

## 解説

## Review

# 鉄道車両への摩擦攪拌接合の適用

宮道知典\*

## Application of Friction Stir Welding to Railroad Carbody

Tomonori Miyamichi

### Synopsis

Aluminum alloy material is used for a lot of railroad cars such as SHINKANSEN and the commuting train. The carbody is composed A6N01S extrusion of aluminum alloy material and manufactured with MIG welding process. New joining process "Friction Stir Welding (FSW)" is developed in TWI in 1991. Because FSW is a low heat input process compared with MIG welding, the distortion of welding joint can be reduced. With using the advantage of FSW, the application is started in 1998. The first application is joining parts of carbody side-panel. After the hollow shape extrusion is developed, FSW has extended to the primary parts of the carbody structure, such as roof-panel, side-panel and floor-panel. About ten years pass from the first application FSW is becoming the main joining process of the aluminum alloy carbody.

### 1. はじめに

新幹線に代表される高速車両、地下鉄、在来線などの通勤車両では軽量、耐食性、リサイクル性の良好なアルミニウム合金材料が使用されており、現在までに製作されたアルミニウム合金製車両（以下アルミ車両）は累計 14000 両を超える程である<sup>1)</sup>。次世代新幹線 N700 系においてもアルミニウム合金材料を用いて製作中であり、今後も高い水準で車両に採用されると考えられる。

アルミ車両の製作組立ては従来から MIG (Metal Inert Gas) 溶接を用いて行われてきたが、摩擦攪拌接合 (Friction stir welding, 以下 FSW) が英国溶接研究所 (TWI) で 1991 年に開発、特許出願された以後、国内の材料メーカーおよび車両メーカーで試験、研究が進み 1998 年より車両の組立てに FSW 適用が開始された。当初は車体部品接合への適用であったが、現在では主構造部全体の接合にまで適用が拡大している。

日本車輛製造(株)（以下、当社という）では、当初ライセンス取得の問題もあり材料メーカー施工により FSW の適用を開始し、車両製作を進めてきた。現在ではライセンスを取得しており車両製作を行っている。最初の適用から現

在までに、車両業界全体として FSW 適用車両（部品のみの適用を含む）は 1500 両を超えると考えられ、アルミ車両製作において必要不可欠な接合法となっている。

本稿ではアルミ車両の材料、車体構造、接合法を解説し、あわせて適用事例について、当社製車両だけでなく他社製車両も含め紹介する。

### 2. アルミ車両への FSW 適用の背景

車両に FSW が急速に適用された背景には、アルミ車両ニーズの増加、車両製作に関する周辺技術であるアルミ押し出し形材の開発、それを使用した新構造の車体開発などがある。それらと接合方法が有する特徴を上手く組合せ適用がなされた。

#### 2.1 車両に使用される材料

車両の主構造部に使用されるアルミニウム合金材料は大別すると 5000 系 (Al-Mg) 合金の A5083P-O、6000 系 (Al-Mg-Si) 合金の A6N01S-T5、7000 系 (Al-Zn-Mg) 合金の A7N01S-T5 の 3 種類である。これら材料の化学成分 (JIS 規格値) を Table 1、機械的性質 (JIS 規格値) を Table 2 に示す。

Table 1. Chemical composition of materials.

Alloy-temper	Chemical composition (%)									
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr	V
A5083P-O	≤ 0.40	≤ 0.40	≤ 0.10	0.40 to 1.0	4.0 to 4.9	0.05 to 0.25	≤ 0.25	≤ 0.15		
A6N01S-T5	0.40 to 0.9	≤ 0.35	≤ 0.35	≤ 0.50	0.40 to 0.8	≤ 0.30	≤ 0.25	≤ 0.10		
A7N01S-T5	≤ 0.30	≤ 0.35	≤ 0.20	0.20 to 0.7	1.0 to 2.0	≤ 0.30	4.0 to 5.0	≤ 0.20	≤ 0.25	≤ 0.10

Table 2. Mechanical properties of materials.

