

令和3-5年度厚生労働行政推進調査事業費補助金
(循環器疾患・糖尿病等生活習慣病対策総合研究事業)
分担研究報告書

加熱式たばこの副流煙分析および受動喫煙環境下のシミュレーション評価（令和3-5年度総括）

分担研究者 李 時恒 名古屋大学

研究要旨

喫煙によって発生するタバコの煙は、主流煙と副流煙の両方の発がん物質として定義され、人の健康への危険性が広く認識されている。したがって、喫煙室などの屋内空間では、喫煙によって発生する汚染物質を効率的に除去するための換気設計が必要である。最近では、加熱式タバコ（紙巻き状の非燃焼加熱式タバコ）は従来の紙巻式タバコより発生する副流煙が少ないため、加熱式タバコ専用の室内喫煙エリアも設置されている。しかし、加熱式タバコによる健康への危険性はまだ明らかになっておらず、室内環境における受動喫煙による有害性及びその健康影響については明確な検討事例が少ない。第1章では、喫煙時の加熱式タバコ呼吸特性と汚染物質の発生を実測により定量的に分析し、呼吸特性を適用した解析モデルを提案することで化学種物質の挙動特性を明らかにし、それらの結果をもとに第2章では、非定常計算用の数値解析モデルを構築し、構築した数値解析モデルを用いて受動喫煙防止のために喫煙者と受動喫煙者の離れた距離による有害物質の摂取量について定量的に検討した。第3章では実測によるエアバリア最適風速の検証と第1、2章の結果をもとに数値モデルと飲食店舗モデルを構築し、受動喫煙防止のためのエアバリア型テーブルの提案・検討を行った。

はじめに

喫煙によって発生するタバコの煙は、主流煙と副流煙の両方の発がん物質として定義¹⁾され、人の健康への危険性が広く認識されている。したがって、喫煙室などの屋内空間では、喫煙によって発生する汚染物質を効率的に除去するための換気設計が必要である。最近では、加熱式タバコ（紙巻き状の非燃焼加熱式タバコ）は従来の紙巻式タバコより発生する副流煙が少ないため、加熱式タバコ専用の室内喫煙エリアも設置されている。しかし、加熱式タバコによる健康への危険性はまだ明らかになっておらず、室内環境における受動喫煙による有害性及びその健康影響については明確な検討事例が少ない。

第1章（令和3年度）では、喫煙時の加熱式タバコ呼吸特性と汚染物質の発生を実測により定量的に分析し、呼吸特性を適用した解析モデルを提案する

ことで化学種物質の挙動特性を明らかにすることを目的とする。第2章（令和4年度）では、非定常計算用の数値解析モデルを構築し、構築した数値解析モデルを用い、受動喫煙防止のために喫煙者と受動喫煙者の離れた距離による有害物質の摂取量についての定量的な検討を行う。第3章（令和5年度）では、実測と数値解析モデルをもとに飲食店舗（加熱式たばこ専用室）で飲食する非喫煙者の受動喫煙曝露評価を行う。また、受動喫煙防止のためのエアバリア型テーブルの提案し、その効果を明らかにする。

第1章 加熱式タバコの喫煙による呼吸特性と化学種物質の挙動特性（令和3年度）

1.1 研究目的

第1章（令和3年度）では、喫煙時の加熱式タ

バコ呼吸特性と汚染物質の発生を実測により定量的に分析し、呼吸特性を適用した解析モデルを提案することで化学種物質の挙動特性を明らかにすることを目的とする。

1.2 研究方法

(1) 実測による喫煙時の呼吸特性

本研究（第1章）では、喫煙時の呼吸特性を検討するために、呼吸流量の測定を行う。同時に、汚染源を二酸化炭素（CO₂）として呼気 CO₂ 濃度を測定する。**Figure 1** に実測風景を示す。実測機器としては流量と CO₂ 濃度が同時測定可能なエアロモニター（ミナト医科学, AE-310E）を使用する。被験者実測では**Figure 2(a)**に示す呼吸手順（非喫煙5回、喫煙1回）を1サイクルとし、加熱式タバコの喫煙による呼吸特性について複数回測定する。なお、喫煙時は**Figure 2(b)**に示すように呼吸方法を統一している。また、副流煙については、タバコ本体から発生する CO₂ 濃度を測定する。

(2) 数値解析による化学種物質の挙動特性

喫煙時の化学種物質発生状況および挙動特性を検討するため、数値解析モデルを作成する。**Figure 3** に解析モデルの概要を示す。解析領域は1.80(x)×1.00(y)×1.00(z) m とし、人体は上半身のみ解析対象とする。**Table 1** に解析条件を示す。呼吸特性は実測と同様に非喫煙時の呼吸5回と喫煙中の呼吸1回を1サイクルとし、呼吸は鼻で喫煙は口で行う。また、加熱式タバコ1スティックあたりの喫煙時間は約6分間であり、喫煙は10サイクル行くと設定する。汚染物質は化学種物質としてCO₂とNicotine（ニコチン）の2種類を対象とし、人体モデルの口と鼻、タバコ先端部を汚染物質の発生源とする。副流煙の発生源は0.01(x)×0.01(y)×0.01(z) m³としてモデル化し、空間内環境のCO₂濃度は1,000 ppm、ニコチンは0 ppbとする。実測で得られた呼吸流量とCO₂濃度、ニコチン濃度を境界条件として与えるが、呼吸から発生するニコチン量は主流煙の30%²⁾とする。数値解析は喫煙1サイクルを非定常計算で行い、発生するCO₂、ニコチン濃度および空気中での挙動特性を確認する。

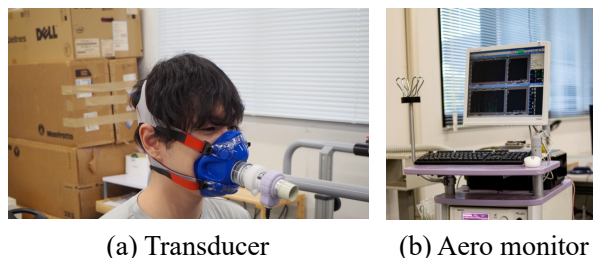


Fig. 1 Status of measurement

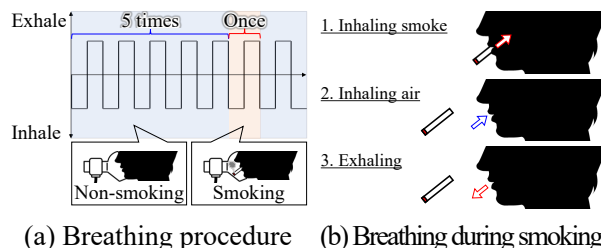


Fig. 2 Breathing Method

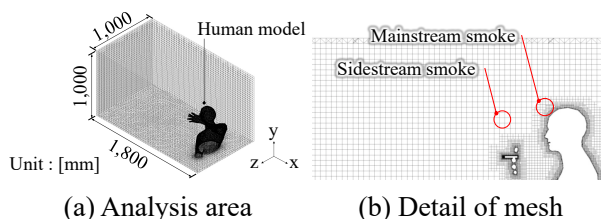


Fig. 3 Overview of analytical model

Table 1. Analysis conditions

Items	Contents	
Scheme	SIMPLE	
Turbulence model	Standard k-ε model	
Meshes	Approximately 1,300,000	
Calculation time	60 s (1 cycle)	
CO ₂ emission [ppm] (Mainstream smoke)	Non-smoking	40,000
	Heated tobacco	42,000
CO ₂ emission [ppm] (Sidestream smoke)	1,100	
Nicotine emission [mg/stick] (Mainstream smoke)	1.640	
Nicotine emission [mg/stick] (sidestream smoke)	0.056	
Temperature [°C]	Exhalation	32
	Indoor air	24
	Heated tobacco	47

