業務用レンジから発生する上昇気流の性状把握およびモデル化

MEASUREMENT AND MODELING OF PLUME ABOVE COMMERCIAL COOKING STOVES

百瀬敏成*, 山中俊夫**, 甲谷寿史***, 山本晃裕****

Toshinari MOMOSE, Toshio YAMANAKA, Hisashi KOTANI
and Akihiro YAMAMOTO

The purpose of this report is to make a plume model above commercial use cooking stove to simulate environment of commercial kitchen by CFD. We measured the temperature, air velocity, turbulence energy, concentration of tracer gas of plume above gas and induction heating commercial cooking stoves at 0.5m to 1.5m high. In results, it is made clear that the shape of distribution in each section can be expressed Gaussian profiles, but it is difficult to predict value of commercial use cooking stove from value of domestic one.

Keywords: Commercial Kitchen, Cooking Stove, Plume, Measurement, Modeling

業務用厨房, レンジ, 上昇気流, 測定, モデル化

1. はじめに

業務用厨房では、発熱量が大きい上に調理時間が長時間となるため、調理者にとって過酷な労働環境となる場合が多い。これを改善するため様々な研究が行われており、近年は計算流体力学(以下CFD)による検討が多数行われている¹⁾²⁾。

CFDによる厨房環境の研究では、発熱源部分の境界条件として発熱量を与える場合が多い。しかし厨房内の環境をより正確に再現するためには、実験値に基づく上昇気流モデルを作成し、境界条件の適切な設定方法の検証に用いることが有効と考えられる。

調理器具から発生する上昇気流の測定例としては、千原³⁾が家庭用のレンジを用いて発熱量0.85～2.5kW、加熱面からの高さ0.8mまでの測定とモデル化を行い、Chenら⁴⁾のまとめた浮力噴流の乱流ブルーム域の式と比較して、最大値および特性長の高さ方向変化が適合しないことを示している。また鎌田⁵⁾、千葉ら⁶⁾はガスレンジ4.9kW、電気レンジ(シーズヒーターおよびハロゲンヒーター)について高さ0.8mまでの風速分布を測定している。

業務用レンジについては寺沢ら⁷⁾、坂口ら⁸⁾が、レンジ上方から給気口付のフード下面付近までの風速・温度分布を測定しており発熱量7kWにおいて、風速分布を加熱面から高さ0.25～0.85mの範囲で測定している。また近藤ら⁹⁾は、並行して行ったCFDによる結果を実測値と比較して熱上昇気流の幅が小さく高温になる事を示し、高温空気の膨張や水蒸気発生を考慮していないモデルによる計算では上昇気流の混合、拡散を過小評価している可能性が

あることを報告している。

これら既往の測定例では、器具の発熱量は業務用レンジとしてはやや小さい7kWが最大であり、また通常の局所フード下で測定しているため、測定領域もレンジ上面から高さ0.8mまでに限定されている。また乱流統計量については測定例がない。

CFDによるレンジ上方の上昇気流の再現精度を把握するには、できるだけ間隔を広げた複数断面について上昇気流を測定し、CFDの境界条件として低い位置の測定値を用い、より高い位置でのCFDによる結果を測定結果と比較検討することが望ましい。

そこで本研究では、一般的に業務用厨房で広く用いられている発熱量の業務用ガスレンジ(以下ガス)と電磁調理器(以下電磁)について、レンジからの高さ0.5m、1.0m、1.5mの3つの断面について、温度、風速、トレーサーガス濃度の分布を測定し、実験値に基づいたモデルを作成した。さらに高さ0.5mの断面については、CFDでの境界条件として用いるために風速と乱流統計量の関係についても測定した。高さ0.5mの測定結果を境界条件として利用し、高さ1.0、1.5mでの風速・温度の測定結果と比較することでCFDによる結果の検証を可能としている。

2. 実験方法

調理器具として、表1に示す業務用に通常用いられるガス及び電磁レンジを用いた。両者は発熱量は異なるが、表2のよ

* 大阪大学大学院工学研究科建築工学専攻
博士後期課程・修士(工学)

** 大阪大学大学院工学研究科建築工学専攻
助教授・博士(工学)

*** 大阪大学大学院工学研究科建築工学専攻
助手・博士(工学)

**** 大阪大学大学院工学研究科建築工学専攻 大学院生

Graduate Student, Dept. of Architectural Eng., Graduate School of Eng., Osaka University, M. Eng.

