

〈研究発表〉

堆積物微生物燃料電池の下水道施設への適用に関する基礎的研究

福嶋 俊 貴¹⁾, 中 村 俊 男²⁾¹⁾メタウォーター(株) 事業戦略本部 技術戦略部

(〒 101-0041 東京都千代田区神田須田町 1-25 JR 神田万世橋ビル E-mail: fukushima-toshiki@metawater.co.jp)

²⁾東京都下水道サービス(株) 施設管理部 保全管理課 (元技術部技術開発課所属)

(〒 100-0004 東京都千代田区大手町二丁目 6 番 2 号 日本ビル内私書箱 164 号 E-mail: toshio-nakamura@tgs-sw.co.jp)

概 要

堆積物微生物燃料電池の原理を下水道施設(重力濃縮槽や汚泥貯留槽)へ適用した下水汚泥からの発電について小型実験装置を使用して検討した。集約汚泥処理施設の汚泥を対象にバッチ・セミバッチ実験を行い発電特性や汚泥分解率, 汚泥改質(脱水性向上)を評価した。バッチ実験の繰り返しにより下水汚泥から安定して発電することが確認でき, 汚泥分解率も 20% 以上が期待できた。汚泥を間欠的に投入するセミバッチ実験により, 重力濃縮槽では発電レベルを維持できることがわかった。上澄み液の溶解性有機物(COD・BOD)はともに実験終了時には減少しており, 汚泥分解による難分解性有機物の生成は無いと考えられた。また, 発電の有無による比較では, 発電による汚泥改質効果が見られ脱水性の向上が期待できた。

キーワード: 堆積物微生物燃料電池, 下水汚泥, 発電, 汚泥減容, 汚泥改質

1. はじめに

燃料電池の負極側反応槽に微生物細胞を組み込んだ微生物燃料電池(MFC: Microbial Fuel Cell)は, 種々のバイオマス燃料源に, 微生物が持つ有機物の分解代謝作用を利用してバイオマス中の有機物の化学エネルギーを電気エネルギーへと直接変換するエネルギー変換器である。このため後処理におけるエネルギーロスがなくなり高いエネルギー回収率が期待できる。微生物燃料電池の原理を Fig. 1 に示す¹⁾。コストなどの面から実用化 MFC のエネルギー源となる有機物は廃棄物系バイオマスや排水中の汚濁物質が候補として考えられている。

廃水処理と微生物燃料電池をうまく組み合わせると微生物の成長に利用されるはずの有機物エネルギーの一部が電気エネルギーとして回収されるため従来の廃水処理プロセスよりも余剰汚泥を削減することができる。このように廃水処理を行いながら電気エネルギーを回収し余剰汚泥も削減する一石三鳥の次世代型廃水処理技術に繋がる²⁾。

そのひとつの方式である堆積物微生物燃料電池³⁾の原理を Fig. 2 に示すが, プロトン透過膜を使用しないシンプルな構造であり田んぼ発電として応用が検討されている。同様なアプローチを重力濃縮槽への適用を考え, 実際の下水汚泥を用いて発電・汚泥分解等について基礎的な実験を行ったので報告する。