Alloy-temper	Mechanical properties		
	Tensile strength (MPa)	Yield strength at 0.2% (MPa)	Elongation (%)
A5083P-O	275 to 355	≥ 125	≥ 16.0
A6N01S-T5	≥ 245	≥ 205	≥ 8.0
A7N01S-T5	≥ 325	≥ 245	≥ 10.0

A5083P-O（以下 5083）は非熱処理合金で強度が高く、機械加工性が良好であるため、板材を成形し外板、柱、補強部材として使用される。アーク溶接性に関しても良好で継手強度は母材と同じである。

A6N01S-T5（以下 6N01）は熱処理合金で一般に押し出し材料として使用される。いろいろな断面形状があり、車両を形作る部材として最も多く使用される。強度は 5083 に比べると低い、耐力は高い。アーク溶接性は良好ではあるものの、T5 処理（170 ～ 180 ℃で 8 時間保持）により強度を高めているため溶接熱によるなまし効果を受け、熱影響部が軟化する。したがって継手強度は母材強度の 60 % 程度となる。

A7N01S-T5（以下 7N01）は熱処理合金で一般に押し出し材料として使用される。強度が高く、さまざまな断面形状の形材を柱、梁として車体を支持する床下の台枠部材などに使用される。アーク溶接性は良好で 6N01 と同様に溶接熱により熱影響部が軟化するが、自然時効により硬度が回復する特徴があり、継手強度は母材並となる。

車体に最も多く使用される 6N01 形材の代表的な断面形状 2 種類を Fig.1 に示す。(a) はシングルスキン形材と呼ばれ、面板に複数の補強リブが付いた形状である。面板の板厚は 2.0 ～ 4.0 mm 程度、幅は最大 600 mm 程度である。(b) はダブルスキン形材と呼ばれ、2 枚の面板の間にトラス状の補強がある中空形状である。それゆえシングルスキン形材に比べ、ねじり剛性、曲げ剛性が高い。面板の板厚は 2.0 ～ 4.0 mm 程度、厚みは 60 mm 程度、幅はシングルスキン形材に比べやや狭く最大 500 mm 程度である。車両用の 6N01 形材が開発された当初はシングルスキン形材であったが、その後、押し出し技術の向上などによりダブル

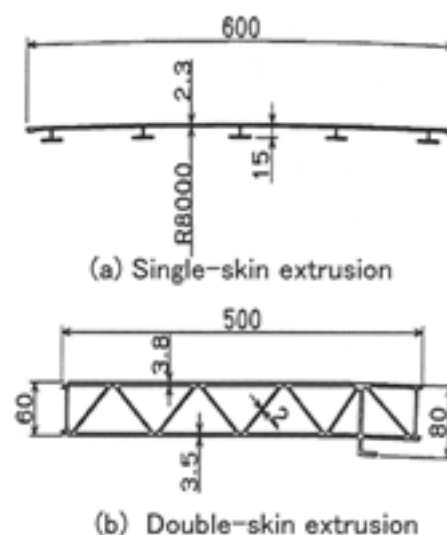


Fig.1. Aluminum alloy extrusion for carbody.

スキン形材が開発された。現在ではダブルスキン形材の使用割合が非常に高くなっている。これら形材の長さは使用される部位により異なるが、短いもので 1 m 以下、最も長いもので車両 1 両分の約 25 m である。

## 2. 2 車体構造

アルミ車両の構造はメインに使用する形材の形状で 2 種類に分けることができる。Fig.2 にシングルスキン形材を使用した車体構造を示す。車両の屋根、側（窓、出入り口のある部分）にシングルスキン形材を用い、車外側を形材のフラットな面とし、車内側にリブを配置する。その車内側リブを柱、補強部材と接合する構造である。屋根は車両 1 両分の長さの形材を 6 本使用し、長手方向を接合される。側は 1 ～ 2 m 程度の形材を出入り口両側では上下方向、窓

下の腰部分は長手方向に配置し接合される。なお、床にはダブルスキン形材を長手方向に配置し接合される。接合線は形材同士のつなぎ部分は直線であるが、車内側にはリブと柱、補強部材との接合など、細かく複雑な部分がたくさんある。

