

肉盛 FSW 継手の機械的性質に対するプローブピッチの影響

日大生産工(院) ○濱名 晃平 日大生産工 前田 将克

1. 緒言

摩擦撹拌接合 (FSW) はアルミニウム合金をはじめとした様々な軽金属材料への接合性が優れることで知られており、鉄道車両や船舶などの産業分野で適用されている。一方でFSWは接合装置の剛性によって接合可能なワークが制限される。そのため、FSW技術の普及は大型の接合専用機を利用可能な一部の企業にとどまっており²⁾、接合装置の剛性に囚われない接合技術の開発が求められている。

この課題の解決に向けて、接合パスを複数回に分割することで接合装置への反力の低減が期待できる肉盛FSW法の研究が進められている。しかしながら、肉盛FSW法は一般的なI開先突合せFSWを行う場合と比較して、接合パスあたりに撹拌する表面酸化膜の総量が多くなることから、撹拌部 (SZ) 内部に継手強度を著しく低下させる lazy S が生じやすいことが問題となっている。既報³⁾では、肉盛FSWにプローブのねじピッチを増加させた接合ツールを適用することで、継手内部のSZが大幅に拡大され、酸化物の分散に効果的であることが明らかとなった。SZの形成メカニズムは未だ詳細な解明がなされていないが、ツール1回転あたりのツール走行距離である回転ピッチに依存することが通説であり、このようなSZの拡大は継手への入熱量の増加や、それに伴った継手の機械的性質の低下が懸念される。

本報告では板厚5 mmのアルミニウム合金に対して、ねじピッチを増加させた複数種類の接合ツールを用いてそれぞれ肉盛FSWを行った。得られた継手の接合中の温度履歴、機械的性質を調査し、プローブのねじピッチが継手の機械的性質に与える影響について検討を行った。

2. 実験方法

供試材には矩形開口開先を設けた板厚5 mmのA6061P-T6（引張強さ321 MPa、破断伸び19 %、以後A6061）を長さ150 mm、幅50 mmに機械加工して使用した。開先形状は母材の板厚方向に4 mm、幅方向に2.5および3 mmとした2種類で実験を行った。これらの開先形状を付与した供試材は、混在して使用することなく、それぞれ同一形状のものを前進側 (AS) と後退側

(RS) に配置し、接合を行った。肉盛材には母材の同種材料を長さ150 mm、幅を継手の開先開口幅と同じ5および6 mmに機械加工して接合に用いた。接合装置には主軸傾斜可能な汎用立フライス盤を使用した。合金工具鋼 (SKD61) 製の接合ツールはショルダー径20 mm、ショルダー角4°、プローブ直径6 mm、プローブ長さ4.8 mmを一定として、プローブをメートルねじに準拠したねじ山でねじピッチ (P_s) 1.0 mm (M6並目ねじ相当) のものと2.0 mmの2種類を用意し、使用した。接合条件をTable 1に示す。肉盛接合中の模式図をFig. 1に示す。肉盛材は接合方向の前方から走行中のツールに接触させ、圧入することで開先部の充填を行った。接合中に母材の温度測定を行い、接合における継手の熱履歴を調査した。また、得られた継手に対して、引張試験による評価を室温で行った。接合部を試験片平行部中央とし、接合方向に垂直にJIS14B号試験片を採取して試験に供した。

Table 1 Friction stir welding conditions.

Parameter,	Symbol	[unit]	Values
Rotational speed,	N	[rpm]	1100, 2000
Welding speed,	V	[mm/s]	1, 5, 10
Tilt angle,	θ	[deg.]	3
Preheating time,	t	[s]	30

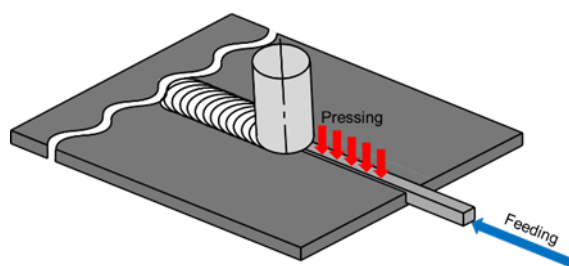


Fig. 1 Schematic diagram of build-up friction stir welding.

3. 実験結果および考察

Fig.2に $P_s=1.0$ mmと2.0 mmの接合ツールを用い、 $N=1100$ rpmの接合条件で接合を行った継手の引張試験結果を示す。図には示さないが、 $P_s=2.0$ mmの継手は P_s の増大に伴ってツールの回転による材料輸送量が増加され、継手に形成されるSZの幅が大幅に拡大する。しかしなが

