

## 研究論文

## 塑性加工を応用したアルミニウム合金の新生面接合技術

永縄勇人\*1、津本宏樹\*1、廣澤考司\*1、宮本晃吉\*1、福原徹\*2

## Forming Technology of Fresh Surface Joining for Aluminum Alloy

Hayato NAGANAWA\*1, Hiroki TSUMOTO\*1, Kouji HIROSAWA\*1,  
Koukichi MIYAMOTO\*1 and Toru FUKUHARA\*2

Industrial Research Center \*1\*2

板厚 2.3mm のアルミニウム合金(A5052)に対して塑性加工を利用した新生面接合の検討を行った。ダイクッションを活用することで新生面接合が可能となり、ショットブラスト処理を施すことで倍以上の接合力が得られた。成形モーシヨンの検証の結果、速い成形で加工発熱を促しつつ、下死点で一時停止させ、圧力と拡散時間を制御する方法が効果的であった。また、凸状のダイクッションを用いることで接合力が向上し、最大で 2.2kN の接合力が得られた。

## 1. はじめに

金属の接手法は多岐に渡り、様々な部材で用いられている。それぞれ長所短所が存在し、溶接では高い接合強度を持つ反面、接合できる金属種の制限や反りなどの熱による悪影響といった問題がある。摩擦攪拌接合(Friction Stir Welding : FSW)では熱による悪影響といった問題はないが、溶接と同様に接合できる金属種に制限があり、加工時間の長さによる生産性の低さもある。かしめやボルトなどを利用した機械的な接合では、信頼性の高い接合にするためには多数の部品や加工が必要であり、製品重量が重くなってしまふ。

上記問題を解決するため、高い生産性を有する塑性加工を応用した新生面接合技術に注目した<sup>1)</sup>。この接手法では、塑性加工によって生成した新生面同士を加圧して圧着することで接合するため、多くの金属を高強度に接合することができ、接合が困難である異種金属接合も可能とする。しかし、まだ技術的な知見がほとんどなく、最適な接合の条件はよくわかっていない。また、使い捨てを前提とした変形金型を用いた技術であるため、コストが高いといった課題もある。そこで本研究では、金型のダイクッションに注目し、接合時に背圧を制御することで変形金型の代用を試みた。接合試料には、アルミニウム合金の中でも中間程度の強度を示し、成形性、耐食性、溶接性に優れたアルミニウム合金 A5052 を対象とし、接合条件を検討した。また、塑性加工用 CAE(Computer Aided Engineering)を用いて接合条件の解析を行い、接合試料の変形による新生面の生成具合も検証した。

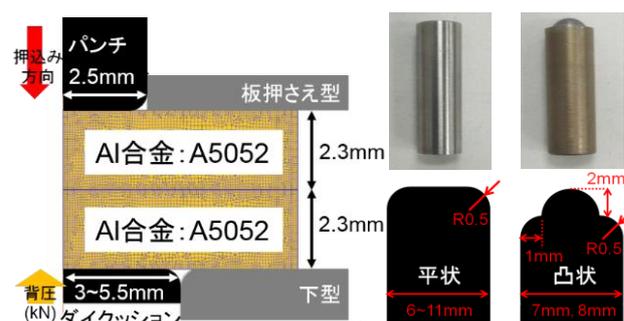
## 2. 実験方法

## 2.1 接合試料

接合試料には、アルミニウム合金(A5052、150×50×2.3mm)を用いた。前処理として各試料の表面を十分に洗浄し、ショットブラスト(アルミナ、平均粒径：106~125 $\mu$ m)処理を行った。また、比較としてショットブラスト処理を施さない試料も準備した。

## 2.2 接合条件

図 1 に示す金型(ユーアイ精機(株)製)により、サーボプレス機((株)アマダ製、SDE1522)を用いて表 1 に示す条件で接合した。



(a) 金型概略図(1/2 モデル) (b) ダイクッション形状

図 1 金型とダイクッション形状

## 2.3 接合の評価

## 2.3.1 十字引張試験

試験には万能試験機((株)島津製作所製、AG-100kNIS)を用い、JIS Z 3137(抵抗スポット及びプロジェクト溶接継手の十字引張試験に対する試験片寸法及び試験方法)に準ずる方法により接合力を測定した。

