信学技報 IEICE Technical Report EMD2017-38 (2017-10)

平板状1ターンと4ターンコイルで電磁圧接されたAI/Cu薄板の比較

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 A1(アルミニウム) 薄板の上に間隙を設けてCu(銅) 薄板を重ね,これらを絶縁された平板状1ターンと4ターンコイル上にそれぞれ固定する。コンデンサ電源から各コイルへ放電大電流を急激に流す。コイルに近いA1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A1薄板はCu薄板へ高速衝突し、両薄板(A1/Cu) は圧接される。このような電磁圧接は、コイルのターン数に影響される。1ターンと4ターンコイルによって同様に圧接された結果を比較した。

キーワード 電気接続, Al薄板, Cu薄板, 溶接, 電磁圧接, シーム溶接, 平板状コイル, コイル巻数

Comparison of Al/Cu sheets welded by one-turn and four-turn flat coils for magnetic pulse welding

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 magnetic pulse welding of an Al sheet to a Cu sheet using one-turn and four-turn flat coils. When a discharge current from a capacitor bank passes through each coil, a magnetic flux is suddenly generated around the coil. Eddy currents are induced in the overlapped Al and Cu sheets placed on the coil. The Al/Cu sheets have a gap between them. Electromagnetic force acts on the Al sheet near the coil, and the Al sheet collides at high speed with the Cu sheet and both sheets weld together. The number of coil turns affects the welding. Experimental results similarly welded by both coils were compared.

Keywords Electrical connection, Al sheet, Cu sheet, Welding, Magnetic pulse welding, Seam welding, Flat coil, Number of coil turns

1. はじめに

近年,電気・電子部品を電気接続するのに,電磁圧接,電磁溶接などと呼ばれる方法が研究されている[1-4]. 従来,接続部品の多くは周囲が露出したCu(銅)であり,Cu/Cu接続が主流であった.このようなCu/Cu接続に対し,はんだ付けと言う普遍的な接合方法があった.しかし,積層型リチウムイオン電池などの内部接続では,A1(アルミニウム)/Cu接合が必要になっている.バスバー,ワイヤーハーネスなど配電部品でも,CuからA1への代替によりA1/Cu接合が必要になっている.また,フレキシブルプリント配線板などの片面だけ露出したCu箔へ,裏面の絶縁フィルムを溶かさず,電気接続するのは困難である.以上のように,はんだ付けでは難しい場合の接続法として,電磁圧接が研究されている.

電磁圧接の主な接合形態は、重ね接合であり、幅数mm

の端子板から幅100mmの薄板まで全幅にわたり直線状に接合するシーム溶接である. 衝撃的な電磁力でAI 薄板を少し離れたCu薄板などへ高速衝突させ、常温で溶かさず接合できる特徴がある[5,6]. 特許も各種、登録されている[7-11]. 接合面の酸化皮膜などは、衝突時に発生する金属ジェットで除去される[5]. AI/Cu接合界面に生じる金属間化合物は、組織観察などから接合状態に悪影響しないと言われている[12-14].

技術的には、A1/Cu 薄板を平板状コイル上に固定し、コイルへ放電大電流を急激に流し、両薄板を溶接(圧接)する. 以前は、平板状ワン(1) ターンコイルが使用され、コイルへ流す放電電流の最大値は約200kAであった[15]. 最近、筆者は、平板状多数ターンコイルを使用するなどし、この値を減らすことができた[14,16,17].

ここでは、同じ放電装置を使用し、平板状1ターンと4

ターンコイルでA1/Cu薄板を電磁圧接し,両コイルによる結果を比較した.できる限り同じ条件で比較するため, 絶縁シートを含めた両コイルの全板厚,電流が集中する部分の幅,高速衝突するときの速度などを,できるだけ同じにしてある.

2. 電磁圧接の原理・方法

2.1 平板状1ターンコイル使用

電磁力発生に使用する平板状1ターンコイルの概略を図1に示す. コイルは絶縁されたE字形の平板(1枚) からなる. 電流は細長い中央部分(幅5mm) へ上向きに流入し,幅の広い周辺部分から下向きに流出する. 電流は中央部分に集中して流れ,この周囲に高密度磁束が発生する.

