

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：82641

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K05807

研究課題名(和文) 固体金属から電子を引き抜く硫酸還元菌が引き起こす金属腐食のメカニズム解明

研究課題名(英文) Analysis of sulfate reducing bacteria capable of electrical microbiologically influenced corrosion

研究代表者

平野 伸一 (Shin-ichi, Hirano)

一般財団法人電力中央研究所・サステナブルシステム研究本部・上席研究員

研究者番号：20392748

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：固体金属から電子を引き抜く微生物が引き起こす金属腐食(EMIC)が、配管など金属設備の深刻な腐食被害に大きく関与していると考えられている。しかし、対策技術開発に必要なEMICのメカニズムは明確になっていない。そこで、本研究ではメカニズム解明に向け、EMICを引き起こす異なる3株の硫酸還元菌について、腐食速度及び形態の評価、電気化学的な腐食過程の解析、固体鉄からの電子を引き抜く腐食反応に寄与する遺伝子の推定を行った。3株のうち最も高いEMIC活性を示した硫酸還元菌株は固体鉄表面でカソード反応を担うことで腐食を促進することに加え、その細胞外電子伝達に関与する膜タンパク質の存在が明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

既報のEMIC能を有する硫酸還元菌単離株は2株のみであり知見は限定されていた。本研究では独自に取得したEMIC能を持つ3種類の硫酸還元菌について、腐食速度・形態、腐食生成物、電気化学的特性、EMIC反応を担う遺伝子の解析という多面的なアプローチで比較解析を行うことで、新たな腐食形態の発見、腐食速度と電気化学的特性の相関の明確化、固体鉄からの電子引き抜きに関与する遺伝子候補といったEMICのメカニズムに関する新しい知見を得た。

本研究の成果は、EMICのメカニズムに学術的に新しい知見を与えるとともに、社会インフラ(金属配管等)におけるEMIC対策技術やリスク診断技術の開発に繋がる知見と言える。

研究成果の概要(英文)：Corrosion caused by microorganisms that extract electrons from solid metals (EMIC) has been suggested to play a major role in serious corrosion damage to metal equipment under anaerobic environments. Although understanding of the EMIC mechanism is required for protecting equipment against EMIC, it has not been clarified. In this study, to elucidate the mechanism, three different sulfate-reducing bacteria with EMIC ability were analyzed in the view of the corrosion rate, electrochemical properties, and genes responsible for the reaction of extracting electrons from solid iron. We revealed the three strains have different corrosion rates and a relationship between corrosion rate and electrochemical characteristics of the strains. The strain, which showed the highest EMIC activity among the three strains, was shown to promote corrosion by acting as a cathode on the surface of solid iron, and the presence of membrane proteins involved in extracting electrons from solid iron was estimated.

研究分野：微生物電気化学

キーワード：微生物腐食 微生物電気腐食 硫酸還元菌 細胞外電子移動

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

微生物が金属腐食を誘引する現象(微生物腐食)が報告されており、通常の腐食が起こりづらい環境(常温、常圧、嫌気環境等)においても深刻な腐食被害を生じるため設備の維持・管理において問題となっている。微生物腐食の事例として、微生物が配管に穴を開けることで石油や排水の漏洩や土壌埋設設備の強度低下を引き起こすことが報告されており、それら損害は世界累計 30-50 億ドル/年にも上ると試算されている。これまでに、嫌気環境で発生する腐食の多くは硫酸還元菌の生産する硫化水素が主な腐食要因と考えられてきたが、腐食生成物である硫化鉄が金属表面を被覆した後、硫化水素による腐食は停止するため、この仮説では現場で観察される深刻な腐食を説明することはできなかった。近年、硫化鉄による母材表面被覆後も導電性をもつ硫化鉄を介して固体鉄から電子(エネルギー源)を獲得することで増殖する硫酸還元菌、メタン菌が報告され(Nature, Dinh et al, 2004)、これらの微生物が長期間・継続的に腐食を促進しうることが示唆された(図1)。この現象は微生物電気腐食 EMIC (Electrochemical Microbially influenced corrosion) と呼ばれ、嫌気環境での腐食において重要な現象と考えられている。しかし、金属-微生物間の電子移動を含め、EMIC のメカニズムは分かっていない部分が多い。我々はこれまでに鉄を単一電子源として増殖する EMIC 能を有する 3 種類の硫酸還元菌を環境中より単離している(以下 ~)。

