

レーザピーニングおよびショットピーニングを施した ステンレス鋼の残留応力予測モデルの構築

熊本大学 大学院先端科学研究所

准教授 黒田 雅利

(2020 年度 一般研究開発助成 AF-2020209-B2)

キーワード：残留応力、レーザピーニング、ショットピーニング

1. 研究の目的と背景

ショットピーニングとは、小さな無数の鋼球（ショット球）を対象物表面に高速で投射することで、表面層に加工硬化や圧縮残留応力を付与することができる表面改質方法の一つである。一方、レーザピーニングとは、強力なパルス状のレーザを対象物表面に照射することで発生する高圧のプラズマの衝撃力を利用し、ショットピーニングと同様に表面層に加工硬化や圧縮残留応力を付与することができる表面改質方法である。両者とも耐応力腐食割れ性や耐疲労性を改善することが可能な加工技術であるが、レーザピーニングはその効果が構造物の奥深くまで及ぶことが知られており、原子炉構造物の応力腐食割れを防止するための予防保全対策として利用されている^{1),2)}。またレーザピーニングは、ショットピーニングよりも深く圧縮残留応力を付与することが可能であることが報告されている³⁾。これらのことからレーザピーニングは、ショットピーニングに取って代わる表面改質技術として期待されている。

レーザピーニングがショットピーニングと比べて、どの程度深く圧縮残留応力を付与することが可能か定量的な観点から検証するためには、ピーニング条件から被加工材の残留応力を定量的に予測できる、信頼性の高いモデルの構築が不可欠である。しかしながら、そのようなモデルを構築するためには、通常膨大な実験データの蓄積が必要となる。そこで本研究では、この問題に対する解決策として、中心複合計画と応答曲面法を組み合わせた実験計画法アプローチ^{4)~8)}に着目した。実験計画法は、効率的な実験を計画する方策であり、必要最小限の実験にも関わらず合理的でかつ信頼性の高い結果を得ることが可能となる統計学に基づく手法である⁹⁾。

以上の背景より、本研究では実験計画法アプローチを導入することで、ステンレス鋼に対してレーザピーニングやショットピーニングの加工条件で、被加工材の表面から深さ方向の残留応力の分布が予測可能なモデルを作成し、そのモデルの妥当性について検討した。

2. 供試材および実験方法

2.1 被加工材およびピーニング方法

材料として、レーザピーニング材は表 1、ショットピーニング材は表 2 に示す化学成分を有する市販の 316 系ス

テンレス鋼の熱間圧延鋼板を用いた。それらの機械的性質をそれぞれ表 3 と表 4 に示す。まずそれらの圧延鋼板から、縦 19mm、横 19mm、厚さ 15mm の直方体のブロック状サンプルを必要数切り出した。次に、それらのサンプル表面を #800 までのエメリー研磨紙を用いて研磨した後、後述のピーニング条件に従って、研磨面に対してレーザピーニングとショットピーニングを実施した。

表 1 化学成分（レーザピーニング材）

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
SUS316	0.04	0.58	0.92	0.036	0.001	10.17	16.89	2.08

表 2 化学成分（ショットピーニング材）

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
SUS316	0.05	0.39	0.83	0.026	0.001	10.06	16.13	2.08

表 3 機械的性質（レーザピーニング材）

Material	0.2% proof stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Brinell hardness (HBW)
SUS316	319	608	58	170

表 4 機械的性質（ショットピーニング材）

Material	0.2% proof stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Brinell hardness (HBW)
SUS316	263	568	68	153

2.2 残留応力測定方法

2.1 節のピーニングを施したサンプルに対して、電解研磨により表面層を逐次除去することで、任意の深さでの残留応力を測定した。残留応力測定には、X 線応力測定装置（Pulsetec 製、μ-360s）を用い、X 線照射径 φ1mm、特性 X 線 Mn-Kα、電圧 30kV、電流 0.6mA、応力定数-339.825GPa、回折面 311(γFe)の条件で、cosα 法を採用した。残留応力の変化が激しい領域では 10μm 間隔、緩やかな領域では 50μm 間隔もしくは 100μm 間隔で測定を行った。

