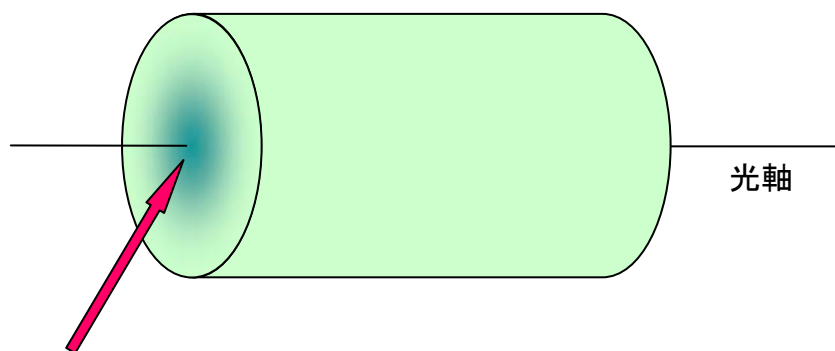


光の綴れ織～思い違いシリーズ(2)

光線は曲がるのか、曲がらないのか？

レンズ表面での光の屈折を光線の図で見ていると、どうしても「屈折率によって光線が曲げられる」と思いがちである。つまり屈折率そのものが光線に作用するような印象を抱いてしまう。すると、次のような疑問が湧いてくることになる。

図1は、分布屈折率レンズを示し、断面内の屈折率分布は光軸を中心とした軸対称になっている。一方光軸を含んだ断面では屈折率はレンズの厚さ方向に一定、すなわち完全な金太郎飴構造である。



断面内の屈折率分布は光軸対称。

光軸方向には金太郎飴。

図1

ここに左からレンズの光軸に平行に、1本の光線が入射する。光線を感じる屈折率は入射した位置に依存するが、入射面に対して垂直に入射するので光線は曲がらない。入射後はどうだろうか。光線に沿ったこのレンズの屈折率は、もともと金太郎飴構造だからどこまでいっても同じ値である。では、この光線はどこまでも曲がらないのではないか？（図2参照）

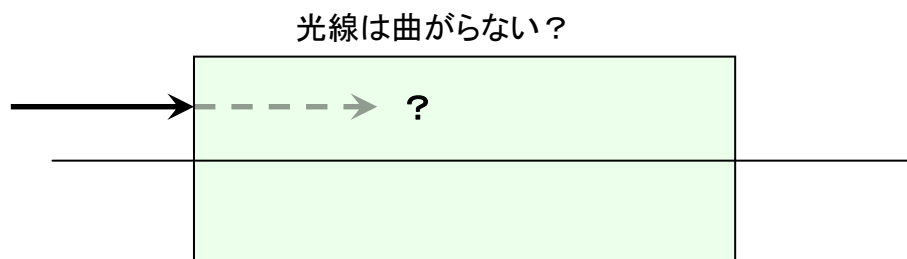


図2

この誤解の源は、光線が曲がるのは屈折率ではなく屈折率の勾配によるのだということを認識していない点にある。ちなみに任意の屈折率分布中での光線の挙動を表した光線方程式は次のような形をしている（この方程式の導出については、たとえば Born&Wolf「光学の原理」3.1～3.2 節参照）。

$$\frac{d}{ds} \left(n \frac{d\mathbf{r}}{ds} \right) = \text{grad } n$$

上式で $\mathbf{r}$ は光線上の位置ベクトル、 s は光線に沿った微小長さ、 n は屈折率である。式からわかるように、これは重力場中の質点の運動方程式に良く似ている。ちなみにこちらの方程式は、 m を質量、 $\mathbf{r}$ を質点の位置ベクトル、 U をポテンシャルエネルギーとすると

$$m \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = -\text{grad } U$$

である。重力場中の質点は、ポテンシャルエネルギーの勾配の方向にエネルギーが低くなる方へ向かって（右辺にマイナスがついているので）動き続けるが、光線は屈折率の勾配の方向に屈折率が高くなる方へ向かって曲がる。つまり屈折率はポテンシャルであり、屈折率の勾配が光線を曲げる力になっている。図1の分布屈折率レンズは、面内でいたるところ屈折率の勾配があるので、入射した光線が曲がらないということはありません。図1の構造では勾配は光軸に向かってプラスになるから、光線も当然光軸に向かって曲げられる（図3）。

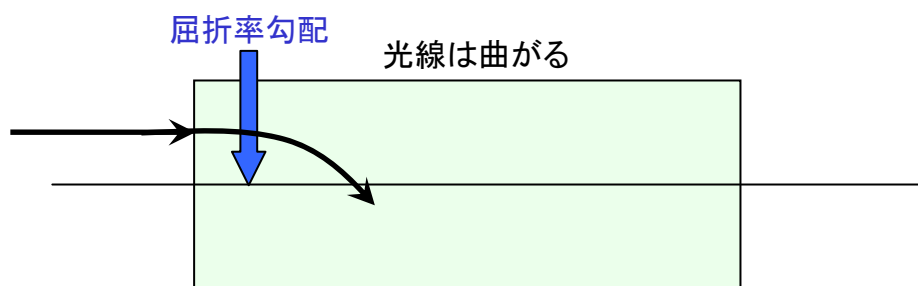


図3

ついでにもう一点付け加えると、「光線」という概念が誤解の源であるとも解釈できる。光線というのは甚だご都合主義的な概念であり、不確定性原理を完全に無視しているため現実には実体として存在することはない。実際の光はかならずある程度の幅に広がった波面を持っているので必然的に屈折率勾配を感じ、波面はそれに応じて変形する（傾く）。よって波面の法線としての光線もこれに連動して曲がるのが理解できる。このように考えれば光線方程式を知らなくてもわかるのであるが、いきなり光線という概念だけで考えようとすると図2に示すような誤解が生じるわけである。