

# 厨房空間における調理器周辺の温熱・空気環境の高精度評価手法

2007064019 門司 宜大

白石研究室

We proposed the new simulation models in the case of using IH cooking heater, considering ①vapor generation from the surface of boiling water, ②Compressive characteristics corresponding to high temperature difference and alteration of air composition, and ③introduction of the anisotropic turbulence model, as accurate simulation methods of thermal and air environment around the cooker. Then we compared with experimental results and verified the prediction accuracy of methods. In the case of gas cooker, we also proposed ④simulation model of high temperature gas radiation and also verified the validity. Accurate results were obtained by using these models.

厨房、IH 調理器、ガス調理器、温熱・空気環境、圧縮性解析、非等方乱流モデル、高温ガス放射

## 1.はじめに

厨房に関する近年の研究では、機械換気方式や捕集率に関する研究が主であるが、調理者の視点を考慮すると、調理器周辺の温熱環境の不均一性評価に関する研究も重要である。また、CFD 解析を用いた研究も精力的に行われているが、鍋直上での熱上昇流が実際よりも非拡散的になる等、予測精度において問題があり、高精度且つ汎用性のある解析手法が求められている。本研究では、IH 調理器に関しては、①湯面からの水蒸気発生 の考慮、②高温度差や空気組成の変化を考慮した圧縮性流体解析、③非等方乱流モデルの導入による調理器周辺の温熱・空気環境の高精度解析手法を提案し、実験結果との比較・検証を行う。また、ガス調理器に関しては、④高温ガス放射解析による高精度解析手法の有効性に関する検証もあわせて行う。

## 2.対象実験室

北九州市立大学国際環境工学部S棟の厨房実験室を用いた。図1に実験室の平面図・断面図及び温熱環境実験の測定点を示す。実験室は、東西方向に細長い建物の中央に位置し、北側に窓面を有し、南側が中廊下に接している。調理機器、レンジフードは北側コーナーに設置している。

## 3.実験概要

### 3.1 湯沸し実験

鍋に2Lの水を入れ、湯沸しを行う。IH 調理器は定格容量 2.5kW、ガスコンロは 2.45kW の口を使用し (図2)、ガスコンロは燃料別に都市ガス用と LP ガス用の2機種の実験を行う。なお、実験では定格容量で加熱を行うとし、レンジフードの換気量は 335 m<sup>3</sup>/h とする。

### 3.2 調理器直上の環境測定

#### 1) 風速測定

沸騰 30 分後から、図3に示す鍋上高さ 150mm の測定面①とさらに 500mm 上の測定面②の計 50 点での風速を測定する。風速は鉛直上向き方向の 1 分間の平均風速を測定する。

表1. 測定項目及び測定機器

測定項目		測定機器	型番 (メーカー)
調理器直上	風速	定温型熱式風速計	MODEL6162 (日本カノマックス)
	温度	熱電対	T型熱電対
温湿度センサ		HygroLogNT 3-D (神栄)	
厨房空間	上下温度	小型無線温湿度計	ThermoRecorder (T&D)
	放射	4成分放射收支計	CNR1 (Kipp&Zonen)
	熱画像	サーモカメラ	CPA2200 (チノー)
発生水分量	質量	電子天秤	GX-6000(A&D)
	消費電力量	電力量計	クランプオンパワーハイテスタ 3168(HIOKI)
	ガス消費量	ガス流量計	DC-5A(シナガワ)