3. 応答曲面モデル作成方法

3.1 中心複合計画

レーザピーニングやショットピーニングの加工条件から、被加工材の表面から深さ方向の残留応力の分布を、必

要最小限の実験で精度良く予測できるモデルを構築するためには、適切な実験計画を立案することが不可欠である。本研究では、被加工材の残留応力分布に影響すると予想される加工条件として、レーザピーニングではパルスエネルギー、スポット径、被覆率の3因子を、ショットピーニングではショット粒径、噴射圧力、被覆率の3因子を取り上げ、応答曲面モデルを作成する上で最も一般的な実験計画である中心複合計画¹⁰⁾に基づいて、レーザピーニングとショットピーニングの加工条件を決定した。3因子に対する中心複合計画は、図1の模式図に示すように、8個の要因点(●印)、6個の軸点(★印)、6個の重複した中心点(○印)の合計20個から構成される^{4)~7)}。ここで中心点を重複させるのは、再現性を調べることでモデルの信頼性を評価するためである。3因子に対する中心複合計画では、中心点から要因点までの距離を1と仮定すると、中心点から軸点までの距離は1.68となる。従って中心点を原点に置いた場合の各因子の値は、-1.68、-1、0、1、1.68の5段階となり、本研究に適用するとレーザピーニングでは、パルスエネルギーは1.0、2.0、3.5、5.0、6.0(J)、スポット径は0.60、0.70、0.80、0.90、1.00(mm)、被覆率は1000、2620、5000、7380、9000(%)となり、ショットピーニングでは、ショット粒径は0.20、0.40、0.60、0.80、1.00(mm)、噴射圧力は0.13、0.20、0.30、0.40、0.47(MPa)、被覆率は130、300、550、800、970(%)となる。表5と表6に実験の順番をランダムにしてまとめた実際のレーザピーニングとショットピーニングの20個の実験計画をそれぞれ示す。

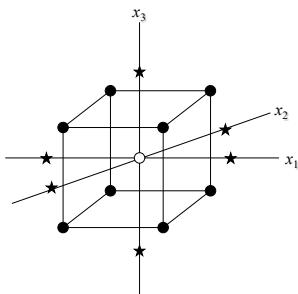


図1 3因子の中心複合計画の模式図^{4)~7)}

3.2 応答曲面法

ショットピーニング材の残留応力の最表面から深さ方向の分布を表現することができる数式として、式(1)が報告されている¹¹⁾。

$$\sigma = A \exp \left\{ \frac{-2(x-D)^2}{W^2} \right\} + B \quad (1)$$

ここで、 σ は残留応力(単位: MPa)、 x は最表面からの深さ(単位: μm)、 A , B , W , D は定数である。本研究では、まず表5と表6に示した条件にて、サンプル表面に対してレーザピーニングとショットピーニングを実施した。次に、ピーニング加工後のサンプルに対して、最表面から深

さ方向の残留応力分布を測定することで、ピーニング加工条件と残留応力分布との関係に関する実験データを収集した。さらに、これらの実験データに対して、以下の原理および手順で、ピーニング加工条件から式(1)のA, B, W, Dの定数を予測可能な応答曲面モデルを導出した。

表5 モデル構築用のレーザピーニング条件

Run Number	Pulse Energy (J)	Spot Diameter (mm)	Coverage (%)
1	6.0	0.80	5000
2	1.0	0.80	5000
3	5.0	0.70	7380
4	3.5	0.80	5000
5	5.0	0.90	2620
6	2.0	0.70	7380
7	3.5	0.80	5000
8	3.5	0.80	5000
9	2.0	0.90	2620
10	3.5	0.80	1000
11	3.5	0.80	9000
12	5.0	0.90	7380
13	3.5	1.00	5000
14	3.5	0.80	5000
15	5.0	0.70	2620
16	3.5	0.80	5000
17	2.0	0.90	7380
18	2.0	0.70	2620
19	3.5	0.80	5000
20	3.5	0.60	5000

