目　　次

基本的定義への手引き
参　考　書

序　　論 …… 1

1　モデル系の状態 …… 5

2 価モデル系 …… 8
状態の数え方と多重度関数 …… 11
2 元 合 金 系 …… 14
多重度関数の鋭さ …… 15
平　均　値 …… 18
2 価磁気系のエネルギー …… 19
例題：調和振動子に対する多重度関数 …… 20
ま　と　め …… 21

2　エントロピーと温度 …… 23

基 本 仮 定 …… 23
確　　率 …… 24
例題：アンサンブルの構成 …… 26
最も確からしい配列 …… 27
例題：熱的に接触している 2 つのスピン系 …… 30
熱　平　衡 …… 32
温　　度 …… 33
エントロピー …… 35
例題：熱の流れによるエントロピーの増加 …… 36

エントロピー増加の法則……37
熱力学の法則……40
対数としてのエントロピー……41
例題：第2種の永久運動……42
まとめ……42
問題……43

3　ボルツマン分布とヘルムホルツの自由エネルギー……46
ボルツマン因子……46
分配関数……49
例題：2状態系のエネルギーと熱容量……50
定義：可逆過程……51
圧力……52
熱力学の恒等式……54
ヘルムホルツの自由エネルギー……55
例題：常磁性系の自由エネルギー極小の性質……56
微分関係式……57
マクスウェルの関係式……57
ZからFの計算……58
理想気体：概観……58
例題：箱の中のN個の原子……60
例題：エネルギーの等分配……62
例題：混合のエントロピー……63
まとめ……65
問題……66

4　熱輻射とプランク分布……71
プランク分布関数……71
プランクの法則とステファン-ボルツマンの法則……74
放出と吸収：キルヒホッフの法則……78
表面温度の推定……78
例題：宇宙黒体残留輻射……80
電気的雑音……80

固体におけるフォノン：デバイ理論……84
フォノンモードの数……84
ま　と　め……89
問　　題……90

5　化学ポテンシャルとギブス分布……95
化学ポテンシャルの定義……96
例題：理想気体の化学ポテンシャル……97
内部および全化学ポテンシャル……99
例題：高度による大気圧の変化……101
例題：磁場内を動きうる磁性粒子の化学ポテンシャル……103
例題：電池……104
化学ポテンシャルとエントロピー……106
ギブス因子とギブス和……108
例題：占有率0または1……114
例題：半導体における不純物原子のイオン化……117
ま　と　め……117
問　　題……118

6　理　想　気　体……123
フェルミ-ディラックの分布関数……124
ボーズ-アインシュタインの分布関数……128
古　典　極　限……131
化学ポテンシャル……132
自由エネルギー……133
圧　　力……134
エ　ネ　ル　ギ　ー……134
エントロピー……135
熱　　容　　量……135
例題：サックール-テトロード方程式の実験的テスト……136
内部自由度をもつ理想気体の化学ポテンシャル……138
例題：磁場のない場合のスピンエントロピー……140
可逆等温膨張……140

等エントロピー可逆膨張 ……142
真空への急激な膨張 ……143
まとめ ……144
問題 ……145

7　フェルミ気体とボーズ気体 ……149
フェルミ気体 ……150
3次元のフェミル気体の基底状態 ……151
状態密度 ……153
電子気体の熱容量 ……155
金属中のフェルミ気体 ……160
白色矮星 ……163
核物質 ……165
ボーズ粒子気体とアインシュタイン凝縮 ……165
絶対零度近くでの化学ポテンシャル ……166
例題：自由原子の最低軌道と第2番目の最低軌道との間隔 ……167
軌道占拠数と温度 ……168
アインシュタイン凝縮温度 ……171
液体ヘリウム ^{4}He ……171
ヘリウムの相の関係 ……176
準粒子と超流動性，^{4}He ……177
^{3}He の超流動相 ……181
まとめ ……182
問題 ……183

8　熱と仕事 ……188
エネルギーとエントロピーの移動：熱と仕事との定義 ……188
熱機関：熱の仕事への転化 ……189
冷凍機 ……195
空調機と熱ポンプ ……197
カルノー・サイクル ……197
例題：理想気体に対するカルノー・サイクル ……199
エネルギー転換と熱力学の第2法則 ……201

熱と仕事との径路依存性 ……202
非可逆な仕事 ……202
例題：理想気体の急激な膨張 ……204
一定温度あるいは一定圧力のもとでの熱と仕事 ……205
例題：電気分解と燃料電池 ……207
化学的仕事 ……210
例題：理想気体に対する化学的仕事 ……211
磁気的仕事と超伝導体 ……212
まとめ ……217
問題 ……217

