

5 軸摩擦攪拌接合装置の開発 (第2報)

Development of Five-Axis Friction Stir Welding System (Report 2)

大川 裕蔵* 谷口 正志* 杉井 春夫*
Yuzo Okawa Masashi Taniguchi Haruo Sugii
丸谷 洋二**
Yoji Marutani

(2007年6月22日 受理)

Friction stir welding (FSW) is an important industrial joining method in the fields of automotive and aircraft engineering. The method features a solid-state joint without melting workpieces: it engenders superior quality of joining. A new FSW system, which has a tool head with five degrees of freedom, is developed to join to workpieces with a curved surface. Joining on the curved surface using this system causes a tool rotation scratch formed on a welding path in the case of angle leap of the C-axis. In this paper, it is suggested that FSW on a curved surface with this system gives a good appearance without scratching, using a tool posture that enables deviation in welding patterns.

キーワード：摩擦攪拌接合, 5 軸, 曲面接合, ツール痕

1. はじめに

筆者らは平成16年度から実施された都市エリア産官学連携促進事業において、『次世代の高品位接合技術の開発』を目的として5軸の摩擦攪拌接合(以下FSW [Friction Stir Welding] と略す。)装置を開発・試作した。また本装置を運用するための平面接合支援ソフトウェアの作成を行い、平面上の曲線接合が可能であることを確認し¹⁾、昨年度の研究所報告において発表した²⁾。

FSWは通常の溶接が不得手とするアルミニウム合金などの軽金属の接合に適しており、パネルだけでなく構造部材も鉄鋼から軽金属合金に換えつつある列車や自動車メーカーから注目を集めている。中でも接合する部材の形状に対する制限が少ない曲面接合の技術はすぐにでも製造現場に利用できるため、その開発が

望まれている。

しかし現時点で実用化されているのは直線接合やスポット接合であり、曲線や曲面の接合はほとんど行われていない。その理由の一つとしてツールの姿勢制御の難しさが挙げられる。良好な接合を行うにはツールが接合面に対し一定の姿勢を保つ必要があり、曲線や曲面の接合では、接合面の形状と接合パスに合わせてツールの姿勢を随時変化させなければならない。そしてツールの姿勢を決定する角度等の数値を接合パス全行程において算出する必要があるが、現状ではFSWのツール姿勢を計算するソフトウェアは存在せず、使用者が自ら計算している。

筆者らは本事業において5軸の自由度を持つFSW装置を用いてアルミニウム板の曲面接合を行った。その際曲面の接合における5軸接合機の持つ問題点が見つかったが、それについての対策を施した結果、良好な接合ができたので報告する³⁻⁵⁾。

* 情報電子部 制御情報系

** 大阪産業大学 工学部



図1 開発したFSW装置の全景
Configuration of FSW equipment.

2. 開発・試作したFSW装置の概要

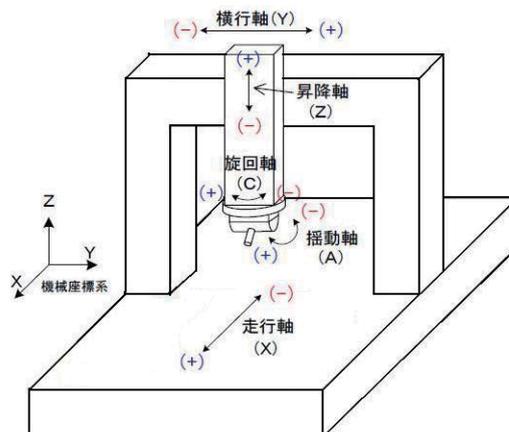
今回開発したFSW装置は2種類の接合用ツールヘッドを持つ。一つはヘッドの自由度が2(X, Z軸方向に移動可)で最大加圧荷重29.4 kNの直線用ヘッドで、もう一つが5自由度(X, Y, Z, A, C軸方向に移動可)で最大荷重9.8 kNの3次元ヘッドである。

図1に3次元ヘッド側から見たFSW装置の全景を示す。直線用ヘッドはこの裏側にあり、ワークを設置する作業テーブルは共通である。今回の実験はすべて3次元ヘッドを利用して行った。図2に3次元ヘッドにおける座標系と各軸の動作方向及びその範囲を表した模式図を示す。この3次元ヘッドでは3 mm厚までのアルミニウム板の接合が可能である。