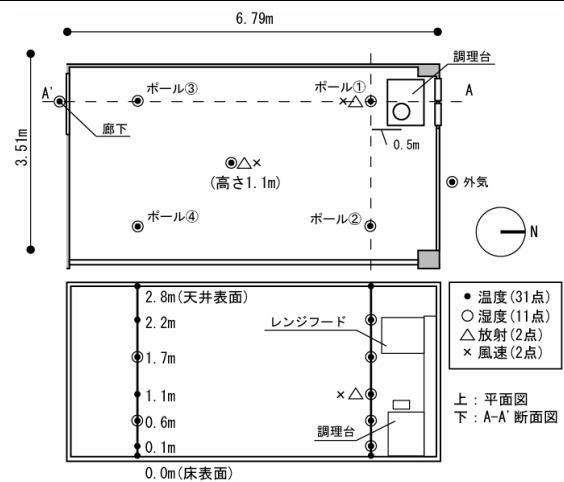


図1. 対象実験室概要

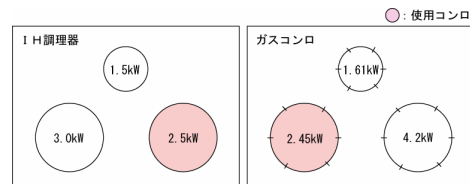


図2. 定格容量・使用口

## 2) 温度測定

風速と同様、図3に示す50点で熱電対を用いて温度を測定する。

### 3.3 周辺環境の測定

図1に示す室内4箇所のパールの上下温度(床面温度、0.1m、0.6m、1.1m、1.7m、2.2m、天井面温度)、外気温度、換気口の流入温度を測定する。パール①は調理者が立つ位置を想定しており、加えて、高さ1.1mで放射量、風速を測定し、熱画像撮影を行う。他のパールでは全ての高さでの温度を測定する。また、室中心では高さ1.1mでの温度測定に加え、放射量、風速も測定する。測定した放射量を用いて調理者位置と室中心位置のMRT(平均放射温度)を算出<sup>文1)</sup>する。

### 3.4 発生水分量の測定

加熱開始前、沸騰開始直後、沸騰10分後の水の質量を測定し、要した時間で除すことにより、沸騰前、沸騰中の単位時間あたりの発生水分量を算出する。また、IHは消費電力量、ガスコンロはガス消費量も測定し、投入熱量の算出に用いる。測定は、各2回行いその平均値を算出する。

## 4. 実験結果

### 4.1 調理器直上の環境測定

#### 1) 風速測定

鍋上高さ150mmにおいて、IH調理器では拡散的な分布となり、ガスコンロでは中心付近に集中する傾向が見られた。また、鍋上高さ650mmにおいても同様の傾向がみられ、IHは最大で0.57m/s、都市ガスは0.82m/s、LPガスは0.87m/sとガスコンロの方が大きな値となった。これは、ガスコンロの方が、発生熱量が大きいためだと考えられる。

#### 2) 温度測定

高さ150mmにおいて、ガスコンロの方が全体的に高い値となった。また、高さ650mmにおいても同様であった。これらは発生熱量の差によるものであると考えられる。

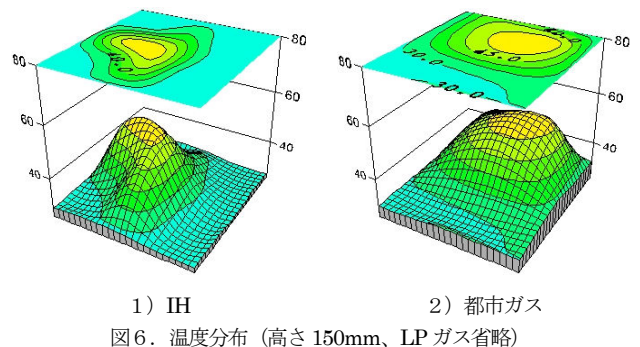
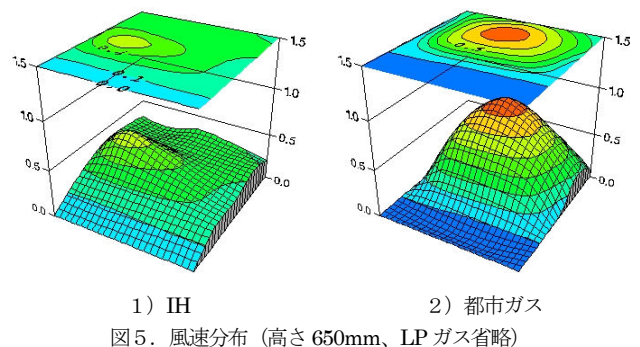
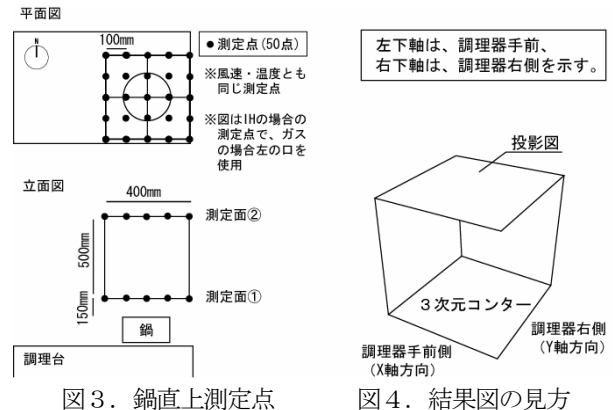
### 4.2 周辺環境測定

