

溶接部性能に優れるラインパイプ用電縫鋼管 マイティーシーム®の開発

岡部能知^{*1)} 豊田俊介^{*1)} 松井 穰^{*2)}
伊木 聡^{*3)} 藪本 哲^{*4)}

1. はじめに

石油や天然ガスに代表されるエネルギー資源の採掘・運搬・利用の分野で鋼管製品が広く用いられている。このうち電縫鋼管は熱延コイルを高周波電流による発熱により溶接した鋼管で、優れた機械的特性、良好な寸法精度、高効率な製造プロセスなどの特長から、外径 660 mm、肉厚 25.4 mm までのラインパイプ、油井管に広く用いられている。近年、世界的なエネルギー需要の増大に伴い、油井やガス井の環境が苛酷化し、電縫鋼管に対しても、極寒冷地向けなどのこれまで以上に厳しい環境での信頼性が求められるようになってきている。しかしながら、これらの苛酷な環境下では、電縫溶接時に生じる微量の酸化物により溶接部の靱性が低下するなどが課題であった。

これまでに、1970年代以降主流となった高周波溶接技術、1980年代以降開発・適用された入熱制御・監視技術⁽¹⁾、シーム部のオンライン熱処理技術⁽²⁾等により電縫鋼管の性能は飛躍的に向上した。また、電縫鋼管溶接部の酸化を抑制する技術として、BOX 型のシールド技術、不活性ガスをブローする方向が開発されている。しかしながらこれらの技術では電縫溶接部において設計温度 -45℃ というような極低温靱性を確保するのは困難であった。

こうした課題を解決するために、まず溶接時に発生する酸化物の形態や分布を制御する溶接技術を開発した。さらに溶接部全長にわたり安定した品質を保証すべく、酸化物を連続的にリアルタイムで探傷する技術を開発した。この結果、こ

れらを組み合わせた溶接部の信頼性の高い電縫鋼管「マイティーシーム®」を開発することに成功した⁽³⁾⁽⁴⁾。実管を用いた評価試験により、開発鋼管はこれまで電縫鋼管が本格的に用いられていなかった、厳しい環境の極寒冷地や海底ラインパイプなどへの適用が可能であることを確認した。以下、開発した鋼管の特長を QC (Quality Control) 技術、QA (Quality Assurance) 技術、PE (Performance Evaluation) 技術の観点から紹介する。

2. 開発のコンセプト

(1) マイティーシーム®の QC 技術

電縫鋼管は、鋼板を連続的に円弧状にロール成形したのち、帯端部に高周波電流を通電することにより、帯端部を加熱・溶融させて端面同士を加圧・溶接して製造される。極寒冷地用途で必要とされる低温靱性を得るには、電縫溶接時に生成する酸化物を排出させ、電縫部に残さないことが重要である。開発ではまず、電縫溶接部の酸化物の生成機構を明らかにすることを目的に、溶接現象の直接観察による可視化を試みた。図 1 に高速度カメラにより電縫溶接部を撮像した結果を示す⁽⁵⁾。このように、電縫溶接部の加熱挙動と溶鋼の生成およびスパッタの発生現象について可視化し、その過程を詳細に観察した。次いでその観察結果を基に、電縫溶接の挙動を有限要素法による数値解析でモデル化した。図 2 に電縫溶接部の数値解析結果例として電縫溶接部の温度分布図を示

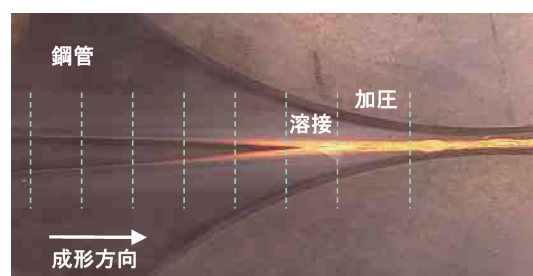


図 1 電縫溶接部の高速度カメラ映像⁽⁵⁾。

* JFE スチール株式会社 スチール研究所

1) 鋼管・鋳物研究部；主任研究員 2) 計測制御研究部；主任研究員 3) 接合・強度研究部；主任研究員

4) 東日本製鉄所 京浜商品技術部；主任部員

Development of Advanced High Frequency Electric Resistance Welded (HFWR) Linepipe MightySeam® with a High Quality Weld Seam Suitable for Extra-low-temperature Services; Takatoshi Okabe, Shunsuke Toyoda, Yutaka Matsui, Satoshi Igi, and Satoru Yabumoto (JFE Steel Corporation)

