

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：15201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05156

研究課題名（和文）人工さび実験による塩害地域での亜鉛めっき鋼板の腐食機構の解明と高耐食性鋼板の開発

研究課題名（英文）Elucidation of corrosion mechanism of galvanized steels in chloride environment using artificial rust and development of high corrosion resistant steels

研究代表者

田中 秀和（TANAKA, Hidekazu）

島根大学・学術研究院環境システム科学系・教授

研究者番号：70325041

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本課題は、人工さび実験により塩害地域での亜鉛めっき鋼板の腐食機構の耐食性発現機構を解明および高い耐食性を発揮する新たな亜鉛合金めっき鋼板の開発について研究を行った。（1）亜鉛めっき鋼板の初期さびであるHydrozincite（HZ）はZnCl₂水溶液中でZinc Hydroxychloride（ZHC）さびに速やかに転移する。（2）塩害環境での亜鉛さび粒子の成長は腐食寄与物質の種類、乾湿繰り返しが強く影響する。（3）リン酸イオンはZHCさび粒子を微細化し、耐食性をもつさび粒子層を形成する。（4）鉄イオンは、HZさびの転移により生成するZHCさび粒子を微細化し、緻密なさび粒子層の形成を促進する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

実環境下で生成する亜鉛さび粒子の系統的な調査は、気温や湿度、大気組成の変動のため困難である。本課題の特徴は、人工さび粒子を用いた研究結果から、実際の腐食・さび生成で起こる種々の現象をナノ・マイクロ・マクロレベルで系統的に考察し、体系化することである。さらに、過酷な塩害環境でも亜鉛めっき鋼板の高耐食性発現に有効な合金金属を人工さび実験により模索する、耐食鋼材の開発への新しいアプローチである。実際に本課題では、人工さび実験により過酷な塩害環境でも亜鉛めっき鋼板の耐食性向上に有効な添加元素の提案が可能となった。よって、本課題の成果は産業界、工業界に対する貢献は極めて大きいと言える。

研究成果の概要（英文）：This study was aim to elucidate the corrosion mechanism of galvanized steels in severe chloride environment using artificial synthesized rusts and to develop the high corrosion resistant galvanized steels without using rare-metals. (1) Hydrozincite (HZ) rusts which are initial zinc rust of galvanized steel in atmosphere is immediately transformed into zinc hydroxychloride (ZHC) rusts in ZnCl₂ solutions. (2) Crystallization and particle growth of HZ rust are strongly affected not only kinds and amounts of corrosive gasses in atmosphere but repeating of wet-dry cycles. (3) Adding phosphate ions and Fe²⁺ and Fe³⁺ remarkably suppresses the crystallization and particle growth of ZHC rusts, leading to the formation of dense and compact rust layer on the P-doped galvanized steels.

研究分野：コロイド化学，粉体工学，腐食防食化学

キーワード：人工亜鉛さび 塩害環境 大気腐食 亜鉛めっき鋼板 合金金属 保護性さび粒子層 形態制御 分子吸着

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

鋼材は、広く使用されている重要な基盤材料である。一方、腐食による鋼材の劣化は深刻な問題となっており、1997年の調査では日本国内の腐食対策費は年間約4兆円、さらに腐食による経済損失は約10兆円と推定されている。現在、省資源、省エネルギー、環境保全、ミニマムメンテナンスなどの立場から、鋼材の軽量化と長期間使用できる新たな高耐食性鋼材の開発が望まれている。さらに、日本では沿岸部を中心に都市や工業が発達しているが、塩害環境では鋼材の耐食性は著しく低く、そのような環境でも使用可能な高耐食性鋼材の開発は急務である。そのためには、鋼材の耐食性発現機構を正確に理解する必要がある。亜鉛めっき鋼板は、亜鉛の犠牲防食作用に加え、塩基性亜鉛塩 (Basic Zinc Salt: BZS) さび粒子による保護被膜作用をもつため、高い耐食性を有し、建築、電器、自動車分野などで利用されている。したがって、亜鉛さび粒子の生成機構を解明することは、亜鉛めっき鋼板の耐食性を解明する上で非常に重要である。さらに、亜鉛めっき鋼板の亜鉛被膜には、耐食性向上や機能強化を目的に、Al や Mg, Co, Ni, Mo, Cr, Fe などの金属が合金化されている。一方、亜鉛さび粒子による保護被膜作用に及ぼす合金金属の影響はほとんど検討されていない。亜鉛合金めっき鋼板の大気腐食では、図3のように合金金属 (Me) も亜鉛とともに溶解し、腐食寄与分子由来のアニオン、水と反応することで亜鉛さび粒子が形成するため、合金金属イオンは BZS さびの生成に影響を及ぼす。よって、その効果を調べることは、亜鉛合金めっき鋼板の耐食性発現機構を解明する上で重要である。

