数値計算による流体力学

ポテンシャル流，層流，そして乱流へ

博士(理学)　岡本正芳 著

コロナ社

数値計算による流体力学

――ポテンシャル流，層流，そして乱流へ――

博士（理学）　岡本　正芳 著

コロナ社

ま　え　が　き

本書は，著者が所属している静岡大学工学部機械工学科の学部 3 回生に対して講義してきた「流体力学 III」と大学院工学研究科機械工学専攻の修士学生に対して講義してきた「流体力学特論」後半の講義ノートを活用して，その講義の教科書として執筆した。前者は完全流体の非圧縮性および圧縮性ポテンシャル流が，後者は乱流とその数値計算法が中心の講義となっており，本書はその内容とその間を埋めるのに必要な層流解析から構成されている。筆者は理学部物理の出身で，現在乱流現象に対する統計理論と数値シミュレーションによる基礎研究に取り組んできた。その経緯からも近年の計算機能力の発達の恩恵を多大に受けてきたが，講義を行ってきてそれに反比例するように数学的な取組みが理解できない学生諸氏が増えてきていることに日々危惧(ぐ)している。また，販売されている流体解析ソフトを内容を理解することなく盲目的に利用しているユーザーの存在も近年増えている。そこで，本書では解ける方程式は解析的に解くことを意識し，さらに数値計算方法においても数学的に記述し，その理解につなげることを重視している。一方，著者の経験からも実験や実用面といった点では欠けている点は多々あると思うが，解答を web で提供する章末問題や，web で公開する付録プログラムコード†などによる体験から工学分野では最も難解な流体力学への興味を持ってもらえれば幸いである。最後に本書の執筆を勧誘していただいたコロナ社に心から感謝申し上げる。

2016 年 11 月

岡本　正芳

† コロナ社の書籍詳細ページ（http://www.coronasha.co.jp/np/isbn/9784339046519/）の関連資料からダウンロードのこと。

目　　次

1.　流体と基礎方程式

1.1　流体力学の対象 …… 1
1.2　流体運動のとらえ方 …… 2
　1.2.1　ラグランジェ的見方 …… 2
　1.2.2　オイラー的見方 …… 3
1.3　基 礎 方 程 式 …… 6
　1.3.1　ラグランジェ描像での完全流体の基礎方程式 …… 6
　1.3.2　オイラー描像での基礎方程式 …… 8
　1.3.3　ナビア–ストークス方程式 …… 9
　1.3.4　エネルギー流束方程式 …… 10
　1.3.5　バロトロピー流体 …… 12
　1.3.6　ラグランジェの渦不生不滅の法則 …… 13
章　末　問　題 …… 15

2.　ポテンシャル流：非圧縮性

2.1　ベルヌーイの定理 …… 16
　2.1.1　さまざまなベルヌーイの定理の導出 …… 17
　2.1.2　水力学でのベルヌーイの定理の応用例 …… 19
2.2　ラプラス方程式 …… 22
2.3　2 次元ポテンシャル流 …… 24
　2.3.1　典型的な解の例 …… 27
　2.3.2　静止流体中を一定速度で移動する円柱周りの流れ …… 37

2.3.3　循環が寄与している一様流中の静止円柱周りの流れ …… 39
2.4　翼への適用と等角写像 …… 42
2.4.1　基礎的な等角写像 …… 43
2.4.2　ジューコフスキー変換 …… 44
2.4.3　カルマン–トレフツ変換 …… 49
2.4.4　翼周りの流れ …… 49
2.5　一般形状物体周りの流れ …… 53
2.6　3次元ポテンシャル流 …… 55
章　末　問　題 …… 58

3.　ポテンシャル流：圧縮性

3.1　圧縮性ポテンシャル流の基礎方程式 …… 60
3.2　1次元圧縮性流れとラバール管 …… 61
3.3　圧縮性ポテンシャル流の定常解の例 …… 66
3.4　圧縮性ポテンシャル流の速度ポテンシャル方程式 …… 71
3.5　ホドグラフ法 …… 74
3.6　M^2 展開法 …… 76
3.7　薄翼理論 …… 84
章　末　問　題 …… 87

