摩擦かくはん点接合等においてインプロセスでの接合強度の予測技術の開発

広島県立総合技術研究所　東部工業技術センター　加工技術研究部
担当部長　大石　郁
（2022 年度 一般研究開発助成 AF-2022028-B3）

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．研究の目的と背景

摩擦攪拌接合(FSW：Friction Stir Welding)や摩擦攪拌点接合(FSSW：Friction Stir Spot Welding)は，回転する接合ツールを被接合材である金属に押込み，塑性流動させることによって，複数枚の被接合材を一体化させる固相接合である．入熱量が小さいため熱変形が少ないこと，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こと，一旦条件が確立されれば熟練工が必要ではなく，近年の人員不足に対応できること，接合時の電力消費が少なく省エネであること等の特徴を活かし，県内の主要産業である自動車産業を中心に鉄道やロケット，航空機，船舶，土木構造物等，様々な産業に適用されてきている[1-3]．ただし実際に施工している製造現場の品質管理手法は，接合装置の制御（回転速度等の接合条件の入力）や後工程での検査といった従来型の品質管理であることが多い．一方，世の中の流れとしてトレーサビリティの強化や全数検査，人員不足の対策(品質管理の自動化）等，様々な要望が高まっており，本接合技術においても品質管理手法の向上が急務となってきている．

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]，多くの製造現場にて各社の目的に合わせて導入されてきている．そうした中で，摩擦攪拌点接合を実施しているメーカーから「現行のような接合装置への接合条件（回転速度，圧力等）の入力や後工程での検査によって接合品質を担保するのではなく，製造時にて自動で判定できる品質評価システムが欲しい」との要望から，「接合時に発生している熱や接合ツールの回転トルクの変化等の挙動を把握し，分析することによって接合品質（接合強度）を予測する技術」を開発することとした．また，弊所が開発した摩擦アンカー接合[7]を用いた異種金属接合においても同様のニーズがあるため，本事業にて実施することとした．

その為，本研究では次の 2 課題について取り組む．

1. 摩擦かくはん点接合における同種金属接合に対する強度予測　（位置制御および圧力制御）
2. 摩擦アンカー接合における異種金属接合に対する強度予測

２．摩擦かくはん点接合における同種金属接合に対する強度予測（位置制御）

2.1　実験方法

実験には図 1-1 に示す弊所が保有する FSW 装置（芝浦機械㈱製 MPF-2114FS）を用い，かつ図 1-2 に示すとおり様々なセンサを取り付け，接合中の温度変化等の挙動データを収集した．また接合ツールの押込み速度や保持時間等の接合条件を変えて実験をすることで，様々な接合条件下における挙動データを収集した．

尚，接合実験にはショルダー径 φ10mm，プローブ径 φ3mm，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°）を用いた．また接合試料は t1.2mm のアルミニウム合金 A5052 材を用いて，重ね継手とした．

