

「鋼構造物の被覆防食に関する長期耐久性の研究」

被覆防食の長期暴露試験による耐久性評価

—駿河湾・沖ノ鳥島における海洋暴露試験結果—

国立研究開発法人土木研究所
先端材料資源研究センター (iMaRRC)

富山 禎仁

はじめに

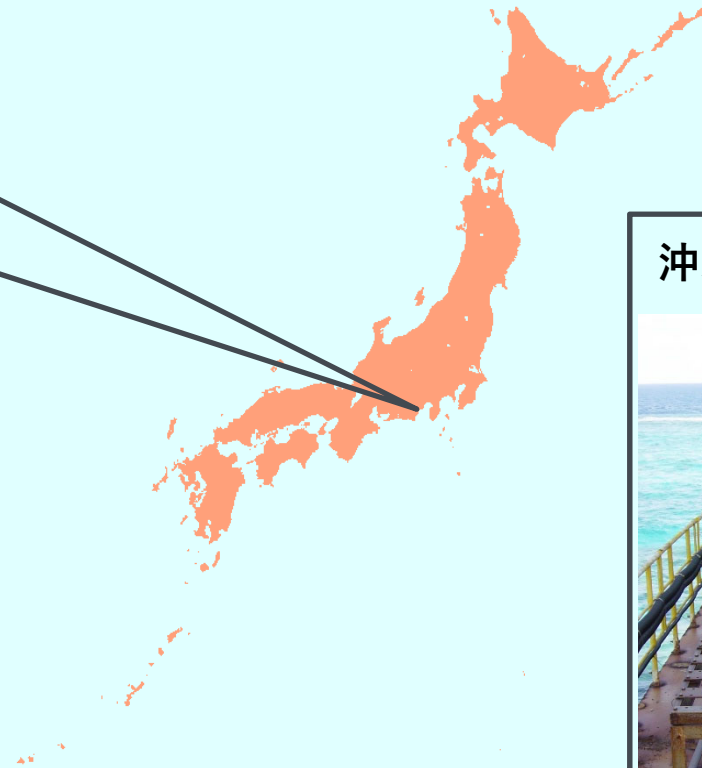
- 沖ノ鳥島は熱帯地域に位置し高温多湿、高日照で、なおかつ潮流や波高が大きく常時海水飛沫を受けるなど、本土周辺海域と比べてはるかに厳しい腐食環境であることから、各種建設材料の長期耐久性の促進評価に適していると考えられる。
- 土木研究所と日本鉄鋼連盟（旧 鋼材倶楽部）は、海洋鋼構造物を対象とした防食技術の開発及びそれらの長期耐久性評価のため、同島で19.5年間にわたり金属系建設材料の海上大気暴露試験を行った。
- これらと同じ材料の本土周辺海域での長期耐久性についても把握するため、併行して駿河湾海洋技術総合研究施設（静岡県焼津市の駿河海岸沖合250 m）においても、24年間にわたる海上大気暴露試験を行い、2箇所異なる腐食環境における暴露試験結果について比較し考察した。

暴露試験箇所と暴露方法

駿河湾海洋技術総合研究施設



暴露試験箇所

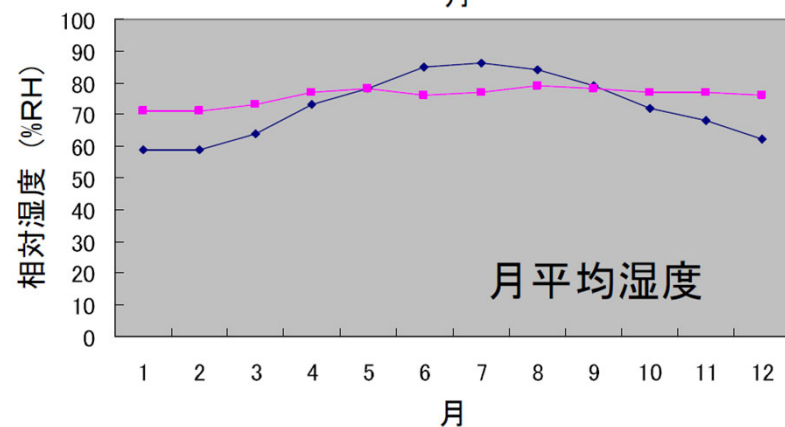
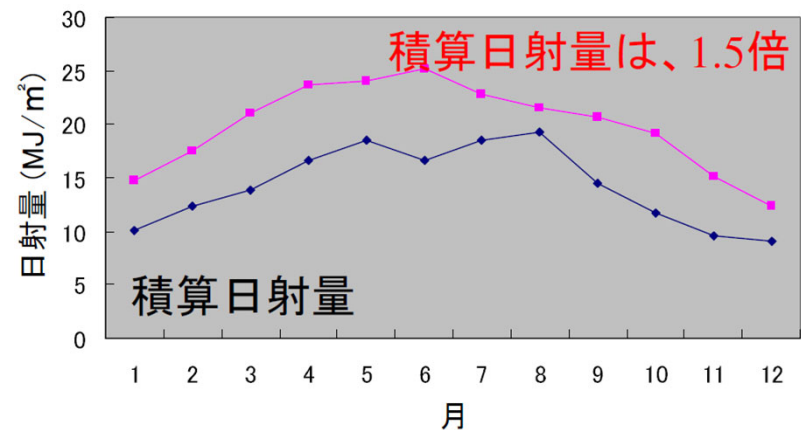
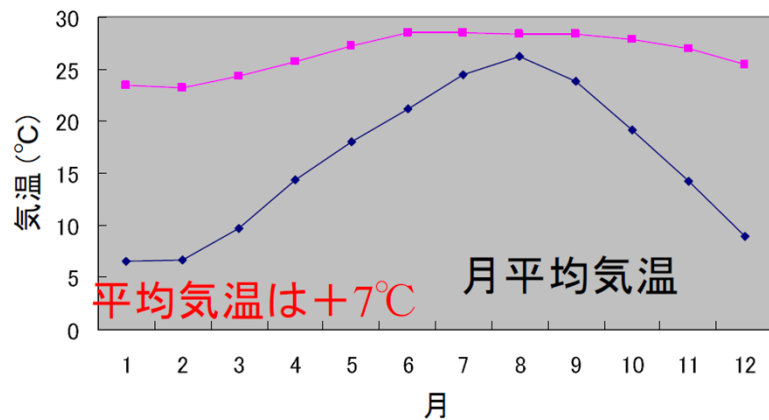