2. 研究の目的

本課題では、人工さび実験により塩害地域での亜鉛めっき鋼板の腐食機構および亜鉛合金めっき鋼板の耐食性発現機構を解明し、さらに塩害地域で高い耐食性を発揮する新たなレアメタルフリー亜鉛合金めっき鋼板を開発することを目的に、以下の研究を行う。

① 塩害地域での亜鉛めっき鋼板の腐食機構および亜鉛合金めっき鋼板の高耐食性発現機構、合金金属の働きを詳細に解明するため、人工さび実験により、塩化物イオン存在下、亜鉛さびの主成分である BZS さび粒子を合成し、その生成温度や pH、構造、組成、粒子形態、腐食寄与分子の吸着特性を解明する。さらに、BZS さび粒子の生成、構造、形態に及ぼす耐食性発現に有効な合金金属イオンの詳細な働きを明らかにする。

② 塩害地域でも保護性亜鉛さび粒子層の形成を促進する合金金属や元素を探求し、レアメタルフリー高耐食性亜鉛めっき鋼板を開発する。

3. 研究の方法

(1) 塩害地域での亜鉛めっき鋼板の腐食機構および亜鉛合金めっき鋼板の耐食性発現機構、合金金属の働きを調べるため、塩化物イオン存在下、人工亜鉛さび BZS 粒子の生成、構造、形態に及ぼす Ni(II)や Al(III), Fe(III)など種々の金属イオンの添加効果を調べ、亜鉛さび粒子層の緻密性、保護性との関係を明らかにする。

上記(1)から明らかになった亜鉛合金めっき鋼板の合金金属の役割を基に、高い塩分濃度下でも合金金属と同等に働く代替金属や元素を人工亜鉛さび実験で探求し、レアメタルフリー高耐食性亜鉛合金めっき鋼板を開発する。

4. 研究成果

(1) ZnCl₂水溶液中での人工 Hydrozincite さび粒子から Zinc Hydroxychloride への転移

実験方法：人工 HZ さび粒子の合成は、次のように合成した。2.0 mol/L ZnCl₂ 水溶液 50 mL に 2.0 mol/L Na₂CO₃ 水溶液 50 mL を加え、生成物を 50°C で 24 時間熟成した。得られた懸濁液をろ過、蒸留水で洗浄し、50°C で一晩乾燥した。このように調製した HZ さびの ZHC への転移は次のように行った。0-2.0 mol/L ZnCl₂ 水溶液 50 mL に人工 HZ 粒子を加え、85°C で 0-24 時間処理した。得られた懸濁液をろ過、蒸留水で洗浄し、50°C で一晩乾燥した。

結果と考察：種々の濃度の ZnCl₂ 水溶液に人工 HZ 粒子 3.0 mmol を加え、85°C で 24 時間処理した。生成物の収量は [Zn²⁺] = 0 mol/L では 1.5 g で、[Zn²⁺] とともに増加し、2.0 mol/L になると 1.9 g となった。図1に示す XRD パターンには、[Zn²⁺] = 0 mol/L では HZ の回折ピークのみ確認されたが、0.5 mol/L になると ZHC

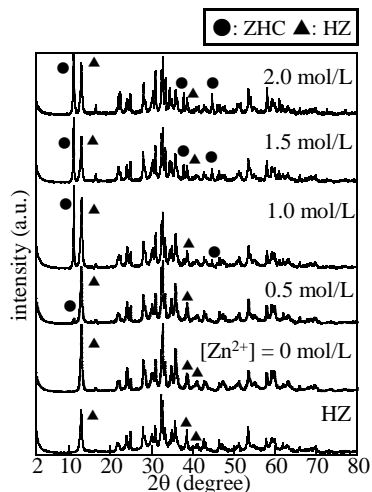


Fig. 1 XRD patterns of the products formed at different [Zn²⁺].