Assoc. Prof., Dept. of Architectural Eng., Graduate School of Eng., Osaka University, Dr. Eng.

Research Assoc., Dept. of Architectural Eng., Graduate School of Eng., Osaka University, Dr. Eng.

Graduate Student, Dept. of Architectural Eng., Graduate School of Eng., Osaka University

うにはほぼ同等の沸騰能力をもつ。実験は図1～3に示す実験室で行った。実験室天井部には上昇気流の滞留を防ぐための排気ファン・天井ファンを設置した。排気量はガスでは1350m³/h、電磁は給気の影響を受けやすいので、給気風速を可能な限り小さくするため200～300m³/hとした。給気は部屋の側壁面3方向全面から行ったが、メッシュで覆うことで外乱の影響を抑制し、測定毎に煙発生器(ロスコ社製 スモークマシン)を用いた可視化により加熱前および加熱中のレンジ周囲の風速が0.1m/s以下であることを確認した。発熱面から天井までの距離を確保するため、各レンジの発熱面高さは床上0.31mに設定した(図2参照)。実験は鍋で水を定常沸騰させ、温度、風速、燃焼廃ガス、調理汚染物を対象として行った。測定点は、図4に示すようにレンジ上面から距離0.5m, 1.0m, 1.5mの3段階の高さに、鍋を中心とする十字方向の各軸上に5cm間隔で設定した(表3)。なお、濃度については高さ1.5mでの測定を省略し、乱流統計量はCFDの境界条件として用いることを目的として、高さ0.5mでのみ測定を行った。

測定機器について表3に示す。温度は各高さ毎に同時に測定を行い、風速、乱流統計量、濃度については1点ずつ測定を行った。温度はアルミ箔の放射避けを付けたT型熱電対を鍋上方に十字状に設置して測定した。平均風速の測定には中高温用の定温度型熱式風速計(KANOMAX 製6162型 アネモマスター 0～200℃用)を用いた。風速計は図5のように上昇気流の下流側から接近させるようにした。また熱式風速計には指向性があるため、事前に煙発生器を用いた可視化により主流方向が上向きであることを確認し、図5のように上向き方向を中心に測定した。さらにガスでは超音波風速計でも主流方向を確認している^{注1)}。定温度型熱式風速計への温度の影響については、温度の影響を受けない測定法である相関利用法^{(10),(11)注2)}と比較して誤差が10%程度であることを確認した^{注3)}。一方、乱流統

図1 実験室上面図 単位 [mm]

図2 実験室断面図(A-A断面) 単位 [mm]

図3 実験室断面図(B-B断面) 単位 [mm]

計量を求めるための風速測定には、定温度式熱線風速計(I型プローブ)を用いた。I型プローブは指向性があるため、上昇気流の主流方向が上向きであることと乱流の等方性を仮定して上向きに図5のように配置した。熱線風速計では風速変動だけでなく温度変動の影響も受ける。温度補償に用いた直径0.12mmの熱電対では温度変動に対する応答性が十分とは言えず、温度変動を風速変動として評価する可能性があり、乱流エネルギーの平方根はガスでは最大風速の15%、電磁では7%程度の影響があることに注意を払う必要がある^{注4)}。

ガスの燃焼廃ガスの濃度分布については燃焼により発生するCO₂を測定し、調理汚染物については鍋内に下向きにトレーサーガスとしてSF₆を放出し、これを各測定点で連続サンプリングして測定した。

表1 レンジ仕様

熱源	ガス	電磁
定格出力 [KW]	14.5	5.0
器具形状 [m]	幅 0.45×奥行 0.60×高さ 0.80	
加熱容器 [m]	直径 0.37×高さ 0.19 SUS製	

