

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 24 日現在

機関番号：53601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760705

研究課題名(和文) 金属薄板と金属箔の衝撃電磁シーム溶接

研究課題名(英文) Magnetic pressure seam welding of metal sheets and metal foils

研究代表者

宮崎 忠 (MIYAZAKI, Makoto)

長野工業高等専門学校・機械工学科・准教授

研究者番号：70383487

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円、(間接経費) 960,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、金属板及び金属箔の電磁シーム溶接に関する動的変形プロセスを調べることである。その結果、磁気圧力シーム溶接の衝突挙動が、この研究によってある程度明確にすることができた。1) 金属板表面の間の衝突点移動速度は初期衝突点では非常に高速であるが、初期衝突点から離れるにしたがって減少した。2) 間隙が狭くなると、衝突点移動速度は速くなった。3) 金属板表面の間の衝突角度は、初期衝突点では0度であるが、初期衝突点から離れるに従って増加した。4) 間隙が狭くなると衝突角度はゆっくり増加した。

研究成果の概要(英文)：This study aims at examining dynamic deformation process on magnetic pressure seam welding of metal sheets and metal foils. As a result, collision behavior of magnetic pressure seam welding was able to be clarified to some extent by this study. 1) A collision point velocity between the metal sheet surfaces was very high at an initial collision point, but it decreased continuously during the welding. 2) When the gap length becomes narrow, collision point velocity was decreased early. 3) The collision angle between the metal plate surfaces was 0 degree at the initial collision point, but it increased continuously during the welding. 4) When the gap length becomes narrow, collision angle was increased slowly.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料加工・処理

キーワード：材料加工 電磁圧接 電磁成形 高エネルギー速度加工

1. 研究開始当初の背景

アルミニウム薄板やアルミニウム箔を接合する技術が必要とされているが、従来の抵抗溶接法によるシーム溶接では導電率、熱伝導率が高いアルミニウム薄板をシーム溶接することは困難である。衝撃電磁シーム溶接法は、アルミニウム、銅など良導電性の金属薄板へ高密度磁束を急激に加え、電磁力を利用して他の金属材へ衝突させ圧接する方法である。

金属材同士が衝突する時には、衝突点から前方に金属の噴流（金属ジェット）が発生する。金属ジェットにより金属表面の酸化皮膜やガスの吸着層が除去されるため、現れた清浄表面が高圧によって密着し、金属材同士は完全に金属組織的に接合される。衝撃電磁シーム溶接法により接合された金属薄板と金属箔の例を以下に示す。

本接合法の最大の特徴を挙げると以下の通りである。

- (1) アルミニウム薄板や銅薄板を特性の大きく異なる鋼板など異種金属材を容易に溶接できる
- (2) 厚さ 3 mm の薄板から厚さ 6.5 μm の金属箔のシーム溶接が可能である
- (3) 片側(片面)からの溶接が可能なので、薄板を角形鋼管の平面や厚板に T 形継手状にシーム溶接できる
- (4) シーム溶接部全体に気密性がある
- (5) 接合面を特に処理しなくても溶接できる
- (6) 同種・異種金属の組み合わせに関わらず、接合部分の引張せん断強さは母材と同等である
- (7) 機械的な接触がない非接触加工なので、材料をビニールなどで密封したまま加工できる

以上のように衝撃電磁シーム溶接法は様々な利点を持つが、最適な接合条件は経験的にしか得られていないのが現状である。本研究と関連した研究として、本加工法と同様に衝突現象を利用した爆発圧接がある。この加工法は、火薬の爆発現象を利用して板材同士を衝突させて圧接する方法である。爆発圧接では、形成される界面状態に及ぼす板材の衝突速度および板材同士の衝突角度の影響が検討されており、適切な衝突速度と衝突角度の組み合わせによって良好な接合が得られることが報告されている。しかし、衝撃電磁シーム溶接における接合界面状態と衝突パラメータ(衝突速度、衝突角度、衝突点移動速度(溶接速度に相当)など)の相関は明らかされていない。これらを明らかにすることは最適な接合条件を得る上で大変重要であるといえる。

