

Al/Cu薄板の衝突部へ放電電流を転流する電磁圧接法

相沢 友勝

東京都立工業高等専門学校 〒140-0011 東京都品川区東大井 1-10-40

E-mail: aizawa@mem.iece.or.jp

あらまし この報告で、電磁圧接はコンデンサ電源から絶縁した平板状5ターンコイルへ放電電流を瞬間的に流して行われる。間隙を設けて重ねた二組の同じAl/Cu薄板をコイル上に並べて固定し、高密度磁束を加える。磁束はコイルに近いAl薄板に交差する。Al薄板には渦電流が流れて電磁力が働く。Al薄板はCu薄板へ高速で衝突して圧接される。薄板が衝突するとき、放電電流はほぼ最大に達するようにする。一組は従来どおり固定され、他の一組は機械式スイッチの接点用として固定される。接点用Al/Cu薄板はそれぞれコイルの両端へ接続される。放電電流がほぼ最大になったとき、接点用薄板は衝突するので、放電電流は接点用薄板を含む短絡回路へ転流する。転流後、コイルへ流れる電流は、回路条件を選ぶと振動しなくなり、徐々に減衰する。二組のAl/Cu薄板をこのように圧接した結果を報告する。

キーワード 電磁圧接, Al薄板, Cu薄板, コンデンサ電源, 放電電流, 転流, 機械式スイッチ

Magnetic pulse welding method commutating discharge current to collision part of Al/Cu sheets

Tomokatsu AIZAWA

Tokyo Metropolitan College of Technology 1-10-40, Higashi-Ohi, Shinagawa-ku, Tokyo 140-0011, Japan

E-mail: aizawa@mem.iece.or.jp

Abstract In this report, magnetic pulse welding is performed by rapidly flowing a discharge current from a capacitor bank to an insulated 5-turn flat coil. Two sets of overlapped Al/Cu sheets with a gap are fixed on the coil, and high density magnetic flux is applied to them. The flux intersects the Al sheets near the coil. The resulting eddy currents are induced in the sheets, applying electromagnetic forces to them. The Al sheets collide to the Cu sheets at high speed and these are welded. The current is set to be nearly peak when the sheets collide. One set is fixed as usual and the other set is fixed as mechanical switch contacts. The contacts (Al/Cu sheets) connected to both ends of the coil. When the discharge current reaches nearly the peak, the contacts collide and so the current flowing through the coil commutates to the short-circuit including the contacts. Depending on the circuit conditions after the commutation, the coil current does not oscillate but gradually damps. The results of two sets of Al/Cu sheets welded in this way are reported.

Keywords Magnetic pulse welding, Al sheet, Cu sheet, Capacitor bank, Discharge current, Commutation, Mechanical switch

1. はじめに

電気、電子部品を電気接続する分野で、アルミニウム (Al) と銅 (Cu) を溶接接続する需要が増加している。Alは難はんだ付け材料であるが、軽量、安価などの理由で、接続部品として使われ始め、Al/Cuの溶接が必要になっている。本技術報告にも発表例がある[1-4]。

電磁圧接は、間隙を設けて重ねたAl/Cu薄板などへ高密度磁束を急激に加え、薄板同士を高速衝突させて行われる[5-8]。Al/Cu薄板、電気電子部品の溶接接続に適している[9-14]。Al/Cu薄板を電磁圧接しても、異種金属

間に生じる脆い金属間化合物の悪影響がほとんど無く、接合強度に問題ないと言われている[15-17]。

技術的には、コンデンサ電源から平板状のコイルへ放電電流を急激に流し、Al薄板へ高密度磁束を急に加え、電磁力を発生させる。電磁力で加速されたAl薄板はCu薄板へ高速衝突して接合する。平板状コイルのターン数を増加すると、圧接に必要な放電電流はターン数に応じて減少する[9-11]。電磁圧接用の放電電流は、回路抵抗が小さいので減衰振動する。振動する電流波形の最大値(1/4周期)近くで衝突させると、効率よく圧接できる[18, 1

9]. 後に続く電流波形にはほとんど影響されない. 後続する放電電流は極性を変えて大きく振動して流れるので電圧変化が大きく, 放電装置に悪影響することがある. できれば, 後続する減衰振動を防ぎたい.

