

## 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

### Performance of Local Exhaust System as Prevention Measure of Infection in Consulting Room - Part 2 Estimation of Infection Risk due to Exposure to Droplet Nuclei from Infected Person in front

○吉原 隼 (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) 張 韌 (大阪大学)

Jun YOSHIHARA\*<sup>1</sup> Toshio YAMANAKA\*<sup>1</sup> Tomohiro KOBAYASHI\*<sup>1</sup>

Narae CHOI\*<sup>1</sup> Noriaki KOBAYASHI\*<sup>1</sup> Ren ZHANG\*<sup>1</sup>

\*<sup>1</sup>Osaka University

In this paper, a local exhaust system is introduced into the consultation room to explore more effective ventilation measures in order to prevent infection. This study plans to carry out the experiment in a full-scale model. CFD steady state analysis was used to figure out the capture efficiency of the hood and estimate the infection risk due to exposure to droplet nuclei from infected person in front. In addition, contribution rate of the hood is estimated using SVE 5, which is known as one of the ventilation efficiency indices.

#### はじめに

2019年秋より感染が確認された新型コロナウイルス感染症 (Coronavirus disease 2019: COVID19) は、さまざまに変化を遂げながら2022年に入っても収束したとは言えない状況が続いている。その感染経路の一つとして、空中を漂う飛沫核による空気感染が挙げられる。本研究は咳や会話によって排出された飛沫核に対し、局所排気装置 (フード) を用いて除去するという着想に基づき、フードの感染予防対策としての性能把握を目的としている。本報では空間として感染者と接触する可能性の高い診察室を、状況として患者と医者が対面し着席して会話をすることを想定した。また患者の口から発生した飛沫核を空気と同じ密度を持つ仮想のトレーサーガスを用いて再現し、数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics : 以下 CFD) を用いた定常解析において、フードの排気量、高さ、位置及び室換気回数をパラメータとして変化させ、それぞれのケースについて、患者の口から発生したトレーサーガスに対するフードの捕集率を算定した。また換気効率指標として知られる SVE 5<sup>1)</sup> (Scale of Ventilation Efficiencies 5) を

用いてフードの寄与率分布を明らかにした。さらに患者の15分間在室時の感染リスク及び感染リスクが5%に達するまでの時間の算定を行なった結果を報告する。

#### 1. CFD 定常解析概要

##### 1.1 解析空間

本研究は Fig.1 に示す実寸大模倣実験を予定しており、室内に HEPA フィルターを通して浄化した空気を給気することで、クリーンルームとして機能するチャンバーを構築した。Fig.1 において赤線で示したチャンバー内だけを解析空間とする。給気方法は室内の流れ場に与える影響を最小するため、全面床染み出し空調を採用した。また Fig.1 に示す実験装置の都合上、予定している実寸大模型実験では床面給気量が 1,000 m<sup>3</sup>/h で固定されることになる。この場合、室換気回数は 49.85 回/h と非常に大きくなる。空間の主要な寸法は Fig.2 に示すように、2.4 × 3.8 × 2.2 (= 20.064 m<sup>3</sup>) の空間で、患者と医者が対面し 1,200 mm の距離を開けて着席して会話をすることを想定する。患者の頭上に局所排気装置 (フード) を導入し、流量バランスを取るための一般的な排気

