

CFD解析による飲食店を対象とした室内空気環境に関する研究

F07D038H 都丸恵理
 指導教員 赤林伸一教授

1 研究目的

本研究では、2種類の飲食店を対象としている。
 (1) レストランを対象とした解析：タバコ煙の健康へのリスクは広く認められており、公共空間における受動喫煙防止対策として、施設の分煙化が注目されている。しかし、レストランなどの飲食店では、依然として同一空間に喫煙席と非喫煙席が設けられる場合が多い。同一空間に喫煙席と非喫煙席を設ける場合、外気取入口や排気口と喫煙席の相対位置関係を考慮した詳細な換気計画を行う必要があるが、空調方式などを考慮したタバコ煙の拡散状況に関する設計資料は不足しているのが現状である。本研究では、暖房時のレストランを対象に、同一空間内に喫煙席と禁煙席を設け、喫煙席の相対的な位置関係によるタバコ煙の拡散状況を数値流体解析により明らかにし、効率的な喫煙席の配置計画、および粉塵濃度と臭気強度を用いた室内空気環境を明らかにすることを目的とする。
 (2) 焼肉店を対象とした解析：焼肉用ロースターは高温部（炭火）が存在し、また調理時に汚染質を発生

させるため、連続して長時間使用することが予測される焼肉店では、適切な換気が行われない場合に空気環境が著しく悪化すると考えられる。このような汚染質発生源のある空間で適切な換気計画を行うためには、ロースターの排気形式によって変化する空気環境を明らかにする必要がある。本研究では、主に使用されている卓上排気型（フードあり、フードなし）、無煙型を対象として、各ロースター周辺の温度・汚染質濃度分布および、各ロースターを店舗内で使用した際の室内温度・汚染質濃度分布を明らかにすることを目的とする。また、店舗全体の解析では、複雑なロースター形状を忠実に再現した場合、膨大な記憶容量や計算時間を要する。これらの負荷を低減するためにロースター直上の温度・気流性状を再現したモデル（仮想ボックス）を作成し、店舗の解析に応用させることを目的とする。

表1 レストランモデルの解析case

解析case	喫煙席の配置型	喫煙本数	換気回数	解析case	喫煙席の配置型	喫煙本数	換気回数
case1-1	(1)給気口側	喫煙本数 66本/h	3回/h	case1-16	(2)排気口側	喫煙本数 66本/h	10回/h
case1-2	(2)排気口側			case1-17	(3)給排気口一体		
case1-3	(3)給排気口一体			case1-18	(4)給気口側密集		
case1-4	(4)給気口側密集			case1-19	(5)排気口側密集		
case1-5	(5)排気口側密集			case1-20	(1)給気口側		
case1-6	(1)給気口側	喫煙本数 22本/h (1/3)	3回/h	case1-21	(2)排気口側	喫煙本数 22本/h (1/3)	10回/h
case1-7	(2)排気口側			case1-22	(3)給排気口一体		
case1-8	(3)給排気口一体			case1-23	(4)給気口側密集		
case1-9	(4)給気口側密集			case1-24	(5)排気口側密集		
case1-10	(5)排気口側密集			case1-25	(1)給気口側		
case1-11	(1)給気口側	喫煙本数 66本/h	3回/h	case1-26	(2)排気口側	喫煙本数 66本/h	10回/h
case1-12	(2)排気口側			case1-27	(3)給排気口一体		
case1-13	(3)給排気口一体			case1-28	(4)給気口側密集		
case1-14	(4)給気口側密集			case1-29	(5)排気口側密集		
case1-15	(5)排気口側密集			case1-30	(5)排気口側密集		

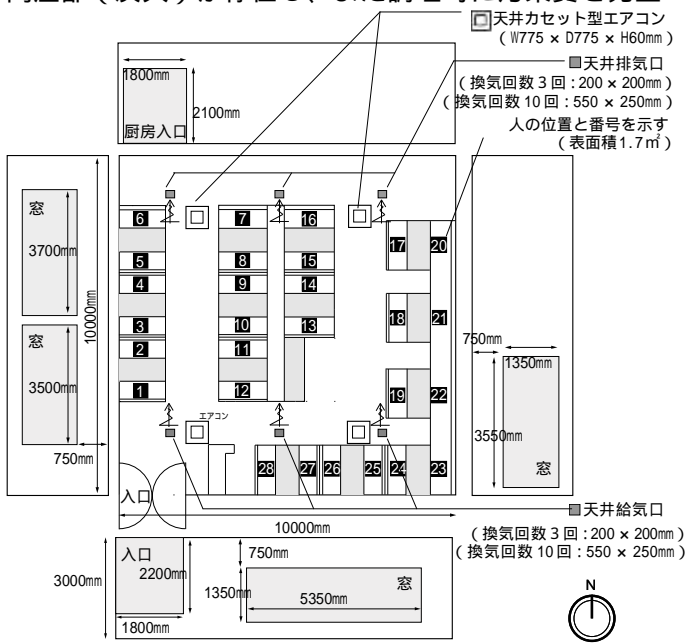


図1 解析対象の概要(レストランモデル)