表6 モデル構築用のショットピーニング条件⁵⁾

Run Number	Shot Diameter (mm)	Air Pressure (MPa)	Coverage (%)
1	1.0	0.30	550
2	0.2	0.30	550
3	0.8	0.20	800
4	0.6	0.30	550
5	0.8	0.40	300
6	0.4	0.20	800
7	0.6	0.30	550
8	0.6	0.30	550
9	0.4	0.40	300
10	0.6	0.30	130
11	0.6	0.30	970
12	0.8	0.40	800
13	0.6	0.47	550
14	0.6	0.30	550
15	0.8	0.20	300
16	0.6	0.30	550
17	0.4	0.40	800
18	0.4	0.20	300
19	0.6	0.30	550
20	0.6	0.13	550

3.1節において、レーザピーニングとショットピーニングの加工条件を決定する際に採用した中心複合計画は、2次(多項式)の応答曲面モデルのフィッティングに効果的であることが知られている¹⁰⁾。そこで本研究では、応答曲面モデルとして以下の式で表される2次モデルを採用した。

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2)$$

ここで, y は予測応答, x_i, x_j は入力変数, ε はモデル誤差, β_0 は切片, $\beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ は各項の係数である. ピーニング加工条件と式(1)の A, B, W, D の各定数との関係を, 式(2)のモデル式で表現するために, 重回帰分析を行った. また, 得られた応答曲面モデルの有意性を検討するために, 分散分析を行った. なお, これらの統計解析には, 著者らが数値解析ソフトウェア Matlab¹²⁾を利用して作成した応答曲面モデル導出プログラムを用いた. 図 2 にその応答曲面モデル導出プログラムの GUI 入力画面を示す.



図 2 応答曲面モデル導出プログラム⁶⁾

4. 結果および考察

4.1 応答曲面モデル構築

4.1.1 レーザピーニング材

3.2 節に記載の手順にて, レーザピーニング材の最表面から深さ方向の残留応力分布のデータに対して, 重回帰分析を行うことで導出された, 式(1)の A, B, W, D の各定数の応答曲面モデル (予測式) を, それぞれ式(3)~(6)に示す.

$$\begin{aligned} A = & -2.465 \times 10^3 - 3.162 \times 10^2 a + 4.340 \times 10^3 b + \\ & 2.996 \times 10^{-1} c - 1.056 \times 10^2 ab - 7.700 \times 10^{-3} ac - \\ & 2.609 \times 10^{-1} bc + 5.357 \times 10^1 a^2 - 1.483 \times 10^3 b^2 - \\ & 4.078 \times 10^{-6} c^2 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} B = & -1.175 \times 10^2 + 1.094 \times 10^2 a - 7.940 \times 10^2 b + \\ & 1.410 \times 10^{-2} c - 8.815 \times 10^1 ab + 2.600 \times 10^{-3} ac - \\ & 3.070 \times 10^{-2} bc - 4.850 a^2 + 6.512 \times 10^2 b^2 - 1.251 \times \\ & 10^{-6} c^2 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} W = & 1.596 \times 10^2 + 1.134 \times 10^2 a - 1.444 \times 10^2 b + \\ & 4.650 \times 10^{-2} c - 2.125 \times 10^2 ab - 6.200 \times 10^{-3} ac + \\ & 5.690 \times 10^{-2} bc + 1.216 \times 10^1 a^2 + 5.199 \times 10^1 b^2 - \\ & 6.819 \times 10^{-6} c^2 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} D = & 8.846 \times 10^1 - 1.398 \times 10^2 a + 5.945 \times 10^2 b + 1.120 \times \\ & 10^{-2} c - 3.446 \times 10^1 ab + 1.600 \times 10^{-3} ac - 1.110 \times \\ & 10^{-2} bc + 1.868 \times 10^1 a^2 - 2.617 \times 10^2 b^2 - 1.041 \times \\ & 10^{-6} c^2 \end{aligned} \quad (6)$$

ここで, a はパルスエネルギー (単位: J), b はスポット径 (単位: mm), c は被覆率 (単位: %) を示す.

