

=溶接学会誌にみる TIG 溶接技術の最近の歩み (8) =

第 240 話から始めて本話 247 話まで、2005 年～2016 年にかけて主に TIG 溶接技術の歩みを、学会誌を参考にさせて頂き、溶接プロセスと溶接機器にわけて振り返りました。一口に言って、大変な進歩がこれら短期間に成し遂げられたと感ずる次第です。

溶接プロセスにおいては、TIG 溶接の構成要素である電極、アーク現象、溶融池、凝固現象に到る一連の現象を捉える観察技術へ進化を目指し、プロセスからスタートし一貫した現象予測と理解ができるシミュレーション技術の構築が進みました。

一方、溶接機器においては溶接専用 LSI 「Welbee (Welding Best electronic engine)」が開発され、アーク現象のモデル化・計測技術の動向に、溶接法および溶接機器も呼応し、進化をとげてきたことが特筆すべき点であると感じています。

本話では、2012 年～2016 年における「アーク溶接 (機器)」(1.4 複合プロセス, 1.5 その他)を見ることで、最近の歩みの最終とさせて頂きます。

### 1. 「アーク溶接 (機器)」2012-2016 ; (1.4 複合プロセス (効率化), 1.5 その他)

溶接学会誌引用文献 (レビュー&トレンド) の目次一覧を表 247-01 に示します。

溶接学会誌 2012~2016年の = 特集「溶接・接合をめぐる最近の動向」= 欄より引用  
表 247-01 TIG 溶接関係文献 (レビュー&トレンド) の一覧

整理 NO.	執筆者 (所属) (敬称略) 文献 NO. および記載ページ	文献の主要目次 と TIG 溶接関連目次
8	恵良 哲生 (株ダイヘン) Vol. 81 No.5 2012 p 62~64	第 II 部 産業界の最近の動向と溶接工学 II 溶接・接合および関連機器 1 アーク溶接 1.1 市場動向 1.2 GMA 溶接法 1.3 GTA, プラズマ溶接法 1.4 複合プロセスによる高効率化 1.5 その他
10	恵良 哲生 (株ダイヘン) Vol. 83 No.5 2014 p 51~53	第 II 部 産業界の最近の動向と溶接工学 II 溶接・接合および関連機器 1 アーク溶接 1.1 市場動向 1.2 GMA 溶接法 1.3 GTA 溶接法 1.4 複合プロセス 1.5 その他
12	小野 貢平 (株ダイヘン) Vol. 85 No.5 2016 p 62~64	第 II 部 産業界の最近の動向と溶接工学 II 溶接・接合および関連機器 1 アーク溶接 1.1 市場動向 1.2 GMA 溶接法 1.3 TIG・プラズマ溶接法 1.4 複合プロセス 1.5 その他

### 2. 「各年次におけるレビュー&トレンドとその動向」からみた概要

「各年次における TIG 溶接関連レビュー&トレンドとその動向」(2012-2016) における記事を最終ページの表 247-02 に示します。

表 247-02 の具体的な記事を参照しながら、各年次の主な流れを以下に記します。また記事のなかの図 (写真) も参考として添付しました。なお、記事および図表についての詳細は溶学誌の原文を参照して頂きますようお願いいたします。

## 2-1) 2012年 (1.4 複合プロセスによる高効率化 1.5 その他)

### 1.4 複合プロセスによる高効率化 2012年

■ ハイブリッド溶接プロセス、代表はレーザアークハイブリッド溶接法。他にプラズマGMA法の提案あり

#### ① 10kWファイバーレーザとマグ溶接を組合わせたハイブリッド溶接

- T継手水平すみ肉溶接への適用；レーザ先行の場合、適切なマグ溶接条件で12mm1パス溶接可能
- 12mm×I形突合せ溶接への適用；アーク先行/レーザ後行で滑らかで安定な裏波ビード形成。