減衰振動する放電電流の振動を防ぐには, 放電電流が最大値に達した時点で, 平板状コイルの両端を低インピーダンスの回路で短絡すればよい[20-23]. 短絡後, コイルへ流れる電流は短絡部分へ転流して流れ, 振動しなくなる. このスイッチとして, 普通の放電ギャップスイッチを用いることは困難である. 理由は, 放電電流が最大に達する時点で, コンデンサ電源の電圧が零になるからである, この場合, 普通の放電ギャップスイッチをトリガしても簡単に放電短絡しない. ギャップスイッチを使用する場合には工夫が必要である.

ここでは, 間隙を設けて重ねた二組の同じAl/Cu 薄板を平板状5ターンコイル上に並べて固定する. 一組の薄板を放電電流が確実に短絡, 転流す高速機械式スイッチとして動作させる[24]. 放電電流を転流させた状態で二組の薄板を同時に電磁圧接した結果を報告する.

2. 平板状コイルおよび圧接原理

2.1 平板状5ターンコイル

Al/Cu 薄板を電磁力で衝突させる平板状5ターンコイル(概略図)を図1に示す. コイルはそれぞれ絶縁された5枚のコイル板(No. 1~No. 5) からなり, ぴったり重なっている. コイルにはコンデンサ電源および放電ギャップスイッチが接続されている. 電流は板No. 1の細長い中央部分(幅5mm)に上向きに流入し, 幅の広い周辺部分から下向きに戻る. この電流は板No. 1下部で合流し, 再び板No. 2の中央部分に上向きに流れる. 電流はこのようなターンを繰り返して板No. 5の周辺部から流出する. コイル中央部分には, 電流が直列に流れる. この部分に電磁圧接用の高密度磁束が発生する. コイル面に往復して流れる電流間に働く面方向の電磁力は, 打ち消されるような構造であり, 電流間の電磁力で変形しにくい.

2.2 圧接原理

原理を説明する概略図を図2(断面図)に示す. 絶縁されたコイル上に, 間隙(2mm)を設けて重ねたAl/Cu 薄板を固定する. コイル中央部分へ放電電流が急激に流れると, ここに高密度磁束が発生する. この磁束は下側のAl薄板に交差する. Al薄板には渦電流と呼ばれる誘導電流が流れ, 上向きの電磁力 f が働く. Al薄板は変形しながらCu 薄板へ高速で衝突するとき, 金属ジェットが発生して接合面は清浄化され, 両薄板は圧接される.

