

目 次

I 高速空気力学の基礎

1 序 説

1-1 高速飛行機	2
1-1.1 大 気	3
1-1.2 連続流体の限界	4
1-1.3 有翼飛行体の再突入経路	6
1-1.4 空 気 力	7
1-2 圧 縮 性	9
1-2.1 圧縮性を考慮する速度	9
1-2.2 温度変化の影響	10
1-2.3 粘性の影響と圧縮性	10
1-2.4 圧縮性と非線形性	10
1-3 空気熱力学	11
1-3.1 理想気体	12
1-3.2 完全気体	13
1-3.3 空 気	14
1-3.4 実在気体の状態方程式	14
1-3.5 基準体積, 調査体積	15
1-4 熱 力 学	16
1-4.1 空気の比熱	19
1-4.2 ジュールの法則の証明	19
1-4.3 内部エネルギー	20
1-4.4 完全気体の断熱変化と等エントロピー変化	21
1-4.5 エントロピーの変化	21
1-4.6 内部エネルギー	21
1-4.7 仕 事	21
1-4.8 比 熱	22
1-4.9 熱力学的に完全な完全気体の圧力比	22
1-5 等エントロピー変化.....	23
1-5.1 ジュール-トムソンの細孔栓実験.....	24
1-5.2 熱力学的状態方程式	25
1-5.3 可逆的断熱変化	25
1-5.4 温度の等エントロピー変化	25
1-5.5 密度の等エントロピー変化	26
1-5.6 気体の熱力学的性質	26

2 流線上の物理量

2-1 定常断熱1次元流れ	28
2-1.1 定常断熱流れ槽円	33
2-1.2 1次元断熱定常流れの図式解法	33
2-1.3 変化率	34
2-1.4 澱み点温度	35
2-1.5 臨界音速, 最大速度	36
2-1.6 澱み点温度	36
2-1.7 断熱1次元定常流れ	36
2-1.8 変化率の影響係数	37
2-2 定常等エントロピー1次元流れ	38
2-2.1 圧縮性の影響	40
2-2.2 ピトー管補正	41
2-2.3 変化率	42
2-2.4 ピトー管補正	43
2-2.5 圧力係数の公式(2.20)の誤差	43
2-2.6 局所速度	43
2-2.7 圧縮性の影響	43
2-2.8 等エントロピー流れの数表	43
2-3 音速	44
2-3.1 音速	45
2-3.2 音速の式	46
2-3.3 気体中の音速	47
2-3.4 気体定数の算定	47
2-3.5 大気中の音速	47
2-3.6 音の減衰	47
2-4 定常非等エントロピー流れ	48
2-4.1 $h-v$ 面上のファノ線	49
2-4.2 レイリー線	50
2-4.3 完全気体のファノ線, レイリー線の数値表	50

3 太さの変わる管の中の1次元流れ

3-1 断面の変化する管の中の定常等エントロピー流れ	52
3-1.1 ラバール・ノズル	54
3-1.2 流出量の測定	55
3-1.3 等温変化の1次元定常流れ	55
3-1.4 最小断面でのマッハ数	56
3-1.5 ラバール管内の等エントロピー流れ	56
3-1.6 ベンチュリー管内の速度	56

3-2 断面の変わるまっすぐな管に働く軸力	57
3-2.1 ロケットの推力	58
3-2.2 ジェット・エンジンの推力	59
3-2.3 ノズルによる推力	59
3-2.4 ジェット・エンジンの推力	59
3-2.5 ノズル	60
3-2.6 各種ロケットの比推力	60
3-3 完全気体の定常1次元流れ	61
3-3.1 太さの様な長い管の中の流れ	64
3-3.2 1次元等エントロピー流れ	65
3-4 管の中の気体の流れの基礎方程式	66

4 垂直衝撃波と衝撃波管

4-1 垂直衝撃波	70
4-1.1 激み点状態と貯気槽状態	75
4-1.2 衝撃波の後方の状態	76
4-2 静止気体中の衝撃波の進行	77
4-2.1 衝撃波の後方の状態	81
4-2.2 ビトー管によるマッハ数の測定	82
4-2.3 ビトー管補正	83
4-2.4 断面積が変化する管の中の衝撃波の進行	84
4-3 衝撃波管	85
4-3.1 衝撃波管の実験	90
4-3.2 最大衝撃マッハ数	90

