原理から学ぶ光学

工学博士　左貝　潤一　著

コ ロ ナ 社

ま　え　が　き

現代でも通用する光学の概念が誕生したのは17世紀である。それ以降，光学は顕微鏡や望遠鏡，カメラ，分光器などを通じて，天文学，分光学，計測などの進展に寄与してきた。光学は光の関連分野だけでなく，20世紀初頭には幾何光学を通じて量子力学の発展に貢献した。1960年の可干渉性に優れたレーザの誕生を契機として，光学はその内容と応用範囲が質的な変革を遂げた。近年では，電気・電子工学や機械工学との境界領域であるオプトエレクトロニクスやオプトメカトロニクスが進展している。また，光技術が電気・電子・通信工業，機械工業，自動車産業，建設業，化学産業などの分野へ広がっている。

光ファイバは通信インフラを支えており，光ディスク，レーザプリンタ，バーコードリーダなどは日常眼にすることが多い。このように，光学は身近な領域まで進出してきている。さらには，人工物質であるフォトニック結晶やメタマテリアル，変換光学，構造色に関するナノフォトニクスなどの新規分野の萌芽がみられる。

光学の関連領域の広がりに応じて，企業でも光学に素養のある人材が求められている。しかし，学生時代に光学を学習した人数は少なく，電気系出身者があてられている場合が多く，入社後の研修や自己啓発により，光学を学んでいるのが実情である。光学の既習者でも，光学現象を原理から学習し直すことは，理解度を深め，視野を広げる意味でも有意義である。

原理を理解していれば，多くのことを覚えることなく，そこから派生する多様な現象を理解するのが容易になる。このような考え方から，本書では光学における重要な原理，つまりホイヘンス-フレネルの原理，フェルマーの原理，重ね合わせの原理に基づき，多くの光学現象を学べるようにしている。重要で基本的な内容では，同じ題材を代数的立場と物理的・幾何学的立場で説明し，内容を多面的に捉えて定性的に理解できるように努めている。

対象とする読者は学部3・4年生，大学院生，技術系社会人である。

各章の概要は次の通りである。1章では，2章以降の議論が理解しやすいように「光の基本事項」を配置している。2～4章では，波面の伝搬に関するホイヘンス-フレネルの原理に基づいて，反射・屈折，結像特性などを説明している。5章と6章では，光波の最小伝搬時間や変分に関係するフェルマーの原理に基づいて，反射・屈折，結像特性などを説明している。7～10章では，光波の重ね合わせの原理に基づいて，干渉，回折，偏光などを説明している。

11章と12章では，上記現象に関連する光学での重要な概念を扱っている。13章では光学の理論的基礎である，マクスウェル方程式や境界条件などの電磁波に関する内容を扱っている。

本書の特徴は以下の通りである。

（1）　従来の光学書では光学が分かりにくかった読者に対して，既存の書籍とは異なるアプローチの光学の入門書を提供する。

（2）　光学における主要な現象が理解できるように，本書全体を三つの原理を基にして系統的に構築している。

（3）　いかに考えるかを主眼としているので，基本的な内容では，同一の題材を複数の立場で捉えて多様な見方ができ，自分に合った形で学習・理解できるようにしている。

（4）　電気系学生・出身者も学びやすいように，フェーザ表示を多用している。

（5）　光学における重要な概念を習得，あるいは具体的な数値に対する感覚を磨くため，例題や演習問題を配置し，解答を丁寧に示している。

本書を出版するにあたり，終始お世話になったコロナ社の関係各位に感謝申し上げる。

2024年12月

左貝　潤一

目　　次

1章　光の基本事項

1.1　光の基本的性質……1
1.1.1　光波と光線　1　/1.1.2　光の特性　2
1.2　屈折率と光速……2
1.3　光波の表示……4
1.3.1　1次元波動と基本パラメータ　4　/1.3.2　光強度　7
演習問題……8

2章　ホイヘンス-フレネルの原理から学ぶ基本現象

2.1　ホイヘンス-フレネルの原理……9
2.1.1　ホイヘンスの考え方による波面形成　9　/2.1.2　フレネルによる2次波面形成の精密化　10
2.2　ホイヘンス-フレネルの原理による波面の伝搬……11
2.2.1　平面波の伝搬　11　/2.2.2　球面波と一般の波面の伝搬　12
2.3　平面波と球面波の伝搬特性……13
2.3.1　前進波と後進波　13　/2.3.2　3次元での平面波　14　/2.3.3　球面波　14
2.4　ホイヘンス-フレネルの原理の回折問題への展開……15
2.4.1　フレネルの輪帯による考え方　15　/2.4.2　回折問題への適用　17
演習問題……18

