

## トラブル事例から学ぶ ステンレス鋼溶接の勘どころ

一般社団法人日本溶接協会 特殊材料溶接研究委員会  
副委員長 川 嶋 巖

### 1. はじめに

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、各企業とも失敗と成功の繰り返しで、その問題解決のために多くの人と金が投入された。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。

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、技能者の減少が進んでおり、技術の弱体化が懸念される現状にある。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、先人達が経験したトラブルをまた繰り返すことになる。

このトラブルを繰り返さない様に、日本溶接協会、特殊材料溶接研究委員会（委員長：西本教授、主査：川嶋）では、「ステンレス鋼溶接トラブル事例集」<sup>1)</sup>を編纂し発刊した。このトラブル事例を熟知することは、ものづくりの成功への道標になるので活用頂きたい。

今回は、溶接施工時に発生するステンレス鋼特有のトラブル事例数件を用いて、ステンレス鋼溶接の勘どころを解説する。

### 2. ステンレス鋼溶接施工時に発生するトラブル事例

ステンレス鋼の溶接において発生するトラブルを大別すると、溶接施工時に発生する問題（溶接欠陥、溶接変形、溶接施工承認試験不合格など）と使用中に発生する問題（腐食、応力腐食割れ、熱疲労、ぜい化など）がある。ここでは、ステンレス鋼溶接施工時に発生するトラブル事例数件を用いて、ステンレス鋼溶接施工の成功への道標を示す。

#### 2.1 ステンレス鋼裏波溶接金属の酸化による溶接欠陥の発生事例

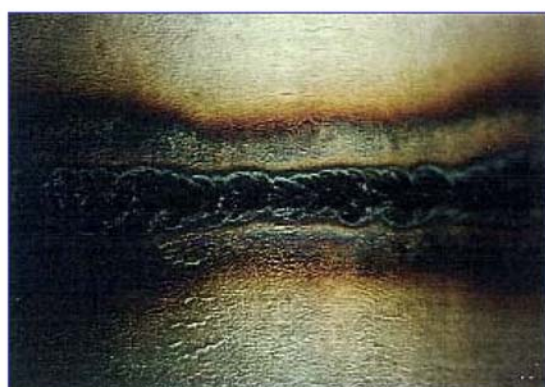
##### 2.1.1 裏波不良の防止

###### (1) ステンレス鋼溶接の裏波ビード外観と断面マクロ組織の例

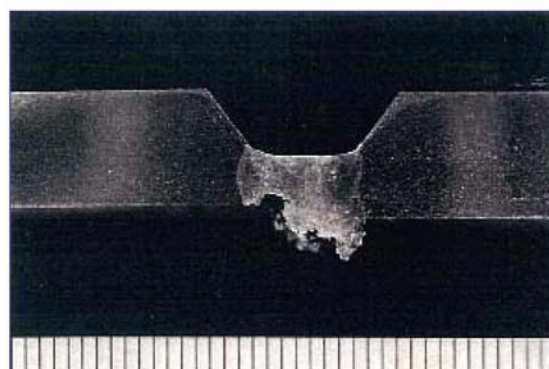
管や薄板のステンレス鋼の溶接において、片側から裏面に溶接ビードを形成する方法としてGTAW（ティグ溶接）による裏波溶接法が採用されている。

この溶接で裏面の熔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ぶ）しないと図1に示すようにステンレス鋼（SUS304）等は酸化により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<sup>2)</sup>。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小径の管などにおいては、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があるので十分な注意が必要である。図2にバックシールドを行った健全な裏波溶接ビードの外

観と断面マクロ組織を示す<sup>2)</sup>。

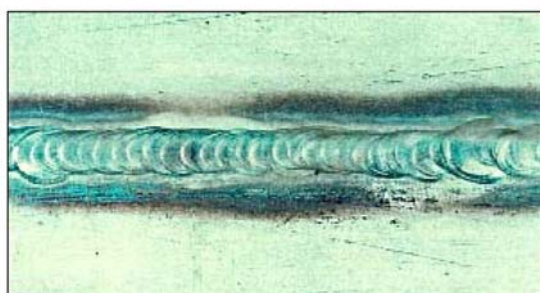


裏波ビードの外観

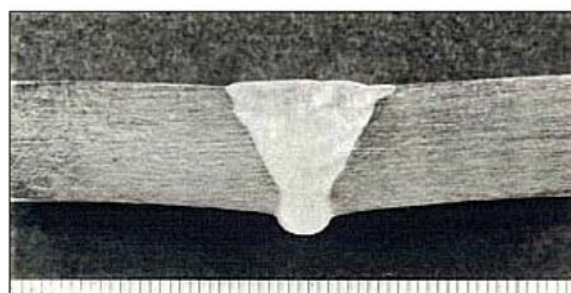


裏波ビードの断面

図1 ステンレス鋼のバックシールドなしの裏波溶接ビード外観と断面マクロ組織の例



裏波ビードの外観



裏波ビードの断面

図2 ステンレス鋼のバックシールド有りの裏波ビード外観と断面マクロ組織の例 (SUS304)

## (2) 各種鋼材のバックシールドなしの裏波溶接ビード形状

材料の種類（化学成分）によりバックシールドが必要な材料と必要としない材料があり、各材料の特性を知ることが重要な溶接施工のポイントになる。

図3にクロム（Cr）含有量の異なる各種鋼材のバックシールド無しの裏波ビード外観と断面マクロ組織を示す<sup>2)</sup>。図のビード断面形状から判るごとく、炭素鋼（SM400）および低合金鋼（1.25Cr-1Mo）はバックシールド無しでも健全なビード断面形状であり、バックシールドは不要であることが判る。しかし2.25Cr-1Mo鋼からノッチが入り始めているので、Cr含有量が約2%以上の材料からバックシールドが必要になると判断される。Cr含有量が2%以上の材料は、低合金鋼（Cr-Mo鋼）・ステンレス鋼・インコロイ・インコネル・ハステロイ合金等、数多く存在するので、その材料に適した十分な裏波溶接金属の酸化防止対策が必要である。

Cr含有金属以外にも、入念な酸化防止策の必要なチタン及びチタン合金等があるので、溶接施工にあたっては、施工する材料の特性を良く把握して対応する必要がある。


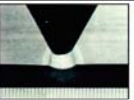
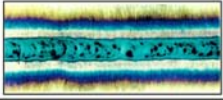
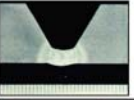
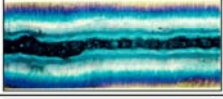
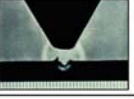
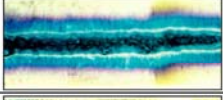

