

チタン陽極酸化干渉色のシミュレーション技術

Simulation Technology for Titanium Oxide Layer Interference Color

長田典子*
Noriko NAGATA

飛谷謙介
Kensuke TOBITANI

亀井光仁
Mitsuhito KAMEI

赤木俊夫
Toshio AKAGI

高橋一浩
Kazuhiro TAKAHASHI

山村咲弥
Sakuya YAMAMURA

抄 録

陽極酸化処理チタンは薄膜干渉による色が様々に変化し、その多様な意匠性から各種応用への注目が集まっている。こうした意匠性をシミュレーションで正確に表現できれば、デザイン支援につながる。そこで陽極酸化皮膜による干渉色のシミュレーションについて、2つのステップで検討を進めた。1つ目は干渉色の仕組みをマクロに説明するハーフベクトルベースの薄膜干渉モデルであり、2つ目はチタン表面の粗さ構造をミクロに説明するマイクロファセットベースの薄膜干渉モデルである。シミュレーション結果ではいずれも、平均色差 (ΔE) 5.0 以内、許容色差分類における4級、と実用上十分な精度であることを確認した。

Abstract

Titanium oxide layer changes color diversely due to thin film interference. Because of its high designability, expectations for various applications are increasing. Accurate representation of the interference color and texture of the oxide layer formation in simulation will lead to design support. In this study, we investigated the simulation of interference colors of a thin oxide layer on titanium in two steps. The first is a half-vector-based thin film interference model for expressing the interference color macroscopically, and the second is a microfacet-based thin film interference model for expressing the surface roughness structure microscopically. Both simulation results show that the accuracy of the mean color difference is within 5.0 and 4 in the color tolerance grade, which are sufficient for practical use.

1. 緒 言

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。チタンは陽極酸化によって形成される酸化皮膜（以下、陽極酸化皮膜）の厚さによって様々な干渉色を創り出す。さらに陽極酸化処理を施すチタン表面の凹凸によっても様々な質感を形成する。この多様な干渉色と凹凸状態の重畳によって豊かな意匠性がもたらされ、建築物（図1）や装飾品等多方面への展開が進められている。こうしたチタン材の意匠性をCG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し、デザインプロセス支援につながると期待される。

CGシミュレーションによる素材の質感表現技術は、プロダクトデザインやオンラインマーケティング等、様々な分野で利用されている。とりわけ意匠性や魅力といった価

値創出に関わる分野において、その重要性が増している。素材の色や質感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



図1 酸化皮膜を有するチタンを用いた建築物（ホテル・マルケス・デ・リスカル）
View of color-decorated building using titanium oxide layers (Hotel Marques de Riscal)

化する physically based modeling/rendering のアプローチが有効である。

著者らは陽極酸化皮膜による干渉色のシミュレーションについて、2つのステップで検討を進めた。1つ目は拡散反射方向に干渉色が見えるという陽極酸化皮膜に特徴的な光学現象をマクロに説明するモデル（ハーフベクトルベースの薄膜干渉モデル）、およびSD材（冷熱肌、凹凸が比較的小さい）に適用したシミュレーションである。2つ目はチタン表面の粗さ構造をマイクロに説明するモデル（マイクロファセットベースの薄膜干渉モデル）、およびND材（ダル肌、凹凸が比較的大きい）に適用したシミュレーションである。シミュレーション結果ではいずれも、平均色差 (ΔE) 5.0 以内、許容色差分類における4級となり、実用上十分な精度であることを確認した。以下それぞれのモデルとシミュレーション結果について述べる。

2. ハーフベクトルベースの薄膜干渉モデルによるシミュレーション

2.1 陽極酸化皮膜による薄膜干渉の特徴

陽極酸化皮膜による薄膜干渉の特徴は、鏡面（正）反射方向だけでなく、拡散（一様）反射方向にも干渉色が観測されることである。実際に陽極酸化処理を施したチタンで装飾した建物の外観（図1）では、複雑な形状にも関わらず、広範囲にわたって明らかな干渉色が観察される。これは干渉色が拡散反射方向にも広く分布していることを意味する。一方、従来の薄膜干渉を説明する原理モデル（図2）では、干渉色は鏡面反射方向のみで観測されることになり、このモデルでは説明ができない。

2.2 チタン試料を用いた干渉色および表面粗さの特性評価

チタンは陽極酸化処理時の電圧を変えることで酸化皮膜の膜厚を変え、図3の外観写真に示すような各種の干渉色を得る。そこでまずチタン試料を用いて全方位分光反射率測定による干渉色の計測、粗さ測定器による表面粗さの計測、および、粗さ測定の結果から想定された局部干渉色の顕微鏡観察を行った。試料には図3の左上の青色サンプル（サンプル2）を用いた。

