

光弾性変調器を用いたミュラー行列偏光計 —散乱による偏光解消— Mueller matrix polarimeter using photoelastic modulator - Depolarization by scattering -

石田 章伍, °大谷 幸利

Shogo Ishida, °Yukitoshi Otani

宇都宮大学オプティクス教育研究センター

Center for Optical Research and Education, Utsunomiya University

E-mail: otani@cc.utsunomiya-u.ac.jp

1. はじめに

ミュラー行列は、複屈折、旋光、二色性、円二色性、偏光解消の偏光パラメータを求めることができる。代表的な計測法として二重回転位相法が挙げられる^[1]。しかし、機械的な回転を行うため計測時間に限界があった。我々は、2つの光弾性変調器(PEM)と半波長板を用いたミュラー行列偏光計を提案してきた^[2]。また、PEMは複屈折位相差を高速に変調するため、短時間でも非常に多くのサンプリング点が取得できるため高精度な計測が期待できる。しかしながら、PEMは、熱応力によるドリフトが発生するという問題があった。我々は、ベッセル関数の奇数次項と偶数次項がそれぞれ同じ変調振幅で動作しているということを新たに発見し、2つのPEMの同時キャリブレーション法を提案した。これを精度計測に適用し精度向上を可能とした。この際、散乱体であるイントラリピッドは粒子径が揃っておらず、散乱と偏光解消の議論が難しいという問題があった。そこで今回、金ナノ粒子を用いて散乱による偏光解消を計測したので報告する。

2. ミュラー行列計測原理

図1に示すように、我々の提案するミュラー行列偏光計は、光源(He-Ne レーザー)、偏光子、PEM1、半波長板1からなるPSG、および、サンプル、半波長板2、PEM2、検光子からなるPSA、とディテクタからなる。

ディテクタで得られる光強度 I は

$$I = \frac{I_0}{4} \{ m_{00} + 2J_2(\delta_{01})m_{02} \cos(2\pi \cdot 2f_1 \cdot t) + 2J_1(\delta_{01})m_{03} \cos(2\pi \cdot f_1 \cdot t) - 2J_2(\delta_{02})m_{10} \cos(2\pi \cdot 2f_2 \cdot t) - 2J_1(\delta_{01})J_2(\delta_{02})m_{12} \cos\{2\pi \cdot 2(f_1 - f_2) \cdot t\} - 2J_1(\delta_{01})J_2(\delta_{02})m_{13} \sin\{2\pi \cdot (f_1 - 2f_2) \cdot t\} + 2J_1(\delta_{02})m_{30} \cos(2\pi \cdot f_2 \cdot t) + 2J_2(\delta_{01})J_1(\delta_{01})m_{32} \sin\{2\pi \cdot 2(f_1 - f_2) \cdot t\} + 2J_1(\delta_{01})J_1(\delta_{02})m_{33} \cos\{2\pi \cdot (f_1 - f_2) \cdot t\} \} \quad (1)$$

ここで、 m_{ij} はサンプルのミュラー行列要素、 δ はPEMの複屈折位相差、 f はPEMの変調周波数、 J_n は第1種ベッセル関数、 t は時間となる。

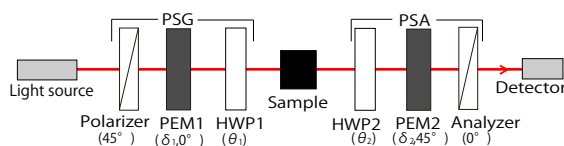


Fig.1 Mueller matrix polarimeter by dual PEMs

式(1)中のそれぞれの周波数成分を解析することによりサンプルの9つのミュラー行列要素を算出することができる。さらに、2つの半波長板の方位 θ_1 , θ_2 を 0° と 22.5° で組み合わせることにより表1のように得られるミュラー行列要素が変化し、4ショットで完全ミュラー行列が得られる。こうして得られたミュラー行列は様々な偏光パラメータが混在しているため、解析が困難である。そこで、ミュラー行列をデコンポジションすることで複屈折、複屈折、偏光解消行列に分解することにより詳細なパラメータの解析が可能となる。