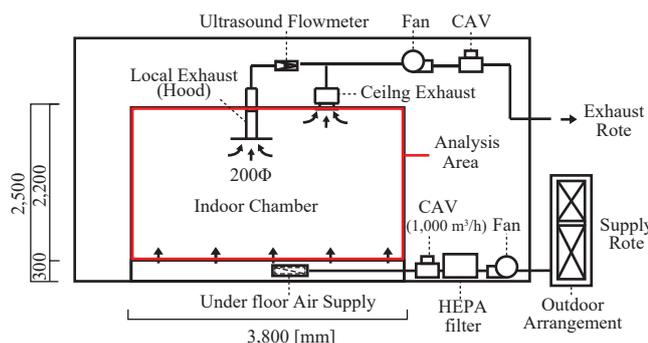


Fig. 1 Cross section of full scale experiment

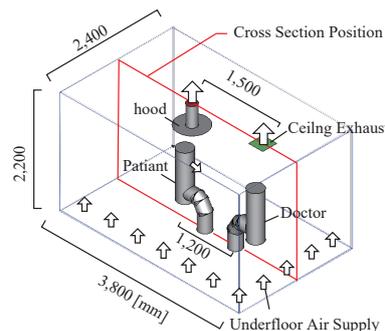


Fig. 2 Analytical model

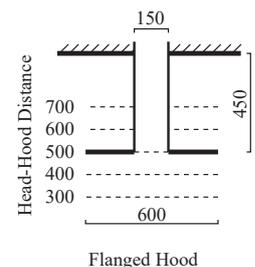


Fig. 3 Details of hood

口をフードと中心間距離 1,500 mm の位置に設置した。フードの形状は既往研究<sup>2)</sup>において捕集性能の高かった Flanged 型を採用した (Fig.3)。

1.2 CFD 解析条件及び境界条件

主な解析手法を Table 1 に示す。患者が新型コロナウイルス感染症に感染していると仮定し、会話により患者の口から発生した飛沫核を、気流と共に挙動するものとして、空気と同じ密度を持つ仮想のトレーサーガスを用いて再現する。なお発生条件は前報<sup>3)</sup>に記載する発話時の呼気風速及び呼吸量の測定実験により得られた風速 0.299 m/s、角度 11.9° (鉛直下向き)、呼吸量 5.21 L/min (口の大きさ 17.04 mm × 17.04 mm) を使用する。そのため本解析ではマスクをしないで会話をすると仮定する。境界条件を Table 2 に示す。トレーサーガス発生濃度は換気回数に基づく基準化濃度とし、式(1)において完全混合時の濃度が 1 となるように、換気量ごとにトレーサーガス発生濃度 (C<sub>tg</sub>) を変化させている。トレーサーガス濃度図 (Fig.5) において濃度を相対的に比べることが狙いである。

$$C_p = \frac{M \times C_{tg}}{Q} = 1 \quad (1)$$

C<sub>p</sub>: 完全混合時の室内濃度 [-]      C<sub>tg</sub>: トレーサーガス発生濃度 [-]  
M: トレーサーガス発生流量 [m<sup>3</sup>/h]      Q: 換気量 [m<sup>3</sup>/h]

また発熱は人体からのみとし一体 75 W × 2 人とした。人体モデルは実験で使用予定の模擬人体を再現した。また乱流エネルギー:k及び乱流消失率:εを Table 3 に示す。

1.3 解析パラメータ

フードの捕集率への影響及び感染リスクへの影響を比較するためにフード排気量、フード - 頭上間距離、フード水平位置及び室換気回数をパラメータとして変化させた。パラメータ表を Table 4 に示す。目的ごとにパラメータを Case A, B, C, D の 4 種類に分類した。Case A は予定している実験の予備解析および実験パラメータの検討として、換気回数を 49.85 回/h (床面給気量: 1,000 m<sup>3</sup>/h) に固定し、フード排気量、フード - 頭上間距離、フード水平位置を Table 4 の通りに変化させた。Case B では換気回数の影響を見るためにフードの排気量、フード頭上

Table 1 Analysis Condition

Analysis Condition	
CFD Code	STREAM ver.2021
Analysis Volume	2.4 (x) × 3.8 (y) × 2.2 (z)
Total Number of Mesh	2,444,148
Turbulence Model	Standard k-ε model
Algorithm	SIMPLE
Discretization Scheme	QUICK
Number of Cycles	3,000

