

## 第4章 レーザークリーニング処理を施した塗装鋼板の耐久性評価試験

### 4.1 はじめに

前章での検討において、レーザークリーニングの適用により、鋼材表面のミルスケール（黒皮）や塗膜を効率的に除去できることを把握した。その一方で、レーザークリーニング処理後の鋼材表面には、酸化皮膜や特徴的なアンカープロファイル（鋼材表面の粗さとその形状）が形成され、従来の物理的素地調整工法によって形成される鋼材表面とは異なった性状を有することが明らかとなった。

そこで本章では、レーザークリーニング処理面に対する塗装の適否を検証するため、塗装による腐食鋼材の補修を模擬して作製した試験体を用い、塗膜耐久性評価試験として耐中性塩水噴霧試験、複合サイクル試験、温度差耐水性試験、屋外暴露試験を行った。

### 4.2 試験方法

#### 4.2.1 試験体の概要

試験体一覧を表 4.2.1 に示す。また各種試験体の仕様を(1)～(3)に示す。

表 4.2.1 試験体一覧（表中の番号は塗装系を示す）

処理水準		試験項目	耐中性塩水 噴霧試験	複合サイクル 試験	温度差 耐水性試験	屋外暴露試験	
試験片（体）の基材		人工的に腐食させた鋼板					橋梁撤去部材 (塗装CT形鋼)
比較	無処理（黒皮材） <sup>注1)</sup>		①②	①	③	④ <sup>注2)</sup>	—
	グリットブラスト処理		①②	①	③	④ <sup>注2)</sup>	⑤ <sup>注2)</sup>
	動力工具（ディスクサンダー）処理		①②	①	③	④ <sup>注2)</sup>	⑤ <sup>注2)</sup>
レーザー 処理	R1：パルスレーザー100W		①②	①	③	④ <sup>注2)</sup>	⑤ <sup>注2)</sup>
	R2：パルスレーザー500W		①②	①	③	④ <sup>注2)</sup>	⑤ <sup>注2)</sup>
	R3：パルスレーザー1000+50W		①②	①	③	④ <sup>注2)</sup>	⑤ <sup>注2)</sup>
	R4：CW レーザー1000+50W		①②	①	③	④ <sup>注2)</sup>	⑤ <sup>注2)</sup>
	R5：CW レーザー2000W		①②	①	③	—	—

（供試塗装系）

①有機ジンクリッチペイント（75 $\mu$ m）

②エポキシ樹脂塗料下塗（60 $\mu$ m）×2

③水中部用エポキシ樹脂塗料下塗（60 $\mu$ m）×2

④有機ジンクリッチペイント（75 $\mu$ m）／エポキシ樹脂塗料下塗（60 $\mu$ m）×2

⑤有機ジンクリッチペイント（75 $\mu$ m）／エポキシ樹脂塗料下塗（60 $\mu$ m）×2／ポリウレタン樹脂塗料用中塗（30 $\mu$ m）／ポリウレタン樹脂塗料上塗（25 $\mu$ m）

注1)：未腐食の黒皮材に塗装し試験体を作製した

注2)：試験体は長辺の半分で二分割して塗り分け、一方には有機ジンクリッチペイント（第1層）から、もう一方にはエポキシ樹脂塗料下塗（第2層）から塗装した。

#### (1) 小型試験体

小型試験体は、SS400 鋼板で、150×70×6mm のサイズであり、耐中性塩水噴霧試験、複合サイクル試験、温度差耐水性試験に使用した。表 4.2.1 に示す「無処理（黒皮材）」以外は、健全な SS400 鋼板を、塩分影響をほとんど受けない環境で1年間屋外暴露し、定期的に散水することで、比較的均質なさび鋼板を作成した。作成されたさび鋼板に対し、グリットブラスト、動力工具、

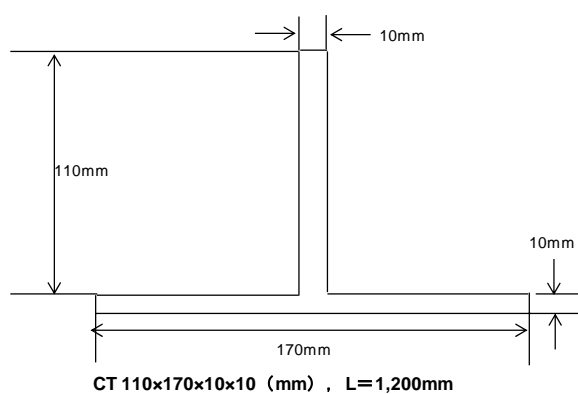
レーザーの各種表面処理を実施したのち、表 4.2.1 に示す塗装を施した。

## (2) 中型試験体

中型試験体は、SS400 鋼板で、 $300 \times 100 \times 6\text{mm}$  のサイズであり、屋外暴露試験に使用した。小型試験体と同様、表 4.2.1 に示す「無処理（黒皮材）」以外は、屋外暴露によりさび鋼板を作成し、各種表面処理を実施したのち、塗装を施した。

## (3) CT 試験体

実橋で発生している顕著な腐食（孔食やこぶ状、層状のさびなど）を再現することは困難であるため、実橋で使用されていた部材を用いて屋外暴露試験を行うこととした。使用した鋼材は高知県の海岸沿いに架かる橋梁において、腐食により部材の交換工事を行った際に撤去した下横構であり、図 4.2.1 に示すような形状に切断したものである<sup>4)</sup>。施工当時の塗装仕様は不明であるが、下塗りに鉛系さび止め塗料、上塗りに長油性アルキド樹脂塗料を塗装した外面用塗装系 A で施工されたものと推測する<sup>6)</sup>。



(a) 断面図



(b) 外観

図 4.2.1 屋外暴露試験用 CT 鋼

## 4.2.2 レーザー処理方法

### (1) レーザー発振器

本試験で使用した装置が搭載するレーザー発振器の仕様を表 4.2.2 に示す。

表 4.2.2 レーザー発振器の仕様

項目	パルスレーザー①	パルスレーザー②	CW レーザー
型式	QF-100	QF-1000	LZK-1000
最大レーザー出力	100W	1000W	1000W
中心波長	$1064 \pm 10\text{nm}$	$1064 \pm 10\text{nm}$	$1080 \pm 5\text{nm}$
レーザーモード	パルス	パルス	CW
ビーム径	—	—	$25.7\mu\text{m}$
パルスエネルギー	1mJ	100mJ	—
パルス周波数	5-500kHz	5-50kHz	—
パルス幅	150ns	200ns	—
ピーク出力	6000W	500kW	1000W

## (2) 計測機器

レーザー処理前には膜厚計測，温度測定を，レーザー処理中には温度計測を，レーザー処理後には CT 鋼に対してのみ色彩計測を実施した。以下，計測に使用した機器の仕様を示す。

### a) 膜厚計測

サンコウ電子研究所製電磁式膜厚計（型式：SL-2C Pro-2）を使用した。

### b) 温度計測

エー・アンド・デイ製赤外線放射温度計（型式：AD-5616）を使用した。

### c) 色彩計測

コニカミノルタ製色彩色差計（型式：CR-400）を使用した。JIS Z 2358「レーザー照射処理面の除せい（錆）度測定方法」に準拠した。

## 4.2.3 試験用塗料

レーザークリーニング処理を含む各種表面処理を行った試験体に対して，塗膜の密着性を確認するため以下の塗料を使用した。

### (1) 耐久性試験

#### a) 有機ジンクリッチペイント

ジンクリッチペイントは，重防食塗装系の防食下地として，非常に重要な役割を果たしており，JIS K 5553「厚膜形ジンクリッチペイント」として規格化されている。ジンクリッチペイントは透過する水分により腐食電池が形成されると，高濃度に配合された亜鉛末が鉄素地に代わって腐食すること（亜鉛の犠牲防食作用）で，優れた防せい（錆）性を示す。

無機ジンクリッチペイントは主として新設塗装仕様の防食下地として使用され，有機ジンクリッチペイントは塗替え塗装仕様の防食下地として使用される。今回の試験では，さびの発生した既設鋼構造物に対してレーザークリーニング処理を行ったのち，塗替え塗装を行うことを想定しており，試験片処理面との付着性および防せい（錆）性を確認するため，JIS K 5553「厚膜形ジンクリッチペイント」2種適合品である有機ジンクリッチペイントを適用することとした。

試験体作製にあたっては JIS K 5553「厚膜形ジンクリッチペイント」での試験体作製方法に準拠し，各試験体に対して，塗膜の厚さが  $75 \pm 10 \mu\text{m}$  となるよう，吹付塗り（エアスプレー塗り）で塗装を行った。

#### b) 変性エポキシ樹脂塗料

変性エポキシ樹脂塗料は主にエポキシ樹脂にエポキシ樹脂以外の変性樹脂をブレンドした塗料である。変性エポキシ樹脂塗料は，変性樹脂の種類等によって差はあるものの，変性樹脂により被塗面への濡れ性を良好にすること及びエポキシ樹脂の内部応力を緩和することにより，悪素地や旧塗膜への付着性を向上させる，あるいはさび面へのなじみを良くするという特徴を活かし，塗替え用途での適用が多い。

そのため，レーザークリーニング処理された試験板との付着性および環境遮断による防せい（錆）性を確認するため，塗替え用途での実績も多い JIS K 5551「構造物用さび止めペイント」として規格化されている C 種 1 号の強溶剤系変性エポキシ樹脂塗料（2液形）を使用した。

試験体作製にあたっては JIS K 5551「構造物用さび止めペイント」での試験体作製方法に準拠し，各試験体に対して，塗膜の厚さが  $55 \sim 65 \mu\text{m}$  となるよう，吹付塗り（エアスプレー塗り）で塗

装を行った。

### c) 没水部用エポキシ樹脂塗料

没水部用エポキシ樹脂塗料は、水資源の確保や災害の予防のために建設されたダム・堰などの社会資本の保全を目的に適用されている。これらの諸設備は防食の観点から見ると非常に厳しい環境に設置されており、防せい（錆）・防食などの塗料技術により、これらの設備の機能を保ち、常に良好な状態にしてゆくことが社会的にも強く要請されている。

かつては、防食性・耐水性などに優れたタールエポキシ樹脂塗料が 2000 年ごろまで広く使用されていたが、タールエポキシ樹脂塗料に含まれるコールタールによる健康被害への懸念から使用が抑制され、JIS 規格（JIS K 5664）も 2009 年に廃止された。

現在は、コールタールを含まないタールフリー変性エポキシ樹脂塗料が使用されることも多いが、今回の試験では、公益社団法人日本水道協会規格 JWWA K 135「水道用液状エポキシ樹脂塗料塗装方法」に適合し、水処理設備等での使用実績も多い没水部用エポキシ樹脂塗料を使用した。

試験体作製にあたっては JWWA K 135 に規定されている試験体作製要領、ならびに使用した没水部用エポキシ樹脂塗料の施工方法を参考に、各試験体に対して、塗膜の厚さが 2 回塗りで 300～400 $\mu\text{m}$  となるよう、吹付塗り（エアスプレー塗り）で塗装を行った。

## (2) 屋外暴露試験

### a) 小型、中型試験体

各耐久性試験と同じ方法で腐食させ、表面処理を行った試験体を使用し、試験体の下半分に下塗りとして有機ジンクリッチペイントを 75 $\pm$ 10 $\mu\text{m}$  となるよう吹付塗り（エアスプレー塗り）で塗装を行ったのち、変性エポキシ樹脂塗料を 1 回あたりの膜厚が 55～65 $\mu\text{m}$  となるよう吹付塗り（エアスプレー塗り）を 2 回行った。それぞれの塗装間隔は 24 時間とした。試験体の塗装は、NEXCO 試験方法 第 4 編 構造関係試験方法に記載の試験法 404-2009 塗料の暴露耐候性試験方法に準拠した<sup>6)</sup>。

### b) CT 試験体

表面処理を行った鋼材に対し、表 4.2.1 に示す塗装仕様にて試験体の塗装を行った。鋼道路橋防食便覧（平成 26 年）の外表面用塗替え塗装仕様では、鋼橋の LCC、環境対応、景観上への配慮などから、ブラスト工法で素地調整（素地調整程度 1 種）を行う Rc-I 塗装系、動力工具等で下地処理（素地調整程度 2 種）を行う Rc-II 塗装系において、下塗りには弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料、上塗りには弱溶剤形ふっ素樹脂塗料上塗を使用することとなっている<sup>7)</sup>。

しかし、今回試験を行う鴨川暴露試験場は、高架橋の桁下であり、直射日光や直接の降雨に晒されることも少ないため、上塗り塗料には耐候性の優れたふっ素樹脂塗料上塗を使用せず、JIS K 5659「鋼構造物用耐候性塗料」A 種上塗り塗料 3 級規格適合品のポリウレタン樹脂塗料を使用することとした。また、下塗りに用いる有機ジンクリッチペイントおよび変性エポキシ樹脂塗料は先に記載した耐久性試験に使用した塗料を使用した。

