

連携記事

日立製作所におけるアルミ車両へのFSW適用について

Application of FSW in Railway Aluminum Car Body in Hitachi

江角昌邦 (株)日立製作所鉄道ビジネスユニット
笠戸事務所 笠戸交通システム本部
Masakuni Ezumi 車両製造部 主任技師

1 緒言

日立では、1991年に英国TWI (The Welding Institute) にて考案されたFSW (Friction Stir Welding) のアルミ製鉄道車両への適用に向けた取り組みを1995年に開始し、鉄道車両適用を可能とする上での様々な課題を解決しながら、1998年4月から車両用部品へ初めて適用を開始した。また同年からアルミ車両本体へFSWを適用するために、20m超の長尺アルミダブルスキン形材へFSWを適用するための本格的な研究を開始し、1999年から都市近郊型通勤車両の側構体へ適用、その後、屋根構体、出入口部、側構体と台枠との接合、台枠への適用へと、適用範囲を拡大し、現在に至っている。これまで約5000両、総溶接長は約4000kmに及ぶFSWを実施した。近年では、通勤電車だけでなく、地下鉄、モノレール、新幹線、海外向け高速車両へと適用車種も増やしている。

今回の報告では、FSWを鉄道車両へ適用するに至った開発に関する取り組みについて報告する。

2 鉄道車両の構造の変遷

鉄道車両の歴史は古く、蒸気機関車の導入から数えても200年以上になる。旅客用車体の構造についても初期の全木製から鋼製台枠と木製車体の組み合わせ、リベット結合全鋼製車体、全溶接結合モノコック車体へと進歩してきている。近年では、高速化のニーズに応えるべく更なる軽量化を図るため、鋼製車体に代って抵抗スポット溶接による軽量ステンレス車体やアーク溶接による全アルミ合金製車体とその割合を増やしてきている。図1に鉄道車両構造の変遷を示す¹⁾。

アルミ合金製車体は、そのメリットを生かすため、最初是新幹線や振り電車など特に軽量化を要求される車両に重点的

に採用された。しかしながら、最近ではアルミ合金押出技術の進歩により、大型の中空押出形材が成形可能となり、車体の外板と内側の板を同時に押出成形することにより、従来の骨組みと外板1枚を組み合わせるシングルスキン構造から、骨組みレスのダブルスキン構造の車体を実現できるようになってきた。これにより、軽量化のみならず、部品点数の削減、内外装部品、装置の取り付けの容易化が可能となり、車両の作りと作り方に大きな変革をもたらしている²⁾。

図2にシングルスキン構造とダブルスキン構造の比較を示す。

3 FSW適用へ向けた取り組み

日立では新幹線から特急、地下鉄、通勤電車、モノレールまで数多くの鉄道車両を生産しているが、従来から車体製作における結合技術としては、アーク溶接が主流であった。アーク溶接はリベット結合やボルト締結などと比較すると継手が軽量化できるメリットがあり、鋼→ステンレス→アルミ合金といった材料の変遷とともに車両の軽量化に大きく

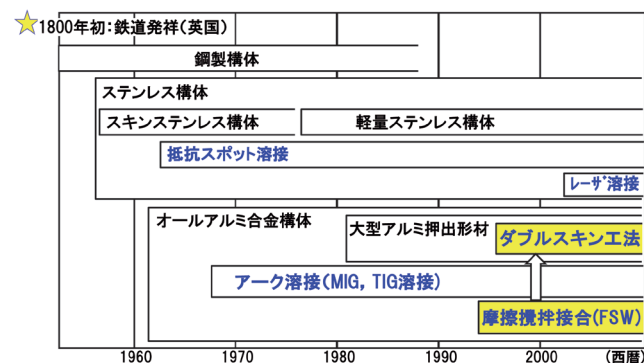


図1 鉄道車両構造の変遷

寄与してきた。しかしながら、アーク溶接は被接合金属及び溶加材を高温のアークで溶融させるため、どうしても接合部に熱歪が発生するという問題を有していた。特にアルミの場合、溶融温度は鉄に比べて低い、比熱、溶融潜熱が大きく、熱伝導も良いため、多量の熱を急速に与えなければならないなど、その品質を確保するためには、熟練の作業者が必要であった。しかしながら、このような熟練した作業者は、我が国の将来の少子化を見越すとその確保が困難になると予想された。以上に述べた課題に対応するために、抜本的な技術革新による新しい溶接方法が求められていた。そこで着目したのが、1991年に英国TWIにおいて発明されたFSW法であった。以下にその開発の経緯を述べる。

3.1 開発経緯

表1に、開発の経緯をまとめる。1991年にTWIでFSWが発明された直後から、日立はTWIから基礎的な技術を導入し、日立研究所で接合試験を実施し各種データの蓄積を図るとともに、鉄道車両用アルミ構体への適用を目指した研究開発を独自で実施した。最初の製品適用には、接合長3mのシング

