# 切削加工面の三次元表面性状測定による反射光分布の計算

照明音響科 志智 亘\* 豊田敏裕 栁原 亘

# Calculation of reflected light distribution by using measurements from the areal surface texture of a machined surface

#### SHICHI Wataru, TOYOTA Toshihiro and YANAGIHARA Wataru

Optical simulations using the ray tracing method allow the performance of optical equipment to be evaluated in a virtual environment, thereby enabling product design procedures, such as prototype development, testing, and defect identification, to be performed more efficiently. With this method, the scattering phenomenon that occurs when light reflects off an object can be reproduced by using light scattering data. However, few studies have reported data indicating a property where light scattered with a widely spread diffraction using a high density surface texture that included complex microstructures ranging from smaller than a micrometer to up to 100 µm were obtained by a non-contact areal surface texture measuring instrument. In this report, the distribution of colored scattering light caused by the diffraction phenomenon generated on a machined surface by using measurements from its surface texture was calculated. The calculation results reproduced patterns similar to the actual measurements and provided more detailed information about the scattering phenomena. In addition, the calculation results was described as bidirectional scattering distribution function (BSDF) data and some reflection appearances simulation of the scattering light on a machined surface was carried out by using BSDF data. The simulation results reproduced the appearances of actual scattering light well. Based on these methods, this report discusses the appearances of light reflected from a machined surface under different machining conditions that are reproduced virtually by modifying the aspect ratio of the measured machined surface data.

Keywords : Precision machining process, 3D surface profile data, Reflection scattering, Diffraction

光線追跡法を用いた光学シミュレーションは、光学機器の性能を仮想空間上で評価することができるため、製品の試作・実験や不具合箇所の特定などをより効率的に行うことが期待できる。この手法において、光線が物体から反射する際に生じる散乱現象は、散乱特性データを使用することで再現される。しかしながら、これまでに非接触3次元表面性状測定機で得られたマイクロメートル以下のミクロで複雑な周期構造から100マイクロメートル程度のマクロな周期構造を同時に含む高密度な表面性状データを用いて、広範囲に広がる回折現象を含む散乱光を記述した散乱特性データに関する報告はほぼなされていない。本報告では、機械加工面の表面性状測定データからその表面で生じる回折現象による色のついた散乱光の分布を計算した。計算結果は実測値と同様の傾向を再現するとともに、より詳細な散乱に関する情報が得られた。また、計算結果を双方向散乱分布関数(BSDF)データとして記述し、機械加工面の散乱光の見えのシミュレーションを行った。シミュレーション結果は実際の散乱光の見えをよく再現することが確認できた。一連の手法を応用して、表面性状測定データの縦横比を変化させてシミュレーションを行うことで、仮想的に異なる加工条件下における反射光の見えを議論する。

キーワード:機械加工、微細加工、虹目、表面散乱、回折

<sup>\*</sup>現 浜松工業技術支援センター 光科

)

## 1 はじめに

光線追跡法を用いた光学シミュレーションは、光学 機器の性能を仮想空間上で評価することができ、製品 の試作・実験や不具合箇所の特定などをより効率的に 行うことが期待できる。この手法において、光線が物 体から反射する際に生じる散乱現象は、散乱特性 データを使用することで再現される。散乱特性データ は様々なモデルが提案されているが1)、精密な機械加 工によって生じる回折現象を含む複雑で広範囲な散 乱を正確に再現することは難しい。このような場合は実 際の加工面の表面性状データから回折現象を取り入 れた散乱分布を推測する必要がある2)。しかしながら、 これまでに非接触3次元表面性状測定機で得られた マイクロメートル以下のミクロで複雑な周期構造と100 マイクロメートル程度のマクロな周期構造を同時に含 む表面性状データから、広範囲に広がる回折を含む 散乱光を記述した散乱特性データに関する報告はほ ぼなされていない。

このような現実の機械加工面からの散乱特性データ があれば、よりリアルな見えを表現することができ、散 乱光による迷光やぼやけなどといった光学性能を低 下させる原因もより詳細に調べることができる。

本報告では上述した複雑な表面性状を持つ機械加 工面で生じる反射散乱光の散乱特性を、機械加工面 の3次元表面性状測定データ<sup>3)</sup>と回折理論を用いて算 出し、その再現性を変角分光測色測定による実測値<sup>3)</sup> と比較する。次に求めた散乱特性データを用いて反射 散乱光の見えの光線追跡シミュレーションを実施し、 計算に用いた機械加工面の実際の反射散乱光の見 えと比較する。最後に、得られた表面性状測定データ の縦横比を編集することで切削加工条件を仮想的に 変更した状況を作り出し、この時の反射散乱光の見え を予測する。

