

赤外及び軟 X 線領域における中空光ファイバ

工業技術院電子技術総合研究所 日 高 建 彦
電 波 電 子 部 主 任 研 究 官

1. ま え が き

従来の石英系光ファイバの伝送波長は、ほぼ $2\text{--}0.3\text{ }\mu\text{m}$ である。これより外側の波長の光エネルギーを伝送させたい場合には、石英とは異なる材料、あるいは異なる構造の光ファイバを考案しなければならない。 $2\text{ }\mu\text{m}$ より長い波長（中一遠赤外）領域においては、フッ化物及びアルカリハライド系化合物が比較的透明であり、これらを用いた充填コアクラッド型光ファイバは、一部で商品化もされている。ところが、短波長側、すなわち、真空紫外、あるいはより短波長で透明な固体材料は存在しない。それゆえ、この波長域で使用する光ファイバとしては、全く別の原理に基づく、新構造の光ファイバを開発する必要がある。

一般に、固体（ガラスを含む）の屈折率は赤外および真空紫外—X線領域において真空、あるいは空気（1.0）より小さくなる可能性を持っている。図1は固体の複素屈折率を赤外から真空紫外域まで模式的に示した。赤外域においては、固体の格子振動の異常分散により、真空紫外域では電子のプラズマ振動により、複

素屈折率の実数部が1より小さくなり得る。もし、屈折率が1より小さい固体（ガラスが望ましい）があれば、そのような素材をクラッド材として用いる事により、クラッド部分の屈折率がコア部、すなわち、空気又は真空の屈折率（1）より小さくなる。このことにより、通常のステップインデックス型光ファイバが構成出来る。さて、ここで注意すべき事は、屈折率が1より小さい、ということは光のエネルギー速度が媒質中で真空中の光速 C_0 より速くなる訳ではない、ということである。屈折率の値は、いわゆる位相速度のみを与え、エネルギー速度は、常に C_0 よりも小さい事が保証されている。

本文において、まず、赤外域、特に $10.6\text{ }\mu\text{m}$ での炭酸ガスレーザ光に対して低損失伝送が期待される、二酸化ゲルマニウム (GeO_2) 中空ファイバについて簡単に触れ、次に、最近、電総研で行なわれている中空型軟X線光ウェーブガイドの実験を紹介する。

2. 赤外用 GeO_2 中空ウェーブガイド

赤外光伝送用光ファイバとしては、アルカリハライド、銀ハライドあるいはカルコゲンガラ

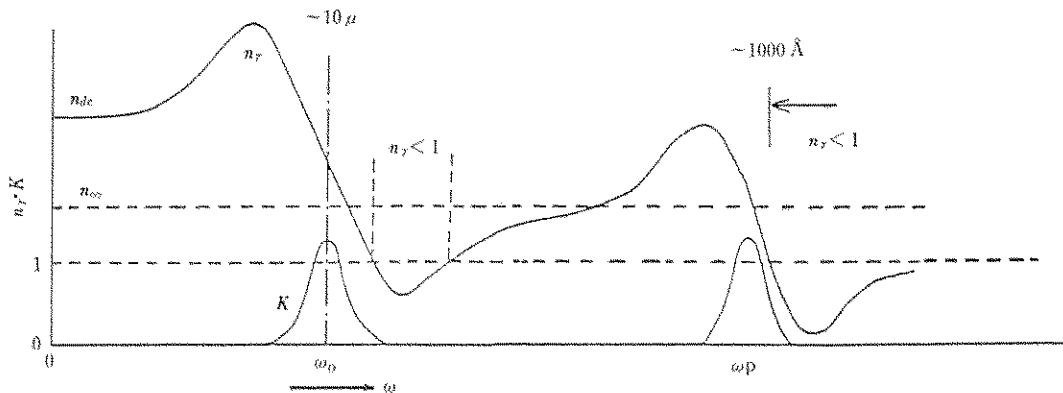


図1 固体の複素屈折率 $n_r - iK$. 赤外域と真空紫外域で n_r が1より小さくなる領域がある

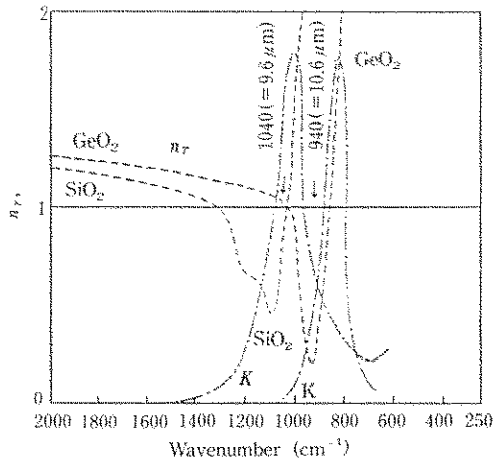


図 2 SiO₂ と GeO₂ ガラスの n_r-iK .
GeO₂ においては n_r は 940 cm^{-1} で
0.3 まで下がる.

