

令和 6 年 6 月 24 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01495

研究課題名（和文）室内空間におけるバイオエアロゾル評価指標の開発と感染リスク低減方法

研究課題名（英文）Development of bioaerosol assessment index in indoor spaces and methods to reduce the risk of infection

研究代表者

倉淵 隆（Kurabuchi, Takashi）

東京理科大学・工学部建築学科・教授

研究者番号：70178094

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：バイオエアロゾルの挙動を定量的に検討する評価指標を開発し感染リスク低減方法の構築することを目的として、まずは様々な呼吸関連活動によって生じるエアロゾルの粒子径分布の被験者実測より感染リスクを定量評価した。PIV実験装置を用いて単一開口モデルを対象とした模型実測より可視化による自然換気の気流特性を把握した後、粒子状物質の粒径による重力沈降、沈着速度を数値解析によって定量的に示した。動的定常濃度の理論を応用したトレーサガス実験法より室内の空気齢分布、空気清浄機が及ぼす室空気への影響を考察し、粒子状物質を用いた実測及び数値解析より空気清浄機の相対距離に応じた汚染質除去効率（CRE）を用いて評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一般的な換気計画を行う際には、室内の完全混合を仮定し、室内における汚染質濃度分布を無視した状態で必要換気量を算定することが多い。本研究ではバイオエアロゾルを汚染源とする局所的な汚染発生での換気量の算出及び換気基準の確立を目指そうとする新たな試みであり、実験的な手法による数理疫学の検証、数値解析による定量的な検討により、感染症対策としての数理疫学理論の建築設備工学理論への適用が可能であることを確認した。同様の提案は国内外で例がなく、今までと異なる新たな換気効率の評価手法として、様々な用途における換気システムの評価に活用することが可能である。

研究成果の概要（英文）：The risk of infection was quantitatively evaluated by measuring the particle size distribution of aerosols generated by various respiration-related activities in subjects. After understanding the airflow characteristics of natural ventilation by visualization, the gravitational settling and deposition velocity of particulate matter by particle size were quantitatively demonstrated by numerical analysis. The air age distribution in a room and the effect of air purifiers on room air were considered from the tracer gas experimental method applying the theory of dynamic steady-state concentration, and evaluated using the contaminant removal effectiveness (CRE) according to the relative distance of air purifiers based on actual measurements using particulate matter and numerical analysis.

研究分野：建築環境・設備（換気力学、換気設備、通風、CFD）

キーワード：バイオエアロゾル 挙動特性 数値解析 換気 感染リスク 重力沈降 沈着 蒸発

様式 C - 19 , F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

世界規模で急速な広がりを見せる新型コロナウイルス (COVID-19) 感染症に影響を受け、社会的・経済的に大きな問題となっている。このような感染症問題を解決するためには、医学・生理学分野で迅速なワクチンの開発が目標であると言えるが、また新たなウイルス感染症が出た時の感染症リスク低減には時間遅れが生じる。この問題に対して具体的な対策は、人間側では外出制限やソーシャルディスタンス確保、マスク着用、環境側では換気・空気清浄・殺菌などがある。しかし、それぞれの項目に対する数理疫学・工学的に評価する指標がなく、その効果について明確な基準がないのが現状であり、適切な社会科学・工学分野でソリューションの提案が急務である。

2. 研究の目的

換気運用方法の提案をする際に解決すべき課題は、感染源とされるバイオエアロゾル発生性状を把握し、感染源の局所領域における汚染質除去をするための換気指標の提案することである。これらが解決できれば、感染リスクの低減方法が構築でき、用途別施設における効率的な換気運用方法の提案が可能となる。本研究は、バイオエアロゾル (ウイルス、バクテリアなど) の挙動を定量的に検討する評価指標を開発し、その指標に基づいた寄与率評価により感染リスク低減方法を構築する。

3. 研究の方法

(1) 空気感染に関するバイオエアロゾル発生性状の把握

世界各国で行われている粒子状物質の検討手法に関する研究報告書や調査レポートなどを参考にしてエアロゾルの挙動特性を検討する手法を纏め ISO 規格クラス 5 のクリーンルームで様々な呼吸関連活動によって生じるエアロゾルの粒子径分布の被験者実測を行う (図 1)。また、PIV 実験装置を用いて単一開口モデルを対象とした模型実測を実施し、可視化による自然換気の気流特性を把握する (図 2)。

