## ●── 技術論文 リーンおよび汎用二相ステンレス鋼のティグ溶接の実際

Practice of TIG welding of lean and ordinarily used duplex stainless steels

中野 正大\*(技術本部 企画開発部),山口 ちひろ(技術本部 企画開発部)

Masahiro NAKANO\*, Chihiro YAMAGUCHI

(Technology Planning & Development Department, Technology & Engineering Division)

ニ相ステンレス鋼のティグ溶接では、溶接金属のフェライト量を30~70%あるいは30~60%の範囲となる 溶接条件を選定する必要がある<sup>1)</sup>. このフェライト量に影響する因子として溶接金属に含まれる窒素がある. 窒素は溶接中に溶融部から放出されると溶接金属のフェライト量が過多となり、溶接金属の強度および耐食 性が低下するおそれがある<sup>2,3)</sup>. そこで、二相ステンレス鋼にティグ溶接を適用した場合において、溶接条件 を変化させると溶接金属の窒素含有量およびフェライト量にどのような影響をおよぼすか検証するととも に、溶接金属の窒素含有量とフェライト量の関係ならびにフェライト量の測定方法の比較を評価した. その 結果、溶接金属のフェライト量を30~60%の範囲にするためには、トーチシールドガスとバックシールドガ スの組合せをAr-4%N<sub>2</sub>/Arとし、溶接入熱を25kJ/cm以下とする必要があること、溶接金属の窒素含有量が増 加するとフェライト量が低下し、裏面側のフェライト量は表面側よりも小さくなる傾向がみられること、そ して、磁気誘導法のフェライト量は表面側では面積比測定法と一致したが、裏面側では面積比測定法よりも やや低くなる傾向がみられることが明らかとなった.

In TIG welding of duplex stainless steel, it is necessary to select welding conditions in which the ferrite content of the weld metal is in the range of 30 to 70 % or 30 to 60 % <sup>1</sup>). Nitrogen contained in the weld metal is a factor that affects the ferrite content. When nitrogen is released from the molten zone during welding, the ferrite content of the weld metal becomes excessive and the strength and corrosion resistance of the weld metal may decrease <sup>2,3</sup>. Therefore, when TIG welding is applied to duplex stainless steel, the effect of changing the welding conditions on the nitrogen content and ferrite content of the weld metal, and the comparison of the two methods of measuring ferrite content. As a result, in order to keep the ferrite content of the weld metal within the range of 30 to 60 %, the combination of the torch shield gas and the backing shield gas should be  $Ar - 4\%N_2 / Ar$ , and the welding heat input should be 25 kJ/cm or less. As the nitrogen content of the weld metal increases, the ferrite content decreases, and the ferrite content on the back side tends to be smaller than that on the front side, but tended to be slightly lower than that of the area ratio measurement method on the back side.

## 1. はじめに

国内の二相ステンレス鋼は汎用二相ステンレス鋼の SUS329J3LおよびSUS329J4Lが広く普及しており,近 年では,Ni含有量を抑えて経済性を高めたリーン二相 ステンレス鋼のSUS821L1およびSUS323L,ならびに 耐食性を極めて高くしたスーパー二相ステレンス鋼の SUS327L1およびハイパー二相ステンレス鋼が普及し 始めている.

二相ステンレス鋼のティグ溶接では、作業性はオー ステナイト系ステンレス鋼と同程度であるが、溶接金 属のフェライト量を30~70%あるいは30~60%の範囲 となる溶接条件を選定する必要がある<sup>1)</sup>.このフェラ イト量に影響する因子として溶接金属に含まれる窒素 がある.窒素はオーステナイト相の形成を促し,強度 や耐食性を高めるために,母材および溶加棒に含まれ ている.そして,溶接中に溶融部から窒素が放出され ると溶接金属のオーステナイト相が減少してフェライ ト相が過多となり,溶接金属の強度および耐食性が低 下するおそれがある<sup>2.3)</sup>.このことからティグ溶接の トーチシールドガスにはアルゴンに2~5%の窒素を混 合させたものの使用が推奨されている<sup>1)</sup>.その他にも 溶接金属のフェライト量が過多とならないための対策 として,溶接入熱の下限を8kJ/cm,メルトラン溶接は 行わないことが推奨されている<sup>1)</sup>.

