

ラインパイプ用電縫鋼管の溶接部の高信頼性技術

High Reliability Technology of the Weld Zone of the High-Frequency Electric Resistance Welding Line Pipes

岡部 能知 OKABE Takatoshi JFE スチール スチール研究所 鋼管・鋳物研究部 主任研究員(課長)
飯塚 幸理 IIZUKA Yukinori JFE スチール スチール研究所 計測制御研究部長・博士(工学)
伊木 聡 IGI Satoshi JFE スチール スチール研究所 接合・強度研究部 主任研究員(部長)・博士(工学)

要旨

エネルギー分野や高級ラインパイプ用途などに高い信頼性を有する電縫鋼管が求められている。電縫溶接技術と品質保証技術および電縫鋼管の品質評価技術の開発により、電縫溶接部の機械的特性と信頼性を向上させた。最初に、電縫溶接現象を高速カメラにより直接観察して可視化した。電縫溶接部の数値解析モデルを構築して、電縫溶接条件の最適化技術と溶接部の均一加熱技術を開発した。開発した鋼管のシャルピー破面遷移温度は -90°C であり、極低温まで高い吸収エネルギー値を示した。次に、点集束ビームタンデム超音波探傷法により溶接部の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。従来に比べて 10 倍以上の高感度で、溶接部の韌性に影響を及ぼす酸化物の分布状態を検出できるようにして、溶接部全長にわたり安定した品質を保証することに成功した。実管を用いた評価試験により、 -45°C の低温環境でも脆性破壊を起こさないことを確認した。

Abstract:

High-frequency electric resistance welding (HFW) steel pipe is used in high-grade pipelines and energy field. To address the significant need for weld seam reliability, we have developed welding technology, high sensitivity ultrasonic inspection technology, and quality assessment technology for HFW pipe. HFW phenomena were visualised dynamically using a high-speed video camera. Furthermore, an HFW numerical analysis model was constructed to develop optimization technology of HFW conditions and the homogeneous heating technology of the weld zone. The Charpy fracture transition temperature of the weld metal of the developed steel pipe was -90°C showing the high absorbed energy value at cryogenic temperature. Furthermore, real-time continuous detection technology of the oxide of the weld zone was developed by a point converging tandem beam ultrasonic inspection method. This technology achieved high sensitivity 10 times or more than that of the conventional method. It was possible to detect the oxide which decreases the toughness of weld metal. It was successfully achieved to guarantee the stabilized quality covering full length in the weld zone. By the evaluation test using a full-body pipe, it became clear that the developed steel pipe does not cause the brittle fracture at the low temperature environment of -45°C .

1. はじめに

電縫鋼管は、形状精度が良好で表面の肌が美麗であるなどのさまざまな優れた特性を有する。電縫鋼管の素材や製造プロセス、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、エネルギー分野や機械構造用および一般配管用などの幅広い用途に使用されている。近年、世界的なエネルギー需要の増大に伴い、極寒冷地などの厳しい環境の油井やガス井で使用できる電縫鋼管が求められている。これらの環境下では電縫溶接部の韌性が不足するという課題があった¹⁾。

本研究では、溶接部の韌性を改善するために、電縫溶接現象を直接観察するとともに数値解析法を構築して、電縫

溶接の挙動を明らかにした²⁻⁹⁾。これらの知見をもとに、電縫溶接部の機械的特性に影響を与える酸化物の形態と酸化物が溶接部に残存する機構を明らかにした。溶接部を板厚方向に均一な温度で加熱して溶融させる技術を開発して、溶接時に生じる酸化物を排出しやすくした。溶接部の衝撃韌性をシャルピー破面遷移温度で -90°C の極低温とすることに成功した^{10,11)}。

溶接部の韌性を全長にわたり保証するために、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。従来がない超音波探傷設備を開発して製造中のオンライン化を図り、全長にわたる溶接部の品質検査を実現した¹²⁻¹⁵⁾。

さらに、実管を用いた評価試験により、開発鋼管は低温環境でも優れた韌性を確保することを確認した。この結果、極低温の環境や海底パイプラインなどへの電縫鋼管の採用を実現した。

本報では、開発鋼管を実現させた要素技術である電縫溶接技術と非破壊評価技術および電縫鋼管の品質評価技術についての概要を述べる。

2. 電縫溶接技術の開発

2.1 電縫溶接現象の可視化技術

電縫鋼管は、熱間圧延鋼板を円弧状にロール成形して、その両端部同士を高周波抵抗溶接法により溶接して製造される(図1)。

最初に、電縫溶接の加熱・溶接挙動を可視化して解明することを目的として、鋼板を電縫溶接実験装置により円弧状に成形して高周波誘導抵抗溶接法による溶接を行ない、溶接部を観察した。写真1に、電縫溶接部を真上から高速カメラにて撮像した画像を示す。V収束点(V)はスクイズロールの中心から約42mm上流に存在しており、端面は完全に溶融した。溶接点(W)の出側にて溶鋼はスクイズロールにより加圧されて、管の上部に盛り上がり溶融池が形成された。スクイズロールの中心から約15mm上流にて溶鋼は凝固した。

