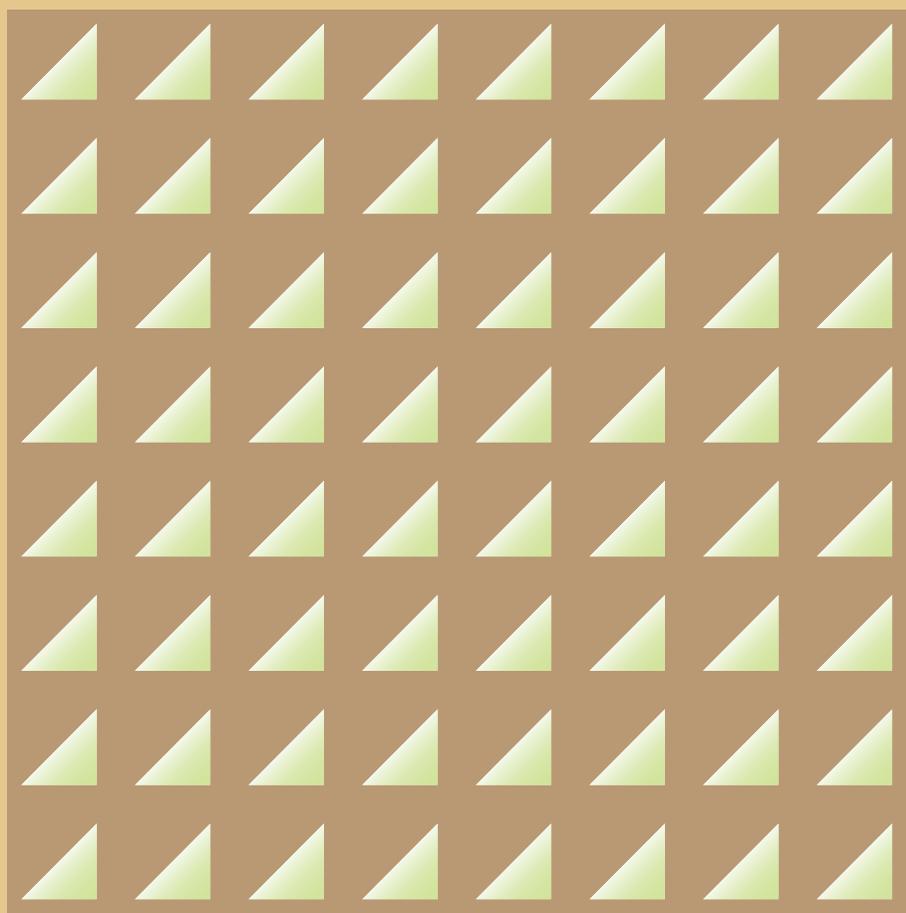


光学設計のための 基礎知識

河合 滋 著



オプトロニクス社

光学設計のための 基礎知識

河合 滋 著

オプトロニクス社

まえがき

近年、デジタルカメラ、光ディスク装置、液晶ディスプレイなどの普及に伴い、光関連の情報・通信機器は、非常に身近なものとなり、それらに必要な光学設計の重要性は、ますます高くなっています。我が国は、ドイツと並ぶ古くからの光学技術立国であり、これから先も、この技術を絶やしてはいけません。しかしながら、光学設計という技術分野は、すでに確立された部分が多く、大学研究者の減少と共に、多くの大学のカリキュラムから姿を消しつつあります。したがって、多くの方が必要性を感じながらも、光学設計技術を学ぶ機会は少なくなっています。

筆者は、2004年に、(株)オプトロニクス社と共同で、光学設計を目的としたeラーニング「基礎から学ぶ光学設計」をスタートさせました。これまでの本における「文字」だけによる情報の提供とは異なり、音声を伴う講義形式による情報の提供には、予想以上の反響がありました。このeラーニングでは、受講者からの質問を受け付け、筆者がそれに答えるというサービスを含めました。非常に多くの方々から質問をいただき、それらの質問に回答する中で、初心者がどこでつまずくのか、どの部分が難しいのかということが、徐々に手に取るようになってきました。

本書は、このeラーニングを土台にしてできたものです。光学設計を志す人を対象に、光学の基礎をわかりやすく解説したものでありますが、多くの方々からの質問を糧にした、本当の意味での「わかりやすさ」を目指した本です。特に、論理の展開や式の変形に非常に多くの頁を割きました。言わば、行間をなくしたということです。多くの方は、本を読んでいて、たった一言の説明、あるいは、ちょっとした式の変形の過程

が記載されていないために、多くの時間を費やして悩んだ経験があると思います。この本には、そのような部分がないと自負しています。数式の変形には十分気を遣いました。光学に現れる数学は決して難しくありませんが、この本では、読者の知識として高校レベルを前提にし、やや難しい部分については、最小限ではありますが、付録において、それらの公式や解説をまとめました。

本書は、光学設計者を対象としていますが、幾何光学、波動光学、レーザ光学などの光学に関する技術分野をほとんどすべてカバーしていますから、これらの分野を勉強したい方々にも最適です。「基礎知識」としていますが、大学の学部レベルで講義される内容が、ほとんど網羅されていると言えます。

最後に、筆者がこのような光学分野に入ることを導いてくださった、大学時代の恩師である、筑波大学名誉教授の三宅和夫博士に感謝いたします。また、eラーニングの教材を一緒に作ってくださった(株)オプトロニクス社の福田祐子氏、本書の執筆でお世話になった川尻多加志編集長および宮崎尚樹氏に感謝いたします。

2006年3月

河合 滋

光学設計のための基礎知識

目次

第1章 光学の基礎	1
1.1 光と電磁波	1
1.2 点光源と光線	5
1.3 波面	6
1.3.1 平面波	6
1.3.2 球面波	7
1.3.3 波面の変換	8
1.4 幾何光学と物理光学	8
1.5 幾何光学の基礎	9
1.5.1 反射の法則	9
1.5.2 屈折の法則	10
1.5.3 全反射	11
1.5.4 レンズによる結像	13
1.6 身近な光学系	16
1.6.1 眼の光学系	16
1.6.2 望遠鏡の光学系	18
1.6.3 顕微鏡の光学系	19
1.6.4 カメラの光学系	20
1.6.5 プロジェクタの光学系	21

第2章 幾何光学	23
2.1 フェルマの原理	24
2.1.1 反射の法則の導出	25
2.1.2 屈折の法則の導出	26
2.2 結像の概念	27
2.2.1 共役な関係	27
2.2.2 ガウス光学	28
2.3 結像のパラメータ	30
2.3.1 焦点距離	30
2.3.2 主要点	32
2.3.3 絞りと瞳	34
2.3.4 明るさ	35
2.3.5 像倍率	36
(1) 横倍率	36
(2) 角倍率	38
(3) 縦倍率	38
(4) 像倍率の間の関係	39
2.4 球面による結像	39
2.4.1 球面による屈折	39
(1) 結像	39
(2) 焦点距離	42
(3) 像倍率	42
2.4.2 球面による反射	43
2.5 合成結像系	43
2.5.1 焦点距離	43
(1) 二つの結像系が離れている場合	44
(2) 二つの結像系が近い場合	45

