

アルミニウム製品ニュース

一般社団法人 日本アルミニウム協会 土木製品開発委員会
東京都中央区銀座4-2-15 塚本素山ビル TEL.03-3538-0221(代)

No.32
2022年1月

特集

異種金属接触腐食に関する耐久性

アルミニウム合金は、軽量で耐久性や美観性に優れており、土木分野では1960年代から橋梁用防護柵、橋梁の張出し歩道用床版、高潮や津波対策の水門、防潮堤の出入り口に設置される陸閘（ゲート）および照明用ポールなどに使われてきました。アルミ製品には、酸化皮膜が形成される上、各種の表面処理が施されるため、通常の環境では腐食はほとんど問題となりません。しかし、アルミニウムより活性度の少ない他種の金属と直接接触させると腐食が加速する「異種金属接触腐食」が発生することが知られています。そのため、橋梁用防護柵や高欄の各種連結部を模擬した連結部試験体の暴露試験を行って参りましたので、本号で対策等を含め特集いたします。



<甑大橋>鹿児島県薩摩川内市上甑町・鹿島町

長さ：L=1,533メートル（鹿児島県内最長）

令和2年（2020年）8月29日開通、中甑島と下甑島が陸路で繋がり、甑島三島が一つに結ばれました。

アルミニウム合金土木構造物の耐久性向上



名古屋産業科学研究所
上席研究員

伊藤 義人

略歴

昭和50年3月	名古屋大学工学部土木工学科卒業
昭和52年3月	名古屋大学工学研究科土木工学専攻博士課程前期課程修了
昭和52年4月	名古屋大学助手
昭和63年10月	名古屋大学助教授
平成7年4月	名古屋大学教授（平成28年3月まで）
平成12年4月	名古屋大学附属図書館長（平成21年3月まで）
平成21年4月	名古屋大学情報連携統括本部副本部長／ 名古屋大学情報戦略室長（平成28年3月まで）
平成28年4月	国立岐阜工業高等専門学校長（令和3年3月まで）／ 名古屋大学名誉教授
令和3年4月	名古屋産業科学研究所上席研究員（現在に至る）／ 岐阜高専名誉教授

1. はじめに

アルミニウム合金土木構造物の研究を本格的に始めて20年以上になります。研究者としては、最初に鋼構造部材の座屈耐荷力に関する研究を始めて、その後、鋼橋の維持管理や防護柵研究に関連して、アルミニウム合金製の防護柵の耐久性を含む性能評価の研究を開始しました。押出形材支柱を用いた新たなアルミニウム合金製防護柵の共同開発なども行いました¹⁾。最近は、日本アルミニウム協会の耐久性小委員会での活動に関連して、土木構造物に使われる6000系のアルミニウム合金部材連結部の耐久性研究を実施しています。

2. アルミニウム合金部材の耐久性向上

アルミニウムは環境側に電子をとられやすい活発な金属ですが、幸いにして、アルミニウム表面には、安定かつ緻密で密着性のよい酸化皮膜ができます。その性質を利用して、陽極酸化塗装複合皮膜処理をすることによって通常の環境ではアルミニウム合金部材は高い耐久性を有しています。ただし、連結部などの異種金属と接触するような部位において、厳しい環境中では異種金属接触腐食が課題でした。

1) 地覆中の鉄筋との異種金属接触腐食

アルミニウム合金防護柵が採用され始めた当初、鉄筋コンクリート地覆中に支柱を立て込んだ時に、鉄筋と支柱との接触により腐食が発生して、地覆にクラックが入り、異種金属接触腐食が広く認識されました。補修も含めて鉄筋と支柱との絶縁をすることによって、この問題は早期に解決されています。

2) ポルト類の腐食耐久性

アルミニウム合金部材の連結は、現場での溶接が困難なため、ステンレスボルトやビスが用いられることが多いです。ステンレスボルト類（ボルト、ワッシャー、ナット）などの耐久性については、最近、宮古島の暴露試験場で定量的に確認されました²⁾。