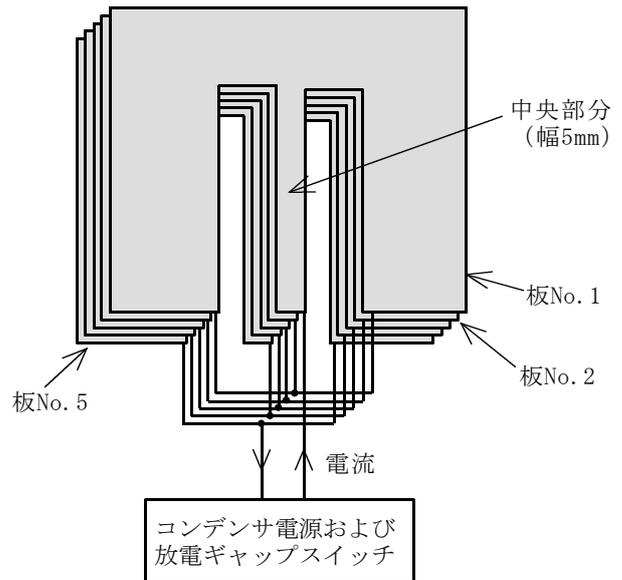


図1 電磁力発生用平板状5ターンコイルの概略図

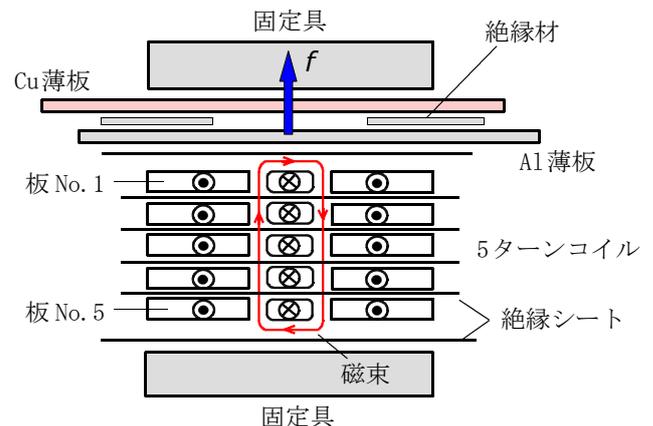


図2 圧接原理を説明する概略図(断面図)

通常, コイルとAl/Cu 薄板は直流的に絶縁されているが, 交流的には電磁結合している. 後で示すように機械式スイッチの接点用Al/Cu薄板は, 各薄板がそれぞれコイルの両端(端子板)へ直接接続される.

Al薄板に流れる渦電流密度 i は式(1)で, この薄板に単位体積あたり働く電磁力 f は式(2)で, 電磁力に相当する磁気圧力 p は式(3)で与えられる.

$$\text{rot } i = -\kappa (\partial B / \partial t) \quad (1)$$

$$f = i \times B \quad (2)$$

$$p = (B_0^2 - B_i^2) / 2\mu \quad (3)$$

ここで, κ , μ はそれぞれ, 下側Al薄板の導電率, 透磁率であり, B はコイル中央部分上面に発生する磁束密度, B_0 および B_i はAl薄板の下面および上面での磁束密度(面方向成分)の大きさである.

3. コンデンサ放電回路および短絡転流回路

コンデンサ放電回路，短絡転流回路の構成例を図3に示す．コンデンサ電源，放電スイッチおよび平板状5ターンコイルからなる回路が，薄板衝突（転流）前の放電回路である．コイル上には二組の同じAl/Cu薄板（圧接用薄板および機械式スイッチの接点用薄板と区別する）が間隙を設けて置かれる．短絡転流回路のインダクタンスが小さいとして放電，転流動作を説明する．

まず，充電されたコンデンサ電源を放電ギャップスイッチを電気的にトリガして閉じ，平板状5ターンコイルへ放電電流を流す．放電電流は図3の点線に沿った放電回路へ流れる．

次に，この放電電流が最大値近くに達したとき，二組のAl/Cu薄板の下側Al薄板を上側Cu薄板へ高速衝突させる．この結果，機械式スイッチの接点用Al/Cu薄板が閉じ，コイルに流れているほとんどの電流は，平板状5ターンコイルに比べて低インダクタンスの接点用薄板で短絡された転流回路に矢印の方向へ流れ続け，次第に減少する．このコイル電流は振動(LC振動)しなくなる．

機械式スイッチの動作原理，構造などについては別に報告されている[24]．接点用薄板は圧接用薄板と同様に重ね，図2のように両端の絶縁材を挟んで固定される．

4. 実験装置

コンデンサ電源の放電，短絡転流回路を図4に示す．まず，放電回路のコンデンサ電源C（容量50 μ F）を充電した．放電ギャップスイッチGを電気パルスでトリガし，平板状5ターンコイルL5へ放電電流Iを流した．充電する電圧は約5kVであり，放電エネルギーは0.6kJ，放電電流最大値は約28kAであった．

次に，放電電流が最大値近くに達したとき，機械式スイッチの両接点用薄板が衝突するように薄板の厚さ，間隙などを変えて調整した．これらの結果，放電電流が最大値達したとき，接点用薄板を含む短絡回路へ転流した．コイルへ流れる電流は振動しなくなった．

コイル外觀例を図5に示す．写真は，見やすくするため絶縁シートを挿入せず，各板を少し離して撮影された．手前右側に接続用端子板が上下に付いている．各コイル板（No.1～No.5）の形状を図6に示す．コイル板は銅合金製，板厚は0.5mmであった．各板中央部分の幅は5mm，長さは120mmであり，中央部分と周辺部分の間隔は5mmであった．コイルは，各板を重ね，各板下部の一部両面をはんだ付けして製作された．各板の間に挿入する絶縁シートの材質はポリイミド，厚さは50 μ mであり，数枚を重ね

