

細径ファイバによる同軸変位センサの厚み計測高分解能化の実現

早川 雅之, 木村 和哉, 藤原 直樹, 森野 久康

ディスプレイ用のガラスやフィルムなど、インラインでの透明体厚み検査において、設置時の調整が簡単で、搬送中のばたつきやシワによる傾斜に対しても安定して計測できるセンサが求められる。我々はこれまでに、変位センサの主流であった三角測距方式に代わる、白色共焦点方式によるファイバ同軸変位センサをリリースし、従来課題であった光沢面での傾斜に対して計測精度が劣化しないセンサを提供してきた。しかし、同軸変位センサで薄い透明体の厚み測定を実現するには、センサ内部にあるファイバのコア径を細くする必要があり、光量低下や分岐カプラでの波長依存性が課題であった。そこで、レーザー励起によるファイバ光源と可視域に対応したフィルタ型カプラを導入し、薄さ 15 μm の透明体の計測を実現した。この厚み分解能が向上した同軸変位センサによって、インライン透明体厚み検査における設置調整の手間や搬送中の安定計測が期待できる。

High Resolution Coaxial Displacement Sensor Using Small Diameter Fiber for Thickness Measurement

HAYAKAWA Masayuki, KIMURA Kazuya, FUJIWARA Naoki and MORINO Hisayasu

In in-line thickness inspection of glass and film for displays, there is a need for a sensor that is easy to adjust during installation and can stably measure even when tilted due to fluttering or wrinkling during transport. A fiber coaxial displacement sensor based on the chromatic confocal method has been released which replaces the triangulation distance measurement method that has been the mainstay of displacement sensors. The fiber coaxial displacement sensor is resistant to inclination on glossy surfaces, which has been a problem in the past. However, in order to measure the thickness as thin as a film with a coaxial displacement sensor, it was necessary to reduce the core diameter of the fiber inside the sensor, but this was problematic due to a decrease in light intensity and high wavelength dependence at the fiber coupler. Therefore, we utilized a laser-pumped light source and optical filter coupler for visible range to realize measurement of a transparent film as thin as 15 μm . This coaxial displacement sensor with improved thickness resolution is expected to reduce the time and effort required for installation and adjustment in in-line thickness inspection, and to ensure stable measurement during transport.

1. まえがき

生産ラインの自動化、製品品質の維持を目的に、部品の形状、厚み、高さや、搬送ステージなどの位置を高精度に測定できる変位センサが使われている。従来、変位センサは三角測距方式のレーザー変位センサが主流であったが、モノづくりの製造現場では、その方式に由来する設置調整の難しさ、測定対象物の材質の違いによる測定誤差の課題があった。それらの課題に対し、我々は白色共焦点方式によ

るファイバ同軸変位センサを、2012年に初めて商品リリース（型 ZW-CE シリーズ）し、その後2016年に高精度化したタイプ（型 ZW-5000、7000 シリーズ）を商品リリースした。白色共焦点方式とは、光学系のもつ軸上色収差を利用して、対象物にピントが合った光の波長から対象物までの距離を求める原理である。小型で簡単に設置でき、測定対象物の材質の違いに依存せず、光沢面も 25° 傾斜しても高精度な距離計測を可能にした¹⁾。

厚み検査には、ディスプレイ用のガラスや機能性フィルムなどの薄い透明体を対象とすることがある。例えば、

Contact : HAYAKAWA Masayuki masayuki.hayakawa@omron.com

ディスプレイ用のガラス基板は、約 1 mm のものから数 100 μm のものがあり、近年では 25 μm まで薄いものも登場している²⁾。数 100 μm もの薄い透明体の厚み測定には、三角測距方式とは異なる、光の干渉現象を利用した反射分光方式のセンサが使われてきた。しかし、数度以内の正確な設置調整が求められ、また搬送時のばたつきやシワによる傾斜で計測が不安定になる課題もあった。これは、計測精度を得るためにセンサの対物レンズの開口数が小さく設計され、測定対象物が傾斜すると受光しにくくなるためである。

一方、白色共焦点方式によるファイバ同軸変位センサは、原理上対物レンズの開口数が大きく設計され、傾斜に対して安定して計測できる。しかし、これまでリリースした商品では、25 μm の薄い透明体は表面、裏面ともにピン트가合うため、表裏を分離して計測することができなかった。表裏を分離するには、センサ内部にある光ファイバのコア径を細くすることが有効であるが、2つの課題が生じる。一つは受光量が減る課題と、もう一つは、ファイバを伝搬するモード数の減少により、センサ内部にある分岐カブラの透過率が波長に応じて変化する課題である。このような光量の減衰や波長依存性が生じると、十分な信号強度が得られず、計測値が不安定になる。そこで、我々は、レーザ励起による高輝度なファイバ光源と、可視域対応のフィルタ型カブラによる波長依存性の改善に取組み、厚さ 25 μm よりも薄い 15 μm の透明体の厚み計測を実現した。本稿でそれを報告する。

