2021年度論文奨励賞（廣瀬賞）受賞

Efficient conversion of organic nitrogenous wastewater to nitrate solution driven by comammox *Nitrospira*

佐藤　由也（産業技術総合研究所　環境創生研究部門　主任研究員）

はじめに

この度は，栄誉ある論文奨励賞（廣瀬賞）を授与いただき，誠にありがとうございました。ご推薦，ご選考くださった先生方，ならびに，日本水環境学会関係者の皆様にこの場をお借りしまして心より御礼申しあげます。

受賞対象の論文は，廃棄物として捨てられていた水産加工廃水を原料として，有価物である液肥を作るというユニークな装置についてのもので，装置は共同研究者の株式会社アイエイアイ（以下IAI）により開発されたものです。また，本研究はIAIだけでなく，静岡大学，静岡工業技術研究所，沼津工業技術支援センターとの共同研究で進めたものであり，一緒に研究を進めた皆様に深く感謝いたします。

研究背景

研究対象の装置は，水産加工廃水由来のタンパク質（アミノ酸）を原料に，複数の微生物活性を利用して，水耕栽培用の液肥（高濃度の硝酸イオン水溶液）を製造するものです。本装置は長期間にわたり安定・高効率で稼働していましたが，系内にどのような微生物がいるか，そして混在する数千種のうちどの微生物が重要かといった点はわかっていませんでした。そのため，微生物反応を高活性化，もしくは抑制する条件がわからず，装置の運転条件を最適化することができませんでした。

研究結果1：菌叢の全体的な傾向

そこで我々は，1日間（4時間おき）および10週間（2週間おき）の，装置内の微生物組成（菌叢）の変遷を解析しました。装置は2つの反応槽に分かれており，反応槽Aでは原料成分のアミノ酸が分解されてアンモニアが生成する反応が，反応槽Bではアンモニアが硝化によって硝酸イオンに変換される反応が進行します。なお，それぞれの槽には微生物が付着する足場となる担体を加えていたため，反応槽AおよびBの，液相および担体の菌叢を，それぞれ次世代シークエンサーで解析しました。その結果，どちらの反応槽においても，液相の菌叢は大きく変遷しているのに対し，担体の菌叢は10週間以上安定しており，各反応槽における重要微生物が担体に集積していることが示唆されました。

研究結果2：アンモニア酸化細菌の不在

本装置で最も重要な反応は，反応槽Bにおける硝化です。反応槽Aのアンモニア化反応は様々な微生物が触媒しますが，硝化はごく限られた微生物（硝化細菌群）しか触媒できません。また硝化反応では，［i］アンモニアを亜硝酸に変換する反応（アンモニア→亜硝酸）はアンモニア酸化細菌・古細菌が，［ii］亜硝酸を硝酸に変換する反応（亜硝酸→硝酸）は亜硝酸酸化細菌が担っており，少なくとも2種の硝化細菌群（［i］および［ii］）が必要というのが定説でした。しかし，我々の解析では，硝化反応が安定的に進行している反応槽Bから，亜硝酸酸化細菌は高頻度で検出されましたが，アンモニア酸化細菌・古細菌が検出されませんでした。そのため，従来型の，［i］および［ii］の2種の硝化細菌による硝化反応は，この装置内では進行していないと考えました。

研究結果3：Comammoxによる硝化

ここまでの結果から，我々は，本装置の硝化反応はComammox（Complete ammonia oxidationの略）細菌が担っていると推察しました。Comammoxは2015年にその存在が報告された細菌で，当時は2つの研究グループから同時にNature誌に報告されたため，非常に大きな注目を集めました。この細菌は，亜硝酸酸化細菌とされてきた*Nitrospira*属に属します。しかし*Nitrospira*の一部は，亜硝酸だけでなくアンモニアまでも酸化する能力を持ち，単独で2段階の硝化反応を一挙に行うことが明らかにされました。我々の装置では硝化反応が進行しているにもかかわらずアンモニア酸化細菌が検出されておらず，*Nitrospira*のみ多く存在していたため，この細菌がComammoxであれば辻褄が合います。

水質分析の結果，硝化反応の中間体として亜硝酸が蓄積しないという，Comammoxの特徴が見いだされました。また，ショットガンメタゲノム解析を行ったところ，検出された16S rRNA遺伝子はComammox細菌グループに属することがわかり，Comammoxに特徴的な（通常のアンモニア酸化細菌とは異なるタイプの）アンモニア酸化酵素遺伝子（*amoA*遺伝子）が検出されました。さらに，Comammoxタイプとアンモニア酸化細菌タイプの*amoA*遺伝子の発現量を比較したところ，Comammoxタイプが500倍以上高発現していることがわかりました。これらの結果から，本装置ではやはりComammoxが単独で高効率な硝化反応を進めていると結論づけました。

実用化とその後の展開

今回，Comammoxが重要微生物であることを解明することで，装置の運転条件を最適化し，当該微生物を長期にわたり安定的に維持することに成功しました。また，本装置で製造した液肥は，前処理なしで直接水耕栽培に使用可能で，安定的にトマトを水耕栽培できることも確認しています。さらに，液肥製造装置の大規模化およびその安定稼働にも成功しており，最近は水耕栽培装置の大規模化もIAIが進めています。SDGs制定などに象徴される通り，環境問題に大きな注目が集まる昨今，このような廃棄物から有価物を生み出す技術の開発はとても重要だと考えています。

謝辞

共同研究者の皆様に，そして実験をサポートしてくださった技術職員の皆様に深く感謝いたします。なお本研究は，静岡県の「先端企業育成プロジェクト推進事業（2016～2018年度）」による支援を受けて行いました。