

嫌気性処理水に含まれる溶存メタンのガス化回収

長岡技術科学大学 (学) 大河原 正博 西山桂太 (正) 山口 隆司、国立環境研究所 (正) 珠坪 一晃
(独) 海洋研究開発機構 井町 寛之、東北大学 (正) 原田 秀樹、広島大学 (正) 大橋 晶良

1. はじめに

下水のような低濃度有機性廃水をメタン発酵で処理する場合、生成されたメタンの一部が処理水に溶存し、いずれは大気に気散される。その結果、エネルギーとして利用可能なメタンの回収量が減少するだけでなく、溶存メタンが大気に気散することで地球温暖化が促進されてしまう。メタンの温室効果は二酸化炭素の約 20 倍と高く、メタン発酵処理水にはかなりの量の溶存メタンが含まれているため、溶存メタンを大気に気散させないための対策が急務である。

一方、メタン発酵槽の後段処理システムとして開発された懸垂型スポンジろ床 (Down-flow hanging sponge : DHS) は、担体としてポリウレタンスポンジを用いたろ床型生物膜処理法であり、曝気動力無しに卓越した有機物除去性能を実現した。この DHS における溶存メタンの消長を調査した結果、溶存メタンは気相と液相間での物質移動作用 (気液平衡) により直ちに大気に気散しており、DHS の優れた気液接触効率を利用して溶存メタンをガス化回収出来る可能性が示唆された。

そこで本研究では、新たに開発した密閉型 DHS を用いた溶存メタン含有排水 (下水のメタン発酵処理水) の連続処理実験を行い、溶存メタンのガス化回収能力を評価した。

2. 実験装置及び溶存メタン回収原理

溶存メタン回収 DHS の概略図及びメタンガス回収原理を図 1 に示した。DHS は装置容積 80 L、高さ 2 m、断面 0.2 m × 0.2 m の直方体の密閉容器に、ろ材としてポリウレタン製のスポンジを懸垂する形で 35 L 充填した (充填率 44%)。

溶存メタン回収原理は以下の通りである。密閉型 DHS の上部よりメタン発酵処理水を流下させ、下部より空気を供給し、気液平衡により溶存メタンはガス化して気相に放出される。この際、気相中のメタンガス濃度は容器内を上昇するに

従って高濃度になるため、上部より高濃度メタン含有ガスが回収できるしくみである。

3. 実験方法

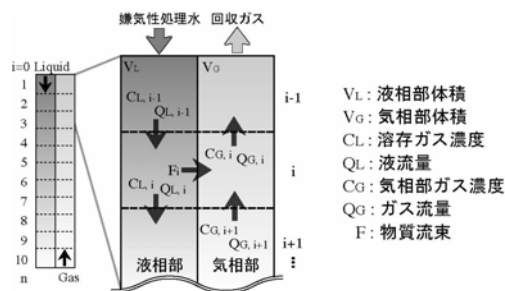
3-1. 溶存メタンの連続回収実験

被処理対象廃水として、下水のメタン発酵処理水を用いた。温度制御は行わず、常温条件下 (10-27°C) で連続実験を行った。DHS の HRT は、実験期間を通じて 4.6 時間 (スポンジ容積基準) と一定とした。DHS による溶存メタン回収性能を調査するため、流入・流出の溶存メタン濃度、DHS の回収ガス量・組成等の分析を定期的に行った。溶存メタン濃度は、ヘッドスペース GC 法によって測定した。

3-2. 溶存メタン回収シミュレーションモデル

DHS 内におけるメタン発酵処理水の溶存メタンのガス化現象は、気相と液相間での物質移動作用 (気液平衡) に支配されるが、その際の拡散に関する情報を得ることは回収装置を設計・運転を最適化する上で重要である。そこで、溶存メタン回収 DHS リアクター内の物質移動現象に関するシミュレーションモデルを構築し、最適な DHS 設計条件及び運転条件を検討した。

