

カラー画像解析に基づく薄膜干渉色を有するチタンの マイクロファセット法線分布モデル*

藤本 翔** 飛谷 謙介***† 亀井 光仁** 長田 典子**
赤木 俊夫†† 高橋 一浩†† 山村 咲弥††

Normal Distribution Model of Microfacets Based on Color Image Analysis for Titanium Surface with Thin Film Interference Color

Sho FUJIMOTO, Kensuke TOBITANI, Mitsuhiro KAMEI, Noriko NAGATA,
Toshio AKAGI, Kazuhiro TAKAHASHI and Sakuya YAMAMURA

In the computer graphics field, the microfacets theory has been a hypothesis in many studies as an effective model for expressing light's reflection from a rough surface, but no studies actually observe microfacets as images. To establish a thin-film interference color simulation of a titanium oxide film based on a physical model in this study, we attempted observation via an optical microscope to obtain a microfacet normal distribution model in an oxide-layered coating on titanium. Then, we successfully observed properties or optical phenomena corresponding to the microfacet concept (theory). We verified the acquired microfacet images and proposed a method to calculate the microfacets' normal distribution via color image analysis. Thus, the calculated distribution was considered a typical Gaussian distribution with an added distortion component.

Key words: thin film interference, microfacet, normal distribution model, titanium with oxide layered coating, design, texture

1. 緒 言

近年、ものづくりにおいて意匠性の高い素材の需要が高まっている。酸化皮膜を有するチタンは、チタン素材に陽極酸化処理を施すことで表面に酸化チタン薄膜を生成したもので、薄膜干渉による多彩な発色が豊かな意匠性をもたらす。さらに軽量かつ、強度、耐食性に優れた物理特性を持つため、建材や装飾品等(図1)多方面へ応用されている¹⁾²⁾。酸化皮膜を有するチタンの色をシミュレーションで正確に表現することで、所望のデザインを容易に可視化することが可能となり、デザインプロセス支援につながる。素材の色を正確に表現するには、光学現象のシミュレーションにおいて素材固有の物理現象に着目してモデル化する physically based modeling/rendering のアプローチが有効³⁾⁴⁾であり、薄膜干渉に着目したモデル化⁵⁾⁶⁾や、表面下散乱や異方性反射の組み合わせによる複雑な物理現象のシミュレーション⁷⁾などの研究例がある。

これまでに著者らは、チタン酸化皮膜に特徴的な拡散反射方向に生じる干渉色の仕組みについて、粗面のマクロな粗さ構造をマイクロファセットと呼ばれる微小面の集合体と仮定し、微小面における散乱光が引き起こす薄膜干渉をハーフベクトルで説明する薄膜干渉モデル(以下、ハーフベクトルベースの薄膜干渉モデルと記述)を提案し、シミュレーション手法を構築し



Fig. 1 View of a color-decorated building using an oxide-layered coating on titanium (Hotel Marquesde Riscal)

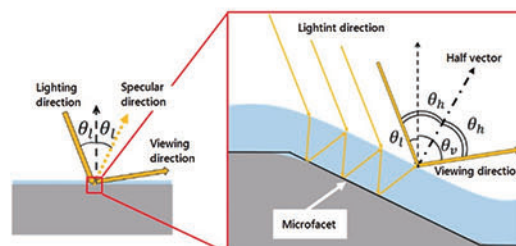


Fig. 2 Model of thin-layer interference on a half vector

た⁸⁾。ハーフベクトルベースの薄膜干渉モデルは、拡散反射方向に生じる干渉色を、光源方向と視点方向のハーフベクトルを法線にもつ微小面のみ集合体に着目して計算する近似モデルである(図2)。先行研究⁸⁾ではこのモデルを用いて、圧延加工表面に陽極酸化処理を施した表面構造が比較的均一とされる酸化皮膜を有するチタン素材(SD材)について干渉色のシミュレーションを行い、平均色差(ΔE) 5.0, 許容色差分類⁹⁾における4級と実用上十分な精度であることを確認した。し

* 原稿受付 令和2年5月27日

掲載決定 令和2年6月30日

** 関西学院大学 理工学部/感性価値創造インスティテュート
(兵庫県三田市学園2-1)

*** 正会員 関西学院大学 理工学部/感性価値創造インスティテュート

† 長崎県立大学 情報システム学部
(長崎県西彼杵郡長与町まなび野1-1-1)

†† 日本製鉄株式会社(東京都千代田区丸の内2-6-1)

