

カラー画像解析を用いた酸化皮膜を有するチタンの表面特性解析

○ 東田成輝 †, 飛谷謙介 † ‡, 亀井光仁 †, 長田典子 †

○ Naruki HIGASHIDA †, Kensuke TOBITANI ‡, Mitsuhiro KAMEI ‡, Noriko NAGATA ‡

†: 関西学院大学大学院理工学研究科, narukihigashida@kwansei.ac.jp

‡: 長崎県立大学情報システム学部

<要約> 酸化皮膜を有するチタンは薄膜干渉による多様な発色を持ち、干渉色は拡散反射方向にも広く分布する。このような干渉色の分布は、チタン表面がマイクロファセットの集合体からなる粗面であることに起因していると考えられており、チタン表面を光学顕微鏡で観察した画像からは、マイクロファセット構造の理論に相当する性状、あるいは光学現象が観察されている。本研究では、酸化皮膜を有するチタンの反射をモデル化することを目的とし、カラー画像から表面特性を解析する手法を提案する。まずハイトマップを用いて、膜厚変化の少ない平坦な領域を抽出する。次に、チタン表面をV字型のマイクロファセットの集合体として考えることで反射をモデル化し、顕微鏡画像の色情報から傾きおよび酸化皮膜厚さを同時に推定する。推定されたマイクロファセットの法線分布から本方法の妥当性が示唆された。またxy色度図を用いた解析を行い、同色相の局所領域における膜厚は一定と見なせることが確認された。

<キーワード> 薄膜干渉, マイクロファセット, 微小面法線分布, 酸化皮膜を有するチタン, テクスチャ

1. はじめに

コンピュータグラフィックス (CG) 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。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、軽量かつ、強度、耐食性に優れた物理特性を持つ。チタンの薄膜干渉色は拡散反射方向にも広く分布し、薄膜干渉による多彩な発色が豊かな意匠性をもたらす (図 1.1)。酸化皮膜を有するチタンの色及び質感を CG で再現することで、所望のデザインを容易に可視化することが可能となり、デザイン行為の支援につながる。

素材の色を正確に表現するには、物体表面をマイクロファセットと呼ばれる微小面の集合として考える *physically based modeling/rendering* のアプローチが有効であり、薄膜干渉に着目したモデル化 [1, 2],

布や人の肌など複雑な光学特性を持つ物質について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 [3-11] などの研究例がある。微小面は集合の理論として扱われ、分布関数は計算モデルとして利用されている。微細構造を計測して分布関数を定義した研究例 [12] もあるが、



図 1.1 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・ド・リスカル)

