

# 応用的TIG溶接施工法の加工コスト検証 ～在職者訓練コース開発の現場から～

広島センター 野原 英孝  
(広島職業能力開発促進センター)

## 1. はじめに

著者は、既報<sup>1)</sup>『職業能力開発の実践～熱加工プロセス技能者の生産コスト意識，改善意識高揚化に向けての取り組み～』において，熱切断，MAG溶接およびガウジング作業の加工コスト試算例を紹介，コスト構造を理解させると同時にコストダウン化のためのきっかけづくりを在職者訓練（能力開発セミナー）で実施した様子を報告した。

その後，能力開発セミナーを継続，実施していくなかで，受講者から「TIG溶接に関する内容をカリキュラムに追加してほしい。この分野においても低加工コスト化を検討したい」旨の要望が多く聞かれ，実施に向けての検討を試みた。

本報では，県内のTIG溶接用材料として最も需要の多いオーステナイト系ステンレス鋼SUS304材を対象に，加工コスト（溶接コスト）を新たな設備投資をすることなく現有の設備機（溶接装置）で活用できる範囲内での応用的TIG溶接施工法で検証した結果を報告する。

## 2. TIG溶接を高能率化するための着眼点と溶接施工法の選定

既報<sup>1)</sup>でも述べたように，低加工コスト化を進めるためには対象となる加工法の高能率化がポイントとなる。ステンレス鋼のTIG溶接では，他のMIGやMAGに代表されるGMA溶接とは異なり，母材の溶込みが熱伝導よりも溶融金属の流れ（対流）による

エネルギー輸送が支配的であり<sup>2)</sup>，図1に示すような溶融池の対流現象の違いによって溶接部の溶込み形状が変化する。このため，高能率化を図るためには，常に溶接施工の諸条件と溶込み形状の關係に配慮しながら検討する必要がある（例えば，溶込み深さを増やす目的で単純に溶接電流を上げただけでは，深さ方向に溶込みが進まず，形状が周辺溶込み形（図1の左側）になり，目標とする溶込み深さが得られないといったケースが起こりえる）。



図1 溶融池内の対流現象の代表パターン

溶融池内の対流の駆動力としては，従来から4つが示されている。すなわち，アークによって生じたプラズマ気流によるせん断力，溶融池内を流れる電流に起因する電磁気力，溶融池内での密度差に起因する浮力，溶融池の表面張力差に起因するマランゴニ力である<sup>3) 4)</sup>。これらの駆動力は，母材中の酸素(O)や硫黄(S)などの表面活性元素量と主として次にあげる溶接施工パラメータ量の相互作用により決定される。

- (1) 溶接電流（パルスの有無，電流波形）
- (2) 放電電極（先端形状，材質，径）
- (3) 電極母材間の幾何学的位置，距離
- (4) シールドガスの組成

- (5) 溶加材（ワイヤの組成，供給方式，供給量，  
 通電の有無，フラックスの有無）

ここでは，以上の状況を鑑み，受講者の要望から，例えばホットワイヤTIG溶接システムや特殊なパルス電流波形が得られるTIG溶接電源等，新たな設備投資をすることなく現有の設備機（溶接装置）で活用できる範囲内での応用的TIG溶接施工法をいくつか抽出してみた。

具体的には，パラメータ(1)，(2)，(3)を固定し，(4)，(5)を主体とした応用的溶接施工法である。すなわち，(4)については，ヘリウムガス（He）をシールドガスとして用いるHeシールドTIG溶接法，アルゴン-水素混合ガス（Ar+H<sub>2</sub>）をシールドガスとして用いるAr+H<sub>2</sub>シールドTIG溶接法を選定し，(5)については，最近『深溶込剤』として話題となっている母材塗布用溶接促進剤を使用したTIG溶接法（Active-TIG溶接法）を選定した。

なお，本検討においては受講者の要望からすべての溶接法において溶接棒の使用をなし（Melt-Run法）とし，応用的溶接施工法と比較するため，標準的に使用されているArシールドTIG溶接法も合わせて実施している。

