

診察室における感染予防対策としての局所換気システムの性能評価 (その5) 給気方式ごとのガス発生によるエアロゾル感染リスクの評価

Performance of Local Exhaust System as Prevention Measure of Infection in Consulting Room (Part5) The Effect of Air Supply Systems with Gas Generation on Aerosol Infection Risk

○藤原 碧海 (大阪大学) 山中 俊夫 (大阪大学) 小林 知広 (大阪大学)

崔 ナレ (大阪大学) 小林 典彰 (大阪大学) 吉原 隼 (大阪大学) 張 靱 (大阪大学)

Aoi Fujiwara^{*1} Toshio YAMANAKA^{*1} Tomohiro KOBAYASHI^{*1}

Narae CHOI^{*1} Noriaki KOBAYASHI^{*1} Jun YOSHIHARA^{*1} Ren ZHANG^{*1}

^{*1}Osaka University

In this paper, a local exhaust ventilation system that combines a floor-supply ventilation with a local exhaust system (hood) is introduced as a countermeasure against aerosol infection during close-range conversation. The capture efficiency was calculated to examine the effectiveness of the combination of hood and floor-supply ventilation. In addition, the quanta concentration in front of non-infected person's mouth and the time to reach 5% risk of infection to non-infected person is calculated to evaluate infectious risk in each condition.

はじめに

今なお多くの感染者を生み出す新型コロナウイルス (COVID-19) の感染経路の一つに飛沫核・微小飛沫によるエアロゾル感染があり、換気による対策が求められる。しかしながら、1-2 m 以内の特にマスク未着用時の近接会話時において全般換気の効果に限界がある¹⁾。そこで、近接会話時の感染対策として、局所排気装置 (フード) の導入を提案し、フードの性能は周辺気流の影響を大きく受ける²⁾ことから、給気方式として静穏な気流を形成する全面床吹出し方式を組み合わせた「局所排気併用換気システム」を提案する。導入場面として、本研究では感染者の位置が特定できる診察室と、感染者の位置が不明な診察室以外の面談室や会議室、飲食店などを想定する。また、診察室に導入した局所排気装置の性能評価に関連する既往研究が少なく、不明な点が多いことを受け本報では、全面床吹出し方式とフードの組み合わせの有効性を明らかにすることを1つ目の研究目的とし、3つの給気方式を比較する実大実験を行う。その後、2つ目の研究目的として、提案システムの感染対策としての性能評価を行う。フードと給気方式の有効性を検討するためにフード捕集率を算定し、感染対策性能を評価するため

に在室者口前 quanta 濃度 nd 、対面在室者の感染リスクが 5% に達するまでの時間 $t_{5\%}$ を算定した。本報では、それらの結果を報告する。

1. 実験概要

1.1 実験設備

実験室の断面図を Fig.1 に示し、実験空間のアイソメ図を Fig.2 に示す。実験室は 2,400 × 3,800 × 2,200 mm の実験空間とその床下チャンバー、周辺空間によって構成される。HEPA フィルターにより清浄化した外気を実験空間床下に給気し、その後3通りの床吹出しにより室内に給気する。ここで、給気量は 1000 m³/h (50ACH) で固定されている。排気は、局所排気装置 (フード) と流量バランスをとるための一般的な天井給気口により合計風量 990 m³/h で行われる。局所排気装置の詳細な寸法を Fig.3 に示す。以上の通り、実験室は室内を正圧に保つクリーンルームとして設計されている。また、実験室内には感染者と非感染者を模擬する人体2つを口前間隔 1200 mm で配置した。実験中人体1体あたり 75 W で発熱させた。