3章　ホイヘンス-フレネルの原理から学ぶ反射と屈折特性

3.1　ホイヘンス-フレネルの原理の屈折と反射への適用……19
3.1.1　スネルの法則：平面境界での平面波の屈折と反射　19　/3.1.2　全反射　21
3.1.3　球面境界での光の反射　21　/3.1.4　球面境界での光の屈折　23
3.2　フレネルの公式：振幅反射率と振幅透過率……24
3.2.1　フレネルの公式導出のための準備　24　/3.2.2　振幅反射率と振幅透過率の表現と特性　25
3.3　ストークスの関係式……28
3.4　ブルースターの法則……30
3.5　全反射：波動的振る舞い……31
3.5.1　全反射時の光波の浸み込み　32　/3.5.2　全反射時の光波の反射による位相変化　33
3.6　光強度反射率と光強度透過率……33
演習問題……35

4章　ホイヘンス-フレネルの原理から学ぶ球面光学系による結像特性

4.1　球面反射鏡による結像特性……36
4.1.1　球面における光線の反射法則の幾何学的説明　36
4.1.2　球面反射鏡の球面での反射法則を用いた結像特性　38
4.2　単一球面での屈折による結像特性……40
4.3　薄肉レンズによる結像特性……42
4.3.1　薄肉レンズの結像式と横・角倍率　42　/ 4.3.2　ニュートンの公式ほか　45
4.3.3　薄肉凹レンズによる結像特性　46
演　習　問　題……47

5章　フェルマーの原理から学ぶ反射と屈折特性

5.1　フェルマーの原理……48
5.1.1　フェルマーの原理の基本　48　/ 5.1.2　フェルマーの原理の光路長による表現　49
5.2　幾何光学の三法則とマリュスの定理……51
5.2.1　幾何光学の三法則（直進性，屈折と反射）　51　/ 5.2.2　マリュスの定理　52
5.3　フェルマーの原理と変分原理……54
5.4　フェルマーの原理と光線方程式の関係……56
演　習　問　題……57

6章　フェルマーの原理から学ぶ非球面・球面光学系による結像特性

6.1　フェルマーの原理と結像特性の関係……58
6.2　非球面反射鏡による結像特性……59
6.3　球面反射鏡による結像特性……60
6.4　薄肉レンズによる結像特性……62
6.5　球面レンズの波面変換作用……65
演　習　問　題……66

7章　重ね合わせの原理から学ぶ光学現象の基礎

7.1　重ね合わせの原理と波動方程式の線形性との関連……67
7.2　重ね合わせと関係する数学的手法……68
7.2.1　複素数とベクトル表示での演算　68　/ 7.2.2　フェーザ表示による扱い　69
7.2.3　フーリエ級数・変換　71
7.3　群速度と位相速度……71

7.3.1 多色光に対する時空間波形：フーリエ変換の利用 71
7.3.2 群速度と位相速度の関係 73
7.4 反射による定在波 …… 73
演 習 問 題 …… 75

8章 重ね合わせの原理から学ぶ干渉

8.1 二光波干渉：反射がない場合 …… 76
8.1.1 二光波干渉の基礎 76 / 8.1.2 ヤングの干渉実験（二光波干渉） 78
8.2 多重ピンホールによる干渉 …… 80
8.2.1 多重ピンホールによる干渉：標準的解法による扱い 80
8.2.2 多重ピンホールによる干渉：フェーザ表示による扱い 83
8.2.3 フェーザ表示による干渉光強度の極大・極小条件の解釈 84
8.2.4 物理的意味による干渉光強度の極大・極小条件の解釈 85
8.3 二光波干渉：反射を伴う場合 …… 87
8.3.1 平行平面板による二光波干渉 87
8.3.2 平行平面板による干渉光強度の極大・極小条件 89
8.4 等 厚 干 渉 …… 90
8.4.1 等厚干渉での考え方 90 / 8.4.2 ニュートンリング 91
8.5 3層構造での多重反射による干渉 …… 93
8.5.1 平行平面板の透過光による干渉 93 / 8.5.2 平行平面板の反射光による干渉 95
8.6 3層構造に対する干渉理論の応用 …… 96
8.6.1 ファブリ-ペロー干渉計 96 / 8.6.2 反 射 防 止 膜 98
8.7 可干渉性を考慮した干渉 …… 99
演 習 問 題 …… 101

9章 重ね合わせの原理から学ぶ回折

9.1 回折の基礎：キルヒホッフの理論 …… 103
9.1.1 キルヒホッフ近似 103 / 9.1.2 バ ビ ネ の 原 理 105
9.2 回折の分類と概要 …… 106
9.2.1 回 折 の 分 類 106 / 9.2.2 フラウンホーファー回折の概要 107
9.2.3 凸レンズを用いた回折 107 / 9.2.4 フレネル回折の概要 108
9.3 単スリットによるフラウンホーファー回折 …… 109
9.3.1 単スリットによる回折：多重ピンホールによる干渉からの拡張 109
9.3.2 回折限界とその意義 112
9.3.3 フェーザ表示による回折像光強度の極大・極小条件の解釈 113
9.3.4 物理的意味による回折像光強度の極大・極小条件の解釈 114
9.3.5 単スリットによるフラウンホーファー回折：標準的解法 116
9.4 方形・円形開口によるフラウンホーファー回折 …… 117

