

正反射による物体表面の傾斜エリプソメトリー

— 精密実時間形状計測への基本概念 —

山本 正樹・津留 俊英

東北大学多元物質科学研究所附属先端計測開発センター 〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1

Tilt-Ellipsometry of Object Surface by Specular Reflection: Concept for Precise Real-Time Shape Measurements

Masaki YAMAMOTO and Toshihide TSURU

Center for Advanced Microscopy and Spectroscopy, Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577

Koshikawa's polarimetric approach to shape understanding of glossy object demonstrated in 1979 has been reworked as surface tilt-ellipsometry of specular reflection for precise real-time shape measurements. Principle of the tilt detection of 3D objects is demonstrated experimentally for the proof of concept, followed by potential applications of the tilt-ellipsometry features.

Key words: real time, 3D shape, surface tilt, polarization, ellipsometry

1. はじめに

光学的に物体の三次元形状を計測する方法として、各種の干渉計測法¹⁾、モアレトポグラフィなどの縞投影法²⁾、あるいは共焦点顕微鏡観察法が広く実用化されている。これらの光計測法では、基本的に距離の計測によって等高線で表した地形図の様式で形状を構築する。距離計測によらない計測法として、ロボティクス分野では、非偏光照明下で物体面の散乱光の“偏り”を利用した三次元形状の認識研究が進展し、形状再構築に成功している³⁻⁶⁾。計測原理はポラリメトリーであって、たとえば、雪面の散乱の“偏り”を示す偏光度の傾斜角依存性が水の偏光角で最大値1に近づくことを利用する傾斜計測法である。偏光度の計測精度の限界から現状では形状認識に应用が限定されているものの、偏光を利用することで“傾斜”を直読し、物体形状を実時間で再構築できることを示している。実時間計測に必要な偏光画像の検知では、偏光カメラ^{7,8)}の開発も進展し、各種の物体形状の抽出の応用も発展している。

本論文では、ロボティクス応用の非偏光照明ポラリメトリーに代えて、完全円偏光を照明に用いて、反射偏光の楕円形状を精密計測するエリプソメトリー法を精密傾斜計測

に適用する。この円偏光照明の構成は、実は、ロボティクス分野での傾斜計測を1979年にはじめて提案したKoshikawaの検証実験にすでに用いられている^{9,10)}。しかし、Koshikawa実験は、散乱試料による部分偏光計測であったため、その後はもっぱら非偏光照明が用いられ、本報告で述べる円偏光照明の精密計測への有用性に着目する研究へは進展しなかった。

なお、エリプソメトリーの分野では、偏光反射特性の入射角依存性を精密計測に利用する主入射角法^{11,12)}が知られているが、試料の光学特性を計測するという標準的な目的の手法である。形状計測に関連する報告では、干渉による形状計測の反射位相の物質依存性を補正¹³⁾したり、反射面のp方向の特性を利用して1°程度以内の表面傾斜を補正してGRINレンズの屈折率を計測した例^{14,15)}がある。また、波長程度のL&Sの格子構造による散乱光の偏光計測は半導体回路パターンのCD metrologyにも応用されている^{16,17)}。しかし、本論文で新たに提案する、滑らかな物体をその周辺から完全円偏光で一様に照明して、三次元的な広がりをもつ物体表面の“傾斜”をエリプソメトリーで精密計測する方法の原理と応用は、筆者の知る限り発表されていない。以下では、これを“傾斜エリプソメトリー

E-mail: yamamoto@tagen.tohoku.ac.jp

一” とよび、その計測原理と傾斜解析法について詳述した後、原理検証の実験結果を述べる。また、計測法としての特徴と応用の可能性についてもコメントしたい。

2. 物体表面傾斜角の計測原理—傾斜エリプソメトリー

一般に、ポラリメトリーは、非偏光と完全偏光の和で記述される部分偏光をストークスパラメータで計測して、部分偏光生成の背景にある物理現象を研究する。したがって、非偏光成分を含む散乱現象を扱うことができる。ロボティクス分野での計測では、散乱試料からの散乱光の全強度に対する完全偏光成分強度の比で定義される“偏光度”を計測変数とする。一方、通常のエリプソメトリーでは、光学特性の未知な平面試料に、光学特性の精密計測を目的として直線偏光子で生成した既知の完全偏光をプローブとして入射し、反射される完全偏光の“偏光楕円”の変化を精密計測する^{18,19)}。部分偏光では、偏光度を含めて計測精度が2桁以上落ちるので計測対象とせず、偏光度1の完全偏光を計測対象とする。散乱は扱わず、試料の表面粗さは使用波長に比べて十分小さく、散乱が無視できるとする。

本論文の傾斜エリプソメトリーは、通常のエリプソメトリーと同様に完全偏光をプローブとして正反射での偏光楕円の変化を精密計測する。しかし、通常とは逆に、既知の光学特性の試料の形状測定を目的として、通常は既知とされる入射角と入射面の方位角を精密計測する。以下に述べる傾斜角の計測の概念を理解するには、通常のエリプソメトリーの入射面の二次元面内限定の光路の概念を三次元に拡張する必要がある。

物質表面での光の反射では、一般に光の振幅と位相が変化するために、複素振幅反射率で反射特性が記述できる。光の偏りを考慮すると、複素振幅反射率は、入射面（入射光線と反射面の法線を含む面として定義される）内の偏りの成分であるp成分と、入射面に垂直（表面に平行）なs成分とで異なった値をとる。入射する光のp成分の複素振幅反射率を r_p 、s成分の複素振幅反射率を r_s と書くと、偏光が物質表面で反射されたとき、光の電気ベクトルのp成分とs成分とで振幅と位相の変化が異なるために、反射光は一般に偏光状態が変化する。具体的には、完全偏光の偏光楕円の形状が変化する。