実験条件を Table.1 に示す。診察室と診察室以外を想定し、それぞれの想定においてフード排気量を 8 通り変化さ

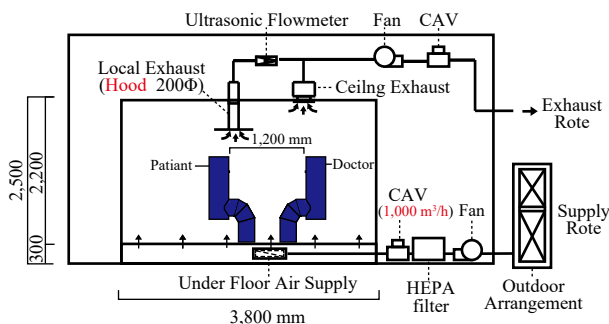


Fig. 1 Cross section of full scale experimental room

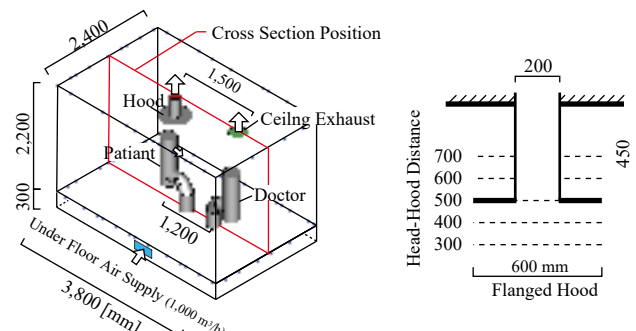


Fig. 2 Isometric view of experimental room Fig. 3 Details of hood

Table 1 Details of Experiment Parameter

	Air Supply Method from Under Floor Chamber	Air Flow Rate [m ³ /h] (Air Change Rate [1/h])	Hood Horizontal Position	Hood Flow Rate [m ³ /h]	Hood-Head Distance [mm]
Case A-1	Floor-supply ventilation	1,000 m ³ /h (50/h)	above the infected person (patient)	0,50,100,150,200,300,400,500	500
Case A-2	8 Swirling flow type diffusers	1,000 m ³ /h (=125m ³ /h/diffuser×8) (50/h)		0,50,100,150,200,300,400,500	500
Case A-3	12 Displacement flow type diffusers	1,000 m ³ /h (=83.3m ³ /h/diffuser×12) (50/h)		0,50,100,150,200,300,400,500	500
Case B-1	Floor-supply ventilation	1,000 m ³ /h (50/h)	middle of manikins	0,50,100,150,200,300,400,500	500
Case B-2	8 Swirling flow type diffusers	1,000 m ³ /h (=125m ³ /h/diffuser×8) (50/h)		0,50,100,150,200,300,400,500	500
Case B-3	12 Displacement flow type diffuser	1,000 m ³ /h (=83.3m ³ /h/diffuser×12) (50/h)		0,50,100,150,200,300,400,500	500

