

## テーラードブランク材の加工技術に関する試験研究事業(第 2 報)

行武栄太郎\* 磯山 亮\* 上田 聖\* 早乙女秀丸\*

小林正憲\* 齋藤和哉\* 山下 宏\*\*

### 1. はじめに

軽量化に資する研究開発が急速に進んでいる背景には省エネ・エコ活動及び地球環境に関する高い関心がある。特に、輸送機器のエコ活動はグローバルに拡大しており社会貢献できると同時に高い技術力を示すことができる。そのため、各メーカー間で激しい競争をしている。

異種金属の組み合わせ(テーラードブランク)による軽量化を目指した技術開発が進んでおり、自動車産業では鉄鋼材料において実用化されている。高機能化が求められる家電製品でも使用環境に応じ、異種材料を用いたマルチマテリアルによる製品設計が進んでいる。しかし、軽金属材料であるアルミニウム合金、マグネシウム合金を用いたテーラードブランク材の実用化事例がない。これは、マグネシウム合金の耐食性、成形性がアルミニウム合金と異なることが一原因と考えられる。今後、軽金属材料を用いた異種金属との組合せによる重量、強度の最適化により製品の更なる軽量化が進むと予測できる。

### 2. 目的

テーラードブランク材は、板厚や材質の異なる板材を接合し1枚にしたものである。その接合方法は溶融溶接(YAGレーザー、TIG等)が一般的であるが、融点の異なる異種金属の接合は困難である。

本研究事業では、昨年度、異種金属接合を可能とする摩擦攪拌接合(FSW)を用いて、軽金属材料(マグネシウム合金、アルミニウム合金等)のテーラードブランク材を作製した。本年度は摩擦攪拌接合技術を用いた板厚の異なる材料の接合技術の検討、板厚方向に異種材料を積層する技術としてクラッド材製造技術の検討、及びテーラードブランク材の成形技術として金属ブロー成形技術を検討することを目的とした。

### 3. 研究内容

#### 3.1 供試材

アルミニウム合金は一般市販材料であるA5052H34の圧延材(板厚2.0mm、表面研磨済み)、マグネシウム合金は日本金属(株)製難燃性マグネシウム合金(板厚2.0mm、1.5mm、表面研磨済み)圧延材であるAZX411(A14mass%、Zn1mass%、Ca1mass%)及びAZ31(A13mass%、Zn1mass%)を用いた。

摩擦攪拌接合には幅70mm、長さ200mmの短冊状の板材(圧延方向を長さ方向とする)とした。接合方向は圧延方向と同じ方向とした。クラッド材作製には、幅70mm及び35mm、長さ200mmを用いた。金属

ブロー成形ではφ180(板厚1.5mm)のブランク材を板材より切り取り試験片とした。圧延方向はすべての接合条件で長さ方向(接合方向)として摩擦攪拌接合を評価した。

#### 3.2 摩擦攪拌接合の検討

摩擦攪拌接合は、中心部に突起(プローブ)のある回転ツールを、高速で回転させながら被加工材へ挿入し、接合部に沿ってツールを移動させ接合する方法で、固相状態での接合が可能である。その結果、凝固割れがなく、熱ひずみも小さく接合後の変形が少ない特徴がある。摩擦攪拌接合の原理を図1に示す。ツール移動方向とツール回転方向が一致する側をAS(advancing side)、ツール回転方向が一致しない側をRS(retreating side)と呼ぶ。ツール材質はSKD61とし、ショルダー径φ12mm、ショルダー角4°、プローブ径φ6mm、長さ1.3mm、(板厚1.5mm用)1.8mm(板厚2.0mm用)を用いた。プローブにはM6のネジ加工を施した。接合条件は回転数500rpm、1000rpm及び1500rpmの3条件、接合速度5mm/s、10mm/s及び20mm/sの3条件とした。ツール接触後の予熱時間は10sec、ツール角度は前進角度約3°とし摩擦攪拌接合を行った。なお、プローブ挿入量は、バックプレートから0.1mmの深さまで挿入し接合した。接合方向は圧延方向と平行(圧延方向同士を向い合せに突き合せたもの)とし、接合部表面は研削せず接合したままの状態とした。摩擦攪拌接合には日東制機(株)製FF-20IV-FSWを用いた。接合雰囲気は大気室温として、冷却なしで200mm接合した。