のピークがわずかに見られた。さらに $[Zn^{2+}]$ が増加すると、HZの回折強度は減少し、同時にZHCの強度が急激に増加した。処理前のHZのIRスペクトルには、 3276 cm^{-1} にO-H伸縮振動帯、 1499 cm^{-1} 、 1378 cm^{-1} にC-O伸縮振動帯、 1045 cm^{-1} 、 832 cm^{-1} 、 707 cm^{-1} 、 466 cm^{-1} にZn-O伸縮振動帯が見られた。 $[Zn^{2+}] = 0-0.5\text{ mol/L}$ ではこれらの吸収帯に大きな変化は見られなかった。 $[Zn^{2+}] = 1.0\text{ mol/L}$ 以上になるとHZの吸収帯はわずかに小さくなり、新たに 3444 cm^{-1} にZHCのO-H伸縮振動帯、 899 cm^{-1} 、 706 cm^{-1} 、 462 cm^{-1} にZn-O伸縮振動帯が現れた。TEM観察より、処理前のHZは $0.4\text{ }\mu\text{m}$ の板状粒子であったが、 $[Zn^{2+}] = 0-0.5\text{ mol/L}$ ではHZ粒子はわずかに小さくなった。また、 $[Zn^{2+}] = 0.5\text{ mol/L}$ では $2.0\text{ }\mu\text{m}$ の板状ZHC粒子も現れた。さらに $[Zn^{2+}]$ が増加するとZHC粒子は大きくなり、 $[Zn^{2+}] = 2.0\text{ mol/L}$ になると $5.8\text{ }\mu\text{m}$ になった。これらから、HZからZHCへの転移は、 $[Zn^{2+}]$ に強く依存するとわかった。

2.0 mol/L $ZnCl_2$ 水溶液にHZ粒子1.0 mmolを加え、 85°C で種々の時間、処理した。得られた生成物のXRDパターンを図2に示す。HZの回折強度は処理時間の増加とともに小さくなった。一方、処理後1分でZHCのピークは現れ、その強度は処理時間とともに大きくなった。IR測定を行ったところ、HZのC-O帯は1分間の処理で急激に小さくなり、それ以上の処理時間ではほとんど変化しなかった。また、処理後1分でZHCのO-H帯およびZn-O帯が現れ、処理時間とともにこれらは大きくなった。TEM観察から、HZの粒子形態はいずれの処理時間でもほとんど変化しないことがわかった。また、処理後1分で $3.1\text{ }\mu\text{m}$ の板状ZHC粒子が現れ、その粒子サイズは12時間以上では約 $5\text{ }\mu\text{m}$ に増加した。よって、HZからZHCへの転移は速やかに進行することが明らかになった。

以上より、飛来塩分環境下の亜鉛めっき鋼板の大気腐食では鋼板表面に生成したHZさび粒子は、腐食の進行とともに板状ZHCさび粒子に速やかに転移することがわかった。

(2) $ZnCl_2$ 水溶液の乾湿繰り返しにより調製した人工亜鉛さび粒子の構造と形態

実験方法： $ZnCl_2$ 水溶液の乾湿繰り返しは、以下のように行った。1.5 mol/L $ZnCl_2$ 水溶液30 mLに合成HZ粒子10 mmolを添加した。その懸濁液をガラスシャーレに加え、乾湿を5サイクル行った。乾湿1サイクルは、 20°C 、4時間の湿潤と、 85°C 、18時間の乾燥とした。その後、蒸留水30 mLを加え、生成物を溶解した後、2サイクル以降の実験を行った。