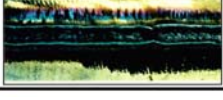
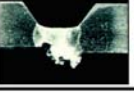
材料	裏波ビード外観	ビード断面形状
SM400		
1.25Cr -0.5Mo		
2.25Cr -1Mo		
9Cr-1Mo		
SUS304		













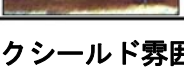
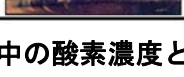
図3 各種鋼材のバックシールド無しの裏波ビード外観と断面マクロ組織

### (3) バックシールド雰囲気中の酸素濃度管理

酸化による裏波溶接ビードの不具合は、熔融金属（裏波）が凝固完了するまでの酸素濃度に関係する。図4にアルゴンバックシールド雰囲気中の酸素濃度と裏波ビードの酸化状態を示す<sup>2)</sup>。また、図中には酸素メータの一例もあわせて記す<sup>3)</sup>。

酸素濃度が1%以下の場合、裏波ビードの酸化及びビードの蛇行も少なく問題の無い状態であるが、2%辺りからビードの酸化とビード幅の不揃いが激しくなっている。

従って、工業的（目視検査・放射線透過検査）には酸素濃度2%以下（少ないほど良い）程度が管理目標値になると判断される。この管理目標値については、自社の責任で決める方法と客先から設定（要求）される場合がある。筆者の経験した客先からの最も厳しい要求値は、管内（溶接部近傍）の酸素濃度500PPM以下の例もあった。過度な酸素濃度管理値は、置換（大気→アルゴン雰囲気）時間が長くなる事と入念な対応策が必要になり、溶接工事費のコストアップに繋がるので、適正な値を決定する作業も重要な溶接施工のポイントになる。厳密には、対象材料により又要求される品質（放射線透過検査の等級など）により、不具合防止の酸素濃度の管理値は若干変動するものと判断されるので、施工法承認試験等により確認し決定することを推奨する。

酸素濃度	SUS304	SUS316NG(P)
<0.005%		
0.2%		
0.5%		
1.0%		
2.0%		
5.0%		
No Back -Shield		



酸素メータ

図4 バックシールド雰囲気中の酸素濃度と裏波ビードの酸化状態



#### (4) バックシールド用治具

バックシールド治具は、一般的に自家製（自社製作）の物が多く使用されている。その作り方と基本形を以下に示す。また、市販のパイプ用治具も数件あるので紹介する。

##### (a) 自家製のバックシールド治具

バックシールド治具の基本形になるのが、図 5 に示す配管用と平板用である<sup>2)</sup>。これらの治具は、被溶接物の形状やサイズに合わせて手製で作るのが一般的である。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に当たる様にステンレス鋼製多孔板（ポーラスメタル）を使用している場合が多い。ポー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処置（ステンレス製のウールで覆う）が必要になる場合もある。

バックシールドの方法としては、これらの治具を用いて、アルゴンガスなどの不活性ガスを流して溶融金属が大气に触れない様にすれば、酸化の無い健全な裏波ビードが得られる。バックシールドの範囲は、溶接がスタートし溶融金属が凝固するまでの極狭い範囲の酸素濃度が重要になるので、バックシールド範囲を狭くしてアルゴンガスの使用量を少なくする等の工夫がポイントになる。

又、被溶接物（製品・部品）が小さい場合、真空チャンバーや不活性ガスで充填したチャンバー内へ被溶接物を入れて、酸素の無い環境下で溶接する方法も実用されている。

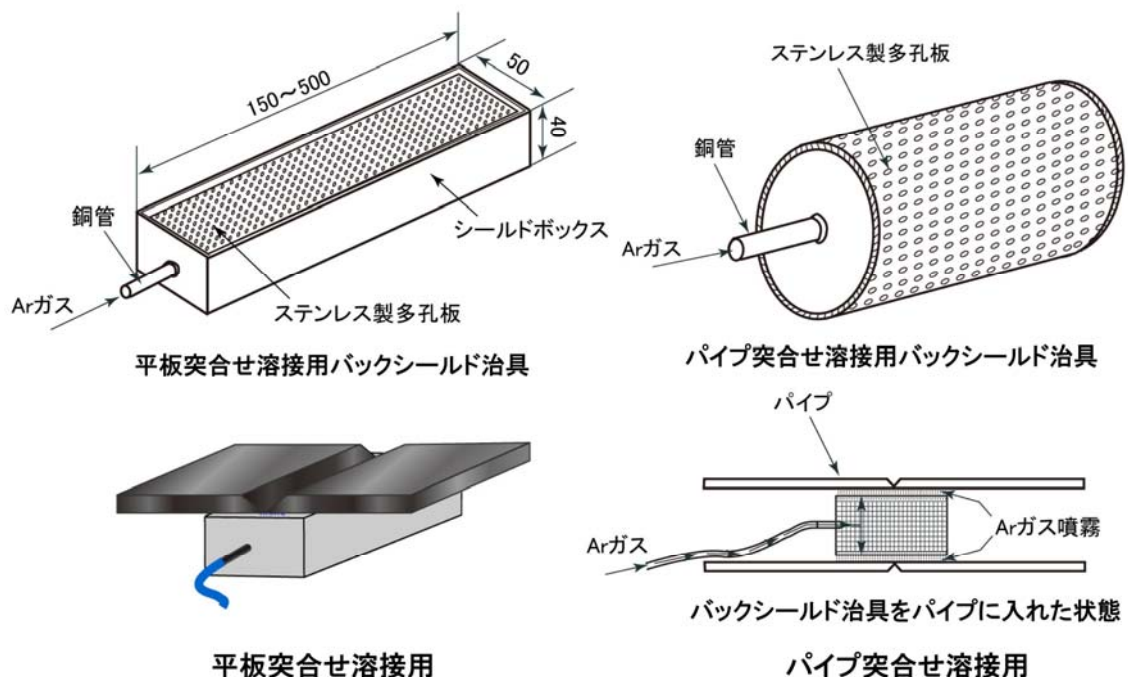


図 5 板および管の突合せ溶接用バックシールド治具の例

##### (b) 市販のバックシールド用治具

配管用のバックシールド治具が数社から市販されているので紹介する。

図 6 は商品名・ガスダムと言い、管の内径に合ったガスダムを管内に挿入して溶接線近傍をアルゴンガスシールドする方法である<sup>3)</sup>。バックシールド部（管内）の酸素濃度も計測可能な商品である。