5 角を回る超音速2次元流れ

5-1 斜め衝撃波	92
5-1.1 斜め衝撃波の発生	94
5-1.2 速度不連続面	95
5-1.3 斜め衝撃波	95
5-1.4 衝撃波角 σ と M_1 との関係	95
5-2 衝撃極線	96
5-3 角を回る超音速流れの図式計算 (斜め衝撃波をふくむ流れ)	100
5-3.1 角のついた壁に沿う流れ	102
5-3.2 くさびにあたる流れ	103
5-3.3 固定壁における衝撃波の反射	104
5-3.4 3つの衝撃波の干渉	104
5-3.5 衝撃波の干渉	105
5-4 プラントル-マイエル流れ	106

5-4・1 ホドグラフ特性曲線法 111
 5-5 特性曲線による超音速流れの図式計算 113

II 圧縮性ポテンシャル流れ

6 圧縮性流れの基礎方程式

6-1 仮定と準備 116
 6-1・1 理想気体と輸送特性 119
 6-2 保存原理 120
 6-2・1 理想気体の場合 123
 6-2・2 保存原理 123
 6-3 基礎方程式 124
 6-3・1 カートesian座標系で表わした基礎方程式 127
 6-3・2 円柱座標系で表わした基礎方程式 127
 6-3・3 球座標系で表わした基礎方程式 128
 6-3・4 直交曲線座標系で表わした基礎方程式 129
 6-3・5 拡大係数 129
 6-4 循環, エントロピー, 渦度 130
 6-5 渦無し定常流れ 132
 6-5・1 気体力学の基礎方程式 134
 6-5・2 速度が最大となる点 135
 6-5・3 楕円座標 135
 6-5・4 円柱座標系 136
 6-5・5 球座標系 136
 6-5・6 流れ関数 136
 6-5・7 混合形方程式 137
 6-6 流線座標系による基礎方程式 138
 6-6・1 流線座標系 140
 6-6・2 マッハ波 140

7 ポテンシャル流れの厳密解

7-1 1次元流れ 142
 7-1・1 非定常1次元流れのポテンシャル 144
 7-2 基礎方程式の積分 (2次元定常流れの厳密解) 145
 7-2・1 吹出し, 吸込み 145
 7-2・2 循環流 147
 7-2・3 渦湧出し 147
 7-2・4 ノズル 149
 7-2・5 先細末広ノズルの流れ 151

7-2-6 ノズルの流れの差分法による解法	154
7-3 プラントル-マイエル流れ	156
7-3-1 プラントル-マイエル流れの解析	160
7-4 錐状流	161
7-4-1 迎え角をもった円錐の周りの超音速流れ	163
7-5 軸対称ポテンシャル流れの特性曲線	166

8 ホドグラフ法

8-1 ルジャンドル変換	168
8-1-1 $\chi(q, \theta)$ の一般解	172
8-1-2 流れ関数 ψ に関するホドグラフ方程式	173
8-1-3 吹出し, 吸込み	173
8-2 モーレンブロック-チャプリギン変換	174
8-2-1 ホドグラフ方程式の導び方	178
8-2-2 ホドグラフ方程式の簡略化	179
8-2-3 吹出し, 吸込み	180
8-2-4 循環流	181
8-2-5 角を回る流れ	181
8-2-6 ホドグラフ法の困難点	184
8-2-7 2次元ジェット	184
8-2-8 遷音速近似	186
8-3 ホドグラフ法	189
8-4 カルマン-チェン近似	193
8-4-1 カルマン-チェンの圧力係数の修正式	197
8-4-2 楕円柱の周りの流れ	198
8-5 ライトヒルの方法	200
8-5-1 円柱の周りの循環のない遷音速流れ	202

