

令和 4 年度 学生実験 B レポート

実験題目：B-2 光ファイバ

学籍番号： B9TB2025 氏 名：伊藤裕太

電気工学 コース A 班 提出日：

共同実験者名：安部 南欧斗, 石川 瑞基, 淡路 怜

電気・通信・電子・情報工学実験 B 報告書

題目 B - 3 直流回転機

実験日 令和 年 月 日

報告書提出日 令和 年 月 日

東北大学 工学部 電気情報物理工学科
電気工学コース A 班

報告者 伊藤裕太(学籍番号 B9TB2025)

共同実験者 安部 南欧斗

石川 瑞基

淡路 怜

実験の目的

光通信や光計測，レーザー光などを利用した産業や医療応用においては，光源からの光を決まった光路に沿って目的の領域に導く必要がある．そのための伝送路の代表的なものが光ファイバである．光ファイバの伝送原理や伝送特性をファイバの開口数の測定や伝送損失の測定を通して学ぶとともに，伝送モードの概念についても学ぶ．

1. 原理

1. 伝送原理とモード

一般的なステップインデックス型と呼ばれる光ファイバでは、光が閉じ込められる領域をコア、その周囲の領域をクラディング領域と呼ぶ。通常の通信用石英ガラス光ファイバではコアの直径は $7 - 10\mu\text{m}$ 、クラッドは $125\mu\text{m}$ である。コア、クラディングともに石英ガラスで構成されるが、コアの部分にドーパントと呼ばれるゲルマニウムなどの不純物を添加することにより屈折率を上昇させる。

コアの屈折率を n_1 、クラッドの屈折率を n_2 とすると、コア・クラッド境界面における全反射臨界角は

$$\varphi_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1} \quad (1)$$

で与えられる。

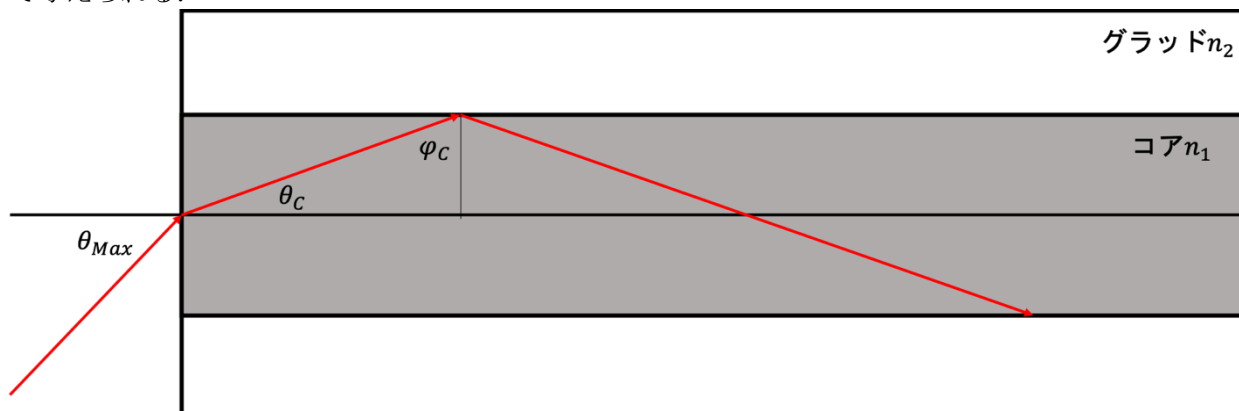


図 1 光ファイバ端面への光の挿入

ここで、図 1 に示すようにファイバの入射端へ $\theta \leq \theta_{Max}$ の角度で入射した光はコアとクラッドの界面で全反射され、コア内を伝播する。この角度 θ はファイバの重要なパラメータの一つであり、

$$\sin \theta_{Max} = n_1 \sin \theta_c = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2)$$

この $\sin \theta_{Max}$ を開口数と呼ぶ。 $\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ で定義される比屈折率差を用いると、通常コア・クラッドの屈折率差は極めて小さな値を取るため、(2)式は

$$\sin \theta_{Max} = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (3)$$

と表される。なお、角度 θ_{Max} 以下で入射したすべての光がコア内を伝播するわけではなく、ある条件を満たすとびとびの特定の角度を持つ光のみが伝播する。これを伝播モードと呼ぶ。

伝搬モードが生じる原因は、光の波長の数倍から 10 倍程度と小さいサイズのコアに光が閉じ込められるためであり、このような狭い空間を伝わる光は、空気中のような境界のない空間を伝わる平面波とは異なる特徴的な振る舞いをする。光の進行方向に垂直な方向についてみれば、光はクラディングにはわずかにしみ出さないために、コア・クラッド境界面でのその界はほぼ 0 となる。弦の振動に類推して考えれば、この境界面が固定端であり、径方向に定在波が生じるモードのみが安定して存在しえる。このような状態をで生じるものを伝搬モードという。

幾何光学的にモードの成立条件を考えてみる。最も単純な構造の導波路である、平板でサンドイッチ構造を形成したスラブ導波路と呼ばれるもののコア中を光線が伝播する様子を図 2 に示す。

