

アルミニウム異方向テーラードブランクの変形挙動の 解明とそれを用いた r 値評価

京都工芸繊維大学 機械工学系
教授 飯塚 高志
(2019 年度 一般研究開発助成 AF-2019028-B3)

キーワード：塑性異方性，テーラードブランク，アルミニウム

1. 研究の背景と目的

アルミニウム合金テーラードブランクの利用は軽量化と共にコスト低減や精度向上などのメリットが期待できる。アルミニウム合金の摩擦攪拌接合の研究では接合特性に関するものが専らであり、接合材の変形および成形特性に関するものは少ない。しかし、テーラードブランク成形に関する基礎的な知見を得ることは非常に価値がある。

一方、テーラードブランクに関する研究については、その多くは材質や板厚の違いに注目したものであり、材料の方向を考慮して変形や成形特性を研究した例は少ない。同一素材についても、材料の変形抵抗、すなわち塑性係数(F 値)および加工硬化指数(n 値)や塑性異方性、すなわちランクフォード値(r 値)は方向によって異なる。したがって、方向が異なる材料で作製した異方向接合材においても、素材の違いと同じような影響が生じるものと考えられる。

また、一軸引張試験などの成形性試験は、主引張方向とその垂直方向を対称軸とする系が直交対称性を持った試験である。一方、アルミニウムは結晶構造として面心立方格子構造を持ち、純アルミニウムに関しては一般に Cube 方位の集合組織を持つ¹⁾。このような背景から、一般のアルミニウム材料は対称軸を 0° および 90° もしくは 45° および 135° としたおよそ直交四回対称の性質を有する。

試験の系を参照として、材料の対称性が試験の系と近い接合材と異なる接合材では、変形挙動が異なると考えられる。また、異種金属接合材を使用して深絞り成形を行った場合、二種類の金属が異なる異方性を持つため、成形した材料に耳の増大や吸収が発生する²⁾。同種異方向接合材でもこのような挙動が生じるものと考えられる。

そこで本研究では、摩擦攪拌接合によって同一のアルミニウム板から素材を切り出して異方向に接合した異方向テーラードブランクを作製し、一軸引張試験を行った。異方向接合材は引張りの系の対称性と近いものとして、引張方向と接合ビードが垂直なもの(対称試験片)と、異なるものとして、接合ビードに平行なもの(非対称試験片)をそれぞれ作製し、変形挙動の調査および r 値などの力学特性の評価を行った。攪拌領域(接合ビード部)は結晶粒微細化のため、高強度・低延性化するため、試験片の変形に影響を及ぼす。そこで、対称試験片については焼鈍し処理を行い、変形挙動への影響も調べている。

2. 実験方法

2・1 摩擦攪拌接合

本研究ではアルミニウム異方向テーラードブランクの作製に摩擦攪拌接合を用いた。図 1 に、摩擦攪拌接合に使用した工具の形状および接合パラメータの定義を示す。摩擦攪拌接合においては接合工具の形状も重要な要素であるが、今回は単純な段付き丸棒形状とした。この工具の大径部をショルダー部、小径部をプローブと呼ぶことにする。なお、ショルダー部の角には材料押込みの役割を担う様に面取りを施している。段付き面の面取りのない部分の直径をショルダー内径と呼ぶことにする。主な接合パラメータとしては、前進角と工具の押込み量を定義している。前進角は工具の進行方向に対する工具の傾斜角であり、押込み量は板面に対するショルダー面取り部の押込み量である。

接合工具の寸法および接合条件を表 1 に示す。表からわかるように、ショルダー外径を $\phi 4\text{mm}$ 、ショルダー内径を $\phi 2\text{mm}$ とし、面取り角を 5° としている。プローブの直径および長さは共に 1mm とした。前進角は面取り角と同じ 5° とすることで、接合時に面取り部と板面は平行となる。押込み量は 0.05mm 、工具の回転速度は 4000rpm 、接合速度は 125mm/min とした。

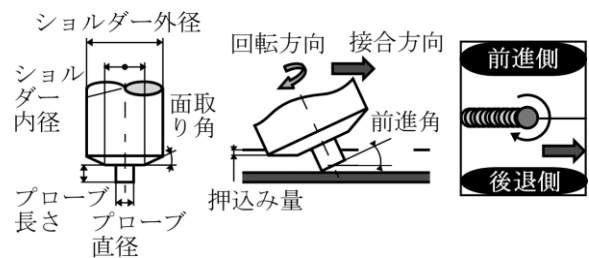


図 1 接合工具の形状および接合パラメータの定義

表 1 接合工具の寸法および接合条件

ショルダー外径/mm	4	前進角/ $^\circ$	5
ショルダー内径/mm	2	押込み量/mm	0.05
面取り角/ $^\circ$	5	回転速度/rpm	4000
プローブ直径/mm	1	接合速度mm/min	125
プローブ長さ/mm	1		

