

# 溶接部品質に優れたラインパイプ用電縫鋼管 「マイティーシーム<sup>®</sup>」の開発

## Development of Advanced Electric Resistance Welding (ERW) Linepipe “Mighty Seam<sup>®</sup>” with High Quality Weld Seam Suitable for Extra-Low Temperature Services

井上 智弘	INOUE Tomohiro	JFE スチール	知多製造所	商品技術部商品技術室	主任部員 (課長)
鈴木 雅仁	SUZUKI Masahito	JFE スチール	東日本製鉄所 (京浜地区)	溶接管部溶接管工場長	
岡部 能知	OKABE Takatoshi	JFE スチール	スチール研究所	鋼管鑄物研究部	主任研究員 (課長)
松井 穰	MATSUI Yutaka	JFE スチール	スチール研究所	計測制御研究部	主任研究員 (副課長)

### 要旨

JFE スチールは、溶接シーム部の極低温での靱性保証を全長において可能とした電縫鋼管「マイティーシーム<sup>®</sup>」を開発した。「マイティーシーム<sup>®</sup>」はこれまで主にシームレス鋼管や UOE 鋼管を使用することが一般的であった、寒冷地など厳格用途における石油・ガス用のラインパイプに使用され、ラインパイプ敷設におけるコスト低減が期待できる。

### Abstract:

JFE Steel has developed an advanced electric resistance welding (ERW) linepipe “Mighty Seam<sup>®</sup>.” This new process controls the morphology and distribution of oxides generated during welding, and checks for flaws along an entire length of welds on a real-time basis. “Mighty Seam<sup>®</sup>” offers cost savings to extra low temperature services for which mainly seamless pipes or UOE pipes have been used until now.

## 1. まえがき

JFE スチールでは、溶接シーム部の性能が高い電縫鋼管「マイティーシーム<sup>®</sup>」を開発したので、本稿で紹介する。「マイティーシーム<sup>®</sup>」は、これまで主にシームレス鋼管や UOE 鋼管を使用することが一般的であった寒冷地など厳格用途における、石油・ガス用のラインパイプに使用される。

## 2. 電縫鋼管ラインパイプの品質課題

### 2.1 電縫鋼管ラインパイプの製造・検査、利点

電縫鋼管は熱延コイルを連続的に管状にロール成型し、コイルエッジ部に高周波電流を通電することで発生する抵抗熱を利用して、エッジを加熱・溶融のち突合せ溶接を行うものである。突合せ電縫溶接のシーム部（以下、シーム部）は、管内面と外面の溶接ビードをオンラインで全長研削された後、シーム熱処理による溶接組織の改質が施さ

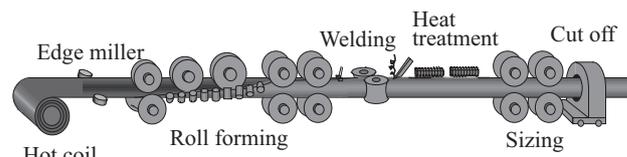


図 1 電縫鋼管の製造工程

Fig. 1 Manufacturing method of ERW tube

れる (図 1)。

電縫鋼管ラインパイプにおいては所定の長さに切断後、水圧試験、シーム部や管体への超音波試験、外観・寸法検査などの品質保証工程を通過する。

電縫鋼管は一般的に以下のような利点を有している。

- (1) 熱間圧延コイルを素材にするため、薄肉化が可能であり、かつ肉厚精度が良好で、鋼管の肌が美麗である。
- (2) 高い生産性を有しており、また高い寸法精度を有していることから、鋼管の継ぎ目部分における溶接負荷の低減など、敷設工程におけるコスト低減が期待できる。

## 2.2 電縫鋼管ラインパイプの 品質上の課題・用途上の制約

JFE スチールは従来から電縫鋼管のシーム部の性能向上に取り組んでおり、素材となる鋼板の化学成分や圧延条件の最適化、さらに電縫鋼管製造時の溶接条件やシーム熱処理条件の最適化により、高級ラインパイプ用電縫鋼管を製造してきた。しかし、アラスカなど極寒冷地の低温下では、電縫溶接時に発生する酸化物の影響で靱性が著しく低下するため、電縫鋼管の使用は困難とされてきた。

