電磁シーム圧接に及ぼすコイル形状の影響

岡川 啓悟* 相沢 友勝*

広橋 光治** 石橋 正基*

Influence of Coil Shape on Seam Welding by Applying Magnetic Pressure

Keigo OKAGAWA*, Tomokatsu AIZAWA*,

Mitsuji HIROHASHI ** and Masaki ISHIBASHI*

(Received on November 14, 2008)

A coil used in this seam welding has a large mechanical strength because it is fabricated from one copper alloy plate. When the coil has a small width and a small thickness, the welding of sheet metals can be performed using a low discharge energy in general. However, the coil is unfit for an experiment with a high discharge energy because the mechanical strength of the coil decreases with a decrease in coil cross-sectional area. Therefore, the proper selection of coil shapes is important, and the coil shape should be determined for the size of the sheet metals. The influence of coil width on welding an aluminum sheet to an aluminum sheet or a magnesium alloy sheet is confirmed. It becomes clear that a coil of 3 mm width is used only for the experiment with a low discharge energy because of its low durability and the influence of discharge circuit. To improve energy efficiency, the coil with enough cross-sectional area and many grooves of uniform depth is fabricated, and the effect is confirmed. A coil with grooves can weld sheet metals with a lower discharge energy compared with a coil without grooves.

Key words: high-energy-rate forming, joining, tension test, magnetic pulse welding, sheet metal, coil shape, magnetic flux density, electromagnetic force, magnetic pressure.

1. 緒言

電磁シーム圧接は、平板状ワンターンコイルにパルス大電流を流し、上面に置かれた金属薄板を重ね溶接する技術である。独自の技術として特許登録され¹⁾、報告されている^{2)~5)}。高エネルギー速度の固相接合法であり、200 m/s を超える衝突速度^{3), 6)}、金属ジェットの発生⁶⁾、接合界面に生じる波状模様^{2), 3)}の存在など爆発圧接⁷⁾とよく似た接合法である。圧接は電磁力によって瞬間的に行われ、10 μ m ~ 1.5 mm 厚程度のアリミニウム箔⁴⁾または板を圧接できる。アリミニウム/SPCC 鋼板⁵⁾、アリミニウム/溶融亜鉛めっき鋼板⁸⁾、アリミニウム/マグネシウム合金板⁹⁾など異種金属の圧接も可能である。

本報告の平板状ワンターンコイルは、一枚の銅合金板に二本の切込みを加えた E 字形状で、細長い中央部分と両側の幅広い部分からなる軸対称構造である。コイルに流れる電流は中央部分に集中して流入し、両側の周辺部分へ流出

する。板状なので、巻線形のコイルに比べ構造的に強固である。しかし、細長い中央部分に流せる電流には限度があり、この部分の形状は接合強度に影響を及ぼすと考えられる。実用化を考えると、これは重要なポイントになる。

コイルの細長い中央部分の形状に関する研究は、これまで部分的に報告^{10)~14)}されている。中央部分の幅が狭く、厚さが薄いと効率よく圧接できること¹⁰⁾、中央部分の裏側に溝を設けたときの影響^{11)~13)}、コイル交換に伴う中央部分のインダクタンスの影響¹⁴⁾などが示されている。ここでは、電磁シーム圧接に及ぼすコイル形状の影響を集約して報告する。

2. 圧接原理

E 字形平板状ワンターンコイルは、金属薄板の取り付けが容易なのでよく用いられる。E 字形コイル、金属薄板、固定具および電流と磁束の断面を Fig. 1 に示す。コイル電流は両側の周辺部分 (⊙) から細長い中央部分 (⊗) に集中して流れるので、中央部分の電流密度は高くなり、長手方向周辺に高密度磁束を生成する。高密度磁束が交差した下側の薄板部分に、磁束の浸透を妨げるように、コイル電流と逆方向の渦電流が流れる。薄板部分の渦電流密度 i 、単位体積あたりの電磁力 f は式(1)、(2)で与えられる。

* 東京都立産業技術高等専門学校ものづくり工学科 〒140-0011 東京都品川区東大井 1-10-40

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

** 千葉大学大学院工学研究科 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33 Graduate School of Engineering, Chiba University 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-8522, Japan.

