

—入門者のためのレンズ・ミラー、光学部品解説—

# 基礎からわかる 光学部品

中村荘一・藤江大二郎 編

オプトロニクス社

## まえがき

われわれの身近には、カメラ、顕微鏡のみならず、CD/DVD プレーヤーやコピー機、レーザプリンタや各種ディスプレイなどの光エレクトロ製品に、光関連技術が広く使われており、そのキーデバイスとして各種の光学部品が活躍しています。例えば、かつては夢のレンズと言われた非球面レンズが、今ではデジタルスチルカメラ（デジカメ）や携帯電話用のレンズにごく一般的に使用されています。また、回折光学素子（DOE）やマイクロレンズアレイに代表される微小光学素子の開発も進み、各種機器の小型化、高機能化、そして複合化、システム化を目指して、さらに新しい挑戦が行われています。光時代のキーデバイスともいえる、これら光学部品の基礎的な解説に主眼を置き、2004年4月より24回にわたり月刊オプトロニクスに「光学部品のABC」として連載されました。本書はこれをベースに見直し、さらに充実をはかったものです。

本書は、基礎編と部品編の二部より構成されています。

基礎編では、光学部品を有効に活用するための光学、主に幾何光学に関する基礎理論をわかりやすく解説しています。これに続く部品編では、まず、光学部品に関連する技術として、光学材料と部品加工、光学薄膜について概要を説明しています。その後、さまざまな光学部品について、機能、作り方、応用例などのトピックが展開されています。この中には、レンズ、ミラー、プリズムなどの従来からよく知られた光学部品から、機能素子として近年急速に進歩している、DOEやMEMSなどの新規な光学部品の例についても取り上げられています。いずれも、数式などの使用は最小限にとどめて、図や表を多用し、専門家以外の方にも理解しやすいようにしました。

本書を契機に光学部品に対する理解、関心がさらに高まり、この分野がより一層発展することを切望いたします。

本書の発行にあたり、昭和オプトロニクスの各メンバーの協力や、オプトロニクス編集長の川尻多加志氏の多大なるお力添えに対して深く感謝いたします。

2006年7月

編者を代表して 藤江大二郎

## 【編 者】

(敬称略・50音順)

中村 莊一 中村レンズデザイン研究所 所長  
藤江 大二郎 昭和オプトロニクス株式会社 第二技術部 エキスパート

## 【執筆者】

(敬称略・50音順)

相田 善明 昭和オプトロニクス株式会社 第二技術部 部長  
阿竹 宏 昭和オプトロニクス株式会社 技術部 上級エキスパート  
池田 欣史 昭和オプトロニクス株式会社 技術部  
木村 信二 昭和オプトロニクス株式会社 技術部 エキスパート  
中島 康裕 昭和オプトロニクス株式会社 第一技術部 主任  
中村 莊一 中村レンズデザイン研究所 所長  
藤江 大二郎 昭和オプトロニクス株式会社 第二技術部 エキスパート  
山村 史彦 昭和オプトロニクス株式会社 技術部 マネージャー

---

---

# 目次

---

---

## 【基礎編】

第1章 幾何光学の基礎と近軸理論	3
	(中村莊一)
1. 幾何光学とは	3
2. 理想的な光学系	4
3. 球面における光の屈折の近軸理論	5
3.1 アッペの零不変量	6
3.2 ガウスの式	6
3.3 横倍率	6
3.4 ヘルムホルツの不変量	7
3.5 シャールの式	7
4. 球面における光の反射	8
5. 薄レンズの公式	10
6. ニュートンの結像式	11
7. 各種倍率	12
8. 多数の面からなる共軸光学系の近軸追跡	13
第2章 パワー配置による種々の光学系	17
	(中村莊一)
1. 厚レンズと薄レンズとの関係	17
2. 多数の薄レンズからなる共軸光学系の近軸追跡	18
3. 2組組み合わせの基本パワー配置	19
3.1 凸レンズ, 凸レンズの組み合わせ	20
3.2 凹レンズ, 凹レンズの組み合わせ	20
3.3 凸レンズ, 凹レンズの組み合わせ	21
3.4 凹レンズ, 凸レンズの組み合わせ	21
4. 2組組み合わせパワー配置の特殊な場合	22

