

住宅用電化厨房を対象とした 高効率換気に関する研究

沸騰の有無がレンジフードの
直接捕集率に与える影響に関する検討

指導教員 佐藤 涼佳
有波 裕貴 助教



研究目的

住宅用電化厨房における効率的な**汚染質**の捕集・排気は、厨房を含めた室内の**空気・熱環境的快適性を維持**し、冷暖房や換気による**エネルギー消費量を低減**するために重要である。

排出効率の高い換気方式の開発研究では、CFD※¹解析による調理時の気流性状の再現が行われている。

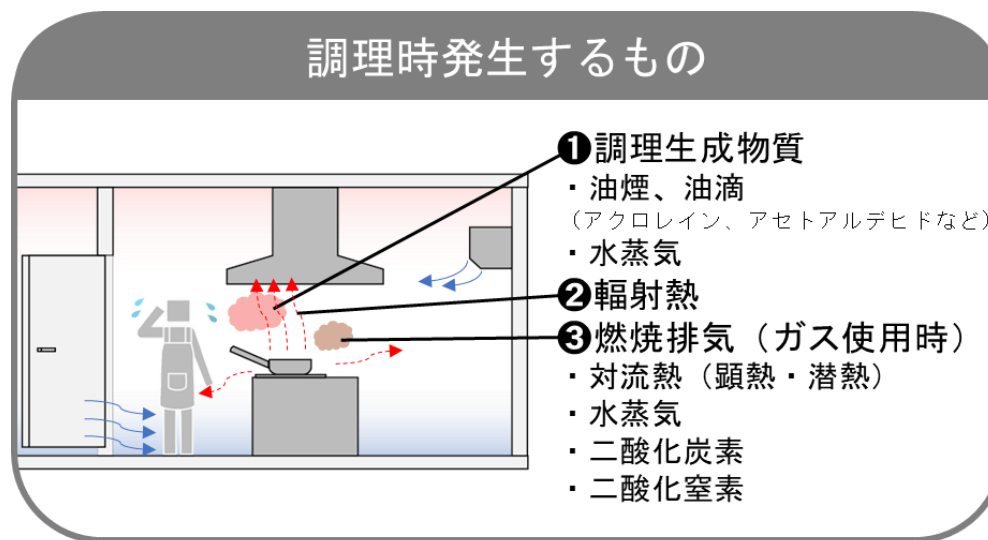


図 調理時に発生する汚染質

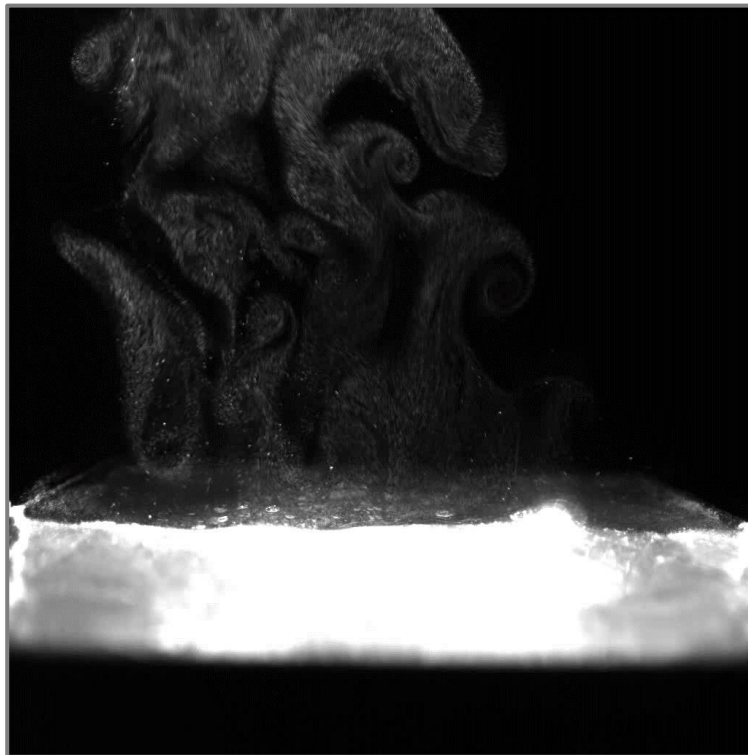
※¹ 数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics)

既往の研究^{文1)}では、住宅用電化厨房を対象に実大実験およびCFD解析において、レンジフードの直接捕集率^{※2}を算出した。求めた直接捕集率は、CFD解析の方が総じて高い値となる傾向がある。

※2 鍋から発生する汚染質のうち、居住空間へ流出せずに排気装置(レンジフード)から直接排出される汚染質の割合。

文1) 永田、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、2017年

その要因として、CFD解析において鍋内での沸騰によって生じる気流や水の蒸発による体積膨張などの変化を考慮していないことが考えられる。



動画 鍋内における沸騰の様子(ハイスピードカメラ)

研究目的

本研究は、沸騰の有無が直接捕集率へ与える影響を考慮したCFD解析について検討を行い、CFD解析による直接捕集率の予測精度の向上を目的とする。

研究概要

はじめに、実大実験において鍋の内容物を100[°C]の沸騰状態の水および沸騰しない天ぷら油とし、住宅用電化厨房を対象として直接捕集率の算出およびPIV^{※3}測定・解析を行い、沸騰の有無が直接捕集率へ与える影響を検討する。

※3 粒子画像流速測定法 (Particle Image Velocimetry) の略称。流れの中に微細なトレーサ粒子を混入させ、その動きを動画として撮影し、個々の微粒子あるいは微粒子群の移動距離と撮影間隔から速度ベクトルを算出する方法の総称。

はじめに、実大実験において鍋の内容物を100[°C]の沸騰状態の水および沸騰しない天ぷら油とし、住宅用電化厨房を対象として直接捕集率の算出およびPIV※³測定・解析を行い、沸騰の有無が直接捕集率へ与える影響を検討する。

次に、CFD解析において沸騰による熱上昇気流への影響を考慮した解析モデルを作成し、直接捕集率を予測する手法の検討を行う。

※3 粒子画像流速測定法 (Particle Image Velocimetry) の略称。流れの中に微細なトレーサ粒子を混入させ、その動きを動画として撮影し、個々の微粒子あるいは微粒子群の移動距離と撮影間隔から速度ベクトルを算出する方法の総称。

