

(技術資料)

# アーク溶接ロボットのデュアルアークセンサ

## Dual-arc-sensor for Arc Welding Robots



重吉正之\*

Masayuki SHIGEYOSHI



西村利彦\*\*

Toshihiko NISHIMURA

In tandem welding defects have been an issue caused by trailing-electrodes going off-their targets. A dual-arc-sensor is effective in tracking the weld line. This paper reports on the control logic of the dual-arc-sensor.

まえばき = 当社は、溶接時間を大幅に短縮できるタンデムアーク溶接システムを2001年に開発した。以来、タンデムアーク溶接システムは、溶接性能向上や適用範囲の拡大、ロボット操作性の改善など、多方面において進化し続け、国内外の顧客に100台以上のシステムを納入することができた。

タンデムアーク溶接<sup>1)</sup>は、2本の消耗電極(以下、ワイヤという)で同時にアークを出して溶接するため、従来の1本ワイヤによるシングル溶接に比べて高能率で高速な溶接を可能にする溶接法として普及してきた(図1、図2)。

しかしながら、従来のタンデムアーク溶接法では、後行ワイヤのアーク発生部が溶接線から位置ずれしている状態(以下、狙いずれという)を補正することができず、それによる溶接欠陥が課題になっていた。

この課題に対して当社は、本来は先行ワイヤにのみ適用するアークセンサを後行ワイヤにも適用し、先行と後行の二つのアークセンサ(=デュアルアークセンサ)を

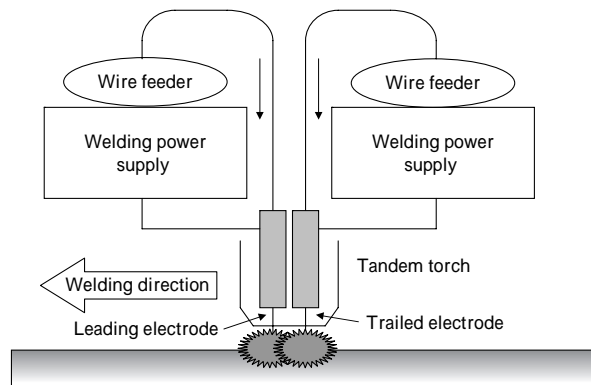


図2 タンデム溶接概念図

Fig. 2 Schematic diagram of tandem welding

実現するシステムの開発に成功した。

本稿では、デュアルアークセンサの制御方法と溶接試験結果について説明する。

### 1. タンデムアーク溶接法

#### 1.1 アークセンサ

タンデムアーク溶接法は2本のワイヤで同時溶接するため、高品質な溶接を行うためには2本のワイヤが溶接線に正確に位置決めされている必要がある。どちらか一方のワイヤでも溶接線からずれた場合、アンダカットや溶込み不良などの溶接欠陥が発生する。一般的にアーク溶接では、ワイヤの狙いが溶接線から1mm程度以上ずれると溶接品質上問題になる。そのため、ロボットでタンデムアーク溶接を行うには、2本のワイヤとも正確に溶接線を狙うようにロボットを位置決めし、その位置をロボットに記憶させる作業(=ティーチング作業)が必要になる。

