

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01565

研究課題名(和文) 低コスト高性能エアカソードを用いた有機物・窒素同時処理モジュールの創製

研究課題名(英文) Development of bioelectrochemical electrodes unit using low-cost air cathode capable of simultaneous removal of organic matter and nitrogen with generating electric power from organic wastewater

研究代表者

渡邊 智秀 (Watanabe, Tomohide)

群馬大学・大学院理工学府・教授

研究者番号：60251120

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：活性炭を原料とする高活性ORR触媒の調整条件ならびに廉価で高性能なエアカソード作製条件の一端を実験的に明らかにした。また、予め硝化細菌生物膜を形成させた多孔性シートでエアカソードの触媒層を覆うことによる有効性を実証するとともに、適する素材についての知見を得た。さらに、エアカソード、セパレータの役割も果たす予め硝化細菌生物膜を形成させた多孔性シート、アノードならびに集電体で構成される電極ユニットを試作し、有機物および窒素の同時除去に合わせた発電が可能であることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究において、系内で安定的に窒素処理を進行させること、活性炭を原料として従来に比べて大幅に廉価なORR触媒やエアカソードの作製条件に関わる知見が得られたこと、さらには、電極をユニット化して利用する可能性も実証したことのそれぞれに学術的な意義がある。また、MFCの仕組みを応用した含窒素有機性廃水に対する新しい省・創エネルギー型処理システムの実用へ向けた課題の克服に寄与する可能性を有することに社会的意義があると考えられる。

研究成果の概要(英文)：A low-cost and high-activity ORR catalysts were prepared by nitrogen-doping of powdered activated carbon. Optimum and/or acceptable conditions for making the cost-effective air breathing cathodes were obtained experimentally such as the N-doped activated carbon catalyst loading, lesser content of Nafion, possible alternative binder materials for making the catalyst layer and stainless-steel woven wire meshes as alternative base electrode instead of conventional carbon materials. Improved performance of a long-term nitrogen removal and power generation was demonstrated in MFC equipped with the air cathode covered by a separator with pre-enriched nitrifying biofilm. The better materials as separators in this system were also obtained. An electrode unit, a set of the air cathode, a separator with pre-enriched nitrifying biofilm, carbon felt anode and current collectors is assembled and was demonstrated simultaneous removal of organic matter and nitrogen with generating electric power.

研究分野：環境工学

キーワード：微生物燃料電池 廃水処理 エアカソード 硝化 窒素処理

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

微生物燃料電池 (MFC) は、細胞外電子伝達能を持つ微生物 (発電微生物) を含む生物膜が形成されたアノードと対極となるカソードで構成され、発電微生物による有機物分解に合わせて電気エネルギーを直接的に獲得できる仕組みである。電極基材、酸素還元反応 (ORR) 触媒層および遮水透気層から成るエアカソードを用いると、カソード反応の電子受容体となる酸素をエアレーションすることなく供給可能である。さらに、予め硝化細菌を含む生物膜をエアカソードの触媒層表面に形成させておくと窒素が除去される可能性も報告され、含窒素有機性廃水に対する新しい省・創エネルギー型処理システムへと発展することに大きな期待が寄せられている。これを実用へ展開するには、カソードコストの大幅な低減と高性能で安定した出力や処理速度・処理効率が不可欠であるものの、関連する知見が非常に限られ、確立されていないのが現状である。

### 2. 研究の目的

本研究では、エアカソードを用いる MFC の仕組みを応用し、有機物と窒素を同時に処理しながら電力の回収も可能な新しい含窒素有機性廃水処理プロセスの実用に向けて、低廉で高性能かつ高機能なエアカソードを開発するとともにアノードと組み合わせた電極ユニットを構築することを目的とする。具体的には、活性炭を主な原料とした廉価で高活性な ORR 触媒に加えて、触媒性能を十分に発揮可能なエアカソードの作製条件を明らかにするとともに、窒素処理を担う微生物群の作用と効果的に融合する仕組みについて、それらの特性や影響因子等を把握する。さらに、アノードと組み合わせた電極ユニットを試作して含窒素有機性廃水処理を実証するとともに適用性を明らかにする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 活性炭を原料とした高性能触媒調整条件の検討