9 特性曲線法, 数値計算法

9-1 特性曲線法	206
9-1-1 1次元定常等エントロピー流れの特性曲線	212
9-1-2 1次元非定常等エントロピー流れの特性曲線	213
9-1-3 1次元波動方程式	214
9-2 特性曲線法による超音速流れの解法	215
9-3 特性曲線法の応用例	219
9-3-1 ノズル内の超音速流れの計算	219
9-3-2 ノズルの設計	220

9-4 数値計算	222
9-4・1 超音速後流の PIC 法による計算	223

10 極超音速流れ

10-1 極超音速流れ	226
10-1・1 極超音速飛行径路	227
10-2 極超音速等エントロピー流れ	228
10-3 衝撃波	230
10-3・1 平板の周りの極超音速流れ	233
10-3・2 くさびや円錐にあたる極超音速流れ	234
10-3・3 円柱や球の周りの極超音速流れ	235
10-4 ニュートン流れ	236
10-4・1 翼形の空力係数	237
10-5 極超音速流れの特徴	238
10-5・1 球の圧力係数	241
10-6 細長い物体の周りの極超音速流れ	242
10-6・1 鈍頭の細長い物体の周りの極超音速流れ	244

III 微小擾乱理論, 線形化理論

11 線形理論

11-1 微小擾乱理論	246
11-1・1 線形化のための条件	250
11-1・2 流線とマッハ円錐とが直交することの証明	250
11-1・3 円柱座標系	250
11-1・4 軸対称超音速流れの無次元化擾乱ポテンシャル	251
11-1・5 臨界音速からの微小変動	252
11-1・6 無限に長い波状壁に沿う圧縮性流れ	253
11-1・7 任意の形状の壁に沿う亜音速流れ	255
11-2 音波	256
11-2・1 音波の反射	257
11-2・2 音波のエネルギー	258
11-2・3 球面波	258
11-2・4 音波の方程式の誘導	259
11-2・5 音速と分子速度	259
11-3 M^2 展開法	260
11-3・1 M^2 展開法と亜音速解	263

11-3-2 円柱の周りの解	263
11-3-3 今井の方法	265
11-3-4 ジュコウスキー翼の周りの流れ	268
11-4 薄翼展開法	269
11-4-1 円弧翼の周りの解	271
11-4-2 薄翼展開法と M^2 展解法	272
11-4-3 楕円柱の周りの亜音速流れ	272

12 2次元翼理論

12-1 超音速2次元翼理論	274
12-1-1 迎え角 α の平板	277
12-1-2 対称くさび翼(ダイヤモンド翼)	277
12-1-3 円弧翼	278
12-1-4 レンズ翼	278
12-1-5 平板の空力特性	279
12-1-6 圧縮性翼理論	281
12-2 翼の周りの混合流れ	282
12-2-1 亜音速流れ中の翼の特性	284
12-3 局所線形化理論	285
12-3-1 くさびの周りの流れ	293
12-3-2 円弧翼	293
12-4 遷音速翼理論	294
12-4-1 遷音速流れの非存在定理	309
12-4-2 ニューランド翼	309
12-4-3 衝撃波を伴わない遷音速翼形	310
12-5 遷音速翼形の半実験的理論	312
12-6 積分方程式による解法	317

13 3次元翼理論

13-1 後退翼	320
13-2 超音速3次元翼	322
13-2-1 基本解 $-1/R_k$	323
13-2-2 平板の擾乱ポテンシャル	324
13-3 超音速微小擾乱理論	325
13-4 吹出し分布法	330
13-4-1 超音速前縁をもつ薄い3次元揚力面	331
13-4-2 部分的に亜音速な前縁の場合	332
13-4-3 亜音速3次元翼理論	333

13-5	細長い平面形の翼	334
13-6	超音速における3次元翼の特性	337
13-6-1	超音速における矩形翼の空力特性	346
13-6-2	矩形翼の抵抗係数	346
13-7	遷音速3次元翼理論	347
13-7-1	計算例	351
13-7-2	翼理論の展望	352
13-8	ラプラス変換による超音速非定常翼	354
13-8-1	超音速定常翼	356
13-8-2	超音速非定常翼の単位応答	357

