

光学素子のいろは

—機能別分類による説明—

工学博士 左貝 潤一 著

コロナ社

まえがき

近年、光技術の産業分野（電気・電子・通信工業，機械工業，建設業，化学など）への普及に伴い，光技術の重要性が増している。光技術は多岐にわたるが，その光学要素を構成しているのは光学素子あるいは光学部品，光回路素子と呼ばれる個別部品である。光学素子として古くから平面鏡，レンズ，プリズム，回折格子などが使用されてきた。

近年では，光リソグラフィ技術の進展に伴う回折光学素子・偏光素子や，光ファイバの誕生によるファイバ応用部品が生まれ，光 MEMS による微小光学素子などが産業に導入されつつある。高パワ・高指向性などの特徴をもつレーザでは，旧来とは異なる特性の光学素子が必要とされる。

どのような光学素子があるかは，メーカーや販売業者のホームページ，あるいはカタログで容易に調べることができる。しかし，多種類の光学素子の中から，各人の研究・開発の用途・性能・価格などに合致した光学素子を見つけるには，ある程度の基礎知識を必要とする。また，光学素子を手にしても，どのように利用するかについては，ある程度の経験が必要である。

市販されている光学の解説書や光学素子・光学部品に関する書籍は，一般に理論的に体系立った構成になっており，各人の要求に合う光学素子を早期に見つけるのには適していない。

本書は，読者が光学的機能や作用のなにかを利用したいとき，適切な光学素子を探しやすくなるように配慮している。全体を機能別に分類・構成し，光学素子の原理や特性，用途，適用範囲，応用の例示などを通して，実用面に資する書籍を提供することを目指す。

本書の概要は以下の通りである。1 章では，以下の内容を理解する上で最低限必要な，光の基本的性質，結像作用，干渉と回折，偏光と複屈折などを説明

する。2章では光の向きの変更や一方向遮断など、光路の制御に関する光学素子を、3章では結像作用に関する球面レンズや色消しレンズ、アナモルフィック光学系を、4章では像の転送方法や像反転系を説明する。

5章では光の分波と合波に関する光学素子を、6章では各種光フィルタや反射防止膜など、透過率と反射率に関する素子を説明する。7章では空間分解能や解像度に関する内容を、8章では位相の制御に関する偏光素子や波長板などを、9章ではレーザビームの制御に関する内容や素子を説明する。

10章では実際に光学系を組む上での調整用機器や調整法、留意点などを、11章では光学素子に用いられる光学材料を説明する。

本書の特徴は次の通りである。

- (1) 機能別の章立てにして、読者の目的に合致した光学素子やその特徴などが探しやすいようにする。
- (2) 各項目では、素子選択上の機能や特徴などを含めて留意点も述べる。また、応用の仕方が分かるように、ノウハウの開示や具体的用途の例示を行う。
- (3) 旧来のものだけでなく、光ファイバや光 MEMS の利用による微小光学素子や回折光学素子、レーザ用途など新規のものも紹介する。
- (4) 読みやすくするため、数式は動作原理の理解に必要な結果を示し、できるかぎり定性的な説明を行う。また、関連内容の参照箇所を適宜明示している。

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ます。

2023年7月

左貝 潤一

目 次

1. 光学の基礎事項

1.1 屈折率に関連する事項	1
1.1.1 屈折率とスネルの法則	2
1.1.2 全 反 射	3
1.1.3 光路長とフェルマーの原理	4
1.1.4 分散：屈折率の波長依存性	6
1.2 光の波動的性質	7
1.2.1 光の波動的記述	7
1.2.2 フレネルの公式	8
1.2.3 ブルースターの法則	12
1.3 球面光学系による結像作用	14
1.3.1 薄肉レンズによる結像特性	14
1.3.2 結像と光路長の関係	17
1.3.3 厚肉レンズによる結像特性	18
1.3.4 球面反射鏡による結像特性	20
1.4 光学系での諸概念	22
1.4.1 絞 り と 瞳	22
1.4.2 光学系の明るさ表示	23
1.4.3 焦 点 深 度	24
1.5 収 差	25
1.5.1 単 色 収 差	25
1.5.2 単色収差の軽減・除去方法	28
1.5.3 色 収 差	29

1.6 干渉と回折	29
1.6.1 干渉	29
1.6.2 回折	31
1.7 偏光の分類	32
1.7.1 完全偏光と非偏光	33
1.7.2 偏光の形状	33
1.8 偏光が関連する現象	36
1.8.1 複屈折	36
1.8.2 旋光性	38
1.8.3 二色性	39