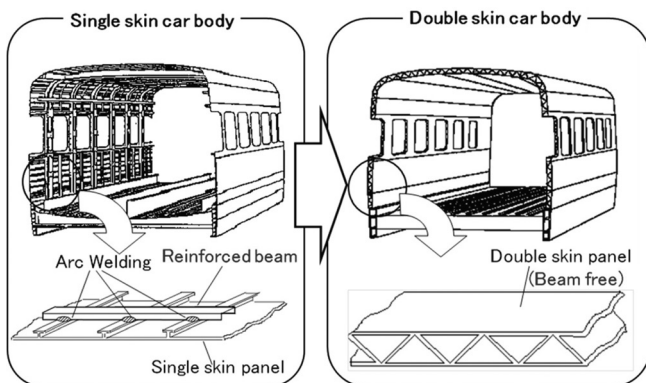


図2 シングルスキン構造とダブルスキン構造の比較

ルスキン用中型FSW装置を1998年に開発し、アルミ構体部品などへ適用した。その後、上述したダブルスキン構体への適用を図るべく、1999年に長さ25mの側構体を接合できる大型FSW装置を開発した。本開発により、長手方向に配置した数本のアルミ中空押出型材をFSWで接合して側構体を構成できることになり、構体の寸法精度は飛躍的に向上し、アルミ中空押出型材を使用したダブルスキン構造も相まって大幅な部品点数削減、リードタイム短縮を図ることができた。その後、屋根構体、台枠パネルへのFSW適用を推進し、現在では側構体と台枠の結合へもFSWを適用している。このほかにも、高速化、出入口部へのロボット適用を進め、現在、既に5000両、4000km以上の接合を問題なく完了している。

3.2 適用へ向けた技術的検討

TWIで開発された際には、まだ実験室レベルの接合であった。このため、鉄道車両への適用に当たっては主に表2に示す技術的な課題が存在した。

例えば、上述した表2に示すギャップに関しては、溶加材を用いないので、ギャップを埋めることができない。このため、板材や型材への適用に限定されており、その接合開先はルートギャップ0の突合せ開先に限定されていた。溶接継手の開先形状としてルートギャップ0は理想的条件ではあるが、実際の製品において接合線を全てルートルートギャップ0に保つのは困難である。このため、もし許容値を超えるルートギャップが接合線中に存在するとその部位には接合欠陥が発生し、そのままでは車両構体の接合には適用できないことになる。その他、長尺の中空押出型材の製作公差や生産時の位置決めのはらつきにより開先条件が変動しても安定したFSW接合ができるようにするために多くの検討を実施した。

表1 日立のFSW開発経緯

西暦	項 目	フェーズ
1995	FSW 技術導入, 基礎研究開始	基礎
1997	鉄道車両部品用 FSW 装置(接合長 3m 迄)開発	導入
1998	車両部品への適用開始 側構体用大型 FSW 装置開発開始(接合長 25m)	
1999	側構体への適用開始	
2000	屋根構体用大型 FSW 装置導入	拡大
2001	出入口フレーム接合用 FSW 装置導入	
2002	側構体-台枠接合用 FSW 装置導入	
2005	台枠用大型 FSW 装置導入	
2012	車両部品用として高速両面 FSW 装置導入	発展
2014	出入口フレーム接合へロボット FSW 装置を導入	

4 ダブルスキン構体適用のための
取り組み

従来のFSWは数mの板部材への適用が中心であった。しかし、ダブルスキン構体は、長さ20m、幅3m、高さ3mと非常に大きく、且つ複数枚の形材を並べてパネルにする必要がある。そこで、中空押出形材をFSWで接合する場合には、押出性のよい形材形状の決定や最適な接合条件の把握といった技術と同時に、これらの制約条件を満足しながら、FSWに特有な接合時の荷重を安定して支え、構体に用いたときの強度、剛性も十分に確保できる継手を開発する必要がある。このような問題を解決し、欠陥の無い長尺FSW継手を得るために、表3に示す技術を開発した。

以下に、FSWを各々の製品に適用するにあたって推進した主な技術開発内容について述べる。

4.1 FSWプロセス

中空押出形材用FSW継手に対して検討した結果を以下に示す。開発当初、MIG溶接継手形状に類似の形材に対して

表2 実用化に向けた技術的な課題

No.	技術的な課題	内 容
1	ギャップ	溶加材を使用しないためギャップ尤度が狭い
2	FSW 荷重	接合中に高い接合反力が生じる
3	FSW 専用継手	接合中の熱及び荷重に耐え得る継手形状の最適化
4	接合条件	FSW ツール及び接合条件の最適化
5	FSW 装置	FSW 専用装置の開発、ワークセット及び拘束方法の開発