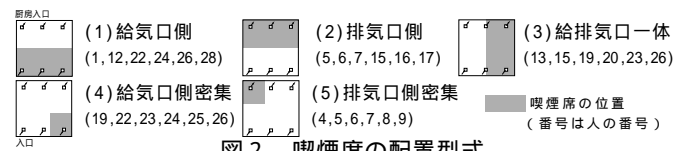


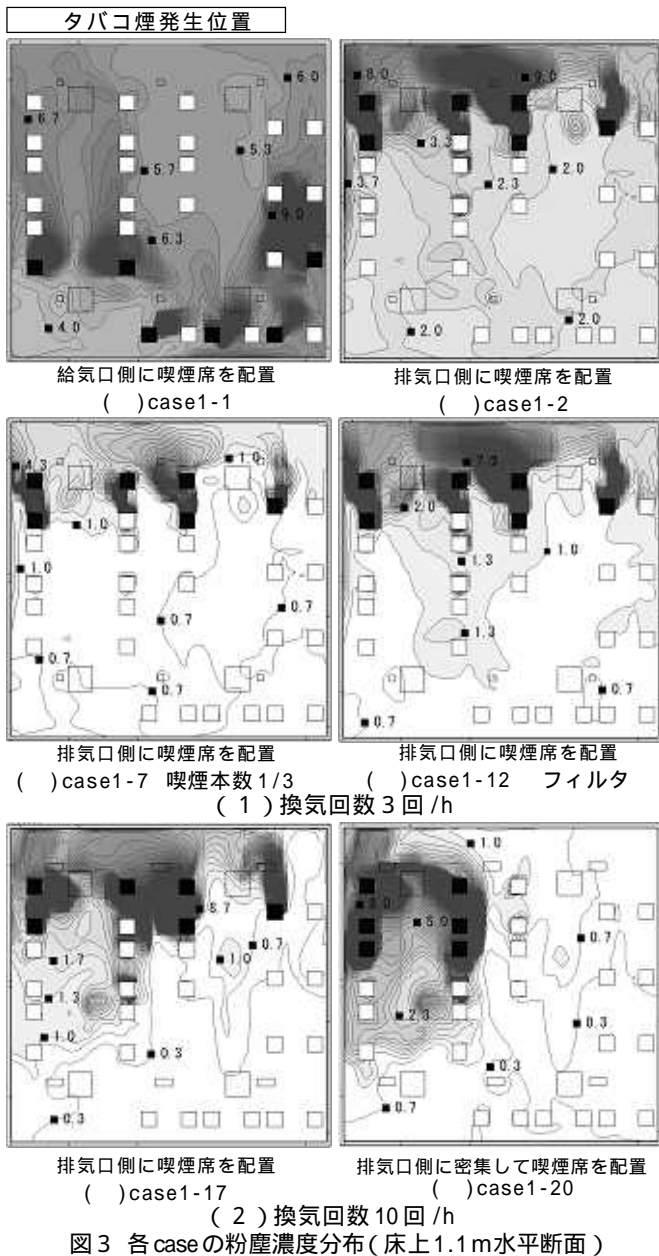
図2 喫煙席の配置型式

2 レストランを対象としたタバコ煙の解析

2.1 解析対象: 図1に解析対象の概要を示す。エアコン、給気口、排気口を設置した床面積100 m²のレストランを対象とする。東面、西面、南面は外気に接しており、北面、天井面、床面は上下階及び隣室に接している。図1に解析対象の概要を示す。

2.2 解析方法: 表1にレストランモデルの解析 case を、表2に数値解析条件を、図2に喫煙席の配置型式を示す。解析には汎用流体解析ソフト (STREAM) を用いて、換気、空調を行っている室内において、6ヶ所からタバコ煙を模擬したトレーサガスを発生させ、濃度分布の解析を行う。

2.3 評価方法: 粉塵濃度を室内環境基準濃度 (0.15mg/m³)



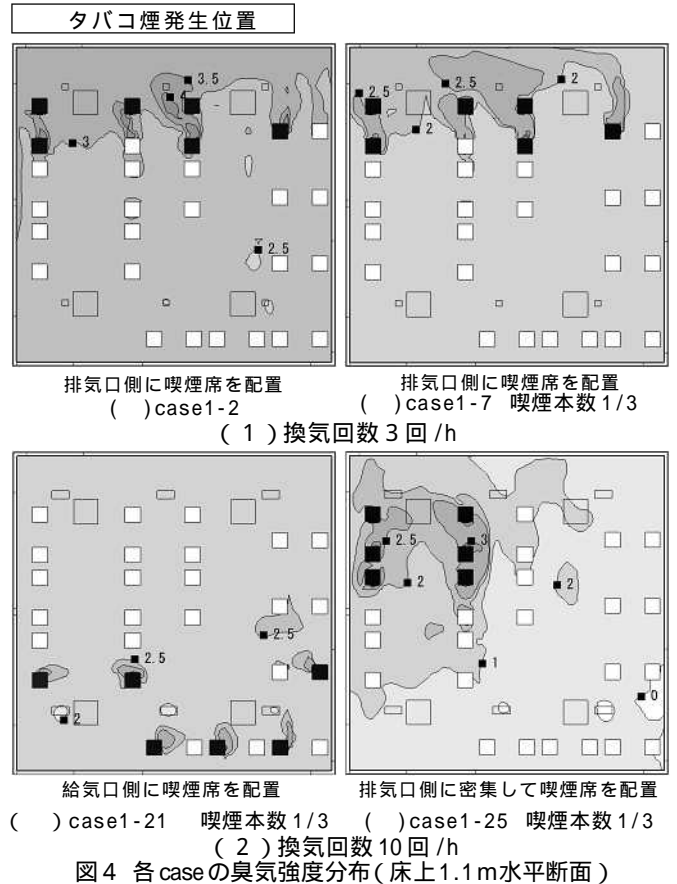
で除した値を用い、数値が1.0以下を室内環境基準を満たしているとする。表3に6段階臭気強度を示す。臭

