M. Yamashita

高速摺動圧縮による銅 C1100 とアルミニウム合金 A6061-T6 の衝撃接合

山下　実*

1．はじめに

塑性変形を利用した接合法には，鍛造や ECAP（Equal Channel Angular Pressing）法などによって，非常に大きい塑性ひずみ下で新生面同士を高い圧力で押し付ける方法がある[1～4]．すでに FSW(Friction Stir Welding)は実用化されており，改善も進んでいる[5]．また爆着では十分強い接合強さが得られるが，重ね板の接合に限られ，板端面同士で接合できないといった制約があり，超音波接合法も同様である[6, 7]．

昨今，機械部品などの一層の高機能，高性能化を目的として複数の素材を組み合わせるマルチマテリアル化技術の開発が盛んである．樹脂と金属など異種材料の接着やリベットによる接合技術など実用化も進んでいる．溶接等の従来技術では接合が不可能であった銅とアルミニウム合金の組合せに対するニーズは，モビリティの電動化に対して大きい．特殊な溶接で銅とアルミニウム合金を接合する例はあるが，寸法変化や機械的特性の変化が課題である．

筆者は，銅 C1100 とアルミニウム合金 A6061-T6 の板端面同士を接合する新たな突合せ接合法を考案した[8]．母材破断させることを可能とするこの接合方法は，材料同士を高速で摺動させながら圧縮変形させることによって，接合に必要な新生面を生成するもので，拡散接合である．

はじめに，接合境界部の表面性状や板材料の形状が接合性に及ぼす影響に関する検討結果を示し，つぎに接合境界部の塑性変形能を検証するため接合板の圧延試験および圧延板の引張試験結果を示す[9, 10]．

2．供試材と実験方法

供試材は，公称板厚 5.0 mm のタフピッチ銅(C1100，引張強度 249 MPa)とアルミニウム合金(A6061-T6，同 322 MPa)である．前述の通り，板を端面同士で接触させておき，高速で摺動させると同時に圧縮する．エネルギー源には落錘による打撃を用いた．図 1 に示すように長さ 200 mm の 2 枚の板をテーパー形状に加工し，最大摺動距離 100 mm ずらして配置した．摺動面先端は 60° の尖り形状とし，先端の平坦面の幅は 1 mm である．図中の WS と WL は，48 と 56 mm（小テーパーの板材）または 47.5 と 57.5 mm（大テーパーの板材）に設定した．被接合材である板材はホルダーに取付けられ，塑性変形を端部に集中させるため，幅方向と奥行き（板厚）方向の変形は拘束されている．

図 2 に接合装置の内部写真を示す．板はホルダーで挟み拘束した．C1100 板を下側，A6061-T6 板を上側に配置し，最大摺動距離分だけ突き出した設定になっている．質量 90，120 または 130 kg の落錘を衝突速度 10 m/s でホルダーに取付けられた左側の部分を打撃することによって下方に高速で摺動させた．板はテーパー形状のため板面内に圧縮応力が生じ，大きい塑性変形を板端部に与え，新生面が生成する．落錘のエネルギーがなくなれば動作は停止する．このため，ストロークで制御することはできない．

塑性変形によって新生面同士を接合させる場合，その接合性に対して被接合材の表面性状や仕上げ方法などが影響する[11]．まず面性状が接合性に及ぼす影響を検討した．つぎに板材のテーパーの影響を検討し，つづいて接合板の圧延加工を行った．実験条件の詳細は都度示す．

