0S2-H1 (IS1-B1)

ハーフベクトルベースの薄膜干渉モデルによるチタンの色表現

Color of Oxide Layered Coating on Titanium by Model of Oxide Layer Interference based on Half Vector

藤井 宏樹†, 飛谷 謙介‡, 谿 雄祐‡, 亀井 光仁‡, 長田 典子†‡, 赤木 俊夫§, 髙橋 一浩§, 山村 咲弥§

Hiroki FUJII[†], Kensuke TOBITANI[‡], Yusuke TANI[‡], Mitsuhito KAMEI[‡], Noriko NAGATA[†][‡], Toshio AKAGI § , Kazuhiro TAKAHASHI § and Sakuya YAMAMURA §

*: 関西学院大学大学院理工学研究科, F-hiroki@kwansei.ac.jp
 ‡: 感性価値創造研究センター, nagata@kwansei.ac.jp
 §: 新日鐵住金株式会社

概要: 酸化皮膜を有するチタンの薄膜干渉色シミュレーションでは、これまで鏡面反射方向の限られた干渉のみを扱っており、色の見え方を十分に表現できていなかった.本研究では拡散反射方向からも観測されるチタン素材固有の干渉色を表現するため、素材表面を微小面の集合体からなる粗面として扱い、微小面の集合体による散乱をハーフベクトルベースで表現する薄膜干渉モデルを提案する.シミュレーション結果と計測値の色差を算出した結果、目標とした許容色差 5 級以内を達成したことから、モデルの妥当性を確認できた.

1. まえがき

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.

素材の質感を忠実に表現するには、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 してモデル化することが有効である.例えば、しゃぼ ん玉や真珠の質感表現では薄膜干渉に着目したモ デル化が行われている [1][2][3][4][5][6][7].

本研究では酸化皮膜を有するチタン素材の色表 現手法を提案する.チタンは陽極酸化処理によって 表面に酸化皮膜を生成することで,薄膜干渉による 色変化を得るとともに,軽量,高強度,高耐食性など 優れた物理特性を持つ.特にチタンの酸化皮膜(以 降,酸化皮膜と略す)の膜厚によって色が複雑に変 化するため,その多様な意匠性から建材や装飾品等 へ応用されるなど注目が集まっている[8][9].そこで 酸化皮膜の干渉色や質感をシミュレーションで正確 に表現できれば,建築家やデザイナーのイメージし た建物や製品の印象を容易に可視化でき,価値創

ViEW2017 ビジョン技術の実利用ワークショップ(2017.12.7-8 横浜)

出に繋がるデザイン支援が実現できる.そのために は、酸化皮膜を有するチタン表面における光の振る 舞いのモデル化が必要となる.酸化皮膜の干渉色シ ミュレーションに関するこれまでの研究では、図1に 示すようなチタン素材および酸化皮膜の両方を鏡面 とした薄膜干渉の原理モデルが採用されてきた.



図1 薄膜干渉の原理モデル

図1の原理モデルでは,酸化皮膜表面で反射した 光と,酸化皮膜を透過してチタン素材表面で反射し た光が,再び同じ光路上に重なることによる構造色と されており,鏡面反射方向のみで干渉色が生じること になる.一方,実際に酸化皮膜を有するチタンで装 飾した建物の外観(図2)では,複雑な形状にも関わ らず,ほぼ一方向からの平行光を仮定できる太陽光 の照明下において,明らかな干渉色が広範囲にわた って観察される.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しており、図1の鏡面反 射モデルでは説明が困難である.



図2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)

このような拡散反射方向の干渉色を表現するため に、本研究では、チタン素材表面を微小面の集合体 からなる粗面として扱い、微小面の集合体による散乱 をハーフベクトルベースで表現する薄膜干渉モデル を提案する.これにより酸化皮膜の膜厚による構造色 変化が表現でき、デザイン支援可能なシミュレーショ ンツールが構築できる.