表2 数値解析条件(レストランモデル)

計算コード	ソフトウェアクレイドル 汎用熱流体解析ソフト STREAM Ver.6
乱流モデル	標準k-εモデル
解析格子	163(x) × 167(y) × 61(z) = 16,60,481メッシュ (壁面近傍最少メッシュ幅: 5mm)
境界条件	・室内の天井・壁・床面境界条件: 風速は一般化対数則、温度は温度対数則を与える。 ・天井・壁(北面)、床面: 隣室を想定し、隣室温度を20、境界面の熱伝達率9W/mkを与える。 ・壁(南、西、東面)は外部を想定し、外気温0、境界面の熱伝達率23W/mkを与える。 ・テーブル・椅子・人体: 風速は一般化対数則、温度は温度対数則で与える。
建物仕様	・窓ガラス(厚さ15mm)、出入口扉及び厨房入口扉(木材15mm) ・壁(室外側からサイディングボード20mm、グラスウール100mm、石膏ボード15mm) ・天井(室内側から石膏ボード15mm、グラスウール200mm、サイディングボード20mm) ・床(室内側から合板10mm、グラスウール100mm) ・椅子及びテーブルの材質(木材) ・熱伝達率(ガラス: 0.776、サイディングボード: 0.129、グラスウール0.051、石膏ボード0.213、木材: 0.069) 単位: W/(mK)
放射条件	各壁面に放射率0.9を与える。形態係数の算出は、モンテカルロ法によるView Factor法を使用。
人体モデル	成人男性を想定し、体表面積1.7m ² 、発熱量500Wの立方体とする。
排出風速	・給気口: 天井給気 室温が概ね22 になるよう、それぞれの換気回数毎に給気温度を調整。 換気回数3回/h 給気口面積=0.04m ² 、排出風速=2.08m/s, k = 0.0216m ² /s ² , =0.0014m ² /s ² , 吹出温度=10 換気回数10回/h 給気口面積=0.138m ² 、排出風速=2.02m/s, k = 0.0204m ² /s ² , =0.0013m ² /s ² , 吹出温度=20 ・排気口: 天井排気 換気回数3回/h 排気口面積=0.04m ² 、吸込風速=2.08m/s 換気回数10回/h 排気口面積=0.138m ² 、吸込風速=2.02m/s ・エアコン吹出 吹出風速=2.08m/s, k = 0.0194m ² /s ² , =0.0005m ² /s ² 、天井面に対して45度の傾きで吹出 吹出温度=35 ()、30 () ・エアコン吸込: 自由流入流出条件 ・エアコン吸込: 吸込風速=0.9972m/s
汚染質の拡散	・タバコ煙の浮力・分子拡散は無視し、移流・乱流拡散の計算を行う。
フィルタ	・フィルタの捕集率を0.8とし、エアコン吸込口の粉塵濃度に0.2を掛けた値を、エアコン吹出濃度として与える。

表3 臭気強度(6段階)

臭気強度 (アセトアルデヒド濃度[ppm])	内 容
0	- 無臭
1	(0.002) やっと感知できるにおい(検知閾値濃度)
2	(0.01) 何のにおいであるかがわかる弱いにおい(認知閾値濃度)
3	(0.1) らくに感知できるにおい
4	(1) 強いにおい
5	(10) 強烈なにおい



気は、タバコ煙から発生するアセトアルデヒドを代表臭気とし、6段階臭気強度を用いて評価する。また、臭気強度1（検知閾値濃度）以下を良好な室内環境基準とする。

2.4 解析結果

2.4.1 汚染質濃度分布：図3に各caseの粉塵濃度分布を示す。換気回数3回/hの場合、case1-1（給気口側に喫煙席を配置）では、粉塵が給気口からの気流により室内全体に拡散するため、室内全域で濃度が高くなる。case1-2（排気口側に喫煙席を配置）では他の配置型式より室内の粉塵濃度が相対的に低くなる。これは粉塵が排気口側で発生するため、給気口側に拡散する前に排気口から排気されているためである。喫煙本数を1/3に減らした場合と、フィルタによる粉塵の除去を行った場合、case1-7とcase1-12（共に排気口側に喫煙席を配置）で粉塵濃度が1.0以下の領域が最も拡大する。換気回数10回/hの場合、case1-17（排気口側に喫煙席を配置）と比較して、case1-20（排気口側に密集して喫煙席を配置）の方が1.0以下の領域が広く、最も良い配置型式となる。これは、1ヶ所当りの排気口の排気量が増加し、喫煙席上部の排気口の粉塵捕集率が大きくなるためである。

