

令和五年度 修士論文

微粒子計測による空気清浄機の効率的使用に関する研究

指導教員 高橋 俊樹 准教授

令和6年

群馬大学大学院理工学府 理工学専攻

電子情報・数理教育プログラム

T221D014 大澤 由奈

目次

第1章 序論	3
第1節 花粉症	3
第2節 空気清浄機と浮遊粒子	2
第3節 先行研究	4
第4節 研究目的	5
第2章 データの処理方法	6
第1節 減衰定数	6
第2節 CADR	7
第3章 実験環境に関する基礎実験	8
第1節 実験背景	8
第2節 使用機器	8
第3節 実験方法	9
第4節 実験結果	12
第3章 生活空間を想定した実験	15
第1節 実験背景	15
第2節 実験方法	15
第3節 実験結果	16
第4章 試験粒子の選定	22
第1節 実験背景	22
第2節 実験方法	22
第3節 実験結果	22
第5章 空気清浄機の電力量評価	25
第1節 実験背景	25
第2節 実験方法	25
第3節 実験結果	29
第7章 空気清浄機とサーキュレーター連携実験	33
第1節 実験背景	33
第2節 実験方法	33
第3節 実験結果	34
第8章 結論	38
参考文献	39

第1章 序論

第1節 花粉症

日本国内の花粉症患者数は年々増加傾向にある。Fig. 1.1 は 1998 年，2008 年，2019 年とほぼ 10 年おきに実施されている調査の結果である。この調査によると花粉症の有病率は 1998 年が 19.6%，2008 年が 29.8%，2019 年には 42.5% で 10 年ごとにほぼ 10% 増加している。花粉症の代表例でもあるスギ花粉症にいたっても同様の増加傾向となっており，2019 年には 38.8% でほぼ 3 人に 1 人がスギ花粉症と推定される。

花粉症は，花粉によって引き起こされるアレルギー疾患でくしゃみや鼻づまり等のアレルギー性鼻炎や目のかゆみ，流涙などのアレルギー性結膜炎が多く見られる。この対策として花粉症は，予防として発症の症状を緩和させる方法や花粉自体を避けるといった手段があげられる。Figure 1.2 より花粉は昼前後と夕方によく飛散する。そのため，外出時のマスクやメガネの着用等により花粉を防ぎ，帰宅時には花粉を払うなどして家の中に花粉を持ち込まないことが予防の一環となる。しかし室内の換気等で，窓を開けた際に花粉が室内に流入することが考えられる。室内に侵入した花粉は残存し続けるため，除去する必要がある。

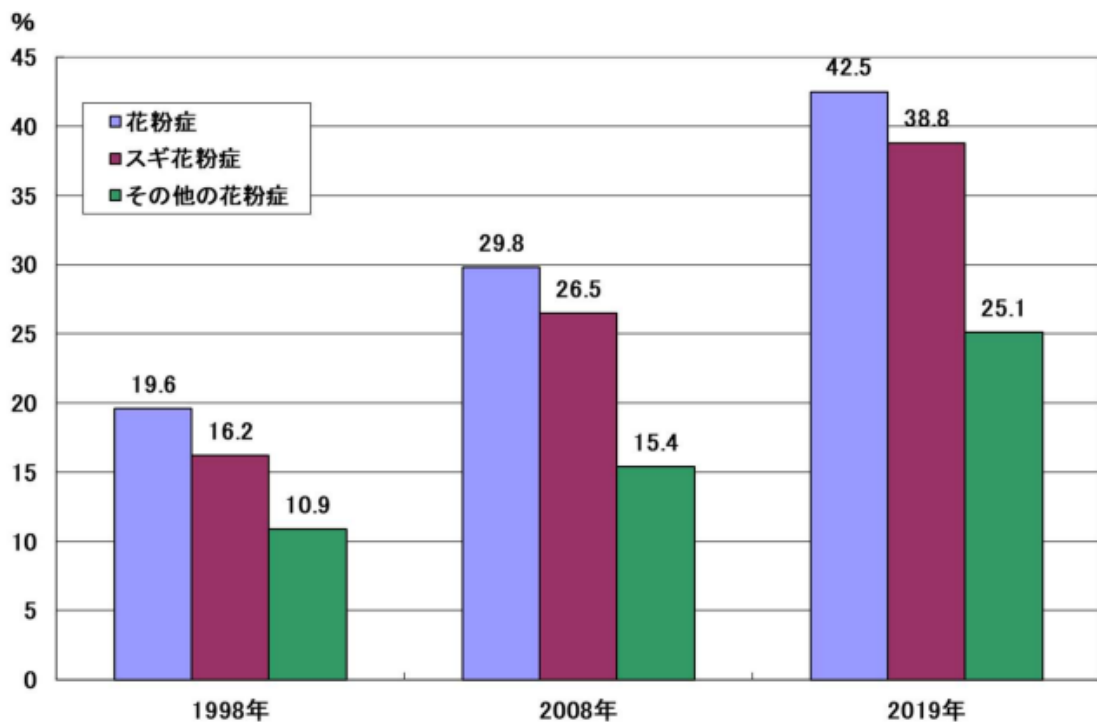


Fig. 1.1. 花粉症の有病率^[1].

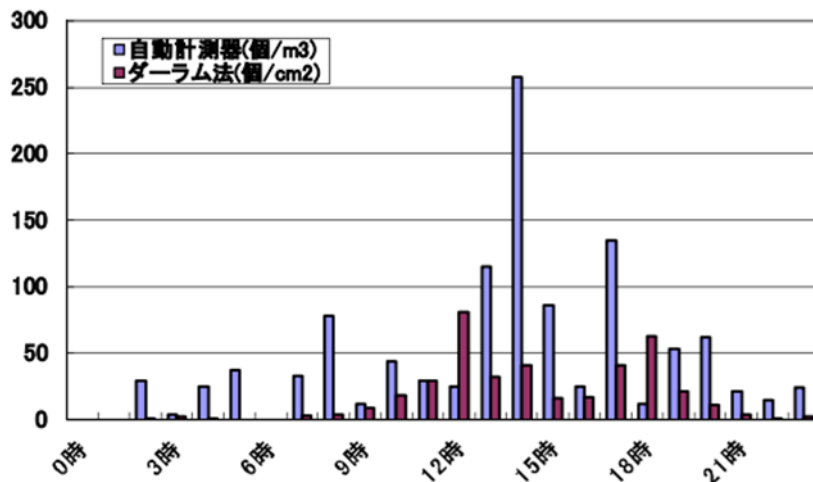


Fig. 1.2. 花粉の多い時間帯（ダーラム法と自動計測器による観測）^[1].

第2節 空気清浄機と浮遊粒子

第1節で述べたように、花粉粒子が一度屋内に侵入した場合除去を行わない限り、屋内に残留し続け花粉症患者に影響を与える。そのため花粉症患者が屋内で快適に生活するためには、屋内に侵入した花粉を除去しなければならない。花粉除去の方法の1つとして、空気清浄機の使用があげられる。空気清浄機は室内の空気を吸引し、その中に含まれている花粉やハウスダスト等を除去して清浄された空気を吹き出す。また、排気される空気の流れにより空気を循環させている。

家庭用空気清浄機ならば比較的安価に、なおかつ現存の建築物に手を加えることなく設置できるため一般家庭において気軽に導入できる空気清浄システムである。近年の主要耐久消費財の普及率を Fig. 1.3 に示す。他の主要耐久消費財と比較するとまだ劣るが、空気清浄機の一般普及率は年々徐々に増加していることが伺える^[2]。

スギやヒノキの花粉の粒径はおよそ 30 μm 前後であり、浮遊粒子としては大きな粒子である。しかし、スギ花粉のアレルゲンは花粉の外壁や内部に局在している Cry j 1 と Cry j 2 であり^[3]、その粒径は約 0.7 μm ^[4]と非常に小さい。これらは花粉が何らかの理由で破壊されると空气中を長時間漂うことが考えられる。

花粉の他にも室内を漂う粒子は多く存在する。ハウスダストやカビ、揮発性有機化合物など、人体に悪影響を及ぼす粒子は様々である。昨今世界中で流行したコロナウイルスも、飛沫感染の観点から重要視されていた。ウイルスの粒径と浮遊時間の関連を示す Fig. 1.4^[5]よ

り、粒径が小さいほど粒子の浮遊時間は長くなる。これはウイルス以外の粒子状物質においても明確である。

これらのように、空気中に長く滞在し続ける粒子は微小粒子状物質 (PM2.5) と呼ばれる。

PM2.5 は大気汚染物質の 1 つで、直径 $2.5\mu\text{m}$ ($1\mu\text{m}=0.001\text{mm}$) 以下の小さな粒子であり、様々な成分からなっており、影響も異なると考えられる。従来より、人の健康を保護する上で維持されることが望ましい基準である環境基準を定め対策を進めてきた浮遊粒子状物質 (SPM: $10\mu\text{m}$ 以下の粒子) に比べて肺の奥深くまで入りやすく、呼吸器系への影響に加え、循環器系への影響も懸念されている。

室内の PM2.5 の対策としては、通常の室内汚染物質と同様に、室内に入れない、室内で発生させない、発生したら速やかに除去することが基本とされている。発生した微粒子の除去には、換気の他にエアフィルタによる除去が期待できる。空調機を有するような建築物においては、外気処理及び環気空気の浮遊粉塵浄化のために、エアフィルタが装着されている。また、フィルタの捕集効率は、粒子の粒径によって異なる。PM2.5 への対応としては、HEPA フィルタを装着した空気清浄機を用いることが多い。

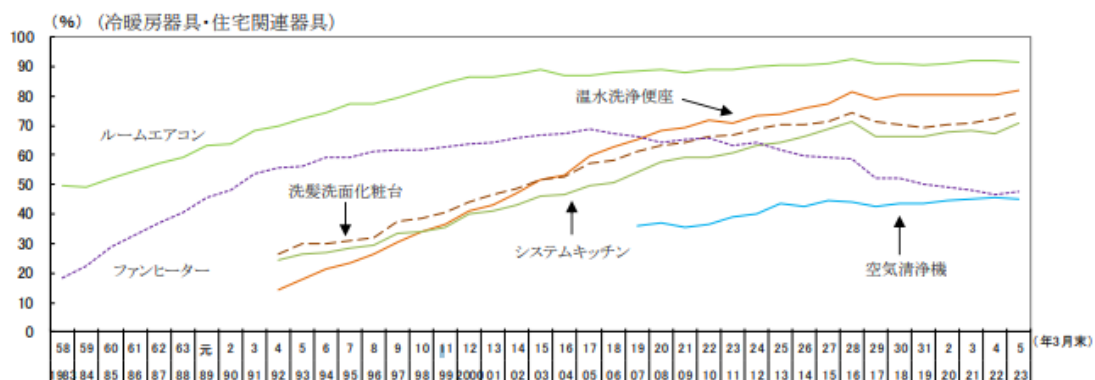


Fig. 1.3. 主要耐久消費財の普及率の推移 (二人以上の世帯) [2].

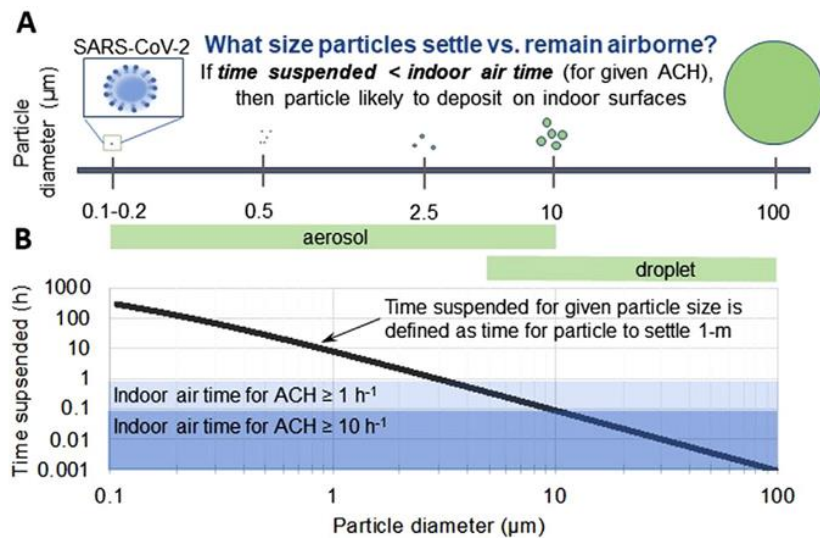


Fig. 1.4. 粒径ごとの粒子の落下時間. [5].

