

表面性状の高精度測定と光学シミュレーションへの活用

— 微小表面幾何構造からの光散乱特性の予測 —

照明音響科 豊田敏裕 志智 亘* 柳原 亘 木野直樹
研究統括官 鬼久保郁雄**
企画調整部長 鈴木敬明

High precision measurements of surface textures and their utilization in optical simulations

— Estimation of the characteristics of light scattered from a surface geometric microstructure —

TOYOTA Toshihiro, SHICHI Wataru, YANAGIHARA Wataru, KINO Naoki, ONIKUBO Ikuo
and SUZUKI Taka-aki

Geometrically regular roughness on surface like hair-lines causes light diffraction so called rainbow effect. This phenomenon is often observed on the high-precision machined surfaces of injection molding dies. Such regular roughness unexpectedly transferred by injection molding on the optical components result degradation of optical properties as light scattering.

Gonio-spectrophotometric color measurement instruments have been used to measure these light scattering characteristics which depend on light incident angles and scattering angles. These instruments provide the light scattering characteristics on a surface as their mean values over a certain area. For this reason, optical measurements only produce degenerated characteristic data for regular surface roughness.

Meanwhile, the surface geometrical structure can be digitized as set of high-density point cloud based on the light interference principle. These set of point cloud are used to evaluate surface roughness parameters such as Ra and Sa. Although light diffraction phenomena such as the rainbow effect are caused by the regularity of surface microstructures, most discussions of light scattering characteristics do not pay attention to them.

This report demonstrates that light scattering characteristics, including light diffraction, can be estimated precisely by using micro-area geometrical structures.

Keywords : high-precision machining, surface roughness, optical diffraction, wave optical simulation

ヘアラインのような幾何学的な規則性のある表面凹凸は、虹目と呼ばれる光の回折現象を引き起こす。この現象は射出成形金型の高精度な加工面でしばしば観察される。また、射出成形によって光学部品に転写された予期せぬ規則的な凹凸は、光散乱として光学特性の劣化を引き起こす。

このような光散乱特性を光の入射角と光の散乱角に対応付けて捉えるために、従来は変角分光測色装置が用いられてきたが、表面の光散乱特性はある面積の平均値として得られる。そのため、光学測定では表面の規則的な粗さの特徴は縮退する。

一方、表面の幾何学的な構造は、光干渉の原理により、高密度の点群としてデジタル化することができる。このような点群は、RaやSaなどの表面粗さパラメータの評価に利用されている。虹目のような光の回折は、表面の微細構造の規則性によるものであるにもかかわらず、光の散乱特性を議論する際にはそれらは考慮されていない。

本報告では、微小面積の表面幾何構造から、光回折を含む光散乱特性を高精度に推定できることを示す。

キーワード：高精度機械加工、表面性状、光の回折、波動光学シミュレーション

*現 浜松工業技術支援センター 光科

**現 沼津工業技術支援センター 研究統括官

1 はじめに

ヘアラインのような幾何学的な規則性のある表面凹凸は、虹目と呼ばれる光の回折現象を引き起こす。この現象は射出成形金型の高精度な加工面でしばしば観察され、加工現場で解決すべき課題となっている。このような微細な周期構造は、射出成形によって光学部品にも転写され、光散乱など、光学特性の劣化を引き起こす原因となっている。

このような光散乱特性を光の入射角と光の散乱角に対応付けて捉えるために、変角分光測色装置が用いられているが、表面の光散乱特性はある面積の平均値として得られる。そのため、光学測定では表面の規則的な粗さの特徴は縮退し、虹目の特徴である鮮やかな光散乱を正確に捉えることができない。

一方、表面の微細な周期構造は、光干渉の原理により、高密度の点群としてデジタル化することができる。このような点群は、Ra や Sa などの表面粗さパラメータの評価に利用されてきた。虹目のような光の回折は、表面の微細構造の規則性によるものであるにもかかわらず、光の散乱特性を議論する際にはそれらは考慮されていない。

本報告では、光干渉の原理を用いて微細な表面幾何構造をデジタルデータ化し、そのデータを用いた光学シミュレーションにより、表面幾何構造から回折を含む光の散乱現象を予測できることを示す。

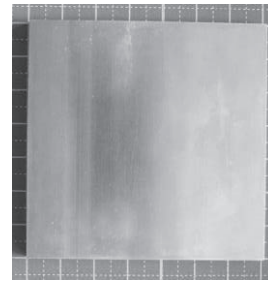
2 方法

まず、光干渉の原理で表面の幾何構造を非接触でデジタルデータ化し、接触式の表面性状測定結果と比較することで非接触測定の精度を検証する。次に、表面幾何構造のデジタルデータを用いて光学シミュレーションを行い、回折を含む光の散乱現象を予測した結果と実測結果を比較することで予測結果を評価する。本章では、その方法及び手続きについて述べる。

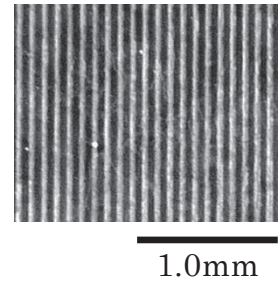
2.1 表面幾何構造のデジタルデータ化

(1) 測定試料

以前の報告¹⁾ で使用した、樹脂成型用金型に使用されるクロム合金ステンレス工具鋼（通称：STAVAX）の平板の表面をミーリング加工した試料を用いた（写真1）。試料は、マシニングセンター（芝浦機械㈱製 UVM-450C）を用いて、2枚刃ボールエンドミル（日進工具株㈱製 MRBH230、先端半径：1mm）を一定方向に走査（工具回転数：58,000rpm、送り速度：



