

# 小型摩擦攪拌接合機の設計製作

立花一志、青山正樹

名古屋大学工学部・工学研究科 技術部

## はじめに

摩擦攪拌接合（FSW: Friction Stir Welding）は、1991年英国 TWI（The Welding Institute）により発明・開発された新しい接合技術である。FSWは固相接合の一種で従来の溶接とは異なり、素材の融点より低い温度でこの接合プロセスが完了する為、従来の溶解して接合する方法より摩擦攪拌接合には多くの利点がある。即ち、接合部の金属組織は溶接時の鑄造組織ではなく加工組織となり、機械的強さに優れている。また、材料を溶かさぬ方法（加工温度が低い。）であるため、接合後の材料の変形や反りを極めて小さくすることができる。これまで、アルミ合金を対象に鉄道車両や船舶の構体などに実用化されている。この度、材料プロセス工学専攻熱加工プロセス講座の篠田剛助教授より、小型のFSW機の製作依頼が技術部にあり、製作を行ったので、その製作過程ならびに試験結果を報告する。

尚、同装置の制御は電子情報技術系の佐々木らのグループが担当したので本稿では割愛する。詳細はポスターセッションの「VBによる小型摩擦攪拌接合機の制御」を参照。

## 1 FSWとは

原理は図1のように回転する攪拌ピンを被接合母材に押し当て、塑性流動状態で攪拌される母材同士が効率よく接合されるものである。

1. 回転する段（肩部）のついたピンを被接合部材に押しつける。
2. ピンと部材との摩擦熱により、被接合部材が軟化し、ピンは部材の中に入ってゆく。
3. ピンは肩部が部材に接触又は少し入った位置で挿入を止める。

（肩部は攪拌による部材の盛り上がりを防ぐと共に接合部表面を平らにする働きがある。）

4. 軟化した部材はピンの回転方向に合わせて、塑性流動が起こり、部材同士の組織が攪拌される。
5. ピンを接合ライン方向に移動させると共に進行方向両側の部材は攪拌、一体化する。攪拌の停止とともに冷却され組織が一体化して接合が完了する。

将来有望な接合技術で、各方面でピンの回転数、回転方向、挿入速度、移動速度、ピンの形状、その他、様々なパラメータを変えて研究がなされている。製作した装置を図2に示す。

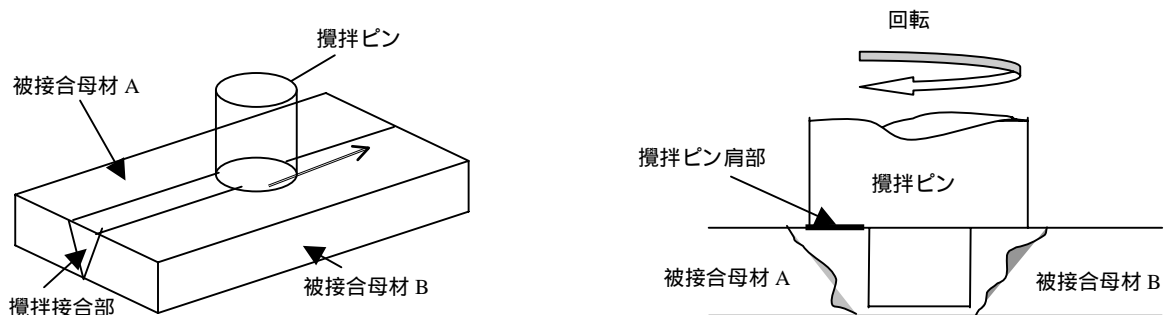


図1 FSWの原理

## 2 設計

### 2.1 設計仕様

前述のように、F S W機はその原理から制御性の高いフライス盤で代用可能である。即ちエンドミルを攪拌ピンに替え、攪拌ピンの細かな回転数制御や攪拌ピンの昇降及びX Yテーブルの細かな制御ができれば、中古の汎用フライス盤を利用することも可能である。但し、汎用のフライス盤はギヤ比により回転数を制御しているものが多いので、その点は改良を要する。また、フライス盤等では剛性の問題があり、十分とは言えない場合も多い。今回は、製作依頼者である篠田剛助教授のご厚意により技術部の研鑽を兼ねて研究用小型F S W機の設計から製作まで、一連の機器開発を行った。