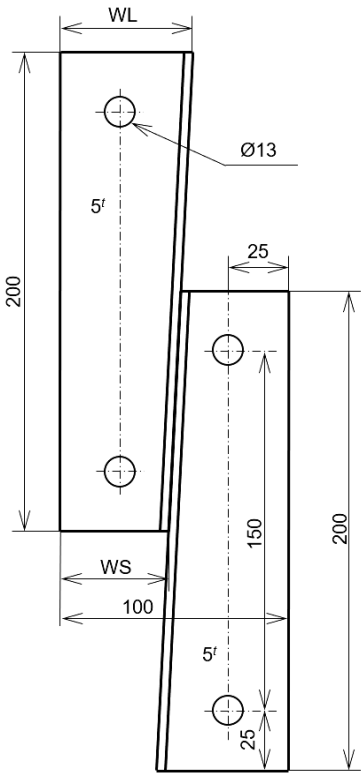


図 1　板材の寸法形状と配置

* 岐阜大学　教授

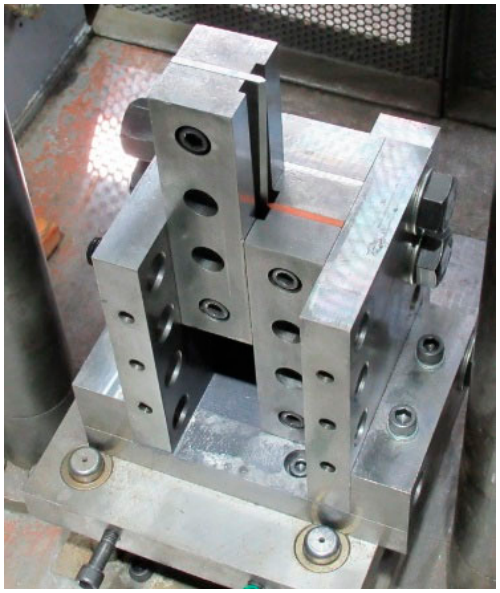


図 2　接合装置の内部(上：A6061-T6，下：C1100)

3．接合実験結果および考察

小テーパーの板材を用いたときの接合板を図 3 に示す．この衝撃接合法の特徴的な点は，A6061-T6 板では表面層が軟化し箔状に変形，圧縮力によって排出されることによって新生面を生成することである．したがって酸化膜は完全に除去できるものと考えている．

図 3　接合板（小テーパー板材，落錘質量：90 kg）

接合境界に沿って 10 mm 間隔で切断し，図 4 に示す引張試験片で接合性を継手効率(弱い方の母材の引張強さに対する最大応力の百分率）で評価した．なお，板厚方向の接合個所は，板厚中央部の約 3 mm で，表面付近は接合していない．継手効率の計算で，断面積は幅と元の板厚(5 mm)で計算しており，接合していた面積そのものではないため過少評価することになる．破断面は図 5 に示すように，C1100 に A6061-T6 が凝着した状態で，C1100 の表面が見えることはなかった．以下，検討項目ごとに示す．

3.1　接合性に対する表面性状の影響

放電加工面のまま実験したとき，接合境界に沿った引張強さと継手効率の分布は，図 6 に示すように A6061-T6 の箔が生じて比較的強固な場合とそうでない場合があり，安定しなかった．そのため#100 または#400 のペーパー掛け

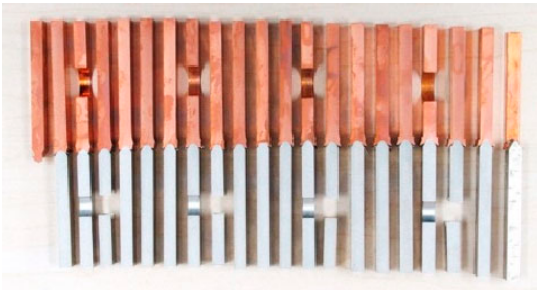


図 4　引張試験片の断面

図 5　破断面の例(左：A6061-T6，右：C1100)

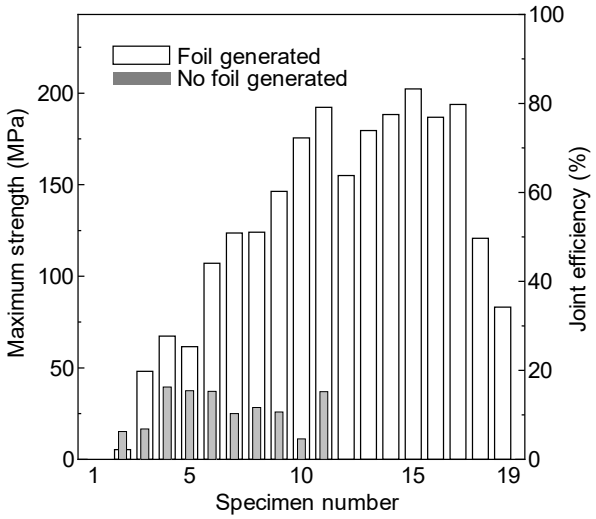
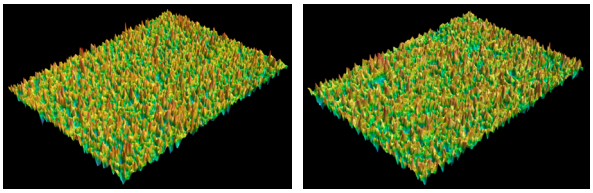


