

溶接管理技術者の体験紹介

海底パイプライン敷設への自動溶接機の適用例

日鉄エンジニアリング株式会社
森本 拓世

1. はじめに

世界的な経済発展を背景にエネルギー資源としての石油・天然ガスの需要は堅調であり、現在も世界各地で様々な生産プロジェクトが計画・実行されている¹⁾。石油・天然ガスを効率的かつ安全に輸送するため、鋼管（ラインパイプ）を溶接して繋ぎ合わせたパイプラインが敷設されている。海外では、沖合に据え付けた掘削ジャケットから生産施設あるいは陸上までを繋ぐ海底パイプラインが数多く敷設されている。海底パイプラインの敷設には、一般的に専用の施工船を用いたレイバージ工法が用いられる。

図1に示す施工船はS-レイ工法と呼ばれるレイバージ工法用の施工船となっている。この工法では、施工船内で長さ約12mのラインパイプを溶接接合し、施工船を進水させることで接合したパイプを船尾から海中に送り出し、パイプラインとして海底に着底させていく。このとき、船尾から着底するまでの間のパイプラインの形状がS字となることからS-レイ工法と呼ばれる（図2）。海底パイプラインの長さは数km～数十km以上と比較的長距離となることが多く、施工期間を短縮させるために溶接能率の高い自動溶接が適用されている。本稿では、当社の海底パイプライン用全姿勢自動マグ溶接機の海外での適用例について紹介する。



図1 海底パイプライン敷設船

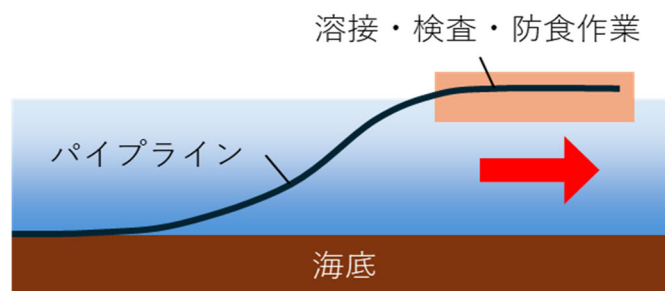


図2 S-レイ工法

2. 現地溶接施工について

施工船内では、ラインパイプの船内への取り込みから始まり、ラインパイプの両端に開先加工を行った後、大きく分けて①溶接施工、②非破壊検査、③防食処理までを行う（図 3）。施工船内ではそれぞれの作業を分担し並行作業が出来るように、作業ステージがラインパイプ 1 本分の長さの間隔でレイアウトされている（図 4）。①溶接施工については、パイプ同士のフィットアップの後、ルートパス（初層）溶接及びホットパス（2層）溶接までを行う第 1 作業ステージと、フィラーパス（積層）溶接およびキャップパス（仕上げ）溶接までを行う第 2～第 4 作業ステージで作業が行われる。各作業ステージでの作業が全て完了したことを確認し施工船がラインパイプ 1 本分（約 12m）進水すると、船内では継手が次の作業ステージに進み、①から③までの作業が順次行われていく。このため、各作業をスピーディに行うことが生産性を上げることに直結するが、その中でも、溶接の作業時間を短縮することが特に重要となる。また、非破壊検査により溶接欠陥が見つかった場合、補修が完了するまではその継手を次の工程に送り出せないためパイプライン敷設が停止する。このため、生産性を高めるためには、溶接作業時間の短縮と補修率の低減を両立させることが重要となる。