油圧ショベルなどの大型・中厚板ワークでは、正確にティーチング作業を行った場合でもワークの加工誤差や

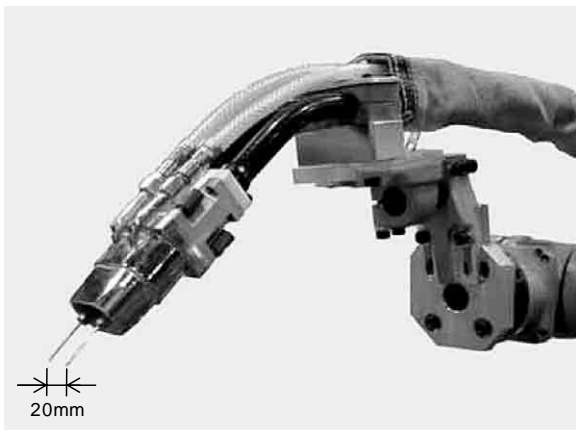


図1 タンデムトーチ

Fig. 1 Tandem welding torch

\* 溶接カンパニー 溶接システム部 \*\* 技術開発本部 生産システム研究所

溶接ステージへの設置誤差，溶接時の熱ひずみ，ワイヤの曲り癖などの影響により，実ワーク溶接時にはワイヤの狙い位置が溶接線から数 mm 以上ずれることが多い。

この問題を解決する手段としてアークセンサ機能が用いられてきた。トーチを開先内で往復動作（以下，ウィーピングという）させた場合，電極チップと母材との距離（以下，ワイヤ突出し長さという）が変化する。溶接電流はワイヤ突出し長さに反比例する特性があるため，溶接線のずれがない状態ではウィーピング左右端の溶接電流は一致する（図 3(a)）。溶接線にずれがある場合，ウィーピング右端と左端のワイヤ突出し長さが異なるため，ウィーピング左右端の溶接電流に違いが生じる（図 3(b)）。アークセンサはこの溶接電流変化を用いて溶接線左右方向の位置ずれを検出し，トーチの位置を左右方向に補正する。

また，溶接線が上下方向にずれた場合は，ウィーピング一回分の溶接電流平均値と基準電流（一般に設定電流を用いる）に違いが生じる。この変化を用いることによって溶接線の上下方向の位置ずれを検出し，トーチの位置を上下方向に補正する（図 4）。

アークセンサは，トーチ周りに何ら特別な機器を取付ける必要はなく，溶接中に溶接線の位置ずれに追従できる実用性に優れた溶接線追い機能である。

従来のタンデムアーク溶接システムのアークセンサは，先行ワイヤの溶接電流変化を利用して先行ワイヤの位置ずれを検知し，タンデムトーチ全体を左右・上下方向に位置補正していた（図 5）。これにより，溶接線に位置ずれが発生する場合でも良好なタンデムアーク溶接ができ，タンデムアーク溶接システムにおいてもアークセ