また, フィッシャーの F 検定による分散分析を実施することで得られた, A, B, W, D の各定数の応答曲面モデルの p 値を表 7 に示す. ここで, p 値が有意水準以下の場合, 帰無仮説が棄却となる. つまり, 帰無仮説が棄却されるような有意水準の限界値が p 値であり, p 値が低いほどモデルに有意性があることを意味する. 有意水準は 0.05 が一般的であるが, 本研究で導出した p 値は A, B, W, D のいずれもその有意水準を超えていることがわかる. これは, 本研究で導出した A, B, W, D の各定数の応答曲面モデルが, 予測モデルにそれほど適していないことを示唆している.

表 7 レーザピーニング材に対するモデルの p 値

	A	B	W	D
Model	0.1058	0.5592	0.1112	0.3319

4.1.2 ショットピーニング材

3.2 節に記載の手順にて, ショットピーニング材の最表面から深さ方向の残留応力分布のデータに対して, 重回帰分析を行うことで導出された, 式(1)の A, B, W, D の各定数の応答曲面モデル (予測式) を, それぞれ式(7)~(10)に示す.

$$\begin{aligned} A = & -2.415 \times 10^3 + 7.971 \times 10^2 a + 3.964 \times 10^3 b + \\ & 2.894 c - 9.173 \times 10^2 ab + 5.302 \times 10^{-1} ac - 7.025 bc - \\ & 2.929 \times 10^2 a^2 + 1.303 \times 10^3 b^2 - 8.183 \times 10^{-4} c^2 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} B = & 1.228 \times 10^3 + 1.343 \times 10^2 a - 2.954 \times 10^3 b - \\ & 2.431 c + 6.727 \times 10^2 ab - 7.558 \times 10^{-1} ac + 7.023 bc - \\ & 1.822 \times 10^2 a^2 - 3.284 \times 10^3 b^2 + 4.518 \times 10^{-4} c^2 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} W = & 5.011 \times 10^2 + 3.379 \times 10^2 a - 6.106 \times 10^2 b - \\ & 7.112 \times 10^{-1} c - 5.166 \times 10^2 ab - 7.957 \times 10^{-1} ac + \\ & 3.354 bc + 2.028 \times 10^2 a^2 - 1.927 \times 10^3 b^2 - 8.034 \times \\ & 10^{-6} c^2 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} D = & -3.120 \times 10^2 + 5.914 \times 10^2 a + 6.319 \times 10^2 b + \\ & 3.228 \times 10^{-1} c - 6.013 \times 10^2 - 4.178 \times 10^{-1} ac + 7.985 \times \\ & 10^{-2} bc - 3.569 \times 10^1 a^2 - 3.755 \times 10^2 b^2 - 1.151 \times \\ & 10^{-4} c^2 \end{aligned} \quad (10)$$

ここで, a はショット粒径 (単位: mm), b は噴射圧力 (単位: MPa), c は被覆率 (単位: %) を示す.

また, フィッシャーの F 検定による分散分析を実施することで得られた, A, B, W, D の各定数の応答曲面モデルの p 値を表 8 に示す. ここで, p 値が有意水準以下の場合, 帰無仮説が棄却となる. つまり, 帰無仮説が棄却さ

れるような有意水準の限界値が p 値であり, p 値が低いほどモデルに有意性があることを意味する. 有意水準は 0.05 が一般的であるが, 本研究で導出した p 値は W のみその有意水準を超えていているのに対し, それ以外の A, B, D は有意水準以下であることがわかる. これは, 本研究で導出した応答曲面モデルが, 高精度な予測モデルであることを示唆している.