以下,2章では試料を用いた干渉色の計測,3章 では提案する薄膜干渉モデル,4章ではシミュレーシ ョン方法,5章ではシミュレーション結果と評価につい て順に述べる.結果の評価には、実際に計測した干 渉色と計算色との色差をΔE で表し、許容色差の分 類[10]における5 級以内(日常生活での色差許容範 囲)を目標とする.

2. 干渉色の計測と表面粗さの評価

チタンは陽極酸化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.本研究ではまず,酸化皮膜を有す るチタンの外観的な表面性状を評価するため、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,及び,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左上の青色サンプルを用いた.



図3酸化皮膜を有するチタンの実写画像

2.1. 干渉色の計測

酸化皮膜を有するチタン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. 測定装置の光学系と仕様を図 4,表1に示す.



図4 sBRDF 測定装置の光学系

仕様
,

名称	S-OGM3: Spectrum-Optical
	Gyro Measuring Machine-3
光源	ハロゲンランプ
分光器距離	325mm 以上(ステージ中心からレ
	ンズ先端までの距離)
受光系	φ8mm(受光開き角:1.0°)
受光系の型名	浜松ホトニクス製マルチチャンネル
	分光器 PMA-12 C10544-01

sBRDF 測定装置はサンプルに対し, 光源方向(θ_l , φ_l)と分光器方向(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 計測した sBRDF から算出した 干渉色の角度分布(青色サンプル)

図 5 において光量が大き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,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 ルターによっ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. 表面粗さの計測

次に、チタン素材の表面粗さを評価する.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.チタン素材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.なお青色サンプルの陽極酸化時電圧 は 25V であり、本条件に該当する)[11].これはすな 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素材表 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.



図6酸化皮膜の表面粗さ曲線

ー方,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[12].

$$h = \lambda / 8 \cos \theta \tag{1}$$

ここで λ は波長, θ は入射角を示している.素材表面の粗さが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 タン素材表面も同様に「粗い」表面であると考えられ る.

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.



(a) 光源方向 0°, カメラ方向 0°



(b) 光源方向 45°, カメラ方向 0°



(c) (b)の平均明度を上げたもの

図7光学顕微鏡の撮影画像

図 7(a)は光源方向 0°,顕微鏡方向 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で 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°,顕微鏡方向 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)の平均明度 をあげた(c)において,(a)と同色相の青色干渉色が局 所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.

なお(b)において局部的に赤,緑など,マクロな色 (本サンプルでは青色)とは異なる色が複数確認され た.これは平均的な膜厚に基づく干渉とは異なる局 所的な干渉と解釈されるが,本研究で提案する微小 領域の散乱による干渉モデルと矛盾するものではな い.ただし顕微鏡によってようやく確認できる程度で あり,通常の表面色観察ではマクロな干渉色に埋も れて視認できないと考えられ,以降の研究では取り 扱わないこととした.

3. ハーフベクトルベースの薄膜干渉モデル

本研究では、光学的粗面であるチタン素材における拡散反射方向の干渉色を表現するために、ハーフ ベクトルベースの薄膜干渉モデルを提案する.

ハーフベクトルは、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。ハーフベクトルを採用したモデルとして は、物体表面を微小面の集合と考えて反射光分布を 表現する Torrance-Sparrow モデルなどが挙げられる [13]. ハーフベクトルは一般的には反射光の強度分 布を表現するために用いられるが、光の波長を考慮 することで反射光の波長分布を表現することもできる。 本研究ではこのハーフベクトルを薄膜干渉モデルに 適用し、光学的粗面であるチタン素材における拡散 反射方向の干渉色を表現する。

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8 ハーフベクトルベースの薄膜干渉モデル

図は光源方向θ_l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 さまざまな方向を持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,局所的に 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.

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 9 に薄膜 干渉シミュレーションのパラメータを示す.



図9 薄膜干渉シミュレーションのパラメータ

 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.

まず原理モデル(図 1)における反射率は式(2)で 算出される.

