

アルミニウム合金部材連結部の異種金属接触腐食に関する実証的研究



名古屋産業科学研究所 上席研究員 伊藤義人

1. はじめに

2000年から日本アルミニウム協会との委託研究や共同研究を名古屋産業科学研究所を經由して継続的に行っている。アルミニウム合金の車両防護柵の開発、ライフサイクルアナリシス、耐久性評価などの研究を行ってきた。本稿は、最近10年間のステンレスボルトを用いたアルミニウム合金部材連結部の異種金属接触腐食に関する実証的な研究成果をまとめたものである。

最初に、沖縄県における橋梁用防護柵・高欄の現地実態調査を行い問題点を明らかにした。その後、14種の各種の連結部のモデル試験体を使った連続塩水噴霧促進試験によるパイロット試験によって、定性的な連結部の異種金属接触腐食の性状を把握した。さらに、沖縄宮古島において5年にわたる実証的な暴露試験を行い、連結部の異種金属接触腐食の定量的な性状を明らかにして、アルミニウム合金部材連結部の高耐久性を実現するための提案を行った。

アルミニウム合金は、軽量で耐久性や美観性に優れているので、土木分野では、これまでa)防護柵や高欄¹⁾、b)高潮や津波対策の水門、c)橋梁の張出し歩道用床版、d)照明用ポールなどに用いられてきている。最近では、橋梁検査路や作業用足場板などにも用いられるようになってきている。

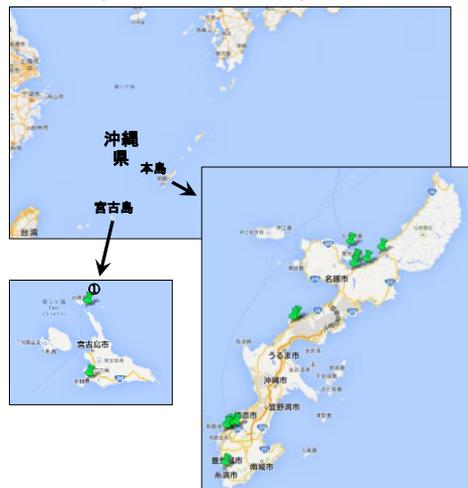
土木分野の構造材に用いられるアルミニウム合金は、5000系(Al-Mg系)と6000系(Al-Mg-Si系)が主なものであるが、アルミニウム合金部材の連結には、厳しい環境の場合はステンレスのボルトやビスを用いることが多い。これは、アルミニウム合金のボルトも開発されてはいるが、強度が低いことや使える品種が少ないためである。この場合、心配されるのがアルミニウム合金部材連結部の異種金属接触腐食である。アルミニウム合金は、ステンレス鋼より腐食電位が卑であるためである。日本アルミニウム協会の耐久性小委員会(委員長:伊藤義人)では、異種金属接触腐食に関して種々の現地調査や研究が長年行われている^{2)~7)}。

2. 沖縄県における橋梁用防護柵・高欄の異種金属接触腐食調査

厳しい環境下に設置されている沖縄県本島と宮古島の図-1と表-1に示す14橋のアルミニウム合金の橋梁用防護柵と高欄を、平成24年度(2012年度)に現地調査³⁾を行い、その後も継続的に調査を行っている。

1980年以後に設置されるようになったアルミニウム合金の橋梁用防護柵や高欄の部材連結に、厳しい環境の場合は、当初は表面処理無(無処理)のステンレスボルト類(ボルト、ナットとワッシャー)が使われていた。その後、亜鉛

フレークコーティング（初期はダクロ処理，最近はジオメット処理）が採用されるようになってきている．なお，亜鉛フレークコーティング（Zinc Flake Coating）とは，金属フレーク（亜鉛フレーク＋アルミフレーク）が数十層に積層され無機バインダーにより焼付された金属防錆表面処理である．膜厚が8 μm 程度と薄いので，ボルト類やビスの防食のための表面処理としても使われる．皮膜の腐食電位はアルミニウムに近く，アルミニウム合金との相性がよい．ジオメット処理（GEOMET）はダクロ処理（DAKURO）から人体に有害なクロムを使わないようにしたもの（クロムフリー）である．



図一 1 沖縄本島と宮古島におけるアルミニウム合金橋梁防護柵・高欄の耐久性調査地点（緑ピン）

表一 1 調査対象防護柵・高欄の概要

No.	橋梁名	施工年	種類	経年	大気暴露部腐食形態	異種金属接触腐食の有無	支柱コンクリート地覆部埋込部	耐久性の判定
1	池間大橋	1992	車両用防護柵	21年	軽度の腐食	軒天部のボルト部に孔食が発生	問題なし	ボルト部孔食進行の経時観察が必要。他は大きな問題なし
		1992	ハイテンション型高欄	21年	軒天部に孔食が点在			
2	来間大橋	1995	車両用防護柵	18年	軽度の腐食	パラスターはSUSビスとの腐食により、穴が空いている。軒天部のボルト部に大きな孔食が発生	問題なし	ボルト部孔食進行の経時観察が必要。パラスター腐食の経時観察必要
		1995	ハイテンション型高欄	18年	軒天部に孔食が点在			
3	塩屋大橋	1999	ハイテンション型高欄	14年	トップレール塗装がチョーキング発生 パラスター塗装剥がれ。鋼製支柱は塗装が剥がれ、メッキが露出している箇所あり	鋼製支柱は軒天部鋼板が発錆 アルミレールは腐食無し	アンカー式	鋼製支柱の再塗装が必要。アルミ材は腐食していないが、美観上再塗装が必要
4	源河橋	1988	車両用防護柵	25年	全体的に腐食しており、汚れている。主要横梁、支柱、ボトムレールは、前面腐食	軒天部の継ぎ手ボルトの付近に大きな孔食が発生している。パラスターも多数の孔食が発生	問題なし	ボルト部孔食進行の経時観察が必要。パラスター腐食の経時観察必要
		2009	高欄兼用車両防護柵	4年	腐食は発生していない	ボルトはダクロ処理品。腐食の発生なし	アンカー式	全く問題なし
5	屋我地大橋	1993	ハイテンション型高欄	20年	トップレール上面は全体腐食。鋳物パラスターは塗装剥がれ	軒天部のボルト部に孔食が発生	問題なし	大きな問題なし。美観上パラスター再塗装が必要
6	古宇利大橋	2005	車両用防護柵	8年	腐食は発生していない	ボルトはダクロ処理品。支柱部、継ぎ手ボルト部は腐食は発生していない。パラスター軒天のボルト部に孔食が発生	問題なし	パラスターの腐食進行の経時観察必要。他の部材は問題なし
		2005	ハイテンション型高欄	8年	腐食は発生していない			
7	羽地大橋	1991	車両用防護柵	22年	複合皮膜が黄変またはチョーキング発生	軒天部のボルト部は、酸化アルミが付着しており、腐食が進行	問題なし	ボルト部孔食進行の経時観察が必要。他は大きな問題なし
		1991	高欄	22年				
8	泊大橋	2003	車両用防護柵	10年	腐食は発生していない	ボルトはダクロ処理品。腐食の発生なし	問題なし	全く問題なし
		1986	高欄	27年 支柱18年	軒天部に孔食が点在。パラスターエッジ部に孔食。	軒天部ボルト部孔食が発生。パラスター、ボトムレール取付部が腐食	問題なし	ボルト部孔食進行の経時観察が必要。
9	波之上橋	1993	車両用防護柵	20年	チョーキングが発生している。剥がれ無し	軒天部のボルト部に孔食が発生	問題なし	ボルト部孔食進行の経時観察が必要。他は大きな問題なし
		1986	高欄	27年	高欄は塗装が剥がれている。補修で一部鉄レールを使用しており、腐食が発生している。	パラスターの鉄芯貫通部に激しい腐食 車道用の軒天ボルト部は孔食が発生	問題なし	ボルト部孔食進行の経時観察が必要。他は大きな問題なし
10	波之上橋 取付道路	1993	車両用防護柵	20年	チョーキングが発生している。剥がれ無し	軒天部のボルト部に孔食が発生	問題なし	ボルト部孔食進行の経時観察が必要。他は大きな問題なし
		1986	高欄	27年	軽度の腐食 軒天部に孔食が点在	パラスターの鉄芯貫通部に激しい腐食 車道用の軒天ボルト部は孔食が発生	地覆に亀裂が入っている。アルミ支柱と鉄筋が接触しているためと思われる。	ボルト部孔食進行の経時観察が必要。高欄地覆改修が必要（支柱と鉄筋を絶縁する）
11	恩納バイパス 6号橋	2002	高欄兼用車両防護柵	11年	腐食は発生していない	ボルトはダクロ処理品。腐食の発生なし	アンカー式	全く問題なし
12	恩納バイパス 5号橋	2002	ハイテンション型高欄	11年	腐食は発生していない	ボルトはダクロ処理品。腐食の発生なし	アンカー式	全く問題なし
13	南浜1号橋	2002	高欄兼用車両防護柵	11年	複合皮膜はチョーキングを起している。アクリル焼付は塗膜が剥がれている。軒天部は複合被膜も残っており、問題なし	ボルトはダクロ処理品。腐食の発生なし	アンカー式	強度的には全く問題ないが、美観上アクリル焼付塗装のメンテ必要
14	おもろ天空橋	2005	高欄	8年	腐食は発生していない	ボルトはダクロ処理品。腐食の発生なし	アンカー式	全く問題なし

