

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01660

研究課題名（和文）金属カチオンによる不動態皮膜補修機序に基づく耐食性表面の創製

研究課題名（英文）Formation of corrosion resistant surface on metals by means of metal cation assisted restoration of passive films

研究代表者

坂入 正敏（Sakairi, Masatoshi）

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号：50280847

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：材料の水溶液環境における防食は、資源や炭酸ガス排出量削減のために重要である。環境中に存在する微量の金属カチオンを用いる金属材料の新規防食法について研究を行った。亜鉛イオンは多くの合金において有効な腐食を抑える腐食抑制剤であることを明らかにした。電気めっきと低温・短時間の熱処理で亜鉛イオン供給層を形成すると、鉄鋼材料の腐食をめっきのままより効果的に抑制できること、金属カチオンは腐食抑制剤の防食能を数倍に高めることを明らかにした。表面分析から導出した金属カチオンの防食機構を第一原理計算（コンピュータシミュレーション）により確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

金属材料は現代社会に不可欠であり素材産業の中心であるが、多くの使用環境中で腐食する。産業事故の約3割は腐食に起因するとされるため、腐食を防止（防食）することは、資源や炭酸ガス排出量削減につながる。防食に使用する材料も省資源化が望まれている。本研究の成果は、従来より省資源、省エネルギーかつより効果的に金属材料の防食を可能にするため、持続可能な社会に大きく貢献する。腐食は材料と環境が相互に影響しあう複雑な界面化学反応であるため、今回の成果は、腐食科学と界面化学、計算科学において新たな知見を与えるものである。

研究成果の概要（英文）：Corrosion protection of materials in aqueous environments is important for reducing of metal resource and carbon dioxide emission. A novel corrosion protection method for metallic materials using trace amounts of metal cations in the environments was studied. Zinc ions were found to be effective corrosion inhibitors in alloys. It was found that the formation of zinc ion-supplying layer by electroplating and low temperature and short-time heat treatments can inhibit corrosion of steels more effectively than the only zinc plating. The metal cations increase the corrosion inhibition ability of traditionally used corrosion inhibitors several-fold. The corrosion inhibition mechanism of metal cations derived from surface analysis was confirmed by first-principles calculations (computer simulation).

研究分野：腐食防食

キーワード：金属カチオン 耐食性表面 計算科学 電気化学 表面分析

1. 研究開始当初の背景

鉄鋼に代表される金属材料は現代社会に不可欠な材料であり、素材産業の中心である。しかし、多くの使用環境中で腐食する。腐食は材料と環境が相互に影響することで起こり、特に水の関与する水溶液腐食(大気中の腐食;大気腐食を含む)は、常温・常圧の水溶液と金属の界面で起こる高速の化学反応である。このことは、環境と材料界面構造の僅かな違いが腐食進展に大きく影響することを意味している。

ここで、産業事故の約3割は腐食に起因するとされ、わが国で過去3回に実施された腐食を防ぐためのコストや腐食関連の研究・開発費(腐食コスト)の調査から、腐食コストはGDPの約1%(約5兆円)と試算されている。2015年に実施の調査を基に2020年1月に発行された「わが国における腐食コスト報告書」によると、前回の調査と金額や使用されている内容はほぼ変わらず、腐食コストは年間4.3兆円(GDPの0.78%)であり、約6割が塗装、約3割が表面処理、約1割が耐食材料である。この結果は、経済の面から、実際の防食法として材料表面をどのように改善するかが重要であることが理解できる。一方、腐食コストの大部分をしめる塗装は、建築や輸送機器分野で主に使用されているため、国土強靱化や持続可能な社会やSDGsにおいて中心的な役割をはたす分野である。以上のことから、金属材料の耐食性を追求する研究は学術的のみならず、社会的、経済的にも大きな意義がある。

これまで行われてきている腐食を防止する方法は大きく2つに分けられる。ステンレス鋼に代表される、CrやNiなど添加元素による材料の耐食性を向上する方法と腐食を抑制する薬品(腐食抑制剤、塗装)のように材料を腐食性の環境から隔離して守る方法である。これらの方法は、耐食性の向上に有効であり、多くの実績もあるが、使用する資源量は十分とは言えない。そのため、省資源で耐食性を効率的に向上可能かつ自己修復性を兼ね備えた新規耐食性表面の構築が必要である。

