

## ステンレス鋼と炭素鋼を溶接接合した厚板の異種金属接触腐食 Galvanic corrosion of thick plate made of welding stainless steel and carbon steel

○小見 恒介\*                      宮寄 靖大\*\*  
Kosuke KOMI                      Yasuhiro MIYAZAKI

**ABSTRACT** Stainless steels have high corrosion resistance. Therefore, stainless steel structures can decrease life cycle costs than carbon steel structures. This study focused galvanic corrosion behavior made of welding stainless steel and carbon steel. Then, these phenomena are conformed using accelerated corrosion test. First, the specimens in this study made up welding thick plate of stainless steel and carbon steel. In addition, the specimens of made of simple carbon steel was used for comparison in this study. The corrosion amount of welding specimens clarified 1.03 to 1.85 times more than simple carbon steel specimens.

**Keywords** : ステンレス鋼, 炭素鋼, 異種金属接触腐食, 促進腐食試験

*Stainless steel, carbon steel, galvanic corrosion, accelerated corrosion test*

### 1. はじめに

我が国では、高度経済成長期に数多く建設された土木構造物の老朽化が進行し、これら構造物の維持管理費用が増大している。このような構造物の補修および補強または架け替えに対して、従来よりも優れた耐久性を有する材料を使用することは、構造物の耐久性向上によるライフサイクルコストの低減を可能とする。なかでも、ステンレス鋼は、不動態皮膜の形成により、優れた耐久性を有することから、土木構造物および建築物への使用事例が報告されている<sup>1)3)</sup>。しかし、ステンレス鋼は、構造用炭素鋼に比べて高価な材料であるため、構造物全体をステンレス鋼とする場合、初期コストが大きくなる。したがって、厳しい腐食環境に曝される箇所にはステンレス鋼を、その他は炭素鋼とする適材適所の使用が考えられる。一方、このようなス

テンレス鋼と炭素鋼を併用した部材は、材料間の電位に差が生じることから、炭素鋼の腐食が単独の場合よりも促進される異種金属接触腐食の発現が懸念される。ステンレス鋼と炭素鋼についての異種金属接触腐食の発現性は、溶液中での検証が報告されている<sup>4)</sup>。しかし、大気環境下では、その検証が詳細に行われていない。大気環境下における材料の耐久性を確かめる方法としては、一般的に大気暴露試験が実施される。この試験による結果は、実環境における腐食性状を忠実に再現できるものの、多大な時間を必要とする。よって、本研究では、ステンレス鋼と炭素鋼を異材溶接接合した厚板供試体を用いて大気環境下を模擬した促進腐食試験を実施し、その腐食性状に関する基礎的なデータを得ることを目的とする。

\*長岡工業高等専門学校専攻科 環境都市工学専攻 (〒940-8532 新潟県長岡市西片貝町 888)

\*\*博士 (工学) 長岡工業高等専門学校准教授 環境都市工学科

(〒940-8532 新潟県長岡市西片貝町 888) 準会員

表 1 対象鋼種の化学成分および材料強度

鋼種	化学成分(%)												0.2%耐力または降伏応力(MPa)
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N	Nb	Cu	V	
SUS304	0.05	0.55	0.89	0.035	0.001	8.09	18.12	-	-	-	-	-	303
SUS316	0.04	0.64	0.93	0.037	0.001	10.29	16.81	2.06	-	-	-	-	302
SUS304N2	0.05	0.76	1.87	0.029	-	7.75	18.49	-	0.22	0.10	-	-	450
SUS329J3L	0.01	0.57	1.81	0.024	-	5.70	22.50	3.10	-	-	-	-	554
SM400	0.18	0.08	0.50	0.017	0.004	0.01	0.02	-	-	-	0.01	0.2	271
SM490Y	0.16	0.03	0.14	0.019	0.006	-	-	-	-	-	-	0	392
SM570	0.10	0.18	1.54	0.010	0.002	0.02	0.01	-	-	0.02	0.01	0.1	532

