

ステンレス鋼溶接の勘どころ (その1)

溶接技術の伝承およびトラブル事例の重要性



独立行政法人 産業技術総合研究所
デジタルものづくり研究センター
加工情報構造研究チーム

客員研究員 川嶋 巖

表 1 産総研の加工技術データベース⁽¹⁾

鋳造 鋳造は利用による構造力 設計に定規に無いデータ ベースの構築を目指します。	鍛造 高品質メッキ仕上げ製造を 実現するために必要な情報を 集積することを目指します。	金属プレス 切り刻みの製品種類に對 应的な基本的、応用的な情報集 積を目指します。
射出成形 射出成形に関する基礎知 識・加工条件の集積。企業ニ ーズに応じた、実物形式デ ータを集積しています。	切削 切削加工に関する基礎知 識と、加工条件設定の参考にな る加工事例などの情報を集 積しています。	研削 研削加工のノウハウと、 実際の加工現場の事例のま たを集積しています。
研削 各種材料の研削仕上げ方法 と加工条件、研削の適切な 技術知識を集積しています。	放電加工 公認研究開発機関に集積さ れている放電加工の基礎的 な加工特性データと加工ジ ャフを集積しています。	レーザー切断 高精度レーザー切断加工を するための熟練者の技量を注 目し、現場で参考になる研 究情報を集積しています。
レーザー溶接 レーザー溶接中に発生しやすい 溶接不良を防止し、溶接効率 を向上させる取組事例となる 情報を集積しています。	アーク溶接 加工事例とための、溶接条件 設定システム、溶接作業標準 集、様々な溶接士が持つ 技術知識を集積しています。	めっき めっきの基礎から、溶接特 性、トラブル対策、製品に特 化した、様々なめっきの技 術知識を集積しています。
PVD/CVD 溶接の基礎から、溶接特 性、トラブル対策、製品に特 化した溶接技術知識を集積 しています。	溶射 溶射の基礎から、溶接特 性、トラブル対策、製品に特 化した溶射技術知識を集積 しています。	熱処理 シミュレーションでの利用に 有用な熱処理データベースを 集積しています。

1. 溶接技術伝承の重要性と伝承方法

1.1 溶接技術伝承の重要性

日本の溶接技術は、戦後の高度経済成長期に大きく発展し、世界に誇れる製造技術へと成長した。その過程においては、各企業とも失敗と試行錯誤の繰り返しで、問題解決のために多くの人材と資金が投入された。

今思えば、この過程で専門家が育ち、技術の急速な発展も達成されたのである。

現在、これらの成果を纏めてみると、アーク溶接の分野では成熟技術と言えるものが多い。

しかし昨今、ものづくりの拠点が中国や韓国を代表とする海外に移り、日本での生産量が少なくなっているのが現状である。これに伴い国内の生産現場の技術者、技能者の削減が進められており、技術者および技能の伝承の空洞化が懸念される傾向にある。

このような状況になると、従来から受け継がれてきたものづくりの技術や経験の伝承が途絶え、先人が経験した失敗をまた繰り返すことになり、競争力の弱体化に繋がる傾向が見受けられる昨今である。これらの空洞化による失敗の繰り返しを防ぐ技術伝承方法として、産総研では以下を進めている。

1.2 技術の伝承方法

産総研では、この技術の伝承を円滑に進めるために、先人達が築いた技術を集積・デジタル

化しインターネットを通して、日本のものづくりを支援すべく、表1に示す15分野の「加工技術データベース」の構築作業を進めている。これらの詳細な閲覧方法等については先に本誌(No.218)で紹介した通り、パスワードを取得(申請)することにより、無料で閲覧することができる。

本稿では、上記「アーク溶接」分野内にある溶接作業標準を活用して、ステンレス鋼溶接の勘どころについて、シリーズで考えてみたい。

溶接作業標準の現状(完成)と将来構想(準備中)は表2のごとくである(2006年5月現在)。溶接作業標準は、各種の材料に対して溶接法別に作成されており、溶接材料の選定方法から溶接条件等まで詳細な内容になっている。

