

平成 30 年 4 月 16 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04069

研究課題名(和文) 多層型人工湿地 - 微生物燃料電池の確立とその水質浄化同時発電特性および機構の解明

研究課題名(英文) Development of multi-layer constructed wetland integrated with microbial fuel cell and evaluation of its specific characteristics of simultaneous water purification and electricity generation

研究代表者

中野 和典 (NAKANO, Kazunori)

日本大学・工学部・教授

研究者番号：30292519

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)：本研究では、空気層を導入することで多層化した人工湿地ろ床の好気・嫌気条件をコントロールする技術を確立した。さらに、多層化した人工湿地に微生物燃料電池を導入することで、世界初の人工湿地 - 微生物燃料電池のスタック化を実現するとともに、スタック化に適したろ材厚を明らかにした。これらの成果は、コンパクト化と創エネルギー化を両立する新しい人工湿地の確立に貢献するものである。

研究成果の概要(英文)：A novel strategy controlling aerobic-anaerobic condition in filtration-bed of multi-layer constructed wetland was proposed and established in this study. Furthermore, a stacked constructed wetland integrated with microbial fuel cell was realized for the first time in the world by introducing the proposed strategy. Appropriate thickness condition of filtration-bed for stacking was also investigated. The results of this study contribute to establish a novel compact constructed wetland generating energy.

研究分野：環境生態工学

キーワード：人工湿地 微生物燃料電池 スタック化 ろ材

### 1. 研究開始当初の背景

自然の浄化機構を模倣した廃水処理である人工湿地は、低炭素・省メンテナンス・低コストな小規模分散型の廃水処理手法として欧米諸国では普及しているが、面積を要することが課題であった。そこで本研究では、機械的曝気に頼らずに地下に好氣的環境を創出する普遍的な手法の確立により人工湿地の多層化を図り、人工湿地の課題である面積を要する点を劇的に改善する技術の確立することを目指した。

一方、廃水処理を利用した微生物燃料電池は、廃水中の有機物を直接的に電力資源化する技術として注目されている。その理論は廃水処理を行う人工湿地にも適用可能であり、人工湿地の地下の嫌氣的環境と表層の好氣的環境をそれぞれアノードとカソードとして利用した人工湿地-微生物燃料電池の研究が行われてきている。

一般的に単独の燃料電池の開回路電圧は概ね 1V 程度であり、作動電圧としては十分ではないため、セルを幾重にも重ねるスタック構造が通常の燃料電池では採用されている。しかし、人工湿地-微生物燃料電池ではスタック化が困難であり、そのような検討は手つかずの状況にあった。その理由のひとつは、地下環境を利用する人工湿地-微生物燃料電池では、3 次元的に複数の電極対を設けることが困難であるためであった。

本研究で確立する地下に好氣的環境を創出する手法を応用すれば、好氣的環境と嫌氣的環境を同居させたろ床の多層化が図れるため、アノードとカソードを 3 次元的に複数対組み合わせたスタック化が可能となることが期待できる。

以上の背景により、本研究では、地下に好氣的環境を創出する普遍的な手法の確立により、人工湿地の課題である面積を要する点の解消と人工湿地-微生物燃料電池のスタック化の実現を試みることにした。

### 2. 研究の目的

本研究では、機械的曝気に頼らず大気 of 自然な移流・拡散により地下に好氣的環境を創出する普遍的な手法としてろ床内部に空気層を導入する手法を提案したことから、本手法を廃水処理を行う人工湿地のろ床の多層化に応用して、その効果を実証することを本研究の第一の目的とした。

空気層を導入することで、ろ床の上下両方向から空気の拡散が起こることから、ろ床厚の調整やろ材の粒径により、ろ床内部の好氣・嫌氣ゾーンのバランスの調整が可能となることが期待できる。それを実証し、ろ床厚やろ材の粒径によるろ床内部の好氣・嫌氣的環境創出特性を解明することを本研究の第二の目的とした。