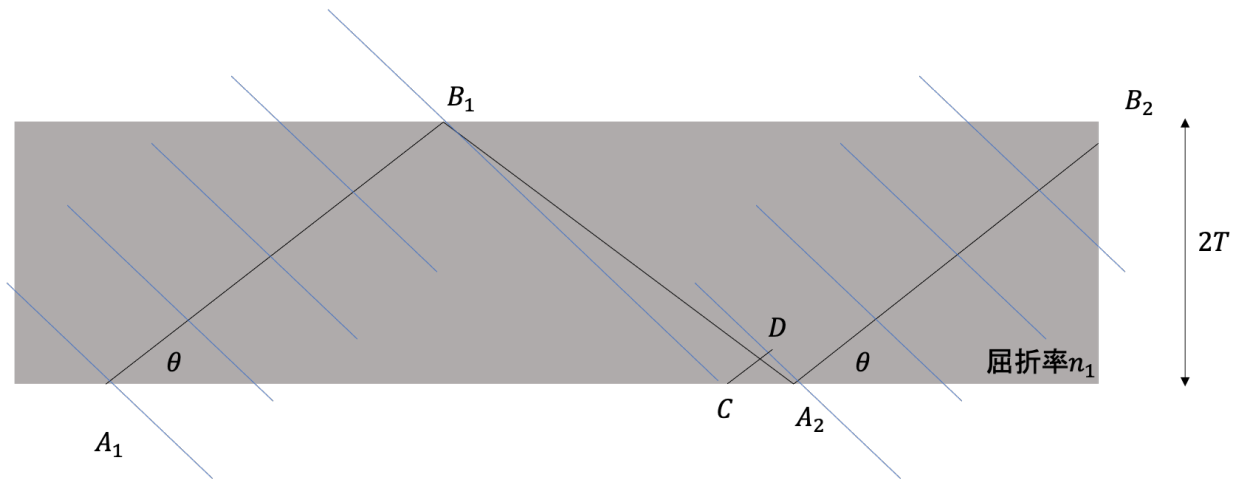


図 2 スラブ導波路中を伝播する光線

光線が屈折率が n である物質中を距離 s だけ進んだ際に生じる位相変化は、真空中の波数 $k_0(=\frac{2\pi}{\lambda})$ を用いれば、 nk_0s で与えられる。そこで、図 2 にあるように厚さ $2T$ のコア中を経路 $A_1 \rightarrow B_1 \rightarrow A_2 \rightarrow B_2$ に沿って角度 θ で伝播する光において、 $A_1 \rightarrow B_1$ と伝播する光と、 $A_2 \rightarrow B_2$ と進む光の破面が揃うためには、 $A_1 \rightarrow B_1$ と $C \rightarrow D$ との距離差から生じる位相差 ϕ

$$\phi = n_1 k_0 \left[\frac{2T}{\sin \theta} - \left(\frac{2T}{\tan \theta} - 2T \tan \theta \right) \cos \theta \right] \quad (4)$$

と、 B_1 と A_2 において全反射の際に生じる位相差 2δ との和が

$$\phi + 2\delta = 4n_1 k_0 T \sin \theta + 2\delta = 2m\pi \quad (m: \text{整数}) \quad (5)$$

である必要がある。この式を満たす角度 θ はとびとびの値を取ることがわかり、この条件下においてコアの厚さ方向に定在波が生じる。

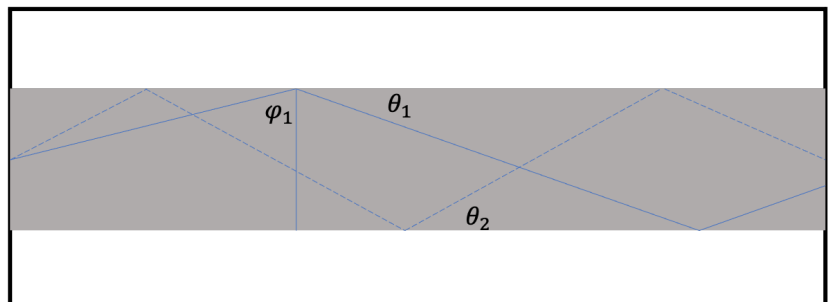
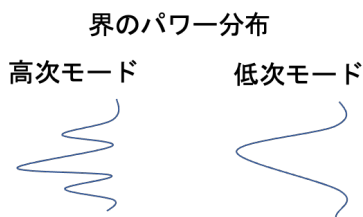


図 3 各モードの界分布と伝播角

図 3 に示すように伝播角 θ が小さい、つまりコア・クラッド界面への入射角 ϕ が大きいものの低次モード、伝播角が大きく、入射角 ϕ が小さいものを高次モードと呼ぶ。モードが工事になるにつれ、入射角が小さくなり全反射臨界角 θ_c を超えるとクラディングに放射されてしまい、コア中を伝播することができなくなる。これをモードの遮断と呼ぶ。ファイバのコア中に存在しえる伝播モードの数は、コアの半径を T とすれば、

$$v = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} k_0 T = \frac{2\pi T}{\lambda} n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (6)$$