高周波抵抗溶接法は溶融接合されており、溶融金属は加

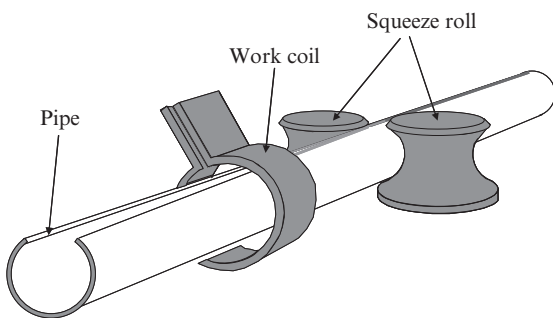


図1 電縫鋼管の製造方法

Fig. 1 Production process of high-frequency electric resistance welding (HFRW) steel pipe

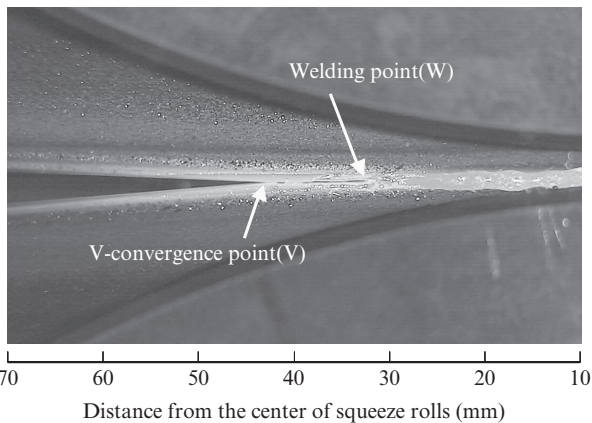


写真1 高速カメラによる電縫溶接部の撮像結果

Photo 1 Appearance of welding as captured by high-speed camera

圧されつつ凝固することを可視化して明らかにした。本知見をもとに、電縫溶接部のVまでの加熱現象とWからの溶融金属の加圧現象についての数値解析技術を開発した。

2.2 電縫溶接現象の数値解析技術

数値解析法を用いて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。高周波抵抗溶接法は高周波誘導抵抗溶接法と高周波接触抵抗溶接法に大別される¹⁰⁾。両者の溶接法についてそれぞれ数値解析モデルを作成して電縫溶接現象を調査した。

2.2.1 高周波誘導溶接法の数値解析技術

電縫溶接部の温度分布を明らかにすることを目的として、数値解析モデルを開発した。図2に、高周波誘導溶接法による電縫溶接部の数値解析モデルの概要を示す。電磁界解析により管の渦電流密度分布を計算して、伝熱解析により温度分布を求める有限要素解析手法を用いて、電縫鋼管の温度分布を求めた。

溶接中の磁場分布は静止状態の分布と同じと考えて、周

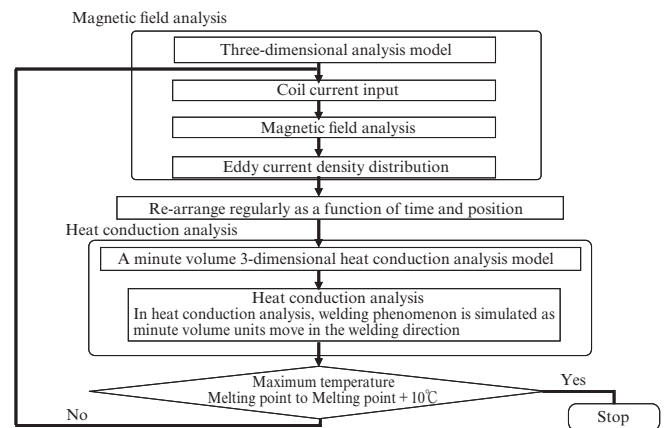


図2 電磁伝熱有限要素解析の概要

Fig. 2 Analysis flow of electro magnetic and heat conduction finite element analysis (FEA)

