

# 小型飛沫除去装置による飛沫除去性能最適化のための 自然放射線源利用の検討

## Study on Utilizing Natural Radiation Sources for Optimizing Droplet Removal Performance in Compact Droplet Remover

○秋吉優史（大阪公立大学 大阪国際感染症研究センター/放射線研究センター）\*

### Abstract

As one engineering countermeasure against respiratory infections, we are developing a compact droplet removal device. To evaluate the transport of substances contained within droplets, we investigated the use of  $^{212}\text{Pb}/^{212}\text{Bi}$ , daughter nuclides of  $^{232}\text{Th}$ , a naturally occurring radioactive material (NORM). A thorium-containing mantel piece was placed inside a sealed container, and  $^{212}\text{Pb}/^{212}\text{Bi}$  was collected on a filter using a fan. The filter type, number of filters, and installation method were optimized, and the saturation behavior with respect to collection time was evaluated by calculation.

Keyword: Droplet, Particle collection efficiency, Infection control, Naturally Occurring Radioactive Material  
キーワード 飛沫、粒子捕集率、感染制御、自然起源放射性物質

### 1. 背景

様々な呼吸器感染症に対する対策技術の開発はコロナ禍収束後も依然として重要なテーマである。患者個人に対する治療薬やワクチンなどの医療による対策をマイクロ感染症対策とすると、人と人の接触の抑制、感染者から非感染者への病原体の伝播の阻止、さらには生活環境などの改善でそもそも病気にかかりにくくするなど、工学的な対策から社会的なものまで包括した感染症対策をマクロ感染症学と位置づけ、学際的な研究を大阪公立大学大阪国際感染症研究センターに於いて実施している。

これまでに筆者は工学的対策として、呼吸器感染症の伝播経路を遮断する技術を提唱してきた。コロナ禍の最中に嫌というほど三密（密閉、密接、密集）の回避を要求されてきたが、その意味するところを理解している人は少なく、少なくとも筆者の知る限り一度も公的には説明がされてこなかった。密閉した空間に感染者がいると長期間空气中を浮遊するウイルスを含有したエアロゾル濃度が高くなり、密接は物体表面に付着したウイルスを手から口腔や目などの粘膜に移動させる接触感染リスクを高め、最後に密集は射程距離が小さいが大きく大量のウイルスを含有した飛沫感染のリスクを増大させる。このあたりの点については本学会の学会誌「空気清浄」Vol 63 に R&D トピックス「小型飛沫除去装置による人と人の間を飛ぶ飛沫除去による感染症制御」<sup>1)</sup>として掲載されているので、ご一読願いたい。この三つの感染伝播ルート（エアロゾル感染、接触感染、飛沫感染）を明確に区別して考えることが非常に重要で、それぞれの感染ルートを全て遮断する必要がある。

ここで、エアロゾルに関しては様々な空気清浄機や紫外線照射などの対策があり、接触感染に関しては物体表面への光触媒の塗布などの対策技術が存在しているが、飛沫に関しては距離を取る、マスクをする、パーティションを設けるなどの19世紀以前から行われていたような対策しか存在しておらず、パーティションなどについては効果は実証されておらず

弊害があることも知られている<sup>2)</sup>。このため筆者はサブミクロンのエアロゾルについては捕集は行わないという割り切りをした上で飛沫（医学的には口腔から放出される $5\mu\text{m}$ 以上の液滴を指す）に特化した捕集を行う小型飛沫除去装置の開発を行ってきた<sup>1)3)4)5)</sup>。

### 2. 飛沫捕集に用いるフィルターについてのこれまでの実験結果

飛沫除去を行う上で、フィルターメッシュと捕集対象とする粒子の挙動はザルで砂を漉すような場合と異なり、さえぎりやブラウン運動などの挙動によって説明され単純ではない。実際に、 $0.5\times 2\text{mm}$ 程度の大きな穴が多数空いた不織布フィルターによって $5\text{-}25\mu\text{m}$ の飛沫は99.9%以上が除去されるという実験結果が得られている<sup>2)</sup>。PC用の大きな穴が空いたガードメッシュにたくさんの埃が捕集されているのを見ている読者も多いかと思う。これまでに、 $0.6\times 0.6\times 1.5\text{m}$ の小型のクリーンブース中で噴霧器（超音波式の加湿器）による水道水の噴霧を行い液滴の濃度をパーティクルカウンター（AERO Trak APC 9303-01, TSI社）を用いて評価し、噴霧機とパーティクルカウンターの間に設置した小型飛沫除去装置に装着したメッシュ径の異なる#18/19, #14, #10.5の3種類のフィルターによる空中を飛ぶ飛沫の除去率と、ダクト中に設置したファン-フィルターを挟んだ上流側と下流側の粒子径を同時計測し、単純にフィルターに対する透過率を求めた。その結果、空中を飛ぶ飛沫（ $5\text{-}25\mu\text{m}$ ）の除去率と透過率は綺麗にトレードオフの関係となっていることが明らかとなった。

