

目 次

1. 基礎方程式

1-1 流れ場の記述	1	1-3-3 熱伝導および拡散の方程式	17
1-1-1 流体運動の記述	1	1-4 境界条件, 相似則および	
1-1-2 流体粒子の相対運動	2	非圧縮場の条件	18
1-1-3 Gauss の定理および Stokes の		1-4-1 非粘性流体の境界条件	18
定理	3	1-4-2 粘性流体の境界条件	18
1-1-4 湧き出し, 渦度, 循環, 流線,		1-4-3 相似法則	19
渦線	4	1-4-4 非圧縮場の条件	20
1-1-5 応力と熱流 (Newton 流体)		1-5 曲線座標系での方程式	22
.....	5	1-5-1 直交曲線座標系	22
1-2 保存方程式	7	1-5-2 平面極座標	25
1-2-1 保存法則	7	1-5-3 円柱座標	26
1-2-2 質量の保存	8	1-5-4 球座標	26
1-2-3 非圧縮の流れ	8	1-6 熱力学の関係式	28
1-2-4 運動量の保存	10	1-6-1 熱力学の基本法則	28
1-2-5 エネルギーの保存	10	1-6-2 熱力学関数と基本量	29
1-3 流体運動の方程式	12	1-6-3 理想気体	30
1-3-1 完全流体の運動方程式	12		
1-3-2 粘性流体の運動方程式	14		

2. 完全流体

2-1 Euler 方程式と積分	33	定理	33
2-1-1 渦なし流に対する Bernoulli の		2-1-3 非圧縮流に対する Bernoulli の	
定理	33	定理	34
2-1-2 定常流に対する Bernoulli の		2-1-4 完全流体の境界条件	34

2-2 Bernoulli の定理の応用	35
2-2-1 Torricelli の定理	35
2-2-2 Venturi 管	36
2-2-3 Pitot 管	36
2-2-4 U字管内の流体の振動	36
2-2-5 重力波の伝播速度	37
2-3 3次元非圧縮渦なし流	37
2-3-1 流れのポテンシャル	37
2-3-2 鏡像定理	38
2-3-3 一様流, 湧き出し, 吸い込み	39
2-3-4 球を過ぎる流れ	40
2-3-5 縮脈	41
2-3-6 細長い軸対称物体を過ぎる流れ	41
2-4 2次元非圧縮渦なし流	42
2-4-1 複素速度ポテンシャル	42
2-4-2 等角写像	42
2-4-3 2次元流の鏡像定理	43
2-4-4 一様流と角をまわる流れ	44
2-4-5 湧き出しと渦点	45
2-4-6 円柱を過ぎる流れ	45
2-4-7 楕円柱および平板を過ぎる一様流	46

2-5 物体に働く力と力のモーメント	47
2-5-1 Blasius の公式	47
2-5-2 応用例	48
2-5-3 特異点に働く力と薄翼理論	49
2-5-4 仮想質量	50
2-6 集中渦度分布	50
2-6-1 渦点と Rankine の渦	50
2-6-2 渦点列と Stuart の渦列	51
2-6-3 2次元渦対	52
2-6-4 Hill の球形渦	52
2-6-5 Kirchhoff の死水領域	52
2-7 渦の運動	53
2-7-1 Biot-Savart の定理	53
2-7-2 2次元渦層の不安定と巻上り	54
2-7-3 渦度領域の輪郭の運動	54
2-7-4 渦点系の2次元運動	55
2-7-5 渦系の3次元運動	57
2-8 圧縮性流体	58
2-8-1 圧縮性流体の Bernoulli の定理	58
2-8-2 Bernoulli の定理の応用	58
2-8-3 Crocco の定理	59

3. 粘性流体

3-1 Navier-Stokes 方程式の厳密解	61
3-1-1 一方向流れ	61
3-1-2 軸対称流	65
3-1-3 非平行流	66
3-1-4 渦運動	67

3-1-5 吸い込みを伴う流れ	70
3-2 境界層方程式の厳密解と近似解	71
3-2-1 境界層方程式	71
3-2-2 有益な変換公式	72
3-2-3 2次元定常流	73

