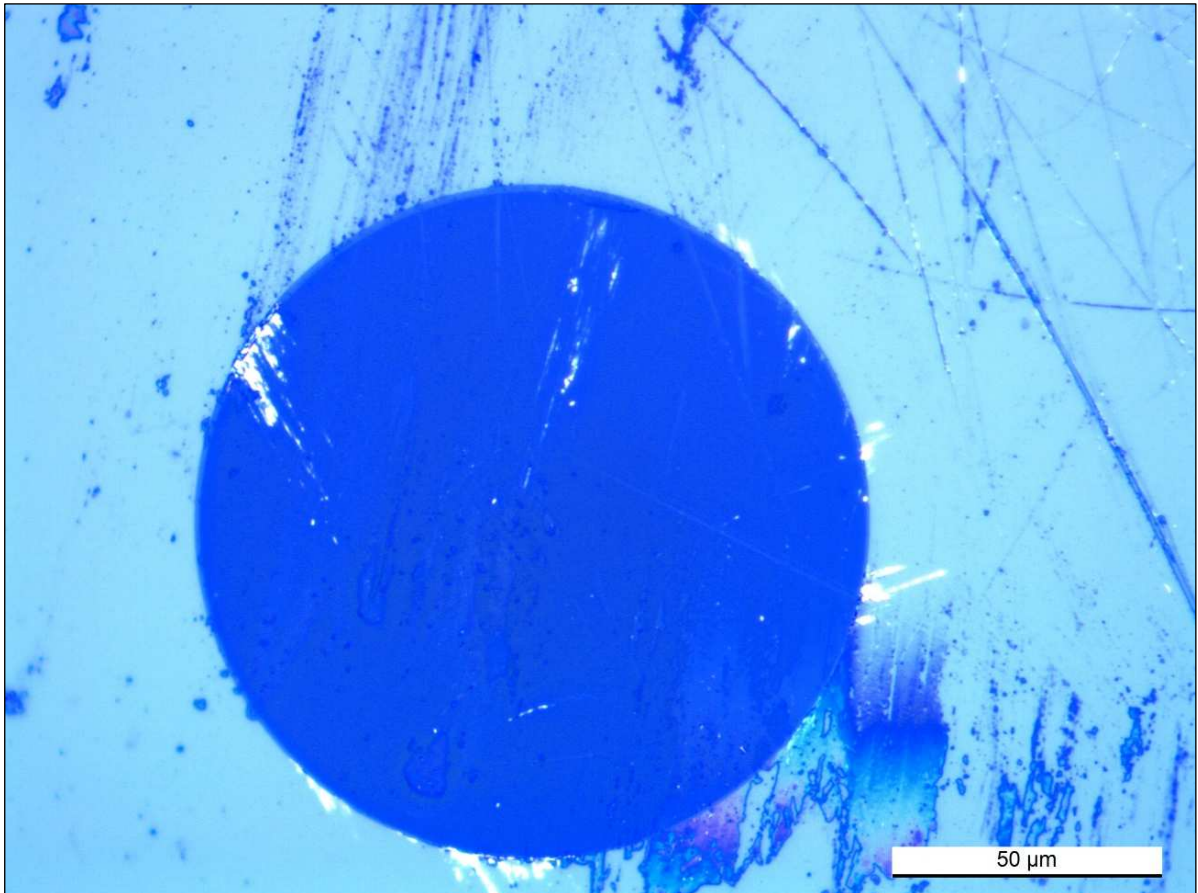


＜見えない世界を見る技術＞

1. 光ファイバー端面の観察

下の画像は、通常の方法（倒立顕微鏡で反射観察＝明視野観察）で「可視用シングルモード光ファイバー」の端面を観察（倍率 50 倍）したものです。濃い青色の大きな円は光ファイバーの「クラッド部（＝約 $\phi 125 \mu\text{m}$ ）」で、この中心にあると思われる「コア部（＝約 $\phi 5 \mu\text{m}$ ）」は見えていません。

