論文

電磁圧接板の接合性に及ぼす衝突速度および衝突時間の影響

石橋 正基*

岡川 啓悟*

栴沢 栄基*

Influence of Collision Velocity and Collision Time on Joining Property
in Welded Sheets Obtained by Magnetic Pulse Welding

Masaki ISHIBASHI*, Keigo OKAGAWA* and Eiki KABASAWA*

(Received on April 4, 2015)

In this paper, a number of factors influencing the joining property of sheets welded by a magnetic pulse welding are described. An electromagnetic force deforms a moving sheet, and the height of the sheet is governed by both the force and the properties of the sheet. Some information obtained from the first collision time is very useful, so two sheets with a gap can be joined with each other after the first collision. The relationship between the collision time and the gap length for an aluminum sheet is examined by 2.0kJ discharge energy experiments, and an approximation curve of this relationship is drawn. The velocity of the moving sheet is found by differentiation of the curve. The relationship between shearing load with the welded sheet and the gap length is also examined. Similar results have also been obtained for a copper sheet, and the relationship between the shearing load and the collision velocity has been shown for two materials. It has been clarified that the shearing load is distributed into three areas depending on the collision velocity. Therefore, the collision velocity is the main factor influencing the joining property of welded sheets. It has also been clarified that another influencing factor is the first collision time.

Key words: high-energy-rate forming, magnetic pulse welding, aluminum sheet, welded sheet, gap, collision time, collision velocity, tension test, electromagnetic force.

1. 緒 言

間隙を有する金属薄板の電磁圧接は、電磁力によって可動薄板が間隙内を高速変形し、固定薄板へ最初に衝突した後、固定薄板の表面に連続衝突するため、低い放電エネルギーで重ねシーム接合できる^{1)~3)}。間隙を設ける効果は、純アルミニウム板、1kJ程度の低放電エネルギーおよび1.0mm厚の可動薄板の圧接実験で明らかにされている^{2),3)}。圧接板の接合強さは、最初の衝突が放電電流の最大値付近で生じるような間隙長で大きくなる^{2),3)}。しかし、接合強さに及ぼす衝突速度の影響は明らかにされていない。

可動薄板の板厚やシーム圧接長⁴⁾の増加、および6000系のアルミニウム合金と低炭素鋼板などの電磁圧接^{5),6)}では、高い放電エネルギーが必要になる。また、圧接板の接合強さに及ぼす可動薄板の材質や板厚などの影響は明らかでない。衝突時間は放電回路の定数や放電エネルギーおよび可動薄板の材質や板厚などに依存するため、有益な情報を含む。また、間隙長を変えると変形速度を算出できる。

実用的な放電エネルギー2.0kJ、可動薄板の板厚が0.6~2.0mmおよび間隙長が5mmまでの広範囲で、純アルミニウム薄板の衝突時間が調べられ、変形速度が算出されている^{7),8)}。また、それぞれの間隙長で、圧接板分割片の接合強さと衝

突速度との関係が調べられている^{8),9)}。

本報告では、放電エネルギー2.0kJにおける純アルミニウム薄板の電磁圧接で、変形速度の算出法、変形速度に及ぼす可動薄板の板厚の影響および圧接板の接合強さに及ぼす衝突速度の影響について述べる。また、純銅圧接板の接合強さと純銅薄板の変形速度との結果と併せ、電磁圧接板の接合性に影響する要因について述べる。