Fig. 1 Coil current, eddy currents and magnetic flux lines (Lower Al sheet is accelerated by electromagnetic force and collides with upper sheet metal)

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

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

ここで、 κ および $\mathbf{B}$ は下側のアルミニウム薄板の導電率および磁束密度である。電磁力 $\mathbf{f}$ により、下側の薄板可動部分は上側の固定された薄板の方向に速度 $\mathbf{v}$ で運動（変形）する。運動中の導体に関するオーム則は式(3)で表される。

$$\mathbf{i} = \kappa (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{E}$ は静止している薄板内の電界で、運動中の薄板部分には、 $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ の新たな電界が静止中の電界 $\mathbf{E}$ と逆方向に加わる。その結果、運動中の渦電流密度 $\mathbf{i}$ は減少する。

Fig. 1 の下側の薄板可動部分が円弧状に変形し、固定されている上側の金属薄板に衝突すると、衝突点は2つに分かれてコイル幅方向へ対称に移動しながら、薄板間の衝突角度をコイル幅内で連続的に増加させる⁶⁾。接触面に生じる衝突点の移動は長手方向に沿って連続して生じるので、二枚の金属薄板は二本の線状にシーム圧接される。

3. 磁束密度測定と磁気圧力

圧接時の磁束密度と磁気圧力の概算値を知るために、低い放電エネルギー実験で、磁束密度を測定した。Fig. 1 で、下側のアルミニウム薄板は細長い中央部分上方の狭い領域で変形するので、圧接時の磁束密度測定は難しい。コイル幅より短い小型のサーチコイルを作成し、変形を生じない 0.1 kJ の放電エネルギー実験で得られた磁束密度信号から、下側のアルミニウム薄板の表面（コイル側）磁束密度を算出した¹⁴⁾。サーチコイルを Fig. 1 の細長い中央部分の上面と下側の薄板間に挿入し、コイル電流による誘導電圧 V_s を検出した。この電圧 V_s を Fig. 2 の測定回路で積分し、コンデンサ電圧 V_c をオシロスコープで観測した。表面磁束密度 B_1 は、電圧 V_c を用いて式(4)で求められる。

$$B_1 = -(CR/NS) \cdot V_c \quad (4)$$

ここで、時定数 CR は $300 \mu\text{s}$ 、 N と S はサーチコイルの巻数と断面積で、20 ターンと $0.64 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ である。磁束密度はコイル電流に比例し、コイル電流は放電エネルギーの 1/2 乗に比例する。式(4)の磁束密度 B_1 を用いて、圧接時（変形時）の放電エネルギー W における下側のアルミニウム薄板の表面磁束密度 B は、近似的に式(5)で求められる。

Fig. 2 Measuring circuit of magnetic flux density

$$B = B_1 (W/0.1)^{1/2} \quad (5)$$

式(2)に示される電磁力 $\mathbf{f}$ は、渦電流の正確な大きさや分布が分からないので算出は困難である。下側の薄板部分に働く圧力は、式(5)の表面磁束密度 B を用いると、式(6)で与えられる等価的な磁気圧力差 P で概算される¹⁵⁾。

$$P = B^2 / 2\mu \{1 - \exp(-2\tau/\delta)\} \quad (6)$$

ここで、 μ および τ は薄板の透磁率および板厚である。 δ は表皮の深さで、 $\delta = (T/\pi\kappa\mu)^{1/2}$ 、 T は周期である。