ろ床の嫌氣的環境をアノードに、好氣的環境を創出する空気層をカソードとして利用する人工湿地-微生物燃料電池に、空気層を

導入すれば、人工湿地-微生物燃料電池の多層化が可能となる。そこで、空気層の導入により、世界初のスタック化となる多層型的人工湿地-微生物燃料電池を確立することを本研究の第三の目的とした。

### 3. 研究の方法

(1) ろ床内部に空気層を導入する手法の提案とその効果の実証

ろ床内部に空気層を設ける方法として、本研究では、両端を大気に開放した有孔管をろ床内に敷き詰めて空気層とすることを試みた。空気層を導入した 4 層のガラス造粒砂層を組み合わせて作製した人工湿地実験装置の概要を図-1 に示す。空気層を導入して多層化した人工湿地の好氣的浄化性能を確認するため、高濃度のアンモニア態窒素を含むメタン発酵消化液を流入させる浄化試験を行った。

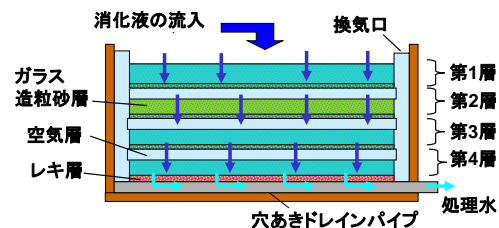


図-1 空気層を導入した4層のガラス造粒砂層を組み合わせて作製した人工湿地実験装置の概要

(2) ろ床厚及びろ材の粒径によるろ床内部の好氣・嫌氣的環境創出特性の検討

ろ床厚による好氣・嫌氣的環境創出特性を検討するため、ろ床内の異なる深さに 17 本の酸化還元電位(Eh)測定用白金電極を取り付けた円筒カラム実験装置を製作し、所定濃度に希釈した下水汚泥を投入して 17 か所の異なる深さの Eh 値を測定することで酸化・還元環境の比率を評価した。ろ材粒径による好氣・嫌氣的環境創出特性を検討するため、3 種類の異なる粒径を有する瀘材(礫、砂利、砂)を用いた円筒カラム実験装置を製作し、得られる酸化・還元環境の比率を比較した。

(3) スタック化に適したろ床厚の検討と人工湿地-微生物燃料電池のスタック化

実際の人工湿地を想定して作製したラボスケールの人工湿地-微生物燃料電池の概要図を図-2 に示す。電極は導電性の高いカーボンフェルトを使用し、好氣環境が必要なカソードを上部、嫌氣環境が必要なアノードを下部とした。絶縁ろ材にはリサイクルガラスを用いた。導線と電極の接続には、腐食の恐れのない炭素棒を使用し、抵抗 10kΩ を介してデータロガーに接続して発電量を測定した。人工湿地-微生物燃料電池のスタック化に向け、ろ材厚が発電性能に及ぼす影響を明らかにするため、絶縁ろ材の厚さが異なる 3 系列の人工湿地-微生物燃料電池実験装置(ろ材厚 1,4,7cm)を準備し、pH7、COD 濃度

500mg/Lの人工廃水を投入して発電性能を比較した。

絶縁ろ材の厚さによる発電性能の違いを考慮し、絶縁ろ材厚を5cmとした2台の人工湿地-微生物燃料電池を連結することで、2層スタック化人工湿地-微生物燃料電池を試作した。その発電性能を評価するため、人工排水300mlを投入し、単独の人工湿地-微生物燃料電池と2層スタック化人工湿地-微生物燃料電池の発電特性を比較した。

