

住宅用電化厨房を対象とした高効率換気に関する研究 鍋及びレンジフード周辺における上昇気流に関する数値解析

富田 侑作 指導教員 有波 裕貴 助教

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排ガス・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。既往の研究^{文1)}では、普及している電磁調理器 (IH レンジ) を用いて住宅用厨房を対象に実大実験によって直接捕集率を計算し、排気効率を明らかにした。

一方、既往の研究^{文2)}では CFD 解析で求めた直接捕集率^{※1)}は同じ条件で求めた実験結果と比較して高い値となることが指摘されている。倉渕ら^{文3)}はその要因を標準 k-ε モデルを用いた RANS^{※2)}で解析した際、速度及び温度の拡散が不足し、直接捕集率が過大に評価されるためと推定した。本研究では、CFD 解析によって鍋と湯表面の対流熱伝達率及び鍋内に乱流エネルギーを設定し、直接捕集率の算出を行う。実大実験の結果を RANS 解析で再現するためのパラメータを検討することを目的とする。

2 研究概要

2.1 解析条件：図 1 に解析対象モデルを示す。解析対象は住宅用の厨房^{※3)}を模擬し、解析領域は 4,500[mm] (幅) × 2,700[mm] (奥行き) × 2,400[mm] (高さ) とする。排気はレンジフード、給気は可能な限り擾乱が発生しないよう開放した扉で行う。

表 1 に解析条件、表 2 に対流熱伝達率の検討に関する解析 case を示す。RANS 解析には汎用数値流体解析ソフト STREAM ver.2020 を使用し、乱流モデルは標準 k-ε モデルとする。レンジフードの排気量は 150[m³/h] とする。扉の境界条件は自然流入とする。

2.2 直接捕集率の算出方法：本研究では RANS 解析を用いてレンジフード排気口の濃度を解析し、倉渕らが開発したストップ法^{文4)}により直接捕集率を計算する。図 2 に直接捕集率計算の概念を示す。レンジフード排気濃度が定常状態となるまで鍋の中に汚染物質を発生させ定常排気濃度 (C_E) を測定し、汚染物質の発生を停止する。レンジ

フード排気濃度の減衰過程から定常時の室の平均ガス濃度 (C_B) を推定し、直接捕集率 (μ) を (1) 式により算出する。

$$\mu = \frac{C_E - C_B}{M} \times Q \quad \dots (1)$$

M : トレーサーガス供給量 [m³/h]
Q : レンジフード排気量 [m³/h]
C_E : 定常排気濃度 [m³/m³]
C_B : 室内平均濃度 [m³/m³]

2.3 対流熱伝達率の検討：case0 は鍋及び湯表面と空気との対流熱伝達率は温度対数則に設定する。その他の case は対流熱伝達率を 25、50、100、200[W/m²・K] として設定し、直接捕集率を求める。

2.4 乱流エネルギーの検討：直接捕集率を再現するためのパラメータとして乱流エネルギーの検討を行う。鍋内に乱流エネルギー発生量を設定^{※4)}し、湯沸かし時の鍋周辺の気流を対象とした PIV^{※5)}測定を行い、PIV 解析結果と CFD 解析結果の比較及び直接捕集率の算出を行う。PIV 解析結果はフレームレート 500[fps] で 10 秒間撮影し、既往の研究^{文5)}の手法を用いて、フレームスキップした解析を合成して各点の速度を算出したものを用いる。本研究で用いる PIV 解析は 2 次元 2 成分の風速データであるため、乱流エネルギーを求める際は鍋上の上昇気流は水平方向で点対称であると考え、風速の X 成分と Y 成分は等しいと仮定し計算を行う。PIV 解析で得られた風速を元に (2) 式により鍋直上範囲の乱流エネルギーを算出する。CFD 解析では乱流エネルギーの発生量は係数および定数^{※6)}を操作することで設定する。

$$k = \frac{(x' - \bar{x})^2 + (y' - \bar{y})^2 + (z' - \bar{z})^2}{2} \quad \dots (2)$$

k : 乱流エネルギー [m²/s²]
x', y', z' : 各成分の瞬時速度 [m/s]
x, y, z : 各成分の時間平均速度 [m/s]

表 3 に乱流エネルギーの検討に関する解析 case を示す。本検討では鍋及び湯表面の対流熱伝達率は case1-3 とした

表 2 対流熱伝達率の検討に関する解析 case

解析 case	熱伝達率 [W/m ² ・K]	
	湯表面	鍋表面
case0	温度対数則	
case1-1	25	25
case1-2	50	50
case1-3	100	100
case1-4	200	200

表 3 乱流エネルギーの検討に関する解析 case

解析 case	乱流エネルギー発生条件	
	発生項の係数 [kg/m ³ ・s]	発生項の定数 [m ² /s ²]
case2-1	0	0
case2-2		1
case2-3	0.2	0.2
case2-4		0.4
case2-5	0.3	0.5
case2-6		0.3
case2-7	0.4	0.4
case2-8		0.2
case2-9	0.5	0.4
case2-10		0.5
case2-11		1
case2-12	0.7	0.2
case2-13		0.4
case2-14	1	0
case2-15		1

