

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

Effect of shielding gas containing nitrogen in TIG welding on weld metal of lean duplex stainless steel

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）

安西 敏雄（技術本部）

Masahiro NAKANO, Chihiro YAMAGUCHI

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

Toshio ANZAI (Technology & Engineering Division)

二相ステンレス鋼の溶接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、母材や溶加棒に含まれる窒素が溶接中に放出されると、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^{1,2)}。そこで、近年、普及し始めているリーン二相ステンレス鋼を用いて、ティグ溶接のトーチシールドガスのアルゴンに窒素を混合させて溶接した場合に溶接金属のフェライト量および窒素含有量がどのように変化するかを検証した。その結果、窒素の影響によって、溶接金属の窒素含有量が大きくなり、溶接金属のフェライト量が小さくなることが明らかとなった。

While the welding workability of duplex stainless steel is equivalent to that of austenitic stainless steel, the ferrite content in the weld metal becomes excessive if nitrogen contained in the base metal or the filler rod is released during welding, and the strength and corrosion resistance of the weld metal may deteriorate. Therefore, we verified how the ferrite content and nitrogen content of weld metal changed when welding was conducted on lean duplex stainless steel, which has been gaining in popularity, while mixing nitrogen with argon for the torch shield gas of TIG welding. As a consequence, we found that the nitrogen content of weld metal increased while the ferrite content decreased due to the effect of nitrogen.

1. はじめに

二相ステンレス鋼は、オーステナイト系ステンレス鋼に比べてNi含有量が少なく、フェライト系ステンレス鋼に比べてじん性に優れる。また、耐孔食性や耐応力腐食割れ性といった耐食性に優れ、高強度である。ただし、二相ステンレス鋼の組織は常温でオーステナイト相とフェライト相の混合組織になることから、その相比が大きく変化すると、機械的性質や耐食性が低下するおそれがある。さらに、ぜい化の感受性が高いことから300℃以上といった高温での使用には適さない。

国内の汎用二相ステンレス鋼としては、SUS329J3LおよびSUS329J4Lが広く普及している。そして、近年は耐食性を極めて高くしたスーパー二相ステンレス鋼およびハイパー二相ステンレス鋼、そして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が開発されている。リーン二相ステンレス鋼はオーステナイト系ステンレス鋼として広く普及しているSUS304の代替材料としても注目されている。

二相ステンレス鋼に関する主なトピックスとしては、2012年11月に国土交通省の新技術情報提供システムNETISにステンレス鋼材として初めて二相ステンレス鋼が登録されている³⁾。2014年1月に日本海事協会「二相ステンレス鋼の溶接に関するガイドライン」が公開されている⁴⁾。2015年9月に経済産業省が日本工業規格（現 日本産業規格）のJIS G 4304およびJIS G 4305にリーン二相ステンレス鋼（SUS821L1およびSUS323L）およびスーパー二相ステンレス鋼（SUS327L1）を追加する改正を行っている。そして、2017年10月に日本溶接協会における化学機械溶接研究委員会の二相ステンレス鋼溶接研究小委員会で「二相ステンレス鋼の溶接施工ガイドライン」が公開さ

れている⁵⁾。さらに、2019年5月に日刊工業新聞でリーニ
二相ステンレス鋼の継ぎ目無し鋼管が船舶陸揚げ・進水設
備用オートテンションウインチの油圧配管に採用された事
例が公開されている⁶⁾。

二相ステンレス鋼の溶接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⁵⁾。このフェライト量に影響する因子のひとつ
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^{1, 2)}。そこで、それを防止するために、
二相ステンレス鋼の突合せ溶接において、ティグ溶接のト
ーチシールドガスのアルゴンに窒素を混合させて溶接した
場合に溶接部にどのような影響があるかを検証した。供試
材には近年普及し始めているリーニ二相ステンレス鋼を用
いた。

2. 供試材

供試材には、リーニ二相ステンレス鋼としてJIS G 4304
のSUS821L1の鋼板を使用し、その板厚は9mmとした。
また、溶加棒にはJIS Z 3321に示すYS2209を使用し、そ