2.4.2 臭気強度分布：図4に各caseの臭気強度分布を示す。換気回数3回/hの場合、case1-2（排気口側に喫煙席を配置）では臭気強度が1（検知閾値濃度）以下になる領域はない。発生量を1/3にしたcase1-7（排気口側に喫煙席を設置）でも、臭気強度が1以下になる領域はない。発生量の減少により臭気強度の減少は見られるが、どのcaseも基準とした検知閾値濃度以下にはならない。換気回数10回/hの場合、case1-21（給気口側に喫煙席を配置）でも、臭気強度が1以下になる領域は

ない。case1-25（排気口側に密集して喫煙席を配置、喫煙本数1/3）では、臭気強度1以下の領域が全体の半分以上と最も広くなり、喫煙席が排気口側に密集しているほど室内の臭気強度は低下する。

3 焼肉用ロースター単体を対象とした解析

3.1 解析対象：図5に解析対象の概要を、図6にロースターの概要を示す。壁面から流入出のある2700×1445×3000[m³]の解析領域の中央にロースターを配置する。汚染質は鉄板上から発生するものとする。

3.2 解析方法：表4にロースター単体モデルの解析caseを、表5に数値解析条件を示す。ロースター形式、排気風量、フード高さを組み合わせた計11caseについて、汚染質濃度分布の解析を行う。

3.3 評価方法：解析によって得られた濃度の、完全拡散時の濃度に対する割合を百分率で示す。

3.4 解析結果

3.4.1 流速分布：図7に代表的なcaseの流速ベクトルを示す。case2-3と比較してフード高さの低い（400mm）case2-1では、上昇流およびフード内の気流に乱れが生じている。case2-7では、上昇流が速度を保ったまま排気ダクト側面を流れている。case2-10では、ロースター方向に吸い込まれる気流がある。また上昇流は速度を保ったまま上方空間へ流れている。

3.4.2 汚染質濃度分布：図8に代表的なcaseの汚染質濃度分布を示す。フード高さの低い（400mm）case2-1では他caseと比較して、フード下の空間に汚染質が広がっている。卓上排気型のフードありとフードなしを比較すると、case2-3と比較してcase2-7では高濃度の領域がダクト側面に沿って上方へ伸びている。無煙型の

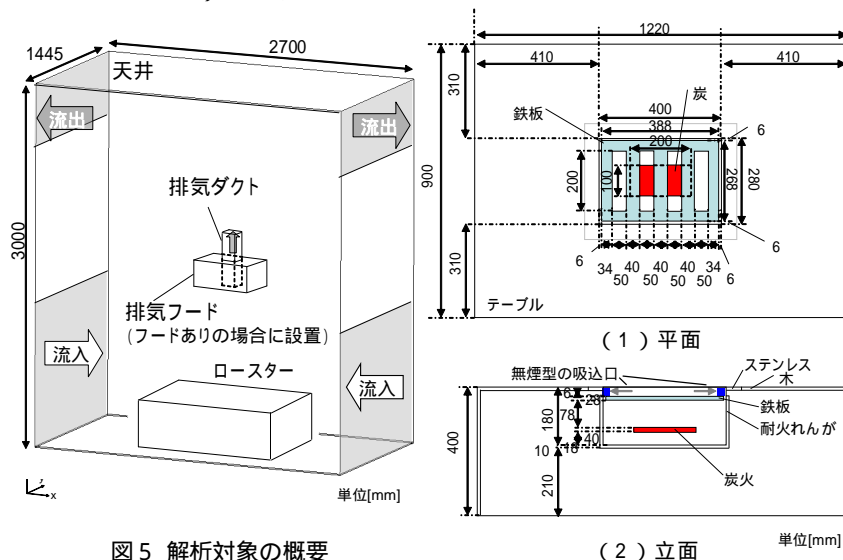


図5 解析対象の概要

（ロースター単体の解析モデル）

図6 ロースターの概要

表4 ロースター単体モデルの解析case

解析case	ロースター形式	排気風量[m ³ /h]	フード高さ[mm]
case2-1	卓上排気型 (フードあり)	300	400
case2-2			600
case2-3			800
case2-4	卓上排気型 (フードなし)	300	400
case2-5			600
case2-6			800
case2-7	無煙型	400	800
case2-8			200
case2-9			300
case2-10	-	400	-
case2-11			-

表5 数値解析条件(ロースター単体モデルの解析)

計算コード	ソフトウェアクレディット	STREAM Ver.7
乱流モデル	標準k-	
移流項精度	QUICK	
流速境界	ノースリップ	
熱境界	炭: 対流熱伝達率=100[W/m ² K] その他の表面: 温度対数則	
輻射境界	輻射率=0.9	
ダクトの吸込風速	卓上フード吸込 排気風量300[m ³ /h]: 吸込風速=8.33[m/s] 排気風量400[m ³ /h]: 吸込風速=11.11[m/s] テーブル吸込 排気風量200[m ³ /h]: 吸込風速=2.04[m/s] 排気風量300[m ³ /h]: 吸込風速=3.06[m/s] 排気風量400[m ³ /h]: 吸込風速=4.08[m/s]	
流入流出条件	ロースター底流入 底面に0.5[m/s]を与える。 側面流入: 流入風速=0.05[m/s] 壁面流入: 排気風量200[m ³ /h]: 吸込風速=0.17[m/s] 排気風量300[m ³ /h]: 吸込風速=0.14[m/s] 排気風量400[m ³ /h]: 吸込風速=0.11[m/s]	
汚染質の発生量	天井面に開口部(表面圧力規定)を設ける。 発生量: 卓上排気型=2.016[g/s], 無煙型=0.832[g/s]	
温度条件	炭火: 温度固定1000	

case2-10では、他caseと比較して、ロースター上の空間では高濃度の領域が少ない。

3.4.3 廃気捕集率：図9に各caseの廃気捕集率を示す。排気風量が300[m³/h]以上の場合は、卓上排気型（フードあり）、無煙型、卓上排気型（フードなし）の順で廃気捕集率が良い傾向がある。