対象空間は4,500 [mm] (幅) × 2,700 [mm] (奥行) × 2,400 [mm] (高さ)の住宅用電化厨房とする。

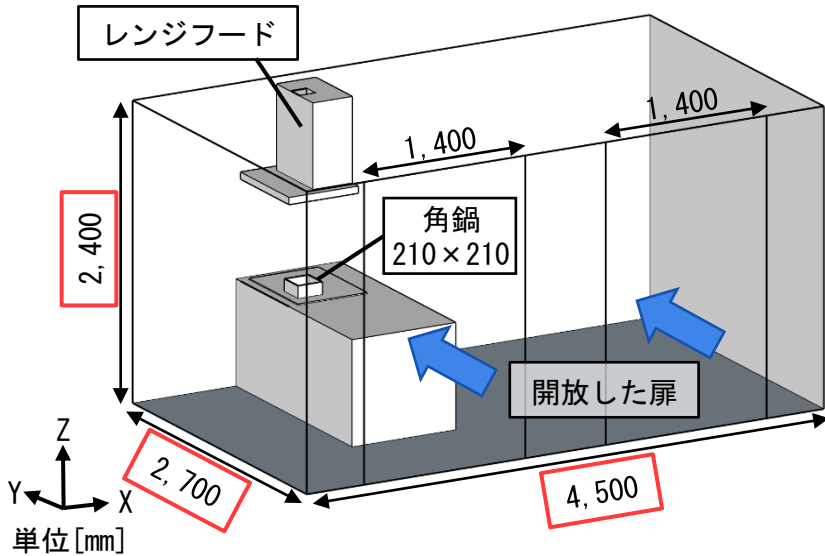


図 実大実験・CFD解析対象空間

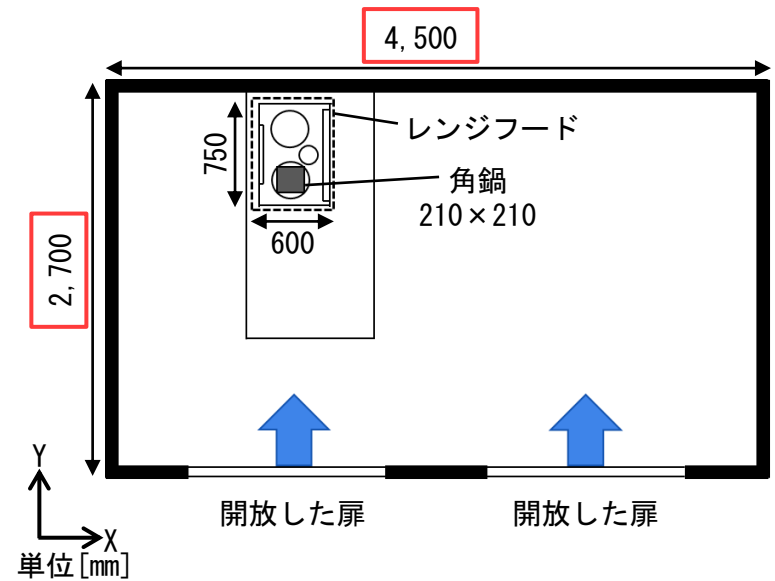


図1 実大実験・CFD解析対象平面

可能な限り擾乱が発生しないよう 給気は、開放した扉
(1,400 [mm] (幅) × 2,400 [mm] (高さ) × 2か所) から行う。

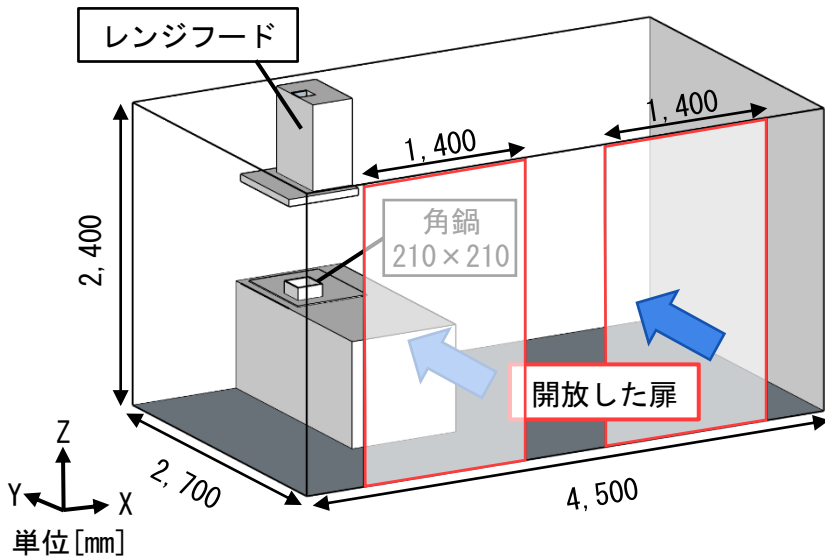


図 実大実験・CFD解析対象空間

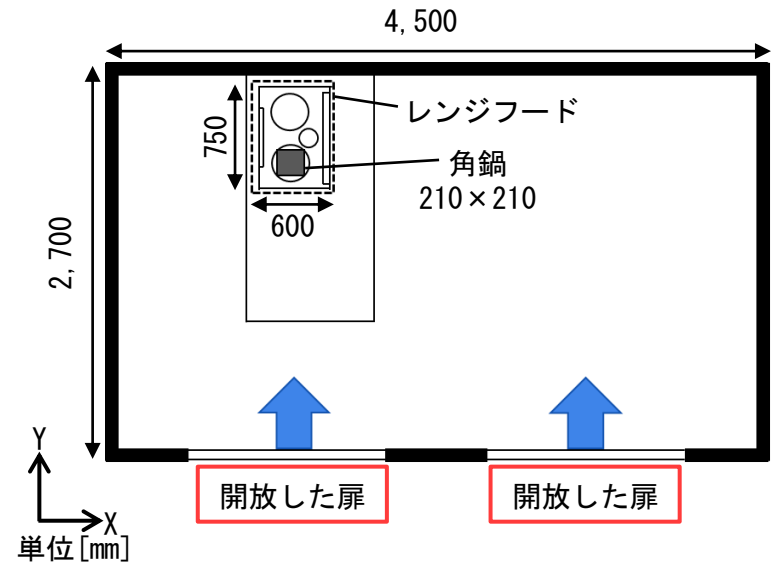


図 1 実大実験・CFD解析対象平面

本研究では、式 1 に示す **ストップ法**^{文 2)} によりレンジフード排気ダクト内の汚染質濃度をもとに直接捕集率の算出を行う。

$$\text{直接捕集率} (\mu) = \frac{\text{定常排気濃度} (C_E) - \text{室内平均濃度} (C_B)}{\text{汚染質完全捕集濃度} (M/Q)} \dots (1)$$

M : 汚染質供給量 [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]

実大実験における直接捕集率の算出

鍋の内容物は、水および天ぷら油とし、IHレンジで鍋を加熱することで100[°C]に保つ。

表 1 実験case

実験case		鍋の内容物	レンジフード 排気量
case1	case1-1	水 (100[°C])	100[m ³ /h]
	case1-2		150[m ³ /h]
	case1-3		200[m ³ /h]
	case1-4		300[m ³ /h]
case2	case2-1	天ぷら油 (100[°C])	150[m ³ /h]
	case2-2		300[m ³ /h]