2. 白色共焦点変位センサ

2.1 白色共焦点計測原理

本原理は、測定対象物の高さ方向に異なる波長の光を集光し、測定対象物に集光した波長の光のみを分光器内の受光素子で受光することで測定対象物までの距離を測定する原理である¹⁾。

システム構成としては、図 1 に示すように白色光源、分岐カブラ、ファイバ、センサヘッド、分光器、処理部からなる。分光器は、回折格子を用いた一般的な分光方式がもちいられ、回折格子、受光素子からなる。

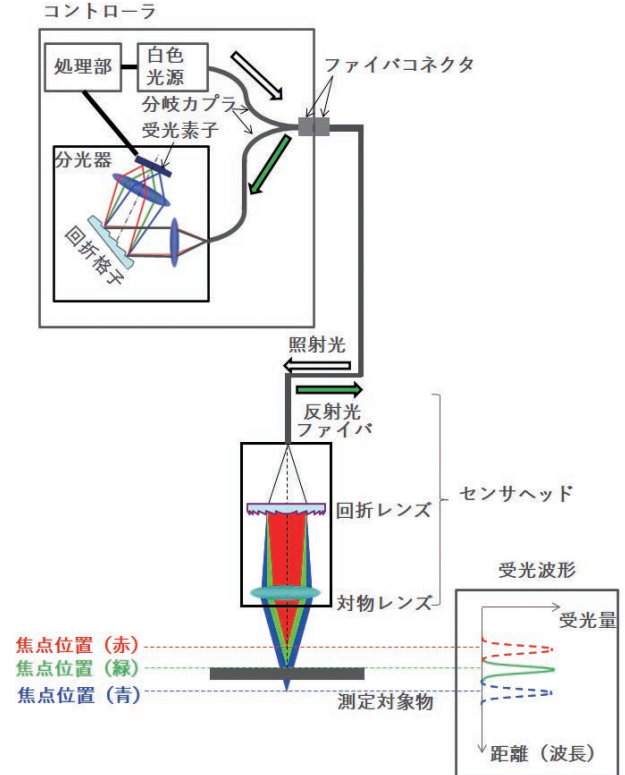


図 1 システム構成

白色光源から出射した光は、分岐カブラ、ファイバを経由し、センサヘッドへ入射する。入射した光は、波長によって焦点距離が異なる特性（軸上色収差）を持たせたセンサヘッド光学系によって、測定対象物の高さ方向に波長が分光される。センサヘッドは測定対象物からの反射光がファイバ上に焦点が合う共焦点光学系であるため、測定対象物上に集光された特定の波長の光のみがセンサヘッドに接続されているファイバへ結像し、分光器へ入光する。例えば、図 1 の例では測定対象物に緑色光が集光されているため、緑色光のみ分光器へ入光する。一方、赤、青色光は測定対象物に集光していないためファイバへ結像されず、分光器には入光しない。分光器に入光した光は、回折格子により、分光され、受光素子に結像する画素位置を求め、予め画素位置と距離を対応付けた補正データを用いることで、測定対象物までの距離を算出することができる。

センサヘッドの軸上色収差は、回折レンズを使って発生させる。回折レンズとは、光の回折現象を利用し、同心円状の微細なパターンによって、光を集光・発散させるレンズである。回折現象を利用するため、回折レンズの焦点距離は入射光の波長に反比例する特性がある。センサヘッドに回折レンズを組込むことで、波長によって焦点距離が異なる、軸上色収差をもった光学系が実現される。

白色光源には、長寿命で交換が不要な白色 LED を用いることが多い。白色 LED とは、青色 LED で蛍光体を励起し、その蛍光と励起光である青色を拡散させ、白色にみえ

る光源である。一般的には蛍光体材料に Ce 添加 YAG の粉末が使われ、黄色の蛍光を発する。白色 LED の分光スペクトルを図 2 に示す。

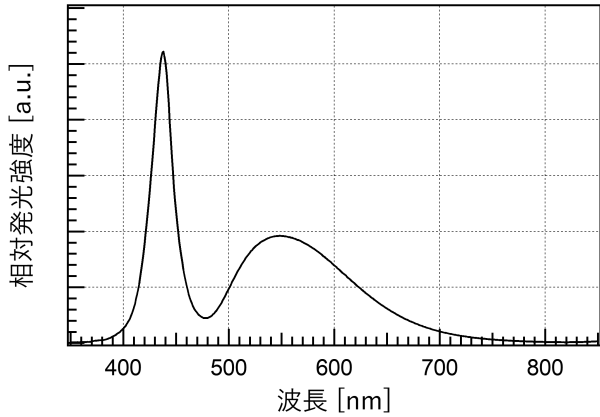


図 2 白色 LED の分光スペクトル

波長帯は、およそ 400~750 nm あたりの可視域となる。440 nm 付近の青色の急峻なピークと 550 nm 付近にピークをもつなだらかな単峰のスペクトルからなる。当社では、計測レンジ内での光量変化を抑えるため、500~650 nm を計測に利用している。