2. 実験装置と回路動作

実験装置の概要をFig. 1に示す。Fig. 1(a)はE字形の圧接コイルの平面図、Fig. 1(b)は実験装置の断面図である。Fig. 1(a)のE字形コイルは、二つの隙間 g によって細長い中央直線部と広い両側部に分けられている。コイル幅 b は5mm、板厚 c は3mm、コイル中央の直線部長さ a は80mmである。圧接は中央直線部の上面で行われる。Fig. 1(b)で、可動薄板と固定薄板は、2つのスペーサで z 方向に間隙を設けられてコイル上面に置かれる。スペーサ間の x 方向空隙長は、可動薄板の変形を妨げないように、約40mmに設定される。電気的な絶縁のため、0.1mm厚のポリイミドフィルムが薄板外側に2枚置かれ、固定具とコイル間の全体はシャコ万力でFig. 1(a)の y 方向に沿って2箇所固定される。したがって、可動薄板とコイル間および固定薄板と固定具間はフィルムを介して密着しており、2枚の薄板は $\pm z$ 方向に拘束される。間隙長は0~5.17mmまで変えられる。2つの金属薄板はA1050-H24純アルミニウムで、幅は100mm、長さ(シ

* 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.

Fig. 1 General outlines of apparatus: (a) plane view of one-turn coil without sheet metals and fixture, (b) section view with discharge circuit

ーム圧接長)は80mmである。コイル側の可動薄板の厚さが0.6mmと1.0mmで固定薄板は1.0mmに、可動薄板の厚さが1.5mmと2.0mmで固定薄板は2.5mmに組み合わせられる。

Fig. 1(b)で、コンデンサ電源 C –放電ギャップスイッチ G –コイル L は放電回路を構成し、電源容量は $100\mu\text{F}$ 、放電エネルギーは 2.0kJ である。放電電流はサーチコイルで検出される。放電電流がコイル L の両側部 (⊙) から中央直線部 (⊗) に集中して流れるため、中央直線部の y 方向電流密度は大きくなる。矢印の高密度磁束が周辺に生成され、電氣的に密に結合している可動薄板に交差するため、逆方向の渦電流 (⊙) が可動薄板に流れる。渦電流と磁束で生じる電磁力により、可動薄板は上向きの z 方向に半円筒状に高速変形され、固定薄板に連続衝突し、接合に至る。

放電で生じるコイル変形は、放電終了後、間隙を設けずに2mm厚程度の薄板を置き、再放電して矯正される。

3. 衝突時間信号と放電電流の同時測定法

Fig. 2 は衝突時間信号と放電電流の同時測定系を示している。可動薄板の変形は放電電流がコイルに流れて始まるため、放電電流の立ち上がり時刻が時間基準になる。

放電電流はサーチコイルで検出され、積分回路を通してオシロスコープに記録される。衝突時間信号は可動薄板が変形して固定薄板に接触した瞬間から現れ、銅箔テープから測定回路を通してオシロスコープに記録される^{2), 3), 10)}。

Fig. 2 Simultaneous measuring system of collision time signal detecting from two sheets

Fig. 3 Waveforms of discharge current (upper) and collision time signal (lower) at 1.5mm thick sheet

衝突時間信号と放電電流の立ち上がり時刻の差が最初の接触衝突における衝突時間になる。最初の接触衝突の状態が電氣的に保持されるため、検出は1回に限られる。そのため、最初の衝突後、Fig. 1(b)の± x 方向(コイル幅方向)への衝突点移動に伴う連続衝突^{10), 11)}の時間は検出されない。

4. アルミニウム薄板の結果と考察

4.1 放電電流と衝突時間信号

Fig. 3 は同時測定で得られた放電電流(上段)および衝突時間信号(下段)の一例を示している。放電エネルギーは 2.0kJ 、可動薄板の板厚は 1.5mm である⁷⁾。Fig. 3(a)は間隙長が 0.38mm の波形である。時間 t_m , t_0 および T は放電電流が最大値に達する時間、零値になる時間および周期であり、 3.20 , 7.00 および $14.12\mu\text{s}$ である。放電電流の最大値は約 235kA である。最初の衝突時間は $3.28\mu\text{s}$ である。

Fig. 3(b)は間隙長が 0.80mm の波形である。最初の衝突時間は長くなり、 $4.74\mu\text{s}$ である。 t_m , t_0 はほぼ同じであるが、周期 T は $14.24\mu\text{s}$ でやや長くなる。

