

金属層内装ガラスキャピラリにより構成された 軟 X 線伝送用中空ファイバ

松浦 祐司

Hollow fiber optics for transmission of soft X ray

Yuji MATSUURA

A glass capillary with an inner metal coating is proposed for the soft X-ray fiberoptics used in medical applications. For transmission of continuous soft-X-ray radiation from common X-ray tubes, nickel was chosen as the coating material because of the large critical angle and high reflection at grazing incidence angles of soft X-ray. A nickel-coated capillary was fabricated by using electroless deposition and from observation by atomic force microscopy, the surface roughness is smaller than 6 nm in rms value. Transmission characteristics of fabricated nickel hollow fiberoptics was evaluated by using a X-ray tube and a photomultiplier with X-ray scintillator. The results show focusing and collimating effects of the hollow fiberoptics and the transmission of a nickel-coated capillary with an inner diameter of 0.53 mm and a length of 300 mm was 10%, which is approximately double that of an uncoated glass capillary. Although it was also shown that the transmission is reduced when a slight bend is applied on the fibers, the nickel hollow fiber is less sensitive to bending than silica glass capillary optics. The hollow fibers with a length of several tens of centimeters would permit the introduction of X rays into the body via a laparoscope to irradiate infected or possibly tumorous regions for diagnosis or treatment.

1. はじめに

医療分野で広く普及している X 線イメージングにおいては、通常、X 線管が光源として用いられる。より高い分解能を得るためには点光源である X 線管からの放射光を平行化することが有効であり、大規模なシステムにおいてはクマコフレズと呼ばれる複数の微細キャピラリを一体化しテーパ状にしたものが用いられることがある¹⁻³⁾。この研究では、伝送路により体内へ X 線を導き、ターゲットのごく近傍から X 線を照射し体外において撮像するシステムを構築することを最終的な目的としている。その手法として、出射光の拡がり角が通常、数ミリラジアン以下と小さく、ほぼ平行光が得られるキャピラリ型の伝送路⁴⁾を用いることを提案する。体内から X 線を照射することにより、高い解像度が得られるだけでなく、健常な部位への X 線照射を最低限に抑えることも可能となる。また、硬性腹腔鏡もしくは軟性内視鏡を用いて X 線を伝送することが可能になれば、ガンなどの腫瘍に

スポット的に高密度 X 線を照射することが可能となり、まったく新しい低襲侵治療法をもたらす可能性もある。

ガラスキャピラリを用いた X 線伝送用光学素子はいくつか提案されており⁴⁻⁶⁾、これらは主に、X 線を集光・平行化するのに用いられる⁷⁾。キャピラリ中で X 線は、内面で反射を繰り返しながら伝搬するが、X 線の波長域においては、物質の複素屈折率の実部は、1 をわずかに下回るために、内面にきわめて浅い角度で入射した場合、