DHS 内での溶存メタンの物質移動現象を数学的モデル化したものを図 2 に示す。なお、総括物質移動係数 KLa は、DHS 内での物質移動気散量の把握実験より算出した。



$$\begin{aligned} \text{物質流束} \quad F_i &= K_{La} (C_{L,i} - C'_{G,i}) \\ \text{ガス流量} \quad Q_{G,i} &= Q_{G,i+1} + \sum_j F_{ij} \quad (j = CH_4, N_2, C_2, O_2) \\ \text{溶存ガス濃度} \quad V_L \frac{dC_{L,i}}{dt} &= Q_L C_{L,i} - Q_L C_{L,i+1} - F_i \\ \text{気相中ガス濃度} \quad V_G \frac{dC_{G,i}}{dt} &= Q_{G,i+1} C_{G,i+1} - Q_G C_{G,i} + F_i \end{aligned}$$

図 2 溶存メタン回収シミュレーションモデル

3-3. DHS 担体汚泥の微生物群集解析

密閉型 DHS における生物学的なメタン酸化の有無を調査するため、分子生物学的手法を用いて 16S rRNA 遺伝子を標

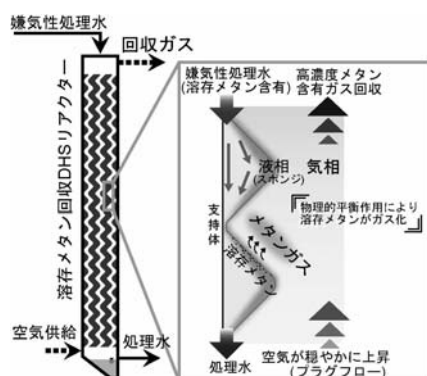


図 1 密閉型 DHS 概要及び溶存メタン回収原理

的とした真性細菌 (Domain Bacteria) に関する微生物群集の解析を行った。汚泥試料は DHS 運転開始後 183 日目のものを使用し、DNA 抽出はビーズビーター法を用いて行った。EUB338F-mix と UNIV1500R のプライマーセットを用いて 16S rRNA 遺伝子の特異的に PCR 増幅し、クローン解析を行った。

4. 実験結果

4-1. 溶存メタンの連続回収実験

図3に実験期間中の外気温、流入水と流出水の溶存メタン濃度、及び溶存メタン回収率と回収メタンガス濃度の経日変化を示した。

実験期間前半は運転を継続するに伴い外気温は上昇し、メタン発酵槽のメタン生成量が増加したことにより、DHS 内に流入する溶存メタンの濃度が高まった。DHS への空気供給量が 73 L/day の期間においては流入溶存メタン濃度が高くなる一方で、処理水中の溶存メタン濃度の増加は見られず、溶存メタン回収率 90%以上を維持することが出来た。この時の回収メタン濃度は、平均 4.2%であった。

回収したメタンの燃焼利用を目指し、空気供給量を 35 L/day に低下させたところ、回収メタンガス濃度は 35%に達した。別途、回収メタンガスの燃焼実験を行ったところ、メタンガス濃度が 30%以上になると燃焼可能である事が確認できた。しかし、回収メタンガス濃度を燃焼可能な濃度で維持しようとする、溶存メタン回収率が低下するトレードオフの関係が見られた。