表2 レンジの沸騰能力比較

熱源	ガス	電磁
15分間沸騰量 [kg]	1.71	1.49

表3 実験装置と実験条件

計測対象	測定機器	レンジ上面から高さ [m]	鍋中心から測定範囲 [m]	間隔 [m]	測定回数	備考
温度	T型 熱電対	0.5, 1.0, 1.5	0.6	0.05	5秒毎 60回	同一高さはXY軸上全点を同時測定 各高さ2回
風速	定温度型熱式風速計 KANOMAX製 6162型 温度補償精度 0-200℃ FS15%	0.5, 1.0, 1.5	0.5	0.05	1Hz 60回	1点ずつ 順次測定 X,Y軸方向 各2回
風速 (乱流統計量)	定温度型熱線風速計(I型) KANOMAX製 0251R-PI5 (ガス) 0251T5 (電磁)	0.5	0.5	0.05	250Hz 20秒間	同上
SF ₆ 濃度	リアルタイムガスモニター1311型 Bruel&Kjaer製	0.5, 1.0	ガス: 0.5 電磁: 0.3	0.1	1秒毎 120回	1点ずつ 順次測定 X,Y軸方向 各1回
CO ₂ 濃度	赤外線式 堀場製 VIA-510	0.5, 1.0	ガス: 0.5	0.1	1秒毎 120回	同上

測定間隔は、鍋中心から0.4m以遠は0.1m間隔

表4 実験設備機器

設備機器	機器名称	備考
排気ファン	ナショナル FY55DTH	定格1500W 設定排気量 ガス1350m ³ /h 電磁2～300 m ³ /h
天井ファン	三菱電機 防爆型	定格 300W (天井上部空気排出用)
ガス流量調整器	低圧用圧力調整器	設定圧力 19.6 Pa (200 mmAq)
SF ₆ 流量調整器	マスフロー流量調整器	設定流量 2.6 L/min
SF ₆ ガス発生器	鍋内環状ガス放出器	直径0.225m、下向きに直径0.01mの穴を10個 等間隔配置

図4 測定点 単位 [m]

(a) 風速 (b) 乱流統計量 図5 風速測定方法

3. 実験結果

3.1 温度分布

上昇気流の温度分布の測定結果を図6に示す。ガス、電磁ともにレンジ上面からの距離が大きくなると温度が低くなる。特に電磁では、高さ1.5mでは周囲との温度差が最大で4℃と非常に小さい。各条件での温度分布はばらつきが少なく正規分布に近い分布を示しているが、測定回によって温度が最高値になる位置が水平方向にずれる結果も見られた。特にガスで0.5mの場合のみX、Y軸の結果に若干の差がみられるのは、燃焼廃ガスがごとく形状や鍋の取っ手の影響を受けているためと考えられる。

図6 上昇気流の温度分布

図7 上昇気流の風速分布 (中高温用定温度型熱式風速計による)

3.2 風速分布

中高温用の定温度型熱式風速計を用いて測定した上昇気流の風速分布の測定結果を図7に示す。温度同様、ガスの方が電磁に比べて大きく、最高風速はガスは電磁の約2倍である。また、レンジからの高さによる最大風速の変化は、ガスは高さ0.5mから1.0mになると風速は急に大きくなり、1.5mでもほぼ同じ風速であるが、電磁は高さ0.5mから1.5mまで最大風速の変化は少なくほぼ一定に近い。中心軸から遠い位置での風速はレンジからの距離が遠いほど大きくなっている。温度の測定結果と比べると、測定値のばらつきが大きい。

表5 乱流統計量の計算方法

乱流エネルギー*: k [m^2/s^2]	$k = \frac{1}{2} \left(\frac{3}{2} \overline{u'^2} \right)$	$\overline{u'^2}$: 風速測定値の分散 [m^2/s^2]
時間スケール: T [s]	$T = \int_0^\infty \rho(\tau) d\tau$	$\rho(\tau)$: 風速測定値の分散 [m^2/s^2]
渦の長さスケール: ℓ [m]	$\ell = \overline{u} \times T$	$\overline{u}$: 平均風速 [m/s]

* I型プローブを用いたので、2方向成分を測定していると考え、乱れの等方向性を仮定して3/2倍とした。

図8 風速分布 (高さ0.5m熱線風速計による)