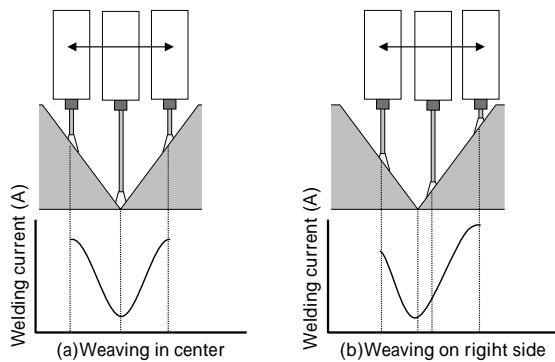


図 3 左右方向アークセンサ  
Fig. 3 Right and left direction tracking of arc sensor

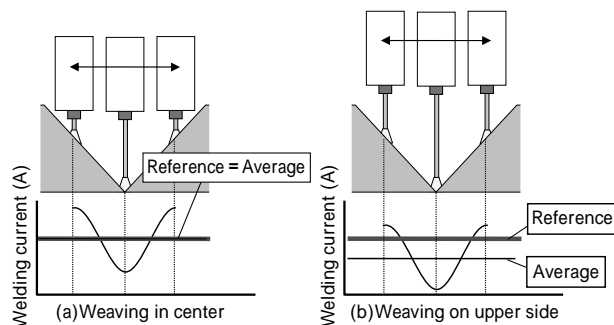


図 4 上下アークセンサ  
Fig. 4 Upper and lower direction tracking of arc sensor

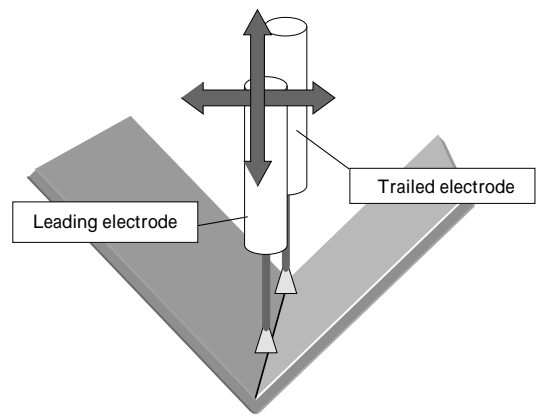


図 5 従来のアークセンサ補正方向  
Fig. 5 Direction of conventional arc sensor correction

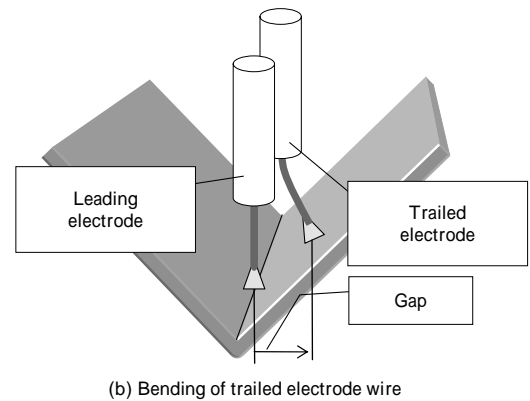
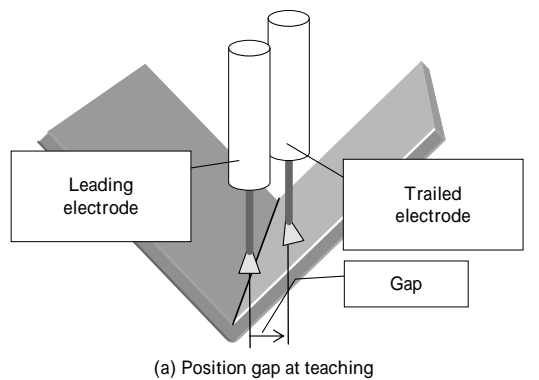


図 6 後行ワイヤの狙いずれ  
Fig. 6 Position gap of trailed electrode wire

ンサが広く使用されてきた。

## 1.2 タンデムアーク溶接法の課題

従来の先行ワイヤだけによるアークセンサは，溶接線からのずれが先行ワイヤ，後行ワイヤともほぼ同じ場合に有効であるが，両ワイヤでずれが異なる場合には対応できないという問題がある。実際の生産現場では，溶接線のずれが両ワイヤで異なってしまう場合もあり，後行ワイヤの狙いずれによる溶接不良が発生していた（図 6）。

## 2. デュアルアークセンサの開発<sup>2)</sup>

前章で述べた従来の問題を解決するため，先行ワイヤと後行ワイヤの両方の狙いずれが検出・補正できるアークセンサ（デュアルアークセンサ）の開発を行った。

### 2.1 溶接電流検出手段の開発

アークセンサを実現するためには，溶接時の溶接電流

を検出する必要がある。従来のシステムでは先行ワイヤ側の溶接電流しか検出できず、後行ワイヤの溶接電流を検出することは不可能であった（図7）。

そこで、先行ワイヤと後行ワイヤの溶接電流を同時に検出できるシステムを開発した（図8）。

## 2.2 後行ワイヤ狙いずれ検出方法の開発

アークセンサは、トーチを開先内でウィーピングした場合のワイヤ突出し長さの変化によって生じる溶接電流変化を用いる。このため、ウィーピング時のワイヤ突出し長さ変化が大きいくほど精度良く位置ずれを検出できる。

タンデム溶接時の後行ワイヤは、先行ワイヤが溶けた溶融プール上にアークが発生するため、ウィーピング時のワイヤ突出し長さはほとんど変化しない（図9）。さらに、実際の溶接電流は、ワイヤ突出し長さに応じた変化要素だけでなく、溶接中の微小短絡や溶融プールの振動などによる電流変化（以下、ノイズ成分という）が加わる。これにより、先行ワイヤと同等の位置ずれ検出方法では後行ワイヤの位置ずれを良好に検出することはできなかった。

そこで、ノイズ成分を除去する適切なフィルタ処理の追加、およびウィーピングの左端と右端の溶接電流差から後行ワイヤの位置補正量を算出するまでの補正量計算処理の見直しを行った。この新制御方法により、後行ワイヤの狙いずれを良好に検出することが可能になった。

