

摩擦攪拌異材接合における高度塑性流動制御 による高強度接合体の創製

豊橋技術科学大学 機械工学系
准教授 安井 利明
(2019 年度 一般研究開発助成 AF-2019023-B3)

キーワード：摩擦攪拌接合，異材接合，塑性流動，可視化，内部応力，光弾性法

1. 研究の目的と背景

輸送機器の軽量化のため、鉄鋼材料(Fe)とアルミニウム合金(Al)を適材適所で組み合わせる用いるマルチマテリアル構造が注目されている^{1,2)}。摩擦攪拌接合(FSW)を用いることにより Fe/Al 接合は可能であるが、接合ツール形状や接合ツール回転速度、接合速度等の接合条件が入熱量、材料流動、応力場等の接合体の内部状態を変化させて接合品質に影響を与える。図1に FSW による Fe/Al の突合せ接合の模式図を示す。接合ツールの回転・移動方向に対して Fe 材が前進側(AS)、Al 材が後退側(RS)になるように接合ツールのプローブを接合界面近傍で回転・移動させると共にプローブ側面で Fe 材表面を僅かに削るオフセット量を与えることで、Fe 材表面の酸化膜を除去して新生面を創出して高い接合強度が得られることが明らかにされている³⁻⁵⁾。この時、塑性流動が活発でないプローブ底部での欠陥生成を抑制するため、プローブ底部への塑性流動を誘起するねじ形状のプローブが利用される⁶⁻⁸⁾。このねじ形状のプローブにより接合部の Fe 材の接合界面に接合方向と平行な線状痕が形成されより高い接合強度が得られることが明らかにされているが、線状痕の形成機構は明らかでない⁹⁾。

FSW では接合ツールによる未熔融の材料流動（塑性流動）により接合界面で材料の混合・接合が促進されるため、接合体内部の塑性流動が重要であり、その流動状態を明らかにするために様々な可視化が行われている^{7,8,10,11)}。図1に示す FSW による Fe/Al の突合せ接合においても、温度場や材料流動の可視化が進められているが、接合界面構造の形成や接合後の残留応力などを通して接合強度に関係す

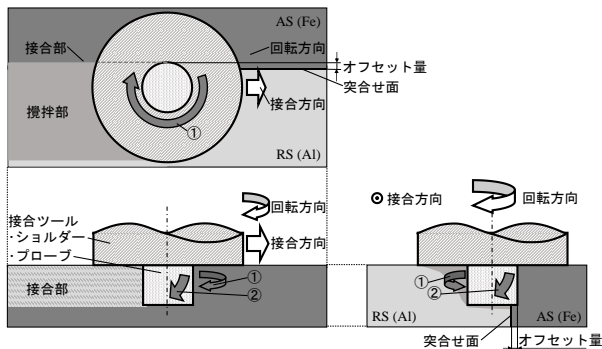


図1 FSW による Fe/Al 突合せ接合

る重要な因子である内部応力状態については実験的に可視化が行えていない。そこで、内部応力分布を可視化手法として光弾性法に注目し、FSW 中の内部応力分布測定への適用を検討した。

本研究では高度な塑性流動制御による高強度接合体の創製を目指し、接合ツール形状による FSW 中の接合界面構造や内部応力状態への影響を明らかにすることを目的とした。まず、接合界面構造を明らかにするため X 線 CT 法による接合界面構造の内部状態観察を行った。次に、FSW 中の内部応力状態を明らかにするために光弾性法と数値解析により内部応力分布を調査した。なお、本研究では、接合ツールのプローブ挿入過程での内部応力状態についてプローブ形状の与える影響を比較検討した。