で与えられる規格化周波数と呼ばれるパラメータによって決定づけられ、 $v < 2.405$ の時は最低次モードのみが伝播する。このようなファイバを単一モードファイバと呼ぶ。つまり、コア径を細く、屈折率差を小さくすることにより単一モードファイバを構成することができる。一方、 $v \geq 2.405$ となるファイバには複数の伝播モードが存在し、このようなファイバを多モードファイバと呼ぶ。

2. 光ファイバの伝送特性

光ファイバはその用途や使用波長によって、ファイバを構成する材質が異なるが、光通信に使用されるもので最も代表的なものは石英ガラスファイバである。石英ガラスは耐熱性に極めて優れる上、機械的強度も高く、波長 $300 \sim 2000 \text{ nm}$ 程度の紫外から赤外の広い波長域に

において高い透過性を持っていることが長距離通信に用いられる光ファイバの材料として使われる理由である。石英ガラスファイバは SiO_2 の一部が GeO_2 に容易に置き換わる。 Ge の他にも屈折率を上昇させるものとしてはホウ素がある。また、屈折率を低下させるものとしてはフッ素があり、これをクラッド部に添加する事で純粋石英ガラスをコアとするファイバが構成され、添加物の吸収損失が生じない超低損失ファイバを実現することが可能であり、理論的な固有損失は 0.2dB/km 程度とされる。

光通信に用いられる波長 $1.3\sim 1.5\mu\text{m}$ の近赤外や可視波長域における石英ガラスファイバの伝送損失の主な原因はガラス内での光の散乱と吸収であり、そのうち散乱をもたらす要因としてはレイリー散乱が挙げられる。レイリー散乱とは光の波長よりも小さな粒子による産卵のことで、散乱強度は光の波長の4乗に反比例する。バルク状の石英ガラスではレイリー散乱は小さいが、ガラスファイバの製造工程では、 2000°C 程度の液状ガラスを室温程度に急速に冷却して固化するために、分子密度に揺らぎが生じこれがレイリー散乱の原因となる。これは製法上避けることのできない光ファイバ固有の光損失要因である。レイリー散乱の他にもファイバに大きなパワーの光を入射した場合には、非線形現象である、ブルリアン散乱やラマン散乱などが問題となることもある。

一方、吸収損失とは光ファイバの中を伝わる光が吸収されて熱に変換されることによる損失で、ガラス固有の吸収によるものと、ガラス内に含まれる不純物によるものがある。石英ガラスの吸収損失には赤外吸収と紫外吸収とがあり、紫外吸収は電子遷移によるもので吸収端は 160nm 付近に存在し、赤外吸収は Si-O 結合の振動吸収によるもので、波長 $9\mu\text{m}$ 付近にピークを持つ。

不純物による吸収損失としては、光ファイバ開発が開始された当初は遷移金属イオンによるものが主だったが、開発が進むにつれこれらの問題は解決され、ガラス内に残存する OH 基が主なものとなった。短波長側ではレイリー散乱によって、長波長側では赤外吸収によって損失が増加し、波長 $1.55\mu\text{m}$ 付近で最も低損失となる。そのため、現在の光通信では主はこの波長が使用される。

