

前話では、「融合」というコンセプトでロボットと溶接機との境界をなくし、融合化した制御装置によって、アーク溶接に特化した専用ロボットの動作制御と溶接波形制御を一元的に制御する「TAWERS」の開発概要について、該当文献を参考にし、紹介しました。

TAWERS は、P 社殿が 2004 年 10 月から開発製品化し、販売を開始された、早速、2004 年 12 月号には溶接技術誌に、「スパッタ低減の取組み」と題して向井康士氏が執筆、掲載されたのですが、最近、産報出版(株)に問い合わせたところ、残念ながら在庫切れでした。TAWERS におけるスパッタ低減の取組みについてホットなところが掲載されていると思いますが、あきらめまして、それ以降の溶接技術誌、溶学誌を参考にして、紹介を続けます。

スパッタ低減の取組みとして最初に登場したのが SP-MAG 溶接法であり、続いて HD-PULSE 溶接法でした。その後、2009 年頃までに開発されたのは CO2 溶接のグロービュール移行領域における溶滴移行安定化制御である MTS-CO2 溶接法が代表的なものです。そこで、本話では文献中に何度も出てくる表現を借りて「進化の基本である SP-MAG 溶接法」と HD-Pulse 溶接法の二つを紹介させていただきます。

1. SP-MAG 溶接法

1) P-2～P-6 各文献における SP-MAG 溶接法に関する説明記事の抜粋（概要）

- P-2 ; 2004 年 12 月号に SP-MAG 法については執筆されたとして、本文献では概要にとどめている。
波形制御は溶接制御カードで行なう。それはロボットのメイン CPU ボードのバスに直接接続。
溶接制御カードは DSP (デジタルシグナルプロセッサ) を搭載、「ソフトウェア波形制御」を実現していることが最大の特徴。これにより 1 秒間に 10 万回アークを調整可能。さらに TAWERS ではリアクタンスの動作を電圧フィードバックのソフトウェアアルゴリズムによって実現しハードウェアリアクタを不要とした。
- P-3 ; 低電流短絡移行領域は SP-MAG 溶接法とセカンダリスイッチング制御により、スパッタ発生量を大幅に低減。
ワイヤの短絡開始と終了直前を正確に瞬時検知し出力低下させること（セカンダリスイッチング制御）で、ワイヤ通電可能径が細くなったところに過大な電流を流すことによる「ヒューズ効果」で発生するスパッタ発生量を従来比約 1/5～1/10 にまで大幅低減。
また、ワイヤの短絡解放直後に電流を重畳し、ワイヤ先端溶融を促進させ、溶滴移行の短絡周期を早めることが可能となる（SP-MAG 溶接法）。このため母材への低入熱溶接となり、薄板ギャップ溶接の適用裕度の拡大が可能。
- P-4 ; 波形制御の進化 → マグ溶接／新短絡波形制御法 (SP-MAG) → 重畳電流制御
→ セカンダリスイッチング制御 のストーリーで詳述されている。
- P-5 ; P-4 の記述とほぼ同じ
SP-MAG 溶接法／概要 → 重畳電流制御によるスパッタ低減 → セカンダリスイッチング制御によるスパッタ低減 のストーリーで詳述。
- P-6 ; P-3 の記述とほぼ同じ
低電流短絡移行領域 (SP-MAG 溶接法) ; 本短絡溶接法はスパッタの大幅低減と低入熱安定溶接を実現。低電流短絡移行領域は弊社独自の SP-MAG 溶接法と 2 次スイッチング制御により溶滴の短絡開始と終了直前を瞬時に検知し、ヒューズ効果によるスパッタ発生量を従来比 1/5～1/10 にまで大幅低減。また、溶滴の短絡解放直後に電流を重畳し、ワイヤ先端溶融の促進で短絡周期を早めることが可能となる。このため低入熱溶接となり、薄板 GAP 溶接の適用裕度も拡大。

以上の記述概要であるため、主として P-4 文献を選んで、「SP-MAG 溶接法」に関する説明を以下に補足します。

2) 新短絡波形制御法 (SP-MAG 溶接法)

- アルゴンガスを主体に CO2 ガスを混合したマグガス雰囲気中における短絡移行溶接は、母材への入熱が比較的少なくアークも安定しているため非常に使いやすく優れた溶接法である反面、小粒のスパッタが多いといった問題点がある。
- 一方、パルス移行溶接はスパッタが低減できるが、母材への入熱のコントロールが難しく薄板やギャップがあるワークでは溶落ちなどの問題や、アークブローなどの厄介な現象も発生しやすい。
- このような両者の特長を併せ持つ溶接法として開発した短絡波形制御法である SP-MAG 溶接法を最初に紹介する。