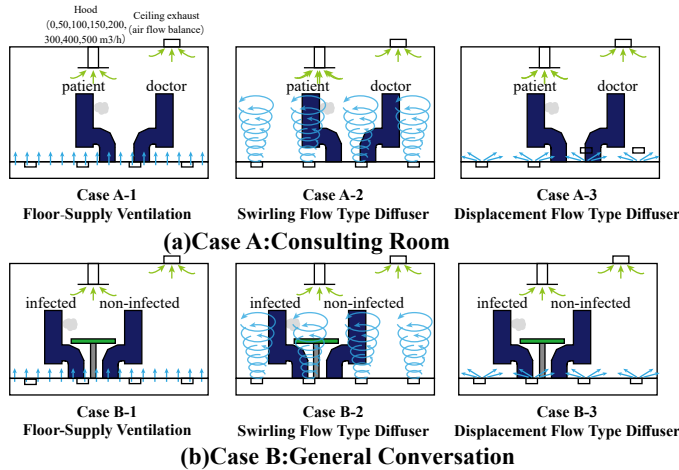


Fig.3 Images of Experimental Conditions

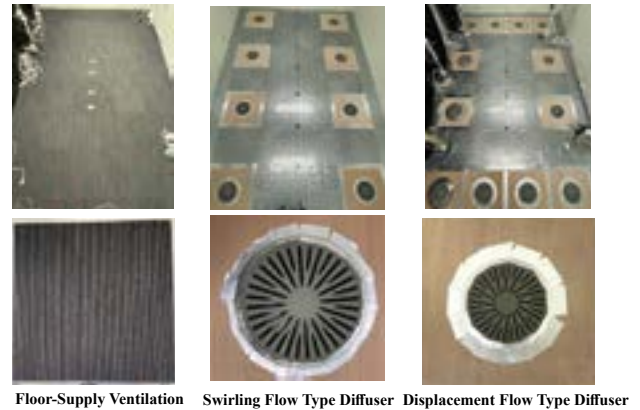


Fig. 4 Floor Surfaces for each Air Supply Method

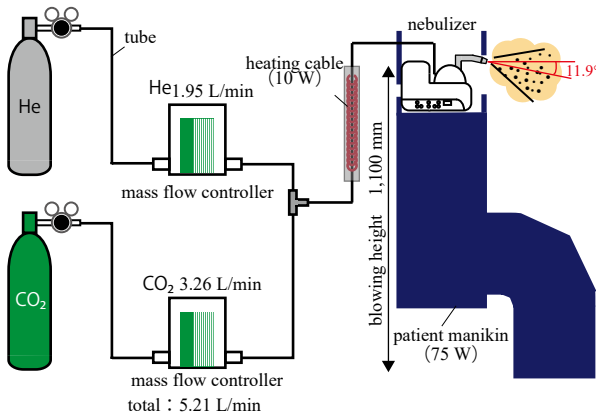


Fig.5 Method of Exhalation Generation

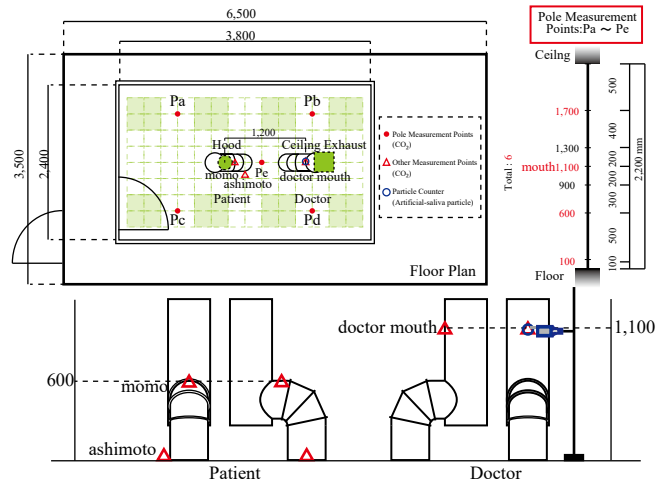


Fig.6 Measurement Points (CO₂ Concentration, Particle number)

せる実験を給気方式3通りに対して行う。実験概念図を Fig.3 に示す。診察室では患者が感染した状態で医者とは会話する場面を想定し、既報のフード位置に関する検討において患者頭上にフードを設置した際最も高い性能を示した³⁾ことから、フードを患者頭上に固定する。診察室以外においては、感染者の位置が特定できないため、現実的な導入位置としてフードを人体間に固定し、机を介しての対面が一般的であることから机を設置して検討を行う。次に、比較する3通りの給気方式における床面を Fig.4 に示す。比較する給気方式は全面床吹出し方式、旋回流型床吹出し方式、置換換気型床吹出し方式の3通りである。全面床吹出しでは、床全面から低風速 (0.3 m/s) で給気することで静穏な気流を形成する。一方旋回流型床吹出しでは、旋回流型床吹出しディフューザー 8 個からの風速 3.58 m/s の給

気により室内気流を形成し、置換換気型床吹出しでは、置換換気型床吹出しディフューザー 12 個により床面に沿った角度で給気する。

1.2 呼気の発生条件・測定点

本研究では、感染者呼気の再現を CO₂ トレーサーガス、ネブライザーによる模擬唾液噴霧の2通りの方法で行い、それらの同時発生を行ったが、本報では CO₂ トレーサーガスによる結果を報告する。呼気発生概念図を Fig.5 に示す。空気と密度を等しくするために CO₂ とヘリウムを 5:3(CO₂:He=3.26 L/min:1.95 L/min) で混合し、ネブライザーにより霧化した模擬唾液粒子とともに感染者口前 (高さ 1,100 mm) から発生させる。なお、呼気風速、吹出し角度は既報の被験者実験⁴⁾により得られた値を使用し、それぞれ 0.3 m/s、下向き 11.9° とした。その後、発生した CO₂ 濃度、

模擬唾液粒子数をそれぞれ Fig.6 に示す測定点で測定した。

2. 評価指標

2.1 フード捕集率評価

フードと給気方式の組み合わせの有効性を検討するために式(1)よりフード捕集率を算定する。式(1)は、発生トレーサーガス流量のうちフードで捕集した割合を示す。

$$\eta = \frac{Q_h(C_h - C_{SA})}{Q_h C_h + Q_e C_e - Q_{SA} C_{SA}} \quad (1)$$

η : フード捕集率 [-] C_h : フードのトレーサーガス濃度 [-]
 Q_h : フード排気量 [m³/h] C_e : 天井排気口のトレーサーガス濃度 [-]
 Q_e : 天井排気口排気量 [m³/h] C_{SA} : 給気 (床下) トレーサーガス濃度 [-]
 Q_{SA} : 床面給気量 [m³/h]