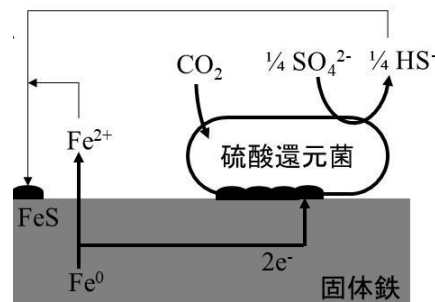


図1. 硫酸還元菌による EMIC

Desulfovibrio sp. EE-1 株：淡水環境から単離した EMIC 能を持つ硫酸還元菌

Desulfovibrio sp. SDB-1 株：海水環境から単離した EMIC 能を有する硫酸還元菌

Desulforhabdus sp. SDB-2 株：同一環境から単離した EMIC 能を有する硫酸還元菌

これら 3 種の異なる硫酸還元菌の腐食過程を解析、比較することで、EMIC の腐食メカニズムの理解や EMIC のリスク評価・対策に貢献できると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、自然環境より単離した 3 種類の異なる硫酸還元菌を EMIC のモデルとして、それらの増殖・代謝と EMIC (速度・形態) の関係を複合的な視点で明らかにし、EMIC の速度・形態に關与する因子の推定を目的とする。

3. 研究の方法

本研究では 3 種の異なる硫酸還元菌による腐食過程を、材料科学・電気化学・微生物学(分子生物学)の手法で解析し、硫酸還元菌がどのように EMIC を引き起こしているか明らかにする。

(1) 腐食試験による硫酸還元菌の腐食速度評価

硫酸還元菌 3 種類それぞれを炭素鋼試験片(SS400, 0.8 cm 角)を単一電子供与体、 $\text{NaHCO}_3/\text{CO}_2$ を単一炭素源とした無機塩培地を用いて、嫌気条件下($\text{N}_2/\text{CO}_2=8:2$)にて培養を行った。同一条件の試料の培養を並列して開始し、2 か月間、1 週間おきに試料を 3 本ずつ開封、炭素鋼試験片を回収した。回収した炭素鋼片は酸溶液で腐食生成物を溶解、アセトン洗浄し、乾燥後に測定した重量と培養開始時の試験片重量との差分から重量減損量(腐食量)を算出した。また、SDB-2 株については培養期間を延長し、3、4、5、9、12 か月経過後の試験片の重量減損量を評価した。

(2) 炭素鋼表面観察、表面上の腐食生成物の分析

炭素鋼試験片(0.8 cm 角)を供試体として嫌気環境下で硫酸還元菌 3 株の培養を行い、2 か月後に表面の腐食生成物ごと試験片を回収し、以下の手順で前処理を行った。試験片を 2% glutaraldehyde 溶液に窒素雰囲気下で 12 時間、4 浸漬し、固定した。嫌気条件下で試験片を PBS にて洗浄後、エタノール溶液(25%、50%、75%、90%、100%)で各 30 分ずつ段階的に脱水を行い、最終的に窒素雰囲気下で乾燥させた。乾燥させた供試体は、SEM-EDS を用い、表面の観察および元素組成の分析を行った。

(3) 腐食反応過程の電気化学的特性の比較解析

SDB-1 株、SDB-2 株の腐食過程における電気学的な解析は炭素鋼試験片(2 cm 角)を作用極、白金メッシュを対極、銀/塩化銀電極を参照極とした三極式の電気化学セルにおいて各電極をポテンシオスタットと接続することで実施した。嫌気ガス($\text{N}_2/\text{CO}_2=8:2$)で置換した電気化学セル内で硫酸還元菌 3 株の培養を行い($n=3$)、培養開始後 1 週間おきに 2 か月間分極抵抗測定(LPR)を行った。各培養条件の分極抵抗(R_p)、腐食電位(E_{corr})、腐食電流(I_{corr})は自然電位に対して ± 10 mV の範囲、 0.125 mVs^{-1} で掃引することで測定し、3 連の試験結果の平均値とした。また、炭素鋼表面の電気化学反応特性を把握するために、2 か月培養後の炭素鋼試験片を新しい培養液を含む電気化学セルに移し替え、嫌気条件下において CV(Cyclic voltammetry)解析を行った。解析

