

## 微小欠陥を瞬時に鮮明な画像にできる撮像技術

Imaging Technology to Immediately Obtain Clear Images of Microdefects

大野 博司 OHNO Hiroshi 大野 啓文 OHNO Akifumi 岡野 英明 OKANO Hideaki

製造工程の外観検査では、非破壊で高速な光学的撮像技術による自動化が進められている。しかし、微小欠陥を鮮明に撮像できない場合が多く、いまだに熟練者による目視検査に頼らざるを得ないことが多かった。

そこで、東芝グループは、微小欠陥の反射光の方向分布（BRDF：Bidirectional Reflectance Distribution Function）が正常面のものとは異なることに着目し、BRDFの違いを色情報として取得することで、深さ数 $\mu\text{m}$ の微小欠陥を周囲とは異なる色で瞬時に鮮明な画像にできる、ワンショットBRDF技術を開発した。試作機による評価実験の結果から、様々なサンプルの微小欠陥が鮮明化できること、更に、微小凸形状の光沢面の傾斜角分布も高精度に計測できることを確認した。

In inspection processes at manufacturing sites, demand for the introduction of automated processes using nondestructive, high-speed imaging technologies has been increasing in recent years. However, as it is difficult to obtain clear images of microdefects using conventional optical imaging technologies, the inspection of microdefects still depends on visual inspection performed by skilled workers.

To rectify this situation, the Toshiba Group has developed an optical imaging technology focusing on the phenomenon that the bidirectional reflectance distribution function (BRDF) of light reflected from a surface with microdefects is different from that of light reflected from the normal surface. This novel approach, called one-shot BRDF technology, makes it possible to immediately obtain clear images of microdefects having a depth of as little as a few microns. The microdefects are visualized in colors that differ from those of the surroundings by converting the BRDF differences into color information. Experiments on a prototype one-shot BRDF optical system have verified that this technology has the potential to obtain clear images of microdefects on the surface of various samples, as well as to measure the inclination angle distributions of microconvex shape on the metallic surface with a high degree of accuracy.

### 1. まえがき

近年、製造工程における製品表面の外観検査では、非接触で高速な光学的撮像装置で取得した画像を用い、欠陥（小さな傷や、凹凸、異物の付着など）をインラインで検査する方法が広く行われている。また、IoT（Internet of Things）化によって、取得した画像を即座に計算機に伝送できるようにし、AI技術による画像解析を用いて検査を自動化する試みが世界的に行われている。しかし、例えば、数 $\mu\text{m}$ サイズの微小欠陥は、明暗のコントラストが得にくかったり、撮像画像が不鮮明になったりするために、AIによる判定ではそのような微小欠陥を見落とすことがある。また、正常部を微小欠陥と認識してしまう過検出が起こることもある。そのため、微小欠陥の検査は、いまだに熟練者による目視検査や触感検査に頼らざるを得ないことが多い。

光が微小欠陥に入射すると、微小欠陥の種類に応じて様々な方向に反射される。反射光の方向分布はBRDF（Bidirectional Reflectance Distribution Function）と呼ばれる分布関数で表すことができる<sup>(1)</sup>。BRDFは、物体表面に

おける数 $\mu\text{m}$ サイズの微小な形状の違いによって、大きく変化する。そのため、BRDFを測定すれば、表面状態を精度良く検査できると考えられる。実際、正常な面と微小欠陥に対するBRDFは、多くの場合、両者に有意な差が生じる。しかし、従来のBRDF測定は、光の方向ごとに受光器を移動させる方法が一般的であり、細かく方向を変えて測定するには時間が掛かるという問題があった。

そこで、光学系を工夫し、**図1**に示すように、BRDFで記述される光の方向分布を色情報としてワンショットで取得する撮像技術を開発した<sup>(2)-(4)</sup>。この技術は、伝搬方向が平行にそろった光を物体に照射し、撮像光学系に組み込まれた多波長開口（異なる波長の光を透過する複数の領域を持つフィルター）で反射光の方向に応じて色分けする。これにより、撮像画像の全画素のそれぞれで、光の方向分布を色情報として取得できる。つまり、ワンショットでBRDFに関する情報を撮像できるようになるため、この技術をここではワンショットBRDFと呼ぶ。この技術により、例えば深さ数 $\mu\text{m}$ 程度の傷を周囲と異なる色で鮮明化できるようになった。

