

溶接管理技術者の体験紹介

オーステナイト系ステンレス鋼配管への自動 TIG 溶接の導入

三菱電機株式会社
伊藤 裕介

1. 概要

私が担当する製品では、ステンレス鋼、アルミニウム合金同士の溶融接合を多用しており、溶接は熟練した溶接工による TIG 溶接にて行っている。しかし、昨今の少子化により溶接工の採用が難しくなっていること、育成に時間を要することで熟練工の確保が難しい中、溶接の自動化推進は重要課題の1つとなっている。この自動化推進の動きの中で、オーステナイト系ステンレス鋼配管(SUS304L)を対象とした自動 TIG 溶接設備の導入を検討していたが、その検討中に『ビードの片寄り』という現象が発生した。本稿ではこの『ビードの片寄り』現象の原因説明までのプロセスで、私が体験したことについて紹介する。

2. 溶接仕様(図1)

【材 質】	SUS304L
【外 径 / 肉 厚】	外径 10~36mm/肉厚 1~2mm
【継 手 形 状】	I形開先 完全溶込み溶接
【溶 接 方 法】	TIG 溶接
【フィラ供給有無】	無し
【電 極 種】	セリア入りタングステン
【シールドガス】	アルゴン
【バックガス】	アルゴン

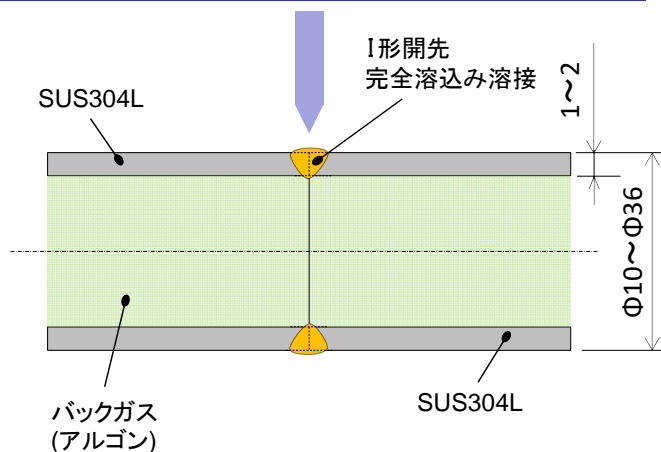


図1 配管溶接部 概要図

3. 『ビードの片寄り』発生時の状況

3.1 第一報の報告内容と状況確認

【報告内容】

SUS304L 配管の自動 TIG 溶接時、アークが片寄り、ビードがずれた。

【報告後の状況確認結果】

ビードが片側の部材に寄っていた(図2)。

【応急処置】

自動 TIG 溶接の適用を中断した。その後、当該溶接部を除去の上、過去に施工実績のある溶接施工要領書(WPS)に則り、手動 TIG 溶接による補修溶接を実施した。