2. 光路の制御

2.1 光路の向き変更	40
2.1.1 平面鏡による光路の向きの変更	41
2.1.2 光路の向きを 90° 変える方法	43
2.1.3 光路の向きを 180° 変える方法	44
2.1.4 再帰性反射：光を元の経路に戻す方法	45
2.1.5 光路を任意に変える方法	48
2.2 光路の平行移動	48
2.2.1 平行移動量が大い場合	48
2.2.2 平行移動量が微小な場合	49
2.3 光の通過領域の制限	50
2.4 光の一方方向通過・逆方向遮断	50
2.4.1 光アイソレータ①：4分の1波長板の利用	52
2.4.2 光アイソレータ②：ファラデー回転子の利用	52
2.5 光路長の変更	53
2.5.1 単純な光路長の変化	53
2.5.2 その他の光路長の変化方法	54

3. 光の集束と結像作用

3.1 基本的な結像素子	56
3.1.1 球面レンズ	56
3.1.2 球面反射鏡	61
3.2 収差を除去した結像素子	61
3.2.1 非球面レンズ	62
3.2.2 非球面反射鏡（無収差反射鏡）	63
3.2.3 色消しレンズ：色収差の補正	65
3.3 方向により集束作用が異なる結像素子	69
3.3.1 アナモルフィック光学系	70
3.3.2 シリンドリカルレンズ	70
3.3.3 トロイダルレンズ	71
3.3.4 アナモルフィックプリズム	72
3.3.5 $f\theta$ レンズ	74
3.4 球面をもたない屈折型結像素子	75
3.4.1 フレネルレンズ	75
3.4.2 分布屈折率（GRIN）レンズ	76
3.5 回折を利用する結像素子	79
3.5.1 球面レンズの位相変換作用	79
3.5.2 回折光学素子	81
3.5.3 ホログラム	84
3.6 結像作用の比較とハイブリッド結像素子	86
3.6.1 結像作用の比較	86
3.6.2 ハイブリッド結像素子	87

4. 像の転送と反転

4.1 プリズムによる像の正立転送	89
-------------------	----

4.1.1	ペンタプリズム	89
4.1.2	菱形プリズム	90
4.2	屋根型鏡・プリズムによる像変換	91
4.3	プリズムによる像反転系	94
4.3.1	アミチプリズム	94
4.3.2	ダブプリズム	95
4.3.3	ペンタダハプリズム	97
4.3.4	シュミットプリズム	97
4.3.5	ポロプリズム	99
4.3.6	像反転系の利用例	99
4.4	その他の像転送方法	100
4.4.1	リレー光学系	100
4.4.2	バンドルファイバ	102
4.4.3	GRIN レンズアレー	102

5. 光の分波と合波

5.1	光の分波と合波 (1×2)	103
5.1.1	ビームスプリッタ	103
5.1.2	偏光ビームスプリッタ	104
5.1.3	光 カ プ ラ	106
5.2	光の波長による 2 分波と合波	107
5.2.1	ダイクロイックミラー・プリズム：波長分離素子	107
5.2.2	波長分離カブラ	109
5.3	波長選択素子	110
5.3.1	分散プリズム	110
5.3.2	回折格子	113
5.3.3	ファブリ-ペロー干渉素子	115
5.3.4	色消しプリズムと直視プリズム	118

6. 光の透過率と反射率の制御

6.1 光学フィルタの分類	121
6.2 透過率の減少（波長無依存）	122
6.3 吸収型フィルタによる透過率の制御	123
6.3.1 シャープカットフィルタ	124
6.3.2 色温度変換フィルタ	125
6.3.3 色補正フィルタ	126
6.4 干渉型フィルタによる透過率の制御	127
6.4.1 バンドパスフィルタ	128
6.4.2 ダイクロイックフィルタ	129
6.4.3 ノッチフィルタ	130
6.5 反射率の制御	130
6.5.1 反射防止膜	131
6.5.2 増反射膜	134
6.6 偏光による透過率の制御	136
6.6.1 偏光フィルタ	136
6.6.2 ブルースター窓	136

7. 分解能

7.1 光学系の分解能	138
7.1.1 円形開口からの回折	138
7.1.2 レイリーの分解能	141
7.1.3 スリットからの回折による分解能	142
7.2 光学素子の分解能	143
7.2.1 プリズムの分解能	143
7.2.2 回折格子の分解能	145
7.2.3 ファブリーペロー干渉素子の分解能	147

7.2.4	光学素子における分解能の比較	149
7.3	眼の分解能	149
7.4	光学機器の分解能	150
7.4.1	望遠鏡の分解能	150
7.4.2	顕微鏡の分解能と油浸法	151

