

学会の申し込み時期が近づくと、やりにかっていた実験に再び集中し、学生を叱咤激励しながら実験結果を出し、その内容をまとめる作業が続くようになる。この時期は、研究内容の原理から測定方法などを学生に十分理解させる必要があるときでもあり、こちらもいろいろと工夫をしなければならない。人に1のことを教えるには10以上勉強しなければダメだ、と説教された学生時代のころを思い出しながら、これまでは何とか学生に教えてきたが、どうも最近事情が変わってきている。自分自身も少し前までは圧倒的に教えられる側だったので偉そうなことは言えないが、ある測定原理を学生に説明するときにも、これまでのやりかたではうまく理解してもらえず、苦悶する状況である。そんな中で、説明したい測定原理などから生じる事例や現象などをビジュアル的（絵、写真、動画など）に示し、その現象の特徴を数値データなどを利用しながら説明することにより、大本となる原理を理解してもらえることがあった。この方法が最適かどうかは疑問の余地が残るところではあるが、低コヒーレンス光源を利用した干渉計測法で観測される、波数軸で展開された干渉信号を例にして、この手法をご紹介します。

低コヒーレンス干渉計測法は、低コヒーレンス光源を利用することによりコヒーレントノイズの影響を受けず、所望の被検面以外からの反射や被検物体中の光散乱に伴う不必要な干渉信号を回避して、干渉計測を行うことができる¹⁾。低コヒーレンス干渉縞を回折格子に入射させ、波数軸に展開すると、二光束間の光路差に比例した一定周波数の干渉信号が得られる。スペクトル領域 OCT (optical coherence tomography) は、干渉信号をフーリエ解析し、その周波数を測ることにより、被検物体内部の反射率分布を測定している^{2,3)}。

図1は、スペクトル領域 OCT による被検物体の反射率分布を測定する方法の模式図で、ここでは被検物体を可動式のミラーとし、反射点は1つであると仮定した。光源は、低コヒーレンス光源である。

ビームスプリッター (BS) で振幅分割された参照光と物体光は、参照ミラー、被検ミラーで各々反射し、BS で合波したあと、検出系へ導かれる。検出系は、回折格子と CCD センサーから構成されている。光源の低コヒーレンス光は、異なる周波数を有するコヒーレント光の集合体と考えることができ、参照光と物体光が回折格子へ入射すると、周波数成分ごとに回折角が異なるので、干渉強度が SLD のスペクトル範囲内で波数空間 (k 空間) 上で展開される。CCD センサーで測定される干渉強度分布は、波数 k の関数として次式で与えられる。

$$I(k) = A + B \exp \left[-\ln(2) \left(\frac{k - k_0}{\Delta k} \right) \right] \times \cos[\phi(k)] \quad (1)$$

ここで、 A はバイアス強度、 B は変調強度、 k_0 は低コヒーレンス光源の中心波数、 Δk は光源の波数スペクトルをガウス分布と仮定したときの半値半幅である。 $\phi(k)$ は干渉位相で、被検物体に分散特性がない場合は、 z を光路差として次式で与えられる、

$$\phi(k) = kz \quad (2)$$

式(2)より、干渉位相は波数に比例した線形分布となり、その傾きは光路差に比例することがわかる。したがって、波数軸で展開された干渉信号は光路差に比例した一定周波数を有し、その周波数を測定することにより、被検物体の反射点の位置を知る

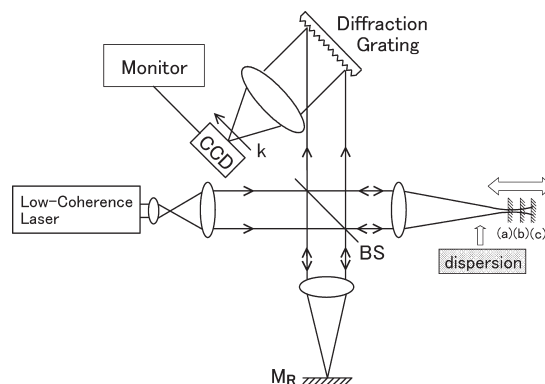


図1 スペクトル領域 OCT の基本構成.

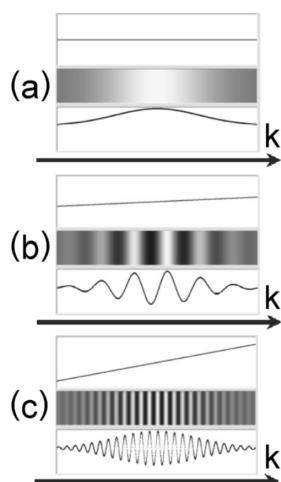


図2 波数軸で展開された干渉信号のシミュレーション。

ことができる。被検物体中に複数の反射点がある場合、光路差が多数存在し、式(1)は光路差について多重化された干渉信号となる。この多重化された干渉ビート信号を CCD センサーで検出し、計算機に転送して高速フーリエ変換すると、被検物体の反射点の空間分布を測定することができる。

