

住宅用電化厨房における換気・空調方式に関する研究 － 室内気流による擾乱が厨房内環境に及ぼす影響評価 －

高橋 大智
指導教員 赤林 伸一 教授

1 研究目的

厨房における換気・空調設備には、調理機器により生じる廃ガス・水蒸気・臭気などの汚染質や熱が室内へ拡散することを防ぎ、室内環境を良好に保つことが要求される。近年、住宅用厨房において電磁調理器（IH レンジ）が普及しているが、現在、IH レンジを導入した電化厨房における換気・空調方式に関する知見は少なく、住宅用電化厨房の換気・空調設備を対象とした、厨房内環境に基づいた具体的な指針・規制は存在しない。

燃焼式調理機器を用いる場合、厨房内の汚染質や熱の排出のための必要換気量は理論廃ガス量、燃料消費量により算出される法定排気量以上と定められているが、住宅用電化厨房では、「建築設備設計・施工上の運用指針^{文1)}」により望ましいとされる必要換気量 $300[\text{m}^3/\text{h}]$ に準拠した設計を行っているのが現状である。ところで、IH レンジは燃焼による廃ガスが生じず、高熱効率で廃熱も少ないため、汚染質や熱の排出に必要な換気量に対して過剰な換気量が設定されている可能性がある。更に、IH レンジには炎等の高温部が存在しないため、一般に燃焼式調理器と比較してレンジ上に生じる上昇気流速度が遅く、空調や人間の動きに伴う室内気流の擾乱を受け易いと考えられる。従って、汚染質の拡散を防止する手法の導入など、電化厨房独自の換気・空調システムの検討が求められる。

又、調理時に生じる汚染質の排気効率を評価する指標の一つとして排気捕集率（以下、捕集率）がある。これはレンジフード等の換気装置の汚染質捕集性能を評価するものであり、「換気装置により直接排出される汚染質量と汚染質発生量との比」として表される。家庭用レンジフードの捕集率測定法としては、ベターリビングにより排気捕集効率試験^{文2)}が定められているが、この試験法は大容積で静穏な試験空間で汚染質の再帰がない条件での換気装置単体の捕集率を求めるものであり、実際の住宅用厨房等の使用環境下においてはレンジフード周囲の気流性状により捕集率が当然変化する。従って、実使用環境下における換気・空調システムの捕集性能を評価

する上で、室内気流による擾乱の影響を考慮した検討が必要である。

本研究では、住宅の厨房及びダイニングを対象に数値流体解析（CFD 解析）、実大模型を対象としたPIV測定^{※1}、捕集率測定を行うことで、実使用環境下における住宅用電化厨房の気流性状の特性を把握するとともに、レンジフードによる汚染質の捕集性能を明らかにし、室内気流による擾乱が厨房内環境にどのような影響を与えるかを把握することを目的とする。

2 解析・測定対象の概要

図1に解析・測定対象の概要を示す。対象は集合住宅の中間階中間住戸におけるダイニングキッチン^{※2}とする。調理時にはIHヒーター1口で鍋を加熱し、鍋の水が沸騰した状態を保つ。調理時の排気はレンジフードから一定風量で行い、レンジフード作動時の給気手法は、①ドアのアンダーカットからの給気、②天井給気口からの給気、③ドアのアンダーカット及び常時換気口から給

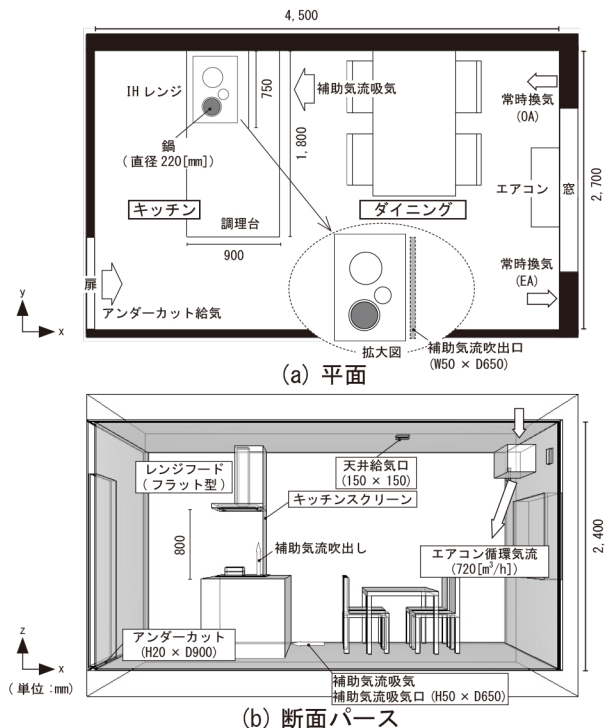


図1 解析・測定対象の概要

気とする。②、③は室内への流入気流速度を低減し、流入気流による擾乱の影響を低減することを目的としている。又、調理台とレンジフードの間にはキッチンスクリーンを設置可能とする。室内の空調はエアコン及び天井給気（セントラル空調を想定）によって行い、常時換気は換気回数 0.5[回/h] の第一種機械換気とする。更に、調理台前面壁の床面付近から吸気し、IH レンジ上端からレンジフードに向けて補助気流を吹出す。

