

環境促進実験による構造用鋼溶接部の腐食特性および 防食塗装劣化特性に関する基礎的研究

Corrosion and paint coating deterioration characteristics of welded part of structural steel
by accelerated exposure test

廣畑幹人*, 伊藤義人**
Mikihito Hirohata, Yoshito Itoh

*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)
hirohata@civil.nagoya-u.ac.jp

** 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 corrosion characteristics of welded part of structural steel and paint coating deterioration behavior on it, a series of accelerated exposure tests with combined salt water spray cycles were carried out. The degree of corrosion of welded part without any coating was smaller than that of base metal part because of advantageous chemical compositions in anti-corrosion. Although the deterioration from paint defect along the weld toe was larger than that from the cross scribe paint defect in the early stage of the tests, the speed of paint deterioration was slower around the weld toe rather than that around the cross scribe line.

Key Words: Welded part, corrosion, paint coating, accelerated exposure test

キーワード: 溶接部, 腐食, 防食塗装, 環境促進実験

1. 緒言

社会基盤構造物の損傷, 劣化が顕在化してきており, 適切な補修補強による維持管理を行い構造物の長寿命化を図ることの重要性が強く認識されるようになってきている。

鋼橋の主たる損傷の要因のひとつは腐食である¹⁾。そのため, 塗装や金属被覆による防食の適用や, 耐候性鋼の使用により腐食劣化を抑制することが一般的である²⁾。

現在のところ, 鋼橋の腐食対策として防食塗装が最も広く用いられている。防食塗装についてはこれまでに種々の塗装系が実用化され, 実環境における長期間の曝露試験や, 実環境と対応関係がある環境促進実験により防食塗装の長期的性能の検証がなされてきた^{3~8)}。

これらの性能検証実験には, 鋼板に塗装を施し, 塗装にクロスカット等の初期欠陥を設けた試験片が一般に用いられてきた。しかし, 実構造物では鋼板の角部形状に依存して防食塗装の厚さが異なるため, 角部と一般部で防食の劣化特性が異なる^{9, 10)}。また, 形状が複雑なボルト継手部においても, 防食塗装の劣化特性が一般部と異なることが知られている¹¹⁾。すなわち, 鋼構造物の防食

劣化特性を評価するうえで, 評価対象部位の幾何学的形状が及ぼす影響が大きいといえる。

鋼構造物の部材接合に多用される溶接継手は, 溶接ビードがあるため幾何学的形状が平滑ではない。また, 溶接金属と母材の異種金属接触や溶接残留応力の存在等, 幾何学的形状以外の点でも溶接部の腐食劣化特性は母材一般部と異なる。船体構造物では溶接止端に沿って腐食が進行する溝状腐食の事例¹²⁾や, ステンレス鋼によるパイプライン等の円周継手では異種金属接触腐食や応力腐食割れの事例が多数報告されている^{13~15)}。

大気環境に設置されている鋼構造物についても, 鋼床版や鉄塔構造物の一般部に先行して溶接部の防食が劣化した事例が報告されている³⁾。大気腐食環境における鋼構造物の溶接部の腐食特性に関する研究事例は幾つかあるが^{16~19)}, 溶接部に施した防食塗装の劣化特性について検証した研究は少ない。継手部という構造的な重要性から, 溶接部の腐食劣化特性および防食塗装の劣化特性が母材一般部とどのように異なるのかを検討することは, 鋼構造物の維持管理において必要性が高いと考える。

本研究では, 鋼溶接部の腐食特性および防食劣化特性

を明らかにするための基礎的検討を行う目的で、一連の環境促進実験を実施した。鋼板上に溶接ビードを設けた供試体（溶接部供試体と称す）と鋼板のみの供試体（母材供試体と称す）、ならびにそれらに防食塗装を施した供試体を、実環境と相関性が高いとされる S6 サイクル塩水噴霧複合サイクル環境促進実験⁵⁾に供した。300 日間（1200 サイクル）の環境促進実験結果に基づき、溶接部と母材一般部の腐食特性および防食塗装の劣化特性の相違について、溶接部と母材部の幾何学的形状と化学組成の観点から検討、考察した。

2. 無防食溶接部の腐食特性

2.1 実験供試体

防食塗装を施していない母材供試体および溶接部供試体の形状、寸法を図-1 に示す。母材供試体と溶接部供試体の数はそれぞれ 9 体ずつである。

板厚 6mm の SM490A 材を長さ 150mm、幅 70mm に切断し、母材供試体とした。また、母材供試体と同じ鋼板に CO₂ ガスアーク溶接によりビードオンプレート溶接を施した後、溶接始末端を除いて鋼板を長さ 150mm、幅

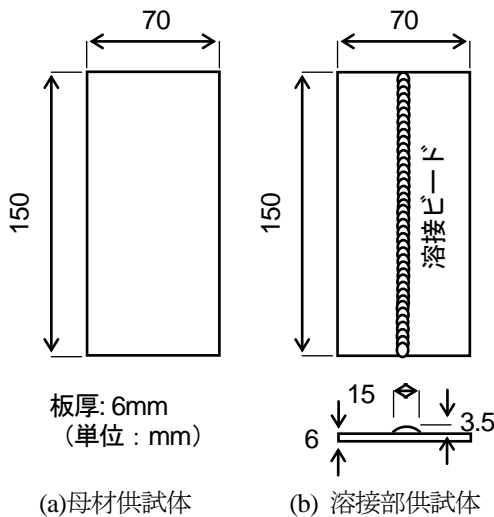


図-1 無防食供試体

70mm に切断し、溶接部供試体とした。用いた溶接ワイヤは JIS Z 3313 に準拠する軟鋼～490MPa 級鋼用のフラックス入りワイヤ (YFW-C50DM, 直径 1.2mm) である。母材および溶接ワイヤの機械的性質（ミルシート値およびカタログ値）を表-1 に、溶接条件を表-2 に示す。また、化学成分の分析結果を表-3 に示す。

母材供試体および溶接部供試体に対し、ISO Sa 2 1/2 のブラスト処理によりミルスケールを除去し、供試体の裏面および側面に防錆テープを貼付した。また、後述する腐食量算出のための基準点を設定するため、表面の端部から幅約 5mm の領域にはエポキシ系樹脂を塗布し、評価対象となる表面内に腐食しない部位を設けた。

ところで、一般に溶接部近傍には引張残留応力が生じ、腐食環境下では溶接部の応力腐食割れの発生が問題となる^{20, 21)}。本研究で使用した供試体は、溶接後にブラスト処理を施したため、溶接部近傍であっても表面には圧縮応力が生成しているものと考えられる²²⁾。母材供試体も同様にブラスト処理により表面に圧縮残留応力が生じているものと思われる。本実験の範囲では、残留応力による母材部および溶接部の腐食特性の違いを検討することはできない。このため、幾何学的形状と化学組成の観点から母材部および溶接部の腐食特性の違いを考察する。