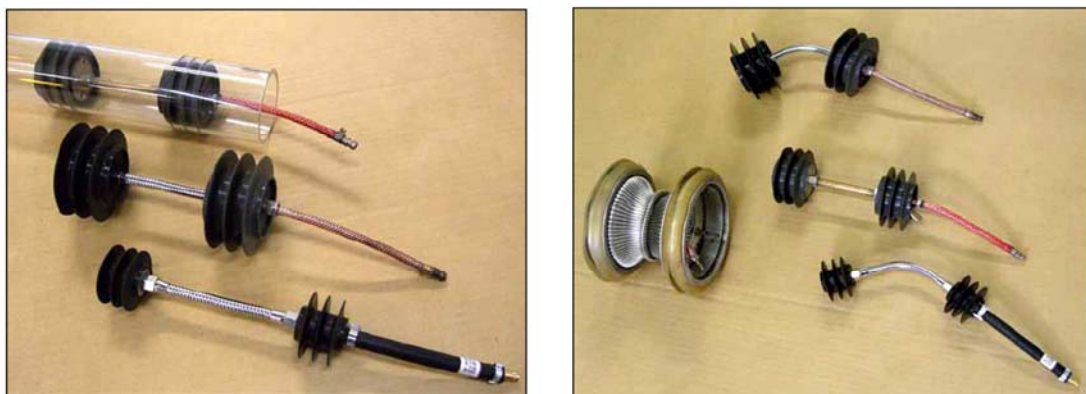


図6 市販のバックシールド用治具の例（1）  
（商品名：ガスタム）

図7は商品名：パージダム及びパージリングと呼ばれている<sup>4)</sup>。

パージダムはバルーンを管内へ挿入して膨らませて溶接線近傍をアルゴンガスシールドする方法である。パージリングは大口径用管対応で、管の径に適したリングを挿入しアルゴンガスシールドする方法である。パージダムでは、溶接時のアルゴンガス使用量および作業時間を20～50%低減できる。パージリングでは、900mm配管を10分以内で酸素濃度1%以下に充填可能である。また、両商品とも溶接部近傍（管内）の酸素濃度が計測可能な商品であり、その方法を図8に示す<sup>4)</sup>。



図7 市販のバックシールド用治具の例（2）  
（商品名：パージダム、パージリング）

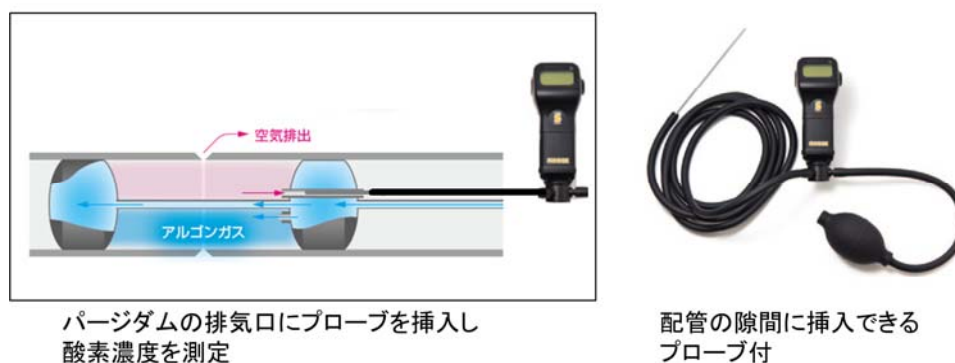


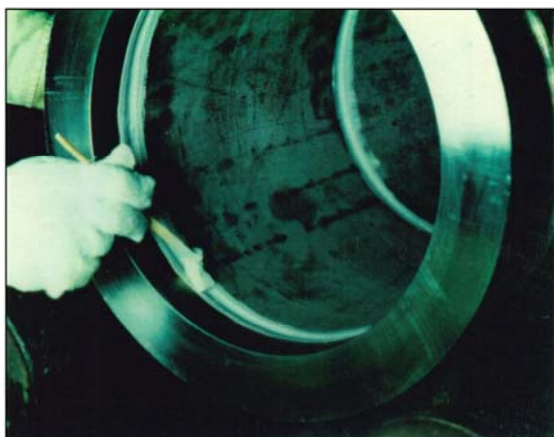
図8 市販のバックシールド用治具（パージダム）のシールド内の酸素濃度計測方法の例

## (5) その他の裏波溶接用商品

アルゴンバックシールド法の溶接コスト低減を狙った商品が市販されているので2件紹介する。

### (a) 裏波ビードの酸化防止用フラックス（商品名：ウラナミックス）

使用方法是、図9に示すごとく、裏面にウラナミックスを刷毛塗りし、乾燥したら溶接を開始する<sup>5)</sup>。裏波ビード（溶融金属）により溶融されたウラナミックスがビードを覆う（スラグ）ので、酸化の無い健全な溶接金属部が得られる。



ウラナミックスの塗布状況



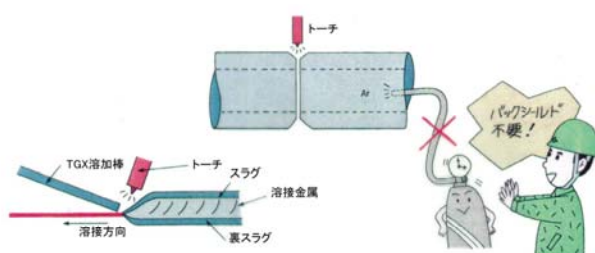
裏波溶接状況

図9 裏波ビードの酸化防止用フラックス（商品名：ウラナミックス）

### (b) 裏波溶接用ティグ溶加棒

図10に市販の裏波溶接用のティグ溶加棒を示す<sup>6)</sup>。溶加棒の断面形状から分かるように、フラックスを内蔵した溶加棒である。溶融されたフラックスが裏面に廻り、裏波ビードをスラグが覆い保護するので、酸化の無い裏波ビードが得られる。