### 2 方法

## 2.1 表面性状測定データを用いた反射散乱光の計算

回折現象を含む表面散乱を、ホイヘンスの原理に 基づく二次波の概念を用いて計算することを考える。 図1は表面性状測定データ(データは離散的な点群) を反射面とした際の入射および出射する光のある時刻 の波面の広がりを示している。波面は図1に示した様 に波動の位相が等しい面のことである(例えば、図2 に示した様に波動の山の部分を結んだ面や谷の部分 を結んだ面など)。図1において波面は点光源から球 面波として伝搬し、反射面に到達すると面内の全ての 測定データ点で二次波が発生する。発生した二次波 は球面波として伝搬する。観測点での反射光の振幅 強度はこの地点に到達した二次波の足し合わせとな り、次式のキルヒホフの回折積分で表される<sup>4)</sup>。

$$U = \frac{1}{i\lambda} \int K_{r,s} \frac{\exp(ik(r+s))}{rs} dS$$
(1)



図1 ホイヘンスの原理



ここで、λは光の波長、rとsはそれぞれ、反射面で 二次波が発生した点から観測点までの距離および光源 までの距離である。*Krs*は二次波の振幅の方向依存性 を表す傾斜係数であり次式で表される。

$$K_{r,s} = \frac{1}{2} \left( \cos \alpha + \cos \beta \right)$$
 (2)

ここで、αとβはそれぞれ反射面で二次波が発生した点から光源方向および観測点方向と反射面の法線方向のなす角度とする。式1の積分は反射面内で発生する二次波について行うことを意味する。なお、今回は無偏光の反射散乱を考えているため、偏光状態による反射光強度の角度依存(フレネル反射)の効果は考慮されていない。また、光線追跡ソフトで使用する双方向散乱分布関数(BSDF)データを式1から求める場合は、点光源および観測点がそれぞれ反射面から十分離れており反射面が点と見なすことができる以

下の関係式が成り立つ状況(フラウンホーファー回折 領域)となる<sup>4)</sup>。

$$\frac{a^2}{8s} << \lambda \quad \text{in the } \frac{a^2}{8r} << \lambda \tag{3}$$

ここで、aは反射面の幅とする。

これらを踏まえて、今回の取り組みでは図3に示した 様に、光源方向から反射面に入射し、観測点方向に 出射する波長 λ の光強度を次式を用いて計算した。





図3 式4における反射面(表面性状測定データ点 群)の入射光の単位ベクトル、出射光の単位 ベクトルおよびデータ点の位置ベクトル

ここで、式4の $\sigma$ と $\psi$ は光源方向の反射面の法線方 向を北極とした時の極角とこの軸回りの方位角であり、 e( $\sigma$ , $\psi$ )は光源方向から反射面への単位ベクトルであ る。 $\theta$ と $\varphi$ は観測点方向の極角と方位角であり、e( $\theta$ ,  $\varphi$ )は反射面から観測点方向への単位ベクトルである。 また、Qは反射面内の表面性状データ点の位置ベクト ルである。ただしQは離散的なデータ点群であるため、 式4の積分はすべてのデータ点を足し合わせたものと なっている。傾斜係数*K*は

 $K = \frac{1}{2} \left( \mathbf{e}(\sigma, \psi) + \mathbf{e}(\theta, \varphi) \right) \cdot \mathbf{n}$  (5)

とした。ここでnは反射面の法線ベクトルである。な お、今回使用した光線追跡ソフトウェア(Zemax, LLC 社 OpticStudio)の BSDF データの出射角は正反方向 を北極とする極角  $\theta$ 'とその軸回りの方位角  $\varphi$ 'で記述さ れている<sup>5)</sup> ため(図4)、 $\theta$ 'と $\varphi$ 'をそれぞれ  $\theta$  と $\varphi$ に 変換し、式4と式5を波長毎に計算した。

