

JFE スチールにおける 溶接・接合部の高性能化技術開発への取り組み



企業レポート

大井 健次*

Development of high performance technologies for welding and joining field in JFE steel

Key Words : Welding, Joining, Steel plate, Steel sheet, Weldability

1. はじめに

鉄鋼の需要は人口の増加とともに拡大し、1人当たりの鉄の使用量も産業技術の進歩とともに多くなり、さらには新興国のめざましい発展がその拡大に拍車をかけている。とくに、世界規模での産業のめざましい発展を背景に、鋼構造物は大型化しており、高機能化も同時に求められている。鉄鋼メーカーはこれまで、より高強度で高性能な鋼材をいかに低コストで造り込むかに開発を注力してきたが、最近ではその鋼材を使いこなすための利用技術が実用化に際しての大きなハードルとなっている。すなわち、高強度、高性能な鋼材のパフォーマンスを落とさないような加工技術、溶接・接合技術が重要なポイントになりつつある。

たとえば、自動車用鋼板では第三世代と言われる超ハイテン材料が軽量化や衝突安全性確保の目的で適用されつつあるが¹⁾、これまでの車体の製造時に必要とされるプレス加工や抵抗スポット溶接技術だけでは鋼材の性能を十分に生かせない状況になってきている。そのため、先進的なプレス加工技術やレーザー溶接、摩擦攪拌接合、さらには接着剤や機械締結など、超ハイテンを加工・接合するための新たな技術開発が精力的に行われている。

また、厚鋼板の分野においては超大型コンテナ船や超高層ビル、高強度のパイプラインなどが実機化

されつつあり、そこには高強度・極厚鋼板が多用されている。そして、地震などの自然災害や苛酷な供用環境に対応可能な構造物の安全性とコストパフォーマンスの両者を考慮した溶接・接合技術および安全性評価技術の研究がなされている²⁾³⁾⁴⁾。

以上のように、新しい最先端鉄鋼材料の優れた特性を実機構造において最大限発揮させるためには、溶接・接合技術が重要なキー技術の一つであり、JFE スチールでは最先端の溶接・接合技術を開発し、鋼材とともにユーザーへ提供すると同時に、それらにより製作された構造物における破壊や疲労に対する安全性も評価・保証する取り組みを行っている⁵⁾。

ここでは、薄板・厚板分野での溶接・接合技術の一部を紹介するとともに、産学連携を含めた今後のJFE スチールの技術開発への取り組みについても言及する。

2. 鋼材の革新化とその溶接・接合技術

2.1 薄板分野（自動車分野）

自動車分野においては環境負荷低減を目的とした車体の軽量化が進められる中、衝突安全性との両立を実現するために各種ハイテン材の開発が行われている¹⁾。車体の組立ではこれらの鋼板を有効に活用するための溶接技術がとくに重要である。

自動車組立工程では抵抗スポット溶接、アーク溶接、レーザー溶接が主として用いられるが、最も多用されるのは抵抗スポット溶接である。抵抗スポット溶接に求められるのは、多様な強度、板厚、表面処理に対応可能な溶接技術と遅れ破壊などに対応可能な超ハイテンに対する溶接技術である。

多様な鋼板の組み合わせに対して安定したナゲット径を確保し、目的の継手強度を得るとともに、その施工のロバスト性に対して有効な手法の一つとして図1⁵⁾に示したようなインテリジェントスポット[®]



* Kenji OI

1962年2月生まれ
大阪大学工学部 溶接工学科 卒業
(1985年)
大阪大学大学院 工学研究科 溶接工学
専攻博士前期課程修了(1987年)
現在、JFEスチール株式会社 スチール
研究所 主席研究員 博士(工学)
溶接冶金、鉄鋼材料
TEL : 043-262-2052
FAX : 043-262-4155
E-mail : ke-ooi@jfe-steel.co.jp

