

粒子画像流速測定法（PIV）と数値流体解析（CFD）による 調理レンジ上の気流分布に関する研究

宮本啓太
指導教員 赤林伸一教授

1 研究目的

近年、全電化住宅の普及が進み、IH レンジが一般家庭で広く用いられるようになってきている。IH レンジの特徴はGAS レンジと加熱原理が全く異なる点である。GAS レンジは高温の炎により鍋と周辺の空気を加熱するが、IH レンジは電磁誘導により鍋のみを加熱するため高温部（炎）が存在しない。従って、GAS レンジとIH レンジでは高温部である炎の有無により、レンジ上の気流性状が異なると考えられる。厨房の快適な温熱空気環境を実現するためには、これらの特性の違いによるレンジ周辺の温熱空気環境を明らかにし、レンジ周辺の気流性状に配慮した適切な厨房設計が行われる必要がある。

粒子画像流速測定法（Particle Image Velocimetry：以後PIV）は、流体中に目印となる微細なトレーサ粒子を混入してその動きを時系列で撮影し、得られた画像をデジタル処理して速度ベクトルを得る方法の総称であり、風速の計測方法の一つである。PIVは従来の風速計などによる測定と異なり、流れ場を非接触で空間的に多数の位置で同時に気流速度情報を得られる利点がある。

一方、数値流体解析（Computational Fluid Dynamics：以後CFD）は、設計ツールとして有効な技術であり、多様な住宅調理レンジの配置パターンにおけ

る、GAS レンジ、IH レンジが室内空気環境に及ぼす影響を検討する際、実験に比べ容易に温熱空気環境を予測することが出来る。

本研究では、PIVを用いて、GAS レンジ及びIH レンジを対象に鍋周辺とレンジフードの排気風量を変化させた場合のレンジ上、排気フード近傍の流れ場を可視化、計測し、レンジ上の流速ベクトルを解析し、両レンジの気流性状を明らかにする。CFD解析では、厨房単体又は厨房を含む一室を解くための基礎資料となる鍋単体モデルを対象とした解析を行う。さらに、鍋周辺気流のPIV測定結果と比較し、CFDによる解析精度の検証を行う。

2 鍋周辺気流のPIV測定

2.1 測定対象

図1にPIVシステムの概要を、図2に測定断面を、表1に使用したPIV測定装置を示す。測定対象領域は360mm×270mm、測定断面は50mm間隔で計5断面の測定を行う。測定はレンジ右側1口を対象に鍋の中の水が沸騰した状態から開始する。トレーサーとして難燃性のスモークを測定対象領域から離れた位置より供給し、トラバース装置はレーザーとカメラの相対位置を維持しながら、測定断面を変更する際に使用する。

2.2 測定方法

本研究で使用したPIVシステムでは2時刻の画像間の局所的な濃度パターンの類似性を相互相関により求め、そのピーク位置から移動量を定めることで流速ベクトルを算出する。表2にカメラのフレームレート（単位時間の撮影回数）、探査範囲（濃度パターンを比較する範囲）と測定可能最大流速の関係を示す。この時、実際の長さ

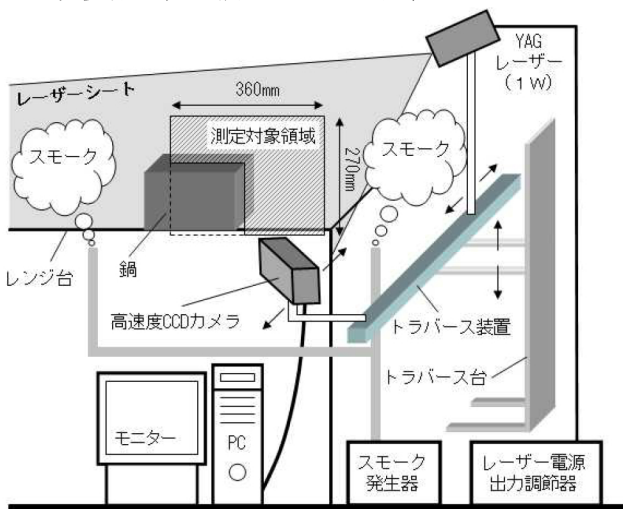


図1 PIVシステムの概要

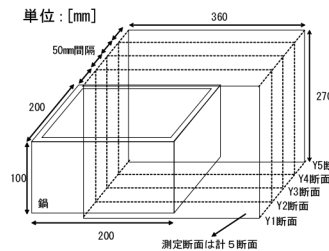


図2 測定断面

表1 PIV測定装置

カメラ	カトウ光研 ハイスピードデジタルCCDカメラK-II
レーザー	カトウ光研 Green Laser Sheet (LD励起Nd:YAG/YVO ₄ レーザー、波長532nm、出力1W、0~10kHzで変調可能な連続光)
ソフトウェア	カメラ制御 Ditect k-II Software PIV解析 Ditect Dipp-Flow
スモーク発生器	DAINICHI PORTA SMOKE PS-2002 スモーク液成分: グリコール類、精製水 スモーク粒子直径: 数10ミクロン
トラバース装置	芝浦製作所 AL-600 (レーザー、カメラの移動に使用)