表-1 供試鋼材の機械的性質

	母材	溶接金属
種類	SM490A	YFW-C50DM
降伏応力 (MPa)	413	530
引張強度 (MPa)	542	590
伸び (%)	22	29

表-2 溶接条件

溶接電流 (A)	溶接電圧 (V)	溶接速度 (mm/sec)	入熱量 (J/mm)
210	26	5	1092

表-3 化学組成 (重量%)

	C	Si	Mn	Ni	Cr	Cu	P	S
母材	0.17	0.27	1.5	<0.01	0.015	<0.01	0.013	0.001
溶接金属	0.086	0.42	1.4	<0.01	0.015	0.015	0.013	0.003

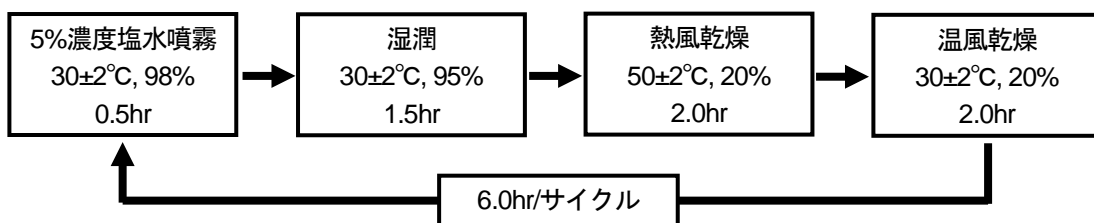


図-2 S6 サイクル実験条件

2.2 実験条件

環境促進実験には複合サイクル試験機（スガ試験機社製，実験槽内寸：幅 2000×奥行 1000×高さ 500mm）を用い，既往の研究⁵⁾で実環境との相関性が高いことが示されている S6 サイクル（JIS Z2371）を採用した．S6 サイクルの詳細を図-2 に示す．この条件は，①実験槽内温度 30±2℃，5%濃度の塩水噴霧を 0.5 時間，②95%の湿潤を 1.5 時間，③50±2℃の熱風乾燥を 2.0 時間，④30±2℃の温風乾燥を 2.0 時間，合計 6 時間を 1 サイクルとするものである．実験期間は 1200 サイクル（300 日）とし，400 サイクル（100 日）ごとに供試体を 3 体ずつ実験槽内から取り出し，外観観察および腐食量の測定を実施した．

供試体の配置角度は，JIS Z2371 に従って鉛直方向から 15° とし，実験槽内における供試体の配置場所による条件の違いを抑制するため，25 日ごとに供試体の配置場所を変化させた．

2.3 実験結果

(1) 外観観察

実験前および 400 サイクルごとに実験槽内から取り出した供試体の外観観察結果を図-3 に示す．図には表面の錆を除去する前の状態と，アルミナを用いたブラスト処理により錆を除去した状態を示している．

母材供試体，溶接部供試体ともに実験サイクルの増加と共に表面の赤錆が増していった．図の「錆除去前」は，各サイクルで温風乾燥が終了した時点で実験槽内から取り出した供試体の表面状態を示している．母材供試体では 1200 サイクルで表面の一部に塩分が残留していた．一方，溶接部供試体では 800 サイクルで溶接止端部に塩分が集中的に残留している様子が目視で確認された．しか

し，ブラストにより錆を除去した後，止端部が集中的に腐食している様子は目視では確認できなかった．

(2) 腐食量

実験前および 400 サイクルごとに実験槽内から取り出した供試体の表面の錆をブラストにより除去した後，レーザ深度計（KEYENCE 社製，分解能 0.1μm）を用いて表面形状を計測した．なお，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づ点 3 点を設けた．実験前後でこの基準点を通る面（基準面）の高さを一致させ，基準面からの高さの変化量として腐食量を求めた．計測点の間隔は縦横 0.3mm である．

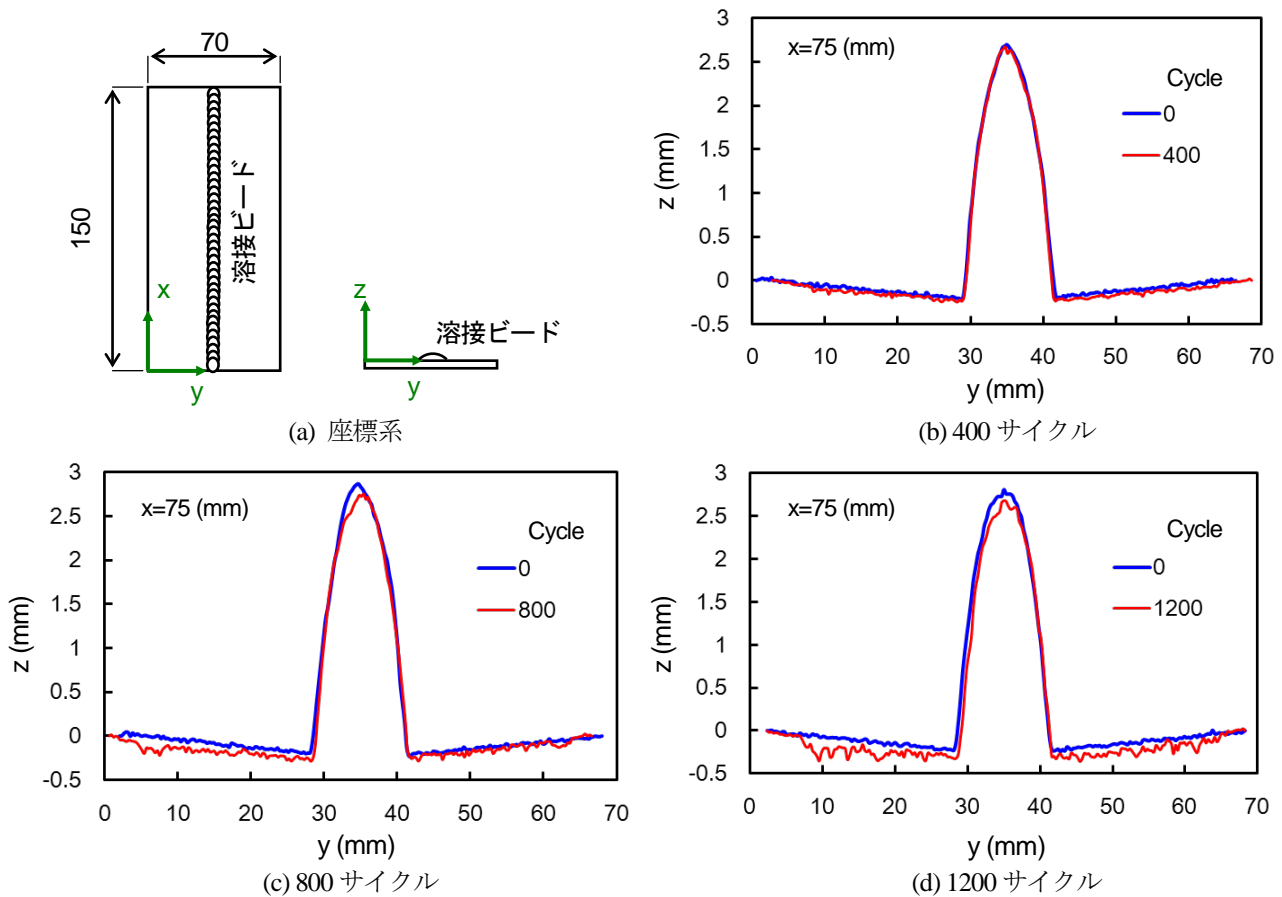
溶接部供試体の表面形状計測結果を図-4 に示す．図の青線が実験前（0 サイクル）の形状であり，赤線が各サイクルの実験後の形状である．これらの二つの線の差が各計測点における腐食量に相当する．400 サイクルでは溶接部，母材部ともに腐食量が小さくその差が明確ではないが，800 サイクルと 1200 サイクルでは腐食量が増加し，溶接部に比べ母材部の腐食量が大きくなっていることがわかる．

