

平板状10および20ターンコイルを用いたAl/Cu薄板の電磁圧接シミュレーション

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.ice.or.jp

あらまし Al/Cu薄板の電磁圧接は、コンデンサ電源から平板状コイルへ放電電流を流し、Al薄板へ高密度磁束を加えて行われる。放電電流を減らすため、多数ターンコイルが用いられる。この報告では、放電時の電源容量を、24, 6および1.5 μF に対し、コイルターン数を、それぞれ、5, 10 および20 に選ぶ。これらの組合せ(電源容量とターン数)は電磁氣的に等価な組合せである。各組合せのコイルが適切に製作されれば、放電電流の振動周期および発生する高密度磁束がほぼ同じになる。この結果、各組合せの電磁圧接では、5ターンコイルを用いた実験結果を基に10 および20 ターンコイルを用いた同様の結果をシミュレーションできる。圧接に必要な放電電流最大値は、10および20ターンコイルで、それぞれ約16および8 kAに減少する。

キーワード 溶接接続, 電磁圧接, Al, Cu, 薄板, コンデンサ電源, 20ターンコイル, シミュレーション

Simulation of magnetic pulse welding of Al/Cu sheets using 10 and 20-turn flat coils

Tomokatsu AIZAWA

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

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

Abstract Magnetic pulse welding of Al/Cu sheets is performed by flowing a discharge current from a capacitor bank to a flat coil and adding high density magnetic flux to the Al sheet. The multi-turn coil is used to reduce the current. In this report, the discharge bank capacity is selected as 24, 6 and 1.5 μF for the 5, 10 and 20-turn coils, respectively. These combinations (bank capacity and number of turns) are electromagnetically equivalent combinations. If each coil is appropriately made in each combination, the oscillating period of the discharge current and the generated high density magnetic flux are substantially the same. As a result, it is possible to simulate similar results using the 10 and 20-turn coils based on the experimental result using the 5-turn coil in each combination welding. The peak discharge current required for welding will be reduced to about 16 and 8 kA for 10 and 20-turn coils, respectively.

Keywords Welded connection, Magnetic pulse welding, Al, Cu, Sheet, Capacitor bank, 20-turn coil, Simulation

1. はじめに

近年、リチウムイオン電池の内部接続、配電用バスバーの接続など電気接続の分野で、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。一般に、接続部品の多くはCu製であり、はんだ付けなどで行われている。Alは難はんだ付け材料であるが、電池材料としての使用、軽量、安価などの理由で、接続部品として使われ始め、Al/Cuの溶接法が必要になっている。

溶接によるAl/Cuの接合は、融点の違い、溶接部に脆い金属間化合物が生じるなどの問題がある[1-3]。このため、

多くの固相溶接法や瞬間熔融溶接法などで研究、改良が行われている[1-12]。本学会でも報告例がある[9-12]。

電磁圧接はAl/Cu接続に適した固相溶接法であり、融点相違の影響を受けにくい。間隙を設けて重ねた両金属薄板へ高密度磁束を急激に加え、薄板同士を高速衝突させて圧接(溶接)させる[13-21]。Al/Cu薄板接合界面の微細組織観察から、金属間化合物による接合強度の低下はなく、高品位の金属結合状態が得られている[15-17]。

技術的には、コンデンサ電源から平板状コイルへ放電大電流を急激に流して高密度磁束を発生させる。コイル

のターン数を増加すると、圧接に必要な放電電流値を下げるができる。放電時のコンデンサ容量とコイルのターン数には等価な組合せがある。等価な組合せを選んでAl/Cu薄板を圧接すると、ほぼ同じ圧接結果が得られる[20, 21]。

ここでは、放電時の電源容量、24, 6 および $1.5\mu\text{F}$ に対しコイルターン数を5, 10 および20 に選ぶ。これらの組合せ(コンデンサ電源容量とターン数)は電磁氣的に等価な組合せである。5ターンコイルを用いたAl/Cu薄板の圧接実験結果[18]を基に、10 および20 ターンコイルを用いた結果をシミュレーションし、比較、検討する。

