光学の基礎

工学博士　左貝潤一著

コロナ社

序

古今東西，名著といわれる光学の書が少なくない。しかし，ほとんどの書物は，光学の基礎をある程度知った後に，より深く光学を理解するときに役立つレベルのものや，専門家向けの実践書である。学部学生用の光学の入門書，あるいは実社会に入って，必要に迫られて光学を初めて学習するときの自習書に適したものは，きわめて少ない。このことが，本書を執筆するに至った動機の一つである。

光学の歴史は古いが，その大部分の期間は，実質上インコヒーレントな光を対象として発展してきた。1960 年のレーザの発明により，コヒーレントな光が利用できるようになり，例えば干渉計測でも様相が一変している。一方，電子技術とりわけコンピュータ技術のめざましい進展が，各分野に変革をもたらしている。光学も例外ではなく，レンズの結像理論が，コンピュータ演算に適した行列で記述されるように変わってきている。光ファイバの出現で，従来，光は直進するものと教えられてきたものが，光の進行方向が自在に操られるようになった。このように，レーザ技術の普及やコンピュータ技術の進展，あるいは光ファイバの出現により，光学の内容そのものが少しずつ変化している。

レーザは，オプトエレクトロニクスの誕生と進展，あるいは光工学の普及にも影響を及ぼしている。昔の光学のイメージは，カメラや顕微鏡などの結像機器，あるいは分光器であろう。しかし，いまや光ディスクやレーザプリンタ，半導体露光装置やレーザ加工機などでも，光学設計の技術が不可欠である。また，特殊な分布をした光ファイバは結像作用を有し，この微小レンズは新しい応用分野を開拓している。このように，先端分野で光関連技術の重要性が増しており，光学の内容が昔より拡大している。

そこで本書では，光学の基礎事項の理解を重視しつつ，現代向けにアレンジ

した，光学の入門書を目標としている。光学全般にかかわる内容をⅠ部におき，残りを，幾何光学と波動光学に分けた3部構成にしている。幾何光学は，光を光線としてとらえるものであり，光学機器設計や光導波路での光線伝搬などで有用である。波動光学は，文字通り光を波動としてとらえるもので，干渉・回折などの，基本現象の理解や応用で力を発揮する。幾何光学と波動光学は，それぞれが得意な領域をもっており，光学を理解・応用する上で，車の両輪の役目を果たしている。それぞれの概要は，II部とIII部の最初の部分で述べている。対象読者は，学部学生および社会人で初めて光学を学ぶ人に設定している。

本書の内容上あるいは構成上の特徴は，つぎのようにまとめられる。

（ⅰ）物理などでは，おぼえる分量を減らし，できる限り少ない原理で応用範囲を広くしたいのが特徴である。そこで，光学の基本原理である，フェルマの原理とホイヘンスの原理を一般の書よりも多用して，どれだけの情報が引き出せるか，またどのように現象を理解するか試みた。（ⅱ）学習の便を考慮して，章立てを小分けした。また，わかりやすさを重視するため，説明の重複をあえて避けていない（節単位で，ある程度読めるように工夫した）。（iii）複雑な式の展開で，本文の理解には直接影響のない部分は，読みやすさを優先させるために付録に回した。光の電磁波論を最後の章にしたのも，同じ理由による。（iv）基本的には，通年授業を想定した分量に設定している。しかし，内容を適宜，取捨選択できるように，分量は少し多目にしてある。そこで，必要度を目次において＊でグレードづけして，読者の便を図った。（ⅴ）本文の理解を確かめたり，あるいは理解を深める目的で，各章末に演習問題をつけ，略解を巻末に示した。

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厚くお礼を申しあげる。

1997年8月

左貝　潤一

目　　次

（＊印が多いほど，より基礎的で重要度が高いことを表す。章全体が同じ比重のときは章のみに示した。）

第Ⅰ部　光　学　全　般

1.** 光学の基礎

1.1　光学の歴史 …… 1
1.2　波動の基本的事項 …… 2
1.3　屈折率と光速 …… 4
1.4　位相・波面・光線の関係 …… 5
1.4.1　位相と波面 …… 5
1.4.2　波面と光線 …… 6
1.5　光の反射と屈折 …… 7
1.5.1　反射と屈折の法則 …… 7
1.5.2　全　反　射 …… 8
1.6　光のエネルギー …… 9
1.6.1　電磁界エネルギー …… 9
1.6.2　光　強　度 …… 11
演習問題 …… 12

