

阿曾 秀明

当論文は、日本プラントメンテナンス協会（JIPM）の2013年度 TPM 優秀論文賞を受賞した内容に基づくものです。

#### 要旨

モーターサイクルのアルミ車体フレーム溶接をロボット施工する際、種々の要因で「手直し」と呼ばれるハンド修正が行われる。本研究ではこの手直しの削減を目指し、アルミ MIG 溶接に共通する原理課題である、溶接始点の溶け込み不足に着目した。

TIG アークによる事前溶融池形成を行う TIGMIG 複合プロセスを検証し、複雑な形状の車体フレームに適用できるコンパクトなハードウェアの開発と、安定生産のための施工条件作り込みを行うことで、オンロードモデルにおいて 68% の手直し工数ロス削減が実現した。

#### Abstract

Arc welding is a widely used method in motorcycle chassis construction, from its joint strength and design/application flexibility. Though, in a mass-production robot process of a complex shaped chassis welding, there has always been a need for re-work by hand, due to multiple reasons, including lack of start-point penetration in MIG welding.

This project focused on this start-point penetration, and developed a TIG/MIG hybrid welding process that forms a molten pool prior to MIG start, along with a compact tool suitable for motorcycle chassis application. The result was a 68% reduction in re-work time on an on-road type chassis.

## 1 はじめに

モーターサイクルの車体フレームの接合には、継手設計の自由度、および接合強度の観点からアーク溶接が広く用いられている。アルミ車体フレームの場合、一般的に適用されるアーク溶接工法は固定電極方式のTIG溶接と、消耗電極方式のMIG溶接がある。TIG溶接の特長はその美しい溶接ビード外観や、入熱に対する溶着金属量の調整幅にあり、MIG溶接の特長は高速性や面精度に対する許容度にある。ヤマハ発動機では量産フレームのロボット溶接に後者を採用している(図1)。

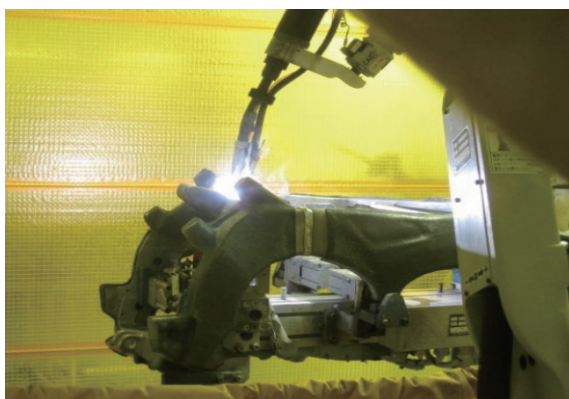


図1 フレームのロボット MIG 溶接の様相

しかし、比較的許容度の高いMIG溶接であっても、ロボット施工においては要求品質を100%満たすには至っておらず、現状ではハンドTIG溶接による補溶接(以下、手直し)を定常工程とせざるを得ない。手直しの原因となる各種の溶接不良現象には、部品精度・ロボットの軌跡精度・アークの安定性など多様な要因が複合的に絡んでおり、日々様々な改善が進められているものの、アルミフレームの溶接において手直しを必要としない手法は確立されていない。それは、前述の各種バラツキ要因の他に、解決しなければならないMIG溶接の原理的な課題があるためである。

本稿では、このMIG溶接の原理課題に対する設備側からのアプローチとしてTIGMIGハイブリッド溶接工法を開発するとともに、それを実機生産に適用した際の手直し削減効果を評価した結果について述べる。

## 2 アルミMIG溶接の原理的な課題

アルミ材料は熱伝導率が高く、溶接加工点への入熱は急速に周囲へと拡散していく。鉄と比較して融点の低いアルミの溶接において、鉄溶接よりも高いアーク熱量が求められるのはこのためである。アルミMIG溶接の特徴は、溶着金属ワイヤ

(以下、ワイヤ)の先端と母材の間でアークを発生させ、ワイヤ先端と母材がともに溶融しながら進行する点にある。すなわち、アーク熱量とワイヤ送給量はバランスしているため、加工点に対してアーク入熱のみを加えたり、溶着金属のみを加えたりすることはできない。

