

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02309

研究課題名（和文）住宅室内における汚染粒子の発生から居住者への曝露の挙動解析と健康リスク評価

研究課題名（英文）Mechanisms of particle emission to exposure for residents and health risk evaluation

研究代表者

鍵 直樹 (Kagi, Naoki)

東京工業大学・環境・社会理工学院・教授

研究者番号：20345383

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、室内における空気汚染物質の中で、浮遊粉じん、堆積粒子（ハウスダスト）、PM<sub>2.5</sub>、超微粒子などの粒子状物質を対象に、室内空間における実態を明らかにするために、粒子の動的挙動を実測、実験及び数値解析により解明することで、室内での粒子の生涯を明らかにすることを目的とする。室内環境における粒子状物質の挙動について、室内の動態を考慮に入れて検討することを目的とし、いくつかの検討を行った。室内発生粒子の除去性能評価手法として濃度減衰法を適用し、沈着を考慮した計算方法を提案し、実空間での実測結果について、概ね減衰係数の予測ができており、本手法の適用可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究においては、室内環境における浮遊粒子の挙動に着目し、粒子が室内に発生してから空間中での存在形態、人への影響まで、室内環境中での粒子の挙動を把握することが目的となっている。住宅室内においては、居住者のアクティビティにより様々な組成、粒径の粒子が発生している。また、住宅室内の曝露評価として呼吸による吸引曝露など、汚染経路の検討にも発展させることで、室内環境における総合的な健康リスク評価へ提案することが期待できる。さらに、2020年より新型コロナウイルス感染症により、室内における空気感染（エアロゾル感染）の防止の観点から、模擬飛沫による挙動解析についても、同様に応用することも可能である。

研究成果の概要（英文）：This study aims to evaluate the dynamic behavior of indoor air pollutants such as airborne dust, settled particles (house dust), PM<sub>2.5</sub>, and ultrafine particles in order to clarify the actual conditions in indoor environments by experiments, and numerical analysis. Several studies were conducted to examine the behavior of particulate matter in indoor environments, taking into account the indoor dynamics.

In this study, the concentration decay method was applied to evaluate the removal rate of indoor airborne particles, and a calculation method that takes deposition into account was proposed. The applicability of this method in a real space was also demonstrated.

研究分野：建築環境工学

キーワード：室内空気質 浮遊粒子状物質 室内発生 実態調査

1. 研究開始当初の背景

居住環境における浮遊粉じん濃度については、室内での喫煙の減少などから、低い濃度で維持されている。一方、シックハウス症候群に端を発した揮発性有機化合物 (VOC)、ダンプネスによる浮遊微生物やアレルゲンによる室内環境の悪化など、現在も盛んに研究が行われている。しかしながら、近年中国からの越境汚染として冬期に飛来する微小粒子状物質 (PM<sub>2.5</sub>) については、日本において大気環境基準も制定され、呼吸器疾患、循環器疾患及び肺がんの増悪因子となる観点から、室内においても注目されている。室内空気汚染については、大気からの侵入、室内での発生、汚染物質の排出が主な室内における収支ではあるが、室内においては今まで考慮されなかったような超微粒子の室内粒子生成、準揮発性有機化合物 (SVOC) の微粒子への吸着に関する汚染物質同士の相互作用など、単純なモデルでは説明できない挙動を考慮することが、詳細な解明には不可欠である。さらに、2020年より新型コロナウイルス感染症により、室内における空気感染 (エアロゾル感染) の防止の観点から、模擬飛沫による挙動解析についても、同様に検討することも可能である。

2. 研究の目的

本研究においては、室内環境における浮遊粒子の挙動に着目し、粒子が室内に発生してから空間中での存在形態、人への影響まで、室内環境中での粒子の挙動を把握することが目的となる。住宅室内においては、居住者のアクティビティにより様々な組成、粒径の粒子が発生している。また、住宅室内の曝露評価として呼吸による吸引曝露など、汚染経路の検討にも発展させることで、室内環境における総合的な健康リスク評価へ提案することが期待できる。よって、室内環境における粒子状物質の挙動について、室内の動態を考慮に入れて検討することを目的とし、いくつかの検討を行った。