表 2 異材溶接接合供試体の溶接条件

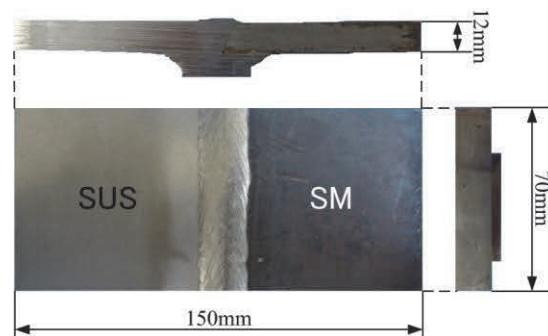
鋼種	溶接材料	パス間温度(℃)	溶接時間(s)	電流値(A)	電圧値(V)
SUS304+SM400	GFW309L	51-120	32-74	192-225	32.7-33.1
SUS316+SM400	GFW309L	90-137	33-74	200-237	32.3-32.9
SUS304N2+SM490Y	GFW308N2	59-125	34-85	180-206	33.0-33.7
SUS329J3L+SM570	GFW329J4L	63-127	39-78	149-208	34.9-39.7

## 2. 対象とする供試体および促進腐食試験方法

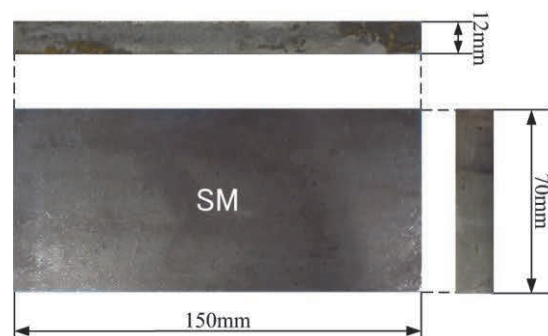
本研究で対象とするステンレス鋼は、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304, SUS316 および SUS304N2, 二相系ステンレス鋼 SUS329J3L である。また、異材溶接接合する炭素鋼は、これらステンレス鋼と同程度の材料強度を有する SM400, SM490Y および SM570 である。表 1 は、本研究で対象とする材料のミルシートに記載の化学成分および材料強度を示す。

図 1 は、本研究で対象とする供試体形状を示す。同図の供試体寸法は、長さ 150mm、幅 70mm、板厚 12mm である。この供試体寸法は、規格類<sup>5),6)</sup>に従い決定している。同図(a)の異材溶接接合供試体は、表 2 に示す条件にて、ステンレス鋼と炭素鋼を 4 パスの半自動マグ溶接により、突き合せ接合している。また、同図(b)の炭素鋼のみの供試体は、異材溶接接合供試体との比較として用いる。

図 2 は、図 1(a)で示した異材溶接接合供試体の促進腐食試験における供試体設置パターンを表している。ここで、同図(c)の平置きを除く供試体は、水平から 70° となるように設置した。また、炭素鋼のみの供試体は縦置きとしている。なお、これら供試体は、評価面積以外の腐食を防止するため、炭素鋼の裏面および側面を、



(a) 異材溶接接合供試体



(b) 炭素鋼のみの供試体

図 1 供試体形状

JIS C 2336<sup>7)</sup>に準拠して作製された電気絶縁用ポリ塩化ビニル粘着テープを用いて保護した。

表 3 は、本研究で対象とした全供試体の実測寸法を示している。同表中の供試体のはじめの

記号は、図2で示した設置パターンに対応しており、記号に続く文字は、組み合わせ鋼種を意味している。例えば、0440はSUS304とSM400の組み合わせを表している。

本研究の促進腐食試験は、JASO M 609<sup>5)</sup>に基づいた塩水噴霧、乾燥および湿潤の各条件を繰り返す複合サイクル試験である。この促進腐食試験は、既往の研究<sup>8)</sup>により、大気暴露試験との相関性が高く、厳しい腐食環境を再現できると結論付けられたものである。なお、試験機には、Q-Lab社製Q-FogCCT1100を使用する。また、図3は、実施する促進腐食試験サイクルを表している。同図に示す1サイクルは、8時間であり、このサイクルを計180回行う。そして、試験終了後の供試体は、腐食生成物を機械的および化学的除去により、質量変化量が微量になるまで除去する<sup>9)</sup>。ここで、機械的除去ではヘラおよびワイヤーブラシで供試体を研削し、化学的除去では供試体を20%クエン酸水素二アンモニウム溶液に60分間浸漬する<sup>9)</sup>。