## 2.3 後行ワイヤ位置補正処理の開発

後行ワイヤの位置ずれ補正として、先行ワイヤ周りにタンデムトーチ全体を回転補正する方法を開発した。この方法により、先行ワイヤの狙い位置に影響することなく後行ワイヤのずれ補正を行うことができる（図10）。

これらの機能は全てロボットの制御ソフトウェアによって実現しており、特殊な機構は一切不要である。以下に演算方法を説明する。

図11に示すように、ロボットは溶接作業時にタンデムトーチの「先行ワイヤ」をTCP（Tool Center Point）とし、TCPを直線（あるいは円弧軌道）で移動させている。ある時刻  $t$  におけるロボットベース座標  $base$  から見たTCPの位置・姿勢  $F(t)$  は  $(X, Y, Z, \quad, \quad)$  の6成分によって与えられる。姿勢角成分  $(\quad, \quad, \quad)$  は一般にはロール・ピッチ・ヨー角（あるいはオイラー角）が用いられ、 $base$  から見たトーチ姿勢角の回転行列は

$${}^{base}R_{tool} = Ro(\quad) \cdot Ro(\quad) \cdot Ro(\quad) \dots \dots \dots (1)$$

ただし

$$Ro(\quad) = \begin{pmatrix} \cos & -\sin & 0 \\ \sin & \cos & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$Ro(\quad) = \begin{pmatrix} \cos & 0 & \sin \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin & 0 & \cos \end{pmatrix}$$