表 8 ショットピーニング材に対するモデルの p 値

	A	B	W	D
Model	0.0398	0.0055	0.1350	0.0049

4・2 応答曲面モデル検証

4.1 節で構築したレーザピーニング材とショットピーニング材に対する, 最表面から深さ方向の残留応力分布を予測するための応答曲面モデルの妥当性を検証するために, それぞれ表 9 および表 10 に示した条件で改めてレーザピーニングおよびショットピーニングを実施し, それらのサンプルの深さ方向の残留応力分布の実測値と予測値の比較を行った.

表 9 モデル検証用のレーザピーニング条件

Run Number	Pulse Energy (J)	Spot Diameter (mm)	Coverage (%)
1	3.5	0.7	7380
2	3.5	0.7	2620
3	3.5	0.9	7380
4	3.5	0.9	2620

表 10 モデル検証用のショットピーニング条件⁵⁾

Run Number	Shot Diameter (mm)	Air Pressure (MPa)	Coverage (%)
1	0.05	0.10	550
2	0.80	0.40	550
3	0.80	0.20	550
4	0.40	0.40	550
5	0.05	0.50	550
6	0.40	0.20	550

図 3~6 にそれぞれ, 表 9 の 1~4 のレーザピーニング条件で加工したサンプルに対する, 深さ方向の残留応力分布を測定した実測値と, 4.1.1 節で構築したレーザピーニング材の応答曲面モデルを用いて導出した予測値との関係を示す. 図中, ○印は実測値, 実線は予測値を示す. 同図から, 式(1)で表される残留応力分布の予測値は, 実測値の分布の傾向をある程度表現できていることがわかる. これは, ショットピーニング材の残留応力分布を表現可能な数式として報告されている式(1)が, レーザピーニング材に対しても適用可能であることを示唆している.