第 II 部 幾 何 光 学

2.** 幾何光学の基礎

2.1 幾何光学特有の現象 …… 14
2.2 幾何光学の基本概念 …… 15
2.2.1 光線とその特徴 …… 15
2.2.2 光 路 長 …… 15
2.3 幾何光学の基本式 …… 16
2.3.1 アイコナール方程式 …… 16
2.3.2 光 線 方 程 式 …… 17
2.3.3 フェルマの原理 …… 18
2.3.4 基本式の特徴と相互関係 …… 19
2.3.5 光線の概念の適用限界 …… 20
2.4 幾何光学での基本的性質 …… 21
2.4.1 光線の反射・屈折の法則 …… 21
2.4.2 マリュスの定理 …… 23
2.4.3 ポインティングベクトル …… 24
2.5 プリズムでの屈折と反射 …… 25
2.6 レンズのプリズムへの分解 …… 27
演 習 問 題 …… 30

3.* 光線伝搬の行列表示

3.1* 行列表示における基底ベクトル …… 31
3.2* 簡単な光学系での行列表示 …… 32
3.2.1 平坦な境界面での屈折 …… 32
3.2.2 一様媒質での光線伝搬 …… 33
3.2.3 平 行 平 面 板 …… 34
3.3* レンズ系での行列表示 …… 34
3.3.1 面と光線の定義 …… 35

3.3.2 曲面での屈折 ……35
3.3.3 曲面間での光線伝搬 ……37
3.3.4 レンズのシステム行列 ……39
3.4* 球面鏡反射での行列表示 ……41
3.5 行列表示理論の適用範囲と特徴 ……41
演習問題 ……43

4.* 球面光学系での結像理論

4.1* 理想光学系 ……44
4.1.1 薄肉レンズでの像作図法 ……44
4.1.2 理想光学系 ……45
4.1.3 共役点 ……47
4.2* 光学系の主要点 ……47
4.2.1 横倍率と焦点・主点 ……48
4.2.2 角倍率と節点 ……51
4.2.3 主要点 ……52
4.2.4 厚肉レンズ系での像作図法 ……53
4.3* レンズの結像式と倍率 ……53
4.3.1 結像式 ……53
4.3.2 横倍率と縦倍率 ……55
4.4* 具体的なレンズ系への適用例 ……57
4.4.1 薄肉単レンズ ……57
4.4.2 厚肉単レンズ ……58
4.4.3 組合せレンズ ……58
4.5 光学系の各種不変量 ……61
4.5.1 アッベの零不変量 ……61
4.5.2 ラグランジュ・ヘルムホルツの不変量 ……62
4.6 球面反射鏡 ……63
4.7 基準座標の変換 ……65
4.7.1 レンズ系システム行列の基準座標変換 ……66
4.7.2 主点基準での結像 ……67

4.7.3 焦点基準での結像 ……68
演 習 問 題 ……69

5.* 光学系での諸概念

5.1* 絞りと瞳空間 ……71
5.1.1 開口絞り，瞳，主光線 ……71
5.1.2 視 野 絞 り ……74
5.2* 光学系の明るさ表示 ……74
5.3 焦点深度と被写界深度 ……75
演 習 問 題 ……77

6. 波 面 光 学

6.1 フェルマの原理 ……78
6.2 レンズの結像式とフェルマの原理 ……79
6.3 無収差反射鏡 ……82
6.3.1 放 物 面 鏡 ……82
6.3.2 楕 円 面 鏡 ……83
6.3.3 双 曲 面 鏡 ……83
6.4 無収差レンズ ……84
演 習 問 題 ……86

7.* 単 色 収 差

7.1* 収差の分類 ……87
7.2* 光 線 収 差 ……88
7.3* ザイデルの5収差 ……89
7.3.1 球 面 収 差 ……89
7.3.2 コマ収差と正弦条件 ……90
7.3.3 非点収差と像面湾曲 ……92
7.3.4 ペッツヴァル和 ……94

7.3.5 歪曲収差 ……94
7.4* 収差に関係した諸概念 ……95
7.5 波面収差 ……96
7.5.1 波面収差と光線収差の関係 ……96
7.5.2 ザイデルの5収差の波面収差表示 ……99
7.5.3 焦点はずれによる波面収差 ……100
7.6 非球面レンズ ……101
7.7 光線追跡 ……102
演習問題 ……103

8.* 色収差

8.1 色収差と色消し ……105
8.1.1 薄肉レンズに対する焦点距離の色収差と色消し ……106
8.1.2 縦の色収差 ……108
8.1.3 横の色収差 ……109
8.2 光学ガラスとアッベ数 ……110
8.2.1 アッベ数 ……110
8.2.2 光学ガラス材料 ……111
8.2.3 色消しレンズの具体例 ……112
8.2.4 超色消し ……113
演習問題 ……114

