HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	きれいな水環境をまもる微生物たち
Author(s)	岡部, 聡
Description	北海道大学大学院地球環境科学研究院平成19年度公開講座 快適環境をまもる微生物たちの姿とはたらき. 平成19年8月21日～9月25日. 札幌市
Relation	北海道大学大学院地球環境科学研究院平成19年度公開講座 快適環境をまもる微生物たちの姿とはたらき. 第3回.
Issue Date	2007-09-04
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/36617
Type	lecture
File Information	koukai-okabe.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

きれいな水環境をまもる微生物たち

大学院工学研究科都市環境工学専攻　准教授　岡部　聡

はじめに

札幌市（人口 189 万人、全国 5 番目の都市）を流れる豊平川の水質（BOD 値）の経年変化をみると、昭和 59 年度以降、水質の改善が図られ、現在では環境基準（河川 A 類型；2 mg/L）を十分に満足しています（**図 1**）。この結果、昭和 54 年にはサケの遡上も再び観察されるようになり、札幌市民の憩いの場として豊平川は定着しています。それでは、どのように豊平川の水質が改善されたのでしょうか？その大きな要因はやはり下水道整備です。昭和 47 年冬季オリンピック開催に向けて積極的に下水道の整備が進められ、昭和 45 年にはわずか 20%足らずであった処理人口普及率は、昭和 50 年には 64.5%、昭和 55 年には 85.6%、昭和 60 年には 91.8%、平成 2 年には 95.4%、平成 7 年には 98.6%へと急速に向上しました。現在では 99.3%に達し、全国でも屈指の高水準となっています。本講義では、現在一般的に用いられている微生物の力を利用した生物学的排水処理の原理及び処理を担う微生物について解説します。特に、河川や湖沼などの富栄養化の原因となる窒素の除去に関与する微生物群に重点をおいて解説します。

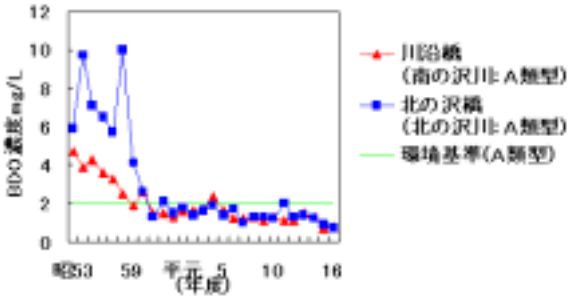

図 1　BOD75%値の経年変化（豊平川）(札幌市の HP より)
http://www.city.sapporo.jp/kankyo/mizu_kankyo/kasen_genkyo/)

新規生物学的窒素除去プロセス

閉鎖性水域の富栄養化や地下水の硝酸塩汚染の問題が顕在化していることから、排水中の窒素除去は必要不可欠です。従来の窒素除去は、好気性独立栄養性細菌である硝化細菌と従属栄養性細菌を併用する、硝化・脱窒プロセスが用いられています（このプロセスの詳細も解説します）。しかし、このプロセスは硝化槽における硝化