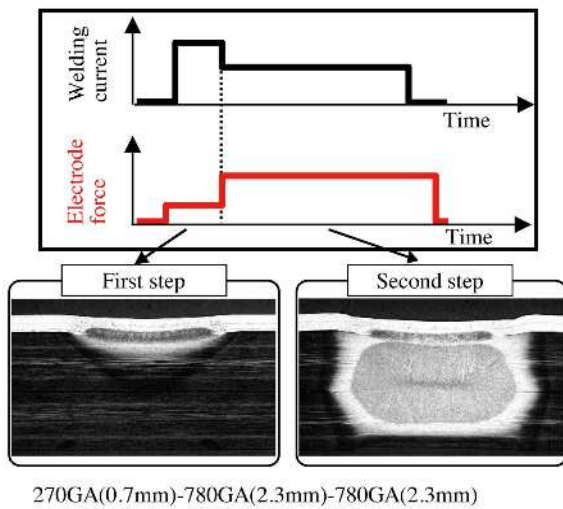


図1 インテリジェントスポット®溶接プロセスの模式図

溶接を開発している。本溶接は、これまでスポット溶接で用いられてきた一定加圧と一定電流において溶接するのではなく、溶接中に加圧力や電流を変化させることで安定したナゲットの形成を可能とする技術であり、3枚重ねの抵抗スポット溶接時に各板間で確実なナゲット形成を実現し、すでに実適用がなされている⁶⁾。

超ハイテンの溶接においては、高強度になるにつれて十字引張り継手強度の確保が難しかったが、溶接継手部の成分偏析や応力分布をコントロールすることによって安定した継手特性が得られるパルススポット®溶接を開発した⁵⁾。この技術は、本通電後にパルス的な短時間・高電流の後通電を行うことを特徴とする技術であり、従来から行われてきたテンパー通電による高強度部の焼き戻し効果を利用した通電パターンに比べて、短時間でより安定した特性を得る方法である。典型的な通電パターンを図2⁵⁾に示す。この新しいプロセスに加えて、ハイテン材の抵抗スポット溶接部に破壊力学に基づく解析を適用し、その強度特性の支配因子の検討を行うことで、継手特性向上のためのアプローチも同時に試みている⁷⁾。

このようにハイテン材に対する独自の抵抗スポット溶接技術を開発するとともに、施工能率の向上を目的とした技術開発も行っている。抵抗スポット溶接のように鋼板の両面から行う手法ではなく、片側からのアクセスで溶接可能な片側スポット溶接⁸⁾やレーザー発振器と光学系などの周辺機器の進歩により、

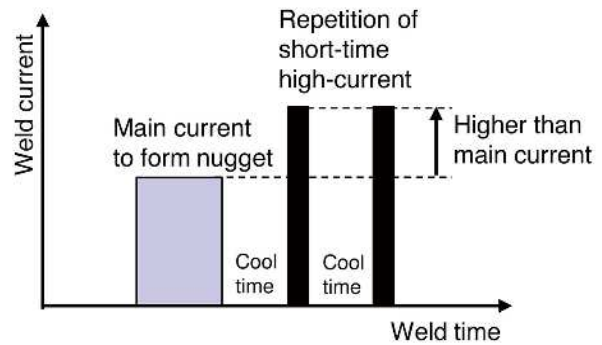


図2 パルススポット®溶接における溶接電流パターン

リモートレーザー溶接と呼ばれる高効率の溶接技術が開発され、国内外で幅広く適用が進められている⁹⁾。さらには溶融させない摩擦攪拌接合技術も有力な接合技術の候補であり、抵抗スポット溶接の点接合から連続・線接合への転換により、ハイテン適用による薄板厚化と継手剛性の向上の両立が可能となることが期待される¹⁰⁾。また、接着剤や機械締結技術の併用により、マルチマテリアル化を視野に入れた多種多様な溶接・接合技術の開発を行っており、これらの技術を高性能な材料とともに提供することに注力している。

2.2 厚板分野

近年の造船および建築分野では構造物の大型化により使用鋼材の高強度・厚肉化がますます進んでいる。造船分野では遠距離貨物の輸送効率向上を狙いコンテナ船の大型化が20000 TEU (Twenty-foot Equivalent Unit:20 フィートコンテナ換算個数) を超えるところまで進んでいる。それに伴い、使用鋼板は板厚も80~100mmtにおよぶ高強度鋼を用いた設計が志向されている。そのため、従来の大入熱溶接技術¹¹⁾により1パスで溶接されていたハッチサイドコーミングなどではエレクトロガス溶接の2電極化やロンジでのCO₂アーク溶接での小入熱多層盛りによる施工を余儀なくされているのが現状である。

一方、CO₂アーク溶接の多層盛り溶接では施工時間・コストの増大が施工上の問題となる。そこで、入熱量の低減と同時に施工能率の向上が可能な狭開先溶接技術の開発が進められている。中でも、CO₂アーク溶接でありながら、スプレー状の溶滴移行を実現したJ-STAR® Welding¹²⁾は低スパッタで深溶