結果と考察：1サイクル、湿潤前の溶液のpHは5.4であったが、湿潤後には4.8に低下した。さらに2サイクル、湿潤前後のpHは5.5および5.0で湿潤中に低下した。3サイクル以降もこの傾向は認められ、湿潤前後のpH差はサイクルが増加すると減少した。乾燥後の生成物の収量は1サイクルでは9.4 gで、サイクルの増加による大きな変化は見られなかった。さらに、生成物中の不溶性物質量は1サイクルでは4.7 gで、2サイクルになると5.8 gと増加したが、それ以降のサイクルではほぼ一定であった。よって、さび粒子の生成は1サイクルで急激に進行すると考えられる。各サイクルで生成した不溶性物質のXRDパターンを図3に示す。1サイクルではHZのピークはわずかに見られ、同時に大きなZHCのピークが現れた。2サイクル以降では、HZのピークは消失し、ZHCのピークのみが確認された。

ZHCの(003)と(110)ピークの面積強度はサイクルとともに増加し、*a*、*b*軸のシート方向と、*c*軸の積層方向に結晶成長するとわかった。HZのIRスペクトルには、 CO_3^{2-} のC-O伸縮振動帯が 1051 cm^{-1} 、 1382 cm^{-1} に、Zn-O伸縮振動帯が 1045 cm^{-1} 、 948 cm^{-1} 、 830 cm^{-1} 、 705 cm^{-1} に見られた。1サイクル後の不溶性物質には、ZHCのZn-O帯が 714 cm^{-1} 、 902 cm^{-1} 、 1038 cm^{-1} に、O-H伸縮振動帯が 3451 cm^{-1} に現れた。さらに、いずれのサイクルでも CO_3^{2-} のC-O帯がわずかに見られた。よって、 CO_3^{2-} はZHCの層間Cl⁻の一部と置換していると推測される。図4に示す不溶性物質のTEM観察から、1サイクルでは約 $2\text{ }\mu\text{m}$ の板状ZHC粒子と $0.2\text{ }\mu\text{m}$ の不定形HZ粒子が見られた。2サイクル以降ではHZ粒子は消失し、ZHCの粒子サイズは大きくなり、5サイクルでは $4.8\text{ }\mu\text{m}$ になった。よって、ZHC粒子はサイクルの増

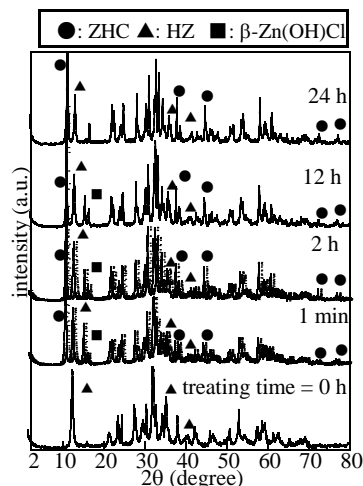


Fig. 2 XRD patterns of the products treated for different time.

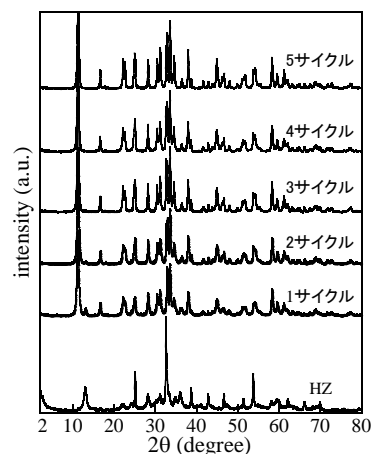


Fig. 3 XRD patterns of the products formed at various wet-dry cycles.

加とともに成長したと明らかになった。

以上の結果から、不定形 HZ さび粒子の板状 ZHC さび粒子への転移は、乾湿繰り返しサイクルの初期で急激に進行するとわかった。よって、飛来塩分環境下での亜鉛めっき鋼板の大気腐食では、緻密な保護性 ZHC さび粒子層が急激に形成し、耐食性を発揮すると推察される。さらに、乾湿繰り返しによりさび粒子は成長し、鋼板の耐食性が更に向上すると考えられる。