4.1	間隔 $e_1 \approx 0$ のとき	22
4.2	間隔 $e_1 = f_1'$ のとき	22
4.3	間隔 $e_1 = f_2'$ のとき	23
4.4	間隔 $\alpha_2 = 0$ になるとき	23
4.5	間隔 $e_1 = f_1' + f_2'$ になるとき	24
4.6	$\alpha_2 = 0$ かつ $e_1 = f_1' + f_2'$ の両方を満足する光学系	24
4.7	2群ズームレンズ	25
<b>第3章 その他のレンズに用いられる物理量</b>		27
(中村荘一)		
1.	包括画角	27
2.	入射瞳と射出瞳	28
3.	開口数 (ニューメリカルアパーチャー), Fナンバー	28
4.	視野絞り	30
5.	焦点合わせの種類	31
5.1	全体繰り出し方式	32
5.2	前玉繰り出し方式	32
5.3	内焦方式	33
5.4	リアフォーカシング方式	33
6.	焦点深度と被写界深度	35
<b>第4章 収差の概念</b>		37
(中村荘一)		
1.	光線追跡と各次数収差の関係	37
2.	収差の概論	38
2.1	球面収差	38
2.2	コマ収差	39
2.3	非点収差	39
2.4	像面湾曲	40
2.5	歪曲収差	41
2.6	色収差	43

## 【部品編】

### 第1部 光学部品の関連技術

第1章 光学材料 .....	47
(藤江大二郎)	
1. はじめに .....	47
2. 光学ガラス .....	47
2.1 光学的性質 .....	48
2.2 熱的性質 .....	50
2.3 機械的性質 .....	51
2.4 化学的性質 .....	52
2.5 内部品質 .....	52
2.6 新しい光学ガラス .....	53
3. 紫外域の光学材料 .....	54
3.1 石英ガラス ( $\text{SiO}_2$ ) .....	54
3.2 フッ化カルシウム ( $\text{CaF}_2$ ) .....	54
3.3 その他の紫外域用光学材料 .....	55
4. 赤外域の光学材料 .....	56
4.1 シリコン (Si), ゲルマニウム (Ge) .....	56
4.2 ジンクセレン ( $\text{ZnSe}$ ) .....	56
4.3 塩化ナトリウム ( $\text{NaCl}$ ) .....	57
4.4 その他の赤外域用光学材料 .....	57
5. プラスチック .....	58
5.1 プラスチック材料の種類 .....	58
5.2 プラスチック材料の特性 .....	58
第2章 光学部品加工 .....	60
(藤江大二郎)	
1. はじめに .....	60
2. 球面レンズ加工 .....	61
2.1 粗加工 (CG加工) .....	61
2.2 スムージング .....	62
2.3 みがき (研磨) .....	63
2.4 心取り .....	65
2.5 コート (コーティング) .....	65

2.6 接合 .....	66
3. プリズム, ミラー加工 .....	67
4. 非球面レンズ加工 .....	67
4.1 精研削非球面 .....	68
4.2 ガラスモールド非球面 .....	68
4.3 複合型非球面 .....	69
4.4 プラスチックモールド非球面 .....	70
5. 高精度金属ミラーの加工 .....	71
<b>第3章 光学薄膜</b> .....	<b>73</b>
	(山村史彦)
1. はじめに .....	73
2. 反射防止膜 .....	73
3. 増反射膜 .....	77
3.1 金属膜 .....	77
3.2 誘電体膜 .....	78
4. 成膜方法 .....	79
4.1 真空蒸着 (RH, EB) .....	79
4.2 イオンプロセス (IAD, IBSD, IPD) .....	80
<b>第2部 光学部品1 (各種レンズ)</b>	
<b>第1章 球面レンズ</b> .....	<b>85</b>
	(藤江大二郎)
1. 球面レンズ .....	85
2. 球面レンズの種類 .....	86
3. レンズ形状による特性の違い .....	87
3.1 主点の位置 .....	87
3.2 ベンディングによる収差の変化 .....	88
4. 色消しダブルレットレンズ .....	89
5. 代表的な球面レンズの使用例 .....	91
5.1 無限遠共役光学系 .....	91
5.2 有限共役光学系 .....	92
5.3 アフォーカル光学系 .....	98
6. 球面レンズの図面 .....	94