1.3 結果及び考察

(1) 喫煙時の呼吸特性

Figure 4 に非喫煙時と喫煙時における測定した呼吸特性を示す。呼吸特性と CO_2 濃度は数回の呼吸を行い、アンサンブル平均化 (ensemble average) した。喫煙時の一呼吸当たりの空気流量は約 2,000 ml となり、非喫煙時の約 600 ml と比べ、約 3.3 倍増加した。

Figure 5 に喫煙 1 サイクル (呼吸 5 回+喫煙 1 回) における呼吸流量, Figure 6 に呼吸 CO_2 濃度を示す。非喫煙時の最大呼気 CO_2 濃度は約 40,000 ppm, 喫煙時の最大呼気 CO_2 濃度は約 42,000 ppm と計測され、喫煙時と非喫煙時における呼気の CO_2 濃度の差は小さかった。一方、実測された空間内温度は約 24.0 °C (T 型熱電対による測定値) であり、喫煙時の呼吸温度は約 32.0 °C (T 型熱電対による測定値), 加熱式タバコの表面温度は約 47.0 °C (赤外線カメラによる測定値) であった。

(2) 喫煙による化学種物質の挙動特性

Figure 7, Figure 8 に CO_2 とニコチンの解析結果を示す。喫煙による汚染物質発生量および空気中における挙動が再現され、 CO_2 は非喫煙, 喫煙時において常に発生し、室内に拡散された。加熱式タバコの場合、副流煙から発生する CO_2 濃度が約 1,100 ppm として非常に少なく、副流煙から発生する CO_2 は呼吸と比べ室内への影響が小さい結果となった。一方、ニコチンは喫煙時のみ口から発生し、ニコチンの副流煙は CO_2 に比べて大きく室内へ影響を与える結果となった。また、発生した汚染物質は加熱式タバコと人体表面温度により発生する上昇気流に沿って上昇した。

1.4 結論 (第 1 章)

本研究 (第 1 章) では、喫煙時の呼吸特性と化学種物質の挙動特性を定量化することを目的とし、実測と数値解析を行った。実測により得られた呼吸流量と汚染物質を基に数値解析モデルを作成し、喫煙時の化学種物質挙動特性を明らかにした。

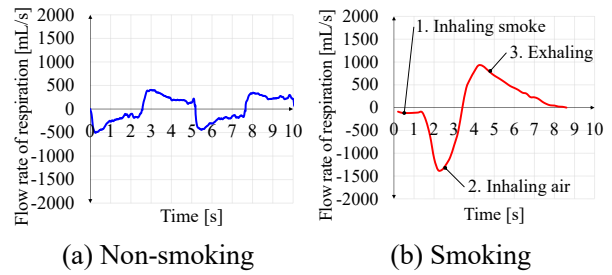


Fig. 4 Respiratory characteristics

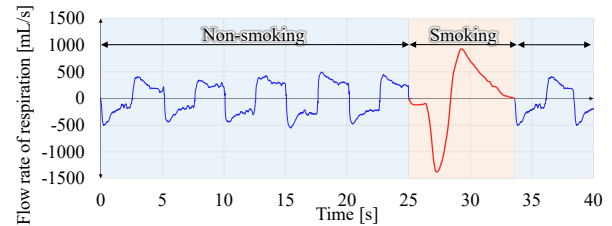


Fig. 5 Fluctuations in flow rate of respiration

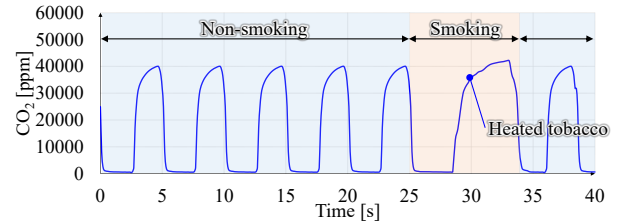


Fig. 6 CO_2 concentration with the tobacco

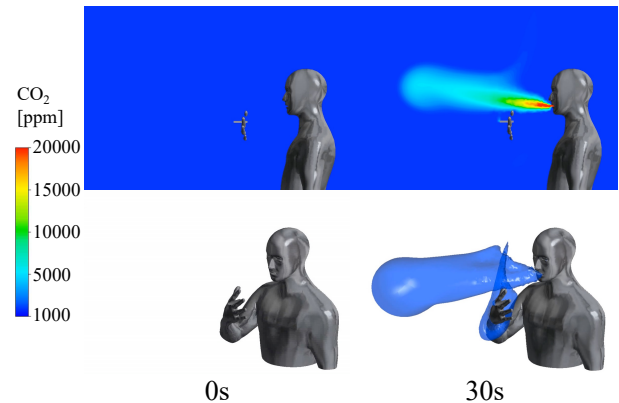


Fig. 7 Analysis results (CO_2)

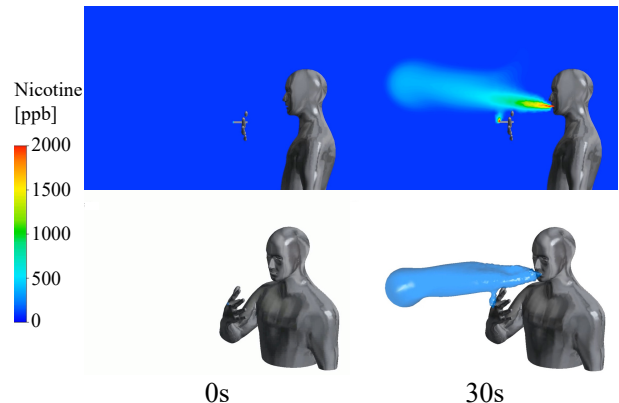


Fig. 8 Analysis results (Nicotine)

第2章 数値解析による受動喫煙者の有害物質摂取量の評価（令和4年度）

2.1 研究目的

第2章（令和4年度）では、非定常計算用の数値解析モデルを構築し、構築した数値解析モデルを用い、受動喫煙防止のために喫煙者と受動喫煙者の離れた距離による有害物質の摂取量についての定量的な検討を行う。

