

中小企業による摩擦攪拌接合技術の実用化開発

田中 努*・沖 幸男**・谷口 正志*
下西 巖***・中田 寛****・東 健司*****

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 57, No. 11 (2007), pp. 549-553

Development of practical friction stir welding technique for small and medium enterprises

Tsutomu TANAKA*, Sachio OKI**, Masashi TANIGUCHI*
Iwao SHIMONISHI***, Hiroshi NAKATA**** and Kenji HIGASHI*****

Keywords: friction stir welding, aluminum alloy

1. 緒 言

摩擦攪拌接合（以後 FSW (Friction Stir Welding) と略す）は 1991 年にイギリス TWI で開発された接合技術で先端に突起物（プローブ）を有するツールを高速で回転させながら材料へ圧入し、発生する摩擦熱に伴う材料の塑性流動によって接合する技術である¹⁾。FSW は従来の溶融溶接に比べて接合後のひずみが極めて小さく、高品質化・低コスト化が達成されるだけでなく、悪臭・閃光・汚水などが発生しないため、地球環境保護にも適した接合方法であり、近年大きな注目を集めている。そのため、FSW が発明されて以来、多くの研究開発が進められ^{2)~8)}、鉄道車両、船舶、土木構造物、航空機器、自動車など種々の分野で実用化されてきた^{9)~12)}。この FSW 技術開発は大企業や大学・研究機関を中心に進む一方で、接合のノウハウ不足や基本特許ライセンス料負担などの問題から中小企業への技術普及はほとんど行われていないのが現状である。

そこで、大阪府では府内の主要産業である機械金属加工関連企業の製品高度化および価格競争力強化を促進することを目的とし、文部科学省の「都市エリア産学官連携促進事業」の平成 16 年度実施地域として採択を受け、金属加工関連企業の集積地である大阪東部エリア（東大阪市、八尾市、大東市域等）を拠点として、摩擦攪拌接合に関する研究「次世代の高品位接合技術の開発」に取り組んできた^{13)~20)}。

大型構造物を製作する際は、比較的単純な形状の大型部品同士を直線 FSW するだけでも付加価値が十分高い場合が多いのに対して、中小企業が取扱う製品はそのようなケースはまれであり、2次元・3次元の接合が必要となる場合が多くなると予想される。FSW は回転ツールが部材表面に常に一定の深さで接触することが必須であるので、2次元・3次元接

合時にはツール姿勢を厳密に制御しなければならない^{18),21)}。さらに、接合方法は単純であっても構造物の形状が複雑な場合には固定方法にも創意工夫が必要となる。本報告では、プロジェクトに参画している中小企業が、上記の問題点を克服し、FSW を用いた実用化開発を行った結果について述べる。

2. FSW 装置

本プロジェクトで用いた FSW 装置は、主に川崎重工業株式会社および東大阪市にある光陽産業株式会社に依託し、製作された。本装置は提案している研究テーマおよびその他多岐にわたる接合条件に幅広く対応できるように設計されており、2種類のヘッドを持っている (Fig. 1)。一つのヘッドは自由度が2軸で最大加圧荷重 29.4 kN の高出力直線ヘッドで、新素材や厚板の接合に適した設計となっている。もう一つのヘッドは X, Y, Z 軸に加えて、回転軸の a 軸, c 軸を有する 3 次元駆動ヘッドで、曲線・曲面接合のために開発されたもの

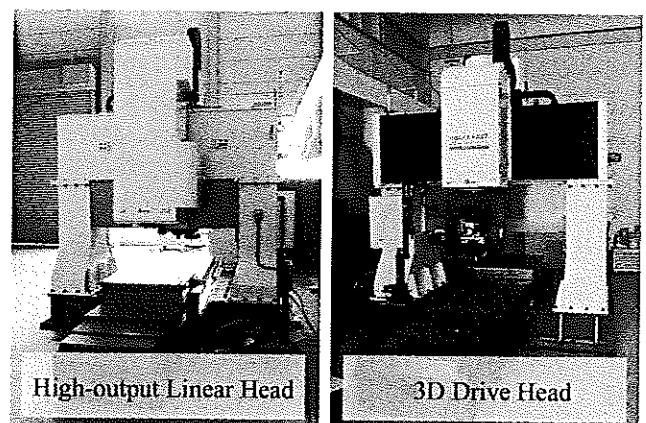


Fig. 1 Appearance of FSW machine used in this report.