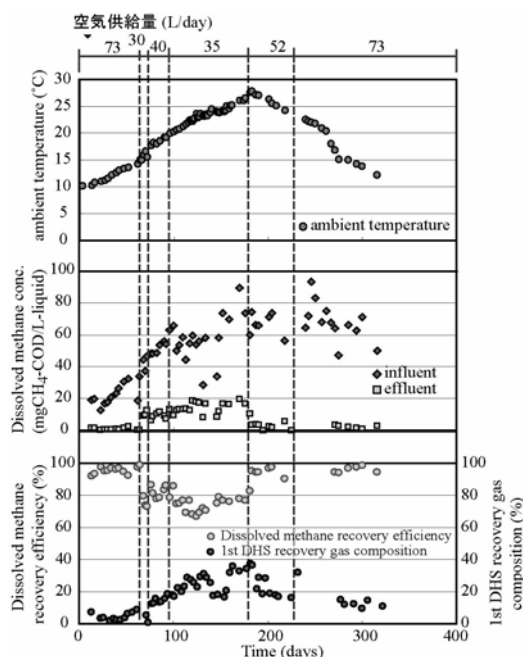


図3 溶存メタンの連続回収実験結果

4-2. 溶存メタン回収シミュレーションモデル

メタン発酵槽で下水を処理した際に処理水に含まれる溶存メタン濃度 (1.153 mmol/L) を想定し、DHS の装置容積 80 L、スポンジ充填率 50%とした場合の溶存メタン回収シミュレーションを行った。

HRT が 3.8 時間の場合、空気供給量によって回収率に差があったものの、DHS 装置の高さを増すことで回収率が向上す

る傾向が見られた (図 4、左)。次に、回収メタンガスの燃焼実験により、メタン濃度が 30%以上だと燃焼可能である事が確認できたので、回収メタン濃度を 30%に維持するための空気供給量のシミュレーションを行った。その結果、回収メタンガス濃度 30%と溶存メタン回収率 90%を同時に達成するためには、DHS 高さが 4.0 m の場合で HRT が 10 時間必要となることが分かった (図 4、右)。

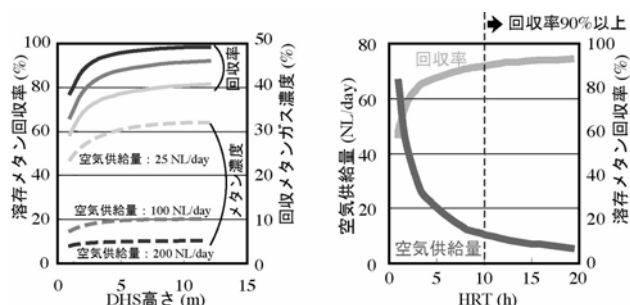


図4 シミュレーション結果 (左 : HRT3.8 時間の場合の溶存メタン回収率と回収メタンガス濃度、右 : 回収メタンガスを 30%にする場合の空気供給量と溶存メタン回収率)

4-3. DHS 担体汚泥の微生物群集解析

図5に微生物群集解析の結果を示した。下水を処理しているため、その多様性は様々なものであった。また、分離培養されていないサンプルが大部分を占めた。リアクターの下部に行くに従い、*Thiomonas* や *Thiobacillus* の硫黄酸化細菌が多く検出されていることが確認できた。リアクター内のスポンジは運転を継続するに従い、また下部に行くに従い硫黄の堆積物と思われるものが蓄積していることが観察できた。最終的に 230 のクローンを得たが、メタン酸化細菌は検出されなかったため、生物学的なメタン酸化は優位でないことが示唆された。

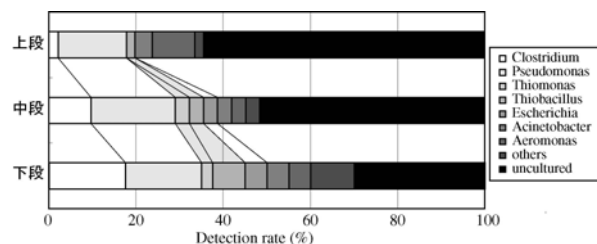


図5 微生物群集解析結果

5. 総括

溶存メタン回収 DHS による溶存メタンの回収連続実験結果とシミュレーション結果より、メタン発酵処理水の溶存メタンはガス化回収可能であり、運転条件や装置の最適化により、回収ガス中のメタンが燃焼可能な濃度を維持しつつ、高い溶存メタン回収率が得られることが分かった。また、微生物群集解析の結果、メタン酸化細菌の検出はされなかったことにより、生物学的なメタンの利用は殆ど生じていないと考えられる。

謝辞：本研究の一部は、NEDO 技術開発機構の助成を受けて実施した。ここに記して感謝の意を表する。