第3節 先行研究

本研究室の橋本らは室内の気流解析と粒子挙動を行うプログラムやそれらの結果を可視化するために数値流体力学および浮遊粒子状物質挙動特性解析ソフト CAMPAS (Computation fluid dynamics and Aerosol Motion Property Analyses Suite) [6][7] (以降 CAMPAS) を開発した。

また、福田らは、CAMPAS を使用し、家具を設置した室内で空気清浄機の補助装置として、アシストデバイスとしてサーキュレーターを設置し室内における気流と粒子挙動の解析を行った[8]。

Figure 1.5 にアシストデバイスの効果についての比較を示す。部屋の大きさ、アシストデバイスの設置位置、アシストデバイスの流量を変更して、それぞれのシミュレーションでの空気清浄機の花粉除去率を求めた。アシストデバイスを設置することで、空気清浄機単体で運転した時よりも、花粉を除去し始めるまでに要する時間を大幅に短縮することができたことが示される。

しかし、CAMPAS のシミュレーションでは、床に落下した花粉の再浮遊などは考えられていない。また、CAMPAS で設定されている空気清浄機は同じ型のもので統一されている。空気清浄機の構造による粒子除去効率の違いや、異なる流量で使用した時の電力量の違いなどは明らかにされていない。さらに、花粉は粒径 $30 \mu\text{m}$ の重力を受ける大きさの粒子と設定しており、微小粒子についてサーキュレーターなどのアシストデバイスの有用性はわかっていない。

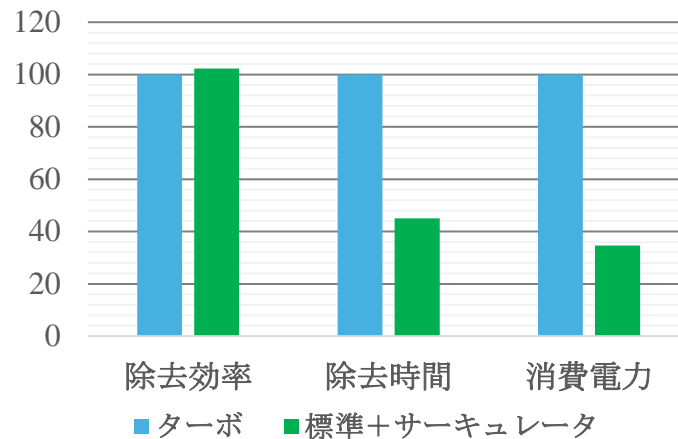


Fig. 1.5 空気清浄機単体運転（ターボモード）と空気清浄機（標準モード）とアシストデバイスを使用した時の効果の比較^[8]。

第4節 研究目的

本研究は、粒子の効率的除去について測定機器を用い実験的に研究を行った。

まず、シミュレーション上で省略されている床に堆積した粒子の再浮遊についての実験を行った。粒子の再浮遊が起っていた場合、室内空気中に花粉が飛散し室内であっても花粉に曝されることになる。その時の空気清浄機の有用性についても確かめた。実験から得られた結果をもとに花粉除去に関する提案をすることを目的とした。

次に、異なる空気清浄機を用いて、電力量による構造評価を行った。それぞれの空気清浄機を流量と除去時間の観点から電力量を求めた。その結果から、どのような空気清浄機の構造が粒子除去に適しているかを示すことを目的とした。

さらに、より効率的な粒子除去を提案するために、第3節で述べたサーキュレーターを空気清浄機と同時使用した時の比較について微小粒子についても評価を行った。

第2章 データの処理方法

第1節 減衰定数

本研究のデータの比較方法を説明する。結果の一例について Fig. 2.1 に示す。縦軸は減衰開始直後の粒子数を C_0 としたとき、1 分間ごとの粒子数 C について正規化したものである。横軸は時間軸となっている。この減衰曲線について指数近似を行った。その時(2-1)式が得られる。

$$y = Ae^{-\alpha x} \quad (2-1)$$

(2-1)式の α の値を減衰定数と定義した。減衰定数が大きいほど粒子の減衰も速いことを示す。また、Fig. 2.2 内の R^2 は決定係数と呼ばれ、実際のデータと近似曲線の相関を示す。決定係数が高いほど近似曲線の精度は高くなる。

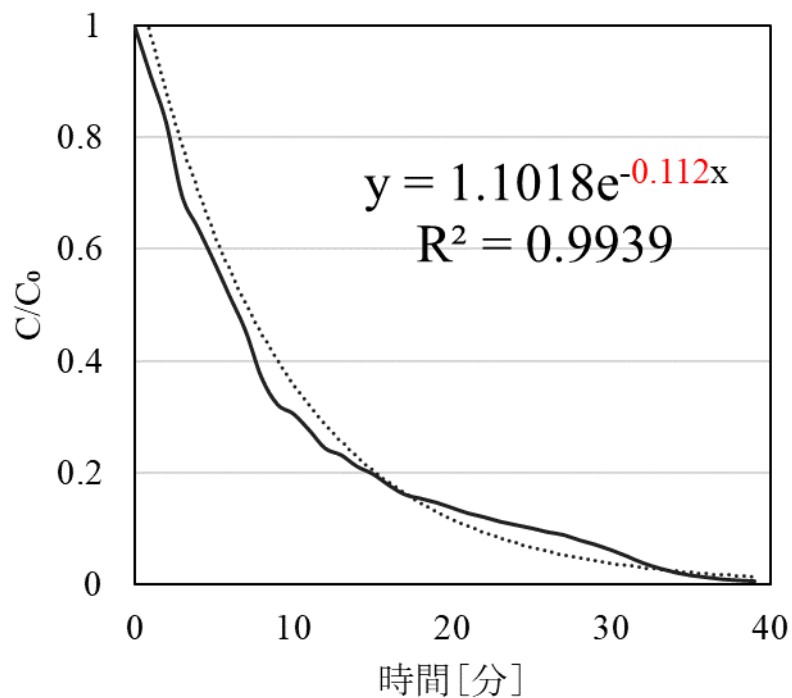


Fig. 2.2. 実験結果の一例.

第2節 CADR

一般的な空気清浄機の除去性能評価には、清浄な空気をどれだけ供給できているかを判断する CADR (clean air delivery rate) が用いられる^[9]。CADR は実験室の容積と、空気清浄機稼働中の粒子除去率と自然減衰率の差の積として表される。実験室容積： V ，空気清浄機による粒子の減衰速度： k_e ，粒子の自然減衰速度： k_n として CADR を算出する式を(2-2)式に示す。

$$CADR = V * (k_e - k_n) \quad (2-2)$$

粒子の減衰速度については前節で説明した減衰定数から求められる。減衰定数は時間の逆数で表される。よって、空気清浄機使用時の減衰定数： α_e ，粒子の自然減衰時の減衰定数： α_n とすると、実験から得られる CADR は(2-3)式で表される。

$$CADR = V * \left(\frac{1}{\alpha_e} - \frac{1}{\alpha_n} \right) \quad (2-3)$$

本研究で行った実験は全て同じ実験室で行い、試験粒子も統一したため、可変する値は空気清浄機による粒子の減衰速度のみである。したがって、減衰定数のみでの比較でも十分であると考えられる。よって本研究のデータは減衰定数をもとに空気清浄機の除去率を評価した。

第3章 実験環境に関する基礎実験

第1節 実験背景

実験を行うにあたり、実験環境を整備した。本研究で行う実験はすべて群馬大学内の電気電子棟3階311号室で行われているものであり、クリーンルームなどの整った環境では行われていない。室内にはエアコンや換気口など外部と繋がっているダクトも多数存在する。この実験では室内の微粒子濃度が外気の影響を受けるかを調べるために行った。

第2節 使用機器

粒子の測定にパーティクルプラス社のハンドヘルドパーティクルカウンター8506-30, 8306を用いた。それぞれの仕様を Table 3.1, Table 3.2, 写真を Fig. 3.1 に示す。

8506-30 について、チャンネルは、0.5 μm ~30 μm まで6段階に設定でき、最小粒径は0.5 μm で固定されている(8306は0.3 μm ~10 μm までで以降の設定は8506-30と同様である)。データは粒子の生のカウント数、立方メートルあたりのカウント値、立方フィートあたりのカウント値、立方メートルあたりの μg (=PM 値)で表示できる。また、チャンネル粒子間の測定値、累計値のデータを切り替えることもできる。

例えばチャンネルを0.5, 2.5, 5.0, 10, 20, 30 μm に設定した時の表示例を示す。

粒子のカウント数で、粒子間のデータを見る時は、0.5 μm のチャンネルは0.5~2.5, 5.0 μm のチャンネルは5.0~10 μm , 30 μm のチャンネルは30 μm 以上でカウントされた粒子の個数を記録している。

PM 値でデータを算出するときは、設定したチャンネル以下の粒子の累計の粒子で算出する。例えばチャンネルを0.5, 2.5, 5.0, 10, 20, 30 μm に設定した時、0.5~2.5 μm の粒子でPM2.5, 0.5~5.0 μm の粒子でPM5.0となるように表示される。

また、付属のオプションアクセサリーの温湿度センサプローブによって温度、湿度も同時に計測可能である。

Table 3.1. パーティクルカウンター8506-30の仕様.

測定粒径	0.5 μm ~30 μm 以上
チャンネル数	6
1分当たりの吸引流量	2.83[L/min]
光源	半導体レーザー
動作温度	5°C~40°C
動作湿度	20%~95%

Table 3.2 パーティクルカウンター8306 の仕様.

測定粒径	0.3 μm ~10 μm 以上
チャンネル数	6
1 分当たりの吸引流量	2.83[L/min]
光源	半導体レーザー
動作温度	5°C~40°C
動作湿度	20%~95%



Fig. 3.1. パーティクルカウンター本体図.

今回はこのパーティクルカウンターによって粒子の粒径ごとの個数を測定し、データをまとめた。この実験以降のデータについては 8306 を使用した時のデータを使っている。

第 3 節 実験方法

Table 3.3 に実験条件, Fig. 3.2 に実験室の概要図, Fig. 3.3 に実験室の写真を示す。

Table 3.3. 実験室の基礎実験における実験条件.

実験室容量	3.9 m×6.6 m×2.7 m (約 70 m ³)
8306 のチャンネル	0.3, 0.5, 1.0, 2.5, 5.0, 10
8506-30 のチャンネル	0.5, 1.0, 2.5, 5.0, 8.0, 10
サンプリング時間	5 分間
合計計測時間	18 時間

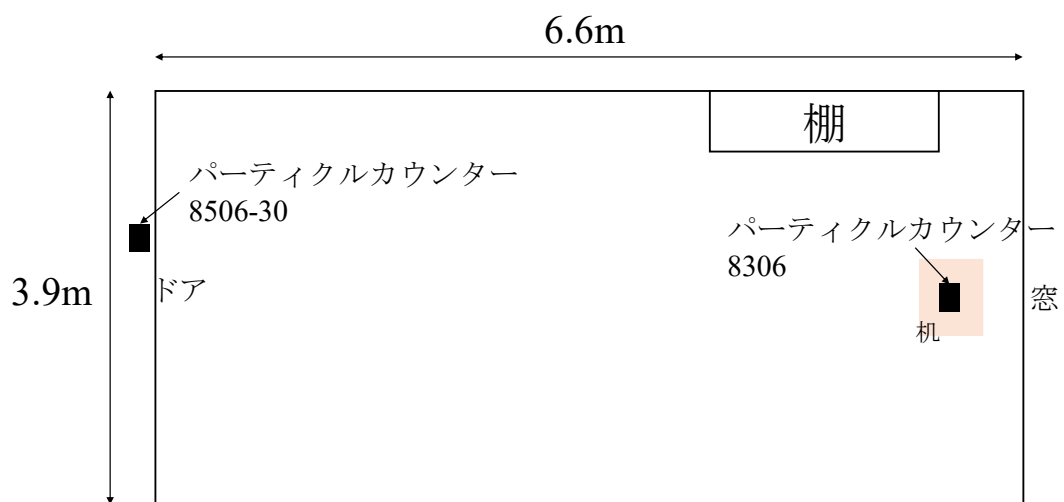


Fig. 3.2. 実験室概要図.

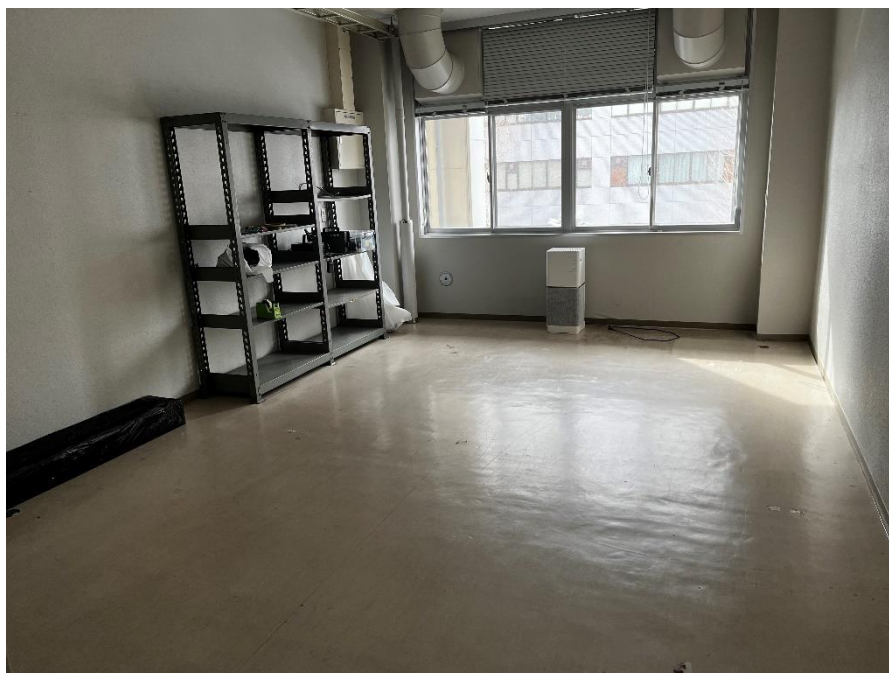




Fig. 3.3. 実験室写真.

実験室は $3.9\text{ m} \times 6.6\text{ m} \times 2.7\text{ m}$ の約 70 m^3 である。窓や廊下につながるドアは閉めている。室内に 8306, 室外に 8506-30 をそれぞれ設置した。実験準備後パーティクルカウンターの ON, OFF 以外で実験室には誰も入っていない。上記の条件で天井やドアの換気口に目張りをしていない時とした時の粒子数の変化を粒径ごとに調べた。目張りをした時の天井の換気口や通気口を Fig. 3.4. に示す。換気口はラップ素材のもので覆い、養生テープとホッチキスでとめた。



Fig. 3.4. 目張り後の実験室の天井写真.