粉末活性炭を原料とし、湿式ならびに乾式にて窒素ドープして得られた試料の ORR 活性に対する調整条件の影響を調べた。湿式法では、窒素源となる硝酸水溶液へ粉末活性炭を加え、還流しながら加熱処理し、硝酸濃度および処理時間による影響を検討した。乾式法では、窒素源となる尿素を粉末活性炭と混合して不活性ガス雰囲気下で 600~1150 の範囲で熱処理して得られた試料の ORR 活性に対する熱処理温度の影響を検討した。なお、試料 ORR 活性は、回転電極を用いたリニアスイープボルタンメトリー (LSV) で調べ、X 線光電子分光法 (XPS) やガス吸着法にて化学的ならびに物理的性状を把握した。

上記で高い活性が得られたいくつかの試料を ORR 触媒として用いたエアカソードを作製して、有効液容積が約 200mL でアノードとしてフェルト状カーボンを用いた一槽式 MFC に設置し、所定の組成に調整した模擬有機性廃水による回分試験を繰り返して有機物分解速度や出力性能等のデータを収集して、MFC での使用環境における性能を調べた。

#### (2) エアカソード作製条件の検討

##### 本系に適するバインダー材のスクリーニング

ポリテトラフルオロエチレン (PTFE)、ポリジメチルシロキサン (PDMS)、ポリフッ化ビニリデン (PVDF) ならびに PVDF-ヘキサフルオロプロピレン共重合体 (PVDF-HFP) のそれぞれと本研究で得た窒素ドープ活性炭触媒とを種々の割合で配合した触媒インクを塗布した回転電極の所定条件下における LSV や触媒インクの走査型電子顕微鏡 (SEM) による観察等に基づいて、触媒層を形成するうえで不可欠なバインダーとして、従来のナフィオンに代替する可能性を有する材料をスクリーニングした。

##### MFC 実験によるエアカソード作製条件と影響因子の検討

触媒担持量やバインダーの種類等が異なる触媒層を形成したエアカソードとアノードとなるカーボンフェルトをアクリル樹脂製または特殊加工したガラス製容器に設置した MFC へ所定濃度の酢酸を含有する模擬有機性廃水を満たして回分操作を繰り返し、基質濃度の経時変化や電位差等をモニタリングするとともに、定期的に分極データを収集し、出力性能や効率等を比較した。その際、必要に応じてアノード/カソード面積比を変更して実験を行った。これとは別に、目開きや線径が異なるステンレス製金網を電極基材として所定条件のもとで作製したエアカソードを設置した MFC を上記と同様な模擬有機性廃水を満たして回分方式で運転して得られたデータに基づいて、電極基材としての利用可能性や影響因子を把握した。

#### (3) 窒素除去エアカソードの特性と影響因子の検討

##### 多孔性シート材の設置効果の把握

所定条件となるように作製したエアカソードの触媒層をポリプロピレン製 (PP) および親水処理されたポリエチレンテレフタレート製 (PET) のナノファイバー不織布ならびに酢酸セルロース製のメンブレンフィルタ (CA) のいずれか一つで覆うように重ねて、MFC として用いるアクリ

ル樹脂製容器に設置し、多孔性シート状に予め硝化細菌生物膜を形成させるため、硝化汚泥を植種し、アンモニウムイオン含有溶液で回分操作を繰り返した。硝化速度が各容器で概ね一定になったことを確認してから、別途、安定した電圧が得られる状態へ馴致しておいたアノードをそれぞれの容器へ移設して MFC を構築した。直ちに、模擬含窒素有機性廃水を満たして回分実験を繰り返し、酢酸や形態別窒素濃度と出力の経時変化を測定するとともに電位差等をモニタリングした。また、適宜、硝化性能試験も行った。さらに、各 MFC から生物膜や汚泥試料を採取し、16SrRNA 遺伝子の塩基配列に基づいて微生物群集を解析した。なお、多孔性シートで被覆せずにエアカソードの触媒層表面に硝化細菌生物膜を直接形成した対照系も用意した。

