

アルミニウム合金の摩擦攪拌接合 (FSW) と鉄道車両への適用

と どり せいじろう おか むら ひさ のぶ
※戸 取 征二郎・※※岡 村 久 宣

要 旨

英国溶接研究所 (TWI)は、1991年に摩擦熱を利用して板材を接合する摩擦攪拌接合法 (Friction Stir Welding 以下FSWと呼ぶ)を開発し、その後わが国においても、主にアルミニウム合金の画期的な接合法として注目され、橋梁や車両などで製品適用化の研究が進められている。当社もFSWがTWIで開発されると同時に共同開発メンバーに参画し、基礎研究および製品に適用するための要素技術を開発してきたが、この度、2.5メートルのアルミ中空押出型材を車両構体のパネルとして接合できるFSW装置を開発し、これをアルミニウム車体に適用した鉄道車両を製品化した。

1. はじめに

わが国におけるアルミニウム合金製の鉄道車両 (以下アルミ車両と呼ぶ) は1962年の山陽電鉄2000系にはじまり、1989年までの27年間で5000両、その後の1999年にいたる10年間で5000両と、リサイクル性、省エネルギー性、加工性、製品の高質化など、ライフサイクルコストやエコロジー、エコノミーなど社会のニーズにマッチングしたアルミニウムの特徴が評価され車両全体に占めるアルミ車両の比率が高まりつつある。

一方、アルミニウム合金は、溶接による変形、ブローホールや割れ、溶接品質の作業環境依存など溶接が難しいとされてきた材料の一つである。FSWはこれらの問題を解決し、製品の高精度化や高品位化に最適な接合法であることに着目し、この度、当社が開発したA-train (次世代アルミ車両システム) に適用し、高精度で高品位の車両が実現できたので、FSWと鉄道車両への適用例を紹介する。

2. FSWの概要と接合原理

図1にFSWの概要を示す。このFSWの原理は、金属製のツールを回転させながら接合部に挿入し、接合線に沿って進行させる。このときアルミ合金は摩擦熱で軟化し、ツールの回転に引きずられるように塑性流動が生じて接合される。接合部の温度はアルミ合金の融点(660℃)以下で、固相接合である。この回転ツールは先端のピン部とショルダー部を有する丸棒で、ピンは接合面を摩擦攪拌し、ショルダー部は攪拌された金属を押え込む作用がある。

3. FSWの特徴

この接合方法は次のような特徴がある。

長所

- (1) 接合による変形や収縮がほとんど無い。
- (2) 接合部の変色がほとんど無い。
- (3) 溶接棒やシールドガスが不要である。
- (4) アークやヒュームの発生が無く、紫外線や赤外線などの有害光線の発生も無い。
- (5) 機械的な接合であることから、接合部は母材に近い組織であり、ブローホールや割れなどの熔融溶接で発生しやすい欠陥はない。
- (6) 上向き接合が可能である。

現在における問題点

- (1) 接合部の裏面にツールの押し付け力に耐えうるバックアップ材や治具が必要である。
- (2) 余盛りを形成しないので隅肉接合ができない。
- (3) 接合部のギャップや目違いの細かい管理や、通り狂いに対し制御が要求される。
- (4) 3次元曲面の施工ができない。
- (5) 接合部終端にピンの穴が残るための処置が必要である。