2. 実験の方法

2.1. 開口数の測定

- (1) 図4の装置を用いて、アクリル棒の端面に緑色レーザダイオード光(波長 532nm)を入射して、全反射しながら光が伝播する様子を観察する。

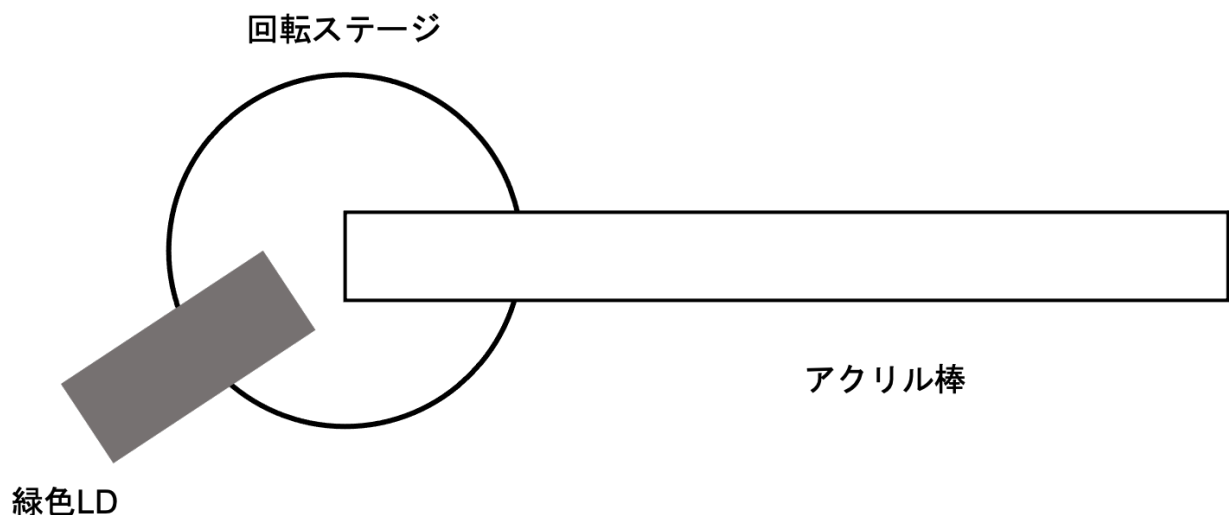
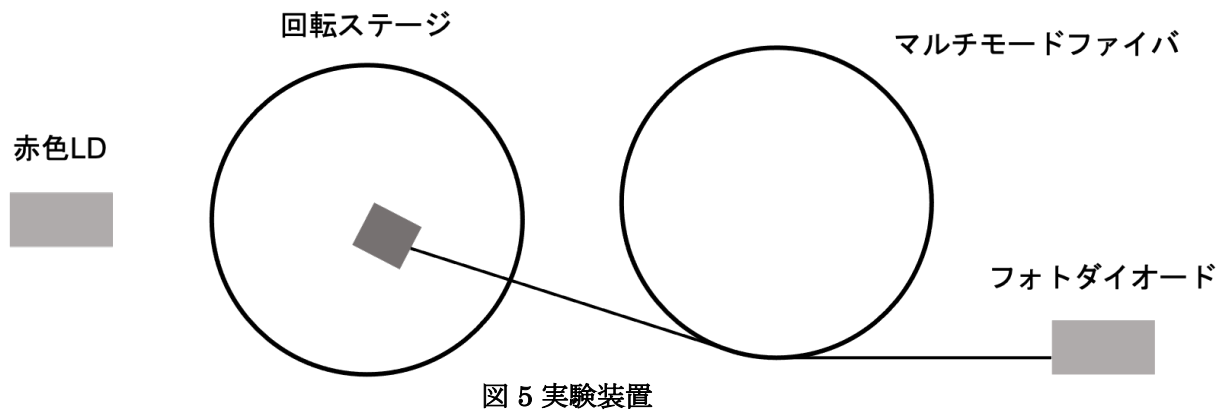


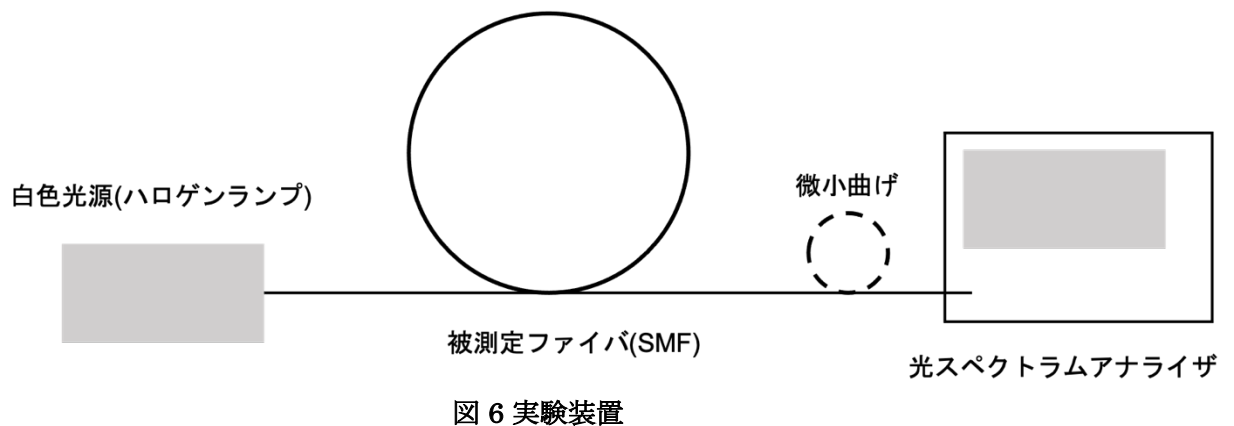
図4 実験装置

- (2) 入射角度を増大させ、全反射が生じなくなる角度を求め、開口数を算出するとともにアクリルの屈折率を計算する。
- (3) 図5の装置を用いて、レーザ光の入射角を変化させながら、ファイバ(マルチモードファイバ、コア径 $80\mu\text{m}$)からの光出力を測定する。入射角 0° の場合に対して、光出力が $\frac{1}{e^2}$ となる入射角から開口数を計算し、比屈折率を計算する。



2.2. 損失波長特性とカットオフ波長測定

- (1) 図 6 に示すように,白色光源からの光をシングルモードファイバ(コア径 $10\mu\text{m}$)に入射し,ファイバ透過光の波長特性を光スペクトラムアナライザで測定する. まずは 1m 程度のものについて測定したものを参照スペクトルとし,長さ 30km ほどの長尺ファイバの伝送損失を $[\text{dB}/\text{km}]$ の単位で測定する.



- (2) 図 6 の装置を用いて, まずシングルモードファイバ(長さ 2m 程度, コア径 $10\mu\text{m}$)の透過光を測定した. これを参照スペクトルとして, ファイバを直径 3cm 程度で数回ループさせた状態でファイバの伝送損失スペクトルを測定する.