と画像上の長さを変換する作業（キャリブレーション）を行う必要がある。キャリブレーション値はpixel 間の距離であり、本測定におけるキャリブレーション値は0.56mm/pixelである。両レンジ使用時の最大流速を想定し、PIV 測定のパラメータを表3のように設定する。フレームレートはGAS レンジで200fps、IH レンジで100fpsとし、両レンジとも測定時間の合計が100 秒間となるように測定を行う。

また、PIV により得られた流速ベクトルから明らかに不適切と考えられる誤ベクトルは削除する。

2.3 測定結果

図3に100 秒間の測定結果を平均した鍋周辺の気流速度分布を示す。測定結果は測定対象領域の鍋中央から右側のみを表示する。GAS レンジでは、各断面の鍋直上(0mm < X < 100mm)での最大流速は約0.5 ~ 0.6m/sであり、IH レンジに比べGAS レンジの方が相対的に流速が速い。また、Y2、Y3、Y4 断面の0mm < Z < 75mmの範囲で鍋中央(X=0mm)に向かう渦状の気流分布となるが、Y1、Y5 断面では鉛直方向への気流分布となる。鍋側面(X=100mm)付近では、高温部である炎の影響により、各断面で鍋側面に沿うような熱上昇気流が形成され、鍋上端で気流が剥離し、鍋中央に向かう左斜め上方への気流分布となる。Y3 断面（鍋中央）で流速は最も速くなる。IH レンジでは、各断面の鍋直上(0mm < X < 100mm)での最大流速は約0.05 ~ 0.3m/sである。鍋側面(x=100mm)付近ではGAS レンジと異なり流速が遅く、鍋直上のみで流速が速い。Y1 断面は流速が遅く、明確な気流分布が形成されていない。また、断面がY1 からY5に移動すると、鍋直上の流速は速くなる傾向がある。

GAS レンジと IH レンジでは高温部である炎の有無により、鍋周辺の気流速度分布に違いが見られる。

表2 PIVの測定可能最大流速（鍋周辺）

キャリブレーション値 0.56mm/pixel	探査範囲						
	5pixel (2.8mm)	10pixel (5.6mm)	15pixel (8.4mm)	20pixel (11.2mm)	25pixel (14mm)	30pixel (16.8mm)	
フレームレート	50fps (t = 20ms)	0.20	0.40	0.59	0.79	0.99	1.19
	100fps (t = 10ms)	0.40	0.79	1.19	1.58	1.98	2.38
	200fps (t = 5ms)	0.79	1.58	2.38	3.17	3.96	4.75
	300fps (t = 3.3ms)	1.19	2.38	3.56	4.75	5.94	7.13

単位：[m/s]

表3 測定パラメータ（鍋周辺）

	GASレンジ	IHレンジ
測定対象領域	360mm × 270mm	
フレームレート	200fps (t = 5ms)	100fps (t = 10ms)
測定回数	10秒間を10回測定 (計100秒間)	20秒間を5回測定 (計100秒間)
画像サイズ	640pixel × 480pixel	
検査領域サイズ	19pixel × 19pixel	
探査領域	±10pixel × ±10pixel	

