

マイクロファセット画像解析に基づく チタン酸化皮膜の薄膜干渉モデル

○藤本 翔[†], 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[‡]

[†]: 関西学院大学大学院工学部/感性価値創造研究センター

[‡]: 日本製鉄株式会社

s.fujimoto@kwansei.ac.jp

概要：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、光学顕微鏡観察によるマイクロファセット画像解析とマイクロファセット法線分布のモデル化手法の検討、およびチタン酸化皮膜のシミュレーションにおける精度向上の可能性を検討した。

<キーワード> 薄膜干渉モデル, マイクロファセット, ハーフベクトル, 法線分布, 意匠性

1. はじめに

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あり、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であり、デザインプロセス支援につながる。



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・ド・リスカル)

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、粗面を微小面（マイクロファセット）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を提案し、シミュレーション手法を構築した[3]。

ただしこの手法では、いわゆる微小面法線分布（微小面の角度の出現確率）は一定とし、強度などの補正は sBRDF 測定装置による実測値で行っている。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と記述）を観測することに成功した。マイクロファセットの理論は、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[4]~[6]。しかし、実際にマイクロファセットを画像として観察した研究例はない。本論文では、マイクロファセットを撮影し、画像解析によって微小面法線分布を求め、今後の微小面法線分布関数 (NDF: normal distribution function) のモデル化へ向けて提案を行う。また先行研究[3]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を行い、モデル化の有用性について検討する。

2. 光学顕微鏡観察によるマイクロファセットの画像化

光学顕微鏡を用いて酸化皮膜を有するチタンの観察を試みた。観察対象の試料を図2に示す。圧延加工の後にロールダル加工を施し、さらに 82.5V で陽極酸化処理を施した酸化皮膜を有するチタン素材である。