部位別の腐食量の違いを検討するため，母材供試体と，溶接部供試体内における母材部ならびに溶接部の代表部位として止端部およびビード頂部の腐食量に注目する．各部位の平均腐食量と実験サイクルとの関係を図-5 に示す．

母材供試体については，供試体表面における中央部の約 100mm×50mm の領域の腐食量の平均値を求めた．また，溶接部供試体の母材部については，供試体中央の溶接部の左右，それぞれ約 100mm×15mm の腐食量の平均値を求めた．溶接止端部および溶接ビード頂部については，供試体端部の防錆領域を除く長さ約 120mm の範囲

サイクル数	0	400		800		1200	
		錆除去前	錆除去後	錆除去前	錆除去後	錆除去前	錆除去後
母材 供試体							
溶接部 供試体							

図-3 無防食供試体の外観観察結果



図—4 表面形状計測結果

において、溶接ビードに直交する各断面内で止端部およびビード頂部の腐食量を求め、それらを平均した。

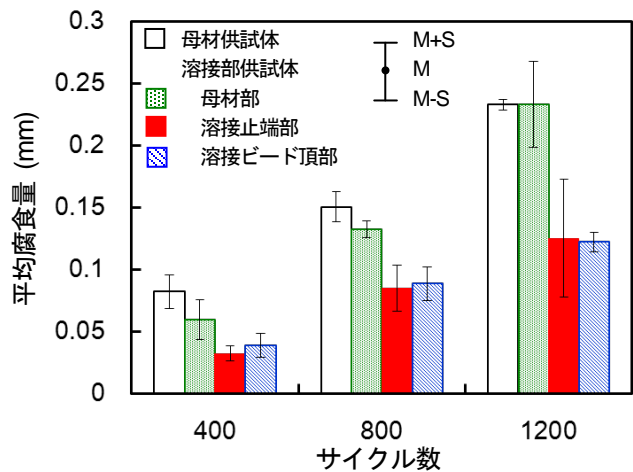
図—5には、母材供試体、溶接部供試体共にそれぞれ3体ずつに対して上述のように算出した各部位の腐食量の平均値 (M) およびその標準偏差 (S) を示している。

母材供試体と溶接部供試体の母材部を比較すると、標準偏差のばらつきはあるものの、400 サイクル、800 サイクルでは母材供試体に比べ溶接部供試体の母材部の平均腐食量が15%程度小さかった。1200 サイクルでは両者の平均腐食量はほぼ同じであった。

一方、溶接止端部およびビード頂部については、標準偏差のばらつきはあるものの、両者の平均腐食量はほぼ同じであった。またこれらは、母材供試体および溶接部供試体の母材部の平均腐食量に比べて小さかった。母材供試体に対する溶接止端部とビード頂部の平均腐食量の割合は、400 サイクルで約51%、800 サイクルで約56%、1200 サイクルで約53%であった。溶接部供試体の母材部に対する溶接止端部とビード頂部の平均腐食量の割合は、400 サイクルで約60%、800 サイクルで約65%、1200 サイクルで約53%であった。

2.4 溶接部腐食の影響因子に関する考察

無防食の溶接部供試体において、止端部は母材部に比べ塩分が残留しやすい傾向にあったことは、溶接部の幾何学的形状によるものと考えられる。しかし、止端部お



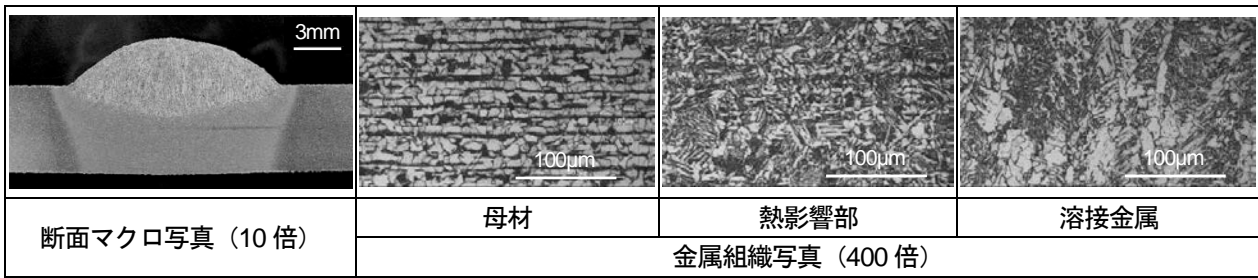
図—5 各部位の平均腐食量

およびビード頂部の腐食量は母材部に比べ少なかった。以下、この理由を考察する。

(1) 金属組織の影響

環境促進実験に用いなかった予備の溶接部供試体を切断し撮影した断面マクロ写真および各部位の金属組織写真を図—6に示す。熱影響部については止端部近傍を撮影した。母材が層状のフェライト・パーライト組織であるのに対し、熱影響部は細粒組織状態になっている。溶接金属は dendritic 状の組織となっている。

