

高精度光応用計測技術の開発 (第10報)

屈折率による厚み補正技術の開発

廣川勝久, 門藤至宏, 古本浩章, 山本 健*¹

Noninvasive Optical Measurement for External, Surface and Internal Structures X

Measurement of refractive index and thickness by using Michelson interferometer combined with confocal microscope

HIROKAWA Katsuhisa, MONDO Munehiro, FURUMOTO Hiroaki, and YAMAMOTO Ken*¹

We propose a low-coherence Michelson interferometer combined with a coherence confocal microscope. The optically measured thicknesses of transparent objects can be compensated by use of their refractive indices obtained from the interferometer. The time coherence of the interferometer is maintained low, and the focal depth of the confocal microscope is used effectively. We experimentally show that refractive index and thickness of the colored transparent film can be determined.

マイケルソン干渉計に共焦点顕微鏡を組み込むことにより、測定物体の厚みと、屈折率を測定するシステムを開発した。システムでは、低コヒーレンス干渉による光学的厚みの測定を行い、レーザ光による共焦点顕微鏡の測定長との比較から屈折率を決定できる。求めた屈折率から光学距離の補正を行うことにより実際の厚みの算出が可能となった。

キーワード：光計測, 屈折率, レーザ, 断層画像, 光学長, 共焦点

1. 緒 言

製造技術の急速な進歩に伴い、製品の形状計測には高速、高精度の計測に加え、非常に多くの計測点が求められてきている。著者らは、これまでこのような高度な形状計測に非接触の光計測を用いる研究を行っている¹⁻⁹⁾。研究では、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、干渉計測法を利用することを提案した。大型製品は、高い意匠性を持つことから、正確な形状計測には計測分解能に加え、非常に多くの計測点を必要とするため光切断法を、また、電子部品や光学部品については、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は、特に高精度な測定が必要とされるため共焦点顕微鏡や干渉計測法を応用した技術を開発した。

現在、光を用いた計測は、医用・生体分野での研究が活発である。これは、光学的な計測は生体に対して、無侵襲かつ高精度な計測技術を提供するからである¹⁰⁻¹³⁾。当然工業分野においても、その利用価値は高く、各方面で利用されている^{14,15)}。

著者らは、これまでの光干渉計測研究で、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^{4,16)}。また、近赤外光源を用いたOCTの光学特性などについても報告を行った⁶⁾。さらに、レーザダイオードの発振波長を時間的に走査することにより参照ミラーとの相対位置を測定するシステムの開発を行った⁹⁾。

本報告では、屈折率と膜厚を測定する光学システムの開発について述べる。光触媒などの実際の塗装では、塗装条件などにより塗膜の屈折率が異なるため、実際の厚みを測定するには、塗膜サンプルごとに屈折率を測定し、光学的な厚みを補正する必要がある。また、材料が不明なものの場合、材料の分析をしなければ実際の厚みが決められないなどの問題がある。提案するシステムでは、計測物の屈折率と光学的な厚みを非接触かつ無侵襲に同時計測できるため、光学的な厚みから実際の厚みを得ることが可能となる。

2. 測定の基本原理

2.1 光学系

提案するシステムはマイケルソン干渉計に共焦点顕微鏡(Confocal Microscope)を組み込んだ光学システムである。OCTの光学系に共焦点顕微鏡を組み込むことで屈折率が測定出来ることはG. J. Tearneyらにより示された¹⁷⁾。また、その後の研究により理論的に確立された^{18,19)}。

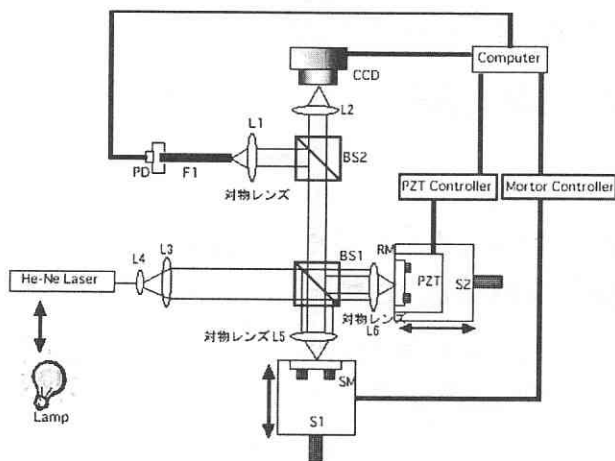


図1 共焦点顕微鏡を加えたマイケルソン光学系

我々の光学計測システムもその方法を用いている。ただし、これまで研究を行った低コヒーレンス光源にハロゲンランプを用いた高い空間分解能や、吸収スペクトル測定能力を保つため、マイケルソン干渉計の両方の腕に、同じ対物レンズを挿入し、波長分散の差が生じない光学系とした。また、低コヒーレンス光源では、ピンホールに入射させるビーム径を絞り込めないことから、共焦点顕微鏡として動作させる場合は、光源にレーザ光を用いた。

