

## 海水中環境を模擬した腐食促進実験による鋼溶接部の 腐食劣化特性に関する基礎的研究

Corrosion deterioration characteristics of welded parts of steel by accelerated exposure test  
simulating environments in the seawater

竹見潤也\*, 廣畑幹人\*\*, 北根安雄\*\*\*, 伊藤義人\*\*\*\*

Junya Takemi, Mikihiro Hirohata, Yasuo Kitane, Yoshito Itoh

\*名古屋大学大学院, 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

\*\*博士(工学), 名古屋大学大学院助教, 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

\*\*\*Ph. D., 名古屋大学大学院准教授, 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

\*\*\*\*工博, 名古屋大学大学院教授, 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

For investigating the corrosion deterioration characteristics of welded parts of steel in the seawater, a series of accelerated exposure tests were performed on the fillet welded specimens by using the newly developed large scale test apparatus. Local corrosion could not be confirmed on the surface of the weld bead and the toe although the surfaces of the weld bead became rough. Regardless of different welding conditions, the corrosion depth of the welded parts was almost the same as that of the general parts.

*Key Words: Maintenance, corrosion acceleration test,*

*environment under the seawater, welded part*

キーワード: 維持管理, 腐食促進実験, 海水中環境, 溶接部

### 1. 緒言

高度経済成長期に建設された港湾施設は 40~50 年供用され, 老朽化が進んでいる. 進行する老朽化に対応しつつ, 港湾施設の既存ストックを最大限に活用していくため, 更新や補修等, 計画的な維持管理を実施していくことが非常に重要である.

これまで, 海洋環境における構造物に用いられる鋼材の腐食特性や防食の劣化特性に関する基礎的データの取得を目的とした種々の研究<sup>1)~3)</sup>が実施され, その結果が土木学会により「海洋環境における鋼構造物の耐久・耐荷性能評価ガイドライン」<sup>4)</sup>に取りまとめられている.

しかし, この既往の研究は鋼材の一般部を対象としたものであり, 継手部に関する実験は実施されていない. 海洋環境における構造物には高い水密性が要求されるため, 部材接合法として溶接が用いられることが多い. また, 腐食劣化した鋼矢板や鋼管杭に対する補修工法として, 腐食部分を鋼板で被覆し, 既設鋼材と鋼板をすみ肉溶接で接合し, 相互間の力の伝達が十分に行うことができるようにする工法(鋼板被覆による鋼板溶接工法)が

適用される<sup>5)</sup>. 溶接部の損傷は構造物の安全性に大きな影響を及ぼすため, 一般部に限らず溶接部における腐食劣化特性を明らかにすることが必要と考えられる.

海洋環境における鋼構造物の溶接部の腐食劣化特性について, 船舶構造分野では溶接部の溝状腐食に関する実験的研究が実施されており, 溶接金属部と母材部の異種金属接触が溶接金属部の優先的な腐食の一因となることなどが示されている<sup>6)</sup>. この既往の研究では溶接部の材料的な特徴が腐食特性に及ぼす影響について検討がなされているものの, 溶接ビードの凹凸形状など, 幾何学的な特徴までも含めた形での検討は実施されておらず, 溶接部の腐食劣化特性については不明な点が多い.

本研究では, 海水中環境を模擬した腐食促進実験を行い, 海水中環境における鋼溶接部の腐食劣化特性に関する基礎的な検討を実施することを目的としている. 実験には, 基本的な溶接継手形式のひとつであるすみ肉溶接継手供試体を用いる. 溶接ビードの凹凸形状を何ら処理することなく, 溶接のままの供試体を用いる. また新設の構造物に限らず, 既設の構造物の補修を想定すると共に, 気中と比較して水中で溶接された継手のビード形状

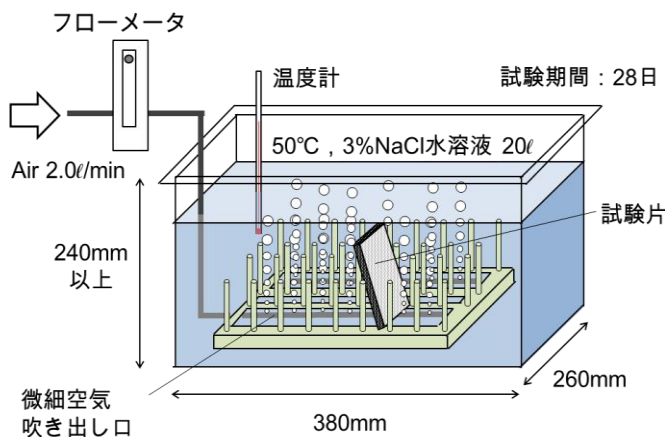


図-1 腐食促進実験装置(標準実験装置)<sup>4)</sup>

には大きなばらつきがある<sup>7)</sup>ことから、気中と海水中の環境で溶接された供試体を用いる。さらに、使用する鋼材として一般鋼材(熱間圧延鋼矢板)と溶接用鋼材(溶接用熱間圧延鋼矢板)を用いる。これにより、溶接ビード形状、溶接環境、材料の違いが溶接部の腐食特性に及ぼす影響を検討する。また、溶接部と一般部を比較、検討することで、溶接部がどのような腐食特性を有するかを明らかにする。

なお、海水中環境を模した腐食促進実験方法が土木学会により規定されている<sup>4)</sup>ため、本研究では同様の実験方法に従う。しかし、この標準実験装置は、比較的小型で、一度に設置できる供試体数が16体に限定されている。本研究では、実験の効率化と高精度化のために標準実験装置の6倍(供試体数: 最大96体)の大きさの装置を新たに開発した。本研究では、開発した実験装置の性能検証を実施するため、まず鋼部材一般部を対象とした基礎的実験を行い、その後、溶接部に対する腐食促進実験を実施した。

## 2. 腐食促進実験装置の性能検証

### 2.1 腐食促進実験装置

海中中部から干満帯下部を模した有機被覆鋼材の標準腐食促進実験として、海洋環境の腐食促進実験方法が土木学会により規定されている<sup>4)</sup>。ここで規定されている腐食促進実験装置(標準実験装置と称す)を図-1に示す。標準実験法では、実験装置内を20ℓの3%NaCl水溶液で満たし、50°Cで一定に保つ。また試験架台下部に通した空気吹き出し口から2.0ℓ/minの空気を噴出させ、空気が直接供試体に当たるように、装置内の試験架台に供試体を立て掛ける。空気吹き出し口に微小な穴の開いたホース(φ6mm)を用いることにより、気泡を実験装置内に拡散させている。空気を噴出させることにより、流速を発生させると共に、鋼材の腐食の進行による溶存酸素の消費を補い、溶存酸素量を維持する。発生した流速により、鋼材への酸素供給量が増大し、鋼材腐食が促進される。

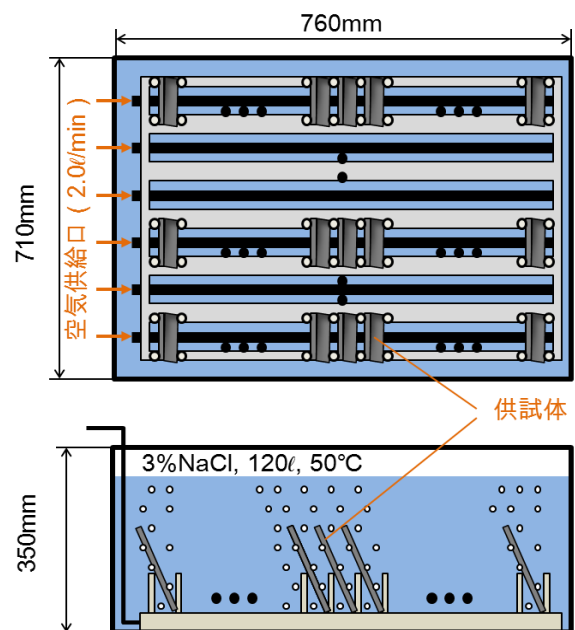


図-2 大型腐食促進実験装置

なお、気泡を供試体に直接当てることで表面の錆が剥がされる波浪の厳しい海洋環境の海中中部を想定している。この実験を28日間連続で実施し、実験終了後の供試体の板厚減少量や重量減少量を計測、評価する。

