

電気集塵方式を用いた空気清浄機の性能評価および解析モデルによる検証



DZ19608

村上 禄

Keywords

CFD 空気清浄機 浮遊微粒子
最透過粒径

1. 背景と目的

新型コロナウイルスの感染拡大により、厚生労働省は自然換気において常時窓を開ける連続的な換気を、機械換気においては一人あたり毎時30m³の換気量確保を推奨している¹⁾。一方で用途・構造上窓を開けての換気が困難な施設も多く、換気設備の増強は多大な費用を要する。これを受けて江東区所在のT社は取り扱う電気集塵機の空気清浄機としての活用を図り、共同開発に西村研究室が参画した。本空気清浄機はウイルスのみに留まらず飲食店で発生するオイルミストなど空気中の浮遊物質を幅広く捕集対象とする見込みであり、現状での性能把握および機器改良の検討を目的として西村研究室が空気清浄機の性能評価と、CFDソフトウェアを用いた実証を行う。本研究では空気清浄機の粒径別捕集能力や室内での拡散状況、クリーンアップまでの時間、汚染物質の挙動について実験およびデータに基づいたシミュレーションを行い、開発途中である空気清浄機の性能を評価する。

2. 研究概要

空気清浄機の空気清浄能力を把握するために大気塵を用いた実験を行い、透過した粒子の数を粒径ごとに測定したのち透過率を計算する。得られたデータから空気清浄機の粒径別捕集能力について評価・考察を行う。次に実在する建築物をもとにした仮想の建築空間の3DデータをCFDソフトにインポートし、算出された透過率に基づいて室内空気環境をシミュレーションする。CFDソフトはMSC社のSTREAM v2022.1を、解析モデルの作成にはAutodesk社のRevit 2023を用いた。空気中の粒子の軌道やエアコンのフィルタに付着する粒子数に着目し、より高い効率を実現する稼働条件やエアコンの出力を検討する。

2.1 実験概要

実験装置本体の写真を写真1に、その概略図を図1に示す。測定対象となる空気清浄機の上流側・下流側にダクトを装着し、各ダクトにチューブ挿入用の孔が設置されている。この孔からサンプル空気を採取し、計測機に導入され、個数濃度すなわち体積あたりの粒子個数を計測



写真1 実験装置

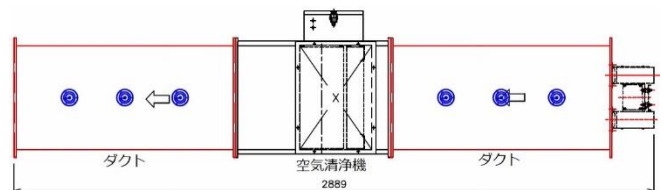


図1 実験装置概略図

する様に組み立てる。上流側に対して下流側にて計測された粒子個数の比を取り、透過率を算出する。チューブの先端部はダクト内の空気の動圧の影響を避けるために、気流方向に対して垂直となる様に設置されている。計測機は対象とする粒径範囲が異なるNanoScan3910とOPS3300を組み合わせ、10~10,000nmの粒径範囲の浮遊微粒子の個数濃度をシームレスに計測した。それぞれ上流側、下流側で同時に稼働するため2台ずつ必要になるが、NanoScanは1台のみの用意であった。そのため本来は1回の実験につき8時間連続で測定するところを、1時間ごとに上流側・下流側のダクトに接続したチューブを繋ぎかえて測定した。実験1回につきOPSで上流側・下流側それぞれ計8回分、NanoScanで計4回分のデータが得られ、これらの平均値を用いて透過率を算出する。サンプリングチューブには浮遊微粒子の正確な測定の際に効果的である導電性チューブを用いた。今回のように空気清浄機やNanoScanで粒子を荷電する場合は特に有用であると思われる。また十分な量の大气塵を常時取り込むため、実験を行った室のダクト先端にブロワーを設けて実験を行っ

た。試験粒子として人工的に生成したものを用いなかった理由としては、粒子の絶対数が不足すること、粒子発生器を長時間作動させた場合に安定しにくいことが挙げられる。外気が室内空気と攪拌してから計測機に採取されるよう、ブロワーの位置や送風方向に留意した。

