

微細酸化膜構造形成による金属立体物へのレーザー加飾

岐阜県産業技術総合センター 金属部
主任専門研究員 田中 等幸
(2021年度 一般研究開発助成 AF-2021211-B2)

キーワード：レーザー加飾，立体物，ステンレス鋼

1. 研究の目的と背景

岐阜県では古くから木工芸，美濃和紙，陶磁器等の伝統文化が受け継がれ，これらの営みは，今日，県の経済を牽引する重要な産業に至っている．中でも関市は，ドイツのゾーリンゲン，英国のシェフィールドに並ぶ世界有数の刃物産地であり，「関の刃物」ブランドは，世界的に認知されている．近年，刃物産業界のトレンドは，北米，欧州等，海外市場を対象として，実用的な機能に加え，デザイン性を重視した刃物開発にシフトしている．色や模様など装飾機能の付与は，製品の付加価値を向上させるとともに，芸術的価値を創出している．

ステンレス鋼等の金属表面に図柄を装飾する技術的手法としては，塗装や水圧転写等が一般的である．しかし，これらの着色技術は，顔料を金属表面に塗布するため，ステンレス鋼特有の金属光沢が失われるほか，化学的処理を伴うことから廃液処理等，環境負荷の課題がある．我々は，金属の質感を活かしつつ化学物質を一切使用しない金属への着色技術として，レーザーを用いた加飾システムの開発を行ってきた¹⁾．このシステムでは，レーザーによって数十 nm～数百 nm の厚みの酸化被膜を形成し，その面積を制御することで多彩な色の表現を実現している．図1は，ステンレス鋼刃物のハンドル部分に，和柄の文様を装飾した試作例であり，金属特有の光沢を活かした加飾が施されている．しかし，開発したシステムがレーザー加飾できる形状は平板に限られており，実製品に応用するための課題が残されている．これは，レーザーによって明瞭な着色を得るためには，レーザーの照射熱量を一定に保持する必要があり，焦点距離を固定していることが要因である．

そこで本研究では，立体物にも適用可能なレーザー加飾システムを提案する．具体的には，システムに移動機構を取り付け，立体物の形状に応じてレーザーの照射角度と焦点距離を一定に保持するシステムである．本稿では，レーザー加飾システムの構成と段差や傾斜のある簡易な立体物を対象とした実施例について報告する．

2. レーザーを使用した金属表面の発色機構

従来研究において，出力，走査速度等のレーザーパラメータが酸化被膜の膜厚に影響を及ぼすことが明らかにされている^{2~4)}．レーザーを使用した金属表面の発色機構を概説する．図2に薄膜干渉モデルを示す．図中の n_1 ， n_2 ， n_3 はそれぞれ大気，酸化被膜及び，ステンレス鋼の屈折率， d は酸化被膜の膜厚を表している．ステンレス鋼表面にレ



図1 ナイフハンドルの試作例

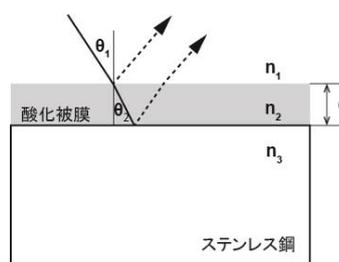


図2 薄膜干渉モデル

ーザーを照射すると，高温酸化によって Cr，Fe を主成分とする酸化被膜が形成される^{5~8)}．大気から酸化被膜に θ_1 の角度で入射する自然光は，酸化被膜表面で反射する光と θ_2 の角度で酸化被膜の中に入射する光に分離する．このとき，入射光は屈折率の小さい媒質から大きな媒質に入射して反射すると位相が 180° 反転する性質がある．酸化被膜表面で反射する光と酸化被膜を透過して金属表面で反射する光の双方の位相が反転する．図2ではこの位相が反転した光を破線で表している．これら二つの光が干渉し強め合う条件は波長の整数倍になるときであり，式(1)で表される⁹⁾．

$$2n_2d \cos \theta_1 = m\lambda \quad (1)$$

ここで， λ 及び， m はそれぞれ光の波長及び，干渉条件に対応する自然数である．薄膜干渉によって強め合う光の波長は，酸化被膜の屈折率と厚さによって決定され，この酸化被膜表面で発色現象が見られる．

