圧縮性流体力学・衝撃波

工学博士　佐宗 章弘 著

コロナ社

ま　え　が　き

圧縮性流体力学は，圧力波と流れの相互作用を捉える学問といってもよい。シンプルに美しく体系化されており，衝撃波はその象徴である。原理の基本は検査体積に適用される保存関係であり，それほど高度な数学を使わなくても，多くの問題に取り組める。流路の拡大縮小，熱の出入り，力の作用によって，流れがどのように変化するかも，重要な点である。

原理はシンプルであるが，その適用範囲は奥深く，本書は当初の予定をはるかに上回る紙数に達してしまった。できれば短期間で一冊を通して読破いただきたいが，原理の理解を重視するなら，詳細に過ぎると感じた部分は読み飛ばしていただいても構わない。また，実際の問題に取り組むために，まず必要箇所から利用することもできるはずである。

本書を出版することができたのも，私を研究者の道に導いてくださった荒川義博東京大学名誉教授，圧縮性流体力学・衝撃波の分野に導いてくださった藤原俊隆名古屋大学名誉教授，高山和喜東北大学名誉教授のご指導の賜物である。心から，感謝の意を表する。本書の執筆にあたり，数年来本書の原型である学部授業「圧縮性流体力学」の教材準備に協力くださった松田晶子さん，式変形を含めた内容の確認，画像・データ・情報の提供などを通して協力いただいた名古屋大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻 衝撃波・宇宙推進研究グループをはじめとする関係諸氏，そして約束の期限を十年以上超過してしまったにもかかわらず，心暖かく執筆の機会を与えてくださった，コロナ社の方々に厚くお礼申し上げる。

最後に，ここまで自分を支えてくれた両親，妻 美智代と娘 麻子，智子に本書を捧げることとしたい。

2017 年 1 月

佐宗 章弘

本書の執筆に協力いただいた方々

【画像・データ・情報提供ならびに執筆補助】

伊東 亜沙子（イラストレーター）
大林　茂（東北大学）
笠原 次郎（名古屋大学）
西成 活裕（東京大学）
Joanna Austin（カリフォルニア工科大学）
Luke J. Doherty（オクスフォード大学）
Carl Knowlen（ワシントン大学）
Evgeny E. Meshkov（サロフ物理･技術研究所）
Joseph E. Shepherd（カリフォルニア工科大学）
三菱重工業株式会社
岩川　輝（名古屋大学）
小川 俊広（東北大学）
酒井 武治（鳥取大学）
姜　宗林（中国科学院力学研究所）
Adam P. Bruckner（ワシントン大学）
David Gildfind（クイーンズランド大学）
David J. Mee（クイーンズランド大学）
Richard Morgan（クイーンズランド大学）
宇宙航空研究開発機構

（ご所属は，2016 年 11 月現在）

【原稿レビュー（名古屋大学大学院生）】

青木 勇磨	今泉 貴博	家弓 昌也	川崎 広勝	後藤 啓介
丹波 高裕	古川 大貴	堀内 拓未	摩嶋 亮祐	吉水 大介

（敬称略）

目　　次

1. 圧力波の伝播

1.1　音　の　伝　播 …… 1
1.2　飛行体が出す音波 …… 3
1.3　一次元粒子列の運動と波の伝播 …… 4
1.3.1　ピストン-小球の衝突 …… 4
1.3.2　小球-小球衝突 …… 4
1.3.3　ピストンと小球の動き …… 5
1.3.4　特　性　速　度 …… 5
1.3.5　平均粒子速度 …… 5
1.3.6　運動エネルギー …… 5
1.3.7　圧　　縮　　比 …… 7
1.3.8　ピストンにかかる力 …… 7
1.4　固体衝突における圧力波の伝播 …… 8

2. 気体粒子の運動と熱力学

2.1　熱力学の基礎 …… 10
2.2　熱速度と流速 …… 13
2.3　圧　　力 …… 14
2.4　エネルギーと温度 …… 17
2.5　理想気体と状態方程式 …… 20
2.6　エントロピー …… 24
2.7　エンタルピー，全温，全圧 …… 25
2.8　多成分混合気体 …… 29

3. 流れの基礎式

3.1　流れの保存式 …… 32
3.1.1　質量保存式 …… 32
3.1.2　運動量保存式 …… 33

3.1.3 エネルギー保存式 …… 35
3.1.4 そのほかの関係式 …… 37
3.1.5 非粘性流れの相似性 …… 38
3.2 ガリレイ変換 …… 38
3.2.1 慣性座標系 …… 38
3.2.2 ガリレイ変換 …… 39
3.2.3 流体の保存方程式のガリレイ変換 …… 41

