

アルミニウム薄板の長さ 1 m 電磁シーム溶接 —新しい板継ぎ法の提案—

相 沢 友 勝* 熊 谷 正 樹**

Sumitomo Light Metal Technical Reports, Vol. 52 No. 1 (2011), pp. 113-118

One-meter Long Seam Welding of an Aluminum Sheet to Another Sheet by Applying Magnetic Pressure

Tomokatsu Aizawa and Masaki Kumagai

This paper describes a one-meter long seam welding technique of an aluminum sheet to another sheet by applying magnetic pressure and its experimental results. When an impulse current from a capacitor bank passes through a one-meter long one-turn electric coil, a magnetic flux is suddenly generated around the coil. Eddy currents are induced inside the one-meter overlapped parts of aluminum (near the coil) and another sheet placed on the coil. The sheets have a gap (1 mm) between them. The parts can be joined both by the joule heat generated in them and by the high-speed collision with magnetic pressure applied to them. The bank energy required for the one-meter long seam welding is about 4 kJ for an aluminum (A1050, 0.5mm thick) sheet and a mild steel sheet (0.5mm thick). There is a proposed new joining method of long sheet metal ends (coil ends) using this welding technique.

1. は じ め に

アルミニウム薄板を巻かれた部分から取り出し、連続的に熱処理や表面処理する走行ラインでは、先行するアルミニウム薄板の終端部と、次にラインへ導入するアルミニウム薄板の始端部とを接続する必要がある。このような接続は「板継ぎ」と呼ばれ、各種の方法がある^{1,2)}。両薄板の接続部分だけを短時間止め、機械的な方法で継ぐことが多い。機械的な方法には、切りくずや切り粉が発生する欠点がある。超音波溶接法や抵抗シーム溶接法では、切りくずなどは出ないが、接続時間が比較的長くなる。また、溶接しにくいアルミニウム薄板に対し十分な接合強度が得られない場合がある。この板継ぎに、アルミニウム薄板のシーム溶接に適した電磁溶接法の使用が検討されている^{1,2)}。溶接時間が数 10 μ s と非常に短く、接合強度が十分あり、切りくずなどが出ないからである³⁾。

ここでは、電磁シーム溶接の原理、接合状態、アルミニウム薄板を長さ 1 m にわたりシーム溶接する実験、

各種板継ぎ方法、ライン通板試験用継手の製作、通板試験結果、新しい板継ぎ法などについて既報³⁾をもとに報告する。

2. 電磁シーム溶接の原理

電磁シーム溶接は、電磁圧接と同じ原理の溶接法であり、アルミニウムなど良導電性の薄板へ高密度磁束を急激に加え、他の金属薄板へ溶接する技術である。瞬間的な溶接法で、溶接部分が溶融しない固相接合法である。アルミニウム薄板同士^{4,5)}の他、アルミニウム薄板を鉄鋼⁵⁻⁷⁾など異種金属薄板へも圧接できる。ここでは、アルミニウム薄板と鋼薄板をシーム溶接する原理を概説する。

高密度磁束を急激に発生させるため Fig. 1 に示す板状コイル（電流方向の最大長さ約 1 m）を使用する。コイルの巻数は 1 で、ワンターンコイルと呼ばれる。絶縁したコイル上に溶接するアルミニウム薄板、鋼薄板を Fig. 2 (a) のように重ね、固定する。重ねた薄板の間に、間隙約 1 mm を設ける。コイルに放電電流を急激に流す。電流は、幅 5 mm のコイル中央部分に集中して流

* 東京都立工業高等専門学校 名誉教授, 理学博士

** 研究開発センター 第五部, 工学博士

れ、この部分に沿って高密度の磁束が発生する。この磁束はアルミニウム板に交差する。アルミニウム板には、渦電流と呼ばれる誘導電流が流れ、磁束の浸入を妨ぐ。この渦電流は、コイル中央部分近くでコイル電流と反対向きに流れる。これらの電流間には互いに反発する力（電磁力）が働く。アルミニウム板は上向きの力を受ける。

