

CFD で移動現象論 111 例題

—Ansys Fluent による計算解法—

工学博士 伊東 章 共著
博士(工学) 大川原 真一

コロナ社

まえがき

コンピュータによる数値流体力学（CFD）シミュレーションは、大型計算機の端末で実行するのが常識であった。しかし、最近のパソコンの性能向上により、簡単な CFD シミュレーションなら個人のパソコンでも可能となってきた。これに対応して、CFD のメジャーソフトである Ansys Fluent の ANSYS 社が、Ansys Student という学生の自習向け無料版の提供を 2015 年から始めた。Ansys Student は手軽に試用することができるので、個人のパソコンで CFD の学習、習得が容易となった。これからは数値計算の専門でない一般の学生、技術者の間で CFD の利用が広がると期待される。しかし、初心者向けの CFD シミュレーションの教科書、参考書はいまだネット上のもの以外はほとんどない。そこで、本書は特に Ansys Fluent で CFD を学ぼうとする学生、技術者のために、CFD シミュレーションの基礎的な例題解法を紹介したものである。

すでに流体工学や伝熱工学を学んだ学生、技術者が CFD 解析を始めようとするとき、教科書で学んだ解析解と CFD シミュレーションの結果が合っているのかがつねに気がかりとなる。ナビエ・ストークスの式など同じ基礎式を解いているのであるから、解析解と CFD シミュレーションの結果（数値解）は基本的には一致するであろう。しかし、実際はどの程度なのか？この例題集はまずこの疑問に答えようとした。もちろん本書の多数の例題を通した結論として、解析解と CFD シミュレーションの結果は一致することが確認された。しかし、CFD シミュレーションの結果に自信をもつために、CFD ユーザは、本書のような基礎的なモデルで自身の CFD シミュレーションの結果と解析解の一致を確認しておくべきである。さらに、CFD シミュレーションを実用的に利用するためには、自身が対象とする現象に近い系において、解析解や確立さ

れた相関式が与える諸変数の関係を CFD シミュレーションで再現できる知識とスキルが必要とされることに留意されたい。

書名とした移動現象論とは、工学部・化学工学課程の主要科目である。これは、機械工学の流体工学と伝熱工学が合体して、それに物質移動論が加わる内容である。移動現象論では、流れ、伝熱、物質移動のおおのこの基礎式の類似性に着目して、例えばある流れモデルの解析解を同形状の他の伝熱、物質移動に応用する。移動現象論では、このような手法（アナロジー）により、三つの移動現象を総合的に取り扱うのが特徴である。本書の 111 例題のうち、41 例題は移動現象論の教科書に記載のモデルである（ファイル番号 <etp*_*> は前著の「Excel で気軽に移動現象論」^{1)†} と共通である）。それらに加えて追加した 70 例題は、二相モデル、3D など CFD 特有のやや高度なモデル解析を取り扱っている。

本書の各例題は独立しているので、ページ順に読む必要はない。流体工学や伝熱工学ですでに習ったことのあるモデルから試すことをおすすめする。コロナ社のホームページ (<https://www.coronasha.co.jp/>) の本書サポートページに各例題の資料が掲載されているので（目次裏“サポートページの資料”参照）、読者自身でモデルを再現しながら解法の操作・設定方法を学習できる。なお、例題集という構成上、本書でのソフトの細かい操作説明は不十分である。この点は付属資料の Excel シートやビデオで補っていただきたい。

本書のもととなった化学工学誌の連載「CFD で気軽に移動現象論」（2021 年 8 号～2022 年 8 号）でお世話になった三角隆太氏（横浜国立大学）、本書の出版に際しご協力いただいたアンシス・ジャパン（株）、サイバネットシステム（株）に感謝申し上げます。