楕円偏光は、2つの実変数で記述できる。楕円の主軸方位角と楕円率角をとれば、主軸方位角変化の基準はp方向であり、物体からの正反射では、反射点の接平面の法線を含む入射面方位に一致する。また、楕円率角の変化は、反射角に対して単調な関数である。傾斜エリプソメトリーでは、この2つの性質を利用して、反射光の偏光状態を計

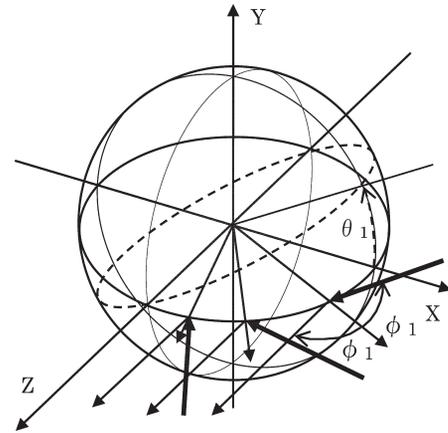


Fig. 1 Tilt-ellipsometry concept of specular reflection depicted by a spherical object observed from z direction.

測して、計測値から入射面の方位と入射角を算出して、光の反射点における微斜面の傾斜を決定する。

具体的には、Fig. 1に球状物体を仮定して例示するように、光学特性のわかっている試料の形状計測を目的として、円偏光を、滑らかな表面または界面をもつ試料物体に周辺から一様に照射する。この試料を空間的に固定された観測方位から偏光像として観測する。観測方位を z 方向とすると、 z 方向に反射される光線は、それぞれ異なった方向からの入射光が、試料の表面（界面）を形成する微斜面（接平面）で鏡面反射された微斜面成分から成る。この微斜面成分は、微斜面での反射の法則を満たす正反射の結果として生じている。

微斜面の反射は、観測方向が固定されているために、接平面の法線の傾きで定義できる。例えば、Fig. 1に示すように、観測方向である z 軸となす角 ϕ_1 と、 z 軸を回転軸とした x 軸からの回転角 θ_1 で記述できる。 θ_1 は接平面の法線の x - y 平面への射影成分の偏角に等しい。さらに、偏角 0° の x - z 平面内に示すように、入射光線がそれぞれの反射点に太線で示す光路で入射した場合に反射の法則を満たし、反射光線は z 軸と平行になる。Fig. 1から明らかのように、接平面の法線の傾き ϕ_1 と θ_1 が、それぞれ、正反射光線の入射角と入射面の偏角に等しい。

ここで、入射光を右または左円偏光に選ぶとき、任意の反射点で、入射偏光の方位角特性は打ち消される。したがって、試料表面の任意の反射点の傾斜情報は反射によって光線の偏光状態に写し取られて運ばれる。適当な結像光学系で物体の偏光像を z 方向から観測すれば、結像面上の像点での偏光楕円の方位角から微斜面の偏角が、楕円率角から入射角（＝反射角）がそれぞれ直読できる。これが、本論文で提案する傾斜エリプソメトリーの傾斜計測の基本

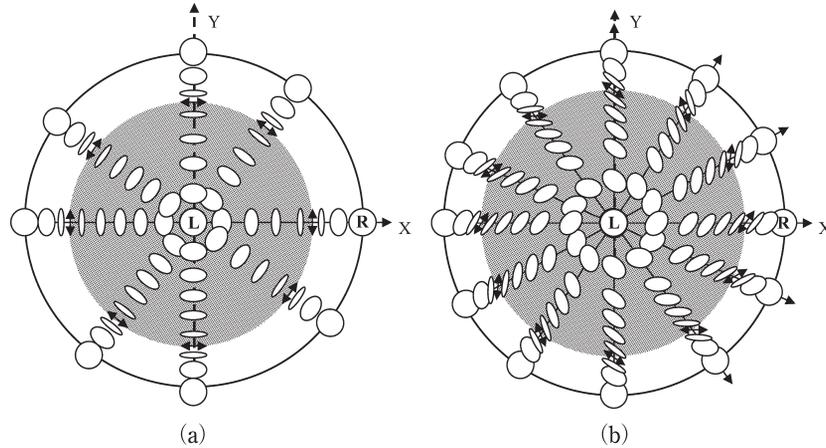


Fig. 2 Cross-sectional polarization maps of expected specular surface reflection of (a) dielectric and (b) metallic spheres under illumination of right circular polarization. L and R denote circular polarization of left-handed and right-handed, respectively. Shadowing in the middle shows the region of left-handed polarization.

原理である。

傾斜エリプソメトリーで計測する微斜面の正反射光成分の反射偏光楕円の形状を、以下では簡単に「楕円」とよぶ。楕円は、p成分の振幅反射率 r_p とs成分の振幅反射率 r_s との比 $\rho \equiv r_p/r_s$ で記述される。なお、通常のエリプソメトリーでは、極座標表示の $r_p/r_s = \tan \psi \exp(i\Delta)$ が使われる。楕円には、

I. 楕円の方位角変化の基準は、微斜面のp方向、すなわち微斜面法線を含む入射面である。

II. 楕円の楕円率角は方位角と独立に、入射角の単調な関数として複素振幅反射率比 ρ で記述される。

という2つの特性がある。特に、 ρ は、物質の種類を問わない次の条件で規定されている。

IIa. すべての物質で、 ρ は、垂直入射 $\phi=0^\circ$ で -1 であり、すれすれ入射 $\phi=90^\circ$ で 1 である。

IIb. 入射角 ϕ が 0° から 90° まで変化すると、複素平面上で ρ は -1 から 1 まで単調に変化し、途中で ρ の実数部が 0 の虚軸($\Delta = \pm 90^\circ$)を必ず通過する。