表一 1 中に、14 の調査対象の概要と調査結果の判定結果を示す。以下に、調査した防護柵・高欄の設置年代順に異種金属接触腐食に関連した事例を示す。

図一 2 は泊大橋（1986 年設置）の事例であり、コンクリート地覆にアルミニウム合金支柱が埋め込まれたときに、コンクリート中の鉄筋とアルミニウム合金支柱が接触していたために、異種金属接触腐食によって腐食生成物が膨張して、図一 2 の左側の写真のように地覆コンクリートが割れた。図一 2 の右側の写真は絶縁をして補修した後のものである。初期のアルミニウム合金防護柵や高欄を除いて、コンクリート中の鉄筋と埋設支柱を絶縁するようになってからは、このような問題は生じていない。



図一 2 泊大橋（1986 年設置）
右側は絶縁しての補修後（調査時）

図一 3 に示すのは、波之上橋（1986 年設置）の高欄である。連結は、無処理のステンレスのボルト類が用いられている。また、現在はこのような構造は採用しないが、防護柵のバラスト内に鋼棒が配置されている。これは、車輻が衝突したときにバラストの脱落を恐れたものであるが、鋼棒は全く腐食していないのに対して、異種金属接触腐食によってアルミニウム合金部材が一部欠損している（左図）。また、無処理のステンレスボルト類周辺でも異種金属接触腐食が発生している（右図）。



図一 3 波之上橋（設置後 27 年）

図一 4 は来間大橋（1995 年設置）の防護柵であり、無処理ステンレスボルト周辺で異種金属接触腐食が左側の写真のように発生している。また、中空円形断面のバラストの中に水が入り、一部のバラストに右側の写真のように小孔があいている。これは、バラストが無処理のステンレスビスで連結されているためと考えられる。このような事例が分かった後の防護柵や高欄で

は、閉断面のバラスターや支柱には水抜き穴が地際近くに設けられるようになり、このような事例は見られなくなっている。



図ー４ 来間大橋（設置後18年）

図ー５は、南浜1号橋（2002年設置）の事例であり、防護柵部材の連結は、ダクロ処理されたステンレスボルト類を使用しており、異種金属接触腐食は発生していない。他の橋梁の防護柵や高欄もダクロ処理やクロムフリーのジオメット処理などの亜鉛フレークコーティングされたステンレスのボルトやビスを使用した防護柵には異種金属接触腐食は調査時には生じていない。



図ー５ 南浜1号橋（設置後11年経過）

3. 連続塩水噴霧環境促進試験によるパイロット試験

沖縄県本島と宮古島のアルミニウム合金部材の連結部の現地調査の結果を参考に、4. で示す表ー2に示す形状の防護柵・高欄の各種連結部を模擬した試験片ボルト結合材No. 1~14を各1体ずつ製作し、実験室で1,000時間の連続塩水噴霧環境促進実験を行った。14種の試験供試体は以下のようである。

試験体1~3：高欄に使用されているA6061S-T6材を実際に取り付けられているようにステンレスボルトを取り付け、A)ボルトは無処理、B)ジオメット処理、C)ワッシャーのみ塗装、D)塩化ビニルによる絶縁の4種とする。

試験体4~6：構造材で使用されているA6N01S-T5、A5083P-0、A3004P-H32も同様に行う。

試験体7~8：高欄支柱で使用しているAC7A-Fは、鋼製橋梁での設置を考慮して、鋼鉄とのボルト結合の影響を試験する。

試験体9~10：バラスターに関しても、実際の取付状態にて試験を行う。

試験体11~13：A6063S-T5は、カラーアルマイト（ステンカラー色、ブラウン色、ダークブラウン色）を実施する。

試験体 14 : ボルト類のみ, 異種金属接触腐食による影響を与えないようにポリカーボネイト板に取付, 暴露試験を行う. ボルトの種類は SS400 溶融亜鉛メッキ処理, SUS304 の無処理と各種表面処理 (ダクロ処理, ジオメット処理, ジオメット plus 処理, ジオメット処理+ZEC コート) とする (ボルト類の性能比較のため).

連続塩水噴霧環境促進実験は, 塩水噴霧 1,000 時間 (JIS Z2371 に準拠) を連続して行った. 実験後, 腐食評価のために外観観察 (ボルト解体前, ボルト解体後) の後で, 腐食生成物を化学的に除去して, 可能な供試体に対して, レーザー深度計を用いて腐食表面形状計測を行い, 腐食面積, 腐食深さおよび腐食量を求めた.

アルミニウム合金部材連結部の異種金属接触腐食の性状に関して以下のような定性的な知見を得た.

- 1) 溶融亜鉛メッキ処理は, 亜鉛が消耗し赤錆が発生した.
- 2) ボルト締結材において, 締結部の異種金属接触腐食はボルト類の表面仕様が, 以下の順で軽微であった.
無処理 < ワッシャーのみ塗装
 < ジオメット処理 = 絶縁ブッシュ
- 3) ジオメット処理と絶縁ブッシュを用いた供試体は赤錆の発生はみられず健全であった.

4. アルミニウム合金部材連結部の屋外暴露試験

4.1 屋外暴露試験概要

沖縄県における橋梁のアルミニウム合金防護柵・高欄の現地調査と 1,000 時間の連続塩水噴霧環境促進実験の定性的な性状をもとに, 表一 2 に示す形状の防護柵・高欄の各種の連結部を模擬したボルト連結部試験体を 250 体製作し, 沖縄県宮古島の日本ウェザリングテストセンターの海岸暴露試験場で大規模な屋外暴露試験を 5 年間行った^{9), 10)}.

4.2 試験体

試験体 1~3 : 防護柵と高欄に通常使用されている A6061S-T6 材のアルミニウム合金板 (210x56x7mm) に, 実際に取り付けられているように SUS304 材のステンレスボルト (M12x25) を 4 つ取り付けた. ボルト類 (ボルト, ナットおよびワッシャー) は, A : 無処理, B : 亜鉛フレークコーティング (ジオメット処理), C : ワッシャーのみ塗装, D : 絶縁ブッシュ (塩化ビニル) による絶縁の 4 種とした. 試験体 1 のアルミニウム合金板の両面は, シルバー色の陽極酸化塗装複合皮膜処理したものである. 試験体 1~3 の各 3 種の試験体のボルト類の配置は以下である.

