

Al/Cu 薄板の無衝突電磁圧接方法および接合界面

Welding Method and Joint Interface in Collision-less Magnetic Pulse Welding of Al/Cu Sheets

相 沢 友 勝*
Tomokatsu Aizawa*

1. ま え が き

電気，電子部品を電気接続する分野などで，アルミニウム（Al）と銅（Cu）を溶接接続する需要が増加している．Al/Cu 薄板など異種金属を溶接すると，融点などが異なるため，接合強度が低下し易い，このため，圧接など各種の接合法が研究されている¹⁾．

金属薄板を電磁圧接する方法は，爆発圧接と類似の衝撃圧接法であり，間隙を設けて重ねた薄板を高速衝突させて行われる^{2)~6)}．爆発圧接に比べ小規模，小部品の圧接に適している．圧接時間が非常に短く，低温のまま圧接接続できる．Al/Cu 薄板を圧接しても，接合部分の強度低下などに問題ないと言われている^{7)~9)}．

技術的には，コンデンサ電源から平板状コイル（E 形または H 形）へ放電電流を瞬間的に流し，Al/Cu 薄板へ高密度磁束（磁界）を加え，電磁力で衝突させる．ただし，高速衝突させると，圧接される部分に変形が生じる⁶⁾．金属ジェットが発生し，周囲に付着する³⁾．これらは，電気電子部品の圧接で好ましくない場合がある．

変形などが生じる欠点は，重ねた薄板間の間隙を無くし，無衝突で行えば防げる．筆者らは，無衝突で圧接する方法，実験結果をすでに報告している^{10)~13)}．コンデンサ電源から平板状コイル（H 形）の細長い中央部分へ往復する放電電流を流して行われた．コイルに発生する高密度磁束を重ねた薄板の両側から加えた．無衝突圧接実験では，平板状コイル（E 形）および多数ターンコイルは使用されなかった．

この報告では，無衝突で行う電磁圧接の原理，方法，結果などを引き続き説明する．圧接された薄板の接合界面状態について，新たな説明を追加して検討する．無衝突圧接実験で使用する多数ターンコイル（E 形）を提案する．

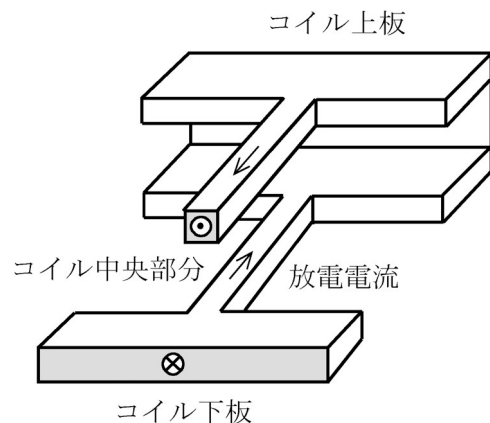
2. 無衝突電磁圧接法の原理および方法

2.1 平板状コイルおよび高密度磁束発生

前報告^{10)~13)}で使用した平板状 1 ターンコイル（H 形）の構成概略を **Fig. 1** に示す．コイルは，往復する 2 枚の H 形コイル板から構成される．両コイル板中央部分は細長く，断面は長方形である．圧接する薄板（間隙なし）は，絶縁された 2 枚のコイル板中央部分の間に配置，固定される．この H 形コイル板の細長い中央部分は，E 形コイル板中央部分に比べ形状的に変形し易い．往復する H 形コイル板には，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，電源からコイルへ放電電流を流す．放電電流が集中して流れるコイル中央部分に高密度磁束が発生する．

2.2 無衝突電磁圧接法の概略

前報告^{10)~13)}の圧接法概略を **Fig. 2** を用いて説明する．**Fig. 1** に示したコイル板中央部分の電流方向に垂直断面の概略図である．圧接する Al/Cu 薄板は，絶縁されたコイル上板中央部分と下板中央部分の間に置かれ，コイルと共に固定される．放電電流がコイルへ急激に増加しながら流れると，**Fig. 2** のように高密度磁束が，上板中央部分と下

