

目次

第1章 はじめに

第2章 差分法と有限体積法の基礎

| | | | |
|----------------------|----|----------------------------------|----|
| 2.1 偏微分方程式とその分類 | 6 | 2.7.3 ラックス・ベンドロフ法 | 17 |
| 2.1.1 偏微分方程式 | 6 | 2.7.4 代表的な方法 (波動方程式) | 17 |
| 2.1.2 二階偏微分方程式の分類 | 6 | 2.8 安定性 | 19 |
| 2.2 偏微分方程式の解の性質 | 8 | 2.8.1 Lax の同等定理 | 19 |
| 2.2.1 だ円型偏微分方程式 | 8 | 2.8.2 固有値法 | 19 |
| 2.2.2 放物型方程式 | 8 | 2.8.3 フォンノイマンの方法 | 19 |
| 2.2.3 双曲型方程式 | 9 | 2.8.4 テイラー展開を利用する方法 | 20 |
| 2.3 初期・境界条件 | 10 | 2.9 曲線座標系 | 21 |
| 2.3.1 境界条件の種類 | 10 | 2.9.1 複雑な形状の取り扱い | 21 |
| 2.3.2 偏微分方程式の型と境界条件 | 10 | 2.9.2 三次元座標変換 | 21 |
| 2.4 差分公式 | 11 | 2.9.3 二次元座標変換 | 22 |
| 2.4.1 差分公式の導き方 | 11 | 2.9.4 直交曲線座標系 | 23 |
| 2.5 だ円型方程式の差分解法 | 13 | 2.9.5 ナビエ・ストークス方程式の円柱座標, 球座標での表式 | 24 |
| 2.5.1 標準的な手順 | 13 | 2.10 有限体積法 | 25 |
| 2.5.2 簡単な例 | 13 | 2.10.1 保存形方程式と有限体積法 | 25 |
| 2.6 放物型方程式の差分解法 | 14 | 2.10.2 二階微分の取り扱い方 | 25 |
| 2.6.1 陽解法 | 14 | 2.11 連立一次方程式の反復解法 | 27 |
| 2.6.2 陰解法 | 14 | 2.11.1 反復法 | 27 |
| 2.6.3 ADI 法 | 15 | 2.11.2 ヤコビ法 | 27 |
| 2.6.4 代表的な方法 (拡散方程式) | 15 | 2.11.3 ガウス・ザイデル法 | 27 |
| 2.6.5 トーマス法 | 15 | 2.11.4 SOR 法 | 28 |
| 2.6.6 だ円型方程式への応用 | 16 | 2.11.5 収束の速さ | 28 |
| 2.7 双曲型方程式の差分解法 | 17 | 2.11.6 共役勾配法 | 28 |
| 2.7.1 簡単な例 | 17 | 2.11.7 共役勾配法から発展した方法 | 29 |
| 2.7.2 上流差分法と人工粘性 | 17 | | |

第3章 非圧縮性流れ

| | | | |
|--|----|--------------------------|----|
| 3.1 基本的な解法 | 32 | 3.4 浮力のある流れ場への適用 | 77 |
| 3.1.1 差分格子系と MAC 法系統の解法 | 33 | 3.4.1 圧縮性粘性流 (気体) の基礎式 | 77 |
| 3.1.2 フラクショナル・ステップ法 | 36 | 3.4.2 等圧密度変化を仮定した近似方程式 | 78 |
| 3.1.3 SIMPLE 法系統の解法 | 38 | 3.4.3 Boussinesq 近似 | 80 |
| 3.1.4 非圧縮性流れに対する対流項差分スキーム | 41 | 3.4.4 非圧縮方程式と等圧密度変化仮定方程式 | 81 |
| 3.1.5 境界適合格子への拡張方法 | 45 | 3.4.5 浮力乱流に対する乱流モデル | 82 |
| 3.2 乱流への適用 | 47 | 3.4.6 浮力流れ場の計算例 | 85 |
| 3.2.1 レイノルズ平均モデルを用いた非圧縮性乱流計算 | 47 | 3.5 流れ連成問題の解析 | 88 |
| 3.2.2 DNS, LES による非圧縮乱流解析 | 62 | 3.5.1 流れ連成問題の考え方 | 88 |
| 3.3 低レイノルズ数流れへの適用 | 74 | 3.5.2 物体と流体の連成運動 | 89 |
| 3.3.1 ストークス流れ ($Re \rightarrow 0$) の解析手法 | 74 | 3.5.3 外力による連成 | 90 |
| 3.3.2 レイノルズ数が 0 でない低レイノルズ数流れの解析手法 | 74 | 3.5.4 移動境界の取り扱い | 91 |
| 3.3.3 計算を行う際に注意すべき点 | 75 | 3.5.5 トレーサ粒子の運動解析 | 93 |
| 3.3.4 計算例 | 75 | 3.5.6 低マッハ数における流体音の解析 | 93 |
| 3.3.5 応用分野 | 76 | | |

