

流体解析におけるデータの信頼性に関する研究

寺澤 章裕・山田 博之・米山 陽

Study on Optimization of Analysis Conditions for CFD Analysis

Akihiro TERASAWA, Hiroyuki YAMADA and Akira YONEYAMA

要 約

有限要素法を用いた流体解析では、要素分割などの解析条件の違いで、結果も大きく異なることがある。また、流体解析の信頼性検証のための流体測定には、流体の可視化を始め課題も多く、容易ではない。そこで、本研究では検証可能な基本的な水流路における流体解析のデータの信頼性を高める目的で層流領域と乱流領域で検証を行った。層流領域で流速について流体解析結果・理論計算結果・送液実験結果を比較した。壁面付近の流速分布を直線的に近似した速度変化率や要素サイズに対する解析精度の関係を検討した。一方、壁面近傍で流速の変化が大きい乱流領域では壁面付近における要素の種類やサイズについて検討を行った。その結果、層流領域では、要素サイズの違いによる速度変化率と解析精度の関係を求め、解析結果の妥当性判断に活用するためのデータを得ることが出来た。乱流領域では、壁面付近にプリズム要素を生成する必要があることを確認した。

1. 緒 言

流体が関係する製品の開発において、設計ツールやトラブル解決手段として流体解析 (Computational Fluid Dynamics) が多く用いられている。流体解析では、解析条件の違い (要素分割によるメッシュ状態など) や流路形状の違いによって、全く違った解析結果を示すこともあり、最適な解析条件の把握が重要である。しかし、このような解析結果の妥当性・信頼性を得るために、実際の流路を用いた検証実験を行うことが考えられるが、流体の可視化をはじめ流体測定には課題も多く、容易ではない。

そこで本研究では、解析者や設計者がメッシュ生成などの解析条件を決めるための目安や、解析結果の妥当性判断に活用するためのデータを構築することによって、流体解析を用いた製品設計における信頼性向上や効率性向上を図ることを目的とし、検証可能な基本的な水流路に対して、流体解析結果・送液実験結果・理論計算結果との比較評価を行い、解析条件 (要素分割によるメッシュ状態) の最適化を図った。

2. 実験方法

2-1 速度変化率の定義

流体の流れには層流と乱流が存在し、レイノルズ数がおよそ2300以下の時に層流領域、2300以上の時に乱流領域となる^{1), 2)}。レイノルズ数Reは次式で求めることが出来る³⁾。

$$Re = \frac{\rho U L}{\mu}$$

ρ : 密度 [kg/m³]

U : 流速 [m/sec]

L : 管径など物体の代表長さ [m]

μ : 粘性係数 [Pa · sec]

層流領域と乱流領域で、解析結果と理論計算結果・送液実験結果を比較して流体解析の精度を検証した。また、管を流れる流体の速度分布は図1のようになる¹⁾⁻³⁾。本研究では、図1に示すように壁面付近の流速分布を直線近似し、この傾きを“速度変化率”と定義した。流体解析結果は離散データであるため、本研究では速度変化率を次式で定義する。

$$\text{速度変化率} : \frac{d_v}{d_x} = \frac{v-v_0}{x-x_0}$$

v_0 : 壁面での流速

x_0 : 壁面位置 0 mm

2-2 主な解析条件

表1に示すように、解析にはメッシュ生成ソフトにANSYS ICEM CFD Ver.10.0、流体解析ソフトにANSYS CFX Ver.10.0を用いた。対象流体は、汎用性を考慮し代表的な液体である20℃の水とした。流路形状も汎用性を考慮して単純な直管とした。

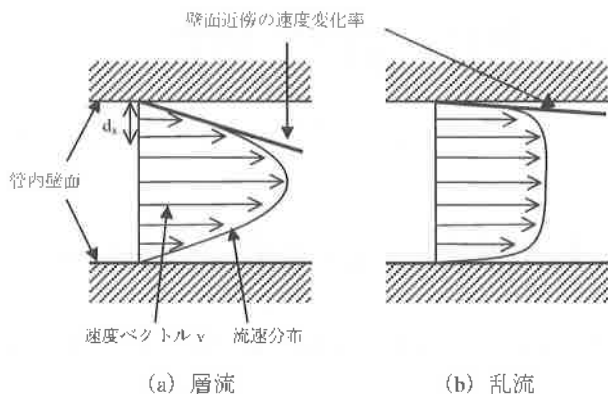


図1 管内の流速分布図（断面図）

表1 使用ソフトウェアおよび流体物性値

流体解析ソフト	ANSYS CFX Ver.10.0
要素分割ソフト	ANSYS ICEM CFD Ver.10.0
流体物性値 (水: 20℃)	密度 0.9970×10^3 [kg/m ³]
	粘性係数 0.890×10^{-3} [Pa · s]