ところで、標準実験装置は、最大16体の供試体を一度に試験できる大きさであるため、供試体数がそれ以上になれば、複数回の実験が必要になる。そこで本研究では、効率的に実験が実施でき、かつ、同一条件で高精度の結果を得るため最大96体の供試体を実験に供することが可能な大型の装置を製作した。製作した大型腐食促進実験装置の概要ならびに外観を図-2に示す。

本装置の大きさは標準実験装置の約6倍であるため、溶液量は120ℓ、空気供給量は12ℓ/min(2ℓ/min×ホース6本)とした。

### 2.2 腐食促進装置の性能検証実験

溶接部を対象とした実験の実施に先立ち、製作した腐食促進実験装置による腐食速度や腐食量のばらつきなど、実験装置の性能を把握しておく必要がある。このた

め、片面無防食の鋼板一般部を対象とした腐食促進実験を行い、実験装置の性能評価を行った。

鋼板供試体に用いた鋼種は SM400 であり、寸法は、長さ 150mm、幅 70mm、板厚 6mm である。実験に用いた SM400 の機械的性質および化学成分を表-1 に示す。

実験実施時に気泡が直接当たる面(表面)を無防食とし、裏面を防錆テープ、側面をエポキシ樹脂により防食した。

鋼板供試体数は 24 体とし、鋼板供試体の間隔を一定にすると共に、鋼板供試体に当たる気泡を均一にするため、鋼板供試体と同じ寸法のアクリル製のダミー供試体 72 体を実験槽内に設置した。供試体設置位置を図-3 に示す。図中の赤色および灰色の四角形はそれぞれ供試体およびダミーを設置した位置を示している。

各種実験条件は標準実験方法に従い、実験期間は 28 日間とした。

## 2.3 実験結果

### (1) 供試体の表面性状

腐食促進実験終了後の供試体の表面性状を観察した。

表-1 SM400の機械的性質および化学成分

機械的性質				
降伏応力 (MPa)		引張強度 (MPa)	破断伸び (%)	
290		416	46	
化学成分(%)				
C	Si	Mn	P	S
0.12	0.23	1.02	0.013	0.003

実験前の供試体、実験後の錆除去前の供試体、ブラスト処理を施し、表面の錆を除去した後の供試体の外観の一例を図-4 に示す。本研究グループの既往の実験から、平均約 15 分のブラスト処理によって鋼材表面の錆が十分に除去できることが確認済みである<sup>8)</sup>。よって本実験でも、酸洗と比較して簡便なブラスト処理を採用した。

錆除去前では、供試体の表層が赤褐色の錆で覆われ、気泡が流れる向き(図中では下から上方向)に、錆の凹凸が生成されていた。また、気泡の流れによって表層の赤褐色の錆が剥離した箇所では、下層の黒色に近い赤褐色の錆が露わになっていた。

卓上式レーザ深度計(KEYENCE 社製、分解能: 0.1 $\mu$ m)を用いた表面形状計測を実施し、供試体内における腐食量の偏りの有無を確認した。なお、レーザ深度計による表面形状計測では、供試体端部の防錆処理を施した箇所に基準点 3 点を設けた。この基準点は腐食していないので、この 3 点を通る面を基準面とし、基準面からの高さの差として表面形状を測定した。計測点の間隔は縦横 0.3mm である。

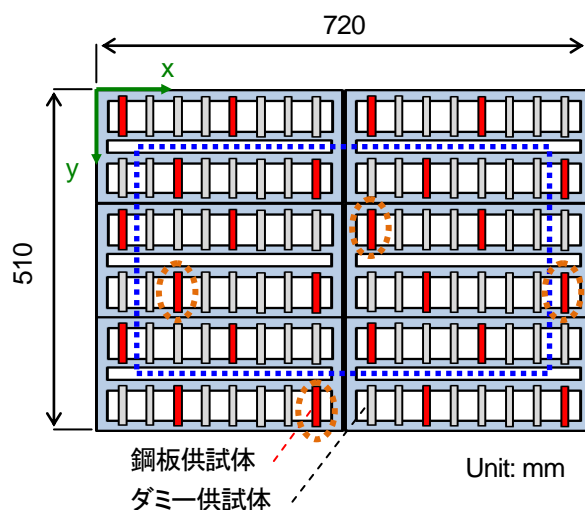


図-3 供試体の設置位置

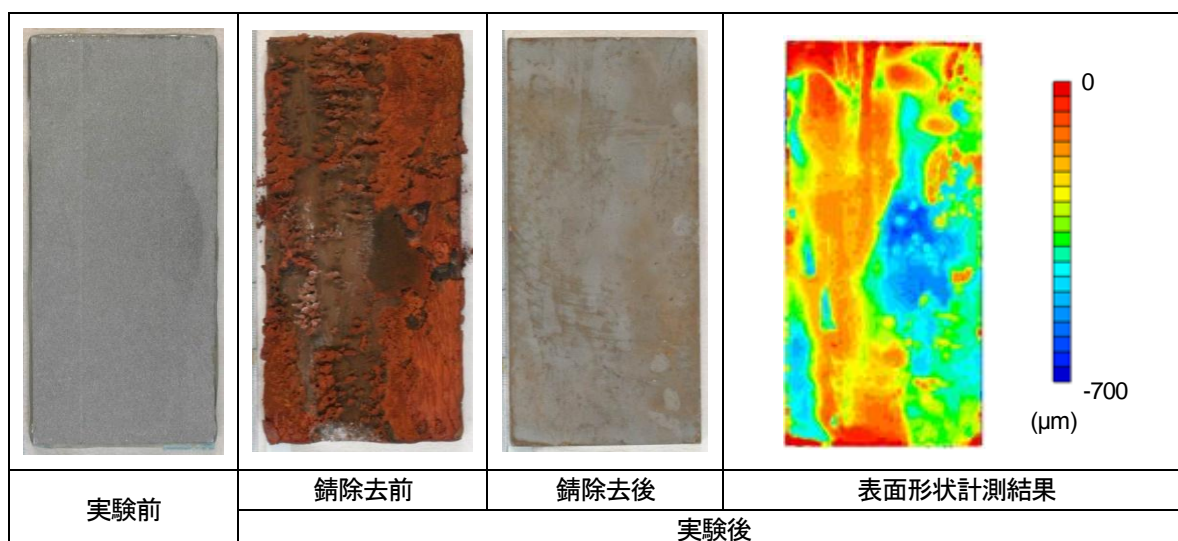


図-4 供試体の表面性状

ブラスト処理により表面の錆を除去した後、供試体の表面形状をレーザ深度計により計測した結果の一例を図-4に示す。レーザ深度計による計測は、供試体4体に対して実施した。