### 3. 放射性物質を用いたフィルター性能評価を実施する上での放射線安全管理上の検討

このように、これまでの研究では特殊画像撮影による飛沫の可視化や、パーティクルカウンターを用いた測定などにより定性的、定量的な評価を行ってきたが、あくまでも水滴の挙動評価であり、内包される物質移動についての評価はされてこ

\* Masafumi Akiyoshi, (Osaka Metropolitan Univ., Osaka International Research Center for Infectious Diseases)

なかった。発生源から放出された病原体がどの程度捕集され、再放出なども含めてどの程度対象者に到達するかの評価が必要であるが、病原体を実際に飛散させての評価は非常に実施の難易度が高く、現実的ではない。蛍光物質などを用いることで飛散状況を定性的に評価することは可能であるが、やはり定量的評価を行う必要があり、放射性物質を用いるトレーサー実験が考えられる。よく知られている  $^{90}\text{Sr}$  は半減期 28.8 年の代表的な高エネルギー  $\beta$  線核種であるが、娘の  $^{90}\text{Y}$  と放射平衡となっており、ミルクিংと言われる化学的に分離する操作を行うことで半減期 64.1 h の後に安定な  $^{90}\text{Zr}$  となる  $^{90}\text{Y}$  を分離することができる。この  $^{90}\text{Y}$  を噴霧する実験を行えば、実験を実施している間はほとんど減衰しないが、数週間経過するとほぼ完全に飛散した放射能は消滅する。これらの適当な半減期の放射性物質を噴霧して定量的に評価を行うことが望ましいが、非密封 RI の取扱いは放射線管理区域の中で行う必要があり、厳密な管理を要求されるため噴霧を行うような実験は放射線安全管理上のハードルが高いため、実現は困難である(筆者は第一種放射線取扱主任者資格を持ち、大阪公立大学研究推進機構の放射線取扱主任者である)。

このため、トリウム( $^{232}\text{Th}$ )を含有するマントルピースなどの自然放射性物質から娘核種として放出される希ガス元素であるラドン( $^{220}\text{Rn}$ )の、さらに娘核種である  $^{212}\text{Pb}$ (半減期 10.6 h)/ $^{212}\text{Bi}$ (半減期 1.01 h)を活用する方法が考えられる(トリウム系列の崩壊系列を Fig.1 に示す)。キャンプなどで使う光源であるランタンのマントルピースは暗いガスの炎を明るく輝かせるために意図的にトリウムが添加されているが、現在スポーツ用品店などで販売されているマントルピースはほぼ全て他の希土類元素などに置き換えられており、非放射性であるが、筆者は放射線教育に長年携わっているため独自ルートで現在でもトリウム含有のマントルピースを入手可能である。なお、法令上は下限数量と下限濃度のいずれの規制値を超えた物を管理対象とするべき「放射性物質」と定義しており、例えばコンクリートなどは一定量のウランを含み、地殻平均で 1t あたり 2.4g、花崗岩では 11g、140 kBq もの  $^{238}\text{U}$  が含まれているため、大きな建物全体ではウラン鉱石としての下限数量 300g を超えてしまうが、ウラン鉱石の下限濃度は固体の場合 370 Bq/g であり、当然ではあるが規制対象となることはない(ウラン、トリウムなどの核燃料物質は原子力規制委員会が放射性同位元素の下限数量、下限濃度を定める「放射線を放出する同位元素の数量等を定める件」<sup>6)</sup>には掲載されていないので注意を要する)。トリウムについても同様で、核原料物質ではなく核燃料物質として解釈してもトリウム 900g 以下であれば対象外である。900g の  $^{232}\text{Th}$  は 3.6 MBq にもなり、マントルピースに含まれる  $^{232}\text{Th}$  は 100 Bq 程度であると考えられる(GM サーベイメーターを直付けで測定して 100 cps 程度であり、放射平衡で存在する娘核種の  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ac}$  2 核種からの  $\beta$  線を測定していて、 $2\pi$  測定であるため検出効率を 50% とする)ため、全く問題無く自然起源放射性物質