7. 市販のカタログレンズ .....	95
<b>第2章 非球面レンズ .....</b>	<b>97</b>
	(阿竹 宏)
1. 非球面レンズ .....	97
2. 非球面レンズの効果 .....	98
2.1 非球面レンズの収差補正 .....	98
2.2 非球面レンズの球面収差補正効果 .....	99
2.3 非球面の場所による収差の変化 .....	100
3. 非球面レンズの実用例 .....	101
3.1 コンデンサレンズ .....	101
3.2 カメラレンズ .....	102
3.3 半導体レーザー用コリメートレンズ .....	103
4. 非球面形状の測定方法 .....	104
<b>第3章 シリンドリカルレンズ, トロイダルレンズ .....</b>	<b>106</b>
	(藤江大二郎)
1. はじめに .....	106
2. シリンドリカルレンズ .....	106
3. シリンドリカルレンズの応用例 .....	108
3.1 シネマスコープ用アナモフィック光学系 .....	108
3.2 半導体レーザーのビーム整形 .....	109
3.3 レーザーラインジェネレーター .....	112
3.4 帯状照明用光学系 .....	113
3.5 非点収差を利用した焦点検出法 .....	114
4. トロイダルレンズ (トーリックレンズ) .....	115
5. トロイダルレンズの応用例 .....	115
5.1 レーザービームプリンター用の光学系 .....	115
5.2 半導体レーザーのビーム整形 .....	117
<b>第4章 分布屈折率レンズ .....</b>	<b>119</b>
	(相田善明)
1. はじめに .....	119
2. 分布屈折率レンズの種類 .....	119
3. アキシャル型分布屈折率レンズ .....	120
4. ラジアル型分布屈折率レンズ .....	123



<b>第5章 回折型レンズ (DOE)</b> .....	128
(池田欣史)	
1. はじめに .....	128
2. 特性 .....	129
2.1 分散特性.....	129
2.2 非球面特性.....	129
2.3 回折効率.....	130
3. 設計方法 .....	131
3.1 位相関数法.....	131
3.2 高屈折率法.....	131
3.3 形状変換.....	132
4. 製作方法 .....	132
4.1 フォトリソグラフィ・エッチングによる方法.....	132
4.2 金型によるモールド成型.....	133
4.3 精密加工機による切削加工.....	133
5. 応用例 .....	134
5.1 光ディスク用2焦点レンズ.....	134
5.2 市販の回折型レンズ.....	135
<b>第6章 フライアイレンズ, ロッドレンズ</b> .....	137
(藤江大二郎)	
1. はじめに .....	137
2. フライアイレンズ .....	138
3. フライアイレンズの応用例 .....	140
3.1 ステッパー用照明光学系.....	140
3.2 液晶プロジェクター用照明光学系.....	141
3.3 レーザーアニール用照明光学系.....	142
4. ロッドレンズ .....	143

