

電磁シーム溶接における磁束密度の影響

Influence of Magnetic Flux Density on Seam Welding by Applying Magnetic Pressure

岡川 啓悟¹⁾ 石橋 正基¹⁾ 佐藤 康宏¹⁾ 進藤 康人¹⁾ 辺見 信夫¹⁾

Keigo okagawa Masaki isibashi Yasuhiro satou Yasuto shindou Nobuo henmi

Keywords: Joining, Sheet metal, Magnetic flux density, Magnetic pressure, Coil

1. まえがき

アルミニウムや銅など良導性の金属材へ高密度磁束を急激に加え、生じた渦電流と電磁力を利用して他の金属材へ接合する技術を電磁溶接法と呼んでいる。この技術は、ソレノイドコイルの中に置かれた円管を、縮管によって内側にある円柱状心材に接合できることが報告されている¹⁾。しかし、板材については従来形のコイルで電磁圧接した例は見当たらない。

比較的機械的強度の大きい平板状ワンターンコイル²⁾を用いると、高密度磁束を容易に生成でき、高導電率の薄板に、大きな渦電流を流せる。薄板は、強い電磁力による圧接とジュール加熱を受けて、短時間で接合される。溶接前に薄板間に間隙を設けると、衝突の効果によって、低い放電エネルギーでの接合が可能になる³⁾。二枚の薄板が電磁力によって高速度で変形し、互いと衝突した効果⁴⁾によると考えられる。

この電磁溶接法は超音波接合、摩擦圧接、爆発圧接など同じ固相接合の仲間である。これらの接合法は、接合工程中に接合面の清浄化工程と密着工程を含む⁵⁾。一般的に、次のような特徴がある。

- (1) 加工エネルギーの調整が容易である。
- (2) 高速度加工なので、加工時間を短縮できる。
- (3) 加工力は電磁力なので、加工中、機械的な接触がない。
- (4) 大気中で、金属薄板 (アルミニウム合金⁶⁾、マグネシウム合金、銅、鉄⁶⁾、ステンレスなど)、金属箔 (アモルファスなど、 $6.5\mu\text{m}$ 厚以上)⁷⁾の重ね溶接および端子と線⁸⁾の溶接が可能である。
- (5) 溶接に際して、溶接材と被溶接材の平らな表面に、特別な処理を必要としない。
- (6) 溶接用コイルの形状を工夫すると、袋とじ状⁹⁾のシーム溶接が可能になる。

薄板間の間隙長を一定にした溶接実験では、溶接された試料の接合強度は、放電エネルギーを高くすると

¹⁾ 都立産技高専 ものづくり工学科 電気電子

大きくなる。また、溶接された試料を分割してその接合強度を調べると、試料両端の分割片の接合強度は、中央部の分割片の強度に比べて小さい。これらはコイル電流で生じた磁束密度と薄板内を流れる誘導された渦電流によると考えられる。電磁シーム溶接で、接合強度に及ぼす磁束密度の影響については明らかでない。本報告では、コイル上方の磁界/電流比の計算、アルミニウム薄板 (アルミ薄板) の変形が起こらない低放電エネルギーにおける磁束密度測定から電磁シーム溶接に及ぼす磁束密度の影響を明らかにする。

2. 溶接原理

予め間隙を設けて重ねたアルミニウム薄板、上下二枚の厚板から成る平板状ワンターンコイルの中央および電流と磁束の断面を図1に示す。向かい合うコイル平板にパルス大電流 (コイル電流) が急激に流れると、狭められたコイル中央部分で集中し、この部分の電流密度は高くなる。この高密度の電流で、中央部分の内側には、縦方向に沿って高密度の磁束が発生し、間隙を設けられたアルミニウム薄板に交差する。コイル中央部近くの薄板部分には、コイル電流と逆方向に大きな電流密度で流れ、磁束の浸透を妨げる。二枚の薄板部分は、ジュール加熱されながら、電磁力によって間隙を狭める方向に高速度で変形する。