試験体その 1 : (A A A D)

試験体その 2 : (B B B D)

試験体その 3 : (C C C D)

一方、試験体 2 のアルミニウム合金板の地側（下面）は、皮膜処理無で、試験体 3 は逆に天側（上面）が皮膜処理無である。ボルト類の配置は、試験体 1 と同様であるが、ナットは使用せず、ねじで連結している。これは、内側面が陽極酸化塗装複合皮膜処理できない閉断面部材との連結を想定したものである。

試験体 4～6：構造材で使用される他のアルミニウム合金材 A6N01S-T5, A5083P-0, A3004P-H32 について、試験体 1～3 と同様な試験体を製作する。

試験体 7, 8：高欄支柱で使用するアルミニウム合金 AC7A-F は、鋼製橋梁での設置を考慮して、SS400 材の鋼板とのボルト連結の影響を試験する。アルミニウム合金板と鋼板の表面処理は、それぞれアクリル樹脂焼付塗装シルバー色 35 μ m 以上と熔融亜鉛メッキ処理 HDZ55 を行う。ボルトは熔融亜鉛メッキ処理 HDZ35 をした SS400 材のボルト類を使用する。試験体 8 では、さらに 2 つの板の間に絶縁シート（塩化ビニル）を挟み、天側のワッシャーの下に絶縁ブッシュも挟む。

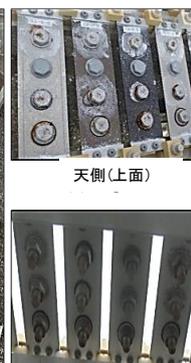
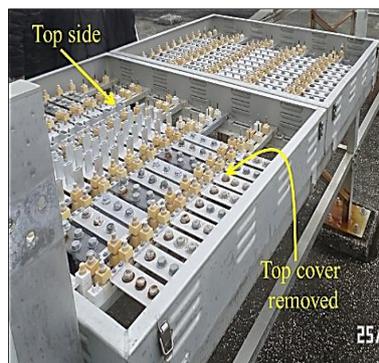
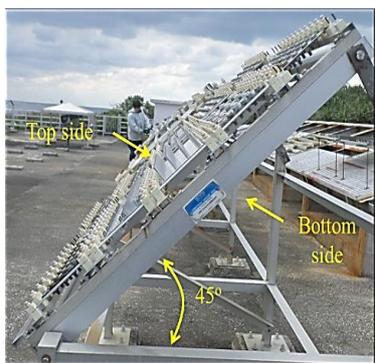
試験体 9, 10：実際の取付状態を模擬したバラスターで暴露試験を行う。試験体 9 は、両面陽極酸化塗装複合皮膜処理したアルミニウム合金板に、内側は無処理のバラスターをジオメット処理したステンレスビスで取り付けたもので、水抜き穴の有るものと無いものを製作する。試験体 10 は、両面陽極酸化塗装複合皮膜処理したアルミニウム合金板と同じ表面処理をしたアングル材を介してバラスターをジオメット処理したステンレスボルト類で取り付けたものである。

試験体 11～13：A6063S-T5 は、カラーアルマイト（陽極酸化塗装複合皮膜）として、ステンカラー色、ブラウン色、ダークブラウン色の 3 色に二次電解着色後にクリアー塗装したアルミニウム合金板を用いた。ステンレスボルト類の配置は（A B C D）である。

試験体 14：異種金属接触腐食による影響を与えないようにポリカーボネイト板に、ボルト類を取付けて屋外暴露試験を行う。ボルト類の表面処理の種類は SS400 材のボルト類に熔融亜鉛メッキ処理 HDZ35, SUS304 材のステンレスボルト類の無処理と各種表面処理（ダクロ処理、ジオメット処理、ジオメット plus 処理、ジオメット処理+ZEC コート）の 6 種とする。なお、ジオメット plus 処理とは、ジオメット処理の上に、珪酸塩と有機ポリマーの複合皮膜であり、ZEC コートとは、シリカ主成分の薄膜（1 μ m）の高耐食皮膜である。

表-2 宮古島での屋外暴露試験の試験体一覧

試験体 No.	形状 ← 暴露時上側	材質	肉厚	表面処理	締結ボルト等				試験体数	
					仕様・材質	A	B	C		D
1		A6061S-T6	t7.0	両面 A2 シルバー色	M12×35 N1,W2,SW1 SUS304					24
2		A6061S-T6	t7.5	天側: A2 シルバー色 地側: 無処理	M12×35 W1,SW1 SUS304	無処理	ジオメット処理	ワッシャーのみ 両面塗装 他は無処理	無処理 絶縁フッシュ 塩化ビニル	24
3		A6061S-T6	t7.5	天側: 無処理 地側: A2 シルバー色	M12×35 W1,SW1 SUS304	無処理	ジオメット処理	ワッシャーのみ 両面塗装 他は無処理	無処理 絶縁フッシュ 塩化ビニル	24
4		A6N01S-T5	t4.0	両面無処理	M12×35 N1,W2,SW1 SUS304					24
5		A5083P-O	t6.0	両面無処理	M12×35 N1,W2,SW1 SUS304					24
6		A3004P-H32	t2.0	両面無処理	M12×35 N1,W2,SW1 SUS304					24
7		AC7A-F	t7.0	アクリル樹脂焼付塗装 シルバー色 35μ以上	M12×35 N1,W2,SW1 SS400	熔融亜鉛メッキ処理 HDZ35				8
		SS400	t6.0	熔融亜鉛メッキ処理 HDZ55	M12×35 N1,W2,SW1 SS400	熔融亜鉛メッキ処理 HDZ35				8
8		AC7A-F	t7.0	アクリル樹脂焼付塗装 シルバー色 35μ以上 絶縁シート貼付	M12×35 N1,W2,SW1 SS400	熔融亜鉛メッキ処理 HDZ35				8
		SS400	t6.0	熔融亜鉛メッキ処理 HDZ55	M12×35 N1,W2,SW1 SS400	熔融亜鉛メッキ処理 HDZ35 絶縁フッシュ 塩化ビニル				8
9		パラスター プレート A6063S-T5	t3.0	パラスター: 表面A2シルバー色 内側無処理 プレート: 両面A2シルバー色	M4×20 SUS304	ジオメット処理	ジオメット処理 水抜き穴	無処理	無処理 水抜き穴	24
10		パラスター アングル プレート A6063S-T5	t3.0	パラスター: 表面A2シルバー色 内側無処理 アングル: 両面A2シルバー色 プレート: 両面A2シルバー色	M6×65 N1,W2,SW1 SUS304 M5×20 N1,W2,SW1 SUS304	上向き ジオメット処理 水抜き穴	下向き ジオメット処理			24
11		A6063S-T5	t6.0	両面A2 ステンカラー色 (KCS)	M12×35 N1,W2,SW1 SUS304	無処理	ジオメット処理	ワッシャーのみ 両面塗装 他は無処理	無処理 絶縁フッシュ 塩化ビニル	8
12		A6063S-T5	t6.0	両面A2 ブラウン色 (KOB)	M12×35 N1,W2,SW1 SUS304	無処理	ジオメット処理	ワッシャーのみ 両面塗装 他は無処理	無処理 絶縁フッシュ 塩化ビニル	8
13		A6063S-T5	t6.0	両面A2 ダークブラウン色 (KSB)	M12×35 N1,W2,SW1 SUS304	無処理	ジオメット処理	ワッシャーのみ 両面塗装 他は無処理	無処理 絶縁フッシュ 塩化ビニル	8
14		ポリカーボ ネット板	t6.0	両面耐候: クリアー	M12×35 N1,W2,SW1	F SS400 熔融亜鉛メッキ処理 HDZ35 E SUS304 無処理	D SUS304 ダクロ処理 C SUS304 ジオメット処理	B SUS304 ジオメットplus処 理 A SUS304 ジオメット処理 ZECコート		8



(a) 直接暴露試験

(b) 軒天暴露試験 (蓋を取って撮影)