従って溶接部近傍の母材温度が低い時、すなわち溶接開始点(以下、始点)においては、母材溶融がワイヤ供給に追いつかないために、溶着金属が母材と融合しない(図2)。この状態は母材の板厚によって始点から10~15mm程度の溶接長に渡って継続し、溶接強度の低下を招くだけでなく、過度に凸形状となった始点ビード端部への応力集中の原因となる。溶接構造一般においては、このような品質不良部位を溶接後に製品から切除する手法が用いられる。しかしモーターサイクルの車体フレームは多くの場合、閉断面の全周溶接構造であるため、加工後に切除する方法は採用できない。そのため、始点ビードの凸形状をハンドTIGで炙ることにより、なだらかな形状に修正する「手直しロス」が生じる。

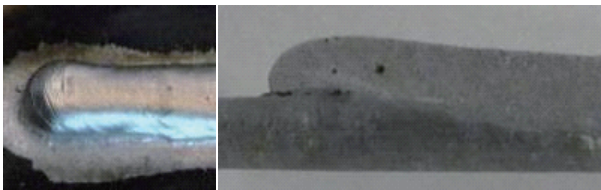


図2 従来 MIG 溶接始点のビード外観と溶け込み

### 3 始点品質向上のためのハイブリッド溶接

#### 3-1. 既存ハイブリッドMIG溶接の種類と特徴

前章で述べたように、MIG溶接の原理課題は始点に十分な母材溶融プールが形成されないことによる溶け込み不良にある。つまり、溶着金属を供給せずに熱のみを母材に与えることができる付加熱源を用いれば、始点から母材に十分な溶融プールを形成することが可能である。

MIG溶接に付加熱源を与える考えは従来から存在し、目的に応じてTIGアーク/プラズマアーク/レーザなどが使い分けられている(図3)。しかし多くの場合、そのトーチサイズの大きさにより狭小部への進入が求められるフレーム溶接への適用は困難である。

	TIGMIG ハイブリッド	プラズマMIG ハイブリッド	レーザMIG ハイブリッド
開発の狙い (用途)	薄板TIGの高速化 (薄板SUS)	MIGの高溶着化 (厚板、船舶など)	MIGの高溶着化 (中厚板、自動車・船舶など)
始点溶け込み への有効性	○	△ (付加熱の集中性不足)	△ (付加熱の集中性過多)
フレーム溶接 への適用	× (トーチサイズ)	× (トーチサイズ)	× (トーチサイズ)

図3 各種ハイブリッド MIG の特徴

#### 3-2. 始点溶け込み向けTIGMIGハイブリッドの原理

通常「TIGMIGハイブリッド」呼ばれる工法は、MIG溶接加工点に付加熱量を加えることで速度と溶着量を向上させることが目的であるが、ここでは前述の「初期溶融プール形成」にTIGアークを用いる工法について述べる。まず、MIGアークのシールドガス雰囲気中にTIGのタングステン電極を挿入し、MIGスタート直前にTIGアークにより溶融プールを形成する初期実験を行った(図2)。その結果、以下2点が確認された。

- ・TIGアークを消弧した直後にMIGアークに点弧すると、凝固した後のTIG溶融プール上にMIGビードが形成され、始点ビードと母材は融合しない(図4a)。
- ・TIGアークを消弧する前にMIGアークを点弧することで、定常溶接部と同等の溶け込みとビード高さを始点から得られる(図4b)。



図4a TIG 消弧後に MIG スタート



図4b TIG 消弧前に MIG スタート

#### 3-3. 生産適用可能な複合トーチの開発

##### 3-3-1. トーチヘッドのコンパクト化

初期実験では、ブラケットを介してMIGトーチとTIGトーチの両方をロボットに装着した(図5)。しかしこれでは、製品や拘束治具の奥まった狭所への適用が困難である。そこで、TIGとMIG両方の電極を持ちつつ可能な限りコンパクトな複合トーチを新たに製作した(図6)。複合トーチの特徴としては、