ファイバには、ガラス製の $\Phi 50 \mu\text{m}$ コア径のマルチモードファイバが使用される。短距離の光通信によく用いられるもので近赤外光に利用するものだが、可視域も透過する。

2.2 厚み分解能改善に向けた技術課題

白色共焦点変位センサで、ガラスなどの透明な材料を測定すると図 3 のように、表面と裏面からそれぞれ反射した受光波形が重なって受光される。なお、横軸は、受光波形の半値全幅を 1 として規格化してある。

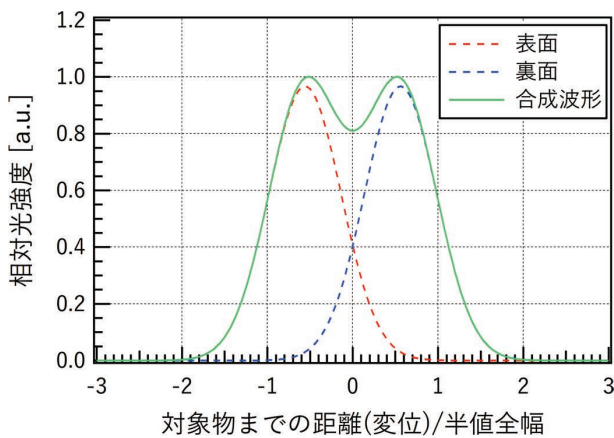


図 3 2つの受光波形の重なり

2つの界面を分離できる最小の厚みのことを厚み分解能と呼ぶことにする。分離の定義は様々あるが³⁾、我々は、二つの波形の重なりである合成波形の頂点で 19%以上凹んだ状態を指すものとする。ガウス関数で表現した場合、受光波形の半値全幅の 1.12 倍離れると、図 3 のように 19%凹みが生じる。透明体の厚み計測ではさらに材料の屈折率 n を乗じた値となる。ガラスやポリエチレンフィルムなど屈折率が $n \approx 1.5$ の場合、受光波形の半値全幅の約 1.7 倍が透明体厚み分解能となる。

白色共焦点変位センサは焦点の合った波長の光だけが受光される原理であるため、受光波形の半値全幅はセンサヘッドの被写界深度に相当し、その被写界深度はファイバのコア径と回折レンズの開口数 (NA)、対物レンズの開口数 (NA) と下記のような関係にある¹⁾。

$$\text{被写界深度} \propto \Phi_p \times \text{NA}_{\text{diff}} / (\text{NA}_{\text{obj}})^2 \quad (1)$$

図 4 に、被写界深度に関連する設計パラメータを示す。

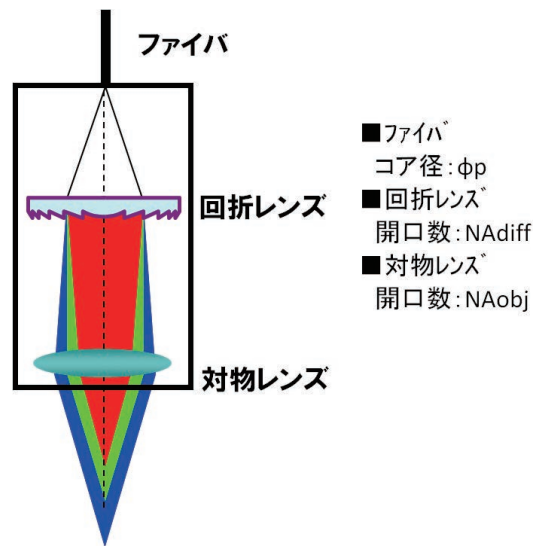


図 4 被写界深度に関する設計パラメータ

関係式からわかるように、厚み分解能の向上には、ファイバコア径を細くするか、回折レンズや対物レンズの開口数を変更する必要がある。開口数を変更する方法では、光学系の倍率と軸上色収差が変わるため、計測できる距離範囲が狭くなり、搬送時に生じる対象物のばたつきで計測が不安定になりやすい。測定できる距離範囲を狭くすることなく、厚み分解能を向上させるには、ファイバコア径を細くするのが有効である。従来用いられる $\Phi 50 \mu\text{m}$ コア径のマルチモードファイバに変わり、 $\Phi 10 \mu\text{m}$ コア径のファイバを使えば、5 倍の改善が見込まれる。