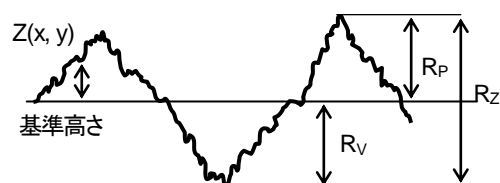
鋼板供試体内において、上下部では腐食後の表面性状に大きな違いがないことが確認できる。左右部を比較すると、腐食後の表面性状は大きく異なっていることがわかる。鋼板供試体表面全体の腐食を定量的に評価するため、表面形状の粗さに注目し、実験前後における表面形状の変化について検討した。鋼板供試体表面の平均高さを基準面として、表面形状の粗さを図-5に示す JIS B 0601 に提示される表面性状パラメータ(輪郭曲線の最大山高さ  $R_p$ 、最大山深さ  $R_v$ 、最大高さ  $R_z$ 、算術平均高さ  $R_a$ )<sup>9)</sup>を用いて評価した。

実験前後における各鋼板供試体の表面性状パラメータを表-2に示す。表中の値は、図-3中の橙色の点線で囲んだ鋼板供試体の表面形状計測結果から求めている。各供試体において、実験前後の  $R_z$  の変化量が大きく、表面性状が大きく変化していると考えられる。実験中、水流によって錆が剥離した箇所と剥離しなかった箇所に表面性状の違いが見られることから、水流(気泡)による錆の剥離の有無が表面性状の変化に影響を及ぼすと考えられる。

## (2) 重量変化量

鋼板供試体の設置位置と重量減少量の関係を図-6(a)に示す。図中の  $x$  および  $y$  は、図-3中の座標に対応している。図中の黒色の点線は平均値  $M(21.66g)$  および平均値  $M$  から標準偏差  $S(2.35g)$  の2倍だけ離れた値( $M \pm 2S$ )を示している。変動係数は約11%であった。

試験槽内の壁面に近い位置に設置した  $y=315mm$  の  $x=700mm$ 、 $y=35mm$  のデータが大きくばらついている。そのため、壁面近くに設置した供試体を除く、図-3の青い点線の枠で囲まれる領域内の供試体に限定して重量減少量を求めたところ、図-6(b)に示すように平均値  $M$  は  $22.03g$ 、標準偏差  $S$  は  $1.24g$  となり、変動係数が約6%となった。

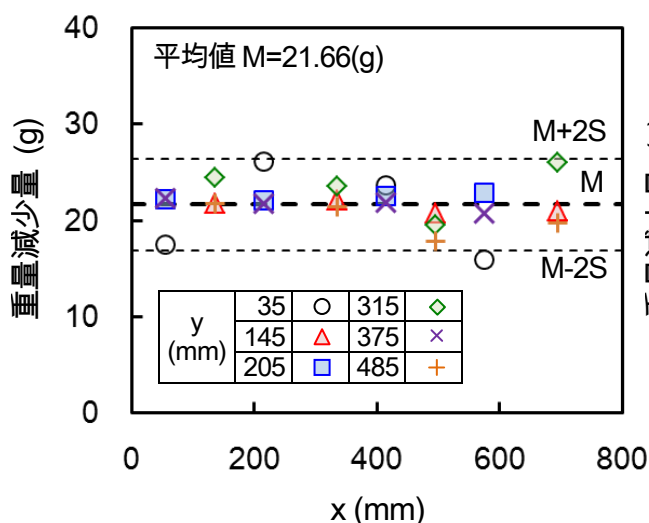


$R_p$ : 輪郭曲線の最大山高さ  
 $R_v$ : 輪郭曲線の最大谷深さ  
 $R_z$ : 輪郭曲線の最大高さ ( $R_z = |R_p| + |R_v|$ )  
 $R_a$ : 輪郭曲線の算術平均高さ  
 $(R_a = \sum |Z(x, y)| / n, n \text{ は測定点数})$

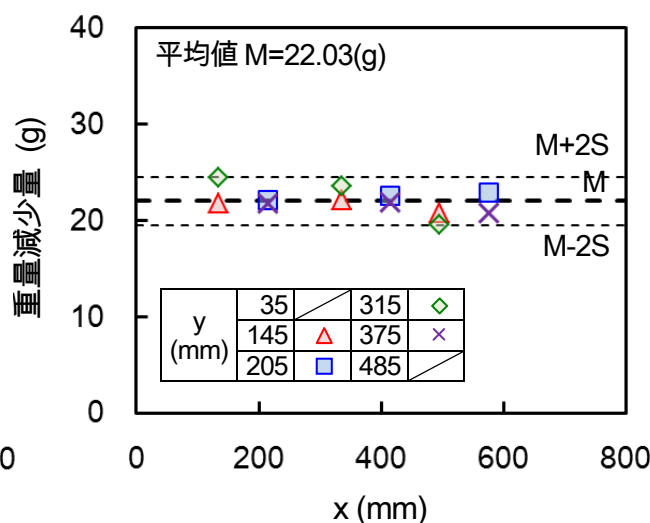
図-5 表面性状パラメータの定義 (JIS B 0601)<sup>9)</sup>

表-2 鋼板供試体の表面性状パラメータ

設置位置(mm)		実験前(mm)				実験後(mm)				実験後－実験前(mm)			
x	y	$R_p$	$R_v$	$R_z$	$R_a$	$R_p$	$R_v$	$R_z$	$R_a$	$R_p$	$R_v$	$R_z$	$R_a$
415	205	0.09	0.07	0.16	0.01	0.24	0.27	0.51	0.09	0.15	0.2	0.35	0.08
135	315	0.1	0.08	0.18	0.01	0.26	0.25	0.51	0.11	0.16	0.17	0.33	0.1
695	315	0.11	0.06	0.17	0.01	0.33	0.37	0.7	0.12	0.22	0.31	0.53	0.11
335	485	0.11	0.08	0.19	0.01	0.23	0.25	0.48	0.09	0.12	0.17	0.29	0.08



(a) 全供試体



(b) 図-3の青い点線内の供試体

図-6 鋼板供試体設置位置と重量減少量の関係



文献 10)で行われた塩水噴霧複合サイクルの大型環境促進実験装置(スガ試験機社製)を用いた既往の研究<sup>10)</sup>では、実験装置内における供試体の設置位置による鋼板腐食量の変動係数が約 10%であったことと比較すれば、実験精度は同等であると考えられる。

全 24 体の供試体を対象に重量減少量から換算した 28 日間の板厚減少量の平均値は 0.26mm(標準偏差 0.03mm)であった。

### (3) 腐食速度

本章で実施した腐食促進実験 28 日間の板厚減少量の平均値(0.26mm)を 1 年間に換算すると、その腐食速度は 3.45mm/year となる。標準実験装置を用いた実験では、重量減少量から換算された腐食速度は 2.65 mm/year<sup>4)</sup>であり、同一のロットの鋼材を用いた標準実験法での腐食速度と比較して、本装置での腐食速度が大きい。標準実験装置の検証実験では、水量 20ℓ に対し、16 体の供試体がい用いられた。本実験装置では、水量 120ℓ に対し、24 体の供試体を用いたため、供試体数に対して、水量が多く、実験装置内の溶液中の錆の濃度が異なることが影響していると考えられる。

また、山沢ら<sup>2)</sup>によると、海洋環境における暴露試験による無防食鋼板の腐食速度は、海中部から干満帯にかけて約 0.1~0.2mm/year という結果が得られている。この腐食速度に対し、本実験装置による無防食鋼板の腐食速度の促進倍率は約 17~35 倍であることが確認できた。