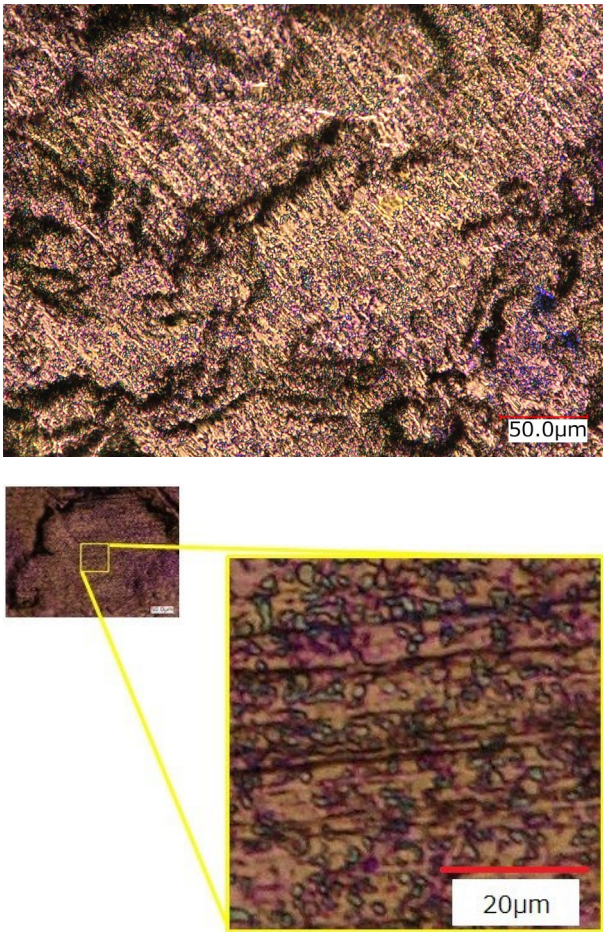


図 1.2 光学顕微鏡を用いて観察された ND 材

一つ一つの微小面の反射に着目し、分布関数を定義した研究例はない。

藤本らは、ロールダル仕上げを施した後に 82.5V で陽極酸化処理を行った酸化皮膜を有するチタン（以下 ND 材と記述）の表面を光学顕微鏡で観察し、マイクロファセット構造の理論に相当する性状、あるいは光学現象を観察することに成功した [13, 14]。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 が用いられ、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トレンズ、倍率は 1000 倍であった。観察された顕微鏡画像を図 1 に示す。さらに顕微鏡画像とそれに位置情報の紐づいたハイトマップを用いてマイクロファセットの法線方向と皮膜厚さを推定する方法を提案した。しかし、推定された法線方向と膜厚を用いたシミュレーションでは十分な精度をあげることができておらず、法線方向と膜厚の推定方法の改善が課題となっていた。

本研究では酸化皮膜を有するチタンの反射を物理

現象に基づいてモデル化することを最終目的とし、カラー画像に基づき表面特性解析する手法を提案する。解析には、先行研究 [14] と同様の顕微鏡画像（図 1.2）とハイトマップを用いる。反射のモデル化は、マイクロファセット 1 つ 1 つの法線方向と膜厚を算出するために行い、マイクロファセットに相当する顕微鏡画像の粒状発色の色情報から算出する。この色相にはマイクロファセットの法線方向、膜厚、鏡面反射強度が寄与していることから、これらの要素を分離することで解析を行う。まず、法線方向の変化と色情報の関係を明らかにすることを目的とし、構造の変化の少ない平坦な領域を抽出する。次に、チタン表面を V 字型溝の構造のマイクロファセットからなる粗面として考えることで抽出した領域におけるマイクロファセットからの反射をモデル化し、法線方向と膜厚の変化を紐づけることで表面構造の推定を行う。本稿では本方法を実際の顕微鏡画像に適用し、推定されたマイクロファセットの法線分布を示し、本方法の有効性を示す。

2. 対象試料

2.1 酸化皮膜を有するチタン

本研究の対象試料は 82.5V で陽極酸化処理を行った 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と数 μm オーダーの微細構造が

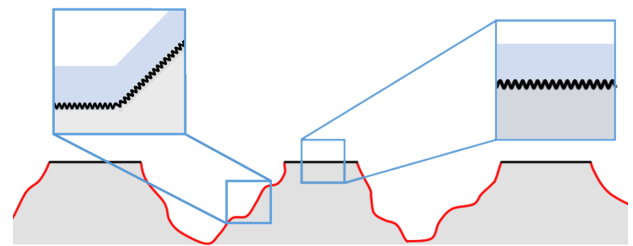


図 2.1 ND 材の表面形状モデル

存在する。ロールダル仕上げでは素材がもともと持っていた構造が凸部に残ることも確認されている [15, 16]。凹部はロールダル仕上げによるランダムな構造であると考えられる。以上より、ND 材の表面形状モデルは図 2.1 で示すようなマクロな構造とミクロな微細構造を併せ持つ複雑な粗面である。

陽極酸化処理を施した粗面において、薄膜は基板の微細構造を追従せず酸化皮膜の表面粗さが基板の表面粗さより小さくなることが知られている [17]。対象試料の持つ複雑な粗面においては、図 2.1 のように基板のマクロな構造を薄膜はある程度追従し、