2.2.1 干渉色の計測

陽極酸化表面の拡散反射方向における干渉色を確認するために、双方向分光反射率分布関数 sBRDF (spectral Bidirectional Reflectance Distribution Function) 測定装置（デジタルファッション(株)製）で分光反射率を測定した。この装置は分光器、光源、サンプル台からなり、sBRDF の測定が可能である。測定装置の光学系を図4に示す。

sBRDF 測定装置はサンプルに対し、光源方向 (θ_p, ϕ_p) と視点方向 (θ_v, ϕ_v) を変化させ、分光反射率を測定する。青

色サンプルの sBRDF を測定し、RGB 変換して得られた干渉色の角度分布を図5に示す。

図5において光量が多い鏡面反射方向の領域ではハイライトが観測されるが、拡散反射方向の角度が大きくなるにつれて、サンプルを視認したときと同様の明るい青色が確認される。さらに拡散反射方向の角度が大きくなると、

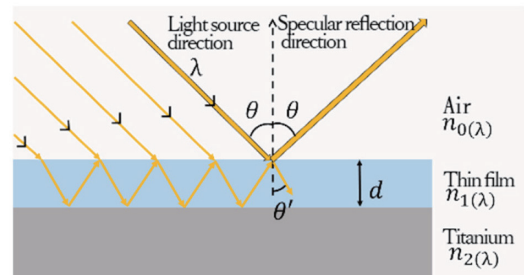


図2 薄膜干渉の原理モデル
Principle model of thin layer interference

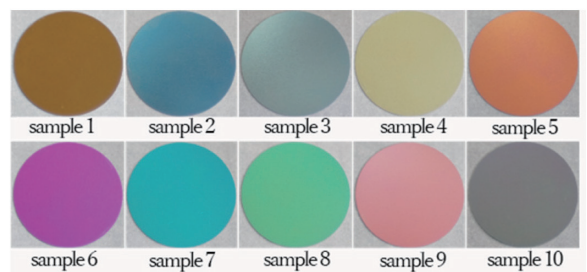


図3 酸化皮膜を有するチタンの実写画像
View of various titanium plates with oxide layer (SD)

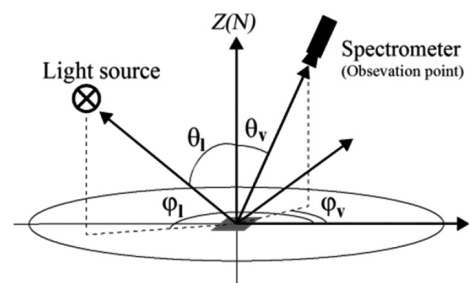


図4 sBRDF 測定装置の光学系
Optical system of sBRDF measuring equipment

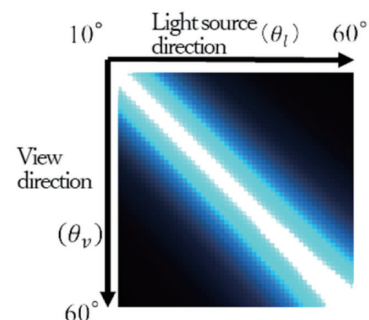


図5 計測した sBRDF から算出した干渉色の角度分布（サンプル2）
Measured interference color distribution of blue color plate (sample 2)

青色ながらも光量の減衰により濃い青色から濃紺へと変化している。なお N.D. フィルターを用いて光源の光量を減らすと、ハイライト部分の鏡面反射方向でも明るい青色が確認されている。

これらの結果から、酸化皮膜表面では拡散反射方向においても、鏡面反射方向で視認される干渉色と同様の色を確認することができた。

2.2.2 表面粗さの計測

次に、チタン表面(肌)の粗さを評価する。これは薄膜干渉による構造色を粗面散乱でモデル化するにあたり必要である。チタン表面のマクロな粗さ曲線は、酸化皮膜表面の粗さ曲線とほぼ同じであることが確認されている(ただし陽極酸化電圧が数 10V 程度の場合。青色サンプルの陽極酸化時電圧は 25V で本条件に該当する)。すなわち酸化皮膜のマクロな膜厚分布はほぼ均一であると仮定できることを示している。したがって、ここでは酸化皮膜の表面粗さを測定することでチタン表面粗さの評価とする。図 6 は接触式粗さ測定器で計測したサンプルの表面粗さ曲線の測定結果であり、算術平均粗さ Ra は 268.0nm, 最大高さ粗さ $Rmax$ は 1821.0nm であった。

一方、光学的なサンプル表面の滑らかさ評価は式 (1) のレイリー基準を用いることで議論される。

$$h = \lambda/8 \cos \theta \quad (1)$$

ここで λ は波長, θ は入射角を示している。表面の粗さが h より小さい場合、表面は光学的に“滑らか”であり、 h より大きい場合、光学的に“粗い”と分類される。人の目に

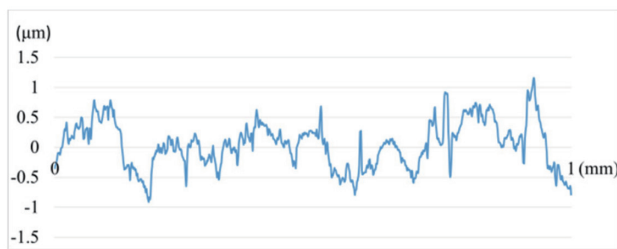


図 6 酸化皮膜の表面粗さ曲線 (サンプル 2)
Surface roughness curve of oxide layer on blue color plate (sample 2)

