

目 次

まえがき

第1章 亂流解析の基礎

1.1 乱 流.....	1
1.2 基礎方程式.....	2
1.2.1 保存則	2
1.2.2 レイノルズ分解とレイノルズ応力	6
1.3 乱れの生成と散逸.....	9
1.3.1 乱れエネルギー、応力の生成と散逸	9
1.3.2 エネルギー・カスケードと乱れのスケール	14
1.4 せん断乱流のスケーリング	17
1.5 乱流のモデリング	20
1.5.1 乱流のモデリングの基礎	20
1.5.2 乱流モデルの分類	22

第2章 数値シミュレーション手法の基礎

2.1 数値シミュレーション手法の考え方	25
2.1.1 数値シミュレーションのプロセス	25
2.1.2 離散化手法とは	26
2.1.3 偏微分方程式の分類	28
2.1.4 方程式の性質とその解法	30
2.1.5 境界条件の設定	31
2.2 差分法と有限体積法	32
2.2.1 有限体積的な評価と保存則の意味	32
2.2.2 非圧縮性流れと圧縮性流れにおける離散化	34
2.2.3 離散物理量の定義方法	35
2.3 座標変換	36
2.3.1 考え方の基礎	36
2.3.2 変換メトリックス等の幾何学的な意味	38
2.3.3 実際の利用	40
2.4 計算法の工夫	41
2.5 利用計算機と言語	44

第3章 非圧縮性流れの解法

3.1 はじめに	47
3.2 非圧縮性流れの基礎方程式と計算法の基礎	47
3.2.1 直角座標系から一般曲線座標系への変換	48
3.2.2 非圧縮性乱流の基礎方程式	50
3.2.3 対流項の差分近似	51
3.2.4 TVD 差分スキーム	52
3.2.5 高次 TVD 差分スキーム	57
3.2.6 有限体積法と MUSCL 型スキーム	60
3.2.7 陰解法化	62
3.2.8 近似因子法	63
3.3 MAC 型解法	65
3.3.1 MAC 法とその特色	65
3.3.2 各種の MAC 型解法	70
3.3.3 一般曲線座標系の基礎方程式	73
3.3.4 SMAC 法の曲線座標格子への拡張	75
3.3.5 曲線座標格子を用いる SMAC \wedge 形陰解法	79
3.4 擬似圧縮性法	81
3.4.1 擬似圧縮性法の基本的考え方	82
3.4.2 圧縮性流れの各種計算法の利用	82
3.4.3 非定常流れ問題への拡張	84
3.5 有限要素法による乱流解析	85
3.5.1 有限要素法と乱流モデル	85
3.5.2 有限要素法による乱流解析の従来の研究	87
3.5.3 分離型解法の重み付き残差法による定式化	90
3.5.4 形状関数の具体的な計算	95
3.5.5 分離型解法の計算手順	100
3.5.6 $k-\epsilon$ 2 方程式モデル	101
3.5.7 $k-\epsilon$ 2 方程式モデルの重み付き残差法による定式化	102
3.5.8 $k-\epsilon$ 2 方程式モデルの問題点と改良	104
3.5.9 有限要素法による LES	109
3.5.10 有限要素法による乱流解析の今後の課題	112

第4章 圧縮性流れの解法

4.1 はじめに	117
4.2 特性の理論と流束分離	117
4.2.1 特性の理論の基礎	118
4.2.2 1 次元オイラー方程式への適用	121

4.2.3 特性曲線法	127
4.2.4 流束分離	128
4.2.5 有限体積法	134
4.3 圧縮性流れの数値スキーム(1)構造格子法	136
4.3.1 圧縮性流れの基礎方程式	136
4.3.2 線形化と対角化	140
4.3.3 構造格子法の数値スキーム	143
4.4 圧縮性流れの数値スキーム(2)非構造格子法	149
4.4.1 方程式の表記法	150
4.4.2 有限体積法	151
4.4.3 検査体積	153
4.4.4 Jameson の方法	154
4.4.5 風上法	156
4.4.6 高次精度風上解法	159
4.4.7 隠的時間積分法	161
4.4.8 粘性項の評価および乱流モデル	164
4.5 圧縮性流れの数値スキーム(3)多次元風上法	166
4.5.1 1次元的な風上法	166
4.5.2 Fluctuation Splitting 法	168
4.5.3 純粋に多次元な風上法の定式化	169
4.5.4 従来法との比較	176
4.6 隠解法と収束加速法	178
4.6.1 時間発展法	179
4.6.2 隠解法	182
4.6.3 隠解法のための反復法	183
4.6.4 AF 法(近似的因数分解法)	184
4.6.5 Beam-Warming 法とその効率化	186
4.6.6 LU-SGS (Symmetric Guass-Seidel) 法	188
4.6.7 多重格子法	191