* 大阪府立産業技術総合研究所 (〒 591-1157 和泉市あゆみ野 2-7-1)。Technology Research Institute of Osaka Prefecture (2-7-1 Ayumino, Izumi-shi, Osaka 591-1157).

** 近畿大学理工学部 (東大阪市)。School of Science and Engineering, Kinki University (HigashiOsaka-shi, Osaka).

*** (株)下西製作所 (東大阪市)。Shimonishi Seisakusyo Co., Ltd (HigashiOsaka-shi, Osaka).

**** (株)中田製作所 (八尾市)。Nakata Company Ltd (Yao-shi, Osaka).

***** 大阪府立大学大学院工学研究科 (堺市)。Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University (Sakai-shi, Osaka).

受付日：平成 19 年 4 月 23 日 受理日：平成 19 年 7 月 2 日

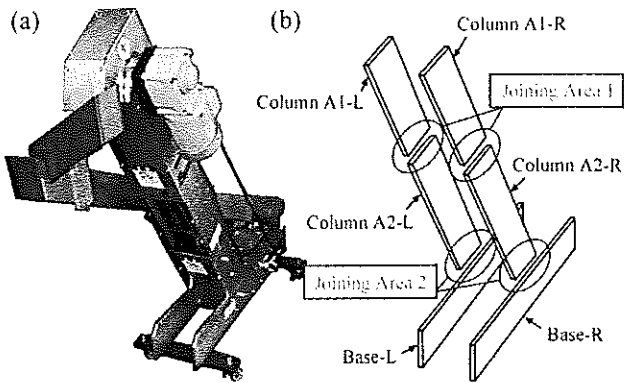


Fig. 2 (a) Appearance of metallic parts supply device and (b) schematic illustration of a chassis of the device.

である。

3. FSW 実用化開発例 1 部品搬送筐体への適用

Fig. 2 に実用化を試みた部品搬送機の (a) 外観写真と、(b) それに対応する搬送機筐体の模式図および接合領域を示す。これまでは、長尺フレーム用の支柱延長部 (図中 Column A2) と支柱頭部 (図中 Column A1) との結合、さらには脚部 (図中 Base) と支柱部 (図中 Column A2) との結合は当て板を介してボルトナット止めしていた。通常の溶接では、接合後のひずみによって組立てが不可能だったためである。そこで、接合後のひずみの少ない FSW を各モジュールの接合に適用できれば、部品点数・組立て工数・製造コストが削減できるだけでなく、より軽量で意匠性に優れた製品を製造できると期待される。

3.1 接合条件の調査

接合部材は、厚さ 10mm、幅 125mm の 6063 アルミニウム合金押出材である。接合にはショルダ径 20mm、プローブ長さ 9.8mm のツールを用い、種々の条件で接合を行った。Fig. 3 には接合条件範囲内で、最も良好な接合状態にあった接合部の断面マクロ組織を示す。図より、素材裏面まで完全に攪拌され、欠陥などは観察されなかった。さらに、接合部材から引張試験片を切出し、引張試験を行った。Table 1 に試験結果を示す。表より、継手効率は約 70% であり、引張強さ 163MPa は本製品の实用に十分耐える値である。

3.2 接合ジグの考案と接合実験

FSW では、接合中に部材を固定することが必要である。特に、接合面に対して垂直方向への固定は、良好な接合を達成させるためだけでなく、寸法精度の点からも重要である。現在までのところ、大型部品の FSW は直線接合が一般的であり、接合部材の両端は平行であることが多いため、接合面に対して垂直方向への固定は比較的容易であった。しかし、中小企業が扱うような小物を製作する際には、接合部材の両端は Fig. 2 の Column A2 のように平行でなかったり、特殊な形状をしている場合が多々あると予想される。そのため、特殊な形状の部材でも固定が可能となる方法を考案する必要がある。ここでは、Fig. 2 に示す部材の接合方法を考案し、接合を行った結果を報告する。

3.2.1 支柱の接合 (Fig. 2 中の Joining Area 1)