図5に本取り組みで使用したサンプル1から4の表



## 図4 光線追跡ソフトウェアで用いるBSDFデータ の入射光と出射光の角度



図5 機械加工面における微小領域の非接触3次元 測定点群データの高さ分布

面性状測定点群データの高さ分布を示す。使用した 表面性状測定データは点間隔が約166nm で縦方向 に2048点、横方向に2048点の格子状に配置されて いる。したがって反射面の大きさはおおよそ縦0.33mm ×横0.33mm である<sup>3)</sup>。ここで表面性状データ点の間 隔が入射光の波長程度になると、この点間隔の周期性 によって回折光が生じるため、測定点群の間隔は波長 以下が望ましい。表面性状データには加工面に切削 工具の送り操作によるマクロな周期をもつ横方向(加 工方向)に伸びる加工痕と、切削工具の回転による円 弧状のミクロな周期を持つ加工痕が確認できる。シミュ レーションでは白色光が入射した際の散乱を再現でき るように波長450nm(青色に対応)、550nm(緑色に 対応)、650nm(赤色に対応)が含まれる入射光を想 定した。また、図4に示す入射光の方位角は加工方向 に平行な方向を $\psi$ =0°とした。それぞれの波長のBSDF データは、入射光の極角を $\sigma$ =15°、方位角を $\psi$ =0°およ び $\psi$ =90°の2条件とした。反射方向の角度条件は極角  $\theta'を0° \le \theta' \le 30°$ の範囲では 0.1°刻み、30°  $\le \theta' \le 180°$ の範囲では 1°刻みとし、方位角 $\varphi' \ge 0° \le \varphi' \le 360°$ の 範囲で 1°刻みとし、方位角 $\varphi' \ge 0° \le \varphi' \le 360°$ の 範囲で 1°刻みと定めた。ただし、出射光が反射面を 透過する状況になる極角の場合は BSDF の値を 0 とし た。また、反射面内では出射光が別のデータ点でさら に反射する状況は考慮しない。

## 2.2 BSDF データを用いた散乱光シミュレーション

点光源で照明した反射面を人間の眼もしくはカメラ で観察する光学配置の断面図を図6に示す。この状況 を光線追跡ソフトにてシミュレーションを行う場合、反射 面で散乱した光線が観測点に到達する確率は一般に 非常に小さい。したがって、良好なシミュレーション結 果を得るためには大量の光線を生成する必要があ る。今回の取り組みでは、より効率的なシミュレーショ ンの実施を目的に、図7に示した様な光学配置を考案 した。これは、図6に示した光学配置において入射光 が平行光であり、反射面のどの位置の散乱も同様の BSDF で記述された状況を近似的に再現している。図 7の光学配置は、反射面で散乱した多くの光線を受光 することができる。ディテクタ平面の大きさは 80mm × 80mmの矩形(解像度 0.31mm/ 画素)とし、反射面 から正反射方向に150mmの距離に配置した。この光 学配置では生成した光線の約85%がディテクタ平面 に到達する。一方、図6の光学配置では生成した光線 の 0.1%程度が瞳もしくはカメラに到達する(ただし、 到達する光線は瞳もしくはカメラの絞り径によって変化 するが、図7の光学系ほどは到達しない)。入射光の 波長と入射角は2-1と同様の条件とし、波長毎のエネ



図6 反射面での散乱光を観察する光学系



# 反射面

図7 今回の取り組みで実施した光線追跡シミュ レーションの光学配置

ルギーは一定とした。各波長のシミュレーションで得ら れるディテクタ平面の各画素における値からRGB画像 を作成し、デジタルカメラで撮影した実際の反射散乱 光の見えと比較した。なお RGB 画像の作成は参考文 献6を参照のこと。また、各シミュレーション画像は適 当なガンマ補正をかけている。

# 2.3 表面性状データ編集による反射散乱光のシミュ レーション予測

図8、図9に図5に示したサンプル1の表面性状デー タを縦方向と横方向に拡大・縮小した結果を示す。図 8は元の測定データを加工方向と直交する方向(元 データの縦方向)に拡大(1.5倍)・縮小(0.5倍)し たデータで、図9は元の測定データを加工方向と平行 な方向(元データの横方向)に拡大(1.5倍)と縮小 (0.5倍)したものである。図8は、切削工具の送りに よって生じる横方向に伸びる加工痕の間隔が変化し ている。これは切削工具の先端形状の大きさが変化し



デジタルデータの縦方向の拡大率

図8 表面性状測定データの縦方向への拡大縮小 編集 たと見なせる。したがって、間隔が広い場合と狭い場 合はそれぞれ、先端形状が大きい切削工具と小さい 切削工具で加工する状況を模している。一方、図9 は、切削工具の回転によって生じる円弧状の微細な 周期構造の幅が変化している。これは切削工具の送 り速度が変化したと見なせる。したがって、微細な周 期構造の幅が広い場合と狭い場合はそれぞれ、切削 工具の送りが速い状態と遅い状態で加工する状況を 模している。