2・2 異方向テーラードブランク

摩擦攪拌接合では、二つの素材で接合工具の回転方向と接合方向の関係が異なる。これらが同じ素材を前進側、逆の材料を後退側と呼ぶことにする。

素材としては、厚さ 1mm の A1050P-0 アルミニウム板を用いた。引張方向に対して圧延方向が 0° 、 45° および 90° となるように素材を切り出し、それぞれ $\alpha 0$ 、 $\alpha 45$ および $\alpha 90$ と呼ぶことにする。対称試験片では、引張り時にチャックの可動側が前進側となるように配置するものとし、可動側に $\alpha 45$ を、固定側（後退側）に $\alpha 0$ を配置した接合材を $\alpha 45/0$ と呼ぶことにする。対称試験片としては、このほかに $\alpha 90/45$ および $\alpha 0/90$ 接合材を作製し、引張試験に用いた。非対称試験片としては、後退側を $\alpha 0$ として、前進側を $\alpha 0$ 、 $\alpha 45$ および $\alpha 90$ にした三種類の接合材を作製し、それぞれを $\alpha 0-0$ 、 $\alpha 45-0$ および $\alpha 90-0$ と呼ぶことにする。

2・3 引張試験とひずみの評価

引張試験には、図 2 に示す JIS5 号試験片を半分にしたものを用いた。試験片の標点間距離は 25mm であり、平行部の幅は 12.5mm である。肩半径は R10mm とし、チャック部の幅は 15mm とした。なお、引張試験は、チャック間距離を 50mm、引張速度を 2mm/min として行った。

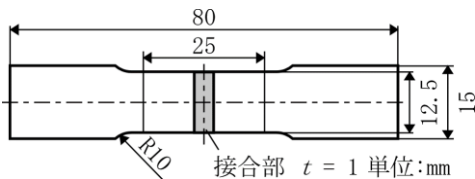
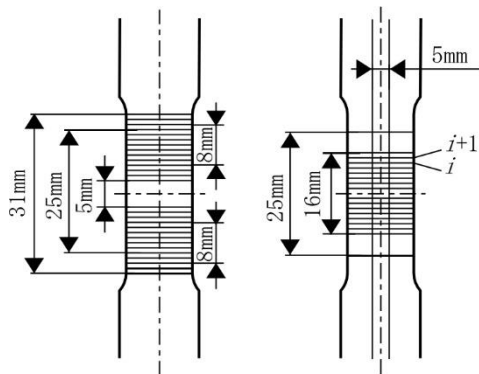


図 2 対称試験片の形状

異方向接合材については、それぞれの方向の材料で変形挙動が異なると考えられる。そこで、試験片の平均的な変形挙動と共に各材料の部分的な変形挙動およびひずみの変化を測定し、評価する必要がある。まず、対称試験片では、図 3(a)のように試験片の長手方向中央（接合ビード部）およびそこから 2.5mm 離れた位置に引張方向と垂直にケガキ線を描き、そこを基準にして 1mm 間隔で 15.5mm の位置まで両側に 14 本のケガキ線を入れ形状測定に用いた。



(a) 対称試験片 (b) 非対称試験片

図 3 形状の測定方法

なお、各材料の部分的な力学特性を中央から 5.5mm (4 番目の線) と 13.5mm (12 番目の線) の間で評価した。

また、非対称試験片については、幅方向中央（接合ビード）から両側に 2.5mm 離れた位置にケガキ線を描き、試験片端とこのケガキ線を用いて幅方向の形状およびひずみ測定を行った。測定位置として、長手方向中央から両側に 1mm 感覚で 8 本のケガキ線を描き、それらを用いてひずみと形状の測定を行った。なお、平均的な力学特性は標線間の平均値として評価した。

試験中は、一軸引張試験中に破断するまで、標線間が 5% 伸びるごとにデジタルカメラで試験片を撮影する。得られた写真について画像処理ソフトウェアを用いてケガキ線の両端の座標、非対称試験片の場合は長手方向に引いたケガキ線上の点の座標も測定し、これらから長手方向および幅方向のひずみを計算した。

