

ERW溶接監視技術の開発

Development of a New Optical Monitoring System for HF-ERW Welding Processes

長谷川昇*
Noboru HASEGAWA濱谷秀樹
Hideki HAMATANI深見俊介
Toshisuke FUKAMI中治智博
Tomohiro NAKAJI武田祐輔
Yusuke TAKEDA本吉卓
Takashi MOTOYOSHI谷本道俊
Michitoshi TANIMOTO大沢隆
Takashi OHSAWA

抄 録

溶接過程で冷接や欠陥を抑制し、高い溶接品質を実現するために、オンライン溶接監視技術を開発した。これまでに溶接現象と品質との相関解析に基づいて最適な溶接条件を見出し、光学的及び電気的な計測手法を組み合わせた入熱管理システムを構築した。本システムを新日鉄住金(株)大分製鉄所光鋼管部 24”ミルに導入した結果、全長にわたって高靱性な ERW 鋼管を安定して製造することが可能になった。

Abstract

To satisfy recent demands for high mechanical strength and toughness in the weld seam for the pipeline fields, we propose a manufacturing technique that controls the generation of cold defects and oxide inclusion in the welding process. By analyzing the welding mechanism, we optimize the welding condition and develop a new monitoring system that combines optical and electrical measurements. We demonstrate that the system improves the weld seam quality of high frequency-electric resistance welded (HF-ERW) pipe in our 24” product process of Hikari works.

1. 緒 言

近年、エネルギー開発の需要を背景に安価で生産性の高い ERW (Electric Resistance Welding) 鋼管のラインパイプ、油井管市場への適用要求が増加している。この用途には母材だけでなく溶接部の材料特性や耐環境性の向上が求められる。そのためには、溶接過程で溶接部に投入する電力の不足による冷接や、溶接面の酸化物生成に起因する欠陥の発生を抑制する製造技術が必要となる。そこでこれまでに、溶接メカニズムに基づいて適正な溶接条件を維持、管理するための高品質化プロジェクトの一環として、溶接監視技術の開発に取り組んできた。本稿では、溶接現象と溶接品質との相関解析を行い、光学的及び電気的な計測手法に基づく入熱管理手法を導入した結果について報告する。

2. ERW溶接とは

鋼板を円形に成形し、ワークコイル、或いはコンタクトチップと呼ばれる電極によって溶接面に高周波電圧を印加することで高周波電流を誘起し、局所的に加熱、溶接するプロセスである。この溶接法では、表皮効果と近傍効果

によって電流の大部分は溶接面の表面近傍に集中するため、つき合わせ面の効率的な加熱が可能となる(図1)。また、加熱過程で溶接面に酸化膜が形成されるが、両端面の反方向電流によって溶鋼とともに酸化物が排出され、さらにスクイズロールによるアプセット過程でも排出が促進される特徴がある。この溶接は、1900年代前半から実工程に導入されている製造法であるが、旧来の低周波溶接では

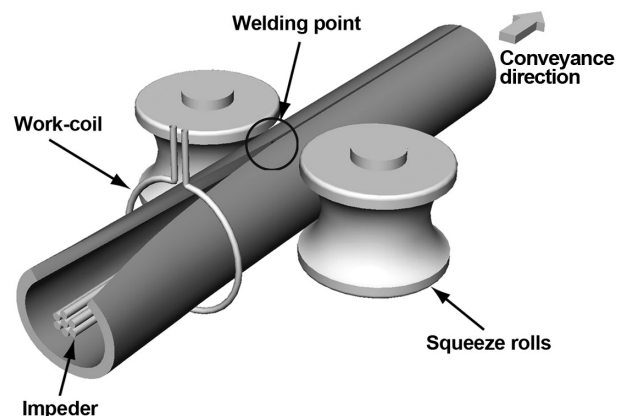


図1 ERW溶接の概要
Outline of the HF-ERW

* プロセス研究所 計測システム研究開発部 主幹研究員 Ph.D. 千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511

電流がゼロとなるタイミングで未溶融部が存在するいわゆる Zipper 溶接問題があった。これに対して、1950 年代から数百 kHz に高周波化された (HF-ERW : High Frequency-Electric Resistance Welding) ことにより大幅に溶接品質が改善された経緯がある。