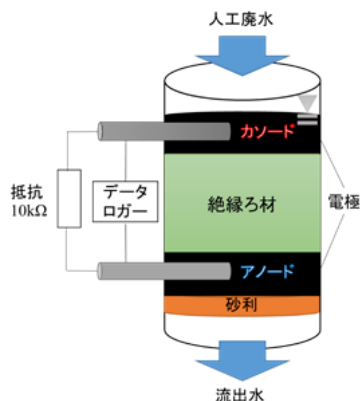


図-2 ラボスケールの人工湿地-微生物燃料電池の概要図

#### 4. 研究成果

(1)ろ床内部に空気層を導入する手法の提案とその効果の実証

両端を大気に開放した有孔管をろ床内に敷き詰めた層からなる空気層と4層のガラス造粒砂層を組み合わせることで作製した人工湿地実験装置3台を組み合わせ、高濃度のアンモニア態窒素を含むメタン発酵消化液を流入させる浄化試験を行った結果、図-3に示すように、好氣的な硝化反応が促進されることを確認することができた。これにより、地下に好氣的環境を創出するための普遍的な手法として、ろ床内部に空気層を導入する手法が十分に有効であることを実証することができた。

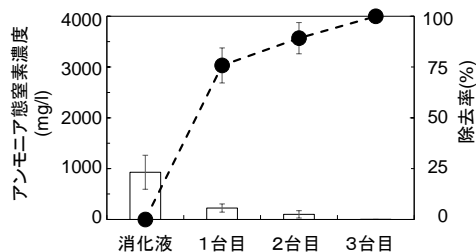


図-3 空気層を導入した3台の人工湿地実験装置によるアンモニア態窒素の除去過程

(2)ろ床厚及びろ材の粒径によるろ床内部の好気・嫌氣的環境創出特性の検討

図-4に礫をろ材とした条件におけるろ床内の酸化・還元環境とろ床厚の関係を示す。大気からの酸素供給が追いつかず酸素が不足して還元環境になるろ床厚が、下水汚泥濃

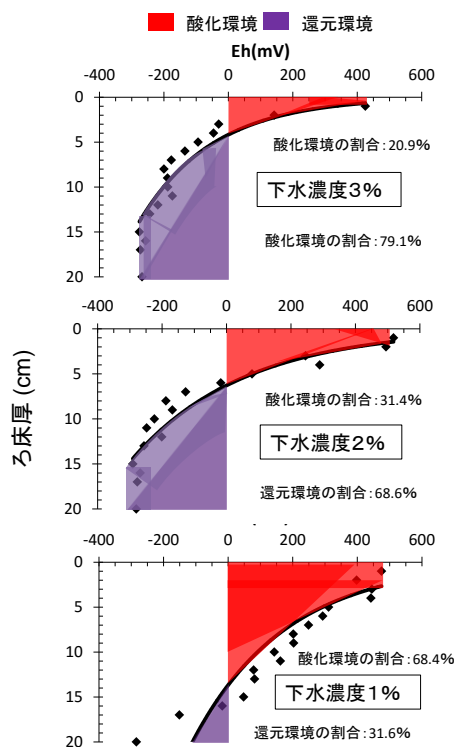


図-4 礫をろ材とした条件におけるろ床内の酸化・還元環境とろ床厚の関係

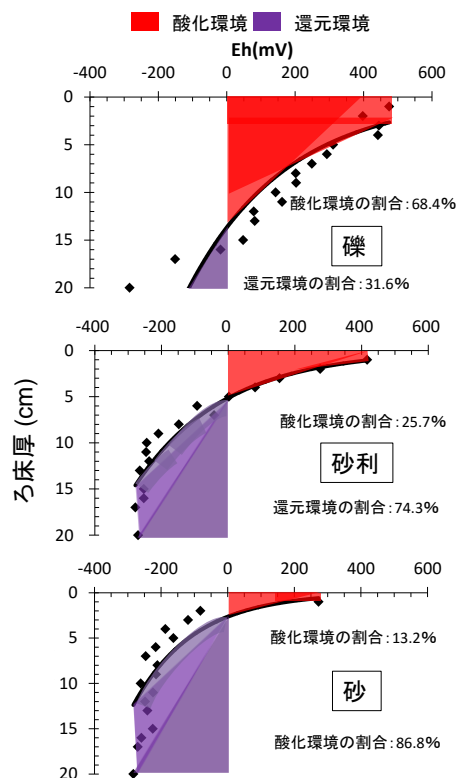


図-5 3種類の粒径の異なるろ材のろ床内の酸化・還元環境とろ床厚の関係

度によって異なることを示すことができた。また、図-4に示されるように、人工湿地のろ床浅部には好気環境が、深部には嫌気環境が存在し得ることを実証することができた。

図-5に3種類のろ材で得られたろ床内の酸化・還元環境とろ床厚の関係と比較した結果

を示す。この結果より、ろ材の粒径が小さいほど酸化環境から還元環境になるろ床厚が薄くなることを確認することができた。さらに、3種類の異なる粒径を有する濾材(礫、砂利、砂)で得られる酸化・還元環境の比率を明らかにすることができた。

### (3) スタック化に適したろ床厚の検討と人工湿地-微生物燃料電池のスタック化

異なるろ材厚(ろ材厚1,4,7cmの3条件)の人工湿地-微生物燃料電池で得られた発電性能の比較を図-6に示す。この結果に示されるように、ろ材厚は厚い方が良好な発電性能が得られることが明らかとなった。