

## 新摩擦接合技術による各種 Al 合金の各種断面形状継手の開発

### Development of Some Kinds of Aluminum Alloy Joints with Various Cross-Sectional Shapes by New Friction Welding Method

	川口 翼	摂南大学理工学研究科
	胡 永波	摂南大学理工学研究科
	辻野良二	摂南大学理工学部 機械工学科
	植田芳昭	摂南大学理工学部 機械工学科
	井口 学	大阪電気通信大学工学部
KAWAGUCHI, Tubasa		Graduate School of Engineering, Setsunan University
HU, Yongbo		Graduate School of Engineering, Setsunan University
TSUJINO, Ryoji		Department of Mechanical Engineering, Setsunan University
UEDA, Yoshiaki		Department of Mechanical Engineering, Setsunan University
IGUCHI, Mababu		Department of Mechanical Engineering, Osaka Electro-Communication University

#### Abstract

For the purpose of improving the defect of conventional friction welding method, new friction welding technology has been examined. New method has an intermediate material for friction between joint specimens. In addition to the experiment, the thermal elastic-plastic stress analysis by the finite element method has been carried out to search the suitable welding conditions. In this study, joints with various cross-sectional shapes except round shape such as square and rectangular using some kind of aluminum alloys were investigated. As a result high efficiency joints could be produced.

**キーワード：**摩擦接合、正方形断面継手、アルミニウム合金、数値解析

**Keywords:** friction welding, square cross sectional joint, aluminum alloy, numerical simulation

#### 1. 緒言

現行の摩擦圧接法では、異形断面材の接合は種々試みられているものの①ブレーキ式摩擦圧接機では圧接面の位相を合わせて回転を停止させることは困難であること、②位相制御型の摩擦圧接機<sup>(1)</sup>のような特殊な装置を用いた研究も行なわれているが、簡便には用いることはできないこと、③断面形状が異形の両側金属部材の位相を一致させ、金属部材の間に同種の素材(インサート材)を挿入してそのインサート材を回転し摩擦発熱させそのまま接合する方法<sup>(2)</sup>では、インサート材近傍に切欠き状の欠陥が残存することなどにより課題が多い。なお、この方法で異形の異種継手を製作するのは適切な材質のインサート材が存在する場合に限られる。

筆者らは、接合金属部材の両側での摩擦熱制御によって融点や変形抵抗の大きく異なる異種金属の接合を可能とし、さらに異形断面、大型断面でも可能な接合法として、摩擦用

の中間部材を配した新しい技術を考案しこれまで研究してきた。本報では、各種アルミニウム合金を用い、円形断面以外の継手の製造を試みた結果について報告する。

## 2. 新技術および実験装置の概要

### 2-1 新技術の考え方<sup>(3) (4)</sup>

本研究では、次のような接合方法を採用した。Fig.1 に示すように接合する両金属部材（以後 A、B 材と呼ぶ）の接合面の間に、高融点又は高強度の中間部材（以後 IM=intermediate material と呼ぶ）を挿入して摩擦圧力を負荷しながら運動させて両金属部材の接合面に摩擦熱を発生させ、A、B 材の接合面が軟化した状態で IM を抜き取り、A、B 材にアップセット圧力を加えることで接合面を圧接するという方法である。

また、A、B 材ごとの摩擦熱制御は IM の両面の材質を変え摩擦係数を変化させることや摩擦圧力をおのおの設定することによって行う。

なお、IM の運動として回転運動は採用せず、並進運動さらにそれを改良し、面内の直交軸方向の並進運動を合成した公転運動を採用した。

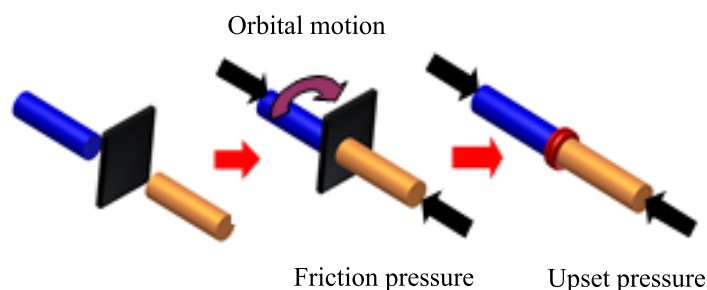


Fig. 1 Schematic diagram of new process

### 2-2 実験設備

実験装置の全体図を Fig.2 に示す。Fig.2 中に A、B 材 (Specimen)、IM (Intermediate material)、IM の回転用のモータ (Oscillation motor of intermediate material)、トルクメータ (Torque meter)、アップセット圧力負荷部 (Upset pressure device)、A、B 材を把持するチャック (Chuck)、IM 抜き取り装置 (Pulling out unit of intermediate material) の位置関係を示している。

