

# 陸上パイプライン用自動溶接機MAG-IIの自動制御技術

## The Automatic Control Technology of Welding Machine MAG-II for Onshore Pipelines

中 村 智<sup>\*(1)</sup> 古 川 裕 一<sup>\*(2)</sup> 生 野 康 之<sup>\*(3)</sup> 児 玉 真 二<sup>\*(4)</sup>  
 Satoshi NAKAMURA Yuichi FURUKAWA Yasuyuki IKUNO Shinji KODAMA  
 前 田 剛<sup>\*(4)</sup>  
 Tsuyoshi MAEDA

### 抄 録

陸上パイプライン向けにアークセンサと視覚センサの2種類のセンサを搭載した狭開先自動溶接システムMAG-IIを開発した。視覚センサは初層溶接において溶接速度と溶接トーチの揺動幅の制御を行ない、アークセンサは開先中心位いと積層における揺動幅倣いの制御を行っている。これらのセンサを搭載した溶接システムを用いる事により、現地において全自動で高品質な円周溶接継手を作製することを可能にした。

### Abstract

Authors have developed a newly automatic narrow groove welding system MAG-II for onshore gas pipelines. It has a through-the-arc sensor (arc sensor) and a vision-based sensor. The vision-based sensor is used for controlling the traveling speed and oscillation width for the root pass. The arc sensor is used for controlling the torch position and torch oscillation width for hot and filler passes. MAG-II equipped with these sensors enables high quality girth welding at field.

## 1. 緒 言

国内のガスパイプライン敷設工事では、1970年代から中大径鋼管の配管溶接に自動溶接機の導入が検討され始め、1990年代には高压ガス幹線パイプラインにおける自動溶接施工が定着して来た。新日本製鐵は1990年代半ばより溶接システムMAG-Iを用いて品質安定を図りつつ、更なる溶接の高速化に対応すべく、自動溶接システムMAG-II(以後、MAG-II)を開発し、現場導入を行なった。本稿では、主にMAG-IIの自動制御技術について述べる。

## 2. MAG-IIの諸特性

### 2.1 システム構成

図1、表1にMAG-IIのシステム構成図および仕様を示す。MAG-IIは、①溶接ヘッド、②制御装置、③ペンダント、④ガイドレール、⑤自走式内面クランプ、⑥溶接電源、⑦ガスボンベから構成される。

300Aから900Aの鋼管に対し、径に応じたガイドレールに刻まれたラックと溶接ヘッドのピニオンギアの噛み合わせにより、広い範囲での高精度な速度制御を行ないながら1ヘッドもしくは2ヘッドでの溶接を可能としている。写真1にMAG-IIの2ヘッド溶接施工状況を示す。

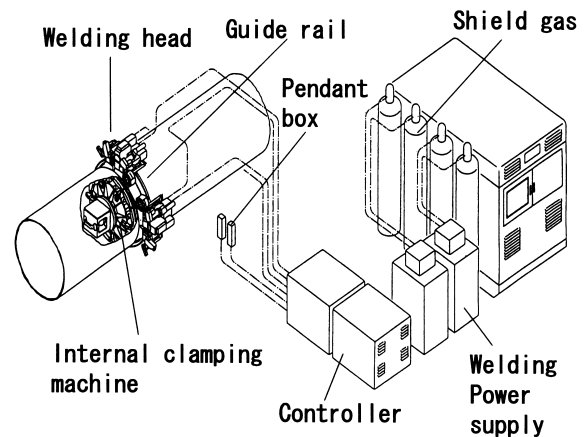


図1 MAG-IIのシステム構成図  
Welding system

### 2.2 溶接プロセス

溶接は、溶接トーチをベベル角度9.5°の開先内で高速揺動(最大75Hz)させるマグ溶接である。溶接は、鋼管上部(0°)から下部までの半周(180°分)を交互に溶接する下振振り分けを採用した。溶接ワイヤには、外径1.2mmのソリッドワイヤ、シールドガスには継手品質と溶接作業性を考慮して比率がAr 70%、CO<sub>2</sub> 30%の混合ガスを選定した。図2にMAG-IIにおける標準的な開先形状を示す。

\*<sup>(1)</sup> 鉄構海洋・エネルギー事業部 パイプラインエンジニアリング部  
東京都新宿区西新宿3-7-1 〒163-1020 TEL:(03)5323-5304

