# 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

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 平板状6ターンコイルを使用した金属薄板の電磁圧接は、コンデンサ電源からコイルへ放電大電流を急激に流 して行われる. 6ターンコイルは、厚さ0.3mm の銅合金平板を絶縁シートと共に6枚重ねて作られる. 6ターンコイルにす ると、放電電流をこれまで使われていたワンターンコイルの場合に比べ、約1/6 に減少できる. また、電源からコイルへの 電磁エネルギー移送効率も良くなる、しかし、各板が薄く、しわなどの変形が生じやすい. ここでは、6ターンコイルへの エネルギー移送、コイル板の変形状態を示し、変形に対する改良法を示す.

キーワード 電磁圧接,コンデンサ放電回路,平板状6ターンコイル,電磁エネルギー移送,金属薄板溶接,導電部品接合

# Electromagnetic Energy Transmission to 6-Turn Flat Coil for Magnetic Pulse Welding and Deformation of its 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 A high pulse current is discharged through a 6-turn flat coil which is used for magnetic pulse welding of sheet metals. The coil comprises six pieces of 0.3mm thick Cu alloy plates which are electrically insulated and are laminated. This coil can generate the magnetic flux of the same value by the current of about 1/6 in comparison with a conventional one-turn flat coil. The charged energy moves more to the 6-turn coil as magnetic energy as well. However, each plate is thin and the deformation such as wrinkles is easily caused. This report describes the energy transmission to the 6-turn coil, and the deformation of the plates with its improving method.

Keywords Magnetic pulse welding, Capacitor discharge circuit, 6-turn flat coil, Electromagnetic energy transmission, Sheet metal welding, Conductive parts joining

# 1. はじめに

電磁圧接(電磁溶接) はアルミニウム(A1) や銅(Cu) 薄 板,配線板など異種を含む導電素材同士を接続するのに 適した非溶融溶接法である[1-3].電気・電子部品を電磁 圧接する基礎実験も行われている[4-6].例えば,間隙を 設けて重ねた金属薄板に,高密度磁束を急激に加え,発 生する電磁力で両薄板を高速衝突させ,接続させる.低 温状態で高品位の金属結合状態が瞬間的に得られる[7,8]. 接合した薄板(継手) の電気抵抗増加も十分小さい[9]. 薄板の厚さは高速に加速するため約1mm以下である.

これまで、電磁圧接するとき、高密度磁束発生用の平 板状ワンターンコイルへ最大値150~200 kAの放電大電流 を流す必要があった.このため、この圧接法は抵抗スポ ット溶接法などに比べ扱いにくかった[10].筆者は薄い 平板を重ねた複数ターンコイルを使用し、ターン数を増 やしながら、放電電流値を減らす実験を行ってきた.6 ターンコイルで圧接すると、電流値は約1/6に減少した [11,12].圧接状態はワンターンコイルの場合と同様であ った.この圧接実験を続けると、6ターンコイルを構成 する6枚の薄板(厚さ0.3mm)の一部に変形が生じた.

ここでは、平板状 6 ターンコイルによるA1/Cu薄板の圧 接実験(概略),放電回路のコンデンサ電源からコイルへ の電磁エネルギー移送、コイル変形状態、変形に対する 改良法などを文献[11]の続報として報告する.

#### 2. 電磁圧接実験の概略

2.1 平板状6ターンコイル

高密度磁束発生に使用する平板状6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6枚のコ イル板(No.1~No.6)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5 mm)を上向きに流 入し,幅の広い両側の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6回繰り返 して板NO.6の周辺部から流出する.コイル中央部分には, 電流が6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 央部分を流れる電流には,電磁圧縮力が働く.この部分 は全体として移動しにくいが,しわなどが生じやすい.

2.2 E接原理·方法

平板状 6 ターンコイルを用いた圧接法を図2(断面図) を用いて説明する.間隙(1mm)を設けて重ねたA1,Cu両 薄板を,絶縁されたコイル上に平行に固定する.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直列に 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[2].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圧接(シーム溶接)される.

発生する磁束密度**B**, A1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* は文献[13]に示されている.

実際には、コイル板は薄く変形し易いので、コイル外 面を隙間が無くなるように固定する.

6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1/6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、全体の厚さをワン ターンコイルと同程度とする.