9. 光導波と分布屈折率レンズ

9.1 不均一媒質中の光線伝搬 ……115
9.2 2次元での光線伝搬式 ……117
9.3 2乗分布形光導波路での結像作用 ……119
9.3.1 光線伝搬 ……119
9.3.2 結像作用 ……121
9.4 分布屈折率レンズにおける光線伝搬の行列表示 ……122
演習問題 ……126

第III部 波 動 光 学

10.** 波動光学の基礎

10.1 波動伝搬の基礎原理 …… 128
10.1.1 ホイヘンスの原理 …… 128
10.1.2 均一媒質での波動伝搬 …… 128
10.1.3 不均一媒質での波動伝搬 …… 129
10.2 位相速度と群速度 …… 129
10.2.1 位 相 速 度 …… 130
10.2.2 波連と群速度 …… 130
10.3 光波の屈折と反射 …… 132
10.3.1 フレネルの公式 …… 132
10.3.2 ブルースター角 …… 134
10.3.3 ストークスの定理 …… 135
10.3.4 光強度に関する反射・屈折 …… 136
10.3.5 全 反 射 …… 138
演 習 問 題 …… 140

11.* 偏 光

11.1* 偏光状態の表示 …… 141
11.1.1 偏 光 の 分 類 …… 141
11.1.2 ストークスパラメータと偏光度 …… 143
11.1.3 ジョーンズベクトル …… 145
11.2 媒質中の偏光伝搬 …… 146
11.2.1 固 有 偏 光 …… 146
11.2.2 複屈折媒質での偏光伝搬 …… 147
11.3* 偏 光 素 子 …… 147
11.3.1 偏光状態変換の記述 …… 147
11.3.2 各種偏光素子 …… 148
11.3.3 フレネルの菱面体 …… 149

演習問題……151

12.** 干渉の基礎：2光波干渉

12.1* 干渉の起源……152
12.2** 定在波……154
12.3 光束分割による干渉の分類……156
12.4** ヤングの干渉実験（波面分割による干渉）……156
12.5* 平行平板による干渉……159
12.5.1 透過波による干渉じま……160
12.5.2 反射波による干渉じま……162
12.6* 等厚干渉……163
12.6.1 等厚干渉の原理……163
12.6.2 ニュートン環……166
12.7 多色光による干渉……167
演習問題……167

13.* 多光波干渉

13.1* 無限小幅の多重スリットによる干渉……169
13.2 平行平板を含む3層構造での多重反射による干渉……172
13.2.1 透過波による干渉……173
13.2.2 反射波による干渉……174
13.3 ファブリペロー干渉計……175
13.3.1 基本特性……175
13.3.2 干渉計固有の概念……177
13.4* 光学薄膜……178
13.4.1 反射防止膜……179
13.4.2 干渉フィルタ……181
演習問題……182

14.** 回折の基礎

14.1** 回折積分 ……184
14.1.1 ヘルムホルツ・キルヒホッフの積分定理 ……184
14.1.2 キルヒホッフ近似 ……185
14.2** フラウンホーファー回折 ……188
14.3* フレネル回折 ……189
14.4** レンズによる回折 ……190
14.4.1 レンズの位相変換作用 ……190
14.4.2 レンズのフーリエ変換作用 ……192
14.5 フレネルの輪帯板 ……194
演習問題 ……197

15.* 各種開口による回折

15.1* 単一開口からのフラウンホーファー回折 ……199
15.1.1 有限幅の単スリット ……199
15.1.2 矩形開口 ……202
15.1.3 円形開口 ……203
15.2* 複数の開口によるフラウンホーファー回折 ……204
15.2.1 2個の有限幅スリットがある場合 ……204
15.2.2 N 個の有限幅スリットがある場合(回折格子) ……206
15.2.3 欠線 ……208
15.3* 正弦波格子によるフラウンホーファー回折 ……208
15.4 単スリットによるフレネル回折 ……211
15.5 半無限平面へのフレネル回折 ……213
演習問題 ……214

16. 結像特性の評価

16.1* 光学系の分解能 ……215

16.1.1　円形開口からのフラウンホーファー回折 ……215
16.1.2　レイリー・スパローの分解能 ……216
16.2　光学伝達関数 ……218
16.3　インコヒーレント結像での像評価関数 ……220
16.3.1　点像分布関数 ……220
16.3.2　光学伝達関数の物理的意味 ……220
16.3.3　瞳　関　数 ……223
16.3.4　瞳関数と光学伝達関数の関係 ……225
16.3.5　光学伝達関数の具体例 ……228
16.4　コヒーレント結像での像評価関数 ……230
16.5　分解能と光学伝達関数の関係 ……231
演　習　問　題 ……232