そして，接合実験中の各センサで収集した温度変化や振動等に対し，それぞれの最高値や累積値等を読み取り，解析することによって接合強度との関係を調査した．



図 1　FSW 装置およびセンサの設置状況（位置制御）

2.2　実験結果

一例として，ある条件下で接合した際の各挙動データを図 2 に示す．尚，図中のグレー色の箇所は接合前後の時間である．

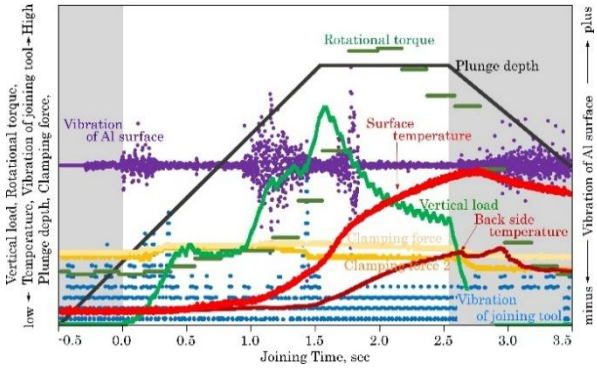


図 2　各種センサから得られた挙動データ（位置制御）

図 2 に示すとおり，本実験が位置制御であるため接合ツールが一定速度に挿入されていることが分かった．次に，接合ツールのプローブ先端が被接合材のアルミニウム合金に挿入されると，垂直荷重やクランプ力，アルミニウム合金表面の振動等に変化が見られた．その後，垂直荷重の上昇は収まるが，接合時間約 1.0 秒で再び上昇を始めた．これは接合ツールのショルダーがアルミニウム合金表面と接触し始めたためと考えられる．そしてショルダー面はプローブ面と比較して大きいこと，さらに本接合実験は位置制御であったことから，設定された位置を維持するために過負荷を掛けて押し込んだため上昇したと考えられる．またショルダーが接触することで，アルミニウム合金の表面の振動も大きくなり，かつアルミニウム合金表面温度の上昇率も大きくなった．

次に，このような挙動データに対し，例えば最高温度や 200℃以上の時間等を読み取り，アルミニウム合金の表面温度に関する説明変数を作成した．そして，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．

そして，様々な実験条件で得られた挙動データに対しても同様に解析し，図 3 に示すデータセットを作成した．

No.									
1	0.17	-0.14	0.31	0.16	0.12	-0.13	0.25	0.16	0.1
2	0.08	-0.09	0.17	0.13	0.09	-0.09	0.18	0.11	0.17
3	0.11	-0.10	0.21	0.15	0.11	-0.11	0.22	0.10	0.08
4	0.11	-0.11	0.22	0.11	0.06	-0.12	0.18	0.11	0.03
5	0.14	-0.11	0.25	0.16	0.15	-0.10	0.25	0.12	0.07
6	0.12	-0.10	0.22	0.13	0.00	-0.01	0.01	0.00	0.17
7	0.13	-0.11	0.24	0.15	0.00	-0.01	0.01	0.00	0.15
8	0.11	-0.11	0.22	0.14	0.00	-0.01	0.01	0.01	0.15
9	0.11	-0.10	0.21	0.15	0.00	-0.01	0.01	0.00	0.13
10	0.11	-0.11	0.22	0.13	0.00	-0.01	0.01	0.00	0.25
11	0.08	-0.11	0.19	0.11	0.00	-0.01	0.01	0.00	0.15
12	0.15	-0.12	0.27	0.09	0.00	-0.01	0.01	0.00	0.15
13	0.12	-0.11	0.23	0.11	0.00	-0.01	0.01	0.01	0.28
14	0.14	-0.09	0.23	0.10	0.00	-0.01	0.01	0.00	0.2
15	0.07	-0.06	0.13	0.09	0.00	-0.01	0.01	0.00	0.13
16	0.13	-0.09	0.22	0.10	0.00	-0.01	0.01	0.01	0.13
17	0.14	-0.10	0.24	0.08	0.00	-0.01	0.01	0.00	0.18
18	0.07	-0.05	0.12	0.08	0.00	-0.01	0.01	0.00	0.2

～

0.37	0.19	0.18	4.9	8.1	2.8	7.7	4.3	1.35
0.32	0.23	0.09	4.1	7.7	2.6	2.0	5.0	0.63
0.30	0.23	0.07	4.2	8.2	2.7	2.6	3.7	0.89
0.31	0.23	0.09	4.6	8.0	2.7	2.7	3.5	0.92
0.33	0.26	0.07	4.9	7.8	2.8	5.0	10.6	1.08
0.27	0.21	0.07	4.3	7.9	2.7	2.9	3.0	0.82
0.29	0.20	0.09	4.1	7.6	2.8	2.8	2.7	1.00
0.30	0.23	0.07	3.9	7.9	2.8	3.3	4.1	1.26
0.33	0.26	0.06	4.5	7.8	2.7	4.9	5.2	0.95
0.31	0.23	0.08	4.0	7.8	2.5	2.1	1.5	0.92
0.30	0.22	0.08	6.5	12.1	2.7	1.0	2.3	3.69
0.32	0.23	0.10	6.7	12.3	2.8	1.2	5.8	3.55
0.31	0.20	0.11	6.9	12.2	2.8	1.3	2.8	3.45
0.30	0.24	0.06	6.4	11.7	2.7	0.8	1.3	3.34
0.32	0.23	0.09	6.6	11.9	2.7	1.4	3.7	3.54
0.33	0.24	0.09	6.4	11.7	2.6	1.7	4.0	3.36
0.31	0.26	0.06	6.6	11.9	2.6	3.4	8.3	3.49
0.32	0.28	0.04	6.7	11.9	2.6	3.6	6.7	3.33