2.5.2	像倍率	46
2.6	レンズによる結像	47
2.6.1	球面レンズによる屈折	47
(1)	結像	47
(2)	焦点距離	48
(3)	光線の振れ角	50
2.6.2	薄レンズ近似	51
2.6.3	レンズのベンディング	51
2.6.4	レンズの組合せ	52
2.7	焦点深度と物体深度	53
2.7.1	焦点深度	53
2.7.2	物体深度	54
2.8	簡単な光学系	56
2.8.1	テレセントリック系	56
2.8.2	望遠鏡系	57
第3章 幾何光学的な結像と収差論		59
3.1	波長分散と色収差	59
3.1.1	波長分散	59
3.1.2	平均分散とアッベ数	60
3.1.3	分散式	61
3.1.4	色収差	62
3.1.5	色消しレンズ (アクロマートレンズ)	64
(1)	2枚のレンズを密着した場合	64
(2)	2枚のレンズを離した場合	66
3.1.6	アポクロマートレンズ	67
3.2	単色収差	68
3.2.1	色収差と単色収差	68

3.2.2	収差の表し方	69
(1)	波面収差	69
3.2.3	波面収差と光線収差の関係	71
3.2.4	ザイデルの5収差	74
(1)	縦方向の焦点位置誤差 (係数 b_1 の項)	75
(2)	横方向の焦点位置誤差 (係数 b_2 の項)	76
(3)	球面収差 (係数 c_1 の項)	77
(4)	非点収差 (係数 c_2 の項)	79
(5)	像面湾曲 (係数 c_3 の項)	82
(6)	歪曲 (係数 c_4 の項)	83
(7)	コマ (係数 c_5 の項)	84
(8)	まとめ	87
3.2.5	ツェルニケの多項式	88
3.3	収差の補正方法	90
3.3.1	正弦条件	90
3.3.2	ハーシェルの条件	91
3.3.3	ペッツバルの条件	92
3.3.4	正像条件	94
3.3.5	まとめ	95
第4章 波動光学		97
4.1	光波の振幅と強度	97
4.1.1	振幅の複素表示	97
4.1.2	強度	98
4.1.3	平面波	99
4.1.4	球面波	99
4.2	分散	100
4.2.1	材料分散と構造分散	100

4.2.2	群速度と群遅延	101
4.3	干渉	101
4.3.1	二つの波の干渉	101
(1)	定在波	102
(2)	平面波と平面波の干渉	103
(3)	平面波と球面波の干渉	105
(4)	球面波と球面波の干渉	107
4.3.2	干渉の応用	108
(1)	反射防止膜	108
(2)	ホログラフィ	110
4.3.3	干渉計	112
(1)	マイケルソン干渉計 (Michelson Interferometer)	113
(2)	マッハ・ツェンダ干渉計 (Mach-Zehnder Interferometer)	114
(3)	シアリング干渉計 (Searing Interferometer)	115
(4)	フィゾー干渉計 (Fizeau Interferometer)	115
(5)	ファブリ・ペロ干渉計 (Fabry-Perot Interferometer)	116
4.4	回折	116
4.4.1	ホイヘンスの原理	117
4.4.2	回折積分	117
4.4.3	フレネル回折	119
4.4.4	フラウンホーファ回折	120
(1)	フーリエ変換レンズによる回折像	121
(2)	点光源の回折	122
(3)	平面波の回折	123
(4)	矩形開口の回折	123
(5)	円形開口の回折	125
(6)	正弦波振幅格子の回折	125
(7)	2値振幅格子の回折	126
4.5	偏光	127

4.5.1	直線偏光と円偏光	127
4.5.2	p偏光とs偏光	130
4.5.3	偏光の表現方法	131
	(1) コヒーレンシ行列	131
	(2) ジョーンズベクトル	133
	(3) ストークスパラメータとポアンカレ球	135
4.5.4	部分偏光	141
4.5.5	偏光デバイス	141
	(1) ジョーンズ行列による記述	141
	(2) ミュラー行列による記述	142
	(3) 偏光子	142
	(4) 移相子	143
	(5) 旋光子	143
4.5.6	複屈折	144
4.5.7	透過率と反射率	145
	(1) 振幅透過率と振幅反射率	145
	(3) プリュースタ角	150
	(3) 反射光の位相変化	151
	(4) 透過率と反射率	153

第5章 波動光学的な結像とフーリエ光学 …155

5.1	解像限界	155
	5.1.1 レイリの分解能	155
5.2	レンズによる結像	157
	5.2.1 レンズの位相変換作用	157
	5.2.2 レンズを透過する光波の振幅	159
5.3	レンズのフーリエ変換作用	161
	5.3.1 空間フィルタリング	161

5.3.2	畳み込み	162
5.3.3	相関	163
5.3.4	標本化定理	163
5.4	光学伝達関数と結像	164
5.4.1	瞳関数	164
5.4.2	点像分布関数	164
5.4.3	伝達関数とインパルス応答	165
5.4.4	光学伝達関数	166
5.4.5	波動光学的結像	168
	(1) コヒーレント結像	168
	(2) インコヒーレント結像	169
5.4.6	アッペの結像理論	171
5.4.7	ストレール比とマレシャルの評価基準	172
5.5	超解像技術	174
5.5.1	アポダイゼーションフィルタ	174
5.5.2	超解像フィルタ	175
5.5.3	遮光体	175
5.5.4	位相シフトマスク	176
第6章	レーザ光学	179
6.1	マクスウェルの方程式	179
6.2	波動方程式	180
6.2.1	静電磁界の波動方程式	180
6.2.2	平面波の伝搬	181
6.3	ガウシアンビーム	183
6.3.1	ヘルムホルツ方程式	183
6.3.2	ガウシアンビームの伝搬	183

6.3.3	ガウシアンビームの特徴	188
6.3.4	ビーム品質	190
(1)	ビームパラメータ積	190
(2)	M^2 ファクタ	190
6.4	コヒーレンス	190
6.4.1	時間と周波数の関係	191
6.4.2	空間と周波数の関係	191
6.4.3	時間的コヒーレンス	192
6.4.2	空間的コヒーレンス	194
第7章	光学設計の手法	195
7.1	光線行列	195
7.1.1	薄レンズの屈折	196
7.1.2	一様媒質中の移行	197
7.1.3	薄レンズによる光線の伝搬	198
7.1.4	平面の屈折	199
7.1.5	球面の屈折	200
7.1.6	厚いレンズによる屈折	201
7.1.7	球面鏡による反射	202
7.1.8	アイコナル方程式と光線方程式	202
7.1.9	分布屈折率型レンズ	205
7.1.10	まとめ	206
7.2	屈折光学系の設計	207
7.2.1	移行過程	207
(1)	球面から接平面までの移行	208
(2)	接平面から球面までの移行	208
7.2.2	屈折過程	211
7.2.3	近軸光線追跡との関係	213