2・4 熱処理による接合ビードの軟化処理

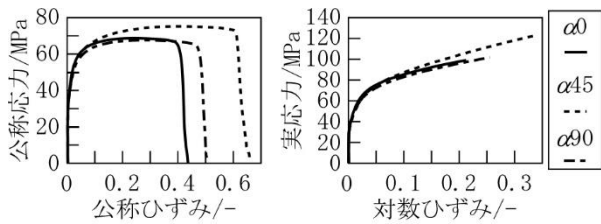
摩擦攪拌接合材について、攪拌部（接合ビード）の結晶粒は微細化されるため、高強度・低延性となった。そこで成形性の低下を抑制する目的で、接合ビードの焼鈍し処理による延性回復を試みた。採用した焼鈍し条件は、それぞれ相当条件として、H26 (180°C, 5 時間)、H24 (220°C, 4 時間)、H22 (240°C, 3 時間) と 0 (350°C, 2 時間) とした。

3. 実験結果

3・1 素材の各方向の力学特性

接合材を実験する前に、参考として素材の引張試験を行った。図 4(a) に素材の公称応力—公称ひずみ線図を示す。図より、 $\alpha 0$ と $\alpha 90$ 材料は同程度の応力レベルを示し、 $\alpha 45$ はそれらより高いことが確認できる。細かく見ると、 $\alpha 0$ の方が $\alpha 90$ より若干応力が高いが、伸びに関しては $\alpha 90$ の方が大きい。一方、 $\alpha 45$ は伸びも最も高いことが見て取れる。図 4(b) に示した実応力—対数ひずみ線図では、公称応力—公称ひずみほどの差は現れていない。ただし、 $\alpha 45$ 、 $\alpha 0$ 、 $\alpha 90$ の順に応力レベルが高い傾向は同じである。

表 2 に素材の力学特性をまとめた。引張強さは最大の $\alpha 45$ に対して 75.1 MPa とやや低めであり、残りの方向はそれより 8 MPa 程度低い値となった。全伸びには差が最も出しており、 $\alpha 45$ で 0.66 とアルミニウムとしては非常に良く伸びている。 $\alpha 90$ で 0.51、 $\alpha 0$ で 0.44 と、 $\alpha 45$ には劣るもののいずれも良い伸びを示した。F 値および n 値については通常の n 乗硬化則で近似したものである。F 値と n 値について $\alpha 0$ と $\alpha 90$ では差がなく、ほぼ同じ大きさと言ってよい。 $\alpha 45$ については、いずれも大きな値となっている。一方、r 値については、一般的な場合とは逆に $\alpha 0$ および $\alpha 90$ で $\alpha 45$ より高い値となった。ただし、 $\alpha 45$ の r 値が異常に低く、これが良い伸びと関係があるように思われる。 $\alpha 0$ および $\alpha 90$ の r 値の大きさは一般の場合と同程度で 0.6 程度であった。



(a) 公称応力-公称ひずみ (b) 実応力-対数ひずみ
図4 素材の応力-ひずみ線図

表2 素材の各方向の力学特性

	$\alpha 0$	$\alpha 45$	$\alpha 90$
引張強さ /MPa	68.6	75.1	67.5
全伸び /-	0.44	0.66	0.51
F /MPa	112	129	111
n	0.18	0.24	0.19
r	0.65	0.20	0.57

3・2 対称試験片の変形挙動

次に異方向接合材の一軸引張試験における変形挙動について調査した。図5に接合材の長手方向のひずみ分布を示す。図は $\alpha 45/0$ 、 $\alpha 90/45$ および $\alpha 0/90$ に対するもので、横軸が長手ひずみ、縦軸が測定位置である。

まず、図5(a)に示した $\alpha 45/0$ について見ると、 $\alpha 0$ が大きく伸びている様子がわかる。ただし、 $\alpha 0$ および $\alpha 45$ のそれぞれではほぼ均一なひずみ分布が観察できる。なお、ビード部はほとんど変形していない。ひずみが15%程度になると、 $\alpha 45$ 側でほとんど伸びなくなり、 $\alpha 0$ 側のひずみのみが徐々に増加し、25%では接合ビード付近で局部的なひずみの集中が見られた。

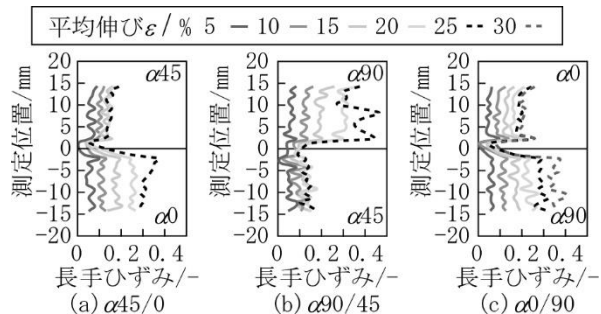


図5 対称試験片の長手方向のひずみ分布の変化

図5(b)に示した $\alpha 90/45$ についても $\alpha 45/0$ と同じような傾向が観察された。ただし、 $\alpha 90$ においては破断前に一様変形領域の中央にも局部的なひずみの集中が見られる。これは、通常の一軸引張りにおける塑性不安定によるくびれ現象と同様のひずみの集中であると考えられる。