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

ここで r_{12} , r_{23} , r_{21} 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.

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

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

次に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)の入射角の代わりに式(5) のθ_bを入射角として代入する.

$$\theta_h = (\theta_l + \theta_v)/2 \tag{5}$$

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 10 に示す.







(b) 膜厚 70nm

図 10 分光反射率の計算結果 (光源方向 10°, 視点方向 45°)

膜厚*d*が 30nm, 70nm の場合を例に分光反射率を 求めている. なお, 酸化皮膜の複素屈折率*n*_{1(λ)}の実 部と虚部の値は図 11 に示す公開情報を用いた.



図 11 酸化皮膜の複素屈折率

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.酸化皮膜とチタン素材の複素屈折率の波 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.

なお、本研究では2章に記した仮定より膜厚は一 定としている.また拡散反射方向の干渉色にのみ着 目したため、微小面の出現確率は考慮せず、最終的 に出現確率の差による拡散反射光強度の差は、 sBRDF測定装置による実測値で補正することとした.

5. シミュレーション結果と評価

ハーフベクトルベースの薄膜干渉モデルの妥当性 を検証するために、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.青色サン プルの場合、推定膜厚は 52nm となった.

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12に示す.図において,全体的に図5の計 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.



図 12 シミュレーション結果から算出した 干渉色の角度分布(青色サンプル)

さらにシミュレーション結果を定量的に評価するために、L*a*b*空間に変換し計測値との色差を求めた. 色差 ΔE は 2 色の知覚的な差を表すもので、式(5)を 用いて求めた.

$$\Delta E = \sqrt{\left(L_0^* - L_1^*\right)^2 + \left(a_0^* - a_1^*\right)^2 + \left(b_0^* - b_1^*\right)^2}$$
(5)

ここで L_0^* , a_0^* , b_0^* はシミュレーション結果, L_1^* , a_1^* , b_1^* は計測値(図5で示した)から求めた $L^*a^*b^*$ 値である.

光源方向と視点方向を変化させたときの色差を図 13 に示す.図から全体的に良好な色差が得られたこ とが分かる.本研究では拡散反射方向の干渉色を対 象としたため,鏡面反射方向の領域を除いて平均色 差を求めた結果,5.84 であった.これは研究目標とし た許容色差分類[10]における 5 級となる良好な結果 であった.



6. 考察

ハーフベクトルベースの薄膜干渉シミュレーション の結果とsBRDF測定装置による計測値を色差により 比較したところ,拡散反射方向領域において良好な 結果を示した.このことから,酸化皮膜を有するチタ ンでは,従来から扱われてきた鏡面反射方向だけで なく,拡散反射方向における干渉色を扱うことの妥当 性が示され,その薄膜干渉は,微小面の法線方向に 着目したハーフベクトルベースのモデルで表現でき ることが確認された.

なお、図 13 において、鏡面反射から一定の角度 領域で誤差が増加し、その誤差が光源方向 θ_l と視 点方向 θ_v とがいずれも大きくなるにつれて大きくなっ ている.この要因については以下の2点が挙げられ る.

1点目は、鏡面反射から一定の角度領域で誤差が 増加するのは、sBRDF 測定装置の光源の輪郭形状 など、鏡面反射領域近傍に限定した測定装置側の 要因が考えられることである.これは今後原因と対策 について検討を行う予定である.

2点目は、角度が大きくなるにつれて誤差が大きく なるのは、式(1)のhが徐々に大きくなり、サンプル表 面の光学的粗さが見かけ上、粗面から滑らかな面に 近付くことによって、散乱モデルが変化する影響(シ ャドー効果としても知られている)が考えられる点であ る.これについては今後のシミュレーションに取り込 んでいく予定である.