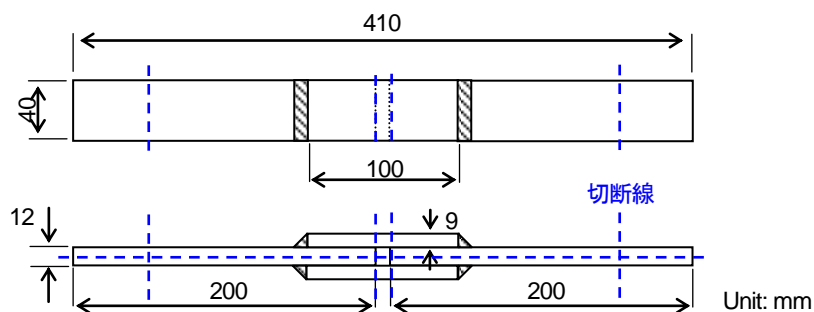
## 3. 腐食促進実験に用いる溶接部供試体

### 3.1 供試体の形状、寸法および材料

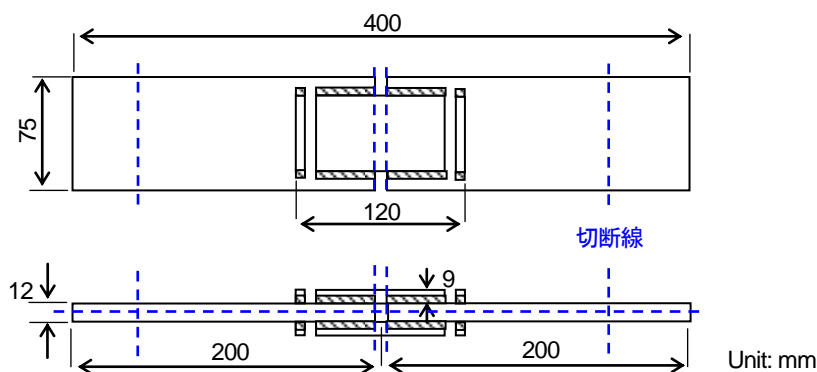
本研究では、JIS Z3131<sup>11)</sup>および JIS Z3132<sup>12)</sup>に規定されている前面すみ肉溶接継手引張試験と側面すみ肉溶接継手せん断試験用に作製した供試体を切断し、腐食促進実験のための供試体を作製した。引張試験およびせん断試験用供試体の形状および寸法を図-7 に、それらから青色の破線の位置で切断し作製した腐食促進実験用供試体の形状および寸法を図-8 に示す。

側面すみ肉溶接供試体(図-7(b), 図-8(b))では、溶接部の始末端部と中央部を切り離すようスリットが設けられているが、これは、溶接始末端部が継手強度に及ぼす影響を除去するためである。腐食促進実験においても、このスリット部および溶接始末端部は腐食量評価領域とはしないこととする。

供試体の裏面は防錆テープ、側面はエポキシ樹脂により防食を施した。また、実験前後の供試体の表面形状を計測する際の基準点とするため、図-8 の緑色の斜線部にも防錆テープにより防食を施した。供試体表面の防錆領域から基準面を設定し、この基準面からの高さの変化量を計測することで、供試体の腐食量を算出する。供試体鋼材の母材は熱間圧延鋼矢板 SY295(JIS A 5528)<sup>13)</sup>と溶接用熱間圧延鋼矢板 SYW295(JIS A 5523)<sup>14)</sup>の 2 種類とし、あて板は SM490 である。溶接金属は、軟鋼、高張力及び

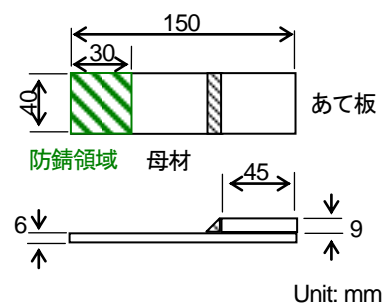


(a) 前面すみ肉溶接継手の引張試験用供試体

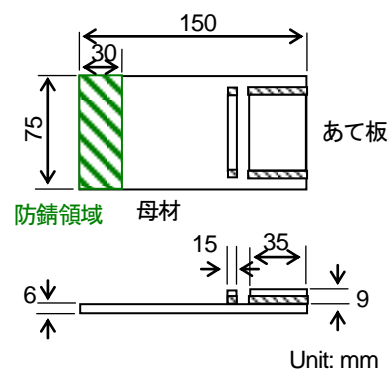


(b) 側面すみ肉溶接継手のせん断試験用供試体

図-7 引張試験およびせん断試験用供試体



(a) 前面すみ肉溶接供試体



(b) 側面すみ肉溶接供試体

図-8 腐食促進実験用供試体

低温用鋼用被覆アーク溶接棒 E4319(JIS Z3211)<sup>15)</sup>である。供試鋼材の機械的性質と化学成分を表-3 に示す。

3.2 供試体の溶接環境および溶接部の形状

水中環境における鋼構造物を新設する場合に限らず、既設の構造物の補修を想定すると、水中において溶接を実施する場合がある。水流の影響や急冷の効果により、水中溶接部のビード形状は、脚長のばらつきが大きい、また止端角の補角が小さくなる等、気中溶接部と比べて大きく異なる<sup>7)</sup>。本実験では、気中と海水中の環境で溶接された供試体<sup>16)</sup>を用い、溶接部の形状の違いが腐食量に及ぼす影響について検討する。

供試体一覧を表-4 に示す。すみ肉溶接の形式(前面と側面)、母材の鋼種(SY295 と SYW295)、溶接環境(気中と水中)の組合せ(2×2×2)による全 8 グループで、合計 24 体の供試体を実験に用いた。

また、すみ肉溶接の形式(前面：T、側面：L)、母材の鋼種(SY295：Y、SYW295：W)、溶接環境(気中：A、水中：W)を記号化することで供試体名を決定した。例えば、前面すみ肉溶接、母材鋼種 SY295、気中溶接の供試体は、記号が TYA となる。

気中溶接と、水中溶接による溶接金属の形状の一例を図-9 に示す。また、各供試体の溶接部の脚長、止端角の補角、のど厚および有効のど厚の計測値を表-5、表-6 に示す。

計測はレーザ深度計を用いて実施し、溶接線方向の平均値として脚長( $S_1$ 、 $S_2$ )を求めた。止端角の補角は、母材

側( $S_1$ )およびあて板側( $S_2$ )の脚長の比から決定した( $\tan^{-1}\alpha = S_1/S_2$ )。側面すみ肉溶接供試体(L シリーズ)については一つの供試体について溶接線が 2 つ存在するので、それぞれの計測結果を示している。またビード形状について、凹形および凸形に分類している。

気中溶接(図-9 左側)の場合、溶接金属はほぼ等脚の三角形となっているが、水中溶接(図-9 右側)の場合、溶接金属はあて板側の脚長( $S_2$ )に比べ、母材側の脚長( $S_1$ )がやや長い。ビード表面の形状は凸形になっているものが多いが、止端角の補角が小さく、気中溶接と比較すると、当て板との溶着部分が少ない。

また、水中溶接供試体の溶接線全長に渡って、止端部にアンダーカットが見られた。また溶着金属表面にピットなどが数個観察されたが、そのまま腐食促進実験に供した。

4. 溶接部供試体に対する腐食促進実験

4.1 実験条件

実験条件は、3.で実施した実験の場合と同じであり、「海洋環境における鋼構造物の耐久・耐荷性能評価ガイドライン」<sup>4)</sup>に示されている標準試験方法に準拠した。

本研究で使用する供試体は、前面すみ肉、側面すみ肉溶接供試体ともに上下非対称の形状となっている。すなわち、供試体の設置方向によって溶接部への気泡の当り方が異なる。供試体の設置方向が腐食量に及ぼす影響を検証するため、図-10 に示す 2 種類の設置方法を採用し、

表-3 溶接供試体に用いた鋼材の機械的性質および化学成分

部位	材料	機械的性質			化学成分(%)				
		降伏応力 (MPa)	引張強度 (MPa)	破断伸び (%)	C	Si	Mn	P	S
母材	SY295	273	497	41	0.30	0.06	0.72	0.016	0.020
	SYW295	392	513	42	0.10	0.23	1.41	0.020	0.005
当て板	SM490	361	532	39	0.16	0.34	1.44	0.015	0.007
溶接金属	JIS E4319	410	460	30	0.10	0.10	0.43	0.015	0.007