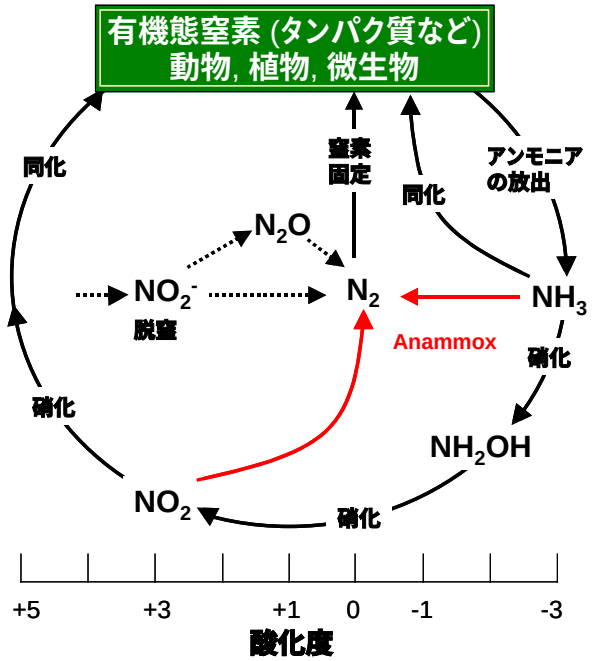

図 2　自然界の窒素サイクル

液循環及び酸素の曝気、および脱窒槽における外部有機炭素源の供給が必要となり、費用や消費エネルギーが多いことが欠点です。また、N_2O 等の温室効果ガスの発生も大きな問題の一つです。従って、持続可能な循環型社会を構築するためには、低コスト、省エネルギー、低環境負荷型の新規窒素除去プロセスを開発する必要があります。この問題を解決できる窒素除去法として、近年、嫌気性（酸素を必要としない）アンモニア酸化(Anammox)細菌を利用した Anammox プロセスが注目されています。Anammox 細菌は *Planctomycetals* 目に属する独立栄養性細菌で、無酸素条件下においてアンモニア(NH_4^+)を電子供与体、亜硝酸塩(NO_2^-)を電子受容体として直接窒素ガス（N_2）へ変換する極めて特殊な代謝経路を持つ細菌です（**図 2**）。この細菌を排水中の窒素除去に応用することにより、ランニングコストを大幅に削減できる新規の窒素処理プロセスの構築が可能となります（**図 3**）。しかしながら、Anammox 細菌は増殖速度が極めて遅く(倍化時間約 11 日)、有機物や酸素曝露により活性の阻害を受けるため集積培養は非常に難しいです。このため、Anammox 細菌は未だ単離培養されておらず、生理・生態に関する知見も少なく最適培養条件も未知な点が多く、Anammox 細菌を用いた効率的な窒素除去プロセスは開発されていません。我々の研究室では Anammox リアクターの効率的で迅速なスタートアップの方法を確立しました。また、上向流バイオフィルムリアクターを用いて高効率な Anammox リアクターの開発に成功しました。本講義ではこの省エネ型・高効率 Anammox リアクターによる窒素除去特性について解説します。