電磁力を受けたアルミニウム板は、変形しながら上側の鋼板へ高速（約 300m/s）で衝突する。衝突時に発生する金属ジェットで接合面はクリーニングされる⁷⁾。電磁力の大きさ、間隙などを適切に選べば、衝突した両薄板はコイル中央部分に沿って連続してシーム溶接される（Fig. 2 (b)）。コイルに放電電流を流してから溶接終了までの時間は数 10 μ s である。

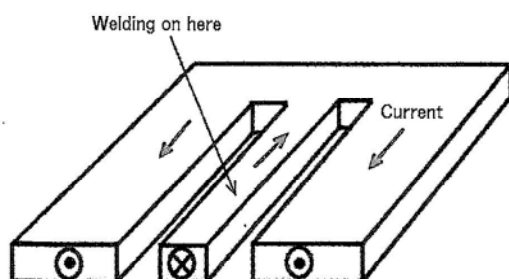


Fig. 1 One-turn electric coil for seam welding.

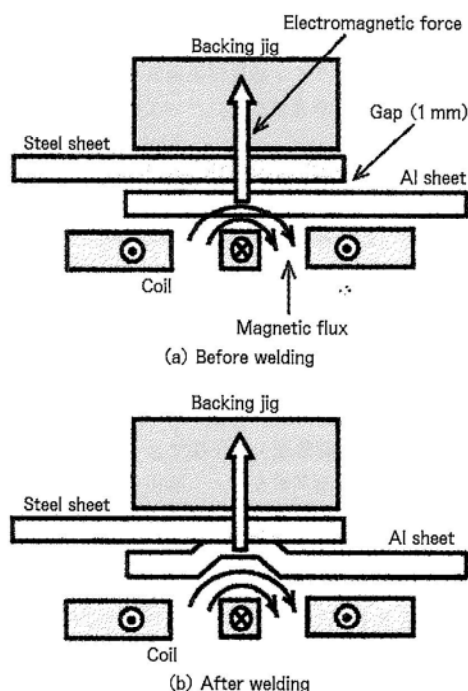


Fig. 2 Principle of seam welding by applying magnetic pressure.

3. 溶接された両薄板の接合状態

実際に Fig. 2 のようにシーム溶接された継手（アルミニウム板 A5052/鋼板 SPCC）の外観例を Fig. 3 に示す。この例では、継手中央に沿って端から端まで 100mm にわたりシーム溶接されている。アルミニウム板側から見た溶接部は、10mm 程度の幅で変形している。条件を選んで溶接し、継手を無理にはく離したときの接合面を Fig. 4 に示す。接合面は全面的には溶接されず、Fig. 4 のように縦長の環状に溶接される。端部を除けば、2 本線状にシーム溶接される。これは磁界がリング状に発生し、その磁界が母材と交差する部分が最も電磁力が大きくなるからである。

継手のシーム溶接方向に垂直な接合界面を光学顕微鏡で観察した結果例を Fig. 5 に示す。Fig. 5 (a) は溶接部全体を撮った写真であり、直線的な鋼板に変形したアルミニウム板が衝突して接合している。(b) は溶接部分の説明図であり、この部分には、Fig. 4 の縦長の環状部分の 2 本線に対応し、2 ヲ所の溶接部とその間の非溶接部が存在する。この部分の長さ 4~5 mm はコイル中央部分の幅 5 mm にほぼ等しい。片方の溶接部を拡大した写真が Fig. 5 (c) である。多くの場合、爆発圧接などに特有な金属ジェットによる波状模様が生じる⁷⁾。金属板が傾斜衝突するとき、その衝突表面が高温・高圧状態になり、塑性流動を生じ、衝突点の移動方向へ金属の一部が噴射され、接合界面は金属学的にしっかり結合される。

