

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

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.iee.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2巻きコイル上に固定する。コンデンサ電源からこのコイルへ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1.0kJ未満、放電電流最大値100kA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 電磁圧接, シーム溶接, アルミニウム薄板, 銅薄板, 異種金属接合, 積層式リチウムイオン電池

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

Tomokatsu AIZAWA

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

E-mail: aizawa@mem.iee.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 flat two-turn 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 and lets the Al sheet collide and weld to the Cu sheet. The bank energy required for this welding is less than 1.0kJ and the maximum discharge current is less than 100kA.

Keywords Magnetic pulse welding, Seam welding, Aluminum sheet, Copper sheet, Dissimilar metal joining, Laminated Li-ion battery

1. はじめに

アルミ(Al), 銅(Cu)両薄板は加工され、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。電気自動車や家庭用蓄電システムのリチウムイオン電池(積層型)では、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る[1, 2]。薄い電池の端子板、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。他製品の接続についても、軽量化などの理由から、Al製部品が増加し、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、拡散溶接、抵抗溶接、超音波接合、摩擦圧接、電磁圧接など固相接合法、電子ビーム溶接、レーザー溶接など瞬間熔融溶接法で研究、改良が行われている[3-7]。

電磁圧接は、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[7-10]。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]。ただし、電磁力発生用の平板状ワンターンコイルに最大値150~200kAの放電大電流を瞬間的に流す必要があり、広く普及していない。

平板状コイルの巻数及びインダクタンスを増加し、この電流値を減らす方法が提案されている[11]。ここでは、

平板状コイルの巻数を2とし、インダクタンスを約4倍に、電流最大値を約半分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2巻きコイル

電磁力発生に使用する平板状2巻きコイルの概略を図1に示す。コイルは絶縁された2枚の金属板（上板及び下板）からなり、ぴったり重なっている。電流は上板の細長い中央部分（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。この電流は下部で合流し、再び下板の中央部分に上向きに流れ、同様に戻る。

2.2 溶接原理・方法

平板状2巻き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(0.5mm)を設けて重ねたAl, Cu両薄板を固定する。コイルに大電流を急激に流すと、コイル中央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薄板には渦電流が流れ、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。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。

実際には、コイル及び両薄板は図3のように固定される。2巻きコイル平板（上板及び下板）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0.5mmを設ける。

なお、渦電流、電磁力及びこれと同等な磁気圧力の詳細は別に示されている[7]。

3. 実験装置

2巻き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。コンデンサ電源（容量 $24\mu\text{F}$ ）を充電し、放電スイッチを閉じ、コイルに放電電流を流す。電源の充電エネルギーは $0.4\sim0.7\text{kJ}$ 、充電電圧は $6\sim8\text{kV}$ である。

コイル上板及び下板の外観を図5に示す。各板はクロム銅製、板厚は1.5mmである。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。上板及び下板を少し離れたときのコイル外観を図6に示す。手前側に接続用端子板が付いている。

