

光の綴れ織～思い違いシリーズ(1)

光学の世界にはかなり多くの誤解が存在している。この「綴れ織～思い違いシリーズ」ではそれらのいくつかについて取り上げ、説明していこうと思う。

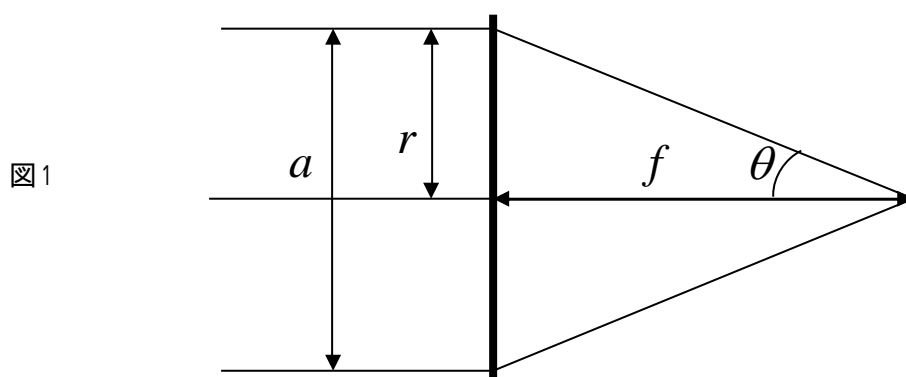
とりあえず今回は非常に基本的なこと、F ナンバーと NA の関係から始めよう。

F ナンバーと NA は、どちらもレンズの明るさを示す尺度である。両者はまったく同じ意味を持ち、その換算式は驚くほど簡単である。すなわち、

$$F = \frac{1}{2NA} \quad (1)$$

である。この式について深く頷いている人はこの先を読む必要はないが、この変換式に \arcsin とか \arctan とかが登場すると誤解されている場合がある。その背景はこうである。

まず、F ナンバーは焦点距離 f を入射光束直径 a で割ったものである。図示すると図1のようになる。



ここで定義から

$$F = \frac{f}{a} \quad (2)$$

であり、また図1から

$$\tan \theta = \frac{r}{f} = \frac{a}{2f} \quad (3)$$

と考えられるので、

$$F = \frac{1}{2 \tan \theta} \quad (4)$$

となる。次に NA については、空気中では定義から

$$NA = \sin \theta \quad (5)$$

である。明らかに(4)、(5)式からは到底(1)を導くことはできず、arcsin とか arctan が登場することになる。どこがおかしいのだろうか。

最大の間違いは図1である。

図1では、レンズを1枚の平面として描いているが、通常のレンズではこのように描いてはいけないのである。良好な結像においては、結像に関わるすべての光線が物体から像まで同じ光路長を有することが必要である。図1の平面レンズでは明らかにレンズの周辺を通過する光線の方が、光路長が長い。つまり幾何光学的には結像しているが、波動光学的には甚だ破綻した状態になっている。

実際のレンズでは、有限な領域で波動光学的にも結像できなければならず、これを実現するには正弦条件を満足する必要がある。図2は正弦条件を満足するレンズの図である。ここではレンズは平面ではなく点線で囲まれたブラックボックスとして表現される。図中の点線円弧は光の出射波面を表し、レンズを出た光は一点に収束する球面波を形成している。レンズの入射面から出射波面までの距離は、図からも明らかに光軸上と周辺で異なっているが、距離に屈折率をかけたものである光路長では同じになる(ように設計されている)。たとえば凸レンズは中心が厚く周辺が薄い。よって光軸上を進む光は距離の割に光路長が大きく、周辺を進む光はその逆となる。

図2

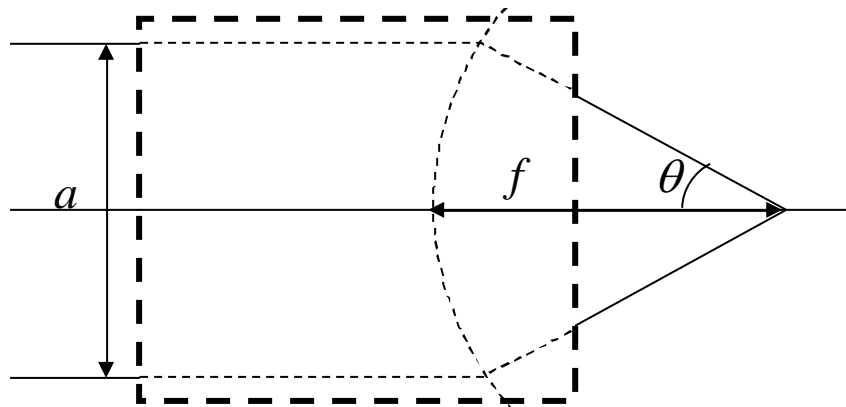


図2をみれば、

$$F = \frac{a}{f} = \frac{1}{2\sin \theta}$$

であることがわかる(正弦条件そのものである)から、(1)式は容易に導ける。

なお、実在する光学系で、図1のように描写できるものが例外的に存在する。それがフレネルゾーンプレートなどの、所謂グレーティングレンズである。これらのレンズは正弦条件を満たしていないので、ほぼ光軸上の一点においてしか良好に結像できない。このようなレンズに対して一般的な結像を論じるのは、例外的な構成においてしか意味を持たないのでここではパスする。