以下に具体的特徴について述べる。

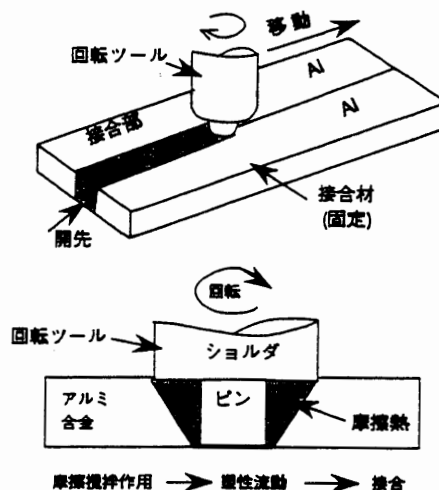


図1 FSW法の概要と接合機構

表1 FSWによる各種金属の接合の可能性と条件範囲

	材質	組成	厚さ (mm)	接合性				
				接合の可否	条件範囲			
アルミニウム	非熱処理材	1080 (O)	>99.8%Al	1~12.0	○ 可能	◎ 極めて広い		
		1100 (H14)	>99.0%Al					
		3004 (O材)	Al-Mn系					
		5052 (O材)	Al-Mg系	4~12.0			○	△ 狭い
		5083 (O材)						
	熱処理材	6061 (T6材)	Al-Si-Mg系	4~6	○	◎		
		6N01 (T5材)	Al-Si-Mg系					
		2017 (T4材)	Al-Cu-Mg系	6.0			△	
		7075 (T6材)	Al-Zn-Mg系	6.0			△	
		7N01 (T6材)	Al-Zn-Mg系	6.0			○	
アルミ鋳物品	1200FD	>99.%	4.0	○	△			
	5083FD	Al-Mg系	6.0	○	△			
Mg系	MC1	Al-Mn-Zn系	3.0	○	△			
銅系	無酸素銅	>99.99%	3.0	× 困難	—			
鉄系	炭素鋼	0.1C-0.3Si-0.5Mn-Fe	3.0					
	ステンレス鋼	18Cr-8Ni-Fe						

4. 接合可能な材料系

表1にFSWで接合可能な金属材料を示す。アルミ合金およびマグネシウム合金は全て接合可能である。ただし、その組成および機械的性質により、接合可能な条件範囲が広い材料と狭い材料がある。

5. 接合部の形状

図2にFSWの接合部断面をMIG溶接と比較して示す。FSWの表面および裏面はMIG溶接に比べて極めて平滑である。従って、FSWの場合は意匠面にも接合のままで製品に適用できる。

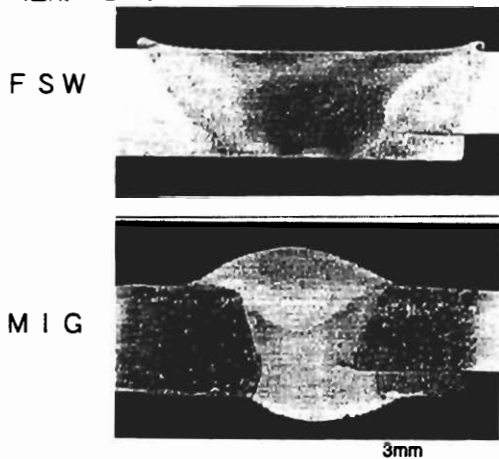


図2 FSW部とMIG接合部の断面の比較

6. 接合部の温度およびひずみ

FSW部の温度測定結果をMIG溶接と比較して図3に示す。FSWの温度は最高でも480℃でMIG溶接の温

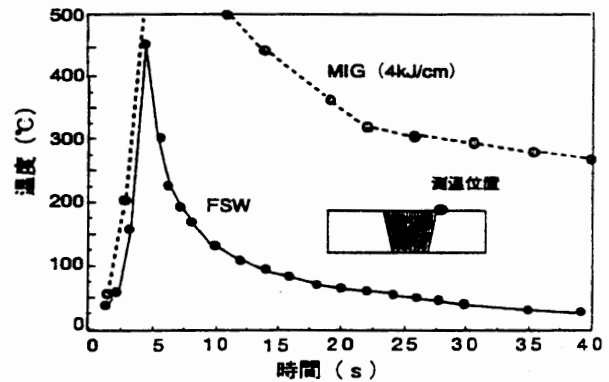


図3 FSWとMIGとの接合部の温度比較 (6N01-4mm)

度 (>660℃) に比べ極めて低い。図4にMIG溶接と同一条件で拘束して溶接した場合のひずみと収縮量を示す。変形量、収縮量ともMIG溶接に比べ格段に少ない。これは図3に示したように接合部の温度が低いためである。

7. 接合部の品質

FSW部のX線透過試験結果を図5に示す。アルミ合金を熔融溶接した場合の特有の欠陥であるブローホールや割れは全く見られない。これはFSWがアルミ合金を融点以下で接合する固相接合のためである。

