

喫煙室の換気効率に関する研究 (その1) 混合換気と置換換気による実験結果

橋本 幸博*¹ 高橋 秀典*² 前田 裕香*³ 池村 泰佳*⁴

Study on Ventilation Efficiency for a Smoking Room (Part1) Experimental Results with Mixing and Displacement Ventilation

Yukihiro Hashimoto Hidenori Takahashi Yuka Maeda Yasuka Ikemura

Abstract

This study compares ventilation effectiveness for a smoking room with mixing and displacement ventilation. Full scale smoking experiments are carried out parametrically for ventilation rates. As a result, displacement ventilation is favorable to apply to a smoking room to increase ventilation efficiency.

Keywords: Smoking Room, ETS, Mixing Ventilation, Displacement Ventilation, Ventilation Effectiveness

1. はじめに

置換換気空調システム(以下 DV と略す)は、北欧で発展した換気方式で、居住域より低い位置から 0.5m/s 以下の低風速で室内温度よりも低温の空気を供給し、居住域より高い位置で排気を行う空調換気方式である。DV は、空気の密度差により居住域に良質な温度成層が形成でき、高い換気効率と空気清浄度が得られる。現在は工場等の大空間で多く活用されており、一般空調用としても注目されている。

環境タバコ煙 (ETS, Environmental Tobacco Smoke) の健康への影響については、すでに WHO (World Health Organization) が報告書及びガイドライン¹⁾²⁾を作成している。我が国では健康増進法の改正により、オフィス等の多数の者が利用する施設の管理者に受動喫煙防止のための努力義務が課せられた³⁾⁴⁾。更に近年では、分煙に関する関心が深まり、受動喫煙防止対策としても高い換気効率が求められている。また、現在厚生労働省より発表されている受動喫煙防止対策のためのガイドラインでの評価は、粉塵濃度及び CO 濃度の測定による評価であり、この評価に使用する器具は高価で連続的に行う数値の測定が困難であることが問題点である。

そこで本研究では、DV と混合換気空調(以下 MV と略す)の換気性能を比較し、喫煙室による分煙の有効性及び更なる換気性能の向上を目的とし、喫煙室を想定した実大実験室を用いて喫煙実験を行う。また、ガイドラインで制定されている粉塵濃度及び



図1 実験対象室写真

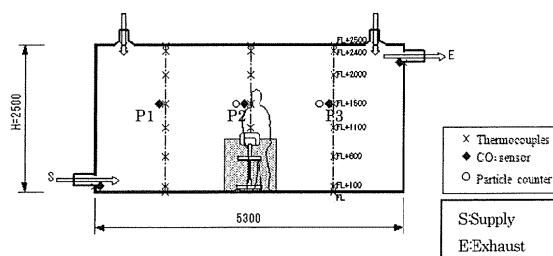


図2 実験対象室 A-A'断面図

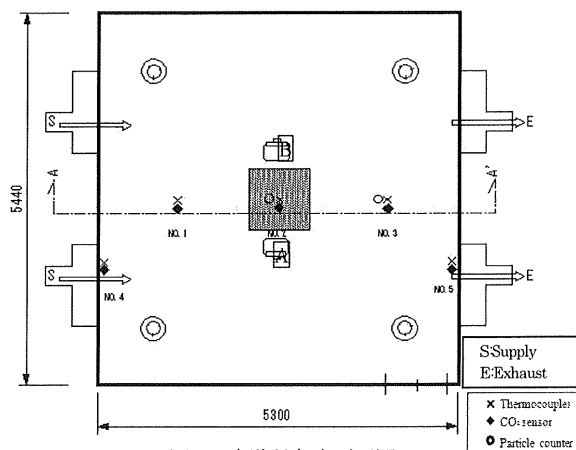


図3 実験対象室平面図

*1 職業能力開発総合大学校 建築システム工学科

*2 職業能力開発総合大学校 研究課程

*3 (独) 高齢・障害・求職者雇用支援機構 山梨職業能力開発促進センター

*4 (独) 高齢・障害・求職者雇用支援機構 島根職業能力開発促進センター

Dept. of Architectural System Engineering, Polytechnic University
Graduate Student, Polytechnic University