Fig. 2 中の Column A1 の長さを一定にし、Column A2 の長さを調節することによって任意の長さの支柱を製作すること

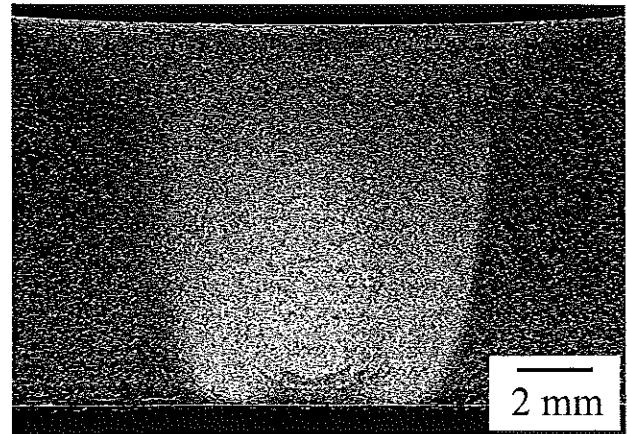


Fig. 3 Macrograph in a joint section.

Table 1 Tensile properties of base material and FSWed material

	Proof stress (MPa)	Tensile stress (MPa)	Elongation (%)	Joint efficiency (%)	Fracture portion
Base metal	201	228	5.4	—	—
FSW joint	99	163	14.9	72	Stir zone

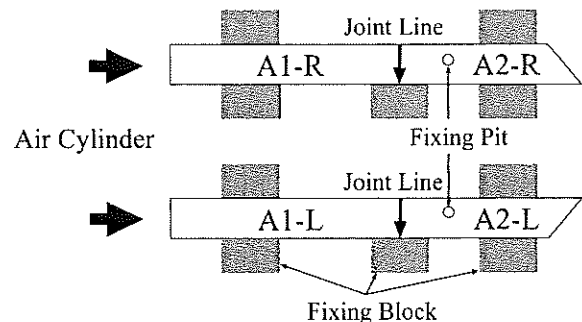


Fig. 4 Schematic illustration of a welding method in right-and-left columns.

ができる。その際の接合方法を Fig. 4 に示す。接合方向には支柱幅を持つ固定ブロックで Column A1 および A2 を固定している。また、長さが固定されている A1 部を先端からエアシリンダで接合面に対して垂直に押し当てた。一方、A2 は長さが一定でなく、先端も接合面と平行ではないため A1 部のように先端から押付けることはできない。そこで A2 部接合部付近の一定位置にピン穴を開け固定する方法を採用した。ピン穴を開けることによって、接合面に対して垂直方向に押付けられるだけでなく、一定位置にピン穴があるため、よりよい寸法精度が得られる。

左右一組の支柱は、意匠性の観点から接合表面が共に内側となるようにする必要がある。Fig. 4 のようにジグの位置を変えず接合をした場合、ピン穴が一定位置となるため接合の作業効率は高い。しかし、組立て時左右の支柱の接合方向が逆となり、それに対応して接合によるひずみも逆となるため、左右の支柱のずれが大きくなり組立てに支障をきたすと予想される。そこで、Fig. 5 のように、左右支柱とも同じ接合方

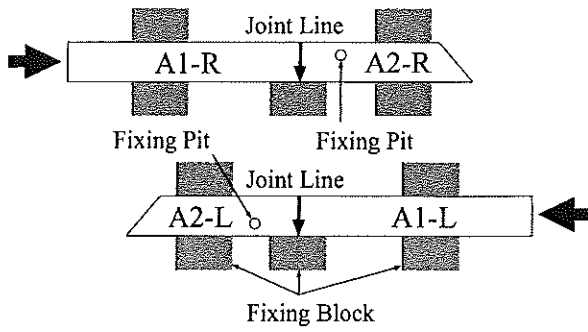


Fig. 5 Schematic illustration of a reviewed welding method in right-and-left columns.

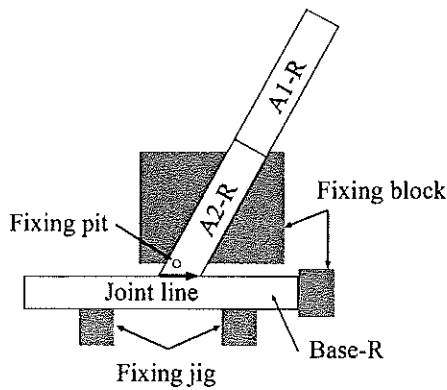


Fig. 6 Schematic illustration of a welding method between a column and a base.