#### 本系に適する多孔性シート材の探索

6 種類（親水性 4 種類および疎水性 2 種類）の多孔性膜を用意し、投影面積が約 7 cm<sup>2</sup> のエアカソードの触媒層を覆うように重ね、特殊形状に加工されたガラス製容器に設置した。所定量の硝化汚泥を植種し、硝化環境下において硝化細菌生物膜をそれぞれの多孔性膜表面に形成させた後、別途、予め発電可能な状態に馴致しておいたアノードをガラス容器内に移設して MFC を構成した。直ちに模擬含窒素有機性廃水を満たして回分実験を繰り返し、酢酸や形態別窒素濃度等の経時変化を測定するとともに、電極間の電位差を連続的にモニタリングした。なお、多孔性膜を設置しない系や硝化細菌生物膜を事前形成しない系も用意した。さらに、一部の MFC では、平均孔径が 0.1 ~ 数 mm の範囲で異なる多孔性素材を多孔性膜へ重ねるように設置し、その効果や影響を比較して、硝化細菌保持量の向上や維持の可能性を調べた。

#### (4) アノード材料の検討

同程度の初期酸素透過能を有するエアカソードを設置した有効液容積が約 200 mL のアクリル樹脂製容器内に性状が異なる導電性材料をアノードとして設置して MFC を構成し、模擬有機性廃水を満たして所定の植種方法ならびに操作条件のもとで回分実験を繰り返して得られたデータに基づいて出力性能等を相互に比較した。アノードとして、厚さ約 1mm に成形された平均気孔径や導電抵抗が異なる導電性多孔質樹脂ならびに導電性多孔質樹脂で薄く被覆された種々の目開きの金網を用いるとともに、対照系としてフェルト状カーボンも用意した。また、材料のミクロ構造や微生物の付着状況を SEM 観察した。

#### (5) 電極ユニットの試作と含窒素有機性廃水処理実験

エアカソード、セパレータの役割も果たし予め硝化細菌生物膜を形成させた多孔性シート、フェルト状カーボンのアノードならびに集電体で構成される有効面積が約 26cm<sup>2</sup> の電極ユニット試作し、アノードが液相側、エアカソードが空気相側となるように設置できるように加工された透明アクリル樹脂製容器に固定し、模擬含窒素有機性廃水が満たされた有効容積約 4.5L の容器内に浸漬して有機物や形態別窒素濃度の経時変化ならびに電極間の電位差等をモニタリングした。多孔性シートとして厚さや気孔率が異なる多孔性 PVA を使用し、さらに、模擬廃水の有機物の有無等を変更して、それらが処理速度や出力性能へ及ぼす影響を把握した。

### 4. 研究成果

#### (1) 活性炭の窒素ドーブによる高活性化に及ぼす調整条件の影響

窒素源として硝酸を用いた湿式法で得られた試料の ORR 活性は、硝酸濃度ならびに加熱処理時間に依存するものの、それぞれに対して単調に増加や減少するのではなく、硝酸濃度に応じて活性が最大となる加熱時間があり、その傾向は、濃度が高くなるにつれて短くなる傾向があった。ORR 活性が高い試料は、ピリジン型窒素含有率が高くなる傾向が認められたが、硝酸濃度や加熱時間の増大とともに炭素-酸素結合の増大と比表面積の減少が顕著になり、炭素骨格の酸化や物理構造の変化も ORR 活性に影響を与えた。

