

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 21 日現在

機関番号：15401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23656306

研究課題名(和文)自己通電によってヘドロ内有機物を分解する技術の開発

研究課題名(英文)Development of sludge-remediation technology with self-energization

研究代表者

日比野 忠史(HIBINO, TADASHI)

広島大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50263736

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：SMFCの分極特性実験からにより、交換電流密度と過電圧、電気抵抗率と限界電流密度に一意的な関係を見出した。この結果により電極の形状評価と分極特性をパラメータとして、SMFCに適した材料と環境条件を推定した。本研究結果として(1)効率的に電子の流れを作る技術、(2)硫化水素などの有害物質の溶出を電氣的に抑える技術、(3)生物が利用できない有機物を利用できる有機物に分解・変換する技術、(4)発生する電力をLED点灯などに利用するための基本技術が開発された。

研究成果の概要(英文)：Unique correlations between exchange current density and overvoltage, and between electrical resistivity and limit current density have been found out based on polarization curves of the sediment microbial fuel cells (SMFC) that have different conditions. Therefore, it is possible to choose appropriate material and environmental conditions for SMFC. From this research, basic technologies for: (1) Efficient electron transfer, (2) Preventing the evolution of toxic substances (e.g. hydrogen sulfide), (3) Transforming and decomposing organic matter to biotic substrates, and (4) Lighting LED were developed.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工学

キーワード：MFC ヘドロ 浄化 発電 実用化 シンプル 安価

1. 研究開始当初の背景

河岸や海底には、有機物が付着したシルト・粘土粒子（以降、有機泥と呼ぶ）が高い還元状態で堆積し、生物生息環境を悪化させている。有機泥中では有機物の嫌気性消化に伴い、電子供与体（ED : Electron Donor, e.g.  $Mn^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $H_2S$ ）の生成が行われ、強い還元性を有する場が形成される（Wijsman ら, 2002）。嫌気性消化プロセスにおいて形成された有機泥内の還元体物質は直上水中に拡散すると溶存酸素を消費し、貧酸素水塊を形成させている。近年では、微生物燃料電池（MFC : Microbial Fuel Cell）を用いた下水処理や微生物電解セル MEC（Microbial Electrolysis Cell）を用いた有機泥からの  $H_2$  回収の試みが行われている。堆積物を燃料とする SMFC では安定的な電流回収は難しいため、MEC の利用が先行しているのが現状である。

2. 研究の目的

SMFC は有機泥中で微生物が排出する電子を介し、アノード電極（負極）から電子を強制的に取り出し ED を EA に酸化させることにより泥内の還元状態を緩和させるとともに微生物を活性化することができる。ただし、その影響範囲は電極から 10mm 程度と著者らは確認しているが、SMFC の電子伝達範囲に関する知見は少ない。一方、MEC は泥中にカソード電極を埋設し、電位を低くすることにより泥内の  $H^+$  をカソード電極に集めて  $H_2$  を発生させる技術である。強制的に泥層内に電位差を与えるため影響範囲は SMFC に比較して広がる。SMFC の電子伝達範囲を把握するため、MEC が泥内に強制的に電子の流れを起こす機構を利用することが考えられる。本論文では SMFC に MEC の考え方を適用して、電極からの距離によって変化する有機泥の性状（pH, ORP, 酸素消費速度）を測定することで SMFC の電子伝達範囲の把握を行った。

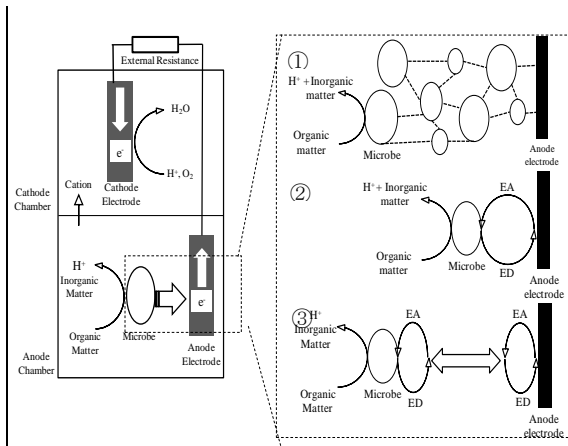
3. 研究の方法

(1) アノード電極への電子伝達機構と浄化範囲の把握

1) SMFC の電子伝達メカニズム

SMFC は有機泥中の微生物の代謝活動に伴い生成する電子を泥中に埋設している電極（アノード電極）に電子伝達する反応、直浄水内に設置してある電極（カソード電極）での  $H_2O$  の生成反応（標準酸化還元電位  $E^{\circ} = 1.229V$ ）を利用して発電する機構である。それぞれの反応が起こる電極反応の電位差により泥内で生産された電子が電極まで伝達される。

