

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2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 (2nd Report)

Chiaki SAKAMOTO, Daisuke SUZUKI, Koji YATSUSHIRO, Daisuke FUKUNAGA^{*1} and Masahito NAKADA^{*1}

要 約

近年、製品の高機能化を目的として熱流体解析を使用した設計検討が多くなされているが、熱流体解析に要する時間と解析精度についての検討は少ない。局所排気装置においては、熱源使用時の気流挙動の変化と、実測結果に対する熱流体解析結果の誤差要因・解析精度等が十分に分かっていない。そこで本研究では、熱源による気流挙動の熱流体解析および実測を行い、熱源を考慮した際の解析精度について検討した。局所排気装置内にビーカーを配置した状態で 500℃の熱源（セラミックヒータ）が配置された場合の熱流体解析を行った。乱流モデルはレイノルズ平均モデルに k-Epsilon を使用したものと、空間平均モデルの LES (Large Eddy Simulation) を使用したものを解析した。また、透明な風洞内にビーカーを配置し、熱式流速計にて測定を行った。解析結果と実測結果の違いを調査したところ、流速分布の傾向は LES の方が実測値に近い傾向となり、特に壁面付近では k-Epsilon の誤差が大きいことが分かった。また、局所排気装置外部を想定した解析では、k-Epsilon に比べて LES 解析結果の方が実測値に近い流速分布となった。今後、技術相談の際に乱流モデル k-Epsilon および LES における解析精度・時間の参考例として提示する。

1. 緒 言

気流等の流体が関係する製品の開発において、製品の高機能化やトラブル解決手段として熱流体解析 (CFD, Computational Fluid Dynamics) が近年多く用いられている。熱流体解析は、実際の乱流現象を直接計算させるには高解像度の要素分割が必要となり、解析時間が膨大になってしまうことから、ある数学モデルに落とし込み流体挙動を計算させる。その数学モデルを乱流モデルと呼ぶが、どの乱流モデルを選択するかによって、解析精度と計算時間等の解析コストが変化する。ここ最近では、レイノルズ平均モデル (RANS, Reynolds Averaged Navier-Stokes equation) と呼ばれる乱流モデルが熱流体解析時に多く採用されているが、RANS は時々刻々と変化する非定常流れを平均化して流速分布を求めることから、解析結果と実現象との誤差が生じる。また、ここ最近ではコンピュータの性能向上や、ソルバーの改良により計算精度の高い空間平均モデル (LES, Large Eddy Simulation) が用いられるケースも増えてきているが¹⁾、実現象との違いについて調べられている例は少ない。

そこで本研究では、化学実験などで使用される局所排

気装置を題材として、乱流モデルによる解析結果への影響を検証した。なお、層流領域の解析結果と実験結果の比較は先行研究²⁾にて行われた為、本研究では乱流領域のみを検証した。また、熱源による気流挙動の熱流体解析および実測を行い、解析結果と実測結果を比較することで乱流モデルによる計算精度の比較を行った。

2. 解析条件と実験方法

2-1 レイノルズの相似則

流体の流れには層流と乱流が存在し、レイノルズ数 (以下: Re) の値により乱流領域と層流領域が区別される。Re は流体の慣性力と粘性力の比で表され、次式で求められる。

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (\text{分子が慣性力・分母が粘性力})$$

ρ : 密度 [kg/m³] U: 流速 [m/sec]

L: 代表長さ [m] μ : 粘性係数 [Pa·sec]

円管内の場合、Re がおよそ 2000 から 4000 の時に層流領域から乱流領域に遷移する。また、レイノルズの相似則から、風洞実験において調べたい対象の Re と同じ Re であれば、2つの流れは本質的に等しく、実験の流

*1 ヤマト科学株式会社

体物性値，代表流速，代表長さを Re に合わせて変更して良いことを意味する。

2-2 局所排気装置内部の評価

図1に第1報³⁾にて製作した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板により囲い，出口部分を軸流ファンにより排気を行う構造とした。風洞は，局所排気装置内部で500℃設定の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た。化学実験で使用される実験用ビーカー（500ml， $\phi 90\text{mm} \times 100\text{mm}$ ）を配置した状態のレイノルズ数は，空気の密度 1.206 kg/m^3 ，流速 0.5m/sec ，代表長さ 100mm ，空気の粘性係数 $1.83 \times 10^{-5}\text{Pa} \cdot \text{sec}$ から算出すると3300である。解析モデル・解析条件の詳細は第1報にて報告したとおりである。

