

Study on Prediction and Evaluation of Exhaust Collection Performance of Residential Electrified Kitchen

Study on CFD Analysis Considering Boiling

指導教員 王 函
有波裕貴

これまでに、数値流体解析 (CFD) により、レンジフードの捕集性能を予測するための検討が多数行われている。近藤、阿部ら⁴⁾は住宅厨房を対象に、フードによる鍋上部の熱上昇気流の捕集性状を精度良く再現することを目的とし、実験により熱上昇気流の風速分布を測定し、CFD 解析に規定するモデリング手法の検討を行っている。熱上昇気流のモデリング手法を CFD 解析に導入することにより、実験に対して鍋上部の温度分布、気流分布の再現性は向上する傾向があることを示している。島貫、倉渕ら^{5, 6)}は CFD による業務用厨房の排気捕集性能の予測精度向上を目的とし、等温噴流を対象として RANS の乱流モデルの選定のための解析及び

排気装置により
排出される汚染質

定常時排気濃度: C_E

レンジフード
排気量: Q

居住空間に拡散したのちに
捕集される汚染質

直接捕集
される汚染質

汚染質
供給量: M

鍋

室内平均濃度: C_0

直接捕集率 (μ) = $\frac{\text{定常排気濃度 } (C_E) - \text{室内平均濃度 } (C_0)}{\text{汚染質発生総量 } (M/Q)}$

図2 CFD解析と実測上昇気流の気流分布の比較

レーザーなど光源をシート状で照射することで、流体の可視化を行う。高速カメラで撮影し、連続的な画像を解析することで、期間内の気流速度を算出する。建築分野におけるレーザを用いたPIVの応用は1985年に村上、加藤、赤林⁹⁾によって始まる。2013年赤林ら¹⁰⁾縮尺モデルを用い、室内気流を対象とし、PIV撮影を行った。その後実大空間を対象としたPIV撮影の検討を行い、厨房における鍋付近の気流を可視化・撮影した¹¹⁾。

筆者らは住宅厨房を対象にこれまでに様々な給気条件、エアコン気流の有無において、レンジフードの排気量を変化させて直接捕集率の測定を行う。更にCFD解析で対象厨房をモデル化し、直接捕集率の算出を行っている。実験結果とCFD解析結果を比較すると、筆者らが検討したどの条件でもCFD解析結果では直接捕集率

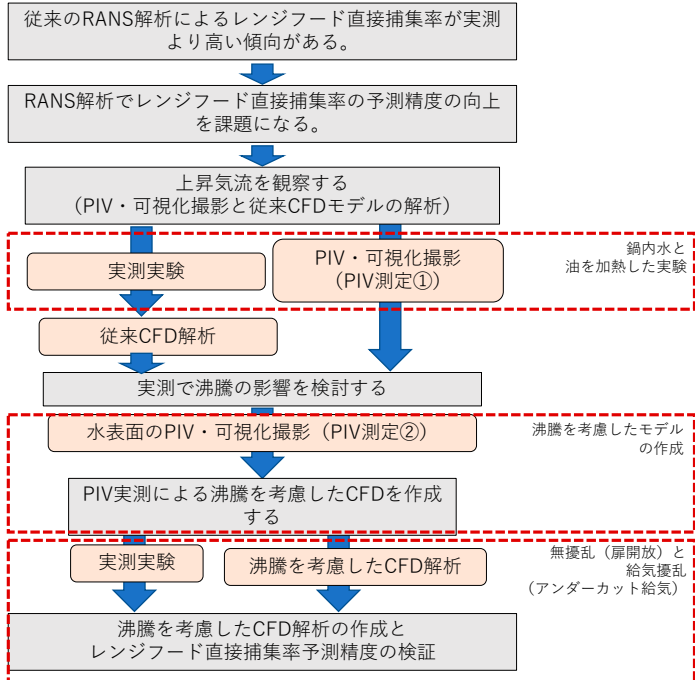
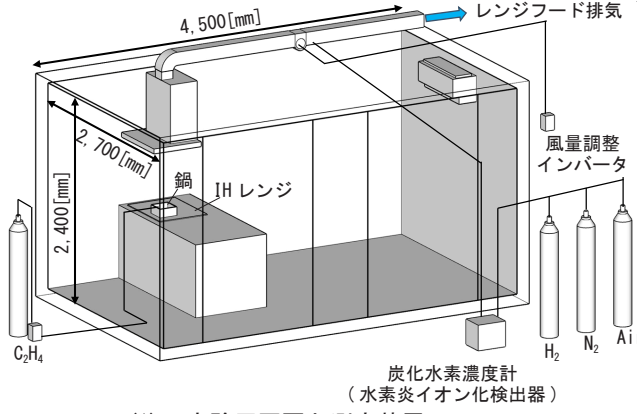


図3 CFDよりレンジフード直接捕集率の予測精度を向上する方法の検討フロー



(1) 実験用厨房と測定装置

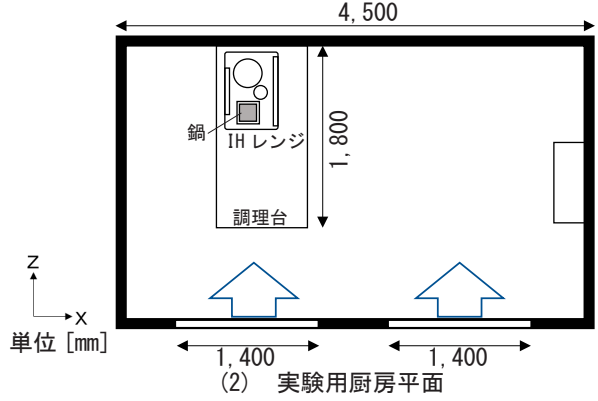
を過大評価する傾向があ¹²⁾。図2にCFD解析と実測上昇気流の気流分布の比較を示す。PIVで実測時鍋付近の気流速度を測定した¹¹⁾、CFD解析の同じ位置の気流分布と比較すると、CFD解析の場合、熱上昇気流を拡散せず、真っ直ぐにレンジフードに到達する。それは直接捕集率を高くなる原因と考えられる。CFD解析による熱上昇気流を精確に再現し、直接捕集率の予測精度の向上が課題となっている。

図3にCFDよりレンジフード直接捕集率の予測精度を向上する方法の検討フローを示す。まず沸騰の有無による鍋上の熱上昇気流の違いが直接捕集率へ与える影響を検討するため、住宅用厨房を模擬した実験室において沸騰状態の水またはサラダ油 (以下、油) を100[℃]に加熱した上で、トレーサガスを液面上から発生させ、レンジフードの直接捕集率の測定を行う。従来CFDモデル解析により直接捕集率と測定した結果を比較する。またCFD解析において沸騰による熱上昇気流への影響を考慮するための検討を行う。ハイスピードカメラを用い、PIVという非接触流速測定方法で鍋周辺気流を実測し、実測値を用いてCFD解析中沸騰を模擬する方法 (沸騰モデル) を検討する。最後にレンジフードの排気量を変化させ、給気擾乱有無の条件でレンジフードの直接捕集率を算出し、実大実験の結果と比較する。CFD解析モデルを検討することで、RANS解析による直接捕集率の予測精度を向上させることを目的とする。

2 沸騰の有無による直接捕集率の比較

2.1 RANS解析と上昇気流

これまでの住宅厨房における鍋から生じる汚染質の直接捕集率の測定では、沸騰状態の鍋を対象としていることが多い。一方で、数値流体解析で汎用しているRANS解析の場合、設定上の制限により、直接捕集率を予測する時^(例えば文12)、鍋内での沸騰による水面直上での気流の乱れや、水から水蒸気へ相変化する際の体積増加の影響¹³⁾、筆者らが知る限り無視されることが多い。なので、



(2) 実験用厨房平面

図4 実験用厨房と測定装置及び平面

実大実験で沸騰の有無がレンジフードの直接捕集率に及ぼす影響を検討する必要がある。

2.2 水及び油を加熱した場合のレンジフード直接捕集率の比較

(1) 実大実験概要 水または油（日清サラダ油）を100[℃]に加熱し、レンジフード直接捕集率の測定を行う。図4に実験用厨房と測定装置及び平面を示す。実

表 1 実験 case

鍋の内容物		実験case	レンジフード排気量
caseA	沸騰状態の水 (100[℃])	caseA-1	150[m ³ /h]
		caseA-2	300[m ³ /h]
caseB	加熱した油 (100[℃])	caseB-1	150[m ³ /h]
		caseB-2	300[m ³ /h]