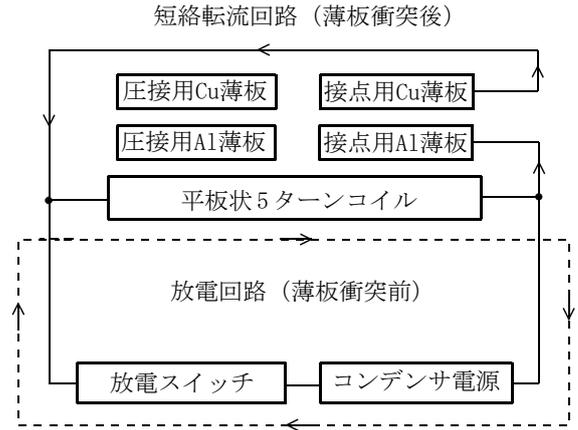
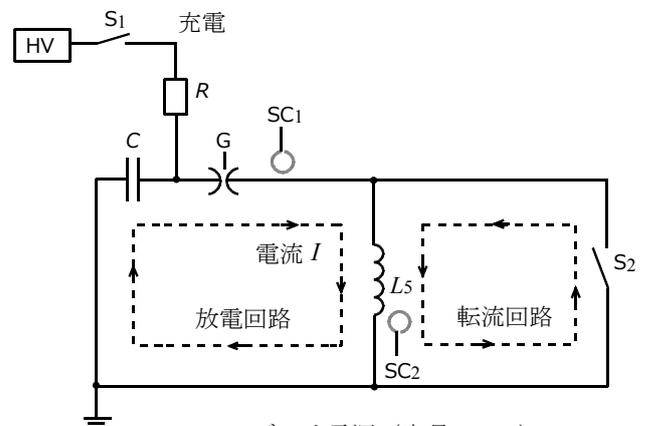


図3 コンデンサ放電回路，短絡転流回路の構成図



- C コンデンサ電源（容量 50 μ F）
- G 放電ギャップスイッチ
- L5 平板状 5ターンコイル
（インダクタンス 0.75 μ H）
- R 抵抗（100 k Ω ）
- HV 直流高電圧電源
- S1 高電圧充電用機械式スイッチ
- S2 高速機械式転流スイッチ
- SC1 電流測定用サーチコイル
- SC2 電流測定用サーチコイル