2.1. 観察条件

光学顕微鏡は(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。

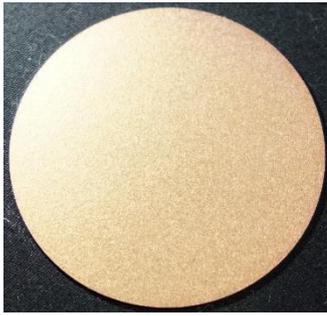


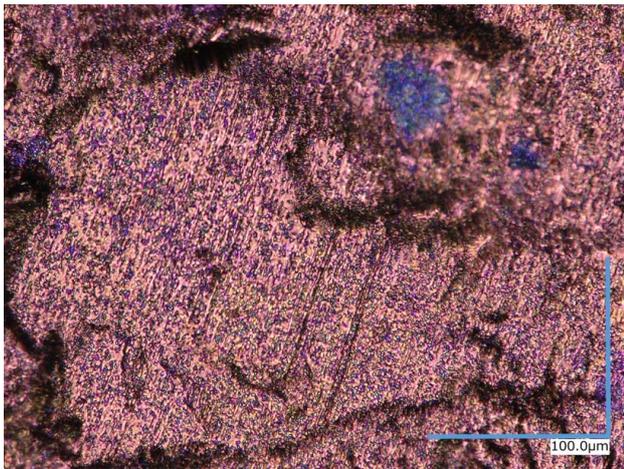
図 2 観察対象試料

2.2. 観察結果と考察

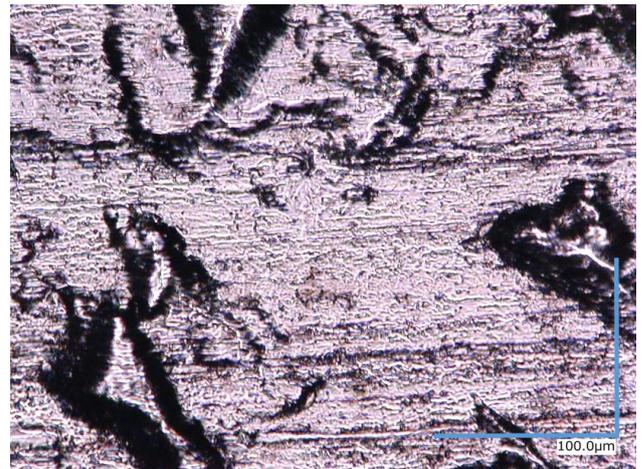
上記観察条件で、対象試料を観測した結果、図 3 (a)に示す画像が得られた。図 3(a)において様々な色が粒状に散らばっているのが確認できる。素材表面で観察される粒状の色の直径は約 $1\sim 3\mu\text{m}$ であるためマイクロファセットを可視化した画像であると考えられる。同一サンプルの他の領域においても同様に各種の色が粒状に散らばっていることが確認できたこ

とから、観察対象の領域によらず粒状の発色が見えることを確認した。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 [7]があるが、数 μm オーダーの微細構造を捉えた例はない。また、同一光学条件で、陽極酸化処理を施していない圧延処理を施した後にロールダル加工を施したチタン素材を観察した結果を図 3 (b)に示す。陽極酸化処理を施した素材とは異なり無数の粒状の発色が確認できない。

このように陽極酸化処理を施したサンプルでのみマイクロファセットが粒状に観察できるのは、法線方向が異なるマイクロファセットがそれぞれ薄膜干渉によって異なる発色をしているためと考えられる。図 4 に本素材表面における光のふるまいを表した概念図を示す。酸化皮膜を有する素材表面では、図 4 (a)で示すように各マイクロファセットの法線方向の違いにより薄膜干渉における位相差が異なるため、各マイクロファセットの酸化皮膜表面に異なる色が発生する。対して、酸化皮膜のない素材表面では、図 4 (b)で示すように

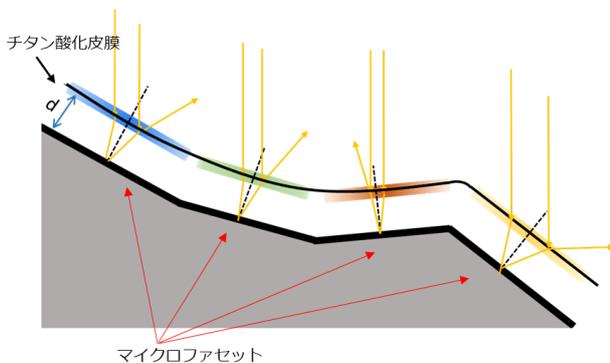


(a) 陽極酸化処理を施したサンプル

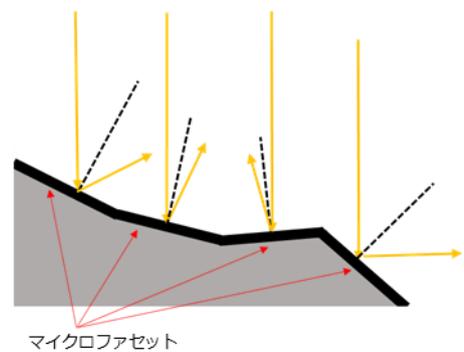


(b) 陽極酸化処理未処理のサンプル

図 3 光学顕微鏡観察画像



(a) 陽極酸化処理を施したサンプル



(b) 陽極酸化処理未処理のサンプル

図 4 素材表面の光のふるまいモデル図

素材表面に入射した光がマイクロファセットの法線方向の違いにより様々な方向へ反射するため、特定のマイクロファセットからの出射光のみを観測することは不可能である。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測することにより“マイクロファセット”が初めて画像として取得されたと考えられる。

3. マイクロファセット分布のモデル化

マイクロファセット画像から画像解析により NDF を求める。ハーフベクトルベースの薄膜干渉モデル[2]を用いることで、マイクロファセット画像の RGB 値からマイクロファセットの膜厚と法線方向が推定可能であり、マイクロファセットの微小面法線分布から NDF をモデル化する。今回は微小面法線分布を算出し、モデル化へ向けて考察を行った。