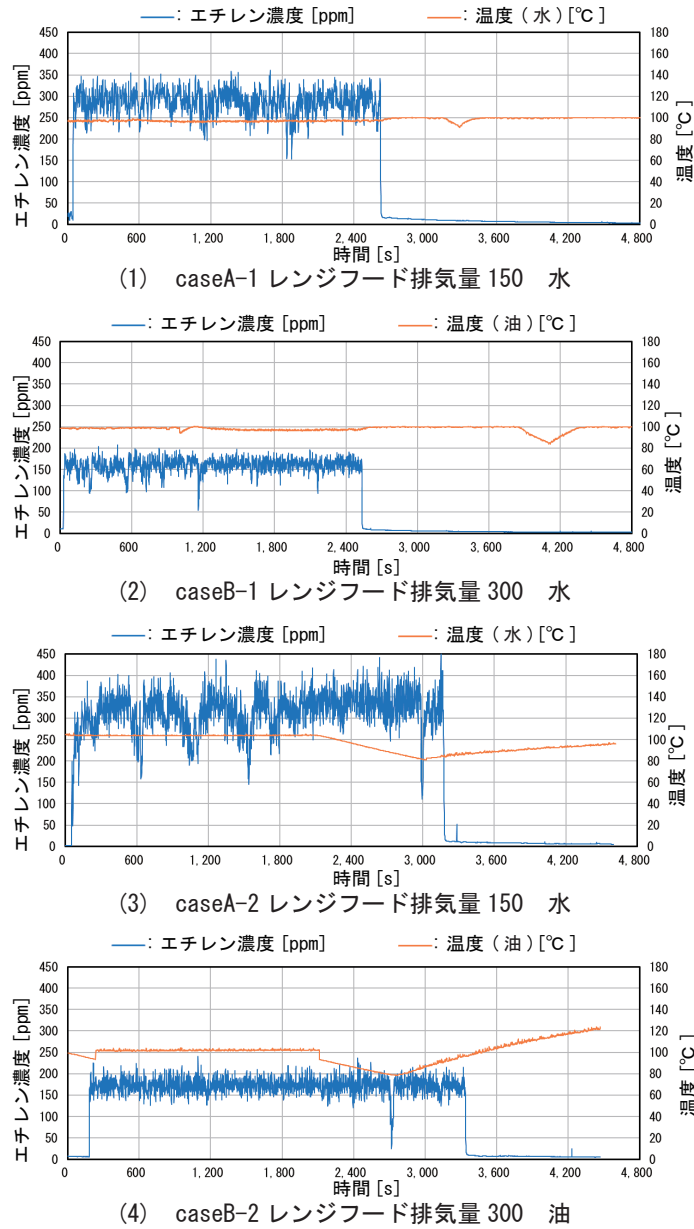


図5 ダクト内エチレン濃度と鍋内水または油の温度の推移

験用厨房は4,500[mm]（幅）×2,700[mm]（奥行き）×2,400[mm]（高さ）とし、レンジフードから排気、可能な限り擾乱が発生しないよう開放した扉（幅1,400[mm]×高さ2,400[mm]×2カ所）から給気を行う。レンジフード排気量はシロッコファンとインバータにより制御し、超音波流量計により測定する。排気量は150または300[m³/h]とする。IHレンジは2口（各定格出力3[kW]）仕様であり、調理台に向かって右側の1口で鍋を加熱する。加熱時の出力は1,400[W]とする。調理中に発生する汚染物質のトレーサはエチレンとし、鍋内へチューブで導き、鍋内液体表面付近からマスフローコントローラーにより一定量で発生させる。トレーサの濃度は炭化水素濃度計を用いてレンジフード下流のダクト内において測定する。まだ、レンジフードの直接捕集率の測定にはストップ法を用いる。

IHレンジで鍋内の水または油を100[℃]に加熱し、トレーサガスを鍋から発生させ、レンジフードのダクト内の濃度を測定する。濃度を定常状態となった後、トレーサの発生を停止する。定常及び減衰過程の濃度を連続的に測定することで、定常排気濃度とエチレン供給停止時の室内平均濃度を求める（ストップ法）。定常排気濃度の算出の際、排気ダクト内の濃度変動を考慮し、測定値の10分間平均値を用いる。室内平均濃度の算出では、エチレン供給停止直後の2分間を過渡的濃度状態とし、過渡的濃度状態を除いた区間を対象に指数近似を行う。加えてそれぞれの実験においてレンジフードにトレーサが100[%]捕集される状態で完全捕集濃度を測定し、(1)式によりレンジフードの直接捕集率を算出する。

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

表1に実験caseを示す。沸騰する水の場合をcaseA、加熱する油をcaseBにする。レンジフード排気量は150、300[m³/h]とし、それぞれcase1、case2とする。

(2) 実大実験結果 図5にダクト内エチレン濃度と鍋内水または油の温度の推移を、図6に実大実験による直

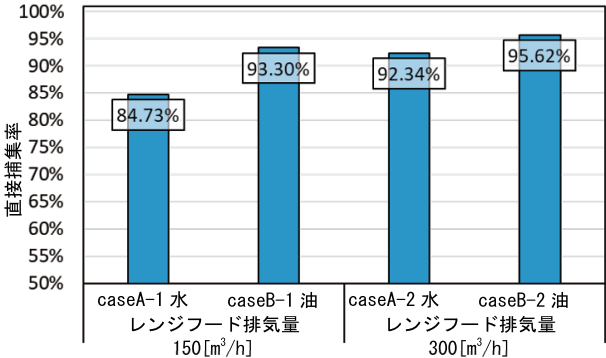


図6 実大実験による直接捕集率の比較

接捕集率の比較を示す。

a 水を加熱した場合 鍋の内容物を水とした場合、レンジフード排気量 150[m³/h] では、定常時の平均排気濃度は 294.1[ppm] (完全捕集濃度 324.1[ppm]) となる。エチレン発生停止後の減衰曲線から求めた室内平均濃度は 19.4[ppm] であり、直接捕集率は 84.72[%] となる (図 5 (1))。レンジフード排気量 300[m³/h] では、定常時平均排気濃度は 168.2[ppm] (完全捕集濃度 166.8[ppm])、求めた室内平均濃度は 11.51[ppm] であり、算出した直接捕集率は 92.3[%] となる (図 5 (2))。

b 油を加熱した場合 鍋の内容物を油とした場合、油の温度は変動するが、概ね 100[°C] となる。レンジフード排気量 150[m³/h] では、定常時平均排気濃度は 334.4[ppm] (完全捕集濃度 346.1[ppm])、室内平均濃度は 11.4[ppm] となり、直接捕集率は 93.3[%] となる (図 5 (3))。レンジフード排気量 300[m³/h] では、定常時平均排気濃度は 173.4[ppm] (完全捕集濃度 173.8[ppm])、室内平均濃度 7.2[ppm] となり、直接捕集率は 95.62[%] となる (図 5 (4))。油の場合、同じ排気風量の沸騰した水の場合と比較して直接捕集率が高くなる傾向がある。この差は沸騰によって生じる気流の乱れが鍋上の熱上昇気流と考えられる。また、換気量 150[m³/h] の場合、直

接捕集率の差は 8.57 ポイント、換気量 300[m³/h] では 3.28 ポイントとなり、換気量が多いほど沸騰による直接捕集率への影響が小さい。

2.3 実大実験と CFD 解析 (RANS 解析) により直接捕集率の比較

(1)CFD 解析概要 (従来モデル) 図 7 に CFD 解析の様子、表 2 に CFD 解析条件を示す。厨房の寸法や内部の配置を、実大実験のチャンバーと同様に設定する。流出境界をレンジフードの排気ダクトに位置し、流量規定とする。流入境界 (給気) を開放した扉とする。安定に解析するためレンジフードの排気量で流量規定に設定し、給気の面風速は 0.06[m/s] である (排気量 150[m³/h] の case)。加熱してる鍋を従来通り、沸騰を考慮せず、温度と放熱のみを模擬する。鍋内の内容物は 100[°C] に温度を固定し、その表面と空気の間には 100[W/m²・K] の対流熱伝達率を設定する。厨房内外温度は 20[°C] 等温で解析を行う。

CFD 及び実大実験によるレンジフード直接捕集率の計算結果を図 8 に示す。CFD による直接捕集率の算出は実験と同様にストップ法で算出する。CFD 解析と実験結果を比較すると、沸騰状態の水では、レンジフードの排気量 150[m³/h] の場合で直接捕集率の差が 11.39 ポイント、300[m³/h] の場合では、CFD に

より直接捕集率は 100.92[%] で、直接捕集率の差が油の実験との差が 7.85 ポイントとなる。100[°C] の油では直接捕集率の差がそれぞれ 2.81、4.57 ポイントとなるが、沸騰状態の水に比較して差が少ない。

2.3 PIVによる水面・油面付近の気流性状の比較 (PIV 測定①)

(1)PIV 撮影概要・配置 沸騰により水面で生じる拳動が周辺気流に与える影響を把握する為、PIV を用いて鍋付近の気流速度の測定を行う。図 9 に PIV 測定の概要、表 3 に撮影 case、表 4 に PIV 解析条

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. 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	IHレンジ-調理台: 断熱	
	その他の固体間: 熱伝導	
	鍋と水の表面: 熱伝達率100[W/(m ² ・K)]	
輻射境界	輻射率=0.9	
流入出境界	流出	レンジフード: 流量規定=150[m ³ /h]、300[m ³ /h]
	流入	扉: 流量規定
温度条件	水	100[°C]に固定する
	その他	外気温: 20[°C]、初期温度: 20[°C]

