

摩擦攪拌点接合におけるインプロセスでの接合強度の予測

大石 郁、大田 耕平、坂村 勝

Prediction of tensile shear strength during friction stir spot welding

OHISHI Kaoru, OTA Kouhei and SAKAMURA Masaru

摩擦攪拌点接合は自動車産業等ではアルミニウム合金の接合に欠かせない接合技術となっている。一方製造現場においては、近年急速に発展してきた AI などのデジタル技術を活用して、スピード化や省力化・無人化が推進され始めている。そこで、本研究では摩擦攪拌点接合に対してインプロセスで接合品質を評価することを目的とした。具体的には、様々なセンサを接合装置に取り付け、接合時の温度変化や接合ツールのブレなどの挙動を把握し、得られた挙動データから最高値や累積値などのデータを取得し（説明変数を作成し）、それら個々の説明変数と接合強度がどのような関係にあるかを調査した。そして、接合強度と特に関係が深い 9 種類の説明変数を用いて、総合的に解析することによって接合強度を予測可能とした。最終的に予測した接合強度と実際の接合強度とを比較すると、その相関関係（決定係数）は $R^2=0.96$ と高い結果が得られ、接合時の挙動から接合強度を予測できることが示唆された。

キーワード：摩擦攪拌点接合（FSSW）、インプロセス、強度予測、回帰分析

1. 緒 言

摩擦攪拌接合（FSW：Friction Stir Welding）は、英国の TWI が考案した固相接合である。入熱量が小さいため熱変形が少なく、異種材料の接合に適している。そして接合中にヒュームやスパッタ、紫外線等が発生せず作業環境が良好な上、接合時の電力消費が少なく省エネである等の特徴を活かし、自動車や鉄道、ロケット、航空機、船舶、土木構造物など様々な産業に適用されてきている¹⁻²⁾。また摩擦攪拌接合を応用した摩擦攪拌点接合（FSSW：Friction Stir Spot Welding）が考案され、自動車産業を中心に適用されてきている³⁾。

一方、近年では IoT や AI といったデジタル技術が目まぐるしく発展してきており⁴⁻⁶⁾、地元製造業においても取り入れている企業が増えつつある。また今後もトレーサビリティの確保やインプロセスでの評価、自動化のために益々発展するものと予測される。

そこで本研究では、摩擦攪拌点接合時に発生する熱や接合ツールの振動といった接合時の各挙動を様々なセンサを用いて収集し、その挙動データと接合強度がどのように関係しているのかを調査し、最終的に接合強度を予測可能とすることを目的とする。

2. 実験方法

実験には東部工業技術センターが保有する図 1 に示す FSW 装置（芝浦機械㈱製 MPF-2114FS）を用い、そして図 2 に示すとおり FSW 装置に様々なセンサを取り付け、種々の条件下で摩擦攪拌点接合を施して、その際の

温度変化等のデータを取得した。

なお、接合実験にはショルダー径 $\phi 10\text{mm}$ 、プローブ径 $\phi 4\text{mm}$ 、プローブ高さ 1.3mm の接合ツール（プローブ部のネジ加工はなし、ショルダー角は 0° ）を用い、接合試料は厚さ 1.2mm のアルミニウム合金 A5052 材を用いた。



図 1 FSW 装置



図 2 様々なセンサの取り付けられた実験状況

そして各センサで収集した熱変化や振動などに対し、それぞれの最高値や累積値などをデータ化し、解析することによって接合強度との関係を調査した。

3. 実験結果

一例として、ある条件下で接合した際のアルミ合金表面温度の挙動を図3に示す。接合ツールのプローブ先端が被接合材のアルミ合金に挿入されると、①アルミ合金の表面温度が高くなり始め、そして②ショルダーが挿入されると急激に温度が高くなるのが判った。そして③接合終了後（接合ツールがアルミ合金から離れると）、アルミ合金の表面温度がゆっくりと低くなっていった。

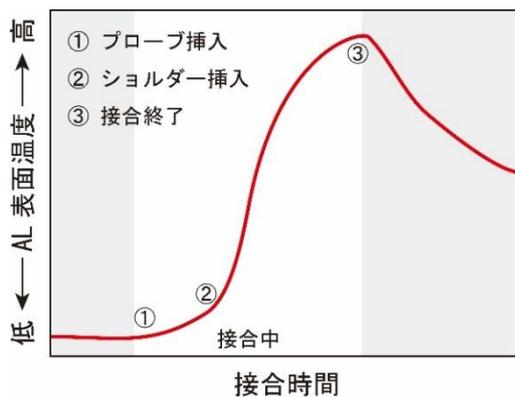


図3 接合時におけるアルミ合金表面温度の変化

次に、このような挙動（温度変化）に対し、最高温度などを読み取り、アルミ合金の表面温度に関する説明変数を作成した。また接合ツールの振動等の他のセンサで得られた挙動データに対しても同様に分析し 43 種の説明変数を作成した。