実験の概要

調理時に発生する汚染質のトレーサには、エチレンを用いる。

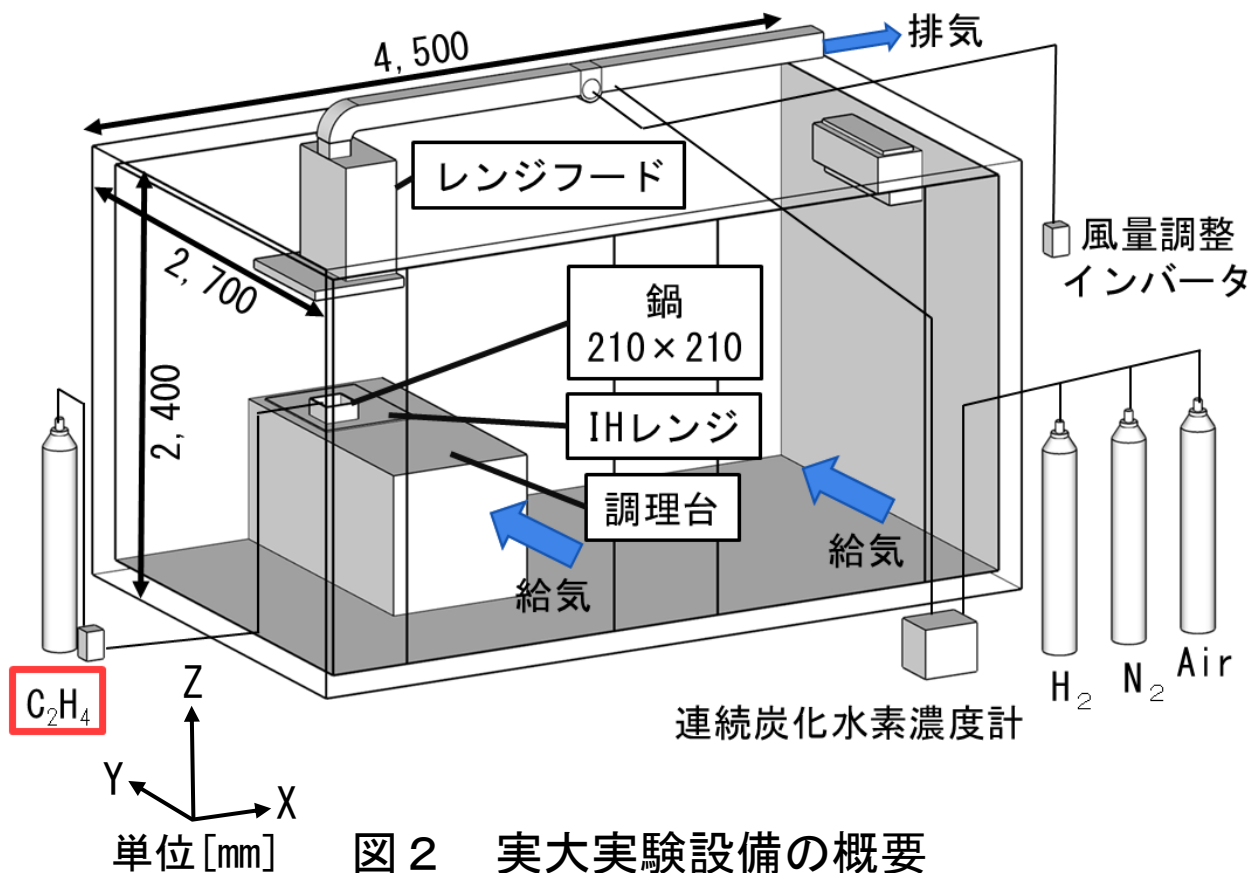


図2 実大実験設備の概要

レンジフード排気ダクト内の汚染質濃度を連続炭化水素濃度計で測定する。

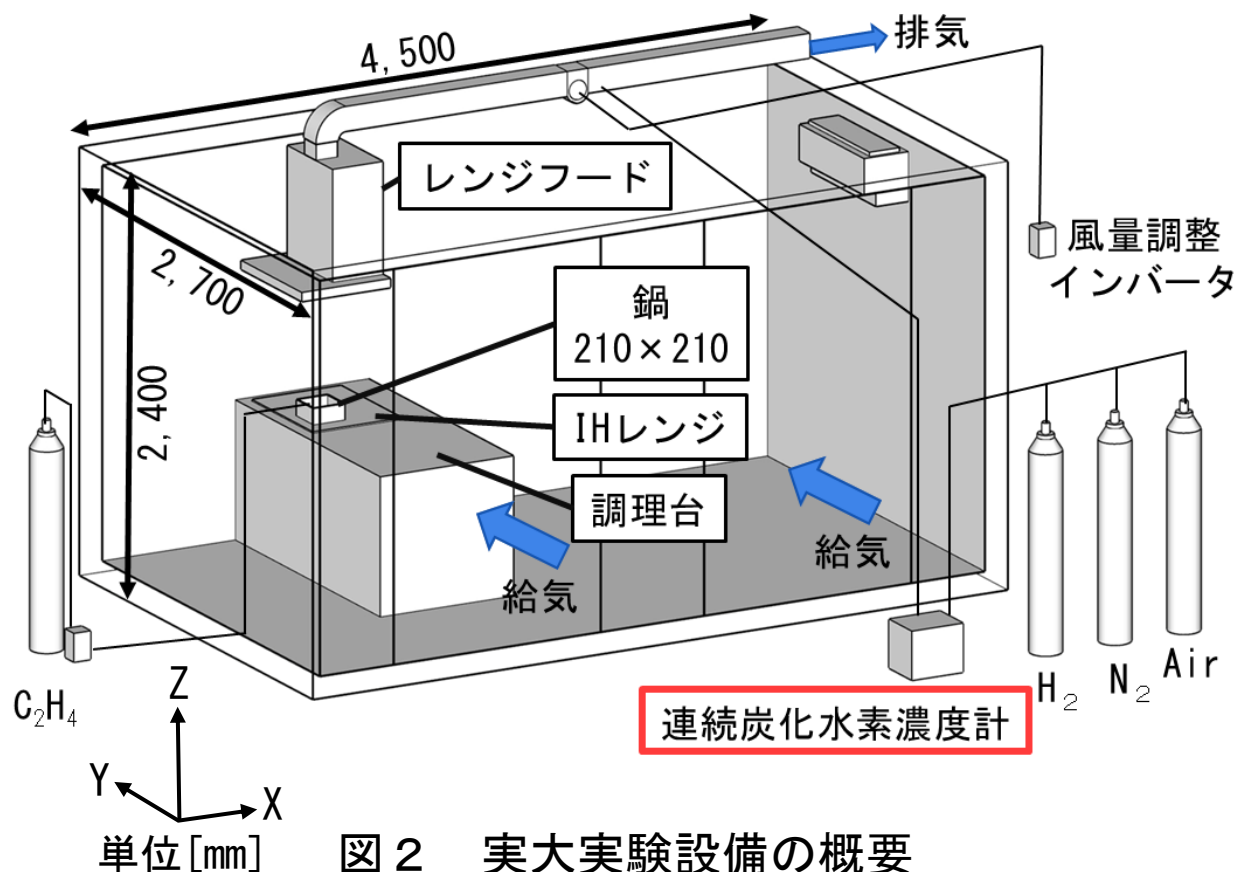


図2 実大実験設備の概要



写真

連続炭化水素濃度計
(水素炎イオン化検出器)