今回は、溶接作業標準の内のデータを活用してステンレス鋼溶接の勘どころ(成功へのポイント)になる重要なトラブル事例を解説する。

表 2 溶接作業標準の現状と将来⁽¹⁾

ステンレス鋼の溶接(完成)	
オーステナイト系ステンレス鋼 8A-8A'	被覆アーク溶接(手溶接)
	ティグ溶接
フェライト系ステンレス鋼 7-7'	被覆アーク溶接(手溶接)
	ティグ溶接
マルテンサイト系ステンレス鋼 6-6'	被覆アーク溶接(手溶接)
	ティグ溶接
オーステナイト・フェライト系ステンレス鋼 (二相系ステンレス鋼) 8B-8B'	被覆アーク溶接(手溶接)
	ティグ溶接
析出硬化系ステンレス鋼 6'-6''	被覆アーク溶接(手溶接)
	ティグ溶接
炭素鋼とステンレス鋼の溶接(完成)	
炭素鋼とステンレス鋼の異材継手	被覆アーク溶接(手溶接)
	ティグ溶接
炭素鋼へのステンレス鋼の内蔵	被覆アーク溶接(手溶接)
	フラックスコートワイヤ溶接 (マグ溶接)
ステンレスクラッド鋼の溶接	被覆アーク溶接(手溶接)
	フラックスコートワイヤ溶接 (マグ溶接)
高合金材料の溶接(完成・作中)	
インコイロ 800H (完成)	被覆アーク溶接(手溶接)
	ティグ溶接
インコネル 600	被覆アーク溶接(手溶接)
	ティグ溶接
ハステロイ C-276	被覆アーク溶接(手溶接)
	ティグ溶接
チタン (完成)	ティグ溶接
モネル (Ni-Cu)	被覆アーク溶接(手溶接)
	ティグ溶接
キュプロニッケル (Cu-Ni)	ティグ溶接
純銅	ティグ溶接

2. ステンレス鋼溶接特有のトラブル事例

トラブルが発生すると原因調査費、補修費、納期の遅延等、仕損じ費用だけでなく、品質に対する疑念、信用失墜にも繋がる。

企業としてトラブルを発生させずに、予定通り製作を完了し納入する事は利益の確保と信用向上に大きく貢献する。

トラブルを発生させない方法としては、まずトラブル事例を良く知ることである。しかし、トラブル事例は、企業から公開されない性質があり、国家的に共有化が進んでいない一面がある。

日本溶接協会、特殊材料溶接研究委員会（委員長：阪大、西本教授）では、トラブル事例の

重要性を考えて、作業部会(主査：川嶋)を結成し、5年にわたる作業の結果を資料「ステンレス鋼溶接トラブル事例集」にして出版⁽²⁾した。

産総研の溶接作業標準の内には、これらの本にあるトラブル事例等が数多く挿入されている。重要なトラブルについては、我々の手で再現試験を行い、データを載せている物もある。トラブル事例は成功への道しるべになる重要な役割を担っているとの認識のもと、溶接作業標準には出来るだけ沢山のトラブル事例を散りばめるように努力している。