3. 実験結果

3.1. 開口数の測定

- (1) 図 4 の実験装置を用いて緑色レーザダイオード光をアクリル棒に入射したところ, ほとんどレーザー光が外に漏れ出ることがなく, 全反射している様子が観察できた. しかし, アクリル棒全体が光を放っていたことから, 光の散乱が起きていることがわかった.
- (2) アクリル棒を空気中に置いた場合は 47° で全反射がなくなり, 水中に置いた場合は 40° で全反射がなくなった.
- (3) レーザ光の入射角を $-15\sim 16^\circ$ の範囲で一度ずつ変化させ, 光出力(μW)を測定したところ, 次のグラフが得られた.

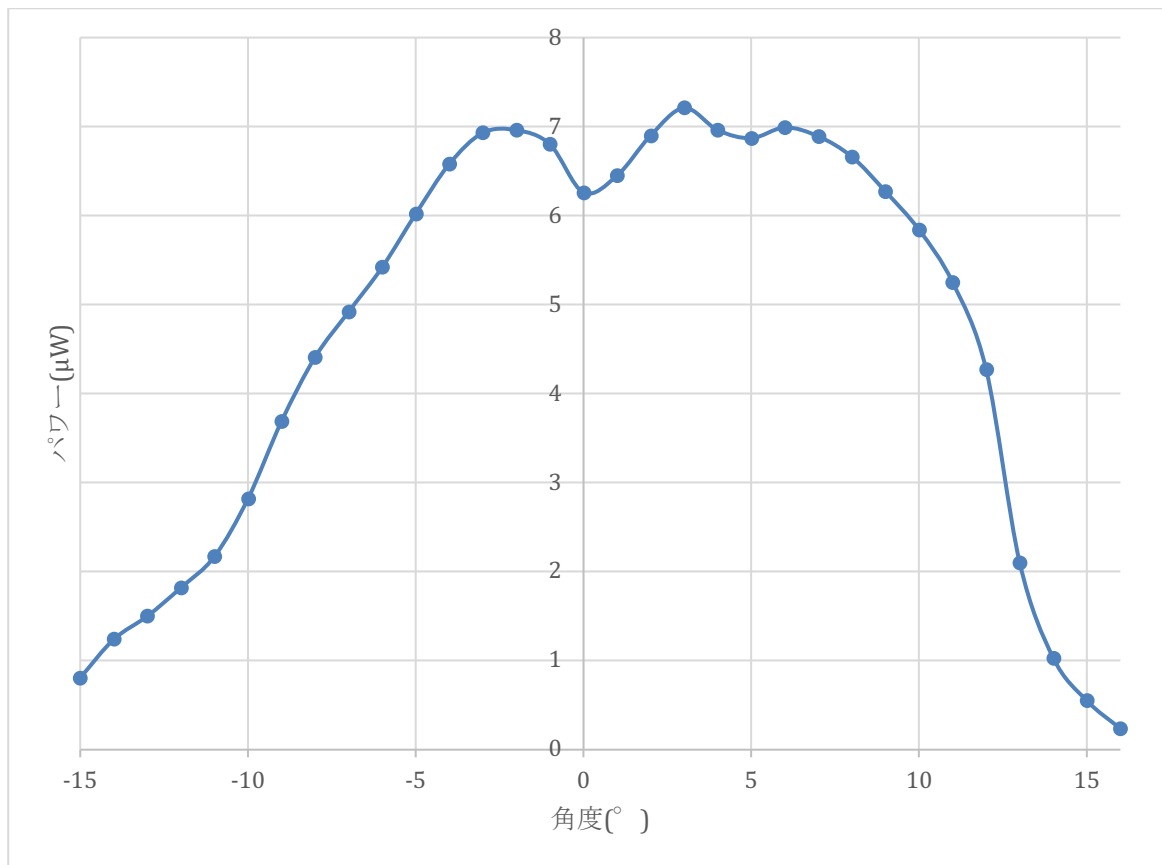


図 7 入射角と光出力の関係

3.2. 損失波長特性とカットオフ波長測定

- (1) 長尺ファイバの伝送損失を, 光スペクトラムアナライザを用いて測定したところ以下のグラフを得た. ただし, 短波長のノイズが多かったため 1000nm 以降の結果のみ描画している.