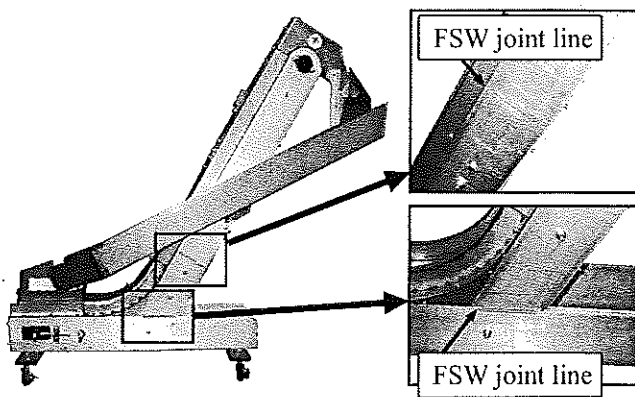


Fig. 7 Appearance of a metallic parts supply device developed in this study.

向を持つように、固定ジグを反転させて接合を行った。

3.2.2 支柱と脚部の接合 (Fig. 2 中の Joining Area 2)

支柱の接合で述べた接合方案を利用して、支柱と脚部の接合を行った。その接合方法を Fig. 6 に示す。接合方向にはブロックを設けて固定した。一方、接合面への固定に関しては、支柱部の接合のときと同様に、支柱接合部近傍にピン穴を設けて支柱を固定し、脚部は均一に押付けるために固定ジグで静的に固定させた。また、前項同様接合ひずみによる左右のずれを解消するために、接合方向が同一になるよう固定ジグを反転させて接合を行った。以上の方案で実際に接合を行った結果、Fig. 7 に示すような意匠性に優れた軽量で製作コストも低い部品搬送機を試作することに成功した。なお、ピン穴による強度低下も製品使用上問題なかった。

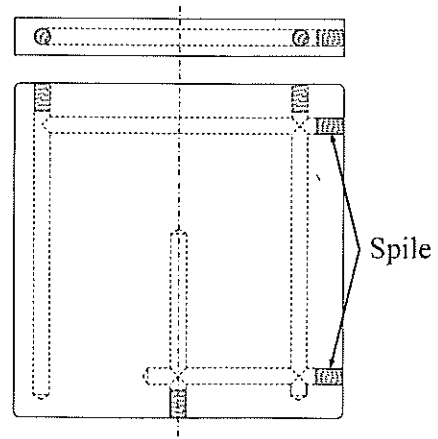


Fig. 8 Fabrication example of the traditional water-cooled plate.

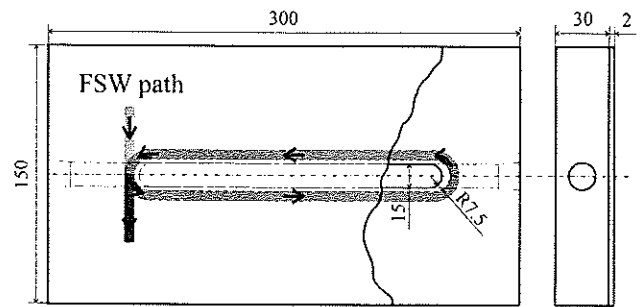


Fig. 9 Illustration of water-cooled plate manufactured in this study.

本章では、特殊な形状を持つ構造物の接合方法として固定ピンを用いることよって、十分な強度と寸法精度を持った FSW 構造物の試作に成功した事例を紹介した。本方案は、接合部材の形状が特殊な場合の固定方法のひとつとして、利用できると思われる。

4. FSW 実用化開発例 2 水冷プレートへの適用

アルミニウム製水冷プレートは、従来 Fig. 8 に示すように、アルミニウムブロックの側面からガンドリルを用いて交差する何本かの深穴を開け、その穴の所々に栓をして水路を構成している。このため作業性が低く、コスト高の原因となっている。そこで、ブロックに水路となる溝を掘り、その上をアルミニウム板で覆い、溝の縁を FSW で重ね合せ接合することができれば、深穴や栓といった作業が不要になるため、加工工程の削減と製造コストの低減が期待される。Fig. 9 に今回実用化を試みた簡易水冷プレートを示す。また、図には FSW の接合経路も示している。図に示すように、接合経路は円弧部分があり、単純な直線接合ではなく、1パスで接合を完了するためには5軸で制御 (X, Y, c軸: 変動 / Z, a軸: 一定) する必要がある。それゆえ、今回の接合には3次元駆動ヘッドを用いている。