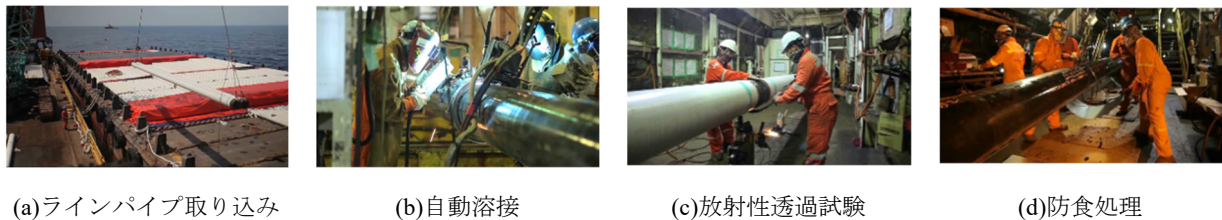


図 3 施工船上の作業の流れ

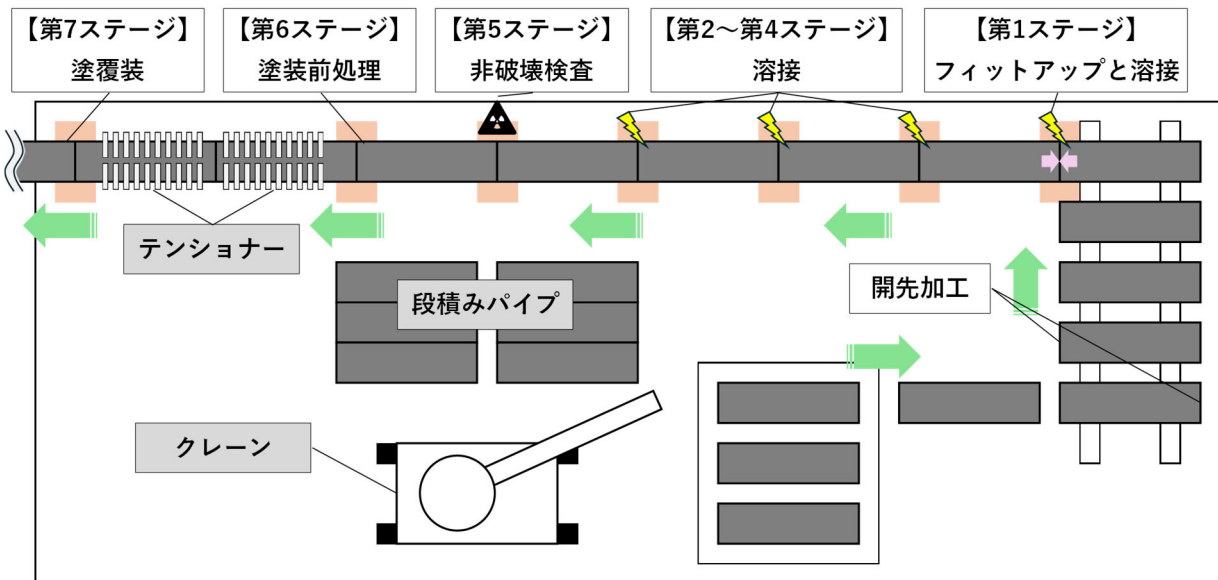


図 4 施工船上の作業ステージ

3. 自動溶接機

船内で溶接接合したパイプはそのまま海底パイプラインとして敷設されるため、溶接方法はパイプを固定した全姿勢円周溶接となる。溶接作業時間を短縮するために、U形の狭開先として溶接量を低減し、溶接速度の速い下進溶接としている。溶接ヘッドはパイプに取り付けた円形のガイドレール

上を走行するバグ型溶接ヘッドであり、2本の溶接トーチを搭載している（図5）。



図5 溶接ヘッド

溶接能率を高めるため、基本的に2トーチ溶接（1走行2層溶接）で施工する。溶接条件は制御装置に予めプリセットされており、溶接ヘッドの周位置によって溶接条件が切り替わるようになっている。参考までにルートパス溶接及びホットパス溶接の溶接条件の一例を表1に示す。溶接中のトーチ位置制御として、トーチの上下位置および左右位置をアークセンサにより制御している。

表1 溶接条件の一例

		下向き	立向き	上向き
ルートパス		-	-	-
ワイヤ送給速度	m/min	11.4	11.8	10.8
電流	A	268	272	258
電圧	V	23.5	23.5	24.4
ホットパス		-	-	-
ワイヤ送給速度	m/min	10.2	10.6	9.6
電流	A	250	254	240
電圧	V	24.1	24.1	23.8
溶接速度	cm/min	120	120	110

アークセンサとは、溶接中の溶接電流やアーク電圧をフィードバックして溶接トーチの位置を逐次補正する制御方法である。マグ溶接では、ワイヤ送給速度を一定とした場合、コンタクトチップからのワイヤ突出し長さに応じて溶接電流が上下する。予め突出し長さと溶接電流の関係を把握した上で、溶接中の溶接電流を監視して所定の突出し長さとなるようにトーチ上下位置を制御している。一方、左右倣いに関しては、溶接の狙い位置の許容ずれが±0.5mm程度と高い精度が要求されるため、トーチの位置制御が重要となる。