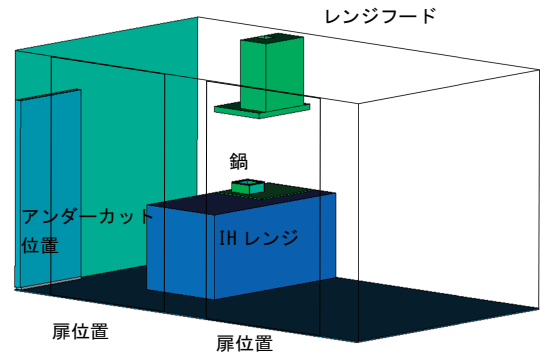


図 7 CFD 解析の様子

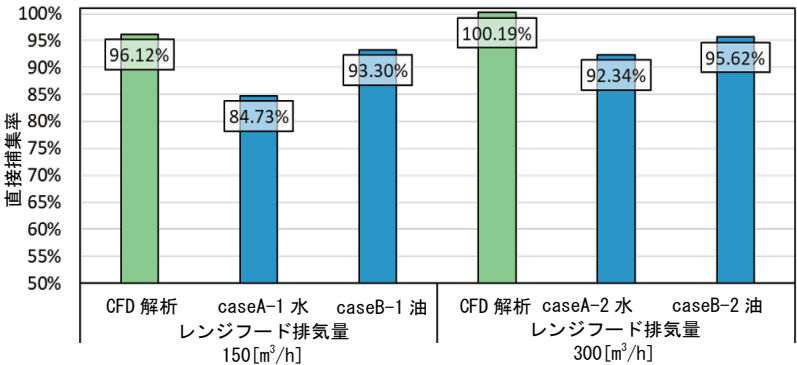


図 8 CFD 及び実大実験によるレンジフード直接捕集率の計算結果

件 (PIV 測定①) を示す。実験は幅 5,000 × 高さ 2,200 × 奥行 3,000 [mm] のチャンバー内で行う。中央に鍋及び卓上 IH レンジを設置し実験時は出力を 1,400 [W] に

制御する。鍋周辺の熱上昇気流を可視化用レーザライトシートとスモークジェネレータを使用し高速度カメラにより撮影する。実大実験と同様に水または油を加熱し、

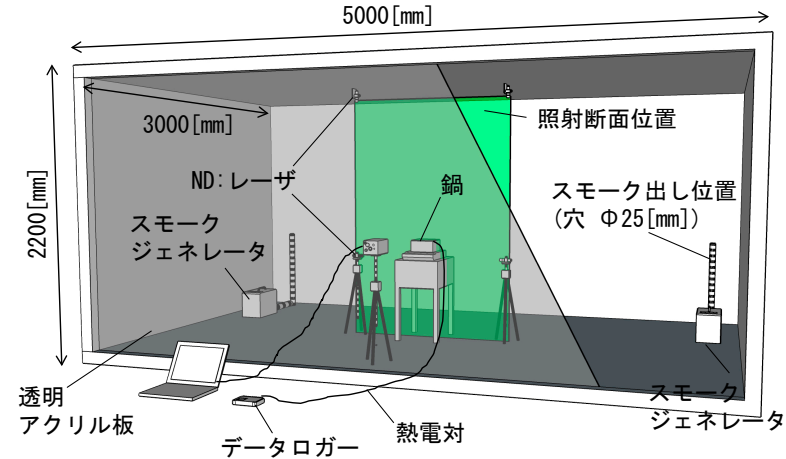


図 9 PIV 測定の概要

表 3 撮影 case (PIV 測定①)

撮影case	鍋内の液体
caseA	沸騰した水 (100[°C])
caseB	油 (100[°C])

表 4 PIV 解析条件 (PIV 測定①)

画像サイズ [pixel]	1024 × 1024
フレームレート [fps]	250
解析ソフト	Flow Expert Ver. 2020
解析方法	直接相関法
レーション値 [mm/pixel]	0.34
算出点距離 [mm]	6
探索領域 [pixel]	32 × 32
検査領域 [pixel]	15

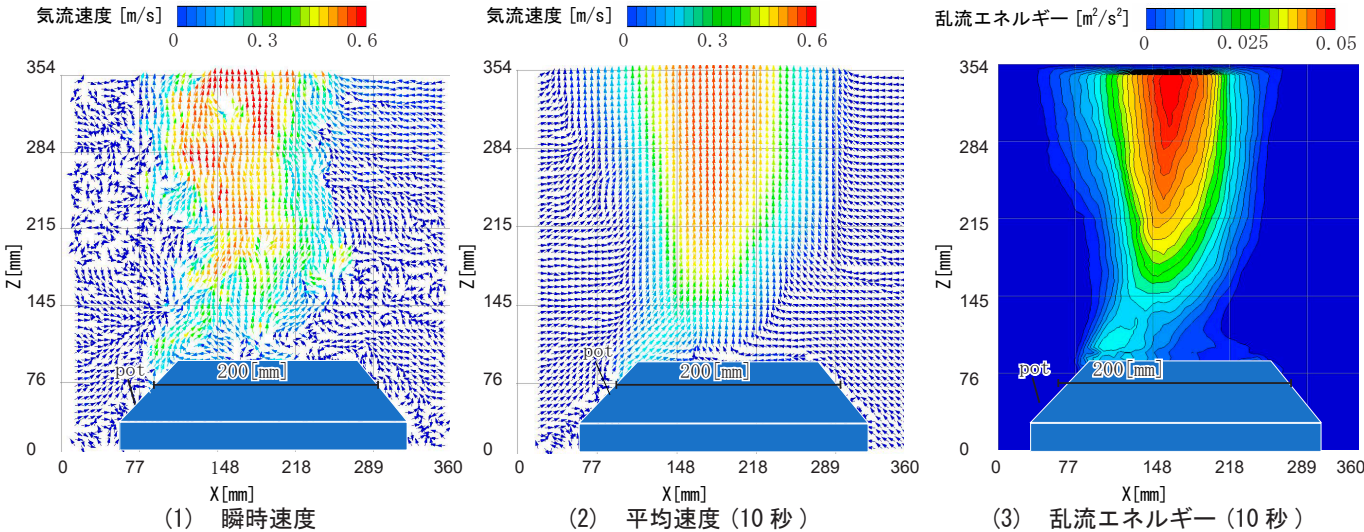


図 10 caseA (水) における PIV 解析による瞬時及び平均速度と乱流エネルギーの分布

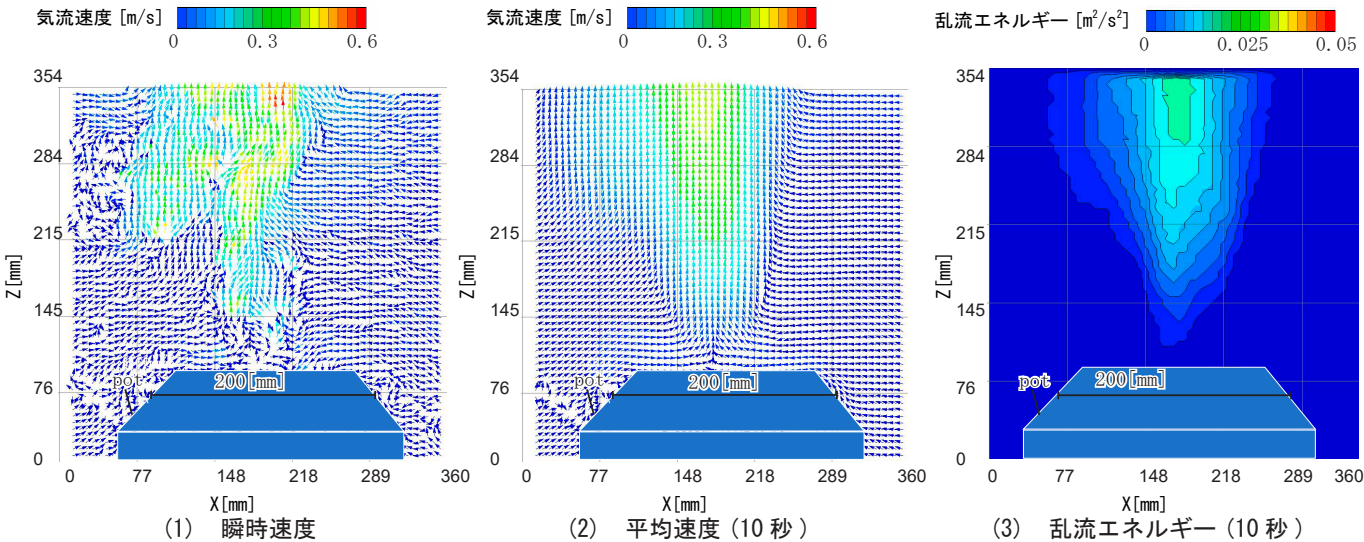


図 11 caseB (油) における PIV 解析による瞬時及び平均速度と乱流エネルギーの分布

水の場合を caseA、油の場合を caseB とする。撮影は鍋の中心鉛直断面において 10 秒間を行う。フレームレートは 250[fps] とし、撮影画像のキャリブレーション値は 0.197[mm/pixel] である。鍋内の液体温度は T 型熱電対により測定し、鍋内の液体温度が概ね 100[℃]であることを確認し可視化画像の撮影を行う。