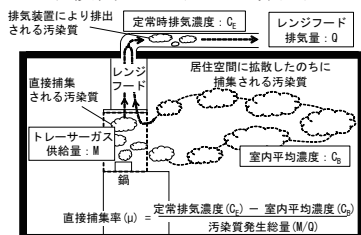


図 2 直接捕集率計算の概念

表 1 解析条件

計算コード	ソフトウェアクレイドルSTREAM ver. 2020	
乱流モデル	標準 k-ε モデル	
解析要素数	210 (X) × 197 (Y) × 124 (Z) = 5, 128, 880	
移流項精度	QUICK	
熱境界 (個体間)	鍋-水 : 2, 000, 000 [W/m ² ・K] IH レンジ-調理台 : 断熱 その他の固体間 : 熱伝導	
輻射境界	輻射率=0.9	
流入境界	流出	レンジフード : 流量規定=150[m ³ /h]
	流入	扉 : 自然流入
温度条件	IH レンジ	鍋内の水と鍋底には初期温度 100 [°C] を与え 100 [°C] に固定する
	その他	外気温 : 20 [°C]、初期温度 : 20 [°C]

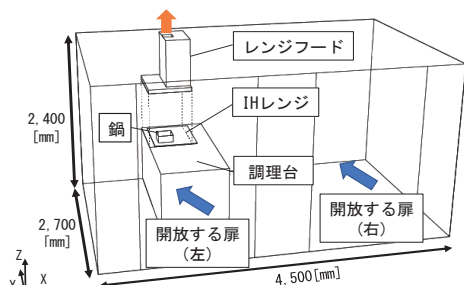


図 1 解析対象モデル

上で各 case の CFD 解析結果と PIV 解析結果を比較する。

3 実験結果

3.1 対流熱伝達率の解析結果：図3に対流熱伝達率を変化させた場合の直接捕集率の計算結果を示す。鍋表面と空気、湯表面と空気間の対流熱伝達率を $100[\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}]$ とした case1-3 では対流熱伝達率の増加によって直接捕集率は最も低くなり、case0 の $98.6[\%]$ より 1.6 ポイント低い $97.0[\%]$ となる。しかし、実大実験の結果 $87.9[\%]$ と比較して 9.1 ポイント高い。また対流熱伝達率をさらに増加させた case1-4 の直接捕集率は $97.3[\%]$ となり、case1-3 と比較して高くなる傾向がある。

3.2 乱流エネルギーの解析結果

3.2.1 PIV 解析結果：図4に PIV 解析と CFD 解析による鍋上の乱流エネルギーの空間分布の比較を示す。図4(a)は PIV 解析結果で、可視化領域は鍋中心断面の約 $360[\text{mm}]$ 角の範囲である。乱流エネルギーは鍋上で $0.01 \sim 0.032[\text{m}^2/\text{s}^2]$ 程度となる。図4(b)に CFD 解析結果(case2-4)を示す。乱流エネルギーは $70 \sim 140[\text{mm}]$ の高さでピーク値 $0.032[\text{m}^2/\text{s}^2]$ となる。CFD 解析結果と PIV 解析結果を比較すると、乱流エネルギーのピーク値と発生範囲の傾向が今回の解析 case の中で最も近いのは case2-4 となる。

3.2.2 直接捕集率：図5に乱流エネルギーの発生量を変化させた場合の解析結果を示す。乱流エネルギー分布が PIV 解析結果に最も近い case2-4 の直接捕集率は $97.5[\%]$ であり、実大実験の結果 $87.9[\%]$ と比較して 9.6 ポイント高い。また、解析した case の中で乱流エネルギー発生量が最大である case2-15 の直接捕集率は $94.7[\%]$ と

なり最も実大実験に近い結果となるが、実大実験の結果 $87.9[\%]$ と比較して 6.8 ポイント高い。

対流熱伝達率及び乱流エネルギー発生量を増加させることで直接捕集率は減少する。しかし、実験と概ね同様の対流熱伝達率及び乱流エネルギーのピーク値を CFD 解析を用いて再現した場合でも直接捕集率が再現できないことが明らかとなった。今後は鍋から生じる水蒸気の潜熱を含めた解析を行い、直接捕集率への影響を検討する。

4 まとめ

- ① 対流熱伝達率の検討では直接捕集率は熱伝導率 $100[\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}]$ で最小となり、 $97.0[\%]$ である。
- ② 乱流エネルギーの検討では、PIV 解析結果と CFD 解析結果を比較して乱流エネルギーの分布が最も近いのは case2-4 であり、直接捕集率は $97.5[\%]$ と、実験と比較して 9.6 ポイント高い。
- ③ 乱流エネルギーの検討において実大実験の直接捕集率と最も近いのは case2-15 で直接捕集率は $94.7[\%]$ と、実験と比較して 6.8 ポイント高い。