3. 研究の方法

3.1 室内における浮遊粒子状物質の濃度減衰法による換気・沈着効果

粒子とガスの濃度減衰法による物質収支式と減衰係数について表1に示す。粒子について検討を行う上では、拡散沈着、沈降を含む  $\beta$  の値を、室の表面積のみを考慮した計算方法 (Cal 1) と共に、内装材料の表面性状と室内に存在する什器などの表面積を考慮した計算方法 (Cal 2) を提案した。計算方法の詳細を表2に示す。表面性状に関する表面粗さ Ra を既往研究から建材ごとに設定した。本研究における濃度減衰法は、室内にトレーサ粒子・CO<sub>2</sub> ガスを発生させ、室全体の濃度を均一化、空調・換気作動後に空間中の濃度を測定機器 (浮遊粒子: PAMS, Model3310; OPS, 3330; パーティクルカウンタ, KR-12A, CO<sub>2</sub>: TR76Ui) で経時的に測定、測定データを式(1)-(4)に適用し、粒子の減衰係数  $n_p$  及びガスの換気回数  $n_g$  を決定、の3ステップとした。

表3に示す大学の居室・講義室において、濃度減衰法による沈着率の測定の検討を行った。居室については換気条件を3ケース (OFF, Low, High モード)、講義室については空調・換気作動時の条件のもとに行った。トレーサ粒子には可視化用スモークと発煙管を使用し、トレーサ粒子の粒径分布から、粒径 500 nm 以下の粒径ではスモーク、粒径 500 nm 以上の粒径では発煙管の測定値を使用した。

表1 濃度減衰法による浮遊粒子状・ガス状物質の濃度式

	粒子	ガス
物質収支式	$C_p(t) = \frac{Q_N + pQ_L + (1 - \eta_S)Q_S}{Q + \eta_F Q_F + \beta V} C_{p0} + \left( C_{p1} - \frac{Q_N + pQ_L + (1 - \eta_S)Q_S}{Q + \eta_F Q_F + \beta V} C_{p0} \right) e^{-n_p t} \quad (1)$	$C_g(t) = C_{g0} + (C_{g1} - C_{g0})e^{-n_g t} \quad (2)$
減衰係数 (粒子)	$n_p = \frac{Q + \eta_F Q_F + \beta}{V} \quad (3)$	$n_g = \frac{Q}{V} \quad (4)$
換気回数 (ガス)		
<small>c: 時間 [h], V: 室容積 [m<sup>3</sup>], Q: 換気量 [m<sup>3</sup>/h], Q<sub>S</sub>: 機械換気量 [m<sup>3</sup>/h], Q<sub>L</sub>: 漏気量 [m<sup>3</sup>/h], Q<sub>N</sub>: 自然換気量 [m<sup>3</sup>/h], Q<sub>F</sub>: フィルタ通過量 [m<sup>3</sup>/h], C<sub>p</sub>(t): 室内粒子濃度 [1/cm<sup>3</sup>], C<sub>p0</sub>: 外気粒子濃度 [1/cm<sup>3</sup>], C<sub>p1</sub>: 初期粒子濃度 [1/cm<sup>3</sup>], C<sub>g</sub>(t): ガス濃度 [ppm], C<sub>g0</sub>: 外気ガス濃度 [ppm], C<sub>g1</sub>: 初期ガス濃度 [ppm], β: 沈着率 [1/h], p: 侵入率 [1], η<sub>S</sub>: 粒径別フィルタ捕集率(外) [1], η<sub>F</sub>: 粒径別フィルタ捕集率(循環) [1], n<sub>p</sub>: 減衰係数 [1/h], n<sub>g</sub>: 換気回数 [1/h]</small>		

表2 沈着率 計算方法の詳細

計算方法	Cal 1	Cal 2
沈着率 [-/h]	$\beta = \frac{2v_{rs}}{h} + v_{diff} \frac{\Sigma A}{V}$ (5)	
$\Sigma A$ [m <sup>2</sup> ]	$\Sigma A_i$	$\Sigma(A_i \times R_{ai}) + A_{furniture}$
$v_{rs}$ : 終末沈降速度 [m/h], $h$ : 天井高 [m] $v_{diff}$ : 拡散による沈着速度 [m/h], $\Sigma A$ : 総表面積 [m <sup>2</sup> ], $V$ : 室容積 [m <sup>3</sup> ], $A_i$ : 壁, 天井, 床の表面積 [m <sup>2</sup> ], $R_{ai}$ : 表面粗さの補正 [-], $A_{furniture}$ : 家具の表面積 [m <sup>2</sup> ]		

