レーザー加飾技術の高度化に関する研究（第１報）

田中等幸*、大津崇*

Research on advanced color laser marking（Ⅰ）

TANAKA Tomoyuki* and OTSU Takashi*

レーザー加飾技術は、金属を発色させる加工技術であり、金属特有の光沢を失わせることなく色彩を表現できる。しかし、多階調の高精細画像などを加工する場合、レーザー照射条件の同定に膨大なテスト工数を要する課題がある。本研究では、レーザー照射条件から所望する発色を推定するため、応答曲面法に基づく実験計画を用いたモデルの作成を検討した。モデルを評価した結果、レーザーによる発色は、複数のレーザーパラメータが影響しあう非線形プロセスであることがわかった。

1　はじめに

我々は、ステンレス鋼やチタン合金などの金属材料にレーザーを照射することによって、色彩が鮮やかで高解像度の画像を作成するためのレーザー加飾技術を開発した[1)2)]。当該技術は、レーザー照射によって基材表面に薄膜を形成し、薄膜干渉効果と混色効果によって多階調表現を可能とするものである。通常、レーザー加飾を行うためには、事前に基材表面色と加工条件を関係づける加飾サンプルを作成する必要がある。このとき、ロゴマークのような数色程度の画像であれば、探索に要する工数は限られているが、階調数の多い画像に対しては、膨大なテスト工数が必要となるため、技術の普及を図るうえで課題となっている。

本研究では、レーザー照射条件によって作成した加飾サンプルの表色値を測定し、応答曲面法に基づく実験計画により、レーザー照射条件からステンレス鋼の発色を推定するためのモデル（回帰式）作成を試みる。

2　実験

2.1　レーザー加飾実験

レーザー加飾では、レーザー照射によって金属表面に薄膜を形成する。本研究では、低出力のパルスレーザー（keyence 製 MD-X2500、波長 1064 nm、パルス幅 5～65 ns）を用いた。図 1 に実験環境を示す。汎用 XYZ ステージに試料テーブルを配し、その上部にレーザー発振器が取り付けてある。発振器の駆動機構を利用して、レーザーパラメータの概要図（図 2）に示すパターンでレーザーを照射した。制御可能なレーザーパラメータには出力、走査速度、周波数、走査間隔、焦点距離、走査回数などがある。また、レーザー加飾による発色には、レーザーパラメータの他、環境条件、材料特性など多くの因子が影響する。しかし、これらすべての因子を用いて発色の推定を試みることは、複雑かつ計算量が膨大にな

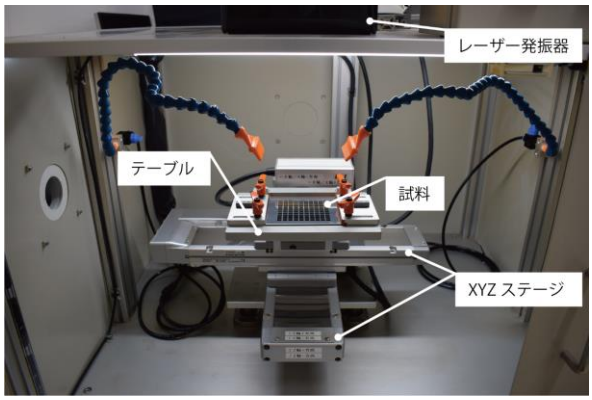


図 1　実験環境

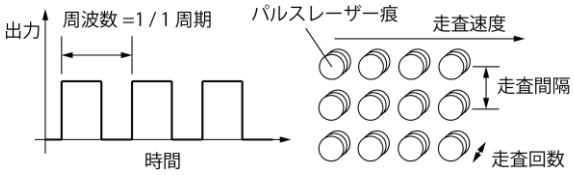


図 2　レーザーパラメータの概要図

る。そのため、モデル作成実験においては、出力（12.5～25 W）、走査速度（100～400 mm/s）、周波数（1～200 kHz）のパラメータを制御対象とした。その他のレーザーパラメータである走査間隔、焦点距離、走査回数は、それぞれ 40 μm、0 mm（ジャストフォーカス）、１回とした。試料には、ステンレス鋼（SUS304 材、縦 100 mm×横 100 mm、厚さ 1 mm）を用いた。加飾実験は、室温、大気環境下で行い、80×80 mm の範囲にレーザーを走査させ、実験サンプルを作成した。

