

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：83807

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04221

研究課題名（和文）多波長イメージングによる高速表面粗さ測定法の開発

研究課題名（英文）Development of high-speed surface roughness measurement method by multi-wavelength imaging

研究代表者

中野 雅晴（Nakano, Masaharu）

静岡県工業技術研究所・浜松工業技術支援センター光科・上席研究員

研究者番号：90707837

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：試料表面で散乱した光を2次元色彩計で測定し、その色分布から表面粗さを推定する方法を開発した。色彩計で測定した測色値をCIE1931 xy色度図にマッピングし、その分布が表面凹凸の高さや周期によって異なることを利用して粗さを推定した。測定感度（粗さに対する色分布拡がり幅の変化量）と測定の影響を与える因子を明らかにし、これらを最適化した測定系を構築した。その結果、粗さパラメータの一種である算術平均高さSaが0.7 μm～11 μmの試料に対して測定系を最適化することで、測定領域の中心付近において、Saを0.69 μmの精度で推定できることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

製品の品質検査工程において、加工面の表面粗さを評価するために、目視や触診といった官能検査が使われてきた。官能検査では、高度な検査技術を有する人材が必要で、定量的な品質管理が難しいことが課題となっていた。本手法により、短時間で粗さを測定することが可能になれば、定量的な全数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。そのためには、測色値の分布と粗さの関係を評価し、本手法による粗さの推定精度を明らかにする必要がある。

研究成果の概要（英文）：We have developed a method for estimating the surface roughness from the color distribution of the scattered light on the sample surface measured by using a two-dimensional colorimeter. It was showed that the distribution of colorimetric value of the scattered light, which mapped to a CIE 1931 xy chromaticity diagram, was varied according to the surface roughness. We clarified the factors affected the measurement sensitivity, which is the amount of change in the colorimetric distribution depending on the surface roughness, and the measurement variation, constructed a measurement system optimized those factors. It was confirmed that a roughness parameter, the arithmetical mean height of a surface 'Sa,' was estimated with an accuracy of 0.69 μm within the range from 0.7 μm to 11 μm near the center of the measurement surface area using our optimized measurement system.

研究分野：光計測

キーワード：表面粗さ 表面性状 測色 イメージング 色彩計 非接触

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

近年、表面性状を評価する指標である表面粗さ（以下、粗さ）を、短時間に広い面積で測定したいという要望が高まっている。例えば、今後、自動車等の大型部品で利用が見込まれる樹脂と金属の直接接合では、密着性を向上させるために金属表面に形成した凹凸の評価で、粗さ測定が必要とされている。現在、粗さ測定では、測定機による形状計測や、人間による官能検査（目視や触診）が用いられている。表面の形状を非接触で三次元測定できる共焦点顕微鏡は、サブ $\mu\text{m}$ の高精度な形状測定ができる。しかし、一度に測定できる領域が狭い（NA0.95の対物レンズで $0.1\text{mm}^2$ 程度）ため、広い面積の評価では、測定を複数回繰り返す必要がある。一方、短時間に広い面積を検査できる官能検査では、専門的な技術を有する検査員が必要なうえに、定量的な品質管理が困難である。

そこで、本研究では、2次元色彩計等の分光イメージング装置を用いて、試料表面で散乱した光の色を非接触で高精度にイメージング測定することで、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す。本方法の利点は、a. CCD等のイメージセンサを用いるため、一度に広い面積を検査できる、b. 人の目と同様に明るさと色を識別するため目視検査の代替法として有望である、c. 巨視的な表面粗さの違いを定量的に測定できるため、同一基準での検査が可能なこと等にある。

本研究の問いは、次のとおりである。研究開始時の段階で、測色結果から推定できる粗さの範囲は、算術平均高さ $S_a$ で数 $\mu\text{m}$ 程度に限られている。この原因は、 $S_a$ が大きい領域では、 $S_a$ が増加しても色分布の変化が小さいことにある。色分布は、形状的な特徴（凹凸の高さ、細かさ、周期性、傾斜等）から複合的に影響を受けていると思われる。粗さの測定範囲を拡大するためには、形状的な特徴が表面画像の色分布にどう影響しているか、機械計測パラメータと色彩計測パラメータの工学的関係を明らかにする必要がある。さらに、照明・撮影光学系により、どのように色分布が変化するかを明らかにして、粗さ測定に最適な光学系を構築する必要がある。