天側

地側



(a)軒天暴露（1年後）



(b)軒天暴露（5年後）

A : S U S 304ジオメットZ E Cコート

B : S U S 304ジオメットP l u s処理

C : S U S 304ジオメット処理

D : S U S 304ダクロ処理

E : S U S 304無処理

F : S S 400溶融亜鉛メッキ処理H D Z 35

図-1 ポルト類自体の腐食状況

図-1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種のボルト類（A～F）を取り付けた1年後と5年後の屋外暴露試験片の外観観察から以下のようなことが分かりました。

S U S 304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+P l u s処理、ジオメット処理+Z E C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した。

無処理のS U S 304材のステンレスボルト類（E）は、1年後から地側（裏面）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ました。

溶融亜鉛メッキ処理H D Z 35したS S 400材のボルト類（F）は、1年後に変化はありませんでしたが、5年後には亜鉛メッキがすべてなくなって赤さびが全体を覆っていました。

ステンレスボルト類は、沖縄のような厳しい海岸環境で、耐久性が要求される場所では、亜鉛フレークコーティング（G E O M E T）の表面処理が必要であることが分かりました。

3) 連結部の異種金属接触腐食

無処理のステンレスボルト類（ボルト、ナット、ワッシャー）やステンレスビスを用いたアルミニウム合金は、厳しい環境の中ではその連結部で異種金属接触腐食が発生する場合があります。

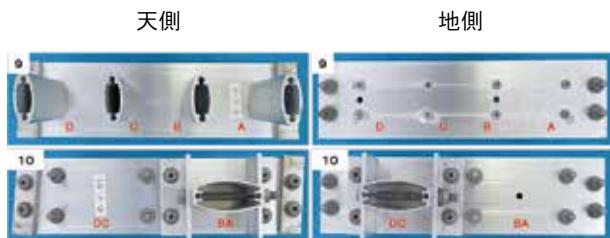
6000系アルミニウム合金部材を用いた種々の連結部を模擬した試験体の長期暴露試験によって、耐久性が要求される環境における陽極酸化塗装複合皮膜処理をしたアルミニウム合金部材どうしの連結には、亜鉛フレークコーティング（G E O M E T）したステンレスボルト類（ボルト、ナット、ワッシャー）を用いるとよいことを定量的に明らかにしました²⁾。

4) 鉛直閉断面部材の水抜き穴

図-2の上側の図の試験体は、閉断面のバラスターをジオメット処理（A）したステンレスビスやねじで直接連結していますが、水抜き穴を付けたものは、長期暴露試験後も異種金属接触腐食は全く生じていませんでした。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、それ程ではないですが、ビス周辺に白さび

がわずかに発生していました。

図-2の下側の図の試験体では、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グ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ますが、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ませんでした。



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

図-2 バラスターの耐久性

閉断面のバラスター部材や支柱などのように、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方がよいことが実証されました²⁾。

5) コンクリートやモルタル埋め込み時の溶解腐食

アルミニウムは、クロムや亜鉛と同じように酸だけではなく塩基（アルカリ）とも反応する両性金属です。強アルカリ性を示すコンクリートやモルタル中にアルミニウム合金部材を埋め込んだときに溶解腐食をするという危惧があるという技術者がいました。構造材として使われる6000系のアルミニウム合金について、定量的な検討が行なわれました。

アルミニウム合金 A6061S-T6 の引張試験片の平行部にモルタルを巻き付けたものと巻き付けないものを用意し、JIS K5621のS6複合サイクルの環境促進試験を実施しました。アルミニウム合金の表面は、陽極酸化塗装複合皮膜処理を施した試験体と陽極酸化処理していない生地材の試験体を用意しました。