第5章 直接数値シミュレーション

5.1 はじめに	197
5.2 フーリエ・スペクトル法	197
5.2.1 フーリエ・ガラーキン法	198
5.2.2 バーガース方程式のスペクトル解法	199
5.2.3 擬スペクトル法	201
5.2.4 選点法と擬スペクトル法	203
5.2.5 時間前進法	205
5.3 チェビシェフ・スペクトル法	207

5.3.1 ガラーキン法, タウ法, 選点法	208
5.3.2 非線形項と微係数の数値計算	209
5.3.3 壁乱流, 複雑形状流路への適用	211
5.4 差分法の精度と整合性	212
5.4.1 非圧縮性流体の基礎方程式からの解析的要求事項	213
5.4.2 離散オペレータと離散的な保存形の定義	215
5.4.3 スタガード格子系の差分スキーム	216
5.5 乱流データベース	222
5.5.1 DNS データベースの利用	222
5.5.2 データベースの具体例	224
5.6 乱流構造 (壁乱流の構造)	230
5.6.1 壁乱流構造の概要	230
5.6.2 ストリーク	231
5.6.3 渦の同定	233
5.6.4 縦渦 (quasi-streamwise vortex)	234
5.7 自由乱流の構造	242
5.7.1 一様等方性乱流の微細構造	242
5.7.2 時間発展乱流混合層の微細構造	245
5.7.3 空間発展乱流混合層の構造	249

第6章 ラージ・エディ・シミュレーション (LES)

6.1 はじめに	259
6.2 LES の基本的な手法	259
6.2.1 基礎方程式とサブグリッド応力	259
6.2.2 サブグリッド応力のモデリング	261
6.2.3 LES の計算手法	262
6.3 ダイナミックモデル	266
6.3.1 ダイナミックモデルの導出	266
6.3.2 空間フィルタの定式化	269
6.3.3 ダイナミックモデルの応用	272
6.4 非等方渦粘性係数モデルとスケール相似則モデル	276
6.4.1 粗視化操作と SGS 応力の発生	276
6.4.2 渦粘性係数モデル	277
6.4.3 スケール相似則モデル	280
6.4.4 SGS モデルの LES 計算における検証	283
6.4.5 まとめ	285
6.5 LES の工学的応用	286
6.5.1 自由噴流の LES	286
6.5.2 角柱周りの流れの LES	289

6.5.3 円管および梢円管内乱流の LES	294
6.5.4 チャネル内立方体障害物周辺の流れの LES	300

第7章 レイノルズ平均乱流モデル

7.1 はじめに	311
7.2 湍粘性型モデル	311
7.2.1 流れの支配方程式	312
7.2.2 モデル化の基礎	312
7.2.3 $k-\epsilon$ 2方程式モデル	315
7.2.4 $k-\tau$, $k-\omega$ 2方程式モデル	322
7.2.5 応力方程式の特徴を反映した 2方程式モデル	323
7.2.6 非線形渦粘性型モデル	328
7.3 応力方程式モデル	330
7.3.1 応力輸送の厳密式	330
7.3.2 モデリングの基礎	332
7.3.3 再分配 Return 項のモデリング	337
7.3.4 再分配 Rapid 項のモデリング	339
7.3.5 壁面近傍における再分配	344
7.3.6 散逸項のモデリング	346
7.3.7 拡散項のモデリング	347
7.3.8 散逸輸送のモデリング	349
7.3.9 統合モデルと適用例	352
7.4 乱流モデルの理論的枠組み	356
7.4.1 2スケール繰り込み理論による渦粘性型表現の導出	357
7.4.2 渦粘性表現モデルと応力方程式モデルの関連	361
7.4.3 マルコフ化された理論によるモデリング	364

第8章 スカラー・温度場乱流モデル

8.1 はじめに	371
8.2 パッシブスカラーの乱流輸送モデル	371
8.2.1 基礎式	371
8.2.2 考慮すべき諸条件	375
8.2.3 乱流熱流束モデル	381
8.2.4 温度変動バリアンスとその散逸率	396
8.3 浮力乱流モデル	401
8.3.1 非等温場における $k-\epsilon$ 型渦粘性モデル	402
8.3.2 非等温場での LES	412

第9章 圧縮性乱流モデル

9.1	はじめに	423
9.2	高速流に利用される乱流モデル	423
9.2.1	概 観	423
9.2.2	圧縮性の影響	424
9.2.3	遷 移	425
9.2.4	高速流乱流モデル	426
9.2.5	支配方程式	439
9.2.6	おわりに	441
9.3	密度変動を考慮した圧縮性乱流モデル	442
9.3.1	圧縮性乱流モデルの必要性と概説	442
9.3.2	Sarkar らのモデル	443
9.3.3	Zeman のモデル	444
9.3.4	藤原らの 2 方程式モデル	444
9.3.5	藤原らの 2 方程式モデルの改良	446
9.3.6	密度変動を組み込んだ 3 方程式モデル	446
9.3.7	吉澤の 3 方程式モデル	447
9.3.8	藤原らの 3 方程式モデル	448
9.3.9	圧縮性乱流モデルの計算結果と信頼性	450
9.3.10	平板境界層での検証	451
9.3.11	圧縮コーナー流れでの検証	453
9.3.12	超音速混合層での検証	455
9.3.13	圧縮性乱流モデルのまとめ	456