ダブルスキン形材を使用した車体構造を Fig.3 に示す。ダブルスキン形材を屋根、側、床に長手方向に配置し車体が構成されており、非常にシンプルである。柱および補強部材はほとんど無くなった。車体剛性はダブルスキン形材自体の剛性がシングルスキン形材より高いため高くなった。接合線も非常にシンプルとなり、車両長手方向のつなぎ部分の直線のみである。高速車両では東北、長野新幹線 (E2、E2 系) の一部車両で初めて採用され、700 系新幹線で本格的に採用された。部品点数削減、溶接自動化による製作工数の削減効果が大きく、在来線車両にも普及した。

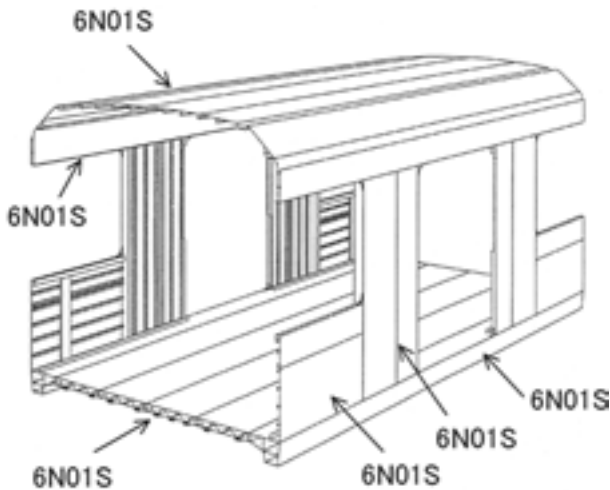


Fig.2. Carbody structure using single-skin extrusion.

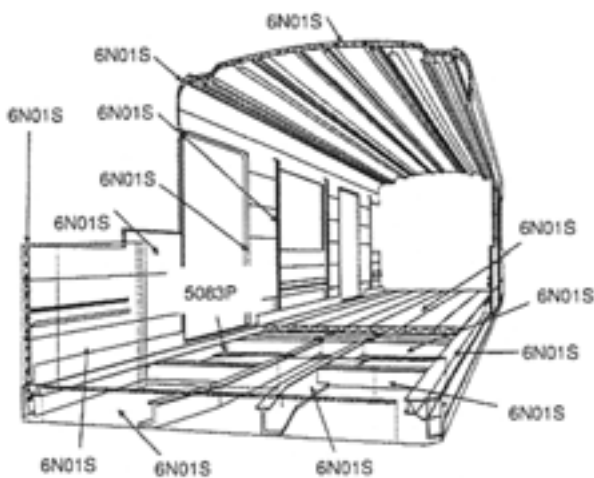


Fig.3. Carbody structure using double-skin extrusion.

## 2.3 接合方法

アルミ車両製作のための接合法は生産性の高さから MIG 溶接を適用しており、FSW 適用が広がった現在でも多くの部分に使用される。フィラーワイヤは溶接金属の強度を考慮して、全ての継手に A5356WY を使用し、シールドガスとして Ar ガスを使用する。MIG 溶接で形材同士を溶接する場合は、溶接線が直線であるため自動溶接装置で行っている。その他の細かく、複雑な溶接線に関しては手動で行っている。

FSW の模式図を Fig.4 に示す。先端に小径のピンとそのまわりのショルダーからなる接合ツールを高速で回転しながら、被接合材料（ワーク）に押し込み、ツールと材料との間の摩擦による熱、ツールの回転、移動にともなう材料の塑性流動により接合を行うものである。ツールを介して材料に荷重をかけるため、これを受け止める定盤が必要となる。フィラーワイヤ、シールドガスなどの消耗資材を必要とせず、スパッタ、ヒューム、アーク光を発生しないクリーンな接合法でもある。原理は単純であるが、健全な接合部を得るためにはツール傾斜角度、材料への押し込み量、ピンおよびショルダーの詳細形状にノウハウが必要である。注目すべき特徴は、材料を熔融させない固相接合法であるため、材料が熔融する MIG 溶接と比較して継手に投入される熱エネルギーが少ない、すなわち継手の熱影響、歪みを少なくすることができる点にある。その他、基本的な継手の諸性質に関しては MIG 溶接継手と同等または優れていると報告がある<sup>2)~5)</sup>。

