オンライン近赤外線厚さ計 WG51S2

WG51S2 Infrared Sensor

市沢 康史*¹ 節田 和紀*¹ 西田 和史*¹ Yasushi Ichizawa Kazuki Setsuda Kazifumi Nishida

オンラインでのフィルム厚さ測定方式には接触式/非接触式の二つの方式があるが、製品への傷付き問題から非接触式が多く採用されている。非接触式にはベータ線, X線などを使った放射線方式と赤外線方式がある。近年, 脱放射線の観点から赤外線式の採用が増えており、今回、市場要求に呼応した赤外線を用いた非接触式のフィルム厚さセンサを開発した。

開発した厚さ計は、薄膜化の進むフィルムに対応し、横河独自の光学系の採用により、放射線並みの測定精度 と高いロバスト性を実現した。本稿では、紙、フィルム、複合素材などの多岐にわたるシート状の対象物に対応 した新製品と、新製品を実現する技術を紹介する。

There are two methods for online film thickness measurement, the contact type and the non-contact type. Most measurement systems use the non-contact type to avoid damaging the product. The non-contact type includes the radiation type such as Beta-ray or X-ray, and the infrared type. Use of the infrared type has increased in recent years to prevent radiation exposure, and in line with this market trend Yokogawa has developed a non-contact-type film thickness sensor using infrared rays.

Utilizing recent progress in thin films, Yokogawa has achieved high measurement accuracy and robustness equivalent to radiation-level quality based on Yokogawa's specific optical system. This paper describes the new product and its technology which can handle various sheet materials such as paper, film, composite materials, and other materials.

1. はじめに

EV (Electric Vehicles) の需要増加などにより、二次電池のセパレータシートなどフィルムやシートの高機能化、薄膜化が進んでいる。また、SDGs (Sustainable Development Goals) で提唱されている、全ての人の豊かな生活を実現するため、脱放射線を実現した安全な計装システムが求められている。

横河電機は、1962年より製膜装置において、フィルム・シートの厚みをオンラインで正確に測定し、厚み分布グラフ(プロファイル)を表示するとともに、厚みが均一になるよう自動制御するシステムを提供し、日本市場ではトップシェアを誇っている。2015年には、最新機種のWEBFREX NVを製品化した。

今回開発したオンライン近赤外線厚さ計 WG51S2 は, OpreX™ Quality Control System のラインアップである WEBFREX NV用の赤外線式センサである。このセンサは, 近赤外線厚さ計 WG51S2 の外観を図1に、主な仕様を表1に示す。表中の従来仕様は、近赤外線厚さ計の従来機(WG31S1) との対比を示す。本稿では、今回開発した採用した技術について、(横河の) 従来機と比較しながら、紹介する。



図1 近赤外線厚さ計 WG51S2 の外観

横河独自の光学系の採用により、放射線並みの測定精度 と高いロバスト性を実現している。

^{*1} IA プロダクト & サービス事業本部 アナライザセンター P&W ソリューション統括部

= 4		/ I 1*
-	一主な	1 十 五二

項目	従来仕様(S1)	開発仕様(S2)
光源	電熱線	ハロゲンランプ
受光素子	PbS	InGaAs PIN-PD
波長弁別方式	ターレット回転	周波数変調
		ロックインアンプ
厚さ測定範囲	(10) \sim 2000 μm	$10\sim 2000~\mu m$
	白濁:不可	白濁:可
	多層:不可	多層:一部可
平均值繰返性	±0.2 μm または	±0.2 μm または
	±0.2% のいずれ	±0.2% のいずれ
	か大きい方以下	か大きい方以下
		最高精度 ±0.1 μm*1
サンプリング	約 13 ms	0.25 ms
		同時同点測定
測定光	並行光	拡散光
薄膜干渉制御方式		角度平均化法
外乱光・熱除去		ロックインアンプ
許容パスライン	±2 mm	±10 mm

