

材料分流を用いた異材接合による複合材料製造の研究

東京大学生産技術研究所

教授 柳本 潤

(平成 15 年度研究開発助成 AF-2002004)

キーワード：クラッド板材，異材接合，材料分流

1. 緒言

金属材料複合化の一つの手段としてクラッド法がある。従来のクラッド板材の製法技術では、厚板や幅広い材料に不適、部材の金属学的性質への高い依存性、膨張係数の差が大きい異種材料による反りの発生、高エネルギー加工、脆性材料・塑性変形能差が大きい異種材料の接合難などの欠点が挙げられる¹⁾。これらの欠点を克服した接合方法として機械的接合法によるクラッド板材の製法が提案されている²⁾。接合時の幾何学的形状に対応して発生する局所塑性変形・材料分流を利用し、両材料の降伏応力比を適切に制御することによって、製品の接合・接合強度を向上させたもので、クラッド板製造のための 2 種類の素材は、接合溝部を有する硬質材と塑性流動部を有する軟質材から成る。硬質材の接合溝部に十分な接合強度を発生すべく軟質材の塑性流動をもたらすための最適な接合界面幾何学的形状が筆者らによってすでに提案されている。

本研究においては、連続的に接合を行う場合を想定して、接合部の寸法をより小さくし、かつ複数の接合部を持つ接合体について、(1) 鍛造による接合実験を行い、強度と接合部形状について調べる³⁾。

(2) 現実的利用を考え、圧延による接合実験を行い、強度と接合部形状について調べる³⁾。(3) 硬質材と軟質材の接合部が 1 mm 以下の微細な接合を行った場合について最適な形状を提案する⁴⁾。(4) 同一材種による、温度差利用硬軟質材の鍛造による接合の可能性について検討する、である。

2. 実験方法

2.1 試験片素材

硬質材・軟質材に異なる材料を用いる場合には、硬質材は炭素鋼 S45C、軟質材は常温で良好な塑性流動が期待できるアルミニウム系材料を用いた。軟質材材質の影響を調べるため、純アルミニウム系材料の A1050P、アルミニウム合金系の A5052P の 2 種類について検討した。表 1 に硬軟質材の材料定数を示す。引張強度の大きさは、S45C > A5052P > A1050P の順となる。

硬質材・軟質材に同一の材料を用いる場合には炭素鋼 S45C またはステンレス鋼 SUS304 を用いた。硬軟の差を発生させるには、接合部材の一方を加熱炉または通電加熱にて加熱する方法を用いた。S45C の温

度と変形抵抗の関係を図 1 に示す。図から、S45C において、(1) 800 と 900 で約 2 倍の変形抵抗が生じること。(2) 約 900 でアルミ合金 A5052 の変形抵抗と同程度となることとわかる。

2.2 試験片寸法形状

鍛造による接合実験では、接合界面の幾何学的形状について軟質材流動部および硬質材接合溝角度に注目し、最適化を試みる。図 2 に試験片形状を示す。単位は mm、奥行きは 20mm である。接合強度が大きく、良好な接合状態となる最適化試験片として、硬質材接合溝角度 が 30° と 90° のものを用いる。なお、軟質材の塑性流動部には切欠き(初期塑性域が軟質材側面に達する形状)を設けてある。また、接合部が複数並んだものについても実験を行った。

圧延による接合実験では、圧延に適した形状とするため、鍛造ではほぼ立方体であった接合試験片形状を、幅は 20mm と一定のまま、奥行きを 80mm と長くした。

接合部が 1mm 以下の微細な接合の場合については、ワイヤーの線径が 0.1 の放電加工によって作ることでできる最小寸法とし、接合部流入深さが 0.2mm 程度のものを作製し、鍛造接合実験を行った。接合箇所が 1 つのもの試験片寸法形状を図 3 および図 4 に示す。また、同様に接合箇所が 2, 5, 10 のものについても調べる。それぞれ、流入部深さが約 400 μm となっている。

