

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

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 アルミ(Al)薄板上に間隙を設けて銅(Cu)薄板を重ね、これらを絶縁された平板状4ターンコイル上に固定する。このコイルへコンデンサ電源から放電大電流を急激に流す。Al薄板には、磁束が交差し、渦電流が流れ、電磁力が働く。この力でAl薄板はCu薄板へ高速衝突し、両薄板(Al/Cu)は圧接される。この電磁圧接は、電源エネルギー0.5kJ未満、放電電流最大値40kA未満で行われる。原理、方法及び実験結果を報告する。

キーワード Al/Cu接合, 溶接, 電磁圧接, シーム溶接, Al/Cu薄板, 積層式リチウムイオン電池

Magnetic Pulse Seam Welding of Al/Cu Sheets using 4-Turn Flat Coil

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 This paper describes a novel welding technique of an Al sheet to a Cu sheet and its experimental results. When a discharge current from a capacitor bank passes through a 4-turn flat coil, a magnetic flux is suddenly generated around the coil. Eddy currents are induced in the overlapped Al sheet and Cu sheet placed on the coil. The Al/Cu sheets have a gap between them. Electromagnetic force acts on the Al sheet near the coil and lets the Al sheet collide and weld to the Cu sheet. The bank energy required for this welding is less than 0.5kJ and the peak discharge current is less than 40kA.

Keywords Al/Cu joining, Welding, Magnetic pulse welding, Seam welding, Al/Cu sheets, Laminated Li-ion battery

1. はじめに

アルミ(Al), 銅(Cu)両薄板は、電池、コンデンサなど蓄電製品の電極基材、配線材として使われている。例えば、電気自動車用の積層型リチウムイオン電池は、薄い単電池を複数接続した組電池、これらを直列接続した電池モジュールなどから構成されている[1, 2]。薄い電池の電極端子板、配線板などは薄板状である。基本的に正極基材がAl、負極基材がCuであり、並列接続では同種(Al/Al, Cu/Cu)、直列接続では異種金属(Al/Cu)接続が必要となる。他の薄板状部品の配線、接続についても、軽量化などの理由からAl製部品が増加し、配線部分にAl/Cu接続が必要になっている。

需要が高まるAl/Cuの異種金属接続(溶接)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[3-5]。このため、特出した方法がなく、各種の固相

接合法、瞬間熔融溶接法などで研究、改良が行われている[3-7]。

電磁圧接もAl/Cuの異種金属接続に適した溶接法である。両金属薄板に間隙を設けて重ね、これに高密度磁束を急に加え、発生する電磁力で薄板を高速衝突させ、シーム溶接させる[7-9]。爆発圧接と類似の衝撃圧接法であり、高品位の金属結合状態が得られる。爆発圧接のような大きなエネルギーを必要とせず、電気電子部品も圧接できる[9]。接合した薄板(継手)の電気抵抗増加も十分小さい[10]。ただし、多くの場合、電磁力発生用の平板状ワンターンコイルに最大値150~200kAの放電大電流を流す必要があり、広く普及していない。

平板状コイルのターン数を増加し、この電流値を減らす方法が提案されている[11]。コイルのターン数(巻き数)を2とし、電流値を約1/2に減らした実験も行われ

ている[12].

ここでは、平板状コイルのターン数を4とし、電流値を約1/4に減らして実験した結果を報告する。

2. 電磁圧接シーム溶接の原理・方法

2.1 平板状4ターンコイル

電磁力発生に使用する平板状4ターンコイルの概略を図1に示す。コイルはそれぞれ絶縁された4枚のコイル板(No.1~No.4)からなり、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)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4回繰り返して板No.4の周辺部から流出する。コイル中央部分には、電流が4層に重なって直列に流れる。

この状態でコイル電流間には電磁力が働く。コイル中央部分を通る電流に働くコイル面方向の電磁力は、打ち消されるような構造である。このため、コイル中央部分は、細く薄いが、電流間の電磁力で変形しにくい。