2-3 層流領域での解析精度の検証

2-3-1 層流における円管の流体解析

流体解析の主な解析条件を表2に示す。流路形状は、内径2mm、長さ100mmの円管とした。流量は0.94ml/minから40ml/minまで段階的に変化させた。レイノルズ数は、420以下で層流領域である。

要素サイズの違いによる解析結果への影響を把握するために、図2に示す流路断面図のように、平均要素サイズを0.29mmから0.10mmまで5段階に変化させた場合について解析を行った。ここで、平均要素サイズは流路断面図での節点間隔の平均値である。流れが定常状態となる断面位置における速度分布から速度変化率を求めた。

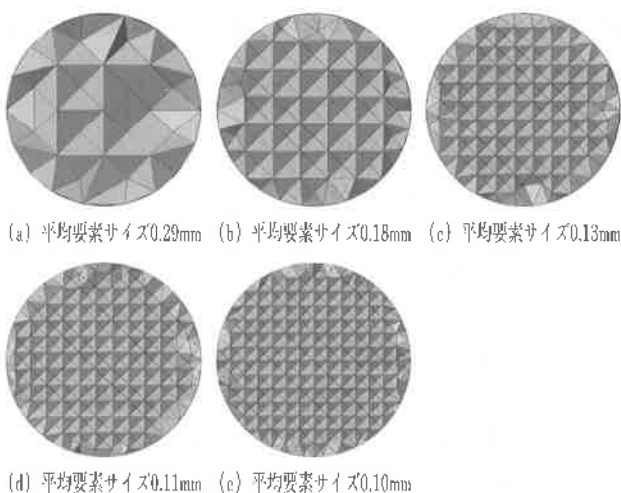


図2 内径φ2mmの円管の断面における要素分割図

表2 流体解析の条件（φ2mm円管）

流体解析モデルの種類	層流モデル
平均要素分割サイズ	(a) 0.29 [mm] (b) 0.18 [mm] (c) 0.13 [mm] (d) 0.11 [mm] (e) 0.10 [mm]
要素の種類	四面体要素
流入部 (inlet) 流量	0.94 [ml/min], 1.88 [ml/min], 4.7 [ml/min], 10 [ml/min], 20 [ml/min], 30 [ml/min], 40 [ml/min]
流出部 (outlet) 圧力	0 [Pa]
壁面の設定	すべりなし

2-3-2 層流領域における円管の理論計算

円管における流体可視化実験では、光の屈折などの影響で流体観察が難しいため、本研究では、理論計算値と流体解析結果を比較した。理論計算では半径aの円管を流れる層流において、中心からrの位置における流速は、

$$U = \frac{P}{4\mu} (a^2 - r^2)$$

U : 流速 [m/sec]

P : 圧力勾配 [Pa/m]

μ : 粘性係数 [Pa · sec]

a : 円管の半径 [m]

r : 中心からの位置 [m]

となり、また、流量Q [m³] は、

$$Q = \int_0^a U(r) 2\pi r dr = \frac{\pi a^4 P}{8\mu}$$

と表現される³⁾。表2に示す流量を送液した時の流速を上式から計算し、さらに速度変化率を求めた。

表3 流体解析の条件（2×2mm角管）

流体解析モデルの種類	層流モデル
平均要素分割サイズ	(a) 0.31 [mm] (b) 0.20 [mm] (c) 0.13 [mm] (d) 0.12 [mm] (e) 0.10 [mm]
要素の種類	四面体要素
流入部 (inlet) 流量	0.94 [ml/min], 4.7 [ml/min], 20 [ml/min], 40 [ml/min]
流出部 (outlet) 圧力	0 [Pa]
壁面の設定	すべりなし