### 3. JASO M 609に基づく促進腐食試験結果

#### 3.1 供試体外観

図4から図8は、促進腐食試験前後および腐食生成物除去後の各供試体の外観を示す。これらの図(b)より、促進腐食試験直後の供試体は、その表面に茶色と黒色の腐食生成物が混在して付着していることがわかる。これらの腐食生成物は、茶色がオキシ水酸化鉄( $\text{FeOOH}$ )、黒色がマグネタイト( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )である<sup>10),11)</sup>。また、各供試体のオキシ水酸化鉄およびマグネタイトの付着量の外観が異なることがわかる。これらの腐食生成物の形成には、様々な因子が影響する<sup>10)</sup>。したがって、試験

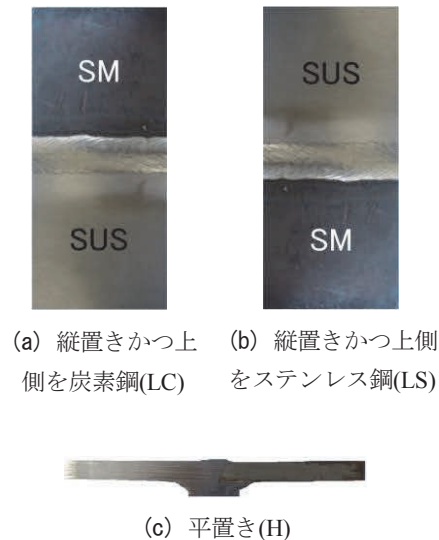


図2 供試体設置パターン

表3 供試体寸法

供試体名	鋼種	長さ×幅×板厚 (mm)	評価面積 A(mm <sup>2</sup> )
LC-0440	SUS304	150.68×70.98×12.18	4781.92
LS-0440	+	149.98×70.67×12.20	4736.30
H-0440	SM400	150.28×70.55×12.27	4738.84
LC-1640	SUS316	150.11×70.20×12.22	4709.37
LS-1640	+	150.29×69.61×12.35	4676.05
H-1640	SM400	150.24×70.60×12.23	4740.79
LC-N249	SUS304N2	150.08×70.26×12.22	4712.34
LS-N249	+	150.09×69.06×12.23	4632.20
H-N249	SM490Y	151.65×70.44×12.24	4779.71
LC-J3L57	SUS329J3L	150.57×70.51×12.18	4746.38
LS-J3L57	+	150.26×70.34×12.09	4724.03
H-J3L57	SM570	150.50×69.87×12.16	4700.85
L-SM400	SM400	150.09×70.50×12.24	10581.35
L-SM490Y	SM490Y	149.89×70.02×12.32	10495.30
L-SM570	SM570	149.98×70.52×12.07	10576.59