2. 実験方法

2・1 X 線 CT 法による接合界面構造観察

FSW による Fe/Al 突合せ接合体の接合界面構造を調査するために X 線 CT 法による接合体内部状態の観察を行った。接合実験では、200×60×t6 mm の S45C と A6063 を被接合材とし、φ20 mm のショルダ部とプローブ部からなる接合ツールを用いた。プローブには図2に示すストレート形状(φ5 mm)とねじ形状(M5×0.8-LH)の2種類を使用し、ショルダ面からの突き出し長さを4 mm とした。接合条件は過去の報告⁶⁻⁹⁾を参考に接合ツール回転速度 2000 mm⁻¹、接合速度 500 mm/min、オフセット量 0.1 mm とした。観察には、マイクロフォーカス X 線 CT システム (Shimadzu, inspeXio SMX-225FPD HR Plus) を用い、接合体の撮像条件は管電圧 190 kV、管電流 70 μA とした。撮像データを取得後、ボリュームレンダリング (VR) 法による 3 次元画像処理を行い、Fe と Al の X 線透過率の差を用いて Fe/Al 突合せ接合体の Fe のみを表示することで接合界面の 3 次元構造 (VR 像) と任意断面 (スライス像) の画像を得た。



図2 プローブ形状 (左: ストレート, 右: ねじ)

2・2 光弾性法によるFSW中の内部応力分布

光弾性法は、透明なガラスや樹脂などの物体に外力を加えた時に現れる干渉縞を利用して応力やひずみを測定する方法であり、透明樹脂でできたモデル（模型）で応力分布を可視化するモデル実験として利用されている。しかし、FSW中の内部応力分布の測定に使用された報告はこれまでない。そこで本研究では、FSWによるFe/Al突合せ接合中の接合界面近傍での内部応力分布を明らかにするため光弾性法によるモデル実験を実施した。図3に光弾性実験の模式図を示す。本実験では、被接合材として透明PVC(20×20×t25 mm)を2枚突合せて設置し、片方のPVCにのみプローブを挿入することでFSWによるFe/Al突合せ接合を模擬した。面光源からの光を偏光子と1/4波長板を通してPVCに入射し、PVCを挟んで対向する位置で偏光子と1/4波長板を通して得られた明暗の干渉縞の変化をカメラで撮像した。干渉縞から応力を求めるため、接合ツールを回転させずに被接合材の表面に接触させ、その時の荷重を被接合材の下部に設置した切削動力計で測定することで干渉縞の1縞次数あたりの応力を求める校正実験を実施した。FSWは、2・1と同じ接合ツールを使用し、接合条件は過去の報告^{7,10)}を参考に接合ツール回転速度1000 mm⁻¹とした。今回の実験では接合ツールの被接合材への挿入時の応力分布について調査し、接合ツールの被接合材への挿入速度を100 mm/minとした。

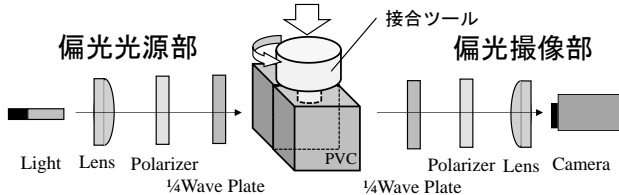


図3 光弾性法によるFSW中の内部応力分布観察

2・3 数値解析によるFSW中の内部応力分布

光弾性法による応力分布観察結果の妥当性を調査するため、有限要素法を用いてFSWによるFe/Al突合せ接合の数値解析を行った。被接合材のS45C/A6063を剛塑性体とし、計算負荷軽減のために解析エリアを30×15×t6 mmの領域とした(図4)。また、接合ツールは剛体とし、接合ツールおよび接合条件は2・1の接合体内部状態観察と

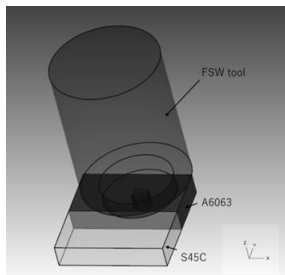


図4 FSWの数値解析モデル

同じとした。さらに解析モデルの簡略化のためオフセット量は0 mmとした。本研究では接合ツール挿入時の応力分布の数値解析を行い、光弾性法による実験結果と比較検討した。

3. 実験結果と考察

3・1 接合界面構造観察結果

FSWによるFe/Al突合せ接合では、プローブ側面で削られたFe材表面が与接合界面近傍に分散することが明らかにされている⁸⁾。Fe/Al突合せ接合では、プローブ形状で接合強度が異なることから、プローブ側面で削られたFe材の接合界面構造が接合強度に影響していると考えられる⁹⁾。そこで、異なるプローブ形状で得られた接合体をX線CT法で撮像し、A6063を透過させて得られた接合界面近傍のS45C切片およびS45C接合界面構造のVR像を図5、6に示す。