Yamanashi Polytechnic Center, JEED
Shimane Polytechnic Center, JEED

CO₂濃度での評価を一般的で容易に連続して計測できる CO₂濃度を用いて評価することの妥当性を図る。

2. 研究方法

2.1 実験対象室

職業能力開発総合大学校1号館3階350室の西側半分を実大実験室として使用する。実験対象室の広さは、奥行き5.3m×幅5.44m×天井高2.5mである。

2.2 実験装置概要

DVでは、実験対象室の床付近の壁面で高さ0.2m×幅1.0mの吹出口より給気を行い、反対側の壁の天井付近に設置した高さ0.2m×幅1.0mの吸込口より排気を行う。吹出口と吸込口は各2個設置する。

MVでは、実験対象室天井4隅に設置された4個のアネモ型吹出口より給気を行い、DVと同じ吸込口から排気される。

2.3 測定項目

DVの温度成層による垂直温度分布を計測するため、図3のNo.1, No.2, No.3の平面位置で、熱電対を表1の高さに取り付けた。

CO₂濃度測定に用いるセンサーは水平方向の拡散を確認するため、室内5か所に設置した。No.1～No.3は喫煙者の呼吸域であるFL+1500の高さに設置し、No.4及びNo.5は、吸込口、吹出口に設置した。

粉塵計は、汚染物質発生源に近いNo.2及び水平方向への拡散を確認するためNo.3に、呼吸域であるFL+1500の高さで設置した。また、各データはデータロガーを介しパソコンに1分毎に記録される。

2.4 実験条件

実験は表2の実験パターンをDVとMVで各6ケース、計12ケースの喫煙実験を行う。また、実験は表3の実験フローに従って行う。

吹き出し温度は、DVとMVのいずれも18℃とする。人体以外の室内発熱は、天井照明の蛍光灯40W×24本である。実験時の外気温度は、18～22℃程度である。いずれも全外気全排気方式とする。

(1) 喫煙人数の影響

対象室内で1人または2人の同時喫煙を行った場合の室内の汚染影響を調べる。この比較を行い、喫煙者の発熱量及び、汚染物質の発生量の違いによる影響を把握する。実験時の立ち位置は、喫煙者1人では図2のA、2人では図2のA・Bと設定した。

(2) 対象室内の換気回数(吹出風速)の影響

実験室内の換気回数6, 8, 10回/h換気(DVの吹出風速0.3m/s, 0.4m/s, 0.5m/sに相当)の3パターンで実験を行う。換気回数を変化させて、喫煙により発生する汚染物質の空間分布の変化を把握する。

2.5 実験の評価

(1) 汚染質除去効率

室内空間から汚染質がどの程度効率的に取り除か

表1 熱電対の取り付け高さ(m)

	床面				天井面			
No. 1	FL	0.1	0.6	1.1	1.5	2.0	2.4	2.5
No. 2	—	—	—	1.1	1.5	2.0	2.4	2.5
No. 3	FL	0.1	0.6	1.1	1.5	2.0	2.4	2.5

表2 実験パターン

	6回/h換気 (DV0.3m/s相当)	8回/h換気 (DV0.4m/s相当)	10回/h換気 (DV0.5m/s相当)
喫煙者1名	I	II	III
喫煙者2名	IV	V	VI

表3 実験フロー

段階	所要時間	内容
①	10分間	在室人員なし (CO ₂ 濃度を一定にする)
②	10分間	喫煙者を入室させ待機 (喫煙はしない) 喫煙前の汚染物質発生量を測定する
③	10分間	喫煙者が任意の間隔で煙草を吸う (1本5分×2本=10分間)
④	10分間	喫煙者を対象室内に待機したままの 状態で汚染物質の減衰を測定する
⑤	10分間	在室者なしの状態 で汚染物質の減衰を測定する