今回は、各種ステンレス鋼に共通して発生する重要なトラブル事例を3件紹介する。その他のトラブル事例を知りたい方は、資料⁽²⁾を活用下さい。

2.1 亜鉛によるステンレス鋼の溶接割れ発生事例

産総研の溶接作業標準には、この種のトラブルの再発防止を促す為に、写真1の亜鉛含有塗料等による割れ発生データの貼付している。

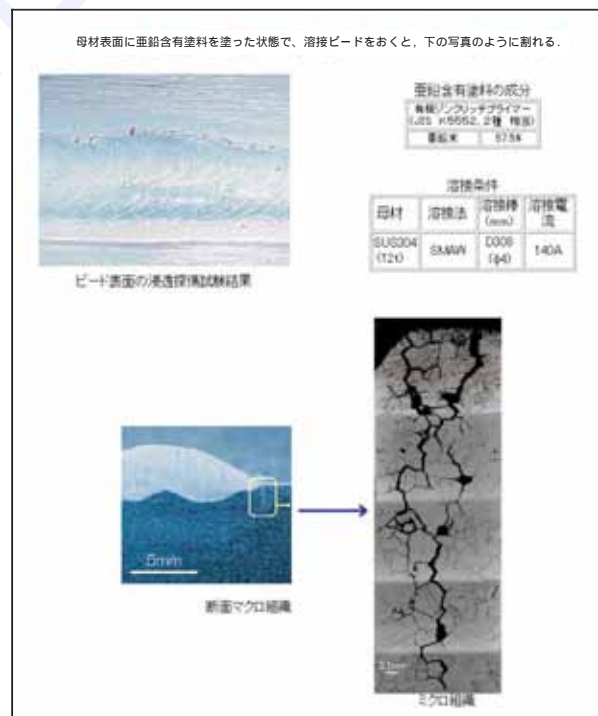


写真 1 亜鉛含有塗料によるステンレス鋼の溶接割れ発生状況
(産総研の溶接作業標準より)

実際に公表されている大きな亜鉛によるトラブル事例には以下のものがある。

< 発生事例 >

(1) SUS 304 鋼製タンクへの亜鉛メッキボルト溶接による割れ発生事例⁽³⁾⁽²⁾

写真 2 に SUS 304 製タンクへの亜鉛メッキボルト溶接の割れ発生事例を示す。

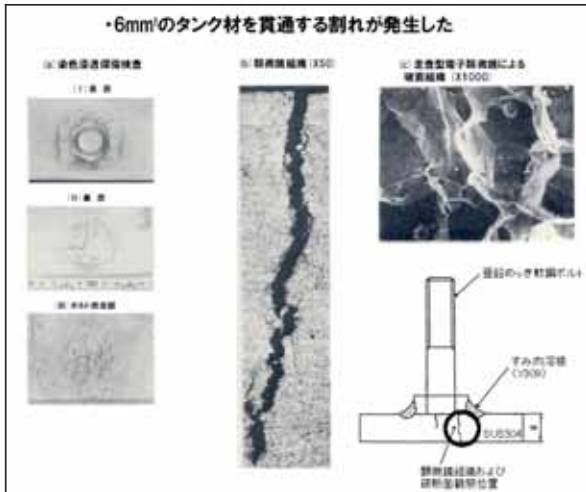


写真 2 SUS 304 製タンクへの亜鉛メッキボルト溶接による割れ発生事例⁽³⁾

断熱材固定用の M12 の炭素鋼ボルト（亜鉛メッキ）を数百本、タンク外面に溶接した結果、全ての溶接部にタンクの板厚（6mm）を貫通する割れが発生した。この割れは、タンクの内面からしか確認できないので、発見が遅れ大きな不良コストの発生と納期遅れ等による信用の失墜を招いた。

(2) SUS 304 鋼製タンクへの昇降用階段（亜鉛メッキ鋼板）の溶接による割れ発生事例⁽²⁾

階段の溶接完了後に実施される最終検査の水張りテストで、全足場板溶接部から水が漏れて問題になった大きなトラブル事例である。

(3) SUS 304 鋼製配管とサポート材（亜鉛メッキ鋼板）の溶接による割れ発生事例⁽²⁾

以上のトラブル事例は完成品に近い状態の製品に対する補助材（ボルト、足場、サポート）の溶接時に発生しており、大きな不良コストの発生と納期遅れ等による信用の失墜を招いた事例である。

< 原因 >

この種の割れは、液体金属脆化割れと言われ、

低融点金属として亜鉛、銅、錫等が身近にある。これらの低融点金属（亜鉛の融点は約 420 ）が溶接熱等で溶かされると、固体の SUS 304 の溶接熱影響部に割れが発生する。

割れ発生メカニズムは明確ではないが、溶融亜鉛がステンレス鋼の粒界へ侵入し割れが発生するものと判断する。写真 2 から判るように割れは全て粒界をひろげている。

この亜鉛による溶接割れ感受性は、図 1 に示すごとく材料の種類によって異なる。図から分かる通り炭素鋼（SB 42）は、割れ感受性が低く割れ発生の危険性はほとんど無い。ステンレス鋼は全ての鋼種で割れ感受性が高く注意が必要である。

