

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420041

研究課題名(和文) レーザカラーリングの発色メカニズムの解明と高精細多色印刷への応用

研究課題名(英文) Clarification of the laser coloring mechanism and its application to high precision multi-color printing

研究代表者

田中 智久 (Tanaka, Tomohisa)

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：70334513

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではレーザー照射することによる金属表面に酸化被膜を形成し、被膜表面で反射する光と下地金属で反射する光の干渉現象を利用して、カラーリングの発色メカニズムの解明及び新しい金属カラーリング技術の開発を目的として研究を行った。YV04レーザーによる酸化被膜生成装置を構築し、レーザーの照射条件が酸化被膜の生成過程及び発色メカニズムに与える影響を解明したうえで、酸化被膜の厚さや表面性状を制御することにより、金属表面に複数の色を用いた精細なカラーリングを実現した。

研究成果の概要(英文)：The main purpose of this research is to clarify the mechanism of laser coloring and to develop a new technology of metallic coloring. The principle is to use laser irradiation to generate a thin oxide film on the target surface, and color can be observed due to the light interference phenomena. In this research, a new oxide film generation device was developed. The affection of the laser irradiation parameter to the oxide film generation and the observed color was clarified. By carefully control the thickness and surface profile of the oxide film, precision coloring with multiple colors are realized on different kinds of metallic materials.

研究分野：知能機械学・機械システム，超精密加工，機械工作・生産工学

キーワード：レーザーカラーリング 酸化被膜 薄膜干渉 微細加工 YV04レーザー 表面粗さ 二酸化チタン

1. 研究開始当初の背景

レーザーマーキング技術は既に多くの分野で実用化されているが、インクジェット法などの方法と異なり、任意の色を自由に付加することができない。これに対し、チタンやステンレスの表面に金属酸化物の被膜を形成し、被膜表面で反射する光と下地の金属で反射する光の干渉を利用したカラーリング技術が研究され、一部実用化されている。この原理を用いた金属のカラーリングは、塗料を用いないため環境や人体に影響を与えることがなく食品や医療用インプラントなど幅広い分野での有効利用が期待できる。また、金属の光沢を残したまま鮮やかな発色が可能であり装飾品や宝飾品として金属製品の付加価値を高めることができる。

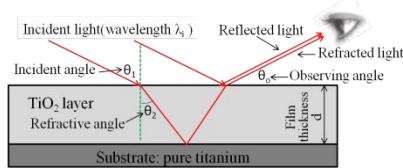


図1 酸化被膜による発色の基本原理

酸化被膜を形成する一般的な方法として、陽極酸化法と加熱酸化法の2つの方法がある。陽極酸化法は金属を陽極として電解質溶液中で通電して表面に酸化被膜を形成する方法で、均一被膜を得ることが可能であるが、部分的な被膜形成を行う場合は煩雑なマスク処理が必要となる。また、バーナー加熱による被膜形成を利用した色付け技術もあるが、大きな部品への適用に限られる。これに対してレーザーを用いた加熱酸化法による酸化被膜形成では、形成したい部分を選択してレーザーを照射することで、前処理などを行うことなく部分的な被膜形成が可能となり、照射条件を調整することで発現する色を変えることができる。しかし、加熱酸化法による酸化被膜形成は、均質な被膜を得ることが難しく、特にレーザーを用いた場合は照射条件、照射環境、下地金属の表面性状などの要因が複雑で、狙った発色を得ることが困難である。また照射条件が発現色に影響するメカニズムについても解明がなされていない。

2. 研究の目的

前述のような研究背景に基づき、本研究はレーザーによる発色メカニズムを理論的・実験的に究明し、レーザーの重要な用途の一つである三次元微細加工と組み合わせ、種々の金属表面に高精細多色印刷する新しい技術の実用化を目的とした。これを達成するために、以下に示す3つの課題について具体的な研究を実施した。

