提供：
Optical Solutions
株式会社オプティカルソリューションズ
〒101-0032
東京都千代田区岩本町 2-15-8（MAS 三田ビル 3 階）
TEL：03-5833-1332　FAX：03-3865-3318
http://www.osc-japan.com/
e-mail:info@osc-japan.com

レンズを使う　1　＜理想的な像点＞

株式会社タイコ
牛山善太

今回からしばらく、照明系を形成するときに光学的には最も重要な要素と成るレンズ、或いはミラーの光学的性質、使い方について、“分かり易いシリーズ”としてできるだけ簡潔に説明させていただきたい。今回はその初回として、レンズの、そもそもの結像性の訳、その性質を定量的に表現するために必要な、理想像点についての解説をさせていただく。

１．レンズとは？

レンズには、光を集める、あるいは広げる力がある。集めるものを凸レンズ或いは正レンズ、広げるものを凹レンズ或いは負レンズと呼ぶ。

これらのレンズは単独で使われたり、何枚も組み合わされたりして使われるが、ここでは今しばらく単独で存在する正レンズについて考えよう。

結局はレンズとは屈折率が空気とは異なる透明な材質の表裏面を曲面に加工したものであり、一般的には回転対称性がある（レンズの回転対称軸を光軸と呼ぶ）。屈折率が低い側に対して凸の面が光を集める力があり（正の面）、屈折率が低い側に対して凹の面は光を広げる（負の面）(図１)。

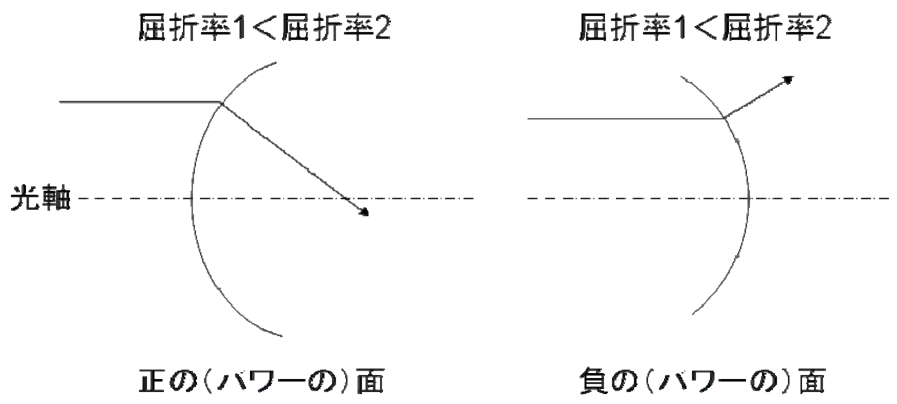

図1 正、負の境界面

曲面は多くの場合単なる球面であるが、場合によっては、球面から少しはずれた形状をとることもある（非球面)。

屈折率とはレンズの材質（硝材とも言う）の性質を現す重要な数字であり、読んで字の如く、光の曲がりやすさを表す。また別の表現をすれば、光の、その媒質における速度を表現する数字でもある。屈折率 1.5 の媒質においては、同じ厚さの真空層（屈折率 1.0）を光が通過する場合に較べて 1.5 倍時間がかかる。

２．なぜ光を集められるのか？

光の進む方向を示す多くの線の集まりと考える。この線を光線と呼ぶ。光線の出発点Ａと通過点Ｂが決まっているとき、フェルマーの原理に拠れば(図２)、

光線は、最短の時間で達する経路、一番早く到着する経路を通る。レンズで像が結んでいるような特別な場合を除き、その経路（光路と言う）は屈折率境界の形状と 2 点Ａ，Ｂの位置が決まれば、一つしかない。（言うまでも無く全く均質な屈折率の媒質中を進む光は最速な直線の経路をとる。）つまり境界面への入射点 P はただ一つに決まる。