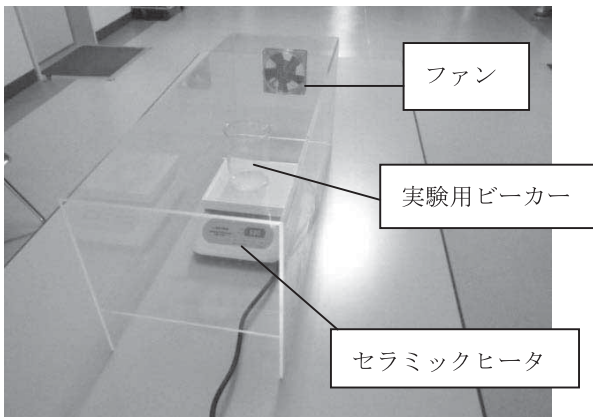


図1 簡易風洞装置

2-3 局所排気装置外部の評価

次に局所排気装置周りを 1m/s で幅 0.4m の人間が歩行した際を想定して，レイノルズ数 26400 となるような簡易風洞を製作した。構造は図1と同様に周りをアクリル板により囲い，出口部分を2つの軸流ファンにより排気させ，風洞内に幅 0.2m の板を配置した。レイノルズ数を等しくするために風洞内の流速を2倍の 2m/s とした。図2に解析空間寸法図と解析に使用した要素分割図を示す。要素分割は四面体要素と壁面にプリズム要素を適用し，要素サイズは全体を 20mm として速度変化の大きい板周囲を 5mm とした。出口ファンの部分はメッシュ数を低減するために省略した。要素分割には汎用ソフトウェア ANSYS ICEM CFD Tetra/Prism を使用し，要素数は18万，節点数は5万5千程度となった。

解析ソルバーは ANSYS CFX を使用し，非定常流体解析を行い，乱流解析手法による解析結果の比較を行った。乱流解析手法としてレイノルズ平均モデル（RANS, Reynolds Averaged Navier-Stokes equation）および空間平均モデル（LES, Large Eddy Simulation）を使用した。

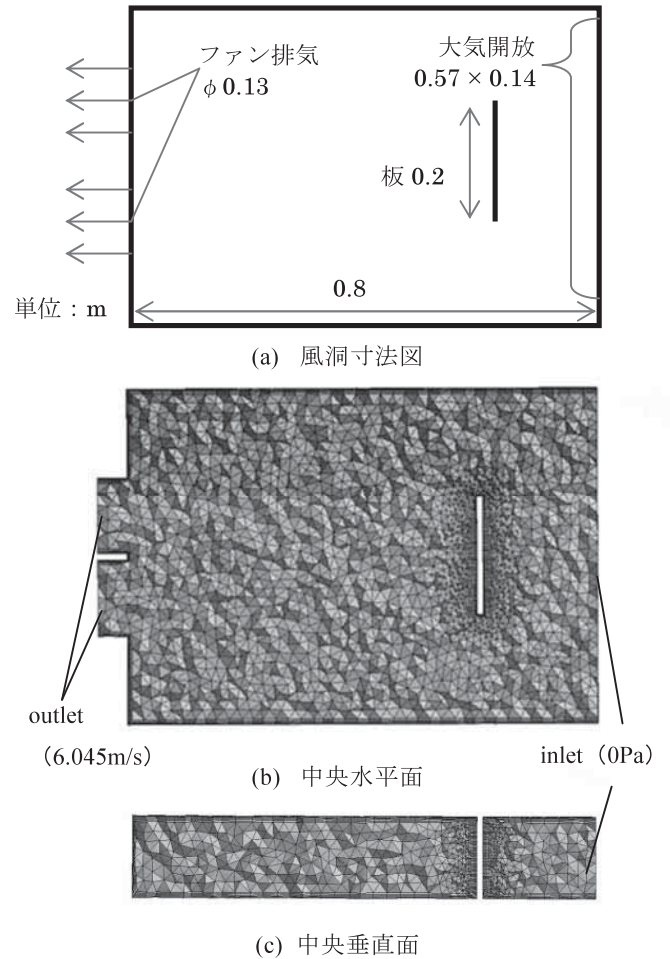


図2 解析空間寸法図・要素分割図

表1 コンピュータの主な仕様

プロセッサ	inter (R) Xeon (R) E5-1660 (3.30GHz, 6コア, 15MB キャッシュ)
メモリ (RAM)	16GB DDR-3 SDRAM (1600MHz, ECC, 4GB ×4)
OS	Windows (R) 7 Professional 64bit SP1