この溶加棒による施工のポイントは、適正なルートギャップの確保（2.0～3.0mm）にある。ルートギャップが狭くなると、溶融スラグが裏面へ廻り難くなり、健全な裏波ビードの形成が不十分になる。



TGX溶加棒の断面形状

開先条件			
	板厚 (t)	ルートギャップ (G)	
	4mm	2.0mm	
	6mm	2.5mm	
	≥10mm	3.0mm	



図10 裏波溶接用 TIG 溶加棒の例（商品名：TGX）



## 2.1.2 裏波溶接金属部からの腐食事例

### (1) SUS304TP 製上水道管の腐食事例

図 11 にバックシールド不十分で酸化した裏波溶接ビード部からの上水道管における早期腐食事例を示す<sup>2)</sup>。母材は SUS304TP (250A、板厚 4mm)、溶接材料は YS308 である。

上水道管からの漏水事故であるが、母材部は健全で、酸化した裏波ビード部からの腐食による事例である。

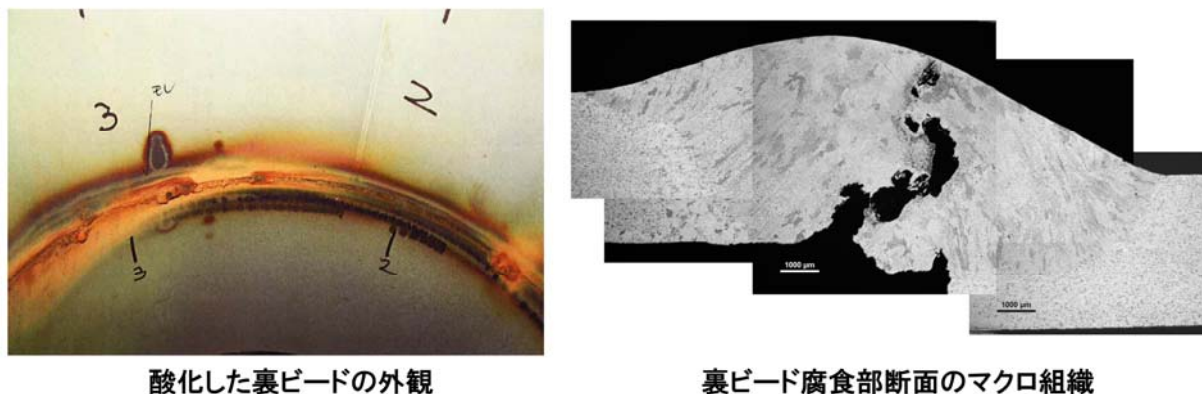


図 11 SUS304TP 製上水道管の腐食事例

### (2) SUS304 製プールの腐食事例

図 12 にバックシールド不十分で酸化した裏波溶接ビード部からの早期腐食事例を示す (SUS304 製プール)<sup>2)</sup>。(1)の事例と同様に、酸化した裏波ビード部の不動態皮膜の形成が阻害されて耐食性が劣化し、腐食により生じた漏水事故である。

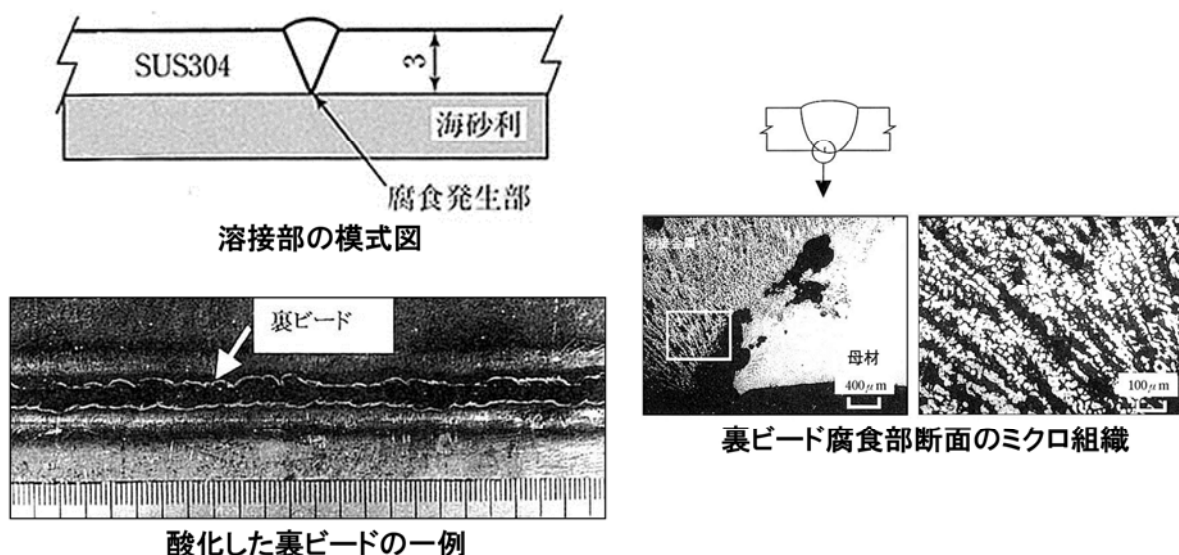


図 12 SUS304 製プールの腐食漏水事例

## 2.1.3 不具合発生メカニズム

### (1) 裏波ビード形状の不良

ステンレス鋼の裏波溶接において、アルゴンバックシールドが不十分で裏波ビードが酸化すると、ビード形状が凸凹になり、目視検査や放射線透過検査で不合格になる不具合が発生する。

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、表面に高融点の Cr

酸化物（ $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ：融点約 2400℃）が形成され、その酸化物が溶融金属（融点約 1500℃）の均一な凝固及び湯流れを阻害するためと考えられる。

## (2) 裏波ビードからの腐食事故

酸化した裏波溶接ビード部からの早期腐食のメカニズムは、以下（①～④）が考えられるが、この問題の研究例が少なく詳細な耐食性劣化のメカニズムは推定の域を出ないので、今後の研究に委ねたい。

- ① 不動態皮膜の形成が高融点の Cr 酸化物により阻害され、耐食性劣化の原因になる。
- ② Cr 酸化物の生成により裏波ビード表面近傍に Cr 欠乏層が形成し、耐食性が劣化する。
- ③ Cr 酸化物と溶接金属の電位差が大きくなり耐食性（電食）が劣化する。
- ④ 裏波ビード表面に Cr 酸化物が形成されるので、隙間腐食による耐食性劣化の懸念もある。