\*<sup>(2)</sup> 鉄構海洋・エネルギー事業部 パイプラインエンジニアリング部  
マネジャー

\*<sup>(3)</sup> 鉄構海洋・エネルギー事業部 エンジニアリングサポートセンター  
マネジャー

\*<sup>(4)</sup> 鉄鋼研究所 接合研究センター 主任研究員

表1 MAG-IIの仕様  
Specifications of MAG-II

Dimensions (mm) / Weight of welding head (kg)	255 height × 525 length × 360 width / 17
Traveling speed (cm/min)	300 (max)
Oscillation frequency (Hz)	75 (max)
Welding process	Metal active gas welding, down hill
Diameter of welding wire (mm)	1.2
Welding power supply (A)	DC 500A
Control unit	Industrial PC, DSP, ADC, DAC, Serial IF, Ethernet IF
Feedback control system	
Seam tracking	Arc sensor
Oscillation width control	Vision-based sensor (root pass), arc sensor (filler passes)
Traveling velocity control	Vision-based sensor (root pass)
Internal clamping machine	Hydraulic / pneumatic clamp with a copper backing ring

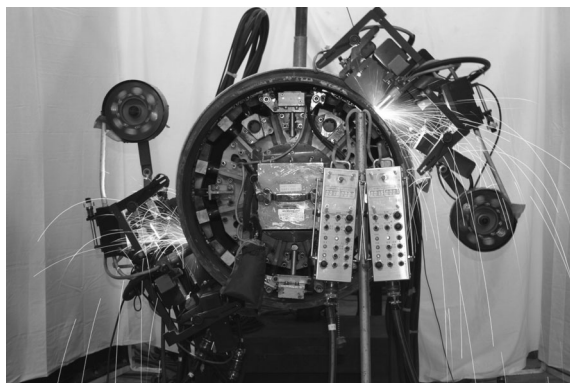


写真1 MAG-IIによる2ヘッド溶接状況  
2-head welding

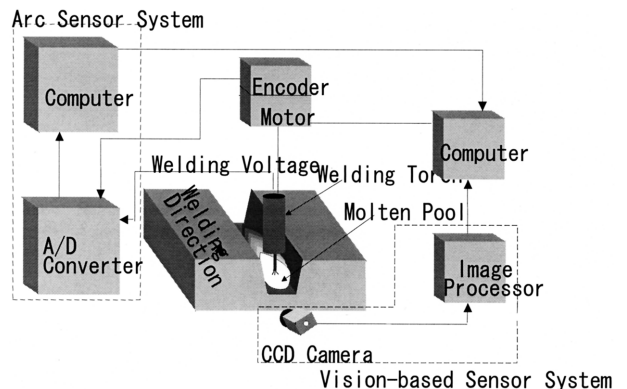


図3 センサシステムの概略図  
Outline of sensor system

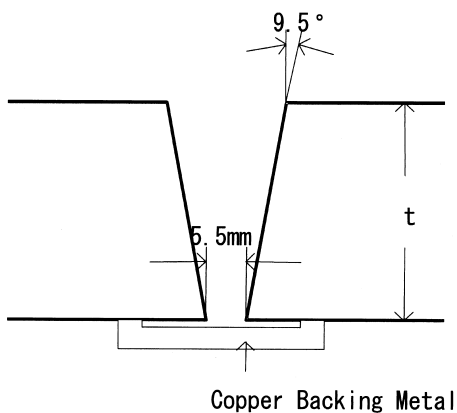


図2 標準開先形状  
Normal groove design

### 2.3 自動制御技術

一般にマグ溶接では、融合不良や溶込み不足などの溶接欠陥発生防止のため、溶接ワイヤ揺動の中心位置及び揺動幅を、開先に対して適正に制御する必要がある。また、ガスパイプラインの全姿勢溶接では、裏波を適切に形成することが必要不可欠である。MAG-IIではアークセンサ及び視覚センサを用いてこれらの制御の自動化を行った。図3にセンサシステムの概要を示し、この詳細について次節以降で述べる。

#### 2.3.1 アークセンサ

アークセンサは、トーチ揺動に伴う溶接電流またはアーク電圧の変化を検知することによって開先とトーチの位置関係を把握する技術で、開先くい制御技術として普及している。図4にアークセンサ