(ア) 測定面全体



(イ) 測定面を拡大

写真1 測定試料

試料の大きさは70mm × 70mm。そのうち、中央の0.3mm × 0.3mmの範囲を測定した。表面にエンドミルの走査によってできた規則的な加工痕がみられる。

400mm/min、走査ピッチ 0.09mm) し、表面が加工されている。

(2) 測定装置及び測定の諸条件

白色光干渉方式の非接触表面性状測定機（アメテック㈱テーラーホブソン事業部製 Talysurf CCI HD XL）（写真2）を使用して試料の表面性状を測定した。測定視野は横0.33mm（X軸）×縦0.33mm（Y軸）、水平方向（X軸方向及びY軸方向）の分解能は0.165 μm、垂直方向（Z軸方向）の分解能は0.01nmであった。測定試料の中央部分1箇所を1視野の範囲で測定し、2,048点×2,048点のデジタルデータ（ポイントクラウド）を得た。

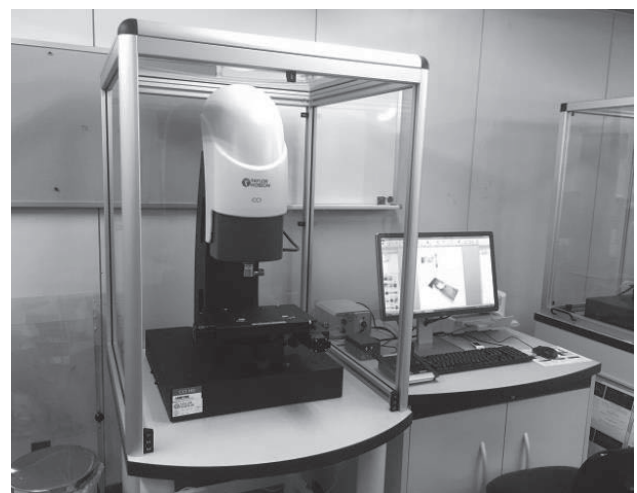


写真2 非接触表面性状測定機

(3) 非接触測定の精度検証

触針式表面粗さ形状測定機（アメテック㈱テーラーホブソン事業部製 Form Talysurf PGI 840）（写真3）

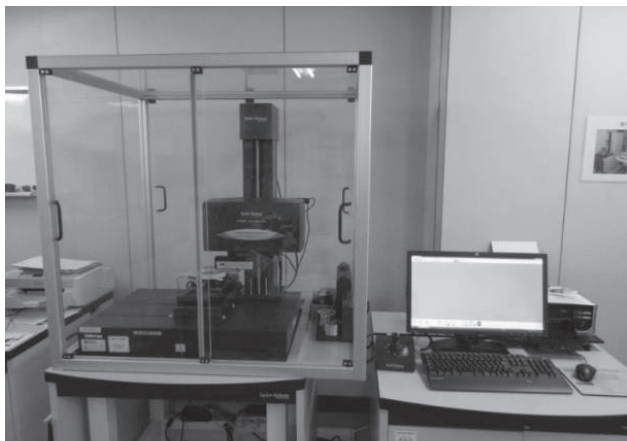


写真3 触針式表面粗さ形状測定機

で測定した表面性状結果と比較した。試料の中央付近9箇所をエンドミルの走査方向に平行な方向と直交する方向に輪郭測定し、測定断面曲線を得た。測定機の水平方向（長さ方向）の分解能は $0.125\mu\text{m}$ 、垂直方向（高さ方向）の分解能は 0.8nm であった。測定には、先端半径 $2\mu\text{m}$ 、テーパ角度 60 度の触針スタイラスを使用した。測定により得られた断面曲線に位相補償フィルタ（ガウシアン、 $\lambda_c = 0.25\text{mm}$ 、 $\lambda_s = 2.5\mu\text{m}$ ）²⁾を適用し、粗さ曲線を得た。表面粗さの評価方法^{3,4)}に従い、得られた粗さ曲線から算術平均粗さ R_a 、平均長さ R_{Sm} 、二乗平均平方根傾斜 R_{dq} を基準長さ $l_r = 0.25\text{mm}$ で算出した。なお、非接触表面性状測定機の測定結果と比較するため、評価長さは、基準長さ1個分に相当する 0.25mm とした。

一方、非接触表面性状測定機を用いて測定したデジタルデータからも、同様の場所から粗さ曲線を抽出した。抽出した断面データの中央部分 0.25mm の範囲を対象に、触針式表面粗さ形状測定機と同様に所定の手順を経て粗さパラメータを算出した。

非接触測定に基づく表面粗さパラメータ N_p 、接触測定に基づく表面粗さパラメータ C_p を用いて、それらの差異 $E_p = (C_p - N_p) / C_p$ を求め、差異の平均 $E = (1/9) \sum_{p=1}^9 E_p$ を評価した。

(4) 表面粗さパラメータによる測定分解能の評価

2.1 (3) で得た非接触測定に基づく断面曲線を対象に、測定点を間引く、または補完して、測定の長さ方向で異なる測定分解能を模擬した粗さ曲線に対し、表面粗さパラメータがどの程度変わるかを検証した。断