## 4.3 評価方法

### 4.3.1 レーザー処理表面評価方法

表面評価方法は、基本的には、3.3 節に準拠する。一部、異なる部分を以下に記載する。対象の試験体は、表 4.2.1 の R1 から R3 の 3 条件のそれぞれ「-16」の記載のある試験体番号の小型

試験体を使用した。

### (1) 表面観察

3.3 節と同様に、全体および中央付近をカメラ(キヤノン製 EOS Kiss X8i)を用いて撮影した。

### (2) 表面粗さ計測

図 4.3.1 に示すように、レーザー照射位置の中央付近の表面粗さを 3D 形状測定機 (キーエンス製 VR-3200 (ステージ部), VR-3000 (コントローラ部)) を用い計測した。計測長さ 20mm とし、計測結果は Ra および Rz にて評価した。

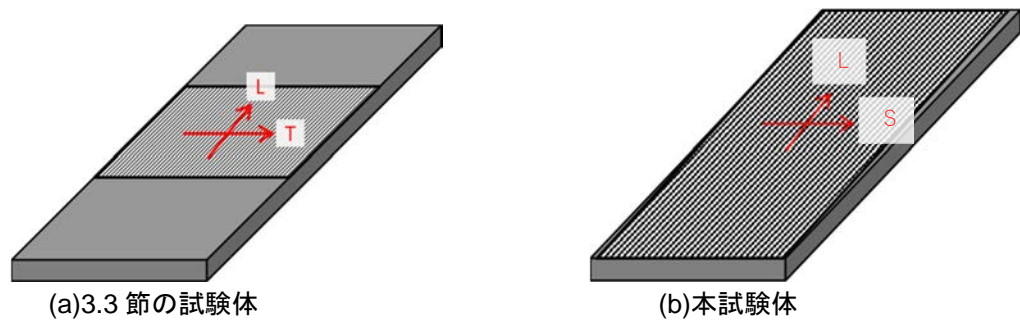


図 4.3.1 表面粗さ計測の位置

### (3) SEM 観察

酸化皮膜の形成状態を評価するため、SEM (日本電子製 IT-300, JED-2300) を用い、表面観察、酸素量・Fe 量の計測および各条件の比較を行った。材料の採取位置を図 4.3.2 に示す。表面観察は観察方向からとした。

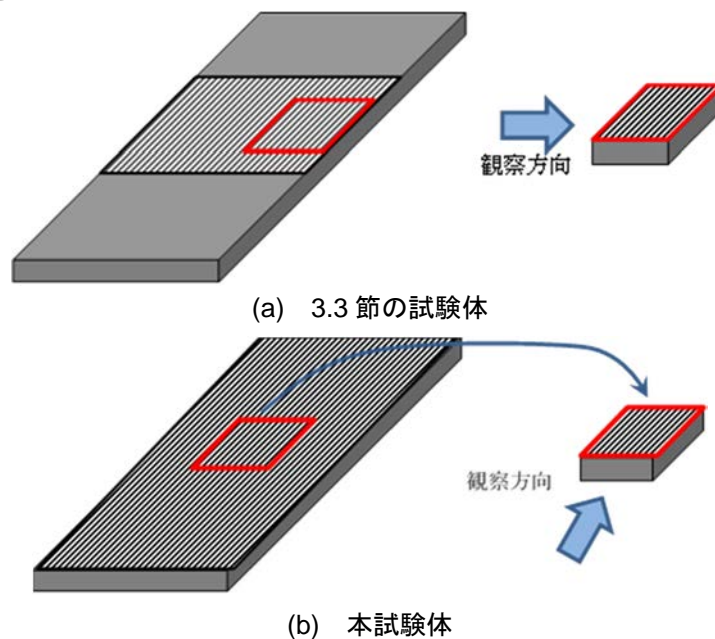


図 4.3.2 SEM 観察の位置

#### 4.3.2 耐久性試験方法および評価方法

##### (1) 耐久性試験方法

各仕様塗装完了後、室温にて 14 日間養生して試験片とし、塩水噴霧試験、複合サイクル試験、温度勾配試験にて耐久性を評価した。各試験 n=3 にて試験を実施した。なお、塩水噴霧試験及び複合サイクル試験に供する試験片には、下半分の位置に、JIS K 5600-7-1 の 6.5（スクラッチの付け方）によって素地に達するクロスの切り込みきずをつけて試験に供した（図 4.3.3 参照）。

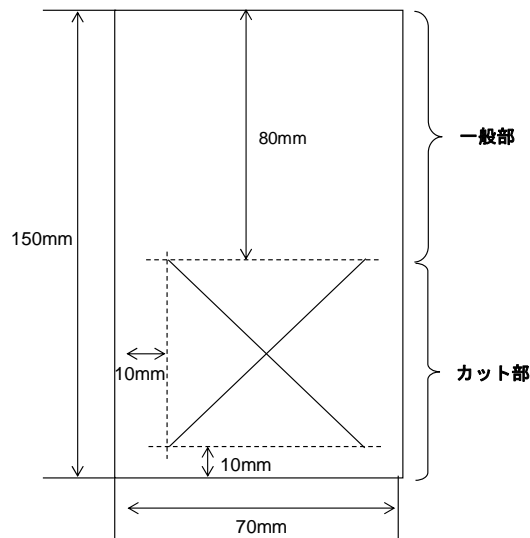


図 4.3.3 促進試験用試験体

以下に各種試験内容詳細を示す。

##### a) 塩水噴霧試験

耐中性塩水噴霧性とは、金属素材またはめっきや塗装鋼材等の試験体を、規定濃度の塩化ナトリウム水溶液を霧状にして吹き込んだ装置内に入れて、その耐食性を評価する試験である。通常の使用環境では、耐食性の評価をするのに長い試験時間が必要になる。試験時間を短くするための促進試験の一つとして耐中性塩水噴霧性があるが、実際の使用環境では様々な腐食要因が関係するため、耐塩水噴霧性試験の結果を実際の使用環境に対する直接の指標とすることはできない。しかしながら、塗料または塗装系の品質のチェックを行うための試験方法として、現在も広く実施されており、この試験方法は JIS K 5600-7-1 に規定されている。

JIS K 5600-7-1 に準拠し、試験を 2000 時間実施した。試験条件を表 4.3.1 に示す。試験後、試験体を取り出して流水で洗い、2 時間以上室内に静置して、水分を乾燥させた後、試験体の評価を行った。

表 4.3.1 耐中性塩水噴霧性試験の試験条件

スプレーキャビネット内部の温度	35±2°C
試験溶液の塩化ナトリウム濃度	50±10g/l
試験溶液のpH	6.5~7.2
溶液捕集の平均速度	水平捕集面積80cm <sup>2</sup> に対し1~2ml/h

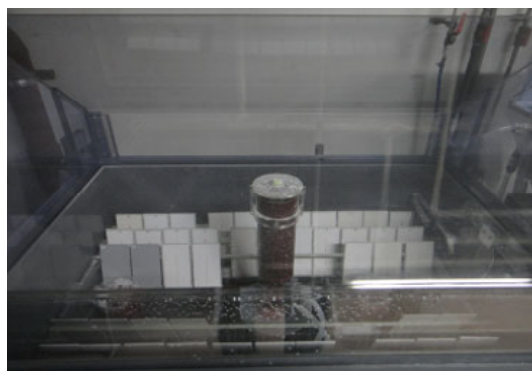
## b) 複合サイクル試験

複合サイクル試験は、屋外暴露と比較的相関性が高い耐久性試験である。塩水噴霧に加え、乾燥・湿潤の工程を組み合わせ、これらのサイクルを繰り返すことで、屋外暴露環境により近い条件を再現することができる試験方法であり、JIS（日本産業規格）、JASO（日本自動車規格）をはじめ、ISO（国際標準化機構）規格等で規定されている。

JIS K 5600-7-9 に準拠し、塗料の耐久性試験として一般的な JIS K 5600-7-9 付属書 1（規定）のサイクル D（1 サイクル：塩水噴霧  $30\pm 2^{\circ}\text{C}$  0.5 時間→湿潤  $95\pm 3\%RH$  1.5 時間→熱風乾燥  $50\pm 2^{\circ}\text{C}$  2 時間→温風乾燥  $30\pm 2^{\circ}\text{C}$  2 時間）にて試験を実施し、サイクル数は 240 サイクルとした。使用した複合サイクル試験装置を図 4.3.4 に示す。



(a) 試験装置の外観



(b) 試験槽内の様子

図 4.3.4 複合サイクル試験装置

## c) 温度差耐水試験

温度差耐水試験とは温度勾配を作り、実際の塗膜側と鋼板側の温度差よりも厳しい温度差を付与する促進試験方法である。塗装鋼板の付着安定性や耐久寿命の推定のために実施される。

塗装鋼板が水に接している場合、高温側の塗膜の熱の拡散方向と、水の塗膜内部の透過方向が一致するため、水の塗膜内部への透過が促進され、早期に塗装鋼板に膨れが発生し、付着強度が低下することもある。温度差浸透現象の模式図を図 4.3.5 に示す。

今回の試験では、耐水性を短期間で確認するために、各種レーザークリーニング処理を行った試験体に没水部用エポキシ樹脂塗料を目標膜厚で塗装し、一定期間養生した後、試験装置に設置した。試験装置の概要を図 4.3.6 に、外観を図 4.3.7 に示す。水温は、試験面を  $40^{\circ}\text{C}$ 、裏面を  $20^{\circ}\text{C}$  に設定し、 $20^{\circ}\text{C}$  の温度勾配を作り、試験を 2～6 週間実施することにより、処理条件の違いによる耐久性を評価した。

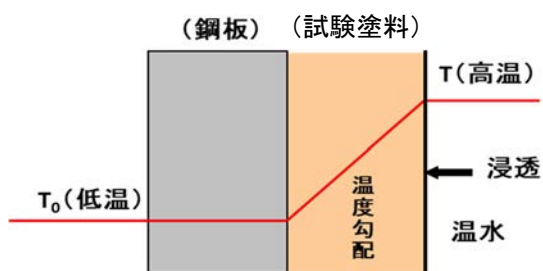


図 4.3.5 温度差浸透現象の模式図

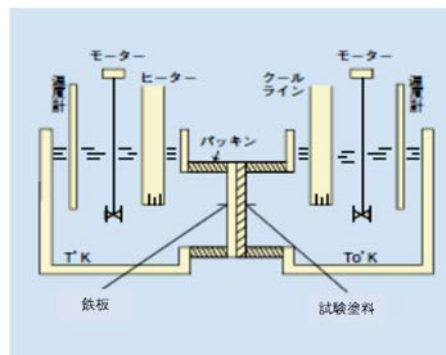


図 4.3.6 温度差試験装置の概要



(a) 温度差耐水試験装置への試験板取り付け  
(試験面：内槽側（高温側）)



(b) 試験の様子（内槽：40℃、外槽：20℃）

図 4.3.7 温度差試験装置の外観

#### d) 屋外暴露試験

実際の鋼道路橋などでは、腐食が特定部位に集中して発生することが多く、橋梁全体に同程度の腐食損傷が発生することはほとんどない。腐食が発生しやすい箇所として、降雨による付着塩分の洗浄がほとんどなく、飛来海塩や凍結防止剤による塩分が蓄積しやすい箇所があげられる<sup>8)</sup>。それらの条件を踏まえ、実環境に近く、かつ厳しい腐食環境で防食性能を確認するため、一般財団法人土木研究センター鴨川暴露試験場にて屋外暴露試験を行うこととした。鴨川暴露試験場は、千葉県鴨川市の国道 128 号線坂下高架橋の桁下にあるため、降雨が直接試験体にかかることが少なく、海岸線からの離岸距離も 150m 程度と非常に近い。そのため、各種表面処理方法の違いによる腐食変状の差を早期に、かつ顕著に発生させることが可能な暴露環境である<sup>4)</sup>。

中型の試験体は、図 4.3.8 に示すように、中央部に JIS K 5600-5-6 で規定されている単一刃を用い、素地に到達するよう切り込み傷を付けた。NEXCO 試験方法 第 4 編 構造関係試験方法に記載の試験法 404-2009 塗料の暴露耐候性試験方法では、試験体下半分の有機ジンクリッチペイント塗装部のみに切り込み傷を付けるが、今回の試験では下塗りの有機ジンクリッチペイント未塗装部にも切り込み傷を付け、傷からのさびおよび膨れの幅を測定するとともに、目視によって、塗膜のさび、膨れ、割れおよび剥がれの有無を観察することとした。なお、裏面については評価を行わないものとした。



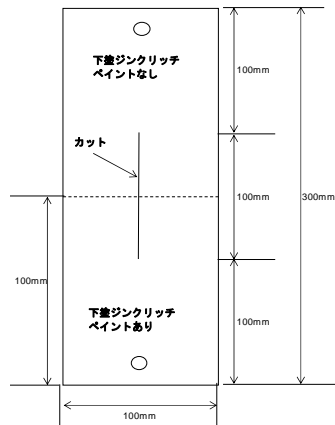


図 4.3.8 屋外暴露試験用試験体

CT 試験体は、レーザークリーニング処理等により表面処理を行った後、図 4.3.9 に示すように塗り分け、全面を塗装することで、有機ジンクリッチペイントの有無による防食性能、鋼材面ごとの腐食度合の違いを確認することとした。試験体作製時の状況および試験体塗装完了後の外観を図 4.3.9 に示す。



