

# 熱流体解析による局所排気装置の評価と応用に関する研究（第1報）

坂本智明・鈴木大介・八代浩二・福永大輔\*1・中田正仁\*1

## Research on Evaluation and Application of the Draft Chamber by Computational Fluid Dynamics (1st Report)

Chiaki SAKAMOTO, Daisuke SUZUKI, Koji YATSUSHIRO, Daisuke FUKUNAGA\*1 and Masahito NAKADA\*1

### 要 約

近年、製品設計段階での解析の需要が高まっており、当センターにおける技術相談件数も増加傾向にある。化学実験にて使用される局所排気装置の設計段階においては、予め熱流体解析による気流挙動の予測を行うことで、製品開発の一助となっている。しかし、熱流体解析では、常温状態と熱源配置状態で解析誤差が生じることから、本研究では熱流体解析結果と実測結果を比較することで、適切な解析条件による解析精度の向上を目指し、的確な業界支援を行うことを目的とした。熱源にはセラミックヒータを使用し、ヒーター上に実験用ビーカー（500ml）を設置した簡易風洞装置により実測を行った。また風洞装置の計算領域をモデル化し、常温状態および熱源配置状態における熱流体解析を行い、常温状態における熱流体解析結果と実測結果を比較することで、解析誤差の把握を行った。なお、乱流解析条件は RANS（レイノルズ平均モデル）、LES（空間平均モデル）の2種類による解析結果の違いを検証した。その結果、ビーカー付近の平均流速分布について、両乱流モデルにおける熱流体解析結果の実測値に対する誤差を把握した。さらに、LESによる解析結果から、熱源を500℃と設定した際にはビーカー背後50mmにおいて0.2m/sから1m/sの間で速度が変動し、25℃では5秒後に一定値に近づくことが予測された。

### 1. 緒 言

化学実験では、揮発性の有害物質等から実験者を保護する局所排気装置（ドラフトチャンバー）が利用されている。局所排気装置の設計段階では、風速計を使用した評価、トレーサーガスを使用した気流の可視化実験やコンピュータによる数値計算を利用した有害物質の封じ込め性能評価が行われている。

気流の可視化実験は、粒子画像流速計測法（PIV, Particle Image Velocimetry）という方法がある<sup>1)</sup>。この手法は、流れに微小トレーサ粒子を混入させ、シート状のレーザ光を照射し撮影されたトレーサ粒子画像に画像処理技術を加え、流れ場の瞬時の空間的な速度分布を求めるものである。流速計による評価では1点の速度計測しかできないが、PIVは2次元3次元計測が可能である。しかし、気流の撮影位置に制限があることや、試作実験にかかる時間と試作機のコストの問題から、短期間での設計評価を行うことが難しいといった問題がある。

このため、設計の低コスト化を目的とし、コンピュータを使用した熱流体解析（CFD, Computational Fluid

Dynamics）が多用されるようになった。しかし、熱流体解析結果と実測結果との間の解析精度、例えばヒーターやガスバーナー等の熱源を使用した場合の対流による複雑な気流挙動と可視化実験との間における相互関係について、十分な検討が行われていないことが問題となっている。

そこで本研究では、熱源を想定してセラミックヒータ上で水入りのビーカーを熱した際に生じる気流挙動の熱流体解析および PIV による気流可視化実験を行い、温度変化が無い場合と熱源による温度変化を考慮した場合の解析精度について検討し、熱流体解析から得られた解析結果を中心に、各熱条件による予測結果と常温における実測値の比較を行った。

### 2. 解析条件と実験方法

#### 2-1 計算領域モデル

図1に簡易風洞装置を示す。可視化の為に周りを透明なアクリルにより囲い、出口部分を軸流ファンにより排気を行う構造とした。風洞内においてセラミックヒータ上に実験用ビーカーを乗せた状態を想定し、セラミックヒータ面の幅と実験用ビーカーの大きさを考慮して断面