図4 コンデンサ放電回路および短絡転流回路

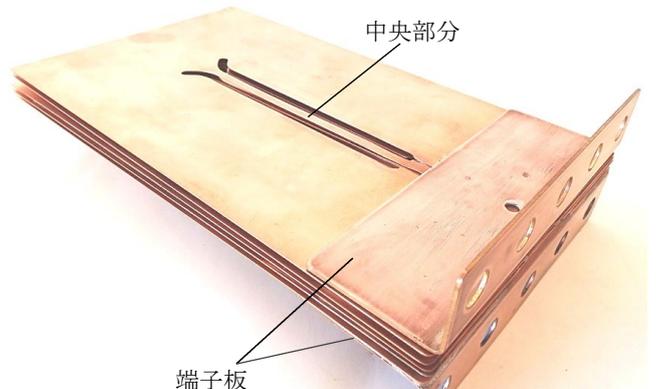


図5 平板状5ターンコイル外觀

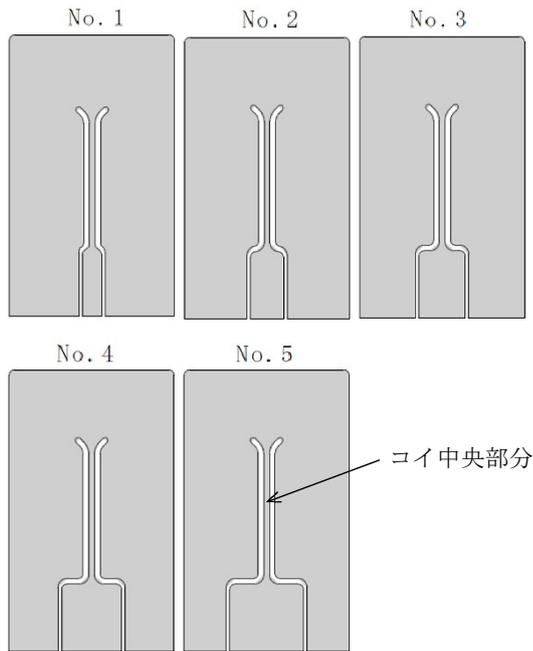


図6 コイル板(No. 1~No. 5)の形状

て挿入した。各板を絶縁した状態で、コイル全体の厚さは、3~4mmであった。

コンデンサ電源および平板状5ターンコイルへ流れる電流波形は、放電スイッチG近くおよびコイル近くに置かれた2つの電流測定用サーチコイル(SC1, SC2)で同時に測定された。サーチコイルからの電圧信号は、シールド室内の整合・積分回路、オシロスコープなどで電流信号に変換され、記録された。

圧接用および接点用薄板の材質は、下側がAl, 上側がCuであり、厚さは0.4mm, 幅は約50mm, 長さ約70mmであった。薄板に設ける間隙は約2mmであった。接点用薄板とコイルはなるべく低インダクタンスになるよう幅約50mmのリード板(厚さ0.1mm)で2並列に加圧接続された。また、リード板は接続された接点用薄板へ転流する電流がコイル中央部分に対しなるべく垂直に対向して流入、流出するように配置された。

圧接された薄板の接合断面の顕微鏡写真観察は、切断、研磨を含めて専門業者に依頼して行われた。

5. 実験結果

5.1 電流波形

放電エネルギー 0.6 kJ のとき、コンデンサ電源および5ターンコイルへ流れる電流波形を図7に示す。両電流が流れ始めてからAl薄板が衝突、転流するまでの時間は、約10 μ sであった。転流は両波形の最大値近くから始まった。両波形の最大値は共に約28kAであった。電流測定用

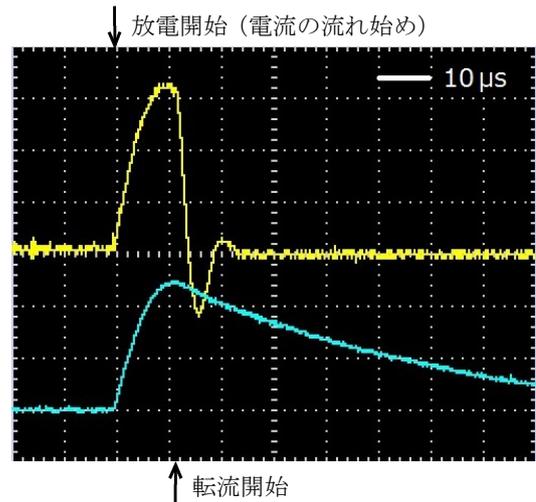


図7 電流最大値で転流した場合の電流波形例
電源容量50 μ F, 放電エネルギー0.6kJ
(上) コンデンサ電源に流れる電流波形
(下) 5ターンコイルに流れる電流波形

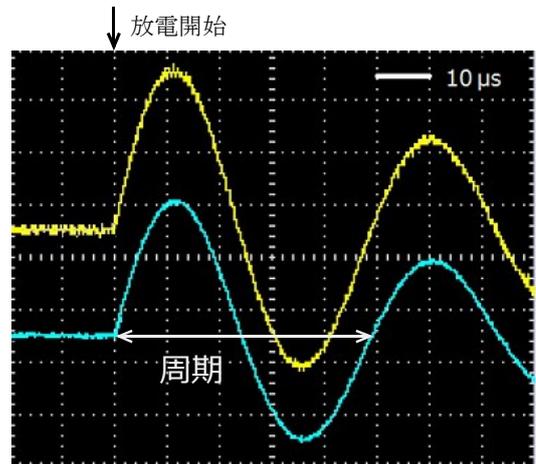


図8 転流しない場合の電流波形例(参考)
電源容量50 μ F, 放電エネルギー0.6kJ
(上) コンデンサ電源に流れる電流波形
(下) 5ターンコイルに流れる電流波形

サーチコイルの出力電圧が異なるため、波形最大値の高さは一致しなかった。転流後、電源に流れる電流は振動性が急に弱まった。コイルに流れる電流は単極性の減衰波形となり、振動しなくなった。