この条件は、次に具体例で示すように、楕円の方位角と楕円率角の変域が、測定すべき微斜面の偏角と光線の反射角の変域と一致していることを保証するもので、傾斜エリプソメトリーの計測法としての完全性を裏づけている。

2.1 円偏光照明による入射角計測の完全性

具体的に右円偏光を入射する条件で、透明体の表面で反射される光の偏光楕円を計算すると、Fig. 2 (a)に示すような楕円偏光群となる。球状の試料の観測面は円となり、円内部の既知の座標観測点で反射された光の偏光状態は、楕円の主軸方位が入射面に直交する。図の中央のLは左円偏光を、周辺のRは右円偏光が反射されることを示す。

また、楕円率角 ϵ は入射角 ϕ の関数として、 $\phi=90^\circ$ のすれすれ反射での $\epsilon=45^\circ$ の右円偏光(入射偏光と同一)から、 $\phi=0^\circ$ の垂直入射で反射される $\epsilon=-45^\circ$ の左円偏光まで連続的に変化する。 $\phi=56^\circ$ 付近の屈折率 $n=1.5$ の媒質の偏光角(ブルースター角 $\phi_B = \tan^{-1} n$)では、 $\epsilon=0^\circ$ の直線偏光状態を経由する。Fig. 2 (a)の中心部で、入射角が ϕ_B より小さい領域(直線偏光の内側)では左回り偏光群が、影の外側の試料周辺部では右回りの偏光群が観測されて、楕円率角 ϵ_1 から入射角 ϕ_1 が、楕円の方位角から入射面の偏角 θ_1 が計測できる。Fig. 2 (b)は、金属球の場合の偏光状態の変化を示す。透明体とは、楕円の傾きが異なる。しかし、楕円率角の変化は、定性的には透明体の場合のように、直線偏光状態を介して外側が右回りの楕円群、内側が左回り楕円群となる。

Fig. 2 (a), (b)の偏光状態変化の境界条件は、右または左円偏光入射に固有である。 $\phi=0^\circ$ の垂直入射では、反射によって光の進行方向が逆転するために偏光の回転方向が逆転し、入射された右回り円偏光は左回り円偏光として反射される。また、 $\phi=90^\circ$ のすれすれ入射では、入射光の偏光状態は変化せずにそのままの偏光状態で反射される。この入射角 ϕ に関する境界条件は、空間の幾何学的な性質に起因するので透明体 Fig. 2 (a)でも吸収体 Fig. 2 (b)でも成立し、試料物質によらない。物理現象は連続であることから、右または左円偏光を入射した場合は、入射角を変化することで、反射偏光状態は、すべての物質で左(右)円偏光から右(左)円偏光まで連続に変化し、中間で必ず直線偏光状態を経由する。したがって、楕円の楕円率角で表せば、 -45° から $+45^\circ$ まで単調に変化する。つまり、円偏光入射では、入射角変化の変域は偏光状態の変域と一致し

ていて、先に述べたように最大の感度が保証される。なお、負の楕円率角は左回り、正は右回りの偏光を示す。

Fig. 2 の偏光楕円群の形は、エリプソメトリーの解析法²⁰⁾に従って計算できる。次章以下で、反射による偏光状態の変化の計算法について、計算例とともに示す。

3. 観測偏光状態と微斜面の傾斜角

物体を右手系座標 (x, y, z) の原点に置き、反射光の偏光状態を適当な結像光学系を介して、 z 方向の十分遠方に位置する x - y 平面上で行う。このとき、所定の倍率の結像関係が維持されるとする。反射光線は z 軸に平行であり、反射光線の x - y 平面内の座標から、反射点の x - y 平面への射影成分 (x_1, y_1) は既知である。なお、観測面内での偏光画像の解像度は、使用する結像光学系の解像度で決定される。このとき、傾斜計測の角度分解能は光学系の開口数を上げると劣化する逆比例関係にある。したがって、角度分解能を上げるには、光学系の焦平面でのフィルタリングによって結像の低次光成分を偏光計測に利用する工夫が必要になる。これらの詳細は、本論文の範囲を超えるために、稿を改める。

物体の滑らかな表面を計測するには、反射点での物体の深さ方向の z 軸成分の座標 z_1 を決定する。通常の結像系では、座標 z_1 は決定できない。傾斜エリプソメトリーでは、偏光の反射特性を利用して反射点 (x_1, y_1, z_1) の接平面の傾斜として、 z_1 での偏微分係数を精密に決定できる。したがって、形状再構築は原理的には積分操作となる。実際、すでに述べたように、ロボティクス分野では接平面の法線から形状を再構築しており、アルゴリズムは確立されている。以下では、接平面の法線の計測について具体的に検討する。

Fig. 2 は、試料が球の場合を例示している。試料が他の一般形状の場合は、容易に類推できるように、観測楕円の二次元分布が変化する。観測される楕円の形状と、その反射点の微斜面の傾斜は 1:1 の対応がある。したがって、試料表面が正反射が得られる程度に滑らかであれば、形は不定形であってもよい。例えば、試料が鋭角の稜をもつ形であっても、傾斜を直読するために不都合は生じない。

3.1 反射による偏光状態の変化

光の偏光状態は、光の電気ベクトルの水平成分 E_x と垂直成分 E_y を成分とするジョーンズベクトル $\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}$ で表現できる。ジョーンズ計算を用いると、反射による偏光状態の変化は次のように記述できる。

右回りの円偏光 $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} -i \\ 1 \end{bmatrix}$ が、法線の傾き ϕ_1 と θ_1 の接平