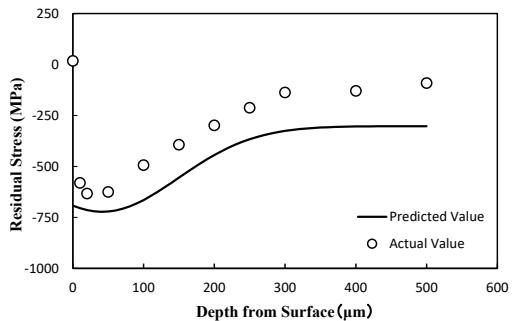


図 3 レーザピーニング材(1)の残留応力分布の予測値と実測値との比較

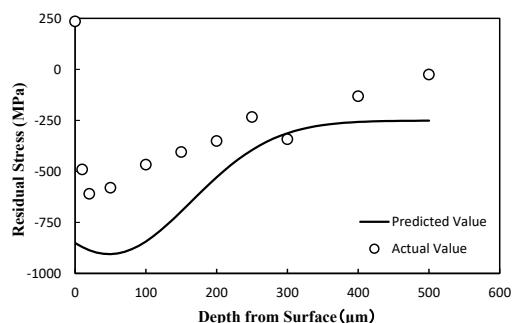


図 4 レーザピーニング材(2)の残留応力分布の予測値と実測値との比較

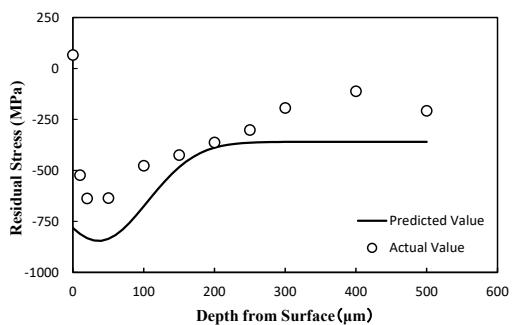


図 5 レーザピーニング材(3)の残留応力分布の予測値と実測値との比較

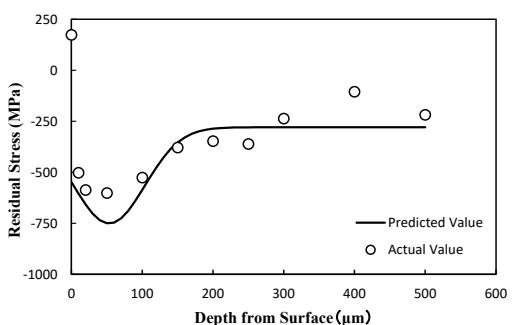


図 6 レーザピーニング材(4)の残留応力分布の予測値と実測値との比較

一方同図から、最表面における残留応力の実測値が外れ値となっているように見受けられる。これは、レーザピーニング材の表面状態が、応力測定値に影響したためと考えられる。今後、レーザピーニング材の最表面の残留応力を精度良く測定可能な技術について、更なる検討が必要であると考えられる。

図7~12にそれぞれ、表10の1~6のショットピーニング条件で加工したサンプルに対する、深さ方向の残留応力分布を測定した実測値と、4.1.2節で構築したショットピーニング材の応答曲面モデルを用いて導出した予測値との関係を示す。図中、○印は実測値、実線は予測値を示す。同図から、表10の5の条件で加工されたショットピーニング材以外では、残留応力分布の予測値は、実測値の分布の傾向をある程度表現できていることがわかる。特に表10の2~4の条件で加工したショットピーニング材においては、予測値と実測値が良く一致していることがわかる。今後、本研究で構築した残留応力分布を予測するための応答曲面モデルの適用範囲について、更なる検討が必要であると考えられる。