4. 実験装置

実験装置の概略を Fig. 3 に示す。実験は、Fig. 3(a), (b) の中央部分が部分的に異なる平板状コイルおよび Fig. 3(c) の通常の平板状コイルを、Fig. 3(d) の放電回路に別々に接続して行われる。コイルはクロム銅製である。Fig. 3 の矢印はコイル電流（放電電流）の経路である。Fig. 3(a), (b) は中央部分のみの形状であり、Fig. 3(a) は 3, 5, 7 mm と異なる幅（コイル幅）を持ち、Fig. 3(b) は中央部分の一部に切込み溝を持つコイルである。中央部分の板厚が 1, 2, 3 mm と異なるコイルでも実験をしている。全てのコイルは、Fig. 3(c) に示されるように、二本の切込み（隙間） d を挟んで、細長い中央部分と幅広い周辺部分に分けられており、外形幅は 145 mm である。その他の寸法はコイルによって異なり、その範囲は、直線部長さ（コイル長さ） a は 80~200 mm、幅（コイル幅） b は 3~7 mm および板厚 c は 1~3 mm である。Fig. 3(d) に示されるように、間隙長 1 mm に設定された二枚の金属薄板と固定具がコイル上面に置かれ、コイルと一緒に締付け金具で固定される。金属間は 0.125 mm 厚のポリイミドフィルムで絶縁される。

Fig. 3(d) の放電回路で、電源容量は $200 \mu\text{F}$ である。コイル電流は、コイル L の両側の幅広い周辺部分からコンデンサ電源 C —放電ギャップスイッチ G —コイル L の中央部分に流れて集中し、Fig. 3(c) の電流経路でコイル内を通過する。回路インダクタンスおよび回路抵抗は、使用するコイルによって異なる。観測したコイル電流波形から計算すると、それぞれ $0.058 \sim 0.094 \mu\text{H}$ および $4.5 \sim 6.2 \text{ m}\Omega$ であった。

Fig. 3 General outlines of apparatus : (a) coil with three widths, (b) coil with notching groove, (c) usual flat one-turn coil with one shape, (d) section view with discharge circuit

5. 実験結果と考察

コイルインダクタンスはコイル形状や寸法によって異なるので、コイルを交換すると、同じ放電エネルギーであってもコイル電流 (放電電流) が異なり、下側の金属薄板に生じる電磁力は変化する。始めに、中央部分の形状が部分的に異なるコイルによる圧接実験から、コイル形状のみの影響を調べた。そして、三枚の通常のコイルによる比較実験から、放電回路を含めた影響についても調べた。

5.1 放電電流

コイルに流れる放電電流を、Fig. 3(d)の放電ギャップスイッチ G に取り付けられた市販のロゴスキーコイルで検出し、オシロスコープで観測した。放電電流例を Fig. 4 に示す。減衰振動電流で、コイル形状によって電流最大値 I_m および周期 T は異なり、 I_m は 100~270 kA、 T は 21.6~28 μ s である。流れた時間は 100 μ s 以内である。

Fig. 4 Waveform of discharge current

5.2 中央部分の形状が部分的に異なるコイル

中央部分の断面積に関係するコイル幅と板厚、およびコイル電流の通路を制限する切込み溝の影響について調べた。

5.2.1 コイル幅および板厚の影響

三つのコイル幅および板厚を有する二枚のコイルを Fig. 5 に示す¹⁰⁾。コイル幅の影響は Fig. 5(a)のコイルで調べられる。中央部分の幅は 3, 5 および 7 mm で、板厚は同じで 2 mm である。板厚の影響は Fig. 5(b)のコイルで調べられる。中央部分の板厚は 1, 2 および 3 mm で、コイル幅は同じで 5 mm である。板厚 1 および 2 mm の底面に、絶縁物のスペーサを入れて中央部分の変形を防止している。コイル長さはどちらも 160 mm で、三つの形状部分の長さはそれぞれ約 50 mm である。コイル上面に置かれた金属薄板は二枚ともに純アルミニウム A1050-H24 で、大きさは 150×100 mm、厚さは 1 mm である。