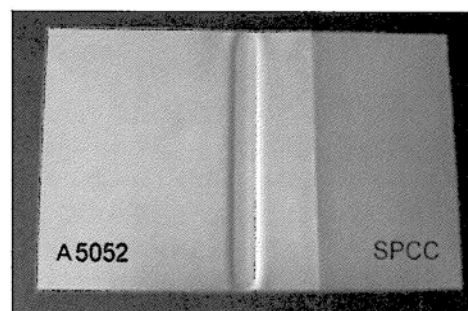


Fig. 3 Appearance of 100 mm long seam welded sheets.

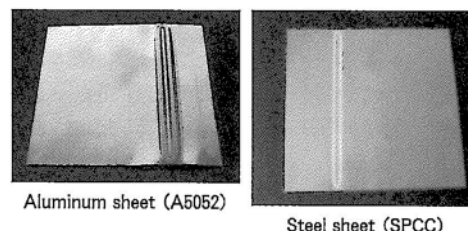


Fig. 4 Appearance of detachment side of seam welded sheets (Fig. 3).

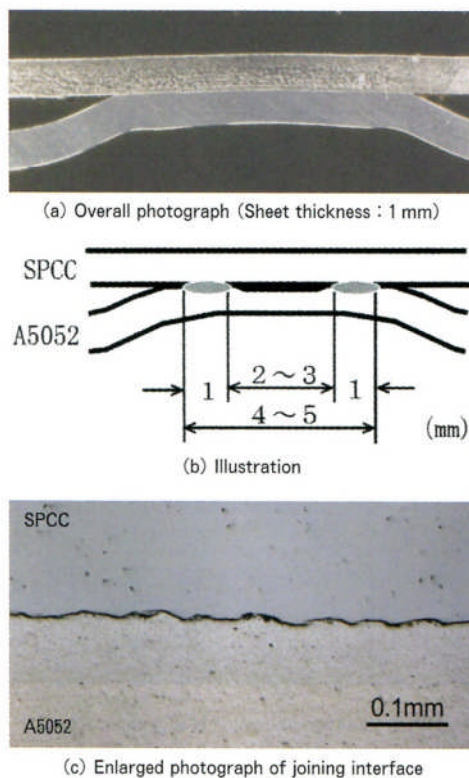


Fig. 5 Optical micrograph of joining interface of welded sheet (Fig. 3).

4. 長さ1mにわたりシーム溶接する装置および実験方法

装置の構成を Fig. 6 に、コンデンサ電源、放電スイッチ、板状ワンターンコイルからなる放電回路の外観例を Fig. 7 に示す。電源を充電し、放電スイッチを閉じ、コイルに放電電流を流す装置である^{8,9)}。コンデンサ電源の静電容量は100 または 200 μ F である。板状コイルは板厚3 mm のクロム銅合金製で、中央部分の幅は5 mm、長さ0.5 または 1 m である。固定具は鉄鋼製である。1 m シーム溶接時、放電回路の全インダクタンスは約0.23 μ H、アルミニウム薄板と電磁結合したコイル部分のインダクタンスは約0.21 μ H である。

実験用のアルミニウム薄板として、幅100 mm、長さ500 および 1000 mm、厚さ0.5 および 1 mm の工業用純アルミニウム A1050 などを使用する。他に金属薄板として、同じ大きさ、厚さの銅、鉄鋼、ステンレス鋼を用いる。シーム溶接する各薄板(2枚)の重ね幅は約50 mm、薄板に設ける間隙は約1 mm である。