### 2.1.4 不具合防止対策

ステンレス鋼溶接のバックシールド不十分による不具合の発生は、2.1.3 項に示したごとく明確になっている。しかし、バックシールドが必要ないと判断し、管（3mm以下の肉厚）の外面に吊りピースなどをバックシールド無しで溶接した事により、管の内面が酸化し腐食した事例等もある。外面からは内面を確認出来ない場所も多いので、酸化させないための十分な注意が必要である。

又、初層の裏波溶接金属部が薄い場合は、次層の溶接により裏面が溶融する場合が有るので、一般的には2層終了まで、酸化防止のためのアルゴンバックシールドを行う場合が多い。

## 2.2 酸化スケールの巻き込み状溶接欠陥の発生事例

### （高合金材料のティグ溶接における溶加棒の供給方法）

#### (1) 溶接欠陥の発生状況

インコロイ 800H 配管のティグ溶接法による突合せ溶接継手部の溶接金属内に、図 13 に示す様な酸化スケールの巻き込み状溶接欠陥が発生した<sup>7)</sup>。

この問題は 2.1 の裏波溶接金属の酸化による場合と同様に、ステンレス鋼等の Cr を含有する材料の溶接において発生しやすく、炭素鋼の溶接においては発生することは少ない。

溶接法	手動ティグ溶接
溶加棒	インコネル617 (φ2.4mm)
溶接電流	150～200A
トーチシールドガス	アルゴンガス (15L/分)

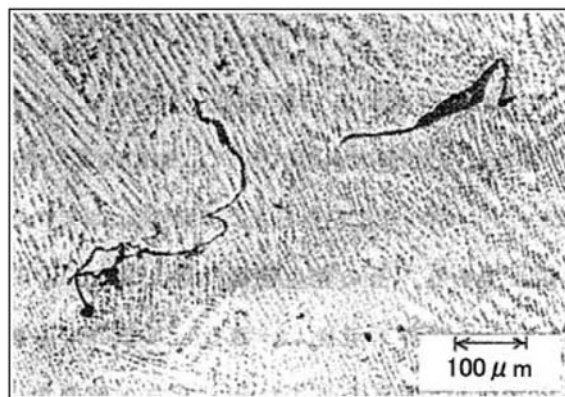


図 13 酸化スケールの巻き込み状溶接欠陥の発生事例



## (2) 酸化スケールの巻き込み状溶接欠陥の発生原因と対策

この問題の発生は、ステンレス鋼等の Cr 含有材料（高合金材料）の溶接に習熟していない溶接士が施工したために発生したと考えられる。高合金材料の溶接においては、溶加棒の供給方法を図 14 に示すように<sup>7)</sup>、溶接開始から終了まで溶加棒を C の状態にすることは厳禁である。この運棒 C の状態は、溶加棒の先端が赤熱状態にあるので、トーチシールドガスの雰囲気外に棒を出すと、大気に触れて酸化する。それを溶融プールへ供給すると高融点の Cr 酸化物が供給され、酸化スケールの巻き込み状溶接欠陥が発生する。

従って、高合金材料の溶接においては、溶接開始から終了まで、溶加棒をトーチシールドガス雰囲気内から逸脱させない様な、溶加棒のスムーズな供給テクニック（技量）を用いる必要が有る。

この様にして、酸化の無い清浄な溶加棒を供給（A と B）することにより、健全な溶接金属を得ることができる。不注意で溶加棒の先端を酸化させた場合には、溶接を中断して溶加棒の酸化部をカッター等で切断除去後、溶接を再開することが望ましい。ビード表面の酸化が激しい場合は、層間でワイヤブラシ以外にグラインダ等による表面研削が必要になる場合も有る。

高合金材料の溶接においては、酸化による問題以外に、溶融金属の湯流れが炭素鋼より悪いので、溶加棒の供給を連続的に行うと融合不良が発生し易く、断続的にポタポタと溶加棒を添加する等の注意点が有る。

この様に、材料の種類（物理的性質）により注意点が異なるため、その材料の溶接性を知ることにも重要な成功への道標になる。

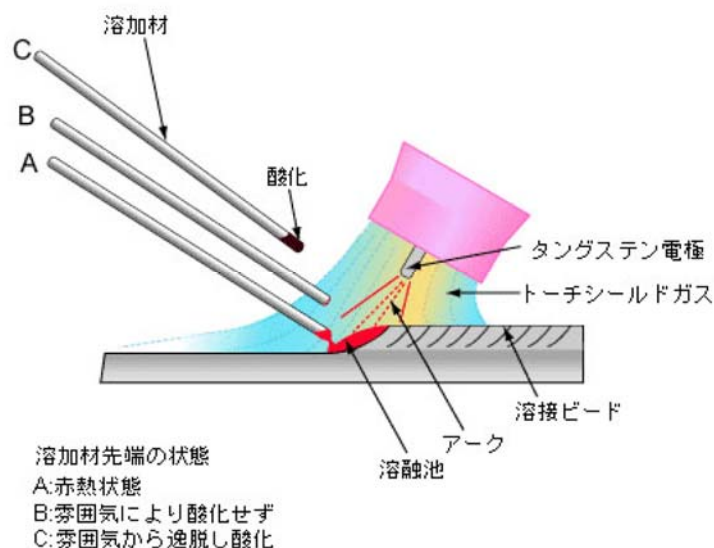


図 14 高合金材料のティグ溶加棒供給方法と酸化スケール巻き込みとの関係

## 2.3 各種材料の亜鉛による溶接割れ発生事例

### (1) ステンレス鋼の亜鉛による溶接割れ発生事例

亜鉛による溶接割れ発生のトラブルは、低融点金属による液体金属ぜい化割れと言われている現象である。低融点金属としては亜鉛以外に、銅、錫、鉛等が工業的（亜鉛・銅含有塗料等）に身近にある。

筆者らが経験した亜鉛による大きなトラブル事例を数件示し、その重要性を解説する。

#### (a) SUS304 製タンクへの亜鉛メッキボルト取付け溶接による割れ発生事例

図 15 に SUS304 製タンクへの亜鉛メッキボルト取り付け溶接の割れ発生事例を示す<sup>8)</sup>。

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（6 mm）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、大きな仕損じ費の発生と納期遅れ等による信用の失墜を招いた。

