

B-51 CH₄, N₂O のインベントリーの精緻化と開発中核技術の内外への普及

(3) バイオ・エコシステムを活用した生活系・事業場系排水の CH₄, N₂O 抑制対策中核技術の汎用化と普及に関する研究

① バイオ・エコシステムを活用した生活系・事業場系排水の CH₄, N₂O 抑制対策中核技術の汎用化と普及に関する研究

独立行政法人国立環境研究所

循環型社会形成推進・廃棄物研究センター バイオエコエンジニアリング研究室

稲森悠平・水落元之・板山朋聡・岩見徳雄

平成 12-14 年度合計予算額 40,947 千円
(うち、平成 14 年度予算額 13,757 千円)

【要旨】

本研究では、生活系・産業系排水を対象として、アジア地域も視野に入れつつ、広く普及可能な CH₄, N₂O 削減中核対策技術の開発を推進すると同時に、CH₄, N₂O 発生特性の定量化、解析評価を行うことで、IPCC インベントリーの精緻化と充実化を図ることを目的としている。生活系排水処理に関しては、有用微生物の積極的な導入や、浄化槽の高度処理化による CH₄, N₂O 発生抑制効果等の検討評価を行った。また、塩類を高濃度に含有する産業系排水処理についての CH₄, N₂O 発生特性と削減手法を検討した。さらに、途上国適用型の各種の生態工学活用技術の CH₄, N₂O 発生特性と発生抑制技術の検討評価を行った。そして、これらの検討と同時に、IPCC インベントリーの精緻化のための放出係数の試算等についても進めた。平成 12-14 年度の研究で得られた成果は以下のとおりである。まず、生活系排水処理プロセスにおいて、微好気条件下でも N₂O 還元活性を発現している微生物の存在が示唆され、処理への応用の可能性が示唆された。また、有用硝化脱窒細菌の *Alcaligenes faecalis* 包括固定化担体の導入により、特に低水温時において硝化能・窒素除去能等の低下と N₂O 放出とを抑制する上で極めて効果的であることがわかった。また、実規模浄化槽を用いて、CH₄, N₂O 削減効果等に関する実証評価を行った結果、富栄養化の防止および特に CH₄ の発生抑制の観点から、浄化槽における硝化液循環は極めて効果的であることがわかった。次に、高塩濃度含有の産業系排水の生物学的窒素除去プロセスにおいて、塩濃度は特に硝化過程からの N₂O 発生に大きな影響を及ぼすとともに、塩濃度の上昇が N₂O 発生量に直接的・間接的に影響を及ぼし、場合によっては N₂O 発生量が急激に増加する可能性が示唆された。さらに、開発途上国で広く適用されている生態工学活用型污水处理システムである、土壌トレッチ、人工湿地、ラグーンの各システムは、良好な BOD・窒素・リン除去能を有することが確認されたが、CH₄, N₂O 発生抑制技術の最適化という観点からは、さらなる研究・技術開発が必要であると考えられた。本研究の推進により、生活系・産業系排水とその処理における、処理対象や適用地域に応じた CH₄, N₂O 削減対策技術と最適管理・操作条件等の提示と、その導入効果の解析評価、そして IPCC インベントリー構築への貢献等、極めて重要な成果が得られた。

【キーワード】 温室効果ガス抑制、メタン (CH₄)、亜酸化窒素 (N₂O)、バイオエンジニアリング、エコエンジニアリング

1. はじめに

COP3 において重要な削減対象ガスとして定められた CH_4 , N_2O は, CO_2 に比較して温室効果ポテンシャルが非常に大きく, その発生を抑制することは, 地球温暖化防止に向けて大きな意義を有するといえる。その場合, 様々な発生源ごとの効果的な対策が必要とされるが, 各々の処理に共通する反応原理の解析と, 対策中核技術開発とその汎用化・普及が重要となる。このことは, CH_4 , N_2O の重要な対策分野である水処理・水環境分野にもあてはまり, 温室効果ガスの発生抑制技術と窒素等の富栄養化制限物質の除去技術を高次元で確立することにより, 世界規模での地球温暖化対策および水環境修復が強力に推進可能となると考えられる。本研究では上記の点に鑑み, バイオ・エコシステムを活用した, 生活系・事業場系排水の CH_4 , N_2O 抑制対策中核技術の研究開発と, 汎用化・普及を目的として検討評価を行った。

2. 研究目的

本研究では, 平成 12-14 年度の実施期間を通じて, 下記の内容について研究開発・解析評価することを目的として検討を行った。まず, 生活系排水を対象として, その処理システムにおける有用微生物の挙動についての知見を集積するとともに, これらの有用微生物の積極的な導入による処理プロセスの高度効率化および CH_4 , N_2O 削減効果等について検討した。次いで, 高度処理浄化槽を用いて, CH_4 , N_2O 削減効果等に関する実証評価を行った。さらに, 産業系排水や, 生態工学活用型排水処理システムについても, 汚水処理特性と CH_4 , N_2O 発生特性, そしてその削減手法等について検討を進めた。これらの検討項目について整理すると, 下記のとおりである。

- (1) 生物学的窒素除去プロセスにおける微生物群集構造と窒素除去および N_2O 放出特性の解析と処理プロセスの最適化に関する研究
- (2) 有用硝化脱窒細菌の包括固定化担体の導入による生物学的窒素除去プロセスの高度化および N_2O 発生抑制効果に関する研究
- (3) 浄化槽からの CH_4 , N_2O 放出量・放出係数の推定と高度合併処理化およびその普及による CH_4 , N_2O 削減効果等の解析評価
- (4) 産業系排水の生物学的窒素除去における塩濃度と窒素除去および N_2O 放出特性の解析と処理プロセスの最適化に関する研究
- (5) 土壌トレンチ, 人工湿地, ラグーンの各システムによる生活系排水の処理特性および CH_4 , N_2O 発生特性の解析と開発途上国への汎用化・普及に向けた技術開発に関する研究

3. 生物学的窒素除去プロセスにおける微生物群集構造と窒素除去および N_2O 放出特性の解析と処理プロセスの最適化に関する研究

生物学的高度窒素除去プロセスである循環式硝化脱窒法において, 窒素除去能の向上と N_2O 発生抑制を同時に可能な運転操作条件の構築を図ることを目的として, 好気槽内 D_0 濃度や硝化液循環による嫌気槽への D_0 の持ち込みが N_2O 発生特性に及ぼす影響について, N_2O 還元酵素をコードする遺伝子(*nosZ* 遺伝子)に基づいた解析を行った。

また, 脱窒反応の進行に伴い, 実際に嫌気槽内で発現している *nosZ* mRNA について, RT-PCR 法を用いることにより, D_0 および ORP との関係について解析を行った。

3.1 実験方法

3.1.1 循環式硝化脱窒法における好気槽内 DO 濃度等が N_2O 発生特性や微生物群集構造に及ぼす影響評価

実験装置は、各槽容積が 6L、嫌気槽 2 槽、好気槽 2 槽の計 4 槽から構成される循環式硝化脱窒法のリアクターを 3 系用い、下水処理施設の生活系排水を流入原水として用いた。好気槽の DO 濃度を $2.0\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ として 32 日間馴養し、その後それぞれの系での好気槽 DO 濃度を $0.3\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (Run1), $2.0\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (Run2), $4.0\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (Run3) に設定した。また、3 系とも 20°C の恒温室に設置し、HRT を 8hr、循環比を 400%, 汚泥返送率を 50%, SRT を 13 日として運転した。試料の採取および分析は、水試料に関しては流入原水、各反応槽内の活性汚泥懸濁液および処理水について、発生ガスに関しては、各槽内に溶存しているものおよび大気中へと放出されるものについて行った。

微生物群集構造解析には、Run2 および Run3 の嫌気 1 槽目の汚泥を用いた。採取した汚泥より DNA を抽出し、Nos1527f-Nos1773r プライマーセットを用いて PCR を行い、*nosZ* 遺伝子の断片を増幅した。得られた増幅産物をプラスミドベクター (pDrive Cloning Vector/Quigen) に挿入し、大腸菌に導入してクローンライブラリーを構築した。そして、得られたクローンの塩基配列を決定して系統解析を行った。

3.1.2 *nosZ* mRNA 発現に基づく N_2O 発生特性や微生物群集構造の解析評価

下水処理場より採取した活性汚泥を、ジャーファメンターを用いて、脱窒機能評価用培地 (改変 PYN 培地) にて培養した。初期 MLSS 濃度を $500\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ とし、培養温度は 20°C に保った。DO コントローラーにより DO 濃度を $1.0\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ($0\sim 3\text{h}$), $0.5\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ($3\sim 6\text{h}$), $0\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ($6\sim 13\text{h}$) と変化させ、水質および溶存態 N_2O 濃度を測定した。また水質サンプリング時に、同時に汚泥をサンプリングし、RNA を抽出をし、Nos1527f-Nos1773r プライマーセットを用いて RT-PCR を行った。

3.2 結果および考察

3.2.1 循環式硝化脱窒法における DO, ORP と硝化・脱窒および N_2O 発生特性との関係

DO 制御開始直後から、Run1 において硝化率・窒素除去率の低下が観察され、好気槽における適正な DO 濃度の確保は硝化反応の速やかな進行に重要であることが確認された。その一方で、好気槽の DO 濃度が高い系ほど嫌気 1 槽目の ORP が高くなることが確認できた。嫌気 1 槽目における ORP 値と溶存態 N_2O 濃度との関係は、図 1 に示すとおりである。嫌気 1 槽目の溶存態 N_2O 量は、ORP が高くなるほど増大し、特に Run3 においては他の 2 系と比較して 3-5 倍の値を示した。好気槽からの循環液による DO の持ち込みの影響で ORP が上昇し、脱窒反応、特に N_2O 還元反応が阻害を受けていることが示唆された。嫌気槽の溶存態 N_2O も、処理系全体の N_2O 生成・放出量に大きな影響を