17. ホログラフィ

17.1　ホログラフィの原理 ……233
17.2　2光束ホログラフィ ……237
17.3　ホログラフィの特徴と応用 ……241
演　習　問　題 ……241

18. 光の電磁界理論

18.1　電磁波の基本式と波動方程式 ……242
18.2　一様媒質中での電磁波の形式解 ……244
18.3　不連続面での境界条件 ……245
18.4　電磁界のエネルギー ……247
演　習　問　題 ……248

付 録

A．フーリエ変換とその性質 ……249
B．アイコナール方程式の導出 ……249
C．レンズの結像式導出 ……250
D．焦点はずれによる波面収差 ……251
E．光源の位相揺らぎによる可干渉性 ……252
F．フレネル・キルヒホッフの回折理論 ……253

参 考 書 ……257
演習問題略解 ……258
索 引 ……268

第Ⅰ部

光 学 全 般

1 光学の基礎

本章では，幾何光学と波動光学に共通な，光の基本概念を説明することを目的とする。まず，光学の歴史を振り返った後，屈折率，波面，光線，スネルの法則など，光固有の概念を順次説明する。

1.1 光 学 の 歴 史

光伝搬の基本は，屈折率が異なる媒質の境界面における，光の反射・屈折である。この際の屈折率と光線角度の関係を示した，反射・屈折の法則は，1621年スネル（Snell）によって見いだされた。屈折率が変化する媒質中での，光の伝搬経路を決定するフェルマ（Fermat）の原理は，1657年に変分原理に基づいて示された。

幾何光学が光学機器を設計する上で有用となったのは，結像理論が確立されてからである。回転対称光学系の近軸光線に対して成立する結像理論は，ガウス（Gauss）によって1840年に明らかにされた。このすぐ後1856年に，ザイデル（Seidel）は，近軸光線からの結像位置のずれを体系化した，5収差を発表した。この後，光学ガラス，カメラ，顕微鏡，望遠鏡などが発達した。

幾何光学は，波動において波長を無限小（$\lambda \to 0$）とした極限において一致する。よって，幾何光学では，波動性固有の干渉や回折を記述することができな

い。

波動の伝搬原理であるホイヘンス（Huygens）の原理は，すでに 1678 年に提唱され，反射・屈折の現象が説明されていた。しかし，当時の代表的科学者であるニュートン（Newton）は光の粒子性を支持しており，波動性はなかなか認知されなかった。光が波動性の側面をもつことの動かし難い事実は，1802 年にヤング（Young）の干渉実験で示された。波動性に由来する現象の一つである回折の理論は，フレネル（Fresnel）により，ホイヘンスの原理を用いて，2 次波の干渉で説明された。回折理論は，さらにフラウンホーファー（Fraunhofer）あるいはキルヒホッフ（Kirchhoff）によって，19 世紀に発展させられ，光の波動性はゆるぎないものとなった。

干渉は波長単位の距離で変化するために，ガラスの平面度や距離測定など精密計測に応用されてきた。干渉計は距離測定や分光に利用されてきた。1948 年にガボア（Gabor）は，干渉を利用したホログラフィを発明し，光の空間位相を記録できるようにした。1960 年には干渉性に優れたレーザが発明された。それまでは，干渉させるために，2 光束の伝搬距離差を極度に小さくする必要があったが，可干渉距離の長いレーザの出現により，干渉計測は熟練を要するものから，汎（はん）用技術に変貌を遂げることとなった。

光の粒子性に関する内容は，本書の目的ではないので割愛する。

1.2　波動の基本的事項

波動は通常，時間的および空間的に，正弦波状あるいは余弦波状で振動するものとして与えられる。光を正弦波形の波動と考える（一様媒質中での光が，厳密に正弦波で表せる根拠は，後ほど 18.2 節で示す）。波動は 1 次元的に伝搬するものとし，その伝搬方向を z 軸にとる（**図 1.1** 参照）。波動の真空中での振幅変化を

$$u = A\sin\left(\omega t - \frac{2\pi z}{\lambda_0}\right) = A\sin(\omega t - k_0 z)$$

