

令和 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

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。そこで本研究では、吹き出しの実測によるエアバリア最適風速の検証と令和 3 年度に行った喫煙時の呼吸流量と加熱式タバコの副流煙と主流煙の分析結果、令和 4 年度に構築された非定常計算用の数値解析モデルをもとに、エアバリア型テーブルの提案・検討を行う。

実測結果より、最適エアバリア風速を 0.68 m/s とし、この値をもとに行った数値解析では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形成時に 459.7 pm^3 、エアバリアが非形成時に 57.8 pm^3 となり、87.4%の減少が見られた。 CO_2 濃度の累積値はエアバリア形成時に $57.8 \mu\text{m}^3$ 、エアバリア非形成時に $56.6 \mu\text{m}^3$ となり、増減はほとんど見られない結果となった。この結果をもとに行った飲食店舗モデルにおける数値解析では、小規模店舗では 197.9 pm^3 から 88.3 pm^3 への 55.4%の減少、中店舗では 206.6 pm^3 から 109.8 pm^3 への 46.9%の減少、大店舗では 270.2 pm^3 から 166.0 pm^3 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 CO_2 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い結果となった。

A. 研究目的

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。

本研究では、令和 3 年度に行った喫煙時の呼吸流量と加熱式タバコの副流煙と主流煙の分析結果、令和 4 年度に構築された非定常計算用の数値解析モデル用い、飲食店舗（加熱式たばこ専用室）においての数値解析を行う。また、エアバリア型テーブル(**Figure 1**)を提案し、その有効性を検討する。

B. 実態調査

加熱式タバコ喫煙可能店において 10 分間の PM2.5 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 2**, 使用機材を **Figure 3** 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。実測結果を表 1 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。

C. 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 (WA-340) と熱線風速計 (HIOKI MODEL 1590) を用いて行う。吹き出し風速の測定位置を **Figure 4**, エアバリアを通過後の吹き出し風速の測定位置を

Figure 5, 使用機材を **Figure 6**, 実測風景を **Figure 7** に示す。エアバリア形成時の吹き出し風速の実測において, 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, $U[\text{m/s}]$ は吹き出し口から $x[\text{mm}]$ 離れた地点の吹き出し風速, $K[-]$ は吹き出し口定数とし, $D_0[\text{mm}]$ 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 4 に吹き出し風速の測定結果, **Figure 5** 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の一部を示す。吹き出し風速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風の初期速度は $U_0=9.119 \text{ m/s}$ 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

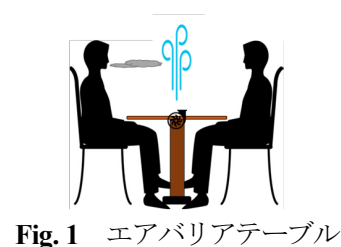


Fig. 1 エアバリアテーブル

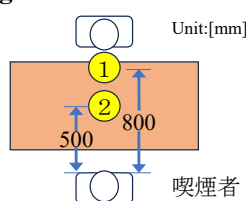


Fig. 2 測定位置

Table 1. 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 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

