新接合法, Friction Stir Welding に関する 最近の開発状況*

篠 田

剛**

Recent development of new joining process,
Friction Stir Welding*

by Takeshi SHINODA**

キーワード：摩擦圧接，摩擦攪拌溶接，アルミニウム合金，英国溶接研究所，
突起付丸棒，接合温度

1. はじめに

最近英国溶接研究所は，間接摩擦による摩擦圧接法を開発し，Friction Stir Welding と称し，主に軽合金の板材の突合わせ接合を可能にしている¹⁾。この新溶接法は，これまでの摩擦圧接法が円形断面部材の接合に限られているという既成概念を打破した点で多くの注目を浴び，今世紀最大のアルミニウムの溶接技術であるとまで推賞されている。しかしながら，英国溶接研究所はその原理を公表しているものの，接合パラメータおよび機器の仕様については言明を避けているので詳細は不明な点が多い。また，日本における特許も成立し，今後の発展が期待されている²⁾。そして，最近の世界最大の溶接機器展示会であるエッセンで，スウェーデンの溶接機器および溶接材料メーカーのESAB社より実用機のデモが行われ，強い印象を与えた。

また，最近日本において Friction Stir Welding の特別セミナーが英国溶接研究所および（財）新産業創造研究機構との共催で東京および神戸で開催され関心と呼んだ。さらに，米国溶接学会の1998年4月の大会では，Friction Stir Welding 関連の発表が3件予定されているなど，欧米での関心の高さを示している³⁾。

この機会にこれまで発表された報告を中心に，現在の技術開発状況について述べてみたい。また，本プロセスの正式な邦訳は無く，一部摩擦攪拌溶接と称されているが，著者の個人的な見解ではあるがもう少しスマートな言葉がないかとも思う。ちなみに，著者は界面活性化接合法という名称で文部省の科学研究費の交付を受け，その成果の一部を発表している⁴⁾。

2. 原 理

この原理は図1に示すように中心に突起のある Stir Rod と称する丸棒を回転させ接合部材に侵入させ，摩擦熱を接合部材に与える。突起の長さ，すなわち侵入させるべき接合部材長さは板厚に等しいか，極わずかに接合部材厚さより短いのが一般的である⁵⁾。この場合丸棒本体の肩部を Shoulder と称しているが，この部分は必須のもので，これがないと突起が部材に侵入したとき，部材が切削状態となって外部に排出されるので，これを防止すると，部材表面から摩擦熱を与える役目を果たしている。したがって，図2のマクロ断面を見ると逆三角形の接合部が得られるが，これは接合部材中心部は突起部からの摩擦発熱を，また上面はこの肩部，Shoulder からの摩擦発熱であることを示している⁴⁾。

図1 Friction Stir Welding 法の概略図

*原稿受付 平成10年1月8日

**正 員 名古屋大学大学院工学研究科 Member, Nagoya University

図2 Friction Stir Welding 接合部のマクロ断面写真

図3 Friction Stir Welding で生じる塑性域の分類

図3は、発明者である英国溶接研究所が、接合継手のマクロ組織観察から定義した、接合部の領域を示したものである。同図によると、中央部に(D)の動的再結晶領域と、(C)の塑性変形と局所的な再結晶領域を伴った領域からなっている⁶⁾。接合は両者の摩擦熱と回転攪拌を接合部に与えるため、強い塑性流動を生じる。また、接合部の最大幅は、図3に示されるように工具の丸棒, Stir Rod の Shoulder 部直径で決まる。

接合雰囲気は、アルミニウムでは特にシールドガスは不用であり、フィラー部材も不用である。特筆すべき点は、溶接にともなう変形が無い、あるいはあっても熔融溶接の場合に比べれば無視できるほど小さいことである。溶接中にヒュームの発生もないし、赤外線、紫外線などの有害光線も発生しない。また、機械的なエネルギー効率も高く、12.5mm 厚の6000系アルミニウム合金に対して、3kW のエネルギーで良いとされている⁷⁾。

接合に際しては突起のある丸棒, Stir Rod により、摩擦熱を与えるため、この突起部付け根の高温剪断強度が重要な因子となる。これまで、この Stir Rod と称する丸棒は英国溶接研究所では工具鋼により作製しているようであるので、原則的に接合部材は、低融点のアルミニウムおよびマグネシウム関係に限られている。したがって、Stir Rod が鋼製であるため、接合部温度は最大でも700-800℃程度で他の高融点材料への適用は不可能であった。しかし、最近チタンあるいは銅合金にも適用可能との記述も見られるようになってきているが⁸⁾、その材質、先端形状などの詳細は不明である。また、英国溶接研究所は板厚3mm程度の鋼の接合も行い、曲げ試験も良好であることをVTRで見せ、またインターネット上でも公開している⁹⁾。これまでに明らかにされている Stir Rod と称する丸棒の材質は、篠田によると、SUS440Cのマルテンサイト系ステンレスを用いているし⁴⁾、榎本らは、SKD61を用いている¹⁰⁾。適切な Stir Rod 材質の開発が進めば、さらに多くの材料への本ブ