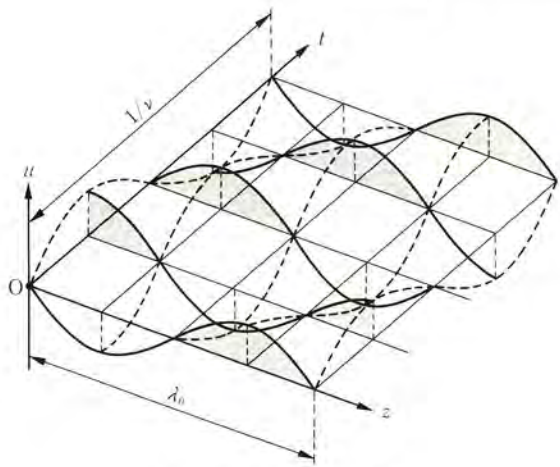

図1.1 波動の伝搬

$$=A\sin\left[2\pi\left(\nu t-\frac{z}{\lambda_0}\right)\right] \tag{1.1}$$

で表す。ここに，A を振幅，sin 内を**位相**（phase）という。

時間を固定した場合，式 (1.1) はある瞬間での波形を表す。z が λ_0 分変化すると，位相が 2π 変化する。つまり，λ_0 は隣接した山と山の間隔，あるいは隣接した谷と谷の間隔に等しく，この距離 λ_0 を**波長**（wavelength）という。

$$k_0=\frac{2\pi}{\lambda_0} \tag{1.2}$$

は単位距離当りに含まれる波の数を表しており，これを**波数**(wavenumber)という。つまり，伝搬距離 z と波数 k_0 の積が位相変化となる。図のように，単一の波長からなる波動を**単色波**（monochromatic light）という。

式 (1.1) で位置 z を固定して考えた場合，これはその場所における振幅の時間変動を表すこととなる。時間 t が $1/\nu$ 変化すると，位相が 2π 変化する。ν は単位時間当りに含まれる波の数に対応し，これを**周波数**（frequency）という。

$$\omega=2\pi\nu \tag{1.3}$$

を**角周波数**（angular frequency）という。

1.3 屈折率と光速

媒質の属性を記述するパラメータのうち，光で特に重要な概念は屈折率であり，屈折率はいろいろな側面をもっている。

光の屈折 (refraction) はもともと日常体験に基づくものである。水につけた箸(はし)が曲がって見えるのは，空気と水との間で光が屈折するためであると理解されている。後の 1.5 節で示すように，屈折率は異なった媒質間での光の屈折現象において，光の入射角と屈折角を関係づけるものであり，この現象が屈折率の語源になっている。

媒質中での光の速さは真空中よりも遅く，媒質中の光速 v_p と真空中の光速 c の比，つまり

$$n \equiv \frac{c}{v_p} \tag{1.4}$$

でも**屈折率** (refractive index) n が定義される。**真空中の光速** (light velocity of vacuum) c の測定値は

$$c = 2.997\,924\,58 \times 10^8\ \mathrm{m/s} \tag{1.5}$$

である。

屈折率 n の媒質中では，波長 λ が真空中の値 λ_0 よりも短くなり

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \tag{1.6}$$

で表せる。媒質中の波数 k は，定義により

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = n\frac{2\pi}{\lambda_0} = nk_0 \left(= \frac{n\omega}{c} \right) \tag{1.7}$$

と書ける。距離 z を伝搬したときの位相変化が kz となるから，媒質中での光の振幅変化は

$$u = A\cos(\omega t - kz) \tag{1.8}$$

と書ける。波面の伝搬速度は，時間 t の間に進む波面の距離 z を考え，式 (1.8) と式 (1.4) を利用して

$$v_p=\frac{w}{k}=\frac{c}{n} \tag{1.9}$$

で表される。この v_p を**位相速度**（phase velocity）といい，波面の伝搬速度でもある。これらより，媒質中の光速は，次式で書き表される。

$$v_p=\frac{2\pi\nu}{\frac{2\pi}{\lambda}}=\nu\lambda \tag{1.10}$$

つまり，媒質中の光速は，周波数と媒質中の波長の積で与えられる。

つぎに，屈折率の起源を説明する。非磁性媒質（比透磁率 $\mu=1$）では，媒質の比誘電率を ε とすると，屈折率 n は

$$n=\sqrt{\varepsilon} \tag{1.11}$$

で得られる。比誘電率は，媒質に光電界が入射したとき，媒質内に侵入した光電界と，媒質内に新たに誘起される分極を考慮した，電束密度と光電界の比を示したものである。その要因には，電子分極，イオン分極，配向分極などがある。分極は，外力が働いた古典的なばね振動によって評価される。このようにして，屈折率の各種分散式が示されている。光学ガラスに対してはハルトマン式，セルマイヤー式などが代表的なものである（8.2.2 項参照）。