2013年10月31日受理[doi:10.2320/materia.53.104]

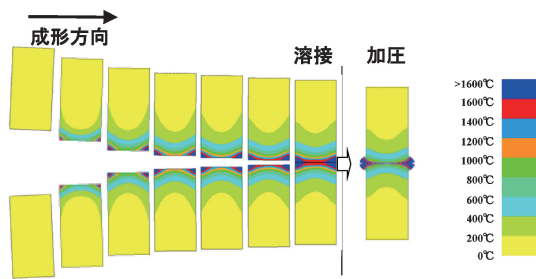


図2 電縫溶接部の温度分布計算例⁽⁶⁾。

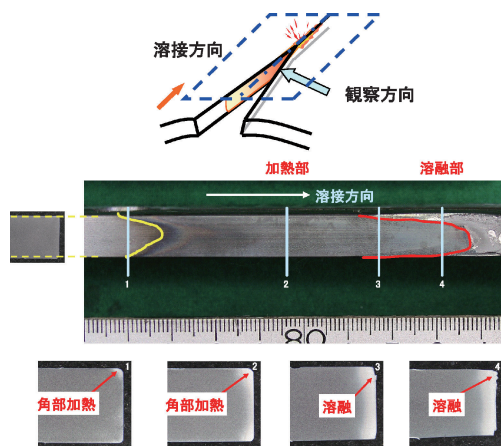


図3 電縫溶接部端面の加熱・熔融状況⁽⁷⁾。

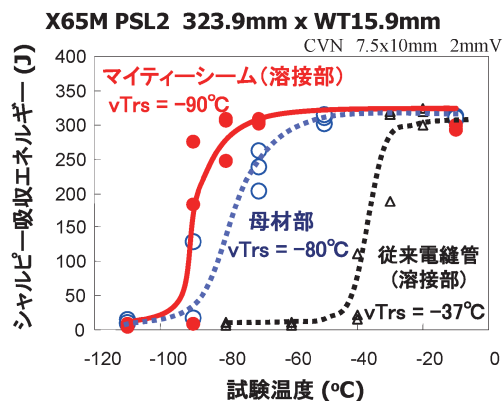


図4 電縫溶接部の低温靱性⁽⁸⁾。

す⁽⁶⁾。管の内部の加熱・熔融・溶接挙動を詳細に調査した結果、従来の電縫鋼管は肉厚の中心部の温度が最も低くなるとの知見を得た。このように電磁界解析と伝熱解析と構造解析を組み合わせることにより、電縫溶接部の加熱・熔融・溶接挙動を明らかにした。

これらの知見をもとに、電縫溶接条件を最適化し、電縫溶接時に発生する酸化物の形態や分布状態を制御した。即ち、溶接部を板厚方向に均一な温度で加熱して熔融するという最適技術を世界で初めて開発した。図3に、溶接中の加熱状態を調査した結果を示す⁽⁷⁾。従来の電縫鋼管は、端面の外側と内側が顕著に加熱しており、板厚方向に不均一に加熱されている。一方、マイティーシーム[®]では、板厚方向に均一に加熱・熔融されていた。この結果、溶接部に生じる酸化物が容易に排出されるようになり、電縫溶接部の酸化物が低減され、図4に示すように電縫部の低温靱性が大きく向上し

表1 マイティーシーム[®]の耐サワー特性⁽¹⁰⁾。

試験	耐 HIC 特性*1		耐 SSC 特性*2
	母材部	電縫部	電縫部
結果	ノークラック	ノークラック	ノークラック

406.4 mmφ, 15.9 mm

*1: NACE TM-0284, 溶液: A(100%硫化水素)