図-6 2種の屋外暴露試験

4.3 試験方法

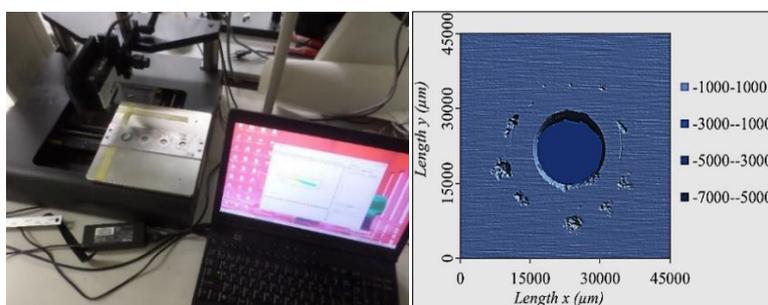
沖縄県宮古島の日本ウェザリングテストセンターの海岸暴露試験場で、直接暴露試験（図一6 (a)）と軒天暴露試験（図一6 (b)）を行った。軒天暴露試験は、水平に試験体を設置して蓋をしたもので、笠木やボトムレール下の連結を模擬したものである。付着した塩分が降雨により洗い流されないため、耐久性にとっては、プレートガーダーの内桁のように、腐食に対して厳しい条件となると言われている。屋外暴露は、1年、3年、5年および5年+ α （予備用）の4バッチを行っている。2019年4月に5年が経過した。3年後までの供試体の測定結果の一部については、文献7)で公表している。

4.4 外観観察と腐食表面形状の計測方法

1年後、3年後、および5年後の屋外暴露試験後、試験体の腐食評価のためにボルト解体前とボルト解体後の外観観察をまず行った。

その後、腐食生成物などを化学的に除去した。すなわち、(a)腐食生成物の除去のため、常温の塩酸（イオン交換水5ℓに塩酸0.5ℓの比率）に15分浸漬し、(b)塗膜の除去には、常温の塩化メチレン系脱膜剤に8時間浸漬し、(c)陽極酸化皮膜の除去には、リン酸35mℓ、無水クロム酸20gを水1ℓに溶解させたリン酸クロム酸混液を沸騰させた後に20分浸漬した。

腐食生成物などの除去後、試験体1~9（SP1~SP9）と試験体11~13（SP11~SP13）に対して、図一7 (a)に示すように、名古屋大学と国立岐阜高専に設置されたレーザー深度計（キーエンス社、LE-4010、最小読取精度0.1 μ m）を用いて、アルミニウム合金板の両面（天側と地側）の腐食表面形状を計測した。腐食表面形状は、各ボルト穴周辺の45mm x 45mmの範囲に区切り、200 μ mピッチで測定した。計測結果を用いて、最大腐食深さ（CDmax）、腐食面積（CA）および腐食量（体積、CV）を求めた。図一7 (b)は、腐食表面形状の測定結果を等高線図として示した例である。



(a)測定状況

(b)測定例

図一7 レーザー深度計による表面形状測定

5. 屋外暴露試験体の外観観察結果

5.1 試験体1～3（表面処理の違い）

試験体1の直接暴露の1年後，3年後，5年後および5年後の軒天暴露の天側と地側の外観写真を図－8(a)～(d)に示す．また，5年後の直接暴露試験体のボルト解体後のアルミニウム合金板の外観を図－8(e)に示す．

無処理(A)：1年後には，ワッシャー周辺のアルミニウム合金板に異種金属接触腐食による白さびが発生しており，ナットにわずかな赤さびも発生している．3年後，5年後でワッシャー周辺のアルミニウム合金板の腐食やボルト部の赤さびが進行している．軒天暴露の場合は，アルミニウム合金版の異種金属接触腐食がより激しくなっているが，逆にボルト類にはほとんど赤さびは見られない．

亜鉛フレークコーティング(B)：5年後もボルト類およびアルミニウム合金板に腐食は全く生じていない．

ワッシャーのみ塗装(C)：ワッシャーを除きステンレスボルト類は無処理なので，1年後からわずかに赤さび発生しているが，アルミニウム合金板には変化がない．

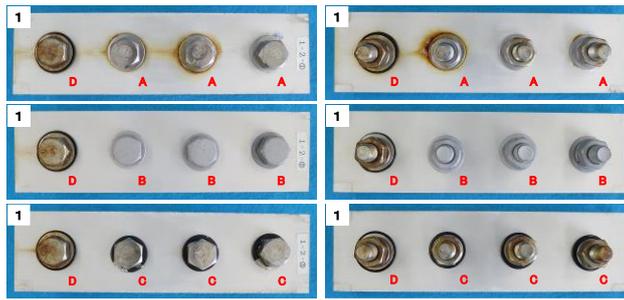
絶縁ブッシュ(D)：1年後からステンレスボルト，ナットおよびワッシャーに赤さびが発生し，3年後からは天側でさび汁が発生している．アルミニウム合金板には変化はない．

図は示していないが，試験体2では，アルミニウム合金板の地側は表面処理されていないが，地側にはナットやワッシャーはなく，ボルト類とアルミニウム合金板の接触が少ないので，腐食の進行はほとんどない．

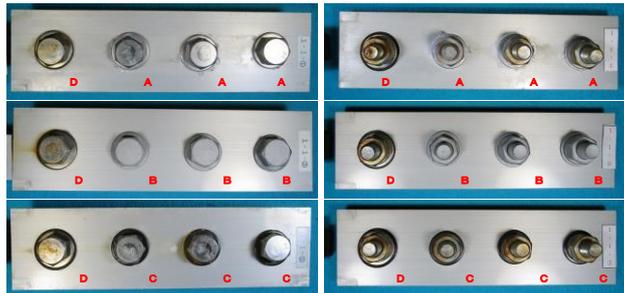
試験体3のボルト解体前後の外観を図－9に示すが，地側のアルミニウム合金板は表面処理されているが，亜鉛フレークコーティングされたボルト類(B)の周辺には腐食がない．その他の3種のボルト類では，バラツキはあるが，全て異種金属接触腐食が生じている．