実際の光学系を図1に示す。光源には He-Ne レーザのコヒーレンス光源とハロゲンランプの低コヒーレンス光源の両方を用いる。

共焦点顕微鏡動作時は He-Ne レーザから出た光は、レンズにより広げられ、平行光となりビームスプリッター (BS) に入射する。その後ビームスプリッターにより2分割され、それぞれ、対物レンズを通して参照ミラー (RM) とサンプルミラー (SM) に集光する。共焦点顕微鏡動作時には、参照ミラーはあらかじめ取り外しておき、サンプルミラーからの反射光のみが反射、検出されるようにする。サンプル面を、光ファイバー (F1) の入射端面に結像させる。これにより、光ファイバーのコアを共焦点顕微鏡のピンホールとして利用できる。光ファイバーを透過した光はフォトダイオードの検出器 (PD) により強度計測される。この時サンプルのステージ (S1) をモーターにより駆動し、焦点位置を表面からサンプル内部に移動させながら、反射光強度を測定する。

OCT 動作モードでは、ハロゲンランプを光源として使用し、ステージ (S2) に参照ミラーを取りつけ、両方のミラーからの反射光を CCD 上に重ね合わせ、低コヒーレンス干渉を計測する。この時、ステージは、参照ミラー側をピエゾ素子により駆動し、サンプルの各反射面の干渉位置を計測する。

2.2 屈折率測定と補正方法

屈折率の測定では、屈折率が1以外の場合に共焦点顕微鏡と OCT の測定長に差が生じることを利用している。

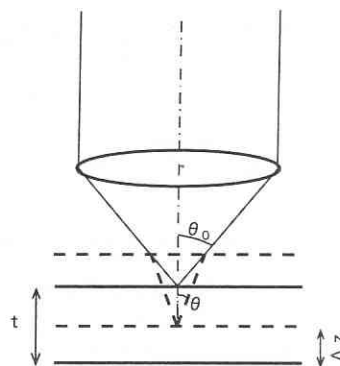


図2 屈折率と焦点距離の変化

屈折率が1の場合は共焦点顕微鏡と OCT の測定長は同じになり、実際の厚みと測定長は一致する。しかし、例えば屈折率が大きくなると、光の進む時間が遅くなるため、実際の厚みとの差が生じる。OCT の場合は時間コヒーレンスが低い光源を用いることにより、反射面の時間遅れを測定しているため、屈折率が大きくなると時間遅れが増し、測定長が長くなる。逆に共焦点顕微鏡の場合は屈折率が大きくなるにしたがい焦点距離が長くなるため、実際より測定長が短くなる。今、図2示すように対物レンズからの光が開口数 $N.A. = \sin\theta_0$ で屈折率 $n = n_0 \sin\theta_0 / \sin\theta$ 、厚み t の計測物に入射した場合を考える。計測物を対物方向に移動させると焦点距離が長くなり Δz 移動させた時点で、裏面反射が観測される。文献19より、この時測定長 Δz は

$$\Delta z = t \left(\frac{1 - \sin^2 \theta_0}{n^2 - \sin^2 \theta_0} \right)^{1/2} \quad (1)$$

の関係があり、OCT により得られた計測物の厚みを Δl とすると、屈折率 n は Δz 、 Δl から

$$n^2 = \frac{1}{2} \left[\sin^2 \theta_0 + \sqrt{\sin^4 \theta_0 + \frac{4(1 - \sin^2 \theta_0) \Delta l^2}{\Delta z^2}} \right] \quad (2)$$