表 5 PIV 解析条件 (PIV 測定②)

画像サイズ[pixel]	1024×1024
フレームレート[fps]	500
解析ソフト	Flow Expert Ver. 2020
解析方法	直接相関法
レーション値[mm/pixel]	0.12
算出点距離[mm]	2.06
探查領域[pixel]	32×32
検査領域[pixel]	12

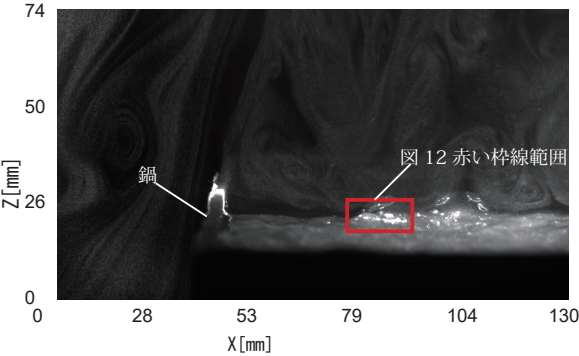


図 12 気泡が崩れる瞬間の可視化画像

(2)PIV 解析結果 図 10、11 に caseA または caseB における PIV 解析による瞬時及び平均速度と乱流エネルギーの分布^{注2)}を示す。PIV 測定結果から乱流エネルギーの算出には (2) 式を用い、測定対象断面の法線方向 (y 方向) 速度成分は面内水平方向速度成分と同様と仮定する。

$$k = \frac{(\overline{v_x} - v_x')^2 + (\overline{v_y} - v_y')^2 + (\overline{v_z} - v_z')^2}{2} \quad \dots(2)$$

鍋上部から熱上昇気流が生じ、鍋の縁から鉛直方向に約 50[mm] の位置で乱れが発生する。また熱上昇気流が生じることで周囲空気が鍋の横から鍋内に流れ込み、鍋内に小さい渦が形成される。熱上昇気流の平均速度を比較すると、油（沸騰状態なし）の場合は最大で 0.39[m/s]、水（沸騰状態あり）の場合は最大で 0.62[m/s] となり、水の方が約 1.6 倍の気流速度が速い。

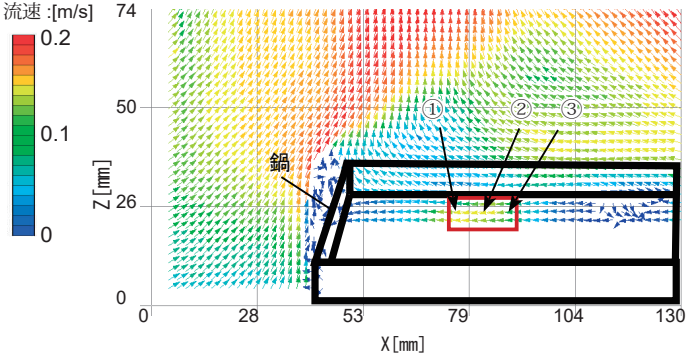


図 13 PIV 解析による平均流速（10 秒間）のベクトル分布

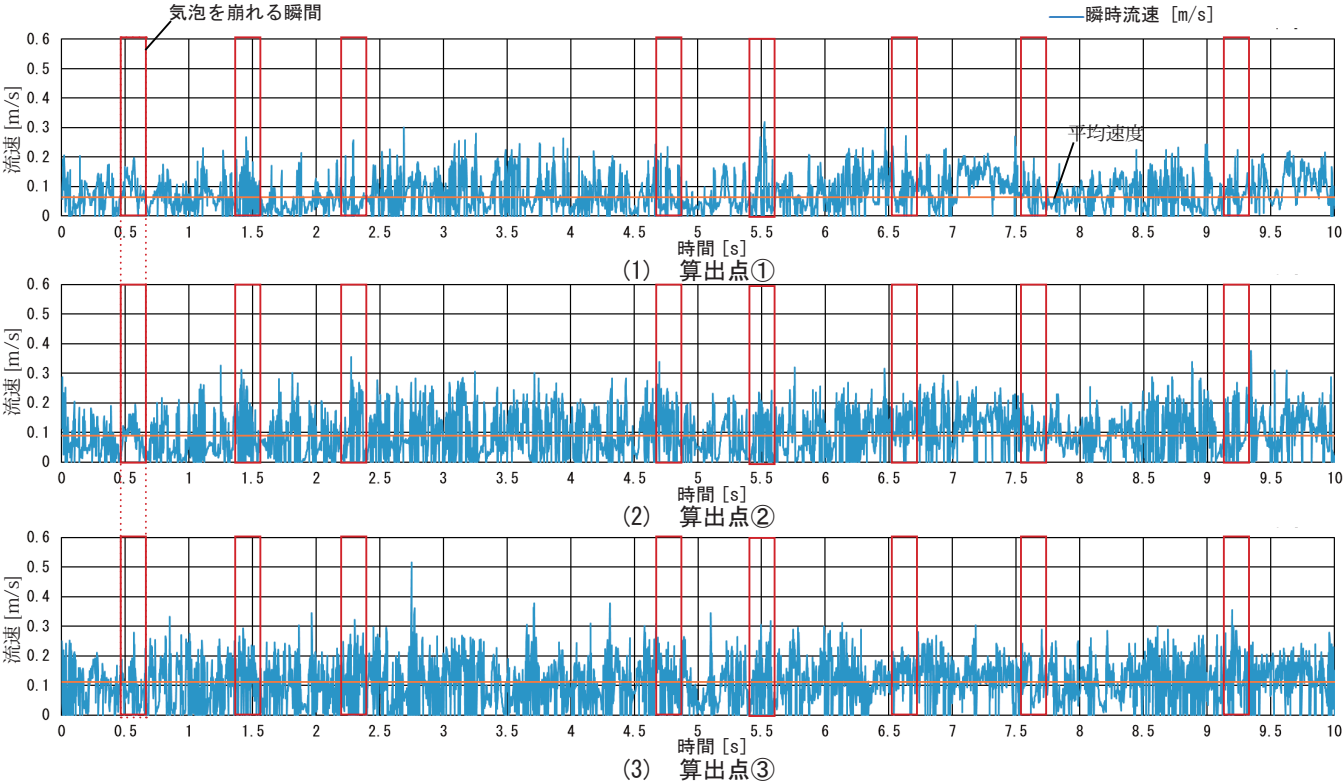


図 14 抽出した算出点における瞬時スカラー流速の時間変化

更に、水を沸騰させた場合、測定範囲における乱流エネルギーの最大値は鍋の縁から 240[mm] の位置で約 $0.05[\text{m}^2/\text{s}^2]$ となる。油の場合では、鍋の縁から 240[mm] の位置における乱流エネルギーの最大値は約

$0.022[\text{m}^2/\text{s}^2]$ となる。

沸騰状態の有無により、同じ温度の物体表面から生じる熱上昇気流の流速や乱れの性状が異なることが明らかとなった。蒸発による水面の乱れや水の蒸発に伴う体積の膨張、潜熱等の発生を、沸騰による熱上昇気流の乱流エネルギーを増加させ、上昇気流の幅を拡散された。その影響でレンジフードの直接捕集率を低下すると推察される。CFD 解析による直接捕集率の予測精度を向上させるためには、沸騰が鍋上の上昇気流に与える影響を考慮する必要があると考えられる。

3 沸騰を考慮した解析モデル

3.1 水面近傍の気流性状を対象とした PIV 測定 (PIV 測定②) 水の沸騰によって生じる水面近傍の気流性状を把握するため、水を沸騰させた鍋の水面付近を対象とした PIV 測定を行う。撮影条件と配置は 2.3 章 (図 9) と同様とする。表 5 に PIV 解析条件 (PIV 測定②) を示す。撮影した動画のキャリブレーション値は $0.125[\text{mm}/$