電子伝達範囲を決定する SMFC のアノード電極へ電子の伝達には図-1 に示す①～③の機構がある。Kato ら（2007）は微生物がアノード電極周辺に電子伝達物質を介さずに有機泥中の電子がアノード電極へ伝達される機構、すなわちアノード電極周辺で微生物の作るナノワイヤー（バイオフィーム）を介し



①形成されたバイオフィームによる電子伝達機構、②EA、ED を介した電子伝達機構、③電子伝達物質（電子シャトル）を媒体とする電子伝達機構

図-1 SMFC のメカニズム

て微生物本体から直接電子が伝達する機構（図-1①）を報告しているが、この機構において電子の伝達が行なわれるのは数  $10\mu m$  程度の範囲である。一方、電極周辺に存在する微生物による有機物の分解から得られた電子を有機泥中に存在する電子伝達物質（Mediator）を介して電子伝達する機構（図-1②）があり、この機構では微生物が生成する電子は電子受容体（EA: Electron Acceptor）に渡され、EA は電子供与体（ED : Electron Donor）に還元される。生成された ED が電極に電子を伝達することで ED が再び EA に変換される過程を繰り返すことで連続的にアノード電極へ電子が伝達されることから①の機構に比較して電子伝達距離は長くなると推定される。さらに電子伝達物質を介した電子伝達では鉄イオン、マンガンイオンが電子シャトルとなり、酸化還元反応を行うことによってアノード電極から離れた位置においても電子伝達を行うことができる機構（図-1③）が報告されている（Zhang ら, 1995）。泥内に電位差を与え電子を強制的に回収する手法は③の機構を活用することになる。なお、Wang ら（2009）は  $200mV$  程度の電極電位は微生物の活性化に繋がることを報告している。

2) 外部電力を用いた電子回収範囲の推定法

SMFC では直上水中、有機汚泥中の各々の測定されるカソード電位とアノード電位の電位差  $V_{SMFC}$  はそれぞれの層内に存在している酸化体、還元体の存在比に依存している。電流は電子の生産、伝達、消費によって流れており、電流が大きくなると内部抵抗  $R_{SMFC}$ （過電圧）が増大していく。SMFC 回路に外部電圧  $V_{ext}$  を組み合わせると(1)式で電圧  $V$  が求められるが、外部電圧により  $R_{SMFC}$  が大きくなるため  $V_{ext} > V_{SMFC}$  の外部電圧を加えても  $V < V_{ext}$  になる。

$$V = (R_{SMFC} + R_{ext})I \quad (1)$$

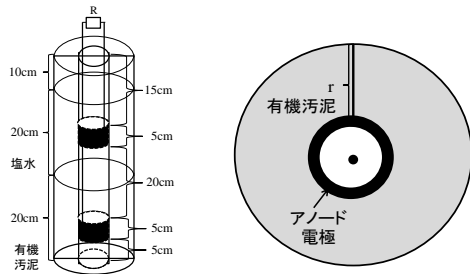


図-2 SMFC 適用時の有機泥の性状把握実験概要図(実験 A)

表-1 アノード電極から容器壁面までの距離 (r) と実験に用いた有機泥と塩水の体積と総電流量

Case	r	Anode Volume	Cathode Volume	Total Current
1	0.8 (cm)	914 (cm <sup>3</sup> )	457 (cm <sup>3</sup> )	4303 (mA*h)
2	1.3 (cm)	1479 (cm <sup>3</sup> )	739 (cm <sup>3</sup> )	4305 (mA*h)
3	2.6 (cm)	3442 (cm <sup>3</sup> )	1721 (cm <sup>3</sup> )	4302 (mA*h)
4	3.8 (cm)	6189 (cm <sup>3</sup> )	3094 (cm <sup>3</sup> )	4304 (mA*h)

