軽金属への Friction Stir Welding の適用

時末 光*・篠田 剛**

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 49, No. 6 (1999), pp. 258-262

Applications of Friction Stir Welding into Light Metals

Hiroshi TOKISUE* and Takeshi SHINODA**

Keywords: Friction Stir Welding, 摩擦圧接, アルミニウム合金, 接合, 塑性流動現象

1. はじめに

最近、英国溶接研究所 (TWI) は、間接摩擦熱を利用して板材を接合する摩擦圧接法を開発し、Friction Stir Welding と称し、軽合金部材の突合せ接合を可能にしている¹⁾。この新しい接合法は、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言われている。また英国溶接研究所はその原理は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不明な点が多い。しかし、最近開催された軽金属関係の国際会議において、この Friction Stir Welding に関する発表件数は多くなってきており、徐々にではあるが、その概要は明らかになりつつある。たとえば、1998年4月に英国溶接研究所で開催された INALCO の大会²⁾、あるいは1998年7月に豊橋で開催された軽金属学会主催の第6回アルミニウム合金国際会議 (ICAA-6)³⁾である。これらの会議では、英国溶接研究所を始め数件の発表があり、日本でも相当な関心呼び始めている。

しかし、本プロセスの正式な邦訳はなく、一部で「摩擦攪拌溶接」と称されているが、著者ら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、著者の一人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⁾。

本解説は、これまで発表されている研究報告などを中心に、現在の技術開発状況について記述する。

2. 原理

この Friction Stir Welding 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ながら接合部材に進入させて摩擦熱を発生させ、その熱を接合部材に与えて接合を行うものである。突起の長さ、すなわち接合部材に侵入させる深さは、部材の板厚に等しいか、板厚より極わずかに短いのが一般的である⁵⁾。この場合、丸棒本体の肩部

図1 Friction Stir Welding 法の概略図

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進入したとき、部材が切削状態となって外部に排出される。このため、Shoulder はこれを防止すること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のマクロ断面に逆三角形の接合部が観察されているが、これは接合部材の中心部は突起部からの摩擦発熱を、また上面はこの肩部、すなわち Shoulder からの摩擦発熱によることを示している^{4),6)}。この方法によった接合部の最大幅は、図2に示したように工具の丸棒、Stir Rod の Shoulder 部の直径で決まることになり、余盛は形成されない。

3. Stir Rod

接合に際しては、突起のある丸棒、Stir Rod により摩擦熱

* 日本大学生産工学部 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)。College of Industrial Technology, Nihon University (1-2-1, Izumi-cho, Narashino-shi, Chiba 275-8575)。

** 名古屋大学大学院工学研究科 (〒464-8603 愛知県名古屋市中種区不老町)。Graduate School of Engineering, Nagoya University (Froumachi, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi 464-8603)。

回転数=1500 rpm
溶接速度=4.0 mm/s

図2 Friction Stir Welding 接合部のマクロ断面写真

図3 Friction Stir Welding 法の一般的な配置と Stir Rod 形状と Shoulder 部のくぼみ

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が、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°C程度で他の高融点材料への適用は不可能であった。これまでに明らかにされている Stir Rod の材質は、TWI の Nicholas³⁾によれば工具鋼 AISI H13を、篠田⁴⁾によればマルテンサイト系ステンレス鋼 SUS440C を、榎本⁷⁾は工具鋼 SKD61を用いている。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プロセスの適用分野が広がることが予見される。

Stir Rod の Shoulder 部は、図3に示すように平面ではなくわずかに凹面状になっている³⁾。これは、Shoulder 部の回転により接合母材の表面直下での塑性流動運動を促進し、混合攪拌の効果を増大させているようである。しかし、この凹面状態の最適化はまだ検討されていない。さらに、75 mmの極厚板の Friction Stir Welding の開発では、Stir Rod の突起表面にねじ山状のらせん溝を切って接合金属に対する攪拌力を増加させている³⁾。

しかし、最近、Friction Stir Welding がチタンあるいは銅合金にも適用可能とした記述もある⁸⁾。しかし、その材質、先端形状などの詳細は不明ではあるが、タングステンカーバイドであるとの情報もある。また TWI は板厚3 mm程度の鋼の一層接合を行い、曲げ試験結果も良好であることを VTR やインターネット上で公開している⁹⁾。最近では板厚25 mmの鋼板の両面接合を100~240 mm/minの速度で行い、板厚12 mmの12%Cr鋼の一層接合を実施している¹⁰⁾。