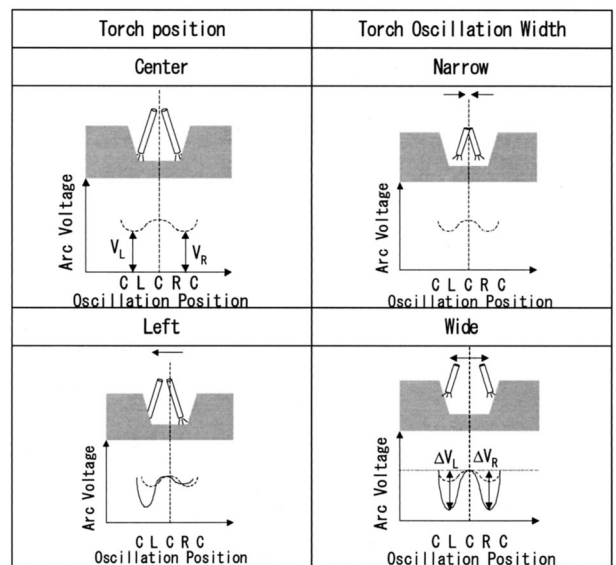


図4 アークセンサの原理  
Principle of arc sensor

の原理を示す。揺動中心位置が開先中心からずれるとアーク電圧波形が破線から実線のように変化するため、揺動左右端での電圧差  $V_L - V_R$  から中心ずれ量を推定できる。一方、揺動幅が増加すると揺動左右端での電圧降下量が破線から実線のように増加するため、例えば、電圧降下量の和  $\Delta V_L + \Delta V_R$  の適正値からの偏差により揺動幅ずれが推定できる。

しかし狭開先では、継手品質を保つためにより高精度のセンシングが必要となる。また、水平固定管の溶接では溶接姿勢に応じて

様々な溶接条件が用いられ、特に、低電流領域では短絡移行に伴うアーク電圧の変動がセンシング精度の低下を招く恐れがあったため低電流領域での精度向上も不可欠であった。

MAG-IIは、これらの課題を解決すべく、揺動周波数、揺動幅を自在に設定できる高速揺動機構を搭載した独自のアークセンサ技術を開発した。

(1)開先中心倣い

図5にトーチ揺動周波数を40Hzに設定した場合のアーク電圧の波形を示す。図5上図に示すスプレー移行となる高電流領域(330A)では、揺動位置の変化によってアーク電圧は連続的に変化し、揺動左右端(L, R)で電圧降下を示す。トーチの揺動中心位置(C)が開先中心からずれると、揺動左右端での電圧降下量も変化するため、アークセンサ制御の概念そのままにその差からずれ量を求めることができ、開先中心倣いが可能である事が判明した。

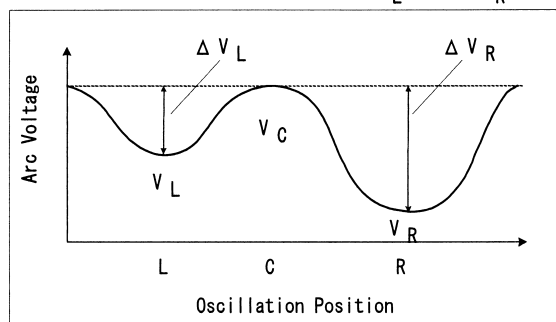
一方、図5下図は低電流領域(180A)でのアーク電圧波形を示す。揺動左右端での短絡が特徴となる。通常、短絡移行の周波数は50~100Hz程度とされ、低速のトーチ揺動条件では揺動位置と無関係に短絡が繰り返されるため、ずれ検出精度低下の要因となっていた。しかし、高速揺動条件、特に、短絡周波数の1/2程度の揺動周波数を設定することによって短絡発生位置を揺動端に限定することが可能となり、また、トーチの揺動中心位置が開先中心からずれると、短絡発生位置を揺動端に固定されたまま揺動左右端での短絡発生頻度が変化する事が判明したため、溶接トーチを高速揺動させる事は低電流領域においても高精度にずれ量を検出することができ中心倣いが可能となる事が判明した。