2.2 研究方法

(1) 数値解析モデルの構築

喫煙際には一般の呼吸と違う喫煙プロセスを持ち、その喫煙プロセスを **Figure 9** に示す。喫煙プロセスは3段階に構成され、① タバコから煙を吸い上げるプロセス (inhaling smoke), ② タバコを口から外して周囲の空気を吸うプロセス (inhaling air), ③ 煙を吐き出すプロセス (Exhaling) で構成される。この喫煙プロセスでの呼吸流量の時系列変化は前年度の研究で測定しており、その結果を呼吸5回と喫煙1回を1セットとして **Figure 10** に示す。主流煙からの CO_2 濃度は **Figure 11** に、副流煙から発生する CO_2 濃度は **Figure 12** にそれぞれ示す。また、ニコチンについては主流煙から 1.640 mg/stick, 副流煙から 0.056 mg/stick であり、数値解析モデルの構築 (**Figure 13** 参照) に活用する。

(2) 数値解析による受動喫煙の影響

実測値をもとに作成した数値解析モデルを用い、喫煙者と受動喫煙者の離れた距離による有害物質の摂取量を検討するための数値解析モデルを作成する。**Figure 14** に数値解析モデルの概要を示す。解析領域は $3.00(x) \times 1.50(y) \times 2.00(z)$ m とし、人体は上半身のみ解析対象とする。呼吸特性は実測状況と同様に非喫煙時の呼吸5回と喫煙中の呼吸1回を1サイクルとし、呼吸は鼻で喫煙は口で行う。また、加熱式タバコ1スティックあたりの喫煙時間は約6分間であり、喫煙は10サイクル行くと設定する。汚染物質は化学種物質として CO_2 とニコチンの2種

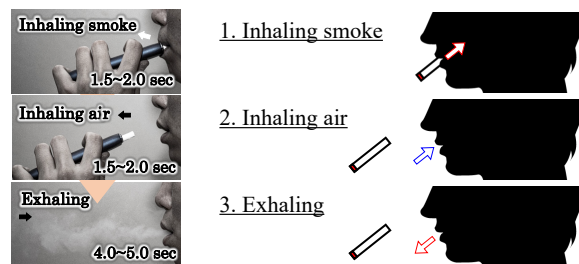


Fig. 9 Breathing characteristics on smoking

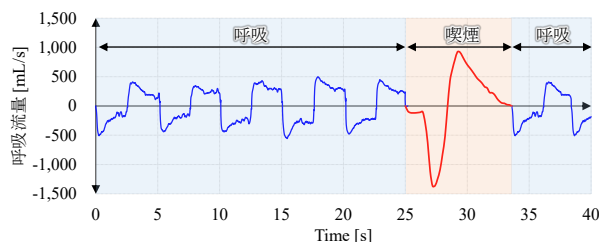


Fig. 10 Fluctuations of flow rate in mainstream

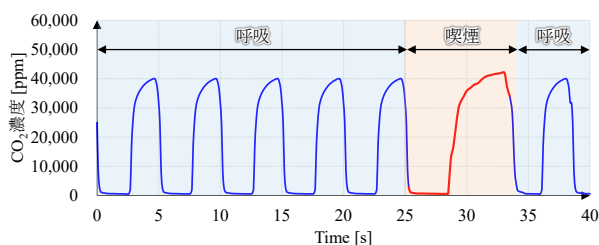


Fig. 11 Fluctuations of CO_2 in mainstream

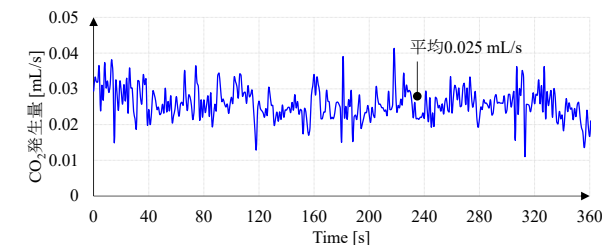


Fig. 12 Fluctuations of CO_2 in sidestream

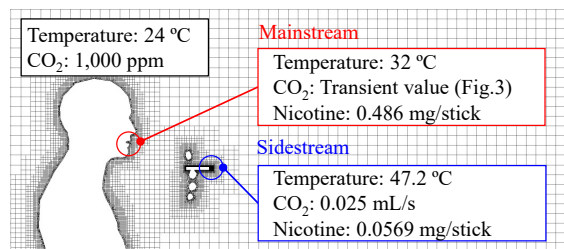


Fig. 13 Numerical model & boundary condition

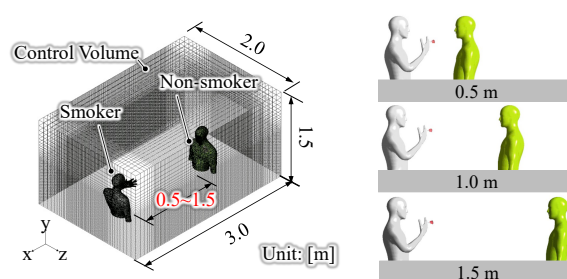


Fig. 14 Overview of evaluation model

類を対象とし、人体モデルの口と鼻、タバコ先端部を汚染物質の発生源とする。副流煙の発生源は $0.01(x) \times 0.01(y) \times 0.01(z)$ m としてモデル化し、空間内環境の CO₂ 濃度は建築基準法で定められている室内環境許容値である 1,000 ppm とし、ニコチンは 0 ppb とする。実測で得られた呼吸流量と CO₂ 濃度、ニコチン濃度を境界条件として与えるが、呼吸から発生するニコチン量は主流煙の 30%²⁾ とする。数値解析は喫煙 1 サイクル (約 360 s (6 分)) を非定常

計算で行い、喫煙者と受動喫煙者間の距離 (0.5 m, 1.0 m, 1.5 m 間隔) による受動喫煙の影響を CO₂ とニコチンの摂取量により定量的に確認する。

2.3 結果及び考察

Figure 15 に数値解析の結果を示す。呼吸時には鼻から CO₂ が出ており、タバコの先端からの副流煙によるニコチンが出ており、温度差による上昇気流が生じる。喫煙する時には喫煙者の口から CO₂