は-0.6 V ~ -1.0 V (vs Ag/Ag/Cl) の範囲、掃引速度 10 mV/sec で実施した。

(4). 固体鉄から電子を引き抜く遺伝子の推定

SDB-1 株、SDB-2 株のゲノム解析を行うために、それぞれの培養後の試料より、DNeasy Power Soil kit (Qiagen) を用いてゲノム DNA の抽出を行った。抽出したゲノム DNA を対象に DNBSEQ G 400 (MGI) を用いて 2 x 200 bp のシーケンス解析を行った。

固体鉄からの電子獲得に関与する遺伝子を推定するために、RNA-seq によるトランスクリプトーム解析を行った。SDB-1 株は異なる電子供与体 (固体鉄、水素) でそれぞれ培養を行い、活発に増殖が見られたタイミングで菌体を回収し、RNeasy Mini kit (Qiagen) を用いることで RNA の抽出を行った。16S rRNA の除去後、ライブラリを作製し、DNBSEQ G400 を用いて 2x200 bp の条件でシーケンス解析を行った。高品質のリードを参照ゲノム配列にマッピングし、マッピングされたリードカウントについてサンプル間の総リード数と遺伝子長の補正を行った。リードカウントをもとに電子供与体を水素とした場合に対して、固体鉄を電子供与体として培養したと場合に転写量が変動した遺伝子を推定した。SDB-2 株については、固体鉄を電子供与体として培養し、培養中期と培養後期で回収した菌体を対象に RNA-seq を行った。

4. 研究成果

(1). 腐食試験による硫酸還元菌の腐食速度評価

EMIC 能を有する異なる 3 株の硫酸還元菌の腐食特性・速度を比較評価するために、炭素鋼試験片を単一電子供与体とした 2 か月間の腐食試験を実施した。試験期間中、1 週間おきに試験片の重量減損量を測定することで経時変化を評価した。EE-1 株では培養 1 か月後から腐食減損量は頭打ちし、2 か月後の重量減損量は 5.6 mg/cm³ となった。同一条件 (淡水)、非植菌区での炭素鋼片の重量減損量は 3.7 mg/cm³ であり、EE-1 株による腐食促進効果は 1.5 倍であった。海水環境から単離された SDB-1 株、SDB-2 株では、培養開始後 2 週間は重量減損量増加がほぼ見られなかったが、それ以降直線的に重量減損量が増加し、2 か月間の培養後の重量現存量はそれぞれ 13 mg/cm³、31.9 mg/cm³ となった。硫酸還元菌が炭素鋼表面に付着し、増殖するまで約 2 週間の遅延が存在すると考えられる。非植菌区との比較から、腐食促進効果は SDB-1 株では 2.1 倍、SDB-2 株では 5.2 倍であった。

2 か月間の腐食試験において最も腐食速度が大きく、腐食の継続が見られた SDB-2 株については、更に長期間 (1 年間) の腐食試験を実施した。SDB-2 株による腐食は 1 年間を通じて連続的に進行し、その平均腐食速度は 0.2 mm/yr であり、非植菌区 0.01mm/yr の 20 倍程度であった (図 2)。また、培養開始後 5 か月間とそれ以降で腐食速度は異なり、5 か月までは 0.35 mm/y、後半 7 か月間は 0.09 mm/yr と低下したが、反応は停止することなく継続しており、1 年以降も継続して SDB-2 株による腐食が進行すると推測された。

腐食試験過程の炭素鋼試験片の観察を行ったところ、EE-1 株・SDB-1 株と SDB-2 株では大きな差異が見られた。EE-1 株、SDB-1 株の培養時には炭素鋼表面が硫化鉄と想定される黒色の薄い腐食生成物で覆われたのに対して、SDB-2 株の培養時には炭素鋼表面が黒色の薄い腐食生成物で覆われた後、培養 2 か月目以降に黒色の腐食生成物の下部から白い腐食生成物が盛り上がり、黒い被膜が剥離する特殊な腐食形態が観察された (図 3)。これまで、EMIC では硫化鉄を介して表層から腐食を進行すると考えられており、SDB-2 株のような腐食形態はこれまでに報告がない。長期間継続する EMIC 活性のメカニズムを考えるための新たな知見と言える。

