**計**文

微小	面による	薄膜干涉	現象を	考慮した	チタン	酸化皮膜の	色表現
藤井	宏樹 <sup>†a)</sup>	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††

Color of Oxide Layered Coating on Titanium Considering Interference from Fine Structure

Hiroki FUJII<sup>†a)</sup>, Kensuke TOBITANI<sup>†</sup>, Yusuke TANI<sup>†</sup>, Mitsuhito KAMEI<sup>†</sup>, Noriko NAGATA<sup>†</sup>, Toshio AKAGI<sup>††</sup>, Kazuhiro TAKAHASHI<sup>††</sup>, and Sakuya YAMAMURA<sup>††</sup>

**あらまし**酸化皮膜を有するチタンは、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。そのため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、デザイン支援につながる。これまで酸化皮膜を有するチタンの干渉色シミュレーションは鏡面反射方向の限られた干渉のみを扱っており、実際に三次元構造物に適用した場合には色の見え方を十分に表現できないという問題があった。本研究ではまずチタン表面の微細構造によって発生する拡散反射方向での干渉色を議論する。次に拡散反射方向の干渉色を表現するためのハーフベクトルベースの薄膜干渉モデルを提案する。モデルから得られた分光反射率と計測結果の分光反射率を用いて色差を算出した結果、目標とした許容色差4級以内に収まることがわかった。最後にレンダリングによる CG 表現を行い、モデルの妥当性を確認した。

キーワード チタン,酸化皮膜,薄膜干渉,反射モデル,ハーフベクトル,CG

## 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 physically based modeling/rendering の アプローチが有効である [1], [2]. 例えばしゃぼん玉や 真珠など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 [3]~[6]. また肌や布の質感表現では

<sup>††</sup> 日本製鉄株式会社,東京都
 NIPPON STEEL CORPORATION, Tokyo, 100-8071 Japan
 a) E-mail: F-hiroki@kwansei.ac.jp

DOI:10.14923/transinfj.2018JDP7030

表面下散乱や異方性反射やその組み合わせによって, 更に複雑な物理現象のシミュレーションが可能になっ ている [7]~[9].

本研究では酸化皮膜を有するチタン素材の色表現を 提案する.チタンは軽量,高強度,高耐食性など優れ た物理特性をもつとともに,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.更に,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[10],[11].そこで酸化皮膜による 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.

薄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に示すような基材及び薄膜の両方を鏡 面とした薄膜干渉の原理モデルが採用されてきた.

<sup>&</sup>lt;sup>†</sup> 関西学院大学大学理工学部/感性価値創造研究センター,三田市 School of Science and Technology/Research Center for Kansei Value Creation, Kwansei Gakuin University, 2–1 Gakuen, Sanda-shi, 669–1337 Japan

図1の原理モデルでは、薄膜表面で反射した光と、 薄膜を透過して基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り構造色が現れるとされており、 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、複雑な形状にもかかわらず、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.

このような拡散反射方向の干渉色を表現するため, 我々は微小面 (micro-facet) を取り入れた反射モデル に着目した [12]~[14]. これらの反射モデルは,物体 表面を微小面の集合として考え,照明された物体の鏡 面反射成分を表現することができる.このモデルを拡 張し,チタン素材の拡散反射をミクロな鏡面反射の集 合としてモデル化することで,拡散反射方向における 干渉色の表現が可能になる.

干渉色の表現に微小面の反射モデルを応用した先行 事例として, He-Torrance モデル [14] を用いて薄膜干 渉を高精度にモデル化している Hirayama et al. の研 究が挙げられる [6]. しかしながらこの研究では, 薄膜



図 1 薄膜干渉の原理モデル Fig. 1 Principle model of thin layer interference.



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)

Fig. 2 View of color decorated building using oxide layered coating on titanium (Hotel Marques de Riscal). 干渉を含む鏡面反射近傍の反射特性を高精度にモデル 化することを目的としているため,拡散反射方向の薄 膜干渉は扱われておらず,多重反射も扱われていない.

以上を踏まえ、本研究ではチタン基板表面を微小面 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で表現する薄膜干渉モデル を提案する.これにより鏡面反射成分だけでなく拡散 反射成分における酸化皮膜の膜厚による構造色変化 が表現でき、将来的に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. では試料を用いた干渉色の計測, 3. では従 来の物理ベースの反射モデルと提案する薄膜干渉モデ ル, 4. ではシミュレーション方法, 5. ではシミュレー ション結果と評価, 6. では提案モデルを用いた CG 表 現について順に述べる. 結果の評価には,本研究が応 用を想定しているデザイン支援という観点から,実際 に計測した干渉色とシミュレーションによる計算色と の色差を ΔE で表し,許容色差の分類 [15] における 4 級以内(経時比較した場合にでも,ほぼ同一と認める ことができる)を目標とする.

# 2. チタン試料を用いた干渉色及び表面粗 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.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の 左上の青色サンプル(サンプル2)を用いた.