スを用いた充填コア型光ファイバの研究が特に日本で進展している。これに対して、我々は、上述の原理に基づく、GeO₂（ジャーマナイトガラス）をクラッド材とする、 $10.6\text{ }\mu\text{m}$ 炭酸ガスレーザー光をガイドするための中空ウェーブガイドを試作した。図 2 は GeO₂ 及び SiO₂（石英）の赤外域の複素屈折率を示している。これを見るに、GeO₂ ガラスは $10.6\text{ }\mu\text{m}$ (940 cm^{-1}) で確かに屈折率 n_r が 1 より小さくなっている。これに対して、SiO₂ は $1,030\sim 1,300\text{ cm}^{-1}$ の範囲でのみ屈折率が 1 より小さくなり、炭酸ガスレーザー光に対しては効果は無い。この、GeO₂ を使って、中空ウェーブガイドを作製した場合、複素屈折率の虚部 iK との関係で、純粋な GeO₂ では、ウェーブガイドとしての最低損失波長が 980 cm^{-1} となり、レーザー光からは僅かに離れている。そこで、GeO₂ に波長調整剤として K₂O、安定剤として ZnO を加えることにより、分光特性を低周波側へシフトさせ、最低損失波長を 940 cm^{-1} に一致させることが出来た。安定剤 ZnO は、K₂O 含有 GeO₂ の潮解性を改善するためのものである。図 3 は K₂O、ZnO 含有量とそのときの光学特性（中空ファイバとしての最低損失波数とその損失の値）を示したものである。損失は、直線状の口径 1 mm のファイバにおいて 0.05 dB/m が期待出来る。

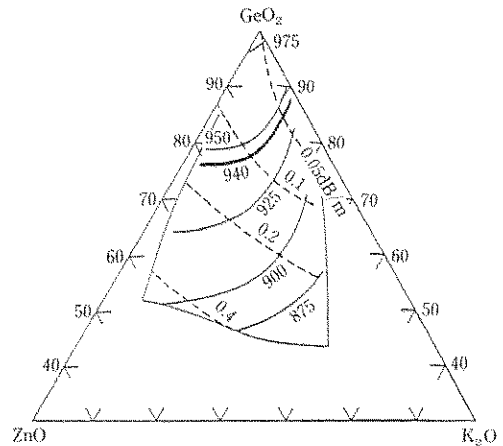


図 3 GeO₂-K₂O-ZnO ガラス中空ファイバの伝送特性。口径 1 mm 、HE₁₁ モードに対する値。三角形の左右両辺の数値は GeO₂ 成分のモル濃度(%)。水平軸の目盛りは ZnO あるいは K₂O の $10\text{ mol}\%$ を示す。実線は最低損失を示す波長、点線はそのときの損失 (dB/m)。

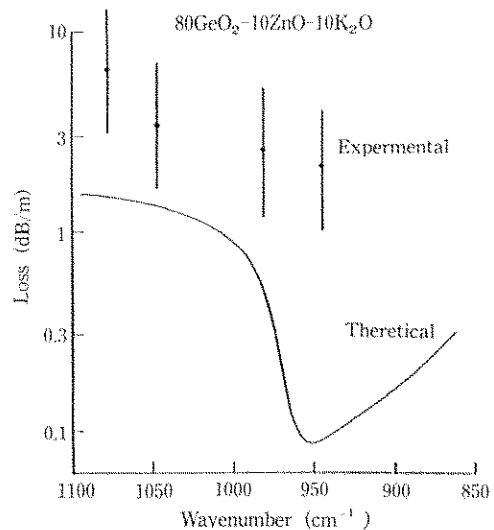


図 4 $80\text{ GeO}_2-10\text{ K}_2\text{O}-10\text{ ZnO}$ ガラス中空光ウェーブガイドの伝送特性。
理論的予想値および実験値。

図 4 は、実際に炭酸ガスレーザー光を伝送させた場合の損失特性である。伝送損失は最低でも理論値より一桁悪い。その原因として、ウェーブガイド内面の不全完さがあげられる。すなわち、線引中に微細な GeO₂ の六方結晶が ZnO を核