4. 不連続面

4.1 不連続面の条件と種類 …… 44
4.1.1 ランキン・ユゴニオ関係式 …… 44
4.1.2 不連続面の分類 …… 45
4.2 垂直衝撃波 …… 47
4.2.1 一般的な性質 …… 47
4.2.2 熱量的完全気体に対する関係式 …… 51
4.2.3 グランシングインシデンス …… 59
4.2.4 衝撃波面の安定性 …… 60
4.2.5 境界層を伴う衝撃波伝播 …… 60
4.3 斜め衝撃波 …… 61
4.3.1 斜め衝撃波の関係式 …… 61
4.3.2 マッハ波 …… 62
4.3.3 二つの解と背後のマッハ数 …… 63
4.3.4 付着衝撃波と離脱衝撃波 …… 65
4.4 界面と不安定性 …… 68
4.4.1 レイリー・テイラー不安定性 …… 68
4.4.2 リヒトマイアー・メシュコフ不安定性 …… 69
4.4.3 ケルビン・ヘルムホルツ不安定性 …… 72

5. 準一次元流れ

5.1 検査体積と基礎式 …… 73
5.1.1 検査体積 …… 73
5.1.2 質量保存 …… 74
5.1.3 運動量保存 …… 74
5.1.4 エネルギー保存 …… 75
5.1.5 状態方程式 …… 76
5.1.6 音速の関係式 …… 76
5.1.7 マッハ数 M の定義 …… 76

5.1.8　微分関係式の導出 …… 76
5.2　流れの性質 …… 78
5.2.1　影響係数 …… 78
5.2.2　流路断面積変化の効果 …… 78
5.2.3　加熱 / 冷却の効果 …… 79
5.2.4　摩擦力の効果 …… 80
5.2.5　外力の効果 …… 80
5.2.6　閉塞条件 …… 81
5.3　摩擦のある管内流れ …… 81

6. 生成項を伴う系

6.1　一般化されたランキン・ユゴニオ関係式 …… 84
6.2　デトネーション / デフラグレーション …… 88
6.2.1　解の存在範囲 …… 88
6.2.2　デトネーション …… 89
6.2.3　デフラグレーション …… 91
6.2.4　エントロピーの変化 …… 92
6.2.5　エネルギーの変化 …… 93
6.2.6　ZND モデル …… 94
6.2.7　デトネーションのセル構造 …… 95
6.3　ラム加速器 …… 97
6.3.1　作動原理と特徴 …… 97
6.3.2　推力の導出 …… 99
6.3.3　熱閉塞点の性質 …… 101
6.3.4　ラム加速器の実験 …… 102
6.4　ジェット推力の一般化 …… 104
6.5　空気吸込みエンジン …… 105

7. 二次元流れ

7.1　圧縮波・膨張波とプラントル・マイヤー関数 …… 108
7.2　プラントル・マイヤー膨張 …… 115
7.3　超音速流れに置かれた円錐周りの流れ …… 116
7.4　衝撃波の反射 …… 120
7.4.1　定常流れにおける反射形態 …… 120
7.4.2　衝撃波極線 …… 121
7.4.3　二衝撃波理論 …… 122

7.4.4 三衝撃波理論 …… 123
7.4.5 反射形態の遷移基準 …… 124
7.4.6 擬似定常流れにおける衝撃波の反射 …… 125
7.5 衝撃波・境界層干渉 …… 126
7.6 演習：三角翼周りの超音速流れ …… 127

8. 非定常一次元流れ

8.1 音 波 …… 132
8.2 特性速度と不変量 …… 133
8.3 圧 縮 波 …… 138
8.4 膨 張 波 …… 141
8.5 垂直衝撃波前後の圧力波伝播 …… 145
8.6 断面積が変化する流路を伝わる衝撃波 …… 146
8.7 爆 風 …… 149

9. リーマン問題

9.1 問題の定義と解 …… 151
9.2 衝 撃 波 管 …… 158
9.3 垂直衝撃波の反射 …… 162
9.4 イクスパンションファンの反射 …… 165
9.5 垂直衝撃波どうしの干渉 …… 168
9.5.1 Head-on 衝 突 …… 168
9.5.2 先行する衝撃波に別の衝撃波が追いつく場合 …… 170
9.6 衝撃波と接触面の干渉 …… 171