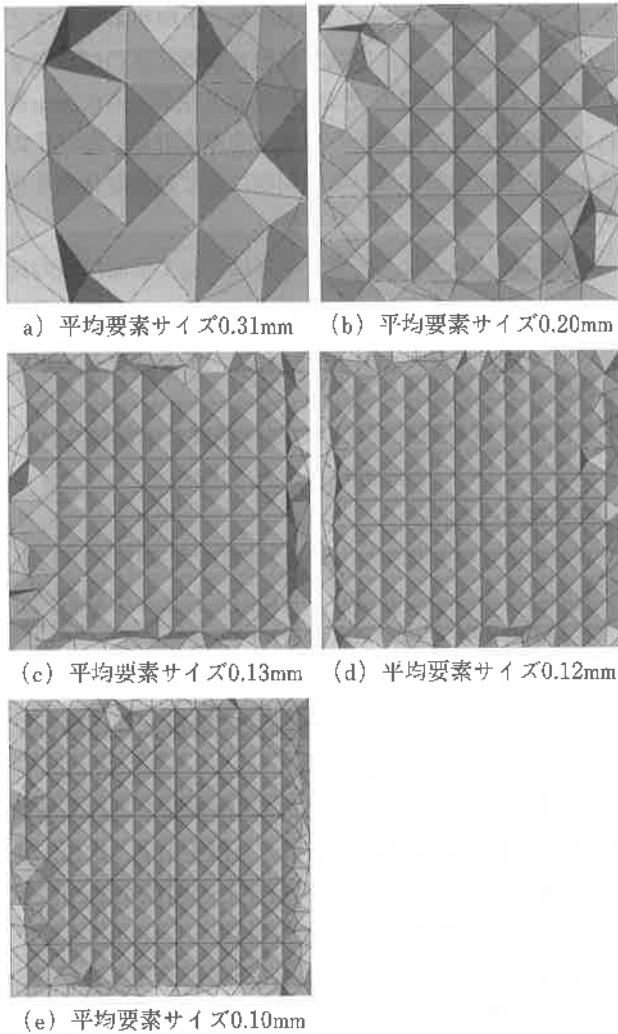


図3 断面2×2mmの角管の断面における要素分割図

2-3-3 層流領域における角管の流体解析

主な解析条件を表3に示す。断面形状が2×2mm、長さ112mmの流路とした。0.94ml/minから40ml/minまで変化させた。レイノルズ数は330以下で層流領域である。

要素サイズの違いによる解析への影響を把握するために、図3に示すように平均要素サイズを0.31mmから0.10mmまで5段階に変化させた場合について行った。流れが定常状態となる断面位置における速度分布から速度変化率を求めた。平均要素サイズは断面図で見た時の節点間隔の平均値とした。

2-3-4 層流領域における角管の送液実験

図4に送液実験装置を示す。断面が2×2mmで長さが112mmの溝をアクリルに切削加工し、さらにアクリル板を接着することによって流路を作製した。流入部・流出部には直径2mmのPVCチューブを接続した。流体観察には、測定顕微鏡(ミットヨ製MF-510TH)と高速度ビデオカメラを用いた。測定顕微鏡の倍率は対物レンズ5倍である。流体可視化方法として、直径45μmのラテックスビーズを水に分散させてシリジポンプを

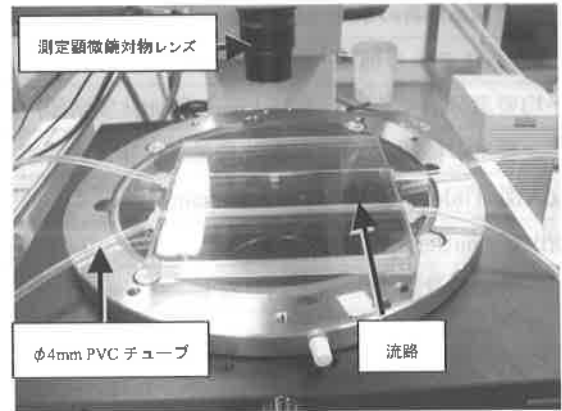


図4 層流観察用実験装置(2×2mm角管)

用いて送液し、流れを撮影した。撮影した動画からビーズの移動時間と移動距離を測定し流速を概算した。測定箇所は流れが定常状態となる位置で、流路天面と底面との中央断面に焦点を合わせてビーズの観察を行った。

