

# AA-TIG 溶接によるステンレス鋼溶接金属の性状の検討

篠原 誠 (技術本部 技術部)

安西 敏雄 (九州工業大学 大学院 生命体工学研究科)\*

溶接構造物を製作する際の溶接施工法は、多種多様にあるが、現在、高品質を維持し、更に高効率な施工法の開発が進められている。今回、ティグ溶接法において、トーチの構造を改造し、溶込みを増加させる技術が開発された。著者らは、その技術のステンレス鋼への適用性とその溶接金属の性状について検討を行った。

## 1. はじめに

ティグ溶接法は、一般的にあらゆる産業分野に利用されている溶接方法である。溶接欠陥が少なく、溶接ビード外観も美しく、高品質な溶接継手を得ることができる。また、溶接作業性がよく、全姿勢溶接が可能である。このような優れた特徴を持つティグ溶接法は、ステンレス鋼を用いた溶接構造物に広く適応されている。

しかし、その反面、ティグ溶接法は他のアーク溶接法に比べ溶込みが浅い、溶着量が小さい、溶接速度が遅いなど溶接効率が低く、生産性が低いという欠点が挙げられる。

近年、ステンレス鋼のティグ溶接法において、溶接効率を向上させる溶接法として、活性フラックスによる方法(A-TIG 溶接法)や酸化性ガスを含むシールドガスを用いる方法(AA-TIG 溶接法)が注目されている。

しかし、一般的なティグ溶接法のトーチに酸化性ガスを含むシールドガスを用いると、タングステン電極の消耗が発生することで溶接が不可能になる。本実験では、タングステン電極の消耗を抑制した二重シールドトーチを採用し、シールドガスに微量な酸化性ガスを添加することによって、溶込みを向上させた溶接方法について検討し、その溶接金属の性状確認を行った。

## 2. AA-TIG 溶接法について

### 2.1 AA-TIG 溶接法の特徴

溶加材を使用しないノンフィラーティグ溶接法において、溶融池の対流駆動の要因として電磁力、浮力、表面張力、プラズマ気流が知られており、AA-TIG 溶接法では、酸化性ガスを使用することによって、マランゴニ対流と呼ばれる表面張力の差異が生じる溶融池の対流現象を利用している。一般的に低 S 量のオーステナイト系ステンレス鋼材は、温度の高い溶融池中心の表面張力は低く、温度の低い溶融池周囲の表面張力は高くなる。よって、溶融池表面では中央部から周辺部へと対流が生じ、熱が分散され、幅の広い、浅い溶込み形状となる。これに対して、微量の

酸素を添加することによって、表面活性状態が変化し対流の方向が逆転して、幅の狭い、深い溶込み形状となる。

### 2.2 溶接トーチの構造

図1に二重シールドティグ溶接トーチの構造<sup>1)</sup>を示す。本実験で使用したシールドガスは、内側のシールドガスにアルゴンガスを用い、外側のシールドガスにアルゴンガスをベースとした酸化性ガスを用いた。この二重シールドの内側ノズルより噴射する内側シールドガスの流量密度を一定範囲内に調整することで、電極の径、内側ノズルの径に関係なく、最大の溶込み深さを得る構造になっている。また、外側のノズルからの酸化性ガスの影響によるタングステン電極消耗を抑制している構造になっている。本実験では、内側シールドガスの流量密度として、ノズル断面に対して  $0.2\text{L}/\text{min} \cdot \text{mm}^2$  を採用し、ガス流量を  $3\text{L}/\text{min}$  とした。図2にシールドガス中に  $0.5\% \text{O}_2$  の酸化性ガスを添加した時の従来のティグ溶接法と AA-TIG 溶接法のタングステン電極の状態を示す。このように、従来のティグ溶接法では、酸化状態が観察されたが、AA-TIG 溶接法では、ほとんど消耗は認められなかった。

