

リーンおよび汎用二相ステンレス鋼の溶接部におよぼす 溶接補修の影響

Effect of welding repair on weld zone of lean and ordinarily used
duplex stainless steels

山口 ちひろ (技術本部 企画開発部) , 中野 正大* (技術本部 企画開発部)

Chihiro YAMAGUCHI , Masahiro NAKANO*

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

二相ステンレス鋼製の圧力容器や配管において、図面変更、構造変更、部分更新などの理由により溶接部の溶接補修を行った場合に、溶接部が再び高温に曝されることで、そこにCr窒化物や金属間化合物が析出し、じん性や耐食性が低下するおそれがある。そこで、リーンおよび汎用二相ステンレス鋼に対して溶接補修を繰り返した際の溶接部への影響を評価した。その結果、継手強度および衝撃特性についてはいずれも溶接補修を3回行っても変化はみられなかった。耐食性については、リーン二相ステンレス鋼(SUS821L1)では溶接補修を3回行っても低下しないが、汎用二相ステンレス鋼(SUS329J4L)では溶接補修を1回でも行うと溶接熱影響部に σ 相が析出して低下することが確認できた。

Weld zones are exposed to high temperatures again when welding repairs are performed on there due to drawing changes, structural changes, partial updates, etc. in duplex stainless steels pressure vessels and piping. Thereby, Cr nitrides and intermetallic compounds are deposited on weld zones, which may reduce toughness and corrosion resistance. Therefore, we evaluated the effect of repeated welding repairs on lean and ordinarily used duplex stainless steels on the welded parts. As a result, neither the joint strength nor the impact characteristics changed even after three welding repairs. Corrosion resistance of lean duplex stainless steels (SUS821L1) did not decrease even after three welding repairs. However, it was confirmed that corrosion resistance of ordinarily used duplex stainless steels (SUS329J4L) decrease due to the precipitation of σ phase in the weld heat-affected zone when welding repair is performed even once.

1. はじめに

二相ステンレス鋼は高い耐食性および強度を有することから、石油精製プラント、化学プラントおよび海水淡水化プラントにおいて、内部流体に塩化物、硫化物、尿素などを含む熱交換器、配管、塔槽類に使用されている^{1,2)}。また、近年では汎用二相ステンレス鋼に比べてNi、CrおよびMo含有量を低く抑えたリーン二相ステンレス鋼が注目されており、リーン二相ステンレス鋼は汎用オーステナイト系ステンレス鋼と同等の耐食性を持ち、強度が高く、Ni含有量が低いという特徴から、汎用オーステナイト系ステンレス鋼の代替品として広く使用されることが期待されている³⁾。

二相ステンレス鋼の金属組織は母材のフェライト(α)相とオーステナイト(γ)相の相比がおおよそ1:1となるよ

うに設計され、溶接金属のフェライト量が30~70%あるいは30~60%の範囲となるように施工されるが、二相ステンレス鋼製の圧力容器や配管において、図面変更、構造変更、部分更新などの理由により溶接部の溶接補修を行った場合に、溶接部が再び高温に曝されることで、そこにCr窒化物や金属間化合物が析出し、じん性や耐食性が低下するおそれがある^{4,5)}。

溶接補修の影響に関しては、以前の実験で、炭素鋼、低合金鋼およびオーステナイト系ステンレス鋼の溶接部におよぼす溶接補修の影響を評価し、炭素鋼および低合金鋼は溶接補修を行っても溶接継手の機械的性質に影響はないこと⁶⁾、オーステナイト系ステンレス鋼は同様に溶接継手の機械的性質に影響はないが、SUS304では溶接補修を2回行うと溶接熱影響部の応力腐食割れ感受性が増大する傾向がみられることが明らかになっている⁷⁾。

* 九州工業大学 大学院 生命体工学研究科へ出向中

そこで、炭素鋼、低合金鋼およびオーステナイト系ステンレス鋼と同様に、リーン二相ステンレス鋼および汎用二相ステンレス鋼についても溶接補修を繰り返した際の溶接部への影響を評価した。

2. 供試材

供試材には、リーン二相ステンレス鋼の SUS821L1 および汎用二相ステンレス鋼の SUS329J4L の鋼板を使用し、その板厚は 9mm とした。また、溶加棒は SUS821L1 には SUS329J3L の溶接に用いられる YS2209 を、SUS329J4L には YS329J4L を使用し、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

実験では、ティグ溶接による突合せ溶接を行い、溶接補修を行うことを想定した。溶接補修は溶接金属を切断し、溶接熱影響部を除去せずに開先加工を行い、再度溶接を行う方法とした。このような溶接補修を繰り返した際の溶接部の引張特性、衝撃特性、断面マイクロ組織および耐食性への影響を評価した。