### 2. 研究の目的

本研究では、試料表面で散乱した光の色を高精度に測定する（色彩計測）ことで、粗さを推定する（機械計測）方法を確立する。対象とする粗さ範囲は、金属と樹脂の直接接合での利用を想定して、 $S_a$ でサブ $\mu\text{m}$ から $10\mu\text{m}$ とする。さらに、2次元色彩計を用いて、これまでは実現されていなかった、広い面積の粗さを短時間で測定するシステムを構築する。

現状より粗さの測定範囲を拡大するためには、粗さに対して色分布を大きく変化させる必要がある。そこで、粗さパラメータ（凹凸の高さや目の細かさを表す指標）と色分布との関係を明らかにする。また、粗さの増加に伴い色分布が広がる原理を明らかにする。さらに、粗さを高精度に検出するために、最適な照明・撮影光学系を検討する。

本手法により、短時間で粗さ分布を測定することが可能になれば、大型の試料についても定量的な全数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。

### 3. 研究の方法

#### (1) 粗さパラメータと試料表面で散乱した光の色分布との相関評価

本手法による粗さ推定では、2次元色彩計で測定した試料表面で散乱した光の色を、色表現で用いる $xy$ 色度図（CIE1931）にマッピングし、その測色値の分布（以下、色分布）を比較した（図1）。加工法（放電加工、ブラスト）が異なる粗さ試験片を用いて、粗さと試料表面で散乱した光の色分布との関係性を評価した。粗さは共焦点顕微鏡で測定した。色分布を比較する指標は、色分布の分散が最大となる方向の拡がり幅（標準偏差）とした。さらに、画像検査用のカラーカメラを用いて同様な評価を行い、2次元色彩計と測定感度（粗さに対する色分布拡がり幅の変化量）を比較した。

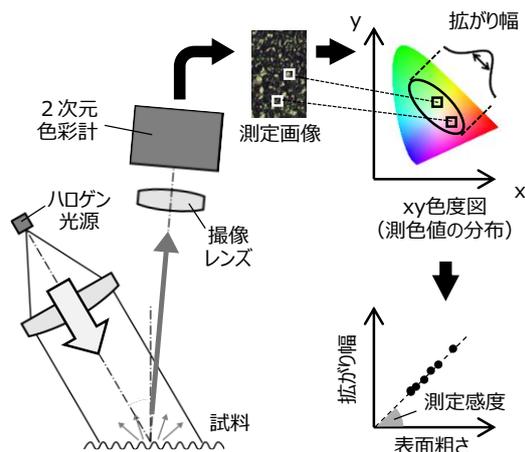


図1 測色による表面粗さ推定の概略図

#### (2) 照明・撮影光学系の最適化検討

ノイズ要因（測定環境の明るさ、撮像レンズの収差）がある場合でも、測定ばらつきが少なく、かつ、粗さに対して大きく色分布が変化するように、品質工学のパラメータ設計手法を用いて測定系を最適化した。具体的には、光源色、撮像レンズ、照明・撮像角度及び測定画像の解像度の各因子が、測定感度と測定ばらつきに与える影響について検討した。さらに、曲面試料を想定し、試料角度と測定感度との関係性を評価した。

(3) 大面積粗さ測定システムの構築と性能評価

2次元色彩計を用いた測定システムを構築して、性能評価と課題抽出を行った。はじめに、色彩計の視野中心で測定した色分布の拡がり幅と表面粗さの関係から回帰直線を求めた。次に、視野中心から離れた位置でも同様に色分布を測定し、拡がり幅について回帰直線からの偏差量を測定ばらつきとして2乗平均平方根誤差 (RMSE) で評価した。回帰直線の傾きと拡がり幅のRMSE 値の比から粗さの推定精度を見積もった。

推定精度を改善させるために、色分布の比較法に多変量解析を用いた。多変量解析は、部分的最小二乗 (PLS) 回帰を用いた。説明変数を xy 色度図における測色値の度数分布とし、目的変数を粗さとした。

4. 研究成果

(1) 粗さパラメータと試料表面で散乱した光の色分布との相関評価

放電加工面 (ニッケル) とブラスト加工面 (アルミ) の試料を用いて、共焦点顕微鏡で測定した粗さと、色彩計で測定した試料表面で散乱した光の色分布との関係の評価した。粗さパラメータの算術平均高さ Sa が増加すると、試料表面の測色値の分布は xy 色度図上で拡がった (図2)。粗さ Sa は、サブ $\mu\text{m}$ ~11 $\mu\text{m}$  の範囲で、色分布の拡がり幅と線形関係が認められた (図3)。また、面内方向の目の細かさを表す粗さパラメータの平均長さ RSm とも強い相関があることが確認された (図4)。