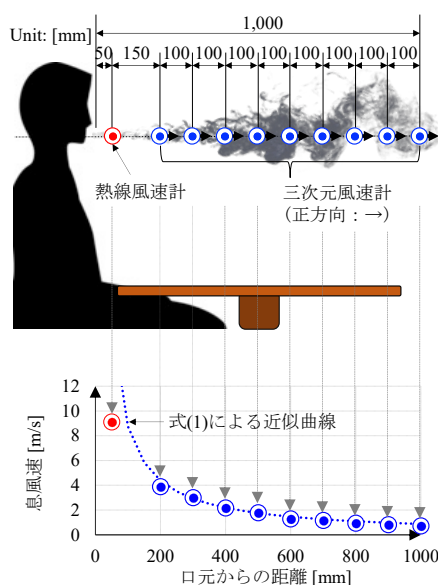


Fig. 4 吹き出し風速の測定位置と測定結果

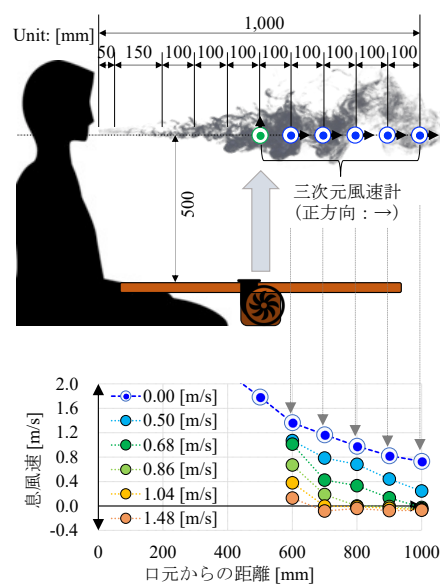


Fig. 5 エアバリア通過後の測定位置と測定結果



(a) PM2.5 粉塵計



(b) 加熱式タバコ



(a) 超音波風速



(b) 熱線風速計



(a) 吹き出し風速



(b) 速度減衰

Fig. 3 実態調査使用機器

Fig. 6 吹き出し風速実測使用機器

Fig. 7 実測風景

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。

D. エアバリア有無による受動喫煙量の検証

1. 解析条件

エアバリア形成時の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 8** 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) $1,000\text{ mm}$ 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 $y=500\text{ mm}$ で 0.68 m/s のエアバリアを形成するものとする。既往研究²⁾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を **Figure 9** に示す。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 本当当たりの喫煙時間を約 6 分とし、喫煙を 10 サイクル行くと設定する。解析条件を **Table 2** に示す。汚染物質は化学物質として CO_2 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 $10(x)\times 10(y)\times 10(z)\text{ mm}$ としてモデル化し、室内環境の CO_2 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 $1,000\text{ ppm}$ 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 $30\%^3$ 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 CO_2 とニコチンの摂取量により確認する。

2. 解析結果

Figure 10 に受動喫煙者が摂取するニコチン濃度と CO_2 濃度の累積値、**Figure 11** に主流煙の時系列変化 (赤流体がニコチン、白流体が CO_2 、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 pm^3 、エアバリアが形成されている場合に 57.8 pm^3 となり、 87.4% の減少が見られた。受動喫煙者が摂取する CO_2 濃度の累計値はエアバリアが形成されていない場合に $56.8\text{ }\mu\text{m}^3$ 、エアバリアが形成されている場合に $56.6\text{ }\mu\text{m}^3$ となり、増減はほとんど見られなかった。