^{*1} ポリプロピレン (PP) の 20 um 厚さの薄膜において

2. 従来の近赤外線厚さ計

2.1 測定原理

測定対象物は、それぞれの材質(成分)に応じて固有の吸収波長帯(スペクトル)を持っている。赤外線式厚さ計は、赤外線が対象物を透過した際、吸収される赤外線の量が厚さに応じて変化すること(減衰する性質)を利用して厚さを算出する。

高分子構造体であるフィルムの厚さ測定は,分子構造中の CH 基の分子振動,回転に伴う近赤外線の吸収を利用する。

図2に、ポリスチレンフィルムの赤外吸収スペクトルを示す。横河電機では、図に示す吸光(M)をリファレンス光(R1, R2)で補正することで、材料の白濁やセンサに対するシートの測定位置(パスライン変動)などの影響を排除し、フィルムの厚みを正確に安定して測定する。

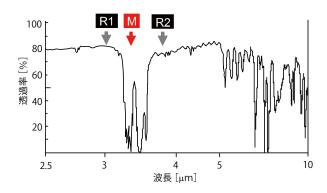


図2 ポリスチレンフィルムの赤外吸収スペクトル

2.2 従来方式の構成

図3に従来型の構造を示す。前記 M, R1, R2 光の波長は、回転円盤に搭載したフィルタで特定波長のみを透過させて選択する。この円盤を、モータなどで回転(数千回転/分)させて順次波長を切り替える。この光をミラーで光路を変えて対象物に照射し、対象物を挟む形で設値した検出素子で受光する。

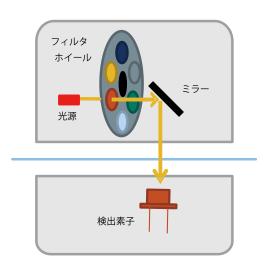


図3 従来の近赤外線厚さ計の構造

2.3 問題点

従来の構造では、**図4**に示す通り、移動するフィルムに対して時系列に波長(R1, M, R2)を照射するために、同じ位置を測れない。これにより、異なる場所を測った結果に対して補正演算を行うことになり、白濁やパスライン変動などの影響を完全に排除することができなかった。その結果、測定精度を上げることができなかった。

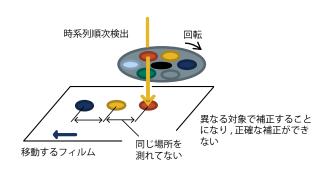


図 4 測定位置が同じにならない問題

この他にも、測定精度を悪くする要因として、測定時のパスライン変動が挙げられる。パスライン変動とは、透過型センサでは光源ヘッド、検出ヘッドを対向に配置し、ヘッドの間にフィルムを通して測定するが、この時、ヘッド間のどの位置をフィルムが通過するかによって厚さ測定値が変わることである。測定方式や補正方式によ

り異なるが、各社 ± 数 mm 程度の変動しか許容できていない。このためパスラインを安定させるローラーやガイドを設けざるを得ず、フィルム傷の要因となり得る。

一方、センサの構造以外の問題として、薄膜に光を透過させると膜の表裏での反射光が互いに干渉し、透過率に周期的な変動を生み出す薄膜干渉がある。図5に、薄膜干渉が発生している時に見られるリファレンス光の変動を示す。特に、薄膜では干渉が強く発生することでリファレンス光が安定せず、吸光量演算が正確に測定できない。

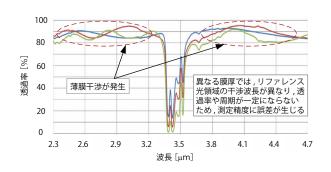


図 5 薄膜干渉によるリファレンス光の乱れ

薄膜干渉に対しては、各社が様々な方法によって干渉発生を抑制する光学系を採用して対策を講じている。代表的な対策に、"P偏光ブリュースタ角入射方法"がある。これは、P偏光の光をブリュースタ角で入射させることで、フィルム表裏での反射を抑制し、薄膜干渉自体を発生させないことを狙った方法である。しかし、現在主流の2軸延伸フィルムで生じる"ボーイング現象"により、干渉抑制効果は小さい。