4 PV法によるロースターのモデリング

4.1 PV法(The Prescribed Velocity Method): PV法とは、CFD解析において、複雑な吹出口の吹出気流性状を比較的粗いメッシュ分割のCFDに組み込むモデリング手法である。

4.2 解析対象：図10に仮想ボックスの概要を、表6に仮想ボックス面境界条件の概要を示す。ロースター上を囲むように仮想ボックスを想定し、単体の解析で得られた気流データをボックス面の各メッシュに与える。またボックス底面には温度データを与える。解析領域はロースター単体の解析で用いたものと同様とし、領域の中央に仮想ボックスモデルを配置する。

4.3 解析方法：表7に解析caseを示す。卓上排気型、無煙型の仮想ボックスモデルを作成し、代表的な3caseについて解析する。

4.4 解析結果：図11に仮想ボックスと単体モデルの流速分布比較（卓上排気型、排気風量300[m³/h]、フード高さ800mm）を、図12に仮想ボックスモデルと単体モデルの流速分布比較（無煙型、排気風量300[m³/h]）を示す。寄与率は卓上排気型で0.9667、無煙型で0.9693と

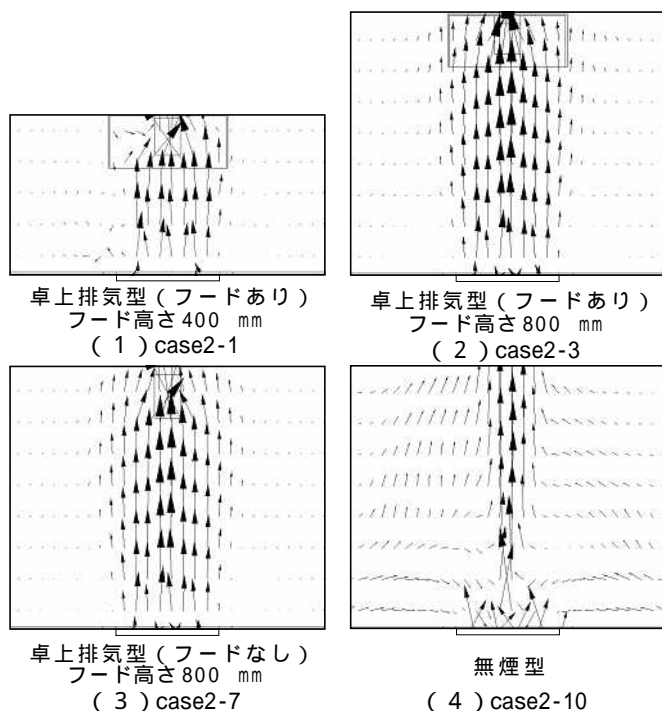


図7 代表的なcaseの流速ベクトル(ロースター中央断面)

なり、どちらも流速分布の相関が高い。図13に仮想ボックスモデルと単体モデルの温度分布比較（卓上排気型、排気風量300[m³/h]、フード高さ800mm）を、図14に仮想ボックスモデルと単体モデルの温度分布比較（無煙型、排気風量300[m³/h]）を示す。寄与率は卓上排気型で0.9794、無煙型で0.8844となり、どちらも温度分布の相関が高く、PV法の有効性が確認された。

5 焼肉店を対象とした汚染質濃度分布の解析

5.1 解析対象：図15に解析対象の概要を示す。レストランの解析で用いた店舗の座席配置を一部変更したものとする。また、外気温は夏季30[]、冬季0[]とする。

5.2 解析方法：表8に解析caseを示す。ロースターの形式、排気風量、空調の種類を組み合わせ合わせた計12caseについて解析を行う。汚染質の表示濃度は、単体の解析と同様とする。

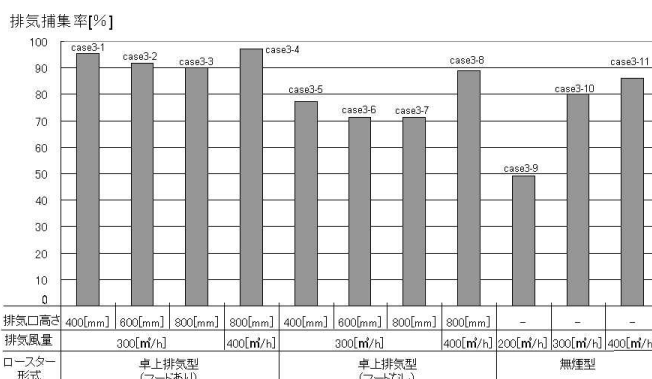


図9 各caseの廃気捕集率(ロースター単体モデルの解析)