## 3. 「マイティーシーム<sup>®</sup>」製造技術の開発

シーム部全長にわたり安定した品質を保証するために、溶接時に発生する酸化物の形態や分布を制御する電縫溶接技術を開発した。合わせて、フェーズドアレイ超音波探傷の技術を適用し、連続的にシーム部全長をリアルタイムで探傷する技術を開発した。新しい探傷技術では、酸化物の形態や分布を検査することが可能となる。そしてこれらを組み合わせたシーム部の信頼性の高い電縫鋼管「マイティーシーム<sup>®</sup>」を開発した。

### 3.1 電縫シーム品質向上技術の開発

電縫鋼管ラインパイプにおいて電縫溶接部の低温靱性などの品質を確保するためには、溶接部の酸化物の低減と成分・組織の最適化が必要である。溶接部の酸化物の低減には、溶接突合せ形状の安定化、鋼帯の板厚や速度に応じた溶接入力 of 適正管理などが重要であり<sup>1~3)</sup>、靱性に優れた微細な組織を得るために、低炭素当量の成分系と<sup>4)</sup>、シーム部のオンライン熱処理<sup>5)</sup>の組み合わせ技術が適用されて

いる。

「マイティーシーム<sup>®</sup>」では、さらに電縫溶接部の加熱-溶融-溶接挙動を解明して最適化した。最初に、有限要素法による電縫溶接部の解析モデルを構築して、電縫溶接の挙動を明らかにした。図2に、解析モデルの概要を示す。給電部から溶接部までの区間について、管の断面方向に相当する多数の二次元モデルを作成した。給電部の解析モデルについて電磁界解析と伝熱解析を行い、給電部の温度分布を求めた。この温度分布を初期値として、微小距離移動した位置について同様の電磁界解析と伝熱解析を行う。この要領を溶接点まで繰り返して計算することにより、電縫溶接部の温度分布を明らかにした。溶接点の直前でこの解析を完了したのち、弾塑性構造解析を行った。溶接部の温度分布を保持したまま鋼帯を水平方向に移動させることにより、溶接部の応力ひずみ分布と変形形状を求めた。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-溶融-溶接挙動を解析することを可能にした<sup>6,7)</sup>。

図3に、このように求めた温度解析例を示す。外径=610 mm、肉厚=16 mm、溶接速度0.2 m/s、溶接部の加圧量=5 mmの条件にて解析を実施した。図3より、溶接点から200 mm手前より外面側と内面側の角部が顕著に加熱された。溶接から60 mm手前において、角部は融点以上に加熱されるのに対して、板厚の中央部は融点以下である。本解析条件のような板厚の厚い鋼管では、高周波電流の特徴である先端効果が強く現れるために、角部は電流が集中して顕著に加熱すると考えられる。さらに、溶接部での5 mmの加圧により、溶接加熱部が内面側と外面側に盛り上

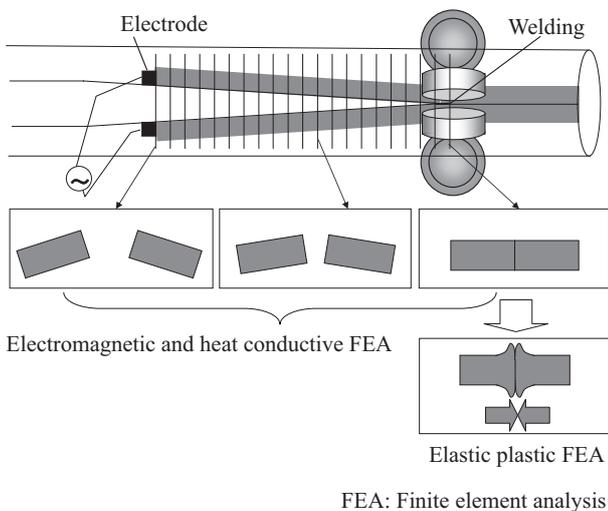


図2 高周波抵抗加熱部の数値計算モデル

Fig. 2 Overview of the finite element analysis system of the electric resistance welding (ERW)