8. 偏光と位相制御

8.1	直線偏光子：複屈折を利用して直線偏光を取り出す	154
8.1.1	グラントムソンプリズム	155
8.1.2	グラン-フーコープリズム	157
8.1.3	グラン-テイラープリズム	157
8.1.4	ローションプリズム	159
8.1.5	ウォラストンプリズム	160
8.2	その他の偏光子	161
8.2.1	ワイヤグリッド偏光子	161
8.2.2	二色性偏光子	162
8.2.3	偏光フィルム	163
8.2.4	薄膜偏光子：ブルースター角を利用する直線偏光子	164
8.2.5	円偏光子：円偏光を取り出す	165
8.3	波長板：直交成分間に一定の位相差を与える	166
8.3.1	半波長板	167
8.3.2	4分の1波長板	169
8.3.3	色消し波長板：波長依存性を抑えた波長板	170
8.4	位相補償板：直交成分間に任意の位相差を与える	173
8.5	デポライザ：偏光状態をなくす	175

9. レーザビームの制御

9.1	レーザービームの特徴と留意点	178
-----	----------------	-----

9.1.1	円形ガウスビーム	179
9.1.2	楕円ガウスビーム	181
9.2	ビームスポットの径や形状の変換	182
9.2.1	結像光学系によるビーム径の変換	182
9.2.2	平行ビームでの径変換	184
9.2.3	ビーム形状の変換	185
9.3	レーザビームにおける焦点深度	189
9.4	ビーム整形素子	190
9.4.1	静的ビーム整形	190
9.4.2	ビームホモジナイザ：ビーム断面の形状と分布の能動的制御	191
9.5	ビーム断面の光強度分布均一化	193
9.5.1	フライアイレンズ	193
9.5.2	カライドスコープ	194
9.5.3	その他の方法と応用例	195
9.6	レーザビームの偏向と走査	196
9.6.1	ガルバノミラーによる偏向と走査	196
9.6.2	回転多面鏡による偏向と走査	198
9.6.3	光MEMSによるスキャナ	199
9.6.4	音響光学偏向器	200
9.7	レーザ用導光路	201
9.7.1	平面反射鏡を用いた導光路	202
9.7.2	光ファイバ導光路	203

10. 光学系の調整

10.1	光学系の構成準備	205
10.2	光学系調整用の機器	206
10.3	光学系の調整作業	207
10.3.1	可視光の場合の調整方法	207
10.3.2	光源が可視光でない場合の調整方法	210

10.3.3 光ビームの微小箇所への集光方法……………211
 10.3.4 光ビーム調整作業での留意点……………212
 10.3.5 アッベの原理：移動測定での測定誤差……………214
 10.4 光学素子を取り扱う上での留意点……………215

11. 光 学 材 料

11.1 光学材料選択上の一般的留意点……………217
 11.2 可視域用の光学ガラスの屈折率とアッベ数……………218
 11.2.1 屈 折 率……………218
 11.2.2 ア ッ ベ 数……………218
 11.2.3 屈折率とアッベ数のデータ……………219
 11.3 各種光学材料の特性……………221
 11.3.1 可視域の光学材料……………222
 11.3.2 赤外域の光学材料……………224
 11.3.3 紫外域の光学材料……………225
 11.3.4 光学プラスチック……………226
 11.3.5 レーザ用光学材料……………227
 11.4 複屈折物質……………227
 11.4.1 一 軸 結 晶……………228
 11.4.2 二 軸 結 晶……………229

付 録……………230

A. 再帰性反射の原理の3次元での証明……………230
 B. 屋根型鏡・プリズムでの入・出射光線の方向の関係……………231

参 考 図 書……………234

索 引……………236

1 光学の基礎事項

光学は可視光を中心として赤外・紫外域を包含しており，光学素子もこの波長域を対象とする。本章では，光学素子の原理を理解する上で基本となる事項を説明する。そのため，光学の網羅的な内容ではなく，光学素子と関係の深い内容に絞って説明し，随時光学素子との関連に言及する。

1.1節では光学における基本特性に関係する，屈折率やスネルの法則，フェルマーの原理などを説明する。1.2節では光の波動的性質の定量的議論に必要なフレネルの公式などを説明する。1.3節では薄肉・厚肉球面レンズと球面反射鏡による結像特性などを，1.4節では光学系での諸概念を説明する。1.5節では像点のずれに関係する収差を述べ，1.6節では干渉と回折の半定量的説明を行う。1.7節では偏光の分類を，1.8節では複屈折，旋光性などを説明する。

1.1 屈折率に関連する事項

本節では，光の領域で物質を特性づけるのによく使用される屈折率に着目して，光線で説明できる内容を中心に説明する。**光線** (optical ray) は，光の伝搬経路を線で表す概念であり，波長が対象とする空間の大きさよりも十分小さいときに導入できる。光線は光領域で適用範囲が広いが，干渉や回折など波動性固有の現象には適用できない。