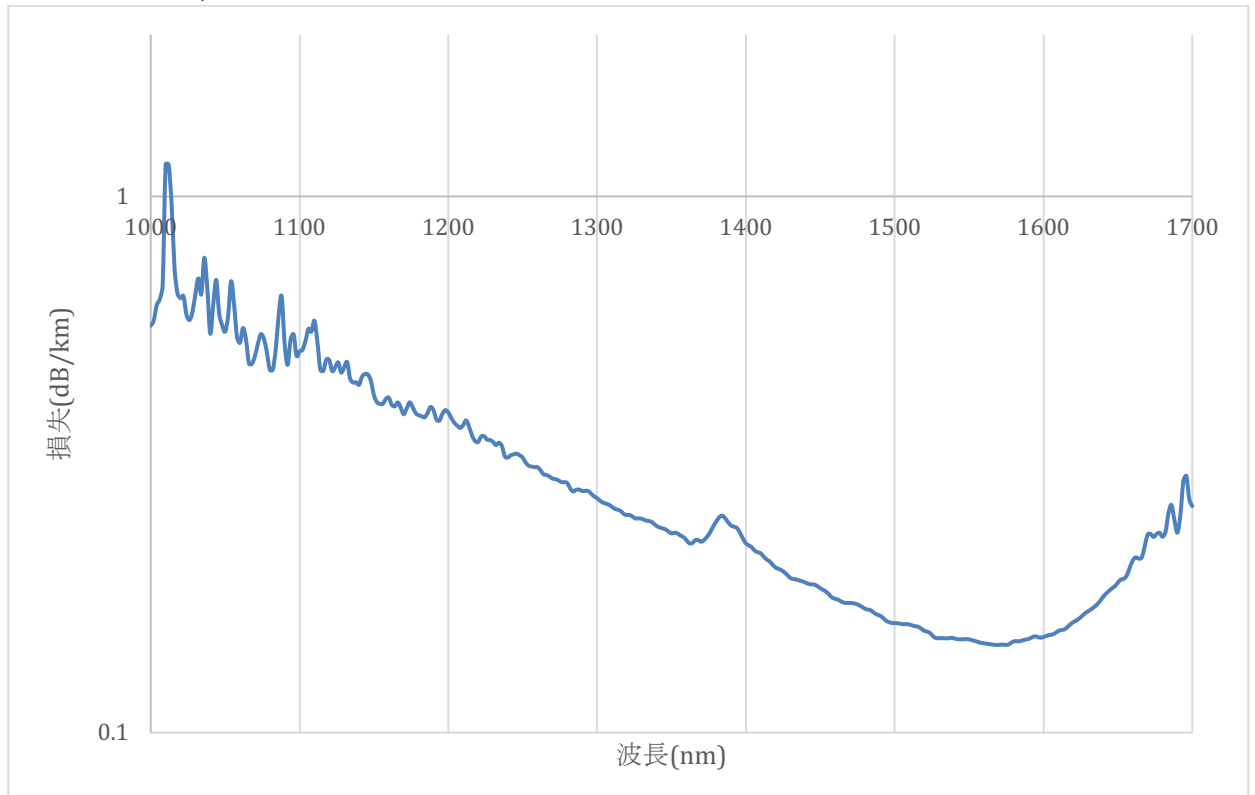


図 8 長尺ファイバの伝送損失

また、シングルモードファイバとマルチモードファイバの端面を観察したところ、マルチモードファイバのコアの方が太いことが観察できた。

- (2) シングルモードファイバを直径 3cm ほどで 4 回ほどループさせて伝送損失スペクトルを測定したところ次のグラフが得られた。ただし、短波長のノイズが多かったため 900nm, 以降の結果のみ描画している。