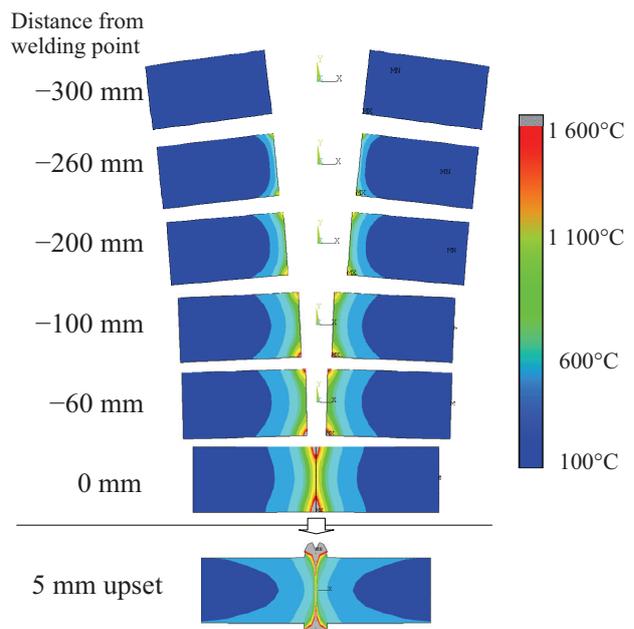


図3 温度分布の伝熱解析結果例

Fig. 3 Contour maps of the temperature distribution

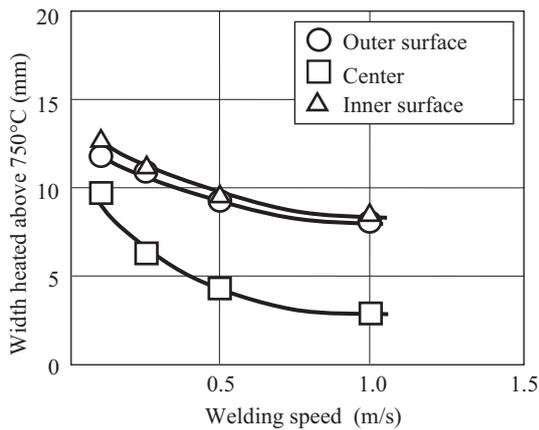


図4 溶接部の750°C以上の加熱幅に及ぼす溶接速度の影響

Fig. 4 Effect of the V-convergence angle on width heated above 750°C

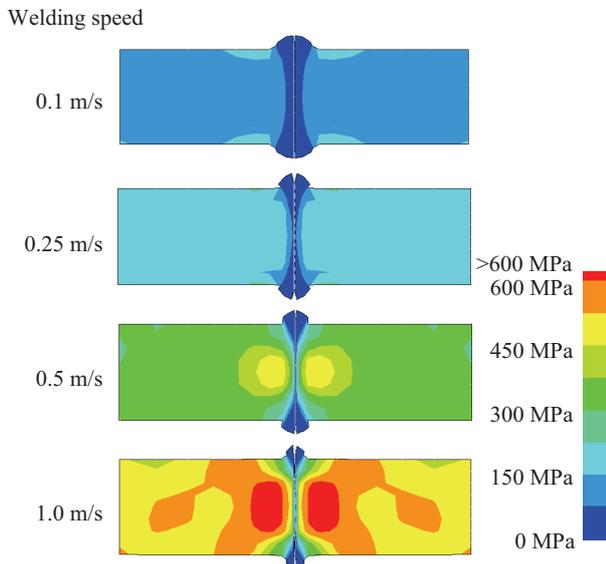


図5 溶接部の応力分布に及ぼす溶接速度の影響

Fig. 5 Effect of the welding speed on stress distribution

がる現象を解析することができた。

本解析モデルにより、電縫溶接現象に及ぼす成形条件や溶接条件の影響について調査した。一例として、**図4**に、溶接部の加圧直前での加熱幅に及ぼす溶接速度の影響を示す。溶接速度の増加にともない加熱幅は減少した。速度が大きくなるにともない、加熱時間が短くなるために、端面から管の周方向への熱伝導は小さくなり、加熱幅は減少したと考えられる。**図5**に、溶接部の応力分布に及ぼす溶接速度の影響を示す。溶接速度の増加にともない、端面近傍の応力は顕著に増加した。その結果、内面と外面の溶接部の盛り上がり形状は、速度の増加にともない、幅が広くて緩やかな形状から幅が狭くて急峻な形状へと変化した。このように、電縫溶接部の加熱融融挙動に及ぼす成形条件や溶接条件の影響について、有限要素解析モデルにより定量化した。