の棒径は2.4mmとした。表1に供試材および溶加棒の化学
成分を示す。

3. 実験方法

ティグ溶接のトーチシールドガスにアルゴンと窒素を混
合させて溶接した場合に、その混合比を変化させると、溶
接金属のフェライト量、窒素含有量および断面ミクロ組織、
ならびに引張特性および衝撃特性がどのように変化するの
かを検証した。

3.1 溶接試験板の作製

溶接試験板は、SUS821L1の鋼板から板厚9mm、長さ
300mm、幅125mmを切り出し、ベベル角度30度に加工し
て、それらを組み合わせて突合せ溶接を行い作製した。表
2に溶接条件を示す。溶加棒にはYS2209を用いた。トーチ
シールドガスにはアルゴンおよびアルゴンと窒素の混合ガ
スを用いた。アルゴンと窒素の混合ガスにはアルゴンに含
まれる窒素の混合率が1, 3, 5, 10, 20および40vol%の
プレミックスガスを用いた。バックシールドガスにはアル
ゴンを用いた。

3.2 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。

表1 供試材および溶加棒の化学成分

		表1 供試材の溶加棒の化学成分 [mass%]										
材料		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N	Co
供試材	SUS821L1	0.018	0.3	3.1	0.023	0.000	2.2	20.9	0.5	1.06	0.16	0.07
溶加棒	YS2209	0.016	0.4	1.5	0.017	0.001	8.6	23.2	3.3	0.04	0.17	-

表2 溶接条件

溶接方法	ティグ溶接
溶接形状	突合せ溶接 (片側)
母材	SUS821L1
溶加棒	YS2209
溶接電流	60～180A
トーチシールドガス	Ar, Ar-N ₂ (窒素の混合率 1, 3, 5, 10, 20, 40%)
バックシールドガス	Ar
溶接姿勢	下向溶接
積層数	4層4パス, 5層5パス
予熱	なし
パス間温度	150℃以下
溶接後熱処理	なし
初層の平均溶接入熱	1400J/mm
最終層の平均溶接入熱	2000J/mm

3.3 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、それぞれが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。

3.4 断面ミクロ組織の観察

溶接試験板から試験片を切り出し、断面ミクロ組織を観察した。観察位置は溶接金属の中央付近の裏面側、板厚中央部および表面側とした。なお、裏面側は裏面から板厚方向に深さが 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。

3.5 引張試験

溶接試験材の溶接継手部の引張試験を JIS Z 3121 に従って行った。試験片の形状は 1 号試験片とした。試験片の数は 2 本とし、引張強さはその平均値とした。

3.6 衝撃試験

溶接試験材の溶接部の衝撃試験を JIS Z 3128 に従って行った。試験位置は溶接金属および溶接熱影響部とした。試験片の形状は幅 7.5mm のサブ試験片とし、ノッチ形状は V ノッチで、ノッチ角度 45 度、ノッチ深さ 2mm およびノッチ底半径 0.25mm とした。図 1 に試験片の採取位置と形状を示す。試験片の数は 3 本とし、吸収エネルギーは試験片を破断するのに要したエネルギーを試験片毎に幅およびノッチ下高さを計測して求めた面積で割った単位面積

当たりの値の平均値とした。試験温度は API RP 582 および NORSOK M-601 を参考にして -46°C とした。

4. 実験結果

4.1 溶接金属のフェライト量、窒素含有量および断面ミクロ組織におよぼすティグ溶接の窒素入りシールドガスの影響

二相ステンレス鋼の溶接では、溶接金属のフェライト量が 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⁵⁾。そして、ティグ溶接では溶接入熱が小さくなりやすく、溶加棒の挿入量が小さくなった場合などにフェライト量が大きくなることが想定されることから⁵⁾、ここではフェライト量が 30～50%となる条件を適当とした。