又、低融点金属を溶融させる作業（熱源）としては溶接以外に、高周波誘導加熱による管の曲げ加工、ガス炎による線状加熱（歪とり・板曲げ）、溶接後熱処理等があるので、注意が必要である。

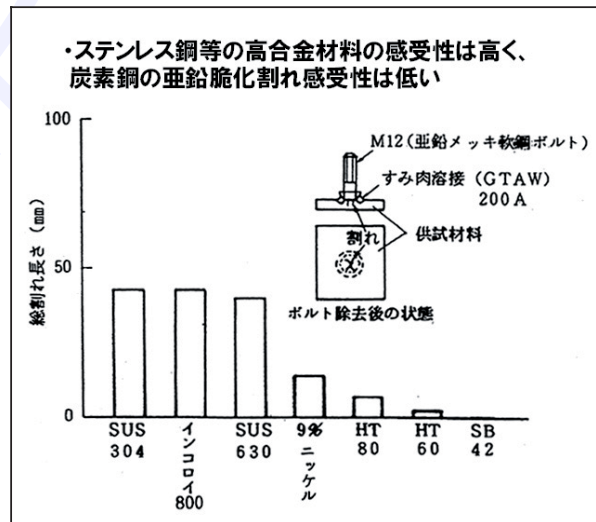


図 1 各種鋼材の亜鉛による溶接割れ感受性⁽⁴⁾

< 対策 >

(1) 亜鉛メッキ鋼板等とステンレス鋼の溶接を行う場合には、亜鉛が溶接熱により溶融されない範囲まで除去して溶接すること。但し、亜鉛メッキは防食の為に施されているので、除去した部分は溶接完了後、何らかの方法で防錆処理が必要である。

(2) 補助材（ボルト、足場）にもタンク材と同材質のステンレス鋼を使用することが最

善の対策（方法）である。

このトラブルが発生する原因には、設計者のコスト低減の善意が反映されている。補助材のボルトだから、足場だから、炭素鋼に垂鉛メッキした安価な材料で良いとの発想が生まれる為、全国的に比較的多く発生するトラブルである。このトラブルによる不良コストは非常に大きい場合が多いので、多くの人にこのトラブル事例を知って頂き、再発防止に貢献出来ればと願うものである。

2.2 ステンレス鋼の裏波溶接金属の酸化による溶接欠陥の発生事例

管や薄板のステンレス鋼の溶接において、片側から裏面に溶接ビードを形成する方法として、GTAW（ティグ溶接）による裏波溶接が採用されている。この溶接で裏面の溶融金属を不活性ガス（通常、アルゴンガス）等で保護（バックシールドと呼ばれている）しないと、写真3に示すように、SUS304は裏面のビードが凸凹になり、健全な溶接金属が得られない。

2.25Cr-1Mo程度の合金を含む材料からバックシールドが必要である		
材質	裏波ビード外観	ビード断面形状
SM400		
1.25Cr-0.5Mo		
2.25Cr-1Mo		
9Cr-1Mo		
SUS304		

写真3 バックシールドなしの裏波溶接ビードの外観と断面形状⁽⁵⁾

- ・裏波ビードが目視できる場合には、ビードが黒く酸化している状態とビード形状の不

良（凸凹）が確認できる。

- ・裏波ビードが目視できない管などにおいては、溶接部の放射線透過検査で裏波ビードのノッチ部が線状欠陥と判定され不合格になる。

更に、上記の検査を通過して納入出来ても、酸化した凸凹の溶接金属部が早期に腐食した事例報告⁽²⁾があるので、十分な注意が必要である。産総研の溶接作業標準では、写真4のようなデータを貼付して、注意を促している。

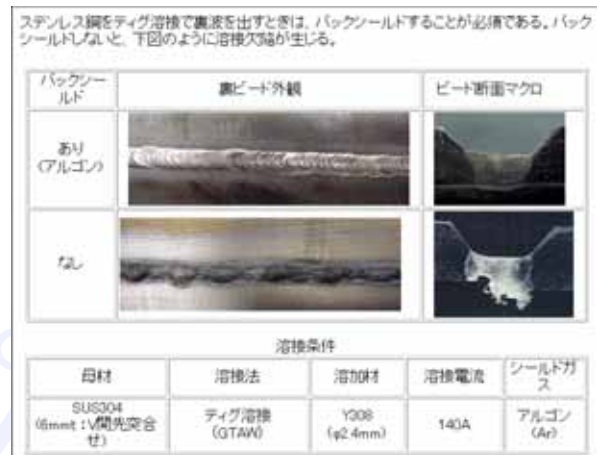


写真4 ステンレス鋼の裏波溶接におけるバックシールドの効果
(産総研の溶接作業標準より)