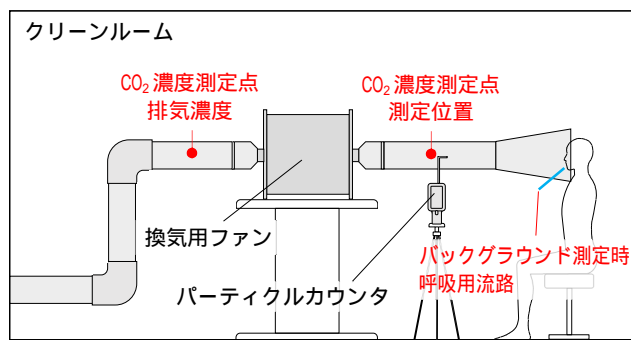


図 1 エアロゾル計測装置



図 2 可視化実測の機器配置の様子

(2) 局所領域における汚染質除去のための数理疫学と換気指標との連成検討

粒子状物質の数値解析方法について Eulerian 手法と Lagrangian 手法に分けて行なった文献調査をもとに、粒子状物質の粒径 ($0.1 \mu\text{m} \sim 100 \mu\text{m}$) による重力沈降、床・天井・壁面への沈着速度について検討し、数値解析によって定量的に検討する (図 3, 図 4)。

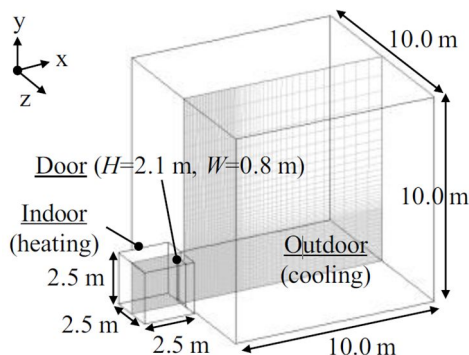


図 3 解析モデル

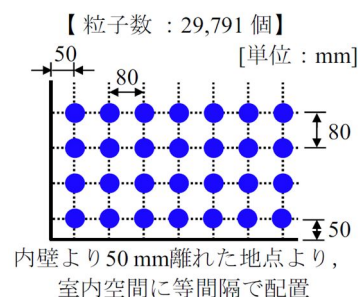


図 4 ラグランジュ型の粒子配置

(3) 感染リスク低減方法の検討

空気清浄による感染リスク低減方法を検討では、動的定常濃度の理論を応用したトレーサガス実験法より室内の空気齢分布より空気清浄機が及ぼす室空気への影響を考察する(図5)。また人工飛沫を用いて空気清浄機の相対距離に応じた汚染質除去効率(CRE)について実測及びCFD解析を行う(図6)。また呼吸関連活動によって生じるエアロゾルの粒子径分布の被験者実測の結果分析において、Buonannoによる感染リスクの評価式を用いて、発声パターンやマスク着用時の感染リスクを相対的に評価する。

