

高精度光応用計測技術の開発(第6報)

近赤外光源の評価と内部計測への応用

廣川勝久, 門藤至宏, 倉本丈久^{*1}, 竹保義博^{*2}

Noninvasive optical measurement for external, surface and internal structures VI

Evaluation of Superluminescent Diode and its Application to Optical Coherence Tomography

HIROKAWA Katsuhisa, MONDO Munehiro, KURAMOTO Takehisa, and TAKEYASU Yoshihiro

Optical coherence length and spectrum bandwidth of a superluminescent diode (SLD) emitting infrared light are evaluated. By using the Michelson interferometer, we show optical coherence length and spectrum band dependent on the injection current of the SLD. The SLD is effectively applied to the optical coherence tomography of a thin film. In addition, thickness measurement for several TiO_2 coats is demonstrated.

近赤外光光源であるスーパーluminescentダイオード (SLD) のコヒーレンス長とスペクトル幅を実験により評価した。SLD に注入される電流に対するコヒーレンス長とスペクトル幅の変化を、マイケルソン干渉計により求めた。この SLD が薄いフィルムの光断層画像計測に有効であることを示す。加えて数種類の酸化チタンの厚さ測定についても紹介する。

キーワード：光計測, 断層画像, 近赤外光源, SLD

1. 緒 言

製造技術の進歩により、製品の形状計測に求められる精度や範囲などの要求は高まる一方である。特に、近年の製品は高い意匠性を持つことから、正確な形状を計測するためには非常に多くの計測点を必要とする。また、電子部品や光学部品の小型化が進み、これらの部品やその製造装置の部品などにも高精度な加工、測定が要求されている。光による形状計測は、計測物体に接触せず、光の高速性、並列性などを利用し高速、高精度、高密度な計測が出来る点で他の測定方法と比較し非常に優位である。我々は、これまでこのような非接触の光計測として、計測物の大きさや測定精度に応じ、光切断法、共焦点顕微鏡、干渉計測法に関する研究を行っている¹⁻⁴⁾。

内部計測技術の進んだ医療分野では、近年光計測の研究により、表面から比較的浅い部分の内部構造を無侵襲かつ高精度に計測するための計測方法が提案された。これにより、医療計測の分野では表皮部分の毛細血管や、網膜細胞の状態の計測、血管中の血流の分布計測が可能

となりつつある⁵⁻⁸⁾。工業分野では、現在、光を利用した内部の検査については塗装内部の錆検出の報告があるだけであり、実用化に至っているのは半導体製品の酸化膜の計測程度しかない^{9,10)}。光干渉計測を内部の計測に用いることは、製品内部の欠陥の検出や、厚みの検査などさまざまな応用が期待でき、製品を切断することなく計測できることから、製品の全数検査の可能性がある。

我々は、これまでの研究で、物体内部から戻ってくる信号光と参照光を重ね合わせる光断層画像計測法(Optical Coherence Tomography: OCT)を用い、光計測法が物体の内部構造及び分光情報の同時計測に有効であることを示した¹¹⁾。また、干渉信号解析に複素関数のウェーブレット関数を用い反射光の位置に対応した波長と反射面を求める方法を提案し、ウェーブレット変換後の信号から反射面の位相を計算することにより、精度の向上と接近した2つの反射面の分離が容易になることを示した⁴⁾。

本報告では、白色光源をハロゲンランプから、近赤外帯域の白色光源であるスーパーluminescentダイオード (SLD) に置き換えた場合の光断層画像計測について、基本的な光学特性を測定、評価し、フィルムの厚さ測定に応用した結果を示す。加えて、酸化チタンの濃度差のある光触媒に対する OCT の測定結果についても述べる。