ろ材厚が薄いとアノードが嫌気的環境になりやすく、嫌気環境で生育・増殖する電流生産微生物に適した環境とならないことが示唆された。ろ材厚7cmの条件で得られた電力密度積算値および発電効率は、それぞれ7010mWh/m<sup>2</sup>および2337mWh/m<sup>2</sup>であった。しかし、ろ材厚4cmと7cmの電力密度積算値の差は8%に過ぎず、燃料である合成排水の投入回数1回あたりの発電効率で比較しても同様の僅かな差であった。ろ材厚が薄いほど人工湿地-微生物燃料電池のスタック化が容易になること、ろ材厚7cmと4cmの発電性能の差が僅かであることの2点を考慮すると、人工湿地-微生物燃料電池のスタック化におけるろ材厚は、4cmの方が有効であると考えられた。

この結果を参考として、絶縁ろ材厚を5cmとした2層スタック化人工湿地-微生物燃料電池を試作し、その性能を調べたところ、得られた出力5370mW/m<sup>2</sup>は、1層の人工湿地-微生物燃料電池の合計出力である5700mW/m<sup>2</sup>(3220+2480=5700)とほぼ一致した。この結果により、スタック化による電圧降下はほぼ無かったことを確認することができた。本研究は、人工湿地-微生物燃料電池のスタック化の事例として世界で初めての試みである。

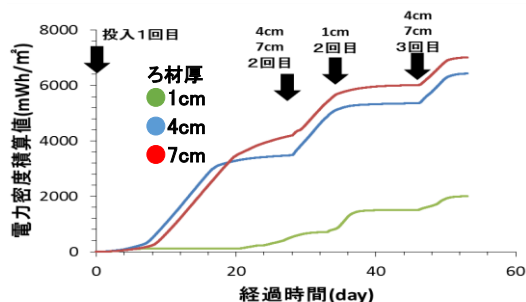


図-6 異なるろ材厚(ろ材厚1,4,7cmの3条件)の人工湿地-微生物燃料電池で得られた発電性能の比較

### (4) 人工湿地-微生物燃料電池で見出された防虫効果

本研究の一環として行った下水汚泥を燃料源とした人工湿地-微生物燃料電池の実験において、開回路(発電なし)では下水汚泥からチョウバエが発生したのに対し、閉回

路(発電あり)ではチョウバエの発生が抑制される現象が見出された。本現象は予期していなかったものであり、その再現性に疑問があったことから、同様の実験を繰り返し行い、再現性を確認した。電気による害虫駆除方法として、1,000V以上の高電圧で感電死させる電撃殺虫機が知られているが、本実験で発生する電圧は1V以下であり、高電圧による電気ショックで感電死させる手法とは全く異なる防虫機構が働いていることが考えられた。そのような微弱な電気で害虫の発生を抑制する手法を確立することができれば、薬剤に頼らず害虫を駆除する道が切り開かれる。そのような観点により、本研究で偶然に見出されたチョウバエの発生を抑制する現象は新しい防虫手法として実用的であると考えられ、微弱な電気で害虫の発生を抑制する新しい手法として特許出願した。