図 4.3.9 屋外暴露試験用 CT 鋼製作状況と塗装完了後の試験体の外観

## (2) 評価方法

### a) 外観観察

評価時間ごとに試験体上部（一般部）の外観観察を実施し、塗膜に異常（さび、膨れ、割れおよび剥がれ）が確認された場合は記録した。また、写真撮影を行った。

### b) スクラッチ部の評価

塩水噴霧試験及び複合サイクル試験において、クロスの切り込みきずをつけた部位は、評価時間ごとに切り込みきずの片側及び両側における最大さび幅を測定し、記録した。

### c) 付着力試験

本試験は、端子を塗膜面に接着剤で接着し、垂直引張力による引張試験を行い、塗膜の付着力を求める試験である。また、垂直引張力で剥離することにより、素地と塗膜の間の最も付着力の弱い部分から剥離するため、塗装系の付着性に関する弱点を明らかにすることができる試験である。

各耐久性試験において試験前と試験終了後に、JIS K 5600-5-7に準拠したプルオフ法により、試験体上部（一般部）の塗膜と試験板との付着強度（破壊強さ）を計測するとともに、剥離界面の状態（破壊の形態）を目視により評価した。

#### 4.4 鋼板およびCT鋼のレーザー処理結果

##### 4.4.1 施工試験結果

###### (1) レーザー処理条件，膜厚測定結果および温度測定結果

鋼板およびCT鋼のレーザー処理条件を表4.4.1～表4.4.3に示す。レーザー出力1000Wの場合は，レーザー処理後50Wで再処理を行った。また次項で表面評価を行う試験体の処理前後の写真を図4.4.1にまとめる。それ以外は，付録A.2に添付する。

表 4.4.1 鋼板およびCT鋼のレーザー処理条件 (パルスレーザー出力100W : R1)

試験体番号	試験体寸法	施工前 さび厚 (μm)				試験体温度 (°C)			処理時間 (s)
		①	②	③	平均	施工前	施工中最高温度	上昇温度	
P100-1	小型	70	85	60	72	9.3	20.7	11.4	98
P100-2		90	70	65	75	9.6	25.5	15.9	62
P100-3		80	65	90	78	9.8	24.4	14.6	61
P100-4		60	50	45	52	11.1	25.1	14.0	57
P100-5		60	85	50	65	11.5	19.1	7.6	58
P100-6		60	50	50	53	12.8	19.5	6.7	60
P100-7		80	70	55	68	14.3	20.1	5.8	55
P100-8		90	70	75	78	12.1	26.9	14.8	60
P100-9		80	75	70	75	12.1	26.4	14.3	68
P100-10		55	60	60	58	12.9	26.2	13.3	63
P100-11		80	90	50	73	12.9	18.3	5.4	49
P100-12		70	110	75	85	12.6	23.2	10.6	57
P100-13		70	75	75	73	11.1	21.1	10.0	53
P100-14		75	100	75	83	10.1	18.9	8.8	63
P100-15		70	65	75	70	9.9	19.1	9.2	70
P100-16		75	110	80	88	10.5	20.6	10.1	56
P100-1 300	中型	60	85	70	72	15.9	41.0	25.1	136
P100-2 300		50	50	80	60	19.3	34.4	15.1	161
P100-3 300		100	100	55	85	19.9	31.9	12.0	145
P100 CT	CT	190	160	110	153	21.1	67.0	45.9	840

表 4.4.2 鋼板およびCT鋼のレーザー処理条件 (パルスレーザー出力500W : R2)

試験体番号	試験体寸法	施工前 さび厚 (μm)				試験体温度 (°C)			処理時間 (s)
		①	②	45	平均	施工前	施工中最高温度	上昇温度	
P500-1	小型	45	55	45	48	14.6	88.1	73.5	26
P500-2		40	80	60	60	15.3	120.0	104.7	21
P500-3		50	45	45	47	15.3	85.9	70.6	23
P500-4		30	50	45	42	16.0	72.0	56.0	21
P500-5		40	55	50	48	16.7	85.6	68.9	23
P500-6		35	45	55	45	16.8	84.9	68.1	20
P500-7		60	60	50	57	17.5	91.2	73.7	16
P500-8		45	35	55	45	17.1	75.6	58.5	16
P500-9		35	60	80	58	17.4	79.0	61.6	14
P500-10		55	65	50	57	17.5	89.6	72.1	15
P500-11		50	40	35	42	22.1	57.1	35.0	15
P500-12		60	60	40	53	25.4	93.4	68.0	14
P500-13		50	50	35	45	25.4	93.4	68.0	12
P500-14		60	50	50	53	28.8	91.7	62.9	20
P500-15		55	50	65	57	30.4	90.2	59.8	14
P500-16		50	60	65	58	29.0	83.6	54.6	16
P500-1 300	中型	75	60	65	67	11.9	61.6	49.7	36
P500-2 300		60	40	60	53	12.5	64.0	51.5	29
P500-3 300		45	45	45	45	13.8	69.6	55.8	25
P500 CT	CT	230	110	50	130	30.9	279.0	248.1	2100

表 4.4.3 鋼板および CT 鋼のレーザー処理条件 (パルスレーザー出力 1000W : R3)

試験体 番号	試験体 寸法	施工前 さび厚 (μm)				試験体温度 (°C)			試験体温度 (°C)			処理時間 (s)	
		①	②	③	平均	1000W処理時			50W処理時			1000W 処理時	50W 処理時
						施工前	施工中 最高温度	上昇 温度	施工前	施工中 最高温度	上昇 温度		
P1000-1	小型	55	65	65	62	28.5	90.9	62.4	35.4	46.6	11.2	11	10
P1000-2		50	55	55	53	28.7	77.4	48.7	34.4	41.8	7.4	10	6
P1000-3		55	60	55	57	29.0	56.9	27.9	31.3	38.9	7.6	8	7
P1000-4		60	65	50	58	29.8	63.5	33.7	31.8	36.0	4.2	8	5
P1000-5		35	30	35	33	30.9	50.3	19.4	34.3	37.6	3.3	9	5
P1000-6		65	45	60	57	31.1	78.9	47.8	35.3	49.5	14.2	10	7
P1000-7		60	65	55	60	33.1	68.0	34.9	36.5	42.3	5.8	9	8
P1000-8		45	55	25	42	33.4	60.6	27.2	36.5	42.5	6.0	10	7
P1000-9		60	50	55	55	32.9	71.3	38.4	33.8	43.6	9.8	9	6
P1000-10		70	60	50	60	33.1	96.9	63.8	36.7	46.9	10.2	10	7
P1000-11		50	50	60	53	32.5	72.3	39.8	34.2	44.6	10.4	9	7
P1000-12		50	50	60	53	43.8	59.3	15.5	34.4	43.2	8.8	9	6
P1000-13		30	25	65	40	32.4	58.1	25.7	37.6	41.5	3.9	9	6
P1000-14		80	35	60	58	32.3	73.7	41.4	37.8	49.5	11.7	10	7
P1000-15		65	65	65	65	32.2	78.7	46.5	34.7	44.7	10.0	11	5
P1000-16		50	50	65	55	31.9	51.3	19.4	33.9	37.9	4.0	10	6
P1000-1 300	中型	32	35	55	41	32.3	85.5	53.2	37.3	44.7	7.4	23	14
P1000-2 300		50	55	30	45	31.4	89.6	58.2	39.6	47.3	7.7	24	15
P1000-3 300		75	35	60	57	35.8	105.4	69.6	34.2	42.7	8.5	22	14
P1000 CT	CT	180	160	110	150	29.5	161.2	131.7	35.8	53.2	17.4	2700	600



(a) パルスレーザー出力 100W 処理前



(b) パルスレーザー出力 100W 処理後



(c) パルスレーザー出力 500W 処理前



(d) パルスレーザー出力 500W 処理後



(e) パルスレーザー出力 1000W 処理前



(f) パルスレーザー出力 1000W 処理後

図 4.4.1 鋼板のレーザー処理前後の表面状態例

## (2) 色彩計測

レーザークリーニング処理後の CT 鋼に対し、目視および色彩計により評価した<sup>9)</sup>。ブラスト工法による素地調整程度 1 種で旧塗膜およびさびを除去した鋼材およびディスクサンダーを用いて素地調整程度 2 種にてさびを除去した鋼材と比較した。同一 CT 鋼材内でも差が見られたため、代表的な 2 箇所を測色し、JIS Z 2358 (レーザー照射処理面の除錆度測定方法) に基づき L\*a\*b\*表色系および Yxy 表色系で記録した結果を表 4.4.4 に示す<sup>10)</sup>。

表 4.4.4 CT鋼の表面処理状態（測色値と目視評価による分類）

表面処理条件		ブラスト		ディスク サンダー		レーザー照射条件							
						R1		R2		R3		R4	
表面処理後の CT鋼外観	全体												
	近接												
測色箇所		n1	n2	n1	n2	n1	n2	n1	n2	n1	n2	n1	n2
L*a*b* 表色系	L*	64.91	52.81	53.42	31.50	62.37	32.28	42.00	28.50	48.91	32.33	48.97	35.03
	a*	0.75	1.53	3.12	6.61	0.68	1.78	1.96	0.74	1.64	0.51	0.38	1.99
	b*	2.15	3.66	7.71	9.57	4.64	2.25	6.71	0.17	5.19	-1.00	-0.25	2.51
Yxy表色系	Y	33.93	20.88	21.44	6.87	30.84	7.21	12.50	5.65	17.52	7.23	17.57	8.52
	x	0.3168	0.3237	0.3395	0.3729	0.3234	0.3250	0.3387	0.3133	0.3301	0.3112	0.3101	0.3259
	y	0.3201	0.3257	0.3356	0.3457	0.3277	0.3231	0.3374	0.3158	0.3307	0.3150	0.3156	0.3234
色見本番号 (目視評価)		4号	4号 および 3号	2号	1号 および 2号	2号 および 1号	1号 および 2号	2号 および 1号	1号 および 2号	2号 および 1号	1号 および 2号	5号 および 2号	2号 および 1号

#### 4.4.2 表面評価結果

##### (1) 外観

レーザー照射後の表面状態の比較を図 4.4.2 に示す。図 4.4.2(a)は、前章で実施した結果（試験体番号：K100P）で、レーザー照射痕が規則的に残る金属光沢があるのに対して、今回の試験体の図 4.4.2(b)~(d)は、スキヤニング方向に痕があり、かつ黒色に変色している状態であった。



(a) 100W パルスレーザー（黒皮）



(b) 100W (P100-16)



(c) 500W (P500-16)



(d) 1000W+50W (P1000-16)

図 4.4.2 表面状態の比較

## (2) 表面粗さ

表面粗さ計測結果として、3章で実施した黒皮の結果（青色）と今回（赤色）との比較を図 4.4.3 にまとめる。今回得られた結果の方が、Ra、Rz および計測方向に関わらず、表面粗さが粗いことがわかる。しかし、前章の CW レーザー1000W の結果と今回の結果では、大きな有意差は認められなかった。また、今回の試験体の中では、P100 が最も滑らかであることがわかった。

