理論応用

物理学演習

②

光・熱と統計力学

三輪光雄編

理論応用

物理学演習

②

光・熱と統計力学

三輪光雄編

森北出版株式会社

物理学演習（第2巻）　© 三輪光雄　*1963*

1963年9月20日　第1版第1刷発行
1976年7月30日　第1版第6刷発行

定価はカバー・ケース
に表示してあります.

編者との協議
により検印は
廃止します.

編　者　三輪光雄
発行者　森北常雄
印刷者　上田三明

発行所　森北出版株式会社
東京都千代田区富士見 1-4-11
電話 東京 (265) 8341 (代表)
振替 東京 1-34757 郵便番号 102

日本書籍出版協会・自然科学書協会・工学書協会　会員

落丁・乱丁本はお取替えいたします　　印刷　寄英印刷／製本　石毛製本

3042-2332-8409　　F130/36 (日2-3/145-2)

Printed in Japan

物理学演习　第2卷
《光学、热力学与统计力学》
B000080

はしがき

実際の役に立つような生きた物理学の学習には，実験と演習とを十分にやることが大切である．実験は物理学の法則がどのようにして導かれたかを知り，あるいは法則を実地に適用したときの限界を知るなど物理学の本質を正しく把握するために不可欠であり，また演習は個々の法則をいろいろな場合に適用してそれを確実に理解修得するために必要欠くべからざるものである．しかし実験も演習も学ぶ側はもちろん教える側にとっても，多くの時間と労力とを必要とするので，わが国ではとかく閑却されがちである．そのためせっかくの学習も本当に身についていない憾が大学・高校を通じて強く感じられる．

本演習書はこの欠陥の一半を補うために編まれたもので，物理学全体を4巻に分け，東京教育大学助教授　永田恒夫，東京理科大学教授・理学博士　鈴木良治，東京学芸大学助教授・理学博士　花輪重雄の3氏が分担執筆し，編者が統一編集したものである．本書では

1) 基本事項をこまかく章にわけ，基本事項から導かれる重要事項は例題として示して理解を深めるようにし，
2) 続いて平易な問題Aを挿入して基本事項の理解を確実にするようにはかった．

わが国ではやさしい問題は自明のこととして素通りしてしまうことが多いが，試験の結果から見ると一般に基礎の理解が不十分である．必ずAをすましてのちBに進んでいただきたい．

なお第2巻は第3編光と第4編熱と統計力学とからなっている．内容は

1) 第1巻と同じように，しばしば高校程度のやさしい基本事項から出発しているが，これはやはり初学者の基礎知識を確実にするためである．

2) 第3編では比較的やさしい幾何光学の部分が後になり，やや程度の高い物理光学（波動光学）の部分が前になっているが，これは第2編の波動との連繋を考えたからである．しかし初学者はむしろ第4章からはいることをすすめたい．

3) 第4編にはときどき第3巻の電磁気学や第4巻の原子物理学の知識を必要とするような問題も出てくるが，これはむしろ当然のことであって，わからない場合は第3巻および第4巻をある程度すませてから考えて頂きたい。このようにはっきりわけられないところに生きた学問がある．

読者諸君は本書によって物理学の基礎をしっかり把握するとともに応用の力を十分身につけて頂きたい．

昭和 38 年8月

編　　者

目　　次

第3編　光　（鈴木良治・永田恒夫）

§1.　干　　渉 ……………………………………………… 1

1.　光　　波 ……………………………………………… 1

2.　波　　動 ……………………………………………… 1

3.　重ね合せの原理 ……………………………………… 3

4.　光の干渉 ……………………………………………… 3

5.　干渉の条件 …………………………………………… 4

例　題　(1) ……………………………………………… 6

〔1・1〕　ヤングの干渉実験　6
〔1・2〕　無限遠の光源からきた光がスリットを通ったときの干渉　7
〔1・3〕　薄膜の干渉　8
〔1・4〕　ファブリ・ペローの干渉計　8
〔1・5〕　ファブリ・ペローの干渉計の分解能　10
〔1・6〕　フレネルの複プリズムの対称面内にスリットをおいたときの干渉　11
〔1・7〕　リップマンの天然色写真　11
〔1・8〕　屈折率 μ_g のガラス面に屈折率 $\mu=\sqrt{\mu_g}$ で厚さが $\lambda/4\mu$ の薄膜をつけたときの反射　12
〔1・9〕　マイケルソンの干渉計　13