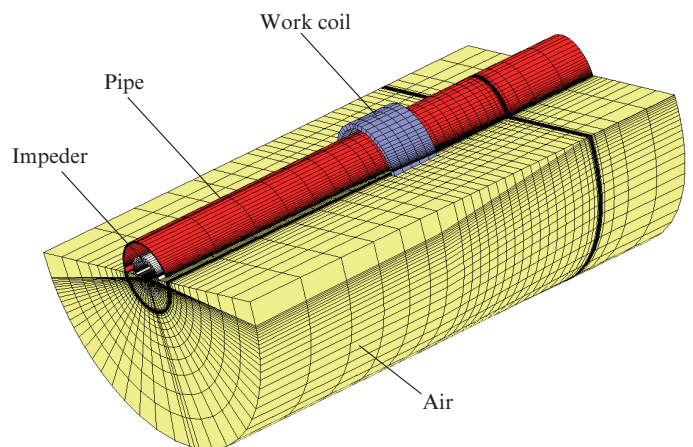


図3 電磁界解析モデルのメッシュ形状

Fig. 3 Meshes of electro magnetic analysis model

波数応答解析法により静止状態の渦電流密度分布を求めた。図3に電磁界解析モデルの全体像を示す。三次元解析モデルであり、管周方向に対称な1/2モデルである。図3はコイルと管部分のみを全周表示している。

図4に、電磁界解析例として、周波数300 kHzで溶接速度100 m/minにおける渦電流密度分布図を示す。電流密度はコイル直下と端部に集中しており、コイル直下では管周方向全体に約 10^7 A/m²程度の渦電流が流れていると推定される。コイルの入側から端面に渦電流は集中しており、コイル出側の端面は約 10^8 A/m²程度である。コイル出側から溶接点にかけて端面の電流密度は増加した。電流密度は溶接点で最も高くなり、溶接点を越えると急速に電流密度は減少して、溶接点より0.2 mm出側では 10^7 A/m²以下になった。図4の電磁界解析結果をもとに伝熱解析を行ない、端面の温度を解析した結果を図5に示す。端面はコイル中央部より加熱され始め、コイル出側から溶接点入側にかけて直線的に温度上昇して、溶接点直前から溶接点にかけてさらに急激に温度上昇したのち徐々に低下するという電縫溶接の加熱挙動が明らかになった。

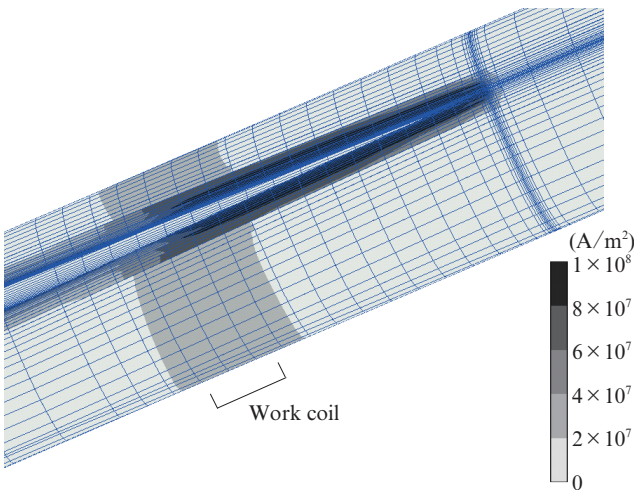


図4 渦電流密度の解析結果例

Fig. 4 Contour map of eddy current density

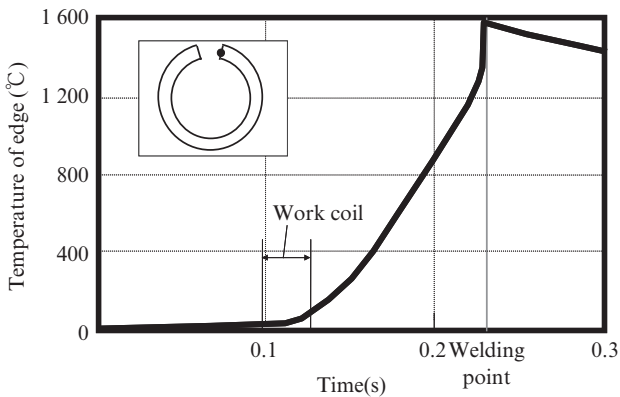


図5 端面の温度と時間の関係

Fig. 5 Relationship of the temperature of edge and time

2.2.2 高周波抵抗溶接法の数値解析技術

図6に、高周波抵抗溶接法による電縫溶接部の数値解析モデルの概要を示す。本法の数値解析には、二次元モデルを組み合わせる解析手法を用いた。給電部から加圧されるまでの区間について、管を輪切りにした多数の二次元モデルを作成して電磁界解析と伝熱解析を繰り返すことにより、溶接点までの各位置における温度分布を求めた。次に、溶接点の温度分布を保持したまま、鋼板を図6に示すように水平方向に移動させることにより、変形挙動を解析した。解析には、過渡応答解析法による弾塑性構造解析法を用いた。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た有限要素解析モデルを開発して、電縫溶接部の変形挙動を明らかにした。鋼板の比透磁率、比熱、電気抵抗率、熱伝導度、エンタルピー、強度とヤング率についての温度依存性を考慮した計算を行なった。