図3 促進腐食試験サイクル条件



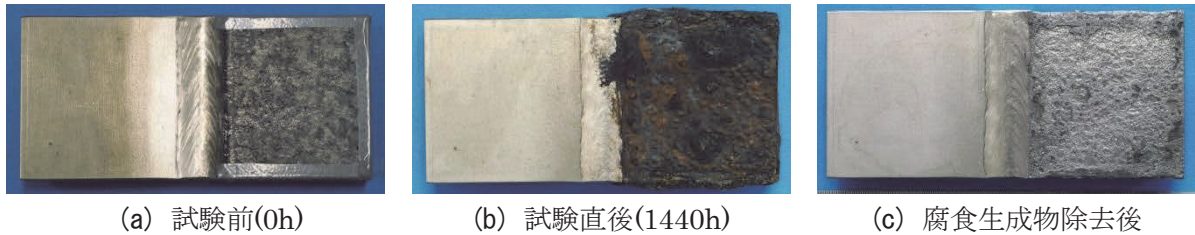


図4 各段階における H-0440 の外観

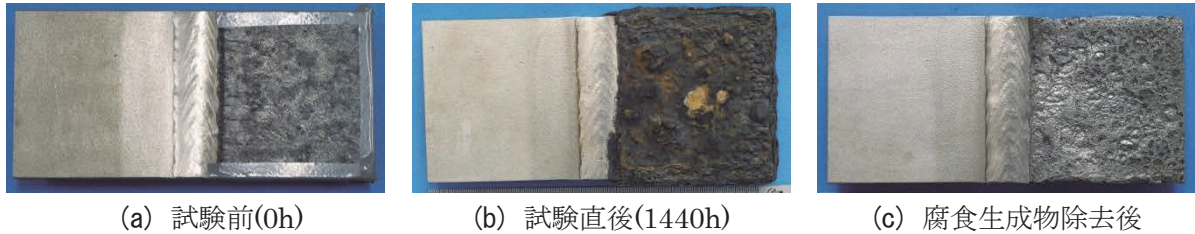


図5 各段階における H-1640 の外観

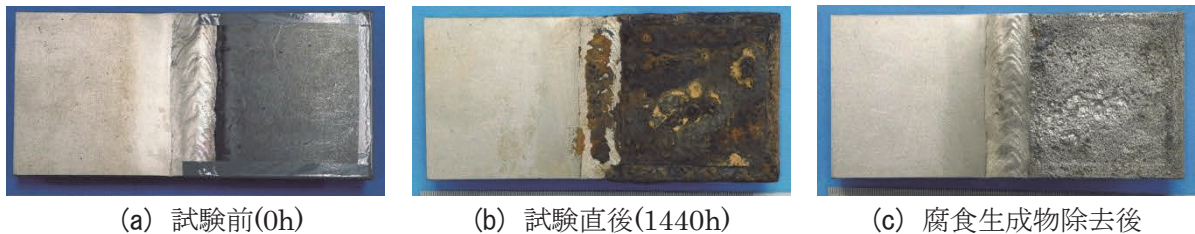


図6 各段階における H-N249 の外観

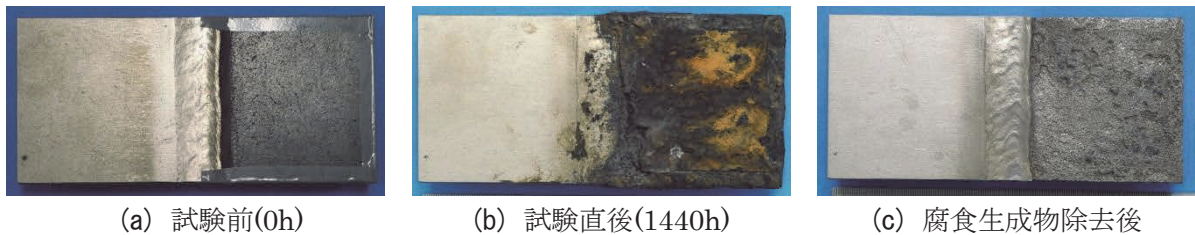


図7 各段階における H-J3L57 の外観

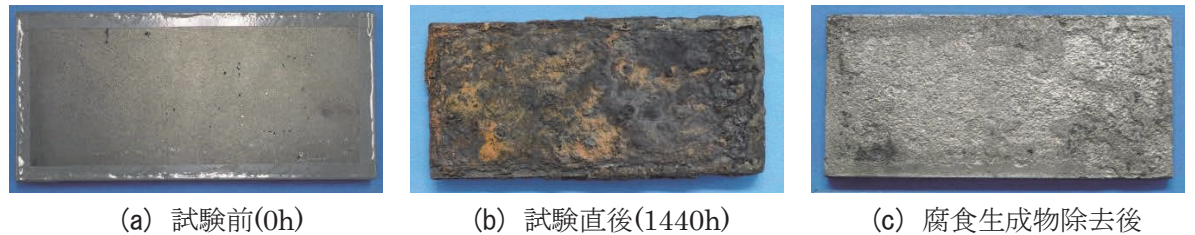


図8 各段階における SM490Y の外観

槽内で生じる腐食環境の差によって、これらの差が生じたといえる<sup>12)</sup>。さらに、腐食生成物の形状はこぶ状であることも判断できる。そして、これらの図(c)における腐食生成物除去後の供試体表面は、無数の腐食孔が形成されていることも見て分かる。以上のような外観観察において、異材溶接接合供試体と炭素鋼のみの供試体の表面性状は、供試体毎の変化は見られず、その腐食形状に明確な違いが発生しないことがわか