- (1) レーザ照射条件と酸化被膜形成過程の関係の解明。
- (2) 酸化被膜の生成状態が発色メカニズムに与える影響の解明。

微細加工とレーザーカラーリングを組み合わせることで、酸化被膜の厚さや表面性状を制御することで、複数の色を用いた精細なカラーリングを実現する。

3. 研究の方法

(1) 種々のレーザー照射条件を精密に制御できる酸化膜生成試験機の構築

本研究の目的の達成のため、金属の表面にレーザーを照射しながらカラーリングする際の照射条件を精密に制御できる酸化膜生成装置を構築した。本装置(図2、図3)は、出力が安定するYVO4固体レーザー(波長1064nm)と微細移動ステージで構成され、レーザーの発振周波数、走査速度、走査線間隔など被膜形成に影響を及ぼす重要なパラメータが容易に変更することが可能である。

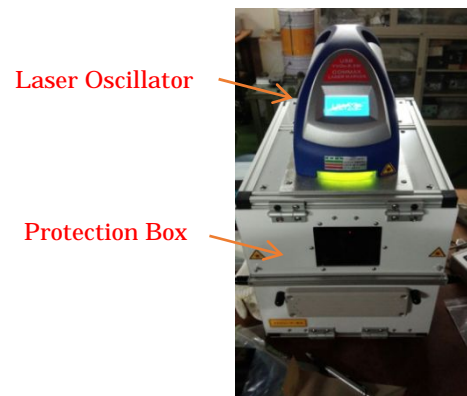


図2 酸化膜生成試験機の外観

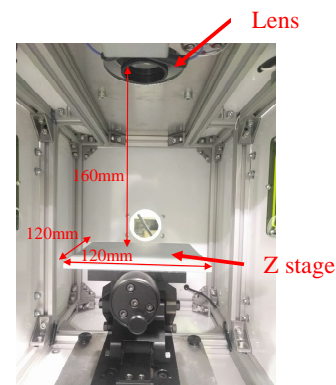


図3 酸化膜生成試験機の内部構造

(2) レーザ照射条件がチタン表面の酸化被膜形成過程に与える影響の考察

構築した試験装置を用いて、種々のレーザー照射条件を細かく変更し、チタン表面に形成された酸化被膜に対して、粗さ測定、電子走査顕微鏡より表面観察、断面観察、X線回折より成分分析を行うことによって、各照射条件が酸化被膜の成長に与える影響を考察した。

(3) 酸化被膜の形成状態が発色メカニズムに与える影響の評価

レーザー照射で得られた色を定量的に評価するため、分光輝度計を用いて色の三刺激値を測定し、レーザーの照射パラメータと得られ

た色の色相，彩度，明度の関係を定量的に評価した．さらに，膜厚の変化とL*a*b*空間で表現された発色の関係を調査したうえで，チタンおよび二酸化チタンの屈折率の波長依存性と多重反射を考慮して薄膜厚さおよび光の入射角を変化させた場合の発色特性を導出し，実発現色の計測評価値から膜厚を高精度に推定できるモデルを構築した．

(4) 微細加工とレーザカラーリングによる酸化被膜の表面性状の制御

レーザ照射後形成した酸化被膜の表面性状を制御するため，レーザを1，2本の直線状にパラメータを変化しながら照射し，酸化被膜の形状計測と局所的な発見色を観察することにより，微視的に表面凹凸の分布とミクルの発色状態の関連を調べた．また，微細加工によるチタン表面に微小な凹みを成形させ，照射パラメータを変化させながらレーザカラーリングを行い，表面凹みの大きさが酸化被膜の形成および発色の変化に及ぼす影響を調査した．

4. 研究成果

(1) 酸化被膜の厚さと発色の関係

薄膜干渉を利用した発色は，図1に示すように薄膜の表面の反射光と母材の反射光が特定の位相で強め合うことによって生じる．その特定の波長は膜厚，入射角度，薄膜の屈折率などによって変化する．本研究では，実験で得られた発色の膜厚を推定するため，酸化被膜が均一に分布した表面と母材の表面で反射した光の多重反射を考慮し，チタンや酸化チタンの屈折率の波長依存性を考慮した理論的な計算のもとで，膜厚及び入射角を変化させた場合の発色特性を導出した．膜厚を1nm，入射角度を5°毎に変化させた際に理論的に得られる色を図4に示す．