表3 実験対象とした室概要

室名	居室		講義室		
	306	610	W831	W834	
空調方式	パッケージユニット方式				
換気装置	全熱交換器				
表面積 [m <sup>2</sup> ]	102	249	390	816	
容積 [m <sup>3</sup> ]	65	127	143	246	
家具	机	0	0	19	32
	椅子	0	0	39	67

3.2 飛沫・飛沫核の曝露量低減効果に関する実験的検討

実居室において、表4に示す実験Case (Case 1: 静穏状態, Case 2: 換気使用, Case 3: 空調使用, Case 4: 換気と空調使用, Case 5: パーテーション設置, Case 6: サーキュレータ設置 (①机上, ②~⑤床)) において行った。図1に室内の機器の配置を示す。測定開始から模擬咳を5秒毎に5回噴射し、パーティクルカウンター (Model 3889, KANOMAX 社) を用いて15分間の測定を行った。計測された粒子の個数濃度及び体積濃度に呼吸量 3) 0.6 m<sup>3</sup>/h を乗じて曝露量と短時間曝露量 (測定開始から30秒までの曝露量) を算出した。咳マシンの正面を測定点 P1, 斜め前を P2, 隣を P3 とした。

表4 模擬飛沫による実験条件

Case	Ventilation System	Air Conditioner	Partition	Air Circulator
	83 [m <sup>3</sup> /h]	1085 (high), 884 (low) [m <sup>3</sup> /h]		
Case 1	off	off	none	none
Case 2	on	off		
Case 3	off	on (high), on (low)		
Case 4	on	on (high), on (low)		
Case 5	off, on	off, on (high)		
Case 6 ~	off	off	none	

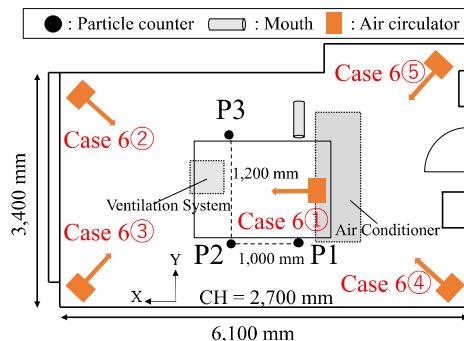


図1 居室内の機器等の配置

4. 研究成果

4.1 室内における浮遊粒子状物質の濃度減衰法による換気・沈着効果

居室・講義室の換気回数  $n_g$ , 粒子の減衰係数  $n_p$  とその計算値をそれぞれ図2, 3に示す。グラ

フ内の直線は  $n_g$  である。概ね  $n_p$  は  $n_g$  を上回り、粒子では換気以外の損失が生じていることがわかる。いずれも、誤差が少ない計算方法は Cal 2 であり、特に小粒径側でその傾向は顕著であった。また、換気・空調を使用し、家具が多数存在する講義室において拡散沈着分を考慮していることで改善されており、Cal 2 は沈着率の計算方法として実空間において、より有効であることを示した。

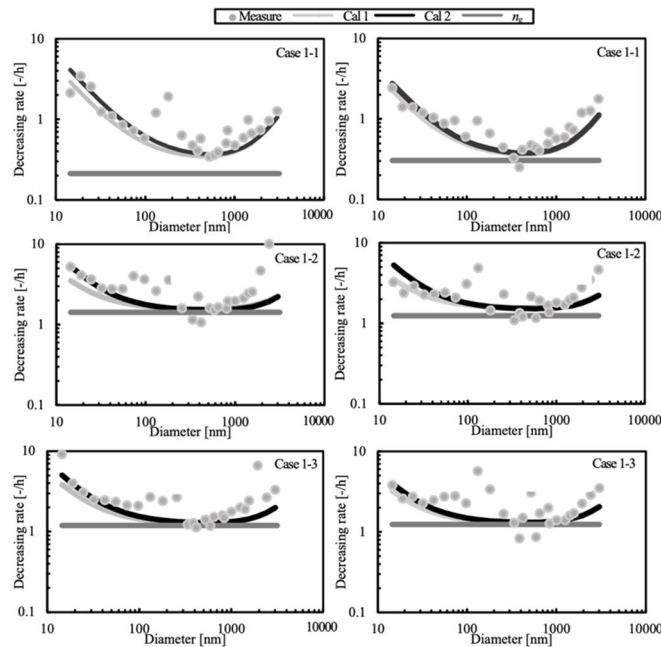


図2 居室の粒径別減衰係数の実測値と計算値(左 306, 右 610)