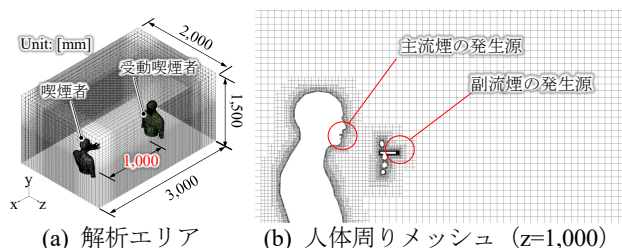


Fig. 8 解析モデル

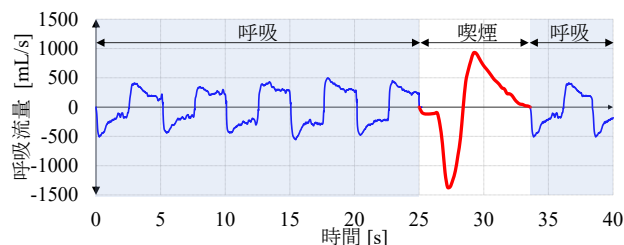


Fig. 9 呼吸特性

Table 2. 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

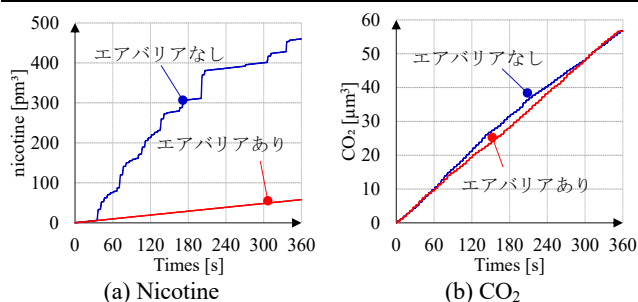


Fig. 10 受動喫煙者が摂取する濃度累積値

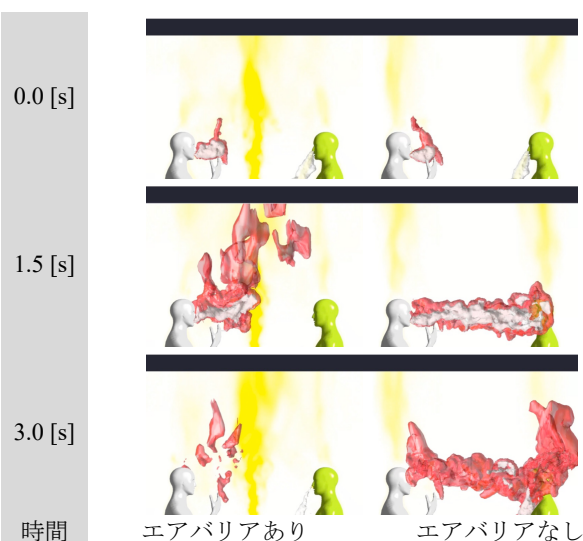


Fig. 11 主流煙の時系列変化

E. 飲食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⁴⁾する。**Figure 12**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、Rhinceros 8.1⁵⁾（Robert McNeel & Associates (TLM, Inc.)）を用いてCADモデルを作成し、FlowDesigner 2024⁶⁾（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第D章と同様にする。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とニコチン摂取量により確認する。

2. 解析結果

Figure 13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 14**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55.4%減少（197.9 pm³→88.3 pm³），中店舗では46.9%減少（206.6 pm³→109.8 pm³），大店舗では38.6%減少（270.2 pm³→166.0 pm³）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。