4.　非圧縮性実在流体解析

4.1　ナビア–ストークス方程式 …… 88
4.2　平行平板間流れ …… 90
4.3　円筒座標系における層流解 …… 96
4.3.1　ポアズイユ流れ …… 96
4.3.2　強制渦と自由渦 …… 97
4.4　正三角形流路における解 …… 99
4.5　自由流れの解 …… 101

4.6 層流境界層 …… 104
章末問題 …… 109

5. 乱流の基礎

5.1 乱流遷移 …… 110
5.2 相似則 …… 113
5.3 相関 …… 115
5.4 スペクトル …… 119
5.5 間欠性 …… 122
章末問題 …… 124

6. 乱流数値解析

6.1 直接数値計算 …… 125
6.2 アンサンブル平均モデルシミュレーション …… 129
6.2.1 渦粘性型モデル …… 132
6.2.2 応力方程式モデル …… 145
6.2.3 代数応力モデル …… 149
6.2.4 RANS の結果の例 …… 150
6.3 ラージ・エディ・シミュレーション …… 152
6.3.1 フィルター関数 …… 155
6.3.2 SGS モデル …… 159
6.3.3 ダイナミック手法 …… 164
6.3.4 LES で必要となる数値計算処理 …… 168
6.3.5 LES における追加事項 …… 171
章末問題 …… 172

7. 数値スキーム：時間解析

7.1 時間発展法とは …… 173
7.2 時間発展法の 3 タイプ …… 174
7.2.1 Adams-Bashforth タイプ陽解法 …… 174
7.2.2 Adams-Moulton タイプ半陰解法 …… 176
7.2.3 Runge-Kutta タイプ陽解法 …… 178
7.2.4 一様せん断乱流での検証 …… 180
章 末 問 題 …… 182

8. 数値スキーム：空間解析

8.1 擬スペクトル法 …… 183
8.2 有 限 差 分 法 …… 186
8.2.1 非保存型差分表現 …… 189
8.2.2 保存型差分表現 …… 191
8.2.3 コンパクト差分法 …… 194
8.2.4 FDM での圧力解法 …… 198
8.3 有 限 体 積 法 …… 203
8.3.1 補　間　法 …… 205
8.3.2 離散化方程式 …… 212
8.3.3 FVM での圧力解法 …… 213
8.3.4 FVM 計算結果の例 …… 220
8.4 有 限 要 素 法 …… 221
8.4.1 ポアソン方程式の FEM …… 221
8.4.2 ナビア–ストークス方程式の FEM …… 227
章 末 問 題 …… 230

付 録 …… 231
A.1 流体力学で必要となる数学 …… 231
A.1.1 ベクトル代数 …… 231
A.1.2 テンソル代数 …… 234
A.1.3 複素関数論 …… 236
A.1.4 偏微分方程式の分類 …… 238
A.2 曲線直交座標系におけるナビア–ストークス方程式 …… 238
A.2.1 一般曲線直交座標系表現 …… 243
A.2.2 円筒座標系表現 …… 247
A.2.3 3 次元極座標系表現 …… 249
A.3 流体力学で必要となる熱力学 …… 251
A.4 参考プログラム …… 252
引用・参考文献 …… 253
索 引 …… 257

1 流体と基礎方程式

まず本章では流体力学を学ぶうえでの基礎となる流体の種類，流体運動のとらえ方や基礎方程式に関して解説していく。さらに，物理原則と保存則との関連性について紹介していく。

1.1 流体力学の対象

物質の三態変化は誰もが子供の頃から勉強してきた基礎的な概念で，固体（solid），液体（liquid），気体（gas）に分類できる。流体力学の対象である流体（fluid）は形状が自由に変形し運動できる液体と気体が主である。しかし，液体や気体中に固体が混在する際も，混相流として流体力学の検討対象となる。さらに高エネルギー状態において，物質構成要素である分子や原子から電子が電離した状態であるプラズマ（plasma）も条件によっては電磁流体として流体力学のターゲットとなる。一方，天文学や宇宙物理学では超重力場や光速に近いほどの流体運動を取り扱う相対論的流体力学や，極超低温の液体ヘリウムにおいて出現する超流動などをとらえるための量子流体力学など古典物理学のレベルを超えた流体力学も近年では重要になっており，かなり広範囲にわたる物理学の分野である。