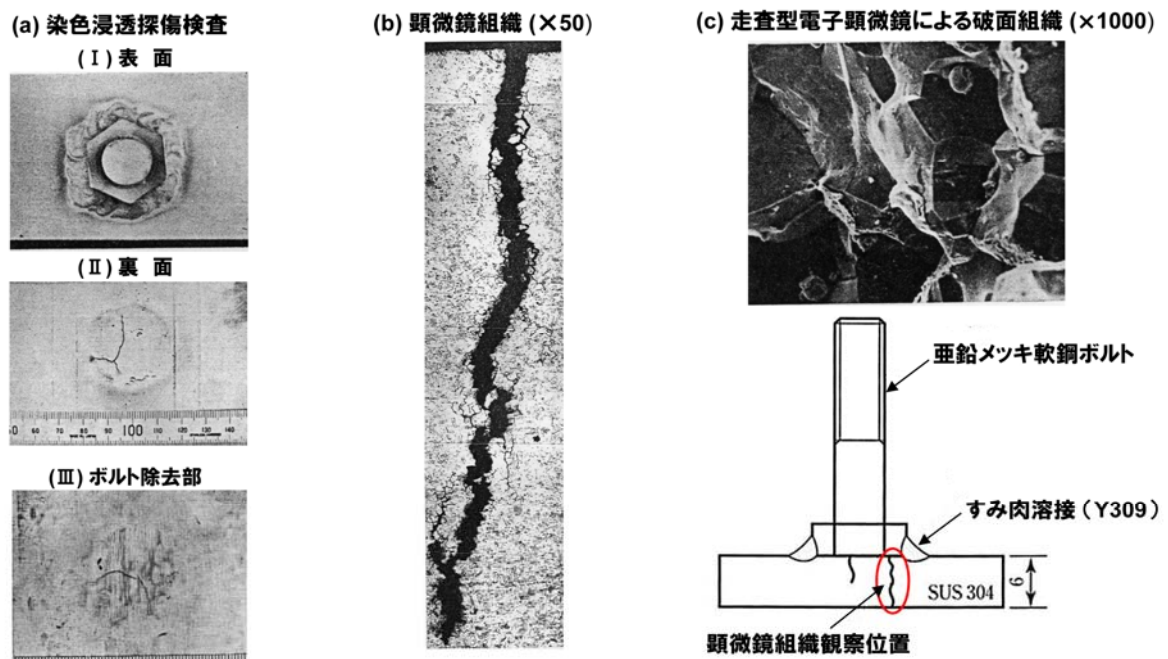
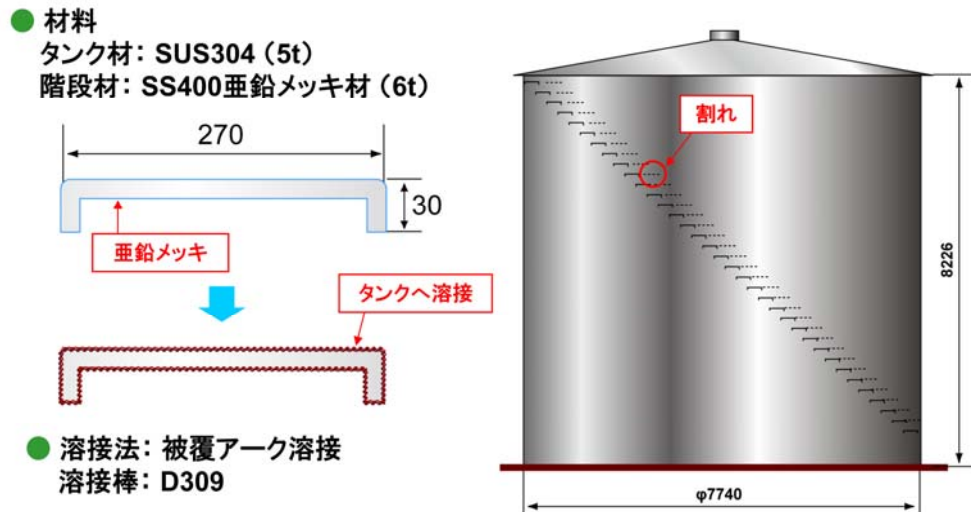