### 3. 加工コストの検証

加工コストの検証は，まず同一溶接電流条件下で各種のTIG溶接を行い（自動溶接），得られたデータから母材の溶込み深さが同じとなる溶接速度を求め，既報<sup>1)</sup>で紹介した計算方法にて単位溶接長さ当たりの加工コストを求めた【基礎検証】。さらに，この検証で得られた低コスト施工法を実際の溶接製品（擬似製品）に手動溶接で実施し，加工コストを検証した【実践検証】。

表1に母材となるSUS304材の化学成分を示す。板厚9mmは基礎検証に，板厚3mmは実践検証に使用した。溶込み形態に影響するS量（%）は，それぞれ0.003，0.004である。

図2に実験装置を示す。溶接機は，市販のデジタルインバータ制御TIG溶接機（電源の主な仕様：定格出力電流300A，定格使用率40%，最高無負荷電圧

表1 母材の化学成分

板厚	mass%						
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
9mm	0.060	0.38	0.83	0.029	0.003	8.12	18.12
3mm	0.061	0.41	0.85	0.028	0.004	8.15	18.17



図2 実験装置

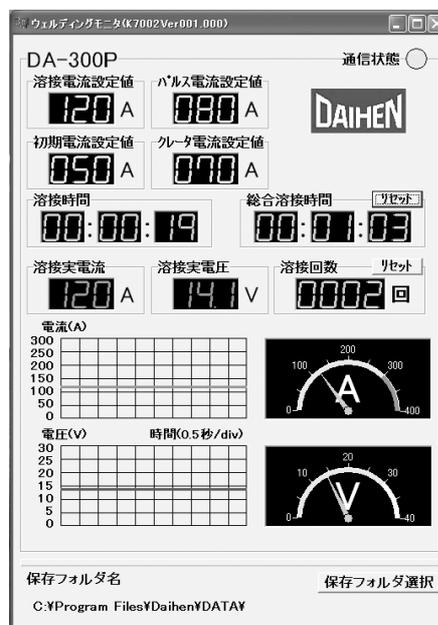


図3 溶接モニタ画面

68V，定格負荷電圧DC時20V)を，自動溶接用駆動装置には低速度運転の許容範囲が広いガス溶接用走行台車を使用した。また，溶接中の実電流値，アーク電圧値および手動溶接時のアークタイムの計測には，溶接電源とシリアル通信回線で結ばれた溶接モニタリング装置を用いた。

図3に，溶接中のモニタ画面の例を示す。本溶接機では1A単位での溶接電流設定が容易に行える。

### 3.1 基礎検証

表2に実験条件を示す。ここで示されている溶接電流は、Arシールド静止TIGアークにおいて母材の溶込みが単純溶込み形から周辺溶込み形（図1の右側）に移行する遷移電流<sup>5)</sup>以下で設定してある。Ar+H<sub>2</sub>ガスは、市販のプラズマ溶接用プリミックスガスを使用した。その混合比率は95%Ar、5%H<sub>2</sub>である。

表2 実験条件

溶接電流	120A
使用電極	CeO <sub>2</sub> (2%)-W φ2.4
電極先端形状	円錐型(先端角45°)
電極母材間距離	2mm
シールドガス	Ar, He, Ar+5%H <sub>2</sub>

図4に、溶接促進剤の外観と母材に塗布した例を示す。溶接促進剤は、実績のある国内溶材メーカーK社製“PENETIG-S（商品名）”を使用した。製品形態は、エアゾール缶であり、スプレーにより溶接前に母材に適量塗布して使用する。

自動溶接にてビードオンプレート溶接し、断面マクロ試験にて溶込み深さを測定したデータを図5に示す。母材の深さ方向に溶け込ます能力は、He-TIG, Ar+H<sub>2</sub>-TIG, 溶接促進剤を用いたActive-TIGいずれもが標準施工法であるAr-TIGより高いことがわかる。