3.1 溶接試験板の作製

溶接試験板は、SUS821L1 および SUS329J4L の鋼板から板厚 9mm、長さ 250mm、幅 125mm を切出し、ベベル角度を 30°に加工して、それらを組み合わせて突合せ溶接を行

い、図 1 のように溶接補修が 0 回 (As welded) , 1 回, 2 回および 3 回のものを作製した。表 2 に溶接条件を示す。ティグ溶接のトーチシールドガスには一般的にアルゴンガスを使用するが、本実験ではアルゴンに 4%の窒素含む混合ガスを使用した。これは、二相ステンレス鋼は溶接時に熔融金属中の窒素が放出され、溶接金属の窒素含有量が低下することで、フェライト相が過多となる場合があるためである⁸⁾。

3.2 引張試験

溶接試験板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。

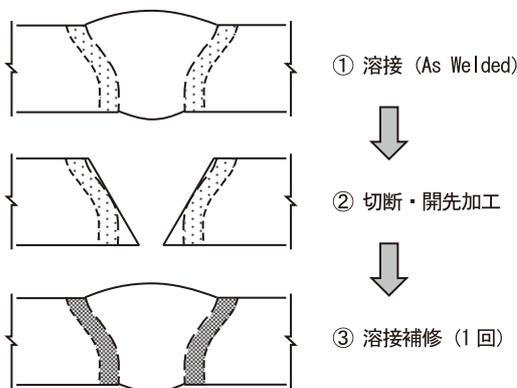
3.3 衝撃試験

溶接試験板の溶接熱影響部および母材の衝撃試験を JIS Z 3128 に従って行った。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°、ノッチ深さ 2mm およびノッチ底半径 0.25mm とした。図 2 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、シャルピー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、-46°Cとした。

表 1 供試材および溶加棒の化学成分

[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	<0.001	2.2	20.9	0.5	1.06	0.16	0.07
	SUS329J4L	0.010	0.5	0.8	0.029	<0.001	7.0	25.5	3.1	-	0.19	0.19
溶加棒	YS2209	0.016	0.4	1.5	0.017	<0.001	8.6	23.2	3.3	0.04	0.17	-
	YS329J4L	0.010	0.4	0.6	0.020	0.001	9.2	25.0	4.0	0.10	0.28	-



※ 溶接補修の 2 回以降は②と③を繰り返す。

図 1 溶接試験板の作製手順

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, SUS329J4L
溶加棒	YS2209, YS329J4L
溶接電流	60 ~ 180A
トーチシールドガス	Ar + 4%N ₂
バックシールドガス	Ar
溶接姿勢	下向姿勢
積層数	5 層 5 パス
予熱	なし
パス間温度	150°C以下
溶接後熱処理	なし

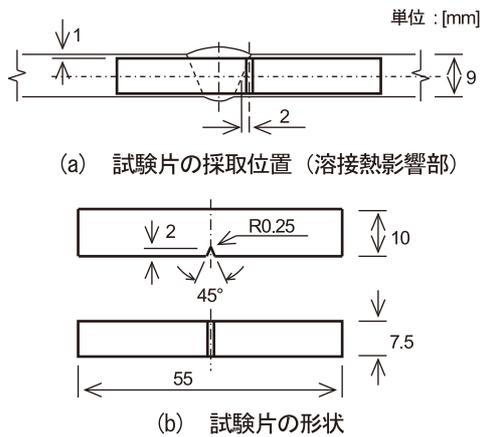


図2 衝撃試験の試験片の採取位置と形状

3.4 断面マクロ・マイクロ組織の観察

溶接試験板から試験片を切出し、溶接部の断面マクロ組織および溶接熱影響部の断面マイクロ組織を観察した。エッチング溶液には王水を用いた。断面マイクロ組織の観察位置は溶接熱影響部の裏面（初層溶接側）または表面から深さが1mm、ボンド部から1.5mmの位置とした。

3.5 X線回折法

溶接補修を繰り返すことにより、溶接熱影響部にCr窒化物や金属間化合物が析出する可能性があるため、X線回折法（以下はXRDと示す）を用いて析出物の有無を確認した。ただし、XRDでは微量の析出物は検出できないため、析出物が検出されなかったとしても、微量の析出物を有している場合がある。分析の位置は溶接熱影響部の裏面側とし、分析には直径1mmのコリメータ、Co管球およびNiフィルターを用いた。分析条件は、管電圧を35kV、管電流を40mA、回折角 2θ を 52° 、X線の照射時間を1200秒とした。

3.6 エネルギー分散型X線分析

断面マイクロ組織の観察およびX線回折法において、SUS329J4Lの溶接熱影響部に析出物が検出されたため、電界放出型走査電子顕微鏡（以下はFE-SEMと示す）を用いて析出物の形態を確認し、エネルギー分散型X線分析（以下はEDXと示す）により、析出物、フェライト相およびオーステナイト相の化学成分分析を行った。