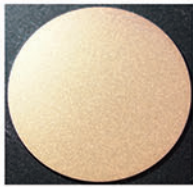


Fig. 3 View of a titanium plate with an oxide-layered coating

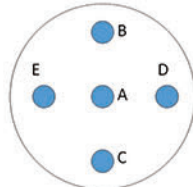


Fig. 5 Target areas for optical microscope observation

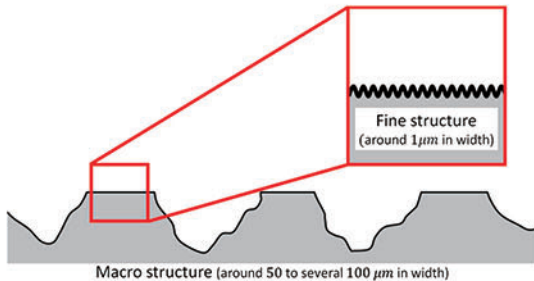


Fig. 4 Surface-shape model of an ND sample

かしながら近似モデルでは、簡単化のため微小面の法線方向の出現確率（微小面法線分布）を一定とし、また鏡面反射方向のハイライト（光源色）強度はシミュレーションの対象とせず、sBRDF (spectral Bidirectional Reflectance Distribution Function) 測定装置による実測値から補正して求めていた。そのため、より複雑なチタン素材の表面構造を表現できるモデルの構築が課題となっていた。

そこで酸化皮膜を有するチタンにおける微小面法線分布モデルを求めることを目的として、光学顕微鏡による観察を試みたところ、マイクロファセットの集合の概念（理論）に相当する性状、あるいは光学現象（以下、マイクロファセット構造と記述）を観察することに成功した。マイクロファセット構造の理論は、CG において粗面からの光の反射を表現する効果的なモデルとしてこれまでに数多くの研究で仮説として用いられてきた^{5)~7)10)~14)}。しかし、実際にマイクロファセット構造を画像として可視化した研究例はない。本論文では、マイクロファセット構造を可視化した画像からカラー画像解析により微小面法線分布を算出する手法を提案する。最終的には微小面法線分布関数 (NDF: normal distribution function) をモデル化し物理モデルに基づいたチタン酸化皮膜の薄膜干渉色シミュレーション方法を確立することを目的とする。

2. 対象試料

本研究の対象試料を図 3 に示す。対象試料は圧延加工後に、ロールダル仕上げによって大きな凹凸の転写を施し、最後に 82.5V で陽極酸化処理を行った酸化皮膜を有するチタン素材（以下、ND 材と記述）である。ND 材の表面はロールダル仕上げによるマクロな構造が存在する。さらに、ロールダル仕上げでは素材がもともと持っていたと数 μm オーダーの微細構造が凸部に残ることも確認されている¹⁵⁾¹⁶⁾。以上より、素材表面形状モデルは図 4 で示すようなマクロな構造と微細構造を併せ持つ複雑な粗面である。

3. 光学顕微鏡観察によるマイクロファセット構造の可視化

光学顕微鏡を用いて ND 材の観察を試みた。また比較として、陽極酸化処理を施していない ND 材（以下、ベア材とする）

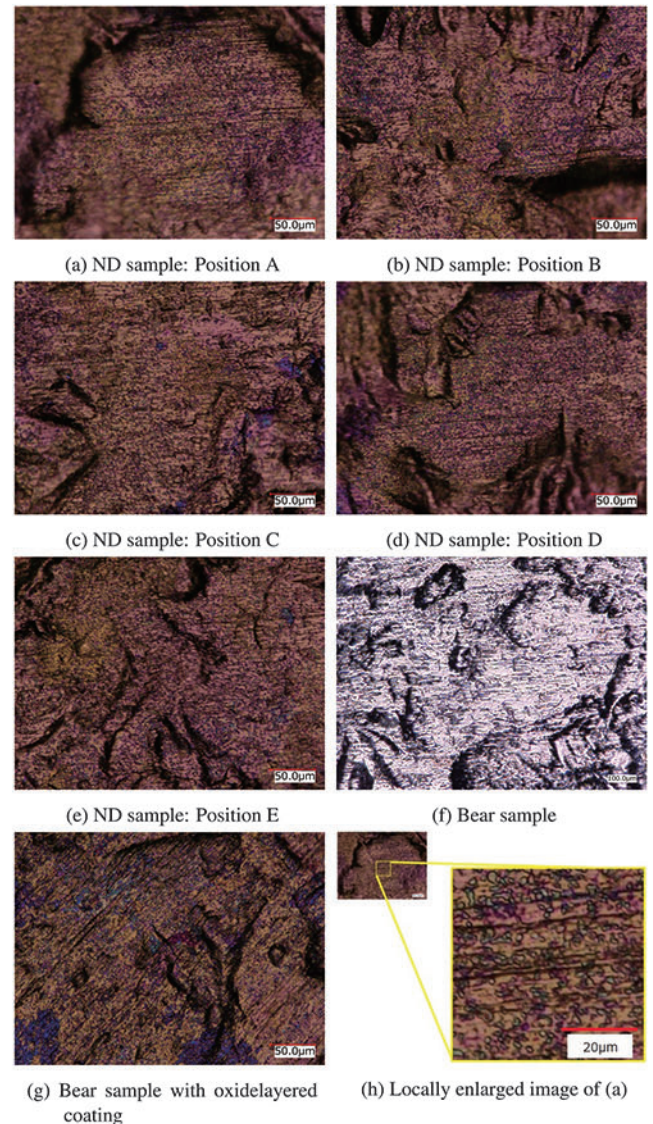


Fig. 6 Microscope images of an ND sample (a)~(e), a bear sample (f) and a bear sample with an oxide-layered coating (g)