面曲線（2,048点の測定点）に対し、長さ方向の測定分解能が $0.33\mu\text{m}$ 相当（1,024点）、 $0.66\mu\text{m}$ 相当（512点）、 $1.32\mu\text{m}$ 相当（256点）、 $2.64\mu\text{m}$ 相当（128点）となるよう測定点数を間引いた粗さ曲線と、補間により長さ方向の測定分解能が $0.0825\mu\text{m}$ 相当（4,096点）となる粗さ曲線を得た。得られた粗さ曲線に基づいて求めた表面粗さパラメータ R_a 、 R_{Sm} 、 R_{dq} と測定分解能の関係を評価した。

2.2 表面幾何構造からの光散乱特性の予測

(1) 光散乱特性の予測と BSDF データの記述

ミーリング加工では、エンドミルの走査と回転による周期的な構造が加工面に生じ、これらの加工痕が光の回折を生じさせる要因となる。そこで、2.1 の手順で得られた高密度かつ高精度な表面幾何構造のデジタルデータから、フラウンホーファー回折領域における回折散乱光の角度依存性を計算した。詳細は本稿では割愛するので、別稿⁵⁾を参照されたい。計算結果は双方向散乱分布関数 (BSDF)* として記述した。BSDF データでは、図1で示す光の入射方向に関する2つの角度（反射面の法線を北極とする極角 σ とこの軸回りの方位角 ψ ）及び光の反射方向に関する2つの角度（正反射軸を北極とする極角 θ とこの軸回りの方位角 φ ）の合計4つを変数として反射強度が記述されている。

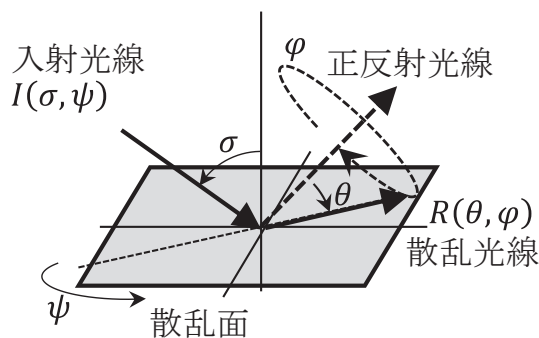


図1 BSDFデータの座標定義

(2) 反射面の見えの予測

光線追跡ソフトウェア（Zemax, LLC 製 Zemax OpticStudio）を用いて BSDF データを組み込んだシミュレーションモデルを作成し、ノンシーケンシャルモード機能を使用して反射の見えを予測した。本報告

* Zemax, LLC : BSDF Data Interchange file format specification.

<https://my.zemax.com/en-US/Knowledge-Base/kb-article/?ka=KA-01372> (2020.4.1アクセス)

では、図2 (ア) に示すような、反射面を実際に写真撮影する状況を模擬し、図2 (イ) のようなシミュレーションモデルを作成した。入射光は、サンプル表面の加工方向に垂直な方向となる方向（極角 $\sigma=15^\circ$ 、方位角 $\varphi=90^\circ$ ）からの平行光のみとし、微小平面の表面幾何構造を BSDF データに置き換えて反射面を再現した。そして、反射面から150mm離れた位置にある仮想的な観察面で反射光を画像として記録した。観察面は縦80mm×横80mmの矩形（解像度0.31mm/画素）とし、観察面の中心が反射面の法線に一致し、反射面と平行となるよう配置した。入射光は、波長450nm、550nm及び650nmとし、波長毎のエネルギーは一定とした。この光学配置では、点光源から出た光線が反射面全体で散乱し、観察面（人間の瞳もしくはカメラ）に到達する。光線追跡法（図3 (ア)）で拡散性が強い反射面を対象とした場合、生成した光線が観察面に届く確率が低くなるため、反射面で良好な予測結果を得るにはより多くの光線の評価が必要が生じる。また、あらゆる光の入射方向及び反射方向に対応する BSDF データをあらかじめ用意する必要もあり、計算コストの増大につながる。そこで本報告では、逆光線追跡法（図3 (イ)）により、観察面と入射光の役割を仮想的に入れ替えることで、観察面に確実に到達する入射光と BSDF の組み合わせの光線のみをシミュレーションに用いた。

なお、本報告では、特定の入射光の角度（極角 $\sigma=15^\circ$ 、方位角 $\varphi=90^\circ$ ）に対する反射特性（極角 $\theta:0^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$ ($\Delta\theta=0.1^\circ$)、 $30^\circ < \theta \leq 180^\circ$ ($\Delta\theta=1^\circ$)、方位角 $\varphi:0^\circ \leq \varphi < 360^\circ$ ($\Delta\varphi=1^\circ$)、合計162,811)を BSDF として記述した。

(3) 反射面の見えの可視化

光線追跡シミュレーションで得られる観察像 $S_\lambda(x, y)$ は、波長 λ での分光画像と考えることができる（ x 及び y は画素の位置）。また、入射エネルギーを波長間で一定にしたことから、この分光画像は相対分光反射率画像を近似していると捉えることができる。

そこで、重係数⁶⁾を用いて D65 光源下の反射面の見えの RGB 画像として可視化した。なお、シミュレーション結果で得られる相対反射率画像 $S_\lambda(x, y)$ は3波長であるため、これらの3波長がおおむね中心波長となるような波長範囲（380nm～490nm、500nm～590nm、600nm～780nm）で既定の重係数（380nm～780nm、10nm 間隔、D65、参考文献6の表17）を

