

5 軸摩擦攪拌接合装置の開発 (第 1 報)

Development of a Five-Axis Friction Stir Welding System

大川 裕蔵* 谷口 正志* 杉井 春夫*
Yuzo Okawa Masashi Taniguchi Haruo Sugi

丸谷 洋二**
Yoji Marutani

(2006 年 8 月 24 日 受理)

Friction stir welding (FSW) is flexible and simple, offering many potential benefits from quality improvement to cost savings. Because of those benefits, it has made inroads into the fabrication of trains, airplanes, automobiles, and boats in recent years. To realize these and other applications, we developed a new FSW system with two welding heads. One head has five degrees of freedom for welding three-dimensionally curved surfaces. The other has two degrees of freedom for linear welding. For welding by FSW, the tool posture is important for high-quality welding. Consequently, the FSW software system was developed; it automatically calculates the tool posture. This paper describes the structure and features of the system, and presents exemplary welded products using this FSW system.

キーワード：摩擦攪拌接合，5 軸，NC プログラム，Spline 補間，Hermite 補間，曲面接合

1. はじめに

摩擦攪拌接合（以下 FSW [Friction Stir Welding] と略す。）は 1991 年に英国 TWI 社で開発された接合技術で、先端に突起物をつけたツールを回転させながら接合する金属に押し付け、発生する摩擦熱で金属を軟化させ、攪拌して接合する技術で、図 1 にその原理図を示す。

FSW は金属を溶融させることなく塑性流動によって固相で接合するため材質劣化が少なく継手効率も高い接合方法として注目を浴びており、航空機やロケットの外装接合、列車や自動車の製造などに実用されている。この技術が Al 合金、Mg 合金などに応用されるのは接合部での結晶粒の粗大化が抑えられ、結果として接合部の機械的強度が非接合部に比べ、劣化しない特徴を有しているためである。しかし実用されている分野は直線接合だけであり、中小企業が必要とする曲線や曲面上での接合はほとんど行われていなかった。

その大きな理由は回転ツールの位置と姿勢を制御するソフトウェア、ハードウェアの開発が遅れていることにある。

筆者らは平成 16 年度より開始したプロジェクト、都市エリア産官学連携促進事業（大阪東部エリア）『次世代の高品位接合技術の開発』において、研究テーマの

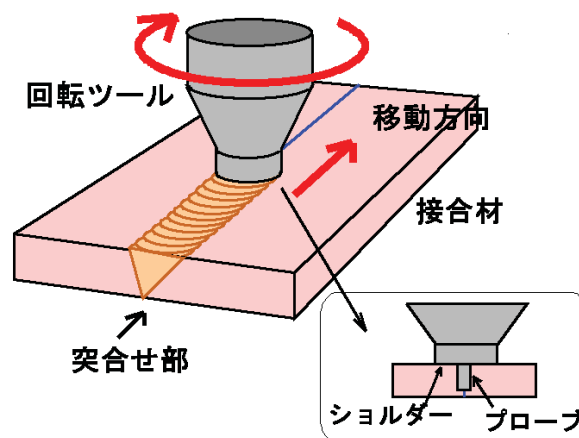


図 1 摩擦攪拌接合 (FSW) の原理
 Principle of welding by FSW

* 情報電子部 制御情報系

** 大阪産業大学 工学部

表1 本装置のヘッドの仕様
Specification of FSW tool heads

| | 2次元ヘッド | 3次元ヘッド |
|------------|-------------------|----------|
| ツール最大回転数 | 2000 rpm | 2000 rpm |
| 加圧力 (空気加圧) | 29.4 kN | 9.8 kN |
| シリンダストローク | 75 mm | 25 mm |
| モータ出力 | 18.5 kW | 7 kW |
| 作業テーブルの大きさ | 800 × 800 mm (共通) | |

一つとして、FSW による3次元形状の部材接合の自動化について取り組んでいる。この研究を進めるにあたり5軸の自由度を持たせたFSW装置を開発・試作した。またこの装置による接合を支援するために接合パスを計算・表示するソフトウェアを制作し、それを用いてAI板の平面接合を行ったので報告する。

2. 開発・試作したFSW装置の概要

今回開発したFSW装置は川崎重工業(株)および光陽産業(株)に製作を依頼したもので、特徴として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軸(X,Z軸方向に移動可)で最大加圧荷重29.4kNの直線ヘッドで、もう一つが自由度5軸(X,Y,Z,A,C軸方向に移動可)で最大荷重9.8kNの3次元ヘッドである(表1)。

図2に3次元ヘッド側から見たFSW装置の全景を示す。2次元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3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6mm厚までのAI板の接合が可能である。ワークを接合するツールは図4のような軸対称の形状をしており、右の拡大図に示すように先端にプローブと呼ばれる小さな突起を持つ。また円柱状の端面をショルダーと呼ぶ。今回使用したツールの材質はSKD61でAIのワークを対象としているが、ワークの材質・形状に応じてツールの材質を選定する必要がある。