促進試験後、陽極酸化塗装複合皮膜処理したアルミニウム合金板は、モルタルを巻き付けた部分もまったく腐食せず、生地材の試験体のモルタル巻き付けした並行部の右側部分は、時間の経過とともに、腐食が進行して、120日で約50 μm程度の腐食深さが生じましたが、問題となるものではありませんでした³⁾。

また、モルタル抽出液、水酸化ナトリウム液、水酸化カ

リウム液などの6種のアルカリ溶液中に、表面処理無しのアルミニウム合金板（生地材）と陽極酸化塗装複合皮膜を付けたアルミニウム合金板を浸して、腐食状況を検討しました。その結果、複合皮膜のあるアルミニウム合金板は、まったく腐食しませんでした。また、生地材の腐食は長期的には、0.05mm/yr以下と非常に遅くなりました⁴⁾。

外側しか陽極酸化塗装複合皮膜処理できず、内側は生地材の閉断面部材をコンクリートやモルタルに埋設しても、強度の低下はほとんどないので、工学的には問題にならないことが分かりました。

3. 今後の課題

軽量で、美観性や耐久性に優れたアルミニウム合金は、今後、土木分野の構造材として、適材適所で広く使われだと思いますが、以下のような課題があります⁵⁾。

まず、耐久性を要求される環境においては、アルミニウム合金部材の連結部には、亜鉛フレークコーティング（G E O M E T 処理）したボルト類を使えばよいですが、無処理のステンレスボルト類の適用可能な場合を今後明確にするとよいと思います。

また、陽極酸化塗装複合皮膜のある部材は、コンクリートやモルタルに埋設されても、アルカリ腐食を発生することはないですが、複合皮膜がない場合や設置時に複合皮膜に傷がついていると、塩化物を含む水が浸入すると腐食が発生する場合がありますので注意が必要です。ステンレスボルト締結時にワッシャーなどにより複合皮膜が傷つかないようにする必要があります。

参考文献

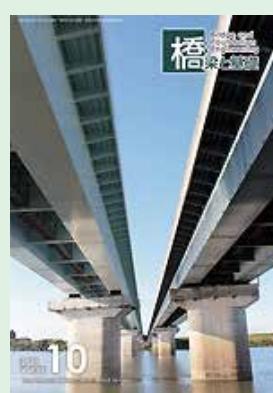
- 1) 伊藤義人 et al. : アルミニウム合金押出形材を用いた橋梁用ビーム型防護柵の動的挙動に関する研究、土木学会論文集 A1, Vol. 71, No. 3, 2015年, pp. 352-366.
- 2) 伊藤義人、兼子彬、小嶋征道：アルミニウム合金部材のボルト連結部の異種金属接触腐食に関する耐久性研究、構造工学論文集 Vol. 67A, 2021, pp. 431-442.
- 3) E. Mrema, Y. Itoh, A. Kaneko, M. Hirohata: Corrosion of aluminium alloy A6061-T6 members embedded in alkaline materials, Corrosion Engineering, Science and Technology, ISSN:1478-422X (Print) 1743-2782 (Online) Journal homepage: <http://www.tandfonline.com/loi/yct20>, December, 2017.
- 4) 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, pp. 525-536.
- 5) 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、10月号、2021年。

論文「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」

土木製品開発委員会傘下の耐久性小委員会伊藤義人委員長、大浦秀剛委員、飯田尚明委員による論文「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」が土木専門誌「橋梁と基礎」2021年10月号（株式会社建設図書刊）に掲載されました。