しかし、ファイバコア径を細くすると 2つの課題が生じる。一つは、受光量が減ることである。図 5 に白色 LED の光をファイバへ導く部分の構造を表している。

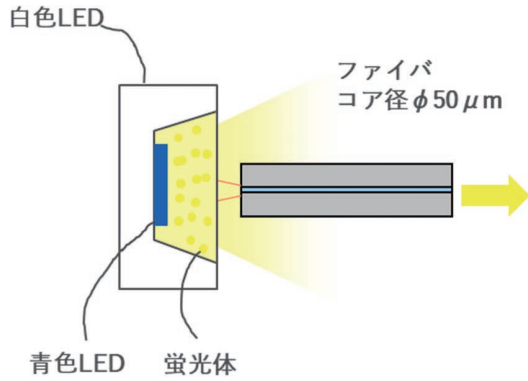


図5 白色LEDとファイバへの結合

白色LEDの発光部はおよそ1mm程度とファイバコア径に対して十分大きいので、レンズを用いず近接してファイバに光を導く。そのため、白色LEDの光がファイバに入光する光量は、ファイバのコア径に比例する。ファイバ径を1/5にすると、光量は $(1/5)^2=1/25$ に低下することになる。

もう一つの課題は、分岐カプラの透過スペクトルに波長依存性が現れることである。分岐カプラは、光通信で多用される、図6のような熔融延伸型のカプラが使われる。2本のファイバを熔融延伸しながらコアを近接させることで、コアから染み出した電磁界分布の拡がりが増え、光の結合現象が生じ、光のパワーが他方のファイバへ移動する。

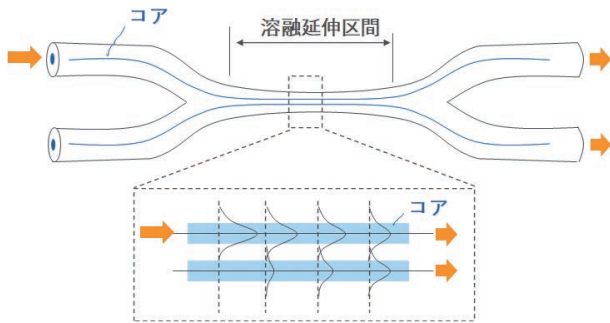


図6 熔融延伸型カプラと光分岐の様子

その分岐比は、電磁界分布を決める伝搬モードや波長などに影響を受ける⁴⁾。そのため、伝搬モードが一つしかないシングルモードファイバで作られたカプラの分岐比には波長依存性がある。一方でマルチモードファイバでは多くの伝搬モードを許容できるため、平均化が働き、波長依存性が小さい。しかし、Φ10μmコア径に可視光を伝搬させた場合は、マルチモードファイバほどモード数はなく、波長依存性が現れる。図7に、Φ10μmコア径のファイバで作製した熔融延伸型カプラに、白色LEDの光を分岐したときの2つの透過スペクトルを示す。

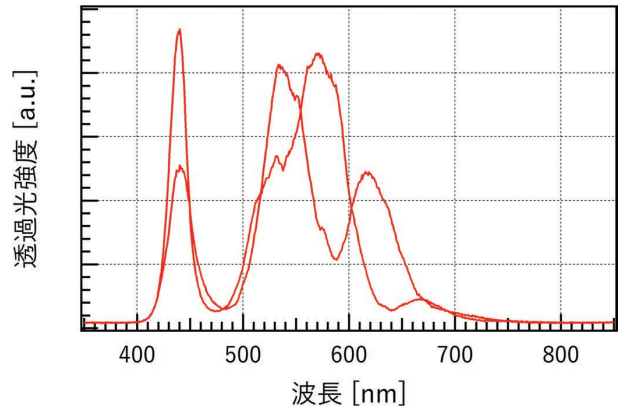


図7 熔融延伸型カプラの透過スペクトル

500~650nm 辺りで、白色LEDの分光スペクトルにはなかった形状が現れ、その形状も2つの出力ポート間で大きく異なる。

以上のような光源部での光量減衰や分岐カプラでの波長依存性が生じると、分光器の受光素子で十分な信号強度が得られなくなり、計測値が不安定になる問題を引き起こす。

3. 開発した技術

コア径を細くすることによって生じる、光量減衰や分岐カプラの波長依存性に対して、下記二つの技術に取り組んだ。

- ①レーザ励起によるファイバ光源で光源高輝度化
- ②可視域に対応したフィルタ型カプラで波長依存解消

本稿にてそれらを説明する。

3.1 レーザ励起によるファイバ光源

青色LEDで励起する白色LEDに対し、LEDより輝度の高い青色半導体レーザー(LD)で蛍光体を励起する高輝度な白色光源が開示されている⁵⁾。蛍光体は、光を拡散させるためのフィルタとともに樹脂中などに分散させ成型してある。光をよく拡散させることで、励起光の青色と蛍光体からの蛍光色がムラなく混ざり、白色照明となる。しかし拡散する蛍光体は青色LDの集光点も蛍光する発光点もぼけてしまうため、ファイバに取り込むには効率が悪かった。