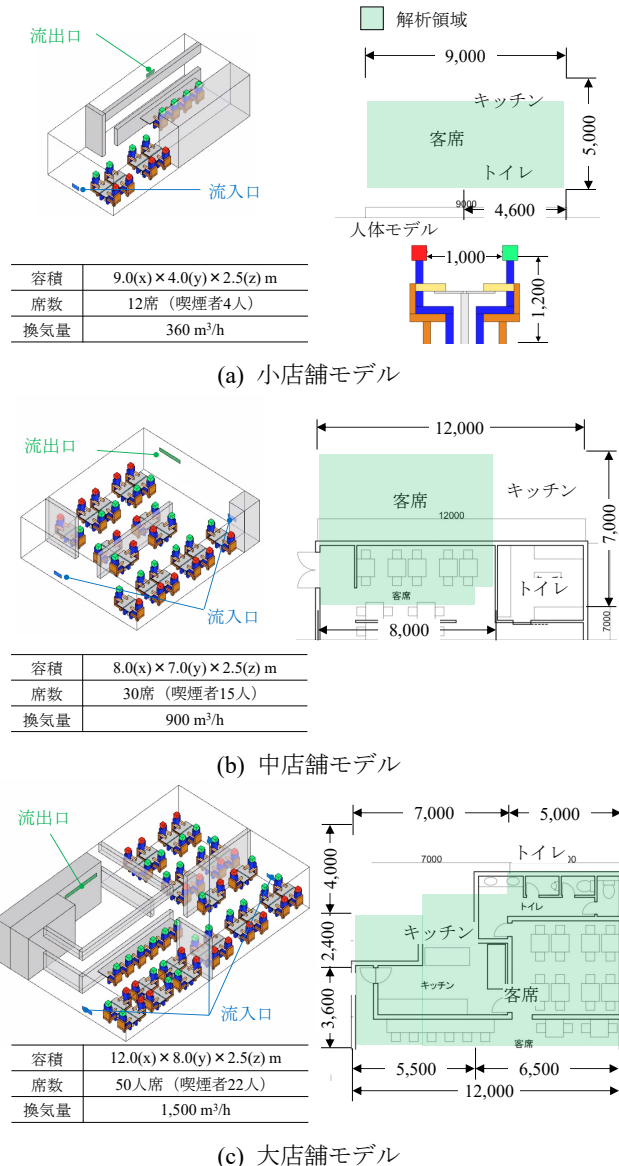


Fig. 12 飲食店舗モデル概要

Table 3. 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	

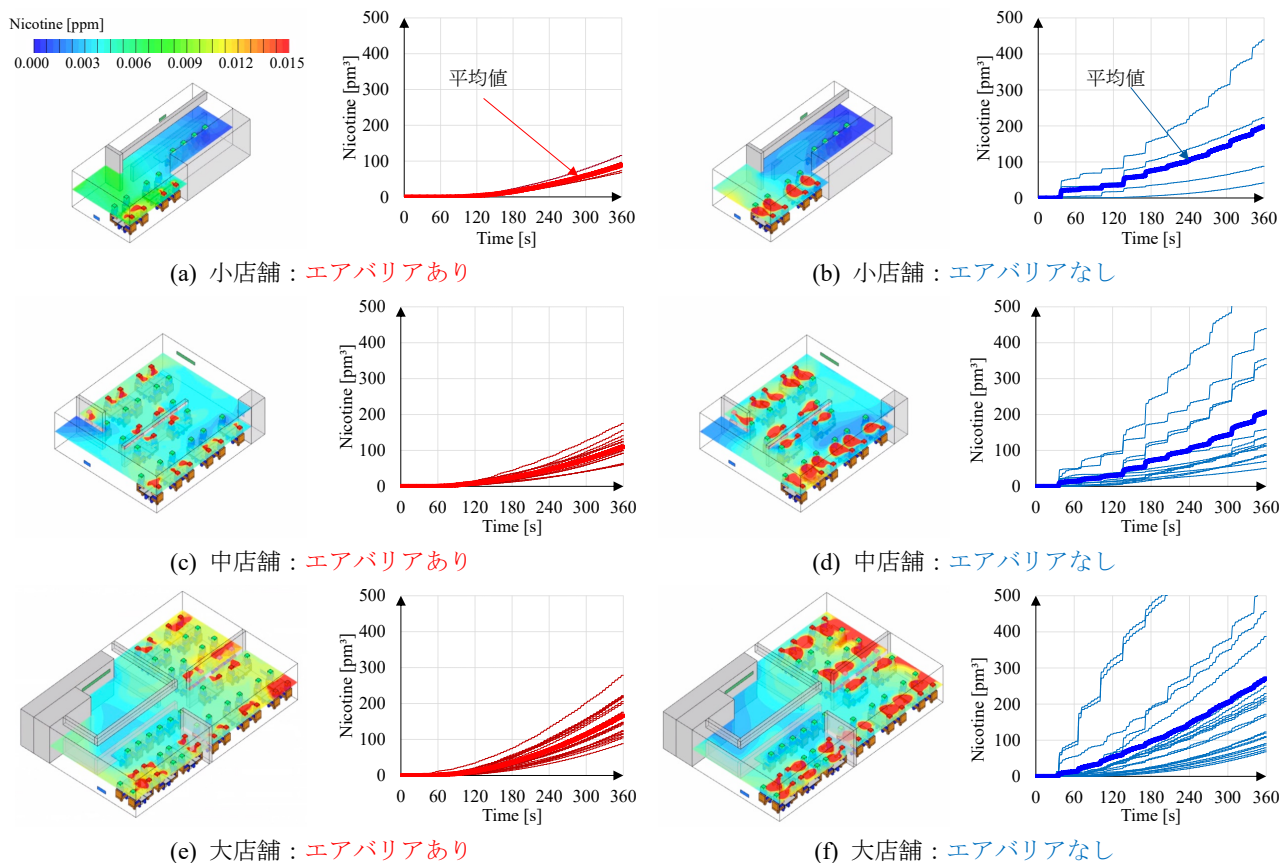


Fig. 13 ニコチン濃度分布 ($z=1.2$ m, 5 分 40 秒時点)・受動喫煙者が摂取する濃度累積値

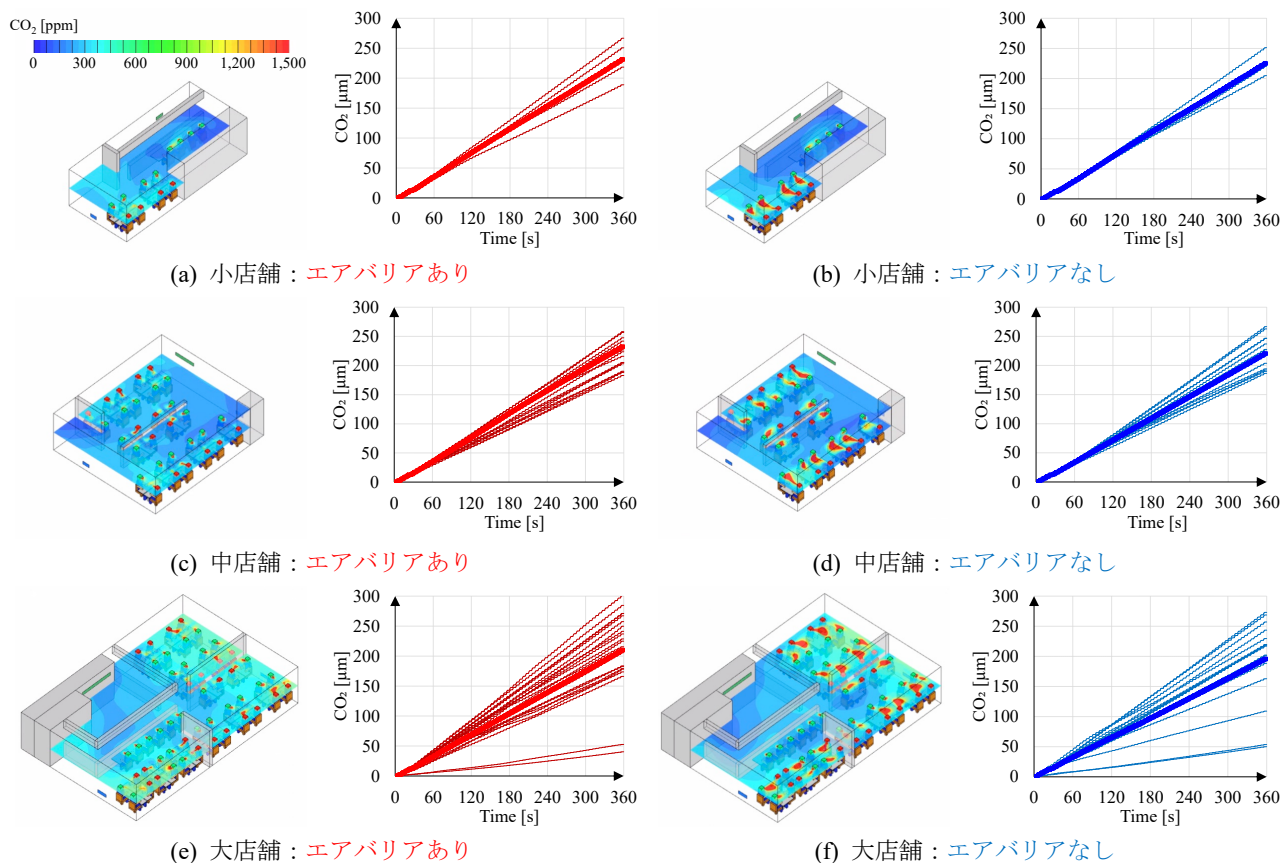


Fig. 14 CO_2 濃度分布 ($z=1.2$ m, 5 分 40 秒時点)・受動喫煙者が摂取する濃度累積値

F. 考察

D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、E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える。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。

G. 結論

本研究では、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。

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

I. 研究発表

- (1) 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)
- (2) 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)

J. 知的財産権の出願・登録状況

特になし