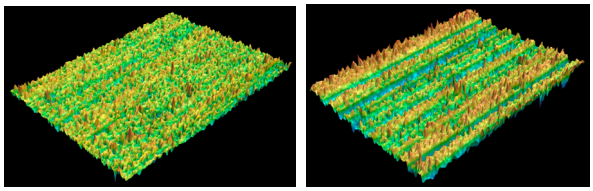
図 6　放電加工面で実験したときの引張強さと継手効率

を縦方向(摺動方向)または横方向に施し，表面性状の影響を検討した．

放電加工面と#100 で処理したときの表面性状(最大高さ粗さ Rz：0.010 mm)を図 7 に示す．ペーパー掛けすると A6061-T6 で筋模様が顕著である．縦方向にペーパー掛けした条件で 4 回実験した．図 4 と同様の方法で継手効率の分布を評価したときの上位 10 個の平均値を図 8 に示す．安定した比較的大きい継手効率が得られることが分かる．しかし横方向にペーパー掛けしたとき，図 9 に示すようにほとんど接合しなかった．摺動方向に大きい凹凸があるため，断続的な接触になる表面性状は適さないことが分かった．



(a) 放電加工面



(b)#100 ペーパー掛けした面

図 7　放電加工面と#100 でペーパー掛けした表面性状

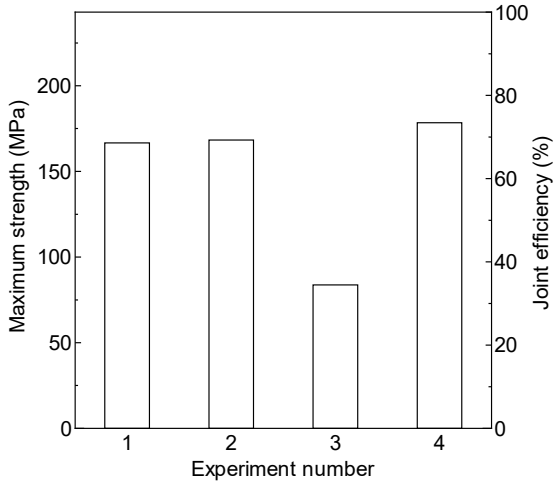


図 8　縦方向にペーパー掛けしたときの引張強さと継手効率上位 10 個の平均値（実験回数 4）

図 10 に示すように，接合している板厚中央部で接合板をスライスし，平行部 40 mm，幅 8 mm の試験片を製作し，引張試験を行った．8 個の試験片のうち 6 個が母材の C1100 で破断し，残りの継手効率も 88.9%（左端），99.8%と大きい値であった．さらに#400 でペーパー掛けした場合についても検討したところ，Rz は 0.004 mm でペーパー掛けの方向について，差は見られなくなった．この後に示す結果については，すべて#400 で摺動方向にペーパー掛けした条件で実験した．

3.2　板材寸法が接合性に及ぼす影響

板材のテーパーを大きくして，接合性を検討した．落錘の質量は 120 kg である．接合板と接合境界に沿った引張強さ，継手効率の分布，母材破断したサンプルを図 11 に示す．グラフ中，試験片 No.1 が接合板の左端の接合部である．図 6 と比較して，テーパーを大きくすると接合性が