流体の最も基礎的な分類としては，密度が変化しない非圧縮性条件（$\rho = \text{const.}$）に該当する水などの液体の非圧縮性流体（incompressible fluid）と，密度（$\rho \neq \text{const.}$）が変化する空気などの気体の圧縮性流体（compressible fluid）に分けられる。我々の身の回りの空気の流れは低速であることから密度変化は無視できるので非圧縮性流れとして取り扱い，おおよその概算では数%の密度変化はマッハ数が 0.3 を超えないと生じないので圧縮性流れとしての取扱いは航空機などの周りに生じる高速気体に限定される。後に支配方程式を見れば一目瞭然であるが，圧縮性流体の取扱いはより複雑なものとなる。

数学的取扱い方の観点からの分類も存在する。力学において抵抗や摩擦が働かない

とする仮定と同様な設定である粘性効果が働かない流れは完全流体（perfect fluid）となる。それに対して，現実に存在する流体は分子粘性率（molecular viscosity）または動粘度（kinetic viscosity）ν の寄与が存在し，その場合の流体を実在流体（real fluid）と呼ぶ。常温（20°C）での分子粘性率は，空気は 15.01×10^{-6}〔$\mathrm{m}^2/\mathrm{sec}$〕，水は 1.004×10^{-6}〔$\mathrm{m}^2/\mathrm{sec}$〕となる。圧縮性流れでは分子粘性率ではなく，それに密度をかけた粘性係数 $\mu(=\rho\nu)$ もよく利用される。また，圧縮性流れにおいて温度変化が激しい場合，粘性係数は一定値として取り扱うことができず，分子運動理論から評価されたサザーランド（Sutherland）の公式[51)†]

$$\mu = \mu_0 \frac{273.2 + C}{\theta + C} \left(\frac{\theta}{273.2} \right)^{3/2} \tag{1.1}$$

（$\mu_0 = 1.72 \times 10^{-5}$，$C = 111$）が利用される。粘性効果に関してはニュートンの応力法則が成立しない流体も粘弾性流体などとして存在するが，本書での実在流体はニュートンの応力法則に従うニュートン流体（Newtonian fluid）のみとする。完全流体は近似的に成立する流れは存在するが，厳密には実在流体の取扱いが必要となる。しかし，数学的な取扱いにおいて前者は後者に比べてはるかに簡便な点もあり，その理解は流体力学の基礎を学ぶうえで非常に重要なものとなる。

1.2　流体運動のとらえ方

流れの現象をいかにしてとらえるかについては，物理学の他の分野である電磁気学，量子力学などと同様，粒子の描像と場の描像に分けることができる。例えば，電磁気学であれば，電子やイオンなどの運動をとらえる立場が粒子的描像で，電場や磁場をマクスウェル方程式により解析するのが場の描像である。流体力学では前者はラグランジェ的見方で，後者はオイラー的見方であり，それらについて説明する。

1.2.1　ラグランジェ的見方

仮想的な流体粒子（fluid particle）をターゲットとして粒子的な描像で流れを探求することがラグランジェ（Lagrange）の見方である。この場合は，流体粒子の軌跡が解析対象となり，ある初期時刻 t_0 において位置 (x_0, y_0, z_0) にいた流体粒子が

† 肩付きの数字は巻末の引用・参考文献番号を表す。

ある程度時間が経過した時刻 t においてどこにいるのかを調べる。そのため，もし解が判明しているとすると

$$x = F_1(x_0, y_0, z_0, t), \quad y = F_2(x_0, y_0, z_0, t), \quad z = F_3(x_0, y_0, z_0, t) \tag{1.2}$$

と書ける。この解より，流体粒子の速度 $\boldsymbol{u}$ や加速度 $\boldsymbol{a}$ は時間微分することで

$$u = \frac{\partial x}{\partial t}, \quad v = \frac{\partial y}{\partial t}, \quad w = \frac{\partial z}{\partial t} \tag{1.3}$$

$$a_x = \frac{\partial^2 x}{\partial t^2}, \quad a_y = \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}, \quad a_z = \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} \tag{1.4}$$