6N01 形材、板厚 4 mm を MIG 溶接した断面マクロ写真を Fig.5 に、FSW 接合した断面マクロ写真を Fig.6 に示す。接合前の開先形状は、MIG 溶接では  $60^\circ$  V 型、FSW は I 型である。MIG 溶接の表ビード幅は 10 mm 程度、裏ビードは幅 5 mm 程度となる。FSW ではツールを押し込むため表ビードが母材よりへこみ、両側にバリが少し発生する。

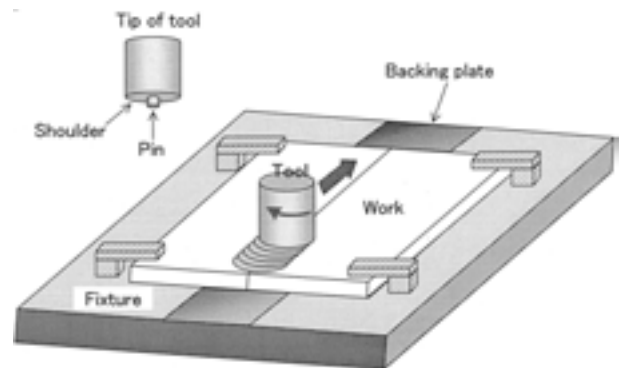


Fig.4. Process of FSW.

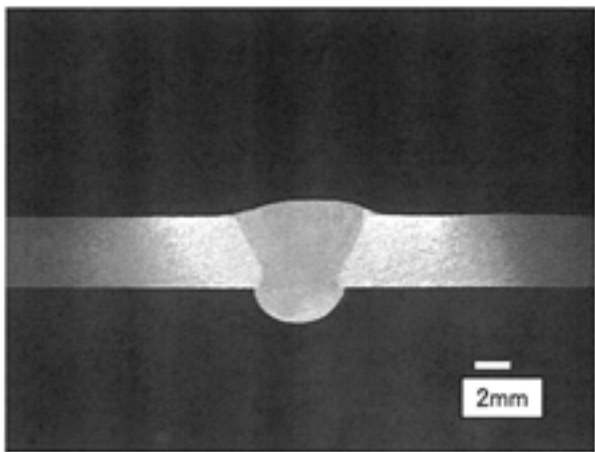


Fig.5. Cross section of MIG joint.

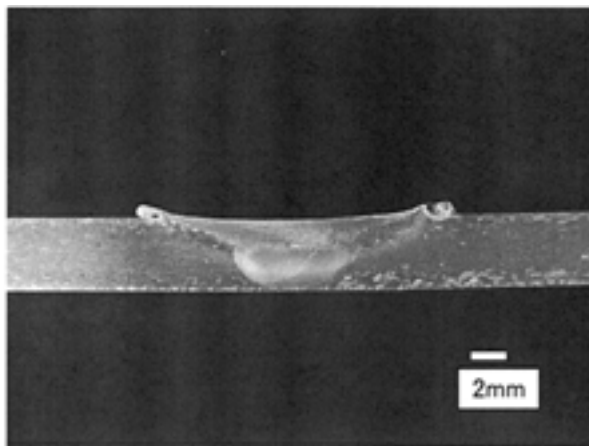


Fig.6. Cross section of FSW joint.