同一材種による、温度差利用硬軟質材の鍛造による接合の場合では、鍛造による接合実験と同じ試験片形状とした。

表 1 材料定数

	Tensile strength σ_e [kg/mm ²]	Elongation E_f [%]
A1050P	6.63	22
A5052P	17.9	22
S45C	62.2	20

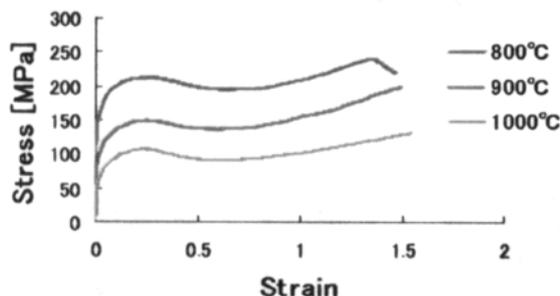


図 1 S45C の温度と変形抵抗の関係

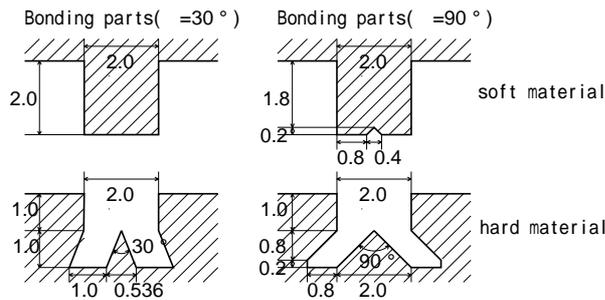


図2 鍛造による試験片寸法形状（接合部）

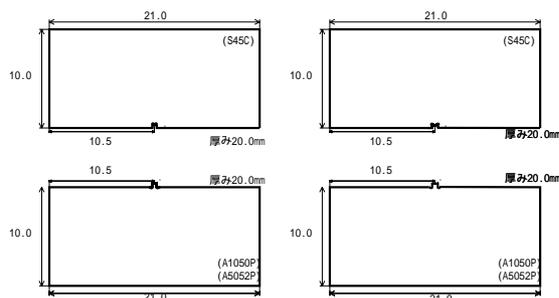


図3 微小接合試験片寸法形状

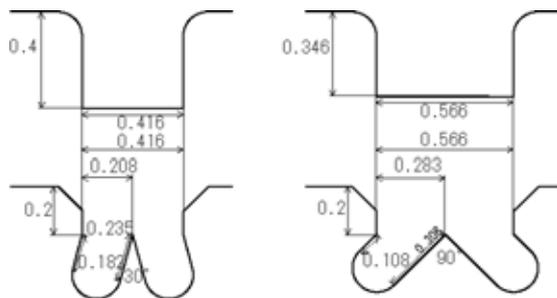


図4 微小接合試験片接合部寸法形状

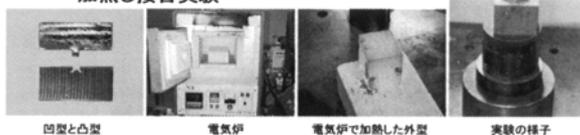
2.3 接合方法とその過程

硬質材と軟質材の側面および底面を治具(S50C)により固定し上面をパンチにより加圧する．圧力が増えるにつれ，軟質材は硬質材接合溝部により塑性流動を起こし，硬質材接合溝部に流れ込む．圧延実験においては，同様の接合実験を圧延機により行った．

同一材種の場合の接合方法の一例を図5に示す．

目的: S45C凸側材料を電気炉で加熱し，凹側材料との接合を試みて同種金属の接合可能性を調べる

方法: 電気炉にて800℃～1000℃まで加熱し接合実験



パラメータ: 加熱温度→800℃, 900℃, 1000℃
凹型工具部角度→90度, 30度

図5 同一材種の場合の接合方法の一例

2.4 接合強度引張試験

接合強度を調べるため接合強度引張試験を行う．引張試験片は，接合済みの試験片を2mm厚にスライスしたのを用い，2mm四方の接合平面についての接合強度を調べる．

3. 実験結果および考察

3.1 鍛造による接合試験

3.1.1 接合状態

図6により，接合部を複数連続に並べても接合状態に影響はないことが確認された．また，切欠きがあるにも関わらず接合溝角度の大きいものよりも，小さいもののほうが良好な接合状態を実現していることがわかった．さらに，図7の軟質材の材質の違いによる比較から，引張強度の小さいA1050Pの方がA5052Pより深い位置までの流入が確認され，良好な接合状態を生むことがわかる．