(3) 人工 Zinc Hydroxychloride さび粒子の生成と構造に及ぼすリン酸イオンの影響

実験方法： PO_4^{3-} 添加 ZHC 粒子は、次のように調製した。2.0 mol/dm³ ZnCl_2 水溶液 50 mL に $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$ 水溶液 50 mL をモル比 P/Zn = 0 - 0.2 となるように加えた。その後、ZnO 粒子 16 mmol を添加し、85°C で 48 時間熟成した。得られた生成物は、ろ過、洗浄し、50°C で乾燥した。

結果と考察： P/Zn = 0 での生成物の収量は 2.1 g であったが、P/Zn 比にほぼ比例して増加し、P/Zn = 1.0 になると 5.9 g になった。図 5 に示す生成物の XRD パターンから、P/Zn = 0 では ZHC の回折ピークみであったが、P/Zn 比の増加によりその強度が低下するとわかった。また、 $2\theta = 11.4^\circ$ ($d = 7.76\text{\AA}$) の (003) ピークが P/Zn 比の増加によりわずかに低角度側にシフトし、P/Zn = 0.05 では $2\theta = 11.1^\circ$ ($d = 7.97\text{\AA}$) になった。P/Zn = 0.05 以上では $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ のピークが現れ、P/Zn 比とともにその強度は増加した。よって、P/Zn 比の増加により主生成物は ZHC から $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ へ変化すると明らかになった。ZHC は水酸化亜鉛八面体と四面体で構成されるナノシートが積層した層状化合物で、Cl⁻ は四面体 Zn(II) の頂点に配位している。また層間には水が存在し、OH⁻...Cl 水素結合によりナノシート同士は結合している。P/Zn 比の増加により ZHC の積層およびシート方向に対応する (003), (220) の回折強度が低下したため、 PO_4^{3-} は ZHC の結晶化を抑制すると明らかになった。また、 PO_4^{3-} 添加により、ZHC の (003) ピークの面間隔がわずかに増加することから、 PO_4^{3-} は ZHC 層間に取り込まれていると推察できる。AAS, IC 測定から求めた生成物の P/Zn 比は、いずれも出発溶液の P/Zn 比の 3-4 倍で、 PO_4^{3-} は生成物に取り込まれやすいと明らかになった。これは Zn^{2+} に対するアニオンの安定度定数 ($\log K$) が、 PO_4^{3-} (12.4) > Cl⁻ (0.6) > OH⁻ (-10.2) で、 PO_4^{3-} は Zn^{2+} と優先的に配位するためと帰属できる。TEM 観察から、図 6 のように P/Zn = 0 では 3.2 μm の六角板状 ZHC 粒子が見られたが、P/Zn 比が増加すると、不定形ナノ粒子の凝集体になった。よって、 PO_4^{3-} は ZHC の粒子成長を抑制するとわかった。P/Zn = 0.075 以上では、約 1 μm の $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 粒子が現れた。これらのことから、 PO_4^{3-} は ZHC の結晶化、粒子成長を強く抑制し、 $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 粒子の生成を促進すると明らかになった。N₂ 吸着等温線から求めた比表面積は、P/Zn = 0 の ZHC では 1 m²/g であったが、P/Zn = 0.025 になると 25 m²/g に増加した。これは、P/Zn 比の増加による ZHC の粒子サイズの低下と一致する。P/Zn = 0.05 以上では、 $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 粒子が生成するため比表面積は低下した。

以上より、沿岸部や融雪剤使用地域では、塗装防食された亜鉛処理鋼材が腐食すると、鋼材表面に微細な ZHC 粒子からなる緻密な保護性さび粒子層が形成すると考えられる。

(4) 人工 Hydrozincite さび粒子の Zinc Hydroxychloride さびへの転移に及ぼす鉄イオンの影響

実験方法： 鉄イオン添加人工 HZ さび粒子は、次のように合成した。93.8 mmol/L ZnCl_2 水溶液 200 mL に、 FeCl_2 あるいは FeCl_3 水溶液 200 mL をモル比 Fe/Zn = 0 - 0.2 となるように加えた。その後、187.5 mmol/L Na_2CO_3 水溶液 100 mL を加え、生成した懸濁液を 50°C で 24 時間熟成し

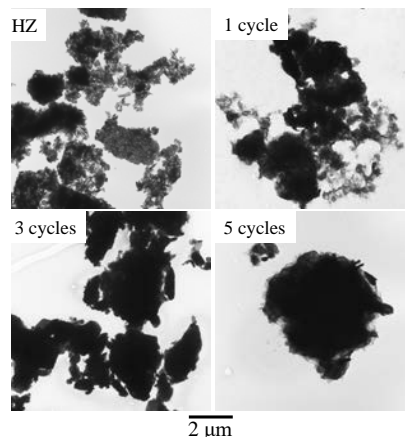


Fig. 4 TEM pictures of the products formed at different wet-dry cycles.

