全方位角度分解散乱光計測による 加工表面性状解析技術*

Ultra-finished Surface Areal-topography Analysis Based on Total Angle-resolved Laser Light Scattering

高谷裕浩** 林 照剛** 道畑正岐**

Yasuhiro TAKAYA, Terutake HAYASHI and Masaki MICHIHATA

Key words

surface inspection, areal-topography, laser light scattering, total angle-resolved scattering, glass lens mold

1. はじめに

近年、デジタルカメラ、携帯電話、高密度光ディスクシステムなど、光学製品の高度化・コンパクト化は著しく、それらの製品には数多くの光学レンズが使われている。レンズ材料は、光学ガラスと光学樹脂に大別されるが、化学的安定性や耐高温特性に優れ、さらに低複屈折であり屈折率の選択範囲が広い（屈折率 $n = 1.5 \sim 1.9$ ）など優れた光学特性をもつため、高性能ガラスレンズの需要が拡大している。従来、ガラスレンズはガラスの直接削削・研磨によって製造されていたが、近年、高精度化とコストダウンを両立し、小径化、非球面、自由曲面、極微細化などの多様な要請に応えるため、成形型を用いたモールドプレス法の開発が進んでいる。

一方、ガラスレンズ金型は、高温・高圧下において強度・硬度・形状精度・表面精度を維持できる、超硬合金や炭化ケイ素などの難削材が利用され、ナノメートルオーダの表面精度が要求される。また、成形工程における金型表面の劣化が著しく、離型膜の剥離および表面荒れなどの進行によって、最終的には金型表面に硝材が溶着して寿命に至る。よって、ガラスレンズ金型の表面計測は、金型加工工程における表面精度だけでなく、成形工程における表面性状の評価においても、重要な課題となっている。そこで本稿は、光散乱特性に基づいたナノメートルオーダの表面性状評価法について概説し、筆者らが開発した全方位角度分解散乱法（T-ARS; Total Angle-Resolved Scatter）の概要とガラスレンズ金型への適用事例を紹介する。

2. 光散乱による表面性状評価法の概要

複雑な3次元微細形状をもつ表面にレーザー光を照射すると、散乱光の強度や分布は、表面微細形状の幾何学的特徴を反映して変化する。その関係は非常に複雑であり、さらに光散乱を利用した表面計測（以降、光散乱法）は、散

乱光分布から表面微細形状の特徴量を推定する逆問題である。そのため、表面微細形状をなるべく一般性の高いモデルで表現し、散乱光分布との関係を求めておく。Beckmann¹⁾らは、不規則な凹凸を繰り返す表面微細形状を統計モデルで表現し、散乱光との詳細な関係を示した。さらにBennettらは、その解析モデルに基づき、凹凸の高さが入射光波長 λ より十分小さい場合の光散乱法として、総散乱光法（TIS; Total Integrated Scatter）²⁾³⁾を提案した。その基本的な考え方を図1に示す。図1(a)に示すように、一般に、入射角 θ_i の入射光（波長 λ ）による表面からの反射光のエネルギーは、反射角 $\theta_r = \theta_i$ 方向の正反射光成分 P_r とそれ以外の方向に向かう散乱光成分 P_s に分配される。TISは表面からの全散乱光（ $P_r + P_s$ ）と散乱光 P_s の強度比で定義され、不規則な微細形状の統計パラメータに相当する、自乗平均平方根粗さ（RMS (Rq); Root Mean Square）と次式の関係で表される。

$$TIS = \frac{P_s}{P_r + P_s} = \left(\frac{4\pi RMS}{\lambda} \cos \theta_i \right)^2 \quad (1)$$

図1(b)に示すTIS測定装置の構成では、散乱光は積分球内部で反射を繰り返し均一化され、検出器で検出される。数十ナノメートル以下の不規則な表面微細形状のRMS評価に限定されるが、ナノメートルオーダに研磨仕上げされた加工表面の高速で高精度な計測が可能である。

