

室内環境のエアロゾルーその挙動と換気

趣旨

本学会の機関紙である「エアロゾル研究」ではこれまで様々な環境で発生したエアロゾルについての研究が公表されてきました。公表された記事から室内環境のエアロゾルに関するものを紹介し、結果を短くまとめて、さらに換気量などの情報を加えました。室内環境のエアロゾルとして多くの研究がなされているタバコ煙（吐出煙）の報告をご紹介いたしますが、これも人から出たエアロゾルの一つと見ていただければ幸いです。エアロゾル粒子とガス分子の違いは、その混ざり易さ（拡散係数）ですが、ここで紹介するのはガス分子に比べて拡散せずに空間中に長く漂っている微小なエアロゾル粒子を対象にした研究です。ガス分子は混ざりやすい（拡散しやすい）ですが、エアロゾル粒子の中でも室内にも多く存在する大きさが1,000分の1mm ($1\text{ }\mu\text{m}$)程度の微小なエアロゾル粒子はガス分子に比べればほとんど拡散しません。さらに、目に見える粗大な粒子とは異なり、その沈降速度も非常に小さく、空間中に長く浮遊しています。この微小なエアロゾル粒子を室内から追い出すには、空気の流れ（気流）により移動させ、排出（換気）または空気清浄機により除去することが必要です。詳細は各文献を参照してください。

1. 飛行機（B747）内のエアロゾル粒子の挙動

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jar/13/2/13_2_119/_article/-char/ja

本報は1997年に日本航空のB747型ジャンボジェット機に実装された分煙システムの気流シミュレーションに関する論文である。一般的に航空機内の排気は尾翼部近傍にあるため気流は全体的に機首から尾翼方向に流れる。そのため当時の国際線は最後尾域を喫煙席としていたが、座席のピッチ幅が狭い航空機内では喫煙席と禁煙席の境界では十分な分煙はなされておらず、そのため最後尾にあるCA（キャビンアテンダント）用の席を改造し、かつ気流の方向を変えるグリルを通常の給気口に取り付け、禁煙席へのたばこ煙の流入を極力低減したシステムを開発した。

換気システムはFig.1に示すように、座席上部に位置する左右の荷物入れの下から機体中央方向に吹き出し、窓側座席下にある排気口から排気される。気流はFig.2の実測結果に示すように中央部席に向かいその後窓側席に回るような旋回流を描きながら流れる。Fig.5に示す気流の数値シミュレーション結果は実測結果を良好に再現している。

一般に航空機の換気回数は多くB747型機における客室内では一時間当たり10回、またフライトデッキでは50回に及ぶ。Fig.3は、Fig.4に示す座席59Aと59Cで喫煙した場合、その周りの席である58A, 58C, 58Dおよび59Dにおけるたばこ煙の濃度の時間変化を示している。喫煙開始0分から10分間喫煙を行い、その後喫煙が終了すると濃度の減衰は早く、およそ5分で喫煙前の水準にまで濃度は低下する。

その後、世界的な国際線の全席禁煙化がすすみ、1999年4月に当該システムは撤去された。またB747型機の最後となった政府専用機が2019年春に退役した。現在の機種の換気はここで示す方法と全く同じではない。

2. 特急列車車内のエアロゾル粒子の挙動

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jar/10/3/10_3_179/_article/-char/ja

本報は1993年にJR東日本の房総特急255系「ビューさざなみ・わかしお」に実装された分煙車両内の気流シミュレーションに関する解説である。図2に示すように、グリーン車両内の通路を出入り口とする仕切り板で喫煙席と禁煙席に分け、喫煙席側を陰圧にすることにより禁煙席側から喫煙席側に流れる気流を形成することによって、たばこの煙が禁煙席側に流れにくい換気の構造を有している。

図2に示すように天井部にある左右2本のライン給気口から給気された空気は窓側から床に沿って流れ中央の通路で左右の流れが合流し上方向に流れる左右対称の旋回流を形成している。図4は気流解析による流線（空気の流れの軌跡）を表したもので、喫煙席から発生した微小なたばこ煙の粒子は、窓側から通路側に気流に沿って流れるが、禁煙席側に流れず天井に配置された排気口から速やかに排気されることが予測された。