2-4 乱流領域での解析値と実験値の比較

2-4-1 乱流領域における角管の流体解析条件

断面形状が5×5mmで長さが245mmの流路に、流量が1500ml/minの水を流した時の流速について、送液実験値と流体解析値の比較を行った。主な解析条件を表4に示す。解析モデルは、要素分割数を考慮して、1/4対称モデルとし、対称境界条件を用いた。レイノルズ数は約5000で乱流領域である。流体解析モデル(乱流モデル)には、k-ε乱流モデルを使用した。

平均要素サイズは断面図での節点間隔の平均値とした。要素分割は、図5に示すように、平均要素サイズが0.19mmの四面体要素のみの場合と、四面体要素に加えて壁面付近にプリズム(三角柱)要素を3層生成した場合と、四面体要素に加えてプリズム要素を10層生成した場合の3種の要素分割について解析を行った。

2-4-2 乱流領域における角管の送液実験条件

実験は図6に示すように、アクリル板を用いて断面形状が5×5mmで長さが245mmの流路を作製した。ギアポンプ(エフニック製AWT-40W)で送液した。測定顕微鏡の倍率は、対物レンズ3倍である。流体可視化方法として、直径90μmのラテックスビーズを水に分散させて流れを撮影し、流速を概算した。

3. 結果と考察

3-1 層流領域での実験結果

3-1-1 円管における理論計算値と流体解析結果との比較

図7は40ml/minで送液を行った時の流体解析結果の一例である。内径2mmの円管の断面において中心位置

表4 流体解析の条件 (5 × 5 mm角管 乱流モデル)

流体解析モデルの種類	k-ε乱流モデル
平均要素分割サイズ	0.19 [mm] (四面体要素部)
要素の種類	四面体要素+プリズム要素
流入部 (inlet) 流量	1500 [ml/min]
流出部 (outlet) 圧力	0 [Pa]
壁面の設定	すべりなし

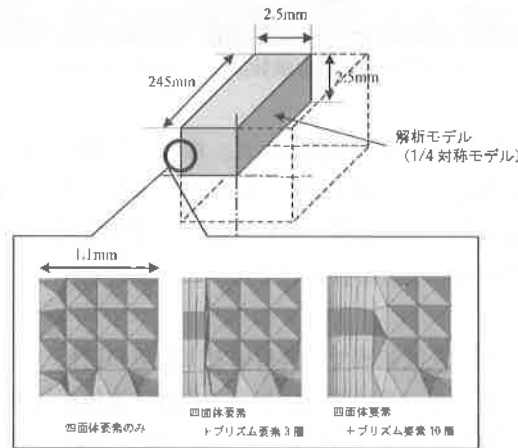


図5 乱流モデルの壁面付近における要素分割例

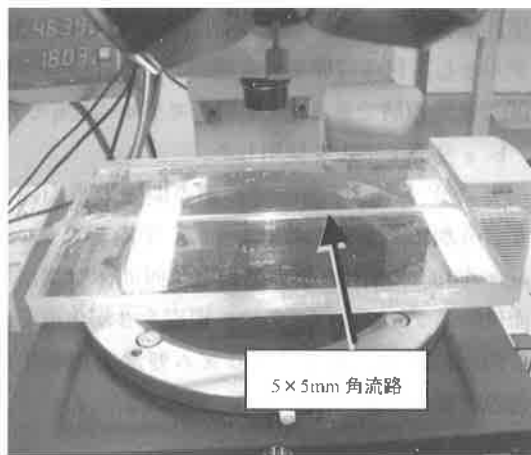


図6 乱流観察用送液実験装置 (5 × 5 mm角管)

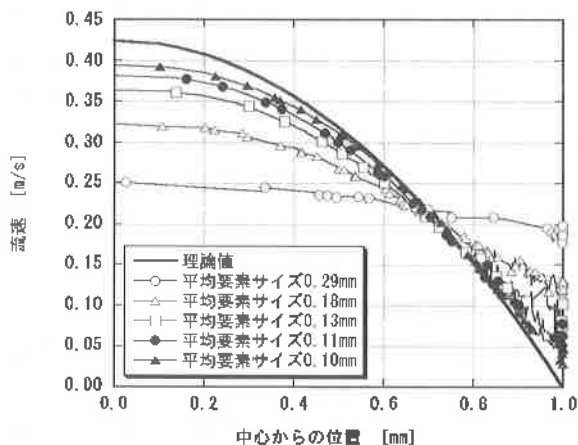


図7 解析結果の一例 (φ 2 mm管に40ml/minで送液)