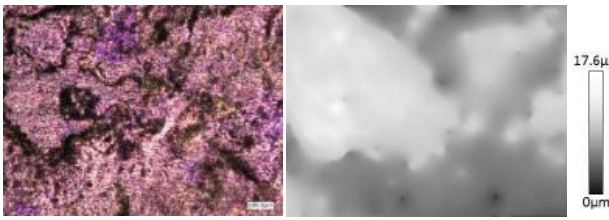


図 2.2 位置情報が紐づいた顕微鏡画像とハイトマップ

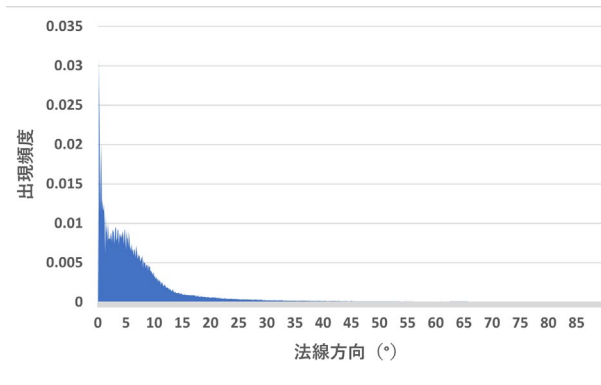
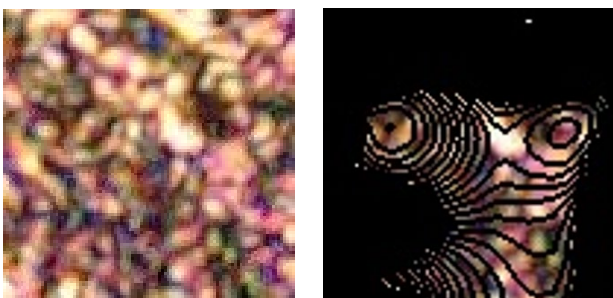


図 2.3 ハイトマップから算出した法線分布

ミクロな構造は追従しないと考えられる。したがって、対象試料における膜厚の変化は、このようなマクロな構造とミクロな微細構造の両方に起因すると仮定できる。

2.2 法線マップを用いた解析対象領域抽出

粒状発色の色相にはマイクロファセットの法線方向、膜厚、鏡面反射強度が寄与しているため、これらの要素と粒状発色の色相の関係を解析する。そこで、これらの要素を分離して解析を行うことを目的としてマクロな構造変化の少ない平坦な領域を解析する。



(a)抽出した平坦部 (b)法線方向 0°
図 2.4 解析対象領域

平坦な領域は法線マップを用いて抽出し、法線マップはハイトマップから算出する。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されており、およそ $0.1 \mu\text{m}$ の分解能がある。ハイトマップと同様に、法線方向も1ピクセルごとに算出する。算出には基準点を含む周辺の5ピクセルのハイトマップデータを用いる。位置情報が紐づいた顕微鏡画像とハイトマップを図 2.2 に、算出した法線分布を図 2.3 に示す。算出した法線分布は 0° 付近と 5° 付近をそれぞれピークとするガウス分布が2つ重なっている分布であることが分かる。これはマクロな構造とミクロな微細構造の法線分布をそれぞれ表していると考えられる。

算出した法線方向から解析対象領域である平坦部を抽出する。領域内のすべての法線が 0° である完全な平坦部を抽出するのは困難であるため、可能な限り傾きのあるピクセルを含まない領域を抽出する。ハイトマップ上では平坦であるが顕微鏡画像に影領域があるものは、ピントが合わずハイトマップが正しく計測できていない可能性を考慮し、抽出対象外とする。

抽出した平坦部を図 2.4(a) に示す。領域は正方形になるように抽出し、一辺の長さは約 $21.7 \mu\text{m}$ であった。また、領域内で最も高い点と最も低い点の高さの差の絶対値は 49nm であった。領域のピクセルはすべて法線方向 3° 以下であった。したがって、図 2.4(a) に示す領域は完全に平坦ではないが、十分平坦な領域であると言える。しかし、この領域内でも粒状発色の色相にはバラツキがあることが確認できる。

微小な法線方向の違いにより色相が変化している可能性が考えられるため、法線方向 0° の領域のみで色相の比較を行う。法線方向 0° の領域のみを示した画像を図 2.4(b) に示す。図 2.4(b) から、法線方向が全く同じでありハイトマップデータも同じ領域であっても、色相が異なっていることが確認できる。したがって、算出した法線マップでは色相の変化を説明することが困難である。

2.3 粒状発色の色相の変化に関する考察

ハイトマップから算出した法線方向以外にも色相の変化に寄与する要素が存在すると考えられることから、粒状発色の色相の変化に寄与する要因を明らかにすることを目的とした解析を行う。解析には薄