図4 Friction Stir Welding で想定される継手形式

図5 熱可塑性プラスチックへ適用が検討されている振動型 Friction Stir Welding の原理

ロセスの適用分野が広がることが予見される。

本プロセスの欠点は、接合部終端に Stir Rod 突起部の穴が残ることである。このため製品の補修あるいは捨て板を仮付けして終端部を製品の外側に逃がす必要がある。また、非消耗の丸棒, Stir Rod を用いるので、余盛を形成できないので、これまでの設計基準を当てはめにくいのと、すみ肉溶接は原理的に不可能である。しかし、この新接合法の継手形成の可能性は、図4に示すような種々の形状が提案されている¹¹⁾。これによると、突合わせ接合はもとより、すみ肉継手、へり継手などが可能で、特に熱容量差の大きい大断面部材と小断面部材の接合が可能であることを示唆しているのは興味深い点である。

また、実機の完成の報告はまだないが、図5に示すようにブレードの往復運動による Friction stir welding も熱可塑性プラスチックの接合に対して提案されている¹²⁾。ブレードの断面形状は、空気力学的な形状を与えている。

3. これまでの主な結果

3.1 温度履歴

著者は既に予備的な実験結果を示しているが⁴⁾、接合部温度は純アルミニウムの場合に図6に示すように最高ではほぼ450℃であり、アルミニウムの溶融温度660℃に対しても溶融点以下の塑性流動を生じさせる温度であることがわかる。また、榎本らによると¹⁰⁾、Friction stir weldingの開始時に、非消耗のStir Rodで母材に摩擦発熱を生じながら、横移動のない搾孔状態を形成するが、この場合の搾孔時間とその周囲の最高到達温度を計測している。この結果は、図7に示すように、最高350~400℃となり、上記の結果と似た値となっている。英国溶接研究所でも、ほぼ溶融点の70%程度の最高温度であり、アルミニウムの場合550℃を越えないとの記述をしており、接合時の最高温度は500℃内外と思われる¹³⁾。

4. 適用例

4.1 接合材料と機械的性質

Klukenらは、各種溶接法とFriction stir weldingのA6006アルミニウム合金に適用した場合の静的強度を比較している。その結果と発明者の英国溶接研究所の

図6 Friction Stir Welding 金属中の熱履歴

図7 Friction Stir Welding 開始時の穿孔時間と温度上昇の関係

データを合わせて、表1に示す^{14,112,6)}。これによると、プラズマキーホール溶接したものが最も高い値、194MPaを示すが、Friction stir weldingの場合は、最も低い175MPaの値となっている。しかしながら、延性値は最も高く22%の伸びを示している。橋梁の軽量化を考えると、このFriction stir weldingは気孔、割れの問題がないので検討に値すると述べている。

曲げ試験結果は良好であり、180度曲げの結果が報告されている。ただし、写真から判断すると曲げ半径は板厚の4倍以上あるように見える^{11,15)}。

Klukenらは、片持ち引張りの疲労試験で(応力比0.5)で図8に示す結果で、6005-T4母材とはほぼ同じS-N線図を得ている。この場合破壊は表面止端位置であり、溶融溶接のルート部の破壊と異なることを示している¹⁴⁾。

4.2 適用製品

日本においても、次期700系新幹線車両の接合に適用を考慮した、応用的な開発研究が進行している¹⁶⁾。この場合の利点は生産性の高さであることが強調されている。

応用的な紹介がKnipstrmにより行われている¹⁵⁾。Knipstrmによると、図9に示すモータのケースの縦継手の接合が行われているが、終端の穴埋めが必要なことを指摘している¹⁵⁾。スウェーデンでは、6mx16mのアルミニウム船のパネルの溶接に1996年より2交代作業に入っており、全溶接長10000mを計画している¹⁷⁾。米国では、航空宇宙産業が強い興味を示しており、従来溶融溶接が不可能とされてきたジュラルミンに対しても適用が可能で、航空機設計者は材料を選択する際、溶接性を

表1 アルミニウム合金の Friction Stir Welding 接合継手の引張り試験結果

材 料	溶接速度 cm/min	0.2% 耐力 N/mm ²	破断強さ N/mm ²	破断伸び %	破断位置	出典
Al2014 T6	—	247	347	6.5	HAZ	(6)
Al5083 O	—	142	299	23	PM	(11)
Al5083	9.2	144	—	16.2	WM	(17)
Al5083	13.2	141	—	13.6	WM	(17)
Al5083	6.6	156	—	20.3	WM	(17)
Al5083	9.2	154	—	18.8	WM	(17)
Al5083	4.6	143	—	19.8	WM	(17)
Al6082	26.4	132	—	11.3	WM	(17)
Al6082	37.4	144	—	10.7	HAZ	(17)
Al6082	75.0	136	—	8.4	HAZ/PM	(17)
Al6082	53.0	141	—	10.7	HAZ	(17)
Al7075 T7351	—	308	384	5.5	HAZ/PM	(6)
Al6005 T4	—	94	175	22	—	(14)
Al6005 T4	Plasma	107	194	20	—	(14)
Al6005 T4	MIG	104	179	18	—	(14)