レンジフード排気量150[m³/h]の場合、直接捕集率は、それぞれ84.7[%]、93.3[%]となる。

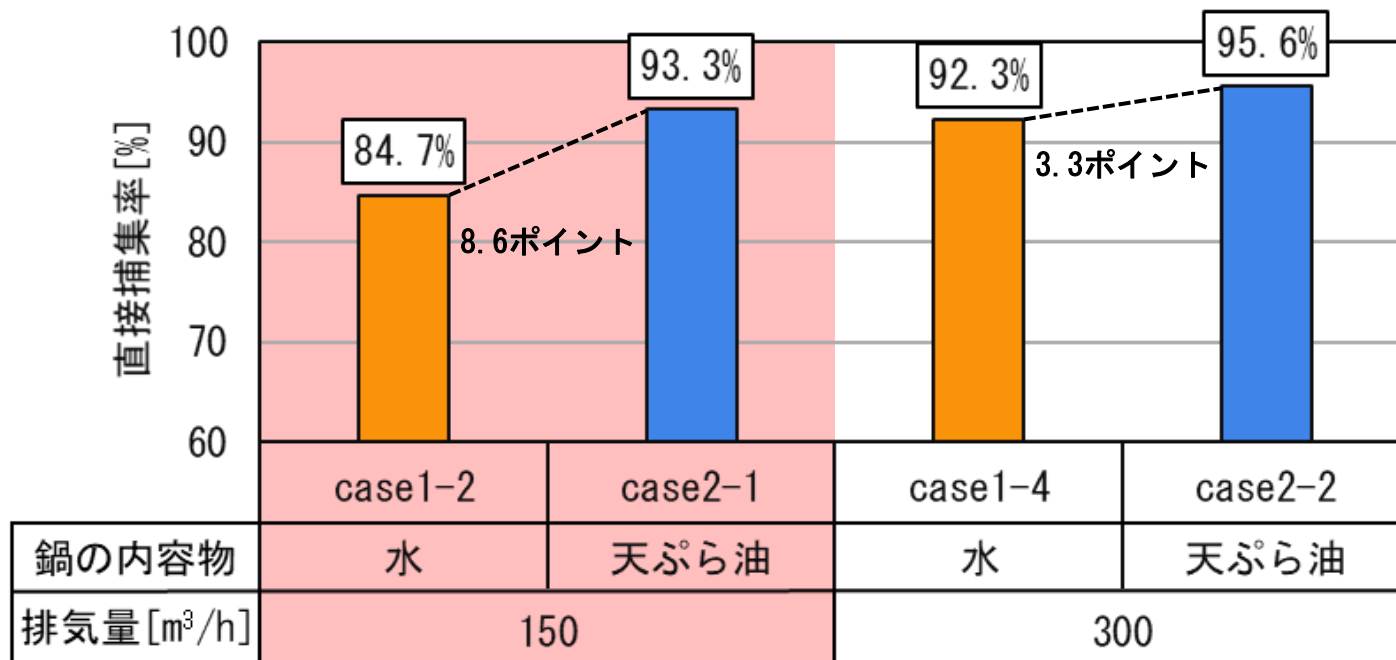


図4 水と天ぷら油の直接捕集率の比較

レンジフード排気量300[m³/h]の場合、**直接捕集率**は、それぞれ92.3[%]、95.6[%]となる。

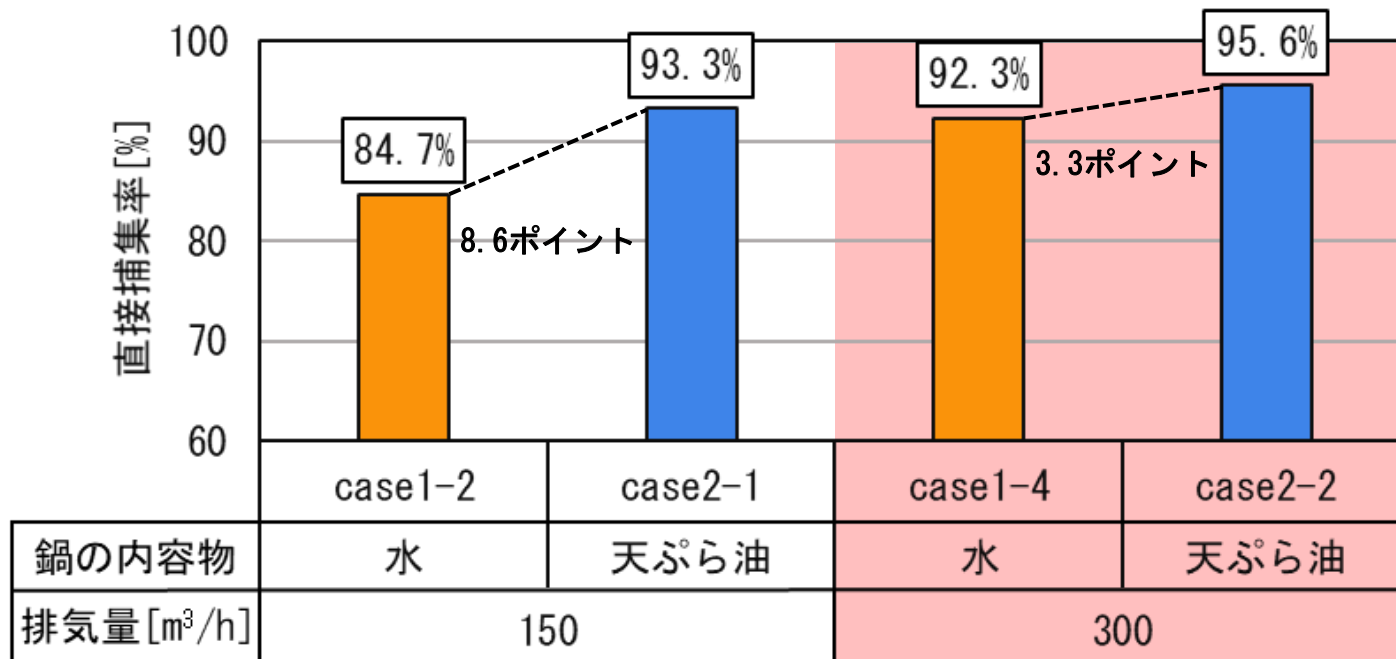


図4 水と天ぷら油の直接捕集率の比較

実験の結果を比較すると、排気量150、300[m³/h]のそれぞれの水と油の直接捕集率の差は8.6、3.3ポイントとなる。

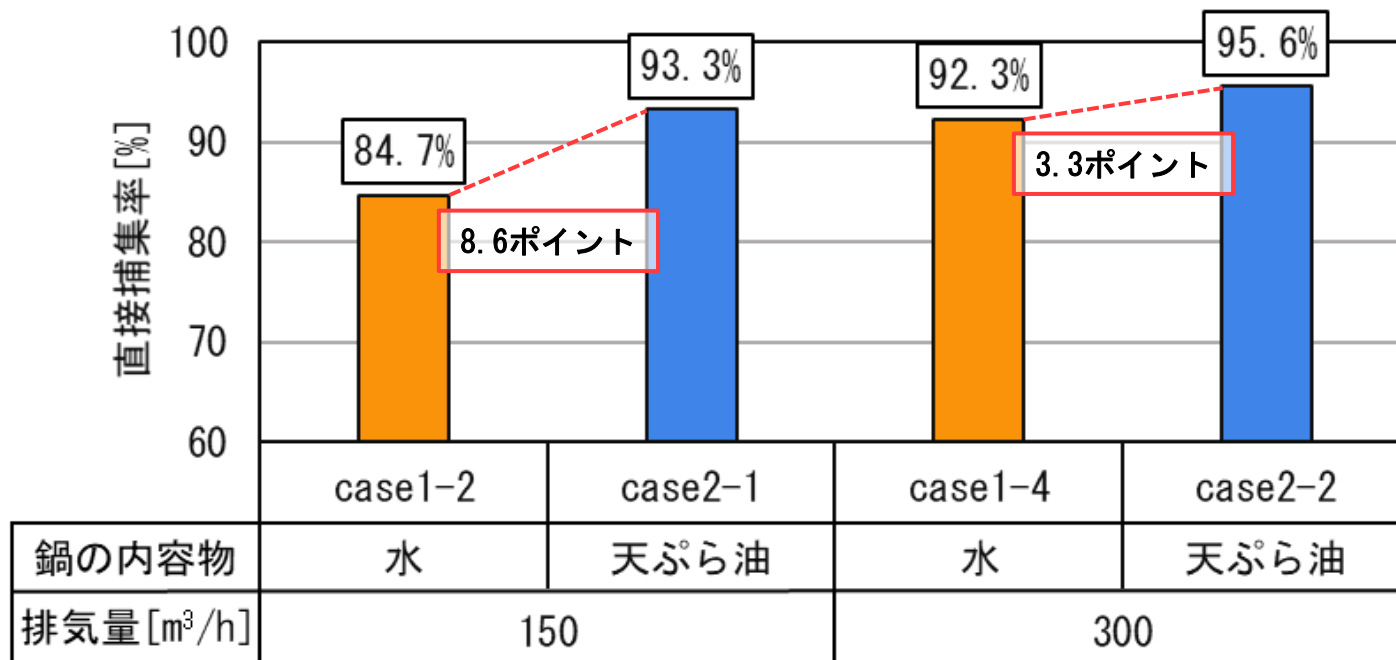


図4 水と天ぷら油の直接捕集率の比較

実験の結果

実験の結果を比較すると、排気量150、300[m³/h]のそれぞれの水と油の直接捕集率の差は8.6、3.3ポイントとなる。

沸騰しない天ぷら油の方が直接捕集率は高く、この差は**沸騰の有無**によるものと考えられる。

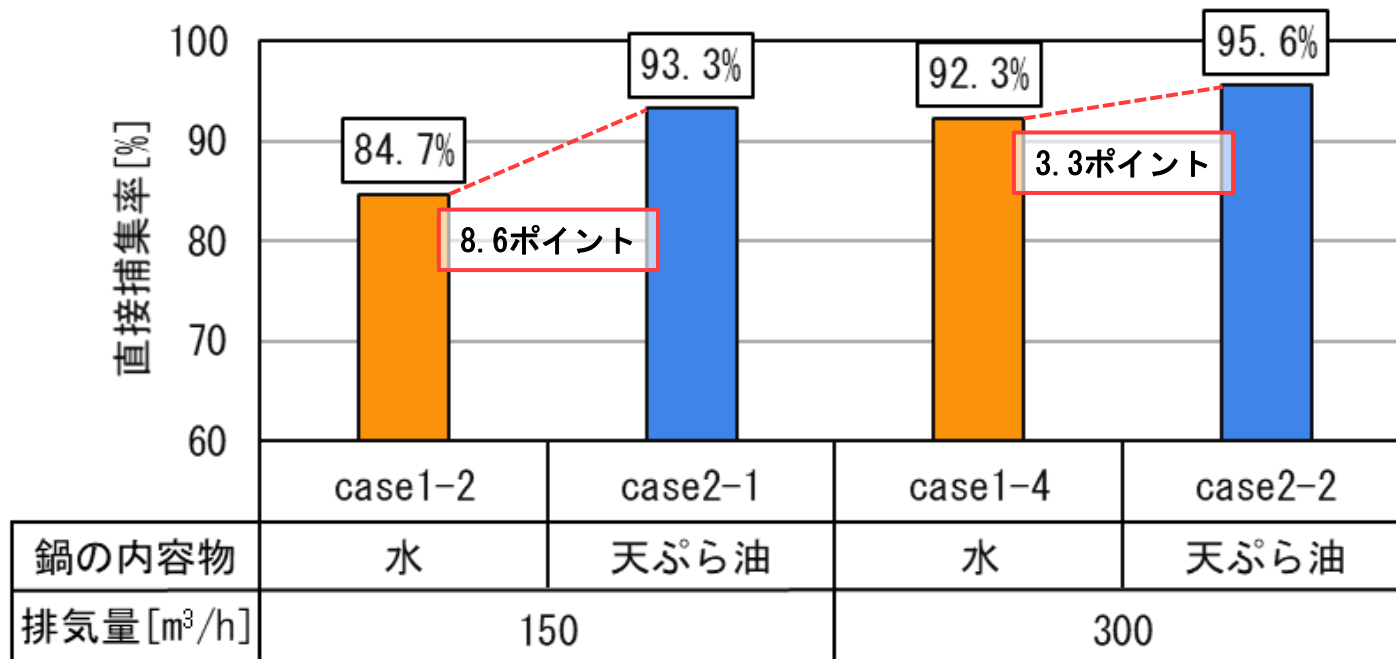


図4 水と天ぷら油の直接捕集率の比較

沸騰による水面の乱れや水の蒸発に伴う体積の膨張、潜熱等が鍋上の熱上昇気流に与える影響によって、レンジフードの直接捕集率が低下すると推察される。

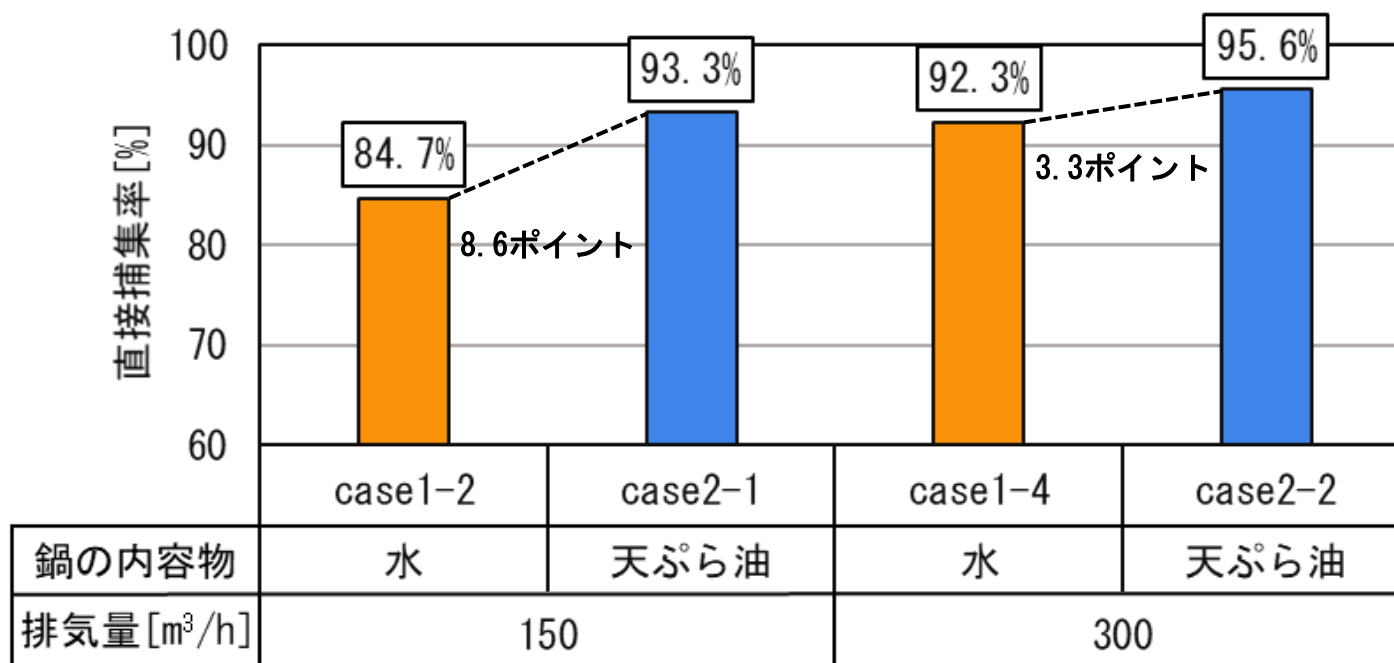


図4 水と天ぷら油の直接捕集率の比較

CFD解析における直接捕集率の算出

鍋の内容物は、水の物性値をもつ固体とし、温度を100[°C]とする。

表 2 CFD解析case

解析case	鍋の内容物	レンジフード 排気量
caseA (従来の解析モデル :モデル①)	caseA-1	100[m ³ /h]
	caseA-2	150[m ³ /h]
	caseA-3	200[m ³ /h]
	caseA-4	300[m ³ /h]