このバックシールドは、写真3のビード断面形状から分かるごとく、炭素鋼および低合金鋼は不要で、2.25Cr 1Mo鋼からノッチが入り始めているので、これ以上の合金鋼で必要になる。

バックシールドの方法としては、溶接形状に合わせた治具を作成し、アルゴンガスなどの不活性ガスを流して、溶融金属を酸化させないようにすれば、健全な裏波ビードが得られる。

図2に、平板用及び管用バックシールド治具の一例を示す。

治具は、一般的には自社で溶接継ぎ手形状に合わせて製作している場合が多いが、市販品⁽⁶⁾も有る。

自作する場合の注意としては、裏面の溶融金属へアルゴンガスが均一なシャワー状で噴霧される様に、ステンレス鋼製多孔板（ポラスメタル）を図のごとく使用している場合が最近多くなった。ポラスメタルは薄い、多孔質材のため、直接溶融金属が接触したり、スパッタが

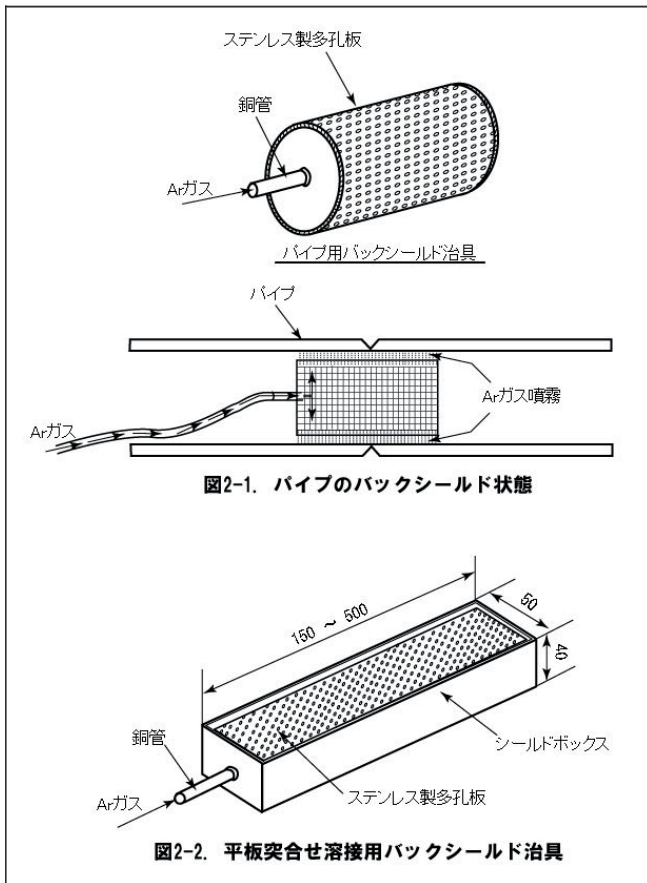


図 2 平板および管の突合せ溶接用バックシールド治具の一例

付着すると性能が劣化するので、破損させないための予防的配慮が必要になる場合もある。

ステンレス鋼の裏波溶接ビードが凸凹になる原因は、裏波溶融金属の表面が大気に触れて、表面にCr 酸化物（融点：約 2300 ）が形成し、高融点の酸化物が湯流れを阻害する為と判断する。また、酸化ビード部からの腐食は、高温の酸化皮膜がビード表面を覆う為、溶接の冷却過程でステンレス鋼の耐食性を保つ、不動態化皮膜の形成が損なわれるものと判断する。

