

全ファイバ TD-OCT のためのファイバ被膜の厚みによる位相の変化の検討 Study on phase change with fiber coating thickness for all-fiber TD-OCT

○高梨達也¹

*Tatsuya Takanashi

Abstract: Optical coherence tomography (OCT) is a non-contact, non-invasive imaging that can be measured in the order of several tens of μm without worrying about exposure, so it can be used for various organs of the human body such as the retina and subcutaneous tissue. It is used for tomographic imaging. In this paper, as an attempt to extend the optical path length, we investigate the relative change of the phase with the thickness of the coating, which solves the problem of extending the measurement distance.

1. はじめに

光コヒーレンストモグラフィ (Optical Coherence Tomography : OCT) は、非接触・非侵襲で撮像でき、被爆の心配がなく数十 [μm] オーダーで測定可能なため網膜や皮下組織などの、人体の様々な器官の断層撮像に用いられている^[1]。OCTには、時間領域法 (Time Domain OCT : TD-OCT) とフーリエ領域法 (Fourier Domain : OCT) などがあり、初期は TD-OCT が用いられていたが、FD-OCT の方が測定感度や測定速度の面で優れているため、近年では FD-OCT が主に使用されている。しかし、FD-OCT は、分光器や波長掃引レーザーなどを用いるので、高コストになってしまう点がある。一方で TD-OCT は絶対値測定が可能であり、機器の設計自由度の高さ、深達度の高さ、低コストで設計できるなどの利点を持っている。様々な分野で用いられている OCT は、低価格化や簡易化、可搬化を容易にするために小型化や外乱に対する耐性などが求められている。

従来の OCT では、可動ミラー部に空間光学系が用いられており、装置が大型化になり、外部からの衝撃や周りの外乱に影響されやすいため可搬化に限界があった。そこでピエゾ素子に光ファイバを巻きつけたものを可動ミラーとして用いることで、試料に直接光を当てるプローブ以外のシステムを全てファイバ光学系で実現できる全ファイバ TD-OCT を用いる^[2]。現在、皮下組織を測定するためには、可動ミラーの可動距離が足りないことが問題となっており、可動距離を延ばすために、光路長を延ばす必要がある。そこで、光ファイバ部にプラスチック被膜をすることで光路長を延ばすことを考えた。

本稿では、光路長を延ばす試みとして、被膜の厚さによる位相の相対変化について検討を行う。この検討により、測定距離を延ばすという課題を解決する。

2. 全ファイバ TD-OCT の原理

今回の研究で用いる全ファイバ光学系 TD-OCT の原理図を Figure1 に示す。

OCTは光の干渉性を利用して測定試料の内部構造を高分解能、高速で撮影することができる。近赤外線を用いるため非接触、非侵襲で撮影できるため、X線CTなどのように被爆の心配がなく、人体の様々な器官の断層画像に用いられている^[3]。

干渉計には、一般的なマイケルソン干渉計を用いており、光源に低干渉光源を用いる。まず、光源からの低コヒーレンス光をファイバケーブルによって2つに分岐させる。一方は多重構造の試料に入射させる。もう一方は可動ミラーに入射させる。試料へ入射された光は、試料の表面や内部の屈折率が異なる境界面で反射する。また、可動ミラー側でも光は反射し、その後試料側の光と重ね合わされる。このとき、低干渉光源という時間的コヒーレンスの悪い光を用いているために、試料側と可動ミラー側が同じ時間移動して重ね合わせた光同士でないと干渉しないため可動ミラーの位置が試料側から反射波が得られる試料の表面や屈折率の異なる層と層との境界の位置に丁度位置したときのみ干渉光を得ることができる。この時の可動ミラーの位置を知ることにより試料の表面や層の位置、厚さを特定することができる。以上の測定を可動ミラーの位置を走査しながら行うことで、光軸方向を反射波が得られる深さまで測定することができる。さらに、測定ヘッドまたは試料を光軸に対して垂直方向に走査しながら行うことで断層画像を得ることができる。

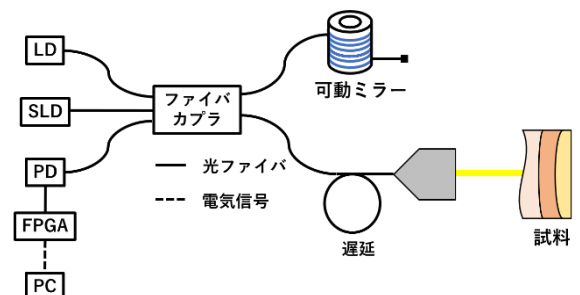


Figure1. Principle of all-fiber TD-OCT

1 : 日大理工・学部・電子

3. 可動ミラー部について

従来の可動ミラーの概要を図2, ピエゾ素子と光ファイバによる可動ミラーの概要を図3に示す.