2.2　応答曲面法

本研究の目的は、発色とレーザー照射条件との関係をモデル化することである。近年、モデル作成のアプローチは、大量の実験データを入力し、ニューラルネットワークを利用する方法がトレンドである。しかし、このアプローチは、発色とレーザー照射条件を関係づけるため

＊ 金属部

に多くの加飾サンプルを作成する必要がある。そこで、作業コスト削減の観点から、応答曲面法に基づく実験計画を設計し、モデルの作成を試みた[3]。例えば、因子の数が３個（出力、走査速度および、周波数）、各因子につき３個の水準、測定回数を２回とする場合、実験総数は 54（2×3^3）となるが、応答曲面法では 32 となり、加飾サンプル作成に要する工数を大幅に削減できる。

2.2.1　モデル作成

モデルの応答は発色の RGB 値とし、因子には出力、走査速度および、周波数を用いた。分光測色計（Konica Minolta 製、CM-2600d）を使用し、レーザー照射した矩形領域内（80 × 80 mm）の表色値を測色した。表色値は、矩形領域内３か所の CIE XYZ 値を測色し、それらの平均値を使用した。CIE 1931[4]を参考に式(1)を用いて XYZ 値を RGB 値（0～255）に変換し、これを応答値とした。

$$\begin{bmatrix}R\\G\\B\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}2.3655 & -0.8971 & -0.4683\\-0.5151 & 1.4264 & 0.0887\\0.0052 & -0.0144 & 1.0089\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X\\Y\\Z\end{bmatrix} \quad (1)$$

出力、走査速度および、周波数の各水準は、中心複合計画[3]によって設定した。応答と因子の関係を表すモデルは、式(2)に示す２次モデルを仮定した。なお、このモデルは、因子が発色に与える線形効果と非線形効果および、２因子間の交互作用を考慮したものである。

$$\begin{aligned}y=\beta_0+&\\&\beta_1x_1+\beta_2x_2+\beta_3x_3+\\&\quad\beta_{12}x_1x_2+\beta_{23}x_2x_3+\beta_{13}x_1x_3+\\&\quad\beta_{11}x_1^2+\beta_{22}x_2^2+\beta_{33}x_3^2+\varepsilon\end{aligned} \quad (2)$$

ここで、yは応答、x_1は出力、x_2は走査速度、x_3は周波数、βは偏回帰係数、εは誤差を表している。モデルの変数選択は、逐次変数選択法によって行った。なお、モデル作成の計算、グラフの作成は、オープンソース・ソフトウェアである R 言語および、RSM パッケージを使用した。

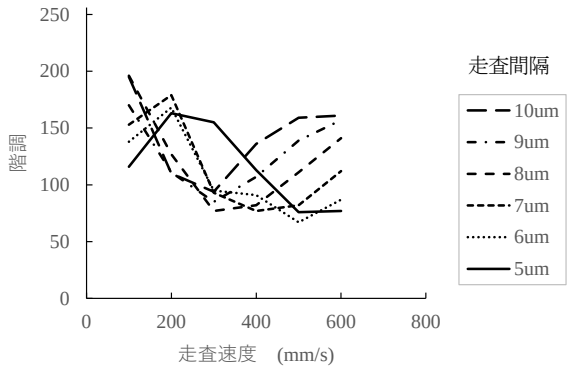
2.2.2　モデルの評価

モデルの精度は、モデル作成に用いた実験データを用いて決定係数r^2（式(3)）および、標準化残差s_i（式(4)）によって評価した。モデルの汎化性能は、未知の実験データをモデルに適用し、決定係数と標準化残差によって評価した。