**Fig. 1** 平板状 1 ターンコイル（H 形）概略図

* 東京都立工業高等専門学校名誉教授
Professor Emeritus of Tokyo Metropolitan College of
Technology
原稿受付：2023年1月20日

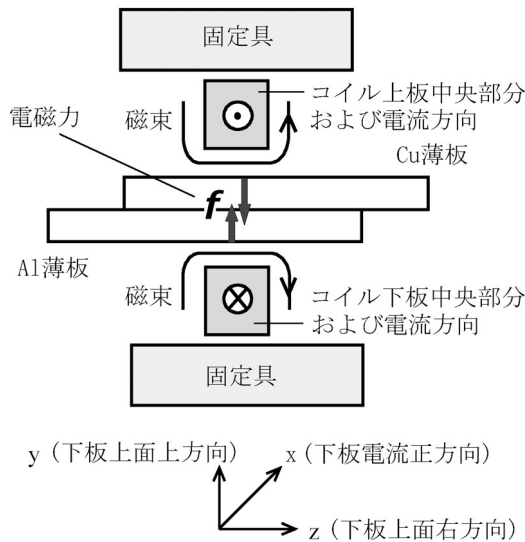


Fig. 2 圧接原理および方法の説明図 (断面図)

板中央部分の間に発生する。この磁束が Al/Cu 薄板へ急に交差すると、両薄板には渦電流と呼ばれる電磁誘導電流が流れ、磁束の浸入を妨げる。それでも、密度の減少した磁束が両薄板内へ浸入する。渦電流の流れ方は単純でないが、平均的には、近くのコイル板に流れる電流と反対方向へ流れる。

コイル板に流れる電流、近くの薄板に流れる平均的渦電流間には、大きな電磁力が発生し、両薄板を加圧する力 f が発生する。平均的渦電流が流れる方向には電気抵抗が存在する。この結果、両薄板は電磁力で加圧されると共に抵抗加熱され、条件により圧接される。圧接される部分はコイル中央部分に沿って連続してシーム溶接される。なお、平均的渦電流に働く電磁力、平均的渦電流の流れ方は後で詳しく説明される。

2.3 渦電流、電磁力などの数式による説明

発生する渦電流（電流密度 i ）は電磁誘導の法則を表すマックスウエルの方程式および導体中の誘導電界 E に関するオームの法則 $i = \kappa E$ から式(1)で、渦電流密度 i 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。磁束密度などの成分、方向を、Fig. 2 のような直交座標軸 (x, y, z) で表す。

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

$$f = i \times B \quad (2)$$

$$p = (B_0^2 - B_1^2) / 2\mu = (B_0^2 / 2\mu) [1 - \exp(-2\tau / \delta)] \quad (3)$$

$$\delta = \sqrt{2 / \omega \kappa \mu} \quad (4)$$

ここで、 t, κ, μ, τ はそれぞれ、時間、各薄板の導電率、透磁率、厚さであり、 ω は放電電流が時間変化する角周波数である。 B はコイル板間に発生する磁束密度、 B_0 および B_1 は例えば Al 薄板の下面および上面での磁束密度の z 方向成分（大きさ）であり、 δ は表皮深さと呼ばれる量である。

式(1)は、磁束密度が薄板に交差するとき、薄板に流れ

る無数の微小渦電流が循環して流れることを表している。式(2)は平均的渦電流に働く電磁力ではない。表皮深さ δ は角周波数 ω で変化する磁束が各薄板内へ浸入し、値が $1/e$ に減少する距離で、各薄板の厚さに比べ小さく選ばれる。

3. 実験装置

前実験^{10)~13)}では、高密度磁束を急激に発生させるため、コンデンサ電源による放電装置を使用した。放電回路部分の構成例を Fig. 3 に、外観例を Fig. 4 に示す。コンデンサ電源 C を必要な電圧（またはエネルギー）で充電し、放電スイッチ（ギャップスイッチ） G を閉じ、両コイル板へ減衰振動する放電電流を流した。電源、放電スイッチおよびコイルは、できるだけ近づけ、幅広い配線板を使い、放電回路のインダクタンスが小さくなるように配線された。