2. 多数ターンコイルおよび圧接原理・方法

2.1 多数ターンコイル

平板状多数ターンコイルを5ターンコイルを例にして説明する。コイルは図1に示すように、それぞれ絶縁された5枚の銅合金製コイル板(No. 1～No. 5)から構成され、ぴったり重なっている。電流は板No. 1の細長い中央部分(幅5mm)へ上向きに流入し、幅の広い周辺部分から下向きに戻る。この電流は板No. 1の下部で合流し、再び板No. 2の中央部分を上向きに流れる。電流はこのようなターンを5回繰り返して板No. 5の周辺部から流出する。電流が集中するコイル中央部分に高密度磁束が発生する。

10および20ターンコイルも、同じ幅、長さの中央部分で同様に構成される。各板を絶縁するシートを含めたコイル(全体)の厚さは5ターンコイルとほぼ同じで3～4mmにする。

2.2 原理・方法

電磁圧接の原理・方法を5ターンコイルを用いる場合で説明する。Al/Cu薄板はコイル上に図2(断面図)のように置かれる。コイルとAl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。コイル各板に電流が急激に流れると、コイル中央部分に高密度磁束が急に発生する。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、ここに上向きの電磁力が働く。Al薄板は上側のCu薄板へ図3のように高速で衝突する。衝突部分は横外方向へ移動し、傾斜衝突が継続する。衝突時には、金属ジェットが発生する[13]。これで酸化被膜などが除去された両薄板はコイル中央部分に沿って連続して直線状に圧接される。ただし、この断面での接合部分は、傾斜衝突する部分の一部である。

Al薄板に流れる渦電流密度 i 、この薄板に単位体積あたり働く電磁力 f 、電磁力に相当する磁気圧力 p は前報告[19, 20]に示されている。

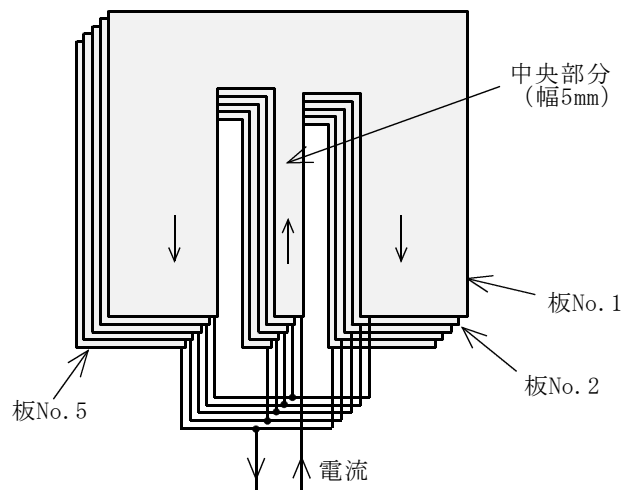


図1 平板状5ターンコイル概略図 (板厚0.5mm)

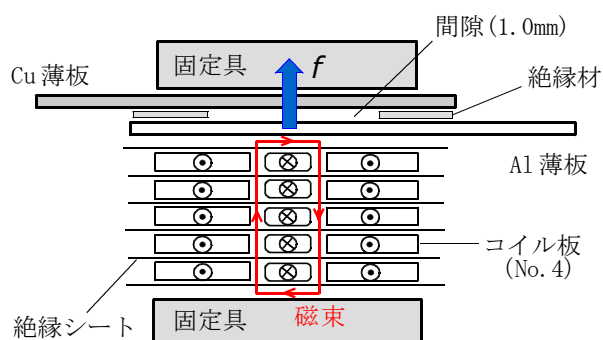


図2 コイル、Al薄板、Cu薄板の固定法および磁束発生でAl薄板に働く電磁力 f (断面図)