近年、腐食で殆ど着目されていなかったある種の金属カチオンは腐食を抑制すること、亜鉛めっきの防食機能が犠牲防食のみではないこと、亜鉛イオンが溶液中に微量存在すると、炭素鋼の腐食抑制剤の防食性能が劇的に向上することを見出していた。省資源で実用金属材料の耐食性を効率的に向上させる1つの方針として、金属カチオンによる不働態皮膜の補修機能を高度に利用することが考えられていた。

2. 研究の目的

塩化物イオン濃度やpHが同じでも溶液や環境中に微量の Zn^{2+} や Al^{3+} のような金属カチオンが存在することで金属材料の耐食性が大きく変化すること、このような金属カチオンは腐食抑制剤の能力を飛躍的に向上することを見いだしている。この機序を用いる省資源の耐食性材料の開発を目指している。そのためには、金属カチオンによる耐食性向上のメカニズムを解明する必要がある。本研究では、金属カチオンによる不働態皮膜の耐食性向上メカニズムを電気化学および表面分析、計算科学(第一原理計算)により解明すること、その機序を利用する鉄鋼材料の新規耐食性表面創製法の開発を行う。

3. 研究の方法

(1) 金属カチオンによる防食機序の解明

金属カチオンによる防食機序の解明のために浸漬腐食試験とその後の表面分析および電気化学測定とその解析を実施した。なお、炭素鋼とアルミニウム合金を所定のサイズに切り出し、機械研磨と超音波洗浄して試料として用いた。溶液には、塩化物イオン濃度を一定とし、NaClと $MgCl_2$ 、 $ZnCl_2$ を単体もしくはNaClを基準とした溶液に他の塩を添加して用いた。

①浸漬腐食試験と表面分析

浸漬腐食試験は、試料を298K、大気解放の溶液中に259.2ks(3日間)浸漬することで実施した。試験中は容器を密封せず大気開放の状態とした。浸漬前後の試料の質量変化を分析天秤で計測して、腐食量を求めた。

溶液に浸漬前後の試料表面及びガラス容器概観の撮影はデジタルカメラで行い、試料表面の高倍率観察と元素分析を走査型電子顕微鏡(SEM)により実施した。SEM観察の加速電圧は10kVとし、元素分析を20kVの加速電圧でSEM付属のエネルギー分散型X線分析(EDS)を用いて行った。腐食生成物の化学状態を分析するため、3日間浸漬後の試料表面をX線光電子分光分析装置(XPS、加速電圧10kV、電流10mA、 $Al-K\alpha$ 線)で分析した。試料断面は、Arイオンを用いる断面研磨作製装置を用いて作製した。断面写真および元素分析はSEMおよびオーギュ電子分光分析(AES)装置で行った。なお、真空装置による観察と分析の前には、高純度水とエタノール中で超音波洗浄し、十分に乾燥した。

②電気化学測定には、コンピュータ制御のポテンショスタットと三電極セルを用いた。対極にPt板、参照極に飽和KClのAg/AgCl電極を用いた。試料を溶液に浸漬した後、浸漬電位(OCP)を1時間測定した。その後、動電位分極測定および電気化学インピーダンス(EIS)測定を行った。動電位分極測定は、走査速度1mV/sでOCP \pm 50mVから、アノード方向とカソード方向、

別々に行った。EIS 測定は、浸漬電位において周波数範囲 10 kHz から 10 mHz, 交流振幅 10 mV で行い、得られたデータの解析には、ポテンシオスタットに付属のソフトを用いた。再現性を確認するため、同様の条件で測定を 3 回以上実施した。

③腐食抑制剤との相乗作用の調査

腐食抑制剤として、食品や歯磨きなどに使用されるほど毒性が低い安息香酸 Na と乳酸 Al を用いた。機械研磨と洗浄を行った炭素鋼を 298 K, 100 時間浸漬することで実施した。試験後の試料表面を XPS により分析した。