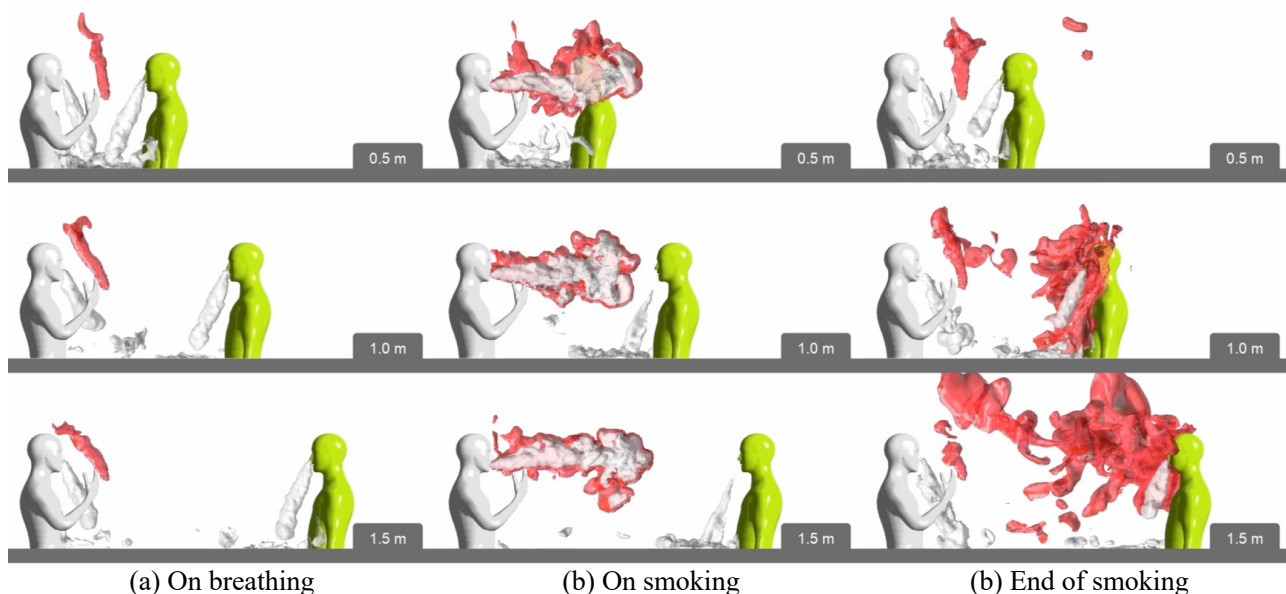


Fig. 15 Analysis results (CO₂: white color, Nicotine: red color)

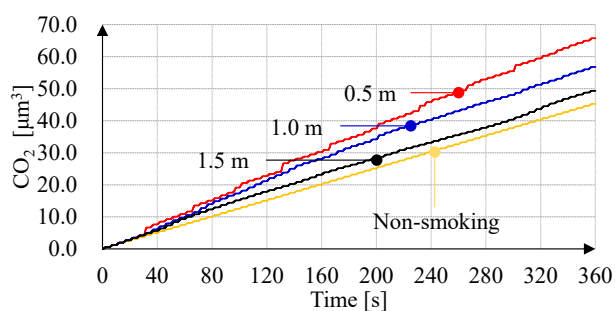


Fig. 16 Cumulative passive smoking (CO₂)

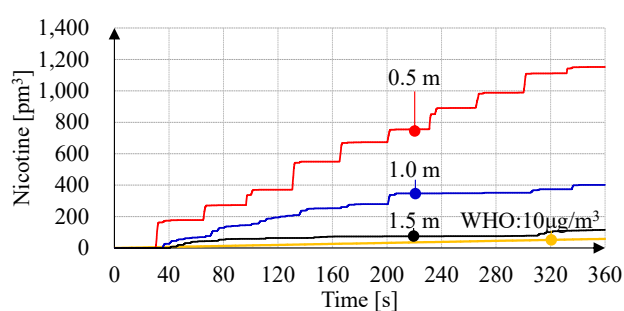


Fig. 17 Cumulative passive smoking (Nicotine)

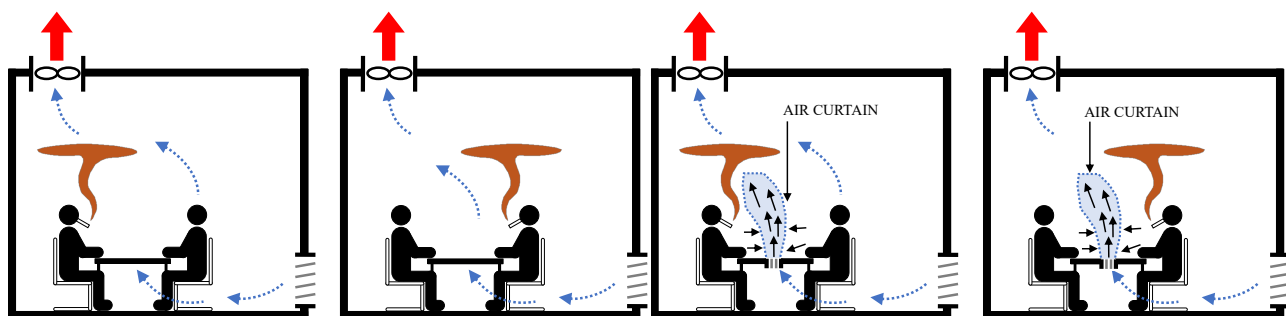


Fig. 18 Future work

とニコチンが両方とも出ており、受動喫煙者まで移流する。喫煙が終了後の一時的には上昇気流に従って流れる有害物質の移動が観測される。

Figure 16 と **Figure 17** に喫煙者とある程度離れている受動喫煙者が摂取する CO_2 濃度とニコチン濃度の累積値を示す。 CO_2 、ニコチンとも距離が近くなると受動喫煙者の摂取量が増加した。また、WHO ガイドラインによるニコチン $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ と受動喫煙者の呼吸による CO_2 を基準とすると、離れた距離 0.5 m において、加熱式タバコの受動喫煙による影響は、 CO_2 が約 145.2% の増加 ($45.24 \mu\text{m}^3 \rightarrow 65.70 \mu\text{m}^3$)、ニコチンが約 1,995% の増加 ($57.75 \text{pm}^3 \rightarrow 1,152.34 \text{pm}^3$) する結果が見られた。

2.4 結論（第2章）

本研究（第2章）では、加熱式タバコの喫煙状況における非定常計算用の数値解析モデルを構築した。また、構築した数値解析モデルを用い、受動喫煙防止のために喫煙者と受動喫煙者の離

れた距離による有害物質の摂取量を明らかにした。次年度には、本年度に構築した解析モデルをもとに、加熱式タバコ専用の室内喫煙エリア（レストラング、喫茶店など）における受動喫煙の影響を換気方式の違い、エアカーテンの有無などによって検討する予定（**Figure 18** 参照）である。

第3章 受動喫煙防止のためのエアバリア型テーブルの開発と効果検証（令和5年度）

3.1 研究目的

第3章（令和5年度）では、実測と数値解析モデルをもとに飲食店舗（加熱式タバコ専用室）で飲食する非喫煙者の受動喫煙曝露評価を行う。また、受動喫煙防止のためのエアバリア型テーブル（**Figure 19** 参照）を提案し、その効果を検討する。

3.2 実態調査

加熱式タバコ喫煙可能店において10分間のPM



Fig. 19 エアバリアテーブル

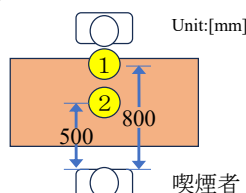


Fig. 20 測定位置

Table 2. 実態調査結果

	PM2.5 濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	
	1 本	2 本
測定位置①	131.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	476.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
測定位置②	526.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	811.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