表-4 溶接供試体一覧

溶接形式	母材材料	溶接環境	供試体名
前面 すみ肉 (T)	SY295 (Y)	気中(A)	TYA1,2,3
		水中(W)	TYW1,2,3
	SYW295 (W)	気中(A)	TWA1,2,3
		水中(W)	TWW1,2,3
側面 すみ肉 (L)	SY295 (Y)	気中(A)	LYA1,2,3,4
		水中(W)	LYW1,2,3
	SYW295 (W)	気中(A)	LWA1,2
		水中(W)	LWW1,2,3

※括弧内は、供試体名のための記号

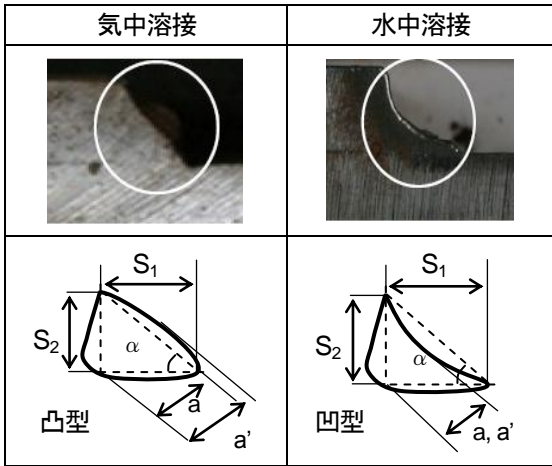


図-9 溶接金属の形状

表—5 前面すみ肉溶接の形状パラメータの計測結果

前面すみ肉溶接	脚長 (mm)		止端角の補角 $\alpha(^{\circ})$	のど厚 a(mm)	有効のど厚 a'(mm)	ビード形状
	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>				
TYA1	7.2	6.5	41.9	4.8	5.8	凸
TYA2	6.0	6.2	45.8	4.3	5.1	凸
TYA3	6.6	6.1	42.8	4.5	5.2	凸
TYW1	7.2	3.3	24.8	3.0	3.4	凸
TYW2	7.5	4.5	31.0	3.4	3.4	凹
TYW3	6.0	3.7	31.7	2.6	2.6	凹
TWA1	3.6	6.5	61.0	3.1	4.3	凸
TWA2	5.7	6.6	49.2	4.3	5.3	凸
TWA3	5.1	6.7	52.6	4.1	4.9	凸
TWW1	7.8	5.8	36.7	4.7	5.5	凸
TWW2	7.5	3.8	26.6	2.8	2.8	凹
TWW3	7.2	3.8	27.5	2.9	2.9	凹

表—6 側面すみ肉溶接の形状パラメータの計測結果

側面すみ肉溶接	1						2					
	脚長 (mm)		止端角の補角 $\alpha(^{\circ})$	のど厚 a(mm)	有効のど厚 a'(mm)	ビード形状	脚長 (mm)		止端角の補角 $\alpha(^{\circ})$	のど厚 a(mm)	有効のど厚 a'(mm)	ビード形状
	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>					S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>				
LYA1	6.6	6.8	45.9	4.7	5.0	凸	6.6	5.9	41.9	4.2	4.4	凸
LYA2	6.9	6.8	44.4	4.8	5.2	凸	7.5	6.3	40.0	4.8	5.2	凸
LYA3	8.1	7.0	41.0	4.5	5.1	凸	8.1	5.6	34.6	3.8	4.3	凸
LYA4	8.1	7.2	41.7	5.0	5.3	凸	7.8	5.6	35.6	4.1	4.4	凸
LYW1	6.6	4.7	35.7	3.9	4.2	凸	6.6	3.9	30.7	3.0	3.3	凸
LYW2	8.1	4.7	29.9	4.0	4.6	凸	8.1	5.3	33.0	4.4	5.0	凸
LYW3	8.7	5.2	31.0	4.5	5.2	凸	7.2	5.4	36.7	4.3	5.1	凸
LWA1	7.5	7.2	43.8	5.2	5.5	凸	7.5	5.4	35.8	4.1	4.1	凸
LWA2	7.2	7.9	47.7	4.6	4.6	凸	8.4	6.0	35.4	4.2	4.2	凸
LWW1	8.7	5.1	30.2	4.4	4.9	凸	8.4	6.1	31.1	4.3	4.8	凸
LWW2	6.6	4.4	33.4	3.3	3.6	凸	6.6	7.5	37.0	4.0	4.3	凸
LWW3	9.0	5.5	31.5	4.7	5.2	凸	9.0	4.3	25.6	3.9	4.4	凸

その結果を比較することとした。あて板が取り付けられている方が下側になる設置方向を下向きとし、その逆の設置方向を上向きと呼ぶこととする。

## 4.2 実験結果

### (1) 腐食状況

前面すみ肉溶接供試体および側面すみ肉溶接供試体計 24 体を用いて腐食促進実験を行った。

供試体の設置位置は、3.における実験の場合と同じ(図—3 参照)であり、72 体のアクリル製ダミー供試体も同様に設置した。

実験後における錆除去前の供試体、ブラスト処理により表面の錆を除去した後の供試体の一例を図—11 に示

す。錆除去前の供試体は、表層が赤褐色の錆で覆われていた。また、気泡の流れによって表層の赤褐色の錆が剥離した箇所では、下層の黒色に近い赤褐色の錆が露わになっていた。一方、錆除去後の供試体表面の腐食状況から、ビード表面やあて板の角部が僅かに滑らかになっていることを確認した。

### (2) 腐食量算出領域の定義

本研究では、レーザ深度計を用いた表面形状計測により、実験前後の表面形状の差として、供試体内の溶接部、母材部およびあて板部の腐食量をそれぞれ算出した。

本実験で用いた供試体の溶接部は、ビード表面に複雑な凹凸がある。また、一部の供試体は止端にアンダーカットがあることも確認している。ビード表面の凹凸部や

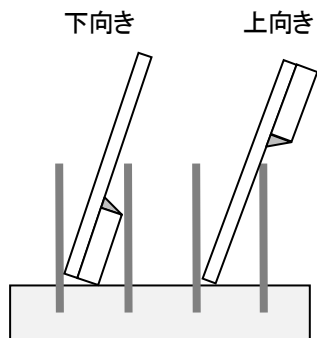


図-10 溶接供試体の設置方向  
(前面すみ肉溶接供試体)