ここでは、このワンショットBRDFの光学系の構造や動作

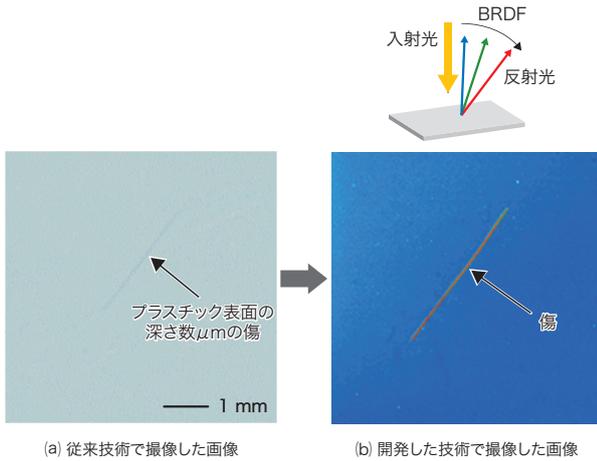


図1. ワンショットBRDF技術による微小欠陥の鮮明化

従来の撮像では困難であった、深さ数 $\mu\text{m}$ 程度の微小な傷が鮮明化できる。  
Clearer image of microdefect obtained by one-shot BRDF technology

とともに、試作機による評価実験の結果について述べる。

## 2. ワンショットBRDFの基本構造と動作

図2に、ワンショットBRDFの光学系の構成を示す。光学系は、特徴的な独自構造の撮像光学系と照明光学系で全体が構成される。

撮像光学系は、結像レンズとイメージセンサーで構成される。この構成自体は、通常の撮像光学系と同じである。結像レンズによって、被検物の表面の点(物点)からの光をイメージセンサー上の点(像点)に集めることができる。このように、物点と像点は結像レンズを介し、共役の関係として対応付けられる。通常の撮像では、物点からの光は結像によって像点の一点に集められる。そのため、BRDF情報を撮像画像から得ることができなかった。そこで、開発した光学系には、結像レンズの焦点面に多波長開口を配置することにした。このようにすると、物点から光軸に平行に伝搬する光は多波長開口の中心(図2で青い領域)を通過するようになる。一方、物点から光軸に対して斜め方向に伝搬する光は、多波長開口の中心以外の領域(図2で緑や赤の領域)を通過する。ここで、光軸に対する伝搬方向の角度が大きい光ほど、多波長開口の外側の領域を通過することになる。このため、多波長開口の各領域を通過する際、それぞれの領域に応じて互いに異なる波長を持った光になる。つまり、光の方向ごとに異なる波長(色)の光になる。このような光の方向と色の関係は、物点の位置に依存せず、常に同じ関係となる。したがって、任意の像点において、光の方向が色で識別できることになる。

