

CFD ツール (OpenFOAM) を用いた二次元急拡大流路内流れの試行計算

桜井 元康*・中西 助次**・大坂 英雄**

(平成22年10月28日受付)

Trial Tests of Two-Dimensional Flow in Sudden Expansion Channel Using a CFD Toolbox (OpenFOAM)

Motoyasu SAKURAI, Suketsugu NAKANISHI and Hideo OSAKA

(Received Oct. 28, 2010)

Abstract

The laminar separated flow through a two-dimensional sudden-expansion channel has been investigated numerically. We have examined the relation between flow structure and the dynamic characteristics of the flow. In this report, we performed several trial tests about the two-dimensional symmetric sudden-expansion channel flow using an open source CFD toolbox (OpenFOAM). The calculations were performed for the case of four different expansion ratios $\alpha=2, 3, 3.5$ and 4 in the range of Reynolds number $20 \leq \text{Re} \leq 400$. The results obtaining by OpenFOAM were compared with our numerical results and with the past reliable results (numerical and experimental results) in the same flow field. The results are in good agreement among them. OpenFOAM confirmed can be actually used for analyzing the same kind of flow field.

Key Words: numerical analysis, internal flow, expansion channel flow, separation vortex length, OpenFOAM, CFD.

1. はじめに

最近のコンピュータの性能の向上は著しく、市販のパーソナルコンピュータにおいても単一CPU内に複数のコアを搭載したものや64bitのオペレーティングシステムに対応したものが、数値計算を行うのに十分な性能を持っているものが多くある。数値計算に使用するソフトウェアに関してもオープンソースのものが数多く提供されている。それらのソフトウェアの中には流体や構造などの計算を行うソルバに加え、モデリングやメッシュジェネレータなどの前処理を行うユーティリティ、計算結果の可視化など後処理を行うユーティリティなども存在する。

流体の数値計算においては、OpenCFD社よりOpenFOAM (Open Source Field Operation and Manipula-

tion) がオープンソース CFD ツールボックスとして提供されている。OpenFOAM は三次元の流れに対応しているだけでなく各種の流れに対応したソルバも用意されているため、多くの流れ場への適用が可能である。多くの研究者は自作のソルバを用いて目的とする流れ場を解析しているが、現実の流れは三次元であり流れ場の形状や条件も単純でない場合が多い。このような流れ場を解析するには多くの労力と高度な専門知識が必要となるため、OpenFOAM など既存のソルバを狙いとする流れ場に用いることができれば効率的に解析することが可能と思われる。OpenFOAM を使って流れ場を計算するためには、流体力学に関する専門知識やOpenFOAM のツールボックスを使いこなすための知識が必要である。しかしながら、計算に必要な基本的なソルバやユーティリティは準備され

* 広島工業大学共同研究機構

** 広島工業大学工学部機械システム工学科

ているため、流路モデルを作成し、境界条件の選択・設定および使用するソルバの選択・設定を行えば計算が可能となる。

一方、得られた計算結果は実験的にあるいは他著者の結果と比較を行うことにより信頼性の検証を行うことが必要であるが、OpenFOAMによる結果を検証した報告^{(1),(2)}はあまり多くない。したがって、数値計算のベンチマークとして良く使用されている後ろ向きステップのような基礎的な流れ場において、厳密に計算結果を検証する必要があると考えられる。後ろ向きステップを持つ流路は単純な形状でありながら流れのはく離・再付着とそれに伴うはく離循環渦領域が存在する流れ場であり、精度の悪い計算を行うと実際の流れとの差が生じやすいことによる。また、後ろ向きステップのような急拡大を伴う流れ場は工学的にも多く存在しており、ガスバーナの燃焼安定性に関わる保炎⁽³⁾、微細転写領域における樹脂流動⁽⁴⁾、工場内におけるスポット空調⁽⁵⁾など工業的にも重要視されている。

一方、管路などの内部流に関しては、はく離・再付着とそれに伴うはく離渦領域に関する流体的問題も多く存在している。例えば上下に後ろ向きステップをもつ対称急拡大流路内の流れはレイノルズ数の増加に伴い定常対称な流れから定常非対称流れになることが実験的、数値計算的、解析的に知られている^{(6)~(8)}。この対称急拡大流路内の流れに関して、著者らは既報⁽⁹⁾で流路拡大比を変化させることよりステップ下流の逆圧力勾配および横断面方向圧力勾配を変化させ、それらがステップ下流のはく離循環渦へおよぼす影響を調べた。また、レイノルズ数と流れパターンとの関係、対称流れから非対称流れに変化するレイノルズ数(Rec:分岐レイノルズ数)と拡大比との関係を調べ、非対称流れの生成機構の解明に必要な基礎的データを提供し

た。さらに別報⁽¹⁰⁾では、局所の圧力勾配の変化が流れに与える影響を調べるため、二次元急拡大流路の上下ステップ位置を局所的に変化させ、ステップ下流に生じる逆圧力勾配とはく離循環渦の関係を系統的に明らかにした。それらを含め、各パラメータが流れにおよぼす影響を系統的に調べるため、広い範囲で流路拡大比、上下ステップ位置のずれ間隔およびレイノルズ数を変化させ、はく離渦長と各パラメータとの関係について調べた⁽¹¹⁾。

以上より、本報告ではOpenFOAMに標準的に用意されているソルバを用いて二次元対称急拡大流路内の流れを計算し、それらの結果と著者らの計算結果、他著者の計算結果および実験結果とを比較した。その結果、いずれとも良い精度で一致していることが確認できOpenFOAMは十分実用に耐えうるということが分かった。

2. 計算モデルと CFD ツール

2-1. OpenFOAM の概要

OpenFOAMは多数のC++ライブラリで構成されたオープンソースCFDツールボックスである。それらのツールボックスには、連続体力学に関する各種問題を解くためのソルバおよびメッシュジェネレータなどのユーティリティなどが含まれている。通常、OpenFOAMはLinux等にインストールされ実行される。今回使用するバージョンにはGUI(Graphical User Interface)環境を構成するユーティリティが付属していないため、ソルバおよびユーティリティを実行するにはターミナルを開き、そこから必要な機能をタイプして呼び出す必要がある。なお、ソルバおよびユーティリティの実行前には、エディタ等で関連する設定ファイルを修正することにより各種条件の設定を行う必要がある。