コンデンサ電源容量は $200 \mu\text{F}$ などであった。コイル板はクロム銅製で、全長約 200 mm 、板厚 $d = 10 \text{ mm}$ 、コイル板中央部分の長さ $a = 70 \sim 130 \text{ mm}$ 、幅 $b = 5 \text{ mm}$ であった。変形を防ぐためコイル板を厚くした。圧接する Al 薄板 (A1050) および Cu 薄板 (C1100) の大きさは $100 \times 100 \text{ mm}$ 、厚さ 1 mm などであった。圧接用薄板は表面の油脂汚れを拭き取って重ねられ、Fig. 3 の圧接部分に置か

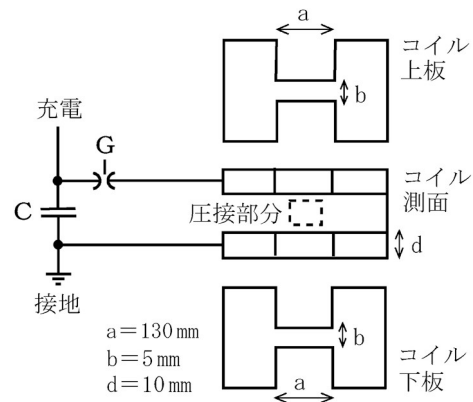


Fig. 3 放電回路部分の構成例



Fig. 4 放電回路部分の外観例

れ、コイル板と共に固定された。

放電電流波形は、放電回路近くに置かれたサーチコイル SC で電圧変化を取り出し、これを積分回路で電流波形（電圧量）に変換して現在と同様に測定された⁶⁾。

4. 実験結果¹⁰⁾

4.1 電流波形および関係量

コイル板に流れる放電電流波形例を Fig. 5 に示す。減衰振動する放電電流が、数 $10 \mu\text{s}$ 流れた。最大電流値は充放電エネルギーが 2.1 kJ のとき約 190 kA などであった。波形の振動周期 T は約 $24 \mu\text{s}$ 、角周波数 $\omega = 2\pi/T$ は約 $2.6 \times 10^6 \text{ rad/s}$ であった。放電電流が発生する磁束が各薄板内へ浸入し、値が $1/e$ に減少する表皮深さ δ は、式(4)から Al 薄板に対して約 0.4 mm 、Cu 薄板に対して約 0.3 mm であった。なお、表皮深さ δ の算出は、各薄板が密着して重ねられている影響を考慮していない。両薄板の接触面にも発生磁束がかなり浸入した。

4.2 圧接された Al/Cu 薄板

圧接（シーム溶接）された Al/Cu 薄板の外観例を Fig. 6 に示す。コイル中央部分（幅 5 mm ）の長さ方向に連続してシーム溶接された。圧接部分に生じる変形は、衝突させて圧接する場合に比べ少なかった。