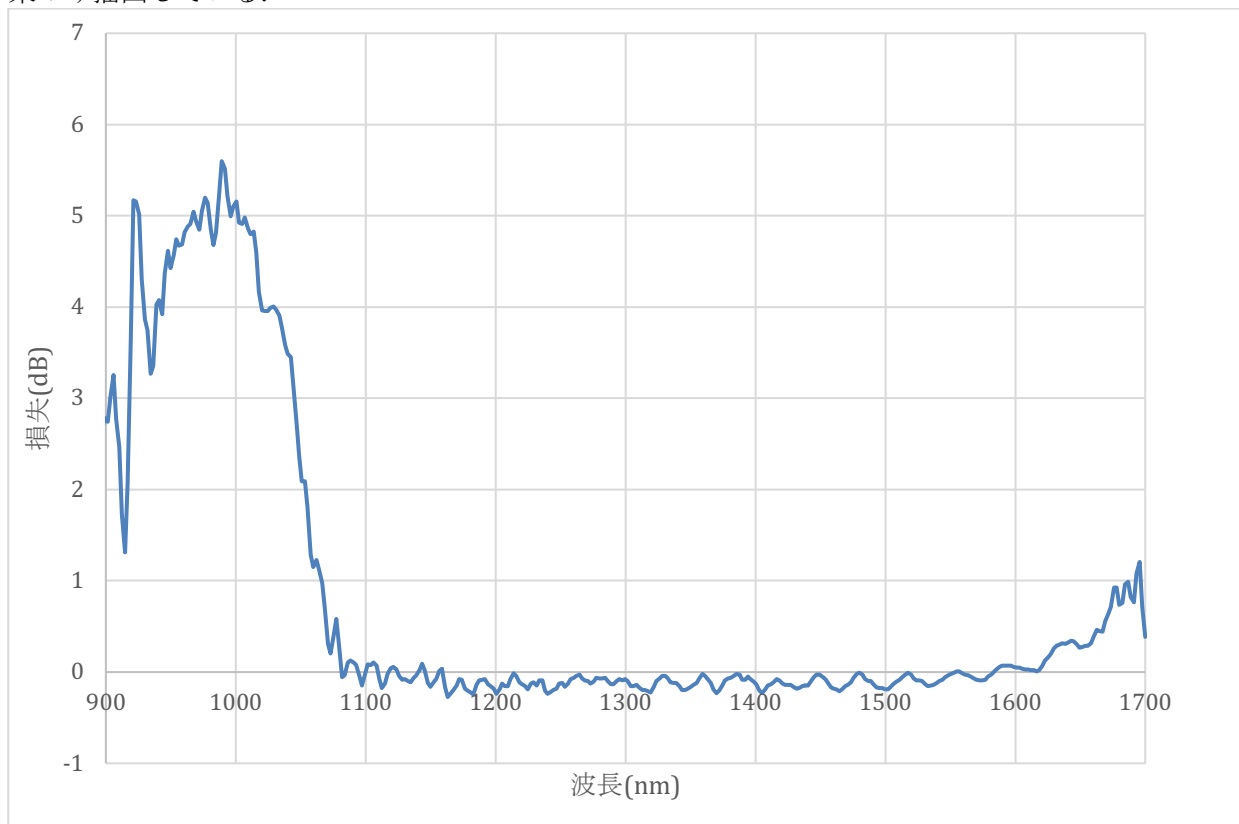


図 9 曲げ損失

4. 考察

4.1. 開口数の測定

全反射は、屈折角が 90° を越えるような時に発生する現象であるため、全反射が起こらない最大の入射角 θ_{Max} はスネルの法則 ($n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$) を用いて計算することができる。アクリルの屈折率は 1.49, 水の屈折率は 1.33 なので、実験結果の理論値は空気中にアクリル棒を置いた場合は存在せず、水中に置いた場合は 42.2° であった。

空気中に置いた場合に本来全ての角度で全反射するはずなのに透過したと思ってしまった理由としては、光の散乱によってアクリル棒自体が光ってしまったため正確に測定できなかったからだと思われる。

図 7 の最大値 7.21 の $1/e^2$ の線を引いたところ以下になった。

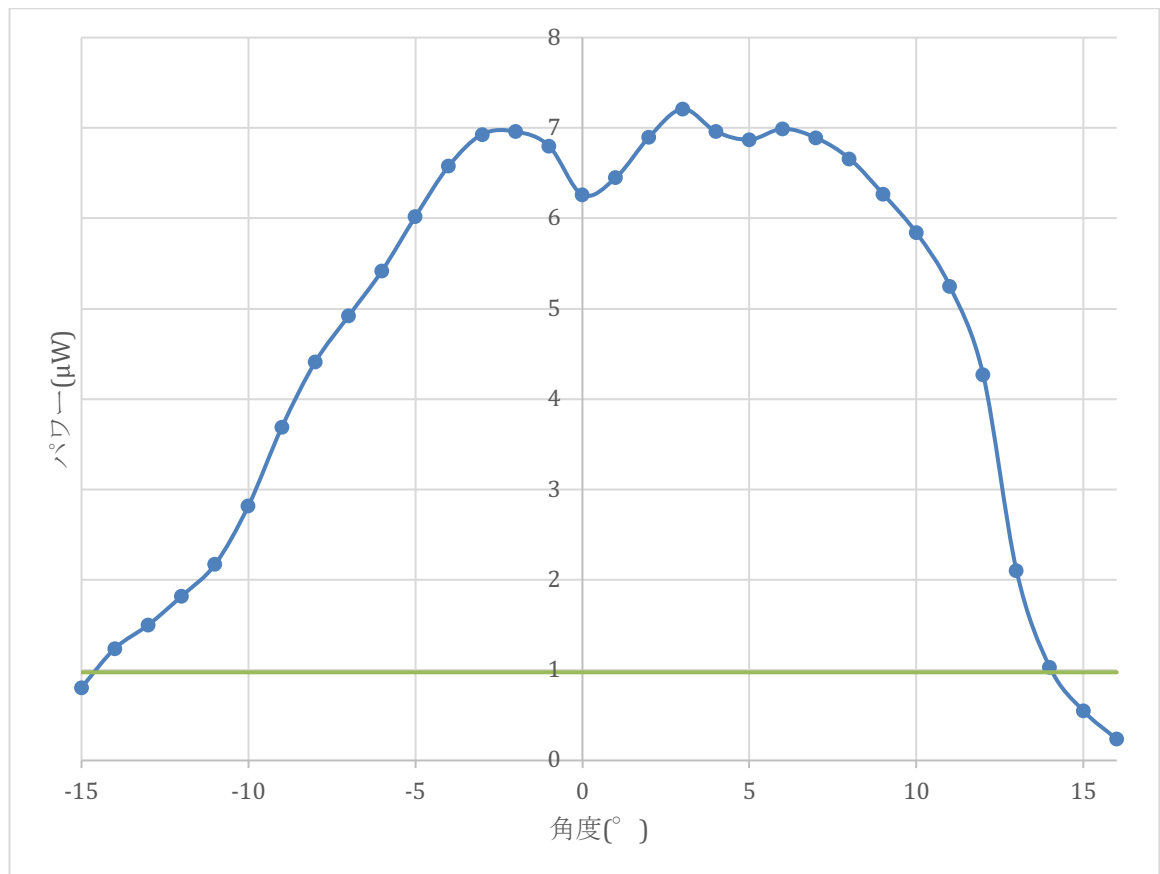


図 10 入射角と光出力の関係と, 最大値の $1/e^2$

図 10 より θ_{Max} は, 正と負の値を平均して 14.3 だとわかった. よって, 開口数は $\sin(14.3 \times \frac{\pi}{180}) = 0.247$ と計算できた. これは, カタログ値の 0.250 にかなり近い値を得ることができた. また, クラディングの屈折率が 1.450 だとすると, コアの屈折率は 1.47, 比屈折率差は 1.36×10^{-2} を得られた.