ここに、 $I$  はカソード電極で使われる電流 (A),  $R_{ext}$  は外部抵抗 ( $\Omega$ ) である。

外部電力を連結した回路ではアノード電極に伝達される電子は図-1③に示す電子伝達体 (EA, ED) を介して回収される。電極では外部電圧により強制的に酸化反応が起こり (電子を貰い), アノード電位は上昇する (過電圧の増大)。本手法では、この特性を利用して電子伝達範囲の拡大を図る。電極反応による電子伝達範囲の変化はアノード電位の変化から推定する。間隙水の水質確認には pH, 酸化還元電位 (ORP) を測定し、微生物の代謝活動に際して分解される有機物量の指標として有機泥から遠心分離された間隙水の COD を測定した。pH, ORP の測定には pH/ORP (銀-塩化銀電極) メーター (HORIBA 製作所, D-52), COD の測定には総合水質計 (ラムダ L-9000) を用いた。なお、論文中で示す有機泥の ORP は泥内間隙水の酸化還元電位である。

### 3) 電子伝達範囲把握のための実験概要

外部電源を SMFC と組み合わせてアノード電極の周辺での ORP, pH 分布から有機泥層での電子伝達範囲を明らかにする。ここではアノード電極での電子回収によって有機泥の性状が変化する距離の把握実験 (実験 A) と電子伝達範囲の推定実験 (実験 B) を行った。

#### a) 実験 A : 通電による有機泥性状の評価

図-2 に実験装置の概要を示した。アクリル製パイプ (高さ 50cm, 直径 2.4cm) に直接面積 37.5 cm<sup>2</sup> (5 cm×7.5cm) のカーボンクロス (ElectroChem, Inc, EC-CC1-06) を貼り、アノードとカソード電極を作成した (図-2)。導線にはニッケル線 (Niraco, NI-311477), アノード基質として有機泥, カソード基質には塩水 (3%) を用いて SMFC を作成し、これに電源 1.5V, 赤色 LED を直列に連結した。表-1 に示す直径が異なる 4 ケースの容器を用いて作成した SMFC に約 1195C 通電した後にアノード基質の pH, ORP を測定した。本実

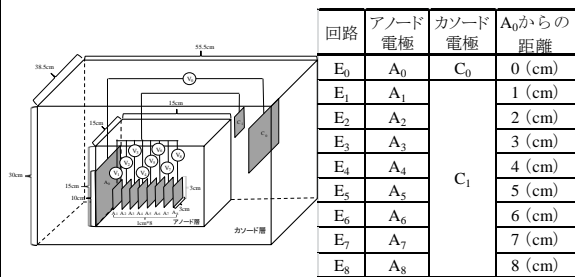


図-3 起電圧分布による電子伝達範囲推定実験概略図(実験 B)

験では装置の半径の 2 乗に比例してアノード層, カソード層体積が大きくなるため, 電子回収効果は大半径の装置で  $r^2$  に反比例して小さくなるが, 現地での効果を把握するため本装置による実験を行なった。

#### b) 実験 B : 起電圧分布による電子伝達範囲の推定

図-3 に実験装置の概要を示した。アノード基質として湿潤状態の有機泥を充填したアクリル製容器 (縦, 横, 高さともに 15cm) をプラスチック製容器 (縦:38.5cm, 横:55.5cm, 高さ:30cm) 中に固定し, 水道水で冠水させた後カソード電極を設置した。アノード層内には面積 150cm<sup>2</sup> (10cm×15cm) のアノード電極 A<sub>0</sub> をアクリル製容器壁面に貼り付け, この電極から水平方向に面積 9 cm<sup>2</sup> (3cm×3cm) アノード電極 A<sub>1</sub> ~ A<sub>8</sub> を 1 cm 間隔で 8 枚設置した。A<sub>0</sub> と同様の電極面積を持つカソード電極 C<sub>0</sub>, A<sub>2</sub> ~ A<sub>8</sub> と同様の電極面積を持つ C<sub>1</sub> をそれぞれプラスチック製容器の壁面に貼り付け, A<sub>1</sub> ~ A<sub>8</sub> のアノード電極と C<sub>1</sub> を共通のカソード電極とする E<sub>1</sub> ~ E<sub>8</sub> 回路を作成した。E<sub>1</sub> ~ E<sub>8</sub> 回路は同様のカソード電極 (C<sub>1</sub>) に接続して, 各回路のカソード電位を等しくした。本実験では A<sub>0</sub>, C<sub>0</sub> からなる通電回路 E<sub>0</sub> とし, ポテンシオスタット (北斗電工, HSV-110) を直列に設置して E<sub>0</sub> 回路に 1mA を強制的に流して変化する E<sub>1</sub> ~ E<sub>8</sub> 回路での起電圧を測定した。さらに, 約 110C の通電終了後 A<sub>1</sub> ~ A<sub>8</sub> はサイクリックボルタンメトリー (CV) と pH, ORP, COD を測定した。pH, ORP は A<sub>0</sub> から 1cm 間隔で, COD は 2cm 間隔で採泥を行い, それらを均等に攪拌した後に測定を行った。