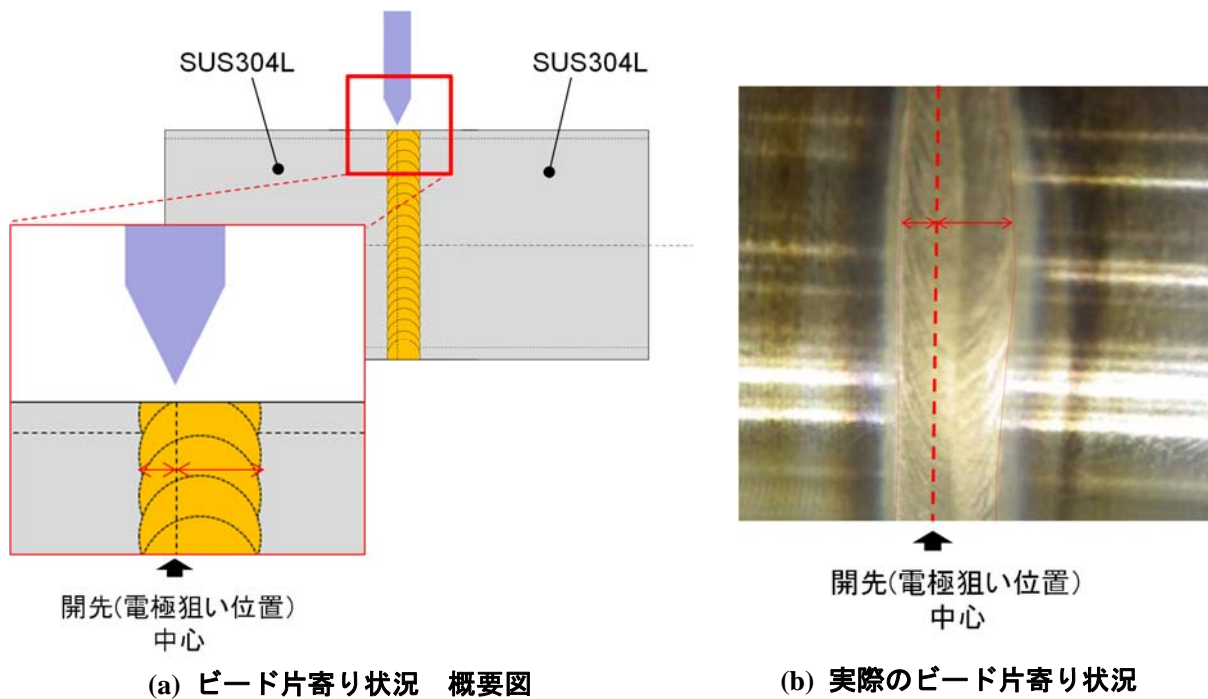


図2 『ビードの片寄り』の発生状況概要図、並びに実際の溶接部の外観写真

3.2 発生原因の調査・結果

現象確認のため、同一部材により再現溶接を実施した。

結果、報告と同様の目視でアークが若干片寄るように見える現象と、溶接後のビードが片寄る現象を確認した。再現で確認した事実より、『アークが片寄る』ことが発生した結果、『ビードの片寄り』が発生したと判断し、『アークの片寄り』に関係する『磁気吹き』を直接原因と仮定した。

その後、『磁気吹き』に対する4M分析(Man、Machine、Method、Material)を実施した結果、材料(Material)起因である『材料の磁化による磁場の発生』及び設備(Machine)起因である『トーチ、設備の自己回路の電流に伴う磁場の発生』が抽出された。以下にこの2要因に対する調査手順と結果を示す。