表4 実験装置

吹出し口	MV (アネモ型空調×4ヶ所) DV (パンチングメタル0.2m×1.0m×2ヶ所)
吸込み口	パンチングメタル 0.2m×1.0m×2ヶ所
熱電対	T-CC No.1,2,3 吹出口 2ヶ所 吸込口 2ヶ所
CO ₂ 濃度センサー	赤外線吸収式 ヴァイサラ GMT222及びGMW20
粉塵計	光散乱式デジタル粉塵計 (カノマックスMODEL3431)
データロガー	アナログ40点 (江藤電気CADAC2)

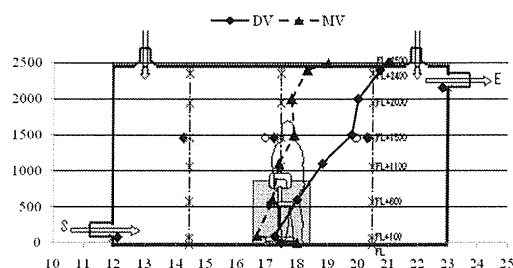


図4 熱電対温度分布図(P3-6回/h換気)

れるかの指標である。汚染質除去効率 CRE (Contaminant Removal Effectiveness) は次式で定義される。

$$CRE = \frac{c_e - c_s}{\langle c \rangle - c_s} \quad (1)$$

ここで、CRE：汚染質除去効率、 c_e ：排気の汚染質濃度、 c_s ：給気の汚染質濃度、 $\langle c \rangle$ ：室内での平均汚染質濃度とする⁵⁾。

ここでは、計測器の制約から CO_2 濃度によって CRE を算出する。

(3) 水平方向への汚染物質の拡散

段階③の P1, P2, P3 の CO_2 濃度と P2, P3 の粉塵濃度の増加傾向を、各実験パターンの平均値により比較する。実際の喫煙室での集団喫煙を想定し、喫煙者以外の周囲への悪影響を評価する。

(4) 粉塵濃度と CO_2 濃度の相関関係

ガイドラインで規定されている粉塵濃度及び CO 濃度での評価を、一般的で容易に連続して計測できる CO_2 濃度を用いて評価することの妥当性を図るため、時間平均粉塵濃度と CO_2 濃度の相関関係を調べ評価する。

3. 実験結果及び考察

図 5～12 は喫煙室の換気性能を評価するための各実験データによる CO_2 濃度と粉塵濃度のグラフである。また、表 5～6 に計 12 パターンの喫煙中 10 分間の CO_2 濃度と粉塵濃度の平均値と、DV, MV の各 6 パターンの総合平均値を示す。

3.1 DV と MV の比較

(1) 粉塵濃度

図 5 に DV 時の対象室内で 2 人同時喫煙をした場合と 1 人単独喫煙をした場合の粉塵濃度変化を示す。段階②の 10 分間では、喫煙者が入室したが粉塵濃度は、全実験を通し、ほぼ 0 であった。次の段階③の 10 分間では、喫煙を始めると急速に粉塵濃度は増加する変化があらわれた。この変化について、図 6 の MV の場合の変化と比べると、MV は増減が大きい DV では喫煙継続中に高濃度を保っていることがわかる。また、表 5 に示した喫煙継続時の P2 での 10 分間の粉塵濃度の DV, MV 各 6 パターンの総合平均値を比較すると、喫煙源に近い中央では DV は 2.24 mg/m^3 、MV は 1.56 mg/m^3 と、DV の方が大きい。しかし、表 6 に示す下流 P3 の粉塵濃度の総合平均値では、DV で 0.19 mg/m^3 、MV で 0.19 mg/m^3 と同じ程度だが、換気回数が高い 8, 10 回/h 換気の平均値では、DV で 0.12 mg/m^3 、MV で 0.18 mg/m^3 と下流側の粉塵濃度は、DV の方が小さくなることがわかった。

