アルミニウム薄板の電磁シーム圧接における 衝突挙動シミュレーション

宮崎 忠*・佐々木邦哲**・岡田 昌樹***

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 61, No. 1 (2011), pp. 20-23

Simulation of collision behavior on magnetic pressure seam welding of aluminum sheets

Makoto MIYAZAKI*, Kuniaki SASAKI** and Masaki OKADA***

This paper deals with dynamic deformation process on magnetic pressure seam welding of aluminum sheets. Numerical analysis of the dynamic deformation process of the aluminum sheets is made by a finite element method. In this analysis, the metal sheets (100 mm width, 1 mm thickness) are modeled with plane-strain quadrilateral elements. A collision point velocity between the aluminum sheet surfaces was very high at an initial collision point, but it decreased continuously during the welding. A collision angle between the aluminum sheet surfaces was 0 degree at an initial collision point, but it increased continuously during the welding. The collision angle in a double-sided magnetic pressure seam welding process increased more quickly than that in a single-sided magnetic pressure seam welding process.

(Received June 9, 2010 Accepted August 26, 2010)

Keywords: magnetic pulse seam welding, pressure welding, collision behavior, aluminum sheet, numerical analysis

1. 緒 言

アルミニウムは鋼などに比べて導電率、熱伝導率が高く、加熱効率が悪いいため、アルミニウム薄板の溶接は困難を伴う。そこでアルミニウム薄板に適した溶接法である電磁シーム溶接法についての報告がされている^{1)~9)}。

電磁シーム圧接法とは、アルミニウムや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2枚の薄板を高速変形させ圧接する方法である。この方法の特徴として、接合強度が高いこと、異種金属材料の接合が可能であること、極めて短時間で接合が行われることなどが挙げられる^{10),11)}。電磁シーム圧接では、接合界面が波状になることが観察されている¹²⁾。この接合界面の形態は、エネルギー源に爆薬を使用した爆発圧接法においても観察されている。爆発圧接法では、良好な接合面を得るための条件（接合条件）として、衝突点移動速度と衝突角度があるとされている¹³⁾。電磁シーム圧接法においても、この衝突点移動速度と衝突角度は接合条件として重要である。しかし、接合に要する時間は数 μ sという非常に短時間であるため、実験から金属薄板の動的変形過程をとらえることは非常に難しい¹⁴⁾。そのため、電磁シーム圧接時におけるこれらの変化の詳細については明らかにされていない。

そこで本研究では、有限要素法による動的変形シミュレーションを用い、電磁シーム圧接過程でのアルミニウム薄板間

の圧接面における衝突角度や衝突点移動速度の変化について検討を行った。

2. 接合原理

圧接原理について Fig. 1 を用いて説明する。Fig. 1 には重ねた2枚の薄板、コイルおよび磁束の断面が示されている。(a) はコイルを薄板の下側に設置し片側から磁気圧力を与えたもの（以下片側電磁シーム圧接方式と表す）、(b) はコイルを薄板の上下両側に設置し両側から磁気圧力を与えたもの

Fig. 1 Schematic illustrations of welding method.

* 長野工業高等専門学校機械工学科 (〒381-8550 長野県長野市徳間716)。Nagano National College of Technology (716 Tokuma, Nagano-shi, Nagano 381-8550). E-mail: miyazaki@me.nagano-nct.ac.jp

** 旭川工業高等専門学校専攻科生産システム工学専攻 (旭川市)。Asahikawa National College of Technology (Asahikawa-shi, Hokkaido).

*** 旭川工業高等専門学校機械システム工学科 (旭川市)。Asahikawa National College of Technology (Asahikawa-shi, Hokkaido).

Fig. 2 Finite element model of magnetic pressure seam welding.

(以下両側電磁シーム圧接方式と表す)である。コイルにパルス大電流を急激に流すと、発生する高密度の磁束(磁束密度 B) がアルミニウム薄板に交差し、渦電流(電流密度 i) が流れ、磁束の浸入を防ぐ。この結果、渦電流によってジュール加熱されたアルミニウム薄板は、電磁力で強く押圧され、コイルに沿ってシーム圧接される。金属板に発生する渦電流(電流密度 i (A/m^2)), 単位体積あたり働く電磁力 f (N/m^3) および単位体積あたり発生するジュール熱 Q (J/m^3) は (1)~(3) 式で与えられる。

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

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

$$Q = -\frac{i^2}{\kappa} \quad (3)$$

ここで、 κ は金属板の導電率 (S/m)、 B は磁束密度 (T) である。

3. 解析方法

解析には汎用非線形構造解析プログラム Marc 2008, プリポストプロセッサには Mentat 2008 を用いた。**Fig. 2** に要素分割モデルを示す。**Fig. 2 (a)** は片側電磁シーム圧接方式、**Fig. 2 (b)** は両側電磁シーム圧接方式の要素分割モデルである。アルミニウム薄板の寸法は、長さ 100mm, 板厚 1mm である。2枚の薄板は互いに 50mm ずつ重なっている。これまでの実験結果など¹⁵⁾ から、本研究では金属薄板間の間隙を 1mm とした。これは2枚の金属薄板の間に間隙を設けることにより、より少ないエネルギーで接合できることが知られているため¹⁶⁾ である。板厚に対して板幅が非常に大きく、板

Fig. 3 Relationship between time t and magnetic pressure P .