表 1 に解析・測定 case を示す。本研究ではレンジフード排気風量、レンジフード作動時の給気手法、キッチンスクリーンの有無、補助気流の有無を変化させた各 case で CFD 解析、実大模型による PIV 解析、捕集率測定を行い、電化厨房における気流性状及び汚染質の拡散状況、レンジフードの捕集性能を明らかにする。

3 CFD 解析の概要

3.1 解析条件：表 2 に CFD 解析条件を示す。解析には汎用流体解析ソフト STREAM ver. 12 を用いる。使用する乱流モデルは標準 $k-\epsilon$ モデルとする。解析は非冷暖房時（室内・室外温度 20[℃]）で行う。鍋底と鍋の水に初期温度 100[℃] を与え、温度固定することで IH レンジによる加熱調理（沸騰状態）を模擬する^{文 3}）。アンダーカット及び常時換気口、天井給気口からの流入温度は 20[℃] に設定し、エアコンは吹出し気流温度 20[℃]、循環風量 720[m³/h]、壁面に対し 20[°] で下向きに吹き出す。又、調理による汚染質の発生を模擬するため、鍋上面に汚染質（トレーサ）発生領域を設定し、一定量の大きさや質量を持たないトレーサを様に発生させ、気流に追従させる。

3.2 基準化濃度の算出：汚染質の拡散状況を把握するため、解析領域内の各点におけるトレーサ濃度から、(1) 式より基準化濃度を算出する。

$$\text{基準化濃度}[-] = \frac{\text{各点のトレーサ濃度} [1/\text{m}^3]}{\text{トレーサの発生量} [1/\text{h}] / \text{レンジフード排気風量} [150 \text{m}^3/\text{h}]} \dots (1)$$

尚、本研究ではレンジフード排気風量を 150[m³/h] とした場合における全捕集時のトレーサ濃度を基準として、各 case の基準化濃度を算出する。

3.3 捕集率の算出：厨房内の排気箇所がレンジフードのみの場合、調理によって発生した汚染質は排出までの経

表 1 解析・測定 case

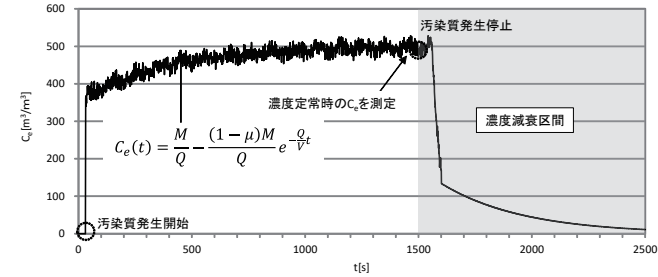
case	レンジフード 排気風量	エアコン 循環風量	スクリーンの有無	給気手法	アンダーカット給気量	常時換気口の 配分給気量	天井給気量	補助気流の詳細
1-1	300[m ³ /h]	720[m ³ /h]	有	アンダーカット	300[m ³ /h]	-	-	-
1-2								
1-3								
1-4								
1-5								
1-6	150[m ³ /h]	720[m ³ /h]	-	アンダーカット +常時換気口	200[m ³ /h]	100[m ³ /h]	-	-
1-7								
1-8								
2-1							300[m ³ /h]	
2-2							-	
2-3	150[m ³ /h]	720[m ³ /h]	有	アンダーカット	150[m ³ /h]	-	-	-
2-4								
2-5								
2-6								
2-7								
2-8							150[m ³ /h]	

路に関係なく、最終的にはレンジフードにより捕集、排出される。そのため、レンジフードによる汚染質の捕集率を「換気装置により直接排出される汚染質量と汚染質発生量との比」と定義すると、レンジフードの汚染質の捕集性能が低く、室内に汚染質が拡散する場合でも、レンジフードの捕集率は 100% と算出される。従って、レンジフードの汚染質捕集性能を明らかにするうえで、発生量に対し居住域へ拡散すること無くレンジフードにより直接捕集された汚染質の割合から捕集率を算出する必要がある。これに対し、倉渕^{文 4}) は実際の厨房環境下におけるレンジフードの直接捕集率を測定する手法として非定常法 (STOP 法) を開発している。