表ビード幅は 16 mm と MIG 溶接に比べ広く、裏ビードは平滑となる。攪拌部形状は母材上部はツールショルダーに

よる材料の攪拌、下部はピンによる材料の攪拌を受けワイングラス状となる。

## 2. 4 車両材料，構造と FSW

上述の材料，構造に FSW を適用すると次のことが考えられる。

- (1) FSW は車体構造部のメイン材料である 6N01 の接合を最も得意としている。5083 や 7N01 と比較すると 6N01 は簡単に接合できる。これは接合条件範囲が広いことにつながる。
- (2) 車体の接合線は直線，かつフラットであるため FSW 接合に向いている。FSW は自動機による装置接合であるため，単純な接合線を得意としている。
- (3) FSW 継手の裏ビードが平滑であるため，これを車両の外側（見付け側）にすることで非常に綺麗な外板面を得ることができる。しかも，MIG 溶接の場合，裏ビードをグラインダーで仕上げる工程があったが，FSW の場合はこの工程を削減できる。
- (4) FSW はフィラーを使用しないためビードと母材の色調が変わらない。MIG 溶接の場合，フィラーワイヤとして 5000 系を使用するので，6000 系である母材 6N01 とビードの色調が異なる。
- (5) 変形が少ないことにより，高精度の車体を製作することが期待できる。

## 3. 通勤車両，在来線車両への FSW 適用例

FSW を適用した車両を Fig.7 に示す。(a) はシングルスキン構造の車両で，(b) はダブルスキン構造の車両である。その他にも多くの車両に適用されている。

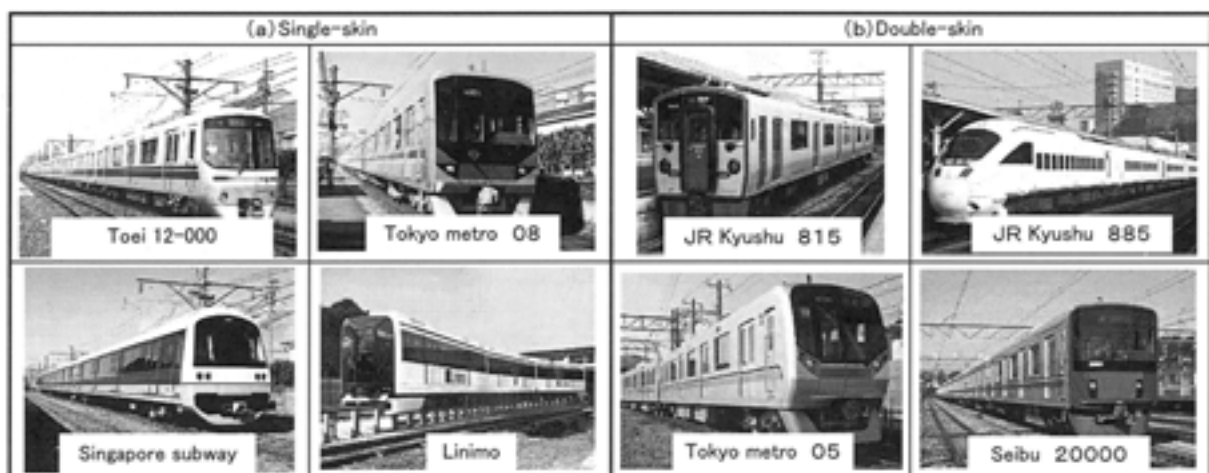


Fig.7. Trains manufactured by FSW.

### 3. 1 シングルスキン構造の車両

Fig.7(a) 中の都営（東京都交通局）12-000 系は 1998 年に営業運転した日本で初めて FSW を適用された車両である。車体外観は塗装無しのアルミ地肌へアールライン仕上げである。1997 年から当社と日立製作所が製作を開始した。適用部位を Fig.8 に示すが、白線で囲まれた側部分の形材つなぎに FSW が使用された。出入り口両側は車両の上下方向の接合、窓下では長手方向の接合である。FSW 接合長さは 1 両あたりおよそ 36 m である。

この部位は FSW 適用以前は MIG 溶接にて接合されており、その継手の模式図を Fig.9 に示す。ジグにシングルスキン形材をセットする際、車内側（リップ側）を上面とし、車外側（フラット側）を下面とする。開先は V 型であるが、これはあらかじめ形材製造時にベベルを付けてあり、形材端部を合わせると V 型となる。この状態で溶接を車内側から行い、裏ビードが車外側に出ることとなるのでグラインダーで平滑に仕上げる。



Fig.8. Carbody after welded.