10. 特 性 曲 線 法

10.1 超音速ノズルの設計 …… 178
10.1.1 特性線と流れの変化の扱い …… 178
10.1.2 ラバールノズルの設計手順 …… 183
10.2 衝撃波管作動の波動線図 …… 184

11. 圧縮性流れの発生と利用

11.1 ノズルとオリフィス …… 187

11.1.1　断面積と等エントロピー流れの関係 …… 188
11.1.2　流　　量 …… 189
11.1.3　推　　力 …… 191
11.1.4　ノズル圧力比と流れの形態 …… 194
11.2　超音速ディフューザー …… 196
11.2.1　一次元的取扱い …… 197
11.2.2　多 次 元 効 果 …… 200
11.2.3　擬 似 衝 撃 波 …… 201
11.3　超音速流れの試験方法 …… 202
11.3.1　超 音 速 風 洞 …… 202
11.3.2　超音速自由飛行 …… 204
11.4　非定常ドライバー …… 204
11.5　衝　撃　風　洞 …… 206
11.6　イクスパンション管 …… 210
11.7　バリスティックレンジ …… 213

12. 類　似　現　象

12.1　浅　水　流　れ …… 217
12.2　交　　通　　流 …… 219
12.2.1　平衡連続流体モデル …… 219
12.2.2　運動方程式を取り入れたモデルと特性速度 …… 224
12.2.3　粒 子 モ デ ル …… 225

付　　録

付録 1　各種の座標系における微分演算子（3 章関連） …… 232
付録 2　デカルト座標系以外の座標系における保存式（3 章関連） …… 234
付録 3　圧縮性流体の応力テンソル（3 章関連） …… 234
付録 4　等エントロピー圧縮率（8 章関連） …… 235
付録 5　特性速度と不変量の一般的導出（8 章関連） …… 236

索　　引 …… 242

1

圧力波の伝播

気体や液体は，形を変えて流れることができるので，**流体**（fluid）と総称される。エアコンから出てくる空気や川の水の流れなど，日常生活で現れる流れのほとんどは，流体が伸び縮みする性質，すなわち**圧縮性**（compressibility）の影響を考える必要がない。しかし高速流れや，流れの速度や圧力が急激に変化する場合には，圧縮性が重要になってくる。流体の伸縮は，密度の変化であり，圧力が変化する波，すなわち**圧力波**（pressure wave）として伝わる。**圧縮性流体力学**（compressible fluid dynamics）では，圧力波の伝播（でんぱ）と流れの変化との関係を扱う。ここでは，いくつかの例をとおして，圧力波の伝播の基本的な考え方を学ぶことにしよう。

1.1 音の伝播

圧力波の中で最も弱い波を**音波**（sound wave）と呼ぶ。静止気体中に音波が伝わると，気体の粒子は定点の周りを振動するようになる。振動の振幅と周波数特性によって，音の強さと高さ，音色が決まる。音波が伝わっても，重心の移動，すなわち「流れ」は生じないが，その音を発したなんらかの「情報」が伝わることになる。

図 1.1 の例を考えてみよう。Aさんの背後で風船が割れたとき，割れた瞬間にはAさんにその音は伝わらない。図（a）は割れる直前の状態，図（b）では割れてから少しだけ時間が経過しているが，まだその音はAさんにまで到達していない。図（c）で「ばん！」という音が聞こえて，初めてそれを知ることになる。