7.2.4	メリジオナル光線の追跡	214
7.2.5	光線収差から波面収差の導出	215
7.3	回折光学系の設計	216
7.3.1	計算機ホログラム	217
(1)	ローマン型計算機ホログラム	217
7.3.2	回折光学素子	218
(1)	干渉縞型ホログラム	218
(2)	直接位相計算法	220
(3)	一般的な設計手法	221
(4)	回折計算法	221
(5)	高屈折率法	223
7.3.3	色収差	225
(1)	回折光学素子の分散特性	225
(2)	ハイブリッド色消しレンズ	226
(3)	ハイブリッドアポクロマートレンズ	227
7.3.4	応用	227
(1)	多焦点レンズ	227
(2)	多点結像レンズ	228
(3)	平板光学系	228
(4)	発受光一体型素子	229
(5)	ブラッグ回折	229
7.4	レーザ光学系	231
7.4.1	レンズによるビームの伝搬	231
7.4.2	幾何光学との関係	233
7.5	波動光学的な解析手法	235
7.5.1	スポットダイヤグラム	235
7.5.2	光学伝達関数の計算方法	236
7.6	レンズ設計の手順	237
7.6.1	レンズ設計の流れ	237
7.6.2	必要なパラメータ	238

7.6.3	光線追跡の手順	238
-------	---------	-----

第8章 マイクロオプティクスと実装 241

8.1	マイクロレンズ	241
8.1.1	モールドレンズ	241
8.1.2	分布屈折率型レンズ	242
8.1.3	フレネルレンズ	243
8.1.4	回折型レンズ	243
8.2	半導体レーザー	246
8.2.1	発光原理	246
8.2.2	エッジエミッタ	247
8.2.3	発振モード	248
8.2.4	面発光レーザー	249
8.3	外部光変調器	250
8.4	光アイソレータ	251
8.5	光ファイバ	252
8.5.1	構造	252
8.5.2	導波モード	253
8.5.3	パラメータ	254
8.5.4	伝送損失	255
8.6	光アンプ	256
8.7	フォトダイオード	257
8.8	波長多重技術	258
8.8.1	多層膜フィルタ	258
8.8.2	ファイバグレーティング	259
8.8.3	アレイ光導波路	259

8.9 実装技術	260
8.9.1 接続損失	260
8.9.2 パッシブアライメント	262
8.9.3 アクティブアライメント	262
8.9.4 結像光学系	263
8.10 実際の光学系	264
8.10.1 走査光学系	264
8.10.2 光ディスク	265
8.10.3 ステツパ	266

付録 本書を理解するための数学の公式と解説...269

I 三角関数	269
i) 三角関数の相互関係	269
ii) 加法定理	269
iii) 倍角の公式	270
iv) 積和の公式	270
v) 和積の公式	270
vi) 次数下げの公式	270
vii) 正弦定理	270
viii) 余弦定理	271
ix) 方向余弦	271
II ベクトルと行列	271
i) スカラ	271
ii) ベクトル	271
iii) 行列	271
vi) 行列式	272
III 微分と積分	273
i) 微分と不定積分の関係	273

ii) 級数	274
IV ベクトル解析	274
i) ベクトルの積	274
ii) ベクトルと微分	275
iii) ベクトル解析の公式	276
iv) 座標変換	276
V 複素関数の演算	278
i) オイラーの公式	278
ii) 加算	278
iii) 乗算	278
iv) 絶対値	278
VI フーリエ変換	279
i) フーリエ級数	279
ii) フーリエ級数の複素関数表示	280
iii) フーリエ変換	282
iv) フーリエ逆変換	282
v) 主な関数のフーリエ変換	282
vi) 畳み込み	283
vii) 相関	284
参考文献	285
索引	286

第 1 章

光学の基礎

1.1 光と電磁波

光は、波の進む方向と電界の振動の方向が互いに垂直な横波である (図 1.1)。光の出射点から z 離れた位置における電界の振幅 $E(z, t)$ は、時間 t と共に変化し、次式に示すような正弦波で表される。

$$E(z, t) = A \cos\{\phi(z, t)\} = A \cos\left\{2\pi\left(\frac{z}{\lambda} - \frac{t}{T}\right)\right\} = A \cos(kz - \omega t) \quad (1.1)$$

ここで、 A 、 ϕ 、 λ 、 T 、 k 、 ω を、それぞれ振幅 (Amplitude)、位相 (Phase)、波長 (Wavelength)、周期 (Period)、波数 (Wavenumber)、角周波数 (Angular Frequency) と呼ぶ。波長とは、光波の 1 周期の長さを表し、周波数 (光波の振動数, Frequency) ν とは、以下の関係にある。

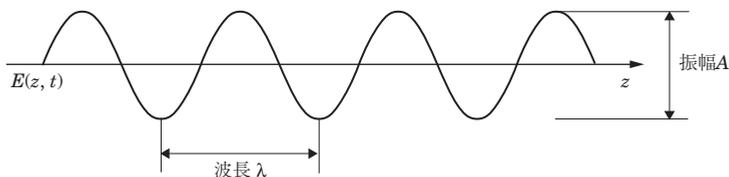


図 1.1 光波の電界

$$\frac{\lambda}{T} = v\lambda = v \quad (1.2)$$

ここで、 v は媒質中の光の速度である。例えば、真空中において、He-Ne レーザ (Laser) の発振波長 632.8 nm は、周波数で表現すると 473.8 THz となる。一般に、電波の周期を周波数で表示するのに対し、光の周期は波長で表現されることが多い。ただし、光においても、波長間隔やスペクトル (Spectrum) の幅を表現する場合には、周波数で表示することがある。例えば、光通信で用いられている高密度波長多重 (DWDM: Dense Wavelength-Division Multiplexing) 技術の波長間隔は、 $1.55 \mu\text{m}$ において 100 GHz または 50 GHz と決められており、これは 0.8 nm または 0.4 nm に相当する。式 (1.2) で定義される光速は、媒質に依存する (詳細は 6.2.2 参照)。真空中の光速 ($2.99792458 \times 10^8 \text{ m/秒}$) を c とすれば次式の関係が成り立つ。

$$\frac{c}{v} = n \quad (1.3)$$

ここで n を媒質の屈折率と呼ぶ。したがって、屈折率の高い媒質内部では、光はゆっくり進むことになる。また、式 (1.3) を式 (1.2) に代入すると、次式が得られる。

$$\begin{aligned} T &= \frac{\lambda}{v} = \frac{\lambda_0}{c} \\ \therefore \lambda &= \frac{v}{c} \lambda_0 = \frac{\lambda_0}{n} \end{aligned} \quad (1.4)$$

ここで、 λ_0 は真空中の波長である。式 (1.4) によれば、屈折率の高い媒質内部では、見かけ上、波長が短くなることがわかる。屈折率が高くなれば、光の進む速度が遅くなるので、実際に波長が変化するわけではない。

自然に存在する光は、互いに位相がランダムで、四方に拡がる性質をもっている。特に、太陽光や電燈の光など、あらゆる色 (波長) の光の

集合体は、白色光 (White Light) と呼ばれている。一方、単一波長で位相の揃った光はコヒーレント光 (Coherent Light) と呼ばれ、単一モード (Single Mode) のレーザから出射される光は、コヒーレンス (Coherence) の高い光である。