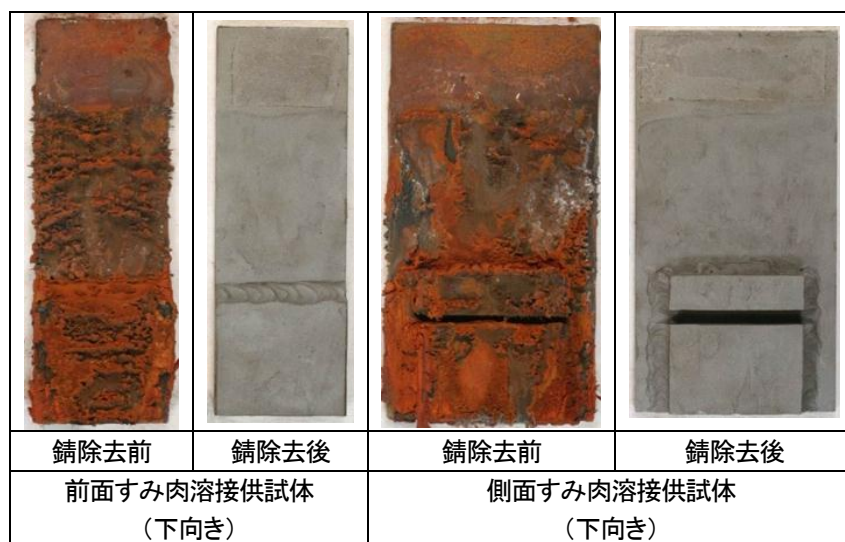


図-11 腐食促進実験後の溶接供試体の性状

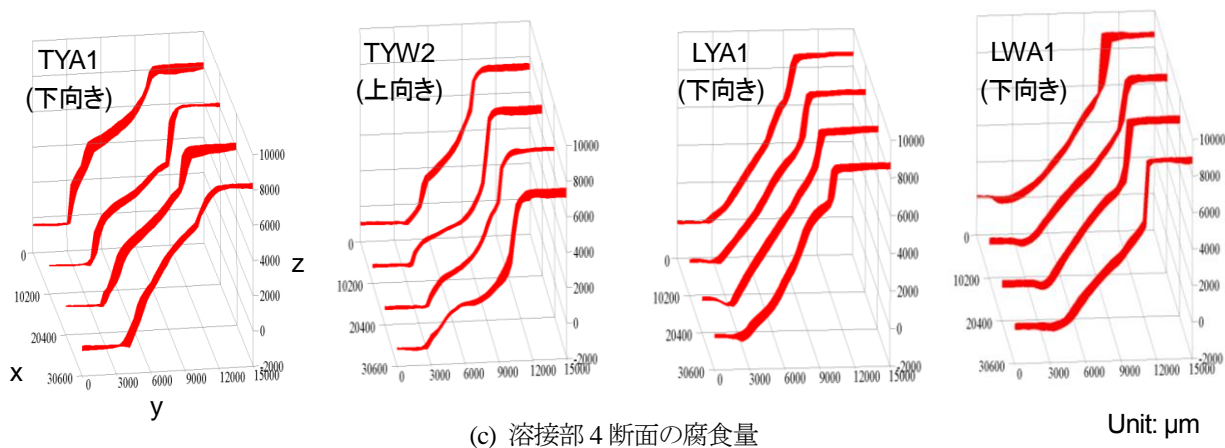
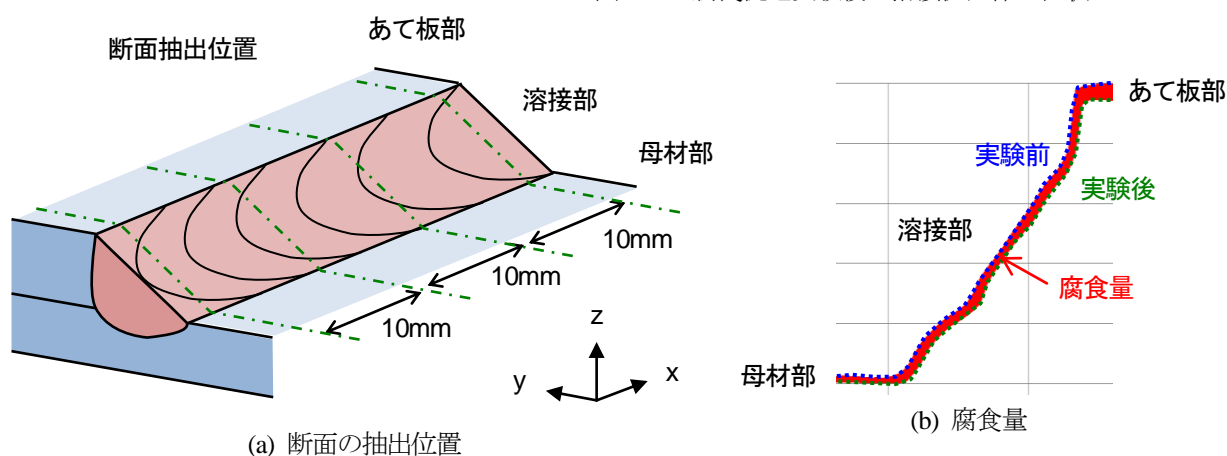


図-12 溶接供試体の腐食量

アンダーカットのような切欠き状の部位が、平滑な部位に比べ、腐食特性が異なるか否かを確認するため、端部を除く溶接長 30mm の範囲の中から等間隔(10mm)に抽出した4つの断面における腐食量を図-12に示す。図-12(b)に示す赤色の領域が、実験前後における溶接部の断面の腐食量を表している。図-12(c)から、多少の変動はあるが、ビード表面の凹凸部や止端部における腐食が、平滑部に比べて大きくなるような局所的に著しい腐食が生じている個所はないことがわかる。

さらに、局所的な腐食の有無を定量的に評価するため、溶接ビードの表面形状の粗さに注目し、実験前後における溶接ビードの表面形状の変化について検討した。すなわち、溶接ビード表面を基準面として、表面形状の粗さを図-5に示す JIS B 0601 に提示される表面性状パラメータ(輪郭曲線の最大山高さ  $R_p$ 、最大山深さ  $R_v$ 、最大高さ  $R_z$ 、算術平均高さ  $R_a$ )<sup>9)</sup>を用いて評価した。

実験前後における各供試体の溶接ビードの表面性状パラメータを表-7に示す。表中の値は、各供試体シリ



ーズの表面性状パラメータの平均値である。

実験前後における最大山高さ  $R_p$ 、最大山深さ  $R_v$  に注目すると、 $R_p$  の平均値は 0.03mm、 $R_v$  の平均値は 0.02mm 減少している。これより、溶接部表面の凹凸が腐食によりやや滑らかになっていると考えられる。また、各断面の平均高さからの凹凸の平均値である算術平均高さ  $R_a$  の変化量は 0.01mm と極めて小さいことを確認した。表面性状パラメータの変化が小さいことは、特定の部位が大きく腐食したわけではなく、表面から腐食が一様に進展したことを意味している。

以上の結果から、今回の実験では、溶接部において特定の箇所が著しく腐食するような傾向はないと判断した。そこで、溶接線長さ方向の端部を除く 30mm の領域に対し、以下に示す方法で溶接部の腐食量を求める。

溶接部の腐食量算出領域を図-13 に青色の枠で示す。図は、実験前後における溶接部の断面形状を示しており、図-12 と同様に赤色の領域が腐食量を表している。

レーザ深度計による表面形状の測定間隔は縦横 0.3mm である。あて板と溶接金属の境界は、あて板の角部を溶接部の腐食量算出領域に含まないように、角部から 0.3mm 離れた位置とした。また、母材と溶接金属の境界は、溶接止端から 0.6mm 離れた位置とした。これは、本実験に用いた供試体の熱影響部が、マクロ写真観察および硬さ試験によって、気中溶接では止端から 1.5~5mm、水中溶接では止端から約 0.5mm であると確認されたため<sup>16)</sup>、止端から 0.6mm の範囲であれば、止端部の形状的特徴が捉えられると共に、溶接部の腐食量算出領域に母材部が含まれることはないと考えたためである。

上述のようにして求めた腐食量は、溶接部の表面積で除することで単位面積当たりの腐食量とした。溶接部の表面積は、溶接部の脚長 ( $S_1$  および  $S_2$ ) から図-13 に示すように単位長さ当りの溶接部の表面積  $d$  を算出し、この  $d$  に溶接線方向の長さ 30(mm) を乗ずることで得た。なお、各供試体の脚長および止端角度の実測値については、表-5 および表-6 に示すとおりである。