本論では、アルミニウム合金構造物・部材の設計や製作・施工の際に問題となる耐久性について、最新の研究成果や検討結果などを示し、提言を行っております。アルミニウム合金部材の異種金属接触腐食については、現地調査と暴露試験の結果をもとに対策を説明しております。コンクリートやモルタル埋込み時の溶解腐食についても実験結果に基づく検討結果を紹介しました。以下の株式会社建設図書HPより同誌2021年10月号を購入できます。

http://www.kensetutosh.com/Magazine/kyouryou/2021_kyouryou.html



「橋梁と基礎」2021年10月号表紙

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の紹介

アルミニウム合金は優れた耐食性を有しているため、塗害地域等の高耐久性を求められる地域を中心に高欄や防護柵等の土木製品に広く使用されている。各部材の多くはステンレス鋼製ボルト等を用いて締結されているため、耐久性小委員会では異種金属接触腐食に関する種々の現地調査や研究を長年行っている。

本稿では、委員会内で実施した各種ボルト連結部試験体の暴露試験結果について紹介する。

表-1 暴露試験の試験体一覧

試験体No.	内 容
1・2・3	高欄に使用されているA6061S-T6材を実際の施工状況と同様にボルトを取付け。ボルトは無処理、ジオメット処理、ワッシャーのみ塗装、絶縁の4種。
4・5・6	構造材で使用されているA6N01S-T5、A5083P-O、A3004P-H32をN01-3と同様に実施。
7・8	高欄支柱で使用しているAC7A-Fを鋼製橋梁での設置を考慮して、鋼板とボルト結合。
9・10	バラスターを実際の取付け状態にて試験。
11・12・13	A6063S-T5をカラーアルマイト（ステンカラーカー、ブラウン色、ダークブラウン色）処理（耐食性に影響はないが参考試験）。
14	異種金属接触腐食による影響を与えないようボルトのみボリカーボネイト板に取付け。ボルトは、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）（ボルトの性能比較のため参考試験）。

暴露試験内容

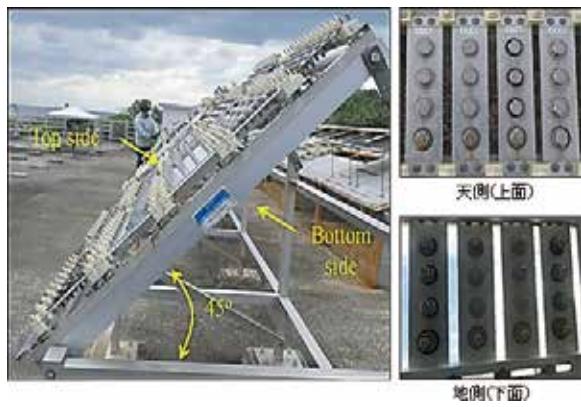
・試験体

表-1に示す防護柵等の各種連結部を模擬したボルト連結部試験体を用いた。

アルミニウム合金板には、A6061S-T6の陽極酸化塗装複合皮膜材、A6N01S-T5、A5083P-O、A3004P-H32の未処理材、AC7A-Fのアクリル樹脂焼付塗装材等を用いた。ボルト類（ボルト、ナットおよびワッシャー）には、未処理ステンレス鋼製ボルト類、亜鉛フレークコーティング（ジオメット処理）を施したボルト類、ワッシャーのみ塗装を施したボルト類、絶縁ブッシュ（塩化ビニル）を使用したボルト類等を用いた。

・暴露試験方法

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-1(a)）および軒天暴露試験（図-1(b)）を行った。暴露期間は、1年、3年、5年、予備の4期間とした。



(a) 直接暴露試験



(b) 軒天暴露試験（蓋を取って撮影）

図-1 暴露試験方法

・腐食評価方法

外観観察および表面形状計測を行った。表面形状計測はレーザー深度計を用い、ボルト周辺部の最大腐食深さ(CDmax)、腐食面積(CA)および腐食体積(CV)を求めた。