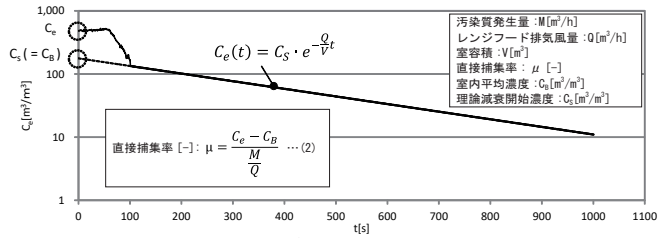
図 2 に非定常法 (STOP 法) の概要を示す。この手法は、レンジフード排気濃度が定常状態となるまでトレーサを供給し、定常排気濃度 (C_e) を測定した後、トレーサの供給を停止し、レンジフード排気濃度の減衰過程からトレーサ供給停止時の室内平均濃度 (C_B) を推定することで、室内に拡散すること無くレンジフードに捕集された汚染質の直接捕集率 (μ) を図 2 (2) 式より算出する。汚染質の溢流、再帰がある条件下での測定及び CFD 解析への適用が可能なことから、本研究では非定常法 (STOP 法) を用いて直接捕集率の算出を行い、レンジフードによる汚染質の捕集性能を明らかにする。

表 2 CFD 解析条件

計算コード	ソフトウェアクレイドルSTREAM Ver.12
乱流モデル	標準 $k-\epsilon$ モデル
移流項精度	QUICK
壁面条件	流速境界
	輻射境界
熱境界条件	熱対流
	鍋-水: 2,000,000[W/m ² ·K], IHレンジ-調理台: 断熱
	その他の表面: 温度対数則
温度条件	IHレンジ
	鍋内の水と鍋底には初期温度 100[℃] を与え、100[℃] に温度固定する
汚染質発生量	
1.0[1/s] = 3,600[1/h]	



(a) 排気ダクト内の汚染質濃度推移



(b) 減衰時の排気ダクト内の汚染質濃度推移

図 2 非定常法 (STOP 法) の概要

本解析では、トレーサ発生量から 100%捕集濃度 (M/Q) を求める。又、室内部の汚染質濃度が定常に達した後、トレーサの発生を停止し、ダクト内の濃度減衰過程をシミュレーションすることで、濃度定常時の排気ダクトの汚染質濃度 (C_e)、トレーサ供給停止時の室内平均濃度 (C_p) をそれぞれ求め、直接捕集率を算出する。

4 PIV 測定・捕集率測定の概要

4.1 測定装置の概要：図 3 に測定装置の概要を示す。調理時のレンジフード排気は、超音波流量計で測定し、排気風量が一定となるよう、排気用シロッコファンをインバータにより制御する。常時換気は換気回数 0.5 [回/h] の第一種機械換気、調理時の給気はアンダーカット、常時換気口、天井給気口から行き、レンジフード排気と同様に風量を一定に制御する。補助気流は DC ファンを用いて調理台前面壁下部より吸気し、ダクトを通じて IH レンジ上端からレンジフードに向け一定風量で吹き出す。

又、鍋上部に設置したガス供給リングから一定量の C_2H_4 (エチレン) を供給し、調理時に鍋から発生する汚染質のトレーサとする。排気ダクト内の C_2H_4 濃度は、連続炭化水素濃度計を用いて測定する。又、本研究では出力 3 [kW] の IH レンジを用いる。IH ヒーター 1 口で鍋を加熱し、鍋の水が沸騰した状態で測定を行なう。

4.2 可視化及び PIV 測定の概要：図 4 に可視化領域の概要を、表 3 に実験機器の詳細を、表 4 に PIV 解析パラメータを示す。可視化には出力 3 [W] × 2 台、2 [W]、1 [W] のシート状連続光レーザー 4 台を使用し、レーザー複数台の照射断面を一致させ、可視化領域内全体をほぼ均一な輝度分布にして実験を行う。

可視化に用いるトレーサには難燃性のスモーク (DAINICHI PORTA SMOKE PS-2002、粒径：数 10 [μm]) を使用し、シーディングを行う。カメラはハイスピードカメラ Photron FASTCAM-SA3 を、可視化画像の PIV 解析には Flow-Expert ver. 1.2.13 を使用する。撮影画像の画素と実距離との換算係数であるキャリブレーション値は 1.21 [mm/pixel] である。ハイスピードカメラのフレームレートは 250 [fps] に設定し、シャッタースピードは 4 [ms] に設定する。