見える波長域を概ね 380~780nm として式 (1) を用いると、入射角を 0~60° の範囲で変化させたときの h は 47.5~195.0nm となり、本研究で使用した青色サンプルの Ra 268.0nm は h より十分大きい値となった。すなわち、サンプルの酸化皮膜表面は光学的に粗い表面であり、膜厚をほぼ均一としたチタン表面も同様に粗い表面であると考えられる。

2.2.3 局部干渉色の観察

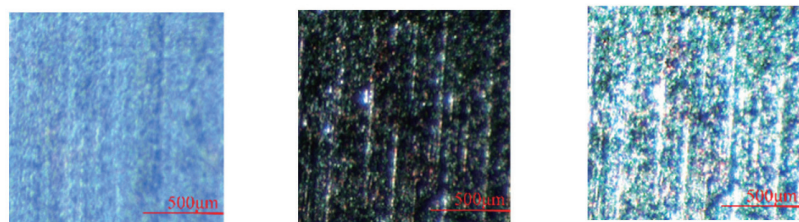
さらに、顕微鏡画像によりサンプル表面の干渉色を確認した。結果を図 7 に示す。

図 7 (a) は光源方向(天頂角) 0°, 視点方向(天頂角) 0° の鏡面反射条件の顕微鏡画像であり、照明光量を絞ることによって図 3 と同様の青色干渉色を観察することができた。一方、図 7 (b) は光源方向 45°, 視点方向 0° の拡散反射条件で観察した画像であり、全体が濃紺から黒に近い色となっている。しかしながら、(b) の条件で照明光量をあげた (c) において、(a) と同色相の青色干渉色が局部的に増えることから、拡散反射方向においても鏡面反射方向と同じ干渉が成立していることが確認された。以上の検討結果より、光学的粗面であるチタン陽極酸化表面における拡散反射方向の干渉色を表現するモデルを提案する。

2.3 ハーフベクトルベースの薄膜干渉モデル

ハーフベクトルとは、光源方向と視点方向の中間の方向を意味し、CG 分野において広く用いられている概念である。一般的に鏡面反射成分における反射光の強度分布を物理的に正しく表現するために用いられるが、光の波長を考慮すれば反射光の波長分布を表現することもできる。

ハーフベクトルベースの薄膜干渉モデルの概略図を図 8 に示す。図は光源方向 θ_i に対して正反射方向とは異なる視点方向 θ_v から観測した様子を示している。粗面では様々な方向をもつ微小面の存在を仮定できる。このうち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の集合体に着目すると、局部的に正反射条件が整い、薄膜干渉が生じる。このモデルによって、拡散反射方向における薄膜干渉色を説明することができる。



(a) Light 0°, View 0° (b) Light 45°, View 0° (c) Image with increased average brightness of (b)

図 7 光学顕微鏡の撮影画像
Microscopic images of blue color plate

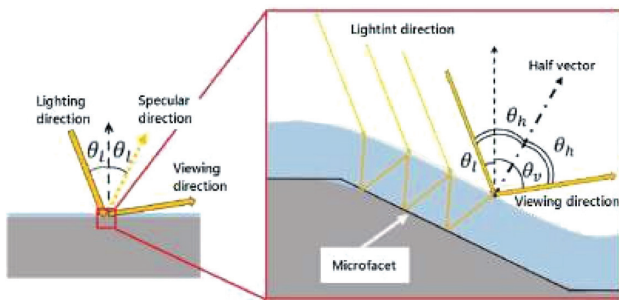


図8 ハーフベクトルベースの薄膜干渉モデル
Model of layer interference based on half vector

2.4 シミュレーション方法

提案した薄膜干渉モデルに基づき、シミュレーションにより反射光の分光反射率を求める。

図8の θ_l , θ_v はそれぞれ光源方向, 視点方向の角度である。 d は酸化皮膜の膜厚, λ は入射光の波長を表す。また $n_{0(\lambda)}$, $n_{1(\lambda)}$, $n_{2(\lambda)}$ はそれぞれ空気層, 酸化皮膜層, チタン層の波長 λ における複素屈折率を表す。上記のパラメータを用いて、スネルの法則, フレネルの式から反射光の分光反射率を算出する。

まず従来原理モデル(図2)における反射率は式(2)で算出される。

$$R = \left| \frac{r_{12} + r_{23} e^{i\delta}}{1 + r_{23} r_{12} e^{i\delta}} \right|^2 \quad (2)$$