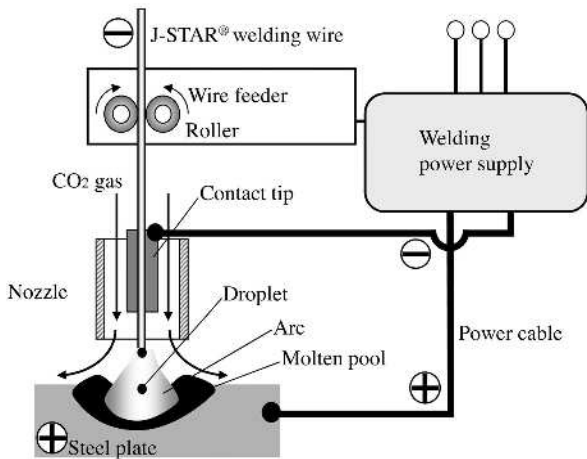


図3 J-STAR® Welding の模式図

け込みが可能であり、狭開先溶接に最も適した一つの方法である。図3¹²⁾にJ-STAR® Weldingの構成を示す。J-STAR® Weldingは、これまでのワイヤプラス (Electrode positive, EP) に対して、逆の極性ワイヤマイナス (Electrode negative, EN) を採用した溶接法であり、アーク安定剤として微量のREM (rare earth metal) を添加したワイヤーを用いる。J-STAR® Weldingは専用のワイヤーを選択するだけで、従来の溶接電源をそのまま利用し、狭開先溶接が可能であるため、安価で高能率の施工が可能であり、厚肉部へ適用すると溶接パス数の削減や溶接量の低減が可能となる。一例として1層2パス溶接により100mmtの鋼板に狭開先突合せ継手溶接を施工した断面マクロ観察結果を図4に示す¹³⁾。また、建築分野への実適用例として、本技術は熊本城天守閣復旧整備事業における大天守6階鉄骨造の主要骨格である溶接組み立て箱型断面柱の角溶接部 (図5¹⁴⁾) に採用され、高施工性と溶接変形抑制の両立が達成された。

厚板分野においても最新の溶接・接合技術として高出力レーザー溶接や摩擦攪拌接合技術が注目されており、これまで多くの研究がなされてきた。

JFE スチールでは、レーザー溶接技術の活用を検討し、厚板クラッド鋼板のスラブ組立工程に30kW級の大出力レーザーを真空中で適用することに成功した。図6¹⁵⁾にその溶接方法と溶接部のマクロ断面の一例を示す。本溶接技術では真空中での安定したレーザービーム品質を確保することで、高速で深い溶け込みを得るとともに溶接欠陥やスパッタを抑制できる

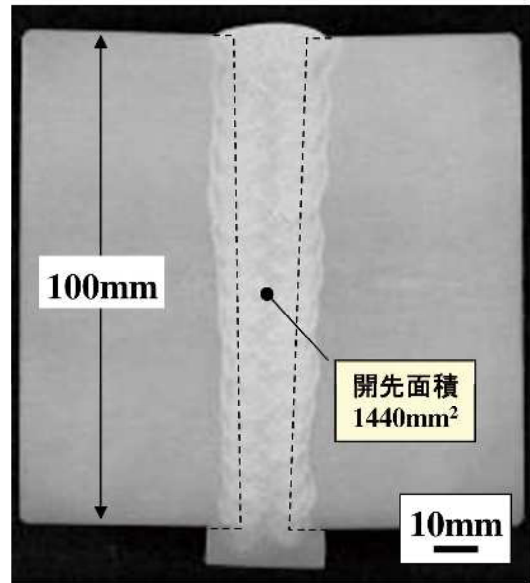


図4 狭開先突合せ継手 (16層31パス) の断面マクロ組織



図5 熊本城大天守のボックス柱角継手部

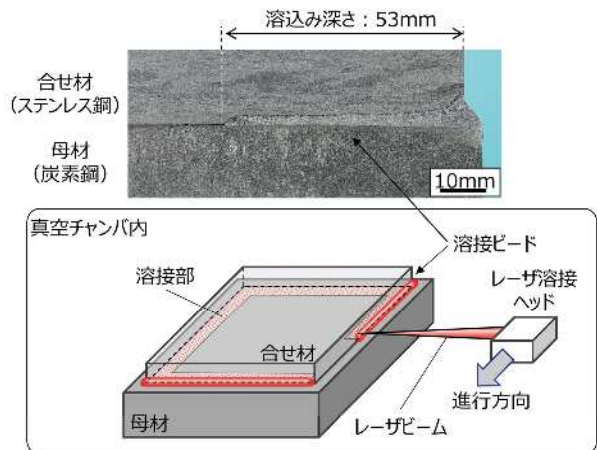


図6 真空中での大出力レーザー溶接方法と断面マクロ組織の一例 (レーザー出力: 25kW 溶接速度: 0.5m/min)