3. 接合状態に影響を及ぼすツールの姿勢

FSWにおいて十分な強度を保ちつつ、外見的にも良好な状態にするために、図3に示すようにツールには前進角を与えて接合する必要がある。曲面の接合においてツールの姿勢は、接合パスの進行方向と接合する面の形状によって定まる曲率に依存する。そして接合パス全体に渡ってそのツールの姿勢を決定しなければならない。

本装置は5軸機なので図2で示した5軸内のA, C軸を用いてツールの姿勢を決定し、残りのX, Y, Z軸を連動させて、接合すべき接合パスに合致するよう接合プログラムを作成する。



軸	ストローク長	各軸最大値	各軸最小値	各軸最高速度
X軸	2500mm	2500mm	0mm	3500mm/min
Y軸	1000mm	500mm	-500mm	1200mm/min
Z軸	300mm	300mm	0mm	1200mm/min
A軸	±45deg	+45deg	-45deg	6252deg/min
C軸	±185deg	+185deg	-185deg	6486deg/min

図2 3次元ヘッドにおける座標系と各軸の動作方向
Coordinate system of FSW equipment.

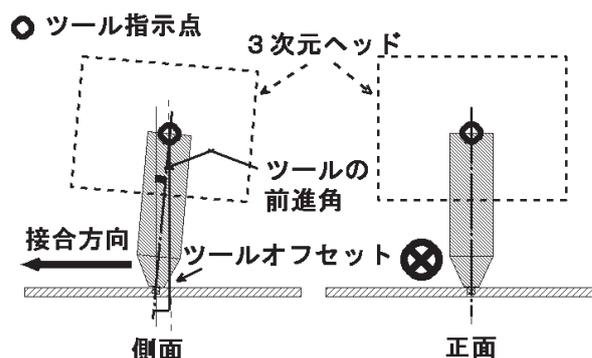


図3 接合時のツールの姿勢
Posture of tool for FSW.

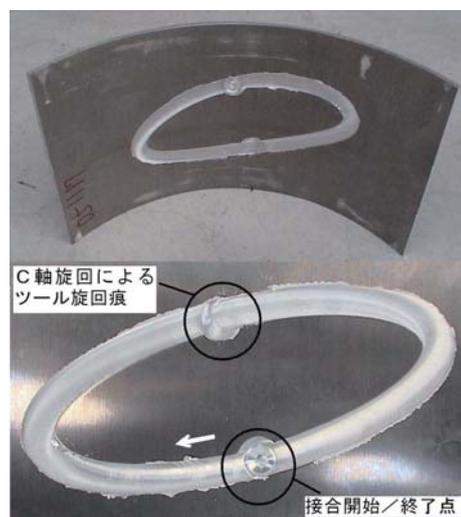


図4 加工した円筒面上の楕円接合パス
Elliptic path on the quarter cylindrical Al plate.

4. 半円筒面での曲面接合

曲面の接合実験として図4にアルミニウムの1/4円筒板(半径:150mm,板厚:3mm)内面に楕円(長径80mm,短径40mmの楕円を15度傾けたもの)の接合パスを加工した例を示す。

本装置が5軸機で且つA, C軸共に可動範囲に制限があることから, この斜め楕円接合パスの場合, ツールが前進角を保持するために, C軸で角度の飛躍(90度→-90度)を起こすことがわかった。これは実際の接合では, 接合パス上のある点とその近辺をツールが移動する際, C軸が大きく回転することを意味する。ツールの姿勢は適正であるが, C軸が大回転するためツール移動速度がその区間で低下し, 接合痕が周りと比較して不均質となる。

図5は斜め楕円接合パスの離心角に対するA, C軸値の変化を表す。この接合パスでは1周のうち3箇所までC軸の大回転が発生するのが確認でき, A, C軸値通りに接合すると接合パス上にツールの旋回痕が発生する。

図4にはツール痕が2つあるが, 下側のツール痕は接合終了時のツールの離脱痕で現状では発生を防げない。今回の接合パスの場合, 図5に見られる最初と最後の角度飛躍によるツール痕は重複し, 且つ接合終了時のツール痕によって消されている。尚, 強度試験の結果, ツール痕があっても接合強度は十分確保されていることを確認している⁶⁾。

5. C軸の大回転によるツール痕を発生を防ぐ接合方法

強度が確保されていても外観上, ツール旋回痕は少ない方がよい。そこでC軸の大回転によるツール痕を発生させない接合方法を検討した。

数学的には三次元空間において任意の位置と方向を確定するために6つの自由度が必要である。それゆえ本FSW装置の軸数を今より増やせば, 図5のようなC軸値の飛躍は起きないため大回転によるツール痕は生じない。