圧接されたアルミニウム薄板各部分の引張せん断強さを次のように調べた。三つの形状部分に位置する薄板の中央から、幅 10 mm のせん断試験片を切り出し、最大せん断荷

Fig. 5 Central part in flat one-turn coil : (a) modified coil width, (b) modified coil thickness

Fig. 6 Influence of coil width (2 mm thick each)

Fig. 7 Influence of coil thickness (5 mm wide each)

重 [kN] を求めた。コイル幅の影響を Fig. 6 に示す。図中○印は試験片の母材で破断し、●印は接合面で剥離したことを表す。コイル幅が 7, 5, 3 mm と狭くなると、母材破断の放電エネルギーは 1.4, 1.2, 1.0 kJ へと低くなり、エネルギー効率よく圧接される。また、板厚の影響を Fig. 7 に示す。板厚が 3, 2, 1 mm と小さくなると、母材破断の放電エネルギーは 1.4, 1.2, 1.0 kJ へと低くなり、エネルギー効率よく圧接される。効率が高くなる理由は、コイル幅や板厚が小さいと断面積が小さくなり、同じ放電電流に対してその部分の電流密度が大きくなるためである。

しかし、断面積が小さくなった細長い中央部分は、放電電流によるジュール熱の影響を強く受けて軟化しやすくなる。また、機械的強度も低下するので、金属薄板からの反発電磁力の影響を強く受けて変形しやすくなる。

5.2.2 切込み溝の影響

高い放電エネルギーの圧接実験では、中央部分の断面積は変形が少ない大きさをなければならない。小さい板厚でのエネルギー効率の向上に着目し、コイル電流密度が大きくなるように、充分なコイル幅と板厚を持つ中央部分に切込み溝を入れたコイルを作成し、実験を行った^{11)~13)}。

Fig. 8 のコイルで、細長い中央部分は長さ 200 mm、幅 5 mm および板厚 3 mm で、矩形断面部分 (コイル A) および裏側に凹形の切込み溝をもつ断面部分 (コイル B) に分けられている。切込み溝は、Fig. 8(b) のように、長手方向に垂直に同じ深さで、幅 0.5 mm、深さ 1.5 mm、ピッチ 2.5 mm であり、電流通路の深さは 1.5 mm になる。下側の金属薄板はアルミニウム合金 A5052-H34、上側の薄板は A5052-H34 およびマグネシウム合金 AZ31 であり、板幅 (シーム長さ) 76 mm、長さ 100 mm、厚さ 0.5 mm である。

切込み溝を入れると、下側の金属薄板の表面磁束密度が高くなって¹³⁾ 式(6)の磁気圧力は高くなるので、下側の可

Fig. 8 Flat one-turn coil with two shapes (coil A and coil B): (a) front side view, (b) longitudinal section view

Fig. 9 Influence of notching groove (A5052-H34/A5052-H34)

Fig. 10 Influence of notching groove (A5052-H34/AZ31)

動薄板はより強く変形される。

同時圧接された同種 2 組の試料から、せん断試験片を切り出し、得られた中央部三辺の最大荷重[kN]を平均し、引張せん断荷重を求めた。試験片の幅は約 10 mm である。A5052-H34 / A5052-H34 薄板に対する荷重を Fig. 9 に、A5052-H34 / AZ31 薄板に対する荷重を Fig. 10 に示す。Fig. 9 と Fig. 10 とともに、放電エネルギーが大きくなると、引張せん断荷重は未接合および切断中に剥離 (×)、接合面剥離 (●)、母材破断と接合面剥離の混在 (◆など)、母材破断 (○) を経て大きくなる。母材破断は、すべて下側の A5052 薄板で生じた。切込み溝のあるコイル B は、矩形断面のコイル A よりも低い放電エネルギーで圧接できる。しかし、この切込み溝によるエネルギー効率の向上は少ない。