3.7 浸漬試験

溶接試験板から試験片を切出し、溶接部の浸漬試験をJIS G 0578の塩化第二鉄腐食試験方法に従って行った。試験片の寸法は、厚さ9mm、長さ30mm、幅40mmとした。浸漬試験は試験片の全面を対象とし、端部のマスキングは行わなかった。試験片の数は2枚とし、腐食度は、単位時間、単位面積当たりの質量減量の平均値とした。試験溶液は塩

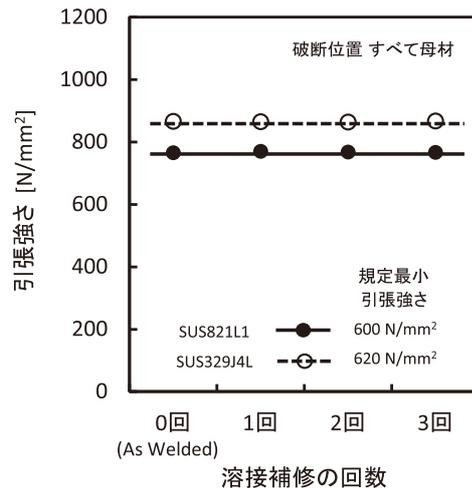


図3 溶接継手部の引張強さにおよぼす溶接補修の影響

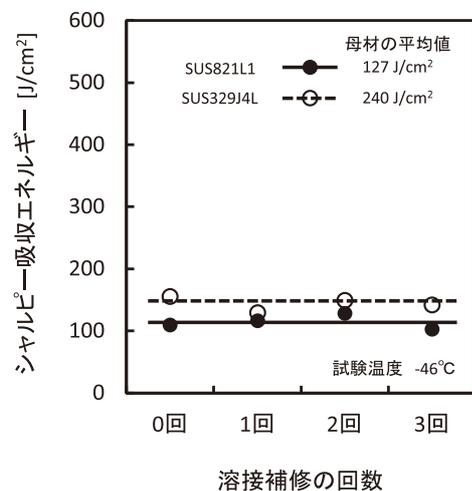


図4 溶接熱影響部の衝撃値におよぼす溶接補修の影響

酸酸性6%塩化第二鉄溶液、試験温度はJIS G 0578に規定されている 50°C では腐食しないため 65°C ^{9,10}、試験時間は24時間とした。また、浸漬試験後に試験片を切出し、溶接部の断面マクロ・マイクロ組織を観察した。エッチング溶液には王水を用いた。

4. 実験結果

4.1 継手強度および衝撃性能におよぼす溶接補修の影響

図3に溶接継手部の引張強さにおよぼす溶接補修の影響を示す。いずれも引張試験片の破断位置は母材部で、母材の規定最小引張強さを上回り、溶接補修の回数が増加しても引張強さに変化はみられなかった。

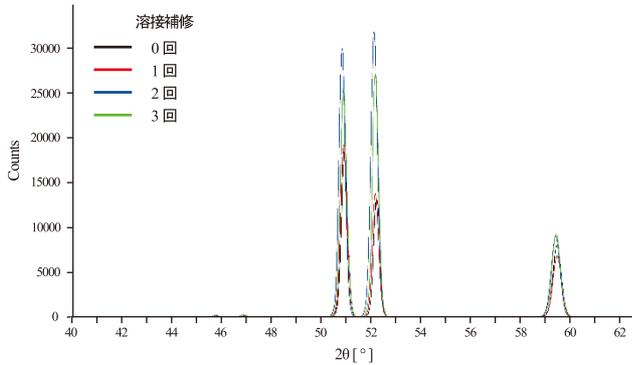
図4に溶接熱影響部の衝撃値におよぼす溶接補修の影響を示す。いずれも溶接補修の回数が増加してもシャルピー吸収エネルギーに変化はみられなかった。なお、溶接熱影

響部と母材のシャルピー吸収エネルギーの比較では、SUS821L1の溶接熱影響部の平均値（溶接補修が0～3回）115 J/cm²は母材の平均値127 J/cm²よりもやや低くなり、SUS329J4Lの溶接熱影響部の平均値144 J/cm²は母材の平均値240 J/cm²よりも著しく低くなった。後者の溶接熱影響部のじん性が低くなった原因は、窒化物や金属間化合物の影響が想定される¹¹⁾。なお、4.2節では溶接補修の回数の増加にともない金属間化合物であるσ相が増加する傾向がみられたにも関わらずじん性に変化はみられないことから、この原因がσ相の影響か否かを判定できなかった。