#### 1) 室内上下温度分布

図7より、調理器に最も近いパール①では、床面、高さ0.1m、0.6mにおいてほぼ同じ温度となったが、高さ1.1m、1.7m、2.2m、2.8mにおいては、IHよりもガスコンロの方が0.4℃~0.6℃高くなる結果となった。一方で、都市ガスとLPガスでの差はほとんど見られなかった。パール②でも同様の結果となった。パール③・パール④では、わずかにガスコンロの方が高い温度を示したが、調理器の違いによる差はほとんど無いものと考えられる。

#### 2) MRT(平均放射温度)

調理器付近のMRTは、IHが26.24℃、都市ガスが28.47℃、LPガスが27.87℃であり、IH調理器と比べガスコンロの方が調理者に与える放射の影響が大きいと考えられる。一方、室中心でのMRTは、IHが25.32℃、都市ガスが25.54℃、LPガスが25.33℃とほとんど差が見られな



かった。室中心では、調理器の影響がほとんど無いと考えられる。

#### 3) 熱画像

調理器付近の熱画像を図8に示す(LPガスは省略)。加熱箇所は3ケースとも高温となっているが、レンジフード下面では、IH調理器の場合に比べ、ガスコンロの方が高温となっている。調理器からの熱上昇流がレンジフードまで到達し、その一部が漏れている様子が確認できる。

### 4.3 発生水分量

沸騰前では、3ケースとも発生水分量がほぼ同程度で、0.123~0.144g/sであったが、沸騰開始後の発生水分量は、IHが0.983g/s、都市ガスが0.602g/s、LPガスが0.562g/sと、IH調理器が最も発生水分量が多いという結果になった。これは、IH調理器の熱効率がガスコンロと比べて高いためと考えられる。

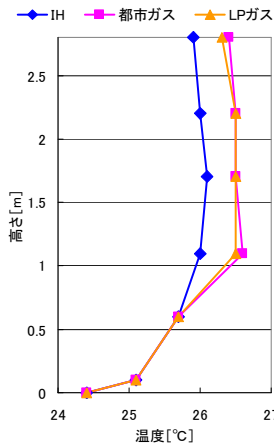
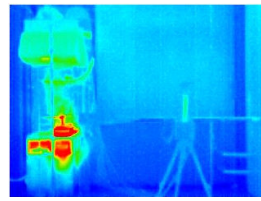
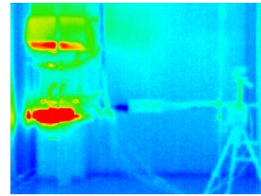


図7. 鉛直上下温度分布



1) IH 調理器



2) 都市ガスコンロ  
図8. 熱画像

## 5. 解析概要

実験と同様、湯沸しを想定した定常解析とし、従来の解析に加え、前述の①鍋上面での水蒸気発生の考慮、②温度や湿度変化に伴った圧縮性の考慮（圧縮性乱流モデルも含む）、③非等方乱流モデルを導入した計4ケースを対象として比較検討を行う。解析ケースの詳細を表2にそれぞれ示す。その他の解析概要として、本研究ではCFD解析による対流熱伝達量の評価に加え、固体内の熱伝導、放射熱伝達及び水蒸気質量分率の輸送を連成して解析を行っている。

**5.1 case1** 一般的に多用される解析ケースとして、鍋に発熱量を与える。今回はIH調理器を対象としているため、鍋の底部にのみ発熱量を与える。使用する乱流モデルは、標準  $k-\epsilon$  モデルとし、密度変化を考慮しない非圧縮性解析を行う。