3-2-4	3次元定常流	75	3-6-2	単一物体の並進および回転	92
3-2-5	非定常流	76	3-6-3	物体間相互作用	96
3-2-6	特別な境界条件をもつ流れ	78	3-6-4	物体と壁の相互作用	98
3-2-7	剝離流の構造	78	3-6-5	粘性渦列と剝離流	102
3-3	特異領域の流れと高次近似解	80	3-6-6	液滴・気泡	103
3-3-1	特異領域の解	80	3-7	非定常 Stokes 方程式	104
3-3-2	高次近似解	81	3-8	Oseen 近似	105
3-4	渦運動の観察	81	3-8-1	Oseen 方程式	105
3-4-1	2次元固体表面からの剝離による渦	81	3-8-2	Oseen 方程式の一般解	106
3-4-2	球の後流	83	3-8-3	Oseen 源・二重 Oseen 源	107
3-4-3	混合層における渦列	83	3-8-4	力とモーメント	108
3-4-4	境界層に生じる渦	83	3-9	Oseen 方程式の特解	109
3-4-5	噴流に生じる渦	84	3-9-1	球を過ぎる一様流	109
3-4-6	渦糸の切りつなぎ	84	3-9-2	円柱を過ぎる一様流	109
3-5	Stokes 近似	84	3-10	Navier-Stokes 方程式の $O(R)$ までの近似	109
3-5-1	定常および非定常 Stokes 方程式	84	3-11	粒子運動	110
3-5-2	Stokes 方程式の一般解	85	3-11-1	流れと粒子の軌道	110
3-5-3	Stokes 方程式の基本解	86	3-11-2	管内粒子の横ばい運動	110
3-5-4	力とモーメント (トルク)	88	3-12	薄層の非平行な流れ	111
3-5-5	相反定理	89	3-12-1	2平板間の流れ	111
3-5-6	ポテンシャル流と Stokes 流の関係	89	3-12-2	厚さの変化する薄層流	111
3-6	Stokes 方程式の特解	90	3-12-3	ブラシ塗布に伴う流れ	111
3-6-1	チャンネルおよび管内の流れ	90			

4. 流れの安定性

4-1	基礎方程式	123	4-2	線形安定性理論	125
4-1-1	流れの安定性の定義	123	4-2-1	線形安定性の基礎方程式	125
4-1-2	流れの安定性の基礎方程式	124	4-2-2	Orr-Sommerfeld 方程式の固有値問題の解法	131

4-3 弱非線形安定性理論134

4-3-1 弱非線形安定性理論の位置づけ134

4-3-2 単一モードの理論134

4-3-3 側帯波 (side band) の影響136

4-3-4 二つ以上のモードが存在する場合の理論137

4-3-5 直接共鳴138

4-4 非線形安定性139

4-4-1 平衡振幅に対する Fourier モード打ち切り法139

4-4-2 数値シミュレーション139

4-5 代表的な流れの安定性139

4-5-1 2次元 Couette 流139

4-5-2 平面 Poiseuille 流140

4-5-3 平板境界層流143

4-5-4 自由境界層流145

4-5-5 2次元ジェット146

4-5-6 2次元ウエーク148

4-5-7 Hagen-Poiseuille 流148

4-5-8 同じ回転円筒間の Couette 流149

5. 乱 流

5-1 基礎方程式157

5-1-1 平均操作157

5-1-2 流体運動を記述する方程式157

5-1-3 Reynolds 応力158

5-1-4 方程式の完結159

5-2 一様乱流159

5-2-1 速度場の Fourier 変換159

5-2-2 速度相関とエネルギースペクトル160

5-2-3 相関関数方程式162

5-2-4 相似則163

5-2-5 カオスとフラクタル165

5-3 せん断乱流166

5-3-1 境界層 (壁面) 乱流167

5-3-2 管内流169

5-3-3 自由乱流170

5-4 乱流中の組織的構造172

5-4-1 乱流境界層中の組織的構造173

5-4-2 自由乱流せん断流中の組織的構造175

5-5 乱流モデル176

5-5-1 0方程式モデル177

5-5-2 1方程式モデル178

5-5-3 2方程式モデル178

5-5-4 Reynolds 応力方程式モデル181

5-5-5 ラージ・エディ・シミュレーション184

5-6 乱流拡散185

5-6-1 拡散方程式185

5-6-2 固定源型拡散186

5-6-3 相対拡散 (浮遊源型拡散)187

5-6-4 乱流拡散における濃度変動188

5-6-5 せん断流中の乱流拡散190

5-6-6 瞬間点源からのパッチ状拡散192

6. 管路流

6-1 等断面流路の流れ	201	6-3-1 曲がり管内流	213
6-1-1 円管流れと損失	201	6-3-2 回転体内の流れ	214
6-1-2 円管内層流	202	6-3-3 浮力を伴う流れ	215
6-1-3 円管内乱流	203	6-3-4 磁場下の流れ	215
6-1-4 円形以外の断面形状直管内の 流動と摩擦抵抗	206	6-4 各種流体要素の抵抗	215
6-1-5 圧縮性の影響	207	6-4-1 弁	215
6-2 断面積変化を伴う流れ	207	6-4-2 エルボ	218
6-2-1 流れの剝離と圧力勾配	207	6-4-3 分岐・合流	219
6-2-2 ノズル流れ	208	6-4-4 管入口・出口部	220
6-2-3 ディフューザ流れ	209	6-4-5 ラビリンス	221
6-2-4 急激な断面積変化を伴う流れ	211	6-4-6 管群	222
6-3 外力を受ける等断面流路の 流れ	212	6-4-7 管路網	223