4.2 最初の衝突時間と間隙長の関係

すべての板厚と間隙長で Fig. 3 に示されるような波形を得ると、Fig. 4 の衝突時間 t_c と間隙長 d の関係が求められる⁸⁾。可動薄板の板厚は、△が 0.6mm 、○が 1.0mm 、□が 1.5mm および◇が 2.0mm である。間隙長 d はスペーサの板厚であり、実測値で示されている。衝突時間の測定はそれぞれの間隙長について2回程度行い、平均値を最初の衝突時間 t_c とする。間隙長 d を $0.38\sim 5.17\text{mm}$ に大きくすると、衝突時間 t_c は長くなるが比例しない。 t_c が最小と最大の範囲は、 0.6mm 厚で $2.04\sim 10.32\mu\text{s}$ 、 1.0mm 厚で $2.56\sim 15.00\mu\text{s}$ 、 1.5mm 厚で $3.28\sim 24.20\mu\text{s}$ 、 2.0mm 厚で $3.86\sim 31.40\mu\text{s}$ である。

4.3 可動薄板の変形速度の算出

可動薄板の変形速度を算出する近似曲線は Fig. 5 の可動薄板の変形高さ y と変形時間 t の関係から求められる⁸⁾。

Fig. 4 Relationship between first collision time and gap length

Fig. 5 Approximation by fourth polynomial of height

Fig. 4の衝突時間 t_c が間隙長 d における変形時間 t であるため、 d は変形高さ y と見なせる。可動薄板が静止しているため、 $t=0$ における変形高さ y は、 $y=0$ である。これを加えると、Fig. 5の測定点の近似曲線は、Fig. 5の太線で示される4次の多項式で表される。4つの近似曲線は、 Δ 、 $\circ$ 、 $\square$ および $\diamond$ で示される測定点とそれぞれよく一致している。可動薄板の変形速度は近似曲線を時間微分して求められる。

Fig. 6は可動薄板の変形速度 v と間隙長4.6mmまでに要する変形時間 t の関係を示している⁸⁾。変形速度 v は零から等加速度的に高くなるが、やがて緩やかに上昇して最大値に達した後、低くなる。また、板厚が小さくなると、等加速度的の時間領域は広くなり、0.6mm厚で約3 μ sである。変形速度 v のおよその最大速度と時間は、0.6mm厚で700 $m\cdot s^{-1}$ と6.5 μ s、1.0mm厚で500 $m\cdot s^{-1}$ と7.0 μ s、1.5mm厚で300 $m\cdot s^{-1}$ と8.2 μ sおよび2.0mm厚で220 $m\cdot s^{-1}$ と10.2 μ sである。可動薄板の板厚(質量)が大きくなると、可動薄板の変形速度 v は低く、変化は小さい。また、変形時間 t は長くなる。

Fig. 6 Relationship between velocity of moving sheet and time

Fig. 7 Relationship between velocity of moving sheet and gap length

4.4 可動薄板の変形速度と間隙長の関係

Fig. 7は可動薄板の変形速度 v と間隙長 d の関係を示している⁸⁾。すべての板厚に対し、変形速度 v は間隙長0mmで0 $m\cdot s^{-1}$ であるが、間隙長0.38mmで170 $m\cdot s^{-1}$ を超え、最大値に達した後、低くなる。間隙長0mmの0 $m\cdot s^{-1}$ を除き、間隙長4.6mmまでで、可動薄板の変形速度がおよその最小と最大の範囲は、板厚0.6、1.0、1.5および2.0mmに対し、それぞれ360~700、300~500、150~300および120~220 $m\cdot s^{-1}$ である。板厚が大きくなると、最大速度と最小速度が低くなり、それらの差は小さくなる。

4.5 圧接板の接合性

シーム圧接長80mmの圧接板を、シーム方向(Fig. 1のy方向)に約10mm幅で7等分した分割片を引張せん断試験し、得られた最大荷重を分割片のせん断荷重とする。