なお、IM の公転運動の原理を Fig.3 に示す。公転運動は、並進運動を直角の 2 方向について組み合わせ互いの位相を  $\pi/2$  ずらすことにより実現できる<sup>(5)</sup>。設備仕様として、IM の回転数は最大 6000rpm、公転運動の A 材中心からのずれは 0.8mm とした。実際には IM が公転運動するが、IM の公転運動の軌跡は複雑であるので、相対運動として A 材 (丸棒の例) が公転運動すると仮定した場合の図を Fig.4 に示す。Fig.4 中 A 材の中心の位置を C で A 材の公転運動の中心を C' ( $CC' = 0.8$ ) で示し、公転運動の領域を斜線で示した。したがって、例えば直径 10mm の A 材を用いると公転の直径は 11.6 ( $=10+2 \times 0.8$ ) mm となる。摩擦圧力とアップセット圧力はおのおの最大 70MPa、700MPa である。

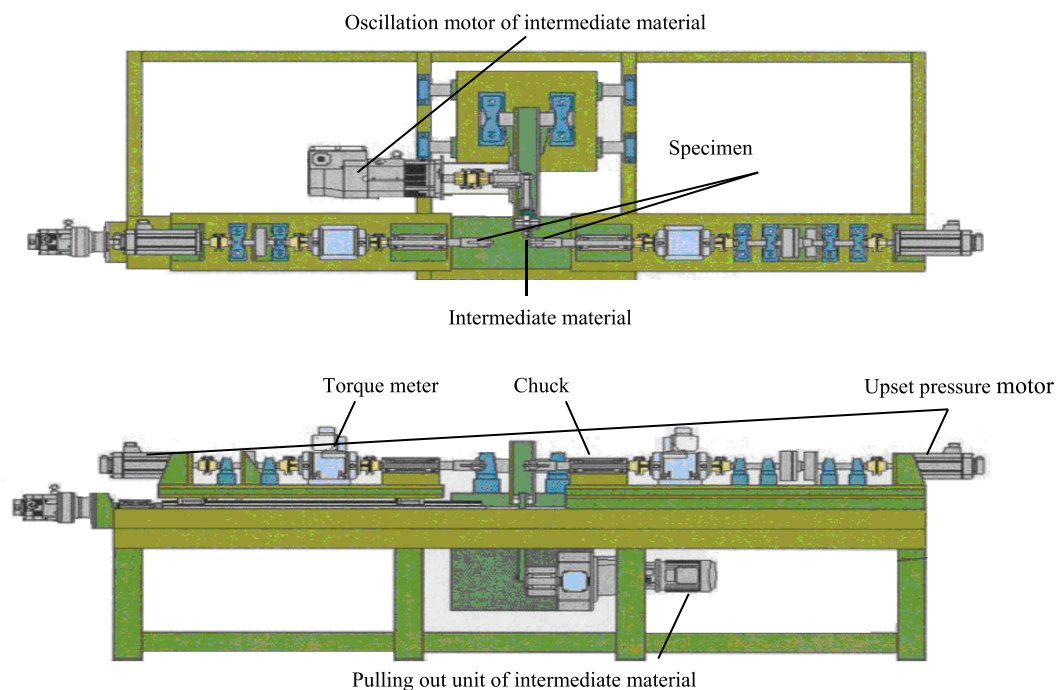


Fig. 2 Experimental equipment of new friction welding method

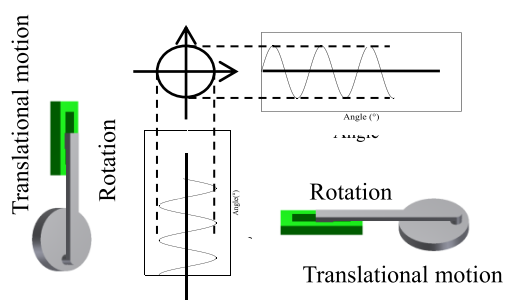


Fig. 3 Concept of orbital motion of IM

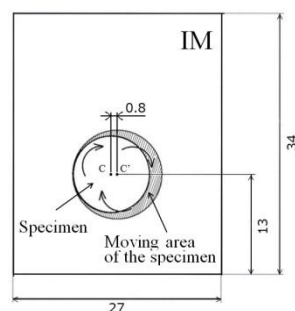


Fig. 4 Moving area of specimen relative to moving IM (C: center of specimen, C': center of orbital motion,  $CC' = 0.8 \text{ mm}$ )