ボーイング現象とは、フィルムが2軸延伸されることにより、幅方向において異なる力および方向で延伸され、中央部と周辺部での物性値が異なる現象である。光学的には、面内複屈折率や屈折率最大方位(分子配向角)に違いが現れる(図6)。

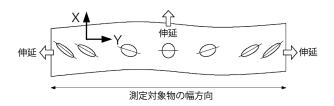


図6 ボーイング現象と分子配向の旋回

図7に、フーリエ変換赤外分光光度計(FTIR)による分子方位角と透過率を測定した結果を示す。P偏光ブリュースタ角入射条件で測ったにもかかわらず、試料を回転させると透過率に差が出ている。生産プロセスでボーイング現象を抑制することは難しく、P偏光ブ

リュースタ角入射方法では,薄膜干渉を有効に抑制する ことは難しい。

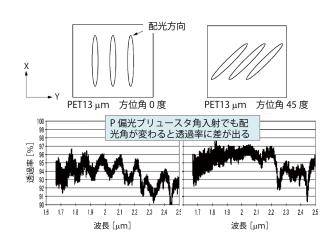


図7 FTIR による分子配向と透過特性の測定結果

3. 新型近赤外線厚さ計

今回開発した新型近赤外線厚さ計 WG51S2 は,次の特徴をもつ。

- 1. 最高精度 ±0.1 um 以内の高い精度を実現
- 2. メンテナンス性と互換性に配慮した設計

次節以降,まず1の高精度を実現する技術について説明し,その後,2について説明する。

3.1 最高精度 ±0.1 µm 以内を実現

周波数変調光源とデュアル積分球からなる当社独自の 光学系とデジタルロックインアンプ回路による微小信号 検出技術を組み合わせ、精度と信頼性を格段に向上させ た。薄膜(10 μm)から厚膜(2000 μm)までの高レ ンジを確保し、安定で且つ高精度(±0.2 μm 以内または ±0.2% のいずれか大きい方)で測定できる。ポリプロピ レンの 20 μm 厚さの薄膜においては、最高精度 ±0.1 μm 以内を実現しており、透明・不透明・発泡フィルムなど 幅広いアプリケーションに対応可能である。フィルムの パスライン変動や外乱赤外線による測定値への影響を受 けにくく、高速移動するフィルム上でも測定可能な高信 頼な測定方法を実現した。

3.2 周波数変調光源

従来のフィルタターレット方式とは異なり、測定光を 異なる3つの周波数で変調し、3つのバンドパスフィル タで所望の波長とし、積分球で混色した後、フィルム上 に一斉に照射する光源を開発した。図8に周波数変調光 源の構造を示す。従来センサの問題点として挙げた、同 点を測れない問題を解決している。

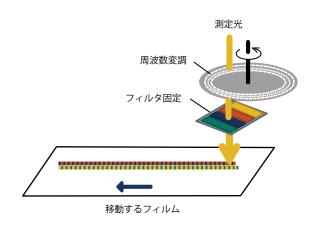


図8 周波数変調光源の構造

3.3 デュアル積分球

光源側と検出側の双方に積分球を備え、光源側積分球から照射された近赤外線がフィルムを透過、検出側積分球で捉えられる。この時、検出側積分球で受光する一方、検出側から光源側に向かって再び(2回目)フィルムを透過する。フィルム透過した近赤外線は、光源側積分球で捉えられ、積分球内壁で反射してフィルムに向かい3回目のフィルム透過を成す。このようにして複数回透過することで、薄膜においても高 S/N 比を得られる。図9にデュアル積分球の構造を示す。