沖ノ鳥島作業基地 (SEP)



駿河湾では海上高さ約13 m、南向き傾斜60°の架台を用い、沖ノ鳥島では海上高さ約15 m、南向き傾斜5°の架台を用いて試験片を暴露

暴露試験箇所の気象条件（海上大気部）



暴露試験箇所	位置	年平均			年間濡れ時間 (ISO 9223)	日射量指数 (駿河湾を1とした)
		気温 (°C)	海水温 (°C)	湿度 (%)		
駿河湾	北緯34° 47' 東経138° 19'	16.6※1	21※1	67※1	1392時間	1.0
沖ノ鳥島	北緯20° 25' 東経136° 5'	27.2※2	28※2	73※2	4476時間	1.3

※1：2001年気象庁データより

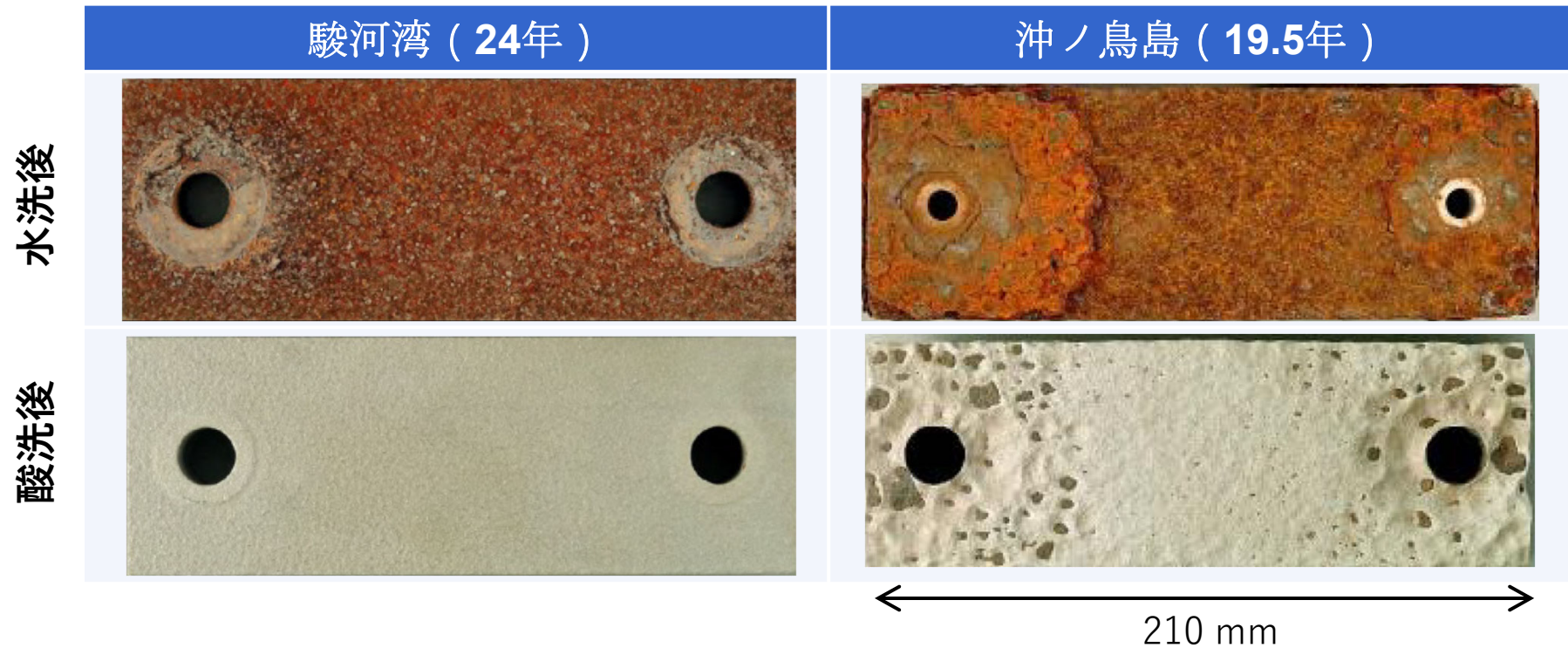
※2：2001年JAMSTECデータより

暴露試験材料

グループ		系	種類	整理番号
A	普通鋼	普通鋼	普通鋼 (SS400)	A-01
B	ステンズ鋼	オーステナイト系	10鋼種	B-01～ B-14
		二相系	2鋼種	
		フェライト系	2鋼種	
C	非鉄金属	チタン	チタン [JIS H4600 TP35H (KS50)]	C-01
		銅	銅 [C-1220]	C-02
		アルミ合金	アルミ合金 [5083]	C-03
D	被覆鋼板	金属被覆	アルミめっきステンレス鋼板	D-01
			溶融亜鉛めっき鋼板	D-02
			亜鉛-アルミ合金溶射鋼板	D-03
			アルミ溶射鋼板	D-04
		有機ライニング	ポリエチレンライニング鋼板	D-05
			ポリウレタンライニング鋼板	D-06
			超厚膜型エポキシライニング鋼板	D-07
		重防食塗装	(エポキシ+ウレタン) 塗装鋼板	D-08
			(エポキシ+フッ素樹脂) 塗装鋼板	D-09
			(エポキシ+アクリルシリコン) 塗装鋼板	D-10