実験(0.5 および 1 m シーム溶接)は次のように行われる。

- (1) 板状ワンターンコイル (Fig. 7 (a)) を薄いシートで絶縁する。
- (2) 絶縁したコイル上に重ねたアルミニウム薄板など

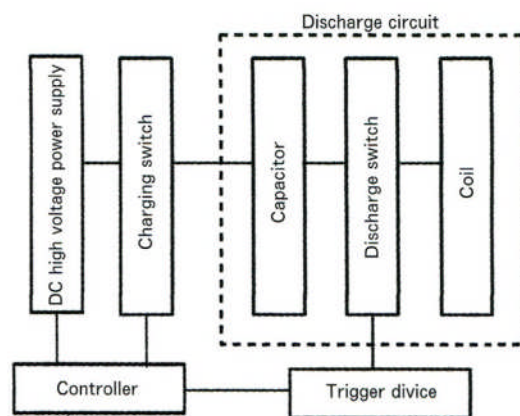
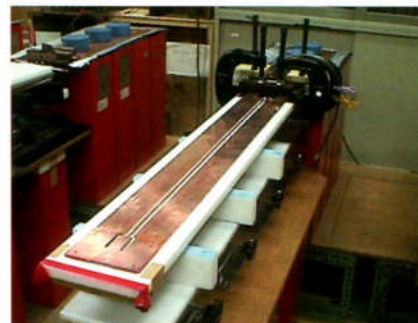


Fig. 6 Block diagram of discharge system for welding.



(a) Flat one-turn coil and capacitor bank.



(b) Sheets for welding put on insulated above coil.



(c) Fixation of coil and sheets with clamping vises.

Fig. 7 Appearance of discharge circuit and procedure to fix coil and sheets for welding.

を配置する (Fig. 7 (b))。

- (3) コイルおよびアルミニウム薄板などを締付け金具で固定する (Fig. 7 (c))。
- (4) 電源を充電し、溶接するのに必要な放電電流をコイルに流す。
- (5) 電源を接地し、締付け金具を外す。

5. 長さ1mにわたるシーム溶接結果

5.1 電流波形および関係量

1m シーム溶接時、コイルに流れる電流波形例を Fig. 8 に示す。図の縦軸は電流値 (大きさ)、横軸は時間を示す。流れ始めた電流は約 $6\mu\text{s}$ で最大値に達する。その後、時間と共に減衰振動し、約 $100\mu\text{s}$ 流れる。最大電流値はコンデンサ電源の充電エネルギーが 3kJ のとき約 130kA であった。このときコイルとアルミニウム薄板の間に発生する最大磁束密度は、約 20T 、発生する最大磁気圧力は 約 140MPa と概算される。

5.2 シーム溶接結果

コンデンサ電源の充電エネルギー 2.5kJ 、アルミニウム板厚 0.5mm でシーム溶接したアルミニウム/アルミニウム板 (A1050) の外観例を Fig. 9 および Fig. 10 に示す。中央部分が長手 (横) 方向に 1m にわたり端から端までシーム溶接されている。参考のため、長さ 0.5m のコイルを用いて、シーム溶接した結果も示してある。Fig. 10 は端部の拡大写真である。端部の外観は Fig. 3 と同様である。充電エネルギー 3.7kJ 、アルミ板厚 0.5mm でシーム溶接したアルミニウム (A5052)/鉄鋼板 (SPCC) の外観例を Fig. 11 に示す。 1m にわたり端から端までシーム溶接されている。同様に、アルミニウム薄板を銅薄板、ステンレス鋼薄板にシーム溶接できた。

以上のように溶接された継手から引張り試験片を数カ所で切り出し、引張せん断試験を行った。端部 (約 10mm) を除き、すべて母材 (アルミニウム) 破断する接合強度が得られた。

6. 各種板継ぎ方法

アルミニウム薄板を連続的に熱処理や表面処理する走行ライン (Fig. 12) では、多くの場合、薄板を巻回形成された部分から徐々に取り出し、加熱処理などが行われる。巻かれた部分がなくなるとき、その終端部と新たにラインに導入するアルミニウム薄板 (巻かれた部分) の始端部とを重ねて板継ぎする必要がある。板継ぎは、Fig. 12 のジョイナーと呼ばれる板継ぎ装置で行われる。各種処理装置を通過中の薄板を止めることなく、薄板の接続部分だけを短時間止めて板継ぎする。このため、アキュムレーターと呼ばれる装置がある。