2023 年 9 月

伊東 章，大川原真一

[†] 肩付き数字は、巻末の引用・参考文献の番号を表す。

目 次

1 章 流 れ

1.1	境界速度起因の粘性流れ	2
例題 1.1	平行平板間の Couette 流れ <etp1_01>	2
例題 1.2	非定常 Couette 流れ <etp1_20>	4
例題 1.3	二層 Couette 流れ <etp1_02>	6
例題 1.4	正方形ダクト内 Couette 流れ <etp1_03>	8
例題 1.5	二重円筒内 Couette 流れ <etp1_04>	10
1.2	圧力起因の粘性流れ	12
例題 1.6	平行平板間の Couette–Poiseuille 流れ <etp1_05>	12
例題 1.7	円管内流れ <etp1_07>	14
例題 1.8	矩形ダクト内の Poiseuille 流れ <etp1_11>	16
例題 1.9	オリフィス流れの圧力損失 <etp1_23>	18
例題 1.10	平膜モジュール流れモデル—多孔質ゾーン— <etp1_35>	20
1.3	外力起因の粘性流れ	22
例題 1.11	流下液膜 <etp1_12>	22
例題 1.12	開水路流れ <etp1_14>	24
例題 1.13	垂直平板間の自然対流流れ <etp1_13>	26
1.4	強 制 対 流	28
例題 1.14	平板に沿う層流境界層 <etp1_17>	28
例題 1.15	円柱まわりの層流流れ (円柱 : <etp1_22>, 球 : <etp1_27>)	30
例題 1.16	攪拌槽のフローパターン <etp1_24>	32
例題 1.17	2次元空気砲 <etp1_28>	34
1.5	混 相 流	36

例題 1.18	ベンチュリーメーター <etp1_29>	36
例題 1.19	ピトー管 <etp1_31>	38
例題 1.20	ロータメータ <etp1_30>	40
例題 1.21	回転容器中の強制渦 <etp1_36>	42
例題 1.22	二重円筒内の自由渦 <etp1_37>	44
例題 1.23	水滴および気泡の終末速度 <etp1_38>	46
例題 1.24	流下液膜流れ (二相モデル) <etp1_32>	48
例題 1.25	Bostwick 粘度計 <etp1_34>	50
例題 1.26	スラグ流れ (液液系 : <etp1_33>, 気液系 : <etp1_42>)	52
例題 1.27	気泡の生成 <etp1_39>	54
例題 1.28	水の滴下 <etp1_45>	56
例題 1.29	液滴の終末速度—雨の降る速度— <etp1_46>	58
例題 1.30	充填層の圧力損失 <etp1_44>	60
例題 1.31	多孔質材料中の水滴の浸透・透過—気固液三相モデル— <etp1_43>	62
例題 1.32	流動層—グラニューラモデル— <etp1_40>	64
例題 1.33	粒子の沈降分離—DDPM モデル— <etp1_41>	66

2 章 伝 熱

2.1	伝 導 伝 熱	68
例題 2.1	多層壁の伝熱 <etp2_01>	68
例題 2.2	円筒状多層壁の伝熱 <etp2_02>	70
例題 2.3	矩形材料の温度分布 <etp2_03>	71
例題 2.4	円柱材料の温度分布 <etp2_04>	72
例題 2.5	電熱ヒーターの中心温度 <etp2_12>	73
2.2	非定常伝導伝熱	74
例題 2.6	板状材料の加熱 <etp2_05>	74
例題 2.7	円柱材料の加熱 <etp2_08>	76
例題 2.8	球状材料の加熱 <etp2_09>	77
例題 2.9	空気中材料の非定常複合伝熱—対流境界条件— <etp2_33>	78
例題 2.10	皮膚から壁への非定常伝熱 <etp2_07>	80
例題 2.11	レトルトパウチの非定常伝熱 <etp2_06>	82