光は電磁波の一種であり、**図 1.2** に示すように、ミリ波 (波長が mm オーダーの電波) よりも波長の短い領域 (波長: 1 mm 以下) が、その範囲に含まれる。JIS (Japanese Industrial Standards) では、波長 380 nm から 780 nm の範囲を可視光 (Visible Light) と呼んでおり、可視光の長波長端が赤色であることから、波長 780 nm 以上の光を赤外光 (赤外線, Infrared), また短波長端が紫色であることから、波長 380 nm 以下の光を紫外光 (紫外線, Ultraviolet) と呼ぶ。

赤外領域は広いので、波長の短い赤外線を近赤外線、波長の長い赤外線を遠赤外線と呼ぶ。これらの中間波長の赤外線を中赤外線と呼ぶこともある。近赤外線の定義はさまざまであるが、ガラスのプリズムで分光 (Spectrum) できる 2.5 μm から 3 μm 以下とすることが多い。遠赤外線は、人間の触覚で熱として感知できるため、熱線とも呼ばれている。遠赤外領域は非常に広範囲であるが、特に長波長側では、発光素子や受光素子が少なく、積極的に利用されている波長領域ではなかったが、近年、テラフォトンクス (Tera Photonics) として脚光を浴びている。も

		TV (VHF) 携帯電話							
		長波	中波	短波	超短波	マイクロ波	ミリ波		
波長		10 km	1 km	100 m	10 m	1 m	1 cm	1 mm	
周波数		30 kHz	300 kHz	3 MHz	30 MHz	300 MHz	3 GHz	300 GHz	
		赤 → 紫							
		780 ~ 380 nm							
		遠赤外線	近赤外線	可視光	紫外線	X線・ γ 線			
波長		100 μm	10 μm	1 μm	100 nm	10 nm	1 nm	1 Å	1 pm
周波数		3 THz	30 THz	300 THz	3 PHz	30 PHz			

図 1.2 電磁波の波長と周波数の関係

っとも波長の長い領域では、サブミリ波（波長：0.1 mm～1 mm）と呼ばれる電波が混在している。

可視光の波長と色の関係は、波長の長い方から、赤、橙、黄、緑、青、藍、紫と変化する。これらは虹の七色と呼ばれている。虹は、大気中の水滴の屈折率が光の波長によって異なる“波長分散（Wavelength Dispersion）”と呼ばれる現象（3.1.1 参照）によって生じるもので、分光された可視光が見られる。色の違いとして判別できるのは、およそ 400 nm～650 nm の範囲であり、この範囲を越えると徐々に色が暗くなり、見えなくなる。ただし、人が見える波長帯には個人差がある。波長が短くなるにしたがって散乱（Scattering）の影響を大きく受ける。空が青いことや、大気の厚い層を透過してくる朝日や夕日の光が赤く見えるのは、このためである。

光は波長 200 nm 以下で空気の吸収（Absorption）を受けるために、大気中を伝搬できなくなる。この波長領域の紫外線は、真空紫外線または極紫外線と呼ばれている。波長 300 nm 以上の紫外線を近紫外線、波長 200 nm～300 nm の紫外線を遠紫外線と呼ぶこともある。紫外領域では物質との光化学反応が顕著となる。日焼けは、紫外線の影響で生じる。波長 1 nm よりも短い電磁波は、光としての性質をなくし、X線、 γ 線と呼ばれる。

このように、光は、1 nm～1 mm までの広範囲の波長領域を含んでいるが、それぞれの波の性質に適した応用がある。例えば石英系の光ファイバ通信では、石英の損失が小さく、波長分散の小さい、1.26 μm （Oバンド）から1.675 μm （Uバンド）の赤外光が用いられている。また、プラスチック光ファイバ（POF: Plastic Optical Fiber）の損失の小さい650 nm、安価なレーザを生産できる850 nm 帯の波長の光も多モード光ファイバ（MMF: Multi-Mode Optical Fiber）を用いた近距離通信に利用されている。

1.2 点光源と光線

太陽や電燈のように自ら光を出すものを発光体，発光体によって照らされることにより，その存在がわかるものを非発光体と呼ぶ。それらに関係なく，観測点に向かって光を送り出すものを光源と呼び，特に光源の大きさを無限に小さくしたものを点光源と呼ぶ。点光源は実在しないが，光の伝搬を考える上で，数学的な取り扱いを容易にする。図1.3に示すように，点光源から出る光を不透明な物体に開けた穴を通して取り出す。この穴を極限まで小さくすると（このような穴をピンホール（Pinhole）と呼ぶ），無限に細い光の道筋が得られる。これを光線（Ray）と呼ぶ。幾何光学（Geometric Optics）は，この光線の通る道筋を数学的な線と考える学問のことである。光線の集合を光束（光線束，Pencil of Light）と呼び，広がって伝搬する光は，光束として考えることができる。

一様な媒質中を進む光は直進する。このことは，ピンホールカメラ（Pinhole Camera）から明らかである。図1.4は，ピンホールカメラの原理を示したものである。物体の各点から出た光がピンホール（実際には，回折（Diffraction，詳細は4.4参照）が生じない程度の大きさの穴

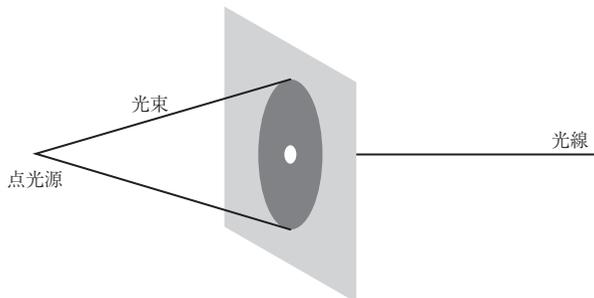


図1.3 光線と光束

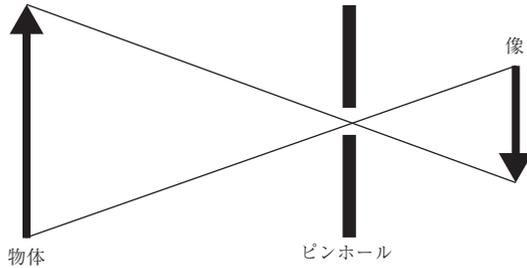


図 1.4 ピンホールカメラの原理

にする必要がある)を通ると、光線となって進む。ピンホールの後ろに感光体をおくと、物体の像が記録される。この像は、ピンホールから光の到達するあらゆる場所に形成され、ピンホールからの距離に比例して大きくなると共に暗くなる。あらゆる場所で結像することをパンフォーカス (Pan Focus) と呼ぶが、このような結像が実現されるのは、光が直進するからである。

1.3 波面

伝搬する光波の等位相面を波面 (Wavefront) と呼ぶ。実際の波面は複雑であり、その伝搬を記述することは容易ではないが、波面が平面または球面の場合には、それらの伝搬を数学的に容易に記述することができる。これらの光波のことを平面波 (Plane Wave) および球面波 (Spherical Wave) と呼ぶ。