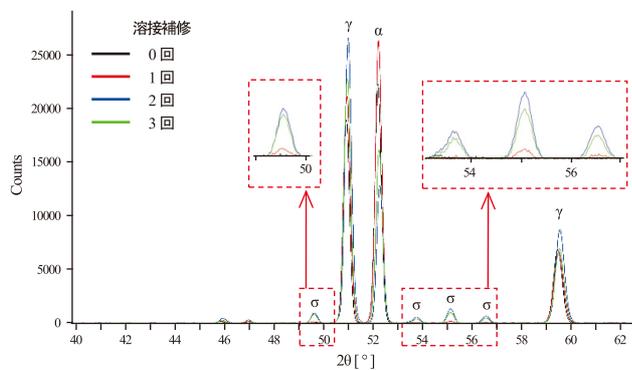
4.2 溶接熱影響部の断面マイクロ組織におよぼす溶接補修の影響

図5および6に溶接熱影響部の断面マイクロ組織を示す。SUS821L1には溶接補修の回数による溶接熱影響部の断面マイクロ組織への影響はみられなかったが、SUS329J4Lには溶接補修が1～3回のもの裏面側に析出物（黒い部分）がみられ、溶接補修の回数の増加にともない析出物が増加する傾向がみられた。

図7に溶接熱影響部のX線回折パターンを示す。いずれにもフェライト相およびオーステナイト相のピークがみられ、SUS821L1にはCr窒化物などの析出物のピークがみら



(a) SUS821L1



(b) SUS329J4L

図7 溶接熱影響部のX線回折パターン

れなかったが、SUS329J4Lには溶接補修が1回以上でσ相のピークがみられた。溶接補修が2回および3回のは、1回に比べてσ相のピークが高くなる傾向がみられ、溶接熱影響部の断面マイクロ組織にみられた析出物の増加傾向と一致した。

図8にSUS329J4Lの溶接補修が3回のもの溶接熱影響部のFE-SEM像を、表3にEDXによる各相の化学成分を示す。FE-SEMで検出された白い析出物は、CrやMoの濃度がフェライト相よりも高いことから¹²⁾、σ相と推定した。σ相はFe-Crの金属間化合物で、析出温度が600～1000℃で、Cr、Moなどの合金元素が多いほど析出しやすい¹³⁾。そして、σ相はCrやMoの濃度がフェライト相よりも高いため、σ相の周辺のCrおよびMoの濃度が低下して、耐食性が低下することから⁹⁾、図6のSUS329J4Lの断面マイクロ組織にみられた析出物（黒い部分）はσ相とその周辺が王水によってエッチングされたものと推定した。

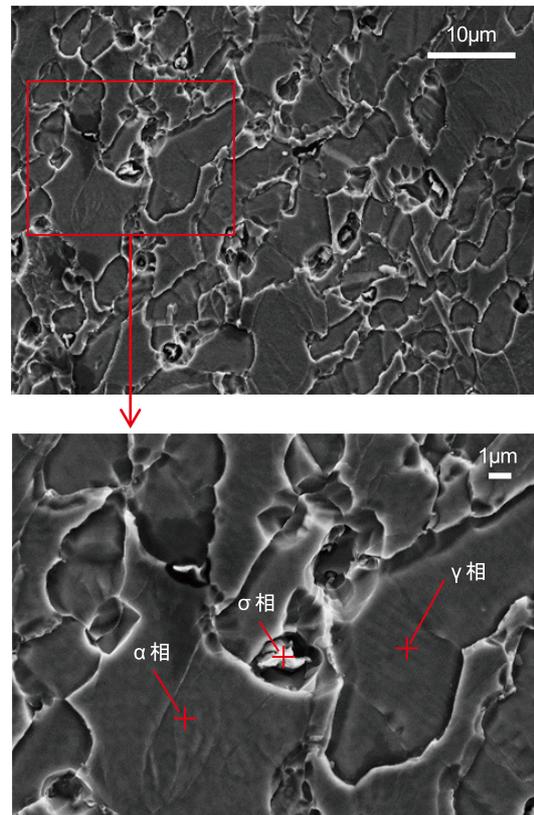


図8 溶接熱影響部のFE-SEM像

表3 EDXによる各相の化学成分 [wt%]