続いて、説明変数が多いとその後の解析に時間がかかるため、得られた 43 種の説明変数について説明変数同士の関係性を調査し、類似する説明変数を統合した。そして、最終的に 9 種に絞った説明変数と目的変数（接合強度）同士の関係（散布図）を図4に示す。また、説明変数や目的変数（接合強度）同士の関係性（ヒートマップ）を図5に示す。

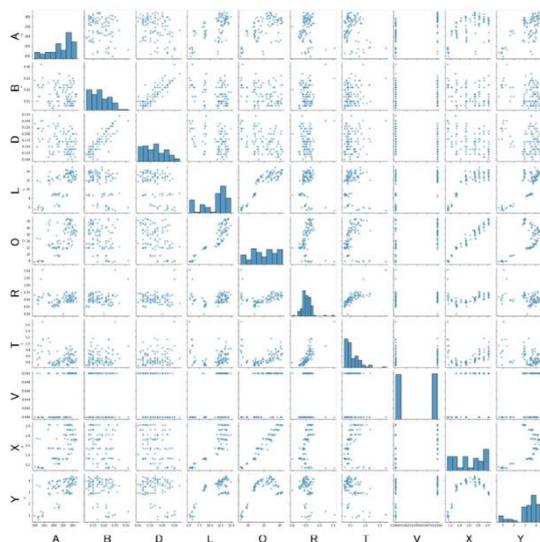


図4 各説明変数と接合強度との関係（散布図）

ここで図4や図5のA、B、Dなどのアルファベットは各説明変数を表す（ただしYは目的変数を表す）。そして図4より、各変数同士がどのような関係であるのか、1次関数的関係なのか2次関数的関係なのか、正の関係か負の関係かなどを把握している。また図5より、色の濃さによって各変数同士がどの程度相関が高いのかを色や数値によって把握している。すなわち白色が正の相関が高いことを示し、黒色が負の相関が高いことを示す。また図中の数値は相関係数Rを表している（それぞれの関係性を数値化している）。

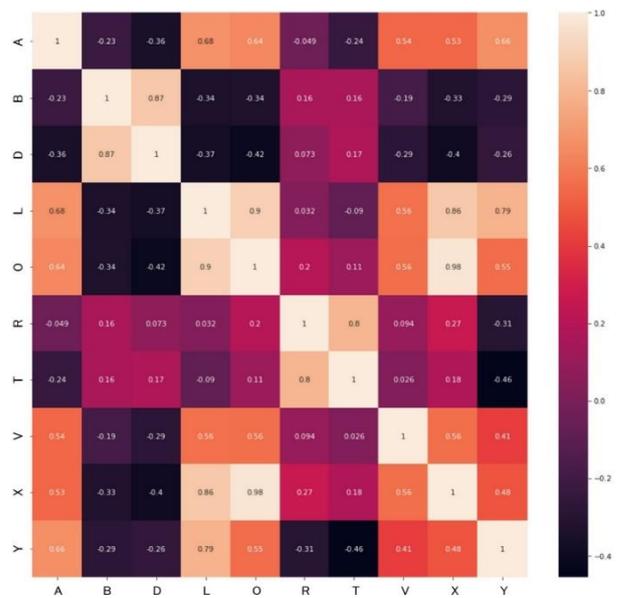


図5 各説明変数と接合強度との関係（ヒートマップ）

これらの結果から、各説明変数と接合強度との関係を把握することができた。

またこれらの結果の中で、相関関係（ヒートマップ上の値）は低い値を示したものの、散布図にて関連性が高いとみられる説明変数Xについて、接合強度との関係を図6に示す。また、散布図およびヒートマップともに高い相関関係を示した説明変数Aについて、接合強度との関係を図7に示す。

図6に示すとおり、説明変数Xと接合強度との相関関係はヒートマップ上（1次関数）では $R=0.48$ であったものの、グラフは曲線を示しており2次関数的に関係性があることが判った。そこで2次式での相関関係を分析したところ $R=0.96$ ($R^2=0.91$) となり比較的高い値を示した。

一方、図7に示すとおり説明変数Aと接合強度の関係はヒートマップ上（1次関数）では $R=0.66$ であり、2次関数の相関関係は $R=0.69$ ($R^2=0.48$) であった。このように説明変数によって接合強度との関係が異なることが判った。また、説明変数XやA以外の説明変数においても、それぞれ異なる関係性を示しており、1次および2次的な関係を示す説明変数の混在が明らかとなった。