第4節 実験結果

この実験で使用した2台のパーティクルカウンターはチャンネルの設定可能範囲が異なる。そのため共通の範囲である $0.5\sim 1.0\ \mu\text{m}$, $1.0\sim 2.5\ \mu\text{m}$, $2.5\sim 5.0\ \mu\text{m}$, $5.0\sim 10\ \mu\text{m}$ のデータについてまとめた。実験結果のグラフ群を Fig. 3.5. に示す。

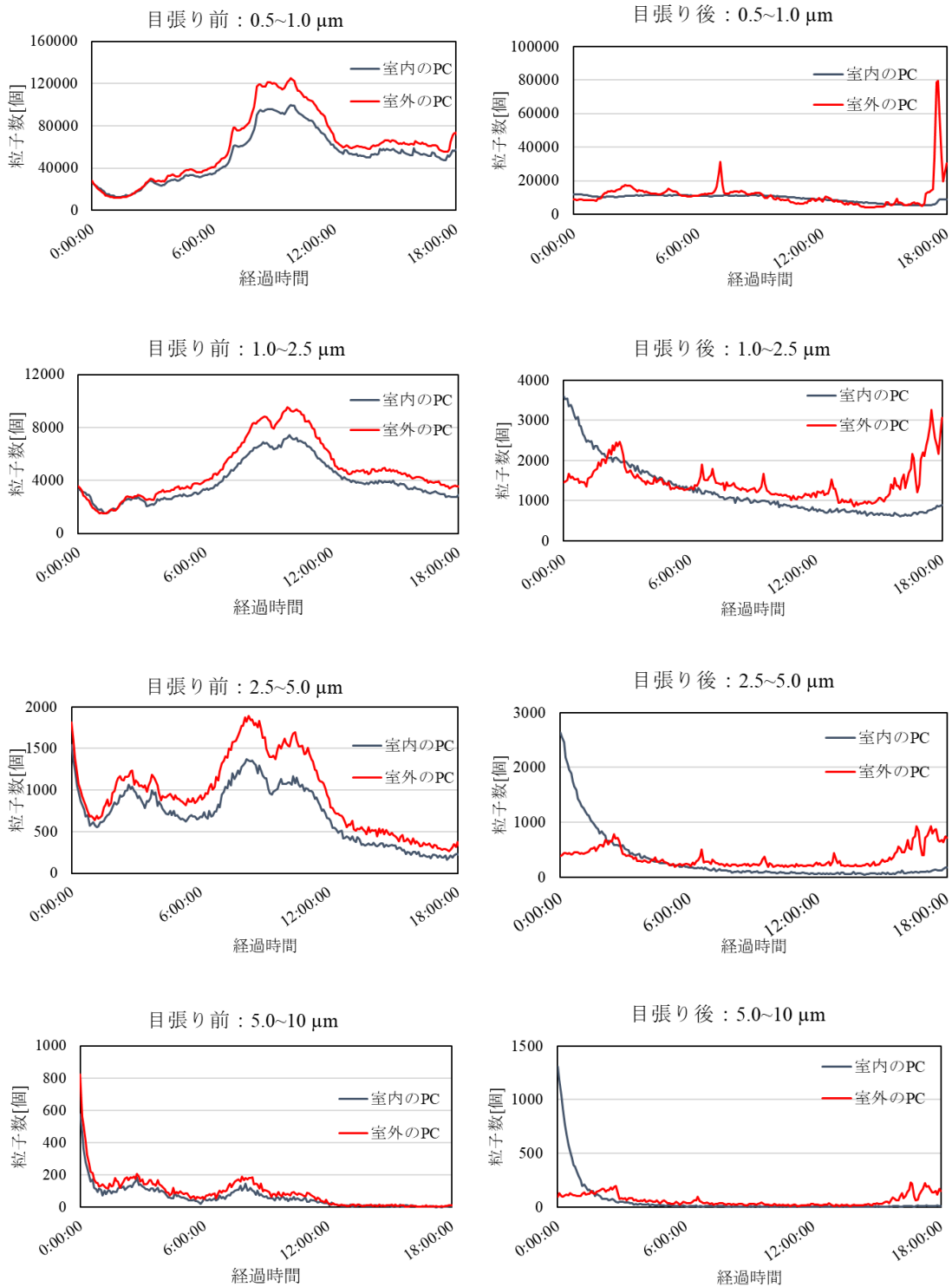


Fig. 3.5. 実験室の粒子数変化 (左：目張り前，右：目張り後).

目張り前の結果より，室外粒子の増加に伴い室内粒子も増加していることがわかる。特に $2.5 \mu\text{m}$ 未満の粒子の時顕著にみられた。一方，目張り後は室外粒子が増加しても室内粒子

は安定していることがわかる。1.0 μm 以上の粒子の時、計測開始初期の粒子数が多いのは実験準備などで人が動くなどしたためだと考えられる。その後は粒子の自然減衰がみられた。

以上の結果より、目張り前の室内では外部粒子の影響を受けやすく、粒子の測定に支障をきたすことが明らかであり正確な減衰を測定できないと考えられる。一方、目張りをした室内では外部粒子の影響を受けにくく、安定して粒子計測が行えた。この状態の場合、室内粒子が安定しているため粒子の除去評価もより正確に行えると考えられる。

本研究で行われる実験については粒子の減衰をより正確に測定するため、実験室に目張りをした状態で実験をしていくものとする。

第3章 生活空間を想定した実験

第1節 実験背景

室内には様々な浮遊粒子が存在することは1章で述べた。大きな粒子は時間とともに落下していくが、それらは人の生活とともに再浮遊すると考えられる。この実験では生活行動を歩行することによって再現し、その時の粒子数の変化について粒径ごとの特性を観察することを目的とする。また、粒子の拡散を防ぐ方法を提案することを目的とした。

第2節 実験方法

実験条件を Table 4.1, 実験室内の配置を Fig. 4.1 に示す。

Table 4.1. 歩行実験における実験条件.

実験室容量	3.9 m×6.6 m×2.7 m (約 70 m ³)
パーティクルカウンターのチャンネル	0.3, 0.5, 1.0, 2.5, 5.0, 10
サンプリング時間	1 分間
合計計測時間	40 分
空気清浄機	象印 (PU-AA50)
空気清浄機の流量	5.2 m ³ /min

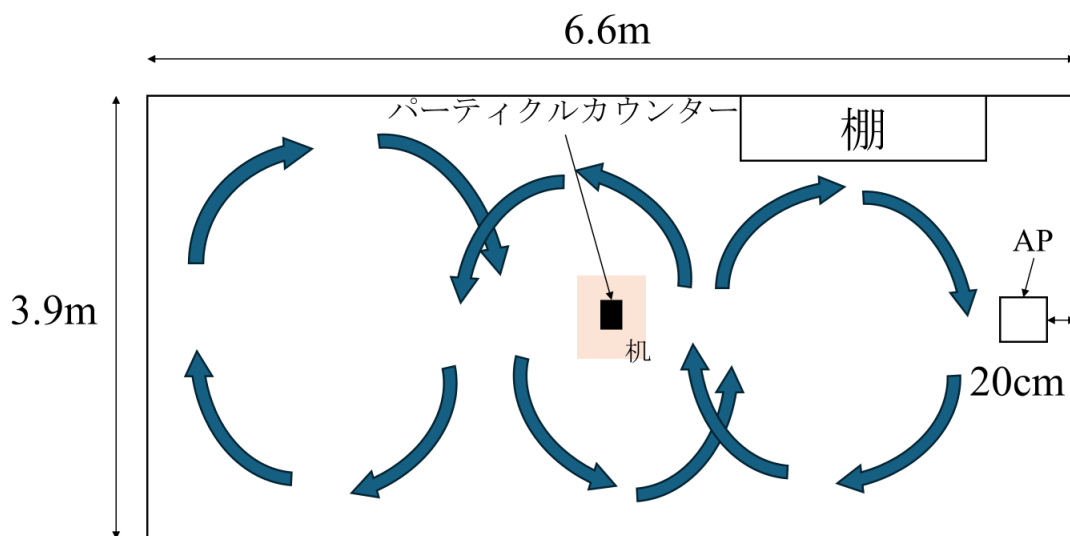


Fig. 4.1. 実験室内配置図.

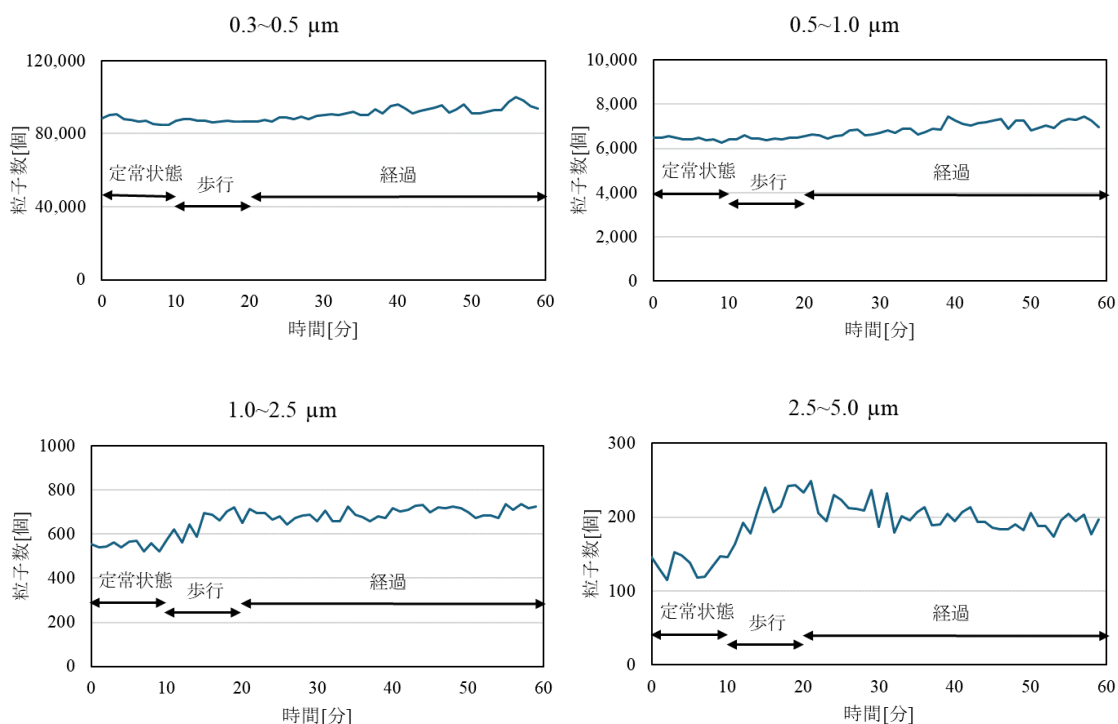
パーティクルカウンターは部屋の中央の机の上に設置した。まず、実験準備後室内の気流を安定させ、定常状態を測定するため10分間何もしない状態で粒子測定を行った。その後10分間 Fig. 4.1 で示した青い矢印のように部屋全体をくまなく歩行した。歩行の際、衣類を統一するためレインコートを着用した。歩行後、静かに部屋を退出し40分間経過を測定した。

次に、空気清浄機を作動させた時の粒子数の変化を調べた。まず空気清浄機を30分稼働させ、気流を安定させた。その後上記の実験同様10分間室内をくまなく歩行した。この時空気清浄機は常時稼働させたまま歩行を行った。歩行後は空気清浄機をそのまま稼働させ続け、静かに退出し40分間経過を測定した。

また、粒子の発生を抑制する方法として床掃除を試した。実験室の床をクイックルワイパーで掃除をした。掃除中は飛散した粒子が再び床に堆積するのを防ぐため、空気清浄機を稼働させた状態にした。掃除後も空気清浄機を稼働させたままにして、室内をきれいな状態に保った。室内空気中の気流を安定させるため、掃除後1時間ほど部屋を退出した。その後、掃除前と同様の方法で実験をして、掃除前後のデータで掃除の効果を検証した。

第3節 実験結果

空気清浄機を使わなかった時の実験のデータグラフ群を Fig. 4.2 に示す。



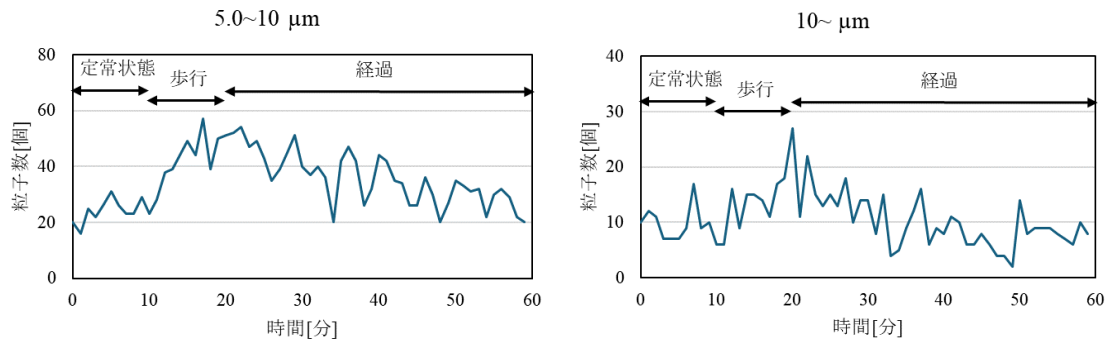
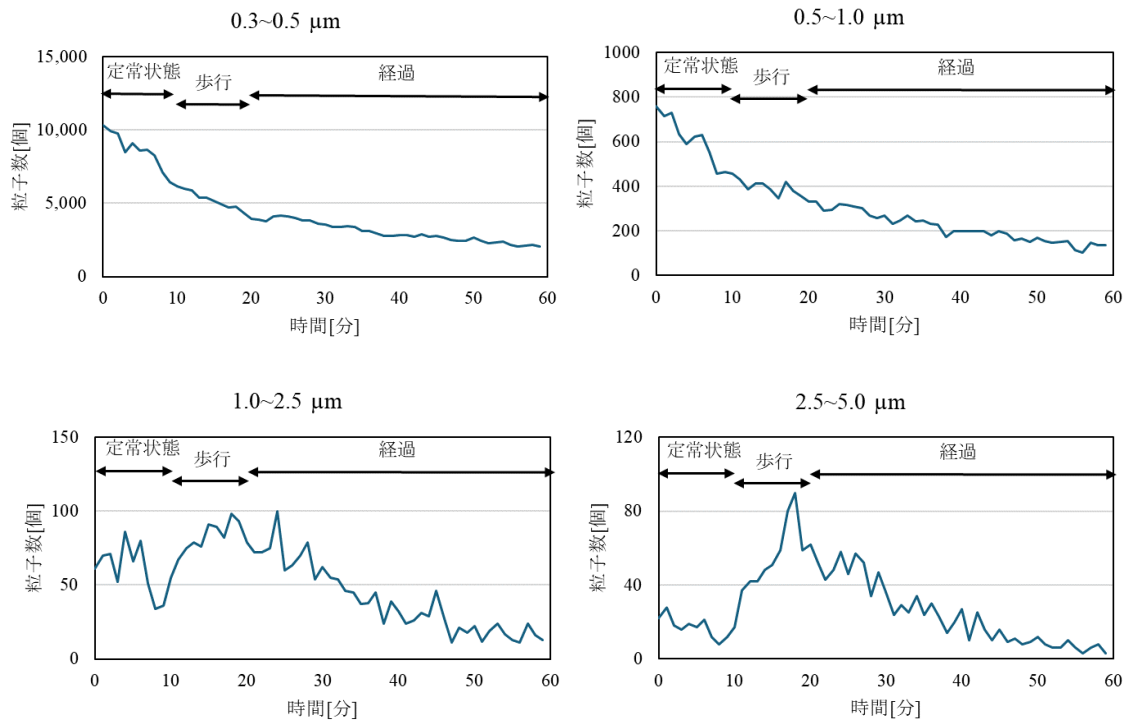


Fig. 4.2. 自然落下の時の結果.