2. 研究の目的

- (1) 充電エネルギーが、衝突パラメータに与える影響について明らかにする

- (2) 衝突パラメータが接合強度や接合界面などに及ぼす影響について明らかにする
- (3) 最適な接合条件(充電エネルギー、間隙など)を検証する。

3. 研究の方法

(1) 圧接の原理

圧接原理を Fig. 1 に示す。アルミニウム薄板、コイルおよび磁束の断面が示されている。コイル平板にパルス大電流を急激に流すと、コイル平板断面の電流密度は様にならず、内側表面の電流密度が高くなる。加えて、パルス大電流は狭められた中央部で発生するので、中央部内側表面の電流密度はさらに高くなる。この結果、高密度の磁束が発生して、中央部内側の薄板部分に鎖交する。この磁束の浸透を妨げるように大きな渦電流が流れ、電磁力が発生し、薄板部分は高速度で変形する。この電磁力は薄板間隙が狭くなる方向に働くので、変形が進み、2枚の薄板は互いに衝突する。衝突後の両薄板は、放電電流による電磁力で押圧され同時にジュール加熱され、コイルに沿ってシーム溶接される。

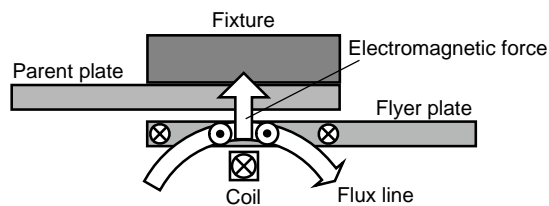


Fig. 1 電磁シーム溶接の接合原理

(2) 解析方法

本接合は、高速変形を伴うため接合実験のみで衝突パラメータを検討することは難しい。最適な接合条件を明らかにするため、アルミニウム薄板同士を接合する場合の変形シミュレーションを行い、衝突パラメータについて検討を行った。変形解析には汎用非線形構造解析プログラム MSC.Marc 2011、プリポストプロセッサ MSC.Mentat 2011 を用いた。本モデルの概要を Fig. 2 に示す。供試材として、長さ 100 mm、板厚 1 mm の A1050-H24 の板材を仮定した。静的引張試験によって得られた供試材の材料特性値を Table 1 に示す。

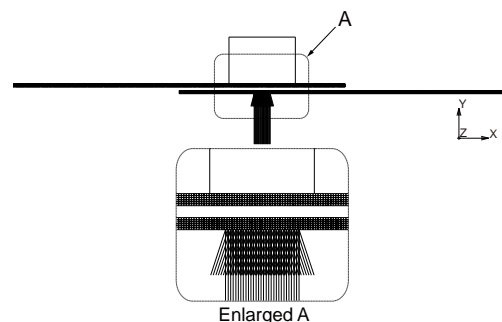


Fig. 2 解析モデルの一例

Table 1 材料特性値 (1050-H24)

Young's modulus	E / GPa	69
Poisson's ratio	ν	0.33
Density	$\rho / \text{kg/m}^3$	2.71×10^3
Work-hardening modulus	F / MPa	118
Work-hardening exponent	n	0.0623

(3) 衝突パラメーター

①衝突点移動速度と衝突角度の算出

2枚の板材を平行に設置して行う電磁シーム溶接法では、金属薄板に加わる力や速度が平行爆着法と良く似た状態となる。そこで衝突角度の算出には、爆発圧接で用いられる衝突角度と衝突速度、衝突点移動速度(溶接速度)の関係式を使用した。

$$v_p = 2v_c \sin \frac{\beta}{2} \quad (1)$$

$$v_p = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (2)$$

ここで、 v_p は衝突速度、 v_c は衝突点移動速度、 β は衝突角度、 v_x 、 v_y は v_p の x 方向および y 方向速度成分であり、それらの位置関係はFig. 3の通りである。また、 v_c については、隣接する節点における衝突時間の差と節点間の距離を用いて算出した。

