高コヒーレンス波長掃引光源を用いた光干渉計測

腰原 勝 Masaru Koshihara, 斉藤崇記 Takanori Saitoh

[要	旨]	スマートファクトリー化の一環として、製品の形状検査は接触式測定から非接触式の光学測定へ置き換えが進
		められている。光学測定による非接触・非破壊検査の手法として種々の干渉計測法があるが,従来の手法は
		nm~µm を高精度に測定できる特長を持つ。反面,測定レンジは短く,大面積の対象物をmオーダーの距離
		から高精度に測定することは困難であった。当社製波長掃引光源は高コヒーレンス性を有しており、本器を利
		用することでmオーダーの遠距離からの測定が可能である。本稿では,光干渉計測法の一つであるOFDRの
		基本原理,実測例について説明する。実測例では,はじめに 2 μm 以下の段差構造を持つブロックゲージの
		形状測定を行い,本器を用いた OFDR の測定精度について言及する。次に,車体側面の形状計測を行い,
		遠距離から大型の対象物を一括に,かつ高精度に測定できることを示す。更に,測定対象物が測定光を透過
		する場合には, 内部構造の測定も可能であることを実測例と共に示し, 産業向け OCT への応用例についても
		議論する。

1 まえがき

製造業において急速に進む DX(Digital Transformation)化の 流れの中で、製造ラインにさまざまなセンシング技術が導入され始 めている。各種センサからリアルタイムに取得されたデータを分析し て製造工程にフィードバックすることで、生産性の向上や品質の安 定化、省人化が期待できるスマートファクトリーの実現が進められて いる。従来、製造工程における製品の寸法や変位、表面粗さなどの 形状測定には、測定対象物に触針を接触させてその変位を測定す る接触式センサが用いられてきた。接触式センサは、原理的に振動 下での測定が困難であり、測定に時間を要するため抜き取り検査が 行われることになる。そのため、規格外品を完全に排除することは 困難である。近年スマートファクトリー化の一環として、接触式セン サを用いた製品検査は非接触式の光学測定に置き換えが進めら れている。従来、抜き取り検査で行われてきた製品の形状測定をイ ンラインで、かつ全数検査とすることが可能となる。更に省人化や生 産性の向上も期待できる。

製造工程では表面形状の検査だけでなく,内部構造の欠損検 査も重要である。光学式による内部構造の測定手法として OCT(Optical Coherence Tomography)が広く知られている。 OCT は眼科向けを中心として生体組織の断層画像測定に広く利 用されており,高速で高精度な測定が可能な技術である。近年,そ の特長から産業分野への応用が期待されている¹⁾。

光によって対象物の形状や内部構造を測定する具体的な手法に は、白色光源を用いた白色干渉方式や SD-OCT(Spectral Domain Optical Coherence Tomography),波長掃引光源を用いた SS- OCT(Swept Source Optical Coherence Tomography)などがある。 非接触式光学測定の代表例と代表仕様を表1に纏める。なお、表1 に示す測定レンジおよび測定精度は市販品の代表値である。

表1 非接触式光学測定の代表例と代表仕様

測定方式	光源	測定レンジ	測定精度	
OFDR	波長掃引光源	数 m	数 µm	
白色干渉法	白色光源 (SLD ^{*1} , LED ^{*2} な ど)	1 μm	1 nm	
SD-OCT	白色光源(SLD)	5 mm	5 µm	
SS-OCT	波長掃引光源	10 mm	5 µm	
ToF 法	パルス光源	100 m	10 cm	
光コム法	パルス光源	6 mm	1 µm	