と、観察したベア材に陽極酸化処理を施し ND 材へと加工したサンプルも考察のために観察した。

3.1 観察条件

光学顕微鏡には（株）KEYENCE 社製のデジタルマイクロスコープ VHX-900F を用いた。観察条件は、入射光は標準白色光、光源方向と視点方向はともに 0 度、レンズはアポクロマートレンズを用い、倍率は 1000 倍とした。光学顕微鏡で観察した ND 材の観察領域 5 点のそれぞれの位置を図 5 に示す。各観察領域の大きさは ND 材表面上で $347.8\mu\text{m} \times 260.9\mu\text{m}$ である。

3.2 観察結果と考察

上記観察条件で、ND 材を観察した結果、図 6 (a)~(e) に示す画像が得られた。また、図 6 (a) を局所的に拡大した画像を図 6 (h) に示す。図 6 (a)~(e), (h) において様々な色が粒状に散らばっているのが確認できる。次に、同一光学条件でベア材を観察した結果を図 6 (f) に示す。ND 材とは異なり粒上の発色は確認できない。さらに、同じベア材に陽極酸化処理を施して観察した結果を図 6 (g) に示す。ベア材に酸化皮膜を生成す

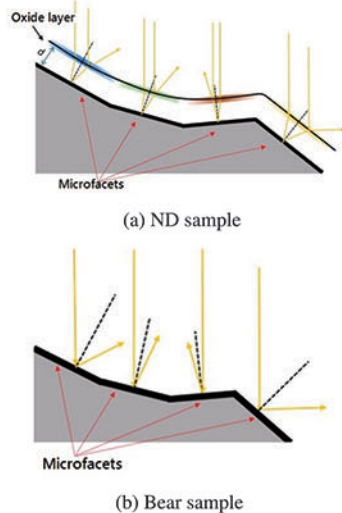


Fig. 7 Model of thin-layer interference based on the microsurface normals

ることで図 6 (a)～(e) の ND 材と同様に粒上の発色が確認できる。この結果、粒状の発色は酸化皮膜に起因することが確認された。

このように酸化皮膜を有するサンプルでのみ粒状の発色が観察できる現象は図 7 の微小面法線ベースの薄膜干渉モデルで説明できる。図 7 (a) は素材表面に陽極酸化によって薄膜が生成したモデルであり、微小面の法線方向の違いにより薄膜干渉の位相差が異なり、各微小面上の酸化皮膜表面に異なる色が発生する。なお、酸化皮膜のない素材表面では、図 7 (b) で示すように素材表面に入射した光が微小面の法線方向の違いにより様々な方向へ反射するため、異なる発色が見られることはない。図 6 の素材表面で観察される粒状の発色の直径は約 $1\sim3\mu\text{m}$ であり、粒状の発色は図 7 のモデルによりマイクロファセット構造を可視化した画像であると考えられる。同一サンプルの全ての領域において無数のマイクロファセットが散らばっていることが確認できたことから、観察対象の領域によらずマイクロファセット構造が顕在化することも確認できた。これまでに純チタンの結晶粒と呼ばれる直径約 $10\mu\text{m}$ の構造を顕微鏡で観察した研究例¹⁷⁾があるが、数 μm オーダーの微細構造を捉えた例はない。以上の結果から、酸化皮膜を有するチタンを光学顕微鏡で観察することにより“マイクロファセット構造”が初めて可視化されたと考えられる。

4. ハイトマップによるマイクロファセット構造の検証

粒状の発色が図 7 に示した微小面法線ベースの薄膜干渉モデルに起因するかの確認を目的として、ハイトマップから粒状発色の表面形状を 3 次元的に再構成した。

4.1 ハイトマップの計測

ハイトマップは、光学顕微鏡のサンプル積載台を高さ方向に移動させながら移動量と画像データを収集し、画像処理によってピントが合う位置をピクセル単位で決定する方法で取得した。これによって得られた位置情報が紐づいた顕微鏡画像とハイトマップを図 8 に示す。読み取られたハイトマップの範囲は画像全体で $0.000\sim17.600\mu\text{m}$ であった。