7. むすび

本研究では,酸化皮膜を有するチタン素材の高精 度な質感表現を目指し,拡散反射方向の薄膜干渉 モデルの提案を行った.まずチタン素材の表面性状 によって起こる現象を明らかにするために,酸化皮膜 を有するチタンの sBRDF の計測,表面粗さの計測, および光学顕微鏡を用いた表面局部干渉色の観察 を行った.次にハーフベクトルベースの薄膜干渉モ デルを提案し,その妥当性を検証するために,シミュ レーションによって得られた分光反射率とチタンサン プルで実測した分光反射率との拡散反射方向にお ける色差を算出した.その結果,以下の結論を得た.

- 酸化皮膜を有するチタンは微小面からの散乱に より,鏡面反射方向のみならず拡散反射方向に おいても薄膜干渉による干渉色が確認された.
- ② ハーフベクトルベースの薄膜干渉モデルを用いることで、拡散反射方向における干渉色を色差5級以内の精度で表現することに成功した。

なお本研究では、拡散反射方向の干渉色を表現 する目的で微小面の出現確率を一定として解析を進 めたが、今後は発生確率を確率密度関数で表現す ることで反射光強度も含めたシミュレーション手法を 確立していく予定である.また、光源方向と視点方向 が大きくなるにつれて、シミュレーションの誤差が増 加する現象について、誤差要因の検証と対策を行う 予定である.

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] M.L.Dias: Ray tracing interference color, IEEE Computer Graphics and Applications, vol.11, no.2, pp.54–60, 1991.
- [2] K.Iwasaki, K.Matsuzawa, and T.Nishita: Real-time rendering of soap bubbles taking into account light interference, Computer Graphics International, 2004. Proceedings, pp.344–348, 2004.
- [3] N.Nagata, T.Dobashi, Y.Manabe, T.Usami, and S.Inokuchi: Modeling and visualization for a pearl-quality evaluation simulator. Visualization and Computer Graphics, IEEE Trans, vol.3, no.4, pp.307–315, 1997.
- [4] T.Dobashi, N.Nagata, Y.Manabe and S.Inokuchi: Implementation of a pearl visual simulator based on blurring and interference, IEEE/ASME Trans. Mechatronics, vol.3, no.2, pp.106-112, 1998.
- [5] H.Hirayama, K.Kaneda, H.Yamashita, and Y.Monden: An Accurate Illumination Model for Objects Coated with Multilayer Films, Computers & Graphics, vol.25, no.3, pp.391-400, 2001.

- [6] 齋藤彰: モルフォ蝶に学ぶ構造色材料, 日本画像学会 誌, vol.53, no.3, pp.216-223, 2014.
- [7] M.V.Diamanti, B.Del Curto, V. Masconale, C.Passaro, and M.P.Pedeferri: Anodic coloring of titanium and its alloy for jewels production, Color Research & Application, vol.37, no.5, pp.384-390, 2012.
- [8] 佐藤廣士:小特集:最近の金属建材と表面技術チタン建 材とその表面処理,表面技術,vol.43, no.11, pp.1014-1019, 1992.
- [9] 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.
- [10] 新編 色彩科学ハンドブック(第2版),日本色彩学会, 東京大学出版会,東京,1998.
- [11] 鈴木俊彦,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.
- [12] T.A.Trezza, and J.M.Krochta: Specular Reflection, Gloss, Roughness and Surface Heterogeneity of Biopolymer Coatings, Journal of Applied Polymer Science, vol.79, no.12, pp.2221-2229, 2001.
- [13] K.E.Torrance, and E.M.Sparrow: Theory for Off-Specular Reflection From Roughened Surfaces, J. Opt. Soc. Am., vol.57, no.9, pp.1105-1114, 1967.

藤井宏樹:2016 年関西学院大学理工学部人間システム工学 科卒業.2017同大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 年早稲田大学理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.2014 年より関西学院大 学理工学部/感性価値創造研究センター特任講師.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 関西学院大学理工学部/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㈱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 一客員教授。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㈱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理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㈱(現,新日鐵住金㈱)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 年東京理科大学理工学研究科物理学専攻 修了.同年新日本製鐵㈱(現,新日鐵住金㈱)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㈱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.