

溶接管理技術者の体験紹介

リーン(省資源型)二相ステンレス鋼上向溶接における
ブローホール防止対策について

株式会社丸島アクアシステム
亀谷博仁

1. 概要

近年、水門業界においてもリーン(省資源型)を中心とした二相ステンレス鋼(以降、二相鋼と記述)が多用されている。これまでのオーステナイト系ステンレス鋼と比較しNiの含有量が低く窒素を多く含む(1000ppm以上)のが二相鋼の特徴である。

二相鋼採用当初は小型構造物(主に水門扉体)が多く、工場で作成がすべて完了する製品ばかりであったが、全長が20mを超える大型の水門扉体の製作も近年出現し、工場では完成できず、据付現場で溶接することも多くなってきた。据付現場での溶接で大きな問題となった事例として、上向姿勢突き合わせ溶接における多数のブローホール発生がある。これについての原因究明及び解決策について以下に記述するものとする。

2. 問題の発生

問題となった製品は桁構造の扉体で津波対策水門である。材質はSUS323Lで、桁フランジの最大板厚は25mmであった。表1に今回製作及び実験に使用したSUS323L及びSUS304の化学成分を示す。据付現場での下向及び立向姿勢溶接では特に問題無く、放射線透過試験(以降、RTと記述)も合格であった。しかし、上向溶接姿勢のところで集中ブローホールの発生によりRTは全て不合格となった。この上向溶接RT不合格により、据付現場での溶接は中断を余儀なくされた。後工程のことも考慮すると上向溶接RT不合格原因及びその解決策を調査する期間は二週間程度しかなかった。

上向姿勢溶接手順は以下の通りである。溶接法はフラックスコアードワイヤ(FCW)によるMAG(CO₂)溶接であり、開先形状は図1、積層順序は図2の通りであった。仮付け溶接は下向姿勢となる開先裏側で実施、初層溶接は表側の立向姿勢溶接で行った。その後、アークエアガウジングにて裏はつりを実施し、裏側の溶接を終了した後、表側の溶接を上向姿勢で仕上げた。集中ブローホールといっても溶接ビード内全体に発生しており、0.5~3mm径のブローホールが無数に撮影されていた。

表1 SUS323L 及び SUS304 化学成分

鋼種	板厚	質量%								
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N
SUS323L	25mm	0.015	0.55	1.58	0.028	0.000	4.0	23.5	0.33	0.16
	32mm	0.010	0.61	1.49	0.022	0.002	4.0	23.2	0.30	0.15
SUS304	25mm	0.017	0.60	0.93	0.037	0.006	8.10	18.15	—	—

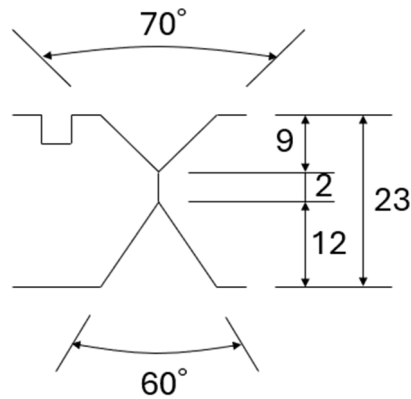


図1 開先形状

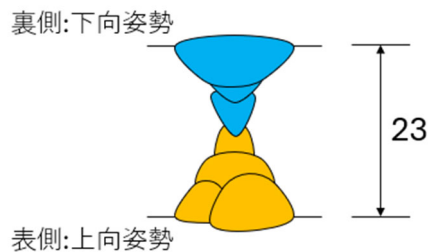


図2 積層順序

3. 原因究明

使用鋼材が SUS323L であり、ブローホールは窒素が原因の一つであることが予想される。ただし、他の姿勢（立向・下向）では多数のブローホールの発生は認められず、RT 結果は全て 2 類以上の合格であった。