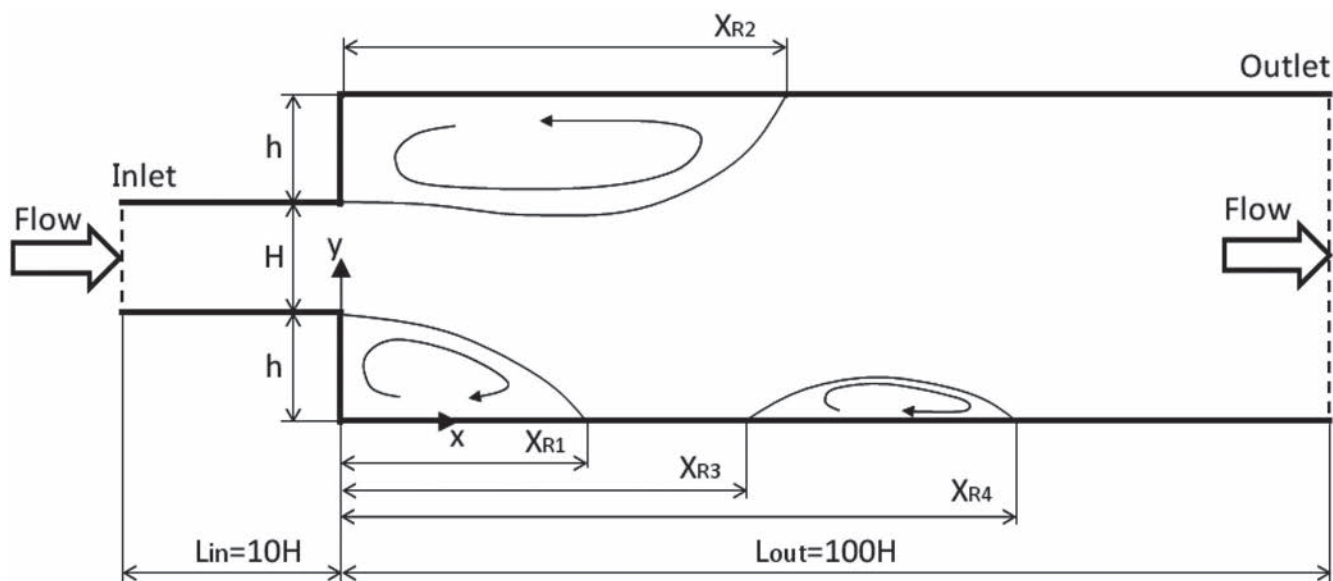


図1 計算モデル

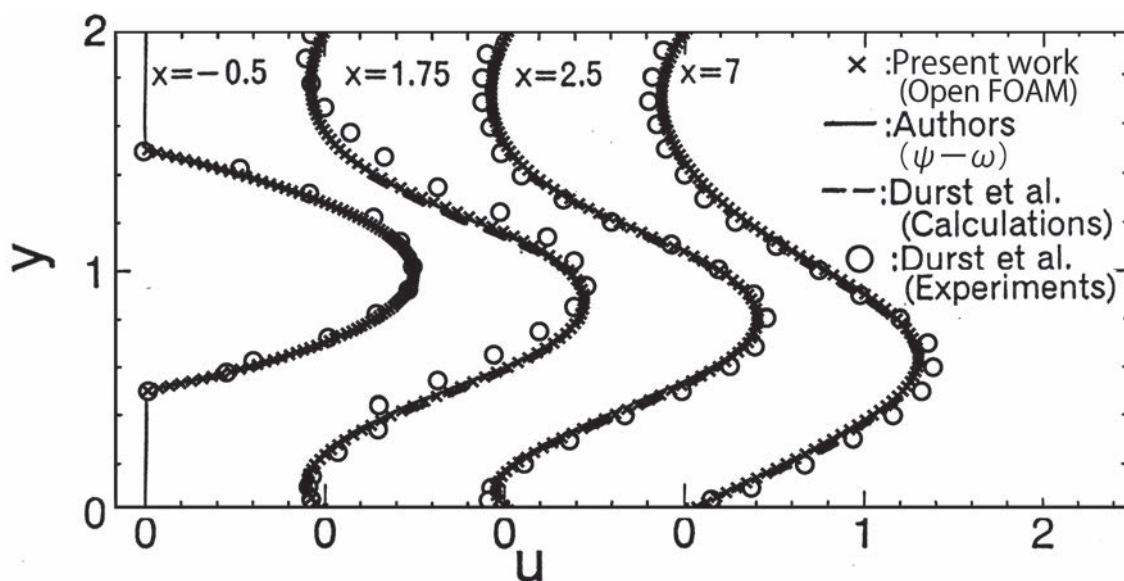
OpenFOAM はオープンソースであるため、ソルバやユーティリティをユーザ自身が改造および作成することが可能である。本報告では第一段階として、標準的なソルバの能力を確かめるため標準的に付属しているソルバおよびユーティリティのみを使い計算を行った。計算結果の可視化、データの切り出しなどの後処理には ParaView を利用した。

OpenFOAM はパーソナルコンピュータにおいても 64bit 版のオペレーティングシステムを利用することにより 4 GB (ギガバイト) の範囲を超える物理メモリを利用でき、大規模な計算が可能となる。また、並列計算に対応しているため、複数の CPU・CPU コアを利用できる場合は計算速度を速めることができる。本報告の計算モデルは、