照明光学系は、白色のLED(発光ダイオード)を光源と

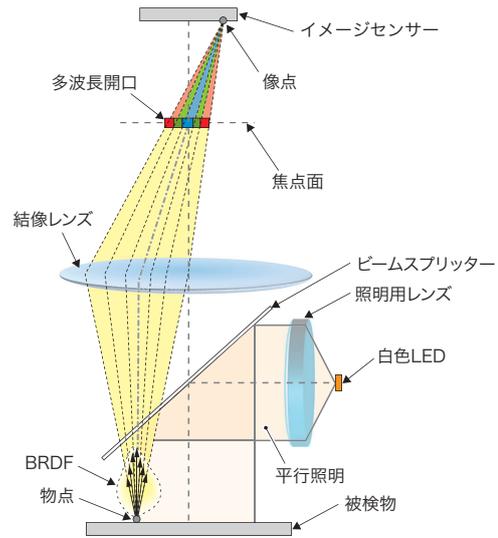


図2. ワンショットBRDF光学系の構成

独自の撮像光学系と照明光学系で、構成されている。

Configuration of one-shot BRDF optical system

し、光源からの光を照明用のレンズで平行照明に変換する。更に、ビームスプリッターを介し、結像レンズの光軸に沿って被検物に平行照明を照射する。これは同軸落射と呼ばれる。照明用レンズは、平行度の高い光線を効率良く出射し、小型であることが望ましいが、解析幾何光学を光学設計に取り入れることで見通し良く設計できる<sup>(5)-(9)</sup>。平行照明を被検物に照射することにより、各物点での光の入射方向をそろえることができる。つまり、BRDFの基準を全撮像面にわたってそろえることができる。これにより、表面状態の僅かな違いをBRDFの違いとして識別できる。また、同軸落射とすることで、正反射方向の近傍に散乱する光を利用できるため、高い検出感度を実現できる。

これらの工夫により、開発した光学系は、光の方向を色情報として捉える撮像系に主な特徴があるが、平行照明を同軸落射で照射する照明系と組み合わせることで、初めて機能するといえる。開発した技術は、撮像画像の全画素のそれぞれにおいて、BRDFを色情報として取得できるため、微小欠陥を周囲と異なる色で鮮明化できるようになった。

## 3. 撮像例

ワンショットBRDFの試作機の構造を、図3に示す。平行照明は、照射野直径が35 mm、発散角が全角で約 $0.12^\circ$ となるように設計した。結像レンズは、焦点距離を105 mmとした。イメージセンサーは、画素数を200万画素とした。

以下では、サンプル3種類を試作機で撮像した例を示す。

図4に、プラスチック表面上の浅い傷を撮像した画像を

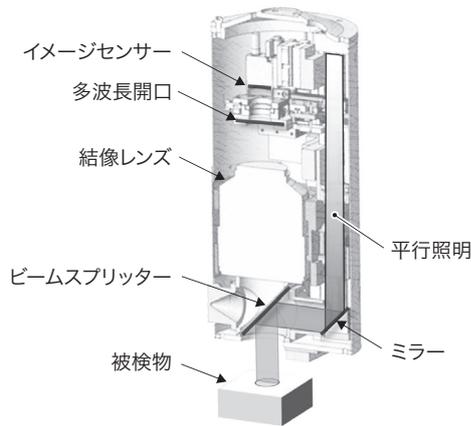


図3. ワンショットBRDF試作機の構造

平行照明は、照射野直径が35 mm、発散角が全角で約0.12°となるように設計した。

Structure of prototype of one-shot BRDF optical system

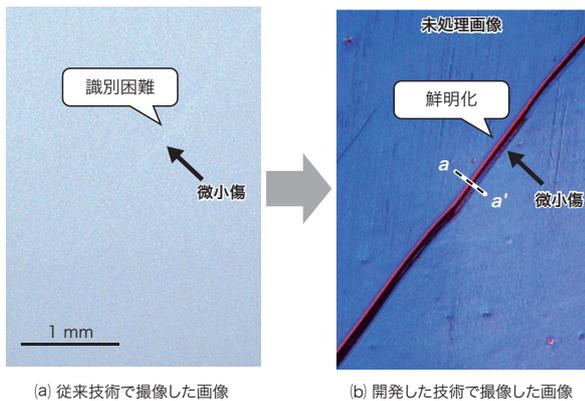


図4. プラスチック表面上の浅い傷の撮像画像

開発した技術では、傷が鮮明化されていることが分かる。

Images of shallow scratch on plastic surface obtained by conventional and one-shot BRDF technologies

示す。図4(a)に従来技術で撮像した画像を示し、図4(b)に開発した技術で撮像した画像を示す。また、図5(a)に、図4(b)の撮像で用いた多波長開口を示す。多波長開口は、中心を青、外側を赤の2色とし、色による違いが識別しやすいものとした。傷の深さは、図5(b)に示すように、スキャニング方式の白色光学干渉計を用いて数秒間で測定したところ、 $2.8\ \mu\text{m}$ であった。