$\alpha 0/90$ では、 $\alpha 90$ でややひずみが大きいもののビード部を除いてほぼ一様に変形している。ただし、伸びが20%を超えると $\alpha 0$ のひずみは0.2程度でほぼ止まり、 $\alpha 90$ のみが伸び続ける。応力-ひずみ曲線がほぼ同様であるのに、最終的な変形の大小が大きく異なることは興味深い。また、破断は全伸びが大きい $\alpha 90$ の側で生じたことから、延性よ

りも変形抵抗の影響が大きいと考えられる。いずれの材料でもビード付近にひずみの集中が見られ、 $\alpha 90$ ではややつかみ部寄りではあるが、もう一カ所の集中が見られた。

図6は対称試験片の幅方向のひずみ分布を示す。図6(a)の $\alpha 45/0$ に関する結果を見ると、 $\alpha 0$ の縮みが顕著で、 $\alpha 45$ の幅ひずみは-0.1程度に留まっている。ただし、長手方向のひずみ分布で見られたようなビード近傍の $\alpha 0$ のひずみの集中は見られない。図6(b)の $\alpha 90/45$ 接合材についても、これと同様の傾向が見られるが、 $\alpha 90$ の一様変形領域の中央でひずみの局部的な集中が見られる。これは長手ひずみの集中に対応するもので、くびれが三次元的に生じていることを示している。一方、ビード部近傍には幅ひずみの集中は見られず、通常の塑性不安定によるくびれ形成とは変形様式が異なることが示唆される。

図6(c)に示された $\alpha 0/90$ のひずみ分布では、伸びが小さい間は接合ビードの両側でひずみがほぼ同程度の大きさで一様となる。ただし、やはり伸びが20%程度になると $\alpha 0$ の縮みが止まり、 $\alpha 90$ の側だけで変形が進む様子が見られる。この場合も破断前にビード部近傍ではなく、一様変形部のややつかみ部寄りにひずみの集中が見られる。

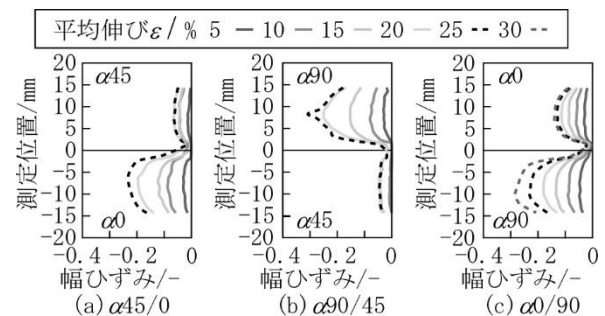


図6 対称試験片の幅方向のひずみ分布の変化

図7には体積一定の条件から計算した厚さ方向のひずみの分布を示す。三つの接合材の分布を比較すると、どの接合材でも、伸びが小さい間はほぼ一様な変形となっていることがわかる。注意すべき点は、破断前に $\alpha 0$ および $\alpha 90$ において、ビード部近傍に局部的なひずみの集中が生じることである。このことから、ビード部近傍のひずみの集中は平面ひずみ引張りに起因したものであるといえる。なお、 $\alpha 90$ では一様変形中央部にもひずみの集中が確認でき、やはり三次元的なくびれが生じていることがわかる。

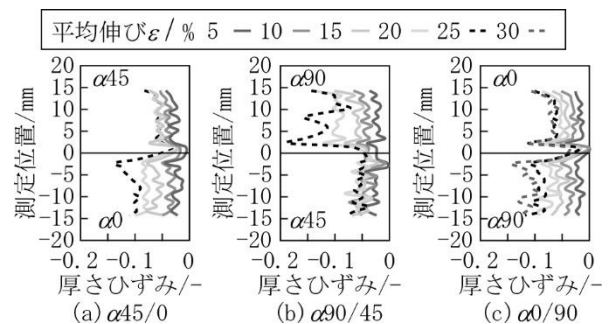


図7 接合材における厚さ方向のひずみ分布

3・3 対称試験片の力学特性

図8に対称試験片の実応力-対数ひずみの関係を示す。応力とひずみは各材料の部分的な伸びと幅の減少量から計算した。図には計算した実応力と対数ひずみを5%の伸びごとにプロットし、 $\alpha 0$ 、 $\alpha 45$ および $\alpha 90$ の実応力-対数ひずみ曲線を参考として示している。