図5にストレート形状のプローブを用いた場合のS45C接合界面をRSから観察した結果を示す。接合界面のS45Cはプローブとの接触により削られ、そのS45C切片がAlの塑性流動により接合界面近傍に分散する。図5(a)はRSから見たS45Cの接合界面であり、図5(b)はその接合界面を接合方向側より見たものである。S45Cの接合界面近傍にはプローブにより削られたS45C切片が分散している。図5(a)に示すようにS45Cの大きな切片は、接合面からの深さ1.4~3.9 mmの間に集中して分散している。図5(b)に示すように、その切片群の下のS45C接合界面には、切片が残存していない平坦な面が形成されているのが確認できる。これは、ストレート形状のプローブ側面により接合界面のS45Cが均一に削られて新生面を創出し、その面で接合部が形成されたと考えられる。

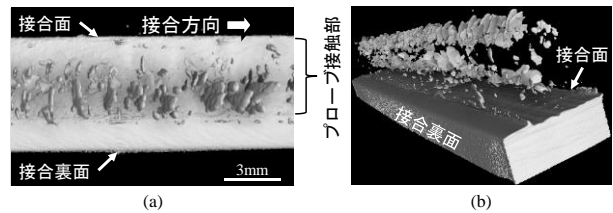


図5 ストレート形状におけるX線CT撮像結果
(a)RSからの観察像, (b)接合方向からの観察像

図6にねじ形状のプローブを用いた場合のS45C接合界面をRSから観察した結果を示す。ねじ形状でもストレート形状と同様にS45C接合界面の上方の接合界面近傍にプローブにより削られたS45C切片が分散している。S45C切片は接合面から深さは2.8~4.1 mmの間に集中し分散しており、ストレート形状とは異なりプローブ底部付近に密集している。ねじ形状を用いることで材料流動が下方へ強い塑性流動が誘起されたと考えられる。また、S45C切片の大きさは、ねじ形状の方が比較的小さい。ねじ形状ではねじ山の頂部しかS45Cと接触しないため、S45Cの切片の

量が小さく細かくなつたと考えられる。図 6 (b) に示すように、S45C 切片群の下の S45C 接合界面には、S45C 切片が残存していない波状の接合界面が形成されている。これは、ねじ形状により接合界面の S45C の一部が削られて新生面が創出され、その面で接合部が形成されたと考えられる。接合部の接合面からの深さは、ストレート形状の場合と異なりねじ形状ではやや浅くなっていた。これは、プローブ製作時にねじ先端部で面取り加工を行っているため、先端部でのねじ山径が部分的に小さくなり、S45C 接合界面にねじ山の頂部が接触していないためである。

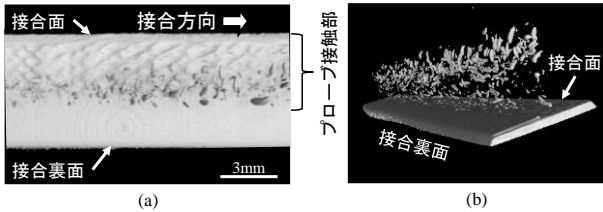


図 6 ねじ形状における X 線 CT 撮像結果
(a)RS からの観察像, (b)接合方向からの観察像

ねじ形状の場合の接合界面構造を詳しく調べるため、図 6 の接合体の中央部を切り出して X 線 CT 撮像を行った。得られた RS の接合体裏面方向から見た接合界面の VR 像を図 7 (a) に示す。また、接合界面でのスライス像を図 7 (b) に示す。VR 像では、切片の下の接合界面に接合方向と平行な線状痕が矢印で示す位置で 4 本確認できる。この線状痕は、スライス像においても矢印で示す色の濃い箇所として観察されており、この部分で S45C 接合界面が深く削られていることを示している。各線状痕の間隔は 0.8 mm 程度でねじ形状のねじピッチと等しく、各線状痕の深さはそれぞれ約 0.1 mm と接合条件のオフセット量とほぼ一致した。しかし、線状痕は接合方向と平行であることから、ねじ山の頂点の S45C の接触点の回転移動に伴ってできる溝とは異なる形状であり、この線状痕の生成によりねじ形状において高い接合強度が得られたものと考えられる⁹⁾。