から、壁面位置 (1 mm) の流速を、平均要素サイズごとに示した図である。壁面では流体解析結果のばらつきが大きいため、本研究では壁面位置と壁面から0.2mm離れた位置における流速から速度変化率を計算した。その他の流量や理論値についても同様にして速度変化率を求めた。

流体解析結果では、要素サイズによって壁面付近の速度勾配が十分に表現できない場合がある。さらに、壁面付近の影響によって、管中心における最大流速も理論計算値より小さい値となった。

理論計算値の速度変化率と解析精度との関係を図8に示す。ここで、解析精度は次式で求めた。

$$\text{解析精度} [\%] = \left| \frac{\text{解析値速度変化率}}{\text{理論値速度変化率}} \right| \times 100$$

この結果から平均要素サイズの設定によって解析精度に大きく影響することがわかる。

3-1-2 角管における送液実験値と流体解析結果との比較

断面形状が2 × 2 mm角流路に送液実験を行い、流速を求めた。図9に流体観察結果の一例を示す。次に、送液実験値の速度変化率と解析精度との関係を図10に示す。ここで、解析精度は次式で求めた。

$$\text{解析精度} [\%] = \left| \frac{\text{解析値速度変化率}}{\text{実験値速度変化率}} \right| \times 100$$

図8と図10を比較すると、類似した傾向を示している。角管の実験値における解析値の速度変化率と解析精度の関係を図11に示す。本研究の図11のデータを用いることで、解析結果から求めた速度変化率と、メッシュ生成時の要素サイズの大きさを比較し、解析精度の推測が可能である。例えば、平均要素サイズが0.31mmのモデルで解析を行った時の解析結果の速度変化率が100程度であった場合 (図11のA点)、解析精度はおよそ20%以下であることが推測できる。そこで約80%の精度が必

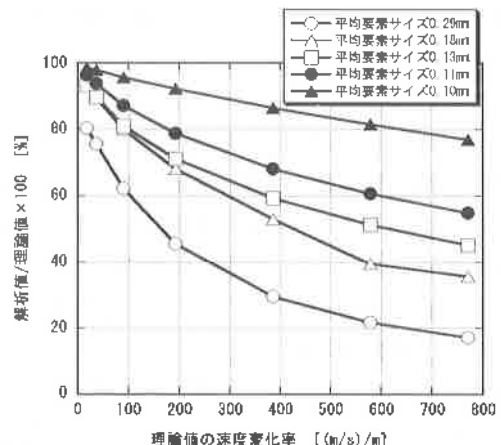


図8 φ 2 mm管での解析値と理論値の比較

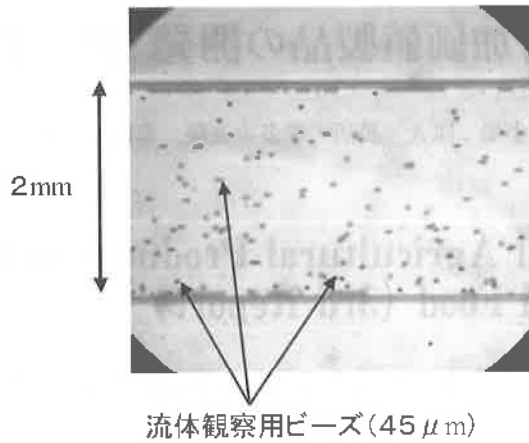


図9 流体観察例 (0.94ml/min)

