

## カラーイメージングによる表面粗さ推定

光科 中野雅晴 太田幸宏\*  
株式会社パパラゴ 岡田 楓 加藤 誠

## Estimation of surface roughness by using color imaging

NAKANO Masaharu, OHTA Yukihiro, OKADA Kaede and KATOH Makoto

A method of estimating surface roughness by using colorimetric data from an object's surface has been developed in order to allow the macroscopic distribution to be measured quantitatively in a short time. Surface roughness was estimated from the distribution of colorimetric data that was obtained using an imaging colorimeter and plotted on an xy chromaticity diagram. The relationship between several areal roughness parameters that were measured using a confocal microscope and the colorimetric distribution was evaluated by using roughness comparison specimens. The width of the colorimetric distribution was approximated to an exponential function of  $S_a$  within the range of 0.3 to  $47\mu\text{m}$ , where  $S_a$  is the arithmetical mean height of the scale limited surface and one of the height roughness parameters. In addition, the authors confirmed that the newly developed method could be applied to estimate other roughness parameters, as well.

Keywords : Surface roughness, colorimetry, imaging, colorimeter, confocal microscope.

検査対象の巨視的な表面粗さの違いを、短時間で定量測定するために、非接触で高精度に測定した試料表面の色から表面粗さを推定する方法を開発した。本方法では、試料表面の反射像を2次元色彩計で測色し、各画素の測色値を色表現で用いるxy色度図にマッピングしたときの測色値の分布の拡がり幅から表面粗さを推定する。粗さが異なる複数の試料面で構成された粗さ比較見本板を試料に用いて、共焦点顕微鏡で測定した三次元の表面粗さパラメータと、試料表面の測色値の分布との関係性を評価した。高さ方向の粗さパラメータである輪郭曲面の算術平均高さ $S_a$ と分布の拡がり幅との関係は、指数関数で近似でき、 $S_a=0.3\sim 47\mu\text{m}$ の範囲で表面粗さを推定できることを示した。また、表面加工法によって、近似曲線が異なることから、 $S_a$ 以外の粗さパラメータも測色値の分布から推定できる可能性があることがわかった。

キーワード：表面粗さ、測色、イメージング、色彩計、共焦点顕微鏡

## 1 はじめに

検査対象の表面性状を評価する方法として、短時間で評価できる官能検査（目視や触診）は、製造現場で広く使われてきた。しかし、官能検査は、専門的な技術を有する人材が必要なうえに、定量的な品質管理が困難であるといった課題がある。近年、定量的な測定が求められる表面粗さの評価では、共焦点顕微鏡等による三次元形状計測が用いられている<sup>1, 2)</sup>。これらの測定機では、微細な表面凹凸の形状を高精度に測定できる特長があるが、一度に測定できる面積が狭

い（例えば、50倍の対物レンズで $0.1\text{mm}^2$ 程度）ため、大面積の測定では測定時間が長くなってしまふ。このため、共焦点顕微鏡等による表面粗さ測定は、インライン検査といった測定速度が求められる用途には向いていない。

そこで、本研究では、2次元色彩計等を用いて非接触で試料表面の色を高精度に測定することで、巨視的な表面粗さの違いを短時間で定量測定する方法の確立を目指している。本報告では、共焦点顕微鏡で測定した表面粗さと、2次元色彩計で測定した試料

\* 現 機械電子科

表面の測色値との関係性を評価した結果について報告する。

## 2 方法

### 2.1 試料

試料は、各加工面の表面形状を有する粗さ比較見本板（放電加工面 KB013、ショットブラスト加工面 KB058、グリットブラスト加工面 KB129、全て Rubert 社製）を用いた。材質はニッケルである。写真1に、放電加工面の粗さ比較見本板の外観を示す。粗さ比較見本板は、輪郭曲線方式の粗さパラメータ（JIS B 0601:2013）<sup>3)</sup> である算術平均粗さ Ra が異なる複数の試料面で構成されている。