圧接された薄板をシーム方向に垂直に切断し、研磨した

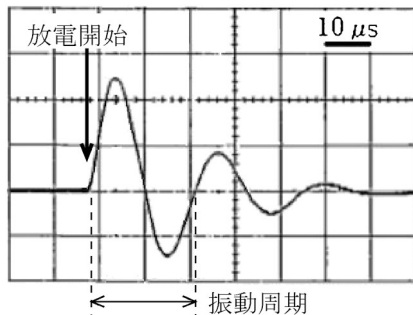


Fig. 5 コイルに流れる放電電流波形例（コンデンサ容量 $200 \mu\text{F}$ 、最大電流 190 kA ）

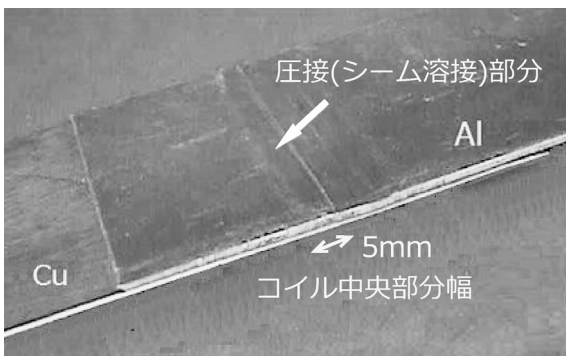


Fig. 6 圧接（シーム溶接）された Al/Cu 薄板の外観例

接合界面を光学顕微鏡で観察した結果を Fig. 7 に示す¹⁰⁾。接合部分は、コイル中央部分上方の 2 箇所が生じ、その間には非接合部分が存在した。接合部分は、2 本線状にシーム溶接されていた。コイル中央部分上方近くで、接合部分全体の厚さが Fig. 7 のように $0.1 \sim 0.3 \text{ mm}$ 減少する変形が見られた。接合界面に熔融凝固した部分などは見られなかった。接合部分の幅は、非接合部分を含めて約 5 mm であり、コイル板中央部分の幅と同程度であった。接合部（片側）の幅は 1 mm 程度であった。接合界面の接合部分（1 箇所）を拡大した電子顕微鏡写真を Fig. 8 に示す¹⁰⁾。条件により波状模様が生じていた。

比較、参考として、同様の実験で得られた Al/Al 薄板の接合界面を光学顕微鏡で観察した結果を Fig. 9 に示す^{11),12)}。接合部分は、コイル中央部分上方の 2 箇所が生じ、その間には非接合部分が存在した。接合部分と非接合部分は、Fig. 7 に比べ、はっきり区別されていた。