2.3	対流伝熱	
例題 2.12	平行平板間 Poiseuille 流れへの伝熱 <etp2_14>	84
例題 2.13	円管内層流流れへの伝熱 (壁面温度一定) <etp2_15>	86
例題 2.14	円管内層流流れへの伝熱 (壁面熱流束一定) <etp2_16>	88
例題 2.15	平板上の温度境界層 <etp2_17>	90
例題 2.16	円柱まわりの強制対流伝熱 <etp2_31>	92
例題 2.17	球まわりの強制対流伝熱 <etp2_32>	94
例題 2.18	垂直平板上の自然対流伝熱 <etp2_19>	96
2.4	複合伝熱	98
例題 2.19	ハーフは暖かくフーフは冷たいのはなぜ <etp2_34>	98
例題 2.20	缶ビールが冷える時間 <etp2_21>	100
例題 2.21	フィンの伝熱 <etp2_22>	102
例題 2.22	ヒートシンクの放熱性能 <etp2_35>	104
例題 2.23	二重管式熱交換器 <etp2_26>	106
2.5	凝縮伝熱・蒸発伝熱	108
例題 2.24	電気ケトルの沸騰・蒸発—Lee モデル— <etp2_28>	108
例題 2.25	面上の水滴の蒸発—Lee モデル— <etp2_36>	110
例題 2.26	面上の滴状凝縮—Lee モデル— <etp2_37>	112
例題 2.27	膜状凝縮—Lee モデル— <etp2_30>	114
例題 2.28	プール沸騰—物質移動モデル— <etp2_38>	116
例題 2.29	膜状凝縮・滴状凝縮—物質移動モデル— <etp2_39>, <etp2_40>	118
例題 2.30	水平円管上の凝縮—物質移動モデル— <etp2_42>	120

3章 物質移動と拡散分離操作

3.1	静止媒体中の成分拡散 一定常, 非定常	122
例題 3.1	静止ガス中の定常拡散 <etp3_03>	122
例題 3.2	板状材料の乾燥—非定常拡散— <etp3_04>	124
例題 3.3	円柱状材料の乾燥—円筒座標非定常拡散— <etp3_09>	126
例題 3.4	球状材料の乾燥—球座標非定常拡散— <etp3_10>	127
3.2	対流拡散	128

例題 3.5	点源からの拡散 <etp3_21>	128
例題 3.6	平板上の濃度境界層 <etp3_22>	130
例題 3.7	流下液膜へのガス吸収 <etp3_17>	132
例題 3.8	円管内流れへの濃度拡散 (Graetz 問題) <etp3_20>	134
3.3	気液間の物質移動 (蒸発, 凝縮, ガス吸収)	136
例題 3.9	一方拡散—物質移動モデル— <etp3_14>	136
例題 3.10	ガス吸収—物質移動モデル— <etp3_35>	138
例題 3.11	水滴の蒸発—物質移動モデル— <etp3_36>	140
例題 3.12	滴状凝縮—物質移動モデル— <etp3_37>	142
例題 3.13	水滴の蒸発・滴状凝縮—熱・物質同時移動モデル— <etp3_54>	143
例題 3.14	床面上の水の蒸発—物質移動モデル— <etp3_46>	146
例題 3.15	膜状凝縮—物質移動モデル— <etp3_49>	148
3.4	物質移動操作	150
例題 3.16	蒸発：拡散セル—熱・物質移動モデル— <etp3_61>	150
例題 3.17	乾燥：材料—空気間の減率乾燥モデル <etp3_50>	152
例題 3.18	ガス吸収：流下液膜へのガス吸収—気液相モデル— <etp3_48>	154
例題 3.19	ガス交換：人工肺のモデル <etp3_44>	156
例題 3.20	液液抽出：並流接触 <etp3_51>	158
例題 3.21	液液抽出：向流接触 <etp3_52>	160
例題 3.22	透析：ダイアライザー <etp3_42>	162
例題 3.23	吸着：固定層吸着と破過曲線 <etp3_40>	164
例題 3.24	クロマトグラフィー <etp3_43>	166
例題 3.25	調湿：水の蒸発と湿球温度 <etp3_45>	168
例題 3.26	乾燥：落下水滴の蒸発 <etp2_45>	170
例題 3.27	蒸留：太陽熱蒸留器 <etp3_57>	172
例題 3.28	蒸留：二成分系単蒸留 <etp3_59>	174

