

平成 22 年 3 月 31 日現在

研究種目：若手研究(B)  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19760406  
 研究課題名（和文） 低マッハ数近似式を応用した多成分系空気流動の簡易予測モデルの提案  
 研究課題名（英文） Proposal of Simple Evaluation Model of Multiple Material Air Flow based on Low Mach Number Approximation  
 研究代表者  
 白石 靖幸 (SHIRAIISHI YASUYUKI)  
 北九州市立大学・国際環境工学部・准教授  
 研究者番号：50302633

研究成果の概要（和文）：IH 調理器を用いた湯沸かし実験を対象として、多成分系の圧縮性 CFD 解析を実施し、通常非圧縮性 CFD 解析と比較して、流れ場・温度場共に大幅に予測精度が向上することを確認した。CFD 解析のケーススタディでは、①湯面での水蒸気発生、②温度及び湿度の変化に伴った密度変化を考慮した解析を行い、この結果より、特に鍋直上の流れ場の評価では、①のモデル化の影響が大きく、逆に、鍋直上の温度場の評価では②の影響が大きいことが分かった。

研究成果の概要（英文）：Compressive CFD analysis of multiple material system was carried out for the kettle experiment using IH cooking heater, and the prediction accuracy was sharply improved for the flow and temperature fields as compared with the usual incompressible CFD analysis. In the case study of CFD analysis, the analysis in consideration of (1) steam generating in water surface and (2) air density change by the change of temperature and humidity was performed, especially, about the evaluation of flow field of pan right above, the influence of modeling of (1) was large, and the influence of (2) was larger in evaluation of temperature field of pan right above conversely.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,000,000	0	1,000,000
2008 年度	900,000	270,000	1,170,000
2009 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,600,000	480,000	3,080,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築環境・設備

キーワード：(1)低マッハ数近似式, (2)多成分系, (3)CFD 解析, (4)簡易予測, (5)圧縮性

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 研究・実務レベルでの非圧縮性の方程式系 + 標準  $k-\epsilon$  モデルを用いた CFD

(Computational Fluid Dynamics) 解析の適用限界として、水蒸気や化学物質が混入した状態（多成分系）での流れ場、温度場等の評

価があげられる。

(2) 建築・都市空間で生じる低マッハな流れ場に対しては、多成分系の厳密な圧縮性の方程式を適用する必要があるが、解析精度等の問題から簡易的に圧縮性を考慮する低マッハ数近似式の導入も重要な検討課題である。更に実務面への応用も考慮し、汎用性の高いCFD商用コードの活用も重要となる。

## 2. 研究の目的

(1) 本研究では、建築・都市空間の多成分系混合空気の流れ場、温度場及び拡散場を高精度に予測するため、低マッハ近似に基づく簡易圧縮性乱流数値解析手法に多成分系の空気流動モデルを組み込んだ新しい予測手法の開発を目的とする。

(2) 同手法の概要としては、①空間全体で定圧場(運動方程式では、流速変化に伴った微小な圧力変化も考慮)を仮定する低マッハ数近似式の採用、②温度差と濃度差(質量分率差)に基づく浮力の考慮、③空気組成の変化にも対応した Smooke らによる簡略化輸送係数モデルの採用(物性値の最適化)、④温度変化のみならず濃度変化(質量分率変化)に対応した収縮・膨張の考慮、⑤高精度乱流モデルの適用、⑥汎用性の高い商用コードの活用である。

## 3. 研究の方法

- (1) 多成分系混合空気の熱対流に関するデータの収集
- (2) 空気組成変化に基づく浮力、膨張・収縮効果の低マッハ数近似式への考慮(圧縮性方程式の採用)
- (3) 水蒸気拡散・輸送の室内実験(厨房空間を対象とした実験)の実施
- (4) 低マッハ数近似式を応用した多成分系空気流動の予測モデルによる解析の実施(圧縮性の方程式による解析の実施)
- (5) 解析結果と実験結果との比較・検証(解析の予測精度の検証とケーススタディの実施)
- (6) 空気組成変化に基づく物質輸送・拡散性状変化に関する物理メカニズムの解明(ケーススタディに基づく感度解析)

## 4. 研究成果

(1) IH調理器を用いた湯沸かし実験における鍋直上の風速・温度データベースの作成

多成分系の圧縮性CFD解析結果と比較検証するため、北九州市立大学厨房実験室(図1)にて定常状態を対象とした鍋湯沸し実験を行い、鍋直上の風速及び温度分布を測定した。実験ケースとしてIH調理器を用いて、発熱量及び鍋の形状を変えて計3ケースの実験を行った(表1)。なお、ガス調理器を用いた追加実験は、スケジュールの都合上、研究期間