(2) 金属カチオンによる防食機序を利用する耐食性層の構築

耐食性層は電気亜鉛めっきとその後の熱処理により構築した。

①表面層の形成

電気めっきは、1L に 100 g $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ と 20 g H_3BO_3 を溶解した水溶液を用い、電流密度 20 mA/cm^2 で行った。電気めっきの時間は、形成する表面層の厚さによって変えた。電気めっきした試料は、400°C の電気炉で熱処理を行った。熱処理により生成した相を明らかにするために、X 線回折(XRD)により分析した。XRD の線源には Cu K α を用いた。

②耐食性の評価

浸漬腐食試験と電気化学測定により耐食性の評価を行った。溶液には、10 mM NaCl 水溶液を用いた。浸漬試験時間は、86.4 ks (1 日間) もしくは 259.2 ks (3 日間)とした。試験後の試料表面の測定と電気化学測定の条件は、(1)と同様とした。

(3) 計算科学による検討

溶液近似第一原理計算手法の一つである ESM-RISM 法を用いて、金属材料表面とアニオン・金属カチオンとの間の結合挙動を調査した。

4. 研究成果

(1) 金属カチオンによる防食機序の解明

①浸漬試験と表面分析、電気化学測定

浸漬試験から、溶液中に Zn^{2+} が微量に含まれると炭素鋼やアルミニウム合金の腐食が抑制された。一方、 Mg^{2+} による腐食抑制量は僅かであった。浸漬試験後の炭素鋼は腐食生成物で覆われていたが、その量と密着性は溶液中に含まれる金属カチオンで大きくことなり、 Zn^{2+} の量は最も少ないが緻密で密着性の高いものであった。この結果は、溶液中に微量存在する金属カチオンは、腐食量のみではなく腐食生成物と不動態皮膜との結合力にも影響することが示唆される。

動電位分極測定から、 Zn^{2+} が微量に含まれるとアノード反応とカソード反応ともに抑制されることが示された。EIS 測定から、腐食反応の速度の逆数に相当する電荷移動抵抗は、 $Zn^{2+} > Mg^{2+} > Na^+$ となり、浸漬試験とよい相関を示した。より詳細なインピーダンスの解析から、溶液中に存在する Zn^{2+} により金属上に Zn 層が形成し、その層が電荷移動を阻害している可能性が示唆された。加えて、溶液と金属の界面に存在して腐食を抑制している層(保護層)の欠陥内部は、 Zn^{2+} が溶液中に存在すると減少することが示唆された。

金属カチオンの異なる溶液に 3 日間浸漬した炭素鋼試料の表面と断面を SEM により観察した。その結果、 Na^+ を含む溶液に浸漬した試料に大きな孔が観察され、孔の上に生成した腐食生成物層の厚さは平坦部よりも厚いことが分かった。 Mg^{2+} を含む溶液に浸漬した試料表面に生成した腐食生成物の厚さは約 3 μm であった。一方、 Zn^{2+} を含む溶液に浸漬した試料は、腐食生成物と炭素鋼母材との平らな界面が観察でき、腐食生成物層の厚さは約 8 μm であった。 Zn^{2+} を含む溶液中で形成した腐食生成物が厚かった理由として、前述した腐食生成物の密着性の違いが考えられる。XPS と AES による浸漬試験終了後の試料表面分析から、形成した腐食生成物は素地金属の酸化物または水酸化物であること、 Zn^{2+} を含む溶液に浸漬した試料で形成した腐食生成物に Zn^{2+} が含まれることがわかった。さらに、Zn は腐食生成物外層に多く存在していることも示唆された。 Na や Mg は表面分析により検出されなかったことから、腐食生成物とは結合を作らないこともわかった。同様の結果をアルミニウム合金でも得られた。