屈折率は様々な光学現象と関係しており，光学素子の原理や機能を理解する上でも重要である。

2 1. 光学の基礎事項

1.1.1 屈折率とスネルの法則

屈折率は様々な側面をもっている。その一つは、媒質中での光速 v は真空中の光速 c よりも遅くなり、その比率が媒質の**屈折率** (refractive index) であるということである。屈折率は n で表され、これらの関係は次式で書ける。

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.1)$$

$$c = 2.997\,924\,58 \times 10^8 \text{ m/s} \doteq 3.0 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (1.2)$$

上式で c は**真空中の光速** (light velocity of vacuum) であり、実測値に基づいた定義値である。式 (1.1) で表される光の伝搬速度 v を**位相速度** (phase velocity) という。

式 (1.1) より、真空の屈折率が $n = 1$ で定義される。自然界の物質では $n > 1$ であり、高々 4 程度である。空気の屈折率は標準状態で $n = 1.000\,28$ であり、厳密な議論をしないかぎりには $n \doteq 1.0$ として差し支えない。光学素子の材料としてよく使用される光学ガラスの屈折率は、概ね $n = 1.45 \sim 1.8$ である。

屈折率は文字通り、異なる媒質の境界部分で光の進行方向が折れ曲がる、つまり屈折するときの角度の変化を記述するものである。図 1.1 (a) で光線が屈折率 n_1 の媒質から屈折率 n_2 の媒質に入射するときを考える。光線の角度を法線に対して反時計方向を正にとり、入射角を θ_i 、屈折角を θ_t 、反射角を θ_r とする。このとき、実験事実より各値は次式を満たす。

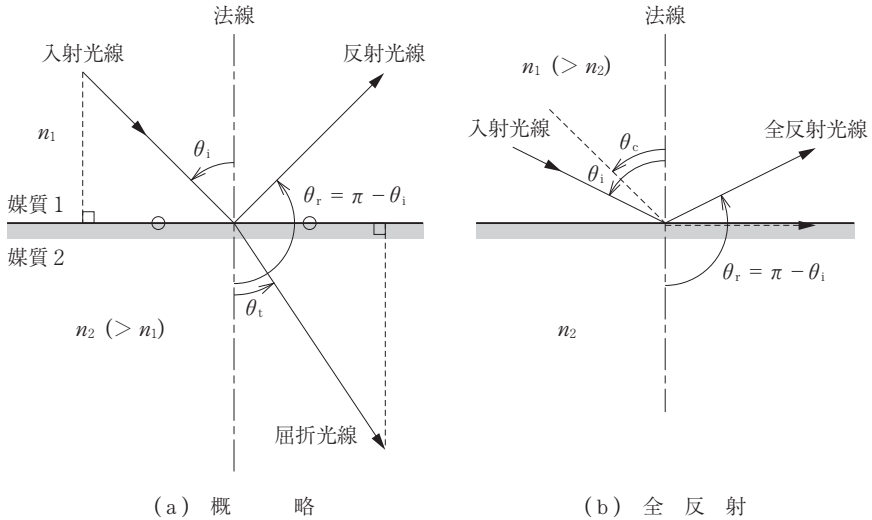
$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t \quad (1.3)$$

$$\theta_r = \pi - \theta_i \quad (1.4)$$

式 (1.3) を**屈折の法則** (law of refraction)、式 (1.4) を**反射の法則** (law of reflection) という。これらを合わせて**スネルの法則** (Snell's law) という。

スネルの法則に関して次のことが成立している。

- (i) 媒質の屈折率とその媒質での光線角度の正弦の積が、屈折の前後で等しく、不変量となる。
- (ii) 屈折率が大いほうの媒質における光線角度が小さくなる。
- (iii) 反射光線は境界面に関する入射側法線に対して入射光線と対称となる。



θ_i : 入射角, θ_t : 屈折角, θ_r : 反射角, θ_c : 臨界角, 入射・屈折・反射光線は入射面内にある。(b)での破線は臨界角で入射した光線の経路を表す。

図 1.1 スネルの法則

(iv) 入射光線とこれから境界面に下ろした垂線を含む面を**入射面**といい、入射・屈折・反射光線は入射面内にある。

上記の性質 (i) は、多数の平行平面からなる多層薄膜において、屈折と反射がどの層であっても式 (1.3) での値が保存されることに利用できる。

上記の性質 (iii) は、媒質の異なる平面があるとき、光線の入射角の変化量の 2 倍だけ、反射光線の角度が変わることを意味する。この性質は平面反射鏡やプリズムを用いた光路の向き変更でしばしば用いられる (2.1 節参照)。