Table 1 Material properties of 1050-H24 aluminum sheet

Young's modulus, E (GPa)	69
Poisson's ratio, ν	0.33
Density, ρ (kg/m^3)	2.71×10^3
Strength coefficient, F (MPa)	118
Strain hardening exponent, n	0.0623

幅方向の変形が小さいため、本解析では金属薄板の要素は4節点4辺形平面ひずみ要素とした。なお、要素数は28804、接点数は31235である。なお、図中の矢印は金属薄板にかかる磁気圧力を示している。磁気圧力 P は、磁束密度 B の測定結果から、(4) 式を用いて計算した。

$$P = \frac{B^2}{2\mu} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{2a}{\delta}\right) \right\} \quad (4)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \kappa \mu}} \quad (5)$$

ここで、 μ は透磁率 (H/m)、 a はアルミニウム薄板の板厚、 δ は表皮深さ、 ω (rad/s) は磁束が周期的に変化する角周波数である。充電エネルギーは、実験より確実に接合が行われると知られている^{16),17)}、片側電磁シーム圧接方式の場合 0.9kJ, 両側電磁シーム圧接方式の場合 0.7kJ とし、本解析ではこれらの磁気圧力の値を用いた。**Fig. 3** は (4) 式より求めた 1050 アルミニウム H24 薄板に働く磁気圧力の履歴である。図中の実線は片側電磁シーム圧接方式、破線は両側電磁シーム圧接方式を示している。変形モデルにかかる磁気圧力は、コイル幅と同じ 5mm で各要素に対して直角に作用し、コイル幅方向に対して均一であると仮定した。動解析の時間積分法として、陰解法のシングルステップフーボルト法を用いた。なお、金属薄板の変形は放電電流の第一波目で完了することが知られている¹⁶⁾。そのため、本解析では放電電流の第一波目が終了する $10.8 \mu s$ まで解析を行った。なおステップ数は 5000 とし、そのときの時間ステップ幅は $2.16 \times 10^{-3} \mu s$ である。

変形体である金属薄板については、加工硬化を有する速度依存性のない弾塑性体とした。材料特性値として、静的引張試験より求めた **Table 1** に示す値を用いた。真応力 σ と真ひずみ ε の関係式には (6) 式を採用した。

$$\sigma = F \varepsilon^n \quad (6)$$

Fig. 4 Relationship between time t and velocity v .

Table 2 Collision velocity in thickness direction of plate (m/s)

	Single side	Double sides
Simulation	297	197
Experimental value	270	195

Fig. 5 Definition of collision angle β , collision velocity v_p and welding velocity v_c .

4. 解析結果と検討

Fig. 4 に変形中心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、その後速度は大きく低下した。これは薄板同士が衝突したためである。次に初期衝突点における衝突速度を Table 2 に示す。表中の実験値は、過去に行われた実験^{18),19)}により測定されたものである。また、両側電磁シーム圧接方式における実験値は両方の薄板が同じ速度で衝突する。すなわち相対速度となるため 0.5 倍した。Table 2 に示すシミュレーション結果は、実験値と近い速度となった。そのため、本シミュレーションは実験をよく再現しているといえる。

エネルギー源に爆薬を使用する爆発圧接法において、良好な接合面を得るために、衝突角度と衝突点移動速度が関係するといわれている¹³⁾。2枚の板材を平行に設置して行う電磁シーム圧接法では、金属薄板に加わる力や速度が平行爆着法と類似した状態²⁰⁾となる。そこで、爆発圧接法で用いられる関係式を用いて検討した。次に電磁シーム圧接時の衝突角度および衝突点移動速度の導出方法を示す。衝突角度の算出には (7) 式を用いた。この式は爆発圧接法で用いられる¹³⁾衝突角度と衝突速度、衝突点移動速度（溶接速度）の関係式であり、それらの位置関係は Fig. 5 の通りである。

Fig. 6 Relationship between distance from initial collision point x and welding velocity v_c . Fig. 7 Relationship between distance from initial collision point x and collision velocity in thickness direction of plate v_y .

$$v_p = 2v_c \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (7)$$

$$v_p = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (8)$$

なお、 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 方向速度成分である。衝突点移動速度は、通常の溶接における溶接速度に相当する。本解析では、この速度を隣接する接点の衝突時間差と接点間の距離より求めた。