この図から、実験点は材質に関係なくおよそ応力レベルが低い曲線上にあることが分かる。ただし、詳しく見ると $\alpha 45$ の実験点は曲線よりも若干上方に位置している。基本的に各材料はそれぞれの流動曲線に従って変形していくと考えられるため、 $\alpha 45$ については変形が小さいため違いが見にくくなっていると考えられる。なお、 $\alpha 45/0$ については、初期的に $\alpha 45$ の方が変形抵抗が小さいため、 $\alpha 0$ の曲線との間で交差が見られた。

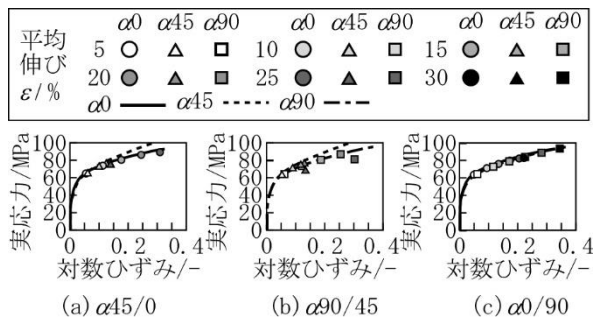


図8 対称試験片の実応力-対数ひずみの関係

図9には各対称試験片の2つの材料間の伸びの差を定量的に比較している。横軸には平均伸びを取り、縦軸にはそれぞれの材料の部分伸びを取っている。図9(a)に示した $\alpha 45/0$ では、平均伸びが10%になるまでは $\alpha 45$ における部分伸びは $\alpha 0$ とほぼ同様に増加していることがわかる。そこから $\alpha 45$ の伸びは急速に低下し、ほぼ $\alpha 0$ のみが伸びている様子が定量的に確認できた。図9(b)の $\alpha 90/45$ では初期段階から $\alpha 45$ の伸びは $\alpha 90$ の伸びに比べて小さく、平均伸びが5%になるとその違いが明らかである。ただし、最終的には $\alpha 45$ の伸びは $\alpha 45/0$ の場合と同程度であった。 $\alpha 0/90$ については、全体の伸びが25%になるまでは、 $\alpha 0$ 、 $\alpha 90$ は同様に直線的に増加する傾向を示した。しかし、初期段階から $\alpha 90$ の伸びは $\alpha 0$ のものよりも大きく、最終的に $\alpha 90$ のみが伸びる状態となっていく様子が見られる。これらから、変形抵抗の違いは初期の伸びに大きく影響し、最終的にどちらでのみ伸びるかの違いを生じるといえる。

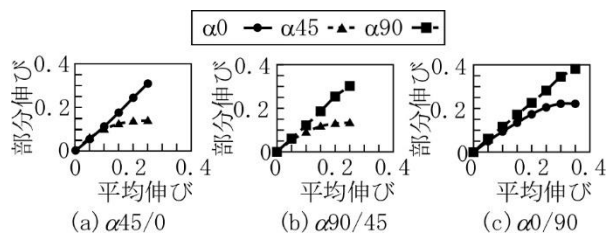


図9 対称試験片における両側素材の伸びの違い

表3に接合材を用いて評価して得られた平均的力学特性と材料個々の部分的力学特性をまとめている。まず、引張強さについては、三つの接合材でほぼ同じになっている。これは主に強度の低い $\alpha 0$ と $\alpha 90$ の性質が反映されたもので、素材のものよりやや低いのがほぼ同じ大きさである。全伸びについては、 $\alpha 45/0$ と $\alpha 90/45$ でほぼ同じ大きさであるが、素材のものよりも0.15~0.20低くなっている。 $\alpha 0/90$ については、ほかの二つの場合より大きい、それでも素材に比べて0.1程度小さい。F値およびn値は三つの条件でほぼ同じ大きさで、素材 $\alpha 0$ および $\alpha 90$ のものと同程度である。くびれて破断する場合に一樣伸びがn値に一致することを考慮すると、くびれ後の伸び、すなわち局部伸びが著しく低下したものと考えられる。これは破断がビード部近傍の平面ひずみ引張りを受ける領域で生じたことと大きく関係していると考えられる。

