連携記事

溶接部の低温靭性に優れる電縫鋼管の開発

Development of Electric Resistance Welded Steel Pipe with Excellent Low-temperature Toughness of the Weld

JFEスチール（株）　スチール研究所
鋼管・鋳物研究部
主任研究員
岡部能知
Takatoshi Okabe

JFEスチール（株）　スチール研究所
計測制御研究部
部長
飯塚幸理
Yukinori Iizuka

JFEスチール（株）　東日本製鉄所
企画部　主任部員
佐藤昭夫
Akio Sato

JFEスチール（株）　スチール研究所
鋼材研究部
部長
伊木　聡
Satoshi Igi

JFEスチール（株）　知多製造所
商品技術部　第二商品技術室
室長
小出竜男
Tatsuo Koide

1 はじめに

溶接鋼管のなかでも電縫鋼管は、表面の肌が美麗であり形状精度が良好で、鋼管の生産性は高いという様々な優れた特長を有する。これまでに、電縫鋼管の素材や管の製造プロセスや溶接技術および品質管理技術は長年に渡る研究開発により著しく進歩してきた。その結果、高品質な電縫鋼管が製造されており、ラインパイプなどのエネルギー分野の鋼管や機械構造用鋼管および一般配管などの幅広い用途に使用されている。最近では、これまで以上に厳しい環境で使用できる電縫鋼管が求められている。たとえば、寒冷地で使用される鋼管や繰返しの塑性変形を受ける海底ラインパイプ用の鋼管には、−50℃の低温環境で十分な靭性を保持することが求められる。

図1に電縫鋼管の製造方法を示す。電縫鋼管は、鋼帯を円弧状にロール成形して、その両端部同士を電縫溶接法により溶接して製造される。電縫溶接法は、鋼帯の両端部に高周波電流を流して両端部同士を加熱して端面を溶融し、端部同士を加圧する溶接法である。加圧により外面と内面に生成する溶接金属と熱影響部を含む余盛部は、一般的に、溶接直後に刃物の工具を用いて連続的に切削される。電縫溶接部には、溶接時に酸化物が生成することが知られている。これらの酸化物により電縫溶接部の低温靭性が低下するために、寒冷地や海底向けなどのこれまで以上に厳しい環境下では電縫鋼管は使用されておらず、継目無鋼管やUOE鋼管が用いられていた。そこで、極低温での電縫溶接部の靭性を向上させて、さらに電縫溶接部の靭性を全長にわたり保証できる電縫鋼管の開発を目的として、溶接部が母材と同等の低温靭性を有する電縫溶接技術の研究開発と、電縫溶接部の低温靭性を全長にわたり保証する検査システムの研究開発を行った[1-15]。本稿ではこれらの技術の特徴について解説する。

2 電縫溶接部の低温靭性を母材と同等とする電縫溶接技術

電縫溶接実験により電縫鋼管を作製して、電縫溶接部を超音波精密探傷試験法で非破壊検査を行ったのち、電縫溶接部

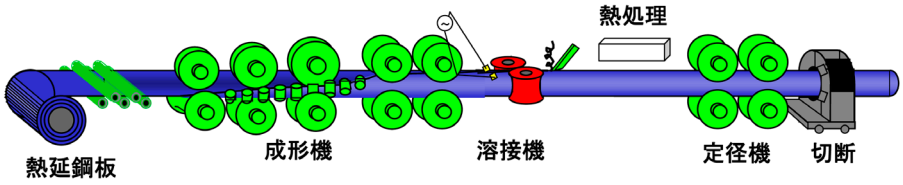

図1　電縫鋼管の製造方法

のシャルピー衝撃試験を行い、溶接部の低温靭性を調査した。種々の条件で実験した結果、低温靭性の低かった試験片のみ板厚中央部の超音波のエコーが高くなることが判明した。この部分を切り出して、電子顕微鏡により断面を観察した結果、数μmのSi-Mn系の酸化物が存在した（図2）。板厚の中央部に微小な酸化物が集積することにより電縫溶接部の低温靭性が低下するという、電縫溶接部の低温靭性の低下原因を明らかにした。