caseB (沸騰による影響を 考慮した解析モデル :モデル②)	caseB-1	100[m ³ /h]
	caseB-2	150[m ³ /h]
	caseB-3	200[m ³ /h]
	caseB-4	300[m ³ /h]

表 3 CFD解析条件

計算コード		ソフトウェアクレイドルSTREAM ver. 2022		
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		
境界条件	流入出境界	流出	レンジフード	
		流入	扉	
	熱境界	熱対流	鍋・固体の水表面	流量規定
			その他の表面	自然流入
壁面条件	輻射境界 流速境界	鍋一固体の水	100[W/(m ² · K)]	
		IHレンジー調理台	温度対数則	
		その他の個体間	2, 000[kW/(m ² · K)]	
			断熱	
			熱伝導	
		輻射率 : 0.9		
		一般対数則		
温度条件		固体の水	100[°C]	
		外気温	20[°C]	
		初期温度	20[°C]	
汚染質発生量		1.0[1/s]=3, 600[1/h]		

従来の解析モデル(以下、モデル①)に対して、水面に沸騰モデルを追加し、沸騰による影響を考慮した解析モデル(以下、モデル②)を作成する。

表 2 CFD解析case

解析case		鍋の内容物	レンジフード 排気量
caseA (従来の解析モデル :モデル①)	caseA-1	固体の水 (100[°C])	100[m ³ /h]
	caseA-2		150[m ³ /h]
	caseA-3		200[m ³ /h]
	caseA-4		300[m ³ /h]
caseB (沸騰による影響を 考慮した解析モデル :モデル②)	caseB-1	固体の水 (100[°C]) + 沸騰モデル	100[m ³ /h]
	caseB-2		150[m ³ /h]
	caseB-3		200[m ³ /h]
	caseB-4		300[m ³ /h]