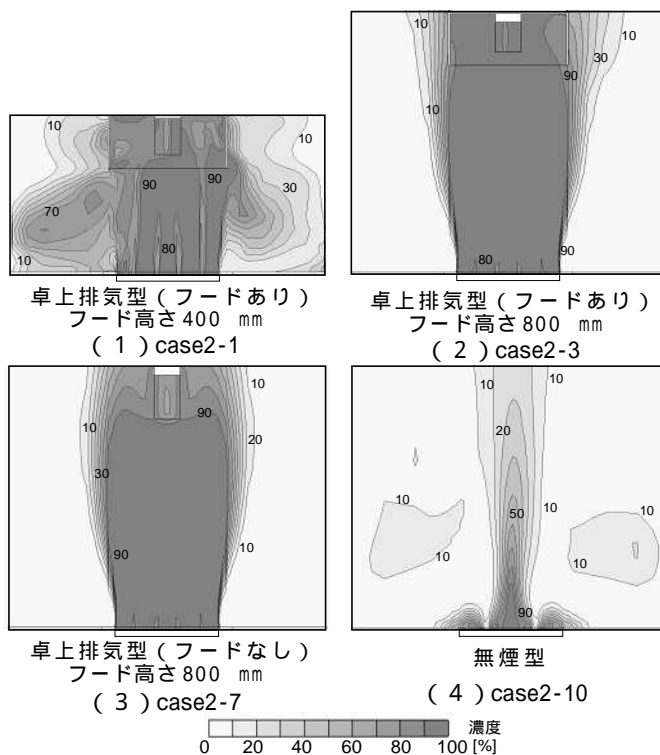


図8 代表的なcaseの汚染質濃度分布(ロースター中央断面)

5.4 解析結果

5.4.1 温度分布：図16に代表的な case の冷房時の温度分布を示す。断面 z (呼吸域：床上1.1m) では、卓上排気型の case5-4、case5-8 と比較して無煙型の case5-12 で室内全域の温度が高い。これは、無煙型ではロースターで発生する温度の高い上昇流が卓上で排気されないためである。

5.4.2 汚染質濃度分布：図17に代表的な case の汚染質濃度分布を示す。卓上排気型の case5-4、case5-8 では断面 z のロースター上に高濃度の領域が集中する。卓上排気型のフードありとフードなしを比較すると、フードありの case5-4 で汚染質濃度 5% 以下の領域が見られるのに対し、フードなしの case5-8 では汚染質濃度 5% 以下の領域は殆ど無い。無煙型の case5-12 では、卓上排気型と比較すると、断面 z でロースター上の高濃度の領域が減少している。

5.4.3 呼吸域平均濃度：図18に各 case の呼吸域平均濃度を示す。呼吸域は人が着席する範囲のみの床上0.5m ~ 1.6m とする。無煙型、排気風量 300[m³/h] の case5-11 と case5-12 で汚染質濃度が最も低い。これは、呼吸域のロースター上に高濃度の領域が存在しないためである。

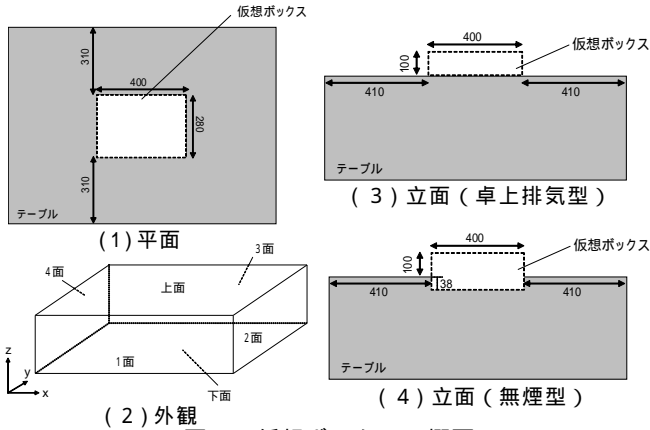


図10 仮想ボックスの概要

表6 各ボックス面境界条件の概要

	1面、3面	2面、4面	上面	下面
境界条件	流速固定	流速固定	流速固定	流出条件、温度条件
メッシュ数	52	36	117	117

表7 解析 case (仮想ボックスモデルによる解析)

	ロースター形式	排気風量[m ³ /h]	フード高さ[mm]
case4-1	卓上排気型	300	800
case4-2	無煙型	300	—
case4-3		200	

表8 解析 case (焼肉店全体の解析)

	ロースター形式	排気風量[m ³ /h]	空調
case5-1	卓上排気型	200	暖房 (外気温: 0)
case5-2			冷房 (外気温: 30)
case5-3			暖房 (外気温: 0)
case5-4		300	冷房 (外気温: 30)
case5-5			暖房 (外気温: 0)
case5-6			冷房 (外気温: 30)
case5-7	無煙型	200	暖房 (外気温: 0)
case5-8			冷房 (外気温: 30)
case5-9			冷房 (外気温: 0)
case5-10		300	冷房 (外気温: 30)
case5-11			冷房 (外気温: 0)
case5-12			冷房 (外気温: 30)