文献調査の結果、一つのブローホール発生メカニズムとして、溶接用ワイヤに含まれる脱酸剤から生成される酸化物などが核として存在し、飽和溶解度を超える窒素量である場合に生じやすいとの報告を入手した¹⁾。そこで前項で製作した SUS323L に使用した FCW を用いた MAG 溶接継手の溶接金属内酸素量を測定した。同時に、板厚 25mm の SUS323L にソリッドワイヤを用いた TIG 溶接継手及び SUS304 にソリッドワイヤを用いた TIG 溶接及び FCW を用いた MAG 溶接継手を製作し、溶接金属内酸素量を測定した。表 2 に使用溶接材料の化学成分を示す。SUS323L に用いた溶接材料は (A) YS329J3L、(B) TS329J3L であり、SUS304 用には (C) YS308L、(D) TS308 を使用した。また、これらの溶接材料で溶接を実施した時の溶接金属内に含まれる酸素量を表 3 に示す。表 3 よりシールドガスが CO₂、Ar+20%CO₂ とも FCW を用いた溶接金属の酸素量が非常に多いことが判明した。そこで SUS323L 及び SUS304 における FCW を用いた MAG 溶接の溶接金属（以下、FCW 溶接金属と記述）のマイクロ組織観察を行った。図 3 にマイクロ組織を示す。比較のため SUS323L 及び SUS304 におけるソリッドワイヤを用いた TIG 溶接金属（以下、TIG 溶接金属と記述）も示す。図 3 より SUS304、SUS323L 共に、TIG 溶接金属と比較し、FCW 溶接金属の介在物の量が非常に多いことが認められた。溶接金属の酸素量及びマイクロ組織より、この介在物は酸化物が主体であることが観察された。

表 2 使用溶接材料の化学成分^{注2)}

質量%

溶接材料	ワイヤ ^{注1)}	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N
A (YS329J3L)	ソリッド	0.018	0.35	1.46	0.017	0.0005	8.63	23.11	3.34	0.061	0.140
B (TS329J3L)	FCW	0.028	0.46	0.73	0.018	0.004	8.95	23.29	3.06	0.04	0.132
C (YS308L)	ソリッド	0.016	0.38	1.55	0.024	0.001	10.00	19.81	0.10	0.11	0.020
D (TS308)	FCW	0.042	0.66	1.24	0.020	0.004	9.51	19.47	0.04	0.04	—

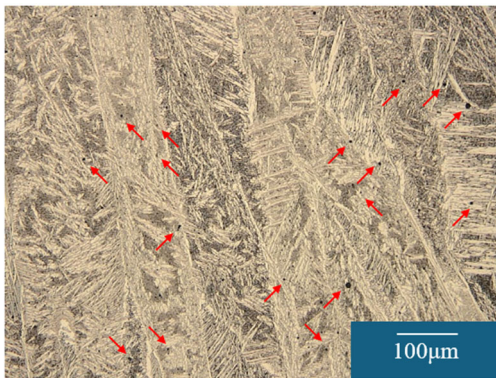
注 1) ソリッドワイヤ: JIS Z 3321 溶接用ステンレス鋼溶加棒、ソリッドワイヤ及び鋼帯 (YS)

FCW: JIS Z 3323 ステンレス鋼アーク溶接フラックス入りワイヤ及び溶加棒 (TS)

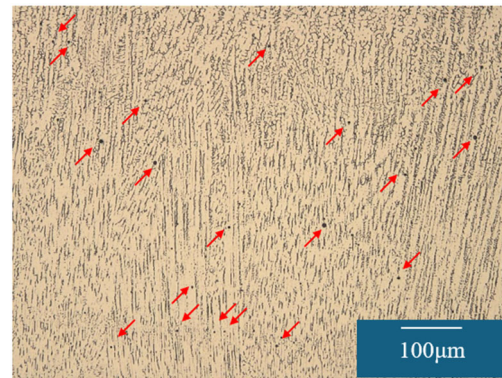
注 2) ソリッドワイヤはワイヤの化学成分、FCW は溶着金属の化学成分を示す。

表 3 各種溶接法の溶接金属に含まれる酸素量

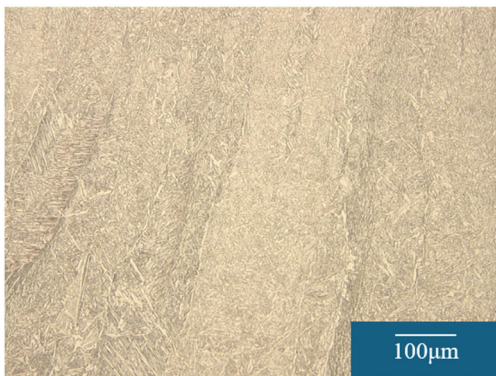
溶接法	シールドガス	溶接材料	ワイヤの種類	溶接金属酸素量
TIG	Ar	A	ソリッド	20ppm
MAG	Ar+20%CO ₂	B	FCW	960ppm
MAG	CO ₂	B	FCW	1020ppm
TIG	Ar	C	ソリッド	20ppm
MAG	CO ₂	D	FCW	1150ppm