測定位置	Cr	Mo	Ni	Fe
σ相	31.6	5.1	4.8	57.8
α相	28.8	3.9	6.0	60.7
γ相	25.3	2.6	9.1	62.5

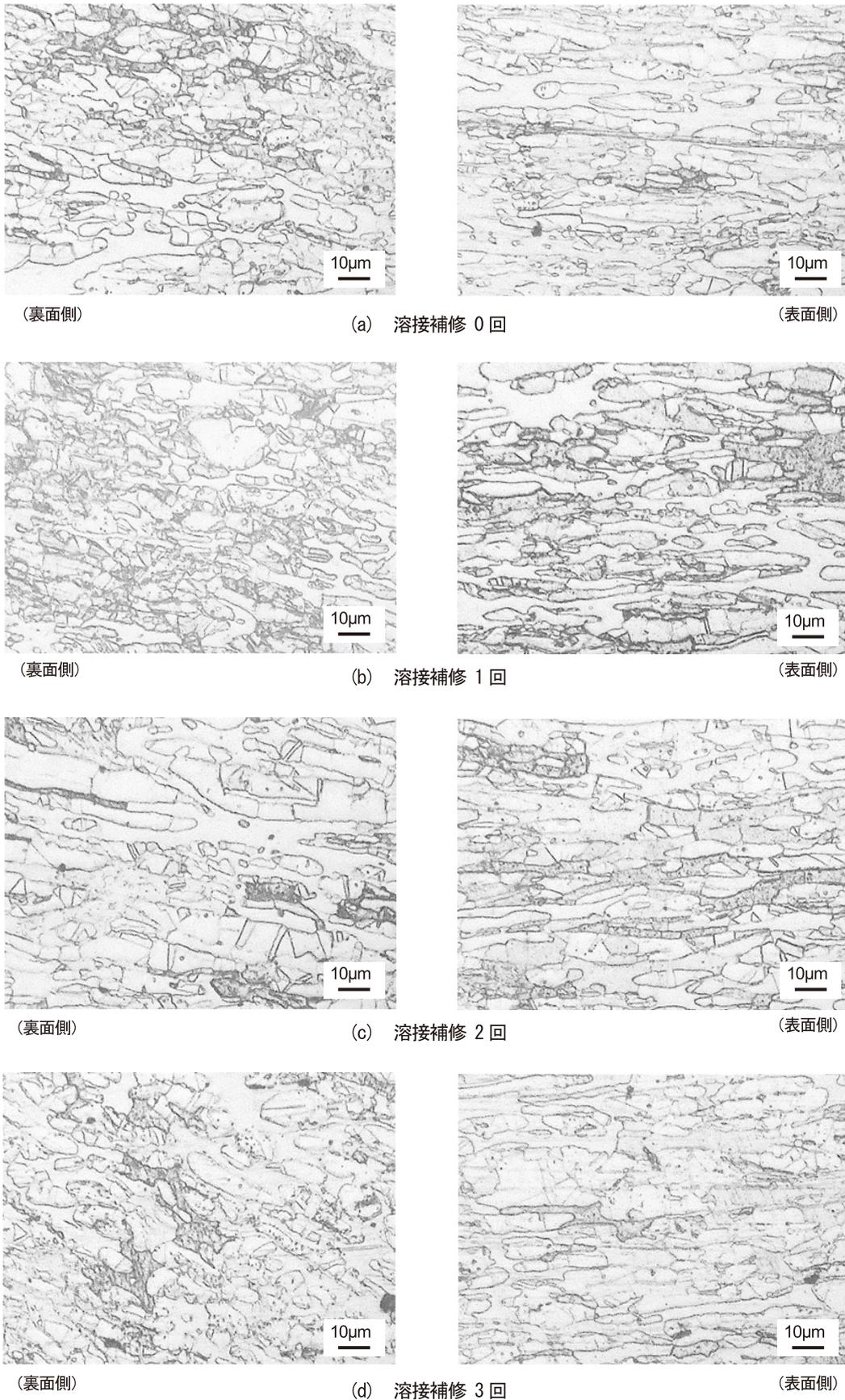


図5 溶接熱影響部の断面ミクロ組織におよぼす溶接補修の回数の影響 (SUS821L1)