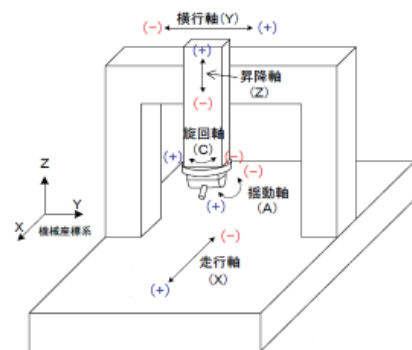
3. ツールオフセット

本装置でFSW接合を行うにはヘッドの動作を記述したプログラムが必要である。そのプログラムにはツール回転数、ツール加圧力そしてツールの位置及びその姿勢等、加工に必要なデータをNC言語あるいはそれに準じた表記法で記述する。

接合パスの軌道をプログラミングの際にはツールの先



図2 開発したFSW装置の全景
Configuration of FSW equipment



| 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3 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4 FSW用ツール 右図は先端を拡大したもの
(ショルダー径: 12 mm, プローブ径: 4 mm)

Tool of FSW

端とツールの指示位置の関係に常に注意しなければならない。

ここではツールの回転軸をツール軸と呼び、3次元ヘッドにツールを装着し、ツール軸が鉛直方向に向いている状態を初期状態と呼ぶこととする。

NCプログラムで指示するFSW装置のヘッド位置は初期状態においてツール軸上にあり、ツールの先端から

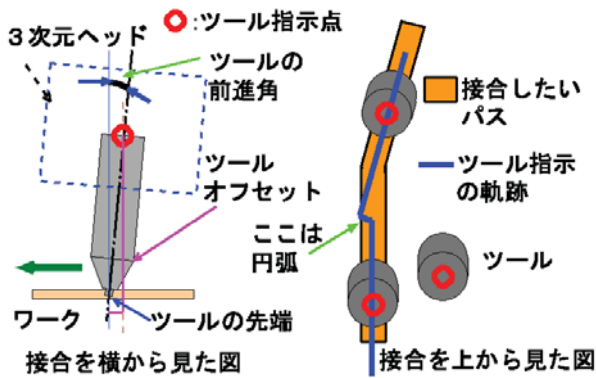


図5 接合時のツール姿勢
Posture of tool for FSW

(ツール全長+125) mm 上方のところにある。この位置をツール指示点と呼ぶことにする。ちなみに図3におけるA軸の揺動軸はこの点を通り、C軸の回転軸は初期状態におけるツール軸と同一である。

図5に接合時のツールの姿勢を示す。左図は直線接合を横から見た図でツールは右から左に移動する。右図は折れ線状のパスの接合を上から見た図でツールは下から上に移動する。図中の丸は上述したツール指示点で、プログラムで指示する5軸の座標値はこの点を表している。

左図に示すように接合状態を最適にするためツールは接合パスの進行方向に対し、ツールの初期状態より数度の前進角を持たせた状態で、プローブをワークに突き刺した姿勢を維持するように設定する。また図のようにツールの先端とツール指示点は一致していない。この差をツールオフセットと呼ぶ。

平面上で直線を接合する場合、左図のようにツールオフセットはツール進行方向と高さ方向に生じる。よって直線を接合する場合には接合開始点と接合終端点に対しツールオフセットを考慮した値をツール指示点として与えなければならない。

(1) ツールオフセットー折れ線状パスの場合

図5右図のような接合パスが折れ線の場合について考える。このようなパスの場合、ツール先端はパスが折れている点に来るとワークに突き刺さったままその先端を中心として次の進行方向に向けて向きを変えなければならない。その結果、ツール指示の軌跡として右図の中央部のようにツールの向きが変わる点でツール指示点を左側に移動させることになる。

その際、そのパスにも配慮が必要である。例えば右図の折れ線の折れ角を15度とする。パスが折れる点でツールの向きを変えるため、ツールヘッドのC軸を15度回転させなければならない。ツールヘッドが回転するのであるから、ツール先端がパスの折れた点を中心

として回転するためには、X, Y軸値に対し(前進角の正弦分×300 mm)の半径を持った円弧を維持しながら移動する命令を与えなければならない。

しかし残念なことに、このFSW装置は仕様上NC言語の円弧補間命令が使用できない。なぜならツールの長さや前進角の設定値が変わる毎に円弧を描く際のオフセット値を変更しなければならないからである。したがって曲線を適当な長さの直線で近似する必要がある。

