

目 次

まえがき

I. 基 础 編

第1章 序 論

1.1	数値流体力学とは	3
1.2	数値流体力学の研究目的と応用分野	4
1.3	数値流体力学発展の歴史	6
1.4	流れの数値解法の比較	9
1.5	乱流の数理モデル	11

第2章 差分法(I)非圧縮性流れ

2.1	はじめに	15
2.2	速度－圧力表示の方程式に対する差分法	16
2.2.1	MAC (Marker-and-Cell) 法	18
2.2.2	MAC 法から発展した方法	20
2.2.3	移流項の風上差分化	21
2.2.4	SIMPLE (Semi-Implicit-Method for Pressure Linked Equation) 法	21
2.2.5	擬似圧縮性法	23
2.3	流れ関数と渦度表示の方程式に対する差分法	24
2.3.1	渦度輸送方程式に対する差分法	26
2.3.2	線の方法 (Method of Lines)	27
2.3.3	ポアソン方程式に対する反復法	29
2.3.4	高次精度の差分法	31
2.3.5	3次元への拡張	34
2.4	速度と渦度表示の方程式に対する差分法	36
2.4.1	古典的差分法	36
2.4.2	ポアソン方程式に対する群陽的反復 (Group Explicit Iterative : GEI) 法	37
2.4.3	3次元への拡張	38
	付 錄：プログラム	41

第3章 差分法(II)圧縮性流れ

3.1 はじめに	49
3.2 圧縮性流れの基礎方程式	49
3.2.1 デカルト座標系の基礎方程式	50
3.2.2 一般曲線座標系への変換	51
3.2.3 一般曲線座標系の基礎方程式	52
3.2.4 反変速度の運動方程式	53
3.2.5 基礎方程式の性質と解法	55
3.3 特性の理論	56
3.3.1 2独立変数の特性の理論	56
3.3.2 1次元流れ	58
3.3.3 固有値と固有ベクトルの計算(I)	59
3.3.4 固有値と固有ベクトルの計算(II)	60
3.3.5 固有値と固有ベクトルの計算(III)	61
3.4 初期の圧縮性流れのスキーム	62
3.4.1 Godunov スキーム	63
3.4.2 Lax-Wendroff スキーム	63
3.4.3 MacCormack スキーム	65
3.4.4 Beam-Warming スキーム	66
3.5 高解像スキームの基礎	67
3.5.1 流束分離法	67
3.5.2 TVD スキーム(I)	68
3.5.3 TVD スキーム(II)	71
3.5.4 ENO スキーム	74
3.5.5 エントロピー条件	75
3.6 圧縮性オイラーおよびナビエ・ストークス方程式のスキーム	77
3.6.1 3次元オイラー方程式のスキーム	77
3.6.2 計算時間の短縮	78
3.6.3 粘性項の取り扱い	80

第4章 有限要素法

4.1 はじめに	83
4.2 有限要素法による流れ解析手法	84
4.3 定常粘性流れの解析	85
4.3.1 基礎方程式の定式化	85
4.3.2 面積座標	88

4.3.3	補間関数	90
4.3.4	各種の三角形要素	92
4.3.5	数値解析例	93
4.4	非定常粘性流れの解析	96
4.4.1	分離型解法	96
4.4.2	開境界の処理	98
4.4.3	数値解析例	100

第5章 境界要素法

5.1	はじめに	105
5.2	境界要素法の基本概念	106
5.3	ポテンシャル流れ解析	108
5.3.1	ポテンシャル流れ問題	108
5.3.2	境界積分方程式	108
5.3.3	離散化表現	110
5.4	遅い非圧縮粘性流れ解析	114
5.4.1	ストークス流れ問題	114
5.4.2	境界積分方程式	114
5.4.3	基本解	115
5.4.4	離散化表現	116
5.5	非圧縮粘性流れ解析(定常問題)	116
5.5.1	ナビエ・ストークス方程式	116
5.5.2	積分方程式	117
5.5.3	離散化表現	117
5.5.4	離散化式の解法	119
5.5.5	一般化境界要素解法	120
5.6	非圧縮粘性流れ解析(非定常問題)	122
5.6.1	初期値-境界値問題	122
5.6.2	境界-内部要素型解法	122
5.6.3	時間分離型境界要素解法	124
5.6.4	数値計算例	125
5.7	おわりに	127