手動ティグ溶接(以下,ティグ溶接)では被覆アー ク溶接や半自動溶接と異なり溶接時に溶加棒の挿入量 を溶接士が調整することができるため,材質,板厚,

\* 九州工業大学 大学院 生命体工学研究科へ出向中

形状などに適した高品質な溶接が可能となるが,その 一方で,二相ステンレス鋼の場合は溶加棒の挿入量が 少ないと溶接金属のフェライト量が過多になりやす く<sup>1)</sup>,溶接士によって溶接金属のフェライト量のばら つきが発生するおそれがある.それ以外にも溶接電流, 溶接速度,溶接入熱,トーチシールドガス,バックシー ルドガスなど様々な溶接条件があり,溶接金属のフェ ライト量を要求される範囲にするためには,溶接金属 のフェライト量におよぼす溶接条件の影響を把握して おく必要がある.

そこで、リーンおよび汎用二相ステンレス鋼にティ グ溶接を適用した場合において、溶接条件を変化させ ると溶接金属の窒素含有量およびフェライト量にどの ような影響をおよぼすか検証するとともに、溶接金属 の窒素含有量とフェライト量の関係、ならびにフェラ イト量の測定方法の比較を評価する.さらに、溶接金 属の断面ミクロ組織とフェライト量の見本、ならびに 母材と溶接金属の元素マッピングを紹介する.

#### 2. 供試材

供試材はリーン二相ステンレス鋼のSUS821L1および汎用二相ステンレス鋼のSUS329J4Lの鋼板を使用し、その板厚は9mmとした.また、溶加棒はSUS821L1

にはSUS329J3Lの溶接に用いられるYS2209を,SUS32 9J4LにはYS329J4Lを使用し,棒径は2.4mmとした. **表1**に供試材および溶加棒の化学成分の一例を示す.

#### 3. 実験方法

ビードオンプレート溶接または突合せ溶接による溶 接試験板を作製し,溶接金属の窒素含有量およびフェ ライト量,ならびに断面ミクロ組織とその元素マッピ ングを確認した.**表2**にティグ溶接の溶接条件を示す.

## 3.1 窒素含有量の測定

溶接金属の窒素含有量の測定をJIS G 1228の附属書5 に従って行った.測定位置は溶接金属の裏面側および 表面側とし,ビードオンプレート溶接の場合は表面か ら板厚方向に深さ1.5mmまで,突合せ溶接の場合は裏 面または表面から板厚方向に深さ3mmまでの範囲と した.

# 3.2 断面ミクロ組織の観察および面積比測定法によるフェライト量の測定

突合せ溶接の溶接金属の断面ミクロ組織を観察した.観察位置は溶接金属の裏面側および表面側とした. なお,裏面側は裏面から板厚方向の深さが1.5mmの位 置とし,表面側は表面から板厚方向に深さが1.5mmの 位置とした.そして,それらのフェライト量を測定し

表1 供試材および溶加棒の化学成分 [mas										[mass%]		
;	材料	С	Si	Mn	Р	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Ν	Co
/++≠≠++	SUS821L1	0.018	0.3	3.1	0.023	< 0.001	2.2	20.9	0.5	1.06	0.16	0.07
供訊材	SUS329J4L	0.010	0.5	0.8	0.029	< 0.001	7.0	25.5	3.1	_	0.19	0.19
波加林	YS2209	0.016	0.4	1.5	0.017	< 0.001	8.6	23.2	3.3	0.04	0.17	-
俗加悴	YS329J4L	0.010	0.4	0.6	0.020	0.001	9.2	25.0	4.0	0.10	0.28	_

表2 ティグ溶接の溶接条件

溶接条件	1	2	3					
溶接形状	ビードオンプレート溶接	突合せ溶接(片側)	突合せ溶接(片側)					
板厚	9mm	9mm	9mm					
開先形状	_	V形 (60deg.)	V形 (60deg.)					
母材	SUS821L1	SUS821L1, SUS329J4L	SUS821L1					
溶加棒	YS2209	YS2209, YS329J4L	YS2209					
溶接電流	140, 180A	80~170A	100, 134A					
溶接速度	50, 100mm/min	—	40~65mm/min					
トーチシールドガス	$Ar - xN_2(x=0, 1, 3, 5, 10\%)$	Ar, Ar–4% $N_2$	Ar, Ar–4% $N_2$					
バックシールドガス	なし	Ar, $N_2$	Ar					
溶接姿勢	下向	下向	下向					
積層数	1層1パス	4層4パス	2層2パス					
予熱	なし	なし	なし					
パス間温度	_	150℃以下	常温					
溶接後熱処理	なし	なし	なし					
(亚坎) 波拉 λ 劫 *	10 12 20 26h Var	16kJ/cm(初層)	12kJ/cm(初層)					
(千均)俗按八愁	10, 13, 20, 20kJ/cm	23kJ/cm (最終層)	14kJ/cm(2層)					
* 溶接入熱 H=60El/v, E:アーク電圧[V], I:溶接電流[A], v:溶接速度[cm/min]								

た.測定方法は画像処理による面積比測定法とし,フ ェライト量は撮影倍率が400倍の3視野の平均値を測定 値とした.