8. 接合部の特性

8.1 金属組織、硬さ

図6にアルミ合金6N01の場合の硬さ分布をMIG溶

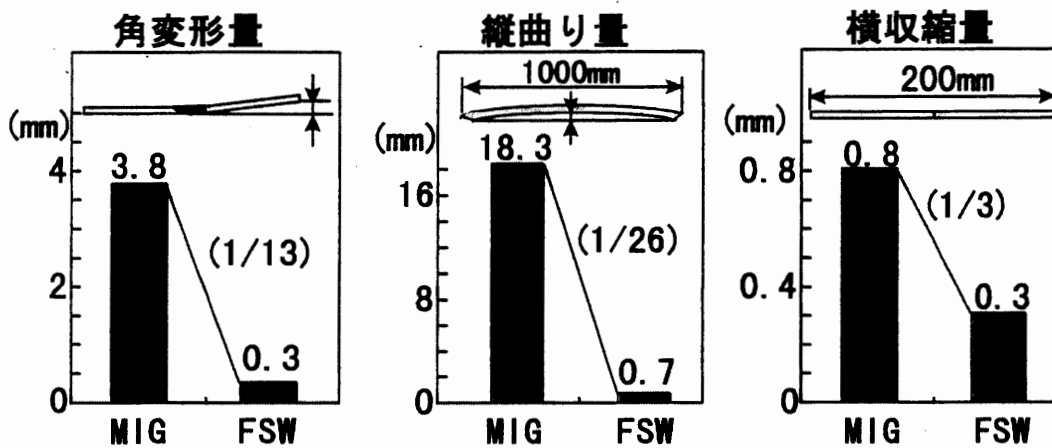
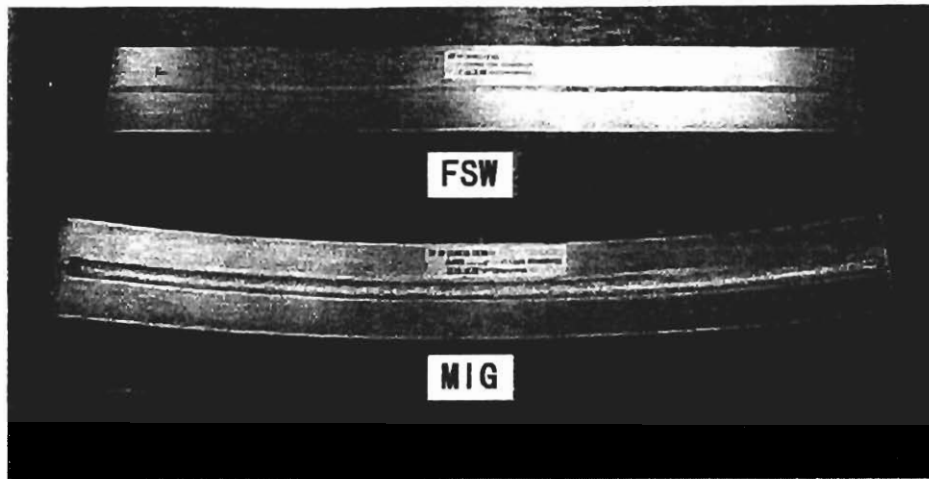


図4 FSWとMIGとの変形量と収縮量比較

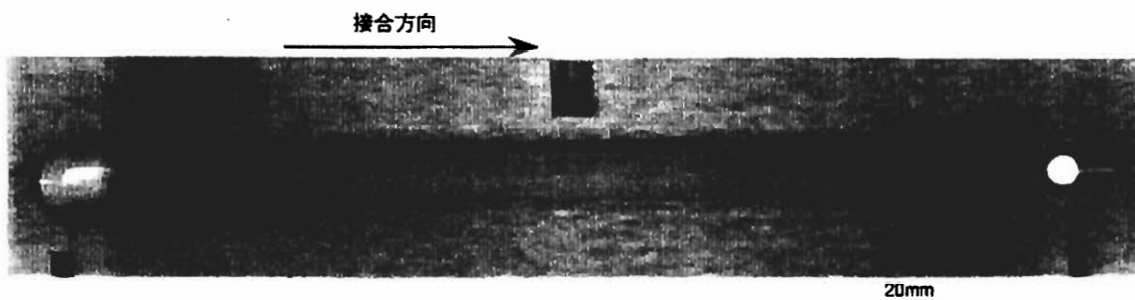


図5 FSW部のX線透過試験結果 (6N01-T5/4mm)