表 3 CFD解析条件

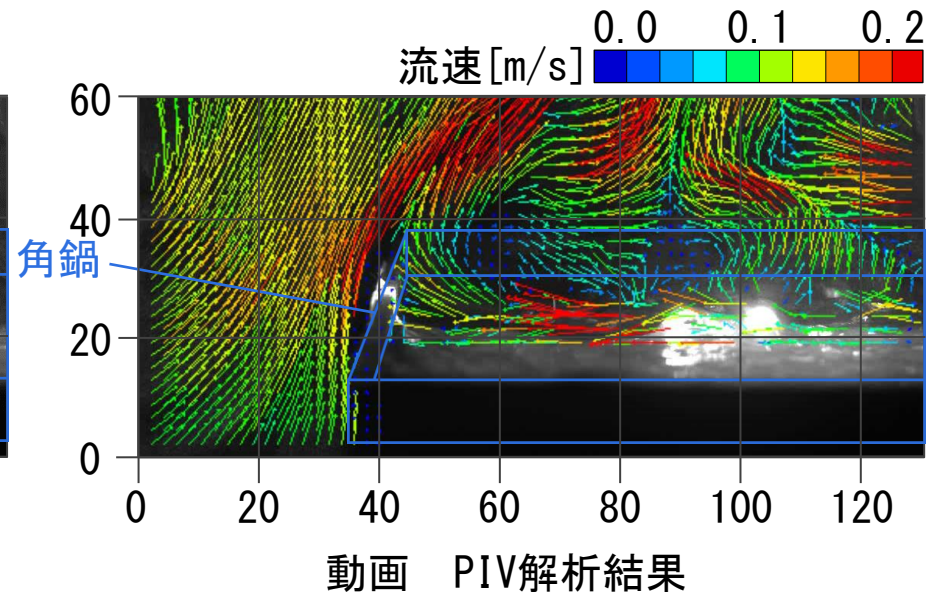
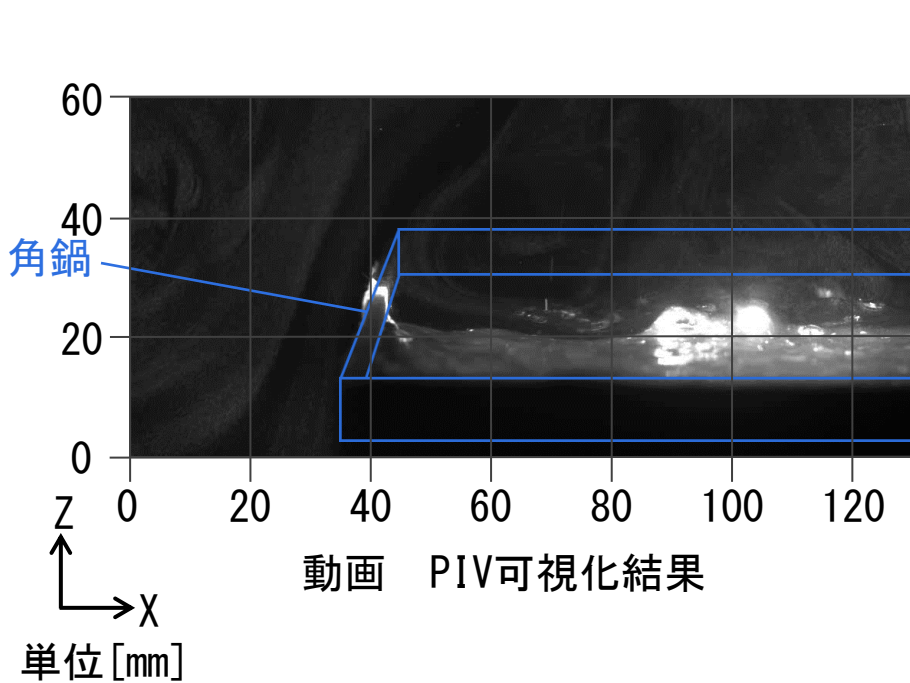
計算コード		ソフトウェアクレイドルSTREAM ver. 2022		
乱流モデル		標準k-εモデル		
解析要素数		210(X) × 197(Y) × 124(Z) = 5, 128, 880		
移流項精度		QUICK		
境界条件	流入出境界	流出	レンジフード	
		流入	扉	
	熱境界	熱対流	鍋・固体の水表面	流量規定 自然流入
			その他の表面	100[W/(m ² · K)] 温度対数則
		個体間	鍋-固体の水	2, 000[kW/(m ² · K)]
			IHレンジー調理台 その他の個体間	断熱 熱伝導
壁面条件	輻射境界	輻射率 : 0. 9		
	流速境界	一般対数則		
温度条件		固体の水	100[°C]	
		外気温	20[°C]	
		初期温度	20[°C]	
汚染質発生量		1. 0[1/s]=3, 600[1/h]		

沸騰モデルを作成するため、PIV測定・解析を行う。

表 4 PIV解析条件

画像サイズ	1,024 × 1,024 [pixel]
フレームレート	250 [fps]
解析ソフト	FlowExpert ver. 1.2.13
解析方法	直接相互相関法
キャリブレーション値	0.12 [mm/pixel]
計測点間隔	2.06 [mm] (17 [pixel])
検査領域	32 × 32 [pixel]
探査領域	±12 [pixel]
撮影時間	10 [s]

沸騰する水面付近の気流性状を観察すると、**連続的に**様々な位置で**気泡が生成・崩壊**する。



水面付近の流速は気泡が崩壊する瞬間に約0.2[m/s]となる。

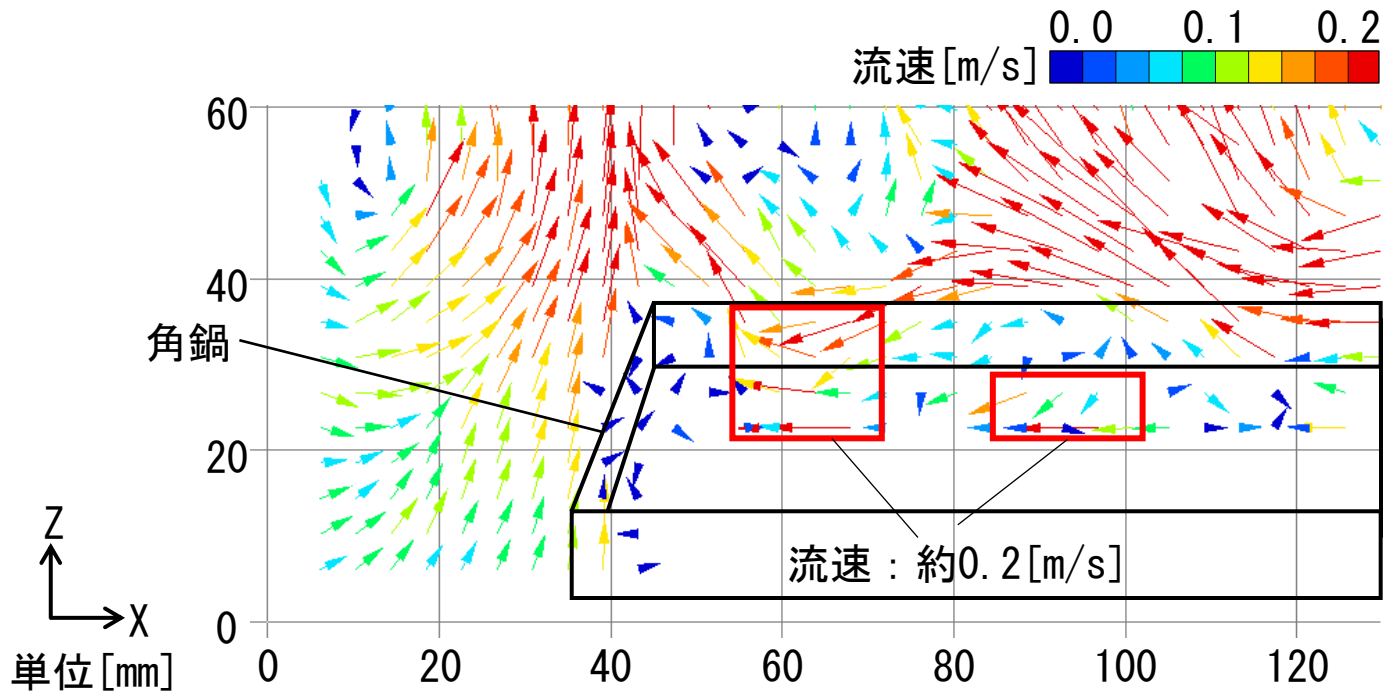


図5 気泡が崩壊する瞬間の気流のベクトル分布

CFD解析モデルの鍋内水面に計9か所の水蒸気発生領域を配置し、側面から法線方向へ風速0.2[m/s]の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。