図 3　データセット

ここで，説明変数の 1 つであるツール位置から算出した“押込み深さ”と目的変数である“接合強度（せん断引張強度”との関係を図 4 に示す．

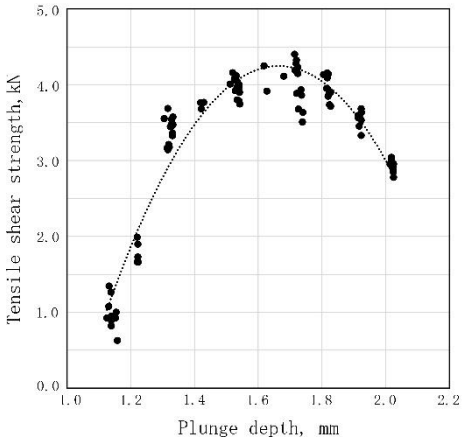


図 4　説明変数（押込み深さ）と接合強度との関係

図 4 に示すとおり，“押込み深さ”と“接合強度”のグラフは上に凸の曲線を示しており 2 次関数的な関係性であることが分かった．また，その相関関係（決定係数）は R^2=0.91 と高い値を示した．

続いて，説明変数が多いと後工程のデータ解析に時間がかかるため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 種に絞った各説明変数同士や目的変数（接合強度）との関係をについて散布図を図 5 に，ヒートマップを図 6 に示す．

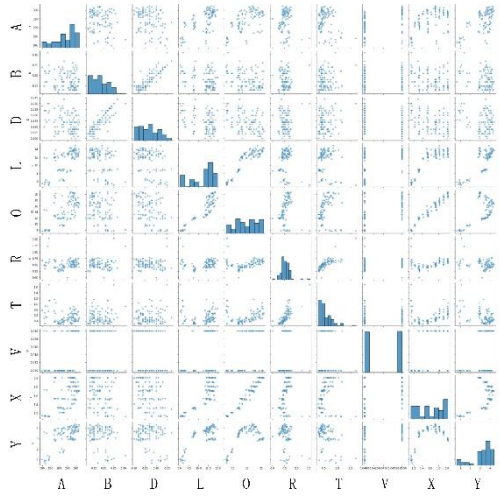


図 5　各説明変数と接合強度との関係
（散布図）

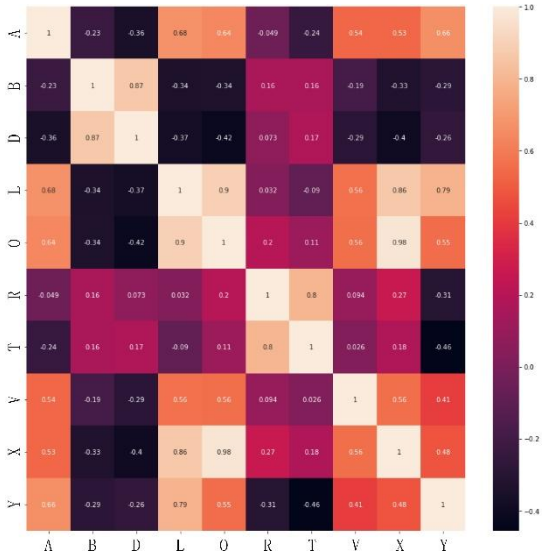


図 6　各説明変数と接合強度との関係
（ヒートマップ）

ここで図 5 や図 6 の縦軸と横軸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 5 より，各変数同士がどのような関係であるのか，図 4 で示すような 2 次関数的関係なのか 1 次関数的関係なのか，正の関係か負の関係かを把握した．また図 6 より，色の濃さによって各

変数同士がどの程度相関があるのかを色や数値によって把握した．尚，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)．そして，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．