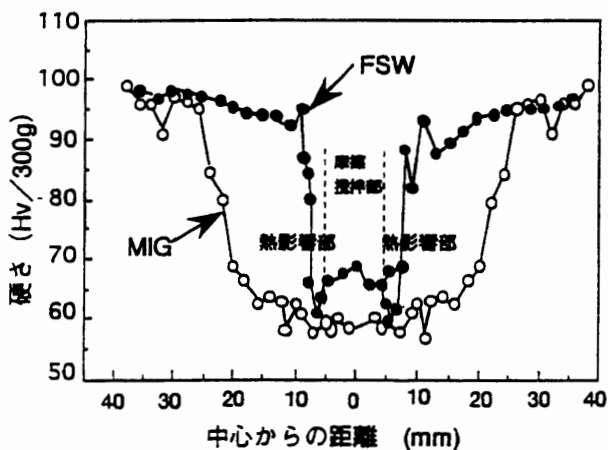


図6 FSWとMIG溶接部との硬さ比較 (6N01-T5)

接と比較して示す。接合部の硬さは全体的にはMIG溶接部よりわずかに高い。これもMIGに比べてFSWの温度が低いためである。FSW部の中では塑性流動部から熱影響部にかけての硬さが最も低い。

図7にアルミ合金(6N01-T5)のFSW部断面の組織とその特徴を示す。この接合法は回転ツールと接合材との間に生じる摩擦熱と動的な攪拌により接合される。従って、接合部は回転ツールにより攪拌された(a)の摩擦攪拌部、さらに、動的攪拌の影響で塑性変形を受けた(b)の塑性変形部、摩擦熱の影響を受けた(c)の熱影響部からなる。引張り試験や疲労試験の破断はほとんど(b)と(c)の間である。

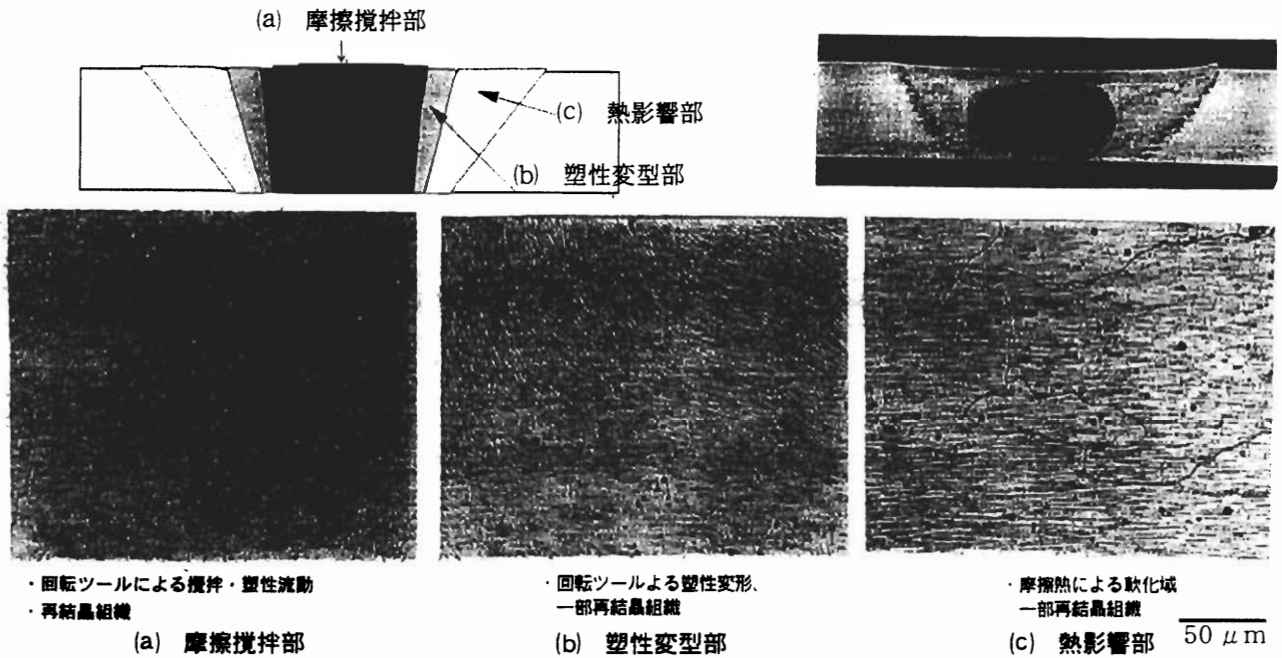


図7 FSW部の組織と特徴

8.2 機械的性質、信頼性

図8にアルミ合金(6N01-T5) FSW部の曲げ試験後の外観を示す。90度曲げ試験も接合表面および裏面に欠陥は見られない。図9にアルミ合金(6N01-T5) FSW部の引張り試験結果を、図10に疲労試験結果をMIG溶接部と比較して示す。いずれもMIG溶接部以上で、破断位置は全て熱影響部である。このようにFSW部の機械的性質がMIG溶接部以上である理由はFSWの接合温度が低い、ひずみが小さい、欠陥の発生が無いためである。なお、FSWおよびMIGとも母材に比べて低下しているが、これはアルミ合金が熱処理材のためである。

