

高速車両気密構体に適用できる 高品質継手が得られるFSW技術

Friction Stir Welding of High-quality Joining that Applied to a High-speed Vehicle Airtight Body Structure

石川 武 Takeshi ISHIKAWA

新幹線構体は、気密を保つためにアルミニウム合金に連続接合を適用して組み立てるが、今回この連続接合の方法として、車両の構体に高品質な継手が得られるFSW（摩擦攪拌接合）を採用した。このFSW技術は、当社では今回が初めての製品適用となるが、FSWは特徴的な長所と短所の両方を合わせ持っているため、適材適所を考えて適用した。そこで、本技術の適用を進めるうえで考慮した、品質を管理するための技術的課題、品質保証の考え方などを紹介する。

1 はじめに

2012年に当社はE7系新幹線を受注した。E7系新幹線は、当社の新幹線製造の歴史を振り返ると数年ぶりの製造となる。新幹線構体は気密を保つためにアルミニウム合金に連続接合を適用して組み立てる。この連続接合の方法として、車体の一部にFSW（摩擦攪拌接合）を採用した。

FSWは、1991年にイギリスのTWI（The Welding Institute）で開発された固相接合で、現在までにアルミニウム合金製のシングルスキン型材やダブルスキン押出型材を使った鉄道車両構体に適用がなされてきた。当社においてもようやく本技術の製品適用が実現した。SUS鋼のFSW技術研究開発成果を応用してAl合金ヘスムーズに適用することができた。

生産工程を考慮したうえで、高速車両気密構体に必要なFSW技術の要件は次のとおりである。

- 高品質で信頼性の高い接合継手
- 生産工程の短縮（工数の低減）
- 接合条件や接合設備管理による品質管理体制の確立
- 作業者の資格管理による品質管理体制の確立
- 完璧な品質検査体制の確立

これらの要件を満たしたうえで、E7系新幹線に適用した当社のFSW技術について紹介する。

2 FSW適用のメリット

まず、FSW技術の特長を次に示す。図1はFSW継手の継手強度を示すグラフである。FSWは最高到達温度が融点に達しない固相接合法であり、接合部の強度低下が熔融溶接と比較して小さいのが特長である。接合条件によっては接合部が母材よりも高強度になるという画期的な手法である。

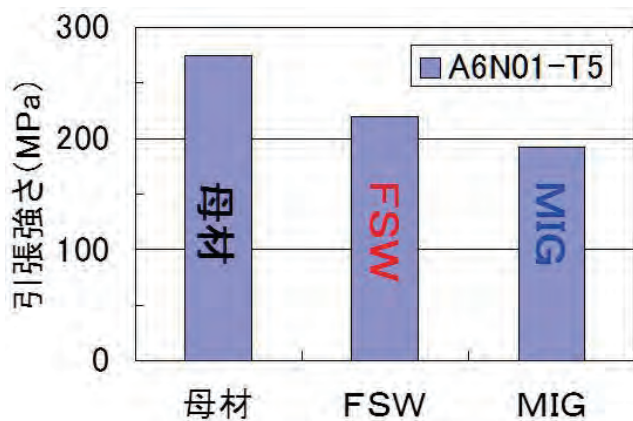


図1 施工法別の継手強度の比較

また、固相接合であるために接合部の結晶粒の粗大化が抑制されて強度低下が小さく、アーク溶接継手と比較して変形が小さい。再結晶により微細化することも可能で母材よりも強度が向上することもある。

さらに、接合中のヒュームやスパッタが発生せず、接合部の気孔や割れがないため、高品質の継手を得ることができる。

一方、次のような問題点もある。剛性の高い拘束治具が必要であり、被接合材料が低融点金属に限られてしまう。突き合わせ面のギャップの許容範囲が小さく、施工時の段差やギャップの管理が重要である。

生産導入に当たり、既存の接合法と比較した場合のメリットを考えると、まず表1に示すような生産工数の低減が挙げられる。突合せ継手の場合、酸化被膜の除去や接合後の余盛りの除去などをおこない接合部を仕上げる工程が必要ない。最も大きな利点はワークの歪が小さいために製品の変形修正時間が要らないことである。

表1 MIG溶接との工数比較

項目	MIG溶接	FSW (摩擦攪拌接合)
接合速度	0.6m/min	0.6m/min
酸化皮膜除去 (時間)	0.5時間 (接合前処理)	不要 (接合前処理)
グラインダ仕上げ (時間)	3時間 (接合後処理)	0.3時間 (接合後処理)
修正 (時間)	1日 (8時間: 接合後処理)	不要 (接合後処理)