1.1.2 全 反 射

前項の性質 (ii) は、光が屈折率の大きい媒質から小さい媒質 ($n_1 > n_2$) に入射するとき、屈折角 θ_t が入射角 θ_i よりも先に 90° になることを意味する (図 1.1 (b))。このときの入射角を**臨界角** (critical angle) と呼び、臨界角は

$$\theta_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1} \tag{1.5}$$

4 1. 光学の基礎事項

で書ける。

光線の入射角 θ_i が臨界角 θ_c よりも大きくなると ($\theta_i > \theta_c$)，入射光線のすべてが境界面に対して入射側に戻って来る。この現象を**全反射** (total reflection) という。波動的には，光波の一部が反対側にわずかに浸み込んでおり，この成分をエバネッセント波と呼ぶ。

【数値例 1.1】 光がプリズム内から空気側に伝搬する場合，プリズムが BK7 ガラス ($n = 1.52$) でできているとき，臨界角は式 (1.5) を用いて， $\theta_c = 41.14^\circ = 41^\circ 8'$ となる。

◇

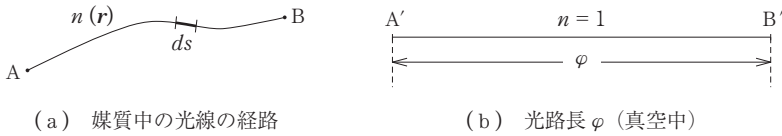
全反射はプリズムや直線偏光子などの光学素子でよく利用されている。上記数値例に基づく，空気中にある BK7 ガラスの 45° 直角プリズムで，光がプリズム内部から界面に入射角 $\theta_i = 45^\circ$ で到達すると，入射角が臨界角より大きいため**内部全反射** (total internal reflection) が生じる。この際，上記の性質 (iii) により，光の向きがプリズム内部で 90° 変わる。これは光路の向き変更利用されている (2.1 節参照)。直線偏光子では常・異常光線に対する臨界角の違いが利用されている (8.1 節参照)。

1.1.3 光路長とフェルマーの原理

〔1〕 光路長 屈折率が空間的に変化する媒質中において，屈折率 n の位置での光速は，式 (1.1) に示すように，真空中よりも屈折率分だけ遅くなる。このような媒質中での光の伝搬を考える場合，これをあらかじめ真空中の伝搬時間に換算しておく，屈折率の変化に言及しなくて済むので便利である。

図 1.2 に示すように，2 点 A, B 間を伝搬する光線の経路 (光路) に沿って幾何学的微小距離 (線素) ds をとる。この光線と同じ伝搬時間で真空中を伝搬する A'B' 間の距離に置き換えると，位置に依存した屈折率分を掛けた距離と等しくなる。

上記のことを，空間的に変化する屈折率 $n(\mathbf{r})$ (\mathbf{r} : 3 次元位置ベクトル) の媒質中における光線の伝搬時間に適用すると，真空中では



$n(\mathbf{r})$: 空間で変化する屈折率, \mathbf{r} : 位置ベクトル, ds : 光路に沿った微小距離 (線素)。AB 間と A'B' 間で光の伝搬時間が等しい。

図 1.2 光路長

$$\varphi \equiv \int n(\mathbf{r})ds \tag{1.6}$$

の距離を伝搬することと等価である。式 (1.6) で定義される距離は、**光路長** (optical path length) または**光学距離** (optical distance) と呼ばれる。一様媒質中での光路長は (屈折率 × 幾何学的伝搬距離) で求められる。

干渉などを考えるとき、伝搬に伴う位相変化が重要であり、これは媒質中の光の波数 $k = nk_0$ (k_0 : 真空中の光の波数) と幾何学的伝搬距離 z との積で与えられる。すなわち、伝搬に伴う**位相変化**は次式で表される。

$$\phi = nk_0z = \varphi k_0 \tag{1.7}$$

つまり、位相変化は光路長 φ と真空中の光の波数 k_0 の積としても表せる。

〔2〕 **フェルマーの原理** 光の伝搬経路を規定するものに**フェルマーの原理** (Fermat's principle) がある。これは、屈折率が空間で連続的に変化する媒質において、光が任意の2点間を伝搬するとき、伝搬時間が最小となるように伝搬経路をとるというものであり、**最小時間の原理**とも呼ばれる。

一様媒質中では、式 (1.1) より、光が一定速度で伝搬する。フェルマーの原理に従うと、2点間では光が最短時間で伝搬するので、これは最短距離を意味する。ところで幾何学によると、2点間の最短距離は直線である。したがって、一様媒質中では光が直進するといえ、これは光の**直進性**を表している。

図 1.3 に示すように、空气中に平面鏡があるとき、光が点 A から出発し、平面鏡で反射後、点 B に至る経路を考える。点 B の平面鏡に対する対称位置に点 B' をとり、線分 AB' と平面鏡との交点を C とすると、線分 CB' と CB の長さが等しい。平面鏡上で点 C 以外に点 D をとると、 $\triangle ADB'$ において AB' の長