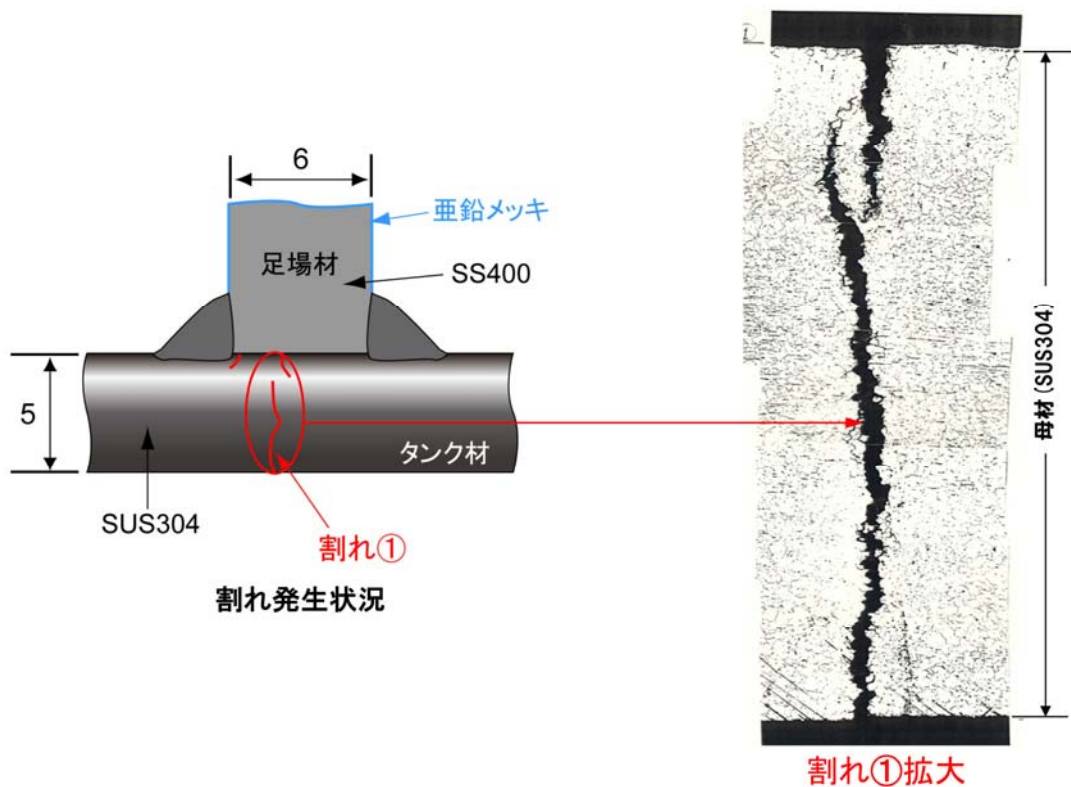
図 15 SUS304 製タンクへの亜鉛メッキボルト溶接による割れ発生事例

#### (b) SUS304 製タンクへの昇降用階段（亜鉛メッキ鋼板）の取付け溶接による割れ発生事例

図 16 に SUS304（板厚 5mm）製タンクへの昇降用階段（SS400 亜鉛メッキ鋼板、板厚 6mm）の取付け溶接による割れ発生事例を示す<sup>2)</sup>。溶接法は被覆アーク溶接、溶接棒は D309（当時、現 ES309）である。階段材に、SS400 亜鉛メッキ材を使用したのが溶接割れ発生の原因である。タンクの完成後に実施される最終検査の水張りテストで、全足場板溶接部の貫通割れ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。



(a) 割れ発生部位



(b) 割れ発生状況

図 16 SUS304 製タンクへの昇降用階段（亜鉛メッキ鋼板）の取付け溶接による割れ発生事例

### (C) SUS304 製配管へのサポート材（亜鉛メッキ鋼板）の取付け溶接による割れ発生事例

図 17 に SUS304 製配管（4mm t）へのサポート材（亜鉛メッキ鋼板）の取付け溶接による割れ発生事例を示す<sup>1)</sup>。この場合もタンクのトラブルと同様に、管の外面から内面まで貫通する割れで、割れ部の局部補修が難しいので、配管の部分取り替え工事により復旧したが、大きな金銭的



損失と信用の失墜を招いた。

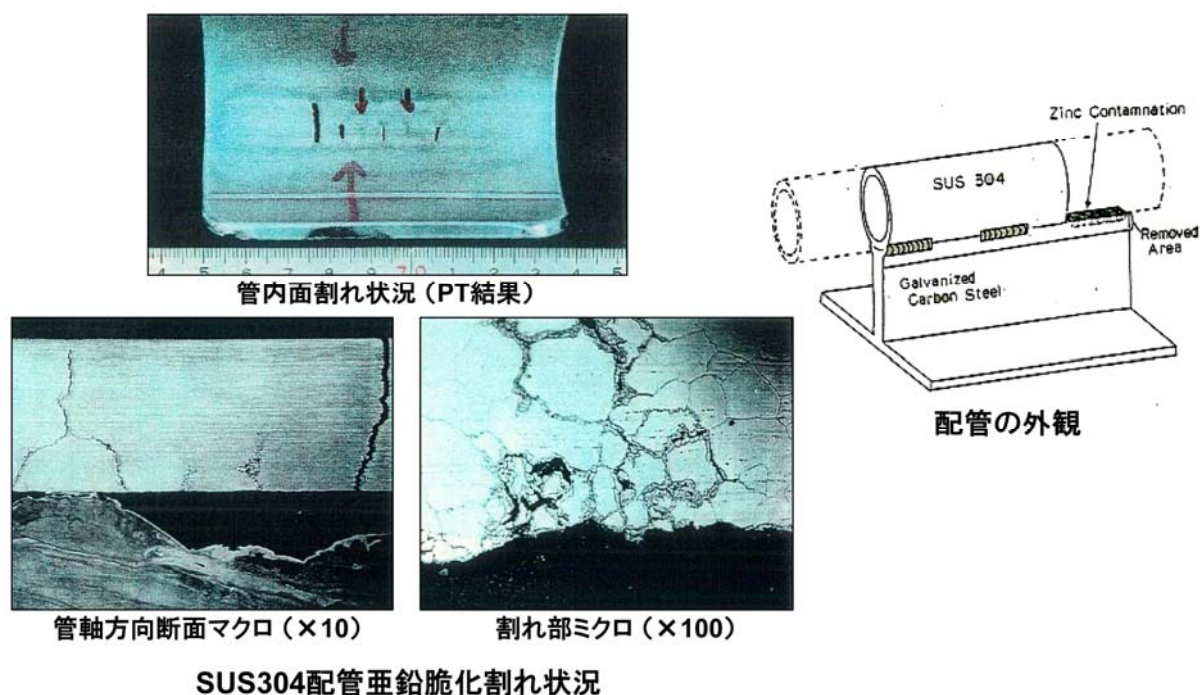


図 17 SUS304 製配管へのサポート材（亜鉛メッキ鋼板）の取付け溶接による割れ発生事例

## (2) 各種鋼材の亜鉛による溶接割れ感受性

図 18 に各種鋼材の亜鉛による溶接割れ感受性を示す<sup>8)</sup>。図から判る通り炭素鋼（SB410）は、割れ感受性が低く割れ発生の危険性はほとんど無い事が判る。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。図に無い材料名の亜鉛による溶接割れ感受性については、各自、感受性を確認する必要がある。