3. 提案システム

3.1 システム構成

図3にシステムの外観を示す．レーザー加工装置は，縦 700 [mm]×横 800 [mm]×高さ 500 [mm]の加工ボックスを



図3 システムの外観

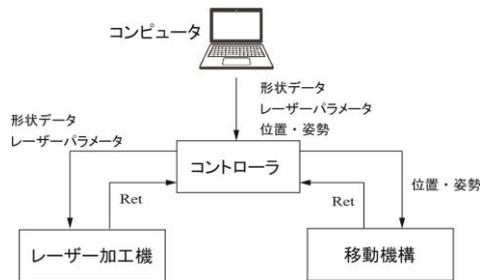


図4 システムのブロック図

有しており、ワークに窒素ガス等を噴射する治具を備えている。システムは、コンピュータ (OS : Windows11, CPU : Intel Core i5), レーザー加工機 (keyence 社製 MD-X2500, 波長 1064 [nm]) および、電動アクチュエータからなる移動機構 (IAI 社製 RCP シリーズ) で構成される。図4にシステムのブロック図を示す。コンピュータで作成したレーザー加工データをコントローラに転送しておき、制御命令を指示することで、コントローラはレーザーの照射と移動機構と同期をとりながらレーザー加飾を行う。以下に構成ユニットの詳細を説明する。

3・2 コンピュータ (レーザー加飾ソフトウェア)

コンピュータでは、開発したレーザー加飾ソフトウェアにより、加工データの作成とコントローラへの制御命令の指示を行う。以下にレーザー加飾ソフトウェアの処理の流れを説明する。レーザー加飾ソフトウェアは、立体形状データ (stl) とカラー画像 (jpg, bmp 等) を読み込み、立体形状にカラー画像をマッピングした3次元モデルを生成する。つぎに、3次元モデルからレーザーを照射する複数の平面モデルを生成し、レーザーが走査する形状データを求める。各平面モデルから3次元空間上の位置・姿勢を求め、移動機構の移動量データとする。また、平面モデルにマッピングされた画像の色 (RGB 値) を基に最適なレーザーパラメータを選定する。レーザーパラメータの選定方法は、レーザーパラメータと金属表面色の関係を示すデータベース (カラーパレット) の中から、カラー画像との色差が最も小さいものを自動選択する¹⁾。このように生成された形状データ、レーザーパラメータおよび、移動機構の位置・姿勢データをコントローラのメモリに転送し、レー

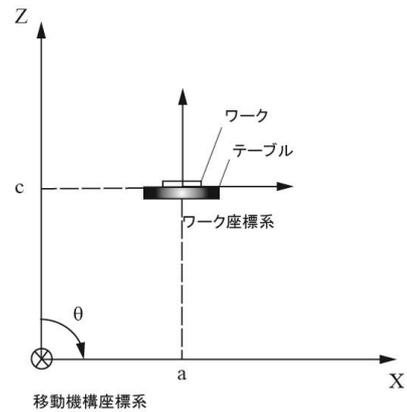


図5 システムの座標系

ザー加飾の準備が完了する。加飾ソフトウェアからコントローラに対してレーザー加飾命令と移動機構への移動命令を送信することで、立体物へのレーザー加飾を開始する。

3・3 コントローラ

コントローラは、コンピュータからの制御命令を受信した後、メモリ内のデータをもとにレーザー加工機と移動機構を制御する。形状データとレーザーパラメータはレーザー加工機に送信され、他方、レーザー照射面の位置(x, y, z)と姿勢角度 θ は移動機構に送信される。また、コントローラは、レーザー加工機と移動機構それぞれの戻り値によって双方の同期をとっている。

3・4 レーザー加工機

本研究では、主に金属への微細加工用途として使用されている YVO₄ 固体レーザーを使用する。レーザー加工機は、発振器内の駆動機構を利用して、125×125 [mm]の範囲で走査することができる。金属表面色に影響を及ぼすレーザーパラメータには、出力 (最大 25 [W]), 走査速度 (最大 12000 [mm/s]), 繰り返し周波数 (最大 400 [kHz]), 走査間隔 (最大 1 [mm]), 走査角度 (0°~359°), 焦点距離 (最大 50 [mm]), 走査回数 (最大 100 回) がある。