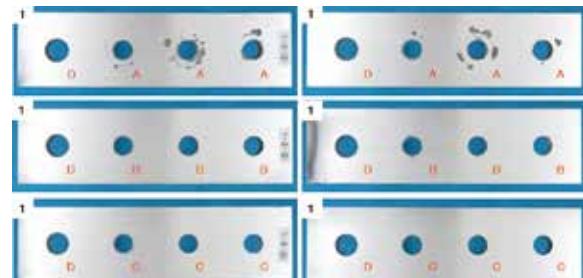
暴露試験結果

・外観観察結果

一例として、直接暴露試験5年後の試験体1の外観写真を図-2に示す。未処理ステンレス鋼製ボルト類(A)を用いた場合、アルミニウム合金板のボルト周辺部に著しい異種金属接触腐食が発生した。一方、亜鉛フレークコーティングを施したボルト類(B)を用いた場合、ボルト類およびアルミニウム合金板に腐食は発生しなかった。ワッシャーのみ塗装を施したボルト類(C)を用いた場合、ワッシャー以外のボルト類に赤さびは発生したが、アルミニウム合金板に腐食は発生しなかった。また、絶縁ブッシュを使用したボルト類(D)を用いた場合、ボルト類に赤さびは発生したが、アルミニウム合金板に腐食は発生しなかった。



(a) ボルト解体前



(b) ボルト解体後

図-2 直接暴露試験5年後の試験体1の外観

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の紹介

・表面形状計測結果

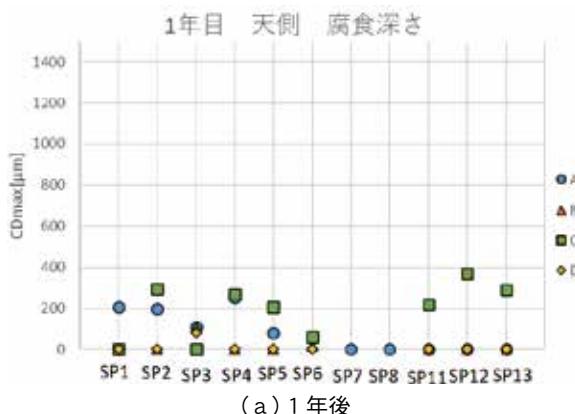
直接暴露試験1年後、3年後および5年後の試験体天側の最大腐食深さ($C D_{max}$)を図-3に示す。未処理ステンレスボルト類(○A)を用いた場合、深い腐食が生じており、その深さは経時に増加した。亜鉛フレークコーティングを施したボルト類(△B)を用いた場合、異種金属接触腐食は発生しなかった。また、腐食面積(C A)および腐食体積(C V)も同様な傾向であった。

直接暴露試験および軒天暴露試験の試験体地側の最大腐食深さ($C D_{max}$)は、付着塩分が降雨により洗い流され難いため、直接暴露試験の試験体天側に比べて深い値を示したが、亜鉛フレークコーティングを施すことで異種金属接触腐食が抑制されていた。

結論

防護柵等の各種連結部を模擬したボルト連結部試験体を用いて暴露試験を行った結果、以下の結論が得られた。

- 1) 耐久性が要求される環境においてステンレス鋼製ボルトをアルミニウム合金部材の連結に用いる場合、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) ステンレス鋼ボルト周辺部のアルミニウム合金部材の異種金属接触腐食は、ボルト類の表面処理等の仕様によって、以下の順で軽微であった。
未処理 < 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
- すなわち、亜鉛フレークコーティングを施したステンレス鋼製ボルト類を用いれば、異種金属接触腐食を抑制できることが分かった。
- 3) 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むことは有効であるが、ゆるみの発生に注意する必要がある。