問　題　(1) ……………………………………………… 14

§2.　光の回折 ……………………………………………… 18

1.　ホイヘンスの原理 …………………………………… 18

2.　フレネルの輪帯 ……………………………………… 18

3.　フラウンホーヘル回折とフレネル回折 …………… 19

4.　バビネの原理 ………………………………………… 19

例　題　(2) ……………………………………………… 20

〔2・1〕 平面波のフレネル輪帯の面積　20
〔2・2〕 細隙による回折のフレネルの方法による説明　20
〔2・3〕 フラウンホーヘルおよびフレネルの回折のキルヒホッフの公式による説明　22
〔2・4〕 長方形状の細隙による回折　25
〔2・5〕 回折格子の回折　26

問　題（2）……28

§ 3.　偏　　光……31
1.　偏　　光……31
2.　光波の重ね合せ……32
3.　複　屈　折……33
4.　旋　光　性……34
例　題（3）……35
〔3・1〕 常光線と異常光線による雲母の屈折率　35
〔3・2〕 比旋光角　35
〔3・3〕 偏光子と検光子の間に異方質の板をはさんだとき通過する光の変化　36
〔3・4〕 光の吸収　37
〔3・5〕 結晶板による光の干渉　37

問　題（3）……39

§ 4.　幾何光学の法則……41
1.　フェルマーの原理……41
2.　反射の法則と屈折の法則……41
光の直進・反射の法則・屈折の法則
3.　全　反　射……42
例　題（4）……42
〔4・1〕 屈折の法則をフェルマーの原理を用いて解く　42
〔4・2〕 凹面鏡による反射　43
〔4・3〕 液体中の物体が浮き上って見えることの説明　44
〔4・4〕 液中の点光源を外からいろいろな角度でながめたとき見える像点のつくる曲面の形　45

問　題（4）……46

§ 5.　球面による屈折……48
1.　球面による屈折……48
2.　座標のとり方……48
3.　大きさのある光源の像……49
4.　焦　点……49
例　題（5）……50
〔5・1〕 球面による屈折像の位置に関する公式　50
〔5・2〕 凹面鏡の虚像のできる場合の像の位置　51
〔5・3〕 屈折率の異なる2つの物質が球面で境されているときの屈折　52
問　題（5）……52

§ 6.　薄いレンズ……56
1.　薄いレンズ……56
2.　焦点と焦点距離……56
3.　薄いレンズの公式……57
4.　球面鏡……57
例　題（6）……57
〔6・1〕 薄いレンズの公式　57
〔6・2〕 凹面鏡の像と点光源の位置に関する公式　59
〔6・3〕 2つの凸レンズによる像の位置　59
問　題（6）……61

§ 7.　厚いレンズ……64
1.　厚いレンズの定点……64
主点と主平面・焦点と焦平面
2.　厚いレンズの主点と焦点の位置……64
3.　厚いレンズの焦点距離……65
4.　厚いレンズの公式……65
5.　厚いレンズの光心と節点……65
光心・節点
6.　2枚のレンズの組み合せレンズ系……66

例 題 (7)……66

[7・1] 両凸レンズでもあまり厚くなると発散レンズとなる．両凹レンズはつねに発散レンズである 66
[7・2] レンズの薄いときの焦点距離 67
[7・3] レンズの主点と焦点の位置の公式，焦点距離の公式 67