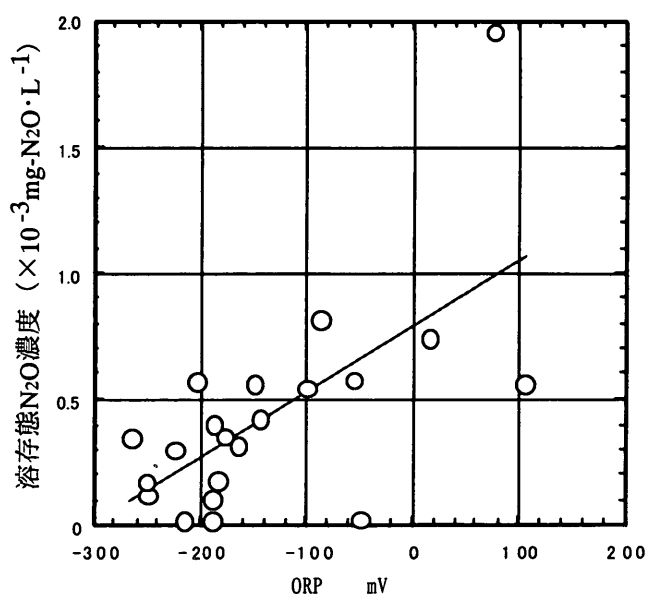


図 1. 嫌気 1 槽めにおける ORP と溶存態 N_2O 濃度との関係

及ぼす可能性があり、脱窒工程からの N_2O 生成抑制技術の開発も重要であると考えられる。

3.2.2 循環式硝化脱窒法における N_2O 発生特性と微生物群集構造との関係

Run2 および Run3 における嫌気 1 槽目の汚泥内の、*nosZ* 遺伝子を有する微生物群集構造の解析を行った。まず、Run2, 3 についてそれぞれ 45 個のクローンを解析し、系統樹を作成した。そして、データベース上に登録されている他の環境中の *nosZ* 遺伝子を系統樹に組み込み、比較したところ、生活系排水処理汚泥中微生物由来の *nosZ* 遺伝子は、①他の環境中の微生物由来の *nosZ* 遺伝子と異なるクラスターを形成すること、②主に 5 つのクラスターを形成すること、③ *Ralstonia eutropha* に近縁な微生物種が優占化していることが示唆された。しかしながら、*nosZ* 遺伝子の多様性について、ORP の違いによる有意な差は確認できなかった。

3.2.4 脱窒過程における *nosZ* mRNA 発現と N_2O 発生特性との関係解析

DO, ORP および NO_x-N 濃度の経時変化は、図 2 に示すとおりである。図から、DO が $0.5-1.0\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 程度であっても、若干ではあるが脱窒反応が進行することが確認された。また DO がゼロになると速やかに脱窒反応が進行した。全実験期間を通して NO_2-N はほとんど検出されなかった。 N_2O に関しては、ORP が -100mV 付近である 7 時間目において、溶存態 N_2O 濃度が突発的に上昇した。これにより ORP が *nosZ* mRNA 発現に強い影響を及ぼしていることが示唆された。また、図 3 の RT-PCR の結果より、6 時間後および 12 時間後に *nosZ* mRNA の発現が確認できた。これより嫌気条件下のみならず、微好気条件下でも *nosZ* mRNA を発現している微生物種の存在が示唆された。このことは、微好気条件下における効率的脱窒および N_2O 発生抑制の技術開発の可能性を示していると考えられる。

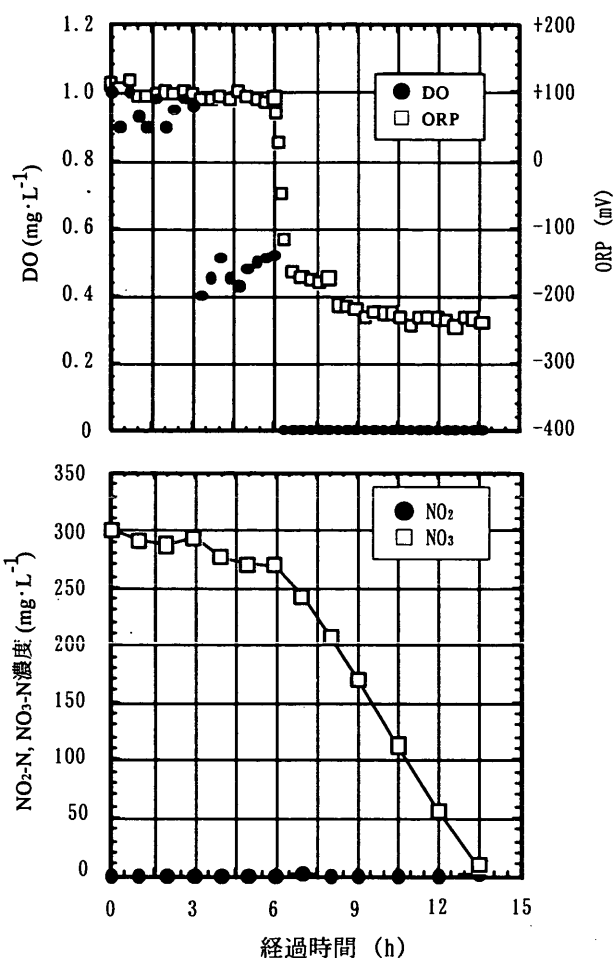


図 2. DO, ORP, NO_2-N , NO_3-N 濃度の経時変化

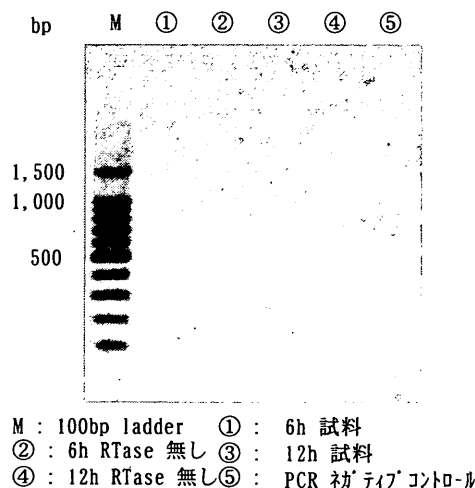


図 3 *nosZ* mRNA RT-PCR

4. 有用硝化脱窒細菌の包括固定化担体の導入による生物学的窒素除去プロセスの高度化および N_2O 発生抑制効果に関する研究

従属栄養型の有用硝化脱窒細菌である *Alcaligenes faecalis* を、実排水処理を行う間欠ばっ気方式活性汚泥法のリアクターに包括固定化担体として導入し、特に低水温時における硝化・脱窒および窒素除去特性、 N_2O 発生特性等について実験的検討を行った。また、FISH (Fluorescent *in situ* hybridization) 法を用いてリアクター内での *A. faecalis* の動態を解析し、導入後の本細菌の定着の程度や窒素除去能の向上効果等について検討した。

さらに実生活排水処理を行う嫌気・好気膜分離活性汚泥浄化槽に、*A. faecalis* 包括固定化担体を導入し、有機物除去特性、硝化・脱窒および窒素除去特性、 N_2O 発生特性等について実験的検討を行った。

4.1 実験方法

4.1.1 *A. faecalis* 包括固定化担体の間欠ばっ気活性汚泥法への導入における水温と窒素除去特性および N_2O 発生特性との基礎的検討

図4に示すような容積 5.4L の円筒型のばっ気槽と同 2.5L の沈殿槽から構成される、DO 制御間欠ばっ気活性汚泥法のバイオリアクターを3系設置し、リアクター内の水温を 10°C に制御した。流入原水は実生活系排水を用いた。実験系は対照系 (Run1)、硝化細菌を優占化させた活性汚泥および *A. faecalis* を包括固定化したポリエチレングリコール (PEG) 担体をばっ気槽容積の 10% 導入した系 (それぞれ Run2, Run3) とした。好気および嫌気の各工程は 60 分/60 分、好気工程時の DO 値は $2.0\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、HRT は 8 時間、実験開始時の MLSS は $2,000\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、SRT は 10 日間、汚泥返送率は 50% として運転を行った。

試料の採取および分析は、水試料に関しては流入原水、ばっ気槽内活性汚泥懸濁液および処理水について、発生ガスに関しては、ばっ気槽および沈殿槽内に溶存しているものおよび大気中へと放出されるものについて行った。また、ばっ気槽より担体および活性汚泥を採取し FISH 法に供試し、*Alcaligenes* spp., アンモニア酸化細菌および全真正細菌について観察した。

4.1.2 *A. faecalis* 包括固定化担体の実規模浄化

槽への導入における窒素除去特性および N_2O 発生特性の解析評価

生活系排水処理施設内に 5 人槽の嫌気・好気膜分離活性汚泥浄化槽を 2 基設置し、処理施設の流入下水を原水として用いた。実験系は *A. faecalis* を包括固定化した PEG 担体をばっ気槽容積の 10% 導入した系 (Run4) と、対照系として何も固定しない PEG 担体をばっ気槽容積の 10% 導入した系 (Run5) とした。実験装置の概要については図5に示すとおりである。

試料の採取および分析は、水試料に関しては流入原水、各反応槽内活性汚泥懸濁液および処理水について、発生ガスに関しては、ばっ気槽および沈殿槽内に溶存しているものおよび大気中へと放出されるものについて行った。

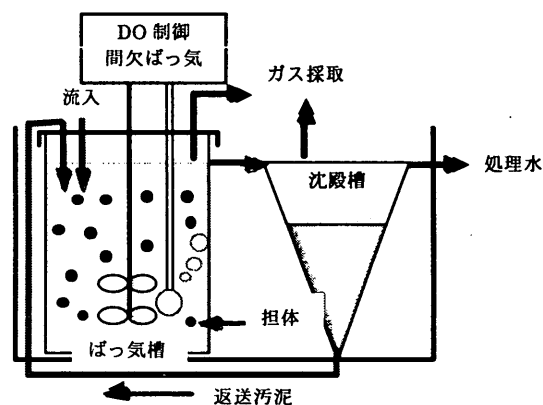


図4. 間欠ばっ気活性汚泥法バイオリアクター

4.2. 結果および考察

4.2.1 *A. faecalis* 固定化担体の導入と硝化・脱窒および N_2O 放出特性との関係

間欠ばっ気バイオリアクターの水温 10℃ の条件下での各実験系の処理特性については表 1 に示すとおりである。硝化率の平均値は Run1, 2, 3 の順にそれぞれ、57.0, 59.8, 67.4% となり、*A. faecalis* 包括固定化担体を導入した系において他の 2 系と比較しておよそ 10% の硝化率の向上が

みられた。また、窒素除去率の平均値は Run1, 2, 3 の順にそれぞれ、56.1, 58.5, 66.6% となり、全ての系で硝化率とほぼ同様の値を示した。すなわち、*A. faecalis* 包括固定化担体の導入により、低水温条件下において硝化能・窒素除去能ともに高く維持できることが明らかとなった。 N_2O については、 N_2O 放出速度の平均値は Run1, 2, 3 の順にそれぞれ、 2.4×10^{-3} , 3.5×10^{-3} , $4.3 \times 10^{-3} \text{ mg-N}_2\text{O} \cdot \text{min}^{-1}$ となり、*A. faecalis* 導入系でやや高い結果となった。これを流入窒素あたりの N_2O 転換率で評価すると（表 1）、Run3 においても 0.6% となり、低水温条件下としては十分に低い転換率に抑えることが可能であった。以上のことから、生活排水処理プロセスに *A. faecalis* 包括固定化担体を導入することで、特に低水温時における窒素除去能の維持と N_2O 発生抑制が達成可能なことが明らかとなった。

4.2.2 FISH 法による *A. faecalis* の検出

間欠ばっ気バイオリアクターの、担体導入後約 2 ヶ月経過時における、硝化活性汚泥固定化担体（Run2）および *A. faecalis* 固定化担体（Run3）の FISH 法を用いた観察結果については、図 6 に示すとおりである。図 6 (b) から、*A. faecalis* 包括固定化担体