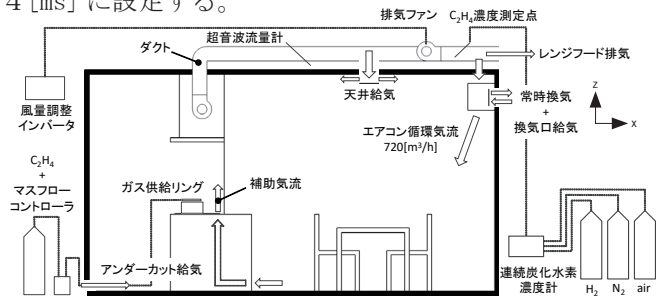


図 3 測定装置の概要

4.3 捕集率測定の概要：捕集率の測定手法は、CFD 解析と同様、非定常法 (STOP 法) を用いる。本測定ではまず初めに、供給した C_2H_4 が 100% 捕集される条件での排気ダクト内の C_2H_4 濃度 (M/Q) を測定する。その後、沸騰した鍋上に供給リングを取り付け、排気ダクト内の C_2H_4 濃度が定常状態となるまで C_2H_4 の供給を行い、定常排気濃度 (C_e) を測定する。 C_2H_4 の供給を停止し、濃度減衰を一定時間 (換気時間の 1.5 倍程度) 測定し、その減衰曲線を指数近似することにより、 C_2H_4 供給停止時の室内平均濃度 (C_p) を推定し、直接捕集率を算出する。又、定常排気濃度の算出の際には、排気ダクト内の濃度変動を考慮し、5 分間の測定値の平均値を求める。

5 解析・測定結果

5.1 CFD 解析結果：図 5 に代表 case における CFD 解析結果を、図 6 に CFD 解析による直接捕集率算出結果を示す。流速分布及び基準化濃度分布では、レンジフードによる排気風量を 300 [m³/h] とした case1-1 で、鍋から生じる上昇気流は 0.2 [m/s] 程度の水平方向の室内気流により偏流し、レンジフードに到達すること無くキッチン側へ漏出し、汚染質が室内に拡散する。

一方、排気風量を 150 [m³/h] とした case2-1 では、鍋上の上昇気流はキッチン側へと偏流するが、レンジフード端部に到達しており、一部の汚染質はレンジフードによって捕集されている。排気風量の増加に伴い、室内への流入気流も増加するため、case1-1 では室内気流の擾乱による影響が増大したと考えられる。

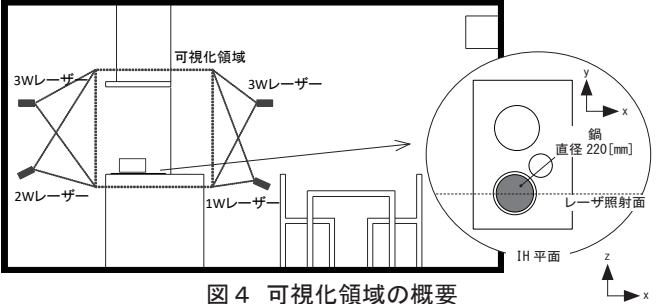


図 4 可視化領域の概要

表 3 実験機器の詳細

Camera	ハイスピードカメラPhotron FASTCAM SA3	
Laser	DPGL - 3W×2	LD励起Nd:YAG/YVO4レーザー(連続光) 波長532[nm], 出力3[W]
	DPGL - 2W	DPGL-3Wと同様(但し、出力2[W])
	G1000	DPGL-3Wと同様(但し、出力1[W])
Software	カメラ制御	Photron FASTCAM Viewer ver. 3.4.1.0
	PIV解析	Flow - Expert ver1.2.13

表 4 PIV 解析パラメータ

測定対象領域	1,200[mm]×1,200[mm]
画像サイズ	1024[pixel]×1024[pixel]
キャリブレーション値	1.2[mm/pixel]
測定時間	22[sec]
測定間隔	4[ms] (250[fps])
検査領域	32[pixel]×32[pixel]
探索範囲	±3[pixel]×±3[pixel]

排気風量を $150[\text{m}^3/\text{h}]$ とし、キッチンスクリーンを設置した case2-2、及び、補助気流 ($30[\text{m}^3/\text{h}]$) を吹出した case2-4 では、case2-1 と比較して室内気流による鍋上の上昇気流の偏流が抑制されており、汚染質の大部分がレンジフードにより捕集される。

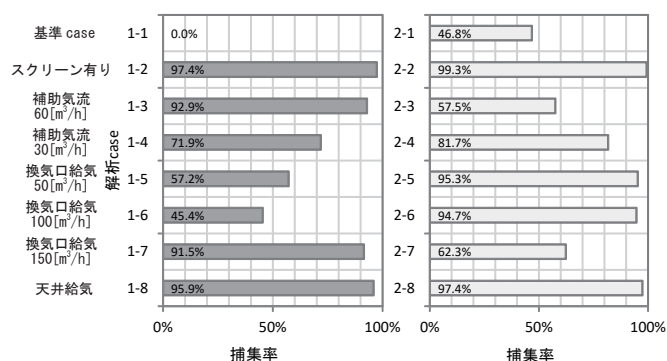
又、給気手法を変更し、アンダーカットに加えて常時換気口から給気を行なう case2-5 (換気口給気 $50[\text{m}^3/\text{h}]$)、及び、天井給気口から給気を行なう case2-8 では、アンダーカットからの流入気流が減少したことで、レンジ上を水平方向に流れる気流が形成されておらず、鍋上の上昇気流は、擾乱による影響を殆ど受けることなく垂直に上昇し、レンジフードに到達、捕集されている。