### 2.3 実験装置

平板状 6 ターンコイルへ大電流を急激に流すためコン デンサ放電回路を使用する.回路の構成要素を図3(左 側)に示す.放電回路は、コンデンサ電源(容量24μF)、 放電スイッチ、6 ターンコイルからなる直列回路である. 電源の充放電エネルギーは0.5~0.6 kJ(電力量 W・sに 相当)、充放電電圧は6~7 kVである.電源は容量6μHの コンデンサを4台並列接続して構成され、内部残留イン



図1 平板状6ターンコイル概略図(各板厚0.3mm)







図3 放電回路及び電流等測定装置の構成図

ダクタンスを減らしてある.

コイルへ流れる電流波形は,放電回路近くに置かれた 電流測定用のロゴスキーコイルなどで,両薄板が衝突し たとき生じる衝突時間信号と同時に測定される.また, コイル上にA1薄板を置かない回路及びコイルなしの回路 でそれぞれ放電し,電流波形が測定される.これらから, 各回路(各部分)のインダクタンス,最大電流,衝突時 間などを算出する. 6ターンコイルの外観,材質,寸法,各板の接続,絶縁について,及び圧接(溶接)用薄板の材質,寸法については,文献[11]と同じである.コイルとA1薄板の間に挿入される絶縁用シートの厚さは約0.2mmである.

#### 2.4 実験結果

圧接時,6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4に示す.振動周期約36μs(振動周波数約28kHz)で減衰振動する電流が約100μs流れた.こ の場合のコイルのインダクタンス(等価インダクタンス) は約1.3μH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33倍であった.充電エネルギー0.6kJの とき,最大電流値は約25kA,瞬間最大電力は数10 MWで あった.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,約9.5μsであり,衝突するとき の速度は約210m/sと概算された.

圧接された両薄板の外観,接合部分断面(界面)の観察 結果は文献[11]に示されている.

#### 3. 電磁エネルギー移送(伝送)

3.1 コンデンサ放電回路の等価回路

先ず,放電回路でコイル上にA1薄板がない場合の等価 回路を図5示す. Cはコンデンサ電源の静電容量, Lc はコイルのインダクタンス, Lr はコンデンサを含む回 路に残留するコイル以外のインダクタンス, R は回路に 存在する全ての抵抗である.

次に、コイル上にA1薄板がある場合の等価回路を図6 に示す.コイルインダクタンスLcとA1薄板のインダク タンスLsは、相互インダクタンスMで電磁結合してい る. Rs は薄板の抵抗である.薄板(2次側回路)には、 渦電流が流れる.電磁結合している等価回路図6(a)は、 単純化した等価回路図6(b)に書き換えできる.ここで、 Le は図6(a)の回路で電磁結合しているコイル(Lc, L s)部分の1次側回路から見た等価インダクタンス、Re は同じく等価抵抗である.このLe はLcに比べ約10% 減少した.

なお,コイルとA1薄板の間に存在する静電容量は十分 に小さく,振動周波数も約28kHzなので省略されてい る.

3.2 電磁エネルギー移送効率

等価回路(図 6 (b)) において, コンデンサ電源に充電 されたエネルギーが圧接用コイルに移る割合を説明する. 電圧  $V_{\circ}$  に充電されたコンデンサ電源(静電容量C)のエ ネルギーは (1/2)  $C V_{\circ}^{2}$  であり,電源の電極間に電界の エネルギーとして蓄えられる.時刻 t = 0 で放電スイッ



図5 A1薄板なし放電回路の等価回路, Cは電源の 静電容量, Lrは回路に残留するコイル以外のインダ クタンス, Lc はコイルのインダクタンス, Rは回 路に存在する全ての抵抗である.



図6 A1薄板あり放電回路の等価回路(a)及び単純化 した等価回路(b), Ls, RsはそれぞれA1薄板のイン ダクタンス,抵抗, M は相互インダクタンスであ る. Le, Reはそれぞれ1次側回路から見たLc, Ls 部分の等価インダクタンス,回路の等価抵抗である.

チを閉じ、放電回路の電流 I が増加すると、電源のエネ ルギーは減少し、回路インダクタンス(Le及びLr)周 辺で磁界のエネルギーが増加する.このようなエネルギ ー移動を電磁エネルギー移送と呼ぶことにする.