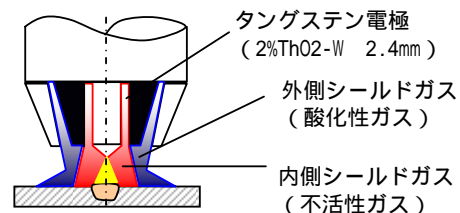
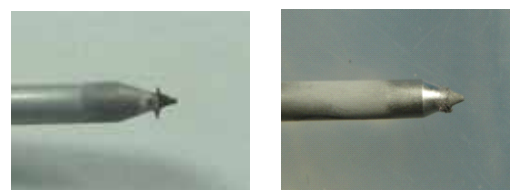


図1 AA-TIG 溶接トーチの構造



(a)従来のティグ溶接法 (b)AA-TIG 溶接法  
図2 タングステン電極に及ぼすトーチ構造の影響  
(電極 2%ThO<sub>2</sub>-W 2.4mm, 電流 150A, アーク時間 60S)

### 3. 外側シールドガスによる溶込みへの影響

#### 3.1 供試材

今回の実験に用いた供試材の材質、板厚および化学成分を表1、表2、表3に示す。酸化性ガスの違う種類の実験に用いた供試材は、表1、表2に示す材料である。また、S量の違う材料を用いた酸化性ガスによる溶込み形状の実験の供試材は、表2、表3に示す材料である。

#### 3.2 実験方法

本実験の酸化性ガスの種類として、表4に示すようにアルゴンガス中に微量の酸素を添加した5種類のシールドガスを使用した。また、溶込み形状に影響を及ぼすと考えられる溶接パラメーターである溶接電流、溶接速度、アーク長、シールドガス流量等は表5に示すような一定の値として、各々の組合せによる実験を行った。また、S量の違う材料を用いて、酸化性ガスによる溶込み形状の因果関係を究明した。

#### 3.3 D/W値に及ぼすシールドガス中の酸素量の影響

図3にシールドガス中の酸素量の変化による溶込みの深さ(D)を幅(W)で割ったD/W値を示し、図4に酸

表1 供試材の化学成分 [mass%]

材料	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
SUS304 (6mmt)	0.05	0.60	0.99	0.030	0.007	8.05	18.16

表2 供試材の化学成分 [mass%]

材料	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
SUS304 (12mmt)	0.05	0.51	0.93	0.033	0.002	8.13	18.22

表3 供試材の化学成分 [mass%]

材料	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
SUS304 (12mmt)	0.04	0.50	0.91	0.029	0.005	8.11	18.17

素量を変化させた時の溶込み形状の断面写真を示す。このように溶接電流に関係なくシールドガス中の酸素量を増やすに従って、幅が狭く、溶込みが深い形状となり、D/W値が大きくなり、0.5%O<sub>2</sub>で最大となる。さらに、シールドガス中の酸素量を増加させていくと、幅広く、浅い溶込み形状となり、D/W値が小さくなる。

#### 3.4 溶接金属内の酸素量

溶接金属内の酸素量の分析を不活性ガス融解 赤外線吸収装置(LECO ジャパン製 TC436)にて実施した。図5

表4 酸化性ガスの種類

(アルゴン+X%O <sub>2</sub> )	X
	0.15, 0.3, 0.5, 0.75, 1.0

表5 溶接パラメーター

溶接電流(A)	100, 130, 150
溶接速度(cm/min)	10
アーク長(mm)	3
内側シールドガス(L/min)	3
外側シールドガス(L/min)	10

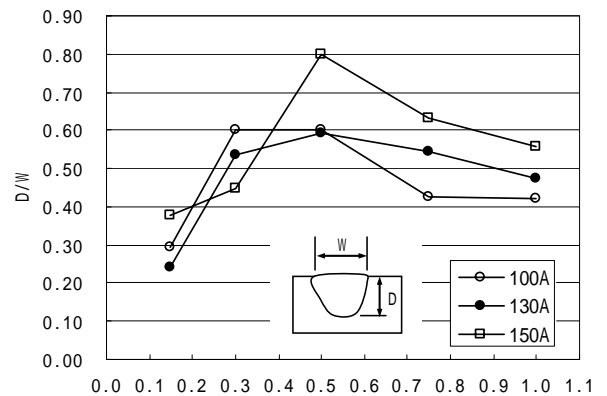


図3 シールドガス中の酸素量の変化によるD/W値

断面写真					
O <sub>2</sub> 添加 (%)	0.15	0.3	0.5	0.75	1.0

図4 酸素量を変化させた時の溶込み形状 (溶接電流: 150A)

