

## 超短チャープ光パルスによる三次元形状計測

美濃島 薫

物体の三次元形状測定は工業的にも基礎科学の分野でも要求の高い基盤技術である。なかでも光を用いた計測法は、非接触・非破壊であるという大きな利点をもっており様々な手法が提案されてきた。そのなかで、パルスレーザーを用いた飛行時間測定法は、モアレ法<sup>1)</sup>などと比べ、結果が直接的で複雑な解析処理を必要としないという利点がある。しかし既存の方法では、光路長または光の照射位置の走査を必要とし、三次元同時測定ができなかった<sup>2)</sup>。これは測定上不便というだけでなく、測定条件の同一性がないことや、状態の変化する物体や運動する物体の形状を測定することができないという点で問題がある。

筆者らは、これらの問題点を解決すべく、超短パルスレーザーを利用した新原理に基づく測定法を開発した<sup>3)</sup>。これは三次元形状を1回のパルスで瞬時に測定し、画像の解析処理なしに光の色で直接、色付き等高線地図のように描き出すものである。以下では原理と応用例を紹介する。

### 1. 測定原理

図1に原理を示す。図中の左端に示した、段差のある物体の形状を測定する場合に、図中右側から光パルスを照射しその反射光の到達時間を測定することで距離情報を得るという、飛行時間測定法に基づいている。このとき、一つのパルス光の先頭から末尾にかけて、色が時間とともに連続的に変化する光パルス（チャープした光パルス）を照射することが特徴である。このとき、反射光をあるタイミングでシャッターで切り出すと、測定点の奥行きに応じて異なる色をしたパルス光が得られる。ここでビームを拡大して対象物体に一度に照射すると、奥行き形状に応じて色の分布をもった二次元の色画像が得られる。このように、奥行き情報を光の伝搬する時間の情報に置き換え、さらにそれをチャープ光パルスを用いることで、色の違いに置き換えることにより、三次元の位置情報を二次元化して一度に測定することができる。

### 2. 測定例

筆者らは、光源として増幅したチタンサファイアレーザー（パルス幅100 fs、波長800 nm、パルス出力1 mJ、繰返し1 Hz～1 kHz）を用い、水の自己位相変調効果により発生させた可視光全域をおおうチャープ光パルスと、二硫化炭素（CS<sub>2</sub>）分子液体の光カーシャッターとにより、以上の原理に基づく新方法を実現した<sup>3)</sup>。

最初の例として、方法の有効性を確認するために、3枚のブロックゲージを用いて作った既知の段差を試料として測定した。試料の形状を図2の右上部に示す。約10 mm径の円形部分に図の手前から光を照射した。ブロックゲージの厚さは、数字で1, 2, 3と書かれた領域について、各々1.6, 1.1, 2 mmである。図2の上部に測定結果を示す。段差が光の色の違いをもって鮮明に検出されている。このときの色と長さを対応づける物差しを図2の下部に示してある。これはあらかじめシャッターの切り出し時刻を刻々と変化させ、検出される色の変化を測定したものである。このときの物差しの分解能は、シャッターの機構であるCS<sub>2</sub>分子の応答時間で決まり、約0.3 mmであった。この結果、1, 2, 3と示した領域相互の段差の値は既知の値とよく一致し、方法の有効性が確認された。

この方法は、ブロックゲージのような鏡面の反射物体だけでなく、測定配置のわずかな変更によって、光を透過する物体や粗面にも応用することができる<sup>4)</sup>。筆者らは透過物体としてレタリングのテンプレートを計測し、文字型の穴の画像を、板の部分と異なる色で計測することができた。また粗面としては、光を完全に散乱する0.3 mm厚の紙を2枚重ね、その段差像を色の違いで計測できた。また時計の時針と分針に修正液を塗り、光を完全に散乱する状態にしたうえで、2つの針の奥行きの違いとその移動する様子を、リアルタイムで計測することができた。