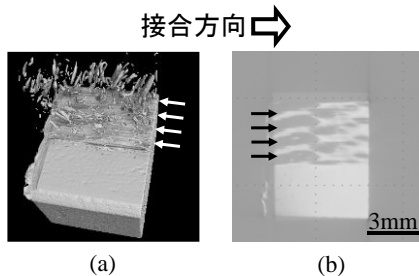


図 7 ねじ形状における接合界面構造
(a) VR 像, (b)スライス像

3・2 FSW 中の内部応力分布

光弾性法では、応力 σ と干渉縞の縞次数 n は比例関係にある。このため、1 縞次数あたりの応力を求めることによ

り縞次数から応力分布を求めることができる。そこで、校正実験として、荷重測定を行いながら無回転でストレート形状プローブの端面を押し付けて干渉縞を観察することにより、1 縞次数あたりの応力 σ_n を求めた。図 8 (a) にプローブ接触時 (荷重 0.864 kN, 縞次数 6), 図 8 (b) にプローブ 1mm 挿入時 (荷重 6.77 kN, 縞次数 46) に得られた干渉縞の観察結果を示す。両条件での 1 縞次数あたりの応力に大きな差はなく、両者の平均値より本実験での 1 縞次数あたりの応力 σ_n が 7.40 MPa と求められた。

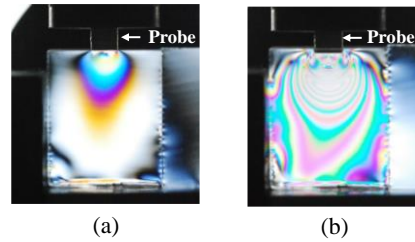


図 8 光弾性校正実験結果
(a)プローブ接触時, (b)プローブ 1mm 挿入時

図 9 にストレート形状のプローブを深さ 4mm まで押し込んだ時点での接合体内部応力分布について (a) 光弾性実験と (b) 数値解析で得られた結果を示す。図 9 (a) の光弾性実験の結果における等色線は内部応力差を示しており、等色線が密であるほど応力が高いことを示している。プローブ真下部の位置では等色線が密になり白く濁っている状態となったことから、プローブ真下において内部応力が最大となった。また、プローブの押し込みと共にプローブの右下角部で応力集中が発生するが、押し込んだ時点でプローブ側面と接触している接合界面の応力分布 (破線部) は深さ方向に均等であり、校正実験の結果から約 110 MPa の応力が負荷されていた。図 9 (b) の数値解析の結果でもプローブ側面と接触している接合界面の応力分布 (破線部) は深さ方向に均等であり、分布形状は光弾性実験の結果と一致した。なお、数値解析では、被接合材として S45C と A6063 を用いたため、応力の絶対値は異なる。

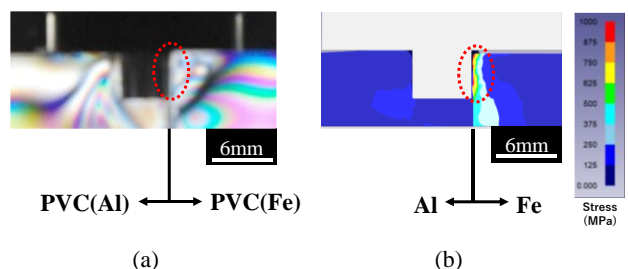


図 9 ストレート形状における応力分布
(a) 光弾性実験, (b) 数値解析

図 10 にねじ形状のプローブを深さ 4 mm まで押し込んだ時点での接合体内部応力分布について (a) 光弾性実験と (b) 数値解析で得られた結果を示す。接合界面右側の