Table 2 Boundary Condition

Boundary Condition			
Wall	Wall Boundary	no-slip	
	First Mesh from Wall	100 mm wide	
	Convective heat transfer rate	Ceiling	0.957 W/(m <sup>2</sup> K)
		Wall	3.048 W/(m <sup>2</sup> K)
		Floor	4.018 W/(m <sup>2</sup> K)
Temperature	20 °C		
Emissivity	0.9 [-]		
Inflow Boundary*	k = 3/2(U · I) <sup>2</sup> ε = (Cμ <sup>3/4</sup> · k <sup>1/2</sup> )/ L		
Human Heat Generation	75W × 2 person		
Emission	Contaminant	Tracer gas	
	Diffusivity	0.00167 (CO <sub>2</sub> )	
	Temperature	32 °C	
	Concentration	Normalization by Ventilation Volume	
	Flow Rate	5.21 L/min	
	Velocity	0,299 m/s	
	Angle	-11.9°	
	Mouth Size	17.04 × 17.04 mm	
Initial Air Temperature	20 °C		
Supply Air Temperature	20 °C		

\* I: Turbulence intensity      Cμ: Turbulence model constant  
U: Mean flow velocity [m/s]      L: Turbulent length scale [m]

Table 3 Turbulence Condition

	I [-]	Cμ [-]	L [m]	Q [m3/h]	k [m2/s2]	ε [m2/s3]
mouth	0.1	0.09	0.0017	0.313	1.34E-03	4.74E-03
				120.1	2.01E-09	1.48E-12
floor	0.01	0.09	0.01	240.5	8.05E-09	1.19E-11
				401.0	2.24E-08	5.50E-11
				601.6	5.04E-08	1.86E-10
				802.2	8.96E-08	4.40E-10
				1000	1.39E-07	8.53E-10

Table 4 Details of Each Parameter

	Parameter	Air Change Rate [1/h] (Flow Rate [m <sup>3</sup> /h])	Hood Flow Rate [m <sup>3</sup> /h]	Hood-Head Distance [mm]	Hood Horizontal Position [mm]
Case A	Reference Condition	49.85 (1,000)	100	500	0
	Hood Flow Rate	49.85 (1,000)	50, 150, 200, 250, 300	500	0
	Hood-Head Distance		100	300, 400, 600, 700	
	Hood Horizontal Position			500	-300,-200,-100,100,200,300
Case B	Air Change Rate	49.9, 40, 30, 20, 12, 6	100	500	0
Case C	Reference Condition	6 (120.1)	100	500	0
	Hood Flow Rate	6 (120.1)	50, 150, 200, 250, 300	500	0
	Hood-Head Distance		100	300,400,600,700	
	Hood Horizontal Position			500	-300,-200,-100,100,200,300
Case D	Air Change Rate	49.9, 40, 30, 20, 12, 6	0	500	0