%1:Super Luminescent Diode %2:Light Emitting Diode

白色干渉方式や SD-OCT, SS-OCT は、数 µm~数 mm の測 定レンジで nm~µm オーダーの高精度測定が実現できる。このた め、小面積で浅い深度に対する近距離・高精度測定に適している。 反面、対象物が cm~m オーダーの大面積である場合、一度に測 定できる狭い範囲に分割して対象全体を少しずつ測定するため、 時間や手間がかかる。また、対象物が測定系に影響を及ぼすような 高温である場合、近距離での測定を必要とするこれらの手法では 測定が困難である。遠距離からの測定を可能にする手法として、パ ルス光源を用いた ToF(Time of Flight)法がある。ToF 法は、100 m レンジの長距離測定が可能な手法であり、主に自動運転向けの LiDAR(Light Detection And Ranging)用途として開発が進めら れている。しかし、測定精度が 10 cm 程度と大きく、製品を検査す るための産業分野向け計測用途としては不向きである。また、ToF 方式ながら µm オーダーの精度で測定できる手法として光コム法が ある。光コム法は、光周波数コム発生器を用いてパルス光を発生さ せる手法であり,高精度測定が実現できる反面,測定レンジが mm オーダーに制限されている。測定レンジ,測定精度共に産業分野 向け計測用途に最適な手法が OFDR(Optical Frequency Domain Reflectometry)である。本手法は FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave)法としても広く知られている技術で ある。波長掃引光源を用いた干渉計測法である OFDR は, 測定対 象物からの反射光と参照光との間で生成される干渉信号から,測 定対象物までの距離を高精度に測定する手法であり、数 cm~数 m までの距離を数 µm の精度で測定可能である。その特長から LiDAR 向けなどへの応用が進められている。ここで利用される波 長掃引光源は,測定に要求される分解能や速度によって,適切な 仕様の光源を選択する必要がある。 例えば, 高い位置分解能を得 るためには,波長掃引幅が広い光源を必要とし,高速に移動する 対象物の位置に応答して測定するためには,波長掃引周波数の高 い光源が必要である。また, 測定可能範囲を広げるためには可干 渉距離(コヒーレンス長)の長い光源を選択する必要がある。高コ ヒーレントな光源を用いることで、OFDR の干渉信号を高い SNR(Signal to Noise Ratio)で測定でき、位置分解能や測定精度 を向上させることもできる。

当社では高コヒーレントな波長掃引光源を開発し,販売を行って いる(AQA5500P, AQB5500P, AQA5500D, AQB5500D)。本波 長掃引光源は, MEMS(Micro Electro-Mechanical System)ス キャニングミラーとグレーティングを用いたリットマン型の外部共振 器レーザーであり,下記の特長をもつ^{2),3)}。

①kHz オーダーの高速波長掃引

(AQA5500P, AQA5500D の場合)

②単一縦モードの狭線幅レーザーによる高コヒーレンス性 ③モードホップ(波長跳び)がない連続的で、かつ広い波長掃引幅

本稿では、当社が開発した波長掃引光源の製品仕様について 説明した後で、本波長掃引光源を利用した OFDR による表面形状 測定について基本原理および実測例を示す。実際の測定例として、 まず 2 µm 以下の段差を持つブロックゲージの形状測定を行い微 細な構造を高精度に測定できることを示す。次に、車体側面の形状 測定を例に挙げ、比較的大型の対象物を遠距離から一括で、かつ µm の精度で測定できることを示す。さらに、測定光を透過する対象 物については内部の断層構造を測定できることを実測例と共に示 し、産業向け OCT への応用例についても議論する。

2 波長掃引光源の製品仕様

当社製波長掃引光源の外観写真を図1に,主な製品仕様を表2にそれぞれ示す。卓上据置きでの使用を想定した Bench top タイプ(図1(a))と,ユーザー機器への組み込み用途を想定したBuilt in タイプ(図1(b))の2機種を製品ラインナップとして準備した。また,市場からのさまざまな測定用途に対応するため,波長掃引速度1250 Hz 品と150 Hz 品の2機種を開発した。

本器は主に、MEMS スキャニングミラーを用いた波長掃引光源モ ジュールと、同光源モジュールを駆動するための制御基板から構成 される。ユーザーが本光源モジュールを単体で使用するには、光源 モジュール内部の温度や、LD(Laser Diode)を発振させるための電 流値、MEMS スキャニングミラーを駆動するための信号強度や周波 数などを高精度に制御する必要がある。そこで、ユーザーの使い勝 手を向上させるため、光源モジュール内温度や LD 電流値の制御を 容易に行える制御基板を開発し、製品構成の一部とした。

Bench top タイプでは、光源モジュール、制御基板の他に、筐体 内部に冷却用のファンを設け、使用環境温度範囲内における特性 の安定化を図った。Built in タイプでは、ユーザー機器への組み込 みを基本コンセプトとしているため、外装筐体と冷却用ファンをなく し、ユーザー機器の構成に整合できるような実装形態を提供した。