図9 乱流エネルギー分布

図10 時間スケール分布

図11 渦の長さスケール分布

いが、これは実験ごとに給気のバランスが若干変化しているためと考えられ、原因としては実験室のケーブル貫通部や出入口等にわずかにある隙間が測定毎に若干異なること等が考えられる。同一条件で温度分布を30分間測定して上昇気流の中心軸の変動幅を確認した所、高さ1.0mで5分間平均値の変動幅は半径0.01m以下であったことから各測定毎の定常性には問題ないと判断した。

3.3 乱流統計量の分布

I型プローブによる熱線風速計を用いた風速の測定結果から、表5に示す計算方法にもとづいて上昇気流の乱流エネルギー k と時間スケール T を測定した。時間スケール T は渦が空間の1点を通り過ぎる時間を表しており、これを用いて渦の長さスケール l を求めることができる。

高さ0.5mでの風速の測定結果を図8に示す。前節の中高温用定温度型熱式風速計による測定結果と比較すると、最大風速はガス、電磁とも同程度であることがわかる。次に、乱流エネルギーと中心軸からの距離の関係を図9に示す。電磁は中心部で最大値をとるが、ガスは外側の鍋の端付近で最大となっている。これは2章で述べた温度変動による影響があるためと考えられる。またガスは

電磁に比べて値が小さい。時間スケールと中心軸からの距離との関係を図10に示す。顕著な傾向は見られないが、概ねガス、電磁ともに時間スケールは鍋中心付近で小さく、鍋の端付近で大きくなる傾向があることが分かる。

図11に長さスケールと中心軸からの距離との関係を示す。長さスケールは速度と時間スケールの両方を用いて算出されるため、流速の大きい中心部が大きい傾向はあるが、風速分布とは一致していないことがわかる。

時間スケールおよび渦の長さスケールの分布に顕著な傾向が見られないことから、CFDの境界条件として実験値の渦の長さスケールの分布をそのまま適用するには問題があることがわかる。

3.4 トレーサーガス濃度分布

トレーサーガス濃度分布の測定結果を図12に示す。CO₂濃度、SF₆濃度いずれにおいても、高さ1.0mの濃度の方が0.5mより濃度が小さい事が分かる。またガスに比べ電磁は約1.5倍の濃度となっている。これは上昇気流の流量がガスよりも電磁の方が小さいためと考えられる。

4. 上昇気流モデルの作成

4.1 モデル化の方法と結果

測定結果を基にして温度、風速、濃度分布のモデル化を試みた。x方向、y方向各断面での各測定結果について、図13のように距離の重み付け平均した値を用いて中心軸位置を補正し、さらに1列の測定結果の最高値と最低値を用いて測定値を無次元化した結果に正規分布曲線をあてはめ、予りが用いた最大値の半分となるまでの距離である特性長を式(1)に基

図12 上昇気流のトレーサー濃度分布

図13 モデル化の方法

図14 上昇気流のモデル化

づいて算出した。

$$\phi = \phi_m 2^{-\frac{x^2}{x_{0.5}^2}} \quad (1)$$

ϕ : 温度、風速、濃度のいずれか
 ϕ_m : 最大値
 x : 鍋中心からの距離 [m]
 $x_{0.5}$: 特性長 [m]

さらに温度については、同一水平面内の測定では同時性が確保されていることを利用し、Kofodら¹²⁾が点熱源のプルームの測定に用いた方法を参考に、中心軸のずれを求めた上で、2次元の正規分布曲面を用いて、測定した2軸上からずれた位置にある最大値を推定した。この推定方法は実際の最高温度より低く見積もる傾向があったが、本試験での測定誤差は周囲温度基準で10%以内と見積もられる^{注5)}。

モデル化により得られた各測定対象の各高さでの水平面分

図15 モデルと測定結果の比較

布を図14に示す。またモデル化の妥当性を確認するため、モデル化した値を基準にした測定結果の分布状況を図15に示す。測定結果とモデルを比較すると、温度、濃度ではよく一致している。風速の特に電磁ではややばつぎが大きい。次にモデル化した結果をみると、温度は、ガス、電磁共レンジからの高さが大きくなるにつれて最大値の分布が急激に小さくなっている。風速はレンジからの高さによりガスでは全体に大きくなるが、電磁は最大値は変化せず外側の風速だけが大きくなる。CO₂濃度、SF₆濃度はレンジからの高さにほぼ反比例して濃度が小さくなっている。