(2)揺動幅制御

揺動幅ずれ量の推定に対しては、図4に示す電圧降下量の和 $\Delta V_L + \Delta V_R$ が指標になる。しかし、揺動幅が同一の場合でも短絡移行の

表2 揺動幅ずれの推定  
Estimation of oscillation width deviation

1) Measure the voltage drops  $\Delta V_L$  and  $\Delta V_R$



2) Compare  $\Delta V_L$  and  $\Delta V_R$  with  $V_{ref}$  and calculate  $\Delta U_L$  and  $\Delta U_R$

$\Delta U_L = 1$ (if $\Delta V_L > V_{ref}$ ) .0 (otherwise)
$\Delta U_R = 1$ (if $\Delta V_R > V_{ref}$ ) .0 (otherwise)

3) Estimate the width deviation  $\Delta W$

		$\Delta U_R$	
		1	0
$\Delta U_L$	1	$D_w$	$-D_w$
	0	$-D_w$	$-D_w$

有無や揺動中心位置のずれにより和 $\Delta V_L + \Delta V_R$ は異なる値を示すため、ずれ量の推定精度が低下する懸念があった。そこで、表2に示す独自の揺動幅ずれ制御方法を採用した。

- 1) 揺動両端での電圧降下量( $\Delta V_L$ ,  $\Delta V_R$ )を求める
- 2)  $\Delta V_L$ ,  $\Delta V_R$ を閾値 $V_{ref}$ と比較し $\Delta U_L$ ,  $\Delta U_R$ に2値化する。なお、 $V_{ref}$ は目標とする揺動幅に依存する定数で、電圧降下量を短絡移行とスプレー移行に関わらず同様に判別するために設定した。
- 3) 予め定めたテーブルに従い、揺動幅の偏差 $\Delta W$ およびフィードバック制御量 $D_w$ を算出する。すなわち、揺動両端の電圧降下量が共に閾値を超える場合は揺動幅(大)と判定し、共に閾値以下の場合は揺動幅(小)とした。また、揺動片側の電圧降下量のみが閾値を超える場合は、開先中心の微小な倣いずれによる揺動片側のみでの短絡移行の発生とみなし、揺動幅(小)と判断した。

以上の処理を揺動1周期毎に繰り返すことによって高精度な揺動幅制御が可能となった<sup>1)</sup>。

2.3.2 視覚センサ<sup>2)</sup>

(1)システム構成

図3に示すように視覚センサシステムでは、溶接方向前方に透過主波長が近赤外域にある干渉フィルタを設けたCCDカメラを設置し、溶融池画像を画像処理装置に取り込んで画像計測および制御量の生成を行ない、初層における揺動幅倣い制御と裏波制御を行っているが、本稿では特に裏波制御について説明する。

(2)先行量計測と裏波制御

図6のカメラ配置で溶接を行い、溶融池画像と裏波溶接の状況との関係を調べたところ、アーク点と溶融池先端部の位置関係が裏波ビード良否に大きく影響しており、図6に示すような溶融池画像下

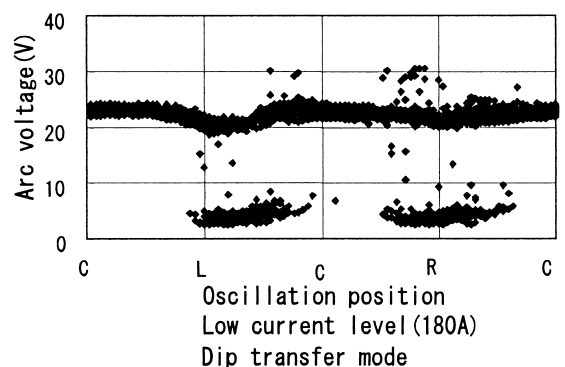
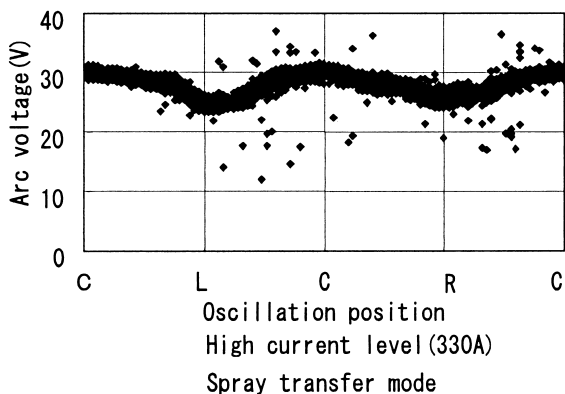