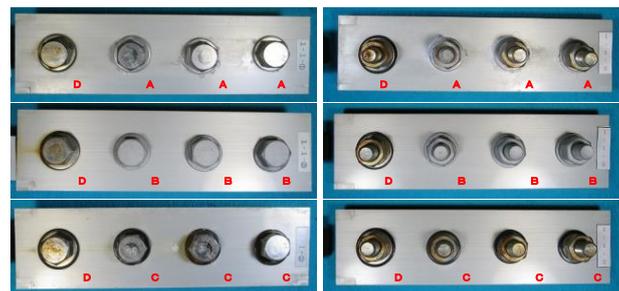
(a) 直接暴露（1年後）



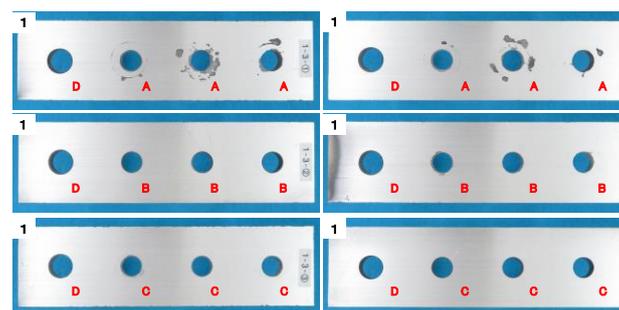
(b)直接暴露（3年後）



(c)直接暴露（5年後）

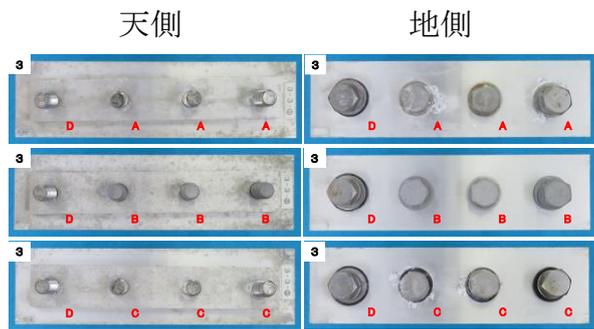


(d)軒天暴露（5年後）

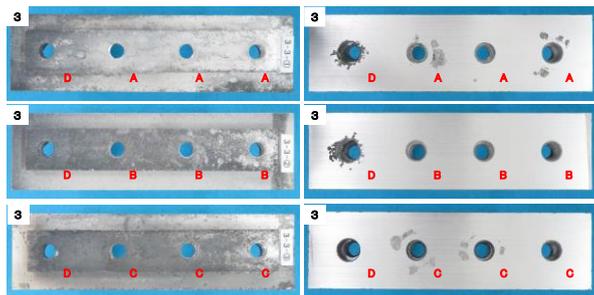


(e)直接暴露（5年後）のボルト解体後

図－8 屋外暴露試験体（試験体1）の外観



(a) 直接暴露（5年後）

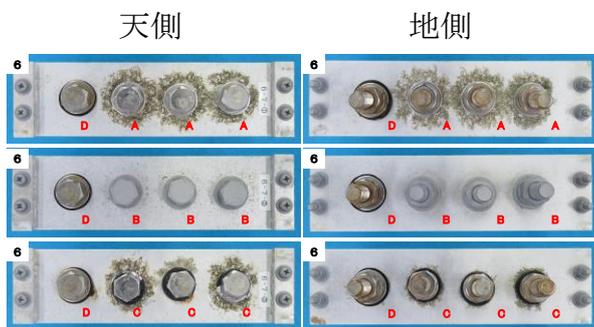


(b) 直接暴露（5年後）のボルト解体後

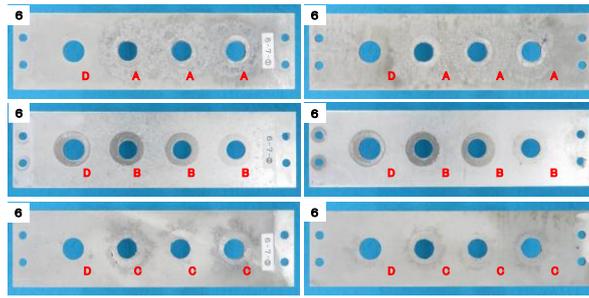
図一 9 屋外暴露試験体（試験体3）の外観

5.2 試験体4～6（別種のアリミニウム合金材）

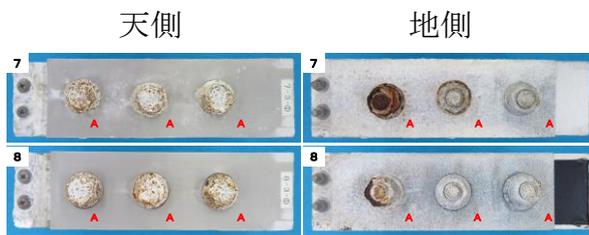
図一 10 に、屋外暴露試験体6の軒天暴露の5年後のボルト解体前後の外観を示す。3種のアリミニウム合金板のいずれも表面処理されていない。外観上、亜鉛フレークコーティング（B）したボルト類の周辺は健全であるが、それ以外のボルト類の周辺は、試験体1～3に比べても白さびが多く発生しており、異種金属接触腐食が発生している。



(a) 軒天暴露（5年後）



(b) 軒天暴露（5年後）のボルト解体後
 図－10 屋外暴露試験体（試験体6）のボルト解体後



図－11 直接暴露（5年後）試験体7，8

5.3 試験体7，8（鋼板との連結）

AC7A-F材のアルミニウム合金板とSS400材の鋼板の連結に溶融亜鉛メッキ処理HDZ35の表面処理をしたSS400材のボルト類を使用している。1年後では変化はない。3年後では、天側のボルト頭に白さびと赤さびが発生し始め、5年後には、図－11のように腐食は進行し、天側および地側ともボルト類は白さびと赤さびで覆われている。試験体7では、アルミニウム合金板のボルト類周辺にも白さびがみられるが、絶縁をしている試験体8では、アルミニウム合金板に白さびは生じていない。

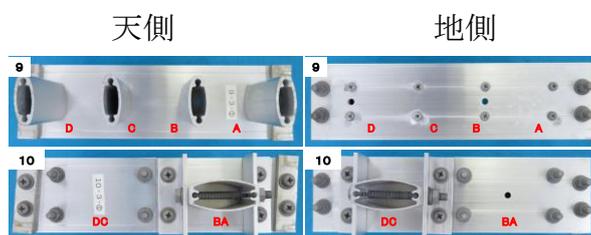
5.4 試験体9，10（バラスター連結）

図－12に、試験体9と10の5年後の直接暴露試験後の外観を示す。

バラスターの連結について、試験体9は、バラスターをジオメット処理(A)したステンレスビスで直接連結しているが、水抜き穴を付けたものは、異種金属接触腐食は全く生じていない。無処理のステンレスビスの場合は、水抜き穴の無いものが、異種金属接触腐食による白さびが多く発生しており、水抜き穴のあるものは、それ程ではないが、ビス周辺に白さびがわずかに発生している。

試験体10では、アルミニウム合金板と同じ陽極酸化塗装複合皮膜処理をしたアルミニウム合金のアンクル部材を介してバラスターをジオメット処理した

ステンレスボルトで連結しているが、水抜き穴の有無にかかわらず異種金属接触は発生していない。

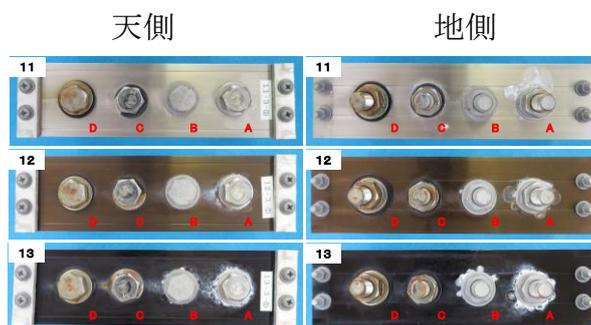


A: ジオメット処理 B: ジオメット処理+水抜き穴
 C: 無処理 D: 無処理+水抜き穴
 AB: 上向きジオメット処理+水抜き
 CD: 下向きジオメット処理

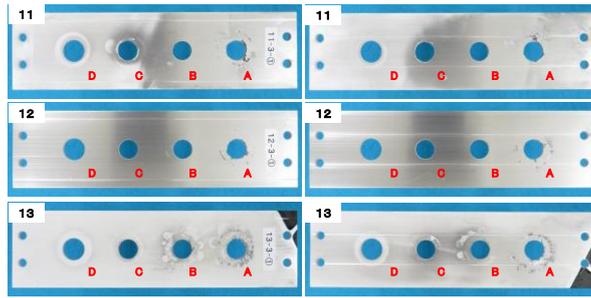
図-12 直接暴露（5年後）試験体9，10

5.5 試験体11～13（カラーアルマイト）

3種のカラーアルマイトの試験体11～13について、直接暴露試験を行った5年後のボルト解体前後の外観を図-13に示す。ステンレスボルトの表面処理は、試験体1と同じように、無処理(A)、ジオメット処理(B)、ワッシャーのみ塗装(C)、絶縁ブッシュ(D)の4種である。外観観察の結果は、各試験体でほぼ同じであるが、試験体13（ダークブラウン色）のみ、ジオメット処理(B)のステンレスボルト類の周辺に異種金属接触腐食が見られる。ボルト連結時にワッシャーのバリによって、アルミニウム合金板の表面処理を傷つけた可能性がある。



(a) 直接暴露（5年後）



(b)直接暴露（5年後）のボルト解体後
 図－13 直接暴露試験体11～13の外観

5.6 試験体14（ボルト類自体の外観観察結果）

試験体14の軒天暴露の1年後と5年間後の外観写真を図－14に示す。

腐食しない両面耐候クリアー処理したポリカーボネイト板に6種の表面処理をしたボルト類を取り付けた試験体14の1年後と5年後の屋外暴露試験の外観観察から以下のようなことが分かった。