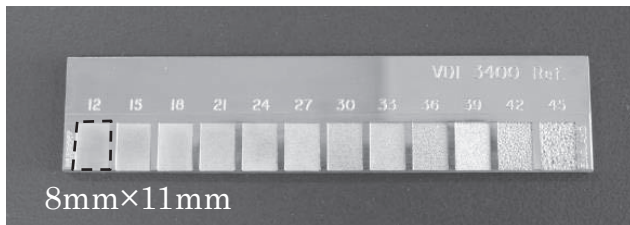


写真1 粗さ比較見本板（放電加工面）

### 2.2 共焦点顕微鏡による表面粗さ測定

試料の表面粗さは、共焦点顕微鏡 OPTELICS HYBRID L7（レーザーテック株式会社製）で表面形状を測定し、三次元の粗さパラメータ（JIS B 0681-2:2018）<sup>4)</sup> を算出した。放電加工面は、試料形状の制約があったため作動距離が長い100倍対物レンズ（NA0.90）で、ブラスト加工面は50倍対物レンズ（NA0.95）で形状を測定した。これらの対物レンズは視野が狭いため、複数の視野をつなぎ合わせるスティッチング処理を用いて評価領域を広げた。粗さパラメータの算出では、測定した輪郭曲面に対して傾斜補正とローパスフィルタであるSフィルタのみを適用し、ハイパスフィルタであるLフィルタを使わなかった。この理由は、2次元色彩計で測定した試料表面の測色値には、高い周波数の粗さ成分だけでなく低い周波数のうねり成分の影響も含まれており、同様な条件で測定した粗さパラメータと比較するためである。各周波数フィルタの詳細は、JIS B 0681-3:2019<sup>5)</sup> を参照されたい。

### 2.3 測色による表面粗さ推定

図1に、2次元色彩計で測定した試料表面の測色値から表面粗さを推定する方法の概略図を示す。同軸光学系を用いて、面発光型の白色LED（RGB 3色の

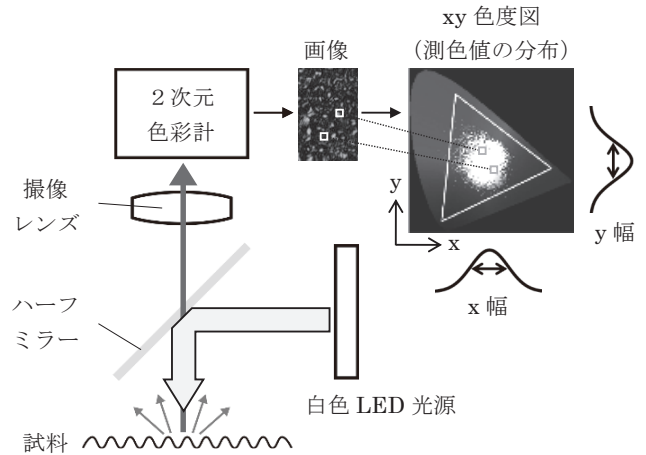


図1 測色による表面粗さ推定の概念図

LEDを混色)で試料を照明し、反射像を2次元色彩計 RC-300（株）パパラゴ製）で測色した。本色彩計は、3つのイメージセンサとカラーフィルターで構成されており、30Hzの動画速度で試料の表面画像と、各画素におけるXYZ表色系の測色値が得られる<sup>6,7)</sup>。各画素の測色値を色表現で用いるxy色度図にマッピングしたとき、その測色値の分布（以下、色分布）が表面粗さの違いによって異なった。この現象を利用して色分布を比較することで、試料表面の色から表面粗さを推定した。本方法の利点は次のとおりである。

- (1) CCD等のイメージセンサを使って測色するため、一度に広い面積を検査できる。
- (2) 人の目と同様に明るさと色を測定するため、目視検査の代替法として有望である。
- (3) 巨視的な表面粗さの違いを定量的に測定でき、同一基準での検査が可能である。

色分布の比較は、xとyの2方向の拡がり幅（標準偏差）を指標とした。撮像レンズは、焦点距離fが8mmと15mmの2種類（絞り値はともに2.8）を用いて、測色結果を比較した。また、評価領域の大きさと色分布の拡がり幅との関係も調べた。

## 3 結果および考察

### 3.1 共焦点顕微鏡で測定した試料表面形状と粗さ

図2に、共焦点顕微鏡で測定した試料表面の輝度画像と点線部における断面形状の結果の一部を示す。これらの試料は表面形状に方向性がなく非周期的なテクスチャを有している。放電加工面は、溶けて形成された滑らかな形状、ショットブラストとグリットブラストの加工面は、それぞれ球形と鋭角の粒を衝突させて