3. T-ARSの原理と基本特性

3.1 T-ARSによる表面性状評価の原理

図2にT-ARSの基本原理を示す。一般に P_s は、表面微細形状の複雑な周波数構造との関係で決まる散乱角で分布する。散乱光分布は3次元的な広がりを持ち、方位角 θ_s と極角 ϕ_s の極座標によって表され、計測座標系は図2(a)のようになる。T-ARSでは、図2(b)に示すように散乱光強度の極座標空間分布を平面マッピングし、加工表面性状をT-ARS散乱パターンとして評価する。T-ARS散乱パターンは、式(1)を用いてTISを直接求めることができるだけでなく、規則的な表面微細形状や微細スクラッチや付着異物などの表面欠陥、表面物性を反映した光散

*原稿受付 平成26年2月12日

**正会員 大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻（大阪府吹田市山田丘2-1）

図1 光散乱を利用した表面性状測定の基本的考え方

図2 T-ARS の基本原理

乱の変化も検出できるため、加工表面性状の多様な評価が可能である。

3.2 自動3次元散乱光計測システムの構成

開発した T-ARS 計測装置の構成を図3に示す。光源に出力 10~30 mW、波長 488 nm の Ar^+ レーザーを用いて、試料表面をスポット径 $40\ \mu\text{m}$ で照射する。検出器にはナノワットレベルの微弱散乱光を検出可能な光電子増倍管 (PMT) を用いている。本装置では、方位角方向、極角方向に回転する2つの回転ステージにより検出器の配

図3 T-ARS 測定装置の構成

図4 Cu 成膜 Si ウェハの表面粗さ

図5 T-ARS による表面粗さ (RMS) の測定結果 (AFM による測定結果との比較)

置を空間的に変えることにより、レーザー照射点から3次元的に広がる散乱光強度分布を得ることができる。また、入射光の入射角、偏光状態などの条件を自由に設定でき、試料面の曲率などに対応した計測が可能である。

3.3 T-ARS による表面粗さ RMS の計測

本装置を用いた、TISに基づく表面粗さ計測の基本特性を検証するため、Cu ウェハ (銅薄膜を成膜した Si ウェハ) をエッチング処理し、初期粗さ (10.8~16.4 nm Rq) から化学機械研磨 (CMP) 工程における表面粗さ (2.0~5.8 nm Rq) を、入射角 5 度で T-ARS 計測した。

(a) レンズ金型の外観 (b) 走査型白色干渉計による測定結果

(c) 断面 A-A' の粗さ曲線から求めた表面粗さ : 3 nm Rq

図 6 球面ガラスレンズ金型の外観と表面粗さ

図 7 微細スクラッチによる T-ARS 散乱パターン

Cu ウエハの表面粗さの AFM 測定結果の一例を図 4 に示す。図 5 に示すように、T-ARS の測定結果は、ほぼ 2~30 nm Rq にわたり、AFM の測定結果とよく一致している。

4. T-ARS によるガラスレンズ金型の表面性状評価

4.1 研磨工程における表面欠陥の測定評価

T-ARS をガラスレンズ金型の表面計測に適用した例を紹介する^{4)~6)}。図 6 に、表面を研磨加工によって仕上げたバイナレス超硬製球面ガラスレンズ金型 (曲率半径 10.5 mm) を示す。図 6 (a) および (b) はそれぞれ外観と金型の中心点を走査型白色干渉計によって測定した結果を示している。図 6 (c) の断面 A-A' における粗さ曲線より求めた表面粗さは、約 3 nm Rq 程度であった。入射角 60 度の T-ARS 計測によって得られた、金型表面の T-ARS 散乱パターンの一例を図 7 に示す。正反射方向から筋状

(a) レンズ金型研磨表面の AFM 像

(b) 断面曲線とスクラッチサイズ

図 8 レンズ金型研磨表面の AFM 測定結果

に広がる特徴的な T-ARS 散乱パターンが検出された。このときレーザー光照射部表面を AFM により測定した結果、図 8 に示すナノメートルオーダーの微細なスクラッチが観察された。図 8 (a) および (b) はそれぞれ表面の AFM 画像および断面曲線を示している。S₁ と S₂ のスクラッチのサイズは、それぞれ深さ 24 nm、幅 625 nm および深さ 21 nm、幅 546 nm の大きさであった。図 7 の S₁ および S₂ に示した筋状の T-ARS 散乱パターンは、スクラッチの長さ方向に対して垂直な方向に分布し、それぞれ図 8 (a) の S₁ および S₂ に対応する。よって、ナノメートルオーダーの微細スクラッチ検出および方向性の判別が可能であることがわかる。