図 2 に断面ミクロ組織から得た溶接金属のフェライト量におよぼすティグ溶接の窒素入りシールドガスの影響を示す。窒素の混合率が增加するとフェライト量は減少する傾向がみられ、裏面側と表面側の比較では、窒素の混合率が 10%未満では表面側のフェライト量が大きくなり、10%以上では裏面側のフェライト量が大きくなった。また、板厚中央部では窒素の混合率が 3%以上の場合に裏面側および表面側よりもフェライト量が小さくなった。そして、溶接金属のフェライト量は、窒素の混合率が 0%の場合に最大で 61%になり、3～5%の場合には 30～50%になった。

図 3 に溶接金属の窒素含有量におよぼすティグ溶接の窒素入りシールドガスの影響を示す。窒素の混合率が增加すると窒素含有量が増加する傾向がみられ、裏面側は表面側よりも窒素含有量が小さくなる傾向を示した。そして、溶接金属の窒素含有量は、窒素の混合率が 0%の場合に最小で 0.11mass%になり、3～5%の場合には母材に要求される窒素含有量 0.15～0.20mass% と同等になった。

図 4 に溶接金属における窒素含有量と断面ミクロ組織から得たフェライト量の関係を示す。窒素含有量が増加するとフェライト量が低下する傾向がみられ、その傾きは裏面側に比べて表面側の方がやや大きく、裏面側は表面側よりもフェライト量が小さくなる傾向がみられた。

図 5 に磁気誘導法によるフェライト量と断面ミクロ組織から得たフェライト量の比較を示す。表面側では概ね両者の値は一致したが、裏面側では磁気誘導法の値が低くなる傾向がみられた。

図 6 に溶接金属の裏面側および表面側の断面ミクロ組織を示す。フェライト相が灰色部で、オーステナイト相が白色部となる。窒素の混合率が增加すると、フェライト相が減少し、オーステナイト相が増加している。そして、窒素