次に、電縫溶接時の加熱・溶接過程を調査した。図3に、電縫溶接中の端面の加熱状態を観察した結果を示す[6,10]。加熱の初期段階から角部のみ加熱されて板厚中央部は加熱されておらず、板厚方向に対して不均一に加熱した。溶接直前において、外面と内面は溶融するが、板厚中央部には空隙が存在しており酸化物が存在した。

さらに、高速度カメラを用いて電縫溶接部を観察するとともに、電縫溶接部の有限要素解析モデルを構築して溶接部の加熱・溶接挙動を調査した。その結果、溶接点の入側で管の端面は完全に溶融することと、溶接時の加圧により、溶鋼は管の上部に盛り上がり溶融池が形成される現象を明らかにした（図4）[2,4]。図5に電縫溶接部の加熱過程における管の内部の温度分布の解析結果例を示す[3,10]。従来の電縫鋼管は、板厚方向に不均一に加熱されており、とくに板厚中央部の温度が最も低くなるとの知見を得た。酸化物の観察結果と合わせて、板厚中央部は加熱・溶融が不十分であるために酸化物は排出されずに残存することを明らかにした。

これらの検討により、電縫溶接部の板厚中央部の酸化物が低温靭性に影響を及ぼすことを把握した。したがって、電縫溶接部の低温靭性を向上させるためには、電縫溶接時の溶鋼と酸化膜の排出挙動を明らかにして板厚中央部の酸化物を排除する溶接条件を見出す必要がある。そこで電縫溶接部の酸化物の挙動についての数値解析モデルを構築した[4,5]。電縫溶接部の温度分布を計算したのち、その温度分布を初期値として、溶鋼の表面に存在する酸化物（FeO）の挙動を熱塑性流動解析により求めた。その結果、図6に示すように、電縫溶接