(2) CO_2 濃度

図 9 に DV の CO_2 濃度の時間変化を表すグラフを、図 10 に同じ条件の MV のグラフを示す。2 つの図から段階③の時、両方共に粉塵濃度の変動と連動した CO_2 濃度の増減がみられた。また、グラフの P2 に注目すると、段階③では MV と比較して DV の方が、

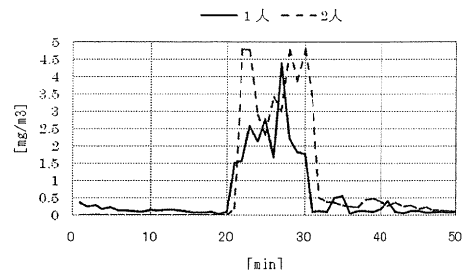


図 5 1-2 人粉塵濃度 P2(DV-6ACH)

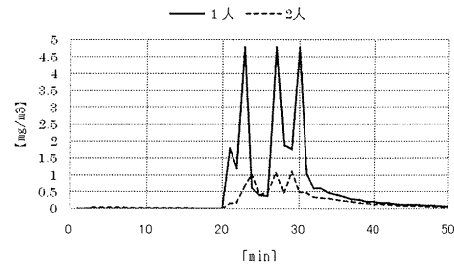


図 6 1-2 人粉塵濃度 P2(MV-6ACH)

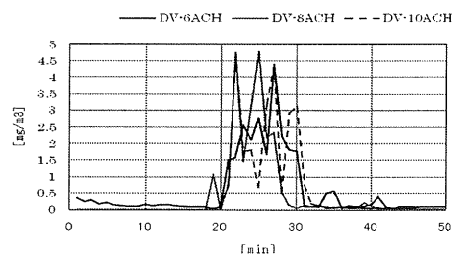


図 7 粉塵濃度 P2(DV-6,8,10ACH)

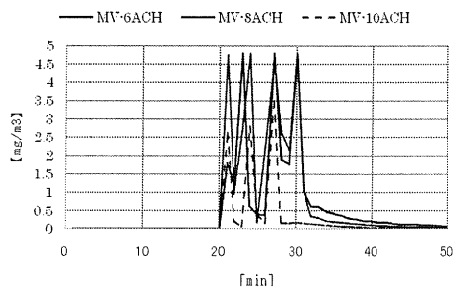


図 8 粉塵濃度 P2(MV-6,8,10ACH)

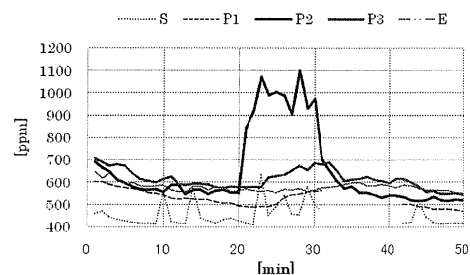


図 9 CO_2 濃度(DV-6ACH)

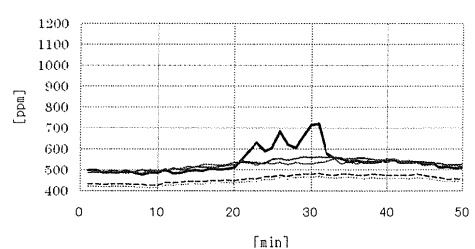


図 10 CO_2 濃度(MV-6ACH)

粉塵濃度と同様に CO_2 濃度も大きい。また、段階④⑤では、DV は喫煙後に速やかに CO_2 濃度が減衰しているが、MV の CO_2 濃度は全体的に高く、減衰時間が長いことがわかる。