※試験片は210×30～75 mm、厚さ1.2～9 mmの平板

腐食環境の比較（普通鋼の腐食速度）



駿河湾では孔食状腐食がほとんど見られなかったのに対し、沖ノ鳥島で多数見られた。

普通鋼の平均腐食速度

駿河湾（24年）	沖ノ鳥島（19.5年）
0.015 mm/year	0.178 mm/year

約12倍

金属被覆材料の暴露試験（被覆の仕様）

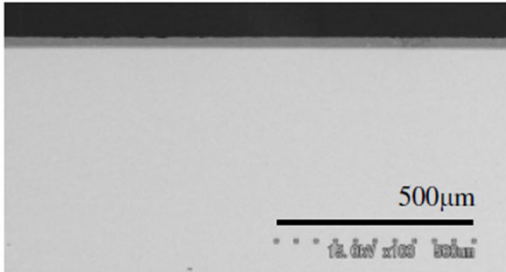
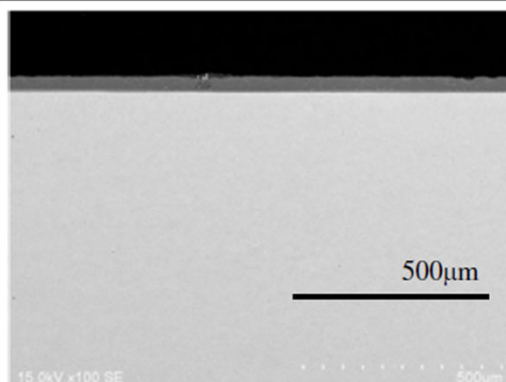
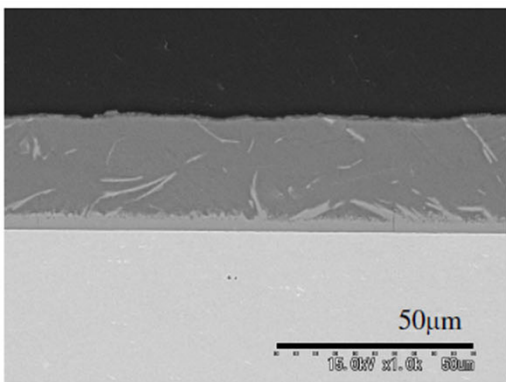
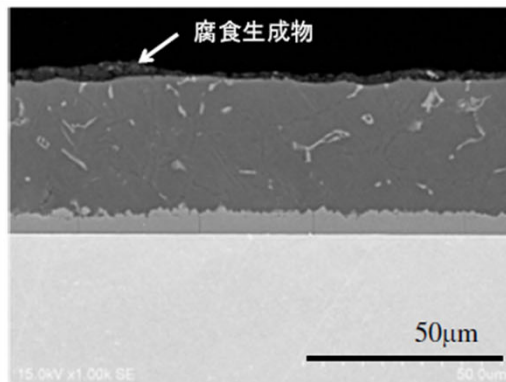
整理番号	種類	母材	めっき材料	膜厚
D01	アルミニウムめっき ステンレス鋼板	フェライト系 ステンレス (19Cr-0,4Nb- 0.4Cu)	熔融アルミニウム	約20 μm
D02	熔融亜鉛めっき鋼板	普通鋼	100%Zn	約85 μm
D03	亜鉛アルミニウム合金 溶射鋼板	普通鋼	87%Zn+13%Al 封孔処理無し	約180 μm
D04	アルミニウム溶射鋼板	普通鋼	100%Al 封孔処理あり	約300 μm

金属被覆材料の暴露試験（評価項目）

評価項目	評価方法
外観観察	水洗前、水洗後、酸洗後
被膜密着力	垂直密着力（万能試験機）
膜厚	電磁膜厚計
被覆断面観察(SEM)	駿河湾のみ元素分析（EPMA）を追加