#### ② プラズマGMA法も提案されている。(レーザより安価)

- 低希釈率、かつ高溶着な肉盛溶接への適用可能性が報告。
- アルミニウム合金の溶接；プラズマの効果でMg蒸気の発生が抑制され美麗外観。
- 純Arシールドで厚板の鉄鋼材料へ適用、パルス化したプラズマ電流が開先内でアークを安定化。

#### ③ ティグ溶接法とミグ溶接法の複合化による両溶接法の長所を両立できる溶接プロセスの紹介

- 先行ティグアークの余熱効果で後行ミグアークを安定化、純Arでも安定ミグアーク可能、溶存酸素量少

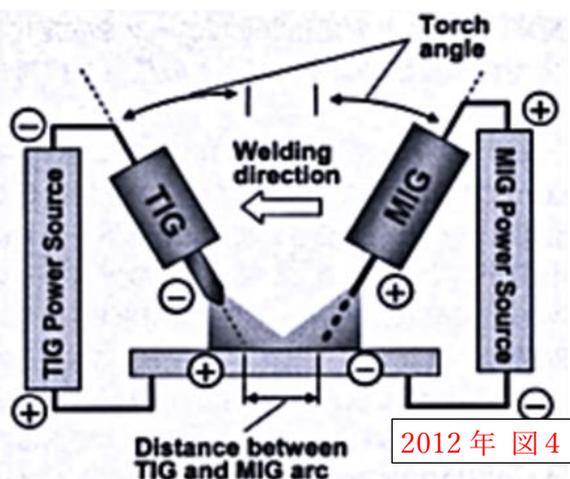


図4 ティグ・ミグ複合溶接法の概略図

■ ティグ・ミグ複合溶接法の説明 (本文より引用)  
適当な電極間距離と電極角度、電流バランスをとることで、先行ティグアークによる予熱効果で後行ミグアークを安定化し、純Arシールドでも安定なミグ溶接が可能となることが報告されている。この結果安定な溶滴移行になりスパッタのない高効率ミグ溶接が可能であり、表面酸化がなく、かつ30ppm未満という溶存酸素量を実現。また、本複合プロセスはティグ電流がミグ電流以上の場合にミグアークが安定し、ティグ電流と溶け込み深さの増加割合がほぼ一致するという知見が得られている。

## 2-2) 2014年 (1.4 複合プロセス 1.5 その他)

### 1.4 複合プロセス 2014年

■ 2012年に引き続き、レーザアークハイブリッド溶接の普及さらに進展

#### ① レーザアークハイブリッド溶接の特徴；

- アーク溶接の長所とレーザ溶接の長所を相互補完できること。
- 高張力鋼の需要拡大を目指し、厚板高張力鋼の溶接が検討される。  
→ 突合わせ切欠き引張試験ではアーク溶接による設計応力の1.5倍に向上可能。

#### ② アーク電極をレーザ光軸と同軸に配置した溶接ヘッドが開発され、適用範囲が拡大。

#### ③ TIG溶接とMIG溶接の複合化プロセスも開発された。

- 純ArのMIG溶接にTIG溶接を複合することでMIG溶接が安定化。またそれら理由付けが呈示。
- 能率面における事例；  
SUS304×突合せ開先溶接(6mm)にてTIG単体に比べ1m当たりの溶接時間を25%にまで短縮

#### ④ プラズマ溶接と「J-STAR Welding」の複合プロセスによる「疲労強度向上」策の提案

<参考>

**\*プラズマ溶接と「J-STAR Welding」の複合プロセスによる疲労強度向上に関する提案**

- ・「J-STAR Welding」はワイヤにアーク安定化元素としてREMを添加することにより棒マイナスでありながら、安定した溶滴移行を実現したプロセスである。
- ・この「J-STAR Welding」を先行、プラズマ溶接を後行とすることにより、両プロセスとも同極性であるためアークが互いに引かれあい、溶融池を押し合うがために湯溜まりが形成される。溜まった溶融金属がプラズマ溶接の側方に流れることにより、ビード形状は広くかつ低く形成されるため、炭酸ガス溶接やMAG溶接と比較してもビード止端部が滑らかになる。
- ・780 Mpa級高張力鋼の重ねすみ肉溶接において、このプラズマアークハイブリッド溶接では炭酸ガス溶接の2倍の疲労強度が得られておりビード止端部の平滑化が疲労強度向上に有効であることが示されている。(本文より引用)