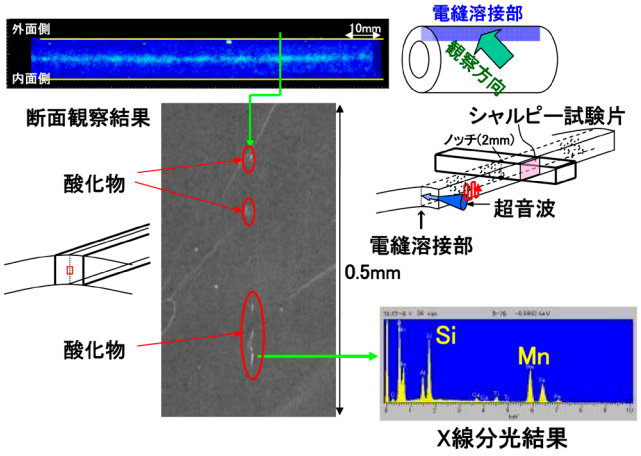

図2　精密超音波探傷法による従来の電縫溶接部の酸化物分布と断面観察結果

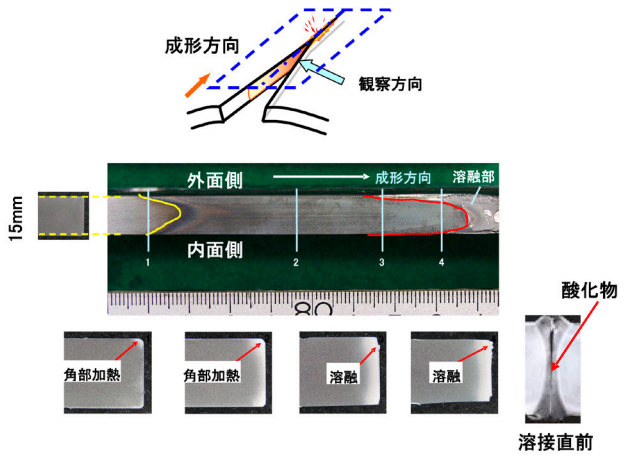

図3　電縫溶接実験による溶接部の加熱状況の把握

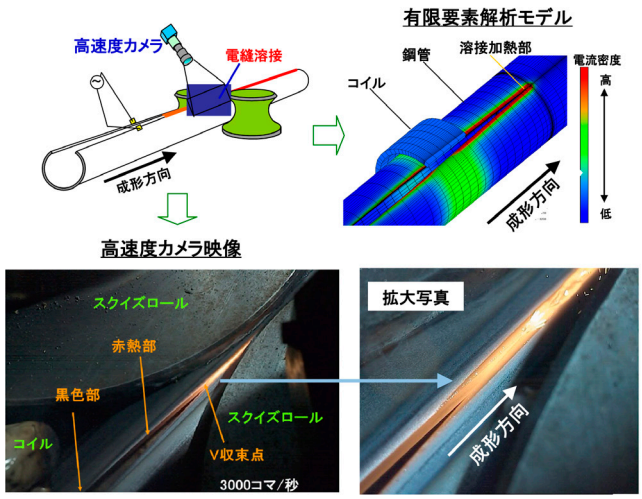

図4　電縫溶接現象の高速度カメラと数値解析による可視化

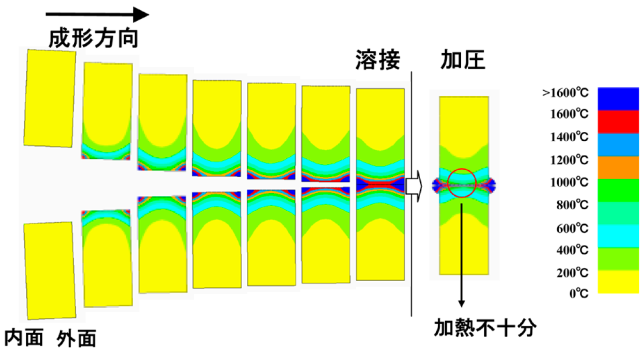

図5　電縫溶接部の管の内部の温度分布の数値解析例（管の断面図）

部の端面の酸化物は加圧直後から、接合面を上部へ移動し、時間の増加に伴い徐々に上部へ移動した[4,5]。加圧後には、大部分の酸化物は余盛部の上部に分散して浮上したが、板厚中央部にはモル分率比で約0.02の酸化物が残存することを数値解析により明らかにした。本解析法を用いて、端面の温度分布を変化させて酸化物の排出挙動を計算した結果、板厚中央部の温度が高く、端面の温度分布が均一であれば、酸化物は十分に排出されることを見出した。

次に、板厚中央部の酸化物を排除するための電縫溶接条件について検討した。その結果、ロール成形条件と電縫溶接条件を制御することにより、電縫溶接時に板厚方向に均一に加熱して板厚中央部を充分に溶融させて溶接する技術を確立した。