4.2 表面形状の 3 次元的再現

粒状の発色箇所として無作為に図 9 の 9 個を抽出し、計測したハイトマップからそれぞれの表面形状を 3 次元的に再構成

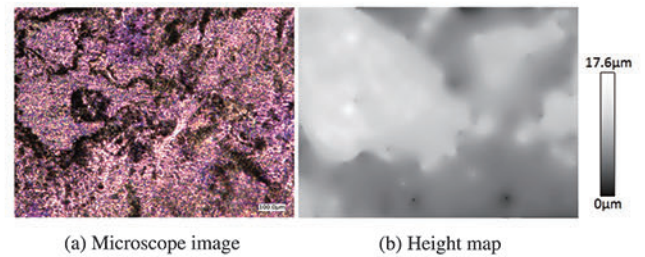


Fig. 8 Microscope image and height map with matching location information

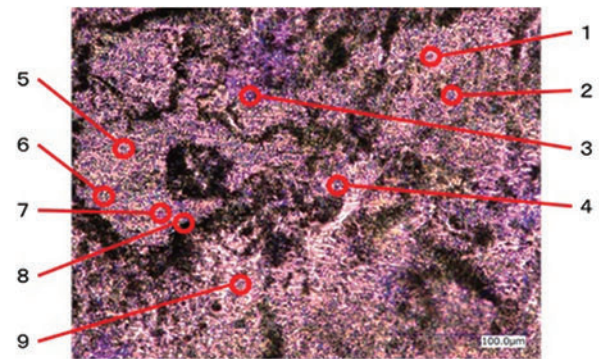


Fig. 9 Positions of targets, with colored grain used to verify microfacets structure

した。

再構成した結果をそれぞれ図 10 に示す。またこのうちの Position 4 および 5 の 2 ヶ所について、縦軸の分解能を上げて観察した例を図 11 に示す。図 11 (a) で、表面形状の凹凸は数 nm すなわち光の波長より 2 桁小さいオーダーであることがわかる。従って表面形状は干渉現象に影響しない程度の凹凸から構成されており、ほぼ平面とみなせることが確認できる。また図 11 (b) は、(a) と同様の平面が 2 枚で構成されている。

その上で、図 10 の各図の粒状発色部の色と表面形状の関係を観察すると、顕微鏡画像において 1 色ならば再現した表面形状も 1 枚の平面 ((a), (b), (c), (d), (f), (g), (i)), 2 色であれば表面形状も 2 枚の平面 ((e), (h)) で構成されている。これより粒状の発色と平面は対応しており色が異なると平面の傾きが異なることが確認でき、この平面が微小面法線ベースの薄膜干渉モデルにおけるマイクロファセットであるという結論を得た。さらに、顕微鏡の視野の範囲では膜厚一定と仮定すれば、微小面の傾きの影響により発色が異なると考えられる。以上により、粒状の発色の局在は微小面法線ベースの薄膜干渉モデルに起因していると想定可能であり、均一な加工面に対して微小面法線の出現確率を一定としたこれまでのシミュレーション手法⁸⁾に対して、複雑な表面構造において色情報を用いた微小面法線分布算出の可能性が示唆された。

5. マイクロファセット画像を用いた微小面法線分布の算出

図 6 (a)～(e) の光学顕微鏡画像（以下、マイクロファセット画像と記述）から、カラー画像解析により微小面法線分布を求めることを目的として、ハーフベクトルベースの薄膜干渉モデル⁸⁾を用い、マイクロファセット画像の $L^*a^*b^*$ 値からマイクロファセットの膜厚と法線方向を推定し、微細構造の微小面法線分布の算出を試みた。

5.1 算出方法

微小面法線分布を以下の手順で算出する。

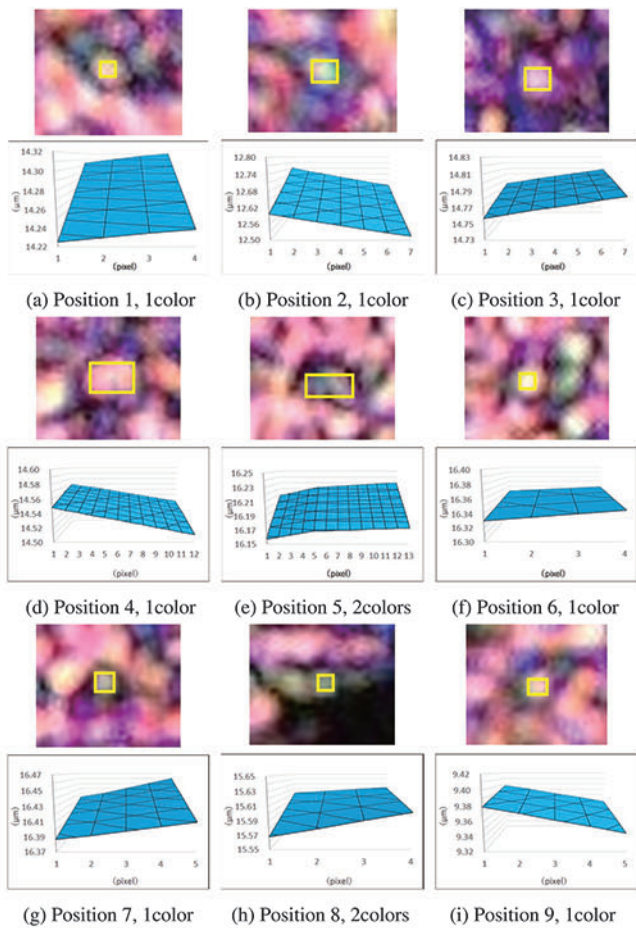


Fig. 10 Surface shapes reproduction results by height map. The vertical axis is height, and the horizontal axis is pixels