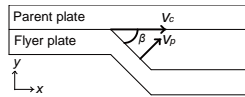


Fig. 3 衝突角度の定義

4. 研究成果

以下、項目ごとに本研究の実施によって得られた知見を示す。

(1) 接合界面

薄板を溶接した供試材の外観の一例をFig. 4に示す。端から端まで縦にシーム溶接されている。実際に溶接されている部分の幅はコイル中央幅 $b=5\text{mm}$ にほぼ等しく、厚さは1割程度減少した。供試材をシーム方向に垂直に切断し、顕微鏡観察した結果をFig. 5に示す。Fig. 5(a)は接合部全体、Fig. 5(b)は中央部を拡大した顕微鏡写真である。Fig. 5を見るとParent plateに変形したFlyer plateが衝突して接合していることがわかる。Fig. 5(b)より、中央部に非接合部(空隙)が存在していた。このことからシーム溶接部分は面ではなく2本の線状に溶接されていることがわかる。

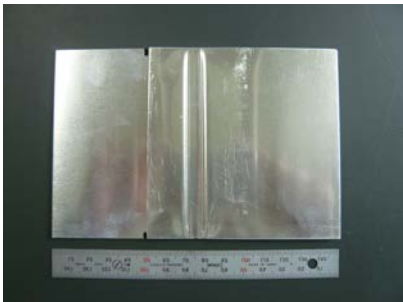
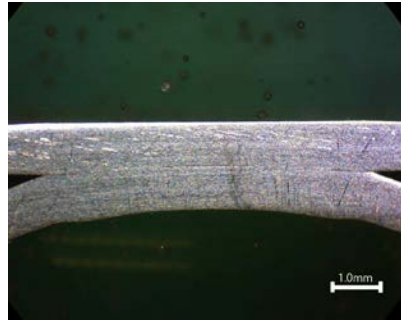
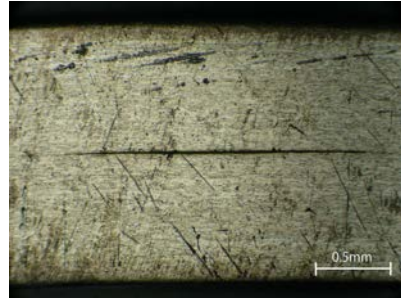


Fig. 4 電磁シーム溶接された供試材の一例 (Al/Al)



(a) 接合部全体



(b) 中央部拡大

Fig. 5 接合部の顕微鏡写真の一例 (Al/Al)

(2) 変形挙動

①変形過程

Fig. 6に電磁シーム溶接される板材の変形過程を示す。Flyer plateに電磁圧力を作用させると、中央部において変形が始まり、その後中央部が衝突している様子わかる。さらに変形が進むと、中央部が離れその周囲が接合されており、圧接部には2カ所の圧接部とその間の非接合部が存在すること再現できた。このことはシーム圧接された部分は、面ではなく2本の線状に溶接されていることを示している。

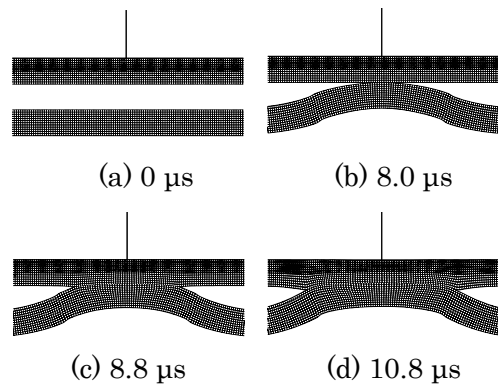


Fig. 6 電磁シーム溶接される板材の変形過程 (a) $0 \mu\text{s}$, (b) $8.0 \mu\text{s}$, (c) $8.8 \mu\text{s}$, (d) $10.8 \mu\text{s}$.