3・5 移動機構

移動機構は、X, Y, Z 軸および、Y 軸周りの回転軸の電動アクチュエータから構成される。座標系は、図5に示すとおり、移動機構の座標系をワールド座標系の原点とし、Y 軸方向に対して時計回りに姿勢角度 θ を定義する。移動機構の座標系からワーク座標系の変換 M は式(2)により表され、コントローラから受信するテーブルの位置(x, y, z) および、姿勢角度 θ をもとに各アクチュエータが動作する。

$$M = \mathbf{Trans}(a, b, c) \mathbf{Rot}(y, \theta) \quad (2)$$

ここで、**Trans** は X 軸, Y 軸および、Z 軸方向にそれぞれ a, b および c に平行移動し、**Rot** は Y 軸まわりに θ 回転することを表している。なお、テーブルは、X 軸 Y 軸ともに ±100 [mm], Z 軸方向に 50 [mm], Y 軸方向に ±60° の範囲で移動、回転する。

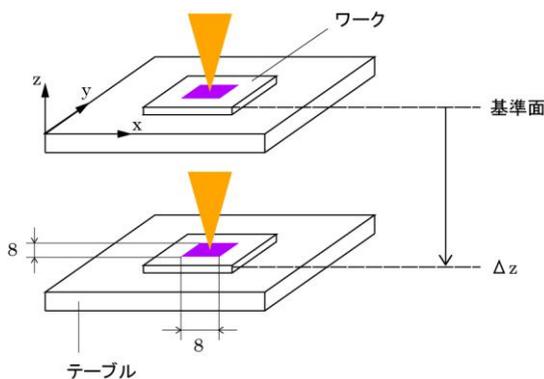


図6 実験の模式図

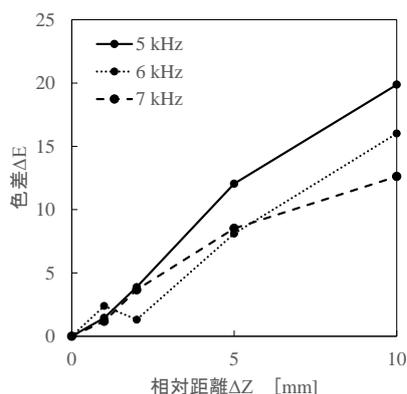


図7 色差結果

4. 検証実験

4.1 レーザー照射距離と表面色の関係

レーザーを使用して明瞭な金属表面色を得るためには、安定した加熱が重要である。そのため、レーザー照射熱量が分散しないように焦点距離をワークの表面に合わせる必要がある。そこで、ワーク表面に焦点距離を合わせた状態で、照射距離によるワーク表面色の変化を調べた。実験の模式図を図6に示す。レーザー照射口からワーク表面までの距離を照射距離として、基準面からの相対距離 Δz が 1, 2, 5, 10 [mm] に変化した時の表面色について検証を行った。実験には、ステンレス鋼 SUS304 材(厚さ 1 [mm])を使用した。テーブルにワークをセットし、8×8 [mm] の矩形範囲にレーザーを照射した。レーザーパラメータは、出力 25 [W]、走査間隔 0.04 [mm]、走査速度 200 [mm/s]、繰り返し周波数 5, 6, 7 [kHz] とした。表面色は、分光測色計 (Konica Minolta 社製, CM-2600d) を用いて測色した。表面色の評価は、レーザー照射基準面の表色値 $L_0^*a_0^*b_0^*$ を基準色として、基準面からの相対距離 Δz における表色値 $L_{\Delta z}^*a_{\Delta z}^*b_{\Delta z}^*$ との色差 ΔE を式(3)によって比較した¹⁰⁾。なお、測定値は矩形範囲内 3 か所の平均値を使用した。

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L_{\Delta z}^*)^2 + (a_0^* - a_{\Delta z}^*)^2 + (b_0^* - b_{\Delta z}^*)^2} \quad (3)$$



図8 入力画像

表1 カラーパレット

(R, G, B)	出力 W	速度 mm/s	周波数 kHz	走査間隔 mm
(78, 111, 63)	15.0	100	2	0.005
(141, 87, 51)	17.5	200	2	0.005
(232, 90, 47)	22.5	200	2	0.015
(90, 81, 201)	25.0	200	2	0.005
(221, 189, 40)	15.0	200	2	0.005