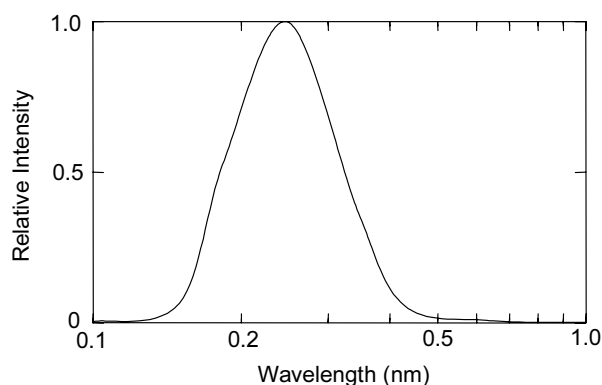


図 1 軟 X 線管の出力スペクトル

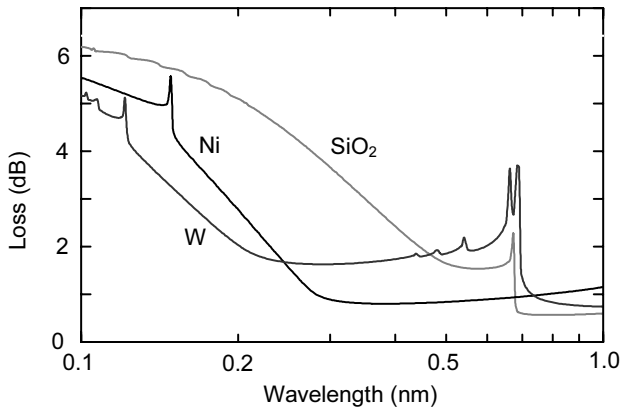


図2 各種材質のキャピラリ素子の伝送損失理論値。
キャピラリ長:100mm, 内径:0.53mm

減衰全反射という現象が生じる。この現象を用いてキャピラリ光学素子により X 線伝送が行われるが、通常、キャピラリ材質として用いられている石英ガラスは、きわめて平滑な表面が得られるために、散乱損失の点においては優れているものの、全反射臨界角はあまり大きくないために、伝送時に多くの X 線光束が減衰してしまう。より臨界角の大きな金属で構成された細管を光学素子として用いることも提案されている⁸⁾が、ダイカストからの押し出しで作製される細管の内面は非常に粗いものとなり、X 線に対する散乱損失が大きくなってしまう。

そこで我々のグループでは、内面が平滑なガラスキャピラリを母材として用い、その内面に軟 X 線に対する臨界角が大きな金属の薄膜を形成することにより、内面がきわめて平滑な金属キャピラリを構成し、これを X 線伝送に用いることについて検討した。

2. 理論検討と材料選択

図 1 は、実験に使用したピーク電圧 10kV、タングステンターゲット X 線管の出力スペクトルである。この種の X 線管は電子ビームのエネルギーが小さいため、特性

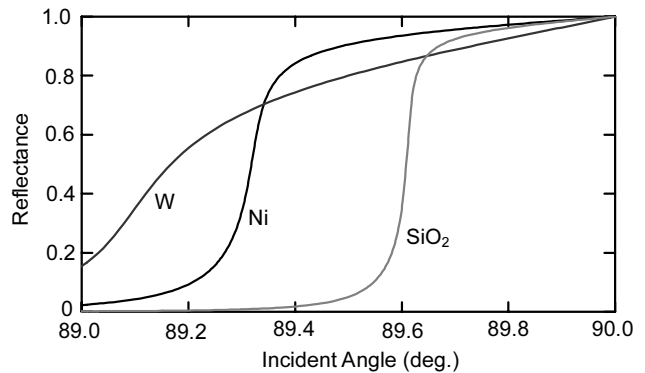


図3 波長 0.25nm における各種物質の反射率理論値

X 線は発生せず、連続 X 線のみが放射され、そのピーク波長は 0.25 nm、バンド幅は 0.2 nm であった。このスペクトル強度分布を用いて、各種の材料で構成されたキャピラリ光学素子の理論的な伝送損失を幾何光学的手法⁹⁾により計算した。なお計算において、キャピラリの入射端は点光源である X 線源から 20 mm 離れた位置にあると仮定しており、キャピラリのサイズは実験で使用したものと同じ、内径 0.53 mm、長さ 300 mm とした。

数多くの金属および誘電体材料の複素屈折率¹⁰⁾を用いて計算¹¹⁻¹³⁾を行った結果、タングステンおよびニッケルがキャピラリ材質として適していることがわかった。その損失スペクトル理論値を、石英ガラスキャピラリのもものと比較して図 2 に示す。図からわかる通り、波長 0.5 nm より短い波長域において、これらの金属で構成されたキャピラリ光学素子が、石英ガラスによるものと比較して低損失となることがわかる。それゆえ、これらの金属キャピラリは、放射線医学などに用いられるような、より高エネルギーを発生する短波長 X 線管に対しても有効であることがわかる。

図 3 はこれらの材質の、波長 0.25 nm における反射率を入射角度の関数として計算した結果である。これらの金属の臨界角は石英ガラスと比較して大きくなっており、