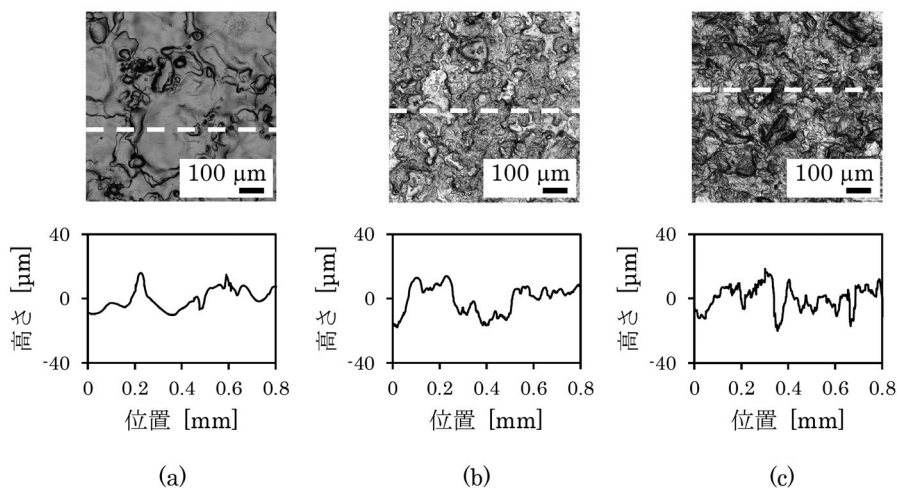


図2 試料表面の輝度画像（上）と断面形状（下）

各加工面の表面粗さは、(a)放電加工： $Sa=6.2\mu\text{m}$ 、 $Sal=88\mu\text{m}$ 、(b)ショットブラスト： $Sa=7.7\mu\text{m}$ 、 $Sal=109\mu\text{m}$ 、(c)グリットブラスト： $Sa=6.6\mu\text{m}$ 、 $Sal=45\mu\text{m}$ である。

作られた形状に特徴がある。このことから、図2に示した3つの試料は、表面形状の高さ方向に関する粗さパラメータである輪郭曲面の算術平均高さ  $Sa$  は同等な測定値であったが、面内方向の目の細かさによって違いが現れる粗さパラメータの自己相関長さ  $Sal$  は大きく異なった。図3に、 $Sa$  とその他の粗さパラメータとの関係性を評価した結果を示す。評価領域は、 $Ra$ （粗さ比較見本板の仕様値）が  $6.3\mu\text{m}$  以上の試料面では  $2\text{mm}$  角、それ以下では  $0.8\text{mm}$  角とした。粗さパラメータの測定値は、試料面内における5箇所の平均値である。 $Sal$  は、 $Sa$  が増加すると同様に大きくなる傾向が見られ、表面加工法によって傾きに違いが現れた。一方、 $Sa$  と輪郭曲面の二乗平均平方根勾配  $Sdq$  の関係からは、表面加工法を判別できる顕著な違いを確認できなかった。この他に、輪郭曲面の二乗平均平方根高さ  $Sq$  と輪郭曲面の展開界面面積  $Sdr$  といった粗さパラメータも  $Sa$  との関係性を調べたが、同様に  $Sa$  が増加すると測定値が大きくなった。今回用いた試料では、これらの粗さパラメータも、 $Sa$  と同じように変化したことから、試料表面の色との関係性を調べる粗さパラメータを  $Sa$  とした。

### 3.2 試料表面の測色値と表面粗さの関係

図4に、二次元色彩計で測定した試料表面（放電加工面）の輝度画像（各図の右上）と、各画素の測色値をマッピングした  $xy$  色度図を示す。測色では、 $f=8\text{mm}$  の撮像レンズを用いた。色彩計で測定した領域は、縦  $8.4\text{mm}$  × 横  $5.6\text{mm}$ （画素分解能： $51\mu\text{m}$ ）で