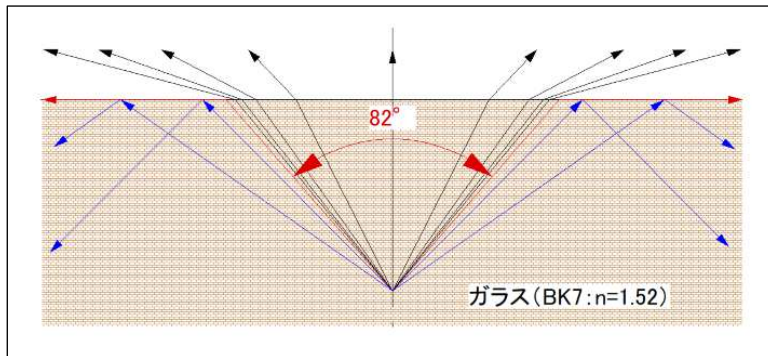


以下の項で、見えない（見えづらい）理由を考えていきます。そこで、まずは光ファイバーの構造を光学的な観点から探っていきます。

2. 光ファイバーの構造について

光ファイバー（ステップインデックス型）は、通常「コア」と呼ばれる光が通る部分と、それを取り巻くように「クラッド」と呼ばれる部分で構成されています。この両者の違いは「屈折率」にあります。つまり「コア」と「クラッド」は、お互いに屈折率が異なる物質で作られている訳です。「コアの屈折率」が「クラッドの屈折率」より少し高くなっていますが、その理由を考えていきます。

光ファイバーは、光が「屈折率の高い媒質（コア）」から「屈折率の低い媒質（クラッド）」に入る場合、「全反射（光が損失無く反射される現象）」が起きることを利用して光を伝送しています。



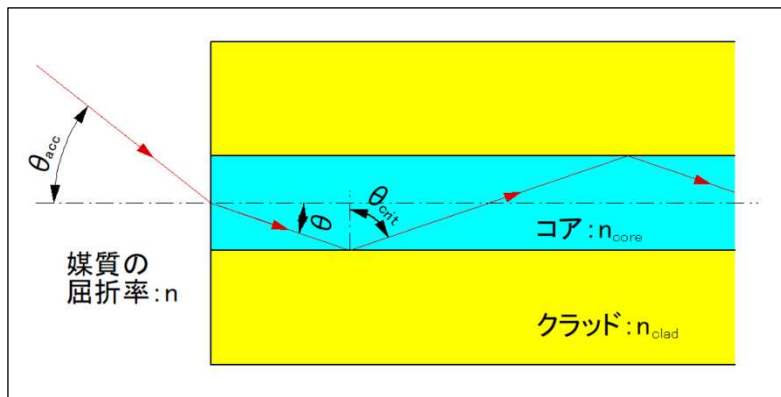
例えば、左図は空气中（屈折率=1）に置かれたガラス「BK7（屈折率=1.52）」内から出た光が進む様子を示しています。図のように82°の角度を超える光は空气中に出ることができず、「全反射」しています。この原理を利用して

光は光ファイバーの中をより長い距離減衰すること無く進むことができます。

(媒質による光の吸収を考えない場合)

3. 光ファイバーの光学

それでは、光ファイバーに入る傾いた光線は、どんな角度の光線も伝送できるのでしょうか？答えは「否」です。光ファイバーが伝送できる光線の最大入射角は決まっています。



これを左図で考えてみましょう。伝送には「全反射」を利用していますが、その角度を「臨界角(critical angle)：全反射が成立する最大の角度」と言い、

「 θ_{crit} 」で表します。この時、光ファイバーに入射できる光線（屈折率： n の媒

質中にある）の内、最大の角度を「 θ_{acc} 」とします。その光線がコアに入ったときの屈折角を「 θ 」とすると、**スネルの法則**から次式が成立します。

$$n \times \sin\theta_{acc} = n_{core} \times \sin\theta \dots \dots \dots (1)$$

また、図内の幾何学的な関係から、次式が成立します。

$$\theta + \theta_{crit} = 90^\circ \dots \dots \dots (2)$$

(2)式を(1)式に代入して整理します。

$$n \times \sin\theta_{acc} = n_{core} \times \sin(90 - \theta_{crit}) = n_{core} \times \cos\theta_{crit}$$

よって

$$n \times \sin\theta_{acc} = n_{core} \times \cos\theta_{crit} \rightarrow \cos\theta_{crit} = \frac{n}{n_{core}} \sin\theta_{acc} \dots \dots \dots (3)$$

一方、「 θ_{crit} 」は次式で与えられます。(臨界角の公式から)

$$\theta_{crit} = \sin^{-1} \left(\frac{n_{clad}}{n_{core}} \right) \rightarrow \sin \theta_{crit} = \frac{n_{clad}}{n_{core}} \dots \dots \dots (4)$$

ここで三角関数の次の関係を使います。

$$\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1 \dots \dots \dots (5)$$