4.1 接合条件

はじめに最適な接合条件を検討した。供試材は 5052-H112 材 (厚さ 30mm) と 5052-H32 材 (厚さ 2mm) である。使用した FSW ツールは、ショルダ径 12mm, プローブ長さ 2.9mm, プローブ径 4mm である。接合条件は、ツール回転数

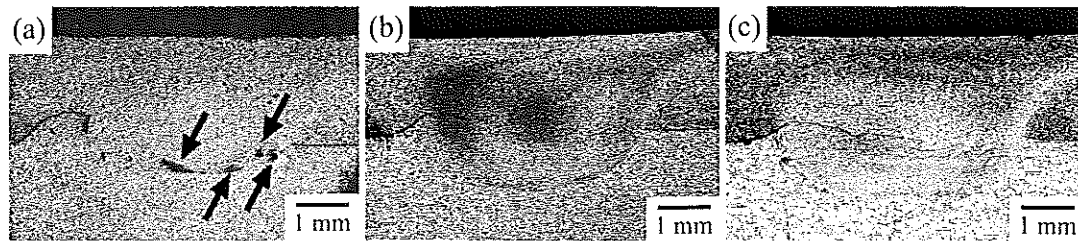


Fig. 10 Macrographs in lap joint section. (a) 600 rpm, 200 mm/min, (b) 1200 rpm, 400 mm/min, (c) 1800 rpm, 600 mm/min.

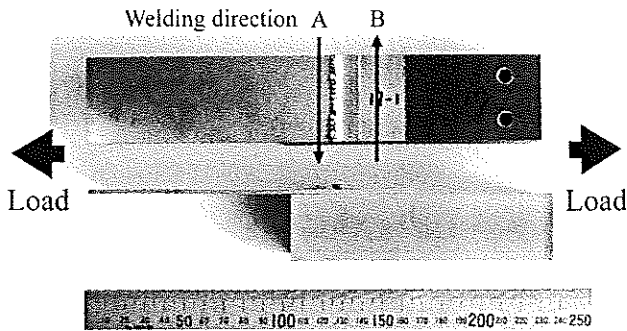


Fig. 11 Appearance of a shear specimen.

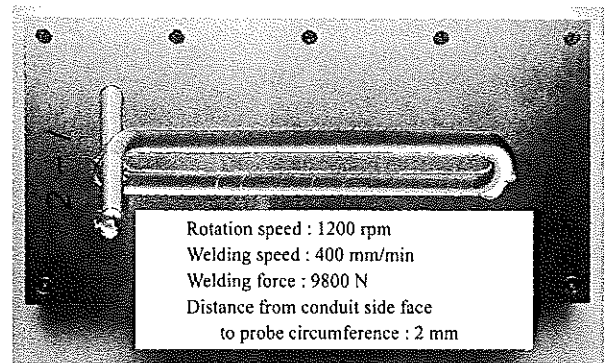


Fig. 12 Water-cooled plate manufactured by FSW.

600~1800rpm, 接合速度 100~600mm/min で行った。Fig. 10 は接合を行った条件の断面マクロ組織の一例を示す。図中で向かって左側が後退側（以後 RS (Retreating Side) と略す) で右側が前進側（以後 AS (Advancing Side) と略す) である。接合を行った結果, すべての条件で上板と下板が攪拌されており, 上板と下板の境界部分での攪拌部幅は, 回転数が高くなるほど, あるいは接合速度が低くなるほど, 広くなる傾向にあった。回転数 600rpm の条件では図の矢印で示すような攪拌不良によって発生したマクロ欠陥が観察された。その他の条件では, マクロ欠陥は観察されなかったが, すべての条件において主に RS にマイクロ欠陥が観察された。また, ツール回転数 1800rpm では, 長尺物の接合の場合, 工具の温度がかなり上昇し, 接合不良が生じる可能性があるため, 以後の評価試験では回転数 1200rpm で接合した試料を用いることとした。