## 3.3 磁気誘導法によるフェライト量の測定

溶接試験板の溶接金属の裏面側および表面側のフェ ライト量を測定した.測定方法は磁気的な装置による 方法の磁気誘導法とし,フェライト量は裏面側と表面 側のそれぞれ5か所の平均値を測定値とした.

## 3.4 母材および溶接金属の元素マッピング

断面ミクロ組織の試験片から母材および溶接金属の 元素マッピングを電子線マイクロアナライザー(以下, EPMA)により確認した. 観察位置は母材が板厚中央 付近とし,溶接金属が表面から深さ1.5mm付近とした. 分析条件は,加速電圧が15kV,照射電流5×10<sup>-8</sup>A,測 定時間40msとした.

## 実験結果とその考察

## 4.1 溶接金属の窒素含有量およびフェライト量にお よぼす窒素入りシールドガスと溶接条件の影響

溶接条件1によって作製したビードオンプレート溶 接の溶接試験板における溶接金属の窒素含有量および フェライト量(磁気誘導法)を確認した.

図1に溶接金属の窒素含有量およびフェライト量に およぼす窒素入りシールドガスおよび溶接条件の影響 を示す. Arに含まれるN₂の混合率が増加すると、溶接 金属の窒素含有量は増加し、フェライト量は減少する 傾向がみられた. また, 溶接速度が遅く, 溶接電流が 高い. すなわち溶接入熱が大きいほど, 溶接金属の窒 素含有量が小さくなり、フェライト量が大きくなった. これは溶接速度が遅くなると溶融池が発生している時 間が長くなり,溶接電流が高くなると溶融池が大きく なることによって, 溶融池からより多くの窒素が放出 されたと推測される. また, トーチシールドガスから の窒素の供給によって相対的に溶接金属の窒素含有量 が増加し,フェライト量が低下していると推測される. そして、フェライト量が60%以上となったのは、トー チシールドガスがArの場合に溶接入熱が13kJ/cm以上 で、トーチシールドガスのArに含まれるN2の混合率が 1%の場合に溶接入熱が20kJ/cmと26kJ/cmで、トーチ シールドガスのArに含まれるN2の混合率が3%の場合 に溶接入熱が26kJ/cmであった.これらのことから, 溶接金属のフェライト量を60%未満とするためには トーチシールドガスのArに含まれるN2の混合率を4%



図1 溶接金属の窒素含有量およびフェライト量にお よぼす窒素入りシールドガスおよび溶接条件の 影響

以上にして,溶接入熱を25kJ/cm以下にする必要がある. 4.2 溶接金属の窒素含有量およびフェライト量におよ

## ぼすティグ溶接のシールドガスの組合せの影響

溶接条件2によって作製した突合せ溶接の溶接試験 板における溶接金属の初層と最終層の窒素含有量およ びフェライト量(面積比測定法)を確認した.

図2に溶接金属の窒素含有量におよぼすティグ溶接 のシールドガスの組合せの影響を示す.初層では,トー チシールドガスの種類に関わらず,バックシールドガ スをArからN<sub>2</sub>とした場合に窒素含有量が0.07%程度大 きくなり,最終層では,バックシールドガスの種類に 関わらず,トーチシールドガスをArからAr-4%N<sub>2</sub>とし た場合に窒素含有量が0.10%程度大きくなる傾向がみ



られた.溶接金属の窒素含有量はシールドガスの成分 の影響を大きく受けることが明らかとなった.母材と 溶加棒の組合せの比較では,溶接金属の窒素含有量は SUS329J4L/YS329J4Lの方がやや大きくなる傾向がみ られた.これは溶加棒に含まれる窒素含有量が大きい ことが影響していると推測される.