で与えられる。したがって、OCT より得られた測定長 Δl は屈折率 n を次式に代入することにより補正され、実際の厚み t が得られる。

$$t = \Delta l / n \quad (3)$$

3. 実験および考察

3.1 光ファイバーを用いた共焦点顕微鏡

本光学システムでは、共焦点に置くピンホールの代わりに、光ファイバーを用いている。この場合、ピンホールに相当する光ファイバーのコア径により、奥行き方向

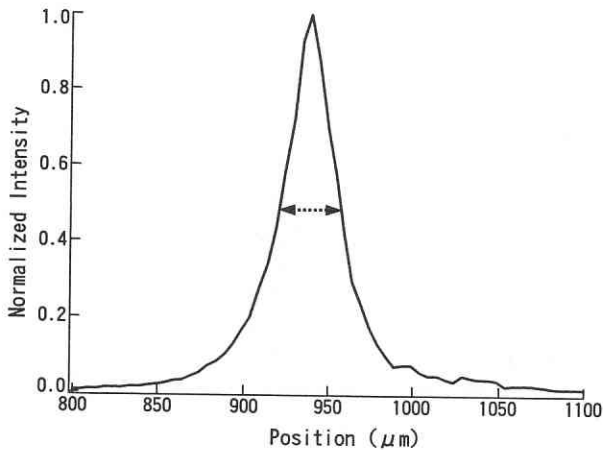


図3 共焦点顕微鏡の焦点深度
光ファイバー：コア径5μm

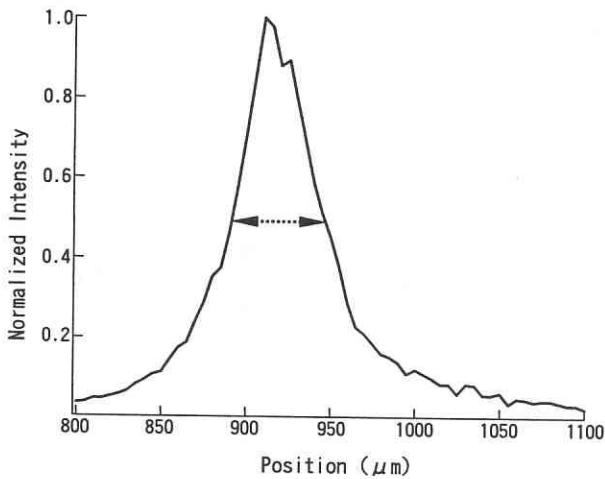


図4 共焦点顕微鏡の焦点深度
光ファイバー：コア径8.2μm

の空間分解能、すなわち焦点深度が変化する。まず、実験では、コア径5μmと8.2μmのシングルモード光ファイバーを用意し、その焦点深度を調べた。焦点深度の計測にあたり、ステージにミラーを置いて移動させその強度変化を測定した。図3、図4にその実験結果を示す。半値全幅はコア径5μmと8.2μmの光ファイバーでそれぞれ、36μm、55μmとなり、ファイバーコアが小さい方が分解能が高い。この実験での対物レンズはサンプル部も検出部も10倍（N.A. 0.28）のものを使った。また、光源にはHe-Neレーザ（λ=623μm）を用いた。以降の実験でも、同様に分解能36μmの共焦点光学系を用いた。

3.2 透明計測サンプルによる厚み測定

透明なサンプル、ここではカバーガラスを用いて、共焦点顕微鏡の表面反射と裏面反射を調べた。対物レンズに入射する光は、空間的な強度分布が一様ではないため、対物レンズの開口数が必ずしも実験時の開口数に一致しないためである。まず、カバーガラスは透明なガラスの上に重ねてステージにセットした。実験結果を図5に示す。前面反射、裏面反射ともに大きな出力が得られてい