7. 物体の抵抗

7-1 粘性抵抗	227	7-3-1 平板上の突起物の抵抗	235
7-1-1 低レイノルズ数流れ	227	7-3-2 流路壁の拘束効果	237
7-1-2 層流境界層	228	7-3-3 二対物体の干渉	239
7-1-3 乱流境界層	228	7-4 表面波を伴う物体の抵抗	241
7-1-4 球形液滴および気泡の抵抗	230	7-4-1 進行浮体の抵抗成分	241
7-2 圧力抵抗	231	7-4-2 線形造波と非線形造波	241
7-2-1 剝離の形態と形状抵抗	231	7-4-3 造波抵抗の理論解析	242
7-2-2 2次元物体の抵抗	232	7-4-4 造波抵抗の数値解析	243
7-2-3 3次元物体の抵抗	234	7-5 圧縮性の影響	243
7-2-4 剝離を伴う液滴および気泡の 抵抗	235	7-5-1 亜音速流	244
7-3 相互作用の働く物体	235	7-5-2 遷音速流	244
		7-5-3 超音速流	245
		7-5-4 極超音速流	246

7-6 誘導抵抗	246
7-6-1 誘導速度と誘導抵抗	246

7-6-2 誘導抵抗の軽減法	248
----------------	-----

8. 開水路流れ

8-1 開水路流れのエネルギーと運動量	253
8-1-1 常流と射流, フルード数	253
8-1-2 比エネルギーと比力	254
8-1-3 限界水深, 交代水深	255
8-2 開水路の急変流	256
8-2-1 基礎方程式	256
8-2-2 跳水および共役水深	256
8-2-3 段上り流れおよび段落ち流れ	256
8-2-4 段波	257
8-3 開水路の漸変流	258
8-3-1 基礎方程式	258
8-3-2 等流公式と等流水深	259
8-3-3 水面形の分類	260

8-3-4 支配断面	262
8-3-5 特異点解析法	262
8-4 開水路の非定常流	263
8-4-1 基礎方程式	263
8-4-2 洪水解析	263
8-5 開水路流れの乱流構造	264
8-5-1 乱流場の領域区分	264
8-5-2 平均流速分布	266
8-5-3 乱れ特性分布	267
8-6 移動床の流れ	268
8-6-1 開水路の土砂輸送	268
8-6-2 河床形態	270
8-6-3 蛇行流路と網状流路	272

9. 水面の波

9-1 基礎方程式	277
9-2 微小振幅波	278
9-2-1 水面波形・水粒子速度・圧力	278
9-2-2 波長・波速	278
9-2-3 エネルギー・質量輸送・運動量輸送・エネルギー輸送	279
9-2-4 重複波	279
9-2-5 一様勾配斜面の波	280
9-3 有限振幅波	280
9-3-1 波速の定義	280

9-3-2 ストークス波	280
9-3-3 クノイド波・孤立波	281
9-3-4 流れ関数法・速度ポテンシャル法	282
9-3-5 有限振幅波理論の適用限界	283
9-4 ソリトン	284
9-4-1 ソリトンの定義	284
9-4-2 KdV 方程式のソリトン	284
9-4-3 各種ソリトン方程式	286
9-4-4 厳密解法	288

9-5 不規則波	288	9-7-1 波平均量の方程式	292
9-5-1 不規則波のスペクトル表示	288	9-7-2 平均水位の変化	293
9-5-2 不規則波の統計的性質	289	9-7-3 沿岸流	293
9-6 波の変形	290	9-8 波力	294
9-6-1 浅水変形と碎波	290	9-8-1 直立壁に作用する波力	294
9-6-2 屈折・回折	291	9-8-2 水中および水面の構造物に作用する波力	296
9-7 海浜流	292		

10. 多孔性固体中の流れ（浸透層内の流れ）

10-1 基礎方程式	305	10-2-2 飽和浸透流	310
10-1-1 連続の式	305	10-2-3 不飽和浸透流	311
10-1-2 運動方程式	305	10-2-4 地下水流	312
10-1-3 温度の変化の式	306	10-2-5 地下密度流	314
10-1-4 濃度の変化の式	308	10-3 化学装置内の流れ	314
10-2 地下水の流れ	309	10-3-1 充填層（固定層・移動層）	314
10-2-1 地下水の種類	309	10-3-2 流動層	317
		10-3-3 噴流および噴流層	322