尿素を窒素源に用い不活性雰囲気下で高温加熱する乾式法で得られた試料は、原料の活性炭に比べて大幅に ORR 活性が向上し、600 ~ 1150 の範囲では 1050 で最大となった。この加熱温度の範囲で得られた試料の比表面積等の物理性状に大きな差異はなく、ピリジン型窒素も形成されていたが、その含有率と ORR 活性が必ずしも一致しなかった。

各方法で最大活性となった試料を触媒として作製したエアカソードを設置した MFC の最大電力密度は、LSV に基づく試料の ORR 活性と大小関係は同様であった。乾式法で得られた試料を触媒に用いた場合の電力密度は湿式法に比べ 30% 程度大きく、1W/m<sup>2</sup> 超が達成された。なお、両触媒試料のピリジン型窒素含有率は同程度であるものの、酸素含有率に 6 倍程度の差異が生じており、炭素骨格の酸化は触媒活性に影響すること示唆された。

#### (2) エアカソード作製条件

##### 触媒担持量

検討項目(1)において最も高い活性が得られた試料を触媒に用い、その担持量を変更して作製したエアカソード設置した MFC で得られた最大電力密度から、10 mg/cm<sup>2</sup> までの範囲では、担持量の増大とともに電力密度が向上し、それを超えるとほぼ一定となる傾向が認められた。電流-電位曲線の形状から、反応物の触媒表面への供給が頭打ちの原因とはいえなかったことから、アノード/カソード面積比を増大させてアノード性能の影響を避けた MFC を作製して触媒担持量と最大電力密度との関係をさらに詳しく調べたところ、20 mg/cm<sup>2</sup> において最大となり、それ以降

は 100mg/cm<sup>2</sup> までの範囲で漸減することがわかった。また、20 mg/cm<sup>2</sup> を超える高担持量での出力低下は、触媒層の厚さの増大に伴う物質移動抵抗が影響していることが示唆された。

#### 固体電解質の添加量低減可能性

触媒担持量が一定のもとでバインダーおよびプロトン移動媒体として多用されているナフィオン添加量を変更して作製したエアカソードを設置した MFC で得られた最大電力密度に基づいて、概ね 0.1 から 1mg/cm<sup>2</sup> 程度までの範囲ではその増大に伴い電力密度も増大したものの、これを超えると 1 オーダー程度まで増大してもほとんど効果はないことがわかった。また、触媒担持量との比で整理可能なことも示唆された。MFC でナフィオンの添加量を低減できるのは、液相と触媒表面が直接的に接しており、プロトンが適度に供給されるためであると考えられた。

#### ステンレス金網のエアカソード電極基材としての利用可能性

目開き 80~250 メッシュの金網をエアカソードの電極基材として用い、PTFE のガス拡散層と活性炭を触媒とした触媒層が形成されたエアカソードを設置した MFC の出力特性に基づいて、目開きが大きいほど高い電力密度が得られ、80 メッシュの場合に、多用されているカーボンクロスを基材とした場合と同等の出力が得られて、ステンレス金網で代替する可能性が示された。また、金網の目開きと出力の関係には、酸素透過能が影響していることが示唆された。さらに、得られた出力と触媒層におけるナフィオンの添加量の関係から、1mg/cm<sup>2</sup> 程度で十分な出力が得られ、さらに減少しても PTFE 等で触媒粒子を保持すれば出力性能の低下を抑えられることがわかった。以上のことから、従来の Pt/C を触媒、ナフィオンをバインダーおよび電極基材にカーボンクロス等の炭素材を使用したエアカソードに比べて、大幅に原料コストを削減する可能性が示された。