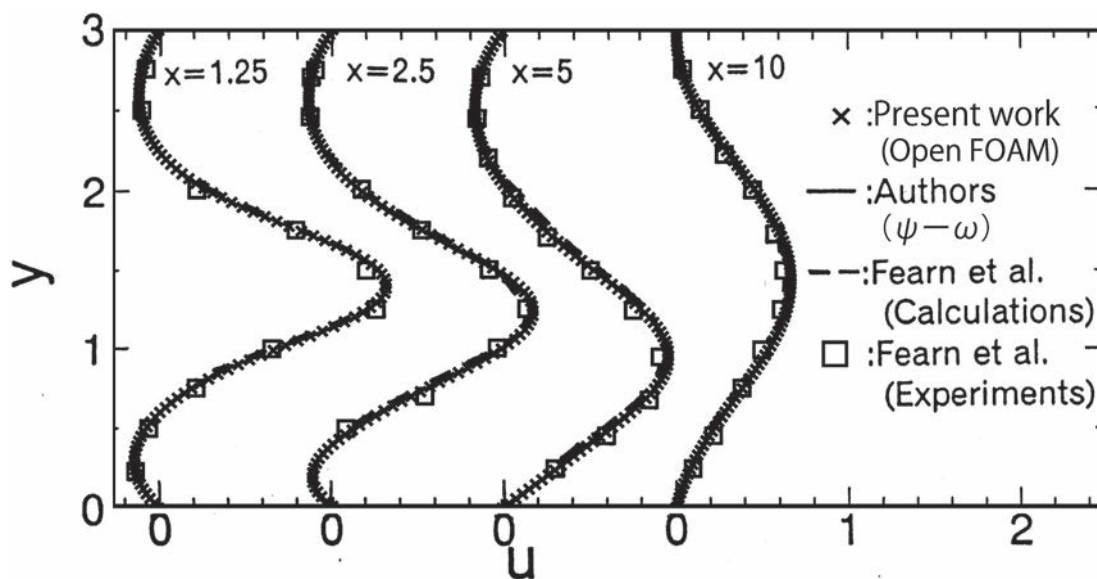
最も計算規模の大きい拡大比 4 の場合でも 84,000 メッシュ点であり比較的小規模なため、32 ビット版 (バージョン 1.6) を使用し並列計算の処理は行わず数値計算を行った。収束解を得るのに必要とした時間の一例を示すと、パーソナルコンピュータ (インテル i7 - 2.8GHz) を使用し、拡大比が 4、レイノルズ数が 100、初期値が一様流の場合、約 12 時間である。

2-2. OpenFOAM による方程式の表現

本報告ではソルバの改造等を行わないが、プログラムソースの記述方法は OpenFOAM の重要な特徴なのでここで紹介しておく。OpenFOAM のクラスを用いると、支配方程式を非常に簡潔に表現できる。例えば方程式、