1.3.1 平面波

光源が無窮遠にある場合の波面は、図 1.5 に示すように平面になることから平面波と呼ばれている。これは、発散 (Divergence) も収束

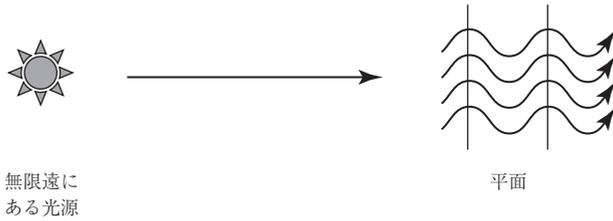


図1.5 平面波の伝搬

(Convergence) もせず、ずっと遠方まで伝搬する波である。遠い恒星から届く光は平面波とみなすことができるが、厳密には自然界に存在しない波である。ガスレーザなど共振器の長い単一モードレーザ (Single-Mode Laser) から出射する光は平面波に近い波である。

1.3.2 球面波

点光源から出射した波面は、図1.6に示すように波面が球面状に拡が

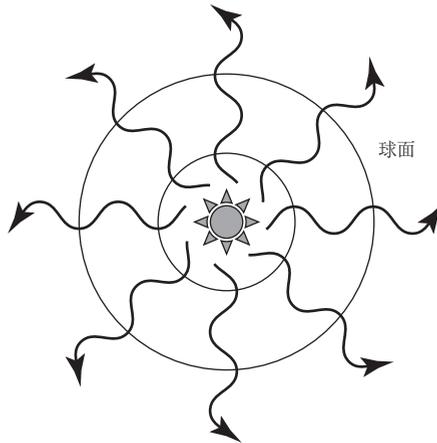


図1.6 球面波の伝搬

るので球面波と呼ばれている。発散する発散球面波と収束する収束球面波がある。球面波も平面波と同様に、厳密には自然界に存在しない波である。数ミクロン以下の円形開口をもつ単一モードの面発光レーザ (VCSEL: Vertical Cavity Surface Emitting Laser) から出射する光は、球面波に近い波である。

1.3.3 波面の変換

光波を制御するには、波面を変換させる機能が必要である。この機能を実現するデバイスがレンズ (Lens) である。レンズには

- ① 球面波を平面波に変換する機能
- ② 平面波を球面波に変換する機能
- ③ 球面波を球面波に変換する機能

などがある。物体は、点光源の集合と考えることができる。①と②の機能をもつ1組2枚のレンズ、あるいは③の機能をもつ1枚のレンズによって、物体の像が形成される。

1.4 幾何光学と物理光学

光の進行の様子、特に光学系の結像について研究する光学の一分野を幾何光学と呼ぶ。これに対して、光の分散、干渉 (Interferometry)、回折、偏光 (Polarization)、発光 (Luminescence)、吸収などの現象を扱う分野を物理光学 (Physical Optics) と呼ぶ。物理光学は、光の波動性と粒子性に着目して、それぞれ波動光学 (Wave Optics) と量子光学 (Quantum Optics) に分類される。この本では、光学設計に必要な、幾何光学と波動光学の基礎について述べる。

1.5 幾何光学の基礎

光は、一様な媒質中を直進するので、その中で進む方向を変えることはできない。したがって、光の進む方向を変えて波面を制御するには、異なる媒質の中に光を入射させなければならない。

1.5.1 反射の法則

光は、異なる媒質に入射する時に反射（Reflection）する。規則的な構造をもつ滑らかな表面による反射を正反射（Direct Reflection）、不規則な構造をもつ表面による反射を乱反射（Irregular Reflection）と呼ぶ。ある媒質から別の媒質へ光を入射させる時、その境界面が滑らかである場合、光は以下の法則にしたがって反射する（図1.7）。

- ① 反射光線は、入射光線と入射点の法線（反射面に対して垂直な線）を含む平面内（入射面）にある。
- ② 入射角（入射光線と法線のなす角）と反射角（反射光線と法線のなす角）の大きさは、常に等しい。

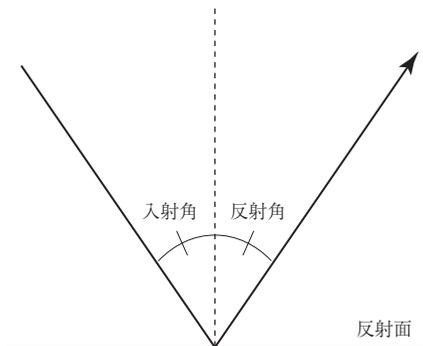


図1.7 反射の法則

これらを反射の法則と呼ぶ。

1.5.2 屈折の法則

ある媒質から別の媒質へ光を入射させる時、その境界面が滑らかである場合、一部の光は反射するが、ほとんどの光は以下の法則にしたがって屈折 (Refraction) する (図 1.8)。

- ① 屈折光線は、入射光線と入射点の法線を含む平面内 (入射面) にある。
- ② 入射角 θ_1 (入射光線と法線のなす角) の正弦と屈折角 θ_2 (屈折光線と法線のなす角) の正弦の比は、媒質の屈折率と光の波長によって決まる。

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1.5)$$

これをスネル (Snell) の法則と呼ぶ。式中の n_1 および n_2 は、それぞれ入射側と屈折側の媒質の屈折率である (図は $n_1 > n_2$ の場合)。

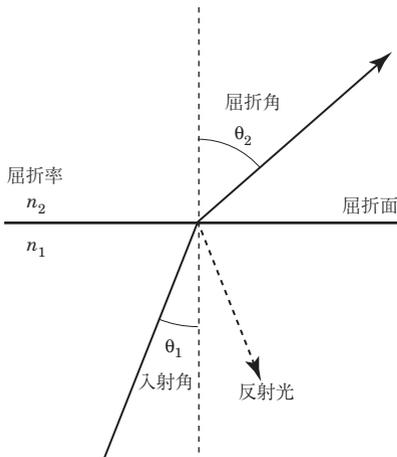


図 1.8 屈折の法則

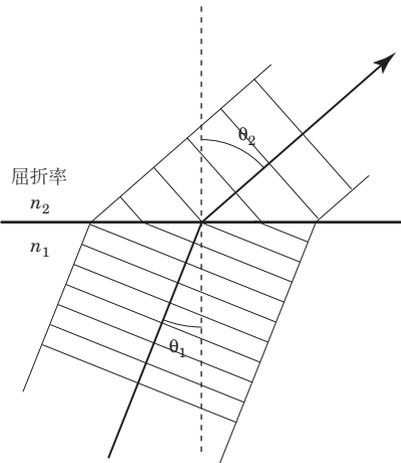


図 1.9 屈折の原理

ここで、屈折率の異なる媒質に光が入射した時に、屈折する理由を考えてみよう。1.1で述べた波数は、光の伝搬距離を位相に変換するパラメータである。これに、光の伝搬する方向の単位ベクトル \mathbf{u} を乗じたものを波数ベクトル (Wave Vector) と呼ぶ。真空中の波長を λ_0 、屈折率 n の媒質中の波長を λ とすれば、次の関係が成り立つ。

$$\mathbf{k} = k\mathbf{u} = \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{u} = \frac{2\pi n}{\lambda_0} \mathbf{u} \quad (1.6)$$