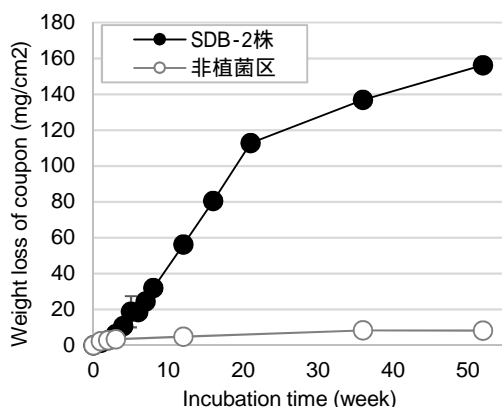


図 2. SDB-2 株の長期腐食試験

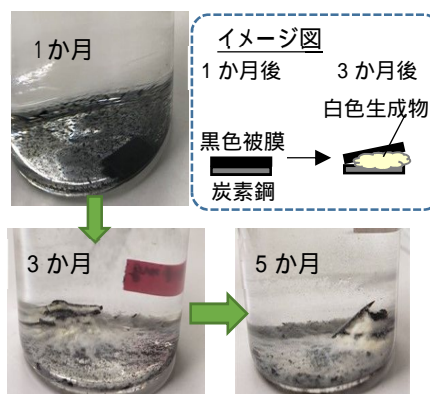


図 3. SDB-2 株による腐食の形態変化

次に、SDB-1 株と SDB-2 株は同じ環境から単離された硫酸還元菌であるため、もともと存在した自然環境を想定し、両者を混合した状態で炭素鋼試験片を用いた腐食試験を行った。その結果、2 か月後の炭素鋼試験片の重量減損量は 53.6 mg/cm³ となり、SDB-1 株・SDB-2 株をそれぞれ単独で培養した場合の腐食量の加算量 (13+31.9=44.9 mg/cm³) よりも大きい値を示した。これは SDB-1 株と SDB-2 株の共存により腐食活性が促進される現象と考えられ、硫酸還元菌間での相互作用に基づく腐食促進効果はこれまでに報告がない。

(2). 炭素鋼表面観察、表面上の腐食生成物の分析

硫酸還元菌 3 株及び混合培養時 (SDB-1 株、SDB-2 株) の腐食形態の違いを比較するために、炭素鋼表面に形成される腐食生成物の観察および組成分析を SEM-EDS を用いて行った。EE-1 株と SDB-1 株では同様に一面が網目の腐食生成物で覆われており、元素組成分析から腐食生成物は主に硫化鉄で構成されていると推定された (図 4a)。表面において明確な菌体細胞の像を観察することはできなかった。SDB-2 株の培養終了後の炭素鋼表面には球状の構造が多く見られ、球状構造の上には硫酸還元菌の細胞が観察され、表層は網目状の腐食生成物に覆われるような形態であった。元素組成分析から球状の生成物は主に炭酸カルシウム (calcite) や炭酸鉄 (siderite)、網目状の腐食生成物は硫化鉄と推定された (図 4b)。図 3 で見られたマクロ的な観察結果を踏まえ、SDB-2 株の培養初期には EE-1 株・SDB-1 株同様に硫化鉄で炭素鋼表面は覆われ、その後、硫化鉄の下で SDB-2 株が腐食反応を進行し、硫化鉄・炭酸鉄・炭酸カルシウムを形成しながら腐食を進行させることが考えられた。