#### (2) 電子伝達範囲の推定

##### 1) 通電 (電子回収) 後の基質変化の範囲 (図-2, 実験 A)

全ての実験ケースにおいて SMFC によって回収された総通電量 (1195C) を一定とした条件で, アノード基質の性状変化を検討した。

##### a) 電子回収による pH, ORP の変化

図-4 には電子回収後の有機泥の pH, ORP と r (容器径) の関係が示されている。主な微生物は酸化物を利用して有機物を分解し H<sup>+</sup> および還元体 (電子) が生成されるため, 有機物の分解が進むと pH, ORP とも低下する。SMFC が設置されると泥内で生成された

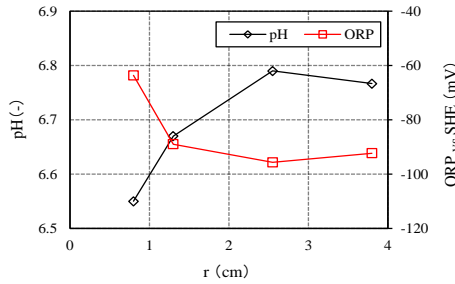


図-4 各 SMFC の厚さと pH, ORP 関係

電子を回収する（電極およびその周辺で ED が EA に酸化）ため、還元状態が緩和され ORP は上昇する。泥内から回収された電子はカソードで泥層から移流した  $H^+$  と反応して消費されると、泥層では電子と同数の  $H^+$  が減少する。しかし、アノード層（泥層）で生産された  $H^+$  の全てがカソード層（水層）に移動できず、カソード層内にある  $H^+$  が先に反応されるため、カソード層内の pH は増加している。 $H^+$  のカソード層への移動量の減少はアノード層内を正に帯電させるため、 $H^+$  の代りに泥内にある高濃度の陽イオンが優先して溶出（濃度拡散）すると泥内では分解により生産された  $H^+$  が蓄積し pH の低下が起こる。

アノード層体積の小さい  $r = 1.3\text{cm}$  までは初期値と比較して電極近くでは ED の酸化によって  $H^+$  と ORP が増加し、基質全体に有機泥性状の変化が及んでいること、 $r$  が  $2.5\text{cm}$  を越える Case 3, 4 では電子の回収効果 (ORP, pH の変化) が小さくなっており、電子回収できる範囲は数 cm 程度であることがわかる。上述のように有機物が分解される場では還元化 (ORP の低下) が進むが、アノード電極の近傍で ORP が上昇 (ED/EA < 1) するのは ED が EA に酸化 (電極への電子伝達) する速度が泥層内での ED 生産速度よりも速いためである。ただし、電子の回収により分解速度が促進される条件になる場もあり (Logan ら, 2006), 限定された場所での pH~ORP 関係から酸化速度と分解速度を比較できない場合もある。本実験では  $1.5\text{V}$  の外部電圧が作用しており、電極周辺には微生物の活性をそこなう電圧が作用していると考えられる。

#### b) アノード体積と pH~ORP 関係

各ケースでの pH~ORP 関係を図-5 に示した。実線は ORP の pH 依存性を表しており、実線上に沿う変化では電子伝達物質の酸化還元反応が平衡状態にあることを示している。泥内から電子を回収する SMFC 回路では、通電量に合う ED が EA に酸化された量だけ還元体が生産された時には実線を変化することになる。還元体の生産には有機物の分解、および還元体 (主に  $Fe^{2+}$ ,  $H_2S$ ) の酸化 (2), (3) 式) がある。