そこで、我々は単結晶の蛍光体を用いて、高輝度なファイバ光源を設計した。図8にその構成を示す。

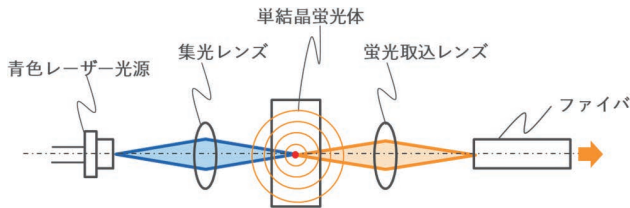


図8 レーザ励起によるファイバ光源の構成

青色 LD からの光を集光レンズにて、単結晶の蛍光体に集光する。単結晶の蛍光体は、シリコンウェハの製造にも利用されるチョクラルスキー法により育成した Ce 添加 YAG の単結晶インゴットからプレート状に切り出されたものを用いた。通常、蛍光体はこの後、粉碎され樹脂などに混ぜられ成型されるが、プレート状のまま利用することで、光を拡散しない透光性のある蛍光体となる。透光性のある単結晶蛍光体内では光が拡散しないため、青色励起光は蛍光体内部で焦点を結ぶことができる。単結晶内では、伝搬する青色励起光で照射された部分から、蛍光が発光する。蛍光は図9のようにウエストをもつ略筒状の形をなす。

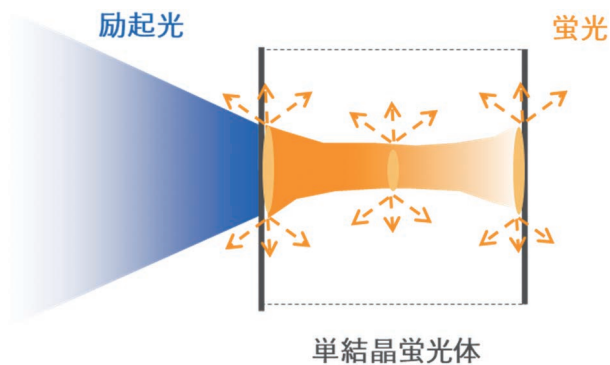


図9 単結晶内部での蛍光の様子

この略筒状の蛍光部からの蛍光を、蛍光取込レンズにてファイバに導く。

単結晶の蛍光体を用いることで、励起光も蛍光も拡散されず、微小な蛍光部を形成することができ、ファイバに効率よく取り込むことが可能になる。

3.2 可視光に対応したフィルタ型カプラ

光通信では、光ファイバの途中で特定の波長の光を選択的に取り出したり結合させたりする光フィルタ型カプラがある⁶⁾。2本と1本のファイバのそれぞれの先端に屈折率分布レンズを付け、両者の間に誘電体多層膜などによる光学フィルタを配置したカプラである。溶融延伸型カプラのような伝搬モードの影響を受けにくいいため、フィルタ次第で広い波長範囲に適用できる。しかし、光通信向けの近赤外光に対応したものしかなく、可視光に対応したものが

なかった。

そこで、我々は、フィルタ部分に、可視域用のハーフミラーを設けたフィルタ型カプラを本センサ向けに新たに導入した。図10にその構成を示す。

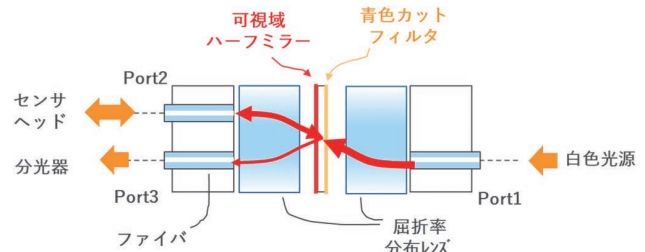


図10 可視光対応のフィルタ型カプラ

白色共焦点変位センサの光源から導かれる光は Port1 から入光し、屈折率分布レンズを経て、可視域対応のハーフミラーを透過し、2つ目のレンズで Port2 のファイバに導かれる。Port2 はセンサヘッドと繋がっており、センサヘッドから戻ってきた反射光は Port2 からレンズを経て可視域対応のハーフミラーを反射し、同じレンズにて、分光器と接続された Port3 のファイバに導かれる。また、可視域対応のハーフミラーを蒸着した反対側には、青色カットフィルタが蒸着されている。レーザー励起光源内の蛍光体が破損した場合に、青色レーザーがセンサヘッドから放出されるのを防ぐためである。