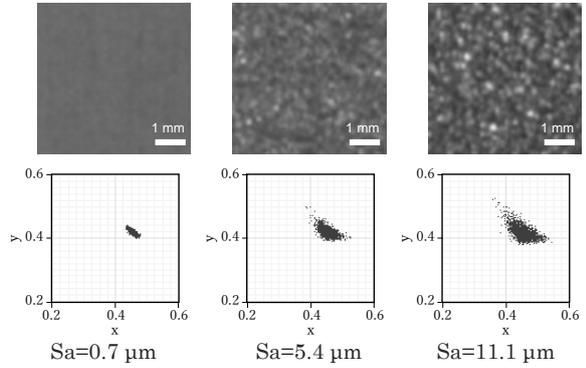


図2 各粗さにおける測色結果 (ブラスト加工)  
上: 色彩計で測定した試料表面の画像  
下: 測色値の分布 (xy 色度図)

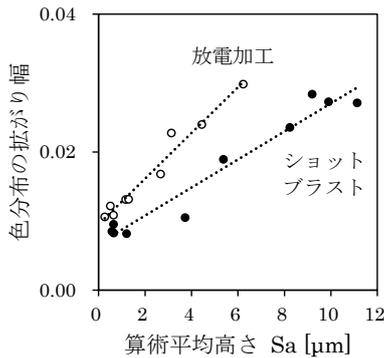


図3 粗さ Sa と色分布拡がり幅の関係

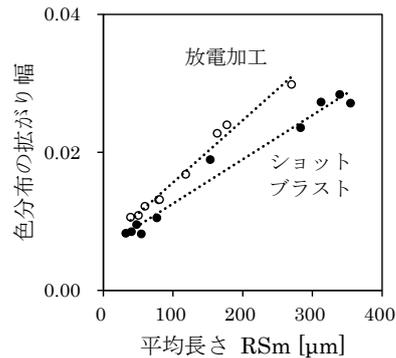


図4 粗さ RSm と色分布拡がり幅の関係

色分布が拡がる現象は、受光量の減少に伴う測色値のばらつき増加に起因することがわかった (図5)。表面粗さが大きいほど、表面形状は複雑化し測定画像の輝度分布が拡がる傾向にあり、色彩計測では、表面粗さに起因する輝度分布の違いが色分布の違いとなって現れた。輝度分布と比べて色分布の方が、情報量が多いため、表面粗さ推定において優位であると思われる。

2次元色彩計より安価な画像検査用カラーカメラを使った表面粗さ推定を試みた。一般的な画像検査用カラーカメラを用いた場合、測定感度 (回帰直線の傾き) は 0.7 倍に低下したが、同様な検査が可能であることがわかった (図6)。

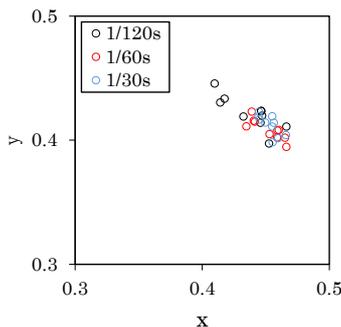


図5 各露光時間における測色値ばらつき (10回測定)

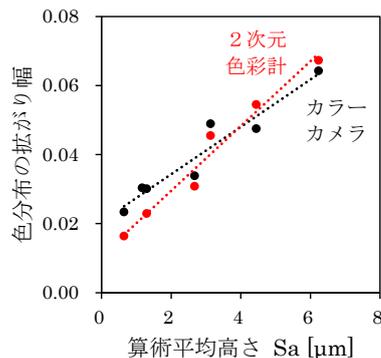


図6 カラーカメラによる粗さ推定

## (2) 粗さ測定範囲を拡大させる照明・撮影光学系の検討

光源の色と拡がり角、撮像レンズの焦点距離と絞り値、照明・撮像角度及び測定画像の解像度を最適化することにより、測定感度（粗さに対して色分布の拡がり幅が変化する割合）と測定ばらつきが改善することを確認した（図7）。これらのうち、光源の色、撮像レンズの絞り値、測定画像の解像度は、色分布を大きく変化させることが明らかになった。さらに、測定画像の解像度は、粗さの測定範囲にも影響を与え、解像度を粗くすることで粗さが大きな試料（ $Sa > 11 \mu\text{m}$ ）にも本方法を適用できる可能性があることがわかった（図8）。