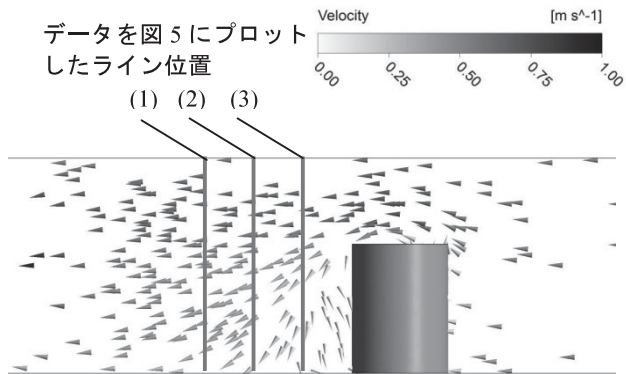
レイノルズ平均モデルには乱流運動エネルギー k と散逸率 ϵ の輸送方程式を解く k-Epsilon モデルを使用した。空間平均モデルは LES の Dynamic Smagorinsky モデルを適用した。境界条件は，入口部分を大気開放（静圧 0Pa ）として，風洞内部を流速 2.0m/s に設定するため出口の流速を 6.045m/s （断面 $\phi 130\text{mm}$ ）とした。また，解析に使用したコンピュータのスペックを表1に示す。

2-4 流速計による速度分布の簡易計測

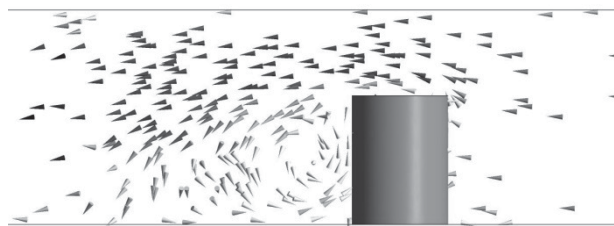
第1報にて粒子画像流速計測法（PIV, Particle Image Velocimetry）による可視可実験を行ったが，今回は熱式流速計を使用して流速値の計測を行い，流速の方向はスモークテスターにより可視化を行った。図3のように熱式流速計（testo 製 405-V1）を流れ方向に沿ってセンサーの向きを配置することで流速を計測した。



図3 熱式流速計



(a) k-Epsilon による解析結果



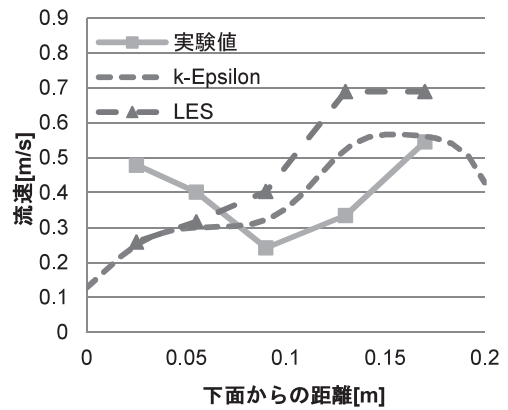
(b) LES による解析結果

図4 ベクトル分布 (中央垂直面)