2.2 解析概要

本研究ではCFDソフトにMSC社のSTREAM v2022.1を用いた。解析を行う仮定の建築空間として、浮遊微粒子の挙動に基づいた空気清浄機の定性的な評価がしやすいように、容積および最大収容人数の比較的小さく単純な構造の会議室を選んだ。図2、表1に仮想会議室の平面図および居室概要を示す。本シミュレーションについては一般的な建築空間における空気清浄機の性能評価を目的とし、収容人数14人のうち5人が一定時間間隔で咳を行うものとした。空調機からの吸い込みと吹き出し、給気口及び排気口における流れ境界条件は、一般的に実空間で取り得る数値とCFD上の粒子の動きを加味して妥当な値を設定した。粒子の噴出に関する設定については咳をする人間として想定される人体モデルの口付近に噴出点を設け、粒子が噴出される方向は各人体モデルの正面方向に合致させた。各噴出点において180秒間隔で噴出されるが、生成開始時間および生成終了時間はそれぞれで10秒ずつ遅らせた。

3. 結果・考察

2.1 実験概要に基づいて行った10回の実験の測定結果およびその平均値について、表とグラフより考察する。粒子数は1分間で計測された個数濃度の1時間あたり平均値、透過率は下流側粒子数を上流側粒子数で除したのちパーセント表記として示した。NanoScanとOPSそれぞれのデータを示したが、グラフの作成にあたって一部重複する測定範囲の扱いについては比較的数据数の多く精度が高いと思われるOPSの数値を採用してNanoScanの365.2nmは除外した。加えてNanoScan計測域のうちグラフから除外した粒子径帯域に準ずる大きさである273.8nmについても、特に上流側粒子数が近辺のデータ推移から考慮して著しく減少しており、不適であるとして除外した。NanoScanにおける測定範囲の最大粒径付近での急激な粒子数減少はメーカーであるTSI社によっても確認されている⁹⁾。また各実験回のうち連続した3時間分のデータを取り上げ、1時間分の下流側粒子数を計2時間分の上流側粒子数の平均値で除してパーセント表記とした透過率を算出したのち、グラフを作成した。連続する比較的短い時間の中でデータをまとめることで計測にブレのある時間帯のデータを除外するねらいがあり、これを挟み込み透過率と題して表および図に示した。

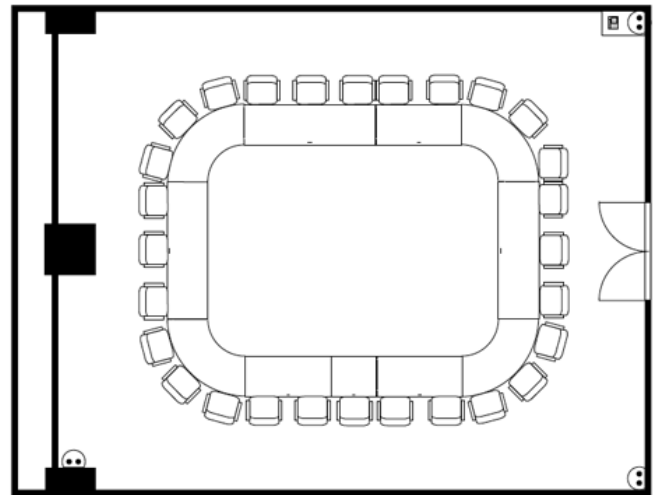


図2 仮想会議室平面図

表1 居室概要

	仮想会議室
床面積[m ²]	92
天井高[m]	3
最大収容人数[人]	28

この挟み込み透過率は全10回の実験のうち、本空気清浄機の捕集傾向が比較的明瞭に表れた8,9,10回目のものを抽出した。縦軸の示す透過率の範囲を5%までに縮小し、より詳細な観察を行った。273.8nmおよび365.2nmの除外については上述のグラフと同様である。