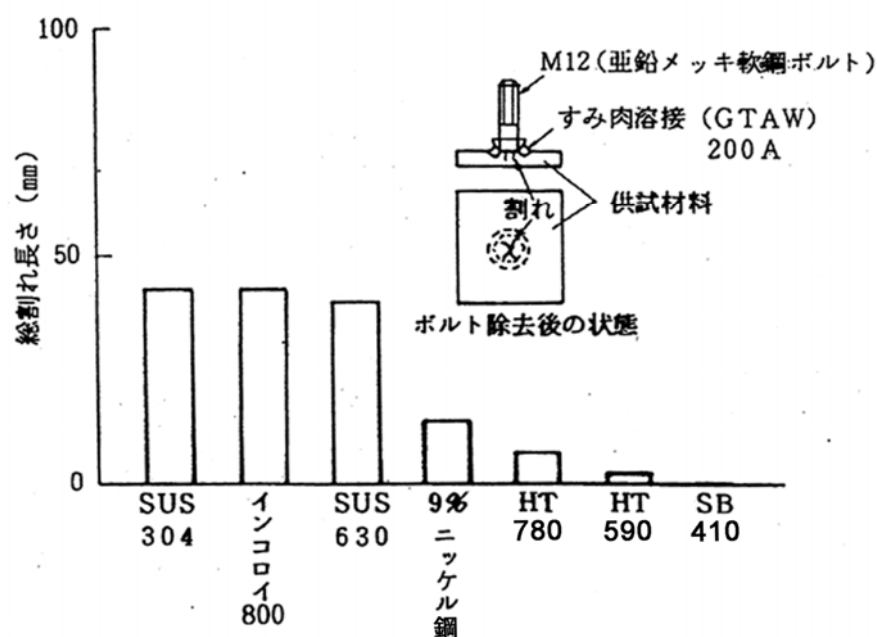


図 18 各種鋼材の亜鉛による溶接割れ感受性

### (3) 亜鉛による溶接割れ発生メカニズム

この割れは低融点金属による液体金属ぜい化割れと言われ、低融点金属としては亜鉛、銅、錫等が工業的に身近（亜鉛や銅含有塗料等）に存在する。例えば、亜鉛含有塗料が塗布されている材料をステンレス鋼へ溶接すると、亜鉛（融点が約 420℃）は溶接熱で容易に溶融する。その溶融亜鉛が固体の SUS304 の上に滞留すると、図 19 に示すメカニズムにより固体の SUS304 の粒界へ溶融亜鉛が侵入し液体金属の凝固過程で割れが発生する<sup>9)</sup>。

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。

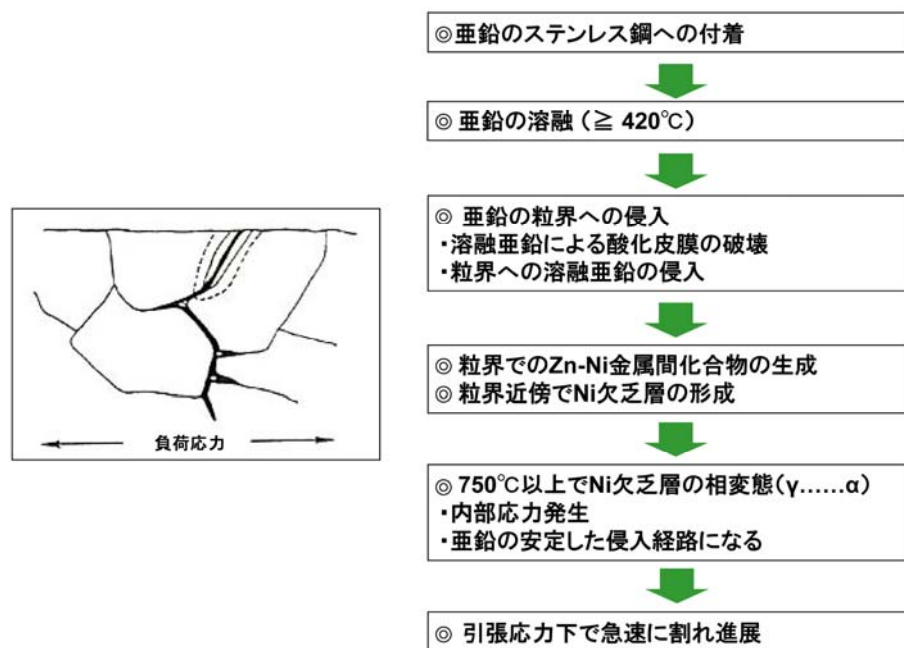


図 19 亜鉛による溶接割れ発生メカニズム

### (4) 亜鉛による溶接割れ発生防止対策

このトラブルが発生する背景には、設計者のコスト低減意識がある。すなわち、補助材のボルトだから、足場だから、炭素鋼に亜鉛メッキした安価な材料で良いとの発想の結果、全国的に比較的多く発生しがちなトラブルである。しかし、このトラブルによる仕損じ費は非常に大きい場合が多い。

対策の案として①と②を示すが、①の採用を推奨する。

- ① 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。
- ② 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。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となる。

### 3. おわりに

トラブルの発生は大きな損失と信用の失墜を招くので、多くの技術者が知るべきであり、事例の共有が必要である。我々は、その一翼を担うべく前述の「ステンレス鋼トラブル事例集」を平成 15 年に発刊した<sup>1)</sup>。

本稿では、それに示されている事例に加え、より実践的（現場的）に重要なトラブル事例 3 件を解説した。

これらのトラブル事例習得が、読者の皆様の今後の生産活動において役に立てば幸甚である。

### 参考資料等

- 1) 日本溶接協会、特殊材料溶接研究委員会編：「ステンレス鋼溶接トラブル事例集」(2003)
- 2) 川嶋 巖：「トラブル事例から学ぶステンレス鋼溶接の勘どころ」，特殊材料溶接研究委員会講習会 (2014)
- 3) 愛知産業株式会社カタログ
- 4) アサダ株式会社カタログ
- 5) 株式会社ツルヤ工場カタログ
- 6) 株式会社神戸製鋼所カタログ
- 7) 産業技術総合研究所編：「加工技術データベース」の溶接作業標準（ステンレス鋼のティグ溶接）
- 8) 蓑田、川嶋ら：「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，Vol.21,No.3 (1981)
- 9) 日本溶接協会化学機械溶接研究委員会編：「ステンレス鋼の亜鉛ぜい化について」，溶接構造物の補修溶接に関するシンポジウム，p.20 (1994)

#### <略歴>

#### 川嶋 巖（かわしま いわお）

1957 年 群馬県立館林高等学校 普通科卒業

1957 年 （株）IHI 入社、45 年間溶接研究所にて溶接の研究業務に従事

2002 年 2002 年 4 月（IHI 定年退職）～2014 年 3 月までの約 10 年間、（独）産業技術総合研究所に設立された「デジタルものづくり研究センター」の客員研究員に就任し、下記を担当した。

- ・「加工技術データベース」の各種材料の溶接作業標準を構築した。
- ・企業支援（溶接関係の技術指導・セミナー等）を全国規模で行った。

現 職 日本溶接協会 技術アドバイザー

日本溶接協会 特殊材料溶接研究委員会 副委員長

茨城県中小企業振興公社 テクノエキスパート

四国地域イノベーション創出協議会 イノベーションコーディネーター