開先内でトーチを左右にウィービングさせると、図6に示すようにトーチ位置の開先中心位置からのずれによって、溶接電流やアーク電圧が変化する。溶接電流あるいはアーク電圧の左右差を常に監視し、左右差を打ち消すようにトーチ左右位置を制御している。近年のデジタル制御電源では、定電圧マグ溶接やパルスマグ溶接など種々の溶接モードを使用出来るようになっている。

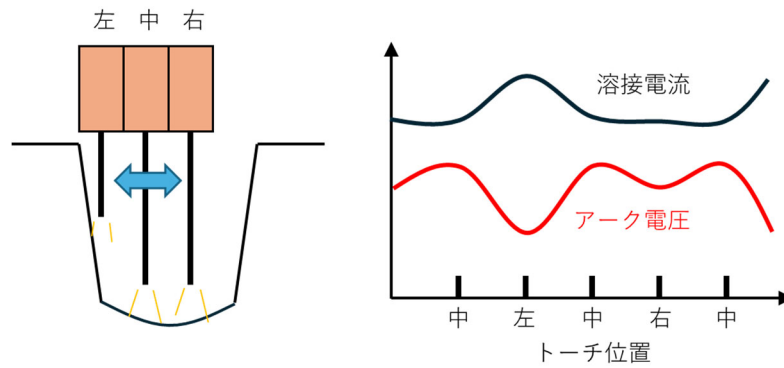


図6 アークセンサ

本アークセンサにおいても、検出した溶接電流やアーク電圧をデジタル変換することにより、溶接電流とアーク電圧の左右差の比重を自在に変更してトーチ左右位置を制御出来るようにして、種々の溶接モードに対応している。一般的なアークセンサと同様に、ウィービング周波数を数 Hz 程度としウィービング両端での溶接電流の差異を検出して左右倣い制御を行うこともあるが、ここでは、ウィービング周波数を 20Hz 以上の高周波数とした場合の左右倣いについて紹介する。例えば定電圧マグ溶接の場合、ウィービング周波数を数 Hz とすると、溶接電源の定電圧特性の応答性により、トーチ位置が開先中心から外れていたとしてもウィービング両端でのアーク電圧の変位が復元しやすく、アーク電圧の左右差が生じにくい。しかし、ウィービング周波数を 20Hz 以上に高めることで、アーク電圧の変位の復元速度よりも開先内でのワイヤ先端の移動速度の方が速くなり、トーチ位置が開先中心から外れた場合のアーク電圧の左右差が検出しやすくなる (図 7)。

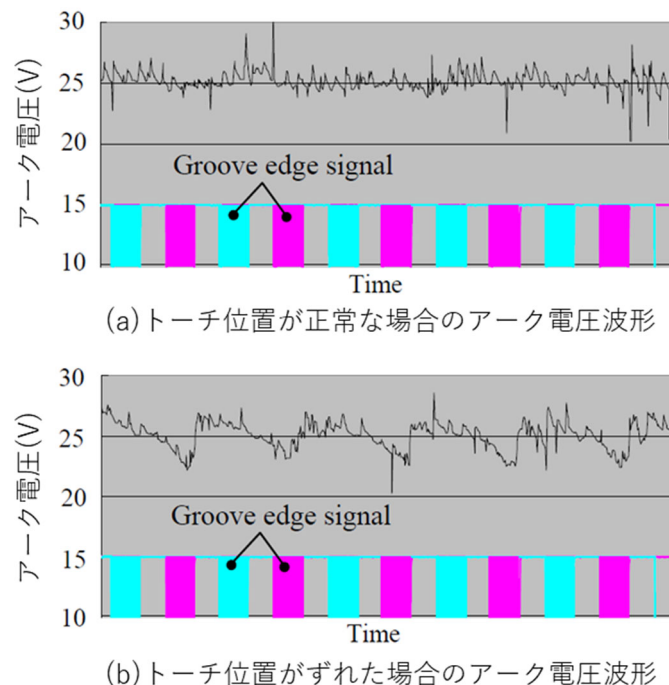


図7 アーク電圧の変化

ウィービング周波数を 3~30Hz として溶接し、アークセンサによる左右倣いを検証した結果を図 8 に示す。溶接ヘッド走行用ガイドレールを鋼管の開先中心線に対して最大で約 3.5mm ずらして斜めに取り付け、溶接速度 250cm/min として溶接を行った。その結果、10Hz 以下のウィービング周波

数では左右倣いが開先中心を追従出来なかったが、20Hz以上のウィービング周波数では左右倣いの最大誤差は0.5mm程度となり、必要な精度を有していることを確認した。