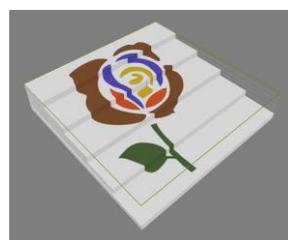
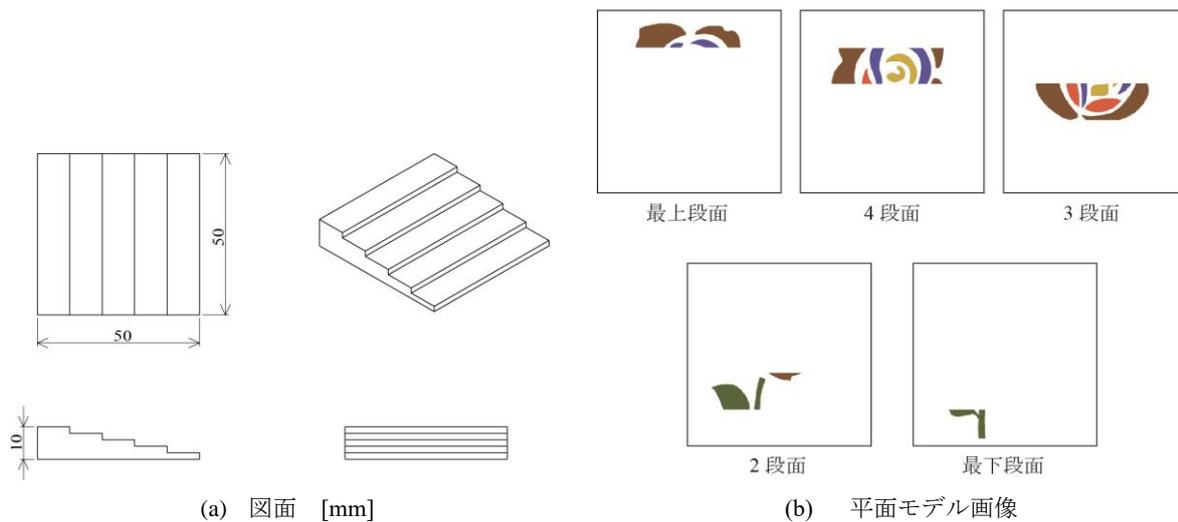
図7に結果を示す。焦点距離をレーザー照射面に合わせれば、照射距離によらず表面色は変化しないと予想されたが、同図から照射距離が長くなるにもなって、基準色との色差が広がることがわかった。CIE (国際照明委員会) によれば、 $\Delta E \geq 12$ のとき異なる色として知覚されるとされている¹¹⁾。したがって、本実験において、立体物の高さが 5 [mm] 程度であれば、同一色として認識されるが、それ以上の高さになると異なる表面色となる。この結果から、立体物に色差のない表面色を加飾するためには、照射距離を一定範囲内に保持する必要があることがわかった。

4.2 段差モデルへのレーザー加飾実験

入力画像を立体物にレーザー加飾を施し、その成果物からシステムの有効性を検証した。図8の入力画像 (750×750 [pixel]) には5色のパーツからなるバラの図柄が描かれており、各パーツの色は入力画像の RGB 値に近似するカラーパレットの RGB 値に変換した。表1は、RGB 値とレーザーパラメータとの関係を示すカラーパレットである。図9に立体物の図面 (図9(a))、平面モデル画像 (図9(b))、3次元モデル画像 (図9(c)) を示す。加飾ソフトウェアによって、3次元モデル画像から5つの平面モデル画像を生成した。平面モデル画像から生成した形状データ、レーザーパラメータおよび、移動機構の移動量 ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$) の各情報をもとにステンレス鋼 SUS304 ブロックをレーザー加飾した。レーザー加飾の動作は、まず最下段にレーザー照射した後、テーブルを下向きに 2 [mm] 移動し、この動作を再帰的に繰り返した。図11にレーザー加飾結果を示す。同図から、3次元モデル画像と同様の結果が再現されていることがわかる。なお、加工時間は 670 秒であった。