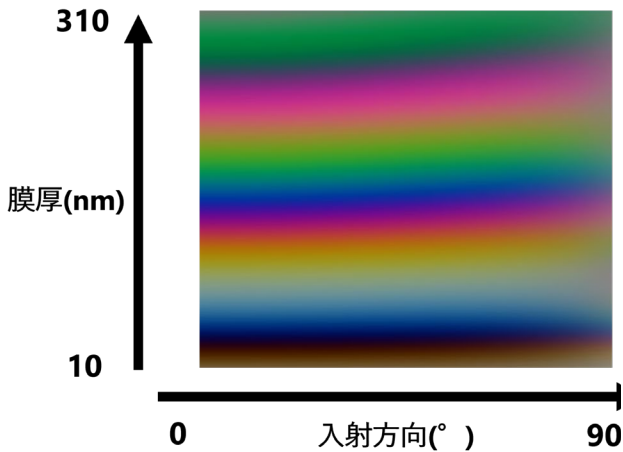


図 2.5 原理モデルに基づき入射方向と膜厚を変化させたシミュレーション

膜干渉の原理モデルに基づくシミュレーションを用いる。薄膜干渉の原理モデルでは基板および薄膜の両方を鏡面としており、入射方向と膜厚のパラメータにより色相が変化する。原理モデルの入射方向と膜厚を変化させてシミュレーションを行い、その色相と顕微鏡画像の粒状発色の色相を比較することで、粒状発色の色相の変化がマイクロファセットの法線方向と膜厚のどちらに起因しているのかを確認する。

原理モデルに基づき入射方向と膜厚を変化させたシミュレーションした際の色相を図 2.5 に示す。光源強度は D65 標準イルミナントを使用した。図 2.5 からチタンの干渉色は膜厚の変化に大きく依存しており、入射方向の変化に対する干渉色の変化は少ないことが分かる。したがって、図 2.4 赤・緑・青などの様々な色相の粒状発色は、膜厚が異なった領域であると考えられ、図 2.4 のような平坦であると言える領域でも膜厚が変化していることが示された。薄膜は基板の微細構造を追従せず酸化皮膜の表面粗さが素材の表面粗さより小さくなる [17] ことから、滑

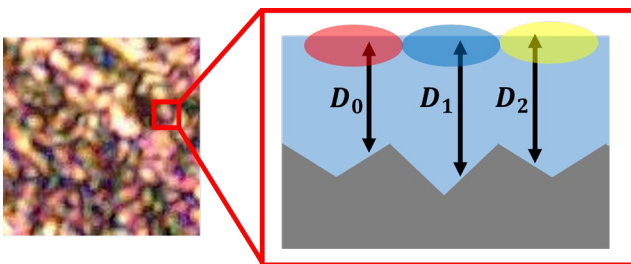


図 3.1 マイクロファセットベースの薄膜干渉モデル

らかな基板が異なる膜厚を持つとは考えにくく、基板の構造の変化により膜厚が異なっていると考えられる。

法線方向の算出に用いたハイトマップは約 $0.1 \mu\text{m}$ の分解能があることから、膜厚の変化に起因している構造は $0.1 \mu\text{m}$ 単位の微細構造であると考えられ、これらを考慮して反射のモデル化を行っていく必要がある。

3. マイクロファセットベースの薄膜干渉

モデルに基づく反射のモデル化

粒状発色の色情報から法線方向と膜厚を推定することを目的とし、反射のモデル化を行う。粒状発色ごとに膜厚は変化しており、膜厚の変化に起因している構造は $0.1 \mu\text{m}$ 単位の微細構造であると考えられることから、 $0.1 \mu\text{m}$ 単位での色の変化を説明できるモデルが必要となる。そこで、マイクロファセットベースの薄膜干渉モデルを提案し、色の変化を説明する。

このモデルは、マイクロファセットの法線方向と膜厚により色を決定するモデルである。提案手法の概要を図 3.1 に示す。図 3.1 において薄膜表面は理想的に滑らかな平面とし、基板はマイクロファセットの集合からなる粗面と仮定する [17]。基板の法線方向と膜厚がランダムに変化するマイクロファセットの集合とした場合には、同様の色となる法線方向と膜厚が複数存在することから推定が困難となる。そこで、physically based modeling/rendering のアプローチ [18] に基づき、基板を V 字型溝のマイクロファセットの集合と仮定し、法線方向と膜厚の変化を紐づける。