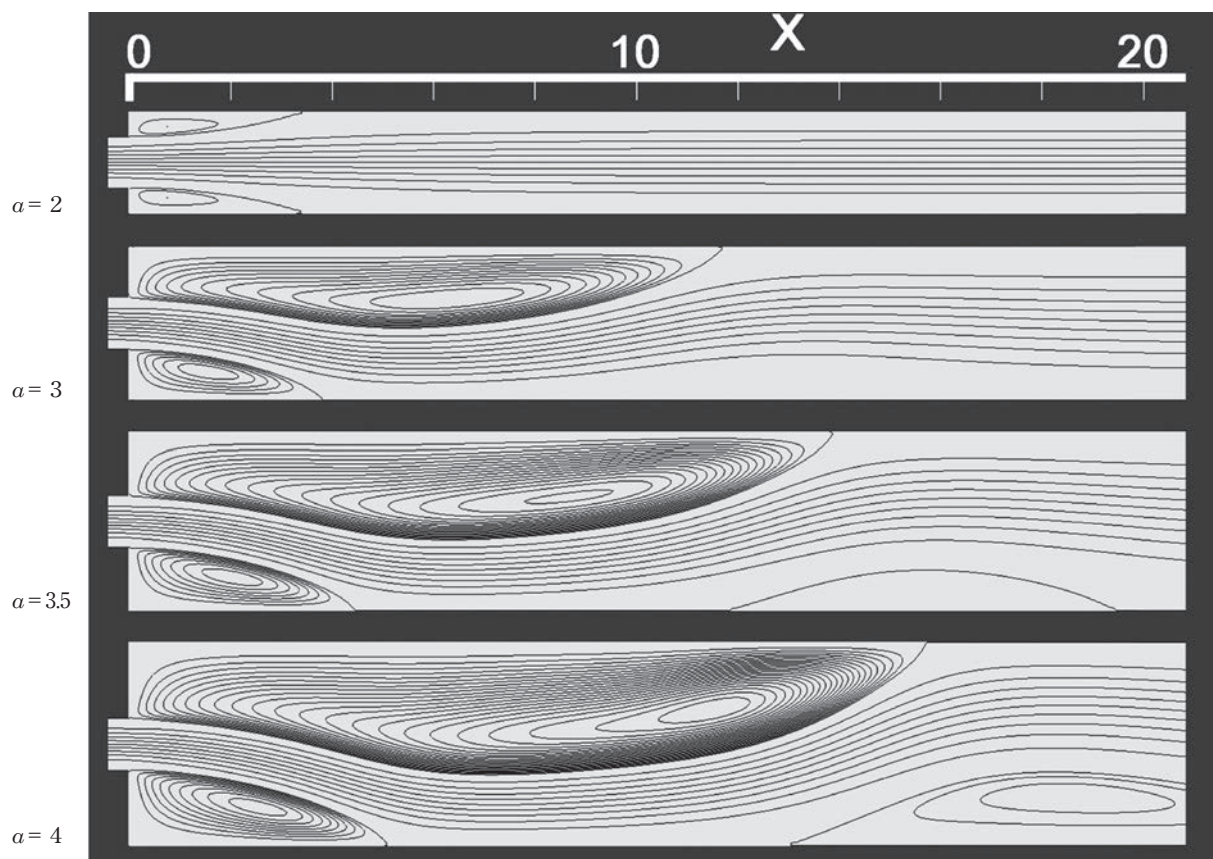


(a) $\alpha = 2$, $Re = 407.6$

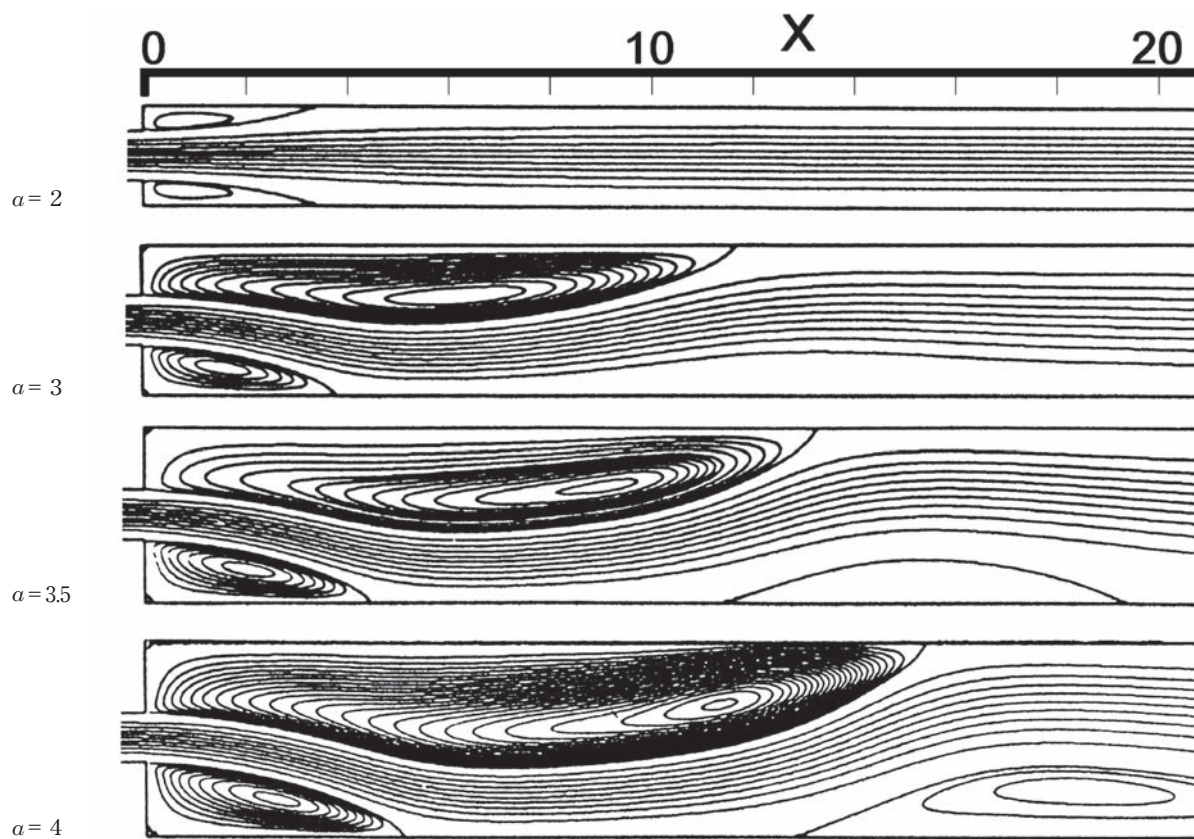


(b) $\alpha = 3$, $Re = 80$

図2 ステップ近傍での速度分布



(a) OpenFOAM



(b) Authors ($\psi - \omega$)⁽⁹⁾

図3 流線 (Re = 100)

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot \phi \mathbf{u} - \nabla \cdot \mu \nabla \mathbf{u} = -\nabla p \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 $\phi = \rho \mathbf{u}$

を有限体積法で解く場合、ソルバのソースは以下のように記述される。

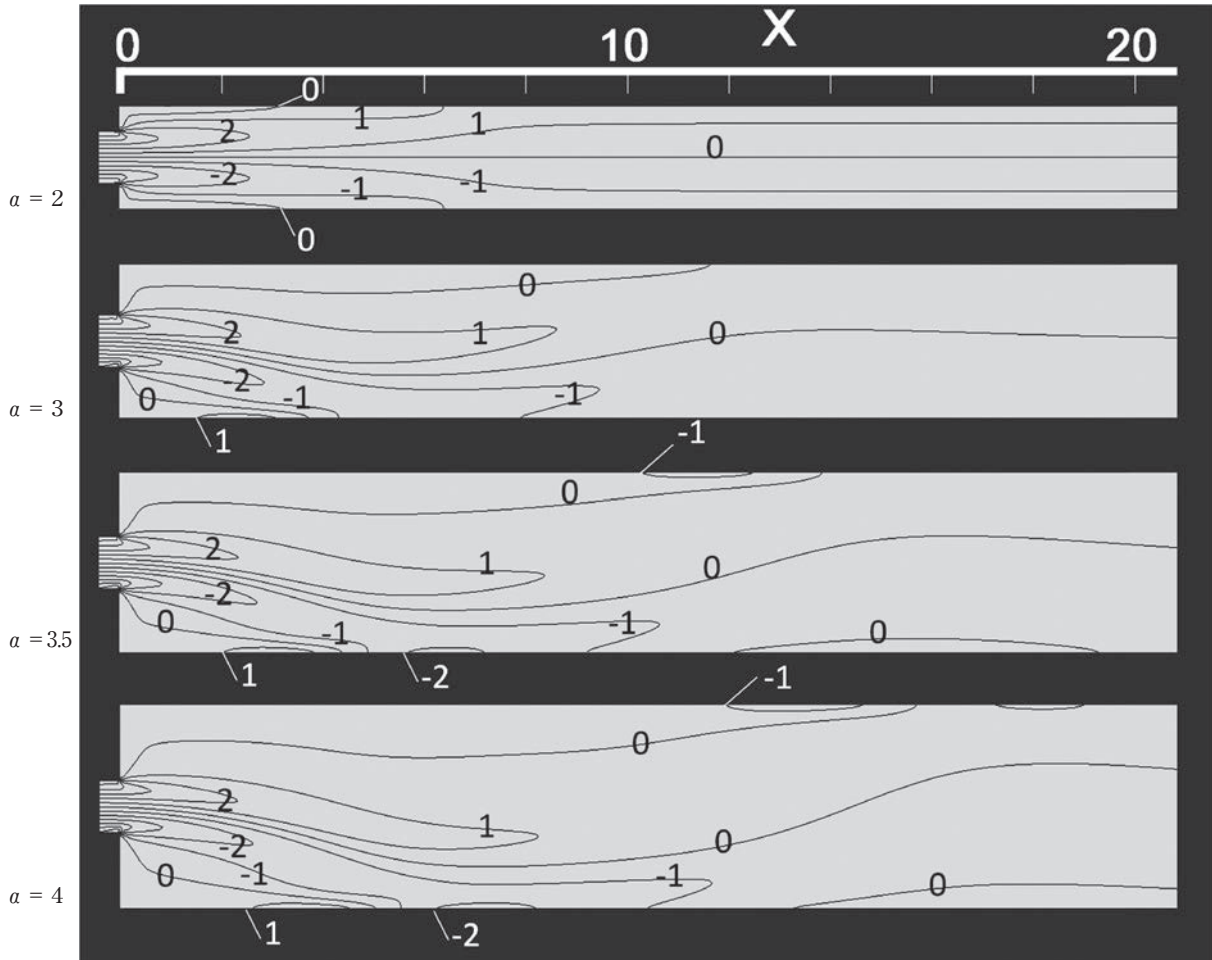
```

1 : solve (
2 :     fvm::ddt (rho, U)
3 :     + fvm::div (phi, U)
4 :     - fvm::laplacian (mu, U)
5 :     == - fvc::grad (p)
6 : );
    
```