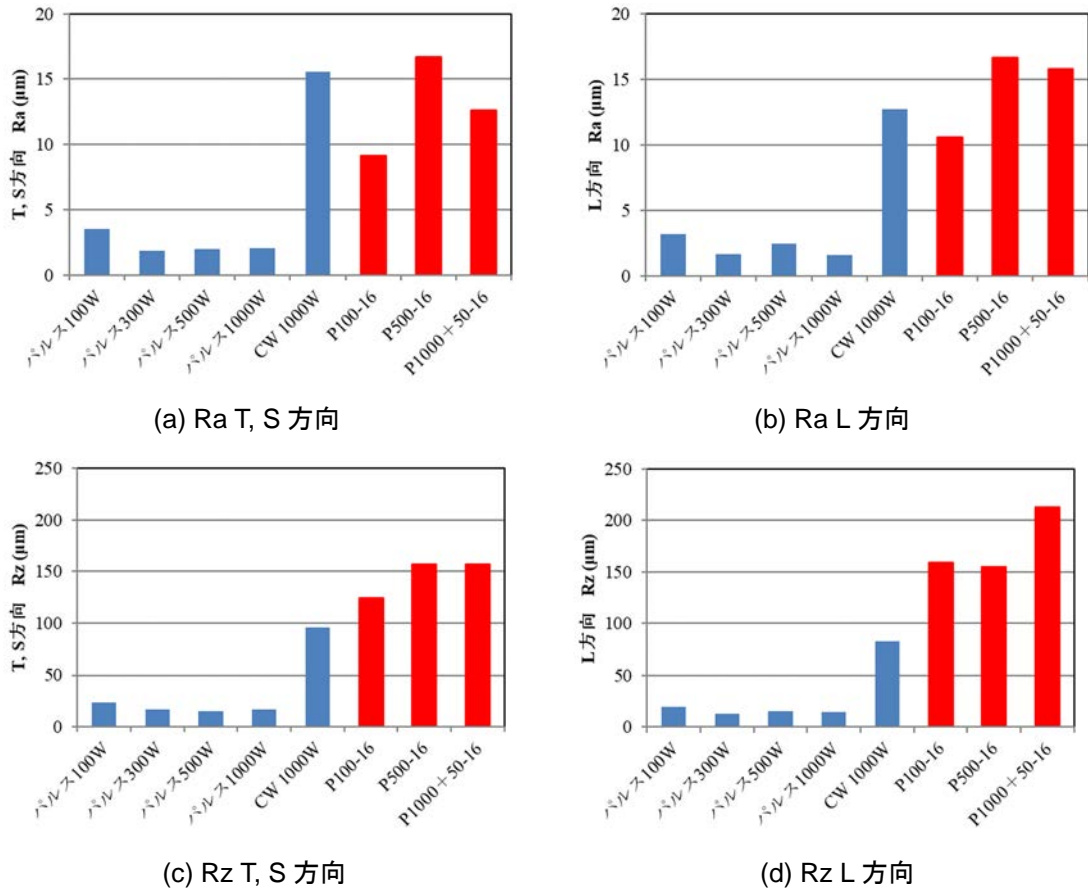
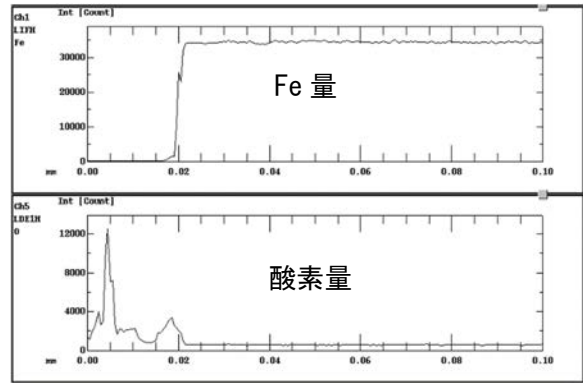
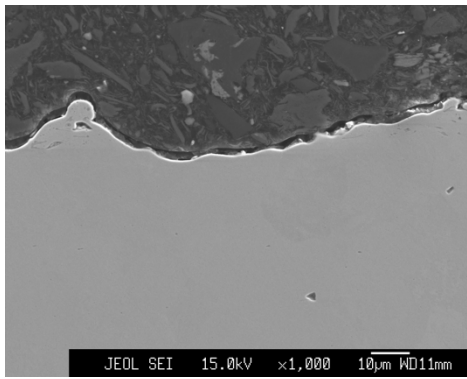


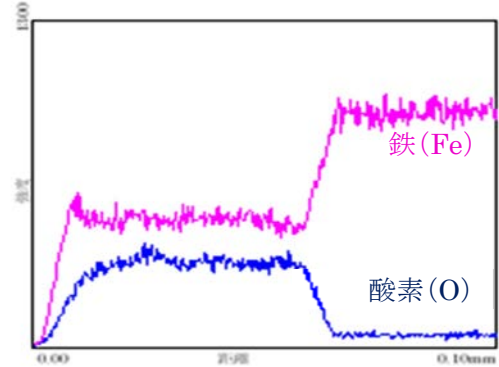
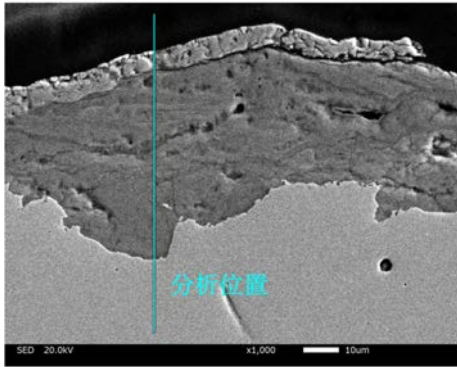
図 4.4.3 表面粗さ試験結果

## (3) 表面層の成分分析

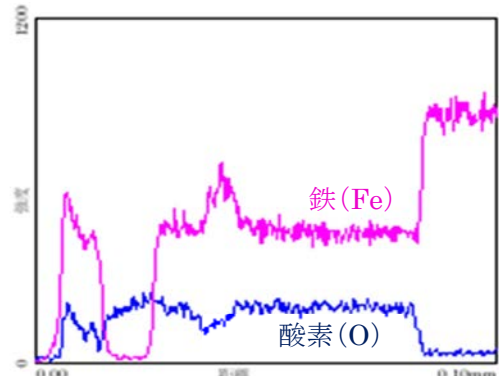
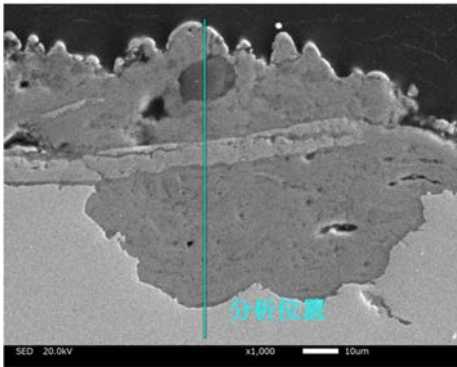
深さ方向への酸素量および Fe 量の計測結果を図 4.4.4 および図 4.4.5 に示す。これらの結果から前章の試験体と比較して、一定の O 量を持つ領域が確認できることから酸化被膜がはっきりと形成されており、成分分析結果からもその状態が判別可能である。また、図 4.4.5 の SEM 観察画像からもわかるように酸化被膜の厚さは場所によって大きく異なる。



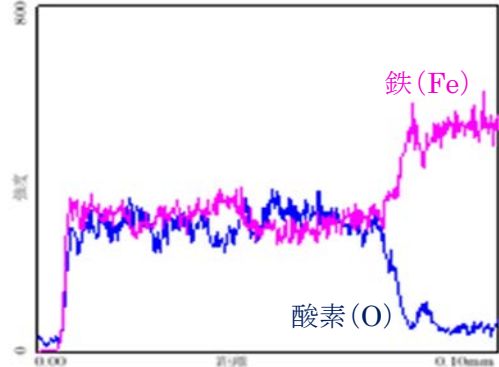
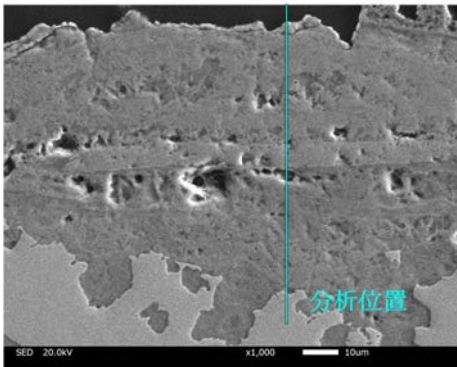
(a) 3章の試験体 表面状態：黒皮 100W パルスレーザーの場合



(b) 100W (P100-16)



(c) 500W (P500-16)



(d) 1000W+50W (P1000-16)

図 4.4.4 成分分析結果の比較

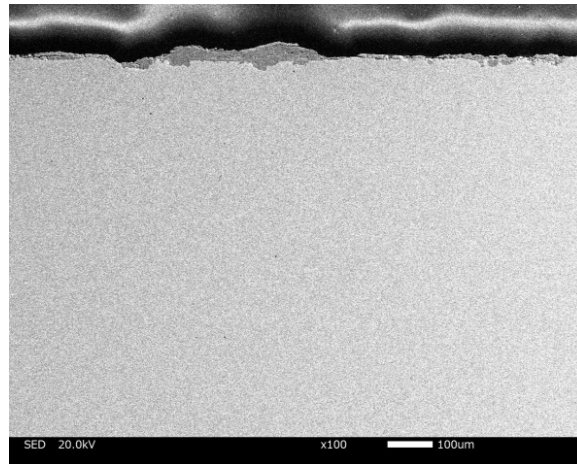


図 4.4.5 酸化被膜の SEM による観察（試験体：P100-16）

#### 4.5 耐久性試験結果

1 年間の屋外暴露により作成したさび鋼板を各種レーザー処理した板と比較素地調整板に各種塗料を塗装し、塩水噴霧試験，複合サイクル試験，温度勾配試験の各種耐久性試験実施した結果を以下に報告する。また，土研センター・鴨川暴露場で実施した屋外暴露試験の 2 年経過時の結果も報告する。

##### 4.5.1 初期付着強度

耐久性試験及び各種素地への塗装した試験体の初期付着強度を測定した。塗装前の素地状態を図 4.5.1 に示す。また，初期の付着強度測定結果を表 4.4.1 に示す。初期付着強度を比較検討の基準とする。

素地調整の基準となるブラスト，ディスクサンダー，黒皮鋼板での付着強度は，ディスクサンダーのエポキシ没水用の  $3\text{N/mm}^2$  を除き，全て  $4\text{N/mm}^2$  以上の付着強度があることが確認できた。また，レーザー処理による付着強度も平均的に良好な結果を得た。初期付着強度は，鋼構造物塗膜調査マニュアル<sup>11)</sup>の評点（アドヒージョンテストの評価点では  $2\text{N/mm}^2 \leq X$  は 0 点， $1.0 \leq X < 2.0\text{N/mm}^2$  は 1 点）において，R1 のエポキシ下塗を除き，全て 0 点と問題のない付着強度であった。

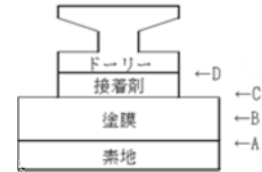
ブラスト	ディスクサンダー	黒皮鋼板	R1 パルス 100W	R2 パルス 500W	R3 パルス 1000+50W	R4 CW 1000+50W	R5 CW 2000W

図 4.5.1 塗装前の試験体素地調整状態



表 4.5.1 初期付着強度

試験塗料	n	ブラスト	ディスク サンダー	黒皮鋼板	レーザー照射条件				
					R1	R2	R3	R4	R5
有機ジンク	1	5.8N/mm <sup>2</sup>	5.2N/mm <sup>2</sup>	5.9N/mm <sup>2</sup>	4.1N/mm <sup>2</sup>	4.2N/mm <sup>2</sup>	5.2N/mm <sup>2</sup>	5.2N/mm <sup>2</sup>	4.9N/mm <sup>2</sup>
	備考	B:80 C:20	A:80 D:20	B:70 C:30	A:90 B:10	A:40 B:60	A:20 B:80	A:10 B:90	A:10 B:90
エポキシ 下塗	1	4.0N/mm <sup>2</sup>	4.7N/mm <sup>2</sup>	4.1N/mm <sup>2</sup>	1.8N/mm <sup>2</sup>	2.6N/mm <sup>2</sup>	4.6N/mm <sup>2</sup>	3.8N/mm <sup>2</sup>	4.0N/mm <sup>2</sup>
	備考	C:90 D:10	A:30 C:40 D:30	C:50 D:50	A:30 D:70	A:5 C:15 D:80	A:80 D:20	C:25 D:75	C:10 D:90
エポキシ 没水部用	1	4.4N/mm <sup>2</sup>	3.0N/mm <sup>2</sup>	4.7N/mm <sup>2</sup>	4.8N/mm <sup>2</sup>	3.1N/mm <sup>2</sup>	4.7N/mm <sup>2</sup>	5.0N/mm <sup>2</sup>	5.1N/mm <sup>2</sup>
	備考	C:40 D:60	A:70 D:30	C:90 D:10	A:15 B:30 C:55	A:20 B:35 C:45	A:15 B:80 C:5	C:70 D:30	A:5 B:35 C:60



#### 4.5.2 塩水噴霧試験

有機ジンクリッチペイントを塗装した試験体を塩水噴霧 1000 時間実施し、付着力試験を実施した後の試験体の外観を図 4.5.2 に、付着強度および錆幅を表 4.5.2 に示す。R1 から R3 のパルスレーザーは他の処理よりクロスカットの錆幅が大きく、付着強度も低い傾向がある。さらに No.3 の試験体では一般面に錆膨れの発生が確認できた。R4 と R5 の CW レーザーはブラスト処理程度の防錆性能を有していることが確認できた。

付着試験後の剥離面は、ブラストとディスクサンダーでは有機ジンク層内剥離となっているが、R1 から R3 のパルスレーザーでは素地と有機ジンク間での剥離が確認でき、鋼材面に錆の発生を確認した。一般面にも点錆の発生が確認された。

エポキシ下塗を塗装した試験体に対し塩水噴霧を 1000 時間実施し、付着力試験を実施した後の試験体の外観を図 4.5.3 に、錆幅および付着強度を表 4.5.2 に示す。錆幅は有機ジンクリッチペイントより全体的に大きい傾向にある。また、一般部でも点錆の発生が確認できる板があった。これは、有機ジンクリッチペイントとエポキシ下塗の防錆力の違いによるものと考えられる。