14 胴体理論

14-1	軸対称物体に働く空気力	360
14-1-1	遷音速領域における実験結果	363
14-2	軸対称定常超音速流れ	364
14-2-1	円錐の圧力係数	366
14-2-2	ロケットの空気抵抗	367
14-2-3	迎え角のある回転体	368
14-2-4	α の冪級数展開	371
14-3	超音速細長物体のラプラス変換による解法	372
14-4	超音速, 極超音速領域における底面圧力の問題	374
14-4-1	物体の壁からの流れの剝離	376

15 空気力学的干渉

15-1	空気力学的干渉	378
15-2	亜音速翼胴体干渉 (ムルトツプの方法)	380
15-2-1	胴体断面が円の場合	383
15-3	亜音速翼胴体干渉 (ワードの方法)	384
15-4	超音速翼胴体干渉	387
15-5	翼・胴体の干渉	389
15-6	ラプラス変換による解法	392
15-7	その他の空力干渉問題	394
15-7-1	飛行機の空気力	394
15-7-2	風洞実験	395
15-7-3	風洞壁の干渉	396
15-8	遷音速面積法則	397
15-8-1	遷音速旅客機の形状	398

IV 非等エントロピー流れ

16 離脱衝撃波を含む流れ

16-1	離脱衝撃波	400
16-1-1	離脱衝撃波	402
16-2	逆問題	403
16-3	ガラベジアンの方法	405
16-3-1	軸対称衝撃波	406
16-3-2	数値解法の安定性	407
16-3-3	球の前方の衝撃波	407
16-3-4	上流に湾曲する衝撃波の計算	407
16-4	ヴァン・ダイクの解法	408

17 粘性気体

17-1	粘性と熱伝達	412
17-1-1	粘性と運動量の輸送	414
17-1-2	レイノルズ数	415
17-1-3	プラントル数	415
17-2	粘性気体の基礎方程式	416
17-2-1	非圧縮性粘性流体	420
17-2-2	ナビエーストークスの方程式	421
17-2-3	テンソルのダイバージェンス	423
17-2-4	ストークスの仮定	423
17-3	エネルギー方程式	424
17-3-1	圧縮性粘性力学の問題	426
17-4	エネルギー逸散	427
17-4-1	エネルギー逸散の分子論的説明	428
17-4-2	逸散関数	429
17-4-3	1次元粘性流れ	429
17-5	圧縮性粘性流れの基礎方程式	430
17-5-1	段差のある超音速層流流れ	431
17-6	変分原理	433
17-6-1	平行流(クエット流)	435
17-6-2	ポアズイユの流れ	435
17-6-3	圧縮性ポテンシャル流れの変分原理	436
17-6-4	任意物体の周りの流れ	438

17-7 衝撃波の厚さ	439
17-7・1 衝撃波の厚さ	441
17-8 圧縮性乱流の基礎方程式	442

18 境界層

18-1 層流境界層の基礎方程式	446
18-1・1 エネルギー方程式の別の導き方	450
18-1・2 球の遷移レイノルズ数	450
18-2 プラントル数が1の場合	451
18-2・1 熱伝達の計算	456
18-3 相似解	457
18-3・1 圧縮性変換による基礎方程式の変換	460
18-4 平板の解	461
18-4・1 平板の境界層の解法	465
18-4・2 激み点および断熱壁上のエンタルピー	467
18-5 数学モデルの比較	468
18-5・1 層流熱境界層の数学モデル	468
18-6 激み点流れ	474
18-6・1 激み点における熱伝達	476
18-7 乱流境界層	477
18-8 鈍頭物体の周りの極超音速流れ	481
18-8・1 境界層と衝撃波との干渉	482

19 反応性気体力学

19-1 化学変化	484
19-1・1 気体成分	488
19-1・2 酸水素反応	488
19-1・3 NO 濃度の変化	489
19-1・4 1次反応系	490
19-1・5 大気中における気体分子の解離と電離	491
19-2 化学反応の特性時間	492
19-2・1 強い垂直衝撃波の後方の温度	493
19-3 化学反応を伴う流れの基礎方程式	494
19-3・1 拡散を伴う1次元流れ	498
19-3・2 境界層内部の2成分気体の混合	499
19-3・3 拡散係数	499
19-4 固体壁の条件	500