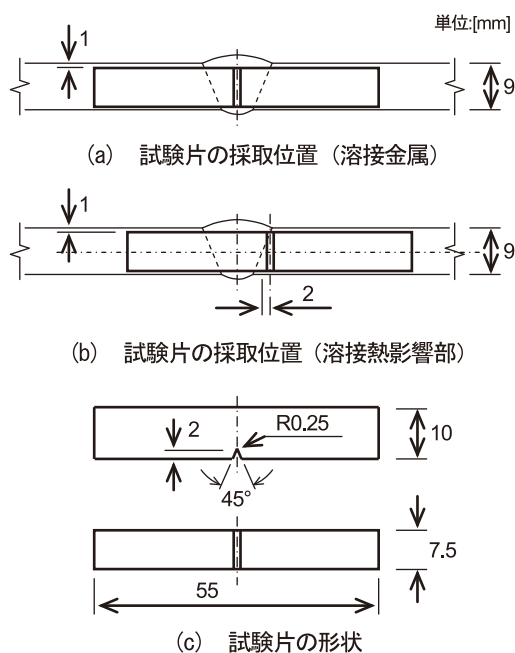


図 1 衝撃試験における試験片の採取位置と形状

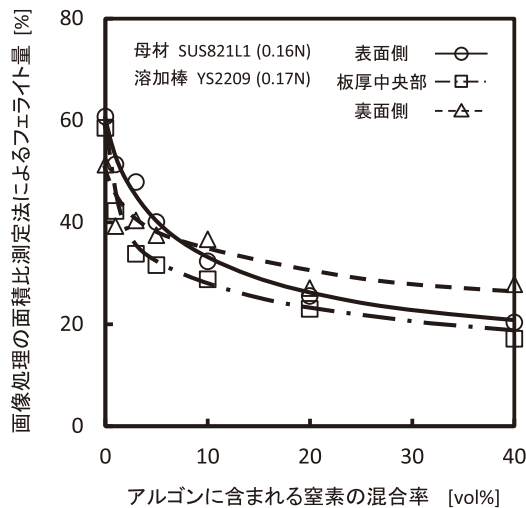


図2 溶接金属のフェライト量におよぼすティグ溶接の窒素入りシールドガスの影響

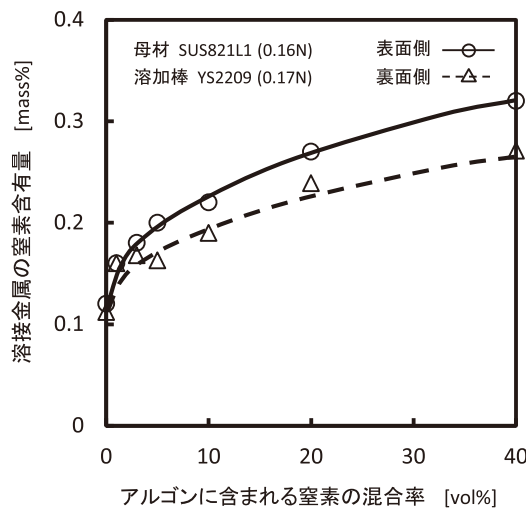


図3 溶接金属の窒素含有量におよぼすティグ溶接の窒素入りシールドガスの影響

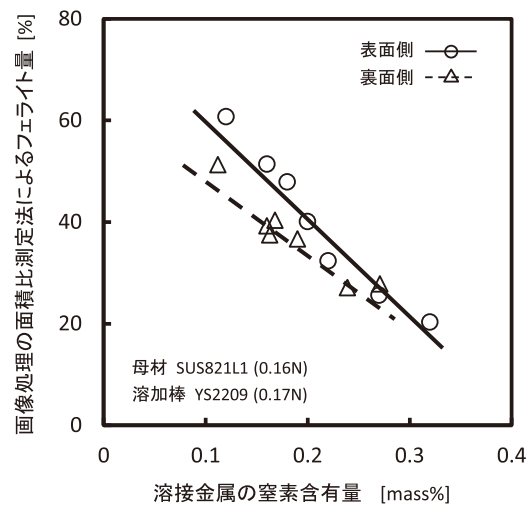


図4 溶接金属の窒素含有量とフェライト量の関係

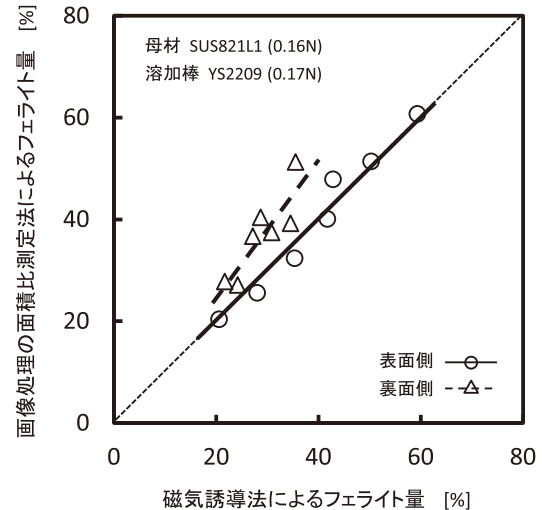


図5 溶接金属におけるフェライト量の測定方法の比較

の混合率が0%の場合は比較的小さなオーステナイト粒が多数みられ、3%および5%では一部にオーステナイト粒が成長した様相がみられ、10%ではフェライト相がやや網目状になり、40%ではフェライト相が完全に網目状になった。