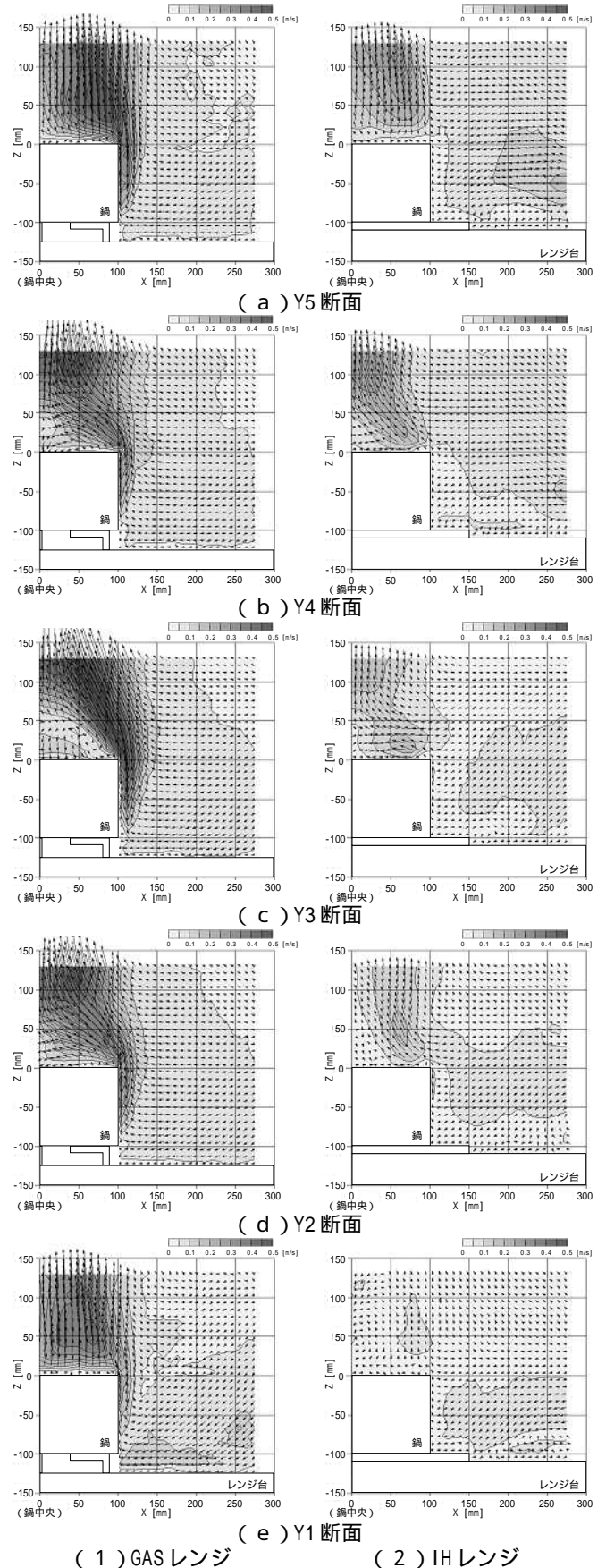


図3 鍋周辺の気流速度分布

図4にY3断面における鍋上50mm、100mmのスカラ流速を示す。GAS レンジは鍋右端付近で流速は速く、鍋中央付近で流速は遅い。IH レンジはGAS レンジに比べ相対的に流速が遅く、流速の変化も少ない。

3 レンジとフードを組み合わせた場合のPIV測定

3.1 測定対象

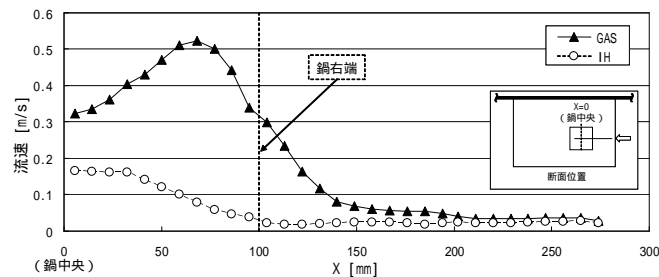
図5に測定対象領域を、図6に測定断面を示す。測定対象領域は800mm×600mm、測定断面は鍋中央とフード中央の2断面で行う。排気フードは600mm角の単純形状とし、レンジ台からフード下端までの高さを600mmとする。レンジ上とフード近傍の気流を可視化、計測する。原点は測定対象領域の左下とする。測定はレンジ左右2口を対象に鍋の中の水が沸騰した状態から開始する。

3.2 測定方法

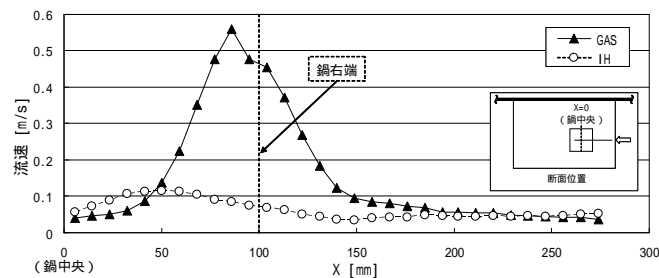
表4に測定ケースを示す。排気風量と測定断面を変化させた計16ケースとする。表5にカメラのフレームレート、探査範囲と測定可能最大流速の関係を示す。本測定におけるキャリブレーション値は1.25mm/pixelである。表6に測定パラメータを示す。フレームレートは両レンジとも100fpsとし、20秒間の測定を5回行い、計100秒間測定する。

3.3 測定結果

図7に100秒間の測定結果を平均した排気風量200m³/h時のレンジ上の気流速度分布を示す。GAS レンジでは、鍋中央断面で各鍋の中央(X=0mm、300mm)付近で流速が速い。Z=300mm付近から流速は速くなり、Z=400mm、500mm付近で流速は最も速くなり、約0.7～0.8m/sである。一方、レンジ台中央(X=150mm)付近では流速が遅く、約0.1～0.3m/sである。また、フード中央断面では鍋中央断面に比べ、各鍋の中央(X=0mm、300mm)付近の流速は遅くなるが、レンジ台中央(X=150mm)付近の流速は速くなり、局所的に流速の速い部分がなくなる。IH レンジでは、鍋中央断面でGAS レンジに比べ流速が遅く、約0.2～0.3m/sである。また、フード中央断面では鍋中央断面に比べ全体的に流速が速く、約0.4～0.5m/sである。両レンジとも鍋中央断面に比べフード中央断面でフード下端付近の流速は速い。



(1) 鍋上100mm



(2) 鍋上50mm

図4 鍋上のスカラ流速(Y3断面)