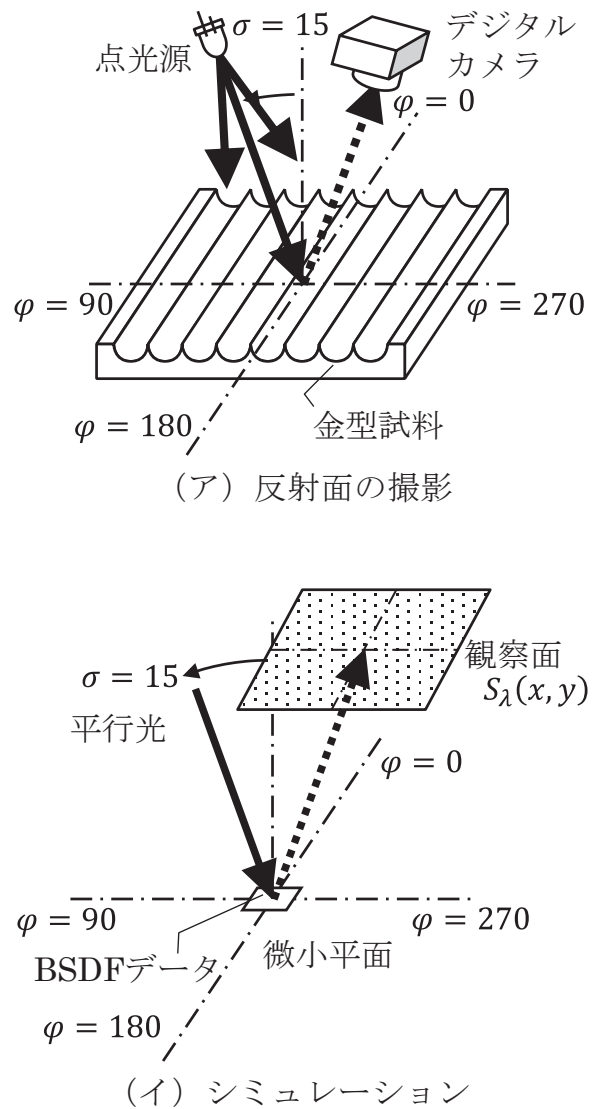


図2 光学配置

→ 入射光 → 反射（散乱）光

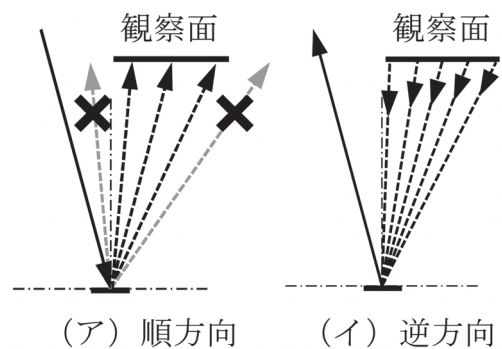


図3 光線追跡法の種類

→ 入射光
.....→ 反射（散乱）光

積分し、3波長での重係数 W_k を近似した(式(1))。

$$W_k = \begin{bmatrix} 17.97 & 39.13 & 39.95 \\ 6.12 & 75.87 & 18.01 \\ 102.88 & 5.99 & 0.01 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

次に、式(2)に示す通り、この重係数 W_k を観察像の画素値 $I_\lambda(x, y)$ に乗じることで三刺激値 XYZ⁷⁾ を得た。

$$\begin{bmatrix} X(x, y) \\ Y(x, y) \\ Z(x, y) \end{bmatrix} = W_k \begin{bmatrix} S_{\lambda=450}(x, y) \\ S_{\lambda=550}(x, y) \\ S_{\lambda=650}(x, y) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

そして、この三刺激値 XYZ を sRGB⁸⁾ に変換することで RGB 画像を得た。

(4) 反射面の実測

シミュレーション結果の比較対象として、デジタルカメラを用いて実際の反射面の見えも撮影した。図2(ア)に示す光学配置において、白色 LED 光源 (B-Y 型) を使い、エンドミルの走査方向 (カッターパス) と直交する方位角 $\psi=90^\circ$ の方向から、極角 $\sigma=15^\circ$ で試料の中心に向かって光を照射した。光源及びデジタルカメラの反射面までの距離は約 150mm とし、鏡面反射の方向から撮影した。

3 結果および考察

3.1 表面性状の測定結果

図4に、高さ (Z 軸) 方向をヒートマップで表示した測定結果を示す。ミーリング加工の送りで生じた筋目

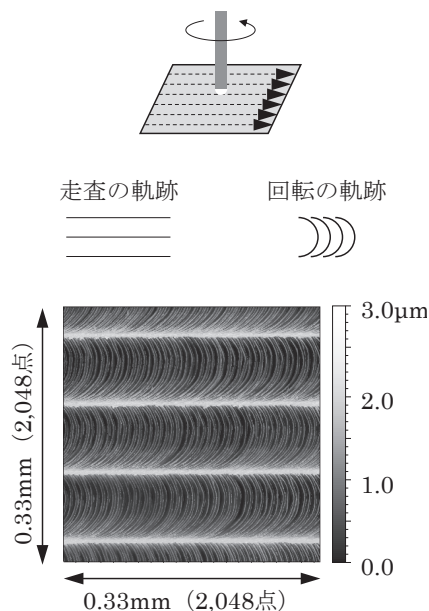
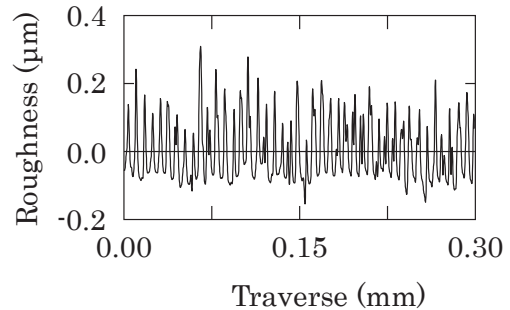