と与えられる。流体粒子は明確な定義はないが，分子運動理論から算出される平均自由行程よりも十分に大きなもので，流れ場の詳細を表現できるくらい小さなものと考えられる。**図 1.1** のようにそれらすべての流体粒子に関して軌跡を計算する必要がある。そのため，非常に多くの流体粒子を取り扱う多体問題となり，理論的には有利な点もあるので解析に利用されてきたが，以前は実用面ではかなり現実感に乏しい概念であった。しかし，近年では急激な計算機能力の発達に伴い，混相流体などの研究においてラグランジェ的見方も重要性を増している。流体粒子を追跡するとその軌跡が一本の線を形成する。この線のことを流跡線（path line）という。

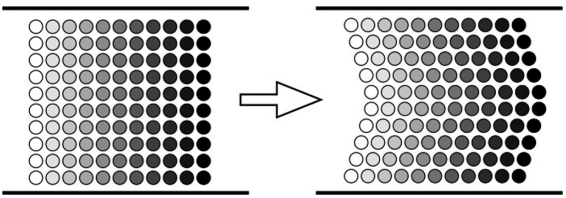

図 1.1　ラグランジェ的見方（流体粒子の動き）

1.2.2　オイラー的見方

場の描像であるオイラー（Euler）的見方では任意の時刻 t における空間各点 (x, y, z) での流れのありようを**図 1.2** のように調べていく。特に，流体力学では空間内での速度分布が最も重要な求めるべき対象の物理量である。もし，速度を記述する関数が判明できれば解は次式で与えられる。

$$u = f_1(x, y, z, t), \quad v = f_2(x, y, z, t), \quad w = f_3(x, y, z, t) \tag{1.5}$$

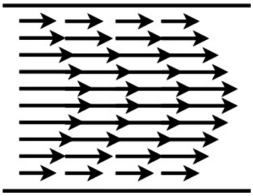

図 1.2　オイラー的見方（速度場）

ラグランジェ的見方では解くべき従属変数であった x，y，z がオイラー的見方では解を記述すべき独立変数として利用される。この解から流体粒子の軌跡と加速度を評価するには次式を用いる。

$$x = \int dtu, \quad y = \int dtv, \quad z = \int dtw \tag{1.6}$$

$$a_x = \frac{\partial u}{\partial t}, \quad a_y = \frac{\partial v}{\partial t}, \quad a_z = \frac{\partial w}{\partial t} \tag{1.7}$$

オイラー的見方ではときおり，流線（streamline）が重要な幾何情報となる。この線は評価する瞬間に流れ場を凍結させ，速度ベクトルに平行なものとなっている。その方程式は

$$\frac{dx}{u} = \frac{dy}{v} = \frac{dz}{w} \tag{1.8}$$

で与えられる。オイラー的見方では速度場が時間に依存しない状態があり，その状態を慣習的に「定常流れ」というが，定常流れの場合のみ流線はラグランジェ的見方での流跡線と一致する。また，流線と類似の幾何概念に渦線がある。渦線は速度の回転で与えられる渦度ベクトル

$$\boldsymbol{\omega} = \nabla \times \boldsymbol{u}, \quad \omega_i = \epsilon_{ijm} \frac{\partial u_m}{\partial x_j} \tag{1.9}$$

に平行な線である。

オイラー的見方において重要になる時間微分にはラグランジェ微分（Lagrangian derivative）がある。この微分は「実質微分」と呼ばれることもある。これはある流体粒子が持つ物理量が流れていくに従って時間的にどのように変化するのか特徴づけるもので

$$\frac{DF}{Dt} = \frac{\partial F}{\partial t} + u\frac{\partial F}{\partial x} + v\frac{\partial F}{\partial y} + w\frac{\partial F}{\partial z} \tag{1.10}$$

で定義される。デカルト直交座標系であれば次式のようにベクトル表現で記述することもできる。

$$\frac{DF}{Dt} = \frac{\partial F}{\partial t} + (\boldsymbol{u} \cdot \nabla) F \tag{1.11}$$

古典物理学の法則はガリレイ不変性（Galilean invariance）を満足する必要性がある。ガリレイ不変性は「慣性系は一義的に定めることはできず，一様な並進運動に関して不定である。」というものである。つまり，一様な並進運動する慣性系にのった移動座標系においても静止系においても物理法則に変化はなく，支配方程式は不変でなければならない。