った。

### 3. 2 各供試体の腐食量

表4は、対象とした全供試体の促進腐食試験前後の質量を示す。ここで、同表中の試験後の質量  $W_t$  は、供試体ブランク減量を考慮して算出している<sup>13)</sup>。また、図9は、各供試体の腐食量を示す。なお、同図縦軸の腐食量  $L$  は式(1)で求める。

$$L = \frac{W_0 - W_1}{A} \quad (1)$$

ここで、 $W_0$ は試験前の供試体質量、 $A$ は評価面積である。なお、評価面積  $A$  は、表 3 中で示した異材溶接接合供試体で炭素鋼側の表面、炭素鋼のみの供試体で表面としている。ここで、異材溶接接合供試体にて炭素鋼側のみを評価した理由は、ステンレス鋼側での腐食が見られなかったためである。図 9 より、SUS304N2+SM490Y の組み合わせを除く異材溶接接合供試体の腐食量は、比較対象とした炭素鋼のみの供試体に比べて 1.03 倍から 1.85 倍程度大きくなることがわかる。また、各設置パターンの腐食量は、炭素鋼のみの供試体に比べて、縦置きかつ上側を炭素鋼とした供試体で約 1.07 倍、縦置きかつ上側をステンレス鋼とした供試体で約 1.34 倍、平置きした供試体で約 1.48 倍大きくなることがわかる。これは、供試体表面に水分および塩分を長時間保持する平置きした供試体の腐食量が 3 設置パターン中で最大となり、炭素鋼上側縦置きした供試体に比べて、炭素鋼側のぬれ時間が長くなるステンレス鋼上側縦置きした供試体の腐食量が 2 番目に大きくなっている。つまり、以上の結果は、腐食の主要因であるぬれ時間および塩分の付着量が影響していると判断する<sup>13)</sup>。

### 3.3 腐食深さ

図 10 は、異種金属接触腐食の発現性を検証するため、炭素鋼側表面を 4 領域に分けて、各領域での腐食深さの計測を行う状況を示している。また、同図中の破線は、供試体の腐食形状を計測する断面部の一例を示している。なお、腐食深さの計測は、KEYENCE 社製 3 次元マ

表 4 供試体の質量

供試体名	試験前の質量 $W_0$ (g)	試験後の質量 $W_1$ (g)	質量減少量 (g)
LC-0440	1147.82	1130.42	17.40
LS-0440	1146.30	1132.82	13.48
H-0440	1148.12	1130.69	17.43
LC-1640	1145.75	1130.98	14.77
LS-1640	1125.52	1108.00	17.52
H-1640	1147.66	1126.08	21.58
LC-N249	1139.02	1128.83	10.19
LS-N249	1110.02	1093.85	16.17
H-N249	1144.25	1129.78	14.47
LC-J3L57	1157.56	1146.10	11.46
LS-J3L57	1164.09	1144.20	19.89
H-J3L57	1150.39	1130.04	20.35
L-SM400	1006.86	979.85	27.01
L-SM490Y	998.46	960.70	37.76
L-SM570	992.26	967.54	24.72