3.1. 算出方法

マイクロファセットの微小面法線分布を以下の手続きで算出する。

- (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
- それぞれの手続き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ロールダル加工によるマクロな構造の影響が少ないと考えられる領域を ROI として抽出する。今回は一辺 $55.1\mu\text{m}$ (255pixel) の正方形とした。これは数 μm オーダーの微細構造(以後マイクロ構造)による微小面法線方向分布を抽出することと、極めて微小な領域を抽出することで領域内での膜厚を一定と仮定することの 2 点を目的としている。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[3]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、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[3]によるシミュレーションから各法線方向の $L^*a^*b^*$ 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)を繰り返す

行い、色差 (ΔE) の全ピクセルの平均が最も小さい膜厚を推定膜厚とする。

3.2. 結果と考察

(1)の手続きにより抽出した ROI の位置を示す画像を図 5 に、抽出した ROI を図 6(a)に、ROI から算出対象領域を抽出した結果を図 6(b)に示す。図 6(b)では算出対象外の領域を水色で示した。算出対象領域のピクセル数は 53156 ピクセルであった。

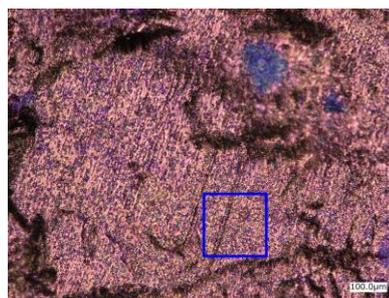
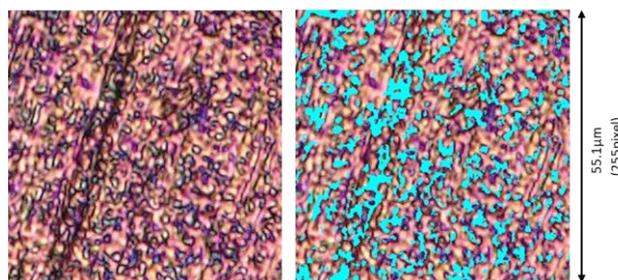


図 5 顕微鏡画像内の ROI



(a) ROI (b)算出対象領域

図 6 算出対象領域の抽出結果

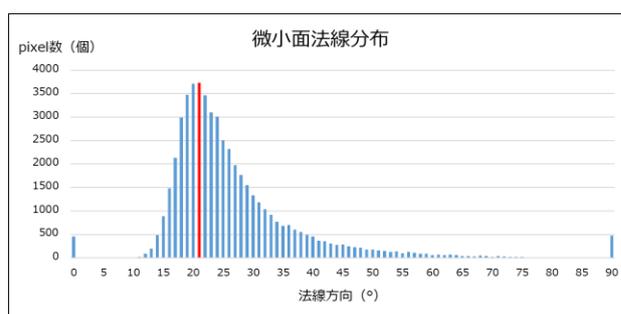


図 7 微小面法線分布の算出結果

(2), (3)の手続きにより算出した微小面法線分布を図 7 に示す。この分布は最頻値 22° の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。歪成分の発生要因としては図 5 のようなサンプル全領域でのマクロな形状変化、ROI 内での膜厚のゆらぎ、あるいはこれらの複合のようなものが考えられる。これを特定するためには歪成分の分離が必要で

あり、今後 ROI のサイズを拡張するか、あるいは複数の ROI を設定し試算結果を平均化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ガウス分布のみが残存し、歪が何らかの確率密度関数で表現される場合には、図7を確率密度関数の和として表現できることになる。なお、図6で設定したROI内の推定膜厚は129.7nm、算出対象ピクセルの平均色差は6.5であった。この試算結果はサンプル上のROI設定領域によって大きく変動することは図5から容易に推測できる。