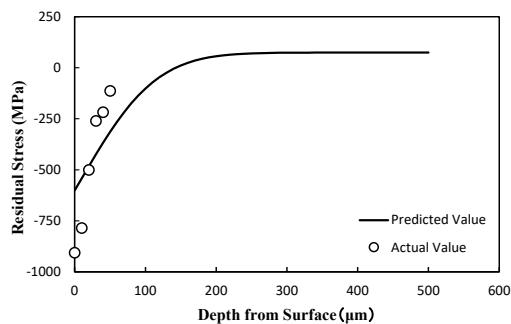


図7 ショットピーニング材(1)の残留応力分布の予測値と実測値との比較

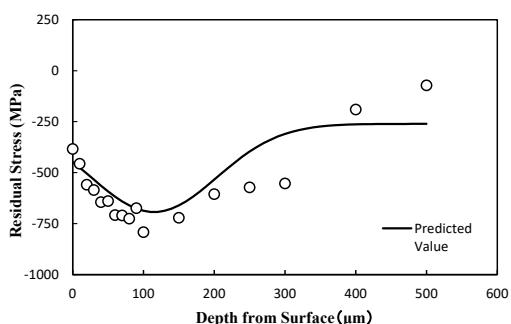


図8 ショットピーニング材(2)の残留応力分布の予測値と実測値との比較

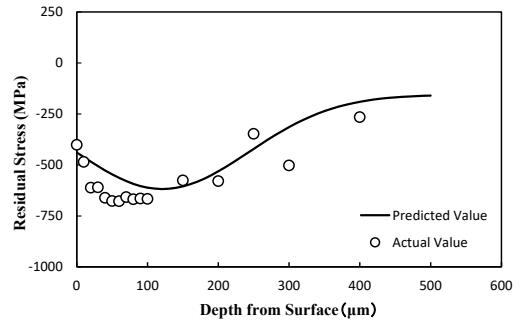


図9 ショットピーニング材(3)の残留応力分布の予測値と実測値との比較

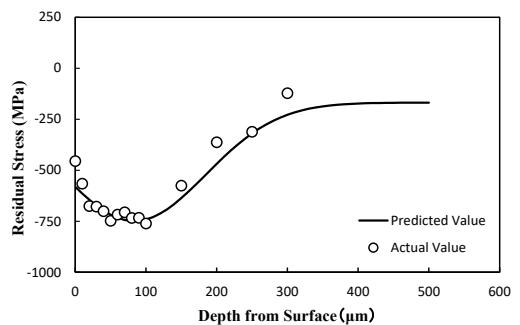


図10 ショットピーニング材(4)の残留応力分布の予測値と実測値との比較

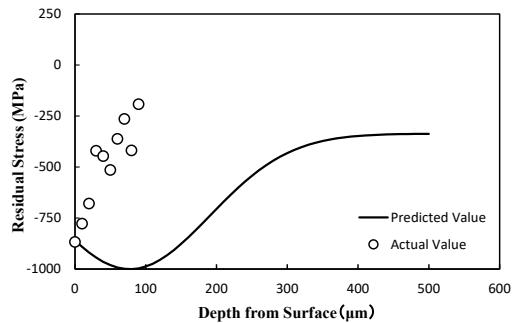


図11 ショットピーニング材(5)の残留応力分布の予測値と実測値との比較

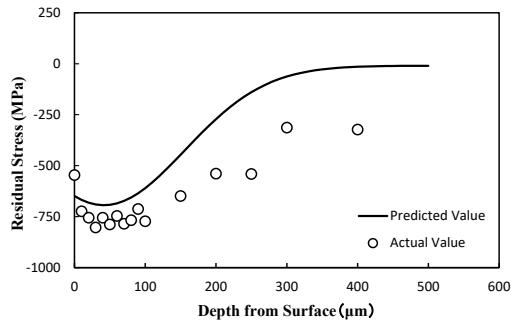


図12 ショットピーニング材(6)の残留応力分布の予測値と実測値との比較

5. まとめ

本研究では実験計画法アプローチを導入することで、ステンレス鋼に対してレーザピーニングやショットピーニングの加工条件から、被加工材の表面から深さ方向の残留応力の分布を予測可能なモデルを作成し、そのモデルの妥当性について検討した。その結果、レーザピーニング材に関しては、残留応力分布の予測値は、実測値の分布の傾向をある程度表現できていることが分かった。またショットピーニング材に関しては、加工条件によっては予測値と実測値が良く一致していることが分かった。今後、本研究で構築した残留応力分布の予測モデルの適用範囲について、更なる検討が必要であると考えられる。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団からの一般研究助成(AF-2020209-B2)により実施した研究に基づいていることを付記するとともに、同財団に感謝いたします。

参考文献

- 1) 佐野雄二・向井成彦・小畠稔・加藤裕美・山本哲夫：溶接学会誌, 75 (2006), 579.
- 2) 佐野雄二：表面技術, 60 (2009), 698.
- 3) 小林祐次：精密工学会誌, 81 (2015), 1062.
- 4) M. Kuroda and T. J. Marrow : Journal of Materials Processing Technology, 203 (2008), 396.
- 5) 黒田雅利・秋田貢一・小林祐次・辻俊哉：日本機械学会論文集, 84 (2018), 18-00150.
- 6) 水野悠太・大橋明弘・黒田雅利・小林祐次・徳永翔一：材料, 70 (2021), 641.
- 7) 黒田雅利・島崎智憲・岩本達也・秋田貢一・小林祐次・水野悠太：材料, 72 (2023), 154.
- 8) J. Aihara, M. Kuroda and Y. Tachibana : Mechanical Engineering Journal, 9 (2022), 21-00424.
- 9) 日本規格協会：JIS Z 8101-3, (1999).
- 10) D. C. Montgomery : Design and analysis of experiments, (2005), John Wiley & Sons, Inc.
- 11) G. T. Robertson : SAE Technical Paper, (1971), 710284.
- 12) MathWorks : MATLAB Statistics and Machine Learning Toolbox User's Guide (R2024b), (2024).