3.1 測定結果に対する考察

透過率は図3より20.5nm以下、および273.8nm点以外でほぼ0.3%以下となっており、JIS Z 8122におけるHEPAフィルタの定義「定格風量で粒径が0.3 μ mの粒子に対して99.97%以上の粒子捕集率を有し、かつ初期圧力損失が245Pa以下の性能を持つエアフィルタ」を参照すると、HEPAフィルタと同等の能力を示すと言える。一方で粒径別の透過率についてはHEPAフィルタと全く異なり、一般的な空気清浄機が捕集対象とする粒径帯域に限れば顕著な最透過粒径が存在しない。

以下空気清浄機の特性を読み取れるような透過傾向が示された帯域について考察する。

<粒径20.5nm以下における粒子の透過が顕著である>

図3より、全実験回を通して粒径20.5nm以下の帯域において格段に高い透過率が示された。近辺のデータの推移を考慮すると、粒径が小さくなると透過率が高くなる傾向があると見て差し支えないものと思われる。前提として直径がナノメートル・オーダーのナノ粒子はこれまで測定することが困難であり、これを捕集対象とする空気清浄機の開発も進んでいなかった。10nm近辺の超微粒子がフィルタ下流側で頻出する現象はピンホールのあるHEPAフィルタなどでも見られる現象ではあるが、本空気

清浄機のような捕集原理の場合こういった理論に基づいてこの現象が発生するかについては、既往の研究においてもあまり報告されていない。

<粒径30~100nmの粒子の透過率に関して特徴的な増減が見られる>

図4より、近辺のデータ推移も含めて考慮した際に30~100nmにおいてグラフが隆起するような増減の傾向が見て取れた。この現象については空気清浄機の放電部にて行われる10,000Vのコロナ放電に伴うオゾン発生、およびこれに由来する二次生成粒子が発生する可能性について考察した。

VOC(揮発性有機化合物)とオゾンが室内環境において共存すると31~129nm程度の粒子濃度が増加することは鍵直樹らによって明らかにされている⁵⁾。しかしその反応速度は実験装置を用いて意図的に生成した場合でも緩やかであり、絶えずダクトから大気塵を取り込んだ本実験においてはVOCとオゾンの反応生成による影響は考えにくい。各実験回にて当該粒径帯域の粒子数が他の粒径帯域に比べて特異な増減の傾向を示すことも無かった。後述するNanoScanの特性を踏まえて重複する測定範囲にてOPSによる計測を信用し、20.5nm以下を無視した一般的な空気清浄機が捕集対象とする粒子径のみについて考察すると、30~100nmの帯域が最透過粒径に相当することになる。

<粒径100~300nmの帯域において粒子が大きいほど透過率が高まっている>

図3よりNanoScanの測定範囲の上限に近づくほどグラフが右肩上がりとなり、透過しやすくなることが示された。一方でOPSによる計測ではそのような傾向は見られない。これについてはNanoScanの特性に影響された可能性を考慮して、空気清浄機とNanoScanで粒子に多重の荷電を行っていることに着目した。

粒子の電気移動度は粒子径に反比例し、粒子上の電荷数に比例する²⁾。実例としてM.Heらによって行われたDMA(Differential Mobility Analyzer)による浮遊微粒子の粒径測定を取り上げる³⁾。なおDMAは本実験で用いたNanoScan SMPS 3910を構成する要素の一つでもあり、電荷を帯びた粒子の移動速度が粒径に応じて変化することを利用して分級するサイズ選別装置である。M.Heらの研究において60nmの一重荷電粒子をDMAから抽出した場合、同じ移動度を持つ二重荷電粒子と三重荷電粒子はそれぞれ88.3nmと111.7nmであった³⁾。粒子が多重荷電される測定された粒度分布から得られる粒度分布の信頼性が損なわれ、その傾向は特に大きな粒子において強く表れることはC.Qiらによっても示されている²⁾。特に本研究のような電気集塵方式を用いた空気清浄機の場合、下流側において同一移動度である粒子のうち多重荷電粒子