(1) 材料の磁化による磁場の発生

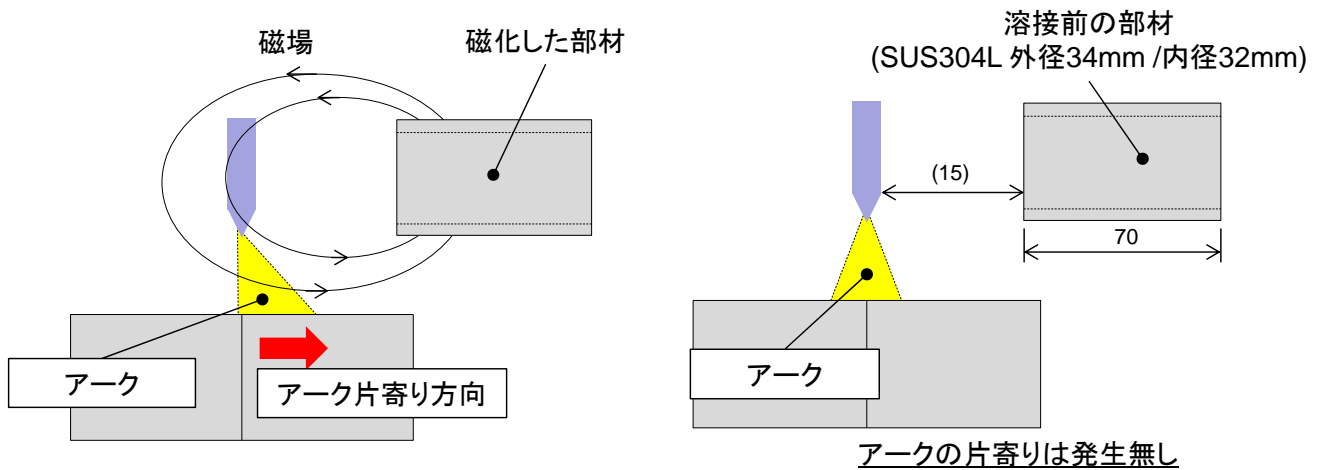
【確認方法】

溶接前の部材が磁化している場合、アークは片寄るが、部材がアークを片寄らせるレベルに磁化していることを磁力計などで得た値で判断することは、閾値の参考が無く難しい。そこで溶接前の部材がアークを片寄らせるレベルに磁化されていれば、部材をアークに近づけることで、図3(a)に示す現象が生じると考えられる。

今回、調査で使用する2つの部材をそれぞれプレート上に発生するアークに近づけ、アークの片寄りの有無により、部材が顕著に磁化されているか否かを確認した。

【結果】

2つの部材では、いずれも図3(b)に示す通り、アークは片寄らず、アークを片寄らせるレベルに磁化していないことを確認した。加えて、アークが片寄らないことを確認した両部材を再び組み合わせて溶接すると、やはり『ビードの片寄り』が発生した。