3. 溶接部の高品質化に向けた開発

3.1 溶接現象の把握

3.1.1 溶接過程の基本的な考え

ERW 溶接は、管径や肉厚、投入電力、溶接速度、両エッジの収束状態や溶接面の角度、給電距離など様々な要因が溶接状態を左右する複雑な工程である。これらの中には独立に制御することが困難なものもあるため、特定の要因に限定して発現する溶接現象を把握するアプローチが採られてきた。これまでに投入電力と溶接速度との関係に着目した相関図である CPD (Condition Phenomena Defect) ダイアグラムが提案されている。図2は溶接速度と投入電力以外の要因が一定の場合のダイアグラムのイメージ図を示す。主な境界は鋼材の両エッジの接近速度と離反速度が等しくなることを示す A 線と、エッジ全厚が溶融する境界を示す B 線で構成される。それぞれの境界で区切られた領域は第1種、第2種及び第3種 (それぞれ Type 1, 2 及び Type 3) と呼ばれる溶接現象が発現し、それぞれ冷接或いは未溶着、適正な条件、過入熱に相当する。これらのうち、第2種の溶接現象は、A、B 線の交点に当たる臨界溶接速度 V_m 以上で、A 線以上となる電力を投入すると安定的に発現すると考えられている¹⁾³⁾。

溶接過程は、加熱、溶融及び排出の3つの過程から構成される。加熱過程では、高周波電圧の印加によってエッジ部から温度が上昇し、これに伴って表面の酸化膜形成が促進される。十分な熱量が投入された理想的な状態では、溶融過程において、鋼材の溶融した部位が高周波電流による電磁力によって逐次、つき合わせ面の表裏面に流出する。最後の排出過程で、スクイズロールによるアプセットが両端に適正に加えられると、メタルフローが立つと共に残留

している酸化物は溶鋼と共につき合わせ面から排出される。このとき十分な入熱がない場合 (B 線より低入熱側)、両エッジの溶融が不十分となり、アプセットを加えても溶着しない (冷接あるいは未溶着) 状態となる。一方、入熱が過多の第3種ではスリットが極端に長くなり、この状態の時にスリット上流側で短絡が起きると、下流側の電磁力の消失によって溶鋼がスリット内に逆流する現象 (還流) が発生する。また、アプセットも十分に伝わらないことから酸化物が適正に排出されず、酸化物の残留に起因したペネトレータ欠陥が発生する。これまで、第2種領域では適正に加熱～排出が行われるため、欠陥の少ない高品質の溶接部位が得られると考えられていたが、実験及びモデル解析の結果、溶接品位の観点から第2種領域が3つの領域に分割される可能性のあることが判った。

3.1.2 第2種溶接現象の解析

投入電力と溶接部欠陥との相関を明確にするため、条件を変えながら帯状鋼材を溶接できるオフライン溶接機を用いた実験と断面解析を行った。板厚 6mm、幅 32mm の API 規格 X65 の鋼帯に 4mm のスクイズ量 (スクイズロールの押し込み量) をかけながら、V 収束角 5.0°、臨界溶接速度 V_m 以上である 32m/min で溶接した。投入電力を 390 ~ 830kVA まで変化させて作製した数種類のサンプルの溶接部を 160°C でシャルピー試験を行い、得られた破面に存在する欠陥量を実体顕微鏡によって評価した。この温度での破面は正常部が延性破断する一方、欠陥部や冷接部は脆性破断するため、正常/異常部の識別が可能になる。

図3に本評価で得られた欠陥面積率の投入電力依存性の一例を示す。投入電力が 460kVA 以上となる第2種領域では低い欠陥率を示すが、550~620kVA に比較的高い欠陥率を示す領域が現れる場合があり、3つの溶接品質の状態が存在することが分かる。これらを低電力側からそれぞれ、第2種、遷移領域、第2'種領域と呼ぶこととした。また、この曲線は溶接面が I 型つき合せからずれた場合に高電力側にシフトすることから、品質を安定させるには第2'種領域が最適であると考えた。