図2 F S W機外観

### アクチュエータ仕様

攪拌ピン回転駆動系： 回転数可変 500～2000rpm

攪拌ピン昇降（挿入加圧）駆動系：

- ・移動速度： 1～20mm/sec
- ・移動量： 300mm 将来回転チャックが設置出来よう比較的長めにとった。
- ・加圧力： 最大1000kg

被接合部材加工用 X Yテーブル駆動系：

- ・X軸移動用： 移動速度 1～20mm/sec
- ・Y軸移動用： 移動速度 1～20mm/sec
- ・X Yテーブル移動範囲： 300mm×300mm

### その他

攪拌ピン（攪拌棒）：

- ・根回り（肩部径）： 最大20
- ・挿入ピン部： 最大6
- ・材質： SKD61相当

攪拌棒のチャック： コレットチャック使用

攪拌ピンの運動： 直線、円弧の組み合わせ、8ステップ

被接合部材（ワーク）： アルミ合金、最大厚さ10mm

製作趣意： 実験用なのでなるべく簡素に、簡単に、安価にすることを目標とした。

### 2.2 筐体の設計

#### ・筐体

○筐体は小型化出来る様に門型とし、搬出入し易いように上下2分割タイプとした。

○段取り作業や接合試験が行いやすいようにテーブル面高さを考え設計を行った。

○板厚16mmの鋼板を溶接構造で設計し強度を保つよう数箇所に梁を入れた。  
(一部に20mm鋼板を使用)

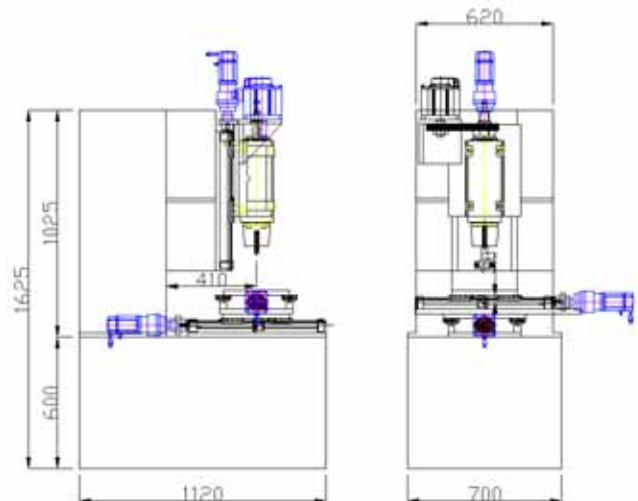


図3 F S W外形図

#### ・X Yテーブル用微動装置

板厚20mmのSS400プレート材を基本ベースにし、ガイドレールおよびボールネジを取り付けた。X軸とY軸は、同じ微動装置を直角に2段に重ねて使用した。

選定した微動装置：ボールネジ THK BTK-2806 型（ボールネジ外径 28mm リード 6mm）  
LM ガイド THK SNS-LR 型

#### ・攪拌ピン昇降用微動装置の選定

攪拌ピン駆動用モータ、スラスト軸受けのスピンデル、およびこれらの固定台の重さは合計で 100kg 程度である。従って微動装置の耐力に余裕はあるが、装置の製作の簡便性を考慮して X Y テーブル用と同一製品を選んだ。

### 2.3 スピンデルの選定

スピンデルは攪拌ピンの脱着を考慮して主軸モータを直結せずスラスト軸受け構造とした。攪拌ピンは被接合部材に押し当てる（最大 1000kg 程度）ので、モータに直結するとモータの軸受けが破損する恐れがあるので、スラスト荷重については十分な対策を施した。スピンデルの選定には 最大 3000rpm の連続回転数に耐え、1000kgf のスラスト荷重に耐えること、しかも安価であることを条件に、YAMAZAKI 社の BHX-55 を選定した

### 2.4 攪拌ピン回転駆動用モータと同ピン昇降用モータの選定

攪拌ピン回転駆動用モータ：

- ・回転数： 500～2000rpm 可変型（刻みは 10rpm）
- ・所要トルク： 攪拌ピン 6 が拘束されてもそれを振り切る、捻り破断トルクを算定すると、以下の通りである。

攪拌棒が SKD61 材の場合、破断応力（剪断応力） = 約 500MPa

$$T_a = (d^3 / 16) \times 6 \times 10^{-3} \times 6 \times 10^{-3} \times 6 \times 10^{-3} / 16 \times 500 = 21.2 (\text{N}\cdot\text{m})$$

回転数制御型モータとしては、（誘導電動機 + インバータ）、（IPM モータ（Interior Permanent Magnet Motor） + ドライバ）、（AC サーボモータ + ドライバ）が考えられるが、回転数の全領域において定トルク特性を持ち、しかも安価なモータを考慮してセンサレスで高精度な同期モータの IPM モータを選定した。

要求されている最大トルクが 21.2(N・m)で、安全率を 1.5 倍として最大トルク 31.8(N・m)以上を選定した。

選定したモータ： 三菱電機製 マグネットモータ MM-CF352 + ドライブユニット MD-AX520-3.5K

- ・定格速度 100～2000rpm 最大回転数 3000rpm
- ・定格出力 3.5kw 定格トルク 16.7(N・m) 最大トルク 33.41(N・m)