光学でよく現れる媒質の屈折率の例はつぎのとおりである。空気：$n=1.00$，水：$n=1.333$，ガラス：$n=1.45\sim1.80$

1.4 位相・波面・光線の関係

1.4.1 位 相 と 波 面

図 1.1 で，山と山，谷と谷はそれぞれ同じ位相にあるという。2 次元または 3 次元空間での波動の場合，例えば空間上のある山の部分に着目すると，その近傍でも山の部分が存在する。このようにすると，遠く離れた部分まで位相の等しい部分を連ねることができる。波動で位相が一定な面を，**等位相面**または**波面**（wave front）という。

索　　引

あ

アイコナール　17,23,98
アイコナール方程式　17
アクロマート　107
厚肉単レンズ　58
厚肉レンズ　45
アッベ数　106,110
アッベの零不変量　61
アポクロマート　114

い

異常分散ガラス　112
位　相　3,141,152
位相因子　239
位相子　148
位相条件(反射防止膜)　180
位相速度　5,130
位相伝達関数　219
1次回折光　210,227,236,240
一様媒質　33,129,244
糸巻形（歪曲収差）　95
色消し　105
　化学的——　113
　光学的——　113
　超——　114
色消し条件　107
色消し二重レンズ　112
色消しレンズ　105
色収差　105
　焦点距離の——　106
　縦の——　105,109
　横の——　105,109
インコヒーレント　153,220
インコヒーレント結像　220
インコヒーレント光　154

う

薄肉単レンズ　57
薄肉密着レンズ系　60,106
薄肉レンズ　44,80,94,106

え

エアリーの円盤　204,216
エタロン　175
エネルギー保存則　137
エバネッセント波　139
円形開口　203,215
円偏光　142

お

応答関数　223
凹面鏡　41,65
凹レンズ　51,190

か

開　口　185
　円形——　203,215
　矩形——　202
　単一——　199
　半無限——　214
　複数の——　204
開口絞り　71
開口数　75
回　折　184,188,189,199,204
回折角　200,210,227,236
回折格子　206
回折光強度分布　206
ガウス行列　40
ガウス光学　35
ガウス像点　46,87
ガウス定数　40,46,124
化学的色消し　113
鏡　19
可干渉距離　153,234
可干渉時間　153
可干渉性　152
角周波数　3
角倍率　51,63
火　線　96
画像信号光　233
ガボアの輪帯板　197
火　面　96
干　渉　152,154
　振幅分割による——　159
　多重スリットによる——　170
　多重反射による——　172
　透過波による——　173
　2球面波による——　157
　2平面波の——　154
　波面分割による——　156
　反射波による——　174
干渉項　154,239
干渉じま
　等厚——　165
　透過波による——　160
　等傾角——　163
　反射波による——　162
　ヤングの——　158
　Fizeau の——　165
　Haidinger の——　163
干渉フィルタ　182
完全結像　46
完全偏光　143,144

き

幾何光学　7
基準座標変換　66
基底ベクトル　32,40,46
輝　点　209

球欠焦線　93
球欠面　92
球面鏡　41,63
——の結像式　64
——の焦点距離　64
球面収差　89
球面波　6,83,129
境界条件　22,245
強度分布の微細構造　206
共　役　47,80
共役像　240
共役点　47,53,82
共役面　47
虚　像　14,47,81,234
キルヒホッフ近似　185,256
記録段階(ホログラフィ)　233,235
均一媒質　129
近軸光学　35
近軸光線　35,122
近軸像点　46

く

空間位相　233
空間周波数　155,188,198,208,218,235,239
矩形開口　202
グース・ヘンヒェンシフト　139
屈折行列　33,37
屈折の法則　8
屈折率　4,244
屈折力　37,40,47,60
組合せレンズ　58
クラッド　116
グレーデッド形　117,119
群速度　131

け

傾斜因子　185,256
欠　線　208
結　像　46
結像作用　122,196
結像式　54,64,80
けられ　72

こ

コ　ア　116
光学距離　16
光学的色消し　113
光学的フーリエ変換　189,193
光学伝達関数(OTF)　218,223,227,228,231
光学薄膜　178
高屈折率低分散ガラス　112
口径食　72
口径比　75
コーシーの分散式　112
光　軸　34
構成方程式　243
合成レンズ　58
光　線　7,15,20
光線収差　87,89,99,103
光線追跡　102
光線方程式　17,117
光　速　4,244
光路長　16,19,78
光路長差　80,161
コヒーレント　153
コヒーレント結像　230
コマ収差　90
固有偏光　146
コルニューの渦巻き　212
コントラスト　218