この図から溶込み深さ2mm時の溶接速度を推定し、これをもとに加工コスト（円/m）を算出した結

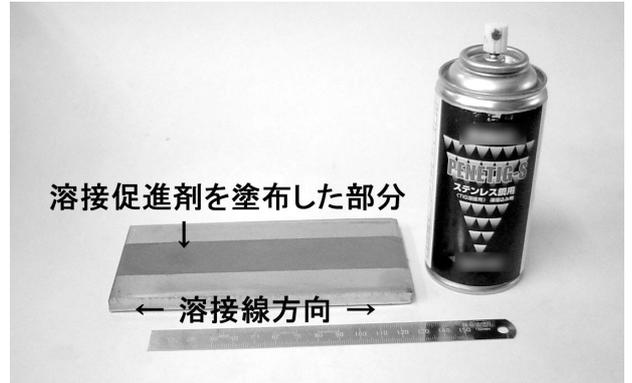


図4 実験に用いた溶接促進剤

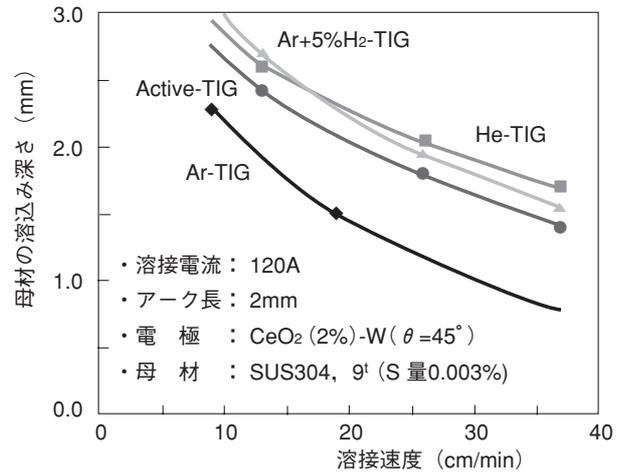


図5 各種TIG溶接法と母材溶込み深さ

果を、表3に示す。He-TIG, Ar+H<sub>2</sub>-TIGの加工コストは、Ar-TIGの60%、54%であり、かなりのコストダウン効果が見込まれる。

一方Active-TIGは、Ar-TIGの1.6倍であり、かえってコストが高くなった。これは、溶接促進剤にかか

表3 加工コストの試算結果（図4の母材溶込み深さ2mm時）

		Ar-TIG	He-TIG	Ar+H <sub>2</sub> -TIG	Active-TIG	備考	
人件費	溶接速度	cm/min	12	27	24	・溶接電流：120A ・溶接長さ：150mm ・ガス流量：8 l/min ・プリーフロー：0.5sec ・アフタフロー：4.5sec ・電力単価：23.2円/kwh ・人件費単価：2500円/h ・溶接促進剤： 48m/本・3cm塗布幅	
	アークタイム	min	1.25	0.56	0.63		
	溶接時間	min	1.33	0.64	0.71		
溶材費	人件費	円/m	370.4	177.5	231.5		
	ガス単価	円/l	0.86	2.43	1.00		
	溶接促進剤単価	円/m	—	—	416.7		
電力費	ガス消費量	リットル	10.67	5.11	5.67		
	溶材費	円/m	61.0	82.8	37.8		
	アーク電圧	V	13.0	17.0	14.1		
	電力量	kwh	0.0325	0.0189	0.0176		
		電力費	円/m	5.0	2.9	2.7	3.0
総合計		円/m	436.3	263.1	237.3	689.3	

※溶接促進剤の単価は、製品価格をメーカー公表の性能データ（備考欄参照）で除して算出した。

るコストが桁違いに高く、これだけでAr-TIGの加工コストレベルに達しているからである。仮に溶接促進剤が現状の1割の価格であっても（加工コストで314円/m）、He-TIG、Ar+H<sub>2</sub>-TIGの加工コスト（230～260円/m台）には及ばない。近年、学会等で高能率TIG溶接施工法として注目を集めているプロセス<sup>6)</sup>だけに今後の性能向上、製品のコストダウン化が期待される。

He-TIGとAr+H<sub>2</sub>-TIGの比較では、図5にみられるように本実験条件範囲内では母材を深さ方向に溶込ます能力はほぼ同等と思われる。加工コストでは、Ar+H<sub>2</sub>-TIGがやや有利でイニシャルコストに相当するガス費がAr+H<sub>2</sub>-TIGの方が安い（地域にもよるが実勢でHeの半分以下）ことも合わせて考えると、Ar+H<sub>2</sub>-TIGの方がユーザには受け入れやすいと思われる。