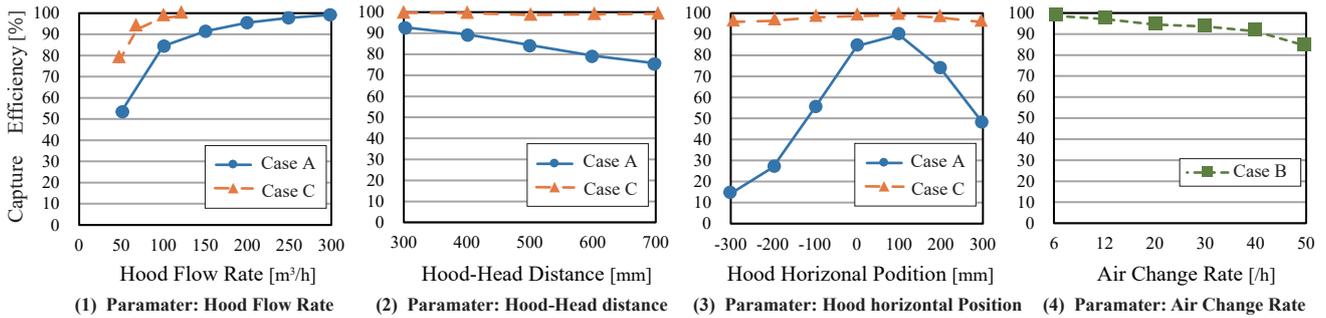


Fig. 4 Estimation of capture efficiency in Case A, B, C

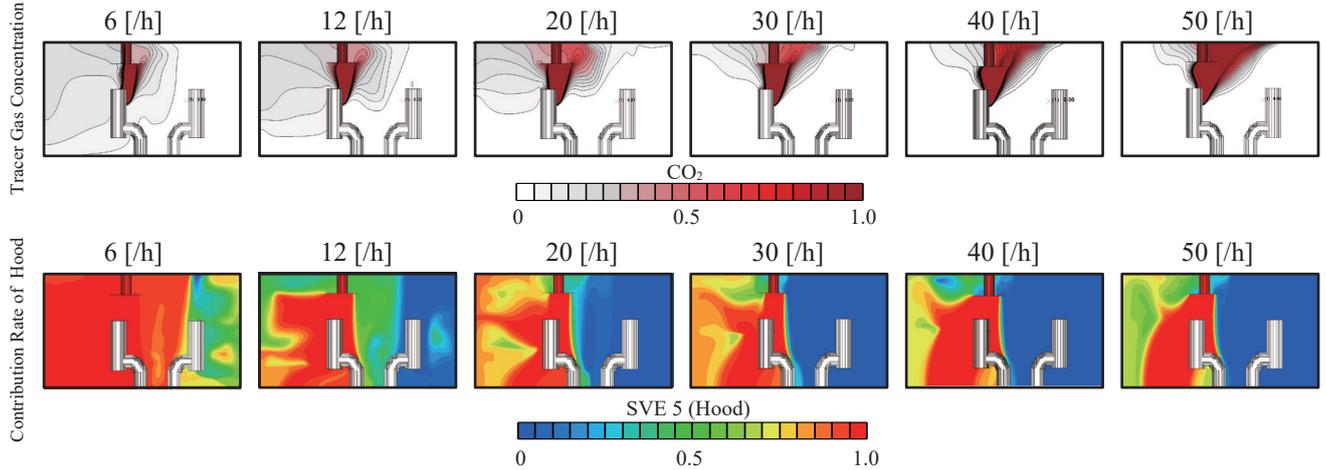


Fig.5 Distribution of tracer gas Concentration and Contribution Rate of Hood in Case B

間距離、フード水平位置を固定し、床面給気量を変化させることにより、換気回数を REHVA<sup>4)</sup> の推奨している 6-12 回/h を参考に Table 4 の通りに変化させた。Case C ではより一般的な環境下で検討を行うために換気回数 6 回/h (床面給気量: 120.4 m³/h) に固定し、フード排気量、フード-頭上間距離、フード水平位置を Table 4 の通りに変化させた。Case D はフードを導入せずに、換気回数を Table 4 の通りに変化させた。Case B (フード 100 m³/h) と比較することで、感染リスクの低減をフードの有無で比較することが狙いである。Case A, B, C (37 条件) において捕集率を、Case A, B, C, D (41 条件) において医師の感染リスクを算定した。なお解析サイクル数は、Case A の基準条件 (Table 4) にて 10,000 回、5,000 回、3,000 回とした定常解析を行い、全ての解析で 10<sup>4</sup> 以下の収束を確認できたため、サイクル数は 3,000 回とした。

## 2. 捕集率の算定及び SVE 5 を用いた比較

### 2.1 捕集率の算定式

患者の口から発生させたトレーサーガスに対するフードの捕集率を式 (2) を用いて算定した。

$$\eta = \frac{Q_h C_h}{Q_h C_h + Q_e C_e} \quad (2)$$

$\eta$ : フード捕集率 [-]       $C_h$ : フードのトレーサーガス排気濃度 [-]  
 $Q_h$ : フード排気量 [m³/h]       $C_e$ : 一般排気口のトレーサーガス排気濃度 [-]  
 $Q_e$ : 一般排気口排気量 [m³/h]

### 2.2 換気効率指標: SVE 5

換気効率指標として知られる SVE 5<sup>1)</sup> を用いて、空間の任意の点におけるフードの寄与率分布を求めた。SVE 5 は式 (3) により与えられる。

$$SVE 5(x) = \frac{C'(x, n)}{C_0(n)} \quad (3)$$

$n$ : 吸い込み口番号  
 $C'(x, n)$ : 初期条件として室内清浄かつ  $n$  番吸い込み口濃度  $C_0(n)$  の条件下で温度輸送方程式を逆時間方向に解いて得られる位置  $x$  での濃度  
 $C_0(n)$ :  $n$  番吹き出し口 (吹き出し風量  $Q_{(n)}$  [m³/s]) から  $q$  [m³/s] のトレーサーガスの発生があるときの吹き出し気流濃度 ( $C_0(n) = q/Q_{(n)}$ )