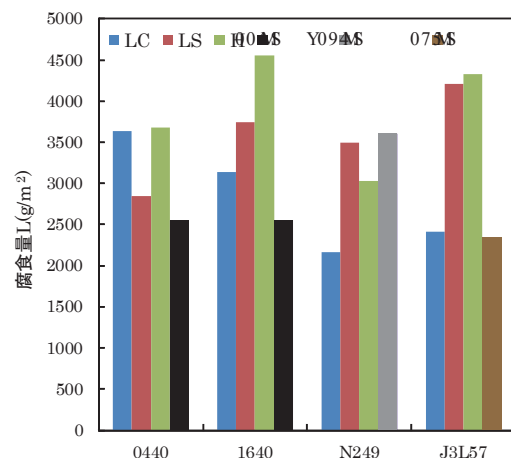


図 9 各供試体の腐食量

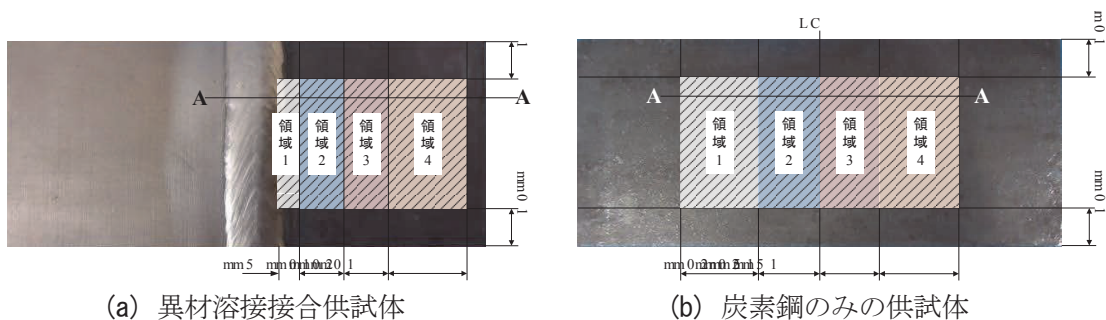


図 10 腐食深さ測定領域

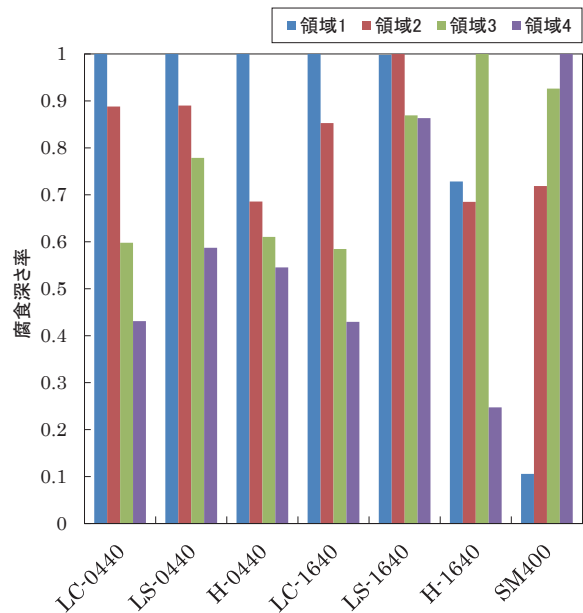
イクロスコプ VR-3000 を用いて行った。  
図 11 は、各領域における腐食深さ率を表している。同図縦軸の腐食深さ率は、各領域の平均腐食深さを、4 領域中最大となる平均腐食深さで除した値である。同図より、異材溶接接合供試体 12 体中 8 体の腐食深さ率は、領域 4、領域 3、領域 2、領域 1 の順に大きくなることわかる。また、SM570 の領域 1 および領域 3 において、腐食深さ率が 0 となっている。この理由としては、炭素鋼単体の供試体数が 1 体のみであったことおよび促進腐食試験時において、これら供試体の配置を適切にローテーションできなかったことが考えられる。

図 12 から図 16 は、腐食生成物除去後に 3 次元マイクロ스코プを用いて図 10 で示した A-A 断面部について、平置き供試体の炭素鋼側および SM490Y の腐食形状を表している。なお、この腐食形状を計測する断面は、試験後の供試体において、領域 1 の最低高さを通る水平断面である。同図より、H-1640 および H-J3L57 の溶接部近傍で幅 3000 $\mu$ m 程度の腐食孔が確認できる。しかし、H-0440、H-N249 および SM490Y では、目立った腐食形状は見られない。このように今回の実験結果のみでは、ばらつきが大きく異材溶接接合供試体と炭素鋼のみの供試体の腐食形状の違いについて判断できなかった。したがって、これらについては、今後の研究により明らかにする必要がある。

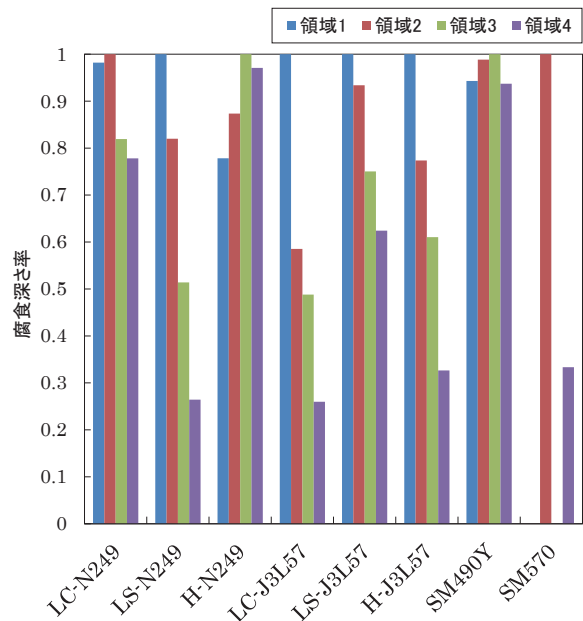
#### 4. おわりに

本研究は、ステンレス鋼と炭素鋼を異材溶接接合した際に懸念される異種金属接触腐食の発現性について、JASO M 609 に基づく促進腐食試験により照査した。本研究で得られた結果は、次の通りである。