にして成長し、特性を悪化させていることが判明している。現在、素材の組成を含めて、改良中である。

3. X線ファイバの原理

さて、前にも述べた様に、一般には固体においては、赤外域と真空紫外—X線領域 ($1,000 \text{ \AA}$ 以下) で屈折率 (の実部 n_r) が1より小さくなる。固体内の価電子のプラズマ振動数 (おおむね $1,000 \text{ \AA}$) より十分高い振動数においては複素屈折率 $n_r - iK$ は、

$$\left. \begin{aligned} n_r &= 1 - \frac{1}{2} (\omega_p / \omega)^2 \\ K &= \frac{1}{2} (\omega_p / \omega)^3 \cdot 1 / (\omega_p \tau) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

で与えられる。ここで $\omega_p = \sqrt{4\pi N e^2 / m^*}$ は電子のプラズマ振動数である。図5には、石英 (SiO_2) の軟X線領域 ($100 \text{ \AA}$ 以下) における、 $n_r - iK$ が模式的に示されている。 n_r の値は、例えば $50 \text{ \AA}$ では0.99であり、これは、中空光ファイバのクラッド材としては使用に耐える値である。ただし、損失項 K も無視出来ない値であるので、ファイバの曲げに対して損失増大の主因となる。図5中、 $23 \text{ \AA}$ における K のピークお

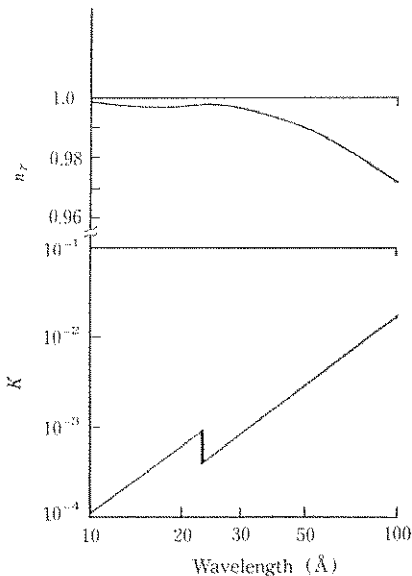


図5 石英 (SiO_2) の軟X線領域 ($10-100 \text{ \AA}$) における n_r 、 K 。

よび n_r の曲がり、酸素原子の内殻電子のK吸収によるものである。

X線伝送ファイバの効率を次の様に評価してみる。X線の進行方向を 90° 曲げる場合を想定する。石英平面板を一枚だけ使って反射させると、入射角は 45° であるから反射率は $10^{-4}\%$ 以下であり、実用性はない。これに対して、光ファイバは、中空内面への入射角が 90° に近いので、反射率は大きくなり、全体の伝送効率は 90° 曲げで1%を超え得る。このように、中空光ファイバは平面板反射鏡に比し、 10^4 倍も効率が良いたことが期待出来る。

4. 軟X線伝送中空光ファイバの伝送特性

石英製中空ファイバの軟X線伝送特性を次の様にして得た。

実験のブロックダイアグラムを図6に示す。光源は電線研設置の軌道放射光 (SOR) であり、これを斜入射回折格子分光器で単色化した。スペクトル純度を向上させるため、適当なフィルタを使用した。単色化された光は、内径 0.2 mm 、長さ 230 mm の石英製中空ファイバに入射し、伝送される。出射光はセラミックチャンネルトロンで検出される。検出器からの電気出力は、マルチチャンネルアナライザで処理された後、パソコンのメモリに蓄積される。ファイバ入力端は固定され、その方向は入射ビームと平行である。出射端は、検出器とも、入射方向に対して、最大 90° まで回転する。この際、ファイバは全長にわたって均一な円弧を描く。伝送効率の角度依存性の一例を図7に示す。定性的には理論値と傾向は一致しているが、全体的に効率は一桁ほど悪い。これは、入力端でのファイバの方向がX線ビームの方向から僅かにずれていることによると思われる。この、入射部の角度ミスマッチを差し引いて考えると、伝送効率はほぼ理論値と一致すると考えられる。

角度を一定にしたときの伝送効率の波長依存性を図8に示す。細かいリップル様の物はあるが、全体としてあまり大きな波長依存性はない。ただし、 $25 \text{ \AA}$ より短波長で損失は大きくなるが、これは、前に述べた、酸素のK吸収に