*2: 四点曲げ, NACE TM0177-96, 溶液: A(100%硫化水素), 応力: 90%実 YS

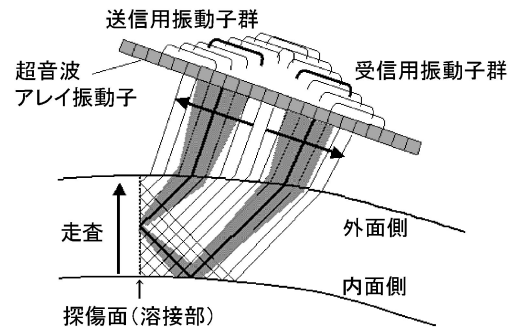


図5 点集束ビームタンデム探傷法⁽¹¹⁾。

た⁽⁸⁾⁽⁹⁾。シャルピー破面遷移温度が従来電縫鋼管では -37°C であったのに対し、マイティーシーム[®]技術を適用した鋼管では -90°C と極低温まで高い吸収エネルギーを示している。こうした電縫部の酸化物の低減は、耐サワー特性の向上にも寄与し(表1)、マイティーシーム[®]はサワー環境用途のラインパイプにも適用されている⁽¹⁰⁾。

(2) マイティーシーム[®]の QA 技術

さらに、電縫溶接部の機械的特性に影響を及ぼす微小酸化物量を非破壊・オンラインで全長計測する技術を新たに開発した。図5に、開発した溶接部の超音波探傷技術の原理を示す⁽¹¹⁾。フェーズドアレイ超音波探傷技術を発展させた点集束ビームタンデム探傷法技術により、従来比10倍以上の高感度で酸化物等を検出することができる。この結果、従来は検出限界以下であった微小酸化物からの微弱なエコーを感度良く検出し、酸化物の分布状況を全長に渡り検査することが可能となった。このように、低温靱性と対応関係のある電縫溶接部の酸化物量を、全長詳細に監視しているという安心は、顧客から高く評価されている。

3. 開発鋼管の諸特性

(1) マイティーシーム[®]の PE 技術とその特性

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。このため実管フルサイズでの変形・破壊挙動の特性データが大変重要であり、こうしたデータが使用環境・操作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バースト試験を行った。図6に結果を示す⁽⁹⁾。図中の2本の線は従来より用いられている UOE 鋼管をベースとした破壊限界内圧の Bat-

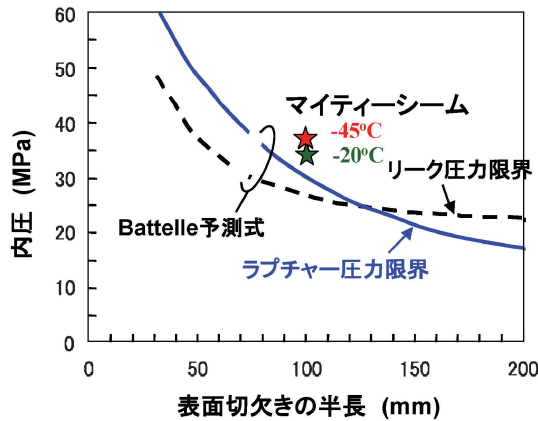
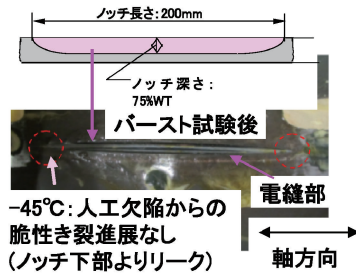


図6 実管低温バースト試験結果⁽⁹⁾。

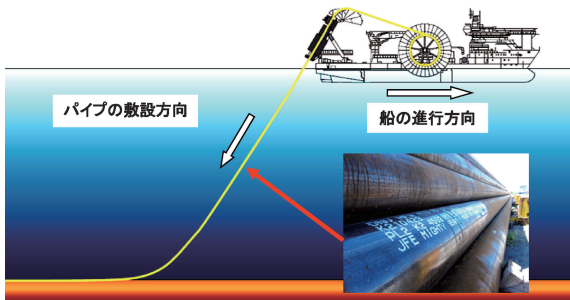


図7 リール工法による海底ラインパイプの敷設⁽¹³⁾。

telle 予測式⁽¹²⁾を示す。マイティースイーム[®]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 Leak before break モードを示すことから、UOE 鋼管と同様、低温での使用においても大規模な破壊を起こさないことを確認した。