金属被覆材料の暴露試験結果①

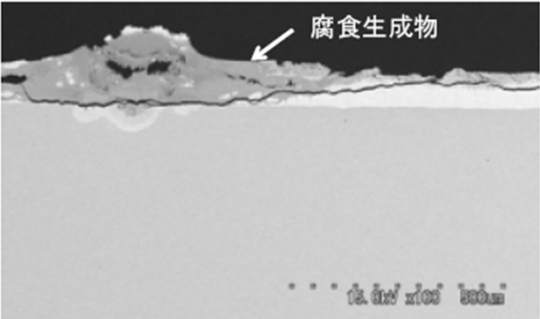
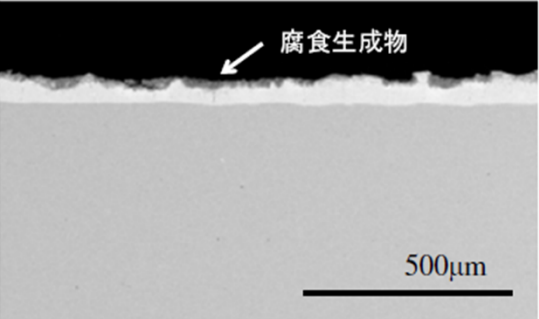
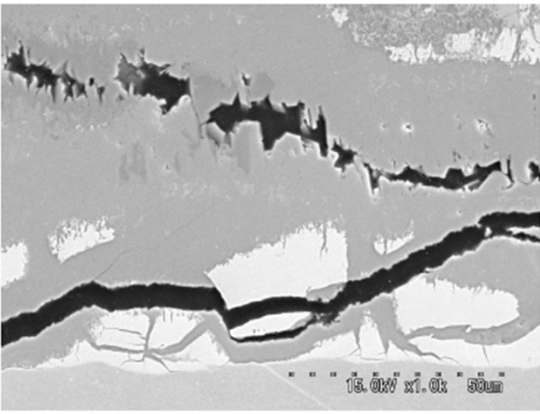
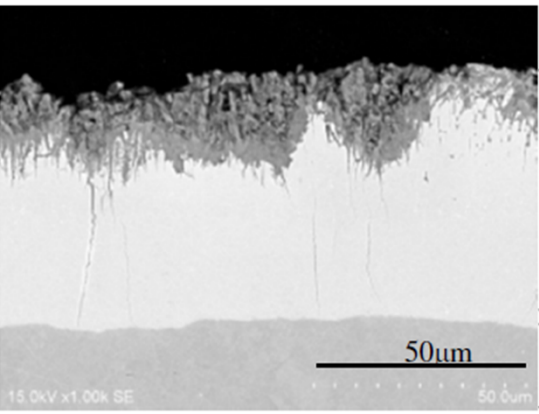
■ D01 アルミニウムめっきステンレス鋼板の断面

	沖ノ鳥島(19年)	駿河湾(24年)	
X 100			めっき ステンレス鋼
X 1000			めっき ステンレス鋼
	断面めっき膜厚: 27µm (膜厚計: 36µm)	断面めっき膜厚: 40µm (膜厚計: 57µm)	

いずれの試験箇所でも腐食生成物の形成が認められたが、めっき層は残存しており、暴露試験終了時点においても健全な防食性能を有していると考えられる

金属被覆材料の暴露試験結果②

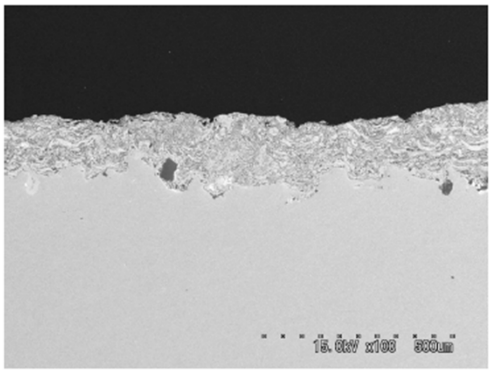
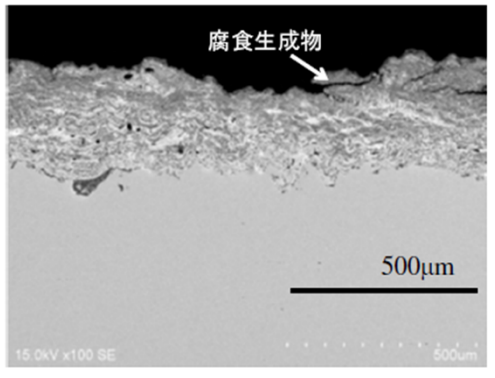
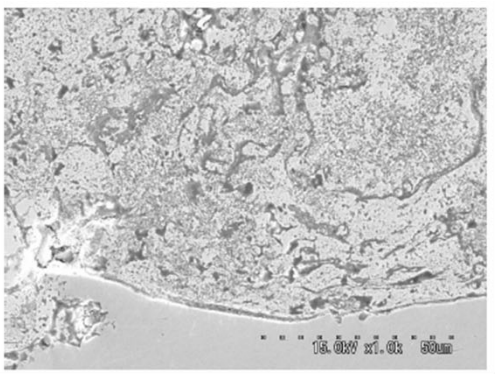
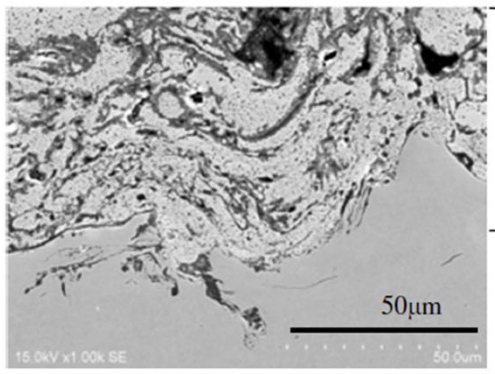
■ D02 溶融亜鉛めっき鋼板の断面

	沖ノ鳥島(19年)	駿河湾(24年)
× 100	 <p>腐食生成物</p> <p>めっき平均損耗速度=4µm/y</p>	 <p>腐食生成物</p> <p>めっき平均損耗速度=2µm/y</p> <p>めっき</p> <p>鋼板</p>
× 1000	 <p>めっき</p> <p>(腐食生成物含む)</p> <p>鋼板</p>	 <p>めっき</p> <p>(腐食生成物含む)</p> <p>鋼板</p>
	断面めっき膜厚: 97µm (膜厚計: 153µm [初期値: 88µm])	断面めっき膜厚: 57µm (膜厚計: 79µm [初期値: 81µm])