## 第3部 光学部品2 (ミラー, プリズム)

第1章 球面ミラー, 非球面ミラー .....	147
(阿竹 宏)	
1. 球面ミラー .....	147
2. 非球面ミラー .....	149
3. 非球面ミラーの効果 .....	151
3.1 放物面鏡 .....	151
3.2 楕円面鏡 .....	153
4. 非球面ミラーの検査 .....	153
第2章 平面ミラー .....	156
(相田善明)	
1. はじめに .....	156
2. 平面ミラーの性質 .....	156
3. 2枚の平面ミラーの応用 .....	158
4. 3枚以上の平面ミラーの応用 .....	160
4.1 コーナーキューブミラー .....	160
4.2 イメージローテーター .....	161
4.3 ポロミラー .....	161
5. 裏面ミラー .....	162
第3章 プリズム (1) .....	164
(藤江大二郎)	
1. はじめに .....	164
2. プリズムの屈折作用 .....	165
2.1 光線の屈折 .....	165
2.2 最小ふれ角 (偏角) .....	166
3. プリズム分光器 .....	167
4. 頂角の小さい (薄い) プリズム, ウェッジプリズム .....	168
4.1 薄いプリズムのふれ角 .....	168
4.2 2個の薄いプリズムの組み合わせ .....	169
5. プリズムの倍率 .....	170
5.1 光線束の倍率 .....	170
5.2 アナモルフィックプリズム .....	171
6. 直視プリズム .....	172

第4章 プリズム (2) .....	174
(藤江大二郎)	
1. 反射部材としてのプリズム .....	174
2. 直角プリズム .....	175
2.1 直角プリズム .....	175
2.2 プリズムの全反射 .....	176
2.3 プリズムの展開図 .....	178
3. ポロプリズム (Porro Prism) .....	178
4. ペンタプリズム (Penta Prism) .....	180
5. 屋根型プリズム, ルーフプリズム、ダハプリズム (Dach Prism) .....	181
5.1 アミチプリズム (Amici Prism) .....	182
5.2 ペンタダハプリズム (Penta Dach Prism) .....	183
5.3 シュミット・ペシヤン (ペチャン) プリズム (Schmidt Pechan Prism) .....	184
6. 梯形プリズム (Dove Prism) .....	185
7. コーナーキューブ (リトロレフレクター) .....	186

## 第4部 光学部品3 (その他の光学部品)

第1章 レーザミラー .....	191
(山村史彦)	
1. はじめに .....	191
2. 光学性能 .....	192
3. レーザ耐力 .....	193
4. 損失 (吸収・散乱) .....	196
5. 最後に .....	198
第2章 ビームスプリッター, PBS .....	199
(中島康裕)	
1. はじめに .....	199
2. パーシャルミラー .....	199
2.1 金属膜 .....	200
2.2 ハイブリッドコーティング .....	201
2.3 誘電体膜 .....	202
3. 偏光ビームスプリッター (PBS) .....	203

3.1	偏光フィルム	226
3.2	複屈折プリズム	227
3.3	多層膜偏光子	230
3.4	ワイヤーグリッド偏光子	230
3.5	その他の偏光子	231
4.	波長板	231
4.1	波長板の機能	231
4.2	位相差フィルム	232
4.3	水晶波長板	233
4.4	フレネルロム波長板	234
4.5	その他の波長板	235
<b>第5章 光変調器, 光偏向器</b>		<b>236</b>
		(相田善明)
1.	はじめに	236
2.	光変調器	236
2.1	電気光学変調器 (EOM : Electro Optic Modulator)	237
2.2	磁気光学変調器 (MOM : Magneto Optic Modulator)	238
2.3	音響光学変調器 (AOM : Acoust Optic Modulator)	239
3.	光偏向器	242
3.1	音響光学偏向器 (AOD)	243
4.	応用例	245
4.1	光アイソレータ	245
4.2	Qスイッチ (AOM)	245
4.3	レーザプリンター	246
4.4	レーザ顕微鏡	247
4.5	自己収束音響光学スキャナー	248
<b>第6章 回折光学素子 (DOE)</b>		<b>249</b>
		(藤江大二郎)
1.	はじめに	249
2.	回折光学素子の機能と特徴	250
3.	回折光学素子の製作法	251
3.1	直接加工による製作	251
3.2	ホログラフィー法	251