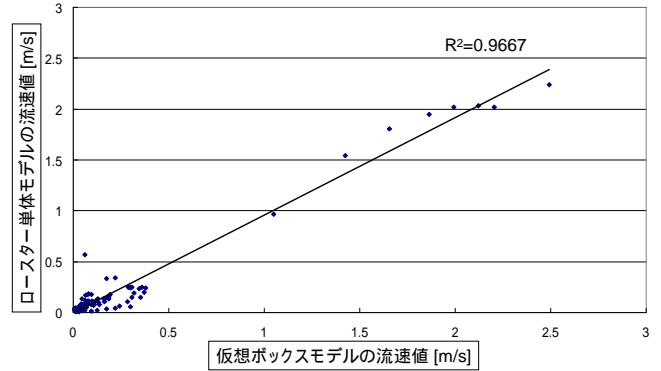


図11 仮想ボックスモデルと単体モデルの流速分布比較 (卓上排気型、排気風量 300[m³/h]、フード高さ 800mm)

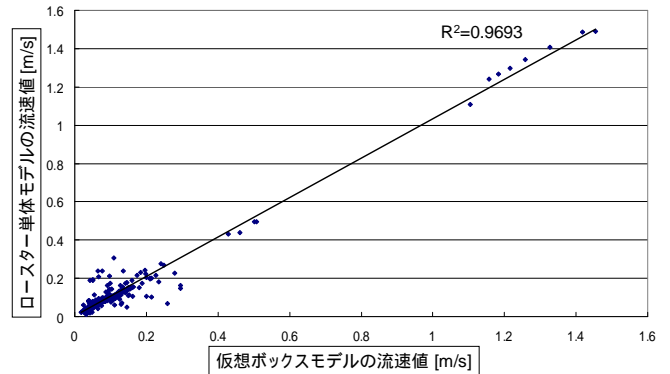


図12 仮想ボックスモデルと単体モデルの流速分布比較 (無煙型、排気風量 300[m³/h])

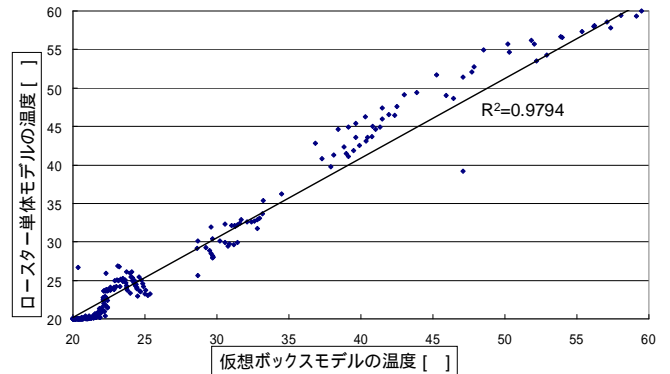


図13 仮想ボックスモデルと単体モデルの温度分布比較 (卓上排気型、排気風量 300[m³/h]、フード高さ 800mm)

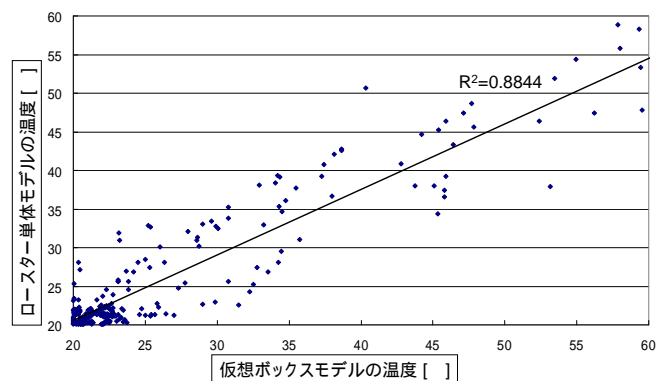


図14 仮想ボックスモデルと単体モデルの温度分布比較 (無煙型、排気風量 200[m³/h])

る。排気風量によらず、卓上排気型（フードなし）で汚染質濃度が最も高くなる傾向がある。卓上排気型（フードあり）では、排気風量によらず汚染質濃度はほぼ同等となる。無煙型では、排気風量が300[m³/h]から200[m³/h]に減少すると、汚染質濃度が約1.7倍になる。