法線方向と膜厚の対応関係の概要を図 3.2 に示し、変化の関係を式 1 に示す。

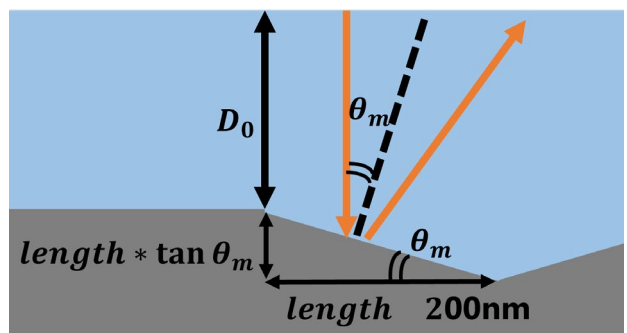


図 3.2 マイクロファセットにおける法線方向と膜厚の関係

$$D = D_0 + length * \tan\theta_m \quad (1)$$

ここで、 D はマイクロファセットにおける膜厚、 D_0 はマクロな平面における全体的な膜厚、 θ_m はマイクロファセットの法線方向、 $length$ は水平方向のマイクロファセットの長さである。ハイトマップが顕微鏡画像の1ピクセル単位で計測されていることから、1ピクセルを1つのマイクロファセットとする。マイクロファセットの長さ $length$ は顕微鏡画像における1ピクセルの長さである200nmとする。

4. カラー画像解析に基づく表面特性解析

4.1 マイクロファセットベースの薄膜干渉モデルに基づくシミュレーション

シミュレーションを行うため、マクロな膜厚 D_0 の値を決定する。マクロな膜厚 D_0 の決定方法には、膜厚を変化させて原理モデルに基づくシミュレーションを行い、シミュレーションの色と顕微鏡画像の全ピクセルの色差の平均を用いる。顕微鏡画像の撮影条件と同じ光源環境を作るため、シミュレーションにおける光源方向と視点方向は 0° とする。色差はCIEにより提案されたCIEDE2000色差式を用いて算出する[19]。その結果、膜厚116nm~121nmでのシミュレーションにおいて色差が15以下であり、最も色差が小さかった膜厚は118nmであった。

マイクロファセットベースの薄膜干渉モデルにおいて、マイクロファセットの法線方向と色の関係を確認することを目的としてシミュレーションを行う。法線方向は $0^\circ \sim 12^\circ$ まで変化させ、マクロな膜厚 D_0 も116nm~121nmまで変化させて色の変化を確認する。マイクロファセットの法線方向が 12° 以上傾いている場合には、光源方向 0° で入射した光の反射光が薄膜内部で全反射し、マクロな色への寄与率が少ないため推定対象外とする。マイクロファセットにおける膜厚 D は式1に従い、法線方向の変化と紐づいて変化する。V字型溝は、マクロな膜厚 D_0 に対して膜厚 D が大きくなるような溝構造と、膜厚 D が小さくなる山構造の両方を考慮する。顕微鏡画像の撮影条件と同じ光源環境を作るため、マクロな平面における光源方向と視点方向は 0° とする。光源強度にはD65標準イルミナントを使用する。

マクロな膜厚 D_0 とマイクロファセットの法線方向を変化させたシミュレーションの結果を図4.1に示す。図4.1の横軸はマイクロファセットの法線方向であり、左に行くほど山のような凸構造の傾斜が大きくなるため膜厚が薄くなり、右に行くほど溝の