本解析モデルを用いて、電縫溶接現象に及ぼす成形条件や溶接条件の影響を調査した。一例として、溶接部の加圧後のひずみ分布と応力分布に及ぼす溶接速度の影響をそれぞれ図7、8に示す。図7より、内面と外面の溶接部の盛り上がり形状は、溶接速度の増加に伴い、幅が広く緩やかな形状から幅が狭く急峻な形状へと変化した。0.1 m/sでは、ひずみは管周方向に広く分布しており、突き合せ面のひずみは最大1.2であった。溶接速度が増加するに伴い、ひずみは管周方向に狭く局所的な分布へと変化するとともに、突き合せ面のひずみは最大1.8に増加した。図8より、溶接速度が遅い場合は端面近傍の応力は低く、速度の増加に伴い端面近傍の応力は顕著に増加した。溶接速度が遅い場合、加熱幅は広く、溶接部全体が高温に加熱される。その結果、溶接部の変形抵抗は低くなり、溶接部全体が低い応力で加圧されて、突き合せ面のひずみは低下したと推定する。溶接速度が増加するに伴い、加熱幅は減少して溶融量は減少し、突き合せ面近傍の変形抵抗が増加するために、突き合せ面には局所的に大きなひずみが生じたと推定する。さらに、

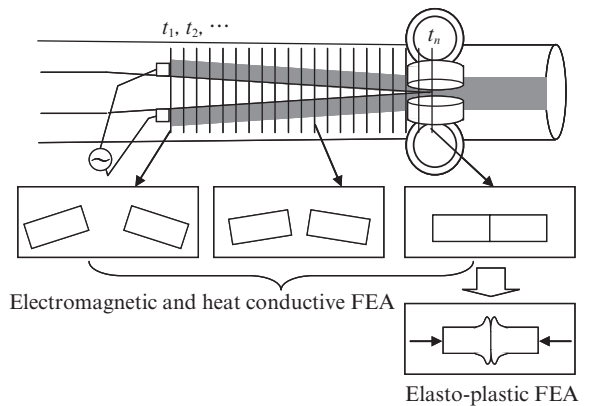


図6 高周波抵抗溶接法の数値解析の概要

Fig. 6 Overview of finite element analysis (FEA) system for high-frequency electric resistance welding (HFW)

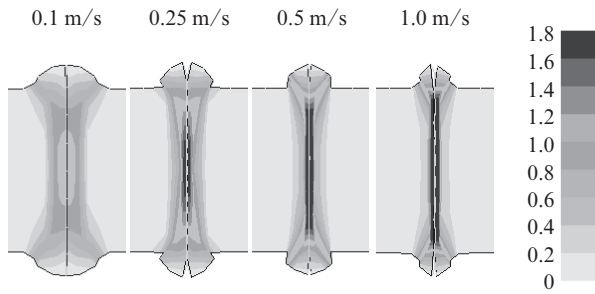


図7 溶接部のひずみ分布に及ぼす溶接速度の影響
Fig. 7 Effect of welding speed on strain distribution

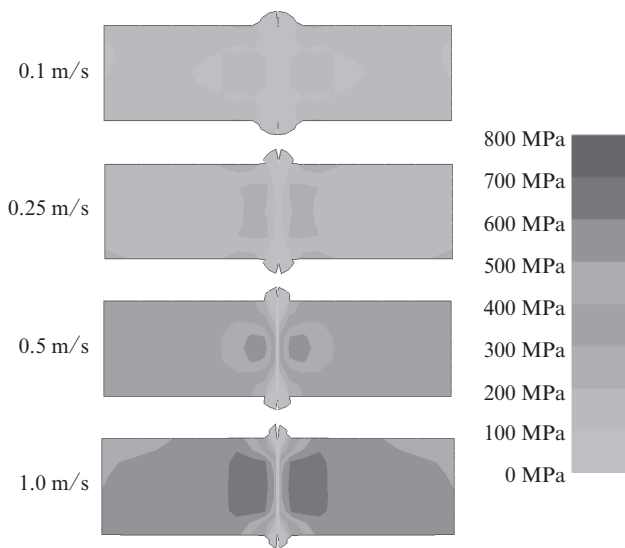


図8 溶接部の応力分布に及ぼす溶接速度の影響
Fig. 8 Effect of welding speed on stress distribution

溶接速度の増加に伴い溶接部のひずみ速度は増加する。これらの結果、端面に存在する溶鋼と溶鋼中の酸化物は余盛部へ排出されやすくなると推定する。溶接部に存在する酸化物の排出を促進させる観点から、溶接速度の増加は有効であると推定された。