3.1.3 画像による現象観察⁴⁾

溶接部の上方から高速度カメラで撮影した鋼板エッジの画像を元にして溶接現象を模式化して図4に示す。鋼材は図中左から右側に向かって搬送中、コンタクトチップ (或いはワークコイル) から給電され、両エッジが衝合した状態でスクイズロールによって圧加される。ここでは、溶接現象を表現するために重要な点である、鋼材エッジの幾何学的収束点 (V0 点) と両エッジが衝合する収束点 (V1 点) 及びアプセットが始まる溶接点 (W 点) の挙動に着目する。第1種条件では、鋼材エッジは単純な V 字形状となり、各点は一致する。

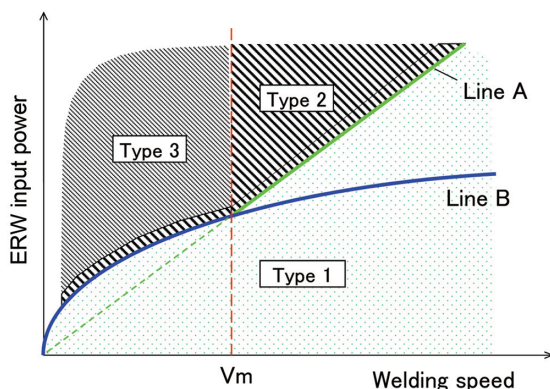


図2 CPD ダイアグラム
CPD diagram

この状態から入熱を上げて第2種になると、W点のみが下流方向に分離する。これは鋼材の移動に伴う両エッジの接近速度と、電磁力による溶鋼のエッジ外への流出による離反速度が一致し、スリットと呼ばれる幅狭のギャップが成長することによる。スリット内では、数百 Hz の周期で伸縮を繰り返すいわゆるブリッジ移動⁹⁾と呼ばれる現象が観測される。最大スリット長は第1種から第2種に移行す

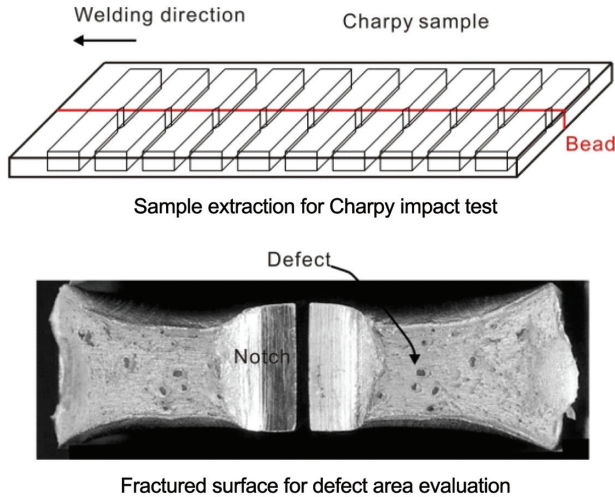


図3 品質（欠陥面積率）の入熱依存性評価
Evaluation of defect ratio versus heat input powers

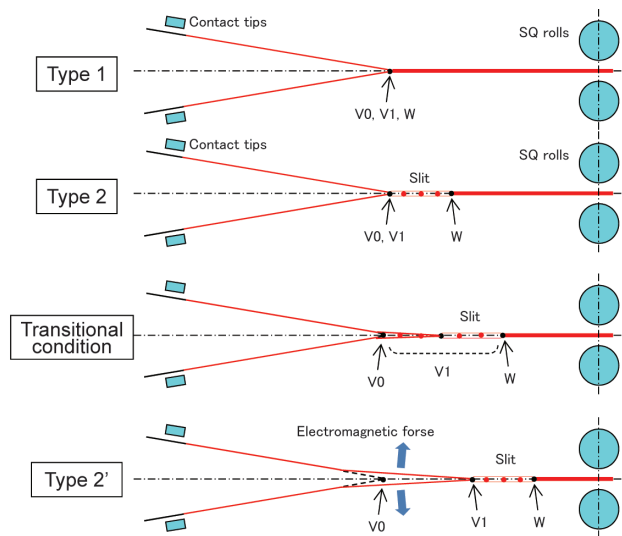


図4 観測される溶接現象
Observed welding phenomena in various heat input powers

るにつれて大きくなり、第2種領域の上限からほぼ一定になる。板厚方向に貫通した間隙であることから、スリットの発現はつき合わせ面全厚が溶融していることを示唆している。

