

高精度光応用計測技術の開発 (第 4 報)

酸化チタン塗膜厚の非接触計測

廣川勝久, 門藤至宏, 倉本丈久, 竹保義博*

Noninvasive optical measurement for external, surface and internal structures IV

Optical coherence tomography for measurement of TiO_2 coat

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

We propose a novel signal processing using the wavelet transform to obtain both transmitting spectrum and reflective point from the interferogram acquired from optical coherence tomography. Internal reflective point resolved into phase is precisely determined by use of a complex wavelet function. Noninvasive measurement for the depth of TiO_2 coat is experimentally demonstrated.

光断層画像計測法の測定から得られた干渉信号をウェーブレット変換することにより, 物体内部からの反射光スペクトルと反射位置を高精度に求める新しい解析方法を提案する。提案する解析方法では, ウェーブレット関数に複素関数を用いることにより, 干渉信号の位相情報を求める。実験では, 酸化チタンの塗装膜の表面反射と裏面反射の位置が, 提案する方法により容易に求まることを示す。

キーワード: 光計測, 断層画像, 分光, ウェーブレット, 位相解析

1. 緒 言

物体の形状を光計測することは, 計測物体に接触しないなどの点で, 他の方法と比較して非常に優位である。たとえば, 計測物体を非接触に計測するため, 高温の物体や, 柔らかい物などの計測が可能となり, 計測物体に傷をつけるなどの心配が無いなどの利点がある。また, 光は空間を伝わるため計測機器の配置などの自由度は大きい。加えて, 光には, 波長, 強度, 偏光などの複数の情報を含んでいることから, これらを組み合わせた計測が出来る点も有利である。本研究では, このような非接触の光計測として, 外部形状, 表面形状, 内部構造に関する研究を行い, 特に本報告では内部構造計測について述べる。

内部構造計測の最も進んだ医療分野では, これまで X 線によるレントゲンや, 超音波エコー, MRI などの生体内部の計測に対する研究開発が行われ, 実用化されている。これらの計測方法は, 深部を比較的広範囲に計測する方法である。ところが, 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など, レントゲンや, 超音波エコー, MRI などでは不可能な計測が可能となりつつある¹⁻⁴⁾。工業製品に目を移すと, 製品の検査は表面だけでなく, 内部の構造, 欠陥や異物, シートや塗装の均一性や厚さなどについて行う必要があるが, 現在, 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^{5),6)}。工業製品の製造品質向上のためには, 製品内部の欠陥の検出や, 厚みの検査などが不可欠であり, すべての製品を検査するために非破壊の検査を必要とする。我々の提案する計測方法はこのための有効な方法であり, さまざまな応用が期待できると考えられる。

我々は, これまで, 物体内部から戻ってくる光と参照光と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⁷⁾。本報告では, 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する。また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す。実験

では、光触媒に用いられる酸化チタンの塗装を光断層画像計測法により計測し、塗装の接着面位置の信号解析について述べる。

2. 測定原理

本報告で示す光断層画像計測法では、低コヒーレンス光の干渉現象を利用して物体の深さ方向の測定を行うものである。低コヒーレンス光による光断層画像計測法の基本原理について図1を基に説明する。図1はマイケルソン干渉計による実験光学系を示す。いま、低コヒーレンス光のコヒーレンス時間を ΔT とする。光源から放射された光は、ビームスプリッターにより2光束に分割され、それぞれサンプルとNDフィルタに入射する。NDフィルタからの表面反射光とサンプルからの反射光は再びハーフミラ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、サンプルとNDフィルタ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項はサンプルとNDフィルタからの戻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。

3. ウェーブレット変換による信号解析

(1)式の第3項に示される干渉信号をフーリエ変換すると、その干渉信号に含まれる光の周波数を求める事が可能である。しかし、フーリエ変換では、計測点の位置に対応した周波数は得られないため、波長分散がある場合や、2つの反射面が接近しているような場合の解析には向かない。そこで、本報告では、局在する信号のスペクトルと反射面の解析方法として、ウェーブレット変換の干渉信号への適用方法を示す。今マザーウェーブレット関数 $\psi(x)$ とした場合、そのウェーブレット関数は、

$$\varphi(x:a,b) = \varphi\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad (2)$$