ここで r_{12} , r_{23} はフレネル反射係数である。また, δ は位相差であり, 式(3)で表される。

$$\delta = 4\pi n_{1(\lambda)} d \cos \theta' / \lambda \quad (3)$$

θ' は屈折角であり, スネルの法則より入射角 θ を用いて式(4)で算出される。

$$\theta' = \sin^{-1}(n_{0(\lambda)} \sin \theta / n_{1(\lambda)}) \quad (4)$$

次に提案するハーフベクトルベースの薄膜干渉モデルでは, 酸化皮膜層とチタン層の界面を微小面の集合と考え, 光源方向と視点方向において正反射条件が成り立つ微小面における薄膜干渉を表す。そこで, 薄膜干渉の原理モデルの式(4)の光源方向 θ の代わりに式(5)の θ_h を入射角として代入する。

$$\theta_h = (\theta_l + \theta_v) / 2 \quad (5)$$

これにより, 大局的には拡散反射方向であるが, 局所的には正反射による薄膜干渉が生じており, その結果干渉色が見えるという現象をモデル化できる。

このモデルを用いて, シミュレーションを行った結果を図9に示す。膜厚 d が30nm, 70nmの場合を例に分光反射率を求めた。酸化皮膜の複素屈折率 $n_{1(\lambda)}$ の実部と虚部の値は公開情報を用いた。また拡散反射を扱うため, 分光反射率の計算では強度の低い多重反射も考慮した。

ハーフベクトルベースの薄膜干渉モデルを適用することで, 拡散反射方向の分光反射率を算出することができた。酸化皮膜とチタンの複素屈折率の波長依存特性により, チタンの分光反射率における波長依存性が示され, また酸化皮膜の膜厚変化による分光反射率の変化も表現された。

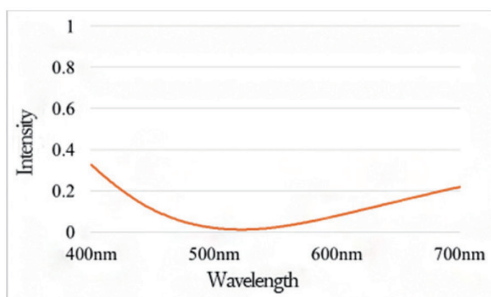
2.5 シミュレーション結果と評価

シミュレーションで算出された分光反射率と計測値の分光反射率から色差を求め, 評価を行う。

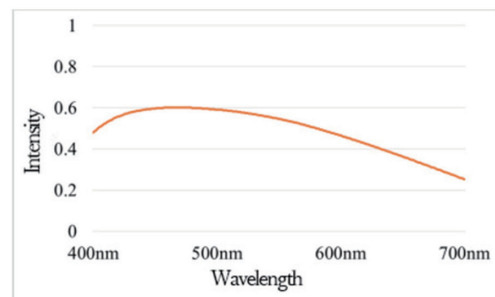
分光反射率を求めるためには, シミュレーションのパラメータである酸化皮膜の膜厚が必要であるが, サンプルは陽極酸化時の電圧のみ既知であり膜厚は未知である。したがって膜厚を推定する必要がある。本研究では, 膜厚パラメータを変化させて分光反射率を求め, 計測した分光反射率との平均二乗誤差が最小となる膜厚を算出し, 推定膜厚とする。推定膜厚を表1に示す。

次に求めた膜厚を用いて, 光源方向と視点方向を変化させ, 式(2)~(5)によりシミュレーションを行った。得られた分光反射率をもとに算出した干渉色の角度分布を図10に示す。図において, 全体的に計測値と近い干渉色の角度分布が得られていることが確認できる。

また計測値との色差を求めた。本研究では拡散反射方向の干渉色を対象とするため, 鏡面反射方向の領域を除いて各サンプルの平均色差を求めた結果を表2に示す。全10サンプルの平均色差は5.0であった。これは許容色差分類における4級であり, 実用上十分な精度と言える。誤差要因については薄膜干渉モデルで表現していない光の挙動



(a) Film thickness 30 nm



(b) Film thickness 70 nm

図9 分光反射率の計算結果(光源方向 10° , 視点方向 45°)
Results of simulation (light: 10° , camera: 45°)

表 1 10 サンプルの推定膜厚
Estimated thickness of oxide layer of 10 samples

Sample number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Estimated thickness (nm)	15.9	50.8	60.6	87.5	121.4	138.4	160.6	173.9	226.6	264.4

表 2 10 サンプルの色差
Color difference of 10 samples

Sample number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Color difference	2.9	3.2	2.5	4.3	7.3	5.6	4.1	4.9	9.9	5.4

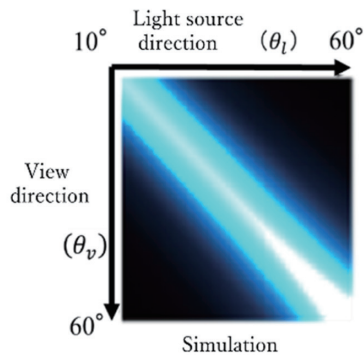
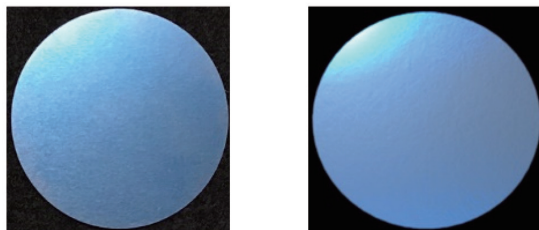


図 10 シミュレーション結果から算出した干渉色の角度分布
Simulated interference color distribution of blue color plate