図4 表面性状の非接触測定結果

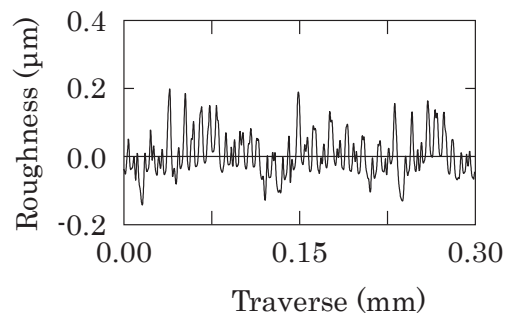
(線状)、及び工具回転で生じた筋目 (円弧状) をデジタルデータ化できた。

3.2 非接触測定の精度検証結果

図5及び図6に測定で得られた粗さ曲線の一部を示す。測定方法の違いによらず、測定の長さ方向に沿っ

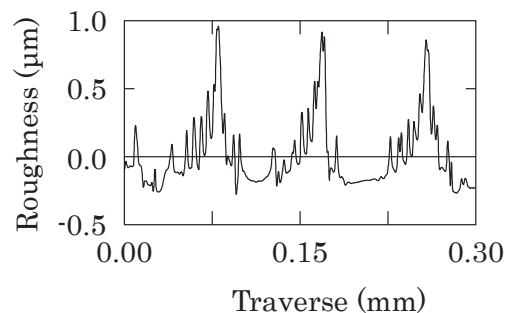


(ア) 非接触表面性状測定機で測定

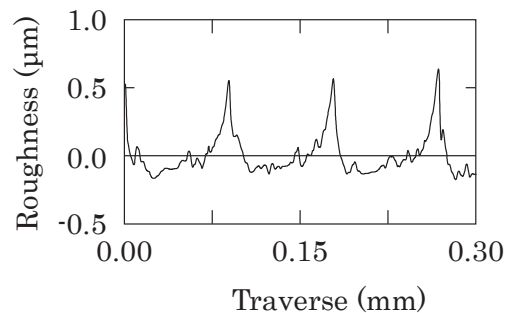


(イ) 触針式表面性状測定機で測定

図5 粗さ曲線 (エンドミルの走査方向に平行)



(ア) 非接触表面性状測定機で測定



(イ) 触針式表面性状測定機で測定

図6 粗さ曲線 (エンドミルの走査方向に直交)

て凹凸の高さが波打つように変化するうねりの傾向は定性的に一致したが、凹凸の高さには違いがみられた。

算術平均粗さ Ra (図7) は、非接触測定は接触測定より30%程度値が大きくなった(図10内の左)。接触測定で用いる触針スタイラスは先端形状より小さな形状(溝)には入り込めないが、非接触測定は光が測定媒体であることからより狭い形状も測定できるためと考えられる。

平均長さ RSm (図8) は粗さ曲線に含まれる周期構造の長さを示すが、エンドミルの走査方向に平行な粗さ曲線では、測定方法に依存しない結果となった(図

10内の中央)。これは、断面曲線がエンドミルの走査でできた溝に沿っており、ほぼ中心線(断面曲線の平均高さ)から対称であることから、高さ方向で変化が生じて、凹凸の平均間隔はさほど変わらないためと考えられる。一方、エンドミルの走査方向に直交する方向の粗さ曲線では、非接触測定の方が40%程度小さくなった。直交方向の粗さ曲線では、エンドミルの先端形状に由来するマクロな表面性状が捉えられており、中心線は曲線の下側に位置することになる。そのため、マクロな表面性状に含まれるマイクロな形状変化も表面粗さパラメータに影響した結果、RSm は、非接触