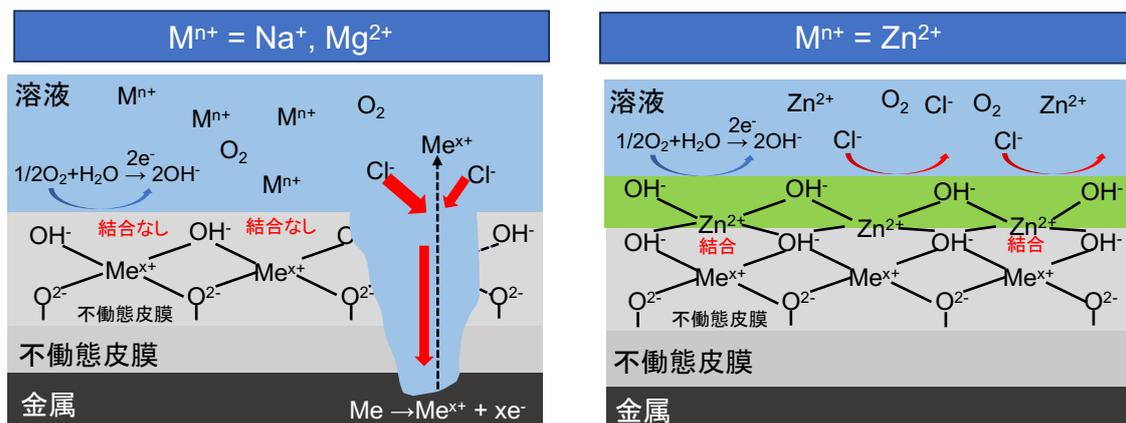


Fig. 1 金属カチオンによる金属材料の水溶液腐食における防食機序の模式図

本研究で得られた結果に基づいて母材が金属カチオンによる水溶液腐食の防食機序を Fig. 1 に模式的に示す。なお、図中の厚さは実際の厚さを正確に反映していない。実用金属材料上には厚さ数 nm であるその金属の酸化物皮膜（不働態皮膜）が存在している。この不働態皮膜により、熱力学的には不安定な金属が多く環境で金属として使用可能となっている。水溶液中において不働態皮膜の最外層は水和していると先行研究から報告されている。しかし、不働態皮膜は、接している環境や金属の不均一性により緻密で均一ではなく、内部に欠陥が存在すると考えられている。溶液中に存在する Na^+ や Mg^{2+} のように水溶液中で水和酸化物を形成しにくい金属カチオンは、不働態皮膜最外層の OH 基と結合しにくい。そのため、溶液中に存在する Cl^- により不働態皮膜が破壊され、その部分から腐食していくことになる。一方、 Zn^{2+} は、水和酸化物を形成しやすいため、不働態皮膜外層の OH 基と容易に結合して、金属カチオンによる保護層（Fig. 1 の緑部分）を形成する。さらに、不働態皮膜に存在する微小な欠陥部上にも結合して、保護層を形成する。その結果、欠陥が補修される。これらの効果により、金属の耐食性が向上することになる。

高い密着性、低融点のため、鉄鋼材料の耐食性向上に最も使用されている亜鉛めっきは、犠牲陽極として働くために高い防食性を示すと考えられてきた。しかし、本研究の結果から、めっきが溶解することで生成する Zn^{2+} も素地金属の防食に大きく寄与することが示唆される。

②腐食抑制剤との相乗作用

炭素鋼試験片を 298 K の溶液中で 100 時間の浸漬腐食試験を実施して得られた腐食減量は、3 mM NaCl 溶液で 0.916 mgcm^{-2} 、3.0 mM NaCl + 1 mM 安息香酸 Na 溶液で 0.784 mgcm^{-2} 、1.0 mM NaCl + 0.25 mM 乳酸 Al + 0.75 mM 安息香酸 Na で 0.864 mgcm^{-2} 、3.0 mM NaCl + 0.5 mM 乳酸 Al + 0.5 mM 安息香酸 Na 溶液で 0.635 mgcm^{-2} 、3.0 mM NaCl + 0.75 mM 乳酸 Al + 0.25 mM 安息香酸 Na 溶液で 0.728 mgcm^{-2} となった。0.5 mM ずつ乳酸アルミニウムと安息香酸 Na を添加した溶液において最も腐食減量が小さい結果であった。腐食抑制剤の総添加濃度が同一でも、安息香酸 Na だけを添加した溶液より複合添加した溶液のほうが、腐食抑制能は向上することが明らかとなった。浸漬試験後の試料を XPS によって分析した結果、炭素鋼上にはアルミニウムおよび安息香酸が結合して被膜を形成することが明らかとなった。既往文献との比較から、腐食抑制剤を混合することで形成した保護皮膜は同じ濃度の腐食抑制剤を単独添加した場合よりも欠陥の少ないものになっていることが示唆された。このことから、複合添加によって生物毒性の低い腐食抑制剤を低い濃度で添加し、欠陥の少ない保護被膜を形成することで炭素鋼の腐食を効果的に抑制する新たな方法を見出した。