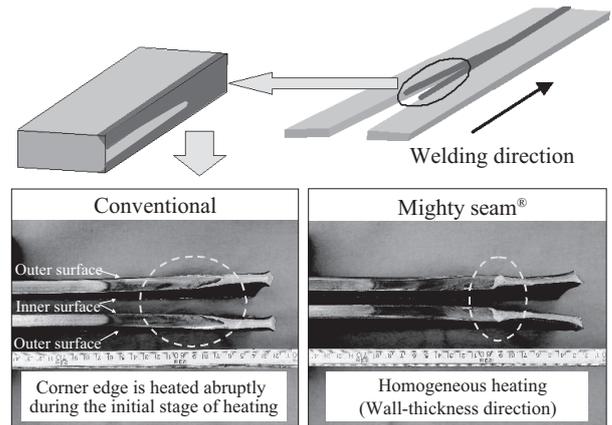


図6 溶接部の端面の加熱・融融状況

Fig. 6 Heating and melting of the edge of welding portion

マイティーシーム®鋼管では、これらの知見をもとに電縫溶接条件を最適化するとともに、電縫溶接時に発生する介在物の形態や分布状態を制御することを可能にした。

**図6**に、溶接中の板厚方向の加熱状態を調査した結果を示す<sup>8,9)</sup>。従来の電縫鋼管は、鋼帯の外側と内側が優先的に加熱して溶融しており、板厚方向に不均一に加熱していた。一方、「マイティーシーム®」は、板厚方向に均一に加熱して溶融した。このような均一な加熱技術を開発することにより、溶接部に生じる介在物を外側に排出しやすくして、溶接部の機械的特性の向上を達成した。

### 3.2 電縫シーム品質検査技術の開発

厳格な用途で使用される電縫鋼管では、上述の酸化物制御技術だけでなく溶接部検査技術の高度化も不可欠である。現在、電縫鋼管の溶接部検査には、超音波斜角探傷による非破壊検査と、シャルピー衝撃試験などの機械試験、扁平などの実用試験が適用されている。超音波斜角探傷は主に溶接不良や母材介在物に起因した割れが検出対象であり、低温靱性などの溶接品質は機械試験で検査が行われる。

マイティーシーム®鋼管では、3.1節で述べた酸化物抑制技術に加えて、溶接品質に影響を及ぼす微小酸化物の連続検査技術<sup>10,11)</sup>を開発・導入し、溶接品質の全長確保を図っている。本技術はフェーズドアレイ超音波技術を活用することにより、点集束ビームでの溶接部探傷を実現し、従来の超音波斜角探傷に比べて10倍以上の高感度化を達成したものである。

フェーズドアレイ超音波技術とは、微小な振動子を多数配列したアレイ探触子を用いる方法であり、各振動子の送受信タイミングにわずかな時間差を加えることで、超音波ビームの方向や集束位置を任意に変えながら探傷できることが特徴である。