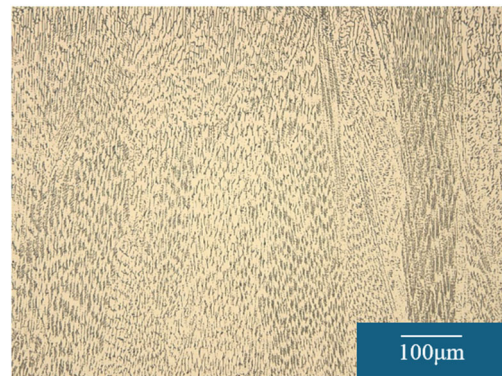
(a) SUS323L FCW 溶接金属マイクロ組織



(b) SUS304 FCW 溶接金属マイクロ組織



(c) SUS323L TIG 溶接金属マイクロ組織



(d) SUS304 TIG 溶接金属マイクロ組織

図 3 溶接金属マイクロ組織

そこで図 4 に示す試験体に FCW を用いた上向溶接及びソリッドワイヤを用いた TIG 上向溶接を実施し、ブローホール数を比較した（なお、ソリッドワイヤを用いた MAG (Ar+2%O₂) 溶接法では上向溶接はできなかった）。図 5 に溶接部のデジタル RT（以下、DRT と記述）画像を示す。FCW 溶接金属には現地溶接時とほぼ同程度のブローホールが発生していた。一方、TIG 溶接金属ではブローホールが発生したものの、その発生量は非常に少なく 1 類合格であった。

試験体形状(SUS323L)

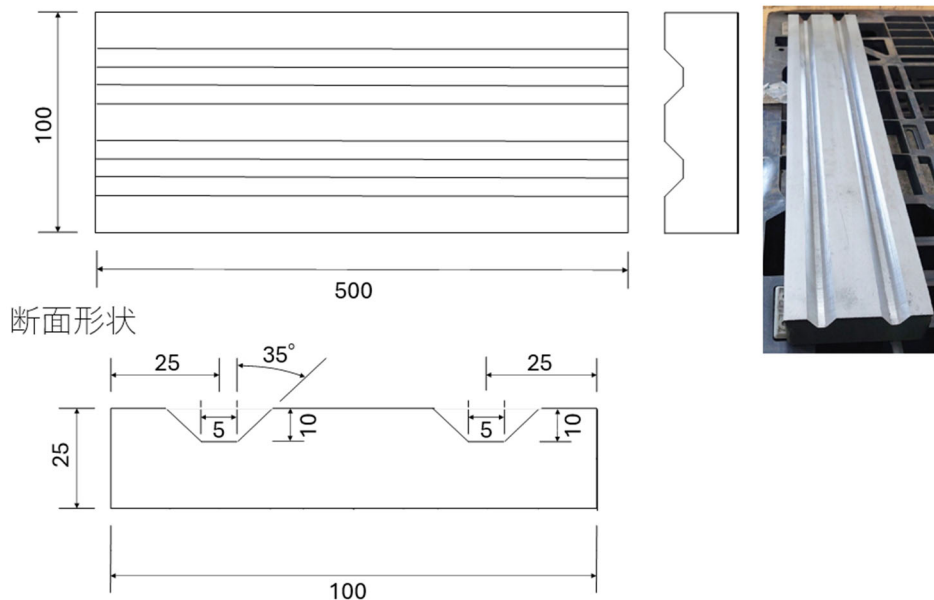
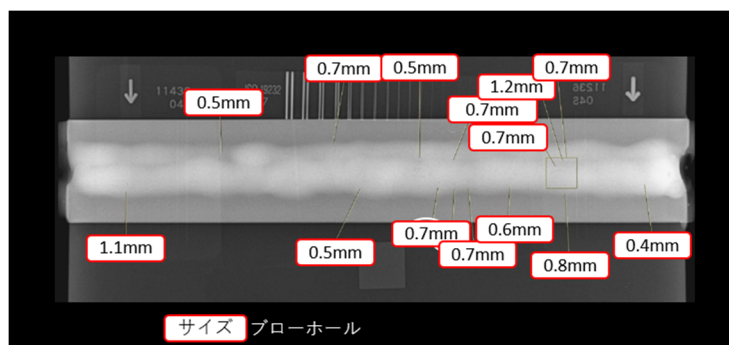
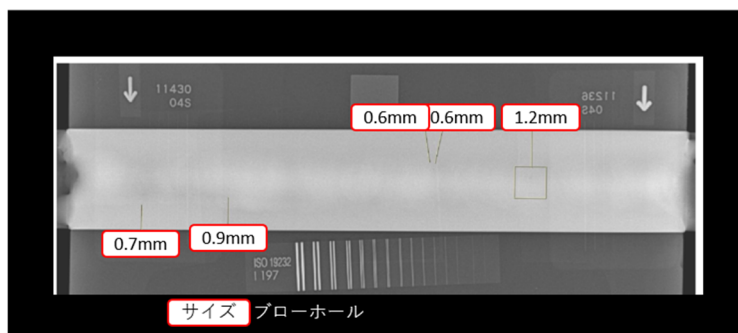