ら, これら2条件の継手の間で引張強度および破断伸びに差は生じず, いずれの継手も接合速度の上昇に伴って引張強度と破断伸びの値が向上する。

P_s を変化させたにもかかわらず, 引張試験の結果に有意の差が生じなかったことから, 各継手における接合中の熱履歴について調査を行った。Fig. 3にそれぞれの接合ツールを用いて, $v=5$ mm/sの接合条件で肉盛FSWを行った継手の接合中における継手の最高到達温度を示す。ASとRSの間に最高到達温度の差は確認されなかったことから, ASの測定結果のみを用いて議論を行う。測定位置であるプローブ中心から8, 10, 15 mmの位置は, それぞれSZ外縁近傍, ショルダー外縁部, 接合中の熱による影響を強く受けていない位置であるが, 全ての位置において2条件の最高到達温度に有意の差はなく, 同様の温度分布を示すことが明らかとなった。このことから, ねじピッチの増加によるツール1回転あたりの材料の総流動量に差はなく, プローブ軸周りの流れの一部が板厚方向に変化していることが推測される。また, 継手の最高到達温度に変化が生じていないことから, 継手

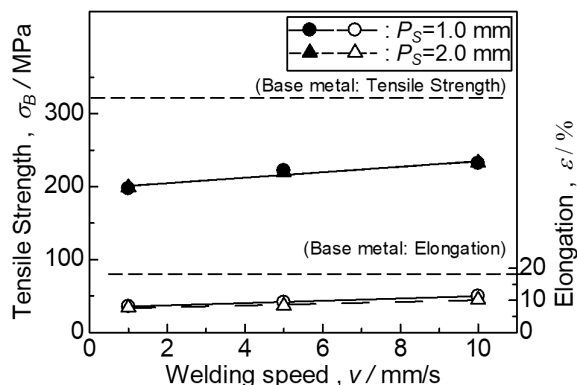


Fig. 2 Influence of the P_s of build-up FSW joints on the tensile strength and fracture elongation. The groove width is 5 mm.

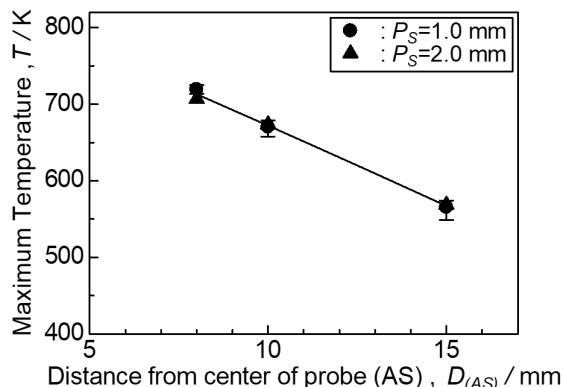


Fig. 3 Maximum temperature at AS of the build-up FSW joints. The welding tools are $P_s=1.0$ and 2.0 mm

の硬度分布においても差が生じないことが推測される。

P_s の変化による継手の機械的性質や熱履歴への影響は確認されなかったが, P_s の増大によるSZ幅の拡大は継手内部に欠陥が生じる接合条件において非常に効果的である。Fig. 4に開先幅3 mmの母材を用いて総開先幅6 mmとした継手の, $N=2000$ rpmの接合条件による引張試験結果を示す。 $P_s=1.0$ mmの継手は接合速度の上昇に伴って引張強度と破断伸びが低下する。また, $v=1$ mm/sを除く接合速度において機械的性質の値が定まらず, 継手の不連続性が確認される。これらの継手は開先幅とプローブ直径が一致している。そのため, 攪拌力が不足した接合条件においてはプローブによる初期酸化被膜の分断が達成されず, 継手内部に生じるlazy Sによる著しい機械的性質の低下が生じる。一方で, $P_s=2.0$ mmの継手は P_s の増大によってプローブが攪拌する範囲が拡大されたことから, 母材/肉盛材界面間の攪拌が促進され, 酸化物による機械的性質の低下が生じない。図には示さないが, $P_s=2.0$ mmの継手は $N=2000$ rpmの接合条件ではすべて熱影響部 (HAZ) による引張破断が生じ, SZ内部に残存した酸化物は継手の機械的性質に影響を及ぼさない。

4. 結言

P_s の増大は, 継手の機械的性質と接合中の熱履歴には影響を与えないことが明らかとなった。このことから, P_s の増大はプローブ直径を増加させることなく微細結晶粒組織の範囲を増加させることに有効であると結論付ける。

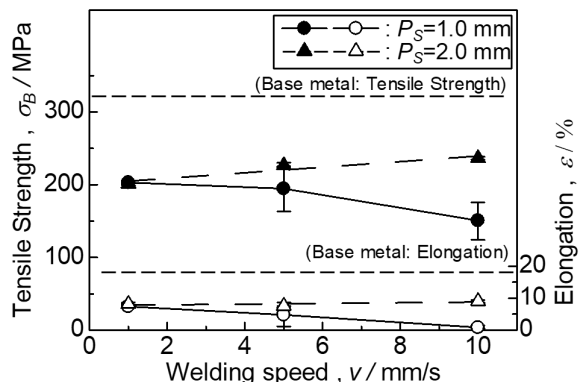


Fig. 4 Influence of the P_s of build-up FSW joints on the tensile strength and elongation at break. The groove width is 6 mm.

参考文献

- 1) H. J. Liu, et al. *J. Mater Proc Technol.*, 142 (2003), 692-696.
- 2) 田中努ら: 軽金属, 57 (2007), 549-553.
- 3) 濱名晃平ら: 溶接学会講演発表概要, 115 (2024), 94-95.