4.2 継手強度および衝撃性能におよぼすティグ溶接の窒素入りシールドガスの影響

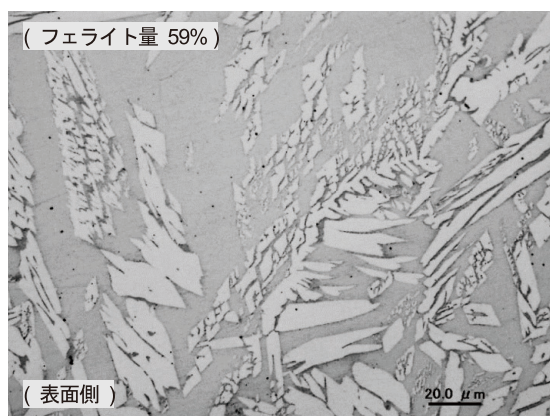
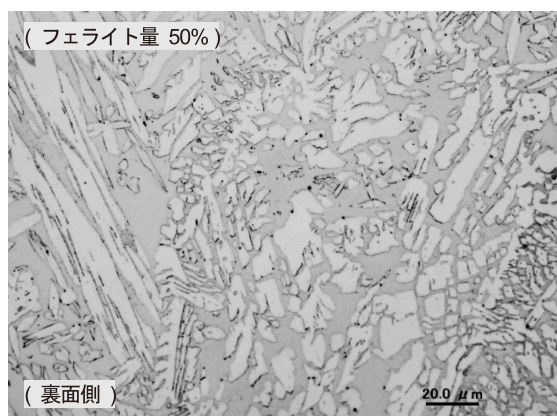
図7に溶接継手部の引張強さにおよぼすティグ溶接の窒素入りシールドガスの影響を示す。引張試験片の破断位置はいずれも母材部であった。窒素の混合率が増加しても引張強さに変化はみられなかった。溶接継手部の引張強さの平均値は765N/mm²で、母材の引張強さが713N/mm²に比べてやや高い値を示した。

図8に溶接金属および溶接熱影響部の衝撃値におよぼすティグ溶接の窒素入りシールドガスの影響を示す。窒素の混合率が増加しても溶接金属および溶接熱影響部の衝撃値に変化はみられなかった。シャルピー吸収エネルギーの平均値は、母材が127J/cm²に対して、溶接金属が357J/cm²で溶接熱影響部が128J/cm²であった。

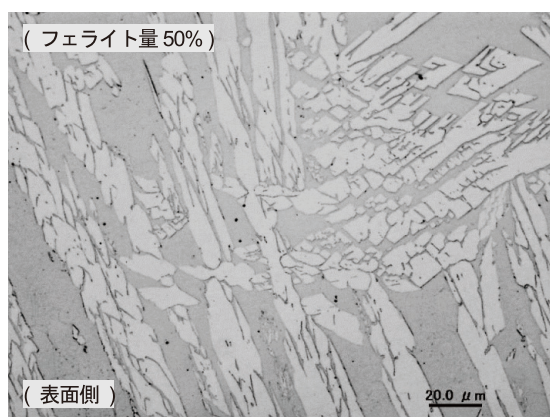
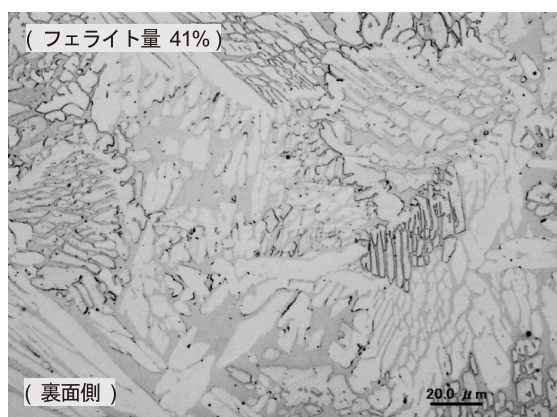
5. おわりに

二相ステンレス鋼の突合せ溶接において、ティグ溶接のトーチシールドガスのアルゴンに窒素を混合させて溶接した場合に溶接部部どのような影響があるかを検証した。以下にその結果をまとめた。