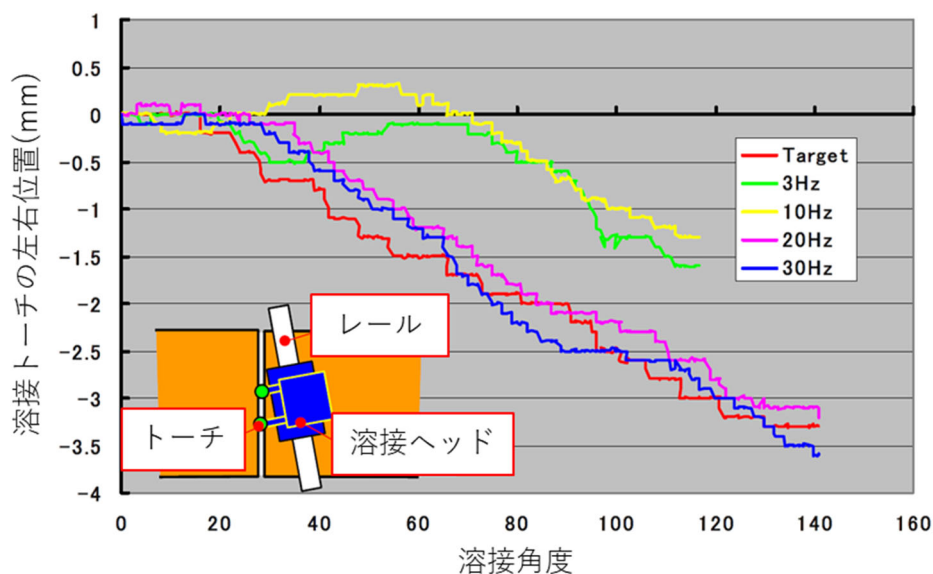


図8 トーチ左右倣いの挙動

生産性を高めるためには溶接速度を上げることが有効であるが、U形狭開先においては高温割れに留意する必要がある。高温割れの発生原因は、溶接金属の最終凝固部が低延性温度域にあるとき引張応力を受けることにあるといわれている。このため、引張応力が高温割れの発生方向に生じやすいルートパス溶接では、数値シミュレーション²⁾も活用しながら、高温割れが発生しない溶接条件を定めた。

加えて、低S量の溶接ワイヤを選定し高温割れが全く発生しない高速溶接施工が可能であることを確認した。フィラーパス（積層）溶接においても溶接能率の高い2トーチでの溶接条件を定めており、健全な溶接部が得られている（図9）。



図9 U開先溶接断面

4. 溶接品質の安定化

溶接欠陥が発生しない溶接条件を自動溶接機にプリセットしていても、現場で加工する開先寸法の変動やパイプ同士のフィットアップの変動に対してプリセットされた溶接条件が適合しない場合、溶接欠陥が生じるおそれがある。開先形状については、レーザセンサを複数搭載した検査装置をパイプの管端に取り付けて円周方向に走査することでパイプ全周の開先形状を高精度で把握し、開先寸