Fig. 8は圧接板分割片No.1~7のせん断荷重 P を示している。板厚は1.0mmである。間隙長は $\circ$ が0.80mmおよび $\square$ が4.07mmであり、可動薄板の破断を示す。■は接合面の剥離を示す。間隙長0.8mmの圧接板はシーム方向に強く接合されている。間隙長4.07mmの圧接板はNo.2~6で薄板破断であるが、せん断荷重は小さい。両端のNo.1とNo.7はさらに小さい。Fig. 9は引張せん断試験前の圧接板の断面を示し、Fig. 9(a)は間隙長0.8mm、Fig. 9(b)は間隙長4.07mmの断面である。Fig. 8で、間隙長4.07mmの圧接板の薄板破断は、Fig. 9(b)の $\circ$ 印内の可動薄板曲げ部で生じる。せん断荷重が小さい理由は、曲げ部における板厚の減少である。実用の観点から、間隙長を大きくすることは望ましくない。

Fig. 10は圧接板のせん断荷重 P_a と間隙長 d の関係を示している⁸⁾。 P_a は圧接板中央部3片の最大荷重の平均値である。圧接板の接合強さをせん断荷重 P_a で示し、 P_a で圧接

Fig. 8 Shearing load of seam welding direction for welded sheets obtained at 0.80mm gap and 4.07mm gap

Fig. 9 Photograph of cross section to seam welding direction

Fig. 10 Shearing load of welded sheets

板の接合性を評価する。白抜き印△, ○, □および◇は Fig. 7 の板厚に対するせん断荷重を示し, かつ可動薄板の破断を意味する。Pa ≠ 0 の塗りつぶし印■と◆は接合面剥離を, Pa = 0 の塗りつぶし▲, ●, ■および◆は未接合を意味する。■と◇は 2 片が薄板破断, 1 片は剥離を意味する。

間隙長 0mm は 2 枚の薄板の密着であり, すべての板厚で未接合である。間隙長 0.38mm の圧接板分割片はすべての板厚で薄板破断であり, 間隙の効果が見れている¹²⁾。0.6mm 厚と 1.0mm 厚の圧接板は間隙長 d が 0.38mm から 4.60mm の広い範囲で薄板破断であり, 圧接板は強く接合される。また, 間隙長 d が 0.38mm 以上で, 未接合が始まる間隙長は板厚によって異なる。1.5mm 厚の圧接板は間隙長 d が 3.53mm 以上で未接合に, 2.0mm 厚の圧接板は d が 2.04mm 以上で未接合になる。

放電エネルギーが一定の場合, 板厚の増加で接合可能な間隙長の範囲は狭くなる。圧接板のせん断荷重は可動薄板の厚さすなわち質量の影響を強く受ける。

5. 接合性に影響を及ぼす因子

間隙を設ける金属薄板の電磁圧接は, $100\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ を超える可動薄板の高速変形, 傾斜衝突, 金属ジェットの排出および接合界面の波状組織の存在など, 爆発圧接によく似た特徴を有している²⁾。一方, 爆発圧接板は面接合, 電磁圧接板は 2 本の線状接合であるなどの相違が存在する。爆発圧接板の接合性に関わる因子の一つは固定薄板への衝突速度であり, 接合の可否が検討されている¹²⁾。したがって, 電磁圧接板の接合性に影響を及ぼす要因は衝突速度などが考えられ, また純アルミニウム薄板のみならず, より高導電率で高密度の純銅薄板でも現れる¹³⁾と考えられる。検証のた

Fig. 11 Relationship between shearing load and velocity at first collision for aluminum sheets

Fig. 12 Relationship between shearing load and velocity at first collision for copper sheets

め, 2 種類の薄板の電磁圧接結果を検討する。%導電率および引張強さは, 純アルミニウム薄板は 58% および約 120MPa , 純銅薄板は 101% および約 245MPa である。純銅薄板の密度は純アルミニウム薄板のその約 3 倍である。%導電率が高いため, これらの材料は電磁圧接に適する。