2.2 溶接原理・方法

平板状4ターンコイルを用いた溶接法を図2(断面図)を用いて説明する。絶縁されたコイル上に、間隙(1mm)を設けて重ねたAl, Cu両薄板を固定する。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。図2のコイル中央部分へ大電流を直列に流すと、この部分に高密度磁束が発生する。この磁束はAl薄板に交差する。Al薄板の表皮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 が図2(a)のように働く。Al薄板は変形しながら上側のCu薄板へ高速で衝突する。衝突時に発生する金属ジェットで両薄板の表面はクリーニングされる[7]。表面の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シーム溶接(圧接)される。ただし、衝突状態などの相違で、変形、衝突した部分の一部(2か所)だけがシーム溶接される[7, 9]。

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。

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

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

$$p = (B_0^2 - B_i^2) / 2\mu \\ = (B_0^2 / 2\mu) [1 - \exp(-2\tau / \delta)] \quad (3)$$

ここで、 κ 、 μ 、 τ はそれぞれ、Al薄板の導電率、透磁

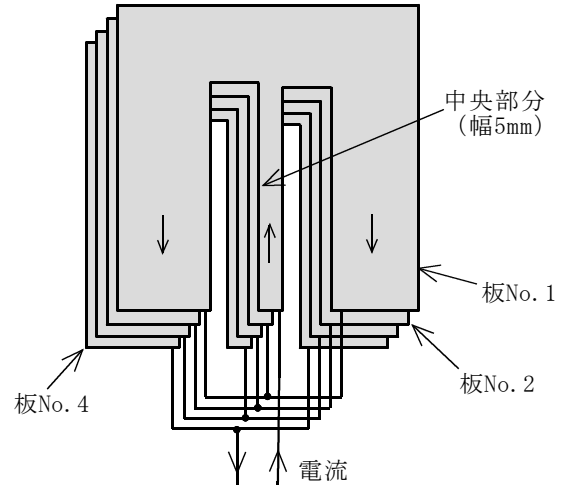


図1 平板状4ターンコイル概略図(板厚0.5mm)

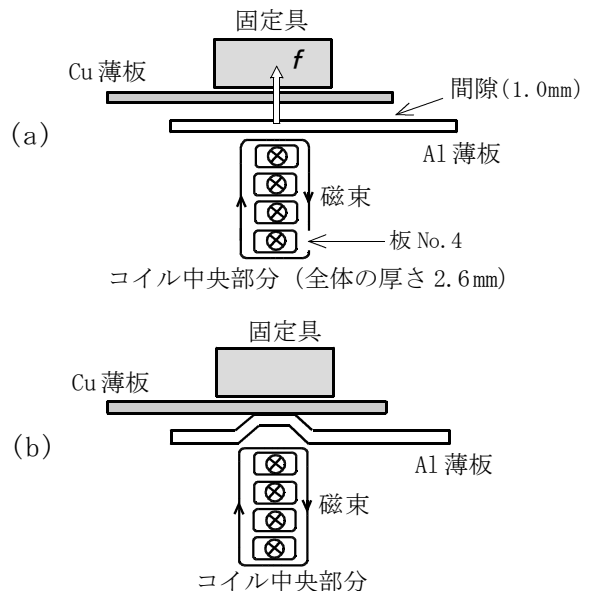


図2 電磁圧接シーム溶接の説明用概略図(断面図)
(a)溶接前、(b)溶接後

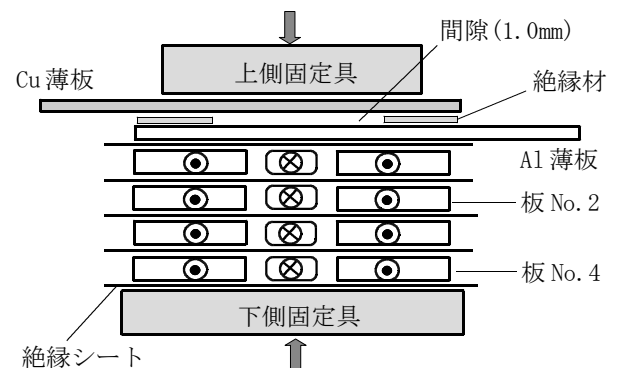


図3 Al薄板、Cu薄板及びコイルの固定法
(締付け金具で矢印の方向に加圧、固定される)