\*1 ヤマト科学株式会社

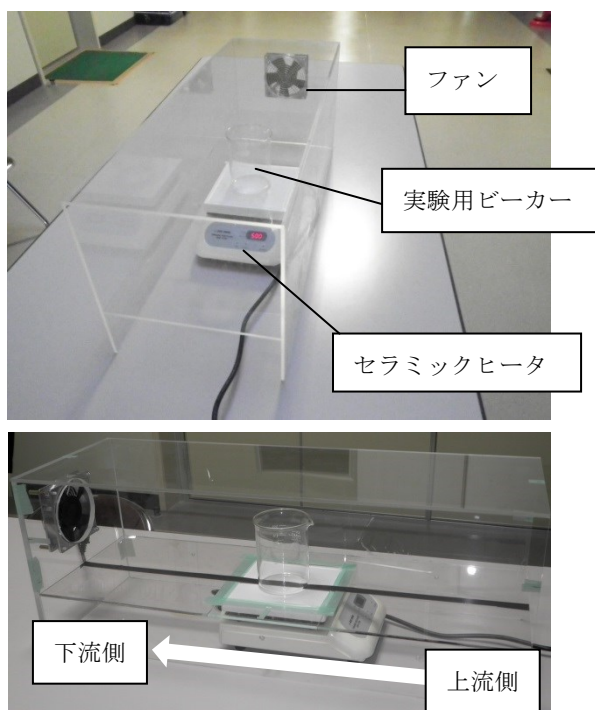
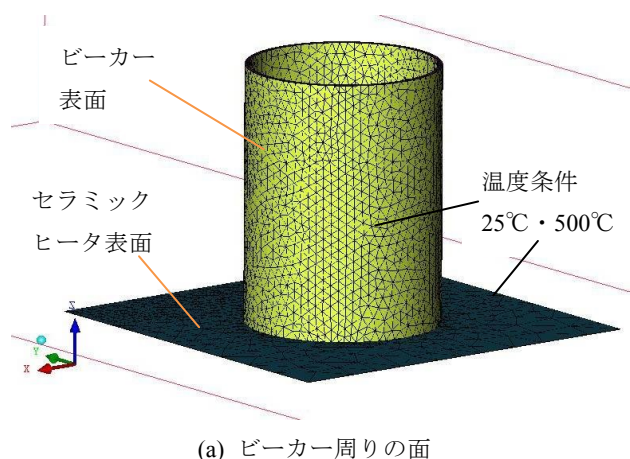
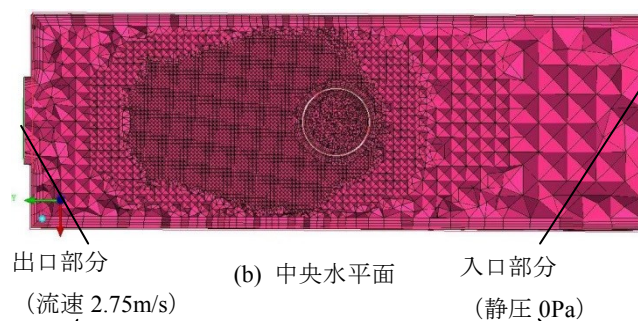


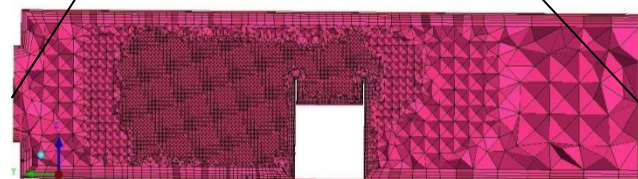
図1 簡易風洞装置



(a) ビーカー周りの面



(b) 中央水平面



(c) 中央垂直面

図2 計算領域モデルにおける要素分割図

を 200mm×280mm とした. また流れ方向の距離はドラフトチャンバー内の奥行きを確保し, 入口部は気流の乱れを低減させるために全長を 800mm に設定した. 化学実験で使用頻度の高い実験用ビーカー (500ml, φ 90mm×120mm) を使用し, 内部に水を入れた.

