

# 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づくのか、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わかってきました。

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」としてはありますが、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

<b>第1章 光学の基礎</b> .....	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

<b>第2章 幾何光学</b> .....	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	ハーシエルの条件	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) ブリュースタ角	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 .....

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
<b>参考文献</b> .....	<b>285</b>
<b>索引</b> .....	<b>286</b>

# 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、 $A$ 、 $\phi$ 、 $\lambda$ 、 $T$ 、 $k$ 、 $\omega$  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)  $\nu$  とは、以下の関係にある。

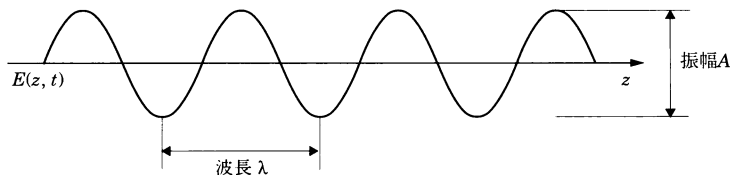


図 1.1 光波の電界



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

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) で定義される光速度は、媒質に依存する (詳細は 6.2.2 参照)。真空中の光速度 ( $2.99792458 \times 10^8 \text{ m/秒}$ ) 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、 $\lambda_0$  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) のレーザから射出される光は、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  $2.5 \mu\text{m}$  から  $3 \mu\text{m}$  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

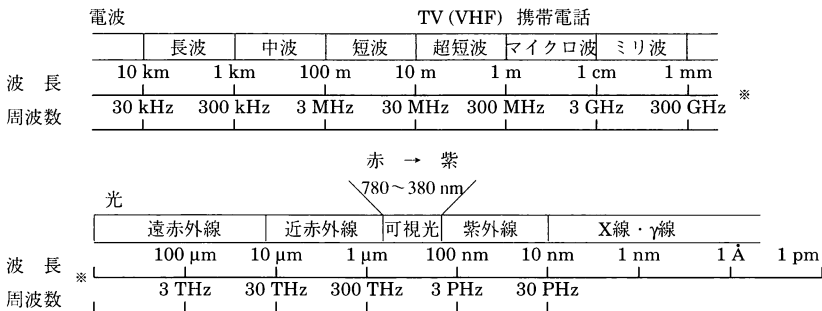


図 1.2 電磁波の波長と周波数の関係

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、 $\gamma$ 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  $\mu\text{m}$ （Oバンド）から1.675  $\mu\text{m}$ （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

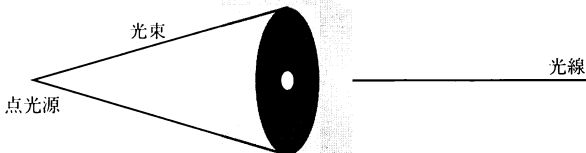


図1.3 光線と光束