攪拌を与える Stir Rod は、エッセン溶接機器展示会での ESAB 社のデモ機でも図4右の写真に示すように5°程度の前進角を付与している。この前進角の目的は不明であるが、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

図4 エッセン溶接機器展示会におけるエサブ社ブースでの Friction Stir Welding の展示

図5 Friction Stir Welding で生じる塑性域の分類 (寸法は比例していない)

A: 非塑性領域, B: 熱影響部, C: 熱-機械的影響域 (局部再結晶部を含む塑性変形領域), D: 動的再結晶部

促進しているものと考えられる。著者の一人は、1100アルミニウムと5003アルミニウム合金の異種材の突合せ継手接合部のマグネシウムの分布を調べ、塑性流動現象に及ぼす前進角の影響を実験的に示した。これによると、角度が大きいくほど攪拌力は増大し、Shoulder 部の下方、すなわちちょうど接合部材中央部に見られる塑性流動のよどみが板上方へ移動し、欠陥が消失する傾向が認められている¹¹⁾。

4. 接合部の組織と温度履歴

図5は、発明者の TWI 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、中央部は (D) の動的再結晶領域と (C) の塑性変形と局部的な再結晶領域を伴った領域となっている¹²⁾。接合時に両者の摩擦熱と回転攪拌を接合部を与えるため、強い塑性流動を生じる¹³⁾。基本的には接合部は非溶融状態の固相接合に分類されるが、Bjorneklett によると Stir Rod の Shoulder 部直下では高温であり、7030系のアルミニウム合金では330°C/s以上の昇温速度となると局部融解現象の生じる可能性を示唆している。Yang は Friction Stir Welding の継手部、特にクレータに相当する領域をいくつかに分けて組織観察を行い、板の境界 (突合せ部) は、進行方向左方から右方へ大きく方向を変化させ、かつ突起後方でボイド形成を助長していることを示している。さらに、接合部に500°Cの高温熱処理を施

図6 6063アルミニウム合金-T6材の Friction Stir Welding の熱サイクル
接合速度：0.5 m/min, 板厚：4 mm, Stir Rod 外形：15 mm

すことによりブリスタを形成したと報告している¹⁴⁾。

Friction Stir Welding の接合時の温度履歴については、種々のデータが発表され始めているが、Backlund は図6に示すようにツール直径15 mm の場合、板厚4 mm の6063アルミニウム合金-T6材の接合線中央より2 mm で500°Cを越える値を記録している¹⁵⁾。著者の一人はすでに予備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最高で約450°Cであり、アルミニウムの融点660°Cに対しても融点以下の塑性流動を生じさせる温度であることを得ている。また榎本ら⁷⁾によると、Friction Stir Welding の開始時には、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となるが、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。この結果では最高350~400°Cとなり、上記の結果と似た値となっている。TWI の実験結果においてもほぼ融点の70%程度の最高温度であり、アルミニウムの場合550°Cを越えないとの記述があり、接合時の最高温度は500°C内外と思われる¹⁶⁾。熱伝導計算による Friction Stir Welding 接合時の温度履歴についても報告があるが^{17), 18)}、いずれも上記の実測値とは矛盾するものではない。

接合雰囲気は、アルミニウムではシールドガスは不要であり、フィラー部材も不要である。TWI は、水中でも Friction Stir Welding を試み満足な結果を得ている³⁾。

さらに特筆すべき点は、接合に伴う変形がないか、あるいはあっても溶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、板厚12.5 mm の6000系アルミニウム合金に対して3 kW のエネルギーでよいとされている¹⁹⁾。

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。このため、これまでの設計基準を当てはめにくいことと、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については種々の形状が提案され^{20), 21)}、突合せ接合はもとより、すみ肉継手、へり継手なども可能であり、

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。

5. Friction Stir Welding の特長

Friction Stir Welding の特長は多いが、まとめると以下のようになる。

- (1) 固相接合である。
- (2) 接合に伴う変形がない。
- (3) ジュラルミンあるいは複合材料などの従来溶融溶接が困難であった材料の接合が可能である。
- (4) 接合雰囲気はシールドガスを必要としない。
- (5) 機械的性質が優れている。特に疲労特性に優れる。
- (6) 接合中にヒュームの発生もなく、赤外線、紫外線などの有害光線も発生しない。
- (7) 高速接合が可能である。
- (8) 溶融溶接において発生しやすい気孔、割れなどの欠陥は発生しない。
- (9) 接合部の組織には柱状晶などは生成せず、塑性流動により結晶粒は微細化する。
- (10) 接合に要するエネルギー効率が高い。