6 結論

(1) レストランを対象としたタバコ煙の解析

粉塵濃度に関しては喫煙本数の制限、フィルタの設置、換気量の増加のいずれの方法も、室内の粉塵濃度を低下させる効果が得られる。

臭気に関しては、換気量を増加した場合に室内の臭気強度を低下させる効果が大きい。

粉塵濃度の室内環境基準を満足させる配置は可能であるが、臭気に関しては認知閾値濃度以上である場合が殆どである。

(2) 焼肉用ロースターに関する解析

ロースター単体の廃気捕集率は、卓上排気型（フードあり）、無煙型、卓上排気型（フードなし）の順で良くなる傾向がある。

無煙型は熱上昇流が卓上で捕集されないため、卓上排気型と比較してロースターの熱が室内に広がる傾向がある。

卓上排気型（フードあり）は、排気風量が少ない場

合も比較的良好に汚染質を捕集する傾向がある。着席時の呼吸域の汚染質濃度は、ロースター上に高濃度領域の集中が少ない無煙型で最も低い。

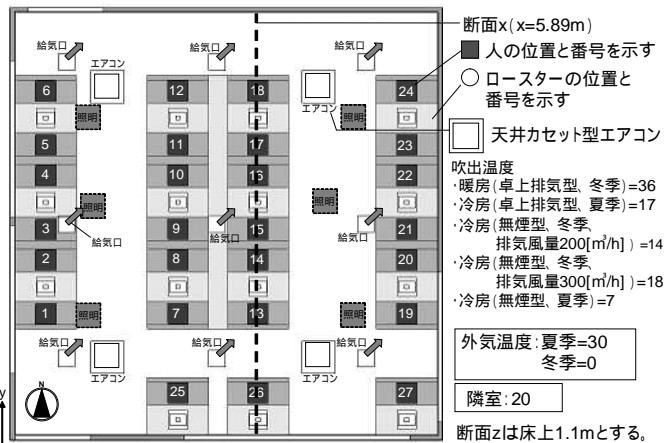


図15 解析対象の概要（焼肉店の解析）

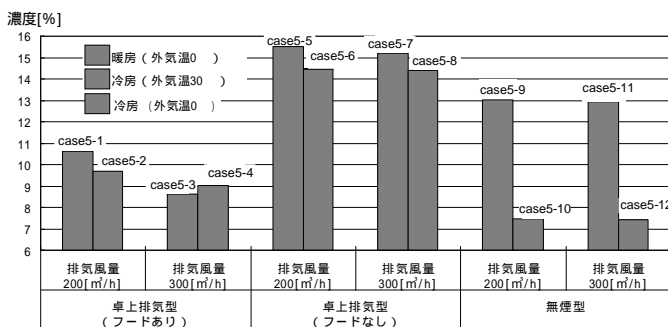


図18 各caseの呼吸域平均濃度

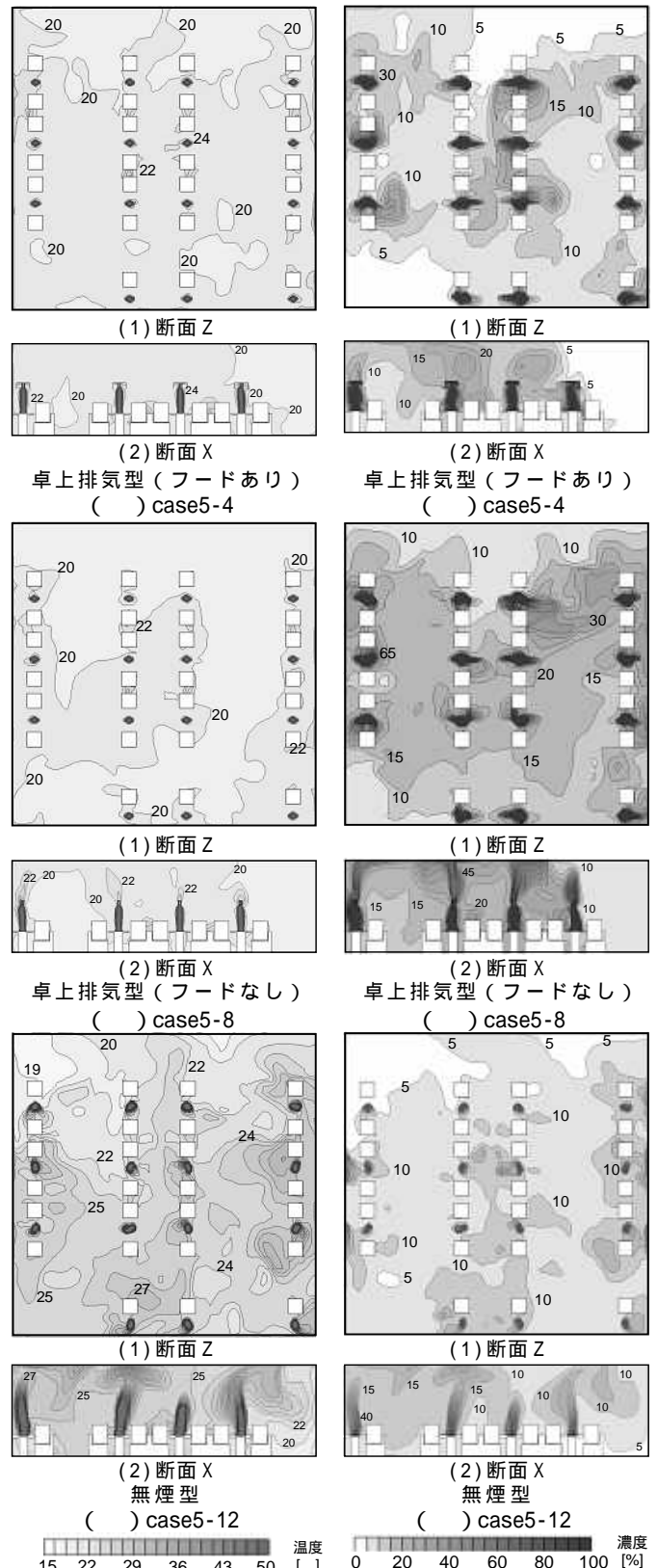


図16 代表的なcaseの温度分布

図17 代表的なcaseの汚染質濃度分布