# レーザー加飾技術の高度化に関する研究(第2報)

# 田中 等幸\*、大津 崇\*

#### Research on advanced color laser marking ( I I )

## TANAKA Tomoyuki\* and OTSU Takashi\*

ステンレス鋼へのレーザー加飾は、レーザー照射領域を発色させる加飾技術であり、刃物など金属製品の装飾 に利用できる。この技術を用いて写真などの多階調加飾を行う場合、レーザー照射条件の特定に膨大なテスト工 数を要するため、当該技術の普及や適用場面の拡大を図るうえで課題となっている。本研究では、レーザー加飾 パラメータから所望の色を予測するモデルの構築を目指しており、本報では、サポートベクター回帰を用いた予 測モデルを構築した。構築したモデルを評価した結果、実測値と予測値の色差は15.2 となり、応答曲面法を使用 した前報の結果より予測精度が改善した。

#### 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表面に レーザーを照射することで、鮮やかな装飾デザインを可 能にするレーザー加飾技術を開発した<sup>112)</sup>。この技術の 特徴は、レーザー照射によって形成した金属表面の薄膜 干渉効果と微細領域の混色効果によって多階調表現を実 現できることにある。また、当該技術は、従来技術であ る陽極酸化や電解質コーティングと比較して、低コスト で環境に優しく、耐摩耗性にも優れている。この技術の 適用先として、刃物、眼鏡、宝飾品など幅広い分野の金 属製品が挙げられ、製品の高付加価値化が期待できる。

通常、レーザー加飾によって所望の発色を得るために は、事前に加飾テストを繰り返し、適切なレーザー加飾 条件と金属表面色との関係を把握する必要がある。この とき、ロゴマークのように使用する色数が少ない場合 は、パラメータ探索に要する加飾テスト回数も少なく、 工数の問題は発生しにくい。しかし、写真など階調数が 多い場合は、金属表面色とパラメータセットの対応関係 を探索するために膨大なテスト工数が必要となる。

レーザー加飾技術の普及や適用場面の拡大を図る上で は、この課題を解決する必要があり、前報では応答曲面 法<sup>3)</sup>を用いて、ステンレス鋼の表面色を予測する数理モ デルを構築した<sup>4)</sup>。その結果、ステンレス鋼表面色とレ ーザー制御パラメータの間には非線形の関係があること が示唆されたものの、構築したモデルは実測値を高精度 で推定するには至っていない。

そこで本報では、近年、非線形問題の解決に広く利用 されている機械学習を活用し、レーザー加飾によって発 色する表面色と加飾パラメータの関係を検討する。具体 的には、機械学習の一手法であるサポートベクター回帰 (以下、SVR)モデルを適用し、その予測精度について 評価したので報告する。



図1 実験環境

#### 2 実験

# 2.1 レーザー加飾実験

レーザー加飾実験に供する試料には、ステンレス鋼 (SUS304 材、縦100 mm × 横100 mm、厚さ1 mm)を用 いた。ステンレス鋼の表面を#400 耐水研磨紙で研磨 し、エタノールで洗浄した後、常温乾燥させたものを使 用した。

レーザー加飾実験は、図1に示す汎用 XYZ ステージ とレーザー発振器により構成されるシステムを用いて行 った。実験には、最大出力 20 W、繰り返し周波数 10 -1000 kHz、レーザー波長 1064 nm のナノ秒パルスレ ーザー(㈱Keyence 製 MD-X2500)を用いた。図2に レーザー制御パラメータの説明図を示す。図2(a)はレー ザー出力と時間の関係、図2(b)はパルスレーザーを走査 した際のマルチパスの状態を示している。金属表面色 は、レーザー出力、走査速度、繰り返し周波数、走査間 隔、焦点距離、走査回数など、多くのパラメータが影響 を及ぼすが、本研究ではステンレス鋼表面色への影響が 大きい出力(10 W-20 W)、走査速度(50 mm/s-300 mm/s)、繰り返し周波数(5 kHz-30 kHz)の3 つのパラ

\* 金属部



メータを制御対象とした。その他の制御パラメータについては、走査間隔40 µm、焦点距離0 mm(ジャストフォーカス)、走査回数1回とした。レーザービームのスポット径は約50 µmである。実験は、室温の大気環境下で行い、試料上の10 mm×10 mmの矩形領域にレーザーを走査させ、モデル構築のための実験サンプルを作成した。レーザーの照射順序は、レーザー照射熱による影響を考慮し、実験サンプルごとに無作為に決定した。

実験に使用する制御パラメータはそれぞれ6水準と し、これらの制御パラメータのすべてを組み合わせた 216 通りのモデル構築用実験データを取得した。また、 構築したモデルの汎化性能を評価するため、各制御パラ メータの範囲内で無作為に水準を設定した32 通りの加 飾実験を行い、評価用の実験データとした。