表3 技術開発項目

No.	項目	開発技術
1	FSW プロセス	・ FSW ツール形状 ・ FSW 専用継手形状 ・ 接合条件(回転数、接合速度等々)
2	装置	・ FSW ツール位置制御システム ・ ワークセット及び拘束
3	品質	・ 継手性能評価 ・ 非破壊検査システム

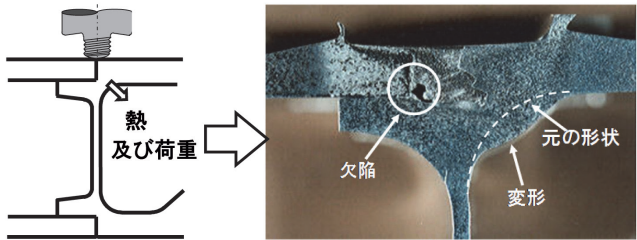


図3 MIG溶接継手でFSWを実施した場合

FSWを実施したが、接合中の熱と荷重により、図3に示すように局部的に変形したために欠陥が発生した。そのため、FSW専用の継手形状を開発した。最適化した中空押出形材用FSW継手の形状³⁾を中空押出形材用MIG継手の形状と比較して図4に示す。FSWで接合する継手は、接合時に作用する荷重と熱により変形しないために、ツール近傍に湾曲部を設け、ツール直下にリブを設置した。本継手形状における適正な接合条件を図5に示すように確立した。中空押出形材でのFSWの断面マクロを図6に示す。

接合部の品質に関しては、FSWの特徴として、ツールの回転方向と進行方向で欠陥が発生する位置が限定されるという特徴がある。且つ一般的なアーク溶接におけるブローホールのような点状的な欠陥形態とは異なり、連続的な空洞欠陥であることが分かっている。そこで、FSW接合部の非破壊検査

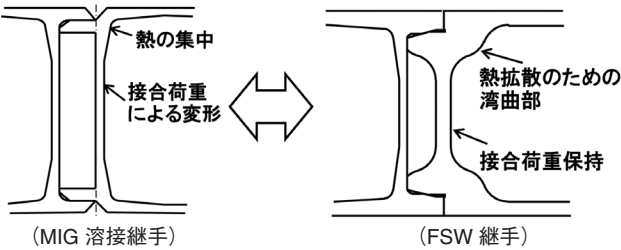


図4 FSW専用継手の特徴

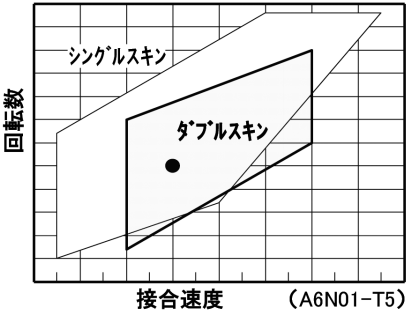


図5 FSW条件

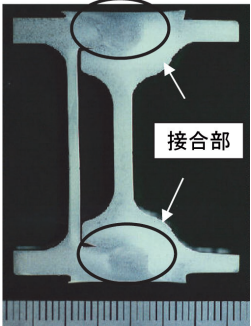
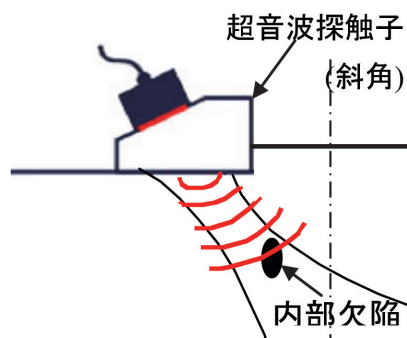
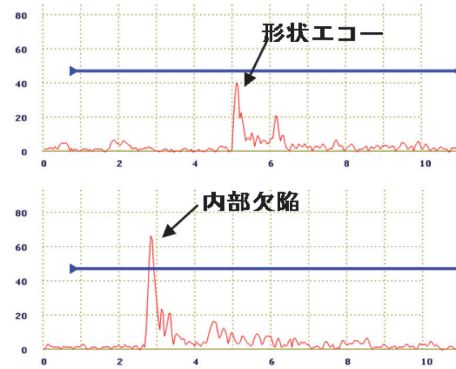


