3次元スペクトル解析と3次元動画顕微鏡の一括計測の実現

		2011007					
ALC .	研究代表者	長岡技術科学大学 工学部 電気系	准教授	塩	\blacksquare	達	俊

Simultaneous Measurement Technique for 3-dimensional Spectroscopy and Tomography

[研究の目的]

マイクロメートル領域の断層計測に用いられ る低コヒーレンス干渉計測法は、様々な物体・ 生体の微細な構造や形状を測定する技術として 広く知られている。多くの低コヒーレンス干渉 計測法による断層計測ではマイケルソン干渉計 が用いられている。基本的な構成としては、光 源から出た光は干渉計内に入射し、干渉計内の ビームスプリッターで分割された片方の光路に 試料を設置し、その反射光(信号光)と参照光 との干渉波形から伝搬時間の情報を取得するこ とで、物体の構造(トモグラフィー画像)を計 測する。このような光学干渉計を用いて得られ るトモグラフィー画像を取得する具体的な方法 としては時間領域法(TD法)とフーリエ領域 法(FD法)が知られている。TD法は光の遅 延時間を掃引するために参照鏡の機械的な走査 を必要とし、直接トモグラフィー画像を取得す ることができる。FD 法は、計測した周波数領 域のデータを離散逆フーリエ変換することに よって干渉波形が得られるため、コンピュータ による演算処理が必要となるが TD 法に比べ 感度が高い。

工業分野において製品の形状検査及び塗装条 件をリアルタイムかつ高速で取得することが求 められているが、本研究室では測定結果として 直接断層画像が得られる TD 法による計測で の研究を進めてきた。しかし、先ほども述べた が TD 法の問題は参照鏡の走査が必要なこと であり,測定時間はこの参照鏡の走査時間に依 存してしまうこととなる。そこで,この問題を 解決するため,本研究室では VIPA (Virtually imaged phased array)と空間位相変調器 (SPM)を用いたシングルショットでの TD 法 による低コヒーレンス干渉計測法を発表してい る。これによれば,参照鏡を無走査での TD 法による計測が可能となる。

一方,現在,広く利用されている分光技術と してフーリエ分光法(FTS法)がある。FTS 法として挙げられるのは赤外分光計 (FT-IR). 近赤外分光計 (FT-NIR) 等があるが、どれも 光のコヒーレンスを用いた計測技術である。 FTS 法に使われる光学系は、先ほど説明した 断層計測に用いられる TD 法による低コヒー レンス干渉計測法と非常に類似している。唯一 異なる点は、試料が干渉計の外部に設置されて いるという点である。そのため、干渉計内の信 号光と参照光は自己相関の関係となる。した がって, FTS 法で得られる干渉波形 (イン ターフェログラム)は自己相関出力となる。 FTS 法では、その名の通り、測定によって得 られるインターフェログラムをフーリエ変換す ることで、干渉計に入射した光のスペクトルが 得られることとなる。これはウィナー=ヒンチ ンの定理から証明される。FTS 法は、光源に 広帯域光源を用いて、干渉計外部光路上に試料 を設置すれば、光源の波長帯域においての試料

の透過または反射スペクトルが得られる。

ここで、低コヒーレンス干渉計測法による断 層計測とフーリエ分光法の光学系を比較すると. 前述したように非常に類似していることがわか る。そのため、これまでにトモグラフィー画像 から試料の断層構造を測定し、かつ、試料のス ペクトル情報までも得られるという内容の研究 が報告されている。これらの研究では、低コ ヒーレンス干渉計で得られるトモグラフィー画 像をフーリエ変換,又はウェーブレット変換す ることで得られたスペクトルを試料の反射スペ クトルとしている。しかし、これらの手法は光 学干渉計内に試料を設置しているため. その干 渉出力は相互相関出力波形となり、 ウィナー= ヒンチンの定理を満たさない。そのため、得ら れたスペクトルは傾向を捉えるために限定すれ ば利用できるが、厳密なスペクトルを得ること はできない。そこで、我々は、TD 法による低 コヒーレンス干渉計で得られたトモグラフィー 画像から、厳密に複素電界スペクトルを得る方 法を提案する。