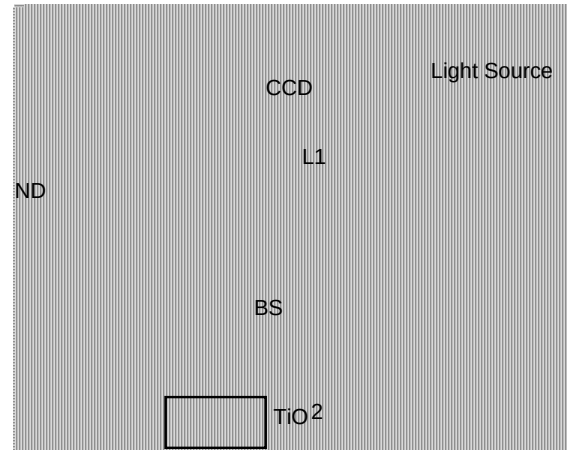


図1 光学系

で与えられる。ここで、 a はスケールパラメータ、 b はシフトパラメータである。今、計測された干渉信号を $I(x)$ とすれば、そのウェーブレット変換は次式により与えられる。

$$W(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} I(x) \varphi(x:a,b) dx \quad (3)$$

(1)式で得られる干渉信号を計測した場合、時間差 τ は、光学系の位置 x により決まるため、以下では τ を x に置き換える。干渉信号に含まれる波長を求めるためのウェーブレット関数としてGaborのウェーブレット関数を用いた⁸⁾。

$$\varphi_{a=\lambda}(x) = \frac{1}{2\sqrt{\pi\sigma}} \exp[-(x/\lambda\sigma)^2] \exp(2\pi i x/\lambda) \quad (4)$$

この時、スケール係数を波長 λ とし、波長に対応したウェーブレット関数を用い、ウェーブレット変換の振幅を波長のスペクトル振幅とする。この時ウェーブレットの窓関数部分、すなわち、 $\exp[-(x/\lambda\sigma)^2]$ は2波長程度の大きさとした。

$$S(x,\lambda) = |W(\lambda,x)| \quad (5)$$

このウェーブレット変換により得られたスペクトル分布から、頂点となる点を反射面とした。さらに、計測精度を上げるため、干渉信号の位相を計算し、計測点間に干渉信号の頂点を求める。このために、(4)式に位相 ϕ を加える。

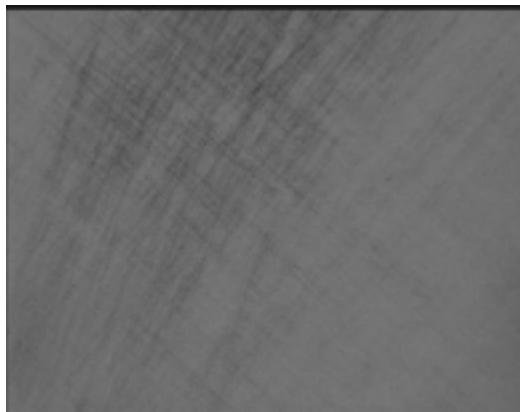
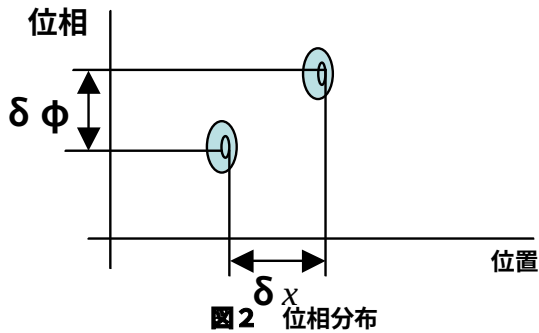