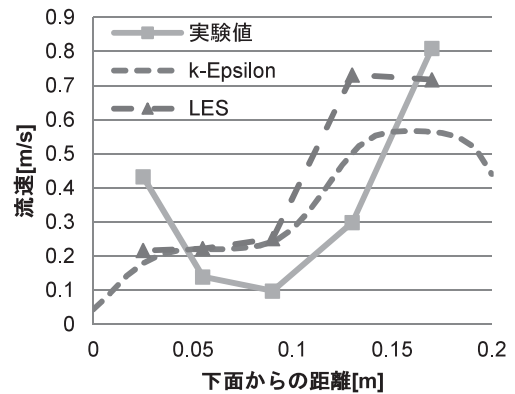
3. 解析結果と実験結果

3-1 局所排気装置内部の評価

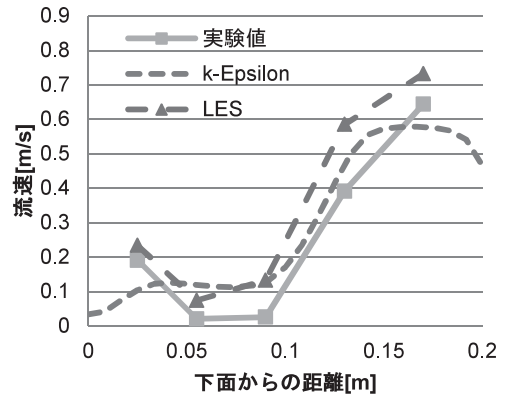
図4に局所排気装置内部を想定した解析におけるピーカー周りの速度ベクトル分布を示す。(a)(b)はピーカー中央を通る垂直面の結果を示しており、(a)は k-Epsilon、(b)は LES による解析結果 (グレースケールの最大値を 1.0m/s、最小値を 0m/s に設定) を表示した。k-Epsilon は定常状態の解析結果を、LES による解析は 10 秒後における解析結果を示している。k-Epsilon 解析結果におけるピーカー後方の流れは、多くが流れ方向に沿って分布しているが、LES 解析結果はピーカー後方にて渦が生じていることが確認された。また図5には図4の観測ライン(1)(2)(3)における解析結果と実測値を比較したグラフを示す。縦軸に速度を、横軸には風洞下面からの距離を示す。(3)はピーカー後方 50mm のデータを示しており、(1)(2)はそれぞれ 50mm 離れている。LES 解析結



(1) ピーカー後方 150mm



(2) ピーカー後方 100mm



(3) ピーカー後方 50mm

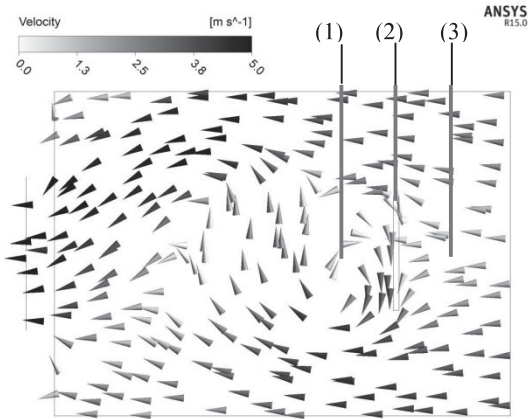
図5 解析結果と実測結果の比較 (ヒーター温度 500°C)

果は 5~10 秒間の流速最大値と最小値の中央値を出力した。実験結果についても実験時における流速中央値を出力した。ピーカー後方に向かうほど解析結果と実測結果は近い傾向になり、壁面沿いでは k-Epsilon に比べて LES の方が実測値に近いが、誤差が大きい個所もあった。解析時間については第一報にて報告したが、k-Epsilon は LES に比べ 50 倍程度かかった。ただし、k-Epsilon は定常解析のみ行い、非定常解析は行わなかった。