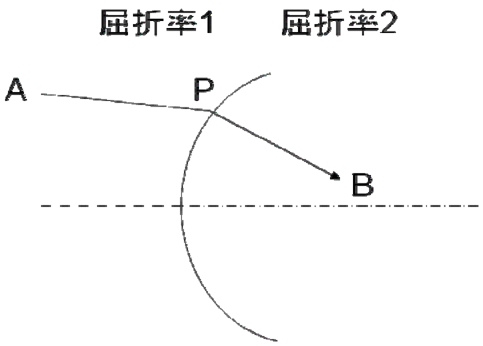

図２ フェルマーの原理

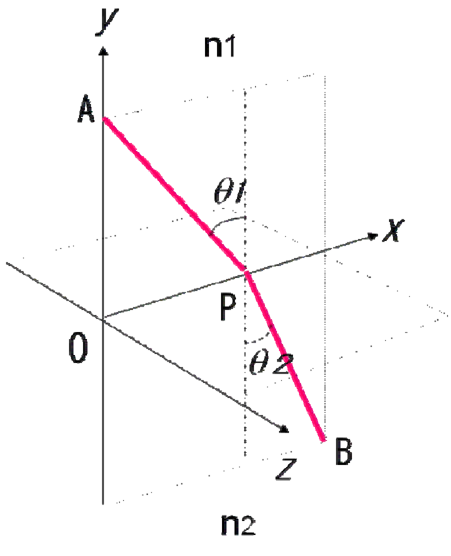

図３　スネルの法則

換言すれば、出発点とそこから光線が進む方向が分かれば、境界面を経て、どの方向に進むかは一つに決まってしまう。この理屈により、光線は運命的に境界面で曲がることになる。これを屈折と言う。この屈折という現象は皆さんよくご存知のスネルの屈折則として定式化されている(図３)。

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 \qquad (1)$$

境界面に対して垂直な方線に対して上記夫々の角度θを光線から計る。入射前がθ₁であり屈折後がθ₂である。n_1、n_2は境界面前後の屈折率である。例えば空気であればだいたい 1、光学ガラスであれば 1.4 から 2.0 程度である。

レンズのように境界面が曲面の場合には、上記境界面を入射点 P に接する平面として考えればよい。特に球面の場合には簡単で、図４にあるように、球の曲率中心 O と P を結んだ直線は自然と P における接平面と直交しているので、これを（1）式における法線とすればよい。

また、例えば、空気とレンズ面との境界面における屈折を考える場合には、n_1は 1 である。n_2は小さくても 1.5 程度であるので、（1）式を成立させるためには

$$\sin\theta_1 \ \rangle\ \sin\theta_2$$

つまり

$$\theta_1 \ \rangle\ \theta_2$$

である必要がある。

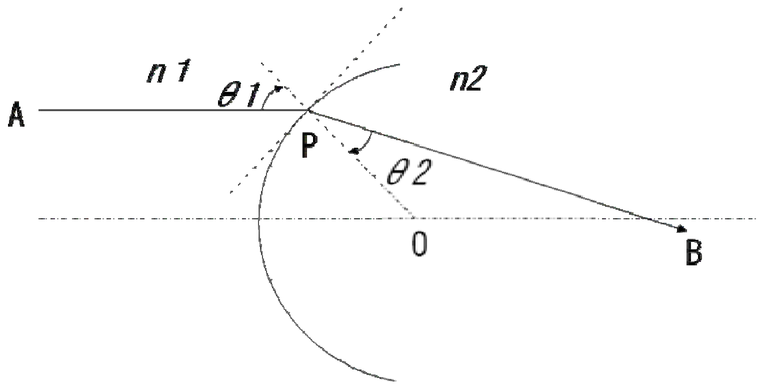

図４　球面におけるスネルの屈折則

従って図４にある様に、上で触れた、正の面に光軸に平行な光線が入射することを想定すると、屈折後の光線は入射光線と較べてより、光軸方向に向くと言うことが分かる。これは光が集中していく傾向である。これをコンピュータでスネルの屈折則を利用してきっちりと計算したのが図５である（光軸に平行な光線群では無く、物点 A から放射している光線を描いてあるが)。明らかに光の集中の傾向が現れている。

この様な現象を、光の進み方をコントロールすることに利用しようと試み、レンズと言う光学素子が考えられた訳である。

３．収差

図５をご覧いただければ一目瞭然であるが、光の集中の傾向は確かに現れていて、かなりエネルギーの集中の高そうな点も存在はしていても、どこに集まっているか？と考えればかなり混沌とした状態になっている。それぞれの光線は全て光軸方向に曲がってはいるが、その方向はかなりバラバラである。本来はどこかの一つの場所に光が集まることが効率からすると理想である。また本来一点から出た光が再びフィルム上で一点に集光しようとする程度は写真などの画像の性質を考える上では大変重要に成る。この光線が一点に収束することからのずれを収差と呼ぶ。結局、この収差を低減することがレンズ設計という仕事の非常に大きな部分を占めている。

従って、こうした作業においては（或いは場合によってはレンズを使用するに際しても）、この収差というものを定量化しなければならない。具体的には基準座標、基準位置を設けて光線通過位置の、そこからのずれを知ることが必要になる。その基準位置となるものが理想像点、というものである。