2)-1 重畳電流制御

- SP の由来は、重ねる、あるいは重畳すると言った意味の「Super-imPosition」からであり、通称 SP-MAG と呼んでいる。
- 図 261-1 が従来の短絡波形と SP-MAG の短絡波形を模式的に表した図である。短絡解放直後に図に示すハッチングの部分で電流を重畳している。SP-MAG ではこのハッチングの部分の電流 (SP 電流) によってアークが再点弧すると直ちにエネルギーを重畳し、ワイヤ先端の溶融を加速してワイヤ先端に溶滴を形成させている。
- ワイヤ先端に十分な溶滴が早期に形成されると次回の短絡移行を非常にスムーズに行うことができるとともに、短絡周期を短く調整することができるようになる。

SP-MAG のメリットとしては、

- ① 次に説明するセカンダリスイッチング制御との相乗効果でスパッタを極小化できる。
- ② 安定した短絡周期と短周期化が図れ、高速溶接に適したアークを創り出すことができる。
- ③ 電圧を絞って使えるので母材への入熱をコントロールしやすい。

の3点が挙げられ、とくに自動車業界を中心とした薄板のロボット溶接に最適な波形制御法であると言える。

2)-2 セカンダリスイッチング制御

- セカンダリスイッチング制御は当社従来電源に十数年以上前から搭載している既知の技術であるが、短絡波形の一周期を表示した図 261-2 を用いて、改めて概要を説明する。
- 一般的にスパッタの多くは短絡とアークとの切り替え時に発生する。アークから短絡に移行する図 261-2 の A のタイミングでもっとも問題となるのは、発生した短絡がすぐに解放されてしまう微小短絡の発生で

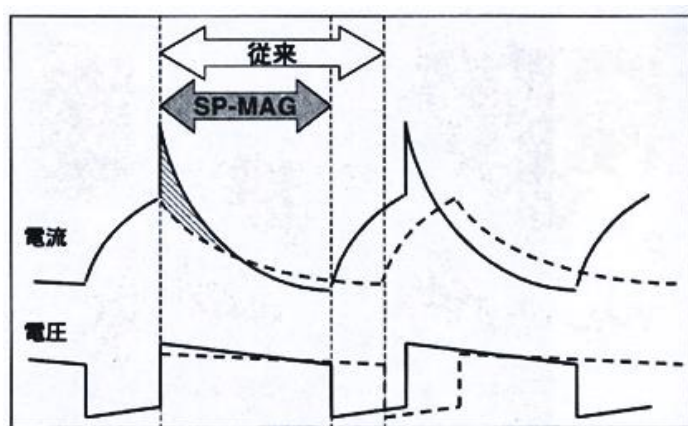


図 261-1 SP-MAG 短絡波形

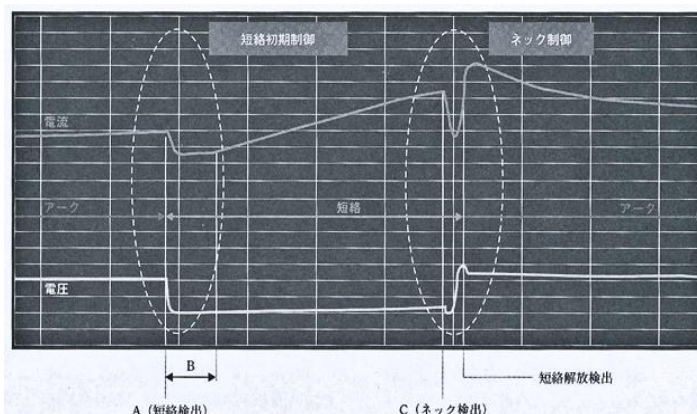


図 261-2 セカンダリスイッチング制御

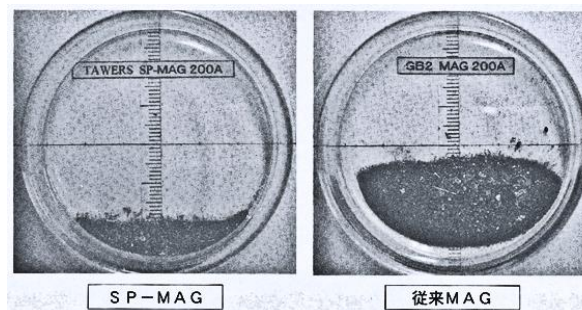


写真 261-1 スパッタ発生量の比較

ある。微小短絡が継続発生すると、ワイヤ先端で溶融形成された溶滴が溶融池に移行せずにワイヤ側に残ってしまい、次の短絡発生時の急激な電流増加によって爆裂し（ヒューズ効果）、大粒のスパッタとして飛ばされる場合が多く発生する。このため、ワイヤ先端の溶融池への短絡を検出するとインバータ出力をOFFにするとともにセカンダリスイッチングを切り替えて電流を急峻に低下させ、短絡からアークへと移行する際の解放エネルギーを低減するよう制御する。