図2に解析空間における要素分割図を示す. 要素分割は四面体メッシュを適用し, 温度変化による影響が大きいビーカー周りには要素外形が小さくなるように設定した. 出口ファン部分はメッシュ数を低減するために省略した. 要素分割には市販の汎用ソフトウェア ANSYS ICEM CFD Tetra/Prism を使用し, 壁面部にレイヤー要素を生成することにより収束性および解析精度の向上を図った. 要素数は 110 万, 節点数は 21 万程度となった.

### 2-2 乱流解析手法と境界条件

解析ソルバーは ANSYS CFX を使用し, 定常解析および非定常解析を行い, 両解析手法による解析結果の評価比較を行った. 乱流解析手法<sup>2)</sup>として定常解析にレイノルズ平均モデル (RANS, Reynolds Averaged Navier-Stokes equation) を, 非定常解析には空間平均モデル (LES, Large Eddy Simulation) を使用した. レイノルズ平均モデルには乱流運動エネルギー  $k$  と散逸率  $\epsilon$  の輸送方程式を解く  $k-\epsilon$  モデルを使用した. 空間平均モデルは LES の Dynamic Smagorinsky モデルを適用した.

境界条件は, 入口部分を大気開放 (静圧 0Pa) として, 風洞内部を流速 0.5m/s に設定するため出口の流速を 2.75m/s (断面φ 120mm) とした. 温度条件は化学実験を想定して常温を 25°C と設定した. また, ビーカーの耐熱温度を考慮してヒーター加熱時の設定を 500°C とし, セラミックヒータ上部およびビーカー周りの壁面に設定した. 計算の簡略化のためビーカー内部の液面の蒸発による温度変化は考慮せず, 液面温度を一定温度で 100°C に設定した.

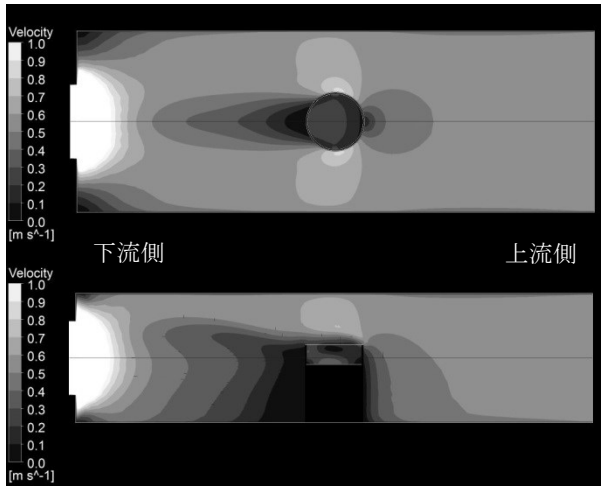
解析出力データは, 速度分布  $v$ ・温度分布  $t$  を確認した. また, 速度の時間変動を定常解析の RANS により評価する為, 乱流運動エネルギー  $k$  を使用した. 乱流運動エネルギーは(1)式で示される<sup>3)</sup>.

$$k=0.5 \times V_i^2 \quad \dots (1)$$

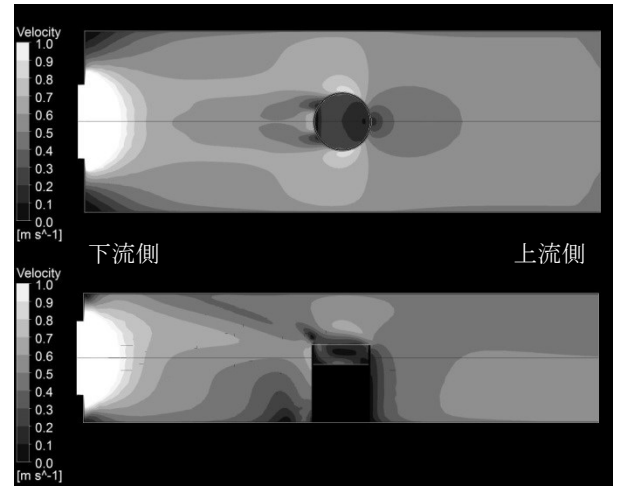
ここで  $V_i$  は平均流速からのずれ, 変動を定義している. 平均流速からのずれの大きさを特徴づける量として, 乱流運動エネルギーを評価した.