問題点としては、

- (1) 余盛を形成しないので、すみ肉継手が作製できない。
- (2) 三次元曲面は現在のところ施工できない。
- (3) 接合部終端に Stir Rod 突起部の穴が残る。
- (4) 接合部材の目違い、ギャップの制御が要求される。
- (5) 現在のところ接合部材は軽金属に限られる。

以上のように長所が圧倒的に多い接合法であることが理解できる。

6. 適用例

6.1 接合材料と機械的性質

Kluken らは、6006アルミニウム合金に各種溶接法と Friction Stir Welding を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 TWI のデータを合わせて表1に示す^{12), 22), 25), 26), 28)}。これによると、プラズマキーホール溶接を行ったものが最も高い値194 MPaを示すが、Friction Stir Welding の場合は、最も低い175 MPaの値となっている。しかし、延性は最も高く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。また2000系の材料も熱影響部破断の結果を示している。

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^{20), 23)}。

Kluken らは、片持ち引張りの疲労試験（応力比0.5）で図7に示すような6005アルミニウム合金-T4母材とほぼ同じ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²²⁾。

6.2 適用製品

日本においても次期700系新幹線車両の接合への適用を考慮した応用的な開発研究が進行している^{24), 25)}。この場合の利点は高い生産性にあることが強調されている。さらに、アルミニウム系の複合材料に適用して、溶融溶接で問題となる気孔、割れなどを生じることなしに接合できるので、今後多

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 (MPa)	破断強さ (MPa)	破断伸び (%)	破断位置	出典
A2014-T6	—	247	378	6.5	HAZ	6)
A5083-O	—	142	299	23	PM	6)
A5083	9.2	144	—	16.2	WM	17)
A5083	13.2	141	—	13.6	WM	17)
A5083	6.6	156	—	20.3	WM	17)
A5083	9.2	154	—	18.8	WM	17)
A5083	4.6	143	—	19.8	WM	17)
A5083-H112	15.0	156	315	18.0	HAZ/PM	20)
A6082	75.0	136	—	8.4	HAZ/PM	17)
A6082	26.4	132	—	11.3	WM	17)
A6082	37.4	144	—	10.7	HAZ	17)
A6082	53.0	141	—	10.7	HAZ	17)
A6082	75.0	—	254	—	HAZ	21)
A7075-T7351	—	208	384	5.5	HAZ/PM	6)
A6005-T4	—	94	175	22	—	14)
A6005-T4	Plasma	107	194	20	—	14)
A6005-T4	MIG	104	179	18	—	14)
6N01	25.0	199	133	12	HAZ/PM	20)

注：PM：母材破断，WM：溶接金属破断，HAZ：熱影響部破断，HAZ/PM：熱影響部母材境界域破断
出典の番号は引用文献番号

図7 5083アルミニウム合金，2014アルミニウム合金の Friction Stir Welding 継手の疲れ強さと設計基準値

くの研究が行われることを予感させる。

Knipstrm による応用的な紹介例であるモータのケースの縦継手を図8に示すが，終端の穴埋めが必要なことを指摘している²³⁾。スウェーデンでは，6 m×16 mのアルミニウム船のパネルの溶接で1996年より2交代作業に入っており，全溶接長10,000 mを計画している²⁶⁾。米国では，航空宇宙産業が強い興味を示しており，従来から熔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あり，航空機設計者は材料を選択する際，溶接性を考慮する必要がないとまで断言している¹⁶⁾。

図8 Friction Stir Welding によるモータケーシングの組立例

6.3 ロボット化およびポータブル化

日本における TWI の特別セミナーでは，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ニウム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。最近，造船所での船台施工を

行うためのポータブル型の装置の開発が行われ、圧力14 MPa、回転数500 rpm、接合速度90 mm/min の条件で2500 mm の溶接長であれば縦向き溶接までも可能なことを示している²⁷⁾。