# 基礎編

## 幾何光学の基礎と近軸理論

---

### 1 幾何光学とは

光学には光の本質、分散、干渉、回折、偏光、吸収、発光などの現象を扱う分野の物理光学（波動光学、量子光学）があるが波長の極限現象として扱う幾何光学がある。幾何光学とは経験的に得られた実験法則を基にして、物質中における光の進路を調べる物理学の分野である。光の通る道筋を数学的な線と考えると光線という概念が用いられる。いろいろな光学器械に用いられるレンズ設計そのものには必ず幾何光学が利用される。幾何光学の基礎原理は次の4つである。

- ①光は等方等質の媒質中では直進する。
- ②光の進路は可逆的である。
- ③一つの光線は他の光線とは独立に振舞う。
- ④異なる媒質の境界では反射屈折の法則によって方向を変える。

#### フェルマの原理

媒質が連続的に変化している場合の中を光がAからBへ向かって進行するとき光路に沿った線素を $d_s$ 、媒質の屈折率を $n$ とすると $AB = \int n d_s$ 、が極値即ち最小値をとるように進む。即ち

$$\delta\left(\int_A^B nd_s\right) = 0$$

屈折率分布ガラスである GRIN レンズの追跡にはこの式が用いられる。基礎原理の④もこのフェルマの原理から導かれる。以上の原理をベースとして光の伝播とくに光学器械による結像の性質を調べるのが幾何光学の目的としているところであり、レンズ、プリズム、鏡等の光学系の設計に利用される。

### 結像の概念

一点 P から発した光線の集合（光線束という）が光学系によって反射、屈折された後、一点 P' で交わるときこれを実像、光線束が発散するため光線を逆向きに延長した P' で交わるときこれを P の虚像という。基礎原理②により、物点と像点はその役割を交換することができる。物点と像点の関係にある P、P' は互いに共役であると言う。反射、又は屈折により与えられた空間のすべての物点 P が第 2 の空間の点 P' に結像されるとき、P 点の集合を物空間、P' の集合を像空間と呼ぶ。

## 2 理想的な光学系

収差を考えない理想的な結像（ガウスの結像）をする光学系の性質は数学的にはすべての共線写像の射影変換の理論から導かれる。理想的な光学的結像とは次の 3 点を満足するものを言う。

- ①物空間の点と像空間の点とは 1 対 1 に対応する。
- ②物空間の平面と像空間の平面とは 1 対 1 に対応する。
- ③像空間上の平面即ち像平面上に生ずる図形は物空間の平面即ち物平面上の元の図形と相似である。

最近の光学系の中には軸非対称のもの（例えばヘッドマウントディスプレイ）も見受けられるが、ここでは基礎となる軸対称のもの共軸結像について話を進める。さて実際の理想的な結像は光線束の中で光軸の近傍の光線のみに制限するとき得られる。

この光線のことを近軸光線という。

この場合光線と光軸のなす角は非常に小さいと仮定でき、 $\sin\theta \approx \theta$ ,  $\cos\theta \approx 1$  またスネルの法則  $n\sin i = n'\sin i'$  を  $ni \approx n'i'$  と近似したときの結像と考える

とができる。

### 3 球面における光の屈折の近軸理論

図1のように物点P, 半径 $r$ の球面, 球面の曲率中心を $O'$ , 球面の光軸との交点を頂点V, 像点を $P'$ , 光軸からの物点からの光線の傾きを $\theta$ , 球面で屈折して光軸に向かう光線が像点になるときの光軸との角度を $\theta'$ , 球面への光線の入射角を $i$ , 屈折角を $i'$ , 球面への光線が交わる点から球面の中心への直線と光軸との角度を $\phi$ とするとき, 符号の約束を次のようにすると後に出てくる多数の面からなる光学系の近軸追跡にも容易に利用できることからコンピュータでの追跡プログラムにも大いに利用されている。