TIG電極ホルダー(i)をMIGガスノズル(ii)のサイドにマウントして、TIGパワーケーブル(iii)およびTIGガスホース(iv)をMIGトーチネックの外部に這わせている点があげられる。TIGパワーケーブル端子はTIG電極ホルダーの上部に直接取り付けられ、TIGガス経路はノズル先端付近でMIGガス経路と合流する。この構造により、互いに絶縁された2つの電極への給電構造と2つのシールドガス経路の簡素化を図った。さらに、従来MIGトーチとの互換性を確保できるため、従来MIGロボット設備を大きく改造することなくハイブリッドトーチを使用することが可能となっている。

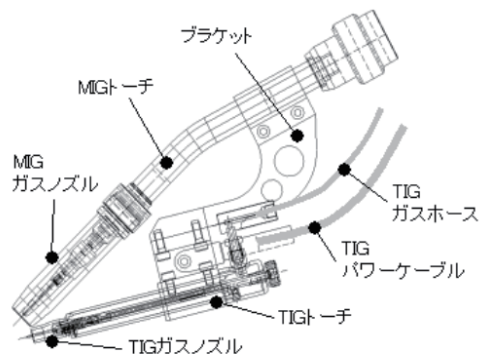


図5 初期実験に用いた試作トーチ

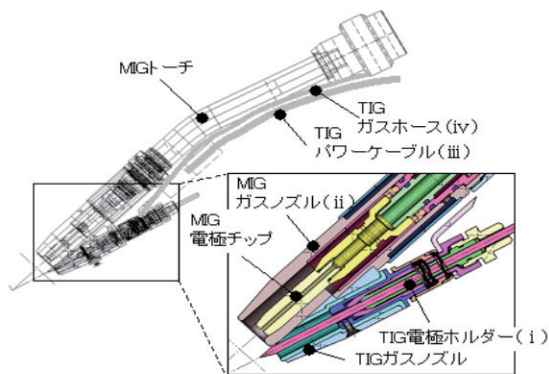


図6 小型化を図った複合トーチ

### 3-3-2. TIG電極メンテナンス工数への対応

母材とワイヤ先端の間でアークを発生させるMIG溶接の銅製給電チップ(以下、チップ)自体には、アーク熱による消耗は起きず、主にワイヤとの摺動によりチップ内径が過大になることで交換が必要となる。すなわち、チップ寿命は比較的長く、生産ラインのロス工数としての影響度は低い。その一方で、TIG電極それ自体がアークの発生点であるため、高融点のタングステン製であるにも関わらず溶融・蒸散によって消耗し、

生産中に定期交換が必要となる。これはTIGMIGハイブリッドにおいても同様で、TIG電極を備えたために従来MIGにはなかったロス工数を生むことになる。そこで、電極寿命および交換工数の2つの観点でこの電極交換ロスを抑制した。

電極寿命に対しては、アルミ溶接に通常用いられる交流TIGと比較して電極消耗の少ない直流TIGを用いることで寿命アップを図った。通常、電極が常時マイナス電位となる直流TIGでアルミを溶接することはできない。これは、アルミ溶接には電極がプラス電位のアークが持つ酸化膜クリーニング作用が必要なためである。しかし、TIGアークで始点に溶融プールを形成しその上にMIGアークを放つ本工法においては、プール上の酸化膜はMIGアークのクリーニング作用で除去され、母材と溶着金属の融合に影響を与えないことが分かった(図7)。