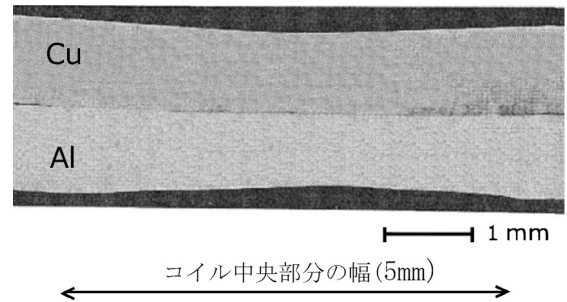


Fig. 7 Al/Cu 薄板接合界面の光学顕微鏡写真

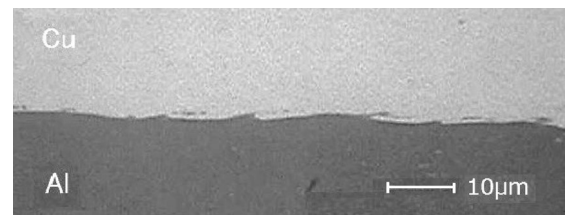


Fig. 8 接合部分（片方）の電子顕微鏡による拡大写真（接合界面に波状模様が見られる）

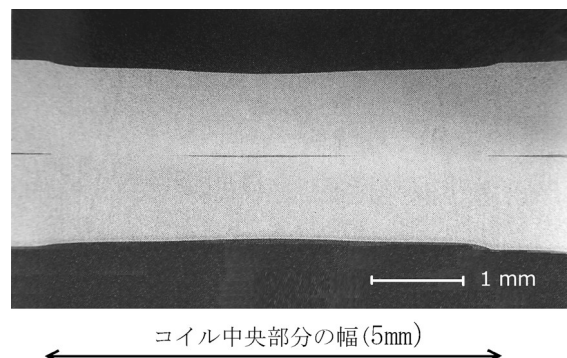


Fig. 9 Al/Al 薄板接合界面の光学顕微鏡写真

5. 実験結果（接合界面）の検討

5.1 平均的渦電流働く電磁力

この電磁力について、概略図（実際の薄板板厚は1mm）**Fig. 10**を用いて再び説明する。コイル中央部分に流れる電流方向、両薄板に流れる平均的渦電流の方向、平均的渦電流に働く代表的な電磁力が示されている。平均的渦電流は**Fig. 10**のようにコイル電流近くなどを逆方向へ流れ、薄板内へ浸入する磁束を妨げる。ただし、両薄板内へは、密度の減少した磁束が浸入する。両薄板に働く電磁力の方向および大きさは、フレミングの左手の法則、磁束密度の分布状態^{14)~16)}から予想できる。左手の法則では、薄板に流れる平均的渦電流に働く電磁力、コイル電流で発生する磁束密度（磁束、磁界）および平均的渦電流の各方向が、直角座標軸のように広げた左手の親指（電磁力）、人差し指（磁束密度）および中指（平均的渦電流）でそれぞれ示される。

コイル電流による磁束（磁束密度）はy方向およびz方向へ発生し、x方向へは発生しない。y方向磁束密度の大きさは、コイル下板中央部分上面の真ん中で零であり、方向が真ん中から左へ離れると+方向へ、右へ離れると逆の-方向へ向かって増加する。コイル上板中央部分下面の真ん中でも零であり、ここから左へ離れると-方向へ、右へ離れると逆の+方向へ向かう。z方向磁束密度の方向は+方向だけである。

各薄板に働く電磁力（±y方向）の方向はAl薄板内とCu薄板内で逆向きであり、大きさは、各コイル中央部分真ん中の近くで最大で、ここから離れても減少は少なく、

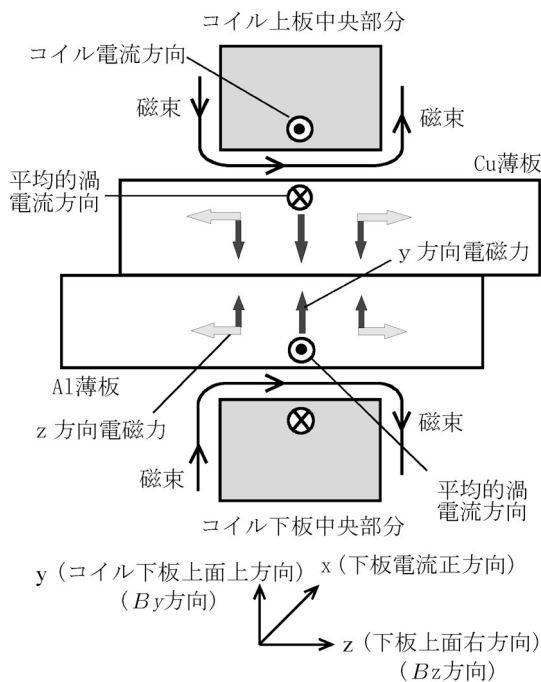


Fig. 10 各電流および電磁力の説明図（断面図）

中央部分端部で急に減少する。これに対し、電磁力（±z方向に働く）の大きさは、コイル中央部分真ん中の近くで零であり、ここから左右へ離れると互いに逆（±）方向へ増加し、増加はコイル中央部分の端部まで続く。電磁力が同時に2方向へ働く場所では、その合力が薄板へ働く。なお、各薄板に対称的に働く電磁力でも、流れる平均的渦電流の大きさが異なるため、大きさに差がある。

5.2 接合部分が2箇所になる理由

接合部分が2箇所になる理由は次のように考えられる。

- (1) コイル中央部分（内側）の真ん中近くでは、薄板を圧接する電磁力が接合界面に垂直に働くため、圧接されにくい。平均的渦電流による抵抗加熱は十分であるが、z方法の電磁力が不足している。
- (2) コイル中央部分（内側）の真ん中から離れた左右2箇所では、薄板を圧接する電磁力（合力）が接合界面に斜めに働くため、圧接され易い。平均的渦電流による抵抗加熱も行われる。加熱で軟化した左右2箇所の接合面に存在する酸化皮膜などは、斜めに働く電磁力などで破られる。