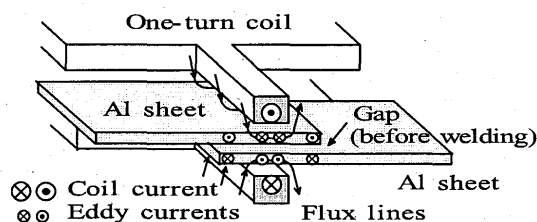


Fig. 1 Coil current, eddy currents and magnetic flux lines (Both Al sheets is accelerated by magnetic pressure and collides with each other)

薄板部分に働く単位体積あたりの電磁力 f は渦電流密度 i と磁束密度 B のベクトル積 $i \times B$ で与えられるが、渦電流の大きさや分布が分からないので算出は困難である。等価的に薄板両面の磁気圧力差として式

$$P = (B_1^2 - B_2^2) / 2\mu = B_1^2 / 2\mu \{1 - \exp(-2\tau/\delta)\} \quad (1)$$

(1)で与えられる¹⁰⁾。 κ はアルミニウム薄板の導電率、 B_1 および B_2 はアルミニウム薄板の表面 (コイル側) および裏面 (衝突面) 上の磁束密度、 μ および τ は薄板の透磁率および板厚である。 δ は表皮効果の深さで、 $\delta = (2/\omega\kappa\mu)^{1/2}$ である。

変形が進むと、二枚の薄板部分は、互いの内側表面と衝突する。これらの薄板が同質、同厚の場合、移動速度 (変形速度) の大きさが等しいので、衝突によって移動速度は零になる。衝突直前の移動速度が充分に高ければ、両衝突面の表面皮膜などは破壊される。衝突後も、コイル電流は流れているので、衝突面は電磁力で圧接され、同時に薄板は渦電流で加熱され、衝突面はシーム溶接される。

3. 実験装置

実験装置の概略を図2に示す。図2(a)は三次元図、図2(b)はコイル中央の狭められた部分の縦方向断面図である。コンデンサ電源 C - 放電ギャップスイッチ G - コイル L は放電回路であり、電源 C の容量は $200 \mu F$ である。コイルはクロム銅製の上板と下板で構成されている。各板の寸法は約 $200 \times 145 \times 10 \text{ mm}$ であり、H形の狭められた中央部分は、長さ $a = 70 \text{ mm}$ 、幅 $b = 5 \text{ mm}$ 、厚さ 10 mm である。薄板 (母材) は工業用純アルミニウム (A1050) で、長さ 100 mm 、幅 (シーム長さ) 50 mm 、厚さ 1 mm である。薄板とコイルの間には、図2(b)に示すように、 0.1 mm の絶縁シートが置かれている。

薄板の衝突面は実験の数10分前に超音波洗浄され、脱脂された。この衝突面が向かい合うように片端を 50 mm 重ね、絶縁物のスペーサーを挿入して間隙を設けた。図2(a)のように、これらをコイル中央部の内側に入れた後に、薄板の外側表面とコイル内側表面が密

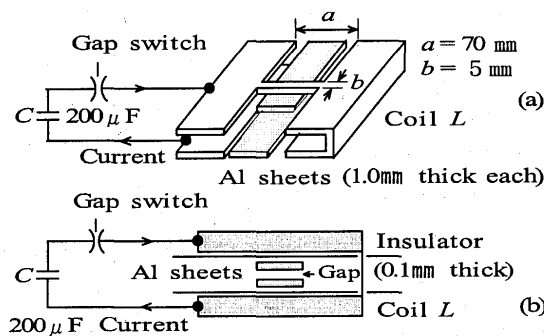


Fig. 2. General outlines of apparatus: (a) three-dimensional view of apparatus, (b) longitudinal section view of middle of coil containing lap of Al/Al sheets (1.0 mm thick each) with discharge circuit