(2) リール工法海底ラインパイプへの採用

北海およびノルウェー海で展開するプロジェクト向けのリール工法海底ラインパイプとして、マイティースイーム[®]が STATOIL 社より採用された。図7に示すように、リール工法とは鋼管を陸上で事前に溶接し、特殊な敷設船に巻き付け海底ラインパイプを敷設方法である⁽¹³⁾。なお、リール工法への適用に際しては、敷設時に加わる歪履歴を考慮した安全性評価データが重要となる。

4. 今後の展開

寒冷地やリール工法など厳格用途への適用可能な、溶接部性能に優れたラインパイプ用電縫鋼管マイティースイーム[®]を

表2 マイティースイーム[®]の適用例⁽⁸⁾。

用途	グレード	外径×肉厚(mm)
極低温パイプライン (-45°C)	X60	406.4×14.3 406.4×7.1
極低温用構造管 (-46°C)	X65	219.1×12.7
オフショアパイプライン (リール工法)	DNV415PD DNV360PD	273.1×15.9 219.1×12.7
オフショアパイプライン (サワー)	X65	406.4×15.9 323.9×15.9
オフショアパイプライン (サワー)	X65	273.1×12.7
オフショアパイプライン	X60	323.9×12.7

開発した。表2にマイティースイーム[®]の適用例を示す⁽⁸⁾。極低温パイプライン、海底パイプライン、耐サワーパイプラインなど様々な厳しい環境で適用されている。本報で述べた QC・QA・PE 技術を軸として、今後、マイティースイーム[®]のさらなる適用の拡大が期待される。

5. 特 許

国内特許3680788, 4544240, 4613777, 4682779, 4682780, 4687268, 4720479, 4720480, 4816015, 4910770, 5076984, 5292830 など65件。海外特許, 米国7779694, 8296932, 8328957, 欧州1931501, 韓国1004237, 1169237他。

文 献

- (1) 居城三郎, 榎本洋一, 高木郁夫, 小峰 勇, 三原 豊, 鈴木孝司: 日本鋼管技報, No. 113(1986), 19-27.
- (2) 下村隆良, 高村登志博, 居城三郎, 菅昌徹朗, 長浜 裕, 矢沢恒治: 日本鋼管技報, No. 116(1987), 25-32.
- (3) 荒川武和, 横山泰康, 飯塚幸理, 井上智弘: 配管技術, **53** (2011), 79-82.
- (4) 井上智弘, 鈴木雅仁, 岡部能知, 松井 稔: JFE 技報, **29** (2012), 17-21.
- (5) T. Okabe, K. Yasuda, T. Kodama, S. Goto, M. Aratani, S. Toyoda, Y. Kato, K. Iwazaki and K. Nakata: Proc. of 66th IIW., (2013), Doc. XII-2130-13.
- (6) T. Okabe, M. Aratani, Y. Yokoyama, S. Toyoda, H. Kimura, M. Egi and A. Kawanishi: Steel Res. Int., 10th ICTP2011, (2011), 662-666.
- (7) 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.
- (8) 正村克身, 藪本 哲, 井上智弘, 豊田俊介, 松井 稔: 配管技術研究協会誌, 秋季号(2012), 14-19.
- (9) S. Toyoda, S. Goto, T. Okabe, H. Kimura, S. Igi, Y. Matsui, S. Yabumoto, A. Sato, M. Suzuki and T. Inoue: Proc. of IPC (2012), IPC2012-90448.
- (10) S. Toyoda, S. Goto, T. Okabe, H. Kimura, S. Sato, S. Kumazawa, S. Yabumoto, A. Sato and T. Inoue: Proc. of OMAE (2013), OMAE2013-10412.
- (11) Y. Matsui, Y. Iizuka, M. Suzuki, E. Urahata, T. Inoue, S. Kumazawa and M. Oka: Proc. of IPC (2012), IPC2012-90213.
- (12) J. F. Kiefner, W. A. Maxey, R. J. Eiber and A. R. Duffy: ASTM STP, (1973) 536, 461-481.
- (13) JFE スチールニュースリリース, (2011), 09-27.