駿河湾ではめっき層が残存していたものの、沖ノ鳥島では概ねめっき層が消失した

金属被覆材料の暴露試験結果③

■ D03 亜鉛アルミニウム合金溶射鋼板の断面

	沖ノ鳥島(19年)	駿河湾(24年)
× 100		
× 1000		
	断面溶射膜厚: 161µm (膜厚計: 179µm [初期値: 173µm])	断面溶射膜厚: 242µm (膜厚計: 290µm [初期値: 168µm])

- 腐食生成物の形成が認められたが溶射被膜は残存しており、暴露試験終了時点においても健全な防食性能を有していると考えられる
- 暴露後の被膜厚さは、腐食生成物の形成によって暴露前よりも増加。増加の程度は沖ノ鳥島 < 駿河湾。

金属被覆材料の暴露試験結果④

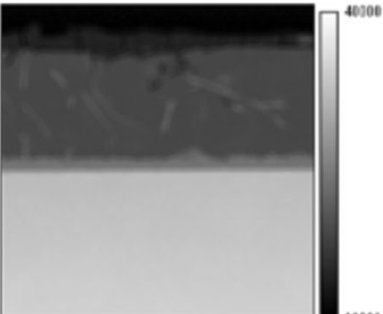
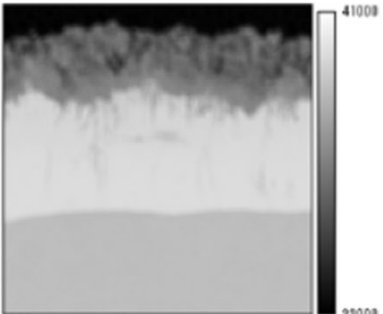
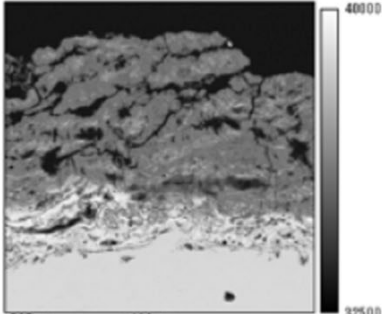
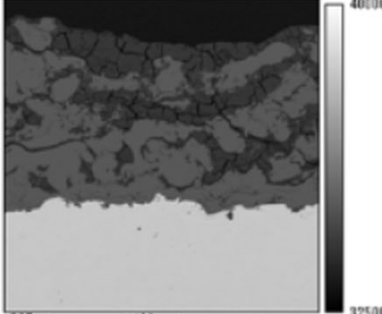
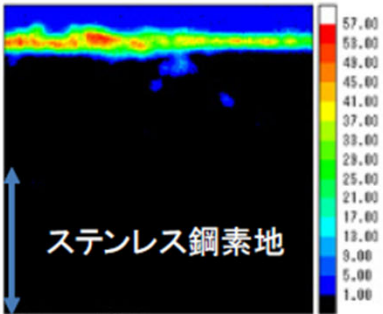
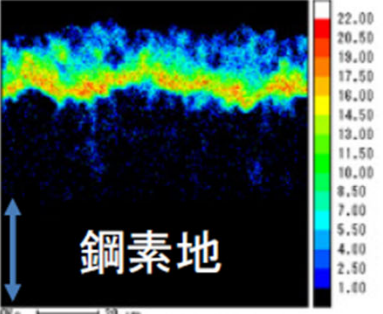
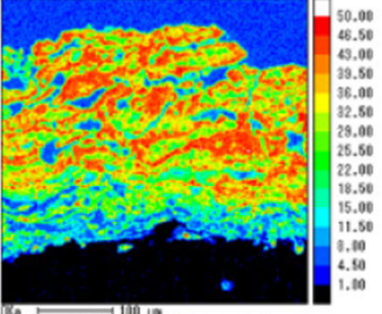
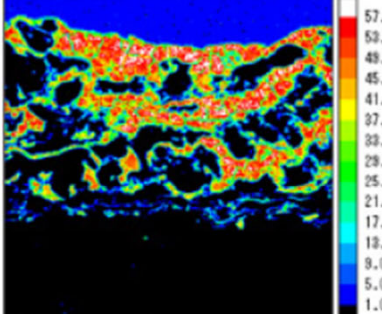
■ D04 アルミニウム溶射鋼板の断面

	沖ノ鳥島(19年)	駿河湾(24年)	
× 100			溶射 鋼板
× 1000			溶射 鋼板
	断面溶射膜厚: 290µm (膜厚計: 320µm [初期値: 299µm])	断面溶射膜厚: 194µm (膜厚計: 256µm [初期値: 220µm])	

- 腐食生成物の形成が認められたが溶射被膜は残存しており、暴露試験終了時点においても健全な防食性能を有していると考えられる
- 暴露によって被膜厚さは増加したが、沖ノ鳥島と駿河湾とで差異は明確でない。

金属被覆材料の暴露試験結果⑤

■ 駿河湾24年暴露材の断面元素分析結果

	D-01 :アルミめっきステンレス鋼板	D-02 :溶融亜鉛めっき鋼板	D-03 :亜鉛-アルミ合金溶射鋼板	D-04 :アルミ溶射鋼板
断面SEM像	 Max.:38864, Min.:32944, Ave.:36442	 Max.:39968, Min.:32944, Ave.:38171	 Max.:40896, Min.:32560, Ave.:36200	 Max.:36512, Min.:32464, Ave.:35786
酸素元素分布	 Max.:55.10, Min.:0.00, Ave.:2.40 ステンレス鋼素地	 Max.:25.97, Min.:10.00, Ave.:11.77 鋼素地	 Max.:53.33, Min.:0.00, Ave.:19.72	 Max.:68.49, Min.:10.00, Ave.:10.57
腐食生成物	めっき表層が酸化	めっき表層が酸化	溶射の隙間から内部がほぼ酸化 → 膜厚大增	溶射の隙間から内部が酸化 → 膜厚増