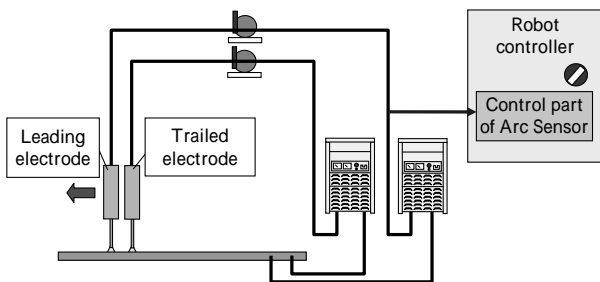


図7 従来のアークセンサ構成  
Fig. 7 Conventional arc sensor system

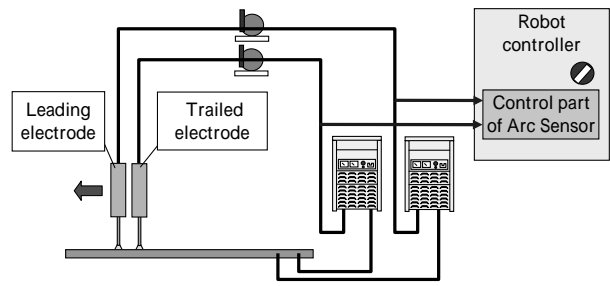


図8 デュアルアークセンサの構成  
Fig. 8 Dual arc sensor system

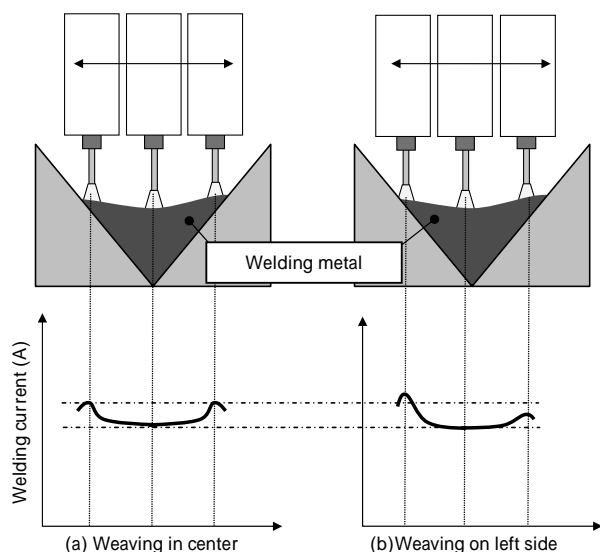


図9 後行ワイヤの溶接電流  
Fig. 9 Welding current of trailed electrode

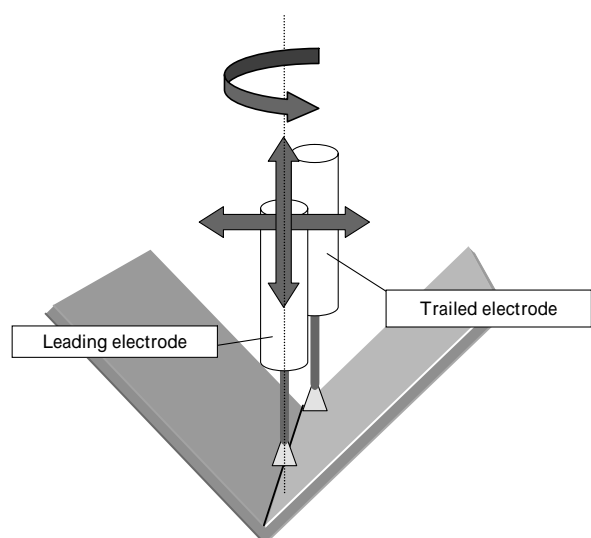


図10 デュアルアークセンサの補正方向  
Fig.10 Direction of dual arc sensor correction

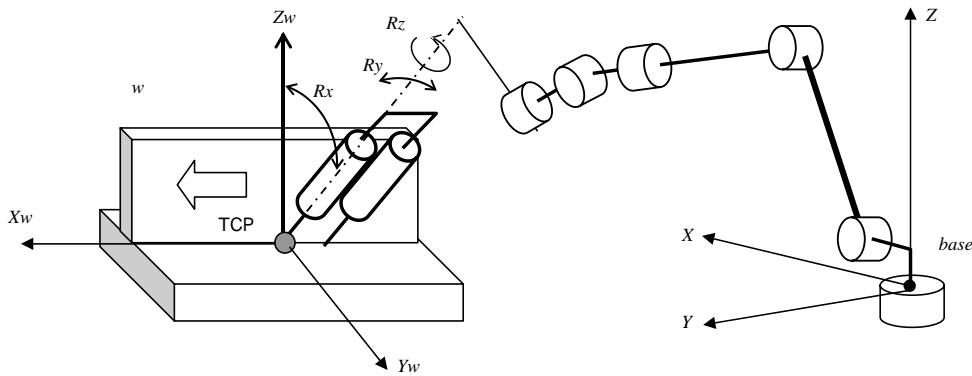


図11 溶接時のロボット座標系  
Fig.11 Robot coordinate of arc welding

$$Ro(\quad) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos & -\sin \\ 0 & \sin & \cos \end{pmatrix}$$

となる。

溶接進行方向を  $X_w$  とすると、 $X_w$  を X 軸とする作業座標系  $w$  を決定することができ、 $base$  から見た作業座標系  $w$  の回転行列  ${}^{base}R_w$  が計算できる。 $w$  から見たトーチ姿勢の回転行列は、以下の式にて計算できる。

$${}^wR_{tool} = ({}^{base}R_w)^T \cdot {}^{base}R_{tool} \dots \dots \dots (2)$$

次に  $w$  上でのトーチ姿勢角として、

$R_x$ :  $X_w$  軸回り  $R_y$ :  $Y_w$  軸回り  $R_z$ :  $Z_w$  軸回り

の順番で回転させた姿勢角 ( $R_x, R_y, R_z$ ) を考える。 $R_x$  は溶接施工での「トーチ傾斜角」、 $R_y$  は「トーチ前進角」に相当し、 $R_z$  は先行ワイヤ回りの回転角となる。 $w$  から見たトーチ姿勢の回転行列は、

$${}^wR_{tool} = Ro(R_x) \cdot Ro(R_y) \cdot Ro(R_z) \dots \dots \dots (3)$$

ただし、

$$Ro(R_x) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos R_x & -\sin R_x \\ 0 & \sin R_x & \cos R_x \end{pmatrix}$$

$$Ro(R_y) = \begin{pmatrix} \cos R_y & 0 & \sin R_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin R_y & 0 & \cos R_y \end{pmatrix}$$

$$Ro(R_z) = \begin{pmatrix} \cos R_z & -\sin R_z & 0 \\ \sin R_z & \cos R_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