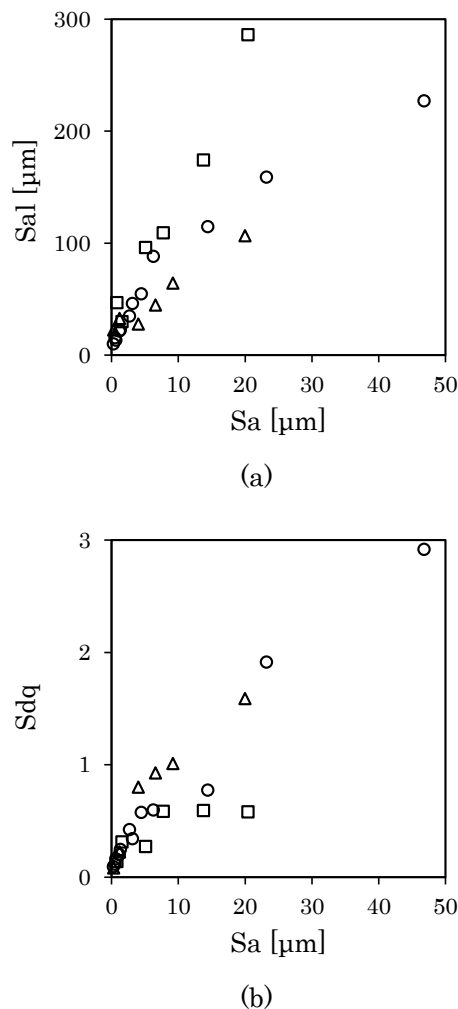


図3  $Sa$  とその他の粗さパラメータとの関係  
 $Sa$  と比較した粗さパラメータは、(a) 自己相関長さ  $Sal$ 、(b) 二乗平均平方根勾配  $Sdq$  である。○：放電加工、□：ショットブラスト、△：グリットブラスト

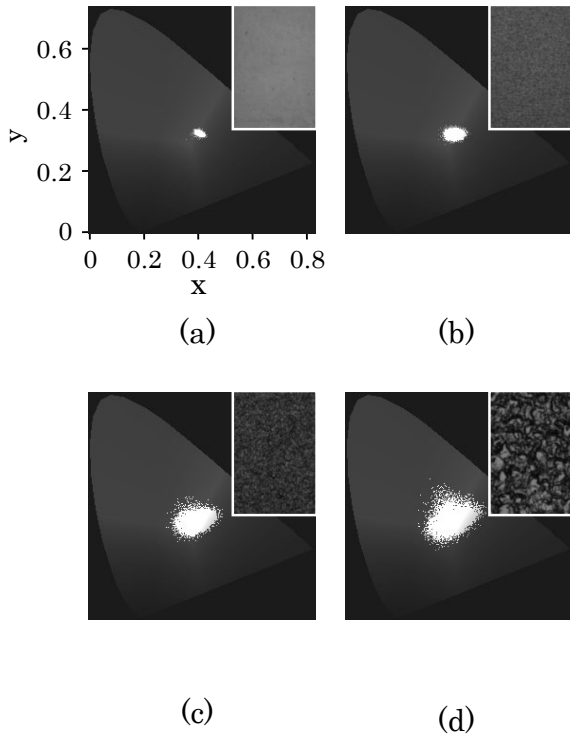


図4 表面粗さと試料表面の色との関係 (f=8mm レンズ)

(a) Sa=0.3 $\mu$ m、(b) Sa=2.7 $\mu$ m、(c) Sa=14.4 $\mu$ m、  
(d) Sa=46.8 $\mu$ m

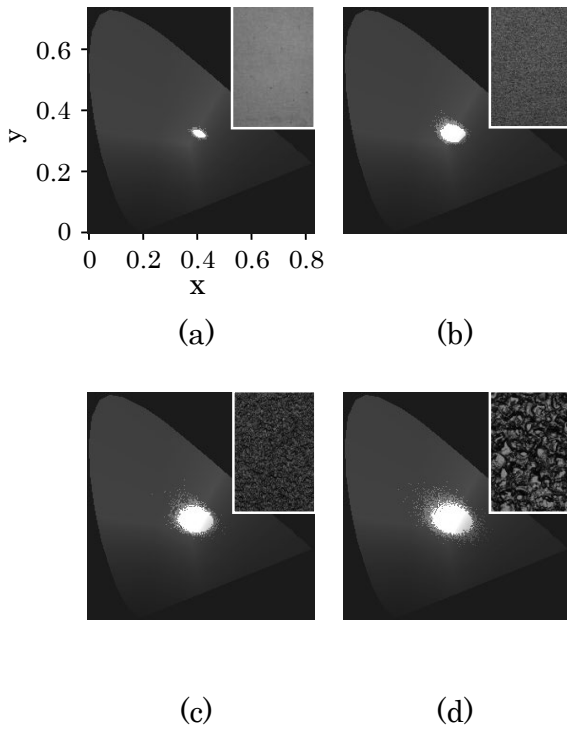
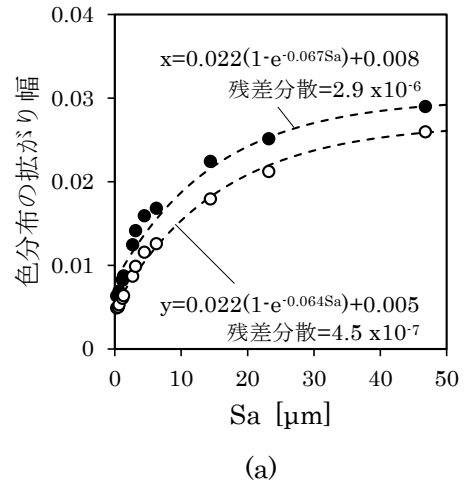