熱影響部の中でも溶接金属から離れた位置では加熱温度が比較的低く、粗粒域に相当する箇所では選択的腐食



図—6 断面マクロ写真および金属組織写真

の感受性が高くなると言われている²³⁾。本実験に用いた溶接部供試体の止端部は溶接金属と熱影響部の中でも加熱温度が比較的高い細粒域の境界にある。図—4にも示したように、本実験において溶接部供試体の止端部が他の部位に比べて腐食量が大きくなるような様子は確認できず、金属組織の観点からは止端部では選択的腐食が起こりにくいと言える。

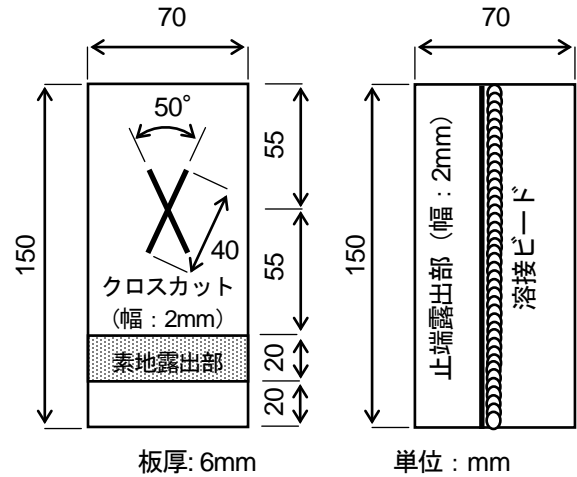
(2) 化学成分の影響

化学成分の観点から、鋼の炭素含有量が多くなると腐食速度が増加することが既往の研究で示されている²⁴⁾。また、Ni、Cr、Cu等の合金元素は鋼の耐食性を向上させる一方で、Mn、Siは鋼の耐食性を低下させることが知られている。さらに、非金属介在物であるMnSの周辺はアノード部となるため、腐食が促進される傾向があることも報告されている²⁵⁾。

表—3に示すように溶接金属の炭素量は母材の約50%であった。また、NiとCrの量は母材と溶接金属で同等であったが、Cuは母材に比べ溶接金属の方が多かった。これらの化学成分の違いは溶接金属の耐食性を向上させる作用を及ぼす。一方、母材と溶接金属に含まれるMn量はほぼ同じであるが、耐食性を低下させるSiとSは母材に比べ溶接金属の方が多かった。しかし、母材のSi量が約0.3%以上になると、溶接金属と母材の腐食速度はほぼ同じになることが既往の研究で示されている²⁰⁾。また、S量を0.005%以下にすることで、溶接金属の選択的腐食を抑制できることが報告されている²⁰⁾。本実験に用いた供試体のSi、Sの含有量は上述の値に近く、溶接金属の耐食性を低下させる化学成分の影響が小さかったものと推察される。

以上のように、本実験に用いた構造用鋼は、母材に比べ溶接金属の方が腐食しにくい組成であったと言える。図—5にも示すように、母材供試体および溶接部供試体の母材部に比べ、溶接止端部および溶接ビード頂部の腐食量は少なかった。また、ばらつきはあるものの、母材供試体に比べ、溶接部供試体の母材部の平均腐食量は少ないか同程度であった。すなわち、溶接部との異種金属接触により、溶接部供試体の母材部が母材供試体よりも大きく腐食することはなかったと考えられる。

一方、溶接部供試体における母材部に対する溶接部の表面積が小さかった（母材部に対する溶接部の表面積の比：約0.4）ことも、異種金属接触腐食の影響を小さくす



(a) 母材供試体 (名古屋大学型ウェザロ供試体) (b) 溶接部供試体

図—7 防食供試体

表—4 C-5 塗装仕様

	塗料名	使用量 (g/m ²)	目標膜厚 (µm)
素地調整	ブラスト ISO Sa 2 1/2	—	—
防食下地	無機ジンクリッチ ペイント	600	75
ミスト コート	エポキシ樹脂塗料 下塗り	160	—
下塗り	エポキシ樹脂塗料 下塗り	540	120
中塗り	ふっ素樹脂塗料 中塗り	170	30
上塗り	ふっ素樹脂塗料 上塗り	140	25

る要因であったと考えられる。一般の鋼構造物においても母材部に対する溶接部の表面積は小さいため、本実験と同様の傾向になるものと推測される。

3. 溶接部における防食塗装の劣化特性

3.1 実験供試体

防食塗装した母材供試体と溶接部供試体を図—7に示す。これらは2.の無防食供試体に表—4に示すC-5塗装系の防食を施したものである²⁾。母材供試体は、防食塗装の劣化特性を検討した既往の研究で多数用いられて

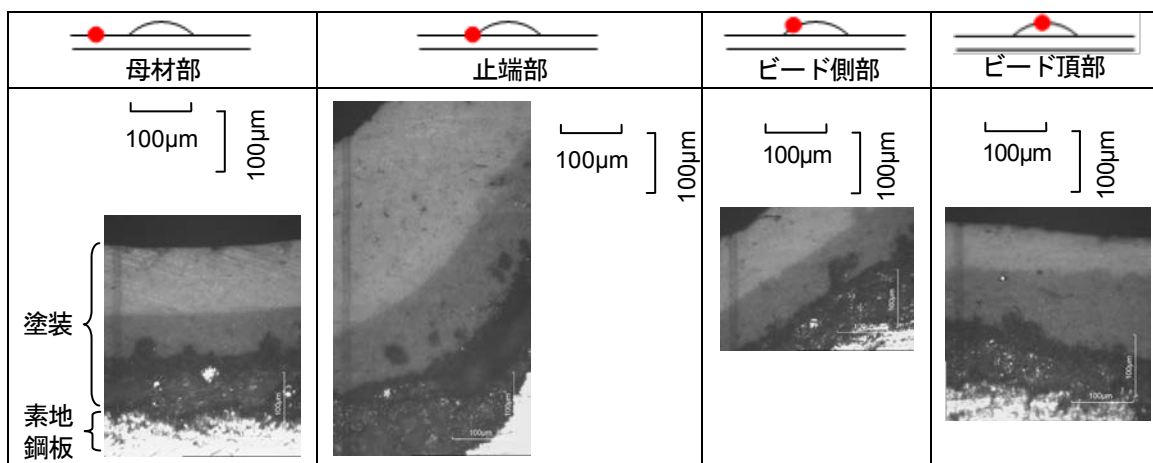


図-8 防食溶接供試体の断面写真

表-5 各部位の膜厚計測結果

部位	膜厚 (μm)	
	平均値	標準偏差
母材部 (膜厚計)	358 (349)	12 (53)
止端部	481	26
ビード側部	313	18
ビード頂部	221	48
目標値	250	—