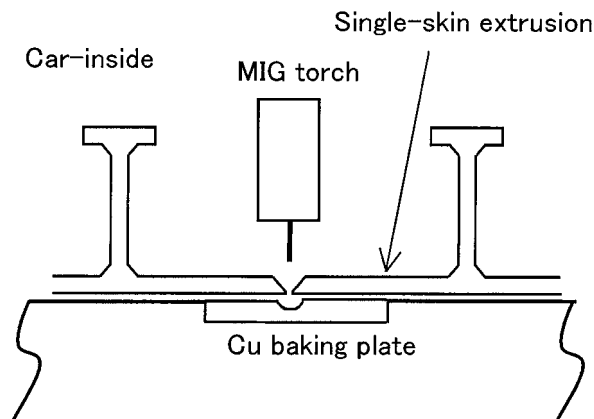


Fig.9. Welding procedure of single-skin extrusion by MIG.

FSW 適用の場合の模式図を Fig.10 に示す。形材を定盤に車内側（リップ側）を上面とし、車外側（フラット側）を下面として拘束する。開先は I 型突合せへと形材端部形状を変更した。接合は、MIG 溶接と同様に車内側から行い、定盤にある裏当て金フラットであるため裏ビード（車外側）はフラットな面となる。

Fig.11 に窓下の腰部の継手裏ビード外観を示す。接合のままの状態であるが、表面の酸化膜が変色している程度で変形のないフラットな面となっている。これにアールライン仕上げを行った外観を Fig.12 に示す。FSW 接合部はフラットで、しかも母材と同じ色調となるため、接合位置の見分けができないほどで、非常に綺麗である。一方、MIG 溶接ビードは色調が変わるので写真からもその位置を認めることができる。

以上のようにシングルスキン構造では車両の側部分に FSW 適用し、見栄えの良い車両を製作することを実現した。その他、適用した車両としてシンガポール地下鉄車両や 2005 年に開催された愛知万博、愛・地球博への交通を担ったりニモがある。

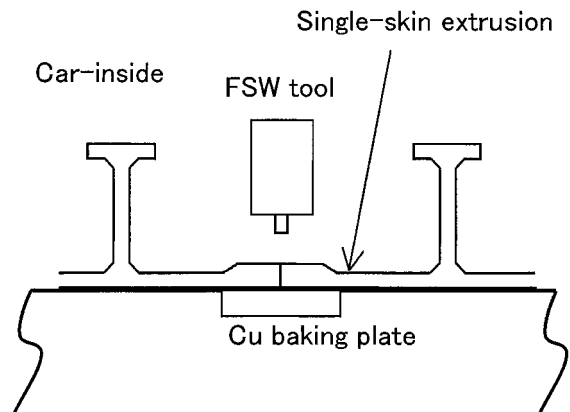


Fig.10. Welding procedure of single-skin extrusion by FSW.

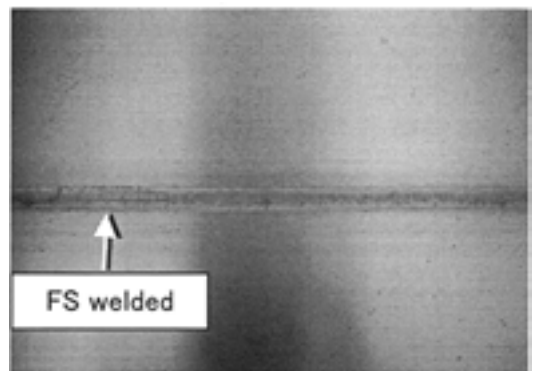


Fig.11. Appearance of backside bead of FSW.

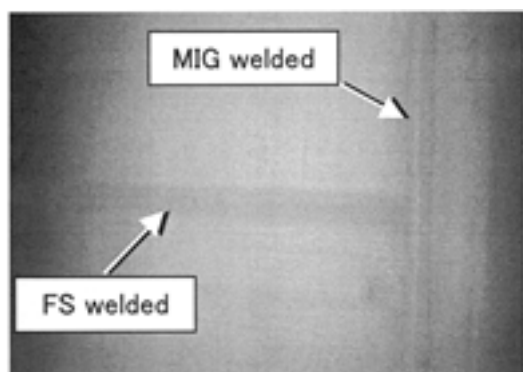


Fig.12. Appearance of backside bead after hairline finish.