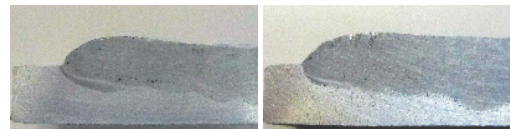


図7 交流TIG(左)と直流TIG(右)の場合の溶け込み比較

交換工数に対しては、TIG電極およびトーチネック外部を這うTIGパワーケーブルの固定機構に工夫を施すことで対応した。TIG電極の交換には、電極の着脱の他に電極先端位置の突き出し量調整作業も必要となる。そこで、電極の固定と給電を兼ねるコレットボデーを着脱式とすることで突き出し調整作業を外段取り化するとともに、コレットボデーのトーチへの固定にはバヨネット機構を用いた。さらに、TIGパワーケーブルの端子をC型の開放形状とし、バヨネット機構のバネ反力を一部利用して摩擦固定する方式をとることで、片手での容易なTIG電極・パワーケーブル着脱を実現しつつ、トーチサイズを抑制することができた(図8)。その結果、TIG電極交換工数は、内段取り・ネジ式固定の3.4分/回に対して1.0分/回まで削減された。元々の従来MIGにおいても、溶接長にして1000mm程度の使用でノズルに付着したスパッタの清掃(0.5分/回)が必要になるため、ノズル清掃と同時に電極交換を行えば、停止ロス増を最小限に抑えることができる。



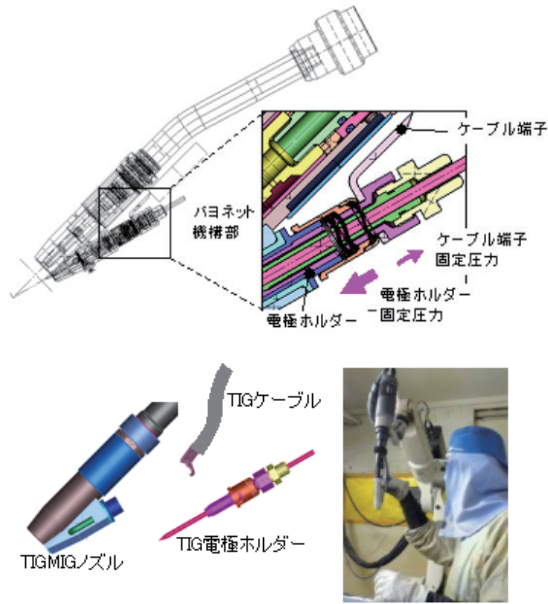


図8 バヨネットを応用した片手でのTIG電極着脱機構

### 3-4. 安定生産のための施工条件開発

#### 3-4-1. 溶接始点ビード品質の安定化

ハイブリッドトーチ開発の初期段階においては、始点ビード品質が安定しないことが多かった。乱れのパターンには2つあり、ビード表面が酸化物に覆われる外観不良と、ビード形状の乱れであった。

前者の根本原因は、TIG電極をマウントした異形MIGノズル形状にあり、MIGガス経路にTIGガス経路が合流する際にシールドガスが乱流化されることが、シュリーレン撮影の結果明確になった。異形ノズルからシールドガスを安定供給するために、ノズル形状の作り込みとTIGMIG各シールドガス経路の流量バランスを調整した。(図9a,b,c)。

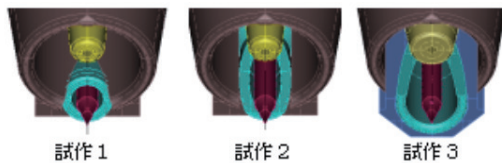


図9a シールドガス経路仕様の変遷

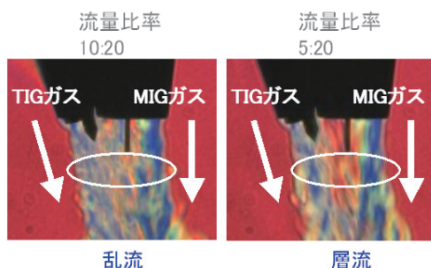


図9b シュリーレン撮影でのガス流観察の例

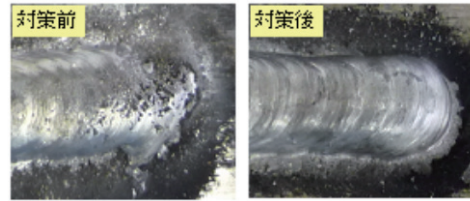


図9c シールド性対策結果

後者はTIGMIGアークの相互干渉に起因するものであった。3-2で述べたように、始点からの十分な融合を得るにはTIGMIGの両アークが同時にONしている期間が必要である。この時、逆極性のTIGMIGアークはそれぞれ反発し合う。この相互作用時にMIG溶滴が溶融プールの外に弾き出されていることが直接の原因であると予想された。相互作用は2電極の挟み角を広げることで緩和できるが、挟み角拡大はトーチサイズとのトレードオフとなる。従ってまずは、MIGアークを点弧する直前にTIGアーク電流を数十アンペアまで降下させることでアーク相互作用の影響の低減を図ったものの、効果としては不十分であった。