第6章 涡度を含む流れの解析

6.1	はじめに	129
6.2	基礎方程式	131
6.2.1	保存関係	131

6.2.2 粘性流体	132
6.2.3 非圧縮性流体	134
6.3 差分法による数値解法	135
6.3.1 MAC 法	135
6.3.2 圧力の境界条件	137
6.3.3 動力学的圧力の分離	137
6.3.4 形状力学の方法	138
6.4 離散渦法	138
6.4.1 渦糸近似法	138
6.4.2 渦管近似	139
6.4.3 渦塊近似	140
6.4.4 粘性効果	141
6.4.5 渦管の干渉	141
6.5 初期条件・境界条件	142
6.5.1 非圧縮性の流れ	142
6.5.2 粘性による渦流出	143
6.5.3 離散渦法における渦放出	143
6.6 結 語	144

第7章 スペクトル法

7.1 はじめに	147
7.2 スペクトル法とは	149
7.3 スペクトル法による計算の基礎	151
7.3.1 直交関数	151
7.3.2 フーリエ級数	152
7.3.3 チェビシェフ多項式級数	153
7.3.4 フーリエ級数近似の離散化	155
7.3.5 チェビシェフ多項式級数近似の離散化	155
7.3.6 エイリアシング誤差と位相誤差	156
7.4 低速流の解法	157
7.5 高速流の解法	159
7.5.1 支配方程式	159
7.5.2 座標変換	160
7.5.3 2次元チエビシェフ選点法	161
7.6 時間積分	162

第8章 格子形成法

8.1 格子形成の基礎	167
8.1.1 格子の種類	167
8.1.2 境界適合格子と座標変換	168
8.1.3 格子形状	170
8.2 格子形成法	171
8.2.1 格子形成法の分類	171
8.2.2 代数的格子形成法	171
8.2.3 橋円型偏微分方程式による形成法	184
8.2.4 双曲型偏微分方程式による形成法	191
8.3 複雑な形状に対するアプローチ	191
8.3.1 マルチ・ブロック法	192
8.3.2 複数の格子を用いる方法	192
8.3.3 非構造格子	193
8.4 解適合格子	194

第9章 コンピュータグラフィックスの利用

9.1 数値流体力学とコンピュータグラフィックス	197
9.2 グラフィックス利用の歴史	198
9.3 グラフィックス表示の効用	200
9.4 グラフィックス表示のプロセス	202
9.5 ソフトウェアの動向	204
9.6 ハードウェアの動向	205
9.7 コンピュータグラフィックスの今後	208

第10章 乱流解析法(I)LES

10.1 亂 流	213
10.2 フィルタリング	214
10.3 LESの基礎方程式	217
10.4 SGS モデル	218
10.4.1 Leonard 項	218
10.4.2 Cross 項	219
10.4.3 Reynolds 応力項	219
10.4.4 モデルの適合性	223
10.5 数値計算	224
10.6 計 算 例	226

10.6.1 溝乱流	226
10.6.2 正方形断面管	231

第 11 章 乱流解析法(II)現象論モデル

11.1 乱流モデルと乱流解析	237
11.2 勾配拡散モデルと $k-\varepsilon$ モデル	238
11.3 低レイノルズ数型 $k-\varepsilon$ モデル	241
11.4 非等方 $k-\varepsilon$ モデル	243
11.5 LES による $k-\varepsilon$ モデルの検討	249
11.6 レイノルズ応力方程式モデルと代数応力モデル	255

第 12 章 乱流解析法(III)スカラー乱流のモデル

12.1 はじめに	263
12.2 乱流プラントル数	265
12.3 乱流熱流束の 2 方程式モデル	268
12.4 乱流熱流束方程式モデル	274
12.5 乱流熱流束の構成方程式モデル	280

第 13 章 ボルツマン方程式の確率解法

13.1 希薄気体となる条件	287
13.2 ボルツマン方程式	288
13.2.1 流れ場の諸量	291
13.2.2 マクスウェル分布	291
13.2.3 逆べき分子	292
13.2.4 擬剛体球分子	294
13.3 分子境界条件	295
13.3.1 流入分子	295
13.3.2 分子の反射	296
13.4 ランダムサンプリング	297
13.4.1 離散型確率分布	297
13.4.2 連続型確率分布	299
13.4.3 確率密度のサンプルによる表現	301
13.5 モンテカルロ直接法	303
13.5.1 分離の原理	303
13.5.2 サンプル分子の衝突過程	304
13.5.3 Nanbu 法	308
13.5.4 Modified Nanbu 法	309