### 3. 2 ダブルスキン構造の車両

Fig.7(b) にダブルスキン構造の車両を示す。この構造への FSW 適用は 1999 年に日立製作所が JR 九州向け 815 系で行った。この車両は側のみ適用であるが、FSW 接合長さは 1 両あたりおよそ 275 m となる。最近の東京メトロ向け車両では側、屋根、側と屋根の結合にも適用されて、接合長さは 1 両あたりおよそ 500 m にもなる。

ダブルスキン形材を MIG 溶接する場合の継手模式図を Fig.13 に示す。ダブルスキン形材の両側にはベベルが付いてあり、別の形材と組み合わせることで裏当て付き V 開先を作る。この形材は車内側、車外側ともに溶接することとなる。

FSW を適用する場合の継手模式図を Fig.14 に示す。形材両側のベベルを変更し裏当て付き I 型突合せとし、MIG 溶接同様に内外両側を接合する。この構造に適用する際の問題点は、形材の高い寸法精度（特に厚み方向）が必要となること、ツールからの荷重により中空構造が座屈しないためにツール直下で荷重を支えるリブ（柱）が必要となること、ビード表面が母材部よりへこまないことである。

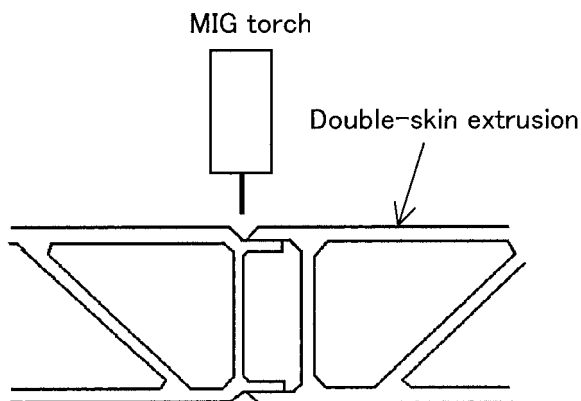


Fig.13. Welding procedure of double-skin extrusion by MIG.

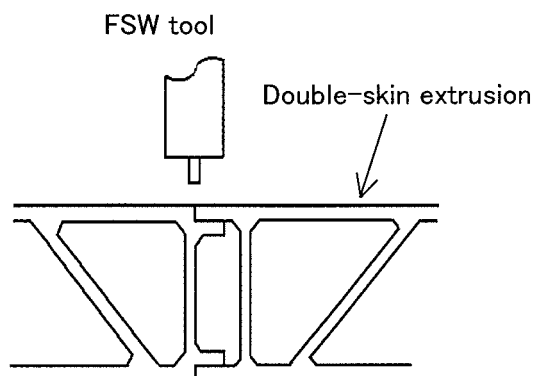


Fig.14. Welding procedure of double-skin extrusion by FSW.



Fig.15. Cross section of double-skin extrusion by FSW.

それらを解決した継手を Fig.15<sup>7)</sup> に示す。図から解るとおり、ツール荷重を受ける柱を太くし、ビード表面のへこみは、接合部材料をあらかじめ厚くしておき、接合後削正することで対応している。

なお、これらダブルスキン構造の車体に FSW 接合を適用する工法は、日立製作所により多くの特許申請がなされている。

## 4. 高速車両への FSW 適用例

新幹線車両への FSW 適用は、700 系新幹線先行試作車の床の一部に適用されたと報告<sup>8)</sup>があるが、量産車の床には適用されていない。量産車への適用は 2003 年以降に当社が製作した 700 系新幹線車両の側カウルと呼ばれる床下機器カバーがある。Fig.16 に 700 系新幹線車両を示す。図中の矢印部が側カウルであり、車両の両側全線を覆うパネル状の部品である。側カウルを Fig.17 に示す。高さがおおよそ 800 mm、幅はさまざまあり 400 ~ 1000 mm である。接合長さは 1 編成 (16 両) あたりおよそ 520 m である。