エポキシ下塗試験体の場合、いずれの試験体も付着力は 3N/mm<sup>2</sup> 以上あり、問題ないレベルであることが確認できるが、ブラスト板とレーザーケレン板の鋼材面に錆の発生が見られた。

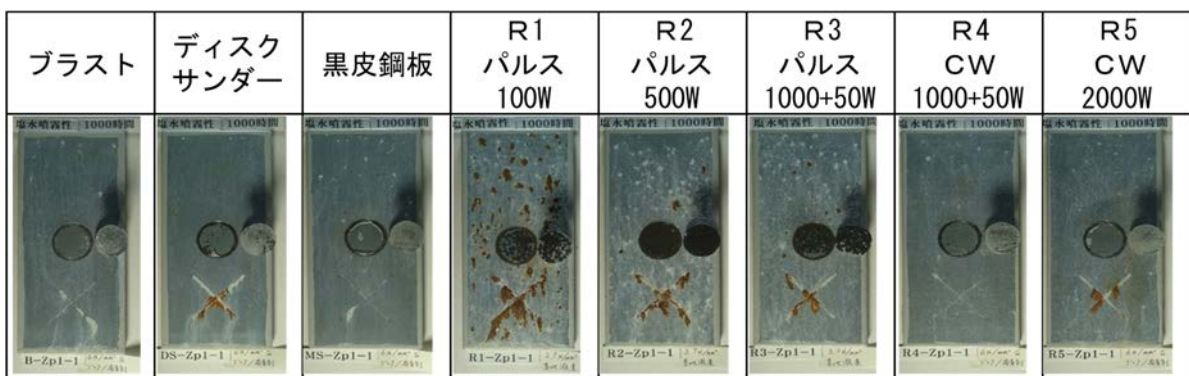


図 4.5.2 塩水噴霧 1000 時間後の外観 (有機ジンク)

表 4.5.2 塩水噴霧試験後の錆幅および付着強度

(a) 錆幅

試験項目 : 塩水噴霧性 (錆幅・外観)

※錆幅: 片側/両側。白さびは錆幅に含まない。

試験条件	試験塗料	n	プラスト	ディスク サンダー	黒皮鋼板	レーザー照射条件				
						R1	R2	R3	R4	R5
1000 時間	有機 ジंक	1	3/4mm	3/6mm	2/3mm	11/12mm	8/11mm	6/7mm	0/0mm	5/5mm
		2	0/0mm	2/5mm	0/0mm	5/10mm	3/10mm	4/10mm	0/0mm	1/4mm
		3	1.5/2.0mm	0.5/1mm	0/0mm	3/5mm	3/5.5mm	6.5/8mm	1.5/2.5mm	1.5/2mm
		備考				一般部錆膨れ	一般部錆膨れ	一般部錆膨れ		
1000 時間	エポキシ 下塗	1	3/4mm	3/5mm	4/6mm	5/7mm	4/7mm	4/6mm	3/6mm	3/5mm
		2	5/5mm	3/5mm	5/8mm	4/5mm	4/5mm	4/5mm	3/6mm	3/5mm
		3	6/11mm	6.5/11.5mm	5/9mm	8.5/15mm	7.5/12mm	7.5/12.5mm	6/9mm	7/11.5mm
		備考	一般部錆	一般部錆		一般部錆	一般部錆	一般部錆		一般部錆

(b) 付着強度

試験項目 : 塩水噴霧性 (付着強度)

試験条件	試験塗料	n	プラスト	ディスク サンダー	黒皮鋼板	レーザー照射条件				
						R1	R2	R3	R4	R5
1000 時間	有機 ジंक	1	6N/mm2	6N/mm2	6N/mm2	2.7N/mm2	3.7N/mm2	3.3N/mm2	6N/mm2	6N/mm2
			B:45 C:50 D:5	B:10 C:90	B:10 C:80 D:10	A:80 B:20	A:100	A:90 C:10	A:5 B:45 C:50	B:95 D:5
			5.6N/mm2	5.8N/mm2	5.8N/mm2	2.4N/mm2	2.8N/mm2	2.0N/mm2	5.6N/mm2	5.8N/mm2
		2	B:80 C:20	A:10 B:60 C:30	B:80 C:20	A:100	A:95 B:5	A:100	B:70 C:30	A:5 B:65 C:30
			2.4N/mm2	2.1N/mm2	2.0N/mm2	1.0N/mm2	1.7N/mm2	2.1N/mm2	1.8N/mm2	2.0N/mm2
			C:95 D:5	C:100	C:100	A:60 C:40	A:40 C:60	A:40 C:60	A:5 C:80 D:15	C:100
1000 時間	エポキシ 下塗	1	6N/mm2	6N/mm2	6N/mm2	6N/mm2	6N/mm2	6N/mm2	6N/mm2	6N/mm2
			A:50 B:50	A:60 B:40	A:5 B:80 C:10 D:5	A:60 C:40	A:35 B:65	A:25 B:75	C:95 D:5	C:95 D:5
			5.9N/mm2	6.0N/mm2	5.9N/mm2	5.8N/mm2	5.8N/mm2	5.8N/mm2	5.9N/mm2	5.8N/mm2
		2	B:60 C:40	A:20 B80	B:100	A:90 B:10	A:60 B:40	A:70 B:30	A:15 B:85	A:65 B:35
			5.9N/mm2	3.5N/mm2	5.9N/mm2	3.1N/mm2	4.1N/mm2	4.1N/mm2	4.1N/mm2	4.1N/mm2
			A:30 B:30 D:40	A:40 B:30 D:30	B:75 D:25	A:40 B:15 C:10 D:35	A:40 B:50 D:10	A:45 B:10 D:45	B:25 D:75	A:10 B:50 D:40

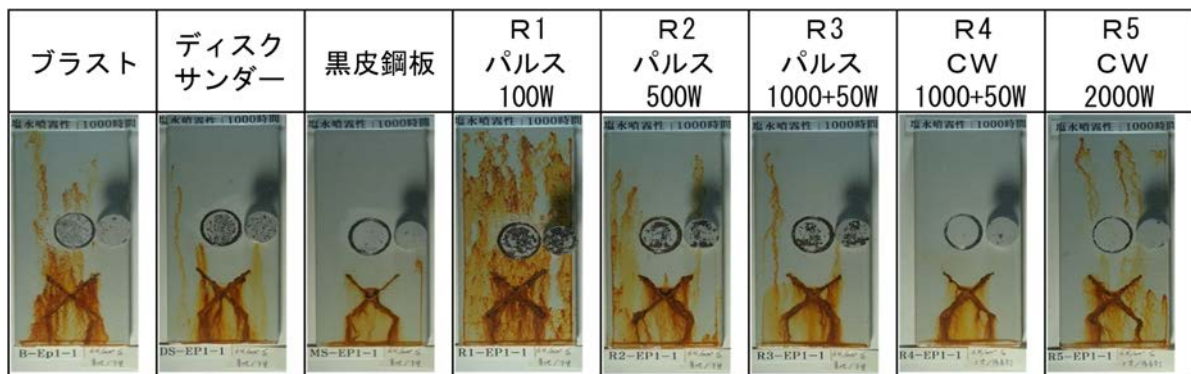
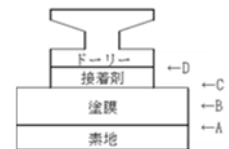


図 4.5.3 塩水噴霧 1000 時間後の外観 (エポキシ下塗)

### 4.5.3 複合サイクル試験

有機ジンクリッチペイントを塗装した試験体に対し複合サイクル試験（240 サイクル）を実施し、付着力試験を実施した後の試験体の外観を図 4.5.4 に、錆幅および付着強度を表 4.5.3 に示す。試験結果は、3 体でばらつきがみられるが、パルスレーザーの R1 から R3 は錆幅が若干大きい傾向があり、R1 は付着強度も低い傾向が見られた。付着力試験後、ディスクサンダーやレーザーケレンでは鋼材素地に錆の発生が確認でき、これは、素地調整で残存した錆が促進されたと考えられる。レーザーケレンの R1 から R5 は、一般部の白錆の発生が多く確認されるがジンクによる犠牲防食が働いたものと考えられる。

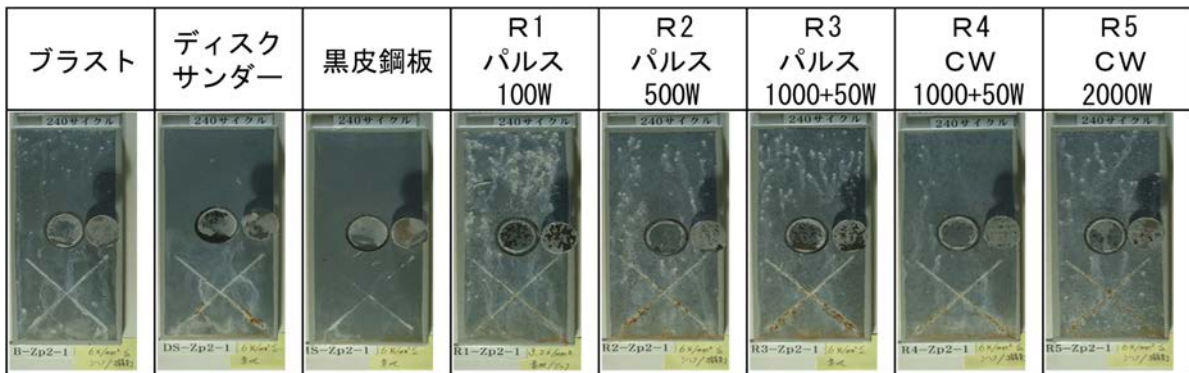


図 4.5.4 複合サイクル試験 240 サイクル後の外観（有機ジンク）

表 4.5.3 複合サイクル試験後の付着強度および錆幅

#### (a) 錆幅

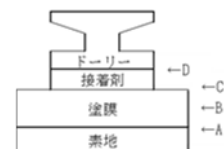
試験項目：複合サイクル試験（錆幅・外観） ※錆幅：片側/両側、白さびは錆幅に含まない。

試験条件	試験塗料	n	ブラスト	ディスクサンダー	黒皮鋼板	レーザー照射条件				
						R1	R2	R3	R4	R5
サイクル D 240c	有機ジンク	1	0/0mm	3/3mm	0/0mm	1/1mm	2/3mm	3/3mm	1/2mm	1/2mm
		2	0/0mm	0/0mm	0/0mm	0/0mm	0/0mm	0/0mm	0/0mm	0/0mm
		3	0.5/1mm	1/1.5mm	0.5/1mm	2.5/4mm	1.5/2.5mm	1.5/2.5mm	1/2mm	1/2mm

#### (b) 付着強度

試験項目：複合サイクル試験（付着強度）

試験条件	試験塗料	n	ブラスト	ディスクサンダー	黒皮鋼板	レーザー照射条件				
						R1	R2	R3	R4	R5
サイクル D 240c	有機ジンク	1	6N/mm2	6N/mm2	6N/mm2	3.2N/mm2	6N/mm2	6N/mm2	6N/mm2	6N/mm2
			B:15	A:30	B:25	A:50	A:5 B:5	A:20	C:90	A:10
			C:85	B:50 C:20	C:25 D:50	C:50	C:80 D:10	C:70 D:10	D:10	B:65 C:25
		2	6.0N/mm2	5.5N/mm2	6.0N/mm2	3.1N/mm2	5.1N/mm2	5.7N/mm2	5.8N/mm2	5.8N/mm2
			B:100	A:20	B:90	A:15	A:15	B:75	B:5	
			C:100	B:80	C:10	B:50 C:25	B:40 C:45	B:30 C:55	C:25	C95
3	1.8N/mm2	1.7N/mm2	1.6N/mm2	2.0N/mm2	2.0N/mm2	2.0N/mm2	1.8N/mm2	2.0N/mm2		
	C:100	C:100	B:5	A:5	B:10	B:10	C:100	C:100		
	C:95	C:95	C:95	C:95	C:90	C:85 D:5	C:100	C:100		



#### 4.5.4 温度勾配試験 (20°C-40°C)

没水部用エポキシ塗料を塗装した試験体に対して、温度勾配試験を実施し、付着力試験を実施した後の試験体の外観を図 4.5.5 に、付着強度を表 4.5.4 に示す。当初 2 週間の予定で温度勾配試験を実施したが、外観変化が少なかったため、試験体番号 n=2 では 4 週間、n=3 では 6 週間の試験を実施した。図 4.5.5 は、2 週間後 (n=1) の外観のみ示している。

付着力試験では、著しい付着強度の低下は見られなかったが、CW レーザーの R4 と R5 で一部に塗膜の膨れが確認された。また、ディスクサンダーやレーザーケレンでは、鋼素地に錆の発生が確認できた。