図3に溶接金属のフェライト量におよぼすティグ溶 接のシールドガスの組合せの影響を示す. 初層では シールドガスの組合せがAr-4%N<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>とした場合にフ ェライト量が30%を下回るものがみられ,最終層では トーチシールドガスをArとした場合にフェライト量 が60%を上回るものがみられた. これらのことからフ ェライト量を30~60%とするためには,シールドガス の組合せをAr-4%N<sub>2</sub>/Arとすることが望ましい.

## 4.3 初層溶接部におよぼす二層溶接の影響

二相ステンレス鋼の多層溶接では,前層の溶接金属 が次層の熱影響によって二次オーステナイトが析出 し,フェライト量が低下するとされている<sup>10</sup>.そこで, 溶接条件3によって作製した突合せ溶接の溶接試験板 において,初層溶接および二層溶接の断面ミクロ組織 を比較し,二次オーステナイトの析出とフェライト量 の変化を確認した.

図4および図5に初層および二層溶接の断面ミクロ組 織を示す.初層溶接部では、初層溶接後に白い領域が みえるが、二層溶接後にはその部分が黒く変化し、二 次オーステナイトの析出がみられた.二層溶接の熱影 響によって、初層溶接部(のど厚3.6mmと4.0mm)の ほぼ全域に二次オーステナイトの析出がみられた.





図6に初層溶接部のフェライト量におよぼす二層溶 接の影響を示す.トーチシールドガスがArでは二層 溶接の影響によって初層溶接部のフェライト量の平均 値が73%から53%に減少し,トーチシールドガスがAr -4%N2では同様に58%から41%に減少した.すなわち, 二層溶接の影響によって初層溶接部のフェライト量は 20%程度減少することが明らかとなった.

## 4.4 溶接金属の窒素含有量とフェライト量の関係,

## ならびにフェライト量の測定方法の比較

溶接条件2で得たデータを以前の実験結果<sup>4</sup>に追加 し,溶接金属の窒素含有量とフェライト量(面積比測 定法)の関係を整理するとともに,フェライト量の測 定方法を比較した.

図7に溶接金属の窒素含有量とフェライト量(面積 比測定法)の関係を示す.溶接金属の窒素含有量が増 加するとフェライト量が低下し,裏面側のフェライト 量は表面側よりも小さくなる傾向がみられた.裏面側 のフェライト量が表面側よりも小さくなるのは4.3節 に示す次層の熱影響により二次オーステナイトが析出 することが影響していると推測できる.そして,溶加 棒がYS329J4Lの方がYS2209よりもフェライト量がや や大きくなる傾向がみられた.

図8に磁気誘導法と面積比測定法のフェライト量の 比較を示す.表面側では概ね両者のフェライト量は一 致したが,裏面側では表面側よりも磁気誘導法のフェ ライト量がやや低くなる傾向がみられた.また,溶加 棒がYS2209とYS329J4Lの差はほとんどみられなかっ た.溶接金属のフェライト量は磁気誘導法で非破壊的 に推測できることが明らかとなった.

## 4.5 溶接金属の断面ミクロ組織とフェライト量の見本

溶接金属の断面ミクロ組織のフェライト量を測定す る方法には、点算法および画像処理による面積比測定 法があり、近年は画像処理が比較的容易にできること から面積比測定法が使用される場合が多いが、エッチ ングの方法を工夫しなければフェライト相とオーステ ナイト相を明瞭に区分することは難しい.そこで、溶 接金属の断面ミクロ組織からフェライト量を定性的に 評価するための見本を作製した.溶接条件は母材と溶 加棒の組合せがSUS821L1/YS2209およびSUS329J4L/ YS329J4L,トーチシールドガスとバックシールドガ スの組合せがAr/Ar, Ar/N<sub>2</sub>, Ar-4%N<sub>2</sub>/Ar, Ar-4%N<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> とし、これらから適当な断面ミクロ組織を抜粋して見 本にした.

**図9**にフェライト量(面積比測定法)が25~80%の



100



図8 溶接金属におけるフェライト量の測定方法の比較



(a) フェライト量 80%



(b) フェライト量 75%



(d) フェライト量 65%



(e) フェライト量 60%



(c) フェライト量 70%



(f) フェライト量 55%

図9 二相ステンレス鋼の溶接金属における断面ミクロ組織とフェライト量の見本



(i) フェライト量 40%

(1) フェライト量 25%

図9 二相ステンレス鋼の溶接金属における断面ミクロ組織とフェライト量の見本(つづき)

断面ミクロ組織を示す. 灰色部がフェライト相で, 白 色部がオーステナイト相である. これによって, 溶接 金属のフェライト量の推測および定性的な合否判定を 行うことができる.