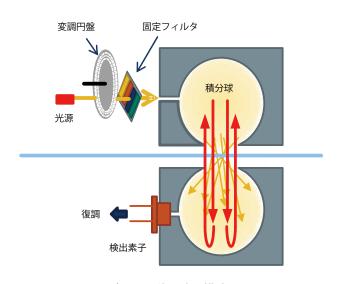


図9 デュアル積分球の構造,原理

さらに特筆すべき効果として、広角無指向の拡散光照射により薄膜干渉の発生条件を無効にすることができる。この方法は「角度平均化法」と呼ばれ、これを積分球の構造で実現した。積分球から照射される0~45度の広角無指向の赤外線はこの原理には好適で、安定且つ確実に薄膜干渉の抑制が可能である。また、拡散光を用いるため、光学的な配置に寛容でヘッド移動を伴うオンライン測定に対しても、測定誤差を低減する効果が大きい。

この横河電機独自のユニークなデュアル積分球光学系で、国内特許を取得している「特許 6394825」。

3.4 デジタルロックインアンプ

ノイズを含む測定信号から特定の信号を抽出するロックインアンプをデジタル化して、さらに性能を高めたものである。検出器で受光した信号を複数の復調器で弁別し、周波数の異なる複数信号を同時に解析することができる。積分球は光量的にはロスの多い光学系であるにもかかわらず、ロックインアンプが検出能力を発揮することで、デュアル積分球光学系を実現できた。

3.5 パスライン変動

デュアル積分球光学系は、光源→受光、受光→光源、と繰り返し透過になるため、フィルムの透過位置の影響を相殺することができ、パスライン変動にも大変強く、一般的なパスライン変動許容±数mmに対して、±10mmを確保できた。これにより、フィルムの流れ変動(揺動)や皺、フィルム端のカールに影響を受け難い。パスライン変動許容値は、他社より秀でており、本センサの特長の一つである。

3.6 外乱赤外線

高温で生産されるフィルム自体から生じる熱放射や、環境光には赤外線が含まれており、これらがセンサの赤外線検出部に混入することは測定誤差が生じる要因の一つとなっている。これらの外乱に対しては、ロックインアンプによる周波数制限で、数~十数 Hz の熱変動を排除している。

3.7 メンテナンス性と互換性に配慮した設計

周波数変調光源を採用したことで有寿命の機構部品をなくし、唯一の保守部品である光源は、お客様で容易に交換が可能である調整レスの構造を実現した。従来の赤外厚さ計と互換性を保った設計を踏襲することで、WEBFREX NV をご使用のお客様には、既存フレームに新型センサのみを取り付けることを可能とした。

4. 測定例

図10 に、ポリエチレン系シート(シート幅:約550 mm,シート厚さ約30 μm)の測定結果の一例を示す。上段のグラフ(黒地にシアン色の折れ線)は、WEBFREX NV に新型近赤外線厚さ計を搭載し、平均化なしの生データを10回重ね書きさせたプロファイルである。測定再現性の良い測定となっている。ベータ線やX線に比ベノイズが少なく、時間的な平均化処理が不要で応答の速い計測ができる。今後求められると考えているシート速度の高速化や高速SCAN(走査)要求に対応している。

下段のグラフは、新型近赤外線式センサ(10 回測定の平均値)とX線センサのプロファイル相関を示す。実績のあるX線(放射線)に対し良好な相関を得た。

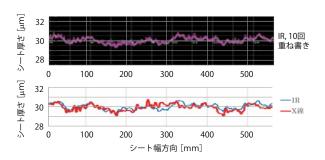


図 10 ポリエチレン系シートの測定結果(サンプルテスト)

5. おわりに

今回開発した近赤外線厚さ計は、独自に開発したデュアル積分球光学系により、高精度、高ロバスト性を実現できた。SDGs に繋がる脱放射線センサの基幹として、さらにアプリケーションの対応範囲を広げる開発を行っていきたい。今後、お客様の経営、操業の変革に迅速に対応し、高効率、高品質、安全で安定した操業基盤を支えることができる高信頼性に繋がるよう、展開を図っていきたい。

- * WEBRREX, OpreX は、横河電機株式会社の登録商標です。
- * 本文中で使用されている会社名,団体名,商品名およびロゴ等は,横河電機株式会社,各社または各団体の登録商標または商標です。