2つのPEM同時キャリブレーション法は図1の光学系からサンプルを取り除いた状態で行う。このとき、ベッセル関数を第4次まで考慮したときの検出光がもつ周波数要素は表1のようになる。 δ_{01} , δ_{02} はそれぞれPEM1,2の複屈折振幅、 f_1 , f_2 はPEM1,2の変調振幅、 J_n は第1種ベッセル関数である。

$$\frac{I_{f_1-3f_2}}{I_{3(f_1-f_2)}} = \frac{J_1(\delta_{01})}{J_3(\delta_{01})}, \quad \frac{I_{f_1-f_2}}{I_{4f_1-2f_2}} = \frac{J_2(\delta_{01})}{J_4(\delta_{01})}, \quad \frac{I_{f_1-f_2}}{I_{f_1-3f_2}} = \frac{J_1(\delta_{02})}{J_3(\delta_{02})}, \quad \frac{I_{2(f_1-f_2)}}{I_{2f_1-4f_2}} = \frac{J_2(\delta_{02})}{J_4(\delta_{02})} \quad (2)$$

のようにPEM1,2それぞれに対して、奇数、偶数次項で比をとることができる。

J_1/J_3 の変調振幅と J_1 の変調振幅、 J_2/J_4 の変調振幅と J_2 の変調振幅が等しいので、この比をとった関数により算出される変調振幅をミュラー行列計測に用いることによりキャリブレーションが可能となる。

このキャリブレーションの効果を実証するため、3時間の間、サンプルを挿入しないときミュラー行列を計測した。その m_{33} 成分のキャリブレーションを施したとき、施していないときをそれぞれ図2に示す。

Tab.1 Frequency component

Frequency	Frequency component
$f_1 f_2$	$2J_1(\delta_{01})J_1(\delta_{02})$
$2(f_1 - f_2)$	$2J_2(\delta_{01})J_2(\delta_{02})$
$3(f_1 - f_2)$	$2J_3(\delta_{01})J_3(\delta_{02})$
$2f_1 - 4f_2$	$2J_3(\delta_{01})J_4(\delta_{02})$
$f_1 - 3f_2$	$2J_1(\delta_{01})J_3(\delta_{02})$
f_2	$2J_0(\delta_{01})J_2(\delta_{02})$
f_1	$2J_2(\delta_{01})J_0(\delta_{02})$
$4f_1 - 2f_2$	$2J_4(\delta_{01})J_2(\delta_{02})$

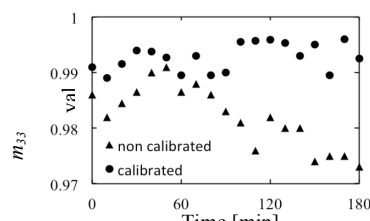


Fig.2 PEM calibration

3. 金ナノ粒子の偏光解消計測

レイリー散乱領域の粒子径をもつ金ナノ粒子の偏光解消度を計測した。用いた金ナノ粒子の粒子径は10,20,30,50,60,80,100nm、偏光解消度を計測することで、レイリー散乱の粒子径に依存することを確認した。図4に結果を示す。粒子径が大きいほど偏光解消度が高くなっていることがわかる。

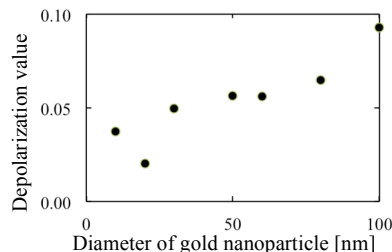


Fig.3 Depolarization of gold nanoparticle

4. まとめ

PEMを用いたミュラー行列偏光計において、2つのPEMの同時キャリブレーション法を提案し、金微粒子による散乱体の入った偏光解消度の同時計測を可能とした。

参考文献

- [1] R.M.A. Azzam: Opt Lett, 2, 6(1978) 146-150.
- [2] 石田 他: 春応物, 31a-ZL-19 (2011).