11. 圧縮性流体

11-1 基礎方程式と一般定理	327	11-3 亜音速流	332
11-1-1 等エントロピー流れ	327	11-3-1 境界層流	332
11-1-2 ホドグラフ	327	11-3-2 線形翼理論	332
11-2 相似則	328	11-3-3 M^2 展開法	333
11-2-1 Prandtl-Glauert の相似則	328	11-4 遷音速流	333
11-2-2 von Kármán の遷音速相似則	329	11-4-1 スーパークリティカル翼	333
11-2-3 後退翼の独立性原理	330	11-4-2 エーリアルール	335
11-2-4 錐状流	330	11-5 超音速流	336
11-2-5 極超音速相似則	331	11-5-1 垂直衝撃波	336
11-2-6 浅水波	331	11-5-2 斜め衝撃波	337

11-5-3	衝撃波の反射	338	11-6-4	カレット翼	345
11-5-4	干渉	340	11-6-5	数値流体力学による最近の成果	345
11-5-5	特性曲線	340			
11-5-6	細長物体理論	341	11-7	ピストン問題	346
11-5-7	離脱衝撃波	341	11-7-1	ピストン問題	346
11-5-8	膨張波	342	11-7-2	Riemann 問題	347
11-5-9	線形翼理論	342	11-7-3	衝撃波管(ショック・チューブ)	348
11-5-10	噴流	343			
11-6	極超音速流	343	11-8	爆燃波	348
11-6-1	Newton 近似	343	11-8-1	燃焼波	348
11-6-2	Busemann 近似	344	11-8-2	爆発波	349
11-6-3	衝撃波層	344			

12. 流れと音

12-1	音波(線形理論)	353	12-3-3	四重極音・多重極音	360
12-1-1	波動方程式	353	12-4	渦音	360
12-1-2	音波のエネルギーと運動量	354	12-4-1	接続漸近展開法 (Method of matched asymptotic expansions)	360
12-1-3	平面波・円筒面波・球面波	354	12-4-2	渦対からの発生音	361
12-1-4	Poisson の公式	355	12-4-3	共軸渦輪からの発生音	362
12-1-5	Helmholtz 方程式と解	355	12-5	音の伝播(音線(ray)の方程式)	362
12-1-6	遅延ポテンシャル	355	12-6	音の散乱と吸収	363
12-1-7	Green 関数	356	12-6-1	粒子による散乱	363
12-2	空力音	356	12-6-2	場の非一様性による散乱	363
12-2-1	Lighthill の方程式	356	12-6-3	渦による散乱	364
12-2-2	Ribner の方程式	357	12-6-4	密度変動による散乱	364
12-2-3	Howe の方程式	357	12-6-5	音の吸収	364
12-2-4	相反定理	358	12-7	乱流騒音	365
12-2-5	Lilley の方程式	358	12-7-1	Lighthill 方程式の解	365
12-2-6	ベクトル Green 関数	358	12-7-2	音の平均強度(パワー)	366
12-3	音の放射(単極・多重極放射)	359	12-7-3	パワースペクトル	366
12-3-1	単極音	359			
12-3-2	二重極音	359			

12-7-4 噴流 (ジェット) 騒音 ……………367	12-9-1 移動音源による音場 ……………370
12-8 物体効果 ……………368	12-9-2 プロペラ, ヘリコプタロータ 騒音 ……………370
12-8-1 エオルス音 ……………368	12-9-3 気流変動による翼の非定常 空気力 ……………371
12-8-2 エッジ効果 ……………368	12-9-4 ターボ機械の回転音 ……………371
12-8-3 渦・円柱効果 ……………369	12-9-5 回転翼による広帯域周波数音 ほか ……………373
12-8-4 渦・平面壁効果 ……………369	
12-9 回転翼騒音 ……………370	