しかし装置の軸数を増やすことは,

- ・装置の構造が複雑になり, 製作コストが上がる
- ・ツールの支持剛性が下がる
- ・ツールの可動範囲が狭くなる

等の問題があるため現実的ではない。

そこで5軸機のままで, 接合パスの途中でできるツール旋回痕を発生させないようにするため, 「ツ

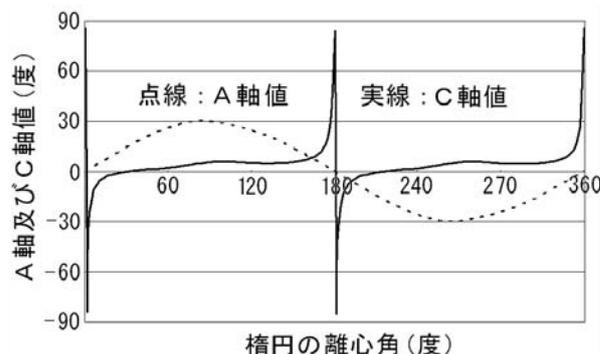


図5 楕円接合パス(図4)のA軸値とC軸値の変化 Profile of A-axis and C-axis of elliptic path.

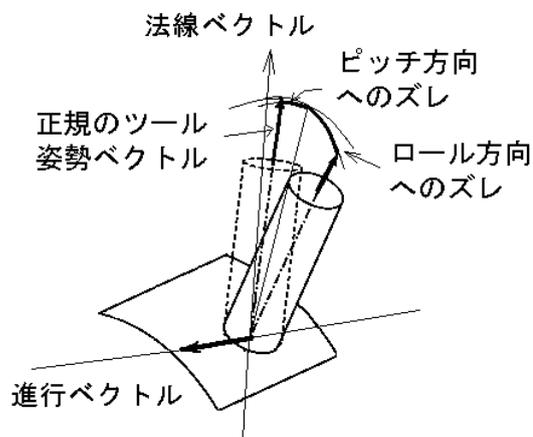


図6 曲面接合時におけるツールのロール方向とピッチ方向へのズレの定義 Definition of roll and pitch angle of FSW tool.

ル姿勢の許容範囲」を利用した。「ツール姿勢の許容範囲」とは「ツールの姿勢が多少ズレても接合強度や外見に影響がない」ということである。

このズレを定量化するためツールに様々な姿勢を与えて平面での直線接合を行ったところ, ツールの姿勢が以下に示す範囲内であれば, 接合強度及び接合パス跡に正規の姿勢による接合との差異を生じなかった⁷⁻¹⁰⁾。

本装置の場合その許容範囲は, ツール姿勢のズレの方向をロール方向(接合の進行方向に対し左右方向)とピッチ方向(進行方向あるいは後退方向)に分解して図6のように表すと, 以下のような値になる。

- ・ロール方向へのズレ: 約±2度以内
- ・ピッチ方向へのズレ: 約±1.5度以内

そこでこの許容範囲を利用し, 曲面接合時に発生する大回転によるツール痕が生じないように, C軸値をこ

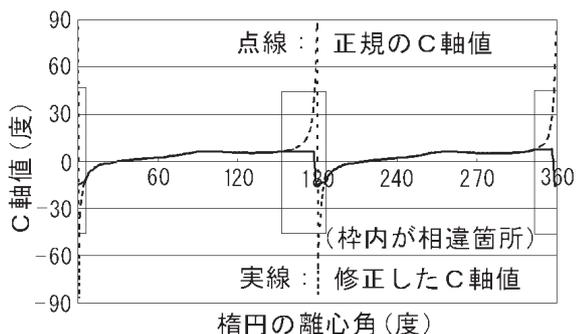


図7 楕円接合パス一周分の正規のC軸値(図5)と修正したC軸値の比較
Comparison of standard C-axis and revised.