### 2-3 簡易風洞装置による速度分布の計測

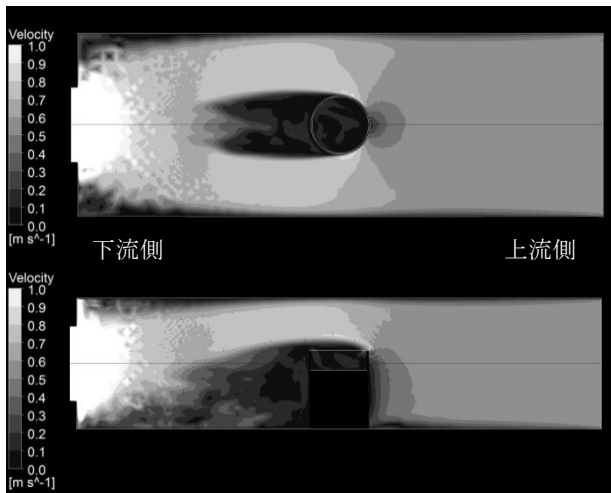
可視可実験は, 煙発生機, レーザーシート光, CCD カメラ, 画像解析装置 (カトウ光研(株)製) を使用し, PIV による可視可を行った. 速度の算出方法は, 2 時刻のトレーサ粒子画像からその画像上の移動量  $\Delta x$  を求め, これと時間感覚  $\Delta t$  から(2)式より求めた.



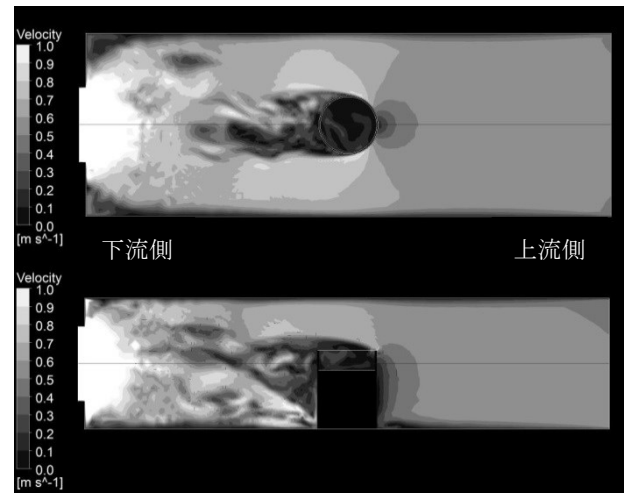
(a) RANS による解析結果(上図：水平面，下図：垂直面)



(a) RANS による解析結果(上図：水平面，下図：垂直面)



(b) LES による解析結果(上図：水平面，下図：垂直面)



(b) LES による解析結果(上図：水平面，下図：垂直面)

図3 速度分布(ヒーター温度 25°C)

図4 速度分布(ヒーター温度 500°C)

$$v = \alpha \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad \dots (2)$$

ここで  $\alpha$  は撮影系の倍率から決定される係数である。本報告ではセラミックヒータの電源は入れず、常温とした時の速度分布のみを解析結果と比較した。

### 3. 解析結果と実験結果

#### 3-1 25°C設定における解析結果

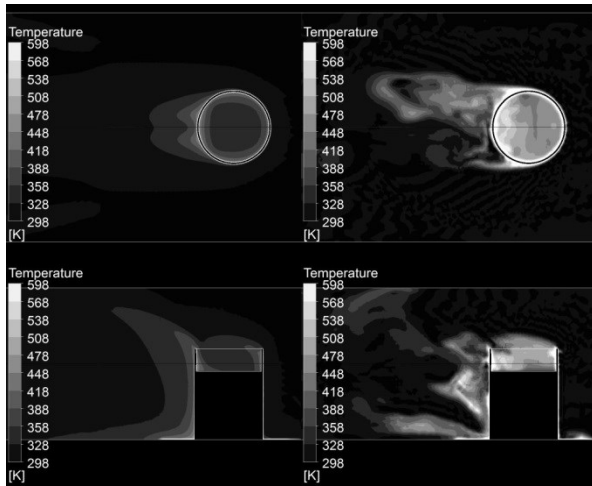
図3にヒーター温度を25°Cに設定した場合の速度分布を示す。(a)はRANS，(b)はLESによる解析結果であり、速度コンター表示範囲の最大値を1m/s，最小値を0m/sに設定した。LESによる解析結果は、5秒後における解析結果を示している。(a)(b)において上図は高さ100mmにおける水平面，下図はビーカー中心を通る垂直面を示している。RANSによる解析結果は、時間平均されている為、速度の分布は広い箇所において0.4m/s～0.6m/sであり、速度の変動を示す表示の変化が少なかつ