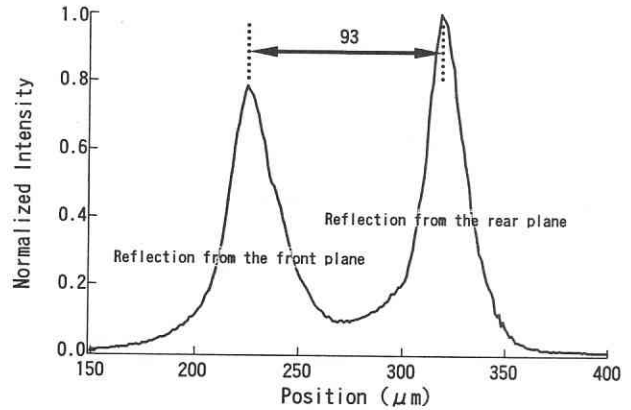


図5 透明なカバーガラスの表面反射と裏面反射

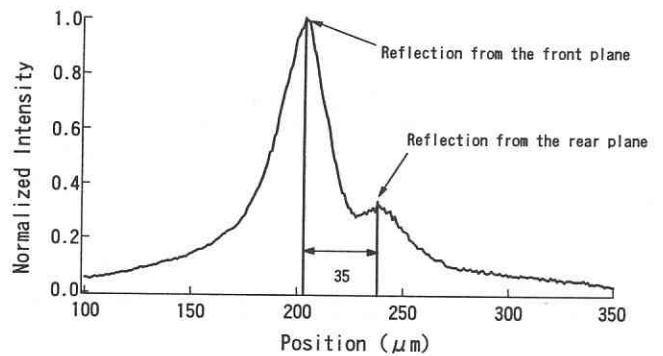


図6 共焦点顕微鏡からのフィルムの反射強度分布

る。また、カバーガラスの屈折率は $n=1.5255$ 、厚みは約142μmであるので、この値を式(1)に代入し、求めた共焦点顕微鏡による光学的な厚みは90μmとなり、実験結果とほぼ一致した。また、この結果より、この光学系の共焦点顕微鏡のN.A.は、ほぼ対物レンズの開口数と見なして良いと考えられる。このことから、内部計測に提案する光学システムは、対物レンズの性能を十分に利用可能であることを確認した。

3.3 吸収がある計測物の厚み計測

最後に光の吸収がある場合の厚み計測と屈折率の計測を行った。計測サンプルにはピンク色のフィルムを用いた。まずフィルムをNDフィルタにはりつけステージに装着し、レーザ光による共焦点顕微鏡により反射面の位置を計測した。なお、フィルムを透過した光は、吸収型NDフィルタにより吸収させている。図6に示す実験結果は、サンプルの側のステージをパルスモータにより駆動し、1μm間隔で反射光強度の測定を行った結果である。裏面反射が表面反射から35μm離れた位置に計測されている。また、吸収があるためピーク強度は低下しているのが見られる。

次に光源をレーザから低コヒーレンス光源のハロゲンランプに置き換え、OCTによる厚みの測定を行った。参照腕のステージのミラーも吸収型NDフィルタを用い両方の腕からの反射光強度が釣り合うようにした。また、参

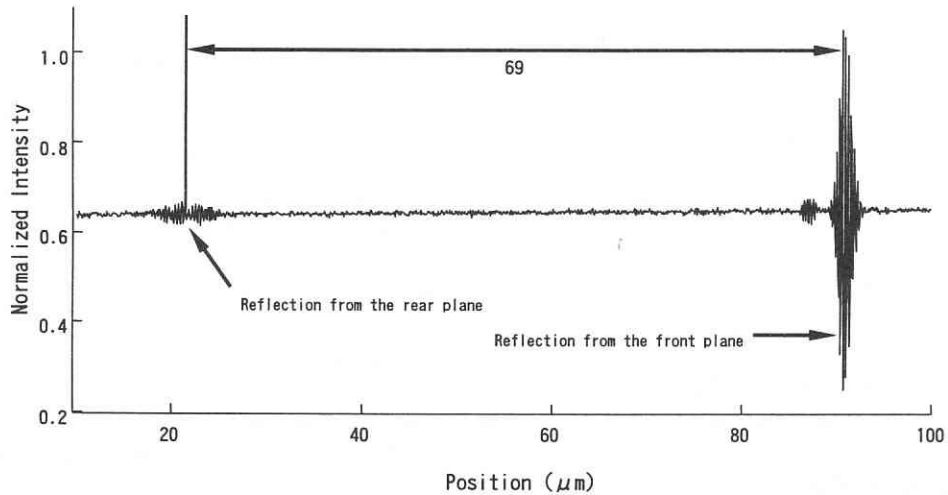


図7 OCTからのフィルムの反射光強度

表1 測定結果

	2層	3層	膜厚計
CM (μm)	35	35	32.94
OCT (μm)	69	89	83.21
屈折率	1.39	1.57	1.57
厚み (μm)	49.6	56	53

照腕にも同じ対物レンズを挿入し、波長分散が等しくすることにより、コヒーレンスゲートの幅が広がらないようにした。まず、フィルムの表面に対物レンズの焦点位置を合わせ、次に、参照腕の対物レンズの焦点位置も、光学的距離が同じになる位置とした。参照腕側のステージをピエゾ素子により駆動し、76.3nm 間隔で干渉光強度分布を CCD カメラにより測定した。この時、同じ位置で5回の強度計測を行いその平均値を光強度とした。