(2) 機序を利用する耐食性層の構築

本研究の(1)において、 Zn^{2+} のような金属カチオンが水溶液（環境）中に微量に存在すると、炭素鋼やアルミニウム合金の腐食を抑制することが明らかとなった。 Zn^{2+} による防食効果を得るためには、環境中に一定量以上の存在が必要であることも明らかにしている。しかし、環境への Zn^{2+} の排出基準は厳しいため、単純に水溶液に添加することでは Zn^{2+} による防食は期待出来ない。環境基準に適合して防食効果を発揮させるためには、水溶液と材料界面における Zn^{2+} を効果的に供給すればよい。しかし、めっきのみでは溶解速度の制御が困難であるため、めっきと熱処理を組みあわせることで亜鉛合金層とすることとした。Fig. 2 に電気めっきで Zn 層厚さを高度に制御して形成した試料と電気めっき後に亜鉛の融点より低い温度で 30 分の熱処理を行った試料

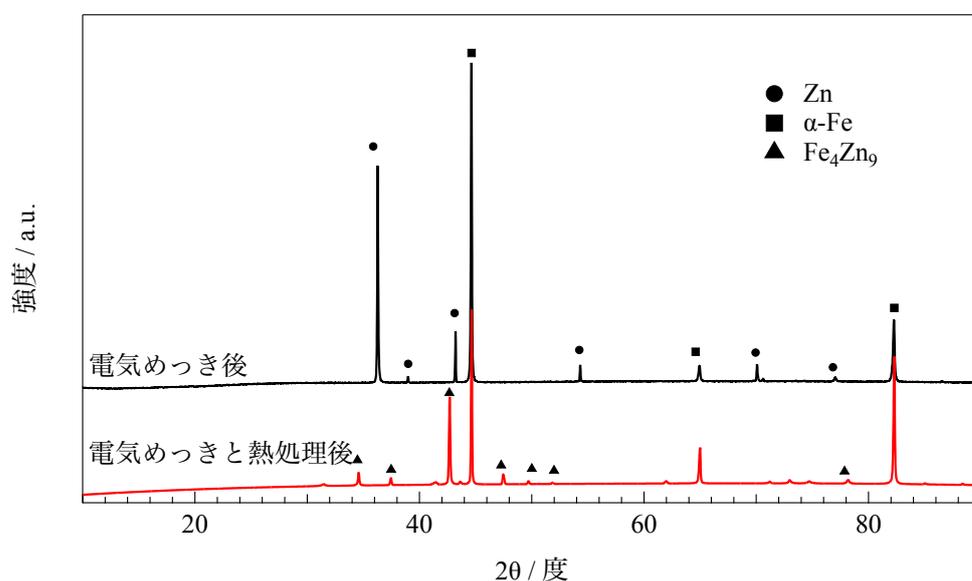


Fig. 2 電気めっき後と電気めっきと熱処理後の試料の XRD 結果

の XRD による結果を示す。今回のめっき厚さは約 $1\ \mu\text{m}$ であるため、電気めっきのみの試料においては、Zn と素地の鋼に由来する Fe のピークが観察される。一方、電気めっき後に熱処理を行った試料においては、Zn のピークは消失し、Zn と Fe の化合物である Fe_4Zn_9 のピークが観察できる。SEM による断面観察から、試料上に厚さのほぼ均一な層が形成していること、AES および EDS による元素分析から、電気めっきのみの試料からは形成している層は Zn 単相であったが、熱処理後に Zn と同じ位置に Fe も検出された。このことから、低温かつ短時間の熱処理で Zn めっき層中に Fe が拡散したことがわかった。この結果と XRD の結果とは良く一致している。なお、熱処理後に試料表面に厚い酸化皮膜の形成は確認できなかったことから、今回の熱処理条件は、めっき層の高温酸化を抑え効果的に Fe と Zn の合金層を形成できることを意味している。