方、レンジ台中央(X=150mm)付近では流速が遅く、約0.1～0.3m/sである。また、フード中央断面では鍋中央断面に比べ、各鍋の中央(X=0mm、300mm)付近の流速は遅くなるが、レンジ台中央(X=150mm)付近の流速は速くなり、局所的に流速の速い部分がなくなる。IH レンジでは、鍋中央断面でGAS レンジに比べ流速が遅く、約0.2～0.3m/sである。また、フード中央断面では鍋中央断面に比べ全体的に流速が速く、約0.4～0.5m/sである。両レンジとも鍋中央断面に比べフード中央断面でフード下端付近の流速は速い。

図8に鍋中央断面における各排気風量時のレンジ上400mmのスカラ流速を示す。両レンジで排気風量の変化によるレンジ上のスカラ流速に大きな違いはない。

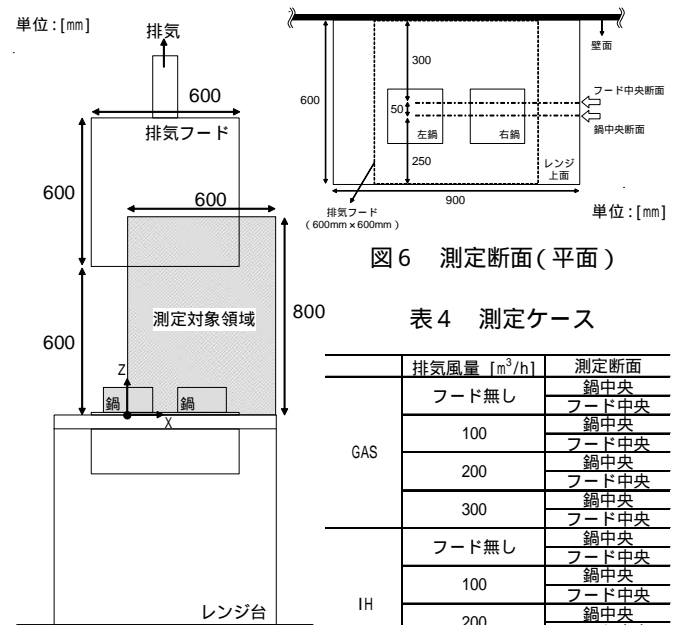


図5 測定対象領域(立面)

図6 測定断面(平面)

表4 測定ケース

	排気風量 [m ³ /h]	測定断面	
		鍋中央	フード中央
GAS	フード無し	鍋中央	フード中央
	100	鍋中央	フード中央
	200	鍋中央	フード中央
IH	300	鍋中央	フード中央
	フード無し	鍋中央	フード中央
	100	鍋中央	フード中央
	200	鍋中央	フード中央
	300	鍋中央	フード中央

表5 PIVの測定可能最大流速(レンジ上、フード近傍)

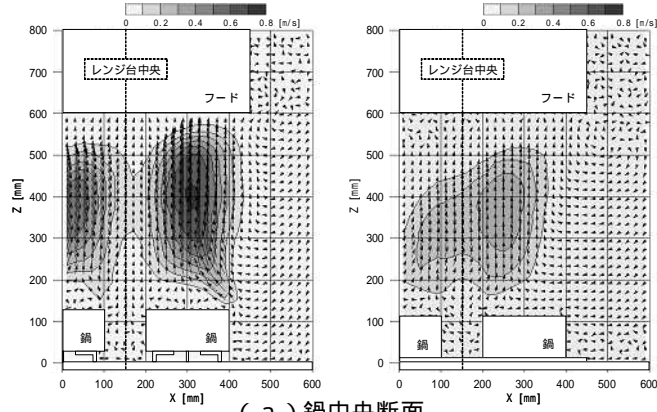
キャリブレーション値 1.25mm/pixel	フレームレート (t)	探査範囲					
		5pixel (6.25mm)	10pixel (12.5mm)	15pixel (18.75mm)	20pixel (25mm)	25pixel (31.25mm)	30pixel (37.5mm)
1.25mm/pixel	50fps (t=20ms)	0.44	0.88	1.33	1.77	2.21	2.65
	100fps (t=10ms)	0.88	1.77	2.65	3.54	4.42	5.30
	200fps (t=5ms)	1.77	3.54	5.30	7.07	8.84	10.61
	300fps (t=3.3ms)	2.65	5.30	7.95	10.61	13.26	15.91

単位: [m/s]

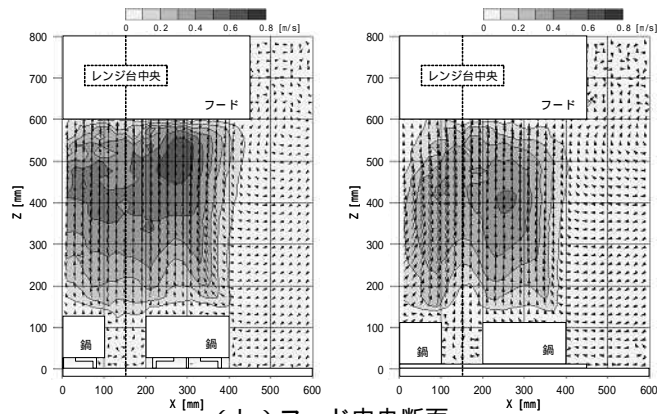
表6 測定パラメータ(レンジ上、フード近傍)