参考のため、接点用薄板をコイル両端へ接続せず、転流しない場合の電流波形例を図8に示す。両波形の最大値は共に約28kAであり、両波形が同様に減衰振動した。電流波形の振動周期は約48 μ sであった。

5.2 圧接された薄板の接合状態

二組の同じAl/Cu薄板は図9のようにほぼ同様に圧接された。各薄板はコイル中央部分に沿って、図9のように縦方向へ端から端まで連続して圧接(シーム溶接)された。コイル近くに置かれたAl薄板は約15mm幅で変形し、この

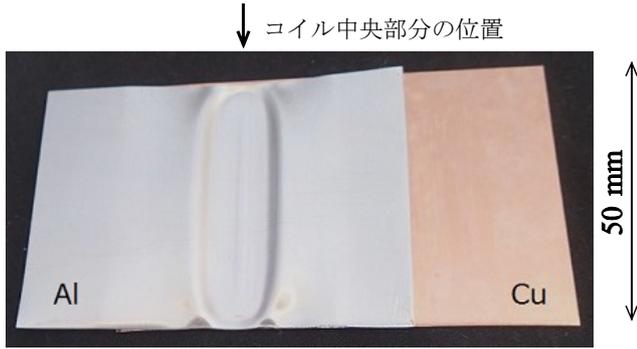


図9 圧接された薄板の外観

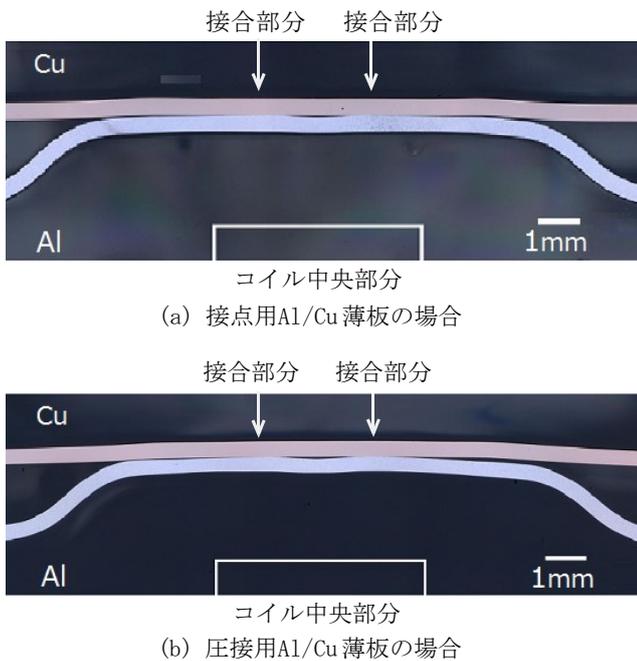
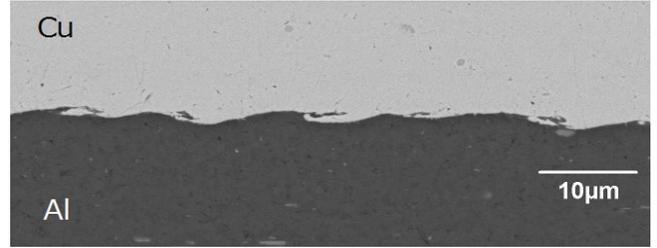


図10 二組のAl/Cu薄板接合断面(界面)の状態
電源容量 $50 \mu\text{F}$ 、放電エネルギー 0.6kJ

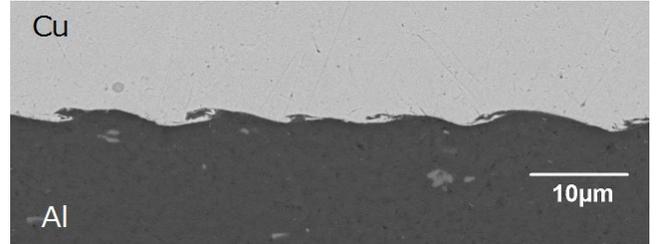
一部が上側のCu薄板へ圧接された。この幅は従来の約10mmに比べて広がった。

両薄板をシーム溶接方向に対し垂直に切断、研磨し、接合断面を光学顕微鏡で観察した。二組のAl/Cu薄板接合断面(界面)の形態を図10に示す。接合部分は、コイル中央部分上方の2箇所(↓で示す部分)に生じた。接合断面の巨視的な形態はほぼ同様であった。今回の実験で、薄板に設ける間隙は約2mmであり、従来の間隙0.5~1.0mmと比べて大きかった。このため、断面でも変形している範囲が広がった。