問 題 (7)……70

§ 8. 光の分散と色収差……72

1. 光の分散と分散能……72
2. 色収差と色消しレンズ……72
3. 光学ガラスの屈折率……72

例 題 (8)……73

[8・1] 薄いレンズのC線，D線，F線についての焦点距離とレンズをつくるガラスの分散能との関係 73
[8・2] 同じガラスでつくった焦点距離 f, f' の薄いレンズを軸を共通にして $(f+f')/2$ だけ隔てておいたレンズ系は焦点距離に関して色消しである 74
[8・3] 2つの薄いレンズをある距離へだてておいた組み合せレンズでは，像の位置と大きさを同時に色消しにすることはできない 74

問 題 (8)……75

§ 9. 光学器械……78

1. プリズムと最小偏角……78
2. 望遠鏡と顕微鏡の原理……78
3. 光学器械の倍率と分解能……78

例 題 (9)……79

[9・1] プリズムの屈折率と最小偏角との関係式 79
[9・2] 虫めがねに眼をつけ，像を明視の距離に生じさせたときの倍率 80

問 題 (9)……80

第4編　熱と統計力学　（鈴木良治）

§1.　熱力学の第1法則とカルノー・サイクル……83

1.　温　　度……83

2.　ボイル・シャルルの法則……84

3.　状態式および状態図……86

状態式・状態図

4.　熱力学の第1法則……87

5.　比熱と断熱変化……88

比熱・断熱変化

6.　カルノー・サイクル……91

例　題　(1)……93

〔1・1〕　理想気体の内部エネルギーは温度のみの関数である　93
〔1・2〕　理想気体の等温圧縮率と断熱圧縮率　93
〔1・3〕　定圧熱容量と定積熱容量との差　94
〔1・4〕　電子と陽子から水素気体をつくるとき発生する熱　94

問　題　(1)……95

§2.　熱力学の第2法則とエントロピー……102

1.　可逆過程と不可逆過程……102

2.　熱力学の第2法則……102

3.　カルノーの定理……102

効率・理想気体温度計

4.　エントロピー……105

5.　不可逆過程……107

6.　熱力学関数……108

例　題　(2)……110

〔2・1〕　可逆機関の効率は不可逆機関の効率より大きい　110
〔2・2〕　カルノー・サイクルの T-S 面図示　111
〔2・3〕　理想気体のエントロピー　111
〔2・4〕　$\frac{1}{T}\left(\frac{\partial c_v}{\partial v}\right)_T=\left(\frac{\partial^2 p}{\partial T^2}\right)_v$　111

〔2・5〕 2つの気体の拡散が完全に可逆的である確率 112
〔2・6〕 ある気体の単位体積あたりの内部エネルギー ε は温度のみの関数で，その状態式で与えられるときの ε の関数形 113
〔2・7〕 $\frac{\partial^2\varepsilon}{\partial T\partial v}=T\frac{\partial^2 S}{\partial T\partial v}$, $\frac{\partial^2 h}{\partial T\partial p}=T\frac{\partial^2 S}{\partial T\partial p}$ 114
〔2・8〕 熱を通さない壁でかこまれた容器の中で高圧部分にある気体が低圧部分に噴入するときエンタルピーが変らない 114
〔2・9〕 理想気体が体積 v_1 の状態から真空中に断熱的に膨張して体積 v_2 の状態になるときのエントロピーの変化 114
〔2・10〕 冷凍機で氷をつくるときの熱量 115
〔2・11〕 $c_p-c_v=T\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p$, $c_p-c_v=\frac{vT\alpha^2}{k}$ 116