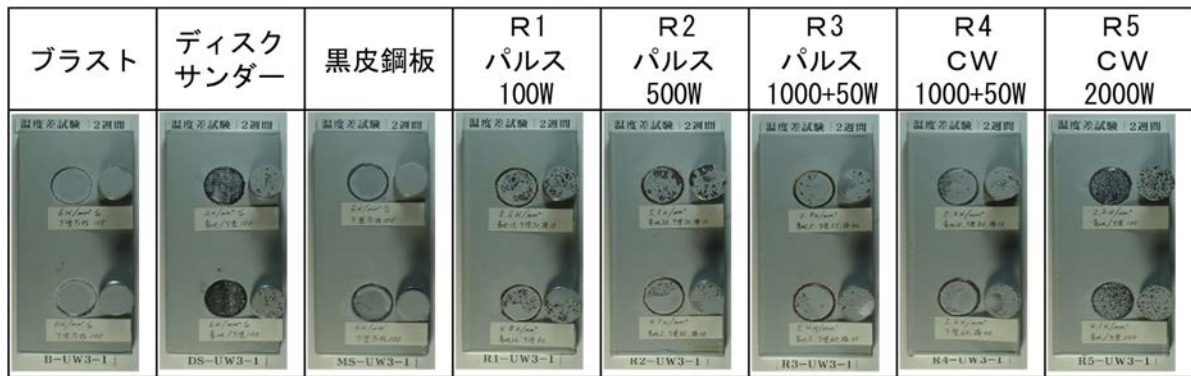
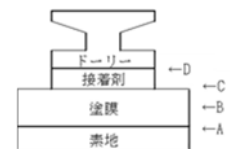


図 4.5.5 温度勾配試験 2 週間後の外観 (没水部用エポキシ)

表 4.5.4 温度勾配試験後の付着強度

試験項目 : 温度勾配試験 (20-40°C) (付着強度)

試験条件	試験塗料	n	プラスト	ディスクサンダー	黒皮鋼板	レーザー照射条件				
						R1	R2	R3	R4	R5
n=1 2週間 n=2 4週間 n=3 6週間	エポキシ 没水部用	1	6N/mm2	6N/mm2	6N/mm2	5.6N/mm2	5.5N/mm2	4.8N/mm2	5.3N/mm2	2.2N/mm2
			B:90 C:10	A:30 B:70	B:90 C:10	A:15 B:70 C:15	A:20 C:70 D:10	A:10 C:55 D:35	A:10 C:80 D:10	A:100
			6N/mm2	6N/mm2	6N/mm2	4.8N/mm2	4.7N/mm2	5.4N/mm2	5.4N/mm2	4.1N/mm2
			B:85 C:15	A:75 B:25	B:80 C:15 D:5	A:10 B:60 C30	A:5 B:30 C:55 D:10	A:5 B:40 C:30 D:20	B:40 C:20 D:40	A:100
									一般部膨れ	一般部膨れ
		2	6N/mm2	5.5N/mm2	6N/mm2	5.6N/mm2	5.5N/mm2	5.0N/mm2	5.5N/mm2	5.2N/mm2
			B:80 C:20	A:100	A:30 B:70	A:40 B:60	A:50 B:50	A:15 B:50 C:35	B:15 C:85	A:45 B:55
			6N/mm2	5.5N/mm2	6N/mm2	4.8N/mm2	4.7N/mm2	5.2N/mm2	5.3N/mm2	4.1N/mm2
			B:80 C:20	A:100	A:20 B:80	A:35 B:65	A:40 B:60	A:25 B:35 C:40	B:100	A:5 B:95
		3	3.6N/mm2	3.0N/mm2	3.1N/mm2	4.2N/mm2	3.5N/mm2	2.8N/mm2	3.3N/mm2	3.0N/mm2
			B:75 D:25	A:15 B:85	B:30 D:70	A:45 B:40 D:15	A:10 B:55 C:20 D:15	A:20 B:20 D:60	B:50 D:50	B:25 D:75



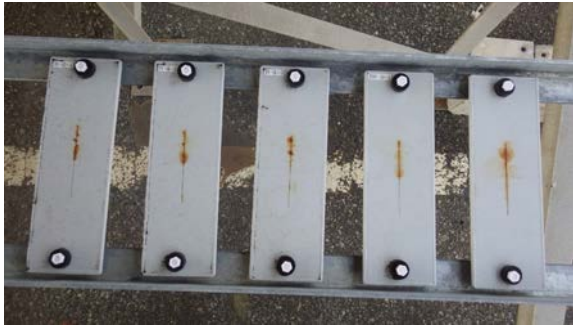
#### 4.5.5 屋外暴露試験

2020年8月3日の架設後半年の状態、2020年12月25日の架設後約1年の状態、および2022年2月7日の架設後2年の状態を報告する。半年後の外観写真は図 4.5.6 と図 4.5.7、約1年後

の外観写真は図 4.5.8 と図 4.5.9, 2 年後の外観写真は図 4.5.10 と図 4.5.11 に示す。また, 半年後と 2 年後では, 錆幅と膨れ幅を評価しており, その結果を表 4.5.5 と表 4.5.6 に, 錆幅と膨れ幅の試験条件ごとの平均値を図 4.5.12 に示す。

試験体は 1 年後までは一般部での変状は何れの条件でも発生していないが, 2 年後ではパルスレーザーの 100W と 500W で膨れが確認できた。有機ジンクなし部分のカット部における錆幅や膨れは, 比較試験体 (表 4.2.1 のレーザー処理以外の試験体) と同等の幅になっている。有機ジンクありの部分では, ブラスト処理では錆や膨れはあまり発生していないが, レーザー処理試験体は錆や膨れが発生しているものが多く, 錆幅が大きくなっている。半年後と 1 年後では大きな錆幅や膨れの進行はないと判断できるが, 2 年後では, 有機ジンクありのカット部の錆汁が一般部へ広がっている事が確認できる。

CT 鋼のブラスト処理やディスクサンダー処理では, 1 年経過時に錆や膨れの発生は殆どなかったが, 2 年経過で全体的に端部の錆発生が目立ってきている。CT 鋼のレーザー処理は, 有機ジンクありの部分でも錆や膨れの発生が進行していることが確認でき, CW レーザー1000+50W は全体に錆発生が見られた。試験体によって半年では多く見られなかった試験体端部の錆が, 1 年後に発生, もしくは広がっていて, 2 年経過では錆の発生が更に進行していることが確認できる。ブラスト処理の CT 鋼は, 錆の発生が他の試験体と比較して最も少ない。レーザー処理の中では, パルスレーザー500W (R2) とパルスレーザー100+50W (R3) の試験体が比較的良好な結果を維持している。



左から B-④-1 から DS-④-2



左から DS-④-3 から R1-④-1



左から R1-④-2 から R2-④-3

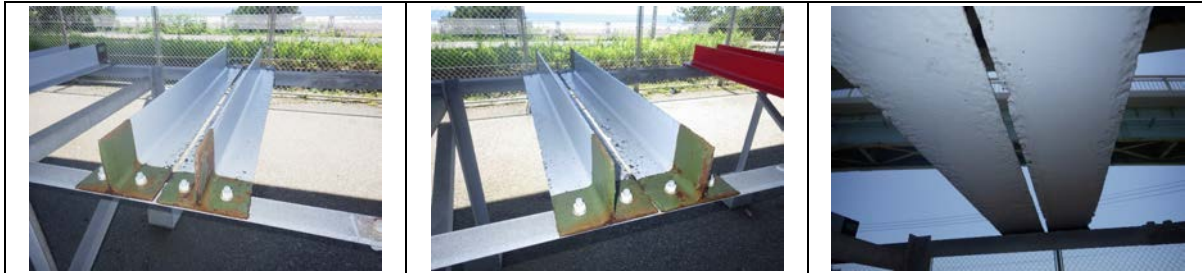
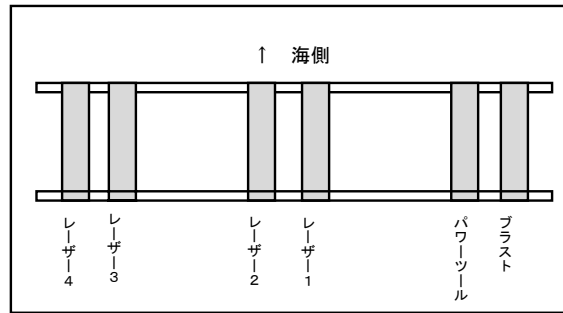


左から R3-④-1 から R4-④-2



左から R4-④-3 から R4-④-6

図 4.5.6 暴露試験体半年後の外観 (2020年8月8日撮影)



左：パワーツール，右：ブラスト



左：ブラスト，右：パワーツール



左：R2，右：R1



左：R1，右：R2

図 4.5.7 暴露試験体 CT 鋼半年後の外観（2020 年 8 月 8 日撮影）（その 1）

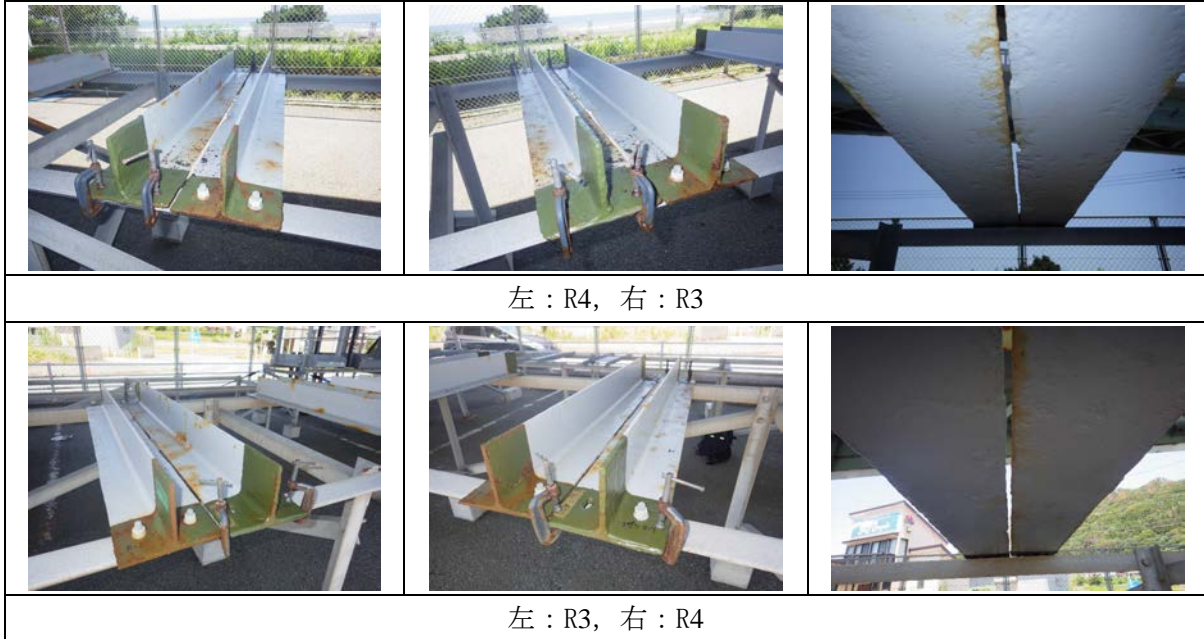
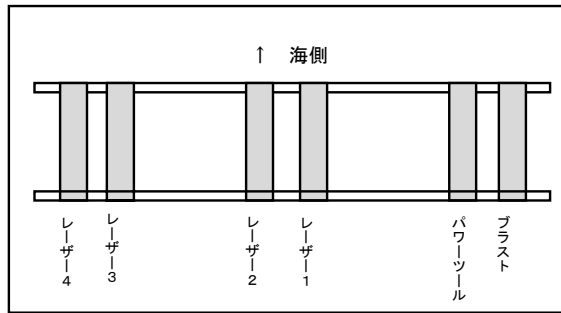


図 4.5.7 暴露試験体 CT 鋼半年後の外観 (2020 年 8 月 8 日撮影) (その 2)