5.1 せん断荷重と最初の衝突速度の関係

Fig. 11 は, 純アルミニウム圧接板のせん断荷重 Pa と最初の衝突速度 v の関係を示している。 Pa は Fig. 10 の, v は Fig. 7 の数値である。 Pa は 2 つの破線で 3 領域に分けられ, 最初の衝突速度 v の増加とともに未接合, 境界, 接合の領域へ移行する。境界領域には薄板破断, 接合面剥離および未接合が混在し, v の範囲は $178\sim 286\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ である。

C1100-1/4H 純銅圧接板のせん断荷重 Pa と最初の衝突速度 v の関係を Fig. 12 に示す。可動薄板の厚さは 0.4, 0.6, 0.8 および 1.0mm, 固定薄板の厚さは 1.0mm である。可動薄板の厚さが等しいと, v は Fig. 11 のそれより低い。接合面剥離は現れず, 接合の最小衝突速度は $155\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 未接合の最大衝突速度は $156\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ であり, 境界領域は非常に狭い。可動薄板の材質に関わらず, v によって接合領域と未接合領域が明確に分けられ, また接合領域では各板厚の Pa が v に依存して分布している。したがって, 最初の衝突速度は電磁圧接板の接合性に影響を及ぼす主要な因子である。

純アルミニウム圧接板の境界領域に接合, 接合面剥離と未接合が混在する, および純銅圧接板の境界領域が狭い。また, 純アルミニウム圧接板の接合の最小衝突速度は純銅圧接板のそれより低い。そのため, 他の要因も考えられる。

5.2 せん断荷重と最初の衝突時間の関係

純アルミニウムおよび純銅圧接板について, せん断荷重

Fig. 13 Relationship between shearing load and first collision time for two kinds of welded sheets

Fig. 14 Schematic view of electromagnetic force after first collision times

P_a と衝突時間 t_c の関係を Fig. 13 に示す。衝突時間 $t_c=0$ は Fig. 10 の間隙長 $d=0$ に対応している。■印の 1.5mm 厚と◆印の 2.0mm 厚の純アルミニウム電磁圧接板の接合は、 $3.28\mu\text{s}$ と $3.86\mu\text{s}$ の短い衝突時間 t_c から始まる。これらの t_c における間隙長 d は Fig. 4 から 0.38mm で小さい。また、 t_c が $5\mu\text{s}$ 近傍でも圧接板は接合する。 d が 0.38mm 以上における圧接板は、衝突時間 t_c の短時間側で接合し易い。

しかし、Fig. 11 の境界領域で、接合時の衝突速度よりやや高い衝突速度で、圧接板は未接合や接合面剥離を生じる。Fig. 13 から、圧接板が接合から未接合になる衝突時間 t_c は長時間側にあり、1.5mm 厚で $14.48\mu\text{s}$ 、2.0mm 厚で $11.12\mu\text{s}$ である。1.5mm 厚圧接板の衝突速度 v は、短時間側の $3.28\mu\text{s}$ で $220\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、長時間側の $14.48\mu\text{s}$ で $227\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ である。

これらの検討のため、可動薄板に生じる電磁力の時間推移を示す模式図を Fig. 14 に示す。電磁力は Fig. 3 の放電電流の 2 乗に比例する。 f_m と f_S は、 t_m 時と t_{cs} 時の電磁力である。 t_m は放電電流の最大値時間で、約 $3.2\mu\text{s}$ である。2 つの衝突時間 t_{cs} および t_{cl} は、1.5mm 厚圧接板の短時間側の $3.28\mu\text{s}$ および長時間側の $14.48\mu\text{s}$ に対応する。