次に、特性長とレンジからの高さとの関係を図16に示す。温度の特性長はレンジからの高さが大きくなるほど大きくなり、風速ではガスの特性長はレンジからの高さにかかわらずほぼ一定である。一方、濃度については、SF₆はレンジからの高さが大きくなると特性長が大きくなるが、CO₂については高さ0.5mから1.0mになると、特性長が小さくなり、SF₆および温度、風速の特性長の値に近くなる結果となった。これは鍋の外側から上昇してきた燃焼廃ガスが、縮流に伴い中央に集まってくるためと考えられる。このためCFDの初期条件としてこれらのトレーサガスを扱う場

図16 レンジ上面からの高さと特性長の関係

合は、鍋内から発生する調理汚染物と燃焼廃ガスは発生箇所を分離した方がよい可能性がある。また図17はレンジからの高ささと最大値の関係を示している。これから、特にガスにおいてレンジからの高さが大きくなるにつれ温度の最大値が急速に小さくなる傾向が分かる。また風速の最大値はガス、電磁共、変化が小さいが、電磁の高さ1.5mの最大値は1.0mの場合より低くなっている。またSF₆濃度は、各高さで電磁がガスの1.5倍の値となっている。

各特性長と最大値から、断面通過流量と断面通過顕熱を求めた。最大風速からその1/eの風速の値までの通過流量は以下の式から求められる。

$$Q(z) = 3600 \cdot 2 \int_0^x \frac{1}{e} U(z, x) \pi x dx \quad (2)$$

$Q(z)$: 鍋上方高さ z [m] の水平面を通過する上昇気流の体積流量 [m³/h]
 U : 上昇気流の上向き風速 [m/s]
 $x_{1/e}$: 風速が同一水平面上の最大値の 1/e になる位置の x

この式と風速についての分布の式(1)から積分は以下のように求められる。

図17 レンジ上面からの高ささと最大値との関係

図18 上昇気流の断面通過流量

図19 上昇気流の断面通過顕熱

$$Q(z) = \frac{U_m(z) \pi x_{0.5u}(z)}{\log 2} \left(1 - \frac{1}{e}\right) \cdot 3600 \quad (3)$$

$U_m(z)$: 高さ z [m] の水平面上の風速の最大値 [m/s]

この式から求めた断面通過流量の計算結果を図18に示す。断面通過流量はレンジからの高さが大きくなると、電磁、ガスともに漸増する。

断面通過顕熱は数値的に積分して算出した。この結果を図19に示す。レンジからの高さに変化しても、断面通過熱量は電磁、ガスともにあまり大きく変化していない。また電磁の通過顕熱が発熱量に対し非常に小さい。これは発熱量の大半が潜熱となっているためと考えられる。

4.2 乱流エネルギーと風速の関係のモデル化

前章で測定した乱流エネルギーの平方根 $\sqrt{k}$ と平均風速 U の相関関係を図20に示す。これから電磁では鍋上方の上昇気流の平均風速 U と乱流エネルギー k の間に $U \propto \sqrt{k}$ の関係があることがわかる。ガスでは比例せず上に凸な曲線となっているが、これは2章で述べたように温度変動の影響による可能性があると考えられる。

5. 既往の測定結果との比較

既往の各種レンジにおける測定結果と今回の測定結果を比較した結果を図21に示す。

電磁は器具の発熱量が大きいのに関わらず、過去の家庭用電気レンジ（シーズヒーター）と比べ温度は低く風速は同等である。これは電磁がシーズヒーターよりも熱効率が大きいいため発熱量に占める潜熱量の割合が大きく顕熱量が小さいためと考えられる。ガスでは家庭用よりも温度、風速共に大きい。これは今回測定に用いた業務用レンジが家庭用レンジより発熱量が大きいためと考えられる。