風船が発した音が到達した領域とそうでない領域は，図（d）の**波動線図**（wave diagram）で区別することができる。風船とAさんを結ぶ直線に沿って x

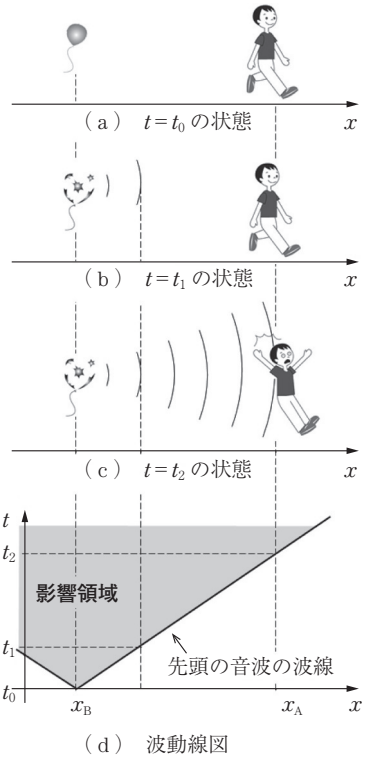
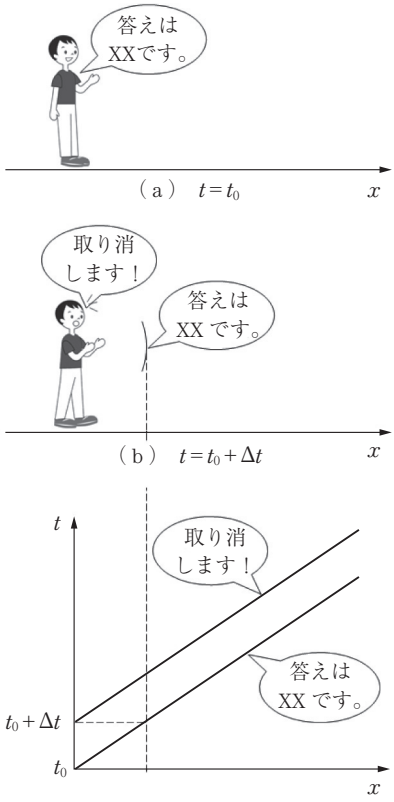


図 1.1 Aさんの背後で風船が割れたときの様子

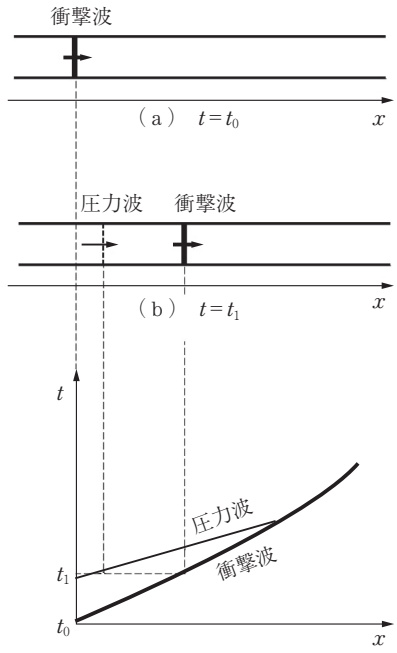
座標をとり，Aさんと風船の位置を，それぞれ x_A，x_B とする。図(a)風船が割れた時刻を t_0，図(b)の時刻を t_1，図(c)の時刻を t_2 とする。音は，**音速**（speed of sound）で伝わる。(x_B，t_0) を頂点とした逆三角形の領域（灰色で示す部分）が風船が割れた音が伝わっている**影響領域**（domain of influence）であり，その外側は伝わっていない領域である。この二つの領域を分けているのが，先頭の音の**波線**（ray）で，音速は波線の傾き $\mathrm{d}t/\mathrm{d}x$ の逆数の大きさに等しい。波線の傾きが小さいほど，波は速く伝わることに注意しよう。

音速が一定であれば，あとから出た音は先に出した音に，決して追いつけない。**図 1.2** を例にとろう。Aさんがある問題の答えを聞かれたとき，時刻 t_0 で「XXです」と答えた(図(a))。そのあとすぐに誤りに気が付いて，訂正した（図(b)）。しかし，取消しの声は，先に発した答えの声に追いつくことができないので，答えを取り消すことはできない。



(c)　波動線図(音速が一定)

図 1.2　音はあとから取り消せない



(c)　波動線図

図 1.3　衝撃波に対しては，あとの圧力波が追いつく

圧縮性流れに現れる波は，音波だけではない。強い圧力波が伝わると，流れが変化する。変化量が大きいほど，より強い波ということになる。波の強さは，通常，圧力増加量で評価

する。高速流れや，流速が急に変化する流れでは，**衝撃波**（shock wave）が発生する。衝撃波に対しては，あとの圧力波が追いつくことができ，その強さを変えることができる（**図 1.3**）。これは，圧縮性流体力学の重要な性質の一つであり，詳しいことは順を追って学んでいく。