更に入熱を上げた第2'種ではV1点がV0点から下流側に分離し、V0点より上流側から元々のエッジが離れる方向に後退する。また、両エッジは単純なV字型ではなく、2段階のV収束角（2段収束）を持つように観測される。この現象は、全厚が溶融していることに加え、両エッジの離反速度が接近速度より若干上回ることによって発現する。またつき合わせがV型になっている場合でも、つき合わせ表裏面のギャップ（間隔差）が元のエッジからの離反量より小さければ全厚が溶融すると考えられる。

尚、2段収束の発現初期にはV1点がV0～W点間で大きく移動する現象が現れる。これは、2段目のエッジ間距離が極めて微小であることから、成形変動やエッジの状態などによってスリットより上流側で衝合するためである。この時、衝合点より下流では一時的に電磁力が消失するため、溶融過程での電磁力による氧化物排出が適正に行われず、欠陥が増加する傾向がある。この入熱条件を遷移領域と呼ぶ。

3.2 溶接監視技術の開発

3.2.1 観察手法

実際の製造工程において、溶融証明のために2段収束を伴う第2'種領域に入熱制御することをターゲットとし、光学的及び電気的な溶接監視技術を開発した（図5）。

a) 光学撮影：鋼材エッジの赤熱しているパターンを40fpsの3板式カラー CCDカメラによって撮影する。幅数百 μm のスリット部を検出するには100 μm 以下の空間分解能が求められる。また前述のようにスリット部には高速で伸縮するブリッジ移動現象があるため、1/10000程度の露光時間で撮影する。撮影した画像をリアルタイム処理し、全長に亘って連続的に入熱の適正と、溶接状態の正常/異常を判断するための情報が検出される。

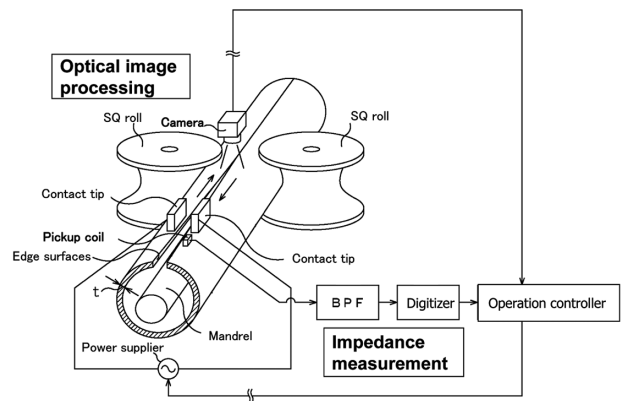


図5 開発した溶接監視手法
Configuration of the welding observation methods

b) 誘起電流の周波数測定：給電チップ近傍に設置したピックアップコイルを用い、鋼材エッジに通電した高周波電流によって発生する電磁場変化を計測する。検出される信号の周波数成分は電流の経路長に比例するので、周波数の変動量はスリットの伸縮に伴うインピーダンス変化を表す。この計測手段を用いると、スリット状態に基づく入熱条件を捉えることができる。スリットは第1種から第2種領域への遷移に伴って徐々に成長するが、この間はスリット長が短いため短い周期で信号が変動する一方、スリットが成長すると長周期側にシフトする。従って、投入電力を低電力側から徐々に増加させると、第1種から第2種領域に遷移する間にスリット成長に伴う周波数変動が観測される。

光学的な手法は測定レートは高くないが、V 収束や各 V 点の状態を視認できる優位性がある一方、周波数測定は 1MHz 以上のサンプリングレート有するため、非常に高速な現象を捉えることができる。これら2つの手法を相補的に用いることで、的確且つ安定的に溶接状態を判断することが可能となる。