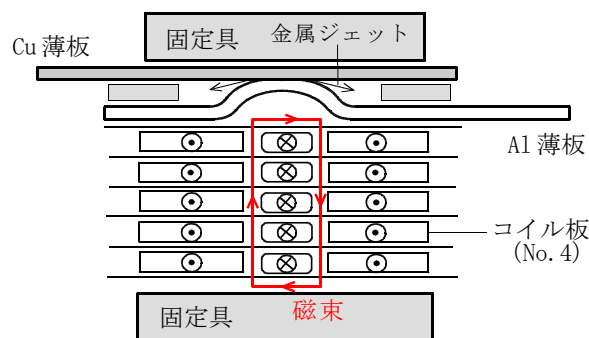
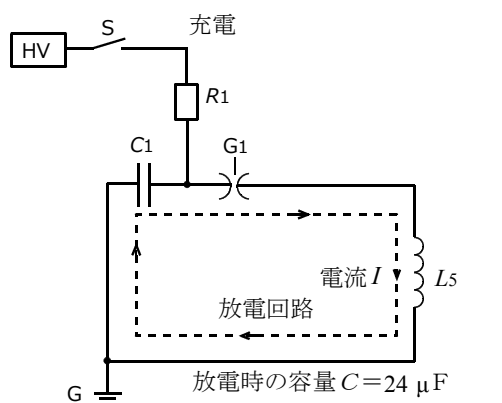


図3 両薄板衝突直後の状態 (断面図)

3. 実験装置 (充放電装置, 測定装置, 材料)

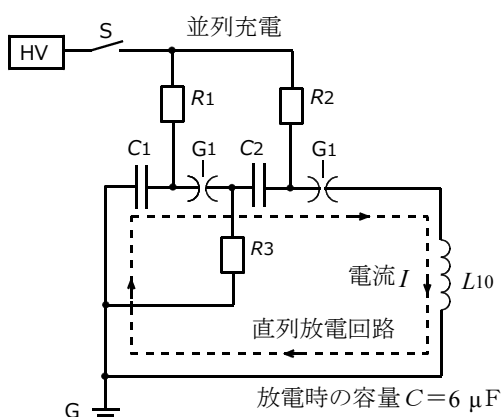
平板状5ターンコイルを用いて実験したコンデンサ充放電装置の回路図を図4に、10および20ターンコイルを用いたシミュレーション用の回路図を図5および図6に示す。

まず、放電回路の各コンデンサを充電する。その後、スイッチ S を開き、全ての放電スイッチを同時にトリガし、コンデンサ電源を放電し、各コイルへ放電電流 I を



- C1 コンデンサ (容量 24 μF)
 G1 放電ギャップスイッチ
 L5 5ターンコイルのインダクタンス
 R1 抵抗 (100 k Ω)
 HV 直流高電圧電源(以下同じ)
 S 高電圧用開閉式スイッチ(以下同じ)

図4 充放電装置回路図 (5ターンコイル用)

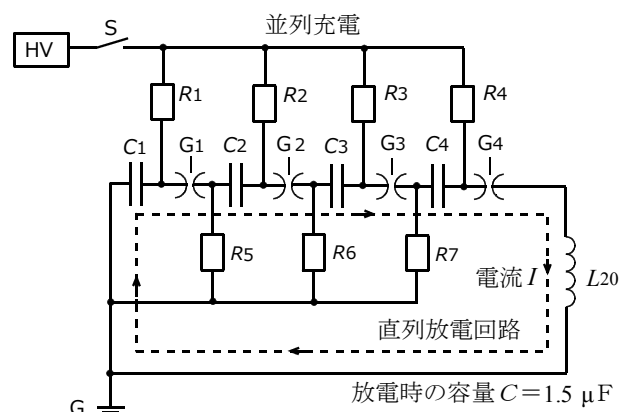


- C1, C2 コンデンサ (容量 12 μF)
 G1, G2 放電ギャップスイッチ
 L10 10ターンコイルのインダクタンス
 R1, R2, R3 抵抗 (100 k Ω)

図5 充放電装置回路図 (10ターンコイル用)