各 case における直接捕集率を見ると、排気風量 $300[\text{m}^3/\text{h}]$ の case1-1 の直接捕集率は $0[\%]$ 、排気風量を $150[\text{m}^3/\text{h}]$ に低減した case2-1 の直接捕集率は $46.8[\%]$ となり、排気風量が多い場合で減少している。

又、キッチンスクリーンの設置、補助気流の吹出し、常時換気口からの給気、天井給気を行った case では、case1-1、2-1 に比較して直接捕集率が上昇する傾向がある。特に、キッチンスクリーンを設置した case1-2、2-2 の直接捕集率は $90[\%]$ を超えており、排気風量 $150[\text{m}^3/\text{h}]$ 、 $300[\text{m}^3/\text{h}]$ のどちらの場合も最大となる。補助気流の吹出し、常時換気口からの給気を行った場合で

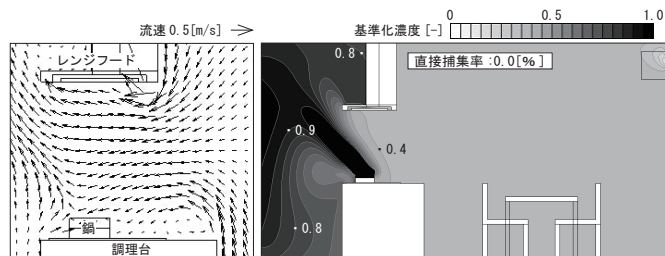
は、吹出風量及び給気量によって直接捕集率が変化し、最大となる case が排気風量によって異なる。従って、レンジフードの捕集性能を向上させるためには、使用状況に応じて適切な排気風量と給気口位置、給気風量のバランスを検討する必要があると考えられる。

5.2 PIV 解析結果： 図 7 に代表的な case における平均流速分布を示す。各 case で鍋上には流速 $0.4[\text{m/s}]$ 程度の上昇気流が生じる。レンジフードの排気風量を $300[\text{m}^3/\text{h}]$ とした case1-1 では、IH レンジ上に流速 $0.2 \sim 0.3[\text{m/s}]$ でダイニング側からキッチン側へ水平方向の気流が生じる。上昇気流は水平方向の気流によって偏流し、レンジフードへ到達すること無くキッチン側へと漏出している。

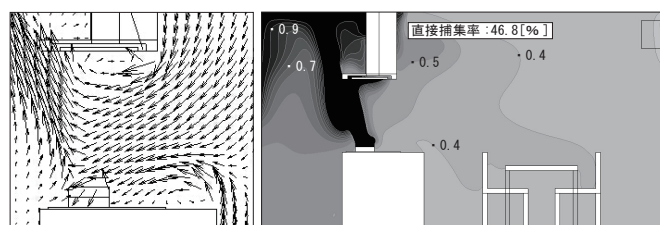


(a) 排気風量 $300[\text{m}^3/\text{h}]$ (b) 排気風量 $150[\text{m}^3/\text{h}]$

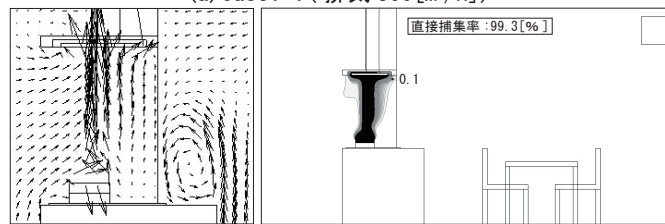
図 6 CFD 解析による直接捕集率算出結果



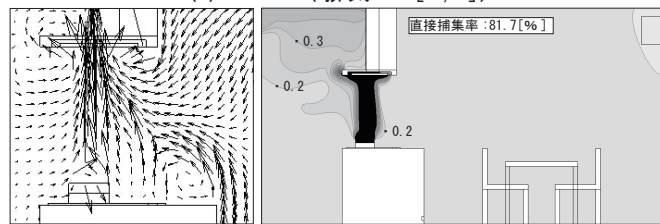
(a) case1-1 (排気 $300[\text{m}^3/\text{h}]$)



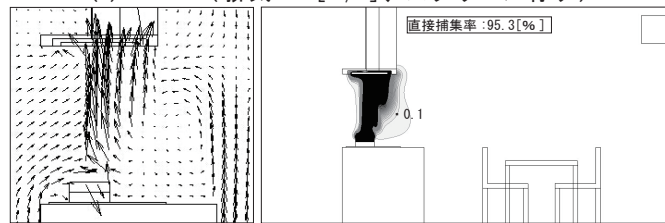
(b) case2-1 (排気 $150[\text{m}^3/\text{h}]$)