縦軸が粒子数、横軸が経過時間を示している。グラフ内の矢印は実験動作を示したものである。パーティクルカウンターで測定された粒径ごとに結果をまとめた。

0.3~1.0 μm までの粒子は歩行前後にかかわらず、ほぼ一定の値をとった。1.0 μm 以上の粒子は歩行により粒子数の増加がみられた。しかし、1.0~2.5 μm の粒子については歩行によって粒子数が増加したが、その後減衰はみられなかった。このことから、2.5 μm 未満の粒子は重力の影響を受けにくく、長時間空気中に浮遊し続けることが考えられる。2.5 μm 以上の粒子では歩行により粒子数が増加した後、緩やかな減衰がみられた。よって、2.5 μm 以上の粒子は重力の影響を受け時間が経つと床に堆積して行くことがわかる。

次に、空気清浄機を用いた時の実験結果を Fig. 4.3 に示す。



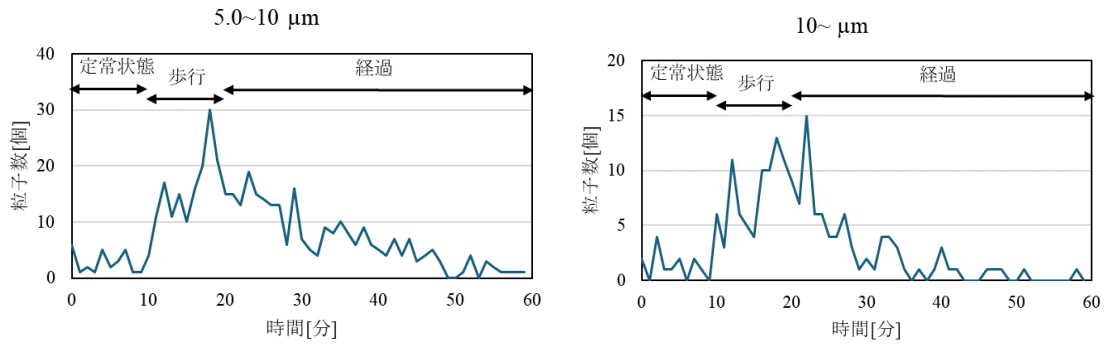
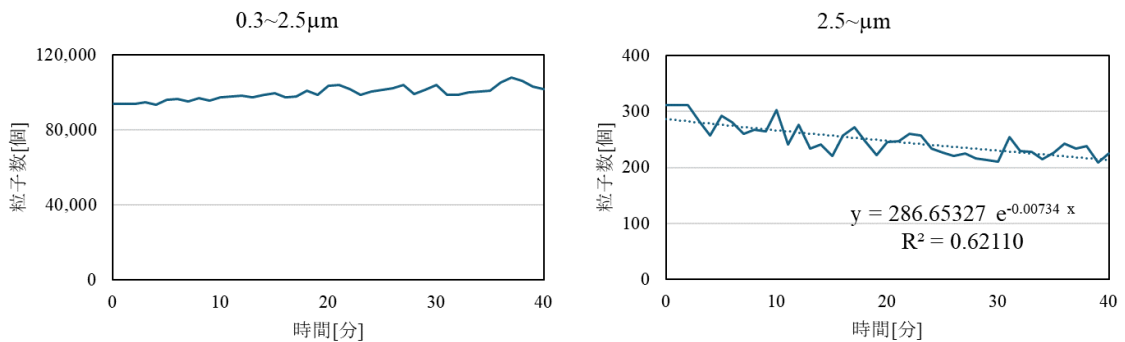


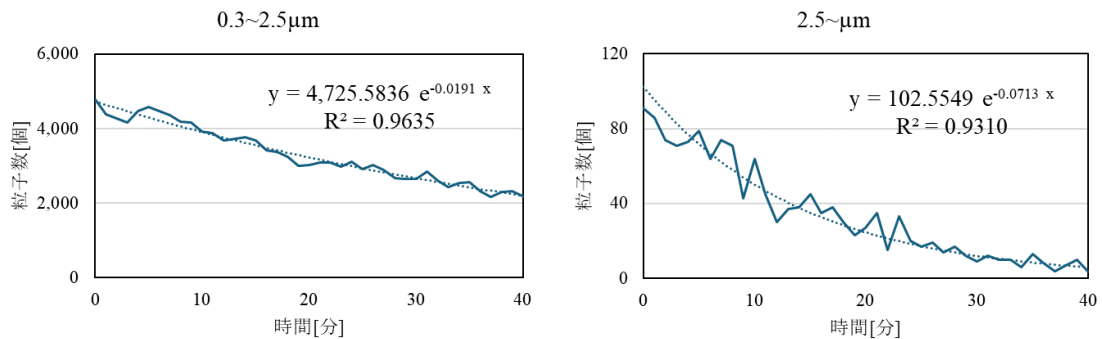
Fig. 4.3. 空気清浄機使用時の結果.

1.0 μm 未満の粒子は歩行をしても粒子数が増加することなく減少し続けた。1.0 μm 以上の粒子では空気清浄機を稼働させている状態でも歩行時に粒子数の増加がみられた。歩行後はどの粒径でも減衰がみられたため、空気清浄機の効果が明確にわかる結果となった。

また、自然落下の結果から、重力の影響を受ける粒子は 2.5 μm であると判断し、2.5 μm の前後で粒径をまとめたグラフを作成した。その時減衰定数も算出し、減衰速度を比較した。そのグラフを Fig. 4.4 に示す。



(a) 自然落下時の減衰.



(b) 空気清浄機を使用した時の減衰.

Fig. 4.4. 歩行直後の減衰.

歩行直後の経過を見ると、自然落下の時の $0.3\sim 2.5\ \mu\text{m}$ では、減衰が起きておらず、増加傾向にあることから減衰定数は算出できなかった。 $2.5\ \mu\text{m}$ 以上の粒子で比較をすると空気清浄機使用時の減衰定数は自然落下の約 10 倍の値を示した。よって、空気清浄機は微小粒子から粗大粒子まで粒子除去に適していることがわかった。

しかし、Fig. 4.3 の空気清浄機使用時の結果より、粗大粒子に関しては空気清浄機を使用しても歩行時に粒子の増加がみられた。このことから、空気清浄機を使用しても人の生活によって粒子は空气中に浮遊することがわかった。

次に、床掃除後の実験結果について、Fig. 4.5 に自然落下、Fig. 4.6 に空気清浄機を使用時の結果を示す。

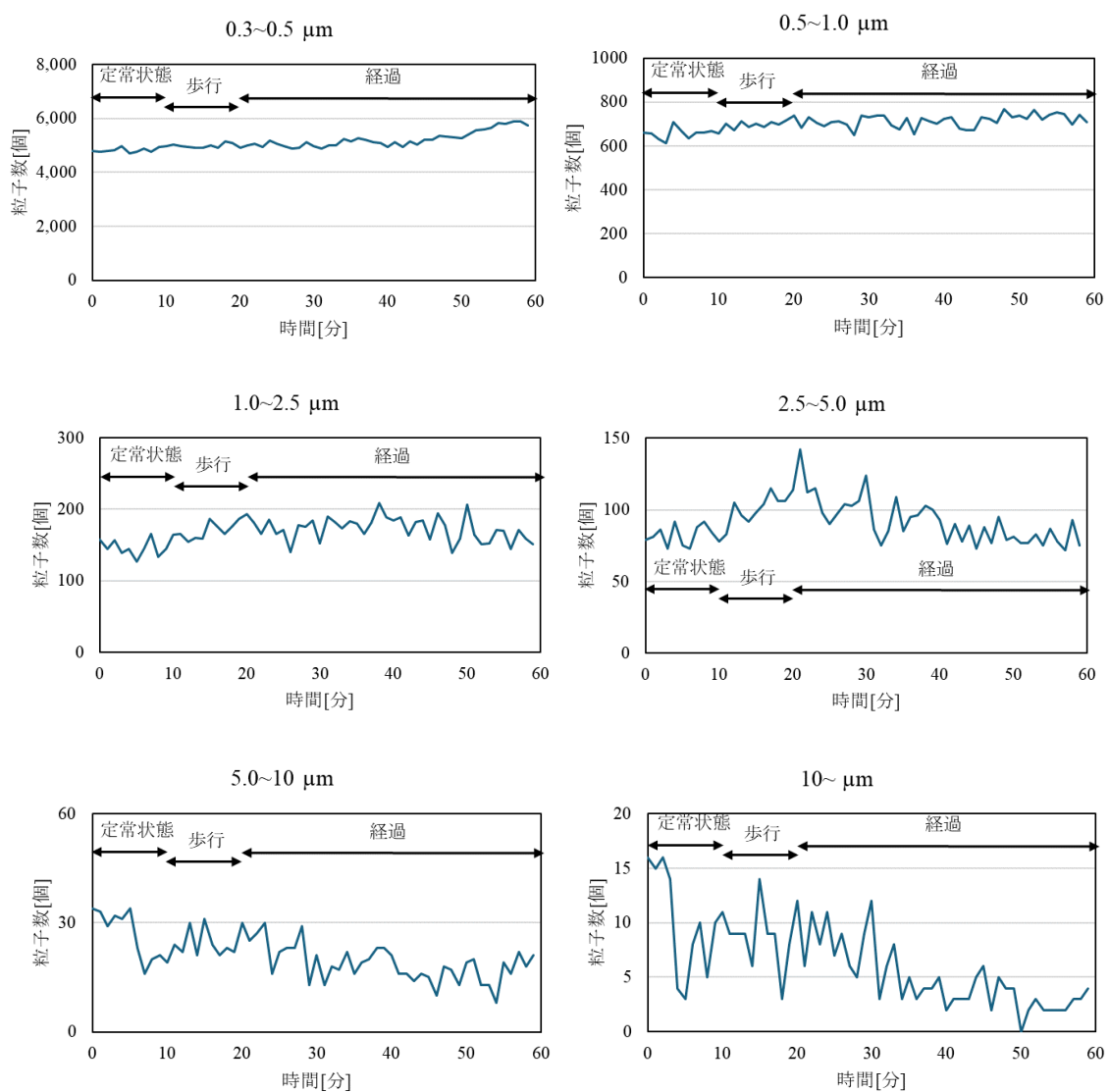


Fig. 4.5. 床掃除後の自然落下の結果.