13. 解離・電離・化学反応

13-1 化学反応のある流れの方程式 ……………377	速度 ……………387
13-1-1 種の保存式 ……………377	13-3-4 電離気体の保存方程式 ……………388
13-1-2 運動量保存式 ……………379	13-3-5 弱電離気体の近似 ……………389
13-1-3 エネルギー保存式 ……………379	13-3-6 プラズマ流の工学的応用 ……390
13-1-4 他の関係式 ……………380	13-4 化学反応流 ……………390
13-2 振動・解離気体 ……………380	13-4-1 高温反応流の扱い方 ……………390
13-2-1 分子の振動励起 ……………380	13-4-2 素反応 ……………390
13-2-2 振動緩和とガスダイナミック レーザー ……………381	13-4-3 反応流のモデリング ……………392
13-2-3 分子の解離と理想解離気体 …383	13-5 高温における物性 ……………392
13-2-4 解離気体の取扱い ……………384	13-5-1 熱力学的諸量 ……………392
13-3 電離気体 ……………385	13-5-2 輸送係数 ……………393
13-3-1 電子励起と電離 ……………385	13-6 ふく射熱輸送 ……………393
13-3-2 電離平衡—Saha の式 ……………386	13-6-1 熱ふく射 ……………393
13-3-3 励起・失活速度と電離・再結合	13-6-2 ふく射熱輸送を含む流体力学方 程式 ……………394
	13-7 熱伝達の評価 ……………395

14. 希薄気体力学 (分子気体力学)

14-1 ま え お き ……………399	14-2-2 Boltzmann 方程式 ……………400
14-2 Boltzmann 方程式 ……………399	14-2-3 保存方程式 ……………400
14-2-1 速度分布関数 ……………399	14-2-4 Maxwell 分布(平衡分布) ……………401

xx	目	次
14-2-5	平均自由行程	401
14-2-6	境界条件	401
14-2-7	モデル方程式	402
14-2-8	無次元化変数と Boltzmann 方程式	402
14-2-9	線形化 Boltzmann 方程式	403
14-2-10	境界に伝わる運動量, エネル ギー	404
14-3	希薄度が高い場合——自由分子 気体——	404
14-3-1	自由分子流の一般解	404
14-3-2	初期値問題	404
14-3-3	境界値問題	405
14-3-4	境界温度の効果	406
14-4	希薄度が低い場合——漸近 理論	408
14-4-1	線形理論	408
14-4-2	弱非線形理論	414
14-4-3	蒸発・凝縮を伴う系	417
14-5	希薄気体特有の流れ	419
14-5-1	温度場により誘起される流れ	419
14-5-2	蒸発・凝縮による流れと逆温度 勾配	420
14-6	物体に働く種々の力	422
14-6-1	抗力	422
14-6-2	熱泳動	423
14-6-3	光泳動	425
14-6-4	高度に希薄な気体中の加熱物体 に働く力	426
14-7	希薄度が中程度の系の解析	428

15. 電 磁 流 体

15-1	基礎方程式	435
15-1-1	オームの法則	435
15-1-2	電磁界の式	436
15-1-3	流体力学の式	437
15-1-4	電磁界の境界条件	438
15-1-5	MHD 近似と EHD 近似	438
15-1-6	無次元パラメーター, 単位	440
15-2	振幅の小さい波	440
15-2-1	分散関係式	440
15-2-2	磁気音波, アルヴェーン波, エントロピー波	441
15-2-3	点波源からの波	443
15-2-4	定在する波	443
15-3	振幅の大きい波	444
15-3-1	不連続面, 衝撃波	444
15-3-2	内部構造	447
15-4	前方伴流, 渦跡	448
15-4-1	前方伴流	448
15-4-2	渦跡	448
15-5	境界層流れ	449
15-5-1	交差磁界流れの境界層	449
15-5-2	平行磁界流れの境界層	450
15-5-3	平行磁界流れにおける薄い平板 上の境界層	450
15-6	チャンネル流れ	451
15-6-1	平行平板間の流れ	451
15-6-2	矩形断面チャンネル	452
15-6-3	直線型チャンネル	454

15-6-4	ディスク型チャンネル	456
15-7	物体が受ける力	457
15-7-1	物体が受ける力の求め方	457
15-7-2	物体が受ける力の計算例	458
15-8	流れの安定性への影響	459
15-8-1	容器内の対流	459
15-8-2	チャンネル流れ	461
15-9	EHD 流れ	463
15-9-1	電場により流体に働く力	463

15-9-2	EHD 対流現象	464
15-9-3	EHD 不安定現象	465
15-9-4	電場の混相流への影響	465
15-10	磁性流体	465
15-10-1	磁性流体の磁化	466
15-10-2	応力テンソル	466
15-10-3	基礎方程式と境界条件	467
15-10-4	Bernoulli の定理	467
15-10-5	界面変形	468
15-10-6	高濃度磁性流体	468

16. 密度成層流体

16-1	基礎方程式	475
16-1-1	重力場における方程式系	475
16-1-2	Boussinesq 近似	475
16-1-3	問題点の分類	477
16-2	内部重力波	477
16-2-1	線形波動	477
16-2-2	非線形現象	480
16-3	安定な密度成層流中の流れとその不安定性	482
16-3-1	選択取水	482
16-3-2	水平対流	484
16-3-3	重力流	486
16-3-4	成層流体中のシア流の不	