2.3 ステンレス鋼への酸素アセチレンガス溶接法によるステライト肉盛溶接部の腐食事例

SCS16A (SUS316L 相当) 製バルブの弁座、弁棒にステライト 6 を酸素アセチレンガス溶接法により肉盛溶接したバルブが約 1 年の海水環境での使用により写真 5 に示す様に腐食した。

腐食している位置は母材と肉盛部境界のステンレス鋼母材(SCS16A)側の極狭い範囲(0.1mm

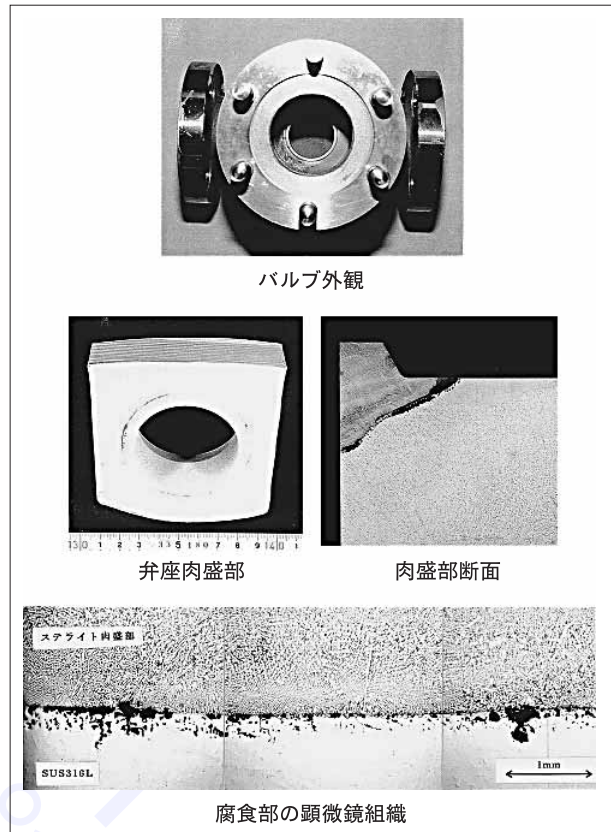


写真 5 ステンレス鋼への酸素アセチレンガス溶接法によるステライト肉盛部の腐食事例⁽⁵⁾

以内) である。その部位以外のステンレス鋼およびステライト肉盛部は全く腐食していない。

その狭い範囲が腐食される原因は、酸素アセチレンガス溶接法の採用にある。

酸素アセチレンガス溶接作業においては、還元炎（アセチレン過剰炎）を使用して、母材表面を「汗ばみ」状態にしてステライト溶加材を添加し肉盛する。この「汗ばみ」状態とは、母材表面へアセチレンガス (C_2H_2) に含有されている炭素 (C) を浸炭させて、材料の融点を下げ、汗ばみ状態を作るもので、ステンレス鋼の表面には高炭素の層が形成される事になる。

ステンレス鋼は、炭素量が多く (0.030% 以

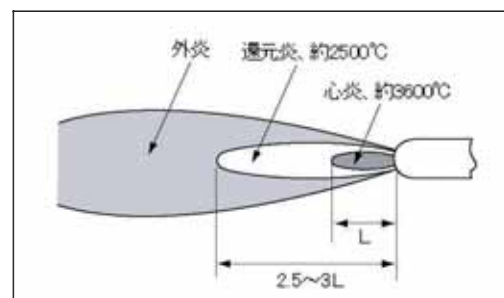


図 3 酸素アセチレンガス溶接の炎 (アセチレン過剰炎)

上) となると、炭素とクロームが結合 (鋭敏化) しやすくなり、耐食性を劣化させる現象がある。この腐食した部位にあたる領域の炭素量を計測すると図 4 に示すごとく、境界部には 0.08% (SUS 304 の炭素量) よりかなり高い部分が存在することがわかる。この炭素量の多い部分が鋭敏化現象により劣化し、腐食したものである。