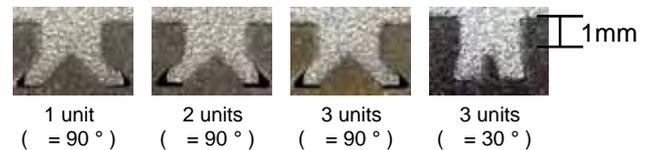


図6 荷重負荷後の接合状態（A5052P，S45C）



図7 荷重負荷後の接合状態（接合部数1，α=90°）

3.1.2 接合強度引張試験

接合強度引張試験結果を図8に示す．接合強度を次式により無次元化することにより得た接合効率 e と接合部数の関係を示している．

$$e = \frac{L}{\sigma_e \cdot W \cdot t}$$

（ただし， W [mm]は接合部幅， t [mm]は接合部厚み）

接合強度引張試験後，軟質材だけが顕著な変形が確認でき，試験片の軟質材塑性流動部入口付近にはすべり線場状のくびれを生じた．特に軟質材A5052P(α=90°)については，その付近での変形が激しく，破断に至るものもあった．接合強度は接合溝角度，接合部数，軟質材引張強度の大きさに応じて増加している．これは，接合溝角度が等しい場合，接合強度は軟質材引張強度の大きさに応じて大きくなる²⁾というこれまでの知見とも一致している．

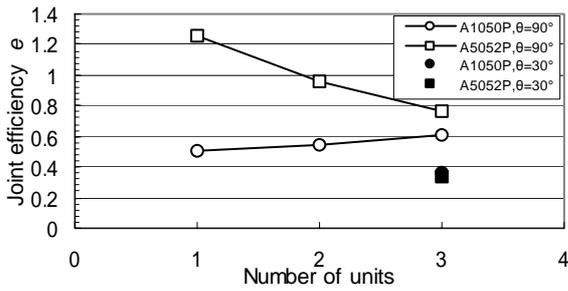


図8 鍛造接合実験による接合強度

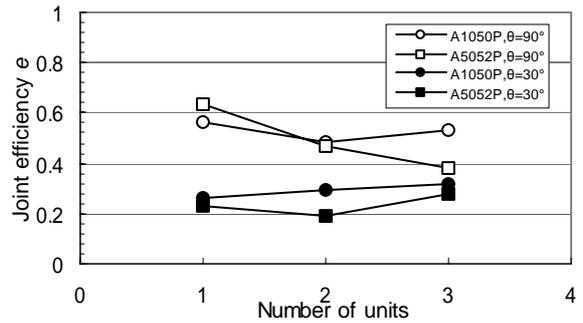


図10 圧延接合実験による接合強度

3.2 圧延による接合試験

3.2.1 接合状態

1パスの圧延後、2パスの圧延を1パスの圧延の際と逆の方向から行った。この結果、硬質材接合溝角度が小さいものについては流入による接合を得た。一方、接合溝角度が大きいものについては、圧延による押込みがなされても押込みと垂直方向の流入がおきにくいことが確認された(図9)。

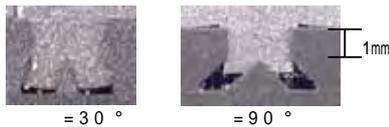


図9 圧延後の接合状態 (A1050P, S45C)