(a) Bench topタイプ(AQA5500P/AQB5500P)



(b) Built inタイプ(AQA5500D/AQB5500D)図1 波長掃引光源の外観

項目	仕様				備考		
形名	AQA5500P	AQB5500P	AQA5500D	AQB5500D			
使用形態	Bench top タイプ	(卓上据置き用途)	Built in タイプ	(組み込み用途)			
外形							
寸法	137.4(W)×131.4((H)×219.4(D)mm	160(W)×118.6(H)×175(D)mm		突起部は除く		
光学的特性							
掃引中心波長		1550=	AQA5500P/AQA5500D:110 nm 掃引時 AQB5500P/AQB5500D:70 nm 掃引時				
波長掃引幅	30~110 nm	$15{\sim}70~{ m nm}$	30~110 nm	$15{\sim}70~\mathrm{nm}$	設定分解能:1 pm USB 経由にて PC 上のソフトウェアより設定可能		
掃引周波数 fres	1250±50 Hz	150±20 Hz	1250±50 Hz	150±20 Hz	固定値であり調整不可		
平均光出力		≥10	CW 出力 Class1(IEC 60825-1:2014)				

表2 波長掃引光源の主な製品仕様

本器は DC+12 V の供給により駆動を開始する。電源を供給する と、使用環境に合わせて光源モジュールの温度安定化や、LD へ の適切な電流値の設定を行うためのキャリブレーションが自動で開 始され、同時に波長掃引された光が出力される。このとき、出荷時 に初期値として設定された波長掃引幅(1250 Hz 品では 110 nm, 150 Hz 品では 70 nm)で掃引が開始されるが、本器正面に備えた USB(Universal Serial Bus) 端子を介して PC(Personal Computer)を接続することで、PC 上の制御ソフトウェアから波長掃 引幅を変更することができる。

制御ソフトウェアの表示画面を図2に示す。制御ソフトウェアから は、波長掃引幅の設定以外に、SCPI(Standard Commands for Programmable Instruments)コマンドを使用して、本器が正常動 作状態であることや、エラー状態であることなどの確認もできる。ま た1台のPCに対して本器を最大4台まで接続でき、それぞれの 機器に対して個別にコマンド送信を可能とした。

Swept Light Source Controller					
le Version					
Device No 112008 Device Select 112008 12008 142008 142008 Connect Connect	Sweep Width[pm] 110000 Command			Set Set	
Information Select Device: 112008 [Module SN:520] [Sweep Set value:	110000] [Light value:29017]	^	_		
				Help	
				Quit	

図2 制御ソフトウェアの画面

本器は、光出力端子と電源用端子、USB 端子以外に、トリガ信 号出力端子とエタロン信号出力端子を備えている。本器から出力さ れる波長掃引波形と、トリガ信号出力波形の関係を図 3(a)、(b)に それぞれ示す。本器は、MEMS スキャニングミラーの往復運動に よって波長掃引を実現しており、光出力波長は図 3(a)に示すよう に、正弦波状に掃引される。トリガ信号出力端子からは、波長掃引 のタイミングに合わせたトリガ信号が、図 3(b)に示すように出力され る。トリガ信号の立上りタイミングと立下りタイミングは、図 3(a)中の A1 および A2 に示すように、制御ソフトウェアから SCPI コマンドを 用いて波長値で設定する。トリガ信号は、波長掃引幅に対して測定 データの取得範囲を任意に指定する目的などに利用できる。

次にエタロン信号について説明する。本器の構成部品である光 源モジュールはエタロンを搭載している。エタロンは,波長掃引され た光が入射された場合,一定の波長間隔(FSR: Free Spectral Range)で周期的なピークを持つ透過スペクトラムを示す。本器は, エタロンからの透過光を電気信号に変換して出力している。図3(c) は,時間軸上で観測されたエタロン信号出力波形を表している。波 長掃引幅 30 mn の場合である。波長軸上で観測した場合,エタロ ン信号の FSR は一定であるが,本器の波長は経過時間に対して 正弦波状に掃引されるため,エタロン信号の FSR もそれに応じた 間隔で観測されている。図3(a)からもわかるように,掃引波長の中 心付近と比較して,折り返し付近のほうが波長掃引速度は遅いため, エタロン信号の FSR はその分広く観測されている。この相関性を利 用して,エタロン信号は波長掃引の非線形性を補正するために利 用できる。なお、エタロン信号の FSR は出荷時にシアン化水素