	安定	488
16-3-5	鉛直壁の加熱による流れ	490
16-4	対流現象	492
16-4-1	Rayleigh-Taylor 不安定	492
16-4-2	Bénard-Rayleigh 対流	492
16-4-3	点源・線源による対流	500
16-4-4	対流混合層	502
16-5	2成分系の対流現象	502
16-5-1	二重拡散対流	502
16-5-2	湿潤対流	505
16-6	密度成層流体中の乱流	506
16-6-1	壁面の影響を受けた乱流	506
16-6-2	壁面の影響を受けない乱流	509

17. 回転流体

17-1	回転流体の基礎	517
17-1-1	回転流体の基礎方程式	517
17-1-2	Ertel の定理と渦位 (ポテン	

	シャル渦度) 保存則	518
17-2	剛体回転からのずれの小さい流れ	518

17-2-1 地衡流と Taylor-Proudman の定理	518	17-4-2 順圧不安定	527
17-2-2 Ekman 境界層と Stewartson 境界層	519	17-4-3 Ekman 境界層と Stewartson の $E^{1/4}$ 層の不安定	528
17-2-3 スピンドアウンとスピニアップ	522	17-4-4 ロスビー波の不安定	528
17-3 回転流体中の波動	523	17-4-5 回転系における乱流 (2次元 乱流)	529
17-3-1 慣性波	523	17-5 回転流体と成層流体のアナロ ジー	531
17-3-2 ロスビー波 (惑星波)	523	17-5-1 基礎方程式のアナロジー	531
17-4 回転流体中の不安定現象と 乱れ	526	17-5-2 流れ・波動・境界層のアナロジー	532
17-4-1 慣性不安定	526	17-5-3 不安定現象のアナロジー	532

18. 地球流体 (回転成層流体)

18-1 地球流体の基礎	535	ロスビー波	544
18-1-1 地球流体の基礎方程式	535	18-4 成層流体のスピニアップ	546
18-1-2 ベータ平面近似とベータ効果	536	18-5 地衡流調節	547
18-1-3 熱拡散のある系における剛体 回転のやぶれ	537	18-6 水平対流と傾圧不安定	548
18-2 回転成層流体中の準地衡流	538	18-7 地衡流乱流	549
18-2-1 温度風のバランス	538	18-8 回転系における対流不安定	550
18-2-2 準地衡流渦位方程式と Ekman 層	538	18-8-1 非粘性で断熱の場合	550
18-2-3 回転成層流体中の側壁境界層	539	18-8-2 粘性や拡散のある場合	551
18-3 長周期波	540	18-9 大気・海洋大循環	551
18-3-1 慣性重力波	540	18-9-1 大気大循環	551
18-3-2 内部ロスビー波	541	18-9-2 海洋大循環	554
18-3-3 赤道波	542	18-10 大気中の様々な現象	555
18-3-4 潮汐波	543	18-10-1 温帯低気圧	555
18-3-5 ケルビン波, エッジ波, 地形性	543	18-10-2 台風	556
		18-10-3 山岳波	557
		18-10-4 局地循環	558
		18-10-5 竜巻	559

18-10-6 突然昇温……………561	18-11-3 黒潮大蛇行……………565
18-10-7 準2年振動……………561	18-11-4 沿岸および赤道湧昇……………567
18-11 海洋中の様々な現象……………562	18-11-5 潮流と残差流……………568
18-11-1 中規模渦……………562	18-11-6 沿岸付近の密度流……………569
18-11-2 暖水塊と冷水塊……………564	18-11-7 前線……………570

19. 混相流

19-1 基礎方程式……………579	19-3-5 流動安定性……………601
19-1-1 連続体理論に基づく取扱い…579	19-3-6 衝撃現象……………603
19-1-2 運動論を用いる取扱い……………584	19-3-7 蒸気爆発……………604
19-2 波動……………585	19-4 固気混相流……………605
19-2-1 微小振幅の波……………585	19-4-1 管内流および噴流……………605
19-2-2 有限振幅の波……………588	19-4-2 ロケットノズル内および衝撃波 をよぎる流れ……………606
19-3 気液混相流……………590	19-4-3 その他の流れ……………607
19-3-1 流動様式……………590	19-5 固液混相流……………608
19-3-2 各流動様式の流動特性……………592	19-5-1 流動様式……………608
19-3-3 ボイド率, 圧力損失……………597	19-5-2 遷移速度……………611
19-3-4 臨界流……………600	19-5-3 圧力損失……………613