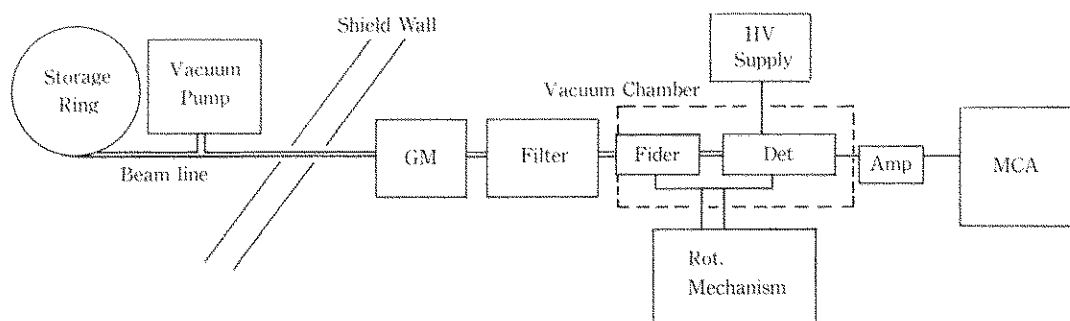


図 6 軟X線伝送特性測定のプロックダイアグラム。

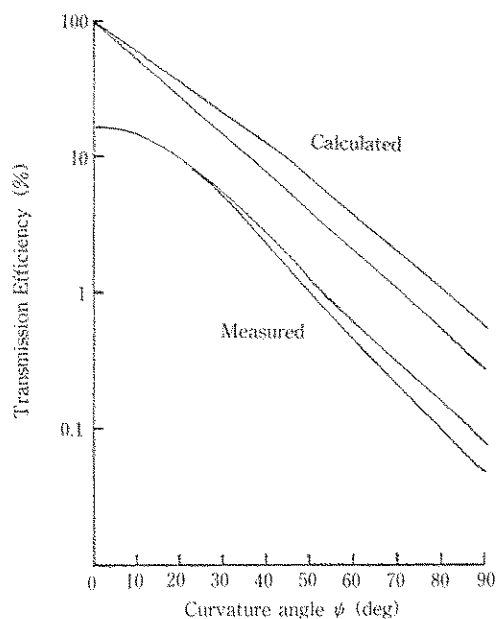


図 7 伝送効率の角度依存性. 各々上は 32 Å, 下は 68 Å.

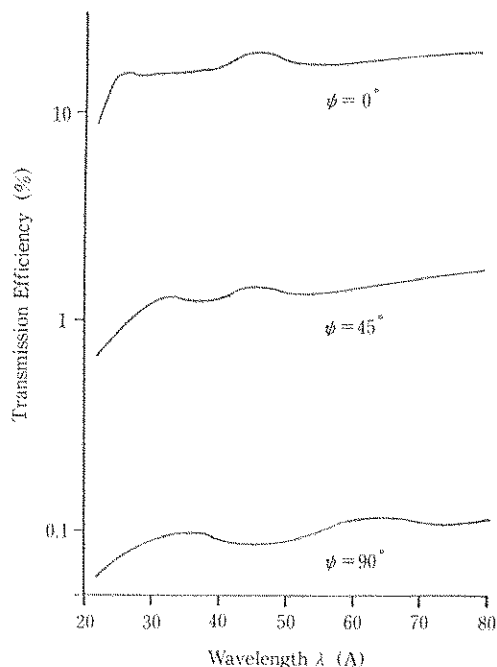


図 8 伝送効率の波長依存性.

よる。また、45 Å 付近の弱いピークは、おそらく、中空ファイバ内面に付着したカーボンCのK吸収 (43.5 Å) の影響によると思われる。

5. 考 察

伝送特性を眺めて、他の光ファイバとの比較で考えると、損失は極めて大きく、実用化の可能性は乏しいように思える。しかしながら、次の様な理由により、当X線ファイバの有用性が期待出来る。まず、ともかくも、現状ではX線を伝送し得る光ファイバはほかには存在しない。それゆえ、損失がある程度大きくとも、短

距離でなら意味のある使い方があり得る。例えば、医療用に使う場合には、伝送距離も数m程度、曲げ角も 90° 以内での使用が容易に想定出来る。この場合に、効率がたとえ 1 % であっても、人体への不要な照射をさけ得たり、患部の至近距離から治療用X線を照射し得るので、その利用価値は大きいであろう。

当文でのべた軟X線伝送中空ファイバにおいては、材料が石英に限られていた。X線の伝送効率はクラッド材料の電子密度に関係しているので、特性には材料を選択することにより、改