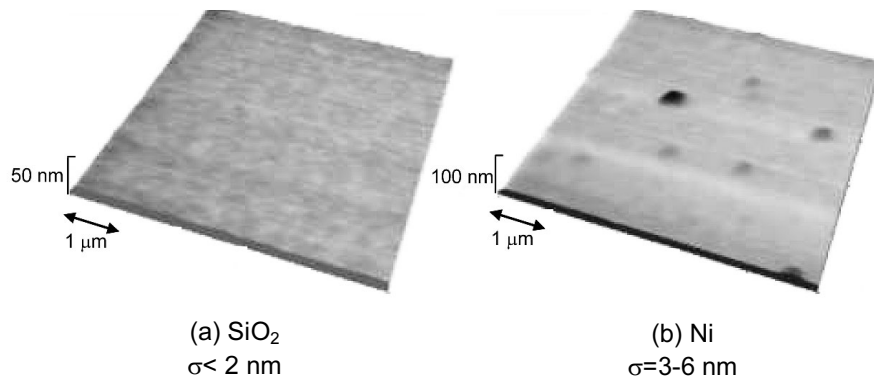


図4 ガラス基板およびニッケル層のAFM像。値は表面粗さRMS値

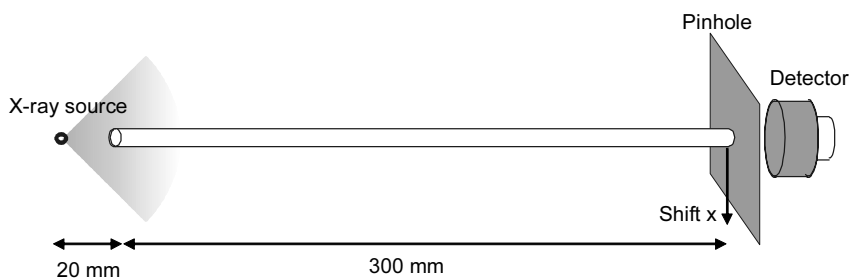


図5 中空光ファイバ伝送特性評価装置

Material	Gain	Loss (dB)	
		Experimental	Theoretical
Without capillary	1	25	24
SiO ₂	16	13.0	6.6
Ni	32	9.9	3.0

表 1 各種中空ファイバの集光利得および伝送損失測定値。
ファイバ内径 0.53 mm, 長さ 200 mm

これが、図2のような低損失をもたらすことは明らかである。タングステンがより大きな臨界角を示しているが、入射角が浅いグレーズング入射時の反射率はニッケルより小さいものとなっている。中空光ファイバ中を伝送するX線束のうち、反射損の小さいグレーズング入射角で反射するものだけが、ある程度の長さをもつファイバ中を伝搬可能なため、大きな臨界角とグレーズング入射時の高い反射率の両方が必要とされる。そのため、グレーズング入射時の反射率が石英とほぼ同程度に高く、さらに臨界角がはるかに大きいニッケルが、この波長域における中空光ファイバの材質として適しているものと思われる。

3. 実験結果

ガラスキャピラリの内面にニッケル薄膜を成膜することにより、ニッケル中空ファイバを製作した。ニッケル成膜には、半導体プロセスでの電極形成に用いられる無電界メッキ浴を使用し、ガスクロマトグラフィー用カラムとして市販されている石英ガラスキャピラリチューブを母材として用いた。ニッケルメッキの前処理としては、フッ化アンモニウム水溶液により石英ガラス表面を活性化することにより、ガラス上のニッケル層の高い付着力が得られた。活性化の際は、石英ガラス表面がエッチングされ、表面粗さが若干増加するが、その表面が厚さ 0.3 μm 以上のニッケル層で覆われる際にはその表面は平滑化された。この厚さは軟 X 線が入射角 89.4° というグレーズング角で入射する場合の表皮深さ 0.02 μm と比較して十分厚いため、ファイバ内を伝搬する軟 X 線は

ファイバ外部に漏れることはない。

図4は成膜したニッケル膜表面と、石英基板表面を原子間力顕微鏡を用いて観察した結果であるニッケル膜表面にはいくつかのクラスタが見られるが、表面粗さは rms 値で 3-6 nm と小さい結果が得られた。成膜条件をさらに最適化してクラスタ形成を抑制すれば、さらに平滑な表面を得ることも可能と思われる。