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を作成した．

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

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．

次に実際の生産現場に取り付けるセンサの数等を考慮し，9つの説明変数の中でも，さらに重要と考えられる3つの主要な説明変数に対して，同様に予測する方程式

$$Y = 0.215A' + 0.183L' + 0.761X' \quad \cdots(2)$$

を作成した．この式を用いて予測した接合強度と実際の接合強度との比較を図7に示す．図7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=0.94 と非常に高い値を得ることができた．このように，説明変数3つと9つとでは0.02のスコア差があったが，説明変数3つにおいても十分な予測が可能であると示唆された．

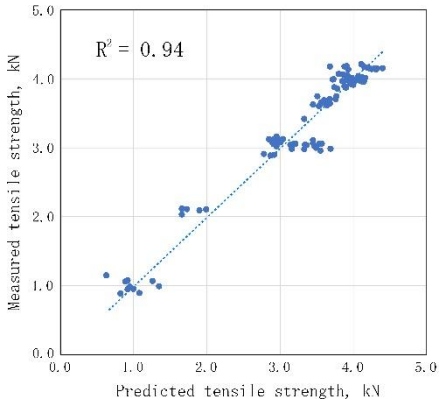


図7　予測値と実測値との比較（位置制御）

3．摩擦かくはん点接合における同種金属接合に対する強度予測（圧力制御）

3.1　実験方法

本実験ではショルダー径φ10.0mm－プローブ径φ3.0mm×高さ1.3mm（ネジ加工無し）の接合ツールを用い，被接合材には t1.2mm の A5052 材を用いて重ね継手とした．また図8に示すとおり，汎用フライス盤のテーブル上にエアシリンダーを配置し，その上に定盤（裏当金）をセットした．



図8　FSW装置およびセンサの設置状況（圧力制御）

そして，その定盤の上に治具を用いて被接合材を固定し，エアシリンダー（定盤）を上下させることによって2枚を重ねた被接合材に回転する接合ツールを押込み，接合試験片を作製した．尚，テーブル上に様々なセンサを取り付けることによって接合時の温度変化等の挙動データを収集し，収集した挙動データから説明変数を作成した．また押込み深さ等を変化させて実験数を増やしデータセットを作成した．さいごに，主要な説明変数から接合強度を予測する方程式を作成し，予測した接合強度と実際の接合強度との相関関係を調査した．

3.2　実験結果

一例として，ある条件下で接合した際の各挙動データを図9に示す．尚，図中のグレー色の箇所は接合前後の時間である．

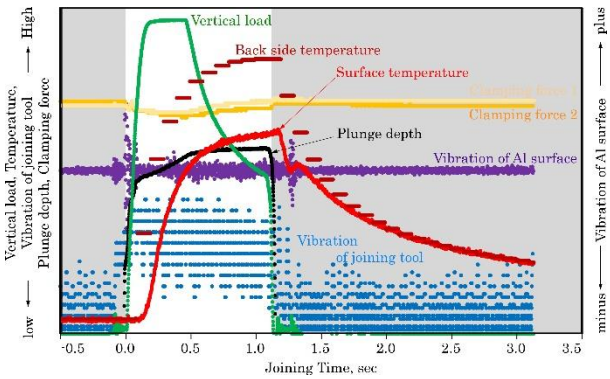


図9　各種センサから得られた挙動データ（圧力制御）

図9に示すとおり，本実験が圧力制御であるため接合ツールの押込み速度は一定ではなかった．次に，接合ツール（プローブ）がアルミニウム合金表面に接触すると同時に垂直荷重やAl裏面温度，振動，試験片を固定するクランプ力に変化が生じていた．一方，Al表面温度は接合中心から7mm離れた箇所を測定しているため若干のタイムラグが生じていた．接合ツールの押込み深さの挙動について，接合時間 0.1sec～0.3sec と 0.3sec～0.5sec とでは若干上昇率が異なるが，これはアルミニウム合金の温度が上昇し，塑性流動が発生しやすくなったためと考えられる．次に，上昇した垂直荷重は所定の圧力で一定

となった後に低下しているが，これは接合ツールが所定の押込み深さまで到達したためと考えられる．

このように圧力制御下での各挙動は図 2 で示す位置制御の挙動とは異なる挙動を示すことが分かった．

次に，前述と同様に例えば Al 裏面温度から最高値や接合中の累積値，温度上昇時の傾き等を特徴量（説明変数）として読み取った．そして他のセンサにおいても同様に読み取り，36 種の説明変数を作成した．