(HCN)ガスセルを用いて高精度に校正されている。

図3 波長掃引波形,トリガ信号出力波形,エタロン信号出力波形

3 OFDR の基本原理

本章では,波長掃引光源を用いた OFDR の基本原理について 説明する。図4に, OFDR の基本構成を示す。



図4 OFDR の基本構成

波長掃引光源から出力された光は,光カプラによりリニアライズ用 基準干渉計 4)と測定干渉計に分岐される。測定干渉計では,再び 光カプラにより,参照光路 LRと測定光路 LM に分岐される。参照光 路に分岐された光は,合波用の光カプラに入射される。測定光路 に分岐された光は,コリメータレンズから空間中に放射される。空間 中に放射された光は、測定対象物で反射され、再びコリメータレンズを通過後、合波用の光カプラに入射される。参照光路と測定光路からのそれぞれの光は合波用の光カプラで合波後、バランスドレシーバーで電気信号に変換される。波長掃引光源から出力される光の周波数が時間に対して線形に増加している場合、時刻 t での光周波数v(t)は式(1)で表すことができる。

$$\nu(t) = \nu_0 + k \cdot t \tag{1}$$

ここで、 v_0 は時刻 0 での光周波数、kは掃引速度である。参照光路 と測定光路の両光路では光路長が異なるため、それぞれの光路を 通過した光が受光器で合波されたとき、時間差 τ が生じる。屈折率 を考慮した参照光路長 L_R と測定光路長 L_M の差を ΔL 、真空中の 光速をcとすると、時間差 τ は次のように表される。

$$\tau = \frac{\Delta L}{c} \tag{2}$$

また、参照光路を通過した光と測定光路を通過した光の電界強度 をそれぞれ E_R , E_M とすると、受光器で検出される干渉強度 P は次 式で表現される。

$$P = \left| \overline{E_R} + \overline{E_M} \right|^2$$

= $\left| E_R e^{-i2\pi\nu(t)\cdot t} + E_M e^{-i2\pi\nu(t-\tau)\cdot t} \right|^2$
= $\left| E_R \right|^2 + \left| E_M \right|^2 + 2\left| E_R \right| \left| E_M \right| \cos\left(2\pi \frac{k\Delta L}{c} t\right)$ (3)

干渉信号の DC 成分を除去することで,式(3)最終式の第3項のみ が観測される。つまり,式(1)に示したように光周波数を線形に掃引 させることにより,受光器からは式(4)で表されるように,ΔL に比例し た周波数 f_{Beat}の干渉信号が出力される。

$$f_{Beat} = \frac{\kappa \Delta L}{c} \tag{4}$$

ここで,波長掃引光源から出力された光が,参照光路を通って受光 器まで到達する光路長(図4中の青色実線)と,測定光路を通って コリメータレンズに到達し,コリメータレンズから受光器まで到達する 光路長(図4中の赤色実線)が一致するように光ファイバ長を調整 することで,受光器から出力される干渉信号 f_{Beat} には,コリメータレ ンズから測定対象物までの距離の情報が含まれることになる。干渉 信号 f_{Beat} をサンプリングした後,FFT(Fast Fourier Transformation)を施せば, f_{Beat} の位置にピークが観測され,式 (4)から ΔL を算出することでコリメータレンズから測定対象物までの 距離が分かる。

一方, リニアライズ用基準干渉計に分岐された光は, ファラデーミ ラーで反射された後, 光路長差 ΔL_{AUX}に応じた周波数の基準干渉 信号として受光器から出力される。リニアライズ用基準干渉計は, 波 長掃引の非線形性を補正するために利用される。時間に対する掃

38 (4)