長時間側の t_{cl} 時の電磁力は小さく、濃い塗りつぶしで示される t_{cl} 以降の力積は小さい。一方、短時間側の t_{cs} では、 t_{cs} 時の電磁力が大きく、塗りつぶしで示される t_{cs} 以降の力積は大きい。そのため、放電電流の最大値時間 $3.2\mu\text{s}$ 近くの短時間側で衝突する圧接板は、衝突速度に起因する衝撃力に加え、衝突直後から可動薄板に連続的に生じる電磁力の作用が大きいため、接合すると考えられる。したがって、衝突時間は接合性に影響を及ぼす因子である。

6. 結 言

純アルミニウム可動薄板について、板厚が $0.6\sim 2.0\text{mm}$ お

よび間隙長が 5.17mm までの広範囲の電磁圧接実験と衝突時間測定を行い、純銅薄板の結果と併せ、電磁圧接板の接合性に影響を及ぼす因子を検討し、以下の結論を得た。

- (1) 純アルミニウム可動薄板は放電電流の立ち上がり時刻で静止しているが、間隙長 0.38mm で $170\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ を超える高速度になる。可動薄板が固定薄板に高速度で衝突するため、2 枚の薄板は互いに接合する。この間隙の効果は間隙長 0.38mm から 4.60mm までの広範囲に現れ、 1.0mm 厚以下の可動薄板を固定薄板に強く接合できる。
- (2) 放電エネルギーが一定の場合、純アルミニウム可動薄板の最初の衝突速度および電磁圧接板のせん断荷重は板厚の影響を強く受ける。板厚が大きくなると衝突速度が低下し、 1.0mm 厚を越えると未接合の領域が現れる。
- (3) 間隙長が大きくなると、純アルミニウム可動薄板の変形が大きくなるため、電磁圧接された可動薄板は薄くなる。その程度が固定薄板との接触端の曲げ部で大きくなるため、圧接板は曲げ部で破断し、最大荷重は低下する。
- (4) 可動薄板の材質に関わらず、せん断荷重が最初の衝突速度によって明確に分けられるため、最初の衝突速度は電磁圧接板の接合性に影響を及ぼす主要な因子である。
- (5) 放電電流の最大値時間付近での衝突は、衝撃力に加え、衝突直後から連続的に加わる電磁力が大きいため、圧接板を強く接合できる。よって、衝突時間も因子である。

謝 辞

本研究は、財団法人先端加工機械技術振興協会の平成 25 年度研究助成によるものであり、深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 相沢友勝：塑性と加工，**44**-512 (2003), 957-959.
- 2) 岡川啓悟・相沢友勝：塑性と加工，**47**-546 (2006), 632-636.
- 3) 岡川啓悟・相沢友勝：塑性と加工，**48**-555 (2007), 323-327.
- 4) 岡川啓悟・石橋正基・相沢友勝：塑性と加工，**53**-616 (2012), 462-466.
- 5) 下田翔・小町拓也・岡川啓悟・広橋光治：平成 23 年度塑性加工春季講演会講演論文集，(2011), 293-294.
- 6) 井関航・森本啓太・糸井貴臣・岡川啓悟：平成 26 年度塑性加工春季講演会講演論文集，(2014), 193-194.
- 7) 石橋正基・岡川啓悟・相沢友勝・梶沢栄基：第 64 回塑性加工連合講演会講演論文集，(2013), 69-70.
- 8) 石橋正基・岡川啓悟・相沢友勝・梶沢栄基：平成 26 年度塑性加工春季講演会講演論文集，(2014), 43-44.
- 9) 石橋正基・岡川啓悟・梶沢栄基：第 65 回塑性加工連合講演会講演論文集，(2014), 21-22.
- 10) 石橋正基・岡川啓悟・梶沢栄基・相沢友勝：塑性と加工，**55**-644 (2014), 858-862.
- 11) 渡邊満洋・熊井真次：軽金属，**59**-3 (2009), 140-147.
- 12) 森昭寿・外本和幸・藤田昌大：塑性と加工，**47**-542 (2006), 195-199.
- 13) 岡川啓悟・石橋正基・梶沢栄基・相沢友勝：銅と銅合金，**52**-1 (2013), 66-71.