ここで，説明変数の 1 つである押込み深さと接合強度との関係，さらに各押込み深さにおける接合強度試験後の接合試験片（下板）の状態を図 10 に示す．

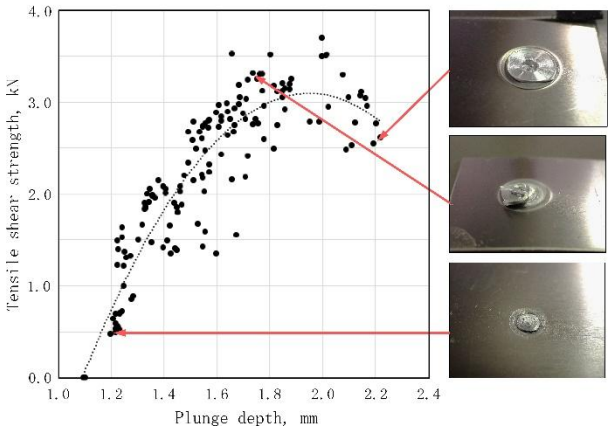


図10　押込み深さと接合強度との関係と各押込み深さの引張試験後の接合試験片（下板）

図 10 に示すとおり，位置制御の図 4 の結果と同様に，押込み深さと接合強度との関係は上に凸の曲線を示しており，2 次関数的に関係性があることが分かった．また，押込み深さが浅い場合，接合強度試験後の接合試験片には小さな凸形状の接合痕が残り，押込み深さが深くなるに従って凸形状の接合痕は大きくなることが分かった．

この原因を調査するため，新たに押込み深さ 1.2㎜ と 1.7㎜ の接合試験片を作製し，押込み深さ 1.2㎜ の接合試験片の断面を図 11 に，押込み深さ 1.7㎜ の接合試験片の断面を図 12 に示す．また，各押込み深さにおける接合強度試験時の亀裂の入り方の考察を図 13 に示す．

図 11-2 に示すとおり押込み深さが浅い場合，上下 2 枚間の未接合界面は接合痕（プローブ痕）近傍まで接近していた．これは，押込み深さが浅いため，十分な攪拌領域が得られなかったためと考えられる．一方，図 12-2 に示すとおり，押込み深さが深くなると攪拌領域も大きくなり，上下 2 枚間の未接合界面と接合痕との距離が長くなり，接合強度も相対的に向上したと考えられる．

一方，さらに押込み深さが深くなると，接合痕（ショルダー痕）と上下 2 枚間の未接合界面との距離（図 12-1 の白色四角）が短くなり，亀裂が進展し易くなり接合強度が低下したと考えられる．その為，押込み深さと接合強度との関係は2次関数的な関係になったと考えられる．

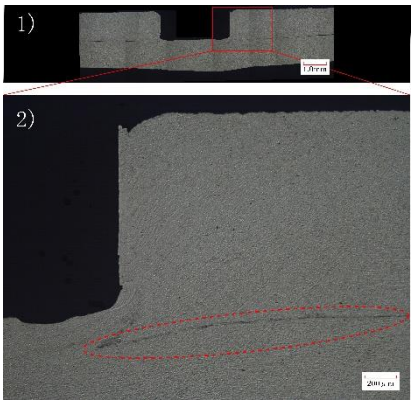


図 11　押込み深さが 1.2㎜ の際の接合試験片の断面組織

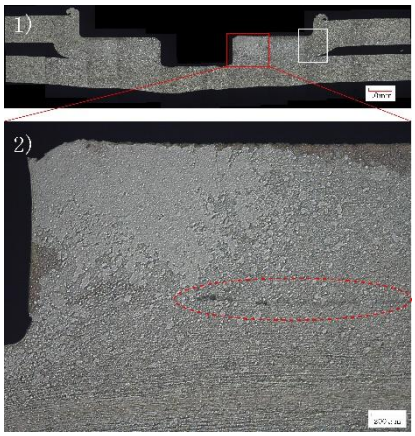
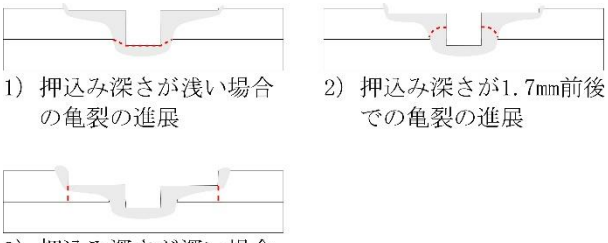