測定対象領域	800mm×600mm
フレームレート	100fps (t=10ms)
測定回数	20秒間を5回測定(計100秒間)
画像サイズ	640pixel×480pixel
検査領域サイズ	19pixel×19pixel
探査領域	±10pixel×±10pixel

図9にフード中央断面における各排気風量時のフード近傍の100秒間平均の気流分布を示す。GASレンジでは、排気風量100m³/h時は常にフードから気流が漏れ、フード外に漏れていく気流の流速は約0.1~0.15m/sである。排気風量200m³/h時も常にフードから気流が漏れている



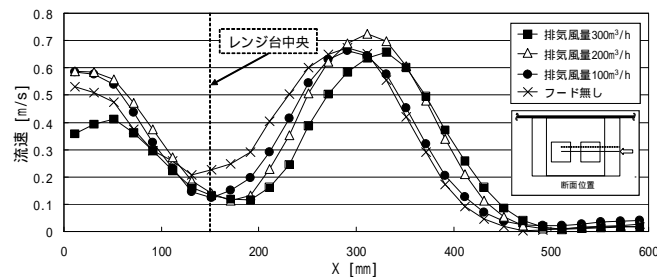
(a) 鍋中央断面



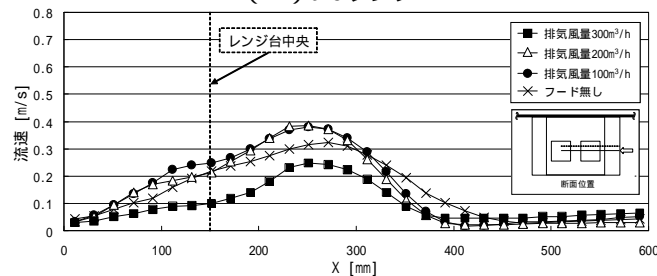
(b) フード中央断面

(1) GASレンジ (2) IHレンジ

図7 レンジ上の気流速度分布(排気風量200m³/h)



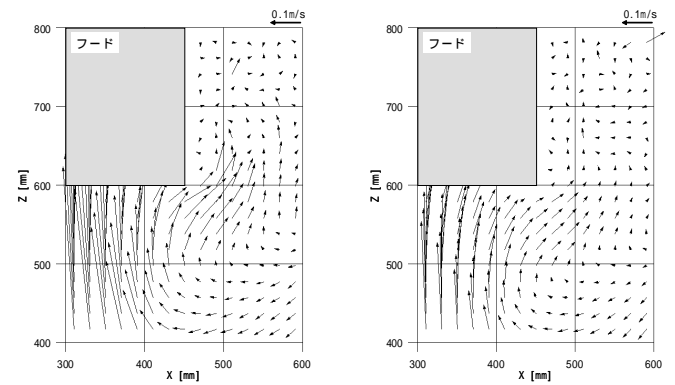
(1) GASレンジ



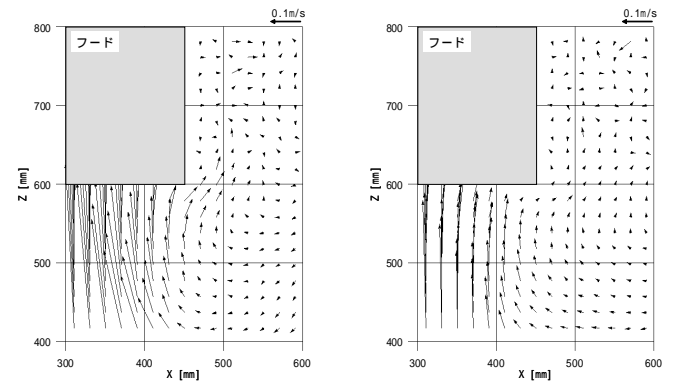
(2) IHレンジ

図8 レンジ上400mmのスカラー流速(鍋中央断面)

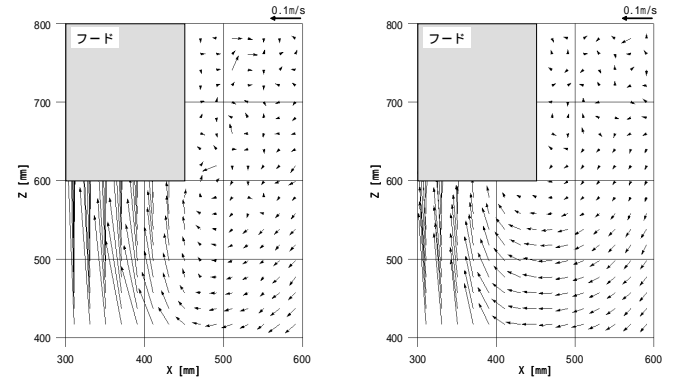
が、排気風量100m³/h時に比べフード外に漏れる気流は少なく、流速は遅い。排気風量300m³/h時はフード下端付近で大部分がフード内に向かう気流分布となるが、測定のタイミングによってはフード外に漏れる気流もある。IHレンジでは、排気風量100m³/h時は常にフードから気流が漏れ、フード外に漏れていく気流の流速は約0.04~0.06m/sであり、GASレンジに比べ流速は遅い。排気風量200m³/h時は平均的にはフード内に向かう気流分布となるが、測定のタイミングによってはフードから漏れる気流もある。排気風量300m³/h時は、フード内に向かう気流分布となり、レンジ上で発生している上昇気流の他に、フード外から流入してくる気流も見られる。