- (1) 算出対象領域を抽出
 - (2) シミュレーション結果との比較から
各ピクセルの法線方向を算出
 - (3) 膜厚を推定
それぞれの手順の詳細を以下で述べる。
- (1) では、はじめに、マイクロファセット画像の中から ROI を設定する。今回は一辺 $55.1\mu\text{m}$ (255pixel) の正方形とした。これは微小面法線方向分布を算出する際に領域内での膜厚を一定と仮定してもかまわないように、陽極酸化に及ぼす表面状態の影響¹⁸⁾を無視することを目的としている。次に、ROI における各ピクセルの彩度を算出し、彩度が閾値（今回は 15 に設定）より大きいピクセルを微小面法線分布の算出対象領域として抽出する。これはハーフベクトルベースの薄膜干渉モデル⁸⁾において、シミュレーションの対象としていない鏡面反射領域と影領域を、微小面法線方向分布算出の対象から除くためである。
- (2) では、はじめに、(1) で抽出した算出対象領域の各ピクセルの RGB 値から各ピクセルの $L^*a^*b^*$ 値を算出する。次に、膜厚を仮定し、法線方向を変化させたハーフベクトルベースの薄膜干渉モデル⁸⁾によるシミュレーションから仮定した膜厚における各法線方向の $L^*a^*b^*$ 値を算出する。さらに、画像から算出した $L^*a^*b^*$ 値とシミュレーションから算出した $L^*a^*b^*$ 値との色差 (ΔE) が最も小さい法線方向を求め、仮定した膜厚における各ピクセルの法線方向とする。
- (3) では、仮定する膜厚を変化させて、(2) を繰り返し行い全

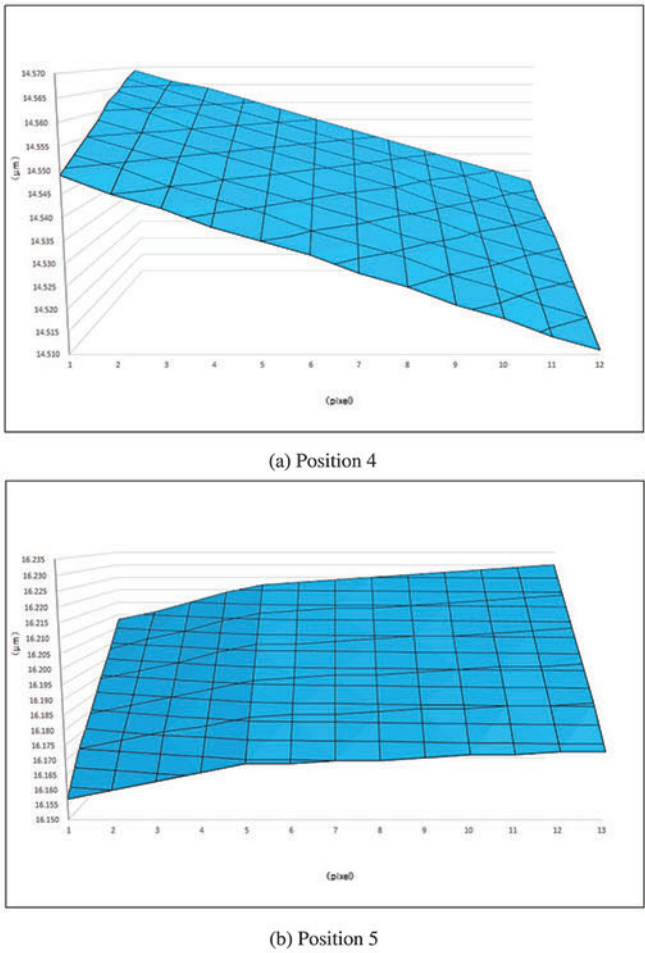


Fig. 11 Surface shape reproduction results with improved resolution. Horizontal and vertical axes are same as Fig. 10.