5.3 平均的な渦電流の流れ方および接合界面が波状になる理由

基本的に、両薄板内に電磁誘導により発生する誘導電界および渦電流密度の指力線（力線）は、式(1)などから微視的には渦があり、閉じている。両薄板に流れる平均的渦電流は、コイル電流が発生した磁束に直交し、この磁束を減らすようにコイル電流近くなどを反対方向へ流れる。平均的渦電流（ここでは単に渦電流と記す）の流れ方および接合界面に波状模様が生じる理由は次のように考えられる。

- (1) 表皮効果により、各薄板に流れる各渦電流は、各薄板表面に集中して流れ易い。コイル電流近くに働く電磁力も強い。各渦電流は、コイル電流と反対方向へ、循環的、螺旋状になって流れる。各渦電流は、流れの途中で合流、分流などを繰り返して複雑に絡み合っている。
- (2) このように流れるのは、コイル電流によって発生する磁束密度が様でなく、時間および位置により変化することからである。また、各渦電流が微小渦電流の集合のままであること、磁束密度の変化に応じて微小渦電流の集合、構成を短時間で変えられること、コイル電流および渦電流の移動速度がこれらの変化に比べ十分に遅いことなどで可能となる。
- (3) 各薄板のコイル表面から離れた部分にも弱い磁束が浸入するので、弱い渦電流が同様に流れる。この部分に働く電磁力は比較的弱い。
- (4) Al薄板およびCu薄板へ流れる各渦電流は、各薄板のコイル中央部分に沿って流れ、薄板端部近くでは、それぞれUターンするように方向を変える¹³⁾。例えば、両薄板接触面の接触状態により、コイル中央部分近くでUターンする渦電流は、Al薄板からCu薄板へ、Cu薄板からAl薄板へ、それぞれ繋がるように流れる。Uターンは、同じ薄板内でも、端部に達する途中でも起こる。

(5) 両薄板の接界面近くでは、薄板表面と異なり、逆方向へ流れる渦電流同士の衝突、合流、分流、Uターンなど複雑に絡み合い、狭い範囲に循環して流れ易くなる。両薄板の接界面に存在する酸化皮膜が破られた界面部分で両薄板を循環する渦電流は、この部分に波状模様を発生し易くなる。

(6) 両薄板内の各渦電流に働く電磁力（接合界面に斜めに働く）は、両薄板の金属原子（正イオン）との間に発生する静電的なクーロン引力とつり合う。この結果、各渦電流に働く電磁力は体積力として金属原子に働く。両薄板は軟化した界面部分の金属原子と共に界面方向へ移動する。界面部分の両薄板金属原子は両薄板を循環する渦電流および電磁力に影響され、Fig. 10のような波状模様写真が撮られる。

5.4 高速衝突圧接および無衝突圧接の比較

(1) 高速衝突圧接の場合、コイル中央部分真ん中近くの上方面では、衝突が接合相手の面に垂直のため、圧接されない。無衝突圧接の場合とかなり類似している。

(2) 高速衝突圧接で、コイル中央部分から離れた左右2箇所では、傾斜衝突するからであり、その角度が関係すると言われている。無衝突圧接でも、圧接用電磁力が接合面に斜めに働く場所で圧接され易い。その角度も関係しているようである。

(3) 高速衝突圧接では、加速中に運動エネルギーが増加し、渦電流が減少する。この運動エネルギーを使って衝撃的に圧接する。これに対し、無衝突圧接では、薄板が移動しないので、渦電流が流れ続け、その多くは抵抗加熱に使われる。この点は抵抗溶接（圧接の一種）に類似している。

6. 平板状多数ターンコイル（E形）の提案

高速衝突させる電磁圧接では、平板状コイル板（E形）を用いてコイルを多数ターン化している^{5),6)}。このように多数ターン化する主な理由は、(1)多数ターンに適したコンデンサ電源容量を選ぶと圧接に必要な放電電流が1ターンコイルの場合に比べ減少する、(2)E形コイル板が、細長い中央部分の変形を防げる構造であり、コイル板厚を減らして磁束密度の発生効率を良くできる、(3)電源から多数ターンコイルへ移る電磁エネルギーが1ターンコイルに比べ多くなるからである⁶⁾。このようなE形多数ターンコイルを参考に、無衝突圧接の場合に使用できるE形多数ターンコイルの具体例を提案する。