長さ $s, s', r$ は頂点Vから測り, 光線の進む方向に測った場合を正, 逆方向に測った場合を負とする。角度 $\phi, \theta, \theta'$ は光軸から時計回りに測った場合を正, 逆回りに測った場合を負にする。

即ち図1では

$$s < 0, \quad s' > 0, \quad r > 0, \quad \phi > 0, \quad \theta < 0, \quad \theta' > 0$$

$$ni = n'i', \quad \theta = \frac{h}{s}, \quad \theta' = \frac{h}{s'}, \quad \phi = \frac{h}{r}$$

$$-\theta = i - \phi, \quad \theta' = \phi - i'$$

スネルの近軸式より  $n(\phi - \theta) = n'(\phi - \theta')$  に代入すると

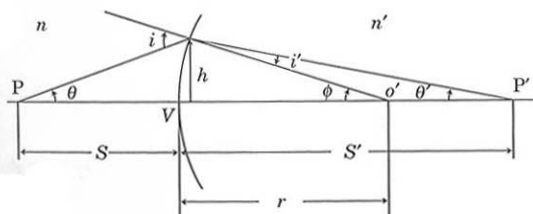


図1



### 3.1 アッベの零不変量

$$\text{アッベの零不変量: } n\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{s}\right) = n'\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{s'}\right) = Q$$

でこれをアッベの零不変量といい収差論に利用される。変形すると

$$-\frac{n}{s} + \frac{n'}{s'} = (n' - n) \frac{1}{r}$$

ここで  $s = -\infty$  としたときの  $s'$  を  $f'$  とし像空間の焦点距離  $f'$  は

$$f' = \frac{n'}{n' - n} \cdot r$$

となり、 $s' = \infty$  としたときの  $s$  を  $f$  とし像空間焦点距離は

$$f = \frac{n}{n - n'} \cdot r$$

となる。

### 3.2 ガウスの式

$$\text{ガウスの式: } -\frac{n}{s} + \frac{n'}{s'} = \frac{n'}{f'} = -\frac{n}{f}$$

となり屈折面のガウスの式とよび近軸追跡式の基本式となる。

### 3.3 横倍率

下図2より  $Q$  から  $C$  に向かう光線は直進して  $Q'$  にたどり着くと考えられ

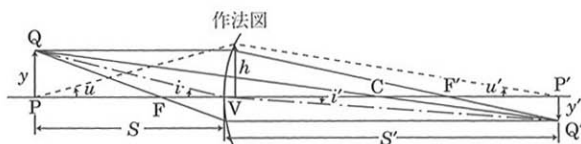


図2

から横倍率を

$$m = \frac{y'}{y}$$

とすると三角形QPCと三角形Q'P'Cの相似の関係と上記の零不変量の後の式より

$$\frac{y'}{y} = \frac{s' - r}{r - s} = \frac{ns'}{n's}$$

となる。

### 3.4 ヘルムホルツの不変量

図2のQから曲率半径 $r$ の面と光軸との交点即ち頂点Vへ向かう光線の入射角を $i$ , 屈折角を $i'$ とすると

$$i = -\frac{y}{s}, \quad i' = -\frac{y'}{s'}$$

これを $ni = n'i'$ に代入して図2の光軸からの高さ $h$ を乗じ

$$\frac{h}{s} = u, \quad \frac{h}{s'} = u'$$

だから $nyu = n'y'u'$ となりこれをヘルムホルツの不変量という。

### 3.5 シャールの式

図3より3角形CTOとCTO'について正弦条件を適用してスネルの式に代入すると

$$\frac{\sin i}{(-s+r)} = \frac{\sin \theta}{p} \rightarrow \frac{\sin i}{\rho} = -\frac{\sin \theta}{p}$$

$$\frac{\sin i'}{(s'-r)} = \frac{\sin \theta}{p'} \rightarrow \frac{\sin i'}{\rho'} = -\frac{\sin \theta}{p'}$$