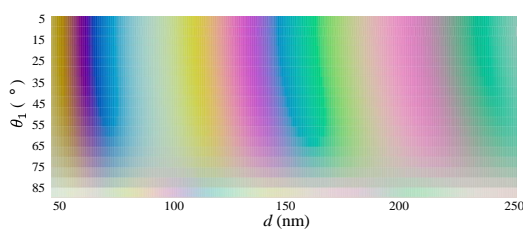


図4 膜厚，入射角度と色相の関係

(2) レーザ照射条件と発色の関係

本テーマで構築した酸化被膜生成装置を用いて，照射条件を変更しながら，表面粗さRa = 0.02 μmの純チタン板に照射実験を行った．図5はパルスエネルギー及びパルス間隔距離を変化させ，チタン表面に一回照射した場合の酸化被膜の発見色と，それらを分光輝度計によって測定したパラメータを元に計算したRGBから得られる色を示したものである．エネルギー密度が大きくなると，膜の厚さが増加

し，薄膜干渉理論から導かれた色相変化と同じ傾向となることが確認された．

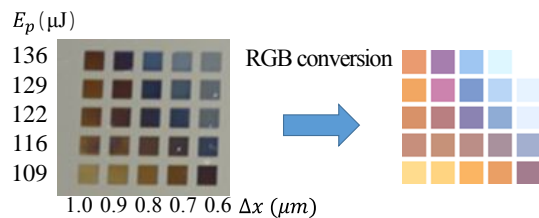


図5 パルスエネルギー及びパルス間隔を変化させた場合の酸化被膜の色相変化

(3) エネルギー密度と表面粗さ，明度の関係

非接触3次元表面形状測定装置を用いて酸化被膜の表面粗さを測定して得られた，表面粗さRaと明度との関係を図6に示す．表面粗さが小さくなるほど明度が高くなることが確認された．これはエネルギー密度が高い条件において被膜表面に大きな凹凸が形成され，これにより光の反射率が変化して明度差が表れたと考えられる．従って，表面粗さをコントロールすることで狙った色の明度が制御できる可能性が示唆された．

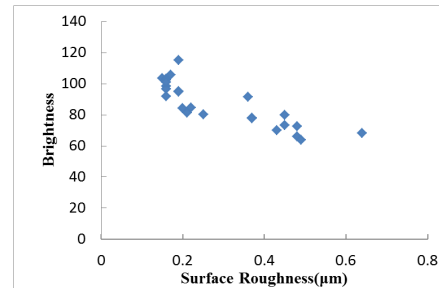


図6 表面粗さと明度の関係

(4) レーザ照射条件と酸化被膜形成の関係

表面粗さをコントロールするため，レーザ照射後のチタン表面の状態を光学顕微鏡で観察し，レーザ照射条件が表面性状に及ぼす影響について調べた．図7，図8は例としてパルスエネルギー193 μJ，パルス間隔1.67 μm，単一走査線照射した場合の照射痕と断面図を示したものである．図7には，レーザ照射の中心部に凹みが観察され，中心から両側に盛り上がり観察された．図8に見られるように，レーザ照射中心部の隣には比較的広い範囲に盛り上がりがあり，照射により作られた堆積物であると推定される．さらに，図7からは，その外側に酸化膜が形成されるが，膜厚は前述の堆積物による遮蔽効果の分布とレーザ自身のエネルギー密度の分布により，場所ごとに異なっていることがわかる．このことから，レーザカラーリングで得られた酸化被膜のマクロな発現色は微視的に各所の色から得られる混色となっていることが分かる．一方，より低パルスエネルギー107 μJで照射した試験片には，このような凹凸形成と色分布の違いが見られなかった．これにより，レーザの照射条件によって，表面性

状が異なることが分かった。さらに、パルスエネルギー、パルス間隔及び走査線間隔を変化させ照射実験を行い、照射条件が表面粗さに及ぼす影響も確認した。これにより、レーザーの照射パラメータを変化させることで、得られる酸化被膜の色相だけではなく、表面粗さ及び明度も同時に制御できる可能性が示された。