Table 1 Calculation results for each area

Position	Film thickness (nm)	ΔE	the most frequent value (°)
A	127.2	5.7	22
B	131.0	4.3	21
C	128.5	4.7	21
D	130.2	5.1	21
E	131.6	4.3	21

ピクセルの色差 (ΔE) の平均が最も小さい膜厚を推定膜厚とする。

5.2 算出結果と考察

(1) で設定した 5 箇所の ROI の位置、および各 ROI 画像を図 12, 13 にそれぞれ示す。なお、図 13 (a) における算出対象領域のピクセル数は 49618 ピクセルであった。

(2), (3) の手続きにより算出した微小面法線分布を図 14 (a) ~ (e) に示す。また、それぞれの ROI 内での推定膜厚、算出対象ピクセルの平均色差、分布の最頻値を表 1 に示す。

それぞれの領域で推定膜厚、平均色差、分布の最頻値は異なるものの、分布の形状は類似しており典型的なガウス分布になんらかの歪成分が加わった分布と見られる。さらに、同一サンプルのそれぞれの領域で推定膜厚は 130nm 前後と比較的均一であり、算出対象ピクセルの平均色差は安定して 5.0 前後であった。以上より、複雑な表面構造を持つ酸化皮膜を有するチタン素材に対してシミュレーション手法を構築できるめどを

得た。

なお、今回は同一サンプル内の複数の領域に対して微小面法線分布の算出を行ったが、算出手法の汎用性を確認するには数種類のサンプルから設定した領域の分布を算出し確認することが必要であるため、今後取り組んでいく予定である。さらに、今回算出対象外とした彩度 15 以下の領域は画像では光学的なハイライトとシャドウ領域に対応しており、これらの低彩度領

域が ND 材の色の鮮やかさ（見映え）に与える影響は幾何学的な面積比率で計算可能と考えられ、リアルな色のシミュレーションのために今後組み込んでいく予定である。また、微小面法線分布による NDF のモデル化をさらに高精度に行うためには、歪成分の発生要因の解明が必要である。歪成分の発生要因