引波長の変化率が線形である場合,測定干渉計から出力される干 渉信号の周波数は一定であり、FFTの演算結果もその周波数に応 じた位置にのみピークが得られる。しかし一般には波長掃引光源か ら出力される光の周波数は時間に対して非線形であるため,干渉 信号の周波数は時間により変化する。そのため、FFT後のピークは 幅広く観測される。結果として、ピーク位置を正確に判別することが 困難となる。例えば、当社製波長掃引光源の波長掃引は、図 3(a) に示すように時間に対して正弦波状であり、特に波長の折り返し部 分ではその非線形性は顕著に表れる。そこで実際の測定では、測 定対象物を含んだ測定干渉計の他に,基準となる干渉計を用いて その非線形性の影響を補正することが重要となる。3)。基準干渉信号 の立上がりに合わせて測定信号をサンプリングすることで、非線形 性の影響を補正することができる。そのため,基準干渉計の光路長 差 ΔLAUX は、測定干渉計の測定対象物までの距離を考慮して設 定する。具体的には、例えば測定干渉計のコリメータレンズから測 定対象物までの距離が 1 m であった場合, ΔL は往復分の距離 2 m となる。このとき、基準干渉信号はサンプリング定理におけるナイ キスト周波数の観点から2倍の周波数が必要となるため、 ΔL_{AUX} に は2m(往復で4m)が必要となる。

最長測定距離は,測定系の帯域と波長掃引光源のコヒーレンス 長により制限を受ける。干渉信号 fBeatの周波数は,コリメータレンズ から測定対象物までの距離に比例して高くなり,測定可能な fBeatの 周波数の上限値は、A/D 変換ボードや受光器の応答帯域によって 制限される。従って,最長測定距離はこれら測定系の帯域によって 制限を受けることになる。基準干渉信号の周波数についても同様の 制限を受けるため、基準干渉信号の光路長差 ΔLAUXを設定する際 には、同様の検討が必要である。また、波長掃引光源のコヒーレン ス長も重要な要素である。 測定干渉計の光路長差 ΔL がコヒーレン ス長以上になると、両光路を通過した光の相関が消失するため、 FFT 後のピークの線幅がレーザー本来の線幅の2倍程度まで広く なり、ピーク位置の検知精度は極端に劣化する。光路長差ΔLは測 定対象物までの距離の往復分で考慮する必要があるため,コリメー タレンズから測定対象物までの距離がコヒーレンス長の半分以上に 相当する場合,この現象は顕著に現れる。このため測定対象物ま での距離が長い場合には、受光器やA/D変換ボードなど測定系の 帯域を向上させるだけでなく、コヒーレンス長の長い光源を選択す る必要がある。当社製波長掃引光源は,単一縦モードの狭線幅 レーザー発振による高コヒーレンス性を有しており、OFDR 測定に おいて適切な光源である4),5)。

基準干渉計では、反射鏡としてファラデーミラーを用いている。こ れにより、それぞれのファラデーミラーから反射した光は、光路長差 によらず同じ偏波状態で受光器に入射するため、偏波による干渉 信号の変動を除去することができる。

4 OFDRによる表面形状測定

4.1 OFDR 測定系の構成

これまで示した OFDR 測定系を実際に構築し,表面形状測定を 行った。構築した OFDR システムの外観写真を図 5(a)に, OFDR システムの内部構造を図 5(b)にそれぞれ示す。可搬性を考慮し、 図 4 で示した波長掃引光源(AQA5500P), 光干渉計, 受光器の他 に、データ取得用の A/D 変換ボードを1 筐体に収めた。 筐体サイズ は 370(W)×180(H)×340(D) mm であった。 測定対象物へ光を照射 するためのコリメータレンズ部は筐体外部に配置し、測定対象物に 対向する形で固定した。測定対象物は x 軸, y 軸方向に動作するス テージ上に乗せ、筐体内に搭載した自動ステージコントローラにより 制御することとした。これにより, 測定対象物の表面形状を 2 次元的 に測定できる構成とした。また,測定位置の確認用途として,光干渉 計内の光カプラから赤色 LED の光を入力した。赤色 LED の光がコ リメータレンズから出力することにより、現在の測定位置を目視で確 認できる。なお,赤色 LED の光は, OFDR 測定の結果に影響を与 えない。A/D 変換ボードでサンプリングしたデータを解析,表示する ための PC は筐体外部に配置し、A/D 変換ボードとの間のデータ転 送には高速通信ケーブルを用いた。PCは高速なデータ処理が可能 な GPU(Graphics Processing Unit)を搭載した機種を選定した。