図5 表面粗さと試料表面の色との関係 (f=15mm レンズ)

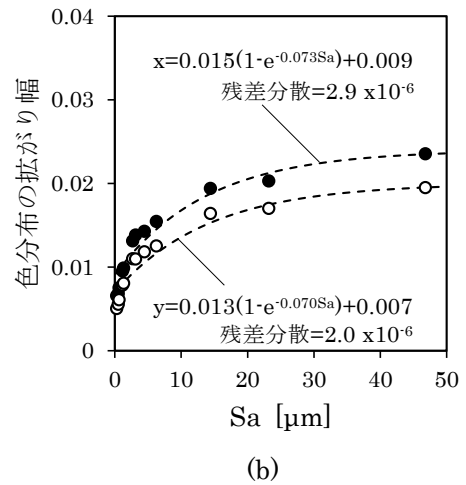
(a) Sa=0.3 $\mu$ m、(b) Sa=2.7 $\mu$ m、(c) Sa=14.4 $\mu$ m、  
(d) Sa=46.8 $\mu$ m

ある。Saが増加するとxy色度図上で色分布が広がっている。次に、撮像レンズをf=15mmに替えて同様な測定をした結果を、図5に示す。試料と色彩計の距離を変えていないため、画素分解能は28 $\mu$ mになった。図4に示したf=8mmのレンズを使った測定結果と比較すると、輝度画像の違いは視認できないが、xy色度図における色分布の形状には違いが見られる。

これらの測色結果をもとに各撮像レンズで測定したSaとxy色度図における色分布の拡がり幅(x、y方向)の関係を評価した。図6に示すように、Saの増加に対して拡がり幅は非線形に増加し、Sa=50 $\mu$ m付近まで変化が見られた。両者の関係は、指数関数で表した近似曲線とよく一致した。この関係を利用すれば、色分布の拡がり幅からSaを推定することが可能である。ま



(a)



(b)

図6 Saと色分布の拡がり幅との関係

拡がり幅の方向は、●: x方向、○: y方向である。撮像レンズは、(a) f=8mm、(b) f=15mmを用いた。近似曲線は、対数に変換して線形回帰で求めた。



た、 $f=8\text{mm}$ のレンズの方が拡がり幅の変化量が大きいことから、粗さ推定には有利である。このような違いが見られた理由は、画角や画素分解能の違いに要因があると推察する。

次に、評価領域の大きさと色分布の拡がり幅との関係を調べた。図7に、評価領域の画素数と色分布の拡がり幅との関係を示す。表1に示した範囲で評価領域の大きさを変えたときの拡がり幅を測定した。2,500px（縦2.6mm×横2.6mm）以上では、xとy方向とも画素数が変わっても拡がり幅に顕著な違いが見られず、粗さによる拡がり幅の違いを識別できる。

表面形状がブラスト加工面（ショット、グリット）の試料についても同様にSaと色分布の拡がり幅との関係を評価し、放電加工面の測定結果と比較した。色彩計

表1 評価領域の大きさ

評価領域	縦 (mm)	横 (mm)	画素数 (px)
1	0.5	0.5	100
2	1.3	1.3	625
3	2.6	1.3	1,250
4	2.6	2.6	2,500
5	5.1	2.6	5,000
6	5.1	5.1	10,000
7	8.4	5.6	18,150