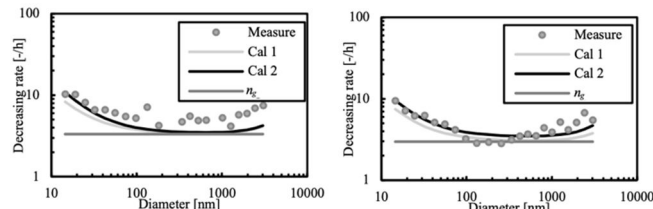


図3 講義室の粒径別減衰係数の実測値と計算値(左 W831, 右 W834)

#### 4.2 飛沫・飛沫核の曝露量低減効果に関する実験的検討

図4に各Caseにおける個数濃度及び体積濃度換算による曝露量を、図5に全体の曝露量に対する短時間曝露量の割合を示す。下側部分は短時間曝露量を表す。

図4より、換気設備を使用したCase 2の曝露量は静穏状態のCase 1と比較して(a)において減少し、(b)において同程度となった。これより、大粒径の粒子に対しては換気による曝露量への影響が小さいことがわかる。また、空調設備を使用したCase 3と換気・空調設備を併用したCase 4の曝露量は(a), (b)共にCase 1と比較して減少した。さらに、図5(a), (b)より、空調設備の使用による短時間曝露量はP1において大幅に減少、P2, 3において同程度であった。以上より、換気・空調設備の使用は曝露量の低減に効果があり、特にP1では空調設備によって短時間曝露量が低減した。

図4より、パーテーションを設置したCase 5の曝露量は静穏気流のCase 1と比較して(a), (b)共に減少がみられた。特に、パーテーションと空調設備を併用したCase 5の曝露量は、パーテーションのみのCase 5と比較して大幅に減少した。Case 5は飛沫がパーテーションを乗り越えたのに対し、Case 5は飛沫が机に沈降したことを可視化で確認した。また、図5(a)より、Case 1と比較してCase 5のP3における短時間曝露量の割合が大きく増加した。これは、飛沫がパーテーションに衝突後、隣に流されていた。

図4より、サーキュレータを設置したCase 6①~⑤は静穏状態のCase 1と比較して(a), (b)共に減少した。特に①で減少が大きく、(a)では65%程度、(b)では80%程度曝露量が減少した測定点が存在した。一方、図5(a), (b)より、Case 1と比較してCase 6のP2における短時間曝露量の割合が大きく増加した。これより、咳マシンの斜め前方にサーキュレータを設置すると、斜め前の席において短時間曝露量の割合が増加する可能性が示唆された。

図6(a), (b)に曝露量と各CaseのP1~P3における風速の関係を示す。風速が大きい程、曝露量が小さい傾向にあり、(a)の個数濃度において支配的な小粒径の粒子は風速に影響されやす



いことがわかる。さらに、(a)、(b)より、曝露量が Case 1 と比較して大きく減少した Case 3、4、5、6 の風速に注目すると、Case 1 の風速と比較して Case 3、4、5 の風速は大きく、Case 6 は概ね同程度となった。Case 1 では、主な風向が咳の噴射方向と同じであったため、飛沫粒子が滞留しやすく、Case 6 では、咳の噴射方向に対し直交方向が主な風向となり、飛沫粒子の進行を阻害したため、風速が大きなくても曝露量が低減したと考えられる。