板継ぎには各種の方法、例えば、重ねた部分をプレス

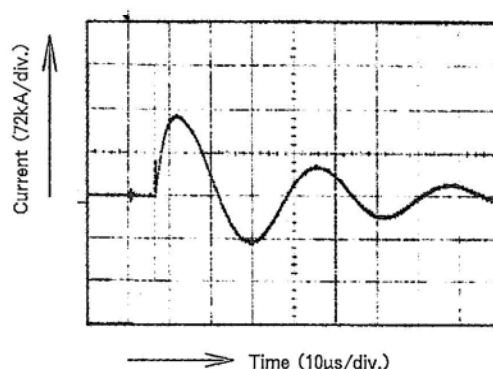


Fig. 8 Waveform of discharge current.

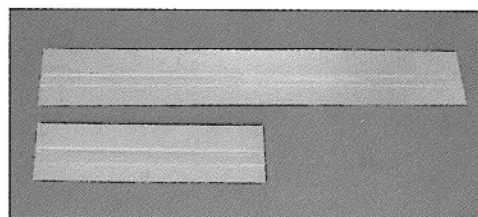


Fig. 9 Seam welding joints of aluminum sheets for 1 m (upper) and 0.5m (lower) long.

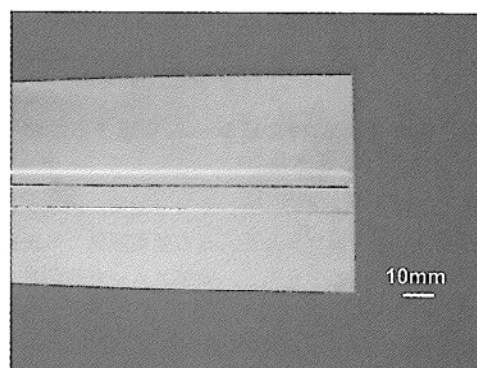


Fig. 10 End enlarged picture of above joint.

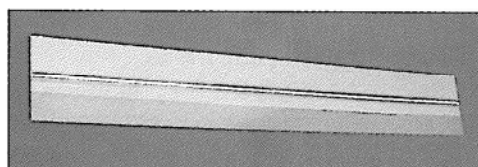


Fig. 11 Seam welding joints of aluminum/steel sheets for 1 m long.

成形し、凹凸嵌合させる機械的連結法、溶接による接合法、接着による方法などがある^{1,2)}。従来の板継ぎ法には、次のような欠点がある。凹凸嵌合する機械的連結法では、切りくずや切り粉が発生し、アルミニウム薄板表面を損傷する恐れがある。超音波溶接法、抵抗シーム溶

接法では、接合時間が比較的に長くなる。また、溶接しにくいアルミニウム薄板に対し十分な接合強度が得られない場合もある。接着による方法では、高温、高張力に耐えられず、処理の種類が制限される。

これに対し電磁シーム溶接による板継ぎ法 (Fig. 13 (a)) には、以下の利点がある。

- (1) シーム溶接部分の引張せん断強度は、母材 (アルミニウム) と同程度である。
- (2) 準備時間を含めて数 10 秒以内の短時間で接続できる。
- (3) 板継ぎ部分に切りくずや切り粉が付着しない。

7. ライン通板試験用継手の製作

通板試験用のアルミニウム薄板 (Fig. 13 (b)) として、幅約 1000mm、長さ約 1000mm、厚さ 0.3mm の工業用純アルミニウム A1050 などを使用する。シーム溶接する薄板 (2 枚) の重ね幅は約 50mm、ここに設ける間隙は約 1mm である。使用する板状コイルは、板厚 3