率、厚さであり、 B は磁束密度、 B_0 および B_i はアルミ薄板の下面および上面での磁束密度の大きさであり、 δ

は表皮深さと呼ばれる量である。

実際には、コイル及び両薄板は図3のように固定される。コイル板(No.1~No.4)の間には絶縁シートを挿入する。重ねたAl, Cu両薄板の端部に絶縁材を挟んで間隙1mmを設ける。各コイル板の中央部分断面の角(4か所)は、絶縁シートの破損、絶縁破壊を防ぐため丸めてある。

4ターンコイルにすると、従来のワンターンコイルに比べ、約1/4のコイル電流で同様の高密度磁束が発生する。ただし、両コイル中央部分の幅、全体の厚さを同程度とする。

3. 実験装置

平板状4ターンコイルへ大電流を急激に流すためコンデンサ放電装置を使用する。装置の構成要素を図4に示す。点線で囲まれた部分は放電回路である。コイルとAl薄板は電磁結合している。コンデンサ電源(容量24 μ F)を充電し、放電スイッチを閉じ、コイルへ放電電流を流す。電源の充電エネルギーは0.3~0.5 kJ, 充電電圧は5~6 kVである。溶接は1回の放電で終了する。

放電電流は、回路抵抗が少ないので減衰振動する。この最大値近くで、Al薄板がCu薄板へ衝突するようにするとエネルギー効率よく溶接できる。

コイル板(No.1~No.4)の外観を図5に示す。各板は銅合金製、板厚は0.5mmである。各板中央部分の幅は各5mm, 長さは各110mmである。中央部分と周辺部分の間隔は5mmである。各板を重ね、各板に対し面積約3mm \times 50mmで2カ所をはんだ付けして製作したコイル外観写真を図6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ている。手前左側に接続用端子板が付いている。絶縁シート(商品名カプトン)の一部を挿入した写真を図7に示す。各シートは図7のように2方向(写真の左右)から入れられ、コイル中央部分で重ねられる。

溶接用Al薄板(A1050)及びCu薄板(C1220)の厚さは0.