従来では, 可動ミラー部に空間光学系が用いられており, 可動ミラーを動かし, 検出器上で双方の反射光が干渉し強めあう位置を観測することで, 試料内のどの深さに反射面があるかを知ることができたが, 先行研究⁽²⁾では可動ミラー部にピエゾ素子に光ファイバを巻きつけ, ファイバの終端面に反射膜コートを塗布しミラーに見立てたものを用いている. ピエゾ素子には逆圧電効果という, 電界を印加することで歪む性質があり, この歪みによりピエゾ素子に巻きつけられた光ファイバに圧力を加え, ファイバ内部のガラス密度が変化することで, 屈折率が変化する. そしてファイバ内部の光路長を, 変化させることができる. これによって生じる光遅延を利用することで仮想的に可動ミラーの位置を変化させている. この性質を用いて可動ミラー部をファイバ光学系により実現する. そしてピエゾ素子に光ファイバを巻き付けた分の光路長を合わせるために, 新たに試料部に遅延を設けている. これにより, 可動ミラー部の光ファイバでの構成, 受光部の小型化が期待できる.

そして光ファイバにプラスチックを被膜することにより外部からの光ファイバの側面に対する圧力感度を増加させ, 光路長を延ばすことができる.

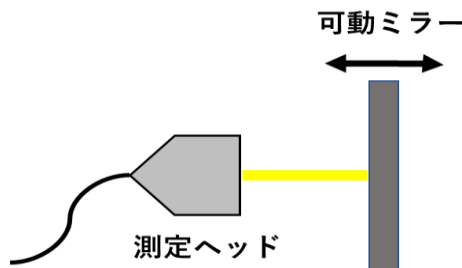


Figure2. Overview of conventional movable mirrors

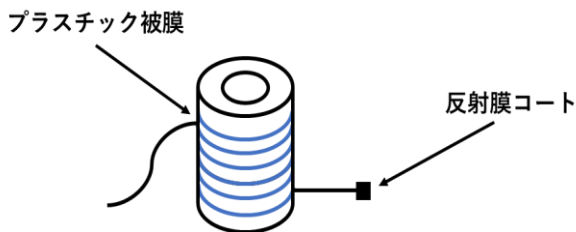


Figure3. Overview of movable mirrors using piezo elements and optical fibers

4. プラスチック被覆された光ファイバの圧力感度特性について

プラスチックを被膜することによって外部からの光ファイバの側面に対する圧力感度を増加させることができる.

プラスチック被膜の厚さによるガラスの軸方向歪み ϵ_z は, 静水圧時の場合, プラスチック被膜の外径が光ファイバのガラス部分の外径に比べて十分に大きく,

ガラスのヤング率 Y_g がプラスチックのヤング率 Y_p より十分に大きい場合式(1)で表される^[4].

$$\epsilon_z \approx \frac{(1-2V_p)L}{fY_g + (1-f)Y_p} \quad (1)$$

ここで, V_p はポアソン比, L はピエゾ素子に巻き付ける光ファイバの長さ, 光ファイバのガラス部分の外径を a , プラスチック被膜の外径を b , $(a/b)^2$ を f とする.

微小圧力 ΔP での光ファイバの位相の相対変化 $\Delta\phi/\phi$ は式(2)で表されている.

$$\frac{\Delta\phi}{\phi\Delta P} = - \left\{ 1 - \frac{n^2}{2}(1-2V_p)p \right\} \frac{1-2V_p}{fY_g + (1-f)Y_p} \quad (2)$$

ここで, n は光ファイバのコアの屈折率であり, 式(2)より, p はポッケルス係数である.

プラスチック被膜を厚くするにしたがって, 位相の相対変化が大きくなっている. この式は静水圧を加えた場合でのプラスチック被膜の厚さによる位相の相対変化で, 引っ張り張力時のプラスチック被膜の厚さによる位相の相対変化は確認されていない. そこで, 静水圧時と引っ張り張力時の相対変化が同じ特性になるかを検討していく.

5. まとめと今後の展望

本稿では, 光ファイバにプラスチック被膜をすることで可動ミラー部の光路長を延ばすことを述べた. 静水圧時にはプラスチック被膜を厚くすることで位相の相対変化が大きくなることが確認されていたが, 引っ張り張力に対しても同じ特性になるかは確認されていない. 今後は, 引っ張り張力時の特性を確認し, 検討を行う予定である.

6. 参考文献

- [1] 湯浅哲也:「光コヒーレンストモグラフィ:第2回」, MEDICAL IMAGING TECHNOLOGY, Vol.29, No.5, pp.277-281, 2011.
- [2] 香取宏昭:「全ファイバ光学系 TD-OCT」, IEEE 主催第1回学生研究発表会予稿集, IEEE_IM-S17-10, 2017.
- [3] 覚間誠一:「材料科学計測のためのレーザー干渉精密測定技術」, までりあ, Vol.49, No.1, pp.3-8, 2007.
- [4] B. Budiansky, D. C. Drucker, G. S. Kino, and J. R. Rice:「Pressure sensitivity of a clad optical fiber」, Vol.18, No.24, pp.4085-4088, 1979.