図 1.3 のように静止系 (x, y, z, t) と速度 U で x 方向に移動する慣性系 (x', y', z', t') を考える。これらの座標系間の変数変換式はつぎのようになる。

$$x' = x - Ut, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = t$$

$$u' = u - U, \quad v' = v, \quad w' = w$$

この変換式を利用して両座標系で不変になる微分を検討する。移動座標系の時間微分は

$$\begin{aligned}\frac{\partial F(x', y', z', t')}{\partial t'} &= \frac{\partial F(x, y, z, t)}{\partial t}\frac{\partial t}{\partial t'} + \frac{\partial F(x, y, z, t)}{\partial x}\frac{\partial x}{\partial t'} \\ &\quad + \frac{\partial F(x, y, z, t)}{\partial y}\frac{\partial y}{\partial t'} + \frac{\partial F(x, y, z, t)}{\partial z}\frac{\partial z}{\partial t'} \\ &= \frac{\partial F(x, y, z, t)}{\partial t} + U\frac{\partial F(x, y, z, t)}{\partial x} \neq \frac{\partial F(x, y, z, t)}{\partial t}\end{aligned} \tag{1.12}$$

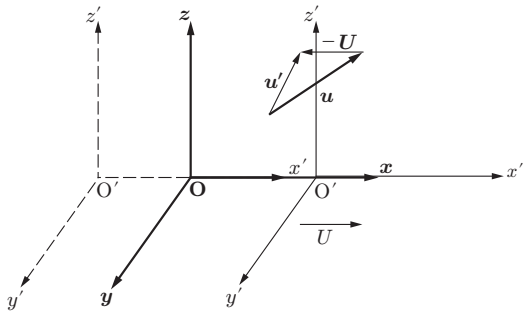

図 1.3　ガリレイ変換

索　　引

【あ】

亜音速流れ 63
厚　さ 42
圧縮性速度ポテンシャル方程式 72
圧縮性流体 1
圧力関数 12
圧力歪相関項 145
アンサンブル平均モデルシミュレーション 129

【い】

1 次精度オイラー陽解法 175, 177
1 次精度風上補間 206
1 方程式型モデル 132
一方程式型 SGS モデル 161
一様せん断乱流 180
一様等方性乱流 115
一般曲線直交座標系 238

【う】

ウェイク流 101
渦　糸 32
渦構造 126
渦　線 4
渦　度 4
渦度テンソル 10
渦なし条件 18
渦粘性率 132
打ち切り誤差 188
運動量厚さ 102

【え】

エネルギースペクトル 120
エネルギー伝達スペクトル関数 121
エネルギー保有または供給領域 121
エネルギー流束スペクトル関数 122
エネルギー流束方程式 11
エリアイジングエラー 186
円弧翼 46
エンストロフィー 126

【お】

オイラー 3
　——の運動方程式 9
　——の連続方程式 8
応力方程式モデル 145
重み関数 221
音　速 21

【か】

改良オイラー法 178
ガウシアンフィルター 156
拡張されたベルヌーイの定理 19
壁法則 113
ガリレイ不変性 5
カルマン定数 114
カルマン–トレフツ変換 49
カルマン–トレフツ翼 49
間欠性 123
完結問題 132
慣性領域 121
完全流体 2

【き】

擬スペクトル法 183
気体の状態方程式 11
境界層 104
境界層厚さ 108
強制渦 98
鏡像法 31

【く】

クェット流れ 90
クッタ–ジューコフスキーの仮説 52
クッタ–ジューコフスキーの定理 42
グリッドスケール 153
クロス項 154

【け】

迎　角 43
計量テンソル 239
ケーリー–ハミルトンの定理 126
弦　長 42

【こ】

後　縁 42
格　子 189
構造関数 122
高速フーリエ変換 185
抗　力 41
抗力係数 43
高レイノルズ数型モデル 138
コーシー–リーマンの関係式 26

コヒーレント構造型スマゴリンスキーモデル 163
コルモゴロフスペクトル 121
コルモゴロフ長 120
コルモゴロフ理論 120
コロケート格子配列 190
混合層流 101
コンパクト差分法 194