にその分析結果を示す。溶接電流 100A、130A および 150A において、溶接金属内の酸素量は外側シールドガス中の酸素量が 0.15～0.5% までは直線的に増加し、0.5% で最大になった。その時の酸素量は 230～240ppm の値を示した。しかし、外側シールドガス中の酸素量が 0.75% および 1.0% と増えても溶接金属内の酸素量は 220～230ppm となり変わらない値を示した。この結果から、熔融池内に 200～250ppm 程度の酸素量が入ることによって、最も深い溶込み形状が得られることがわかる。

### 3.5 溶接金属表面の酸化皮膜

図 6 に溶接金属表面の酸化皮膜の溶接電流 150A での EPMA 面分析結果を示す。外側シールドガス中の酸素量を 0.15% から 0.3% に増加させると、11.1 $\mu\text{m}$  から 8.3 $\mu\text{m}$  と小さくなり、0.5% で 5.0 $\mu\text{m}$  と最小値になる。さらに酸素量を増加させると 0.75% では 42.9 $\mu\text{m}$ 、1.0% では 52.6 $\mu\text{m}$  と酸化皮膜の厚さは急激に大きくなる。これは、シールドガス中の酸素量が 0.5% の時、最もマランゴニ対流が大きくなり、酸素が溶接金属内部に供給されたため、酸化皮膜が薄くなったと考える。

### 3.6 溶込み形状に及ぼす溶接速度の影響

図 7 に、表 2 に示す供試材を用いて、酸素量 0.5% を添

加した酸化性ガスによる溶接速度を変化させた時の溶込み形状の断面写真を示す。溶接速度を次第に遅くした場合、溶接ビード幅は若干広がる程度であるが、それに対して溶込み深さは、溶接速度 4cm/min から急激に深くなる傾向にある。さらに、溶接速度 2cm/min では、つぼ型のような溶込み形状を示した。このような溶込み形状は AA-TIG 溶接法の特徴であると言える。

### 3.7 溶込み形状に及ぼす S 量の影響

溶加材を使用しないノンフィラータグ溶接法においては、材料に含まれる微量元素の S 量の違いにより、溶込み形状に影響を及ぼすことが知られている。しかし、本実験で採用した酸化性ガスを用いた AA-TIG 溶接法では、図 8 に示すように S 量 0.002%、0.005% の違う材料を用いた溶接でも D/W 値はほぼ同じ値を示した。この結果から、本実験で使用した AA-TIG 溶接法を採用することで、S 量の違いによる溶込み形状への影響はないと言える。

### 3.8 タングステン電極の先端角度と溶込み形状の関係

タングステン電極の先端角度 60°、90° における溶込み形状を図 9 に示す。先端角度 60° の時、先端角度 90° に比べてアーク柱は安定し、溶込み形状も D/W が大きな値を示した。