20. 非ニュートン流体

20-1 ニュートン流体と非ニュートン流体……………619	20-2-1 ずり流動化 (擬塑性流体)……………622
20-1-1 粘性率と粘度……………619	20-2-2 ずり粘稠化 (ダイラタント流体) ……………623
20-1-2 レオロジーと流体力学……………620	20-2-3 純粘性流体の構成方程式……………623
20-1-3 見掛けの粘性……………620	20-2-4 粘塑性 (粘塑性流体)……………624
20-1-4 流体の分類と流動曲線……………620	20-2-5 粘塑性流体の構成方程式 (ビ ンガム流体)……………624
20-1-5 構成方程式……………621	20-3 時間依存性のある非ニュートン流体……………625
20-1-6 粘弾性流体……………621	20-3-1 チクソトロピーとヒステリシス ……………625
20-2 時間依存性のない非ニュートン流体……………622	

20-3-2	レオベクシー	626	20-6-3	平行平板間の流れ	636
20-4	粘弾性流体	626	20-6-4	二重円管内の流れ	636
20-4-1	線形粘弾性体	626	20-6-5	二重円筒内の回転流れ	636
20-4-2	非線形粘弾性体	626	20-6-6	伸長流れ	637
20-4-3	粘弾性流体における諸特性	628	20-6-7	Rayleigh 問題	637
20-4-4	粘弾性流体の力学モデルと構成方程式	630	20-6-8	球のまわりの流れ	637
20-5	非ニュートン流体の示す特異な流動現象	630	20-6-9	境界層近似	638
20-5-1	栓流	630	20-6-10	平板に沿う層流境界層	638
20-5-2	シグマ効果	630	20-6-11	回転円板による流れ	638
20-5-3	Weissenberg 効果	631	20-7	分散系	639
20-5-4	二次流れ	631	20-7-1	分散系のレオロジーの一般的特徴	639
20-5-5	tilted trough	632	20-7-2	電気粘性効果	639
20-5-6	静圧誤差	632	20-7-3	見掛けの粘度の分散質濃度および形状依存性	640
20-5-7	弾性回復	632	20-7-4	分散質の有効体積	640
20-5-8	die swell	633	20-7-5	濃厚分散系の現象論	641
20-5-9	Uebler効果	633	20-7-6	分散系の毛管流れ	641
20-5-10	tubeless siphon	633	20-7-7	その他の問題点	642
20-5-11	曳糸性	634	20-8	極性流体	642
20-5-12	Toms 効果	634	20-8-1	Eringen-Allen の理論	642
20-6	非ニュートン流体の流れの解析	634	20-8-2	Stokes の理論	644
20-6-1	円管内の発達した流れ	635	20-8-3	Shliomis の理論	644
20-6-2	円管内助走区間の流れ	635	20-8-4	磁性流体の力学	646
			20-8-5	液晶の流体力学	646

21. 流れと熱伝達

21-1	基礎事項	651	21-3	自然対流熱伝達	661
21-2	強制対流熱伝達	652	21-3-1	鉛直の平面および円筒面, 水平および傾斜の平面	661
21-2-1	平板からの熱伝達	652	21-3-2	円筒および球の外表面	664
21-2-2	外部流の熱伝達	654	21-3-3	平行平板間, 鉛直円筒内面	665
21-2-3	管内流	657	21-3-4	水平流体層, 閉空間	665
21-2-4	その他の熱伝達	660			

21-4	相変化を伴う熱伝達	666	21-5-1	熱交換器の形態	677
21-4-1	沸騰熱伝達	666	21-5-2	流動抵抗と熱伝達	678
21-4-2	凝縮熱伝達	670	21-5-3	オフセットストリップからの 熱伝達	679
21-4-3	物質移動を伴う熱伝達	673	21-5-4	円環フィン付き管の列からの 熱伝達	680
21-5	熱交換器における流れと熱 伝達	677	21-5-5	シェル内における二相流	680
			21-5-6	ヒートパイプ内の流れ	681

22. 流体機械に伴う流れ

22-1	翼列	687	22-2-2	スーパーキャビテーション	699
22-1-1	エネルギー変換と流れの非定 常性	687	22-2-3	遷移領域における諸問題	700
22-1-2	ヘッド, 流量係数, 圧力係数	688	22-3	潤滑の流れ	702
22-1-3	羽根車の形式	688	22-3-1	潤滑理論	702
22-1-4	運動量理論	689	22-3-2	オイルホワール, オイル ホイップ	705
22-1-5	羽根車内の流れ	690	22-4	流体機械に関連する特異な 流れ	706
22-1-6	直線翼列	693	22-4-1	旋回失速	706
22-2	キャビテーション	696	22-4-2	低流量域の流れ	707
22-2-1	サブキャビテーション	697	22-4-3	貫流羽根車と渦	708