9.4.1　方形開口による回折　117　/ 9.4.2　円形開口による回折：フェーザ表示による解法　118
9.5　複数開口によるフラウンホーファー回折 …… 120
9.5.1　任意形状の周期的開口：多重ピンホールによる干渉からの拡張　121
9.5.2　スリットの周期的開口　123
9.6　フレネル回折 …… 125
9.6.1　フレネル積分　125　/ 9.6.2　半無限開口からのフレネル回折　126
9.6.3　単スリットによるフレネル回折　128
9.7　回折を用いた結像作用 …… 129
9.7.1　フレネルの輪帯板による結像作用　129　/ 9.7.2　位相型回折光学素子による結像作用　131
9.8　反射型回折格子 …… 132
演　習　問　題 …… 133

10 章　重ね合わせの原理から学ぶ偏光

10.1　偏光の形状 …… 135
10.2　偏光度の記述法 …… 138
10.2.1　完全偏光と非偏光　138　/ 10.2.2　偏光状態の表現方法　138
10.3　円偏光の重ね合わせによる直線偏光と楕円偏光の表示 …… 139
10.4　異方性物質での偏光の振る舞い …… 141
10.4.1　異方性物質における光波伝搬の解析　141　/ 10.4.2　固有偏光　142
10.4.3　複屈折　143　/ 10.4.4　旋光性　144
10.5　偏光の変換とその記述法 …… 146
10.5.1　偏光素子　146　/ 10.5.2　ジョーンズベクトルと行列　147
10.5.3　ジョーンズベクトルによる固有偏光の表現　148
10.5.4　ジョーンズ行列による各種偏光変換　148
演　習　問　題 …… 150

11 章　行列法による厚肉レンズ等の結像特性

11.1　薄肉レンズと厚肉レンズの関係 …… 151
11.2　行列法での基本式 …… 153
11.2.1　行列法における光線伝搬に関する基本行列と基底ベクトル　153
11.2.2　球面単レンズのシステム行列とガウス定数の関係　155
11.3　厚肉レンズによる結像特性 …… 156
11.3.1　理想光学系における結像特性　156　/ 11.3.2　横倍率と角倍率　157
11.3.3　主要点の位置　158　/ 11.3.4　厚肉単レンズの結像式と横・角・縦倍率　159
11.3.5　基準座標の変換　161
11.4　球面反射鏡による結像特性 …… 162
11.5　合成光学系の結像特性 …… 162
演　習　問　題 …… 165

12章 光学系に関する諸概念

12.1 開口絞りと瞳……166
12.2 焦点深度と被写界深度……167
12.3 測光……168
12.3.1 光束と比視感度 168 / 12.3.2 光度・輝度・照度 170
12.4 光学系の明るさ……172
12.5 収差……174
12.5.1 光線収差 174 / 12.5.2 波面収差 177
12.5.3 色収差と色消しレンズ 178 / 12.5.4 光線追跡 179
12.6 光学系の空間分解能……180
12.6.1 二つの円形開口からのフラウンホーファー回折像 180 / 12.6.2 レイリーの分解能 181
12.7 光学伝達関数（OTF）……182
12.7.1 光学伝達関数の点像分布関数による記述：インコヒーレント結像 182
12.7.2 光学伝達関数の瞳関数による記述：インコヒーレント結像 184
12.7.3 インコヒーレント結像での光学伝達関数の数値例 185
12.7.4 コヒーレント結像での光学伝達関数 186
演習問題……187

13章 電磁波の特性

13.1 媒質中のマクスウェル方程式と構成方程式……189
13.2 無損失・等方性物質での波動方程式……190
13.3 電磁波を形成する電磁界の関係式……192
13.4 電磁波エネルギーとポインティングベクトル……193
13.5 不連続面での境界条件……196
演習問題……198

付録……199
A. SI（国際単位系）での接頭語……199
B. ラプラシアンの表現とベクトル公式……199
C. 波動方程式（13.11）のスカラー解の導出……200
D. 正弦条件の式（12.25）の導出……200

参考図書……201
演習問題解答……202
索引……210

1章

光の基本事項

本書では光学において重要な原理から，様々な現象を学ぶことを主目的としている。それに先立って，重要な原理を理解する上でも不可欠な光の基本事項を本章で説明しておく。

1.1 節では，光の性質の 2 面性に関して重要な，光波と光線の概念を説明した後，光全般に関わる光の基本的性質を述べる。1.2 節では光領域で物質の特性を記述する上で重要な屈折率と光速を説明する。1.3 節では光を定量的に扱う際の基本となる，1 次元での光波伝搬に関係する波動と光の基本パラメータ，光強度などを説明する。