(a) 排気風量100m³/h



(b) 排気風量200m³/h



(c) 排気風量300m³/h

(1) GASレンジ (2) IHレンジ

図9 フード近傍の気流分布(フード中央断面)

4 鍋単体モデルを対象としたCFD解析

4.1 解析対象

図10に解析対象の概要を示す。鍋中央に対称境界を設定し、計算は半分の領域を対象に行う。解析領域の前面下方①、側面下方②からは流入が、側面上方③からは流出があるものとする。GASレンジの炎は1200℃の20mm×20mm×27mmの直方体モデルとし、炎下部に流入境界④(図10(4))を設定する。

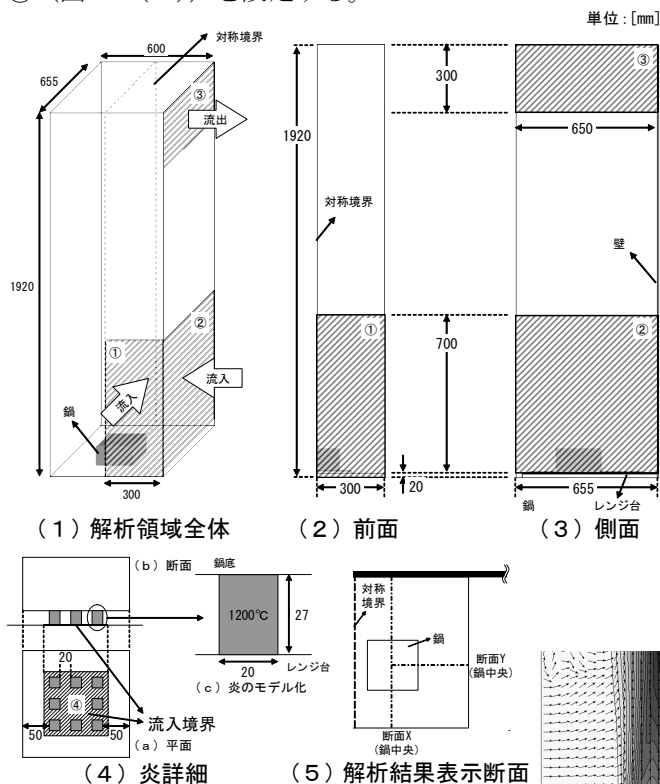


図10 解析対象の概要

表7 解析条件

計算コード		ソフトウェアレイドルSTREAM Ver.7
乱流モデル		標準k-εモデル(非等温)
移項流精度		Quick
壁面条件	流速境界	ノースリップ(炎はフリースリップ)
	熱境界	対流 鍋: 対流熱伝達率50[W/m ² K] 水面: 対流熱伝達率100[W/m ² K] 炎: 対流熱伝達率1000[W/m ² K] その他の表面: 温度対数則
		個体間 鍋-水: 20000[W/m ² K] 鍋底-レンジ台(IH): 断熱 炎-レンジ台、鍋底(GAS): 断熱 その他の個体間: 熱伝導
輻射境界	炎: 輻射率=0.2 ステンレス: 輻射率=0.35 解析領域面: 輻射率=1.0 その他: 輻射率=0.95	
流入出条件	壁面流入(①、②)	流入風速=0.03[m/s] 流入温度=26[°C]
	壁面流出(③)	流出風速=0.1061[m/s](GAS) 流出風速=0.1032[m/s](IH)
	炎下流入(④)	流入風速=0.1[m/s] 流入温度=26[°C]
温度条件	IH	鍋の水、鍋底は100[°C]に温度固定 水と鍋には初期温度100[°C]を与える
	ガスレンジ	鍋の水は100[°C]に温度固定 炎の温度は1200[°C]に温度固定 水と鍋には初期温度100[°C]を与える

4.2 解析条件

表7に解析条件を示す。解析には汎用流体解析ソフト(STREAM)を用いる。GASレンジ、IHレンジ使用時の流れ場を標準k-εモデルにより解析する。レンジ上の流れ場、温度場をCFD解析により明らかにする。さらに、鍋周辺気流のPIV測定結果と比較し、精度の検証を行う。