この可視域に対応したフィルタ型カプラにより、 $\Phi 10 \mu\text{m}$ コア径のファイバでも、波長依存性の少ないカプラの実現が可能になる。

4. 効果検証

開発した2つの技術の効果について4.1、4.2に示し、それらを用いたことによる厚み分解能の改善効果を4.3に、実際の薄い透明体を計測した結果を4.4に示す。

4.1 レーザ励起によるファイバ光源の高輝度化

レーザー励起によるファイバ光源と、従来の白色 LED とで、ファイバから出力される光の分光スペクトルを比較した。使用したファイバはともに $\Phi 50 \mu\text{m}$ コア径で、比較となる白色 LED は当社白色共焦点変位センサ ZW-CE に搭載されているものを使用した。また青色レーザーに注入する電流および白色 LED に注入する電流は、ともに製品仕様上の限界値で設定した。得られた分光スペクトルを図11に示す。

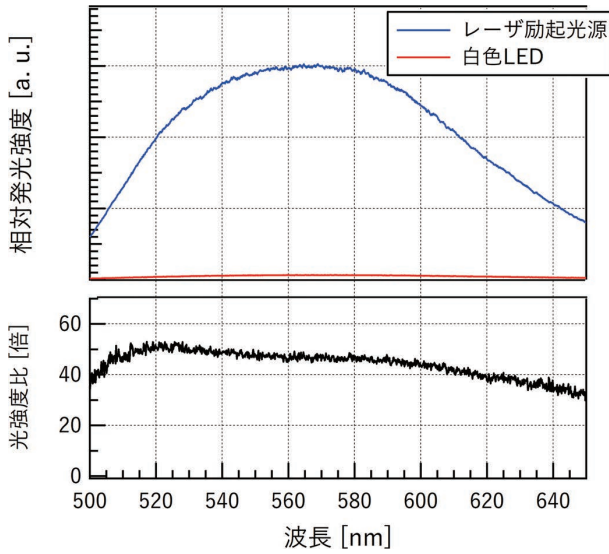


図 11 (上段) 分光スペクトル (下段) 光強度比

500~650 nm のどの波長においても 30 倍以上の光量が得られたことがわかる。

4.2 ファルタ型カプラによる波長依存性の低減

可視域対応のフィルタ型カプラと、Φ10 μm コア径で作製した溶融延伸型の分岐カプラに、それぞれ白色 LED の光を分岐させたときの、2つの透過スペクトルを図 12 に示す。

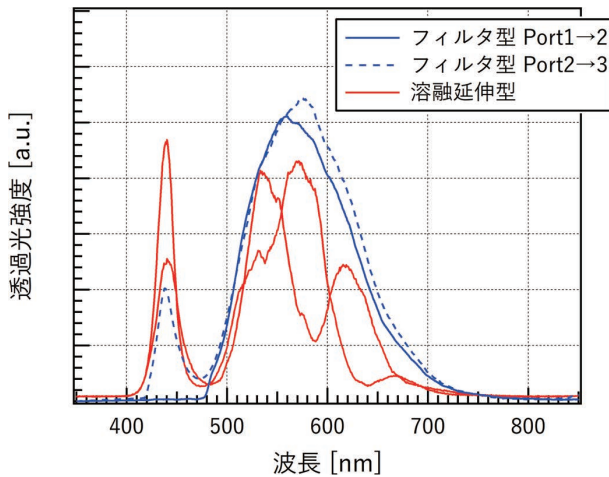


図 12 フィルタ型と溶融延伸型カプラの透過スペクトル

溶融延伸型に比べ、可視域に対応したフィルタ型カプラによって、500~650 nm の透過スペクトルは滑らかになり、また分岐した二つの透過スペクトル間での違いも低減されたことがわかる。

4.3 厚み分解能の改善

レーザー励起によるファイバ光源と可視域に対応したフィルタ型カプラを用いて、Φ10 μm コア径の白色共焦点変位センサを構築し、Φ50 μm コア径の当社白色共焦点変位センサ ZW-S5010 と受光波形を比較した。センサヘッドは、ともに同じ軸上色収差の光学系を使用した。ミラーを計測したときの受光波形を図 13 に示す。