(1)式の左辺の第1～3項がそれぞれソースの2～4行目、右辺が5行目に対応している。乱流モデルなどを用いる場合でも同様にOpenFOAMのクラスを用いることにより簡潔に表現できることが知られている。このように基礎方程式を分かりやすく記述できるためミスも起こりにくく、修正・改造も容易であることがわかる。

2-3. 計算モデル

計算モデルは、図1に示すような上壁と下壁とに高さhの後ろ向きステップを持ち、ステップ上流の流路幅がHの流路である。取り扱う流れ場は非圧縮性ニュートン流体であるので、icoFoam (非圧縮性、層流の速度-圧力ソルバ) をソルバとして使用した。座標は下壁ステップ下端を原点とし、流れ方向にx、断面方向にyとした。ただし、OpenFOAMでは基本的には三次元流路内の流れを取り扱うため、流路に0.1Hの幅を持たせた(三次元の六面体要素を一平面内に並べて実質的に二次元流としている)。流路長さは入口からステップまでの距離 $L_{in}=10H$ 、ステップから出口までの距離 $L_{out}=100H$ とした。この流路モデルで上壁と下壁のステップ高さhを均等に变化させることにより流路拡大比 $a = [(H + 2h) / H]$ を変化させた。代表速度はステップ上流の流路断面平均流速 $U = 1$ [m/s]、代表寸法はステップ上流の流路幅 $H = 1$ [m]とした。レイノルズ数は $Re = UH / \nu$ (ν [m²/s] は動粘度) で定義され、 ν を変化させることによりレイノルズ数を変化させた。境界条件は、OpenFOAMのチュートリアルで使用されている設定を参考とし、以下のように設定した。