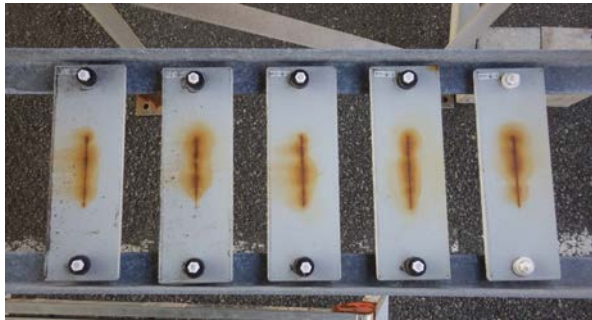




左から B-④-1 から DS-④-2



左から DS-④-3 から R1-④-1



左から R1-④-2 から R2-④-3

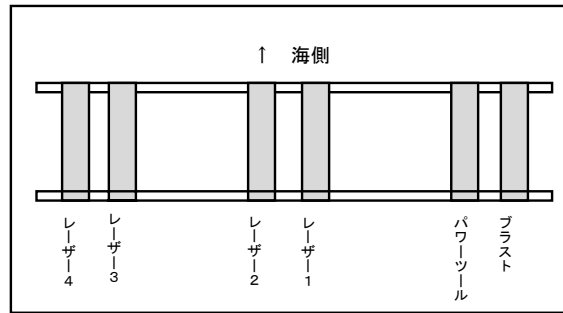


左から R3-④-1 から R4-④-2

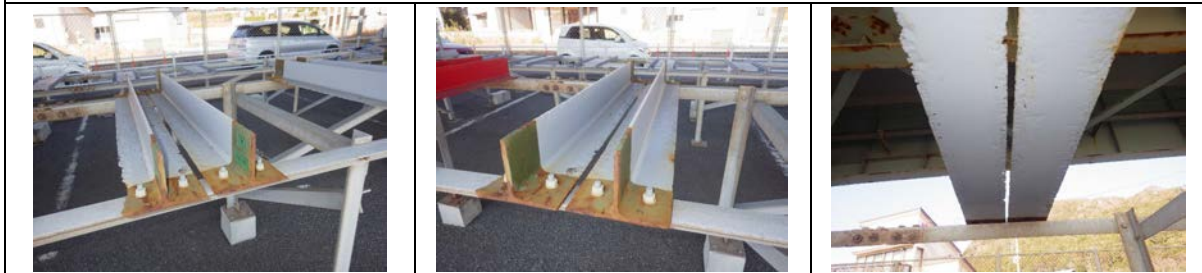


左から R4-④-3 から R4-④-6

図 4.5.8 暴露試験体 1 年後の外観 (2020 年 12 月 25 日撮影)



左：パワーツール，右：ブラスト



左：ブラスト，右：パワーツール



左：R2，右：R1



左：R1，右：R2

図 4.5.9 暴露試験体 CT 鋼 1 年後の外観（2020 年 12 月 25 日撮影）（その 1）

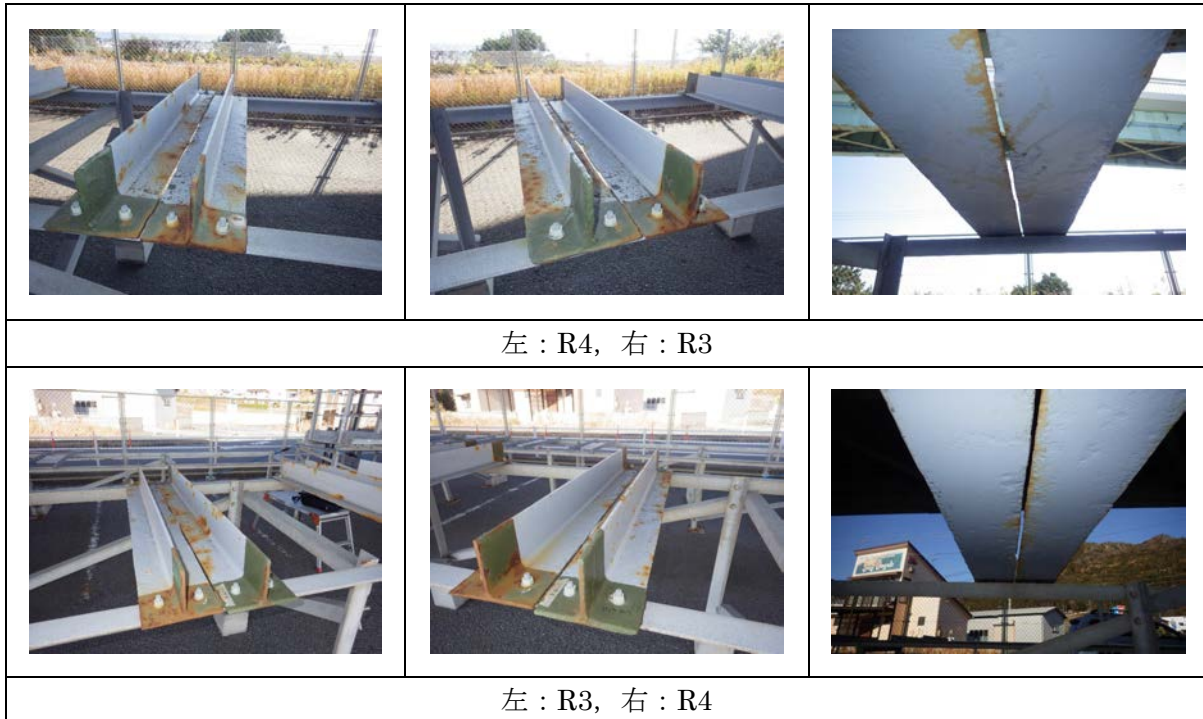
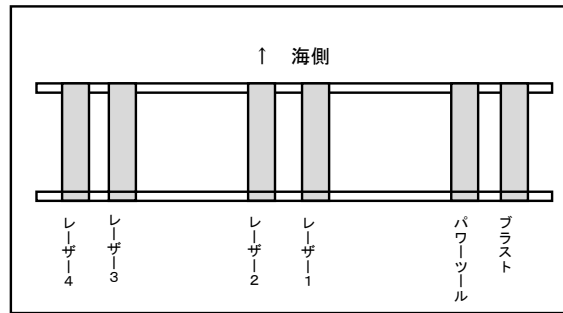
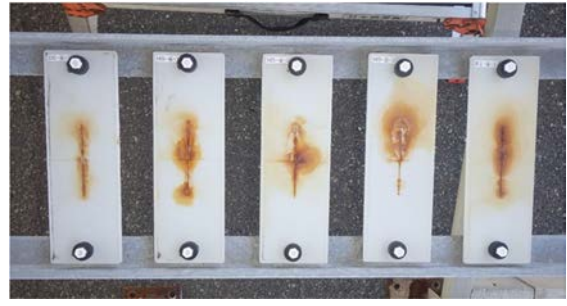


図 4.5.9 暴露試験体 CT 鋼 1 年後の外観（2020 年 12 月 25 日撮影）（その 2）



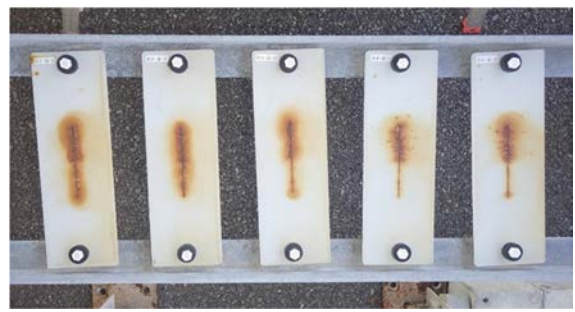
左から B-④-1 から DS-④-2



左から DS-④-3 から R1-④-1



左から R1-④-2 から R2-④-3

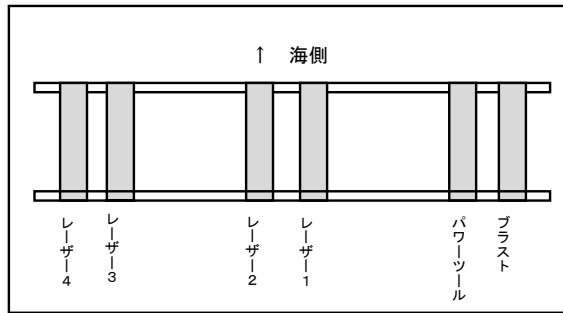


左から R3-④-1 から R4-④-2



左から R4-④-3 から R4-④-6

図 4.5.10 暴露試験体 2 年後の外観 (2022 年 2 月 7 日撮影)



左：パワーツール，右：ブラスト



左：ブラスト，右：パワーツール

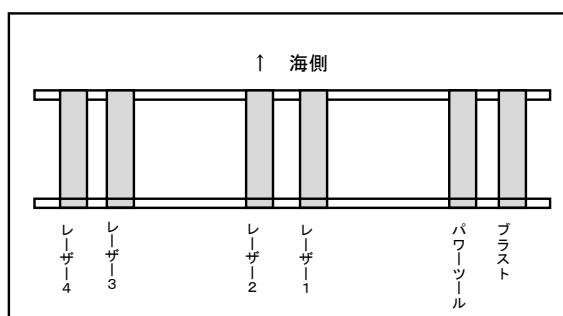


左：R2，右：R1



左：R1，右：R2

図 4.5.11 暴露試験体 CT 鋼 2 年後の外観 (2022 年 2 月 7 日撮影) (その 1)



左：R4，右：R3



左：R3，右：R4

図 4.5.11 暴露試験体 CT 鋼 2 年後の外観 (2022 年 2 月 7 日撮影) (その 2)

表 4.5.5 暴露試験体半年後と2年後の錆幅および膨れ計測結果

鴨川暴露場 評価結果 ～試験板～

塗装仕様: <有機ジンクリッチペイント(75μm)>  
エポキシ樹脂塗料下塗 (60μm x 2)

評価基準: さび JIS K 5600-8-3  
膨れ JIS K 5600-8-2

<暴露開始日: 2020年1月27日>

素地調整方法	試験板No	ジンク	暴露6か月後 (調査日: 2020年8月3日)					暴露1年後					暴露2年後 (調査日: 2022年2月7日)						
			一般部			カット部 (片側最大:mm)		一般部			カット部 (片側最大:mm)		一般部			カット部 (片側最大:mm)			
			さび	膨れ	その他	さび	膨れ	さび	膨れ	その他	さび	膨れ	さび	膨れ	その他	さび	膨れ		
プラスチック(グロウト) RzJIS50 μm	B-④-1	なし	Ri0	0	なし	0.5	3.5								Ri1	0	なし	7	9
		あり	Ri0	0	なし	0	0								Ri0	0	なし	2	0
	B-④-2	なし	Ri0	0	なし	0.5	3.5								Ri1	0	なし	10	10
		あり	Ri0	0	なし	0	0								Ri0	0	なし	0	0
	B-④-3	なし	Ri0	0	なし	0.5	3.0								Ri1~2	0	なし	11	12
		あり	Ri0	0	なし	0	0								Ri0	0	なし	0	0
ディスクサンダー	DS-④-1	なし	Ri0	0	なし	0.5 >	5.0								Ri0	0	なし	11	14
		あり	Ri0	0	なし	0	0								Ri0	0	なし	0	2
	DS-④-2	なし	Ri0	0	なし	0.5	10								Ri0	0	なし	11	20
		あり	Ri0	0	なし	0	0								Ri0	0	なし	0	7
	DS-④-3	なし	Ri0	0	なし	0.5	10								Ri0	0	なし	7	21
		あり	Ri0	0	なし	0	0								Ri0	0	なし	1	8
黒皮銅板	MS-④-1	なし	Ri0	0	なし	0.5	5.0								Ri0	0	なし	14	25
		あり	Ri0	0	なし	0	0								Ri0	0	なし	0	6
	MS-④-2	なし	Ri0	0	なし	0.5	5.0								Ri0	0	なし	1	18
		あり	Ri0	0	なし	0	0								Ri0	0	なし	1	4
	MS-④-3	なし	Ri0	0	なし	0.5	11								Ri0	0	なし	0	17
		あり	Ri0	0	なし	0	0								Ri0	0	なし	0	6
ハルスレーザー 100W	R1-④-1	なし	Ri0	0	なし	1.0	2.0								Ri1	4(S2)	なし	7	5
		あり	Ri0	0	なし	0.5 >	2.0								Ri0	4(S2)	なし	3	4
	R1-④-2	なし	Ri0	0	なし	0.5	1.0								Ri1	4(S2)	なし	5	5
		あり	Ri0	0	なし	0.5 >	1.5								Ri0	0	なし	4	4
	R1-④-3	なし	Ri0	0	なし	1.0	1.5								Ri0	4(S2)	なし	12	4
		あり	Ri0	0	なし	0.5 >	1.0								Ri1	0	なし	2	4
ハルスレーザー 500W	R2-④-1	なし	Ri0	0	なし	0.5	1.0								Ri1	4(S2)	なし	11	4
		あり	Ri0	0	なし	0.5 >	2.0								Ri0	0	なし	3	6
	R2-④-2	なし	Ri0	0	なし	0.5	2.0								Ri0	3(S2)	なし	8	3
		あり	Ri0	0	なし	0.5 >	2.0								Ri0	0	なし	0	4
	R2-④-3	なし	Ri0	0	なし	0.5	2.5								Ri1	4(S2)	なし	11	6
		あり	Ri0	0	なし	0.5 >	1.0								Ri0	0	なし	4	5
ハルスレーザー 1000+50W	R3-④-1	なし	Ri0	0	なし	1.0	2.5								Ri0	0	なし	12	5
		あり	Ri0	0	なし	0.5 >	3.5								Ri0	0	なし	3	3
	R3-④-2	なし	Ri0	0	なし	0.5	2.0								Ri0	0	なし	13	4
		あり	Ri0	0	なし	0.5 >	1.5								Ri0	0	なし	4	3
	R3-④-3	なし	Ri0	0	なし	0.5	4.0								Ri0	0	なし	10	5
		あり	Ri0	0	なし	0	0								Ri0	0	なし	0	4
CWLレーザー 1000+50W	R4-④-1	なし	Ri0	0	なし	1.0	5.0								Ri1	0	なし	16	16
		あり	Ri0	0	なし	0	2.0								Ri0	0	なし	0	2
	R4-④-2	なし	Ri0	0	なし	0.5	6.0								Ri1	0	なし	12	12
		あり	Ri0	0	なし	0.5 >	0								Ri0	0	なし	1	1
	R4-④-3	なし	Ri0	0	なし	0.5 >	6.0								Ri1	0	なし	10	10
		あり	Ri0	0	なし	0	0								Ri0	0	なし	0	1
	R4-④-4	なし	Ri0	0	なし	0.5	5.5								Ri1	0	なし	8	8
		あり	Ri0	0	なし	0	0								Ri0	0	なし	0	1
	R4-④-5	なし	Ri0	0	なし	0.5	4.0								Ri1	0	なし	8	8
		あり	Ri0	0	なし	0	0								Ri0	0	なし	0	0
	R4-④-6	なし	Ri0	0	なし	1.0	5.0								Ri1	0	なし	7	9
		あり	Ri0	0	なし	0.5 >	1.0								Ri0	0	なし	2	5