流す。この電流がコンデンサの充電回路や接地回路へ流入しないよう工夫されている。充電電圧は(並列充電を含め) 6.5～7.6 kVである。放電(直列放電を含め)時のコンデンサ電源容量は5ターンコイル用が24 μF 、10ターンコイル用が6 μF 、20ターンコイル用が1.5 μF である。放電時のエネルギー E は0.5～0.7 kJである。圧接(溶接)は1回の放電(時間約100 μs 以下)で終了する。

平板状コイル(例えば5ターンコイル)は銅合金製であり、外観例を図7に示す。写真は、見やすくするため絶縁シートを挿入せず、5枚のコイル板を少し離して撮影された。手前右側に接続用端子板が付いている。コイル(コイル板)中央部分の幅は5 mm、長さは110 mmである。中



- C1, C2, C3, C4 コンデンサ (容量 6 μF)
 G1, G2, G3, G4 放電ギャップスイッチ
 L20 20ターンコイルのインダクタンス
 R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7 抵抗 (100 k Ω)

図6 充放電装置回路図 (20ターンコイル用)



図7 平板状5ターンコイルの外観

表1 コイルおよびコイル板の厚さ比較

コイルターン数	5	10	20
コイル板の枚数	5	10	20
コイル板の厚さ (mm)	0.5	0.2	0.1
コイル全体の厚さ (mm)	約3	約4	約5

央部分と周辺部分の間隔は5 mmである。

各板の間に挿入される絶縁シートの材質はポリイミド、厚さは25および50 μm であり、数枚が重ねて用いられた。厚さ25 μm のポリイミド(商品名カプトン)の直流耐電圧は10 kVであった。他の5および20ターンコイルもコイル板中央部分の幅、長さなどは同一である。コイルおよびコイル板の厚さ比較を表1に示す。5ターン以外の各厚さは予定(目標)値である。

放電電流および衝突時間測定装置の構成図を図8に示す。コイルに流れる電流波形は、放電回路近くに置かれ

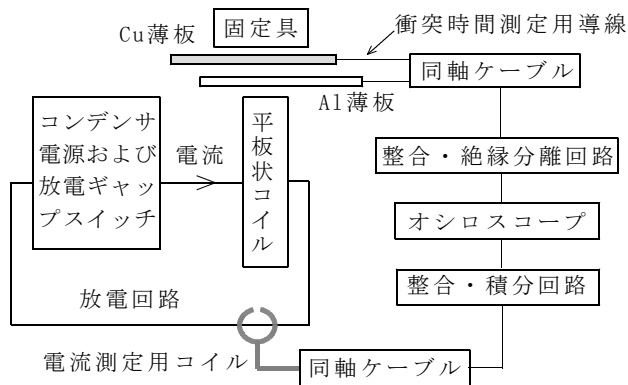


図8 放電電流及び衝突時間測定装置の構成図

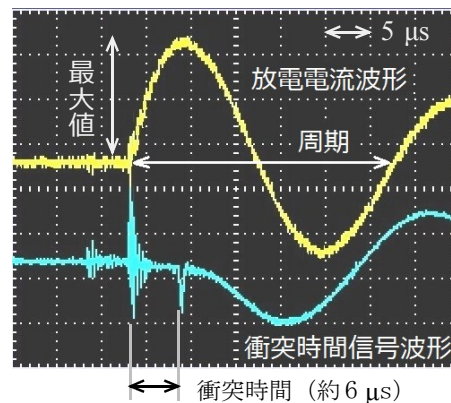


図9 電流及び衝突時間信号波形例

た電流測定用のロコスキーコイル、シールド室内の整合・積分回路、オシロスコープなどで測定された。両薄板が衝突したとき生じる衝突時間信号も、両薄板から直接にリード線を引き出し、整合・絶縁分離回路などを用いて、電流波形と同時に測定された。

実験に用いたAl薄板の材質は工業用純アルミニウム(A1050)、Cu薄板の材質は工業用純銅(C1220)、厚さは0.5 mm であり、大きさは100×100mm であった。両薄板が重なる部分の長さは約50 mm、その間隙は1mmであった。