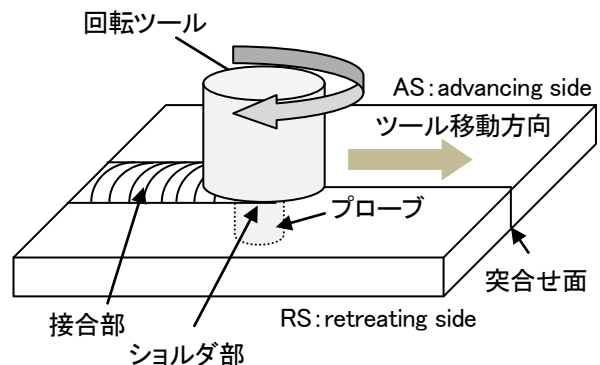


図1 摩擦攪拌接合の原理

#### 3.3 クラッド材の製作の検討

図2に異種金属クラッド材作製に使用したロール径φ160mm、ロール幅210mmの温間2段圧延機(大野ロール(株)製2DR-160D)の外観を示す。ロール温度を

室温、150℃、200℃、250℃及び300℃とし、圧延速度 0.3 mm/s～3mm/s の範囲とした。ロールと供試材には圧延前に潤滑材として離型剤（B・N スプレー耐熱性ボロンナイトライド）を接触面に噴霧し試験した。圧下率は 10%～70%としてアルミニウム合金（5052H34）、マグネシウム合金（AZ31F）のクラッド材を試作し断面観察した。



図 2 温間圧延機外観

### 3.4 金属ブロー成形の検討

図 3 に温間ブロー成形機（有リナシメタリ製）の外観を示す。本装置はポンペ圧を利用し、300℃～450℃の温度範囲で温間ブロー成形を可能とする。試験片形状は約φ100 mmの円形ブランクを用い、ブランクの周囲を一定負荷でクランプ密閉しガス圧、流量及び時間を制御しながら温間ブロー成形できる装置である。本実験ではガスに工業用アルゴンガスを用いた。試験片厚さ 1.5mm とし最大ガス圧、保持時間を変化させながらブランクの膨らみ高さを評価した。ガス圧は最大ガス圧に到達するまで直線的に増加させ、最大ガス圧で一定時間保持した後、直線的に減圧しブランク材を半球状に成形加工した。試験環境は大気雰囲気とした。



図 3 温間ブロー成形機外観

## 4. 研究結果と考察

### 4.1 摩擦攪拌接合

摩擦攪拌接合装置を用いて板厚の異なる接合を試

みた。マグネシウム合金である AZ31 圧延材（板厚 1.5mm 及び 2.0mm）、AZX411 圧延材（板厚 2.0mm）を用いて試験評価した。

AZ31 圧延材では、AS, RS にそれぞれ板厚の異なる圧延材を配置し、接合ツールを突き合せ面に対して垂直に挿入した。プローブ先端がバックプレートか 0.1mm の距離となるように押し込み量を設定した。

図 4 に板厚の異なる接合例として、接合ツール回転数 1000rpm、接合速度 10mm/s の条件での摩擦攪拌接合後外観写真を示す。

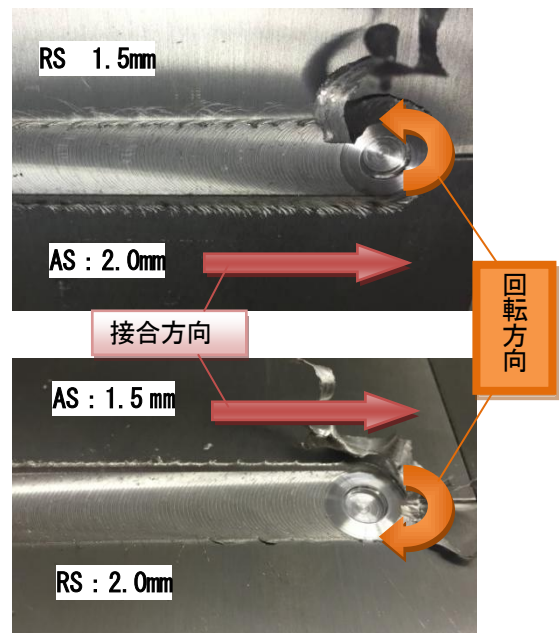


図 4 異板厚さ接合例(マグネシウム合金:AZ31)