2.2 感染リスク評価

本報では、Wells&Riley model⁹⁾に基づく感染リスク評価式を用いて各換気方式の感染対策性能を評価する。モデルでは、1 quanta を閉鎖空間において 63.2% の新規感染者を生む感染力の単位と定義し、基本式は式 (2) で表される。

$$P = \frac{C}{S_0} = \frac{S_0 - S}{S_0} = 1 - e^{-n} \quad (2)$$

P : 閉鎖空間における新規感染者の増加率
 C : 新規感染者数
 S_0 : (susceptibles) 感染可能性を有する人の数の初期値
 S : 一定時間経過後に感染可能性を有する人の数
 n : 感染リスクの評価単位 [quanta]

モデルを前提に、式 (3) より医者 (在室者) の口前 quanta 濃度 n_d を算定した。この際、感染者の quanta 生成率として REHVA¹⁾ が会話時において算定した 42 quanta/h を使用した。その後 n_d の値を用いて医者 (在室者) の感染リスクが 5% に達するまでの時間 $t_{5\%}$ を式 (4) より算定する。REHVA¹⁾ がオフィスにて十分低い感染リスクと述べる際に 5% という値を使用したことから、本報では十分低い感染リスクとして 5% を採用した。

$$n_d = q_{pm} \cdot \eta = \frac{q}{Q} \cdot \frac{C_d}{C_{pm}} \quad (3)$$

n_d : 医者の口前 quanta 濃度 [quanta/m³]
 q : 感染者の単位時間当たりの quanta 生成量 [quanta/h]
 q_{pm} : 完全混合時の室 quanta 濃度 [quanta/m³]
 η : 完全混合濃度に対する医者の口前トレーサーガス濃度比
 Q : 室換気量 [m³/h]
 C_d : 医者の口前トレーサーガス濃度
 C_{pm} : 完全混合時の室平均トレーサーガス濃度

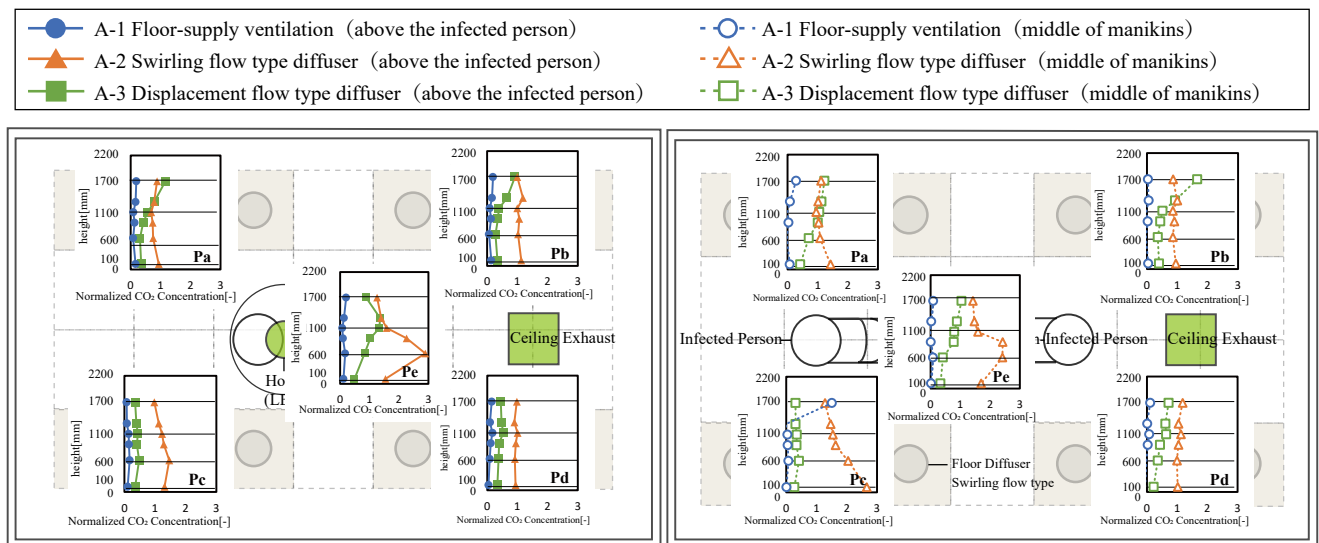
$$t_{p\%} = -\frac{\ln(1 - P/100)}{n_d \cdot P_d} \quad (4)$$