\*1 産業技術センター 金属材料室 \*2 産業技術センター 金属材料室(現産業技術センター 瀬戸窯業試験場 セラミックス技術室)

表 1 接合条件

接合条件	A	A'	B	C	D	E	F
ストローク距離(mm)	225		225	225	225	225	225
背圧(kN)*	0~25		20.1	20.1	20.1	20.1	20.1
ショットブラスト処理	有	無	有	有	有	有	有
パンチ押し込み量(mm)	~4.0		3.8	3.8	3.8	3.8	3.8
毎分ストローク数(spm)	10		0.5~50	10	0.5~50	50	50
下死点での停止時間(sec.)	0		0	0~10	10	10	10
ダイクッション径(mm)	7		7	7	7	6~11	7, 8
ダイクッション形状	平状		平状	平状	平状	平状	凸状

※CAE 解析を用いて算出した。

### 2.3.2 接合面観察

接合部中央で切断して樹脂に埋め込み、切断面を研磨・バフによって鏡面処理することで接合断面の試料を作製した。作製した試料は顕微鏡を用いて観察した。

### 2.3.3 CAE 解析

CAE 解析には塑性加工用 CAE ソフトである DEFORM(Scientific Forming Technologies Corporation 社製)を用い、二次元で 1/2 モデルの有限要素法で計算した。金型モデルは簡易形状で作成し、計算領域も接合試料(150×50×2.3mm)の内 28×28×2.3mm とした。通常、摩擦法則はせん断摩擦則とクーロン摩擦則の 2 法則でモデル化されるが<sup>2)</sup>、本解析では摩擦せん断係数のみで計算を行った。計算パラメータについては表 2 に示す。

表 2 計算パラメータ

パンチ、板押さえ型、 下型、ダイクッション		剛体
接合試料		弾塑性体 <sup>※1</sup>
変形抵抗		n 乗硬化則 <sup>※1</sup>
各接合試料の初期メッシュ数		2000
工具 動作	パンチ 板押さえ型	等速(1mm/min) 一定荷重(8kN)
摩擦 せん断 係数 (m)	パンチ-接合試料間	m = 0.95
	板押さえ型-接合試料間	m = 1
	下型-接合試料間	m = 1
	ダイクッション-接合試料間	m = 0.1
	接合試料-接合試料間	m = F(S) <sup>※2</sup>

※1 ソフト内標準データ:ALUMINUM-5052[20-480℃]

※2 S: 表面積拡大比

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 CAE 解析の摩擦せん断係数の同定

正確な CAE 解析のためには摩擦係数の同定が必要である。本研究では摩擦せん断係数を同定するため、予備実験で作製した試料と比較して各摩擦せん断係数を算出

したが、接合試料間の摩擦せん断係数に関しては図 2 に示すような面積拡大比の関数となった。この理由として、接合面の滑りの影響や新生面の生成に伴う局所的な圧着の影響が考えられる。変形によって接合面が滑るとき、つまり面積拡大比が 1 を超えたとき、摩擦せん断係数は静止状態から運動状態に変わるため減少する。また、新生面の生成が増加、つまり面積拡大比が増大するに伴い圧着量も増加し、滑り時の摩擦せん断係数は増加していく。しかし、徐々にせん断摩擦則に支配され、一定の値に飽和していく。

接合条件 A'(背圧 14.1kN、パンチ押し込み量 3.5mm)で作製した試料とこのモデルを用いて計算した結果を比較したところ、図 3 に示すように接合形状や界面形状でよく一致した結果が得られた。他条件においても同様に実験結果とよく一致した結果が得られ、接合過程の検証が可能となった。