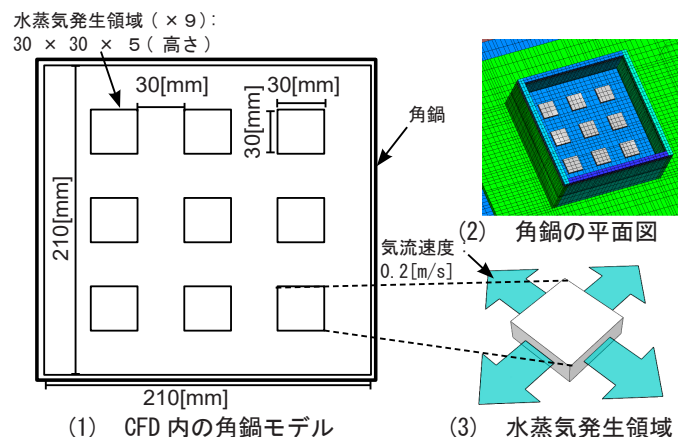


図 15 沸騰モデルの詳細

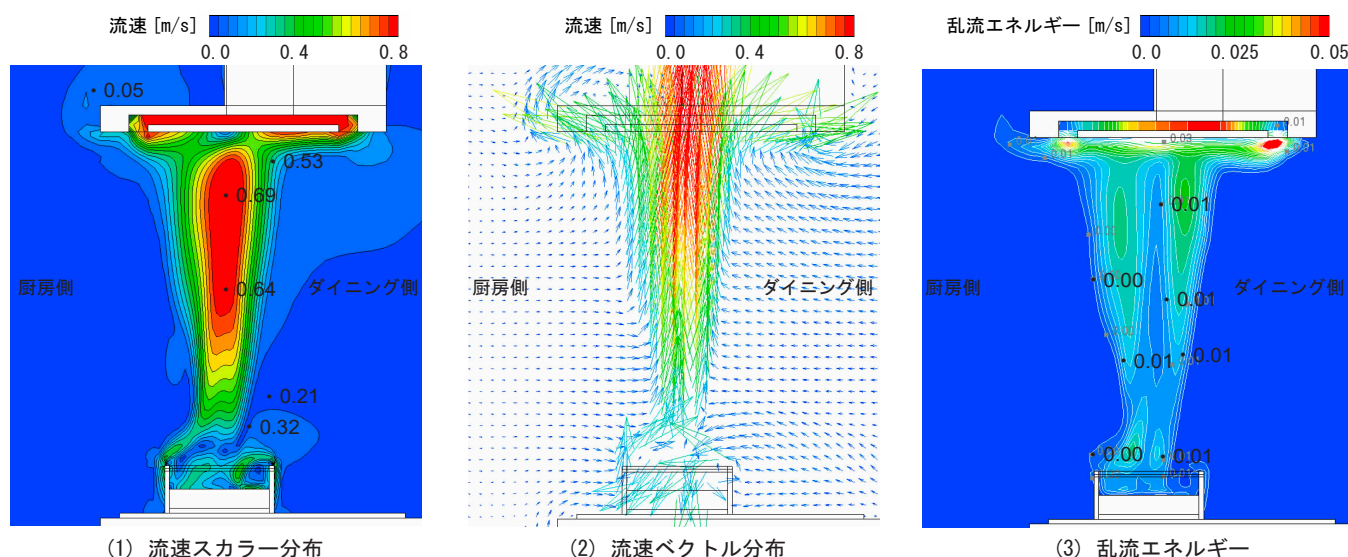


図 16 従来モデルの鍋上の気流速度及び乱流エネルギー分布 (鍋中心鉛直断面)

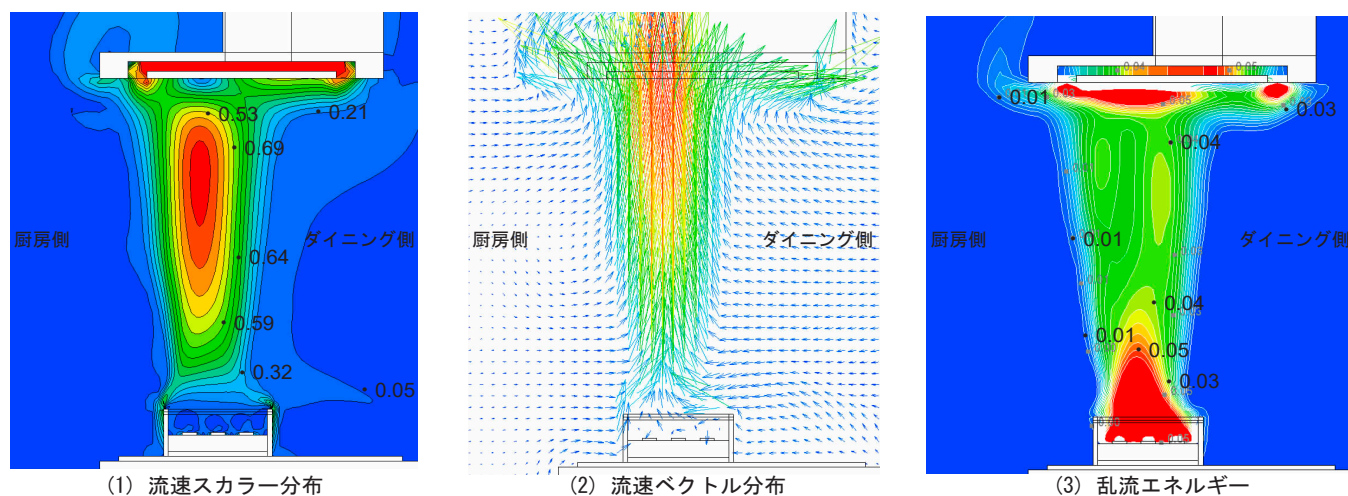


図 17 沸騰を考慮したモデルの鍋上の気流速度及び乱流エネルギー分布 (鍋中心鉛直断面)

pixel]、フレームレートを 500 [fps] とする。10 秒間の動画を解析し、各時刻の速度と時間平均速度を算出した。

図 12 に気泡が崩れる瞬間の可視化画像を、図 13 に PIV 解析による平均流速(10 秒間)ベクトル分布を示す。図 12 の鍋内で気泡が定常的に発生する位置(枠線部分)に注目すると、気泡の崩壊による周辺気流への影響が見られる。PIV 解析結果では枠線部分の平均気流速度が付近と比較して速い傾向がある。気泡を生じる水面直上の流速の算出点から 3ヶ所(①~③)抽出し、図 14 に抽出した算出点における瞬時スカラー流速の時間変化を示す。3 点で同時に速度変動を激しい時刻は気泡が崩壊し

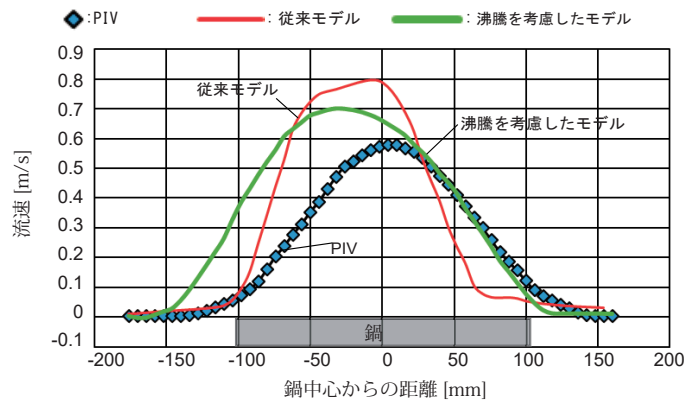


図 18 鍋の縁から高さ 300 [mm] における熱上昇気流の鉛直方向風速成分の比較

水蒸気を放出する瞬間であり、その際の瞬時流速は約 0.2 [m/s] である。

3.2 沸騰状態が熱上昇流に与える影響のモデル化

水が沸騰する時、水面で気泡が連続的に崩壊することで熱上昇気流に与える影響をモデル化する為、CFD 解析モデルの水面に水蒸気発生領域を作成する。図 15 に沸騰モデルの詳細を示す。沸騰する鍋の観察により、水蒸気の気泡は主に鍋底の加熱部から発生し、水面に噴出して崩壊する。そこで本報では水面に計 9 箇所の水蒸気発生領域を均等配置し、水蒸気発生領域の側面から法線方向へ気流を吹き出すことで、沸騰による熱上昇気流への影響を模擬する。吹出気流は、PIV 測定結果より気泡の崩壊時に瞬時的に生じる風速として 0.2 [m/s] 注3) に設定する。更に、吹出気流には乱流エネルギーを設定する。設定値は乱流エネルギーは 10 [m²/s²]、乱流消失率は 1.0 × 10⁻¹⁰ [m²/s³] とする。気泡の崩壊によって生じる乱流エネルギーを直接求めることは困難であったため、鍋上 240 [mm] の乱流エネルギーが図 10 と同様の概ね 0.05 [m²/s²] となるよう調整し設定した。

3.3 従来モデルとの比較

3.2 章で検討した従来 CFD 解析モデルに水蒸気発生領域を設置し、沸騰を考慮した解析モデルを作成する。解析条件は 2.3 章(表 2)と同様とし、メッシュを再分割