図 12　押込み深さが 1.7㎜ の際の接合試験片の断面組織



1）押込み深さが浅い場合の亀裂の進展

2）押込み深さが1.7㎜前後での亀裂の進展

3）押込み深さが深い場合の亀裂の進展

図 13　引張試験時の亀裂の進展

次に，前述の位置制御と同様に，散布図やヒートマップを用いることで各説明変数同士の関係や目的変数（接合強度）との関係を調査し，最終的に 3 つのセンサから得た 3 つの説明変数を選定した．そして回帰分析することによって，下記に示す接合強度を予測するための方程式を作成した．

$$Y = 0.382A + 0.262B + 0.629C \quad \cdots(3)$$

この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 14 に示す．図 14 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=0.88 と良好な結果を得ることができた．

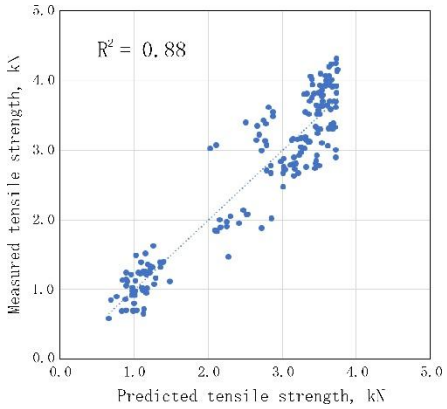


図 14　予測値と実測値との比較（圧力制御）

4．摩擦アンカー接合における異種金属接合に対する強度予測

4.1　実験方法

実験には前述した図 8 に示す装置を用い，異種金属接合を実施した．その際，様々なセンサを取り付けることによって摩擦アンカー接合時の温度変化等の挙動データを収集した．尚，接合実験には直径 φ10mm の窒化ケイ素球を焼き嵌めた接合ツールを用い，被接合材の上板には t1.2mm のアルミニウム合金 A5052 材を，下板には t1.0mm の鋼板 SPCC を用いた．そして，これまでと同様に押込み深さ等を変化させて実験数を増やし，各挙動データから作成した説明変数を用いて接合強度を予測し，実際の接合強度との相関関係を調査した．

4.2　実験結果

一例として，ある条件下で接合した際の各挙動データを図 15 に示す．尚，図中のグレー色の箇所は接合前後の時間である．

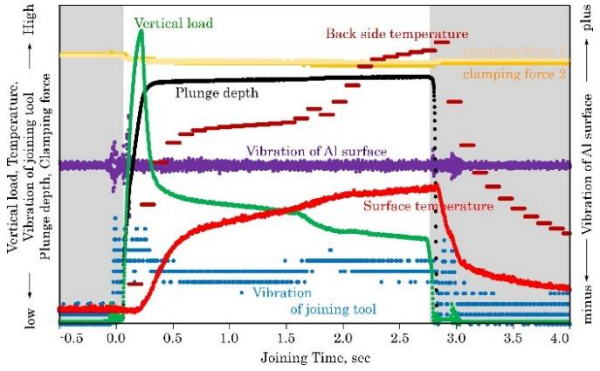


図 15　各種センサから得られた挙動データ
（摩擦アンカー接合/異種金属接合）

図 15 に示すとおり，回転する球面の接合ツールが被接合材に押込まれると同時に被接合材の温度は上がり，一旦温度が平衡状態となった．その後，再び温度は上昇し，約 2.0sec で上昇率は低下した．これは，接合初期では，接合ツールが上板を貫通し下板の鋼板表面に及んでいたと考えられる．そして鋼板がある一定温度以上となることで鋼が攪拌し易くなり，接合ツールが再び押込まれることで温度も上昇したと考えられる．