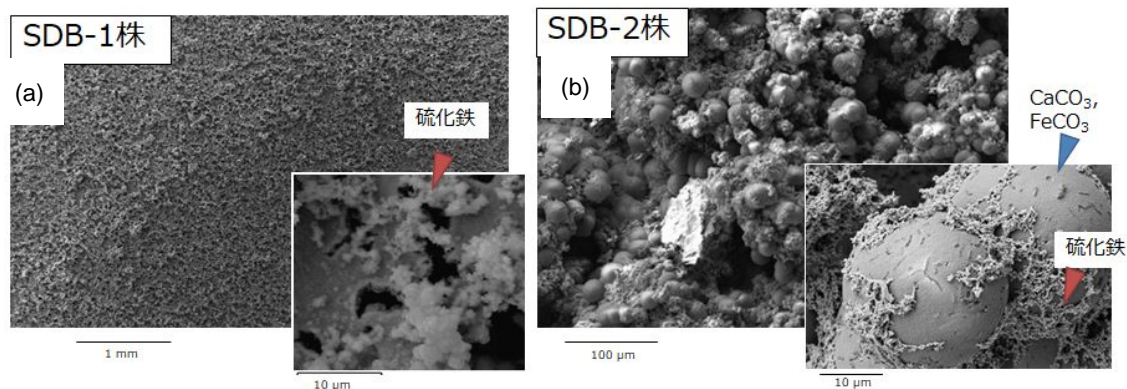


図 4. 腐食試験後の炭素鋼表面観察 (a). SDB-1 株、(b). SDB-2 株

また、SDB-1 株と SDB-2 株の混合培養後の炭素鋼試験片上について観察を行ったところ、SDB-1 株、SDB-2 株単独培養時とは異なる腐食生成物が観察され、硫化鉄とリン酸鉄で構成される腐食生成物の上に菌体の存在が確認された。このように EMIC 活性の高い試料においては硫酸還元菌の代表的な腐食生成物として知られる硫化鉄以外の腐食生成物が高い頻度で観察された。これら腐食生成物と EMIC における細胞外電子獲得との関係は今後更なる検討が必要である。

(3). 腐食反応過程の電気化学的特性の比較解析

腐食試験や表面観察の結果から異なる腐食特性を有すると考えられた SDB-1 株、SDB-2 株及び両株の混合培養時の腐食過程を電気化学的手法 (分極抵抗法) を用いて解析した。E_{corr} の経時変化を図 5 に示した。培養開始初期から非植菌、植菌に関わらず電位は低下し、非植菌区と SDB-1 株培養試料については 2 週間目以降 -900 mV で一定の値を示した。その一方で、SDB-2 株培養試料、混合培養試料については 1 週間目もしくは 2 週間目以降に電位の上昇が見られ、-750 mV 程度まで上昇した。SDB-1 株と SDB-2 株及び混合培養では腐食過程における電気化学的特性が異なっていることが明らかとなった。腐食試験における E_{corr} 上昇の要因はカソード反応の促進と考えられており、SDB-2 株が炭素鋼から電子を引き抜くことで大きくカソード反応を促進していることが電気化学的に示唆された。混合培養においては SDB-2 株の電気化学的特性の影響を大きく受けていることが推定された。

炭素鋼から硫酸還元菌が電子を引き抜く際に関与する因子 (酵素等) を電気化学的に推定するため、培養終了後の炭素鋼表面に存在する菌体及び腐食生成物について CV 法による解析を行った。炭素鋼試験片及び化学的な前処理で炭素鋼表面を硫化鉄で被覆した炭素鋼試験片を対照区として、SDB-1 株、SDB-2 株培養後の炭素鋼試験片の比較評価した結果、SDB-1 株が形成した