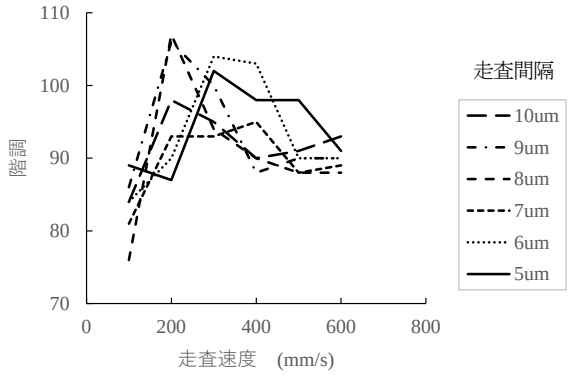
$$r^2=1-\frac{\sum(y_i-\hat{y}_i)^2}{\sum(y_i-\overline{y}_i)^2} \quad (3)$$

ここで、$\hat{y}_i$、$\overline{y}_i$はそれぞれ回帰式から得られた推定値、実測値の平均値を表している。

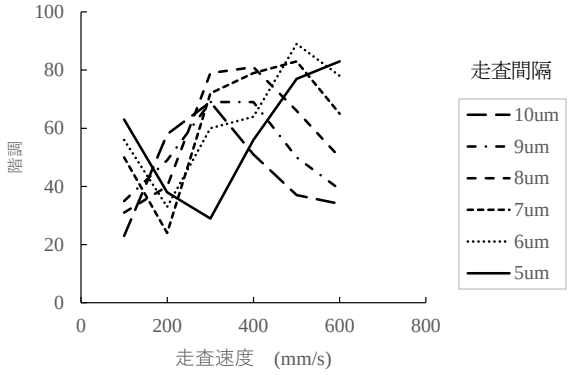
$$s_i=\frac{e_i}{\sqrt{\frac{\sum(e_i-\overline{e})^2}{n-k}}} \quad (4)$$