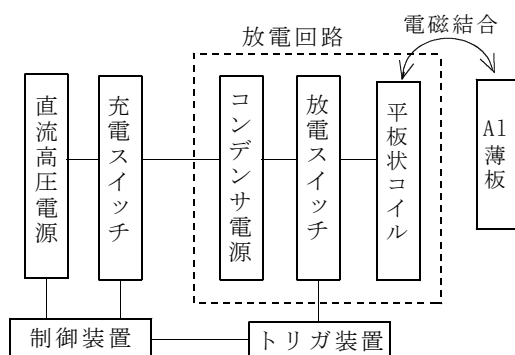


図4 装置全体の構成図

4mm, 大きさは幅50, 100mm, 長さ70mmなどである。両薄板が重なる部分の長さは約50mm, 重なる部分に設ける間隙は1.0mmである。

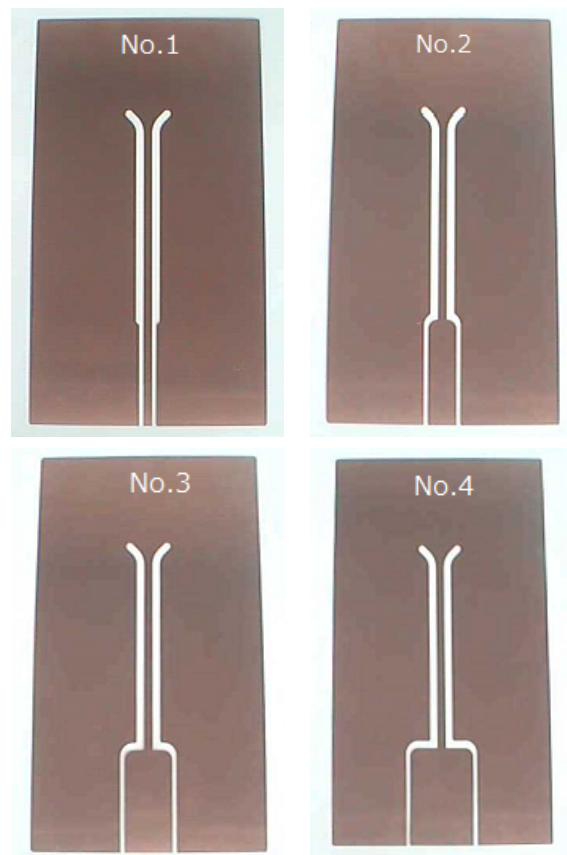


図5 平板状4ターンコイル各板の外観

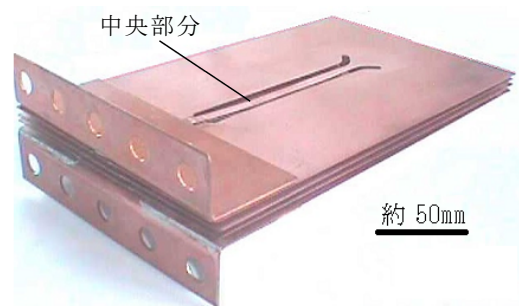


図6 平板状4ターンコイル外観(1)

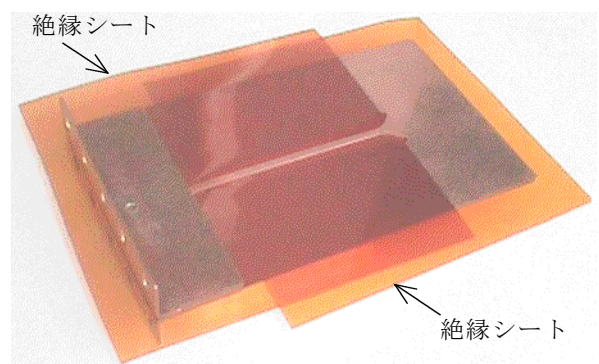


図7 平板状4ターンコイル外観(2)

コイルに流れる放電電流波形は、放電回路近くに置かれた電流磁界の検出用ロゴスキーコイル、シールド室内の積分回路、オシロスコープなどで測定される。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、整合用回路などを用いて、電流波形と同時に測定される[13]。放電回路のインダクタンス、コイルのインダクタンス、最大電流、衝突時間、衝突速度などを算出する。

4. 実験結果

4.1 電流波形及び衝突時間信号波形

溶接時、コイルへ流れる電流及び衝突時間信号波形を図8に示す。振動周期約 $24\mu\text{s}$ で減衰振動する電流が約 $60\mu\text{s}$ 流れた。コイルのインダクタンスは約 $0.59\mu\text{H}$ 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15倍であった。充電エネルギー 0.4kJ のとき、最大電流値は約 31kA 、コイルとAl薄板の間に発生する最大磁束密度は約 20T 、最大磁気圧力は約 150MPa と算出された。

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、数回の観測から約 $6.0\mu\text{s}$ であった。初速度零から加速され、衝突するときの速度は約 340m/s と概算された。衝突したときの電流値は、ほぼ最大値近くであった。

4.2 溶接されたAl/Cu薄板の外観

充電エネルギー 0.4kJ で電磁圧接シーム溶接された両薄板(平面)の外観例を図9及び図10に示す。シーム溶接長さは、それぞれ、 50mm 及び 100mm である。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(図9上、図10)には幅 10mm 程度の変形が見られた。この変形は図2(b)で説明したAl薄板の変形に対応し、この一部分がシーム溶接されていた。Cu薄板側から見た写真(図9下)には、この変形がほとんど見られなかった。