図 4 試験体形状



(a) FCW



(b) TIG

図 5 DRT 結果

これらより、FCW 溶接金属のブローホール発生には多量の酸化物が影響していると考えた。

4. 解決方法の検討

TIG で溶接を行えばブローホールの問題は解決されるが、扉体据付途中で発生した問題であり、工期に間に合わない。半自動溶接を実施しなければならないが、FCW で溶接すればブローホールが発生する。そこで溶接材料メーカに相談したところ、Ar をシールドガスに用いた MIG 溶接用ワイヤが開発されていることを教えて頂いた。

図 6 に新開発ワイヤの構造を²⁾、図 7 にアーク発生時の状態を²⁾、表 4 に今回用いた新開発ワイヤの溶着金属化学成分を示す。これまで Ar をシールドガスに用いた鋼の MIG 溶接ではワイヤ先端が尖ってアークが非常に不安定となり溶接ができなかった。しかし、開発されたワイヤは二重芯線構造を有し、中心にある内皮の溶接芯線は外皮の溶接芯線よりも低融点となっている。これにより先端が鋭くなる前に芯線先端が溶融するために尖らずアークが安定し、溶接が可能となる。しかも、Ar を用いるため溶接金属内の酸素量は 200ppm 以下に収まり、FCW と比較して溶接金属の酸素量を劇的に低減できる。

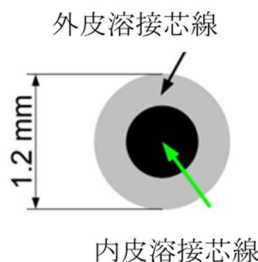
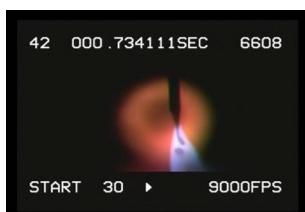


図 6 新開発ワイヤ構造²⁾



(a) 従来ワイヤ (シールドガス : Ar)



(b) 新開発ワイヤ (シールドガス : Ar)

図 7 アーク発生時の状態²⁾

表 4 新開発ワイヤ (SUS329J3L 系溶接材料) による溶着金属化学成分

溶接材料	質量%										
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N	O
新開発ワイヤ	0.017	0.62	1.45	0.025	0.001	8.78	22.84	3.11	0.12	0.15	0.02

この新開発ワイヤ及び Ar を用いて今回の溶接ができればブローホールは改善できると考え、上向き姿勢の溶接条件を求めた。図 8 に新開発ワイヤを用いた溶接金属の DRT 画像を示す。条件設定後、その条件を用いて図 4 の試験体を溶接すると大幅なブローホール低減に成功した。ただし、判定は 2 類合格であった。

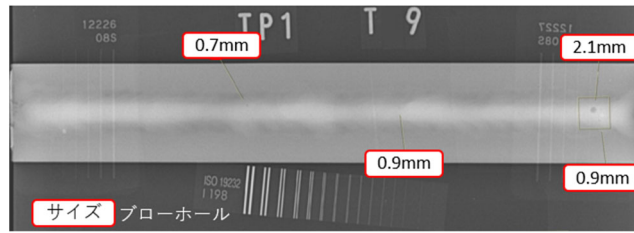


図 8 DRT 結果

新開発ワイヤを用いた MIG 溶接において、溶接金属内の酸素量が FCW と比較して大幅な低減が実現できたにもかかわらず、完全にはブローホールを消滅できなかった。一般的に TIG 溶接や MAG 溶接と違い、MIG 溶接の適正条件範囲は非常に狭い。また、新開発ワイヤ溶着金属に含まれる 200ppm の酸素量が原因でブローホール発生も考えられる。しかし、据付工程に余裕がなく、適正な溶接条件範囲を確定できず、また、新開発ワイヤ溶着金属酸素量とブローホールとの因果関係も調査できなかったため、完全にはブローホールを抑制することは出来なかった。