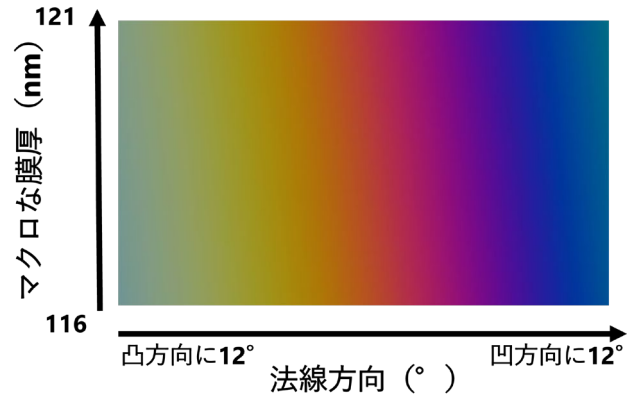


図 4.1 シミュレーション結果

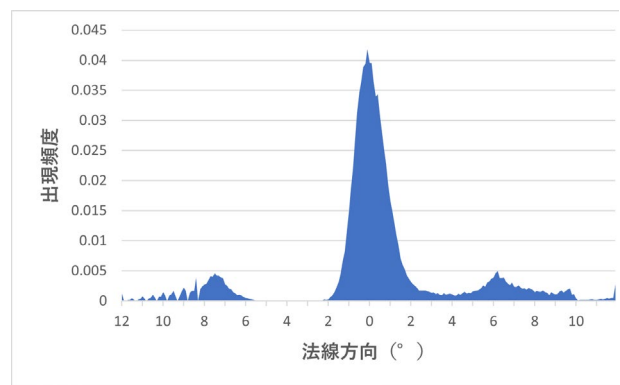


図 4.2 推定した法線分布

ような凹形状の傾斜が大きくなるため膜厚が厚くなる。シミュレーションの色は、顕微鏡画像に出現する赤、黄、緑、青などの粒状発色の色相を網羅しており、これを用いて顕微鏡画像の色から法線方向と膜厚を推定できる目途を得た。

4.2 薄膜干渉シミュレーションを用いた法線方向と膜厚の推定

シミュレーションと顕微鏡画像の色を比較することで、マイクロファセットにおける法線方向と膜厚を推定する。色の比較にはCIEDE2000色差式による色差を用い、ピクセル単位での色差を画像全体で平均して評価する。マクロな膜厚 D_0 は118nmとする。実際に観測される色は図4.1のような理想光源下のシミュレーションの色ではなく、鏡面反射強度により変化している。一般的なマイクロファセットは理想的な鏡面反射を仮定するが、ここでのマイクロファセットは散乱しているものとして扱い、鏡面反射強度による色の変化を考慮する。散乱は等方性のAshikhmin-ShirleyモデルであるNeumann-NeumannのBRDFモデル[19]に従うものとする。マイクロフ

ファセットの粗さを計測して Neumann-Neumann の BRDF モデルの粗さパラメータを決定することは困難であるため、シミュレーションの色と全ピクセルの色の色差の平均が最も小さくなるように粗さパラメータを調整する。

推定の結果、図 4.2 のような法線分布が得られた。この時の Neumann-Neumann モデルの粗さパラメータは 30.0 でピクセルごとの色差の平均は 12.1 であった。図 4.2 に示す法線分布は 0° を中心とした対称性がある点では妥当な結果と考えられる。しかし、左右に小さなピークが出現しており、これが何に起因するものかは今後の検討が必要である。

4.3 xy 色度図を用いた色の確認

法線分布の妥当性を確認するため、顕微鏡画像内のピクセルの色を xy 色度図にプロットした。田中らの手法 [20] に基づき、プロットから規則性を抽出することで微細構造の確認を行う。図 2.4(a) の画像のすべてのピクセルをプロットした xy 色度図を図 4.3 に示す。図 4.3 から、白色点を中心として周辺領域に広く多くのピクセルが密集して分布していることが分かる。しかし局所的な微細構造と色度の関係は明らかでない。

そこで xy 色度図のプロットと顕微鏡画像の座標から規則性を抽出することで、微細構造の考察を行う。顕微鏡画像の局所領域ごとに xy 色度図にプロットを行ったものを図 4.4 に示す。プロット対象とした領域は明るいピクセルと暗いピクセルの両方を含んでいるものであり、顕微鏡画像右下の緑の粒状発色、上部の赤の粒状発色、左下の黄色の粒状発色の 3 領域である。図 4.4 の色度図から、白色点から高彩度領域に直線的にプロットされている様子が確認できる。このことから、局所領域すなわち粒状発色 1 つにおける膜厚は一定であり、マイクロファセットの法線方向の差異による明度と彩度の変化により、