次に浮力噴流における発熱量・発熱源直径と温度、風速との関係を用いて、既往の電気、ガスの測定結果を、今回のガスおよび電磁レンジの試験条件への換算を行った。

浮力噴流モデルについては式(4),(5)から、発熱量、発熱源直径と温度、風速の関係が求められる。

$$T_m(z) - T_a = B_r(T_a + 273) \frac{1}{gD} \left(\frac{W_o}{\rho_a D} \right)^{2/3} \left(\frac{Z'}{D} \right)^{-5/3} \quad (4)$$

$$U_m(z) = B_u \left(\frac{W_o}{\rho_a D} \right)^{1/3} \left(\frac{Z'}{D} \right)^{-1/3} \quad (5)$$

図20 風速と乱流エネルギーの関係

ただし

$$W_o = \frac{Hg}{c_p(T_a + 273)} \quad (6)$$

$T_m(z)$	: 高さ z での最大温度	[°C]
T_a	: 周囲温度	[°C]
D	: 上昇気流の発生源の直径(鍋径)	[m]
Z'	: 上昇気流の仮想点源までの距離	[m]
	$Z' = z + 2D$	
$U_m(z)$	: 高さ z での最大風速	[m/s]
ρ_a	: 周囲空気の密度	[kg/m ³]
H	: 器具発熱量	[W]
g	: 重力加速度 (=9.8)	[m/s ²]
C_p	: 上昇気流発生源における気体の 定圧質量比熱	[J/kgK]
Bt, Bu	: 定数

図 21 既往のレンジの上昇気流との比較 (測定値)

図 22 既往のレンジの上昇気流との比較 (換算値)

図 23 既往のレンジの上昇気流との特性長の比較 (測定値)

式(4)、(5)、(6)より、器具発熱量の異なる2つの器具の、発熱源からの高さが同じ位置での、上昇気流の速度と温度は以下のように換算することができる。

$$\frac{U_{ma}}{U_{mb}} = \left(\frac{H_a}{H_b} \right)^{1/3} \left(\frac{z + 2D_a}{z + 2D_b} \right)^{-1/3} \quad (7)$$

$$\frac{T_a - T_{ma}}{T_a - T_{mb}} = \left(\frac{H_a}{H_b} \right)^{2/3} \left(\frac{z + 2D_a}{z + 2D_b} \right)^{-5/3} \quad (8)$$

H_a, H_b	: 器具 a, b の発熱量	[W]
D_a, D_b	: 器具 a, b の鍋の直径	[m]
U_{ma}, U_{mb}	: 器具 a, b の上昇気流の最大風速	[m/s]
T_{ma}, T_{mb}	: 器具 a, b の上昇気流の最大温度	[°C]

これから、既往のレンジの測定結果を今回の業務用レンジの値に換算すると図22のようになる。ガスの場合、既往の結果からの換算値は本報の測定値よりも温度は小さく、風速では逆に大きいことがわかる。電磁の場合、既往のシーズヒーターの結果を用いた換算値は、特に風速では本報の電磁の測定値に比べて非常に大きい。これは電磁がシーズヒーターよりも熱効率がいため、発熱量当たりの顕熱発生量が小さいためと考えられる。

次に特性長について既往の測定結果と比較した結果を図21に示す。今回の業務用レンジの温度特性長はガス・電磁ともに、既往の家庭用ガスレンジ(2.5~5kW)の約2倍であるが、既往の業務用レンジ(7kW)の結果とはほぼ同等である。風速特性長についても、ガスでは既往の業務用レンジ(7kW)の結果とはほぼ同等である。また、ガスはいずれも上昇途中で縮流になる傾向があること、電気は本報告以外は上昇するにつれ急激に特性長が大きくなることがわかる。さらにガスは発熱量が大きいほど特性長が大きくなる傾向があるのに対し、電気はむしろ発熱量の小さい家庭用レンジの方が特性長が大きい傾向がある。

濃度については既往の研究ではガスが燃焼廃ガス、電気では鍋内に放出したトレーサガスを対象に測定しているので、ガスは本報のCO₂の測定値、電磁はSF₆の測定値と比較した。電気、ガスで特性長に大きな違いはないが、風速と同様にガスが発熱量が大きいほど特性長が大きいのに対して、電気はむしろ発熱量の小さい家庭用レンジの方が特性長が大きい傾向があることがわかる。