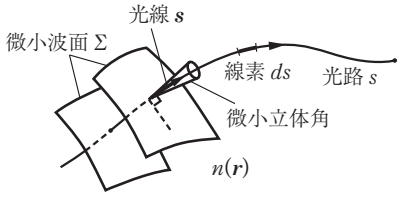
1.1　光の基本的性質

1.1.1　光 波 と 光 線

光は電磁界成分が時空間的に振動する電磁波の一種であり，波動的側面に焦点を合わせるとき，光を**光波**（optical wave）と呼ぶ。波動では山と谷が存在する。時空間において隣接する山どうし，あるいは谷どうしなど，状態が同じ部分を位相が等しいという。波動の位相が等しい部分を連ねた面を**波面**（wave front）または**等位相面**と呼ぶ。

光波としての扱いは定量的な議論に適しており，本項の後半で述べるように多くの利点をもつ。しかし，光を必ずしも厳密に扱う必要はなく，次の段落で説明する光線で扱うほうが便利で分かりやすい場合がある。

光波の一部をなす波面において，波長よりも大きいが，全波面に比べれば十分に微小な波面をとる（**図 1.1**）。その法線方向に微小な立体角（12.3.2 項参照）をとり，その中心に 1 本の微小な直線を対応させ，これを**光線**（optical ray）と呼ぶ。波面 Σ の法線方向にとる大きさ 1 の伝搬方向のベクトルを波面法線ベクトルといい，$\boldsymbol{s}$（$|\boldsymbol{s}|=1$）で表す。連続する波面でこの作業を繰り返すとき，この微小直線を連ねた直線または曲線が光線の軌跡となる。すなわち，光線は伝搬する波面の法線方向の軌跡を表している。



$n(\boldsymbol{r})$：空間で変化する屈折率，$\boldsymbol{r}$：位置ベクトル，
$\boldsymbol{s}$：波面法線ベクトル，
波面に垂直な微小立体角内に 1 本の光線を対応させる

図 1.1　波面と光線の関係

上述のように，波面の形状によらず，光波と光線を対応づけることができる。波面と光線が直交するという性質は，屈折率に不連続面があったとしても，また反射や屈折を繰り返したとしてもあてはまる（5.2.2 項参照）。

光波は，その電界や磁界が式で表され，光の概念の基礎をなす（1.3.1 項参照）。そのため，光波による扱いは定量的な議論に適しており，干渉や回折，偏光など光学の主要領域を含めて適用範囲が広い。これは現象に対する詳しい情報を与えるが，一般に理論的扱いが難しく，物理的直観に欠ける。

一方，光線の概念は，厳密には波長 λ がゼロの極限で成り立つが，実質的には対象とする空間に比べて波長が十分に短い場合に使える。光線の概念は物理的直観に優れており，屈折と反射，光の直進性や逆進性，光学系の結像問題などで利用される。しかし，光線では波長情報が欠落しているので，波動性が関与する現象には適用できない。また，振幅や位相が空間的に激しく変動する箇所でも使えないという制約がある。

1.1.2 光の特性

光は波長がほぼ 10 nm～1 mm の電磁波を指し，前項の最後の記述以外に，以下に示す特徴があるため，特有の扱いがなされている。

(i) 光の厳密な特性はマクスウェル方程式や境界条件を用いて求めることができる（13 章参照）。現実には，光学での多くの現象は必ずしもここまで遡らなくても解決できる場合が多い。

(ii) 光は自由空間では伝搬方向の電磁界成分をもたない横波であり，直進する。光の伝搬方向に垂直な面内にある，直交する電界成分間の位相関係は偏光と関連する。

(iii) 光は目に見える可視光を含んでいるため，光学は古くから発達している。**可視光**（visible light）は個人差があるが，概ね 380 nm≦λ≦780 nm である。

(iv) 光波としての扱いにはホイヘンス-フレネルの原理や重ね合わせの原理が関係し，光線としての扱いにはフェルマーの原理が関係する。

(v) 光は周波数が非常に高いため，現在の検出器では光電界の変化に追随できず，測定できるのは長時間平均の光強度である（1.3.2 項参照）。

(vi) 光は波動性と粒子性を併せもつ量子である。粒子性は光学現象と関係する場面が少なく，光の発生や検出とは密接に関係している。

1.2 屈折率と光速

屈折率は，光領域において物質の特性を記述する上で重要な概念である。屈折率は本来，異なる物質の境界面における屈折に関係して定義されていたが（3.1.1 項参照），屈折率は光の伝搬に関連する多くの現象と結びついている。

光の伝搬速度は真空中で最も速い。**真空中の光速**（light velocity of vacuum）は観測値に基づいた定義値であり，それは次式で表される。

$$c=\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}=2.997\,924\,58\times10^8\ \mathrm{m/s}\fallingdotseq3.0\times10^8\ \mathrm{m/s} \tag{1.1}$$

ただし，ε_0 は真空の誘電率，μ_0 は真空の透磁率である。光の速度は伝搬する物質によって異なるが，観測者の移動速度によらず不変である。これは光速度不変の原理と呼ばれる。

光が真空以外の物質中を伝搬するとき，物質中での光速 v は真空中よりも遅くなり，その比率は次式で記述される。

$$n=\frac{c}{v} \tag{1.2}$$

上記の n は**屈折率**（refractive index）と呼ばれ，真空で $n=1$ と定義する。式 (1.2) で表される光速は単一周波数に対して成り立つものであり，**位相速度**（phase velocity）と呼ばれ，v_p で表されることもある。