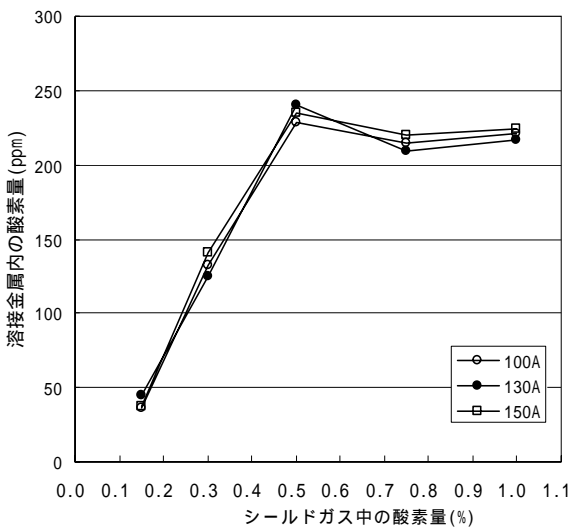


図 5 溶接金属内の酸素量

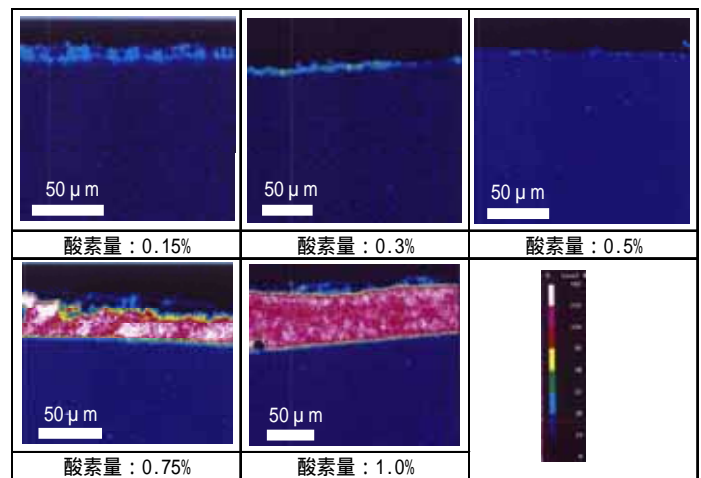


図 6 溶接電流 150A 時の EPMA 面分析結果

断面写真						
O <sub>2</sub> 添加 (%)	添加なし	0.5				
溶接速度 (cm/min)	4	10	8	6	4	2

図 7 溶込み形状に及ぼす溶接速度の影響



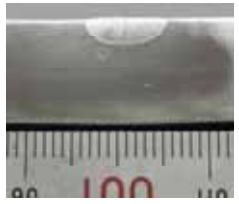

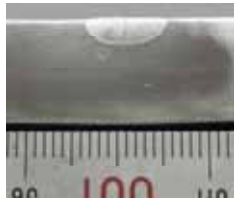

溶接方法	従来ティグ溶接法	AA-TIG溶接法
シールドガス	アルゴン	0.5%O <sub>2</sub> 添加
S量 : 0.002%	D/W:0.31 	D/W:0.86 
	D/W:0.36 	D/W:0.87 
S量 : 0.005%	D/W:0.36 	D/W:0.87 

図8 S量の違う材料による溶込み形状

### 3.9 トーチ高さによる溶込み形状

溶接トーチのガスカップ高さを10mmから5mmに変化させた場合、図10に示すように溶接ビード幅が広く、溶込み形状が浅くなる傾向になる。この要因として、トーチ高さを近づけることで、プラズマ気流の影響により、マランゴニ対流が外向きに働いたためと考えられる。

### 4. AA-TIG溶接法による突合せ溶接施工法

オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304, 12mmの板を用いて下向両側溶接施工した突合せ継手の溶接部を評価した。供試材としては、表3に示す化学成分の供試材を用いた。継手の開先形状は、突合せI型開先とし、積層法は両側からの各1パス溶接の2層で実施した。表6に、その時の溶接条件を示す。またその他の条件としてトーチ高さを10mmに、アーク長を3mmにして実施した。

#### 4.1 溶接金属表面の状況

図11に示すように、酸化性ガスを使用したAA-TIG溶接法では、従来ティグ溶接法に比べて溶接金属表面の酸化物の生成が多い。この酸化物が付着したまま次パスの溶接を行うと溶融池の形状に悪影響を与えるため、パフ仕上げが必要となる。

#### 4.2 放射線透過試験の結果

JIS Z3106 ステンレス鋼溶接継手の放射線透過試験方法にて評価した。撮影写真を図12に示すように、溶接線全長に渡り無欠陥であり、微量酸素を添加したAA-TIG溶接法の品質は全く問題ないと言える。



(a)先端角度：60° (D/W:0.72)



(b)先端角度：90° (D/W:0.56)

図9 タングステン電極の先端角度による溶込み形状



(a)トーチ高さ10mm (D/W:0.87)