溶接用Al薄板（A1050）及びCu薄板（C1220）の厚さは0.3mm、大きさは幅25～100mm、長さ70mmなどである。

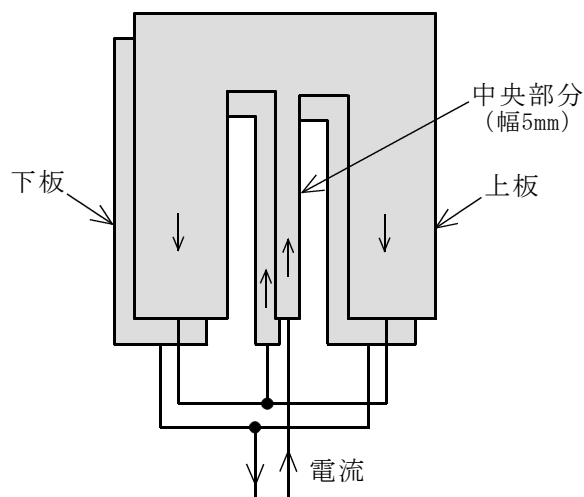


図1 平板状2巻きコイル概略図

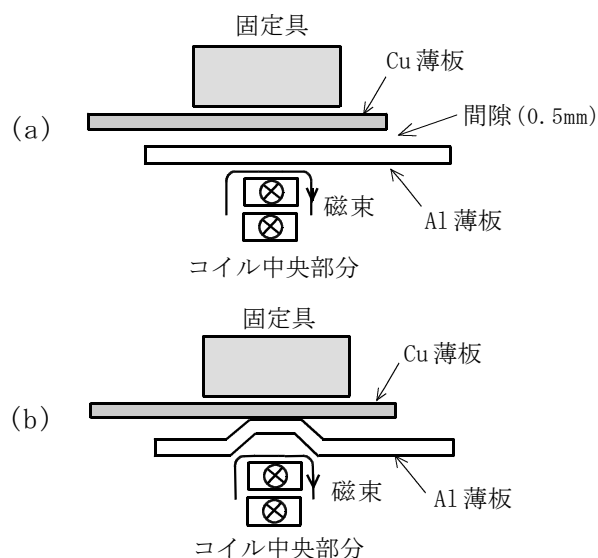


図2 電磁圧接シーム溶接の原理説明図（断面図）
(a) 溶接前、(b) 溶接後

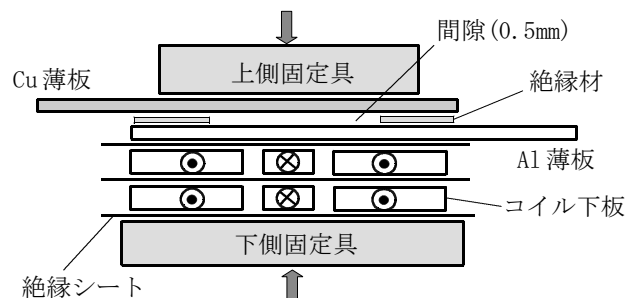


図3 Al薄板、Cu薄板及びコイルの固定法
(締付け金具で矢印の方向に加圧、固定される)

重ねる両薄板に設ける間隙は0.5mm、重ねる部分の長さは約50mmである。

コイルに流れる放電電流波形及び両薄板が衝突するとき生じる衝突時間信号を測定し、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、最大磁束密

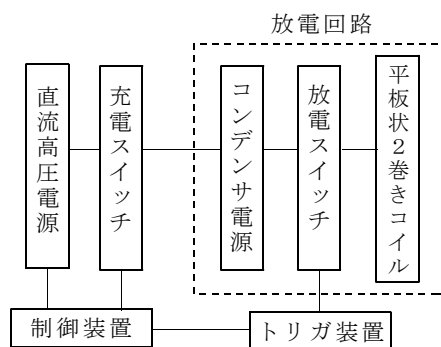


図4 装置全体の構成図

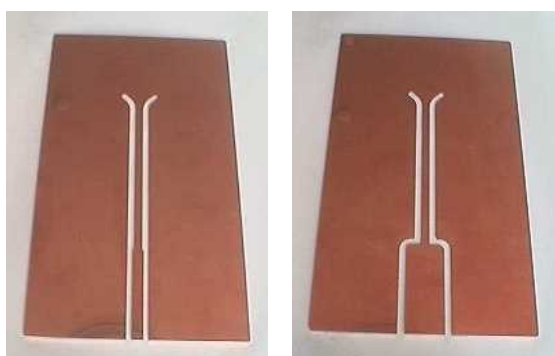


図5 平板状2巻きコイル上板及び下板



図6 平板状2巻きコイル外観(接続用端子板付き)

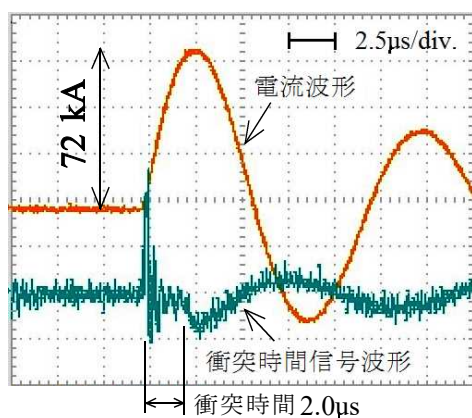


図7 電流及び衝突時間信号波形例

度，衝突時間，衝突速度などを算出する．衝突時間信号の測定法は文献[10]に示してある．

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7に示す．振動周期約 $12.3 \mu\text{s}$ で減衰振動する電流が約 $40 \mu\text{s}$ 流れた．コイルのインダクタンスは約 $0.14 \mu\text{H}$ 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4倍であった．最大電流値は充電エネルギー 0.6 kJ のとき約 72 kA ，コイルとAl薄板の間に発生する最大磁束密度は約 26T と算出された．

衝突時間信号波形には放電に伴う高周波数ノイズが生じた．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 $2.0 \mu\text{s}$ であった．衝突するときの速度は約 500 m/s と概算された．

4.2 溶接されたAl/Cu薄板の外観

電磁圧接でシーム溶接された両薄板の外観例を図8に示す．溶接された薄板(3種類)をAl薄板側から見た写真である．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る．シーム溶接長さは上から 25 ， 50 ， 100 mm である．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る．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を図9に示す．こちら側に変形はほとんど見られない．