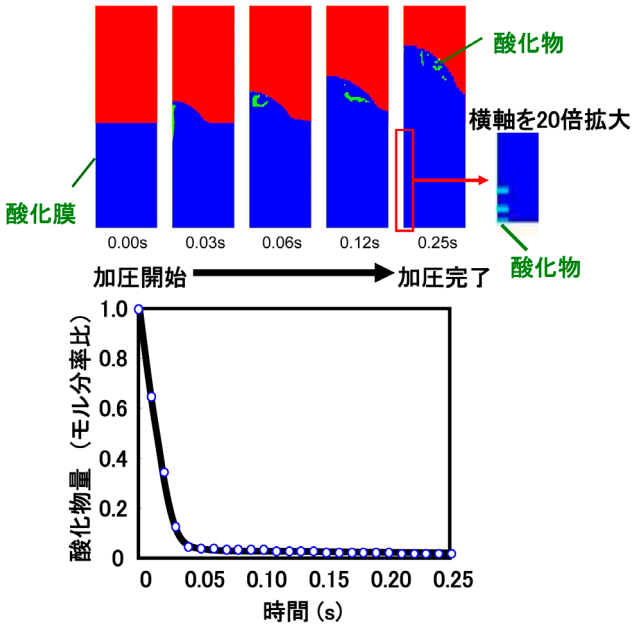

図6　電縫溶接部の酸化物の移動挙動の解析結果

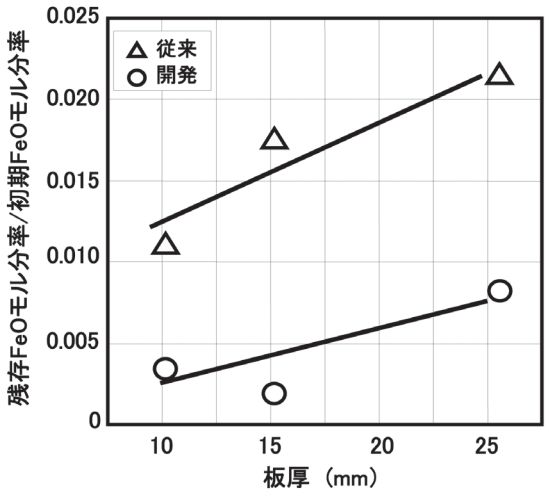

図7　板厚中央部の酸化物を低減する最適な溶接条件

様々な形状の鋼管について最も効果的に酸化物を排出できる電縫溶接条件について調査した結果、図7に示すように、何れの板厚においても酸化物を低減できる溶接条件を確立した[1)]。

これらの研究開発を実機へ適用して、最適条件での電縫溶接実験を行い、電縫溶接部の低温靭性を調査した。その結果、溶接部に生じる酸化物が容易に排出されるようになり、電縫溶接部の板厚中央部の酸化物は低減して（図8）、図9に示すように電縫溶接部の低温靭性は著しく向上した[7)]。シャルピー破面遷移温度が従来電縫鋼管では-37℃であったのに対し、開発技術を適用した鋼管では母材と同程度の極低温まで高い吸収エネルギーを示した。電縫溶接部の低温靭性を母材と同等とする電縫溶接技術の開発に成功した。

3 電縫溶接部の酸化物の全長検査技術

従来、電縫鋼管溶接部の品質保証は、超音波斜角探傷法と、シャルピー衝撃試験などの機械試験法により行われてきた。前者は全長検査が可能であるが、検査の対象はミリメートルオーダーの溶接不良や割れである。したがって、溶接部の靭性の保証は抜き取りの機械試験により行われてきた。電縫溶接部の靭性を全長にわたり保証できれば、電縫鋼管の信頼性は飛躍的に高まる。そこで、低温靭性に影響を及ぼす酸化物を、非破壊試験法により電縫鋼管の製造時に全長にわたり計

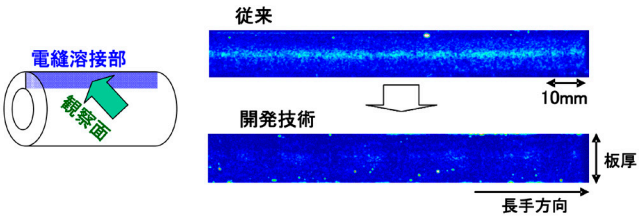

図8　精密超音波探傷法による溶接部酸化物の観察例

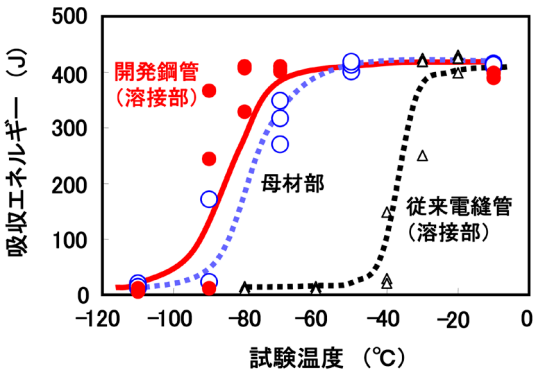

図9　電縫溶接部の低温靭性

測できる技術について研究開発を行った。図10に開発装置の全体構成を示す。微小な酸化物の分布を検出する方法として、点集束ビームタンデム超音波探傷法を開発した[7)]。点集束ビームはフェーズドアレイ技術と音響レンズを活用して実現し、送受信に使用する振動子群を切り替えて高速に全肉厚のスキャンを行うことで、移動する溶接部に対して全長で全厚の測定を可能にした。この開発により、非破壊で電縫溶接部を漏れなく検査して酸化物の分布を二次元的にマッピングすることが可能になった。図11に、溶接条件を様々に変化させて製造した電縫鋼管について本法による探傷を行ったのち、検査部位のシャルピー衝撃試験を行い、両者を対比した結果を示す[7)]。シャルピー衝撃試験の吸収エネルギー値はエコー高さと良い相関があり、本法により、エコー高さから低温靭性の吸収エネルギー値を評価できることを明らかにした。