2.2.3 電縫溶接部の溶鋼と酸化物の挙動

電縫溶接の加圧時の溶鋼と酸化物の挙動を明らかにするために数値解析モデルを開発した。図6の要領で求めた溶接部の温度分布を初期値として二次元の解析モデルにより伝熱解析と流体解析を組合せた解析を行なった。初期条件として、端面の表面に100 μm厚みの酸化物が均一に存在すると仮定した際の加圧過程での解析結果例を図9に示す。溶鋼は加圧に伴い上部へ移動して、端面の酸化物も加圧直後から接合面を上部へ移動した。0.06 s経過後には大部分の酸化物は余盛部へ移動して、時間の増加に伴い中を攪拌しながら上部へ移動した。初期の酸化物量を1とした際の余盛部に存在する酸化物量は約0.98であった。電縫溶接時の加圧により、端部に存在する酸化物の大部分は余盛部へ排出されることが明らかになった。さらに、本解析法を用いて

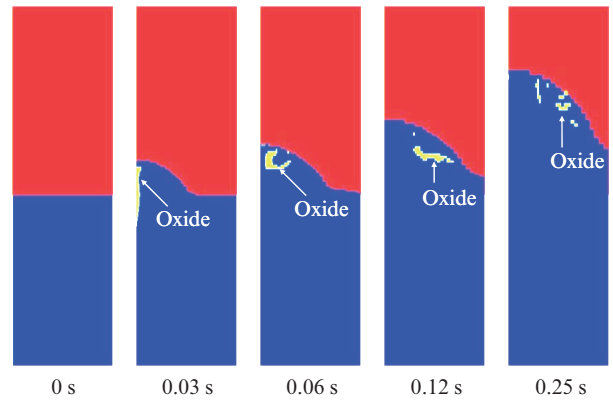


図9 電縫溶接部の加圧過程での酸化物の分布図
Fig. 9 Oxide distribution during pressurisation from welding rolls

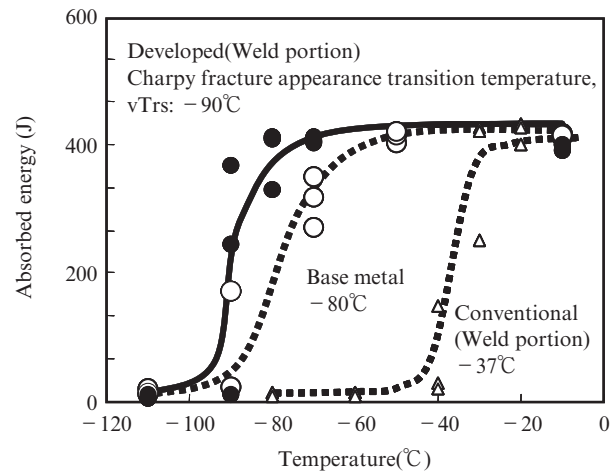


図10 電縫溶接部の低温靱性
Fig. 10 Low temperature Charpy toughness of high-frequency electric resistance welding (HFW) seam

電縫溶接部の酸化物量と温度分布の関係について調査した結果、端面の温度分布を均一にすることにより、酸化物は顕著に排出されやすくなるとの知見を得た。

2.3 電縫溶接技術の開発

電縫溶接現象の直接観察と数値解析による知見をもとに、電縫溶接条件を最適化するとともに、電縫溶接部を均一に加熱する技術を開発した。溶接部に生じる酸化物を余盛部へ排出しやすくして、溶接部の機械的特性の向上を達成した。図10に開発した電縫溶接部の衝撃靱性を示す。シャルピー破面遷移温度が従来の電縫鋼管では-37°Cであったのに対し、開発技術を適用した鋼管では-90°Cの値を得た。