問 題 (2)……118

§ 3. 熱現象への応用……122
1. ファン・デル・ワールスの状態式……122
状態式・状態図
2. クラペイロンの方程式……124
3. 蒸 気 圧……126
4. ジュール・トムソン効果……127
5. 熱 機 関……128
6. 熱電気現象……129
例 題 (3)……129
〔3・1〕 圧力が 1 atm 増すごとに氷の融点が下がる度合 129
〔3・2〕 理想気体の冷却効果 129
〔3・3〕 実在気体の冷却効果 129
〔3・4〕 熱機関の効率 p は $p<\frac{T_1-T_2}{T_1}$ であることを第2法則を用いて解く 131
〔3・5〕 冷凍機の内外の温度と熱量の関係 131
〔3・6〕 2種の金属線の両端を接続して1つの閉回路とし，接続2点の温度差を一定に保ち，この回路に電池を入れて電流を0にするときの関係式 132
〔3・7〕 カルノー・サイクルを用いてクラペイロンの方程式を導く 133
〔3・8〕 沸点および融点と圧力との関係 133
〔3・9〕 クラウジュースの方程式をサイクルを用いて導く 134
〔3・10〕 クラウジュースの方程式を用いて飽和蒸気圧の比熱を求める

134
〔3・11〕 臨界状態と任意状態との換算変数を p, v, T とするとき，ファン・デル・ワールスの方程式は $\left(p+\frac{3}{v^2}\right)\left(v-\frac{1}{3}\right)=\frac{8}{3}T$ となる　135

問　題（3）…… 136

§ 4.　平衡条件と相の変化 …… 138
1.　等温変化…… 138
2.　定積等温変化…… 138
3.　定圧等温変化…… 138
4.　幾何学的表現…… 139
5.　均　一　相…… 140
6.　相の変化…… 140
例　題（4）…… 140
〔4・1〕 温度が一定のとき，系が外部に対してなす仕事はヘルムホルツの自由エネルギーの値の減少を越えない　141
〔4・2〕 状態図における3重点における蒸発熱，融解熱，昇華熱の関係　141

問　題（4）…… 141

§ 5.　統計力学 …… 143
1.　気体分子運動論…… 143
2.　平均自由行程…… 143
3.　エネルギー等分配の法則…… 144
4.　マックスウェル・ボルツマン分布…… 146
5.　ボルツマン統計・量子統計…… 147
例　題（5）…… 152
〔5・1〕 理想気体の定積比熱　152
〔5・2〕 マックスウェルの速度分布則の定数　152
〔5・3〕 エネルギーの平均値　153
〔5・4〕 1原子気体 1 mol の比熱　154
〔5・5〕 2原子理想気体 1 mol の比熱　155
〔5・6〕 気体の温度が一定で外力が働いているとき気体分子の位置およ

び速度成分がある微小範囲にくる確率　155
〔5・7〕 ボルツマンの方程式　156
〔5・8〕 マックスウェル・ボルツマンの分布関数　157
〔5・9〕 気体分子の単位時間に行なう衝突の回数と平均自由行路　158
〔5・10〕 圧力一定の気体の中へ，この気体分子と同種の分子線を送りこむときの分子線分子の強さの減少量　158
〔5・11〕 平均2乗速度の平方根と速さの分布関数が最大になる速さ　159
〔5・12〕 地球の大気密度が無限遠にいくにつれて稀薄になること　160
〔5・13〕 プランクの輻射公式　160
〔5・14〕 金属内の電子ガスを理想気体とみなしたときの化学ポテンシャル　162

問　題（5）……………………………………………… 162

解　答……………………………………………………… 164

1・3・4巻の主要内容

1巻	第1編	力　学
	第2編	振動と波動
3巻	第5編	電気磁気学
4巻	第6編	相対性理論
	第7編	原子物理学

第3編　光

§1. 干　渉

基本事項

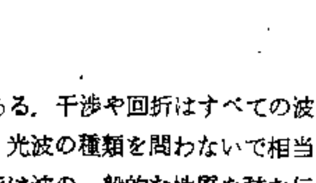
1. 光　波

光（可視光）は，波長がほぼ 4000Å から 8000Å の間の範囲の電磁波である．電磁波とは電界の強さと磁界の強さの変化が伝わる現象で，伝わる方向と電磁界の強さの変化の方向とは直交する．すなわち電磁波，したがって光波は横波である．