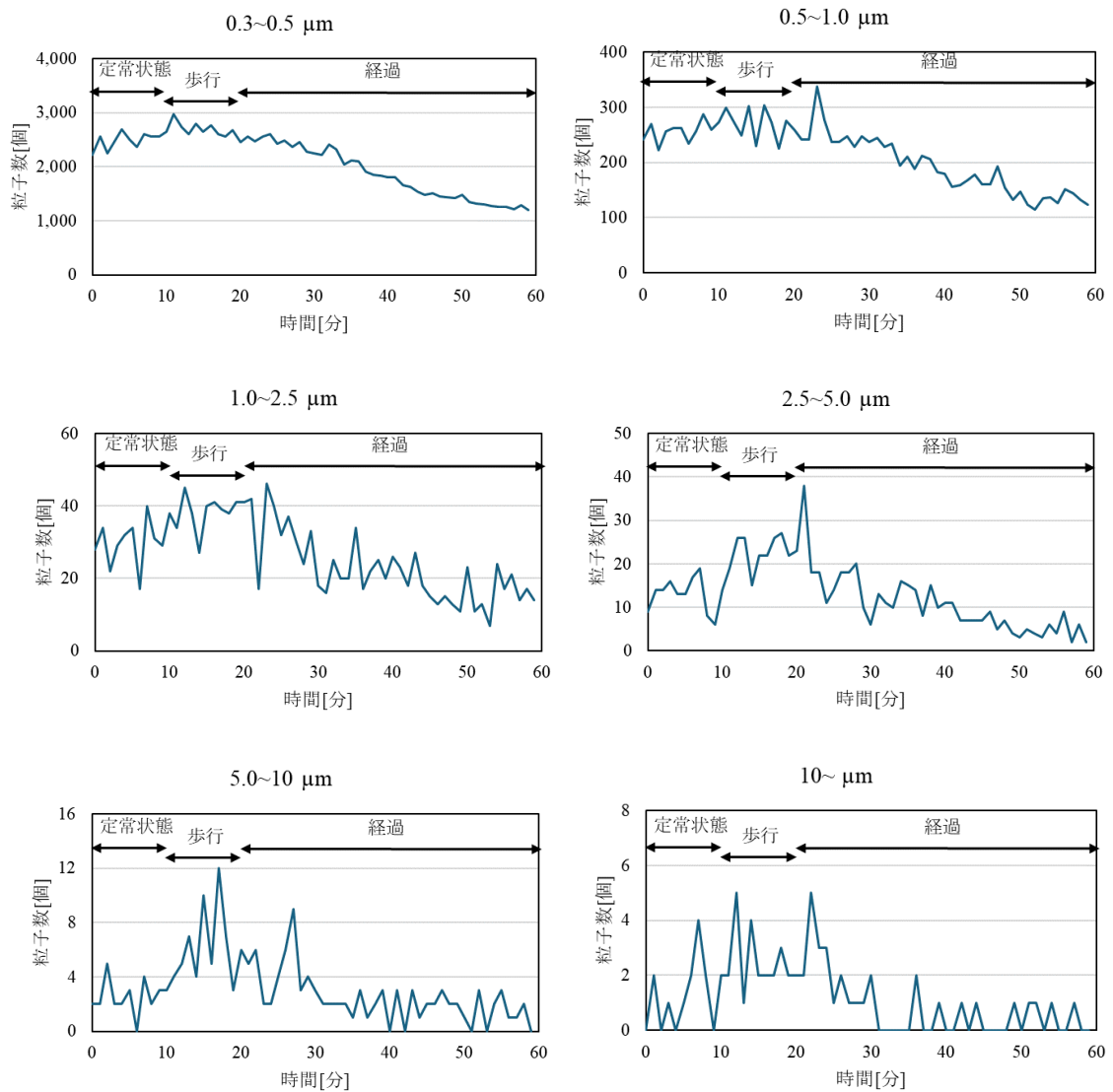
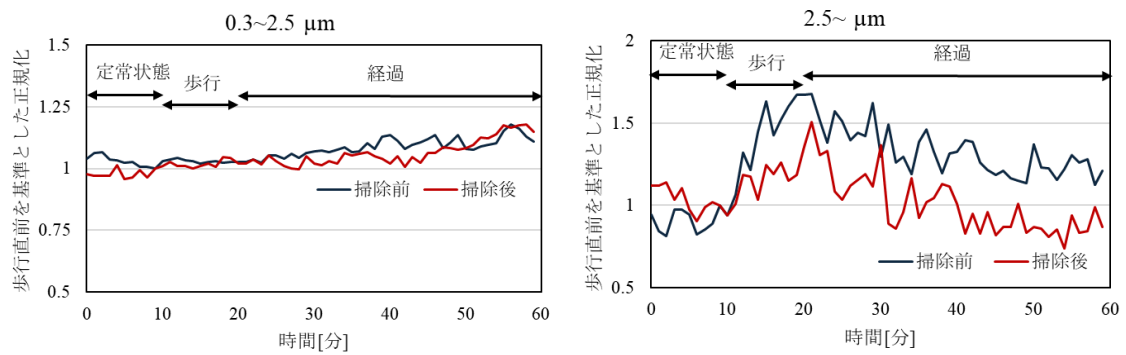


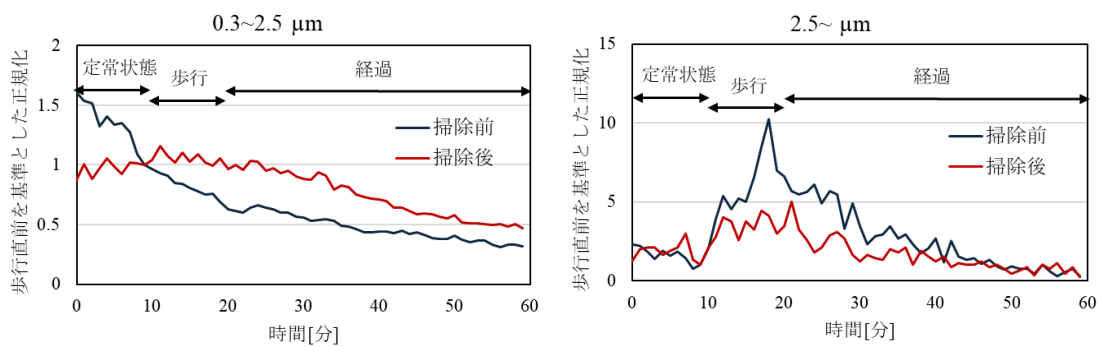
Fig. 4.6. 床掃除後の空気清浄機使用時の結果.

自然落下時の結果では $1.0\ \mu\text{m}$ 以上と空気清浄機使用時の $2.5\ \mu\text{m}$ 以上の時の粒子において歩行時に粒子数の増加がみられた。床掃除をしても粒子の再浮遊を完全に防ぐことはできなかった。

掃除の前後で粒子の再浮遊を抑制できているかを比較した。それぞれのデータについて $2.5\ \mu\text{m}$ の前後でデータをまとめ、歩行直前を基準として正規化したものを Fig. 4.7 に示す。



(a) 自然落下の比較.



(b) 空気清浄機使用時の比較.

Fig. 4.7. 掃除前後の歩行実験比較.

自然減衰の比較より、 $0.3\sim 2.5\ \mu\text{m}$ の微小粒子は掃除の前後で大きな差はみられなかった。 $2.5\ \mu\text{m}$ 以上の粗大粒子では自然落下と空気清浄機使用時でともに掃除後の粒子の増加は掃除前に比べて小さくなっていることがわかる。

これらの結果から、 $1.0\ \mu\text{m}$ 未満の粒子は人の生活行動にかかわらず浮遊し続けるため、空気清浄機での除去が望ましい。 $1.0\sim 2.5\ \mu\text{m}$ の粒子は生活行動により空気中に浮遊するが、重力の影響を受けず浮遊し続けるため、これらも空気清浄機での除去が必要になる。 $2.5\ \mu\text{m}$ 以上の粒子については空気清浄機使用時でも粒子の浮遊が起きていた。床掃除をすることで粒子の浮遊を抑えることができた。花粉などの粗大粒子については床掃除をすることで床に堆積した粒子が空気中へ再浮遊するのを抑制できると考えられる。

第4章 試験粒子の選定

第1節 実験背景

微小粒子において実験を行う際、粒子の減衰を見るために室内粒子濃度を上げる必要がある。そこで、この実験では粒子の測定に適した粒子を検討することを目的とし、数種類の試験粒子について比較実験を行った。

第2節 実験方法

今回は大気塵、フォグ、線香の3種類の粒子について比較を行った。それぞれの試験粒子を室内に取り込む、または発生させ空気清浄機で除去した時の結果を見た。

大気塵は実験室の窓を開けることによって取り込んだ。サーキュレーターを用いて効率良く室内の空気を換気させた。フォグは Antari 製のフォグマシンによってフォグを発生させ、サーキュレーターによって部屋に拡散させた。線香は実験室の中央で焚きサーキュレーターで拡散させた。

これら実験は今まで集めたデータを比較したもので、条件が完全に一致するわけではない。しかし、粒子の特性を見るという観点では十分比較に適していると判断した。空気清浄機は全てダスキンの PSP5 を使用した時のものである。

第3節 実験結果

大気塵を使用した時の結果のグラフを Fig. 5.1 に示す。

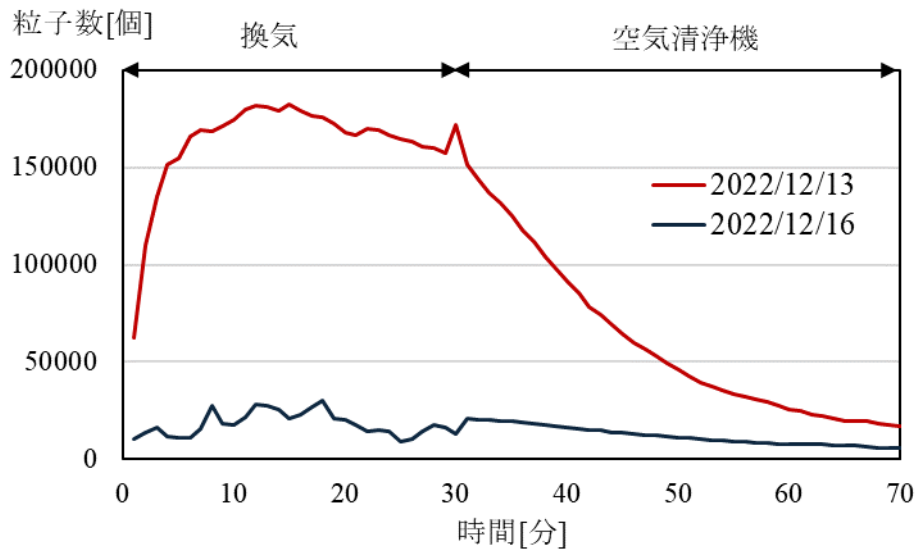


Fig. 5.1. 大気塵を使用した時の結果 (2022/12/13 と 2022/12/16 の 2 日間のデータ).

大気塵は実際の生活環境での粒子と同じであるため実験の信憑性を上げることができる。また、窓を開けるなどすれば容易に室内に取り込めることがメリットとしてあげられる。しかし、Fig. 5.1 のようにいつでも安定した粒子供給ができるわけでない。黄砂や花粉の時期などは多くの粒子の流入が期待できるが、日によってほとんど流入が見込めない日もある。粒子数が少ない日はデータを収集しても減衰がうまく表示されず、別日のデータと比較することが難しい。

次に、フォグを使用した時の結果のグラフを Fig. 5.2 に示す。

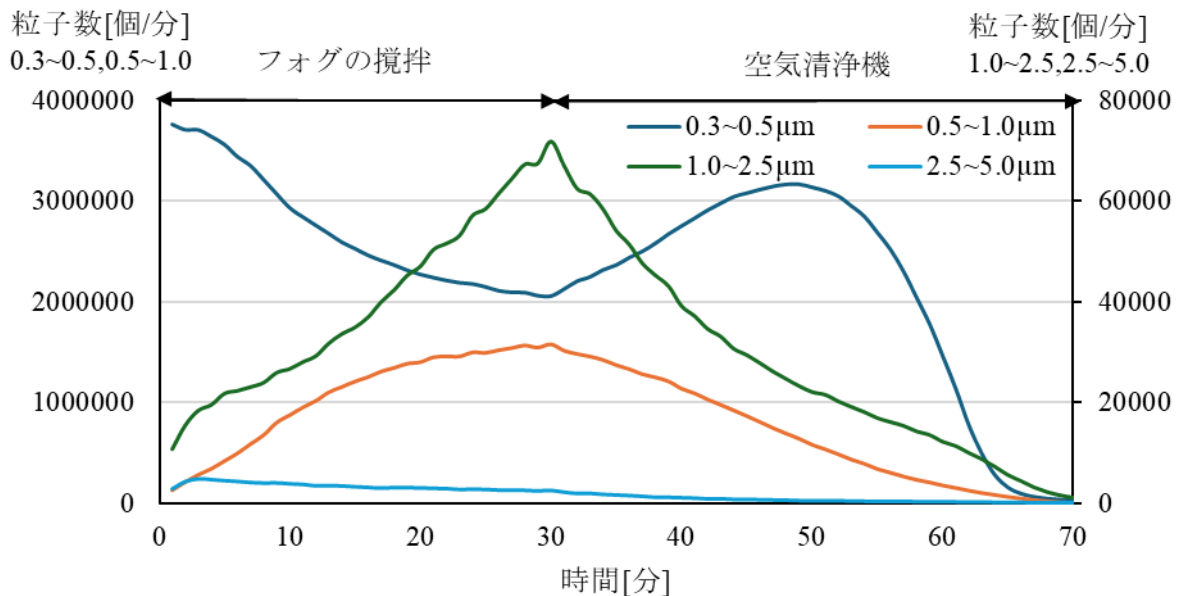


Fig. 5.2. フォグを使用した時の結果.

フオグはフオグマシンから噴出する量を調整することで毎回同様の粒子が室内に攪拌できる。また、大気塵と異なり環境に左右されないというメリットもある。しかし、Fig. 5.2を見ると 0.3~0.5 μm の範囲で空気清浄機使用時でも粒子が減衰していなかった。これはフオグが空気中で凝集して大きくなったり、大きな粒子が分裂したりするなど、粉塵とは異なる特性を持つことが原因だと考えられる。また、フオグは水分を含んだ粒子であることから実際の環境にある粒子と形態が異なり、パーティクルカウンターは粉塵を測定するためのものであるため故障の原因になる恐れもある。

最後に、線香を使用した時の結果のグラフを Fig. 5.3 に示す。

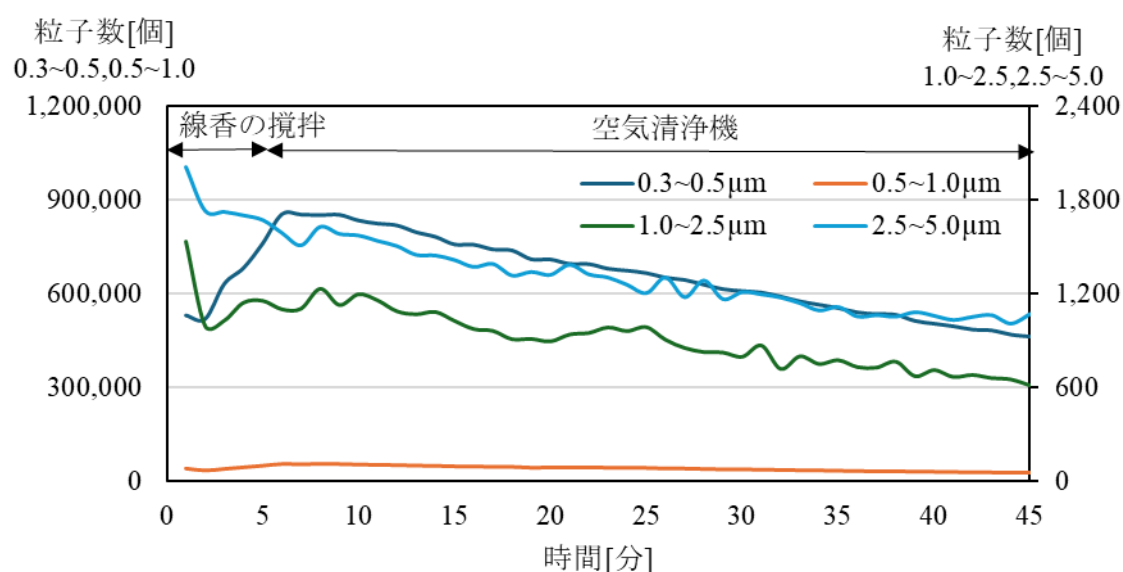


Fig. 5.3. 線香を使用した時の結果.