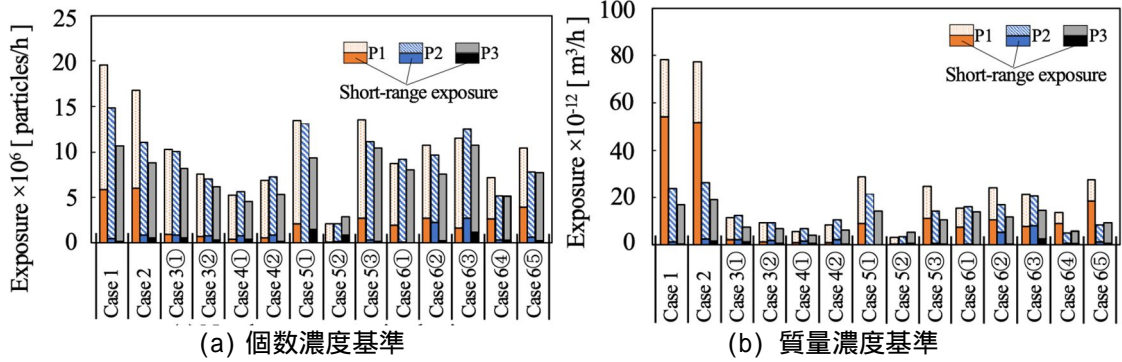


図4 各ケースにおける曝露量

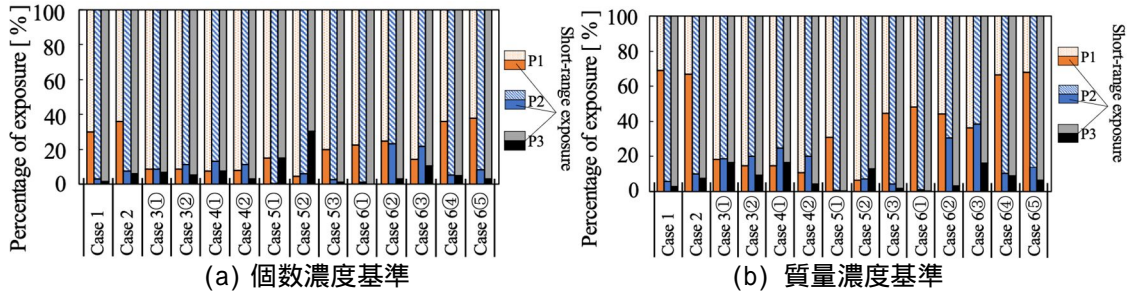


図5 各ケースにおける短期間曝露の割合

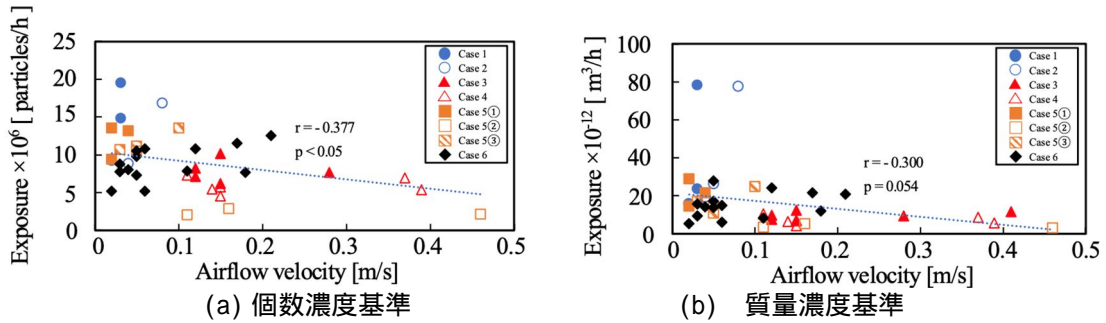


図6 風速と曝露量の関係

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kurabuchi Takashi, Yanagi U., Ogata Masayuki, Otsuka Masayuki, Kagi Naoki, Yamamoto Yoshihide, Hayashi Motoya, Tanabe Shinichi	4. 巻 4
2. 論文標題 Operation of air conditioning and sanitary equipment for SARS CoV 2 infectious disease control	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 JAPAN ARCHITECTURAL REVIEW	6. 最初と最後の頁 608 ~ 620
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2475-8876.12238	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 Umishio Wataru, Kagi Naoki, Asaoka Ryo, Hayashi Motoya, Sawachi Takao, Ueno Takahiro	4. 巻 32
2. 論文標題 Work productivity in the office and at home during the COVID 19 pandemic: A cross sectional analysis of office workers in Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Indoor Air	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/ina.12913	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 -
1. 著者名 Azuma Kenichi, Kagi Naoki, Kim Hoon, Hayashi Motoya	4. 巻 190
2. 論文標題 Impact of climate and ambient air pollution on the epidemic growth during COVID-19 outbreak in Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Environmental Research	6. 最初と最後の頁 110042 ~ 110042
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.envres.2020.110042	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 -
1. 著者名 Hayashi Motoya, Yanagi U, Azuma Kenichi, Kagi Naoki, Ogata Masayuki, Morimoto Shoichi, Hayama Hirofumi, Mori Taro, Kikuta Koki, Tanabe Shin ichi, Kurabuchi Takashi, Yamada Hiromi, Kobayashi Kenichi, Kim Hoon, Kaihara Noriko	4. 巻 3
2. 論文標題 Measures against COVID 19 concerning Summer Indoor Environment in Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JAPAN ARCHITECTURAL REVIEW	6. 最初と最後の頁 423 ~ 434
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2475-8876.12183	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 -