23. 流体振動・流れ誘起振動

23-1	管水路の振動	713	23-2-3	安定性	718
23-1-1	U字管の水面振動	713	23-2-4	曲がり送水管の振動	719
23-1-2	水撃作用	713	23-2-5	気液二相流による送水管の 振動	720
23-1-3	暗渠の呼び水現象	714	23-3	液面の振動	720
23-1-4	サージング現象	715	23-3-1	スロッシング	720
23-1-5	気柱振動	716	23-3-2	開水路の水面不安定	721
23-2	送水管の振動	717	23-3-3	転波列	722
23-2-1	真直な送水管の振動方程式	717	23-4	水脈・水膜・水束の振動	723
23-2-2	送水管の自由振動	718			

23-4-1	水脈・水膜の振動	723	23-5-2	フラッターとギャロッピング	728
23-4-2	水束の振動	725	23-5-3	柱状体群の振動	732
23-5	流れ誘起振動	726	23-5-4	流れの乱れによる振動	737
23-5-1	渦による振動	726			

24. 生物流体力学

24-1	ヒトの体液の流れ	743	24-2-3	鳥のはばたき運動	761
24-1-1	総説	743	24-3	微生物のべん毛運動	762
24-1-2	血液の物性	746	24-3-1	近似解	763
24-1-3	血液の流体力学—大血管内の流れ	747	24-3-2	積分方程式系の基礎方程式とその解	764
24-1-4	微小循環における血液およびリンパの流れ	752	24-4	細胞内の流れ	766
24-2	魚と鳥の運動	758	24-4-1	流動形態	766
24-2-1	魚の細長物体理論	758	24-4-2	原動力発生の座	766
24-2-2	魚の抵抗と出力の推定	760	24-4-3	原動力の測定	767

25. 環境と流れ

25-1	大気汚染	775	25-3	水質汚濁	787
25-1-1	大気汚染物質の拡大と大気安定度	775	25-3-1	運動方程式と物質保存則	787
25-1-2	大気境界層と煙の拡散	778	25-3-2	河川における自浄作用	789
25-1-3	大気拡散の模型実験・数値シミュレーション	779	25-3-3	湖水の流動と富栄養化	789
25-1-4	化学変化を伴う物質の拡散	781	25-3-4	赤潮の集積と流動条件	792
25-2	温排水	782	25-4	植物と流れ	793
25-2-1	温排水の問題点と放出方式	782	25-4-1	植物群落内の流れ	793
25-2-2	放水口付近での拡散	783	25-4-2	同化作用とCO ₂ 濃度分布	795
25-2-3	広い水域での拡散	785	25-4-3	蒸発散と熱収支	796
			25-4-4	植物群落と風の相互作用	798

26. 実験法・相似則

26-1 流れを作る	803	26-3-1 トレーサー法	820
26-1-1 風洞の種類と特徴	803	26-3-2 電気制御法	822
26-1-2 低速風洞の構成	805	26-3-3 タフト法	824
26-1-3 水槽実験装置の種類と特徴	808	26-3-4 表面トレース法	824
26-2 流れの測定法	809	26-3-5 光学的方法	825
26-2-1 速度の測定	809	26-3-6 画像処理	827
26-2-2 圧力の測定	812	26-4 次元解析	828
26-2-3 温度の測定	814	26-4-1 基本単位と無次元量	828
26-2-4 力とモーメントの測定	816	26-4-2 次元解析と Π 定理	829
26-2-5 データ処理	819	26-4-3 模型実験と相似則	830
26-3 流れの観察法	819		

27. 数値解析

27-1 差分法における基本的事項	833	27-3-1 基礎方程式	843
27-1-1 差分法の適合性・収束性および安定性	833	27-3-2 一般座標系	844
27-1-2 安定性解析の方法	834	27-3-3 ポテンシャル流方程式の数値解法	845
27-1-3 非線形不安定性	838	27-3-4 Euler 方程式の数値解法	847
27-2 非圧縮性流れ	838	27-3-5 Navier-Stokes 方程式の数値解析	848
27-2-1 流れ関数と渦度方程式による解法	839	27-4 有限要素法	849
27-2-2 基礎変数による解法	840	27-4-1 有限要素法の概要	849
27-3 圧縮性流れ	843	27-4-2 有限要素法の解析方法	850

付 録	855
I. 流体力学で用いられる主な数学公式	857
II. 基本物理定数・無次元パラメーター・物性値	865
索 引	869