本点集束ビーム法による周方向の感度許容範囲は1mm程度しかなく、製造中に数ミリメートル以上の揺動幅を持つシーム部を安定にオンラインで連続検査するためには、高精度なシーム追従技術を開発した[7,14)]。これらの研究開発により、点集束ビームタンデム超音波探傷法によるフェーズドアレイ超音波探傷技術を確立して、オンラインでの電縫溶接部品質の溶接部全断面全長におけるリアルタイム計測を可能にした。

4 開発鋼管の機能と性能

ラインパイプは敷設から実用まで、長期間にわたり安全にその機能を発揮することが求められる。そのため実管での変形・破壊挙動の特性調査が重要であり、こうしたデータが使用環境・操業条件に応じた最適な製品の採用と健全性確保を支えている。開発鋼管が低温環境でも脆性破壊を起こさないことを確認するために、電縫溶接部に人工切欠きを付与した実管を用いて低温水圧バースト試験を最も厳しい設計温度を想定した-45℃で行った[7,15)]。図12に試験結果を示す。図中の2本の線は従来から用いられているUOE鋼管をベースとした破壊限界内圧の予測式である。開発鋼管の破壊圧力は予測式に比べ十分に高く、また切欠き底から延性き裂が発生・貫通するリークモードを示すことから、UOE鋼管と同様に極低温での使用においても大規模な破壊は発生しないことが実証されている。

また、実管の電縫溶接部に初期ノッチを入れて、局所的に-130℃に冷却して脆性亀裂を強制的に発生・亀裂伝播させた結果、電縫溶接部から進展した脆性亀裂は約200mmで母