さらにビード外観において、He-TIGではAr系-TIGよりガスシールド性が劣るためスマット（黒いスス）状のものが付着しやすい傾向があるが、Ar+H<sub>2</sub>-TIGでは、金属光沢のある美しいビード外観が容易に得られる。

以上のことから、従来のAr-TIG溶接法に置き換わる低加工コスト施工法として、Ar+H<sub>2</sub>-TIG溶接法が

有効であると判断、以後の実験検証では、Ar+H<sub>2</sub>-TIG溶接法で実施した。

### 3.2 実践検証

ここでは、実際の溶接製品を想定して、圧力容器（擬似製品、外形寸法：150mm幅×150mm奥行×165mm高さ）をモデルに、加工コストを検証してみた。

製品の溶接継手は、角を初め、水平隅肉、重ね隅肉、円周隅肉および突合せで構成されている。溶接はすべて手動で実施し、溶接オペレータは、JIS Z 3821ステンレス溶接技能者評価試験（TIG溶接）の合格者である。

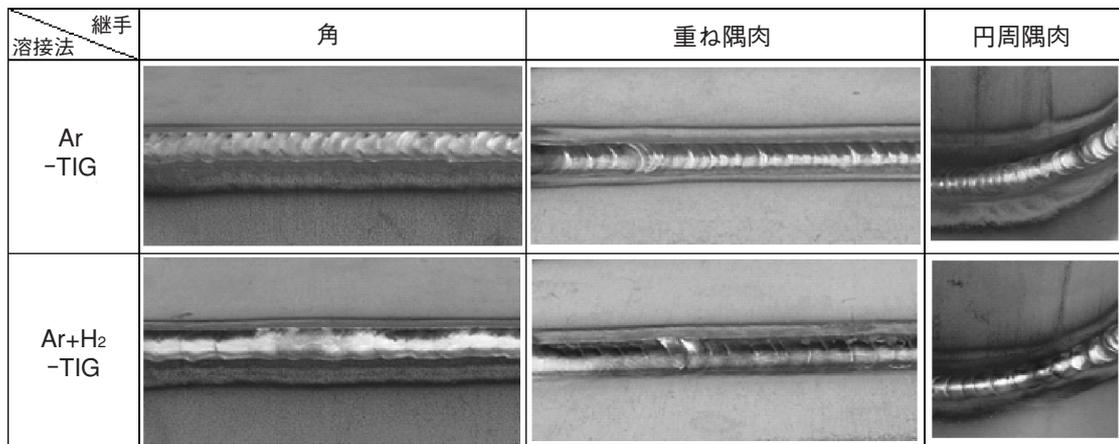
表4に、検証結果を示す。基礎検証の結果と傾向は同じであり、Ar-TIGとAr+H<sub>2</sub>-TIGを比較すると、総アークタイムでかなりの差が認められた。すなわち、Ar+H<sub>2</sub>-TIGがAr-TIGの58%つまり約6割の時間で工作できたことになる。このことが起因してガス単価がArよりも高価なAr+H<sub>2</sub>ガスでもガスの消費量が少なく、ガス費（溶材費）を抑えると同時に人件費にも大きく寄与し、結果的にAr-TIGの約40%のコストダウンとなった。

図6に、各種継手におけるビード外観を比較した

表4 擬似製品における加工コストの試算結果

【製品名】 圧力容器															
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>継手</th> <th>総溶接長(mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>角</td> <td>820</td> </tr> <tr> <td>隅肉(重ね)</td> <td>200</td> </tr> <tr> <td>隅肉(水平)</td> <td>560</td> </tr> <tr> <td>隅肉(円周)</td> <td>75.4</td> </tr> <tr> <td>突合せ</td> <td>350</td> </tr> </tbody> </table>		継手	総溶接長(mm)	角	820	隅肉(重ね)	200	隅肉(水平)	560	隅肉(円周)	75.4	突合せ	350
		継手	総溶接長(mm)												
		角	820												
		隅肉(重ね)	200												
		隅肉(水平)	560												
		隅肉(円周)	75.4												
突合せ	350														
溶接電流：70A ガス流量：8 ℓ/min 使用電極：CeO <sub>2</sub> (2%)-W, 45° 被溶接材：SUS304, 3mmt															
	Ar-TIG	Ar+H <sub>2</sub> -TIG													
総アークタイム	min	18.4	10.8												
人件費	円/m	410.1	252												
溶接材料費	円/m	63.1	43.1												
電力費	円/m	3.2	2.1												
総合計	円/m	476.4	297.2												