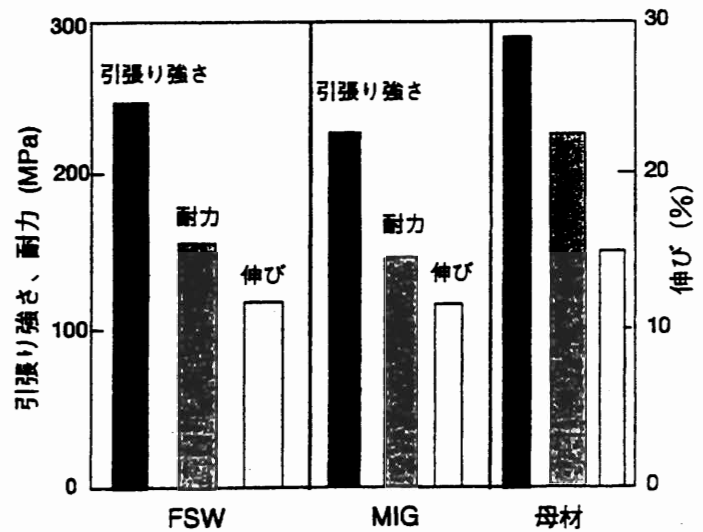


図9 FSW部の引張り試験結果 (6N01-T5/4mm)

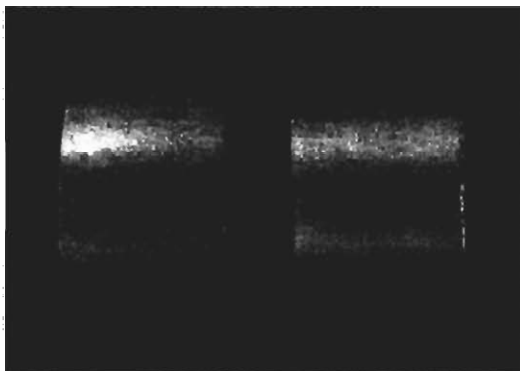


図8 FSW部の曲げ試験後の外観 (6N01-T5/4mm)

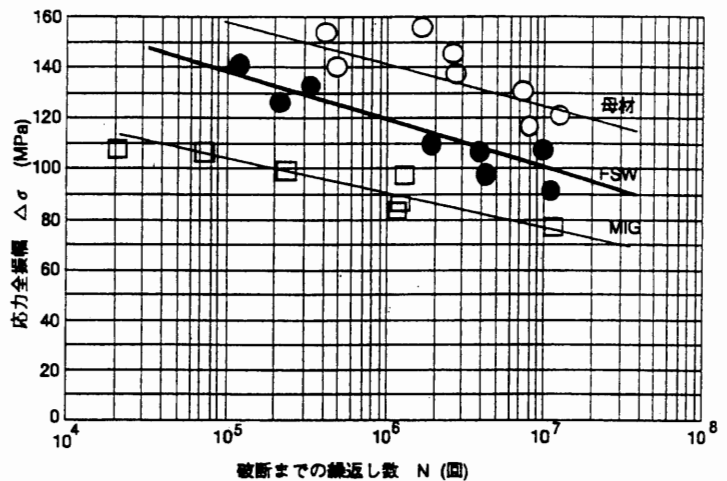


図10 FSW部の疲労試験結果 (6N01-T5/4mm)

9. 接合施工

9.1 接合条件

FSW法の接合条件因子を表2に示す。基本的な接合条件因子は、ツールの形状、ツールの回転数、接合速度、接合材の拘束方法である。これらの条件は接合材の材質、継手形状などにより適宜決定される。

図11にアルミ合金6N01の場合および5083の場合の接合速度とツールの回転数との関係を示す。6N01の場合は5083に比べて健全な接合条件が得られる条件範囲は極めて広い。いずれにしても、接合条件は接合欠陥だけでなく、接合部の各種特性、信頼性、作業管理基準なども含めて厳密な選定が必要である。