続いて、始点ビード形状に大きく影響するMIG初期溶滴の移行形態に着目した。通常MIGのアーク点弧は、母材にタッチさせたワイヤ端と母材の間の微小スパークをきっかけにアークを誘引する。これに対し、TIGアーク中のMIGスタート時には、TIGアークによる空間電位の変動によりワイヤ端が空中にあるにも関わらず母材短絡したとMIG電源が判断する。また、TIGアークがMIG点弧の着火材のように作用し、空中にあるMIGワイヤ端からアークが発生することなどが、高速度撮影による観察から分かった。つまり、MIGの初期溶滴の落下開始位置が高いために、母材へと落下するまでの間にTIGアークからの反発を受ける時間が長くなり、大きく軌道を反らす要因となっていた(図10a)。これを対策するためには、スタート時にMIGワイヤ端が必ず母材から1~2mmの低い位置にあるように制御する必要がある。ワイヤ端調整には一般的にワイヤカッターが用いられるが、アークスタート毎にワイヤカッターまで移動してはロボットの空走時間を増やすことになる。そこで、TIGアーク点弧の前にMIGワイヤを空送りして母材短絡させ、そこから一定時間リトラクトさせることで、母材とワイヤ端の距離を短く一定に保つ動作を行うようにした。このようにスタートシーケンスに工夫を施すことで、安定した初期溶滴移行と良好なビード形状を得ることができた(図10b)。

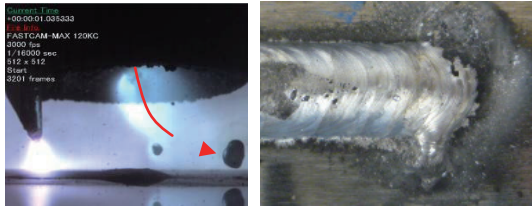


図 10a TIG アークにより弾かれる初期溶滴とその時のビード外観図

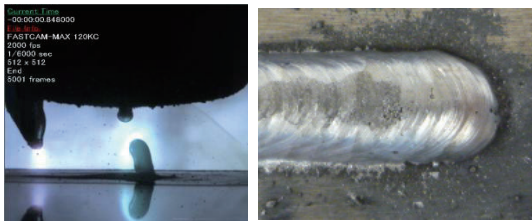


図 10b 対策後の初期溶滴落下とその時のビード外観

### 3-4-2. TIG点弧性向上への取組み

TIGMIGハイブリッドによる連続生産にあたって直面した問題のひとつに、TIG点弧不良によるチョコ停があった。ここではチョコ停のない安定稼働を目指して行った施策について述べる。

本工法でのTIG電極は、常にMIG加工点からのスパッタにさらされており、使用に伴い表面にタングステンとアルミが合金化した層が形成され(図11)、点弧性を悪化させる。これはTIG電極の格納機構などを設ければ回避できるが、それによりトーチサイズが肥大化してはフレーム溶接に適用できない。そのため、前述のようにノズル清掃と同期した電極交換を行う運用方法を当初より検討していたものの、ノズル清掃タイミングより先に点弧不良が発生する頻度が高く、ラインの安定稼働を妨げる原因となった。

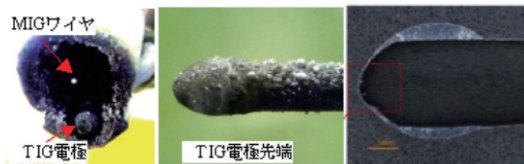


図 11 TIG 電極へのスパッタ付着による合金層の形成

TIGアークは母材・電極間の空間絶縁破壊を行うことで点弧されるのが一般的である。絶縁破壊の方法には、高周波を用いる方法と直流高電圧を用いる方法の2つがある。TIGMIG各電極の近接配置を避けられない本工法では、MIG電源やロボットへの高周波ノイズ流入防止が困難であることから、直流