Anammox 細菌が比較的多く存在する都市下水処理場汚泥を 16S rRNA 遺伝子遺伝

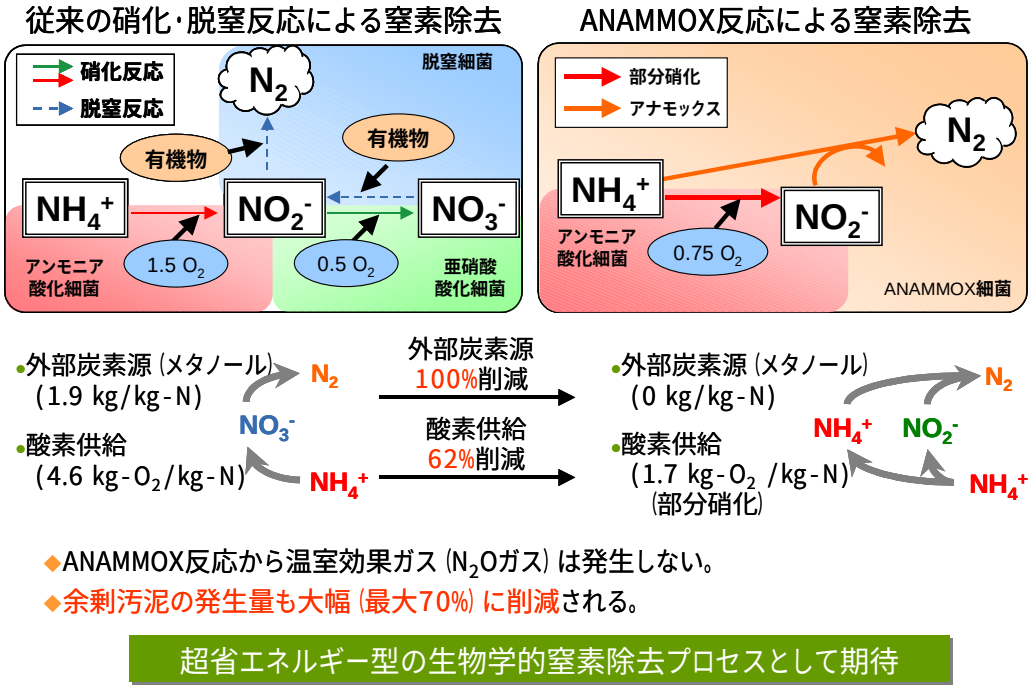

図 3　Anammox プロセスと従来の硝化-脱窒プロセスの比較

子マーカーを手がかりに探し出し、その汚泥を上向流カラム型リアクター(0.8L)に植種しました。運転開始 50 日目に顕著な Anammox 反応が観察され、250 日目には窒素処理速度が世界最高速の 26 kg-N m^{-3} day^{-1} を誇る超高速型 Anammox リアクターの開発に成功した（**図 4**）。これまで報告されている Anammox 細菌を利用した実験室規模リアクターの窒素除去速度が 8.9 kg-N m^{-3} day^{-1} であること、また現行の硝化脱窒プロセスの窒素除去速度が 0.05-4.0 kg-N m^{-3} day^{-1} であることを考慮すると、我々の開発した Anammox リアクターの窒素除去速度は極めて高いと言えます。窒素除去速度が高いということは、それだけリアクターの容積を小さくすることが可能となり、よりコンパクトな排水処理施設となる利点があります。また、我々のリアクター内に存在する Anammox 細菌は新種の細菌であることが確認されています。

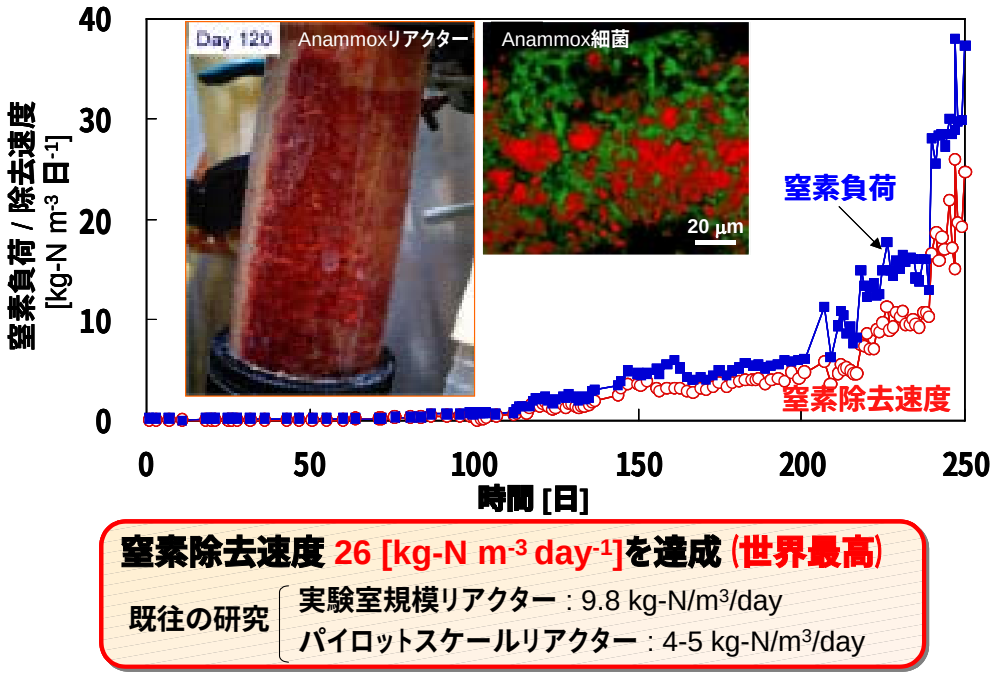

図 4　Anammox リアクターの窒素除去能力の推移

河川の自浄作用

「三尺流れて水清し」といわれるように、河川などの水には自浄能力があります。この作用の一端を担っているのは水中や底泥に生息する種々の微生物です。微生物は水の汚れの原因物質を栄養分として取り込み、分解することで水を浄化してくれています。川底の石表面のヌルヌル（これは、微生物が膜状に住み着いたバイオフィルム）や底泥内に生息する微生物や底生動物、および抽水植物（例えば、ヨシ）などが水の浄化（特に富栄養化の原因となる窒素化合物の生物学的除去）に関与していると考えられています（**図 5**）。一般的に、河川水中のアンモニア性窒素は底泥表層で生物学的硝化反応によって硝酸塩まで酸化され、生成された硝酸塩は嫌気的領域で N_2 まで還元され除去され