面に入射して、試料表面で鏡面反射する。試料の反射で、入射角 $\phi = \phi_1$ のときの p 成分の複素振幅反射率を $r_p|_{\phi=\phi_1}$ 、s 成分の複素振幅反射率を $r_s|_{\phi=\phi_1}$ と書くと、反射された光 $\begin{bmatrix} E_{ox} \\ E_{oy} \end{bmatrix}$ は、強度の基準化の係数 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ を無視すると、

$$\begin{bmatrix} E_{ox} \\ E_{oy} \end{bmatrix} = T_{\theta_1} R_{\phi_1} T_{-\theta_1} \begin{bmatrix} -i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

で表される。ここで

$$T_{\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

は、座標系の回転に伴う角度 θ の旋光子行列、

$$R_{\phi_1} = r_s|_{\phi=\phi_1} \cdot \begin{bmatrix} \rho_1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

は、入射面が水平な鉛直試料面での入射角 ϕ_1 における偏光の反射を表すジョーンズ行列である。ここで、2 章に述べたエリプソメトリーのパラメータは

$$\rho_1 \equiv \frac{r_p}{r_s} \Big|_{\phi=\phi_1} = \tan \psi_1 \cdot \exp(i\Delta_1) \quad (4)$$

と書ける。円偏光は、式 (1) の $T_{-\theta_1}$ で変化しないから、

$$\begin{bmatrix} E_{ox} \\ E_{oy} \end{bmatrix} = T_{\theta_1} \begin{bmatrix} -i\rho_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

として観測される楕円偏光の形が計算できる。なお、式 (3) の複素スカラー量 $r_s|_{\phi=\phi_1}$ は楕円の形を変えないので式 (5) では無視できる。左辺のジョーンズベクトルで記述される観測楕円は、右辺のジョーンズベクトルの楕円を、楕円率角を変えずに方位角だけを θ_1 回転する。つまり、反射面の偏角は角度 θ_1 の旋光子行列だけに現れる。

左辺の観測楕円から、反射点接平面の法線の傾き ϕ_1 と θ_1 を決定するには、観測楕円の楕円率角が右辺のジョーンズベクトルが示す楕円の楕円率角 ε と等しいことを利用できる。右辺の楕円の楕円率角 ε と主軸の方位角 θ は、 ψ_1 、 Δ_1 と簡単な関係で結ばれているので、相互の変換は容易である。例として、右円偏光照明の場合を示すと、観測される楕円率角 ε は、

$$\sin 2\varepsilon = \sin 2\psi_1 \cos \Delta_1 \quad (6)$$

となる。この関数の右辺は、透明体でも吸収体でも Fig. 3 に例を示すように入射角 ϕ_1 (=法線の傾き) の単純な関数である。なお、透明体は、式 (4) の ρ_1 が実数であることから式 (6) は $\varepsilon = \pm \psi_1$ と単純化される。吸収体では、式 (4) は複素数だが、金属などでは絶対値が 1 に近いことから $\psi_1 \approx 45^\circ$ で式 (6) は $\sin 2\varepsilon \approx \cos \Delta_1$ と考えてよい。式 (6) の右辺は、式 (4) を経由して物質の光学定数の関

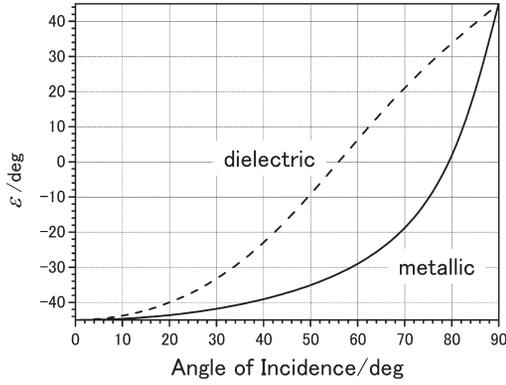


Fig. 3 Calibration diagram extracting the angle of incidence by the ellipticity angle ϵ observed. Calculation examples are for dielectric and metallic surfaces.

数だが、ほとんどの物質で入射角依存性は Fig. 3 の 2 つの曲線の間に入る単調増加の曲線となる。したがって、物質の種類を問わず、符号付きで -45° から $+45^\circ$ の間で計測された ϵ を満たす入射角 ϕ_1 が決定できる。 ϕ_1 が確定されると、式 (4) の反射点での ψ_1, Δ_1 が既知の光学定数で確定される。これらを用いて、入射面方位 θ_1 からの観測楕円の主軸のオフセット方位角 θ_{off} は、右円偏光入射の場合、

$$\tan 2\theta_{\text{off}} = \tan 2\psi_1 \sin \Delta_1 \quad (7)$$

として計算できる。透明体では、 $\sin \Delta_1 = 0$ より、 $\theta_{\text{off}} = 0^\circ$ である。また、吸収体では、 $\sin \Delta_1 \geq 0, \psi_1 \leq 45^\circ$ の性質から $0 \leq \theta_{\text{off}} \leq 45^\circ$ である。結像面で偏光検知された楕円主軸の x 方向からの検出方位角を θ_D と書くと、 $\theta_D = \theta_1 - 90^\circ + \theta_{\text{off}}$ の関係を用いて入射面方位 θ_1 を決定できる。