ことから高品質の異種材料の継手作製を可能とし、実ラインでの工程生産を行っている。

摩擦攪拌接合技術は、アークやレーザなどを用いた溶融溶接と比較して、溶融に伴って起こる複雑な現象やその熱影響部へのダメージを抑えることが可能と考えられており、非溶融の新しい接合技術として注目されている¹⁶⁾。たとえば、本接合技術を用いて、板厚12mmの厚鋼板に適用した突き合わせ継手(図7⁵⁾)のミクロ組織や靱性評価などの詳細な検討を行い、実用レベルの特性が得られることが確認されている。また、本技術は非溶融接合であることから、ブローホールなどの欠陥、残留応力、変形などの抑制やスパッタ、ヒューム、スラグの発生がないことなど施工上のメリットも大きい。そのため、実用化に期待するところが大きいですが、現状では接合速度やツール寿命などの課題が多く残されている。一方、薄鋼板の分野においては、最近、両面ツールによる接合技術が開発され¹⁷⁾、従来に比べて飛躍的な接合速度の増大を達成しており、今後の厚板分野への応用に大きな期待がもたれている。

以上のように厚板分野においては高能率に向けての狭関先溶接技術やレーザ、摩擦攪拌接合といった研究が盛んに行われているが、SIP¹⁸⁾などにおいて材質予測やシミュレーション技術も大きく進歩しており、従来のアーク溶接から最新の接合技術まで、広い範囲でデジタルサイエンスによる高度化が始まっている。なお、厚板分野では溶接金属部、溶接熱影響部(母材)においてもトータルな組織・材質制御が求められ、加えて安全性指標である破壊靱性や耐疲労破壊特性の評価や対策も重要となり、これらを合わせた技術開発が求められている。

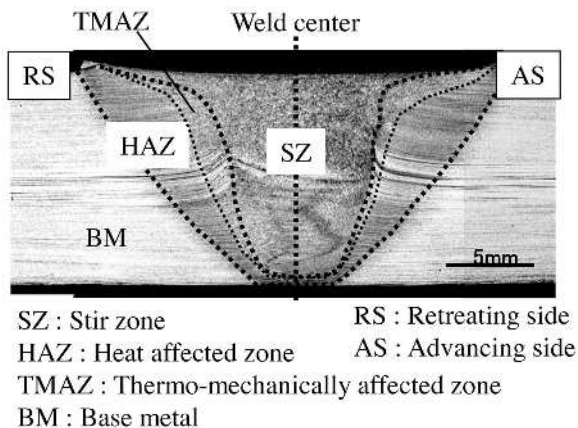


図7 摩擦攪拌接合の断面マクロ組織

3. 今後の展開と産学連携への取り組み

JFE スチールでは、高性能鋼板を社会のニーズに対応しながら低コストで製造するための開発を行っているが、これまでの鋼材の進歩だけでは世の中で広く使用されない時代になってきている。そのため、溶接・接合などの利用技術を重要視するとともに、溶接部の最大の課題である安全性保証や評価といった要素技術も今後のキー技術になると考えている。ただし、これらの分野は常に最先端の設備や研究レベルが求められるため、1企業だけでは十分な対応が困難と考えられる。そこで、2018年4月に大阪大学接合科学研究所にJFE ウエルディング協働研究所を設置し、工学研究科との連携のもと、溶接・接合に関わる現象解明、新溶接技術探求、新溶接材料開発、シミュレーション技術の開発など基礎から応用に渡る複数の研究プロジェクトをスタートさせた¹⁹⁾。

上記と合わせて、JFE スチール、スチール研究所では大型破壊・疲労評価センター (JWI-CIF²) と溶接技術開発センター (JWI-ArC) を2019年2月に開所し²⁰⁾、開発スピードの加速と大阪大学との連携によるアカデミックな視点からの技術開発に注力している (図8)。