図2は CCD センサーで検出される干渉信号を数値計算した結果で、中心波長 815 nm、半値全幅 20 nm の低コヒーレンス光源を仮定したので、 $k_0 = 2\pi \times 1.227 \mu\text{m}^{-1}$ 、 $\Delta k = 2\pi \times 0.01506 \mu\text{m}^{-1}$ となり、 $k_0 \pm 2\Delta k$ の範囲である $2\pi \times 1.197 \mu\text{m}^{-1} \sim 2\pi \times 1.257 \mu\text{m}^{-1}$ の波数範囲についてシミュレーションを行った。(a)、(b)、(c)とも、上段が位相分布、中段が波数軸で展開された干渉信号、下段が波数軸で展開された干渉信号の断面強度分布を、それぞれ表している。図2(a)は光路差がゼロの場合で、式(2)より位相は全波数範囲でゼロであり、式(1)より干渉信号は光源のスペクトル分布自体となる。図2(b)は光路差を $50 \mu\text{m}$ とした場合で、全体で6周期くらいの干渉縞分布が表れ、光源のスペクトラムで強度変調されていることがわかる。図2(c)は光路差を $200 \mu\text{m}$ と大きくした場合で、位相分布の傾きが大きくなり、全体で24周期くらいの干渉縞分

布が表れている。このように、波数軸で展開された干渉信号の周波数は光路差に比例しており、干渉信号が多重化している場合でも、フーリエ変換することによりそれぞれの光路差を分離して測定することができる。

図1のスペクトル領域 OCT の配置で、厚さ d 、屈折率 $n(k)$ の分散媒質を参照光路中に挿入したとき、位相分布は以下の式となる。

$$\phi(k) = k[z - 2d\{n(k) - 1\}] \quad (3)$$

ここで、限られた波数の範囲では、媒質の屈折率は波数に対し線形に変化すると仮定し、分散パラメータを α とすると、屈折率 $n(k)$ は次式で表すことができる。

$$n(k) = n(k_0) + \alpha(k - k_0) \quad (4)$$

式(4)を式(3)へ代入することにより、位相は、次式で示す波数 k の二次関数となる。

$$\phi(k) = -Ek^2 + Fk \quad (5)$$

ここで E 、 F は、

$$E = 2\alpha d, F = z - 2d\{n(k_0) - \alpha k_0 - 1\} \quad (6)$$

である。式(5)で表される位相は、 $k_c = F/(2E)$ に頂点をもつ二次関数であり、頂点の波数の位置 $k_c = F/(2E)$ は式(6)から光路差 z に比例することがわかる。位相の頂点の位置が中心波数 ($k_c = k_0$) となる光路差を z_0 とすると、光路差 z は、次式を満たす。

$$k_c - k_0 = \frac{z - z_0}{2\alpha d} \quad (7)$$

式(5)の位相を式(1)に代入して得られる干渉信号は、位相の頂点に関して対称な分布となる。したがって、干渉信号分布が対称な波数の位置 k_c を測定することにより式(7)から光路差 z が特定できることがわかる⁴⁾。波数 k_c の位置は、測定された干渉信号の畳み込み積分により求められた干渉信号の対称中心から特定される。また、測定された干渉信号を対称な形と仮定し、位相分布を式(5)にフィッティングすることにより、 E 、 F のパラメータ

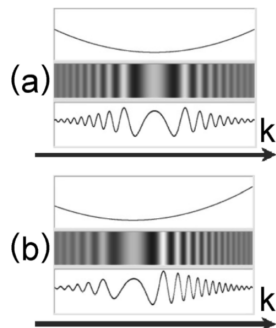


図3 光路中に分散媒質を含んだ場合の波数軸で展開された干渉信号。

を求め、波数 k_c における分散パラメーターを求めることができる。さらに、光路差を変化させることにより k_c の位置が変わるので、分散パラメーターの波数依存も測定することができる⁵⁾。

図3は、被検物体が分散特性を有している場合の波数軸で展開された干渉信号を数値計算した結果で、図2と同様、(a)、(b)とも横軸が波数、上段が位相分布、中段が波数軸で展開された干渉信号、下段が波数軸で展開された干渉信号の断面強度分布を表している。図3(a)は、光路差が $z=z_0$ のときのシミュレーション結果で、位相分布が波数の二次関数となり、干渉信号が対称となっていることがわかる。図3(b)は、分散パラメーターを $\alpha=2\text{ nm}$ 、分散媒質の厚さを $d=2\text{ mm}$ として、(a)から $0.08\text{ }\mu\text{m}$ だけ光路差を変化させた場合で、位相の頂点が移動し、干渉信号が対称となる波数の位置も変化し

ている。ただし、図3(b)の波数軸で展開された干渉信号は、光源の波数スペクトルで強度変調されているので、完全な対称形になっていない。

ここで示したように、干渉信号が変化する様子を例示し、具体的なパラメーターの大きさと、それにより誘起された現象の変化を対応させることにより、光学の原理などが理解しやすくなることがある。光学を利用したさまざまな技術が進歩するなか、他の光学原理についても、このような直感的な説明を試みる必要性を感じる。

(職業能力開発総合大学校 小野寺理文)

文 献

- 1) P. A. Flournoy, R. W. McClure and G. Wyntjes: "White-light interferometric thickness gauge," Appl. Opt., **11** (1972) 1907-1915.
- 2) U. Schnell, R. Dändliker and S. Gray: "Dispersive white-light interferometry for absolute distance measurement with dielectric multilayer systems on the target," Opt. Lett., **21** (1996) 528-530.
- 3) M. Wojtkowski, A. Kowalczyk, R. Leitgeb and A. F. Fercher: "Full range complex spectral optical coherence tomography technique in eye imaging," Opt. Lett., **27** (2002) 1415-1417.
- 4) P. Pavlicek and G. Hausler: "White-light interferometer with dispersion: An accurate fiber-optic sensor for the measurement of distance," Appl. Opt., **44** (2005) 2978-2983.
- 5) S. K. Debnath, N. K. Viswanathan and M. P. Kothiyal: "Spectrally resolved phase-shifting interferometry for accurate group-velocity dispersion measurements," Opt. Lett., **31** (2006) 3098-3100.