いる名古屋大学型ウェザロ供試体である^{6~8)}。後述する溶接部供試体の止端露出部の幅と統一するため、クロスカットの線幅は2mmとした。

溶接部供試体については、実溶接構造物の止端部に発生した疲労き裂による防食塗装の損傷を模擬し、片方の溶接止端部に直線状の鋼板素地露出部を設けた(止端露出部と称す)。すなわち、溶接止端部に幅2mmのマスキングテープを貼付してから塗装を行い、乾燥後にこれを剥がすことで止端部の鋼板素地を露出させた。

無防食供試体と同様、防食供試体の数は母材供試体と溶接部供試体共に9体ずつである。

母材供試体および溶接部供試体の母材部については、電磁膜厚計により膜厚を測定することができたが、形状が平滑でない溶接部については膜厚を測定することができなかった。よって、溶接部供試体を切断し、断面を観察することで溶接部の膜厚を測定した。溶接部の切断面の例を図-8に示す。

1つの断面につき母材部、溶接止端部、溶接ビード側部および頂部4箇所の観察を実施した。5つの断面に対し撮影した顕微鏡写真から膜厚を測定し、その平均値として求めた各部位の膜厚を表-5に示す。母材部については、電磁膜厚計を用いて各供試体につき5点の膜厚を計測した結果を括弧内に併記している。

母材部に比べ、止端部の膜厚は130μm程度厚く、ビード側部の膜厚は40μm程度薄かった。また、ビード頂部の膜厚は母材部に比べ130μm程度薄かった。本実験

では、供試体を水平に設置しスプレーにより塗装したため、ビード頂部および側部では塗料が流れ、平坦な母材部に比べ膜厚が薄くなったものと考えられる。一方、止端部には塗料が滞留し、膜厚が比較的厚くなったものと推察される。ビード頂部以外の部位はC-5塗装系の目標膜厚(250μm)²⁾を満足していた。ビード頂部の膜厚はC-5塗装系の目標膜厚に達していなかったが、鋼道路橋防食・塗装便覧に記載される基準²⁾、すなわち、測定値の最小値は目標膜厚合計値の70%以上であると共に、測定値の標準偏差は目標膜厚合計値の20%を超えていないことを確認した。また、目視では各部位の塗装に損傷や異常はないことを確認した。

3.2 実験条件

実験条件および実験期間は2.2と同様であり、300日間(1200サイクル)のS6サイクル環境促進実験を実施した。100日(400サイクル)ごとに実験槽内から供試体を3体ずつ取り出し、表面の付着塩分を除去し外観を観察した。また、レーザ深度計を用いて供試体の表面形状を計測し、計測結果から塗装のふくれを測定した。

3.3 実験結果

(1) 外観観察

実験前および400サイクルごとに実験槽内から取り出した供試体の外観観察結果を図-9に示す。母材供試体、溶接部供試体ともに実験開始から400サイクルではクロスカット部、素地露出部および止端露出部において赤錆の発生が確認された。その後、実験サイクルの増加と共に錆量が増加したが、800サイクル、1200サイクル経過後も上記の塗装初期欠陥以外の箇所では錆の発生は確認されなかった。

(2) 母材供試体の表面形状

各サイクルの実験終了後、レーザ深度計を用いて供試体の表面形状を計測した。表面形状計測では、供試体端部の塗装健全部に基準点3点を設けた。計測点の間隔は無防食供試体と同じ縦横0.3mmである。

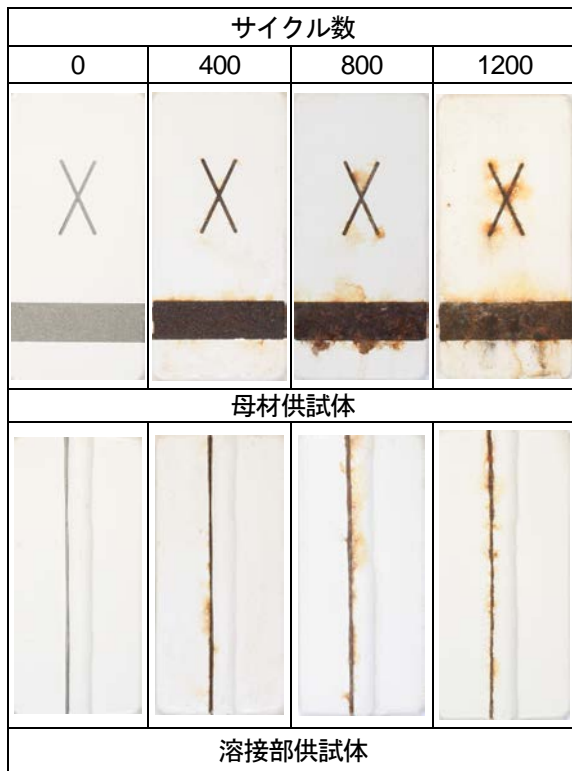


図-9 防食供試体の外観観察結果

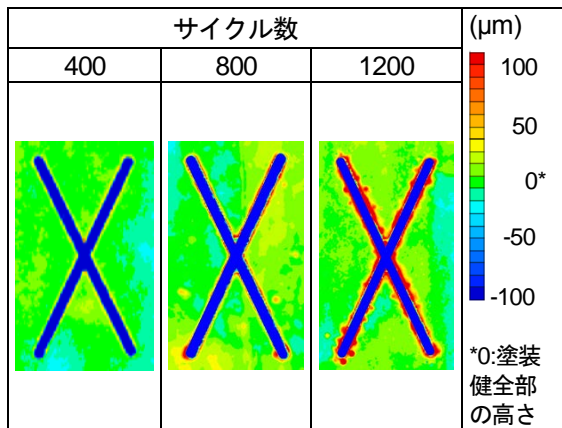


図-10 クロスカット周辺の表面形状計測結果

母材供試体のクロスカット部周辺の表面形状計測結果を図-10に示す。クロスカット部周辺において素地鋼材の腐食による塗装のふくれが観察された。供試体下部の素地露出部においても、素地鋼材と塗装の境界部で塗装のふくれが発生し、実験サイクルの増加と共にふくれが進展した。

(3) 溶接部供試体の表面形状

レーザ深度計を用いて溶接部供試体の表面形状を計測した結果を図-11に示す。図には、各実験サイクル終了後における供試体の3つの断面($x=37.5, 75, 112.5$ (mm))の表面形状を示しており、座標系は図-4(a)に示したものと同一である。