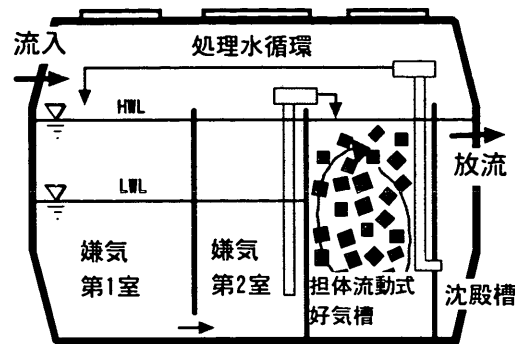


図 5. 嫌気好気膜分離活性汚泥浄化槽

表1. 低水温条件下における処理特性の比較

Run	1	2	3
硝化率 (%)	57.0	59.8	67.4
窒素除去率 (%)	56.1	58.5	66.6
N_2O 転換率 (%) (流入窒素あたり)	≒0.5	≒0.5	≒0.6

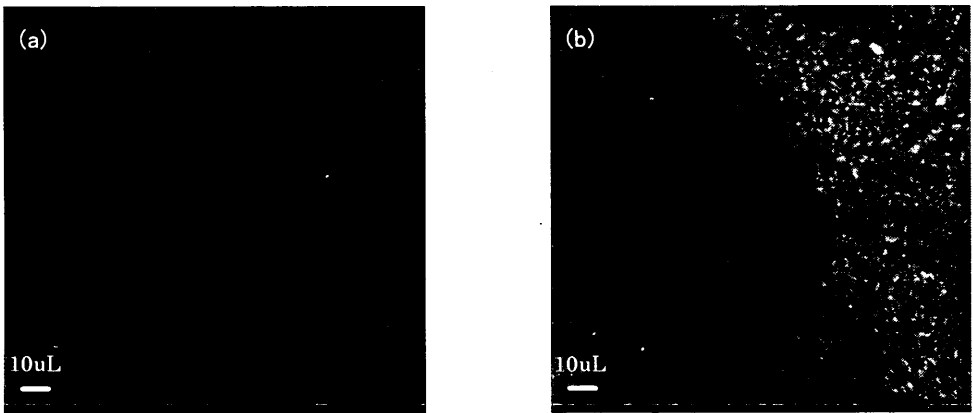


図 6. PEG 担体の FISH 画像 (a) 硝化活性汚泥固定化担体, (b) *A. faecalis* 固定化担体
緑色: *A. faecalis*, 赤色: β -プロテオバクテリア をそれぞれ示す

の導入後数ヶ月経過しても、担体内部および表面の一部に高密度に *A. faecalis* が保持されていることが確認できた。これに対し、図 6 (a) から分かるように、硝化活性汚泥固定化担体では *A. faecalis* はほとんど観察されなかった。これらに加えて、活性汚泥中のアンモニア酸化細菌のバイオマスは各系において大きな差はみられなかったことから、*A. faecalis* 包括固定化担体を導入した実験系における窒素処理特性の向上は、担体内の *A. faecalis* が有効に作用した結果であると考えられた。

4.2.3 実浄化槽への *A. faecalis* 固定化担体の導入による有機物および窒素除去特性の評価

実験期間全体を通して、水温は 9.2 (冬季) から 30.5℃ (夏季) の間で推移した。BOD 除去率については、Run4 で夏季ほぼ 100%, 冬季 92%, Run5 で夏季ほぼ 100%, 冬季 93%と、それぞれの系において年間を通して極めて良好な処理能が得られた。すなわち、有機物の除去に関しては、*A. faecalis* の導入に関係なく浮遊活性汚泥で対応が可能であると考えられた。

一方、窒素除去能については、季節により各系に違いがみられた。夏季においては、Run4 で硝化率 99%, 窒素除去率 73%, Run5 で硝化率 97%, 窒素除去率 74%であり、それぞれの系における処理特性に大きな差はみられなかった。しかし、冬季においては、Run4 で硝化率 94%, 窒素除去率 62%程度だったのに対し、Run5 では硝化率 83%, 窒素除去率 58%に低下した。これらの結果から、導入された *A. faecalis* が、特に冬季の硝化能および窒素除去能の維持・向上に寄与していることが明らかとなった。また、このことは、間欠ばつ気バイオリクター実験で得られた知見を裏付ける結果でもあり、本細菌の導入は、窒素の高度除去プロセスを開発する上で極めて効果的であるものと期待される。

4.2.4 担体の導入と N_2O 放出特性との関係 (実証化実験)

好気槽における N_2O 放出速度の平均値は、Run4, 5 の順にそれぞれ、0.11 および 0.13mg- N_2O ・h⁻¹ となり、*A. faecalis* の導入により、 N_2O 放出量が低下する傾向が観察された。一方、嫌気槽からの N_2O 放出速度は、各系とも好気槽からの放出速度と比較すると極めて小さな値であった。水質の結果と合わせて考察すると、*A. faecalis* の導入により、効率的な硝化・脱窒反応が進行し、その結果、 N_2O 放出量も削減できたものと考えられた。

5. 浄化槽からの CH_4 , N_2O 放出量・放出係数の推定と高度合併処理化およびその普及による CH_4 , N_2O 削減効果等の解析評価

N_2O の潜在的な放出源の可能性の高い浄化槽に関して、実態調査をもとに、合併処理および高度合併処理の各浄化槽において、水温変動および硝化液循環プロセスの有無が処理特性および CH_4 , N_2O 放出特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的として検討を行った。

5.1 実験方法

実験は、非循環型および循環型の 5 人槽合併処理浄化槽を、実生活排水処理施設の敷地内に設置して行った。以下、これらの 2 系の浄化槽を、それぞれ非循環型、循環型と称することとする。循環型の実験装置の概略を図 7 に示す。非循環型は、図 7 において循環装置が設置されていないものとなる。各反応槽の容積は嫌気第 1 槽 0.87m³, 嫌気第 2 槽 0.66m³, 好気担体流動槽 1.04m³ で、好気槽には 40mm 角のスポンジ担体を充填率約 30%となるように導入した。HRT はいずれも 2.5 日とし、循環型は循環比 4.0 で運転した。供試排水は、この排水処理施設に流入する実生活系排水 (BOD: 150-180mg・L⁻¹, T-N: 30-40 mg・L⁻¹, T-P: 3-4mg・L⁻¹) を用いた。

試料の採取および分析は、ガス試料については浄化槽の各反応槽における CH_4 、 N_2O の大気中への放出速度および溶存態濃度を、水試料については各反応槽内および処理水の水温、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 T-N 、 TOC 等について行った。

5.2 結果および考察

5.2.1 硝化液循環が有機物および窒素除去率へ及ぼす影響

窒素除去率の各系の経日変化については、図 8 に示すとおりである。循環型の窒素除去率は 60-80%、非循環型では 20%以下であった。循環型においては、効果的な硝化・脱窒の進行により、高度な窒素除去がなされていた。実験期間後半の冬季においては、除去率の低下がみられたが、これは実験装置を屋外の地上に設置しており、水温が 10℃ 前後まで低下し、それに伴い微生物活性も低下したものと考えられた。一方、有機物除去に関しては TOC 除去率として両系とも 60-80% を示し、硝化液循環の有無による有機物除去能の差はほとんどみられなかった。

5.2.2 硝化液の循環が CH_4 、 N_2O 放出特性に及ぼす影響

各系のそれぞれの反応槽における大気中への N_2O 放出速度については、図 9 に示すとおりである。好気槽から大気中への N_2O 放出速度には、循環・非循環の有無に関わらず、ほとんど差はみられなかった。これは、両系とも硝化反応が極めて効率的に進行し、阻害をほとんど受けなかったためと考えられる。しかしながら、冬季においては、両系とも放出速度は 60-70% の割合で増大した。これは、先にも述べたが、水温低下に伴う微生物活性の低下に起因するものと考えられた。

また、嫌気槽から大気中への N_2O 放出速度は、循環型の方が非循環型よりも高いという結果となった。これは、循環により好気槽から持ち込まれた溶存態の N_2O や、やはり持ち込まれた $\text{NO}_x\text{-N}$ の脱窒過程で生成した N_2O が、大気中へと放出された可能性が考えられた。

溶存態 N_2O 濃度に関しては、非循環型では流入水と同程度で、ほとんど検出されなかった。これ

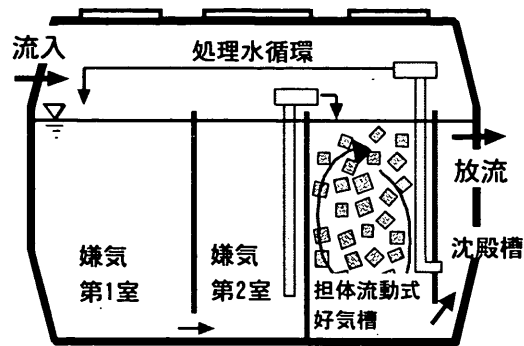


図 7. 循環型浄化槽実験装置

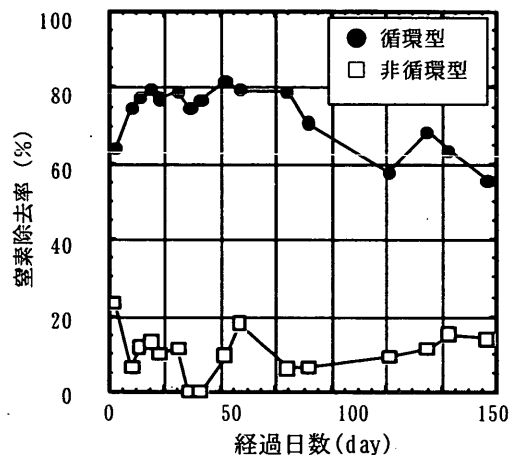


図 8. 各系における窒素除去率の経日変化

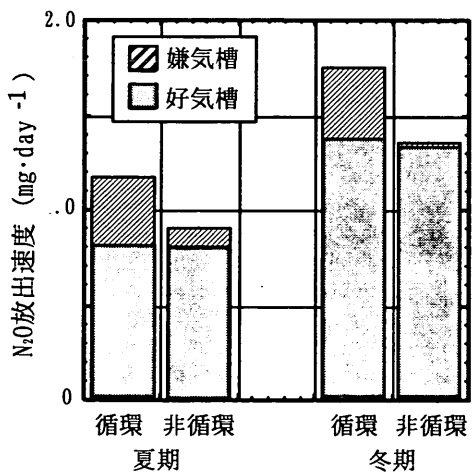


図 9. 各系における大気中への N_2O 放出速度

に対し、循環型では、嫌気第 1 槽、次いで嫌気第 2 槽で溶存 N_2O 濃度が高い値を示し、それ以外の槽内は流入水と同程度であった。循環型の嫌気第 1 槽、第 2 槽で高い溶存 N_2O 濃度が観察された理由としては、嫌気槽から大気中への N_2O 放出速度が高かったことを裏付けるものである。既往研究では、硝化液循環の N_2O 放出抑制効果が示されているが、本研究の場合は、低温期においても硝化が良好に進行していることから、循環、非循環いずれの場合も N_2O の放出が低いレベルで留まったものと考えられた。いずれにせよ、硝化の速やかな進行により、 N_2O 放出が抑制されることが確認された。