(b)トーチ高さ5mm (D/W:0.51)

図10 トーチ高さによる溶込み形状

表6 溶接条件

溶接電流(A)	160
溶接アーク電圧(V)	15
溶接速度(cm/min)	4
内側シールドガスの種類	アルゴン
流量(L/min)	3
ガス圧(MPa)	0.2
外側シールドガスの種類	Ar+0.5%O <sub>2</sub>
流量(L/min)	10
ガス圧(MPa)	0.2



#### 4.3 溶接継手の引張性能

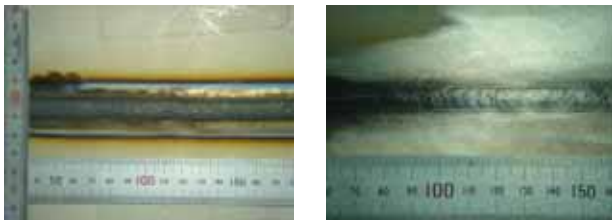
JIS Z3121 突合せ溶接継手の引張試験方法にて評価した。試験片は、1号試験片を用いた。表7に引張試験結果を示す。図13に試験後の試験片外観写真を示す。従来ティグ溶接法で実施した引張試験同様に破断位置は、溶接金属部で破断した。また、引張強度はすべて母材規格値以上であり、また、伸びについても規格値以上の値を示し、良好な継手強度であると言える。

#### 4.4 溶接継手の曲げ性能

JIS Z3122 突合せ溶接継手の曲げ試験方法にて評価した。表曲げ2本、裏曲げ2本で型曲げ試験方法にて実施した。表8に曲げ試験結果を示す。また、図14に試験後の試験片外観写真を示す。すべての曲げ試験片において健全な伸びを有し、無欠陥であった。

#### 4.5 シャルピー衝撃試験の結果

JIS Z2242 金属材料のシャルピー衝撃試験方法にて評価した。試験温度 -196 および -101 とし、標準試験片(10mmt)で行った。表9に試験結果を示し、溶接金属部の吸収エネルギーを評価した。一般的に、溶接金属内の酸素量が増加すると溶接金属部の靱性が低下する傾向が現れるが、本実験で微量酸素を添加した酸化性ガスを用いたAA-TIG溶接法の結果、-196において吸収エネルギーの平均が52J、-101で吸収エネルギーの平均が119Jであった。この値は、低温で使用する压力容器の規格、-196時の吸収エネルギー34J以上を満足しており、低温靱性を十分有していると考えられる。



(a) 溶接のまま (b) バフ仕上げ

図11 溶接金属表面の状況

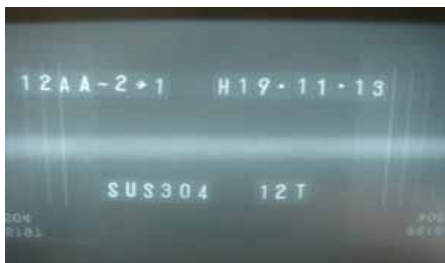


図12 放射線透過試験

表7 引張試験結果

試験片番号	規格値 ( $N/mm^2$ )	引張強さ ( $N/mm^2$ )	伸び (%)	破断位置
T1	520	646	58.6	溶接金属部
T2	520	650	56.3	溶接金属部

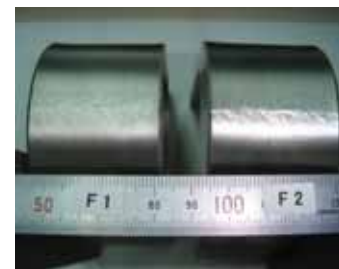
ギーの平均が52J、-101で吸収エネルギーの平均が119Jであった。この値は、低温で使用する压力容器の規格、-196時の吸収エネルギー34J以上を満足しており、低温靱性を十分有していると考えられる。