図6 接合部断面マクロ



(a) FSW用超音波探傷試験概略



(b) 超音波探傷試験結果

図7 非破壊検査方法の概略

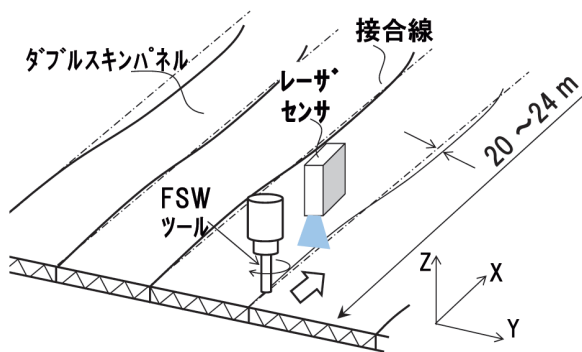


図8 FSWツール位置制御

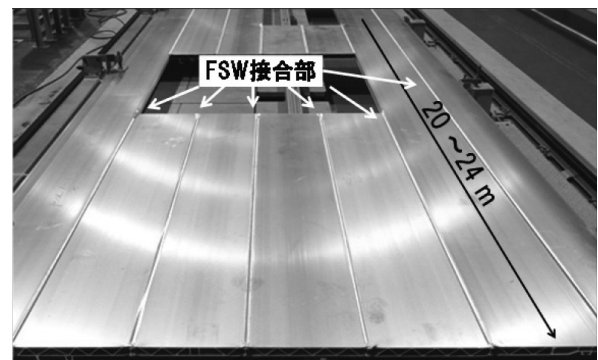


図9 接合後外観

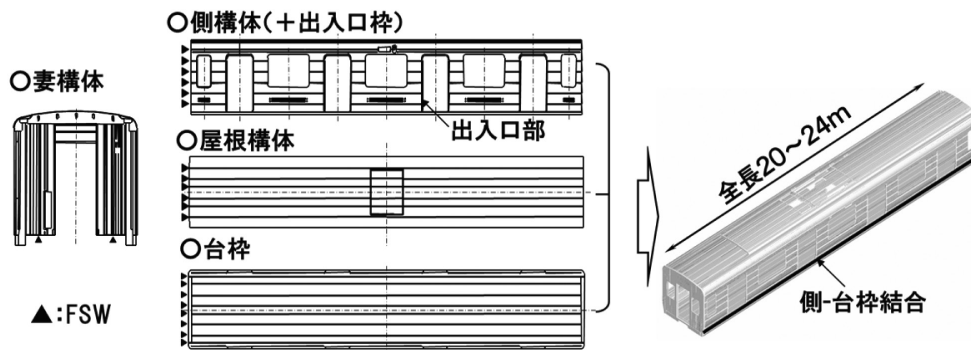


図10 FSW適用部位

では、探傷する位置が限定できるため、図7に示すように接合部継手形状を利用した超音波探傷試験により安定した検査を実現している。

4.2 大型FSW装置

次に、開発した大型装置について述べる。図8に示すように、20~24mの長尺押出型材を接合する場合、型材の寸法のばらつきや型材の曲り、反りによる接合線の上下及び左右方向の位置変動に追従しながら1時間近く安定した接合を行う

必要がある。開発した設備は、鉄道車両専用の自社開発設備であり、レーザセンシング技術を応用して接合線の位置変動にFSWツールを追従させるための位置制御システムを開発した。図9に適用した側構体パネルの外観を示す。

4.3 適用状況

以上に述べた取り組みにより、図10に示す部位へ適用を達成している。1両あたりの総FSW距離は800~1000mである。図11にFSWを適用した代表的な車両として、最近の



(a) 高速車両CLASS395 電車



(b) 高速車両IEP (CLASS800/801)

図11 適用車両例



図12 下松市で行われた鉄道車両輸送の一般公開の様子

トピックスである英国に納めたCLASS395電車とIEP (The Intercity Express Programme) を示す。その他、国内では通勤電車から新幹線電車、モノレールへも適用している。

5 結論

日立では、1995年からFSWをアルミ合金製鉄道車両へ適用するための研究を開始し、今年で23年が経過する。適用するまでには、プロセス的な研究、FSWを鉄道車両へ適用するための強度的、構造的な開発、安定的なFSWを達成するための設備の開発などを生産本部、研究所一体となって進めてきた。これらの成果として、2017年度末時点で、累計5000両を超える車両に適用しており、総FSW長は4000km以上になる。今後、更に適用は拡大、特に輸出車両への適用拡大が見

込まれている。また、図12に示すように、鉄道車両モノづくりへの社会の関心は極めて高く、鉄道車両製造のコア技術である接合に関する開発に従事するエンジニアとして、引き続き高品質な鉄道車両を世界中に展開するためにFSWの更なる発展のための取り組みを行っていく。

参考文献

- 1) 高井英夫, 戸取征二郎, 福寄一成, 江角昌邦, 川崎健, 松永徹也: 軽金属溶接, 39 (2001), 506.
- 2) 服部守成: 鉄道車両輸出組合報, 222 (2005)
- 3) 江角昌邦, 佐藤章弘, 福寄一成, 川崎健: 特許第3420502号.

(2018年5月31日受付)