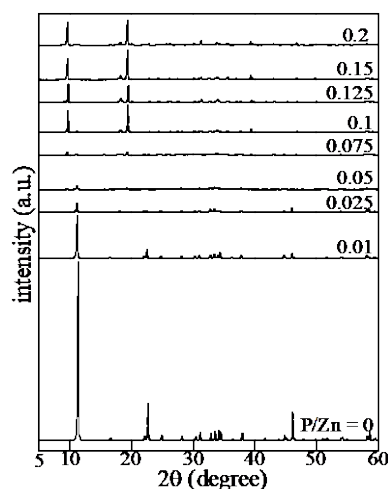


Fig. 5 XRD patterns of the products formed at various P/Zn ratios.

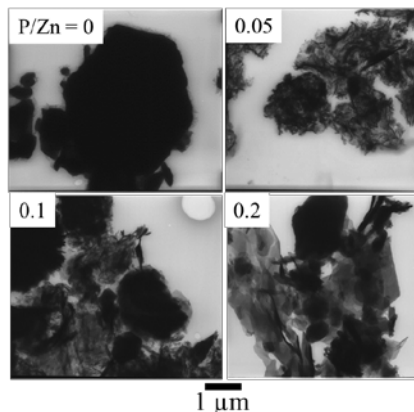


Fig. 6 TEM pictures of the products formed at different P/Zn ratios.

た。得られた生成物を、ろ過、洗浄し、50°Cで乾燥した。鉄イオン添加 HZ さびの ZHC への転移は、次のように行った。2.0 mol/L ZnCl₂ 水溶液 50 mL に、調製した鉄イオン添加 HZ さび粒子 0.8 mmol を加え、85°Cで6日間処理した。その後、生成物を、ろ過、洗浄し、50°Cで乾燥した。

結果と考察：Fe³⁺添加HZ (Fe³⁺-HZ) の収量は、いずれのFe/Zn比でも約1.8 gであった。Fe³⁺-HZのXRD測定を行ったところ、Fe/Zn = 0では、図7のようにHZの回折ピークのみが確認できた。Fe/Zn比の増加とともにHZの回折強度は低下したが、HZ以外のピークは認められなかった。また、(511)ピークから求めたHZの結晶子サイズはFe/Zn = 0では24 nmであったが、Fe/Zn比の増加によりわずかに減少し、Fe/Zn = 0.2になると17 nmになった。さらに、FeおよびZn含有量から求めた粒子のFe/Zn比は、出発溶液のFe/Zn比とほぼ一致した。これらのことから、Fe³⁺添加によるHZの結晶化の抑制が示唆される。一方、Fe²⁺添加HZ (Fe²⁺-HZ) についても、Fe³⁺-HZと同様に、添加したFe²⁺はHZの結晶化および粒子成長を抑制したが、その抑制効果はFe³⁺と比べ低くなった。