索 引

<p>【あ】</p> <p>アイポイント 69</p> <p>アイリス 44, 50</p> <p>アキシャル型 76</p> <p>アークサインレンズ 198</p> <p>アクロマティック波長板 170</p> <p>アクロマート 68</p> <p>アクロマートレンズ 68</p> <p>厚肉レンズ 18</p> <p>——による結像式 20</p> <p>アッペ数 66, 219</p> <p>等価的—— 83</p> <p>アッペの原理 214</p> <p>アナモルフィック光学系 70</p> <p>アナモルフィックプリズム 73, 210</p> <p>アナモルフィックレンズ 70</p> <p>アフォーカル系 150</p> <p>アブラナート 28</p> <p>アポクロマートレンズ 68</p> <p>アミチ直視プリズム 119</p> <p>アミチプリズム 94</p> <p>アライメント 207</p> <p>アラゴナイト 229</p> <p>霰石 229</p> <p>アレイ導波路回折格子 114</p> <p>アンバー系 125</p> <p>暗幕 206</p> <p>【い】</p> <p>異常光線 38</p> <p>異常分散 7</p> <p>異常分散ガラス 219</p> <p>位相 8</p>	<p>位相型回折光学素子 83, 192</p> <p>位相関数法 84</p> <p>移相器 166</p> <p>位相子 166</p> <p>位相条件 132</p> <p>位相速度 2, 7</p> <p>位相板 166</p> <p>位相変化 5</p> <p>位相補償板 173</p> <p>一軸結晶 37, 228</p> <p>異方性媒質 36</p> <p>イメージガイド 102</p> <p>イメージローテータ 97</p> <p>色温度 125</p> <p>色温度変換フィルタ 125</p> <p>色ガラスフィルタ 121, 123, 227</p> <p>色消し 29, 66</p> <p>焦点距離の—— 67, 68</p> <p>色消し4分の1波長板 171</p> <p>色消しダブレット 67</p> <p>色消し二重レンズ 67</p> <p>色消し波長板 170</p> <p>色消し半波長板 171</p> <p>色消しプリズム 74, 119</p> <p>色消しレンズ 29, 66</p> <p>色収差 29, 62, 65</p> <p>焦点距離の—— 65</p> <p>縦の—— 65</p> <p>横の—— 65</p> <p>色の三原色 107, 127, 129</p> <p>色補正フィルタ 126</p> <p>【う】</p> <p>ウォラストンプリズム 160</p>	<p>後側焦点 15</p> <p>後側焦点距離 15</p> <p>薄肉密着レンズ系 67</p> <p>薄肉レンズ 14, 56</p> <p>雲母 229</p> <p>白—— 170, 229</p> <p>【え】</p> <p>エアギャップ 157, 227</p> <p>エアリーの円盤 140</p> <p>液晶ディスプレイ 163</p> <p>液浸法 152</p> <p>エシエル格子 114</p> <p>エシレット格子 114, 147</p> <p>エタロン 55, 115</p> <p>エネルギー保存則 11</p> <p>エバネッセント波 4, 107</p> <p>塩化カリウム 225</p> <p>塩化ナトリウム 224</p> <p>円形ガウスビーム 180</p> <p>遠赤外 224</p> <p>円柱レンズ 70, 185</p> <p>円二色性 39</p> <p>円偏光 35</p> <p>円偏光子 165</p> <p>円偏光二色性 39</p> <p>【お】</p> <p>凹面鏡 21</p> <p>凹レンズ 15, 16, 57</p> <p>オプティカルインテグレータ 194</p> <p>オプティカルコンタクト 106, 227</p> <p>音響光学偏向器 201</p>
---	---	---

【か】

開口	50
開口絞り	22, 101
開口数	24, 141, 152
回折	31
回折角	31
回折光	
0次—	31
<i>m</i> 次—	31
回折光学素子	81
位相型—	83, 192
振幅型—	81
回折格子	113
平面—	113
—の式	113, 146
—の分解能	147
回折格子対	114
回折次数	113
解像度	138
解像力	138
回転多面鏡	198
ガウス像点	15
ガウスのレンズ公式	16
ガウスビーム	179
円形—	180
楕円—	181
可干渉距離	29
可干渉時間	29
可干渉性	178
拡散デポラライザ	176
角度調整	207
角度分解能	141
角分散	118, 144
可視光	222
偏り	32
カナダバルサム	156
カライドスコープ	194
ガラスコード	221
ガラスモールド成形技術	62
ガリレイ式	185
カルサイト	228
ガルパノミラー	196

干渉	29
干渉縞	29, 85
干渉フィルタ	121, 127
関節型導光路	202
完全偏光	33

【き】

擬似デポラライザ	176
キノフォーム	83
逆進性	9
キャッツアイ	47
球欠面	26
球面収差	26
球面波	8
球面反射鏡	20, 61
—による結像式	21
球面レンズ	14, 56
キューブ型BS	104
キューブ型PBS	105
共振条件	116
狭帯域透過フィルタ	128
共役	16, 22, 64
共役点	16
行列法	18
虚像	17
均一輝度レーザ	195
近軸光線	14
近赤外	224
金属膜	135