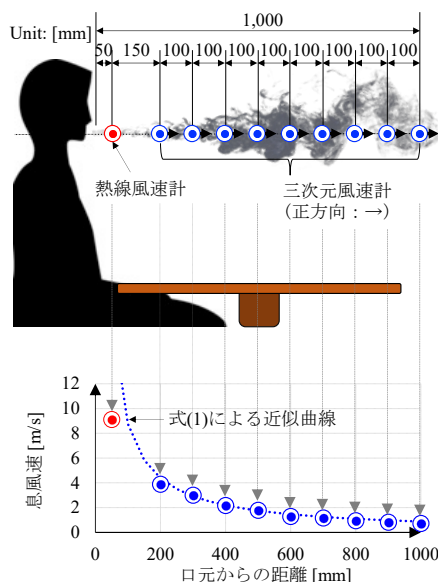


Fig. 22 吹き出し息風速の測定位置と測定結果

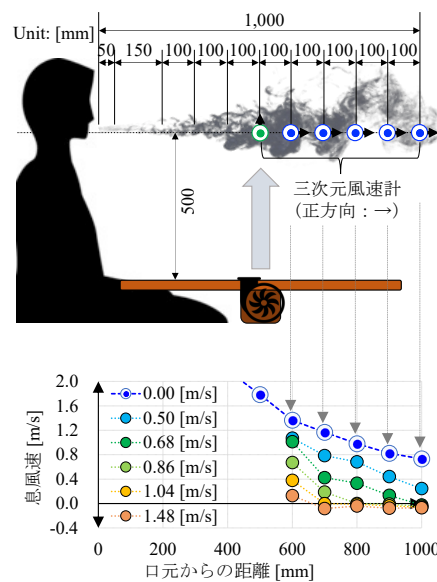
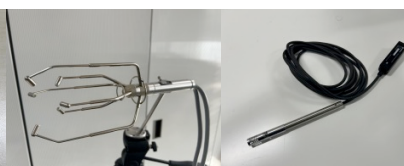


Fig. 23 エアバリア通過後の測定位置と測定結果



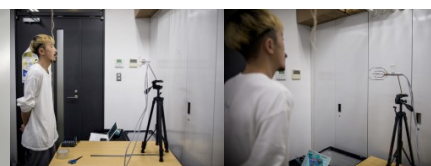
(a) PM2.5 粉塵計 (b) 加熱式タバコ

Fig. 21 実態調査使用機器



(a) 超音波風速 (b) 熱線風速計

Fig. 24 吹き出し息実測使用機器



(a) 吹き出し息速度 (b) 速度減衰

Fig. 25 実測風景

2.5 粉塵濃度の実測を行う。喫煙者の口から受動喫煙者の口までの距離を 1,000 mm と仮定し、実測位置を **Figure 20**, 使用機材を **Figure 21** に示す。実測位置①, ②においてそれぞれ加熱式タバコを 1 本と 2 本喫煙する場合の実測を行う。実測結果を **Table 2** に示す。PM2.5 環境基準値では一年平均値が 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下、一日平均値が 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下であることから、受動喫煙者周囲の空気は一時的に環境基準値を大幅に超える結果となった。

3.3 実測によるエアバリア最適風速の検証

(1) 実測方法

エアバリア形成時と非形成時の喫煙を模した吹き出し風速の距離による減衰の実測を三次元風速計 (SONIC CORPORATION WA-340) と熱線風速計 (多点式アネモマスター, HIOKI 1590) を用いて行う。吹き出し風速の測定位置を **Figure 22**, エアバリアを通過後の吹き出し風速の測定位置を **Figure 23**, 使用機材を **Figure 24**, 実測風景を **Figure 25** に示す。エアバリア形成時の吹き出しの実測において、エアバリア風速は約 0.2–1.6 m/s 間を約 0.1 m/s 間隔で変化させる。噴流特性の方程式を式(1)に示す。ここで、 U [m/s]は吹き出し口から x mm 離れた地点の吹き出し風速, K [-]は吹き出し口定数とし, D_0 [m]は吹き出し口の直径 12 mm と仮定する。実測では、吹き出し速度 U_0 を実測し、吹き出し口定数 K を求める。

$$U = \frac{K}{x/D_0} U_0 \quad (1)$$

(2) 実測結果

Figure 22 に吹き出し風速の測定結果, **Figure 23** にエアバリア風速ごとのエアバリア通過後の吹き出し風速の測定結果を示す。吹き出し息の測定は各測定位置で 20 回の吹き出しを行い、それらのデータをアンサンブル平均化 (ensemble average) した。実測結果で吹き出しの初期速度は $U_0=9.119$ m/s となり、式(1)による近似式では $K=8$ であった。口元からの距離 1,000 mm においてエアバリアを通過後の吹き出し息の風速 (U_x) が 0 m/s 以下となる最小エアバリア風速 (U_y) は 0.68 m/s であった。

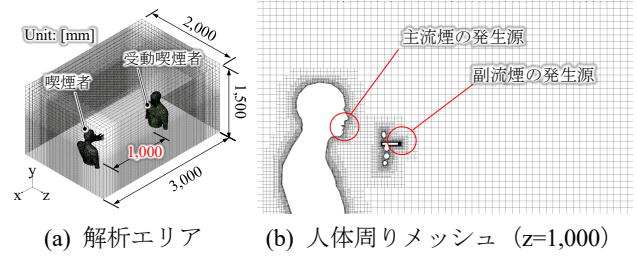


Fig. 26 解析モデル

Table 3. 解析条件

項目	内容	
乱流モデル	LES	
メッシュ	約 130 万個	
呼気 CO ₂ 濃度	呼吸	40,000 ppm
	喫煙	42,000 ppm
ニコチン	呼吸	0 mg/本
	加熱式タバコ	0.482 mg/本
温度	呼気	32 °C
	室内空気	24 °C