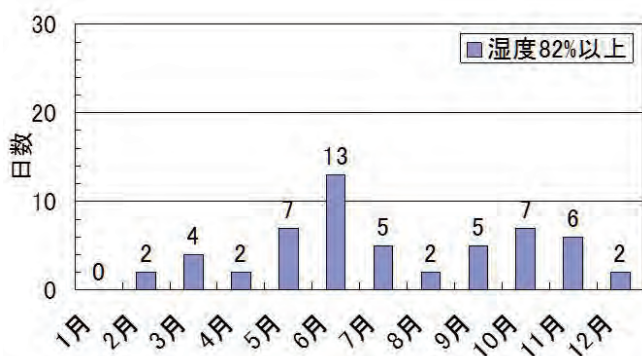


図2 湿度 82% 以上の日数 (2013年)

また、図2には当社横浜事業所で2013年の1年間の湿度が82%以上になる日を調査した結果である。MIG溶接は、雰囲気湿度が82%を超えるとブローホールの発生が極端に増加することが知られていて、この環境では社内標準でもアルミニウム合金のMIG溶接は施工を禁止されている。つまり、溶接作業ができないので、製造工程がストップするわけである。しかし、FSWは施工場所の湿

度に左右されることなく、いつでも接合が可能である。

3 施工管理体制

FSWを製品に適用するうえでは、適切な接合条件範囲の探索から始まり、品質保証の確立は必須である。今回の継手においても、試験片の大きさと接合条件出しをおこない、図3に示すような断面マクロ観察、曲げ試験、引張試験および疲労特性の確認を実施して継手の信頼性を確認した。

4 接合条件管理・設備管理

接合条件管理および設備管理は施工をおこなううえで最も重要なファクタになる。前章3.における継手の信頼性評価は、接合装置、ワークを拘束する治具、材料の寸法管理、FSWの肝となる接合ツールの管理および接合装置の状態管理などが前提となる。当然、当社でもこれらの管理は既存の接合技術と同様に特殊工程の管理並みの体制を作って、施工に取り組んでいる。

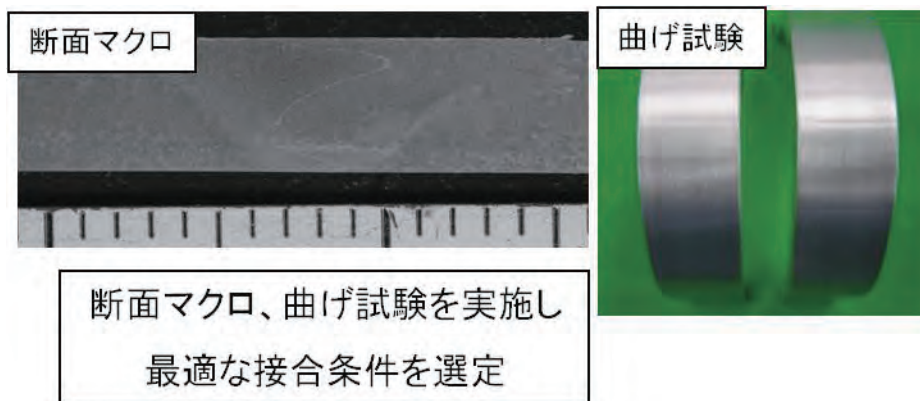


図3 継手の信頼性確認試験

- ・治具の拘束力管理
 - トルクレンチおよび、エア圧力による数値管理をおこなった。
- ・材料の寸法管理
 - 被接合材の板厚をマイクロメータで測定し、板厚差の少ない組み合わせを選定した。
- ・接合ツールの管理
 - 作業開始前に接合ツールの寸法をノギスで測定し、記録した。
- ・装置の状態管理
 - 回転数、加圧力、接合速度などを接合線ごとに電子データとして記録して監視した。

図4 接合条件管理・設備管理について

図4には今回ルール化して取り組んだ品質保証体制の主な項目を列挙した。特に、FSWが他の接合技術と大きく異なる点は、接合ツールによる接触式の接合であることである。この接合ツールの寸法や形状の管理をおこなった。