着するように、間隙長に合った銅板をコイル内側に挿入した。そして、コイル外側をベークライト製厚板および締付け金具で固定した。コンデンサ C を充電した後に、外部から高圧トリガ信号を加えてギャップスイッチ G を閉じて放電回路を起動し、コイル L に放電電流を流し、アルミニウム薄板をシーム溶接した。放電電流はギャップ G の近傍に取り付けたサーチコイルで検出し、積分器を通して測定した。放電回路のインダクタンスは電流波形から計算され、間隙長によってわずかに異なったが、 0.8 mm で全インダクタンスは約 $0.055 \mu H$ 、コイルのインダクタンスは約 $0.03 \mu H$ であった。

4. 磁束密度の計算

薄板は、図2(b)のように、コイル平板の表面上に絶縁シートを介して置かれる。薄板表面の磁束密度が分かると、式(1)から薄板に加わる磁気圧力を求めることができる。そこで、磁束密度分布を計算した。磁束を発生するコイル電流 (放電電流) は 50 kHz 程度の減衰振動電流なので、導体断面での電流密度分布が問題になる。断面積を有する導体に高周波電流が流れると、表皮効果によって、導体表面ほど電流が多く流れ、電流密度が導体断面で一様でなくなることによる。この渦電流密度は、マックスウェルの方程式から3次元の偏微分方程式になる。ここでは、導電率および周波数に依存する表皮深さを用いて、実際の電流密度を近似した形で置き換え、アンペアの周回積分によって薄板表面の磁束密度を求めた。計算に際して、コイル平板は無限量であると仮定した。

図3のように、コイル電流 I は導体表面から表皮深さまで一様に流れ、その内部には流れないと近似した。図3の座標系で、原点 $(0, 0, 0)$ はコイル外周の左上角部とした。網掛部の導体を微小面積の y 方向直線導体の集まりとし、アンペアの周回積分則を用いて H/I の文字解を求めた。任意時刻で微小面積素 $dx dz$ に流れる微小電流 dI は、 I の電流密度 i_x を用いると、 $dI = i_x dx dz$ になる。微小面積素から距離 r の微小磁界 dH は、周回積分して、 $dH = dI / 2\pi r$ になる。 x 方向成分 dH_x 、 z 方向成分 dH_z を網掛部で面積分して、金属薄板が置かれる z 一定の平行磁界 H_x および垂直磁界 H_z を文字解で求めた。 H/I は $[m^{-1}]$ の単位を持ち、コイル形状や表皮深さによって変わる。実験で得られる時間関数のコイル電流 I を代入して、磁界 H に及ぼす放電回路の影響を検討できる。

コイル表面から 0.1 mm 上方の磁界/電流比 H/I を図4に示す。薄板の表面はこの位置にある。 x 方向成分 H_x/I と z 方向成分 H_z/I で構成される。 H_x/I は、

$$\left\{ \begin{array}{l} Q \text{ tki kp} \\ E q q t k p c v g \\ u l v e g o \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} E q k n r r v g < E w / E t \\ U m k p f g r v j < 2 G 7 m m \\ d ? 7 m m \\ e ? 5 m m \end{array} \right.$$

Fig. 3. Distribution of coil current used in calculation

イル幅 b 内の 80% で大体等しく、圧接力に対応する。 H_z/I は、コイル両端において最大、最小であり、引張力に対応する。

計算値の信頼性を調べるために、図 3 のコイル電流分布で、コイルの厚さ c を変えて、コイル表面から z 方向 0.1mm における磁界/電流比の最大値を計算した。図 5 で、厚さを 3mm から小さくすると、この最大値はしだいに大きくなり、0.5mm での最大値は厚さ 0mm の解析解 ●、◆ に近づいた。