た。ビーカーの下流側においては0.4m/s以下が多少分布しており、流速が停滞していることが観察された。

一方LESによる解析結果の速度分布は、時間平均せず5秒後の瞬間的な流れを見ているため、速度の分布を示す表示が細かく変化していた。上流側において0.4m/s～0.6m/sであるが、ビーカーの下流側における流れは、0.4m/s以下の分布範囲がRANSによる解析結果に比べ広いことが確認された。

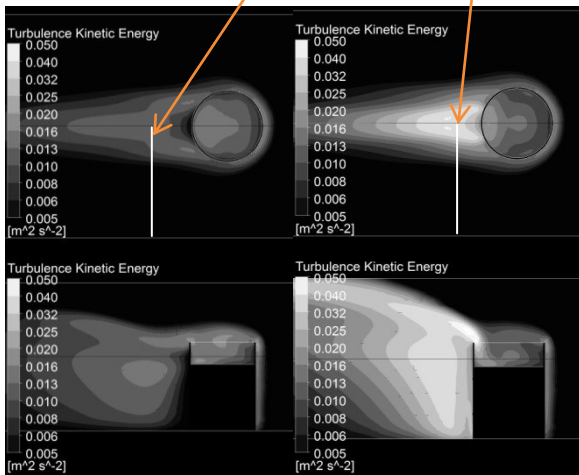
#### 3-2 500°C設定における解析結果

図4にヒーター温度を500°Cに設定した場合の速度分布を示す。(a)はRANS，(b)はLESによる解析結果であり、図3と同様に速度コンター表示範囲の最大値と最小値を設定した。図4のRANSとLESによる解析結果を比較すると、LESはRANSに比べ速度分布を表す色の変化が大きいたことが観察された。これは時間平均したRANSの解析結果とLESによる瞬間的な流れの解析結果の違いによるものと考えられる。また、図4(b)の速度



(a) RANS (b) LES  
図5 温度分布 (ヒーター温度 500°C)

ライン上のデータを図7にプロットした



(a) ヒーター温度 25°C (b) ヒーター温度 500°C  
図6 乱流運動エネルギー分布 (RANS による解析結果)

分布は図3(b)の分布と比較して、ピーカーの下流側における速度変動が大きいことが観察された。

図5にはピーカー周りの温度分布を示すが、図4の速度分布および図5の温度分布から、ヒーター温度 500°C における解析条件では、ピーカー周囲において熱による対流が生じ、速度の変動の発生が生じることが予測された。さらに、以上のことから LES の場合は時々刻々と変化する瞬間の流れを評価するため、時間平均化した RANS の解析結果との単純比較ではなく、乱流運動エネルギーを比較するべきであると考えられた。

### 3-3 乱流エネルギー解析結果の比較

図6にピーカー周りにおける、RANS による解析結果から得られた乱流運動エネルギーの分布を示す。図に示す様に、ピーカーの下流側において高い乱流運動エネルギーが分布しており、温度 25°C に比べて 500°C における乱流エネルギーが高いことが確認された。さらに図7に

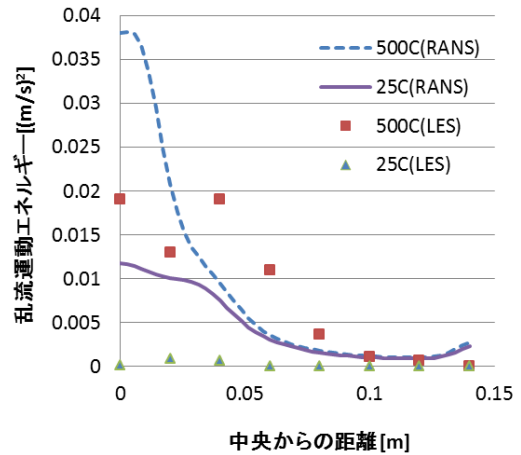


図7 乱流運動エネルギー分布 (ピーカー後方 50mm)