図12に接合条件が適切でない場合にFSWに発生する代表的な欠陥の例を示す。(a)は攪拌不足の場合に発生しやすい代表的な欠陥である。これは接合速度に比べて回転数が小さい場合および接合部材間のギャップが大きい場合などに発生しやすい。(b)は摩擦攪拌が過剰の場合に発生しやすい代表的な欠陥である。これは接合速度に比べてツールの回転数が高い場合に発生しやすい。

しかし、接合材質の特性に応じて適正な接合条件であれば欠陥のない接合が得られる。

表2 FSWの接合条件因子

条件因子		選定のポイント
ツールの形状 ショルダ径、ピン径 ピン長さ		材質、形状、厚さにより決定
ツールの挿入深さ	ピン部	接合材の厚さと同等に挿入
	ショルダ部	接合材の表面からわずかに挿入することが望ましい
ツール角度		若干前進角度を設けることが望ましい
ツール回転数		材質、形状、厚さにより決定
接合速度		
接合材の拘束		

9.2 接合部の継手形状

回転ツールはショルダ部とピン部とからなっている。ピン部は接合材の中に完全挿入されるが、ショルダ部もわずかに挿入されるため、接合部の表面がショルダ部で切削される。また、接合部材間のギャップの空間をショルダ部で押え込むことにより補充するため、表面に凹みが生じる。凹みが生じると接合部の機械的強度の低下原因になるばかりでなく、意匠面を害することもある。そこで、図13に示すように、予め接合部に凸部を設けることが望ましい。

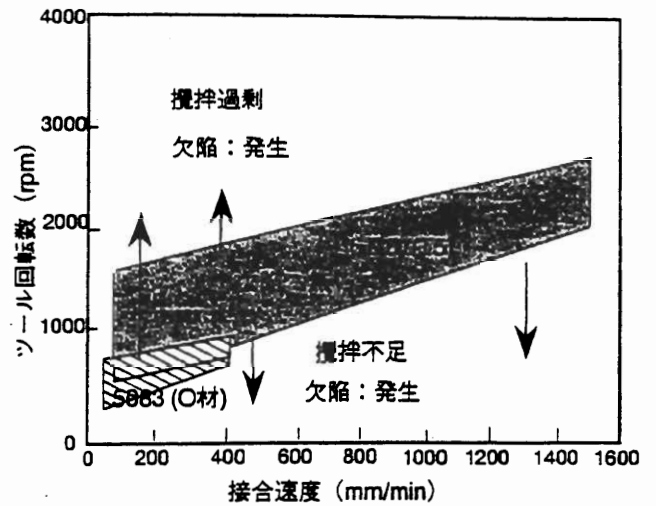


図11 各アルミ合金の接合条件例 (厚さ：5mm)

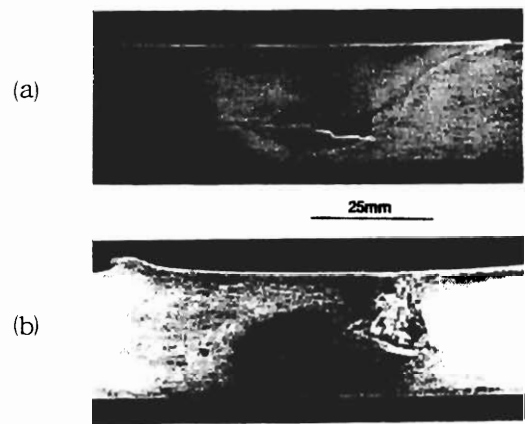


図12 FSWに発生する代表的な欠陥例

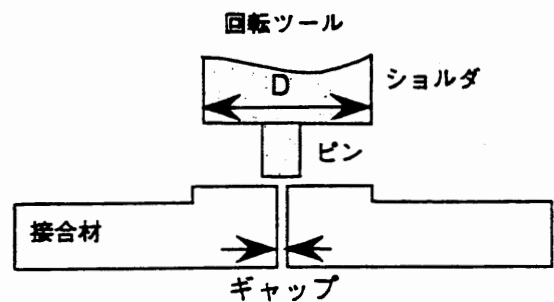


図13 接合部の継手形状の例

9.3 接合部の許容ギャップ

FSWは溶加材を使用しないため、基本的にはギャップがない状態で接合することが望ましい。しかし、接合材が長い場合や通り狂いがある場合は、接合部にギャップが生じることがある。継手部にギャップがあると欠陥が発生しやすくなる。許容ギャップは図14に示すようにショルダの径に依存し、ショルダの径にほぼ比例して許容ギャップも大きくなる。また、ショルダの挿入深さも効果があり、この場合、図13に示す凸型継手が有効である。