図1.9に示すように、屈折率 n_1 の媒質中を屈折面の法線に対して θ_1 の角度で入射する平面波を考える。この光が境界で屈折し、法線に対して θ_2 の角度で出射するとする。この時、入射波面と屈折波面の波数ベクトルの成分は、それぞれ $(2\pi n_1 \sin \theta_1 / \lambda_0, 2\pi n_1 \cos \theta_1 / \lambda_0)$ および $(2\pi n_2 \sin \theta_2 / \lambda_0, 2\pi n_2 \cos \theta_2 / \lambda_0)$ となる。波面の位相は、屈折の前後で連続していなければならない。すなわち、波面の法線ベクトルの屈折面に平行な成分は、屈折前と屈折後で等しくなければならないことがわかる。したがって、次式、すなわちスネルの法則が成り立つ。

$$\begin{aligned} \frac{2\pi n_1 \sin \theta_1}{\lambda_0} &= \frac{2\pi n_2 \sin \theta_2}{\lambda_0} \\ \therefore n_1 \lambda \sin \theta_1 &= n_2 \lambda \sin \theta_2 \end{aligned} \quad (1.7)$$

1.5.3 全反射

屈折率の高い媒質から低い媒質へ光線が入射する時、屈折角は常に入射角よりも大きくなる。入射角が小さい時には光は境界面で一部反射し、残りの部分が屈折する (図1.10)。入射角がある大きさに達すると屈折角が 90° になり、屈折光線は境界面に沿って進む。この角度を臨界角 (Critical Angle) と呼び、入射角が臨界角を越えると、入射光は境界面においてすべて反射される。この現象を全反射 (Total Reflection) と呼ぶ。水中から見上げた時、ある角度から先は水底が見えるだけで、水面よりも上の景色が見えなくなる。これは、全反射による現象である。

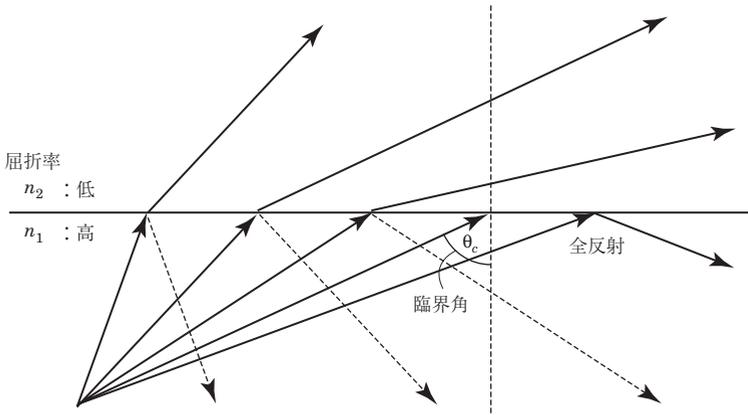


図 1.10 全反射

全反射では、通常の反射と異なり光波のエネルギーがすべて反射される。

光ファイバ内部の光波伝搬は、光を閉じ込めているコア（Core）とその周りのクラッド（Cladding）との間の全反射を利用したもので、極めて低損失の信号伝送が実現されている。ここで、光ファイバの構造について簡単に説明しよう。光ファイバ内部の光信号は、コアとクラッドとの境界の全反射を利用して伝搬するので、図 1.11 に示すように、臨界角 θ_c よりも小さい角度で境界に入射した光は、クラッドへ屈折する。クラッドは、光を伝搬するように作られていないので、この光は直

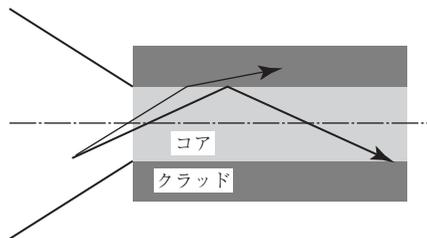


図 1.11 光ファイバ内部の光波の伝搬

に減衰して消失する。したがって、臨界角よりも小さい角度で入射した光は、光ファイバ内部を伝搬できない。光ファイバの入射端および出射端で、この角度を表現するのに、一般に開口数（NA: Numerical Aperture, 2.3.4 参照）が用いられる。これは、光ファイバの重要なパラメータの一つである。

1.5.4 レンズによる結像

中心部分が周辺部分よりも厚いレンズを凸レンズと（Convex Lens）呼ぶ。レンズは大気よりも屈折率の高い材料から作られているので、レンズの中を通る光は、大気を通る光よりも伝搬速度が遅くなる。凸レンズでは、その中心を通る光がもっとも伝搬に時間を要することになるから、定性的に、発散球面波が平面波になったり、収束球面波になったりすることを理解できる。したがって、凸レンズは、光を集光させたり、物体を結像させたりすることができる。この凸レンズの作用を大きく2つに分けることができる。一つは、光源から出射した光を一点に集光させる結像機能（Imaging, 図 1.12）、もう一つは、光源から出射した光が拡がらないように遠くまで伝搬させるコリメート機能（Collimation, 図 1.13）である。言い換えれば、結像機能は、発散球面波を収束球面波に変換する機能であり、コリメート機能は、発散球面波を平面波に変換する機能、あるいは平面波を収束球面波に変換する機能である。

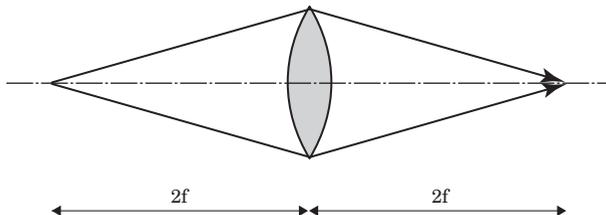


図 1.12 結像系

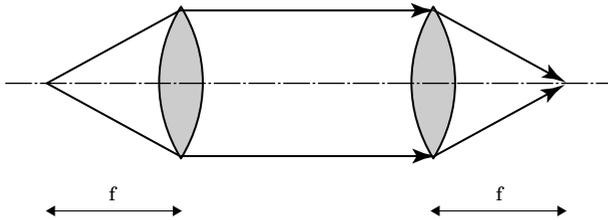


図 1.13 コリメート系

レンズの焦点距離を f とすると、レンズから $2f$ の距離にある光源から出射した光は、レンズを通り、レンズから同じく $2f$ の位置に集光する（結像機能）。また、レンズから f の距離にある光源から出射した光は、レンズを通ると拡がらずに遠くまで伝搬する（コリメート機能）。光源が点光源で、理想的なレンズの場合、透過した光は平行光となり、無限の遠くまで伝搬する。さらに平行光の中に凸レンズを置くと、その焦点距離だけ離れた場所に光は集光する。

一般に、図 1.14 に示すように、点光源からレンズまでの距離を a 、レンズから集光点までの距離を b とすると、レンズの焦点距離を f として次式が成り立つ。