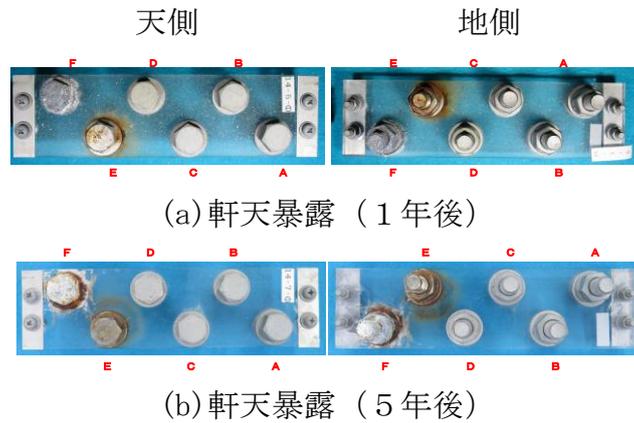
SUS304材のステンレスボルト類の表面処理として、ジオメット処理，ジオメット処理+Plus処理，ジオメット処理+ZEC処理，ダクロ処理したもの（A～D）は，いずれも5年後も腐食は生じておらず健全な状態であった。

無処理のSUS304材のステンレスボルト類（E）は，1年後から地側のボルト類に赤さびが発生し始め，5年後には，天側と地側ともさび汁が周辺にも広がっていた。

溶融亜鉛メッキ処理HDZ35したSS400材のボルト類（F）は，1年後は，変化はなかったが，5年後にはメッキがすべてなくなって赤さびが全体を覆っていた。

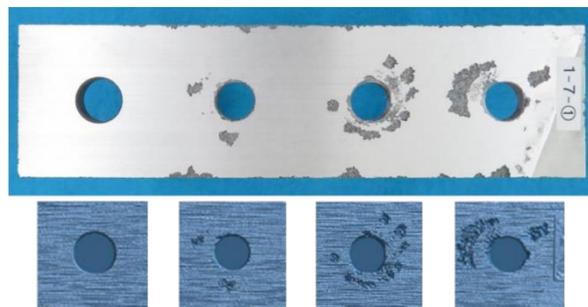
ステンレスボルトは，沖縄のような厳しい海岸環境を有する場所では，亜鉛フレークコーティングの表面処理が必要であることが分かった。

また，溶融亜鉛メッキ処理HDZ35したSS400材のボルト類は，経年によってメッキが消耗し，赤さびが発生するので沖縄のような厳しい海岸環境を有する場所では，使わない方がよいことが分かった。



- (a) 軒天暴露（1年後）
- (b) 軒天暴露（5年後）
- A : SUS304 ジオメット処理 ZEC コート
 - B : SUS304 ジオメット Plus 処理
 - C : SUS304 ジオメット処理
 - D : SUS304 ダクロ処理
 - E : SUS304 無処理
 - F : SS400 熔融亜鉛メッキ処理 HDZ35

図－14 ボルト類自体の腐食状況



図－15 試験体の外観写真と測定結果との比較例

6. レーザー深度計による腐食表面形状の測定結果

6.1 アルミニウム合金板の腐食表面形状測定結果

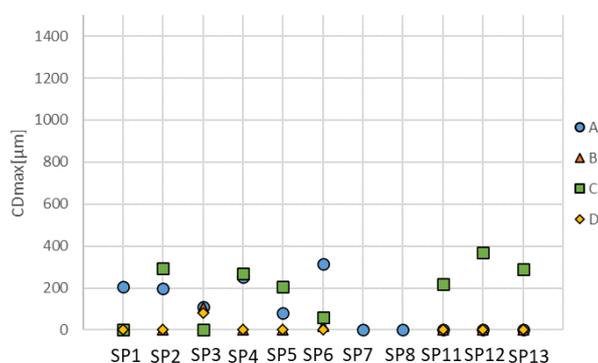
試験体のボルト類を取り外して、腐食生成物などを化学的処理によって除去後のアルミニウム合金板の腐食表面形状を、各ボルト穴の周辺を45mm x 45mmに分割して測定した。

図－15に、屋外暴露試験後のボルト類を取り外したアルミニウム合金板の写真とレーザー深度計で測定した表面形状の等高線図を比較した例を示す。レーザー深度計による表面形状がうまく測定できていることが分かる。また、レーザー深度計で測定した1年後、3年後および5年後の測定した試験体の天側

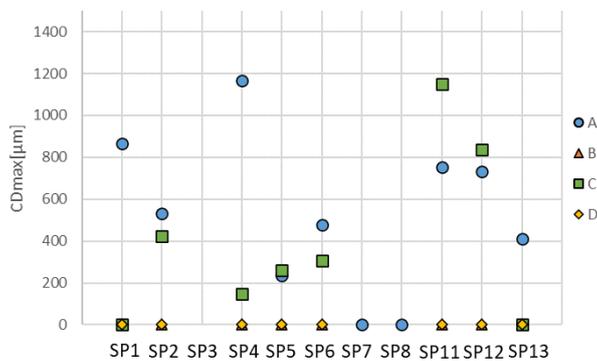
の各ボルト穴周辺の最大腐食深さ CDmax を図-16 に示す。4種のボルト類 (A, B, C, D) 別に記号を変えてプロットしている。

なお、図-16 (c) に示す5年後の試験体6と試験体11~13の内、腐食が大きい一部のボルト穴周辺は、板が薄くて変形しており測定できていない。試験体の外観観察でも述べたが、亜鉛フレークコーティングしたボルト類

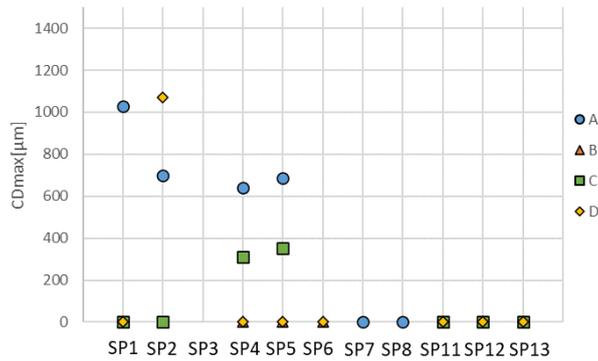
(▲B) の周辺は、異種金属腐食は全く発生していない。無処理ステンレスボルト類 (●A) を用いた場合は、1年後、3年後および5年後の順で最大腐食深さは大きくなっている。試験体7と8では、アルミニウム合金板の腐食は5年後でも無かった。



(a) 1年後



(b) 3年後



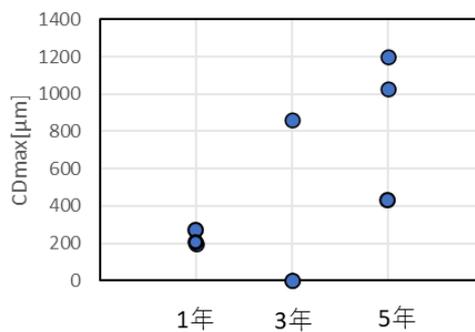
(c) 5年後

図-16 直接暴露の腐食最大深さ

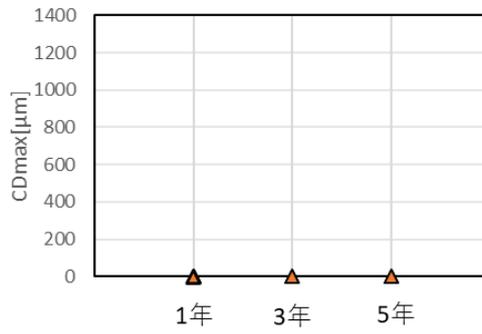
6.2 種々の表面処理をしたステンレスボルト周辺の腐食進展について

図-17, 18に, 直接暴露の試験体1と2の各種の表面処理をしたステンレスボルト周辺のアルミニウム合金板の1年後, 3年後, 5年後の天側の最大腐食深さ (CDmax) の進展をボルト類のタイプ (A~D) ごとに示す.