[研究の内容,成果]

Fig.1 にマイケルソン干渉計を用いた提案手 法の計測概念図を示す。パワースペクトル |e_i (ω)|²の光源から出射された光は干渉計に入射 し、ビームスプリッターによって信号光側と参 照光側に分波される。信号光側は試料の界面に よって複数の波が反射される。参照側は振幅反 射率 r_Mの参照鏡を走査して遅延時間 t を掃引



Fig. 1 The schematic of experimental setup with multi layer sample

する。信号光と参照光を再度ビームスプリッ ターで合波させ、その干渉波形をフォトディテ クターによって観測すれば、試料の断層画像を 取得できる。

ここで、Fig.1 において試料を振幅反射率 r_M の平面反射鏡に取り換えたときに得られる 干渉出力 $I_0(\tau)$ は、

$$I_0(\tau) \propto \int_0^\infty |e_i(\omega)r_M|^2 \operatorname{Re}\left[\exp\left\{i(\omega\tau - kn_0r_{SR})\right\}\right] d\omega$$
(1)

として得られる。ここでは直流成分を無視して 記述する。また、(1) 式のフーリエ変換は

$$F[I_0(\tau)] \propto |e_i(\omega)r_M|^2 \exp\left(-ikn_0r_{SR}\right)$$
(2)

となる。F[…] はフーリエ変換の記号で, r_{SR} は測定開始位置においての参照鏡と信号側に設 置した鏡の距離差である。(2) 式から鏡の反射 率を無視すれば,光源のパワースペクトルが与 えられていることが確認できる。

次に,信号側に複数の界面を持つ試料を設置 することを考える。参照光を掃引すると試料の 断層構造に応じた複数の干渉ピークが取得され るが,試料の光の入射側の界面から順にスペク トルを取得していく。具体的には注目するピー ク以外は0点で補完する作業を行う。このよう にして試料の界面 S0 による反射波から得られ る干渉出力 *I*_{s0}(τ) は,

$$I_{S0}(\tau) \propto \int_{0}^{\infty} |e_{i}(\omega)|^{2} \\ \times \operatorname{Re} \left[r_{M} r_{S0} \exp \left\{ i(\omega \tau - k n_{0} r'_{SR}) \right\} \right] d\omega \quad (3)$$

として得られ, そのフーリエ変換は

 $F[I_{S0}(\tau)] \propto |e_i(\omega)|^2 r_M r_{S0} \exp\{-ikn_0 r'_{SR}\} \quad (4)$

となる。r_{s0}は試料の界面 S0 における振幅反射 率を示し, r'_{SR}は参照鏡と試料界面 S0 の距離 差を表す。また, 試料界面 S1 の反射による干 渉波形 I_{S1}(t) は,

$$I_{S0}(\tau) \propto \int_{0}^{\infty} |e_{i}(\omega)t_{S1}|^{2} r_{M} r_{S1}$$
$$\times \exp \left\{-ik(n_{0}r'_{SR}+n_{s}(\omega)\Delta l_{1})\right\} d\omega \qquad (5)$$

として得られ,フーリエ変換することで得られ るスペクトルは,

$$F[I_{S1}(\tau)] \propto |e_i(\omega)t_{S1}|^2 r_M r_{S1}$$

$$\times \exp\left[i\{\omega\tau - k(n_0 r'_{SR} + n_s(\omega) \varDelta l_1)\}\right] \quad (6)$$

となる。*r*_{s1}は界面 S1 における振幅反射率である。

ここで各界面による反射パワースペクトルを 厳密に求めるにはそれぞれの以下の補正式を用 いなければならない。

$$P_{50}(\omega) = \frac{|F[I_{50}(\tau)]|^2}{|F[I_0(\tau)]|},$$
(7)

$$P_{S0}(\omega) = \frac{|F[I_{S1}(\tau)]|^2}{|F[I_0(\tau)]|} \,. \tag{8}$$

また, 屈折率 n_s(ω) が周波数に依存しないと 仮定すれば, 界面 S0 と界面 S1 による強度反 射率はそれぞれ,

$$|r_{50}|^{2} = |r_{M}|^{2} \frac{|F[I_{50}(\tau)]|^{2}}{|F[I_{0}(\tau)]|^{2}}, \qquad (9)$$

$$|r_{S1}|^{2} = |r_{M}|^{2} \frac{|F[I_{S1}(\tau)]|^{2}}{|F[I_{0}(\tau)]|^{2}}$$
(10)

