DHS リアクターの完全硝化性能と担体内部の微生物群集構造の評価

長岡技術科学大学大学院　非会員　○樺澤壮太
正会員　渡利高大　幡本将史　山口隆司

1. はじめに

標準活性汚泥法は有機物を低濃度まで除去が可能であり，下水処理に世界的に広く利用されている．しかしながら，不十分な栄養塩除去，曝気のための電力消費や多量の余剰汚泥の発生などの問題を抱えており，省エネルギーかつコンパクトな水処理プロセスが求められている．Downflow Hanging Sponge（DHS）リアクターは，スポンジを微生物保持担体として反応槽に敷き詰めた散水ろ床法の一つである．本法は，曝気が不要であり，高濃度の汚泥保持が可能であることが特徴である．実規模 DHS リアクターを用いた下水処理実験は，国内外で行われており，高い有機物及び窒素除去性能が報告されている [1]．

DHS は外部と内部でそれぞれ好気及び嫌気環境を形成され，様々な生物反応が実現可能である．近年，タイ· コンケン市の下水処理場に設置された DHS リアクターで，微好気環境で成育する完全硝化（Comammox）細菌が検出され，高速硝化に寄与した可能性が示唆された [2]．しかしながら，実際にスポンジの外層部を除いた内層部に存在する微生物を解析した事例はなく，内層部の微好気及び嫌気性細菌の存在は明らかにされていない．よって本研究では，担体内の微生物特性について明らかにすることを目的として，低酸素環境で DHS リアクターの運転を行った．

2. 実験方法

2. 1. DHS リアクター

図 1 に実験の概略図を示す．リアクターは 20 L のカラムを用い，微生物保持担体は，直径及び長さが 33 mm のポリウレタンスポンジを使用した．反応槽内に担体を 250 個充填し，総スポンジ容積を約 7 L とした．温度は 25 ℃程度に調整した室内で運転した．

表 1 にリアクターの運転条件を示す．基質の組成は，Graaf らを参考にした [3]．流入アンモニア態窒素濃度を 30 mg-N L^{-1} とし，基質の pH が 7.0-8.0 になるように KH_2PO_4 と $NaHCO_3$ を添加した．実験開始

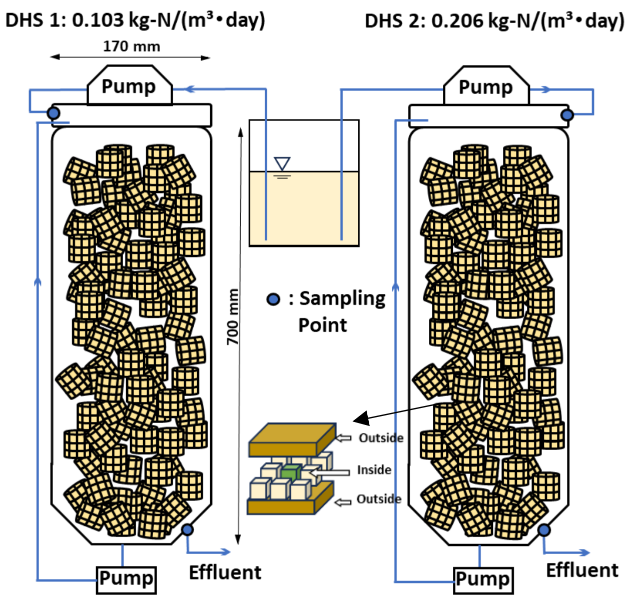

図 1　DHS リアクターの概略図

表 1　運転条件

リアクター	フェーズ	運転期間 (day)	窒素負荷 (kg-N $m^{-3}day^{-1}$)	HRT (h)	流量 (ml h^{-1})	循環流量 (ml h^{-1})
DHS 1	Phase 1	0−96	0.103	7.0	1000	0
	Phase 2	97−112	0.103	7.0	1000	500
DHS 2	Phase 1	0−96	0.206	3.5	2000	0
	Phase 2	97−112	0.206	3.5	2000	1000

日に，長岡中央浄化センターから採取した活性汚泥（19735±375 mg-MLSS L^{-1}）250 ml をスポンジと揉みこむことで植種を行った．窒素負荷は，基質流量を変えることで 0.103 kg-N m^{-3} day^{-1} 及び 0.206 kg-N m^{-3} day^{-1} として，2 つのリアクターの運転を行った．106 日以降は，リアクター内のスポンジの乾燥防止を目的として，それぞれのリアクターで処理水の半分を循環させた．

2. 2. 水質分析

サンプルは両リアクターの流入部と流出部から採取した．項目は気温，pH，水温，DO，ORP，NH_4^+-N，NO_2^--N, NO_3^--N, 溶存 N_2O-N として，分析を行った．

2. 3. 微生物群集構造解析

解析に供する汚泥サンプルは，リアクターの上部，中部，下部のスポンジ担体からそれぞれ採取した．担

体は，図 1 に示す形状に切断した後に再度充填し，スポンジの外層と内層の汚泥を区別して採取した．サンプリングは，運転開始後，35，56，77，98 日目に行った．DNA 抽出は DNeasy PowerSoil Pro Kit（QIAGEN）を用いた．得られた DNA 抽出物に対して，16S rRNA 遺伝子を対象とした Univ515F-806R のプライマーセットを用いて PCR による増幅を行った．増幅産物は QIAquick PCR Purification Kit（QIAGEN）を用いて精製した．その後，iSeq100（Illumina）により塩基配列を取得し，Qiime2 ver. 2022.8[2]で解析した．