種々のFe/Zn比で調製した鉄イオン添加HZさび粒子をZnCl₂水溶液に加え、85°Cで処理した。Fe³⁺-HZでは、処理後の生成物の収量は、いずれのFe/Zn比でも約0.7 gで、Fe³⁺-HZ添加量0.45 gを上回った。Fe³⁺-HZを処理した後の生成物のXRD測定を行った。その結果を図8に示す。いずれのFe/Zn比でもHZのピークはほぼ消失し、同時にZHCのピークが現れ、その回折強度はFe/Zn比の上昇により低下した。ZHCの(110)ピークから求めた結晶子サイズは、Fe/Zn = 0では52 nmであったが、Fe/Zn比の増加とともに減少し、Fe/Zn = 0.2になると24 nmになった。さらにAAS測定から、添加したFe³⁺-HZと生成したZHCのFe/Zn比はほぼ一致することが分かった。TEM観察から、図9のようにFe/Zn = 0で生成したZHC粒子は約2 μmの板状であった。Fe³⁺-HZではFe/Zn比の上昇により、ZHC粒子は板状から不定形に変化し、同時に粒子サイズも低下した。また、Fe²⁺-HZを処理しても、いずれのFe/Zn比でもZHCが生成した。Fe³⁺-HZと同様に、添加したFe²⁺はZHC結晶に取り込まれ、Fe/Zn比の増加によりZHCの結晶子サイズおよび粒子サイズは低下したが、これらに対する影響はFe³⁺ > Fe²⁺であった。これらから、鉄イオン添加HZから溶出したFe²⁺やFe³⁺はZHCに取り込まれることで、結晶化、粒子成長を抑制し、その効果はFe³⁺ > Fe²⁺と明らかになった。Fe²⁺、Fe³⁺のイオン半径は、それぞれ0.077 nm, 0.063 nm (4配位)、0.075 nm, 0.069 nm (6配位)で、Zn²⁺のイオン半径0.074 nm (4配位)、0.088 nm (6配位)より小さい。よって、鉄イオン添加HZから溶出したFe²⁺やFe³⁺がZHC結晶中のZn²⁺と置換すると、その構造が歪み、イオン半径はZn²⁺ > Fe²⁺ > Fe³⁺であるため、ZHCの結晶化、粒子成長の抑制効果はFe³⁺ > Fe²⁺になると考えられる。

以上のことから、飛来塩分環境で亜鉛めっき鋼板の大気腐食が進行し、δ1層あるいはε層に達すると、これらの層中のFeの影響で鉄イオン添加HZさびが生成し、その後、微細なZHCさび粒子へと転移すると考えられる。その結果、緻密な保護性さび粒子層が鋼板表面に形成することで、t₃が延長し、鋼板の耐食性が向上すると示唆される。

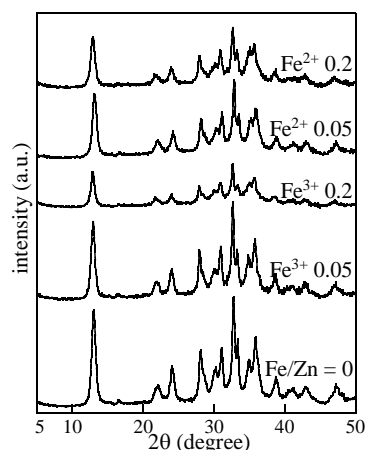


Fig.7 XRD patterns of the synthesized Fe²⁺- and Fe³⁺-HZ.

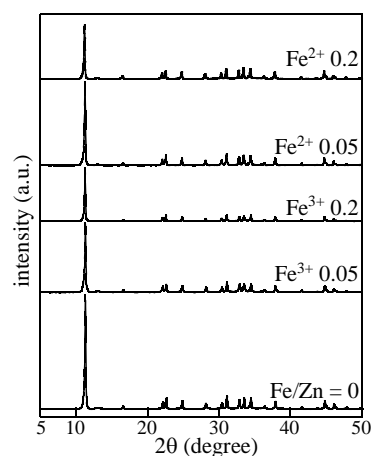


Fig. 8 XRD patterns of the ZHC rusts formed at various Fe/Zn ratios.