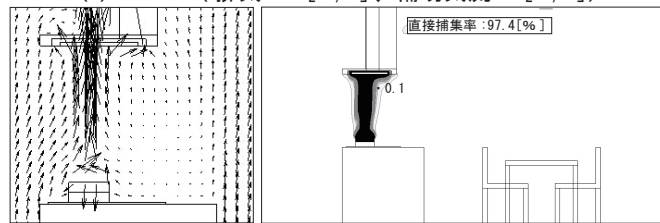
(c) case2-2 (排気 $150[\text{m}^3/\text{h}]$ 、スクリーン有り)



(d) case2-4 (排気 $150[\text{m}^3/\text{h}]$ 、補助気流 $30[\text{m}^3/\text{h}]$)



(e) case2-5 (排気 $150[\text{m}^3/\text{h}]$ 、換気口給気 $50[\text{m}^3/\text{h}]$)



(f) case2-8 (排気 $150[\text{m}^3/\text{h}]$ 、天井給気)

図 5 代表 case における CFD 解析結果 (鍋中心断面)



排気風量を $150[\text{m}^3/\text{h}]$ とした case2-1 では、IH レンジ上の水平気流は流速 $0.1 \sim 0.3[\text{m/s}]$ となり、上昇気流は偏流するがレンジフード下端部に到達する。レンジフードへ到達した上昇気流は捕集されるが、一部がキッチン側へと漏出する。

排気風量を $150[\text{m}^3/\text{h}]$ とし、キッチンスクリーンを設置した case2-2 では、上昇気流はレンジフード下端までほぼ垂直に立ち上がり、フードによって捕集される。一方、アンダーカットからの給気及びエアコンの空調に伴うダイニング側からの気流は、スクリーンに衝突して上下に分かれ、壁面に沿って上昇、下降する様子が確認される。

排気風量 $150[\text{m}^3/\text{h}]$ 、補助気流 ($30[\text{m}^3/\text{h}]$) を吹出した case2-4 では、鍋上の上昇気流は補助気流によって、偏流すること無く、調理台上 $600[\text{mm}]$ まで垂直に上昇する。しかし、ダイニング方向からの気流によって補助気流がキッチン側へ偏流し、鍋からの上昇気流もレンジフード付近でキッチン側へ流れる。レンジフードへ到達した上昇気流は捕集されるが、一部がレンジフードに到達すること無くキッチン側へと漏出する。

排気風量 $150[\text{m}^3/\text{h}]$ 、常時換気口の配分給気量 $50[\text{m}^3/\text{h}]$ の case2-5 では、IH レンジ上の水平気流は流速 $0.1 \sim$

$0.2[\text{m/s}]$ となる。鍋上の上昇気流は偏流することなく、レンジフード下端に到達し捕集される。

排気風量 $150[\text{m}^3/\text{h}]$ 、給気、空調を天井給気で行う case2-8 では、レンジ上を水平方向に流れる気流が形成されておらず、鍋上の上昇気流は偏流することなくほぼ垂直に上昇しており、レンジフード下端に到達し捕集、排気される。

PIV によって測定された IH レンジ周辺の平均流速分布は、CFD 解析により算出された平均流速分布と概ね一致する。

5.3 捕集率測定結果：図 8 に実験による直接捕集率測定結果を示す。各 case の直接捕集率は、排気風量 $150[\text{m}^3/\text{h}]$ の case に比較して、排気風量 $300[\text{m}^3/\text{h}]$ の case における直接捕集率が低く、レンジフードによる排気風量の増加に伴い、室内気流による擾乱の影響が大きくなる。従って、実使用環境下においても、レンジフード排気風量の増加は必ずしも捕集性能の向上には寄与せず、流入気流の増加に伴い、レンジフードによる汚染質の捕集性能が低下する可能性がある。

各 case を比較すると、キッチンスクリーンを設置し、排気風量 $300[\text{m}^3/\text{h}]$ とする case1-2 では、case1-1 に比