攪拌ピン昇降用モータ

- ・昇降スピード： 1～20mm/sec（分解能 0.05mm 以上）  
（微動装置のボールねじのリード 6mm の場合、モータ回転数 10～200rpm）
- ・所要トルク： 攪拌ピンを被接合部材に最大 1000kgf で押し付けるトルクを持つ。  
 $T_a = W / (2 \times r) = 1000 \text{kg} \times 9.8 \times 6 \times 10^{-3} / 2 / 0.9 = 10.4 (\text{N}\cdot\text{m})$

攪拌ピン昇降用のモータとしては要求されている移動量分解能 0.05mm の制御性能ならびに小さな容積で大きな出力を有し、全回転領域で定トルクを出力するものが最適で、AC サーボモータ + ドライバを選択した。その他 AC サーボモータはステッピングモータの様なオープンループ制御の他フィードバック制御も可能で、高性能高機能であるので比較的高価なものとなった。

モータに要求されている回転数が最大 200rpm なので 1/12 の減速ギヤ内蔵型を、また要求最大トルクが 10.4(N・m)で、安全率を 1.5 倍として最大トルク 15.6(N・m)以上のものを選択した。尚、実際に選択したモータは実験の多様性を考え高出力のモータを選定したが、もう少し低出力のモータでも可能である。また、昇降用ということで電磁ブレーキ付きにした。

選定したモータユニット： 三菱電機製 AC サーボモータ & ドライバ

モータ HC-KFS73（電磁ブレーキ、1/12 減速ギヤ内蔵）ドライブユニット MR-J2S-70A

- ・定格速度 3000rpm 最大回転数 4500rpm
- ・定格出力 750W 定格トルク 2.4(N・m) 最大トルク 7.2(N・m)  
（1/12 減速ギヤの使用により、変換ロスを考慮しても定格トルクは 10 倍程度となる。）

## 2.5 被接合母材加工用XYテーブル駆動モータの選定

被接合母材加工用XYテーブル駆動モータ

- ・移動スピード： 1～20mm/sec（移動分解能0.05mm以上）  
（微動装置のボールネジリード6mmの場合、モータ回転数10～200rpm）
- ・所要トルク： 6の攪拌ピンを剪断力により破断出来る程度の十分なトルクを有すること  
6の棒を剪断力により破断する力（SKD61材の剪断応力 = 500MPa）  
 $W = A = 500\text{MPa} \times (3 \times 10^{-3})\text{m} \times (3 \times 10^{-3})\text{m} \times \dots = 14130\text{(N)}$   
所要トルク  $T_a = W / (2 \dots) = 14130\text{(N)} \times (5 \times 10^{-3})\text{m} / 2 / \dots / 0.9 = 12.5\text{(N}\cdot\text{m)}$

XYテーブル用モータとして要求されている仕様は、攪拌ピン昇降用モータと同じであるので同様に、ACサーボモータ+ドライバを選択した。モータに要求されている回転数が最大200rpmなので1/12の減速ギヤ内蔵型を、また要求最大トルクが12.5(N・m)で、安全率を1.5倍として最大トルク18.8(N・m)以上のものを選択した。実験の多様性を考え、少し高容量のモータを選定した。

選定したモータユニット： 攪拌ピン昇降用モータと同一、前項参照、但し電磁ブレーキは無し。

## 3 動作試験結果

### 3.1 試験結果の例

接合条件

接合母材：A5083 - A5083

板厚：4mm

攪拌ピン回転速度：1500rpm

攪拌ピン挿入速度：10mm/min

テーブル送り速度：25mm/min

肩部埋没量：0.1mm

接合の評価

板の反りはほとんど無く、綺麗なフライス目が出来、十分要求された仕様を満足出来る接合が得られた。



表面

裏面

図4 A5083同士の接合写真

問題点と解決法：

- スピンドルに回転止めが付いておらず攪拌ピンを取り付ける際に支障があったが回転止めのピンを差せるよう後加工を行い対処した。
- モータ選定の問題点： 当初、攪拌用モータの容量計算において攪拌ピンの先端部の摩擦とかせん断力のみを考慮して計算した。予想外に攪拌ピン肩部の摩擦抵抗が大きく、当初 20の肩径を予定していたが500rpmでは12迄が限界でそれより太くなると挿入時にIPMモータが停止する。高速の2000rpmでも15が限界であった。半導体を使ったドライブユニットを使用するモータは一瞬でも既定値を超える電流が流れると安全装置が働き、停止する。この安全回路の点は、従来のアナログ型のモータにはない点で、今後他の機器の製作上参考になった。

## 4 おわりに

初めて、設計から製作まで一貫した仕事を行うとともに、今回は電子回路系の同僚とチームを組んで製作する事が出来た。現在 この接合機を使って研究が進められ、十分な研究成果がでているとのことである。問題点や改善点も多々あるが今後の糧にしたいと思う。依頼者の篠田剛助教授はじめ多くの方々のご厚意ご協力に感謝します。