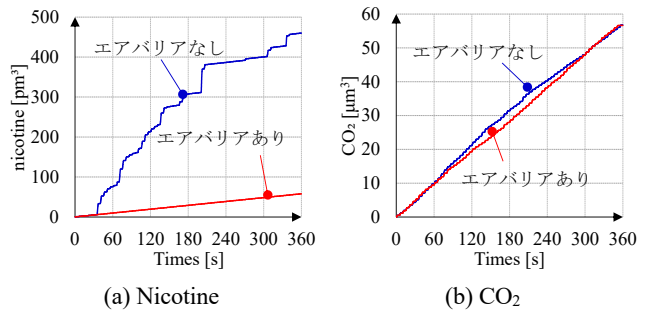


Fig. 27 受動喫煙者が摂取する濃度累積値

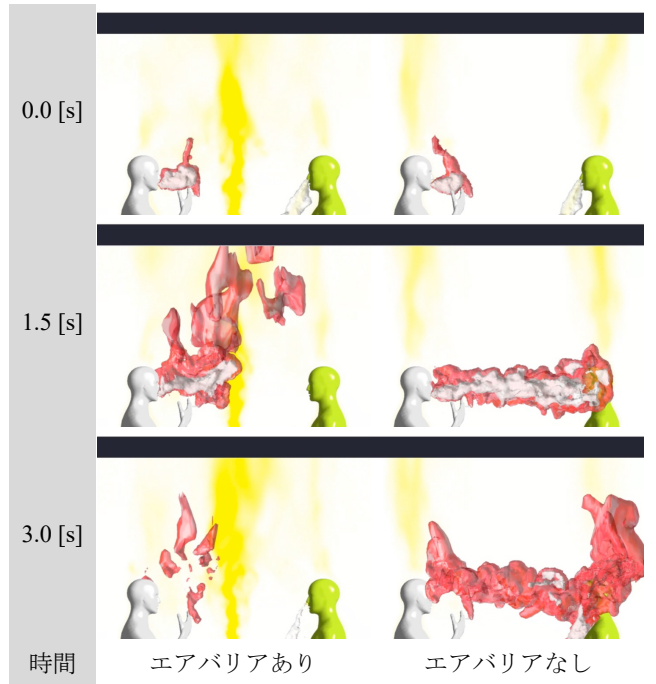


Fig. 28 主流煙の時系列変化

3.4. エアバリア有無による受動喫煙量の検証

(1) 解析条件

エアバリアテーブルによるエアバリア形成時における受動喫煙者の有害物質の摂取量を検討するため、CFD 解析モデルを作成する。**Figure 26** に解析モデルの概要を示す。喫煙者と受動喫煙者の中央 (xz 面上) に幅 (x 方向) 40 mm, 長さ (z 方向) 1,000 mm の吹き出し口を設定し、y 方向へ速度 1.0 m/s で吹き出すことにより y=500 mm で 0.68 m/s のエアバリアを形成するものとする。第 1 章の非喫煙時および喫煙時の呼吸特性をもとに解析で用いる呼吸特性は **Figure 10** を用いる。呼吸特性は呼吸 5 回と喫煙 1 回を 1 サイクルとし、呼吸は鼻で喫煙は口で行う。加熱式タバコ 1 本当たりの喫煙時間を約 6 分とし、喫煙を 10 サイクル行うと設定する。解析条件を **Table 3** に示す。汚染物質は化学物質として CO₂ とニコチンの 2 種類を対象とし、人体モデルの口と鼻、たばこの先端部を汚染物質の発生源とする。副流煙の発生源は 10(x)×10(y)×10(z) mm としてモデル化し、室内環境の CO₂ 濃度は建築基準法で定められている室内環境許容値である 1,000 ppm とし、ニコチンは 0 ppb とする。換気は天井換気とする。呼吸から発生するニコチン量は主流煙の 30%²⁾ とする。数値解析は喫煙 10 サイクルを非定常計算で行い、エアバリアの有無による受動喫煙の影響を CO₂ とニコチンの摂取量により確認する。

(2) 解析結果

Figure 27 に受動喫煙者が摂取するニコチン濃度と CO₂ 濃度の累積値、**Figure 28** に主流煙の時系列変化 (赤流体がニコチン、白流体が CO₂, 黄色が気流速度) を示す。受動喫煙者が摂取するニコチン濃度の累積値はエアバリアが形成されていない場合に 459.7 pm³, エアバリアが形成されている場合に 57.8 pm³ となり, 87.4%の減少が見られた。受動喫煙者が摂取する CO₂ 濃度の累計値はエアバリアが形成されていない場合に 56.8 μm³, エアバリアが形成されている場合に 56.6 μm³ となり, 増減はほとんど見られなかった。

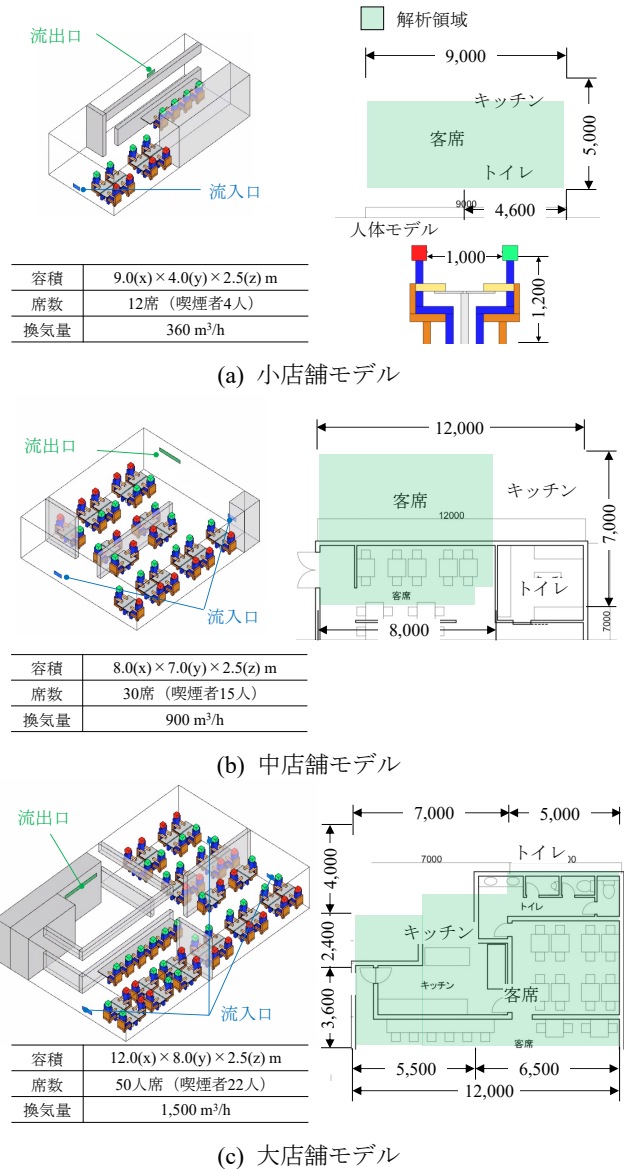


Fig. 29 飲食店舗モデル概要

Table 4. 解析条件

項目	内容	
乱流モデル	高レイノルズ数 k-ε モデル	
時間項	非定常計算	
計算時間	360 s (6 分)	
対象店舗	小店舗	9.0(x)×4.0(y)×2.5(z) m
	中店舗	8.0(x)×7.0(y)×2.5(z) m
	大店舗	12.0(x)×8.0(y)×2.5(z) m
メッシュ	小店舗	約 100 万個
	中店舗	約 200 万個
	大店舗	約 300 万個
呼気 CO ₂ 濃度	呼吸	40,000 ppm
	喫煙	42,000 ppm
ニコチン	呼吸	0 mg/本
	加熱式タバコ	0.482 mg/本
温度	呼気	32 °C
	室内空気	24 °C
人体発熱量	40 W	
換気量	30 m ³ /(h・人)	
外気 CO ₂ , Nicotine	400 m, 0 ppm	