**5.2 case2** 鍋上部の水面からの水蒸気発生(高温水蒸気が吹き出している状態)を再現したケースであるが、本ケースは非圧縮性の解析であるため、水蒸気ではなく100°Cの空気が鍋上部から吹き出していると仮定して解析を行う。吹き出し流量に関しては、実験にて求めた発生水分量 [kg/s] から算出した単位時間あたりの水蒸気発生量 [m<sup>3</sup>/s] を鍋上面に与える。また、乱流モデルは標準  $k-\epsilon$  モデルとする。

**5.3 case3** 高温場、高湿度場での密度変化を考慮したケースとして、低マッハ数近似<sup>2)</sup>を施した基礎方程式系を用いた圧縮性解析を行う。事前に行ったケーススタディにより、温度差による密度変化の効果は殆ど無かったため、主に空気の組成変化による密度変化の効果を検討する。また、case2と同様、鍋上面からの水蒸気発生を考慮しているが、本ケースは圧縮性解析のため他ケースとは異なり、100°Cの水蒸気が鍋上面から吹き出している(水蒸気の質量分率 1.0[-], 温度 100°C)ものとして解析を行う。乱流モデルは圧縮性の標準  $k-\epsilon$  モデルを用いる。

**5.4 case4** 乱れの非等方性を考慮したケースとして、乱流モデルに非線形低 Re 数型  $k-\epsilon$  モデル<sup>3), 注1)</sup>を用いる。

表2. 解析ケース

ケース	case1	case2	case3	case4	case5 (ガス放射)
解析領域	3.51m×6.79m×2.8m(高さ)				
メッシュ数	420,280			652,561	
非圧縮	○	○		○	
圧縮			○		○
水蒸気発生	なし	あり (1.76×10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /s)			
乱流モデル	標準 $k-\epsilon$			低 Re	標準 $k-\epsilon$
壁面条件	速度 一般化対数則 (※case4は解析的壁関数)				
	温度 鍋表面の対流熱伝達率 $\alpha_c=100\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ (※case4は熱伝導条件) その他壁面の対流熱伝達率 $\alpha_c=4.6\text{W/m}^2\cdot\text{K}$				
流入条件	$Q_{in}=0.093\text{m}^3/\text{s}$ , $T_m=25.5^\circ\text{C}$ , $k_m=1.1\times 10^{-4}\text{m}^2/\text{s}^2$ , $\epsilon_{in}=2.5\times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}^3$ , (※case3は基準圧力 101,325 [Pa] を設定)				
流出条件	$Q_{out}=0.093\text{m}^3/\text{s}$ , (※case3は基準圧力 101,325 [Pa] を設定)				
発熱条件	鍋: 437W <sup>*1</sup>				鍋: 1498W <sup>*2</sup>
	照明: 180W (30W×6ヶ所)				

\*1: 鍋底からの発熱、水蒸気の顕熱、湯面からの放射熱量の合計

\*2: 火炎の熱量、水蒸気顕熱、湯面からの放射熱量の合計

表3. WSGG モデル定数

n	$b_{1,n}$	$b_{2,n}$	$k_n$
1	0.255	0.000260	0
2	0.500	-0.000157	1.83
3	0.245	-0.000103	32.3

case2と同様に鍋上面の水蒸気発生を考慮した非圧縮性の解析とする。本来、低 Re 数型  $k-\epsilon$  モデルを用いた場合、壁面近傍のメッシュ解像度上げる必要があり、計算時間の増大が懸念されるが、本研究では、Craft、須賀らが提案する解析的壁関数(AWF)<sup>4-6), 注2)</sup>を用いて、壁面近傍のメッシュ数を削減しつつ、予測精度の向上を試みている。

### 5.5 case5 (高温ガス放射解析)

ガス調理器に関する従来のCFD解析では、鍋に発熱量を与え、Gebhartの吸収係数等を用いた、固体表面間の放射解析が主であったが、本研究では、高温ガス体の吸収や放射も考慮したガス放射モデルによる解析を行う。高温ガス体での放射による熱移動の式を式5.5.1に示す。

$$\frac{dI_m}{ds} = -\kappa I_m - \sigma I_m + \frac{\sigma}{4\pi} \int_0^{4\pi} I_m' d\omega' + \kappa \frac{1}{\pi} \sigma_{SB} T^4 \quad (5.5.1)$$