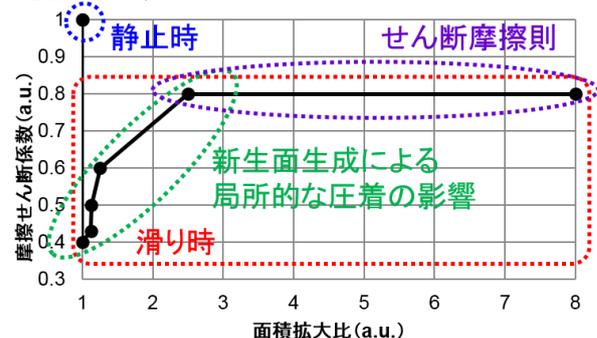


図 2 CAE 解析に用いた摩擦せん断係数

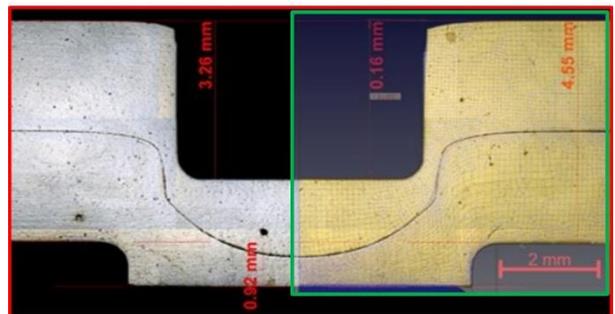
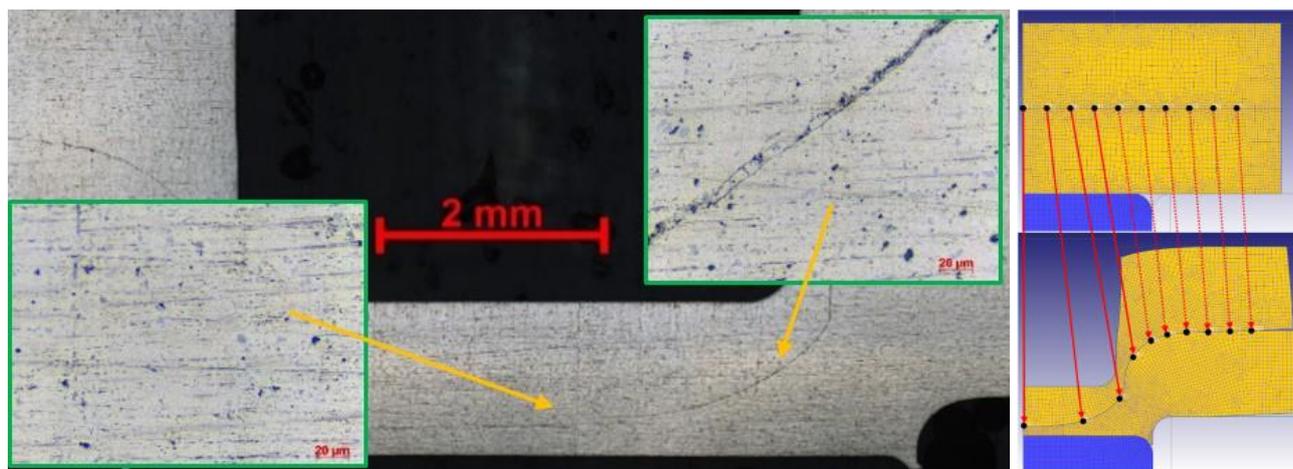


図 3 実験結果(赤枠内)と CAE 解析結果(緑枠内)の比較



(a) 接合断面(パンチ押し込み量 3.8mm)

(b) CAE 解析結果

図 4 接合試料断面(接合条件 A)と CAE 解析結果

### 3.2 接合条件の最適化

#### 3.2.1 背圧が接合に与える影響

接合条件 A で試料を作製して背圧の影響を調査したところ、背圧が 4.5kN~23kN の範囲でのみ試料を作製することができ、接合力を評価できた。背圧 20.1kN で作製した試料の接合面断面を観察したところ(図 4(a))、下板が上板をかきおとさず、中央部付近では界面が消失していた。金属の新生面同士が圧着した場合、金属間の界面は消失して一体化することから、本接合では新生面接合していることが示唆される。また、CAE 解析の結果(図 4(b))、中央部付近が最も大きく伸びている。本接合手法では、表面積の拡大が大きく、新生面の生成が多いほど強固に接合することから<sup>3),4)</sup>、CAE 解析からも整合性がとれる結果が得られた。