曲面試料に対応するための基礎検討として、試料角度と測定感度との関係性を評価した。正反射光を測定する光学配置にしたとき、試料面の傾きが $\pm 12.5$ 度以内であれば、正反射角の測定感度に対して、その差は12%以内に収まることを確認した（図9）。この結果から、試料の傾きが微小であれば、傾き補正がなくても粗さ推定が可能であることがわかった。

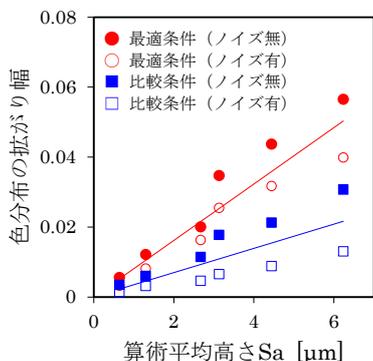


図7 最適化による測定感度とばらつきの改善  
ノイズ：測定環境の明るさ、撮像レンズの収差

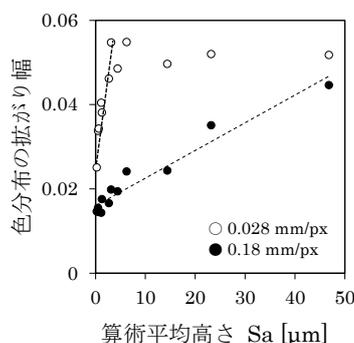
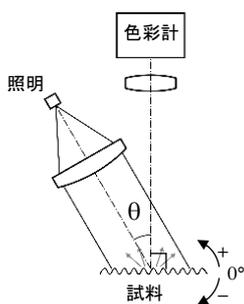
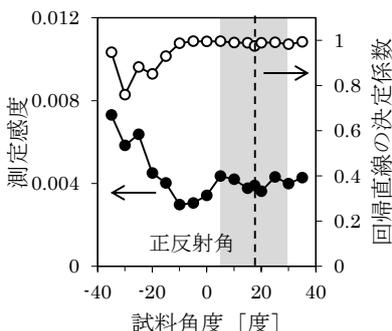


図8 測定画像の解像度による  
粗さ測定範囲の違い



(a) 光学系の概略



(b)  $\theta=35$ 度

図9 試料の傾きと測定感度

## (3) 大面積粗さ測定システムの構築と性能評価

$Sa=0.7 \mu\text{m} \sim 11 \mu\text{m}$ の粗さに対して測定系を最適化した。表に測定条件を示す。このとき、一度に測定できる範囲（色彩計の視野）は $205 \text{mm} \times 154 \text{mm}$ であり、測定時間は約1秒であった。図10に、この測定系における表面粗さと色分布の拡がり幅との関係を示す。回帰直線の傾きは $2.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^{-1}$ 、視野中心から $\pm 30 \text{mm}$ の範囲内における拡がり幅のばらつきは、RMSEで $1.8 \times 10^{-3}$ であった。このことから、 $Sa$ の推定精度（回帰直線の傾きに対する拡がり幅のばらつき量RMSE）は、 $Sa=0.7 \mu\text{m} \sim 11 \mu\text{m}$ の範囲で $\pm 0.91 \mu\text{m}$ と考えられる。一方、視野中心から30mm以上離れた周辺視野で測定した場合、測定感度（回帰直線の傾き）が減少する課題があることがわかった（図11）。これは、撮像レンズの収差に起因し、周辺視野では十分なレンズ性能が得られなかったためだと推察される。

粗さの推定精度を改善するために、PLS回帰法を用いて、色分布から粗さ $Sa$ を推定した（図12）。視野中心から左に10mm、40mm、右に20mm離れた位置（図10参照）で測定した色分布を学習データとした。また、視野中心から左に30mm離れた位置で測定した色分布をテストデータとした。テストデータからPLS回帰法を使って予測された粗さ $Sa$ と、共焦点顕微鏡で測定した実測値の偏差はRMSEで $0.69 \mu\text{m}$ であり、色分布の拡がり幅を指標とする場合と比べて推定精度が1.3倍改善した。

これらの結果から、2次元色彩計で測定した試料表面で散乱した光の色分布から粗さを推定する方法が、顕微鏡測定では困難な広い面積の粗さを短い時間で定量的に評価する方法として有望であると考えられる。また、本手法を発展させて曲面試料にも対応できるようになれば、製