2-3) 2016年 (1.4 複合プロセス 1.5 その他)

1.4 複合プロセス 2016年

■ 2014年に引き続き、レーザアークハイブリッド溶接の普及、造船分野で適用開発進む

- ① レーザアークハイブリッド溶接の造船分野への適用に関する研究開発進む。
  - 2013年度にレーザアークハイブリッド溶接実験装置を構築
  - 2014年度以降の造船業界共同研究の概要が示された。(詳細は本文参照)
- ② ハイブリッドタンデムアーク溶接法の開発；先行極ソリッドワイヤ／後行極FCW
  - プライマ塗布鋼板水平すみ肉溶接時の気孔低減効果について報告あり。それら理由付けが呈示。
- ③ タンデムTIGトーチとMIG溶接のハイブリッド溶接の紹介、長尺パイプの肉盛溶接へ適用
  - 長尺パイプの縦曲がり変形を低減。

3. 各年次の「複合プロセス」に関する振り返り

- \*表 247-02 にみるように「複合プロセス」に対する考え方が各年次の冒頭に詳しく明確に記されている。しかもその代表的なプロセスは、レーザアークハイブリッド溶接法としている。
- \*レーザアークハイブリッド溶接法は、レーザにないギャップ裕度と、アーク溶接にない高速溶接における溶け込み特性を両立させる優れた特徴をもち、大型構造物厚板の高効率溶接法として適用されている。
- \*他の複合プロセスとしては、プラズマGMA法がレーザより安価として追求されている。
- \*さらにTIG/MIG複合化プロセスが開発されている。  
前ページの図4にみる概略図からは、TIGタングステン電極へのMIGの飛散溶滴、ヒューム付着などの汚染によるアーク不安定が早々に心配されるが、これらの課題も克服できたようです。
- \*さらにプラズマ溶接と「J-STAR Welding」の複合プロセスによるビード止端部の平滑化による疲労強度向上の有効性が示されている。  
このように、複合プロセスは各工法はもちろんのこと、溶接材料の適正化にも拡大していく必要性を示している。