1.2　飛行体が出す音波

飛行体が周囲に発する音波の伝播を考えよう。その伝播形態は，飛行速度が音速よりも高いか低いかによって大きく異なる。

音速よりも低い速度で飛行するとき（**亜音速飛行**，subsonic flight），**図 1.4** に示すように，飛行体から発した音波は全方向に伝わっていく。図 1.2 に示したように，先に発した音波はあとから発した音波に追いつかれることはなく，前の時間に発生した波面のほうがより前方までも伝わっていく。図には数少ない音波しか表示していないが実際には時間をさかのぼって多数の音波が到達しており，十分時間が経ったときには，飛行体の影響領域は，周囲の広い範囲に及ぶ。

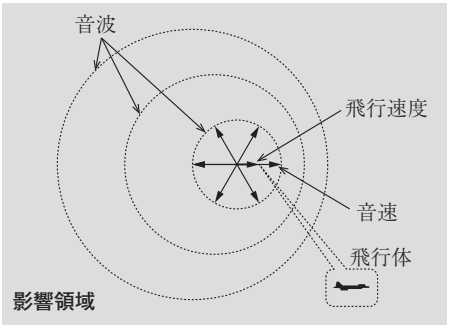


図 1.4　亜音速飛行における音波の伝播
（灰色部分は飛行体の影響領域）

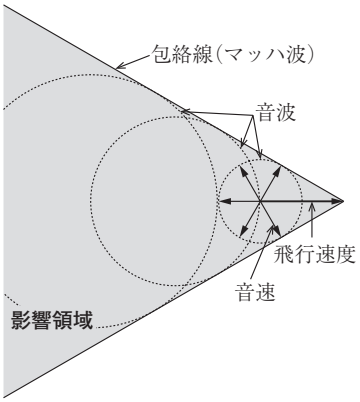


図 1.5　超音速飛行における音波の伝播
（灰色部分は飛行体の影響領域）

飛行速度が音速よりも高いとき（**超音速飛行**，supersonic flight），**図 1.5** に示すように，飛行体から発する音波は包絡線を形成する。この音波の包絡線は**マッハ波**（Mach wave）と呼ばれる。飛行体の大きさを無視すると，包絡線は円錐（すい）状のマッハ波（**マッハコーン**，Mach cone）をなす。影響領域は，マッハコーンの内側（灰色で示す領域）になる。大きさを持ったものが飛行すると，より強い圧力波（圧縮波，衝撃波）が発生する。これについては4章以降で学ぶ。

1.3　一次元粒子列の運動と波の伝播

波の伝播と流れの変化を，簡単な一次元モデルで定量的に扱ってみよう。**図 1.6** に示すような小球列モデルを考える。x 軸に沿って，等間隔 l で直線状に並んでいる小球（質量 m）の列に，質量 m_p のピストンが左から一定速度 u_p で衝突する。ピストンの質量は，球に比べて十分大きい（$m \ll m_p$）とする。このような単純な系でも，情報（波）の伝わり方や集団としての挙動について，圧縮性流れの重要な性質がよく現れる†。これを解析してみよう。

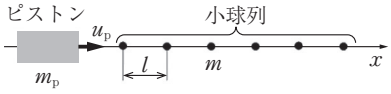


図 1.6　小球列モデル

1.3.1　ピストン–小球の衝突

衝突前に小球は静止しているとする。衝突前のピストン，小球の速度をそれぞれ u_p，u とし，衝突後の値にはプライム（ ′ ）を付ける。小球の内部エネルギーや外部へのエネルギー損失を無視，すなわち弾性衝突を仮定すると，以下の式が成り立つ。

運動量保存式：$m_p u_p = m_p u_p' + m u'$　(1.1)

エネルギー保存式：$\frac{1}{2} m_p u_p^2 = \frac{1}{2} m_p u_p'^2 + \frac{1}{2} m u'^2$　(1.2)

式(1.1)，(1.2)より衝突後の速度を求めて，$m/m_p \ll 1$ を適用すると

$$u' = \frac{2u_p}{1+m/m_p} \cong 2u_p \tag{1.3}$$

$$u_p' = \frac{1-m/m_p}{1+m/m_p} u_p \cong u_p \tag{1.4}$$

すなわち，ピストンが静止している小球に衝突すると，小球は速度 $2u_p$ ではじかれ，ピストンの速度は変化しない。すなわち，重いものを軽いものにぶつけると，軽いものは，重いものの速さの最大 2 倍ではじかれる。物体を高速で射出するために，この原理を利用することもある。