図3 酸化チタン塗膜の CCD 画像

$$\varphi(x, \phi) = \varphi_{a=\lambda}(x) \exp[i\phi] \quad (6)$$

このウェーブレット関数と干渉信号の位相が一致する位相を求める。ウェーブレット関数が複素関数であるため、ウェーブレット変換の実数部を、ウェーブレット関数と干渉信号の位相が一致する位相とした。

$$P(x, \phi) = \text{Re}[W_\lambda(x, \phi)] \quad (7)$$

酸化チタンの塗装厚の計算などでは、図2に示すような表面反射と裏面反射の信号が得られる。この場合の膜厚 $D(x)$ は

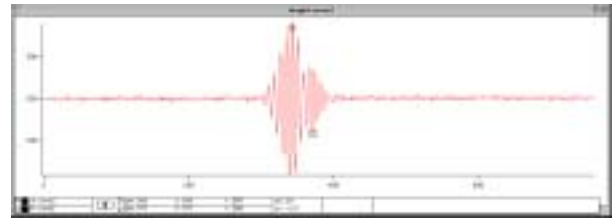
$$D(x) = \delta x + \lambda \delta \phi / 2\pi \quad (8)$$

により計算される。

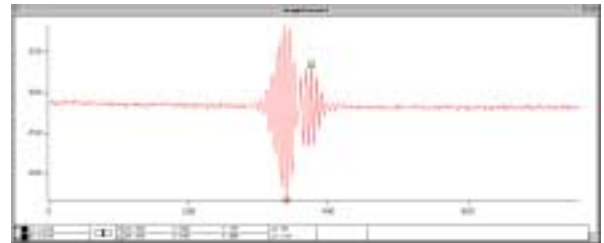
4. 実験

4.1 光断層画像計測システム

低コヒーレンス光源にはハロゲンランプを用いた。ハロゲンランプからの光は、ビームスプリッターにより2分割され、ND フィルタと酸化チタン塗膜を照射する。酸化チタン塗膜はピエゾアクチュエーターにより駆動されるステージにより、数 nm の分解能の光路差を設定出



(a)



(b)



図5 図4(a)のウェーブレット変換結果

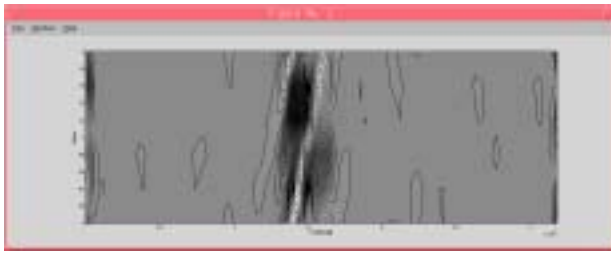
来る。測定では、パーソナルコンピュータによりピエゾアクチュエーターを一定のサンプリング間隔で動作させ、その都度 CCD カメラより画像を取り込み、光強度を測定する。CCD には 10bit デジタル CCD カメラを用いた。

4.2 酸化チタン塗装膜

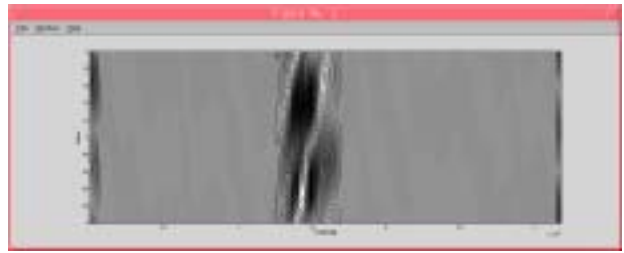
計測サンプルには光触媒用酸化チタンをガラス基板に塗ったものを用いた。酸化チタンは、ガラス基板の上に刷毛塗りする。まず、ガラス基板を親水性状態にするため中性洗剤により表面のふき取りを行う。次に付着強化用の酸化チタンを2回塗り、最後に光触媒機能がある酸化チタンを4回重ね塗りした。図3はその酸化チタンを塗ったガラス基板の CCD 画像を示す。

4.3 実験結果

図4に、測定された2点の干渉信号を示す。測定間隔は 38.14nm で行い、1カ所の測定位置に対して16回測定した強度の平均値を測定位置での強度とした。図4には表面からの強い反射光の干渉信号と裏面からの弱い反射光の両方の干渉信号が測定されているのがわかる。したがってこの両干渉信号の最大値の間隔を測定することにより酸化チタンの膜厚を知ることが出来る。図4(a)に示す干渉信号の最大値の測定間隔は29ステップとなった。