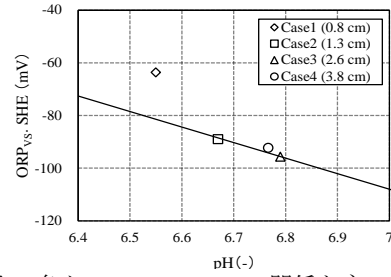
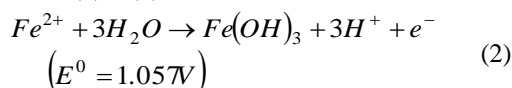
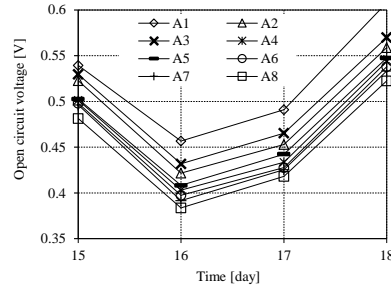
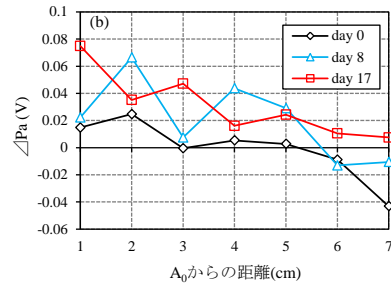


図-5 各ケースの pH, ORP 関係とネルンストの式から得られた pH に依存する ORP の変化 (実線)

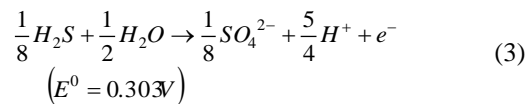


(a) A1~A8 での起電圧の経時変化



(b) A8 電位とのアノード電位差の分布

図-6 通回路の周辺に形成される起電圧分布



$r = 1.3\text{ cm}$  を越える Case 2~4 では pH~ORP は pH のみに依存した電子の消費があるが、Case 1 ( $r = 0.8\text{ cm}$ ) では pH~ORP 関係が線形関係からずれ、ORP の顕著な上昇が現われている。これは電極周辺では強制的な電子回収が行われ酸化物の生産量が還元物の生産量を上回っていることを示している。酸化物と還元物の生産量とつり合った状態にある Case 2 ( $r = 1.3\text{ cm}$ ) に対して、Case 1 で酸化的な (ODU の減少) 状態が形成されるが ORP の上昇は ED の EA への変換によるためであり、Case 2 に比較して有機物の分解が促進されているわけではない。

#### 2) 電子伝達範囲の推定 (実験 B)

##### a) pH~ORP 関係

図-6 には (a)  $A_0$  回路の通電に伴って変化する  $A_1 \sim A_8$  電極 (無通電回路) 起電圧の経時変化, (b) 初期値と通電, 17 日目の  $A_8$  電位基準とした  $A_1 \sim A_7$  回路のアノード電極電位分布が示されている。 $A_0$  回路の通電に伴い、距離方向に電位差ができており、 $A_1 \sim A_7$



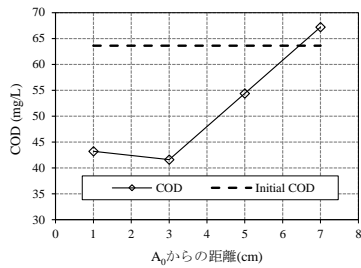
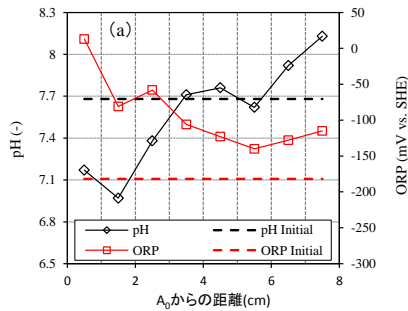
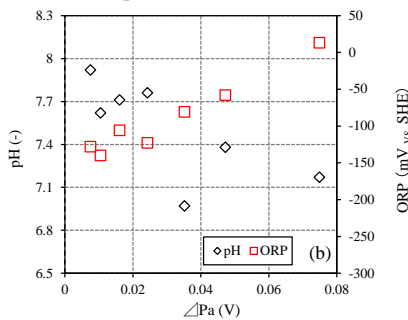