このように 3 章で述べた FSSW（圧力制御）と類似する挙動も示したが，温度や垂直荷重の変化等については異なる挙動を示すことが分かった．

次に，押込み深さと接合強度との関係を図 16 に示す．図 16 に示すとおり，これまでの FSSW では上に凸の 2 次関数的な関係であったのに対し，摩擦アンカー接合では右肩上がりの 1 次関数的な関係になることが分かった．尚，相関関係を示す決定係数は R^2=0.76 であり，これまでとは異なり，低い相関関係にあることが分かった．

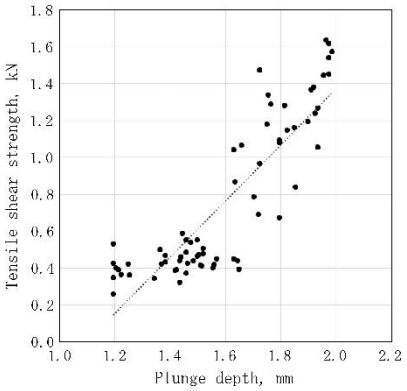


図 16　押込み深さと接合強度との関係

ここで，押込み深さ 1.5mm と 1.7mm と 1.9mm の接合試験片の断面状態を観察した結果を図 17 に，押込み深さ 1.7mm と 1.9mm の突起部の接合界面の成分状態（Fe と Al のマップ）を図 18 と図 19 に示す．図 17 に示すとおり，摩擦アンカー接合の特徴である下板の鋼からなる突起が上板内に形成され，また押込み深さが深くなるに従って突起も大きくなっていたことが分かった．これにより図 16 で示すとおり，押込み深さが深くなるに従って接合強度も向上したと考えられる．