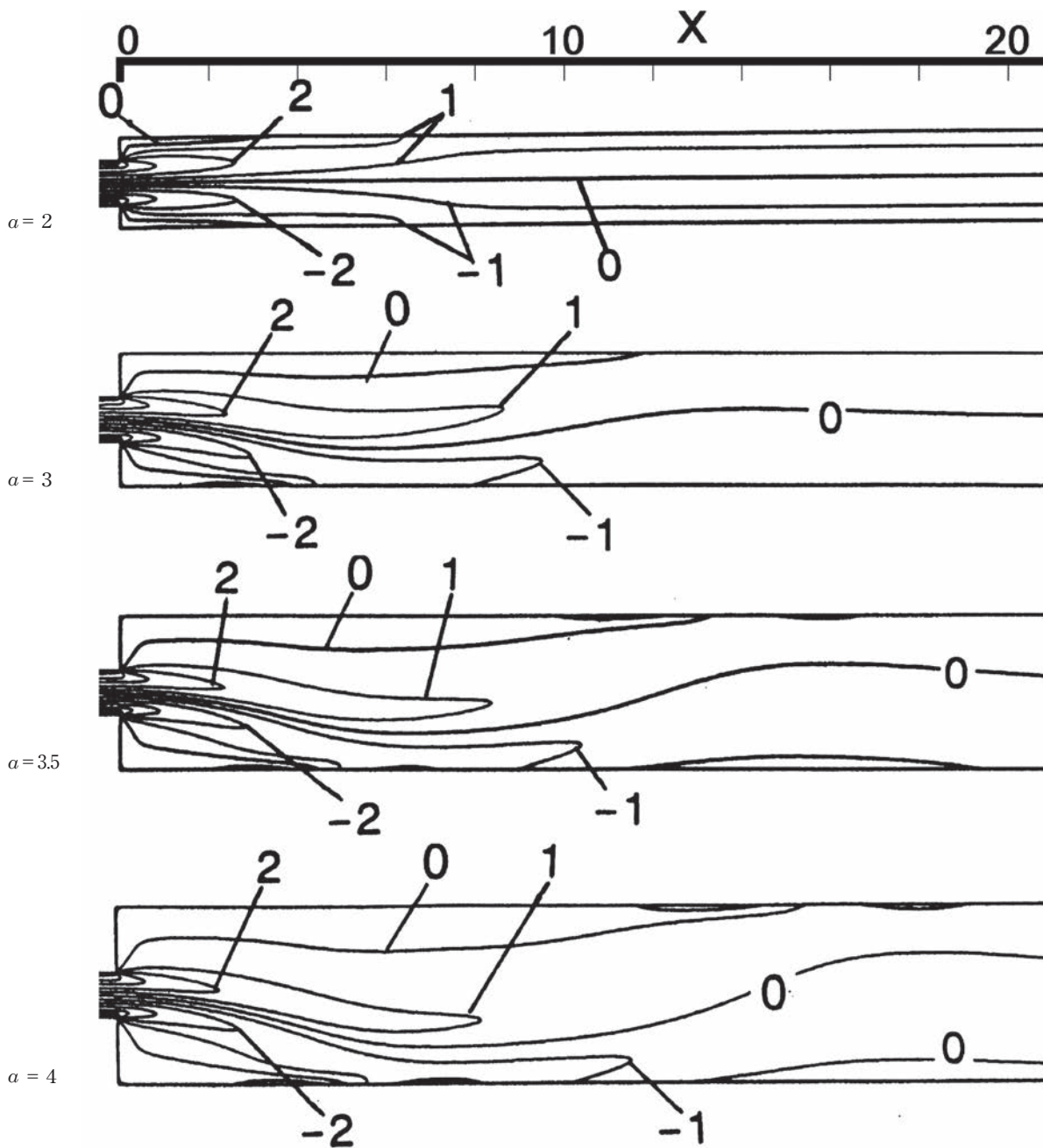


(a) OpenFOAM

図4 等渦度分布

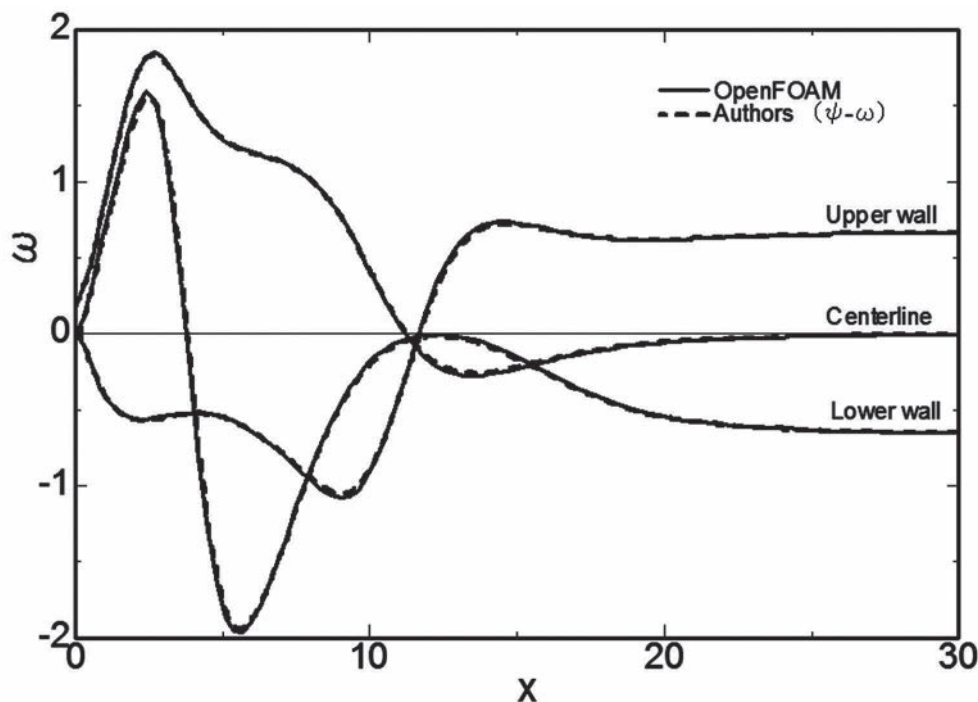
- (i) 流路入口
流れは二次元ポアズイユ流
圧力は zeroGradient ($dp/dx = 0$)
- (ii) 流路出口
流れは zeroGradient ($du/dx = 0$)
圧力 $p = 0$ (基準値)
- (iii) 上下壁
流れは滑りなし ($u = 0$)
圧力は zeroGradient (壁の垂直方向圧力勾配が0)
- (iv) スパン方向の境界
empty (二次元流として取り扱うための条件)

メッシュサイズは既報⁹⁾と同様 $1/20$ とした。数値計算のパラメータ範囲は、流路拡大比 $\alpha = 2 \sim 4$ 、レイノルズ数 $Re = 20 \sim 400$ (ただし、流速分布を Durst らと比較する場合には $Re = 406.7$ を計算した) の層流領域とした。レイノルズ数の影響については、これまで多くの研究者によって報告されている拡大比 $\alpha = 2, 3$ の場合について調べた。なお、図1中には代表として下向きに流れが再付着した場合の非対称流れのはく離流線パターンを示しており、はく離点および再付着点はそれぞれ $X_{R1} \sim X_{R4}$ で示してある。



(b) Authors ($\psi - \omega$)⁹⁾

図4 等渦度分布 ($Re = 100$)

図5 流路中心線上および壁面上の渦度分布 ($\alpha = 3$, $Re = 100$)

3. 計算結果と考察

図2(a), (b)に $\alpha = 2$, $Re = 406.7$ および $\alpha = 3$, $Re = 80$ の場合のステップ近傍での流速分布を一例として示す。いずれの場合も非対称な流れパターンを示すレイノルズ数領域であるので、流速分布は上下非対称となっている。比較のため、既報⁹⁾で報告した著者らの計算結果 ($\psi - \omega$ 法による), Durst⁶⁾, Fearn⁷⁾の実験結果および計算結果も同時に示す。なお、各著者でレイノルズ数の定義が異なっているが、本報告で定義したレイノルズ数に換算している。流路入口近傍で対称な流速分布は、ステップ近傍になると若干非対称な下向き流速分布となる。ステップの下流の流速分布は逆流領域が存在しており、はく離循環渦領域が生じている。上壁側の逆流領域は下壁側のそれよりも広い範囲に分布している。本報告の計算結果は、著者らの計算、Durst⁶⁾らおよびFearn⁷⁾らの計算および実験とよく一致しており、特に計算結果とは極めて良く一致している。このことから、OpenFOAMにより得られた速度分布は信頼性が高く、問題なく利用できることがわかる。

図3(a)に $Re = 100$, $\alpha = 2, 3, 3.5, 4$ の場合の流線を示す。比較のため、図3(b)に既報⁹⁾の結果を示す。流線は、入口流量の $1/10$ 間隔で図示している。ただし、はく離循環渦領域は入口流量の $1/100$ 間隔で示した。 $\alpha = 2$ の場合、ステップ下流に上下対称なはく離循環渦を持つ上下対称な流れパターンとなっている。 $\alpha = 3, 3.5, 4$ の場合、ステップ下流のはく離循環渦は下壁よりも上壁の方が長くなっており、主流は下壁に再付着した上下非対称な流れパ

ターンとなっている。上壁はく離循環渦は、 α の増加に伴い下向きに膨らんだ形となり、渦中心位置はより下流方向に位置している。さらに $\alpha = 3.5, 4$ は下壁はく離循環渦の下流に第三のはく離渦が生じた流れパターンとなっている。はく離流線形状、渦中心位置なども含め、全体的な流れパターンはいずれも既報の結果 [図3(b)] と良く一致している。図4(a)に $Re = 100$, $\alpha = 2, 3, 3.5, 4$ の場合の等渦度分布を示す。比較のため、図4(b)に既報⁹⁾の結果を示す。いずれの場合も上下ステップ角付近の渦度が最も強く、続くステップ下流はく離流線近傍 [図3(a)参照] に強い渦度が分布している。 $\alpha = 2$ の場合、流路中心線上に渦度 $\omega = 0$ が分布しており、渦度の強さは上下対称に分布していることから上下対称な流れであることがわかる。非対称な流れパターンである $\alpha = 3, 3.5, 4$ の場合、流路中心線付近の $\omega = 0$ の分布が下向きに膨らんだ形になっており、ステップ近傍での渦度の強さは上下非対称に分布している。ステップ角付近から下流に向かって分布している強い渦度は、上壁側 (はく離流線に沿う $\omega = 1$) よりも下壁側 ($\omega = -1$) の方がより下流まで広がっている。ステップ下流の上下壁では再付着点 ($\omega = 0$ の線と壁面の交点) の上流側に局所的に強い渦度が分布している (上壁側 $\omega = -1$, 下壁側 $\omega = 1$)。