#### 3.2.2 表面処理とパンチ押し込み量が接合に与える影響

接合条件 A 及び A' で作製した試料の十字引張試験結果を図 5 に示す。表面処理の 1 つであるショットブラスト処理の有無によって大きく影響を受け、ショットブラスト処理によってどの条件でも倍以上の接合力が得られた。これは新生面の生成を阻害する金属表面のスケール層が除去された影響と推察される。ショットブラスト直後にはスケール層は再生成されるが、非常に薄い層である。そのため、ショットブラスト直後は新生面が容易に生成される環境が整っていると考えられる。

次にパンチ押し込み量との関係を検証したところ、どの背圧の場合でもパンチ押し込み量の増加に伴って接合力が増していき、パンチ押し込み量が 3.5mm 以上では背圧の大小に関わらず同程度の接合力を示した。

また、今回の結果ではパンチ押し込み量が 4mm の時に最も高い接合力が得られたが、パンチに掛かる負荷が常用負荷を超えていた。そのため、以後の実験では常用負荷内であったパンチ押し込み量 3.8mm で検証した。

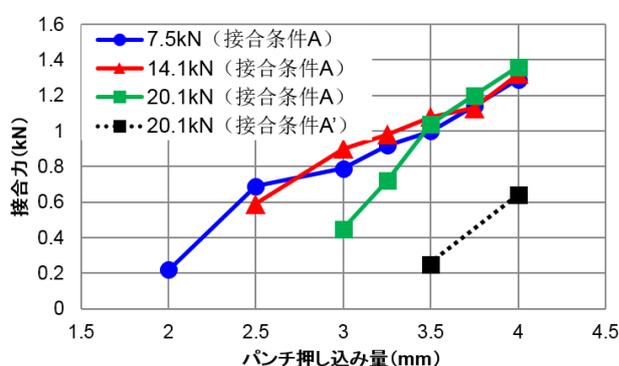
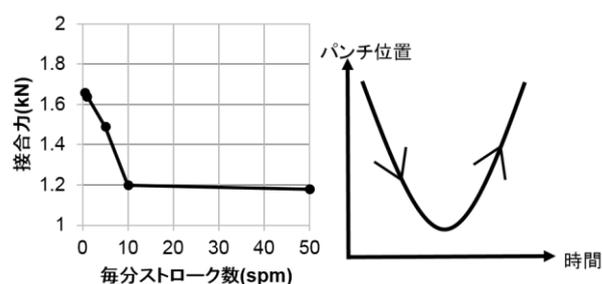


図 5 接合条件 A 及び A' で作製した試料の接合力

#### 3.2.3 成形モーションが接合に与える影響

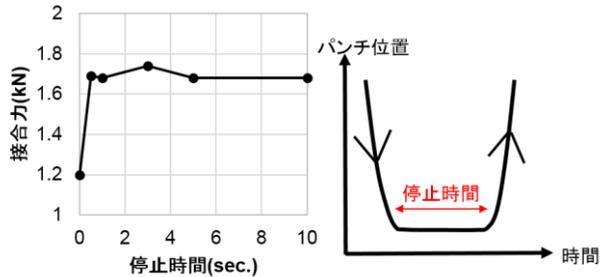
プレス機は 1 分間に何回ストロークできるかで成形速度が決まる。成形速度との関連性を得るために接合条件 B で試料を作製した。その結果、図 6 に示すように、ストローク数が少ない、つまり成形速度が遅いときほど高い接合力を示すことがわかった。



(a) ストローク数と接合力の関係 (b) 成形モーション

図 6 接合条件 B で作製した試料の接合力

次にサーボプレスの特性を利用して下死点で成形モーションを一時停止させ、停止時間との関係进行调查するために接合条件 C で試料を作製した。その結果、図 7 に示すように、0.5 秒以上下死点で成形モーションを停止することで、1.7kN まで接合力が向上した。