9　ギブスの自由エネルギーと化学反応 ……221

ギブスの自由エネルギー ……221
例題：G と F との比較 ……224
反応における平衡 ……225
理想気体に対する平衡 ……226
例題：原子状水素と分子状水素との平衡 ……227
例題：pH と水のイオン化 ……228
例題：質量作用則に対する運動学的なモデル ……228
まとめ ……230
問題 ……230

10　相転移 ……233

蒸気圧の方程式 ……233
共存曲線の導出（p 対 τ） ……235
例題：気体–固体平衡に対するモデル体系 ……241
ファン・デル・ワールスの状態方程式 ……243
平均場の方法 ……244
ファン・デル・ワールス気体に対する臨界点 ……245
ファン・デル・ワールス気体のギブスの自由エネルギー ……247
強磁性 ……252
相転移のランダウ理論 ……254
例題：強磁性体 ……257

1 次の相転移 ……257
まとめ ……259
問題 ……260

11 二元混合物 ……264

溶解度のギャップ ……264
混合のエネルギーとエントロピー ……268
例題：最近接相互作用を行う 2 元合金 ……271
例題：異なる結晶構造をもつ 2 種の固体間の混合 ……272
例題：低温における液体の ^{3}He–^{4}He の混合物 ……273
簡単な溶解度ギャップに対する相図 ……274
液体混合物と固体混合物の間の相の平衡 ……275
まとめ ……283
問題 ……283

12 低温学 ……285

膨張エンジン内の外的仕事による冷却 ……285
ジュールートムソン効果による気体の液化 ……287
例題：ファン・デル・ワールス気体に対するジュールートムソン効果 ……289
蒸発冷却：ポンプで吸い出されたヘリウムによって，0.3K へ ……292
ヘリウム希釈冷凍機：ミリ度 ……292
断熱消磁：絶対零度への追求 ……296
原子核消磁 ……298
まとめ ……300
問題 ……300

13 半導体統計 ……303

エネルギーバンド；フェルミ準位；電子とホール ……303
古典領域 ……306
質量作用の法則 ……309
純粋半導体のフェルミ準位 ……310
n 型と *p* 型の半導体 ……310

ドナーとアクセプター ……310
不純物半導体におけるフェルミ準位 ……312
縮退した半導体 ……313
不純物準位 ……315
ドナー準位の占め方 ……316
例題：半絶縁性のガリウムアルセナイド（GaAs） ……319
p–n 接合 ……320
逆バイアスをかけた *p–n* 接合 ……323
非平衡の半導体 ……325
擬フェルミ準位 ……325
電流の流れ：ドリフトと拡散 ……326
例題：注入レーザー ……327
例題：不純物準位を介するキャリヤの再結合 ……329
まとめ ……330
問題 ……332

14 気体運動論 ……335
理想気体法則の運動論 ……335
マクスウェルの速度分布 ……336
衝突断面積と平均自由行程 ……339
輸送過程 ……342
粒子の拡散 ……342
熱伝導率 ……344
粘性 ……345
一般的な力 ……347
アインシュタインの関係 ……348
詳細つり合いの運動学 ……349
進んだ取扱い：ボルツマンの輸送方程式 ……350
粒子の拡散 ……351
古典分布 ……352
フェルミ–ディラック分布 ……353
電気伝導度 ……354
希薄気体の法則 ……355
孔を通しての分子の流れ ……355

例題：長い管を通しての流れ ……357
ポンプのスピード ……358
ま　と　め ……359
問　　題 ……360

15　伝　　播 ……363
熱伝導の方程式 ……363
分散関係，ω 対 k ……364
温度振動の侵入 ……364
パルスの伝播 ……365
$x=0$ において，境界条件が固定されている場合の拡散 ……367
時間に依存しない分布 ……368
気体中での音波の伝播 ……368
熱　緩　和 ……370
例題：音波内の熱の移動 ……372
ま　と　め ……372
問　　題 ……373

付録 A　指数関数を含むいくつかの積分 ……376
ガウス積分 ……376
一般化したガウス積分，およびガンマ関数で表される積分 ……377
スターリングの近似 ……378

付録 B　温度スケール ……381
ケルビンの温度スケールの定義 ……381
1 次温度計と 2 次温度計 ……383
熱力学的温度測定 ……385
国際実用温度スケール（IPTS） ……386

付録 C　ポアソン分布 ……388
例題：状態の間違った数え方と正しい数え方 ……391

例題：$P(0)$ の初等的導出 ……392
問　　題 ……393

付録 D　圧　　力 ……394

付録 E　負の温度 ……395
負の温度に関するより程度の高い参考文献 ……398

事　項　索　引 ……399
人　名　索　引 ……407