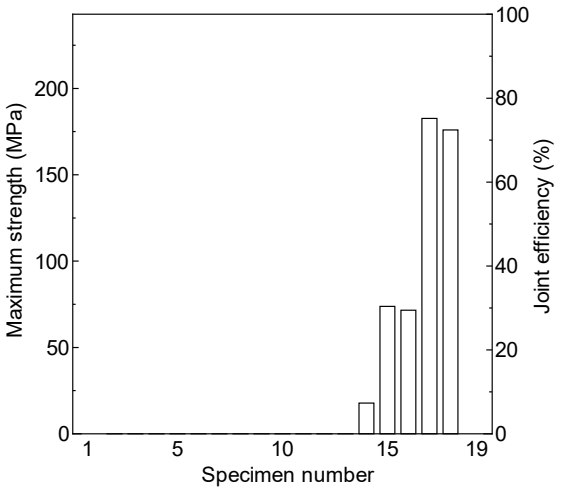
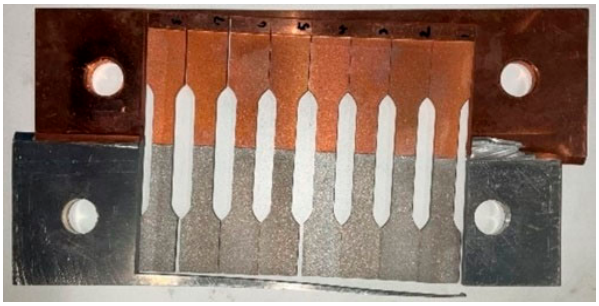
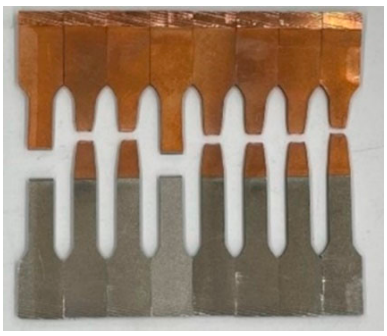


図 9　横方向にペーパー掛けしたときの接合性



(a) 板厚中央部でスライスして製作した引張試験片

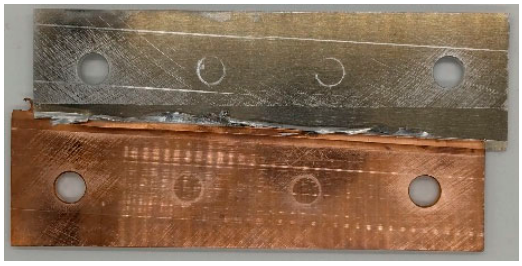


(b) 引張試験結果

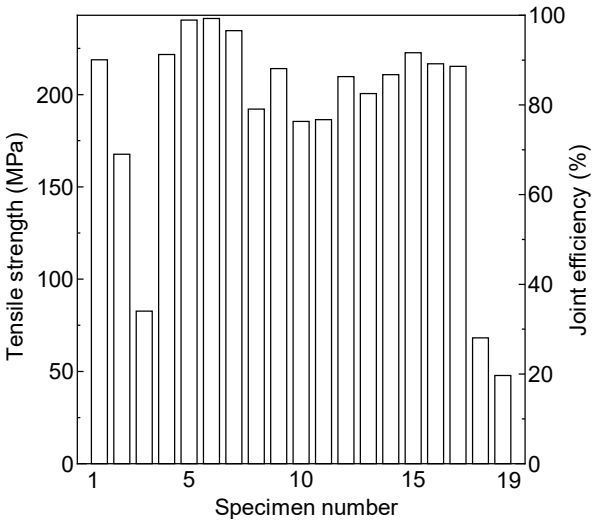
図 10　板厚中央部でスライスした引張試験片と試験結果

良好な範囲が拡大したことが分かる．さらに大テーパーの条件で，落錘質量を 10 kg 増やして 130 kg に設定して実験したところ，8 mm 程度長くストロークしているが，継手効率に差は見られなかった．このとき，2 枚の板に芯ずれを生じていたことが影響した．

A6061-T6 の箔の生成過程を高速度ビデオ撮影した．図 12 に撮影部位(接合完了時の接合板で長さ 100 mm の中央の領域)と A6061-T6 の摺動と箔の生成を示す．摺動開始から 5 ms 程度で箔の生成が始まっていることが観察できた．A6061-T6 の温度上昇を低めに見た概算では 250 K であった [10]．そのとき断熱塑性変形している層の厚さを仮定した．しかし，箔の生成はかなり早期に発生しているため，



(a) 大テーパーの板材を用いたときの接合板



(b) 引張強さと継手効率

(c) 母材破断した試験片(試験片 No. 6)

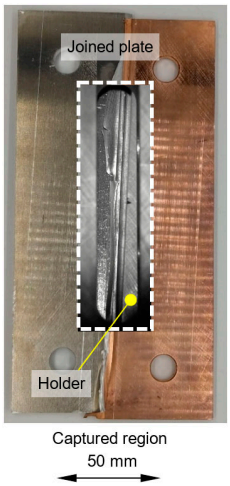
図 11　大テーパーの板材で製作した接合板と引張試験結果

その厚さは仮定したものより相当薄いものであったと考える.