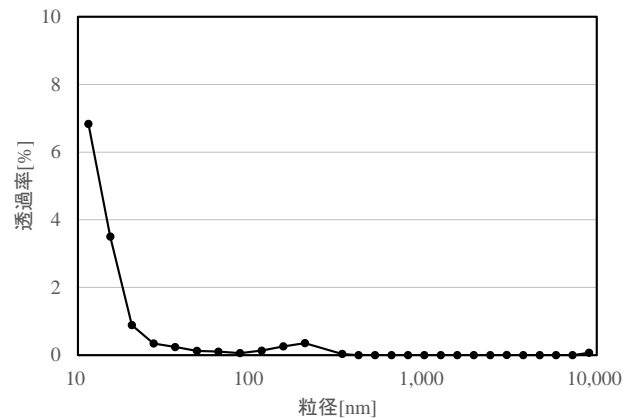


図3 全実験回統合透過率

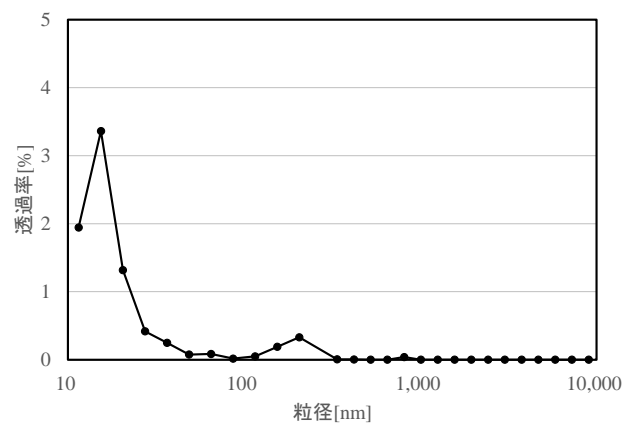


図4 実験8回目3,4,5時間目狭み込み透過率

の占める割合が上流側に比べて高くなるため、単純に濃度を比較すると誤った透過率が得られる可能性がある。しかしいずれの研究も均質な試験粒子を前提としており、大気塵を用いて行った本研究にて示された透過率の傾向に関して決定的な要因とはならなかった。

3.2 解析結果に対する考察

解析の実行とこれを受けての修正を繰り返し行ったが、床の一部や机の上、空調機の吹き出し部から少し下の空中に粒子の吹き溜まりが形成されてしまい、実空間とは乖離した結果に終わった。ソフト上での設定と実際の物理的性質を勘案して、合理性の高い条件を設けることが出来なかった。コロナウイルスやこれを含む飛沫、または飲食店において発生するオイルミストなど様々な捕集対象が想定されるが、これらの物性をCFDに反映し観察を行う方法に関しても検討する必要がある。粒子自身のみならず空気清浄機や空調機、粒子を吐き出す人々の設定について、再考の余地が多く残った。特に空調機では空気の吸い込み、吹き出しに伴う粒子の出入りに関して厳密な条件を設定する必要性が確認された。

3.3 今後の課題

本研究では、企業と共同開発する空気清浄機の性能評価を実験に基づいて行い、仮想建築空間におけるCFD解析を行った。本空気清浄機は測定した粒子径範囲のうちほとんどにおいてHEPAフィルタ相当の捕集率を示した。また繊維層フィルタとは異なる透過傾向を示すことも分かった。今後の課題として以下のものがあげられる。

＜ナノ粒子の特性把握＞

粒子への多重荷電および二次生成粒子に関して**3.1 測定結果に対する考察**では示された透過傾向の決定的な要因でないとしたが、実際にはこれらを含む多くの因子が粒子の生成や運動、計測に影響を及ぼしていると考えられる。特にナノ粒子は体積に対して表面積が大きいこと、大きさが光の波長未満になること等から物性の著しい変化が発現するとされている。そのため電気集塵方式による捕集システムが有効に作用するようなナノ粒子の性質を究明出来れば、フィルタを用いた一般的な空気清浄機とは異なるアプローチで超微粒子の捕集を実現する可能性がある。したがってこの帯域での捕集率向上は、共同開発において今後の研究の学術的価値や製品の市場価値の核となる重要な検討事項の一つになると思われる。