②変形挙動

変形終了後の間隙 1.5 mm の相当塑性ひずみ分布をFig. 7に示す。間隙が広い 1.5 mm では、Flyer plateの肩部に相当塑性ひずみが集中している。次に、初期衝突点からの距離 x と変形終了後の相当塑性ひずみ ϵ_p との関係を示す。

Fig. 8 に示す. なお, この相当塑性ひずみは Flyer plate の板厚中心部について示している. 初期衝突点からの距離 2.5 mm 付近を見ると, 間隙 0.5 mm と 1.0 mm では相当塑性ひずみが小さくなっているのに対して, 間隙 1.5 mm になると相当塑性ひずみが大きくなっている. これは, 磁気圧力が作用している部分の Flyer plate が間隙が広がったことによって大きく移動しているのに対して, 磁気圧力の作用していない部分の Flyer plate は移動していないためだと考えられる.

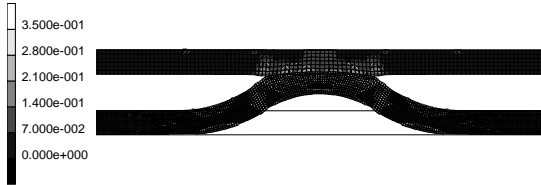


Fig. 7 相当塑性ひずみ分布 (間隙 1.5 mm)

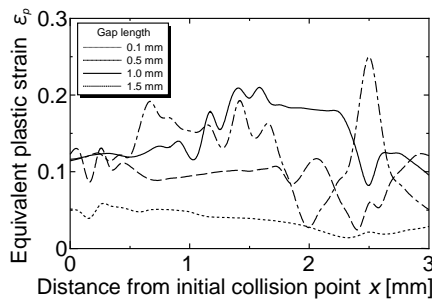


Fig. 8 初期衝突点からの距離 x と変形終了後の相当塑性ひずみ ϵ_p との関係

初期衝突点からの距離 x と変形終了後の相当応力 σ_{eq} との関係を Fig. 9 に示す. なお, この相当応力は Flyer plate の板厚中心部について示している. 間隙 1.0 mm と 1.5 mm では, 衝突部の相当応力は約 100 MPa である. 間隙が 0.1 mm の場合の相当応力は 50 MPa 以下であり, 間隙が小さいと十分に押圧されていないことがわかる. これは, 間隙が少ないと Flyer plate が十分に加速されないまま衝突しているためであると考えられる.

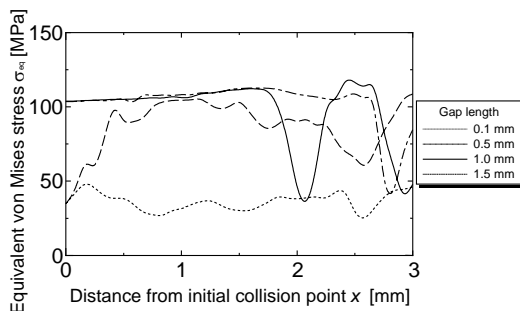


Fig. 9 初期衝突点からの距離 x と変形終了後の相当応力 σ_{eq} との関係

(3) 衝突パラメーター

① 衝突速度

Fig. 10 に初期衝突点における板厚方向の速度履歴を示す. 時間が経過するにつれて速度は連続的に増加し, その後大きく低下した. これは薄板同士が衝突したためである.

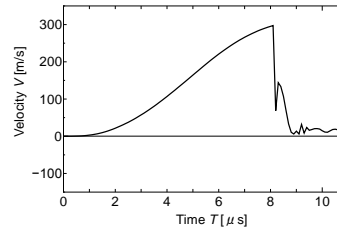


Fig. 10 初期衝突点における速度履歴

② 衝突角度

初期衝突点からの距離 x と衝突角度 β の関係を Fig. 11 に示す. 衝突角度は初期衝突点から離れるにつれて連続的に増加した. また, 衝突角度は, 間隙が広がるほど早く増加し, 2 枚の板のなす角度も間隙が狭い場合に比べて大きくなった.