ます。河川の水環境を保全するうえで、これら微生物の浄化能力を正確に把握することは非常に重要ですが、あまり詳しく理解されていません。

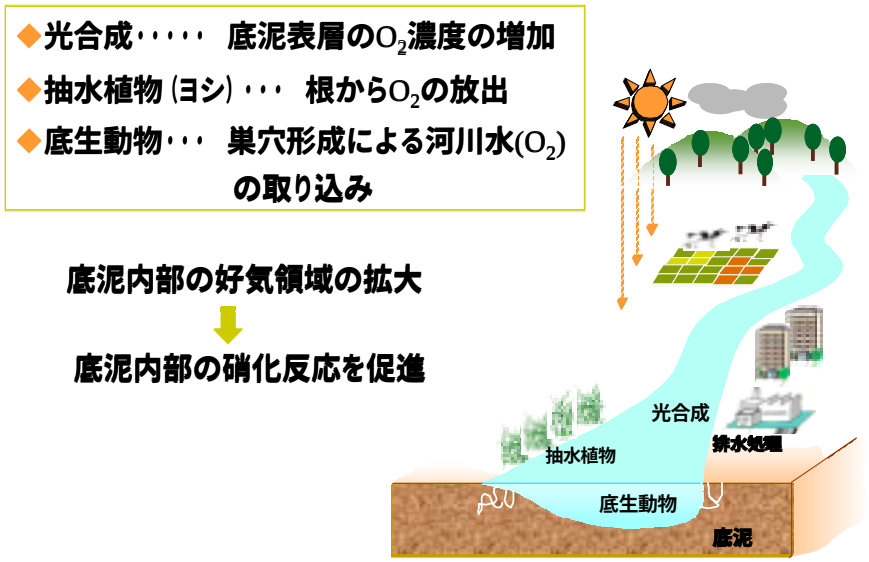

図 5　河川の自浄作用（硝化作用）に影響を及ぼす要因

そこで、本講義では河川全体の窒素除去能力を正確に理解するため、河川底泥の窒素除去に果たす役割について解説します。特に、底泥内で生じるアンモニア性窒素の酸化メカニズムについて説明します。また、底泥内への酸素供給を促進すると考えられる、光合成、底生動物および抽水植物の影響を、人間の髪の毛程度の大きさ（先端径が 10 μm 程度）の小さなセンサー（NH_4^+. NO_3^-, O_2 濃度を測定できる）を用いて詳しく見ていきます。

まず、底泥の表面で生じている光合成（酸素を作り出す反応）により、酸素濃度が増大するとともに、底泥内の酸素が存在する領域が約 2 倍に拡大しました。それに伴い底泥内のアンモニア酸化能力は、最大 270%まで増加しました。次に、河川干潮域の底泥内に生息している底生動物（ゴカイ）がアンモニア性窒素の酸化に与える影響を見てみると、ゴカイの巣穴壁面には好気性細菌であるアンモニア酸化細菌および亜硝酸酸化細菌が、底泥表面よりも約 2 倍多く存在し、巣穴壁面におけるアンモニア酸化能力は底泥表層に比べて約 2 倍高いことが解りました。このことより、底生動物（ゴカイ等）が底泥内の窒素循環に重要な役割を担っていることが明らかとなりました。最後に、抽水植物の代表ともいえるヨシの根から酸素が放出され、底泥内の硝化反応を促進していることが解りました。ヨシが存在することにより、単位底泥表面積当りのアンモニア消費活性は、ヨシが存在しないときの値に比べて約 2 倍増大すると推定され、ヨシの根が河川の窒素除去に重要な役割を果たしていることが明らかとなりました。