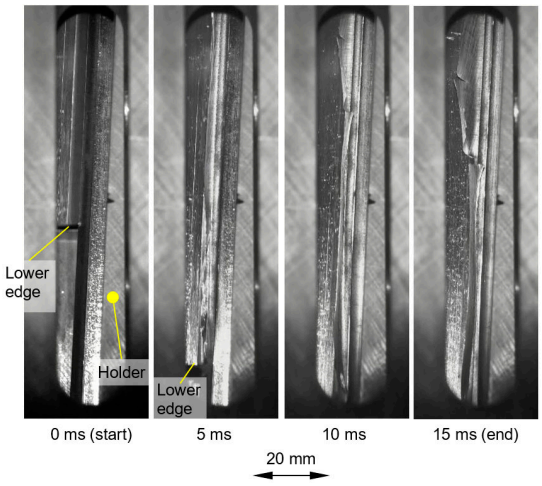
3.3　接合板の圧延と圧延後の引張試験

120 または 130 kg の落錘を用いて接合した板から，図 13 のように中央部で幅 40 mm で圧延素材を 3 枚切り出した．前述の通り，板厚の表面付近ではノッチ状の隙間があり接合していないため,その部分をワイヤーカット放電加工で除去した．圧延素材の板厚は 2.7 mm である．これを図 14 に示すように，ロール径 50 mm の小型の平板圧延機で板厚が 1 mm になるまでロール間隙を 0.1 mm ずつ狭く設定し，繰り返し圧延加工した．全部で 6 枚圧延したところ，圧延時に分離したものは 1 枚であった．表面付近の接合していない部分が圧延素材にもともと残っていたためであるが，圧延前の段階で隙間は肉眼で分からなかった.

幅が約 40 mm の圧延した板から 4 本の引張試験片を製作した．引張試験片の接合境界幅は約 7 mm，境界部が細くなるようにくびれ部を付けた.圧延したため引張強さは上昇しており，C1100 では 388 MPa，A6061-T6 で 411 MPa であった．このため，母材強さは 388 MPa とした．圧延後の板の継手効率を図 15 にまとめて示す．130 kg の落錘を用いたときの接合板では，圧延中に分離したもの(Plate 1)と引張試験加工時に分離したものがある．これは，表面に肉眼で捉えられない程度の小さい非接合部が残っていたことと,圧延すると板幅端部で変形の不均一性が現れやすいことに起因するためと考える.



(a) 撮影領域



(b) 境界部の変形

図 12　A6061-T6 の箔の生成過程の高速度ビデオ撮影
(左: A6061-T6, 右: C1100; 落錘質量: 130 kg)

図 13　圧延用試験片(120 kg の落錘を使用して製作)

図 16 に圧延前後の接合境界を示す．圧延前，丸みのある接合境界の形状が変化したことが分かる．継手効率が 80%を超える場合，破断個所は A6061-T6 であった．これは，圧延後では C1100 と A6061-T6 に引張強さの差が少なくなったためと考えられる．例として，図 15 の▼印の破断した試験片を図 17 に示す．断面写真から A6061-T6 で破断したことが分かる．圧延によるひずみの大きさは約 1 と大きいが，継手効率は 90%を超えているものがいくつかあり，最大は 99%であった．よって，接合境界部はこの種の塑性変形に対して十分な変形能を有すると言える．