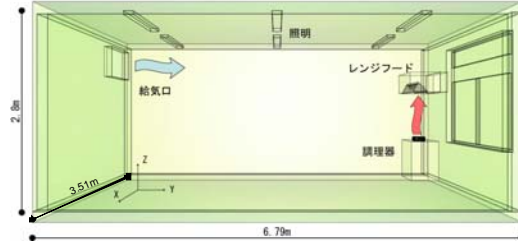
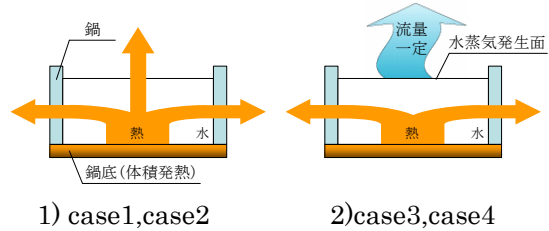


図1 北九州市立大学厨房実験室の概要

表1 実験ケース

ケース	火力	鍋サイズ	換気量
実験A	2.5kW	φ23cm 高さ8cm	335m <sup>3</sup> /h
実験B	3.0kW		
実験C	2.5kW	φ20cm 高さ10cm	



1) case1, case2      2) case3, case4

図2 鍋のモデル化の概要

表2 解析ケースの概要

ケース	case1	case2	case3	case4
非圧縮	○		○	
圧縮		○		○
鍋上面の水蒸気発生	—	—	有り 1.67×10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> /s 100℃ (ただし、空気)	有り 1.67×10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> /s 100℃ 質量分率1.0[-]
乱流モデル	標準k-ε	標準k-ε (圧縮性)	標準k-ε	標準k-ε (圧縮性)
解析領域	3.51m×6.79m×2.8m(高さ)			
メッシュ数	実験ケースA: 581400=76×90×85 実験ケースB: 589050=77×90×85 実験ケースC: 594320=76×92×85			
移流項	一次精度風上			
壁面条件	速度	一般化対数則		
	温度	鍋表面の対流熱伝達率 α <sub>c</sub> = 100W/m <sup>2</sup> · K <sup>2/3</sup> その他壁面の対流熱伝達率 α <sub>c</sub> = 4.6W/m <sup>2</sup> · K		
流入条件	Q <sub>in</sub> = 0.093m <sup>3</sup> /s (換気量335m <sup>3</sup> /h相当)、T <sub>in</sub> = 25.5℃ k <sub>in</sub> = 1.1×10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> 、ε <sub>in</sub> = 2.5×10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> /s <sup>3</sup> 、圧縮性解析の場合は基準圧力101,325[Pa]、混合空気の質量分率[-](乾燥空気:0.9945, 水蒸気:0.0055)を設定			
流出条件	圧力0[Pa]、その他全てFree slip 圧縮性解析の場合は基準圧力101,325[Pa]を設定			
発熱条件	鍋底 <sup>注2)</sup>	実験ケースA: 424.6W 実験ケースB: 468.9W 実験ケースC: 413.6W		
	照明	180W(30W×6カ所)		

中に実施しておらず、次年度以降の研究課題として位置づけている。測定データに関しては、エクセルシートに取りまとめ、全てグラフ化することによってデータベースとして整備している。実験結果の詳細に関しては、(2)の解析結果との比較において併せて示す。(2)解析結果と実験結果の比較

①解析概要 3.51m×6.79m×2.8m の前述の

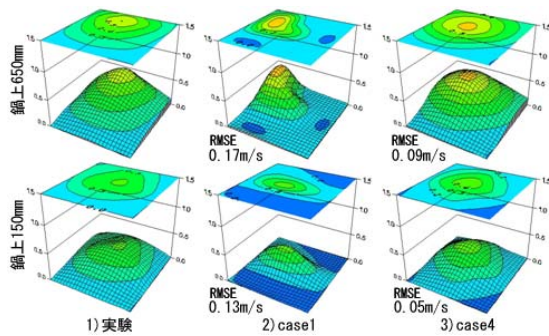


図 3 実験条件 A での鍋直上水平面風速分布

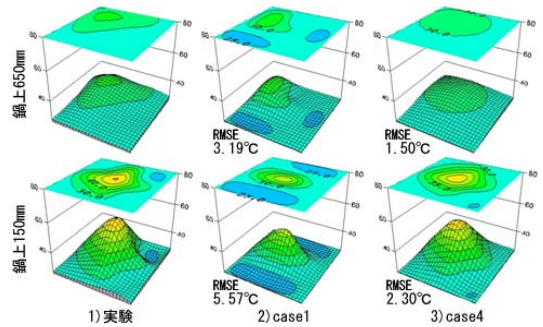


図 4 実験条件 A での鍋直上水平面温度分布

表 3 二乗平均平方根誤差(RMSE)