浸漬腐食試験から、 $10\ \text{mM NaCl}$ 中において電気めっきと熱処理後の試料の腐食量は電気めっきのままの試料の腐食量より小さかった。試験後の試料表面を XPS により分析した結果、熱電気めっきと熱処理後の試料は3日間の浸漬後も全面に Zn が存在していた。しかし、電気めっきのみの試料は一部 Zn が残っていたが、大部分の Zn が消失していた。このことから、合金化することで、Zn の溶出を制御できることが明らかになった。

時間を変えて浸漬した後に、EIS 測定した結果、浸漬初期における電荷移動抵抗（腐食速度の逆数に比例）はほぼ同じであったが、浸漬時間が長くなるなっても熱電気めっきと熱処理後の試料の電荷移動抵抗はほぼ変化しなかった。この結果からも Zn と Fe 合金化することで長時間にわたり、素地の腐食を抑えることが示唆される。

(3) 計算科学による検討

金属カチオンによる金属材料の耐食性向上は、環境中に存在する金属カチオンが材料上に金属カチオン層を形成することであることが、実験から示された。そこで、理論・計算科学の視点から今回の示した機序を検証した。

鉄表面への金属カチオン吸着を調査するため、金属カチオン間の距離による吸着挙動の違いについて解析した。浸漬試験により大きい防食効果が確認されている Al^{3+} や Zn^{2+} について計算を行った結果 (Fig. 3), 吸着サイトからずれることなく配置された。Fe-Al および隣接 Al 原子間に共有電子の増加が見られた。このことから、金属カチオン同士が隣接している状態においても比較的強く吸着していると考えられる。一方、防食効果が小さい金属カチオンで計算を行った結果、隣接原子の間に反発力が生じることで原子間距離が大きくなり、隣接原子間の共有電子が少なくなることが確認できた。このことは、防食効果が低い金属カチオンが環境中に存在すると、不働態皮膜の強度が低下する可能性を示唆している。

酸化物に対する ESM-RISM 計算を行うためには酸化物を構成する量子原子と溶液中イオン間の相互作用パラメータ（量子-古典相互作用パラメータ）の取得が必要となる。そのため、 Fe_3O_4 の 100 面および Zn の 100 面に対して希ガス原子を配置し、各原子と希ガス原子との間の距離を変化させたときの全エネルギーを取得し、最小二乗法を用いてパラメータフィッティングを行った。その結果、Fe および Zn、O 原子について非結合性相互作用モデルの一つである Lennard-Jones 型ポテンシャルのパラメータの取得に成功した。

得られた量子-古典相互作用パラメータを用いて、 Fe_3O_4 の 110 面および ZnO100 面に対する各種金属カチオン (Na^+ , Mg^{2+} , Zn^{2+} , Al^{3+}) 吸着の計算を試みた。しかし、量子計算と古典計算ともにエネルギー収束が悪く、吸着エネルギー取得に至らなかった。その原因として、表面の酸素原子と金属カチオン近傍の電子状態が不安定で、古典溶媒との量子-古典相互作用を適切に表現できていないためと考えられる。