2003.5.30 受理 情報技術部

*1 広島県産業科学技術研究所

*2 応用加工技術部

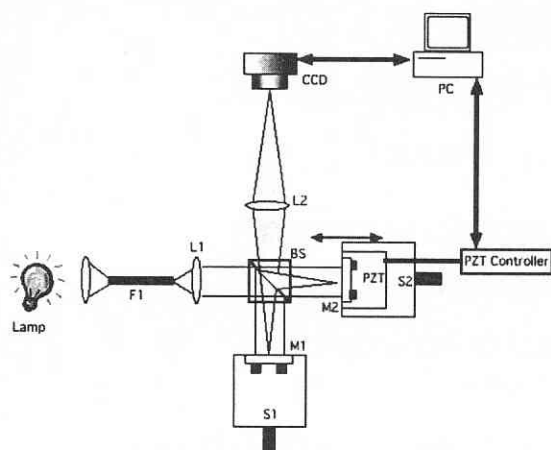


図1 マイケルソン干渉光学系

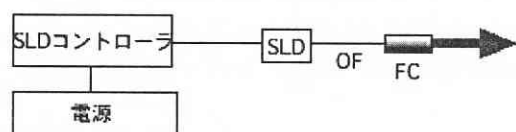


図2 SLDの構成図

2. 近赤外光源による光断層画像計測

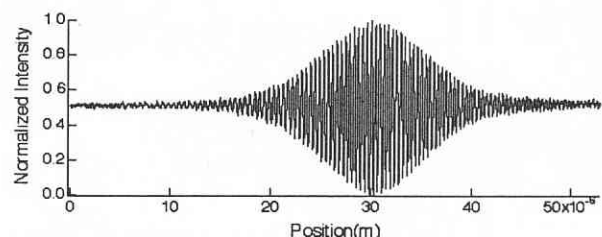
2.1 マイケルソン干渉計

コヒーレンス長や断層画像の計測は、マイケルソン干渉計と呼ばれる光学系により行う。SLDやハロゲンランプなどは干渉性の低い低コヒーレンス光源であり、これらの光源を用いた場合マイケルソン干渉計では、一定の時間範囲において干渉が起こり、インターフェログラムが得られる。また、断層画像についてはこのインターフェログラムの山の位置により求められる。マイケルソンの光学系の基本原理について図1を基に説明する。いま、低コヒーレンス光のコヒーレンス時間を ΔT とする光が光源から放射され、ビームスプリッター(BS)により2光束に分割された後、それぞれサンプルミラー(M1)と参照ミラー(M2)に入射する。両ミラーからの反射光は再びビームスプリッターにより重ね合わされ CCD カメラにより計測される。この時、サンプルミラーと参照ミラーからの反射光をそれぞれ $S(t)$ 、 $S(t+\tau)$ とすると、CCD カメラに計測される光強度 $I(\tau)$ は次式で与えられる。

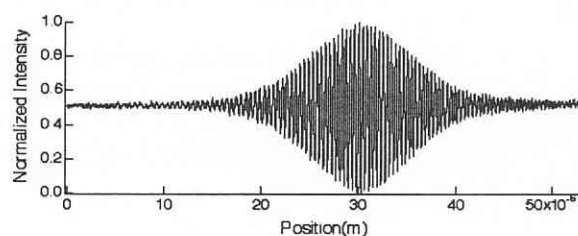
$$I(\tau) = \langle |S(t) + S(t+\tau)|^2 \rangle \quad (1)$$

$$= \langle |S(t)|^2 \rangle + \langle |S(t+\tau)|^2 \rangle + 2\text{Re}\langle S(t)S^*(t+\tau) \rangle,$$

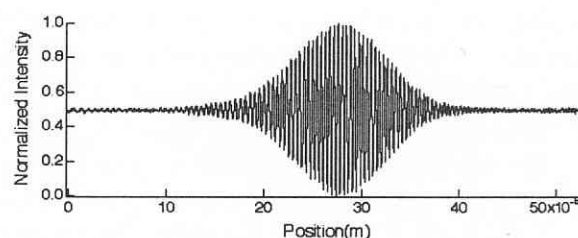
ここで、 $\langle \rangle$ は時間平均、 $*$ は複素共役である。(1)式の第1項、2項はサンプルミラーと参照ミラーからの戻



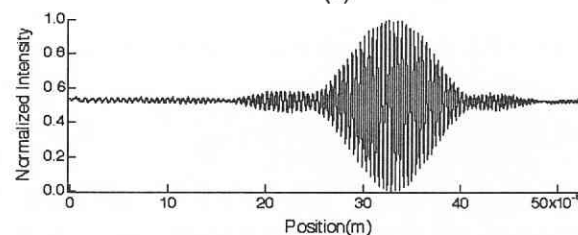
(a)



(b)



(c)



(d)

図3 SLDのインターフェログラム
(a)50mA,(b)75mA,(c)100mA,(d)125mA

り光の光強度を表し、第3項が干渉信号を表している。 τ は時間遅延を示す。低コヒーレンス光では、コヒーレンス時間が ΔT のとき $c\Delta T$ の範囲で干渉縞が観測できる。ここで c は光速である。(1)式では、光源は、点光源と仮定し、時間的なずれのみを考慮しているため、第3項は時間コヒーレンス関数とよばれ、光源の時間的な自己相関関数になっている。この第3項のフーリエ変換は光源のパワースペクトルとなりスペクトル幅やスペクトル形状を求めることができる。