実験より得られた結果を、図7に示す。これまでの実験結果¹⁶⁾と同様に、干渉信号の広がり無く、分解能は保たれている。また、表面反射と裏面反射の距離は 69 μm となった。2つの反射面の距離を使い、式(2)より計算した屈折率は $n=1.39$ となり、式(3)から求めた補正した厚みは、49.6 μm となった。サンプルとして用いたフィルムの主成分は、ガスクロマトグラフによる成分分析の結果ポリエステル $n=1.57$ であった。また、接触式膜厚計による厚みは 53 μm であったため、実験結果に差が生じている。屈折率 $n=1.57$ と厚みは 53 μm から、計算により求めた、共焦点顕微鏡(CM)による厚みと、OCTによる厚みは、それぞれ、32.94 μm, 83.21 μm となる。これらを表にまとめたものを表1に示す。粘着層無しが実験による値を示し、膜厚計が計算によるものである。表より、共焦点顕微鏡に比較してOCTの差が大きい。これは、フィルムの裏面についての粘着層部分の干渉信号を測定できて

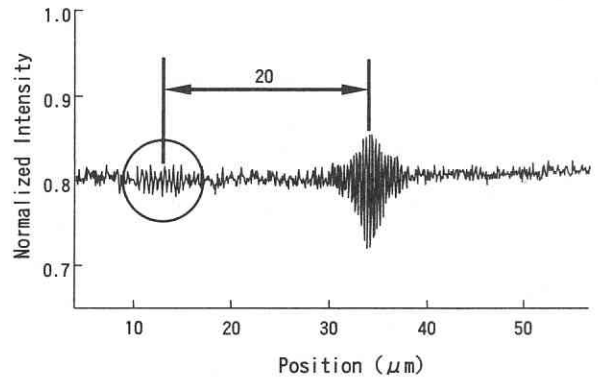


図8 粘着層からの反射光

いないためと考えられる。文献16に示した今回のフィルム断面の電子顕微鏡写真では、フィルムは3層構造をしており、OCTの信号には3層目の粘着層の信号が捉えられていない。そこで、CCDの感度を調整しながら、粘着層の部分の測定した。実験の結果、図8に示すように、第2層目の信号のさらに後方に微弱な信号が観察された。得られた信号光から求めた粘着層の間隔は約 20 μm であった。したがって、この厚みをOCTに加え、OCTから得られた距離を 89 μm として計算した結果、屈折率 $n=1.57$ 、厚み 56 μm となった(表1)。屈折率は、ポリエステル $n=1.57$ と一致した。また、厚みは 3 μm の誤差はあるものの、OCTの光学長 89 μm が 56 μm に補正できた。実験では、光軸と、ステージの移動方向を完全に一致させる事ができないため、距離が長めに出てしまうが、既知の波長のレーザにより、ステージの移動距離を補正することにより共焦点顕微鏡およびOCTの光学距離の補正が可能である。

4. 結 言

マイケルソン干渉計に共焦点顕微鏡を付加した厚み補正が可能な膜厚測定システムを構築した。このシステムでは、屈折率によりマイケルソン干渉計と共焦点顕微鏡の2つの測定長に違いが出ることを利用して、屈折率の測定が可能で、その測定した屈折率により厚みの補正が可能となった。また、波長分散を抑えマイケルソン干渉計の分解能を下げる事無く共焦点顕微鏡を加えた。また、共焦点顕微鏡にはレーザ光を用いることにより、対物レンズをN.A.近くで利用が可能となった。

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) 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, **16**, 13-16 (2003).
- 6) 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, **16**, 17-20 (2003).
- 7) 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, **17**, 13-16 (2004).
- 8) 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, **17**, 17-20 (2004).
- 9) 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, **17**, 21-23 (2004).
- 10) 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).
- 11) C. Yang, A. Wax, M. S. Hahn, K. Badizadegan, R. R. Dasari, and M. S. Feld : Opt. Lett., **26**, 127 (2001).
- 12) X. Li, T. H. Ko, and J. G. Fujimoto : Opt. Lett. **26**, 1906 (2001).
- 13) Zhao, Z. Chen, Z. Ding, H. Ren, and J. S. Nelson : Opt. Lett. **27**, 8 (2002).
- 14) J. Ying, F. Liu, P. P. Ho, and R. R. Alfano : Opt. Lett., **25**, 16, 1189-1191 (2000).
- 15) J. H. Ali, W. B. Wang, P. P. Ho, and R. R. Alfano : Opt. Lett., **25**, 1303 (2000).
- 16) 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).
- 17) G. J. Tearney, M. E. Brezinski, J. F. Southern, B. E. Bouma, M. R. Hee, and J. G. Fujimoto: Opt. Lett. **20**, 2258 (1995).
- 18) T. Fukano and I. Yamaguchi: Opt. Lett. **21**, 1942 (1996).
- 19) M. Ohmi, T. Shiraishi, H. Tajiri and M. Haruna: Opt. Rev., **4**, 507 (1997).