表 6 実大実験と比較する CFD 解析 case

給気位置	鍋の内容物		レンジフード換気量	case
開放した扉 (給気擾乱なし)	実大実験	沸騰した水	100 [m ³ /h]	case1
			150 [m ³ /h]	case2
			200 [m ³ /h]	case3
			300 [m ³ /h]	case4
	CFD解析	100 [°C] の固定した水 (従来モデル)	100 [m ³ /h]	case5
			150 [m ³ /h]	case6
			200 [m ³ /h]	case7
			300 [m ³ /h]	case8
		水蒸気発生領域を設けた モデル	100 [m ³ /h]	case9
			150 [m ³ /h]	case10
			200 [m ³ /h]	case11
			300 [m ³ /h]	case12
アンダーカット (給気擾乱あり)	実大実験	沸騰した水	150 [m ³ /h]	case13
			200 [m ³ /h]	case14
			250 [m ³ /h]	case15
			300 [m ³ /h]	case16
	CFD解析	100 [°C] の固定した水 (従来モデル)	150 [m ³ /h]	case17
			200 [m ³ /h]	case18
			250 [m ³ /h]	case19
			300 [m ³ /h]	case20
		水蒸気発生領域を設けた モデル	150 [m ³ /h]	case21
			200 [m ³ /h]	case22
			250 [m ³ /h]	case23
			300 [m ³ /h]	case24

して解析を行う。レンジフード排気量 150[m³/h] の条件で、沸騰を考慮した CFD モデルと従来モデルを解析し、PIV で実測した鍋直の上昇気流 (PIV 測定①) と比較する。図 16、図 17 に従来モデル、沸騰を考慮したモデルの鍋上の気流速度及び乱流エネルギー分布 (鍋中心鉛直断面) を示す。風速コンタ及びベクトル分布では鍋直上の最大風速はどちらのモデルでも約 0.79[m/s] 以上であるが、従来モデルと比較して沸騰を考慮したモデルのほうは熱上昇気流の幅が広がる傾向がある。

従来モデルと比較して沸騰を考慮したモデルのほうは熱上昇気流の幅が広がる傾向がある。また熱上昇気流の乱流エネルギーは、従来モデルでは全体的に 0.01 ～ 0.02[m²/s²] となるが (図 16(3))、沸騰を考慮したモデルでは鍋直上 200[mm] 付近で 0.05[m²/s²]、全体としては 0.025 ～ 0.04 程度となる (図 17(3))。

図 18 に鍋の縁から高さ 300[mm] における熱上昇気流の鉛直方向風速成分の比較を示す。PIV 測定結果は図 10(2) 用いている。熱上昇気流の風速の最大値は沸騰を考慮したモデルを 0.7[m/s] とし、従来モデルの 0.8[m/s] と比較して、PIV の結果と近い。一方、上昇気流の拡散を評価するため、風速 0.1[m/s] 以上となる範囲を上昇気流の拡散幅とする。PIV では拡散幅が約 200[mm]、従来モデルでは 168[mm]、沸騰を考慮したモデルでは 220[mm] となる。水蒸気発生領域を設けた CFD モデルでは、従来モデルと比較して熱上昇気流の拡散幅が広くなり、実験との差は少なくなっている。また風速のプロファイルと比較すると沸騰を考慮したモデルでは概ね実験における熱上昇気流の風速プロファイルを再現できていると考えられる。

4 沸騰を考慮した数値解析による直接捕集率

表 6 に実大実験と比較する CFD 解析 case を、表 7 に解析条件を示す。レンジフード排気量は、開放した扉給気の場合では 100、150、200、300[m³/h] とし、アンダーカット給気の場合 150、200、250、300[m³/h] とし、ストップ法により実大実験と CFD 解析でレンジフード直接捕集率を求め、比較を行う。case1 ～ 12 は開放した扉から給気、case13 ～ 24 はアンダーカットから給気する。アンダーカットから流入した気流を十分に解析する為、メッシュは細かく分割した。実大実験では IH レンジで鍋内の水を沸騰させ、実大実験を 3 回行い、中間値を採用する。CFD 解析の場合、従来モデルの鍋内に静止する 100[℃] の水を設置する。沸騰を考慮したモデルでは沸騰モデルを用い、直接捕集率を計算する。

4.1 扉開放する (給気擾乱なし) 場合

図 19 に扉開放する (給気擾乱なし) 場合各 case にお

けるレンジフードの直接捕集率を示す。擾乱がない場合、レンジフードの換気量を増やすことで直接捕集率を上げるか、排気量 200[m³/h] 以上となると変化が緩やかになった。CFD 解析の場合、沸騰の影響を考慮する有無に関わらず、直接捕集率の推移は実大実験と同じ傾向となる。しかし、従来モデルと実測の差が大きく、7.70 ～ 14.01 ポイントとなる。沸騰を考慮した CFD 解析結果は実大実験との差が 0.45 ～ 7.20 ポイントとなり、従来の CFD 解析モデルに対して、水蒸気発生領域を設けることにより、レンジフードの直接捕集率の再現性を向上させることが可能であると考えられる。

4.2 アンダーカット給気する (給気擾乱あり) 場合

図 20 に CFD 解析により流速分布を示す。アンダーカットを給気する時、負圧で流入した気流を高速で壁に衝突して料理台に向かって跳ね返し、室内に擾乱が発生する (図 20(1))。鍋直上の横断面を見ると、跳ね返した気流をレンジフードに吸引させ、鍋のダイニング側から横風を形成し、上昇気流に擾乱する (図 20(2))。

図 21 にアンダーカット給気する (給気擾乱あり) 場合各 case のレンジフードの直接捕集率を示す。レンジフード排気量が多い程、給気擾乱が強くなり、直接捕集率を低下する。同じ排気量の場合、擾乱を発生することで、アンダーカット給気の場合、開放した扉の case に対して、レンジフードの直接捕集率が低い。

実験と CFD 解析の直接捕集率の差は、従来モデルで

表 7 解析条件

解析要素数	case1 (従来モデル)	case①	203 (X) × 152 (Y) × 143 (Z) = 5, 128, 880
		case②	203 (X) × 189 (Y) × 143 (Z) = 5, 486, 481
	case2 (沸騰を考慮したモデル)	case①	203 (X) × 152 (Y) × 143 (Z) = 5, 128, 880
		case②	203 (X) × 189 (Y) × 143 (Z) = 5, 486, 481
流入境界	流出	レンジフード：流量規定	
	流入	case①	扉：流量規定
		case②	アンダーカット：流量規定

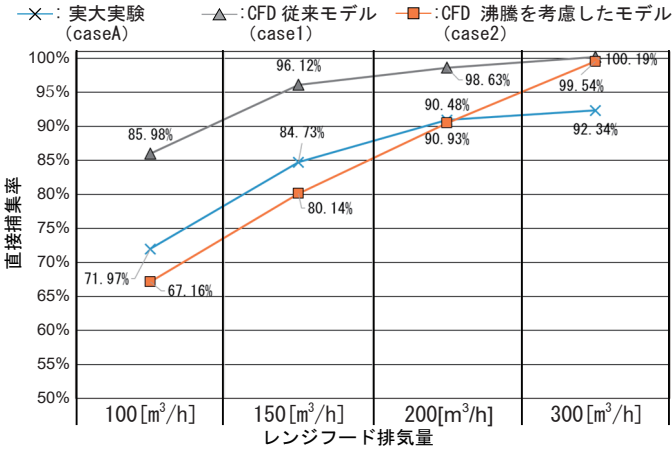
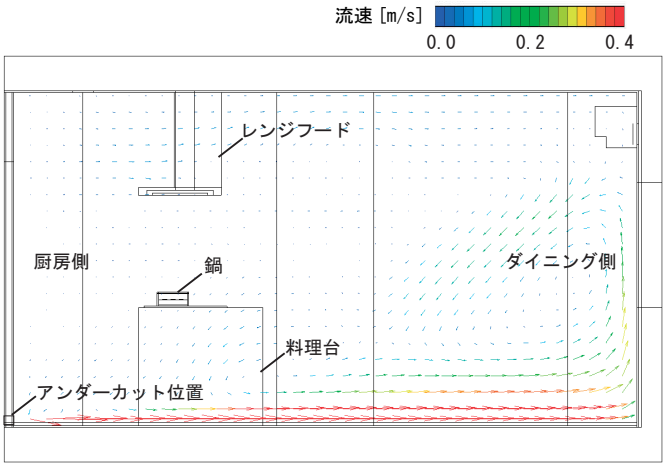
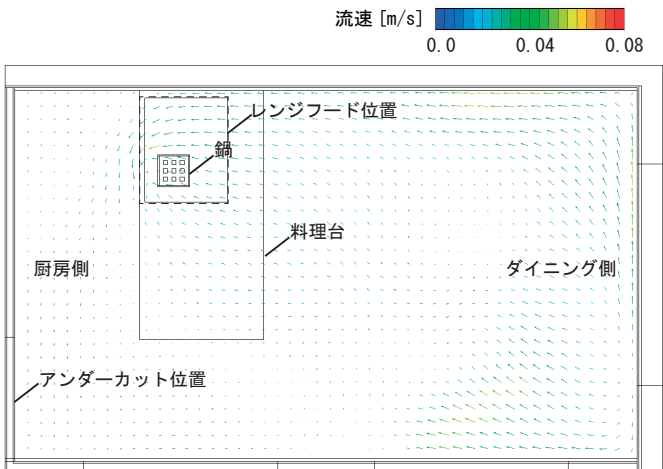