19-4・1 壁における触媒性	501
19-5 化学反応を伴う境界層の流れ	502
19-6 化学変化を伴う非定常な流れ	505

20 実在気体効果

20-1 実在気体	508
20-2 実在気体の基礎方程式	510
20-3 解離現象	513
20-3・1 極超音速ノズル流れ	516
20-3・2 再突入時の揚力飛行体の周りの流れ	517
20-3・3 解離気体の境界層	517
20-4 電離気体の力学	518

V 高速空気力学特論

21 空力加熱

21-1 空力加熱の諸問題	520
21-2 空力加熱	526
21-2・1 スタントン数の計算	527
21-3 空力加熱推算法	528
21-3・1 断熱壁温	532
21-3・2 平板への空力加熱の計算例 (層流)	532
21-3・3 平板の空力加熱量の平均 (乱流)	533
21-3・4 激み点における空力加熱	534
21-4 空力加熱防御法	535
21-4・1 アブレーション	539
21-5 炭化アブレーションの理論	541
21-6 タービン翼の冷却法	547

22 輻射空気力学

22-1 輻射加熱	550
22-1・1 再突入物体の輻射による質量損失	551
22-2 輻射の現象	552
22-2・1 輻射の問題	559
22-2・2 高温気体の熱輻射特性	559
22-3 1次元輻射場	560

22-3-1	光学的厚さが無限大の場合	565
22-3-2	黒体の壁と透明な気体	565
22-3-3	平板が同温で黒体	565
22-3-4	輻射エネルギー	565
22-3-5	衝撃波の構造	565
22-4	熱伝導を考慮した1次元静止輻射場	566
22-4-1	指数近似による解法	568
22-5	輻射気体力学の基礎方程式	569

23 騒音, 汚染, ソニック・ブーム

23-1	騒音	572
23-1-1	ジェット・エンジンの騒音対策	575
23-2	大気汚染	576
23-2-1	拡散方程式	581
23-3	ソニック・ブーム	582
23-3-1	ソニック・ブーム対策	584

24 相似法則, 高速気流実験

24-1	相似法則	586
24-1-1	マッハ数とレイノルズ数に及ぼす気圧の影響	588
24-1-2	空力加熱に関する無次元量	589
24-1-3	輻射気体力学の相似パラメタ	593
24-1-4	その他の無次元パラメタ	594
24-2	微小擾乱の相似法則	595
24-2-1	輻射対称物体の空力特性	598
24-2-2	プラントル-グラウワートの相似法則の応用	598
24-3	極超音速相似法則	599
24-3-1	迎え角を持つ放物体	599
24-4	高速空気力学実験	600
24-4-1	遷音速風洞	607
24-4-2	超音速風洞	608
24-4-3	極超音速風洞	608
24-4-4	遷音速高レイノルズ数風洞	609
24-4-5	ルートビーク管	611
24-4-6	推進機関試験装置	612
24-5	シミュレーション	613
24-5-1	デジタル・シミュレーション	618

25 結 論

25-1 電磁気体力学	620
25-1・1 1次元電磁気体流れ	624
25-1・2 クエット流れ	626
25-1・3 プラズマ	628
25-2 気体分子の流れ	629
25-2・1 マクスウェル分布	634
25-2・2 ボルツマン方程式の近似解法	636
25-3 高速空気力学における数学的研究	637
25-3・1 高速空気力学における数学モデルの応用	642
あ と が き	643

付 録

A-1 数 表	646
A-2 比熱比 γ の関数の数値	647
A-3 \mathcal{M} と M の対応	647
A-4 標準大気	648
A-5 1次元等エントロピー流れの関係式	650
A-6 1次元非等エントロピー流れ	655
A-7 垂直衝撃波の関係式	657
A-8 衝撃極線	659
A-9 斜め衝撃波に関するいろいろなグラフ	661
A-10 プラントル-マイエル関数表	663
A-11 特性曲線	666
A-12 臨界マッハ数を求めるグラフ	667
A-13 高速空気力学参考書	668
人名索引	671
索 引	672