### 3. 測定の性能

この方法を用いて高い奥行き分解能を得るには、高速なシャッターのほか、高速変調されたチャープパルスを

計量研究所量子部光学計測研究室（〒305 つくば市梅園1-1-4）

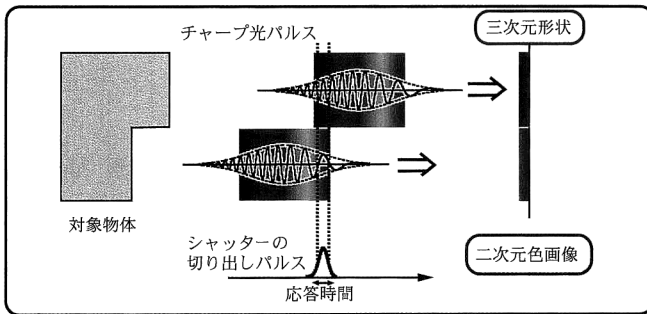


図 1 新測定法の原理。

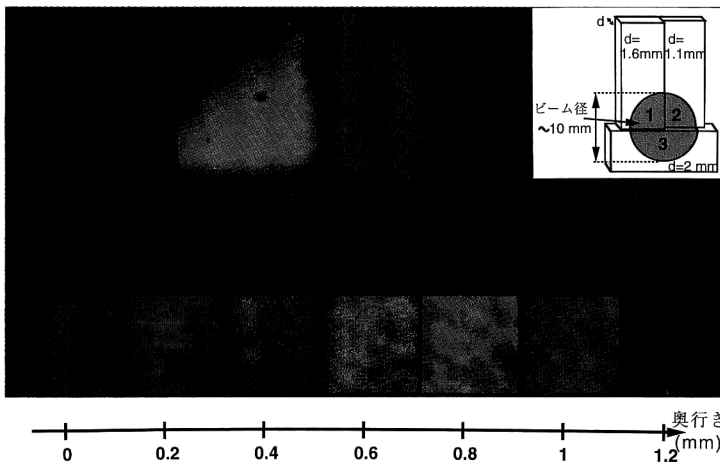


図 2 3枚のブロックで作った段差の測定例。下部のパターンは、色と奥行きを対応させる物差しである。

用いて切り出されるスペクトル幅を広くすることの2つが必要である。さらに、一度に測定できる奥行き領域を広くするには、チャープパルス全体のスペクトル幅を広くすることが必要である。以上の条件を満たしたシャッターとチャープ光を実現するうえで、フェムト秒パルスを用いることが有効である。上記の例では光シャッターとしてCS<sub>2</sub>を用いたが、より高速なシャッターはガラス材料などを用いて実現される<sup>5)</sup>。そのとき理想的な反射物体においては、マイクロメートル領域の分解能で、ミリメートル以上の凹凸形状を一度に求めることが可能となる。

また、粗面の計測においては結像光学系を用いたが、横分解能と集光効率の向上が課題である。しかし一般に、集光効率の向上のために光学系のNAを大きくすると、広い奥行きで同時に横分解能をよくできないという問題が生じる。色と空間、時間の対応を用いるこの方法においては、光学系の色収差とチャープパルスの変調度を同時に調整することが有効であると考えられる<sup>4)</sup>。

この方法を用いることにより、例えば、運動する生体の三次元顕微計測や、逆に面積の比較的大きな製品のイン・オンライン検査等が可能になると期待されている。そのためには測定分解能と感度の向上が課題である。

## 文 献

- 1) H. Takasaki: "Moire topography," *Appl. Opt.*, **9** (1970) 1467-1472.
- 2) J.-C. Diels, J. J. Fontaine and W. Rudolph: "Ultrafast diagnostics," *Rev. Phys. Appl.*, **22** (1987) 1605-1611.
- 3) K. Minoshima, H. Matsumoto, Z. Zhang and T. Yagi: "Simultaneous 3-D imaging using chirped ultrashort optical pulses," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33** (1994) L1348-L1351.
- 4) K. Minoshima and H. Matsumoto: "Time-space conversion using chirped pulses for three-dimensional shape measurements," *Ultrafast Phenomena X* (Springer-Verlag, Berlin) **62** (1996) 154-156.
- 5) K. Minoshima: "New 3-dimensional measurements using color information," *Tech. Dig. CLEO/Pacific Rim '95* (1995) p. 17.

(1996年10月2日受理)