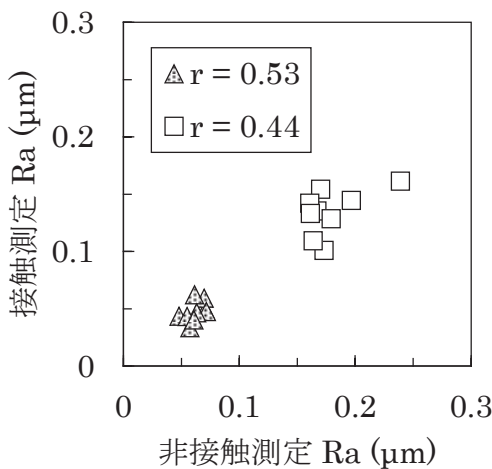


図7 表面粗さパラメータ Ra

▲ エンドミルの走査方向に平行
□ エンドミルの走査方向に直交

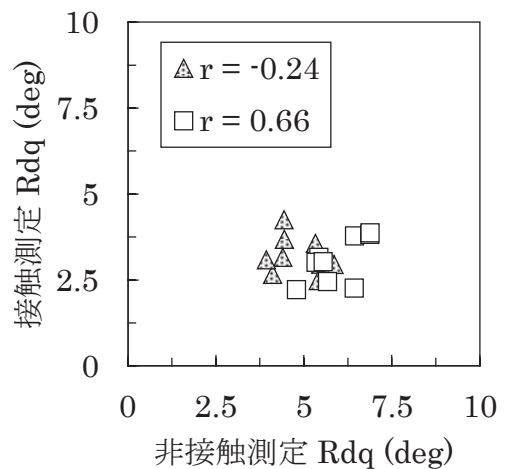


図9 表面粗さパラメータ Rdq

▲ エンドミルの走査方向に平行
□ エンドミルの走査方向に直交

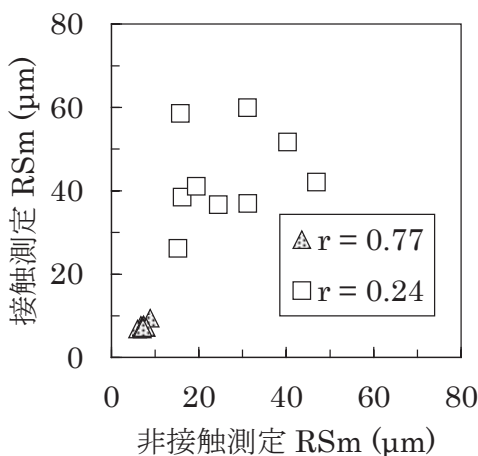


図8 表面粗さパラメータ RSm

▲ エンドミルの走査方向に平行
□ エンドミルの走査方向に直交

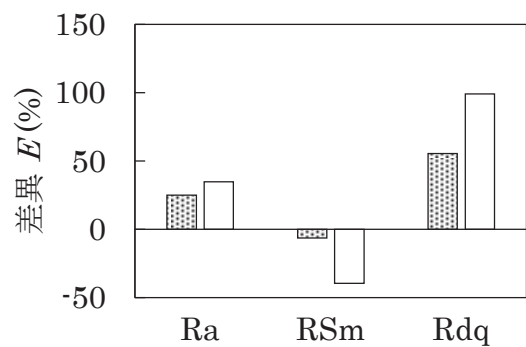


図10 測定方法の異なる表面粗さパラメータの比較結果

■ エンドミルの走査方向に平行
□ エンドミルの走査方向に直交

接触測定に基づく表面粗さパラメータに対する、非接触測定に基づく表面粗さパラメータの誤差割合(パーセント値)。

測定で値が小さくなったと考えられる。

二乗平均平方根傾斜 Rd_q (図9) は粗さ曲線の局所的な傾きを示すが、非接触測定では、エンドミルの走査方向に平行方向な粗さ曲線では 55%、エンドミルの走査方向に直交する方向では 99% 触針測定より大きい値となった (図 10 内の右)。 Rd_q は、粗さ曲線 (凹凸) の高さに比例すること、非接触測定では、接触測定では捉えられない細かな凹凸も捉えられた結果と考えられる。

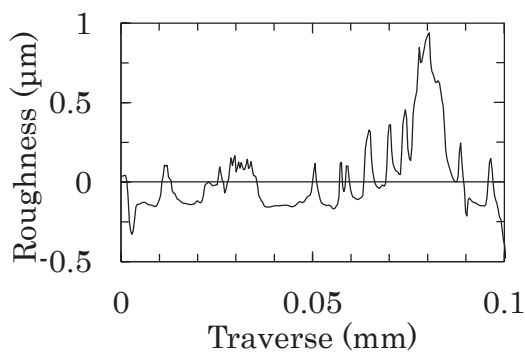
以上より、非接触測定は、よりマイクロな表面性状を測定できることが分かった

3.3 測定分解能の評価結果

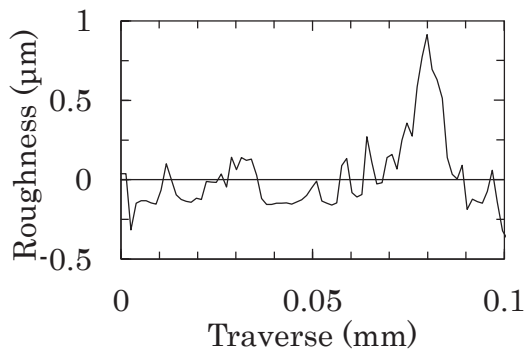
長さ方向の測定分解能が異なると、局所的な凹凸の変化の傾向が異なった (図 11)。

算術平均粗さ Ra は、測定分解能 $2.64\mu\text{m}$ (測定点数 128 点) の場合を除き、測定分解能にほぼ依存しない傾向がみられた (図 12)。この傾向は、 Ra の評価での一般性を示すものではなく、本報告が対象とした試料では、 $2.64\mu\text{m}$ より細かい周期での凹凸が Ra の計算に影響した結果と考えられる。

平均長さ RS_m は、測定分解能が $0.66\mu\text{m}$ (測定点数 512 点) より低くなる、すなわち、測定点の点間ピッ



(ア) 測定分解能 $0.33\mu\text{m}$



(イ) 測定分解能 $1.32\mu\text{m}$ 相当

図 11 測定長さ方向の測定分解能が異なる粗さ曲線

チがこの数値より広くなると値が変化する傾向がみられた (図 13)。これは、分解能の低下により細かい凹凸の変化を測定できなくなることから、うねり曲線のような波長の長い表面性状の変化しか捉えられなくなった結果と考えられる。