さ

サーチライト　83
最小錯乱円　96
最小偏角　26
再生段階(ホログラフィ)　234,236
ザイデルの5収差　89,90,99
最良像面　93,96
錯乱円　76
サジタル面　92
3次収差　89
参照球面　96,224
参照光　233
参照波面　96

し

ジオプトリー　60
磁　界　246
軸上ホログラフィ　237
軸外しホログラム　241
子午光線　35,117,120
子午焦線　93
自己相関関数　226
子午面　35,92
システム行列　40,46,59,66,124
磁束密度　247
実視界角　65,74
実　像　14,46,81
1/4 波長板　148
弱導波近似　120
視野絞り　74
射出瞳　72,88,97,223
射出窓　74
遮断周波数　231
収　差　87
球面——　89
光線——　87,89,99,103
コマ——　90
縦の——　88
単色——　87
波面——　87,96,97,225
非点——　93
横の——　89
歪曲——　94
収差図形　90
自由スペクトル領域　177
集束定数　120
周波数　3
周波数応答特性　223
主光線　72,73,93

主　点　49,67
主平面　49
主要点　52
シュライエルマッヘルの方程式　46
焦　点　48,68
焦点距離　29,48,50,64
——の色収差　106
焦点深度　76
焦点はずれによる球面収差　100,224
焦平面　49
冗長度　240
ジョーンズ行列　147
ジョーンズベクトル　145
蜃気楼　115
新種ガラス　112
振幅条件(反射防止膜)　180
振幅透過率　133
振幅反射率　133
振幅分割　156
——による干渉　159

す

垂直入射　138
ステップ形　116
ストークスの定理　136,160
ストークスパラメータ　143
スネルの法則　8,22
スパローの分解能　217
スペックル雑音　231
スポットダイアグラム　102

せ

正弦条件　92
正弦波格子　208,235
正立像　48
正立等倍像　125
正レンズ　51
接眼レンズ　108
節　点　51
節平面　52
セルマイヤーの分散式　111
0次回折光　199,209
旋光子　148
全反射　9,117,138,150

そ

双曲面鏡　83,84
相対位相差　141,147
像　点　35,46
ガウス——　46,87
球欠——　93
近軸——　46
子午——　93
理想——　46,87
像面の平坦性　113
像面湾曲　94

た

帯　板　239
対物レンズ　75,92,112
楕円偏光　142
楕円面鏡　83,84
多光波干渉　169
多重スリットによる干渉　170
多重反射による干渉　172
多色光による干渉　167
畳込み積分　222,249
縦
——の色収差　105,109
——の収差　88
縦倍率　56
ダブレット　112
樽形(歪曲収差)　95
単一開口　199
単色収差　87
単色波　3
単スリット　199,211
単レンズ　45,57

ち

超色消し　114
直接像　240
直線偏光　142

つ

通常のレンズ　196

て

定在波　155
停留値　78
デルタ関数　223
テレセントリック　73
電　界　246
電磁界のエネルギー　247
転送行列　34,39
点像分布関数　220,222,228
電束密度　247
伝達関数
位相——　219
光学——　218,223,227,228,231
変調——　219

と

等厚干渉じま　165
等位相面　5,129
透過波
——による干渉　173
——による干渉じま　160
等傾角干渉じま　163
同心光束　95
等倍像　50
倒立像　48
倒立等倍像　125
凸面鏡　41,65
凸レンズ　51,81,190

に

ニア・フィールド回折　187
2球面波による干渉　157
逃げ水　116
2光束法　237
2次円錐面　42
2次スペクトル　113
二重像　241

二重レンズ　112
2乗分布形光導波路　119
1/2波長板　148
2平面波の干渉　154
入射瞳　72,102,223
入射窓　74
入射面　8
ニュートン環　167
ニュートン原器　167
ニュートンの公式　55,68
ニュートンリング　167

は

媒質中の波動方程式　244
ハイパーセントリック　74
倍　率
　角——　51,63
　縦——　56
　横——　48,55,63
波　数　3
波　束　131
波　長　3
バックフォーカス　49
波動性　157
バビネソレイユ補償板　149
波　面　5,17,78
波面収差　87,96,97,225
波面分割　156
　——による干渉　156
パラボラアンテナ　82
ハルトマンの分散式　111
波　連　131
反射行列　41,64
反射の法則　8
反射波
　——による干渉　174
　——による干渉じま　162
反射防止膜　179
半値全幅　177
半波長板　148
半無限開口　214