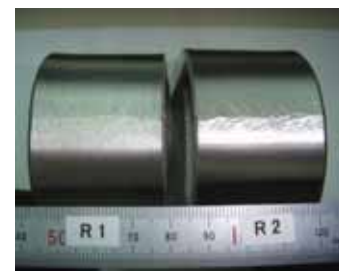
図13 引張試験後

表8 曲げ試験結果

溶接	寸法 (mm)	曲げ半径 (mm)	曲げ角度 ( $^{\circ}$ )	結果
F1	表曲げ	20	180	無欠陥
F2				無欠陥
R1	裏曲げ			無欠陥
R2				無欠陥



(a) 表曲げ試験後



(b) 裏曲げ試験後

図14 曲げ試験後

表9 シャルピー衝撃試験結果

ノッチ位置	試験温度( )	吸収エネルギー(J)	
		単体	平均
溶接金属部	-196	52	52
		58	
		46	
	-101	118	119
		126	
		110	

#### 4.6 断面マクロおよびミクロ組織

図15に断面マクロを示す。溶込み形状は、片側7.5mmの溶込み深さを有し、また、割れ等の欠陥も認められず、開先残りの無い健全な溶込み形状であることがわかる。

また、本実験に用いたAA-TIG溶接法は、従来のティグ溶接法と比べて、溶込みを重視した積層の軽減を目的とした溶接方法であるため、1回の溶接入熱量が大きく、材料への鋭敏化が懸念される。そこで、熱影響部の鋭敏化を定性評価するために、JIS G0571に従い10%しゅう酸エッチング試験を行った。その結果を図16に示す。熱影響

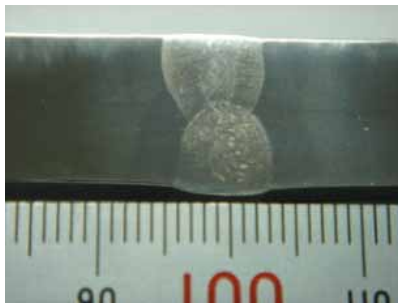


図15 断面マクロ


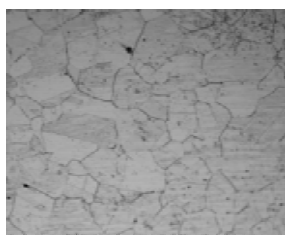
供試材	断面ミクロ組織(200倍)	
SUS304 12mmt A.W.	母材	 段状組織
	熱影響部	 混合組織

図16 ミクロ組織

部の組織としては、結晶粒界に部分的にみぞのある混合組織であり、従来ティグ溶接法を行った時とまったく相違がないと言える。

#### 4.7 電気化学的再活性化測定の結果

AA-TIG溶接法に伴う熱影響部の鋭敏化を定量評価するために、JIS G0580に従い電気化学的再活性化率を測定した。一般的に、腐食試験で粒界腐食感受性が大きくなるのは、電気化学的再活性化法による再活性化率が5%以上得られる場合によることが知られている<sup>2)</sup>。本実験では、再活性化率が最大2.5%であった。この結果からわかるように、AA-TIG溶接法でも、安定した耐食性を保てると言える。

#### 5. おわりに

本実験で採用した二重シールドガスの構造を持つAA-TIG溶接法を行うことで、従来のティグ溶接法に比べ、溶込み形状の深い溶接施工が可能である。また、一般的な開先形状と違ったI型開先形状によるノンフィラー溶接法による施工が可能になり、オーステナイト系ステンレス鋼の構造物を製作するにあたり、かなりの溶接作業効率のアップが図られ、工程短縮が実現できると考える。また、鋼材のS量の違いによる溶込み形状の不均一さがなく、溶接品質も向上すると考える。

#### 謝辞

本研究を実施するにあたり、ご指導頂きました九州工業大学大学院生命体工学研究科西尾一政教授に感謝申し上げます。また、当時、実験の遂行に熱心に協力頂いた修士学生の権藤僚君に感謝します。

#### 参考文献

- 1) 愛知産業株式会社製 TIG Force
- 2) 中野正大, 安西敏雄, 古川誠喜: SUS304の粒界鋭敏化に及ぼす補修溶接の影響, 高田技報 VOL.14, p.22-27, (2004)