**図7**に開発した溶接部超音波探傷技術の原理を示す。適宜選択された振動子群から、超音波ビームを溶接部で集束

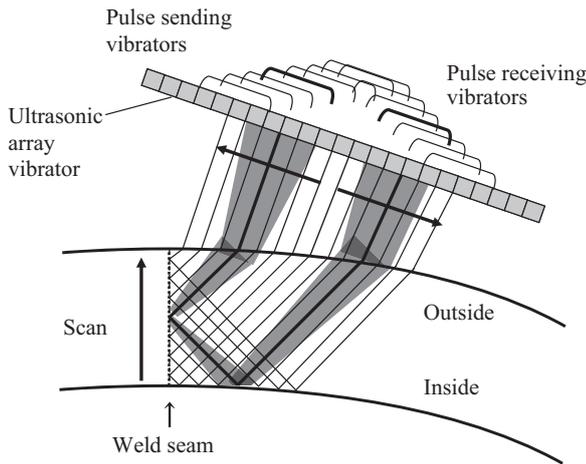


図7 高感度電縫管溶接部検査技術<sup>12)</sup>

Fig. 7 High sensitivity ultrasonic inspection technology for electric resistance welding (ERW) weld seam

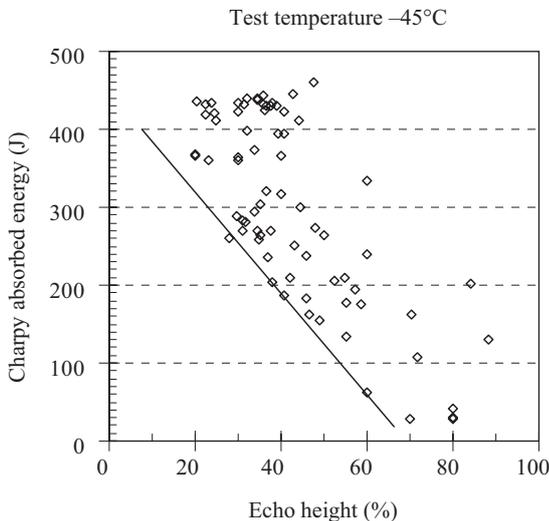


図8 高感度探傷による低温靱性評価例<sup>12)</sup>

Fig. 8 Example of high sensitivity ultrasonic inspection for low temperature charpy toughness at electric resistance welding (ERW) seam

するように送信し、溶接部での正反射方向に位置する別の振動子群で受信を行うようにする。ここで送受振動子群を適切に切り替えていくことで、溶接部の内面から外面までを点集束ビームで走査する。これにより、従来の超音波斜角探傷で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、溶接部L断面の酸化物分布状況を全長マッピングできるようになった。

図8は、さまざまに溶接条件を変化させて造管した試験材を用意し、本技術で溶接部のエコー分布を測定した後、シャルピー衝撃試験を行って両者を対比した結果である。微小酸化物を検出可能な高感度化の結果、低温靱性に相関のある超音波測定値を得ることができ、従来、抜き取り検査の対象だった機械試験値の全長非破壊評価を実現した。

表1 北米向けマイティーシーム®<sup>12)</sup>

Table 1 Mighty Seam® production for North America

Grade	CSA Z245.1, Gr.414, Cat.II, M45C (Equivalent to API5L, X60M)
Size	OD406.4 mm × WT14.3 mm

CSA: The Canadian Standards Association

API: The American Petroleum Institute

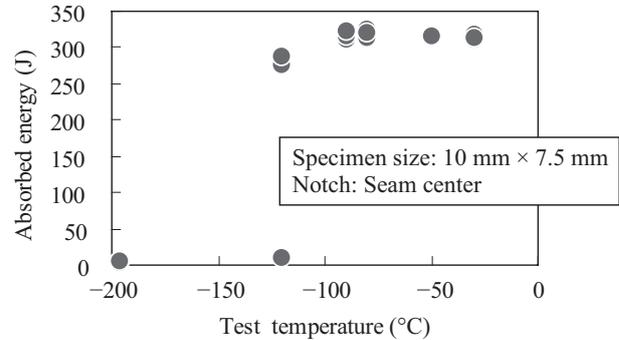


図9 北米向けマイティーシーム®鋼管の溶接部シャルピーフルカーブの例

Fig. 9 Example of ERW weld charpy transition curve at Mighty Seam® production for North America

#### 4. 製造結果

JFE スチール東日本製鉄所（京浜地区）の24インチ（609.6 mm）大径電縫管工場に「マイティーシーム®」製造技術を導入し、北米向け電縫鋼管ラインパイプを製造した。表1に北米向け「マイティーシーム®」のスペック、図9に電縫シーム部のシャルピー試験フルカーブ結果を示す。-45°Cのスペック保証に対し、遷移温度は-100°C以下を示し、期待どおり良好な低温靱性を示して出荷された。