入射面方向を決定する計測の精度は、完全偏光の偏光状

態を計測の対象とする通常のエリプソメトリー技術では、 ψ, Δ で $0.01^\circ \sim 0.001^\circ$ である。計測された ψ_1, Δ_1 は、ともに試料への入射角 ϕ_1 の関数であり、入射角の計測精度も同等の $0.01^\circ \sim 0.001^\circ$ が達成できる。つまり、Fig. 3 の原点付近の曲線の傾きが小さい領域でも、十分な精度で計測できる。実際、エリプソメトリーでは、試料の ψ, Δ を直接に計測する方法と同等に、Fig. 3 の楕円率角 $\epsilon = 0^\circ$ 、すなわち $\Delta = \pm \pi/2$ となることで定義される主入射角 ϕ_p と、主入射角での ψ として定義される主方位角 ψ_p を計測する主入射角法^{11,12)} が知られており、未知の光学特性の試料の主入射角が $0.01^\circ \sim 0.001^\circ$ の精度で決定できる。これらの入射角計測感度は、試料面の傾斜角に換算すると、それぞれ、6000 分の 1 から 60000 分の 1 のわずかな凹凸による傾斜変化に感度があることに相当する。

3.2 複素振幅反射率比の計算

Fig. 3 に示した楕円率角と入射角との変換関数は、式 (1) の複素振幅反射率比 ρ を試料の光学的な性質を表す適当な光学モデルで計算して知ることができる。バルクの試料では、単純なフレネル振幅反射係数の比で記述でき、透明体でも吸収体でも共通の式で

$$\tan \psi \cdot \exp(i\Delta) = -\frac{\cos(\phi + \phi')}{\cos(\phi - \phi')} \quad (8)$$

と書ける。ただし、 ϕ' は複素屈折角であり、スネルの法則

$$n_a \sin \phi = N \sin \phi' \quad (9)$$

で結ばれる、バルク物質の複素屈折率 $N = n - ik$ と媒質の屈折率 n_a の関数である。一般に、媒質は透明で屈折率 n_a は実数であり、入射角も実数だから、スネルの法則の

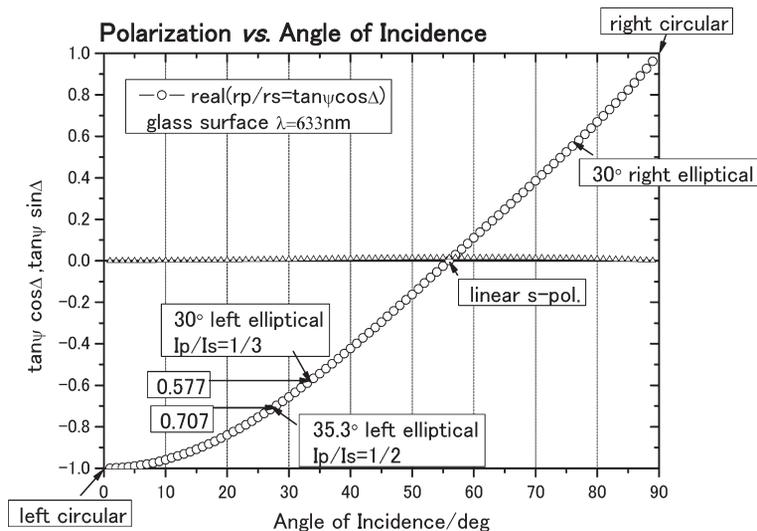


Fig. 4 Real and imaginary parts of the relative complex amplitude reflectance of a glass surface. Refractive index of 1.5 was assumed.

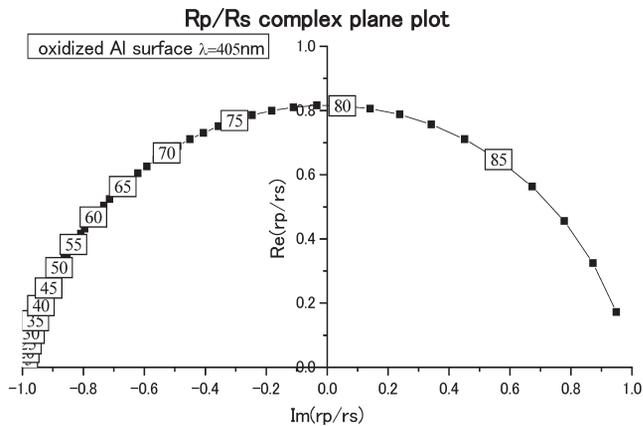


Fig. 5 Angle of incidence variation of relative complex amplitude reflectance plotted in a complex plane from -1 (0° normal incidence) to 1 (90° grazing incidence). Complex refractive index ($n-ik$) of $(0.6-5.04i)$ was used for calculation assuming Al surface at a wavelength of 405 nm .

左辺は実数である。したがって、右辺も実数となる必要があり、吸収のある物質では、屈折角も複素数となる。式(8)は、以下の計算例に示すように、入射角に対して単純な関数であり、物質ごとに容易にキャリブレーションできる。

Fig. 4では、透明な試料に対する変化を説明するために、屈折率 $n=1.5$ の誘電体が空気中にある場合の計算例を示している。透明な物質では消衰係数 $k=0$ だから、 ρ の虚数部は常に 0 である。実数部は、入射角 ϕ が 0° から 90° まで増加すると、 -1 から 1 まで単調に変化し、複素表面表示では単純な線分となる。

Fig. 5には、吸収体の試料での入射角依存性の例として、波長 405 nm での Al 試料での ρ の入射角依存性を複素平面表示で示す。吸収があるために複素屈折率 $N=n-ik$ は $0.6-5.04i$ である。入射角 ϕ が 0° から 90° まで増加すると、 -1 から 1 まで単調に変化する点は透明体と同様である。しかし、Al の吸収のために虚数部がゼロとならず、透明体での -1 と 1 を結ぶ線分とは大きく異なり、半径 1 の円に沿った変化となる。この場合、Fig. 6に示すように $\psi \cdot \Delta$ で図示すると特徴を抽出できる。金属では、p 偏光も s 偏光も反射率が高く、 ψ はほぼ $40^\circ \sim 45^\circ$ の間で一定である。s 偏光反射率が p 偏光反射率よりも高いという物質の共通な性質により、 ψ の最大値は 45° と考えてよい。 Δ には、 180° (複素平面上で -1 に相当する) から 0° (複素平面上で $+1$ に相当する) までの大きな変化が起こる。右円偏光で照明すると、偏光状態は、図中の枠内に示すように左円偏光から右円偏光まで変化する点、途中の $\Delta = \pm 90^\circ$ (Fig. 5の実軸上) の主入射角では直線偏光を通過する点