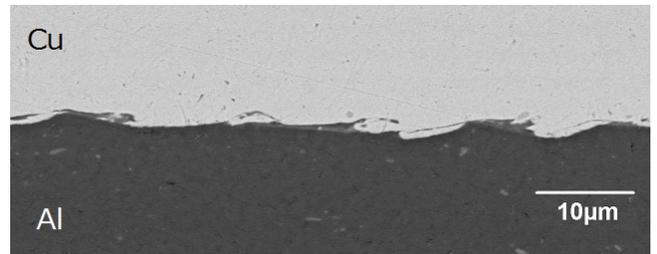
各接合部分の電子顕微鏡(SEM)による拡大写真例を図11に示す。従来と同様、界面に波状模様が見られた。波状模様の詳細な部分に違いがあるようにも見えた。このような波状模様の発生原因など詳細については別に報告されている[25]。



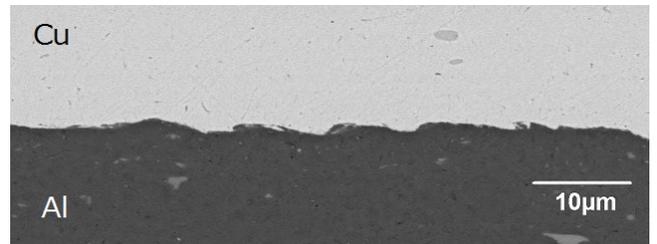
(a) 接点用Al/Cu薄板の左側接合部分



(b) 接点用Al/Cu薄板の右側接合部分



(c) 圧接用Al/Cu薄板の左側接合部分



(d) 圧接用Al/Cu薄板の右側接合部分

図11 各接合部分(図10)の電子顕微鏡による拡大写真
電源容量 $50 \mu\text{F}$ 、放電エネルギー 0.6kJ

6. まとめ

間隙を設けて重ねた二組の同じAl/Cu薄板を平板状5ターンコイル上に並べ、コンデンサ電源からコイルへ放電電流を流した。薄板が衝突したとき、その衝突部へ放電電流を転流させる電磁圧接方法を示し、転流状態、薄板圧接状態などを報告した。主な結果を以下に示す。

- (1) コンデンサ電源の放電電流を確実に短絡、転流させるため、一組の薄板を高速機械式スイッチの接点として使用できた。
- (2) 放電電流の最大近くで短絡、転流し、コイルへ流れる電流を振動しない単極性電流にすることができた。
- (3) 二組の薄板は従来とほぼ同様に圧接され、各接合断面には、衝撃圧接に特有の波状模様が見られた。接合強

度などに問題はないと思われる。

(4) 従来[9, 10]のように減衰振動する放電電流の最大値近くで衝突させて圧接しても、今回のように圧接しても、外観および接合断面などの特徴はほぼ同じであった。

(5) 転流後、コンデンサ電源に流れる電流の振動性は急に弱まった。振幅が減少すると共に振動継続時間も短くなった。これは電源にとって望ましいことである。

今後も、高速機械式スイッチおよび転流方法を改良するなどして実験を続けたい。また、放電電流を薄板の衝突部へ転流した場合としない場合について生じる相違をさらに調べたい。