二乗平均平方根傾斜 Rd_q は、 Ra や RS_m とは異なり、測定分解能に依存する結果となった (図 14)。 Rd_q

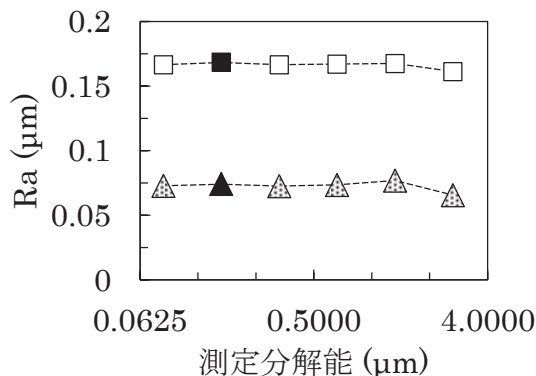


図 12 長さ方向の測定分解能と Ra の関係

- △ エンドミルの走査方向に平行
- エンドミルの走査方向に直交

横軸は対数表示。黒色のシンボルは実測結果。灰色のシンボルは測定データを間引きまたは補完して測定分解能の異なる測定を模擬した結果。

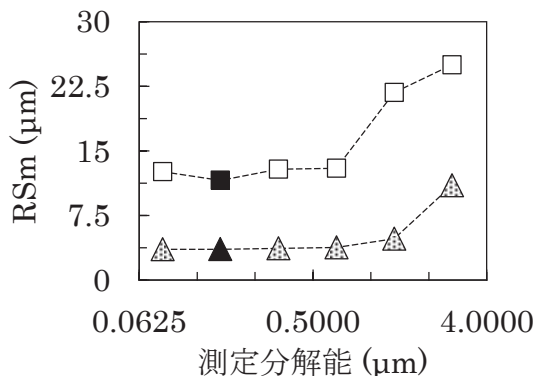


図 13 長さ方向の測定分解能と RS_m の関係

- △ エンドミルの走査方向に平行
- エンドミルの走査方向に直交

横軸は対数表示。黒色のシンボルは実測結果。灰色のシンボルは測定データを間引きまたは補完して測定分解能の異なる測定を模擬した結果。

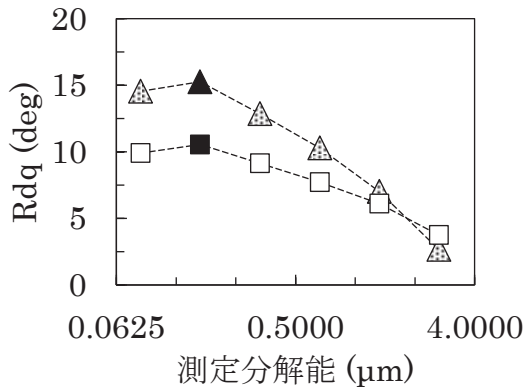


図14 長さ方向の測定分解能とRdqの関係

- ▲エンドミルの走査方向に平行
- エンドミルの走査方向に直交

横軸は対数表示。黒色のシンボルは実測結果。灰色のシンボルは測定データを間引きまたは補完して測定分解能の異なる測定を模擬した結果。

は局所的な断面曲線の傾きに基づくものであることから、言い換えれば、本報告で用いた測定試料は、表面性状を正確に測定するには $0.165\mu\text{m}$ 以上の測定分解能が必要であったということを意味すると考えられる。

非接触測定では、測定に用いる視野（対物レンズ）によって測定分解能が決まる。いわゆる、ナノレベルの機械加工結果の評価にはより視野の狭い、あるいは、より高解像度のイメージセンサーによる非接触測定が望ましいと考えられる。また、広範囲の表面性状を効率的に測定するために視野の広い対物レンズを使用すると測定分解能の低下を招き、表面粗さパラメータを過少あるいは過大評価する可能性がある。

3.4 光散乱特性の予測結果

反射面を撮影した観察像（図15、実際はカラー画像）では、白色の正反射光（像の中心にある円形のスポット）の周辺に白色と有彩色の散乱光が縦縞状に発生しているが、表面幾何構造から予測した光散乱特性に基づくBRDFデータを用いた光学シミュレーション（図16、実際はカラー画像）でもこの傾向を良好に予測できた。