品加工面の品質検査を自動化することができ、生産性を向上できる。

表 測定条件	
照明光源	ハロゲン光源
照明角度	30度
撮像角度	5度
画素分解能 [mm/px]	0.1
評価面積 [px]	50×50
撮像レンズ	
・ 焦点距離 [mm]	15
・ 絞り値	2.2
積算回数 [回]	16

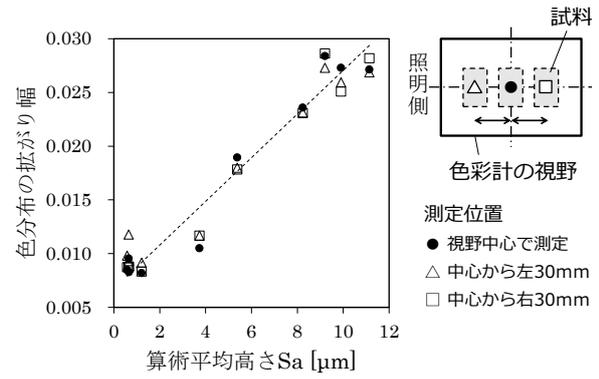


図 10 最適化したシステムでの測定感度とばらつき

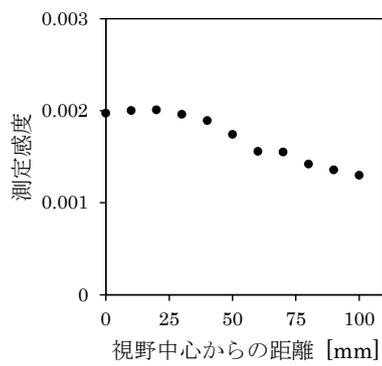


図 11 測定感度と測定位置の関係

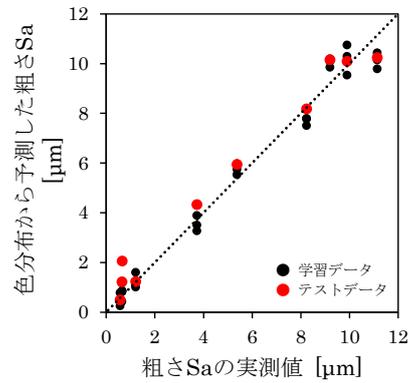


図 12 PLS 回帰法による粗さ推定

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 中野雅晴、太田幸宏、岡田楓、加藤誠	4. 巻 第14号
2. 論文標題 カラーイメージングによる表面粗さ推定	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 静岡県工業技術研究所研究報告	6. 最初と最後の頁 97-102
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 中野雅晴	4. 巻 第15号
2. 論文標題 カラーイメージングによる表面粗さ推定（第2報） - 品質工学のパラメータ設計手法による測定系の最適化 -	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 静岡県工業技術研究所研究報告	6. 最初と最後の頁 97-101
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 中野雅晴、太田幸宏、岡田楓、加藤誠
2. 発表標題 反射像の色の違いを利用した表面粗さ測定法の開発
3. 学会等名 2021年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中野雅晴、太田幸宏
2. 発表標題 カラーイメージングによる表面粗さ推定に関する研究
3. 学会等名 2021年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中野雅晴、岡田楓、加藤誠
2. 発表標題 カラーイメージによる表面粗さ推定に関する研究（第2報） - 撮像レンズ，画素分解能，及び試料角度が測定感度を与える影響 -
3. 学会等名 2022年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中野雅晴、岡田楓、加藤誠
2. 発表標題 カラーイメージによる表面粗さ推定に関する研究（第3報） - 測色値分布が広がる要因の検討 -
3. 学会等名 2022年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>静岡県工業技術研究所 研究成果事例集：カラーイメージによる表面粗さ推定<a href="https://www.iri.pref.shizuoka.jp/wp/wp-content/uploads/2022/04/jirei_2021_25.pdf">https://www.iri.pref.shizuoka.jp/wp/wp-content/uploads/2022/04/jirei_2021_25.pdf</a></p> <p>静岡県工業技術情報（2022）：カラーイメージによる表面粗さ推定<a href="https://www.iri.pref.shizuoka.jp/wp/wp-content/uploads/2022/09/R4_jyuhou9.pdf">https://www.iri.pref.shizuoka.jp/wp/wp-content/uploads/2022/09/R4_jyuhou9.pdf</a></p> <p>金属表面の粗さ 光で計測．中日新聞（静岡版）．2023年3月7日，朝刊，p.14．</p>
---

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------