4. 実験結果（5ターンコイル使用）

4.1 電流波形および衝突時間信号波形

5ターンコイルへ流れる電流および衝突時間信号波形を図9に示す。振動周期約29 μs で減衰振動する電流が約100 μs 流れた。コイルのインダクタンスは約0.89 μH であり、従来のワンターンコイルのインダクタンスに比べ約20倍であった。放電エネルギー0.5 kJ および0.7 kJ のとき、最大電流値はそれぞれ約27 kA および約32 kA であった。

衝突時間信号波形には、放電開始時などに高周波数のノイズが生じた。電流が流れてからAl薄板がCu薄板へ衝突するまでの時間（衝突時間）は、放電エネルギー0.5 kJ の場合、約6 μs であった。Al薄板が初速度零から加速され、衝突するときの速度は約330 m/s と概算された。衝突するときの時間は、電流が最大値に達する時間に近い範囲にあった。

4.2 圧接されたAl / Cu 薄板の接合状態

圧接（シーム溶接）された両薄板の外観例を図10に示す。溶接された薄板の中央部分が縦方向に端から端まで連続してシーム溶接されていた。Al薄板側から見た中央部分には幅10 mm 程度の変形が見られた。この変形部分の中に接合部分が存在した。

シーム溶接方向へ垂直に切断、研磨し、その断面（接合

変形および圧接（シーム溶接）部分

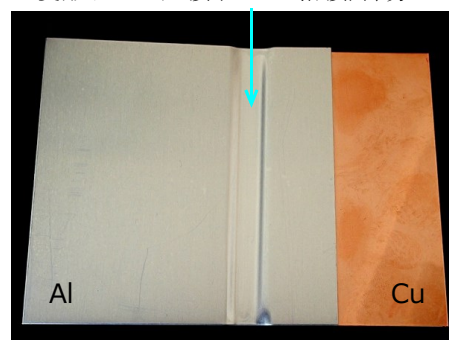


図10 圧接（シーム溶接）されたAl / Cu 薄板の外観

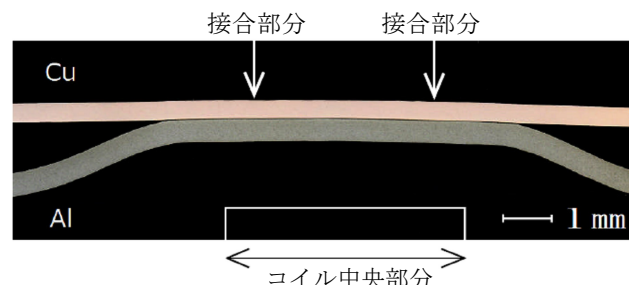


図11 変形および圧接部分断面の光学顕微鏡写真

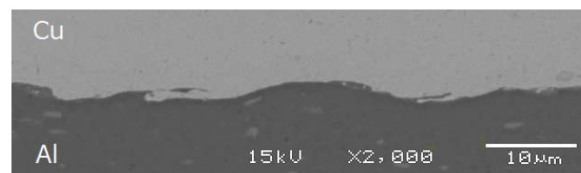


図12 片側接合部分の電子顕微鏡による拡大写真

部分）を光学顕微鏡で観察した写真を図11に示す。接合部分は、従来と同様、コイル中央部分上方の左右2箇所（↓で示す）に見られた[14, 18-20]。Al薄板変形の様子は図3に対応している。接合部分（片側）の電子顕微鏡(SEM)による拡大写真例を図12に示す。従来と同様、接合界面に不規則な波状模様が見られ、波状界面による絡み