#### ナフィオンに代替するバインダーの検討

1050 で調整した窒素ドープ活性炭を触媒に用い、PTFE、PDMS、PVDF および PVDF-HEP のそれぞれを種々の割合で含有する触媒インクに対する LSV に基づいて、いずれの素材も見かけの ORR 活性に影響をほとんど与えない添加率が存在し、素材ごとに異なることがわかった。また、PVDF は見かけの ORR 活性に影響が表れる添加率が他に比べて大きく、PDMS は触媒活性に影響を与えやすい傾向が認められた。さらに、これらの結果に基づいて、見かけの ORR 活性に影響がなかった添加率でそれぞれの素材をバインダーとして作製したエアカソードを設置した MFC における最大電力密度を比べると、対照となるナフィオンを用いた系には及ばないものの、PDMS の系で 80%、PTFE や PVDF の系では約 65% の出力が得られた。これらの素材はナフィオンに比べて非常に廉価であり、触媒に対するバインダー添加率以外の調整条件の最適化についてさらに検討を進めていく必要があると考えられた。

### (3) 窒素除去エアカソードを設置した MFC の特性と影響因子

#### エアカソード触媒層を覆う多孔性シートの設置効果

運転初期におけるエアカソードからの酸素透過能は、エアカソードのみの対照系に比べて多孔性シートで覆われた系では、PP で約 85%、PET で約 70% および CA で約 50% に抑制され、素材により異なるものの、過剰な酸素透過を抑制し系内を嫌氣的に保つことに寄与する可能であることがわかった。また、長期運転に伴う酸素透過能の低下の緩和効果が認められた。

運転初期における各 MFC の最大電力密度は、PP を設置した系を除いて対照系に比べて 1.6 倍も増大した。また、電荷収率は PET で 2~3 倍も大きくなり、エアカソードからの過剰な酸素透過が抑制されて電気産生微生物の活性が向上したことや好気性微生物による有機物の消費が抑制されたためと考えられた。PP において初期の出力や電荷収率が特に低かったのは、疎水性表面を有していることに起因すると考えられた。

約 7 ヶ月間運転した MFC エアカソードの触媒層表面に付着している生物膜量は対照系に比べて多孔性シートで覆われた系で大幅に減少し、非常に高い割合で耐アルカリ性や高塩性の細菌に占められており、エアカソード表面近傍がアルカリ性環境に保たれやすくなったことで耐性のない微生物群の増殖が大幅に抑制されたことによると示唆された。

多孔性シートでエアカソードを覆うと酸素透過速度は抑制されるものの、実験の範囲では、運転開始初期の硝化速度に影響はほとんどなく、さらに、材質によっては運転継続に伴う硝化速度の低下が抑制され、約 170 日経過後でも約 40% が維持された（対照系は 10% 以下まで減少）。

多孔性シートに形成された生物膜は当初、約 35% を *Nitrosomonadacea*、約 20% を *Nitrospira* 属細菌が占めていたものの、約 9 ヶ月後には、それぞれ数% 以下まで減少し、硝化細菌生物膜を形成させた新しい多孔性シートと交換したところ硝化速度が飛躍的に増大したことから、硝化細菌を長期に維持する工夫が必要であることが示唆された。なお、系内には、従属栄養脱窒細菌が高頻度で検出され、多孔質材シート上の生物膜内で硝化により生じた硝酸イオンや亜硝酸イオンがこれらにより消費されて窒素除去が進行していると考えられた。以上から、エアカソードの触媒層を覆うように硝化細菌生物膜が形成された多孔質材を設置することで、実験開始初期の酸素透過量の制御に加えて、長期運転に伴いエアカソードに付着する生物量を大幅に軽減することが可能であることが実証された。