光軸を含む面内で蛇行する光線は子午光線、光軸を中心とする螺旋を描く光線を螺旋光線という。しかし, NA や屈折率の測定方法に与える影響についてはわからなかった。

比屈折率差がこんなにも小さい理由は, 光ファイバの光の伝播に波長依存性を持たせるためだと考えられる。

4.2. 損失波長特性とカットオフ波長測定

図 8 の結果は, 短波長のノイズ部分を除き概ね理論通りの結果を得ることができた. また, 損失と波長の・4 乗をグラフにしたところ, 次のグラフが得られた。

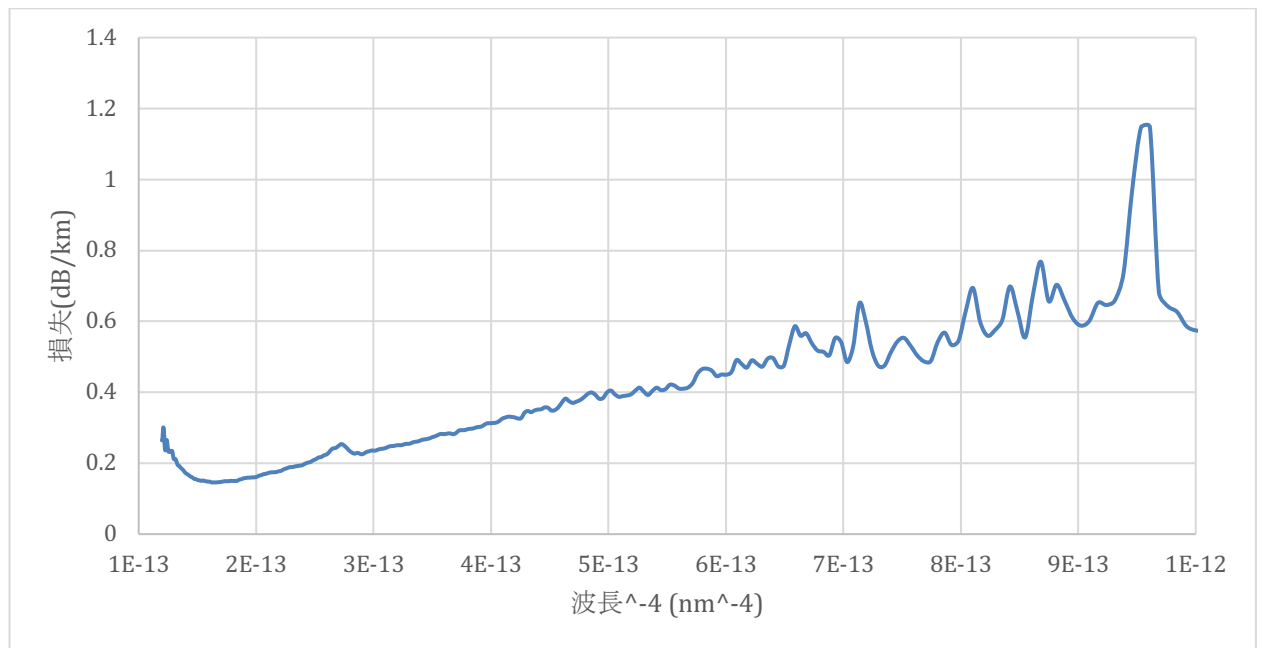


図 11 波長の⁻⁴乗と長尺ファイバの伝送損失

これも、短波長側でほぼ直線であり、理論通りであった。図 8 において、1380nm 付近にある損失は、OH 基吸収損失であると考えられる。

曲げ損失の図 9 の 1000nm 付近で損失が大きくなっているのは、光ファイバが大きく曲げられることで、コア・クラッド界面への入射角が大きくなり、入射角が全反射臨界角を超えて、伝搬できなくなったからだと考えられる。

長波長において損失が少しだけ大きくなっているのは、光の強度分布の広がり $\propto\sqrt{\lambda}$ に比例して大きくなるため、曲げた部分の外周において放射が起きてしまっているからだと考えられる。

5. 結論

ファイバの開口数の測定や伝送損失の測定をすることで、本実験の目的である光ファイバの伝送原理や伝送特性を理解することができ、伝送モードの概念についても学ぶことができた。

<参考文献>

[1] 教科書を参考文献とする場合の書式

著者：実験指針 2022，頁 pp.15-21，出版社 東北大学工学部電気情報物理応学科(2022 年)。