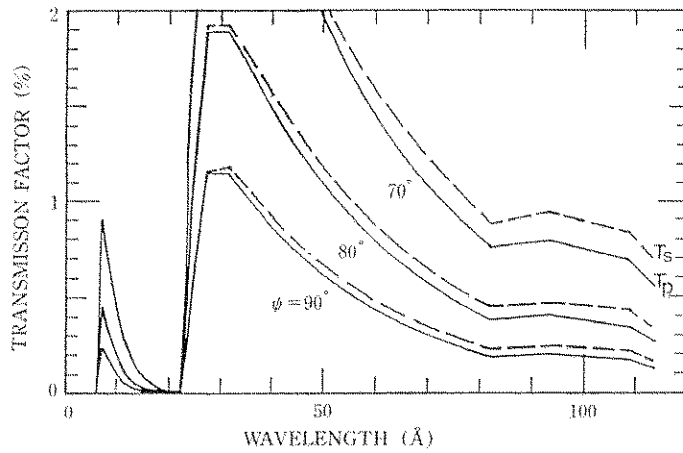


図 9 石英ファイバのより正確な伝送特性の計算例. T_s はS波, T_p はP波に対する値.

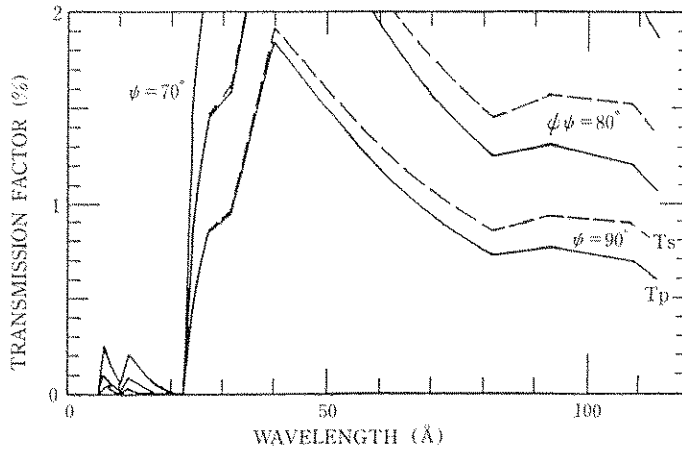


図 10 ソーダガラスに対する伝送効率の計算例

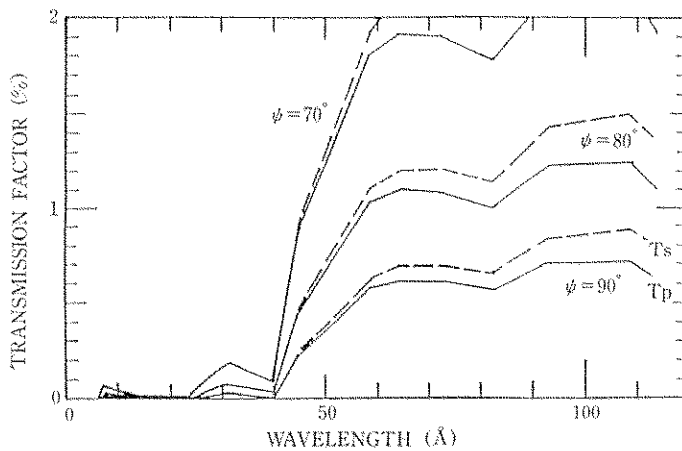


図 11 ナマリガラスに対する伝送効率の計算例

良の余地もある。図9は石英中空ファイバの軟X線伝送効率の厳密な計算値である。ここでTsはS波に対する値、TpはP波に対する値である。違いは僅かであるので、実際の伝送効率はS波でもP波でも殆ど差は無いであろう。図10はソーダガラスの伝送効率である。90°曲げの条件で、効率は石英中空ファイバに比し、最大2倍程度よくなることが期待される。ただし、最高効率を与える波長は異なっている。図11は、同じく鉛ガラスの効率の計算値である。この場合は、最大効率を与える波長が長波長側にずれてしまっている。このように、クラッド材のガラスの成分により、伝送効率が改善される

見込みがある。現在、電総研では、これらも含めて、さらに改良研究中である。

〔著者紹介〕

日高建彦（ひだかたけひこ）

昭和16年7月20日生（東京）



昭和42年3月、東北大学院
修士課程修了（電子工学専攻）
同4月通産省工業技術院電気
試験所

入所（現電子技術総合研究所）

以来、マイクロ波工学、赤外

伝送路、軟X線伝送の研究路

に従事。さらに、固体物性論、構造相転移の研究などを行う。理学博士