金属被覆材料の暴露試験結果の比較

- 溶融亜鉛めっき（沖ノ鳥島）を除き、いずれの環境でも金属被覆材料による防食性は保持されていた。
- 溶融亜鉛めっきの年間腐食量は、沖ノ鳥島（約4 $\mu\text{m}/\text{year}$ ）が駿河湾（約2 $\mu\text{m}/\text{year}$ ）の約2倍。
- めっきは表面から腐食が進行するが、溶射では溶射被膜内部の空隙から腐食が生じる可能性が示唆された。

有機被覆材料の暴露試験（被覆の仕様）

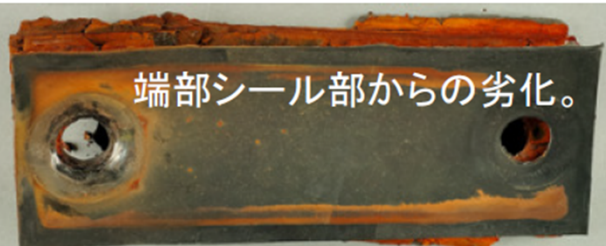
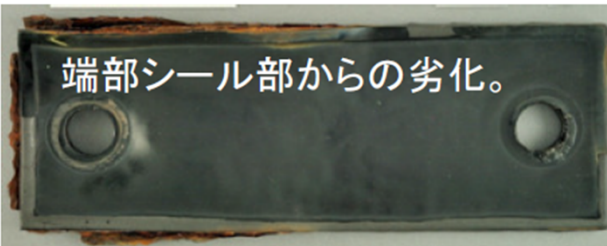



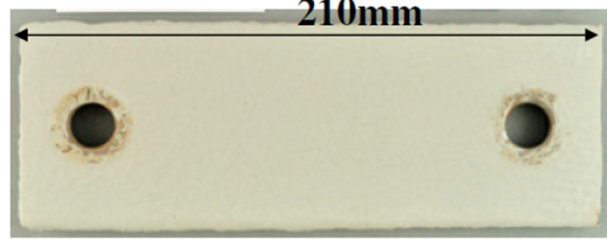
整理番号	種類	仕様	膜厚
D05	ポリエチレンライニング鋼板	プライマ／接着剤／高密度ポリエチレンをプレス貼付	約1.5 mm
D06	ポリウレタンライニング鋼板	プライマ／ポリウレタンをホットエアスプレー塗装	約3.5 mm
D07	超厚膜形エポキシライニング鋼板	ジンクリッチプライマー／エポキシ樹脂塗料1層のスプレー塗装	約2.3 mm
D08	エポキシ＋ウレタン系塗装鋼板	エポキシ下塗／エポキシ中塗／ポリウレタン上塗のスプレー塗装	約500 μ m
D09	エポキシ＋ふっ素系塗装鋼板	エポキシ下塗／エポキシ中塗／ふっ素上塗のスプレー塗装	約500 μ m
D10	エポキシ＋アクリルシリコン系塗装鋼板	エポキシ下塗／エポキシ中塗／アクリルシリコン上塗のスプレー塗装	約500 μ m

有機被覆材料の暴露試験（評価項目）

評価項目	評価方法
外観観察	水洗前、水洗後
ピンホール	ピンホールテスター
被膜密着力	垂直密着力（万能試験機）
膜厚	電磁膜厚計
被膜断面観察(SEM)	
被膜断面元素分析	EPMAによるCl濃度分布
電気絶縁抵抗	ガードリング法
インピーダンス	交流ブリッジ法
被膜硬さ	ショア硬さ（D05、D06）、バーコル硬さ（D07～D10）
光沢・色差	D08、D09、D10のみ

有機被覆材料の暴露試験結果①







■ 有機ライニングの暴露後外観

	沖ノ鳥島(19年)	駿河湾(24年)
D-05:ポリエチレンライニング鋼板	 <p>端部シール部からの劣化。</p> <p>○被覆材の劣化は無いが、剥離。</p>	 <p>端部シール部からの劣化。</p> <p>○被覆材の劣化は無いが、端の一部に剥離。</p>
D-06:ポリウレタンライニング鋼板	 <p>○裏面シール材も剥離し、チョーキング。</p>	 <p>○裏面シール材には割れ在り。</p>
D-07:超厚膜エポキシ鋼板	 <p>○グレー塗膜は白く変色。エッジに赤さび。</p>	 <p>○グレー塗膜は白く変色。</p>

- ポリエチレンライニング鋼板は、両環境とも端部シール材の不良が原因と思われる端部からの剥離が大きかった。
- その他の有機被覆鋼板はいずれも被覆層が残存していた。

有機被覆材料の暴露試験結果②

■ 重防食塗装の暴露後外観

	沖ノ鳥島(19年)	駿河湾(24年)
D-08:エポキシ +ウレタン上塗り	 <p>○上塗(白)は消失。</p>	 <p>○上塗り(白)が半分消失。</p>
D-09:エポキシ +ふっ素系樹脂 上塗り	 <p>○上塗(白)は消失。</p>	 <p>○上塗(白)は消失。</p>
D-10:エポキシ +アクリルシリコン 上塗り	 <p>○上塗(白)は半分消失。</p>	 <p>210mm ○上塗(白)は消失。</p>