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad (1.8)$$

これはレンズの公式と呼ばれている（詳細は、2.6.1 参照）。点光源の位

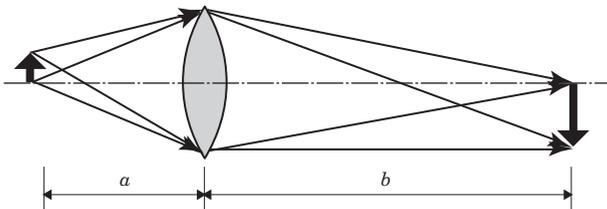


図 1.14 凸レンズによる結像

置に物体を置くと、集光点の位置に像が形成される。この時の像の大きさは b/a で表され、物体をレンズに近づけると、像は大きくなるのがわかる。

中心部分が周辺部分よりも薄いレンズを凹レンズと (Concave Lens) 呼ぶ。凹レンズには、**図 1.15** に示すように、光を発散させる働きがある。この時、発散光線を逆方向に伸ばすと一点に交わり、あたかも光線が像を形成するように振舞う。しかし、実際にその場所へ光線が到達しているわけではないので、像は形成されていない。前述の凸レンズによって形成された像を実像 (Real Image) と呼ぶのに対し、この像を虚像 (Virtual Image) と呼ぶ。虚像は実像と異なり、その部分に像があるわけではなく、レンズを通して像があるかのように見える。**図 1.14** および **図 1.15** より、実像が倒立 (物体に対して 180° 回転する) であるのに対し、虚像は正立 (物体と同じ位置関係) であることがわかる。凸レンズにおいても、**図 1.16** に示すように、物体がレンズの焦点距離よりも近い場所にある場合、実像でなく虚像が形成される。ルーペによっ

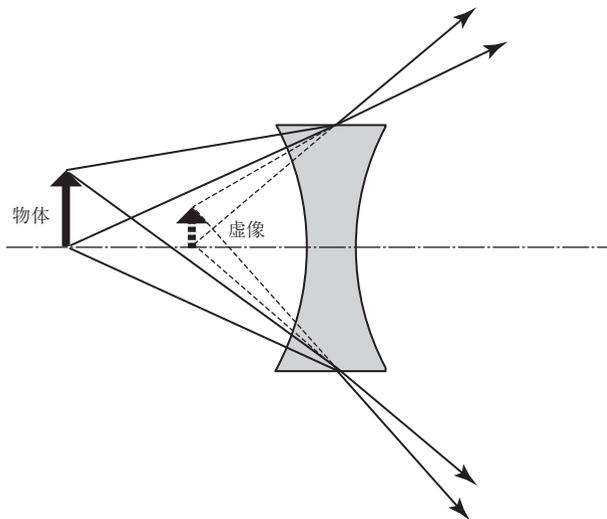


図 1.15 凹レンズによる虚像の形成

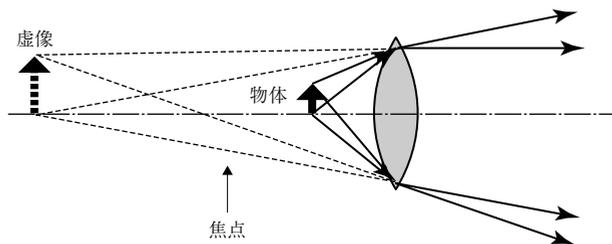


図 1.16 凸レンズによる虚像の形成

て物体が拡大して見えるのは、物体の虚像が見えるからである。

光学系は、実像を形成するものと、虚像を形成するものに、大きく分けることができる。カメラ (Camera) やプロジェクタ (Projector) などのように、像を記録したり投影したりする光学機器は、実像を形成する光学系であり、望遠鏡 (Telescope) や顕微鏡 (Microscope) などのように、レンズを通して像を観測する光学機器は、虚像を形成する光学系である。

1.6 身近な光学系

1.6.1 眼の光学系

我々にとってもっとも身近な光学系は眼 (Eye) であると言える。図 1.17 に眼の模式図を示す。レンズに相当するものが水晶体であり、網膜上に結像された像が視細胞によって光電変換され、大脳の視覚中枢に情報が送られる。水晶体は可変焦点レンズになっており、その厚さを変えることにより、近くの物体から遠くの物体まで、はっきりと焦点を合わせて見ることができる。図 1.18 (a) のように、水晶体が十分に薄く

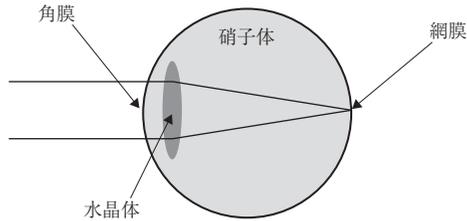
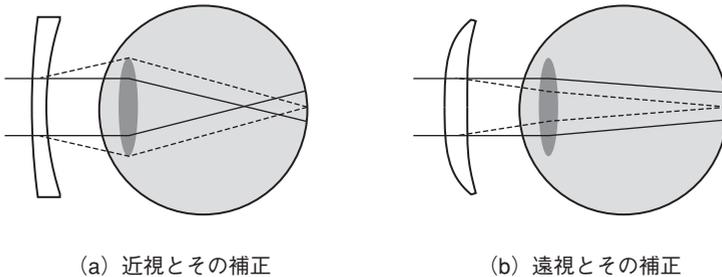


図1.17 眼の光学系



(a) 近視とその補正

(b) 遠視とその補正

図1.18

ならず、遠方の物体に焦点を合わせられない状態を近視と呼び、凹レンズによって水晶体に入射する波面の曲率を大きくすることにより、像を網膜上に結像させる（点線）。一方、**図1.18 (b)**のように、水晶体が十分に厚くならず、近くの物体に焦点を合わせられない状態を遠視と呼び、凸レンズによって水晶体に入射する波面の曲率を小さくすることにより、像を網膜上に結像させる（点線）。また、水晶体の直交する方向の焦点距離が異なる状態を乱視と呼ぶ。このような場合には、直交する方向の焦点距離が異なるトーリックレンズ（**Toric Lens**）を用いて入射波面を修正する。このように、レンズによって視力を補正する方法は、すでに13世紀の頃から知られていた。

1.6.2 望遠鏡の光学系

望遠鏡は、図 1.19 に示すように、遠方にある物体の像を拡大して見る光学系である。対物レンズと接眼レンズから構成され、まず、対物レンズによって遠方の物体を縮小した実像ができる。次に、接眼レンズによって、その実像の虚像を作り、それを肉眼で観測する。現在では、このような構造の望遠鏡が一般に使われており、発明者に因んでケプラー (Kepler) 式と呼ばれている。ケプラー式では一般に、対物レンズは鏡筒に固定されているが、接眼レンズは交換できる構造になっており、焦点距離の異なる接眼レンズにより像倍率 (物体-望遠鏡の場合実像の大きさ-に対する像の大きさ) を変えることができる。像倍率 γ は、対物レンズの焦点距離 f_o と接眼レンズの焦点距離 f_e の比として表される (2.3.5 参照)。

$$\gamma = \frac{f_o}{f_e} \quad (1.9)$$

したがって、接眼レンズの焦点距離を短くすることにより、像倍率を高くすることができる。ただし、像の明るさは、実像を作る対物レンズの

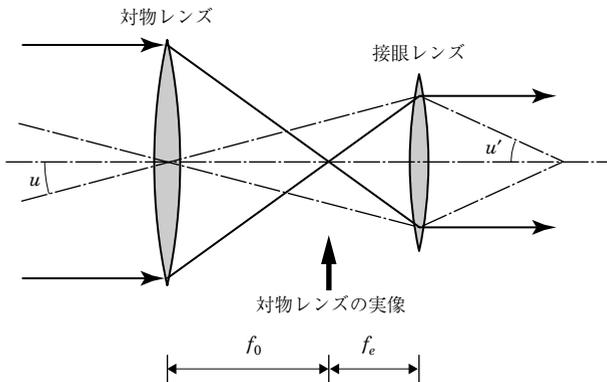


図 1.19 望遠鏡 (ケプラー式) の光学系

大きさで決まるため (2.3.4 参照), 観測する虚像の明るさは, 像倍率が高くなると共に暗くなる。これより, 望遠鏡の性能は, 像倍率よりも対物レンズの明るさであると言える。