#### 本系に適する多孔性シート材

上記の結果を踏まえ、親水性 4 種類および疎水性 2 種類の膜素材を用意して、本系に適する素材や影響因子を調べた。疎水性膜では、予め形成させた硝化細菌生物膜による硝化とそれに続く脱窒により系内で窒素除去は進行するものの、電氣的出力が得られなかった。これは、使用した膜の平均孔径が  $0.5\ \mu\text{m}$  以下と小さかったこともあり、水が膜を透過しにくく、液相と触媒層の接触が妨げられてカソード反応が実質的に生じなかったためである。これに対し、親水性膜では、硝化に伴う窒素除去に加えて安定的に出力も得られ、その出力性能や硝化速度は、素材の酸素透過能の大小の傾向に概ね一致することがわかった。多孔性シートがない対照系では、運転開始初期に比べ約 100 日間を超える運転の間に 70~85% も硝化速度が低下したにも関わらず、親水性膜素材を設置した系では、一部の素材を除きほとんど低下することなく、その有効性が実証され、本研究の範囲では、親水性 PTFE 膜が最も適していた。また、採取した生物膜試料の菌叢解析結果などを踏まえて、硝化速度の低下には、素材による生物膜保持量の相違も影響する可能性が示唆された。

これを受けて、硝化細菌生物膜を安定的に保持する試みとして、生物学的廃水処理で汚泥保持用担体としても使用されている平均孔径が  $0.1\sim\text{数}\ \text{mm}$  の素材で多孔性シートを覆うように重ねてみたところ、硝化速度の向上に対して一定の効果が得られた。ただし、平均孔径が小さいとエアカソードからの酸素透過が妨げられてしまうこと、孔径が大きく空隙率が高すぎると生物膜の保持機能を発揮しにくくなることから、材質に加え、適する物理構造についてさらに調べる必要性が示唆された。

#### (4) 試作したアノード材の適用可能性

$0.1\text{mm}$  オーダーの平均気孔径を有し導電抵抗を種々変更した導電性多孔質樹脂を目開き 10~100 メッシュの金網に薄く塗布した電極を作製し、MFC のアノードとして使用して出力性能を比較したところ、フェルト状カーボンを用いた対照系に比べ、アノードの見かけ体積基準では、優れていることがわかった。実験の範囲では、目開きが小さく、導電抵抗が小さいほど出力性能が向上する傾向があった。さらに、SEM 観察から比較的大きな気孔が有効に微生物付着に作用していると推察された。従来の炭素材に比べて様々な形状へ成形しやすい新たな電極素材へと発展する可能性が示されたが、アノード投影面積あたりではカーボンペーパー等に比べて出力は小さく、改良の余地が大きいと考えられた。