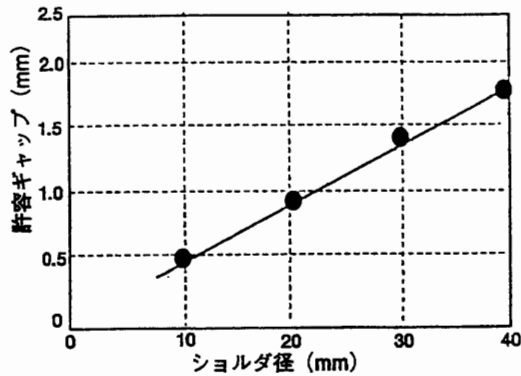


図 14 回転ツールのショルダ径と許容ギャップとの関係 (6 N 01 - 4 mm)

9.4 接合材表面の管理

FSWは固相接合のため、接合材表面の酸化物は接合部に巻き込まれる。しかし、酸化物はツールの回転により、接合部内に細かく分散されて機械的強度や気泡などの欠陥に進展するような悪影響は見られない。このため、特にブラッシングなどによる酸化物の除去が不要である。

なお、FSW法は水中でも接合が可能であることから、アーク溶接のように、湿度などの作業環境の厳密な管理は不要であることが推察できる。

9.5 品質管理

アーク溶接に比べ欠陥の発生がなく、高い品質が得られるFSWと言えども、施工条件の管理をはじめ超音波探傷試験などのX線透過試験などの非破壊検査法により、その品質管理はアーク溶接と同等に厳しく管理することが望ましい。

10. FSW装置

FSW装置はツールの回転および上下駆動および接合方向への駆動機構、接合材の拘束機構が基本構成要素であるが、接合対象物により必要に応じて各種の機構が設けられる。これらの駆動機構、駆動方法および接合材の拘束機構などは接合部に要求される特性などにより最適に選択される。

11. 鉄道車両への適用

以上述べたように、FSWは欠陥の発生が見られないばかりでなく、ひずみが極めて少なく、金属的・機械的特性は現状のアーク溶接に比べて優れており、品質もアーク溶接以上であると言える。さらに、アークやヒュームの発生が無く、且つ静寂で作業環境の改善の点でも大きな効果が期待できるとともに、溶接棒やシールドガスが不要など省資源効果も期待できる。

我社では、FSWがTWIで開発されると同時に、以上のようなFSWの特長に着目し、その後、高精度でひずみの極めて少ない高品位な車両構体を前提にした「次世代アルミ車両システム」A-trainを開発し製品化したので以下紹介する。

11.1 A-trainのコンセプトと基本構成

従来、熟練労働者に依存してきた労働集約型の鉄道車両の保守や生産は、労働人口構成の激変や、今後の少子化をふまえ、抜本的な見直しと改革の必要にせまられている。そこで我社では数年前から、次世代の車体構造と

