示す. この結果より, 窓や搬入口をすべて閉じている①の条件で圧倒的に換気性能が悪いことが確認できる. それに対して, 実習工場の一番大きな開口部である搬入口を解放した②の場合には10分程度で計測前と同等の値まで低下している. この搬入口を解放した②の結果に加えて, 窓の開放や換気扇を動かすことにより換気性能に改善がみられるものの, 各時刻におけるばらつきも確認された. これは動画撮影による計測の誤差も含まれるが, 搬入口の一番大きな開口部が解放されていることで外部の風の影響を受けたことも考えられる.

また特筆すべき点としては, 開口部をすべて閉じた状態でも天井に設置されたエアコンの風量を最大にしてスイングで駆動した⑥の結果が, 開口部をすべて開放し換気扇で対流を起こした⑤の結果と同等の分布を示したことである. これらについては, 外部との空気換気量では⑤が優れていると言えるが, 天井に設置されたエアコンが床方向へ吐出すことは室内の空気循環としては効果的であると言える.

(2) エアコンとの組合せ条件による換気性能の評価

エアコンを駆動させた状態で, 開口部を開けることによる効果と, 換気扇やサーキュレーターの空気循環システムを稼働させた際の効果を比較した. 計測の条件を表2に, 換気性能の比較を図6に示す. 基準として図1のエアコンのみの結果である条件⑥を繰り返し掲載している.

Table 1 開口部の比較条件

	搬入口	窓	換気扇	エアコン
①	close	close	off	off
②	open	close	off	off
③	open	open	off	off
④	open	close	on	off
⑤	open	open	on	off
⑥	close	close	off	on

時間(min)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	計測前
①	223	232	215	194	216	206	196	196	163	147	149	54
②	240	163	193	144	144	99	105	78	75	72	69	59
③	237	196	129	88	111	94	76	71	70	64	59	51
④	240	227	176	135	106	102	82	82	63	64	57	72
⑤	230	216	175	110	72	56	55	56	53	51	52	62
⑥	238	218	163	100	79	68	64	65	65	64	63	54

Fig. 4 開口部比較実験の輝度値

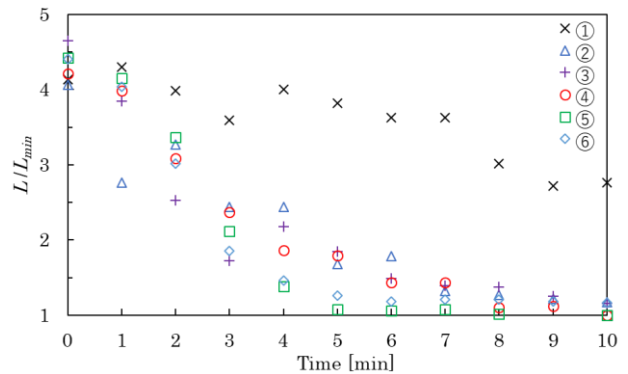


Fig. 5 開口部の比較による換気性能

どの条件においてもエアコンのみの⑥に対して, 同等かそれ以上の換気性能を示し, 5分程度で計測前と同等の値となる. また, ⑩の窓と搬入口を開放し換気扇とサーキュレーターを駆動した場合に対して, ⑨の搬入口を閉めた状態の換気性能が改善されている点については原因が不明である. 他の搬入口を開けた結果である⑦や⑧の条件では換気効率は悪化していないことから, 搬入口の開放が影響を与えたとは考えにくい. 先の開口部の違いによる換気性能の評価と同様に, 一番大きな開口部を開けたことによる外部の風の影響ではないかと推測している.

以上より, 本校の実習工場であれば, 換気扇を用いて天井付近に外気を導入し, エアコンの吹出しにより外気を室内へ拡散させ, 窓から内気を外部へ出すという方法が最適であると言える. これは, 換気扇により強制的に外気を導入するという点で, 本実験で評価を行えていない換気量についても効果があると考えられる.

Table 2 エアコンとの組合せ条件

	エアコン	窓	搬入口	換気扇	サーキュレーター
⑥	on	close	close	off	off
⑦	on	open	open	on	off
⑧	on	open	open	off	on
⑨	on	open	close	on	on
⑩	on	open	open	on	on

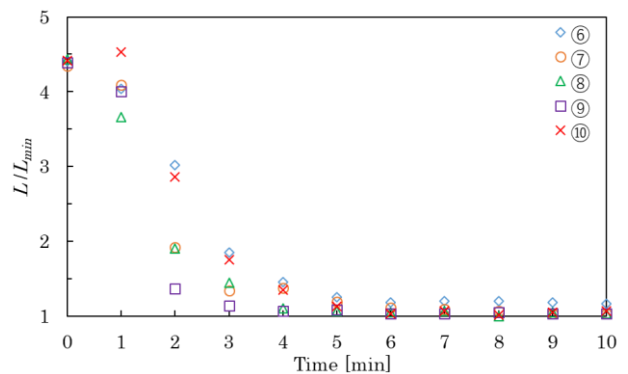


Fig. 6 エアコンとの組合せによる換気性能

(3) 送風機設置位置による換気性能の評価

送風機を追加で設置した場合に換気性能が改善されるのか調査を行うため、搬入口を開放し外に向けて流れが発生するよう送風機を設置し実験を行った。設置場所は図1の㊸~㊻の各位置とし、搬入口に近い側の㊸をnear, 中央の㊹をcenter, 搬入口から遠い側の㊻をfarとして図7に結果を示す。この時、換気扇とサーキュレーターを駆動して実験を行っており、これは条件④にサーキュレーターを追加した状態となるため、条件④の結果も記載している。