### 3. 実験方法

#### 3-1 実験条件

実験に使用した供試材は、A6063-T5 アルミニウム合金（正方形  $10 \times 10$ ）、A2017-T4 ジュラルミン（正方形  $7 \times 7$ 、長方形  $8 \times 10$ ）である。IM は、S50C 鋼で寸法は  $34 \times 27 \times 6$  である。A6063、A2017 アルミニウム合金と S50C の化学組成を Table 1 に示す。IM に S50C を選択した理由は、A、B 材と IM が同種金属では焼き付きが生じ摩擦発熱が不安定、不十分となるためアルミニウム合金系は適しておらず、またアルミニウム合金より高融点、高強度の材料という意味で S50C 鋼を用いた。

Table 1 Chemical compositions of the materials (mass %)

(a) Aluminum alloys

Material	Si	Fe	Cu	Mg	Cr	Zn	Al
A6063	0.43	0.35	0.01	0.51	0.1	—	Bal.
A2017	0.40	0.30	4.30	0.50	0.2	0.1	Bal.

(b) Steel

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Fe
S50C	0.51	0.2	0.72	0.05	0.02	0.07	Bal.

実験の温度測定には、放射温度計 (KEYENCE FT-H40K) と熱電対を用い、接合部材界面から 2mm 位置の表面を測定した。引張試験 (SHIMAZU AG-250KN) は、接合試験後、約 24 時間自然冷却後に行った。

### 3-2 数値解析手法

解析ソフト：ANSYS<sup>(6)</sup>を用い摩擦発熱温度やその温度での変形抵抗（引張強度）に及ぼす操作条件の影響を検討した。解析は非定常伝熱・非線形構造解析を同時に連成（強連成）させて行った。摩擦発熱温度やその温度での変形抵抗に及ぼす操作条件の影響を検討した。

## 4. 実験結果および考察

### 4-1 A6063 アルミニウム合金

10×10 正方形断面試料について、摩擦圧力 7–8MPa、摩擦時間 1.5–3.5s、回転数 3000rpm、アプセット圧力 100–120MPa の条件で種々変更し、IM は S50C を用いて実験を行った結果、Fig. 5 に示す継手が得られた。この場合の条件は摩擦圧力 8MPa、摩擦時間 3s、回転数 3000rpm、アプセット圧力 120MPa の条件で継手効率 90% と良好であった。

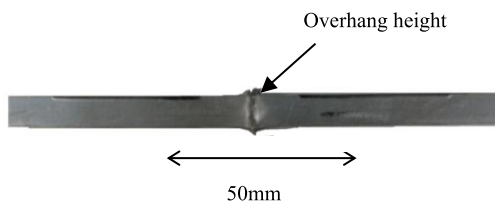


Fig. 5 Appearance of the welded joint

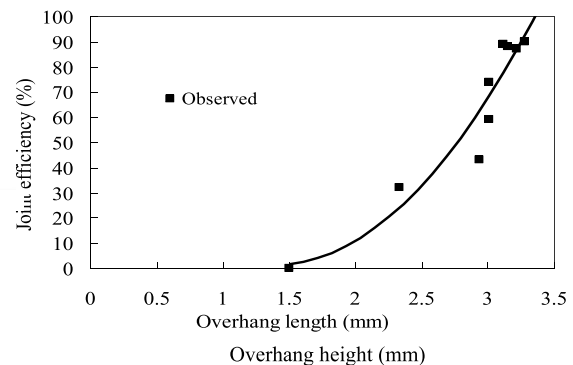


Fig. 6 Relationship between joint efficiency and overhang height

なお、Fig. 5 に示す接合界面での盛り上がり高さ (overhang height) が大きいほど継手効率  $\eta$  は大きくなっており相関がみられる (Fig. 6)。したがって高い継手効率を得られる最小限の盛り上がり高さが認められ、熱影響部の発生観点から過剰なバリ (盛り上がり高さ) は抑制されることが望ましいことから界面の盛り上がり高さは品質指標になると考えられる。