自然界の物質の屈折率は $n>1.0$ で，高々 4.0 程度である。標準空気（1 気圧，20℃）の可視光では $n=1.000\,28$ であり，厳密な議論をしない限りは，空気と真空を同一視しても差し支えない。光学関係でよく使用されるガラスの屈折率は $n=1.45$〜1.8 程度，水は $n=1.33$ である。

屈折率は他の方法でも定義される。物質の誘電率と透磁率を真空に対する比で表した，比誘電率 ε と比透磁率 μ を用いると，屈折率は次式でも表せる。

$$n=\sqrt{\varepsilon\mu} \tag{1.3}$$

光の領域では比透磁率は実質的に $\mu=1.0$ とでき，屈折率は $n=\sqrt{\varepsilon}$ で表せる。屈折率と密接な関係があるスネルの法則は後ほど説明する（3.1.1 項，5.2.1 項参照）。

屈折率が一様な媒質という表現がよく用いられる。これは，屈折率が一定値であることを意味するのではなく，厳密には波長程度の距離で屈折率 n の空間変化が緩やかなことを意味する。

屈折率の値は一般に波長に依存する。このことを**分散**（dispersion）または屈折率分散という。分散は多色光の場合の群速度（7.3 節参照）や色消しレンズ（12.5.3 項参照），分光などで重要となる。

【例題 1.1】 地球を球体とすると，1 周の距離は約 4 万 km である。この値を利用して次の問に答えよ。

（1） 光は 1 秒間に地球の回りを何周できるか求めよ。

（2） 光ファイバを用いて通信を行う場合，地球を半周伝搬させるのに要する時間を求めよ。ただし，光ファイバを構成する石英の屈折率を 1.45 とせよ。

（3） 静止衛星を介して地球上の 2 地点で無線通信（電波を使用）を行うのに要する時間を求めよ。地上局と静止衛星までの距離を 3.6 万 km とし，地上局間の距離を無視して，大気を真空とせよ。

［解］（1） 空気中の光速が真空中と等しいとすると，式 (1.1) を用いて，$(3\times10^5)/(4\times10^4)=7.5$

より7周半できる。

（2） 石英での光速は，式（1.2）を用いて，$v=c/n=3\times10^5/1.45=2.07\times10^5$ km/s となる。半周に要する時間は $(2\times10^4)/(2.07\times10^5)=0.096\,6$ s $=97$ ms となる。

（3） 往復に要する時間は $(3.6\times2\times10^4)/(3\times10^5)=0.24$ s $=240$ ms となる。近年では外国との通信に光ファイバが用いられているので，通信での遅延時間が減少している。 ■

1.3 光波の表示

光の波動としての振る舞いは，マクスウェル方程式（13.1節参照）から導かれる波動方程式を解いて調べることができる。

等方性物質中で電流も電荷も存在せず，屈折率 n が一様とする。このとき，電界 $\boldsymbol{E}$ と磁界 $\boldsymbol{H}$ は題材に応じた適切な座標系を用いることにより，その一般解を求めることができる。さらに，初期条件や境界条件（13.5節参照）を適用することにより解が求められ，これに応じて光の様々な特性が記述できる。

本節では，波動方程式の解は既知として，光波の基本的な特性を説明する。

1.3.1 1次元波動と基本パラメータ

本項では，z 軸方向に伝搬する1次元スカラー波動解を利用して，光波の基本特性を説明する。その解を三角関数表示

$$\psi_s=\sin(\omega t\mp kz),\qquad \psi_c=\cos(\omega t\mp kz) \tag{1.4a, b}$$

と複素関数表示

$$\psi_+=\exp[i(\omega t+kz)],\qquad \psi_-=\exp[i(\omega t-kz)] \tag{1.5a, b}$$

で示す（付録C参照）。式（1.4），（1.5）の括弧内を**位相**（phase）と呼ぶ。位相が等しい面は，すでに述べたように波面と呼ばれる。位相は干渉，反射，偏光など，多くの光学現象を考える上で重要な役割を果たす。

以下で，記号も含めてこれらを説明する。式（1.4），（1.5）における複号で「−」と「+」はそれぞれ前進波と後進波を表す（2.3.1項参照）。複素関数表示は理論計算で使われることが多い。

式（1.4）の波形の概略を**図1.2**に示す。横軸は位置 z 軸，斜めの軸は時間 t 軸である。t（z）の値を固定する場合，波動は横（斜め上）方向に振動を繰り返して伝搬する。

式（1.4），（1.5）の時間項で，ω は**角周波数**（angular frequency）と呼ばれ，ωt は位相角を表す。

$$\omega=2\pi\nu \tag{1.6}$$

と書くとき，ν は**周波数**（frequency）と呼ばれ，単位時間当りの光波の振動回数を表す。

式（1.4），（1.5）で，k は**波数**（wavenumber）と呼ばれ，単位距離当りに含まれる波の数を表す。kz は光波が距離 z 伝搬するときの位相変化を表す。時間 t を固定するとき，位相が 2π