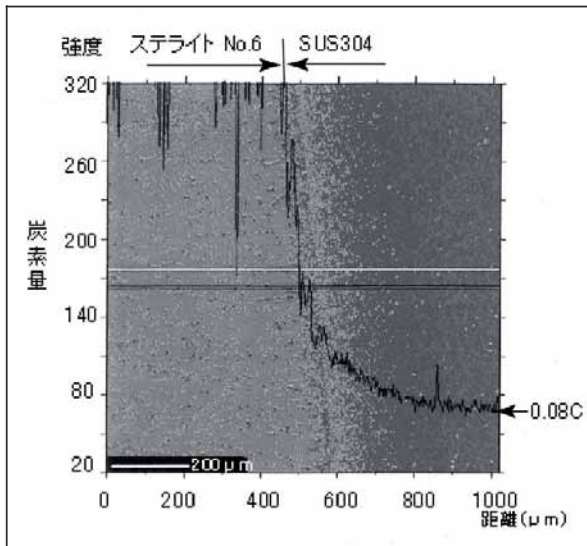


図 4 SUS 304 へのステライト肉盛溶接境界部の浸炭の状況 (X線マイクロアナライザーによる)⁽²⁾

対策としては、アセチレンガスからの浸炭が原因であるので、アセチレンガスを使用しない他の溶接法 (GTAW, SMAW, PTAW 等) で施工すれば、浸炭による問題は解決する。この問題が発生する材料は、ステンレス鋼, Cr Ni 合金等の鋭敏化現象により耐食性が劣化する材料に限られる。

鋭敏化した材料の回復処理として溶体化熱処理 (1050) があるが、この材料組み合わせの場合、この処理により、更に耐食性が劣化したとの報告もあるので注意が必要である。その原因は、溶体化熱処理中に生じる炭素移行現象 (約 600 以上) によるものである。炭素移行現象は、炭素 (C) 量の多い材料 (ステライト・約 1% C) から少ない材料 (SUS 304・約 0.08% C) の方へ炭素が移行するもので、この材料組み合わせにおいては、ステライトに近接する SUS 304 の炭素量が多くなり、鋭敏化現象によりステンレス鋼の耐食性が劣化するものである。

炭素鋼においては、使用環境もマイルドで、

浸炭による耐食性の劣化も少ないので、酸素アセチレンガス溶接法によりステライトの肉盛溶接を実施しても問題は無い。

3. おわりに

ステンレス鋼溶接の「勘どころ」を執筆するにあたり、初回なので、溶接技術の伝承およびトラブル事例の重要性を記した。「勘どころ」とは、トラブルを起こさずに計画通りに製作を完了する技術であると言っても過言ではない。

今回は、トラブルとして炭素鋼の溶接においては問題にならないが、ステンレス鋼の溶接においては、大きなトラブルになる事例を 3 件選り紹介した。トラブルの発生は、大きな損失になるので、トラブル事例の共有化と技術の伝承作業を国家レベルで推進すべきと考えるが、難題が多い。

掲載の機会を頂いたこの機会に、トラブル事例等を含めた技術伝承の一翼を担いたいと思う。次回からは、以下の順序で「ステンレス鋼溶接の勘どころ」を執筆予定している。

- (その 2) 各種ステンレス鋼の溶接施工方法
- (その 3) 炭素鋼へのステンレス鋼肉盛溶接および炭素鋼とステンレス鋼の異材継ぎ手溶接

<参考文献等>

- (1) 加工技術データベースの閲覧方法
<http://unitaistgo.jp/dmrc/> から
利用申込みし、パスワードを取得する。
- (2) 本：「ステンレス鋼溶接トラブル事例集」
平成15年 4月発行・産報出版(株)
- (3) 蓑田, 川嶋, 富澤「亜鉛メッキおよび亜鉛含有塗料による鋼材のぜい化」石川島播磨技報 第21巻第3号, 昭和56年 5月
- (4) 川嶋, 講習会 (広島) 資料「ステンレス鋼溶接施工におけるトラブル事例とその原因・対策」, 平成17年10月6日
(日本溶接協会, 特殊材料溶接研究委員会, 溶接学会中国支部共催)
- (5) 川嶋「ステンレス鋼溶接のトラブル事例とその原因・対策」溶接技術 2000 VOL. 48
- (6) 市販のシールド治具 (一例)
・(社)日本チタン協会「チタン溶接用シールド治具」
・愛知産業(株)「バックシールド用ガスダム」

以上