このように途中で向きが変わる折れ線状のパスを滑らかに接合するためには、ツールオフセットのためにパスの折れる点で生じる円弧パスを短い直線群に近似して円弧状ルートを確保する、というようなプログラムをユーザーが自ら組み込む必要がある。

(2) ツールオフセットー曲線パスの場合

ここでは曲線状のパスを接合する場合について考える。本FSW装置では円弧補間命令が使用できないため、描きたい曲線を適当な長さの直線で分割するという直線近似化が必要がある。曲線の接合について説明するため、一つのプログラムを以下に示す。

プログラム①

```
G01*1) X0, Y0, Z300, A5, C44
G01 X0.5, Y0.5, Z300, A5, C46
```

プログラム①はX軸とY軸がともに0.5 mm移動する間にC軸が2度変わるという動作を表すもので、直線接合中に次のパスのためにツールの向き徐々に変えていくというものである。曲線の直線近似化ではこのようなプログラムをよく使う。

この命令でツールは約0.7 mm直線移動するがその間にC軸は回転している。つまりこの移動の際、ほとんどの区間で接合方向とツールの向きが一致していない。このような移動はFSW接合時にはできれば避けたい動作である。かといってこの不一致を小さくするために曲線を極端に短い直線に分解すると、短い曲線でも行数が多いプログラムとなってパスの確認が煩雑になる等、実用に向いていない。

例えば半径20 mmの1/4円の円弧をFSW接合する場合、その円弧長は約31.4 mmである。この円弧をプログラム①のように長さ約0.7 mmの直線で近似すると45本(≒31.4 mm/0.7 mm)の直線で分割することになる。通常のNC加工機なら円弧補間命令を使って1行で済むプログラムが、本FSW装置では45行になる

*1) 本文中で使用するNCコード

G01: 直線補間命令 2点間を直線で結ぶ
G90: 絶対値指令 以下の座標値は絶対座標系を示す
G91: 相対値指令 以下の座標値は相対座標系を示す

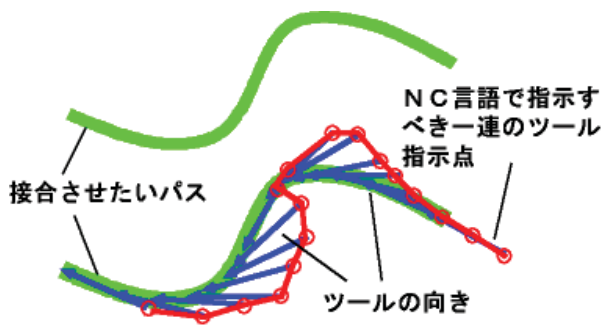


図6 ツール指示位置の例
Example of instructed tool positions

ということである。この例では0.7 mm という短い直線で分割を行ったが、それでもこの直線接合の間にC軸は2度 (=90度 / 45分割) も向きを変えている。

そこで現在では接合状態に影響が出ないよう、これまでの実験データを基に、円弧の直線近似化の際の分割数をパスの半径等を踏まえ経験的に決定している。

図6はツールオフセットの例として平面でS字状パスを接合する場合について示したものである。上段のS字状パスを右から左に接合するためには下段の折れ線状のパスを表したNCプログラムをユーザーが作成しなければならない。この図では与えられた曲線を17本の直線に分解している。次節ではこのツールオフセットを自動的に計算する接合支援ソフトについて説明する。

4. 平面用接合パス計算・表示ソフトの開発

前節で解説したようにツールオフセットに対する処理はかなり煩雑である。そこで平面上に接合したいパスを、標準的に使用されているNCプログラムで与えると、ツールオフセットの計算や円弧の直線近似化を自動的に行い、最終的には本FSW装置で接合を行うためのFSW専用NCプログラムを出力する機能を持つ平面接合支援ソフトを開発した。以下にこのソフトが持つ機能について説明する。

①ツールパスの表示

NC言語で記述されたプログラムファイルを読み込み、その中に書かれた移動・直線補間・円弧補間命令のNC言語を解釈し、その軌跡を描く。

②円弧の直線近似化

本装置では仕様上、円弧補間命令を実行できない。そのため円弧状に接合を行う場合、円弧を直線近似化する必要がある。

そこでこのソフトウェアでは円弧補間命令を任意の数の直線群に変換し、そしてその直線群を直線補間命

令に書き換える。

③移動・直線補間命令で利用するデータを点列データに変換

移動・直線補間命令で構成されたNCプログラム内の座標データを点列データ(X-Y座標:CSV形式)に変換する。また移動・直線補間命令よりパスの進行方向を算出し、接合経路を点列の座標と進行方位角度で構成したデータ(X-Y-C座標:CSV形式)に変換することもできる。

④点列データの補間

点列データを直線で接続し表示する。あるいは点列データを任意のピッチでSpline補間^{*2)}(またはHermite補間^{*3)})し、その点列上に補間した曲線を描写する。またその補間点をCSV形式で保存する。