上記変形部分の端部側面の外観写真を図11に示す。端部まで変形、接合しているが、後述するように端部での接合強度は比較的に弱かった。

外観に関して、従来のワンターン及び2ターンコイルで溶接した場合と同様であった。シーム溶接長さ 50mm の場合、2組同時にシーム溶接できた。

4.3 溶接部分断面の顕微鏡観察

充電エネルギー 0.4kJ でシーム溶接された両薄板の中央近くをシーム溶接方向へ垂直に切断、研磨し、その断面を光学顕微鏡で観察した。溶接部分全体の断面写真例

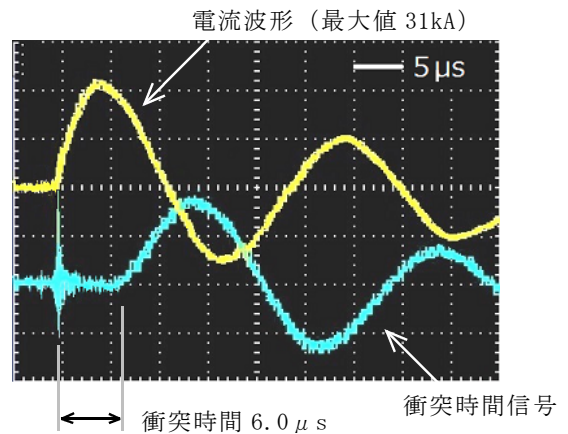


図8 電流及び衝突時間信号波形例

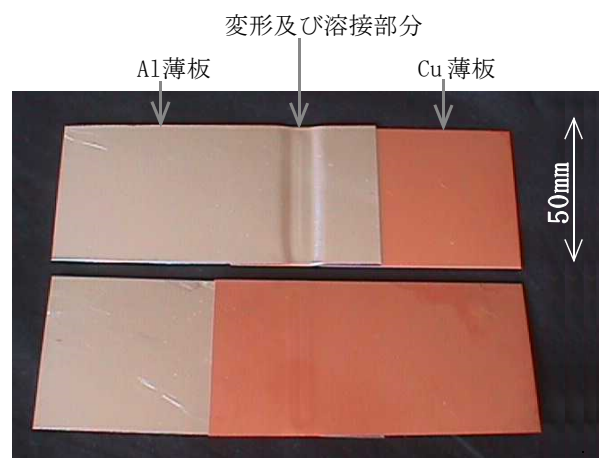


図9 シーム溶接されたAl/Cu薄板の外観(1)

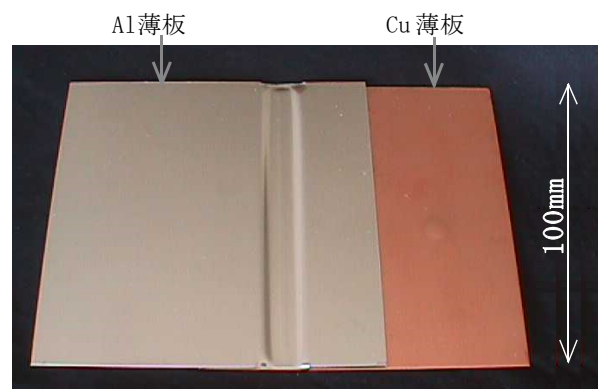


図10 シーム溶接されたAl/Cu薄板の外観(2)

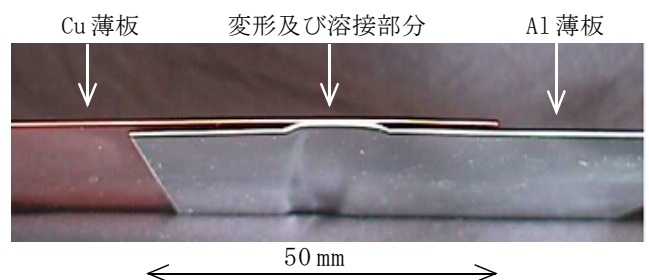


図11 シーム溶接されたAl/Cu薄板の外観(3)

を図12に示す。接合部分は、従来[9, 12]と同様、コイル中央部分上方の左右2カ所に見られた。接合部分（左右）の光学顕微鏡による拡大写真例を図13に、電子顕微鏡（SEM）による拡大写真例を図14に示す。従来[9, 12]と