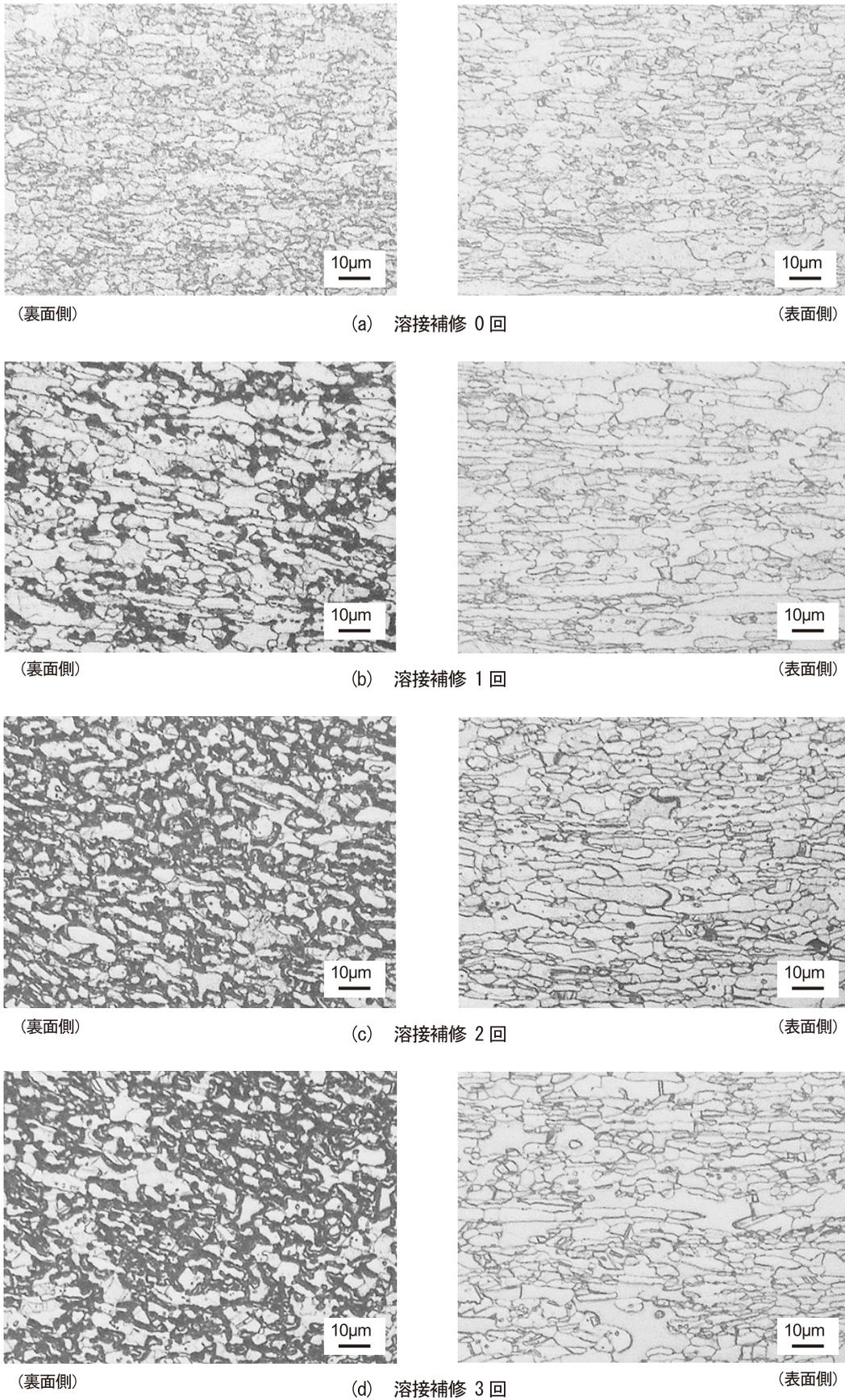


図6 溶接熱影響部の断面マイクロ組織におよぼす溶接補修の影響 (SUS329J4L)

図9にSUS329J4Lの断面マクロ組織を示す。σ相が析出した位置は裏面側の溶接熱影響部で、ボンド部から1~3mm、深さ方向に4.5mm程度の範囲であった。σ相が溶接熱影響部の裏面側のみにもみられたのは、その部分が初層溶接から2層目以降も繰返し高温に曝されたことが影響しており、そして、溶接補修の回数が増加にともないσ相が増加する傾向がみられたのは、このような溶接の熱履歴が蓄積されたことが影響していると推測した。

4.3 溶接部の耐食性におよぼす溶接補修の影響

図10に溶接部の耐食性におよぼす溶接補修の影響を、図11および12に浸漬試験後の断面マクロ・マイクロ組織を示す。SUS821L1は溶接補修の回数が増加しても腐食度に差はほとんどみられなかったが、SUS329J4Lは溶接補修が2

回までは腐食度が増加し、溶接補修が3回で腐食度が飽和する傾向がみられた。また、SUS329J4Lの浸漬試験片には溶接補修が1回以上で溶接熱影響部に溝状の腐食孔がみられた。この溝状の腐食孔がみられた範囲は図9に示すσ相が析出した範囲とおおよそ一致した。さらに、溶接補修の回数が2回のもの腐食孔の断面マイクロ組織にはσ相が析出した部分に選択腐食がみられた。これらの事象と4.2節のσ相の析出状況から、溝状の腐食孔はσ相に起因して発生したものと推定した。