3.2.2 全厚溶融の検証⁶⁾

まず板全厚が溶融する溶接条件を調査するために、オフラインで検証した。つき合わせ面の板厚中心に熱電対を装着して温度を測定しながら、上記システムで画像撮影を行った(図6(a))。(b)、(c)は測定した温度変化のトレンドと対応する画像を示している。第1種条件では、一旦は鉄の溶融点に到達するものの、10ms以内に再び凝固すると解釈される。一方、第2種では板厚中心が溶融した状態で100ms以上の間、保持されており、スクイズ圧加時に溶融金属が排出されると推測できる。遷移領域及び第2'種では、より入熱量が多くなることから、確実に板厚中心まで溶融していると考えられる。

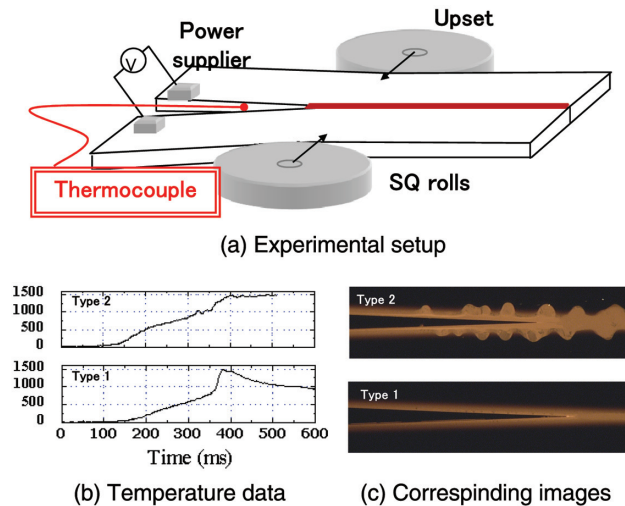


図6 全厚溶融の検証実験

Experiment for clarifying melting of the entire edge surfaces

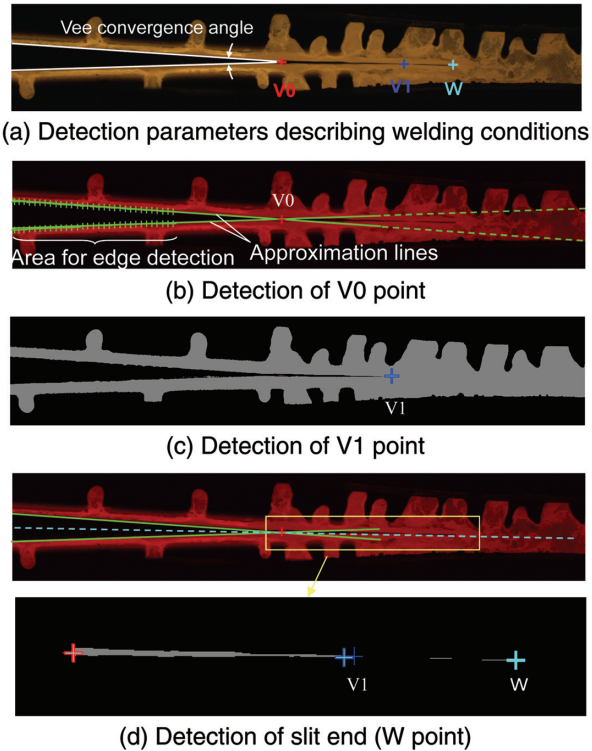


図7 画像処理アルゴリズム
Image processing algorithm

3.2.3 溶接状態を検出する画像処理法

第2'種溶接現象を判定するには、前述のV0、V1、W点及びV収束角の自動検出機能が求められる(図7(a))。安定に検出するために、以下のアルゴリズムを構築した。(1)撮影したカラー画像から赤色成分を抽出、(2)両エッジで挟まれるV収束部の上流側70%の領域でエッジを求め、最小自乗法によって近似直線を導出(図7(b))、同時にV収束角も求める、(3)2本の近似直線の間をV収束角、それらの交点をV0点とする、(4)V収束部を逆2値化し、ラベリングしたプロップの最下流点をV1点とする(図7(c))、(5)V1点より下流に存在するV収束角の2等分線に沿ったプロップのうち、アスペクト比が小さいプロップを接続し、最下流点を求める(図7(d))。スリット部は伸縮するため、数フレーム以上に亘って検出位置をメモリし、最下流になる位置をW点として検出する。尚、プロップとは、ラベリング処理において同じラベルが付けられた近傍4或いは8画素の接続処理によって一塊になったピクセル群を示す。