有機被覆材料の暴露試験結果③

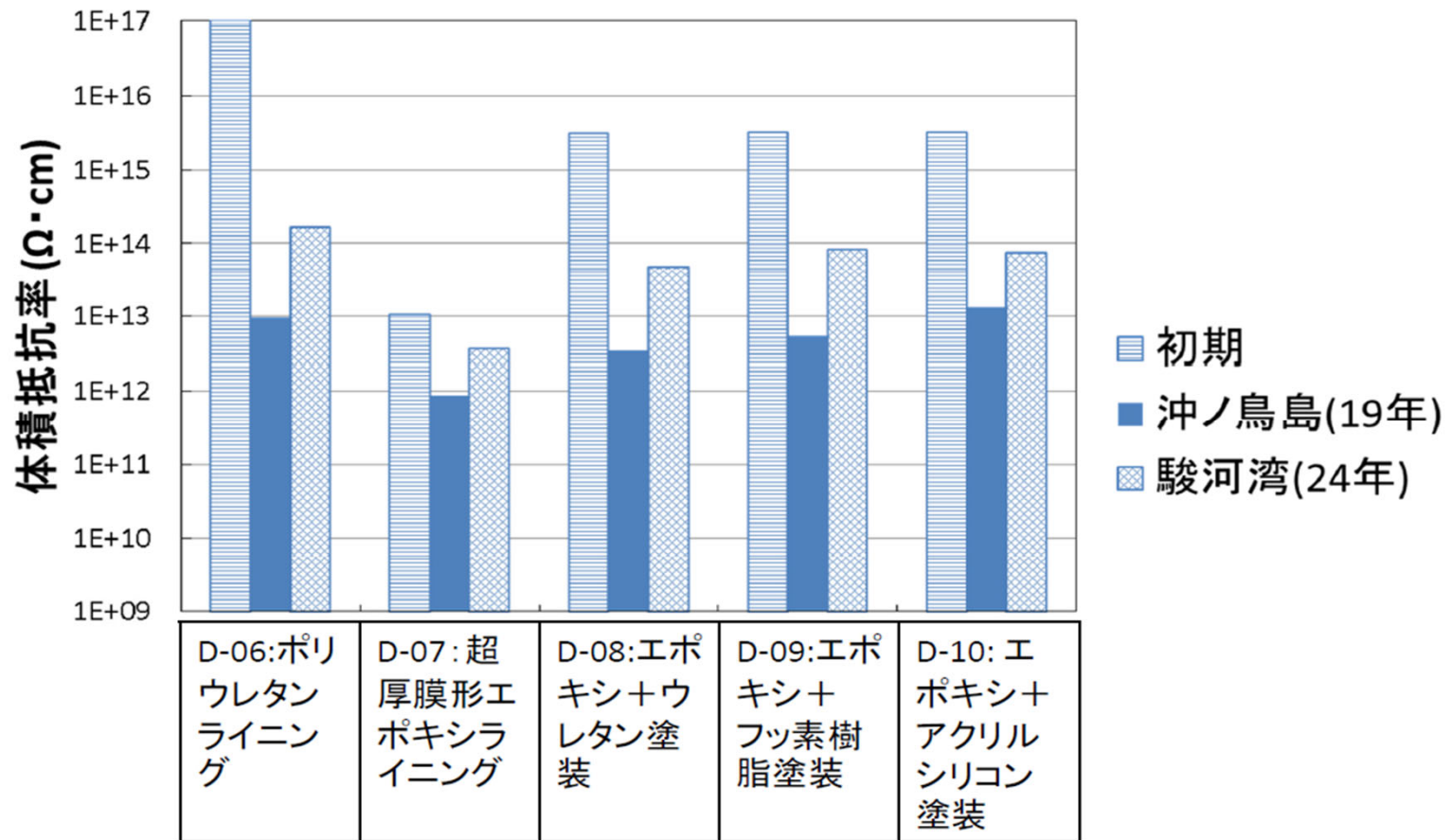
■ 被膜の密着力

No.	種類	初期密着	沖ノ鳥島19年	駿河湾24年
D-05	ポリエチレンライニング鋼板		× 全面剥離	× 一部剥離
			端部からの影響	
D-06	ポリウレタンライニング鋼板	66kg/cm ²	○ 30kg/cm ² 以上	○ 89kg/cm ² 以上
D-07	超厚膜型エポキシライニング鋼板	70kg/cm ² 以上	× 12kg/cm ²	△～○ 26～81kg/cm ²
D-08	エポキシ+ウレタン系塗装鋼板	43kg/cm ²	○ 50kg/cm ² 以上	○ 79kg/cm ²
D-09	エポキシ+ふっ素系塗装鋼板	55kg/cm ²	○ 50kg/cm ² 以上	○ 85kg/cm ²
D-10	エポキシ+アクリルシリコン系塗装鋼板	55kg/cm ²	○ 50kg/cm ² 以上	○ 54kg/cm ²

- ポリエチレンライニング鋼板は、端部シール材の不良の影響が原因と思われるため、評価からは除外。
- 超厚膜型エポキシライニングは、いずれの環境でも密着力の低下が認められた。

