

連続スペクトル白色光を用いた干渉分光トモグラフィー

渡 辺 歴

Optical coherence-domain reflectometry (OCDR) は光通信デバイスにおいて反射面の位置をマイクロメートル程度の解像度で特定するために提案された¹⁻³⁾。その後、試料の表面形状計測に OCDR は適用され⁴⁻⁷⁾、さらに、OCDR の原理に基づき、生体組織の内部構造を非侵襲的に映像化する optical coherence tomography が提案されている^{8,9)}。筆者らは従来から、低コヒーレンス光源を用いて計測対象の深さ情報と同時に分光情報を計測する干渉分光トモグラフィー (coherence spectrotomography: CST) を提案している¹⁰⁻¹⁵⁾。生体内部の空間情報と分光情報を同時に得ることができるならば、生体内部の生理学的構造や物理的組成に関する情報が得られ、医療診断等に役立つと考えられる。本稿では、超短光パルスにより得られる連続スペクトル白色光 (white-light continuum: WLC)¹⁶⁾ を光源とし、層状媒質の形状と分光情報を推定する干渉分光トモグラフィーの概略を紹介する¹⁷⁻¹⁹⁾。

1. 干渉分光トモグラフィーの原理

図1にCSTの光学系を示す。計測対象は低コヒーレンス光源をもつマイケルソン型干渉計の片腕におかれる。干渉信号は計測対象からの反射光(後方散乱光)と参照面からの反射光の光路差がコヒーレンス長以下のときにのみ得られる。白色光源を用いているので、干渉信号から反射光の分光情報を抽出することができる。CSTでは奥行き方向の反射層間の吸収は一定としている。分光情報の抽出には、例えば波数領域で中心波数の異なる連続した矩形のフィルター関数群による干渉信号のフィルタリング処理が行われる。フィルター群の各帯域で再生された干渉信号は、通過する帯域内での干渉信号に相当し、奥行き情報と分光情報を同時に与えることができる。この再生された干渉信号は、実空間では計測対象からの反射光と参照光との相互コヒーレンス関数と各帯域通過フィルターとのコンボリューション積分となる。このため、試料に関する微細な奥行き方向の情報を保つには、フィルター関数の帯域を広くすればよい。しかし、一方で分光情報に関する分解能が低下す

る。CSTでは、計測対象の3次元空間情報と分光情報を同時に抽出することが可能であるが、奥行き方向の解像限界と波数分解能を同時に高めることはできない^{11,19)}。CSTの信号に含まれる情報は光源のスペクトル帯域で決定されるため、帯域の広い光源を用いる必要がある。また、光散乱性媒質である生体試料の測定には、十分な後方散乱光を得るために、輝度の高い光源が必要となる。

2. 着色層状媒質の実験結果

カラーOHPシートの形状と分光特性の同時測定実験を紹介しよう¹⁷⁻¹⁹⁾。光源には、先に述べたWLCを採用している。増幅されたチタンサファイアレーザー(エネルギー $300\mu\text{J}/\text{pulse}$ 、繰り返し周波数 1kHz 、中心波長 800nm)を焦点距離 100mm のレンズにより外径 12.5mm 、光路長 10mm の四塩化炭素セル中に集光することによりWLCが得られる。得られたWLCは、レンズにより平行光となり、マイケルソン干渉計内に置かれた試料面および参照面に垂直に入射する。試料および参照面からの反射光を重ね合わせ、試料を光軸方向にピエゾ素子で駆動し、CCDカメラで受光することにより、干渉信号が得られる。参照面とCCDカメラの受光面は結像関係にある。図2に、赤色層をもつシートから得られた干渉信号を示す。左側の干渉信号は着色層表面に相当し、右側の干渉信号は着色層裏面に相当している。このことから着色層の表裏2つの反射面に由来する干渉信号が得られていることがわかる。WLCは、高輝度かつ広帯域であるが、現在のところ、その強度変動が

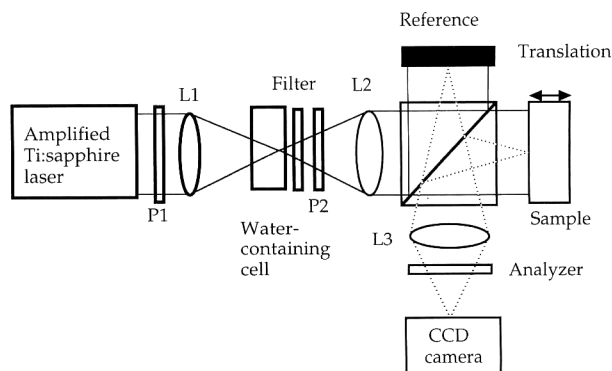


図1 連続スペクトル白色光を用いた干渉分光トモグラフィー光学系。L1, L2, L3: レンズ, P1, P2: 偏光子。

大阪大学大学院工学研究科応用物理学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)
E-mail: watanabe@redeye.ap.eng.osaka-u.ac.jp

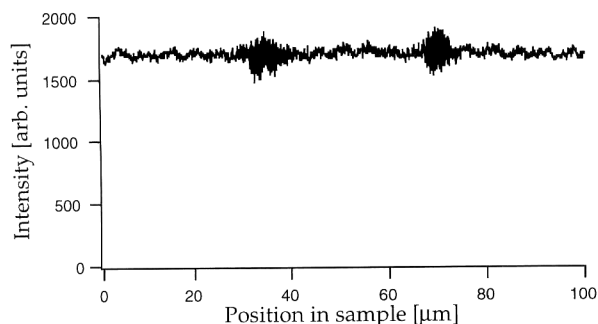


図2 赤色層をもつシートから得られた干渉信号.