※電力費を求める際のアーク電圧値は、アーク長2mm時の値を採用している。



【溶接条件】 ・溶接電流：70A ・使用電極：CeO<sub>2</sub> (2%) -W, 45°  
 ・ガス流量：8 ℓ /min ・被溶接材：SUS304, 3mmt

図6 ビード外観の比較

ものを示す。Ar-TIGに比べるとAr+H<sub>2</sub>-TIGがビード表面に、金色や青色を呈した金属光沢が得られており、酸化の度合いが少ないことがわかる。これは、ArシールドガスにH<sub>2</sub>ガスを添加することでアークプラズマが緊縮し熱源が集中すること、およびH<sub>2</sub>ガスによる溶接部への還元作用が効果的に働いたためと考えられる。

以上、実践検証においてもAr+H<sub>2</sub>-TIG溶接法の有効性を示すことができた。

#### 4. おわりに

原価を下げる生産方式として名高い“トヨタ生産方式”では、『後工程はお客さま』という考え方があ。後工程に対する気配りを表現したものであるが、その思想は、“モノづくりは、自工程の生産だけでなく、後工程を意識した生産を行う必要があり、これが工程内の品質保証や効率化（コストダウン）につながる”というものである<sup>7)</sup>。

本報で対象となるステンレス溶接製品の多くは、商品価値を高めるために溶接の後工程で溶接時に発生する焼け（いわゆる“溶接焼け”）を除去する作業がある。この作業は主として酸洗いや電解研磨等により実施されるが、いずれにしても溶接焼けは、酸化の程度が少ない銀色や金色、青色を呈した溶接ビードの方が短時間に仕上げることができる<sup>8)</sup>。このことからAr+H<sub>2</sub>-TIG溶接法は、加工コストだけで

なく後工程をも含めた生産コスト低減に大きく貢献できる施工法といえる。

結びに、Ar+H<sub>2</sub>-TIG溶接法は、溶接冶金特性の観点からその適用がオーステナイト系ステンレス鋼に限定される。今後は、受講者ニーズの動向に応じてフェライト系ステンレス鋼やアルミニウム（合金）等、他の金属材料についても新たな視点から生産コスト低減につながる低加工コスト施工法を模索してみたい。

#### <参考文献>

- 1) 野原：「職業能力開発の実践～熱加工プロセス技能者の生産コスト意識、改善意識高揚化に向けての取り組み～」、『技能と技術』, Vol.39 (2004), No.226, p.21-30.
- 2) 平田・廣瀬・大垣・浅井・黄地：「熔融池の対流現象のモデリング」, 溶接学会論文集, Vol.18 (2000), p.540-548.
- 3) 松縄：「アーク溶接におけるマランゴニ効果」, 『まてりあ』, Vol.34 (1995), p.412-419.
- 4) 田中：「A-TIG溶接におけるアーク現象」, 溶接学会誌, 74 (2005), p.113-119.
- 5) 日向・安田・春日・恩澤：「静止TIGアークによる溶込み形態の検討～低速DC-TIG溶接法の研究(第一報)～」, 溶接学会論文集, 10-3 (1992), p.37-43.
- 6) 例えば、野城：「溶接技術の高度化による高効率・高信頼性溶接技術の開発」, 溶接学会誌, 72 (2003), p.466-484.
- 7) トヨタ生産方式を考える会編：「トコトンやさしいトヨタ生産方式の本」, 日刊工業新聞社 (2004)
- 8) 例えば、野原：「インバータ式ステンレス溶接焼け清浄装置“WC (V) -3000” 操作実演マニュアル」, 株式会社ダイヘンテクノス西日本 (2000)