表 4.5.6 暴露試験体 CT 鋼半年後と 2 年後の錆幅および膨れ計測結果

鴨川暴露場 評価結果 ~CT試験体~

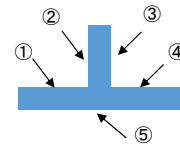
<暴露開始日:2020年1月27日>

素地調整方法	ジンク有無	評価	暴露6か月後 (調査日:2020年8月3日)					暴露2年後 (調査日:2022年2月7日)				
			①	②	③	④	⑤	①	②	③	④	⑤
ブラスト(グリット) RzJIS50 μm	なし	さび	Ri0	Ri0	Ri0	Ri0	Ri0	Ri0	Ri0	Ri0	Ri0	Ri0
		膨れ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		その他	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	エッジさび	エッジさび
	あり	さび	Ri0	Ri0	Ri0	Ri0	Ri0	Ri0	Ri0	Ri0	Ri0	Ri0
		膨れ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		その他	なし	なし	なし	なし	なし	エッジさび	なし	なし	なし	なし
ディスクサンダー	なし	さび	Ri0	Ri0	Ri0	Ri0	Ri0	Ri1	Ri0	Ri0	Ri0	Ri1
		膨れ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		その他	なし	なし	なし	なし	なし	エッジ2点さび	なし	エッジ3点さび	エッジさび	エッジさび
	あり	さび	Ri0	Ri0	Ri0	Ri0	Ri0	Ri0	Ri0	Ri0	Ri0	Ri0~1
		膨れ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		その他	なし	なし	なし	エッジ2点さび	エッジ2点さび	なし	なし	なし	エッジさび	エッジさび
ハルスレーサー 100W	なし	さび	Ri 1	Ri0	Ri0	Ri0	Ri0	Ri 1	Ri0	Ri1	Ri1	Ri1
		膨れ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		その他	エッジ孔食部さび	なし	エッジ2点さび	エッジ1点さび さび1点	エッジ1点さび	エッジさび	なし	エッジさび	エッジさび	エッジさび
	あり	さび	Ri0	Ri0	Ri0	Ri0	Ri0	Ri0	Ri0	Ri0	Ri0	Ri0
		膨れ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		その他	もらいさび1点	なし	なし	エッジ1点さび	エッジ1点さび	なし	なし	なし	なし	なし
ハルスレーサー 500W	なし	さび	Ri0	Ri 0~1	Ri 0~1	Ri 0~1	Ri0	Ri 1	Ri1	Ri1	Ri1	Ri1
		膨れ	0	0	0	0	0	2(S4)	2(S2)	2(S2)	0	0
		その他	なし	2点さび	2点さび	1点さび	なし	エッジさび	エッジさび	エッジさび	エッジさび	エッジさび
	あり	さび	Ri0	Ri0	Ri0	Ri0	Ri0	Ri0	Ri0	Ri0	Ri0	Ri0~1
		膨れ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		その他	なし	なし	なし	エッジ1点さび	エッジ1点さび	エッジさび	なし	なし	エッジさび	エッジさび
ハルスレーサー 1000+50W	なし	さび	Ri 0~1	Ri0	Ri0	Ri0	Ri0	Ri 1~2	Ri0	Ri1	Ri0	Ri1
		膨れ	0	0	0	0	0	2(S3)	0	0	0	0
		その他	2点さび	なし	なし	エッジ1点さび	エッジ1点さび	エッジさび	なし	エッジさび	エッジさび	エッジさび
	あり	さび	Ri0	Ri0	Ri0	Ri0	Ri0	Ri0	Ri0	Ri0	Ri0	Ri1
		膨れ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		その他	1点さび	なし	1点さび	エッジ1点さび	エッジ1点さび	エッジさび	なし	エッジ1点さび	エッジ1点さび	エッジ1点さび
CWLレーサー 1000+50W	なし	さび	Ri 1~2	Ri 1	Ri 1	Ri 2	Ri0	Ri 2	Ri 1~2	Ri 1~2	Ri 2~3	Ri1
		膨れ	0	0	0	0	0	0	2(S3)	2(S3)	2(S2)	2(S2)
		その他	さび10点	さび15点	さび10点	さび多	エッジ多数さび	エッジさび	エッジさび	エッジさび	エッジさび	エッジさび
	あり	さび	Ri 1~2	Ri 2	Ri 2	Ri 1~2	Ri0	Ri 3	Ri 3	Ri 3	Ri 2	Ri1
		膨れ	0	0	0	0	0	3(S3)	2(S2)	3(S3)	1(S2)	2(S2)
		その他	さび約20点	①、②間、 多数さび	なし	なし	エッジ多数さび	エッジさび	エッジさび	エッジさび	エッジさび	エッジさび

塗装仕様: <有機ジンクリッチペイント (75μm)>  
 エポキシ樹脂塗料下塗 (60μm x 2)  
 ポリウレタン樹脂塗料用中塗 (30μm)  
 ポリウレタン樹脂塗料上塗 (25μm)

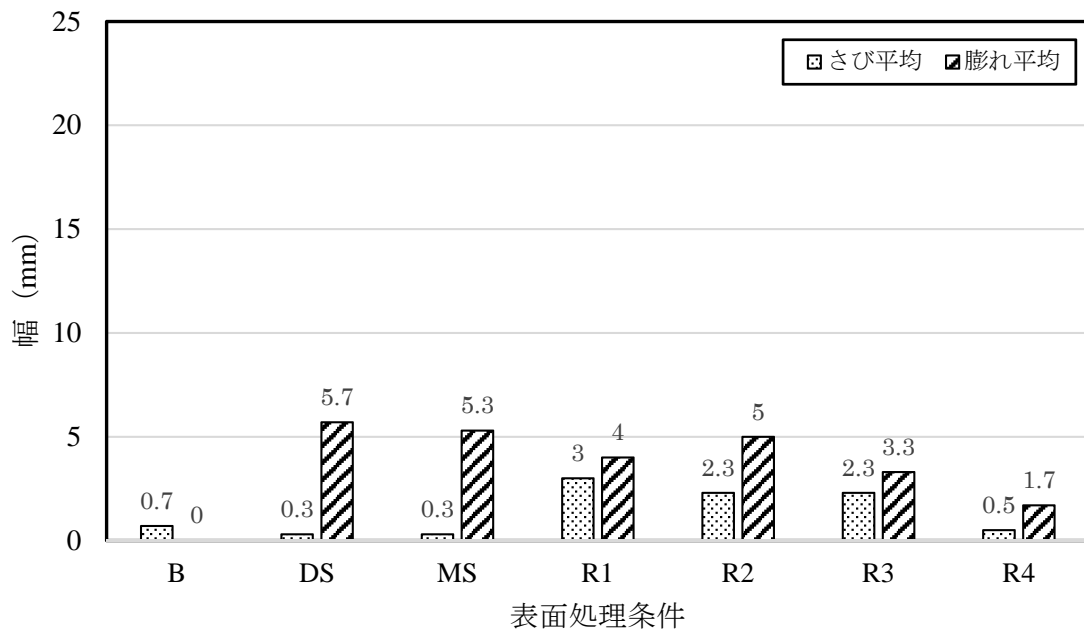
評価基準: さび JIS K 5600-8-3  
 膨れ JIS K 5600-8-2

評価位置: 海側からみて

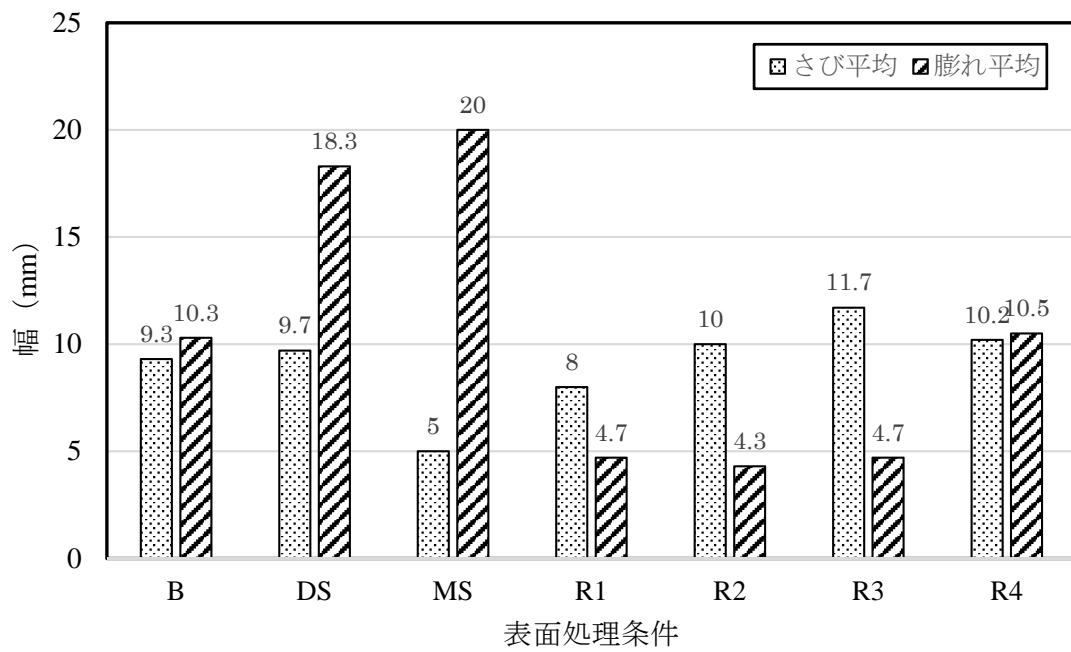


端部から100mmは評価対象外





(a) ジンクあり部



(b) ジンクなし部

図 4.5.12 暴露試験体 2 年後の錆幅および膨れ幅平均

#### 4.6 まとめ

未処理黒皮鋼板と、鍍板をブラスト処理、ディスクサンダー処理、レーザー処理（5条件）した試験体に対して各種適用塗料を塗装し、塩水噴霧試験、複合サイクル試験、温度勾配試験、屋外暴露試験を実施した。

塩水噴霧試験では、レーザー処理の R1, R2, R3 で、有機ジンクリッチペイントの場合は鍍幅と付着強度が、エポキシ下塗りの場合は鍍幅が、ブラスト処理やディスクサンダー処理より耐久性の劣る結果となった。複合サイクル試験では、R1 が付着強度について、R3 が鍍幅について、ブラスト処理やディスクサンダー処理より耐久性の劣る結果となった。温度勾配試験では、レーザー処理試験体で、ブラスト処理やディスクサンダー処理と比較して、大きく付着強度が劣る結果となるものはなかった。

鴨川暴露試験 2 年では、鋼板試験体の有機ジンクリッチペイントがない部分において、各種レーザー処理試験体は、ブラスト処理とディスクサンダー処理と同じ程度の鍍発生であったが、有機ジンクリッチペイントがある部分では、R1, R2, R3 は、ブラスト処理とディスクサンダー処理より鍍発生が悪い結果となった。CT 試験体では、有機ジンクリッチペイント有無に関係なく、レーザー処理試験体の腐食耐久性がブラスト処理やディスクサンダー処理と比較して、劣る傾向が見られた。特に、R4 は全体的に鍍発生が多い傾向が見られた。レーザー処理試験体の腐食耐久性が、ブラスト処理やディスクサンダー処理に比べて劣る傾向が見られた理由として、レーザーによる除鍍の際に発生する酸化皮膜の影響、レーザー処理で鍍が完全に除去できていないまま塗装した可能性、レーザー処理後に塗装するまでのインターバルによる戻り鍍の可能性などが考えられるが、現状では、最も影響を与えた原因は特定できていない。

今後も、屋外暴露試験の継続調査を行い、実環境での耐久性を明らかにしていく予定である。