4.3 解析結果

4.3.1 気流速度分布、温度分布

図11にGASレンジのCFD解析結果を、図12にIHレンジのCFD解析結果を示す。GASレンジでは鍋側面を沿うような上昇気流が形成され、鍋上で流速は1.2m/s以上となる。温度分布は鍋周辺で約100℃の高温の領域があり、上昇気流の温度も85~100℃と高温となる。IHレンジでは流速は鍋から上昇するに伴い速くなり、鍋上の流速は約0.7m/sとなる。鍋の水面近くでは渦状の気流が見られる。温度分布は鍋、水面近くで相対的に温度が高く、約50℃であり、上昇気流の温度は約30~35℃である。

4.3.2 PIVとCFDの比較

図13にPIVとCFDの流速の比較を示す。GASレンジでは、鉛直方向流速は鍋上50mmのY=200mmで違いが見られるが、その他はPIVとCFDは同程度の流速である。スカラー流速は鍋上50mm、100mmともに鍋右端付近でCFDの

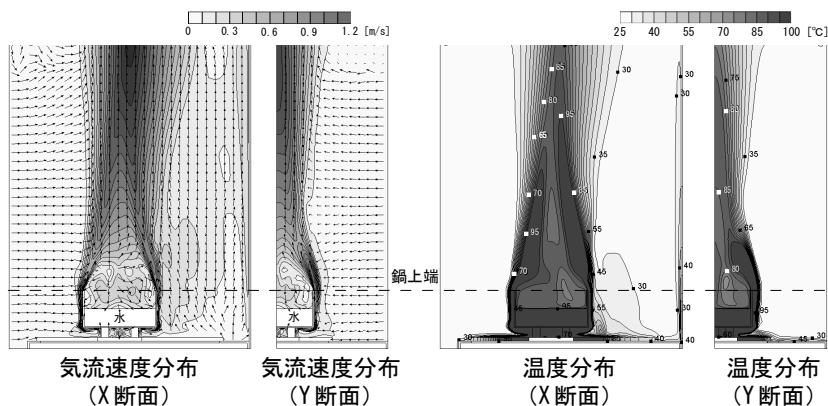


図11 GASレンジのCFD解析結果

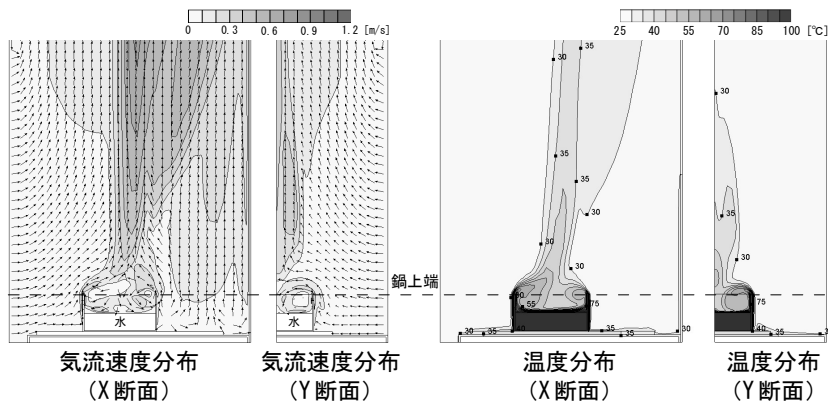


図12 IHレンジのCFD解析結果

方が流速が速い。CFD では流速の変化がPIV に比べ大きく、最大流速も速くなる傾向がある。IH レンジでは、鉛直方向流速、スカラー流速ともに鍋上 50mm、100mm で PIV と CFD は同程度の流速である。

図 14 に鍋上の上昇気流風量を示す。上昇気流の風量はレンジフードファンの排気風量を決定する際の指標となる。GAS レンジでは、上昇気流風量は PIV の鍋上 50mm で 26.8m³/h、鍋上 100mm で 34.9m³/h となる。CFD では鍋上 50mm で 23.6m³/h、鍋上 100mm で 27.2m³/h となる。CFD では PIV に比べ上昇気流風量が少ない。鍋上 50mm では Y1、Y2 断面で、鍋上 100mm では Y1、Y5 断面上昇気流風量に違いが見られる。IH レンジでは、上昇気流風量は PIV の鍋上 50mm で 8.5m³/h、鍋上 100mm で 11.4m³/h となる。CFD では鍋上 50mm で 8.4m³/h、鍋上 100mm で 11.7m³/h となる。鍋上 50mm、100mm ともに PIV と CFD の上昇気流風量は同程度である。IH レンジの上昇気流風量は GAS レンジの約 1/3 である。

5 結論

(1) PIV 測定

GAS レンジでは高温部の炎の影響により、鍋側面を沿うように熱上昇気流が形成され、鍋周辺、レンジ上の流速は IH レンジ比で相対的に速い。レンジ上では、各鍋の中央で局所的に流速が速い部分が生じる。

IH レンジでは全ての断面で GAS レンジに比べ流速が遅く、明確な気流が形成されず、調理者の動作や排気等の外乱の影響を GAS レンジに比較して受けやすいと考えられる。