高電圧スタート方式のTIG電源を採用した。そこで点弧性向上策としては、電圧をそのままに絶縁破壊性能を高める方法と、4.5kVに達する直流高電圧出力を加工点まで分流損失なく伝達する方法の2通りを検討した。

電極間の火花電圧の指標として参照したパッシェンの法則によると、平行な平板電極間で火花放電の生じる電圧は、ガス種およびガス圧と電極間隔の積の関数であることが示されている(図12)。対象が平板ではなく尖った電極であることから火花電圧の絶対値は異なってくるものの、大気圧下・電極～母材間距離(以下スタンドオフ)2~5mmの間では、標準的なシールドガスであるArよりもHe雰囲気の方が火花電圧を下げる事が期待できる。TIGMIGハイブリッドはシールドガスを2系統持っているため、例えばTIGアーク点弧時のみTIGノズルからHeを供給することも可能である。しかし、後述のように直流高電圧の分流損失に関する調査を行ったところ、Heガスによる火花電圧の降下は対策として不適當であることが分かった。

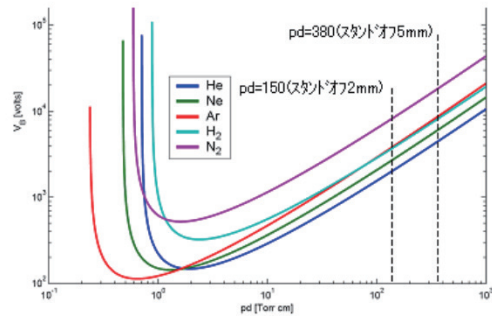


図 12 パッシェンの法則が示す火花電圧の特性

暗所での観察と高電圧プローブでの測定の結果、トーチ構造内でのスパーク(図13a)をきっかけにTIG電極に印加される電圧が低下していることが観測された(図13b)。

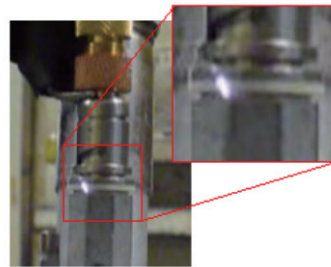


図 13a 高電圧印加時に絶縁層を飛び越えるスパーク

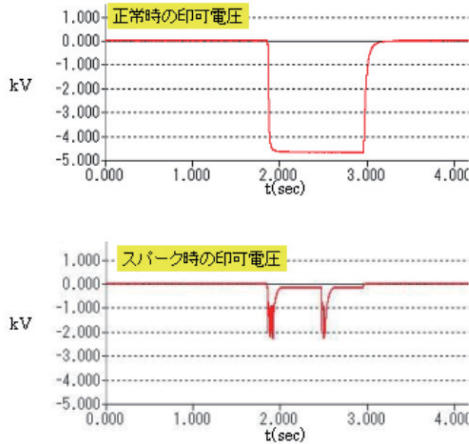


図 13b スパーク発生時の TIG 電極への印加電圧

スパークによる分流損失を抑制するには、絶縁を強化する方法と、分流経路を遮断する方法が考えられる。絶縁を強化していくと、次々と違う箇所からのスパークが起き、最終的にはAr雰囲気にてTIG電極からMIGワイヤへとスパークするようになる(図13c)。つまり、He雰囲気を用いて火花電圧を下げて、スパークによるMIG溶接回路への分流を促進するだけで、TIG点弧性の向上には繋がらない。



図 13c TIG 電極から MIG ワイヤへのスパーク

次に、多岐に渡る分流経路のうち最も影響の大きいMIG溶接回路を、TIG点弧時のみ大容量リレーで遮断する機構を組み込んだ(図14a)。また、TIGスタート成功時は必ず電圧印加から0.3秒以内に点弧していることと、リトライ回数が多いほど点弧成功率は上がることから、TIG点弧の際の高電圧印加を0.3秒周期で高速リトライするスタートシーケンスとした(図14b)。