図5 40Hzにおける溶接トーチの電圧波形  
Arc voltage waveform in 40Hz oscillation

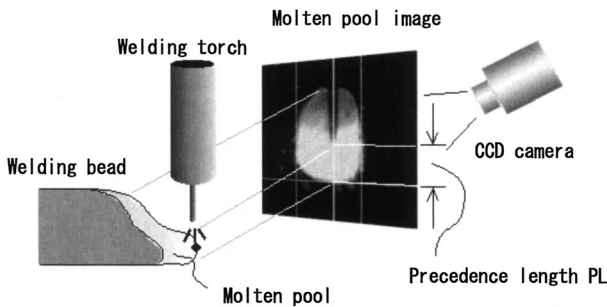


図6 溶融池先行量  
Precedence length of molten pool

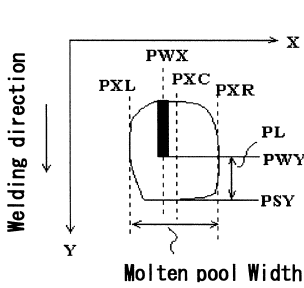


図7 特徴量  
Measured length

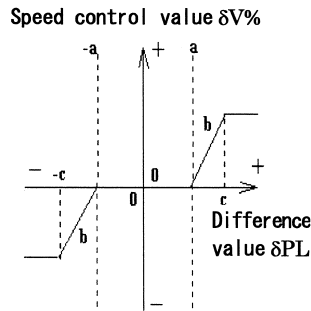


図8 速度制御テーブル  
Function for speed control

端部(溶融池前縁部)と溶接ワイヤ画像下端部との距離(以後、溶融池先行量PLと称する)がある一定範囲にあれば適正な裏波ビードが形成されることを見出した。

PLは図7に示した溶融池画像特徴点と計測値から溶接ワイヤ先端部Y座標をPWY、溶融池中央の下端部Y座標をPSYとしたとき、

$$PL = PSY - PWY$$

となる。

PL検出前後のデータの中央値をとり、計測した時点の姿勢角度を $\phi$ とすると平滑化データ $PL_{med}(\phi)$ を得る。姿勢角度 $\phi$ における基準の先行量を $PL_{std}(\phi)$ とし、 $PL_{med}(\phi)$ との差分値 $\delta PL$ を図8に示す速度制御テーブルに入力すると速度増減値 $\delta V(\%)$ が算出され、これを速度制御指令値として溶接システムの制御盤へ送信する。

### (3)先行量計測による裏波制御実験結果

ルートギャップ4.9mm、開先角度19°のV型狭開先継手において、母材裏面との隙間が溶接開始点付近で0.5mm、途中で1.0mmに広がるような銅裏当て金を用いた試験片(図9)を用い、上向き姿勢で各々裏波制御有り・無しで溶接を行ったときの裏波ビード形状を図10と図11に示す。裏波制御無し(図10)の場合は、隙間0.5mm部分では良好な裏波を形成したものの、隙間が広がってくるテーパ部から隙間1.0mm部分では、不安定な溶接状態となり裏波は蛇行し形状不良となった。一方、裏波制御有り(図11)の場合は、テーパ部も含めた試験箇所全体において安定した溶接状態で良好な裏波形状が得られた。この結果より、裏波制御は開先と母材裏面の隙間が変動していても自動的に十分に対応し、良好な裏波が保てる事を確認した。