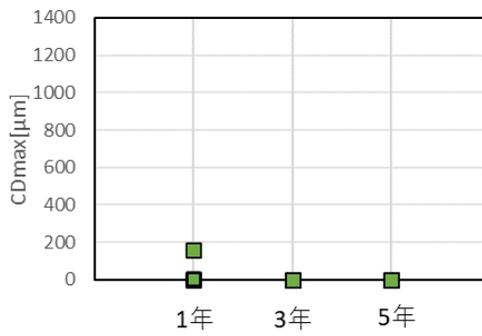
亜鉛フレークコーティングしたステンレスボルト類を用いた場合(B)は, 全く腐食は生じていない. 無処理のステンレスボルト類の場合(A)は, バラツキはあるが, 経年に従って最大腐食深さは大きくなっている. ワッシャー塗装(C)および絶縁ブッシュ(D)の場合は, 試験体2で大きなばらつきを持った腐食が発生している.



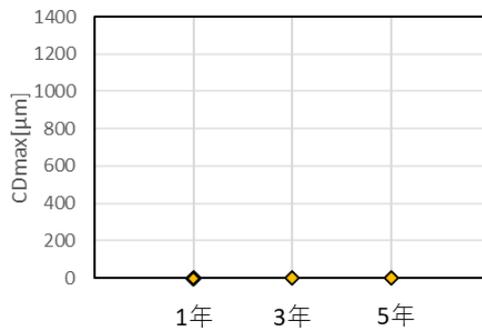
(a) 無処理ボルト周辺



(b) 亜鉛フレークコーティングボルト周辺

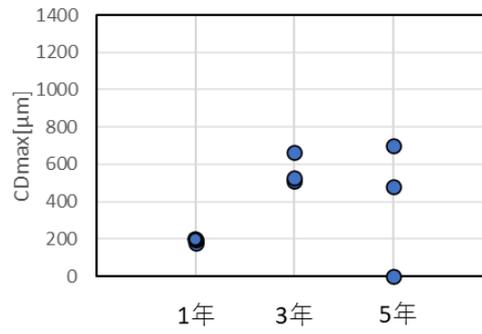


(c) 塗装ワッシャー使用ボルト周辺

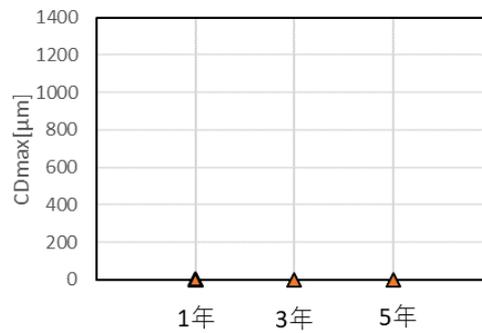


(d) 絶縁ブッシュ使用ボルト周辺

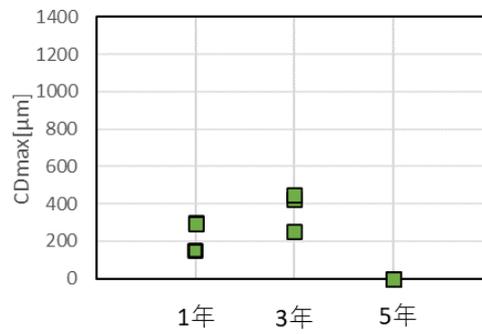
図-17 直接暴露試験体1 (SP1) の最大腐食深さ



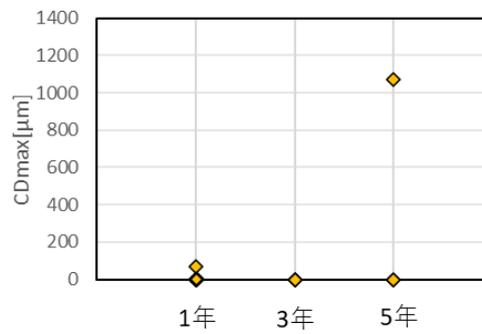
(a) 無処理ボルト周辺



(b) 亜鉛フレークコーティングボルト周辺



(c) 塗装ワッシャー使用ボルト周辺



(d) 絶縁ブッシュ使用ボルト周辺

図－18 直接暴露試験体2 (SP2) の
最大腐食深さ

7. 考察

7.1 腐食面積 (CA) と腐食体積 (CV)

試験体の3年後の腐食深度測定結果から、腐食面積(CA)および腐食体積(CV)を求めたものを、それぞれ図－19 (a)と図－19 (b)に示す。これまで、最大腐食深さでデータを整理してきたが、腐食面積CAと腐食体積CVを使っても、ほぼ定性的な傾向は変わらないが、最大腐食深さ CD_{max} が最も腐食傾向を説明しやすいことが分かった。

7.2 各種ボルト類自体の腐食性状

5.6で示したように、亜鉛フレークコーティングの表面処理をしたSUS304材のステンレスボルト類は、5年後も腐食は生じておらず健全な状態であった。沖縄のような厳しい海岸環境を有する場所では、亜鉛フレークコーティングの表面処理をしたステンレスボルト類を使用するとよい。

7.3 亜鉛フレークコーティングされたステンレスボルト類の連結部の経年変化について

直接暴露試験および軒天暴露試験とも、いずれの条件の連結部においても、亜鉛フレークコーティングされたステンレスボルト類を用いた場合は、アルミニウム合金部材連結部の異種金属接触腐食の耐久性が高いことが分かった。

7.4 天側と地側の腐食性状

図－20に、直接暴露試験体の3年後の地側の最大腐食深さを示す。図－16 (b)の天側と比較すると、バラつきは大きいですが、一般的に地側の方が最大腐食深さは大きい。試験体の地側は雨水による塩分が洗い流されにくく、ぬれ時間も長いためと考えられる。

7.5 直接暴露と軒天暴露の腐食性状の違い

図－21に、軒天暴露の3年後の地側の各試験体の最大腐食深さを示す。図－20の直接暴露と比較すると、軒天暴露の条件の方が一般に腐食は早く進行している。これは、飛来塩分が付着しても、直接暴露のように、降雨などによって塩分が洗い流されないことによるものと思われる。

7.6 連続塩水噴霧促進試験結果との比較

図-22は、横軸に試験の時間軸を、縦軸に最大腐食深さをとり、試験体1の屋外暴露試験の無処理のステンレスボルト類周辺の1年後、3年後および5年後のアルミニウム合金板の天側の最大腐食深さを●で示し、同じ連結条件の1,000時間連続塩水噴霧促進試験⁴⁾の値を○でプロットし、両者の試験結果の関係をとった一例である。この場合は、1,000時間(0.114年)の連続塩水噴霧試験結果が、屋外暴露試験の約1.5年分に相当する(促進倍率約11倍)ことが分かる。

無処理のステンレスボルト類を使用した場合の同一連結条件の屋外暴露試験と連続塩水噴霧促進試験の最大腐食深さの関係をプロットしたものを図-23に示す。結果のばらつきが大きく、屋外暴露試験と連続塩水噴霧促進試験における腐食の一般的な促進倍率などを求めることは困難であることがこの図から分かる。

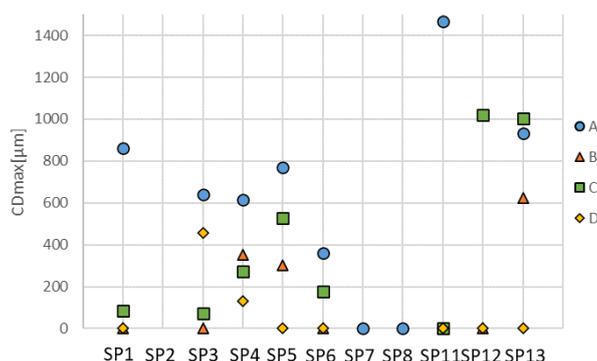


図-21 軒天暴露の最大腐食深さ(3年後, 地側)