(a)　R 値



(b)　G 値

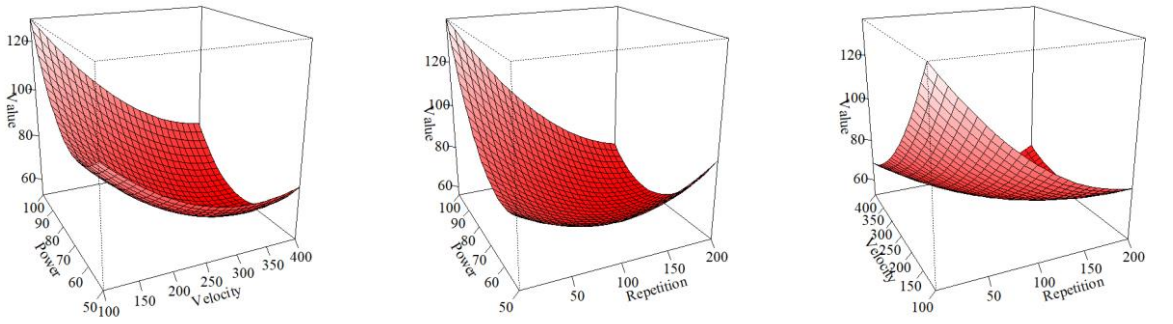


(c)　B 値

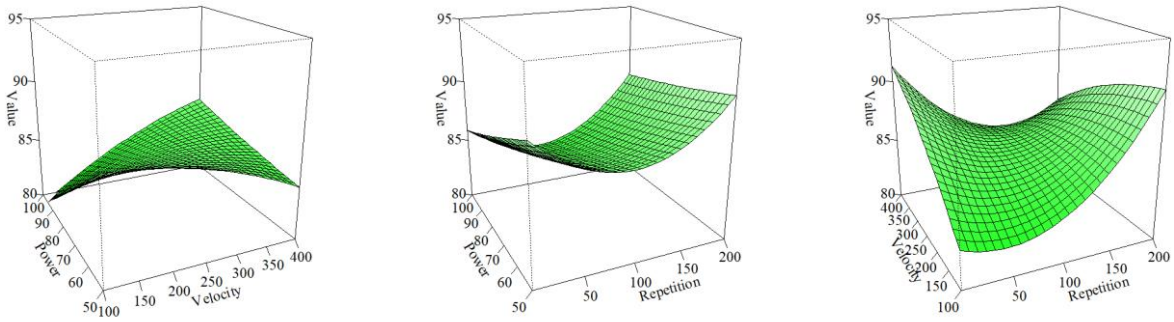
図３　走査間隔・走査速度と階調の関係

表１　偏回帰係数

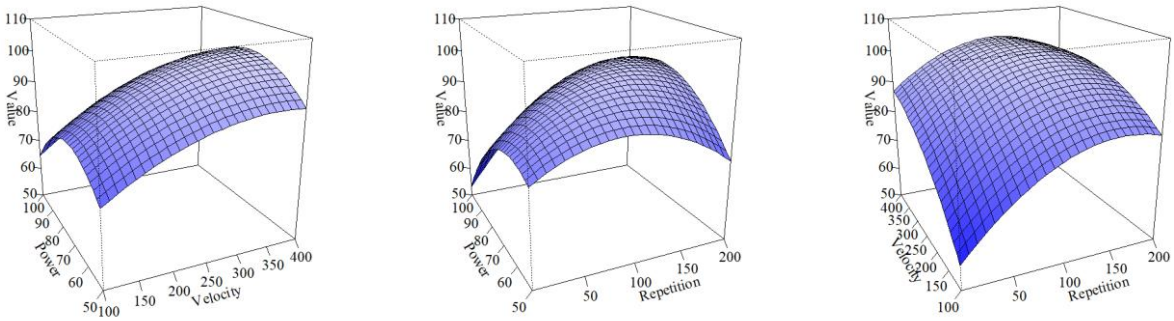
		R値	G値	B値
定数項	β_0	63.602	85	96.603
出力	β_1	7.6	-1.65	-2.8
速度	β_2	-19.75	0	10.2
周波数	β_3	-16.4	0.95	8.1
出力×速度	β_{12}	-7.687	2.813	0
出力×周波数	β_{13}	-19.063	0	10.25
速度×周波数	β_{23}	13.938	-3.313	-4.625
出力^2	β_{11}	24.943	0	-11.655
速度^2	β_{22}	0	0	-5.655
周波数^2	β_{33}	16.943	3.35	-10.655



(a)　R 値



(b)　G 値



(c)　B 値

図４　応答曲面

ここで、e_iは i 番目の実測値の残差、$\bar{e}_i$は残差の平均、n は実測値の数、k は説明変数の数を表している。

3　結果及び考察

3.1　レーザー照射条件と発色との関係

レーザー照射条件が発色に及ぼす影響を明らかにするため、２つのレーザーパラメータを変化させて階調との関係を解析した。図 3 は、走査速度を 100～600 mm/s、走査間隔を 5～10 μm に変化させたときの RGB 各色の階調の変化を示している。同図より、走査間隔 7μm を境に変化の傾向が異なることがわかる。この理由は不明であるが、走査間隔の疎密が階調に影響を及ぼすことが明らかになった。また、階調の変化が走査間隔によって異なることから、走査間隔と走査速度との間には交互作用の存在が示唆された。したがって、作成するモデルにはレーザーパラメータ間の交互作用を取り入れることが

適当であると考えられる。

3.2　モデルの作成結果

表１に重回帰分析によって計算したRGBごとのモデルの偏回帰係数（β_0~β_{33}）を示す。偏回帰係数から、いずれのレーザーパラメータもR値に大きく影響し、G値への影響は小さいことがわかる。このことは、赤褐色の実験サンプルが容易に作成されやすい知見と一致した。

図４は、表１の偏回帰係数を構成するモデルに対し、出力と走査速度、出力と周波数および、走査速度と周波数に分け、それぞれのパラメータと階調との関係を３次元表現した応答曲面である。(a)はR値、(b)はG値、(c)はB値を表している。同図から分かるように、応答曲面はいずれも急峻な非線形曲面となっており、レーザーパラメータが発色の変化に大きく影響を及ぼしていることがわかる。たとえば、図4(a)に示した出力と走査速度の関係においては、出力を徐々に増加させつつ周波数を減少させると、急激にR値が大きくなる。