(a) 磁化した部材を近づけた際に想定される挙動 (b) 溶接前の部材を近づけた際の実際の挙動

図3 磁化した部材による想定アーク挙動、及び溶接前の部材による実際のアーク挙動の概要図

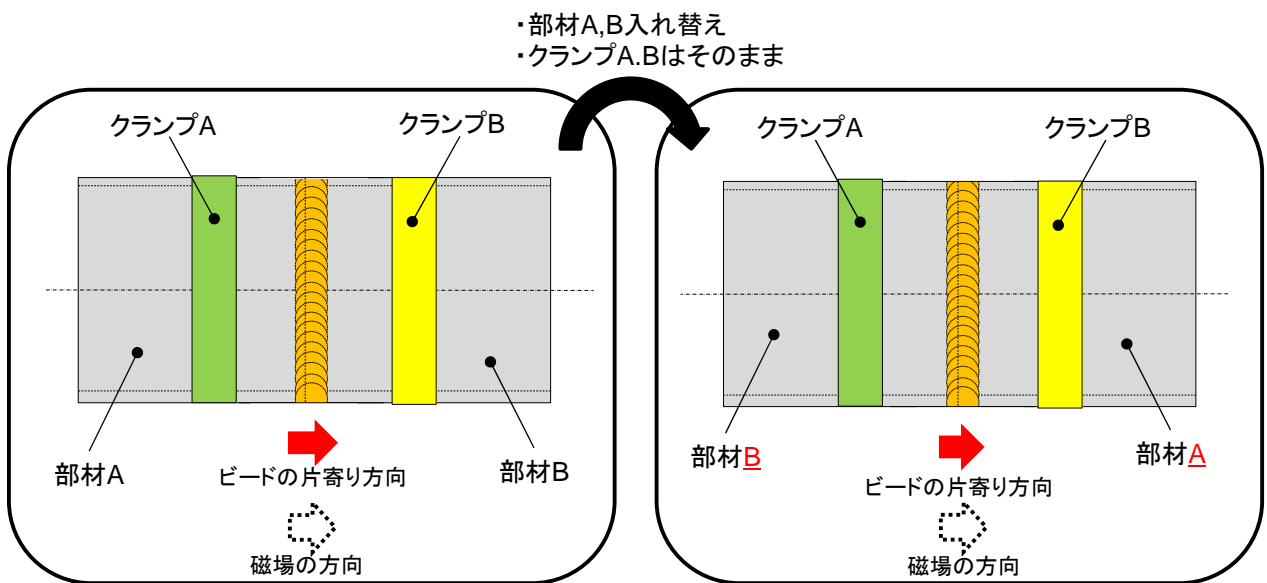
(2) トーチ、設備の自己回路の電流に伴う磁場の発生

【確認方法】

トーチ、設備の自己回路によって局所的に渦電流が発生していれば、磁場によるアークの片寄りが発生する可能性がある。一方、2つの溶接部材の形状は同一であるため、渦電流の発生場所は溶接する部材に関わらず一定、すなわち磁場の発生方向は一定となる。そのため、仮に渦電流が発生していた場合でもビードの片寄り方向とトーチの位置関係は、左右の溶接部材を入れ替えても同一になると考えられる(図4(a))。そこで、3.2(1)の方法で磁化していないことを確認した2つの部材について、通常の場合と左右を入れ替えた場合の2パターンの溶接サンプルを作成し、ビードの片寄り方向を確認した。

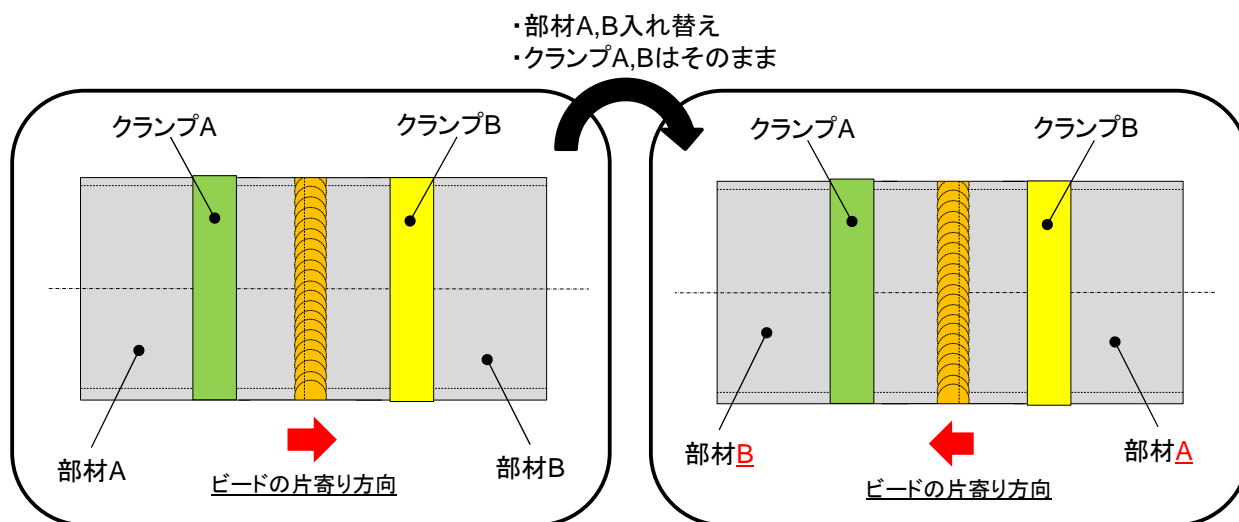
【結果】

図4(b)の通り、部材の入れ替えに伴い、ビードの片寄り方向も入れ替わったため、設備、トーチの自己回路による渦電流により、アークを片寄らせるレベルの磁場は発生していないと結論づけた。



部材AとBを入れ替えてもビードの片寄り方向は同一になる

(a) トーチ、設備の自己回路の渦電流により磁場が発生した際に想定されるビード状態



部材AとBを入れ替えると、ビードの片寄り方向も逆になった

(b) 通常の場合と左右の部材を入れ替え、溶接した際の実際のビード状態

図 4 渦電流による磁場発生時に想定されるビード状態と実際のビード状態の概要図

以上の結果より、『ビードの片寄り』が『磁気吹き』を直接原因として発生したという仮定について、実証することはできなかった。

4. 原因見直し

4.1 現象発生順の入れ替え

今回の初動調査においては、『アークの片寄り』が発生したことで『ビードの片寄り』が発生したと判断した。

この判断について、『ビードが片寄る』ことが要因で『アークが片寄る』現象が発生したという、現象の発生順序を入れ替えることで、他の要因が洗い出せないかという案に行きついた。一方、本現象に結びつく原因に関して、私自身が知見を持ち合わせていなかったため、社内研究部門への協力を要請し、本現象に関する知見の照会を実施した。結果、『マランゴニ対流』と呼ばれる対流現象が『ビードの片寄り』と関係することが判明した。