- (1) 異材溶接接合した供試体および炭素鋼のみの供試体における炭素鋼表面の促進腐食試験直後の外観は、明確な差が見られなかった。
- (2) SUS304N2+SM490Y の組み合わせを除く異材溶接接合供試体の腐食量は、比較対象とした炭素鋼のみの供試体に比べて約 1.03 倍から約 1.85 倍大きくなる。
- (3) 異材溶接接合した供試体の各設置パターン



(a) SUS304+SM400, SUS316+SM400 および SM400



(b) SUS304N2+SM490Y, SUS329J3L+SM570, SM490Y および SM570

図 11 各供試体の腐食深さ率

の平均腐食量は、縦置きかつ上側を炭素鋼、縦置きかつ上側をステンレス鋼、平置きの順に大きくなる。

- (4) 対象とした異材溶接接合供試体 12 体中 8 体は、溶接部近傍の領域が他の領域に比べて最も



平均腐食深さが大きくなる。

(5) 最も腐食量が大きくなる平置きした異材溶接接合供試体の溶接部近傍での腐食孔は、供試体によりばらつきがあり、明確な異種金属接触腐食が確認できなかった。

本研究では、データのばらつきおよび試験槽内で生じる腐食の差について考慮していない。したがって、今後、これらを考慮して同様の試験により、ステンレス鋼と炭素鋼の溶接接合部における腐食性状を明らかにする必要がある。

最後に、本研究は、平成 26 年 NEXCO 東日本技術研究助成を得て実施したものである。また、本研究に用いた供試体は愛知製鋼株式会社より提供いただいた。ここに記して謝意を表する。

#### 【参考文献】

- 1) 日本鋼構造協会:LCC の概念とステンレス鋼の用途先における事例紹介(LCC シリーズ・その 2), ステンレス建築 No.12, pp.19-22, 1998.
- 2) 日本鋼構造協会:LCC の概念とステンレス鋼の用途先における事例紹介(LCC シリーズ・その 3), ステンレス建築 No.13, pp.17-20, 1998.
- 3) Euro Inox : Bridge in Cala Galdana on Menorca, The European Stainless Steel Development Association, 2007.
- 4) 松下久雄, 山本規雄: 船体構造部材の異種金属間腐食, 日本海事協会会誌, pp.43-50, 2008.