(a) 1年後

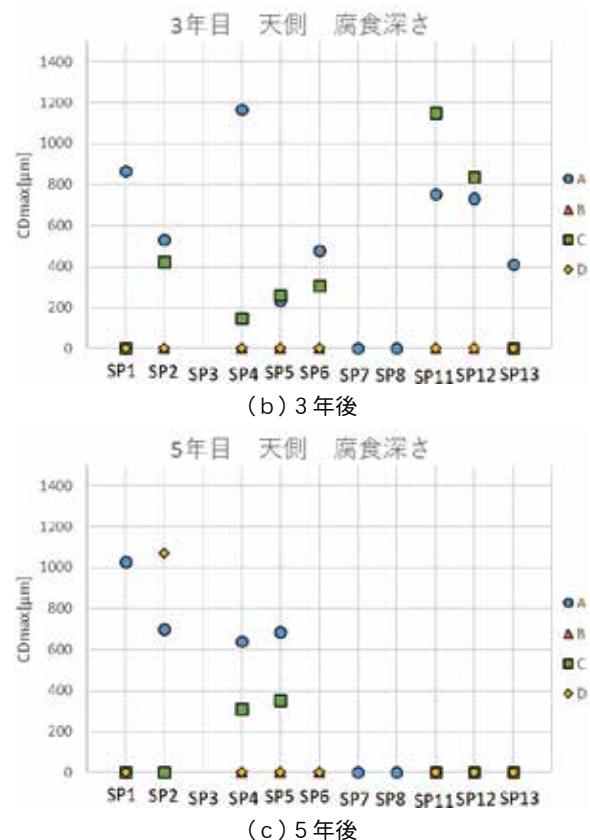


図-3 直接暴露試験後の最大腐食深さ

<委員名簿>

委員長	伊藤 義人	(敬称略)
		名古屋産業科学研究所
		名古屋大学名誉教授／
		岐阜高専名誉教授
委 員	守屋 進	元(国研)土木研究所
"	大浦 秀剛	三協立山㈱
"	太田 吉則	㈱S D A T
"	石橋 学	日鉄神鋼建材㈱
"	大島 勤	日軽エンジニアリング㈱
"	長元 志郎	日軽エンジニアリング㈱
"	村田 拓哉	㈱U A C J
"	花房 奈央子	Y K K A P ㈱
"	兼子 彬	日本軽金属㈱
"	平井 友樹	日本軽金属㈱
事務局	川畠 達哉	(一社)日本アルミニウム協会

ウエザリング技術研究成果発表会

一般財団法人日本ウエザリングテストセンター(J W T C) 殿では、毎年11月頃にウエザリング技術研究成果発表会を耐候性試験の周知・普及、最新の耐候性技術情報の提供、J W T Cの自主研究成果の発表、耐候性にかかる技術者の交流を目的に開催されております。本年度は、11月25日オンラインにて開催されました。

この発表会では、土木製品開発委員会耐久性小委員会伊藤義人委員長が「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耐久性－宮古島における長期暴露試験結果を中心として－」と題して講演しました。内容は、以下のとおりです。

「アルミニウム合金の防護柵や高欄の各所の部材連結部を模擬した250体の試験体を用いて、宮古島の暴露試験場において1年間、3年間および5年間の長期の屋外暴露試験を実施し、異種金属接触腐食の性状について定量的に明らかにした。沖縄本島と宮古島の現地調査結果と長期屋外暴露試験結果を基に異種金属接触腐食の特性を明らかにし、最後に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を高める方策について説明する。」



写真提供 (一財)日本ウエザリングテストセンター

アルミニウム合金製土木製品

数々の優れた特性（耐久性、耐食性、軽量性、美観性、加工性等）を持つアルミニウム合金は、その多くの特性により各種土木製品に使用されています。



芝山大橋 (香川県)



大井川港陸閘 (静岡県)



落合橋 (埼玉県)



金沢駅西広場 (石川県)



常盤橋 (長野県)



八ツ場ダム (群馬県)



横十間川 (東京都)



十三石橋 (富山県)



東横堀川護岸 (大阪府)

土木製品開発委員会構成会社

AAAGエンジニアリング株式会社
JFE建材株式会社
積水樹脂株式会社
株式会社LIXIL

三協立山株式会社
日鉄神鋼建材株式会社
日輕金アクト株式会社
YKKAP株式会社

株式会社S.D.A.T
日輕エンジニアリング株式会社
株式会社UACJ