- **Bの区間**は電流を低く保ってワイヤと溶融池とを十分に短絡させ、その後通常の制御と同じように電流を上昇させて短絡解放を促進させる。
- 溶滴がワイヤから溶融池に移行していくと、短絡が解放される直前の**Cのタイミング**で溶滴部にくびれが発生する。このくびれを**ネック**と呼んでいる。
- ネックが発生すると、導電部の断面積が小さくなるので抵抗値が急激に変化し、短絡の解放を予見することができる。短絡解放時に電流が高い状態に保たれたままであるとヒューズ効果が起こり、溶滴を飛散させてスパッタとなる。
- このため、ネックを検出するとインバータ出力をOFFにするとともにセカンダリスイッチングを再び切り替えて電流を急峻に低下させることでヒューズ効果を防止し、短絡からアークへのスムーズな移行を促すことによりスパッタの発生量を最小限に抑制する。
- TAWERS では、制御周期が $10\mu\text{s}$ と非常に高速であることと、**独自のネック検出アルゴリズム**により、ほぼ100%のネック検出率を実現している。上述の SP-MAG のスムーズな短絡移行との相乗効果により、**写真 261-1** に示すように現行のフルデジタル溶接機 350GB2 と比較してマグで $1/5 \sim 1/7$ の低スパッタ化を達成している。
- さらに、**SP-MAG** は現在短絡解放直後の溶融池の振動抑制制御を加えた **SP-MAG II** へと進化し、さらなる低スパッタ化を図っている。

次に、上記 SP-MAG 溶接法と並んでP社が大切にされているマグ中・高電流向けスパッタ低減・高速溶接用の HD-Pulse 溶接法を紹介します。HD-Pulse 溶接について詳述されている文献は P-2、P-5 ですが本話では掲載スペースの関係もあり、**P-5** の説明をメインに引用することにします。

2. HD-Pulse 溶接

2) -1 HD-Pulse 溶接法の概要

▪ マグ溶接のグローブ移行領域やスプレー移行領域の電流値以上では、短絡回数自体が少ないため、前記 SP-MAG 溶接法のような効果が十分発揮できないといった問題点がある。

▪ そこで、ガスやワイヤに特殊な成分を混合してスパッタ抑制する方法と異なり、一般的な軟鋼ソリッドワイヤであり、かつ一般的なマグガス（80：20 or 90：10）での高電流・高速溶接時のスパッタを最小限とすることを目的とした**新パルス短絡波形制御法を開発**した。この溶接制御法は、自動車部品のシャーシ系部品といった比較的中厚板のロボット溶接に最適な波形制御法である。

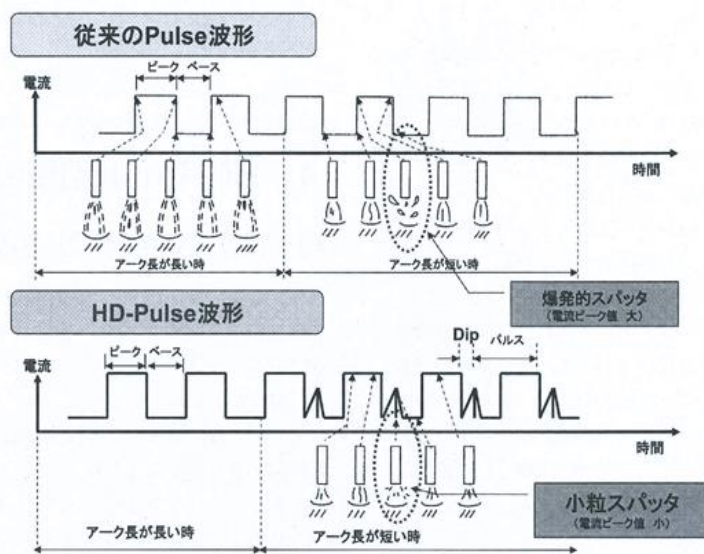


図 261-3 HD-Pulse 溶接法

2)-2 HD-Pulse 溶接法によるスパッタ低減

■ 主なパルス波形制御の波形と溶滴移行のイメージを図 261-3 に示す。従来のパルスアーク溶接では、1 ドロップ／パルスを目指してはいたものの、実際には1～2ドロップ／パルスであった。短絡をさける場合、アーク中に複数個の溶滴が存在するため、必然的にアーク長が長くなっていた。パルスアーク溶接ではアーク長が長いと高速溶接時にビードにくびれが断続的に発生するハンピング、ビード端に接する母材に凹部ができるアンダーカット、重ねすみ肉溶接でのギャップ発生部での上板の溶落ちが発生しやすい。