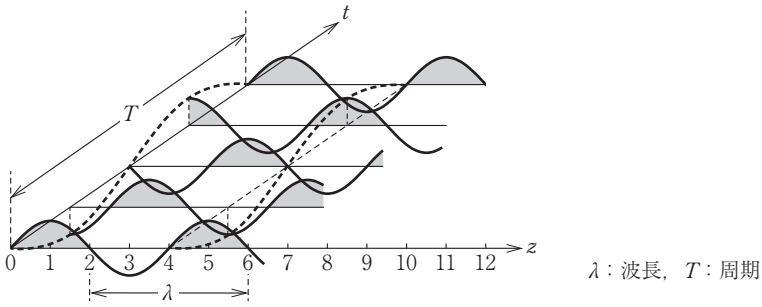


図 1.2　時空間波形の概略

だけ変化する 2 点間の距離を**波長**（wavelength）と呼び，波長 λ は

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} \tag{1.7}$$

で表される。つまり，波長の整数倍離れた位置は同相にある。

位置を固定するとき，位相が 2π だけ変化するのに要する時間を**周期**（period）と呼ぶ。これを T で表すと

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{\nu} \tag{1.8}$$

で書ける。周期 T と周波数 ν は逆数関係にある。

真空中の値に対して添字 0 を付して，媒質中の値と区別することにする。媒質中での波長 λ は真空中の値 λ_0 よりも屈折率分だけ短くなり

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \tag{1.9}$$

で記述できる。媒質中と真空中における波数は

$$k = nk_0 = \frac{n\omega}{c} = \frac{\omega}{v}, \qquad k_0 = \frac{\omega}{c} \tag{1.10a, b}$$

で関係づけられる。角周波数 ω と周波数 ν はともに，真空中と媒質中で不変である。媒質中の光速 v と真空中の光速 c は，周波数と波長を用いて

$$v = \nu\lambda = \frac{\omega}{k} = \nu\frac{\lambda_0}{n} = \frac{c}{n} \tag{1.11}$$

$$c = \nu\lambda_0 \tag{1.12}$$

で表せる。

以上をまとめると，光波が 1 次元で z 軸方向に伝搬しているとき，式 (1.4) における光波の複素振幅は，正弦関数と余弦関数によらず，次のように様々な形式で表すことができる。

$$\psi(z, t) = A\left\{\begin{matrix}\sin\\ \cos\end{matrix}\right\}(\omega t \mp kz + \phi_0) \tag{1.13a}$$

$$\psi(z, t) = A\left\{\begin{matrix}\sin\\ \cos\end{matrix}\right\}\left[2\pi\left(\nu t \mp \frac{z}{\lambda}\right) + \phi_0\right] \tag{1.13b}$$

索　　引

【あ】

アクロマート 179
アクロマートレンズ 179
厚肉レンズ 151
アッベ数 132, 178
アッベの零不変量 41
アプラナート 176
アプラナートレンズ 176
アポクロマートレンズ 179

【い】

移行行列 154
位　相 4
位相型回折光学素子 131
位相型ゾーンプレート 131
位相子 146, 149
位相条件（反射防止膜） 99
位相速度 3, 73
位相伝達関数 183
位相板 146
位相変化 4, 50
　伝搬による—— 50
一様な媒質 3
異方性物質 142
色消し 178
色消しダブレット 179
色消し二重レンズ 179
色消しレンズ 178
色収差 178
インコヒーレント結像 182
インコヒーレント光 100

【う】

薄肉密着レンズ系 164
薄肉レンズ近似 43

【え】

エアリーの円盤 120
エタロン 96
エネルギー定理 195
エネルギー保存則 195
エバネッセント成分 32
エバネッセント波 32
円形開口 118
遠視野像 107

【お】

オイラーの公式 74
オイラー方程式 55
オイラー–ラグランジュ方程式 55
凹面鏡 37
凹レンズ 44

【か】

開　口 104
開口絞り 166
開口数 173, 181
回　折 11, 103
　円形開口による—— 118
　単スリットによる—— 109
　凸レンズを用いた—— 107
　方形開口による—— 117
回折角 113
回折限界 113, 120
回折光 111
　0次—— 111
　±1次—— 111
回折格子 120
　反射型—— 132
　平面—— 132
回折格子の式 132
解像度 180
ガウス行列 155
ガウス定数 155
ガウスのレンズ公式 43
可干渉距離 100
可干渉時間 100
可干渉性 100
角周波数 4
角倍率 45, 157, 159
重ね合わせの原理 68
カージオイド曲線 105
可視光 2
可視度 101
偏　り 135
火　面 167
干　渉 76, 77
　多重反射による—— 93
　多重ピンホールによる——
80, 109, 121
干渉縞 77
干渉フィルタ 98
カンデラ 169