7. 溶接機器展示会における実用機

スウェーデンの溶接機器および材料メーカーである ESAB 社より世界最大のエッセン溶接機器展示会において実用機のデモを行っていた。本機の外観は開発者の TWI が門型の構造を取っているのに対し²⁰⁾、前述の図4に示した片持ち構造となっていてスマートな印象を与えている。さらに、本機ではモータ台の保持レールが簡単に延長できるので、現在、溶接長20 m も問題なくこなしている。主軸モータは上部に収められ、ギアあるいはベルトで変速している。初期の文献では1500 rpm の回転を与えていると記されているが、ESAB 社のデモでの印象では板厚6 mm の5000系アルミニウム合金に対して数100回転以下の低速で接合を行っているようであった。接合速度は極めて速く750 mm/min である。先端形状は機密事項としてデモ中接合終了後すぐに特別な箱の中に収納され(図4右の黒い円筒部)、具体的な寸法は不明であった。

8. 結 言

英国溶接研究所が開発した Friction Stir Welding 法は、従来の固定觀念にとらわれない手法であり、板材の摩擦圧接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ていないにも関わらず実用化の目処もたっている。さらに軽合金系の複合材料や、鋼関係の部材の接合も目処がつき始めるなど活発な開発環境が生まれつつある。現在、TWI が特許によって、この方法を保護している状況にあり、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。

本接合法についての詳細は論文の形では紹介されていないが、可能な限り事実に基づいて記述した。今後、本文章に修正などが加えられる可能性は十分あることを付記しておく。さらに、TWI のホームページ (<http://www.twi.co.uk>) を参

照されれば最新の情報を入手することができることを付記する。

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 December 1991.
- 2) W. M. Thomas: Proceedings INALCO, Cambridge (1998, April), S29-1.
- 3) E. D. Nicholas: Proc. of ICAA-6, Toyohashi, (1998, July), 139.
- 4) 篠田 剛ほか: 摩擦圧接, 3 (1996), 173.
- 5) A. O. Klucken et al: Svetsaren, 50, No. 3 (1995), 13.
- 6) O. Frigaard et al: Proc., Int. ICAA-6, Toyohashi (1998, July), 1477.
- 7) 榎本正敏ほか: 第47回塑性加工連合講演会, (1996), 495.
- 8) P. Threadgill et al: Connect, No. 80 (1996), 6.
- 9) Connect, No. 91 (1997), 3, または, <http://www.twi.co.uk/connect/nov97/nov97.html>
- 10) Connect, No. 96 (1998), 3, または, <http://www.twi.co.uk/connect/sept98/c963a.html>
- 11) 篠田 剛ほか: 溶接学会講演概要集, 62 (1998), 210.
- 12) C. J. Dowes: Proc., of the 6th Int. Symp., Japan Welding Society, Nagoya (1996, Nov), 711.
- 13) B. I. Bjorneklett et al: Proc. of ICAA-6, Toyohashi, (1998, July), 1531.
- 14) H. S. Yang: Proc., Int. ICAA-6, Toyohashi, (1998, July), 1483.
- 15) J. Backlund et al: Proc. of INALCO, Cambridge, (1998, May), 171.
- 16) M. W. Mahoney: Welding & Joining, No. 1/2, (1997), 18.
- 17) M. J. Russel et al: Proc. of INALCO, Cambridge, (1998, May), 185.
- 18) O. Frigaard et al: Proc. of INALCO, Cambridge, (1998, May), 197.
- 19) C. J. Dowes et al: TWI Bulletin 493/6/95, (1995, Dec).
- 20) C. J. Dowes et al: Welding Journal, 75 (1996), 41.
- 21) C. J. Dowes: Proc., Taiwan Int. Welding Conf., Taipei, (1998.9), 497.
- 22) A. N. Klucken et al: Svetsaren, 50, No. 3 (1995), 13.
- 23) K. E. Knipström: Svetsaren, 50, No. 3 (1995), 5.
- 24) 日本経済新聞, 1997年7月6日付け記事.
- 25) 熊谷正樹ほか: 軽金属学会第94回春期大会講演概要, (1998), 239.
- 26) K-E Knipström et al: Svetsaren, 52, No. 1-2, (1997) 49.
- 27) I. Henderson: Proc. of INALCO, Cambridge, (1998, May), 251.
- 28) H. Larsson et al: Revista de Soldadura, 27 (1997), 180.