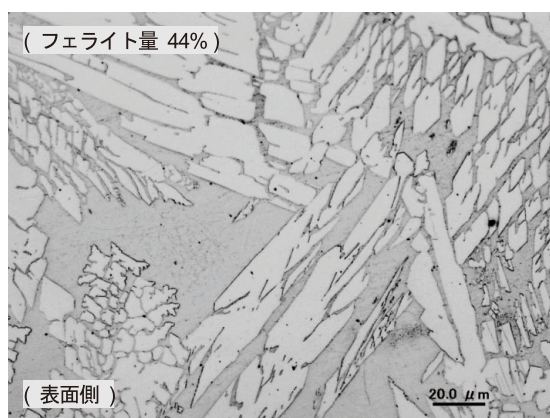
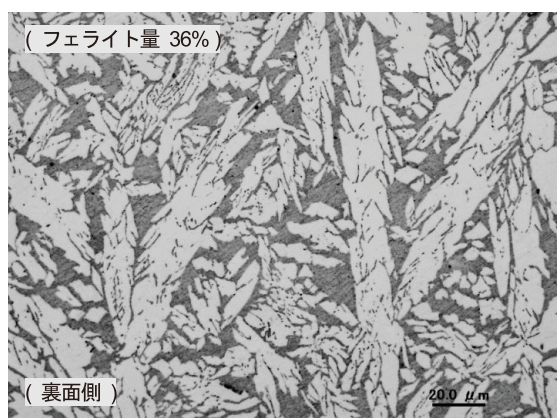
- ① 溶接金属のフェライト量は、窒素の混合率が0%の場合に最大で61%になり、3～5%の場合には30～50%になった。
- ② 溶接金属の窒素含有量は、窒素の混合率が0%の場合に最小で0.11mass%になり、3～5%の場合には母材に要求される窒素含有量0.15～0.20mass%と同等になった。



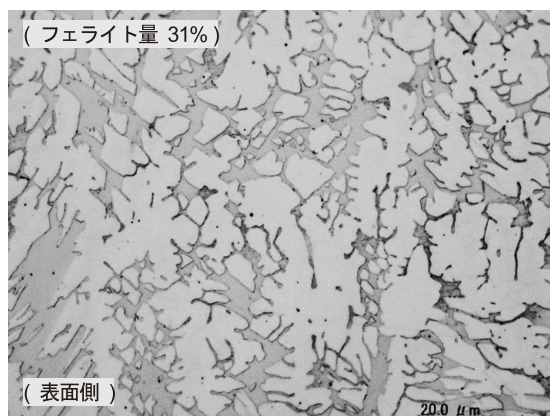
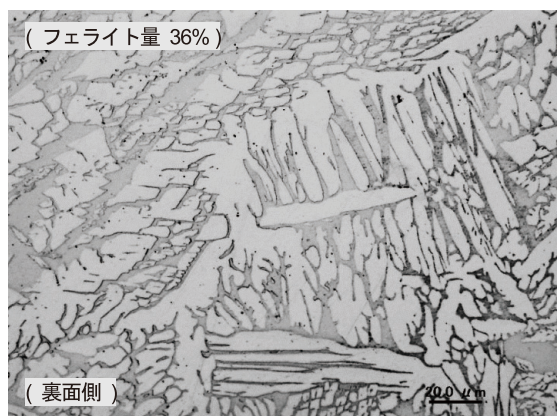
(a) トーチシールドガス Ar



(b) トーチシールドガス Ar-3%N₂

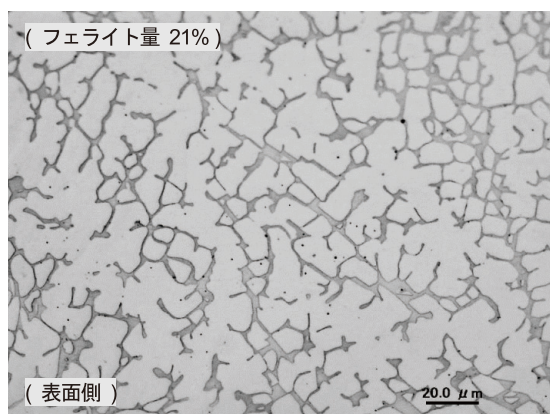
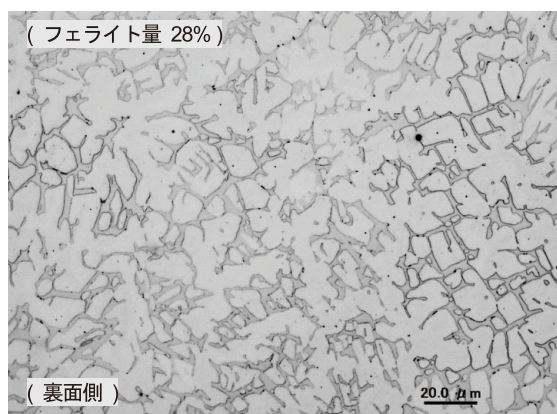