合いを伴って接合していた．波状模様の生成理由などは説明されている[22]．このように圧接されると，接合部分は高品位の金属結合状態であると思われる．

5. シミュレーション方法，結果および検討

5.1 コンデンサ容量とターン数の等価な組合せ

放電時のコンデンサ電源容量 C とコイルターン数の等価な組合せについて説明する．先に示した各コンデンサ放電回路 (LCR 放電回路) の放電電流は，回路抵抗 R が小さいので減衰振動する．その周期 T は，近似式 (1) で与えられる．

$$T = 2\pi\sqrt{LC} \quad (1)$$

ここで， L は放電回路の全インダクタンスであるが，ターン数が4以上の場合，各コイルのインダクタンスが十分に大きいので，各コイルのインダクタンスとする．放電時の電源容量，24, 6および1.5 μF に対し，それぞれターン数を5, 10および20に選んだとき，各量および数値の比較を表2に示す．等価な組合せ (24 μF と5ターン，6 μF と10ターン，1.5 μF と20ターン) の場合，放電電流の振動周期 (および立ち上がり時間) の比は，1:1:1になり，値は近似的に同じになる．

5.2 ターン数，電流および磁束密度の関係

コイルに流れる放電電流は，ターン数 (コイルインダクタンス) によって異なる．放電電流 I は，時間 (t) と共に式 (2) のように変化する．

$$I = \sqrt{2E/L} e^{-(R/2L)t} \sin(2\pi/T)t \quad (2)$$

放電エネルギー E は時間 $t = 0$ での値である．この E が同じならば，電流値はほぼ $1/\sqrt{L}$ に比例する．コイルに発生する磁束密度はコイルに流れる電流とターン数の積に比例する．等価な組合せ (24 μF と5ターン，6 μF と10ターン，1.5 μF と20ターン) の場合，表3のように各コイルの中央部分に発生する磁束密度の比は，1:1:1になり，値は近似的に等しくなる．

5.3 シミュレーション方法および結果

シミュレーション方法は，前述した等価な組合せで実験すると近似的に同じ振動周期，立ち上がり時間の放電電流がコイルに流れ，ほぼ同じ大きさの磁束密度が発生することに基づく．ここでは，各コイルについて全体の外観および材質などを同じと仮定する．5ターンコイルを用いた実験結果から10および20ターンコイルを用いたシミュレーション (模擬実験) 結果が数値的に表4のように得られた．コイルインダクタンスは，ほぼ 1:4:16 になると推定して10および20ターンコイルの値を5ターンコイ

表2 等価な組合せにおける各量および数値の比較

放電時の電源容量 C (μF)	24	6	1.5
放電時の電源容量の比	1	1/4	1/16
コイルターン数	5	10	20
コイルターン数の比	1	2	4
コイルインダクタンスの比	1	4	16
減衰振動周期の比	1	1	1
電流の立ち上がり時間比	1	1	1

表3 ターン数，電流値および磁束密度の関係

放電エネルギー比	1	1	1
コイルターン数	5	10	20
コイルターン数の比	1	2	4
インダクタンス (L) の比	1	4	16
$\sqrt{L}$ の比	1	2	4
コイルに流れる電流の比	1	1/2	1/4
発生する磁束密度の比	1	1	1

表4 実験およびシミュレーション結果

コイルターン数	5	10	20
放電時の電源容量 C (μF)	24	6	1.5
電流の減衰振動周期 (μs)	29	29	29
電流の立ち上がり時間 (μs)	4.5	4.5	4.5
コイルインダクタンス (μH)	0.89	3.56	14
最大電流値 (kA)	32	16	8
放電エネルギー (kJ)	0.7	0.7	0.7
使用する充放電回路図	図4	図5	図6

ルの値から求めた．接合状態などの実験結果も，前記の5ターンコイルでの結果と同様であると思われる．

5.4 検討

ここでは，10および20ターンコイルによる実験が実際に可能かどうかを検討する．

(1) これらのコイルを用いる場合，並列に充電して直列に放電する技術が使用される．この技術は前実験[19]ですでに経験済みであり，問題点は少なかった．

(2) 直列放電時，コイル端子間に加わる電圧は，放電エネルギー E が0.7 kJ のとき10ターンコイルで約15 kV に，20ターンコイルで約30 kV になる．これらの高電圧はパルス的に発生するので，絶縁は直流高電圧の場合に比べて容易である．また，各コイル板間に加わる電圧は10ターンコイルで約1/10 の約1.5 kV に分圧される．コイル端子間に加わる電圧の絶縁は容易である．