4.2 『マランゴニ対流』とは^{1,2)}

液体の表面張力の局所的な差に起因した自由表面移動の現象をマランゴニ効果と呼び、その自由表面移動によって生じる（表面張力の大きな方に引張られる）力をマランゴニ力という。そして、このマランゴニ力によって駆動される液体の対流現象が『マランゴニ対流』と呼ばれ、溶接の溶込み深さと密接に関係する。

熔融池金属に含まれる酸素(O)や硫黄(S)などの不純物元素の濃度が低い場合、表面張力は温度が高くなるほど低下する(図 5(a))。その結果、図 5(a)に示すように、温度が高い（表面張力が小さい）熔融池中央から、温度が低い（表面張力が大きい）熔融池の周辺部へ向かう熔融金属の流れが形成され、溶込みは幅が広く浅いものとなる。一方、熔融池金属に含まれる不純物濃度が高い場合は、温度が高くなるほど表面張力が増加し、図 5(b)のように、熔融池周辺部から中央部に向かう熔融金属の流れが形成され、幅が狭く深い溶込みとなる。

『マランゴニ対流』による溶込み状態の違いが分かる例として、オーステナイト系ステンレス鋼(SUS304)において、硫黄(S)の濃度によって、溶込み深さが異なることが報告されている²⁾。図 6 の通

り、硫黄(S)=30ppm では溶込み深さが浅い一方で、硫黄(S)=220ppm では深溶込みになり、上述の『マランゴニ対流』に従った現象が発生していることが分かる。

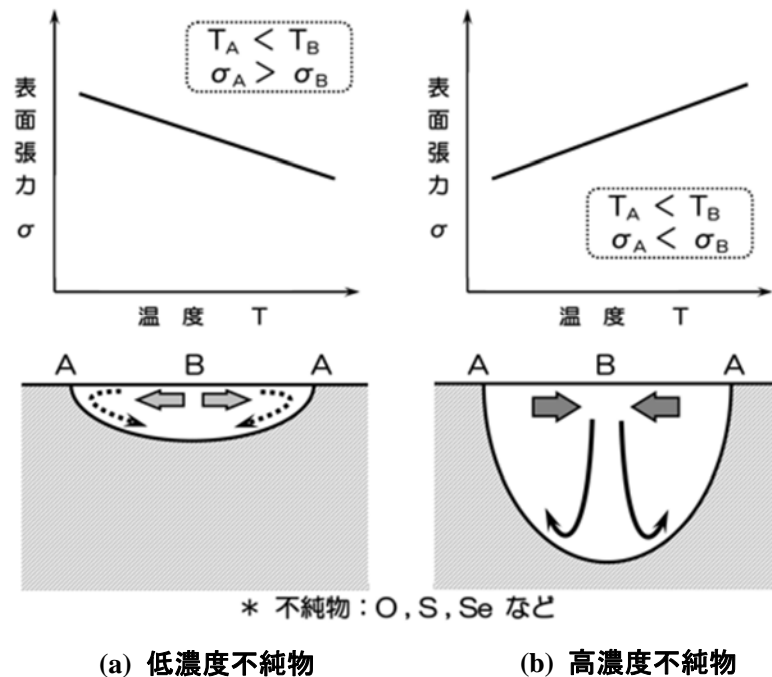


図5 表面張力を駆動力とした対流現象（マランゴニ対流）¹⁾

Arc current: 150 A, Arc gap: 5 mm, Arcing time: 20 s Shielding gas: Ar, Gas flow rate: 15 L/min Cathode: 2% La ₂ O ₃ -W (3.2 mmφ, 60 deg.)	
SUS304 (50 mmφ, 10 mmt)	
40 ppm sulfur	220 ppm sulfur