### 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



Fig. 3 View of various titanium plates with oxide layered coating.



図 4 sBRDF 測定装置の光学系 Fig. 4 Optical system of sBRDF measureing equipment.

表 1 sBRDF 測定装置の仕様 Table 1 Specifications of sBRDF measureing equipment.

名称	S-0 GM 3 : Spectrum -0 ptical G yro M easuring M achine-3
光源	ハロゲン
カメラ距離	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	浜松木トニクス製マルチチャンネル分光器 PMA-12 C10544-01





Fig. 5 Measured interference color distribution of the blue color plate (sample 2).

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.測定装置の光学系と仕様を図4及び表1に示す.

sBRDF 測定装置はサンプルに対し,光源方向( $\theta_l$ ,  $\varphi_l$ )と視点方向( $\theta_v$ ,  $\varphi_v$ )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.更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.フィルタを 用いて光源の光量を減らすと,ハイライト部分の鏡面



Fig. 6 Surface roughness curve of the oxide layered coating on blue color plate

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)[16].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.

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[17].

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

ここで入は波長,  $\theta$  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おおむね 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 均一としたチタン素材表面も同様に粗い表面であると 考えられる.



 (a) 光源方向 0°, (b) 光源方向 45°, (c) (b)の平均明度を 視点方向 0° 視点方向 0° 上げたもの
 図 7 光学顕微鏡の撮影画像
 Fig. 7 Microscopic images of the blue color plate.

#### 2.3 局部干渉色の観察

更に,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0°,視点方向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°,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.

以上を踏まえ,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.

### 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,光の波長を考慮することで反射光の波長分布を表 現することもできる[18].ハーフベクトルを採用した 反射モデルとしては,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



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

どが挙げられる [12]~[14].

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<sub>l</sub> に対して正反射方向と は異なる視点方向 θ<sub>v</sub> 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 8 の  $\theta_l$ ,  $\theta_v$  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,  $\lambda$  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  $\lambda$  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.

まず従来の原理モデル(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, $\delta$ は位相差であり,式(3)で表される.

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

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.

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

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 $\theta$ の代わりに式 (5)の $\theta_b$ を入射角として代入する.

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

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. なお、酸化皮膜の複素屈折率  $n_{1(\lambda)}$ の実部と虚部の値は図10に示す公開情報を用い 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.



(b) 膜厚 70 nm

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



図 10 酸化皮膜の複素屈折率

Fig. 10 Complex refractive index of oxide layered coating on titanium.

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.に記した仮定より膜厚は一定 としている.また,拡散反射方向における干渉色の表 現にのみ着目したため,微小面の出現確率は考慮して いない.そのため,出現確率の差による最終的な反射 光強度の違いは,計測値におけるスペクトル分布の平 均エネルギー値に対し,シミュレーションによるスペ クトル分布の平均エネルギー値が一致するように強度 補正することで表現した.

## 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2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2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11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.

更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、膜厚を推定した際に使用 した計測値との色差を求めた. 色差  $\Delta E$  は 2 色の知覚 的な差を表すもので,式 (6) を用いて求めた.

表 2 10 サンプルの推定膜厚 Table 2 Estimated thickness of oxide layered coating of 10 samples.

サンプル 番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
推定膜厚 (nm)	15.9	50.8	60.6	87.5	121.4	138.4	160.6	173.9	226.6	264.4



Fig. 11 Simulated interference color distribution of the blue color plate.

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L_1^*)^2 + (a_0^* - a_1^*)^2 + (b_0^* - b_1^*)^2}$$
(6)

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 の各角度条件における分光反射率) 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 12 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各サンプルの平 均色差を求めた結果を表3に示す.全10サンプルの 平均色差を求めた結果,5.0であった.これは研究目 標とした許容色差分類[15]における4級であり,実用 上十分な精度と言える.

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,研究目標とした拡散反射方向領域に おいて良好な干渉色表現に成功した.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



図 12 シミュレーションと計測値の色差 Fig. 12 Color difference between simulation and measurement.

表 3 10 サンプルの色差 Table 3 Color difference of 10 samples.

サンプル番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
色差	2.9	3.2	2.5	4.3	7.3	5.6	4.1	4.9	9.9	5.4

デルで表現できることが確認された.

図 12 より各サンプルについて,光源方向と視点方 向の角度が大きくなるにつれて色差が増加するなど, 色差が発生する領域(光学条件)がほぼ同一であるこ とがわかる.これにより誤差要因に関しては薄膜干渉 モデルで表現していない光の振る舞いや,sBRDF 装 置固有の誤差要因などが考えられる.

### 6. CG 表 現

ハーフベクトルベースの薄膜干渉モデルを用いて酸 化皮膜を有するチタンの CG 化を行った.その際,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)及びカ メラパラメータ(焦点距離,センサーサイズ,絞り,



図 13 チタンの実写画像と CG 画像 Fig. 13 Real image and CG image of titanium.