第10章 混相乱流

10.1	はじめに	459
10.2	気泡流乱流の準直接計算	459
10.2.1	気泡流乱流の特徴	459
10.2.2	気泡流の支配方程式と数値解法	460
10.2.3	計算結果	464
10.3	気液界面乱流輸送のモデリング	470
10.3.1	気液界面乱流輸送について	470
10.3.2	気液二相流解析手法	470
10.3.3	気液分散流に対する乱流方程式	472
10.3.4	界面乱流輸送項	475
10.3.5	気泡の非等方乱流拡散に関する輸送方程式	476
10.3.6	気泡流の相分布および乱流特性のシミュレーション	477
10.4	固気混相乱流の直接数値計算	479

10.4.1 計算方法	479
10.4.2 計算結果の例	484
10.5 固気・固液混相乱流輸送の数理モデル	490
10.5.1 まえがき	490
10.5.2 多重スケール混相乱流モデル	491
10.5.3 固体粒子追跡法による数値シミュレーション	494
10.5.4 チャネル流れへの適用	496
10.5.5 おわりに	501
10.6 高濃度固気混相乱流の数理モデル	501
10.6.1 まえがき	501
10.6.2 粒子の運動方程式	502
10.6.3 流体の運動方程式	503
10.6.4 粒子間相互作用	505
10.6.5 中濃度分散流	507
10.6.6 高濃度流	508

第 11 章 自由表面乱流

11.1 はじめに	513
11.2 実験データに基づいた開水路乱流のモデリング	513
11.2.1 自由水面の境界条件	513
11.2.2 単断面長方形水路における 2 次流の計算例	516
11.2.3 複断面水路における 2 次流の計算例	518
11.3 直接数値解析による乱流解析	520
11.3.1 自由表面の条件	520
11.3.2 自由表面の数値的取り扱い	520
11.3.3 開水路乱流の直接数値計算	521
11.3.4 風波の発生の直接数値計算	524
11.4 自由表面付近の運動量・熱・物質輸送	526
11.4.1 自由表面での物質・熱輸送の実験的モデリング	527
11.4.2 自由表面乱流の直接数値シミュレーション	527
11.4.3 自由表面乱流場における乱流統計量	529
11.4.4 自由表面近傍の乱流構造	530
11.4.5 自由表面近傍での物質・熱輸送のメカニズム	532
11.5 応力方程式モデル、代数応力モデルによる解析	533
11.5.1 水面近傍での乱流量の漸近挙動	534
11.5.2 レイノルズ応力方程式モデルによる解析	536
11.5.3 代数応力モデルによる解析	539

第 12 章 風・気候乱流

12.1 はじめに	549
-----------------	-----

12.2 流入境界条件としての自然風(境界層乱流)のモデリング	550
12.3 風と構造物—モデルの適用限界とその改良	554
12.3.1 Bluff body 周辺流れ場の特徴と解析上の問題点	554
12.3.2 Bluff body 周辺流に対する各種乱流モデルの適用	555
12.3.3 Conical Vortex と局部風圧	560
12.3.4 流体・構造連成問題	562
12.4 市街地風と温熱環境	569
12.4.1 都市の人工排熱と乱流熱輸送	569
12.4.2 市街地気候の快適性解析	572
12.5 植生層内の乱流の数値モデルおよび気候緩和効果	575
12.5.1 植生の作用	575
12.5.2 植生層内外の風速分布	576
12.5.3 植生層内の流れの構造	579
12.5.4 植生層の温度・湿度・CO ₂ の分布とエネルギー収支	581
12.5.5 数値モデルによる植生層の気候緩和に関する研究	585
12.6 都市気候、局地気象のモデリング	587
12.6.1 Mellor-Yamada 型の大気乱流モデルの概要	587
12.6.2 土地利用と気候変化	590

第 13 章 電磁流体乱流

13.1 はじめに	599
13.2 電磁流体乱流の統計理論的考察	600
13.2.1 電磁流体方程式	600
13.2.2 平均場方程式	601
13.2.3 擬スカラー量と運動論的ダイナモ	602
13.2.4 電磁流体のモデリング	604
13.2.5 ヘリシティとクロス・ヘリシティ・ダイナモ	608
13.3 天体磁場ダイナモ	610
13.3.1 球状領域での定常的磁場構造	611
13.3.2 円盤状構造での定常的磁場生成	614
13.3.3 差動回転とフィードバック効果	616
13.4 プラズマの回転と乱流抑制	617
13.4.1 MHD 乱流モデル	618
13.4.2 円筒形状プラズマの回転	620
13.4.3 ポロイダル剛体回転の効果	623
13.4.4 おわりに	625
執筆者リスト	629
索引	633