Fig. 8(b) の断面を流れる放電電流は、表皮効果によって、コイル表面から表皮深さ 0.4 mm 内に多く流れる。コイル B の電流通路の深さは約 1.5 mm であり、表皮深さ 0.4 mm よりかなり大きいために、板厚減少に相当する効果は十分に得られていない。細長い中央部分の機械的強度の低下が大きくならないように、0.5 mm よりも狭い切込み幅で、1.5 mm より深く切り込んで電流通路を狭めれば、エネルギー効率はより向上すると思われる。

5.3 通常のコイル

実用的な電磁シーム圧接は Fig. 3(c) の通常の平板状コイルで行われる。コイル幅が 3, 4 および 5 mm の三枚のコイルについて圧接実験を行い、コイル幅および放電電流の変化も含めた影響について検討した¹⁴⁾。Fig. 3(c)で、中央部分の長さ a は 80 mm、板厚 c は 3 mm である。コイル以外の実験条件は、切込み溝の場合と同じである。

三枚のコイルについて、0.1 kJ における磁束密度信号 V_C を測定した。式(4)~(6)から、0.1 kJ の表面磁束密度 B_1 の、1.5 kJ の表面磁束密度 B および磁気圧力 P の最大値を求めた。1.5 kJ における最大値および表皮の深さと周期を Table 1 に示す。コイル幅が 5, 4, 3 mm と狭くなると、最大磁束密度は 23.9, 26.1, 27.4 T へと増加し、最大磁気圧力を高くする。表皮の深さは 0.63, 0.64, 0.65 mm へと増加して最大磁気圧力を低くするように作用するが、影響は小さい。結果として、最大磁気圧力は 180, 214, 234 MPa と高くなる。圧接時には、下側の可動薄板が変形してコイル上面から離れ、表面磁束密度が小さくなるので、変形を考慮していないこれらの最大磁気圧力はやや低くなる。

放電エネルギーに対する、下側の A5052-H34 薄板と上側の各種薄板の引張せん断荷重を Fig. 11, Fig. 12 に示す。Fig. 11 は A5052-H34/A5052-H34 の、Fig. 12 は A5052-H34/AZ31 の引張せん断荷重である。放電エネルギーが大きくなると、切込み溝の場合と同様に、引張せん断荷重は、未接合、剥離および母材破断を経て、しだいに大きくなる。母材破断の多くは、下側の薄板 A5052 薄板で生じた。コイル幅が 5 mm から 4, 3 mm と狭くなると、低い放電エネルギーで金属薄板を圧接できる。3 mm 幅コイルの放電エネルギーが 4 mm 幅コイルより低くならなかった理由の一つは、コイル幅が狭くなるとコイルインダクタンスとコイル抵抗は大きくなり¹⁴⁾、Fig. 13 に示すように放電電流の最大値が減少するからである。もう一つの理由は、コイル幅が狭くなると、可動薄板の変形幅も狭くなって変形抵抗が高く

Table 1 Maximum pressure for three coil widths (at 1.5 kJ)

Coil width /mm	Maximum flux density / T	Period / μ s	Skin depth /mm	Maximum pressure / MPa
5	23.9	21.6	0.63	180
4	26.1	22.2	0.64	214
3	27.4	22.8	0.65	234

Fig. 11 Influence of both coil width and discharge current with exchange of coil (A5052-H34 / A5052-H34)

Fig. 12 Influence of both coil width and discharge current with exchange of coil (A5052-H34 / AZ31)

Fig. 13 Maximum current obtained by exchange of coil

なり、間隙長 1 mm の変形に、より多くの放電エネルギーが必要になるためと考えられる。また、3 mm 幅のコイルは、2.0 kJ 位から中央部分に幅方向の変形が現れた。アルミニウム箔などの低い放電エネルギーの圧接実験⁴⁾を除き、コイル幅を 3 mm にする利点はないようである。コイル幅は、コイルインダクタンスの影響と中央部分の変形を考慮して選択しなければならない。