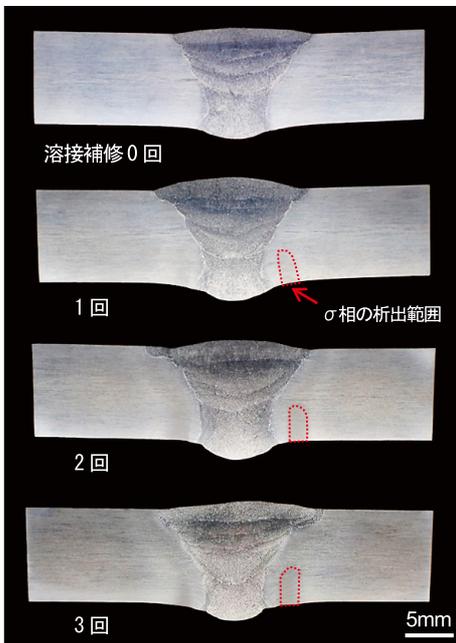


図9 SUS329J4Lの断面マクロ組織

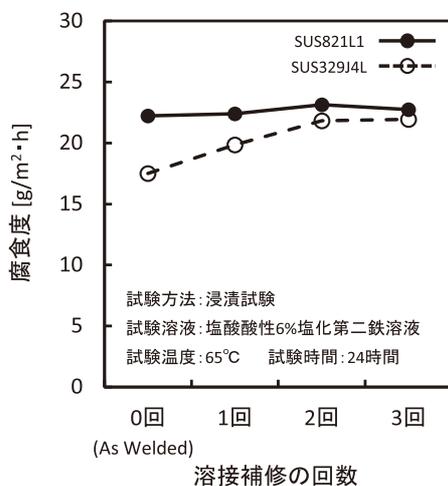
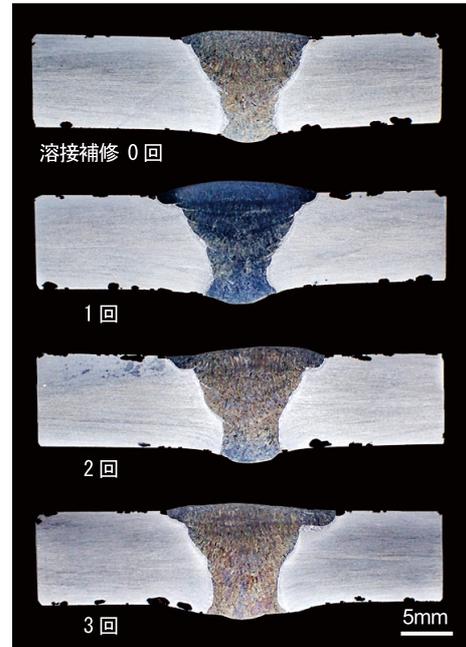
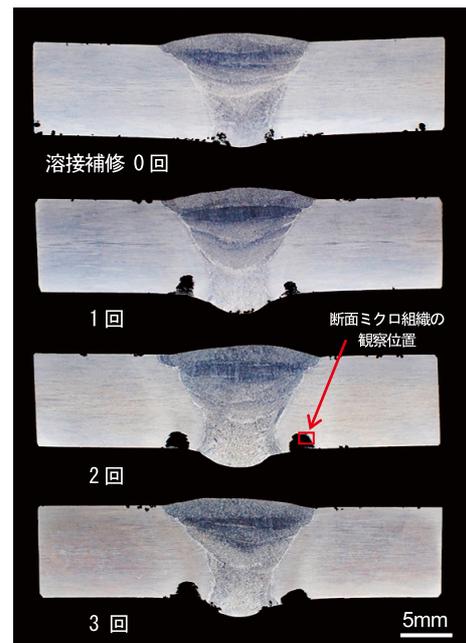


図10 溶接部の耐食性におよぼす溶接補修の影響



(a) SUS821L1



(b) SUS329J4L

図11 浸漬試験後の断面マクロ組織

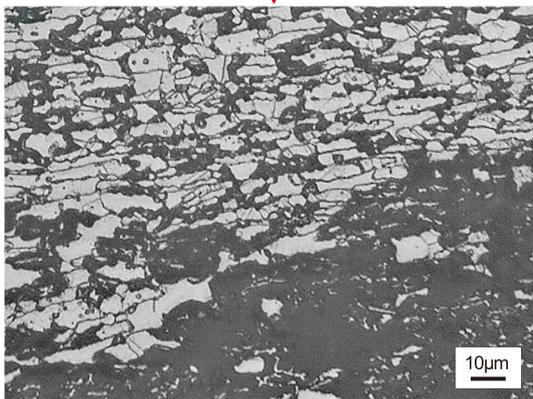
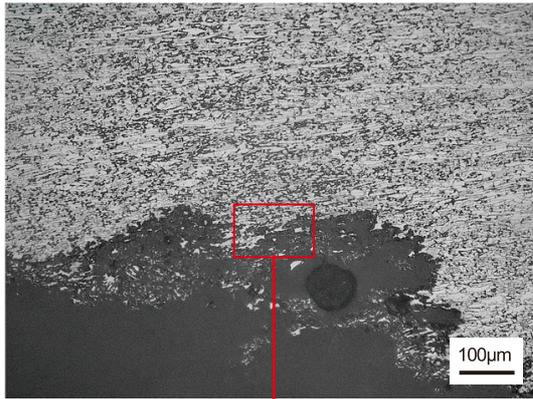