さらに、被接合物を堅固に固定する治具と合わせてワークの寸法についても可能な限り数値管理をおこない、品質管理体制として確立した。また、装置に要求される特徴は、アーク溶接などと比較して大きく異なる。装置側で接合中に変動するパラメータを正確に記録し、エラーが起きた時の重要な証拠として利用することが可能となった。

5 作業者の資格管理

当社では、次の要領でオペレータの資格管理をおこなって、品質管理体制の一部としている。

1つ目は、社外の講習を活用することによる資格認定制度を作り、十分な知識を有した作業者を施工業務に従事させることとした。この講習会は、一般社団法人軽金属溶接協会主催の「FSWオペレータ認証の講習会」であり、国内のオペレータ認証制度の確立を目標として開催されている講習会である。

2つ目は、社内教育による資格認定制度である。当社内で定めた教育課程により認証を受けた作業者だけが、施工作业することができる。この教育は、ISO25239：2011「Friction stir welding-Aluminum-」の内容を元にして、教育カリキュラムを作成し、その他の溶接と同じく実技試験、筆記試験をおこないFSWの施工に必要な知識・技術を教育している。教育内容に実技も含まれているので、欠陥が発生する接合条件の把握などを理解することが可能であり、大変充実した教育・訓練プログラムになっていると自負している。

6 品質検査について

前章までに様々な品質管理体制についてご紹介したが、最後に、FSW技術を製品に適用するうえでの品質検査体制をご紹介する。

鉄道車両に使用されるアルミニウム合金製押出し形材は、多くの場合厚さが薄いため超音波探傷検査技術の適用は困難であると考えられていたが、専用のプローブ（探触子）を使用することにより、FSWに特有なキッシングボンドや攪拌部内にトンネル状に形成されるキャビティと呼ばれる欠陥の検出をおこなうことが可能である。

今回のFSW継手には、図5に示したように超音波探傷技術による直射斜角法および表面波を利用した検査法を採用した。

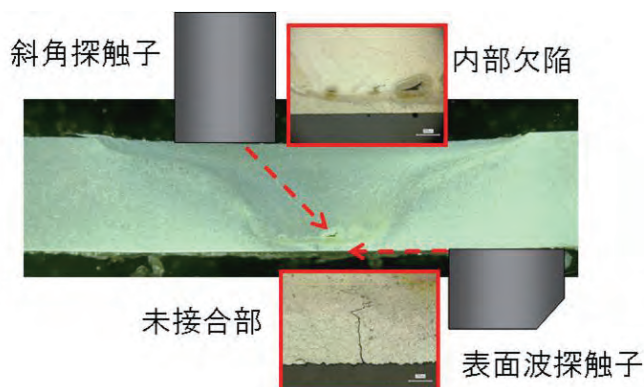


図5 超音波探傷による欠陥検出のイメージ

図6にはその超音波探傷検査で検出された代表的な波形を紹介する。詳細については、本誌に論文として掲載されている「FSW継手の超音波探傷による検査技術検討」をご覧ください。

そのほかにもQC工程表と作業要領書により作業を標準化して施工管理をおこなうことで、品質の安定をはかった。

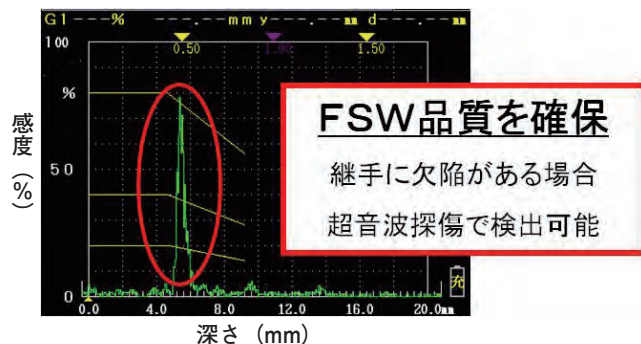


図6 超音波探傷検査による品質管理

7 まとめ

当社で初めて製品に適用した高品質な接合法である FSW 技術について、生産工程を考慮した点を中心に紹介した。今回は、生産工数の低減、作業者の資格管理・接合条件のモニタリング・検査を含めた品質管理体制の確立などをおこなったことで、FSW 技術の製品適用を実現できた。

今後もこの高品質な接合法を上手に利用して、付加価値の高い製品を製造していきたい。

著者紹介



石川 武
博士 (工学)
生産本部
技術部 (接合技術センター) 課長