第4章 圧縮性流れ

4.1 圧縮性流れの基本的な解法96

4.1.1 圧縮性解法の基本的な考え方96

4.1.2 Godunov 法と一次風上差分法97

4.1.3 風上法の高精度化と TVD 法97

4.1.4 スカラ方程式における時間積分法99

4.1.5 スカラ方程式からシステム方程式103

4.1.6 多次元問題への拡張107

4.1.7 一次元システム方程式における時間積分法110

4.1.8 多次元システム方程式への拡張114

4.1.9 一般座標系への適用116

4.1.10 非構造格子における時間積分法117

4.1.11 その他の高次精度計算法117

4.2 圧縮性乱流モデル120

4.2.1 圧縮性乱流の数値計算120

4.2.2 ファーブル平均と支配方程式120

4.2.3 レイノルズ平均ナビエ・ストークス方程式のモデル化120

4.2.4 エネルギー式のモデル化125

4.3 低マッハ数への適用127

4.3.1 低マッハ数の圧縮性流れ128

4.3.2 圧縮性流れの基礎方程式129

4.3.3 低マッハ数の近似129

4.3.4 スケーリング130

4.3.5 低マッハ数近似の積分制約条件130

4.3.6 低マッハ数近似の数値解法131

4.3.7 前処理付法133

4.4 極超音速流への適用135

4.4.1 極超音速流非平衡反応流への拡張135

4.4.2 極超音速流解析コードの検証138

4.4.3 ふく射流体力学の数値解法140

4.5 ジェットおよび空力音144

4.5.1 ジェット・空力音の解析的手法144

4.5.2 ジェット・空力音の数値計算手法146

4.5.3 ジェット・空力音の数値計算で使用される方程式148

4.5.4 境界条件150

4.5.5 音波など微小な波の可視化153

4.6 連成問題155

4.6.1 連成手法について155

4.6.2 連成問題におけるデータ変換方法156

4.6.3 流れと剛体運動の連成解析156

4.6.4 流れと弾性体の連成解析159

4.6.5 流れと熱応答連成解析169

第5章 統一解法

5.1 統一解法の必要性174

5.2 保存系と非保存系176

5.3 セミ・ラグランジュ法178

5.3.1 移流方程式及びラグランジュ解178

5.3.2 Cubic-Spline179

5.3.3 ラグランジュ補間179

5.3.4 Hermite 補間179

5.3.5 CIP スキーム180

5.4 CIP 法181

5.4.1 CIP 法の基本スキーム181

5.4.2 表面捕獲181

5.4.3 有理関数 CIP182

5.4.4 多次元への拡張183

5.4.5 時間分割法と保存性184

5.4.6 完全保存 CIP 法への道185

5.5 圧力ベース解法による統一解法187

5.5.1 基礎方程式187

5.5.2 圧力ベース解法187

5.5.3 CCUP 法189

5.6 応用例190

5.6.1 ミルククラウン190

5.6.2 レーザと物質との相互作用191

5.6.3 プラズマ・希薄流体への応用192

5.7 将来への展望195

第6章 燃焼流

6.1 燃焼流の基礎方程式198

6.1.1 基礎方程式198

6.1.2 熱および物質の拡散198

6.1.3 輸送係数199

6.1.4 熱力学状態量および気体定数199

6.1.5 化学反応199

6.1.6 乱流燃焼の基礎方程式200

6.2 反応項の数値的取扱い201

6.2.1 スティフネス (Stiffness)201

6.2.2 計算法201

6.3 層流火炎の数値計算203

6.3.1 層流火炎の構造203

6.3.2 計算例204

6.4 乱流火炎の数値計算205

6.4.1 乱流火炎の構造205

6.4.2 乱流モデル206

6.4.3 平均反応速度モデル206

6.4.4 乱流火炎の直接数値計算207

6.5 超音速燃焼の数値計算208

6.5.1 超音速燃焼の特徴208

6.5.2 計算例208

第7章 自由界面流れ

7.1 移動境界問題と自由界面流れ212