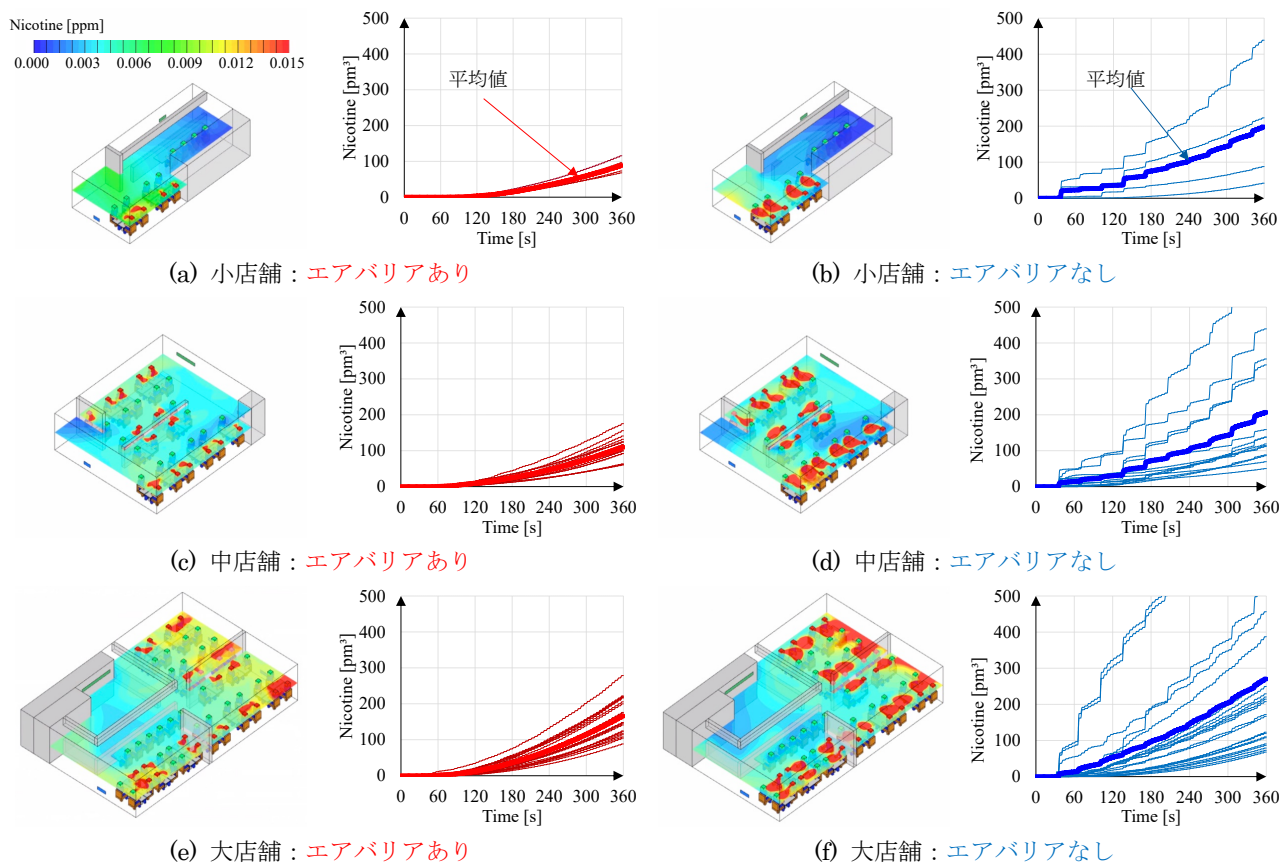


Fig. 30 ニコチン濃度分布 ($z=1.2$ m, 5 分 40 秒時点)・受動喫煙者が摂取する濃度累積値

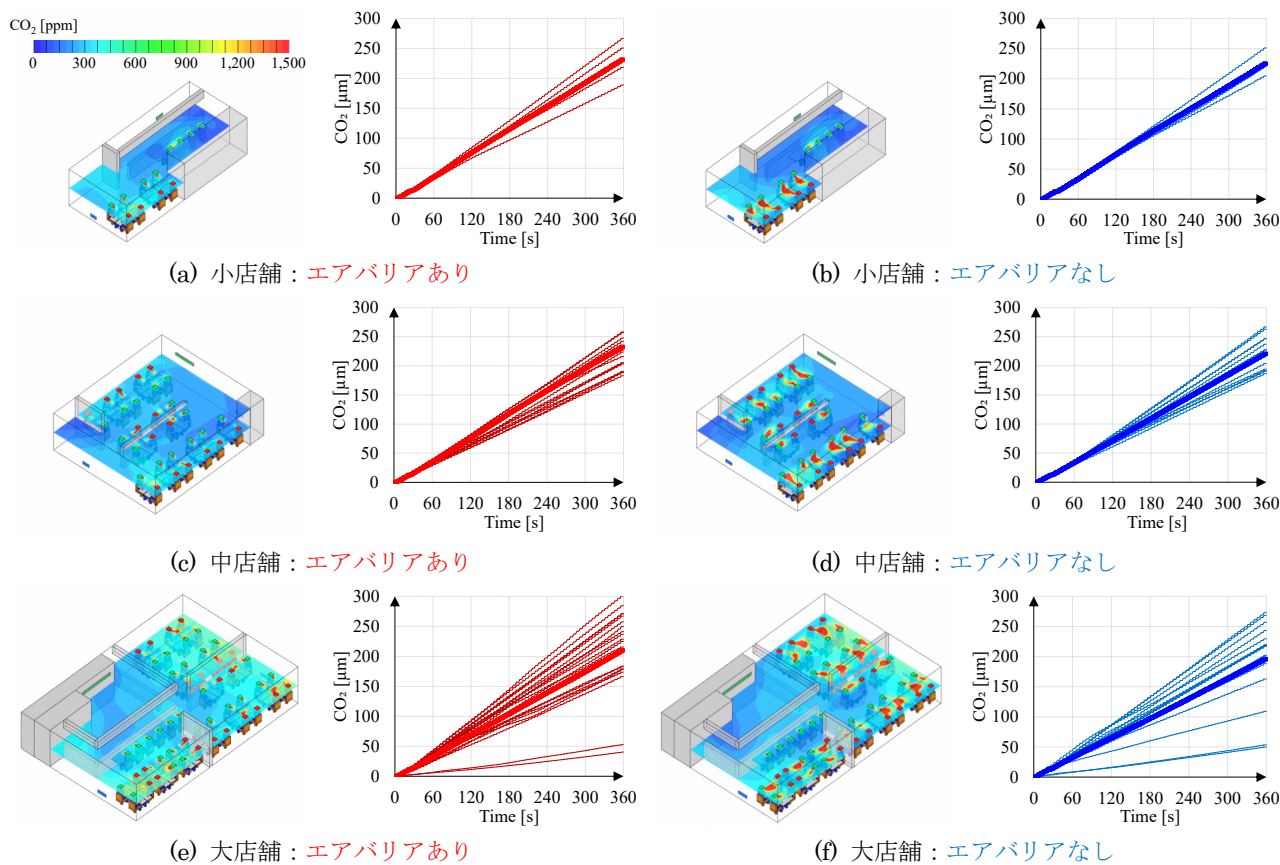


Fig. 31 CO_2 濃度分布 ($z=1.2$ m, 5 分 40 秒時点)・受動喫煙者が摂取する濃度累積値

3.5 店舗モデルにおける受動喫煙量の検証

(1) 解析条件

飲食店舗（加熱式タバコ専用レストラン）でエアバリア型テーブルを使用した際の受動喫煙者の有害物質の摂取量を検討するために小・中・大規模の飲食店舗モデルを作成³⁾する。**Figure 29**に飲食店舗モデル概要、**Table 4**に解析条件を示す。本研究では、Rhino 8.1⁴⁾（Robert McNeel & Associates (TLM, Inc.)) を用いて CAD モデルを作成し、FlowDesigner 2024⁵⁾（株式会社アドバンスドナレッジ研究所）を用いて数値解析を行う。小店舗モデルは 12 席，中店舗モデルは 30 席，大店舗モデルは 50 席とし，喫煙席は壁に沿うように配置し，非喫煙者は小店舗モデルに 4 人，中店舗モデルに 15 人，大店舗モデルに 22 人とする（緑が非喫煙者，赤が喫煙者）。エアバリアと呼吸条件はエアバリア有無による受動喫煙量の検証の数値解析モデルと同様にする。汚染物質は化学物質として CO₂ とニコチンの 2 種類を対象とし，人体モデルの口と鼻を汚染物質の発生源とする。換気条件は席数 × 30 m³/h とし，換気の空気は客席からキッチンへ流れるとし，外気の二酸化炭素濃度は気象庁の「大気中二酸化炭素濃度の経年変化」より 400 ppm とする。外気の流入口は小・中・大店舗モデルにそれぞれ 1 つ，2 つ，3 つとし，流出口はキッチンに 1 つとする。数値解析は喫煙 10 サイクル（6 分間）を非定常計算で行い，エアバリアの有無による受動喫煙の影響を CO₂ とニコチンの摂取量により確認する。

(2) 解析結果

Figure 30 にニコチン濃度分布・受動喫煙者が摂取する濃度累積値，**Figure 31** に CO₂ 濃度分布・濃度累積値を示す。濃度分布図は z=1.2 m，10 回目の喫煙時の 5 分 40 秒を切り出した。受動喫煙者が摂取するニコチンの平均濃度累積値はエアバリア形成時では非形成時と比べ，小店舗では 197.9 pm³ から 88.3 pm³ への 55.4%の減少，中店舗では 206.6 pm³ から 109.8 pm³ への 46.9%の減少，大店舗では 270.2 pm³ から 166.0 pm³ への 38.6%の減少

が見られ，小・中・大店舗全体で角席の減少率が高い傾向にあった。エアバリアの有無による CO₂ の平均濃度累積値は増減がほとんど見られず，席による減少率に傾向は見られなかった。

3.6 考察

3.4 章におけるエアバリア有無における受動喫煙量の検討では受動喫煙者が摂取するニコチン濃度累積値がエアバリア非形成時に比べて形成時には 87.4%の減少が見られた。一方，3.5 章における飲食店舗モデルを用いた受動喫煙量の検証においては小店舗では 55.4%，中店舗では 46.9%，大店舗では 38.6%の減少が見られた。このような解析結果の違いは，エアバリア有無における受動喫煙量の検討では乱流モデルとして高精度の LES（Large Eddy Simulation）解析を使用した半面，飲食店舗モデルにおける受動喫煙量の検討では乱流モデルとして時間平均モデル（RANS: Reynolds-averaged Navier-Stokes Simulation）を使用したことが計算の誤差が生じる原因であると考えられる。今後，飲食店舗モデルにおいても高精度の LES を使用した数値計算を行い，より精密な検討が必要である。また，換気条件として天井換気と厨房換気の違いも数値誤差が生じる原因の一つであると考えられる。