1.3.2　小球–小球衝突

小球 1 が，静止している同質量の小球 2 に，左から速度 $2u_p$ で衝突することを考える。式(1.3)，(1.4)で，$u_p \to u_1$，$u \to u_2$，$m_p \to m$ とすると

$$u_1' = 0 \tag{1.5}$$

† Beads on a Wire Mode：J. R. Asay, M. Shahinpoor (Eds.)：High-Pressure Shock Compression of Solids, Springer-Verlag, New York, pp.12-14(1993)

$$u_2{}'=u_1 \tag{1.6}$$

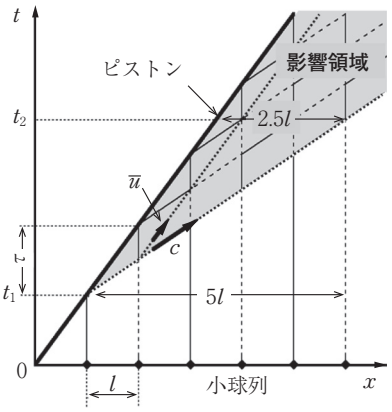
となる。小球 1 にはじかれた小球 2 は，速度 u_1（$=2u_\mathrm{p}$）で右側にはじかれ，小球 1 は静止する。右側に静止した小球が並んでいると，同様な衝突が続けて起こり，小球の運動がつぎつぎに右側に伝わる。

1.3.3　ピストンと小球の動き

この系の動きを，波動線図（**図 1.7**）で表してみよう。図で，傾きが小さいほど速度が高いことになる。ピストンの速度は u_p で一定であるので，その軌跡は直線になる。ピストンと小球が衝突する時間間隔を τ とすると

$$\tau=\frac{l}{u_\mathrm{p}} \tag{1.7}$$

となり，それぞれの小球は，衝突が起こってから $\tau/2$ のあいだ速度 $2u_\mathrm{p}$ で運動し，つぎの時間 $\tau/2$ で静止し，この動きを繰り返す。



（灰色部がピストンの影響領域）
図 1.7　ピストンと小球の軌跡

1.3.4　特　性　速　度

小球列の中に，ピストンがぶつかってきているという「情報」が，どこまで伝わっているだろうか？　その情報，すなわち波が伝わる速度 c を**特性速度**（velocity of characteristic）と呼ぶ。この波は，動いている小球の中で一番先（右）を行くものによって伝えられるので

$$c=2u_\mathrm{p} \tag{1.8}$$

となり，波が伝わった背後（灰色で示す領域）が，ピストンの影響領域となる。

1.3.5　平均粒子速度

小球運動の 1 サイクルについて時間平均すると，平均粒子速度 $\overline{u}$（図 1.7）は

$$\overline{u}=\frac{l}{\dfrac{\tau}{2}+\dfrac{\tau}{2}}=u_\mathrm{p} \tag{1.9}$$

で表される。

1.3.6　運動エネルギー

いくつかの方法で，粒子の運動エネルギーの平均値 K を求めてみよう。

〔1〕 **平均運動エネルギー K_1**　　十分長い時間が経って，たくさんの小球が動いている

索　　引

【あ】

亜音速飛行 3
圧縮管 205
圧縮性 1
圧縮性因子 23
圧縮性流体力学 1
圧縮波 9, 108, 132
圧縮比 7
圧　力 10
圧力推力 16, 105, 192
圧力損失 27
圧力波 1, 132
アボガドロ数 21

【い】

イクスパンション管 204, 211
イクスパンションファン 108, 115
異常反射 126
一般化された
　——ユゴニオ曲線 87
　——ランキン・ユゴニオ関係式 85
　——レイリー直線 86
一般気体定数 11
インパルス風洞 204

【う】

運動量推力 16, 105, 192
運動量保存式 41
運動量流束 15

【え】

影響係数 78
影響領域 2
エネルギーの変化 48
エネルギー付加 173
エネルギー物質 149
エネルギー保存式 41
エンタルピー 10, 13, 26, 37
円柱座標 232, 234
エントロピー 10, 12, 24
　——の変化 49

【お】

オイラーの運動方程式 35, 38
音 132
オーバードリブン（過駆動）デトネーション 90
オリフィス 187
音圧レベル 132
音響インピーダンス 171
音　速 2, 27, 132, 133
音速条件 124
音速ノズル 187
温　度 10, 17
音　波 1, 132