注釈

- ※1 鍋から発生させた汚染質のうち、居住空間へ流出せずに排気装置から直接排出される汚染質の割合を直接捕集率とする。
- ※2 レイノルズ平均モデル (Reynolds-Averaged Navier-Stokes simulations) を用いて解析する手法。
- ※3 厨房はベニシユラ型とし、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。
- ※4 乱流エネルギーは鍋内の水面から鍋の縁までの範囲で発生させる。湯面の沸騰によって生じる乱れの再現を意図している。
- ※5 粒子画像流速測定法 (Particle Image Velocimetry)
- ※6 単位体積あたりの発生量は次式で表される。発生量 = 係数 \times (定数 - ϕ)

参考文献

- 文1) 有波、赤林ら：「住宅用厨房を対象とした高効率換気・空調方式の開発研究 その8 人体等の擾乱がレンジフードの排気捕集率に及ぼす影響」、日本建築学会学術講演梗概集、2021年
- 文2) 有波、赤林ら：「住宅用厨房を対象とした高効率換気・空調方式の開発研究 その3 IH レンジ周辺気流の PIV 測定及びレンジフードの捕集率測定実験」、日本建築学会北陸支部研究報告集、2017年
- 文3) 倉淵、清輔ら：「CFD によるガスコンロ上の熱上昇気流の再現に関する研究」、日本建築学会学術講演梗概集、2018年
- 文4) 倉淵ら：「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
- 文5) 赤林、有波ら：「実大室内空間モデルを対象とした PIV 解析に関する基礎的研究」、日本建築学会学術講演梗概集、2021年

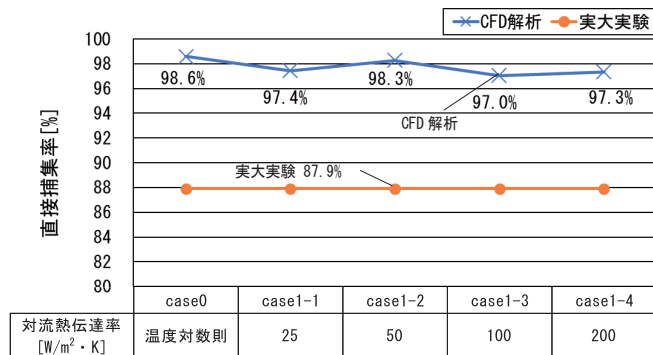


図3 対流熱伝達率を変化させた場合の直接捕集率の解析結果

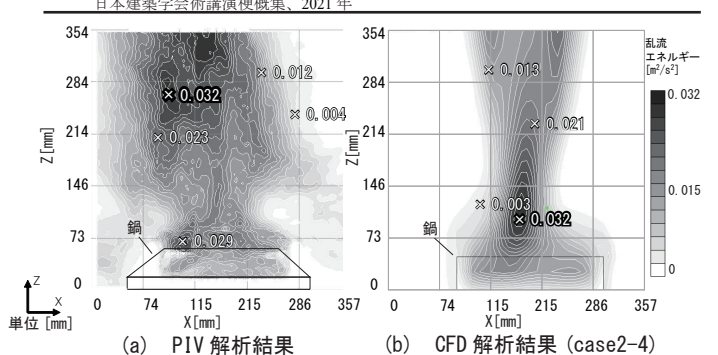


図4 PIV と CFD 解析による乱流エネルギーの空間分布の比較

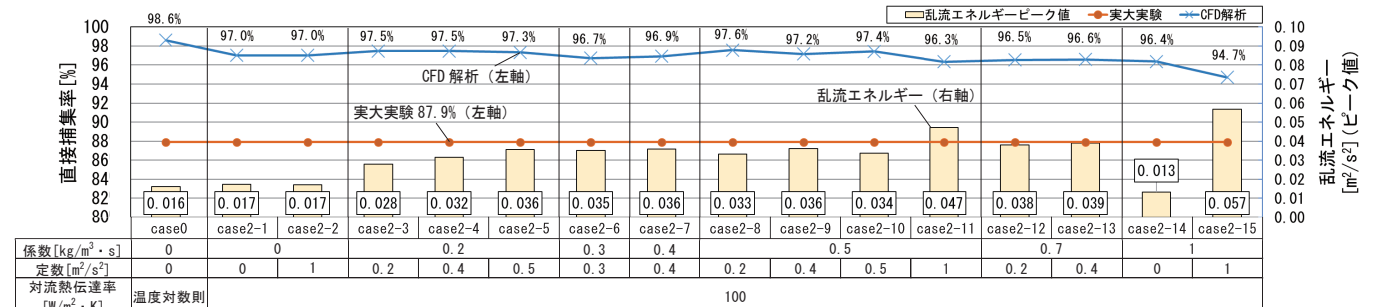


図5 乱流エネルギーの発生量を変化させた場合の解析結果