次話では、ティグ溶接機の変遷と最近の進歩について、溶接学会誌および溶接技術誌をメインとして筆者なりに振り返らせて頂きます。

表 247-02 各年次における TIG 溶接関連レビュー&トレンドとその動向

2012年 (NO.8)	2014年 (NO.10)	2016年 (NO.12)
<p>1.4 複合プロセスによる高効率化</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* 2つ以上の溶接プロセスを組み合わせること(以下、ハイブリッド溶接プロセス)で、各プロセスが互いに短所を補完し、長所を相乗効果で高めることが期待できる方法のなかで、レーザーアークハイブリッド溶接法がその代表である。</li> <li>* 高出力ファイバーレーザーは発振効率が高く、ビーム品質が優れるため、厚板鋼板における高速、高効率溶接への適用と実用化が期待されている。</li> <li>* 10kWファイバーレーザーとマグ溶接を組合わせたハイブリッド溶接をT継手の水平すみ肉溶接に適用する場合、レーザー先行の場合に滑らかな表面形状でピットなどの欠陥がないビードが形成でき、適切なマグ溶接条件を選択することで板厚12mmの1パス貫通溶接が可能であることが示されている。</li> <li>* 一方、板厚12mmのI形突合せ継手に対しては、アーク先行/レーザー後行の場合に滑らかな安定な裏波ビードが得られる条件範囲が存在することが示され、ともに高速ビデオカメラによる観察で、ビード形成メカニズムが考察されている</li> <li>* 高密度エネルギーな熱源としてレーザーよりも安価なプラズマと、アークを組み合わせたプラズマGMA溶接法も提案されている。</li> <li>・鉄鋼材料に対しては、プラズマ電流によりマグ・ミグ溶接法より溶け込み深さが浅くなる傾向にあるが、フラック角の制御が可能でフラットなビードを得ることができる。</li> <li>・この特性を利用して低希釈率で、かつ高溶着な肉盛溶接への適用可能性が報告されている。</li> <li>・アルミニウム合金の溶接においては、プラズマの効果でMgの蒸気の発生が抑制され、また、スパッタの発生が極めて少ない美しいビード外観を得ることができる。</li> <li>→ このように良好な溶接特性により、オートバイフレームや鉄道車両の溶接部への適用が提案されている。</li> <li>* このプラズマGMA溶接法を純Arシールドで厚板の鉄鋼材料に適用し、パルス化したプラズマ電流が開先内のアークを安定化することで、ビード形成が改善されることも報告されている。</li> <li>■ティグ溶接法とミグ溶接法の複合化による、両溶接法の長所を両立することができる溶接プロセスを紹介する。(図4)</li> <ol style="list-style-type: none"> <li>① 適当な電極間距離</li> <li>② 適当な電極角度</li> <li>③ 電流バランス</li> </ol> <p>先行ティグアークによる余熱効果で後行ミグアークを安定化し、純Arシールドでも安定なミグ溶接が可能となる。</p> <p>→ この結果、安定な溶滴移行になりスパッタのない高効率ミグ溶接が可能であり、表面酸化がなく、かつ30ppm未満という溶存酸素量を実現。</p> <li>* また、本複合溶接プロセスは、ティグ電流がミグ電流以上の場合にミグアークが安定し、ティグ電流と溶込み深さの増加割合がほぼ一致するという知見が得られている。</li> </ul>	<p>1.4 複合プロセス</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* 他の溶接プロセスと組み合わせることで、単一のプロセスより適用範囲の拡大や能率を向上させる取り組みがなされ、レーザーアークハイブリッド溶接はその代表的な例である。</li> <li>・レーザーアークハイブリッド溶接の特徴は、アーク溶接の長所である開先精度に対する裕度が大きいことや継手特性に対して母材成分の影響が小さいこと、レーザー溶接の長所である深溶け込みでありながら溶接変形が小さいことを相互補完できることである。</li> <li>・高張力鋼の需要拡大を目指して、レーザーアークハイブリッドを用いた厚板高張力鋼の溶接が検討されている。報告によると、780Mpaおよび980Mpa級高張力鋼の突合せ溶接において板厚12mmでは裏当て無しで片側1パスの貫通溶接が、板厚25mmでは片側1パスずつ計2パスの両面溶接が実現されている。</li> <li>・また、板厚12mmの両面すみ肉溶接も報告されている。</li> <li>・突き合わせ継手の切欠き引張試験では、レーザーアークハイブリッド溶接においてアーク溶接による設計応力の約1.5倍に向上させることが示されている。