【か】

界　面 46
　——の逆位相変形 70
可逆過程 11
可逆変化 12
過度テンソル 235
過膨張流れ 195
ガリレイ変換 38
間欠風洞 204
慣性座標系 38
カントロビッツ限界 198
管内カタパルト射出法 214

【き】

擬似衝撃波 201
擬似定常流れ 125
気体定数 11
きのこ雲 71
希薄波 9
球座標 233, 234
境界層 126
局所熱力学的平衡状態 18

【く】

空気吸込みエンジン 105
空力加熱 67
グランシングインシデンス 59
クロネッカーのデルタ 33

【け】

撃　力 7
ケルビン・ヘルムホルツ不安定性 72
検査体積 15
検査面 15

【こ】

高圧室 158
後退デトネーションドライバー 205
交通流 219
混合領域 201

【さ】

最適速度 224
最適速度モデル 224
先細ノズル 79, 187
サ　ボ 214
三重点 121

【し】

自己相似解 125
仕事率 25
実験室座標 38
実在気体 23
実在気体効果 23
実質微分 35
質量分率 29, 30
質量保存式 33, 41
質量流束 15
質量流量 189
質量流量係数 190
始　動 199
銃 98
収縮率 198
自由ピストン式衝撃風洞 209
自由ピストンドライバー 205
準一次元流れ 73
準静的過程 57
衝撃インピーダンス 171
衝撃層 67, 206
衝撃波 3, 45, 108, 132, 139
　強い—— 50
　弱い—— 50
衝撃波圧縮 57
衝撃波管 158
衝撃波・境界層干渉 201

衝撃波極線 121
衝撃波形成距離 140
衝撃波吸込み条件 199
衝撃波前後 51
衝撃波背後
　――の状態 47
　――のマッハ数 56
衝撃波マッハ数 52
衝撃風洞 204, 206
状態方程式 10, 21
状態量 10
衝突断面積 20
じょう乱 132
ショックトレイン 201
伸縮ひずみ速度 234

【す】

吸込み風洞 204
垂直衝撃波 46
推　力 16, 104
推力係数 192
数密度 20
末広ノズル 79
スクラムジェット 105
ストーカー管 209
滑り面 46
ずれひずみ速度 234
スロート 79, 187

【せ】

静　圧 17
静エンタルピー 26
静　温 27
正常反射 120
生成項 85
接触面 9, 46
セル構造 97
セルサイズ 97
全　圧 27
全域亜音速流れ 194
全エネルギー 19, 35
全エンタルピー 26
全　温 27

【そ】

双曲型 178
相似性 38

【た】

大気圏再突入 206
対向衝撃波管 161
体積粘性率 235
体積ひずみ速度 234
体積力 33
第 2 粘性係数 235
対流項 35
対流熱伝達 67
対流微分 35
脱出速度 155
断熱過程 12

【ち】

チャップマン・ジュゲ
　デトネーション 90
チャップマン・ジュゲ
　デフラグレーション 91
チューンドオペレーション 205
超音速ディフューザー 196
超音速飛行 3
貯気槽 205

【て】

低圧室 158
定圧比熱 13
定積比熱 13
ディフューザー 79, 105, 196
デカルト座標 232
適正膨張 194, 196
デトネーション 88
デフラグレーション 88, 191
テーラード条件 209
電子励起エネルギー 18
テンソル積 34

【と】

動　圧 16
等エントロピー圧縮率 235
等エントロピー過程 13
等エントロピー非閉塞条件 198
等エントロピー変化 57
等価直径 75
凍結音速 30
特性曲線法 178
特性速度 5, 137, 241
特性方程式 135
特性面 238
ドルトンの法則 29

【な】

内部エネルギー 10, 17, 19
内部自由度 18
流　れ 10
斜め衝撃波 46, 108

【に】

二乗平均平方根 20
二段式軽ガス銃 214
入射衝撃波 120, 163
ニュートン流近似 64

【ね】

熱速度 14
熱的完全気体 13
熱伝導 67
熱閉塞 81
熱閉塞モード 101
熱力学 10
熱力学第 1 法則 11, 37
熱力学第 2 法則 12
熱量的完全気体 13
粘性係数 235

【の】

ノイマンスパイク 95
ノズル 79, 187
ノズル圧力比 194

【は】

背　圧 191
排気プルーム 123
爆　縮 70
爆　発 148
爆　風 149
剥離バブル 127
波　線 2
波動線図 1
バブル 173
バリスティックレンジ 204, 213
バロクリニック効果 69
パワー 25
反射衝撃波 121, 163
反応帯 95