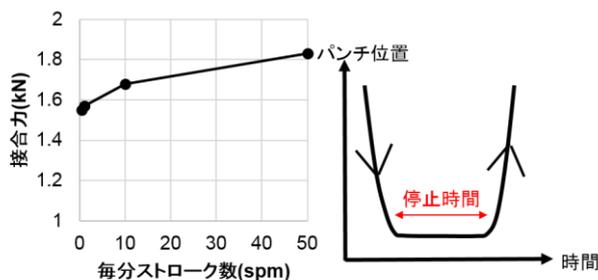


(a) 停止時間と接合力の関係 (b) 成形モーション

図7 接合条件 C で作製した試料の接合力

金属の接合力を高める1つの方法として、金属原子の拡散があり、そのためには温度、圧力及び時間が必要である<sup>5)</sup>。今回、最も高い圧力がかかる下死点付近で一定以上の時間と圧力をかけると接合力が増したことから、接合試料間で拡散が起こった可能性が考えられる。そこで成形速度を変化させ、加工発熱による温度の影響を調査するために接合条件 D で試料を作製した。下死点で成形モーションを一時停止した場合、図8に示すように、加工発熱が大きくなる、つまり成形速度が速い条件ほど高い接合力が得られる傾向にあり、用いたサーボプレス機の最大毎分ストローク数である 50spm のときに最も高い 1.8kN の接合力が得られた。

以上のことから、高い接合力を得るためには、温度、圧力及び時間を同時に制御する成形モーションとする必要があり、速い成形で加工発熱を促しつつ、下死点で一時停止させ、圧力と拡散時間を制御することが有効であった。



(a) ストローク数と接合力の関係 (b) 成形モーション

図8 接合条件 D で作製した試料の接合力

### 3.3 ダイクッション形状が接合に与える影響

接合条件 E 及び F で作製した試料の十字引張試験の結果を図9に示す。平状のダイクッションを用いたところ、ダイクッション径が 7mm のときをピークにし、径の増大とともに接合力が減少していった。次に接合面の変形量が大きく、多くの新生面生成が CAE 解析によって期待できた凸状のダイクッションを検証したところ、接合力の向上が確認でき、ダイクッション径 8mm を用

いたときに本研究の中で最も高い 2.2kN の接合力が得られた。

今後、CAE 解析によって接合条件と接合力との関係からより詳細な接合機構を明らかにし、最適な金型構造を検討していく。

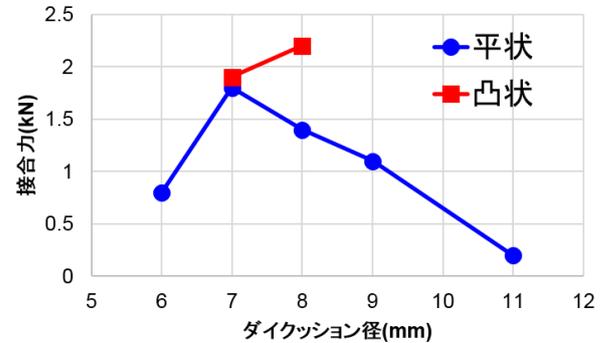


図9 接合条件 E 及び F で作製した試料の接合力

## 4. 結び

本研究の成果は、以下のとおりである。

- (1) 接合面の滑りや新生面の生成に伴う局所的な圧着の影響を考慮した摩擦せん断係数のモデルを用いることで、実験結果と一致する CAE 解析とすることができた。
- (2) 接合試料のショットブラスト処理により、倍以上の接合力が得られた。
- (3) 成形モーションの検討結果から、速い成形で加工発熱を促しつつ、下死点で一時停止させ、圧力と拡散時間を制御する方法が効果的であった。
- (4) ダイクッション形状を凸状へと変更すると接合力が向上し、ダイクッション径 8mm の凸状を用いた場合に 2.2kN の最も高い接合力が得られた。

## 謝辞

本研究の実施に当たって、金型の提供及び修正にご協力頂いたユーアイ精機(株)の水野様にお礼申し上げます。

## 文献

- 1) 石川孝司, 阿部英嗣: 平成 25 年度 A-STEP 研究成果報告, [https://shingi.jst.go.jp/past\\_abst/abst/p/14/1455/a-step4\\_02.pdf](https://shingi.jst.go.jp/past_abst/abst/p/14/1455/a-step4_02.pdf), (2020/05/18)
- 2) 鈴木達博: 岐阜大学博士論文, 博士(工学) 甲第 485 号(2015)
- 3) 特願 2012-163271: 板金結合方法
- 4) 特願 2016-121175: 板金結合方法
- 5) 南埜宜俊: 大阪大学博士論文 (1985)