シーム圧接された試料の断面¹⁶⁾を Fig. 14 に示す。コイル幅 5 mm よりやや広く圧接されるが、拡大観察すると中央部に空隙があり、その両側で接合されている。母材破断した A5052-H34 / AZ31 薄板について、Fig. 14 の○印に相当する接合部を光学顕微鏡で観察した。接合界面は、Fig. 15 に示すように、爆発圧接で見られる規則的な波状模様⁷⁾と類似の接合界面組織であり、波長は約 70 μm である¹³⁾。

Fig. 14 Photograph of cross section to seam welding direction

Fig. 15 Joined interface of welded A5052 / AZ31 (at 3.4kJ)

6. 結 言

中央部分の形状が部分的に異なるコイル、および通常のコイルについて、電磁シーム圧接実験と磁束密度測定を行って以下の結論を得た。

- (1) 中央部分のコイル幅および板厚が小さいほど、低い放電エネルギーで金属薄板を圧接できる。しかし、機械的強度が低下するので、ジュール熱による軟化および反発電磁力によって変形しやすくなる。高い放電エネルギーを必要とする電磁圧接は、エネルギー効率と中央部分の変形の両方を考慮してコイル幅などを選ばばよい。
- (2) 中央部分の裏側に切込み溝を入れると、切込みの無い通常のコイルよりも低い放電エネルギーで金属薄板を効率よく圧接できる。切込み溝は、機械的強度の低下が少なくなるように、狭く深く入れればよい。
- (3) 通常のコイルを選択する場合、金属薄板の電磁圧接はコイル形状の他に、コイルに流れる放電電流すなわち放電回路の影響を受ける。本来、エネルギー効率の高い 3 mm 幅のコイルは、単独使用では効率の低下を起こす。また、中央部分の耐久性も低いことから、アルミニウム箔などの低い放電エネルギーの圧接に用いられるが、高い放電エネルギーでの使用には適していない。

参 考 文 献

- 1) 特許 第 3751153 号。
- 2) Aizawa, T., Mehrdad, K. & Okagawa, K.: WELDING JOURNAL, **86** (2007), 119s-124s.
- 3) 岡川啓悟・相沢友勝: 塑性と加工, **48**-555 (2007), 323-327.
- 4) 宮崎忠・岡川啓悟・相沢友勝・熊谷正樹: 軽金属, **57**-2 (2007), 47-51.
- 5) 相沢友勝: 塑性と加工, **44**-512 (2003), 957-959.
- 6) 渡邊満洋・熊井真次・岡川啓悟・相沢友勝: 平 20 春溶接講概, (2008), 122-123.
- 7) 外本和幸・氏本泰弘・藤田昌大: 塑性と加工, **44**-512 (2003), 947-951.
- 8) 岡川啓悟・広橋光治・相沢友勝: 平 20 秋溶接講概, (2008), 412-413.
- 9) 松澤和夫・岡川啓悟・相沢友勝: 113 回軽金属秋講概, (2007), 185-186.
- 10) 大木渉・石井大哲・宇田川奈々美・相沢友勝・辺見信夫: 電子情報通信学会技術報告, EMD2004-112, (2005), 13-16.
- 11) 相沢友勝・岡川啓悟: 平 19 塑加春講論, (2007), 241-242.
- 12) 岡川啓悟・相沢友勝・辺見信夫・進藤康人: 58 回塑加連講論, (2007), 327-328.
- 13) 岡川啓悟・相沢友勝・石橋正基・辺見信夫・進藤康人: 平 20 塑加春講論, (2008), 143-144.
- 14) 岡川啓悟・相沢友勝・広橋光治・石橋正基: 59 回塑加連講論, (2008), 403-404.
- 15) 日本塑性加工学会編: 高エネルギー速度加工, (1993), 163-165, コロナ社.
- 16) 相沢友勝・熊谷正樹・松田正文: 電子情報通信学会技術報告, EMD2004-94, (2005), 7-12.