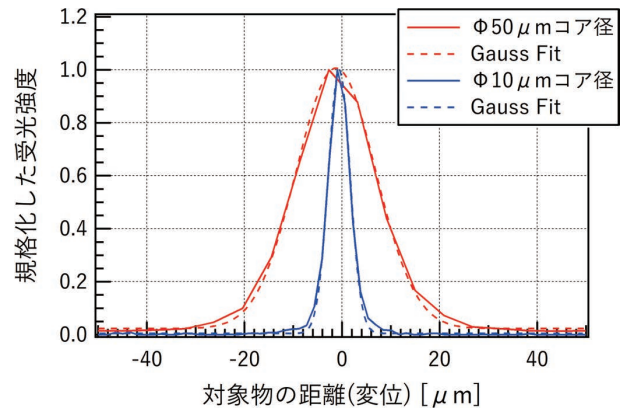


図 13 コア径違いの受光波形の比較

横軸は距離 (変位) を表しており、センサヘッドの軸上色収差量と分光器の波長をもとに算出した。縦軸は、比較しやすいよう、それぞれの受光波形の最大値で規格化した。得られた受光波形に、ガウス関数で Fitting し、ミラーに対する半値全幅を求めた。さらに材質の違いによる影響を評価するため、ミラー以外に、ガラス表面、SUS 金属も計測した。結果を表 1 にまとめる。

表 1 コア径違いによる厚み分解能 実測評価

		改善前 (Φ50 μm)	改善後 (Φ10 μm)
半値全幅	ミラー	19.1 μm	5.2 μm
	ガラス表面	19.2 μm	5.2 μm
	SUS	19.0 μm	5.2 μm
透明体 (n=1.5) 厚み分解能		32.6 μm	8.8 μm

対象物の材質によらず、半値全幅が改善されたことがわかる。得られた半値全幅の最大値から、屈折率 n=1.5 の透明体における厚み分解能を求めた。Φ10 μm コア径によって、厚み分解能が 3.7 倍改善し、透明体厚みで 8.8 μm まで計測できる可能性がわかった。

4.4 薄い透明体の実測

構築した Φ10 μm コア径の白色共焦点変位センサと、Φ50 μm コア径の当社白色共焦点変位センサ ZW-S5010 に

て、薄い透明体の実測を行った。薄い透明体として、厚み $30\ \mu\text{m}$ のガラスと、厚み $30\ \mu\text{m}$ 、 $15\ \mu\text{m}$ のポリエリレン (PE) フィルムを計測した。図 14 にその受光波形を示す。

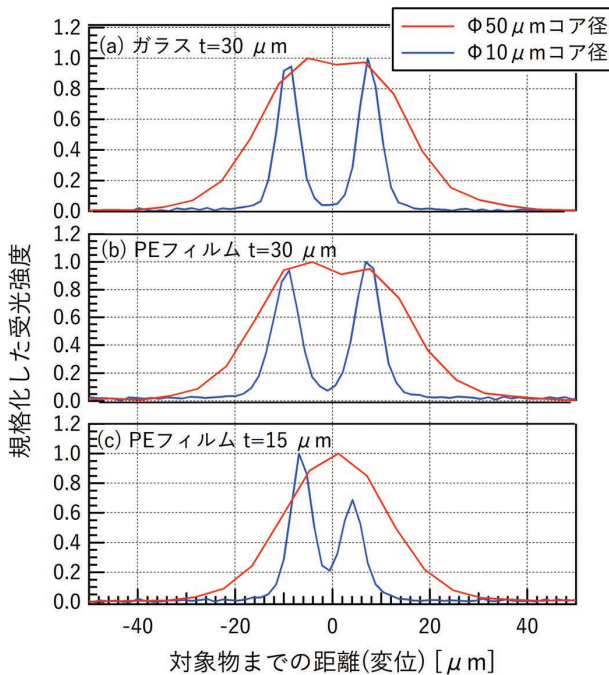


図 14 PE フィルム ($t=15\ \mu\text{m}$) を計測した時の受光波形

図 14 (a), (b) から、 $\Phi 10\ \mu\text{m}$ コア径によって、ガラス、PE フィルムどちらの材質においても、厚み分解能の改善が確認できた。さらに、図 14 (c) から、 $\Phi 10\ \mu\text{m}$ コア径において、受光波形の頂点に 19% 以上の凹みが確認でき、 $15\ \mu\text{m}$ の透明体厚み分解能が実測で確認できた。

また、厚み $15\ \mu\text{m}$ の PE フィルムに対して、 $\Phi 10\ \mu\text{m}$ コア径の白色共焦点変位センサのセンサヘッドを傾けて計測した。フィルムと正対したときの角度を $\theta=0^\circ$ として、 5° 、 10° 、 15° と傾けて計測した。計測した受光波形を、図 15 に示す。