図 19 扉開放する (給気擾乱なし) 場合各 case におけるレンジフードの直接捕集率

11.16 ～ 32.75 ポイント、沸騰を考慮したモデルで 1.92 ～ 23.74 ポイントとなり、従来 CFD 解析モデルに対して、沸騰を考慮したモデルを予測したレンジフードの直接捕集率は実大実験と近い。水蒸気発生領域を設けた沸騰を考慮したモデルを給気擾乱がある場合、直接捕集率の予測精度が向上すると考えられる。



(1) アンダーカット中央断面



(2) 鍋直上（高さ 1000[mm]）水平断面
図 20 CFD 解析による気流速度分布

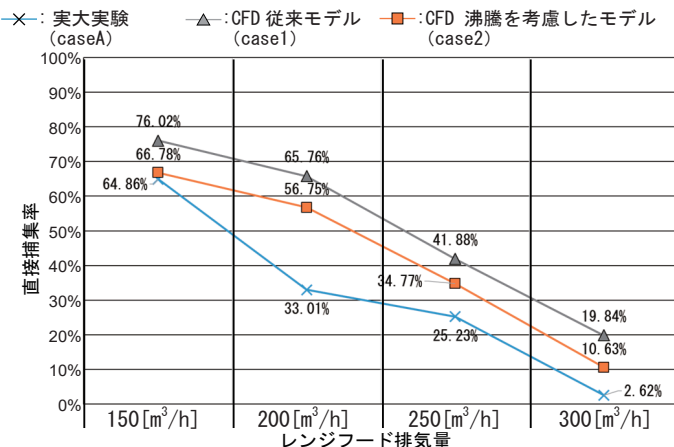


図 21 アンダーカット給気する（給気擾乱あり）場合各 case におけるレンジフードの直接捕集率

5 まとめ

- ① 100[℃] の水（沸騰あり）と油（沸騰なし）を加熱した実大実験と PIV 撮影を行ったことで、水の沸騰により擾乱がレンジフードの直接捕集率を低下させることを明らかとした。CFD 解析の場合、沸騰の影響を考慮するのは必要である。RANS を用いた従来の CFD 解析による直接捕集率を予測では、水が沸騰することによって生じる熱上昇気流への影響を無視していることがレンジフードの直接捕集率を過大に評価する要因の一つとなると考えられる。
- ② 水が沸騰状態となっている鍋近接の気流を対象とした PIV 撮影を行った。実測したデータを CFD 解析モデルの根拠として用い、沸騰を考慮したモデルを作成した。水面に水蒸気発生領域を設定し、気流を発生させることで、沸騰による鍋上の熱上昇気流への影響を模擬する方法を提案した。
- ③ 給気擾乱がない場合、CFD 解析と実大実験によるレンジフードの直接捕集率と排気量の変化傾向を同様となり、レンジフードの排気量が多くなると、レンジフードの直接捕集率を向上することになった。実験と CFD 解析による直接捕集率の差は、従来の CFD 解析モデルで 7.70 ～ 14.01 ポイントと、沸騰を考慮した CFD 解析モデルで 0.45 ～ 7.20 ポイントとなり、CFD 解析によるレンジフードの直接捕集率の再現性が向上したと考えられる。
- ④ 給気擾乱がある場合、実大実験では、レンジフードの排気量を高くすると、アンダーカットから吸込む風速が速くなり、厨房内より強い擾乱を発生することで、レンジフードの直接捕集率を低くなる。従来モデルと沸騰を考慮したモデルによる解析にその傾向が予測できる。しかし実験と CFD 解析による直接捕集率の差は、従来の CFD 解析モデルで 11.16 ～ 32.75 ポイント、沸騰を考慮した CFD 解析モデルで 1.92 ～ 23.74 ポイントとなり、擾乱がある場合、沸騰モデルの設定は CFD 解析の直接捕集率の予測精度を向上させる。
- ⑤ 同じレンジフード排気量にした場合、給気擾乱がなしと比べて給気擾乱があるレンジフード直接捕集率が低い。それは給気擾乱を発生する的原因と考えられ、排気量が大きいかほど擾乱が強い。
- ⑥ 本報では、給気による擾乱があるとなしの条件で検討を行った、今後は密閉厨房空間を対象に、エアコンの吹出気流、人体の動作によって生じる気流擾乱がある場合の CFD 解析方法を検討し、レンジフードの直接捕集率を予測する。

記号

μ [-]:	Direct capture efficiency
C_e [ppm]:	Steady-state concentration
C_b [ppm]:	Background concentration
Q [m ³ /h]:	Ventilation flow rate
M [m ³ /h]:	Pollutant emissions
k [m ² /s ²):	Turbulent kinetic energy
u_x [m/s]:	x component of average airflow velocity
u_{ix} [m/s]:	x component of instantaneous airflow velocity
v_y [m/s]:	y component of average airflow velocity
v_{iy} [m/s]:	y component of instantaneous airflow velocity
w_z [m/s]:	z component of average airflow velocity
w_{iz} [m/s]:	z component of instantaneous airflow velocity

注釈

- 注 1) 体積増加の影響は発生する水蒸気の体積がレンジフードの排気量に対して約 2 ～ 4[%] である。
- 注 2) 本報における PIV 測定の精度は、Wieneke らが提案した PIV 測定の不確か算出方法¹⁴⁾によると、測定の不確か約 30[%] である。
- 注 3) 1H レンジの熱出力が 1400[W]、熱効率を 90[%]、水の蒸発潜熱量を 2257[kJ/kg] とすると、単位時間に生じる水蒸気の体積は 949.0[cc/s] となる。水蒸気発生領域から発生させる合計風量は 0.2[m/s] × 30[mm] × 5[mm] × 4 面 × 9 カ所 = 1,080[cc/s] となり概ね一致する。

参考文献

1) Christine Frederick, The New Housekeeping: Efficiency Studies in Home Management, Garden City, New York: Doubleday Page and Company, 1913.

2) 倉渕隆、鳥海吉弘、遠藤智行、坂本淳、奥田篤：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，第 76 巻、第 663 号、pp.493-500、2011 (DOI: <https://doi.org/10.3130/aije.76.493>)

3) 田所祐人 近藤靖史 荻田俊輔 藤村淳一 局所排気システムにおける直接捕集率 (DCE) の定義とその算出法 (環境工学，計画系) Vol.70 pp：237-240、2000-02 関東支部 支部研究報告集

4) 近藤靖史、阿部有希子、宮藤章、相澤芳弘、赤城克斎：鍋上部の熱上昇流の CFD モデリングと暖房実験 住宅厨房と隣接するリビング空間の温熱・空気環境に関する研究 (第 2 報)、日本建築学会環境系論文集、第 73 巻、第 634 号、pp.1383-1390、2008 (DOI: <https://doi.org/10.3130/aije.73.1383>)

5) 島貫友貴、倉渕隆、清輔隼仁、鳥海吉弘、李時恒、浅輪泰久：数値流体力学解析による業務用調理機器から発生する熱上昇気流の再現 (第 1 報) 等温噴流における RANS 乱流モデルの検証、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp. 25-28、2019

6) 島貫友貴、倉渕隆、設楽直暉、鳥海吉弘、李時恒、浅輪泰久：数値流体力学解析による業務用調理機器から発生する熱上昇気流の再現 (第 2 報) 等温噴流における RANS 乱流モデルの検証、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp. 21-24、2020

7) 清輔隼仁、島貫友貴、倉渕隆、鳥海吉弘、李時恒、浅輪泰久、設楽直暉：GGDH による熱上昇気流 CFD の再現性検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、環境工学-II，pp. 1479-1480、2020

8) 百瀬敏成、山中俊夫、甲谷寿史、山本晃裕：業務用レンジから発生

する上昇気流の性状把握及びモデル化、日本建築学会環境系論文集，第 68 巻，第 567 号，pp.49-56、2003 (DOI: https://doi.org/10.3130/aije.68.49_1)

9) 村上周三、加藤 信介、赤林 伸一：レーザーライトシート (LLS) を用いた乱流の微細構造の可視化システムに関する開発研究 風洞内における建物周辺気流の可視化を中心として、流れの可視化、1985 年 5 巻 18 号 p. 213-218 (DOI:<https://doi.org/10.3154/jvs1981.5.213>)

10) 赤林伸一、大嶋拓也、有波裕貴、大久保肇、楊曉韻、坂口淳：室内気流モデルを対象としたシーディング手法の検討及び測定結果 室内気流を対象とした PIV 計測に関する研究 その 1、日本建築学会環境系論文集 第 78 巻 第 690 号、631-638、2013 年 8 月

11) 井上 翔太 赤林 伸一 有波 裕貴 王 函：住宅を対象とした高効率換気方式に関する研究 その 9 厨房において人体擾乱を発生させた場合の PIV 測定、日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道) 2022 年 9 月、環境工学、pp. 1535-1536、2022

12) 永田貴一、赤林伸一、有波裕貴、志賀彰、斎木あゆみ、小前草太：住宅用厨房を対象とした高効率換気・空調方式に関する研究 その 5 レンジフードの排気捕集率に関する実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、環境工学-II，pp. 871-872、2017