3. 電縫溶接部の品質保証技術の開発

3.1 品質保証システムの概要

電縫鋼管溶接部の品質保証は、従来、超音波斜角探傷と、

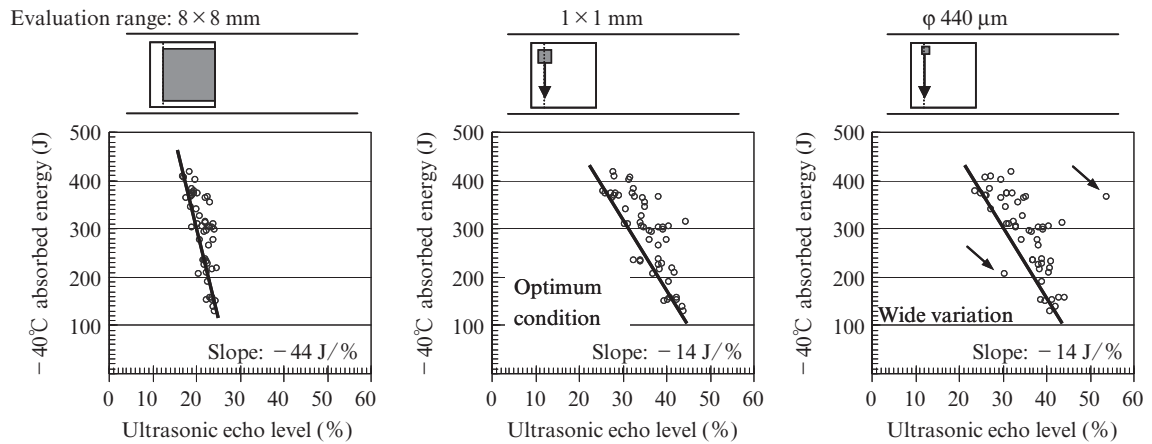


図 12 酸化物の品質保証に最適な超音波測定条件

Fig. 12 Optimum high sensitivity ultrasonic inspection condition for quality assurance of high-frequency electric resistance welding (HFW)

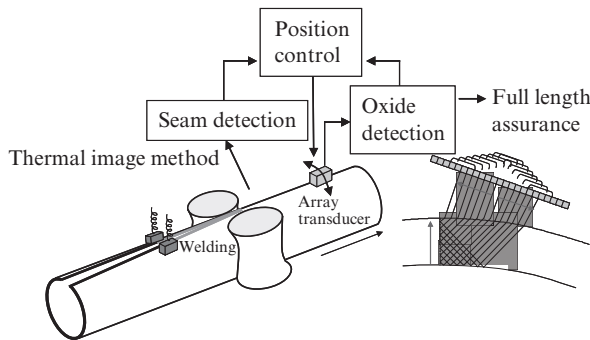


図 11 電縫鋼管の品質保証システムの全体構成

Fig. 11 Outline of quality assurance system of high-frequency electric resistance welding (HFW) steel pipe

シャルピー衝撃試験などの機械試験とで行なわれてきた。前者は全長検査が可能であるが、検査対象はミリオーダーの溶接不良や割れなどであり、微小な酸化物が影響を及ぼす低温靱性の評価については機械試験法を用いていた。

そこで、溶接部の品質を全長にわたり保証するために、低温靱性に影響を及ぼす微小な酸化物を非破壊かつオンラインで全長検査計測する技術を新たに開発した。図 11 に検査システムの全体構成を示す。本検査システムは、微小酸化物を検出するためのフェーズドアレイ超音波探傷装置と、溶接直後オンライン探傷するための設備であるシーム検出・追従装置と水冷装置などからなる。これらの装置は、(1) 検出対象についての基礎研究、(2) フェーズドアレイ超音波探傷による検出技術の開発、(3) オンライン適用システム化開発を経て実現した。以下にその詳細を述べる。

3.2 電縫溶接部の酸化物の検出技術の基礎研究

酸化物の検出により溶接品質を保証するためには、低温靱性に影響を与える時の酸化物の状態を検出しなければならない。そこで、溶接部を切り出して点集束超音波探傷装置を用いた精密 C スキャンにより調査を行なった。その結果、

電縫溶接部には数マイクロメートルの微小酸化物が散在している形態があり、その密度の高い部分が低温靱性に影響していることを発見した。

さらに、精密 C スキャンの評価範囲をさまざまに変化させてシャルピー衝撃試験の吸収エネルギーとの比較を行なった。図 12 に超音波評価範囲を変化させた際のエコー高さと吸収エネルギー値の関係を示す。超音波を 1 mm^2 程度に集束させることにより、最も感度よく吸収エネルギーを評価できることを見出した。すなわち、超音波探傷法を用いて低温靱性に影響を及ぼす微小な酸化物の分布状態を評価することに成功した。

3.3 フェーズドアレイ超音波探傷による検出技術

溶接部を切り出すことなく鋼管のままで上記の集束条件の検査を行なうため、フェーズドアレイ技術を活用した。複数の振動子から位相を少しずつずらしながら送信することで、 1 mm^2 に集束した点集束ビームを実現した。探傷面が垂直であることを考慮し、図 13 に示すように、正反射方向で受信を行なうことで従来の超音波斜角探傷法に比較して 10 倍以上に感度を向上させた。さらに、送信位置と受信位

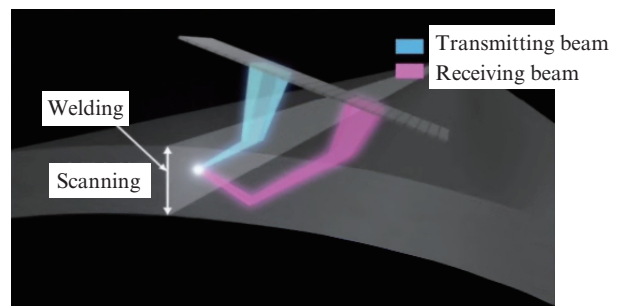


図 13 高感度電縫鋼管溶接部検査技術

Fig. 13 High sensitivity ultrasonic inspection technology for high-frequency electric resistance welding (HFW) weld seam