4 章 装置の混合特性

例題 4.1	石油タンクの換気—流通式混合槽— <etp3_47>	176
例題 4.2	流通式混合槽の混合特性—ステップ応答とインパルス応答—	

<etp3_39>, <etp3_53>	178
例題 4.3 多段流通式混合槽の混合特性—ステップ応答とインパルス応答— <etp3_41>	180
例題 4.4 プラグフローの混合特性—ステップ応答とインパルス応答— <etp3_16>	182
例題 4.5 層流管流れの混合特性—ステップ応答— (LFR モデル) <etp3_33>	184
例題 4.6 層流管流れの混合特性—インパルス応答— (細管流れの Taylor 分散) <etp3_32>	186

5章 反応工学

5.1 回分反応器 (BR)	188
例題 5.1 液相 BR における逐次反応 <etp5_01>	188
例題 5.2 非等温 BR <etp5_02>	190
5.2 流通式槽型反応器 (CSTR)	192
例題 5.3 CSTR の非定常挙動 <etp5_03>	192
例題 5.4 多段 CSTR の非定常挙動 <etp5_04>	194
5.3 管型反応器 (PFR)	196
例題 5.5 液相 PFR (一次反応) <etp5_05>	196
例題 5.6 液相 PFR における逐次反応 <etp5_06>	198
例題 5.7 気相等温 PFR <etp5_07>	200
例題 5.8 非等温液相反応 PFR <etp5_08>	202
例題 5.9 非等温気相反応 PFR <etp5_09>	204
例題 5.10 非理想管型反応器—反応を伴う混合拡散— <etp5_10>	206
5.4 物質拡散と反応の複合モデル	209
例題 5.11 触媒有効係数—反応を伴う拡散 (球座標) — <etp5_12>	209
例題 5.12 反応吸収—反応を伴う拡散 (1次元) — <etp5_13>	210
例題 5.13 メンブレンリアクター (触媒の不均一反応) <etp5_14>	212
例題 5.14 メタンの拡散燃焼 <etp5_11>	214

引用・参考文献	216
---------------	-----

サポートページの資料

コロナ社ホームページの本書サポートページ (<https://www.coronasha.co.jp/np/isbn/9784339066661/>) に各例題の付属資料として以下を掲載している。

1. Excel ファイル (<*.xlsm>) [†] : ソフトウェアの設定をメニューに従い詳しく記述している。各モデルの解析解も示している。
2. プロジェクトファイル (<*.zip>) : ダウンロードして解凍するとプロジェクトファイル <*.wbpj> と付属のフォルダ <*_files> となる。<*.wbpj> ファイルをダブルクリックして例題解法が立ち上がる。
3. ビデオ資料へのリンク : 36 例題にソフトの設定を解説したビデオがある。また、非定常計算のモデルは計算結果を紹介するビデオがある。

Images used courtesy of ANSYS, Inc.

[†] 1. ~ 3. に記載されたファイル名の * 部分は、各例題タイトルの末尾にあるファイル番号 <*_*> の *_* 部分に対応している。

1 章 流 れ

この章では、基礎的な粘性流れについて CFD 解析を行う。一般に粘性流れは、流動を引き起こす要因ごとに、境界速度起因、圧力起因、外力起因、強制対流に分類される。章の前半（～例題 1.17）では、各例題をこの分類に従って示す。これらは前著¹⁾で解析解を示した移動現象論のモデルであり、その解析解と CFD 計算結果を比較して、CFD 計算の適用性を検証する。章の後半は、移動現象論の範囲を超えて、CFD で可能となった混相流のモデル (VOF) を用いて、各種流体計測法、気液二相流れ、気固二相流れについて CFD モデル解析の例を示す。

【起動とプロジェクトの構成】

はじめに、プロジェクト（解析モデル）の構成を解説する。起動した Ansys Workbench で、左欄の解析システムのリストから**流体**（Fluent）を選択し、右ウィンドウの**プロジェクト概念図**に移動させる。すると下図の**新規プロジェクト**が自動作成される。



図 新規プロジェクトの構成

プロジェクトは階層になっており、新規モデルではまず**ジオメトリ**で流れ場の形状を作成する。これを右クリックして作図用の CAD ソフトを選択する。本書の例題では、ほとんど Ansys DesignModeler を使用した。なお、本書ではこれ以降ジオメトリおよび形状を**領域**と略称する。