■ そこで、アーク長を短くし（電圧を下げ）、短絡とスプレー移行が混在する条件で溶接をしていた。この場合、短絡解放とピーク電流が重なりとヒューズ効果により大粒のスパッタが発生していた。

■ そこで、短絡をベース電流期間中に発生させるように制御し、短絡解放電流値を低く抑えるために短絡電流の立ち上がり傾斜を緩やかにしたのが **Dip-Pulse** で、スパッタの低減が図れた。

■ また、Normal-Pulse においても、最近の溶接機性能の向上により、確実に1ドロップ／パルスが達成できるようになったため、アーク長を短くすることができる。

■ さらに TAWERS では、短絡のタイミングがベース電流期間の開始時になるよう精度良くコントロールし、短絡解放時には上述のネック制御を行っており、さらなるスパッタ低減を図っている。**Dip-Pulse** を進化させた「HyperDip-Pulse」から通称 **HD-Pulse** と呼んでいる。

■ HD-Pulse と SP-MAG のスパッタ発生量比較を図 261-4 に示す。HD-Pulse は高電流でよりスパッタ低減効果大きいことが分かる。

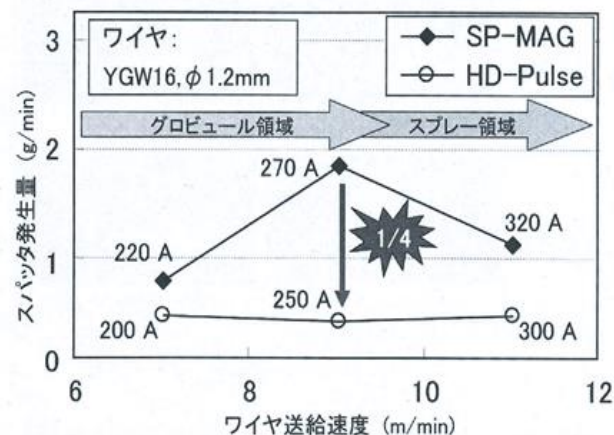


図 261-4 HD-Pulse スパッタ発生量の比較

表 261-1 溶接法の特徴比較

| 溶接法 | SP-MAG | | | Normal-Pulse | | | HD-Pulse | | |
|---------|----------------|--------------------|----------------|----------------|--------------------|----------------|----------------|--------------------|----------------|
| | 短絡領域 0～200A | グローブ領域 200～280A | スプレー領域 280～ | 短絡領域 0～200A | グローブ領域 200～280A | スプレー領域 280～ | 短絡領域 0～200A | グローブ領域 200～280A | スプレー領域 280～ |
| 溶接速度 | ○ | ○ | ▲ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| スパッタ | ○ | △ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 溶込み形状 | ○ | ○ | ▲ | △ | △ | △ | ○ | ○ | ○ |
| アンダーカット | ○ | ○ | ▲ | ○ | ▲ | ▲ | ○ | ○ | ○ |
| 母材入熱 | ○ | ○ | ▲ | △ | △ | ▲ | ○ | ○ | ○ |
| 耐GAP性 | ○ | ○ | ▲ | △ | △ | ▲ | ○ | ○ | ○ |
| コメント | 短絡移行領域で効果絶大 | | | 低中速度で低スパッタ溶接 | | | 高電流域で効果絶大 | | |
| 総合評価 | ○ | ○ | ▲ | △ | △ | ▲ | ○ | ○ | ○ |

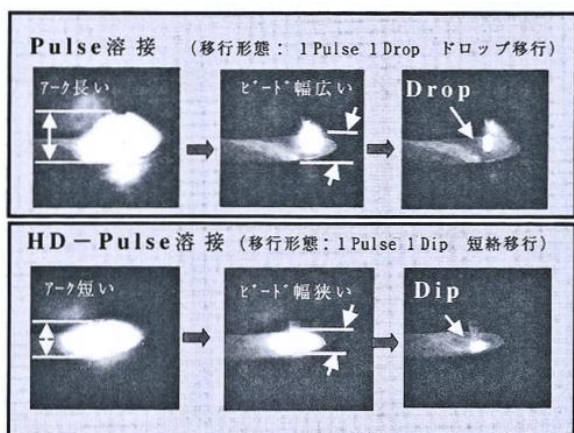


図 261-5 HD-Pulse のアーク状態

なお、P-2 文献に掲載の、表 261-1 および図 261-5 を添付します。但し、説明は掲載スペースの関係上省略させていただきます。参考にして下さい。

次話では、中電流グローブ移行領域に好適な MTS-CO2 溶接法および新入熱制御法である HEAT 工法について紹介を予定します。

以上。