一方、各系のそれぞれの反応槽における大気中への CH_4 放出速度については、図 10 に示すとおりである。非循環型の嫌気槽での大気中への放出量が、循環型より数十倍大きな値を示した。これは、非循環型では、嫌気槽がより嫌気的な環境になりやすく、流入した有機物の多くが CH_4 へと転換された可能性が考えられる。一方の循環型においては、循環により NO_x-N や多少の DO が嫌気槽に供給され、それほど嫌気的な環境になりにくいことに加え、流入有機物が効果的に脱窒のための有機炭素源として消費されていることが示唆された。また、 CH_4 は水への溶解度の低いガスであり、嫌気槽で生成後直ちに大気中へと放出され、高濃度で検出された可能性が考えられた。両系における全体的な傾向としては、嫌気第 1 槽に比べ第 2 槽で放出量が高く、好気槽での放出量は嫌気槽の値に比べると無視できるほど微量であった。これらの結果から、浄化槽を循環型にすることで、 CH_4 、 N_2O 排出抑制と富栄養化対策が両立して達成可能であることが確認された。

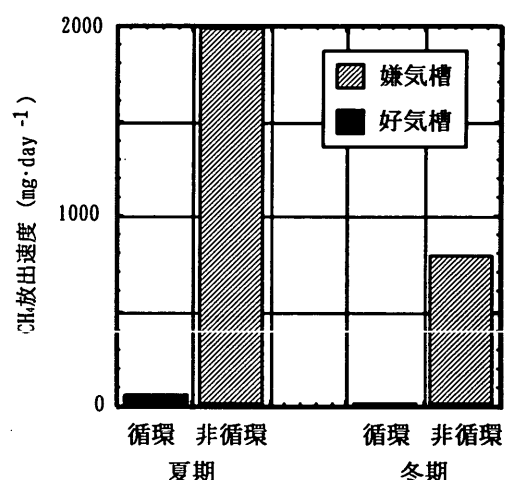


図 10. 各系における大気中への CH_4 放出速度

6. 事業場系排水の生物学的窒素除去における塩濃度と窒素除去および N_2O 放出特性の解析と処理プロセスの最適化に関する研究

事業場系排水の処理における運転操作条件と GHGs 放出特性については、これまでは極めて知見が乏しかったのが現状である。ここでは、大量の N_2O 排出が予想される、高濃度窒素含有事業場排水の処理プロセスについて検討を行うこととした。具体的には、金属の精錬排水を想定し、排水中に高濃度で含有される塩類が硝化・脱窒の各反応に及ぼす影響について、嫌気好気循環型活性汚泥法を用いて検討を行った。

6.1 実験方法

貴金属回収工程から排出される高濃度にアンモニア、硝酸態窒素および NaCl を高濃度に含む事業場系排水を用いて、嫌気槽容積 3.6L、好気槽容積 4.5L の嫌気好気循環型活性汚泥法を用い、塩濃度をステップアップさせることにより、塩濃度が N_2O 発生特性におよぼす影響を評価・解析した。 NH_4-N : $550mg \cdot L^{-1}$ 、 NO_3-N : $1,450mg \cdot L^{-1}$ 、TOC: $3,000mg \cdot L^{-1}$ を含む基質を表 2 の条件で連続流入し実験を行った。硝化率・窒素除去率が安定した連続運転開始後 49 日目 (1.0% から 1.6%)

および192日目(1.6%から3.0%)にそれぞれ塩濃度を上昇させた。

試料の採取および分析は、水試料に関しては流入原水、各反応槽内活性汚泥懸濁液および処理水について、発生ガスに関しては、各反応槽および沈殿槽内に溶存しているものおよび大気中へと放出されるものについて行った。

6.2 結果および考察

6.2.1 嫌気好気循環型活性汚泥法における塩濃度がN₂O発生量におよぼす影響評価

嫌気好気循環型活性汚泥法実験の嫌気槽内 TOC、NO_x-N 濃度、好気槽内 NH₄-N、NO_x-N 濃度およびアンモニア除去率、窒素除去率の経日変化をそれぞれ図 11 に示す。塩濃度を 1.0% から 1.6% に増加した際 ((i) → (ii)) には嫌気・好気槽内において処理能に変化は見られなかった。一方、1.6% から 3.0% に増加した際 ((ii) → (iii)) に、嫌気槽内において NO_x-N、TOC が蓄積し、好気槽内では NH₄-N が蓄積し、硝化能・脱窒能ともに悪化した。

その後嫌気槽内で NO_x-N、TOC が減少し連続運転開始後 245 日目において NO_x-N が検出されなくなり、脱窒能は完全に回復した。しかしながら好気槽内において NH₄-N の減少および NO_x-N の生成が見られず、硝化能の回復は見られなかった。

次に、各槽から大気中へと放出される N₂O 放出速度についてまとめたものを図 12 に示す。塩濃度を 1.0% から 1.6% に増加した際には処理能に変化は見られなかったが平均の N₂O 放出速度は嫌気槽において微量増加し、好気槽において大きく増加する結果が得られた(嫌気槽; $0.75 \times 10^{-4} [\text{mg} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{L}^{-1}] \Rightarrow 1.3 \times 10^{-4} [\text{mg} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{L}^{-1}]$, 好気槽; $1.9 \times 10^{-3} [\text{mg} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{L}^{-1}] \Rightarrow 8.6 \times 10^{-4} [\text{mg} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{L}^{-1}]$)。一方、1.6% から 3.0% に増加した際 ((ii) →

(iii)) は嫌気槽では平均の N₂O 放出速度は $0.13 [\text{mg}/\text{min} \cdot \text{L}]$ と値が大幅に増加し、好気槽では $0.64 \times 10^{-3} [\text{mg} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{L}^{-1}]$ となり減少する結果が得られた。塩濃度 3.0% において嫌気槽から放出される N₂O が急増した原因としては好気槽内で硝化が起こらなくなったため、DO が消費されずに循環硝化液によって嫌気槽に流入することにより、嫌気槽が微好気条件下にあったことが可能性として考えられる。脱窒の最終工程である N₂O → N₂ 還元を司る N₂O 還元酵素は DO に対して失活し易く、微好気条件下では N₂O → N₂ が阻害されることが報告されており、このため嫌気槽から大気中へと放出される N₂O が急増したのであらうと考えられる。また、好気槽から大気中へと放出される N₂O が減少した原因としては硝化自体が起こらなくなったことが原因であると考えられる。

また、硝化能・脱窒能ともに 89hr 以降共に減少する傾向を示した。この原因としては以下の過

表 2. 嫌気好気活性汚泥法の実験条件

DO	>2 (mg・L ⁻¹)
HRT	3.6 (日)
循環比	4
温度	20℃～30℃
C/N 比	1.5
塩濃度	1.0→1.6%→3.0%

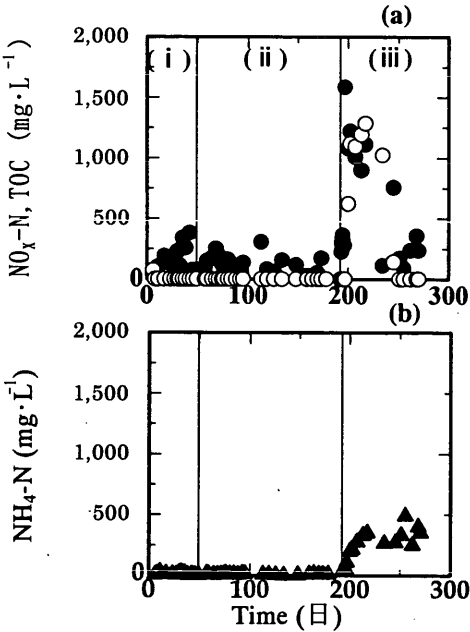


図 11. NO_x-N、NH₄-N、TOC 濃度の経日変化
(i) 1.0%, (ii) 1.6%, (iii) 3.0%
○; NO_x-N, ●; TOC, ▲; NH₄-N

程が考えられる。①塩濃度上昇後 89hr において好気槽内で $\text{NH}_4\text{-N}$ の蓄積が見られたのに対し、嫌気槽内で $\text{NO}_x\text{-N}$ の蓄積が見られなかったことから、塩濃度の上昇により硝化能が悪化、②硝化能低下により循環液中の D_0 が上昇し嫌気槽内の D_0 濃度が高くなり、脱窒能が悪化、③ $\text{NH}_4\text{-N}$ の蓄積により微生物の活性に悪影響をおよぼす遊離 NH_3 量が増加し、硝化能がさらに悪化した。一方、 N_2O に関しては嫌気槽では大気中へと放出される N_2O が短期間急激に増加・減少し、再度増加した後に減少する傾向が見られた。また、好気槽では塩濃度の上昇後 89hr までは N_2O 放出速度が徐々に増加する傾向が得られていたが、その後 N_2O 放出速度が急増し、塩濃度上昇後 216hr に最大値を示した。これらの原因としては、嫌気槽については塩濃度上昇直後 89hr までの増減の原因は突発的なストレス応答によるものであろうと考えられる。その後再度増加した原因としては、嫌気槽内への D_0 の持ち込みによる N_2O 還元酵素活性の失活が原因であろうと考えられる。また、更にその後に減少している原因としては、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ の還元の自体が進行しないために減少したと考えられる。このことから嫌気槽では処理能悪化前に N_2O 放出量が非常に大きくなる可能性が示唆された。一方、好気槽については塩濃度の上昇により徐々に N_2O 発生量が増加したが、遊離 NH_3 の蓄積・塩濃度の上昇による硝化能の低下に伴って N_2O 放出量が増加した。このことから好気槽では処理能悪化とともに N_2O 発生量が増加することが明らかとなった。

次に、除去窒素に対する N_2O 転換率の経日変化についてまとめたものは、図 13 に示すとおりである。塩濃度 1.0%、1.6% の条件下において除去窒素に対する平均の N_2O 転換率はそれぞれ 0.2%、0.7% と算出された。一方、塩濃度 3.0% において平均の N_2O 転換率は 13% と非常に大きな値を示した。また、塩濃度を 1.6% から 3.0% に上昇させた際に短期間 N_2O 転換率が急増し、最大で除去窒素の 90% が N_2O に転換される結果が得られた。本実験において用いた $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ を高濃度に含有する産業排水では嫌気好気循環型活性汚泥法を用いた場合、塩濃度が N_2O に対して直接影響をおよぼす可能性に加え、処理能が悪化した際には前述のように塩濃度の上昇が N_2O 発生量に左右する因子、本研究に関しては特に D_0 に対して影響を与え、間接的に N_2O 発生量に対して影響をおよぼす可能性が考えられる。このため、 N_2O 発生抑制のためには塩濃度を適正に維持管理し、塩濃度を 3% 以下に保ち、また塩濃度の変動を抑える必要があることが明らかとなった。