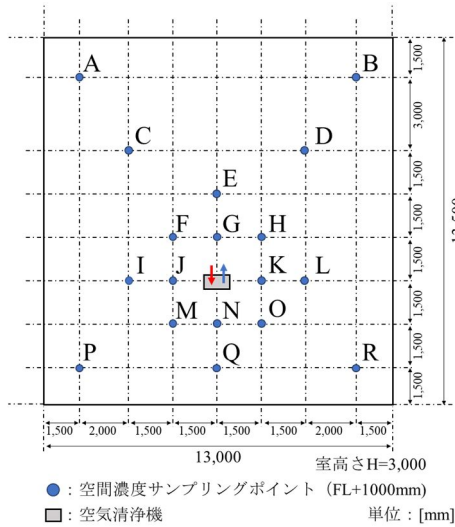


図5 空気清浄機の空気齢測定

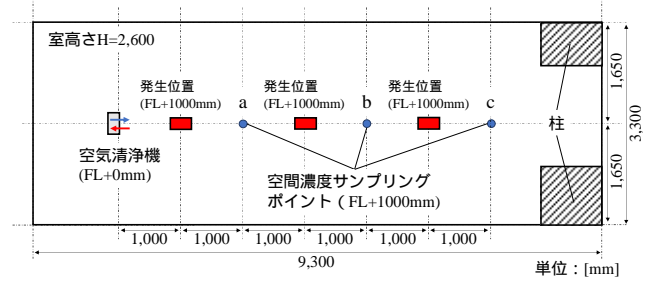


図6 空気清浄機の汚染質除去効率(CRE)測定

(4) 建築物に用途に応じた換気設備の設計・運用方法の提案

単一開口を有する室内空間における室内外の温度差を駆動力とする自然換気を対象とした自由落下モデルを用いて微細粒子の挙動および解析モデルと実測モデルの互換性を確認する。その上で、実スケールの単一開口モデルにおける自然換気による微細粒子流出特性について数値解析を行う。

4. 研究成果

(1) 空気感染に関するバイオエアロゾル発生性状の把握

エアロゾル濃度は全ての粒子径で声の大きさに比例し、粒子径が大きくなるほどその傾向が顕著であったことが明らかになった。また、マスクと顔の隙間からの漏れがマスクの効果に影響を及ぼす可能性が示唆され、マスクと顔の隙間からの漏れを考慮した結果、マスクは飛沫拡散を50-60%低下させることが確認された。

縮小模型の可視化実測において、開口部近傍に自然換気による中性帯の観測ができた。可視化による開口部上の濃度差と数値解析による開口部上のx方向速度の結果より、同程度の高さ(y = 約0.21-0.24 m)における中性帯の確認ができた(図7)。同模型の換気量実測において、100秒間における実測平均換気量は0.0047 m³/sと理論値の0.0055 m³/sと近い値が得られた。

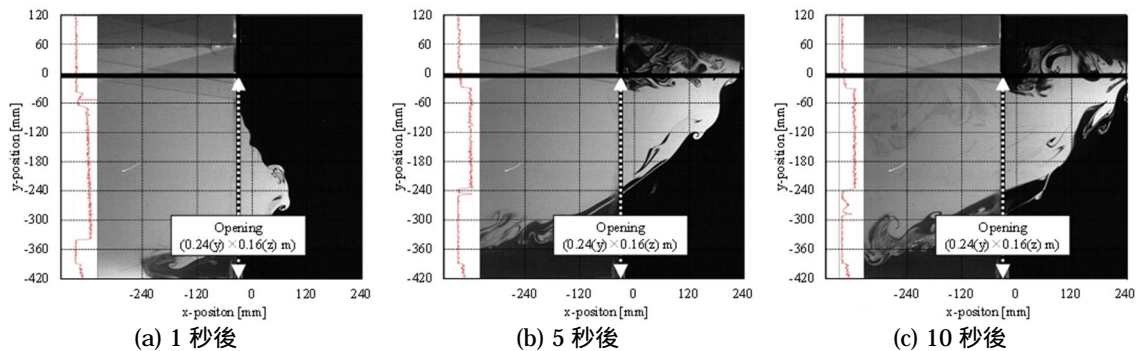


図7 開口部近傍の気流可視化(開口部線分上における濃度差)

(2) 局所領域における汚染質除去のための数値疫学と換気指標との連成検討

Eulerian 型数値解析と Lagrangian 型数値解析とも解析結果の違いが少なく、室内空間における粒子解析に両モデルとも適用可能であることを確認した(図8)。また粒径の大きさが約 30 μm 以上の粒子は重力沈降の影響が大きく、Passive Scalar 解析での解析には限界がある課題もあった。粒径が大きい粒子は重力沈降により、床面に沈着して除去され、換気量が高くなったと見なすことで評価可能であることが明らかになった(図9)。