3.3　モデルの評価結果

モデル作成に使用した実験データ96個を学習データとし、ランダムに決定した未知のレーザー照射条件48個を検証データとしてモデルの精度、汎化性能を評価した。図５は、RGB実測値と作成したモデルから計算されたRGB推定値の対応関係を示している。全ての実験データが実線上にのれば、実測値と推定値は完全に一致し、精度の高いモデルが作成できたといえる。同図から、実測値と推定値の間には、ある程度の相関が予想された。しかし、検証データにおいては大きく乖離しているデータが散見され、各データの決定係数は、学習データが0.81であるのに対して、検証データでは0.21であった。図６に標準残差プロットを示す。同図から、検証データにおいて2σを超える値が散見されることから、モデルを構成している因子が実測値を説明できているとは言い難い。モデルの汎化性能が低い要因としては、モデル作成に使用した学習データに偏りがあることが考えられる。加飾サンプルの基材表面色は、目視では多彩に発色しているにも関わらず、図５に示す学習データのRGB値は、50～125の低階調に集中している。また、学習データの階調範囲を超えた検証データほど乖離が大きい傾向にある。これは、レーザー加飾による発色には角度依存性があるため、実験に使用した分光測色計では色差を取得できていない可能性がある。このことがモデルの性能を著しく低下させる要因かもしれない。今後、レーザー加飾の評価に適した測色方法および、汎化性能の高いモデルを検討する。

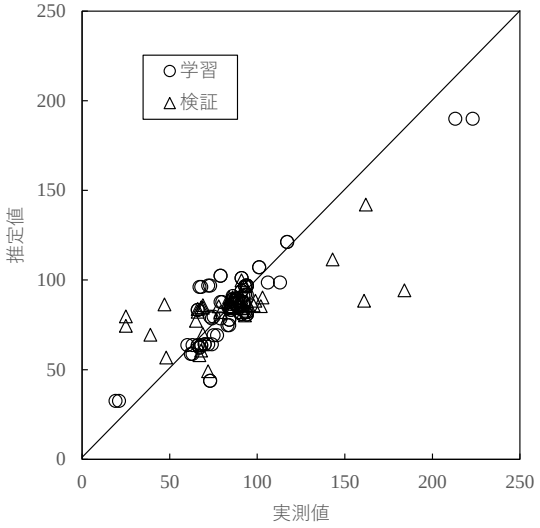


図５　実測値－推定値プロット

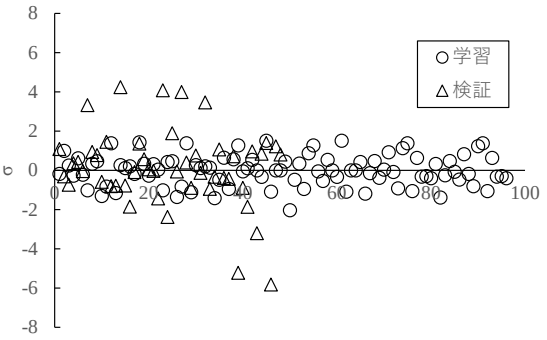


図６　標準残差プロット

4　まとめ

本研究では、応答曲面法に基づく実験計画により、レーザー照射条件からステンレス鋼SUS304の発色を推定するモデルの作成を試みた。結果、以下の知見を得た。

1) 走査間隔によって階調の変化が著しく異なったことから、レーザーパラメータ間には交互作用があることが示唆された。
2) 線形効果、交互作用および、非線形効果を含めた２次モデルを仮定した結果、レーザー照射による発色は複数のレーザーパラメータが影響しあう非線形プロセスであることがわかった。
3) 作成したモデルは、未知のレーザー照射条件に対する当てはまりが低いため、今後汎化性能を向上させる必要がある。

【参考文献】

1) 田中ら,岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.1, pp25-26,2020
2) 田中ら,岐阜県工業技術研究所研究報告 No.7, pp1-4,2018
3) 山田ら,パラメータ設計・応答曲面法・ロバスト最適化入門,pp97-117,2022
4) "CIE 1931 color space",Wikipedia,2019, https://en.wikipedia.org/wiki/CIE_1931_color_space, (参照 2024/02/02)