表3 接合材の平均的および局部的力学特性

		$\alpha 45/0$	$\alpha 90/45$	$\alpha 0/90$			
引張強さ /MPa		67.6	67.3	66.8			
全伸び /-		0.29	0.29	0.37			
平均的力学特性	F /MPa	109	111	109			
	n	0.18	0.19	0.18			
部分的力学特性	材料	$\alpha 45$	$\alpha 0$	$\alpha 90$	$\alpha 45$	$\alpha 0$	$\alpha 90$
	F /MPa	118	111	115	117	109	116
	n	0.21	0.19	0.21	0.21	0.18	0.22
	r	0.18	0.52	0.55	0.20	0.44	0.55

次に部分的な特性について見ると、F値とn値については接合材の両材料で平均的特性値と比べて、やや大きいものの、ほぼ同程度の大きさであることがわかる。一方、r値については、 $\alpha 45$ は素材の値とほぼ同じであるが、 $\alpha 0$ および $\alpha 90$ については素材に比べて大きく低下している。これは既に一軸引張状態ではなく、二軸引張状態となっていることを示唆している。

3・4 焼鈍し処理を施した対称試験片の形状変化

これまでの結果から硬化した接合ビードが試験片の変形挙動に影響を与えることが確認できた。そこで、その影響を減らすため、対称試験片にビード部を軟化させる焼鈍し処理を行った。図10に接合まま材、H26相当材、H24相当材、H22相当材および0相当材の一軸引張りによる形状変化を示す。図では横軸に試験片の幅を縦軸に測定位置を示すことによって形状変化を再現している。

まず、その接合まま材については、これまで説明したように、接合ビードの変形がほぼ見られず、破断前にビード部近傍の低変形抵抗の材料側にくびれが形成される様子が見られる。H26相当材、H24相当材およびH22相当材では接合まま材とは異なるほぼ同様の傾向を示していることが確認できる。まず、残念ながらビード部は焼鈍し処理によっても十分に軟化されず、ほぼ変形しない状況のまま

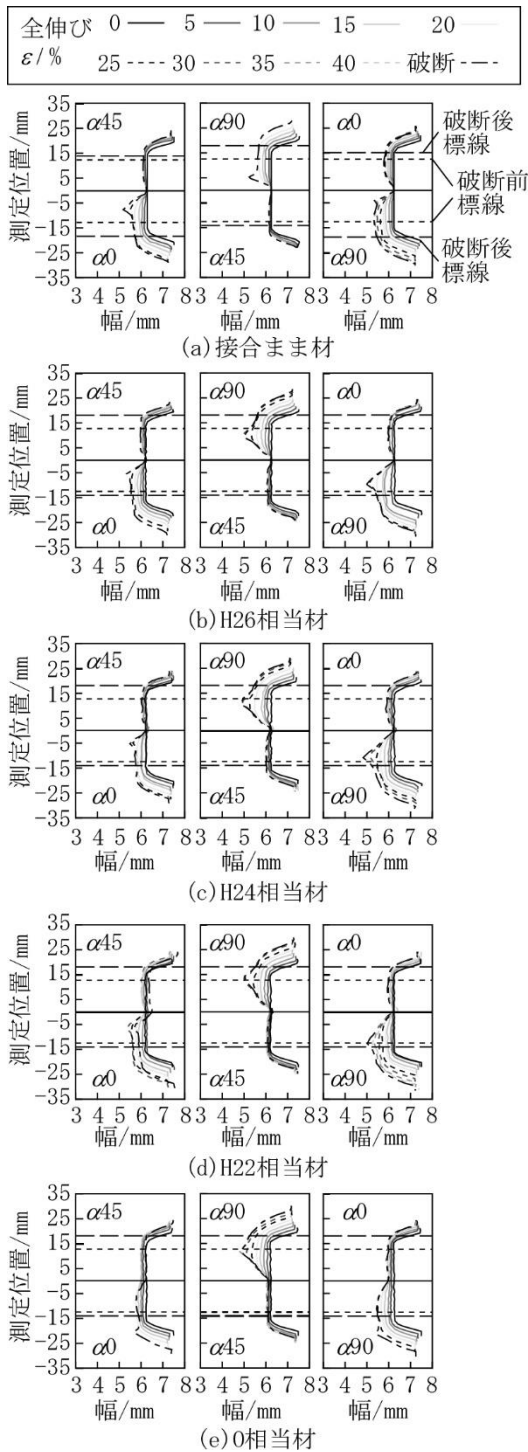


図 10 焼鈍し処理をした対称試験片の形状変化

あった。α45/0 については、ビード部近傍のα0 側の変形の集中が弱まり、一様な変形が促進されたように見える。α90/45 およびα0/90 では特にα90 側に顕著な変化が見られた。いずれの場合もビード部近傍のα90 側で変形の集中が見られなくなり、一様変形部でくびれが大きく発達するようになっている。これらの結果からビード部の近傍では軟化が生じて変形がより一様になったことが示唆される。