4.2 成形工程における表面劣化の測定評価

研磨仕上げ面に Pt コーティングしたガラスレンズ金型 (図 6) によるレンズ成形を行った。ガラス材料は K-BK7 (屈伏点 630℃) を用いた。成形サイクルは、型温度を 670℃ まで上昇させて 5 秒間維持した後 30 秒間成形荷重を負荷し、その後 520℃ になるまで徐冷して最後に急冷する。成形レンズの目視検査では、90 ショット以降、レンズ表面に顕著な曇りが見られたため NG となった。レンズ表面の曇りは、金型表面性状の何らかの変化がレンズ表面に転写された結果であると推察される。しかし、走査型白

色干渉計を用いた金型の表面粗さの測定結果は、90 ショット以降も変化が確認されなかった。そこで、成形回数による金型表面性状の変化を入射角 37.5 度の T-ARS 計測によって調べた。金型の中心点 ($R=0$) および中心点から 0.5 mm ($R=0.5$) の位置で測定を実施した。図 9 にショット数 60 回以降におけるショット数ごとの T-ARS 散乱パターンを示す。 $R=0$ および $R=0.5$ とともに、ショット数の増加に伴い、散乱光強度の増加と散乱範囲の増大が確認できる。また、 $R=0.5$ では、ショット数 80 で微細スクラッチが検出されている。ただし、金型は各ショット数ごとに測定機から取り外すため、完全に同じ位置を測定するの

は困難である。そのため、ショット数 100, 120 の測定位置では微細スクラッチが検出されていない。さらに、散乱光強度が 100 nW を超える散乱光領域の面積を特徴量 (T-ARS 散乱領域比) として抽出し、ショット数との関係を調べた結果を図 10 に示す。ショット数 80 付近から、徐々に T-ARS 散乱領域比が大きくなっている。これは目視による曇り欠陥の検査結果とよく一致し、従来の表面粗さ評価では検出が困難なピットやスクラッチなどの微細欠陥による表面性状変化が、T-ARS で検出されていると推測される。

5. 光散乱法と 3 次元表面粗さパラメータ

従来の 2 次元輪郭曲線に基づく表面粗さパラメータ⁷⁾は、複雑な 3 次元表面微細形状やその加工精度評価に十分対応できなくなってきた。そこで、3 次元表面微細形状計測に対応する ISO 25178-2 の新たな表面粗さ規格が定められた⁸⁾。自己相関距離やモチーフ解析のような 3 次元

(a) 金型中心 ($R=0$) の T-ARS 散乱パターン

(b) 中心近傍 ($R=0.5$) の T-ARS 散乱パターン

図 9 成形過程における金型表面の T-ARS 散乱パターン

図 10 成形過程における T-ARS 散乱領域比の変化

図 11 表面微細形状計測法の分類

トポグラフィ特徴解析など、3次元パラメータ独自の評価方法も定義されている。さらに規格では、主に3次元プロファイル計測に適した光学式測定法が、図11のように分類されており、TISやARSなどの光散乱法が3次元面計測法として提示されている。

近年、光散乱法の研究は、Beckmann理論に基づいたインプロセス計測への適用手法^{9) 10)}や粗い面への拡張手法¹¹⁾、非ガウス確率過程で表される表面粗さの散乱理論¹²⁾、TISの高度化^{13) 14)}やARSの樹脂成形への応用¹⁵⁾に関する研究、ナノ構造や欠陥解析¹⁶⁾、加工表面粗さ計測¹⁷⁾など、その適用範囲を広げるとともに、実用的な研究が増えている。光散乱法は、2次元輪郭曲線よりも3次元トポグラフィとの互換性がよく、今後のさらなる展開が期待される。

6. ま と め

光散乱による加工表面計測技術は、光波長より十分小さな表面微細形状を測定対象としてきたため、その適用範囲も極めて限定的であると考えられてきた。しかし最近では、ナノメートル単位の加工制御が可能な超微細形状・精密加工技術を利用し、光学素子表面に複雑で高度な機能を有する表面微細形状を付与する要求が増しており、加工表面計測技術としての、光散乱法の重要な役割が再認識されている。