これまでの接合実験から得られたデータを基に経験的に修正して接合を行った。採用した新たなC軸値と離心角の関係を図7に示す。

修正したC軸値は正規のC軸値とは異なっているため、修正した区間においてツールは正規の姿勢を保っていない。そこで修正したC軸値を採用した場合のツールの姿勢を解析した。修正したC軸値を与えた場合のツール姿勢の解析結果を図8に示す。

解析の結果、ロール方向のズレの最大値は ± 0.9 度(+は左側)で、規定の前進角からのピッチ方向のズレは+側に最大0.4度、-側に最大1.0度であった。図9にこの修正値を採用して接合した例を示す。

修正したC軸値を採用した場合、最適な姿勢を維持していないことになるが、ロール・ピッチ方向のズレが許容範囲内であったため、接合での悪影響は見られなかった。最適なツール姿勢を採用したときの図4の接合に比べ、ツールの旋回痕が無くなったことで仕上がりが良くなった。

6. まとめ

5軸の自由度を持つFSW装置を開発し、アルミニウム板を用いて曲面接合を行った。本装置によって曲面接合は可能であるが、自由度が5で、A、C両軸の可動範囲に制限があることから、接合パス上にツール旋回痕が残ることが多かった。そこでツール姿勢の許容範囲を利用し、接合パス上に旋回痕の少ない接合方法を実施した結果、良好な接合を行うことができた。

参考文献

1) Y. Okawa, Y. Marutani, H. Sugii and M. Taniguchi: SICE-

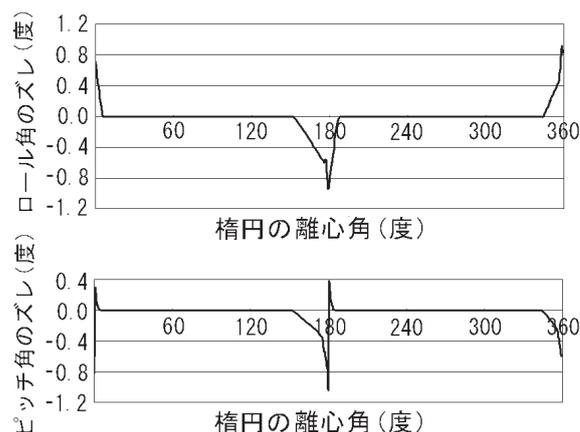


図8 楕円パス接合時のツールのロール方向及びピッチ方向のズレ
(ロール角の+側は進行方向に対し左側)
Profile of roll and pitch angle of tool posture.

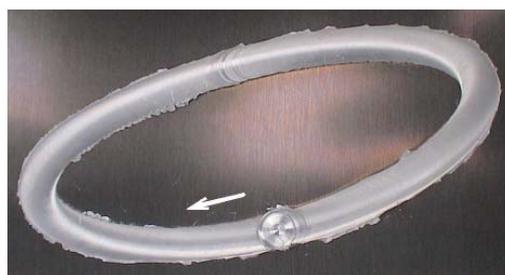


図9 修正したC軸値を採用した楕円接合パス
Elliptic path with revised C-axis profile.

ICCAS 2006 (2006), TP14-4, p.128.

- 2) 大川裕蔵, 谷口正志, 杉井春夫, 丸谷洋二: 大阪府立産業技術総合研究所報告, No.20 (2006) p.87.
- 3) 大川裕蔵, 杉井春夫, 谷口正志, 丸谷洋二: 精密工学会2006年度関西地方定期学術講演会論文集 (2006), p.35.
- 4) 大川裕蔵, 杉井春夫, 谷口正志, 丸谷洋二: 溶接学会平成18年度秋期全国大会講演概要集, (2006) p.64.
- 5) 大川裕蔵, 谷口正志, 杉井春夫, 丸谷洋二: 溶接技術, **55** (2007) p.71.
- 6) S. Oki, M. Tsujikawa, S. W. Chung, T. Hirata and K. Higashi: Proc. International Symposium on Joining Technologies in Advanced, Automobile Assembly 2005, (2005) p.189.
- 7) 辻川正人, 高原裕典, 東 健司, 沖 幸男, 大川裕蔵, 鄭 盛旭, 丸谷洋二: 日本鑄造工学会, 第148回春季大会公演概要集, (2006) p.59.
- 8) H. Takahara, Y. Motoyama, M. Tsujikawa, S. Oki, S. W. Chung and K. Higashi: Thermec'2006, (2006) p.340.
- 9) S.Oki, H. Takahara, Y. Okawa, M. Tsujikawa, Y. Marutani and K. Higashi: Thermec'2006, (2006) p.316.
- 10) 辻川正人, 高原裕典, 沖 幸男, S. W. Chung, 平田智丈, 東 健司: 軽金属学会第109回秋季大会公演概要集, (2006) p.312.