2.2 スーパーluminescentダイオード

SLDの光学特性、すなわち光強度、時間コヒーレンス、スペクトル幅などは、SLDに注入される電流やSLDの温度により変化する。従って、SLDを使った光学測定では、このような光学特性をあらかじめ求めておく必要がある。一般的にSLDの光強度は、注入電流の増加に伴い強くな

表 1 注入電流と半値全幅

注入電流 (mA)	半値全幅 (μm)
50	13.7
75	12.2
100	10.6
125	0.8

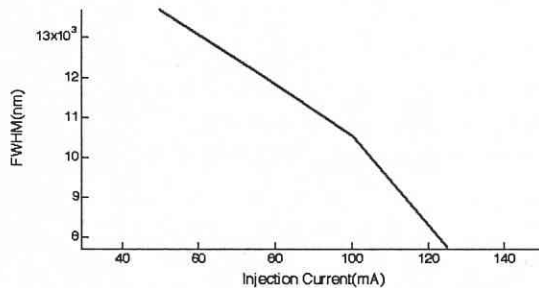


図 4 注入電流と半値全幅

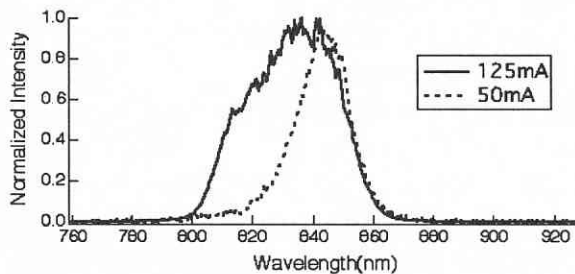


図 5 発振波長

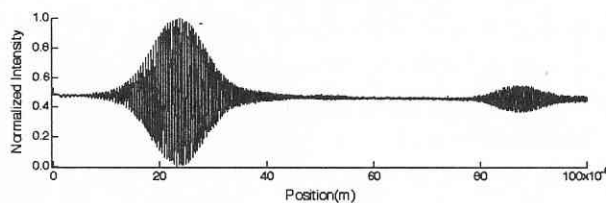


図 6 赤色フィルムからの表面反射と裏面反射

る。また、注入電流を増やすと、時間コヒーレンスは短くなり、スペクトル幅が広がる。

SLD 光源には SLD-37(スーパーミネッセント社製)を用いた。中心波長 820nm、スペクトル半値全幅 50nm である。図 2 に示すように SLD は SLD コントローラーにより駆動され、SLD コントローラーは注入電流と温度を制御する。SLD からの光はシングルモード光ファイバー(OF)によりファイバーコリメータ(FC)に導かれ、ファイバーコリメータにより数ミリ程度の径をもつ平行光としてマイケルソン干渉計に入射する。

表 2 光触媒と酸化チタンの濃度

光触媒名	酸化チタン濃度
X22	1.2 倍
MR2	2 倍
P1	無し

表 3 光断層画像による測定結果

光触媒名	測定結果
X22	裏面反射光強度弱
MR2	良好
P1	裏面反射光強度弱 測定不可能な部分がある

注入電流を 50mA から 125mA まで変化させた時、マイケルソン干渉計より得られたインターフェログラムを図 3 に示す。これらのインターフェログラムは干渉計の一方のミラーを 38nm 間隔でシフトさせ、各ミラーの位置での光強度を CCD カメラにより測定し、得られたものである。注入電流に対するインターフェログラムの半値全幅を表 1 に示し、グラフ化したものを図 4 に示す。注入電流を増加させると時間コヒーレンスが低下し、半値全幅は狭くなる傾向がある。特に 125mA ではその傾向は強まる。図 5 は 50mA と 125mA の場合の分光器より得られたスペクトル分布を示す。

2.3 赤色フィルムの測定

100mA の注入電流により SLD を駆動し、光源として用いて赤色のフィルムを測定した結果を図 6 に示す。以前我々がハロゲンランプで行った測定¹⁾と比較すると、SLD を用いた場合、表面反射と比較し裏面反射の強度が強いことが判る。SLD はハロゲンランプと比較し、強度の時間変動も少なく安定した測定が出来、近赤外域で吸収の少ない OCT に利用可能である。

3. 近赤外光源による光断層画像計測

我々のこれまでの研究では、光触媒の膜厚が光断層画像計測法により非常に高精度に測定出来ることを示した⁴⁾。本報告では、さらに酸化チタンの含有量の異なる光触媒の塗装膜を測定し、その影響を調べた。まず、刷毛塗りによる光触媒について、酸化チタンの含有量の異なる 3 種類を光断層画像計測法により計測し、その比較を行った。各光触媒の酸化チタンの含有比を表 2 に示す。