で得ることができる。

次に,(4) 式の位相部分を φ_{S0}(ω),(6) 式を φ_{S1}(ω) と置くと,界面 S0 と界面 S1 によって 構成される層の光路長 n_{s1}Δl は,

$$n_{S1} \Delta l = -c \left\{ \frac{d\phi_{S1}}{dk} - \frac{d\phi_{S0}}{dk} \right\}$$
(11)

で求めることができる。

Fig.1 に示す実験系にて断層計測と空間分解 スペクトル計測を同時に行った。光源はスー パールミネッセントダイオード(中心周波数: 193.9 [THz], FWHM: 9.0 [THz])と周波数 229.141 [THz](周波数カウンタ計測による) の DFB-LD を使用した。この DFB-LD は断 層画像に含まれる光学干渉計の揺らぎを補正す るために用いた。SLD と DFB-LD の強度比率 は 5.3[dBm]: -15.5[dBm] とし,低コヒーレ ンス干渉計測法によって得られるトモグラ フィー画像に単色光の成分が影響しないよう注 意した。試料には Fig.2 に示す光路長 220 [µm] のガラス板の両端に金を蒸着させた光共 振器を使用した。



Fig. 2 Structure of resonator (Au-coated glass plate)

Fig.3 に測定によって得られた試料の位置に 平面反射鏡を設置した場合の自己相関出力の干 渉波形を,Fig.4 に試料の断層画像を示す。な お,どちらも一定値のベースラインを差し引い た結果である。Fig.3 は参照鏡と平面反射鏡と の干渉出力であるため干渉ピークがただ一つで ある。Fig.4 は複数の干渉ピークが確認できる が,R1 が界面 S0,R2 が界面 S1,R3 以降が多 重反射による干渉ピークである。それぞれの干 渉ピークの間隔が試料の光路長に対応しており, 平均で光路長 223[µm] が得られた。また,式 (1),式(3),式(5)より,トモグラフィー画像 からも界面 S0 と界面 S1 による強度反射率を 算出することができる。Fig.5,Fig.6 は Fig.3,



Fig. 3 The measured tomographic image of mirror-sample



Fig.4 The measured tomographic image of Au-coated cavity



Fig. 5 The absolute reflection profile of Fig. 4



Fig. 6 The absolute reflection profile of Fig. 5

Fig. 4 の反射ピークの絶対値を取ったものであ るが,包絡線を検波してその面積を比較した結 果,界面 S0 による強度反射率は 35%,界面 S1 による強度反射率は 1.9% が得られた。

Fig.7にFig.3のフーリエ変換した結果(光 源のパワースペクトル)と, Fig.4のR1とR2



Fig. 7 The power spectrum of SLD, reflected light from R1, and R2



Fig. 8 Relative phase spectra of each peak

をそれぞれ個別に切り出し,それ以外を0置換 したものをフーリエ変換した結果(界面 S0 と 界面 S2 による反射パワースペクトル)を示す。 干渉画像で得られた振幅の大小関係と,パワー スペクトルの振幅の大小関係の整合性が取れて いることが確認できる。また,(9)式,(10)式 から界面 S0, 界面 S1 による強度反射率を得 ることができ, $|\mathbf{r}_{S0}|^2 \ge |\mathbf{r}_{S1}|^2$ はそれぞれ 36% と 2.0% であった。

また, Fig.8にFig.4に示した試料の断層画 像の各ピークを切り抜きその他を0置換したも のを個別にフーリエ変換した結果をR1から R6までまとめて示す。反射次数が増加するご とに位相スペクトルの直線の傾きが負の方向に 大きく傾いているが,これは測定開始位置から の群遅延の情報を表しており,それぞれの傾き の差を求めることで試料の光路長を求めること ができる。Table 1にFig.8に示した位相スペ クトルの傾きと,(11)式によって計算した試