これらの光散乱は、エンドミルの回転に由来するミクロで周期的な加工痕、エンドミルの走査方向に由来するマクロで周期的な加工痕によって生じたものであると考えられる。

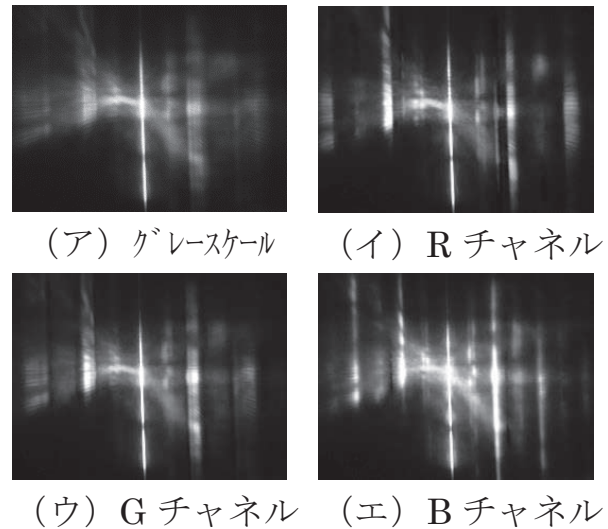


図15 反射面を撮影した写真

実際はカラー画像。カラーチャンネル毎で異なる位置に、光の回折による特徴的な縦縞が表れている。中央には白色の縦縞が生じている。

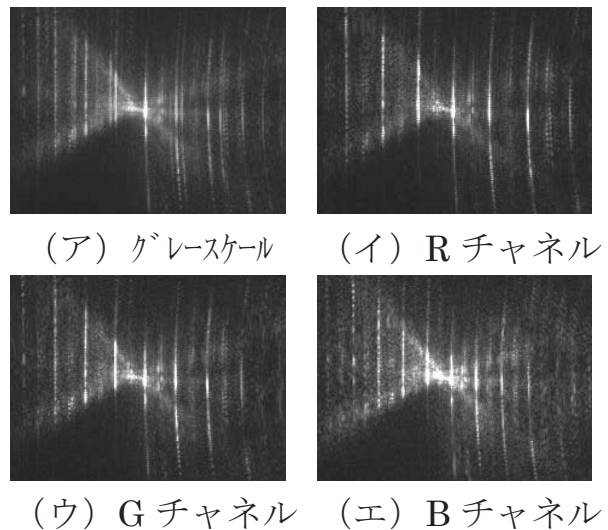


図16 シミュレーション結果

実際はカラー画像。カラーチャンネルごとで異なる位置に、光の回折による特徴的な縦縞が表れることを予測している。中央にスポット状の白色の輝点（正反射）が生じている。

回折光は散乱方向が幾何構造の周期と入射する光の波長に依存する。回折光の散乱角度は、波長に比例し、幾何構造の周期の長さに反比例する特徴がある。

エンドミルの回転由来の加工痕は、波長ごとに光の散乱方向が異なる程度の周期構造（約 $7\mu\text{m}$ ）となっていたため有彩色の散乱光を生じさせ、エンドミルの走

査方向由来の加工痕は、光の散乱方向が波長で変化しない程度の周期構造（約 82 μm ）であったために白色の散乱光を生じさせたと考えられる。

なお、デジタルカメラで撮影した反射像が不鮮明となっているのは、有彩色の縦縞がグラデーションになっているためであり、これは撮影の際に使用した LED 光源（波長の連続性）に由来している。一方、シミュレーションでは離散的な3波長で構成した狭帯域光であることから特定の波長が相対的に強調された結果であると推察する。反射像を撮影した際に使用した白色 LED と同等の波長範囲でシミュレーションを行えば、有彩色の回折光の連続的な色調の変化も予測可能であると考えられる。

以上の通り、高精度にデジタルデータ化された表面幾何構造を用いることで、回折による光散乱を高精度かつ高解像度に予測できることが分かった。本報告の手順で得られる BSDF データは様々な照明シミュレーションシステムでも利用可能である。ヘッドアップディスプレイなどの車載光学機器のモデルベース評価⁹⁾においても、テスト加工した平板での BSDF データを作成し、加工条件と対応付けておけば、レンズや凹面鏡の性能を試作レスで予測できるようになると考えられる。

4 まとめ

本報告では、光干渉方式による非接触表面性状測定技術を用いることで、接触式の表面性状測定技術では捉え切れない微小な表面の凹凸を正確にデジタルデータ化できることを示した。また、このデジタルデータを用いた光学シミュレーションにより、表面幾何構造から光の反射特性を高精度に予測できることを示した。従来の光学測定による反射特性の測定では微小面積に対する測定が困難であったが、本技術を用いることで、微小領域での光反射特性を予測し、光学シミュレーションに利用可能な BSDF データとして記述できることを示した。

表面幾何構造を捉えたデジタルデータに対し、縦横比を変えるなどの操作を加えることで、異なる機械加工の条件を模擬し、実際に加工を行うことなく加工後の光反射特性を予測する技術に発展できるものと考えられる。

今後は、本技術の有効性及び一般性を示すため、透過特性への応用や材質依存性などの検討を進める。

参考文献

- 1) 柳原亘 他：表面の光学特性に影響する粗さパラメータの解明．静岡県工業技術研究所報告，第 13 号，4-8 (2020)．
- 2) JIS B 0651:2001 製品の幾何特性使用 (GPS) - 表面性状：輪郭曲線方式-触針式表面粗さ測定機 の特性．
- 3) JIS B 0601:2013 製品の幾何特性使用 (GPS) - 表面性状：輪郭曲線方式-用語，定義及び表面性状パラメータ．
- 4) JIS B 0633:2001 製品の幾何特性使用 (GPS) - 表面性状：輪郭曲線方式-表面性状評価の方式及び手順．
- 5) 志智亘 他：三次元表面性状測定による表面散乱光の予測．静岡県工業技術研究所報告，第 14 号，掲載予定，(202)．
- 6) JIS Z 8722:2009 色の測定方法-反射及び透過物体色．
- 7) JIS Z 8781-3:2016 測色-第3部：CIE 三刺激値．
- 8) IEC 61966-2-1:1999/AMD1:2003 Amendment 1 - Multimedia systems and equipment - Colour measurement and management - Part 2-1: Colour management - Default RGB colour space - sRGB．
- 9) 豊田敏裕：光源データの配光測定方式の違いがヘッドアップディスプレイの表示シミュレーションに与える影響 -ファーフィールド配光データとニアフィールド配光データの比較-．静岡県工業技術研究所研究報告，第 13 号，9-14 (2020)．