(a)



(b)

図6 位相検出 (a)位相 5 分割 (b)位相 100 分割

したがって膜厚は $1.1\mu\text{m}$ となる。また図4(b)については 36 ステップ、 $1.3\mu\text{m}$ であった。

図5は図4(a)に示す干渉信号をウェーブレット変換したものである。干渉信号がわずかにチャープした場合など干渉信号の最大値を調べるのは困難であるため、ウェーブレット変換により、波長に対応した最大値を求め反射面の間隔を決定できる。また、測定位置に対応した反射スペクトルを求めることも出来る。図5ではハロゲンランプの中心波長付近に2つの最大値があることがわかる。

次に干渉信号の位相により測定位置の位相のずれからさらに高精度に反射面を求めた結果を図6に示す。図6の位相分布は図5のウェーブレット変換の波長 589nm に対して位相分布を計算したものである。位相値を求めると今までウェーブレット変換では接近していた表面と裏面の反射が分離出来ているのがわかる。また、図6(a)は 2π までの位相を 5 分割したもの、(b)は 100 分割したものを示す。明らかに位相の分解能を高めることにより、位相分布の精度が上がるのがわかる。したがって位相の分割数を増やすことにより、測定精度の向上が期待できる。

図7は酸化チタンをガラス基板に塗ったものと、ガラス基板のみの透過スペクトルをグラフに示したものである。可視光域では、偏った吸収は見られないが、酸化チタンにより 20% 程度の吸収がある。

5. 結 言

マイケルソン干渉光学系により測定した干渉信号の解析にウェーブレット関数を用いることにより酸化チタンなどの塗装の内部計測と反射スペクトルの同時計測が可能であることを示した。加えて、複素関数のウェーブレット関数を用い反射面の位相を計算することにより、接近した2つの反射面の分離が容易になり、測定精度を向上させた。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、計測材料の製作にご協力頂きました(株)大野石油店に感謝いたします。

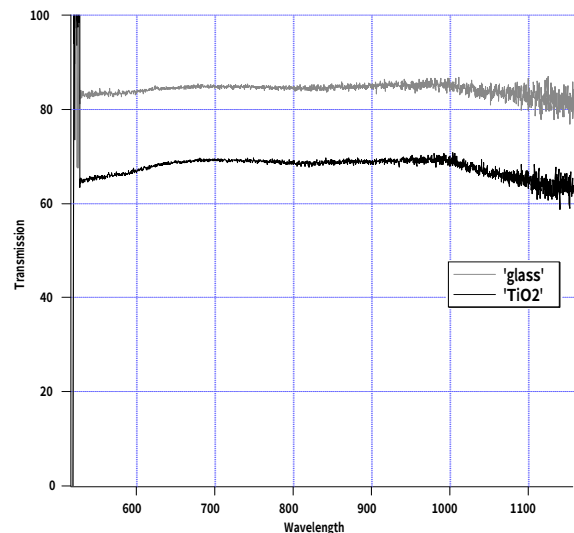


図7 酸化チタンの透過スペクトル

文 献

- 1) 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).
- 2) C. Yang, A. Wax, M. S. Hahn, K. Badizadegan, R. R. Dasari, and M. S. Feld : Opt. Lett., **26**, 127 (2001).
- 3) Xingde Li, Tony H. Ko, and James G. Fujimoto : Opt. Lett. **26**, 1906 (2001).
- 4) Zhao, Z. Chen, Z. Ding, H. Ren, and J. S. Nelson : Opt. Lett. **27**, 8(2002).
- 5) Jinpin Ying, Feng Liu, P. P. Ho, and R. R. Alfano : Opt. Lett., **25**, 16, 1189-1191 (2000).
- 6) J. H. Ali, W. B. Wang, P. P. Ho, and R. R. Aifano : Opt. Lett., **25**, 1303 (2000).
- 7) 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).
- 8) Y. Yasuno, M. Nakahama, Y.Sutoh, M. Itoh, and T. Yatagai : Opt. Lett., **26**, 90 (2001).