GAS レンジで IH レンジと同程度の排気捕集率にするためには、IH レンジよりも多くの排気量が必要である。

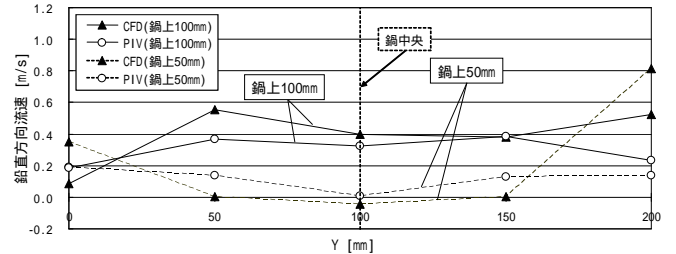
(2) CFD 解析

GAS レンジは IH レンジに比べ、上昇気流速度が速く、上昇気流と鍋周辺の温度が高い。また、鍋上の上昇気流風量も多い。

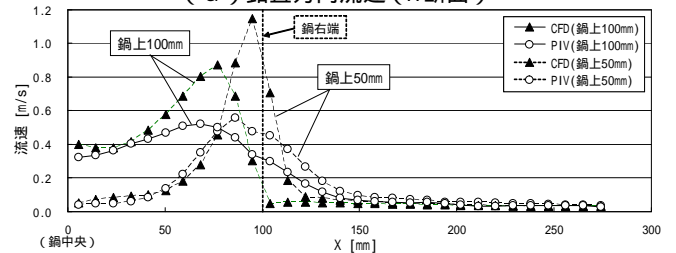
IH レンジを対象とした PIV による実測結果と CFD 解析結果は整合性が良い。IH レンジは PIV 測定の結果を

CFD でよく再現出来ている。

GAS レンジでは PIV に比べ CFD で流速は速くなる傾向がある。一方、鍋上の上昇気流風量は CFD で小さくなる。GAS レンジは CFD 解析結果と PIV 測定の結果が一致しない部分が見られる。

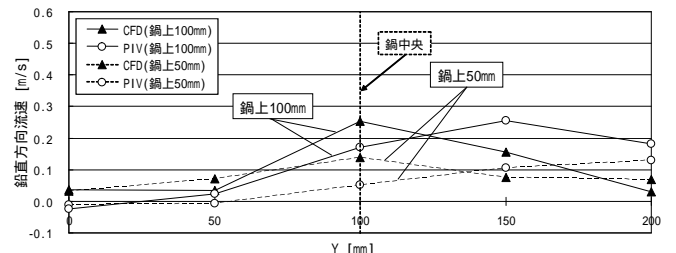


(a) 鉛直方向流速 (X断面)

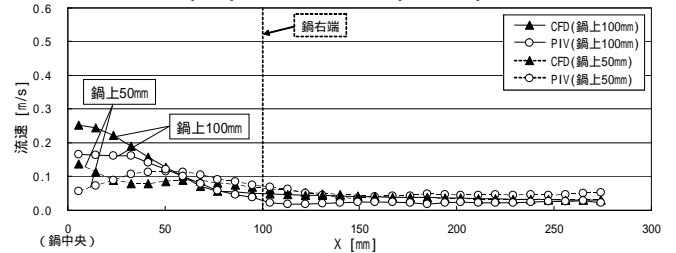


(b) スカラー流速 (Y断面)

(1) GAS レンジ



(a) 鉛直方向流速 (X断面)



(b) スカラー流速 (Y断面)

(2) IH レンジ

図 13 PIVとCFDの流速の比較

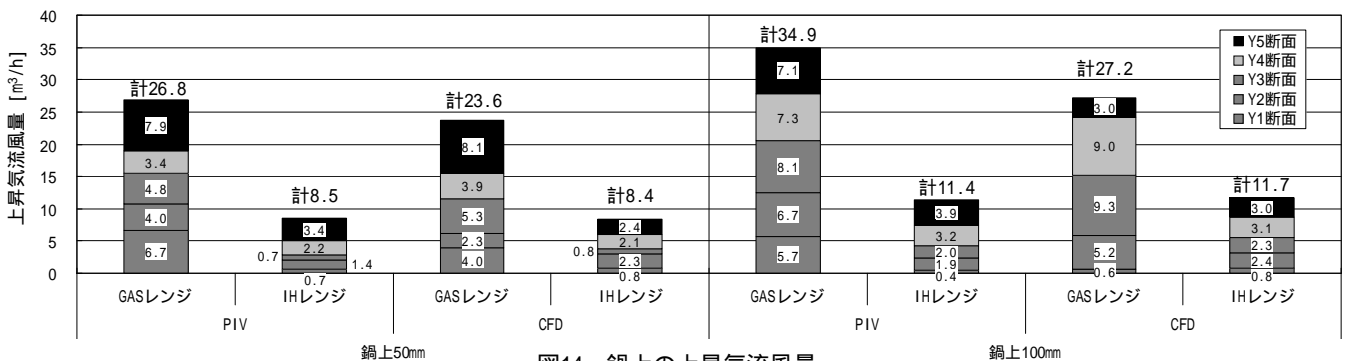


図 14 鍋上の上昇気流風量