13.5.5 衝突数法	309
13.5.6 最大衝突数法	310
13.5.7 流れ場の決定	311
13.5.8 アンサンブル平均と時間平均	312
13.6 例題とプログラム	313
13.6.1 セル分割	313
13.6.2 セルに分子を配置	314
13.6.3 分子の移動	315
13.6.4 分子の流入	316
13.6.5 分子間衝突	316
13.6.6 データの時間平均	317
13.6.7 プログラム	317
付録：参考プログラム	320

第 14 章 混相流の解析法

14.1 はじめに	325
14.2 混相流の基礎方程式	325
14.2.1 混相流動のモデル化(基礎方程式と構成方程式)	325
14.2.2 計算モデルの安定性	328
14.3 数値計算手法	329
14.3.1 支配方程式の離散化	329
14.3.2 数値計算の手順	330
14.4 いくつかの計算例	331
14.4.1 単一気泡の運動	331
14.4.2 気泡流中の圧力波の挙動	333
14.4.3 物体まわりの気泡流	338
14.4.4 気泡プルーム	340

II. 応 用 編

第 15 章 理学問題への応用

15.1 海洋学・乱流への応用	347
15.1.1 海洋大循環	347
15.1.2 渦のつなぎかえ	349
15.1.3 2 次元乱流の構造と誤差成長	351
15.1.4 回転球面上の 2 次元乱流	354

15.2 プラズマ流および天文学への応用	356
15.2.1 亂流磁気ダイナモ	356
15.2.2 太陽風と地球磁気圏の相互作用	361
15.2.3 近接連星系における降着円盤	364
15.2.4 星風からのコンパクト星への降着	366
15.2.5 自己重力ガス雲の3次元衝突	367
15.2.6 超新星爆発による衝撃波	371
15.2.7 超新星爆発時のレイリー・ティラー不安定と物質混合	373
15.2.8 宇宙ジェット	375

第16章 宇宙・航空分野への応用

16.1 航空機体メーカーにおける数値流体力学応用	379
16.1.1 航空機体メーカーにおける数値流体力学応用(I)	379
16.1.2 航空機体メーカーにおける数値流体力学応用(II)	382
16.1.3 航空機体メーカーにおける数値流体力学応用(III)	385
16.2 航空機まわりの流れ解析	388
16.2.1 遷音速ポテンシャル解析と設計	388
16.2.2 遷音速機バネル法の計算	390
16.2.3 完全航空機形態のナビエ・ストークスシミュレーション	396
16.2.4 表面効果翼艇まわりの流れ	397
16.2.5 CFD 実用化のための一方法とその応用	400
16.2.6 高速プロペラ	403
16.2.7 回転翼の空力弾性問題	409
16.3 超高速機・宇宙機・ロケットまわりの流れ解析	410
16.3.1 実在気体効果を伴う飛行体まわりの流れ	411
16.3.2 スペース・プレーン(HOPE)	414
16.3.3 極超音速機	415
16.3.4 AOTV	417
16.3.5 飛翔体まわりの極超音速低密度流	420
16.3.6 エアロブレーキ衛星まわりの流れ	421
16.3.7 ロケット形状物体	423
16.3.8 位相数学的アプローチによる細長物体の大迎角空力問題	428
16.4 剥離と渦を伴う流れ・乱流の解析	430
16.4.1 3次元剥離	430
16.4.2 離散渦法による振動翼まわりの剥離流の数値計算	432
16.4.3 渦法による乱流混合層の解析	436
16.4.4 乱流火炎と乱流混合	437
16.4.5 乱流旋回火炎	440

16.5 衝撃波・高速流れの解析	442
16.5.1 ベンド内の衝撃波流れ	442
16.5.2 気体論モデルによる衝撃波流れの解析	445
16.5.3 正方形オリフィスから噴出する超音速ジェット	448
16.5.4 デトネーション開始現象のシミュレーション	450
16.5.5 素反応・分子拡散・熱伝導を考慮した2次元デトネーション	453
16.5.6 反応を伴う高速流	455
16.5.7 反応を伴う超音速流と噴流の干渉	457
16.5.8 電磁流体としてのプラズマ流	459