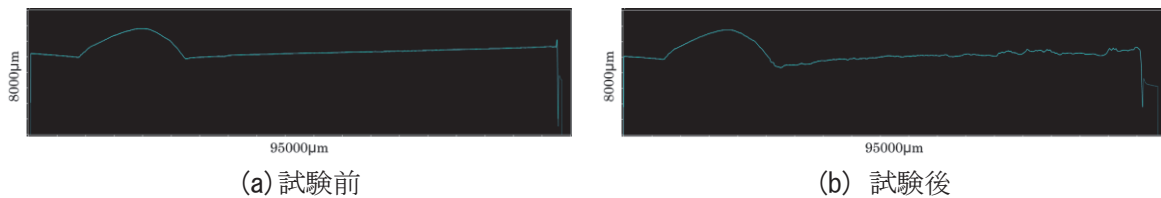


図 12 H-0440 の腐食形状

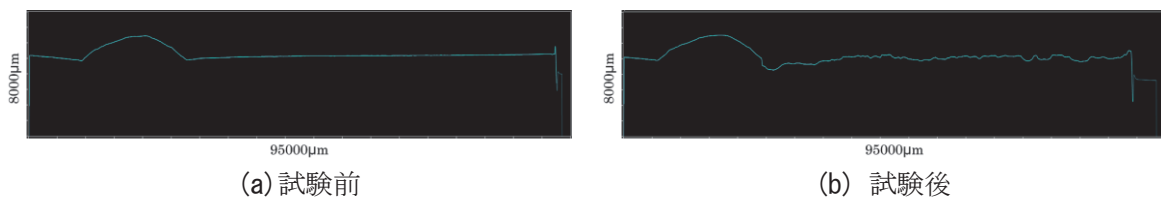


図 13 H-1640 の腐食形状

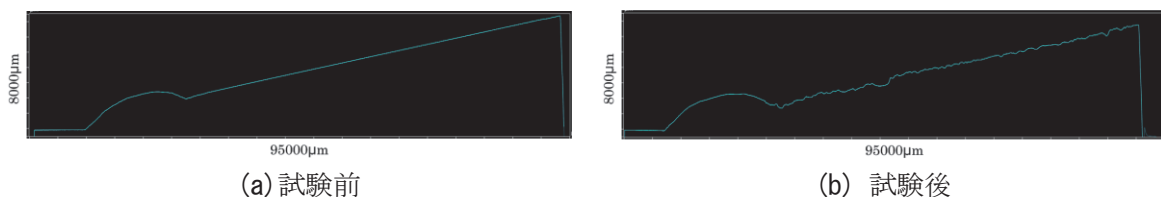


図 14 H-N249 の腐食形状

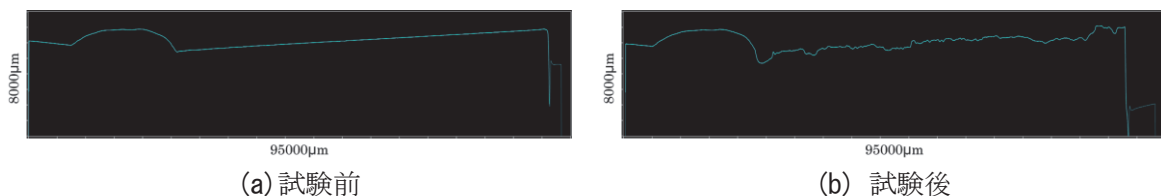


図 15 H-J3L57 の腐食形状

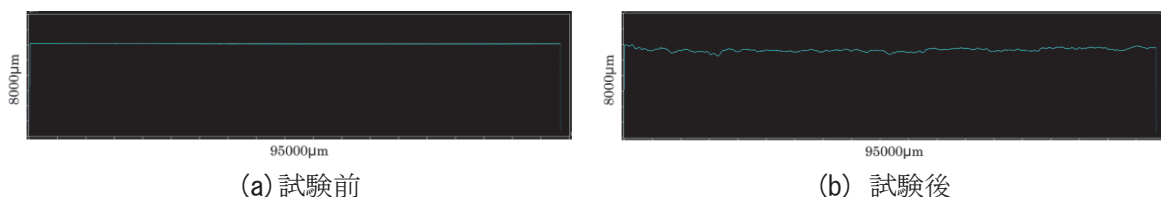


図 16 SM490Y の腐食形状

- 5) 日本自動車技術会：自動車用材料腐食試験方法,1991.
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説, pp.110-117,2002.
- 7) 日本工業標準調査会：電気絶縁用ポリ塩化ビニル粘着テープ,JIS C 2336,2012.
- 8) 藤原博,田原芳雄：鋼橋塗装の長期防食性能の評価に関する研究,土木学会論文集 No.570,I-40,pp.129-140,1997.
- 9) ISO8407 : Corrosion of Metals and from Corrosion Test Specimens ,ISO,2009.
- 10) 久松敬弘：さび層をもつ鋼の大気腐食,防食技術,vol.20,No.5,pp.207-212,1971.
- 11) 松島巖：さびおよびさびた鋼板の性質,色材協会誌,vol.49,No.11,pp.669-675,1976.
- 12) 伊藤義人,金仁泰,太田洋,貝沼重信：鋼材の腐食耐久性評価のための環境促進実験に関する基礎的研究,構造工学論文集,vol.49A,pp.697-706,2003.
- 13) 日本ウェザリングテストセンター：大気暴露試験ハンドブック, 2007.
- 14) 日本ウェザリングテストセンター：促進暴露試験ハンドブック,2009.