(3) コイル全体の厚さを約3 mmにすることは、ターン数が増加すると問題になる。ここでは、コイル板の厚さを、10ターンコイルで0.2mmに、20ターンコイルで0.1mmに減らして対応した。しかし、板の変形、これに伴う各板間の絶縁が心配である。板の材質を選び、固定方法などをよく検討する必要がある。

6. まとめ

放電時のコンデンサ電源容量とターン数の等価な組合せで実験すると近似的に同じ振動周期(および立ち上がり時間)の放電電流がコイルに流れ、ほぼ同じ磁束密度が発生する。このような等価な組合せを利用し、5ターンコイルを用いた実験結果から10および20ターンコイルを用いた結果をシミュレーションし、検討した。

電磁圧接に必要な放電電流最大値は、10および20ターンコイルで、それぞれ約16および8 kAに減少する。接合状態も、前記の5ターンコイルでの結果と同様であると思われる。

参考文献

- [1] 越智, 小川, 山本, 川井, 澤井: “アルミニウム合金と銅の摩擦圧接継手における金属間化合物形成およびその継手効率への影響”, 溶接学会論文集, 21巻3号, pp. 381-388, Mar. 2003.
- [2] 謝, 山口, 西尾: “アルミニウム／銅クラッド材接合界面における金属間化合物の形成”, 日本金属学会誌, 75巻3号, pp. 166-172, Mar. 2011.
- [3] Lee, Nakamura, Kawahito, Katayama: “Effect of welding speed on microstructural and mechanical properties of laser lap weld joints in dissimilar Al and Cu sheets”, Science and Technology of Welding and Joining, Vol.19, pp.111-118, 2014.
- [4] 布施, 石渡, 伊藤: “銅-アルミニウム摩擦攪拌接合部の特性”, 溶接学会全国大会講演概要, 83集, pp. 60-61, 2008.
- [5] 花井: “電子ビーム溶接による銅とアルミニウムなどの異種金属接合”, 機能材料, 34巻12号, pp. 12-18, 2014.
- [6] 萩野, 山口: “ファイバーレーザを用いたアルミニウムと銅の異種金属溶接”, レーザ加工学会誌, 22巻3号, pp. 186-190, 2015.
- [7] 松本, 山口, 西尾: “真空圧延接合法により作製したA1050/C1020クラッド材の接合部強さに及ぼす接合条件の影響”, 溶接学会全国大会講演概要, 101集, pp. 314-315, 2017.
- [8] 外本, 藤田, 大塚: “爆発圧着”, 日本塑性加工学会編, 衝撃塑性加工, pp. 66-93, コロナ社, 2017.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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, Dec. 2014.
- [12] 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, Dec. 2016.
- [13] 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, Dec. 2008.
- [14] 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, Dec. 2012.
- [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, 55巻8号, pp. 290-299, 2017.
- [18] 相沢: “平板状複数ターンコイルによる金属薄板の電磁圧接(第2報)”, 溶接学会全国大会講演概要, 98集, pp. 130-131, 2016.
- [19] 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, Jun. 2018.
- [20] Aizawa: “Equivalent Combinations of Discharge Capacitor Bank and Multi-Turn Coil in Magnetic Pulse Welding of Al/Cu Sheets”, IEICE Technical Report, Vol. 118, No. 290, EMD2018-45, pp.27-32, 2018.
- [21] 相沢: “平板状4, 8および16ターンコイルを用いるAl/Cu薄板の電磁圧接法比較”, 信学技報, EMD-2018-38, pp. 7-12, Oct. 2018.
- [22] Ben-Artzy, Stem, Frage, Shribman, Sadot: “Wave formation mechanism in magnetic pulse welding”, International Journal of Impact Engineering, Vol.37, pp.397-404, 2010.