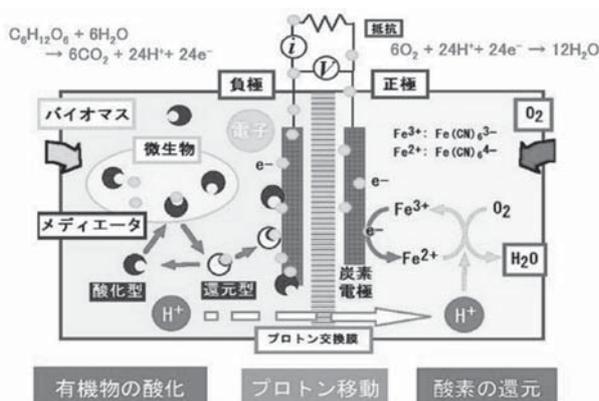


Fig. 1: The mechanism of Microbial Fuel Cell

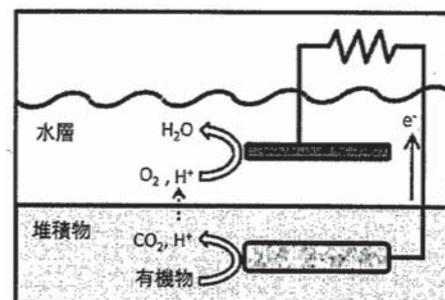


Fig. 2 The mechanism of Sediment Microbial Fuel Cell

2. 実験装置

Fig. 3 に示す装置を用いて実験を行った。電極はドーナツ状リングではさんだものを支え柱にセットして、沈殿した汚泥部分にアノード電極気液境界面にカソード電極を設置した。電極はアノード電極、カソード電極ともカーボンクロス（バラード社）を使用した。また両電極とも使用サイズを 200 cm^2 とし、外部抵抗は $300\ \Omega$ とした。電圧及び水温をデータロガーで測定した。

使用した汚泥は、汚泥集約汚泥プラントの重力濃縮槽引抜汚泥を水道水で4倍希釈し、全量を5Lとして用いた。実験の実施期間は、発電が安定する期間までとし、おおむね1ヶ月程度実施した。実験の前後でTSとVSを測定して汚泥分解率を計算し、上澄み液の溶解性CODcrとBODも測定した。

Fig. 4 には堆積物微生物燃料電池実験装置を示す。4台の実験装置を使用し、2台ずつと同じ条件とした実験とした（結果では系と表現）。

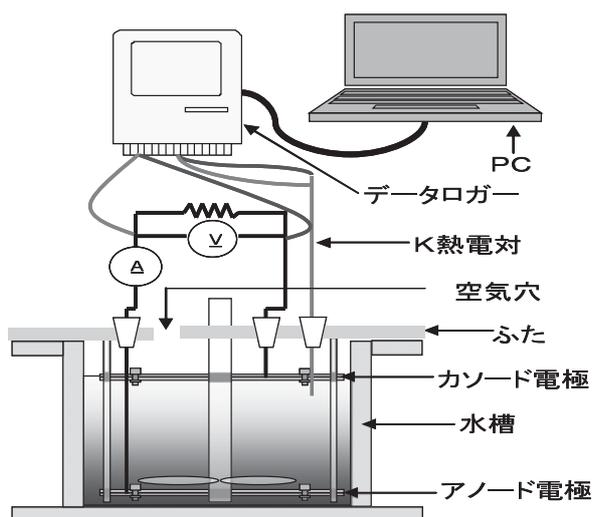


Fig. 3: The Experimental Device

3. 実験結果

3.1 バッチ実験（発電の確認）

Fig. 5 に RUN1 での重力濃縮汚泥からの発生電流の経時変化を示す。左縦軸は電流、右縦軸は温度、横軸は経過日数を表す。3系は実験開始から7日後頃に立ち上がり始め、試験開始から20日から30日あたりでピークをむかえた。これより重力濃縮汚泥から発電できることが確認できた。その後、電流値は徐々に低下していったが、この理由として汚泥に含まれる有機物が減少したことが考えられる。水温は、全期間を通しておおむね $20\sim 25^\circ\text{C}$ に保たれた。途中から1日あたりの水温変動が大きくなったのは、室内の空調が日中時のみしか使用されなかったためである。なお、実験の経過とともに上澄み液が透明になった。実験終了時（47日目）には、3系ではTS減少率が25.4%、VS減少率が36.5%、4系ではTS減少率が26.1%、VS減少率が36.8%であった。

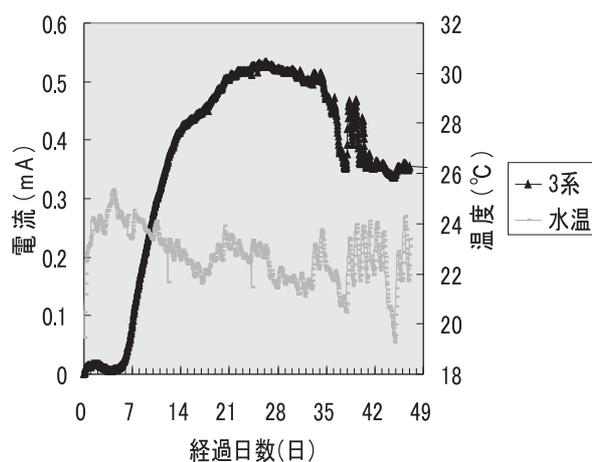


Fig. 5: The Result of Electric Current (Run1)