重ね合せ接合後の機械的性質を調べるため, Fig. 11 に示すように, 接合材を幅 40mm に切出し, 接合線に対して垂直方向にせん断試験を行った。接合条件はツール回転数 1200rpm で固定し, 接合速度を 400mm/min および 100mm/min とした。接合方向によって強度が変わる可能性もあるため, それぞれ二つの接合方向 (図中 A 方向, B 方向) でせん断試験を行った。その結果, AS が溝側面になるように接合した 1200rpm, 400mm/min, B 方向が最も高い破断荷重 (17.3kN) を示した。なお最も強度の低かったのは 1200rpm, 400mm/min, A 方向で接合した条件であった (14.5kN)。また, せん断試験時の破断箇所は, すべての試験片において溝側接合領域 (攪拌領域) 端部付近であった。試験片は上板と下板の接合界面で剥離することなく板厚方向に破断していたことから, 接合界面は完全に攪拌され, 良好な接合強度を有していたと考えられる。また, 組織観察より, ミクロ欠陥が RS において観察されたため, 応力が集中する溝側接合領域端部が AS となる接合条件がより高いせん断強度を示したと

考えられる。

4.2 FSW の施工と加圧試験

前節のせん断試験で最も高い強度を示した条件である, ツール回転数 1200rpm, 接合速度 400mm/min, B 方向で接合し, 簡易水冷プレートを作製した。また, 接合後の耐圧性は, 溝側面と接合部との距離に依存すると考えられるので, 溝側面からプローブまでの距離を 1mm, 2mm, 4mm の 3 段階に分けて接合を行った。なお, 接合中のツール位置・姿勢は NC 言語で記述したプログラムで制御している。試料外観を Fig. 12 に示す。試料表面には欠陥は見られず, 良好に接合ができた。

はじめに, 接合した簡易プレートの気密性を調べるため, 0.49MPa (5kgf/cm²) の空気圧を加えて水中に 5 分間放置し, 空気の漏れを調べた。いずれのプレートからも連続した気泡の発生は観察されず, 気密性に問題はなかった。

次に, 簡易プレートの耐圧性を調べるために, 水圧試験器によって加圧し, その変化を観察した。「給水装置の構造及び材質の基準に関する省令」では, 「1.75MPa の静水圧を 1 分間加えたときに, 水漏れ, 変形, 破損その他の異常を生じないこと」と規定されている。今回, 同条件で試験を行ったところ水漏れ, 変形等が生じることはなく, 製品使用上十分な強度を持つことが確認できた。最後に, 製品の破壊強度を調査した。試験結果を Table 2 に示す。また, Fig. 13 には溝側面とプローブ外周との距離が 2mm の試料における耐圧試験後の接合断面マクロ組織を示す。表に示すように, プローブ外周が溝側面から離れるに従い, 破断強度が劣ることが明らかになった。特に間隔が 1mm の場合には, 試験器の能力の限界を超えていたため, 破壊まで至らなかった。接合位置によって破断強度が異なるのはモーメントの違いによるものであると考えられる。しかし, プローブ外周が溝側面から 4mm 離れているプレートでも, 省令に規定されている水

Table 2 Compression strength in various welding conditions

Sample	Distance from wall surface (mm)	Max. water pressure (MPa)	Shape deformation of joint line		Failure of sample
			Straight portion	Curve portion	
1	1	25	○	○	Not failed
2	2	23	○	○	Failed
3	4	17	○	○	Failed

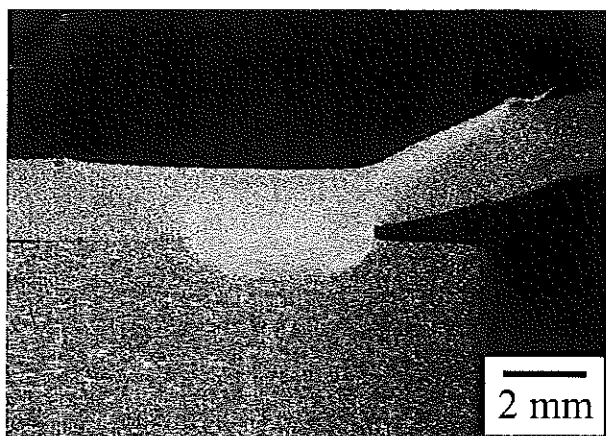


Fig. 13 Macrograph in lap joint section after pressure test.