(a) 表面形状測定系の外観写真および構成



4.2 ブロックゲージの表面形状測定

はじめに、公称値 0.25 μ m, 0.5 μ m, 1.0 μ m, 2.0 μ m の階段状 の段差形状を持つブロックゲージの表面形状測定を行った。ブロック ゲージは光ファイバの APC(Angled Physical Contact)コネクタ端 面から 137 mm の距離に配置した。波長掃引幅を 110 nm とし、そ の内の線形性の高い中心 104 nm の範囲をサンプリング用として用 いた。理論分解能を Δz とすると、式(5)より 12 μ m と算出される ⁵。ブ ロックゲージの段差に対して大きい分解能であるが、FFT 解析後の ピーク位置を高精度に検知することで、理論分解能より高精度に測 定できる。

$$\Delta z = \frac{1}{2} \frac{\lambda_c^2}{\Delta \lambda} \tag{5}$$

ここで, Ac は波長掃引の中心波長, ΔA は, 波長掃引幅を表す。 ブロックゲージの外観写真と段差形状を図 6(a)に,表面形状の測 定結果を図 6(b)にそれぞれ示す。形状測定の結果は解析ソフト ウェアを用いて表示している。サンプリング数は y 軸方向(段差方向) 500 点, x 軸方向 125 点とした。この場合, 理論上の測定速度はサ ンプリング数と波長掃引光源の掃引周波数より,50秒(=500点 ×125 点÷1250 Hz)と算出できるが、自動ステージの移動速度の制 限から,測定時間は5分程度であった。x軸方向のデータを平均化 した結果を図 6(c)に示す。縦軸は中央③の高さを基準としたブロッ クゲージの相対高さである。表3に、ブロックゲージメーカーの実測 値である製品成績書の値とOFDR での測定結果,およびそれぞれ の差を示す。表4に, APC コネクタ端面からブロックゲージまでの 距離を 609 mm とした場合の結果も示す。ここで設定した距離 609 mm は,距離方向の高分解能を維持したまま測定できる最長距離 である。測定対象物までの距離が 137 mm の場合, 製品成績書と の差は最大で 0.14 µm であった。また測定対象物までの距離を 609 mm とした場合であっても、その差は最大で 0.26 µm であっ た。本稿冒頭で言及したように,低コヒーレンス性を特長に持つ他

の光干渉方式では測定レンジは数 mm 程度である。高コヒーレンス 性を有する当社製波長掃引光源を用いることで OFDR の干渉信 号を高い SNR で測定でき、広い測定レンジで高分解能の測定が 実現できている。



図 6 ブロックゲージの外観形状および表面形状測定の結果

表3 ブロックゲージの測定結果(測定レンジ:137 mm)

					単位:µm
ブロックゲージの	1	2	3	4	5
相対高さ(公称値)	3.0	1.0	0	-0.5	-0.75
メーカー実測値	2.94	1.0	0	-0.49	-0.83
OFDR 実測値	2.8	1.0	0	-0.5	-0.9
差	0.14	0	0	0.01	0.07

表4 ブロックゲージの測定結果(測定レンジ:609 mm)

					単位:µm
ブロックゲージの	1	2	3	4	5
相対高さ(公称値)	3.0	1.0	0	-0.5	-0.75
メーカー実測値	2.94	1.0	0	-0.49	-0.83
OFDR 実測値	3.2	1.0	0	-0.4	-0.7
差	0.26	0	0	0.09	0.13