4. チタン酸化皮膜のシミュレーション

本研究で対象としたロールダル加工表面に対して、著者らの先行研究[3]で提案したチタン素材のシミュレーション手法を適用した(先行研究では圧延加工のみ(ロールダル加工無し)のチタン素材に対して提案したシミュレーション手法であった)。

提案したシミュレーションモデルの概略図を図8に示す。図8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。このモデルでは粗面における、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し、局所的に正反射条件が整い薄膜干渉が生じるとして拡散反射方向における薄膜干渉色を説明している。その際、微小面の法線ベクトルの出現確率は一定とし、強度補正はsBRDF測定装置による実測値で行っている。シミュレーションのパラメータである酸化皮膜の膜厚は、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2乗誤差が最小となる膜厚を算出し、推定膜厚としている。また、シミュレーション精度はシミュレーション結果とsBRDF測定装置による計測結果の色差を算出することにより評価している。先行研究[3]では、圧延加工後に(ロールダル加工を施さず)陽極酸化処理を施した酸化皮膜を有するチタン素材を対象としたところ、平均色差5.0、許容色差分類における4級であり、実用上十分な精度であることを確認している。

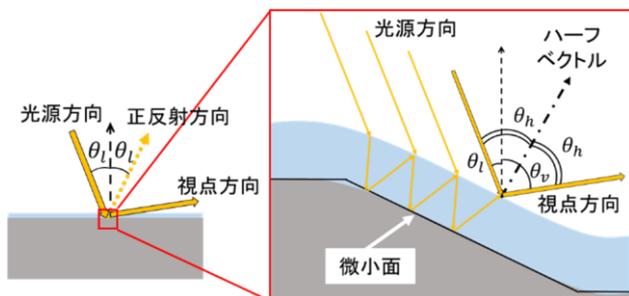


図8 ハーフベクトルベースの薄膜干渉モデル

これに対して本研究では、ロールダル加工表面を対象としている。シミュレーションで得られた結果とsBRDF測定装置による計測結果の色差は6.4であった。シミュレーションにより作成したCGを図9に示す。図10は圧延加工表面とロールダル加工表面の100倍顕微鏡写真を比較したもので、圧延加工表面の均一な構造に比較して、ロールダル表面はランダムなマクロな構造が現れている。すなわち先行研究における「微小表面の法線ベクトルの発生確率が一定」という仮定条件が、ロールダル加工表面に対しては物理モデルとして適当でないことが色差悪化の要因と考えられる。この結果、前章で算出した微小面法線分布からNDF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モデルを構築することが、このようなランダムなマクロ構造をもつ平面に対するシミュレーションの高精度化に有用な手法であることが示唆された。

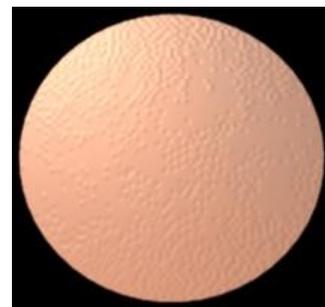
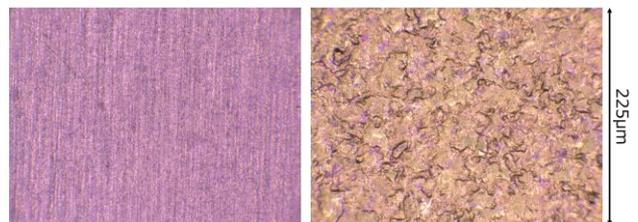


図9 CG画像



(a) 圧延加工 (b) ロールダル加工

図10 表面顕微鏡画像の比較

5. まとめ

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、光学顕微鏡観察によるマイクロファセット画像解析手法とマイクロファセット法線分布のモデル化手法の検討、およびチタン酸化皮膜のシミュレーションの精度確認を行った。光学顕微鏡画像で見られる直径約1 μ m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が初めて視覚的に観測されたものと考えられる。またマイクロファセット画像