3.2.4 誘起電流のデジタル化開発

誘起電流の測定法はこれまでも製造工程で活用してきたが、アナログ波形の表示に留まっていた。そこで新たに測定データをA/D変換し、デジタル処理を施すよう改造を行った。これにより信号処理のパラメータを自由に設定できることでノイズカットが容易になり、データの長期保存が可能になるなどのメリットがある。ここでは多周波デジ

タルフィルタ機能を追加することで、連続的に溶接状態や異常判定ができるようにした例を紹介する。図8 (a) 右の測定波形からは、高周波電流の周波数変動の大きさを測定でき、前述のようにスリットの伸縮挙動が把握できる。ところが生波形には電源リップルやその高調波などが重畳され、そのままでは異常現象の検出が困難であった。そこで、A/D 変換後に電源や印加電圧など複数の特定周波数帯域をカットするフィルタ処理により、欠陥が発生する可能性のあるスパーク (図8 (b) のスパイク状部) を検出できるようになった。

3.3 実機システムの導入

上記の溶接状態の判定及びスパーク検出機能を実装した実機モニタリングシステムを光鋼管部 24" ミルに導入した。これには更に、初期入熱の設定や CPD ダイアグラムのリアルタイム更新、溶接部の温度計測、溶接異常の検出機能な

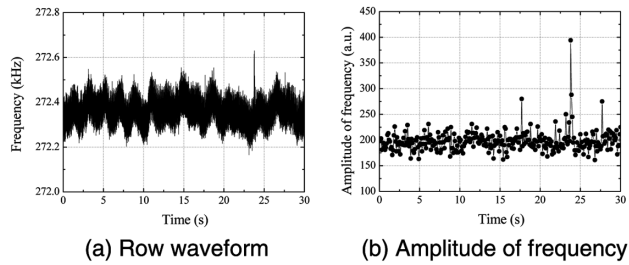


図8 多周波フィルタリングの処理例
Typical result of multi-frequency filtering

どが組み込まれており、全長に亘る溶接状態の監視が可能である。

本システムを肉厚 12.7mm の API 規格 X65 試験材に適用し、投入電力を作業上の入熱基準 (第2種領域下限) から +20% まで変化させながら、オンラインでの性能検証と指標構築を行った。図9は各投入電力での欠陥面積率を調べた結果である。本データでは、第2種及び第2'種が最適な溶接条件であること及び、両条件の間に欠陥率の高くなる領域が存在する場合があることなど、オフライン試験と同様の傾向が示されている。