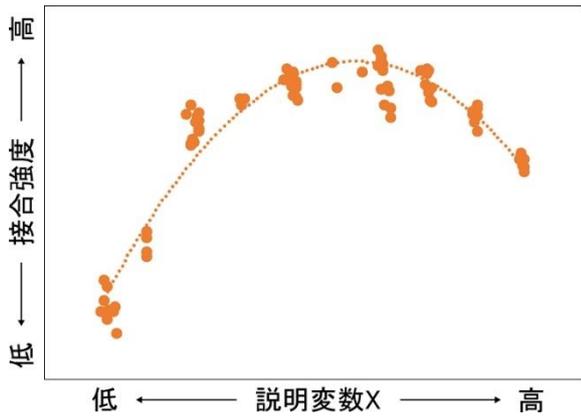


図6 説明変数Xと接合強度との関係

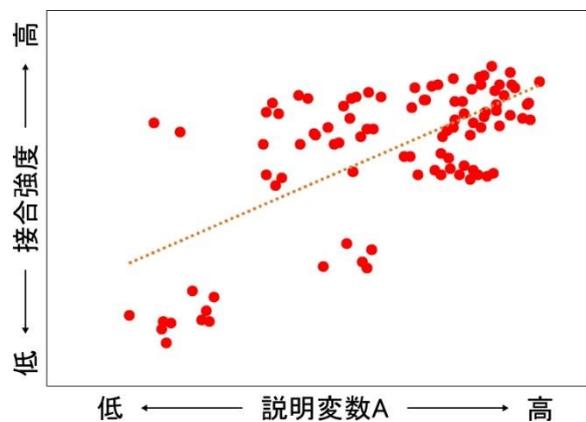


図7 説明変数挙動Aと接合強度との関係

続いて、9種の説明変数を用いて回帰分析を行い、各説明変数（A～X）の接合強度（Y）への影響の大きさを数式化し、接合強度（Y）を予測するための方程式（1）を作成した。

$$Y = 0.034A' + 0.031B' - 0.024D + 0.016L' \\ - 0.073O' + 0.127R + 0.068T \\ + 0.387V + 0.510X' \\ \dots (1)$$

この方程式を用いて予測した接合強度と実際の接合強度との関係を図8に示す。

図8に示すとおり予測した接合強度と実際の接合強度の相関関係（決定係数）は $R^2=0.96$ と、高い値を得ることができた。この結果より、接合時に発生する温度変化などを捉えることで、接合強度を予測することが可能であることが示唆された。

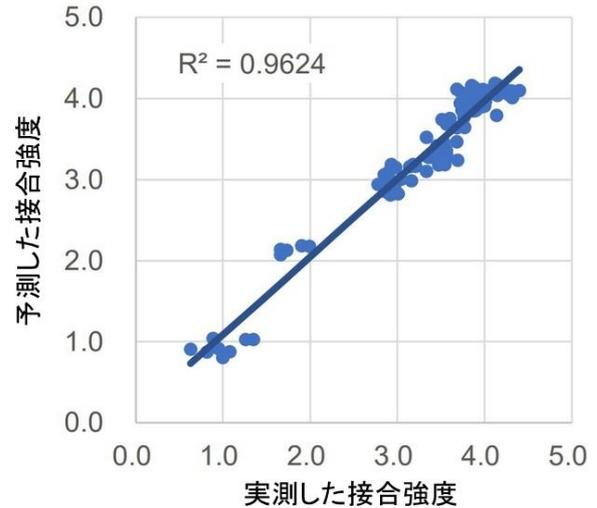


図8 予測した接合強度と実測値との関係

4. 結 言

本研究により摩擦攪拌点接合時に得られる挙動と接合強度との関係性を解析し、次の結論を得た。

- ・一部の挙動（説明変数）において接合強度と高い関係性を見出すことができた。
- ・各説明変数同士の関係性を把握することができた。
- ・各説明変数と接合強度との関係性を把握することができた。
- ・重回帰分析することで、各説明変数と接合強度との関係性を数値化し、接合強度を予測するための方程式を作成することができた。
- ・予測強度と実際の接合強度との相関関係（決定係数）が $R^2=0.96$ と高い値を得ることができた。

本研究によって、接合強度を予測するためのセンサの種類、得られた挙動に対するデータ処理の仕方（説明変数の作り方）、説明変数の影響度を把握することによってインプロセスでの強度予測（品質管理手法の確立）に一步近づけた。

今後はRaspberryPiなどの簡易なコンピューターシステムの測定・判定機器を作製し、工程内にて接合強度が判定できるシステムの構築を検討していく予定である。

また本研究では、位置制御装置による摩擦攪拌点接合に対して分析したが、圧力制御装置に対しても同様の分析手法で良いかを調査する予定である。さらに、弊所が開発した接合方法である摩擦アンカー接合⁷⁾においても、同様の知見が得られるか検討していく予定である。

最後に、本研究における知見は他の分野、例えばプレス加工や鋳造においても応用できる可能性を秘めており、成功事例を増やして横展開していくことも検討している。

謝 辞

本研究の一部は公益財団法人天田財団の助成事業「一般研究開発助成」の支援を受けて行いました。この場を借りて感謝申し上げます。

文 献

- 1) 大石郁：まてりあ、60 (2021) 2
- 2) 大石郁、藤井英俊：まてりあ、53 (2014) 12、603-60
- 3) 村上士嘉、山下浩二郎、妹尾安郎、橘昭男：マツダ技法、(2013) No.13
- 4) 荻野陽輔、平田好則：溶接学会論文集、34 (2016)、35-41
- 5) 片岡耕太郎、野村和史、三村晃平、平田好則：溶接学会論文集、33 (2015)、233-241
- 6) 鹽津陵雅、河合真二、山本憲吾、榎本正敏、富田正吾、柴柳敏哉：溶接学会全国大会講演概要、105 (2019)、96-97
- 7) 特許 第 5854451 号 異種金属板の接合方法