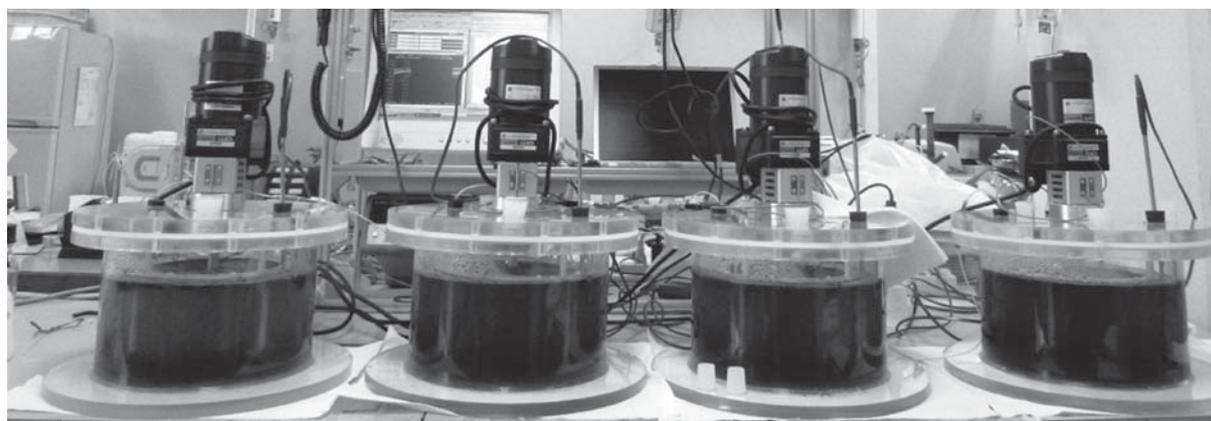


Fig. 4: The Photograph of Experimental Device

3.2 バッチ実験（発電の効果）

汚泥減少の効果が発電によるものか確認するために、外部回路を接続する（閉回路；発電有）と外部回路を接続しない（開回路；発電無）2つの装置により実験を行った。**Fig. 6**にRUN2における発生電流の経時変化を示す。発生電流は、実験開始から12日あたりから立ち上がり始め、実験終了時の41日目まで上昇した。

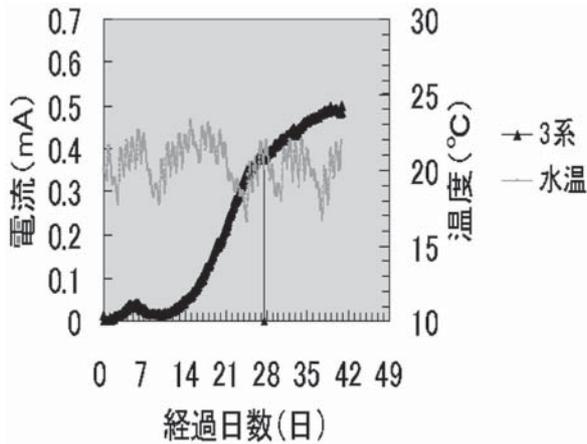


Fig. 6: The Result of Electric Current (Run2)

Fig. 7に1系と3系それぞれの実験前後の汚泥のTSとVSを示す。1系（開回路）ではTS減少率が18.5%、VS減少率が24.6%、3系（閉回路）ではTS減少率が23.8%、VS減少率が29.5%であった。TS減少率を比較すると、開回路に比べて閉回路は1.3倍高くなった。同様にVS減少率は1.2倍高くなった。したがって、汚泥からの電流の取り出しによって、より多く汚泥が分解されたことが確認できた。