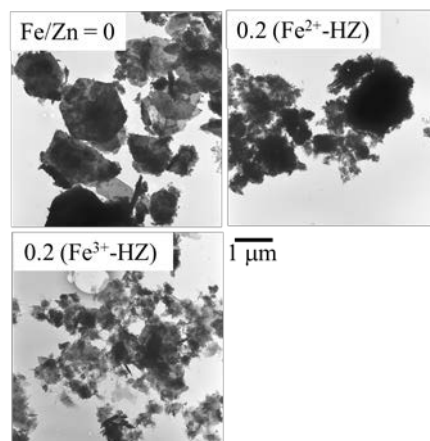


Fig. 9 TEM pictures of the ZHC rust particles formed at Fe/Zn = 0 and 0.2.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 田中 秀和, 村田 豊, 石川 達雄, 中山 武典	4. 巻 58
2. 論文標題 FeCl ₂ 水溶液からの人工 -FeOOH さび粒子の 生成におよぼすMo ⁵⁺ の影響	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 粉体工学会誌	6. 最初と最後の頁 546-551
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4164/sptj.58.546	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 田中 秀和	4. 巻 65
2. 論文標題 亜鉛の腐食生成物に与える金属の影響	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 防錆管理	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Hidekazu Tanaka	4. 巻 39
2. 論文標題 Influence of Anions and Cations on the Formation of Iron Oxide Nanoparticles in Aqueous Media	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 KONA Powder and Particle Journal	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14356/kona.2022003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 田中秀和, 山本彩未, 石川達雄, 中山武典	4. 巻 71
2. 論文標題 ZnCl ₂ 水溶液の乾湿繰り返しにより調製した人工亜鉛さび粒子の構造と形態	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 材料と環境	6. 最初と最後の頁 279-283
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3323/jcorr.71.279	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 田中秀和	4. 巻 105
2. 論文標題 鋼材の腐食に及ぼすリンの影響	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Phos. Lett.	6. 最初と最後の頁 9-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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11件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 藤澤勇介, 田中秀和, 石川達雄, 中山武典
2. 発表標題 ZnCl ₂ 水溶液中での人工Hydrozinciteさび粒子からZinc hydroxychlorideへの転移
3. 学会等名 第68回材料と環境討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中秀和, 堀尾 宇絵, 石川達雄, 中山武典
2. 発表標題 人工Zinc Hydroxychlorideの生成と構造に及ぼすリン酸イオンの影響
3. 学会等名 第68回材料と環境討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中秀和, 野里 久幸, 石川達雄, 中山武典
2. 発表標題 リン酸イオン存在下で調製した 人工 -および -FeOOHさび粒子の構造と形態
3. 学会等名 第58回粉体に関する討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中秀和, 内田 大貴, 石川達雄, 中山武典
2. 発表標題 Fe ³⁺ 添加人工Hydrozinciteさび粒子の Zinc Hydroxychlorideさびへの転移
3. 学会等名 2022年材料と環境研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中 秀和, 村田 豊, 石川 達雄, 中山 武典
2. 発表標題 FeCl ₂ 水溶液からの人工 -Fe ₂ O ₃ さび粒子の生成に及ぼすMo ⁵⁺ の影響
3. 学会等名 2020年度 粉体工学会秋期研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松本 悠揮, 田中 秀和, 江崎 達哉, 重永 勉
2. 発表標題 人工 -Fe ₂ O ₃ さび粒子の生成に及ぼすケイ酸イオンの影響
3. 学会等名 2021年 材料と環境研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中 秀和, 樋口 大成, 江崎 達哉, 重永 勉
2. 発表標題 人工アルミニウムさび粒子の生成に及ぼすアニオンの影響
3. 学会等名 2021年 材料と環境研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中秀和, 内田大貴, 石川達雄, 中山武典
2. 発表標題 人工Hydrozinciteさび粒子のZinc Hydroxychloride さびへの転移に及ぼす鉄イオンの影響
3. 学会等名 2022年度粉体工学会春期研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中秀和, 山本彩未, 石川達雄, 中山武典
2. 発表標題 ZnCl ₂ 水溶液の乾湿繰り返しにより調製した 人工亜鉛さび粒子の構造と形態
3. 学会等名 材料と環境2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中秀和
2. 発表標題 人工さび実験による亜鉛めっき鋼板の大気腐食による亜鉛さび粒子の生成・生長機構の解明
3. 学会等名 2022年第2回グリーン・IT研究会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中秀和, 岸宏樹, 石川達雄, 中山武典
2. 発表標題 FeCl ₂ - FeSO ₄ 水溶液の乾湿繰り返しにより調製した人工鉄さび粒子の構造と形態
3. 学会等名 第59回粉体に関する討論会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

島根大学大学院 自然科学研究科 物質化学コース 無機材料物性工学1研究室
<http://www.ipc.shimane-u.ac.jp/imchem/>

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------