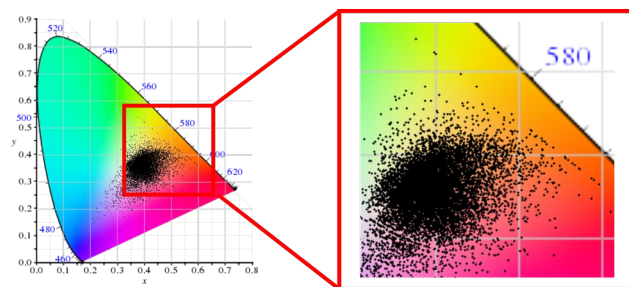
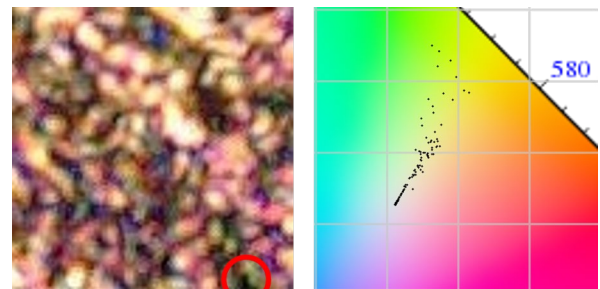


図 4.3 顕微鏡画像の各ピクセルの色をプロットした xy 色度図

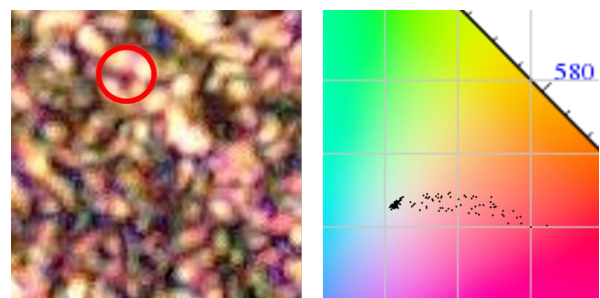
観察された顕微鏡画像の RGB 値が変化していると確認できた。ただしこれは図 3.1 で提案した基板を V 字型溝のマイクロファセットの集合と仮定し法線方向と膜厚の変化を紐づける手法とは必ずしも十分な整合性がとれないと考えられる。今後は、粒状発色 1 つを膜厚一定で異なる法線方向のマイクロファセットの集合と扱うモデルを検討し、構造推定を行う予定である。

5. おわりに

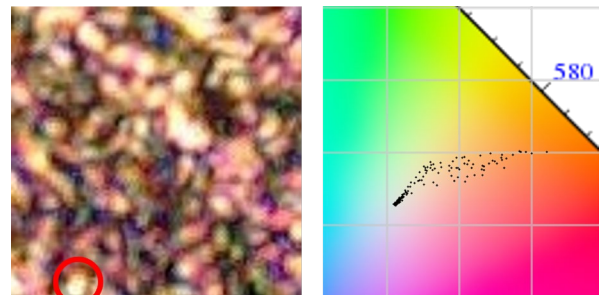
本研究では、酸化皮膜を有するチタンの薄膜干渉による発色を物理現象に基づいてモデル化することを目的とし、カラー画像を用いた表面特性解析を行った。対象試料とした ND 材はマクロな構造とマイクロな微細構造を併せ持つ複雑な粗面であり、顕微鏡



(a) 局所領域 a



(b) 局所領域 b



(c) 局所領域 c

図 4.4 領域ごとにプロットした xy 色度図

画像の粒状発色にはマイクロファセットの法線方向、皮膜厚さ、鏡面反射強度が関係する。これらの要因を分離して解析を行うため比較的平坦な領域を抽出して解析を行ったところ、膜厚の変化に起因している微細構造はハイトマップの分解能である $0.01 \mu\text{m}$ 単位以下の大きさであると考えられた。

膜厚の変化を説明するため、マイクロファセットの法線方向と膜厚により色を決定するモデルである、マイクロファセットベースの薄膜干渉モデルを提案し、基板をV字型溝のマイクロファセットの集合と仮定することで反射をモデル化した。法線方向推定の結果、対称性をもつ法線分布が得られたため手法の妥当性が示唆された。また局所的な微細構造と色の関係は明らかにするため xy 色度図を用いた解析を行い、局所領域に同色相で彩度の異なるピクセルが集まっていることから、粒状発色1つにおける膜厚は一定と見なせることが確認された。これに基づいてV字構造のモデルのブラッシュアップを行っていく。