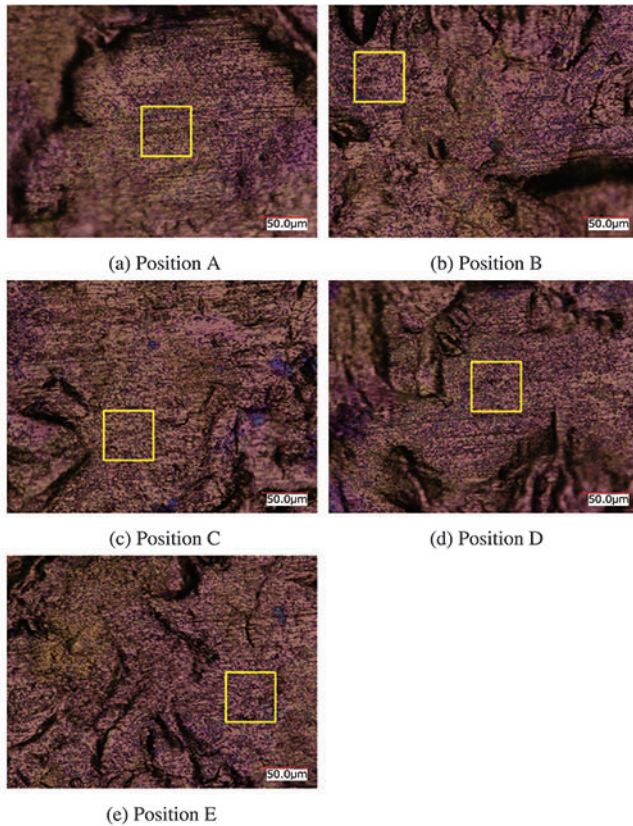


Fig. 12 ROI positions in each microscope images

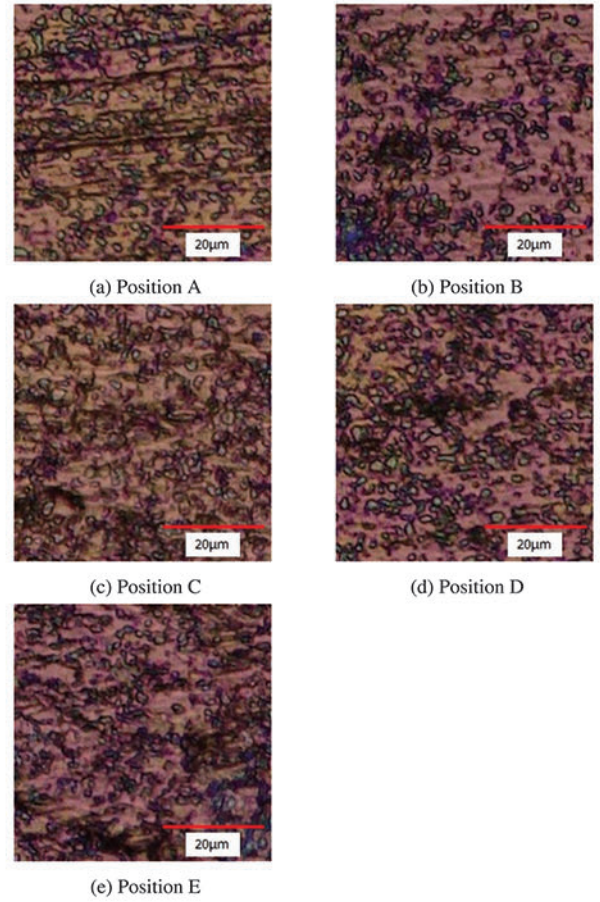


Fig. 13 ROIs of each position

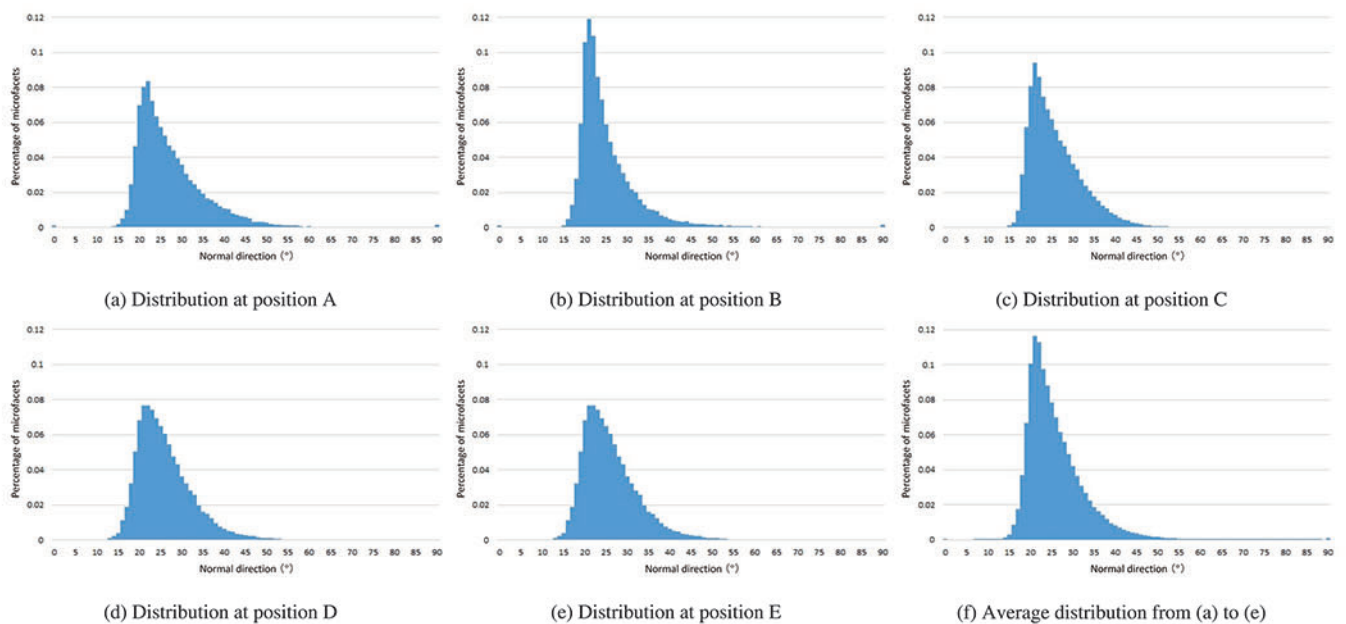


Fig. 14 Microfacets normal distributions. The vertical axis is the percentage of microfacets, and the horizontal axis is the normal direction.

としてはノイズである場合と、なんらかの表面性状に対応したもの（例えば、2種類のロール加工によってND材表面に2種類の構造が存在、サンプル全領域でのマクロな構造の変化、ROI内での膜厚のゆらぎ、あるいはこれらの複合のような表面性状に対応したもの）である場合が考えられる。これを特定するためには歪成分の分離が必要であり、複数の領域から算出した結果を平均化するか、ROIのサイズを拡張するなどの手続きが必要である。歪がノイズ的である場合には、平均化によりガウス分布のみが残存し、歪がサンプルの表面性状に対応した何らかの確率密度関数として残る場合には、図14を確率密度関数の和として表現できることになる。図14(a)~(e)の結果を平均化したものを図14(f)に示す。平均化後に歪成分が残存していることから歪はノイズではなく、何らかの表面性状に対応した確率密度関数を表現しているものと考えられ、今後この要因も特定していく予定である。

6. 結 言

本研究では、物理モデルに基づいたチタン酸化皮膜の薄膜干渉シミュレーションの確立を目指し、マイクロファセット構造の可視化と検証、及び、マイクロファセット画像を用いた微小面法線分布算出手法の提案を行った。