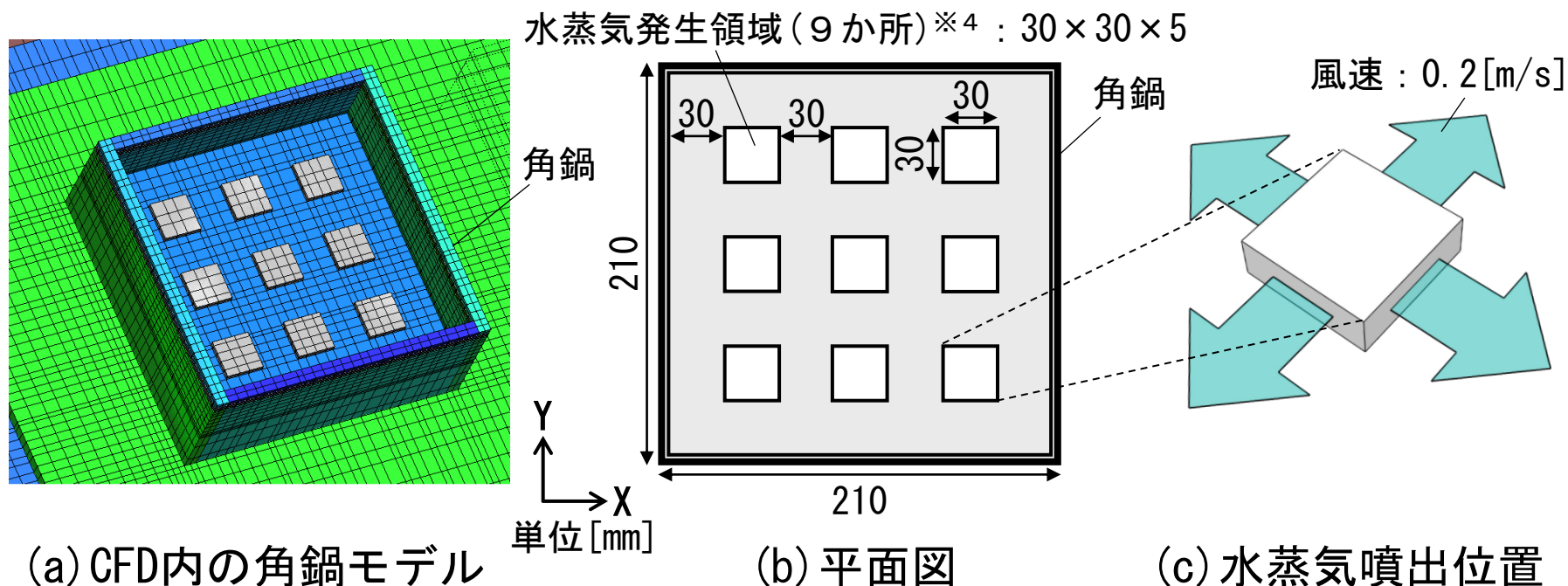


図6 沸騰モデルの概要

※4 IHレンジの熱出力が1,400[W]、熱効率を90[%]、水の蒸発潜熱量を2,257[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か所=1,080[cc/s]となりおおむね一致する。

case1 (実大実験) とCFD解析の直接捕集率の差は、caseA (モデル①) で7.7~14.0ポイント、caseB (モデル②) で2.5~8.4ポイントとなる。

表 実験・解析case

実験・解析case	鍋の内容物	レンジフード排気量
case1	水 (100[°C])	100[m ³ /h]
		150[m ³ /h]
		200[m ³ /h]
		300[m ³ /h]
caseA (従来の解析モデル :モデル①)	固体の水 (100[°C])	100[m ³ /h]
		150[m ³ /h]
		200[m ³ /h]
		300[m ³ /h]
caseB (沸騰による影響を 考慮した解析モデル :モデル②)	固体の水 (100[°C]) + 沸騰モデル	100[m ³ /h]
		150[m ³ /h]
		200[m ³ /h]
		300[m ³ /h]

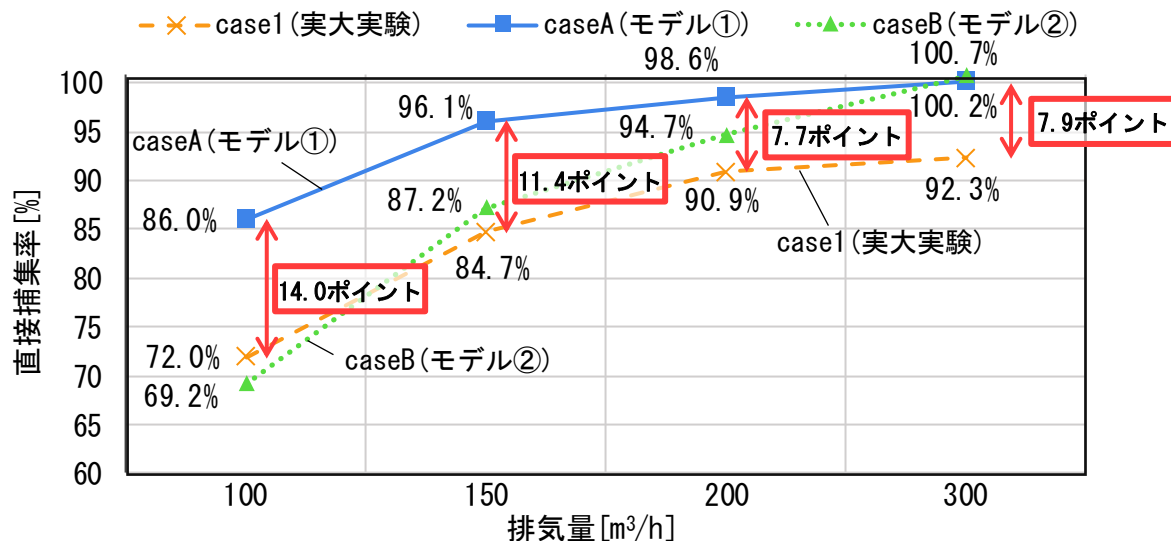


図6 実大実験とCFD解析による直接捕集率の比較

case1 (実大実験) とCFD解析の直接捕集率の差は、caseA (モデル①) で7.7~14.0ポイント、caseB (モデル②) で2.5~8.4ポイントとなる。

表 実験・解析case

実験・解析case	鍋の内容物	レンジフード排気量
case1	水 (100[°C])	100[m ³ /h]
		150[m ³ /h]
		200[m ³ /h]
		300[m ³ /h]
caseA (従来の解析モデル :モデル①)	固体の水 (100[°C])	100[m ³ /h]
		150[m ³ /h]
		200[m ³ /h]
		300[m ³ /h]
caseB (沸騰による影響を 考慮した解析モデル :モデル②)	固体の水 (100[°C]) + 沸騰モデル	100[m ³ /h]
		150[m ³ /h]
		200[m ³ /h]
		300[m ³ /h]