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 13 に示す.

図では、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ている.また、鏡面反射方向から 拡散反射方向に変化するグラデーションも極めて類似 した色相変化が表現できている.このように、ハーフ ベクトルベースの薄膜干渉モデルを適用した酸化皮膜 を有するチタンの CG 画像は、実写画像と比較した場 合でも良好な結果となり、本論文で提起した手法が、 酸化皮膜を有するチタン素材を活用する建築家やデザ イナーのデザイン支援に有効であることを確認した.

## 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,及び光学 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. 更にレンダリングによる CG 表現を行い,実写画像と 比較を行った.その結果,以下の結論を得た.

- ① 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4級以内の精度で表現することに成功した。
- ③ レンダリングによる CG 表現が十分な写実性を もつことからも、モデルの妥当性と有用性が確 認できた。

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強度補正を行 い、解析を進めたが、補正手法に関しては議論の余地 がある.その上で、今後は微小面の出現確率を確率密 度関数で表現することで干渉色だけでなく反射光強度 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の角度が大きくなる 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.最 後に、酸化皮膜を有するチタンの CG 化において、撮 像系の分光感度特性等を考慮することで更なる高精度 化を試みる.

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.

## 文 献

- M. Pharr, J. Wenzel, and H. Greg, Physically based rendering: From theory to implementation, Morgan Kaufmann, 2016.
- [2] J. Dorsey and H. Rushmeier, "Advanced material appearance modeling," ACM SIGGRAPH 2009 Courses, Article No.3, 2009.
- [3] K. Iwasaki, K. Matsuzawa, and T. Nishita, "Realtime rendering of soap bubbles taking into account light interference," Proc. Computer Graphics International, 2004, pp.344–348, June 2004. DOI: 10.1109/CGI.2004.1309231
- [4] N. Nagata, T. Dobashi, Y. Manabe, T. Usami, and S. Inokuchi, "Modeling and visualization for a pearl-quality evaluation simulator," IEEE Trans. Vis. Comput. Graphics, vol.3, no.4, pp.307–315, 1997. DOI: 10.1109/2945.646234
- [5] 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. DOI: 10.1109/3516.686678
- [6] 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.
- [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, vol.34, Issue 2, pp.45–55, 2015.
- [8] 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,"映情学 誌, vol.71, no.11, pp.259–268, 2017.
- [9] D. Pantelic, S. Savic-Sevic, D.V. Stojanovic, S. Curcic, A.J. Krmpot, M. Rabasovic, D. Pavlocic,

V. Lazovic, and V. Milosevic, "Scattering-enhanced absorption and interference produce a golden wing color of the burnished brass moth, Diachrysia chrysitis," Phys. Rev. E, vol.95, no.3, p.032405, 2017, DOI: 10.1103/PhysRevE.95.032405.

- [10] 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. DOI: 10.4139/sfj.43.1014
- [11] 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. DOI: 10.4139/sfj.40.64
- [12] K. Torrance and E. Sparrow, "Theory for off-specular reflection from roughened surfaces," J. Opt. Soc. Am., vol.57, no.9, pp.1105–1114, 1967.
- [13] J.F. Blinn, "Models of light reflection for computer synthesized pictures," Proc. 4th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, pp.192–198, 1977.
- [14] X. He, K. Torrance, F. Sillon, and D. Greenberg, "A comprehensive physical model for light reflection," Computer Graphics 25, Annual Conference Series, pp.175–186, 1991.
- [15] 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.
- [16] 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. DOI: 10.11516/dentalmedres1981.
   12.134
- [17] T.A. Trezza and J.M. Krochta, "Specular reflection, gloss, roughness and surface heterogeneity of biopolymer coatings," J. Applied Polymer Science, vol.79, no.12, pp.2221–2229, 2001. DOI: 10.1002/1097-4628 (20010321) 79:12<2221:: AID-APP1029>3.0.CO;2-F
- [18] R. Cook and K. Torrance, "A reflection model for computer graphics," ACM Trans. Graphics, vol.1, no.1, pp.7–24, 1982.

(2018 年 4 月 27 日受付, 10 月 24 日再受付, 2019 年 2 月 22 日早期公開)



#### 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.2018 年同大大学院修士課 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.2004 年岐阜県立情報科学芸術大学 院大学 (IAMAS) 修士課程了.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 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.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.博士(工学).



## 谿 雄祐

2011 年,東京大学大学院博士課程了. 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.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 (正員)

1983 年京都大学理学部数学系卒.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.同年新日本製鐵(株)(現,日本製鉄 (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 了.主として計測技術,データ解析技術の 研究開発に従事.



## 髙橋 一浩

1991 年東京理科大学理工学研究科物理 学専攻了.同年新日本製鐵(株)(現,日本 製鉄(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了.同年新 日本製鐵(株)(現,日本製鉄(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.