#### 5. 「マイティーシーム®」の製品情報

当社東日本製鉄所（京浜地区）24インチ大径電縫管工場にオンラインフェーズドアレイ超音波探傷装置を導入し、溶接部全長をリアルタイムで探傷できる体制を構築した。なお、「マイティーシーム®」は、通常の電縫鋼管ラインパイプで行われる、水圧試験、溶接部全長の超音波探傷試験（斜角探傷）、外観・寸法検査に加え、フルボディ超音波探傷試験による管全面のラミネーション検査や要求に応じて溶接部全長の超音波探傷試験（タンデム探傷）などの検査も実施する。これらは、最新の海底ラインパイプ規格であるDNV Offshore Standard OS-F101 2010（DNV: Det Norske Veritas）にも対応した品質保証機器となっている。

表2に「マイティーシーム®」の製造可能範囲を示す。外径219.1 mmから610 mm、管厚4.8 mmから16.3 mmの製造が可能で、外径660 mm、管厚20.6 mmまで製造可能範囲拡大を計画している。「マイティーシーム®」の商品化に

表2 マイティーシーム®製造可能範囲(2011年3月現在)<sup>12)</sup>

Table 2 Mighty Seam® Available size (As of March, 2011)

Manufacturing plant	24 inches (609.6 mm) Electric Resistance Welding (ERW) Pipe Mill, East Japan Works (Keihin), JFE Steel
Outside diameter	219.1 mm–610 mm
Wall thickness	4.8 mm–16.3 mm
Grade (API 5L)	Max. X80M (L555M) PSL2 Offshore, Sour (Max. X65)

API: The American Petroleum Institute

より、ラインパイプ用鋼管の商品拡充が図れ、多様なニーズに応えることが可能となる。

## 6. まとめ

「マイティーシーム®」は、JFE スチール東日本製鉄所（京浜地区）において、すでに北米および東南アジア向けに出荷している。「マイティーシーム®」の開発により、電縫鋼管の適用をさらに拡大し、今まで以上に広いお客様からの電縫鋼管のニーズに貢献できる。電縫鋼管は高い生産性や良好な寸法精度を有していることから、鋼管の円周溶接における作業負荷の低減など、ラインパイプ敷設におけるコスト低減が期待できる。

### 参考文献

- 1) 神崎文暁. 第50・51回西山記念講座. 日本鉄鋼協会. 1978, p.179.
- 2) 桐本武志. 第171・172回西山記念講座. 日本鉄鋼協会. 1999, p.1.
- 3) 西田保夫. 第201・202回西山記念講座. 日本鉄鋼協会. 2010, p.97.
- 4) 小出竜男, 近藤廣章, 板谷進. JFE 技報. 2005, no.9, p.25.

- 5) 中田博士, 上力, 松尾信行. JFE 技報. 2007, no.17, p.37.
- 6) 岡部能知, 剣持一仁, 坂田敬. 鉄と鋼. 2007, vol.93, no.5, p.33.
- 7) 岡部能知, 横山泰康, 豊田俊介, 木村秀途, 川西昭. CAMP-ISIJ. 2010, vol.23, p.1083.
- 8) 横山泰康, 岡部能知, 豊田俊介, 飯塚幸理, 松岡才二, 鈴木雅仁, 稲垣公男, 井上智弘, 村上亮平. CAMP-ISIJ. 2010, vol.23, p.252.
- 9) 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. 2010, vol.23, p.1084.
- 10) 飯塚幸理. CAMP-ISIJ. 2011, vol.22, p.1052.
- 11) 飯塚幸理, 横山泰康, 岡部能知, 鈴木雅仁, 熊沢忠信, 井上智弘. CAMP-ISIJ. 2011, vol.24, p.247.
- 12) 荒川武和, 横山泰康, 飯塚幸理, 井上智弘. 配管技術. 2011, 6月号, p.79.



井上 智弘



鈴木 雅仁



岡部 能知



松井 穰