【き】

基底ベクトル 153
輝　度 170
輝度不変の法則 173
キノフォーム 131
逆　相 6
球欠焦線 176
球欠面 153
球面波 10, 14
球面レンズ 42
境界条件 196
鏡面反射 21, 132
共　役 39, 60
共役点 39
行列法 153
虚　像 40, 59
キルヒホッフ近似 104
近軸光線 36, 153
近視野像 106

【く】

空間周波数 182
くさび形干渉 102
グース–ヘンヒェンシフト 32, 33
屈折行列 155
屈折法則 20, 24, 52
屈折率 3
　絶対—— 20
屈折率楕円体 141
屈折率分散 3
屈折力
　光学系の—— 156
　レンズの—— 164
クラウジウスの関係式 172, 200
群速度 72

【け】

傾斜因子 16, 104
結　晶 141
　一軸—— 141
　双軸—— 141
　単軸—— 141
　二軸—— 141
欠　線 124
結像式
　厚肉レンズによる—— 159
　薄肉レンズによる—— 43, 64

球面反射鏡による――　39, 62, 162
単一球面による――　41
限界周波数　185
検光子　146

【こ】

光学距離　49
光学系の屈折力　156
光学軸　141
光学的に互いに共役　39
光学伝達関数　182
光学薄膜　98
口径食　167
口径比　174
光　軸　22
後進波　14
合成光学系　162
構成方程式　190
光　線　1
異常――　143
子午――　36, 153
周縁――　36
常――　143
正常――　143
らせん――　153
光線収差　174
光線追跡　174
光線方程式　56
構造色　133
光　束　169
光速度不変の原理　3
後退波　14
光　度　170
光　波　1
光路長　49
コヒーレンス　100
コヒーレンス時間　100
コヒーレンス長　100
コヒーレント結像　186
コヒーレント光　100
部分的――　101
固有偏光　143
コルニューの渦巻　126
コルニューのらせん　126

【さ】

最小光路長の原理　49
最小時間の原理　49
ザイデルの５収差　174
最良像面　167, 176
錯乱円　167, 175
最小――　167, 175
サジタル面　153
参照球面　177
参照波面　177

【し】

磁気エネルギー密度　193
子午焦線　176
子午面　36, 153
システム行列　155
自然光　100, 138
実　像　40, 59
四分の一波長板　146
視野絞り　167
遮断周波数　185
周　期　5
収　差　174
３次――　175
球面――　38, 175
光線――　174
コマ――　175
単色――　174
波面――　177
非点――　176
歪曲――　176
収差波面　177
自由スペクトル領域　97
周期的開口　121
周波数　4
主屈折率　141
主光線　167
主軸方位角　136
主　点　152, 158
主平面　152
主要点　153, 158
シュライエルマッヘルの方程式　157
準単色光　72
焦　点　38, 43, 158
後側――　43
像側――　43
物側――　43
前側――　43
焦点距離　38, 43, 158
後側――　43
像側――　43
物側――　43
前側――　43
焦点深度　167
照　度　171
照度の余弦法則　171
ジョーンズ行列　147
ジョーンズベクトル　147
真空アドミタンス　192
真空インピーダンス　192
真空換算距離　43
真空中の光速　3
進行波　13
振幅条件（反射防止膜）　99
振幅透過係数　25
振幅透過率　25
振幅反射係数　25
振幅反射率　25

【す】

垂直入射　26
ストークスの関係式　29
ストークスパラメータ　138
スネルの法則　20
スペックル雑音　187
スポットダイアグラム　179
すれすれ入射　26

【せ】

正弦条件　175, 200
正立像　40
正レンズ　44
節　点　152, 158
節平面　152
接平面　22
旋光子　149
旋光性　144
前進波　13
全反射　21, 31
鮮明度　101