(Naturally Occurring Radioactive Material, NORM)として法令上の規制に抵触せずに取り扱うことが可能である。また、 $^{212}\text{Pb}$  および  $^{212}\text{Bi}$  の下限数量、下限濃度はいずれもそれぞれ 100 kBq, 10Bq/g であり(放射平衡中の子孫核種含む)<sup>6)</sup>、下限濃度は下記の実験から分かるように簡単に超えるため絶対量が 100 kBq を超えないように注意する必要があるが、後述の通り現実的には心配する必要のないレベルである。

放射線教育の分野では大気中のラドン ( $^{222}\text{Rn}$  系列核種の  $^{222}\text{Rn}$ ) 娘核種を捕集して  $^{214}\text{Pb}/^{214}\text{Bi}$  による半減期 40 min 程度の線源を得ることがよく行われているが、ダストモニターを流用して強力なファンと目の細かいフィルターを用いて長時間捕集しても大して集まらない一方で、ベンコットなどの目の粗いガーゼを掃除機の先に取り付け 10 min 程度捕集することで広窓 GM より 20,000 CPM を超える強力な線源を得ることが出来るため、経験的に高性能なフィルターを使えば良いという物ではないことが知られている。後に示すように余り捕集に時間がかかると捕集する核種の半減期の制約のために大きな放射能を得ることが出来ない。このため、効率的な捕集のために最適な条件を検討することにした。

#### 4. 実験方法

$^{220}\text{Rn}$  娘核種の捕集は 45 L の簡易密閉コンテナ中で行い、当初 50 枚のマントルピースをコンテナ中に入れて実施した(Fig.2)。使用したファンは小型飛沫除去装置<sup>1)3)4)5)</sup>で使用したのと同様の 1200 rpm の 120 mm 角静音ファンであり、上面側から下面側に送風している。排気によってマントルピースの細かい埃が舞い上がりフィルターに  $^{232}\text{Th}$  およびその直下( $^{220}\text{Rn}$  の親)の娘核種が捕集されることを防ぐために、ファンの下にはスチレンボードを設置した。ファンに装着するフィルターとしてメッシュの細かさの異なる(#10.5, #14, #18/19)グラスファイバーメッシュ、不織布(モノタロウ不織布ワイパー(1枚、2枚)、ポリエステル 45%、セルロース 55%)、ベンコット M3(2枚重ね)を使用して捕集性能の違いを評価した。なお、モノタロウ不織布ワイパーおよびベンコット M3 は 250 mm 角を四つ折りにされて販売されているが、それを開いた状態を 1 枚としてカウントしている。捕集の際のレイアウトとしてファンの上面に  $\Phi 2$  のパンチングメッシュを設置してその上にフィルターを置き、吸引(pull)で捕集する場合と、ファンの下面に足として設置している M4 ネジとナットによってネジ止めして吹きつけ(push)で捕集した場合の両方で捕集を行い比較を行っている。

比較の結果 push, pull どちらでもほとんど捕集性能は変わらず、取り扱いがより簡便な上面設置の pull での捕集方法を採用した。フィルター間の比較ではベンコットが明らかに高い性能を示したため、ベンコットフィルターを用いて 2,653 min の連続吸引を行った上で得られたフィルターからの  $^{212}\text{Pb}$  の抽出を行った。抽出にはクエン酸 2 g を 60 ml の熱湯で溶かし、上記のベンコット試料を浸して 5 min の超音波洗浄を行った。抽出液を  $\Phi 90$  mm ディスポシャーレに移



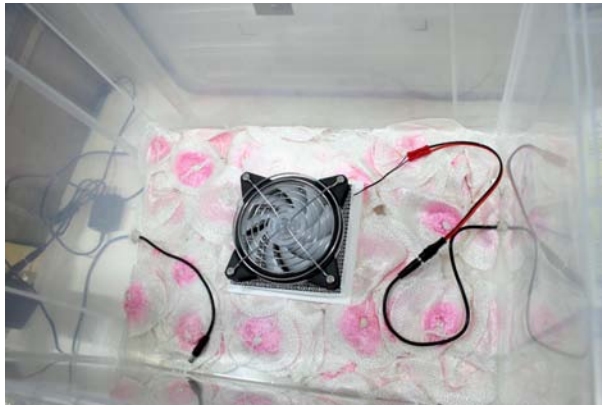


Fig.2 A thorium-containing mantel piece and a fan unit with a filter for collection, enclosed within a sealed container. In this figure, the filter is installed beneath the fan.