4.3 車体側面の表面形状測定

次に,比較的大型の対象物である車体側面の形状測定を行った。 車体側面の大きさは、1.5(H)×4.4(W) m 程度である。大型の対象 物を遠距離から測定するため、測定系を図7に示す構成へ変更し た。屋外での測定となるため可搬性も考慮した構成とした。光干渉 計や A/D 変換ボード等の筐体部分は図 5(b)に示した測定系と同 様とし、コリメータレンズを2自由度の回転ステージ上に固定し、筐 体内に搭載した自動ステージコントローラによって 2 次元的に走査 する構成とした。コリメータレンズは、車体から4.5mの位置に置き、 測定対象物からの反射光パワーが最大となるように焦点距離を調 整した。また, 自動ステージを用いて縦方向 φ±12°, 横方向 θ±27° の角度を走査することで,縦1.9 m,横4.6 m の範囲を測定した。 波長掃引幅を 24 nm とし, 中央の線形性の高い 10.5 nm の範囲 を測定に用いた。これにより,理論分解能は 113 µm となる。 AQA5500P の製品仕様外での設定値ではあるが,長距離での測 定を実現するため分解能を低くして測定を行った。測定を行う際, 分解能,波長掃引幅,測定レンジ,干渉信号の周波数の関係を適 切に定める必要がある。式(5)より,分解能は波長掃引幅に反比例 する。また波長掃引速度は波長掃引幅に比例するため、式(4)より 干渉信号の周波数は波長掃引幅に比例することがわかる。した がって,分解能を向上させるために波長掃引幅を広げると,干渉信 号の周波数も高くなる。これは基準干渉信号についても同様であり, 波長掃引幅を広げることにより基準干渉信号の周波数は高くなる。 また、測定レンジは基準干渉計の光路長差 Δ LAUX で決まる。前述

したように、 ΔL_{AUX} は測定干渉計のコリメータレンズから測定対象 物までの距離の 2 倍の長さが必要となる。測定レンジを広くするた めには ΔL_{AUX} を長くする必要があるが、同時に式(4)より基準干渉 信号の周波数も高くなることがわかる。測定系の干渉信号と基準干 渉信号の周波数は AD 変換ボードなど測定系の帯域で制限される ため、ここでは分解能と測定レンジが両立するように理論分解能 113 μ m として測定を行った。なお、AQA5500P の最大掃引幅は 110 nm であるため、測定距離を短く設定すれば分解能は約 10 倍 程度まで向上させることができる。





車体側面の形状測定を行うに当たり、はじめに定点測定を行った。コリメータレンズの位置を固定し、車体のドア付近を 10 秒間測 定した結果を図 8 に示す。屋外での測定であったため、風などの 外乱の影響で車体が振動し、測定データにうねりが観測されるもの の、標準偏差(σ値)で 5.6 μm の測定結果であった。



図8 定点測定の結果

図 9(a)に測定対象である車体の写真を、図 9(b)に形状測定の 結果を示す。形状測定の結果表示は縦500×横500ピクセルとした。 測定箇所を分割して、その区域ごとに OFDR システムの位置を移動 させることなく、比較的大きな車体側面全体を一度に測定できている。 このとき、測定に要した時間はおよそ 12 分間であった。より高速な自 動ステージを用いることで、理論上は200秒(=500点×500点÷1250 Hz)まで短縮が可能である。図 9(c)~(e)に、車体中央付近の断面 図を示す。図 9(e)に示した拡大図より、50 µm 程度のリップルが観 測されているが、遠距離から高精度に測定できている。



5 OCT への応用

これまで示した表面形状測定は,測定対象物の表面で反射した 光を受光して、コリメータレンズから反射点までの相対距離を測定 することで,全体形状を明らかにする手法であった。測定対象物が 光を透過する材質で構成されている場合,内部の屈折率境界面で 反射された光を受光することにより、内部構造を可視化することがで きる。本章では、これまで説明した OFDR が、内部構造を可視化す る OCT へ応用できることを実測例と共に示す。測定系は、図5に 示した構成と同様とした。波長掃引幅は 110 nm とし,線形性の高 い内側 104 nm をサンプリングに用いた。これにより理論分解能は 12 µm となる。測定対象物をコリメータレンズから約 100 mm の距 離に置いて測定を行った。はじめに,ポリプロピレン製容器を 4 枚 重ねたものを測定対象物とした。本容器は、OCT の測定波長域で は透明となる。容器の大きさは直径 120 mm, 深さ 30 mm, 厚さ 2 mm 程度である。コリメータレンズの焦点距離を,1枚目の容器から の反射パワーが最大となるように調整した。測定時間は自動ステー ジの回転速度に制限されており、ここで示す断層画像の測定時間 は1秒程度である。

図 10(a)に測定対象である容器の写真を、図 10(b)に OCT 画像の全体図を、図 10(c)に容器頂点部分の拡大図をそれぞれ示す。図 10(b)に示す OCT 画像の画素数は縦 4027×横 500 ピクセルとした。図 10(c)より、樹脂内部に層状の屈折率分布があり、縞模様として可視化されていることがわかる。また、測定深度が深くなるほど光量が減少するため鮮明度は低下しているが、4枚の容器がすべて確認できる。4.3 節のとおり、原理的には数 m までの遠方測定が可能であるが、容器の表面や内部での光の吸収や散乱によって本測定の測定深度は 13 mm 程度に制限されている。