SVE 5 の算出は STREAM.ver2021 の機能を用いた。

### 2.3 捕集率の算定結果と考察

Case A, B, C の捕集率の算定結果を Fig.4 に示す。Case A と Case C を比較すると、すべての条件で捕集率は Case C が上回った。これはフードと一般排気口の流量比が小さくなったためだと考えられる。Case A ではフードの水平位置が捕集率に最も影響を与えた。これは換気回数: 49.8 回/h (総給気量 1,000 m³/h) という大きな流量が、室全体に強い上向きの気流場を作った影響だと考えられる。Case C ではフードの排気量が捕集率に最も影響を与えた。これによりフードの捕集域に影響を与えるような大きな気流がない場合は、フードの排気量が捕集率に最も影響することが分かった。

### 2.4 トレーサーガス濃度分布図と SVE 5 の比較と考察

Case B におけるトレーサーガス濃度分布図及び SVE 5 によるフードの寄与率を Fig.5 に示す。SVE 5 では 1 に近いほど、その点のトレーサーガスがフードから排

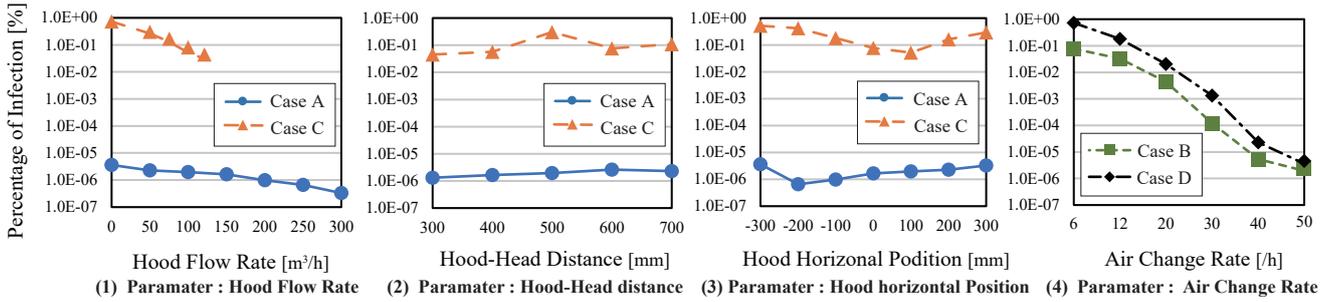


Fig. 6 Estimation of infection risk of doctor in Case A, B, C, D

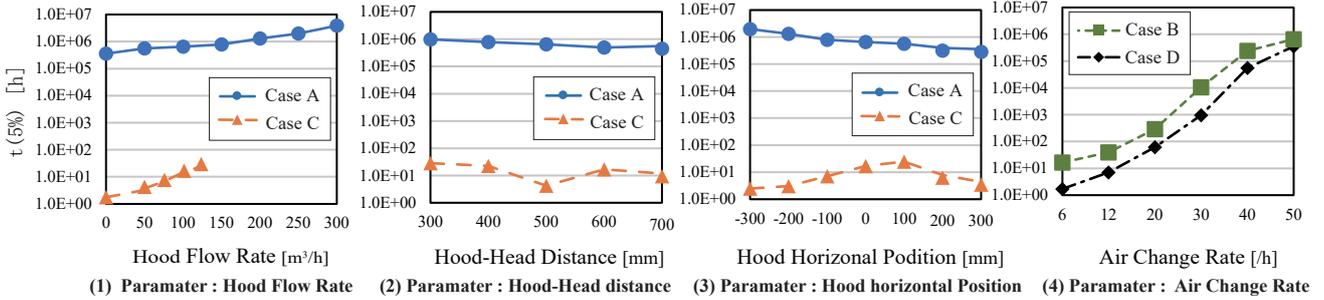


Fig. 7 Estimation of time for infection risk reach to 5% in Case A, B, C, D

出されていることが分かる。Fig.5(Case B) ではフードの排気量は 100 m<sup>3</sup>/h であり、換気回数が大きくなるに従い、一般排気口の流量も大きくなり、その結果フードの勢力範囲に大きな影響を与えたことが分かった。