これらを詳細に見るため、図5に $\alpha = 3$, $Re = 100$ における流路中心線上 ($y = 1.5$) および壁面上の渦度分布を示す。いずれの場合も、 ω の分布は定性・定量的に見て極めて良く一致している。特に $\omega = 0$ の点は再付着点を決定する最も明確な物理量であり、図6で示すはく離渦の長

さの両者の一致を裏付ける結果を示している。

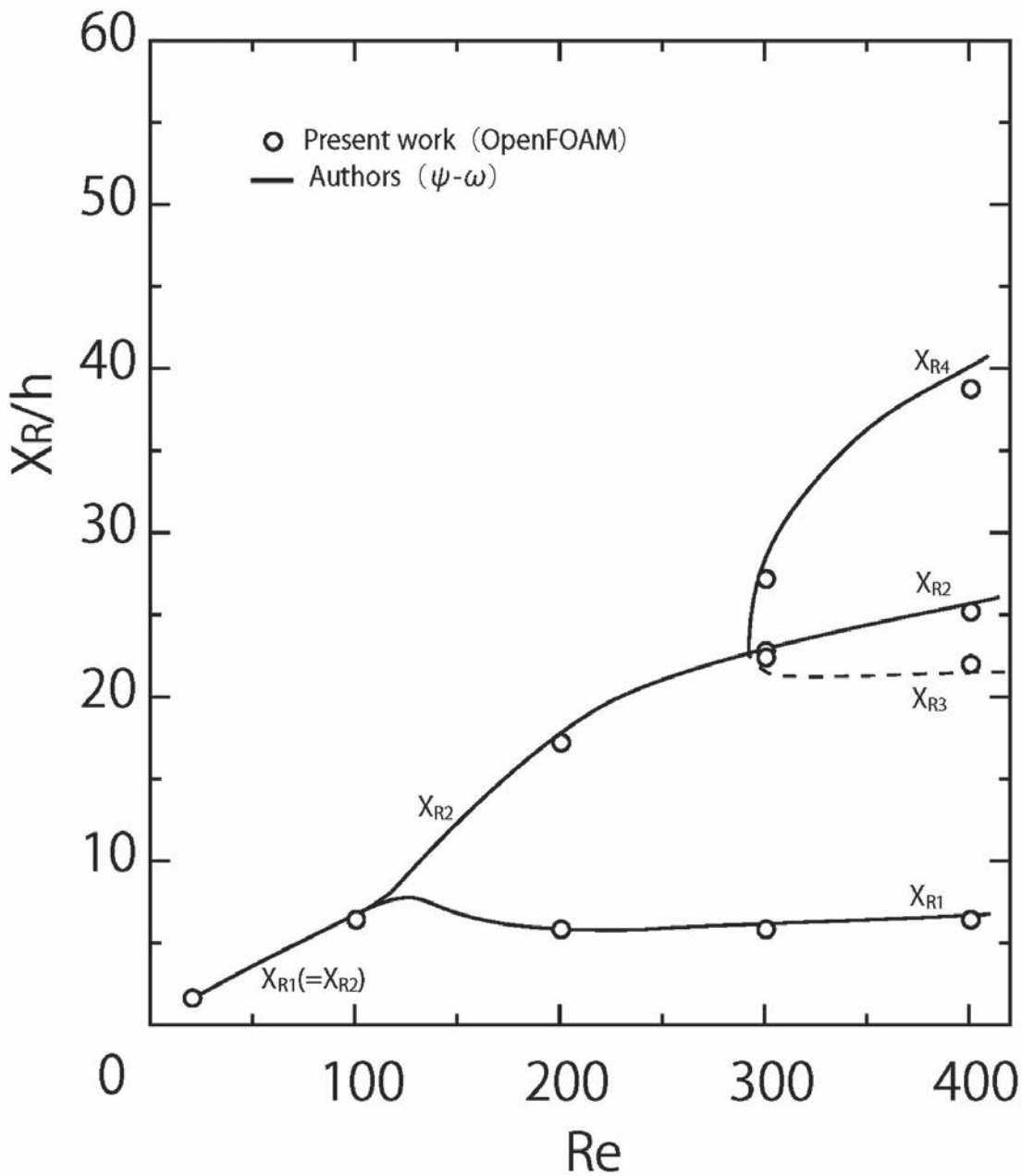
レイノルズ数の変化がはく離渦長さにおよぼす影響を見るため、図6(a), (b)にレイノルズ数の変化に伴うはく離渦長さ X_R/h の変化を示す。同時に既報⁹⁾の結果も示す。ステップ下流に生じるはく離渦の長さは、ステップから再付着点までの流れ方向距離とした (X_{R1} および X_{R2})。ここで、実線は既報の結果を示している。既報の結果の概要を述べると、以下のようなものである。

- i) 低いレイノルズ数で流れは上下対称であり、上下のはく離渦長は等しい。
- ii) 分岐レイノルズ数 Rec ($\alpha = 2$ の場合 $Rec \approx 100$, $\alpha = 3$ の場合 $Rec \approx 40$) を超えてレイノルズ数が高くなる

と非対称流れが安定な流れとなり、下壁のはく離渦 X_{R1} に比べ上壁のはく離渦 X_{R2} は長くなる。

- iii) さらにレイノルズ数が高くなると、下壁はく離渦の下流に第三のはく離渦 [はく離点 X_{R3} (既報の結果を波線で示す) ~再付着点 X_{R4} (既報の結果を実線で示す)] が生じる流れパターンとなる。この第三のはく離渦のはく離点 X_{R3} および再付着点 X_{R4} は、レイノルズ数の増加に伴い移動する。