一方、母材部およびあて板部については、供試体表面において、端部および防錆領域を含まない 30mm×30mm

の領域を、それぞれの部位の腐食量算出領域とした。

### (3) あて板部および母材部の腐食量

あて板部の腐食量を図-14 に示す。あて板部の材料は全て SM490 であり、供試体の設置向きが異なることのみが条件の違いである。腐食量のばらつきは大きい、供試体の設置向きと腐食量の間に明確な関係はないようである。今後、更なる検討が必要である。

母材部の腐食量を図-15 に示す。母材部に関しては、供試体の設置向きに加えて、材料の違い (SY295 と SYW295) がある。前面すみ肉溶接供試体の場合、SY295 に比べ、SYW295 の平均腐食量は 0.09mm 大きい。しかし、側面すみ肉溶接供試体の場合、両者の平均腐食量は同じであり、標準偏差もほぼ等しい。実験装置内における設置位置や、供試体の設置方向によるばらつきも考慮すると、前面すみ肉溶接供試体で見られた平均腐食量の差は、ばらつきの範囲と言える。

### (4) 溶接部の腐食量

母材材料の違い (SY295 あるいは SYW295) が溶接部の材料特性に影響を及ぼす領域は、母材部と溶着金属部境界近傍の熱影響部であり、本実験で腐食量を算出した領域は、主に溶着金属部である。そのため、算出した腐食量は、溶着金属の材質に依存すると考えられる。すなわち溶接部全体の腐食に及ぼす母材材料の影響は小さい

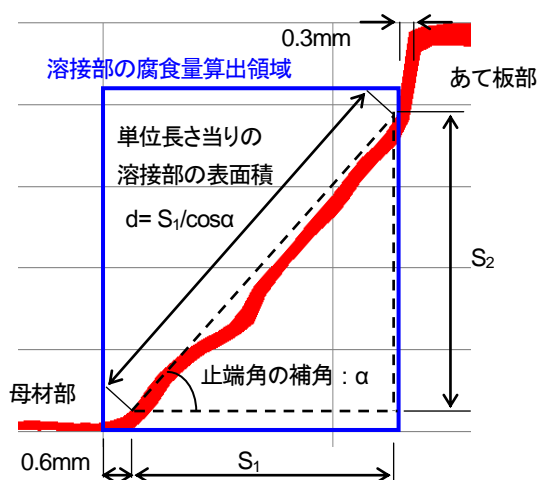


図-13 溶接部の腐食量算出領域と溶接部の表面積

表-7 各供試体シリーズの溶接ビードの表面性状パラメータ

供試体	実験前 (mm)				実験後 (mm)				実験前 — 実験後 (mm)			
	$R_p$	$R_v$	$R_z$	$R_a$	$R_p$	$R_v$	$R_z$	$R_a$	$R_p$	$R_v$	$R_z$	$R_a$
TYA	0.82	0.51	1.33	0.26	0.77	0.48	1.25	0.24	0.05	0.03	0.08	0.02
TYW	0.48	0.46	0.94	0.20	0.53	0.45	0.98	0.20	-0.05	0.01	-0.04	0.00
TWA	1.02	0.78	1.80	0.40	0.95	0.77	1.73	0.39	0.07	0.01	0.07	0.01
TWW	0.57	0.59	1.16	0.29	0.56	0.54	1.10	0.28	0.01	0.05	0.06	0.01
LYA	0.40	0.46	0.86	0.18	0.37	0.47	0.84	0.18	0.03	-0.01	0.02	0.00
LYW	0.58	0.42	1.00	0.22	0.54	0.45	0.99	0.21	0.04	-0.03	0.01	0.01
LWA	0.32	0.52	0.84	0.16	0.28	0.47	0.75	0.15	0.04	0.05	0.11	0.01
LWW	0.45	0.37	0.82	0.17	0.42	0.35	0.77	0.17	0.03	0.02	0.05	0.00
平均値	0.58	0.52	1.10	0.24	0.55	0.50	1.05	0.23	0.03	0.02	0.05	0.01

と考えられる。よって、溶接部については、母材材料の違いを区別せずに腐食量を整理した。

前面すみ肉溶接と側面すみ肉溶接供試体について、供試体の設置向きおよび溶接環境(気中あるいは水中溶接)の違いによって整理した腐食量を図-16に示す。

前面すみ肉溶接、側面すみ肉溶接供試体共に、供試体を上向きに設置した場合に比べ、下向きに設置した場合の平均腐食量がやや大きい。しかし、その差は各供試体の腐食量のばらつき(標準偏差)の範囲内であり、供試体の設置向きが溶接部の腐食量に及ぼす影響を明確に特定することは困難である。

また、供試体の設置方向が同じ場合、溶接環境(気中あるいは水中溶接)の違いによる腐食量の差は小さく、溶接環境による溶接部形状の違いが腐食量に及ぼす影響は小さいことが確認できた。

#### (5) 溶接部と一般部の腐食量の比較

本研究で腐食促進実験に用いた全ての供試体の腐食量を、部位ごとにまとめて表-8に示す。

まず、溶接継手供試体のあて板部および母材部の腐食量に大きな差はなかった。材料の違い、供試体の設置向きが種々異なっているにもかかわらず、それらの条件が腐食量に及ぼ

す影響は小さいことがわかった。本実験では、鋼板一般部としての腐食量は0.23~0.25mmであった。

一方、溶接部については、供試体の設置向き、溶接環境の違いを考慮せずに求めた前面すみ肉溶接供試体の腐食量の平均値は0.25mm、標準偏差は0.026mm(変動係数0.10)であった。同様に、側面すみ肉溶接供試体の腐食量の平均値は0.25mm、標準偏差は0.041mm(変動係数0.16)であった。さらに、前面すみ肉溶接と側面すみ肉溶接の違いを考慮せずに求めた溶接部の腐食量の平均値は0.25mm、標準偏差は0.035mm(変動係数0.14)であった。一般部と比較して、溶接部の腐食量のばらつきが小さい結果となった。一般部に比べ、溶接部では腐食量を算出する領域自体が小さいことが影響している可能性があるが、本実験の範囲ではその原因は不明であり、更なる検討が必要といえる。

以上の結果から、あて板溶接継手に対して実施した本実験の範囲では、母材およびあて板の材料の違い、前面すみ肉溶接や側面すみ肉溶接の形式の違い、そして気中と水中の溶接環境の違いによる溶接金属の形状の違いがあっても、溶接部と一般部の腐食量の平均値の差は小さく、ばらつきや誤差を考慮しても、腐食量がほぼ同じ