( $I_m$ : m方向の輻射強度、 $s$ : 微小距離、 $\kappa$ : 吸収係数、 $\sigma$ : 散乱係数、 $\omega'$ : m'方向の微小立体角、 $\sigma_{SB}$ : ステファン・ボルツマン定数=5.67×10<sup>8</sup>[J/(m<sup>2</sup>・s・K<sup>4</sup>)])

また、式5.5.1に含まれる吸収係数は、簡便な方法として波長依存性を考慮してガスの吸収係数を決める WSGGモデル(Weighted Sum of Gray Gases Model)<sup>7)</sup>を使用する。吸収係数の算出式を式5.5.2に示す。

$$\kappa_i = \sum_{n=1}^m a_n(T_i) k_n (p_{CO_2} + p_{H_2O}) \quad (5.5.2)$$

( $p_{CO_2}$ : CO<sub>2</sub>の分圧[Pa]、 $p_{H_2O}$ : H<sub>2</sub>Oの分圧[Pa])

ただし、 $a_n(T_i) = b_{1,n} + b_{2,n} T_i$ で、 $b_{1,n}$ 、 $b_{2,n}$ は表3の通りである。

## 6.解析結果

### 6.1 IH 調理器

・**case1** 鍋上高さ 150mm から勾配の急な風速分布となり、両端で実験値と差が見られた。高さ 400mm、650mm では更に勾配が急となり、実験値と大きく異なる結果となった。湯面からの水蒸気発生を考慮しない場合、鍋に与える発熱量が大きくなるため風速のピーク値が大きくなり、勾配が急になると考えられる。また温度分布も同様であった。

・**case2** 水蒸気発生の影響で両端での鉛直上向き風速が、case1 と比べて大きく実験値に近い値となり、拡散的になったが、実験値と比較してやや平坦な分布となった。しかし、水蒸気発生を考慮することで、case1 と比較すると予測精度の向上が確認できた。

・**case3** 風速の勾配が緩やかとなり、比較的实验値と合う結果が得られた (図 9)。空気の組成 (case2、case4 では高温空気、case3 では水蒸気) の違いによる密度変化の効果により、わずかに差が生じたと考えられる。また、追加ケースにより検討を行ったところ、空気の組成変化による圧縮性の効果はわずかであった。温度分布は case2 と類似した結果となった。

・**case4** case2、case3 と同様、拡散的であるが、高さ 150mm においては、X 方向・Y 方向とも両端の風速値が小さくなる傾向が見られ、高さ 650mm においては、case2、3 よりも拡散的であった。温度分布は case2、3 とほぼ同じであった。また補足ケースとの比較により、非等方乱流モデルは水蒸気発生を考慮せずとも、拡散的な熱上昇流を再現できるが、精度の向上はあまり見られなかった。

・**予測精度の検証** case2、case3 (図 11)、case4 の風速の RMSE (二乗平均平方根誤差) の値は、0.101m/s、0.104m/s、0.148m/s となり、case1 の 0.191m/s と比較して小さく、精度の向上が見られた。また、温度の RMSE 値も case2、case3、case4 それぞれ、3.89°C、3.81°C、3.89°C となり、case1 の 5.14°C と比較して精度の向上が見られた。以上より、特に鍋上面の水蒸気発生を考慮することによって精度の向上が見られる結果が得られた。また、圧縮性解析による予測精度への影響は小さいものと思われる。

### 6.2 ガス調理器

・**case5** 従来の解析手法と比較して、拡散的な熱上昇流となり、水蒸気発生の効果が見られた (図 10)。風速の RMSE の値は、従来の解析手法では 0.160m/s、case5 では 0.118m/s と予測精度の向上が見られた。また、温度の RMSE の値は、従来の解析手法では 9.53°C、case5 では 7.89°C と風速と同様精度の向上が見られた。また、従来の解析手法では調理器周辺の壁面温度が広範囲に渡り高温となったが、case5 では一部の壁面のみ温度上昇が確認された。ガス放射を考慮することにより、従来の過剰な壁面の温度上昇を抑えることが出来ていると考えられ、高温ガス放射解析は有用であると考えられる。