# 2.2 ステンレス鋼表面色の測定

ステンレス鋼表面色の測定には、分光測色計(Konica Minolta ㈱製 CM-M6)を使用した。この分光測色計 は、実験サンプルに対し 45°方向から照明を照射した 拡散光が検出可能である。本研究では、予備実験におい て最も高い反射率が得られた-15°方向の拡散反射を CIE LAB 表色系で評価することとした。測定は、実験 サンプル上のレーザー走査によって形成された各色 8 mm × 8 mmの矩形領域内に対して行い、明度 L\*値およ び色度 a\*値(赤-緑色差)、b\*値(黄-青色差)を取 得した。なお、CIE LAB は物体色を表す表色系として 工業分野で広く使用されており、JIS Z 8781-4 として規 格化されている。

### 2.3 モデルの構築

本研究では、制御パラメータとステンレス鋼表面色の 相互作用をモデリングするため、L\*値、a\*値、b\*値ごと



図3 サポートベクター回帰

にレーザー制御パラメータを対応付けたモデルを構築し た。前報では、制御パラメータとステンレス鋼表面色と の間には非線形の関係があること、また、少ない実験計 画数では目標精度(R<sup>2</sup>≥0.9、σ≤2.0)に到達できず、実 用的なモデル構築が困難であることを報告した<sup>4)</sup>。この 結果を踏まえ、本報では機械学習の一手法である SVR を使用してモデル化を試みた。モデルは 2.1 節で作成 した実験サンプルの制御パラメータを説明変数、ステン レス鋼表面色を目的変数とし、216 通りの実験データの 組み合わせから Python の Scikit-learn ライブラリを使用 して構築した。

一般に回帰モデルでは、実測値と予測値との誤差(損 失関数)を最小にする回帰係数を求める。式(1)は、回 帰式を $f(x) = xw^{T} + b$ とした場合の SVR の損失関数 E(w)である。

$$E(w) = C \sum_{i=0}^{n} max\{0, |y_i - f(x_i) - \varepsilon\} + \frac{1}{2} ||w||^2$$
 (1)

図3は非線形データにおける SVR の一例を示してい る。この回帰曲線は、± $\epsilon$ 以内のデータを無視し、それ 以外のデータ(サポートベクター)によって構築され る。一般に、 $\epsilon$ マージンは誤差を許容するため、線形回 帰で使用される残差平方和よりもノイズや外れ値に頑健 であることが知られている<sup>5</sup>)。本研究では、複雑なパタ ーンをモデル化する際に効果的な RBF(Radial Basis Function)カーネルを用いて非線形回帰モデルを構築し た。式 (2)に RBF カーネルの定義式を示す。

$$k(x, x') = exp(-\gamma ||x - x'||^2)$$
(2)

	Laser parameters				L*	a*	b*
No	Laser Power (w)	Scanning speed (mm/s)	repetition frequency (kHz)	_			
	1	100	50	5	55.99	13.97	37.82
	2	100	50 1	10	44.72	25.29	29.91
	3	100	50 1	15	57.91	23.18	43.43
	4	100	50 2	20	44.62	20.47	36.91
	5	100	50 2	25	80.45	7.82	31.06
	6	100	50 3	30	81.4	5.68	28.66
	7	90	50	5	61.59	15.79	51.85
	8	90	50 1	10	50.19	32.14	39.75
	9	90	50 1	15	53.79	20.19	44.33
	10	90	50 2	20	69.48	15.53	49.87
2	207	60	300 1	15	117.08	-5.5	-8.86
2	208	60	300 2	20	90.9	-1.46	-8.44
2	209	60	300 2	25	77.36	2.35	1.62
2	210	60	300 3	30	74.42	3.82	11.14
2	211	50	300	5	78.24	7.79	22.93
2	212	50	300 1	10	88.02	4.78	4.17
2	213	50	300 1	15	86.06	5.26	11.84
2	214	50	300 2	20	76.38	6.32	17.32
2	215	50	300 2	25	73.47	4.07	14.56
2	216	50	300 3	30	79.5	-0.58	4.33

表1 実験データの一部

ここで、||x - x'||は2つのデータ間のユークリッド 距離、 $\gamma$ はカーネルの幅を制御するハイパーパラメータ である。 $\gamma$ が大きいほど局所的なデータを捉え、小さい ほどデータの全体的な傾向を捉えやすい性質がある。直 感的には、RBF カーネルは実験データ間の類似度を計 算し、この値が高いデータをサポートベクターとして選 択することで回帰モデルを構築すると説明できる。SVR の詳細な解説は、文献<sup>ヵ</sup>を参照されたい。

### 2.4 モデルの性能評価

構築した SVR モデルの汎化性能は、32 通りの実験デ ータを使用して評価した。実験データを5分割し、1つ のグループをハイパーパラメータ調整用データ、残りの グループをモデル評価用データとして使用した。この操 作を5回繰り返して交差検証を行った。ハイパーパラメ ータは SVR モデルの性能に大きく影響を及ぼすため、 本研究では Optuna<sup>6</sup>を用いて最適化を実施した。探索 空間を 0.01 – 100 の範囲に設定して 100 回試行し、最も 性能が良かった時のハイパーパラメータを最適値とし た。SVR モデルの性能評価には、L\*値、a\*値および、b\* 値それぞれの決定係数(R<sup>2</sup>スコア、式(3))と平方根平 均二乗誤差(RMSE、式(4))を用いた。最終的な発色 の類似性は、実測値と予測値の色差  $\Delta$ E\*を式(5)により 求め判定した。

$$R^{2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (y_{i} - y_{i}')^{2}}{\sum_{i=1}^{n} (y_{i} - \overline{y})^{2}}$$
(3)