となり、式(1)~(3)、および与えられた姿勢角 ( $\quad, \quad, \quad$ ) から ( $R_x, R_y, R_z$ ) を求めることができる。

なお、タンデムトーチの場合は、2本のワイヤの先端が共に溶接線を狙うように教示されるため、前進角  $R_y = 0$  となり式(3)の  $Ro(R_y)$  は単位行列とみなしても良い。

アークセンサが検出した後行ワイヤと溶接線とのずれ  $YW$  から、図12のようにトーチ回転角  $R_z$  を  $R_z$  だけ回転させ、 $R_z' = R_z + R_z$  とする。以降は式(1)~(3)を用いて補正後の ( $R_x, R_y, R_z'$ ) からベース座標系でのTCP姿勢角 ( $\quad, \quad, \quad$ ) を求め、ロボットを駆動させることで後行ワイヤを溶接線に追従させることが可能となる。

## 2.4 実験結果

後行ワイヤの追従性能を評価するため、図13のよう

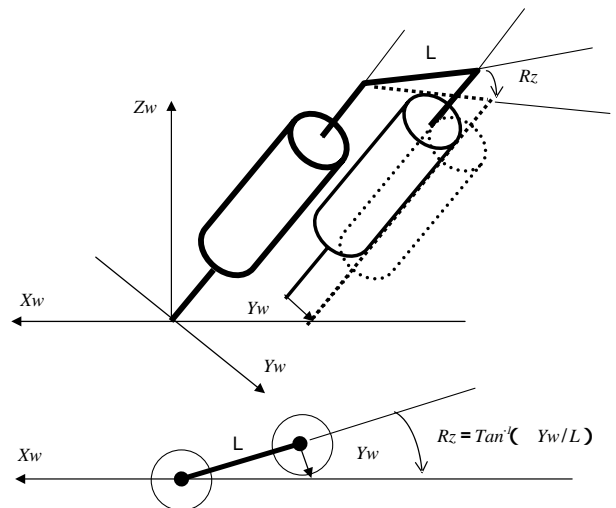


図12 後行ワイヤの位置補正  
Fig.12 Positional correction of trailed electrode wire

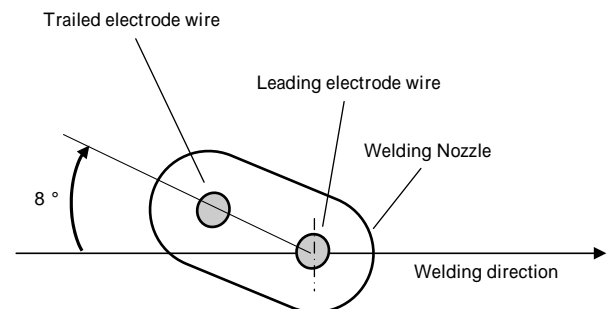


図13 後行ワイヤの位置ずれ追従試験  
Fig.13 Tracking test of trailed electrode wire

に後行ワイヤだけを溶接線から8度(後行ワイヤのずれ量としては約3mm)ずらして溶接を行った。この時の溶接条件を表1に示す。

図14は、従来アークセンサ(後行ワイヤの做いなし)を用いて溶接した結果である。後行ワイヤが試験板を大きくかじり、大きなアンダカットが発生している。図15にデュアルアークセンサを用いた場合の做い結果を示す。図15(a)の縦軸は後行ワイヤの位置補正量(做い開始からの積算値)、図15(b)の縦軸は後行ワイヤでのウィーピング左端と右端の溶接電流差を示す。5秒程度で後行ワイヤの位置補正量は7.5度に達し(後行ワイヤの狙いずれ量としては約0.2mm相当)、後行ワイヤの位置ずれが速やかに解消されていることがわかる。その後