$t_{p\%}$: 医者 (在室者) の感染リスクが P% に到達するまでの時間 [h]
 n_d : 医者 (在室者) の口前 quanta 濃度 [quanta/m³]
 P : 閉鎖空間における新規感染者の増加率
 P_d : 医者 (在室者) の呼吸量 [m³/h]

3. 結果・考察

3.1 CO₂ 規準化濃度の空間分布

フード排気量 100 m³/h (天井排気量 890m³/h) の条件において、排気口における流量重みづけ濃度で規準化した CO₂ トレーサーガス濃度の空間分布を Fig.7 に示す。全面床吹出しでは、Case A, Case B どちらも規準化濃度が 0 に近く、フードで捕集できない場合に関しても一方向に排気されることが分かる。置換換気型では、濃度成層が確認され上昇気流の形成が示唆されるが、全面床吹出しより室内気流に乱れが確認できる。旋回流型では、呼気発生点付近 (Case A: Pe, Case B: Pa, Pc, Pe) で下降気流の存在が示唆され、その他測定点では規準化濃度が 1 に近いことから呼気は下降後に混合すると考えられる。旋回流型では、ディフューザー 1 つ当たり 125 m³/h という大きな給気量により、ディフューザー間で循環流による下降気流が生じると考えられる。



(a) Case A (Hood Flow Rate: 100 m³/h)

(b) Case B (Hood Flow Rate: 100 m³/h)

Fig.7 Space Distribution of Normalized CO₂ Concentration

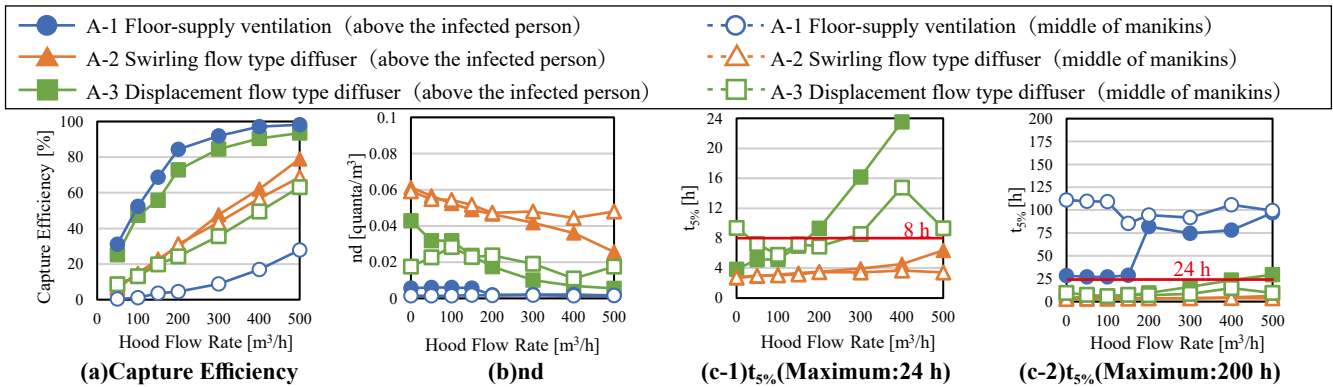
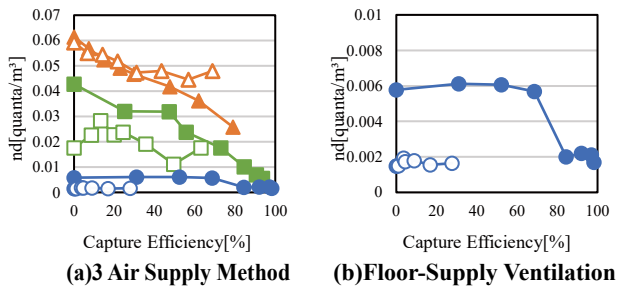
Fig.8 Experimental Results of Capture Efficiency, nd and $t_{5\%}$ 

Fig.9 Relationship between Capture Efficiency and nd

3.2 捕集率、感染リスクの算定結果 (Case A 診察室)