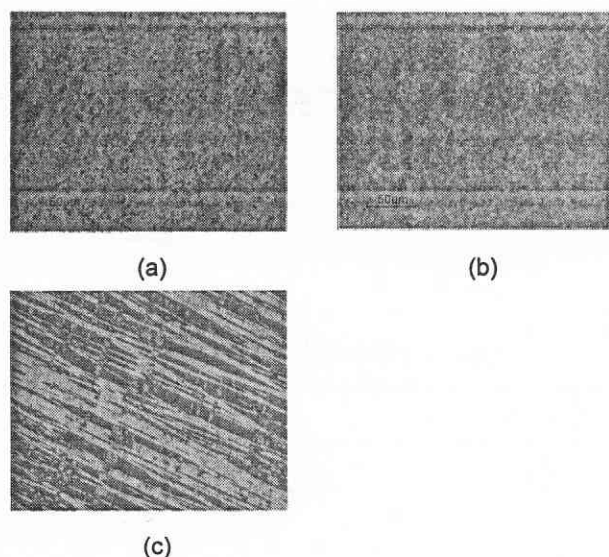


図7 光触媒の表面状態

(a)X22, (b)MR2, (c)P1 (100倍)

この比率は前回の報告で使用したサンプルに対する酸化チタンの濃度比である。

測定結果を表3に示す。酸化チタンの含有量が多いものが裏面反射が出にくいと予想したが結果的には、酸化チタンの含有量の光測定への依存性は低く、酸化チタンの含有量が2倍程度でも測定に影響しない。

光計測へ影響を与える他の要因として、塗装面の表面状態が考えられる。表面状態が荒れている場合、入射した光は直進光以外の光となり、裏面反射が得られないと考えられる。このため、金属顕微鏡により表面状態を調べ、接触式の表面粗さ計により表面粗さを数値化した。金属顕微鏡の写真を図7に示す。P1は親水処理を行ったにもかかわらず、むらが出来ているため、測定可能な部分と不可能な部分があったと考えられる。また写真からわかるように、それぞれのサンプルでは表面状態はかなり異なっている。表面粗さ計により測定した結果を表4に示す。光断層画像計測には表面状態の影響が大きく特に表面粗さのパラメータではSパラメータの影響が大きいと考えられる。つまり表面での山の間隔が広いほど計測しやすいと考えられる。

4. 結 言

近赤外帯域の白色光源、スーパーluminescentダイオード (SLD) の光断層画像計測について、基本的な光学特性を測定評価し、注入電流に対する時間コヒーレンス

表4 表面粗さ

	Ra	Ry	S
X22	0.030	0.384	28.593
MR2	0.033	0.315	31.257
P1	0.028	0.186	25.020

単位 μm

Ra:算術平均粗さ, Ry:最大高さ, S:局部山頂の平均間隔

の関係を明らかにした。また SLD をフィルムの厚さ測定に応用した例を示し、可視光光源の場合と比較した。加えて、酸化チタン濃度差のある光触媒に対して OCT による測定を行った結果を示し、表面状態が OCT に影響することを明らかにした。

文 献

- 1) 倉本文久ほか3名：広島県立東部工業技術センター研究報告, 15, 1-4 (2002).
- 2) 竹保義博ほか3名：広島県立東部工業技術センター研究報告, 15, 5-8 (2002).
- 3) 門藤至宏ほか4名：広島県立東部工業技術センター研究報告, 15, 9-12 (2002).
- 4) 廣川勝久ほか3名：広島県立東部工業技術センター研究報告, 15, 13-16 (2002).
- 5) I. Hartl, X.D.Li, C. Chudoba, R. K. Ghanta, T. H. Ko, and J.G. Fujimoto J. K. Ranka and R. S. Windele : Opt. Lett., 26, 9, 608-610 (2001).
- 6) C. Yang, A. Wax, M. S. Hahn, K. Badizadegan, R. R. Dasari, and M. S. Feld : Opt. Lett., 26, 127 (2001).
- 7) Xingde Li, Tony H. Ko, and James G. Fujimoto : Opt. Lett., 26, 1906 (2001).
- 8) Zhao, Z. Chen, Z. Ding, H. Ren, and J. S. Nelson : Opt. Lett., 27, 8(2002).
- 9) Jinpin Ying, Feng Liu, P. P. Ho, and R. R. Alfano : Opt. Lett., 25, 16, 1189-1191 (2000).
- 10) J. H. Ali, W. B. Wang, P. P. Ho, and R. R. Aifano : Opt. Lett., 25, 1303 (2000).
- 11) 廣川勝久ほか3名：広島県立東部工業技術センター研究報告, 13, 12-15 (2000).