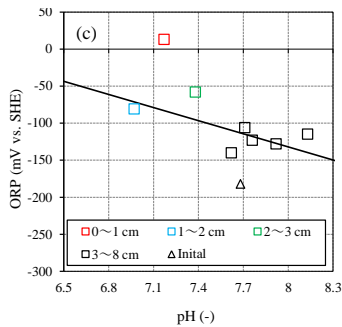
図-7 有機泥の COD 分布



(a) pH, ORP 分布



(b) アノード電位と pH, ORP 関係



(c) pH~ORP 関係

図-8 通電 17 日後の有機泥の pH, ORP 特性

電極の初期値（通電開始時の電位は約-0.2V）に比較してアノード電極電位（起電圧）の上昇が顕著であることから、通電電極を中心にして有機泥層全体の酸化が進んでいることがわかる。このことは  $E_0$  回路によって形成された電位分布が距離方向に電子伝達場をつくること、すなわち  $A_0$  電極の電極反応によって電子伝達径路が  $A_8$  から  $A_0$  に向かって形成されたことを示している。

図-7 には COD 分布、図-8 には通電 17 日後の有機泥の pH, ORP 特性が示されている。通電電極 ( $A_0$ ) 近傍では COD の低下とあわせて、実験 A と同様に酸化による pH の減少

と ORP の増加が確認された。これら pH, ORP の変化はアノード電極電位の上昇と相関関係を持つ（図-8(b)）ことから電子回収に伴い電子伝達物質による電子伝達、すなわち ED の酸化と EA の還元が連続的に生じていることがわかる。 $A_0$  から 4cm までの範囲においては COD 値も同時に低下している（図-7）ことから、 $A_0$  電極周辺では ED の酸化反応が還元反応を越えて起こっていることを裏付けている。 $A_0$  から 1cm 程度の範囲では  $H^+$  に依存しない ORP の上昇、つまり電子伝達物質である ED の酸化が顕著に表れていることが pH~ORP 関係からわかる。 $A_0$  電極近傍において  $H^+$  と電子の生産が電子の回収速度よりも劣る場では微生物による有機物の分解は期待できない。ただし、 $A_1$  以降では各電極間の電位差が 20mV 程度（図-6(b)）であり、微生物分解が促進されていることも考えられる。

#### b) CV の変化

ORP, COD 等では  $A_0$  回路の効果を確認するため、各アノード電極での CV を測定した。CV は、測定される酸化還元電流のピークの位置、大きさ（勾配）から、その電極で反応（電子伝達）している物質または微生物の種類、活性度合を推定するものである。図-9 には  $A_1 \sim A_8$  電極での CV が示されている。図-9 から  $A_1 \sim A_8$  の電極で異なる CV 特性があり、通電によって形成された電位場に合った電子伝達機構が形成されている可能性が示される。本実験においてはすべての電極で  $P_a = 0.4 \sim 1.0$  V の範囲で酸化電流のピークが生じているが、 $A_1 \sim A_3$  と  $A_4 \sim A_8$  のピーク初期の勾配が異なっている。 $A_1 \sim A_3$  では  $H^+$  の増加があり（図-8(a)）、 $HS^-$  の酸化、または有機物の分解が主に起こっていることが推定される。 $A_1$  に関しては電子の回収量が  $H^+$  の生産に勝っており微生物の活動が抑制されていることも考えられるが、 $A_1$  での電子伝達能力が最も高くなっており、電子伝達場としては良好な形成状態にあると判断できる。図-6 には示されていないが  $A_1$  ( $A_1 = 0.46 \sim 0.61V$ ) での電位は  $A_0$  ( $A_0 = 0.8 \sim 0.9V$ ) よりも  $A_2$  ( $A_2 = 0.42 \sim 0.56V$ ) の電位に近く、微生物の活性を妨げる電位は  $A_0$  のごく近傍で急激に低下していると考えられる。 $A_1$  周辺では電位の増加に対して電子の供給が最も効率的に起こっており、電位差の勾配が大きい程、電子伝達効率が高くなると考えられる。同様に考えれば、 $A_4 \sim A_8$  においても酸化電流のピークが現れており、有機泥層から強制的に電子回収を行なうことにより、1 オーダ高い範囲での電子伝達場の形成を助長できる可能性が見出された。 $A_1 \sim A_3$  と  $A_4 \sim A_8$  でのピーク勾配が異なることから電子の回収量によって電子の生成機構が異なることは推定できるが、電子の生成機構を明らかにするためには微生物に関する実験が必要である。