</li> <li>* その他、レーザーアークハイブリッドは一般的にレーザーの集光レンズに対して側方にアークトーチを配する形となるが、アーク電極をレーザー光軸と同軸に配置した溶接ヘッドも開発され、実用化されている。</li> <li>・この技術により溶接方向に対するトーチ配置の制約が無くなることから、3次元で複雑な形状の溶接施工において、位置設定の負荷低減が期待。</li> <li>* TIG溶接とMIG溶接の複合化プロセスも開発されている。</li> <li>・純ArシールドガスのMIG溶接にTIG溶接を複合することで、MIG溶接が安定化できると報告されている。</li> <li>・このプロセスの安定化の理由として、TIG溶接がMIG溶接に先行して母材を加熱し、MIG溶接における母材の熱電子放出の促進と、TIG-MIG電極間の安定的な電流経路形成がMIG溶接の安定化に寄与している可能性が示されている。</li> <li>・安定化条件はTIG溶接電流をMIG溶接電流以上に設定するという知見が得られており、複合するMIG溶接をMIGパルス溶接とすることで、MIG溶接の溶滴移行がドロップ移行となる条件でも溶滴移行とアークが共に安定した溶接ができることが示されている。</li> <li>・能率面の観点からTIG溶接と比較すると、TIG-MIG溶接のほうが溶接速度を速くすることができ、パス数も少なく、高能率であると言える。</li> <li>・板厚6mmのSUS304の突合せ開先溶接ではTIG単体溶接に比べて1mあたりの溶接時間を25%にまで短縮できることが示されている。</li> <li>* プラズマ溶接と「J-STAR Welding」の複合プロセスによる「疲労強度向上」策の提案(記事は、スペースの関係上省略、本文参照)</li> </ul>	<p>1.4 複合プロセス</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* 2つ以上の溶接プロセスを組み合わせること(以下、ハイブリッド溶接プロセス)で、各プロセスが互いに短所を補完し、長所を相乗効果で高めることが期待でき、レーザー・アークハイブリッド溶接法がその代表である。</li> <li>* レーザ・アークハイブリッド溶接法は、レーザーがないギャップ裕度と、アーク溶接にない高速溶接における溶け込み特性を両立させる優れた特徴をもち、その特徴を活かして、大型構造物厚板の高効率溶接法として適用されている。</li> <li>・特に最近の大型構造物業界では、構造物の軽量化を目的として、780MPaや980MPa級の高張力鋼を積極的に採用することが考えられ、厚鋼板のレーザー溶接およびハイブリッド溶接のプロジェクト研究が行われている。</li> <li>* レーザ・アークハイブリッド溶接の高張力鋼への適用については、板厚12mmの高張力鋼HT780に対し、高出力・高輝度ディスクレーザーとアークによる1型開先突合せハイブリッド溶接を行い、溶け落ち、ハンピングなどの溶接欠陥の発生・防止条件を明確にし、良好な溶接部が得られたという報告がされている。</li> <li>* また、レーザー・アークハイブリッド溶接は、高品質・高効率性を活用すべく、造船分野への適用に関する研究開発も進んでいる。</li> <li>* 2014年度以降の造船業界共同研究の概要としては2013年度の業界共同研究で構築したレーザー・アークハイブリッド溶接実証試験装置を活用し(1)片側完全溶け込みT継手製作に関する施工条件の検討、(2)ステイク溶接継ぎ手の製作に関する施工条件の検討、(3)インプロセスかつ自動で溶接線を検出するセンサの開発、に取り組まれている。</li> <li>* 従来のタンデムアーク溶接の課題である、浅い溶込みと、アーク干渉によるスパッタ多量発生を改善する、先行極にソリッドワイヤ、後行極にFCWを組み合わせたハイブリッドタンデムアーク溶接法が開発されている。</li> <li>・このハイブリッドタンデムアーク溶接法においては、プライマ塗布鋼板の水平すみ肉溶接に適用した場合の気孔低減効果について報告あり。</li> <li>* ハイブリッドタンデムアーク溶接法では、溶込み深さが最大となる位置がアーク直下よりも後方となり、その前方における固体面が常に露出しているため、ルート部に溶け残しが生じても、大半のガスがアーク直下より散逸できるので、気孔欠陥が低減すると考えられている。</li> <li>* 他に、タンデムTIGトーチとMIG溶接のハイブリッド溶接を紹介する。</li> <li>・長尺パイプの肉盛溶接において、タンデムTIGトーチで先行して裏面を予熱し、一定距離離れて後方からMIG溶接による肉盛溶接を行うことで、長尺パイプの縦曲がり変形を低減させる溶接方法である。</li> <li>TIGトーチをタンデム化させているのは、裏面加熱部の硬度上昇を抑えるためである。</li> </ul>

以上。