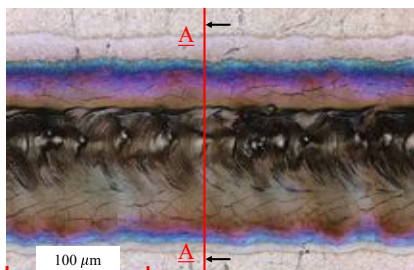


図7 単一直線走査照射した表面の顕微鏡観察結果

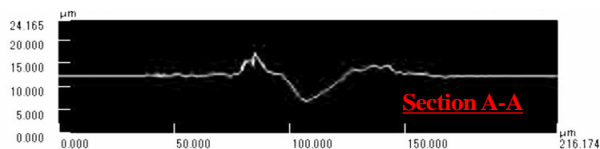


図8 単一直線走査照射した表面の断面形状

(5) 金属曲面への高精細レーザー多色印刷システムの構築

これまでの知見を用いて、金属表面に微細加工とレーザーカラーリングをおこなうことにより、表面粗さ、色度、明度を同時に制御できる事を実験により確かめた。またこの結果が、腕時計のベルトやケースなど曲率が緩やかに変化する3次元曲面に適用できる事を確認した。

さらに、システムで使用する照射レンズについて、焦点距離の異なる物を適切に変更することで、大面積に対する一様なカラーリングと、小面積に対する微細カラーリングが両立できる事を確認した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計8件)

堀田駿介, 吉岡勇人, 朱疆, 田中智久, チタンへのレーザー照射条件が表明性状及び発色に与える影響, 2017年度精密工学会春季大会学術講演会, 慶応義塾大学, Mar.2017, Paper ID: M16

Shunsuke Hotta, Jiang Zhu, Hayato Yoshioka, Tomohisa Tanaka, Study on the mechanism of titanium oxide layer growth by laser irradiation on titanium, 16th International Conference on Precision Engineering,

査読有, Nov.2016, Hamamatsu, Japan, Paper ID: P20-8192.

Jiang Zhu, Shunsuke Hotta, Hayato Yoshioka, Tomohisa Tanaka, Study on the titanium oxide layer generation mechanism by YV04 laser irradiation on titanium, the 8th Japan-Taiwan workshop on mechanical engineering and aerospace, Tokyo, Japan, Nov. 2016, Paper ID: G3.

Shunsuke Hotta, Jiang Zhu, Hayato Yoshioka, Tomohisa Tanaka, Study on the mechanism of titanium oxide layer growth by laser irradiation on titanium, 16th International Conference on Precision Engineering, 査読有, Nov. 2016, Hamamatsu, Japan, Paper ID: P20-8192.

Shunsuke Hotta, Jiang Zhu, Tomohisa Tanaka, Hayato Yoshioka, Titanium Coloring Machining by Laser Irradiation, the 17th International Machine Tool Engineers' Conference, 査読有, Tokyo, Japan, Nov. 2016, pp.84-85.

堀田駿介, 吉岡勇人, 朱疆, 田中智久, YV04レーザーを用いたチタンへのカラーリング - 加工条件と発色の関係 -, 日本機械学会関東支部第22期総会講演会, Mar.2016, No.0S0612.

Tomohisa Tanaka, Syo Harada, Jiang Zhu, Hayato Yoshioka, Yoshio Saito, Fundamental Study for Control of Hue and Brightness in the Laser Coloring, The 8th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, 査読有, Oct. 2015, Kyoto, Japan, Paper ID: 1208.

原田将, 朱疆, 田中智久, 吉岡勇人, 齋藤義夫. チタンへのレーザー照射による構造色に関する研究 - 色再現性の向上と広色空間の実現, 日本機械学会生産システム部門研究発表講演会 2015, No.15-8, pp. 109-110, Mar.2015.

[その他]

ホームページ等

<http://www.chitose.mep.titech.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 智久 (TANAKA TOMOHISA)
名古屋大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 70334513

(2) 研究分担者

朱 疆 (ZHU JIANG)
東京工業大学・工学院・助教
研究者番号: 70509330