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2件)

①中野和典、大附遼太郎、橋本 純、花壇型人工湿地の開発 ~污水处理施設のグリーンインフラ化を目指して~、再生と利用、査読無、Vol. 42, No. 157, pp. 121-127(2018)

②中野和典、大附遼太郎、中村和徳、橋本 純、花壇型人工湿地による学生食堂排水の処理、環境技術、査読無 Vol. 46, No. 11, pp. 588-595(2017)

[学会発表] (計 12件)

①山本 翔、泉井孝太、中村和徳、中野和典、pHが人工湿地-微生物燃料電池に与える影響、第52回日本水環境学会年会、2018年

②泉井孝太、山本 翔、中村和徳、中野和典、pHとろ材厚が人工湿地-微生物燃料電池に及ぼす影響、平成29年度土木学会東北支部技術研究発表会、2018年

③浅見雄紀、山本 翔、中村和徳、中野和典、堆積物燃料電池が下水汚泥からのチョウバエの発生に及ぼす効果、平成29年度土木学会東北支部技術研究発表会、2018年

④浅見雄紀、山本 翔、中野和典、堆積物燃料電池が下水汚泥からのチョウバエの発生に及ぼす影響、第10回廃棄物資源循環学会東北支部・第5回日本水環境学会東北支部合同研究発表会、2018年

⑤望月裕仁、谷口崇至、中村和徳、中野和典、ろ材粒径と深さがろ床内の酸化・還元環境に及ぼす影響、平成28年度土木学会東北支部技術研究発表会、2017年

⑥山本 翔、中村和徳、谷口崇至、中野和典、人工湿地-微生物燃料電池の濾材が発電量に

与える影響、第 51 回日本水環境学会年会、  
2017 年

日本大学・工学部・教授  
研究者番号：80713338

⑦山本 翔、泉井孝太、中村和徳、渡部仁貴、中野和典、pH が人工湿地－微生物燃料電池に及ぼす影響、第 60 回日本大学工学部学術研究報告会、2017 年

⑧高野隆盛、中野和典、渡部仁貴、バイオ燃料電池電極距離の比較検討、平成 28 年東北地区若手研究者研究発表会「音・光・電波・エネルギー・システムとその応用」、2016 年

⑨山田健太、中村和徳、中野和典、微生物燃料電池を人工湿地に適用するための濾材の多面的評価、平成 27 年度土木学会東北支部技術研究発表会、2016 年

⑩山本 翔、中村和徳、中野和典、電極に活性炭を用いた人工湿地－微生物燃料電池の構築と発電特性、平成 27 年度土木学会東北支部技術研究発表会、2016 年

⑪山本 翔、渡部仁貴、中野和典、人工湿地－微生物燃料電池システムの構築、第 59 回日本大学工学部学術研究報告会、2016 年

⑫渡部仁貴、千葉玲一、中野和典、高野隆盛、木質バイオマス燃料と畜産排水バイオ燃料電池特性について、第 59 回日本大学工学部学術研究報告会、2016 年

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 1 件）

名称：生物発生抑制装置

発明者：中野和典

権利者：日本大学

種類：特許

番号：特許願 2018-005824 号

出願年月日：平成 30 年 1 月 17 日

国内外の別：国内

○取得状況（計 0 件）

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中野 和典 (NAKAN0, Kazunori)

日本大学・工学部・教授

研究者番号：30292519

### (2) 研究分担者

相澤 朋子 (AIZAWA, Tomoko)

日本大学・生物資源科学部・助教

研究者番号：60398849

渡部 仁貴 (WATANABE, Kimitaka)