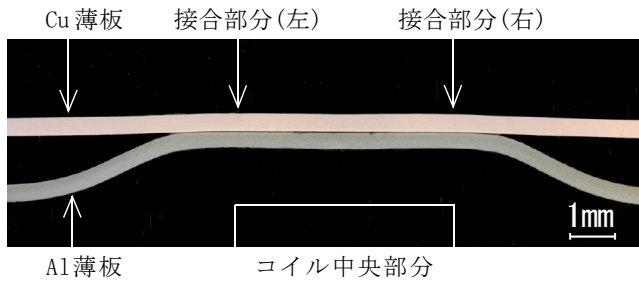


図12 溶接部分断面の光学顕微鏡写真

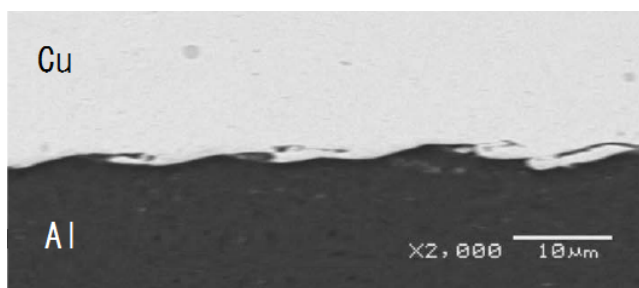


接合部分(左)

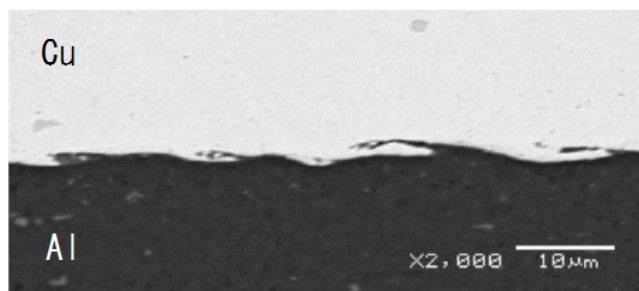


接合部分(右)

図13 接合部分(左右)の光学顕微鏡拡大写真



接合部分(左)



接合部分(右)

図14 接合部分(左右)の電子顕微鏡拡大写真

同様、接合界面に波状模様が見られ、波状界面によるかみ合いを伴って接合していた。

接合界面に見られる波状模様の発生は次のように説明される。両薄板が最初に接合面に垂直な縦方向へ衝突した後、衝突点は、衝突を継続しながら接合面方向（左右横方向）へ高速移動する[7, 9]。このような衝突点では、両薄板の表面金属が流体状態になり、金属ジェットが2方向へ発生する。各金属ジェットの後方にカルマン渦列のようなものが生じる。これが波状模様になると考えられる[14]。

なお、接合（溶接）部分に生じる金属間化合物の厚さは10 μm以下であり、この部分での接合強度に問題はないと思われる。

4.4 接合部分の引張せん断試験

充電エネルギー0.4 kJでシーム溶接された接合部分の接合強さを次のように調べた。図9のようにシーム溶接されたAl/Cu薄板継手を、図15のように約9mm幅で5等分し、各分割片に番号を付けた。各分割片を引張試験片とし図16のように長手方向に引張りせん断試験し、破断状態及び最大せん断強さ（引張力に抗する力、単位[N]）

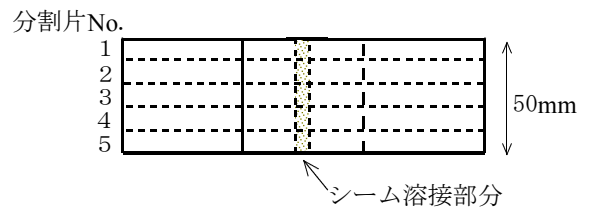
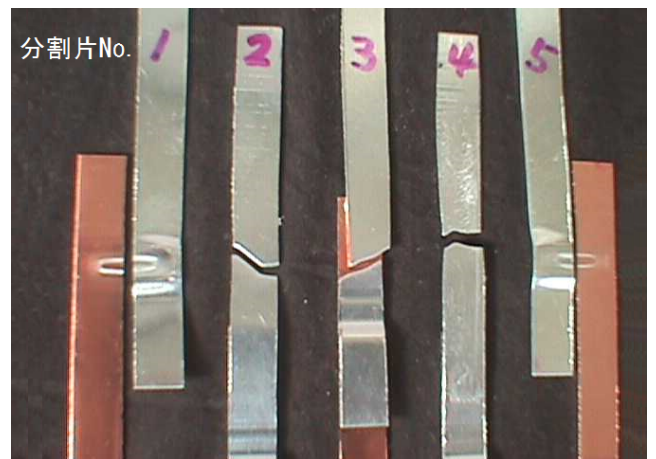