これらの編集した表面性状データを用いて、BSDF データを計算し、それらの状況における反射散乱の見 えをシミュレーションした。



測定データの横方向の拡大率

図9 表面性状測定データの横方向への拡大縮小 編集

## 3 結果と考察

## 3.1 表面性状測定データを反射光の計算結果

図 10 は図5のサンプル1に入射光が方位角 $\psi$ =0 で 入射したときの出射光強度分布の正反射面内(出射 光の方位角が $\varphi'$ =0°および180°)(図 11)における波 長 450nm(ア)、550nm(イ)、650nm(ウ)の計算結 果(実線)と、同サンプルの偏角分光測色計により反 射光を同条件の入射角で測定した実測結果(点線) である<sup>6)</sup>。図 10 の横軸は反射光の極角であり、横軸 の正の領域は方位角 $\varphi'$ =180°の極角 $\theta'$ の値、負の領 域は方位角 $\varphi'$ =0°の極角 $\theta'$ を負の値にしたものであ る。図 10 よりすべての波長において、計算結果は正 反射光(極角 $\theta'$ =0°)のピークの肩に非対称な裾を持 つ実測結果のおおよその傾向を再現していることが確



 図10 サンプル1に入射光を極角σ=15°、方位角 ψ=0°で入射した光の正反射断面(φ'=0°お よび180°)における波長450nm(ア)、550nm (イ)、650nm(ウ)の出射光強度の極角θ'依 存性



 図11 サンプル1に入射光を極角σ=15°、方位角
ψ=0°で入射した光の正反射断面(φ'=0°お よび180°)

認できる。また、計算結果には、図10(ア)、(イ)、 (ウ)のそれぞれの挿入図に示した様に、実測結果に

【報告】

は見られない微細なピークが複数存在している。これら のピークの間隔の平均は波長 450nm では約 0.30°、 550nm では約 0.36°、650nm では約 0.41°であった。 回折の式<sup>7)</sup>からこれらのピーク間隔に対応する回折格 子の周期を計算すると、どの波長の計算結果も加工方 向に伸びる加工痕の間隔(約 90µm)に近い値であっ た。したがって、微細なピークはこの加工痕の周期性 に伴う回折光であると考えられる。また、各波長の出 射光強度分布がほぼ同じ傾向となっていることから、こ の入射光の正反射面内の散乱光は白色に近いことが わかる。

図 12 はサンプル1に入射光が方位角ψ=90°で入射 したときの出射光強度分布の正反射面内(図13)に おける波長 450nm (ア)、550nm (イ)、650nm (ウ) の計算結果(実線)と、同サンプルの偏角分光測色 計により反射光を同条件の入射角で測定した実測結 果(点線)である。計算結果には実測結果と同様に 正反射光( $\theta$ '=0°)のピークのほかに $\theta$ '=0°から正負 の両方向に (ア) ではおおよそ 3.8°、(イ) では 4.8°、 (ウ) では 5.8° 間隔でピークが複数確認できる。これ らのピーク間隔に対応する回折格子の周期を計算す ると、どの波長も切削工具の回転による微細で周期的 な加工痕の間隔(約7µm)に近い値となった。した がって、計算結果や実測結果でみられるピークはこの 加工痕の周期性に伴う回折光であると考えられる。ま た、回折光のピークの角度が波長により各ピークの幅 以上に異なっていることから、その波長に対応した有 色彩の散乱光となっていることがわかる。

なお、計算結果と実測結果のピーク幅の違いは極 角 θ'についてのそれぞれの分解能によるものと考えら れる。

以上のように、計算結果には実測では測定機の分 解能の制限により失われる情報も再現することがで き、より詳細な反射光の評価が可能になるものと考え らえる。

## 3.2 BSDF データを用いたシミュレーションの結果

図14から図17に図5に示した4つのサンプルの反 射散乱光シミュレーション画像のR(赤色)成分、G (緑色)成分、B(青色)成分および各サンプルの反 射光をデジタルカメラで観察した画像のR成分、G成 分、B成分を示す。入射光はすべてのサンプルにお いて2-1の条件であり、カメラ画像およびシミュレー ション画像の縦方向が入射光の方位角ψ=0°方向であ る。各サンプルのシミュレーション画像にはサンプルに よって異なる表面性状を反映した反射散乱光が確認 できる。どのシミュレーション画像もデジタルカメラ画像



図12 サンプル1に入射光を極角 $\sigma$ =15°、方位角  $\psi$ =90°で入射した光の正反射断面( $\varphi$ '=0° および180°)における波長450nm(ア)、 550nm(イ)、650nm(ウ)の出射光強度の 極角 $\theta$ '依存性