1ターンコイルを用いた圧接(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、A1、Cu両薄板を、端部に絶縁材を挟んで間隙(0.5mm)を設けて図2のように固定する. コイルとA1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が流れると、この部分に高密度磁束が発生する. この磁束はA1薄板に交差する. A1薄板の表皮には渦

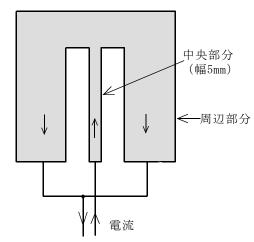


図1 平板状1ターンコイル概略図 (板厚3.0 mm)

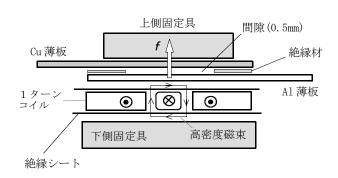


図2 1ターンコイル,両薄板の配置(固定法),A1薄板に働く電磁力 f (断面概略図)

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. A1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[5]. 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.

2.2 平板状4ターンコイル使用

平板状4ターンコイルの概略を図3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,図1と同形)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)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、4層の電流が直列に流れる. 4ターンコイルを用いて溶接する場合も、図4のように配置、固定する. 電流がコイル中央部分へ直列に流れると、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、条件を選ぶと、溶接に必要な

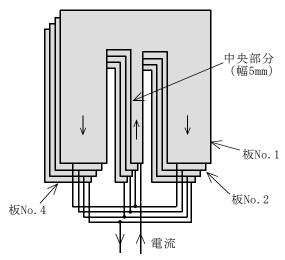


図3 平板状4ターンコイル概略図(各板厚0.5 mm)

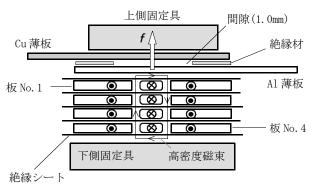


図4 4ターンコイル, 両薄板の配置(固定法), A1薄板に働く電磁力 **f** (断面概略図)

電流は1ターンコイルの場合に比べ約1/4 に減少する[16].

2.3 A1薄板に働く電磁力 **f**

A1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.

$$rot \mathbf{i} = -\kappa \left(\partial \mathbf{B} / \partial t \right) \tag{1}$$

$$\mathbf{f} = \mathbf{i} \times \mathbf{B}$$
 (2)

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

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

ここで、 κ , μ , τ はそれぞれ、 Λ 1薄板の導電率、透磁率、厚さであり、 \boldsymbol{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.

3. 実験装置

コイルへ大電流を急激に流すコンデンサ放電装置の構成要素を図5に示す。左側部分のコンデンサ電源(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した。放電回路の外観を図6に示す。放電スイッチとして電気トリガ式のギャップスイッチを用いた。電源の充電エネルギーは $0.3\sim0.6\,\mathrm{kJ}$, 充電電圧は $5\sim7\,\mathrm{kV}$ であった。溶接は1回の放電で終了した。

放電電流は、回路抵抗が小さいので減衰振動した.この最大値近くで、A1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た.電流及び衝突時間信号波形を測定する部分を図5の右側部分に示す.

各コイルの外観を図7及び図8に示す.写真は,絶縁シートを取り去り,見やすくして撮影された.各コイルはクロム銅製,1ターンコイルの板厚は3.0mmであった.4ターンコイル各板の厚さは0.5mmであり,絶縁シートの厚さを含めたコイル全体の厚さは約2.8mmであった.両コイルの中央部分の幅は5mm,長さは110mmであり,中央部分と周辺部分の間隔は5mmであった.

溶接用AI薄板(A1050) 及びCu薄板(C1220) の厚さは0. 4mm,接合する幅100mm,長さ70-100mmであった.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ターンコイルの場合,図2のように0.5mmであり,4ターンコイルの場合,図4のように1.0mmであった.

なお、溶接された部分(断面) の顕微鏡観察は、切断、 研磨を含めて、業者に依頼して行われた.

4. 実験結果

- 4.1 電流波形及び衝突時間信号波形
- (1) 1ターンコイルへ流れる電流及び衝突時間信号波形

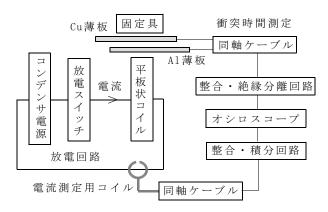


図5 放電及び測定装置の構成図

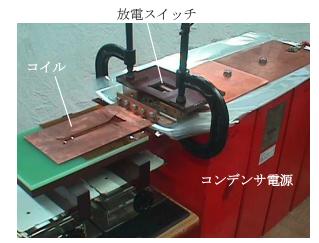


図6 放電回路外観



図7 平板状1ターンコイル外観

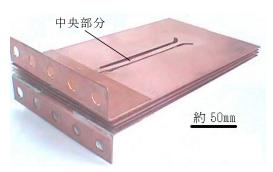


図8 平板状4ターンコイル外観

を図9に示す.このときの充電エネルギーは $0.6\,\mathrm{kJ}$ であった.最大電流値は約 $115\,\mathrm{kA}$ であり,振動周期約 $7.7\,\mu\,\mathrm{s}$ で減衰振動する電流が約 $30\,\mu\,\mathrm{s}$ 流れた.これらから,溶接時の放電回路全インダクタンスは約 $0.063\,\mu\mathrm{H}$,1ターンコイルのインダクタンスは約 $0.043\,\mu\mathrm{H}$ と算出された.コイルと Al 薄板の間に発生する最大磁束密度は約 $16\,\mathrm{T}$,磁気圧力pは約 $100\,\mathrm{MPa}$ と概算された.

衝突時間信号波形には、放電開始時などに高周波数で振動するノイズが生じた.電流が流れてからA1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 3.0μ 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 $330\,\text{m/s}$ 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.

(2) $4ターンコイルへ流れる電流及び衝突時間信号波形例を図10に示す.このときの充電エネルギーは<math>0.4\,\mathrm{kJ}$ であった.最大電流値は約 $31\,\mathrm{kA}$ であり,振動周期約 $24\,\mathrm{\mu\,s}$ で減衰振動する電流が約 $60\,\mathrm{\mu\,s}$ 流れた.これらから,溶接時の放電回路全インダクタンスは約 $0.61\,\mathrm{\mu H}$, $4ターンコイルのインダクタンスは約<math>0.59\,\mathrm{\mu H}$ と計算された.コイルと41薄板の間に発生する最大磁束密度は約 $20\,\mathrm{T}$, 磁気圧力pは約 $130\,\mathrm{MPa}$ と概算された.

衝突時間は、数回の観測から約 $6.0\mu s$ 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330m/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。

(3) 主な結果を比較する. 溶接に必要な放電電流の最大値は、4ターンコイルの場合、1ターンコイルに比べ約1/4に減少した. 充電エネルギーは、4ターンコイルの場合、1ターンコイルに比べ約2/3に減少した(理由はエネルギー移送効率[18]の違いによる). 衝突時間は4ターンコイルの場合、1ターンコイルに比べ2倍に増加した.

圧接(溶接) に大きく影響する衝突速度は等しかったので, ほぼ同じ条件で圧接されていると思われる.

4.2 圧接(溶接)されたAl/Cu薄板の外観

充電エネルギー0.6 kJ, 1ターンコイルで圧接された両薄板(平面)の外観例を図11に示す.写真中央近くが縦に100 mm,連続してシーム溶接されていた.A1薄板側から見た中央部分には幅10mm程度の変形が見られた.この変形部分の端部側面の外観写真を図12に示す.端部まで変形,接合している.

4ターンコイルで圧接された両薄板(平面)の外観例は別に示されている[16].外観に関して、両コイルとも同様であった.各部分の引張せん断試験も同様であり、端部を除き、母材(A1)破断する強さであった.

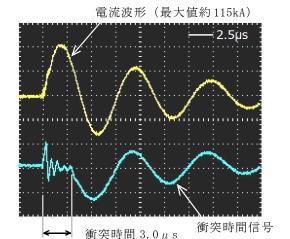


図9 電流及び衝突時間信号波形例(1ターンコイル)

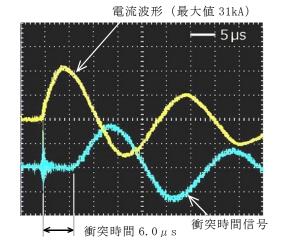


図10 電流及び衝突時間信号波形例(4ターンコイル)

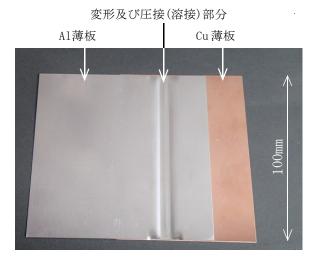


図11 1ターンコイルで圧接(溶接)されたAl/Cu 薄板の外観(1)

4.3 溶接部分断面の顕微鏡観察

(1) 1ターンコイル, 充電エネルギー0.6kJで圧接(シ

Cu 薄板 変形及び(圧接)溶接部分 Al 薄板

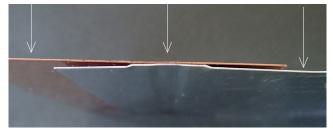


図12 1ターンコイルで圧接(溶接)されたA1/Cu 薄板の外観(2)

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を図13に示す.接合部分は、コイル中央部分上方の左右2箇所(矢印↓で示す)に見られた.この接合部分の間には、非接合部分が存在した.接合部分(左右)の電子顕微鏡(SEM)による拡大写真例を図14に示す.従来[1,5,12,15など]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

Cu 薄板 接合部分(左) 接合部分(右)

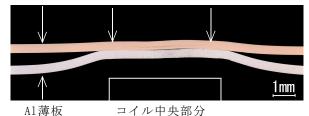
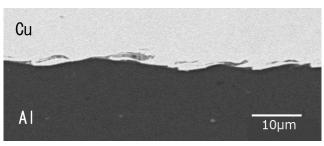
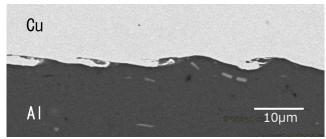


図13 溶接部分断面の光学顕微鏡写真(1ターンコイル)



接合部分(左)



接合部分(右)

図14 接合部分(左右)のSEM 拡大写真(1ターンコイル)

く接合していた.

(2) 4ターンコイル, 充電エネルギー0.4 kJで圧接(シーム溶接) された両薄板を同様に光学顕微鏡で観察した. 溶接部分全体の断面写真例を図15に示す. 接合部分は, コイル中央部分上方の左右2箇所に見られた. 接合部分(左右) の電子顕微鏡(SEM) による拡大写真例を図16に示す. 接合界面に1ターンコイルの場合と同様の波状模様が見られた.

(3) 接合界面に見られる波状模様の発生は次のように 説明されている[19,20]. 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,傾斜衝突を継続しなが ら接合面方向へ高速移動する.この衝突点移動で,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 になると考えらる.

なお、左右の接合(溶接)部分に生じる金属間化合物の厚さは10μm以下であり、接合状態に問題はないと言われている[12-14].接合部分は傾斜衝突するときの衝突角度などの条件によって生じる.

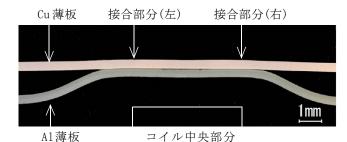
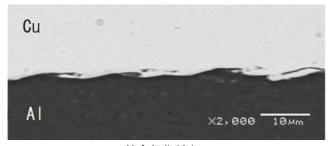
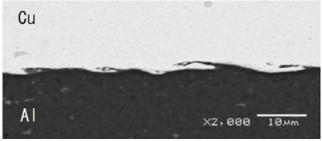


図15 溶接部分断面の光学顕微鏡写真(4ターンコイル)



接合部分(左)



接合部分(右)

図16 接合部分(左右)のSEM拡大写真(4ターンコイル)

(4) 1ターンコイルと4ターンコイルでの断面(変形)を比較する.図13と図15を比べると薄板の変形状態に違いが見られた.この原因は、圧接(衝突)前にA1/Cu薄板に設けた間隙が異なるからである.4ターンコイルの場合、間隙が1.0mmで2倍大きく、変形部分も、図15の垂直(衝突)方向に約2倍大きかった.この影響で水平方向の変形も広がったと思われる.

5. まとめ

A1/Cu 薄板を電磁圧接する実験において, 平板状1ターンと4ターンコイルを同じ放電装置で用い, 衝突速度などを同じにして比較した. 主な結果を以下に示す.

- (1) 4ターンコイルを使用すると、 1ターンコイルに比べ、 圧接に必要な最大電流が約1/4の約31kAに減少した.
- (2) 4ターンコイルを使用すると、コンデンサ電源のエネルギー移送効率が良くなり、圧接に必要なエネルギーも約2/3の0.4kJに減少した.
- (3) 両コイルで圧接したA1/Cu薄板の外観はほぼ同様であった.
- (4) 圧接したA1/Cu 薄板の接合界面(シーム溶接方向へ垂直な断面) もほぼ同様であり、爆発圧接、電磁圧接など 衝撃圧接に特有な波状模様が従来どおり生じた.
- (5) 接合部分の引張せん断強さも, 共に母材(A1) で破断 する強さであった.

今回,同じ放電装置(容量24µF)を使用したため,両コイルへ流れる電流波形の周期に大きな差が生じた.電源容量など装置定数を自由に選ぶことができれば,電流波形の周期を同程度にした場合でも比較実験できる.今後,検討して結果を報告したい.

参考文献

- [1] 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.201 2.
- [2] 相沢: "フレキシブルプリント配線銅箔の電磁スポット溶接",溶接技術,59巻2号,pp.113-116,Feb. 2011.
- [3] 杉山, 花崎, 相沢, 岡川: "電磁圧接を用いた自動 車用 FPC 回路の重ね合せ溶接", 溶接技術, 57巻6号, pp. 87-92, Jun. 2009.
- [4] 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, Jun. 2016.
- [5] 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.
- [6] 特許公報: "金属薄板の電磁溶接法及び装置",登 録番号3751153.
- [7] 特許公報: "金属薄板の積層式電磁溶接方法",登 録番号3852824.
- [8] 特許公報: "半導体スイッチおよび溶接トランスを 使用した電磁溶接装置",登録番号4024119.
- [9] 特許公報: "電磁溶接方法及び導体モジュール", 登録番号 4644559.
- [10]特許公報: "導体モジュール及び電磁圧接法",登 録番号5274944.
- [11] U.S. Patent: "Electromagnetic welding method and conductor module", US20070029103.
- [12] Watanabe, Kumai, Aizawa: "Interfacial micro-structure of magnetic pressure seam welded Al-Fe, Al-Ni and Al-Cu lap joints", Materials Science Forum, Vol. 519-521, pp.1145-1150, 2006.
- [13] Itoi, Mohamad, Suzuki, Okagawa: "Microstructure evolution of a dissimilar junction interface between an Al sheet and a Ni-coated Cu sheet joined by magnetic pulse welding", Materials Characterization, Vol.118, pp.142-148, 2016.
- [14]相沢: "並列シーム溶接用平板状3ターンコイルによるA1/Cu薄板の電磁圧接",信学技報,EMD-2017-17,pp. 19-24, Jun. 2017.
- [15]相沢,熊谷,松田: "各種アルミニウム薄板の電磁シーム溶接",信学技報,EMD-2004-94,pp.7-12,Jan. 2005.
- [16]相沢: "平板状4ターンコイルによるA1/Cu薄板の電磁圧接シーム溶接",信学技報,EMD-2015-87,pp.1-6,Jan.2016.
- [17]相沢: "平板状6ターンコイルによるA1/Cu薄板の電磁圧接シーム溶接",信学技報,EMD-2016-22,pp.3 1-36,Jul. 2016.
- [18]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,Dec.2016.
- [19] 恩澤: "接合界面の波状模様とその生成機構", 日本塑性加工学会編, 高エネルギー速度加工, pp, 70-72, コロナ社, 1993.
- [20] Ben-Artzy, Stem, Frage, Shribman, Sadot: "Wave formation mechanism in magnetic pulse welding", International Jounal of Impact Engineering, Vol.37, pp.397-404, 2010.