		case1	case2	case3	case4
風速 [m/s]	実験 A	0.15	0.13	<b>0.06*</b>	0.07
	実験 B	0.16	0.16	<b>0.08*</b>	<b>0.08*</b>
	実験 C	0.14	0.13	<b>0.06*</b>	<b>0.06*</b>
温度 [°C]	実験 A	4.54	4.42	2.97	<b>1.94*</b>
	実験 B	4.48	4.52	4.28	<b>3.49*</b>
	実験 C	3.82	4.07	2.60	<b>2.22*</b>

(測定点全体：50点，\*はケース内の最小値を示す)

同厨房空間(図1)を対象とする。解析は実験と同様、湯沸しを想定した定常解析とし、1)湯面での水蒸気発生、2)圧縮性(温度及び湿度の変化に伴った密度変化)の考慮の2つを組み合わせた計4ケースを対象とした。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、固体表面間の放射熱伝達を連成して解析を行っている。また、圧縮性解析の場合は乾燥空気と水蒸気の質量分率の輸送方程式も連成して解析を行っている。ただし、予備解析により、“圧縮性の方程式系”と“低マッハ数近似式を施した方程式系”を用いた解析では、計算時間、予測精度共に殆ど差が見られなかったため、基本的に全ての解析において圧縮性の方程式系を用いて解析を行っている。各ケースの詳細を以下に示す(図2,表2参照)。

**case1** 一般的な解析ケースとして、鍋底に発熱量を与えたモデルである(図2(1))。乱流モデルは高Re数型のk-εモデルとし、密度変化を考慮しない非圧縮性解析(浮力項は

Boussinesq近似)を行う。

**case2** 鍋上面での水蒸気発生を再現せず圧縮性を考慮した基礎方程式を用いた解析を行う。乱流モデルは圧縮性を考慮した高Re数型のk-εモデルである。その他はcase1と同条件である。ここでの圧縮性とは、温度変化に伴った密度変化を意味する。

**case3** case1に鍋上面での水蒸気発生を考慮したモデルである。非圧縮性解析のため、水蒸気ではなく100°Cの空気が水面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[g/s]から算出した単位時間当たりの水蒸気発生量[m<sup>3</sup>/s]を鍋上面に与える。

**case4** case3に加えて圧縮性を考慮した基礎方程式を用いたケースである。本ケースは圧縮性解析のためcase3と異なり、100°Cの水蒸気(水蒸気の質量分率1.0[-],温度100°C)が吹き出しているものとして解析を行う。なお、ここでの圧縮性とは、温度と湿度(空気の組成)の変化に伴った密度変化を意味する。

②比較結果 一例として実験Aの測定結果及び解析結果(case1, case4)を図3(水平面風速分布)及び図4(水平面温度分布)に、また鉛直面風速ベクトルを図5、鉛直面温度分布を図6にそれぞれ示す。各ケースの二乗平均平方根誤差(RMSE)を表3に示す。

#### 鍋直上の鉛直上向き風速分布

実験A, B, Cの全てにおいてcase1は速度勾配が急な分布となり非拡散的となった。case2はcase1よりも全体的にピーク風速が低い値となり、速度勾配も緩やかになる傾向にあった。水蒸気発生を考慮したcase3, case4は他の2ケースに比べて拡散的な分布になり、その傾向はcase3の方が強く、鉛直上向きの風速値が小さくなった。また、風速の最大値は鍋の中心上よりもY軸方向にずれる傾向が見られ、実験と同様な結果が得られた。今回の実験条件ではcase3とcase4が実験A, B, Cの全てにおいて実験値に最も近い値を示した(RMSE=0.06~0.08m/s)。

#### 鍋直上の水平面温度分布

温度分布も風速分布と同様な結果となり、水蒸気発生を考慮したcase3, case4は他の2ケースよりも拡散的な温度分布となった。case3はcase4よりも拡散的でピーク温度も低い傾向が見られた。RMSEより実験A, B, Cの全てでcase4が最も精度が高いことがわかった。また、風速分布を考慮するとcase4が最も実験との対応が良好であった。特に、図6に示すように、非圧縮性の従来の解析(case1)と比較して、圧縮性を考慮した今回の解析(case4)では鍋直上の温度分布は大幅に改善されており(図5の風速分布も同様)、従来の非圧縮性の解析では困難であったレンジフードの捕集率の評価等への適用が期