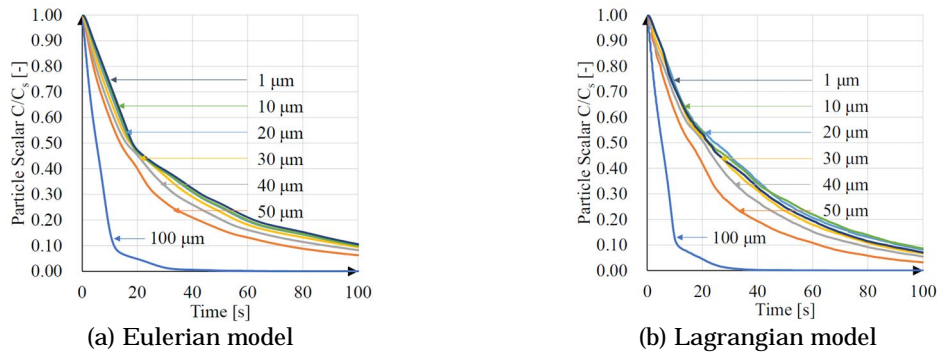


図8 粒径による室内粒子の減衰特性

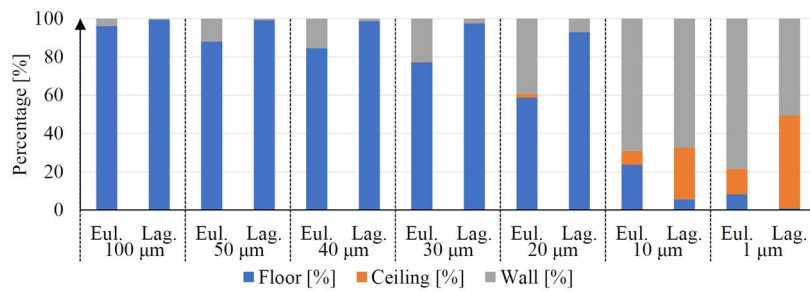


図9 沈着された粒子の沈着部位 (100 秒後)

(3) 感染リスク低減方法の検討

動的定常濃度を用いた空気清浄機による室内空気環境の改善効果の定量評価が可能であること確認し、空気清浄機の影響範囲を明らかにした。175.5 m^2 の空間全体のSVE3が1.25以下になり、空気清浄機の影響範囲は部屋全体に及んでいることを確認した。また汚染源の高さと空気清浄機の位置によって影響範囲が変化し、空気清浄機が壁際より室中央に設置される場合、除去効率が高いことを確認した。換気効率の評価として、空気齢測定から適用床面積を超える範囲においても概ね一様に換気効果が期待でき、CRE測定から相対距離が離れるほど飛沫の拡散は大きくなることを確認した。粒径ごとの挙動からみる課題点として、0.5~3.0 μm では蒸発の定量化により減衰率の対応の改善、3 μm 以上では安定した飛沫の供給や再飛散の評価法についての検討が挙げられる(図10)。

また、発声パターンやマスク着用時の感染リスクを相対的に評価では、Covid-19の感染リスクが高いとされる1 μm 以下の粒子径において、感染リスクは声量に応じて高くなり、大声で鼻呼吸の12倍程のリスクがあることが分かった。マスクを着用することで、1 μm 未満の粒子では鼻呼吸で90%、会話で84%ほど感染リスクを低減させる効果が示された(図11)。