2. 波　動

波には光波のほかに弾性波や水波などがある．干渉や回折はすべての波について起る現象なので，光の干渉や回折は，光波の種類を問わないで相当な程度までとりあつかうことができる．ここでは波の一般的な性質を弦を伝わる波を例として説明する．

弾性媒質中のある場所にたとえば圧力や張力の変化が起ると媒質の構成要素が変位を起し，それに隣りあった要素も変位をうけ，それがさらに次の要素に変位を伝えてゆく．このような現象は，たとえば水平に張られた弦のある場所を引っぱって離すと，そのために起るある有限の長さの弦のゆがみが，ある速度を持って弦を伝わってゆくことをみればわかる．



第3·1図

いま弦のゆがみの曲線，すなわち波形が $t=0$ で $y=f(x)$ で表わされたとする．これがその形を変えないで速度 v で x の正の方向に進むとすれば，t 時間後の波形は $y=f(x-vt)$ で表わされる（第3·1図参照）．この例では変位 y が進行方向 x

に垂直な横波を表わしているが，y はかならずしも x に垂直でなく，どんな角をなしていてもよい．縦波のようにこの角が0である場合でもやはり波動の伝播は $y=f(x-vt)$ で表わされる．また x の負の方向に進む波は $y=g(x+vt)$ で表わされる．ここで注意しなければならないことは，x 方向に進んでゆくのは波の形であって，x 軸上にある媒質の要素(たとえば質点)は y 方向に $f(x-vt)$ なる変位をするだけで，x 方向に進行するのではないということである．正，負両方向に進む波が同時にあるときは

$$y=f(x-vt)+g(x+vt),\ (v>0) \tag{3·1}$$

で表わされる．第1項は $+x$ 方向に進む波を表わし，第2項は $-x$ 方向に進む波を表わしている．(3·1) 式を x および t について2回微分して f, g を消去すれば

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}=v^2\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \tag{3·2}$$

を得る．これを波動方程式という．(3·1) 式はその一般解である．正弦波や余弦波は波動方程式の最も簡単な例である．

たとえば余弦波は次のような形のものである．

$$y=A\cos\omega\left(t-\frac{x}{v}\right) \tag{3·3}$$

ここで A は振幅である．また ω は角振動数 (rad/sec) で，x 軸上の各質点が y 方向に往復運動する時間，すなわち周期 T と

$$T=\frac{2\pi}{\omega}=\frac{1}{\nu} \tag{3·4}$$

の関係にある．この波の波形は (3·3) 式で $t=0$ とおいたときの y で表わされる．

$$y=A\cos\left(-\frac{\omega}{v}x\right)=A\cos\left(\frac{\omega}{v}x\right). \tag{3·5}$$

ところでこの波は位相が 2π だけ進む間に1波長 λ だけ前進する．したがって波の進行する速度は

$$v=\nu\lambda=\frac{\omega\lambda}{2\pi} \tag{3·6}$$

であるから，(3·3) 式は

$$y=A\cos 2\pi\left(\frac{t}{T}-\frac{x}{\lambda}\right). \tag{3·7}$$

あるいは

$$y = A\cos 2\pi(\nu t - kx) \tag{3·8}$$

と書くことができる．$k = 1/\lambda$ は 1 cm の中に含まれている波の数を表わしており，波数といい，$\nu = 1/T$ は振動数を表わしている．また位相が一定であるような点の軌跡を波面といい，これが平面ならば平面波，球面ならば球面波と呼ぶ．

3. 重ね合せの原理

空間内の1点Oで，たとえば，2つの光源からきた光波を同時に受けたとする．簡単のために点Oにおける2つの光波は同じ進行方向を持ち，各光源から独立にくる光の点Oにおける（振動）状態を y_1, y_2 とすれば，これらは波動方程式 (3·2) を満足する．一方波動方程式は線形であるから，線形組み合せ関数 ay_1+by_2 も (3·2) 式の解となる．ところでO点をかこむ閉曲面上の各点における状態が ay_1+by_2 で表わされるならば，その内部の各点の状態も ay_1+by_2 に等しくなる．この性質を波の重畳性という．a, b は任意定数である．