【さ】

再分配項 147
サザーランドの公式 2
サブグリッドスケール 153
散逸スペクトル関数 121
散逸率 120
散逸領域 121
3 方程式型モデル 133

【し】

時間不定性 23
自己保存的状態 134
実在流体 2
自由渦 99
修正オイラー法 178
集中化行列 228
ジューコフスキー変換 44
ジューコフスキー翼 47
循　環 25
衝撃波 66

【す】

吸込み 25
垂直応力 10
スタガード格子配列 190
ストリーク構造 129
スペクトルシャープカットオフフィルター 156
スマゴリンスキーモデル 160
スロー項 147

【せ】

静　圧 20
静圧管 20
正　則 26
積分長 117
節　点 222
0 方程式型モデル 132
前　縁 42
遷音速流れ 73
線形安定性理論 110
線形性 23
線形補間 207
せん断応力 10

【そ】

総　圧 20
双曲型偏微分方程式 73
層　流 89
速度ポテンシャル 19
反　り 42

【た】

代数応力モデル 149
対数層 114
対数法則 114
体積座標 223
体積座標積分公式 225
ダイナミック手法 164
第二粘性係数 9
楕円型偏微分方程式 73
楕円翼 46
縦速度相関 115
ダランベールのパラドクス 42

【ち】

超音速流れ 63
超粘性率 211
調和関数 23
直接数値計算 125

【つ，て】

ツォイナーの公式 21
テイラーマイクロスケール 116
低レイノルズ数型モデル 138
テストスケールフィルター 164

【と】

動　圧 20
等エントロピー流れ 11
等角写像 43
等方性散逸率 141
トップハットフィルター 156
トリチェリの定理 19

【な】

流れ関数 25
ナビア–ストークス方程式 10
ナビアの公式 21

【に】

2 次精度 Crank-Nicolson 法 177
2 重わき出し吸込み 35
2 方程式型モデル 132
ニュートンの応力法則 9
ニュートン流体 2

【ね】

熱拡散係数 11
粘性係数 2
粘性底層 113

【は】

排除厚さ 108
薄翼理論 84
バッファー層 114
バロトロピー流体 12
半無限体 55

【ひ】

非圧縮性流体 1
歪テンソル 10
非線形渦粘性モデル 144
ピトー管 20
ピトー静圧管 20
微分長 116
標準 $K-\varepsilon$ モデル 138

【ふ】

フィルター関数 153
フィルター代表長さ 153
複素関数論 24

複素速度 26
複素速度ポテンシャル 26
ブジネスク近似 132
物質客観性 144
不変量 127
フラクショナルステップ解法 199
ブラジウスの第一公式 54
ブラジウスの第二公式 54
ブラジウス方程式 106
プラントル–グラウアートの相似法則 86
プラントルの混合距離理論 133
フーリエの法則 11
分子粘性率 2
噴　流 101

【へ】

平板翼 45
平面ポアズイユ流れ 90
壁面摩擦 91
ベルヌーイの定理 16

【ほ】

ポアズイユ流れ 96
放物型偏微分方程式 73
保存型差分スキーム 191
ポテンシャル流 16
ホドグラフ法 74
ポリトロピック指数 13
ポリトロープ変化 13

【ま，も】

マッハ数 63
モーメント係数 43

【ゆ】

有限差分法 186
有限体積法 203
有限要素法 221
ユゴニオの方程式 63

【よ】

要　素 221
揚　力 42
揚力係数 43
翼　弦 42
翼面関数 84
横速度相関 115
よどみ点 39

【ら】

ラグランジェ 2
——の渦不生不滅の法則 13
——の運動方程式 8
——の連続方程式 7
——微分 4
ラージ・エディ・シミュレーション 152
ラバール管 63
ラピッド項 147
ラプラス方程式 23
ランキン卵形 56
乱　流 89
乱流エネルギー 116
乱流レイノルズ数 117

【り】

流跡線 3
流　線 4
流体粒子 2
臨界状態 63

【れ】

レイノルズ応力 131
レイノルズ数 89
レナード項 154
レンズ翼 49

【ろ】

ローラン展開 37

【A】

Abe-Kondoh-Nagano モデル 142
Adams-Bashforth タイプ陽解法 174
Adams-Moulton タイプ半陰解法 176
angle of attack 43