での測定では、 $f=8\text{mm}$ のレンズを用いた。評価領域は、縦8.4mm×横5.6mmとした。図8 (a)、(b)に示すように、表面加工法によって曲線が異なっており、拡がり幅の変化量や傾きに違いが現れた。図8 (c)に示したSaが $20\mu\text{m}$ 付近の試料におけるxy色度図の色分布を比較すると、分布の形状が異なっている。特に、グリットブラスト加工面では、xとy方向で拡がり幅に顕著な違いが見られた。このことから、色分布の拡がりには、高さ方向の粗さパラメータであるSa以外の要因も含まれていると推察する。

#### 4 まとめ

高精度に測定した試料表面の色から表面粗さを推定する方法を確立するために、表面粗さと2次元色彩計で測定した試料表面の色との関係を評価した。

- (1) 測定画像の各画素の測色値をxy色度図にマッピングして、その分布の拡がり幅を測定することで、表面粗さをSa=0.3～47 $\mu\text{m}$ の範囲で推定できることがわかった。
- (2) 測定画像の色分布は撮像レンズによって変化し、今回の実験構成では焦点距離fは15mmよりも8mmのレンズの方が有利であった。また、評価領域は2.6mm角以上あれば同等な測定が可能であることがわかった。
- (3) 表面加工法が異なると、色分布の形が変化し表面粗さと色分布の拡がり幅との関係を表す曲線に違いが見られた。このことから、高さ方向だけでなく、自己相関長さSalといった面内方向の特徴を表す粗さパラメータも推定できる可能性がある。

本方法により、大きな検査対象に対して、動画速度で巨視的な表面粗さの違いを定量測定できるようになれば、評価すべき領域の全面に対して同一基準の検査をインラインで行うといった高レベルの品質管理での利用を期待できる。

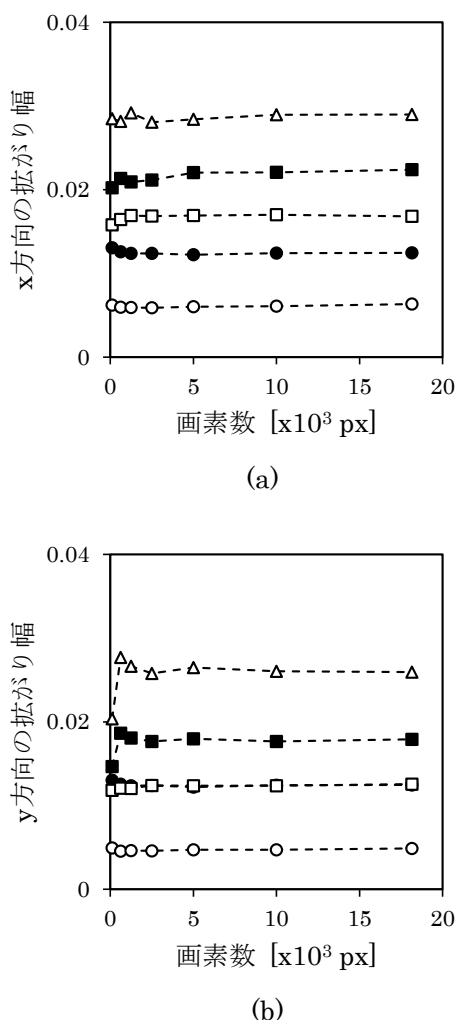


図7 評価領域の大きさと色分布の拡がり幅との関係 (a)x方向、(b)y方向の色分布拡がり幅。○：Sa=0.3 $\mu\text{m}$ 、●：Sa=2.7 $\mu\text{m}$ 、□：Sa=6.2 $\mu\text{m}$ 、■：Sa=14.4 $\mu\text{m}$ 、△：Sa=46.8 $\mu\text{m}$