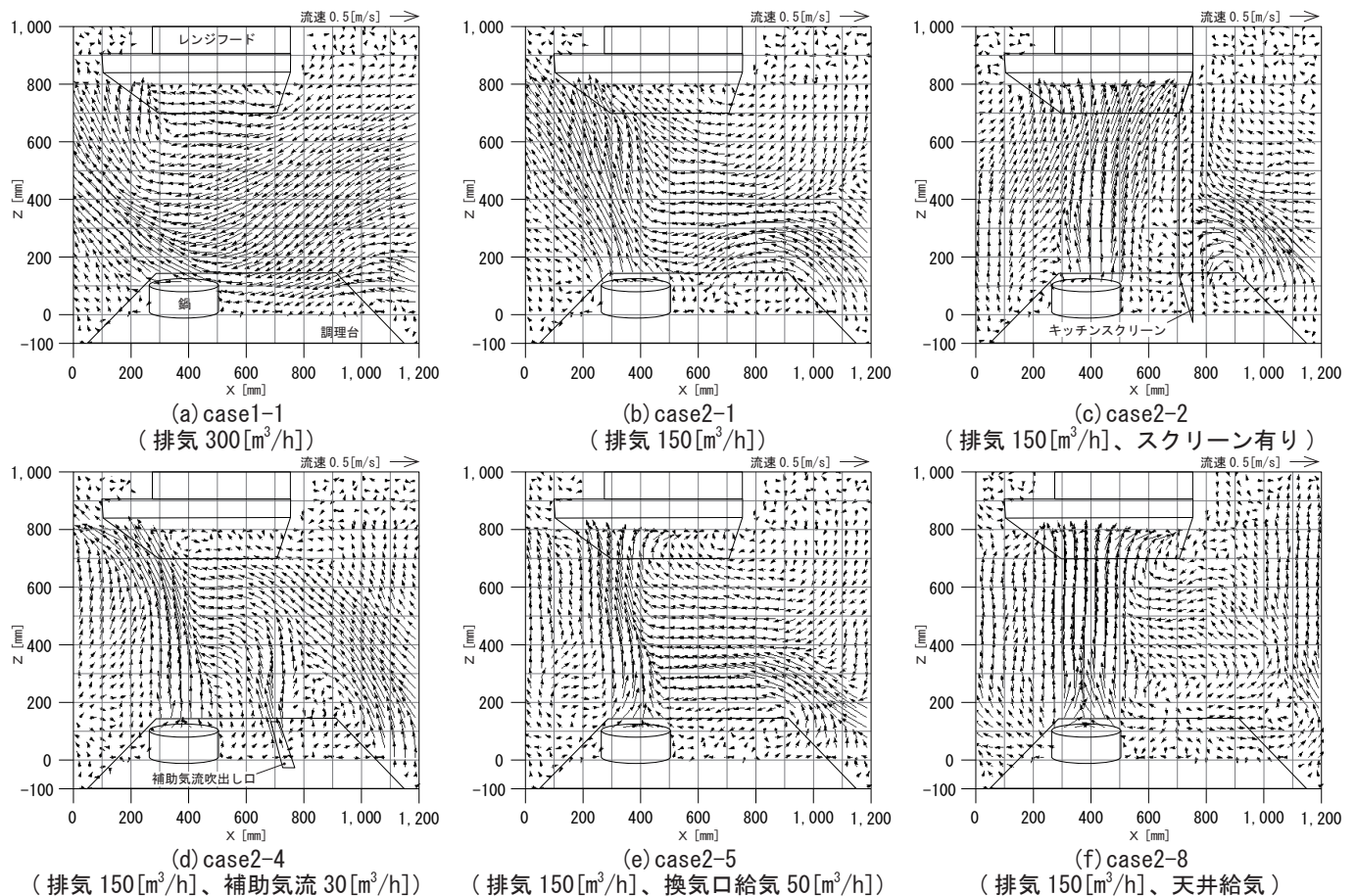


図 7 代表 case における平均流速分布

較して直接捕集率は 37.8 ポイント向上し 45.1[%] となる。排気風量を 150[m³/h] とする case2-2 では、case2-1 に比較して 48.4 ポイント向上して 75.0[%] となり、排気風量 150[m³/h] の場合では最大となる。

常時換気口からの配分給気及び天井給気を行った case では、case1-1、2-1 に比較して直接捕集率が増加しており、給気に伴う室内気流の擾乱の影響を低減する上で、給気口の配置など給気手法を検討することが重要であると考えられる。

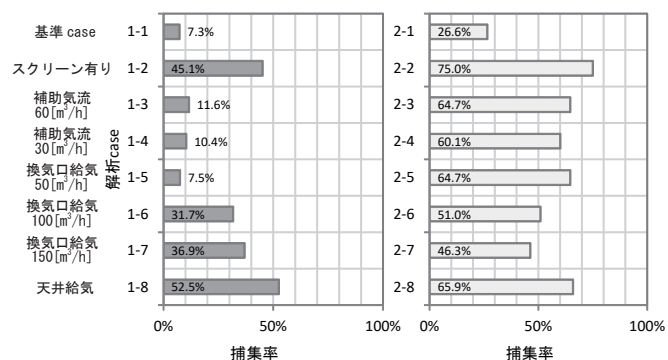
一方、調理台からレンジフードに向けて補助気流を吹出した場合、排気風量 150[m³/h] の case では、case2-1 に対して直接捕集率が大きく増加して 60[%] 程度となるが、排気風量 300[m³/h] の case では、直接捕集率は 10[%] 程度となる。