搬入口の一番近くであるnearの結果では、④と比較して2分程度まで低い値を示すものの、④に対して送風機とサーキュレーターが追加されているにも関わらず3分以降は同等の結果となった。これは搬入口付近の空気のみが換気されたためだと考えられる。一方で、centerやfarの結果では条件④と比較して換気が促進されており、6分で計測前とほぼ同等の値となっている。

実習工場では図1に示した配置図の左側に外部とつながる窓が無く今回の比較も搬入口のみを開けた実験のため、強制的に換気を行う際には開口部に向けて部屋の奥側から風を送ることが効果的という結果となった。しかし、対角で開口部を有する場合には機械換気の方法¹⁾から考えると、室内が負圧となる開口部付近への送風機の設置が望ましいのではないかと考えられる。

また、実験に使用した送風機とエアコンの空気流量は同程度であるが、エアコンを用いた実験の方がわずかながら換気性能が高い結果が得られた。このことより、水平方向へ空気を送ることに対して、垂直方向へ空気を循環させることの方が効率的と言える。ただし、この結果に対して一般の室内よりも実習工場の天井が高いという事の影響がどの程度現れているかは不明である。

これらの結果より、実習工場内の換気特性としては上下方向への空気を循環させることが効果的と言える。これにより呼吸域の高さでの二酸化炭素濃度を室内に分散させることができる。感染症対策からも、上下方向へ空気を循環することで飛沫を早期に拡散させるとともに、風下を作らずに空気を循環させることが可能となる。最終的には、クリーンルームや塗装ブースのように、上方から空気を流入し床から空気を抜く方法が最適ではないかと推測する。

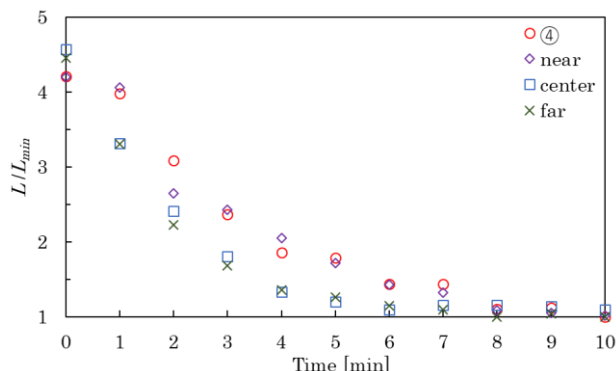


Fig. 7 送風機設置位置による換気性能

実習工場でこれを模すには、人のいない部分で天井付近に空気を送り、人の作業している場所で下降流が起きるように室内気流を設計することが良いのではないかと考える。

4. 結言

本研究では、本校の実習工場の換気特性を把握し効率的な換気方法を提案するため、 Fogマシンを用いた実験的評価を行った。

その結果として、換気扇を用いて天井付近に外気を導入し、エアコンの吹出しにより外気を室内へ拡散させ、窓から内気を外部へ出すという方法が最適であると言える。この方法で4分程度換気することで十分な空気循環が得られる。通常の室内換気方法としても、上下方向へ空気を循環させることは、風下を作らずに空気を循環させることが可能となるため効果的であると考えられる。

参考文献

- 1) 大岡龍三：「換気」に関して、ターボ機械, Vol.49, No.7, pp. 19-23, 2021.
- 2) 小林弘造：「With/After コロナ」のビルの換気・空調, ターボ機械, Vol.49, No.7, pp. 33-39, 2021.
- 3) 小林敏雄ら：室内換気流の可視化と画像解析, 可視化情報, Vol.17, No.66, pp. 38-43, 1997.
- 4) 加藤信介, 村上周三, 大岡龍三：CFDを用いた居住空間の換気効率評価手法の開発と検証に関する研究, 住宅総合研究財団研究年報, Vol.24, pp. 267-276, 1997.
- 5) 橋本佳延：新型コロナウイルス感染症予防を目的とした換気と空調の効率を両立させる方法を探る, 全国科学博物館協議会研究発表大会, No.28, pp. 33-38, 2021.
- 6) 池田良穂：船舶の換気・空調システム, ターボ機械, Vol.49, No.6, pp. 5-12, 2021.
- 7) 田邊尚紀ら：鉄道車両の換気および空気浄化システムについて, ターボ機械, Vol.49, No.6, pp. 13-17, 2021.
- 8) 文部科学省：学校環境衛生管理マニュアル, pp. 26-33, 2018.
- 9) 日本建築学会：学校における温熱・空気環境に関する現状の問題点と対策, pp. 4.1-4.28, 2015.
- 10) 坪倉誠：「富岳」による室内環境の飛沫・エアロゾル感染リスク評価とリスク低減対策, ターボ機械, Vol.49, No.7, pp. 1-10, 2021.
- 11) 山中俊夫：新型コロナウイルス感染防止対策と空調・換気設備, ターボ機械, Vol.49, No.7, pp. 11-18, 2021.
- 12) 坪倉誠：「富岳」によるウイルス飛沫・エアロゾル飛散シミュレーションと感染リスク低減対策の提案, ながれ, Vol.40, pp. 86-93, 2021.

(2021.9.30受付)