6. まとめ

本報では、業務用厨房についてCFD解析を行うための基礎データを得ることを目的として、業務用ガスレンジおよび電磁レンジについて、自由空間内で1口のみ使用した時の、上昇気流の温度、風速、乱流統計量、濃度分布を測定し、レンジ上高さ0.5mから1.5mまでのモデル化を行い、既往の測定例との比較を行った。

CFDによる解析を行うには初期条件として以下の情報が必要になる。

- 1) 器具寸法、形状、発熱量
- 2) 上昇気流の温度分布、風速分布、濃度分布のモデル化した値
- 3) 乱流エネルギーについての情報
- 4) 渦の長さスケールに関する情報

本報告ではこのうち、1)が既知であるガスおよび電磁レンジを

用いて、2),3)について測定とモデル化を行い、以下の点を明らかにした。

- ・温度、風速、濃度がそれぞれ正規分布で近似可能である。
- ・発熱量の異なる器具のデータを用いて近似することは難しい。
- ・風速と乱流エネルギーの平方根との関係は、電磁では比例しその比例係数は0.3程度であるが、ガスでは温度変動の影響が大きく比例係数の明確な値は不明である。

また4)の渦の長さスケールについては今回の測定では顕著な傾向がみられず、今後のCFDによる検討を行う際の課題である。これらの結果をもとにCFDによる業務用厨房の環境評価を行う予定である。

なお本研究は大阪ガス（株）からの委託研究の一部として行ったものである。

【謝辞】 本論文作成にあたり、県立新潟女子短期大学講師・坂口淳氏のご好意により文献⁹⁾の実験データのご提供を頂きました。ここに深く謝意を表します。

注

- 1) 上昇気流の垂直方向以外の成分について確認するため、事前にガスレンジについて、超音波風速計を用いて3次元風速を測定した。その結果、高さ1.0mにて水平方向の風速は上向き風速の1/10以下（風速0.15m/s以下）であった。電磁については結露するため測定不可能であったが、可視化による限りガスと同様に主流は上向きであると考えられる。
- 2) 相関利用法：主流方向に並べた1対の熱線風速計の出力信号の相互相関関数と、熱式風速計間の距離から風速を求める方法。本試験では熱線風速計は補図1のように設置している。
- 3) 熱式風速計はレンジ上方のように高温で温度変化が大きい可能性のある所では風速の測定誤差を確認する必要がある。今回、主流方向のはっきりしている上昇気流の中心付近について、温度の影響を受けない風速測定方法である相互相関関数利用法と中温度用アネモマスターと測定結果を比較した。風速値の相違はレンジ上方0.5m～1.0mの中央部および外側0.2mにおいてほぼ直線の相関があり、2つの測定結果の差は平均10%であった。
- 4) 温度変化の大きな場で、十分な応答性を確保して温度変動の影響を測定した既往の研究例としては、義江ら¹⁰⁾が、高温鉛直加熱壁近傍の自然対流について、直径0.012mmの熱電対を用いて実験した報告があげられる。義江らの報告によれば加熱面温度と周囲温度の温度差が43℃および404℃の場合、いずれも温度の分散の平方根は、加熱面温度と周囲温度の温度差に対し最大で15%前後である。仮に、今回の測定においても、温度の分散の平方根が上昇気流の最高温度と周囲温度との温度差の15%程度と仮定した場合、それらが乱流エネルギーの測定値に与える誤差はガスで最大0.17m/s、電磁で0.07m/s程度と見積もられる。
- 5) 4章・図13で行ったモデル化で、温度について2次元の正規分布を仮定し、測定した2軸上からずれた位置にある最大値を推定している。この推定値

補図2 定温度型熱式風速計と相関利用法の風速測定結果の比較（ガス・高さ1m）

と実際の最大値の誤差について検討するため、ガスレンジの上方高さ1.0mにおいて、XY軸での測定と同時に、別途トラバースで最高温度を探しながら測定した。その結果、上昇気流の中心位置がXY軸より0.05～0.1mずれている場合、本モデル化によって求められる最高温度は、実測で求めた最高温度より平均3～4℃低く見積もる傾向があることがわかった。これはこの高さでの周囲との温度差の6～7%に相当する。