磁束密度は図 4 の磁界/電流比にコイル電流 I と透磁率 μ を掛けて求められる。コイル電流は図 2 のギャップスイッチ近傍に取り付けられたサーチコイルで検出された。積分器を通して得られた放電電流と衝突時間信号の例を図 6 に示す。間隙長は 0.8mm、放電エネルギーは 0.7kJ である。放電電流 (上段) は、流れ始めから約 5.2 μ s で最大値 139kA に達し、振動しながら減衰した。振動周期は約 22 μ s、流れた期間は約

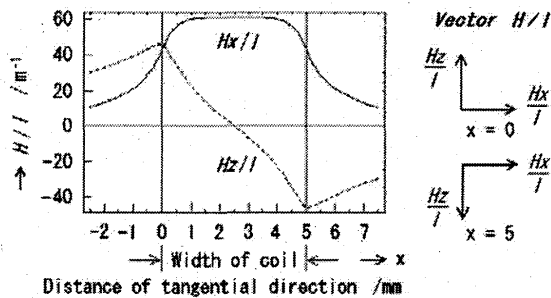


Fig.4. Ratio of magnetic fields to coil current calculated in fig.3

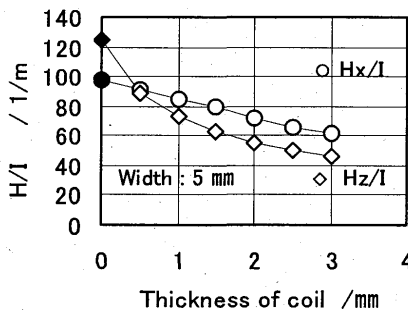


Fig.5. Relationship between H/I and thickness of coil

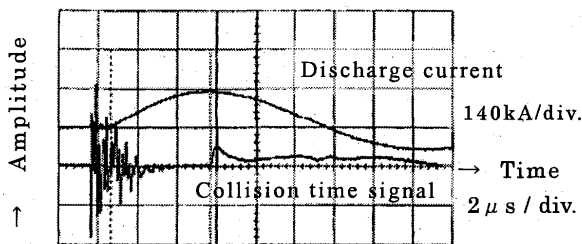


Fig.6 Waveforms of discharge current (upper) and collision time signal (lower) at 0.7kJ discharge energy

50 μ s であった。アルミニウムに対する表皮深さは約 0.41mm となる。

5. 磁束密度の測定

計算された磁束密度は薄板の表面 (コイル側) の値を示す。薄板に加わる磁気圧力を求めるには、裏面 (衝突面) の磁束密度も必要である。裏面の磁束密度は両端部から回り込む磁束の影響を受けるので、計算することは難しい。小型のサーチコイルで薄板表面と裏面の磁束密度を測定した¹⁾。

電磁シーム溶接実験では、薄板の間隙長は、予め 1mm 位に設定される。溶接時はこの間隙が無くなるので、衝突面磁束密度は測定できない。そこで、変形を生じない 0.1kJ の低い放電エネルギー実験で磁束密度を測定し、0.1kJ と溶接実験時の放電電流比を乗じて溶接時の磁束密度を求めた。磁束密度の測定回路を図

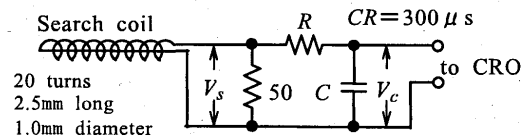


Fig.7. Measuring circuit of magnetic flux density

7 に示す。誘導電圧 V_s を検出すると、磁束密度 B は、積分回路のコンデンサ電圧 V_c を用いて、(2)式で求

$$B = -(CR/NS) \cdot V_c \quad (2)$$

められる。時定数 CR は 300 μ s、 N と S はサーチコイルの巻数と断面積である。

測定値の信頼性を調べるために、図 8 のように、薄板の無い状態で、磁束密度の x 方向成分を測定した。放電エネルギーは 0.1kJ である。サーチコイルをコイル平板表面から上方の z 方向に移動し、5 点のコイル平板上方の磁束密度を検出した。コイル電流の最大値