図6は、塗装面上の微小欠陥を撮像した画像である。図6(a)に従来技術で撮像した画像を示し、図6(b)に開発した技術で撮像した画像を示す。これらの図から、従来画像では識別困難であった微小欠陥が鮮明化されることが分かる。ここで用いた多波長開口は、中心が青、その外側が緑、更に外側が赤のものを用いた。

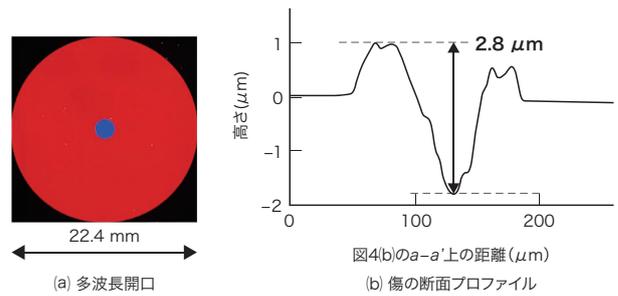


図5. 多波長開口と浅い傷の断面プロファイル

多波長開口は、図4(b)の撮像に用いたものであり、傷の深さは $2.8\ \mu\text{m}$ であった。

Multiwavelength aperture and cross-sectional profile of shallow scratch

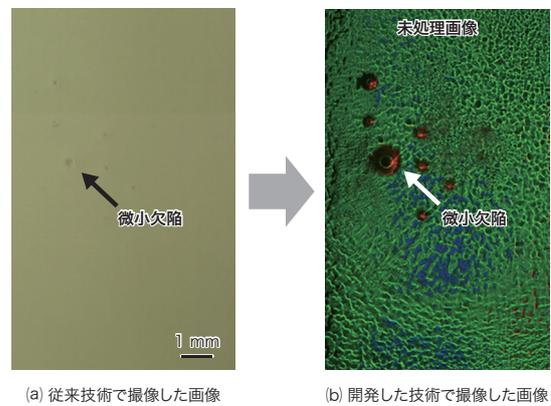


図6. 塗装面上の微小欠陥画像

開発した技術では、塗装面上の微小欠陥が鮮明に分かる。

Images of microdefects on painted surface obtained by conventional and one-shot BRDF technologies

図7に、アルミニウム (Al) 板の表面にある高さ $37\ \mu\text{m}$ の微小凸形状を撮像した画像を示す。微小凸形状は、Al板を切削加工して作製した。また、表面は研磨によって鏡面処理を施した。図7(a)に従来技術で撮像した画像を示し、図7(b)に開発した技術で撮像した画像を示す。対象物の表面が鏡面であるため、光の反射はほぼ正反射となる。このとき、表面の傾斜角と色相の関係はほぼ一意的に定まる。実際、図7の右のカラーバーに示すように、傾斜角を色相で表すことができる。つまり、開発した技術を用いて、微小凸形状の傾斜角分布が測定できる。図8(a)に、図7(b)の撮像で用いた多波長開口を示す。多波長開口は、中心が赤、外側に向かって青、緑、黄の順に色相が徐々に変化するものを用いた。色相の階調は24段階とした。図8(b)に、スキャニング方式の白色干渉計を用い、時間を掛けて高精度に微小凸形状の3次元プロファイルを計測した結果を示す。これから算出される傾斜角と開発した技術を比較したところ、

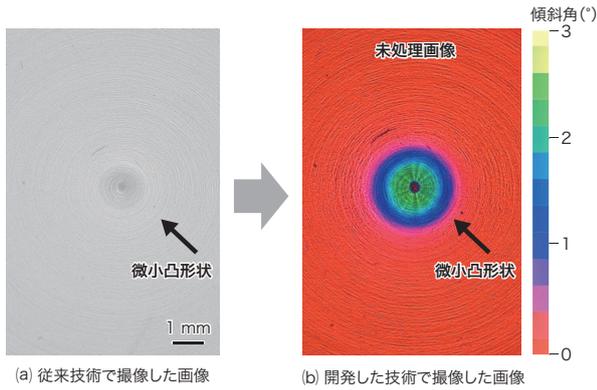


図7. Al板上の微小凸形状画像

開発した技術では、表面の傾斜角を色相で表せるので、傾斜角分布が測定できる。

Images of microconvex shape on aluminum plate obtained by conventional and one-shot BRDF technologies