４．　理想的な像点

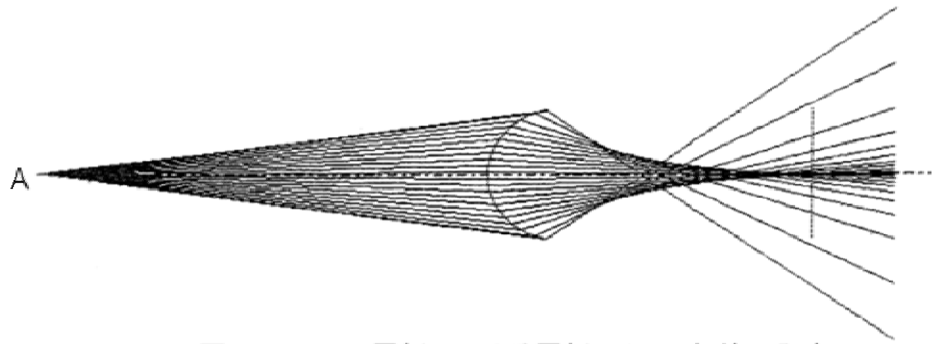

図５　一つの屈折面による屈折、そして収差の発生

図５を良く見ていただくと、光軸のそばを通過する光線は、境界面で僅かに屈折した後、光軸上の殆ど同じあたりを横切っていることが、なんとなく分かる。光軸のそばにどんどん近くなるように光線を発射させれば、ある位置に、この光軸と光線のクロス点は収束していく。これが理想的な像点である。軸に近いところ（近軸領域）の光線で定義されるので近軸像点と称される。これが収差を計るための基準と成る。

実はこの近軸像点は(1)式を

$$n_1\theta_1 = n_2\theta_2 \qquad (2)$$

として、光線の屈折を計算することによって簡単に定まる。なぜ、このような簡略化が可能かといえば、sin は

$$\sin\theta = \theta - \frac{\theta^3}{3!} + \frac{\theta^5}{5!} - \cdots \qquad (3)$$

と続く多項式に展開できる。右辺の無限の項まで考えてはじめて右辺と左辺が一致するわけであるが、θが極小さい場合には右辺第一項で事足りる。つまり

$$\sin\theta \approx \theta \qquad (4)$$

である。従って上記の近軸領域の場合には、(2)式が成立する。

さてこの(2)式で光線の屈折を考えるとどうなるであろうか？

光軸の極近くのみを考えるのであるから、本来は球面であった境界面が、殆ど平面と看做せることになる。これを考慮して、また、本当に光軸の極近傍のみの光線を描くと、非常に長細い図になり見にくいので、光軸と垂直の方向に、図を引き延ばして (2)式の屈折計算結果を図示すると図６(下側)の如くになる。

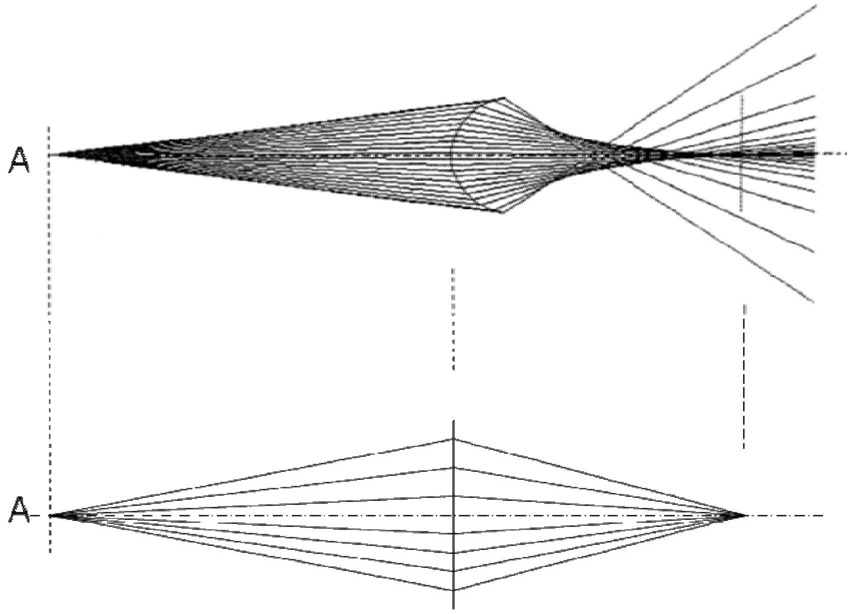

図6 近軸領域における結像(下側)

(1)式のスネルの屈折則で計算した混沌は無く、すべての光線は一点、近軸像点に集まっている。

５．参考図書

1) 小倉敏布：写真レンズの基礎と発展 (朝日ソノラマ、東京、1995)

2) 高野栄一：レンズデザインガイド (写真工業出版社、東京、1993)

3) 松居吉哉：結像光学入門 (JOEM、東京、1988)