摩擦時間 3s での A 材と IM の接触界面の温度分布 (計算) を Fig. 7 に示す。なお、前述のように放射温度計と熱電対を用い、接合部材界面から 2mm 位置の表面を測定しているが、計算結果と実測値が対応しており計算の妥当性を別途確認している。Fig. 7 より A 材の界面の中心に比べ界面の表面 (正方形一辺の中心) さらには、界面のコナ (正方形の対角線と辺が交わる点) は抜熱のため温度が低いことがわかる (なお、Fig. 7 中 A 材の界面温度に記号\*、◇、◆をおのおの、中心、表面、コナとして記した)。また、IM 材では摩擦領域 (円周直径 11.6mm、コナ直径 16.4mm) の周囲に抜熱されているが、A 材に比べ温度が高く保持されている。これは、Al の熱伝導率に比べ Fe のそれが低いためである。なおここで円周直径とは正方形の一辺の長さ、コナ直径は対角線の長さを示す。

また、摩擦過程での温度が、A 材界面の中心部で 185°C (液相線 655°C) と低いにもかかわらず接合が十分に行われているのは一種の固相接合であり、バリの発生 (盛り上がり高さ) が小さいことと対応している。

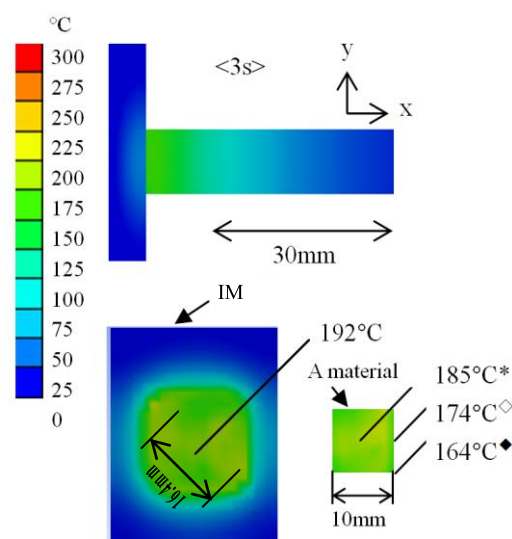


Fig. 7 Calculated temperature distribution during friction stage (friction pressure 8MPa, rotation number 3000rpm  
\*:center, ◇: surface, ◆:corner at the interface of the specimen )

摩擦過程での正方形断面の中心 (0y0x)、正方形断面の一辺の中心(0y5x)、正方形断面の対角線と辺が交わる点であるコーナ (0y5x (corner)での接合界面からの位置の変形抵抗の変化を Fig. 8 に示す。

界面および近傍では界面の中心に比べ、一辺の中心、特にコーナで変形抵抗が高くなっていることがわかる。一般に、現行の摩擦圧接法でしばしばみられるように界面が液相線に達する場合は、接合の機構としては原子の拡散の寄与があると思われるが、本研究結果のような液相線に達しないで液相線の 1/2 以下の低温での接合では、原子の拡散の寄与は小さく、A、B 材の互いの塑性変形によって接合が起こると考えられる。つまり摩擦発熱によって A、B 材界面およびその近傍が軟化し（変形抵抗が低下し）、アプセット圧力を負荷することにより A、B 材が互いに塑性変形し接合すると考えられる。コーナでは中心部に比べ低温で変形抵抗が高かったため A、B 材間の塑性変形が十分でなかった可能性が考えられる。

すなわち、今回の試作試験では摩擦発熱量（摩擦圧力、回転数）またはアプセット圧力が不足しコーナ部の接合が劣ったため 100%の継手効率とはならなかったと考えられる。次ステップとしてより摩擦発熱量やアプセット圧力を高めさらなる良質継手の開発につなげたい。

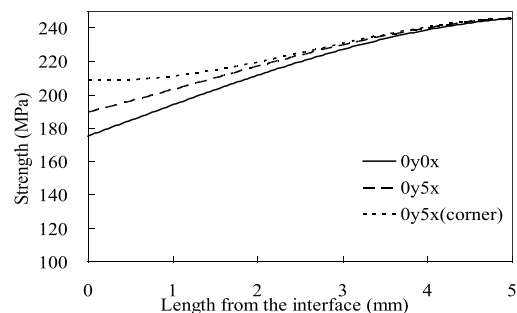


Fig. 8 Change of tensile strengths at the center, surface and corner of the cross section from interface during friction stage