Fig.8. Detection of magnetic flux density above one plate

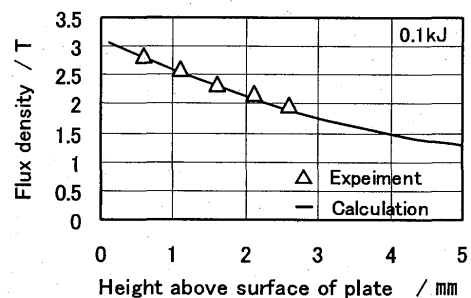


Fig.9. Comparison of experimental results with calculated results without sheet at 0.1kJ

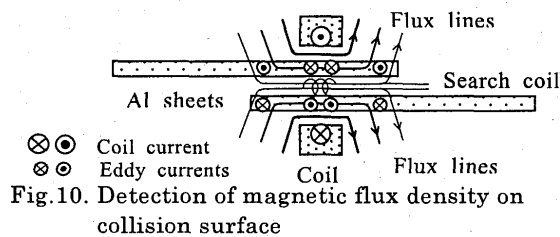


Fig. 10. Detection of magnetic flux density on collision surface

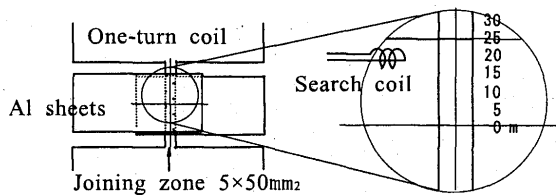


Fig. 11. Measured points of magnetic flux density

について計算した磁束密度と、(2)式で求めた最大値との比較を図9に示す。磁束密度はコイル平板表面近くでは約3 Tであり、表面から離れると次第に小さくなった。測定値と計算値の誤差率は表面近くで小さく離れると大きくなったが、最大で約5%と小さく大体一致した。従って、サーチコイルで、薄板がある場合の両面の磁束密度を測定すれば、薄板に加わる磁気圧力を知ることができる。

衝突面磁束密度の検出を図10に示す。アルミニウム薄板は、長さ100 mm、幅(シーム長さ)50 mm、厚さ1 mmである。コイルと薄板間およびサーチコイルと薄板間を、厚さ0.1mmのカプトン(ポリイミドフィルム)で絶縁した。そして、薄板間にサーチコイルを挿入して測定した。磁束密度は薄板の長手方向に対して対称であるので、図11のように、薄板シーム長さの中心0 mmから端面に向かって平行(y方向)にサーチコイルを移動し、5 mmおきに検出・測定した。測定点の0~25mmが薄板面内に位置している。

図11の両面磁束密度測定で、衝突面測定時の回路インダクタンスは溶接時のそれに等しい。外表面測定時では、衝突面測定時よりコイル平板間が広いので、回路インダクタンスが増えてコイル電流が減少し、測定

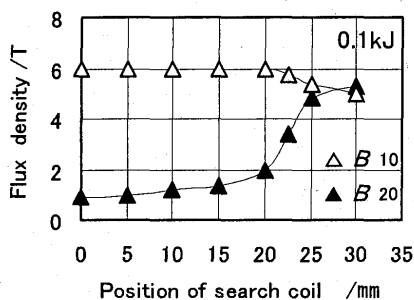


Fig. 12. Maximum magnetic flux density on both sides of sheet without deformation at 0.1kJ