#### (5) 電極ユニットの試作と実証

試作した電極ユニットの模擬含窒素有機性廃水を用いた回分実験において、単位カソード投影面積あたり  $0.025\text{kg-N}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$  程度の TN 除去速度と約  $0.085\text{kg-C}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$  の有機物除去速度が得られたのに合わせて  $0.4\text{W}/\text{m}^2$  の電力が発生した。また、有機物を含有しない模擬廃水を使用した実験で得られた硝化速度が約  $0.020\text{kg-N}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$  であったことも踏まえて、試作した一体型電極ユニットで有機物および窒素の同時的な除去に合わせて電氣的出力を得られることが実証された。多孔性シートの厚さを  $1\text{mm}$  から  $2\text{mm}$  へ変更したところ硝化速度が平均で約 20% 低下したものの、開口率で約 6% に相当する直径約  $1\text{mm}$  の貫通孔を均一に多数設けた  $1\text{mm}$  厚のシートを用いた場合、窒素除去速度が 10~20% 向上したことから、シート素材の酸素透過性が重要な因子であることが示唆された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 劉澤, 佐藤司, 篠原雅人, 窪田恵一, 渡邊智秀
2. 発表標題 エアカソードへ重ねた硝化能を有する多孔性膜の効果と材質の影響
3. 学会等名 第56回日本水環境学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomohide Watanabe, Atsuko Kawata, Shun Tanno, Song Xue, and Keiichi. Kubota
2. 発表標題 Long-term performance of TN removal and power generation in a single chamber MFC using a separator with pre-enriched nitrifying biofilm
3. 学会等名 16th IWA World Conference on Anaerobic Digestion (AD-16) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomohide Watanabe, Atsuko Kawata, Shun Tanno and Keiichi Kubota
2. 発表標題 Mitigation effect of a microporous sheet with pre-enriched nitrifying biofilm on long-term deterioration in TN removal and power generation in a single-chamber MFC
3. 学会等名 International society for microbial electrochemistry and technology global conference (ISMET7) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kouhei Narizuka, Hirokazu Ishitobi, Keiichi Kubota and Tomohide Watanabe
2. 発表標題 Power generation in a MFC with an air cathode fabricated under different preparation condition for a catalytic layer using a nitrogen-doped activated carbon catalyst
3. 学会等名 International society for microbial electrochemistry and technology global conference (ISMET7) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 入澤友規, 窪田恵一, 渡邊智秀
2. 発表標題 硝化細菌生物膜を有するセバレータ の一槽式微生物燃料電池への設置効果
3. 学会等名 第22回化学工学会学生発表会 (東京大会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 成塚宏平, 窪田恵一, 石飛宏和, 渡邊智秀
2. 発表標題 エアカソードの触媒層調整条件が微生物燃料電池の性能へ及ぼす影響
3. 学会等名 第54回日本水環境学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 成塚宏平, 後藤博登, 窪田恵一, 渡邊智秀
2. 発表標題 炭素質触媒を用いたエアカソードの作製条件が微生物燃料電池の性能へ及ぼす影響
3. 学会等名 化学工学会室蘭大会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Watanabe, N. Kojima, S. Xue, W. Takahashi and K. Kubota
2. 発表標題 Long-term performance of TN removal and power generation in a MFC using an air-cathode covered with nitrifying biofilm
3. 学会等名 IWA World Water Congress & Exhibition 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 後藤博登, 成塚宏平, 窪田恵一, 渡邊智秀
2. 発表標題 炭素質触媒と金属メッシュを用いたエアカソードの特性
3. 学会等名 第55回環境工学研究フォーラム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐々木拓真, 成塚宏平, 窪田恵一, 渡邊智秀
2. 発表標題 活性炭触媒を用いたエアカソードを適用した微生物燃料電池の特性
3. 学会等名 第21回化学工学会学生発表会(東京大会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川田敦子, 丹野 峻, 窪田恵一, 渡邊智秀
2. 発表標題 硝化能を有する多孔質シートを設置した一槽式微生物燃料電池の特性
3. 学会等名 第53回日本水環境学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 成塚宏平, 佐々木拓真, 窪田恵一, 渡邊智秀
2. 発表標題 一槽式微生物燃料電池の性能に及ぼす窒素ドープ炭素質触媒層作製条件の影響
3. 学会等名 第53回日本水環境学会年会
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 後藤博登, 窪田恵一, 渡邊智秀
2. 発表標題 炭素質触媒と金属メッシュを用いるエアカソードを適用した微生物燃料電池の特性
3. 学会等名 第53回日本水環境学会年会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 渡邊一哉監修 渡邊智秀, 窪田恵一 他 38名 (分担執筆)	4. 発行年 2021年
2. 出版社 (株)シーエムシー出版	5. 総ページ数 245
3. 書名 バイオテクノロジーシリーズ 微生物を用いた発電および水素生産	

1. 著者名 公益社団法人 日本水環境学会 電気化学的技術研究委員会 (榊原豊, 岸本直之, 渡邊智秀 他10名)	4. 発行年 2020年
2. 出版社 デザインエッグ社	5. 総ページ数 174
3. 書名 環境エンジニアリングにおける電気化学的技術	

〔産業財産権〕

〔その他〕

渡邊・窪田研究室ホームページ <a href="https://environ.ees.st.gunma-u.ac.jp/index.html">https://environ.ees.st.gunma-u.ac.jp/index.html</a>
---

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	石飛 宏和  (Ishitobi Hirokazu)  (00708406)	群馬大学・大学院理工学府・助教    (12301)	
研究分担者	窪田 恵一  (Kubota Keiichi)  (50707510)	群馬大学・大学院理工学府・助教    (12301)	

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