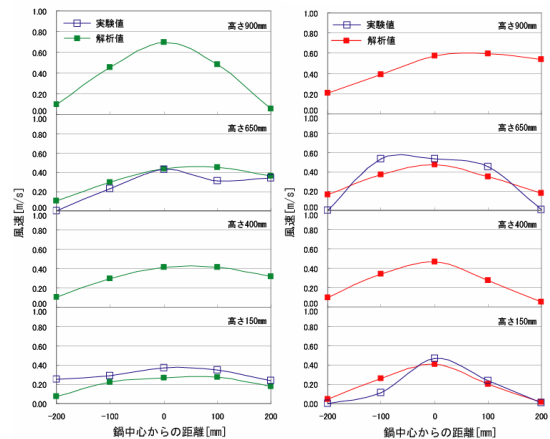


図 9. Y 方向風速(case3)

図 10. X 方向風速(case5)

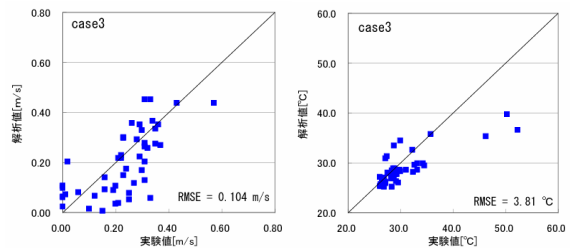


図 11. case3 の実験値と解析値の相関 (左: 風速、右: 温度)

## 7.まとめ

- 1) IH 調理器とガス調理器では発生熱量が異なるため、厨房内の温熱環境が大きく異なる。
- 2) IH 調理器使用時、湯面からの水蒸気発生を考慮すると、熱上昇流を拡散的に再現することができ、水蒸気発生を考慮しない場合と比較して、鉛直上向き風速、温度共に、より実験値に近い値を得られる。
- 3) 水蒸気発生と併せて空気の圧縮性を考慮することにより最も精度の良い結果を得た。ただし、空気の組成変化による圧縮性の効果はわずかであった。
- 4) 非等方乱流モデルを使用する場合、水蒸気発生を行わなくても拡散的な熱上昇流を再現できるが、精度の向上はあまり見られない。
- 5) 鍋直上の流れ場・温度場予測の高精度化に最も効果的であったものは①湯面からの水蒸気発生であった。
- 6) ガス調理器に関して、従来の解析手法による結果と比べると精度の良い結果が得られた。

### 【注釈】

- 1) 本研究では、(株)ソフトウェアクレイドル社製の STREAM ver 7 を使用しており、非等方乱流モデルとして既に組み込まれている非線形低レイノルズ数型  $k-\epsilon$  モデル<sup>3)</sup> を採用した。
  - 2) 壁面隣接セルで運動方程式を解析的に積分した壁関数モデルであり、これを用いることにより十分な解析精度を維持しつつ、壁面近傍のメッシュ数を削減することが可能である
- 【参考文献】
- 1) B.W. Olsen, et al.: Method for Measuring and Evaluating the Thermal Radiation in a Room, ASHRAE Transaction, Vol.95(1), pp.1028-1044, 1989
  - 2) 白石ら, 低マッハ数近似式との比較による Boussinesq 近似式の予測精度の検討, 圧縮性高浮力流の数値解析に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第 577 号, pp.13-18, 2004
  - 3) 安倍, 近藤, 長野, 応力モデルの特徴を反映した低レイノルズ数型  $k-\epsilon$  モデル, 日本機械学会論文集 B 編, 61 巻 585 号, pp.1714-1721, 1995
  - 4) T.J. Craft et al., Progress in the generalization of wall-function treatments, Int. J. Heat Fluid Flow, Vol.23, pp.148-160, 2002
  - 5) 須賀ら, 汎用的な解析的壁関数モデル (第 1 報 滑面～粗面乱流に対応した流れ場のモデル), 日本機械学会論文集 B 編, 71 巻, 711 号, pp.2725-2733, 2005
  - 6) 須賀ら, 汎用的な解析的壁関数モデル (第 2 報 滑面～粗面乱流に対応した強制対流温度場のモデル), 日本機械学会論文集 B 編, 71 巻, 711 号, pp.2734-2740, 2005
  - 7) Toshiaki Omori et al.: Computational Heat Transfer Analysis of a Furnace Using the WSGG Model, ASME, Vol.366-1, pp.103-108, 2000