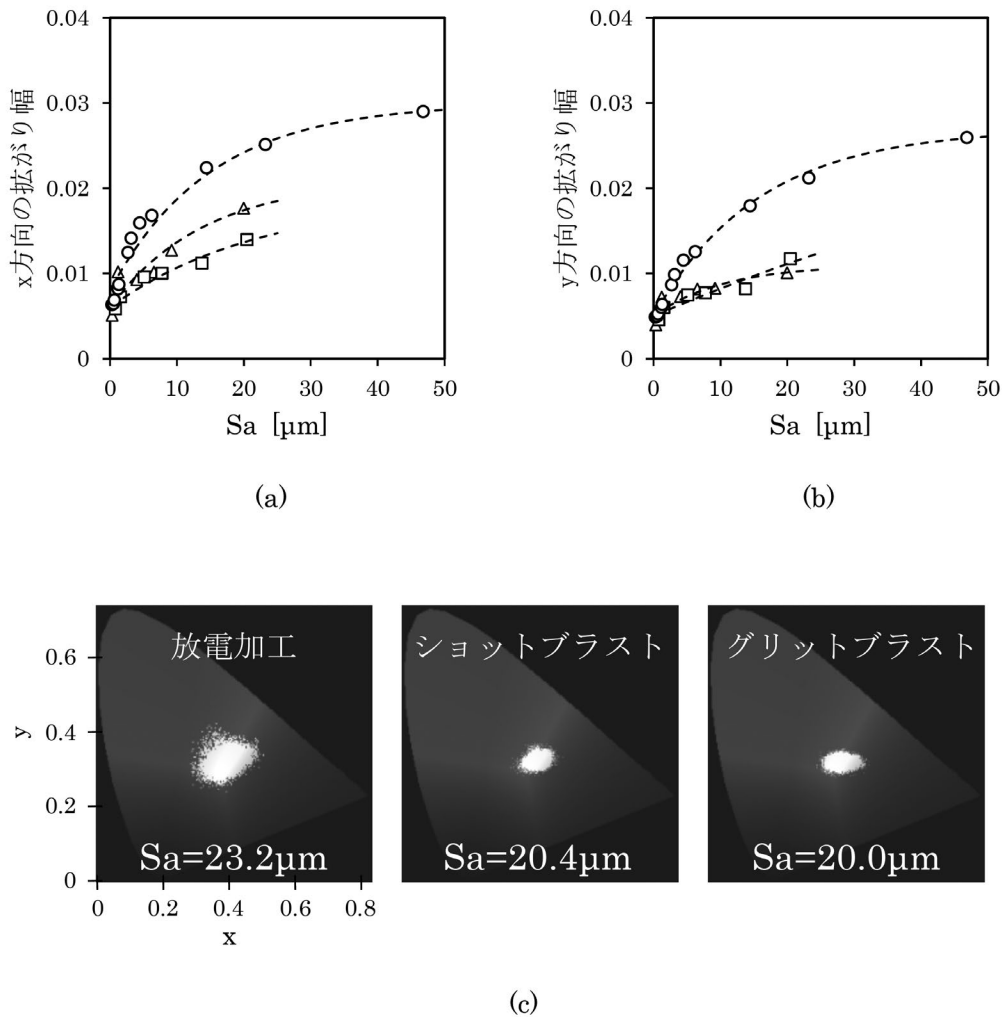


図8 表面加工法による色分布拡がりの違い  
 (a) x方向、(b) y方向の色分布拡がり幅とSaの関係  
 (○：放電加工、□：ショットブラスト、△：グリットブラスト)  
 (c) Sa=20µm 付近の試料におけるxy色度図の色分布

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP20K04221 の助成を受けて行いました。

参考文献

1) 佐藤敦：非接触による三次元表面性状の測定の現状—三次元規格の意義とものづくりへの活用—はじめての精密加工. 精密工学会誌, 81 (10), 922-925 (2015).  
 2) 藤井章弘 他：特集 裾野が広がる共焦点顕微鏡 3D 測定レーザー顕微鏡 OLS4000 による3D 表面性状計測. O plus E, 31 (6), pp.640-644 (2009).  
 3) JIS B 0601 : 2013 製品の幾何特性仕様 (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. 財団法人 日本規格協会.  
 4) JIS B 0681-2:2018 製品の幾何特性仕様 (GPS) —表面性状：三次元—第2部：用語，定義及び表面性状パラメータ. 財団法人 日本規格協会.  
 5) JIS B 0681-3:2019 製品の幾何特性仕様 (GPS) —表面性状：三次元—第3部：仕様オペレータ. 財団法人 日本規格協会.  
 6) 加藤誠 他：人の目と等価な分光感度を持つカメラとその応用. 電子情報通信学会誌, 94 (7), 579-584 (2011).  
 7) 加藤誠：二次元色彩計による色・質感測定法とその応用. 色材協会誌, 89 (4), 129-134 (2016).