待できる結果が得られた。

(3) 空気組成及び温度変化による物質輸送・拡散性状変化の物理メカニズムの解明

上述の(2)のケーススタディ結果より、鍋鍋直上の流れ場の評価に関しては、鍋上面からの水蒸気発生(質量分率 1.0、100℃の水蒸気が発生)のモデル化の影響が大きく、方程式系で圧縮性を考慮した影響は相対的に小さいことが分かった。逆に、鍋直上の温度場の評価に関しては圧縮性を考慮した影響が大きかった。よって、鍋直上の流れ場及び温度場を高精度に評価するためには、解析において1)湯面での水蒸気発生、2)圧縮性(温度及び湿度の変化に伴った密度変化)の双方を考慮する必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計7件)

- ① 吉村崇弘、白石靖幸、圧縮性解析による住宅厨房空間の温熱・空気環境評価に関する研究、(その1) IH 調理器使用時における鍋湯沸し実験を対象とした検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、2010年9月、富山大学 (発表予定)
- ② 吉村崇弘、白石靖幸、住宅厨房空間の温熱・空気環境評価に関する研究、(その4) IH 調理器による鍋湯沸し実験を対象としたCFD高精度解析手法の検討、日本建築学会九州支部研究報告、第49号 環境系、pp. 205-208、2010年3月、長崎総合科学大学
- ③ 門司宣大、白石靖幸、住宅厨房空間の温熱・空気環境評価に関する研究、(その1) 調理器直上及び厨房空間内の物理量測定、日本建築学会九州支部研究報告、第48号 環境系、pp. 217-220、2009年3月、琉球大学
- ④ 白石靖幸、門司宣大、住宅厨房空間の温熱・空気環境評価に関する研究、(その2) CFD解析によるIH調理器使用時の予測精度の検証、日本建築学会九州支部研究報告、第48号 環境系、pp. 221-224、2009年3月、琉球大学
- ⑤ 吉村崇弘、門司宣大、白石靖幸、中野淳太、住宅厨房空間の温熱・空気環境評価に関する研究、(その3) 実調理実験による調理者の局所・非定常温冷感評価、日本建築学会九州支部研究報告、第48号 環境系、pp. 225-228、2009年3月、琉球大学
- ⑥ 門司宣大、白石靖幸、相楽典泰、住宅用IH調理器とガスコンロの性能評価、熱効率及び台所内温熱環境の比較、日本建築

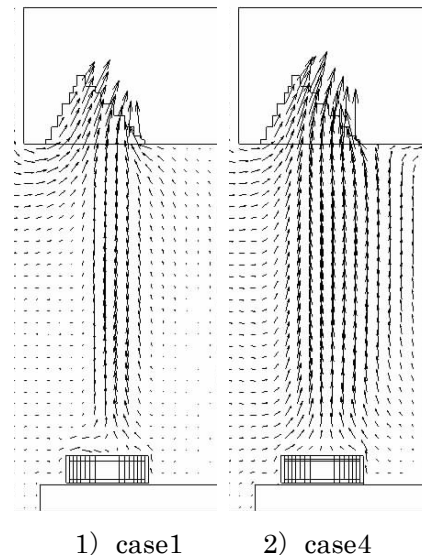


図5 鉛直面風速分布

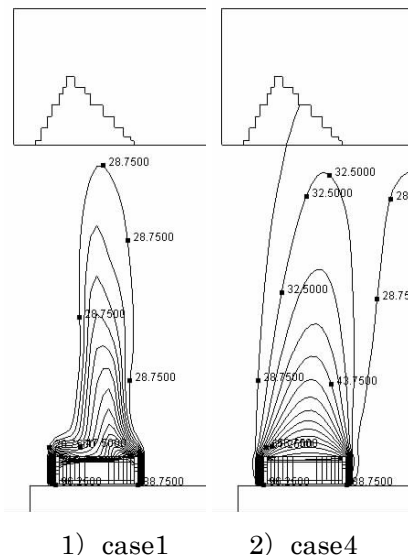


図6 鉛直面温度分布

学会九州支部研究報告集、第47号・2、環境系、pp. 437-440、2008年3月、崇城大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

白石 靖幸 (SHIRAISHI YASUYUKI)  
北九州市立大学・国際環境工学部・准教授  
研究者番号：50302633

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し