一般に列車の換気条件について「鉄道に関する技術上の基準を定める省令」では“客室内は、必要な換気をすることができます。”と記載があるだけで具体的な数値は述べられていない。しかしながら“通常時において強制換気装置は1人1時間あたりの換気量を 13m^3 とする。それに客室定員の2倍を乗じて算定した容量以上の能力があること”と、解釈基準¹⁾がなされているようである。

本研究の分煙室は、2020年4月1日から本格的に施行される改正健康増進法に定める喫煙室の技術基準の考え方を先取りした画期的な換気システムであった。しかし、2002年8月に公布された旧健康増進法による受動喫煙防止の強化等による世の中の動向もあり、当該分煙車両は2005年12月に全車禁煙となっている。

1) 「解説 鉄道に関する技術基準（車両編）改訂版」、第二版 平成22年11月15日、社団法人 日本鉄道車両機械技術協会、pp137-138.

3. 自動車内のエアロゾル粒子の挙動

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jar/28/1/28_44/_article/-char/ja

本報は、セダン型普通乗用車の車内でエアロゾルの発生（たばこ煙）時の換気条件による濃度の違いを実験的に計測した論文である。濃度の測定場所は、Fig.2に示す運転席、助手席、助手席後ろの後部座席である。乗用車の走行速度は停止、20km/時、40km/時、1

0 0 km/時の 4 条件、換気モードは停止、低、中、高の 4 条件、たばこ煙の発生場所は助手席および助手後部座席の 2 条件、たばこ煙の吐出方向は正面方向および窓側方向の 2 条件、窓はすべて閉、運転席側の窓のみ開、助手席後部座席側の窓のみ開の 3 条件であり、それぞれの条件を組み合わせることによって Table 2 に示すように合計 11 水準の計測をおこなっている。また、窓の開口幅は Fig.1-1 に示すようにおよそ 5cm であり、開口部の 5 点で風速を測定した。

その結果、室内における粉じん濃度の基準値 $0.15\text{mg}/\text{m}^3$ を車内空気環境評価の目安とした場合、運転席、助手席、助手席後部座席のいずれかにおいて、喫煙時に粉じん濃度の基準値を超過する条件は、Table 4 に示すように Test 1 (走行停止、換気停止、窓全閉、後部座席で正面吐出)、Test 2 (走行停止、換気中、窓全閉、後部座席で正面吐出)、Test 3 (走行 2 0 km/時、換気中、窓全閉、運転席で正面吐出)、Test 5 (走行 2 0 km/時、換気中、運転席側の窓のみ開、後部座席で正面吐出) および Test 7 (走行 2 0 km/時、換気低、助手席後部座席側の窓のみ開、後部座席で正面吐出) の 4 水準であった。以上のことにより、**車室のエアロゾルによる空気環境を悪化させる条件は①車内換気が悪いこと、②吐出位置と開いている窓との距離が長いこと、③車が停止していることが挙げられる**。また、Test 3 の結果より、換気 (中モード) を行いながら走行 (2 0 km/時) しても、窓が閉まっている場合では車内空気環境が悪化しており、窓を開けることによる自然換気の効果は高いと推測される。ただし、走行時ではエアロゾル発生場所と開いている窓との位置関係が車内濃度を低減させる効果としては重要であり、また吐出方向は窓側に向けることが濃度の低減に効果があることがわかった。

4. 喫煙所の空気清浄機

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jar/23/4/23_4_246/_article/-char/ja

本解説記事は、分煙機（空気清浄機）が設置された喫煙所の現場測定の結果を元に、分煙機に求められる機能について述べたものである。たばこ煙粒子の空間中での粒径分布が主流煙、副流煙が混合した状態で粒径 $0.3 \mu\text{m}$ 程度であること、一般的な**分煙機**の構造について、集じん部の粒子捕集効率は $0.3 \mu\text{m}$ 粒子で 90% 程度であるものの、ガス状成分は完全に除去できるものではないことを述べている。また、喫煙室には、非喫煙空間へのたばこ煙の漏洩を防ぐため、**喫煙室と非喫煙空間の境界において風速 0.2 m/s** の気流を保つことが必要となるが、開口部の工夫やフードの使用によりたばこ煙をより効率よく除去することが示されている。また、喫煙室を設けることのできない場合には気流の流れを工夫することにより、非喫煙空間の汚染物質の濃度低減が期待できることも明らかにしている。喫煙所においては、換気による排気と空気清浄機による浄化、気流による拡散防止等を組み合わせることにより、効果的な分煙ができる事を示したものである。