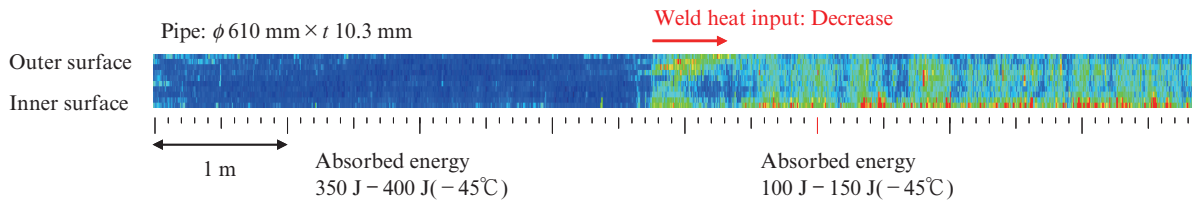


図 14 オンラインでの溶接品質評価例

Fig. 14 Quality assessment examination in the high-frequency electric resistance welding (HFW) actual mill

置を適切に制御することによって溶接部の内面から外面までを走査するようにした。

3.4 オンライン適用システム化と全長評価例

製造中の電縫鋼管を連続検査するための装置構成として、製造中に位置変動する溶接シームに探触子を追従させるべく、高精度シーム追従技術を開発した。熱画像を用いたシーム検出装置により、入熱分布を基にシーム位置を計測し、追従制御装置によりアレイ探触子の位置をシームに追従させることにより安定したオンライン検査を達成した。図 14 は、本技術により、電縫鋼管の造管中に溶接の入熱量を最適値よりも低くして人為的に溶接部の機械的特性を低下させた状態を検出した事例である。微小な酸化物の密度分布を確実に検出できるようになった。

以上より、非破壊で電縫鋼管溶接部の肉厚方向および管軸方向の断面を漏れなく検査して、酸化物の分布をリアルタイムに検出・表示することが可能となり、全長にわたる溶接品質保証が実現された。

4. 実管評価試験例

ラインパイプは敷設から実供用まで、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。開発した鋼管の低温環境での破壊挙動を確認するために、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 -20°C と -45°C で行なった。写真 2、図 15 に結果例を示す。図 15 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予測式である¹⁷⁾。開発した鋼管の破壊圧力は予測式に比ベ十分に高く、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、低温での使用においても大規模な破壊は起こさないことが証明された。このように、UOE 鋼管と同等の評価を行なうことにより、電縫鋼管の残留応力の影響を考慮しなくても問題ないことが確認された。

開発した鋼管を用いることにより、高い安全性の求められるガスや石油用のラインパイプを経済的かつ効率的に敷設

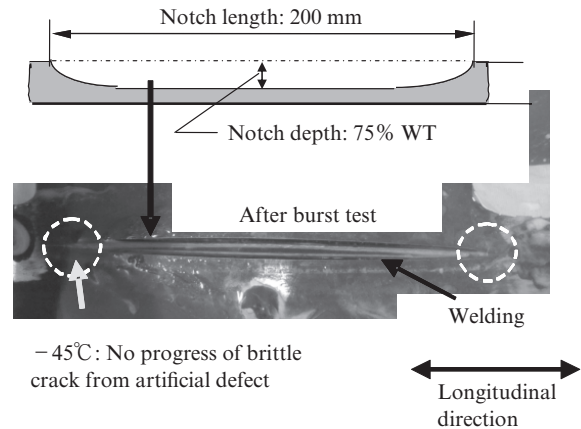


写真 2 実管低温バースト試験結果例

Photo 2 Low temperature full pipe burst examination result

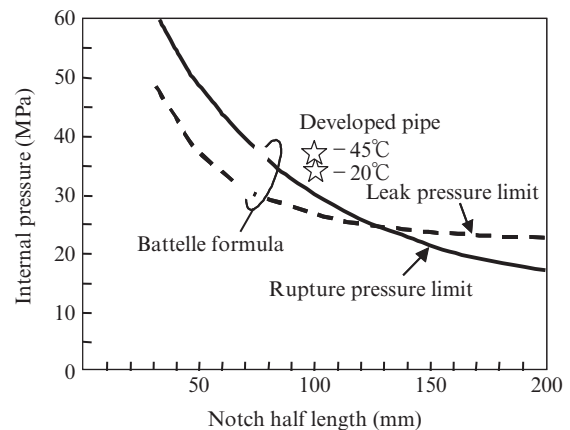


図 15 実管低温バースト試験結果例

Fig. 15 Low temperature full pipe burst examination result

することが可能となり、現在、北米や東南アジアや北欧など世界的に適用されてエネルギーコストの低減に寄与している。

5. まとめ

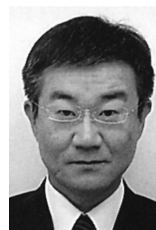
電縫溶接技術と品質保証技術および電縫鋼管の品質評価技術を開発して、電縫溶接部の機械的特性と信頼性を向上させた。