## 4.6 母材および溶接金属の元素マッピング

二相ステンレス鋼の母材および溶接金属はフェライ ト相とオーステナイト相の二相で構成されている.母 材では、フェライト相にCrとMoが、オーステナイト 相ではNiとNが濃化するが、溶接金属では、各相にCr、 Ni、Moが濃化せずにNのみがオーステナイト相に濃 化するとされている<sup>1)</sup>.そこで、母材および溶接金属 の元素マッピングをEPMAにより確認した.試験条件 は母材と溶加棒の組合せがSUS821L1/YS2209および SUS329J4L/YS329J4L、トーチシールドガスとバック シールドガスの組合せがAr-4%N<sub>2</sub>/Arとした.

図10および図11に母材および溶接金属の元素マッピ ングを示す.母材および溶接金属で,フェライト相に CrとMoが,オーステナイト相にNiとNの濃化がみら れた.MnについてはSUS821Lの母材のオーステナイ ト相にわずかな濃化がみられた.

#### 5. おわりに

リーンおよび汎用二相ステンレス鋼にティグ溶接を 適用した場合において,溶接条件を変化させると溶接 金属の窒素含有量およびフェライト量にどのような影 響をおよぼすか検証するとともに,溶接金属の窒素含 有量とフェライト量の関係ならびにフェライト量の測 定方法の比較を評価した.さらに,溶接金属の断面ミ クロ組織とフェライト量の見本,ならびに母材と溶接 金属の元素マッピングを紹介した.以下に結果のまと めを示す.

- トーチシールドガスのArに含まれるN2の混合率が 増加すると、溶接金属の窒素含有量は増加し、フェ ライト量は減少する傾向がある。
- ② 溶接入熱が大きいほど、溶接金属の窒素含有量が 小さくなり、フェライト量が大きくなる.
- ③ 溶接金属のフェライト量を60%未満とするために はトーチシールドガスのArに含まれるN₂の混合率を 4%以上にして、溶接入熱を25kJ/cm以下にする必要 がある。



④ 初層ではバックシールドガスをArからN2とした場

合に窒素含有量が0.07%程度大きくなり、最終層で はトーチシールドガスをArからAr−4%N₂とした場合 に窒素含有量が0.10%程度大きくなる.

- ⑤ 溶接金属のフェライト量を30~60%の範囲にする ためには、トーチシールドガスとバックシールドガ スの組合せをAr-4%N<sub>2</sub>/Arにする必要がある.
- ⑥ 二層溶接の影響によって、初層溶接部のほぼ全域 に二次オーステナイトの析出がみられ、初層溶接部 のフェライト量は20%程度減少する.
- ⑦ 溶接金属の窒素含有量が増加するとフェライト量 が低下し、裏面側のフェライト量は表面側よりも小 さくなる傾向がある。
- ⑧ 磁気誘導法のフェライト量は表面側では面積比測 定法と概ね一致したが、裏面側では面積比測定法よ りもやや低くなる傾向がある。
- ⑨ 溶接金属の断面ミクロ組織とフェライト量の見本から、溶接金属のフェライト量の推測および定性的な合否判定を行うことができる。
- ⑩ 母材および溶接金属の元素マッピングを確認した ところ、フェライト相にCrとMoが、オーステナイ ト相にNiとNの濃化がみられる。

## 参考文献

- 二相ステンレス鋼の溶接施工ガイドライン、日本溶接協 会、2017年10月
- 2) 粉川博之,梅田繁,桑名武:二相ステンレス鋼溶接金属の引張特性に及ぼす窒素の影響,溶接学会論文集,11-4, pp.531-537 (1993)
- 三浦実,高祖正志,工藤赳夫,拓殖宏之:二相ステンレス鋼溶接部の組織,耐食性に及ぼすNi,Nの影響,溶接 学会論文集,7-1, pp.94-100(1989)
- 4) 中野正大、山口ちひろ、安西敏雄:リーン二相ステンレス鋼の溶接金属におよぼすティグ溶接の窒素入りシール ドガスの影響、高田技報、Vol.30, pp.10-15 (2020)



中野 正大 Masahiro NAKANO 技術本部 企画開発部 技術士(金属部門)



山口 ちひろ Chihiro YAMAGUCHI 技術本部 企画開発部



図11 EPMAによる元素マッピング(SUS329J4L/YS329J4L, Ar-4%N<sub>2</sub>/Ar)