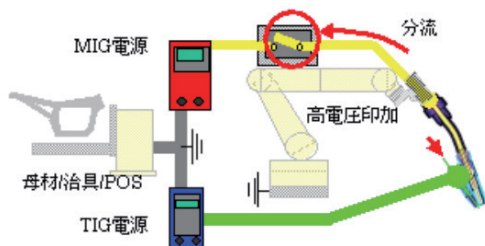


図 14a MIG 回路遮断機構

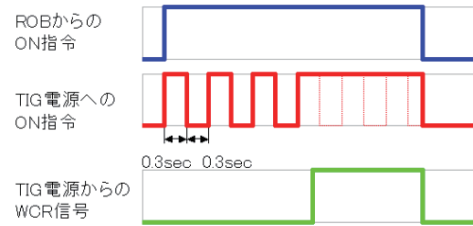


図 14b 高速リトライシーケンス

これらの対策の結果、TIG点弧性は著しく向上し、それはスタンドオフ余裕度として表すことができる(図14c)。スタンドオフ7mmまでは1秒以内に点弧する確率が100%で、TIG電極とMIGワイヤの間隔は8mmである。つまり、TIG電極消耗と製品バラツキから想定されるスタンドオフ2~5mmの範囲では、MIGワイヤへのスパークを起点にした分流損失によるTIG点弧不良は発生しないことになる。

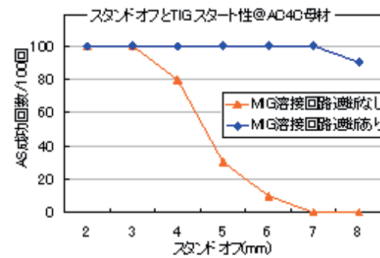


図 14c MIG 回路遮断機構による点弧性改善

## 4 実機生産への適用

### 4-1. TIGMIGハイブリッド溶接による効果

ここでは、あるオンロードモデルのフレーム生産に、TIGMIGハイブリッド溶接を適用した結果について述べる。このフレームは2点の大型鋳造部品で構成され、溶接始点は4箇所である。効果測定の指標として、2回に分けておよそ700台を生産する間の手直し長さ(ハンドTIGでビードを引いた長さ)および工数(手直しオペレーターがTIGトーチを手にとってから置くまでの時間:溶接ビードの目視検査を含む)を測定した。

手直し長さの推移を図15aに、手直し工数の推移を図15bに示す。TIGMIGが手直し量に対して明確なインパクトを与えていることが分かる。通常MIGに対し、TIGMIGハイブリッド1回目の生産検証では平均手直し長さ▲67%、作り込みの進んだ2回目の生産検証では▲88%、となった(図15a)。



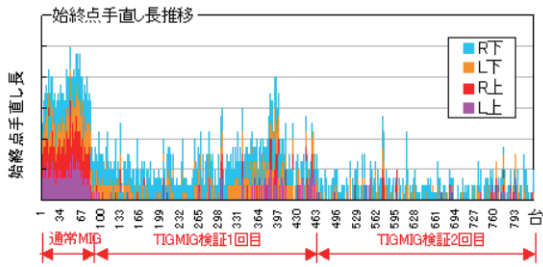


図 15a 手直し長さの推移

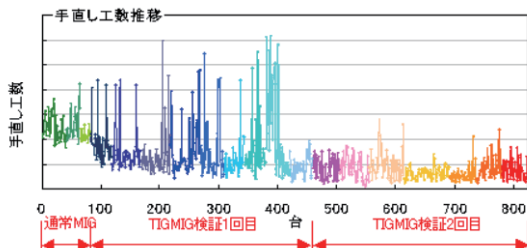


図 15b 手直し工数の推移

また、平均手直し工数については、TIGMIG1回目では▲39%、2回目では▲68%となり(図16a)、従来は生産数の80%以上を占めた1.0~2.0分の手直し発生が1.9%にまで減少した(図16b)。