光学顕微鏡画像で見られる直径約 $1\mu\text{m}$ 前後の微細構造は、酸化皮膜の薄膜干渉による多彩な発色であり、マイクロファセット構造が初めて視覚的に観察されたものと考えられる。またマイクロファセット画像からカラー画像解析とハーフベクトルベースの薄膜干渉モデルを適用し各ピクセル単位での法線分布を算出した。算出した分布は典型的なガウス分布に、なんらかの歪成分が加わった分布と見られる。同一サンプルのそれぞれの領域で推定膜厚が比較的均一であった点、算出対象ピクセルの平均色差が5.0前後と高精度に算出できている点、分布の形状は類似していた点から複雑な表面構造を持つ酸化皮膜を有するチタン素材に対してシミュレーション手法を構築できることを得た。

今後は微小面法線分布に含まれる歪要因を特定するとともに、算出した微小面法線分布からNDFのモデル化を行い、物理モデルに基づいたチタン酸化皮膜の薄膜干渉シミュレーション方法を確立する予定である。さらに光学的なハイライトやシャドウなどの低彩度領域の影響も織り込むことで、複雑な表面構造を持つ酸化皮膜を有するチタン素材に対する総合的なシミュレーション手法として確立する。

謝 辞

本研究の一部は科学技術振興機構(JST)の研究成果展開事業COIプログラム「感性とデジタル製造を直結し、生活者の創造性を拡張するファブ地球社会創造拠点」の支援によって行われた。

参 考 文 献

- 1) 佐藤廣士: チタン建材とその表面処理, 表面技術, **43**, 11, (1992) 1014.
- 2) 山口英佐, 佐藤廣士: チタン陽極酸化技術の建築材料への応用, 表面技術, **40**, 1, (1989) 64.
- 3) M. Pharr, W. Jakob, and G. Humphreys: Physically based rendering: From theory to implementation, Morgan Kaufmann, (2016).
- 4) J. Dorsey and H. Rushmeier: Advanced material appearance modeling, ACM SIGGRAPH 2009 Courses, Article No.3, (2009).
- 5) N. Nagata, T. Dobashi, Y. Manabe, T. Usami, and S. Inokuchi: Modeling and visualization for a pearl-quality evaluation simulator, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, **3**, 4, (1997) 307.
- 6) T. Dobashi, N. Nagata, Y. Manabe, and S. Inokuchi: Implementation of a pearl visual simulator based on blurring and interference, IEEE/ASME Transactions on mechatronics, **3**, 2, (1998) 106.
- 7) J. A. Iglesias-Guitian, C. Aliaga, A. Jarabo, and D. Gutierrez: A biophysically-based model of the optical properties of skin aging, Computer Graphics Forum, **34**, 2, (2015) 45.
- 8) 藤井宏樹, 飛谷謙介, 谿雄祐, 亀井光仁, 長田典子, 赤木俊夫, 高橋一浩, 山村咲弥: 微小面による薄膜干渉現象を考慮したチタン酸化皮膜の色表現, 電子情報通信学会論文誌 D, **J102-D**, 6, (2019) 464.
- 9) 色彩学会: 新編色彩科学ハンドブック, 東京大学出版会, (1998).
- 10) K. Torrance and E. Sparrow: Theory for off-specular reflection from roughened surfaces, Josa, **57**, 9, (1967) 1105.
- 11) J.F. Blinn: Models of light reflection for computer synthesized pictures, 4th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, (1977) 192.
- 12) X. He, K. Torrance, F. Sillion, and D. Greenberg: A comprehensive physical model for light reflection, ACM SIGGRAPH computer graphics, **25**, 4, (1991) 175.
- 13) B. Walter, S. R. Marschner, H. Li, and K. E. Torrance: Microfacet models for refraction through rough surfaces, Rendering Techniques 2007, **2007**, 18, (2007) 195.
- 14) M. Ribardière, B. Bringier, L. Simonot, and D. Meneveaux: Microfacet BSDFs Generated from NDFs and Explicit Microgeometry, ACM Transactions on Graphics, **38**, 5, (2019) 1.
- 15) 明石透, 白石利幸, 小川茂, 松瀬善信, 森原秀征: ダルワークロール調質圧延現象の解明 -極薄鋼板の調質圧延現象の数値解析-, 新日鉄住金技報, **401**, (2015) 35.
- 16) 長直樹, 志誠一, 鍵征雄: 調質圧延時の表面粗さ転写に与える水系調質圧延液の効果, 鉄と鋼, **94**, 10, (2008) 429.
- 17) 吉村知浩, 今井久志, 近藤勝義: 純チタンの結晶粒微細化と酸化物分散強化, 日本金属学会誌, **73**, 10, (2009) 768.
- 18) 北司郎, 志善明, 村山順一郎: チタンの陽極酸化に及ぼす表面状態の影響, 鉄と鋼, **77**, 7, (1991) 1198.