3. 結果及び考察

3. 1 リアクター処理性能

図 2 に各リアクターの処理水の無機態窒素の経日変化を示す．Phase 1 の DHS 1，2 のアンモニア除去率は 48.0±20.0%, 33.5±19.8%, Phase 2 では 73.5±12.9%, 31.4±13.7%であった．両リアクターにおいて，3 日程度で亜硝酸，30 日程度で硝酸が検出され，硝化反応が確認された．処理水を循環させてスポンジの乾燥を防いだ Phase 2 において，DHS 1 の硝化性能の向上が確認できたが，DHS 2 では除去率は上がらなかった．このことから，スタートアップ期間において除去率を高く保つには，窒素負荷を 0.1 kg-N m^{-3} day^{-1} 程度に抑えて運転する必要があると考えられる．DHS 1 では徐々に処理水のアンモニア濃度が下がっているため，今後も継続して運転して硝化細菌の存在量を増やすことで，処理性能の向上が期待できる．

3. 2 微生物群集構造

図 3 に 63 日目に DHS 1, 2 のスポンジ担体から採取された汚泥で多く検出された上位 3 種を示す．両リアクターにおいて，*Nitrospira* 属，*Nitrosomonas* 属，脱窒菌が存在する *Rhodanobacter* 属が多く検出された．また，酸素濃度が低いスポンジの内層の方がより *Nitrospira* 属及び *Rhodanobacter* 属の相対存在量が高かった．したがって，*Nitrospira* 属である Comammox 細菌は微好気条件で増殖するため，本 DHS で検出された *Nitrospira* 属は Comammox 細菌であることが示唆された．DHS 2 において以上 3 種の種の割合が多いことは，高流量による DHS の乾燥抑制に起因すると考えられる．

4. おわりに

本研究では，DHS リアクターにより最大 74%のアンモニア除去率を達成し，担体内層で微好気性細菌及び脱窒菌の存在が確認された．今後も高速完全硝化を目指し，引き続きリアクターの運転を行う．

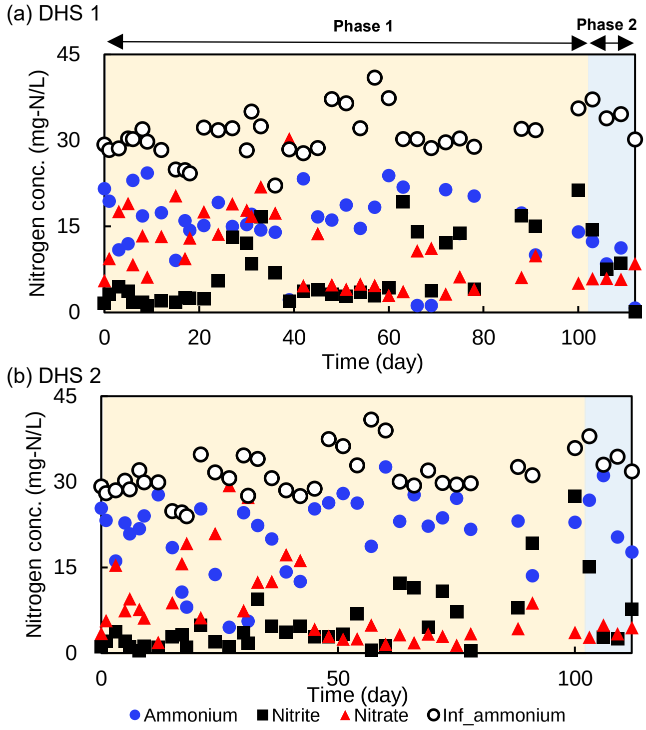

図 2　処理水の無機態窒素濃度の経日変化

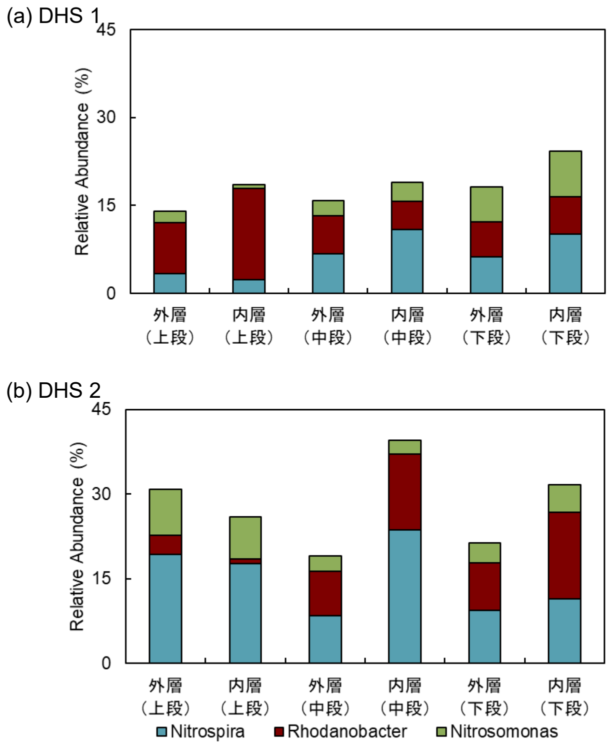

図 3　スポンジ内外層で検出された硝化・脱窒菌

参考文献

1）T. Watari, et al., 2024, Biores. Tech., 408, 131160.

2）B. Evan, et al. 2019, Nat. bio., 37 (8), 852-857.

3）V. Graaf., et al. 1996, Microbio., 142 (8), 2187-2196.