これらの状態に対応した撮影画像の例を図10 (a) に示

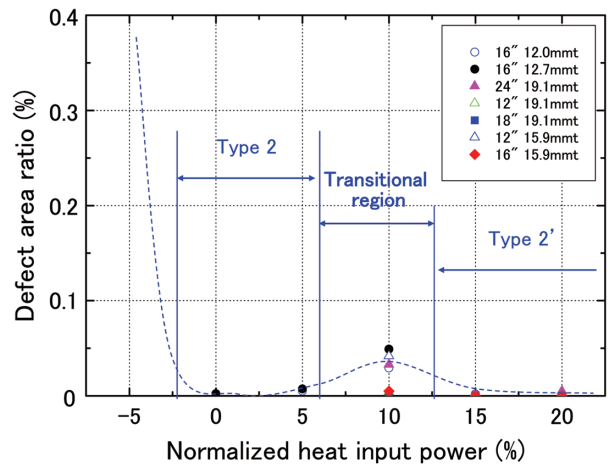
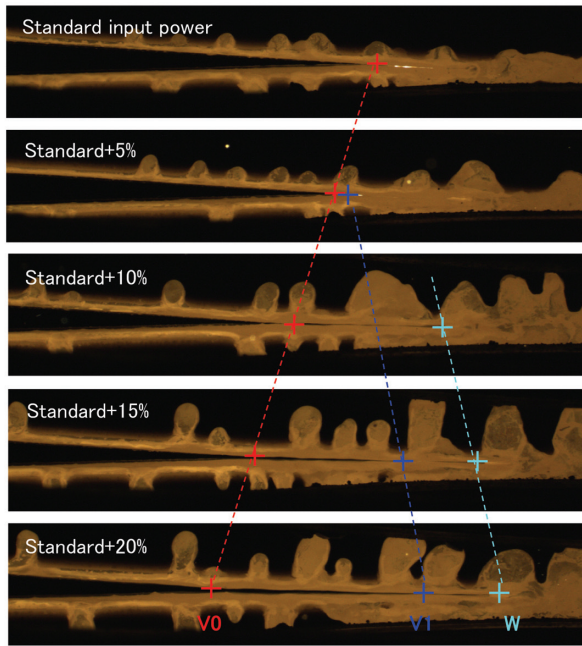
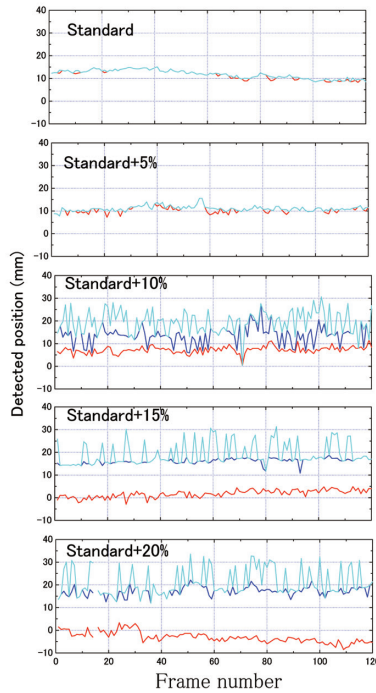


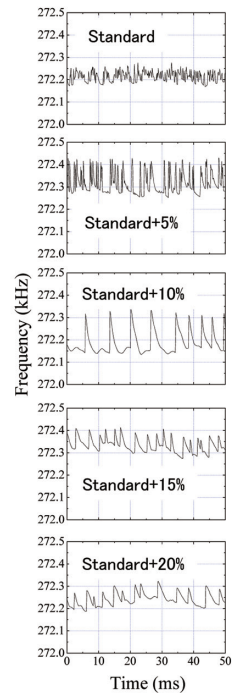
図9 X65 規格における欠陥面積率の評価
Defect area ratio evaluation of X65 products



(a) Detected points in various heat input



(b) Trend chart of the detected points



(c) Frequency waveforms

図10 光鋼管部 24" 製造工程における溶接監視例
Real-time monitoring of the welding phenomena in Hikari 24" process

す。投入電力が大きくなるに連れて、V0 点（図中赤印）、V1（青印）及び W 点（水色印）は投入電力の変化に伴って系統的に移動する。入熱基準では全ての点は一点に収束して観察されるが、投入電力を上げると V0 点は上流側へ、V1 と W 点は下流側へ移動し、入熱基準+15%以上になると V0 及び V1 点間が分離し、V 角が2段階に収束する領域が現れることが分かる。

これらの入熱条件下で3秒間、連続撮影した画像処理の結果（図 10 (b)）では、入熱基準+5%以下で全ての点が重なって観測される一方、入熱基準+15%以上では V0 と V1 が常時分離した2段階収束を示す状態になっていることが分かる。この時、V1 点から下流側に一定の確率で W 点の候補点が分離することから、撮影レート 40 fps でもスリットの伸縮挙動が捉えられると判断される。また、入熱基準+10%（遷移領域）では V1 点が V0 点と W 点との間を不規則にホッピングする不安定な現象が見られる。尚、入熱基準及び+5%は第2種領域に該当するため、本来スリットが存在しているはずであるが、撮影画像では明瞭に確認できていない⁶⁾。

更に誘起電流の周波数測定波形（図 10 (c)）もこれらの解釈を支持している。前述の通り、振幅の大きさはスリット挙動を示すので、入熱基準ではスリットが成長途中であることや、入熱基準+5%で比較的長いスリットが存在することが分かる。入熱基準+15%以上では安定したスリット伸縮が見られる一方、遷移領域ではスリットが非常に長い状態であることや比較的長い周期で伸縮がおきていることなどが推察される。