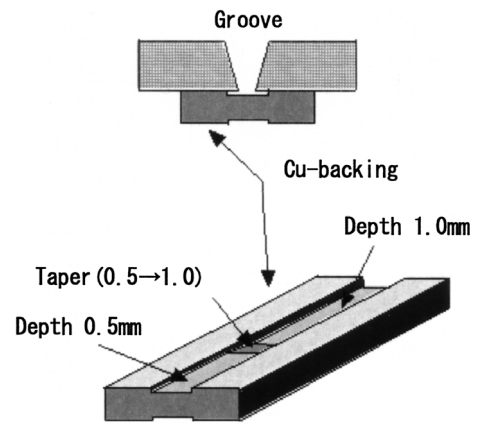


図9 試験片  
Test piece

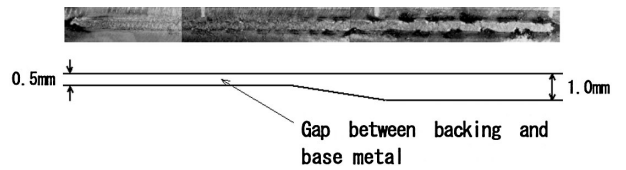


図10 裏波制御無し  
Appearance of back-bead without control

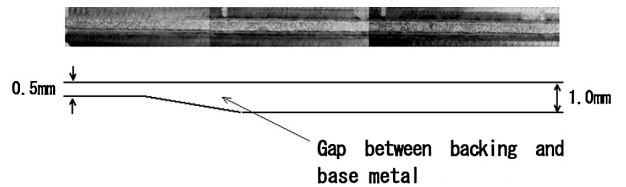


図11 裏波制御有り  
Appearance of back-bead with control

## 3. 性能検証結果

これまで述べてきたアークセンサ及び視覚センサを搭載したMAG-IIを用いて以下の設定で溶接実験を行なうことにより自動制御技術の性能検証を行った。まず、①ルートギャップを鋼管上部(0度)と鋼管下部(180度)に比べて90度位置で1mm広く、また、②ガイドレールを0度と180度に対して90度位置で6mmずらして設置し、この試験体に対して0度から180度までの半周の溶接を交互に行ない継手を製作した。

アークセンサを用いた積層における揺動幅微い制御では、トーチの揺動幅は開先幅の変化に伴って90度において揺動幅が約1mm広がる結果が得られ、①の設定に対して幅微いの制御結果が良好なことを示した。

また、アークセンサを用いた開先中心微いでは、開先とガイドレールの距離変化に従って溶接トーチ位置が変位し90度で最大6mmとなった後、180度で再び元の位置に戻る軌跡を描き、上記②の設定に対して中心微い制御が適切に動作している事を検証した<sup>3,4)</sup>。

視覚センサを用いた初層の揺動幅微い制御では、ルートギャップの変化に伴って揺動幅が90度で約1mm広がる結果となり揺動幅の制御が適切に動作している事を確認した<sup>3,4)</sup>。

この様な設定においても裏波が適切に形成されており、非破壊試験の結果でも、融合不良や溶け込み不良等の溶接欠陥が存在しない事を確認した。また、この時の継手の機械的特性を調査し、良好な

結果を得た。表3にその結果を示す<sup>4)</sup>。

これまで述べてきた自動制御技術を搭載したMAG-IIを2003年度から国内の陸上ガス導管建設工事に使用している。

表3 機械試験結果  
Mechanical test results

Diameter and wall thickness	609mm outer diameter × 15.1mm wall thickness	API 5L X65
Electrode	φ 1.2mm	JIS 3312 YGW24
Tensile test	607 - 610 MPa	JIS Z 3121, Z 2241
Bending test	No crack	JIS Z 3122
Hardness test (HV 98N)	Max. 241	JIS Z 2244
Charpy impact test	Weld metal: Min. 90J @ -10°C	JIS Z 2202, Z 2242
	HAZ: Min. 185J @ -10°C	

#### 4. 結 言

開発した自動制御技術であるアークセンサと視覚センサによって自動溶接システムMAG-IIは、開先中心倣い、揺動幅倣い及び裏波制御をリアルタイムに行なうことが可能となり、狭開先の全姿勢溶接を溶接工の技量に依らずに高品質な溶接継手を得ることが可能となった。

#### 参考文献

- 1) 児玉真二ほか:容器・配管溶接の最新技術. 溶接法ガイドブック4. 社団法人溶接学会溶接法研究委員会編. 初版. 東京, 1999, II-180
- 2) 前田剛ほか:溶接プロセスの高効率化. 溶接法ガイドブック5. 社団法人溶接学会溶接法研究委員会編. 初版. 東京, 2003, II-264
- 3) 生野康之ほか:溶接学会全国大会概要第68集. 北海道, 2001-4, 社団法人溶接学会
- 4) Ikuno, Y. et al.: 2002 Automatic Welding Wystem for Onshore Gas Pipelines. Preprints of the International Pipe Dreamer's Conference