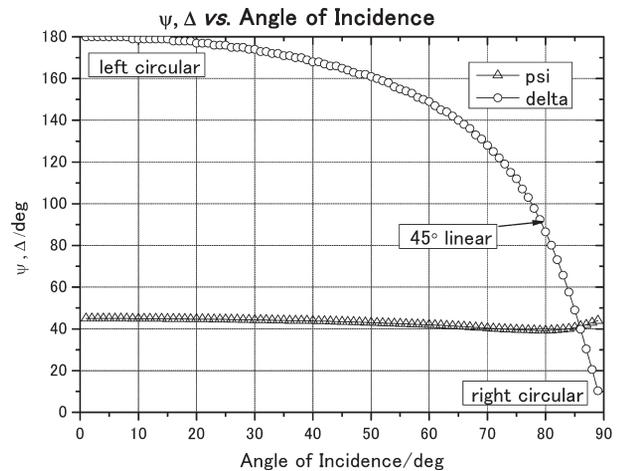


Fig. 6 The angle of incidence variation in Fig. 5 shown by the ellipsometric parameters of the relative amplitude attenuation ψ and the relative phase Δ . Reflected states of polarization under the illumination of right-circular polarization are shown in square boxes. Linear polarization is reflected at the principal angle of incidence of 79° where $\Delta=90^\circ$.

は、透明体の場合と全く同様である。ただし、観測されるすべての偏光は、楕円の“短軸”が入射面から ψ に等しい方位角だけオフセットされて傾く。Fig. 6の例では ψ は常にほぼ 45° で、途中の楕円も直線偏光も、Fig. 2(b)に示すように一様に 45° 傾く (円は傾いても円)。

式(8)は、試料物質の表面がバルクとみなせる場合の記述である。試料表面がバルクと異なり、例えば、表面が薄膜で覆われている場合などでは、反射面を光学的にモデル化して複素変数 ρ を計算し、観測された偏光状態の変化と対応づけを行う。この解析計算部分は、従来からのエリプソメトリー手法がそのまま適用できる。

このようにして、ただ一度の反射で起こる偏光状態の変化の入射角依存性から、観測物体表面の反射点 (x_1, y_1, z_1) での接平面の法線について、観測方向である z 軸となす角 ϕ_1 と、 $x-y$ 平面への射影成分の偏角 θ_1 が直接に計測できる。計測された法線の傾きは、物体の反射点 (x_1, y_1, z_1) での形状の偏微分係数を与える。次章に、半球と角錐台の試料の実測例を示す

4. 計測原理検証

Fig. 7に、検証に用いた実験装置を示す。円偏光照明は、市販のドーム型照明に円偏光フィルムを円筒状に巻いて挿入して製作した。また、正反射光の偏光楕円は、ポラロイドシート製の偏光子、波長 633 nm 用の干渉フィルターと CCD 検出器を組み合わせ、回転検光子法を用いて観測した。角錐台と半球の観測結果を Fig. 8の左側と右

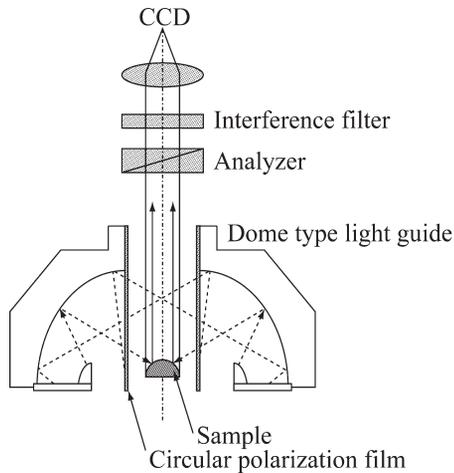


Fig. 7 Experimental setup for the proof-of-concept experiments. Circular polarization illumination was made by a commercial circular polarizing sheet rolled and inserted in the dome illuminator. Rotating analyzer method was used for the polarization measurements with a Polaroid sheet. Interference filter for a wavelength of 633 nm was used.

側に並べて示す。上から (a) 楕円率角観測値, (b) 方位角観測値, (c) 試料写真である。

グレースケールに示されるように、簡単な観察装置で 6 mm 程度の小さい試料で十分な分解能の傾斜観測が実証できた。各試料の観測結果の左側中央部の偏光状態の乱れは、円偏光フィルムのつなぎ目による入射円偏光の不均一性に起因する。また、(a) の楕円率観測値のグレースケールは、左図で $5^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 、右図で $10^{\circ} \sim 35^{\circ}$ の範囲を示す。右円偏光照明では、観測された楕円は左回りで楕円率角が負の領域にあるが、右回りと左回りが判別できない回転偏光子法によるデータとして正で示してある。また、右側の半球試料では、直入射に近い領域と、試料周辺部の切り立った斜入射領域は、空間的に正反射できる照明光が欠けているために観測されていない。今後、本格的な円偏光照明装置を製作して、精密計測を定量的に議論する予定である。