ひ

光共振器　178
光強度　11
光電力　12
光導波路　9,139
光パワー　12
光ファイバ　9
非球面レンズ　86,101
被写界深度　77
ピッチ　120
非点隔差　93
非点光束　93,96
非点収差　93
比透磁率　5,243
瞳関数　225,228,231
瞳空間　73
非偏光　143,144
比誘電率　5,243
ピンホール　220,223

ふ

ファブリペロー干渉計　175
フィネス　178
フーリエ変換　223,225
フーリエ変換レンズ　193
フェルマの原理　18,19,78
不均一媒質　129
複屈折　146
複数の開口　204
物質方程式　243
物体深度　77
物　点　35,46
部分的にコヒーレント　153
部分偏光　143,144
不遊条件　92
不遊点　92,103
不遊レンズ　92
フラウンホーファー回折
　188,198,215
フラウンホーファーの暗線
　110
プリズム　26,27
ブルースター角　134
フレネル回折
　189,198,211,214
フレネル積分　211
フレネルゾーンプレート
　194,239
フレネル帯　194
フレネル
　——の公式　133
　——の斜方体　150
　——の菱面体　150
　——の輪帯板　194,196,
　239
フレネルロム　150
負レンズ　51
分解能　75,215
　スパローの——　217
　レイリーの——　217,231
分　散　112
分散式
　コーシーの——　112
　セルマイヤーの——　111
　ハルトマンの——　111
分散性媒質　132
分布屈折率形　117
分布屈折率レンズ
　122,124,196

へ

平行平板　159,172
平行平面板　34
平凸レンズ　28
平面波　6,129
ベッツヴァル条件　94
ベッツヴァル和　94
ヘルムホルツ・キルヒホッフ
の積分定理　184,255
ヘルムホルツの方程式　245
偏　光　141
　円——　142
　完全——　143,144
　固有——　146
　楕円——　142

直線—— 142
非—— 143,144
部分—— 143,144
偏光角 134
偏光子 148
偏光度 144
偏光分割 156
変 調 218
変調伝達関数 219
ベンディング 58

ほ

ポアンカレ球表示 144
ホイヘンス
——の原理 128,157,171,186,200
——の接眼レンズ 108
ポインティングベクトル 11,25
放物面鏡 82,84
包絡線
強度分布の—— 206
蛍 石 112
ホログラフィ 233
ホログラム 233,240

ま

マイクロレンズ 122
マクスウェル方程式 242
マリュスの定理 24

み

見掛けの視界角 74

む

無収差反射鏡 82,84
無収差レンズ 84

め

メニスカスレンズ 39
面 頂 45

や

ヤング
——の干渉実験 157
——の干渉じま 158

ゆ

有効F値 75

よ

横
——の色収差 105,109
——の収差 89
横倍率 48,55,63

ら

ラグランジュ・ヘルムホルツ
——の公式 63
——の不変量 63
ラグランジュの積分不変量 22
らせん光線 35,117
ラムスデンの接眼レンズ 107,114

り

理想結像条件 47,53
理想光学系 46
理想像点 46,87
臨界角 9,117
輪帯板
ガボアの—— 197
フレネルの—— 194,196,239

れ

0次回折光 199,209
レイリーの分解能 217,231
レーザ光 237
レンズアレー 125
レンズ
——による波面変換作用 190
——の total curvature 57
——の屈折力 57,60
——の結像式 54,68,80
——のシステム行列 40

わ

歪曲収差 94

F

Fizeau の干渉じま 165
F 数 75,229
F 値 75
fθ レンズ 95

G

GRIN レンズ 122

H

Haidinger の干渉じま 163

N

NA 75

O

OTF 218,227,231

P

P 波 132
P 偏光 134

S

S 波 132
sinc 関数 199
SI 単位系 242

——著者略歴——

1973年　大阪大学大学院工学研究科修士課程修了（応用物理学専攻）
1982年　工学博士（大阪大学）
1995年　立命館大学教授
2013年　立命館大学名誉教授

光学の基礎

Introduction to Optics

© Jun-ichi Sakai 1997

1997年10月20日　初版第1刷発行
2019年 6月15日　初版第16刷発行

検印省略

著　者　左貝潤一
発行者　株式会社　コロナ社
　　代表者　牛来真也
印刷所　壮光舎印刷株式会社
製本所　牧製本印刷株式会社

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 978-4-339-00680-3　C3055　Printed in Japan　（横尾）

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。