AS に板厚 1.5mm、RS に板厚 2.0mm の AZ31 圧延材を配置し接合した場合、大きなバリが発生するが接合部には外観からは目視できる大きな表面欠陥は目視で確認されない。X 線 CT 装置（ヤマト科学製 TDM 3000H-FP）で内部を非破壊で観察したが同様に欠陥は観察されない健全な接合継ぎ手が得られた。接合時に接合ツール回転軸方向に最大約 15 kN の負荷が挿入時に観察された。また、接合中（接合ツール移動中）は約 10 kN 程度の負荷を維持しながら接合された。接合ツール進行方向には約 2 kN の負荷が連続的に観察された。

AS に板厚 2.0mm、RS に板厚 1.5mm の AZ31 圧延材を配置し接合した場合、同様にバリが発生するがその量は AS に板厚 1.5mm、RS に板厚 2.0mm の供試材より多い。また、接合部の表面状態は AS 側に微小な欠陥が観察された。X 線 CT 装置で内部を非破壊で観察した結果、不連続な欠陥が観察された。接合中の接合ツールへの負荷変化は AS に板厚 1.5mm、RS に板厚 2.0mm に配置した場合と同様の結果が得られた。

AS に板厚 1.5mm、RS に板厚 2.0mm に配置し接合したサンプルより引張試験片を接合方向より垂直に採取し引張試験により継手効率を評価した結果、板厚

1.5mm 側で破断するが、その断面積で破断応力を評価すると母材に比べ約 80%を達成しており、同板厚同士の突き合せ接合で得られた継手効率と大きな違いは確認されない。接合条件を変化させて接合した結果、接合速度が大きくなると欠陥の数が増えるが、回転数による接合部外観に関する大きな変化は確認されない。欠陥が観察されない接合条件での接合部継手効率は約 80%を示す。しかし、接合部には大きな段差が確認され、変形応力が集中することで破壊の起点となり疲労強度の低下が予測される。

そこで、大きな段差が発生しないような接合方法及びツール先端形状を検討した。ショルダー径を小さくし、段差のある突き合せ面に垂直挿入するのではなく、段差に併せて接合ツールを傾けて挿入することでなめらかな接合面を実現できる工法を検討した。本接合装置では接合ツールを傾けて挿入することは困難なため、接合試験片を傾けて設置することで接合試験を試みた。

図 5 に異板厚接合方法の概略図を示す。ショルダー径  $\phi 8\text{mm}$ 、プローブ M3 の接合ツールを  $4^\circ$  傾けた接合材に挿入し接合することでなめらかな接合面を有する継手を得られることが確認できた。接合方向は図に向かって奥方向とした。板厚差は最大で 1.0 mm 程度まで健全な継手を得ることができる。しかし、現在使用している治具での接合試験片の固定が困難であるため接合部の機械的特性を評価できる接合長さは最大 180mm 以上である。

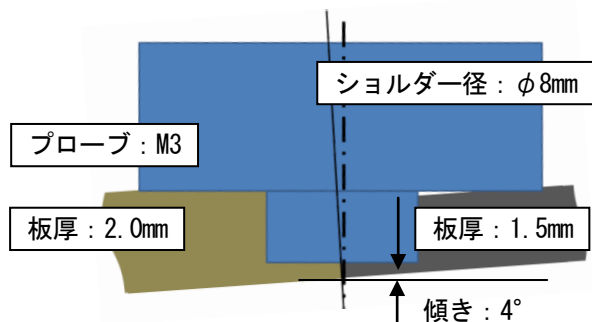


図 5 異板厚さ接合方法の概略図

#### 4.2 クラッド材の作製

クラッド材の作製には温間圧延機を用いた。アルミニウム合金(5052H34)、マグネシウム合金(AZ31F)は板厚 1.5 mm の圧延材を用いた。1 パスの圧下率を 10% から 60% まで 10% 間隔で増加させた。50% 以上の圧下率を与えることでクラッド材の作製が可能であることを確認した。圧延ロールの表面温度は  $150^\circ\text{C}$  で、ロール軸受荷重が 30 トン以上を示した。マグネシウム合金側では縁割れが発生するが  $300^\circ\text{C}$  では 10 トン程度まで低下し縁割れなく圧延が可能である。しかし、圧延温度  $250^\circ\text{C}$  ではアルミニウム合金とマグネシウム合金で変形能の差が大きく、マグネシウム合金がアルミニウム合金に対して 10% 以上大きく変形することが観察され、圧延温度  $300^\circ\text{C}$  では 30% 以上変形した。圧延温度  $200^\circ\text{C}$  では、