時刻 t = tmで,電源のエネルギーが最初に零になっ

$$\left(\frac{1}{2}\right) L_{e} I^{2} = \left(\frac{1}{2}\right) C V_{0}^{2} - \left(\frac{1}{2}\right) L_{r} I^{2} - \int_{0}^{tm} R_{e} I^{2} dt \quad (1)$$

$$\eta = \frac{\left(\frac{1}{2}\right) L_{e} I^{2}}{\left(\frac{1}{2}\right) C V_{0}^{2}} = \frac{L_{e}}{L_{e} + L_{r}} \left(1 - \frac{\int_{0}^{tm} R_{e} I^{2} dt}{\left(\frac{1}{2}\right) C V_{0}^{2}}\right) \quad (2)$$

$$\eta \doteq \frac{L_{e}}{L_{e} + L_{r}} \quad (3)$$

たとすれば、コイル部分の等価インダクタンス Le に移 送されるエネルギー (1/2) Le I<sup>2</sup> は、式(1)で与えられ る. Re I<sup>2</sup>を含む項は、回路抵抗で消費されるエネルギ ーに相当する. 電源からコイルへの電磁エネルギー移送 効率(割合) η は、式(2)で表される. この移送効率は、 電源のエネルギーが全てコイル部分に移送される場合に 1となるが、実際には式(2)から1未満である. 電源のエ ネルギーを効率よくコイル部分へ移す(1に近づける) た めには、コイル部分の等価インダクタンス Le に比べ残 留インダクタンス Lr を小さくし、回路抵抗を減らせば 良い.

一般的に,放電回路の電流波形(図4)は減衰振動し, 電磁圧接現象は電流波形の半周期以内で終了する.この 間に回路抵抗で消費されるエネルギーは少ない.電源電 圧が最初に零になる時刻 tm での移送効率 n は,近似式 (3)で表され,後で算出に使われる.

#### 3.3 エネルギー移送効率の算出例及び比較

移送効率  $\eta$  は、6 ターンコイル部分の等価インダクタ ンスを1.3µH、残留インダクタンス Lr を0.02µH として  $\eta$  = 0.98 であった.比較のため、従来のワンターンコイ ルの場合も示す.コイル部分の等価インダクタンスを0.0 39µH、残留インダクタンス Lrを0.02µH として、 $\eta$  = 0. 66 であった.6 ターンコイルへのエネルギー移送効率は ワンターンコイルに比べ約1.5倍よくなった.6 ターンコ イルのインダクタンスが増加した結果である.

実際の圧接中は、等価インダクタンスLeがAl薄板の 移動(加速)で変化する.このため、移送効率も薄板の 移動中に変化する.また、Leは平均的な放電周期から 求められたので、効率ηの計算値は圧接中の平均的な概 算値である.

3.4 コイル中央部分へのエネルギー移送

圧接はコイル中央部分で行われるので、この部分への 電源エネルギーの移送効率を考える.図6の等価回路(b) で、等価インダクタンスLe部分をコイルの中央部分と



図7 A1薄板あり放電回路の単純化した等価回路(c) Le1及びLe2は、それぞれ1次側回路から見たコイ ル中央部分及びコイル周辺部分の等価インダクタン スである.

周辺部分に分けた等価回路を図7に示す. Lei及びLe2 は、それぞれ1次側回路から見たコイル中央部分及びコ イル周辺部分の等価インダクタンスである.

コイルへ移送されたエネルギーは、コイル中央部分へ Le1/(Le1+Le2)を乗算して移る.エネルギーを効 率よくコイル中央部分へ移すためには、コイル中央部分 の等価インダクタンスLe1に比ベコイル周辺部分の等価 インダクタンスLe2を小さくする.この理由などで、コ イル周辺部分の幅を広くしてある.

#### 4. コイル板の変形及び改良法

4.1 コイル板の変形

充電エネルギー0.6 kJ程度で約40回圧接実験した後の 平板状6ターンコイル外観例を図8に示す.絶縁シート



図8 圧接実験後の平板状6ターンコイルの外観 (a)No.1側,(b)No.6側,白線の円内に変形あり.

を取り去り、中央部分を上から撮影した.中央部分のコ イル板No.1の手前側などに変形(しわ)が見られた.この ような変形が比較的に大きな部分は、図8に示す白線の 円内に生じた.コイル板No.6 側の変形は比較的に少なか った.内側コイル板(例えばNo.3の中央部分)の変形を 図9に示す.板No.3の上に板No.2があり、その一部がは んだ付けされている.内側コイル板にも変形が生じた.