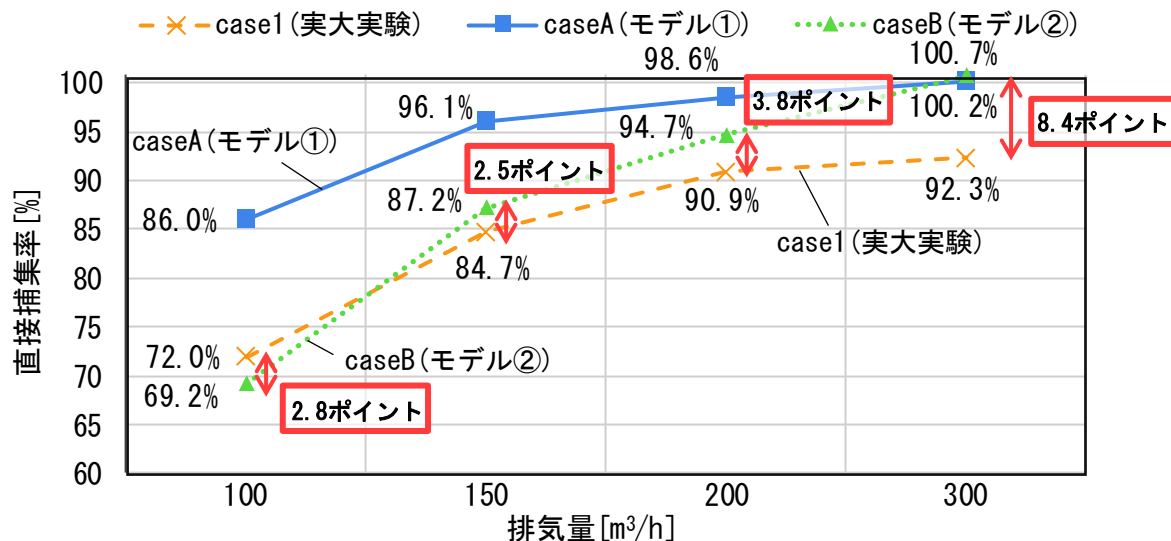


図6 実大実験とCFD解析による直接捕集率の比較

レンジフード排気量100、150、200[m³/h]の場合では、case1とcaseBの差は4ポイント以下となる。

表 実験・解析case

実験・解析case	鍋の内容物	レンジフード排気量
case1	水 (100[°C])	100[m ³ /h]
		150[m ³ /h]
		200[m ³ /h]
caseA (従来の解析モデル :モデル①)	固体の水 (100[°C])	100[m ³ /h]
		150[m ³ /h]
		200[m ³ /h]
caseB (沸騰による影響を 考慮した解析モデル :モデル②)	固体の水 (100[°C]) + 沸騰モデル	300[m ³ /h]
		100[m ³ /h]
		150[m ³ /h]
		200[m ³ /h]
		300[m ³ /h]

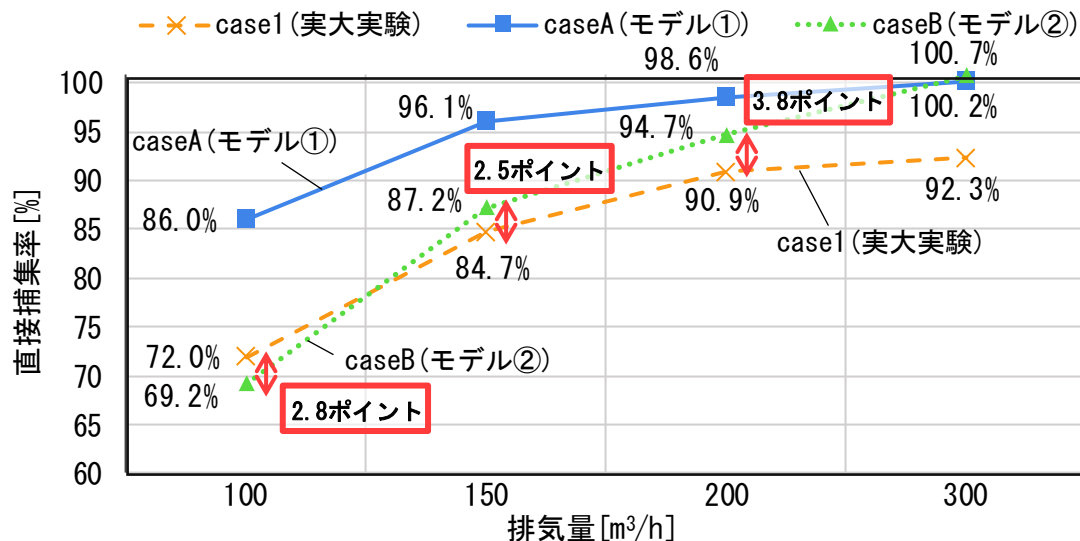


図6 実大実験とCFD解析による直接捕集率の比較

住宅用電化厨房を対象としたCFD解析では、水面に沸騰モデルを設けることにより、レンジフードの直接捕集率の予測精度を向上させることが可能であると考えられる。

表 実験・解析case

実験・解析case	鍋の内容物	レンジフード 排気量
case1	水 (100[°C])	100[m ³ /h]
		150[m ³ /h]
		200[m ³ /h]
		300[m ³ /h]
caseA (従来の解析モデル :モデル①)	固体の水 (100[°C])	100[m ³ /h]
		150[m ³ /h]
		200[m ³ /h]
		300[m ³ /h]
caseB (沸騰による影響を 考慮した解析モデル :モデル②)	固体の水 (100[°C]) + 沸騰モデル	100[m ³ /h]
		150[m ³ /h]
		200[m ³ /h]
		300[m ³ /h]

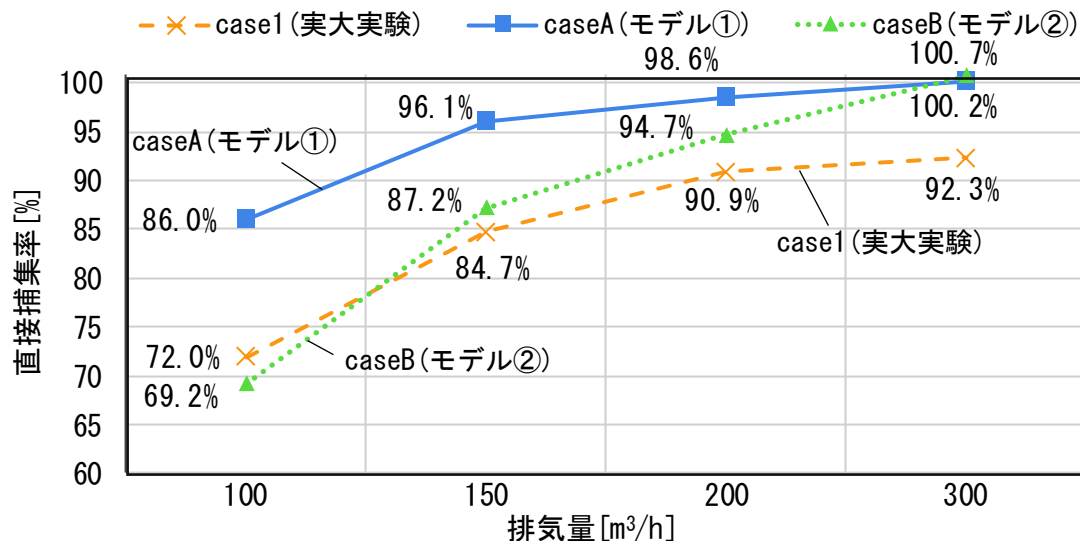


図6 実大実験とCFD解析による直接捕集率の比較

まとめ

- ① 天ぷら油の場合、直接捕集率は9割以上となり、同じ温度の水と比較して直接捕集率は高くなる傾向がある。
- ② 従来のCFD解析モデル(モデル①)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と考えられる。
- ③ 今回の解析対象空間において、モデル②を用いたCFD解析による直接捕集率は、おおむね実大実験と一致することが明らかとなった。