#### 4-2 A2017 ジュラルミン

7 × 7 正方形断面試料および長方形 8 × 10 断面試料について、摩擦圧力 20-35MPa、摩擦時間 3-10s、回転数 40000rpm、アプセット圧力 200MPa の条件で種々変更し、IM は S50C を用いて実験を行った。

なお、7 × 7 正方形断面試料は、10 φ 丸棒の先端 5mm を 7 × 7 正方形断面に加工し接合を行った。その結果、正方形 7 × 7 断面試料については継手効率 90%の、長方形 8 × 10 断面試料については継手効率 96%の良好な継手が得られた。この時の試験条件は 7 × 7 正

形断面試験片が摩擦圧力 20MPa、摩擦時間 10S、回転数 40000rpm、アップセット圧力 200MPa であり、8×10 長方形断面試験片については、摩擦圧力 35MPa、摩擦時間 4S、回転数 40000rpm、アップセット圧力 200MPa である。これらの外観写真を おのこの Fig. 9、10 に示す

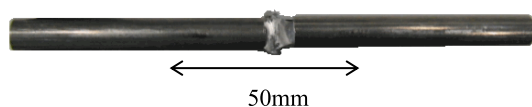


Fig. 9 Appearance of the welded joint  
(7×7 square) (friction pressure=20MPa, friction time=10S, rotation number=40000rpm, upset pressure=200MPa)

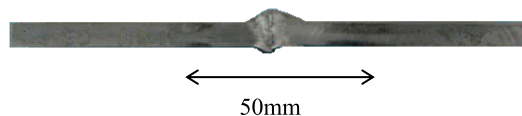


Fig. 10 Appearance of the welded joint  
(8×10 rectangle) (friction pressure=35MPa, friction time=4S, rotation number=40000rpm, upset pressure=200MPa)

## 5. 結言

接合する両金属部材の間に摩擦用中間材を配し公転運動することにより接合面に摩擦熱を発生させ、瞬時に中間材を抜き取った後、アップセット圧力を加えることで接合面を圧接するという新しい方法を考案し、A6063 および A2017 アルミニウム合金を用いて角型継手を製作した。さらに最適摩擦接合技術の追求のため熱弾塑性応力解析を行い、良質継手の製造のための知見を得た。

- (1) 現行摩擦圧接法では困難な角型継手について正方形断面 (A6063 および A2017) および長方形断面 (A2017) について継手効率 90%以上の継手が製作できた。
- (2) 接合界面の盛り上がり高さ (overhang height) と継手効率の間には相関がみられ、盛り上がり高さが大きいほど継手効率が高い。今回の実験では盛り上がり高さ 3.2mm で継手効率 90%となる。
- (3) A6063 の場合、摩擦過程での試験片の温度が、中心部で 185℃ (液相線 655℃) と低いにもかかわらず接合が十分に行われているのは一種の固相接合であり、バリの発生 (盛り上がり高さ) が小さいことと対応している。

## 参考文献

- (1) 加藤数良, 時末光, 「6063 アルミニウム合金角材の位相制御摩擦圧接継手の機械的性質」, 日本軽金属学会予稿集, 100(2001), pp.229-230.
- (2) 木村真晃, 藤井利充, 日下正広, 瀬尾健二, 「インサートライフ 摩擦圧接法により接合した角棒継手の機械的性質」, 溶接学会論文集, 25-2 (2007), pp.343-352.
- (3) Takeshi Higashi, Ryoji Tsujino, Kiyoshi Matsuura, Yoshiaki Ueda and Mnamabu Iguchi, “Numerical Simulation of New Friction Welded Joints”, *J. of Mechanics Engineering and Automation*, 3 (2013), pp.595-601.
- (4) Ryoji Tsujino, Takeshi Higashi, Kiyoshi Matsuura, Yoshiaki Ueda and Mamabu Iguchi, “The Friction Welding Method with Intermediate Material”, *J. of Mechanics Engineering and Automation*, 3 (2013), pp. 677-684.
- (5) 斎藤秀雄, 「機械力学」, 朝倉書店, (1988).
- (6) 「工学解析のための ANSYS 入門」, 理工学社, (2005)

---

【原稿受付】2015 年 7 月 30 日、【掲載決定】2015 年 9 月 28 日

【著者連絡先】

辻野良二 摂南大学、教授 e-mail:tsujino@mec.setsunan.ac.jp

〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町 17-8 摂南大学理工学部 機械工学科