第17章 機械工学とその関連分野への応用

17.1 ターボ機械の数値流体力学	463
17.1.1 3次元内部流動解析技術の現状	463
17.1.2 LU-ADI法による3次元流動解析例	467
17.1.3 反変速度による3次元流動解析例	469
17.1.4 緩和形陰解法による翼列非定常流れ解析例	471
17.1.5 2次元翼列の流動解析	474
17.1.6 3次元翼列の逆問題解法	477
17.2 自動車工業における応用	480
17.2.1 車体周囲の流れ解析	480
17.2.2 エンジンシリンダ内の空気流動	483
17.2.3 エンジン内流動, 燃焼の数値計算	485
17.2.4 トルクコンバータ内の流れ(I)	488
17.2.5 トルクコンバータ内の流れ(II)	490
17.2.6 格子生成と計算結果の表示	493
17.3 原子炉への応用	497
17.3.1 原子炉安全解析における熱流動解析	497
17.3.2 原子炉サブチャンネル解析例	499
17.3.3 気水分離器の水位勾配解析例	502
17.3.4 原子炉下部プレナム部の流動解析例	505
17.3.5 原子炉内自然循環試験解析例	506
17.3.6 タンク型FBRの炉容器内流動解析例	510
17.4 船舶への応用	513
17.4.1 船体まわりの流れの計算	513
17.4.2 船尾近傍伴流の計算	515
17.4.3 キャビテーションを伴う翼面まわりの流れの計算	517
17.4.4 境界積分法による一様流中に置かれた没水球まわりの自由表面流れの計算	519

17.4.5	境界積分法によるプロペラ性能の計算	521
17.4.6	Rankine Source 特異点による船体まわりの自由表面流れと造波抵抗の計算	522
17.4.7	船 の 波	525
17.5	燃焼器への応用	526
17.5.1	放射熱再循環を伴う燃焼器	526
17.5.2	乱流予混合火炎の反応モデル	530
17.5.3	噴霧火炎	533
17.5.4	層流拡散火炎	535
17.5.5	乱流拡散火炎	537
17.6	流れの遷移・混合・熱伝達への応用	539
17.6.1	層流から乱流への遷移過程のダイレクト・シミュレーション	539
17.6.2	混合層の直接数値計算	541
17.6.3	熱流体機器の乱流熱伝達解析への応用	543
17.6.4	低プラントル数流体の乱流熱伝達	547

第 18 章 土木・建築・環境問題への応用

18.1	都市・建築環境における流れの解析[I]——室内空調環境の流れの解析	551
18.1.1	空調時の室内気流の乱流構造の解析	551
18.1.2	室内温熱環境の放射場・対流場の連成問題の解析	554
18.1.3	クリーンルーム内拡散場の最適設計	559
18.1.4	大空間の温熱・空気環境に関する数値計算	563
18.2	都市・建築環境における流れの解析[II]——屋外風環境の流れの解析	567
18.2.1	都市の風環境——地表面粗度と接地境界層	567
18.2.2	建物周辺の非等方的乱流構造の解析	570
18.2.3	実物市街地におけるビル風問題の解析	574
18.2.4	通風時の建物内外気流の解析	577
18.2.5	建物周辺, 壁面の変動風圧力の解析	580
18.2.6	高層建築物の渦励振機構の解析	582
18.3	水環境における流れ解析	586
18.3.1	二段階陽的有限要素法による津波の伝播解析	586
18.3.2	周期的ガレルキン有限要素法解析による潮汐残差流の解析	589
18.3.3	湖流の数値解析	592
18.3.4	開水路流れにおける流動と水質分散	595
18.3.5	大気—植生—土壤系の水文気象プログラム	599
18.3.6	結合解法による港内静穏度の数値解析	602
18.3.7	適応型有限要素法による浅水長波解析	605
18.3.8	Lagrange 表記に基づく水面波の数値解析	608

18.3.9 境界要素法による非線形水波の解析	609
18.3.10 海底底質移動のシミュレーション	612
18.3.11 有限要素法による浸透流解析	615
執筆者リスト	619
索 引	623