注：PM:母材破断、WM:母材破断、HAZ:熱影響部破断、HAZ/PM:熱影響部母材破断
出典の番号は、引用文献番号

図8 A5083, A2014 の Friction Stir Welding 継手の疲れ強さと設計基準値

図9 Friction Stir Welding によるモータケーシングの組立例

図10 Essen 溶接展示会における Friction Stir Welding 法のデモンストレーション

考慮する必要がないとまで断言している¹³⁾。

4.3 ロボット化

上述の日本における特別セミナーでは、Friction stir welding の駆動部を大型のハンドリングロボットに搭載して、U 型の軌跡を描かせ、3 mm 程度の板厚のアルミ合金を接合している VTR が公開され、全姿勢溶接と 3 次元曲面継手への適用を示唆している。

5. エッセン溶接展示会

世界最大の溶接機器展示会であるエッセンで実用機がスウェーデンの溶接機器および材料メーカーである ESAB 社よりデモが行われた。本機の外観は開発者の英国溶接研究所 (TWI) が、門型の構造を取っているのに対し¹¹⁾、図 10 に示すように片持ち構造となっていて、スマートな印象を与えている。主軸のモーターは上部に収められ、ギアあるいはベルトで減速している。初期の文献では 1500rpm の回転を与えていると記されているが、ESAB 社のデモの印象では板厚 6mm の 5000 系アルミ合金に対して数 100 回転以下の低速で接合を行っているようである。接合速度は極めて早く、75cm/min である。先端形状は機密事項で、デモ中もすぐ特別な箱の中に収納され、具体的な寸法は不明である。また、同図からも明らかなように、攪拌を与える Stir Rod は 5 度

程度の前進角を付与している。この前進角の意味は不明であるが、Stir Rod の寿命の改善と摩擦による接合部の塑性流動現象を促進しているものと考えられる。

結 言

英国溶接研究所が、開発した、Friction Stir Welding 法は従来の固定観念にとらわれない手法で、板材の摩擦熱による接合を可能としたユニークな方法である。しかも、発表されてから数年しか経っていないにも関わらず実用化の目途もたっている。現在、英国溶接研究所が特許によりこの方法を保護している状況であり、自由な研究が行われる雰囲気ではないが、今後この接合法の有用性が広く認められれば、広い工業分野での使用が期待され、動向を注意深く見守る必要がある。

本方法は詳細が論文の形で紹介されていないので、可能な限り事実に基づいて書いたつもりであるが、今後、本文章に修正などが加えられる可能性が十分あることを付記しておきます。

引 用 文 献

- 1) W. M. Thomas, Friction Stir Butt Welding, International Patent Application No. PCT/GB92, GB Patent Application No. 9125978. 8, 6 December 1991
- 2) 特表平 9-508073 摩擦攪拌溶接/特願平 07-525109
- 3) '98 Advance Program, 98 AWS International Welding and Fabricating Exposition and Annual Convention, Welding Journal 76-12 (1997) ap. 13
- 4) 篠田 剛, 近藤康裕: 界面活性化接合法によるアルミニウム板材の接合, 摩擦圧接 3-4 (1996), P. 173-178
- 5) A. O. Kluken and M. Ranes, Aluminium Bridge Constructions - Welding Technology and Fatigue Properties, 50-3 (1995), Svetsaren, p.13-15
- 6) C. J. Doves: Seam Welding Aluminium Sheet and Plate, Using the Friction Stir Welding Process, Proc., of the 6th Int. Symp., Japan Welding Society (1996) P.711-718
- 7) C. J. Doves and P. Threadgill: Friction Stir Welding of Aluminium Alloys, TWI Bulletin 493/6/95, (1995, Dec)
- 8) P. Threadgill and W. M. Thomas: Friction Stir Joining of Titanium, Connect, (1996, Oct) P. 6
- 9) Connect (1997, Nov) または, <http://www.twi.co.uk/connect/nov97/nov97.html>
- 10) 榎本ら: 塑性流動によるアルミニウム合金の接合, 第 47 回塑性加工連合講演会 (1996, Nov.) P. 495-496
- 11) C. J. Doves and W. M. Thomas: Friction Stir Welding Process Welds Aluminium Alloys, Weld. J. 75-3 (1996) P.41-45
- 12) W. M. Thomas, Friction Stir Welding, Proc., International Conference of Metalworking Technology Europe, 1994, P. 143-145
- 13) M. W. Mahoney: Science Friction, Welding & Joining (1997), No. 1/2 P. 18-19
- 14) A. N. Kluken and M. Ranes, Aluminium Bridge Constructions - Welding Technology and Fatigue Properties, Svetsaren, 50-3 (1995), P. 13-15
- 15) K. E. Knipström, New Welding Method for Aluminium, Svetsaren, 50-3 (1995), P. 5-6
- 16) 日本経済新聞, (1997), 7 月 6 日付け記事
- 17) K-E Knipstrom and B. Pekkari, A Novel Joining Process - Friction Stir Welding, 52-1 (1997), Svetsaren, p. 49-52