(a) Real image (b) CG image

図 11 チタンの実写画像と CG 画像
Real image and CG image of titanium

や、sBRDF 装置固有の誤差要因などが考えられる。

2.6 CG 表現

モデルを用いて CG 表現を行った。光源の種類 (D65 光源を使用)、撮影環境 (光源位置、撮影対象位置、カメラ位置、撮影空間の大きさ) およびカメラパラメータ (焦点距離、センサーサイズ、絞り、シャッタースピード等) は実写画像撮影時と同じ設定でレンダリングした。実写画像と CG 画像の比較結果を図 11 に示す。拡散反射方向全般において実写画像と同様の青系の色相を示し、鏡面反射方向から拡散反射方向に変化する色相変化も表現できている。

3. マイクロファセットベースの薄膜干渉モデル

3.1 マイクロファセット理論

前章で述べた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チタン特有の干渉色に着目したマクロな近似モデルであるため、SD 材のような比較的凹凸が小さく、微小面の法線方向の出現確率 (微小面法線分布) が一定と仮定できる場合には有効である。しかし ND 材のような、より複雑な凹凸特性をもつチタンを表現するためには、微小面法線分布を適切に表現するモデルが必要になる。

CG 分野ではマイクロファセット (微小面) 理論、あるいはその法線分布関数 (NDF: Normal Distribution Function) の研究として、凹凸面からの光の反射の表現技術の研究が行われている。しかしここでのマイクロファセットは (集合を仮定した) 概念であり、実際にマイクロファセットを画像として可視化した研究例はなかった。

3.2 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

チタン表面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。その結果マイクロファセット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) を観察することに成功した。

対象試料を図 12 に示す。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チタン (以下、ND 材) 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。またチタン表面がもともと持っていた数 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³⁾。以上より、表面形状モデルは図 13 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と考えられる。なお、陽極酸化処理を施していない ND 材 (以下、ベア材) も比較のため観察した。

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° 、レンズはアポクロマトレンズを用い、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。

図 14 に得られた画像を示す。図 14 (a) において様々な



図12 光学顕微鏡にて観察した陽極酸化した対象材(ND材)
View of titanium plate with oxide layer (ND)

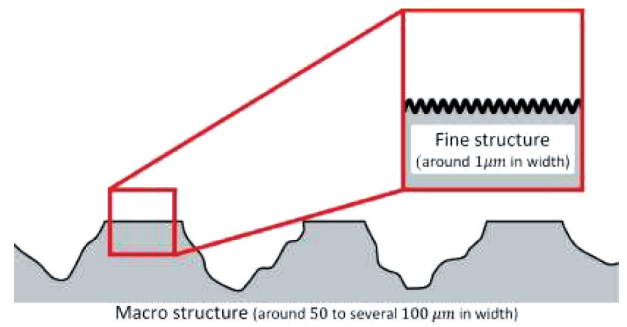
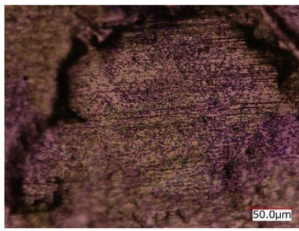
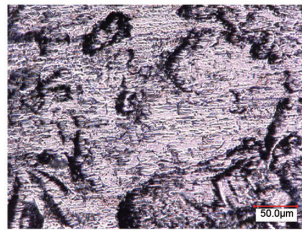


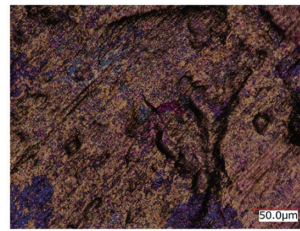
図13 ND材の表面形状モデル
Surface-shape model of ND sample



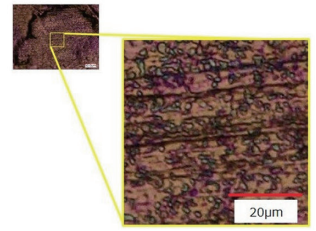
(a) ND sample



(b) Bear sample



(c) Bear sample with oxide layer



(d) Locally enlarged image of (a)

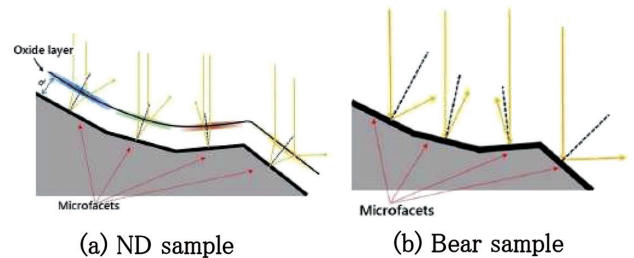
図14 光学顕微鏡の撮影画像 (a) ND材, (b) ベア材, (c) ベア材を陽極酸化, (d) (a)の拡大画像
Microscope images

色が粒状に散らばっているのが確認できる。図14(b)は同一光学条件でベア材を観察した結果であり、ND材と異なり粒状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た図14(c)では、再びND材と同様に粒状の発色が確認できた。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。