3.2 喫煙者人数の影響

(1) 粉塵濃度

図5からDVの場合の喫煙者人数の影響をみると、P2での粉塵濃度は喫煙者1人の場合と比べ、2人の場合は増加していることがわかり、10分間の平均値を比較すると、DV(1人)の場合 2.24 mg/m^3 、DV(2人)の場合 3.48 mg/m^3 と約1.5倍になっている。MVの場合は、P2で喫煙者の人数による関係は換気回数に依存せず、数値は一定の傾向を示していない。

(2) CO_2 濃度

表5,6の喫煙時10分間の平均値から1人に比べ2人では、DVとMV両方のP1,P2,P3で CO_2 濃度の増加がみられた。P2では、DVでは人数による変化はなかったが、MVでは喫煙者が増えることで CO_2 濃度が大きく増加した。

3.3 換気回数(吹出風速)の影響

(1) 粉塵濃度

図7,8にDV及びMVのP2での換気回数(吹出風速)の影響を表したグラフを示す。図7からDVの段階④に着目すると、6,8,10回/h換気と換気回数を大きくすることで、粉塵濃度の減衰している段階での変動が小さくなる。特に10回/h換気に関しては、ほぼ0に近い濃度まで急速に減衰している。また、P2,P3の粉塵濃度平均値は、P2では粉塵濃度が高いがP3では換気回数を増やすことで粉塵濃度が減少した。MVに関しては粉塵濃度のP2,P3での値は換気回数が上がっても粉塵濃度が減少するとは限らず、換気回数の違いによる影響はみられない。

(2) CO_2 濃度

段階④,⑤の CO_2 濃度の減衰傾向では換気回数が大きくなるにつれて、 CO_2 濃度の減衰時間が短くなることがわかる。また、中央の CO_2 濃度の変化に関しては、換気回数の影響はあまり受けず、対象室内に喫煙者が入室している段階で呼吸及び喫煙による短時間での急な変化が確認できた。

3.4 汚染質除去効率

表7にDV及びMVの6,8,10回/h換気における汚染質除去効率を示す。表7より汚染質除去効率の平均値では、DVが0.95、MVでは1.0と、MVの方が高い結果となった。また、それぞれの換気方式についてのデータでみるとDVの場合、6回/h換気では十分な除去効率を得られていないが、換気回数を上げることで安定した汚染質除去効率の向上が得られている。一方、MVは高い汚染質除去効率を得られる場合もあれば、低い値しか得られない場合もあり、

表5 喫煙時(10分間)P2平均値

Item		Concentrations at P2		
換気方式	換気回数 [ACH]	喫煙者 [人]	粉塵濃度 [mg/m^3]	CO_2 [ppm]
DV	6	1	2.24	973
	6	2	3.48	976
	8	1	1.95	682
	8	2	1.3	657
	10	1	2.4	524
	10	2	3.75	669
	Ensemble average		2.52	747
MV	6	1	2.23	626
	6	2	0.61	866
	8	1	2.97	569
	8	2	0.47	735
	10	1	1.02	547
	10	2	1.15	733
	Ensemble average		1.41	679

表6 喫煙時(10分間)P1,P3平均値

Item		P1	Concentrations at P3	
換気方式	換気回数 [ACH]	喫煙者 [人]	CO_2 [ppm]	粉塵濃度 [mg/m^3]
DV	6	1	525	0.48
	6	2	687	0.18
	8	1	458	0.09
	8	2	436	0.12
	10	1	393	0.08
	10	2	457	0.19
	Ensemble average		493	0.19
MV	6	1	472	0.26
	6	2	487	0.2
	8	1	461	0.17
	8	2	474	0.13
	10	1	425	0.17
	10	2	450	0.23
	Ensemble average		462	0.19

表7 汚染質除去効率

換気回数 (ACH)	喫煙者 (人)	DV	MV
6	1	0.53	0.89
6	2	0.68	0.8
8	1	0.99	1.15
8	2	1.22	0.97
10	1	1.14	1.33
10	2	1.14	0.84
Average		0.95	1