【く】

空間フィルタ	185, 191
空間分解能	141
屈折の法則	2
屈折率	2
屈折率楕円体	36
屈折力	16
クラウンガラス	219
グラン-テイラープリズム	
—	157
グラン-トムソンプリズム	
—	155

グラン-フーコープリズム	
—	157
グラン-レーザプリズム	
—	158, 227
グリセリン	156
群速度	7

【け】

結合長	109
結像	15
結像作用	77, 80
結像式	
厚肉レンズによる—	20
球面反射鏡による—	21
結像素子	56
ケプラー式	185
ケーラー照明	193
ゲルマニウム	224
検光子	156
減光フィルタ	122
顕微鏡	69, 151
—の倍率	151
顕微鏡対物レンズ	212

【こ】

光学活性	38
光学ガラス	218
光学距離	5
光学軸	36, 227
光学実験台	205
光学定盤	205
光学的に共役	16
光学伝達関数	142
光学濃度	123
光学フィルタ	121
光学プラスチック	226
高屈折率法	84
虹彩絞り	44, 50, 191, 208
光軸	14
格子定数	147
高次波長板	168
高出力レーザ	227
合成石英	223

線二色性 39, 229
全反射 4

【そ】

双眼鏡 99
双曲面鏡 63
走査 196
双軸結晶 228
像点 15
 ガウス—— 15
 理想—— 15
増反射膜 134
像反転系 94
像面湾曲 26

【た】

ダイクロイック 107
ダイクロイックフィルタ 129
ダイクロイックプリズム 108
ダイクロイックミラー 107
楕円ガウスビーム 181
楕円偏光 35
楕円面鏡 63
多光波干渉 116
多焦点レンズ 83
多層薄膜 133
縦の色収差 65
ダハプリズム 91
ダブプリズム 95
ダブルプレート波長板 168
単軸結晶 228
単色収差 25, 61
単層薄膜 132

【ち】

中性濃度フィルタ 122
中赤外 224
超色消し 68
頂角 41
直視プリズム 119
直視分光器 120
直進性 5
直線偏光 35

直線偏光子 154
直線偏光二色性 39
直角プリズム 43
直交ニコル 154

【て】

低分散 223
テポラライザ 175
 拡散—— 176
 疑似—— 176
 Lyot 型—— 176
電気石 229

【と】

等位相面 8
透過限界波長 124
等価的アッペ数 83
導光路 201
 関節型—— 202
 光ファイバ—— 203
倒立像 17
トッパハット 192
凸面鏡 20
凸レンズ 15, 16, 57
トーリックレンズ 72, 187
トルマリン 229
トロイダルミラー 70
トロイダルレンズ 26, 71, 187, 210

【な】

内部全反射 4

【に】

ニコルプリズム 154
二軸結晶 228
二重ポロプリズム 99
二色性 39, 162
 円—— 39
 円偏光—— 39
 線—— 39, 229
 直線偏光—— 39
二色性偏光子 162

入射瞳 22, 69
入射窓 23
入射面 3

【ね】

ネジ穴方式 206

【の】

ノッチフィルタ 130

【は】

ハイブリッド結像素子 87
倍率
 顕微鏡の—— 151
 望遠鏡の—— 150
 有効—— 151
 横—— 17, 20, 22
蠅の目レンズ 193
薄膜偏光子 164
波束 29
 波長可変レザ 170
 波長選択素子 110
波長板 166, 228, 229
 高次—— 168
 広帯域—— 170
 ダブルプレート—— 168
 フレネルロム—— 171
 ポリマー—— 171
 マルチオーダー—— 168
波長分割多重光通信 114
波長分離カブラ 109
バビネ-ソレイユ位相補償板 173
波面 8
 ——の曲率半径 180
波面収差 25
波連 29
パワメータ 211
反射損 213
反射の法則 2
反射防止膜 132, 213, 227
反転像 17, 43, 44
半透鏡 103

平面回折格子 113
 平面鏡 40
 平面波 8
 ヘラパタイト 162
 偏角 42, 110, 143
 最小—— 111
 偏角プリズム 89
 45°—— 98
 偏向 196, 198
 偏光 32
 円—— 35
 完全—— 33
 楕円—— 35
 直線—— 35
 非—— 33, 175
 部分—— 33
 偏光回転子 167
 偏光角 12
 偏光子 154
 円—— 165
 積層板—— 164
 直線—— 154
 二色性—— 162
 薄膜—— 164
 複屈折—— 154
 ワイヤグリッド—— 161
 偏光素子 228
 偏光楕円率 35
 偏光度 33
 偏光ビームスプリッタ 104, 164