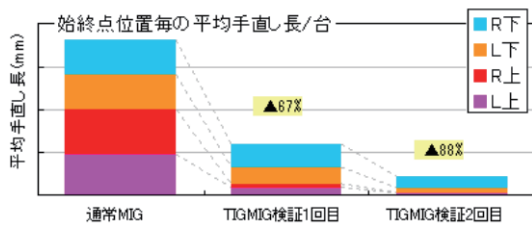


図 16a TIGMIG 導入による平均手直し長さの変化

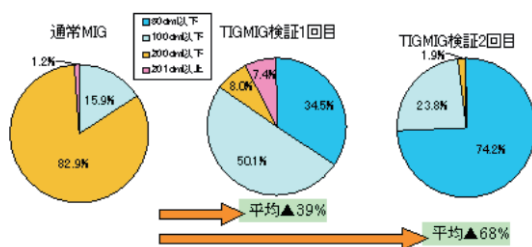


図 16b TIGMIG 導入による平均手直し工数の変化

今回検証を行った国内小規模ラインの場合、配員1名の時には手直し工数削減がそのままサイクルタイム短縮に繋がり、およそ14%の溶接コストダウン効果が得られることになる。

この取組みの本質的な課題である「手直しゼロ」の達成率

に関しては、従来MIGでは0%であった割合が、TIGMIGハイブリッド検証1回目では1.6%、2回目では30.7%に増加した(図17)。

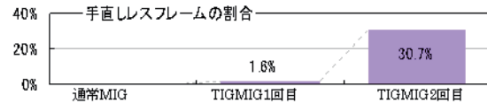


図 17 手直しレスフレームの割合

#### 4-2. TIGMIGハイブリッド溶接の課題と対策

従来MIGに対して増加するロスとして、TIG電極の交換工数があることは先に述べた通りである。この他に、アークスタート時の各種シーケンスに伴うロボット工数増がある。この工数増により、手直しを完全にゼロ化して定常工程から排除しない限り、導入効果がライン出来高に明確に現れない場合がある。具体的には、ライン配員1名での低負荷操業時には平均手直し工数の削減値と同等のCT短縮効果が得られるのに対し、配員2名での高負荷操業時にはロボットネックにより僅かながらCT増となる。すなわち、TIGMIGハイブリッドのメリットは、前述したその他手直し要因の改善との相乗効果になって表れる。

また、本稿ではオンロードモデル1機種に適用した結果について述べたが、実際の溶接ラインには多種多様な製品形状・部品構成のフレームが流れる。MIGトーチの汎用性を可能な限り損なわないコンパクトな複合トーチの開発を目指したが、トーチ進入性の不足でTIGMIGハイブリッドを適用できないモデルが複数存在している。TIGMIGハイブリッドの持続的な運用のためには、製品形状および治具構造・ロボットシステム等も視野に入れた、総合的な取組みが必要となる。

## 5 おわりに

TIGMIGハイブリッド溶接の効果測定結果は、工法の有効性を示すだけでなく、始点溶け込みというアルミMIG溶接の原理課題を取り除いた際に残存する手直し要因とその影響度を浮き彫りにしている。項目としては、ワーク精度などに起因する狙いズレの手直しと、铸造ガスによるブローの修正などが挙げられる。これらを改善するには製品設計や前工程からの技術的インプットが必要であり、それら単体の及ぼす改善効果を定量化することも、本取組みの目指すところである。

溶接始点品質向上のためのTIGMIGハイブリッド溶接は、工法・設備としては一定の完成度に達した。本格的な生産運用のためには各種課題が山積しているが、溶接の技術理論値向上は中長期的視点においては必須であり、効率的なモー

ターサイクル車体製造を達成するための総合的な取組みのひとつの要素として、今後も周辺技術を含めた工法の開発を続ける。その他、燃料タンクの溶接など、車体フレーム以外への応用も視野に、基礎的な加工技術として根付くように取組みを継続していきたい。

**■著者****阿曾 秀明**

Hideaki Aso

技術本部

生産技術統括部

生産技術部