5. 更なる改善

Ar をシールドガスとして新開発ワイヤを用いた MIG 溶接の結果、大幅なブローホール減少には成功した。しかし、ブローホール発生原因の更なる追求や適正な溶接条件を求められず、完全にブローホールを消滅させることは出来なかった。そこで、積層手順を変えるという違うアプローチを考えた。

図 9 (a) に従来の積層法及び今回用いた積層法を示す。従来法ではガウジングによる初層のブローホール除去は可能だが、その後の上向姿勢の溶接で発生したガスは逃げるところがなくなり、図 8 のようにブローホールとなってしまふ。

図 9 (b) に今回考えた積層手順を、図 10 に溶接金属の DRT 画像を示す。図 8 と比較してブローホールの発生は減少し、1 類合格の結果を得た。この理由として、積層数を減らすことで発生するブローホールを減少させたことが考えられる。

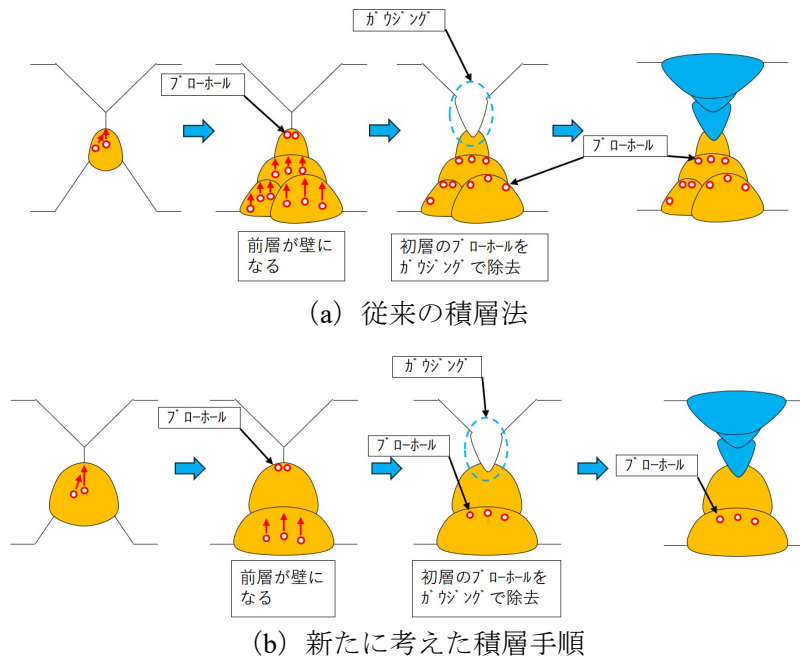


図 9 積層法

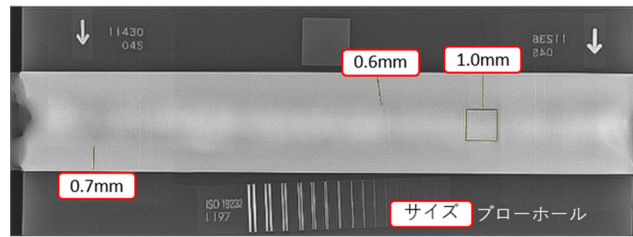


図 10 DRT 結果

6. 今後の課題

今回、積層法まで考慮して改善を行った。DRT 結果で 1 類合格は得られたものの、完全にはブローホールを消去することはできなかった。新開発ワイヤにおけるブローホール発生が、適正な溶接条件が得られなかったのが原因か、他の要因であるのかは、据付期間のこのこともあり、十分な究明はできなかった。従って、板厚が 30mm 以上の鋼板の突き合わせ溶接における上記の問題を解決することを今後の課題としたいと考える。

参考文献

- 1) 常富栄一 (1969)「鉄鋼のアーキ溶接における冶金反応について」鉄と鋼第 55 巻第 7 号, pp. 599-603
- 2) 中村照美, 平岡和雄他 (2007)「同軸複層ハイブリッドワイヤの構造と溶滴移行特性」平成 19 年度溶接学会秋季全国大会セッション ID405

<略歴>

亀谷博仁 (かめたに ひろひと)

1990 年 大阪大学工学部卒業

2011 年 英国国立ウェールズ大学経営大学院修士課程修了 MBA 取得

1990 年より鋼構造物製造業で水門、鉄管、橋梁の生産管理、生産技術開発に携わる。