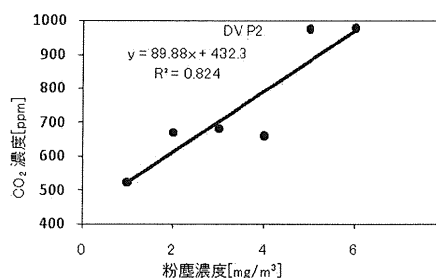


図11 CO_2 濃度-粉塵濃度相関図 (DV-P2)

換気回数に関係しない。以上から、DVは換気回数が少ない場合、汚染質除去効率が低い、換気回数が8回/h以上では、DVの方がより効果的な換気を行うことが可能であると評価できる。

3.5 粉塵濃度と CO_2 濃度の相関

図11に段階③でのP2における10分平均値の粉塵濃度と CO_2 濃度の相関を示す。グラフにみられる数値のばらつきは、計測器の計測方法の相違と喫煙者の呼気による影響が考えられる。 CO_2 センサーは1分毎の瞬時値を計測するのに対し、粉塵計は1分間のサンプリングで収集した空気中の粉塵の積算値

を計測しているため、喫煙者の煙を吐き出すタイミングが計測値に影響を与えているものと考えられる。また、CO₂濃度はバックグラウンド濃度が高いことから、粉塵濃度が低い場合は、CO₂濃度との相関が鮮明でない。以上から、汚染物質濃度の高い場合に、粉塵濃度とCO₂濃度には正の相関が成り立つと結論できる。

4. まとめ

喫煙室の換気効率を調査するために、混合換気と置換換気を用いた喫煙室で、喫煙実験を行い、以下の結果を得た。

- 1) 混合換気と置換換気では、汚染物質の水平方向の拡散や減衰時間に相違があり、狭い空間及び少人数での喫煙室には混合換気が適している。休憩室にも使用される比較的広い喫煙室には置換換気を採用するのが好ましい。
- 2) 置換換気空調システムには、水平方向に汚染空気が拡散するのを抑制できるという特徴がある。これは、喫煙により発生する汚染物質を効率よく換気することに適している。
- 3) 喫煙室に置換換気空調を用いるとき、換気回数が少ないと、汚染物質が呼吸域で停滞する時間が長くなるため、換気回数は8回/h以上必要である。
- 4) 粉塵濃度とCO₂濃度の間には、相関関係があると認められるが、ガイドラインで定められた粉塵濃度のみの評価をCO₂濃度による評価と置き換えるには、喫煙者の呼気による影響などを考慮する必要がある。

【謝辞】

本研究に関して、喫煙実験に協力して下さった方々に深謝致します。

【本研究に関連する既往発表文献】

- 1) 前田裕香：置換換気空調システムに関する研究-喫煙室への適用の有効性に関する空気質の測定-平成21年度職業能力開発総合大学校卒業論文,2010
- 2) 高橋秀典：置換換気空調システムに関する研究-喫煙室への適用の有効性に関する空気質の測定-平成22年度職業能力開発総合大学校卒業論文,2011
- 3) Hashimoto, Y. and Takahashi, H.: Experimental Study on the Ventilation Effectiveness with Mixing and Displacement Ventilation, ROOMVENT2011, Trondheim, Norway, 2011

【参考文献】

- 1) WHO: Air Quality Guidelines- Second Edition, WHO Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark, 2000
- 2) WHO: Guidelines on Protection from Exposure to Tobacco Smoke, World Health Organization, 2007
- 3) 厚生労働省労働基準局安全衛生部環境改善室 監修：職場における喫煙対策 一新ガイドラインと解説一、中央労働災害防止協会、2003
- 4) 厚生労働省労働基準局安全衛生部環境改善室 監修：職場における喫煙対策 Q&A ～喫煙対策推進のキーポイント～、中央労働災害防止協会、1998
- 5) Skistad, H., Mundt, E., Nielsen, P.V., Hagström, K. and Railio, J.: Displacement Ventilaton in non-industrial Premises, Federation of Heating and Air-conditioning Associations, 2002