線香は水分を持たない塵状の煙を出すため実際の環境に近い粒子である。また、線香を焚く時間を調節することで安定した粒子供給ができる。その日の環境にも左右されないこともメリットである。また、比較的安価に入手することも可能である。

以上より、3種類の試験粒子を比較したところ線香を用いるのが粒子の減衰を見るうえで最も良いと考えられる。以降の実験は試験粒子として線香を使用している。

第5章 空気清浄機の電力量評価

第1節 実験背景

空気清浄機は微粒子除去に適している家電であり、現在は様々な構造の空気清浄機が開発されている。その中でどのような空気清浄機がより効率よく除去できるかはわかっていない。この実験では異なる空気清浄機を用いた時の電力量による構造評価を行った。

また、この実験では空気清浄機ごとの流量についても考慮した。流量が小さいほど空気清浄機の消費電力は少ないが、除去に時間がかかってしまう。また、流量が大きい時は除去にかかる時間は短い、消費電力が大きくなってしまふ。

実験結果からどのような構造の空気清浄機が微粒子除去に適しているか、流量はどの設定が電力量を抑えることができるのか提案することを目的とした。

第2節 実験方法

実験条件を Table 6.1 に、実験室の概要図を Fig. 6.1 に示す。また、今回比較した空気清浄機について図を Fig. 6.2 に、仕様書に記載されている流量を Table 6.2、仕様書に記載されている消費電力を Table 6.3、ワットメーターで測定した消費電力を Table 6.4 に示す。

空気清浄機の稼働時間は流量によって変える必要があるためその稼働時間を Table 6.5 にまとめた。

ダスキン社製の空気清浄機は前面吸気、側面・下方排気の構造である。象印製は下方全面吸気、上面排気の構造で、バルミューダは象印製のものと類似しており、下方吸気、上面排気の構造となっている。

Table 6.1. 電力量評価における実験条件.

実験室容量	3.9 m×6.6 m×2.7 m (約 70 m ³)
パーティクルカウンターのチャンネル	0.3, 0.5, 1.0, 2.5, 5.0, 10
サンプリング時間	1 分間
合計計測時間	流量による
試験粒子	線香
攪拌用サーキュレーター	IRIS OHYAMA PCF-SC15T (ターボ 上下首振り)

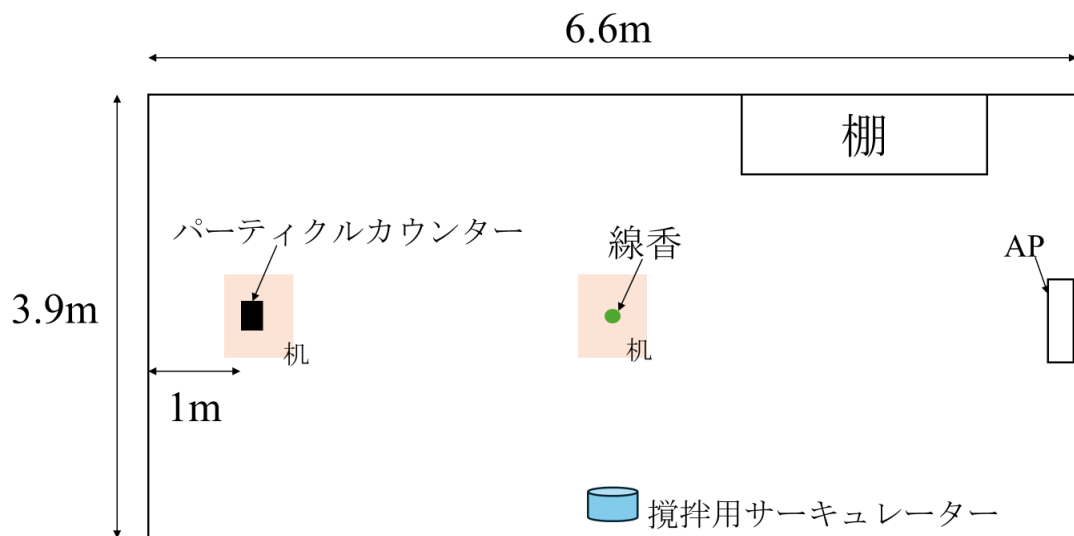


Fig. 6.1. 実験室の概要.

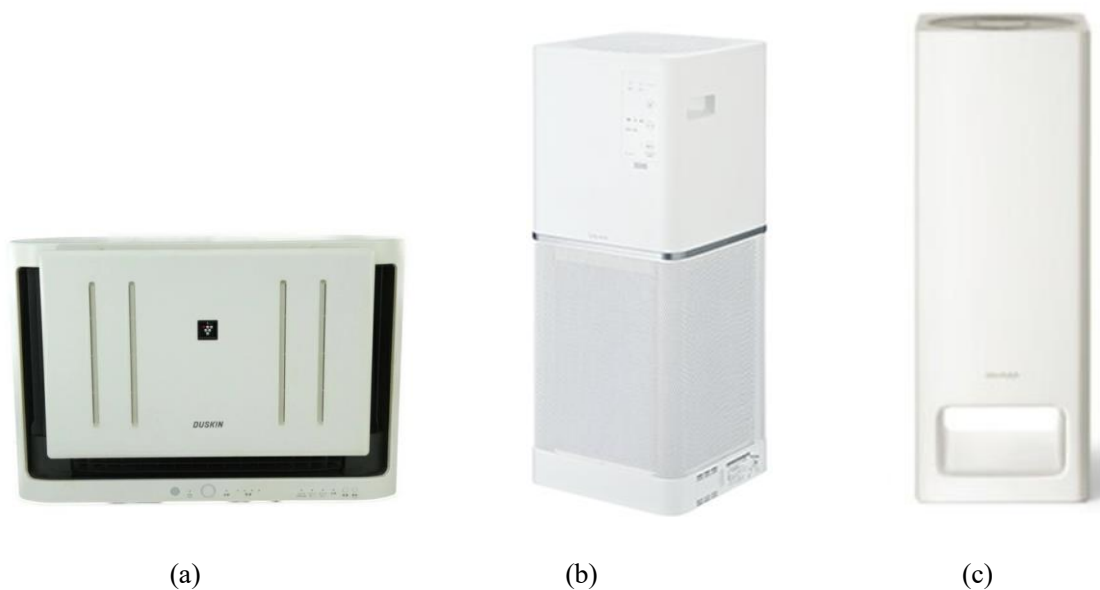


Fig. 6.2. 使用した空気清浄機.

(a) ダスキン(PSP5) , (b)象印(PU-AA50), (c)バルミューダ(A01A).

Table 6.2. 空気清浄機の流量[m³/min](仕様書).

	風量 1	風量 2	風量 3	風量 4
ダスキン	1.3	3.0	4.0	5.6
象印	2.0	3.4	5.2	-
バルミューダ	0.3	1.5	4.8	7.3

Table 6.3. 空気清浄機の消費電力[W](仕様書).

	風量 1	風量 2	風量 3	風量 4
ダスキン	6.6	20	34	69
象印	4	6	10	-
バルミューダ*	-	-	-	-

*バルミューダは風量ごとの消費電力の記載がなかった。

Table 6.4. 空気清浄機の消費電力[W](ワットメーターの計測).

	風量 1	風量 2	風量 3	風量 4
ダスキン	5.7	15.9	30.0	62.0
象印	3.6	5.5	8.6	-
バルミューダ	8.5	11.7	35.4	72.6

Table 6.5. 空気清浄機の稼働時間[min].

	風量 1	風量 2	風量 3	風量 4
ダスキン	120	90	60	60
象印	120	90	90	-
バルミューダ	120	120	90	60

まず、部屋の中央で5分間線香を焚き、サーキュレーターで攪拌した。線香を外に出しサーキュレーターを止めた後空気清浄機を稼働させた。空気清浄機の稼働時間は Table 6.5 に示した通りである。得られたデータから減衰定数を出し電力量を比較する。

データの処理方法について説明する。結果の一例を Fig. 6.3 に示す。測定時間に対し除去にかかる時間が十分であったため、すぐに定常状態となった。そのため指数近似をした際、決定係数が下がってしまった。そこで、減衰において空気清浄機の稼働開始から 80%減衰したところまでのデータを Fig. 6.4 に示す。このグラフの方が決定係数が向上し、空気清浄機の減衰定数の算出に適しているため、この時の減衰定数を用いてデータを比較した。

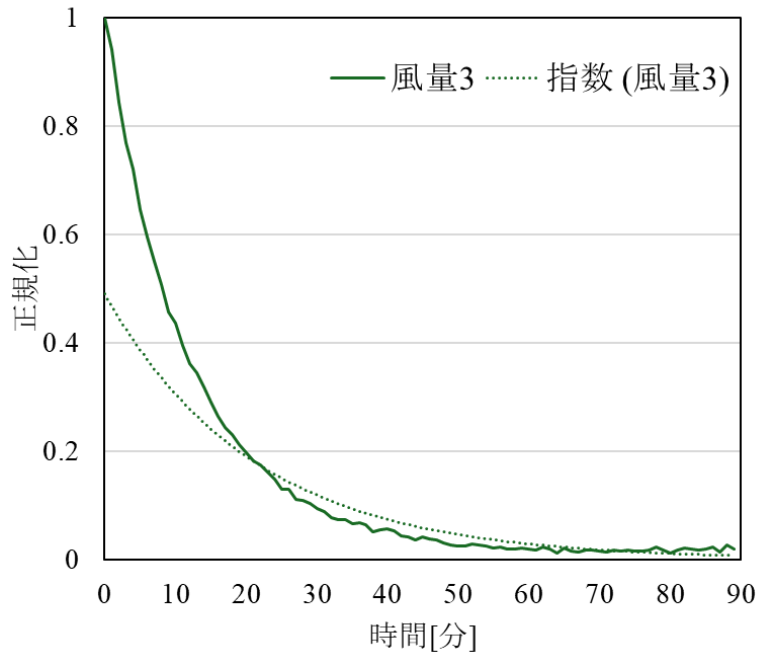


Fig. 6.3. 象印の風量3の結果.

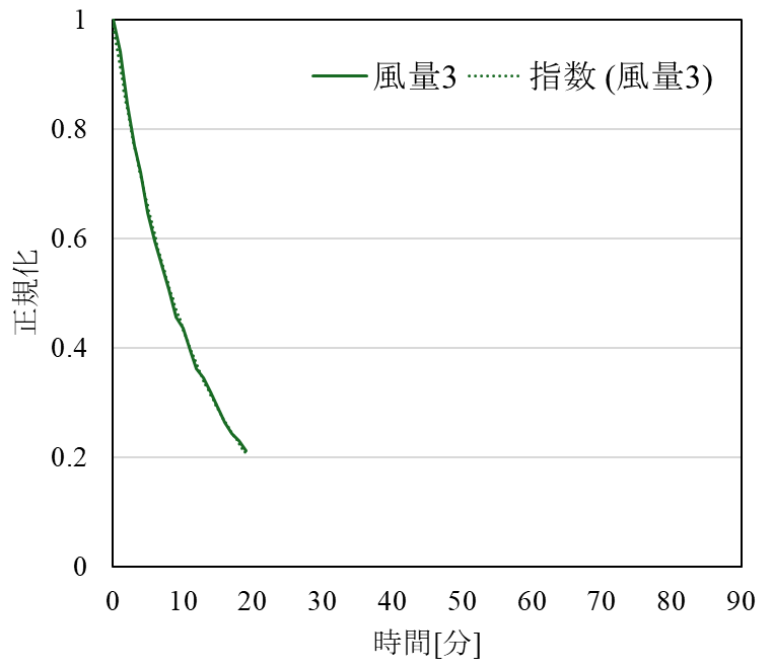


Fig. 6.4. 空気清浄機稼働から80%減衰したところまでの結果.