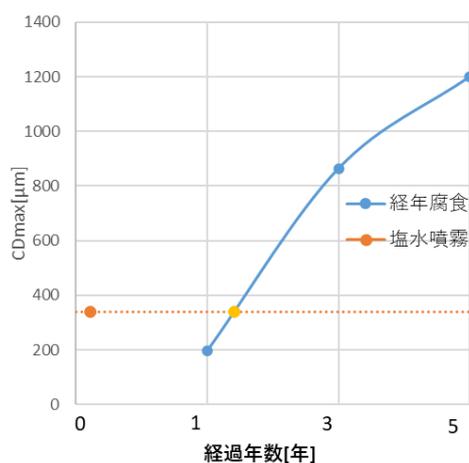


図-22 連続塩水噴霧促進試験と屋外暴露試験の最大腐食深さの関係の一例

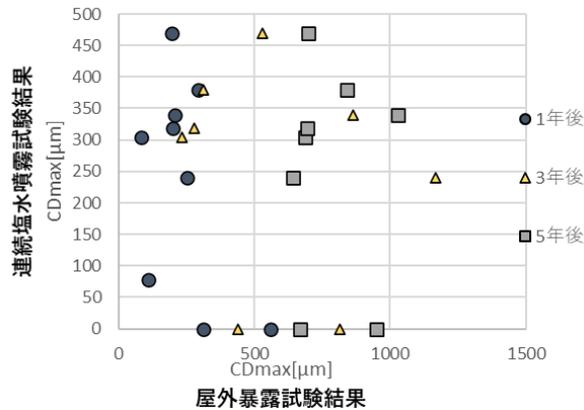


図-23 無処理ステンレスボルト類周辺の連続塩水噴霧促進試験結果と屋外暴露試験結果の関係

7.7 連結部の異種金属接触腐食対策の提案

これまでの検討から、厳しい環境におけるアルミニウム合金の橋梁用防護柵や高欄の部材連結については、異種金属接触腐食を避けるために以下の方策が有効であることが分かった。

- 1) 連結部に亜鉛フレークコーティング (GEOMET) したステンレスボルト類を用いる。また、絶縁ブッシュを挟んで絶縁することによる異種金属接触腐食を防ぐためには、ボルトのゆるみが発生しない劣化のない絶縁ブッシュを使用する。
- 2) 閉断面のバラスト一部材などのように、内部に雨水がたまる可能性がある場合は、部材下部に水抜き穴を設ける。
- 3) 内側の表面処理ができない閉断面のアルミニウム合金部材との連結は、内側の異種金属接触腐食が問題とならないねじで連結する。
- 4) コンクリート地覆にアルミニウム合金部材を埋め込む場合は、鉄筋との接触を避けるように絶縁処置を施す。
- 5) アルミニウム合金部材の連結のためボルトを締め付けるときに、ワッシャーのバリなどが、アルミニウム合金部材の表面処理を傷つけないように注意をする必要がある。

8. 結論

沖縄県内のアルミニウム合金の橋梁用防護柵と高欄の異種金属接触腐食の現地調査と連続塩水噴霧環境促進によるパーロット試験、及び引き続いて行われ

た宮古島での250体の試験体を用いた5年間の大規模な屋外暴露試験結果によって以下のような主な結論が得られた。

1) ステンレスボルトを、沖縄のような厳しい環境においてアルミニウム合金部材の連結に用いる場合は、異種金属接触腐食の発生を防止する表面処理や絶縁が必要である。

2) アルミニウム合金部材のステンレスボルト連結部の異種金属接触腐食は、ボルト類の表面処理などの仕様によって、以下の順で軽微であった。

無処理<ワッシャーのみ塗装<絶縁ブッシュ

≒亜鉛フレークコーティング (GEOMET 処理)

すなわち、亜鉛フレークコーティングをしたステンレスボルト類を用いれば、長期に渡って、異種金属接触腐食に対する耐久性を確保できることが分かった。

3) ワッシャーに塗装材を塗布しての絶縁は、施工時に塗装が剥げる可能性があり、その部分からアルミニウム合金部材の異種金属接触腐食が発生すると思われるので有効ではない。

4) 絶縁ブッシュをワッシャーとアルミニウム合金板の間に挟んでの絶縁は有効であるが、ゆるみが発生するとその効果が減じて、無処理のボルト類に赤さびが発生するので注意が必要である。

5) ポリカーボネイト板を使ったボルト類の試験において、無処理のステンレスボルトは、時間経過に従ってわずかに赤さびが発生した。一方、溶融亜鉛メッキをしたSS400材のボルト類自体は、1年後は健全であったが、5年後にはメッキが消耗して、赤さびでおおわれてしまった。沖縄のような厳しい環境の沿岸環境では、溶融亜鉛メッキボルト類は使用しない方がよい。

6) 直接暴露と軒天暴露では、一般に軒天暴露の方が腐食は早く進行する。すなわち、降雨によって付着塩分が洗い流されない笠木やボトムレールの下での連結部の異種金属接触腐食に、より注意が必要である。

7) ボルト連結部の異種金属接触腐食についての宮古島の屋外暴露試験結果と実験室での連続塩水噴霧促進試験結果との比較から、両者は定性的な整合性はあるが、結果のばらつきが大きいので、促進倍率を求めることは困難であることが分かった。

今後の課題として、アルミニウム合金土木構造物の異種金属接触腐食に対する高耐久性を確保するためさらなる検討を継続する必要があると思われる。また、腐食に対して環境の厳しさの度合いに応じて、どのような種類のボルトや防食方法を用いるかを明らかにする必要がある。

謝辞

2010年から約10年以上にわたって本研究を推進するにあたり、沖縄県での現地調査および宮古島での屋外暴露試験において、種々の方々の支援を得た。特に、株式会社住軽日軽エンジニアリングの故高堂治氏には研究の当初より各種の支援を受けた。日本アルミニウム協会耐久性小委員会の兼子彬氏と岐阜高専の小嶋証道君には論文作成時にお世話になった。また、宮古島での暴露試験においては、日本アルミニウム協会およびその加盟会社と日本ウェザリングテストセンター（JWTC）にも種々の支援を受けた。また、レーザー深度計に表面形状計測には、名古屋大学と岐阜高専の学生達にお世話になった。ここに深謝する。

参考文献

- 1) 日本道路協会：防護柵の設置基準・同解説，丸善，2008.
- 2) 伊藤義人，守屋進，長澤大介，兼子彬，川畑達哉：56年経過したアルミニウム合金橋梁「金慶橋」の現状と耐久性，橋梁と基礎 2017-9，2017年9月，pp. 35-40.
- 3) 日本アルミニウム協会 土木製品開発委員会 耐久性WG：平成24年度沖縄地区アルミニウム合金製土木製品の耐久性調査結果報告，2013.
- 4) E. Mrema, Y. Itoh, A. Kaneko and M. Hirohata: Galvanic corrosion study of aluminium alloy plates mounted to stainless and mild steel bolts by accelerated exposure test, *Journal of Structural Engineering (JSCE)*, 62A, 2016, pp.525-536.
- 5) E. Mrema, Y. Itoh, A. Kaneko, M. Hirohata: Corrosion of aluminium alloy A6061-T6 members embedded in alkaline materials, *Corrosion Engineering, Science and Technology*, N: 1478-422X (Print) 1743-2782 (Online) Journal homepage: <http://www.tandfonline.com/loi/ycst20>, December, 2017.
- 6) 兼子彬，長澤大介，伊藤義人：モルタル埋設直後におけるアルミニウム合金の腐食挙動，構造工学論文集 Vol. 64A，2018年3月，pp. 525-536.
- 7) E. Mrema, Y. Itoh & A. Kaneko: Galvanic corrosion of aluminium alloy members of bridge guiderails under severe atmospheric exposure conditions, *Corrosion Engineering, Science and Technology*, ISSN: 1478-422X (Print) 1743-2782 (Online) Journal homepage: <http://www.tandfonline.com/loi/ycst20>, 22 Nov 2018.
- 8) H. H. Uhlig: *The corrosion handbook*, John Wiley & Sons, 1958, pp.747-756.

- 9) 伊藤義人, 兼子彬, 小嶋枉道: アルミニウム合金部材のボルト連結部の異種金属接触腐食に関する耐久性研究, 構造工学論文集 Vol. 67A, 2021年3月, pp. 431-442.
- 10) 伊藤義人, 大浦秀剛, 飯田尚明: 最新の研究成果に基づくアルミニウム合金構造部材の耐久性, 橋梁と基礎, Vol. 55, No. 10, 2021年10月号, pp. 39-43.