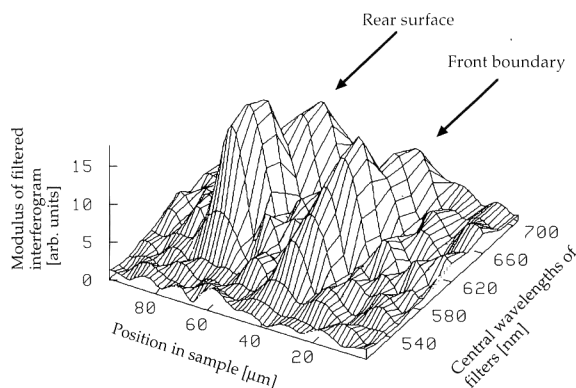


図3 再生された干渉信号.

問題となっている。この強度変動は、WLCを励起するチタンサファイアレーザーの出力変動とWLC発生の際の強度変動が原因と考えられている。図3に、フィルターの中心波長と試料の位置との関数として、図2で示された干渉信号を多数の連続した矩形の帯域通過フィルターで処理した再生干渉信号の絶対値を示す。再生された干渉信号はフィルターの通過帯域内での干渉信号に相当するので、試料の各帯域での散乱係数、すなわち分光情報が試料内の位置の関数として示されている。

計測対象の奥行き情報と同時に分光情報を抽出する干渉分光トモグラフィーの原理を概説し、連続スペクトル白色光を用いて、着色層状媒質の形状と分光情報を推定する実験結果を紹介した。散乱が顕著な生体組織の測定には、連続スペクトル白色光のより安定な発生方法を検討する必要がある。

日頃、干渉分光トモグラフィーに関して御指導いただいている大阪大学大学院伊東一良教授、実験に協力していただいている同増田善裕氏に感謝します。また、本稿で述べられた多くの実験は大阪大学ベンチャービジネ斯拉ボラトリーで行われました。

文 献

- 1) K. Takada, I. Yokohama, K. Chida and J. Noda: "New measurement system for fault location in optical waveguide devices based on an interferometric technique," *Appl. Opt.*, **26** (1987) 1603-1606.
- 2) B. L. Danielson and C. D. Whittenberg: "Guided-wave reflectometry with micrometer resolution," *Appl. Opt.*, **26** (1987) 2836-2842.
- 3) R. C. Youngquist, S. Carr and D. E. N. Davies: "Optical coherence-domain reflectometry: A new optical evaluation technique," *Opt. Lett.*, **12** (1987) 158-160.
- 4) M. Davidson, K. Kaufman, I. Mazor and F. Cohen: "An application of interference microscopy to investigated circuit inspection and metrology," *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, **775** (1987) 233-247.
- 5) B. S. Lee and T. C. Strand: "Profilometry with a coherence scanning microscope," *Appl. Opt.*, **29** (1990) 3784-3788.
- 6) G. S. Kino and S. S. C. Chim: "Mirau correlation microscope," *Appl. Opt.*, **29** (1990) 3775-3783.
- 7) T. Dresel, G. Häusler and H. Venzke: "Three-dimensional sensing of rough surfaces by coherence radar," *Appl. Opt.*, **31** (1992) 919-925.
- 8) D. Huang, E. A. Swanson, C. P. Lin, J. S. Schuman, W. G. Stinson, W. Chang, M. R. Hee, T. Flotte, K. Gregory, C. A. Puliafito and J. G. Fujimoto: "Optical coherence tomography," *Science*, **254** (1991) 1178-1181.
- 9) 丹野直弘, 市村 勉, 佐伯昭雄: 特許第 20100425 号 (特公平 6-35946).
- 10) K. Minami, T. Inoue, K. Itoh and Y. Ichioka: "Coherence spectrometry with reflected light from colored layers," *Proc. SPIE*, **2778** (1996) 7P-PD-7.
- 11) 南 浩治, 菅 武志, 井上 卓, 伊東一良, 一岡芳樹: "コヒーレンス・スペクトロトモグラフィー—低干渉光干渉計測法による多層膜中間層の分光吸収率の測定—", *光学*, **25** (1996) 156-160.
- 12) 渡辺 歴, 伊東一良: "多層媒質のコヒーレンス分光トモグラフィー", 第17回光波センシング技術研究会講演論文集 (1996) pp. 69-72.
- 13) W. Watanabe, Y. Masuda and K. Itoh: "Coherence spectrometry with white light continuum," *Proc. SPIE*, **3261** (1998) 305-312.
- 14) K. Itoh, W. Watanabe and Y. Masuda: "Parallelisms in interferometric fast spectral imaging," *Proc. SPIE*, **3261** (1998) 278-288.
- 15) 伊東一良, 渡辺 歴: "コヒーレンス分光トモグラフィーとコンフォーカルレイ干渉計", 第21回光波センシング技術研究会講演論文集 (1998) pp. 7-12.
- 16) R. R. Alfano, ed.: *The Supercontinuum Laser Source* (Springer-Verlag, New York, 1989).
- 17) K. Itoh, W. Watanabe and Y. Masuda: "Coherence-based spectrometry", *Proc. OII '98, Topical Meeting of the International Commission for Optics* (J. Optoelectron. Laser, 1998) pp. 233-235.
- 18) 渡辺 歴, 増田善裕, 伊東一良: "高輝度連続スペクトル白色光源を用いた層状媒質のコヒーレンス分光トモグラフィー", *Optics Japan '98 予稿集* (1998) p. 18p1C03.
- 19) W. Watanabe, Y. Masuda and K. Itoh: "Coherence spectrometry of layered medium with white-light continuum," *Opt. Rev.*, **6** (1999) 71-76.

(1998年11月2日受理)