アルミニウム合金とマグネシウム合金の変形能が同等で圧延後の板厚がほぼ同等となることが観察された。

図 6 に圧延温度  $300^\circ\text{C}$ 、圧下率約 50% で得られたアルミニウム合金 - マグネシウム合金クラッド材の断面写真を示す。圧延温度  $200^\circ\text{C}$  で圧延するとアルミニウム合金とマグネシウム合金との板厚はほぼ同等であるが、圧延温度  $300^\circ\text{C}$  では、マグネシウム合金の板厚はアルミニウム合金と比べ 20% 以下と大きく減少している。これは、 $300^\circ\text{C}$  ではアルミニウム合金よりマグネシウム合金の変形能が大きいことが起因していると考えられる。また、マグネシウム合金-アルミニウム合金間には数  $\mu\text{m}$  の明瞭な硬さ Hv200 以上の金属間化合物が観察された。

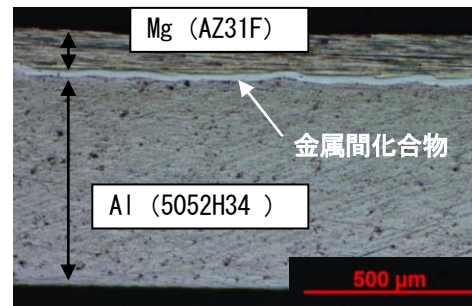


図 6 クラッド材断面写真

#### 4.3 金属ブロー成形の検討

金属ブロー成形性を評価するために金型を加熱でき温間でブロー成形性を評価できる温間ブロー成形機を用いて、マグネシウム合金 (AZ31) の温間ブロー成形性を評価した。

図 7 にマグネシウム合金を温間ブロー成形した後のブランク外観写真を示す。成形圧力 150kPa、試験温度  $150^\circ\text{C}$  ではほとんど変形しないが、試験温度  $300^\circ\text{C}$  では高さ 10 mm 以上の変形が観察された。さらに、成形圧力を 300 kPa にすると 15 mm 以上の張出高さを示した。成形後 (試験温度  $300^\circ\text{C}$ 、成形圧力 300kPa、材質: AZ31 マグネシウム合金) のブランク結晶組織は完全に再結晶した等軸で平均粒径約数  $\mu\text{m}$  の結晶粒が観察された。

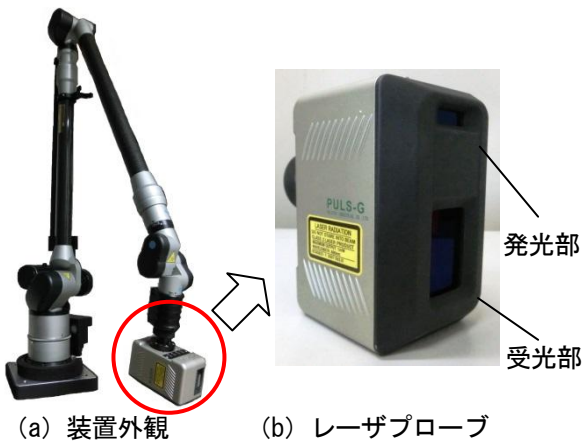


図 7 温間ブロー成形 (マグネシウム合金: AZ31)

温間ブロー成形ではブランク周辺を完全固定しブランクに均一に圧力をかけて成形するため均一な張出成形が期待できる。また、金型を用いないため、供試材の表面形状が平滑でなくとも成形できる利点

がある。そこで、各種成形条件での温間ブロー成形後の形状測定を行い、3次元で評価した。

blanks材φ105mm（材質：AZ31 マグネシウム合金）、板厚1.5mm、成形圧力を150kPaと300kPaの2種類として成形した試作品について、三次元デジタイザにより形状データを取得した。試作は型を使用せずフリーブローによる成形とし、表面形状はドーム型となるため、ポイント測定を行う接触式の測定装置では、全体の評価が困難である。そこで、図8に示す多関節アーム型の三次元デジタイザ（株式会社小坂研究所製 VMC666MplS）の先端にレーザプローブ装着し、非接触で表面形状データを取得した。レーザは走査ライン幅20mm、ピッチ0.05mm、ライン数60本/secを選択した。取得した表面形状データから全体形状及び板厚分布の測定を行った。