今後はさらに、手法の精緻化や他領域の推定による妥当性検証を進めていく予定である。

参考文献

- [1] 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*, Vol. 3, No. 4, pp. 307–315 (1997)
- [2] 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*, Vol. 3, No. 2, pp. 106–112 (1998)
- [3] L. Belcour and P. Barla, "A practical extension to microfacet theory for the modeling of varying iridescence," *ACM Trans. Graph.*, Vol. 36, jul (2017)
- [4] J. A. Iglesias-Guitian, C. Aliaga, A. Jarabo, and D. Gutierrez, "A bio physically based model of the optical properties of skin aging," in *Computer Graphics Forum*, Vol. 34, pp. 45–55, Wiley Online Library (2015)
- [5] H. Uno, Y. Mizushima, N. Nagata, and Y. Sakaguchi, "Lace curtain: measurement of BTDF and rendering of woven cloth - production of a catalog of curtain animations," *ACM SIGGRAPH 2008 talks (SIGGRAPH '08)*, Article No. 30, p. 1 (2008)
- [6] 飛谷謙介, 松本達也, 谿雄祐, 藤井宏樹, 長田典子: "素肌の質感表現における印象と物理特性の関係性のモデル化", *映像情報メディア学会誌*, Vol. 71, No. 11, pp. J259-J268 (2017)
- [7] 飛谷謙介, 石田適志, 野村周平, 長田典子: "Microfacet BSDF モデルを用いた織布の CG 表現—カーテンアニメーションカタログの制作—", *精密工学会誌*, Vol. 79, No. 11, pp. 1165-1170 (2013)
- [8] J. Dorsey, and H. Rushmeier, "Advanced material appearance modeling," *ACM SIGGRAPH 2009 Courses*, Article No. 3 (2009)
- [9] M. Pharr, W. Jakob, and G. Humphreys, "Physically based rendering: From theory to implementation," Elsevier (2016)
- [10] X. Chermain, F. Claux, and S. Mérillou, "A microfacet-based BRDF for the accurate and efficient rendering of high-definition specular normal maps," *The Visual Computer*, Vol. 36, pp. 267–277 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00371-018-1606-7>
- [11] M. Ribardière, B. Bringier, L. Simonot, and D. Meneveaux, "Microfacet BSDFs generated from NDFs and explicit microgeometry," *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 38, No.5, pp. 1-15 (2019)
- [12] W. Huang, S. Merzbach, C. Callenberg, D. Stavenga, and M. Hullin, "Rendering iridescent rock dove neck feathers," in *ACM SIGGRAPH 2022 Conference Proceedings, SIGGRAPH '22*, (New York, NY, USA), Association for Computing Machinery (2022)
- [13] 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*, Vol. J102-D, No. 6, pp. 464-472 (2019)
- [14] 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*, Vol. 86, No. 12, pp. 1051-1056 (2020)
- [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*, No. 401, pp. 35-49 (2015)

- [16]長瀬直樹, 志渡誠一, 鐘田征雄: “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, Vol. 94, No. 10, pp. 429-437 (2008)
- [17]鈴木利彦, 藤森伸也: “リン酸電解液中でのチタンの放電陽極酸化処理に関する研究”, 昭和歯学会雑誌, Vol. 12, No. 2, pp. 134-146 (1992)
- [18]K. E. Torrance and E. M. Sparrow, “Theory for off-specular reflection from roughened surfaces,” *Josa*, Vol. 57, No. 9, pp. 1105–1114 (1967)
- [19]G. Sharma, W. Wu, and E. N. Dalal, “The ciede2000 color-difference formula: Implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations,” *Color Research & Application: Endorsed by Inter-Society Color Council, The Colour Group (Great Britain), Canadian Society for Color, Color Science Association of Japan, Dutch Society for the Study of Color, The Swedish Colour Centre Foundation, Colour Society of Australia, Centre Fran,cais de la Couleur*, Vol. 30, No. 1, pp. 21–30 (2005)
- [20]L. Neumann, A. Neumann, and L. Szirmay-Kalos, “Compact metallic reflectance models,” *Computer Graphics Forum*, Vol. 18, No. 3, pp. 161–172 (1999)
- [21]田中 士郎, 高柳 亜紀, 土田 勝, 坂口 嘉之, 田中 弘美: “高分解能マルチバンド hdr 画像解析に基づく織物の分光反射率推定”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 20, No. 1, pp. 35-44 (2015)