Case A, Case B におけるフード捕集率、感染リスクの算定結果を Fig.8 に示し、本節では Case A の結果に着目する。まず、捕集率は「全面床吹き出し>置換換気型>旋回流型」の順番になる。このことから、やはりフードの捕集性能は周辺気流の乱れを大きく受け、静穏な気流を形成する全面床吹き出しとフードの組み合わせの有効性は明らかである。感染リスクを給気方式毎に比較すると、全面床吹き出しでは $t_{5\%}$ の値は常に 24 時間を超え、感染に対して十分に安全と言え、置換換気型では、フード導入時（フード排気量 200 m^3/h 以上） $t_{5\%}$ の値は一般的な勤務時間の最大値を想定した 8 時間を超え、比較的安全と言える。一方、旋回流型では、 $t_{5\%}$ の値は常に 8 時間を超えず、安全とは言えない。以上の結果から全面床吹き出しにおいて感染リスクが最も低く、提案システムの高い感染対策性能が確認できる。

3.3 捕集率、感染リスクの算定結果 (Case B 診察室以外)

本節では Case B の結果に着目する。捕集率は「旋回流型>置換換気型>全面床吹き出し」の順番になり、全面床吹き出しとフードの組み合わせの有効性は確認できない。Case A と Case B を比較すると、上向き気流が生じる全面床吹き出し、置換換気型ではフード位置の影響が大きく、上昇した呼吸を捕集する位置にフードを導入することが必要だと考えられる。また、旋回流型では下降流と混合の影響により、フード位置の影響をほとんど受けないことがわかる。

感染リスクを給気方式毎に比較する。全面床吹き出しでは、 $t_{5\%}$ の値は常に 24 時間を超え感染に対して十分安全と言え、置換換気型では、概ね $t_{5\%}$ の値は 8 時間付近であり

比較的安全と言える。一方、旋回流型では、 $t_{5\%}$ の値は 4 時間を超えず安全とは言えない。以上から全面床吹き出しにおける高い感染対策性能が示される。ここで、フード排気量に伴う感染リスクの変化の仕方に着目する。Case A では全面床吹き出しと置換換気型においてフードを導入することによる感染リスクの低下が確認できるが、Case B においてフード排気量の変化に伴う感染リスクの変化はわずかであり、フード導入による効果はほとんど見られない。フード捕集率と nd の関係を示す Fig.9 からも、Case B においてはフード捕集率の上昇に伴う感染リスクの低下は小さく、フード導入後も在室者口前に届く呼吸を捕集できないと分かる。以上から、診察室以外において全面床吹き出しとフードの組み合わせによる効果は得られず、全面床吹き出しの示す高い感染対策性能は給気量 1000 m^3/h における全面床吹き出し単体の性能によるものと考えられる。そのため、一般的な給気量の室への局所排気フードの導入には慎重な検討が求められる。

4 . まとめ

本報では、診察室への導入において全面床吹き出しとフードの組み合わせの有効性を確認し、診察室と診察室以外における提案システムの高い感染対策性能を確認した。しかし、診察室以外においては 1000 m^3/h の給気量による影響が大きく、導入には慎重な検討が必要だと考えられる。今後は換気量に関する検討が求められる。

謝辞

なお、本研究は、科研費基礎研究 (B)21H01492、挑戦的研究 (萌芽)19K22011、及び令和 2 年度大阪大学医学部附属型コロナウイルス対策研究開発助成を受けたものである。

参考文献

- 1) REHVA : COVID-19 guidance document version4, 2021
- 2) 小森、山中、小林智広、崔ナレ、小林典彰：横風気流下における局所排気装置の汚染物捕集性能に関する研究 (その 2) フード形状及び汚染源の発熱の有無が汚染物捕集性能に及ぼす影響、日本建築学会大会学術講演梗概集, pp1453-1454, 2021. 9
- 3) 張 韜, 山中 俊夫, 小林 知宏, 崔 ナレ, 小林 典彰, 吉原 隼: 診察室における感染予防対策としての局所換気システムの性能評価に関する研究 (その 1) CFD 解析によるヒト由来飛沫核の拡散挙動と換気による除去性能の検討, 令和 3 年度 (第 51 回) 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, A-16
- 4) 吉原 隼, 山中 俊夫, 小林 知宏, 崔 ナレ, 小林 典彰, 張 韜: 診察室における感染予防対策としての局所換気システムの性能評価に関する研究 (その 2) 対面者からの飛沫核暴露による在室者の感染リスクに関する検討, 令和 3 年度 (第 51 回) 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, A-17
- 5) Riley EC, Murphy G, Riley RL. Airborne spread of measles in a suburban elementary school. American Journal of Epidemiology 1978; 107: 421-432.