図13 サンプル1に入射光を極角σ=15°、方位角 ψ=90°で入射した光の正反射断面(φ'=0° および180°)

-27-

の中心付近に白色の正反射光とその周辺に各色成分 で間隔が異なる縦縞の分布傾向を良好に再現してい ることが確認できる。

回折光の回折角は波長に比例し、周期構造の周期 に反比例する。したがって、各サンプル表面の円弧状 のミクロな周期を持つ加工痕では、波長ごとに異なる 角度で回折するため、R、G、B成分で横方向に異



図14 サンプル1のシミュレーション画像と実測に よるデジタルカメラ画像



図15 サンプル2のシミュレーション画像と実測に よるデジタルカメラ画像

なった間隔の回折光が生じ、切削工具の送り方向に由 来するマクロな周期を持つ加工痕では、回折する角度 が非常に小さいため、縦方向は連続した散乱光が生 じ、縦縞の散乱分布になっていると考えられる。なお、 シミュレーション画像とカメラ画像では縦縞の太さが異 なっているが、これはシミュレーションと実測における光 源の分光分布の違いによるものであると考えられる。



図16 サンプル3のシミュレーション画像と実測に よるデジタルカメラ画像



図17 サンプル4のシミュレーション画像と実測に よるデジタルカメラ画像

# 3.3 表面性状データ編集による反射散乱光の見えの シミュレーション結果

図18と図19はそれぞれ図8と図9に示した表面性状 に対応する反射散乱光の見えにおけるシミュレーション のグレースケール画像(実際はカラー画像)である。 画像の中央の明るい点が正反射光である。図18では、 切削工具の先端形状が大きくなると縦縞が短くなって おり、正反射光の周辺に明るい散乱光が確認できる。 一方で、先端形状が小さくなると縦縞が長くなってお り、広範囲に散乱光が分散している。縦縞の間隔はほ とんど変化しない。図19では、切削工具の送りが速く なると縦縞の間隔が小さくなり、正反射光付近に明るい 散乱光が集中している。一方、送りが遅くなると縦縞 の間隔が大きくなり、散乱光が分散している。縦縞の 長さはほとんど変化しない。これらのことより、切削工 具の先端形状が小さく、送りが遅い場合は回折による 散乱が卓越し、正反射光から離れた領域に色のつい

小 ← 切削工具の先端形状 →大

元のデータ

0.5倍



測定データの縦方向の拡大率

図18 表面性状測定データ(サンプル1)を縦方向 に変形した(図8)時のシミュレーション画像 (実際はカラー画像)



測定データの横方向の拡大率

図19 表面性状測定データ(サンプル1)を横方向 に変形した(図9)時のシミュレーション画像 (実際はカラー画像)

た散乱光が分布する傾向があり、反対に、先端形状 が大きく送りが速い場合は幾何光学的な散乱が卓越し、 正反射光付近に白色に近い散乱光が分布する傾向が あることが推測される。

## 4 まとめ

本報告では、実際に加工された表面の表面性状測 定データからその表面で生じる回折現象による色のつ いた散乱光の分布を計算した。計算結果は同様の散 乱分布の実測値と同様の傾向を再現するとともに、よ り詳細な散乱に関する情報が得られた。また、計算結 果を BSDF データとして記述し、機械加工面の散乱光 の見えのシミュレーションを行った。シミュレーション結 果は実際の散乱光の見えをよく再現することが確認で きた。一連の手法を応用して、表面性状測定データの 縦横比を変化させてシミュレーションを行うことで、仮想 的に異なる加工条件下における反射光の見えを予測 した。

今回の取り組みで行った手法は、光学部品の実際 の表面の散乱光をシミュレーションすることができ、より 現実に即した光学系の迷光解析が実施できるものと 考える。

## 参考文献

- 1) Y. Mukaigawa, IPSJ SIG Technical Report, Vol.2010-CVIM-172 No.34, pp.1-11 (2010).
- 2) Z. Doneg, et al., ACM Transactions of Graphics, 35 (1), pp.1-13 (2015)
- 3) 栁原亘 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).
- 4) 渋谷眞人 他:回折の基礎,「回折と結像の光学」, 初版(朝倉書店,東京), pp.1-20 (2013)
- 5) Zemax, LLC : BSDF Data Interchange fille format specification.

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

- 6) 豊田敏裕 他:表面性状と光学シミュレーションへ の活用.静岡県工業技術研究所報告,第14号,掲 載予定 (2021).
- 7) 河合 滋:光学設計の手法,「光学設計のための 基礎知識」,初版(オプトロニクス社,東京), pp.195-239 (2013).