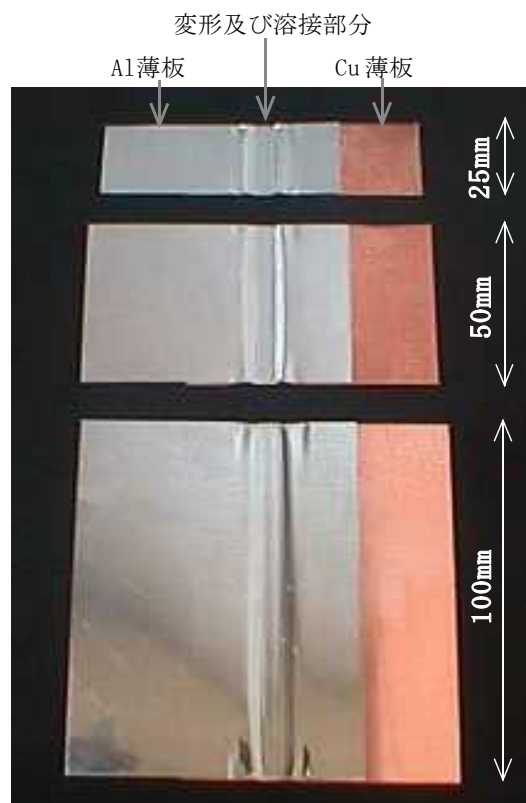


図8 シーム溶接されたAl/Cu薄板の外観(1)

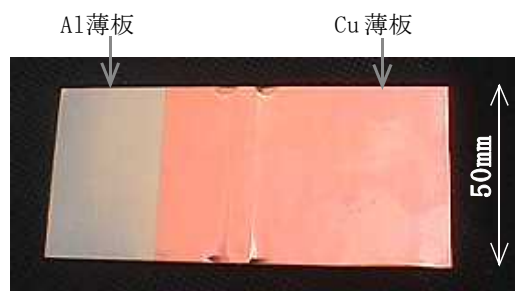


図9 シーム溶接されたAl/Cu 薄板の外観(2)

外観に関して、従来のワンターンコイルで溶接した場合と同様であった。今回、シーム溶接できる長さは100mmまでであった(コイル中央部分の長さで制限される)。シーム溶接長さ25mmの場合、4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

シーム溶接した継手をシーム溶接方向へ垂直に切断、研磨した断面を光学顕微鏡で観察した。溶接部分全体の顕微鏡写真例を図10に示す。接合部分は、従来[7, 9]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(右側)の光学顕微鏡による拡大写真例を図11に、電子顕微鏡(SEM)による拡大写真例を図12に示す。従来

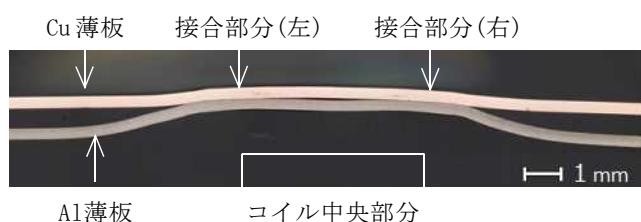


図10 溶接部分断面の光学顕微鏡写真

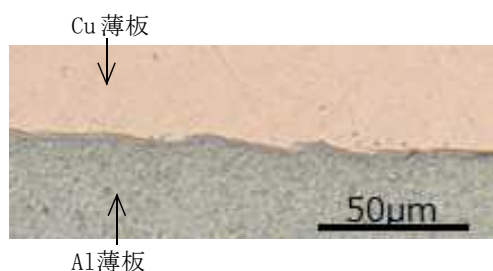


図11 接合部分(右側)の光学顕微鏡拡大写真



図12 接合部分(右側)の電子顕微鏡拡大写真

[9]と同様、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強固な接合が得られた(接合部分は引張試験で、はく離せず、アルミ母材で破断した)。

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、接合状態に問題はないと思われる。

5. まとめ

平板状2巻きコイルを用いて、Al/Cu 薄板を従来のワンターンコイルと同様に電磁圧接シーム溶接できた。従来のコイルに比べ、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約半分に減少して溶接できた。今後、コイル巻数をさらに増加して実験を続け、コイルへ流れる電流をどの程度まで減らせるかなどを調べたい。

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，松澤，岡川：“電磁圧接による導電接続用アルミニウムおよび銅薄板の並列シーム溶接”，信学技報，EMD-2012-20，pp. 25-30，Jul. 2012.
- [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] 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.
- [11] 公開特許公報：“平板状複数巻きコイル”，公開番号 2007-305555.