望遠鏡の発明者として, ガリレオ・ガリレイ (Galileo Galilei) が有名であるが, 彼が作った望遠鏡は, 図 1.19 とは異なった構造をもっていた。図 1.20 に示すように, 対物レンズで実像は作らず, 対物レンズと凹レンズでできた接眼レンズによって, 直接, 物体の虚像を作った。このような構成にすると, 接眼レンズによって倍率を変えることはできないが, 光学系をコンパクトにすることができる。今でも, オペラグラスなどの簡易望遠鏡に, この光学系が使われており, ガリレイ式望遠鏡と呼ばれている。

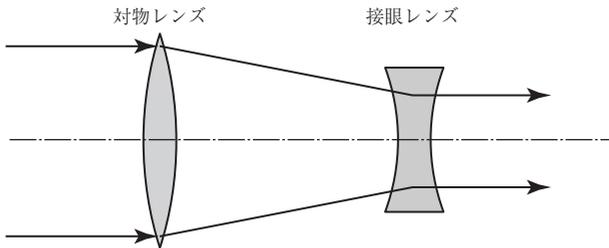


図 1.20 ガリレイ式望遠鏡の光学系

1.6.3 顕微鏡の光学系

顕微鏡にも対物レンズと接眼レンズがあり, 望遠鏡と同じような光学系になっているが, 対物レンズの役割は大きく異なる。顕微鏡では, 図 1.21 に示すように, 対物レンズによって微小な物体の拡大された実像が形成され, 接眼レンズによって, その実像の虚像を作る。顕微鏡の像倍率 M は, 対物レンズの像倍率 M_o と接眼レンズの像倍率 M_e の積で表

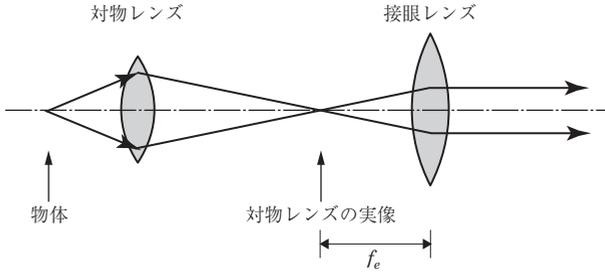


図 1.21 顕微鏡の光学系

される。

$$M = M_o \times M_e \quad (1.10)$$

顕微鏡では、一般に、対物レンズも接眼レンズも交換できるようになっており、これらの組合せにより、さまざまな像倍率が実現される。

一般に、人間が自然にしている時、眼から 250 mm 程度離れた位置にある物体が見やすいとされており、この距離を明視距離 (Distance of Distinct Vision) と呼んでいる。顕微鏡においては、この位置に虚像ができるように設計されているので、接眼レンズの像倍率は、この距離を焦点距離で割った値となっている。

$$M_e = \frac{250}{f_e} \quad (1.11)$$

1.6.4 カメラの光学系

カメラレンズは、図 1.22 に示すように、フィルムや受光素子上に実像を作る光学系である。カメラから対象とする物体までの距離はさまざまであり、また、広範囲に広がる物体を良好に結像する必要があるので、複数枚のレンズから構成される。

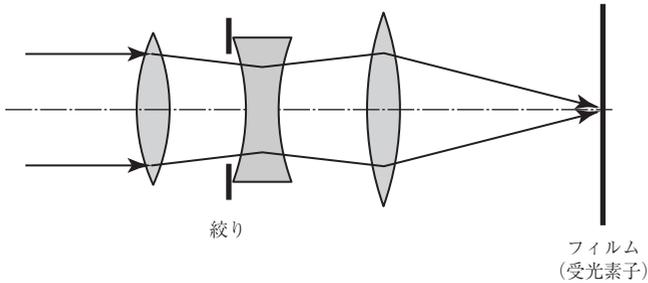


図1.22 カメラの光学系

最近では、コンパクトカメラだけでなく、一眼レフカメラもズームレンズが主流であり、広角から望遠まで、さまざまな焦点距離のレンズが揃っている。ズームレンズでは、内部の複数のレンズ位置を変えることによって焦点距離を変化させる。その範囲は、2～3倍のものから、広いものでは10倍程度のものである。カメラのズームレンズは、もっとも設計の難しい光学系の一つであると言える。

1.6.5 プロジェクタの光学系

プロジェクタは、図1.23に示すように、液晶やMEMS（Micro Electro-Mechanical System）などの空間光変調器（SLM：Spatial

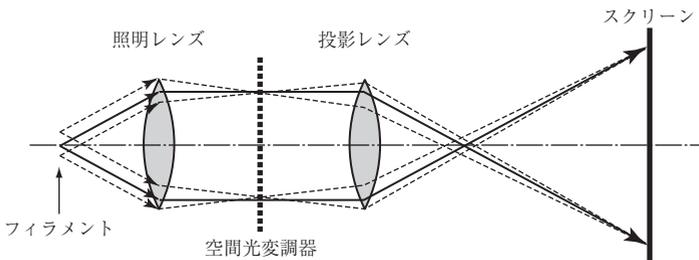


図1.23 プロジェクタの光学系

Light Modulator) によって表示されたパターンを照明し、その実像をスクリーン上に結像する光学機器である。高輝度のフィラメントから出射した光を照明レンズによって空間光変調器に照射し、投影レンズによって、この空間光変調器のパターンをスクリーン上に結像させる。照明レンズでは、一様な光量で空間光変調器全体を照射する機能が必要であり、投影レンズでは、空間光変調器のパターンを高解像度で拡大結像する機能が必要である。

空間光変調器では、有効画素の周囲に光を透過（反射）しない部分があり、この部分で光を損失する。この問題を改善するために、**図 1.24** に示すように、空間光変調器の直前にマイクロレンズを置き、損失する光を有効に利用する光学系も使われている。

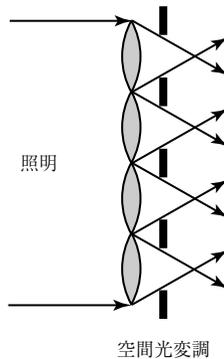


図 1.24 マイクロレンズによる光の有効利用