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. 6 に示す。 v_c は初期衝突点において非常に高速で、中心から離れるほど減少した。また、片側電磁シーム圧接方式・両側電磁シーム圧接方式とも同じような傾向となった。Fig. 7 に初期衝突点からの距離 x と板厚方向の衝突速度 v_y の関係を示す。 v_y は片側電磁シーム圧接方式では初期衝突点から約 0.7 mm、両側電磁シーム圧接方式では約 1.9 mm の位置から減少した。Fig. 8 に初期衝突点からの距離 x と衝突角度 β の関係を示す。衝突角度は片側電磁シーム圧接方式・両側電磁シーム圧接方式とも初期衝突点から離れると連続的に増加した。両側電磁シーム圧接方式では、1.9 mm 付近から減少したが、これは v_y が減少に転じると同じ位置であった。電磁シーム圧接において 2 枚の薄板は初期衝突点近傍では接合されず剥離していることが知られている¹²⁾。本解析において v_y が減少に転じるとき、同時に初期衝突点の剥離も開始しており、このことが衝突速度の減少に関係あると考えるが、詳細については検討中である。爆発圧接法では、衝突点移動速度が遅く、衝突角度が大きいとき良好な接合が行われる¹³⁾。

Fig. 8 Relationship between distance from initial collision point x and collision angle β .

電磁シーム圧接法において、2枚のアルミニウム薄板が初期衝突点近傍で接合されないのは、初期衝突点近傍の衝突点移動速度が非常に速く、衝突角度が小さいためだと考えられる。

また、衝突角度については両側電磁シーム圧接方式は片側電磁シーム圧接方式より速く増加した。そのため、両側電磁シーム圧接方式の方が片側電磁シーム圧接方式より少ないエネルギーで接合することが可能であると考えられる。

5. 結 言

2枚のアルミニウム薄板を電磁シーム圧接した場合における、アルミニウム薄板の動的変形シミュレーションを行い、以下の結論を得た。

(1) 衝突点移動速度は、初期衝突点から離れるに従って減少した。

(2) 衝突角度は、初期衝突点から離れるに従って増加した。

(3) 両側電磁シーム圧接方式では衝突角度が片側電磁シーム圧接方式よりも速く増加した。

(4) 初期衝突点近傍で2枚のアルミニウム薄板が接合されないのは、初期衝突点近傍の衝突点移動速度が非常に速く、衝突角度が小さいためである。

謝 辞

本研究は社団法人日本アルミニウム協会の平成20年度ア

ルミニウム研究助成事業によって行われたものであります。社団法人日本アルミニウム協会に心より感謝の意を表します。また、本研究を進めるにあたり多大なるご協力を頂きました東京都立産業技術高等専門学校ものづくり工学科 岡川啓悟教授ならびに相沢友勝名誉教授に深く感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) T. Aizawa, K. Okagawa, M. Yoshizawa and N. Henmi: Proceedings of 4th International Symposium on Impact Engineering, (2001), 827-832.
- 2) 相沢友勝：軽金属, **54** (2004), 153-158.
- 3) 相沢友勝, 岡川啓悟, 宮崎 忠：平成17年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2005), 101-102.
- 4) M. Watanabe, S. Kumai and T. Aizawa: Mater. Sci. Forum, 519-521 (2006), 1145-1150.
- 5) 宮崎 忠, 岡川啓悟, 相沢友勝, 熊谷正樹：軽金属, **57** (2007), 47-51.
- 6) K. J. Lee, S. Kumai, T. Arai and T. Aizawa: Mater. Sci. Eng. A, 471 (2007), 95-101.
- 7) T. Aizawa, M. Kashani and K. Okagawa: Weld. J., **86** (2007), 119s-125s.
- 8) 宮崎 忠, 佐々木邦哲, 岡川啓悟：軽金属学会第115回秋期大会講演概要, (2008), 169-170.
- 9) 宮崎 忠, 佐々木邦哲, 岡川啓悟, 岡田昌樹：平成21年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2009), 177-178.
- 10) 岡川啓悟, 相沢友勝, 吉沢昌純：平成14年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2002), 475-476.
- 11) 相沢友勝, 岡川啓悟, 辺見信夫：第54回塑性加工連合講演会講演論文集, (2003), 119-120.
- 12) M. Watanabe and S. Kumai: Materials Trans., **50** (2009), 286-292.
- 13) 日本塑性加工学会編：高エネルギー速度加工, コロナ社, (1993), 68-76.
- 14) M. Watanabe and S. Kumai: Materials Trans., **50** (2009), 2035-2042.
- 15) 岡川啓悟, 相沢友勝, 後藤祐介, 角井崇幸：第54回塑性加工連合講演会講演論文集, (2003), 121-122.
- 16) 岡川啓悟, 相沢友勝, 宮崎 忠, 進藤康人, 谷所慎二, 宮城由行：日本機械学会第12回機械材料・材料加工技術講演会講演論文集, (2004), 171-172.
- 17) 岡川啓悟, 相沢友勝, 進藤康人：平成17年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2005), 103-104.
- 18) 岡川啓悟, 相沢友勝：塑性と加工, **47** (2006), 632-636.
- 19) 岡川啓悟, 相沢友勝：塑性と加工, **48** (2007), 323-327.
- 20) 森 昭寿, 外本和幸, 藤田昌大：M&M2006材料力学カンファレンス講演論文集, (2006), 419-420.