参考文献

- [1] 高田, 高屋敷, 渡邊: “アルミニウムと銅の超音波接合技術の開発”, 信学技報, EMD-2007-26, pp. 47-51, 2007.
- [2] 高屋敷, 高田, 村上, 渡邊: “Al/Cuの異種金属重ね合わせ摩擦攪拌点接合”, 信学技報, EMD-2008-19, pp. 49-51, 2008.
- [3] 辻野: “細く長い複合曲げ振動溶接チップを用いた電子部品・デバイスの超音波溶接 ～狭く深い溶接部の超音波複合振動溶接について～”, 信学技報, US-2014-70, pp. 29-34, 2014.
- [4] 樋口, 浅見, 三浦: “超音波複合振動を用いたアルミニウム板と銅板の接合: いくつかの振動軌跡における検討”, 信学技報, US-2016-65, pp. 23-28, 2016.
- [5] 特許: “金属薄板の電磁溶接法及び装置”, 登録番号3751153.
- [6] 相沢: “金属薄板の電磁シーム溶接”, 溶接学会誌, 77巻8号, pp. 718-721, 2008.
- [7] 相沢: “電磁シーム溶接による異種金属接合”, 溶接技術 (日本溶接協会誌), 61巻3号, pp. 48-51, 2013.
- [8] 日本塑性加工学会編: “金属薄板の電磁圧接”, 衝撃塑性加工, コロナ社, pp. 206-220, 2017.
- [9] 相沢: “平板状4ターンコイルによるAl/Cu薄板の電磁圧接シーム溶接”, 信学技報, EMD-2015-87, pp. 1-6, 2016.
- [10] 相沢: “平板状6ターンコイルによるAl/Cu薄板の電磁圧接”, 信学技報, EMD-2016-22, pp. 31-36, 2016.
- [11] 相沢: “平板状8ターンコイルによるAl/Cu薄板の電磁圧接”, 信学技報, EMD-2018-9, pp. 7-12, 2018.
- [12] 特許: “電磁溶接方法及び導体モジュール”, 登録番号5274944.
- [13] 相沢: “電気・電子部品を電磁圧接するための基礎実験”, 信学技報, EMD-2012-92, pp. 7-12, 2012.
- [14] 相沢, 杉山: “リジッド及びフレキシブルプリント配線板銅箔の電磁圧接 (第2報)”, 信学技報, EMD-2016-15, pp. 39-42, 2016.
- [15] Watanabe, Kumai, Aizawa: “Interfacial microstructure of magnetic pressure seam welded Al-Fe, Al-Ni and Al-Cu lap joints”, Materials Science Forum, Vol. 519-521, pp. 1145-1150, 2006.
- [16] Kwee, Faes: “Interfacial Morphology and Mechanical Properties of Aluminium to Copper Sheet Joints by electromagnetic Pulse Welding”, Key Engineering Materials, Vol. 710, pp. 109-114, 2016.
- [17] 糸井, 鈴木, 佐々木, 岡川: “電磁圧接によるAl/Cu接合板の作製とその界面組織観察”, 軽金属溶接 (軽金属溶接協会誌), 55巻8号, pp. 290-299, 2017.
- [18] Aizawa: “Electromagnetic Energy Transmission in Magnetic Pulse Welding of Al/Cu Sheets using 1, 3, 4 and 6 Turn Flat Coils”, IEICE Technical Report, Vol.117, No.312, EMD 2017-46, pp.21-26, 2017.
- [19] 相沢: “電磁圧接用平板状6ターンコイルへの電磁エネルギー移送及びコイルの変形”, 信学技報, EMD-2016-65, pp. 1-6, 2016.
- [20] エネルギー変換懇談会編: “電磁気エネルギーの貯蔵 [1] 静電エネルギー”, エネルギー蓄積輸送工学, オーム社, pp. 72-75, 1980.
- [21] 相沢: “負荷電流にリップルの乗らないクローバ回路”, 電気学会論文誌B, 102巻3号, p. 186, 1982.
- [22] 電気学会 (大電流応用技術調査専門委員会) 編: “電流クローバ”, 大電流工学ハンドブック, コロナ社, pp. 196-200, 1992.
- [23] 柳父: “パルスパワー技術とその応用”, オーム社, pp. 87-89, 1992.
- [24] 相沢: “金属薄板の電磁圧接における放電電流転流用高速機械式スイッチの提案”, 信学技報, EMD-2019-2, pp. 7-11, 2019.
- [25] Ben-Artzy, Stern, Frage, Shribman, Sadot: “Wave formation mechanism in magnetic pulse welding”, International Journal of Impact Engineering, Vol.37, pp. 397-404, 2010.