このように誘起電流の周波数測定では第2種領域の詳細な入熱変化を捉えることは容易ではないが、第2種下限付近のスリット成長を観測することが可能である。一方、光学撮影では V0-V1 間距離から入熱基準+15%以上の入熱変化を定量化できるが、成長初期のスリットを検出することが難しい。これら2つの手法で得られた測定情報を相補的に活用することで、広い入熱領域にわたって溶接状態を把握できるようになった。

以上のデータに基づいて、実プロセスの溶接状態を連続的に監視し、2段階収束第2種領域に入熱制御したところ、9.5~19.1 mm 厚の試験材及びブロー材で全長に亘って欠陥面積率を抑制し、結果として品質のばらつきを抑制することが分かった（図 11）。

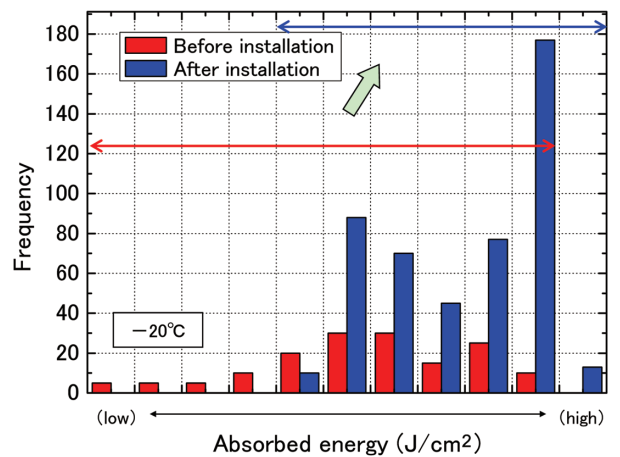


図 11 光鋼管部 24" 製造工程における品質改善例
Improvement of the seam quality in Hikari 24" process

4. 結 言

ERW 溶接において、従来最適条件と考えられていた第2種溶接領域が溶接品位の観点から遷移領域を含む3つのサブ領域に分割されることが分かった。この中で、第2種領域で観測される2段階の収束現象はつき合わせ面全厚が溶融している証明になること及び、つき合わせ角が変動する可能性のある実工程でも欠陥率を最も抑制できることを実験的に検証した。そこで溶接条件が第2種領域に制御するため、リアルタイム画像処理及び誘起電流の周波数測定を用いた溶接監視技術を開発し、実プロセスへ適用したところ、溶接部の高品質管理ができることを確認した。

参考文献

- 1) Haga, H.: Weld. J. Res. Suppl. July, 208 (1980)
- 2) Haga, H.: Weld. J. Res. Suppl. June, 104 (1981)
- 3) Haga, H.: Nippon Steel Technical Report. (26), 27 (1985)
- 4) Fukami, T., Mizuhashi, N., Hasegawa, N., Hamatani, H., Hasegawa, Y., Asano, T., Motoyoshi, S., Miura, T., Tanaka, K., Nakaji, T., Yamamoto, K.: Proc. Int. Pipeline Conf. 90219, 2012
- 5) Kim, C-M., Kim, J-K.: J. Mat. Process, Technol. 209, 838 (2009)
- 6) Hasegawa, N., Hamatani, H., Mizuhashi, N., Fukami, T., Karube, Y., Miura, T., Tanaka, K., Nakaji, T., Yamamoto, K., Hasegawa, Y.: Proc. Int. Pipeline Conf. 90222, 2012



長谷川昇 Noboru HASEGAWA
プロセス研究所 計測システム研究開発部
主幹研究員 Ph.D.
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



武田祐輔 Yusuke TAKEDA
大分製鉄所 光鋼管部



濱谷秀樹 Hideki HAMATANI
名古屋技術研究部 上席主幹研究員 工博



本吉 卓 Takashi MOTOYOSHI
大分製鉄所 光鋼管部 鋼管技術室長



深見俊介 Toshisuke FUKAMI
鉄鋼研究所 鋼管研究部 主幹研究員



谷本道俊 Michitoshi TANIMOTO
鋼管技術部 主幹



中治智博 Tomohiro NAKAJI
設備・保全技術センター
プラントエンジニアリング部 主幹



大沢 隆 Takashi OHSAWA
鋼管技術部 鋼管技術室長