図6中の記号 (○および□) は本報告の結果であるが、実線および波線と一致しており、はく離渦の長さを良く表現している。



(a) $\alpha = 2$

図6 レイノルズ数の変化に伴うはく離渦長さ X_R/h の変化

4. まとめ

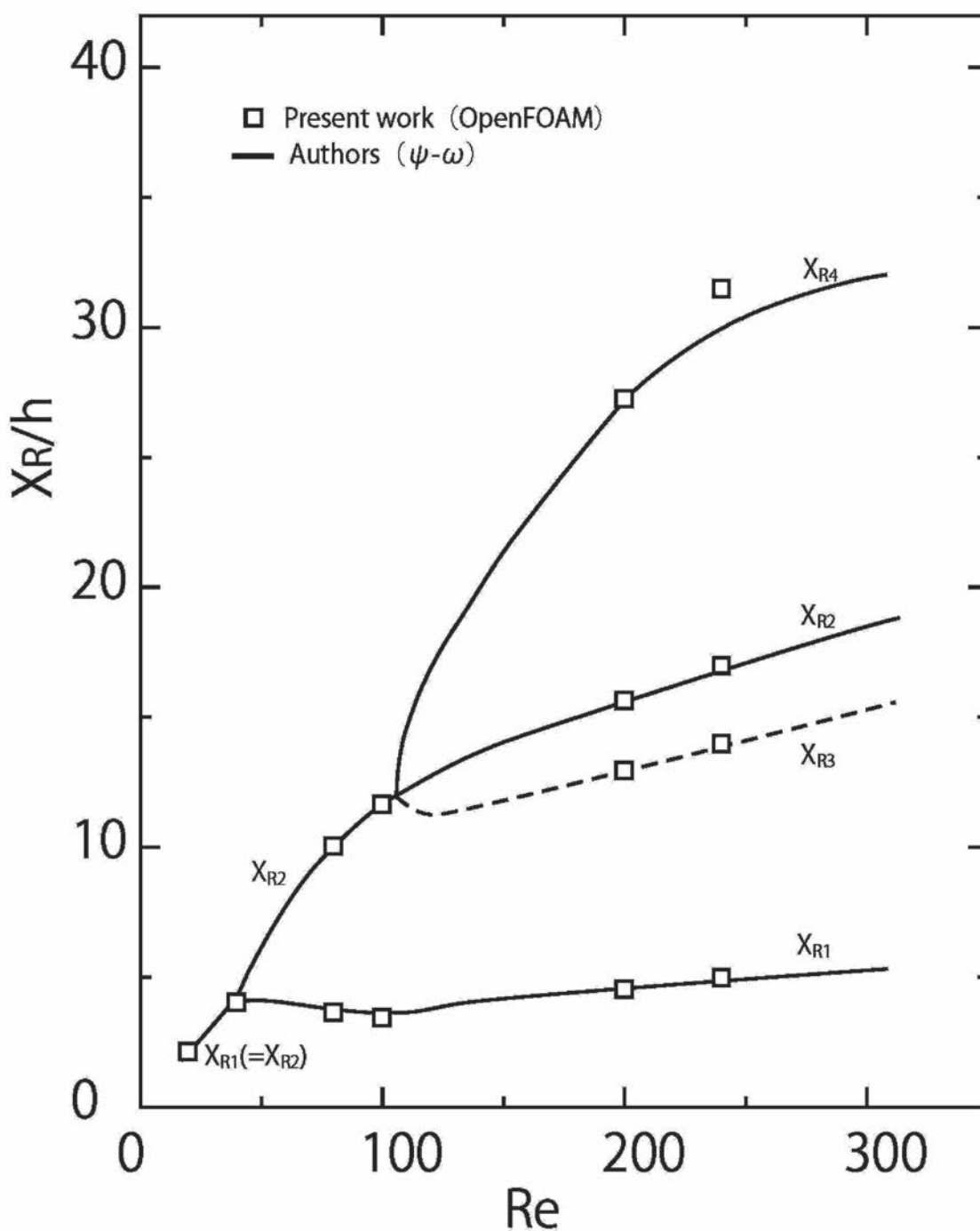
オープンソース CFD ツールボックス (OpenFOAM) を使って二次元対称急拡大流路内の流れを計算し、流れ関数-渦度法 (差分法) により求めた著者らの結果と比較検討した。その結果を以下に要約する。

(1) ステップ近傍の流速分布は著者らの計算, Durst らおよび Fearn らの計算および実験とよく一致しており, 特に計算結果とは極めて良く一致した。

(2) 流線および渦度の分布は既報の結果と一致しており, 特に渦度の分布は定性・定量的に見て極めて良く一致した。

(3) はく離渦の長さは, レイノルズ数が分岐レイノルズ数より低い場合, 高い場合, 第三のはく離渦の生じている場合も含め, 良く表現されていた。

以上のことより, 層流領域における比較的低い Re 数範囲 ($Re \leq 400$) において OpenFOAM は十分に使用できることを確認した。このことより, これらツールボックスの利用は流れ場の解析に効果的であり有効な手段となる。



(b) $\alpha = 3$

図6 レイノルズ数の変化に伴うはく離渦長さ X_R/h の変化

5. 文献

- (1) 今野・鎌田, 空気調和・衛生工学会講演論文集, 8 (2005), 1097-1100.
- (2) 田中, 日本機械学会流体工学部門ニューズレター流れ, 8 (2007).
- (3) 藤峰・仲町・速川, 工業加熱, 47- 1 (2010), 26-34.
- (4) 原崎, 住友重機械技報, No. 168 (2008), 19-22.
- (5) 古内, HINO TECHNICAL REVIEW, No.60, JUNE (2009), 41-47.
- (6) Fearn,R.M., Mullin,T. and Cliff,K.A., J. Fluid Mech., 211(1990), 595-608.
- (7) Durst,F., Pereira,J.C.F. and Tropea,C., J. Fluid Mech., 248(1993), 567-581.
- (8) 太田・柳岡・畑, 機論, 60-579, B (1994), 3930-3936.
- (9) 中西・桜井・大坂, 機論, 61-589, B (1995), 3182-3189.
- (10) 中西・桜井・大坂, 機論, 61-582, B (1995), 460-467.
- (11) 中西・桜井・大坂, 機論, 63-613, B (1997), 2915-2922.