無衝突圧接用のE形多数ターンコイルの構成概略図をFig. 11に示す。コイルは絶縁された上板3枚および下板3枚から構成される。各コイル板はE形である。各コイル板はぴったり重ねられる。放電電流は、コイル下板最下の中央部分へ流入する。この電流は、各コイル板をFig. 11矢印の方向へ流れ、コイル上板最上の中央部分から流出する。コイル上板および下板各3枚の中央部分の間に高密度磁束が発生する。

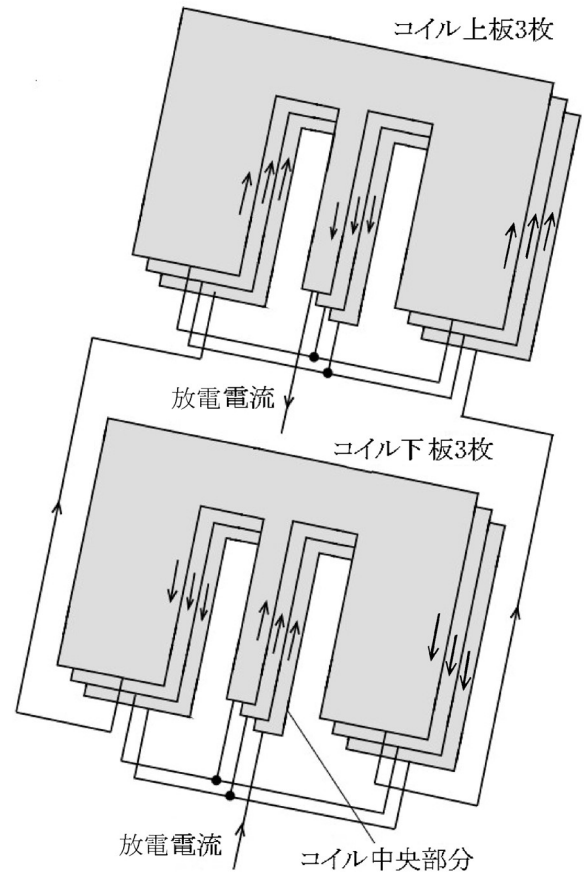


Fig. 11 無衝突圧接用多数ターンコイルの概略図

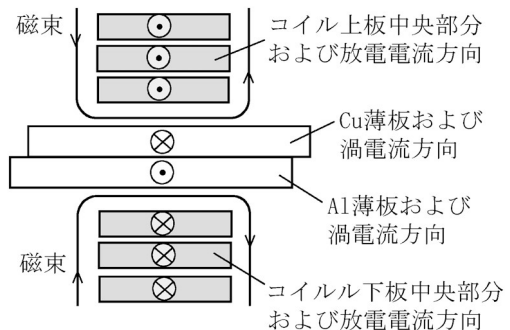


Fig. 12 Al/Cu 薄板および各コイル板の配置断面図

圧接用 Al/Cu 薄板は、コイル上板中央部分と下板中央部分の間に Fig. 12（断面図）のように置かれ、コイルと共に固定される。コイル中央部分間に発生した高密度磁束は、両薄板へ交差する。近くのコイル板と強く電磁結合する両薄板には平均的渦電流が Fig. 12の方向へ流れる。コイル電流と近くの渦電流間にそれぞれ強い電磁力が働く。両薄板は渦電流で抵抗加熱される。条件を選べば、両薄板は電磁力と抵抗加熱で従来の報告¹⁰⁾と同様に圧接される。

7. まとめ

金属薄板の電磁圧接法には、両薄板を高速衝突させて行

う方法および無衝突で行う方法があり、それぞれ特徴がある。両方の接合界面には、衝撃圧接に特有の波状模様が生じる^{2)~5),10)}。ただし、無衝突で行った場合、接合界面についての詳しい説明がなかった。また、圧接用コイルなどの改良も行われなかった。