3.2.3 薄板圧延

軟質材の板厚 t を薄くし、4mm, 2mm, 1mmとした場合の圧延接合実験を行った。この結果、板厚の小さい方がより軟質材が溝部に流入していることが分かる(図11)。一方で、軟質材と硬質材の反りの現象が見られた。

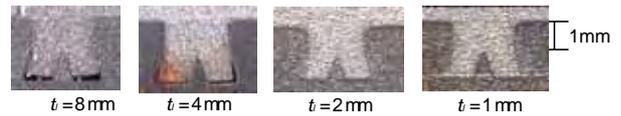


図11 薄板圧延後接合状態 (A1050P, S45C)

接合部を複数連続に並べても接合状態に影響はないこと、接合溝角度の大きいものよりも小さいもののほうが良好な接合状態を実現していること、引張強度の小さい軟質材 A1050P の方がより深い位置までの流入を得ることが分かった。以上の点で、鍛造による成形と同様の結果が得られていることがわかる。一方で、高さ方向の変位量に注目すると、均一な接合結果が得られにくく、圧延終了部の末端からは接合部数、板厚の薄さに応じた軟質材の流出が見られる。

3.2.2 接合強度引張試験

圧延後の接合材の中央部付近から 2mm 厚の試験片を切り出し、接合強度引張試験を行った。この結果、鍛造の際と同様、接合部数や供試材の引張強度に応じ接合強度は増加することが確認された。また、接合溝角度 90°、軟質材 A5052P のものについては、鍛造接合の約 50~60%の接合強度となり、それ以外については約 90%の接合強度が得られることが分かる(図10)。

3.3 鍛造による微小接合試験

3.3.1 接合状態の主な特徴

鍛造による接合実験を行った結果、軟質材の流入による接合が確認された(図12 参照)。

なお、接合溝部底面に共通して半円状の隙間が確認されるが、これはワイヤー径による空間なので、流入が期待される部分には相当しない。

接合溝部角度が 30° の場合のものの方が、90° のものよりもより深部までの流入が確認された。接合溝部角度が 90° のものについては、流入が完了していることが確認されるが、押込み方向と垂直な横方向への変位がほとんど起きていないことが確認された。これは、切り欠きがないことに関係しているものと考えられる。

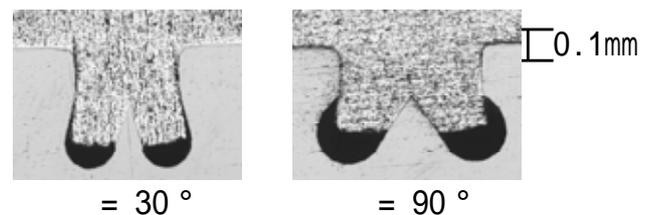


図12 微小接合試験の接合状態 (A5052P, S45C)

3.3.2 接合強度引張試験

鍛造による微小接合により得られた接合材の中央部付近から 2mm 厚の引張試験片材を切り出し、接合強度引張試験を行った。この結果、を Fig. 13 と Fig. 14 に示す。

図 13 は、接合部数と引張荷重 L の関係を示している。引張荷重 L は、接合部数に応じて大きくなる。また、接合部数が等しい場合には、引張荷重 L は軟質材引張強度の大きさに応じて大きくなる。さらに、軟質材の引張強度の小さいものについては、流入角度が大きいものはより大きな接合強度を実現していることも分かる。