＜実験装置・手法の再検討＞

NanoScanの用意が1台のみであったため、比較的小さい粒径範囲の測定において上流・下流を同時に計測することが出来ず厳密性を欠いた実験となった。

また上流側にて計測された全体の粒子の総数に関して実験日ごとに大きな数値のブレが見られ、特に7日目と10日目では118.8倍もの差となった。当日の気温や降水量、日照時間などの条件に大きな差異は確認できず、日によって粒子数が極端に増減する原因は不明である。全体の粒子数が透過率に影響を及ぼす傾向は全実験回を通して見受けられたため、この原因が判明すればより精密な性能評価を行える可能性がある。実験では取り入れた外気を安定させるために、直接空気清浄機に取り込まず室内の空気と攪拌させたのち測定したが、上流側粒子数の測定結果をふまえるとその意義は必ずしも認められない。下流側のダクトから空気清浄機を経ていない空気が混入・計測されているおそれもあるため、実験装置の構成には改善の余地がある。

製品化にあたっては他製品との比較実験も不可欠である。特にフィルタを用いた空気清浄機と比較して、フィルタの目詰まりに由来するメンテナンスの頻度や併用する空調設備の汚れが低減されるとの予想が当初あったが、これの立証についても検討すべきである。加えてCFDの実空間に対する整合性を示すことを目的として、より限定的な条件下での実験や飲食店における実地試験なども検討すべきである。

＜CFDソフトの取り扱い＞

CFD上で粒子を生成しその軌道を解析することは可能だが、物性を反映させる際の限界や実空間との整合性については把握出来ていないのが現状である。CFDを用いた手法が最適であるか、用いる場合どういった局面での適用を想定するか十分に考慮すべきである。使用にあたっては捕集対象として想定する粒子の物理的・化学的性質をふまえて、合理性の高い条件設定を行う必要がある。また空調機や人体モデルについても粒子の出入りに関して厳密な検討が求められる。

参考文献

- 1) 厚生労働省：冬場における「換気の悪い密閉空間」を改善するための換気の方法
https://www.mhlw.go.jp/stf/newpage_15102.html, 2022年10月5日閲覧
https://www.mhlw.go.jp/stf/newpage_15102.html
- 2) Unipolar charging based, hand-held mobility spectrometer for aerosol size distribution measurement — C.Qi,P.Kulkarni Journal of Aerosol Science(ISSN=00218502) 49,p32-47,2012
- 3) Aerosol Filtration with Mobility-Classified Particles: Role of Multiply Charged Particles in Skewing Penetration Measurements — M.He,S.Dhaniyala,M.Wagner Aerosol Science and Technology(ISSN=02786826,CODEN=ASTYDQ) 49(9),p705-716,2015
- 4) NANOSCAN SMPS SPECTROMETER COMPARED TO THE TSI® SMPSTM SPECTROMETER — TSI 社 APPLICATION NOTE NANOSCAN-002
- 5) 室内空気中のオゾンによるVOCの粒子作成 — 鍵直樹,川尻第貴,並木則和,藤井修二 日本建築学会環境系論文集 第585号,35-39,2004年11月
- 6) 多分散ナノマテリアル粒子を用いたポータブルSMPSの評価 — 山田丸(労働安全衛生総合研),鷹屋光俊(労働安全衛生総合研)労働安全衛生総合研究所特別研究報告 JNOSH-SRR No.46 Page.179-185 (2016.10.31)
- 7) エアフィルタ・ろ材、マスク、空気清浄機、換気による新型コロナ感染症対策(研究最前線) 東北文化学園大学 野崎淳夫 クリーンテクノロジー 2021.11 Vol.31 No.11 p.29-37
- 8) COVID-19対策で求められる換気とフィルタの考察 新菱冷熱工業株式会社 森本正一 クリーンテクノロジー 2022.2 Vol.32 No.2 p.19-22
- 9) フィルタのピンホールに関する研究 — HEPAフィルタにおける実験的比較 — 近藤貴寛 芝浦工業大学学士論文 2021.3
- 10) 事務所ビルにおける浮遊微粒子とCO2の相関に関する研究 — 原田優也 芝浦工業大学学士論文 2019.3