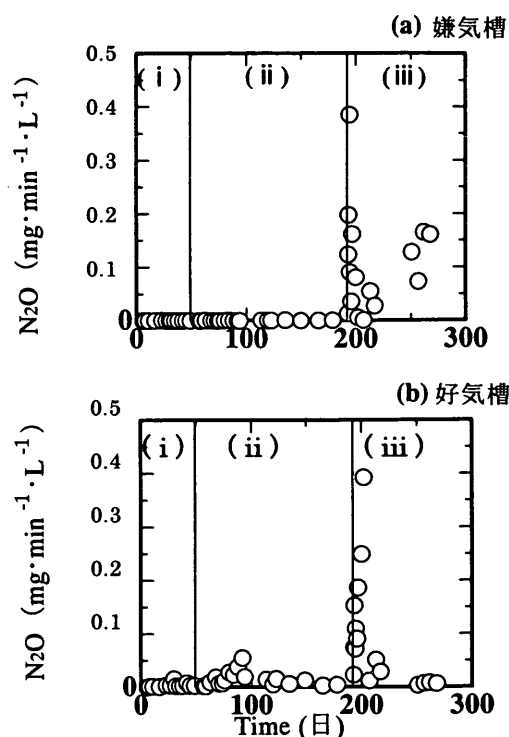


図 12. 大気中への N_2O 放出速度の経日変化
(i) 1.0%, (ii) 1.6%, (iii) 3.0%

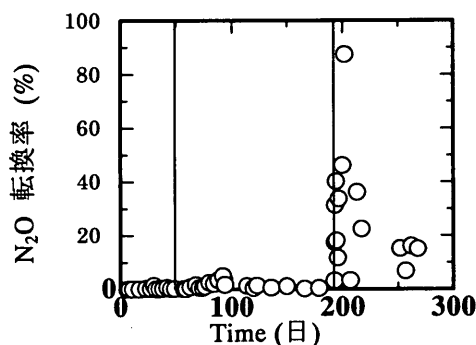


図 13. 除去窒素に対する N_2O 転換率の経日変化

7. 土壌トレンチ、人工湿地、ラグーンの各システムによる生活系排水処理特性および CH_4 、 N_2O 発生特性の解析評価と開発途上国への汎用化・普及に向けた技術開発に関する研究

世界の人口に大きな割合を占める開発途上国において水環境修復・改善技術を導入する上では、これらの地域の経済・エネルギー事情等を考慮すると、「建設費が安い」「運転に伴うエネルギー消費が少ない」「運転・維持管理が容易である」といった項目が満足される必要がある。そのため、土壌・沼沢地・湿地等を活用した生態工学的手法が多用されることとなる。そこで、特に開発途上国において適用が期待される生態工学活用型水処理システムとして、土壌トレンチ、人工湿地、ラグーンを対象として、水質浄化特性や CH_4 、 N_2O 発生特性等について比較検討を行うと同時に、水環境の修復・改善と地球温暖化防止の観点から解析評価を行った。

7.1 実験方法

7.1.1 嫌気ろ床・土壌トレンチシステム

日本および中国における土壌処理システムからの CH_4 、 N_2O 発生量の現場測定を行った。日本で測定を行った処理施設は、し尿を対象排水とし、嫌気ろ床槽と土壌トレンチから構成されており、土壌は現場のものを使用している。処理規模は 20 人程度であり、嫌気ろ床槽の HRT が 24 時間、土壌トレンチの水量負荷は $100\text{L}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ であった。一方、中国の処理施設は遼寧省瀋陽市に設置された施設で、同様に嫌気ろ床槽と土壌トレンチから構成されるが、雑排水を含む生活系排水を処理対象としている。処理用の土壌は日本と同様に現場のものを使用した。処理規模は 1,000 人程度であり、嫌気ろ床槽の HRT が 14 時間、土壌トレンチの水量負荷は同様に $100\text{L}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ に設定した。各処理施設の流入水質については表 3 に示すとおりである。

次に、土壌処理プロセスからの CH_4 、 N_2O 発生特性および発生機構等について、ベンチスケール装置を用いて検討した。装置は容積 1L の嫌気ろ床槽と 5L の土壌トレンチから構成され、その構造は測定を行った現場施設と同様である。実験装置の概略については図 14 に示すとおりである。実験系は 2 系設定し、一般的な土壌処理プロセスとしての非通気系 (Run1) と、土壌中の ORP を高く維持するための微量通気系 (Run2) とした。通気の方法は、土壌トレンチの土壌層の下部に散気管を設置し、ブロワを用いて行った。通気量は $0.2\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ とした。土壌トレンチの土壌は黒ボク土を使用した。運転条件についても、現場施設と同様に嫌気ろ床槽の HRT を 24 時間、土壌トレン

表3. 日本および中国の土壌活用型生活系排水処理施設における流入原水の水質

流入原水 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	日本	中国
BOD	252	266
T-N	192	87
T-P	26	—

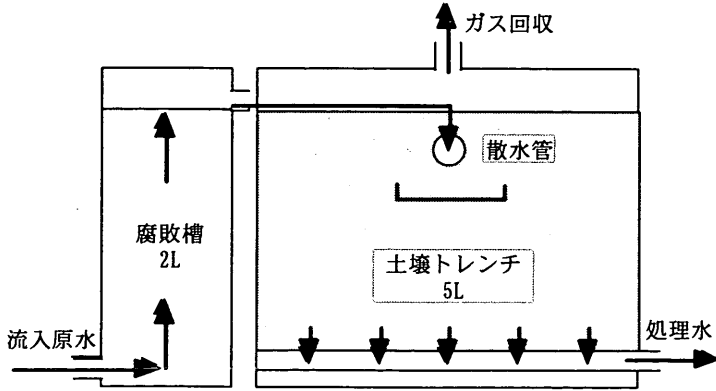


図14. ベンチスケール土壌トレンチ実験装置の概要

チの水量負荷を $100\text{L}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ とし、コミュニティープラントに流入する実生活排水を供試排水とした。なお、実験装置は 20°C 恒温室内に設置した。

現場調査、室内実験いずれにおいても、試料の採取および分析は、水試料としては流入水および、処理水の BOD, COD, TOC, T-N, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_x\text{-N}$, T-P, $\text{PO}_4\text{-P}$, pH, ORP 等について、ガス試料としては、ガス回収チャンバーを用いて、土壌表面から発生する CO_2 , CH_4 , N_2O について行った。

7.1.2 水生植物植栽人工湿地システム

土壌・水生植物を活用した生態工学技法を導入した処理システムとして、直径 30cm, 深さ 1m の円柱カラムを用い、これを 8 系設置した。なお、水生植物としてはヨシ、マコモ、ガマを植栽した系を用い、対照系として水生植物を非植栽の系を用いた。また、それぞれ、生活排水および浄化槽処理水を流入する系として比較を行い、土壌としては解析・評価を単純化するために川砂を充填することとした。なお、本研究においては、植物による処理能力を実用化レベルで検証するために、実際の生活排水および浄化槽処理水を用いた。水生植物としてはヨシ、マコモ、ガマを植栽し、流入負荷条件としては、水理的滞留時間 (HRT) は 7 日間とした。

試料の採取および分析は、水質については流入水および処理水の BOD, COD, TOC, T-N, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_x\text{-N}$, T-P, $\text{PO}_4\text{-P}$, pH 等、ガスについては装置土壌表層から発生する CO_2 , CH_4 , N_2O 等とした。

7.1.3 ラグーンシステム

実験室規模ラグーンシステムと実規模ラグーンシステムについて検討を行った。実験室規模での実験装置は、容量 16L の水槽を 3 槽直列に接続したものとし、前槽においてオーバーフローした処理水を次槽の底部に流入させるようにした。処理系全体の HRT は 15 日、照度は $4,000\text{lux}$ (明暗 12 時間) に設定し、 30°C の恒温条件下で実験を行った。供試排水は $\text{BOD } 200\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{T-N } 50\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{T-P } 6\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ に調整したペプトン・デキストリン系合成排水を用いた。

実規模ラグーンシステムとしては、タイ王国ペップリロイヤルプロジェクトの排水処理施設内にある、調整池 (SP) 1 池、通性池 (OP) 3 池、仕上げ池 (PP) 1 池の合計 5 池から構成されるラグーンシステムを用いた。処理施設全体の概要については図 15 に示すとおりである。

これらの実験における測定項目としては、水質については流入水、各反応工程水および処理水の BOD, COD, TOC, T-N, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_x\text{-N}$, T-P, $\text{PO}_4\text{-P}$, pH 等、発生ガスについては処理槽水面から発生する CO_2 , CH_4 , N_2O 等とした。

7.2 結果および考察

7.2.1 嫌気ろ床・土壌トレンチシステムにおける汚水処理特性および CH_4 , N_2O 発生特性

日本、中国それぞれの実態調査における、処理水質と CH_4 , N_2O 発生特性についての、実験期間を通しての平均値は、表 4 に示すとおりである。BOD 除去率としては、日本および

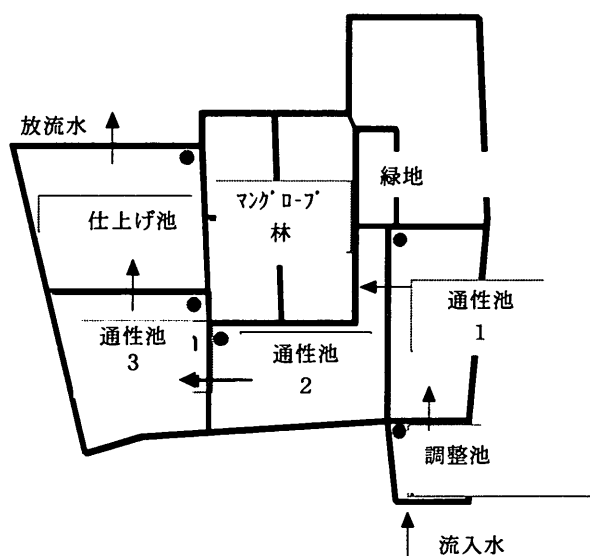


図 15. タイ王国における実規模ラグーンの処理フロー

中国がそれぞれ 99% および 90% と、ともに良好な処理能を示した。また、窒素についてはその除去を目的としていないので、除去率はそれぞれ約 23% および 28% にとどまった。