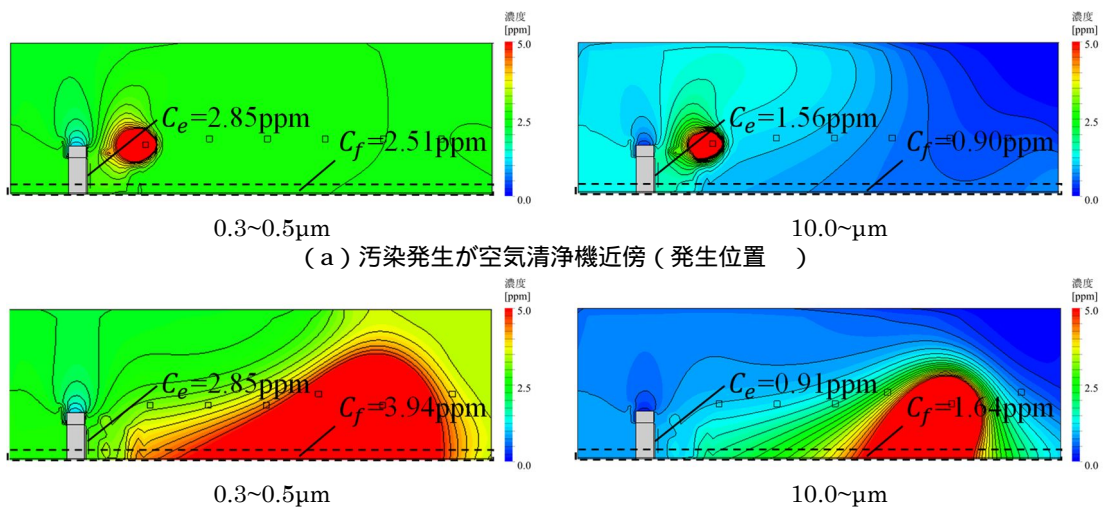


図10 空気清浄機の相対距離に応じた定常濃度分布

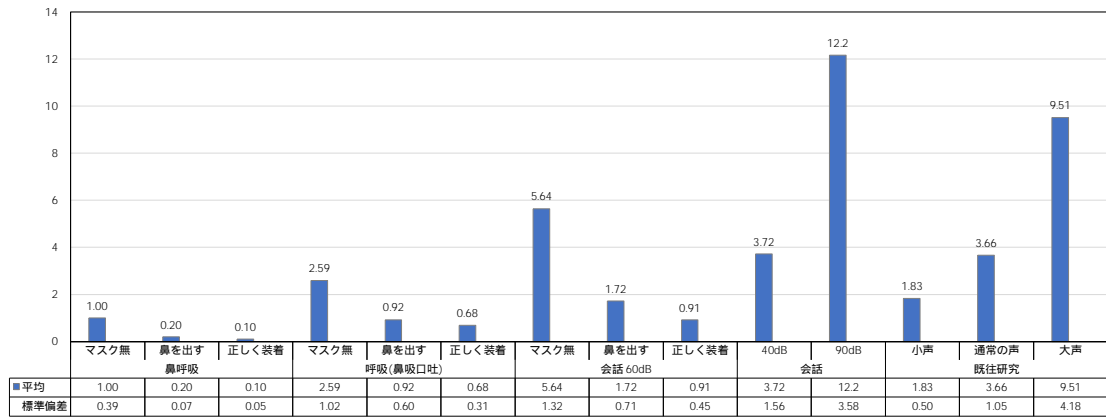


図 11 鼻呼吸の感染リスクを 1 とした場合の $1\mu\text{m}$ 未満の粒子における相対的な感染リスク

(4) 建築物に用途に応じた換気設備の設計・運用方法の提案

微粒子の自由落下解析において、粒子径は相対湿度 0% の場合 $100\mu\text{m}$ の水粒子は約 6 秒で 1.0 まで蒸発により縮小し、蒸発に伴い落下速度も低下する傾向が見られた (図 12, 図 13)。また縮小模型の可視化実測により開口部近傍での自然換気による中性帯の位置を確認し、実スケール解析において粒子径が小さい程化学種と理論値に近づく傾向を確認した。粒子数を増加する程、解析時間が長くなるデメリットがあることと、 $10\mu\text{m}$ 以上の粒子は重力沈降により室内に堆積し、室内空間から除去される割合が増加することを確認した。