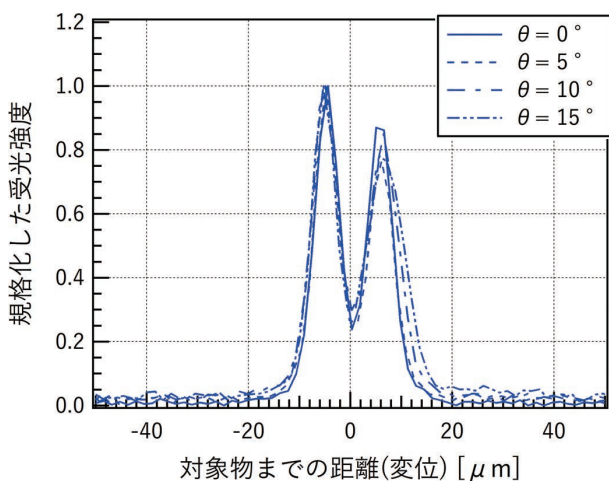


図 15 センサを傾けて計測した時の受光波形

15° 傾けても、 $15\ \mu\text{m}$ の透明体厚み分解能が維持できていることがわかる。

5. むすび

薄板ガラスやフィルムなどの透明素材の厚み計測の実現に向け、 $\Phi 10\ \mu\text{m}$ コア径のファイバを用いて白色共焦点変位センサの厚み分解能の改善を行った。コア径を細くすることによる光量低下と分岐カプラでの波長依存性の課題に対して、それぞれレーザー励起によるファイバ光源と可視域対応のファルタ型カプラにて克服した。結果、透明体の厚み $15\ \mu\text{m}$ が計測できるまでに、厚み分解能が向上した。

本技術を搭載した変位センサ ZW-8000 シリーズ (図 16) を 2018 年 4 月に商品リリースした⁷⁾。



図 16 ファイバ同軸変位センサ ZW (金色が ZW-8000)

本センサによって、ガラスやフィルムの厚み計測において、設置時調整の手間の緩和や、搬送時のばたつきやシワに対する安定計測が期待できる。またコア径を細くしたことにより、対象物上での焦点スポットが小さくなった。これまで以上に小さな部品の検査も可能になり、高度なものづくりにおける製品品質維持に広く貢献できると考える。

今後も、部品の軽薄短小化や検査点数の増加などの顧客ニーズに応えるため、本技術をもとに、高精度化、高速化、多点同時計測へと進めていきたい。

参考文献

- 1) 高嶋潤, 奥田貴啓, 森野久康, 早川雅之. 製造現場の変化に追従して進化する変位センサ技術. OMRON TECHNICS. 2019, Vol.51, No.1, p.10-15.
- 2) 日本電気ガラス. “フォルダブルディスプレイのカバーガラス用に世界最薄ガラスの開発に成功”. NewsRelease. 2020-7-21. https://www.neg.co.jp/uploads/news_20200721_jp.pdf, (参照 2022-05-26).
- 3) 波岡武. “分光装置 第 3 講 分光器に関する光学”. https://www.jstage.jst.go.jp/article/bunkou1951/19/3/19_3_127/_pdf/char/ja, (参照 2022-05-26).
- 4) 川上登. 光ファイバカプラ. New Glass. 1991 Vol.6, p.48-59. <https://www.newglass.jp/mag/TITL/maghtml/20-pdf/+20-p048.pdf>.

(参照 2022-05-26).

- 5) 日亜化学. 発光装置. 特開 2006-173324 号. 2006-6-29.
- 6) 金森弘雄. FTTHを支える光受動部品. SEIテクニカルレビュー. 2011, No.179, p.17-24. <https://sei.co.jp/technology/tr/bn179/pdf/sei10675.pdf>, (参照 2022-05-26).
- 7) オムロン株式会社. ZW-8000 / 7000 / 5000 シリーズ ファイバ同軸変位センサ / 特長 | オムロン制御機器. <https://www.fa.omron.co.jp/products/family/3500/feature.html>, (参照 2022-05-26).

執筆者紹介



早川 雅之 HAYAKAWA Masayuki

技術・知財本部
アドバンステクノロジーセンター
アドバンステクノロジー開発部
専門：機械工学・光学



木村 和哉 KIMURA Kazuya

技術・知財本部
アドバンステクノロジーセンター
アドバンステクノロジー開発部
専門：機械工学・光学



藤原 直樹 FUJIWARA Naoki

技術・知財本部
アドバンステクノロジーセンター
アドバンステクノロジー開発部
専門：機械工学・光学



森野 久康 MORINO Hisayasu

インダストリアルオートメーション
ビジネスカンパニー 商品事業本部
センサ事業部 第1開発部
専門：機械工学・光学

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。