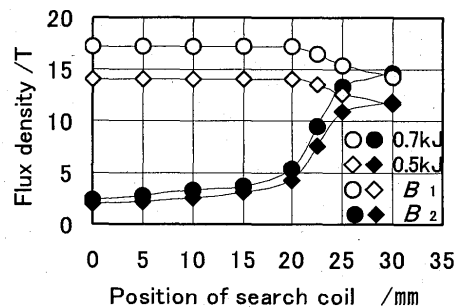


Fig. 13. Maximum magnetic flux densities in welding energies

された(2)式の V_C は低く現れた。そこで、この V_C を衝突面測定時のコイル電流で校正した。0.1kJの電流最大値49kAに対する外表面および衝突面の磁束密度 B_{10} および B_{20} を図12に示す。 B_{10} は薄板中心0 mmでは約6 MPaで、薄板の無い場合の約2倍であった。この B_{10} は、端面25mm近くまではほぼ一定であった。 B_{20} は0mmから20mmまで緩やかに増加し、20mmを超えると急激に大きくなった。磁束の回り込みによると考えられる。

0.1kJの B_{10} および B_{20} を基に、溶接時0.5, 0.7kJの電流最大値110, 139kAにおける外表面と衝突面の最大磁束密度 B_1 と B_2 を計算した。0.1kJの両面磁束密度に、溶接時0.5, 0.7kJと0.1kJのコイル電流最大値比110/49, 135/49を乗じて求めた結果を図13に示す。0.5, 0.7kJの B_1 は約14, 17 Tであった。

6. 磁気圧力と接合強度

図13の最大磁束密度から、溶接時の最大磁気圧力を(1)式で求めた。図14で、磁気圧力は0 mm付近で高く、0.5, 0.7kJで約77, 115MPaであり、20mm近くまでわずかに減少したが大体等しかった。20mmを超えると急激に減少し、薄板端面25mmの外側に零になった。

溶接された試料を分割して、分割片の接合強度を調べた。図15に溶接された試料の平面図と分割を示す。コイル中央幅5 mmにほぼ等しい幅でシーム溶接された試料(母材)を約10 mm幅で5等分して、分割幅

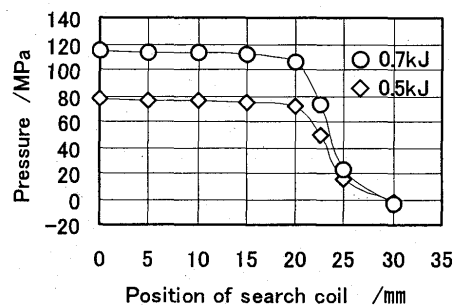


Fig. 14. Maximum magnetic pressures in welding energies

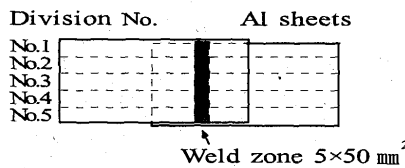
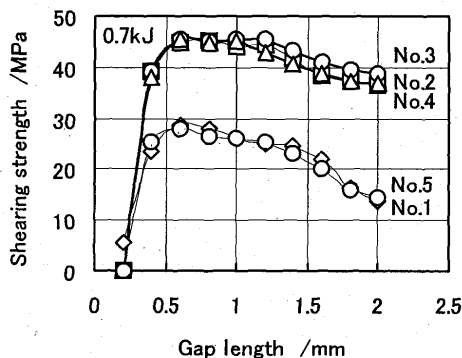


Fig. 15. Shearing tension test : seam-welded sheet is divided into 5 pieces along the dotted line for the test

を計測して分割片に番号 (Nq0) を付けて区別した。万力で平らにして外側表面をヤスリで研磨した後、超音波洗浄して乾燥した。両外側表面に分割片より長い補強材 (C 8283) を接着し、十分に自然乾燥した後に、これらを長手方向に引張せん断試験し、分割片の最大せん断荷重を求めた。接合しようとするシーム幅は、電磁力が強く作用するコイル幅 (500) なので、見かけの接触面積を $500 \times$ 分割幅とした。最大せん断荷重 P_{max} を見かけの接触面積 $l \cdot a$ で割って、せん断接合強度 $J0 R_c$ を算出し、間隙の影響を調べた³⁴⁾。