3.7 結論（第 3 章）

本研究（第 3 章）では，エアバリア型テーブルの有効性を示し，飲食店舗モデルへの導入を目的とし，実測と数値解析を行った。実測によって得られたエアバリア最適風速を基に数値解析モデルを作成し，エアバリア型テーブルの有効性を示した。

A. 参考文献

- (1) World health organization international agency for research on cancer: IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, Vol.83, Tobacco smoke and involuntary smoking, 2004.

- (2) Frank Kelley St. Charles, John McAughey, Christopher J. Shepperd : Methodologies for the quantitative estimation of toxicant dose to cigarette smokers using physical, chemical and bio analytical data, Inhalation Toxicology, 25(7), p. 383-397, 2013, <https://doi.org/10.3109/08958378.2013.794177>.
- (3) 飲食店の開業改装サポート : <https://nomura-fp.com>.
(2024 年 2 月 12 日参照)
- (4) Rhinoceros 3D: <https://www.rhino3d.com>.
- (5) FlowDesigner 2024: <https://akl.co.jp>.

B. 研究発表

- (1) 岡村晃, 李時桓, 黄載雄, 近藤志樹 : 喫煙による呼吸特性, その数値解析, 室内環境学会学術論文集, B-06, p.146-147, 2021.12. (本報告書第 1 章の内容)
- (2) Jaeung Hwang, Sihwan Lee: Respiratory characteristics during smoking and its numerical analysis, Indoor Air 2022, ID 1513, p.1-4, 2022.06. (本報告書第 2 章の内容)
- (3) 黄載雄, 李時桓 : 加熱式タバコの喫煙による呼吸特性と化学種物質の挙動特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学, 40733, p.1591-1592, 2022.09. (本報告書第 2 章の内容)
- (4) 黄載雄, 李時桓 : 加熱式タバコの距離による受動喫煙の影響, 室内環境学会学術論文集, A-21, p.230-231, 2022.12. (本報告書第 2 章の内容)
- (5) 平山由晏, 李時桓 : 受動喫煙防止のためのエアバリア型テーブルの開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学, 2024.08. (発表予定, 本報告書第 3 章の内容)
- (6) 平山由晏, 李時桓 : 加熱式タバコ専用飲食店舗におけるエアバリア型テーブルの効果, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 2024.09. (発表予定, 本報告書第 3 章の内容)

C. 知的財産権の出願・登録状況

特になし

D. Supplemental Data

本研究で行われた実測結果及び数値解析結果(動画など)は下記のリンクで確認可能である。

<https://lee-lab.net/smoking/smoking.html>.