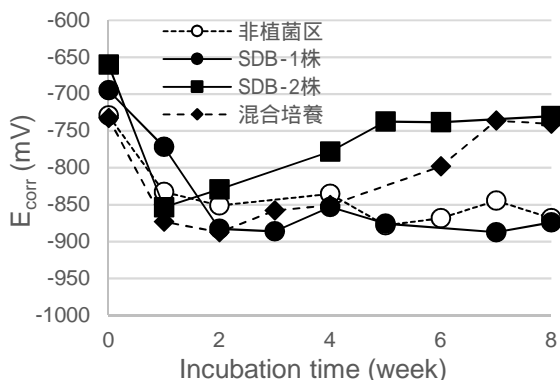


図 5. 腐食電位の経時変化

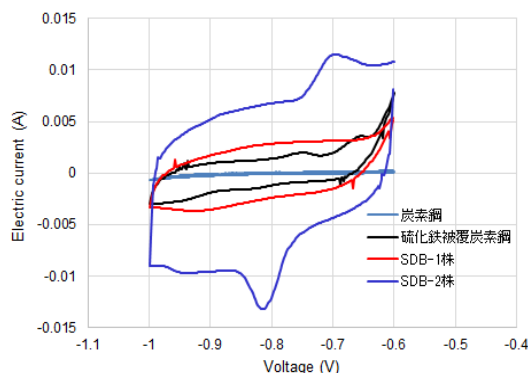


図 6. 炭素鋼表面の CV 解析

腐食生成物の主成分は硫化鉄であるが、化学的に形成された硫化鉄よりも高い電気化学活性を示し、SDB-1 株の酵素類の存在が示唆された (図 6)。また、SDB-2 株によって形成された炭素鋼表面上の付着物は顕著に高い腐食活性を示すとともに、明確な酸化還元ピーク (アノード側: -695 mV、カソード側: -813 mV) を示した。この酸化還元ピークはこれまでに EMIC 能を有する硫酸還元菌で報告されているピークより低い電位に存在するため、炭素鋼表面上に SDB-2 株由来の酸化還元可逆的な新しい電子伝達因子 (酵素等) が存在することを示唆する。以上、EMIC 能を有する硫酸還元菌においても株ごとに電気化学的特性 (腐食電位・抵抗・電流の推移、電子獲得に關与する因子) が異なることが明らかとなり、それぞれの腐食様式の差異を反映しているものと推定された。

(4). 固体鉄から電子を引き抜く遺伝子の推定

SDB-1 株、SDB-2 株の EMIC 反応に寄与し、腐食特性の違いをもたらす酵素、特に SDB-2 株が固体鉄から電子を引き抜く酵素を推定するために、その基盤情報となるゲノム配列を決定した。既報の EMIC 能を有する硫酸還元菌である *Desulfovibrio ferrophilus* IS5 株についてはゲノム配列が公開されており、かつ固体からの電子獲得に寄与する酵素 (Cytochrome) が推定されていることから、3 株の cytochrome の数を比較したところ、IS5 に比べて SDB-1 株、SDB-2 株の保有する cytochrome の数は少なく、EMIC に關与する IS5 株の cytochrome と類似の配列を SDB-1 株、SDB-2 株において見出すことはできなかった。

そこで、RNA-seq によるトランスクリプトーム解析を行い、固体鉄を単一電子供与体として培養した際に転写が活性化している遺伝子の推定を行った。SDB-1 株を水素もしくは固体鉄を単一電子供与体として培養した際の転写量の比較解析を行い、固体鉄を電子供与体とした培養試料においてリード数が多く (転写絶対量の多い)、水素を電子供与体とした培養時に比べ 2 倍以上転写量が増加している遺伝子に絞り込んだ結果、ATP-dependent protease、DNA polymerase、ABC transporter、TetR transcriptional regulator が活発に転写されていることが明らかとなった。しかし、これら遺伝子と固体鉄からの電子獲得の間の関係性を見出すことはできなかった。

SDB-2 株は代替電子供与体として水素を用いた十分な増殖が見られなかったため、固体鉄を電子供与体とした培養において中期と後期でそれぞれ菌体を回収し、RNA-seq を行った。転写量の比較を行ったところ、培養中期において培養後期と比べて転写量が 5 倍以上高い遺伝子が複数検出された (最大で 202 倍)。5 倍を超える転写量の増加を示した遺伝子には硫酸還元反応や増殖に關与する遺伝子に加えて、電子伝達や酸化還元に關与する遺伝子や機能未知遺伝子が複数含まれていた (表 1)。これら遺伝子のうち、4Fe-4S binding protein、polyferredoxin は膜タンパク質であり、固体からの電子獲得のような細胞外電子伝達に關与している可能性がある。また、機能未知であるが、転写が活発であり、配列から膜タンパク質に分類される hypothetical protein Desgi1233 についても細胞外での電子獲得に關与している可能性が推定された。

表 2. 固体鉄を使った培養時に SDB-2 株において転写が活発な遺伝子

機能	遺伝子名 (含まれているドメイン)	増加倍率
細胞分裂	AAA ATPase	202.7
輸送	Putative inner membrane exporter	124.4
酸化還元	Indole pyruvate ferredoxin oxidoreductase	35.4
機能未知	Hypothetical protein Desgi 1233	19.0
電子伝達	4Fe-4S binding protein	18.6
電子伝達	Polyferredoxin	15.0
機能未知	Zinc-ribbon domain containing protein	14.3
機能未知	DUF1957 domain containing protein	13.7
発現制御	two-component system sensor histidine kinase	13.5
電子伝達	Rubredoxin, flavin reductase	5.6
酸化還元	Thioredoxin disulfide reductase	6.4