図 12 SUS329J4L の溝状の腐食孔の断面マイクロ組織

5. おわりに

リーン二相ステンレス鋼 (SUS821L1) および汎用二相ステンレス鋼 (SUS329J4L) に対して溶接補修を繰り返した場合の溶接部への影響を評価した。以下に結果のまとめを示す。

- ① 溶接継手部の引張強さおよび溶接熱影響部の衝撃値には溶接補修の影響はみられなかった。
- ② 断面マイクロ組織の観察では、SUS821L1 には溶接補修の回数による影響はみられなかったが、SUS329J4L には溶接補修が 1 回以上で裏面側の溶接熱影響部に σ 相がみられた。
- ③ X 線回折法による裏面側の溶接熱影響部の分析では、SUS821L1 には Cr 窒化物などの析出物のピークはみられなかったが、SUS329J4L には溶接補修が 1 回以上で σ 相のピークがみられた。
- ④ SUS329J4L に σ 相が析出した位置は裏面側の溶接熱影響部で、ボンド部から 1~3mm、深さ方向に 4.5mm 程度の範囲であった。
- ⑤ 浸漬試験では、SUS821L1 は溶接補修の回数が増加しても腐食度に差はほとんどみられなかったが、SUS329J4L は溶接補修が 2 回までは腐食度が増加し、溶接補修が 3

回で腐食度が飽和する傾向がみられ、溶接補修が 1 回以上では溶接熱影響部に溝状の腐食孔がみられた。

- ⑥ SUS329J4L の溶接熱影響部にみられた溝状の腐食孔には σ 相が析出した部分に選択腐食がみられ、溝状の腐食孔の範囲は σ 相が析出した範囲とおおよそ一致した。

参考文献

- 1) 小川和博: 二相ステンレス鋼の最近の動向とその溶接技術 第 1 回 二相ステンレス鋼の特徴と発展の歴史, 溶接技術, Vol.68 No.1, pp.112-118 (2020)
- 2) 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, pp.92-97 (2017)
- 3) 及川雄介, 拓殖信二, 梶村治彦, 井上裕滋: 省合金型二相ステンレス鋼溶接熱影響部の特性, 溶接学会誌, 82-6, pp.435-438 (2013)
- 4) 橋爪修司, 佐藤馨, 本田正春, 正村克身, 酒井潤一, 松島巖: 二相系ステンレス鋼の耐食性に与えるシグマ相の影響, 材料と環境, Vol.45, pp.83-89 (1996)
- 5) 小川和博: 二相ステンレス鋼の最近の動向とその溶接技術 第 3 回 二相ステンレス鋼の溶接性について, 溶接技術, Vol.68 No.3, pp.107-113 (2020)
- 6) 中野正大, 山崎義彦, 安西敏雄: 炭素鋼および低合金鋼の溶接部における溶接補修および溶接後熱処理の繰返しによる継手性能への影響評価, 高田技報, Vol.27, pp.4-11 (2017)
- 7) 中野正大, 古川誠喜, 安西敏雄: SUS304 の粒界鋭敏化に及ぼす補修溶接の影響, 高田技報, vol.14, pp.22-27 (2004)
- 8) 中野正大, 山口ちひろ, 安西敏雄: 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, 高田技報, Vol.30, pp.10-15 (2020)
- 9) 庄篤史: 二相系ステンレス鋼の耐食性に及ぼす γ 相量の影響, 山陽特殊製鋼技報, Vol.10, pp.42-47 (2003)
- 10) 二相ステンレス鋼 SUS329J4L, 山陽特殊製鋼技報, Vol.16, pp.81-83 (2009)
- 11) 小川和博, 三浦実, 小溝裕一: 高シリコン二相ステンレス鋼の HAZ 靱性—高シリコン・ステンレス鋼の溶接に関する研究 (第 2 報) —, 溶接技術, Vol.9 No.2, pp.269-275 (1991)
- 12) 中出且之, 黒田敏雄: スーパー二相ステンレス鋼におけるシグマ相の析出機構, 高温学会誌, Vol.33 No.2, pp.95-100 (2007)
- 13) 日本材料学会 腐食防食部門委員会: 二相ステンレス鋼の上手な使い方—その特性と使用実績—, pp.19-20 (2000)



山口 ちひろ Chihiro YAMAGUCHI
技術本部 企画開発部