図中、点線で丸く囲った領域は止端露出部であるが、この周囲に実験サイクルの増加と共に塗装のふくれが確認された。止端露出部の母材側(図の左側)、溶接ビ

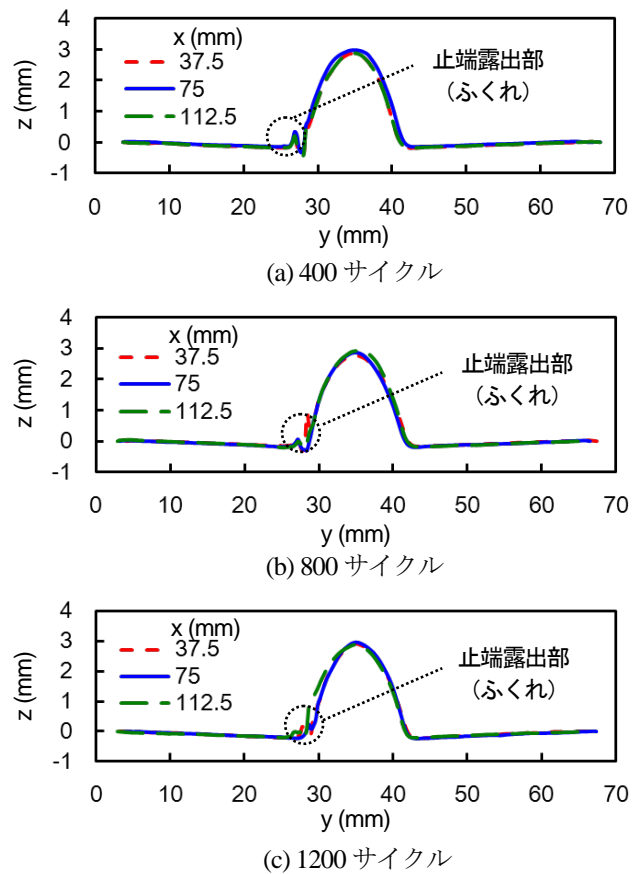


図-11 溶接部供試体の表面形状計測結果 (3断面)

ード側(図の右側)の両方にそれぞれ塗装のふくれが確認された。

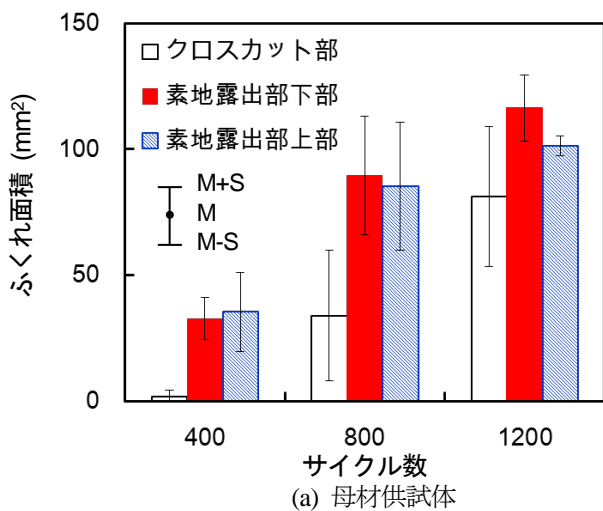
(4) ふくれ面積の推移

塗装欠陥部の素地鋼材が露出している部分からの錆の広がりおよび塗装の損傷を評価する指標として、塗装のふくれ面積を用いることの有効性が既往の研究により示されている^{6~8)}。そこで、本研究においても塗装のふくれ面積に注目し、溶接部供試体の塗装の劣化特性について検討する。

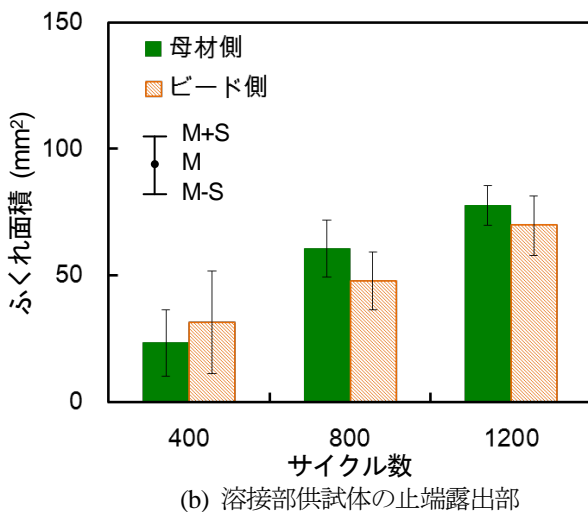
なお、本研究におけるふくれ面積の定義は、塗装の健全部から $50\mu\text{m}$ 以上の塗装の隆起が生じた領域の面積とした^{6~8)}。塗装の健全部は、母材供試体ではクロスカット部および素地露出部から離れた位置で塗装の劣化、損傷が確認されていない領域とした。溶接部供試体においては、素地鋼材を露出させていない溶接止端部(図-11、溶接ビードの右側の止端部)周辺の領域とした。

母材供試体のクロスカット部および素地露出部の上側、下側における塗装のふくれ面積の推移、また、溶接部供試体の止端露出部の母材側とビード側における塗装のふくれ面積の推移を図-12に示す。図には、母材供試体および溶接部供試体3体ずつの各部位のふくれ面積の平均値(M)および標準偏差(S)を示している。

母材供試体のクロスカット部では、400サイクルではほとんどふくれが生じていなかったが、その後の実験サイクルの増加と共にふくれ面積が増加した。



(a) 母材供試体



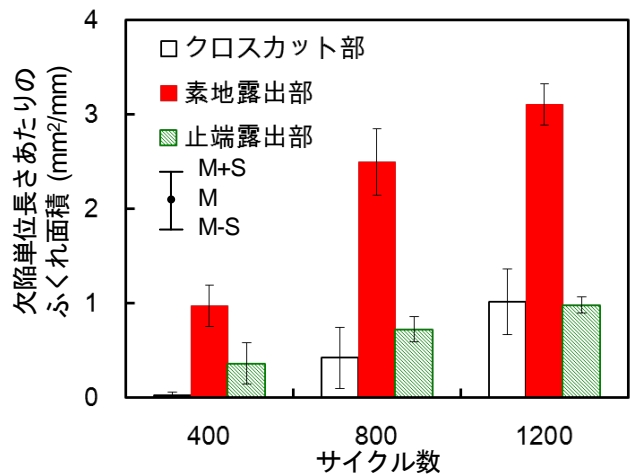
図—12 ふくれ面積の推移

素地露出部上部と下部については 400 サイクルの時点でふくれ面積が約 34mm^2 となっており、その後、800 サイクルでは約 87mm^2 となった。800 サイクルまでは素地露出部上部および下部のふくれ面積はほぼ同じであったが、1200 サイクルの時点では素地露出部上部に比べ下部の方がふくれ面積が約 15% 大きくなった (上部: 101mm^2 , 下部, 116mm^2)。