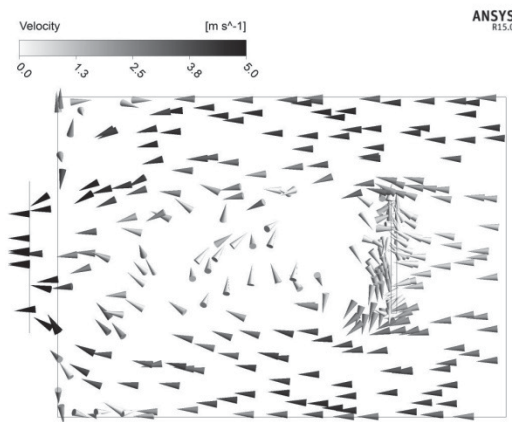
3-2 局所排気装置外部の評価

図6に局所排気装置外部を想定した解析における板周

データを図7にプロットしたライン位置



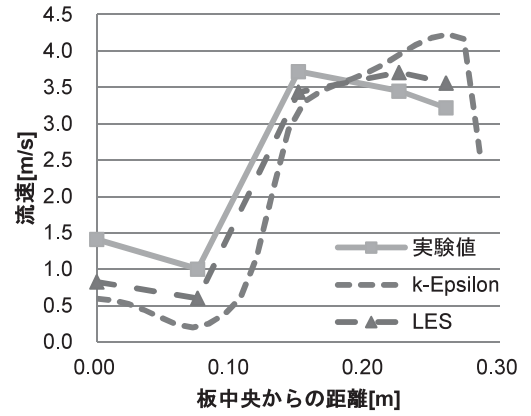
(a) k-Epsilon による解析結果



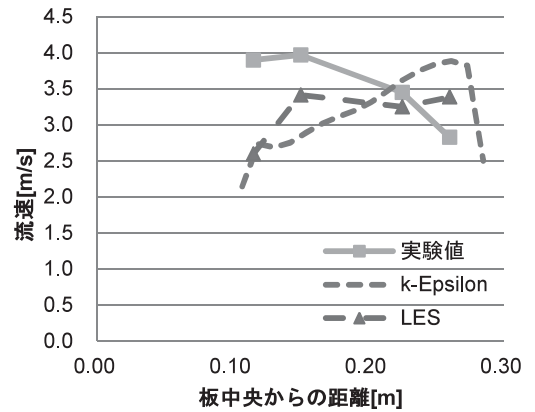
(b) LES による解析結果

図6 ベクトル分布 (中央水平面)

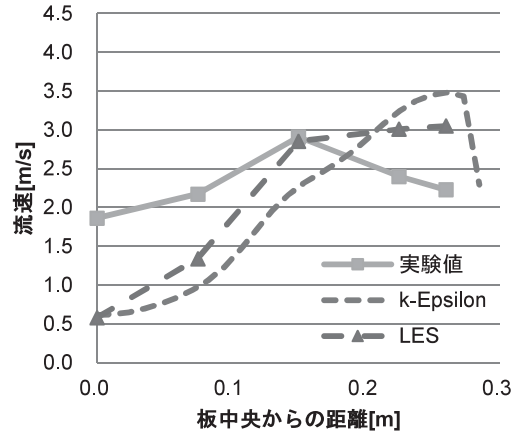
りの速度ベクトル分布を示す。(a)(b)は中央水平面の結果を示しており、(a)は k-Epsilon, (b)は LES による解析結果 (グレースケールの最大値を 5.0m/s, 最小値を 0m/s に設定) を表示した。k-Epsilon, LES 解析結果は 8 秒後における解析結果を示している。k-Epsilon 解析結果は、LES 解析結果に比べて板背後の渦が大きく、LES の解析結果は全体的に流れ方向にベクトルの向きが並んでいた。また図7には図6の観測ライン(1)(2)(3)における解析結果と実測値を比較したグラフを示す。縦軸に速度を、横軸には板中央からの距離を示す。(1)は板後方 5cm のデータを示しており、(2)は板と同一線上におけるデータを、(3)は板前方 50mm のデータを示している。k-Epsilon, LES 解析結果は 5~8 秒間の流速最大値と最小値の中央値を出力した。実験結果についても同様に流速中央値を出力した。板後方に向かうほど解析結果と実測値は近い傾向となり、壁面沿いでは k-Epsilon に比べて LES の方が実測値に近いが、誤差が大きい個所もあった。解析時間は LES の場合 5 時間 12 分、k-Epsilon は 2 時間 23 分であった。局所排気装置外部の評価では、



(1) 板後方 50mm



(2) 板に対して同一直線状



(3) 板前方 50mm

図7 解析結果と実測結果の比較

k-Epsilon についても非定常解析を行った為、解析条件はほぼ同じである。そのため、同一条件における解析時間の違いは k-Epsilon に比べて LES は 2 倍程度であった。

4. 結 言

局所排気装置内部・外部を想定した、熱流体解析および簡易風洞装置による実験を行った。

(1) 局所排気装置内部を想定した解析において、セラミックヒータを 500℃と設定した際の流速分布の傾向は k-Epsilon に比べて LES の方が実測に近い傾向となり、特

に壁面付近では k-Epsilon の誤差が大きかった。

(2) 局所排気装置外部を想定した解析では、レイノルズ平均モデルに比べて LES の方が実測結果に近い流速分布となった。ただし同じ解析モデルの解析時間は LES の方が 3 倍程度かかったことから、解析精度の重要な場面で LES を使用すべきである。

(3) 熱源を想定した解析では、熱源を想定しない場合に比べて LES を使用した場合の解析時間が膨大になることが確認された。

これらの結果を基に、当センターの技術相談の際に乱流モデル k-Epsilon および LES における解析精度・時間の参考例として提示する。

参考文献

- 1) 梶山岳夫 乱流の数値シミュレーション改訂版 養賢堂 (2014)
- 2) 寺澤章裕 山田博之 米山陽 流体解析におけるデータ信頼性に関する研究 山梨県工業技術センター研究報告 No.22 (2008)
- 3) 坂本智明 鈴木大介 八代浩二 福永大輔 中田正仁 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) 山梨県工業技術センター研究報告 No.28 (2014)