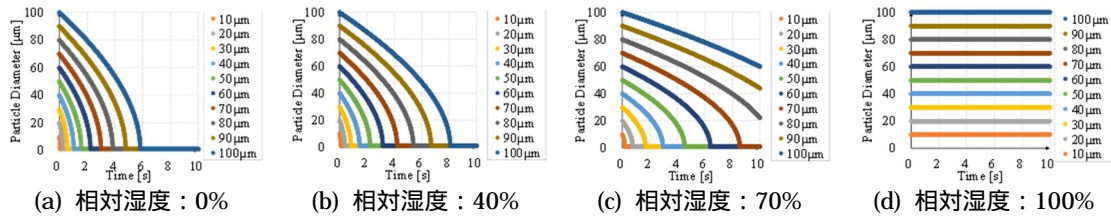


図 12 粒子径の時系列変化

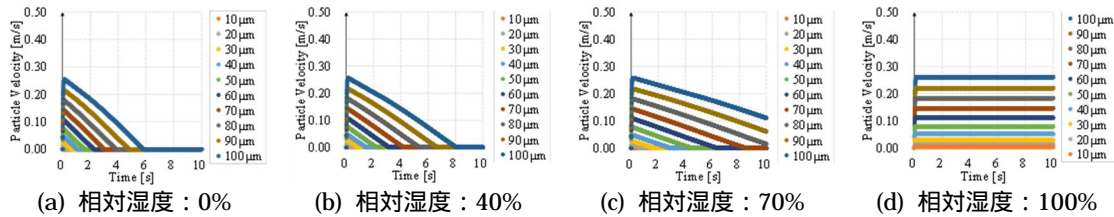


図 13 粒子落下速度の時系列変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Arisu Furusawa, Takashi Kurabuchi, Jeongil Kim, Masaki Shimizu, Haruki Taguchi	4. 巻 2022
2. 論文標題 Droplet Concentration Produced during Expiratory Activities and Evaluation of Relative Infection Risk	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 CLIMA 2022 The 14th REHVA HVAC World Congress	6. 最初と最後の頁 2022
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.34641/clima.2022.153	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Yuta Mutou, and Sihwan Lee	4. 巻 2022
2. 論文標題 Relationship between bioaerosol particle size and ventilation removal efficiency for airborne infections	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 CLIMA 2022 The 14th REHVA HVAC World Congress	6. 最初と最後の頁 2022
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.34641/clima.2022.198	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Yuta Mutou, Sihwan Lee, and Jaeung Hwang	4. 巻 2022
2. 論文標題 Gravity settling of particles and ventilation characteristics by natural ventilation method	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Indoor Air 2022	6. 最初と最後の頁 2022
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 金政一, 倉淵隆, 李時桓, 古澤明里朱, 田口遥樹, 李彦
2. 発表標題 呼吸と発声による飛沫発生が感染リスクに与える影響
3. 学会等名 室内環境学会学術論文集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 武藤祐太, 李時桓, 倉淵隆, 金政一, 黄載雄
2. 発表標題 単一開口モデルにおける自然換気をもたらす室内粒子の流出特性を対象としたRANSとLESの比較
3. 学会等名 室内環境学会学術論文集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 古澤明里朱, 倉淵隆, 金政一, 李時桓, 田口遥樹, 李彦
2. 発表標題 呼吸関連活動時に発生する飛沫・エアロゾル濃度と相対的な感染リスクの評価
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 李彦, 倉淵隆, 金政一, 竹内仁哉, 吉野一, 鳥海吉弘, 田口遥樹, 古澤明里朱
2. 発表標題 動的定常濃度を用いた空気齢分布測定に基づく空気清浄機の影響範囲に関する研究
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 武藤祐太, 李時桓, 倉淵隆, 金政一, 黄載雄
2. 発表標題 単一開口モデルにおける自然換気を評価する数値解析条件に関する検討
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 古澤明里朱, 倉淵隆, 金政一, 李時桓, 田口遙樹, 李彦
2. 発表標題 呼吸関連活動時に発生する飛沫・エアロゾル濃度と相対的な感染リスクの評価
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 李彦, 倉淵隆, 金政一, 竹内仁哉, 吉野一, 鳥海吉弘, 田口遙樹, 古澤明里朱
2. 発表標題 動的定常濃度を用いた空気齢分布測定に基づく空気清浄機の影響範囲に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 武藤祐太, 李時桓
2. 発表標題 粒径別粒子状物質の終端速度の確認と実測による基礎検討
3. 学会等名 室内環境学会学術論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 古澤明里朱, 倉淵隆, 金政一, 阿式信英, 田口遙樹
2. 発表標題 活動に伴う飛沫発生量とその捕集効率に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 古澤明里朱, 倉淵隆, 金政一, 阿式信英, 清水大暉, 田口遥樹
2. 発表標題 活動に伴う飛沫発生量とその捕集効率に関する研究
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	金 政一 (Kim Jeongil) (50887891)	東京理科大学・工学部建築学科・助教 (32660)	
研究分担者	李 時桓 (Lee Sihwan) (60624997)	名古屋大学・環境学研究科・准教授 (13901)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------