図5は製作した中空光ファイバの伝送特性評価に用いた測定系であり、用いたファイバは長さ 300 mm、内径 0.53 mm であった。測定においてX線発生部とファイバ入射端との距離は 20 mm とし、この値とX線点源の大きさ 0.3 mm とを用いて計算したファイバへの最大入射角は 88.8° となる。そのため、図3に示したとおり臨界角の大きなニッケル中空ファイバにおいて高い伝送効率が得られることが期待される。ファイバ出射端から放射されるX線は直径 0.5 mm のピンホールを介して、X線シンチレータが取り付けられたフォトマルチプライヤによって検出される。すべての光路は、この波長の軟 X 線をほとんど吸収しないヘリウムガスによってパージされている。伝送損失の測定は、ファイバの入出射パワー比をとることにより、集光利得の測定はX線源から 320 mm の位置に検出器を配置し、ファイバを挿入した場合とファイバが無い場合の検出パワー比をとることにより行った。

測定結果を表1に示すように、ニッケル中空ファイバはX線の平行化および集光素子として機能していることが確認され、線源から 320 mm の位置におけるパワーはファイバを配置することにより、ファイバが無い場合と

比較して 3.2 倍となった。また、石英ガラスキャピラリの内面にニッケル層を形成することによりファイバ伝送損失の低減が達成され、ニッケル中空ファイバの伝送損失は石英のそれより 3 dB 以上低いものとなった。実測値と理論予測値との差は、ニッケル中空ファイバにおいて 6.9 dB、石英中空ファイバにおいて 6.4 dB であることから、ニッケル層の表面粗さ (rms 値 3-6 nm) の影響は 0.5 dB と小さいことがわかる。理論値との差異は、後述するように X 線伝送損失がファイバの曲げに強く影響されることから、ファイバに存在するわずかな曲がりや断面形状の微細な揺らぎなどの構造不整が主な原因であると考えられる。

図 6 は曲げを加えたファイバからの出射 X 線強度の実測値を直線状態の時と比較してプロットしたものである。図 5 に示すようにファイバ入射端 50 mm を直線に保持したまま、ファイバ出射端をファイバ軸と垂直方向に x だけ移動させることによりファイバに曲げを付加した。表面粗さが比較的大きなニッケル中空ファイバの実測値も参考のためあわせて示した。わずかな量の曲げがファイバの伝送効率に大きく影響することがわかるが、その影響は表面が平滑なニッケル中空ファイバにおいて小さく、曲げ量を増加した場合も、ニッケル中空ファイバが石英中空ファイバより高い伝送効率を示すことが確認された。これは図 3 に示したとおり、ニッケルの臨界角が大きいことによるものと考えられる。

図 7 はニッケル中空ファイバと石英中空ファイバの伝送損失理論値をファイバ長の関数として計算した結果である。この理論値と同形状の曲線をニッケル中空ファイバの損失実測値にフィッティングさせることによりファイバ長 1 m の場合の損失を予測すると、約 12 dB となる。この損失は、より理想的に近い形状のキャピラリチューブを母材として用いることにより低減することも可能であるが、現状では長尺の軟 X 線伝送路は全く存在しないため、上記の伝送損失をもつファイバでも新たな応

用への展開の可能性は十分にあるものと考えられる。

5. 結論

特に医療分野をターゲットとした軟 X 線用伝送路として、ガラスキャピラリの内面に金属層を形成した中空ファイバを提案した。通常の X 線管から発生する低エネルギー軟 X 線を伝送するファイバの構成材料としては、減衰全反射時の臨界角が大きく、さらにグレーディング入射時の反射率が高いニッケルを選択した。無電界メッキ法を用いてガラスキャピラリの内面にニッケル層を形成することによりニッケル中空ファイバを製作し、その伝送効率の評価を行ったところ、ニッケル層形成の効果が現れ、石英中空ファイバと比較して高い伝送効率を得られた。現状では曲げによる付加損失が大きいために、本中空ファイバをフレキシブルなファイバとして体内へ導くことは難しいが、数 10 cm 程度の長さの直線状の腹腔鏡を用いて体内へ照射し、腫瘍の診断や治療に応用することは十分可能である。また、金属層を形成したキャピラリ光学素子のもう一つの利点として、金属層が十分に厚い場合は X 線がファイバの外側に漏れることはなく、鉛板などのシールドを必要としないということも挙げられる。現在、ファイバ内面に多層膜を形成したものについても検討中であり、これが実現されれば飛躍的に低損失化が達成され、曲げに対しても影響が小さな、より実用的な軟 X 線用ファイバの実現も可能となる。