PVC(Fe)は、約3mmの深さの位置で等色線が上下ではっきりと分かれ、接合界面のプローブ根元角部（上矢印部）とプローブ先端角部（下矢印部）で応力集中が発生した。プローブ根元角部では等色線が密となり応力の値を求めることはできなかったが、プローブ先端角部においては約96MPaの応力が負荷されていた。図10(b)の数値解析の結果においてもプローブ根元角部（上矢印部）とプローブ先端角部（下矢印部）で応力集中が発生しており、両者の結果は一致した。ねじ形状のプローブの回転によりプローブ先端方向への塑性流動が誘起されるが、プローブ根元角部での流動方向の変化や入熱が低いプローブ先端角部への流入により応力集中が発生したものと考えられる。

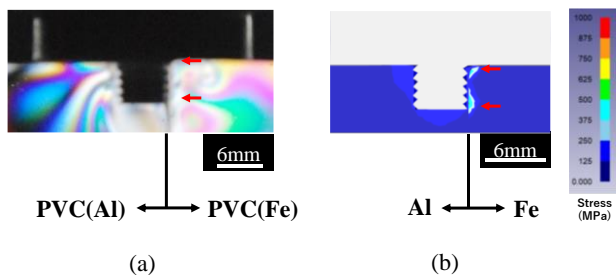


図10 ねじ形状における応力分布
(a) 光弾性実験, (b) 数値解析

数値解析結果との比較から光弾性法を用いたFSWのモデル実験により接合中の内部応力分布の測定が可能であることが明らかにされた。また、プローブ側面と接触する接合界面に発生する内部応力分布は、ストレート形状では均一だが、ねじ形状ではねじ根元角部とねじ先端角部で高い応力をもつ分布を示した。しかし、接合界面での最大応力はストレート形状がねじ形状と比べて高い応力であった。

4. 結言

接合ツール形状によるFSW中の内部応力状態の影響を明らかにすることを目的とし、接合界面構造の調査と接合時の接合界面での内部応力分布の観察を行った。以下に得られた結果を示す。

- (1) X線CT法による接合界面構造観察により、ストレート形状のプローブでは平坦なS45C接合界面が形成されているが、ねじ形状のプローブでは接合方向に平行な4本の線状痕をもつS45C接合界面が形成されていることを明らかにした。
- (2) 透明PVCを用いたFSWの光弾性実験により、接合中の内部応力分布の測定が可能であった。また、光弾性実験と有限要素法を用いた数値解析結果との比較から内部応力分布の傾向は両者で一致することが示された。
- (3) プローブ側面と接触する接合界面の応力分布は、

ストレート形状では均一であるが、ねじ形状のプローブではねじ根元角部とねじ先端角部で高い応力を示すことが明らかとなった。

謝辞

本研究は、公益財団法人天田財団一般研究開発助成(AF-2019023-B3)および豊橋技術科学大学教育研究基盤センターの支援により実施されました。

参考文献

- 1) 安井利明：表面技術，72（2021），649.
- 2) 安井利明：軽金属，71（2021），222.
- 3) 福本昌宏・椿正己・下田陽一郎・安井利明：溶接学会論文集，22（2004），309.
- 4) 安井利明・下田陽一郎・椿正己・石井貴之・福本昌宏：溶接学会論文集，23（2005），469.
- 5) 安井利明・下田陽一郎・石井貴之・椿正己・福本昌宏：溶接学会論文集，25（2007），426.
- 6) Y. Shimoda・M. Tsubaki, T. Yasui・M. Fukumoto・T. Fijita・J. Osawa：STEEL RESEARCH INTERNATIONAL, 81（2010），1108.
- 7) Y. Shimoda・M. Tsubaki, T. Yasui・M. Fukumoto：溶接学会論文集，29（2011），114s.
- 8) 安井利明，石田將，福本昌宏：軽金属，64（2014），604.
- 9) 安井利明・今井新・福本昌宏：軽金属溶接，58（2020），12.
- 10) T. Yasui・Y. Ogura・X. Hullin・F. Farrah Najwa・D. Sugimoto・A. Ito・M. Fukumoto：Proc. JSME 2020 Conference on Leading Edge Manufacturing/Materials and Processing (LEMP2020), (2020).
- 11) 安井利明：ぷらすとす，5-58（2022），661.