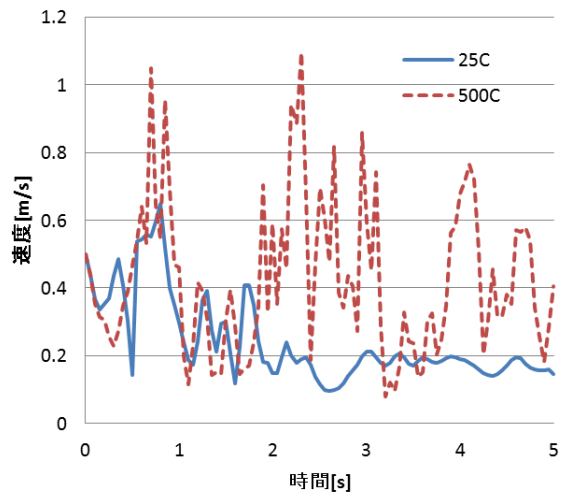


図8 LES による解析による速度の時間変化 (ピーカー後方 50mm 高さ 100mm)

は、図6の水平面における、解析結果図に示す場所の乱流運動エネルギーをプロットした。LES の解析結果は、3~5 秒間における乱流運動エネルギーの平均値を算出した。RANS および LES の解析結果は、共に速度の変動が大きいピーカーに近い中央部にて高いエネルギーを示したが、中央部では LES による解析結果と比べ RANS の解析結果の方が 2 倍程度大きく示された。また、LES による解析結果より得られた速度の時間変化を図8に示す。ピーカーの下流側 50mm 高さ 100mm における点を観測点とした。図のようにヒーター温度が 25°C の場合、3~5 秒後には一定値に近づくが、500°C の場合は速度が 0.2m/s から 1m/s の間で変動し続けていた。

### 3-4 PIV 観測結果と解析結果の比較

図9に煙発生機から発生させたトレーサ粒子にレーザーシート光を当てた際の気流の可視化状態を、図10



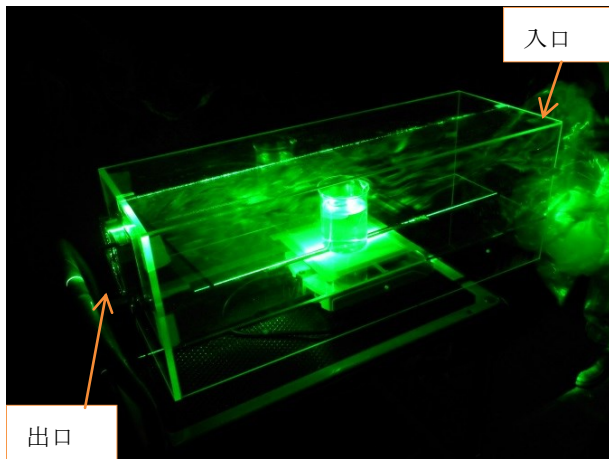


図9 気流の可視化の様子

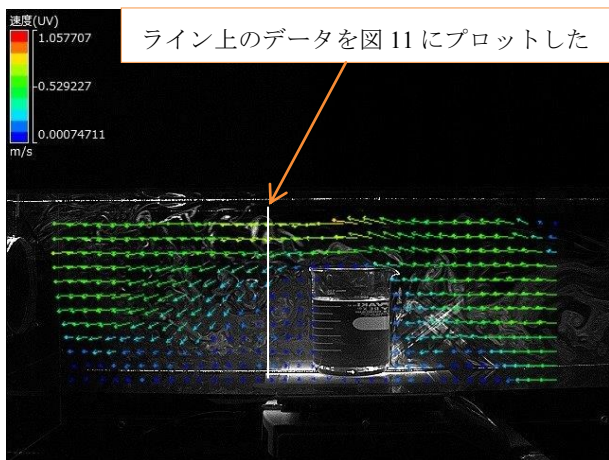


図10 速度ベクトル図 (温度 25°C)