図6 20秒間のステンレス鋼のアルゴン静止TIG溶接による溶込み断面形状²⁾

5. 再調査結果

5.1 硫黄(S)濃度調査

図2(b)の『ビードの片寄り』が発生した実際の部材について、ミルシートに記載の硫黄(S)濃度を確認した。結果、SUS304Lの成分規格範囲である0.030%(300ppm)以下ではあったが、ビードが片寄った側の部材は0.006%(60ppm)、反対側は0.023%(230ppm)で、硫黄(S)濃度に差があることが確認できた(図7)。

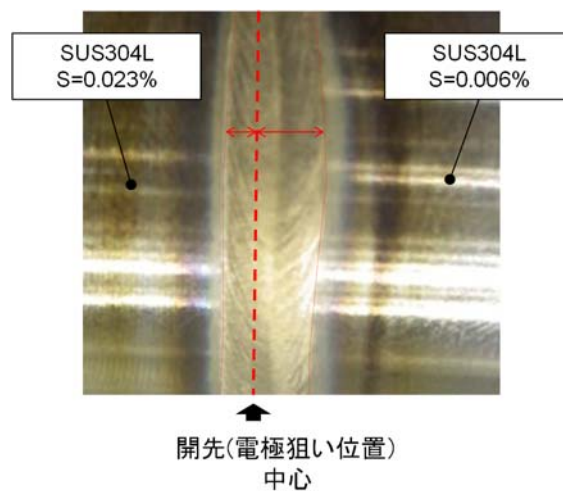
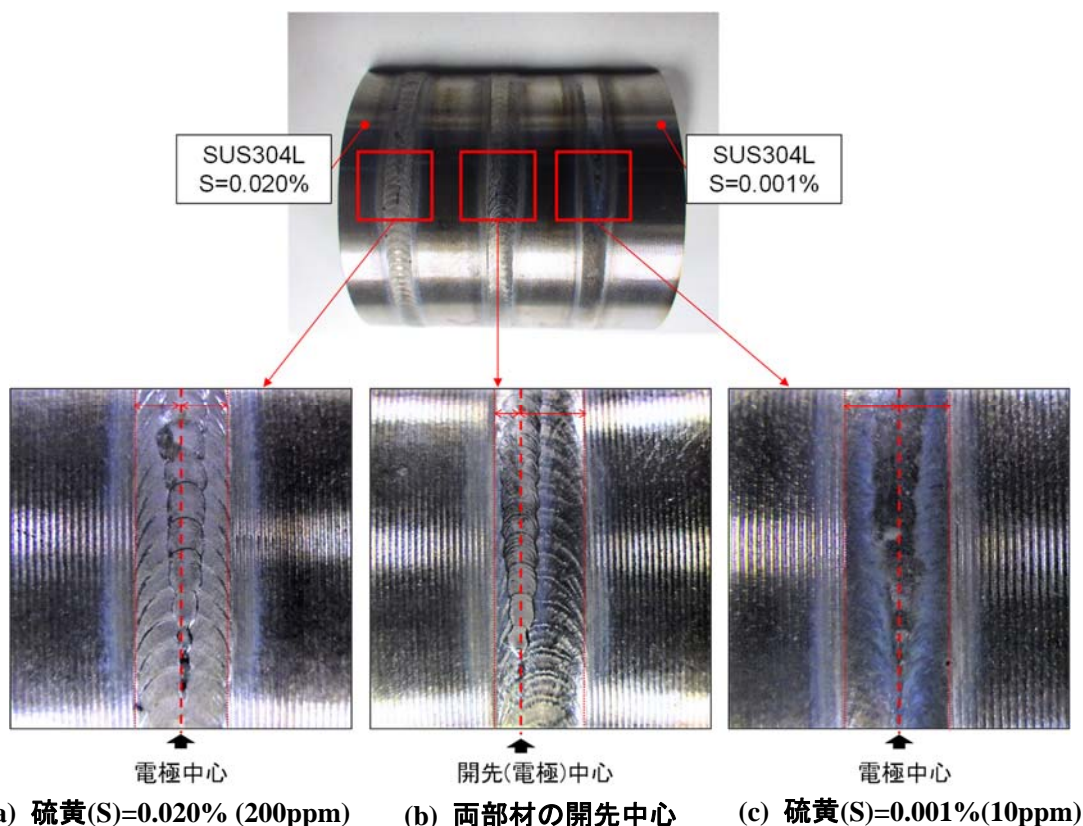