更に、各 case において、実験による直接捕集率測定結果は、CFD 解析による直接捕集率算出結果と比較して低い値となる傾向がある。

図 9 に case1-1 における排気ダクト内汚染質濃度の推移を示す。実験による測定値では、排気ダクト内の C₂H₄ 濃度の推移は C₂H₄ 供給区間で、比較的大きく変動している。C₂H₄ 濃度の測定値が 200[ppm] 程度増減する瞬間も確認され、レンジフードによって捕集される汚染質濃度が常に変動することが分かる。一方、CFD 解析値では、排気ダクト内の基準化トレーサ濃度は変動すること無く推移する。本研究で行った CFD 解析では、時間的な変動を考慮しない定常解析により算出された流れ場において直接捕集率を求めたため、時間変動による捕集性能への影響が反映されておらず、実験による直接捕集率測定結果が CFD 解析による直接捕集率算出結果と比較して差が生じたと考えられる。

6 まとめ

①実使用環境下においては、室内への流入気流や空調に起因する室内気流によって、鍋上に生じる上昇気流が偏流し、汚染質が拡散することで、厨房内環境が悪化



(a) 排気風量 300[m³/h] (b) 排気風量 150[m³/h]

図 8 実験による直接捕集率測定結果

する場合がある。

- ②レンジフード排気風量の増加に伴い、IH レンジ周辺に生じる気流による擾乱の影響が大きくなり、レンジフードの捕集性能が悪化する可能性がある。
- ③キッチンスクリーンや補助気流などの手法を用いることにより、室内気流による擾乱を抑制し、レンジフードの捕集性能を向上させることが可能である。しかし、室内気流の擾乱が大きい場合、補助気流による擾乱の抑制効果は著しく低下する。
- ④給気口の配置や給気配分など給気手法を検討することで、流入気流に伴う室内気流による擾乱を低減し、レンジフードの捕集性能を向上させることが可能であるが、十分な効果を得るには使用状況に応じた適切な排気風量と給気バランスの検討が必要である。
- ⑤CFD 解析により、PIV 測定結果と比較して高い精度で厨房内の気流性状を予測することができた。一方、直接捕集率の算出では、CFD 解析と実験による算出結果の間に差が生じた。これは実験で生じる IH レンジ上の非定常な気流変動に起因すると考えられる。

注釈

※1 粒子画像流速測定法 (Particle Image Velocimetry)

※2 室内にはエアコン、テーブル、イス、常時換気口、ドアにはアンダーカット、天井にはセントラル空調を想定した天井給気口を設ける。厨房はペニンシュラ型とし、IH レンジ上部には整流板を有するフラット型レンジフードを設置する。

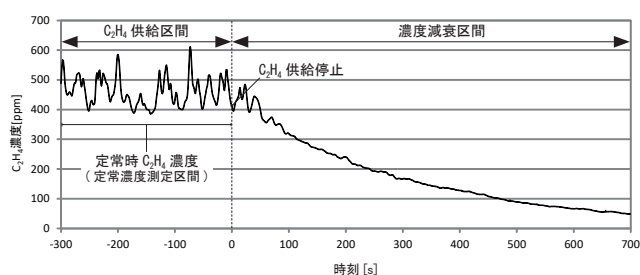
参考文献

文1) 日本建築行政会議：建築設備設計・施工上の運用指針

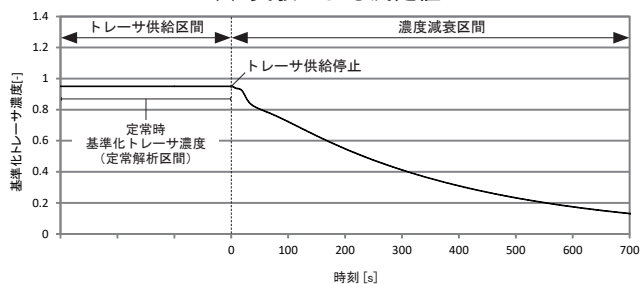
文2) ベターリビング：優良住宅部品性能試験方法書 換気ユニット (台所用ファン) BLT VU-1:2013 (2), 2013. 8

文3) 坂口淳, 赤林伸一: 数値流体解析による住宅用厨房の温熱空気環境に関する研究, 空気調和・衛生工学会大会学術講演会講演論文集, 1033-1036, 2008. 8

文4) 倉瀬ら: 住宅厨房内の各種擾乱が排気捕集率に及ぼす影響評価に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 76 No. 663, 493-500, 2011. 5



(a) 実験による測定値



(b) CFD 解析値

図 9 case1-1 における排気ダクト内汚染質濃度の推移