(c) トーチシールドガス Ar-5%N₂



(d) トーチシールドガス Ar-10%N₂

図6 溶接金属の裏面側および表面側の断面マイクロ組織におよぼすティグ溶接の窒素入りシールドガスの影響



(e) トーチシールドガス Ar-40%N₂

図6 溶接金属の裏面側および表面側の断面マイクロ組織におよぼすティグ溶接の窒素入りシールドガスの影響
(つづき)

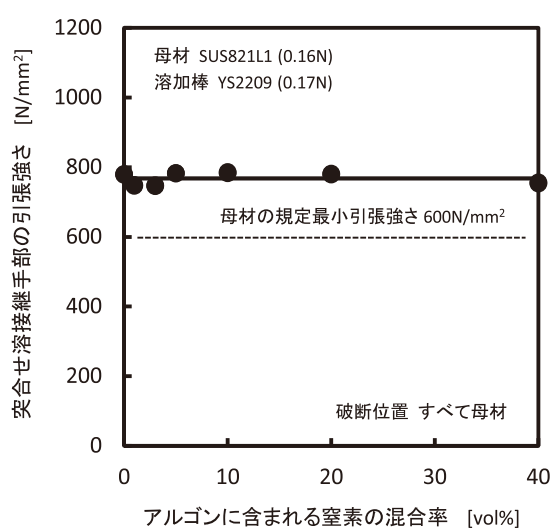


図7 溶接継手部の引張強さにおよぼすティグ溶接の窒素入りシールドガスの混合率の影響

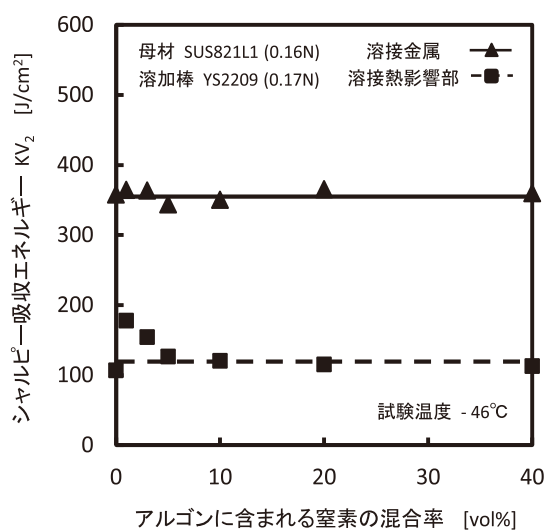


図8 溶接部の衝撃値におよぼすティグ溶接の窒素入りシールドガスの影響

- ③ 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する傾向がみられ、溶接金属の裏面側は表面側よりもフェライト量がやや小さくなる傾向がみられた。
- ④ 磁気誘導法と画像処理の面積比測定法によるフェライト量の比較では、表面側では概ね両者の値は一致したが、裏面側では磁気誘導法の値が低くなる傾向がみられた。
- ⑤ 断面マイクロ組織では、窒素の混合率が0%の場合は比較的小さなオーステナイト粒が多数みられ、3%および5%では一部にオーステナイト粒が成長した様相がみられ、10%ではフェライト相がやや網目状になり、40%ではフェライト相が完全に網目状になった。
- ⑥ 窒素の混合率が0%の場合に比べて窒素の混合率が増加しても、継手強度ならびに溶接金属および溶接熱影響部の衝撃値に大きな変化はみられなかった。

参考文献

- 1) 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, pp531-537 (1993)
- 2) 三浦実, 高祖正志, 工藤昶夫, 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, pp94-100 (1989)
- 3) 新技術情報提供システムNETIS, 国土交通省, (2012)
- 4) 二相ステンレス鋼の溶接に関するガイドライン, 日本海事協会, (2014)
- 5) 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)
- 6) 省合金型2相ステンレス鋼 継ぎ目無し鋼管開発, 日刊工業新聞, 2019年5月30日



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