法が許容誤差内であることを確認している (図 10)。

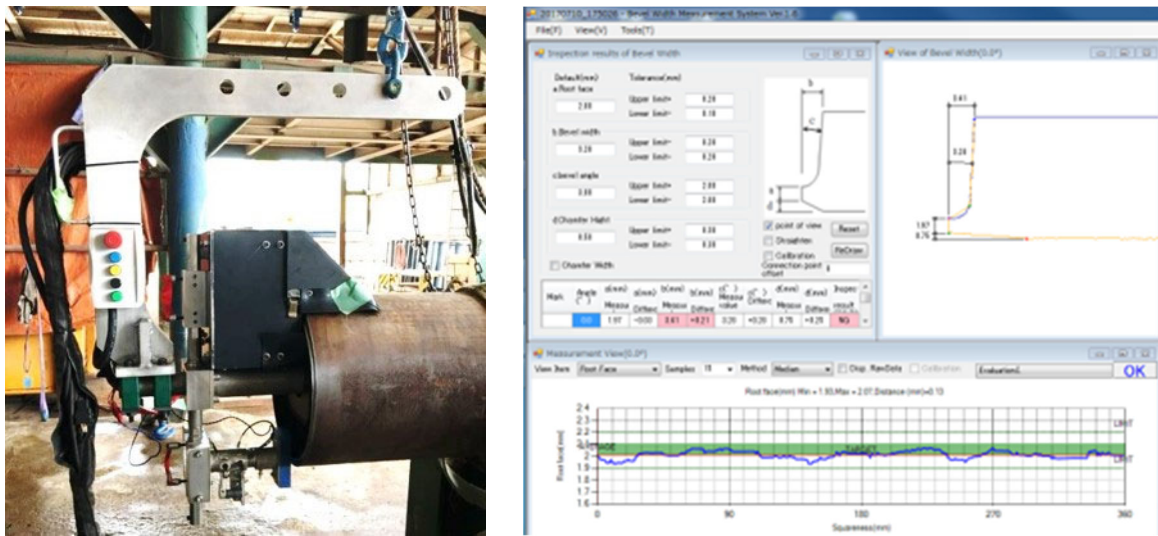


図 10 開先検査装置と測定結果

フィットアップについては、パイプ同士を突合せた際のギャップが最小になるようにしているものの、周位置によって 0.1mm~0.5mm 程度のギャップが生じることは避けられない。この程度のギャップであっても溶着量に換算すれば数%の差異となり、常に最適な溶接を行うためには溶接条件の微調整が求められる。このため、フィットアップの状態についても複数のレーザセンサで計測することで溶接前のギャップの大きさを把握し、ギャップの大きさに応じて溶接条件を自動で微調整するシステムを導入している³⁾。

まず、図 11 (a) のようにギャップとそのギャップに対応する適切な溶接条件の関係を予め把握しておく。そして、溶接前に円周方向に数点箇所ギャップを計測し、その数点の計測値から全周のギャップを幾何学的な計算により推定する。図 11 (b) の○が計測値、実線がギャップの推定値を表している。これらのギャップと溶接条件の対応関係、及び全周のギャップ推定値により、図 11 (c) のようにパイプ全周に対する最適な溶接条件が求まると考え、溶接条件を調整する仕組みとなっている (溶接条件の分割数の関係により与える条件は階段状となる)。

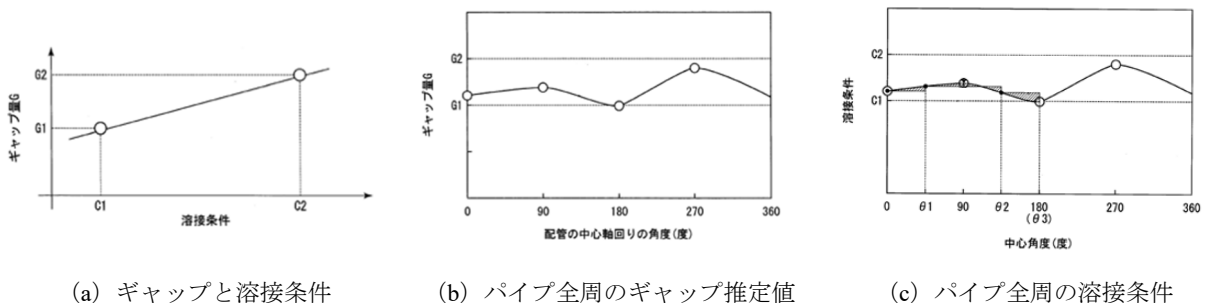


図 11 ギャップ量に応じた溶接条件の微調整

以上のような開先加工精度の管理やフィットアップに応じた溶接条件の自動修正を取り入れながらパイプライン現地溶接の溶接品質を安定化させている。

5. まとめ

当社が開発した海底パイプライン用の全姿勢自動マグ溶接機の適用例について紹介した。

今回紹介した各種の取り組みの効果もあり、現在では海外での施工において一日当たり 3km を超える敷設速度を実現している。本知見が自動溶接機を用いた現地溶接施工に携わる技術者の方々への一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 石油・天然ガス資源情報 世界の主要ガスパイプラインプロジェクト
<https://oilgas-info.jogmec.go.jp/nglng/datahub/dh2024/index.html>
- 2) 狭開先 2 トーチ高速円周 MAG 溶接時における凝固割れに関する力学的検討 溶接学会全国大会講演概要 平成 26 年度秋季全国大会
- 3) 特許 6647437 配管溶接方法及び配管溶接装置

<略歴>

森 本 拓 世 (もりもと たくや)

2007 年 大阪大学工学部 地球総合工学科 卒業

2009 年 大阪大学大学院 社会基盤工学 卒業

2009 年 新日鉄エンジニアリング(株) 入社 技術開発研究所 配属

2016 年 同社海外海洋事業部 (現 海洋本部)

現在に至る