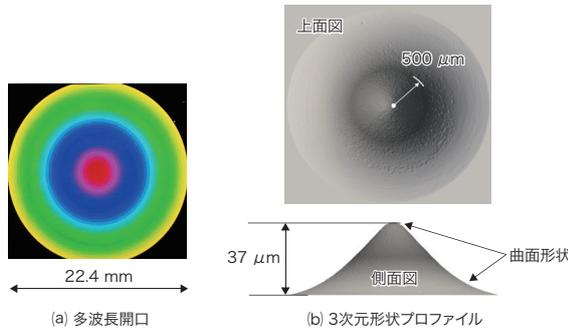


図8. 多波長開口と微小凸形状の3次元形状プロファイル

多波長開口は、図7(b)の撮像に用いたものであり、開発した技術と3次元形状プロファイルによる傾斜角は最大誤差約10%でよく一致した。

Multiwavelength aperture and three-dimensional surface profile of microconvex shape

両者は最大誤差約10%でよく一致した。これらの結果から、開発した技術は、微小凸形状に対して高精度な傾斜角分布の測定が可能と考えられる。

#### 4. あとがき

ワンショットBRDF技術により、従来では撮像困難であった微小欠陥を色情報として鮮明化できるようになった。開発した技術を用いた撮像により、従来では撮像が困難であった、深さ数 $\mu\text{m}$ の微小傷や塗装面の微小欠陥が鮮明化できることを示した。また、微小凸形状の傾斜角分布も、より高精度に計測できることを示した。開発した技術は、更に、表面粗さや熔融液状金属の接触角などの測定にも適用可能と考えられる。

今後、様々な製造工程におけるインライン外観検査に適

用することで、検査の高精度化・高速化に貢献するとともに、検査対象の拡大も加速していく。

#### 文献

- (1) Nicodemus, F. E. Directional Reflectance and Emissivity of an Opaque Surface. *Applied Optics*. 1965, **4**, 7, p.767-775.
- (2) Ohno, H. One-shot color mapping imaging system of light direction extracted from a surface BRDF. *OSA continuum*. 2020, **3**, 12, p.3343-3350.
- (3) Ohno, H. One-shot three-dimensional measurement method with the color mapping of light direction. *OSA continuum*. 2021, **4**, 3, p.840-848.
- (4) Ohno, H.; Kano, H. Depth reconstruction with coaxial multi-wavelength aperture telecentric optical system. *Optics Express*. 2018, **26**, 20, p.25880-25891.
- (5) Ohno, H. Symplectic ray tracing based on Hamiltonian optics in gradient-index media. *Journal of the Optical Society of America A*. 2020, **37**, 3, p.411-416.
- (6) Ohno, H. et al. Design of secondary light source for reflectors with axisymmetric light guide. *Applied Optics*. 2019, **58**, 14, p.3848-3855.
- (7) Ohno, H.; Usui, T. Gradient-index dark hole based on conformal mapping with etendue conservation. *Optics Express*. 2019, **27**, 13, p.18493-18507.
- (8) Ohno, H. Design of a coaxial light guide producing a wide-angle light distribution. *Applied Optics*. 2017, **56**, 14, p.3977-3983.
- (9) Ohno, H.; Kato, M. Total internal reflection shell for light-emitting diode bulbs. *Applied Optics*. 2019, **58**, 1, p.87-93.



大野 博司 OHNO Hiroshi, Ph.D

研究開発センター 知能化システム研究所  
機械・システムラボラトリー  
博士(理学) 日本光学会・応用物理学会・OSA・SPIE 会員  
Mechanical Systems Lab.



大野 啓文 OHNO Akifumi

東芝情報システム(株)  
エンベデッドシステム事業部 エンベデッドシステム営業技術部  
Toshiba Information Systems (Japan) Corp.



岡野 英明 OKANO Hideaki

研究開発センター 知能化システム研究所  
機械・システムラボラトリー  
日本光学会・応用物理学会会員  
Mechanical Systems Lab.