3.3 マイクロファセットベースの薄膜干渉モデル

3.3.1 モデルの提案

酸化皮膜サンプルでのみ粒状の発色が観察できる現象を図15のマイクロファセットベースの薄膜干渉モデルとして提案する。図15(a)はチタン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。一方、酸化皮膜のないチタン表面では、図15(b)で示すようにチタン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14で観察される粒状の発色の直径は約1~3μmであり、これらは図15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10μmの構造を顕微鏡で観察した研究例



(a) ND sample

(b) Bear sample

図15 マイクロファセットベースの薄膜干渉モデル
Model of thin-film interference based on microsurface normal

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。

3.3.2 ハイトマップによるマイクロファセット構造の検証

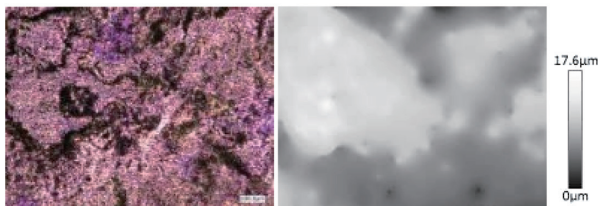
粒状の発色がマイクロファセット構造に起因するかを確認するため、ハイトマップから粒状発色の表面形状を3次元的に再構成した。

ハイトマップの計測は、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行った。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16に示す。読み取ら

れたハイトマップの範囲は画像全体で $0.000 \sim 17.600 \mu\text{m}$ であった。

次に粒状の発色箇所として図 16 (a) から無作為に数点抽出し、計測したハイトマップからそれぞれの表面形状を 3 次元的に再構成した。再構成した結果 (ここでは 2 点のみ) を図 17 に示す。図で、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り、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いることがわかる。すなわち (a) はほぼ平面であり、また (b) は (a) と同様の平面が 2 枚で構成されていると見なせる。その上で粒状発色部の色と表面形状の関係を観察すると、(a) では 1 枚の平面に対し顕微鏡画像も 1 色が対応し、(b) では 2 枚の平面に対し画像も 2 色で構成されている。

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。



(a) Microscope image (b) Height map

図 16 位置情報が紐づいた顕微鏡画像とハイトマップ
Microscope image and height map with matching location information

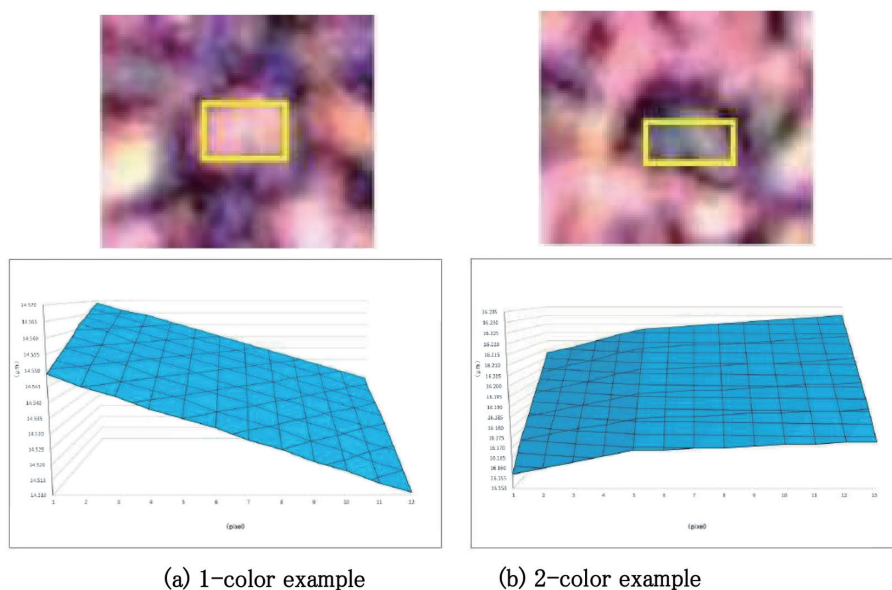


図 17 顕微鏡画像 (上段) と計測したハイトマップから再構成した 3 次元的表面形状 (下段)
Microscope images and surface shapes reproduction results by height map
Vertical axis is height, and horizontal axis is pixels.

以上により、粒状の発色の局在はマイクロファセット構造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に対して、複雑な表面構造においてマイクロファセットベースのモデルに基づき、色情報による微小面法線分布算出の可能性が示唆された。

3.3.3 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

光学顕微鏡画像 (以下、マイクロファセット画像) から、カラー画像解析により微小面法線分布を求める。微小面法線分布は以下の手順で算出する。

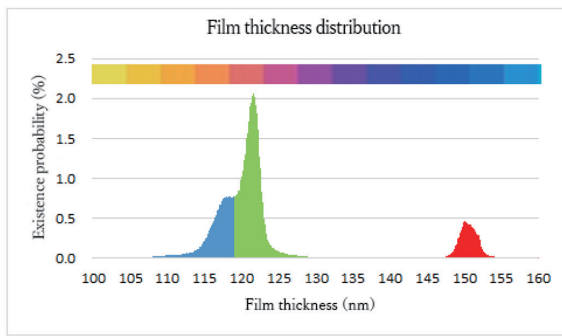
(1) 法線マップの算出

ハイトマップ (図 16 (b)) の各点から構成される面の法線方向を算出し、マイクロファセット画像 (図 16 (a)) と位置情報が紐づいた法線マップを得る。