仕様書に記載されたデータをもとに算出される、電力量の理論値を求める式を(6-1)に示す。また、結果から得られる減衰定数とワットメーターに記載されたデータより算出される、

実際の電力量を求める式を(6-2)に示す。

$$\text{理論値 [Wh]} = \text{仕様書の消費電力値 [W]} * \text{換気 1 回あたりの時間 [h]} \quad (6-1)$$

$$\text{実際の電力量 [Wh]} = \text{ワットメーターの消費電力 [W]} * \frac{1}{\text{減衰定数} * 60} \text{ [h]} \quad (6-2)$$

以上の式によって電力量を計算し、データを比較した。

また、今回比較したデータは第4章で長時間浮遊し続けるとされる 2.5 μm 未満の粒子に着目して整理した。

第3節 実験結果

まず、ダスキンの実験結果から得られた電力量を Fig. 6.5 に示す。

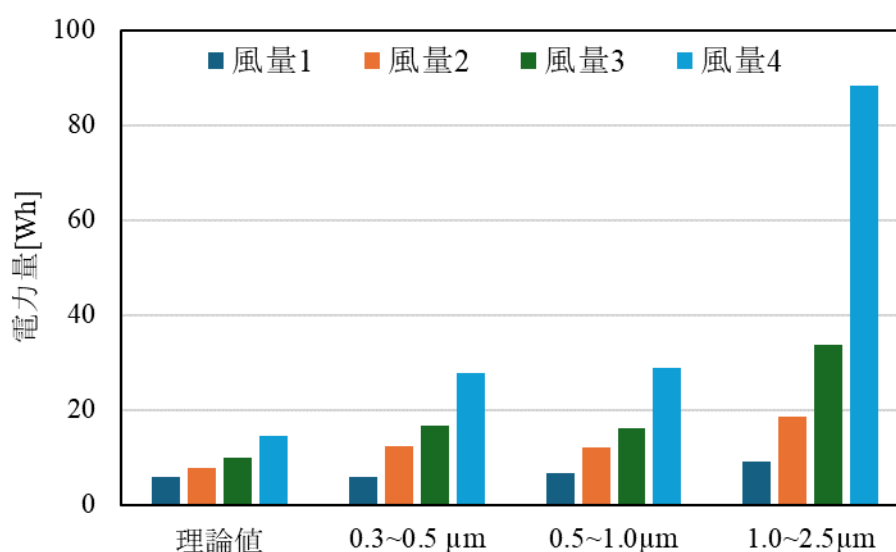


Fig. 6.5. ダスキンの実験結果から得られた電力量。

1.0 μm 未満の粒子についてはほぼ同じ傾向になったが、粒径が大きくなったり、風量が大きくなったりするほど電力量は多くかかった。これは大きい粒子になるほど質量が大きくなるため空気清浄機の気流の影響を受けにくくなるのが原因と考えられる。また、この結果について粒径ごとに横軸を流量、縦軸に電力量をとると Fig. 6.6 のようになった。

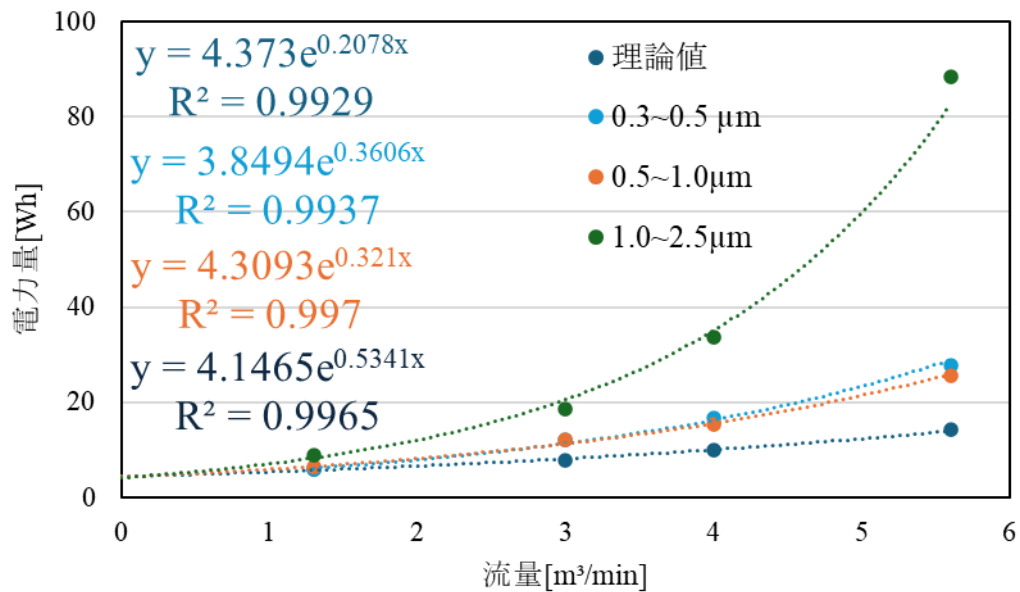


Fig. 6.6. 流量と電力量の関係.

流量と電力量について指数近似をとったところ、強い相関がみられた。よって、ダスキン社製の空気清浄機は流量を上げるほど電力量が増加してしまうことがわかった。これはダスキン社製の空気清浄機の吸排気構造が近くに位置しており、気流が混ざってしまうためであると考えられる。

次に、象印製の空気清浄機を用いた時の電力量を Fig. 6.7 に示す。

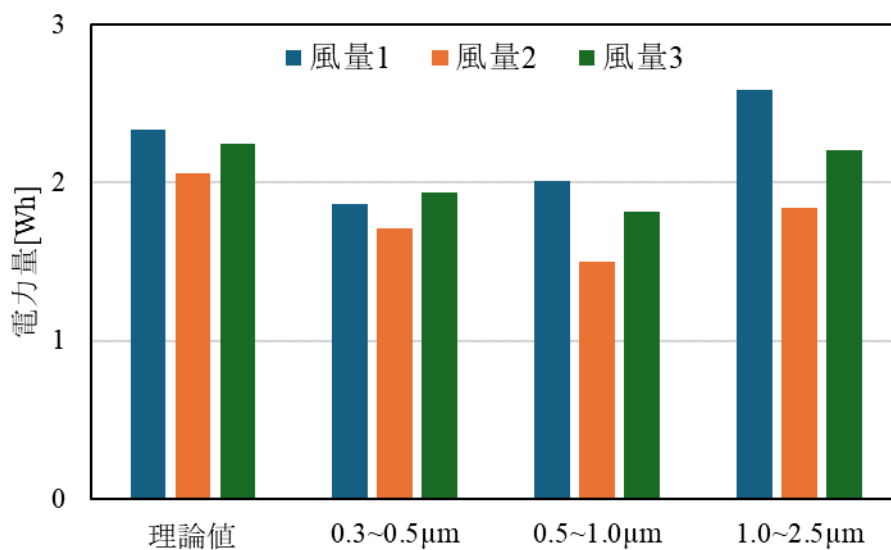


Fig. 6.7. 象印製の電力量.

実験結果より、象印製の空気清浄機は理論値よりも実測値の方が電力量が少なくなることがわかった。また、流量を大きくしても電力量は大幅には上がらないことがわかる。これは象印製の空気清浄機の吸排気部が離れて配置しており、気流が混ざりあわなくなっていることが考えられる。象印製の空気清浄機を用いる時には流量が大きい設定にしても電気代はあまりかからず、素早い粒子除去が可能であることがわかった。

最後に、バルミューダ製の空気清浄機を用いた時の結果を Fig. 6.8 に示す。

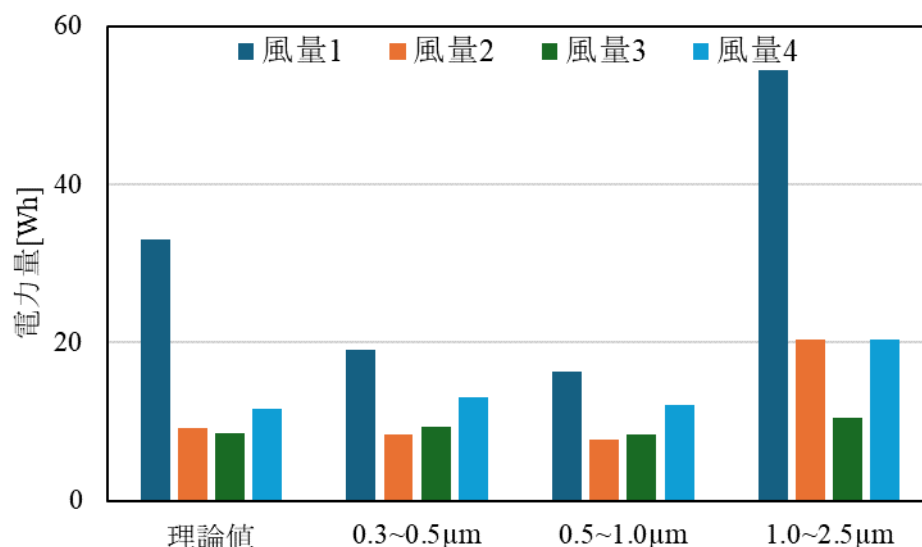


Fig. 6.8. バルミューダ製の電力量.

実験結果より、0.3~1.0 μm に比べて 1.0~2.5 μm の時の粒径の方が電力量が多くなった。理論値と比較するとどの粒径でも大体同じような傾向を示した。バルミューダ製の空気清浄機では風量 1 の時が極端に電力量が大きくなってしまいう傾向にあり、これは風量 1 の時の流量が 0.3 m³/min と小さいことが原因と考えられる。よって、流量が小さすぎても除去にかかる時間が多くなりすぎてしまうため結果として電力量も多くなってしまいうことが考えられる。バルミューダ製の空気清浄機では風量 2, 3 にすることで電力量を抑えつつ粒子除去ができると考えられる。

ここで、3社の空気清浄機を比較したグラフを Fig. 6.9 に示す。ここでは 0.5~1.0 μm のデータで比較を行った。

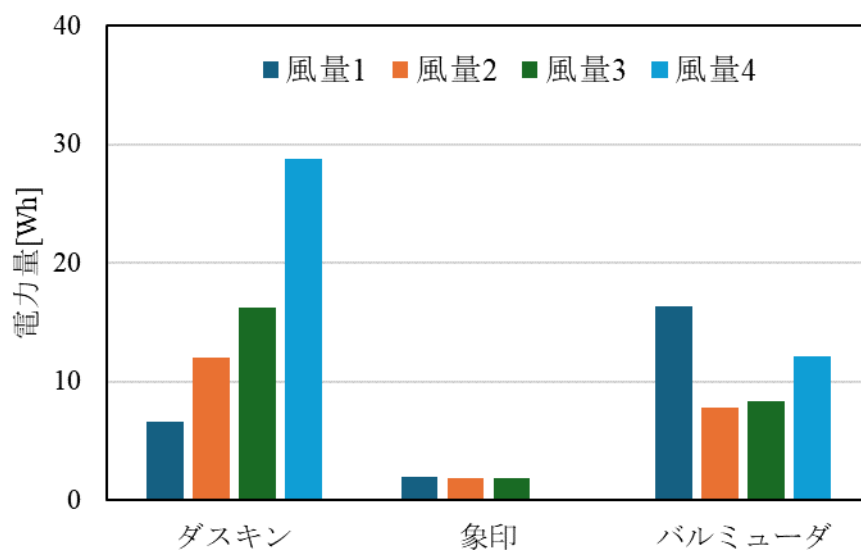


Fig. 6.9. 空気清浄機ごとの電力量比較.

3社を比較すると、象印製の空気清浄機が最も電力量を抑えていることがわかる。ダスキ
ン製とバルミューダについて比較する。Table 6.2 より、ダスキンの風量3は $4.0 \text{ m}^3/\text{min}$ 、
バルミューダ製の風量3は $4.8 \text{ m}^3/\text{min}$ となっていて、バルミューダ製の方が流量が大きい
のに、電力量は象印よりも小さくなっている。このことから、バルミューダ製の方がダスキ
ン製よりも電力量を抑えて効率よく粒子除去が行えていることがわかる。

以上の結果から、吸排気構造が離れて作られた空気清浄機の方が電力量を抑えながら粒
子除去ができることがわかった。

第7章 空気清浄機とサーキュレーター連携実験

第1節 実験背景

第6章より、象印製の空気清浄機が最も効率よく粒子の除去が可能であることがわかった。そこで、さらに素早く除去できる方法を探した。30 μm ほどの粗大粒子に対して空気清浄機とともにサーキュレーターを使用することで除去効率が上がることがわかっている。しかし、空気中に浮遊し続ける微小粒子に対してのサーキュレーターの使用効果はわかっていない。この実験では空気清浄機とサーキュレーターを連携させた時の微小粒子の変化について減衰定数を用いて評価を行った。

また、流量が小さい時空気清浄機から近い場所と遠い場所で粒子の減衰速度に違いがあるのか、空間依存性についても調べた。

第2節 実験方法

実験条件を Table 7.1 に、実験室の概要図を Fig. 7.1 にそれぞれ示す。

Table 7.1. 連携実験における実験条件.

実験室容量	3.9 m×6.6 m×2.7 m (約 70 m ³)
パーティクルカウンターのチャンネル	0.3, 0.5, 0.85, 1.0, 2.5, 5.0
サンプリング時間	1 分間
合計計測時間	40 分
試験粒子	線香
空気清浄機	象印 (PU-AA50)
空気清浄機の流量	2.0 m ³ /min
送風用サーキュレーター	山善
攪拌用サーキュレーター	IRIS OHYAMA PCF-SC15T

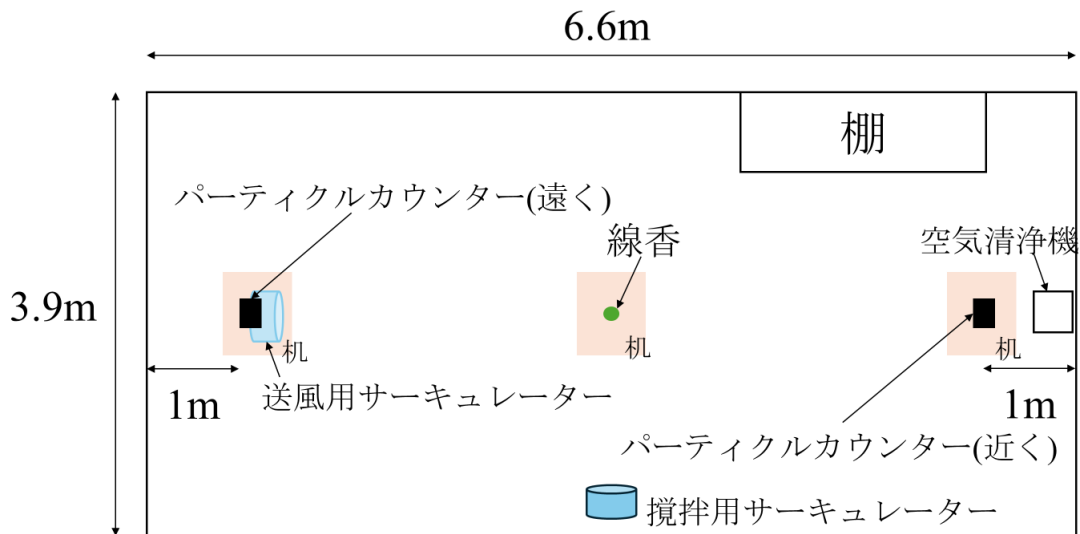


Fig. 7.1. 実験室概要.