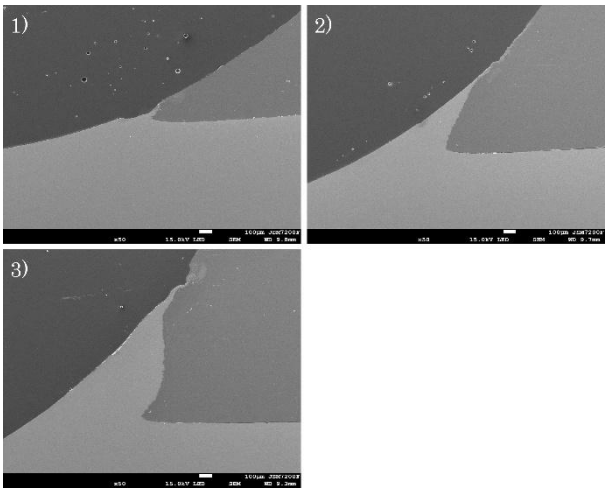


図 17　押込み深さの違いによる突起形状状態

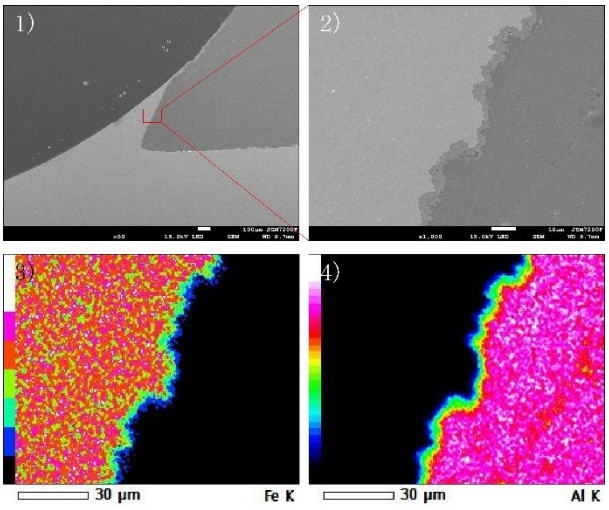


図 18　押込み深さ 1.7㎜ における接合界面の状態

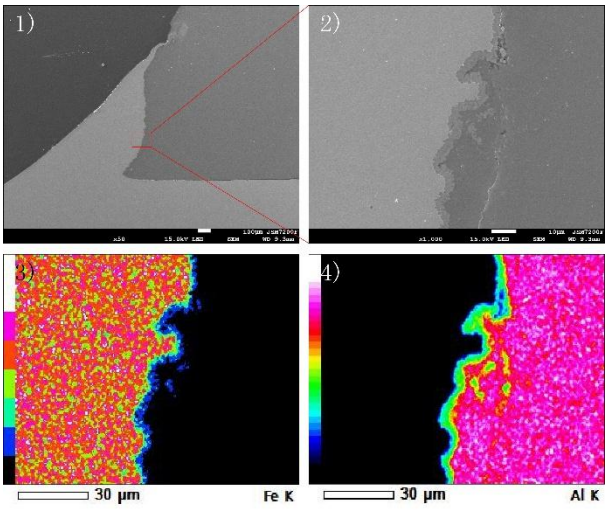


図 19　押込み深さ 1.9㎜ における接合界面の状態

また図 18 と図 19 に示すとおり，突起部（鋼）とアルミニウム合金との間には金属間化合物が形成されていることが分かった．そして，押込み深さが深くなると，金属間化合物の厚さも厚くなることが分かった．ただし，接合強度への影響は，“金属間化合物の厚さ”よりも“突起部の大きさ”が強く影響したため図 16 の結果になったと考えられる．

続いて，前述と同様に各センサから読み取った挙動データから説明変数を作成し，ヒートマップや散布図を用いることで主要な説明変数を 3 つ選定した．そして，接合強度を導き出す方程式を作成し，接合強度を予測した．予測した接合強度と実際の接合強度との関係を図 20 に示す．図 20 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=0.80 と良好な結果を得ることができた．

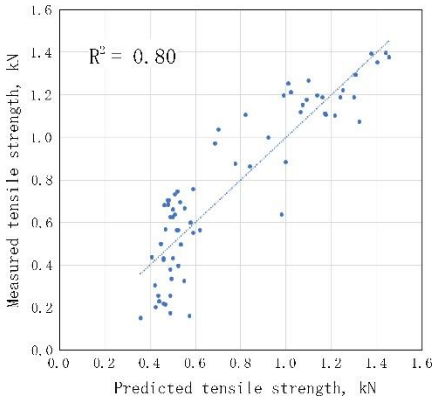


図 20　予測値と実測値との関係（摩擦アンカー接合）

5．結言

摩擦攪拌点接合および摩擦アンカー接合時にて得られる挙動から説明変数を作成し，接合強度との関係性を解析することによって次の結論を得た．

（摩擦攪拌点接合（位置制御））

- 接合時における各挙動を把握することができた．
- 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．
- 3 つの説明変数によって予測した接合強度と実際の接合強度との相関関係（決定係数）は R^2=0.94 と非常に高い値を得ることができた．

（摩擦攪拌点接合（圧力制御））

- 位置制御と圧力制御とでは異なる挙動を示すことが分かった．
- 押込み深さによって，接合強度試験時の亀裂の進展方向が異なることが分かった．
- 3 つの説明変数と接合強度とを重回帰分析することで接合強度の予測式を作成し，そして予測した接合強度と実際の接合強度との相関関係（決定係数）は R^2=0.88 と高い値を得ることができた．

（摩擦アンカー接合）

- 接合ツールの押込み深さを深くすることによって，下板からなる突起部が大きくなることが分かった．
- 突起部には金属間化合物が形成されるが，接合強度への影響は突起部の大きさの方が強いことが分かった．
- 3 つの説明変数と接合強度とを重回帰分析することで接合強度の予測式を作成し，そして予測した接合強度と実際の接合強度との相関関係（決定係数）は R^2=0.80 と高い値を得ることができた．

以上の結論のほか，本研究によって接合強度を予測するための主要なセンサの把握，得られた挙動に対するデ

ータ処理の方法等を習得できるとともに，インプロセスでの接合品質（接合強度）の予測技術を向上させることができた.

謝　辞

本研究は公益財団法人天田財団一般研究開発助成及び大阪大学接合科学研究所共同研究員制度を利用して行われたものであり，ここに深く感謝の意を表します.

参考文献

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
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) 天野晋作，辻村吉寛，小川剛史，小林大祐，柴田智行：溶接学会全国大会講演概要，(2023)325
5) 山内悠暉，松岡諒，木谷悠二，生島一樹，荒井正行，西田秀高，柴原正和：溶接学会論文集，43(2025)2
6) 加藤拓也，生島一樹，丹後義彦，野津亮，柴原正和：溶接学会論文集，43(2025)2
7) 特許 第5854451号　異種金属板の接合方法