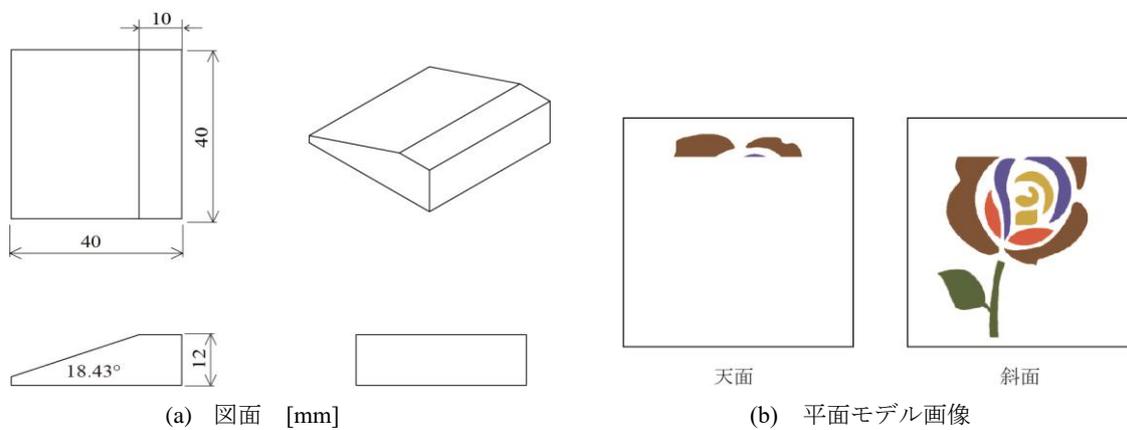
4.3 傾斜モデルへのレーザー加飾実験

入力画像および、カラーパレットはいずれも 4.2 節と同様のものを使用し、傾斜のある立体物 (ステンレス鋼 SUS304 ブロック) にレーザー加飾した。図10に立体物の



(c) 3次元モデル画像

図9 段差モデル



(c) 3次元モデル画像

図10 傾斜モデル

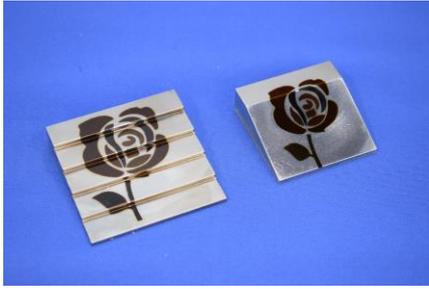


図 1 1 レーザー加飾結果
左：段差モデル 右：傾斜モデル

図面 (図 1 0 (a)), 平面モデル画像 (図 1 0 (b)), 3 次元モデル画像 (図 1 0 (c)) を示す. 加飾ソフトウェアによって, 3 次元モデル画像から天面と傾斜面の 2 つの平面モデル画像を生成した. レーザー加飾の動作は, まずワークの天面にレーザーを照射した後, 移動機構によって姿勢角度を 18.43° 傾けると同時に, 天面と同じ照射距離になるように Z 軸方向に移動した. 図 1 1 にレーザー加飾結果を示す. 同図から, 3 次元モデル画像と同様の結果が再現されていることがわかる. なお, 加工時間は 442 秒であった.

5. 結論

本論文では, レーザーによって金属立体物を着色するレーザー加飾システムを提案し, 簡易な立体物への加飾例を示した. 本システムは, レーザーの照射距離を一定に保持することで, 立体形状によらず入力画像の近似色の加飾を可能とした.

今後は, 実製品にある複雑な形状と意匠画像を用いて検討を進める予定である.

謝 辞

本研究は公益財団法人天田財団の支援を受けて実施しました. ここに深謝いたします. また, 本研究の遂行にあたっては, 産業技術総合センター藤井勝敏主任専門研究員に研究の一部を協力していただきました. 深く感謝の意を申し上げます.

参考文献

- 1) 田中等幸・松原早苗・西村太志: レーザー学会誌, 51-6(2023), 371.
- 2) Xiaolei Ma, Jian Gup, Xuekang Si, and Jingnan Zhao: IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 538-1(2019), 012024.
- 3) Ayat Khalaf Rahma, Ziad Aeyad Taha: J. Mech. Eng. Res. Dev. 44-6(2021), 379.
- 4) R. Linggamm, M M Quazi, M Ishak, M H Aiman, A Q Zafiuddin and Abdullah Qaban: Mater. Sci. Eng. 1078-1(2021) 12015.
- 5) 野口学・八鍬浩: エバラ時報, 252(2016), 31.
- 6) V. P. Veiko, A. A. Slobodov and G. V. Odintsova: A Laser Phys, 23-6(2013), 066001.
- 7) 田辺郁男: 表面技術, 60-11 (2009) 704.
- 8) Y. Lu, X. Shi, Z. Huang, T. Li, M. Zhang, J. Czajkowski, T. Fabritius, M. Huttula, and W. Cao: Sci. Rep. 7 (2017) 7092.
- 9) S. Kinoshita, S. Yoshioka, and J. Miyazaki: Rep. Prog. Phys, 71(2008), 76401.
- 10) 日本工業規格: JIS Z8781-4(2013)
- 11) シーシーエス株式会社: 第 32 回色差と均等色空間, https://www.ccsinc.co.jp/guide/column/light_color/vol32.htm(参照 2024-04-24)