一方、溶接部供試体の止端露出部については、400 サイクルの時点で母材側のふくれ面積が約 23mm^2 、ビード側のふくれ面積が約 31mm^2 であった。その後、800 サイクルおよび 1200 サイクルではビード側に比べ母材側のふくれ面積が大きくなり、800 サイクルの時点で母材側のふくれ面積がビード側のふくれ面積の 1.27 倍になった (母材側: 約 61mm^2 , ビード側: 約 48mm^2)。1200 サイクルの時点では、母材側のふくれ面積がビード側のふくれ面積の 1.11 倍になった (母材側: 約 78mm^2 , ビード側: 約 60mm^2)。

3.4 塗装のふくれに対する考察

本研究で用いた母材供試体および溶接部供試体の塗装初期欠陥は、形状および寸法が異なるため、これらの欠



図—13 欠陥単位長さあたりのふくれ面積の推移

陥部のふくれ面積を直接比較することはできない。よってここでは、以下に示す方法で各塗装欠陥部のふくれ面積を比較する。

クロスカット部では、線状欠陥の左右両側に塗装のふくれが生じ、線状欠陥の交差部も含めてふくれ面積を算出した。これに対し素地露出部では露出部の上側および下側、止端露出部については母材側およびビード側に分けてふくれ面積を算出した。そこで、素地露出部および止端露出部をそれぞれひとつの塗装欠陥部と見なし、素地露出部の上側および下側のふくれ面積を足し合わせ、止端露出部の母材側とビード側のふくれ面積を足し合わせたものをそれぞれ素地露出部および止端露出部のふくれ面積とした。さらに、各塗装欠陥部のふくれ面積算出領域 (長さ) が異なるため、これを統一するために各塗装欠陥部のふくれ面積を欠陥部の長さ (クロスカット部: $40\text{mm} \times 2$ 本, 素地露出部: 70mm , 止端露出部: 150mm) で除し、単位長さあたりのふくれ面積を求めた。

各塗装欠陥部の単位長さあたりのふくれ面積の推移を図—13 に示す。同じ線状の欠陥であるクロスカット部と止端露出部を比較すると、400 サイクルの時点ではクロスカット部には塗装のふくれがほとんど発生していなかったが、止端露出部には塗装のふくれが発生していた。その後の 800 サイクル、1200 サイクルの過程では止端露出部よりもクロスカット部のふくれ面積の増加の度合いが大きく、1200 サイクルではクロスカット部と止端露出部の単位長さあたりのふくれ面積がほぼ等しくなった。

一方、クロスカット部や止端露出部のような線状の欠陥に比べ、面状の欠陥である素地露出部の単位長さあたりのふくれ面積は大きかった。1200 サイクルでは、素地露出部の単位長さあたりのふくれ面積はクロスカット部および止端露出部の単位長さあたりのふくれ面積の 3.12 倍であった。

以上より、本実験の範囲では、溶接止端部に設けた線状の素地露出部から発生する塗装の劣化 (ふくれ) の進展挙動は、同じ線状の欠陥であるクロスカット部とは異なることがわかった。すなわち、クロスカット部よりも

止端露出部の方が早期に劣化が生じるが、その後の塗装劣化の進展はクロスカット部よりも止端露出部の方が遅かった。

2. に示したように、本実験で用いた供試体では母材に比べ溶接金属の方が腐食しにくい化学組成であった。また、図-8および表-5に示すように、止端部の膜厚が母材部に比べ厚くなっていた。既往の研究では、塗装の膜厚が厚いほど、塗装の劣化に伴う付着力の低下が抑制されることが報告されている²⁶⁾。すなわち、母材供試体のクロスカット部に比べ、止端露出部では素地鋼材の腐食進行が遅いことに加え、塗膜が厚く付着力が低下しにくいため、塗装の劣化が抑制されたと考えられる。

一方、面状の欠陥である素地露出部と比べると、止端露出部の塗装の劣化の度合いは小さいことがわかった。塗装欠陥の単位長さあたりのふくれ面積を塗装劣化の指標とすると、1200 サイクルの環境促進実験の範囲では、止端露出部における塗装の劣化は素地露出部における塗装の劣化の30~40%程度であることがわかった。

4. 結言

構造用鋼溶接部の腐食特性および防食劣化特性を明らかにするため、鋼板上に溶接ビードを設けた溶接部供試体と鋼板のみの母材供試体、ならびにそれらにC-5 塗装系の防食を施した供試体を300日間(1200サイクル)のS6 サイクル塩水噴霧複合サイクル環境促進実験に供し、溶接部と母材一般部の腐食特性および防食塗装の劣化特性の相違について検討、考察した。

得られた主な知見を以下に示す。

- (1) 無防食の溶接部供試体では止端部に塩分が滞留しやすい傾向があることを目視の範囲で確認した。
- (2) 無防食の母材供試体と溶接部供試体の母材部を比較すると、400 サイクル、800 サイクルでは母材供試体に比べ溶接部供試体の母材部の平均腐食量は15%程度小さかった。1200 サイクルでは両者の平均腐食量はほぼ同じであった。
- (3) 無防食の溶接部供試体の止端部とビード頂部の平均腐食量はほぼ同じであり、これらは溶接部供試体の母材部および母材供試体の平均腐食量に比べ小さかった。1200 サイクルの実験終了時点では、止端部およびビード頂部の腐食量は、母材供試体および溶接部供試体の母材部の平均腐食量の約53%であった。
- (4) 本研究で用いた供試鋼材では、母材に比べ、溶接金属には耐食性の観点から有利となる元素(C, Cu)が多く含まれていた。一方、溶接金属には耐食性の観点から不利となるSi, Sが母材よりも多く含まれていたが、その量は鋼材の腐食に及ぼす影響が小さい範囲にあることを確認した。
- (5) 溶接部は幾何学的形状が平滑でなく塩分が残留しやすい傾向にあったにも関わらず、母材部に比べ溶接

部の腐食量が少なかった主たる要因は、母材と溶接金属の化学組成の違いであることを実験結果は示唆していた。化学組成の観点からは溶接金属よりも母材の方が腐食しやすいと言えるが、溶接部との異種金属接触により、溶接部供試体の母材部が母材供試体よりも大きく腐食することはなかった。溶接部供試体における母材部に対する溶接部の表面積が小さかった(母材部に対する溶接部の表面積の比:約0.4)ことも、異種金属接触腐食の影響を小さくする要因であったと考えられる。