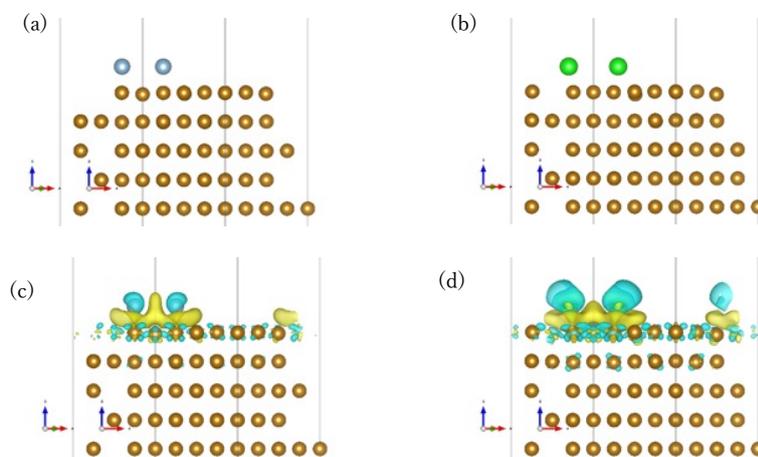


Fig. 3 金属カチオンが吸着した Fe110 表面近傍の原子配置と差電子密度

(a) Fe110 面上に吸着した隣接 Al 原子の配置, (b) Fe110 面上に吸着した隣接 Zr 原子の配置, (c) Fe110 面上に吸着した隣接 Al 原子の差電子密度, (d) Fe110 面上に吸着した隣接 Zr 原子の差電子密度

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Li Li, Sakairi Masatoshi, Islam Md. Saiful, Kaneko Akira	4. 巻 64
2. 論文標題 Influence of Metal Cations on Corrosion Behavior of Aluminum Alloy 2024-T3 in Model Freshwater	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 MATERIALS TRANSACTIONS	6. 最初と最後の頁 540 ~ 547
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2320/matertrans.MT-C2022006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Li Li, Sakairi Masatoshi	4. 巻 71
2. 論文標題 Effects of Metal Cations on Corrosion Morphology of Carbon Steel in Model Fresh Water	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Zairyo-to-Kankyo	6. 最初と最後の頁 208 ~ 212
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3323/jcorr.71.208	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Li Li, Sakairi Masatoshi	4. 巻 107
2. 論文標題 Influence of Metal Cations on Corrosion Behavior of Carbon Steel in Model Fresh Water	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Tetsu-to-Hagane	6. 最初と最後の頁 1066 ~ 1073
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2355/tetsutohagane.TETSU-2021-037	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Otani Kyohei, Kato Chiaki, Igarashi Takahiro	4. 巻 79
2. 論文標題 Synergistic Effect of Aluminum Lactate and Sodium Molybdate on Freshwater Corrosion of Carbon Steel Under Irradiation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Corrosion	6. 最初と最後の頁 1277 ~ 1286
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5006/4386	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 李礼, 坂入正敏
2. 発表標題 異なる金属カチオンを含む模擬淡水中で金属上に形成した被膜の表面分析
3. 学会等名 材料と環境2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Li Li, Masatoshi Sakairi
2. 発表標題 Corrosion behavior of 2024-T3 aluminum alloy influenced by metal cations in 10mM NaCl solutions
3. 学会等名 EMCR2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 坂入正敏, 李礼
2. 発表標題 各種金属カチオンを含む溶液に浸漬したアルミニウム合金に形成する腐食生成物の分析
3. 学会等名 軽金属学会第140回春期大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 李礼, 坂入正敏
2. 発表標題 模擬淡水環境中の金属カチオンによる炭素鋼表面の腐食形態変化
3. 学会等名 第68回材料と環境討論会討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Li Li, Masatoshi Sakairi
2. 発表標題 Effects of Zn ²⁺ on corrosion behavior of aluminum alloy and carbon steel in NaCl aqueous solutions
3. 学会等名 72nd Annual Meeting of ISE (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大谷恭平, 上野文義, 加藤千明
2. 発表標題 乳酸アルミニウムとモリブデン酸ナトリウムが炭素鋼の淡水腐食抑制に及ぼす相乗効果
3. 学会等名 第68回材料と環境討論会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	大谷 恭平 (Otani Kyohei) (20828280)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 原子力基礎工学研究センター・研究職 (82110)	
研究分担者	五十嵐 誉廣 (Igarashi Takahiro) (70414555)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 原子力基礎工学研究センター・研究職 (82110)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------