なお,平板状ワンターンコイル(板厚3mm)を使用して 同様の圧接実験(充電エネルギー約0.9kJ)を40回以上行 った場合,コイルは,ほとんど変形しなかった.

4.2 コイル板変形の改良法

コイル板の変形を減らし、使用寿命を延ばす方法を、 コイル全体の厚さが約3mmの平板状6ターンコイルを基 に示す.

(1) 現在のコイル板(No.1~No.6)の形状(図10)を図 11のように改良,変更する.各板(図11)の大きさは180 mm×260 mmである.各板中央部分(幅5 mm)をそのままに, 横幅を180mmに広げる.コイル板(No.1)の比較例を図12 に示す.コイル板No.1中央部分の手前側など,変形の発 生し易い部分の幅が広がっている.

(2) 各コイル板の周辺部分には、電流が遠回りする部分があり、図12(b)に示す角度45°,角度90°が共通して存在する.これらの角度部分は、各板で同じ長さにし



図9 内側コイル板(No.3)中央部分の変形例

てある.これら角度部分の長さ、角度を選択する.

(3) 各コイル板の厚さを増減して変形を少なくすることもできる.変形し易いコイル板(No.1, No.2 など)を 厚くし、変形しにくいコイル板を薄くするなどして変形 を防ぐ.ただし、コイル全体の厚さを3 mm以上にすると、 ワンターンコイル(板厚3 mm)の場合と比べ、中央部分に 発生する磁束密度が減少するので注意する.

(4) 各コイル板の導電率及び引張強さ(変形抵抗)を, 可能な範囲で最適に選んで組み合わせ,全体として導電 性がよく,変形しにくいコイルとする.特に,変形し易 いコイル板の引張強さを大きくして変形を防ぐ.



図11 改良後の各コイル板 (No. 1~No. 6)の形状



図12 コイル板(No.1)の比較例, (a)現在 のコイル板, (b)改良後のコイル板

(5)実験中,A1,Cu両薄板が置かれた各コイル板の中 央部分は、ほとんど変形しなかった.理由は、A1薄板に 働く大きな電磁力の反作用がコイル板中央部分に働き、 この部分を下側固定具へ加圧していたからである.変形 が生じたコイル板中央部分は、絶縁材で固定されていた. この変形部分の固定法を工夫すれば、変形を減少できる.

(6) 各板の中央部分(幅5 mmの部分) と周辺部分の間隔 は,約5 mm一定である.この間隔も板の変形に影響する. ただし,この間隔(一定)を数10 mm以上にすると,周辺 部分のインダクタンスが増加し,電源エネルギーのコイ ル中央部分への移送効率が悪くなる.間隙を増加し,変 形を減少させる場合,この点にも注意する.

## 5. まとめ

平板状6ターンコイルを用いて、A1/Cu薄板を電磁圧 接すると、従来のワンターンコイルの場合に比べ、コイ ルへ流れる最大電流は約1/6の25kA程度に減り、電源の エネルギー移送効率は約1.5倍よくなった.

コイル板の厚さを0.3 mm にしたため,コイル板の一部 に、しわなどの変形が生じた.この変形を減らす改良法 を示した.コイル全体及び各板の厚さを増加する手段も 残されている.

今後,再検討し,平板状6ターンコイルの変形を少な くしたい.また,ターン数を増やし,電磁圧接に必要な 電流値をさらに減らしたい.

#### 参考文献

- [1] 特許公報: "金属薄板の電磁溶接法及び装置",登 録番号 3751153.
- [2] 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.
- [3] 相沢,岡川: "金属薄板の電磁圧接",塑性と加工, 52巻4号, pp. 424-428, Apr. 2011.
- [4] 特許公報: "電磁溶接方法及び導体モジュール", 登録番号4644559.
- [5] 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.87-92,2008.
- [6] 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.
- [7] 渡邉,熊井,石内,梶山,相沢: "電磁シーム溶接 したFe/Al接合材の界面組織解析",軽金属学会109回 秋期大会講演概要,pp. 309-310, 2005.
- [8] M. Watanabe, S. Kumai, T. 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.
- [9] 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.
- [10]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.
- [11]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-2016-49, pp.3 1-36, Jul. 2016.
- [12] T, Aizawa : "Magnetic Pulse Welding of Al/Cu Sheets using 6-Turn Flat Coil", Proc. 10th Int. Conf. on Trends in Welding Research, Tokyo, Japan, pp.964-967, 2016.
- [13]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.