- (6) 溶接部供試体を水平に設置してスプレーにより防食塗装を施した場合、ビード頂部では塗料が流れ、平坦な母材部に比べ膜厚が130 μm 程度薄くなった。ビード頂部ではC-5 塗装系の目標膜厚を満足していなかったが、膜厚の最小値および標準偏差は鋼道路橋塗装・防食便覧に記載される基準の範囲内にあることを確認した。同様にビード側部は母材部に比べ膜厚が40 μm 程度薄かったが、C-5 塗装系の目標膜厚(250 μm)を満足していた。一方、止端部には塗料が滞留し、膜厚が母材部よりも130 μm 程度厚かった。
- (7) 塗装欠陥の単位長さあたりのふくれ面積を塗装劣化の指標とすると、本実験の範囲では、溶接止端部に設けた素地露出部からは、同じ線状の欠陥であるクロスカット部よりも早期に劣化が生じたが、その後の劣化の進展はクロスカット部よりも溶接止端部の方が遅かった。溶接金属は母材部よりも腐食しにくい化学組成であると共に、止端部の膜厚は母材部よりも厚かったため、母材部に比べ溶接止端部の塗装の劣化が抑制されたと考えられる。
- (8) 面状の欠陥である素地露出部と比べると、溶接止端部の直線状の素地露出部の塗装の劣化は少なかった。1200 サイクルの環境促進実験の範囲では、溶接止端部における素地露出部の単位長さあたりのふくれ面積は、母材部の面状の素地露出部のふくれ面積の30~40%程度であった。
- (9) 本研究で実施した大気腐食環境を模擬した環境促進実験の範囲では、溶接部の腐食および防食塗装の劣化の進展が母材一般部よりも早くなることがなかった。大気環境に設置される鋼構造物の維持管理の観点からは、溶接部の防食塗装に対し母材一般部以上の注意を払う必要性は低く、防食塗装に関しては溶接部も母材一般部と同様に取り扱える可能性があることを結果は示唆していた。

謝辞

本研究の一部は公益財団法人スガウエザリング技術振興財団 第31回研究助成(平成24年度)を受けて行った。また、実験結果の分析には日新製鋼株式会社 堀川裕史氏の協力を得た。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 名取 暢, 西川和廣, 村越 潤, 大野 崇: 鋼橋の腐食事例調査とその分析, 土木学会論文集, No. 668/I-54, pp.299-311, 2001.
- 2) (社)日本道路協会: 鋼道路橋防食・塗装便覧, 丸善, 2005.
- 3) (社)日本鋼構造協会: 重防食塗装, 技報堂出版, 2012.
- 4) 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.
- 5) 伊藤義人, 岩田厚司, 貝沼重信: 鋼材の腐食耐久性評価のための環境促進実験とその促進倍率に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol. 48A, pp. 1021-1029, 2002.
- 6) 金 仁泰, 伊藤義人, 肥田達久, 小山明久, 忽那幸浩: 環境促進実験を用いた鋼橋塗装系の腐食劣化評価, 構造工学論文集, Vol.52A, pp.803-812, 2006.
- 7) 伊藤義人, 清水善行, 小山明久: 酸性雨噴霧および塩水噴霧複合サイクル環境促進実験による鋼橋塗装の耐久性に関する研究, 土木学会論文集 A, Vol. 63, No. 3, pp.506-517, 2007.
- 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) 清水善行, 伊藤義人, 金 仁泰: 角部形状が鋼橋防食性能に与える影響に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol. 53A, pp.825-833, 2007.
- 10) 伊藤義人, 清水善行, 北根安雄: 複合サイクル環境促進実験を用いた鋼板角部形状の塗装防食耐久性に関する研究, 土木学会論文集 A, Vol. 66, No. 1, pp. 68-78, 2010.
- 11) National Research Council: Maintenance Issues and Alternate Corrosion Protection Methods for Exposed Bridge Steel, National Cooperative Highway Research Program, Synthesis 257, Transportation Research Board, 1998.
- 12) 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.
- 13) 山手利博, 藤井哲雄, 松島俊久, 河村久和, 中村 勉, 南雲一郎: 設備配管の異種金属接触腐食の防止に関する実験的研究, 空気調和・衛生工学論文集, No. 99, pp. 11-18, 2005.
- 14) 西川 聡: 原子力発電プラントにおけるニッケル基600合金用溶接金属の応力腐食割れ(SCC)とその防止対策, 高温学会誌, Vol. 37, pp.186-191, 2011.
- 15) T. G. Gooch: Stress Corrosion Cracking of Welded Joints in High Strength Steels, Welding Research Supplement, pp. 287-298, 1974.
- 16) 山田健太郎, 村上 眞, 近藤明雅, 菊池洋一: 大気暴露された無塗装の耐候性鋼および普通鋼溶接継手の疲れ強さ, 土木学会論文集, No.337, pp.67-74, 1983.
- 17) 山田健太郎, 村上 眞, 近藤明雅, 菊池洋一: 10年間大気暴露した耐候性鋼と普通鋼溶接継手の疲労挙動, 土木学会論文集, No.489/I-27, pp.121-127, 1994.
- 18) 貝沼重信, 細見直史, 金 仁泰, 伊藤義人, 柿木信浩: 面外ガセット溶接継手の腐食特性と疲労挙動に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.49A, pp.707-715, 2002.
- 19) 田辺篤史, 佐々木栄一, 三木千壽: 環境条件に適した耐候性鋼材の選定法の提案, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.68, No.3, pp.610-622, 2012.
- 20) 松島 巖: 溶接部の腐食 (II) 炭素鋼の溶接部の腐食と対策, 溶接学会誌, 第61巻, 第2号, pp. 76-81, 1992.
- 21) 松島 巖: 溶接部の腐食 (IV) 溶接部の応力腐食割れと対策, 溶接学会誌, 第61巻, 第4号, pp. 269-277, 1992.
- 22) 齋藤 博, 梶田正美, 小澤克己: 押込み加工によるプラスチック加工面の残留応力評価, 精密工学会誌, Vol. 70, No. 3, pp.428-432, 2004.
- 23) 幸 英昭: 炭素鋼配管溶接部の耐食性とその評価法, 材料, 第38巻, 第424号, pp. 62-68, 1989.
- 24) 長船忠夫, 田村英雄: 鋼の腐食速度におよぼす熱処理の影響, 津山高等専門学校紀要, 第22号, pp. 51-56, 1984.
- 25) 幸 英昭: 炭素鋼・低合金鋼溶接部における腐食・防食, 溶接学会誌, 第77巻, 第7号, pp.13-17, 2008.
- 26) 村上睦尚, 穴井陽佑, 林原仁志, 山根健次, 安藤孝弘, 岩田知明: バラストタンクにおける保護塗装および塗膜劣化に関する研究, 海上技術安全研究所報告, 第10巻, 第3号, pp.49-76, 2010.

(2013年9月25日受付)