 偏光フィルタ 136
 偏光フィルム 163
 偏光分離型素子 160
 偏光膜 163
 ペンタゴナルプリズム 89
 ペンタダハプリズム 97
 ペンタダハミラー 97
 ペンタプリズム 89
 偏波保持光ファイバ 177

【ほ】
 ポアンカレ球 175

ホイヘンス
 ——の原理 32
 ——の接眼レンズ 68
 望遠鏡 69, 150
 ——の倍率 150
 望遠鏡系 150
 方解石 156, 228
 放物面鏡 63
 蛍石 219, 223
 ポリカーボネート 72, 226
 ポリゴンミラー 198
 ポリマー波長板 171
 ポリメタクリル酸メチル 226
 ホログラフィ 84
 2光束—— 84
 ホログラム 84
 ポロプリズム 99
 二重—— 99

【ま】
 マイカ 229
 マイクロマシン 199
 マイクロレンズ 76
 前側焦点 15
 前側焦点距離 15
 マルチオーダー波長板 168

【み】
 右水晶 228

【む】
 無収差反射鏡 64
 無焦点系 150
 無偏光ビームスプリッタ 105

【め】
 迷光 122, 214
 メニスカスレンズ 57
 眼の分解能 149
 面倒れ 199

【も】
 モノプロモナフタレン 152

【や】
 屋根型鏡 91, 231
 屋根型プリズム 91, 231

【ゆ】
 有限共役光学系 100
 有効倍率 151
 誘電体多層膜 136
 油浸対物 152
 油浸法 152

【よ】
 溶融石英 223
 横の色収差 65
 横倍率 17, 20, 22

【ら】
 ライトガイド 102
 ライトパイプ 194
 ラジアル型 76
 ラムステンの接眼レンズ 68
 乱視 72

【り】
 理想像点 15
 リターダンス 167
 リトロリフレクタ 45
 裏面鏡 40, 213
 硫化亜鉛 224
 リレー光学系 79, 100
 リレーレンズ 100
 臨界角 3

【れ】
 レイリーの分解能 141
 レーザアニーリング 193
 レーザ医療 192
 レーザ加工 192, 202
 レーザ共振器 137
 レーザラインジェネレータ 71
 レール 205

レンズ		ロッドレンズ	194	ワイヤーグリッド偏光子	161
——の位相変換作用	79	ロングパスフィルタ	124	ワイヤーグリッド偏光	
——のベンディング	28	ロンボイドプリズム	90	フィルム	162
【ろ】		【わ】			
ローションプリズム	159	歪曲収差	26, 74		

【A】		【I】		sinc 関数	142
AR コート	132	IR フォスファ	210	S 偏光	8
ATR プリズム	225	【K】		【T】	
AWG	114	KCl	225	TEM ₀₀ モード	179, 191
【B】		KRS-5	225	TE 波	8
BK7 ガラス	222	【L】		TM 波	8
BS	103	LiF	225	【U】	
【C】		Lyot 型デポラライザ	176	UV グレード	225
CaF ₂	223	【M】		【Z】	
CO ₂ レーザ	202, 204	MEMS	199	ZnS	224
CR-39	227	MgF ₂	225, 229	ZnSe	204, 224
【D】		<i>m</i> 次回折光	31	【数字】	
DOE	81, 192	【N】		0 次回折光	31
【F】		NA	24, 152	0 次 1/4 波長板	169
FSR	117	NaCl	224	0 次半波長板	167
FZP	82, 86	Nd:YAG レーザ	203	1/4 波長板	169
f θ レンズ	27, 74, 198, 199	ND フィルタ	122	1/2 波長板	167
【G】		【O】		2 光束ホログラフィ	84
Ge	224	OD	123	2 次スペクトル	68
Glan-Air	157	【P】		3 次収差	25
GRIN レンズ	76	PBS	104	45°直角プリズム	43
GRIN レンズアレー	102	PMMA	72, 170, 226	45°偏角プリズム	98
【H】		P 偏光	8, 13	4 分の 1 波長板	169
He-Ne レーザ	210	【S】		【ギリシャ文字】	
		Si	224	α -BBO	229
				$\lambda/2$ 板	167
				$\lambda/4$ 板	169

— 著 者 紹 介 —

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）
「光学機器の基礎」森北出版（2013）
「光の数理」コロナ社（2021）
「電気系のための光工学」共立出版（2022）
ほか

光学素子のいろは —機能別分類による説明—
A to Z of Optical Elements —classified by function—

© Jun-ichi Sakai 2023

2023年10月5日 初版第1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	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 978-4-339-00987-3 C3055 Printed in Japan

(新井)



©COPY <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。