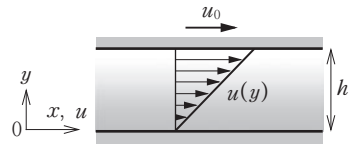
次いで**メッシュ**で領域を区切るメッシュを作成し、**セットアップ**に進む。**セットアップ**が Ansys Fluent の本体である。モデルの条件設定、計算の実行、結果表示を行う。計算結果は Ansys CFD-Post でもより詳しく表示できる。

なお、一つのモデルは、プロジェクトファイル (*.wbpj) とその付属フォルダ (*_files) の一組で構成されている。

1.1 境界速度起因の粘性流れ

【例題 1.1】 平行平板間の Couette 流れ^{1), p.3 <etpl_01>}

距離 $h = 0.01$ m の平行平板間に水があり、片側の平板が速度 $u_0 = 0.1$ m/s で動き、もう片側は静止している (図 1)。平板間に形成される定常速度分布 $u(y)$ を求めよ。モデルの基礎式は図に示す粘性項のみとなる。この解 $u(y)$ は直線状の速度分布となる。



基礎式 (粘性項のみ) :

$$0 = \mu \frac{d^2 u}{dy^2}$$

図 1 平行平板間の Couette 流れ

【CFD 解法】 領域[†]は高さ 10 mm × 長さ 30 mm である。サーフェスボディ: 流体とする。メッシュで 40×20 分割の 800 cells とする。各辺に名前を付けておく (図 2)。

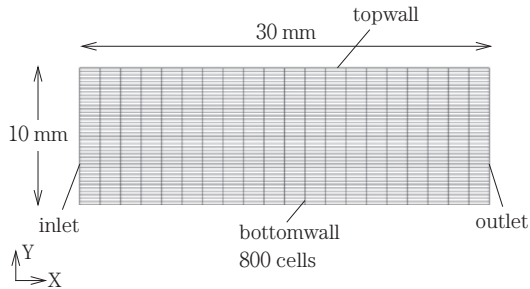


図 2 領域とメッシュ

セットアップで一般/定常, 平面, 重力なし, モデル/粘性/層流とする。設定/物性/流体で water-liquid をリストアップする。粘性係数 μ は物性値で設定される。セルゾーン条件/流体/_(ゾーン名) で物質名: water-liquid を設定して、領域内の流体を水とする。

境界条件は図 3 のようである。topwall を移動壁として X 方向速度 $u = 0.1$ m/s を設定する。bottomwall は静止壁である。流体が入り出る inlet, outlet

^{†1} 本書では、全例題を通して、Ansys Fluent のフロントエンドに表示される設定項目 (場合によっては設定値) について、主要と思われるものについて太字で表記し、全体の流れが一目で把握できるようにしている。

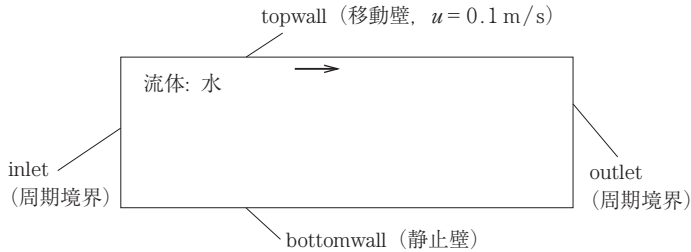


図3 境界条件

に周期境界条件^{†2}の設定を行う。これは境界条件でこれらの面をインターフェースと指定して、メッシュインターフェースで二つの面に名前 (periodic) を付けてインターフェースにする。タイプ: 並進の設定もする。

計算は計算手法^{†3}: SIMPLE による。初期化して、反復回数: 2000 で計算実行する。

【CFD 計算結果】 図4に、得られた速度分布を示す。基礎式の解と同じ平板間で直線状の速度分布となっている。また、周期境界条件により、inlet と outlet が同じ速度分布となっている。