謝辞 本研究の一部は、科学研究費補助金「基盤研究 B」(課題番号: 18360157) によって進められた。

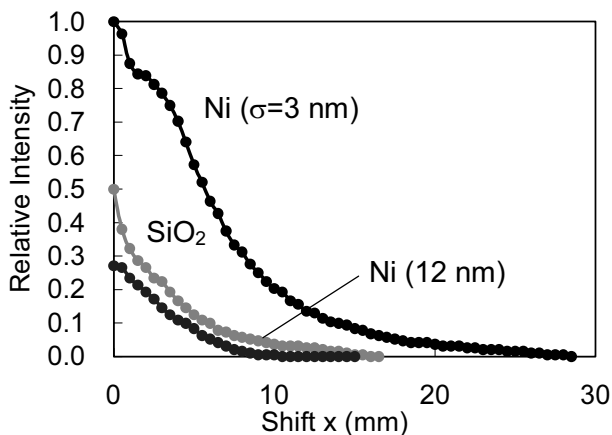


図 6 曲げを加えた中空ファイバからの軟 X 線出力測定値

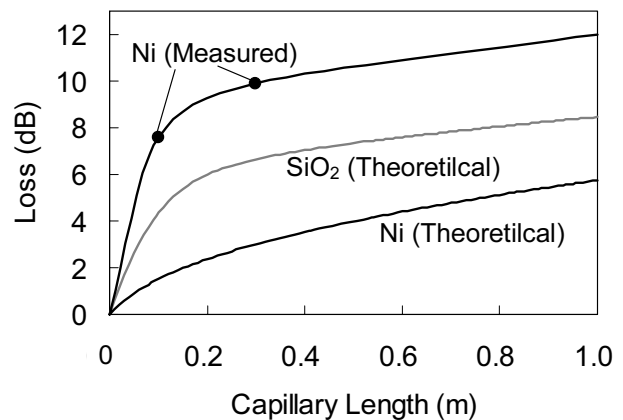


図 7 ニッケルおよび石英中空ファイバの軟 X 線伝送損失の理論値、実測値および予測値

引用文献

- 1) M. A. Kumakhov, Nucl. Instrum. Methods **B48**, 1990, 283.
- 2) V. A. Arkdiev, A. I. Kolomitsev, M. A. Kumakhov, I. Yu. Ponomarev, I. A. Khodeev, Yu. P. Chertov and I. M. Shakparonov, Sov. Phys. Usp. **32**, 1989, 271.
- 3) M. A. Kumakhov, Proc. SPIE. **2515**, 1995, 87.
- 4) R. W. Waynant, I. K. Ilev, K. Mitra, I. Gannot, and R. J. Jennings, Proc. SPIE **4616**, 2002, 121
- 5) L. Marton, Appl Phys. Lett. **9**, 1966, 194.
- 6) D. R. Parsignault and A. S. Krieger, Proc. SPIE **173**, 6, 1992, 190
- 7) C. A. MacDonald, Handbook of Optics, vol. III, M. Bass ed., (McGraw-Hill, New York, 2000).
- 8) G. Hirsch, X-ray Spectrom. **32**, 2003, 229.
- 9) Y. Matsuura, M. Saito, M. Miyagi, and A. Hongo, J. Opt. Soc. Am. A **6**, 1989, 423.
- 10) X-Ray Interactions With Matter, http://www-cxro.lbl.gov/optical_constants/
- 11) S. V. Kukhlevsky, F. Flora, A. Marinai, K. Negrea, L. Palladino, A. Reale, G. Tomassetti, A. Ritucci, G. Nyitray, and L. Kozma, Appl. Opt. **39**, 2000, 1059.
- 12) A. Michette, Optical System for Soft X-rays (Plenum, New York, 1986).
- 13) A. H. Ho, M. A. Piestrup, R. M. Silzer, and D. M. Skopik, J. Appl. Phys. **74**, 1993, 5320.