5. 傾斜エリプソメトリーの特徴と期待される応用

本論文に述べた面傾斜の計測原理は、電磁波が物質界面で反射するときに普遍的に生じる偏光現象を利用する。円偏光が生成できれば、使用する波長に制限がない。また、照明光のコヒーレンスや単色性にも制限がないために、白色円偏光で照明することもできる。反射による偏光状態の変化は、試料表面部でただ一度起こる現象である。照明光を円偏光とすることで、反射における入射偏光の方位角依存性が消滅し、反射の法則に従って、反射の幾何学的な傾斜の情報が偏光楕円に精密に写し取られる。偏光楕円は、入射角の関数として右 (左) 円偏光から左 (右) 円偏光ま

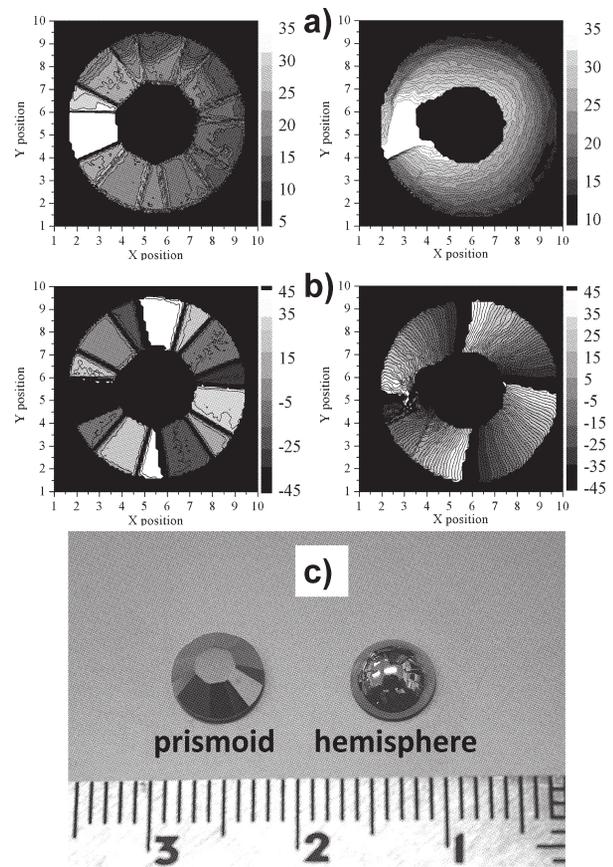


Fig. 8 Expected high polarization resolution observed by the experiments with prismoid and hemisphere samples shown in the left and right, respectively. Measured polarization maps of (a) ellipticity angles and (b) azimuths are shown above (c) sample photographs. Imperfection of the right circular polarization illumination at the left middle area was caused by the connection of the rolled polarizing sheet shown in Fig. 7.

で、最大の変域で変化する。一方、入射偏光および反射後の射出偏光は、共に、空気や液体などの等方で均一な媒質を通過するので、伝搬中には光の偏光状態には変化を起こさない。したがって、観測環境を選ばず、観測距離にも影響されない傾斜のリモートセンシング手法である。

従来の干渉法などの方法は、光路長の変化、すなわち距離の変化を精密に計測する。例えば、傾斜を算出するには観測物体上の所定の距離だけ離れた位置での観測値との演算を行うので、この距離の決定誤差も傾斜の誤差となる。また、観測される光路長は、光の伝搬中に外乱を受けやすい。

一方、傾斜エリプソメトリーでは、物体の傾斜が直読できる。傾斜の局所的な変化も精密に非接触で観測できることから、簡単な画像処理によって、さまざまな応用に展開できる可能性がある。特に、環境を選ばないことから、観測光学系の工夫によって顕微鏡観測、カメラ観測、望遠鏡観

測など、さまざまな環境での新規の計測装置と、その応用としての発展が期待できる。これらの観測法としての特徴に呼応する応用の可能性について、さまざまな分野での発展を期待して以下にコメントする。

5.1 表面傾斜角データの直接応用：基準化された形状データ

傾斜エリプソメトリーで計測できる表面傾斜角データは、形状計測に限らず、物体形状のサンプリングと統計処理などによるデータベース構築などへも応用できると考えられる。傾斜エリプソメトリーでは、倍率を変えた計測に対しても表面の傾斜を記録するので、本質的に形状に関する情報だけを抽出する。したがって、個体差で大きさが変わっても、形状を基準化する特性をもつ。

5.2 多波長応用：波長が限定されない：白色円偏光が利用できる

傾斜エリプソメトリーの方法は、すべての電磁波に適用できる。特に、他の干渉を利用する方法と異なり、白色円偏光が利用できる。したがって、光の侵入深さが小さい波長で形状を計測し、侵入深さが長い他の波長での計測で侵入深さの範囲の表面領域の光学特性を精密評価できる。この場合、複素屈折率の波長分散は、3変数程度の分散式で記述できるから、表面の光学特性を詳細に知る手法へ発展できると考えられる。

5.3 傾斜角計測は外乱に強い：計測環境を選ばない

傾斜エリプソメトリーの傾斜角計測は、入射角に敏感であり、外乱による振動などに起因する試料の横シフトや縦シフト成分には感度がない。したがって、円偏光照明を備えた傾斜センサーとしての応用がありうる。この場合、観測は、偏光像観測望遠鏡の光学系を用いる。

5.4 通常環境での精密傾斜計測：傾斜変化の一次微分量で局所的な変形が抽出できる

傾斜直読の手法として、現状技術のホログラフィーによる形状計測やモアレトポグラフィーの計測対象にも応用できると考えられる。特に、傾斜エリプソメトリーを適用することにより、わずかな窪みや隆起などの局所的な変形は、データの微分量として容易に検出できる。また、次に述べる時間的な変動に対しても高感度が期待できる。観測には、現在すでに市販されている偏光カメラが使える。