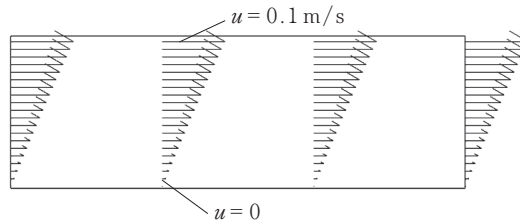


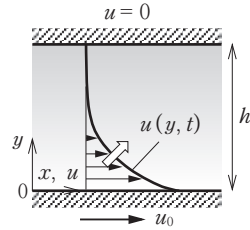
図4 計算結果 (速度分布)

^{†2} 周期境界条件は、この例題のように、一方向に無限長さのモデルに使うと便利である。本書では他に例題 1.2 非定常 Couette 流れ、例題 1.3 二層 Couette 流れ、例題 1.12 開水路流れ、で用いた。ただし、管内流れ (例題 1.7) のように、圧力差が発生するモデルでは設定できない。

^{†3} Ansys Fluent 上での実際の表記は“解析/手法/計算手法/スキーム”ですが、以下、便宜的に、計算手法、計算スキーム、スキーム、解析/計算手法、解析/手法のように表記する場合があります。なお、他の設定項目についても、これと同様な表記のゆれがありますが、その点は、あらかじめご容赦、ご理解のほどお願いいたします (編集者注)。

【例題 1.2】 非定常 Couette 流れ^{1), p35}
 <etpl_20>

距離 $h = 0.01$ m の平行平板間に水がある (図 1)。時間 $t \geq 0$ s で底面が x 方向に一定速度 $u_0 = 0.01$ m/s で動く場合の、水中の速度分布 $u(y)$ の経時変化を求めよ。このモデルの基礎式は、左辺に非定常項のある図中の式である。



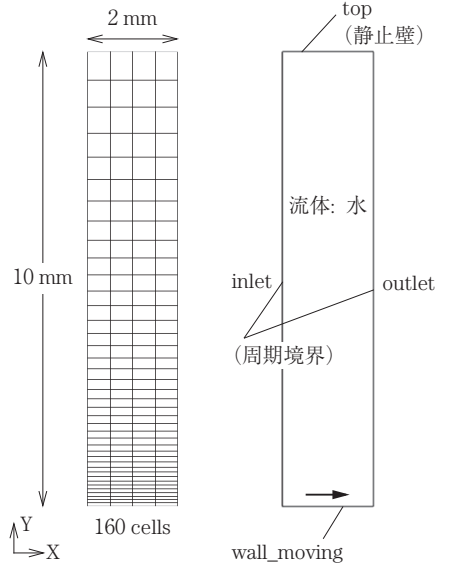
基礎式 (非定常項と粘性項) :

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

図 1 非定常 Couette 流れ

【CFD 解法】 領域は X 方向 2 mm × Y 方向 10 mm で、領域の上下が**静止壁**、**移動壁**である。メッシュで 4×40 分割の 160 cells とする。左右の境界に底辺の移動壁から Y 方向に**バイアス** (係数: 10) を設定して、移動壁付近のメッシュを細かくする (図 2 (a))。

セットアップから**一般/非定常**、**モデル/粘性/層流**を設定する。設定/**物性/流体**で water-liquid をリストアップする。**セルゾーン条件/流体/_(ゾーン名)**で物質名: water-liquid を設定して、領域内の流体を水とする。密度 ρ 、粘度 μ が物性値で設定される。



(a) 領域とメッシュ (b) 境界条件

境界条件で底辺 (wall_moving) を**移動壁**として X 方向

速度 $u_0 = 0.1$ m/s を設定し、上の壁 (top) は**静止壁**である。また、境界条件で左右壁 (inlet, outlet) をインターフェースに指定する (図 2 (b))。次いで、**メッシュインターフェース**でこの左右壁の組に名前を付けて、**インター**