⑤パス上の点列データをオフセットを計算した点列データに変換

ツールパスを表した点列データを、ツールオフセットを考慮に入れた点列データに変換する。

⑥点列データをNC言語に変換

CSV形式のファイルを直線補間命令(G01)に変換し、保存する。必要ならば相対座標系コード(G90,G91)にも変換できる。

接合パスとFSW特有の条件をパラメータとして与えると、この支援ソフトは上記の機能を使い、そして3(2)項で説明した経験による処理等を加味してFSW接合に必要なNCプログラムを出力する。

5. FSW加工の例

図7は評価用に板厚3 mmのAl板(240 mm × 340 mm × 3 mm)に8の字のパス(コーナー半径:20 mm)を描かせたときの接合パスを計算し、平面接合支援ソフトに表示させた状態である。(加工条件 ツール回転数:1800 rpm, ツール加圧力:4.9 kN, 加工速度:250 mm/min)

また図8はそれを実際に加工したワークの写真である。ツールが8の字パスを描いている間の、ワークに対する入熱量が大きかったため、実験後、ワークは多少鞍状に変形した。しかしながらツールの先端は接合支援ソフトウェアの指示通りに移動した。

*2)Spline 補間

全ての与えられた数値点列で1次と2次の微分値は連続するが、元点列を通らなくても良い補間法
(本論文で使用しているのは3次B-Spline補間)

*3)Hermite 補間

数値点列の値とその点での一次微分から構成される補間多項式による補間法

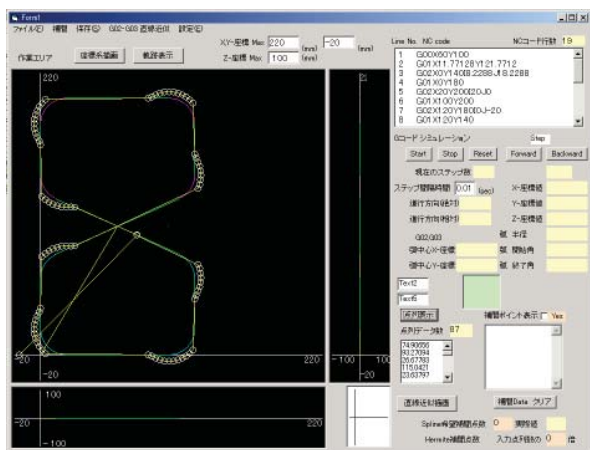


図7 平面接合支援ソフトによる8の字パスの表示
Path of figure eight on FSW support software

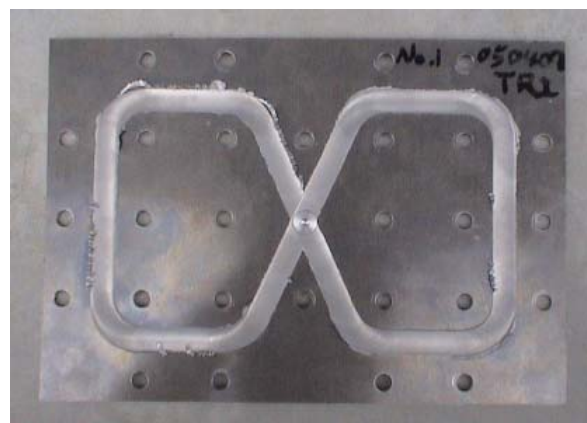


図8 Al 平板上の8の字パス
Path of figure eight on Al plate

6. まとめ

都市エリア産官学連携促進事業(大阪東部エリア)『次世代の高品位接合技術の開発』のために5軸FSW装置を開発・試作した。またこの装置を運用するための平面接合支援ソフトも併せて開発した。それを基にAl板を対象に2次元加工のための予備実験を行ったところ、本装置による平面上の曲線の接合が十分可能であることがわかった。今後は本装置による3次元曲面接合を中心に実験を行い、その際の課題や問題点を探っていく。

参考文献

- 1) W. M. Thomas: Friction Stir Butt Welding, International Patent Application No. PCT/GB92, GB Patent Application No. 9125978.8, 6 (1991)
- 2) C. J. Dawes: An Introduction of Friction Stir Welding and Its Development, *Welding & Metal Fabrication*, **1** (1995) p.13
- 3) 大川裕蔵, 杉井春夫, 谷口正志, 丸谷洋二: 精密工学会鳥取地方学術講演会講演論文集, (2005) p.37
- 4) 時末光: FSW (摩擦攪拌接合) の基礎と応用, 日刊工業新聞社, (2005) p.113
- 5) 古賀信次: 摩擦攪拌接合とその適用について, 摩擦圧接協会資料, FW-11-2-6, (1999)