から画像解析とハーフベクトルベースの薄膜干渉モデルによりマイクロ構造の微小面法線分布を算出し、ガウス分布をベースとした NDF のモデル化方法を提案した。さらに先行研究で提案したシミュレーション手法を本稿で対象としたロール加工表面に適用し、観測したマイクロfacet分布から NDF を求める方法の有用性を示唆した。

今後は 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。

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, vol. 43, No. 11, pp. 1014-1019, 1992.
- [2] 山口英俊, 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, vol.40, no.1, pp. 64-65, 1989.
- [3] 藤井宏樹他：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.
- [4] B.Walter, et al. : Microfacet models for refraction through rough surfaces, Proc. 18th Eurographics conference on Rendering Techniques (EGSR'07), pp. 195-206, 2007.
- [5] Dorsey, Julie and Rushmeier, Holly :Advanced material appearance modeling, ACM SIGGRAPH 2009 Courses s (SIGGRAPH'09), pp. 1-134, 2009.
- [6] RIBARDIEREM, et al. : Microfacet BSDFs Generated from NDFs and Explicit Microgeometry , ACM Transactions on Graphics, vol 38, No 5, pp. 1- 15, 2019.
- [7] 吉村知浩他：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, Vol. 73, No.10, pp. 768-772, 2009.

謝辞 本研究の一部は JST 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。

藤本翔:2019 年関西学院大学工学部人間システム工学科卒業。2019 同大学院修士課程在学中。現在, CG 分野の研究に従事。

飛谷謙介:2002 年早稲田大学工学部応用物理学科卒業。2004 年岐阜県立情報科学芸術大学院大学(IAMAS) 修士課程修了。JST 地域結集型共同研究事業特別研究員を経て, 2010 年岐阜大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年岐阜大学産官学融合本部研究員。2019 年より関西学院大学工学部/感性価値創造研究センター特任准教授。博士(工学)。主に感性工学, コンピュータビジョンに関する研究に従事。電気学会, 精密工学会, 日本顔学会, ACM など各会員。

谿雄祐:2011 年, 東京大学大学院博士課程修了。2015 年より関西学院大学工学部/感性価値創造研究センター研究特別任期制講師。視覚と触覚を介した物体の質感や印象の認知に関する研究に従事。博士(心理学)。

亀井光仁:1971 年奈良工業高等専門学校卒業。同年三菱電機(株)入社。生産技術研究所, 応用機器研究所, 産業システム研究所を経て 1993 年系統変電システム製作所。2011 年名古屋大学大学院工学研究科マテリアル理工学専攻博士後期課程修了。2016 年より関西学院大学感性価値創造研究センター客員教授。主として産業向けのセンサ技術, 計測技術の研究開発に従事。博士(工学)。

長田典子:1983 年京都大学理学部数学系卒業。同年三菱電機(株)入社。産業システム研究所等において色彩情報処理, 感性情報処理の計測システムへの応用に関する研究に従事。1996 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。2003 年より関西学院大学工学部情報科学科助教授, 2007 年教授。2009 年米国パデュー大学客員研究員。2013 年感性価値創造研究センター長。専門は感性工学, メディア工学等。博士(工学)。

赤木俊夫:1987 年東京大学工学部産業機械工学科卒業。同年新日本製鐵(株)(現, 日本製鐵(株))入社。1999 年テキサス大学オースチン校コンピュータサイエンス科修士課程修了。主として計測技術, データ解析技術の研究開発に従事。

高橋一浩:1991 年東京理科大学工学研究科物理学専攻修了。同年新日本製鐵(株)(現, 日本製鐵(株))入社。以降, 建材用チタン板をはじめとするチタンの研究開発に従事。博士(工学)。

山村咲弥:2015 年早稲田大学先進理工学研究科物理学及応用物理学専攻修士課程修了。同年新日鐵住金(株)(現, 日本製鐵(株))入社。プロセス研究所にて, 主として計測技術, コンピュータビジョンに関する研究開発に従事。