有機被覆材料の暴露試験結果④

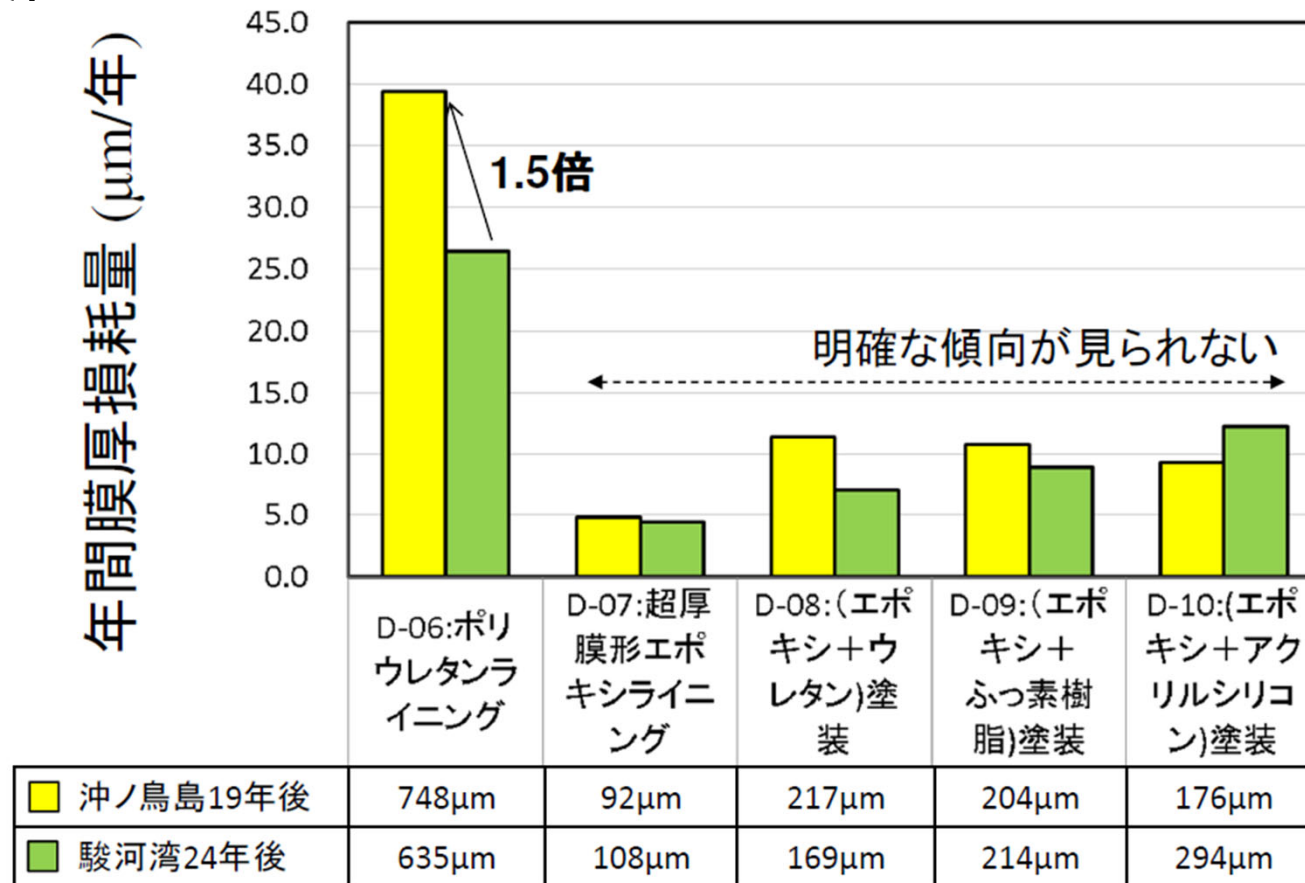
■ 暴露試験前後の有機被膜の絶縁抵抗



- 被覆層の絶縁抵抗は暴露により低下したが、いずれにおいても $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上の高い値であり、暴露試験終了時点においても **防食性は保持されている** のと考えられる。
- 暴露による絶縁抵抗の低下は駿河湾よりも沖ノ鳥島の方が大きいことから、被膜の劣化環境としては沖ノ鳥島の方が厳しいことが推察される。

有機被覆材料の暴露試験結果⑤

■ 膜厚損耗量



- 年間平均膜厚損耗量（暴露前後の膜厚差（ μm ）/暴露年数（年））が最も大きいポリウレタンライニング鋼板では、沖ノ鳥島での損耗量が駿河湾よりも1.5倍となっており、日射量の比（1.3倍）と概ね一致。
- 他の材種でも沖ノ鳥島の方が損耗量は大きかったが、エポキシ樹脂塗料/アクリルシリコン樹脂塗料塗装鋼板のみ駿河湾の方が大きい結果となった。

有機被覆材料の暴露試験結果の比較

- 有機ライニング被膜の経年での膜厚損耗量は、ポリウレタンでは沖ノ鳥島の方が駿河湾よりも1.5倍大きく、紫外線量に概ね比例する結果となった。
- 重防食塗装の膜厚損耗量は、樹脂種によっては駿河湾の方が大きい結果であった。
- ポリエチレンライニング、超厚膜型エポキシライニングを除き、密着力やインピーダンスも健全な値であり、いずれの環境でも防食性が保持されていた。

まとめ

- 2箇所異なる腐食環境で海上大気部での暴露試験を行い、結果を比較した。
- 沖ノ鳥島における普通鋼の腐食速度は、駿河湾に比べ約12倍であり、厳しい腐食環境であることが示された。
- 沖ノ鳥島における溶融亜鉛めっき被膜の腐食速度は、駿河湾の約2倍であった。
- 溶融亜鉛めっき以外の金属被覆は、環境による劣化の大きな違いはなく高い防食性が保持されていた。
- 有機ライニングおよび重防食被覆に関しては、体積固有抵抗率の値から防食性は保持されていると考えられるが、沖ノ鳥島ではその低下が大きく、被覆材料の劣化がより促進される環境であることが示された。