この報告では、まず、無衝突で圧接する原理、方法、結果などを基に、両薄板に働く電磁力の方向および大きさを説明し、接合部分が2箇所が生じる理由、平均的な渦電流の流れ方および波状接合界面の発生理由などについて検討した。しかし、不十分なところがあると思われる。次に、無衝突圧接用の多数ターンコイルを提案した。今後、多数ターンコイルを使って無衝突で圧接実験を行う予定である。

接合界面状態に関する説明などは、高速衝突させて行う場合の説明^{17),18)}と大きく異なっている。同じような実験結果が得られるのは不思議であり、質問されることがあった。この報告が参考になれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) 中田一博：異材接合，軽金属溶接，60-10 (2022)，493-511.
- 2) T. Aizawa, M. Kashani, K. Okagawa: Application of Magnetic Pulse Welding for Aluminum Alloys and SPCC Steel Sheet Joints, *Welding Journal*, 86 (2007), 119s-124s.
- 3) 相沢友勝：金属薄板の電磁シーム溶接，溶接学会誌，77-8 (2008)，718-721.
- 4) 相沢友勝：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，59-2 (2011)，111-116.
- 5) T. Aizawa: Magnetic Pulse Welding of Al/Cu Sheets Using 8-Turn Flat Coil, *Journal of Light Metal Welding*, 58, Supplement March, (2019), 97s-101s.
- 6) 相沢友勝：電磁圧接 平板状 5 および 10 ターンによる電磁圧接技術—間隙を設けて重ねた Al/Cu 薄板の電磁力による圧接—，軽金属溶接，60-10 (2022)，520-533.
- 7) M. Watanabe, S. Kumai, T. Aizawa: Interfacial microstructure of magnetic pressure seam welded Al-Fe, Al-Ni and Al-Cu lap joints, *Materials Science Forum*, 519-521 (2006), 1145-1150.
- 8) I. Kwee, K. Faes: Interfacial Morphology and Mechanical Properties of Aluminium to Copper Sheet Joints by Electromagnetic Pulse Welding, *Key Engineering Materials*, 710 (2016), 109-114.
- 9) 糸井貴臣，鈴木亮，佐々木雅史，岡川啓悟：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，55-8 (2017)，290-299.
- 10) T. Aizawa, M. Yoshizawa: Impulse magnetic pressure seam welding of Aluminum and Copper sheets, *Proc. 7th Int. Symposium of Japan Welding Society, Kobe, Japan*, (2001), 295-300.
- 11) T. Aizawa: Magnetic pressure seam welding method for aluminum sheets, *Welding International*, 17 (2003), 929-933.
- 12) 相沢友勝：アルミニウム薄板の電磁圧接シーム溶接，軽金属溶接，41-3 (2003)，114-119.
- 13) 相沢友勝：アルミニウム薄片の電磁シーム溶接，電子情報通信学会技術報告，100-110 (EMD-2000-6)，25-30.
- 14) 岡川啓悟，相沢友勝，佐藤康宏：衝撃電磁シーム溶接装置における磁束密度測定，電気学会全国大会論文集，1，講演 No. 146 (2006)，178-179.
- 15) 太田智也，木村克紀，岡川啓悟，相沢友勝：平板状ワンターンコイルで生成される高密度磁束と磁気圧力の計算，電子情報通信学会技術報告，106-580 (EMD-2006-75)，5-8.
- 16) 岡川，啓悟，石橋，正基，佐藤，康宏，進藤，康人，辺見，信夫：電磁シーム溶接における磁束密度の影響，東京都立産業技術高等専門学校研究紀要，1 (2007)，26-30.
- 17) A. Ben-Artzy, A. Stem, N. Frage, V. Shribman, O. Sadot: Wave formation mechanism in magnetic pulse welding, *International Journal of Impact Engineering*, 37 (2010), 397-404.
- 18) 熊井真次，木村慎吾：電磁圧接に関する最近の研究—実験と数値解析の融合—，軽金属溶接，60-10 (2022)，512-519.