以上、EMIC 能を有する異なる硫酸還元菌 3 株が引き起こす腐食過程を解析することで、それぞれの腐食速度及び形態の差異と電気化学特性を明確化できた。また、特徴的な腐食形態を示した SDB-2 株について、RNA-seq 解析により固体鉄からの電子獲得に關与する可能性のある遺伝子を複数推定することができた。遺伝子機能の解析など、更なる詳細な解析は必要であるが、本研究で得られた成果を基盤として EMIC 腐食対策技術の開発や特定の遺伝子をターゲットとした検出ツールのようなリスク評価技術開発への展開が期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hirano Shin-ichi, Nagaoka Toru, Matsumoto Norio	4. 巻 55
2. 論文標題 Microbial community dynamics in a crust formed on carbon steel SS400 during corrosion	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Corrosion Engineering, Science and Technology	6. 最初と最後の頁 685 ~ 692
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/1478422X.2020.1774961	査読の有無 無
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 Matsumoto Akiho, Nagoya Misa, Tsuchiya Miyu, Suga Keigo, Inohana Yoshino, Hirose Atsumi, Yamada Shohei, Hirano Shinichi, Ito Yuki, Tanaka Shirou, Kouzuma Atsushi, Watanabe Kazuya	4. 巻 136
2. 論文標題 Enhanced electricity generation in rice paddy-field microbial fuel cells supplemented with iron powders	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Bioelectrochemistry	6. 最初と最後の頁 107625 ~ 107625
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.bioelechem.2020.107625	査読の有無 無
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 Liang Renxing, Davidova Irene, Hirano Shin-ichi, Duncan Kathleen E, Suflita Joseph M	4. 巻 95
2. 論文標題 Community succession in an anaerobic long-chain paraffin-degrading consortium and impact on chemical and electrical microbially influenced iron corrosion	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 FEMS Microbiology Ecology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/femsec/fiz111	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

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 1件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 平野伸一、長岡亨
2. 発表標題 異なる環境から分離された硫酸還元菌の比較と腐食過程の解析
3. 学会等名 材料と環境2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平野伸一
2. 発表標題 嫌気条件において硫酸還元菌が引き起こす炭素鋼腐食の解析
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 第180回講演大会併催シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 平野伸一
2. 発表標題 微生物と固相間の電子授受が引き起こす金属腐食
3. 学会等名 日本農芸化学会2021年度大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Sufliita Joseph M、Hirano Shin-ichi、Davidova Irene、Liang Renxing
2. 発表標題 Desulfovibrio giganteus C2, a novel isolate from a paraffin-degrading methanogenic consortium capable of electrical microbially influenced corrosion (EMIC)
3. 学会等名 7th International Symposium on Applied Microbiology and Molecular Biology in Oil Systems (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平野伸一、Davidova Irene、Liang Renxing、Sufliita Joseph M
2. 発表標題 石油分解微生物群集から単離された腐食性硫酸還元菌の電気化学的解析
3. 学会等名 材料と環境2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平野伸一、Davidova Irene、Suflita Joseph M、長岡亨、松本伯夫
2. 発表標題 鉄を電子源とする硫酸還元菌の単離とその腐食プロセスの電気化学的解析
3. 学会等名 第71回日本生物工学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hirano Shin-ichi、Davidova Irene、Suflita Joseph M
2. 発表標題 Electrochemical Properties of Two Sulfate Reducing Bacteria from a Paraffin-Degrading Consortium
3. 学会等名 NACE EAPA conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hirano Shin-ichi、Davidova Irene、Liang Renxing、Suflita Joseph M
2. 発表標題 Electrochemical analysis of novel sulfate reducing bacteria with novel corrosion activity
3. 学会等名 FRC-corrosion2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平野伸一
2. 発表標題 微生物腐食について-嫌気環境下での微生物腐食-
3. 学会等名 腐食防食学会関西支部 新進気鋭の若手研究者・技術者によるセミナー (招待講演)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Shin-ichi Hirano	4. 発行年 2020年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 229
3. 書名 Electron-Based Bioscience and Biotechnology	

〔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
---------------------------	-----------------------	----

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