0 相当材では、α45/0 およびα90/45 では目立たないものの、ビード部がおおよそα45 の幅に合わせて変形している様子が伺える。α0/90 では明らかにビード部がおおよそα0 に合わせて変形しており、十分に軟化されている様子がわかる。ただし、この場合にひずみの集中がα90 のつかみ部近傍で生じているため、より適切な力学特性の評価には試験片形状の再検討が必要であると考えられる。

3・5 四枚接合による対称試験片の作製

また、摩擦攪拌接合を利用し、接合を二回行って四枚の板を接合すると試験の系の対称性とおよそ一致する対称性を持つ接合材が作製できる。そこで、摩擦攪拌接合による四枚接合の方法を検討し、四枚接合材の作製を試みた。図 11 に作製した四枚接合材を示す。図から、十字型の接合ビードが確認でき、良好な四枚接合がなされていることが示唆される。ただし、これまでの結果のようにビード部が変形挙動に大きく影響するため、まずはビードの影響の解明と軟化の方法の検討を先に進めることとした。

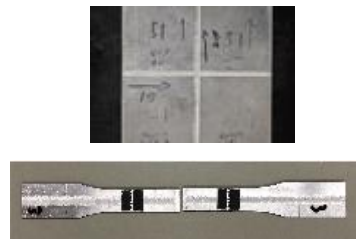


図 11 四枚接合材を持つ接合材

3・6 非対称試験片の変形挙動および力学特性

引張方向と平行な接合ビードの影響と引張りの系に非対称な試験片の変形挙動を明らかにするために、非対称試験片の引張試験を行い、長手方向と幅方向のひずみ分布を調査した。図 12 に平均伸びが 2% ごとに測定した引張りによる非対称試験片の長手ひずみ分布の変化を示す。図 12(a)～(c) はそれぞれα0-0、α45-0 およびα90-0 に対する結果である。図では左側に前進側、右側に後退側の材料の分布を示している。

図より、長手方向のひずみ分布はややばらつきが大きいものの、基本的には左右対称の分布になっている。本来は変形抵抗の異なる材料であるが、平行部が変形的な拘束を受けた状態で一様に変形するため、長手方向の変形は左右で同じになったものと考えられる。

次に図 13 に、非対称試験片の引張り時の幅の変化について示す。α0-0 およびα90-0 については、左右の変形に大きな違いが見られなかった。α45-0 については、α45 側の変化が大きくなった。また、中央部に大きなくびれが形成されている様子が確認できる。ただし、破断の形態として、ビード部の損傷から損傷部における変形の集中が起きて破断に至っていることに注意が必要である。