CH₄, N₂O 発生量は、夏期に高く、冬期に低くなる傾向が見られた。日本における CH₄, N₂O 発生量は、8 月でそれぞれ約 16.1 g CH₄・m⁻³ および 14.6 g N₂O・m⁻³ であったのが、2 月にはそれぞれ約 8.6 g CH₄・m⁻³ および 8.2 g N₂O・m⁻³ に減少した。また、N₂O 発生量は日本の測定値が中国の 2 倍以上となったが、これは窒素の流入負荷量の違いを反映しているものと考えられ、処理システムに流入する窒素あたりの N₂O への転換率はいずれも 2-4% と同程度であった。生活排水を処理している活性汚泥法における流入窒素あたりの N₂O 転換率は、窒素除去を想定していない標準活性汚泥法で 1% 前後、硝化・脱窒プロセスを組み込んだ嫌

気好気法ではその数十分の一という研究結果もある。これらのことを考慮すると、土壌処理プロセスにおける N₂O 転換率は活性汚泥法に比較して、最大で数倍-数十倍程度高い値をとっている。一方、CH₄ 発生量は、流入 BOD 濃度に大差がないにも関わらず日本の処理施設の測定値の方が大きくなり、流入 BOD の CH₄ 転換率は、日本の処理施設では 3-4% であったのに対して、中国の場合は 1% 前後であった。この CH₄ の発生量の違いに関しては、トレンチの埋設深度の違いによる影響が最も大きい可能性が考えられた。実際、日本の施設の埋設深度が 30cm 程度なのに対し、中国の施設は凍結深度以下の 2m 程度となっており、CH₄ 発生特性の違いは、トレンチ部から地表に向かって生成されると予想される CH₄ 酸化層の厚さの違いに起因しているものと考えられた。以上のように、土壌処理プロセスからの CH₄, N₂O 発生特性は、流入水質に依存することはもちろんであるが、トレンチの埋設深度等の処理施設の構造の違いによっても大きく異なってくる可能性が示唆された。

次に、ベンチスケール装置における水質データおよび CH₄, N₂O 発生量のデータに基づき、窒素に関する物質収支を試算したところ、現場処理施設のモデルである非通気系 (Run 1) では図 16 に示すとおりである。本処理システムの窒素収支として、原水の T-N を 100% とすると嫌気ろ床槽で窒素形態のほぼ 100% が NH₄-N となり、土壌トレンチ内で 27% が除去され、73% は基本的には NO₃-N として処理水中に含まれていた。そして、ガス試料中の N₂O の測定結果から、除去された窒素の 26% が N₂O に転換されたと推測され、これを流入窒素あたりの転換率に換算すると約 8% となった。この転換率は現場調査結果の 2 倍程度の値であるが、土壌処理システムとしての N₂O 発生ポテンシャルは、状況によってはこの程度の値に達する可能性があるものと考えられる。

また、土壌処理システムからの CH₄, N₂O 発生抑制のためには ORP を高く維持すればよいと考えられることから、通気による ORP の特性と CH₄, N₂O 発生抑制効果について検討した。CH₄, N₂O 発

表4. 日本および中国の土壌処理実施設における調査結果

処理水質 (mg, L ⁻¹)	日本	中国
BOD	3	26
T-N	148	63
T-P	1	—
GHG発生量 (g, m ⁻³ 流入原水)		
CH ₄	9.3-13.9	3.0-4.5
N ₂ O	8.2-12.2	3.3-5.0
GHG転換率 (流入BOD, Nあたり)		
CH ₄	2.8-4.1	0.8-1.3
N ₂ O	2.7-4.0	2.4-3.7

生特性としては、実験初期においては Run1（非通気系）の CH_4 、 N_2O 発生量はそれぞれ $5.2\text{g CH}_4\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $3.4\text{gN}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-3}$ 、また Run 2（通気系）では $5.4\text{g CH}_4\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $3.2\text{gN}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-3}$ と大きな差はみられなかった。しかし 1 年経過後には、双方の系において CH_4 、 N_2O 発生量はともに増大し、Run1 の CH_4 、 N_2O 発生量はそれぞれ $14.3\text{g CH}_4\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $5.7\text{gN}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-3}$ 、また Run2 については $6.6\text{g CH}_4\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $3.7\text{gN}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-3}$ の値をとった。通気により高い ORP が維持されている Run2 においては CH_4 、 N_2O 発生量の増大の程度は小さなものとなったのに対して、ORP の著しい低下が観察された非通気の Run 1 では、特に CH_4 の発生量が大幅に増大した。Run2 の Run1 に対する CH_4 、 N_2O 発生量はそれぞれ 1/2 および 2/3 程度まで抑制されており、通気により ORP の低下を防止し、トレンチ内部を適度に好気的な環境に維持することで、これらのガスの発生を効果的に削減することが可能であることが明らかとなった。

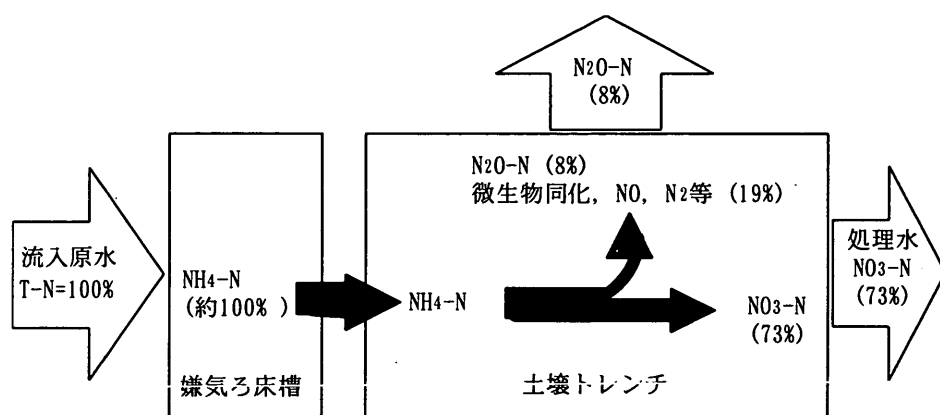


図16. 非通気系土壌トレンチベンチスケール実験装置の窒素収支

7.2.2 人工湿地システムにおける汚水処理特性および CH_4 、 N_2O 発生特性

人工湿地システムについては、ヨシ、マコモのいずれの系においても BOD で 80%以上の除去率が認められたが、冬季の水温低下に伴い処理能が低下した。このことから植物の処理能力を、冬季に高めるためには、HRT、流入負荷条件の適正化が重要であると考えられた。水生植物としてのヨシ、マコモのいずれも水中の茎の部分、底泥表層部には生物膜が形成され、これらの生物膜の機能で BOD 除去が行われたものと考えられた。なお、生物膜量は、流入有機物負荷量に左右され、生活排水流入系の方が浄化槽処理流入系に比べて当然のこと高いことが認められた。N、P 除去特性としては、ヨシ、マコモの植物の成長量と温度等との間に相関が認められ、水生植物成長速度および付着生物膜の活性等の高いときに窒素・リン除去機能の高まる傾向にあることがわかった。なお、窒素除去機能の向上においては、根圏部での硝化脱窒反応が大きく関与しているものと考えられた。また、浄化槽処理水は、BOD $10\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下、T-N $10\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下、T-P $3\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下程度であったが、これらは水質汚濁指標からみると強腐水性に位置づくもので水生植物による浄化と組み合わせることによりさらに水質の高度化が期待できることから、適正な組み合わせの重要性が示唆された。

また、人工湿地システムからの CH_4 、 N_2O 放出特性については、ヨシ、マコモともに温度の違い

において CH_4 の発生ポテンシャル、 N_2O の発生ポテンシャルに差があること、生活系排水および浄化槽処理水の流入有機物負荷が高い方が CH_4 の発生ポテンシャルが高まり、 N_2O の発生ポテンシャルの低下する傾向が認められた。また、ヨシの方がマコモより CH_4 産成能が低い結果となったが、その原因としては、根圏構造の違いによるメタン酸化細菌の定着特性と CH_4 発生抑制機能とが関係している可能性が示唆された。さらに、 CH_4 から CO_2 へのガス質変換による温暖化ポテンシャル低減技術として、ヨシの方がマコモに比べて長期的運転より高いことが明らかとなった。

7.2.3 ラグーンシステムにおける汚水処理特性および CH_4 、 N_2O 発生特性

実験室規模ラグーンシステムにおける、流入原水の BOD の平均値は $200\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、処理能安定後の第 1 槽、第 2 槽および第 3 槽の流出水の BOD の平均値はそれぞれ 44, 12, $8\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ であった。BOD 除去特性を評価すると、第 1 槽において約 80% の BOD が除去され、最終的な BOD 除去率は 96% が達成された。第 1 槽で大部分の BOD が除去されたことについては、流入する懸濁物質 (SS) のほとんどが第 1 槽で沈殿したことによるところが大きいと考えられた。また、流入原水の BOD 値は変動があったにもかかわらず、第 3 槽流出水 (すなわち最終放流水) の BOD 値は極めて低濃度で安定していた。窒素に関しては、流入原水の T-N の平均値は $64\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、処理能安定後の第 1 槽、第 2 槽および第 3 槽の流出水の T-N の平均値はそれぞれ 23.7, 13.7, $9.2\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ であった。これらの値から算出した T-N 除去率は 86% と、良好な窒素除去能が得られた。第 1 槽において T-N の 60% 以上が除去されたが、この理由は、BOD の場合と同様に、SS 中の窒素分が第 1 槽で沈殿したことによるところが大きいものと考えられた。

実験室規模ラグーンシステムにおける、処理能安定時の各槽ごとの大気中への平均 N_2O 放出速度は、第 1 槽、第 2 槽、第 3 槽の順にそれぞれ 0.067 , 0.36 , $0.25\text{mg}\cdot\text{N}_2\text{O}\cdot\text{day}^{-1}$ であり、実験系全体での値は $0.67\text{mg}\cdot\text{N}_2\text{O}\cdot\text{day}^{-1}$ であった。また、水中の溶存態の N_2O 濃度の平均値は、第 1 槽、第 2 槽、第 3 槽の順にそれぞれ 0.024 , 0.10 , $0.23\text{mg}\cdot\text{N}_2\text{O}\cdot\text{L}^{-1}$ であり、第 3 槽が他の 2 槽に比較して高い結果となった。排水からの生物学的な窒素除去は、硝化・脱窒の過程を経てなされるが、特に脱窒工程における N_2O 還元酵素は、その活性が DO の影響を強く受けることが報告されている。このため、DO 濃度の低い第 1 槽および第 2 槽においては硝化反応とともに脱窒反応も適宜進行するが、第 3 槽では特に DO 濃度が高いために、硝化反応は効果的に進行するが、脱窒反応は N_2O で反応が止まり、その結果溶存態 N_2O 濃度が高まった可能性が考えられる。また、第 3 槽においては、BOD 濃度も極めて低くなっており、脱窒に必要な有機炭素源も不足した可能性が考えられる。そこで、処理系全体における DO 濃度と大気中への N_2O 放出速度との関係について解析した結果、DO 濃度が $3\text{--}4\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 程度の領域で N_2O 放出速度は最大となった (図 17)。ラグーンシステムにおいては、第 1 槽のように DO 濃度がゼロに近いような低い領域においては硝