反射次数	傾き [rad/THz]	前後の光路長差 [mm]
R1	-4.22×10^{-12}	
R2	-1.35×10^{-11}	222
R3	-2.28×10^{-11}	221
R4	-3.21×10^{-11}	223
R4	-4.15×10^{-11}	224
R6	-5.09×10^{-11}	223

Table 1 Gradient and Thickness measured by the tomograhpic spectroscopy

料の光路長を示す。Table 1 からスペクトル計 測によって試料の光路長は平均 223[µm] が得 られた。

Fig. 9, Fig. 10 に界面 S0 および界面 S1 によ る複素電界スペクトルを示す。Fig.9および Fig.10 のスペクトルはコイル状であるが. コ イルの半径が振幅スペクトルの情報を示してお り、Fig.7に示した強度スペクトルの振幅の関 係と整合性が取れる結果となった。また、複素 電界スペクトルのコイルの巻が位相スペクトル



Fig. 9 Complex electrical spectrum of R1



Fig. 10 Complex electrical spectrum of R2

Table 2	Reflectance and thickness measured by
	tomography and spectroscopy

	$ r_{S0} ^2$ [%]	$ r_{S0} ^2$ [%]	nDl [mm]
干渉出力波形	35	1.9	223
振幅スペクトル	36	2.0	
位相スペクトル			223

の情報を示しており、Fig.8に示したように反 射次数が増加するほど位相スペクトルの傾きは 増すため、反射次数が高いほどコイルの巻が急 であることが確認できた。

[今後の研究の方向,課題]

吸収スペクトルを有する試料を対象としたト モグラフィー計測を行う。さらに、実際に異な る波長帯域の光源を用いて、提案システムを適 用する応用分野を開拓する。

[成果の発表,論文等]

- 1. Tatsutoshi Shioda, Takashi Morisaki, Tuan Quoc Banh, and Kohei Suzuki, "Two-dimensional singleshot tomography using a virtually imaged phased array and a spatial phase modulator," Appl. Opt. Vol. 51, no. 21, pp. 5224-5230 (2012).
- 2. Kohei Suzuki and Tatsutoshi Shioda, "Range Expansion of Single-Shot Surface Profilometry by Installing Optical Resonator into Interferometer," The Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) Pacific Rim (IQEC/CLEO Pacific Rim 2011) 3620-CT-3 Aug. 2011, Sydney, Australia.
- 3. Masaya Sakatsume and Tatsutoshi Shioda, "Spatially Distinguished Spectroscopy and Tomography using Time-domain Interferometer," The Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) Pacific Rim (IQEC/CLEO Pacific Rim 2011) 3620-CT-2 Aug. 2011, Sydney, Australia.
- 4. 坂詰将也, Quoc Tuan Banh, 塩田達俊, "トモグ ラフィック分光計測法の提案と周波数補正による精 度向上" 2012 年春季 第 59 回 応用物理学関係連合 講演会, 18a-B9-3, 2012年3月18日, 早稲田大学.
- 5. Quoc Tuan Banh, 鈴木康平, 木村宗弘, 塩田達俊, "Development of Tunable-Liquid Crystal Resonator for Frequency Comb Interfermetry" 2012 年春季 第59回 応用物理学関係連合講演会, 18a-B9-4, 2012年3月18日,早稲田大学.
- 6. Banh Quac Tuan, 鈴木康平, 木村宗弘, 塩田達俊,

"Utilization of an optical tunable resonator for expanding the emasurement range of a single-shot surface profilometry and tomography", 光波センシ ング技術研究会, LST48-26, 2011 年 12 月 7 日, 東京理科大学 (森戸記念館).

 3. 鈴木康平,塩田達俊,"可変光共振器によるシング ルショット干渉計の距離計測範囲の拡大"日本光学 会年次学術講演会(Optics & Photonics Japan 2011) 29AF7, 2011 年 11 月 29 日.

8. 鈴木康平,塩田達後,"干渉次数判別による複数次数を利用した形状計測範囲の拡大",光波センシング技術研究会,LST47-9,2011年6月14日,東京理科大学(森戸記念館).