7.2 自由界面流れ数値計算手法の分類213

7.3 境界条件の数学的定式化215

7.3.1 界面追跡の方法について215

7.3.2 運動学的条件 (Kinematic Condition)215

7.3.3 動力学的条件 (Dynamic Condition)216

7.3.4 気液界面の曲率の計算法216

7.4 有限差分 (体積) 法を用いた各種数値計算手法218

7.4.1 固定矩形格子型218

7.4.2 境界適合格子型220

7.5 各種手法の比較222

第8章 解法の選択

8.1 まえがき224

8.2 計算空間の取り扱い方法の分類224

8.2.1 構造格子型解法225

8.2.2 非構造格子型解法と構造-非構造ハイブリッド型解法226

8.2.3 直交格子型解法227

8.2.4 解適合型解法228

8.3 選択のポイント229

8.3.1 物理的側面からのポイント229

8.3.2 使い方の側面からのポイント229

第9章 格子形成

9.1 計算格子232

9.1.1 格子形成手順232

9.1.2 格子の種類232

9.1.3 格子と計算精度235

9.2 境界適合格子の形成法236

9.2.1 境界適合格子と座標変換236

9.2.2 格子トポロジ237

9.2.3 格子形成法の分類237

9.2.4 代数式による格子形成法238

9.2.5 だ円型偏微分方程式による格子形成法239

9.2.6 双曲型偏微分方程式による格子形成法240

9.3 非構造格子243

9.3.1 非構造格子のデータ243

9.3.2 デローニー三角形分割法244

9.3.3 前進先端法247

9.4 工学的手法249

9.4.1 物体モデリングと表面格子249

9.4.2 複雑形状への対応249

9.4.3 解適合格子法249

第10章 可視化

10.1 可視化とは254

10.1.1 可視化の目的と意義254

10.1.2 可視化の流れ255

10.2 三次元 CG の基礎256

10.2.1 プリミティブ256

10.2.2 ビューイング256

10.2.3 色257

10.2.4 ライティングとシェーディング258

10.2.5 隠面処理とピクセル変換259

10.2.6 画像ファイル259

10.2.7 インタラクティブ259

10.3 流れの可視化手法261

10.3.1 メッシュ図261

10.3.2 等高線と面塗り262

10.3.3 等値面264

10.3.4 ベクトル図264

10.3.5 可視化手法の選択265

10.3.6 流線と表面流線265

10.3.7 可視化実験との比較267

10.3.8 その他の方法269

10.3.9 アニメーション269

10.4 ハードウェア271

10.4.1 GWS と PC271

10.4.2 周辺装置271

10.5 ソフトウェア273

10.5.1 市販ソフトウェア273

10.5.2 無償ソフトウェア273

10.5.3 グラフィックス・ライブラリ275

10.5.4 インターネットの利用275

10.5.5 画像とアニメーション275

第11章 最適化と設計

11.1 流体問題と最適化278

11.1.1 流体と制御・最適化278

11.1.2 最適化問題について278

11.1.3 最適設計の目的とは279

11.1.4 最適化問題の定式化について280

11.1.5 決定論的最適化アルゴリズム280

11.1.6 確率論的最適化アルゴリズム281

11.1.7 応答局面法282

11.1.8 逆解法とその展開282

| | |
|--|--|
| 11.2 空力問題における最適化法の比較.....283 | 11.2.3 遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, GA)287 |
| 11.2.1 勾配法 (Gradient-based Method, GM)283 | |
| 11.2.2 焼きなまし法 (Simulated Annealing, SA)285 | 11.2.4 高揚力翼型の最適化289 |