【そ】

双曲面鏡　60
像　点　44, 157
ガウス――　44, 157
近軸――　44, 157
理想――　44, 157
像面湾曲　176
測光学　168

【た】

第１変分　55
第２変分　55
楕円面鏡　59
多重ピンホール　80, 109, 121
多色光　71
縦倍率　160
単色収差　174

【ち】
超色消し 179
【て】
定在波 74
電荷保存則 189
電気エネルギー密度 141, 193
点光源 170
電磁波 190
転送行列 154
点像分布関数 183
【と】
等厚干渉 91
等厚干渉縞 91
等位相面 1
等傾角干渉縞 90
同　相 6
等方性物質 141
倒立像 40
凸面鏡 37
凸レンズ 44
【に】
ニアフィールド回折 106, 128
二光波干渉 76
　平行平面板による—— 87
二色性 143
入射面 21
ニュートン環 92
ニュートンの公式 45, 160
ニュートンリング 92
【は】
ハイブリッドモード 192
波　数 4
波　束 72, 100
波　長 5
波長選択性 132
発光ダイオード 170
波動インピーダンス 192
波動方程式 191
バビネの原理 105
波　面 1
波面形成法 9
波面収差 177
波面変換作用 65
波面法線ベクトル 1, 192
腹 75
波　連 72, 100
汎関数 54
反射行列 155
反射防止膜 98
反射法則 20, 52
半波長板 146
【ひ】
光強度 7, 195
光強度透過率 34
光強度反射率 33
光ディスク 113, 133
光電力 195
光の逆進性 21, 50
光の直進性 11, 51
光パワ 195
光ファイバ 33
非球面反射鏡 59
非球面レンズ 179
比視感度 168
比視感度曲線 169
被写界深度 168
非点隔差 176
比透磁率 3, 190
瞳 166
　射出—— 166
　入射—— 166
瞳関数 184
非分散性物質 73
比誘電率 3, 190
標準空気 3
【ふ】
ファブリ-ペロー干渉計 96
フィネス 97
フェーザ 69
フェーザ表示 83, 94, 110, 118
フェーザ法 69
フェルマーの原理 49
複屈折 143
複素干渉度 100
節 75
物質方程式 190
物体深度 168
不遊条件 176
不遊点 176, 188
不遊レンズ 176
フラウンホーファー回折 107, 129
　——の成立条件 107, 128
フラウンホーファー線 179
フーリエ変換 71
プルキニエ効果 169
ブルースター角 31
ブルースターの法則 31
フレネル回折 107, 109, 125
　単スリットによる—— 128
　半無限開口からの—— 126
フレネル-キルヒホッフの回折公式 104
フレネル積分 125
フレネルゾーンプレート 131
フレネルの公式 26
フレネルの斜方体 33
フレネルの法線方程式 142
フレネルの菱面体 33
フレネルの輪帯 16
フレネルの輪帯板 131
負レンズ 44
分解能 98, 180
　角度—— 181
　空間—— 181
　レイリーの—— 181
分　散 3, 71
　異常—— 73
　正常—— 73
分散性物質 73
【へ】
平面波 10, 14
ヘルムホルツ-キルヒホッフの積分定理 104
ヘルムホルツの相反定理 105
ヘルムホルツ方程式 191
偏　光 135
　円—— 136
　完全—— 138
　楕円—— 136
　直線—— 136
　非—— 138
　部分—— 138
偏光回転子 149
偏光角 31
偏光子 146
　円—— 146
　直線—— 146
偏光素子 146
偏光楕円率 137
偏光度 139
変調伝達関数 183
変　分 48, 54
変分法 54
【ほ】
ポアンカレ球 139
ホイヘンスの原理 9, 78, 109
ホイヘンスの接眼レンズ 178

ホイヘンス–フレネルの原理 9
ポインティングベクトル 194
方形開口 117
放射束 168
放物面鏡 59
蛍　石 179

【ま】

マイケルソン干渉計 99
マクスウェル方程式 189
マリュスの定理 54

【み】

ミュラー行列 139

【む】

無収差反射鏡 60

【め】

明瞭度 101
メニスカスレンズ 44
面光源 170
　完全拡散—— 170

【や】

ヤングの干渉実験 78
ヤングの干渉縞 79

【ゆ】

誘電体 198
油浸対物レンズ 176
ユニモジュラー行列 154

【よ】

横　波 2, 192
横倍率 40, 44, 157, 159

【ら】

ラグランジュの積分不変量 53
ラグランジュ–ヘルムホルツの
　不変量 157
ラムスデンの接眼レンズ 178
ランベルトの法則 171

【り】

理想結像条件 157, 159
理想光学系 44, 157
立体角 170
臨界角 21

【る】

ルーメン 169

【れ】

レイリーの分解能 181
レンズの屈折力 164
連続の方程式 189

【F】

Fizeau の干渉縞 91
FSR 97
FZP 131
fθ レンズ 177
F 数 174
F 値 174

【H】

Haidinger の干渉縞 90

【L】

LED 169

【N】

NA 173

【O】

OTF 182

【P】

P 偏光 24

【S】

sinc 関数 70, 82, 111
S 偏光 24

【T】

TEM 波 192

【数字】

1/2 波長板 146
1/4 波長板 146
3 層構造 93

【ギリシャ文字】

λ/2 板 146
λ/4 板 146

―― 著 者 略 歴 ――

現　在　立命館大学名誉教授・工学博士
著　書　「光学の基礎」, コロナ社（1997）
「光通信工学」, 共立出版（2000）
「フォトニック結晶ファイバ」, コロナ社（2011）
「通信ネットワーク概論」, 森北出版（2018）
「光の数理」, コロナ社（2021）
「電気系のための光工学」, 共立出版（2022）
「光学素子のいろは」, コロナ社（2023）
ほか

原理から学ぶ光学
Optics Learning Based on the Principles
© Jun-ichi Sakai 2025

2025 年 2 月 17 日　初版第 1 刷発行　★

検印省略

著　　者　左貝潤一（さかい じゅんいち）
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　https://www.coronasha.co.jp

ISBN 978-4-339-00995-8　C3055　Printed in Japan　（西村）

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 03-5244-5088, FAX 03-5244-5089, 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。