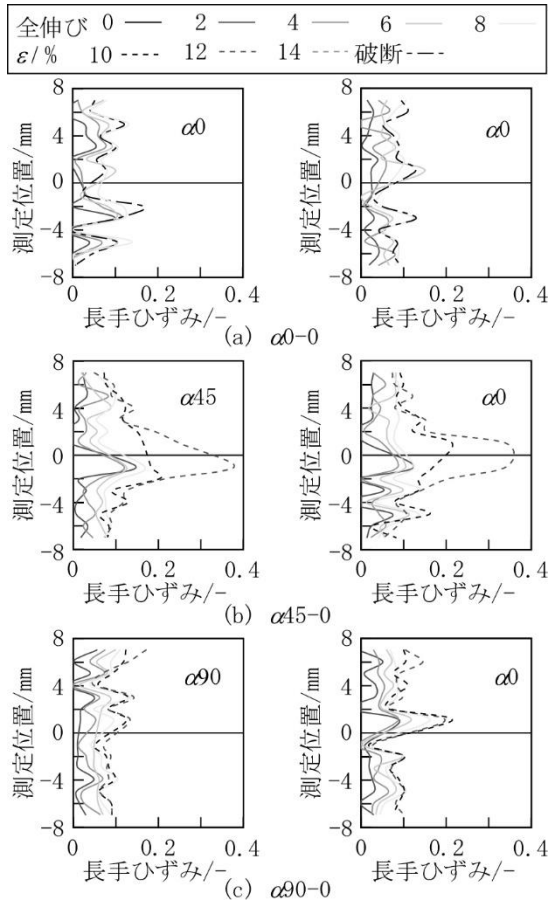


図 12 非対称試験片の長手方向のひずみ分布の変化

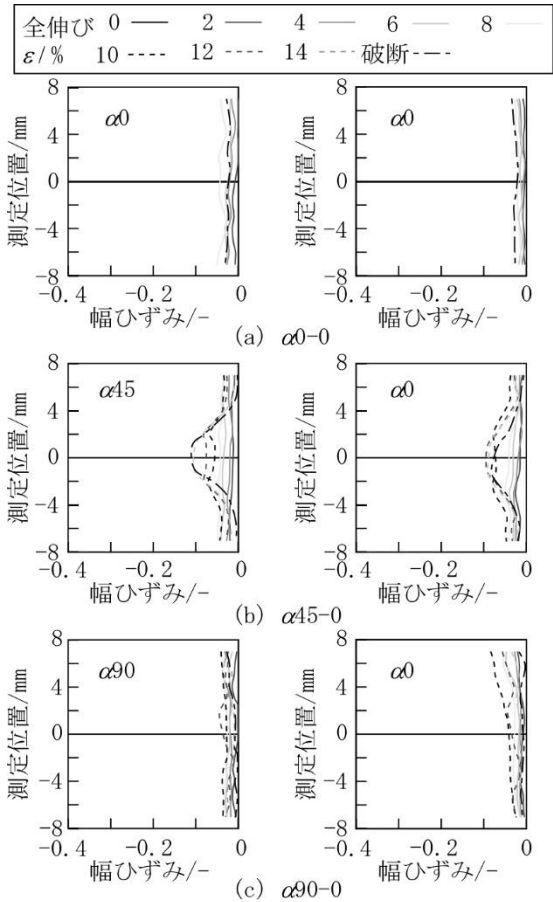


図 13 非対称試験片の幅方向のひずみ分布の変化

最後に表 4 に非対称試験片の平均的力学特性と部分的力学特性をまとめた。まず、引張強さについては高強度のビード部の変形も生じるためか、二つの材料の平均値よりやや高い値となった。全伸びは大きく減少し、平均的な F 値は対称試験片よりも 10MPa 程度高く、逆に n 値は多少小さくなった。部分的な特性について見ると、F 値と n 値は平均的な特性値と同等で、二つの材料で大きな違いはなかった。一方、r 値については、多少過大評価しているものも見受けられるが、 $\alpha 0$ および $\alpha 90$ については素材の値と大きな変化がなかった。一方、 $\alpha 45$ については素材に比べて明らかに増加したと考えられる。

表 4 非対称試験片の力学特性

		$\alpha 0-0$	$\alpha 45-0$	$\alpha 90-0$			
引張強さ /MPa		74.6	72.9	72.8			
全伸び /-		0.09	0.15	0.16			
平均的力学特性	F /MPa	125	120	121			
	n	0.17	0.17	0.17			
部分的力学特性	材料	$\alpha 0$	$\alpha 0$	$\alpha 45$	$\alpha 0$	$\alpha 90$	$\alpha 0$
	F /MPa	115	128	121	123	123	123
	n	0.14	0.18	0.17	0.18	0.18	0.18
	r	0.79	0.34	0.63	0.67	0.56	0.67

これについてはビード部の r 値の影響が考えられる。ビード部の r 値が $\alpha 0$ や $\alpha 90$ と同程度もしくはそれより大きいと考えると、元々かなり小さかった $\alpha 45$ に対しては板厚方向の変形への拘束が大きいと考えられる。そのため、一軸引張りのものよりも板厚方向のひずみが小さくなり、相対的に r 値が大きくなったことが考えられる。したがって、 $\alpha 45$ に関しては板厚断面内で二軸引張り状態となっているのではないかと考えられる。

4. 結言

本研究では、異方向アルミニウム摩擦攪拌接合材を作製し、一軸引張試験における接合材の変形挙動と r 値等の力学特性の評価を行った。接合ビードが引張方向に垂直な対称試験片と平行な非対称試験片のそれぞれについて実験による調査を行った

まず、変形には組織や構造の対称性よりも負荷系の対称性の影響が強く現れた。これは塑性ひずみ生成のメカニズムに起因したものと考えられる。対称試験片では幅方向の拘束から r 値が大きい方向で変形への影響が大きく、逆に非対称試験片では長手と厚さ方向の拘束から r 値が小さい方向で大きな影響が現れることが示唆された。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり(公財)天田財団より2019年度一般研究開発助成(AF-2019028-B3)をいただきました。ここに心より感謝の意を表します。

参考文献

- 1) J. Hirsch · T. Al-Samman: Acta Materialia, 61(2013), 818.
- 2) T. Iizuka · S. Kajikawa · N. Hatanaka · N. Takakura: steel research international Sp. Ed. 10th International Conference on Technology of Plasticity(ICTP 2011), (2011), 651.