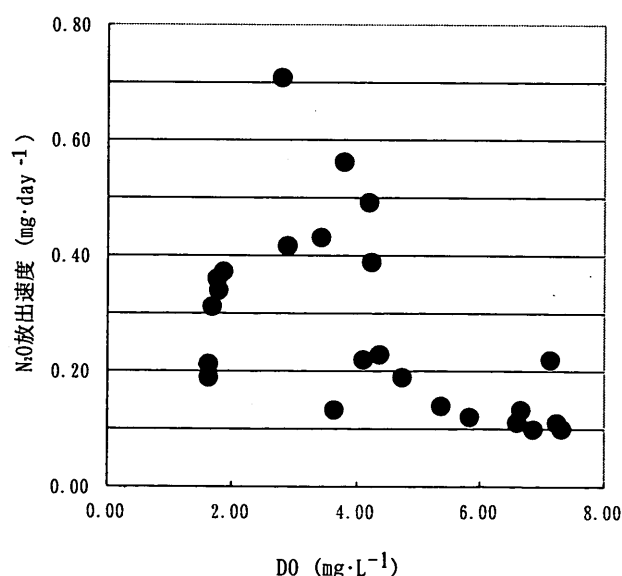


図17. DOと大気中への N_2O 放出速度の関係

化反応とともに脱窒反応が同時に進行し、第3槽のようにD0濃度が高い領域においては硝化反応が優先的に進行していると考えられる。そして、平均D0濃度が $4.0\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ であった第2槽のように、あるD0濃度領域においては硝化・脱窒の両方の反応が不完全に進行し、その結果 N_2O 放出速度が高まる可能性が示唆された。また、大気中への N_2O 放出速度が最も大きかった第2槽における、水中の $\text{NO}_2\text{-N}$ 濃度と大気中への N_2O 放出速度との関係について解析したところ、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 濃度が高まるほど N_2O 放出速度も上昇するという結果が得られた(図18)。このことから、生物学的窒素除去プロセスにおいて N_2O の発生を抑制する上では、 $\text{NO}_2\text{-N}$ の蓄積を防止することが重要であることが確認された。処理系全体での流入窒素あたりの $\text{N}_2\text{O}\text{-N}$ 転換率は、大気中へのものが0.21%、処理水中へのものが0.22%、合計0.43%となり、溶存態での放出量が大気中への放出量と同程度の値であった。

CH_4 については、第1槽における大気中への放出速度が一貫して極めて高い値を示した。各槽ごとの大気中への平均 CH_4 放出速度は、第1槽、第2槽、第3槽の順にそれぞれ $138, 2.9, 0.13\text{mg}\cdot\text{CH}_4\cdot\text{day}^{-1}$ であり、実験系全体での値は $141\text{mg}\cdot\text{CH}_4\cdot\text{day}^{-1}$ であった。また、水中の溶存態の CH_4 については極めてわずかな量であったが、これは、 CH_4 は N_2O と異なり水への溶解度が非常に小さいために、生成した CH_4 は直ちに大気中へと放出された結果と考えられた。また、流入BODあたりの $\text{CH}_4\text{-C}$ 転換率は16.7%となった。

次に、実規模ラグーンシステムの污水処理特性であるが、BOD、N、P除去率がそれぞれ90%、72%、86%と、極めて良好な処理能が得られた。実験室規模ラグーンシステムの検討結果も併せて、污水処理において、富栄養化防止の観点からラグーンシステムは極めて効果的な手法であることが明らかとなった。

実規模ラグーンシステムにおける、システム全体からの CH_4 、 N_2O の放出速度については、図19に示すとおりである。実施設においては、 CH_4 、 N_2O ともに放出速度のばらつきが大きく、特にインベントリーの精度向上の観点からは、より詳細な調査の必要性が明らかとなった。また、この調査結果から、 CH_4 と N_2O は、放出特性としてトレードオフ的な関係にある可能性が示唆された。このことは、 CH_4 が絶対嫌気条件下で発生するのに対し、そのような条件下では N_2O はほぼ完全に脱窒に費やされてしまうこと、逆に N_2O が発生しやすい微好気条件下では CH_4 発生には至らないことから想像できる。

実験室規模および実規模双方のシステムにおける N_2O 放出特性を比較すると、嫌気性や好気性の条件下では N_2O 放出速度は小さく、微好気性の条件下で極めて大きいという、共通した傾向が観察された。各ラグーンシステムにおいて、最大 N_2O 放出速度では6倍近い差がみられたが、これは実験室規模の装置では水深が浅い等の理由から微好気性条件になりやすかったためと考えられた。また、実際の施設にみられる、水流の短絡防止を目的とした邪魔板の設置や、システムのコンパクト化による壁面積割合の増大は、硝化細菌の増殖を促進し、窒素除去能の向上をもたらすが、同時に N_2O 放出速度を増大させる可能性が示

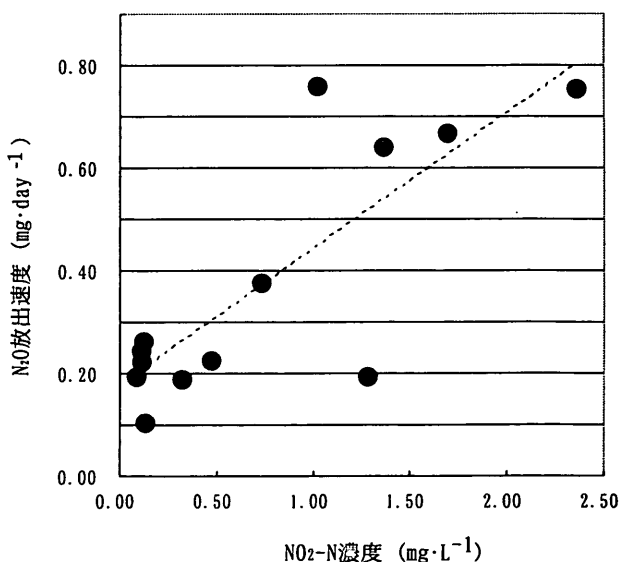


図18. 第2槽の $\text{NO}_2\text{-N}$ 濃度と N_2O 放出速度の関係

唆された。このことから、 N_2O 放出抑制を図る上では、有機物除去が主である現在の設計基準の再検討の必要が示唆された。ラグーンシステムにおける N_2O の転換率としては、1%以下であり、効率的な硝化・脱窒の進行により、転換率を極めて小さくできる可能性が示唆された。これに対し、ラグーンシステムにおける CH_4 の転換率は数十%に達し、特に第1ラグーンにおいて大量の CH_4 が放出されることが明らかとなった。水質の結果とともに考察すると、第1ラグーンにおいては、流入有機物の大きな割合が除去されるものの、そのほとんどが CH_4 に転換している可能性があり、ラグーンシステムにおいては CH_4 への対策の必要性が示唆された。

以上の結果から、土壌トレంచి、人工湿地、ラグーンの各システムは、良好な BOD・窒素・リン除去能を有することが確認されたものの、 CH_4 、 N_2O 発生抑制の観点からは、さらなる研究・技術開発が必要であることが示唆された。

7.2.4 IPCC インベントリー充実化・精度向上に関する検討評価

IPCC インベントリーの充実化・精度向上の観点からは、例えば、 CH_4 、 N_2O の排出量試算のための IPCC ガイドラインにおける、生活系排水由来の CH_4 転換率のデフォルト値は 75-85%と設定されている。しかしながら、土壌トレంచి、人工湿地、ラグーンの各污水处理システムにおける流入 BOD の CH_4 転換率には大きな差がみられ、比較的、値が近いと考えられるラグーンシステムにおいても、 CH_4 放出速度および CH_4 転換率は極めて大きな変動幅を有している。実際、生態工学活用型の污水处理システムは、リアクターを用いる活性汚泥法等の処理プロセスに比較して人為的に制御可能な部分の割合が小さく、自然環境等の影響を大きく受けることから、污水处理特性や GHGs 発生特性も大きく変動する可能性が考えられる。こうした現状に鑑みると、実態調査に基づくさらなるデータの集積と解析評価に基づき、運転操作・維持管理条件の適正化のための検討を図ることが必要不可欠であると考えられる。

本研究の遂行により、これまでほとんど皆無といえる、これらの生態工学活用型污水处理システムからの CH_4 、 N_2O 排出量の試算が着手されたことから、デフォルト値しかなかった IPCC インベントリーを精緻化・充実化していく上で、極めて重要な知見が得られた。

8. 本研究により得られた成果

- (1) 生活系排水処理システムの汚泥の *nosZ* 遺伝子は、他の環境中の *nosZ* 遺伝子と異なるクラスターを形成することがわかった。また、*Ralstonia eutropha* に近縁な微生物種が優占化している可能性が示唆された。さらに、微好気条件下でも *nosZ* mRNA を発現している微生物の存在が示唆された。