図15 引張試験用分割片の切り出し方法



図16 切り出した分割片(幅約9mm)の引張方法



幅約9mm

図17 引張試験後の破断状態

を求めた。破断状態の例を図17に示す。中央部分の分割片(No. 2, No. 3, No. 4)は、いずれも接合部分ではなく離せず、接合部分から少し離れたAl薄板の母材で破断した。両端の分割片(No. 1, No. 5)は接合部分ではなく離した。この場合の分割片は、はく離後のはく離面を示している。最大せん断強さは、母材破断の場合が約430N、はく離の場合が約180~240Nであった。両端の分割片(No. 1, No. 5)のはく離面には、接合していた部分の痕跡(半長円状)が見られた。薄板継手は、このように端から4~5mmの範囲で溶接痕跡がなかった。

5. まとめ

平板状4ターンコイルを用いて、Al/Cu薄板を電磁圧接シーム溶接できた。従来のワンターンコイルに比べ、コイルインダクタンスを約15倍に増加し、コイルへ流れる最大電流を1/4程度の40kA未満に減少して溶接できた。溶接されたAl/Cu薄板の外観及び接合部分の状態は従来通りであった。接合界面に酸化被膜などがほとんど残留しない高品位の金属結合状態が得られたと言える。

平板状2ターンコイルを用いた実験でも、同様にコイルインダクタンスを約4倍に増加し、コイルへ流れる最大電流を1/2程度に減少して溶接できた[12]。

これらの結果から、コイルのターン数をさらに増加すれば、コイルへ流れる放電電流をさらに減らせる。ただし、コイルのターン数を増加すると回路インダクタンスが増え、磁束密度の時間変化が小さくなり、式(1)及び(2)から、発生する電磁力が弱まる。場合によっては対策が必要となる。

最終的には、コイルへ流れる放電電流を減らすと共に、この電流をコンデンサ放電式抵抗スポット溶接機並みに制御できるようにしたい[15]、

参考文献

- [1] 特許公報：“積層型電池，組電池，電池モジュール並びに電気自動車”，登録番号4211322.
- [2] 特許公報：“組電池，リチウムイオン電池および電池間接続継ぎ手”，登録番号4572605.
- [3] 圓城，池内，秋川：“銅とアルミの拡散溶接”，溶接学会誌，48巻10号，pp. 770-775，1979.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 辻野：“超音波複合振動によるアルミおよび異種金属の溶接”，軽金属溶接，51巻8号，pp. 295-302，Aug. 2013.
- [7] 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.
- [8] 特許公報：“金属薄板の電磁溶接法及び装置”，登録番号3751153.
- [9] 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.
- [10] 樺沢，岡川，石橋，相沢：“電磁圧接された試料板の電気抵抗測定”，信学技報，EMD-2012-19，pp. 19-24，Jul. 2012.
- [11] 公開特許公報：“平板状複数巻きコイル”，公開番号2007-305555.
- [12] 相沢：“平板状2巻きコイルによるAl/Cu薄板の電磁圧接シーム溶接”，信学技報，EMD-2015-27，pp. 37-40，Jul. 2015.
- [13] 後藤，角井，池田，岡川，相沢：“間隙を設けて重ねたアルミニウム薄板の電磁シーム溶接”，信学技報，EMD-2003-108，pp. 1-4，Mar. 2004.
- [14] 日本塑性加工学会編：“高エネルギー速度加工”コロナ社，東京，pp. 70-71，1993年.
- [15] 相沢，岡川，吉田：“平角導線に対する電磁圧接と抵抗スポット溶接の比較”，信学技報，EMD-2010-18，pp. 7-12，Jul. 2010.