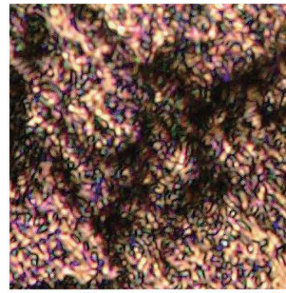
(2) 膜厚の推定

マイクロファセット画像の中に、膜厚一定と仮定できる範囲を ROI (Region of Interest) 設定する (今回は一辺 $55.1 \mu\text{m}$ (255 pixel) の正方形)。次に ROI において彩度が閾値 (今回は 15 に設定) より小さいピクセルをマスクする。これは鏡面反射領域と影領域を除くためである。ハーフベクトルベースの薄膜干渉モデルによるシミュレーションから、膜厚を仮定したときの法線方向から決まる Lab^* 値とマイクロファセット画像の Lab 値とを比較し、平均色差 (ΔE) が最小となる膜厚を決定する。

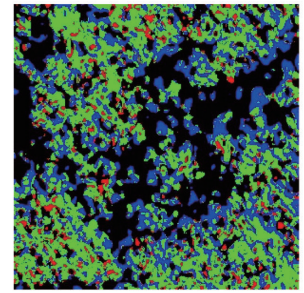
*1 CIE (国際照明委員会) が定義した、世界的に使われている色の表現方法。L は明度 (0 ~ 100)、a は緑から赤の色味の度合 (-100 ~ +100)、b は青から黄色の色味の度合 (-100 ~ +100) を数値で表現。例えば L: 65, a: 57, b: 70 は全世界共通でオレンジ色を示す。



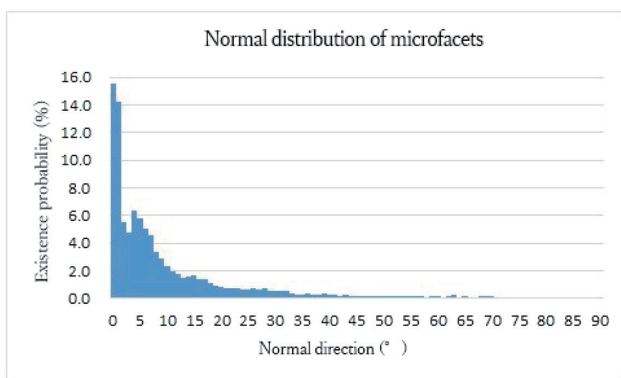
(a) Three normal distributions in film thickness distribution



(b) Microfacet image



(c) Visualization of microfacet image

図 18 (a) 薄膜厚さの分布, (b) (c) マイクロファセット画像
Film thickness distribution and microfacet images図 19 マイクロファセットの法線分布
Microfacets normal distribution

(3) 法線方向の推定

(2) で決定した膜厚を用いたシミュレーションから法線方向と Lab 値を算出し、画像の Lab 値との色差 (ΔE) が最小となる法線方向を求め、ピクセルの法線方向とする。

上記の手続きにより算出した全算出領域の推定膜厚と微小面法線分布を図 18, 図 19 に示す。推定膜厚は 100.0 ~ 160.0 nm となり、算出対象ピクセルの平均色差は安定して 5.0 前後になったため、良好な推定結果が得られたと示唆される。膜厚分布、法線方向分布ともに典型的な正規分布になんらかの歪成分が加わった分布であると考えられる。

膜厚分布 (図 18 (a)) を 3 つの正規分布の複合であると解釈し、マイクロファセット画像を対応する 3 つの膜厚帯別に可視化したものを図 18 (c) に示す (119 nm 以下を青, 120 ~ 139 nm を緑, 140 nm 以上を赤)。(b) において色みが大きく異なる領域は (c) において膜厚の大きな領域に対応しており、また (b) における影領域の周辺が (c) における膜厚の小さな領域に対応していることがわかる。すなわち膜厚変化は局所的に発生し、それらが全体の膜厚分布の正規分布の複合となっていることが示唆される。

一方、法線分布 (図 19) もまた、 0° を最頻値とする分散が小さい正規分布と、 0° を最頻値とする分散が大きい正規

分布の 2 つの正規分布の複合であると解釈される。これらを図 13 で示した表面形状モデルにあてはめると、分散が小さい正規分布は SD 材の微細構造の特徴が残っている凸部の構造に起因し、分散が大きい正規分布は ND 材の特徴である凹部のマクロ構造に起因するとの仮説が立てられる。今後は仮説に基づき、法線分布のモデル化と、局所的な膜厚変化の発生要因について検証を進める予定である。

3.4 シミュレーション方法

マイクロファセットベースの薄膜干渉モデルに基づき、シミュレーションにより反射光の分光反射率を求める。2.4 節で述べたハーフベクトルベースの計算手順に加え、3.3.3 項で得られたマイクロファセットの法線分布と膜厚分布を確率密度関数として使用する。

$$R_{in,out} = \sum_{\theta_m} \sum_d r(\theta_{in} + \theta_m, d) g(d) f(\theta_m) \cos(\theta_{out} - \theta_m) \cos(\theta_{in} + \theta_m) \cos(\theta_{out} + \theta_{in} - 2\theta_m)^n$$