13) 王函、赤林伸一、有波裕貴：住宅を対象とした高効率換気方式に関する研究 その 10 住宅厨房における沸騰の有無がレンジフードの直接捕集率に与える影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、環境工学、pp. 1537-1538、2022

14) Wieneke, B., 2015. PIV unceratinty quantification from correlation statistics. Meas. Sci. Technol. 26 074002, 2015

記号

μ [-]	Direct capture efficiency
C_e [ppm]	Steady-state concentration
C_b [ppm]	Background concentration
Q [m ³ /h]	Ventilation flow rate
M [m ³ /h]	Pollutant emissions
k [m ² /s ²]	Turbulent kinetic energy
$[m/s]$:x	component of average airflow velocity
$[m/s]$:x	component of instantaneous airflow velocity
$[m/s]$:y	component of average airflow velocity
$[m/s]$:y	component of instantaneous airflow velocity
$[m/s]$:z	component of average airflow velocity
$[m/s]$:z	component of instantaneous airflow velocity

注釈

注１）体積増加の影響は発生する水蒸気の体積がレンジフードの排気量に対して約２～４[%]である。

注２）本報におけるPIV測定の精度は、Wienekeらが提案したPIV測定の不確か算出方法¹⁴⁾によると、測定の不確か約30[%]である。

注３）IHレンジの熱出力が1400[W]、熱効率を90[%]、水の蒸発潜熱量を2257[kJ/kg]とすると、単位時間に生じる水蒸気の体積は949.0[cc/s]となる。水蒸気発生領域から発生させる合計風量は0.2[m/s]×30[mm]×5[mm]×4面×9カ所＝1,080[cc/s]となり概ね一致する。

参考文献

1) Christine Frederick, The New Housekeeping: Efficiency Studies in Home Management, Garden City, New York: Doubleday Page and Company, 1913.

2)Kurabuchi T., Toriumi Y., Endo T., Sakamoto J., Okuda A.:Evaluation Technique of Various Disturbing Factors in Residential Kitchen Spaces Affecting Exhaust Hood Efficiency, Journal ofEnvironmental Engineering (Transactions of AIJ), Vol.76 No.663, pp.493-500、2011
倉渕隆、島海吉弘、遠藤智行、坂本淳、奥田篤：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，第76巻、第663号、pp.493-500、2011 (DOI: <https://doi.org/10.3130/aije.76.493>)

3) 田所祐人 近藤靖史 荻田俊輔 藤村淳一 局所排気システムにおける直接捕集率(DCE)の定義とその算出法(環境工学, 計画系)Vol.70 pp：237-240,2000-02 関東支部 支部研究報告集

4) Kondo S., Abe Y., Miyafuji A., Aizawa Y., Akagi K. :CFD Modeling of Thermal PlumeOver A Cooking Pot and Experiments Under Heating Condition, Indoor Temperature and airDistributions of House Kitchens and Adjacent Living Room (Part2), Journal ofEnvironmental Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 73, No. 634, pp.1383-1390, 2008(in Japanese)

近藤靖史、阿部有希子、宮藤章、相澤芳弘、赤城克斎：鍋上部の熱上昇流のCFDモデリングと暖房実験 住宅厨房と隣接するリビング空間の温熱・空気環境に関する研究（第2報）、日本建築学会環境系論文集、第73巻、第634号、pp.1383-1390、2008 (DOI: <https://doi.org/10.3130/aije.73.1383>)

5) Shimanuki Y., Kurabuchi T., Kiyosuke H., Toriumi Y., Lee S., Asawa Y. : Reproduction of Thermal Plume above Commercial Cooking Equipment Using Computational Fluid Dynamics Analysis (Part1)

Validation of RANS Turbulence Model for Isothermal Jet,Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, The Society of Heating, Air-conditioning Sanitary Engineers, pp.25-28, 2019 (in Japanese)

島貫友貴、倉渕隆、清輔隼仁、島海吉弘、李時恒、浅輪泰久：数値流体力学解析による業務用調理機器から発生する熱上昇気流の再現（第1報）等温噴流におけるRANS乱流モデルの検証、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp.25-28、2019

6) Shimanuki Y., Kurabuchi T., Shitara N., Toriumi Y., Lee S., Asawa Y. : Reproduction ofThermal Plume above Commercial Cooking Equipment Using Computational Fluid Dynamics Analysis (Part2) Validation of RANS Turbulence Model for Isothermal Jet,Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, The Society of Heating, Air-conditioning Sanitary Engineers, pp.21-24, 2020 (in Japanese)

島貫友貴、倉渕隆、設楽直暉、島海吉弘、李時恒、浅輪泰久：数値流体力学解析による業務用調理機器から発生する熱上昇気流の再現（第2報）等温噴流におけるRANS乱流モデルの検証、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp.21-24、2020

7) Kiyosuke H., Shimanuki Y., Kurabuchi T., Toriumi Y., Lee S., Asawa Y. , Shitara N.,Toki S. : Study on Reproduction of CFD of Buoyant Plume by GGDH, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, EnvironmentalEngineering-II, pp.1479-1480, 2020 (in Japanese)),
清輔隼仁、島貫友貴、倉渕隆、島海吉弘、李時恒、浅輪泰久、設楽直暉：GGDHによる熱上昇気流CFDの再現性検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、環境工学-II, pp.1479-1480, 2020

8) Momose T., Yamanaka T., Kotani H., Yamamoto A. : Measurement and Modeling ofPlume above Commercial Cooking Stoves, Journal of Environmental Engineering(Transactions of AIJ), Vol. 68, No.567, pp.49-56, 2003 (in Japanese)

百瀬敏成、山中俊夫、甲谷寿史、山本晃裕：業務用レンジから発生する上昇気流の性状把握及びモデル化、日本建築学会環境系論文集，第68巻，第567号，pp.49-56，2003 (DOI: https://doi.org/10.3130/aije.68.49_1)

9)Murakami S., Kato S., Akabayashi S., : VISUALIZATION WITH LASER LIGHT SHEET APPLIED TO EXTERNAL AIR FLOW AROUND BUILDINGS
村上周三、加藤 信介、赤林 伸一：レーザーライトシート(LLS)を用いた乱流の微細構造の可視化システムに関する開発研究 風洞内における建物周辺気流の可視化を中心として、流れの可視化、1985年5巻18号 p. 213-218(DOI:<https://doi.org/10.3154/jvs1981.5.213>)

10)Akabayashi S., Oshima T., Arinami Y., Okubo H., Yang X., Sakaguchi J. : AIR FLOW MEASUREMENTS IN A SCALE MODEL OF A ROOM AND METHOD SELECTION OF SEEDING WITH TRACER PARTICLES Study on PIV measurement and analysis for room air flow distribution Part 1(in Japanese) Journal ofEnvironmental Engineering (Transactions of AIJ), Vol.78 No.690, pp.631-638、2013Aug.

赤林伸一、大嶋拓也、有波裕貴、大久保肇、楊曉韻、坂口淳：室内気流模型を対象としたシーディング手法の検討及び測定結果 室内気流を対象としたPIV計測に関する研究 その1、日本建築学会環境系論文集 第78巻 第690号、631-638、2013年8月

11)Inoue S. , Akabayashi S., Arinami Y.,Wan H. :Research and Development of High Efficient Ventilation for Residential Kitchens Part 10: Study of Direct Capture Efficiency of Range Hood with or

without Boiling in the Residential Kitchen, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Environmental Engineering, pp.1535-1536, 2022 (in Japanese)

井上 翔太 赤林 伸一 有波 裕貴 王 函：住宅を対象とした高効率換気方式に関する研究 その9 厨房において人体擾乱を発生させた場合のPIV測定、日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道）2022年9月、環境工学、pp.1535-1536, 2022

12) Nagata K., Akabayashi S., Arinami Y., Shiga A., Saiki A., Komae S. : Research and Development of High Efficient Ventilation and Air-conditioning System for House Kitchen Part5 Experiment about Capture efficiency of Range Hood, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Environmental Engineering-II, pp.871-872, 2017 (in Japanese)

永田貴一、赤林伸一、有波裕貴、志賀彰、斎木あゆみ、小前草太：住宅用厨房を対象とした高効率換気・空調方式に関する研究 その5 レンジフードの排気捕集率に関する実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、環境工学-II, pp.871-872, 2017

13)Wan H., Akabayashi S., Arinami Y. :Research and Development of High Efficient Ventilation for Residential Kitchens Part 10: Study of Direct Capture Efficiency of Range Hood with or without Boiling in the Residential Kitchen, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Environmental Engineering, pp.1537-1538, 2022 (in Japanese)

王函、赤林伸一、有波裕貴：住宅を対象とした高効率換気方式に関する研究 その10 住宅厨房における沸騰の有無がレンジフードの直接捕集率に与える影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、環境工学、pp.1537-1538, 2022

14)Wieneke, B.,2015.PIV unceratinty quantification from correlation statistics. Meas. Sci. Technol. 26 074002, 2015