図7 不良発生部材の硫黄(S)の濃度とビードの片寄り方向の関係

5.2 再現サンプルによる確認

硫黄(S)濃度がそれぞれ 0.020%(200ppm)、及び 0.001%(10ppm)の SUS304L 材を配管状に削り出した部材にて、現象を再現した。結果、想定通りに『ビードの片寄り』を再現することができた(図8、9)。加えて、硫黄(S)濃度の異なる部材へのビードオン溶接によって、マランゴニ対流の違いに起因すると思われる溶接ビードの表面状態の違いも確認できた。

よって今回の『ビード片寄り』現象の発生原因が、硫黄(S)濃度の大小で異なる挙動を示す『マランゴニ対流』が直接の原因であり、『アークの片寄り』は、『ビードの片寄り』が発生した結果、発生した現象であることを確認できた。



【備考】図8の溶接部外観の写真では、1層目の溶接ビード上に、幅の細い溶接ビードを置いている。これは低い電流で1層目のビードに重ねるように再溶接することで、電極(開先)位置の可視化を目的に、意図的に溶接したものである。

図8 硫黄(S)濃度の異なる部材同士、及び両部材のビードオン溶接の外観比較

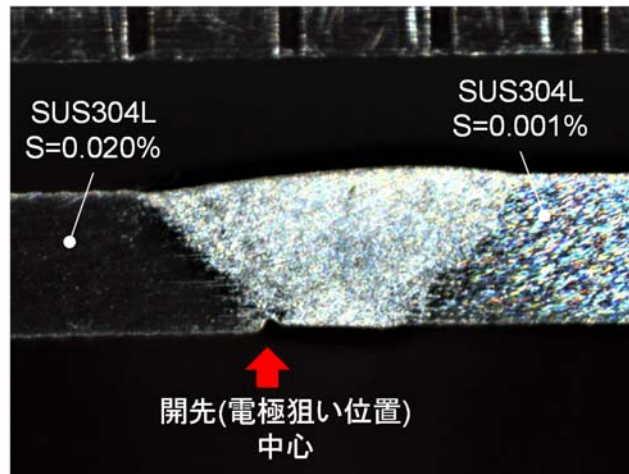


図9 『ビード片寄り』部の断面写真

6. おわりに

オーステナイト系ステンレス鋼配管に対する自動 TIG 溶接適用時に発生した、『ビードの片寄り』という現象について、原因解明に向けた各種検討を行った。当初、『磁気吹き』を主要因と考えていたところが、結果的に『マランゴニ対流』という、当時存在すら知らなかった現象が直接原因であることが判明し、溶接管理技術者としての自身の経験、学習不足を痛感する経験となった。分野に限らず、絶えず最新技術動向を収集し、広く知見を獲得することが、課題解決において重要であることを心に刻み、今後も資格に恥じないよう、研鑽を続けたい。

なお今回の『ビードの片寄り』事象の再発防止のため、自動 TIG 溶接適用箇所については、各部材の硫黄(S)濃度を規定する方針で現在改善を進めている。

参考文献

- 1) 三田：JWES 接合・溶接 Q&A 1000 No.007-01-17, (社)日本溶接協会/溶接技術センター
- 2) 田中：A-TIG 溶接におけるアーク現象, 溶接学会誌, 74-2 (2005), 113-119

伊藤 裕介 (いとう ゆうすけ)

溶接管理技術者特別級

<略歴>

2011年3月 大阪大学 工学部 応用理工学科 卒業
 2013年3月 大阪大学大学院 工学研究科 マテリアル生産科学専攻 修了
 2013年4月 三菱電機株式会社 入社
 2015年9月 WE 特別級 取得
 2019年2月 国際溶接技術者 IWE 取得
 現在に至る