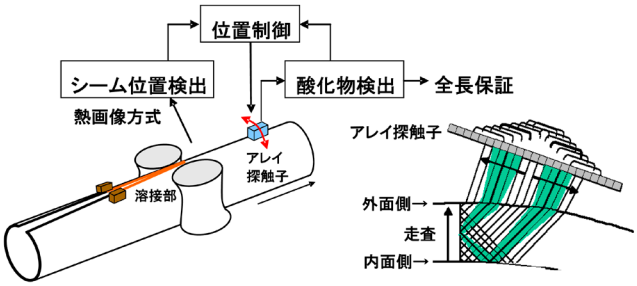

図10　電縫溶接部の非破壊検査装置の全体構成

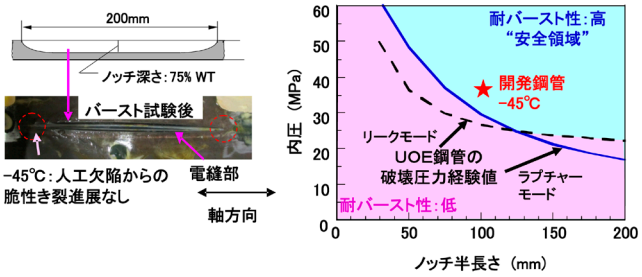

図12　実管低温水圧バースト試験結果

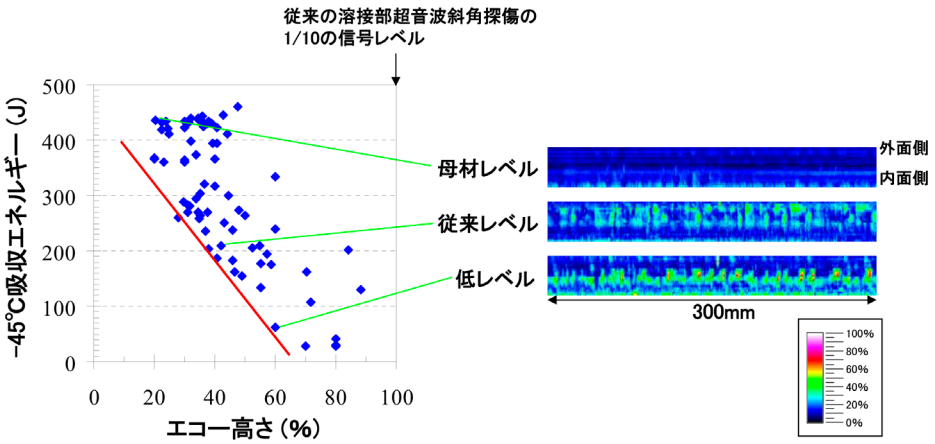

図11　電縫鋼管溶接品質の非破壊評価結果

材側にそれて延性亀裂に遷移して伝播停止した。以上の結果より、開発鋼管は溶接部の脆性亀裂伝播停止特性が高いことを実証した。

5 おわりに

極低温での電縫溶接部の靭性を保証できる信頼性の極めて高い電縫鋼管を目標に、電縫溶接技術と非破壊評価技術の研究開発を行った。その結果、電縫溶接部の低温靭性を母材と同等とする電縫溶接技術を確立して、低温靭性に影響を及ぼす電縫溶接部の酸化物を全長検査する品質保証技術を開発して実機化した。

開発鋼管を適用することにより、高い安全性の求められるガス・石油用のラインパイプが経済的かつ効率的に敷設することが可能となった。現在、アラスカなど極低温環境におけるパイプラインやリールバージ工法による北海海底パイプラインなどに市場が拡大している。また、本技術開発により、電縫溶接技術や超音波検査技術などの分野において技術革新がなされた。これらの技術により、極低温環境用だけでなく、高圧ガス用鋼管や高強度厚肉鋼管、耐腐食性鋼管などへの発展が期待できる。

参考文献

1) 岡部能知, 飯塚幸理, 佐藤昭夫, 伊木聡, 小出竜男：第62回大河内賞受賞業績報告書, (2016), 75.
2) 岡部能知, 剣持一仁, 坂田敬：鉄と鋼, 93 (2007) 5, 33.
3) T.Okabe, M.Aratani, Y.Yokoyama, S.Toyoda, H.Kimura, M.Egi and A.Kawanishi：Steel Res. Int., 10th ICTP, (2011), 662.
4) 岡部能知, 安田功一, 中田一博：溶接学会論文集, 32 (2014) 3, 156.
5) T.Okabe, S.Toyoda, S.Goto, Y.Kato, K.Yasuda and K.Nakata：Key Eng.Mat., 622 (2014), 525.
6) 横山泰康, 岡部能知, 豊田俊介, 木村秀途, 鈴木雅仁, 江木基明：CAMP-ISIJ, 23 (2010), 1084.
7) 岡部能知, 飯塚幸理, 伊木聡：JFE技報, 34 (2014), 77.
8) 岡部能知, 豊田俊介, 加藤康, 安田功一, 中田一博：溶接学会全国大会講演概要, 94 (2014), 110.
9) 岡部能知, 剣持一仁, 坂田敬, 川西昭：CAMP-ISIJ, 20 (2007), 316.
10) 岡部能知, 後藤聡太, 荒谷昌利, 豊田俊介, 木村秀途, 川西昭：CAMP-ISIJ, 25 (2012), 719.
11) Y.Matsui, Y.Iizuka, M.Suzuki, E.Urahata, T.Inoue, S.Kumazawa and M.Oka：Proc. of IPC, IPC2012-90213, (2012)
12) 飯塚幸理：CAMP-ISIJ, 22 (2009), 1052.
13) 飯塚幸理, 横山泰康, 岡部能知, 鈴木雅仁, 熊沢慎太郎, 井上智弘：CAMP-ISIJ, 24 (2011), 247.
14) 松井穣, 飯塚幸理, 浦畑瑛一, 鈴木雅仁, 岡賢：CAMP-ISIJ, 25 (2012), 347.
15) S.Igi, S.Toyoda, S.Yabumoto, T.Sadasue and K.Oi：Proc. of OMAE, OMAE2014-23755, (2014)

(2016年12月1日受付)