放電エネルギーが 200 mL の場合の間隙長に対する分割片の接合強度を図 38 に示す。コイル厚さは 300 である。分割時に剥離した場合には、接合強度を零とした。図中の◇は Nq01、□は Nq02、○は Nq03、△は Nq04、○は Nq05 の分割片強度である。間隙長 200 で、すべての分割片の強度は非常に小さかったが、両端部 1 片 Nq01 だけが弱く接合していた。間隙を 200 に広げると接合強度は急に大きくなり、間隙長 200 で最大値 $67.0 R_c$ に達し、以後同じような曲線で緩やかに小さくなった。中央部 3 片 (Nq02~6) の接合強度はそれぞれの間隙長で大体同じで大きかった。両端部 2 片の接合強度も大体同じだが、小さかった。

シーム長さを 32200 にした溶接実験で、両端部 3200 の接合強度は小さかったが、他の分割片の接合強度は大きかった³⁴⁾。溶接材の接合強度はシーム両端で小さく、他のシーム部で大きく大体同じである。図 37 の両端の分割片 Pq08、Pq07 は、図 36 の横軸 $37 \sim 4700$ に相当する。磁気圧力は、図 36 の $0 \sim 4200$ まではほぼ一定であるが $42 \sim 4700$ で急激に低下する。この圧力の低下によって、薄板への変形力や衝突面を密着す



Hki 0'38''T guwru'qh'ujgctkpi'vpuqap'vuv'qh'gcej''
fkxkfgf'rkgag'ht'icr'rgp'ivj''

る力が低下する。従って、シーム両端 10 mm の接合強度は小さくなると考えられる。

7. まとめ

磁束密度について、コイル電流分布を仮定した計算および作成した小型サーチコイルによる測定を行った。そして、磁気圧力と接合強度について検討し、以下の結論を得た。

- (1) コイル厚さを小さくした計算で、磁束密度に比例する磁界/電流比はコイル厚さ 0 mm の厳密解に近づいた。計算は信頼できる。
- (2) コイル平板上方における磁束密度の平行成分について、計算値と測定値は良く一致し、最大誤差は 5% であった。磁束密度の測定は信頼できる。
- (3) 衝突面では、磁束密度の平行成分は薄板両端の 5 mm で急増する。このため、薄板を圧接する磁気圧力は、薄板両端の 5 mm で急減する。
- (4) 溶接実験で、溶接材の接合強度がシーム中央部で大きく、シーム両端 10 mm で小さかった。このことは、両端 5 mm での磁気圧力の急減で説明できる。

8. 文献

- 1) 益本功・玉置維昭・小嶋昌俊：溶接学会誌，49-1 (1980)，29-35
- 2) 特許第3751153号，(2005)
- 3) 岡川啓悟・相沢友勝・宮崎忠・進藤康人・後藤祐介・池田明日香：平16春塑加講論，No.733 (2004)，435-436
- 4) 外本和幸・氏本泰弘・藤田昌大：塑性と加工，44-512 (2003)，947-951
- 5) 大橋修：軽金属溶接，42，No.2，(2003)，67-71.
- 6) T.Aizawa, M.Kashani, K.Okagawa: Proceedings of the IIW, (2005), 211-222
- 7) 相沢友勝：日本機械学会第11回機械材料・材料加工技術講論，No.513 (2003)，325-326
- 8) 相沢友勝・Kashani.Mehrdad・花崎健一：電子情報通信学会技術報告，105巻485号 (2005)，19-24
- 9) 相沢友勝・岡川啓悟・辺見信夫：溶接学会全国大会，(2005)，講演概要76集，128-129
- 10) 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。
- 11) 岡川啓悟・相沢友勝・佐藤康宏：平成18年電気学会全国大会，1-146 (2006)，178-179.
- 12) 岡川啓悟・相沢友勝：塑性と加工，47-546 (2006)，632-636.