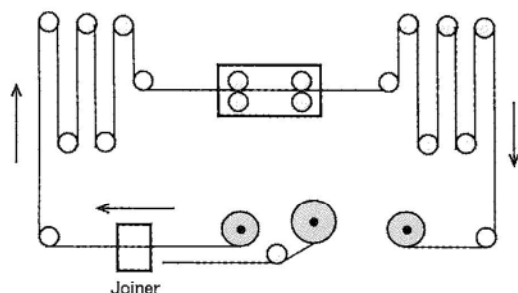


Fig. 12 Schematic diagram of heat or surface treatment line for rolled long sheet metal.

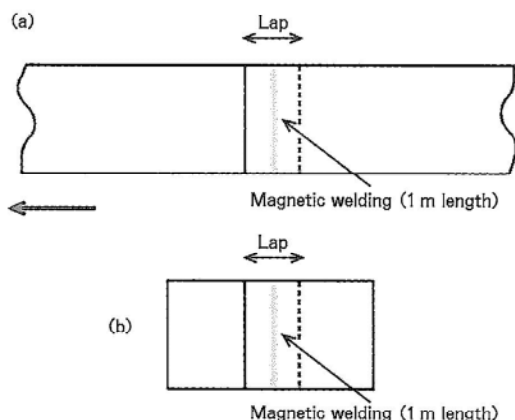


Fig. 13 Joining outline of long sheet metal ends by applying magnetic pressure (a) and making outline of joint for treatment line passage test (b).

mm のクロム銅合金製で、中央部分の幅は 5 mm、長さ 0.5m である。このコイル上に前記のアルミニウム薄板を固定して溶接する。薄板の一部分は、締め付け金具で固定するため、Fig. 14 のように巻かれる。

長さ 1 m にわたるシーム溶接実験は、装置の都合で、シーム長さ 0.5m ずつ 2 度に分けて行われた。装置を改善すれば、1 度の実験 (放電) で、基礎実験と同様に長さ 1 m のシーム溶接ができる。

溶接された継手から引張り試験片を数カ所で採取し、引張せん断試験を行った。端部を除き、すべて母材 (アルミニウム) 破断する接合強度が得られた。

8. ライン通板試験および結果

前記のように長さ 1 m にわたり電磁シーム溶接されたアルミニウム薄板 B は、ライン上を先行するアルミニウム薄板 A の終端部と、次に導入するアルミニウム薄板 C の始端部との間に Fig. 15 のように置かれる。薄板 A と薄板 B、薄板 B と薄板 C は、板継ぎ装置で通常の方法 (部分的にせん断変形し、凹凸嵌合させる連結法) で接続される。これらをアキュムレーター、脱脂槽、表面処理槽、塗油装置などのラインを走行させ、巻取る。

ライン通板 (走行) の結果、アルミニウム薄板 B の電磁シーム溶接された部分に、破損、はく離などは見られなかった。通板試験後のアルミニウム薄板 B の外観を Fig. 16 に示す。

9. 新しい板継ぎ法

電磁シーム溶接による新しい板継ぎ法の概念を Fig. 17 で説明する。Fig. 17 は、ライン上を先行する薄板 (アルミニウムなど) A の終端部、板継ぎ用アルミニウム薄板 B、後続する薄板 (アルミニウムなど) C の始端部を示す。ライン上を走行する薄板 A と薄板 C は、板



Fig. 14 Making state of joint for treatment line passage test.

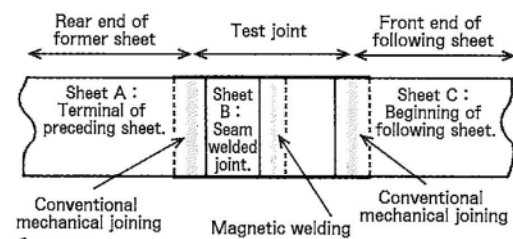


Fig. 15 Treatment line passage method of seam welded joint for test.