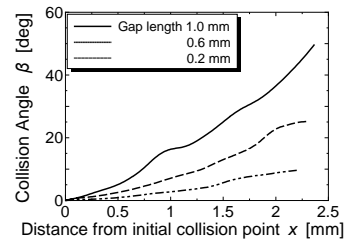


Fig. 11 初期衝突点からの距離 x と衝突角度 β の関係

③ 衝突点移動速度

初期衝突点からの距離 x と衝突点移動速度 v_c の関係を Fig. 12 に示す. v_c は初期衝突点近傍においては非常に高速で, 離れるほど減速した. 間隙が狭くなると, 間隙が広い場合に比べて, 初期衝突点からの距離が同じ位置での衝突点移動速度が速くなる傾向が得られた.

金属板同士が衝突する際に衝突点から前方に金属ジェットが発生することが知られている. 金属ジェットの速度は 2000~3000 m/s といわれている. Fig. 12 より初期衝突点近傍の衝突点移動速度は金属ジェットの速度を上回っている. また爆発圧接法では, 衝突点移動速度が金属内の音速を上回ると接合されないことが知られている. 初期衝突点では, 衝突点移動速度が金属内の音速を上回っている. 初期衝突点近傍に非接合部が存在する理由として, この2つのことが大きく関わっていると考えられる.

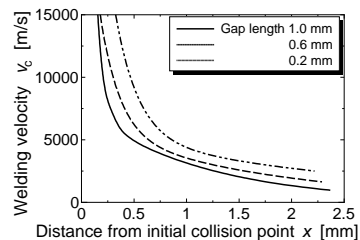


Fig. 12 初期衝突点からの距離 x と衝突点移動速度 v_c の関係

現在、充電エネルギーと衝突パラメーターの関係について検討しているところである。この関係は箔圧接の接合条件を明らかにする上で重要であると考えられる。結果が出次第、発表・論文投稿を行う予定である。

(2) 研究分担者
なし

(3) 連携研究者
なし

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- (1) Makoto Miyazaki, Kuniaki Sasaki, Masaki Okada: Influence of gap length on collision angle and collision point velocity of magnetic pressure seam welding, Materials Science Forum, 査読有, Vol. 767, (2014), pp. 166-170.
DOI:10.4028/MSF.767.166

[学会発表] (計6件)

- (1) 宮崎 忠, 久保田 将史: 電磁シーム圧接されるアルミニウム薄板の変形プロセスについて, 第64回塑性加工連合講演会, 2013年11月1日, 大阪大学(吹田市).
- (2) 宮崎 忠, 黒田 大介: アルミニウム薄板と各種金属薄板の電磁シーム圧接 (第3報), 平成25年度塑性加工春季講演会, 2013年6月9日, 大同大学(名古屋市).
- (3) Makoto Miyazaki, Kuniaki Sasaki, Masaki Okada: Influence of gap length on collision angle and collision point velocity of magnetic pressure seam welding, Abstract of the 4th International Symposium on Explosion, Shock wave and High-energy reaction Phenomena 2013 (4th ESHP Symposium), 2013年3月28日, 沖縄工業高等専門学校(名護市).
- (4) 宮崎 忠: 電磁シーム圧接されるアルミニウム薄板の変形挙動, 第123回軽金属学会秋季大会, 2012年11月11日, 千葉工業大学(習志野市).
- (5) 宮崎 忠: アルミニウム薄板と各種金属薄板の電磁シーム圧接 (第2報), 平成24年度塑性加工春季講演会, 2012年6月9日, コマツウェイ総合研修センター(小松市).
- (6) 宮崎 忠: 電磁シーム溶接されるアルミニウム薄板の変形挙動について, 第62回塑性加工連合講演会講演会講演論文集, 2011年10月29日, ホテル日航豊橋(豊橋市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮崎 忠 (MIYAZAKI Makoto)

長野工業高等専門学校・機械工学科・准教授

研究者番号: 70383487