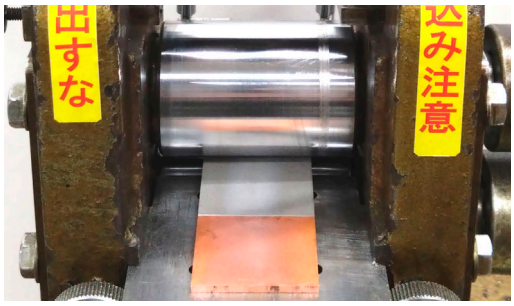


図 14　接合板の平圧延

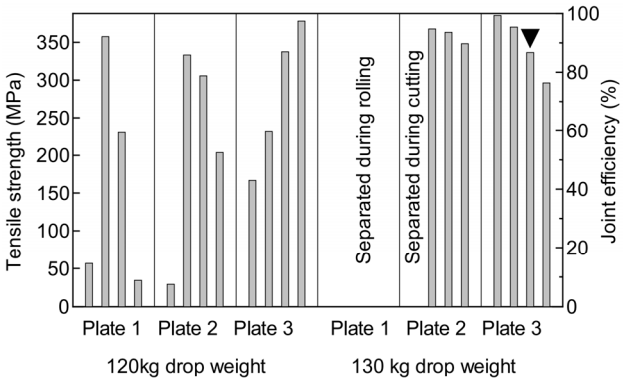
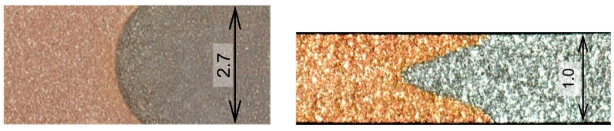
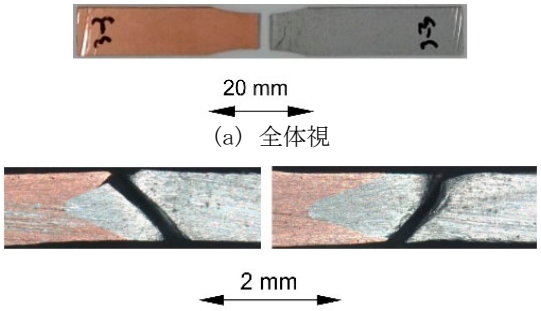


図 15　圧延板の引張試験結果



(a) 圧延前　　(b) 圧延後

図 16　圧延前後の接合境界



(a) 全体視

(b) 破断部拡大（両側）

図 17　破断した試験片（図 15 で▼印の試験片）

4．まとめ

筆者が考案した銅 C1100 とアルミニウム合金 A6061-T6 の高速塑性変形を利用した異材接合法について，実験条件が接合性に及ぼす影響について検討し，安定的に母材破断させることができることを示した．また接合板を圧延加工した後も，継手効率は良好であることを示し，加工用素材として用いることができることも示した．得られた主な結論は以下のとおりである．

1) 試験板のテーパーを大きくすることによって，接合性は向上した．一部の引張試験片は母材(C1100)で破断した．
2) 衝撃接合中の高速度ビデオカメラによる観察によって，接合プロセスに不可欠な A6061-T6 箔の形成が，プロセスの開始からわずか 5 ms で始まり，接合プロセスは 15 ms で完了した．
3) 接合板を板厚方向の真ひずみが約-1.0 になるまで圧延したとき，接合効率は最大で 99%が得られた．また接合効率が 80%を超えると，A6061-T6 で破断が発生した．

謝　辞

筆者は，公益財団法人天田財団からの国際会議等参加準備助成金(AF-2002030)を受けており，ご支援に対し同財団に感謝いたします．

参考文献

1) Pawlicki, M., Drenger, T., Pieszak, M., Borowski, J.: J. Mater. Proc. Technol. 2015, 223, 193-202.
2) Matsumoto, R., Hashimoto, K., Utsunomiya, H.: J. Mater. Proc. Technol. 2022, 307, 117685.
3) Yamagishi, H.: Metall. Mater. Trans. 2023, 54A, 3519-3536.
4) Eivani, A.R., Mirzakoochakshirazi, H.R., Jafarian, H.R.: J. Mater. Res. Technol. 2020, 9, 3394-3405.
5) Eslami, N., Harms, A., Deringer, J., Fricke, A., Bohm, A.: Metals 2018, 8, 661.
6) Kaya, Y.: Metals 2018, 8, 780.
7) Yang, J., Cao, B.: Mater. Design 2015, 74, 19-24.
8) Yamashita, M., Imayoshi A., Nikawa M.: Proc. 14th Int. Conf. Technol. Plasticity, 2023, 19-26.
9) Yamashita, M., Nishimura, Y., Imayoshi, A., Nikawa, M.: Metals 2024, 14, 878.
10) Yamashita, M., Nishimura, Y., Nikawa, M.: Metals 2025, 15, 1207.
11) Zhang, W., Bay, N.: Welding J. 1997, 76, 326-330.