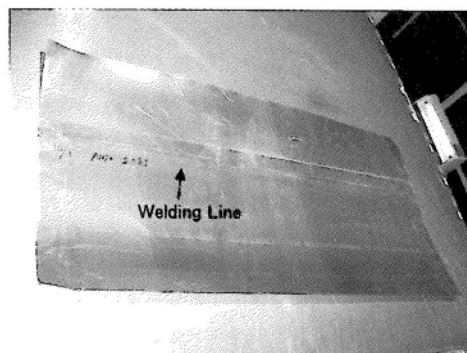


Fig. 16 Appearance of sheet B (aluminum sheets) after line passage

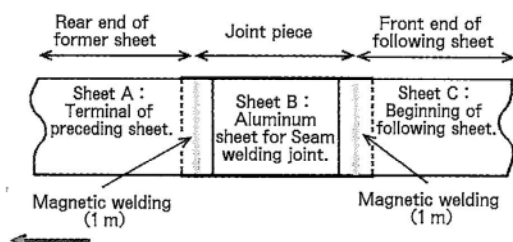


Fig. 17 New joining outline of long sheet metal ends by applying magnetic pressure.

継ぎ用アルミニウム薄板 B を介して接続される。両薄板 A, C の端部には、長さ 1~2m のアルミニウム薄板 B が Fig. 17 のように電磁シーム溶接される。シーム溶接の長さは 1m などである。

この板継ぎ法には、6 章で述べた電磁シーム溶接による板継ぎの利点に以下が追加される。

(4) 薄板 A, C の材質、板厚によらず、同じアルミニウム薄板 B を介して接続できる。

(5) 薄板 A, C がアルミニウム、薄板 B が鉄鋼やステンレス鋼でも接続できる。

10. おわりに

アルミニウム薄板を長さ 1m にわたり各種金属薄板（アルミニウム、鉄鋼、ステンレス鋼など）に電磁シーム溶接できた。溶接部分の接合強度は、部分的な引張せん断試験の結果、母材で破断する強さが得られた。この溶接法でアルミニウム薄板を 1m 板継ぎし、ライン通板（走行）試験を行った。電磁シーム溶接された部分に、破損、はく離などは見られなかった。

現在、コイル上に置かれた溶接板材を締め付け金具で固定するのに数分を要するが、昇降装置⁹⁾に改良すれば、数 10 秒以内の短時間で固定でき、溶接を含めてもこの程度の短時間で済む。ここで紹介した新しい板継ぎ法では、1m のシーム溶接 (Fig. 17) を 2 ヲ所で行う必要がある。しかし、2 ヲ所を同時（並列）に行うことも可能である¹⁰⁾。従来の板継ぎ法に代わる新技術として電磁シーム溶接の使用が期待される。

参考文献

- 1) 熊谷正樹, 田中晃二, 松田正文: 日本国特許 特開 2005-324225 (2005).
- 2) 熊谷正樹, 相沢友勝: 日本国特許 第 4313276 号, (2009).
- 3) 相沢友勝, 熊谷正樹, 岡川啓悟: 軽金属溶接, 48-5 (2010), 158.
- 4) 相沢友勝: 軽金属溶接, 41-3 (2003), 114.
- 5) 相沢友勝: 軽金属, 54-4 (2004), 153.
- 6) 相沢友勝: 軽金属溶接, 42-2 (2004), 79.
- 7) 相沢友勝: 溶接学会誌, 77-8 (2008), 718.
- 8) 相沢友勝: 日本国特許 第 3751153 号, (2005).
- 9) 相沢友勝, 小崎 崇, 増田幸一, 米永祐司, 松田正文: 日本国特許 第 3942082 号, (2007).
- 10) 相沢友勝, 岡川啓悟, 石橋正基, カシャニ メハダッド: 平成 23 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2011), 225.