(a) 測定対象である容器の写真(4枚重ね)



図 10 4 枚のポリプロピレン製容器を重ねた場合の OCT 測定結果

次に,図10で測定した容器を,蓋をする形で重ね合わせて測定 を行った。これにより,容器全体の高さは2倍の60mmとなる。本 測定の場合,測定対象物の奥行が広いためコリメータレンズの焦点 距離を上下どちらかの容器に合わせると,もう一方からの反射パ ワーは極端に小さくなり断層画像の鮮明度も低くなる。そのため焦 点距離は奥行方向の中間(z=30mm)付近となるように調整して測 定を行った。図11(a)に測定対象である容器の写真を,図11(b) にOCT 画像の全体図を,図11(c)に上側の容器の頂点部拡大図 を,図11(d)に下側の容器の底面部拡大図をそれぞれ示す。図 11(b)に示す OCT 画像の画素数は縦 6330×横 500 ピクセルとし た。図10 と同様に上側容器はもちろん,下側容器底面内部の屈 折率分布までが可視化されている。これらの結果は高コヒーレンス 性を持つ当社製波長掃引光源によってもたらされたものであり,表 1 で比較した他の OCT 測定にはない特長といえる。



(a) 測定対象である容器の写真



図 11 2 枚のポリプロピレン製容器で蓋をした場合の OCT 測定結果

まとめ

アンリツ製波長掃引光源の製品仕様について説明した後で、本 器を利用した OFDR による形状測定について実測例と共に示した。 形状測定では、はじめに 2 µm 以下の微細な段差形状を持つブ ロックゲージの形状測定を行い、光ファイバの APC 端面からブロッ クゲージまでの距離が 137 mm の場合、0.14 µm の精度で測定が 可能であることを実証した。次に比較的大型の対象物である車体側 面の測定を行った。高コヒーレンス性を特長に持つ当社製波長掃 引光源を利用することで、4.5 m 離れた位置から一括で、かつ 5.6 µm の精度で測定できることを示した。さらに、産業分野向け OCT への応用例として、ポリプロピレン製容器の内部構造を可視化でき ることを示した。特に、他の OCT の測定レンジ数 mm に比べて、当

43 (9)

社製波長掃引光源を利用することで 60 mm 以上の OCT 測定が 可能であることを明らかにした。

本波長掃引光源は、その他の産業分野でも応用が期待できる。 例えば、高コヒーレンス性の特長を利用して、手の届かない高所や、 近距離からの測定が困難な高温部の形状や振動を遠距離から測 定する用途が考えられる。また、光の透過性を利用して、ケースや 恒温槽内部に置かれた対象物の経時的な形状変化や振動を槽外 から窓を通して測定する用途などにも応用が可能である。更に、最 大 110 nm の広い波長掃引幅の特長を活かして、光デバイスの反 射・透過特性の瞬時測定が可能であるなど、さまざまな用途で応用 が期待できる。

参考文献

- 1) 腰原勝, "高コヒーレンス波長掃引光源を用いた光干渉測定", 光アラ イアンス, 2021.11.
- 2) K. Nakamura, S. Morimoto, and T. Nakayama, "Single-Mode and Mode-Hop-Free Wavelength Sweep Light Source with Range of Over 160 nm and High Swept Frequency," IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 22, No. 19, Oct. 2010.
- 中村賢一, 腰原勝, 斉藤崇記, 川北浩二, "高コヒーレンス波長掃引光 源", アンリツテクニカル, No.92, pp.35-39 (2017.3)
- 4) 斉藤崇記, "OFDR による 3 次元形状測定", アンリツテクニカル, No.95, pp.28-34 (2020.3)
- 5) 斉藤崇記, "高コヒーレンス波長掃引光源を用いた高精度形状測定", IEICE Technical Report, OFT2020-43(2020-11).

執筆者



腰 原 勝 センシング&デバイスカンパニー 開発本部 第1開発部



斉藤崇記 センシング&デバイスカンパニー 開発本部 第1開発部