【ひ】

比 11
非可逆過程 11
非可逆変化 12
ひずみ速度テンソル 234
比体積 11
左進行波 151
ピトー圧 27
ピトー管 27
比熱比 13
非粘性流れ 32
非平衡 31
非保存形 35
標準生成エンタルピー 29

【ふ】

ファノ流れ 81
ファンデルワールスの状態
　方程式 23
噴出し風洞 204
輻射熱伝達 67

不始動 197, 199
不足膨張 196
付着衝撃波 65, 108
プラントルの関係式 55
プラントル・マイヤー関数 108, 112
プラントル・マイヤー膨張 115
プリカーサー衝撃波 213
不連続面 43
プロジェクタイル 98, 213
分子量 29

【へ】

平均自由行程 21
平均自由時間 21
平　衡 31
平衡音速 31
並進エネルギー 17
閉塞条件 81
閉塞状態 188
閉塞流れ 195
ベルヌーイの式 28
ベルヌーイの定理 112
変形速度テンソル 234
偏向角 61, 110

【ほ】

膨張衝撃波 223
膨張波 9, 108, 132
膨張比 192
保存形 35
ボルツマン定数 17

【ま】

マクスウェル分布 19
マズル 215
マッハ角 63
マッハコーン 3
マッハ数 27
　――の変化 50
マッハステム 121
マッハディスク 123
マッハ波 3, 62, 108
マッハ反射 120

【み】

右進行波 151
密　度 10, 15

【め】

メシュコフの実験 70

【や】

ヤコビ行列 40

【ゆ】

誘起帯 95
ユゴニオ曲線 48, 53
ユゴニオの式 48
弓形衝撃波 67

【よ】

よどみ状態 189
よどみ線 66
よどみ点圧力 27
よどみ点エンタルピー 26
よどみ点温度 27

【ら】

ラバールノズル 79, 187
ラム圧縮 105
ラム加速器 97
ラムジェット 105
ランキン・ユゴニオ関係式 45

【り】

力学的平衡条件 125
理想気体 10, 21
離脱衝撃波 66, 108
離脱条件 124
リヒトマイアー・メシュコフ不安定性 69, 71
リーマン不変量 114, 137
リーマン問題 151
粒子速度 9
流　線 25
流　速 10, 14
流　束 15
流　体 1
臨界圧力比 190, 194
臨界状態 190
臨界流れ 194
臨界ノズル 187
臨界流量 190

【れ】

レイリー線 47, 52
レイリー・テイラー不安定性 68
レイリーのピトー管公式 28
連続循環式風洞 203
連続流体 32, 43

【ろ】

ロシュミット数 20

【C】

CD-ST 161

【N】

NPR 194

【T】

Taylor-Maccoll の解 117

【Z】

ZND モデル 94

——著 者 略 歴——

1984 年　東京大学工学部航空学科卒業
1986 年　東京大学大学院工学系研究科修士課程修了（航空学専攻）
1989 年　東京大学大学院工学系研究科博士課程修了（航空学専攻）
　　工学博士
1989 年　名古屋大学助手
1991 年　東北大学助教授
2003 年　東北大学教授
2006 年　名古屋大学教授
　　現在に至る

圧縮性流体力学・衝撃波
Compressible Fluid Dynamics and Shock Waves

© Akihiro Sasoh 2017

2017 年 3 月27日　初版第 1 刷発行　★

検印省略

著　　者　佐宗章弘（さそう あきひろ）
発 行 者　株式会社　コロナ社
　　代 表 者　牛来真也
印 刷 所　新日本印刷株式会社
製 本 所　有限会社　愛千製本所

112-0011　東京都文京区千石 4-46-10
発 行 所　株式会社　**コ ロ ナ 社**
CORONA PUBLISHING CO., LTD.
Tokyo Japan
振替 00140-8-14844・電話 (03) 3941-3131 (代)
ホームページ　http://www.coronasha.co.jp

ISBN 978-4-339-04653-3　C3053　Printed in Japan　（中原）

JCOPY ＜出版者著作権管理機構 委託出版物＞
本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は，そのつど事前に，出版者著作権管理機構（電話 03-3513-6969，FAX 03-3513-6979，e-mail: info@jcopy.or.jp）の許諾を得てください。

本書のコピー，スキャン，デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は，いかなる場合も認めていません。
落丁・乱丁はお取替えいたします。