圧よりも十分高い耐圧強度を持っていることが明らかとなった。以上のように、5軸制御による2次元重ね合せ接合によって、十分な耐圧強度を持つ製造工程の少ない安価な水冷プレートを製作することに成功した。

5. まとめ

工業的価値の高いFSW技術の中小企業への技術普及が求められる中、都市エリア産学官連携促進事業に参画していた多数の中小企業の中で、実用化開発を行った一部の例を紹介した。今回紹介したように、中小企業が取扱う小型製品に対してFSWを施す場合には、被接合材の形状に起因した問題があり、大型製品の製造時には配慮する必要のなかった接合方法の工夫が必要となる。本研究において、特殊形状を持つ接合部材のFSW法案を提案するとともに、重ね合せ接合に関する基礎データを収集し、小型製品の実用化開発に活用することができた。

謝 辞

本研究は文部科学省「FSWに関する大阪東部都市エリア産学官連携プロジェクト(2004-2007)」による成果の一部である。関係諸氏に感謝の意を表します。特に、株式会社下西製作所ならびに株式会社中田製作所の関係諸氏には多大なご協力を賜りました。ここに深甚なる謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) C. J. Dawes, W. M. Thomas: Weld. J., 75-3 (1996), 13-16.
- 2) 佐藤 裕, 粉川博之: まてりあ, 42 (2003), 214-220.
- 3) 加藤数良, 時末 光, 北原孝施: 軽金属, 55 (2005), 259-264.
- 4) 熊井真次, 二木秀幸, 朱 洪: 軽金属, 55 (2005), 507-512.
- 5) 中田一博, 居軒征吾, 長野喜隆, 橋本武典, 成願茂利, 牛尾誠夫: 軽金属, 51 (2001), 528-533.
- 6) 柴柳敏哉, 前田将克, 奈賀正明: 軽金属, 56 (2006), 347-353.
- 7) 東山実樹, 篠田 剛, 竹上弘彰: 軽金属, 56 (2006), 533-537.
- 8) 藤井英俊: 軽金属溶接, 43 (2005), 325-332.
- 9) 岡村久宣, 青田欣也, 高井英夫, 江角昌邦: 軽金属溶接, 41 (2003), 191-202.
- 10) 平野 聡: 軽金属溶接, 43 (2005), 565-569.
- 11) 熊谷正樹, 田中 直: 軽金属溶接, 39 (2001), 22-28.
- 12) M. R. Johnsen: Welding J., 78 (1999), 35-39.
- 13) M. Tsujikawa, S. W. Chung, M. Tanaka, Y. Takigawa, S. Oki, K. Higashi: Mater. Trans., 46 (2005), 3081-3084.
- 14) M. Tsujikawa, Y. Abe, S. W. Chung, S. Oki, K. Higashi: Mater. Trans., 47 (2006), 1077-1081.
- 15) S. Oki, Y. Okawa, M. Tsujikawa, Y. Marutani, K. Higashi: Mater. Sci. Forum, 539-543 (2007), 3850-3855.
- 16) Y. Takigawa, J. Kobata, H. Tsuda, K. Higashi: Mater. Sci. Forum, 558-559 (2007), 1449-1452.
- 17) M. Ikeda, S. Hasegawa, S. W. Chung, K. Higashi: Proc. of 6th International Friction Stir Welding Symposium, (2006).
- 18) 大川裕蔵, 谷口正志, 杉井春夫, 丸谷洋二: 溶接技術, (2007), 71-75.
- 19) T. Hirata, T. Oguri, H. Hagino, T. Tanaka, Y. Takigawa, K. Higashi: Mater. Sci. Eng. A, 456 (2007), 344-349.
- 20) T. Hirata, T. Tanaka, S. W. Chung, Y. Takigawa, K. Higashi: Scripta Mater., 56 (2007), 477-480.
- 21) S. Hirano, K. Okamoto, K. Aota: Proc. of 3rd International Friction Stir Welding Symposium, (2001).