部屋の中央で線香を5分間焚き、サーキュレーターで攪拌する。送風用サーキュレーターと、攪拌用サーキュレーターのどちらも床置きである。その後空気清浄機を風量1で稼働させ、空気清浄機の近くで40分間減衰を測定する。同様の操作をして粒子を攪拌させ、空気清浄機から遠い位置で40分間減衰を測定する。これらを送風用サーキュレーターがない場合、風量3、風量5の時それぞれ行った。今回使用したサーキュレーターは風量が5段階あるものを使用した。攪拌後、空気清浄機やパーティクルカウンターを作動させてから部屋を退出し、減衰測定時には室内に誰も入っていない。

それぞれの実験条件について再現性を確かめるために3回以上同じ動作を繰り返した。

第3節 実験結果

実験で得られた減衰定数をまとめた図を Fig. 7.2 に示す。

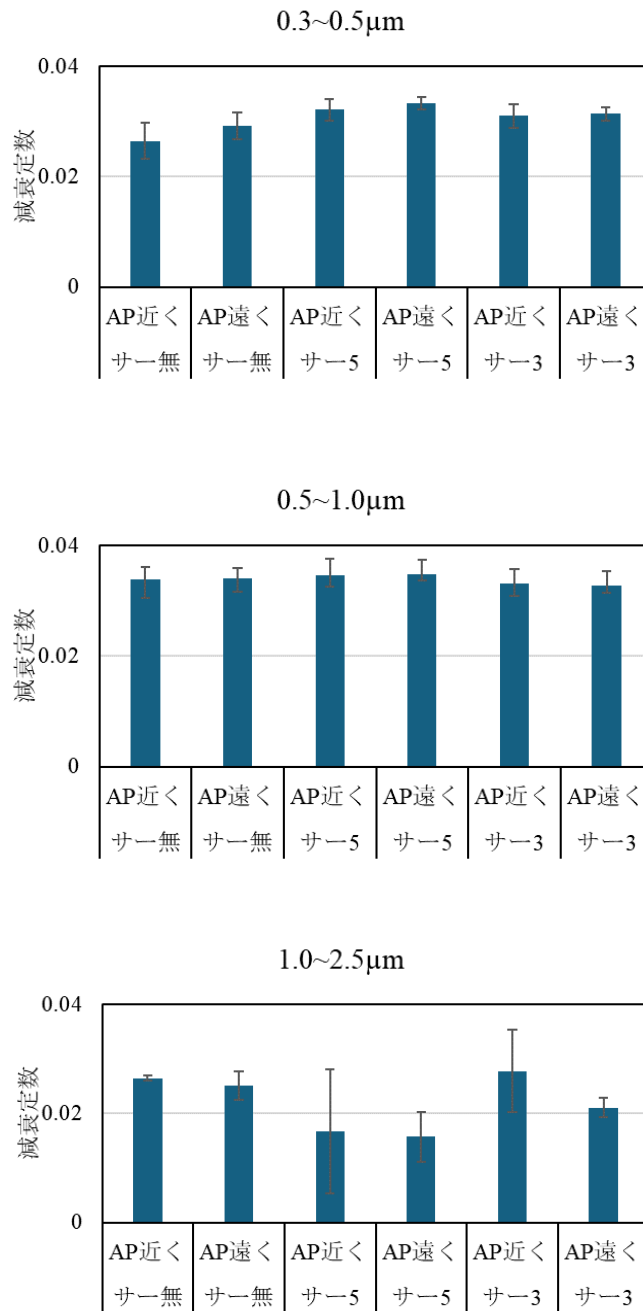


Fig. 7.2. 実験条件ごとの減衰定数.

空気清浄機の近くで測定したものを「AP 近く」、遠くで測定したものを「AP 遠く」と示した。また、サーキュレーター未使用時を「サー無」、風量3で使用した時を「サー3」、風量5で使用した時を「サー5」と示した。図のエラーバーは各実験の標準誤差をとったものである。

サーキュレーターの条件ごとに結果を見ると、空気清浄機の近くと遠くではどの結果も

全てエラーバー内に収まる結果となった。このことから、空気清浄機の除去による空間依存性は確認できなかった。

次に空気清浄機の条件ごとに結果を見るため、条件を並べ替えたものを Fig. 7.3 に示す。

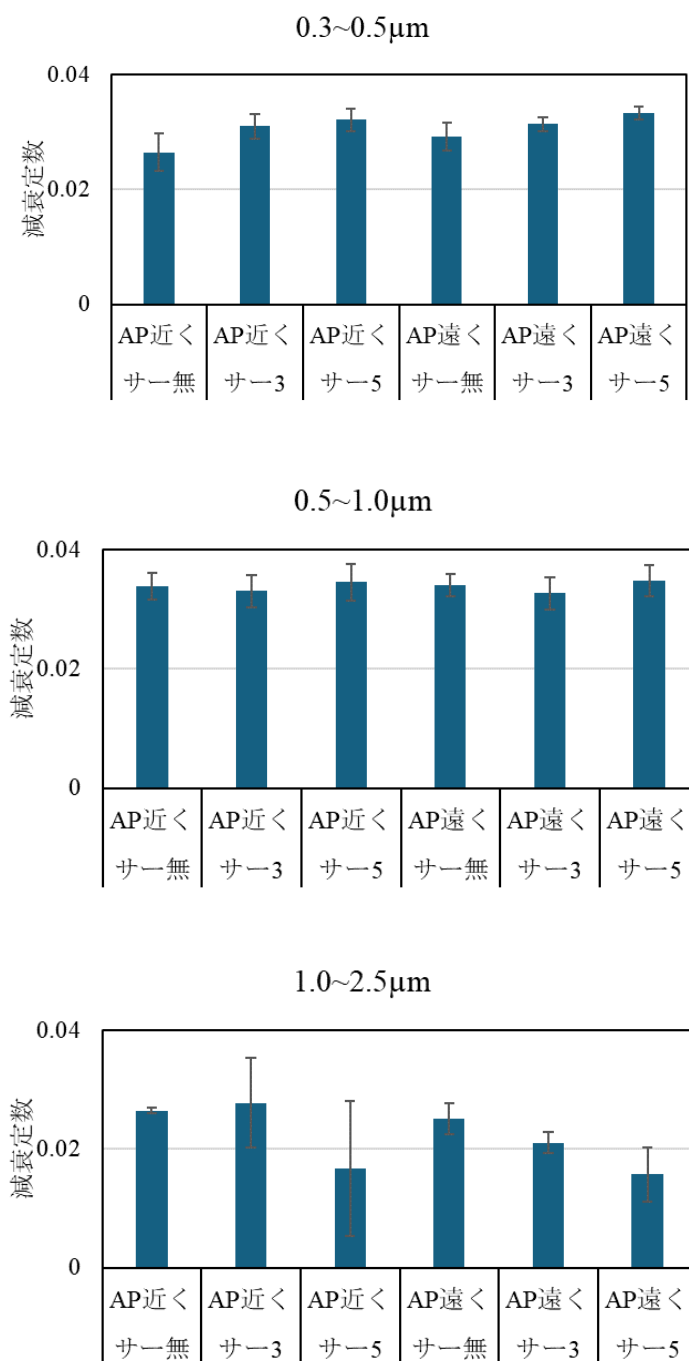


Fig. 7.3. 実験結果を並べ替えたグラフ.

0.3~0.5 μm の結果の時、サーキュレーター使用により減衰定数の上昇がみられた。サーキュレーター未使用時を基準とすると、空気清浄機の近くで測定した時、風量 3 では 17.1%、風量 5 では 21.4%減衰定数が上昇していた。空気清浄機の遠くで測定した時の結果では、風量 3 で 7.7%、風量 5 で 13.9%の上昇がみられた。

しかし、0.5~1.0 μm の範囲では全てのデータがエラーバー内に収まる結果となり、サーキュレーターの有用性は確認できなかった。1.0~2.5 μm ではサーキュレーターを使用したことにより減衰定数が下がってしまったところもあった。これらより、サーキュレーターの使用は必ずしも粒子除去に役立つわけではないということがわかった。

空気清浄機によって室内全体に気流ができるため、空気清浄機からの距離にかかわらず安定した吸気ができたと考えられる。0.3~0.5 μm ではサーキュレーターにより減衰定数が向上したが、小さな粒子は気流に乗って空気清浄機の吸気部に届く確率が上がるためだと考えた。1.0~2.5 μm の粒子は 3 章でも述べたように人の歩行によって粒子数が増加した。床付近にサーキュレーターを設置したため床から粒子が再浮遊したため新たな粒子が空気中に飛散し減衰定数が下がってしまったと考えられる。1 章で上げた先行研究においてサーキュレーターとの連携において除去効率が上がったとされる結果が得られていた。しかしこれらは床や壁に粒子が到達するとそのまま動かなくなる仕様に設定されている。実際の環境では粒子が再浮遊する可能性もあることからシミュレーションと実験で結果が異なってしまったと考えられる。

第 8 章 結論

まず、床に堆積した粒子に関する再浮遊実験を行った。歩行した際、 $0.3\sim 1.0\ \mu\text{m}$ の粒子は影響を受けなかった。 $1.0\sim 2.5\ \mu\text{m}$ の粒子は歩行によって粒子数の増加がみられたが、歩行終了後も増加した粒子が減衰することなく、浮遊し続けた。これらより、 $2.5\ \mu\text{m}$ 未満の粒子は重力の影響を受けず、長時間空気中に浮遊し続けるため、空気清浄機などを用いて除去する必要がある。また、 $2.5\ \mu\text{m}$ 以上の粒子については歩行後重力の影響を受けて自然減衰していた。同様の実験に空気清浄機を使用する条件を加えると、 $2.5\ \mu\text{m}$ 以上の粒子の減衰速度は約 10 倍大きくなった。よって空気清浄機は室内に浮遊し続ける微小粒子だけでなく、重力の影響を受ける粗大粒子に対しても効果があることがわかった。

この実験では、粒子の再浮遊を防ぐ方法として床掃除を行った。掃除後に同様の操作を行い、掃除前後での粒子の挙動を比較した。結果、粗大粒子に関しては粒子の増加を抑える効果があることがわかった。粗大粒子には花粉やホコリなどのアレルギー物質なども含まれていることから、それらが空気中に飛散しないようにするためにも床掃除をこまめにする必要がある。

空気清浄機の電力量評価では、より効率的な空気清浄機の構造について提案した。ダスキン製、象印製、バルミューダ製の 3 社の比較を行ったところ、象印製の空気清浄機が最も電力量を抑えて粒子除去ができていた。象印製とバルミューダ製は吸排気構造が離れた位置にある構造のため、気流が混ざらず粒子除去が行えていると考えた。ダスキン製の空気清浄機は吸排気構造が近くにあるため気流が混ざり合い、性能を落としてしまったと考えられる。ダスキン製とバルミューダ製の空気清浄機を比較したところ、バルミューダ製の方がより電力量を抑えて粒子除去が行えていることがわかった。

空気清浄機を使ってより速く粒子除去を行う方法としてサーキュレーターとの連携実験を行った。また、空気清浄機の流量が小さい時、空気清浄機の近くと遠くでどちらの方が速く減衰するのか空間依存性についても調べた。その結果、今回の実験では空間依存性は確認されなかった。サーキュレーターの条件ごとに結果を比較すると、 $0.3\sim 0.5\ \mu\text{m}$ の時、サーキュレーターを使用した際、最大 21.4% の減衰定数の向上がみられた。しかし、 $0.5\sim 1.0\ \mu\text{m}$ の範囲ではサーキュレーターの効果は確認できず、ほぼ同じ減衰定数となった。 $1.0\sim 2.5\ \mu\text{m}$ ではサーキュレーターを使用したことによって減衰定数が悪化するような結果がみられた。これらから、サーキュレーターは必ずしも粒子除去に役立つわけではないことがわかった。

以上の結果より、空気清浄機は空気中の浮遊粒子を除去するのに役立ち、吸排気構造が離れている構造のものを使用することでより効果的に粒子除去が行える。

参考文献

- [1] 環境省：花粉症環境保健マニュアル 2022 年.
- [2] 内閣府経済社会総合研究所景気等軽侮：消費動向調査 令和 5 年 11 月実施調査結果.
- [3] 中村澄夫, ほか：スギ花粉アレルゲン Cry j 1 Cry j 2 の発芽花粉における局在性, 日花粉会誌. 2004; 50: 15-22.
- [4] Funakoshi FRONTIERS IN LIFE SCIENCE：日本スギ花粉抗原・抗体 (Cry j 1, Cry j 2)
- [5] Micheal A. Kohanski, L James Lo, Michael S. Waring: “Review of indoor aerosol generation transport and control in the context of COVID-19”, International Forum of Allergy & Rhinology, **10**(10) pp.1173-1179 (2020).
- [6] 橋本明憲, 高橋俊樹, 松本健作, 鴨崎健一：空気清浄機の生成する室内気流と花粉挙動のシミュレーション研究, 室内環境 15(2), 2012.
- [7] 橋本明憲, 高橋俊樹：空気清浄機を設置した屋内の花粉尘挙動解析ソフトウェアの開発, 日本花粉学会誌 56(2) 71-81(2010) .
- [8] 福田裕也：アシストデバイスを用いた室内花粉除去システムの研究開発, 修士論文, 群馬大学(2018).
- [9] Kwang-Chul Noh : “Variation of clean air delivery rate and effective air cleaning ratio of room air cleaning devices”, Building and Environment, **84** pp. 44-49 (2015).

謝辞

本研究を進めるにあたり、数々のご指導ご鞭撻をいただいた高橋俊樹准教授に、心から感謝いたします。また、主査、副査を務めていただいた高橋佳孝先生、三浦健太先生にも大変感謝いたします。優しく、丁寧なご指導ご鞭撻ありがとうございました。

また、一緒に研究してくれた研究室の皆さん、ありがとうございました。楽しく、和気あいあいと研究室活動を送れて大学院生活を充実させられました。白熱したバレーボール大会、油まみれになるたこ焼きパーティーなどたくさんの行事がありました。持ち寄りパーティーと寿司パーティーで体調を崩してしまったことが唯一の後悔です。私たちの代が卒業した後もぜひイベントを続けてほしいです。3年間、ありがとうございました。