(3)～(5)式から、次式が得られます。

$$\left(\frac{n_{clad}}{n_{core}} \right)^2 + \left(\frac{n \times \sin \theta_{acc}}{n_{core}} \right)^2 = 1$$

$n \times \sin \theta_{acc}$ について解くと、

$$n \times \sin \theta_{acc} = \sqrt{n_{core}^2 - n_{clad}^2}$$

「 $n \times \sin \theta_{acc}$ 」は、光ファイバーの「**NA=Numerical Aperture=開口数**」に他なりませんので、次式が得られます。

$$NA = \sqrt{n_{core}^2 - n_{clad}^2} \dots \dots \dots (6)$$

(6)式から「光ファイバーのNA」は、コアとクラッドの屈折率によって決まっていることが分かります。

そこで、例えば波長 1.3 μm用の「NA : 0.1」の光ファイバーを作ることを考えます。コアに「石英ガラス」を使った場合、クラッドの屈折率がどのようになるかを計算したのが下表です。

波長 (μm)	石英	クラッドガラス	屈折率差	垂直入射時の反射率 (%)		
				コア	クラッド	反射率差
1.28	1.4471438	1.443684584	0.003459216	3.338685	3.29654023	0.04214477
1.282	1.4471212	1.44366193	0.00345927	3.33840918	3.29626472	0.04214446
1.284	1.4470986	1.443639276	0.003459324	3.33813336	3.29598921	0.04214415
1.286	1.4470759	1.443616521	0.003459379	3.33785633	3.29571249	0.04214383
1.288	1.4470533	1.443593867	0.003459433	3.33758052	3.295437	0.04214352
1.29	1.4470307	1.443571213	0.003459487	3.33730472	3.29516151	0.04214321
1.292	1.4470081	1.443548559	0.003459541	3.33702893	3.29488603	0.0421429
1.294	1.4469854	1.443525804	0.003459596	3.33675192	3.29460934	0.04214259
1.296	1.4469628	1.44350315	0.00345965	3.33647614	3.29433387	0.04214227
1.298	1.4469402	1.443480496	0.003459704	3.33620037	3.29405841	0.04214196
1.3	1.4469175	1.443457742	0.003459758	3.33592338	3.29378173	0.04214165
1.302	1.4468949	1.443435087	0.003459813	3.33564762	3.29350629	0.04214134
1.304	1.4468723	1.443412433	0.003459867	3.33537187	3.29323084	0.04214102
1.306	1.4468496	1.443389679	0.003459921	3.3350949	3.29295419	0.04214071
1.308	1.446827	1.443367025	0.003459975	3.33481916	3.29267876	0.0421404
1.31	1.4468043	1.44334427	0.00346003	3.3345422	3.29240212	0.04214008
1.312	1.4467817	1.443321616	0.003460084	3.33426647	3.2921267	0.04213977
1.314	1.446759	1.443298862	0.003460138	3.33398953	3.29185007	0.04213946
1.316	1.4467364	1.443276207	0.003460193	3.33371381	3.29157467	0.04213914
1.318	1.4467137	1.443253453	0.003460247	3.33343688	3.29129805	0.04213883
1.32	1.446691	1.443230699	0.003460301	3.33315996	3.29102144	0.04213852

< 屈折率の差と表面反射率の差 >

上表から分かることは「NA : 0.1」の場合、コアとクラッドの屈折率差は「約 0.0035」に過ぎないことです。そして、大事なことは、このコアとクラッドの端面に垂直に光が入った場合、その「反射率の差は 0.042%」程度しか変わらないことです。（今回の観察では可視領域で見えていますので、もう少し上がりますが、それにしても差は僅かしかありません。本稿初めに示した画像が示しています。）

【ここで、反射率の計算には、 $R = \left[\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right]^2$ を使い、「 n_2 」に相当するのが、コアとクラッドの屈折率で、「 n_1 」は空気中で考え、「 $n_1 = 1$ 」としています。】

4. 光ファイバー「コア部」の観察

前置きが長くなってしまいましたが、ここからが「見えない世界を見る技術」のご紹介です。上述したように、コア部とクラッド部の光の反射率の差はほんの僅かです。この反射光の差をそのまま画像化するのは至難の技です。

ところが、当社が色々と工夫をして得た画像を以下に示します。約 $\phi 125 \mu\text{m}$ のクラッド部の中心に明るく丸い像が見えています。約 $\phi 5 \mu\text{m}$ のコア部が観察できています。

（観察している光ファイバーの反対側から光を入れて観察したものではありません。あくまでも端面側からのみ照明して観察しています。）