図 2 計算モデル

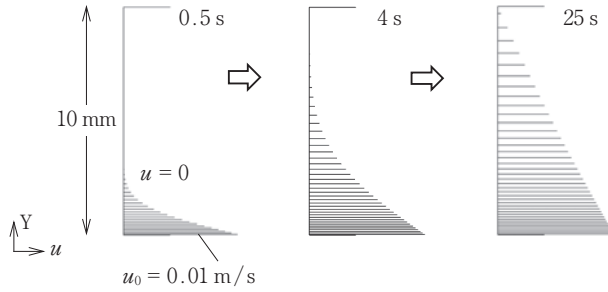
フェース（タイプ：並進）と設定する。これで**周期境界条件**となる。

計算手法：SIMPLE により，初期化して，時間進行：Fixed，時間刻み幅：0.01 s，時間ステップ数：2500（25 s），最大反復回数：20 で**計算実行**する。

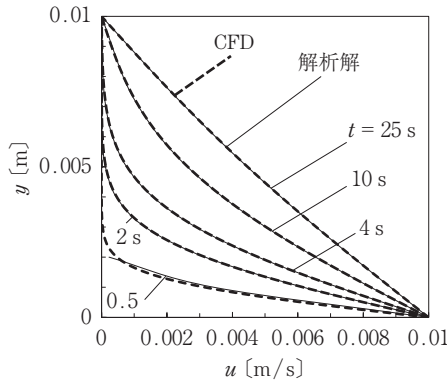
【CFD 計算結果】速度分布の時間ごとの変化を，**図 3 (a)** にベクトル図で示す。速度分布の発達が水中に進行して，25 s 程度で定常の直線状速度分布となる。図 (b) に速度分布の経時変化をグラフで示す。図中の細実線で非常速度分布の解析解^{B), p.119}：

$$u = u_0 \left\{ (1 - \eta) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n\pi} \exp(-n^2 \pi^2 \tau) \sin(n\pi\eta) \right\} \quad \left(\eta = \frac{y}{h}, \tau = \frac{(\mu/\rho)t}{h^2} \right)$$

と比較した。太破線の CFD 計算結果は理論値と良好に一致した。



(a) 速度分布の変化（ベクトル図）



(b) 時間ごとの速度分布（解析解との比較）

図 3 計算結果[†]

[†] Ansys Fluent による計算結果を“CFD”と表記し，通常この図 (b) のグラフのように，太い破線で表記する。

—著者略歴—

伊東 章 (いとう あきら)

1977年 東京工業大学工学部化学工学科卒業

1979年 東京工業大学大学院修士課程修了
(化学工学専攻)

1982年 東京工業大学大学院博士課程修了
(化学工学専攻)
工学博士

1982年 東京工業大学助手

1983年 新潟大学助手

1988年 新潟大学助教授

2007年 新潟大学教授

2009年 東京工業大学教授

2018年 東京工業大学名誉教授

大川原 真一 (おおかわら しんいち)

1990年 東京工業大学工学部化学工学科卒業

1992年 Leeds 大学大学院修士課程修了
(化学工学専攻)

1993年 東京工業大学大学院修士課程修了
(化学工学専攻)

1996年 東京工業大学大学院博士課程修了
(化学工学専攻)
博士 (工学)

1996年 東京工業大学助手

2009年 東京工業大学特任准教授

2017年 東京工業大学特任教授

現在に至る

CFDで移動現象論 111 例題 —Ansys Fluent による計算解法—

Transport Phenomena 111 Examples by CFD

—Computational Solutions by Ansys Fluent—

© Akira Ito, Shinichi Ookawara 2023

2023年11月22日 初版第1刷発行

★

検印省略

著 者 伊 東 章

大 川 原 真 一

発 行 者 株式会社 コロナ社

代 表 者 牛 来 真 也

印 刷 所 新日本印刷株式会社

製 本 所 有限会社 愛千製本所

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発 行 所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)

ホームページ <https://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-06666-1 C3043 Printed in Japan

(金)



©COPY <出版者著作権管理機構 委託出版物>

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構(電話 03-5244-5088, FAX 03-5244-5089, e-mail: info@jcopy.or.jp)の許諾を得てください。

本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。落丁・乱丁はお取替えいたします。