以上より、鍛造の際と同様、接合部数や供試材の引張強度に応じて接合強度は増加することが確認された。

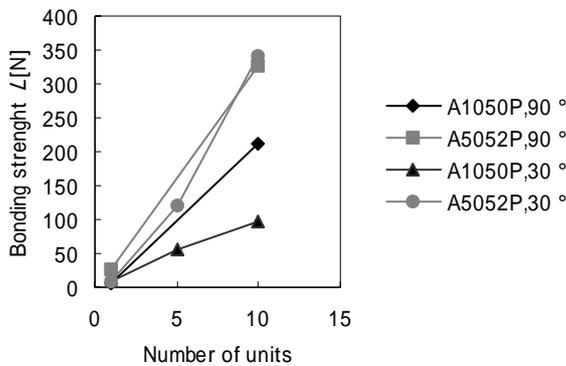


図 13 極小接合実験による接合強度引張試験結果

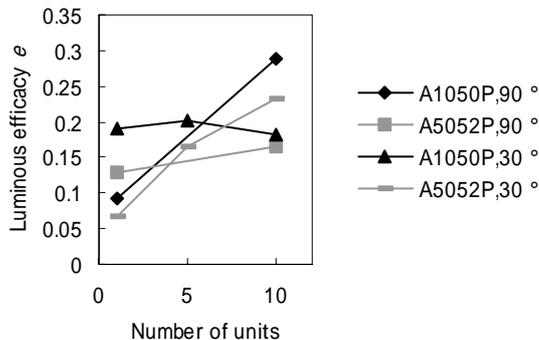


図 14 極小接合実験による接合強度引張試験結果

次に、接合強度を次式により無次元化することにより、接合効率 e を求めた。

$$e = \frac{L}{\sigma_e \cdot w \cdot t}$$

(ただし、 w [mm] は接合部幅、 t [mm] は接合部厚み)

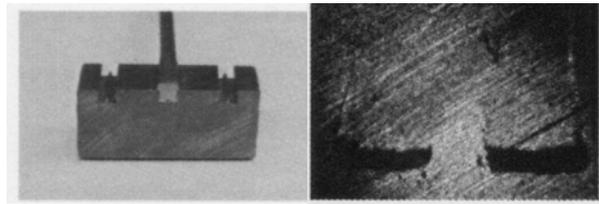
接合部数と接合効率 e の関係を図 14 に示す。このグラフにより、接合部数を増やすと、接合効率はほぼ一定となり、一部では増加の傾向を示しているものもあるということが分かる。また、流入角度が大きいものの方が高い接合効

率を得るとは言えず、かなり小さい接合効率となっているものもあり、散らばりが大きくなっていることがわかる。同様に、軟質材の引張強度についても、大きい A5052P のほうが接合効率が高いとは言えず、むしろ接合効率が A1050P の場合よりも小さくなっているものも多く、散らばりが見られる。

これは、分流の範囲が非常に小さく、結晶粒形の範囲にまでなっているため、結晶粒形の影響を強く受けているためであると推察される。

3.4 同一材種による接合試験

図 15 は温度差利用硬軟質材の鍛造による接合の結果の一例を示す。適正な部分加熱を行えば同種の金属同士であっても分流接合が可能であると考えられる。



凸型：S45C 室温，凹型：SUS304 1000

図 15 温度差利用硬軟質材の鍛造による接合

4. 結言

材料分流を伴う異材接合に関する研究を行った。本研究では、連続的な接合を行う場合を想定し、接合部の寸法をこれまでより小さくし、かつ複数の接合部を持つものについて、(1) 鍛造による接合、(2) 圧延による接合、(3) 接合部が 1mm 以下の微小接合、(4) 同一材種による接合、について検討した。

その結果、接合効率は接合溝角度 30°、90°とも 0.2 前後だったこと、接合部寸法を極小レベル (400 μm 程度) までスケールダウンした状態でも接合が可能で、同一材種であっても異なる温度による変形抵抗差によって接合が可能などなどが判明した。

謝辞

本研究において、多大な協力を頂きました東京大学生産技術研究所試作工場の谷田貝悦男氏に感謝致します。

また、本研究の一部は、財団法人天田金属加工機械技術振興財団の研究開発助成の援助を受けて行われたことを記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 石尾雅昭：塑性と加工，32-360(1991)，27。
- 2) 柳本潤・鈴木茂久・杉山澄雄：平 14 春塑加講論 (2002)，319-320。
- 3) 柳本潤・堅田真人・杉山澄雄：平 15 春塑加講論 (2003)，19-20。
- 4) 柳本潤・堅田真人・杉山澄雄：平 15 春塑加講論 (2003)，21-22。