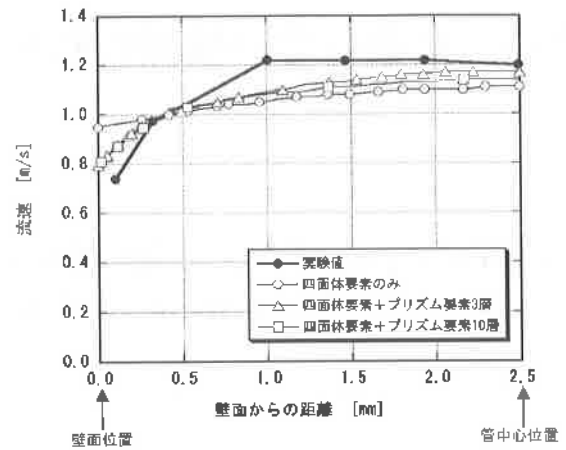


図12 乱流の実験結果 (四面体要素平均サイズ0.19mm)

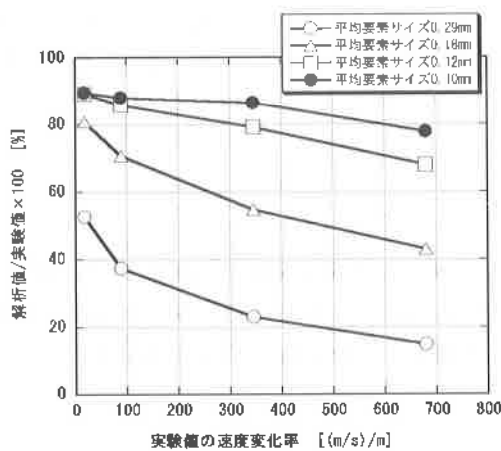


図10 2×2mm管での解析値と実験値の比較

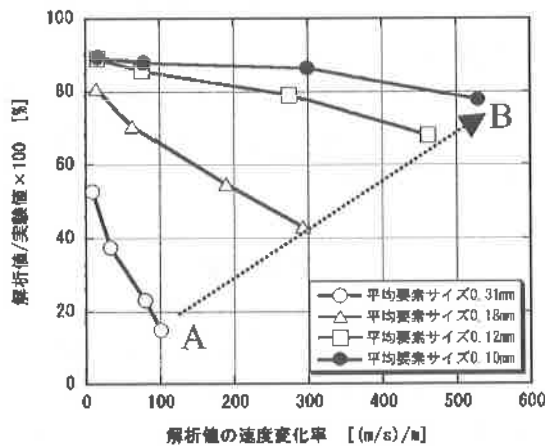


図11 角管における解析値の速度変化率と解析精度の関係

要な場合 (図11のB点) は、平均要素サイズを約0.1mmにして再解析を行うことによって、より精度の高い流体解析が短い設計時間で可能となる。

3-2 乱流領域での実験値と解析値の比較

図12に断面形状が5×5mmの正方形流路に1500ml/minの水を流した時の送液実験結果と流体解析結果のそれぞれから求めた速度分布を示す。四面体要素のみを

用いた場合、平均要素サイズを0.19mmのように流路幅5mmに対して比較的小さいサイズに設定しても、乱流領域では壁面近傍の速度変化率が大きいため、壁面近傍の速度勾配が表現出来ず、管中心における最大流速も送液実験値に比べ小さな値となる。しかし、平均要素サイズをさらに小さくして解析精度を向上させることは、コンピュータの計算能力を考慮すると難しいと考えられる。そこで、壁面近傍にプリズム要素を併用することで、送液実験値に近づくことが確認出来た。しかし、プリズム要素を3層に設定した場合と10層に設定した場合には、解析結果に大きな違いはなかった。従って、プリズム要素はコンピュータの計算能力を考慮して、適切な層数(要素数)を選択する必要があると考えられる。

4. 結 言

流体解析の信頼性向上のために層流領域、乱流領域において流体解析値、送液実験値・理論計算値を比較して以下の結果を得た。

- (1) 層流領域では、理論計算値に対する解析精度も、送液実験値に対する解析精度も類似した傾向を示した。
- (2) 層流領域では、流体解析値の速度変化率と解析精度の関係を求めた。これにより、解析精度の推測が可能となった。
- (3) 乱流モデルの解析では、壁面付近にプリズム要素でメッシュを生成することで解析精度の向上が図れることがわかった。

参考文献

- 1) 藤沢延行：熱流体の可視化と計測，コロナ社，p.7-12 (2003)
- 2) 生井武文，井上雅弘：粘性流体の力学，理工学社，p.79 (1978)
- 3) 神部勉：流体力学，裳華房，p.169-179 (1995)