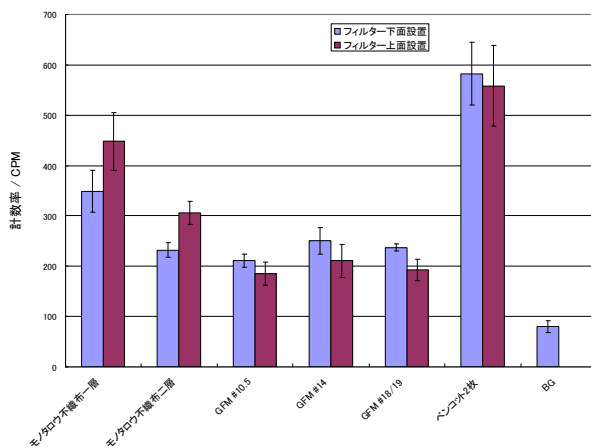


Fig.3 Differences in radioactive particle capture efficiency when placing 50 mantel pieces inside a container, based on filter type and placement above or below the fan. GFM denotes glass fiber mesh. BG represents the count rate at the measurement point when no filter is installed.

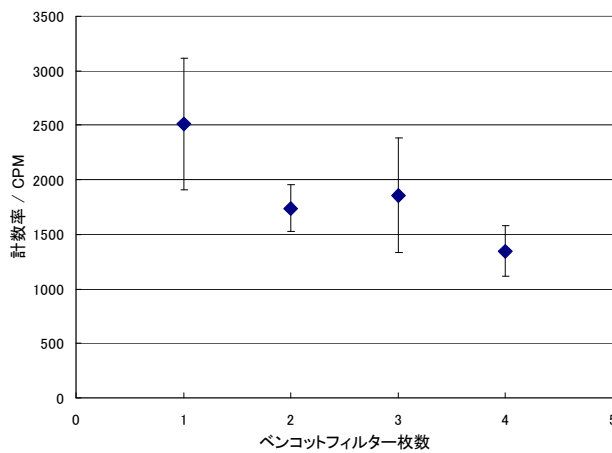


Fig.4 Differences in radioactive material collection efficiency based on the number of Bemcot filters used when placing 250 mantel pieces inside a container and collecting for 30 minutes. The filters are installed on the top surface of the fan.

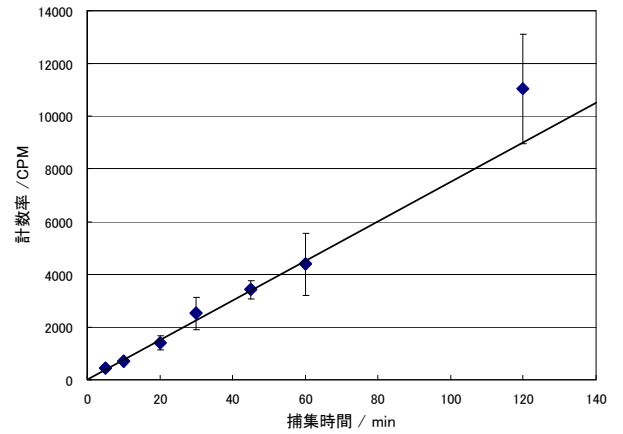


Fig.5 Difference in radioactive material collected over time when 250 mantelpieces are placed inside a container and one Bemcot filter is installed on top of the fan. The straight line is fitted based on the trend up to 60 minutes.

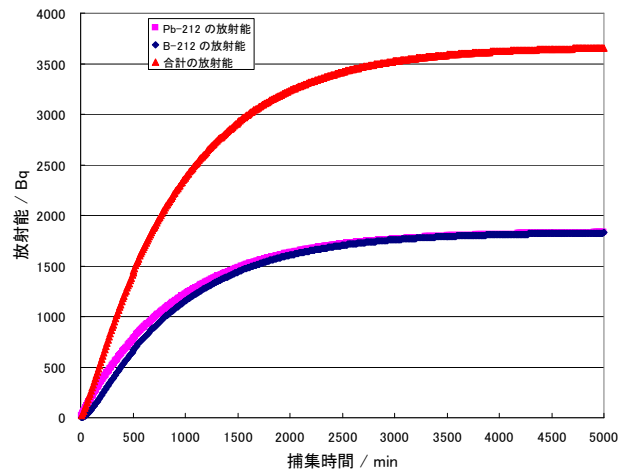


Fig. 6 The time dependence of the radioactivity collected by the filter for  $^{212}\text{Pb}$ ,  $^{212}\text{Bi}$ , and the total, calculated by solving differential equations based on the collection rate up to 60 minutes and the half-lives of Pb-212 and Bi-212. A tendency toward saturation around 3000 minutes (50 hours) can be observed. When the collection efficiency halves, the radioactivity at saturation also halves, meaning the collection efficiency ultimately determines the total radioactivity that can be collected.