RMSE = 
$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (y_i - y'_i)^2}$$
 (4)

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$
 (5)

ここで、 $y_i$ は実測値、 $y'_i$ は予測値、nはデータ数、 $\Delta E^*$ 



図4 実験サンプル例 (レーザー出力 10W-20W, 2W 刻み、繰り返し周 波数 5kHz-30kHz, 5kHz 刻み、走査速度 100 mm/s)

は色差、ΔL\*は実測値と予測値の明度差、Δa\*は実測値と 予測値の赤ー緑の色度差、Δb\*は実測値と予測値の黄-青の色度差を表している。

### 3 結果と考察

表 1 は SVR モデルの構築に使用したレーザー制御 パラメータと、分光測色計によって測定したステンレス 鋼表面色の CIE LAB 値の一部である。図 4 は、レーザ ー出力 10 W – 20 W の範囲で 2 W 刻み、繰り返し周波 数 5 kHz – 30 kHz の範囲で 5 kHz 刻み、走査速度 100 mm/s の条件で作成したステンレス鋼へのレーザー加飾例 である。連続するレーザー制御パラメータであっても発 色が連続的に変化していないことがわかる。図 5 は、実 測値と予測値の回帰プロットであり、評価データ(n = 32)を分光測色計で測定した実測値と SVR モデルによる 予測値の関係を示している。同図におけるハイパーパラ メータの最適値(C,  $\varepsilon$ ,  $\gamma$ )は、L<sup>\*</sup>:(24.0, 0.22, 4.18)、a<sup>\*</sup>: (44.7, 0.02, 5.81)、b<sup>\*</sup>: (37.4, 0.17, 9.40)であり、構築したモデル はデータに適合しやすい特性を持つが、わずかに汎化性 能が低いモデルであることが示唆された。しかし、前報





の回帰プロットと比較すると、SVR によって予測され た L\*a\*b\* 値は実測値に適合しており、データの分布に 偏りがないことが確認できた。モデルの予測精度が前報 より改善した理由として、SVR の使用に伴い、データ 数を 32 通りから 216 通りに増やしたこと、またモデル の構築に使用する実験データに反射率の高い角度の反射 光を用いたことが考えられる。表2にモデルの予測精度 結果を示す。同表から決定係数 R<sup>2</sup>は、明度差 ΔL\*: 0.84、色度差 Δa<sup>\*</sup>: 0.56、色度差 Δb<sup>\*</sup>: 0.67 であり、応答曲 面法を用いてモデル化した前報の結果より予測精度が改 善した。評価データから算出した色差 ΔE\*の RMSE は 15.2 となった。これまでの経験から実用的には ΔE\*<12 であることが望ましいため、今後さらなる予測精度の向 上が必要である。モデルの予測精度をさらに向上する対 策として、予測モデルの構築に使用する学習データ数の 増加、あるいはニューラルネットワークなど非線形問題 に効果的なモデル構築法の導入を検討する予定である。

図 6 は、実測値および予測値の L\*a\*b\* 値を RGB 値 に変換し、コンピュータ上で再現した画像であり、評価 データのうち、 $\Delta E$ \*が最も小さい画像と大きい画像を示 している。図中の括弧の値は、256 階調の RGB 値であ る。同図から、 $\Delta E$ \*が 3.36 では、実測画像と予測画像の 両者に色差はないと判断できるが、 $\Delta E$ \*が 39.9 と大きな 画像では明らかな違いが認められた。

# 4 まとめ

レーザー加飾技術の利便性向上および普及拡大を目的 として、本研究では SVR を用いた非線形学習により、 加飾パラメータとステンレス鋼表面色の関係をモデル化 した。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 学習データ(n=216)を用いて SVR (RBF カーネル 使用)を構築した結果、応答曲面法を用いた二次 回帰モデルよりも予測精度が改善した。
- 評価データ(n=32)に対する SVR モデルの実測値 と予測値の色差 ΔE\*は15.2 となり、実用的なモ デルとするためには、さらなる予測精度の向上が 必要である。

#### 表2 モデルの予測精度結果

	$\Delta L^*$	$\Delta a^*$	$\Delta b^*$	$\Delta E^{*}$
$R^2$	0.84	0.56	0.67	-
RMSE	14.3	7.51	8.37	15.2



### 【参考文献】

- 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
- 田中ら,岐阜県工業技術研究所研究報告 No.7, pp1-4,2018
- 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
- 田中ら,岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.5, pp30-33,2024
- 5) 村上ら,東京都立産業技術研究センターNo.11, pp36-39,2016
- 6) 柳瀬,Optuna で始めるハイパーパラメータ最適 化,Vol.104,No.7,2021
- 7) 赤穂,カーネル多変量解析,岩波書店, pp99-121,2022