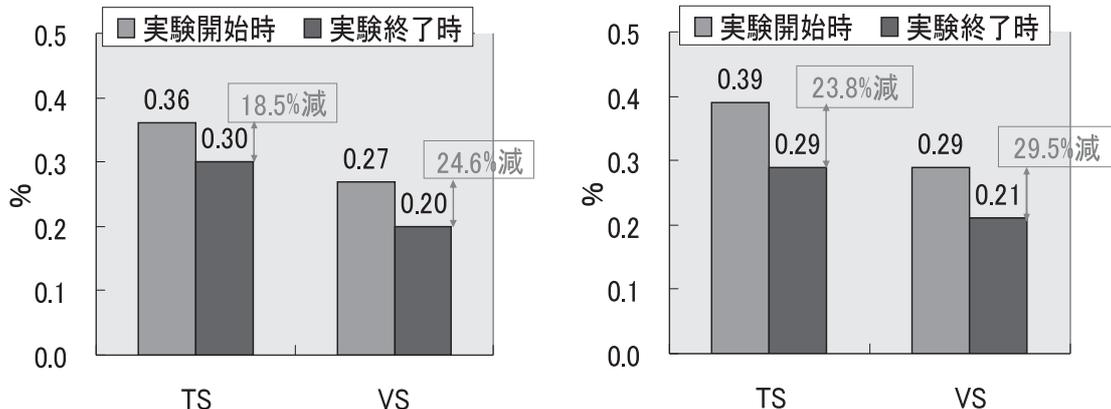


Fig. 7: The Result of Sludge Resolution (Run2)

実験の前後に上澄み液の有機物（COD・BOD）を測定した結果、3系（閉回路）では実験前CODが1,100 mg/Lであったが実験後は220 mg/Lになり実験前後で80%減少した（BODは750 mg/Lであったが実験後は100 mg/Lになり実験前後で87%減少した）。この結果より、汚泥分解に伴う溶解性有機物の増加はなく、返流水への悪影響は及ぼさないと考えられた。

実験の進行に伴い上澄み液が透明になるのみでなく、汚泥の色も黒色から茶褐色への変化していた。このことが汚泥質の向上（脱水性の向上）に繋がると期待されたので、ろ紙ろ過量を測定した⁴⁾。結果を**Fig. 8**に実験前の濃縮汚泥の結果と合わせて示す。実験前汚泥のろ紙ろ過量は平均2.1 mL、1系（開回路）終了時のそれは平均2.0 mLであり、ほとんど差はなかった。一方で、3系（閉回路；発電有）終了時のろ紙ろ過量は2.6 mLで、実験前及び1系終了時汚泥と比べると1.2~1.3倍多かった。このことより、発電（汚泥からの電流の取り出し）によって、汚泥の脱水性が向上することが確認できた。

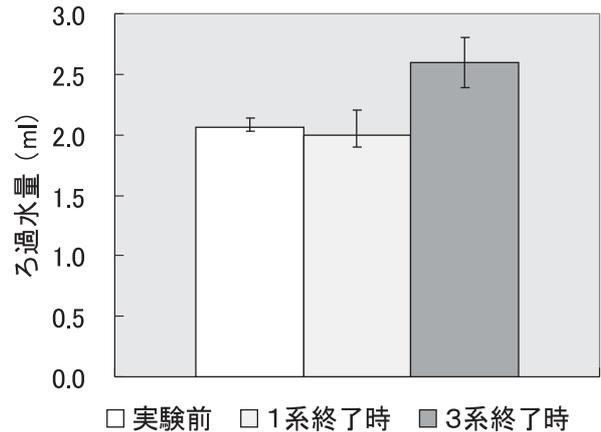


Fig. 8: The Result of Sludge Dehydration (Run2)

3.3 セミバッチ実験(汚泥の間欠投入)

実際の重力濃縮槽等への適用を想定し、汚泥を間欠投入するセミバッチ実験を実施した。間欠投入の手順としては電流が低下し始めたタイミングで全槽を高速攪拌することにより均質化した後に、1/4を取り出し4倍希釈した重力濃縮汚泥1/4と入れ替えた。