- (1) 電縫溶接現象を直接観察することにより、高周波抵抗溶接法は溶融接合されており、溶融金属は加圧されつつ凝固することを可視化して明らかにした。
- (2) 高周波誘導抵抗溶接法において、端面はコイル中央部より加熱され始め、コイル出側から溶接点入側にかけて直線的に温度上昇して、溶接点直前から溶接点にかけてさらに急激に温度上昇したのち、徐々に低下することを明らかにした。
- (3) 高周波抵抗溶接法による電縫溶接部の数値解析モデルを開発した。溶接部に存在する酸化物を減少させる観点から、溶接速度の増加は有効であるとの知見を得た。
- (4) 電縫溶接の加圧時の溶鋼と酸化物の挙動を数値解析により明らかにした。電縫溶接時の加圧により、端面に存在する酸化物の大部分は余盛部へ排出した。端面の温度分布を均一にすることにより、酸化物は顕著に排出されやすくなるなどの知見を得た。
- (5) 電縫溶接現象の直接観察と数値解析による知見のもとに、電縫溶接条件を最適化するとともに、電縫溶接部を均一に加熱する技術を開発した。開発した鋼管のシャルピー破面遷移温度は -90°C であり、極低温まで高い吸収エネルギー値を示した。
- (6) 点集束超音波探触子を用いた精密Cスキャンにより電縫溶接部を調査した結果、溶接部には数マイクロメートルの微小酸化物が散在している形態があり、その密度の高い部分が低温韌性に影響していることを発見した。
- (7) 精密超音波Cスキャンのエコー高さでシャルピー吸収エネルギー値の関係を調査して、超音波評価範囲を $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ にすることにより感度良く吸収エネルギーの評価ができることを明らかにした。
- (8) 微小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。従来の超音波斜角探傷法に比較して10倍以上の感度で、溶接品質に影響を及ぼす酸化物の分布状態を検出できるようにした。
- (9) 電縫鋼管溶接部の肉厚方向および管軸方向の断面を非破壊で漏れなく検査する技術を確認した。本技術のオンラインへの適用を実現して、酸化物の分布をリアルタイムに検出・表示することが可能となり、全長にわたる溶接部の品質保証が実現された。

- (10) 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 -20°C と -45°C で行なった結果、開発した鋼管の破壊圧力は予測式に比べ十分に高いことが証明された。

参考文献

- 1) 抵抗溶接部における欠陥と特徴。溶接学会抵抗溶接研究委員会。1987, p. 2.
- 2) 岡部能知, 児玉俊文, 堀弘道, 豊田俊介, 木村秀途, 安田功一, 中田一博。溶接学会全国大会講演概要。2013, 第92集, p. 223.
- 3) Okabe, T.; Yasuda, K.; Kodama, T.; Goto, S.; Aratani, M.; Toyoda, S.; Kato, Y.; Iwazaki, K.; Nakata, K. Proc. of 66th IIW. 2013, doc. XII-2130-13.
- 4) 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。2014, 第94集, p. 110.
- 5) 岡部能知, 後藤聡太, 荒谷昌利, 豊田俊介, 木村秀途, 川西昭。塑加春講論。2013, p. 231.
- 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) Okabe, T.; Aratani, M.; Yokoyama, Y.; Toyoda, S.; Kimura, H.; Egi, M.; Kawanishi, A. Steel Res. Int. 10th ICTP2011. p. 662.
- 9) 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. 2012, vol. 25, p. 391.
- 10) 井上智弘, 鈴木雅仁, 岡部能知, 松井穰。JFE 技報。2012, no. 29, p. 17.
- 11) 岡部能知, 豊田俊介, 松井穰, 伊木聡, 藪本哲。まてりあ。2014, no. 53, vol. 3, p. 104.
- 12) 飯塚幸理。CAMP-ISIJ. 2011, vol. 22, p. 1052.
- 13) 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.
- 14) 飯塚幸理, 横山泰康, 鈴木雅仁, 熊沢慎太郎。日本非破壊検査協会第19回超音波による非破壊評価シンポジウム。2012, p. 7.
- 15) 松井穰, 飯塚幸理, 浦畑瑛一, 岡賢, 鈴木雅仁。日本非破壊検査協会第19回超音波による非破壊評価シンポジウム。2012, p. 13.
- 16) 新版接合技術総覧。新版接合技術総覧編集委員会。1994, p. 322.
- 17) Kiefner, J. F.; Maxey, W. A.; Eiber, R. J.; Duffy, A. R. ASTM STP 536, p. 461.



岡部 能知



飯塚 幸理



伊木 聡