側カウルは 6N01 形材で製作されており、適用以前は展開形材（シングルスキン）であった。展開形材は、素材から形材として押し出す時は紙を丸めたようなコンパクトな断面で、その後、所定の断面形状にするため、全体を広げるものである。この方法はコストが掛かるため、幅の狭い形材3枚をFSWで接合する構造としコストダウンを行った。Fig.17の矢印部が接合部である。

その他の高速車両では、三菱重工が製作した山梨リニア実験線向けリニアモーターカー先頭車両 Mc5 に適用されている<sup>9)</sup>。先頭車両の外板パネルの一部を小型のリブ付きシングルスキン形材を複数枚 FSW 接合することにより製作した。



Fig.16. 700 series SHINKANSEN.

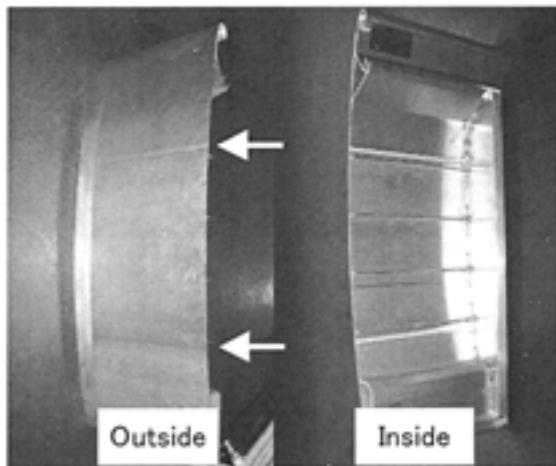


Fig.17. Undercover-panel.

## 5. おわりに

車両への FSW 適用は約 10 年が経過し、もはや FSW は特別な技術ではなくなり、MIG 溶接と同じように一般の技術となりつつある。他の産業においても一時のブームが過ぎ、あまり積極的な適用がなされていないように感じる。FSW はアルミ材料の接合法としては画期的で、優れた継手性能、変形の少ない継手を実現できることは魅力的である。しかし一方で、接合法自体が特許であるためライセンスが必要となること、これを応用した工法、継手構造についても数え切れない程の特許申請がなされていることで、それらを回避し広く製品に適用することは難しく注意が必要である。

今後しばらくの間、FSW は有力なアルミ車両接合法の 1 つであることは間違いない。しかし、最近のファイバーレーザの高出力化、低価格化および MIG 溶接のデジタル制御化など、FSW 以外の接合装置の開発が目覚ましい。特にそれらを組み合わせたレーザ MIG ハイブリッド溶接法は接合速度、継手ギャップ裕度の面で FSW より優れているため、次の有力な接合技術として注目している。

### （文 献）

- 1) 鉄道車輛工業会：アルミニウム車両委員会資料、次世代を担うアルミ車両、(2005)、1.
- 2) 江口法孝, 岩木俊一, 岡田俊哉, 田中直, 大岩直貴, 難波圭三：軽金属溶接, 43(2005), 5, 18.
- 3) 谷川久男, 堀久司, 宮道知典, 難波圭三：軽金属溶接, 43(2005), 5, 30.
- 4) 橋本武典, 武田治郎, 難波圭三：軽金属溶接, 43(2005), 5, 38.
- 5) 大久保克己, 難波圭三：軽金属溶接, 43(2005), 5, 46.
- 6) 岡村久宣, 青田欣也, 高井英夫, 江角昌邦：溶接技術, 5(2003), 60.
- 7) 高井英夫, 西山寛二, 江角昌邦, 石田良二, 竹中剛, 松永徹也：シンポジウム資料, アルミニウム合金製鉄道車両, (2004), 21.
- 8) 熊谷正樹：シンポジウム資料, アルミニウムの各種固相接合と最近の進歩, (2000), 45.
- 9) 青木繁, 長嶋哲矢, 海田武司, 藤本隆史, 金川泰宏, 保坂史郎：三菱重工技法, 40(2003), 3, 138.