発電電流の結果を Fig. 9 に示す。A 期間において、発生電流は実験開始4日目あたりから立ち上がり始め、1回目の汚泥入替時である26日目まで上昇し続け、およそ0.5 mA 程度に達した。期間 B では、汚泥入替直後に一旦電流は低下したものの、その後は緩やかに入替前と同程度まで回復した。しかし実験開始から40日を過ぎたあたりから電流は低下した。期間 D と期間 E でも、汚泥入替直後は期間 B、期間 C と同様に電流は低下するものの、その後低下することなく上昇した。全期間を通して、電流は変動しながらも発生し続けた。

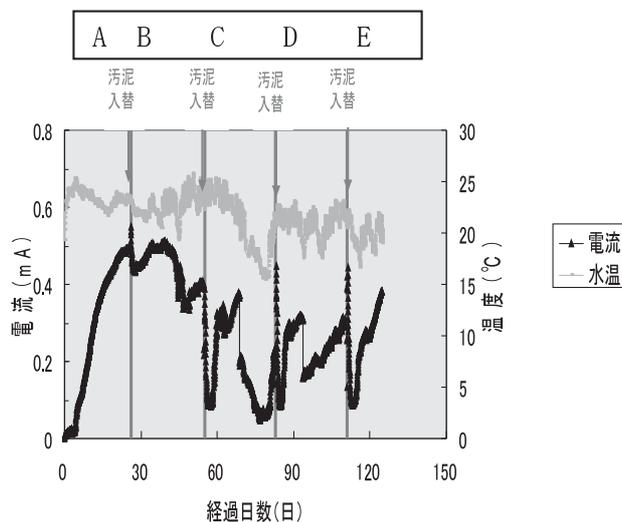


Fig. 9: The Result of Electric Current (RUN3)

B 期間における汚泥入替直後の発電電流の低下の原因としては、今回は入替前後での汚泥分解率把握のためのサンプリングのために全槽を高速で攪拌したために電極に付着していた発電微生物の剥離が考えられた。通常の運転では沈降分離した状態での入替となるので、このような影響は無くなるものと考えている。また、

C/D 期間での大幅な低下には投入した汚泥の pH が 5 付近まで低下していた影響と思われる(採取汚泥を長期間冷蔵保管していたため)。

なお、汚泥入替の繰り返しにより、遅分解汚泥の割合が高くなる(初期 TS・VS 濃度は A 期間に一致せず低下する)ため、TS・VS 率は実験の繰り返しにより低下する傾向にあった。VS 分解率では A 期間の 31.5% が最終の E 期間では 16.0% と半分近くにまで低下していた。ただし、上澄みの COD_{Cr} は減少し、難分解性有機物の蓄積は見られなかった。

4. おわりに

堆積物微生物燃料電池の原理を下水処理の汚泥槽への適用を考え、濃縮汚泥を対象にバッチ・セミバッチ実験を行い、発電と汚泥分解、汚泥改質の観点から検討した。結果をまとめると以下ようになった。

- ① バッチ実験により下水汚泥から発電できることが確認でき、逆流負荷を増加させることなく汚泥分解量も増加することが確認できた。さらに、分解汚泥は脱水性も向上することが期待された。
- ② セミバッチ実験により汚泥を間欠投入すると入れ替え量が少ないために徐々に発電電流は低下するものの、長期間発電が継続できることが確認できた。

なお、本研究は東京都下水道サービス(株)とメタウォーター(株)の共同研究の成果をまとめたものである。汚泥サンプリング等でお世話になった事業所の皆様に感謝します。また、実験は富士電機(株)の協力で実施した。

参考文献

- 1) 柿園俊英：微生物燃料電池 (MFC) —— 水処理汚泥の電力変換 ——, 水と水技術, No. 7, pp. 94-97 (2010)
- 2) 岡部 聡：微生物燃料電池；一石三鳥の次世代型排水処理技術, 水環境学会誌, Vol. 33(A), No. 11, p. 347 (2010)
- 3) 産業調査会：実用水の処理・活用大事典, p. 510 (2011)
- 4) 日本水環境学会・膜を利用した水処理技術研究委員会編：膜を利用した水再生 —— 水循環の時代 ——, p. 72 (2008)