JFE ウエルディング協働研究所の研究プロジェクトには、従来の基礎的な共同研究課題に加え、実用化を視野に入れた課題や先導的な最先端の課題を取り上げ、企業、大学の双方が互いに補完しながら成果が得られるように取り組んでいる。とくに、JFE スチールが保有する大型評価設備や最先端の溶接設備を相互に活用可能な研究プロジェクトはこれまでにない新しい共同研究スキームであり、大学の教員が個々の基礎的研究成果を実物大のスケールで検証

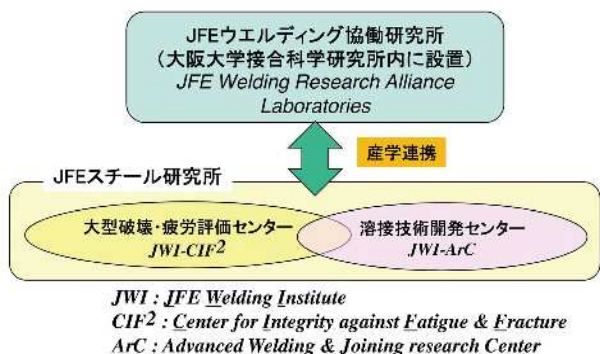


図8 JFEにおける開発体制と産学連携

し、実用化に向けた課題の発見と応用へのスピードアップを可能にすると考えている。

また、JFE ウエルディング協働研究所の研究プロジェクトでは、若手研究者からの自主的なプロジェクト提案も積極的に受け入れ、自由な発想に基づいた先進的な研究や学位取得を奨励することで、次代を担う世界に通用する人材の育成を目指している。

以上の取り組みから、JFE スチールではオープンイノベーションを実現し、スピード感のある新技術の創出と人材育成を推進している。

<参考文献>

- 1) たとえば瀬戸一洋. 自動車技術. Vol.64, No.11, p.29-34 (2010)
- 2) 中島孝一, 長谷和邦, 衛藤太紀; JFE 技報, No.33, 2014年, p.7-12
- 3) 中川 佳, 植木卓也, 難波隆行; JFE 技報, No.31, 2013年, p.8-15
- 4) 正村克身, 大井健次; JFE 技報, No.29, 2012年, p.1-10
- 5) 大井健次, 村山雅智; JFE 技報, No.34, 2014年, p.1-7
- 6) 池田倫正, 沖田泰明, 小野守章, 安田功一, 寺崎俊夫. 溶接学会論文集. vol.28, No.1, 2010, p.141-148
- 7) 貞末照輝, 伊木 聡, 谷口公一, 池田倫正, 大井健次 溶接学会論文集 第32巻 第2号 P.64-72 (2014)
- 8) 松下宗生, 池田倫正, 大井健次. 溶接学会全国大会講演概要. 2013, vol.92, 223.
- 9) 吉川暢広, 樽井大志, 森 清和, 坂本 剛. レーザ加工学会論文集. 2010, No.73, p.53-56
- 10) 小林 茂, 五味哲也, Honda R&D Technical Review, 2010, vol.22, No.1, p.188-193.
- 11) 鈴木伸一, 大井健次, 一宮克行, 木谷 靖, 村上善明. まてりあ. 2004, vol.43, No.3, p.232-234.
- 12) 片岡時彦, 池田倫正, 安田功一; JFE 技報, No.16, 2007年, p.50-53.
- 13) 角 博幸, 片岡時彦, 木谷 靖, 大井健次, 安田功一: 溶接学会全国大会講演概要, 92(2013), 26.
- 14) J-STAR® 溶接技術の熊本城への適用ニュースリリース
<https://www.jfe-steel.co.jp/release/2018/05/180509.html>
- 15) 真空中大出力レーザの実用化ニュースリリース
<https://www.jfe-steel.co.jp/release/2019/05/190522.html>
- 16) Matsushita, M.; Kitani, Y.; Ikeda, R.; Fujii, H. ISIJ Int. 2012, vol.52, No.7, p.1335-1341.
- 17) 山岸大起, 松下宗生, 松田広志, 村上善明: 溶接学会全国大会講演概要, 103(2018), 158.
- 18) 廣瀬明夫: 溶接学会誌, 86(2017), 24.
- 19) JFE ウエルディング協働研究所ニュースリリース
<https://www.jfe-steel.co.jp/release/2018/06/180605.html>
- 20) JWI-CIF², ArC 開所ニュースリリース
<https://www.jfe-steel.co.jp/release/2019/02/190220.html>