現在は、受動喫煙対策として、原則として屋内禁煙が求められるが、喫煙を認める場合、

室外への煙の流出防止措置が確認されている喫煙専用室の設置が義務付けられる。ここでは主に喫煙室と非喫煙空間の境界の風速を重要視し、換気による排気の風量を十分に確保することで煙の流出を防ぐ方法を示したものとなっている。

5. 喫煙室入口の気流による分煙効果

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jar/33/1/33_12/_article/-char/ja

受動喫煙防止の観点から分煙効果のある喫煙室として、非喫煙空間へのたばこ煙の漏洩防止として、喫煙室内に向かう気流、浮遊粉じん濃度、一酸化炭素濃度を確認することが重要である。本報では、規定されている境界面での風速 0.2 m/s よりも低気流であっても一定の分煙性能が維持できる可能性について、実験および数値解析により検討したものである。喫煙所の扉の形状・開閉動作、マネキンの入退室などの喫煙所の環境を模擬し、非喫煙側で検出する粉じん濃度により評価を行った。気流速度を 0.2 m/s から、0.15, 0.1 m/s とすることで、粉じん濃度の上昇が確認された。しかしながら、分煙性能を維持するために、扉に空気の流入が可能となるガラリの設置、さらに扉の開口部にフードを設けることで気流の乱れを抑制する方法などにより、空気の流れを整流化することで低風速であっても分煙性能を向上または維持できる可能性を示した。

空気中に浮遊するエアロゾルの移流の制御には、適切な気流を作り出すことにより、ある程度汚染物質の拡散を防ぎ、効率的に汚染物質を排出することが可能となることを示したものである。

6. オフィス内のエアロゾル粒子

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jar/7/2/7_2_99/_article/-char/ja

本報では、オフィスにおけるエアロゾルの概要と実態について元素分析結果を元に紹介したものである。室内の浮遊粉じんの管理基準値は建築物衛生法により $0.15 \text{ mg}/\text{m}^3$ 以下と定められていること、オフィスの空調システムに装着されているエアフィルタにより外気および室内の粒子を除去していること、室内の粒子の発生源として建物、在室者、人間活動に分類して示している。

近年、オフィス内では禁煙または分煙が進んでおり、室内エアロゾルの主要発生源が喫煙ではなくになっている現状がある。しかし、室内には他にも様々なエアロゾルの発生源があり、さらには $\text{PM}_{2.5}$ など外気からの侵入もある。また、オフィスでは換気および空気調和機のエアフィルタによりエアロゾルを除去しており、外気よりも低濃度になっているのが一般的となっている。

7. 病院のエアロゾル粒子

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jar/7/2/7_2_106/_article/-char/ja

本報では、病院における汚染物質としてガス状物質、臭気物質、そしてエアロゾルの中でもアスベストなどの纖維状エアロゾル、また浮遊微生物として真菌胞子、レジオネラ属菌が存在することを述べている。病院における空気中の微生物については文献調査により、検出された微生物の種類と検出数をまとめている。病院環境においては、人由来の腸内細菌、環境由来の細菌が特定の病院において検出された。一般手術室、ICU、一般病棟などで特長ある菌種があり、浮遊粉じん（エアロゾル粒子）の個数濃度と浮遊微生物数が良い相関があることから、微生物はこれらの粒子に付着して浮遊していることを示唆している。また、病院環境の制御として、汚染物質の適切な管理・運営の重要性、空間消毒の効果などを示している。

8. ウイルス計測のための捕集手法

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jar/34/4/34_219/_article/-char/ja

本報では、空气中に存在するウイルスなどの微生物の計測の重要性から、インフルエンザウイルスを対象に、エアロゾル状態で捕集を行い、検出することが可能になる方法について紹介したものである。このような条件で捕集できるバイオエアロゾルサンプラーを開発し、その捕集性能を確認し、バイオエアロゾルへの適用可能性とその有用性を検討した。さらに実環境中においてインフルエンザウイルスの捕集、検出の実証実験を行い、あるサンプルについてはインフルエンザ A 型を検出することに成功し、今後の空間中の感染リスク評価への適用可能性を示唆したものである。今後はさらなる検討を行い、例えばポンプの大きさや設置性の観点から、簡便性や捕集効率の向上により、また検出方法として PCR 以外の生菌を検討できる手法を採用するなどにより、広く用いられる方法となることが期待されるものである。