ここで $R_{in,out}$ は入射方向 in 、出射方向 out における反射率、 $r(\theta, d)$ は法線方向 θ 、膜厚 d におけるハーフベクトルベースの薄膜干渉モデルによる反射率、 θ_{in} 、 θ_{out} 、 θ_m は入射角、出射角、マイクロファセット法線角度、 $f(\theta)$ は法線方向 θ の確率密度関数、 $g(d)$ は膜厚 d の確率密度関数、 n はコサインロープモデルのパラメータである。

本モデルによって反射強度の計算が可能になり、鏡面反射光と拡散反射光の両方を含む干渉色の分光反射率を算出できるようになった。

3.5 シミュレーション結果と評価

図 20 に示すように、シミュレーションで算出された分光反射率の角度分布 (b) を計測値のもの (a) と比較したところ平均色差 (ΔE) は 4.98 (c) であり、許容色差 4 級を達成した。前モデル (ハーフベクトルベース) においても平均色差 5.0 (d) を達成したが、鏡面反射光を含めない拡散反射光のみの評価であった。本モデルにおいて精度と表現能力の大幅な向上が達成された。

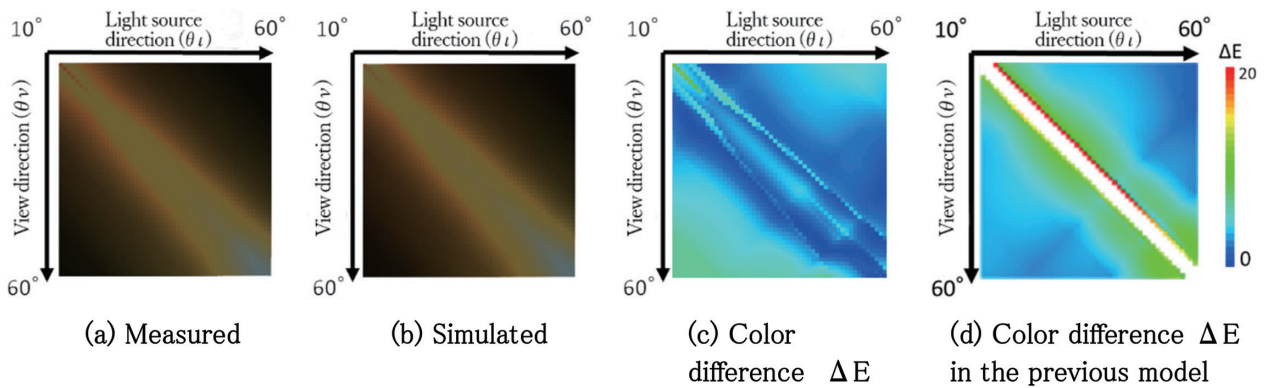


図 20 分光反射率の角度分布の (a) 計測値, (b) マイクロファセット薄膜干渉モデルによるシミュレーション結果, (c) 計測値とシミュレーション結果の色差, (d) 従来モデルの場合の色差
Results of interference color distribution

4. 結 言

陽極酸化処理チタンの意匠性を支える多様な干渉色と凹凸状態の物理モデル化とシミュレーション方法について検討した。干渉色のモデル化ではハーフベクトルベースの干渉モデルを提案し、凹凸状態のモデル化では、マイクロファセットベースの干渉モデルを提案した。検討の過程において、マイクロファセット構造を初めて可視化でき、膜厚分布と微小面法線分布を推定できた。最終的に平均色差 5.0 前後と高精度なシミュレーションを実現した。

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、法線分布関数 (NDF) のモデル化を行い、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チタン陽極酸化皮膜の総合的なシミュレーション手法を確立する。

参照文献

- 1) 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), 464-472 (2019)
- 2) 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: 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. 精密工学会誌, 86 (12), 1051-1056 (2020)
- 3) 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), 35-49 (2015)



長田典子 Noriko NAGATA
関西学院大学 工学部 教授/
感性価値創造インスティテュート 所長
博士(工学)
兵庫県三田市学園2-1 〒669-1337



飛谷謙介 Kensuke TOBITANI
関西学院大学 感性価値創造インスティテュート
客員教授,
長崎県立大学 シーボルト校 情報システム学部
准教授
博士(工学)



亀井光仁 Mitsuhiro KAMEI
関西学院大学 感性価値創造インスティテュート
客員教授 博士(工学)



赤木俊夫 Toshio AKAGI
プロセス研究所
インテリジェントアルゴリズム研究センター
生産マネジメント研究室長



高橋一浩 Kazuhiro TAKAHASHI
鉄鋼研究所 材料信頼性研究部
チタン・ステンレス研究室長 博士(工学)



山村咲弥 Sakuya YAMAMURA
プロセス研究所 計測・制御研究部
プロセス加工計測研究室 主任研究員