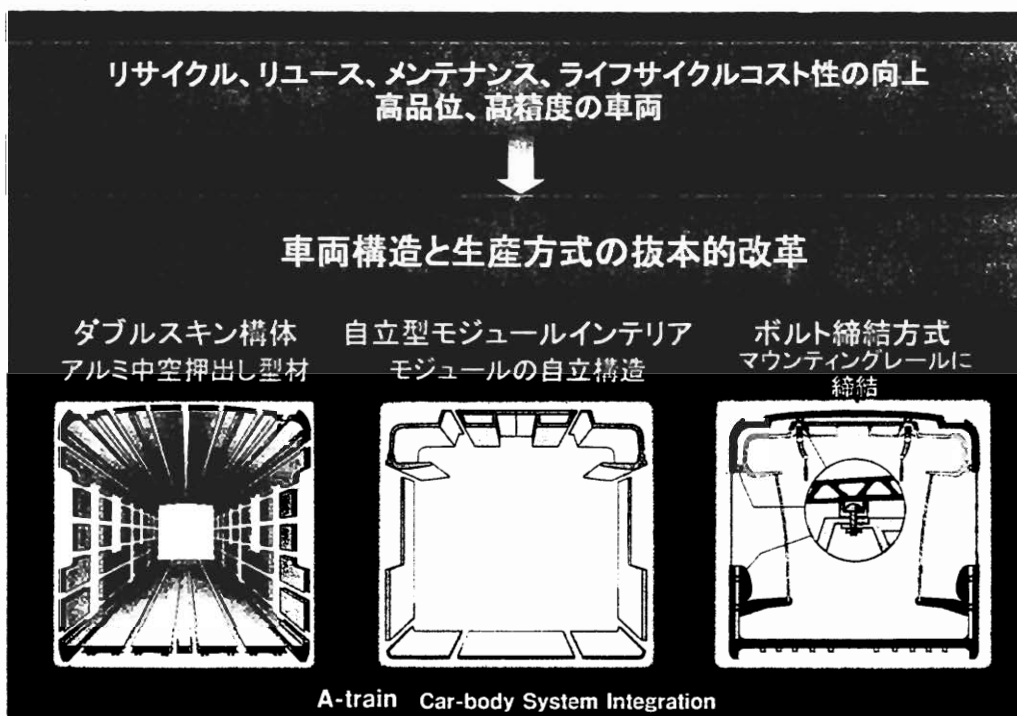


図 15 A-trainの開発コンセプトと基本構成

生産方式の開発に取り組み、コンセプトづくりや基礎検討にはじまり各種試作や信頼性試験を経た上で車両の「つくり」と「つくりかた」を一新したA-train「次世代アルミ車両システム」を開発し、製品化することができた。図15にA-trainのコンセプトと基本構成を示す。

11.2 構体構造

制振性や遮音性にすぐれているトラス断面のアルミ中空押出型材を車両の長手方向に配置し、型材相互の接合を全て直線的に長手方向のみロボットで接合することにより、側構体、屋根構体および台枠を構成する。上記中空押出型材にはA-trainの基本構成をなす自立型モジュール品をぎ装するための、マウンティングレールを一体に形成することにより、内部骨組や床下機器吊りのまったく無いダブルスキン構造とし、軽量化と部品点数の抜本的な低減をはかるとともに、将来のリニューアルやリサイクルの容易な構体とした。

一方、従来構造では、構体の構造物としての設計が継手強度に支配されていたが、図16に示すように低応力部を中空アルミ型材の接合部とし、高応力である窓隅や開口部を母材化するとともに、板厚を応力レベルに応じて最適化できるアルミ押出型材の長所を生かすことにより、従来に比べ、より合理的な設計と軽量化が可能となった。また、アルミ型材は押出成形であるため、その断面形状の選択の自由度が高い。従って、車体の断面形状も従来よりも美しい表現が可能で、車両のデザイン面でも質的向上が期待できる。

11.3 高精度構体と自立モジュールぎ装

構体の製作にあたり、上記のアルミ押出型材の接合は、長さ2.5メートルの大型中空押出型材を長手方向に接合可能なFSW装置で行う。自社開発したこのFSW装置は接合面をレーザセンサでセンシングしながら主軸ヘッドを移動しながら接合するもので、最大幅3メートル、長さ2.5メートルの側構体や屋根構体および台枠が製作可能である。当初はダブルスキンの構体を反転することにより、ダブルスキンの両面を外側から接合していたが、その後、構体をFSW装置の治具にセットしたまま反転せず、ダブルスキンの両面を接合する、ワンサイドFSW工法を開発し、作業効率の向上を図っている。

このように骨組が全く無いオールダブルスキン構体をFSW工法により製作することにより、構体の精度が従来工法に比べ、約10倍に向上した。その結果、従来の構体依存型の現車合わせを前提としたぎ装構造に代わり、前述のアウトワークした自立型モジュール工法を全面的に採用することが可能となり、ぎ装作業の効率も飛躍的に向上した。また、外板の平滑度も格段に向上し、塗装前のパテの使用量が半減できるとともに、外観の質的向上が図れた。

12. あとがき

以上述べたように、FSWの適用は製品の格段の質的向上とぎ装作業を含めた生産の合理化が図れるとともに、環境負荷の小さい、クリーンな接合法として、多様性と可能性を秘めた画期的な生産技術であり、今後広い工業分野への適用が期待できる。



図16 ダブルスキン構体の部材構成