【B】

Baldwin-Lomax モデル 135
Bardina モデル 162
Blasius の第一公式 54
Boussinesq 近似 132
Burgers 方程式 211

【C】

CIVA 法 228
closure problem 132
Cotton-Kirwin モデル 142
Couette 流れ 90
cubic interpolation with volume/area coordinates 法 228

【D】

D'Alembert's paradox 42
Daly-Harlow モデル 146
De Laval nozzle 63
direct numerical simulation 125
displcement thickness 108
dissipation range 121
DNS 125
drag 41

【E, F】

eddy viscosity 132
forced vortex 98
fractional step 解法 199
free vortex 99

【G, H】

GS エネルギー 159

Hanjalic-Launder モデル 146
harmonic function 23
Heun 法 179
highly simplified MAC 解法 201
HSMAC 解法 201
Hugoniot の方程式 63
hyper viscosity 211

【I】

inertial range 121
intermittency 123
invariance 127

【J, K】

jet 101
Karman-Howarth 方程式 118
Karman-Trefftz 変換 49
Kawamura-Kuwahara スキーム 191
KdV 方程式 211
KK スキーム 191
$K-\omega$ モデル 139
Korteweg-de Vries 方程式 211
Kutta-Joukowski の仮説 52
Kutta-Joukowski theorem 42

【L】

Laplace 方程式 23
Launder-Sharma モデル 141
Laurent 展開 37
linear stability theory 110
LRR モデル 147

【M】

MAC 解法 198
marker-and-cell 解法 198
material frame indefference 144
Mellor-Herring モデル 146
mixing layer flow 101
momentum thickness 102
M^2 展開法 76

【N】

Nagano-Hishida モデル 142
Navier の公式 21
Navier-Stokes 方程式 10
node 222

【O, P】

Orr-Sommerfeld 方程式 111
Poiseuille 流れ 90
polytrope 変化 13
Prandtl-Glauert の相似法則 86
pseude spectral method 183

【Q】

quadratic upstream interpolation for convection kinematics 208
QUICK 208

【R】

Reynolds number 89
Runge-Kutta タイプ陽解法 178

【S】

self preservation 状態 134
semi-implicit methods for pressure-linked equation 解法 214
SGS エネルギー 159
SGS レイノルズ応力項 154
shear stress transport モデル 143
SIMPLE 解法 214
SIMPLEC 法 216
SIMPLER 解法 218
SIMPLEST 解法 219
simplified MAC 解法 200
SMAC 解法 200
Spalart-Allmaras モデル 137
SSG モデル 148
SST モデル 143
stagnation point 39
stream function 25
subsonic flow 63
Sutherland の公式 2

【T】

thin airfoil theory 84
Tollmien-Schlichting 波 112
Torriceli の定理 19
transonic flow 73
TS フィルター 164

【U】

uniformly third-order polynomial interpolation algorithm スキーム 191
UTOPIA スキーム 191

【V, W, Z】

Van-Driest の壁関数 160
wake flow 101
Zeuner の公式 21

—— 著 者 略 歴 ——

1992 年　東京大学理学部物理学科卒業
1994 年　東京大学大学院理学系研究科修士課程修了（物理学専攻）
1997 年　東京大学大学院理学系研究科博士課程修了（物理学専攻）
　　博士（理学）
1997 年　静岡大学助手
2004 年　静岡大学助教授
2007 年　静岡大学准教授
　　現在に至る

数値計算による流体力学
——ポテンシャル流，層流，そして乱流へ——
Computational Fluid Mechanics
——Potential Flow, Laminar Flow, and Turbulent Flow——

© Masayoshi Okamoto 2017

2017 年 1 月 6 日　初版第 1 刷発行　★

検印省略

著　　者　岡本正芳（おかもと まさよし）
発 行 者　株式会社　コロナ社
　　代 表 者　牛来真也
印 刷 所　三美印刷株式会社

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 http://www.coronasha.co.jp

ISBN 978–4–339–04651–9　（齋藤）　（製本：愛千製本所）
Printed in Japan

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おります。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おりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします