# 平板状10ターンコイルによるAI/Cu薄板の電磁圧接

### 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 この電磁圧接は、A1薄板とCu薄板を低温のまま高品位に電気接続できる. 圧接実験は、パルス放電電流を並列充 電して直列放電するコンデンサ電源から、高インダクタンスの平板状10ターンコイルへ流して行われる. 10ターンコイルは 圧接用放電電流を減らすために使われる. コイルは高強度、中導電率のコイル板10枚で構成される. 間隙を設けて重ねた A1/Cu薄板を絶縁されたコイル上に固定する. コイルに近いA1薄板はコイルと電磁結合している. コイルに電流が流れると、 A1薄板に高密度磁束が急激に加わる. この結果、A1薄板に渦電流が流れ、電磁力が働く. A1薄板は加速されてCu薄板へ高速 衝突し、両薄板は衝撃的に圧接される. 直列放電時の電源容量は6μF,放電電流の立ち上がり時間は約 5μsである. 圧接 に必要な並列充電電圧、電源エネルギーおよび放電電流最大値は、それぞれ 7.6 kV、0.70 kJ および約16 kA である.

キーワード 電磁圧接, A1薄板, Cu薄板, 平板状10ターンコイル, コンデンサ電源, 直列放電, パルス放電電流

## Magnetic Pulse Welding of Al/Cu Sheets Using 10-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.iee.or.jp

Abstract This magnetic pulse welding can electrically connect Al sheet and Cu sheet at low temperature with high quality. Welding experiments are performed by flowing a pulse discharge current from a parallel-charge series-discharge capacitor bank through a high inductance 10-turn flat coil. The 10-turn coil is used to reduce the discharge current for welding. The coil consists of 10 coil plates made of high-strength, medium-conductivity copper alloy. Overlapping Al/Cu sheets with a gap are fixed on the insulated coil. The Al sheet near the coil is electromagnetically coupled to the coil. When the current flows through the coil, a high density magnetic flux is suddenly applied to the Al sheet. The resulting eddy currents are induced in the sheet and electromagnetic forces act on the sheet. This sheet collides with the Cu sheet at high speed, and both sheets are impact welded. The bank capacitance during series-discharge is 6  $\mu$ F and the rise time of the discharge current is about 5  $\mu$ s. The parallel charging voltage, the total bank energy and the peak discharge current required for welding are 7.6 kV, 0.70 kJ and about 16 kA, respectively.

Keywords Magnetic pulse welding, Al sheet, Cu sheet, 10-turn flat coil, Capacitor bank, Series discharge, Pulse discharge current

### 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 (A1)と銅(Cu)を溶接接続する需要が増加している.A1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,A1/Cuの溶接が必要になっ ている.本技術報告にも発表例が見られる[1-4].

電磁圧接(または,電磁シーム溶接)は.間隙を設けて 重ねた金属薄板へ高密度磁束を急激に加え,薄板を高速 衝突させて行われる[5-7].爆発圧接と類似の衝撃圧接法 であるが,電磁圧接は,爆発圧接に比べ小規模である. 電気電子部品などを低温のまま溶接接続できる[8-13].A 1/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い信頼性の高い金属結 合状態が得られる[14-18].接合強度などに問題はない. 圧接部分の電気抵抗の増加もないと言える[19].

技術的には、コンデンサ電源から平板状コイルへ放電 電流を瞬間的に流し、重ねたA1/Cu薄板へ高密度磁束を加 えて衝撃圧接する.通常使われる平板状1ターンコイル の場合、圧接に必要な放電電流は約150kA以上である. この電流はコイルのターン数を増加すると減少する[20-2 3].ただし、放電電流を急激に流すため、ターン数によ り、放電時のコンデンサ容量を減らす必要がある. 平板状 4 および 6 ターンコイルで実験する場合,コン デンサ容量は24  $\mu$  F (6  $\mu$  F×4 並列接続) であった[21]. 8 ターンコイルの場合,この電源を容量12  $\mu$  F (6  $\mu$  F×2 並列接続)の2 組のコンデンサに分ける.これらを6 タ ーンコイルの場合とほぼ同じ充電電圧で並列充電,直列 放電し、電源容量を6  $\mu$  F に減らして実験した.A1/Cu薄 板の圧接に必要な放電電流最大値は約 21 kA に減少した[ 22,23].同様に、10ターンコイルを用いて並列充電,直 列放電して実験し、概略を報告した[24].放電電流最大 値は約 16 kA に減少した,

実験に10ターンコイルなどを用いる目的は、A1/Cu薄板 などの電磁圧接に必要な放電電流を減少させることであ る、コンデンサ電源、放電スイッチの負担が減る.半導 体スイッチを安価で使えるなどの利点がある.

ここでは、平板状10ターンコイルへ、並列充電直列放 電するコンデンサ電源から放電電流を流し、前報告[24] に続きA1/Cu薄板を電磁圧接した結果を詳しく報告する.

#### 2. 平板状10ターンコイルによる電磁圧接概略

圧接法の概略を図1を用いて説明する.間隙(1mm)を 設けて重ねたAl/Cu薄板は,絶縁された平板状10ターン コイル上に固定される.コイルには,並列に充電して直 列に放電するコンデンサ電源および放電ギャップスイッ チが接続される.並列充電後,放電スイッチを閉じると, 直列放電で容量が減少したコンデンサ電源からインダク タンスの大きい10ターンコイルへ放電電流が矢印方向へ 急激に流れる.

コイルとA1薄板は直流的に絶縁されているが,交流的 に電磁結合している.コイルへ電流が急激に流れると発 生する高密度磁束がA1薄板に交差する(貫く).この結果, A1薄板に渦電流と呼ばれる誘導電流が流れ,A1薄板に上 向きの電磁力 f が働き,A1薄板はCu薄板へ高速衝突する. 両薄板は磁束が集中して発生するコイル中央部分(図2参 照)に沿って連続して圧接(シーム溶接)される.渦電流, 電磁力 f などの詳細は文献[20,22]に示されている.

A1/Cu薄板の衝突時間および放電電流波形の詳しい測定 は後述される.

#### 3. 実験装置

#### 3.1 平板状10ターンコイル

コイルは図2のような銅合金(C7025) 製コイル板10枚 から構成された.各板の導電率は45%,引張強さは約74 4N/mm<sup>2</sup>であった.各板同士は各板の下部で直列に接続さ れた.板厚は0.2mm,中央部分の長さ約110mmで幅5mm であった.各板の下部形状は文献[22,23]と同様に異な



図1 平板状10ターンコイルによる電磁圧接法説明図



図2 コイル板1枚の形状例

った. 圧接時のコイルインダクタンスは3.1μHであった [25]. 絶縁用シートを省いたコイル全体の外観例を図3 (a) に,これを上下方向に広げて横に倒した写真を図3 (b) に示す. 各コイル板をコイル内部で接続した状態が 見える. 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50μmであり,数枚を重ねて挿入した. 絶 縁したコイル全体の厚さは約5mmであった.

#### 3.2 並列充電,直列放電装置

充放電装置の回路図を図4に,回路の外観例を図5に 示す.先ず,放電回路の2台の同じコンデンサC1, C2(容



図3 平板状10ターンコイル外観例

量12μF)を7.6 kVの電圧で並列に充電した.次に,2台 の放電ギャップスイッチを起動し,各コンデンサを直列 に放電し,10ターンコイルL10へ放電電流Iを流した.直 列放電時のコンデンサ電源容量は6μF, 充放電エネル ギーは0.70 kJ,最大放電電圧は約15kVであった.

放電回路へ流れる電流波形信号は回路近くに電磁結合 するように置かれた電流測定用サーチコイルSCで検出さ れた.この信号は、シールド室内の積分回路、オシロス コープなどで電流を表す電圧波形に変換、記録された. 電流が流れてからA1薄板がCu薄板へ衝突するまでの衝突 時間信号波形も、電流波形と同時に測定された.詳しく は文献[21-23]に示されている.

3.3 圧接材および固定法

A1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), 厚さは共に0.5 mmであり, 大きさは100×100 mm などであった. 両薄板が重なる部分 の長さは約 50 mm, 重なる部分に設ける間隙は1 mmであっ た. 両薄板はコイル板と共に上下方向から締め付け用具 を用いて固定された. 両薄板のないコイル部分も別の用 具で同様に固定された.

#### 4. 実験結果

#### 4.1 放電電流および衝突時間信号波形

圧接時,平板状10ターンコイルへ流れる放電電流およ び衝突時間信号波形例を図6に示す.圧接に必要な放電 電流最大値は充放電エネルギー0.70kJのとき約16kAで あった.コイルと薄板間に発生する最大磁束密度は付録



放電ギャップスイッチ 10ターンコイル



コンデンサ(12μF)
 図5 並列充電,直列放電装置(回路部分)の外観例



(1)の概算法で約21Tであった.電流波形が最大値に達

するまでの時間は、約5 $\mu$ sであった.その後、減衰振動 する電流が約100 $\mu$ s流れた.電流波形の時間変化は付録 (2)のように1ターンコイルの場合と同様であった[25].

衝突時間信号波形は,放電開始時などに高周波数のノ イズが生じた.衝突するまでの時間は数回の測定から約 6µs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300m/sと概算された.

4.2 圧接されたA1/Cu薄板の外観

充放電エネルギー0.70 kJで圧接された両薄板の外観例 を図7に示す. A1薄板側から撮られた写真である. 両薄 板の中央部分が縦方向に端から端まで連続して圧接(シー ム溶接) されていた. この中央縦部分には幅10mm 程度の 変形が見られた. この変形の一部分がシーム溶接されて いた. Cu薄板側から見ると, このような変形がほとんど なかった.

4.3 接合部分断面の顕微鏡観察

充電エネルギー0.70kJ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.顕微鏡写真は専門業者が撮 影した.変形,圧接部分全体の断面写真例を図8に示す. 接合部分は,従来[14-18]と同様,コイル中央部分上方の 左右2箇所に見られた.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9に示す.従来[14-18,20-23]と同様, 接合界面に波状(さざ波)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.

異種金属の接合界面には金属間化合物が生じるが,波 状模様の生成などの理由から,影響は少なく,強い接合 が得られている[16-18].波状模様は高速衝突で接合面に 発生する金属ジェットの高速移動で生じたと考えられて いる[26].今回も,溶融した部分はほとんど無く,高品 位の状態で接合していると言える.

4.4 コイル板の変形状態

同じコイルを使用して約60回実験した後,取り外した コイル(コイル板10枚)の外観を図10に示す.10枚の板 はぴったり重ねられた.今回使用した板の材質は,高強 度,中導電率材であった.これを用いると,実験後の変 形は図10のように少なかった.従来の中強度,高導電率 材を用いた8ターンコイルで約60回実験した場合,コイ ル中央部分に比較的に大きな変形が見られた[27].

#### 5. まとめ

並列充電して直列放電するコンデンサ電源(放電時のコ ンデンサ容量6µF)から高インダクタンスの平板状10タ



図7 圧接されたA1/Cu薄板の外観



コイル中央部分(5mm) 図8 変形および圧接部分断面の光学顕微鏡写真



接合部分(左)



接合部分(右) 図9 接合部分(左右)の電子顕微鏡拡大写真

ーンコイルへパルス放電電流を急激に流してAl/Cu薄板 を電磁圧接した.1ターンコイルなど従来の少ターン数 コイルの場合と同様に圧接できた.圧接したAl/Cu薄板の 接合界面には、衝撃圧接に特有の波状模様が見られた. 高品位状態で圧接されたと思える.必要な電源エネルギ ーは0.70 kJで,放電電流の最大値は約16 kAに減少した. 実験(約60回)後のコイル板には、新しい高強度材を選択 したことで変形はほとんど無かった.

#### 6. 付録(1) コイルで発生する磁束密度の概算法

平板状10ターンコイルで発生する最大磁束密度の概算 方法を以下に示す.コイル板中央部分(板厚0.2 mm) へ直 列に流れる高周波振動電流 I は,表皮深さ(0.3~0.4 m m)を考慮し,薄いコイル板中央部分の断面に一様に流れ ると仮定する.各コイル板断面,板の間隔,直交座標軸 など計算用説明概略図を図11に示す.図11では,コイル 板No.1の断面中央を原点(0,0,0)とし,右横(水平)方向 を z 軸,コイル板に流れる電流方向を x 軸,上(垂直)方 向を y 軸としている,

z 方向の磁東密度  $B_z$ を求める方法を示す.薄い板No. 1に電流 I が流れており、z 軸上の位置 h1での値を求める. 図11に示す板No.1のz 軸上の位置 z で幅なの部分に流れる電流は I dz / b である. この薄く細い直線状電流が P点に作る磁東密度  $d B_{21}$  はアンペアの磁気に関する法則から式(1.1)で求まる、z 軸上の磁東密度の方向は発生する磁東密度の対称性から z 成分だけとなる. 磁東密度  $d B_{21}$ の z 方向成分は図11のようになる. これを-w /2 からw/2 まで積分すると、薄いコイル板No.1に流れる電流 I が P点に作る磁東密度は式(1.2)で求まる. この磁東密度は、時間と共に変化し、電流最大時に最大に達する. ここでは電流最大時の最大磁東密度を計算する.

具体的には、先ずコイル板No.1に流れる最大電流(I = 16 kA)がP点に作るz方向の磁束密度Bz1をh1=0.30 mmとして式(1.2)からMKS単位で求める.h1=0.30 mmは実際に実験する場合の数値例であり、コイル板No.1の中心からA1薄板下面までの距離である.次に、コイル板No.2断面中央を新しい原点とし、コイル板No.1と同様に流れる最大電流(I = 16 kA以下同じ)がP点に作る作るz方向の磁束密度Bz2をh2=0.30+c+g(mm)で同様に求め、次にコイル板No.3断面中央を新しい原点とし、コイル板No.1と同様、流れる電流がP点に作る作る磁束密度Bz3をh3=0.30+2(c+g)(mm)で同様に求める.このような計算を繰り返して最後にコイル板No.10に流れる電流がP点に作る作る磁束密度Bz10をh10=0.30+9(c+g)(mm)で求める.コイル全体としてP点に作るBzは各板について求めた各磁束密度を合計した式(1.3)て得られる.

 $dBz_1 = (\mu I)/2\pi \sqrt{z^2 + h_1^2}$ (1.1)

 $B_{\rm Z1} = \mu \ I / \pi \ b) \ \tan^{-1}(b / 2 h_{\rm I}) \tag{1.2}$ 

 $B_{z} = B_{z1} + B_{z2} + B_{z3} + B_{z4} + B_{z5}$ 

 $+B_{z6}+B_{z7}+B_{z8}+B_{z9}+B_{z10}$  (1.3)

ここで、 $\sqrt{z^2+h^2}$ はdz部分からP点までの距離rであ



図10 約60回実験後のコイル面の変形状態 右側はコイル中央部分拡大写真



図11 平板状10ターンコイル(各コイル板)がP点に 発生する磁束密度Bzの計算用説明概略図

り, μ および b は空間の透磁率および各コイル板断面中 央部分の幅である.

コイルで発生する最大磁束密度*B*zは、コイル板No.1の 中心からA1薄板下面までの距離0.30 mm、コイルに流れる 最大電流16 kA、コイルの各板厚0.20 mm 、各板の間隔(絶 縁シートなどの厚さ)0.33 mm、コイル全体の厚さが5.0 mm の場合、概算値で約10.6 Tと算出される.

この値はコイル上に圧接用A1薄板がない場合である. 薄板がある場合には、薄板に流れる渦電流による同方向 磁束密度が加わり、コイルと薄板間の値は約2倍になる.

なお、今回のようにコイル板(板厚0.2 mm)が薄いと、 流れる高周波振動電流がコイル板断面にほぼ一様に流れ る.コイル断面にもかなり一様に流れる.このため、P 点に発生する磁束密度 d Bz は、コイル全厚さが同じ場 合、一般的に使われている1枚板のワンターンコイルに 比べて磁束密度の発生効率が良くなる.ワンターンコイ ルの場合、高周波振動電流がコイル断面周辺の薄い表皮 だけに流れ、発生効率が悪くなる.

## 7. 付録(2) 放電電流波形, 衝突時間信号波形の 1 ターン コイルの場合との比較

平板状10ターンコイルおよび1ターンコイルへ流れる 放電電流波形などの比較例を以下に示す.比較は次の2 条件で行われた[25].条件を満たすため,1ターンコイ

- (1) 電流波形の振動周期をほぼ同じにする.
- (2) 電流最大値近くでA1薄板を衝突させる.

ル用のコンデンサ容量を200μFに、コイル板厚を2mmに 選んだ.コイル中央部分の幅および長さ、薄板の厚さお よび薄板間の間隙、圧接に必要な充電エネルギーなどは ほぼ同じにした.

電流波形,衝突時間信号波形の例を図12に示す.両電 流波形はほぼ同じように時間変化した.電流最大値は10 倍ほど異なった.電流最大値近くで A1薄板が衝突した. 電流波形の減衰はコイルのインダクタンス増加で少なく なり,抵抗増加で多くなっている.A1薄板に働く電磁力, 衝突速度はほぼ同じと思われる.



図12 電流波形, 衝突時間信号波形の比較例

#### 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: "A1/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] 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.
- [8] 特許: "電磁溶接方法及び導体モジュール",登録番号5274944.
- [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, 2012.
- [10]相沢: "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", 信学技報, EMD-2013-1, pp. 1-4, 2013.
- [11]相沢、松澤、岡川: "磁気シールド用アモルファス 金属箔へのアルミニウム薄板(または箔)の電磁圧 接",信学技報,EMD-2013-13,pp.1-6,2013.
- [12]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.
- [13] 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.
- [14] Zhang, Babu, Daehn: "Interfacial Ultrafine Grained Structures on Aluminum Alloy 6061 and Copper Alloy 110 Joint Fabricated by Electromagnetic Pulse Welding", Journal of Materials Science, Vol. 45, pp. 4645-4651, 2010.
- [15] 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.
- [16]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.

- [17] Sarvari, Abdollah, Naffakh, Rahimi, Parsayan: "Investigation of Collision Surfaces and Weld Interface in Magnetic Pulse Welding of Dissimilar Al/Cu Sheets", Journal of Manufacturing Processes, Vol. 45, pp. 356-367, 2019.
- [18] Wang, Liu, Li, Cui: "Study on mechanical properties and microstructural feature of magnetic pulse welding joint between Cu and Al sheets", The International Journal of Advanced Manufacturing, Vol. 113, pp. 1739–1751, 2021.
- [19] 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",電子情報通信学会技術研究報告, 112巻143号, pp. 19-24, 2012.
- [20]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.1-6,2016
- [21]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 1-36,2016.
- [22]相沢: "平板状8ターンコイルによるA1/Cu薄板の電磁圧接",信学技報,EMD-2018-9, pp.7-12, 2018.
- [23] Aizawa: "Magnetic Pulse Welding of Al/Cu Sheets Using 8-Turn Flat Coil", Journal of Light Metal Welding, Vol. 58, Supplement March, pp. 97s-101s, 2019.
- [24]相沢: "平板状10ターンコイルによるA1/Cu薄板の電磁圧接",2021年電子情報通信学会総合大会,エレクトロニクス講演論文集,Vol.2,p.3,2021.
- [25]相沢: "平板状1,5および10ターンコイルを用いる電磁
  磁圧接用放電回路の比較",信学技報,EMD-2021-1,
  pp.1-6,2021.
- [26] Ben-Artzy, Stem, Frage, Shribman, Sadot: "Wave formation mechanism in magnetic pulse welding", International Jounal of Impact Engineering, Vol.37, pp. 397-404, 2010.
- [27]相沢: "平板状8ターンコイルによるA1/Cu薄板の電磁圧接(第2報)",信学技報,EMD-2019-48, pp.1-6, 2020.

以上の研究報告は,電子情報通信学会技術研究報告 Vol. 121, No. 369, pp. 6-11 (2022) を加筆,修正した内容で ある.