項目	仕様
投光部	赤色半導体レーザ 690nm クラス2
測定精度	±0.07mm

図8 三次元デジタイザ

温間ブロー成形の加圧力とドーム形状の膨らみ状態の関係を把握するため、150kPaと300kPaそれぞれ成形品について内径を測定した。図9に示す測定結果から成形圧力150kPaでは内径R70.1mm、300kPaでは内径R54.9mmとなっていることを確認した。

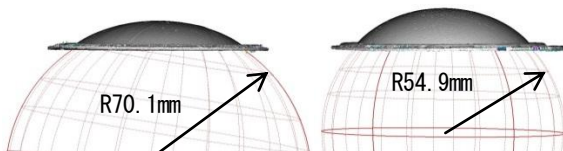


図9 形状データ（左：150kPa、右：300kPa）

図10は、成形品の板厚分布をコンター画像として表している。図11は成形品の頂点を通る断面位置の板厚を5mmピッチで示しており、150kPaと300kPaどちらの成形条件でも板厚の分布は外側が厚く、頂点部に向けて徐々に薄くなっていることを確認した。図11と図12により、成形後の頂点部の厚み及び頂

点部の高さを計測すると、頂点部厚みは150kPaが1.40mm、300kPaが1.29mm、頂点部高さは150kPaが12.1mm、300kPaが17.0mmとなっており、印加圧力を高めることで、材料がより伸ばされていることを確認した。

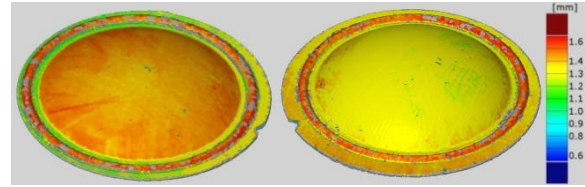


図10 板厚分布（左：150kPa、右：300kPa）

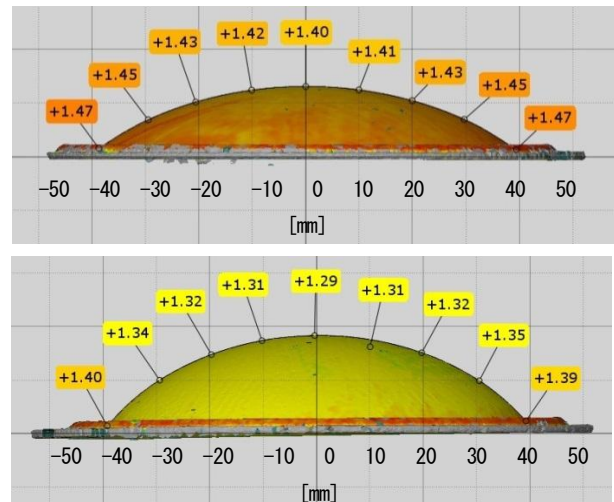


図11 任意断面の板厚（上：150kPa、下：300kPa）

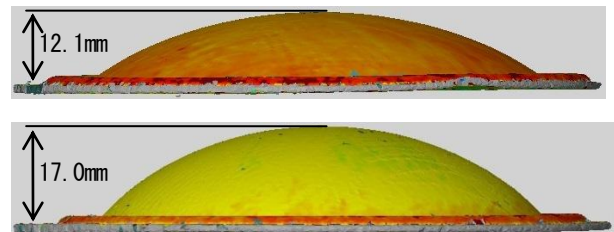


図12 頂点部高さ（上：150kPa、下：300kPa）

## 5. まとめ

- ・マグネシウム合金(AZ31F)の異板厚(1.5mm, 2.0mm)の摩擦攪拌接合が可能である。
- ・摩擦攪拌接合で最大板厚差1mmまでマグネシウム合金で成功した。
- ・ロール温度200℃以上、圧下率50%以上の圧延条件でアルミニウム合金(5052H34)-マグネシウム合金(AZ31F)のクラッド材作製が可能である。
- ・圧延温度300℃ではアルミニウム合金(5052H34)-マグネシウム合金(AZ31F)の界面で数μmの金属間化合物が生成される。
- ・マグネシウム合金(AZ31)では試験温300℃、成形圧力300kPaで高さ15mm以上の温間ブロー成形が可能である。