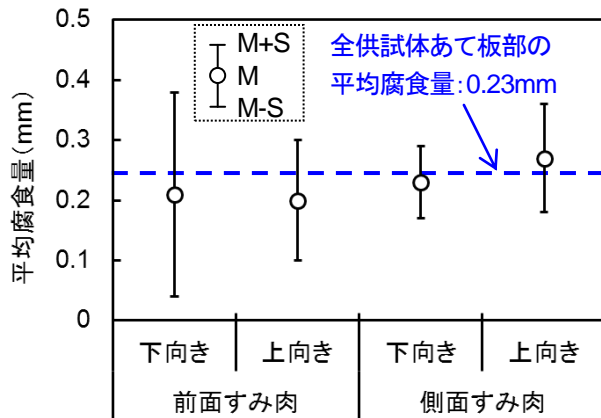


図-14 あて板部の平均腐食量

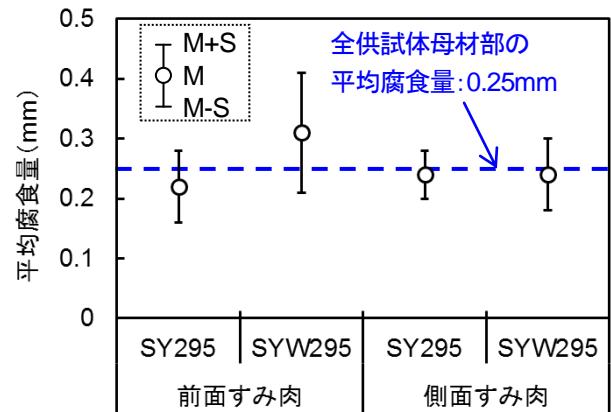


図-15 母材部の平均腐食量

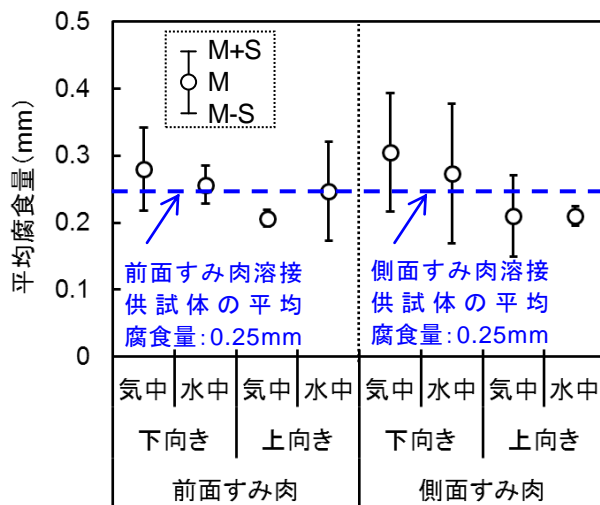


図-16 溶接部の平均腐食量

表-8 各部位の腐食量の比較

腐食量		平均値 (mm)	標準偏差 (mm)	変動 係数
溶接 継手	あて板部	0.23	0.11	0.48
	母材部	0.25	0.075	0.30
	前面すみ肉 溶接部	0.25	0.026	0.10
	側面すみ肉 溶接部	0.25	0.041	0.16
	溶接部 (前面, 側面 区別なし)	0.25	0.035	0.14

となる傾向が見られることがわかった。文献 6)では、溶接金属の余盛を除去し、表面処理を施した溶接部では、溶接金属と母材の異種金属接触により、溶接部の腐食が促進されると報告されている。しかし、本研究では、溶接金属の余盛を除去せず、表面処理を施していない。余盛部分では、異種金属接触の影響は小さく溶接部の優先的な腐食が生じなかったと考えられる。

## 5. 結言

本研究では、前面すみ肉溶接と側面すみ肉溶接された供試体を対象に、海水中を模擬した腐食促進実験を行うことで、海水中環境における鋼溶接部の腐食劣化特性を明らかにするための基礎的検討を実施した。

得られた主な結論を以下に示す。

- 1) 本実験に用いる腐食促進実験装置の性能評価を行う必要があるため、SM400 材の片面無防食鋼板を対象に 28 日間の腐食促進実験を行った。その結果、重量減少量から換算した平均板厚減少量は 0.26mm であり、平均腐食速度は 3.45mm/year となった。海洋曝露試験結果と比較すると、本実験装置による無防食鋼板の腐食速度の促進倍率は、海中部から干満帯までの水中領域における腐食速度の 17~35 倍であることを確認し、腐食促進実験装置として有用であることを示した。
- 2) 本研究で開発した腐食促進実験装置内における供試体の設置位置によって腐食量はばらつくが、その変動係数は約 11%であった。
- 3) 母材にあて板を前面すみ肉溶接および側面すみ肉溶接した供試体を対象に腐食促進実験を実施した結果、溶接部を除く母材部およびあて板部の腐食量は、材料の違いや供試体の設置方向に関係なくほぼ同じ(母材部: 0.25mm, あて板部: 0.23mm)であった。
- 4) 気中および海水中の溶接環境の違いによって、溶接金属の形状は異なるが、本実験の条件では、溶接ビード表面の凹凸部や止端部、ピット部などから局所的に著しい腐食が生じることはなかった。また、気中および水中溶接した供試体の溶接部の平均的な腐食量に有意な差は確認できなかった。
- 5) 本実験の範囲では、前面すみ肉溶接や側面すみ肉溶接の形式の違いや、気中と水中の溶接環境の違いによる溶接金属の形状の違いがあっても、余盛部分を除去せず、表面処理を施していない溶接部の腐食量(0.25mm)は、平坦な一般部の腐食量とほぼ同じであることを確認した。

## 謝辞

本研究の一部は、日本鉄鋼連盟による鋼構造研究・教育助成事業における目的研究助成「補修後性能も考慮し

た港湾鋼構造物のライフサイクル性能評価手法の確立」(研究代表者: 伊藤義人, 平成 22 年~平成 26 年)を受けて行ったものである。また、2. の鋼板供試体は、標準試験装置開発グループから、そこで用いた鋼材の残りを提供していただいた。ここに記して感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 吉崎信樹, 守屋進: 20 年海洋暴露での鋼材腐食と一般塗装鋼材の劣化挙動について, 土木学会論文集, Vol.65, No.2, pp.222-229, 2009.
- 2) 山沢哲也, 野上邦栄, 伊藤義人, 渡邊英一, 杉浦邦征, 藤井堅, 永田和寿: 19.5 年海洋暴露された鋼アングル材の腐食形態, 土木学会論文集 A, Vol.64, No.1, pp.27-37, 2008.
- 3) 小林孝一: 表面被覆した鋼材の海洋環境における腐食性状, 土木学会論文集, Vol.65, No.1, pp.123-135, 2009.
- 4) 土木学会: 海洋環境における鋼構造物の耐久・耐荷性能評価ガイドライン, 丸善, 2009.
- 5) 財団法人沿岸開発技術研究センター: 港湾鋼構造物防食・補修マニュアル(改訂版), 1997.
- 6) 田中義久, 中井達郎, 松下久雄, 丹羽敏男: 船体溶接部に生じる溝状腐食に関する実験的検討, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 5 号, pp.261-268, 2007.
- 7) 福手勤, 阿部正美, 長谷川博行, 松田史朗: 水中溶接された鋼矢板構造物の破断メカニズムと破断モードの改善に関する材料学的研究, 港湾技術研究所報告, 第 36 巻, 第 4 号, 1997.
- 8) 伊藤義人, 坪内佐織, 金仁泰: 環境促進実験による塗替え塗装鋼板の腐食劣化特性に関する研究, 土木学会論文集 A, Vol.64, No.3, pp.556-570, 2008.
- 9) 日本工業規格: JIS B0601 製品の幾何特性仕様 (GPS) — 表面性状: 輪郭曲線方式 — 用語, 定義及び表面性状パラメータ, 2001.
- 10) 伊藤義人, 金仁泰, 太田洋, 貝沼重信: 鋼材の腐食耐久性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.
- 11) 日本工業規格: JIS Z3131, 前面すみ肉溶接継手の引張試験方法, 1976.
- 12) 日本工業規格: JIS Z3132, 側面すみ肉溶接継手のせん断試験方法, 1976.
- 13) 日本工業規格: JIS A5528, 熱間圧延鋼矢板, 2006.
- 14) 日本工業規格: JIS A5523, 溶接用熱間圧延鋼矢板, 2006.
- 15) 日本工業規格: JIS Z3211, 軟鋼, 高張力及び低温用鋼用被覆アーク溶接棒 E3211, 2006.
- 16) Xiao C., Kitane Y. and Itoh Y.: Mechanical Properties of Fillet Weld Joints by Underwater Wet Welding in Repairing Corrosion-Damaged Offshore Steel Structures, Journal of Structural Engineering, Vol.56A, pp.742-755, 2010.

(2012 年 9 月 28 日受付)