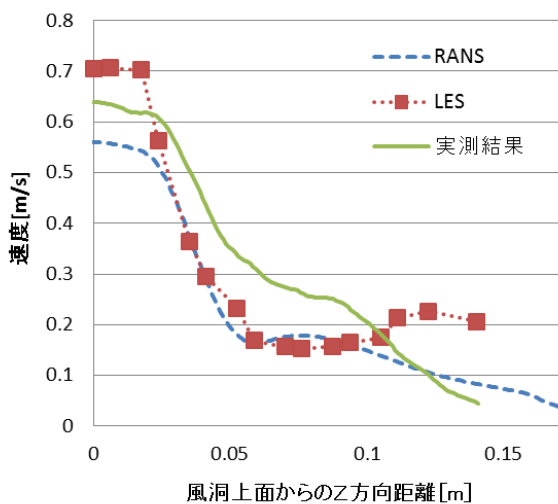


図11 解析結果と実測結果の比較 (温度 25°C)

表1 各解析条件における数値計算時間

ヒーター温度	25°C	500°C
RANS	3分	13分
LES	2時間42分	12時間23分

には CCD カメラから得られた可視化画像を画像処理した流速ベクトル図を示す。ベクトル図は垂直面における測定結果であり、平均流速を出力した。ピーカー付近以外は 0.4m/s~0.6m/s の流速が多く分布していることから解析結果に近い結果となった。ピーカー付近の流れの様子は、可視化実験と解析結果共に、乱流によって気流が出口方向以外にも流れている様子が確認された。図 11 はピーカー後方 50mm における平均流速分布を実験値と解析結果において比較したグラフを示したものである。縦軸に速度を、横軸には Z 方向の天面からの距離を示す。LES の流速は 0~5 秒間の時間平均値を出力した。この結果から、解析結果と実測結果との違いを見ると、RANS と LES とともに平均流速分布の傾向は近似しており、 $\pm 0.1\text{m/s}$  の誤差であることが判明した。また、熱源を配置せず、常温状態における平均流速の解析値と実験値はおおむね一致した。ただし、可視化されたトレーサ粒子の流れを見ると、流入時に発生した乱流がピーカー付近にも見られた為、今後は入口で気流の乱れが少なくなるように、整流部の取付けを検討する予定である。

熱流体解析に要した時間を表 1 に示す。解析時間は RANS による解析の方が LES による解析に比べ 10~100 倍程度短い。そのため RANS による解析では、解析時間が短く実際の設計時には多くの設計パラメータを変化させて評価が可能である。ただし、ある瞬間の局所的な流れの様子は、図 10 のように時間平均した流れの様子と異なる可能性があることから、流速分布のみではなく乱流運動エネルギーについても評価すべきである。

#### 4. 結言

局所排気装置内部での化学実験を想定して、熱流体解析および簡易風洞装置による気流可視化実験を行い次の結論を得た。

- (1) 熱流体解析結果と可視化実験による実測結果を比較し、広域的な視野の平均流速について、乱流モデル RANS および LES の誤差を把握することができた。
- (2) LES による解析結果から、ヒーター温度を 500°C と設定した際には、ピーカー背後 50mm における速度が 0.2m/s から 1m/s の間で変動し、25°C では 5 秒後に一定値に近づくことが予測された。

上記から、設計時に熱流体解析を使用する場合、RANS にて平均流速を評価することが有効である。ただし、熱源の影響を大きく受ける流れにおいては、LES による解析を行うべきであると示唆された。今後は熱源がある場合の実験結果との比較を行う予定である。

## 参考文献

- 1) 井口学 松井剛一 武居昌宏 熱流体工学の基礎  
朝倉書店 (2008)
- 2) 日本機械学会編 流体関連振動 第2版 (2008)
- 3) 三浦登 福田水穂 自動車設計と解析シミュレーション  
培風館 (1990)