#### 4. 研究成果

本研究では強制的に電位差を形成すること

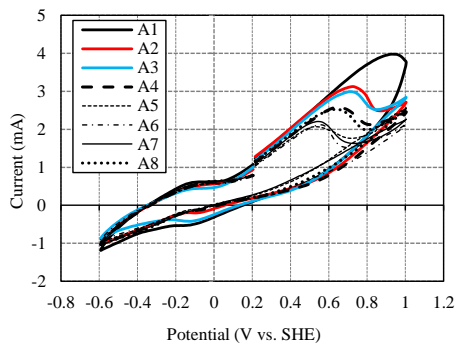


図-9 A<sub>1</sub> から A<sub>8</sub> のサイクリックボルタンメトリー(CV)  
(測定範囲は Pa = -0.6 ~ 1.0 V , 掃引速度は 10 mV/s)

により電子の流れ場における電子の伝達によって変化するセンチ単位の電極電位の測定から電子伝達範囲を推定した。以下に本研究で得られた結論をまとめる。

①外部電源による強制通電によってアノード電極周辺では、基質内にある ED からの強制的な電子回収が起こり ORP の顕著な上昇と、還元体 (主に H<sub>2</sub>S, Fe<sup>2+</sup>) の酸化または有機物の分解による H<sup>+</sup>の生成が確認された。ED が活発に酸化する電極では電位を上昇させることにより、還元物の生産 (EA の還元) よりも酸化物の生産 (ED の酸化) を増大させることができる。これらにより、強制的な電子回収により堆積有機泥の強い還元化を抑制できることが明らかになった。

②強制的な電流の付与により、通電電極周辺にできる酸化還元電位差 (電子伝達範囲) は SMFC 単独でできる酸化還元電位差の 10 倍スケールの範囲に拡大できることを明らかにした。1mA の通電では通電回路から、距離方向に 8cm 以上にわたり電位差を形成することができた。

③電位差は有機泥内の pH の低下、ORP の上昇を生起させ、有機泥中での電子生産が活性化させている可能性があることを、CV のピーク位置と H<sup>+</sup>の生成量から明らかにした。

##### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

- 1.上野耕平、岸本健嗣、TOUCH NARONG、日比野忠史：微生物燃料電池を用いた還元性有機泥の酸素消費抑制、海岸工学論文集 B2(海岸工学) Vol.68、査読有、2012、pp.1201-1205
- 2.日比野忠史：ヘドロを浄化し電力を回収する微生物燃料電池の実用化、技術総合誌 OHM、査読無、2013、pp.4-5
- 3.長津義幸、門田勝吾、TOUCH NARONG、日比野忠史：微生物燃料電池による有機泥性状変化と有機物分解の評価、土木学会論文集 B2 (海岸工学) Vol.69、査読有、2013、pp.

##### I\_1106-I\_1110

4.T. Hibino, N. Touch, K. Komai, K.H. Kim: Modeling the settling velocity of organic settling matter with the consideration of organic properties, Coastal Engineering Journal, Vol.55, No.4(2013)1350015 -1(14pages) (査読有) .

5. 日比野忠史: 太陽電池を越える微生物燃料電池の開発に向けて、月刊ケミカルエンジニアリング Vol.58、査読無、2013、pp.1-7

6.N. Touch, T. Hibino, K. Ueno, S. Fukui: Experimental investigation on effects of acid/base waters on the bottom sediment of Kaita Cove (Hiroshima, Japan), Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol. 135, pp. 18-23, 2013 (査読有) .

7.Kyunghoi Kim, In-Cheol Lee, Sung-Hoon Ryu, Tadashi Saito and Tadashi Hibino: Application of Granulated Coal Ash for Remediation of Coastal Sediment, Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy Vol. 17, No. 1. pp. 1-7, February 2014 (査読有) .

8.N. Touch, T. Hibino, Y. Nagatsu, K. Tachiuchi: Characteristics of electricity generation and biodegradation in tidal river sludge-used microbial fuel cells, Bioresource Technology, Vol. 158, pp. 225-230, 2014 (査読有) .

[図書] (計 1 件)

1.日比野忠史, TOUCH NARONG: 微生物燃料電池による廃水処理システム最前線 pp.197-208, NTS, 2013.

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称：微生物燃料電池及び微生物発電方法

発明者：日比野忠史

権利者：広島大学

種類：特許

番号：特願 2011-276150

出願年月日：2011 年 12 月 16 日

国内外の別：国内

[その他]

ホームページ等

##### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

日比野 忠史 (HIBINO TADASHI)

広島大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：50263736