### 3. 感染リスクの算定

#### 3.1 感染リスク評価手法

感染リスク評価には Welles&Riley Model を用いた。Welles&Riley Model の基本式は式 (4) で与えられる。

$$P = \frac{C}{S_0} = \frac{S_0 - S}{S_0} = 1 - e^{-n} \quad (4)$$

$P$  : 閉鎖空間における新規感染者の増加率  
 $C$  : 新規感染者数  
 $S$  : (susceptibles) ある空間に一定時間入室後に感染可能性を有する人の数  
 $S_0$  : (susceptibles) 感染可能性を有する人の数の初期値  
 $n$  : 感染リスクの評価単位 [quanta]

本研究では REHVA<sup>4)</sup> の算出した軽度の運動、会話時の quanta 生成量 42 quanta/h を用いた。また解析結果から医者 の口前濃度と患者の口からのトレーサーガス発生濃度比を取ることで感染リスクを算定した。また一回の診察時間を考慮して、在室時間は 15 分と仮定した。また感染リスクの評価基準として REHVA<sup>4)</sup> が用いた 5% という値を基準に、感染リスクが 5% に達するまでの時間 :  $t(5\%)$  も算出した。

#### 3.2 感染リスクの算定結果と考察

Case A~D の感染リスク :  $P$  を Fig.6 に、感染リスクが 5% に達するまでの時間 :  $t(5\%)$  の算定結果を Fig.7 に示す。結果を比較すると Case A において、全体的に  $P = \text{約 } 10^{-6} \%$ 、 $t(5\%) = \text{約 } 10^6 \text{ h}$  となり感染リスクは殆どないと言える。Case C では、フード水平位置 -300 mm における  $P = 0.52 \%$ 、 $t(5\%) = 2.5 \text{ h}$  で最大、最短となっ

た。またフードの有無を Case B, D で比較すると、どちらも換気回数が 6 回/h で、フード排気量 0 m<sup>3</sup>/h の Case D では  $P = 0.73 \%$ 、 $t(5\%) = 1.7 \text{ h}$  であったのに対し、フードを 100 m<sup>3</sup>/h 導入した Case B では  $P = 0.08 \%$ 、 $t(5\%) = 16.7 \text{ h}$  となった。 $t(5\%) = 16.7 \text{ h}$  は一般的な医師の勤務時間を考えると十分に長い時間だと言える。

#### おわりに

本報では、診察室で対面着席時に会話をする状況について CFD 定常解析を行い、フードの捕集率、寄与率及び医師の感染リスクの算定結果について報告した。結果から、フードのより純粋な捕集性能を見るためには、実験装置の 49.8 回/h という換気回数は、過大であることが分かった。また換気回数 6 回/h (1,000 m<sup>3</sup>/h) の場合、フードを 100 m<sup>3</sup>/h 導入することで、十分な感染症対策効果があることが確認された。今後は実寸大模型実験を行い、CFD 解析 (Case A) の精度検証及び咳発生に対するフードの捕集性能、感染リスク評価を行う予定である。

#### 謝辞

なお、本研究は、科研費基盤研究 (B)21H01492、挑戦的研究 (萌芽)19K22011、及び令和 2 年度大阪大学医学部新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

- 小林、加藤、村上：不完全混合室内における換気効率・温熱環境 形成効率評価指標に関する研究、第 1 報 CFD に基づく局所領域の換気効率評価指標の開発、空調調和・衛生工学学会論文集 No. 6, pp29-36, 1998. 1
- 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
- 張、山中、小林智広、崔ナレ、小林典彰：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、空調調和・衛生工学学会近畿支部学術研究発表会論文集, 2022. 3, 掲載予定
- REHVA : COVID-19 guidance document version4,2021