4. 光　の　干　渉

話しを簡単にするために，2つの光源からくる光波が同じ振動数を持つ余弦波としよう．

$$\left.\begin{aligned} y_1 &= A_1\cos\left\{2\pi\nu\left(t-\frac{x}{v}\right)+\delta_1\right\}, \\ y_2 &= A_2\cos\left\{2\pi\nu\left(t-\frac{x}{v}\right)+\delta_2\right\}. \end{aligned}\right\} \tag{3·9}$$

この2つの光波を同時に受けたときの光波の状態を y とすれば（定係数を1にとる）

$$y = y_1+y_2 = A_1\cos\left\{2\pi\nu\left(t-\frac{x}{v}\right)+\delta_1\right\}+A_2\cos\left\{2\pi\nu\left(t-\frac{x}{v}\right)+\delta_2\right\}$$

となる．これは三角法の加法定理を用いて

$$y = A\cos\left\{2\pi\nu\left(t-\frac{x}{v}\right)+\delta\right\} \tag{3·10}$$

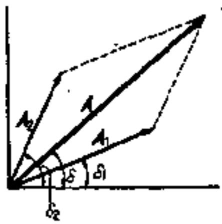
に変形することができる．ここで

$$A = \sqrt{A_1{}^2+A_2{}^2+2A_1A_2\cos(\delta_1-\delta_2)} \tag{3·11}$$

$$\tan\delta = \frac{A_1 \sin\delta_1 + A_2 \sin\delta_2}{A_1 \cos\delta_1 + A_2 \cos\delta_2} \qquad (3\cdot12)$$

とする.

このように2つの光波を1点で重ね合せた場合の光波もやはり余弦波でその状態が表わされることがわかる．また(3·11)式からわかるように(3·10)式の振幅 A は2つの光波の振幅をベクトル合成したときの合成ベクトルの大きさに等しいことが容易に理解できる（第3·2図）．この性質は光波を複素量で表わした場合はさらに容易にわかる．



第3·2図

(3·12)式からわかるように，合成波の振幅すなわちその明るさは2つの光波の位相差 $\delta_1-\delta_2$ によって変わる．(3·11) 式から

$$A^2 = (A_1+A_2)^2 : \delta_1-\delta_2 = 2n\pi \qquad (n=0,1,2\cdots), \qquad (3\cdot13)$$

$$A^2 = (A_1-A_2)^2 : \delta_1-\delta_2 = (2n+1)\pi \qquad (n=0,1,2\cdots) \qquad (3\cdot14)$$

であるから，(3·13) 式の場合は最も明るく，(3·14) 式の場合は明るさが最小である．もし位相差が場所によって連続的に変化するならば，明るさは周期的に変わることは当然である．

5. 干渉の条件

4. では振動数の等しい2つの光波の干渉について述べたが，さらに進んで振動数を異にする余弦波の干渉について考えよう．振動数が等しい余弦波を同時に受けたときの明るさは一般に各光波を別々に受けたときの明るさの和にならないことは上にみたとおりである．これが一般に考えられる干渉である．しかし振動数が異なるときは光の色が異なるため，このような場合に明るさを量的に比較することは不可能であるから，明るさの関係で光波の干渉を定義することがむずかしくなる．その場合には明るさのかわりに光波の状態を表わす y の2乗の時間平均

$$\overline{y^2} = \frac{1}{T}\int_0^T y^2 dt \qquad (3\cdot15)$$

で干渉を定義することが望ましい．ここで T はその間に平均をとるべき時間を表わす．2つの光波を別々に受けるときの光波の状態をそれぞれ y_1, y_2 とすれば，同時に受けるときの光波の状態は $y=y_1+y_2$ である．そこで2