5.5 時間変化を容易に記録できる：ダイナミクス観測に適する

傾斜エリプソメトリーでは、傾斜の直読を画像の取得と同時にできることから、時間変化を記録することで、画像中の局所的な微細な変形を検知できる。この機能は、例えば、細胞の分裂やアポトーシスなどのダイナミクスを研究

するうえで、前駆現象をとらえるなどの応用に発展しうる。この場合、偏光像検知の顕微光学系を構築する必要がある。3章の冒頭に述べたように、結像分解能と傾斜計測分解能は光学系のNAに関して相反するので、この点に注意した新たな開発研究を必要とする。

5.6 固体、液体、気体、およびそれらの組み合わせの界面観測

他の方法が適用しにくい液体や液滴表面の形状やダイナミクスを観測する応用にも有用であると考えられる。融液中で成長する結晶のファセットやステップの観測などがこれに当たる。この計測対象は、固-液-気各相のなす界面や密度の異なる同一相中の界面など、反射を起こしうるすべての物質界面が適用対象となりうる。

5.7 極端環境下の観測

傾斜エリプソメトリーはさらに、リモートセンシング法であることから、高温下、高圧化などの通常の方法を適用することが困難な環境下での定型、不定形の物体の形状の計測とダイナミクスの計測にも有用であると考えられる。

6. ま と め

本論文で提案する傾斜エリプソメトリーでは、完全偏光を幾何学的形状の精密プローブとして用いて、従来のロボティクス応用の実時間三次元形状計測の傾斜計測精度を、現状の数度程度から桁違いに精密化できる可能性を傾斜計測原理の実証実験とともに示した。傾斜エリプソメトリーでは、傾斜をその場観測して直接に活用できるほか、ロボティクス応用の形状認識アルゴリズムも利用して、計測された反射点の反射面を試料断面内の計測点間で連続に矛盾なく接続することで、試料の三次元形状を実時間精密計測できる新しい手法として発展できると考えている。特に、従来の距離計測と異なる傾斜の直読手法であることから、相補的な計測と同時に、稜面を含む試料などの従来手法では困難な対象に適用できる可能性もあると考えられる。

文 献

- 1) 田幸敏治, 本田辰篤編: 光測定器ガイド 増補改訂版 (オプトロニクス社, 1998) pp. 197-210.
- 2) 谷田貝豊彦: 応用光学—光計測入門—, 第8章形状の計測 (丸善, 1995) pp. 118-145.
- 3) D. Miyazaki, M. Saito, Y. Sato and K. Ikeuchi: "Determining surface orientations of transparent objects based on polarization degrees in visible and infrared wavelengths," J. Opt. Soc. Am., **A**, **19** (2002) 687-694.
- 4) 宮崎大輔, 池内克史: "偏光レイトレーシング法による透明物体の表面形状の推定手法", 電子情報通信学会論文誌 D-II, **J88-D-II** (2005) 1432-1439.

- 5) G. A. Atkinson and E. R. Hancock: "Recovery of surface orientation from diffuse polarization," *IEEE Trans. Image Process.*, **15** (2006) 1653-1664.
- 6) O. Morel, C. Stolz, F. Meriaudeau and P. Gottia: "Active lighting applied to three-dimensional reconstruction of specular metallic surfaces by polarization imaging," *Appl. Opt.*, **45** (2006) 4062-4068.
- 7) L. B. Wolff and A. G. Andreou: "Polarization camera sensors," *Image Vision Comp.*, **13** (1995) 497-510.
- 8) 川上彰二郎: "積層型フォトニック結晶の産業的諸応用", *応用物理*, **77** (2008) 508-514.
- 9) K. Koshikawa: "A polarimetric approach to shape understanding of glossy objects," *Proc. Int. Joint Conf. Artificial Intelligence* (1979) pp. 493-495.
- 10) K. Koshikawa and Y. Shirai: "A model-based recognition of glossy objects using their polarimetric properties," *Adv. Robotics*, **2** (1987) pp. 137-147.
- 11) K. Kinoshita and M. Yamamoto: "Principal angle of incidence ellipsometry," *Surf. Sci.*, **56** (1976) 64-75.
- 12) 山本正樹: "シリコン表面の光学定数の偏光解析法による測定について", *応用物理*, **50** (1981) 777-781.
- 13) C. W. See, M. G. Somekh and D. Holmes: "Scanning optical microellipsometer for pure surface profiling," *Appl. Opt.*, **35** (1996) 6663-6668.
- 14) K. Y. Lee and Y. F. Chao: "The ellipsometric measurements of a curved surface," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44** (2005) L1015-L1018.
- 15) Y. F. Chao and K. Y. Lee: "Index profile of radial gradient index lens measured by imaging ellipsometric technique," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44** (2005) 1111-1114.
- 16) S. Takeuchi and M. Yamamoto: "A new ellipsometric approach to CD metrology utilizing form birefringence inherent in a sub-micron L & S pattern," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **36** (1998) 7720-7725.
- 17) B. Kaplan, T. Novikova, A. De Martino and B. Drevillon: "Characterization of bidimensional gratings by spectroscopic ellipsometry and angle-resolved Mueller polarimetry," *Appl. Opt.*, **43** (2004) 1233-1240.
- 18) R. M. A. Azzam and N. M. Bashara: *Ellipsometry and Polarized Light* (North Holland, Amsterdam, 1977).
- 19) 小瀬輝次ほか編: "偏光測定と偏光解析法", *光工学ハンドブック* (朝倉書店, 1986) pp. 411-427.
- 20) 近角聡信ほか編: "第3章 偏光解析法 (ellipsometry)", *実験物理学講座14, 表面・微粒子*, 木下是雄編 (共立出版, 1986) pp. 123-168.