1. 著者名 Azuma Kenichi, Yanagi U, Kagi Naoki, Kim Hoon, Ogata Masayuki, Hayashi Motoya	4. 巻 25
2. 論文標題 Environmental factors involved in SARS-CoV-2 transmission: effect and role of indoor environmental quality in the strategy for COVID-19 infection control	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Environmental Health and Preventive Medicine	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s12199-020-00904-2	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 -

1. 著者名 NOMURA Kaori, KAGI Naoki, SHINOHARA Naohide	4. 巻 86
2. 論文標題 DEHP ADSORPTION CHARACTERISTICS AND PREDICTIVE MODELING ONTO SETTLED DUST IN INDOOR ENVIRONMENTS	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 167 ~ 174
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aije.86.167	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 KONDO Kosuke, KAGI Naoki, NAMIKI Norikazu, UMISHIO Wataru	4. 巻 88
2. 論文標題 DEPOSITION BEHAVIOR OF INDOOR AIRBORNE PARTICULATE MATTER ON HUMAN BODY SURFACES	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 316 ~ 324
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aije.88.316	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 鍵直樹, 綿寛子, 海塩渉, 菅田大助, 滝口陽介
2. 発表標題 微粒子を対象とした混合および置換換気・空調方式による換気効果
3. 学会等名 第38回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会予稿集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鍵直樹, 石井良平, 柳宇, 東賢一, 金勲
2. 発表標題 建築物における粒径別浮遊粒子濃度と経時変化
3. 学会等名 第54回空気調和・冷凍連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鍵直樹, 海塩渉
2. 発表標題 室内における浮遊粒子状物質の濃度減衰法による換気・沈着効果
3. 学会等名 日本建築学会学術講演梗概集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鍵直樹, 海塩渉
2. 発表標題 換気設備と空気清浄機による室内発生汚染物質除去効率
3. 学会等名 令和3年度空気調和・衛生工学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石井良平, 鍵直樹, 柳宇, 東賢一, 金勲, 田村一
2. 発表標題 事務所室内における浮遊微粒子の粒径別質量濃度と個数濃度の実態
3. 学会等名 第37回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会予稿集
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 石井良平, 鍵直樹, 柳宇, 東賢一, 金勲
2. 発表標題 建築物における室内浮遊微粒子の粒径別質量・個数濃度の実態
3. 学会等名 日本建築学会学術講演梗概集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鍵直樹, 柳宇, 金勲, 東賢一, 中野淳太, 島崎大, 小林健一, 長谷川兼一, 開原典子, 齋藤敬子, 櫻田尚樹, 林基哉
2. 発表標題 建築物の環境衛生管理の実態に関する全国調査 その6 室内 PM2.5濃度の実態
3. 学会等名 第79回日本公衆衛生学会総合抄録集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鍵直樹, 木村真理子
2. 発表標題 住宅における調理による表面付着物質
3. 学会等名 2020年室内環境学会学術大会講演要旨集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 近藤恒佑, 鍵直樹, 並木則和
2. 発表標題 人体表面への浮遊粒子状物質の沈着挙動に関する検討 サーマルマネキンとシリコンウエハを使用した浮遊粒子沈着実験
3. 学会等名 令和4年度空気調和・衛生工学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋洋太, 鍵直樹, 海塩渉, 並木則和, 馬場航哉
2. 発表標題 模擬咳発生装置を用いた飛沫・飛沫核発生量の定量化の検討
3. 学会等名 2022年室内環境学会学術大会
4. 発表年 2022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	諏訪 好英 (Suwa Yoshihide) (10416836)	芝浦工業大学・工学部・教授  (32619)	
研究分担者	柳 宇 (Yanagi U) (50370945)	工学院大学・建築学部(公私立大学の部局等)・教授  (32613)	
研究分担者	並木 則和 (Namiki Norikazu) (40262555)	工学院大学・先進工学部・教授  (32613)	
研究分担者	東 賢一 (Azume Kenichi) (80469246)	近畿大学・医学部・准教授  (34419)	
研究分担者	金 勲 (Kim Hoon) (00454033)	国立保健医療科学院・その他部局等・上席主任研究官  (82602)	

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
---------	---------