参 考 文 献

- 1) P. Beckmann and A. Spizzichino: The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces, Pergamon Press, (1963).
- 2) J.M. Bennett and L. Mattson: Introduction to Surface Roughness and Scattering, Second Edition, Optical Society of America, (1999).
- 3) H.E. Bennett: Scattering Characteristics of Optical Materials, Optical Engineering, **17** (1978) 480.
- 4) 池田一貴, 三好隆志, 高谷裕浩, T. Ha: マイクロレンズ金型表面性状の光散乱特性, 2004年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集, (2004) 219.
- 5) 林照剛, 高谷裕浩, 三好隆志: 光散乱法を用いたマイクロレンズ金型の非接触検査, 型技術ワークショップ2006, (2006) 64.
- 6) T. Hayashi, Y. Takaya, N. Motoishi and Y. Nakatsuka: Surface Inspection of Micro Glass Mold Based on Total Angle Resolved Scattering Characterization, Int. J. Automation Technology, **4**, 5 (2010) 432.
- 7) IS B 0601-2001, 製品の幾何特性仕様 (GPS) 表面性状: 輪郭曲線方式, (2001).
- 8) ISO 25178-2, Geometrical Product Specifications (GPS) —Surface Texture: Areal—, (2012).
- 9) R. Guo and Z. Tao: The Modified Beckmann-Kirchhoff Scattering Theory for Surface Characteristics in-process Measurement,

- Optics and Letters in Engineering, **47** (2009) 1205.
- 10) R. Guo and Z. Tao: Experimental Investigation of a Modified Beckmann-Kirchhoff Scattering Theory for the in-process Optical Measurement of Surface Quality, Optik, **122** (2011) 1890.
- 11) M.H. Mahdiah and E. Badomi: Beckmann Formulation for Accurate Determination of Submicron Surface Roughness and Correlation Length, Optics & Laser Technology, **53** (2014) 40.
- 12) V.I. Malyugin and M. Ya. Litvak: White Light Scattering from Non-Gaussian Rough Surfaces, Optics and Spectroscopy, **107**, 1 (2009) 144.
- 13) T. Hou, K. Yi, S. Shang, J. Shao and Z. Fan: Measurements of Light Scattering from Glass Substrates by Total Integrated Scattering, Applied Optics, **44**, 29 (2005) 6163.
- 14) L. Mazule, S. Liukaityte, R.C. Eckardt and A. Melninkaitis: A System for Measuring Surface Roughness by Total Integrated Scattering, Journal of Physics D: Applied Physics, **44** (2011) 505103.
- 15) S. Ignell and M. Rigdahl: Angle-Resolved Light Scattering from Textured Injection-Molded Plastics, Journal of Applied Polymer Science, **124** (2012) 1624.
- 16) T. Herfurth, S. Schroder, M. Trost, A. Duparre and A. Tunnemann: Comprehensive Nanostructure and Defect Analysis Using a Simple 3D Light-scatter Sensor, Applied Optics, **52**, 14 (2013) 3279.
- 17) J. Valicek, M. Drzik, T. Hryniewicz, M. Harnicarova, K. Rokosz, M. Kusnerova, K. Barcova and D. Brazina: Non-Contact Method for Surface Roughness Measurement after Machining, Measurement Science Review, **12**, 5 (2012) 184.

高谷裕浩

1992年北海道大学大学院工学研究科博士課程修了。同年大阪大学工学部助手、同講師を経て、1997年大阪大学大学院工学研究科助教授、2006年同教授。博士(工学)。光応用ナノ加工・計測、マイクロ光造形、フラーレン応用加工などの研究に従事。

林 照剛

2001年大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年茨城大学工学部助手、2005年大阪大学大学院工学研究科助手、2009年同准教授。博士(工学)。光応用ナノ加工・計測、マイクロ光造形、ナノ粒子計測、レーザ加工などの研究に従事。

道畑正岐

2010年大阪大学大学院工学研究科博士課程修了。同年同機械工学専攻助教。博士(工学)。光応用形状計測などの研究に従事。