表 1 後行極微い試験時の溶接条件

Table 1 Welding condition of trailed electrode tracking test

Leg length	Welding conditions		
	Current	Speed	Weaving
8 (mm)	Leading electrode : 320 (A) Trailed electrode : 270 (A)	72 (cm/min)	Cycle : 3 (Hz) Width : 4 (mm)

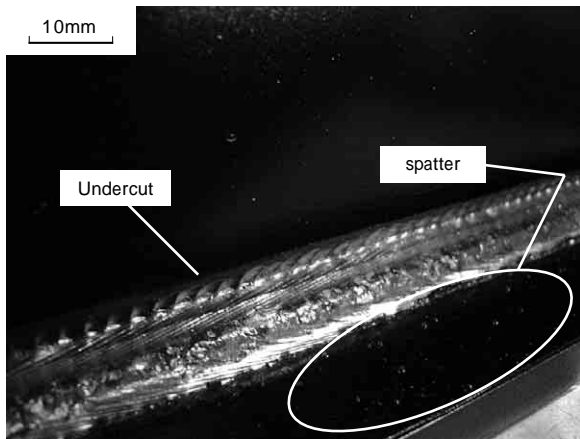


図14 後行ワイヤずれへの従来センサ適用  
Fig.14 Result of conventional arc sensor

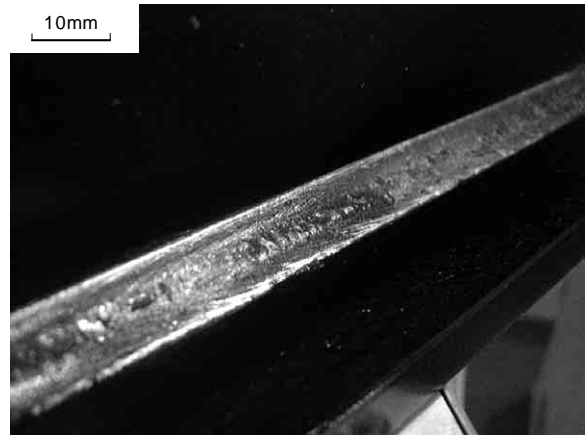
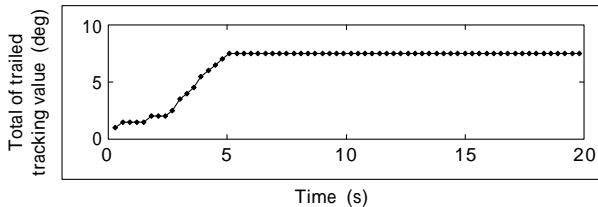


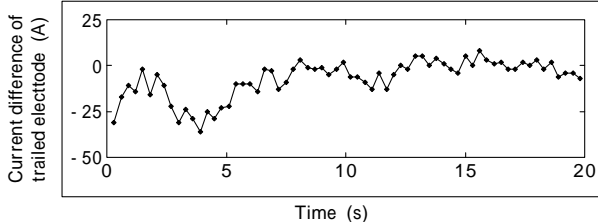
図16 後行ワイヤずれへのデュアルアークセンサ適用  
Fig.16 Result of dual arc sensor

は、溶接電流差の変動（ノイズ成分）はあるが、後行ワイヤの位置補正はほとんど発生しておらず、追従性と安定性に優れた微い実現できていることがわかる。

図16は、デュアルアークセンサを用いて溶接した結果（後行ワイヤの追従が定常状態になった状態）である。溶接欠陥のない良好なビード外観になっている。



(a) Tracking value of Trailed electrode wire



(b) Current difference of trailed electrode wire

図15 後行ワイヤの追従結果

Fig.15 Result of trailed electrode tracking test

むすび= タンデムアーク溶接システムは、生産能率向上に大きく貢献する溶接施工法として広く普及してきた。デュアルアークセンサの開発に成功したことにより、当社タンデムアーク溶接システムはさらに進化し、より高品質な溶接が実現できるようになった。

今後も、タンデムアーク溶接など生産能率向上・溶接品質向上に貢献できる商品開発に取り組んでいく所存である。

参考文献

- 1) 横田順弘ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.54, No.2(2004) p.81.
- 2) 重吉正之：溶接だより技術がいと，Vol.48, 2008-12.