本研究に関連する口頭発表

- 1) 山本晃裕, 山中俊夫, 甲谷寿史, 百瀬敏成: 業務用ガス・IHレンジからの上昇気流性状の把握, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, pp.107-110, 2002. 3
- 2) 山本晃裕, 山中俊夫, 甲谷寿史, 百瀬敏成: 業務用ガス・IHレンジからの熱上昇気流性状のモデル化, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第42号, pp365-368, 2002. 6
- 3) 山本晃裕, 山中俊夫, 甲谷寿史, 百瀬敏成: 業務用厨房における天井換気システムの設計法に関する研究, (その2) レンジの熱上昇気流モデルから作成した境界条件を入力とするCFD解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集D2, pp.819-820, 2002.8
- 4) 百瀬敏成, 山中俊夫, 甲谷寿史: 業務用ガス・IHレンジからの上昇気流性状の把握, (その2) 乱流統計量の測定に基づく上昇気流のCFD解析, 平成14年度 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 D-31, pp793-796, 2002.9

参考文献

- 1) 例えば、荻田俊輔, 近藤靖史, 赤林伸一: 業務用厨房の空調方法と厨房内温度に関するCFDによる検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 973-974, 1998. 9
- 2) 堀川晋他: 業務用厨房における換気天井システムに関する研究 その1 換気天井システムの概要と数値シミュレーション, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1057-1058, 2001. 9
- 3) 于穎, 植崎正也, 佐藤隆二, 山中俊夫: ガスレンジによる調理時の熱上昇気流のモデル化, 住宅厨房におけるレンジフードの捕集効率の予測法に関する研究1, 日本建築学会計画系論文集 第434号, 1992.4
- 4) Chen, C.J. and Rodi, W.: Vertical Turbulent Buoyant Jet-A Review of Experimental Data-, Pergamon Press, 1980
- 5) 鎌田元康: 住宅における局所換気装置に関する研究, 住宅総合研究財団, 1993
- 6) 千葉敏, 小峯裕巳, 倉瀬隆, 鎌田元康, 八乙女敏, 高草 智: 家庭用電化厨房の局所換気方式に関する研究 (その2), 同時給排気型レンジフードに関する実験的研究, 平成6年度 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 C-15, pp.193-196, 1994.10
- 7) 寺沢正浩, 赤林伸一, 近藤靖史, 坂口淳, 上村直純: 業務用厨房の高効率換気・空調システムに関する研究 その2 レンジ上の温度分布及び風速分布の測定結果, 日本建築学会学術講演梗概集D, pp.727-728, 1994.9
- 8) 坂口淳, 赤林伸一, 近藤靖史, 川瀬貴晴, 荻田俊輔: 実大実験による換気・空調効率の測定 業務用厨房の高効率換気・空調システムに関する研究 その1, 日本建築学会計画系論文集 第534号, pp.33-40, 2000.8
- 9) 近藤靖史, 赤林伸一, 川瀬貴晴, 緒方憲, 吉岡朝之: 業務用厨房の高効率換気・空調システムに関する研究 その4 対流・放射連成解析による気流・温度分布および換気効率の検討, 平成6年度 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 C-17, pp201-204, 1994.10
- 10) 寺井俊夫, 新田勝通: 燃焼面熱源より上昇する PLUME について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.189-190, 1976. 10
- 11) 寺井俊夫, 新田勝通: 燃焼面熱源より上昇する PLUME について (その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.257-258, 1978.9
- 12) Peter Kofoed, " THERMAL PLUMES IN VENTILATED ROOMS " , Ph.D.Thesis,Aalborg University, pp.57-59, 1991. 1
- 13) 義江龍一郎, 村上周三, 加藤信介: 高温鉛直加熱壁近傍の自然対流に関する実験, 密度変化を伴う高浮力流れの数値シミュレーションに関する研究 第2報, 日本建築学会計画系論文集, pp.61-68, 1994.7

(2002年9月10日原稿受理, 2003年2月28日採用決定)