

# 目 次

## Table des matières

はじめに	<i>i</i>
<hr/>	
<b>1 熱力学第 1 法則</b>	<b>1</b>
<hr/>	
1.1 熱力学第 0 法則	1
1.2 仕事	2
1.3 熱力学第 1 法則	3
1.4 熱容量と等温潜熱	5
1.5 エンタルピー	8
1.6 圧力計数, 体積弾性率, 体膨張率, 圧縮率	10
<b>2 理想気体, ファン・デル・ワールス気体, 光子気体</b>	<b>15</b>
<hr/>	
2.1 ベルヌーリの気体分子運動論	15
2.2 理想気体 (完全気体)	17
2.3 さまざまな熱機関	27
2.4 ファン・デル・ワールス気体	35
2.5 光子気体	39
<b>3 エントロピー</b>	<b>42</b>
<hr/>	
3.1 クラウジウスの関係式とギブズの関係式	43
3.2 カラテオドリの定理	47

3.3 積分分母の意味 49

3.4 トムソンの等式 52

## 4 熱力学関数

55

4.1 内部エネルギーのルジャンドル変換 56

4.2 マクスウェルの関係式 58

4.3 微分形式によるマクスウェルの関係式 58

4.4 マクスウェルの関係式の意味 59

4.5 エントロピーのルジャンドル変換 60

4.6 定積熱容量と定圧熱容量 63

4.7 エネルギーの方程式 67

4.8 エンタルピーの方程式 71

4.9 レシュの定理 77

4.10 理想気体の熱力学関数 78

4.11 ファン・デル・ワールス気体の熱力学関数 81

4.12 光子気体の熱力学関数 84

4.13 ボルツマンの証明 86

4.14 ミーグリューンアイゼン状態方程式 88

4.15 針金とゴムひもの熱力学 91

## 5 熱力学第2法則

96

5.1 クラウジウス, トムソン, カラテオドリの原理 96

5.2 クラウジウスの不等式 102

5.3 エントロピー極大原理 103

5.4 熱平衡の条件 104

5.5 エントロピーと内部エネルギーの安定性 108

5.6 ルジャンドル変換の安定性 109

5.7 不等式の物理的意味 112

5.8 エントロピーの安定性 113

5.9 内部エネルギーの安定性 117

- 5.10 エンタルピーの安定性 121
- 5.11 ヘルムホルツ関数の安定性 123
- 5.12 ギブズ関数の安定性 124
- 5.13 ヘス行列式 126

## 6 開いた系

131

- 6.1 開いた系 131
- 6.2 エントロピー極大原理と内部エネルギー極小原理 132
- 6.3 化学ポテンシャル 135
- 6.4 相平衡 141
- 6.5 クラペロンの式 145
- 6.6 表面張力の熱力学 148
- 6.7 2次相転移 150
- 6.8 多成分系 153
- 6.9 ギブズの相律とデュエームの定理 156

## 7 熱力学第3法則

160

- 7.1 ネルンスト-プランクの法則 160
- 7.2 絶対零度における熱容量, 圧力計数, 体膨張率 161

## 8 統計力学

164

- 8.1 マクスウェルの速度分布 164
- 8.2 統計力学の基本原理 171
- 8.3 ボルツマンの原理 172
- 8.4 熱力学との関係 178
- 8.5 理想気体のエントロピー 179
- 8.6 ギブズの逆説 182
- 8.7 カノニカル分布 183
- 8.8 グランドカノニカル分布 187

- 8.9 等温定圧分布 189  
8.10 ゆらぎ 192  
8.11 酔歩蹠蹠とゴムの弾性 195  
8.12 ブラウン運動 198

## 9 光子気体

202

- 9.1 振動子の熱力学 202  
9.2 エネルギー量子 204  
9.3 アインシュタインの光量子仮説 205  
9.4 プランクの輻射式 206  
9.5 振動子の量子力学 208  
9.6 シュテファン-ボルツマンの法則 211

## 10 相対論的熱力学

214

- 10.1 完全流体のエネルギー運動量テンソル 214  
10.2 プランクの熱力学第1法則 217  
10.3 ランダウ-リフシッツの公式 219  
10.4 相対論的熱力学再定式化 220  
10.5 相対論的熱力学関数 224  
10.6 光子気体の質量 228  
10.7 相対論的速度分布, マクスウェル-ユトナー分布 230  
10.8 相対論的理想気体 232  
10.9 2次元の相対論的理想気体 234  
10.10 1次元の相対論的理想気体 236  
10.11  $f$ 次元の相対論的理想気体 237  
10.12 任意の慣性系における統計力学 239

## 11 膨張する宇宙

243

- 11.1 古典論による宇宙膨張 243

- 11.2 熱力学第 1 法則 245
- 11.3 平坦な空間 246
- 11.4 曲がった空間 249
- 11.5 フリードマン方程式 254

## 12 ブラックホールの熱力学

257

- 12.1 ブラックホール 257
- 12.2 ホーキング輻射 259
- 12.3 地平線近傍 260
- 12.4 ウンルー輻射 263
- 12.5 固有温度 264
- 12.6 ブラウン-ヨークエネルギー 266
- 12.7 荷電ブラックホール 267
- 12.8 回転荷電ブラックホール 270
- 12.9 ウンルー温度の導出 277

## 数学的準備

282

- A1 連鎖法則 282
- A2 積分可能条件 285
- A3 積分因子, 積分分母 286
- A4 ヤコービ行列とヤコービ行列式 287
- A5 ルジャンドル変換 289
- A6 ガウス積分 292
- A7 オイラーの定理 296
- A8 ラグランジュの未定係数法 297
- A9 デルタ関数 297
- A10 第 2 種の変形ベッセル関数 298

## 索 引

301