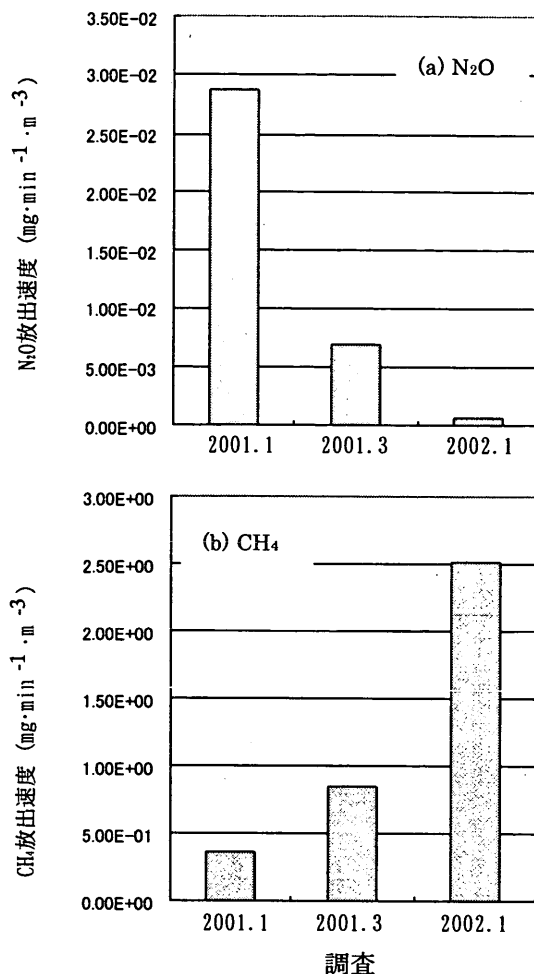


図19. 実規模ラグーンにおける CH_4 、 N_2O 発生速度

- (2) 水温が 10℃ 付近の条件下では、間欠ばつ気活性汚泥法に *Alcaligenes faecalis* 包括固定化担体を導入することは、硝化率および窒素除去率を向上させる上で効果的であることが分かった。また、FISH 法による観察の結果、担体導入から 4 ヶ月経過後においても *A. faecalis* が担体内に高密度に保持されていることが確認できた。
- (3) 包括固定化した *A. faecalis* を高度嫌気・好気膜分離活性汚泥浄化槽に導入することにより、冬季における硝化能・窒素除去能の維持・向上、および N_2O 放出抑制に対して効果的であることが明らかとなった。
- (4) 浄化槽における硝化液循環の影響・効果として、循環の有無に関わらず硝化は進行するが、非循環型では脱窒反応が起こらないので窒素除去率は低かった。 N_2O 放出速度は、循環型と非循環型は同程度を示したが、 CH_4 放出速度は非循環型が循環型の値を大幅に上回った。富栄養化の防止および温室効果ガス、特に CH_4 の発生抑制の観点から、浄化槽における硝化液循環は効果的であることがわかった。
- (5) 産業系排水の生物学的窒素除去の硝化工程において、塩濃度の上昇は N_2O 発生量の増加を招き、硝化能よりも N_2O 発生量は鋭敏に塩濃度の上昇に反応することが示唆された。また、脱窒工程において塩濃度の上昇は、定常状態における N_2O 発生量には大きな影響は及ぼさないが、短期間突発的に N_2O 発生量を増加する可能性が示唆された。さらに、嫌気好気循環型活性汚泥法を用いて連続運転を行った結果、塩濃度の上昇が N_2O 発生量に直接的・間接的に影響をおよぼし、場合によっては N_2O 発生量が急激に増加する可能性が示唆された。
- (6) 生態工学活用型污水处理システムにおける、污水处理特性や GHGs 発生特性は大きく変動したことから、実態調査に基づくさらなるデータの集積と解析評価が必要不可欠であると考えられる。しかしながら、デフォルト値しかなかった IPCC インベントリーを精緻化・充実化していく上で、極めて重要な知見が得られた。

以上のことから、本研究の推進により、各種排水とその処理における、各分野で開発されつつある CH_4 、 N_2O 削減中核対策技術と最適管理・操作条件等の検討評価と、国内はもとよりアジア地域の開発途上国への対策技術の普及とその導入・費用対効果の解析評価、そして IPCC インベントリー構築への貢献等、極めて重要な成果が得られた。

9. 引用文献

- (1) Anderson, I. C., M. Poth, J. Homstead and D. Burdige; "A Comparison of NO and N_2O Production by the Autotrophic Nitrifier *Nitrosomonas europaea* and Heterotrophic Nitrifier *Alcaligenes faecalis*," *Appl. Environ. Microbiol.*, **59**, 3525-3533 (1993)
- (2) Beline, F. and J. Martinez; "Nitrogen Transformations during Biological Aerobic Treatment of Pig Slurry: Effect of Intermittent Aeration on Nitrous Oxide Emissions," *Bioresour. Technol.*, **83**, 225-228 (2002)
- (3) Chan, A. S. K. and T. B. Parkin; "Methane Oxidation and Production Activity in Soils from Natural and Agricultural Ecosystems," *J. Environ. Qual.*, **30**, 1896-1903 (2001)
- (4) Doorn, M., D. Liles and S. Thorneloe; "Quantification of Methane Emissions from Latrines, Septic Tanks, and Stagnant, Open Sewers in the World," *Proceedings of the International Symposium on Non CO_2 Greenhouse Gases*, 2nd, pp.83-88, Noordwijkerhout, Netherlands (2000)

- (5) Hanaki, K., H. Zheng and T. Matsuo; "Production of nitrous Oxide Gas during Denitrification of Wastewater," Wat. Sci. Tech., **26**, 1027-1036 (1992)
- (6) House, S. J. and L. M. Evison; "Hazards of Industrial Anaerobic Digester Effluent Discharges to Sewer," Wat. Environ. Manag., **11**, 282-288 (1997)
- (7) Itokawa H, Hanaki K, Matsuo T. Nitrous oxide emission during nitrification and denitrification in a full-scale night soil treatment plant. Wat Sci Tech 1996; **34** (1-2): 277-284.
- (8) Jia, Z., Z. Cai, H. Xu and X. Li; "Effect of Rice Plants on CH₄ Production, Transport, Oxidation and Emission in Rice Paddy Soil," Plant Soil., **230**, 211-221 (2001)
- (9) Kong, H. N., Y. Kimochi, M. Mizuochi, R. Inamori and Y. Inamori; "Study of the Characteristics of CH₄ and N₂O Emission and Methods of Controlling their Emission in the Soil Trench Wastewater Treatment Process," Sci. Total Environ., **290**, 59-67 (2002)
- (10) Kimochi Y, Inamori Y, Mizuochi M, Xu KQ, Matsumura M. Nitrogen removal and N₂O emission in a full-scale domestic wastewater treatment plant with intermittent aeration, J Ferment Bioeng 1998; **86** (2): 202-206.
- (11) Mckenney, D. J., C. F. Drury, B. M. Findlay, T. McDonnell and C. Gadjia; "Kinetics of Denitrification by *Pseudomonas fluorescens*: Oxygen Effects," Soil Biol. Biochem., **26**, 901-908 (1994)
- (12) Mizuochi M, Inaishi T, Ichikawa M, Ooishi A, Kimochi Y, Inamori Y. Effects of SRT and DO on N₂O emission in biological anoxic-oxic activated sludge process. J Jpn Soc Wat Environ 1999; **22** (2): 145-151 (in Japanese).
- (13) Papen, H., R. Berg, I. Hinkel, B. Thoene and H. Rennenberg; "Heterotrophic Nitrification by *Alcaligenes faecalis*: NO₂⁻, NO₃⁻, N₂O and NO Production in Exponentially Growing Cultures," Appl. Environ. Microbiol., **55**, 2068-2072 (1989)
- (14) Peter, C., C. Patric and H. Robert; "Nitrous Oxide Emissions from Municipal Wastewater Treatment," Environ. Sci. Technol., **29**, 2352-2356 (1995)
- (15) Sumer, E., A. Weiske, G. Benckiser and J. C. G. Ottow; Influence of Environmental Conditions on the Amount of N₂O Released from Activated Sludge in a Domestic Wastewater Treatment Plant," Experientia, **51**, 419-422 (1995)
- (16) Sümer E, Weiske A, Benckiser G, Ottow JCG. Influence of environmental conditions on the amount of N₂O released from activated sludge in a domestic waste water treatment plant. Experientia 1995; **51**: 419-422.
- (17) Wu, X. L., Y. Inamori and T. Ebisuno; "Factors Affecting Performance of *Alcaligenes faecalis* in Activated Sludge Process under Aerobic Conditions," Mizukankyou Gakkaishi, **22**, 215-221 (1999)

10. 国際共同研究等の状況

日中環境保護協定による共同研究

11. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表（学術誌・書籍）

<学術誌（査読あり）>

- ①金正淑, 稲森悠平, 金時浚 (2000) 三相流動反応槽による養殖場排水の処理特性, 水環境学会誌, 23(2), 101-107.
- ②稲森悠平, 富永和樹, 木持謙, 水落元之, 戎野棟一, 松村正利: 生物学的排水処理における硝化活性及び N_2O 生成速度に及ぼす水温および窒素負荷の影響, 水環境学会誌, 24, 97-102 (2001)
- ③He, Y. W., Mizuochi, M., Kong, H. N., Inamori, Y. and Sun T. H.: Nitrous oxide emissions from aerated composting of organic waste, Environ. Sci. Tech., 35, 232-238 (2001)
- ④Park, K. Y., Lee, J. W., Inamori, Y., Mizuochi, M. and Ahn, K. H.: Effects of fill modes on N_2O emission from the SBR treating domestic wastewater, Water Sci. Tech., 43, 147-150 (2001)
- ⑤Kong, H. N., Kimochi, Y., Mizuochi, M. Inamori, R. and Inamori, Y.: Study on the characteristics of CH_4 and N_2O emission and method of controlling their emission in the soil trench wastewater treatment process, Sci. Total Environ., 290, 59-67 (2002)
- ⑥Noda, N., Yoshie, S., Miyano, T., Tsuneda, S., Hirata, A. and Inamori, Y.: PCR-DGGE analysis of denitrifying bacteria in a metallurgic wastewater treatment process, Wat. Sci. Technol., 46 (1-2), 333-336 (2002)
- ⑦Yoshie, S., Noda, N., Miyano, T., Tsuneda, S., Hirata, A., Inamori, Y.: Characterization of microbial community in nitrogen removal process of metallurgic wastewater by PCR-DGGE, Wat. Sci. Technol., 46 (11-12), 93-98 (2002)
- ⑧Noda, N., Kanako, N., Mikami, M., Kimochi, Y., Tsuneda, S., Hirata, A., Mizuochi, M. and Inamori, Y.: Effects of SRT and DO on N_2O reductase activity in anoxic-oxic activated sludge system, Wat. Sci. Technol., (accepted)
- ⑨稲森悠平, 山海敏弘, 松村正利: クロスメディアを踏まえた環境低負荷資源循環型の排水処理技術の高度化, 資源環境対策, 38, 770-782 (2002)

<学術誌（査読なし）>

なし

<書籍>

- ①稲森悠平(共著): 生活排水対策のための高度処理浄化槽の普及と展開に向けて, ぎょうせい, 東京 (2002)

<報告書類等>

なし

(2) 口頭発表

1. 桑原享史, 松村正利, 藤本尚志, 林紀男, 稲森悠平, 水落元之: 高次捕食者として魚類を導入した食物連鎖活用型排水処理システムの解析, 日本水処理生物学会第 37 回神奈川大会, 相模原, (2000. 11)
2. 富永和樹, 蛭江美孝, 稲森悠平, 水落元之, 木持謙, 三上真樹生, 角野立夫, 松村正利:

- Alcaligenes faecalis* の低水温条件下における動態と硝化・脱窒特性評価, 日本水処理生物学会第 37 回神奈川大会, 相模原, (2000. 11)
3. 稲森悠平, 水落元之, 大内山高広, 大森威宜, 古屋昇: ラグーンによる生活排水の処理と N_2O , CH_4 発生ポテンシャルの解析, 日本水処理生物学会第 37 回神奈川大会, 相模原, (2000. 11)
 4. 藤井邦彦, 須藤隆一, 孔海南, 稲森悠平, 水落元之: 無循環多段式嫌気ろ床・土壌トレンチの生活排水由来栄養塩類除去特性と温室効果ガス発生抑制の安定性, 日本水処理生物学会第 37 回神奈川大会, 相模原, (2000. 11)
 5. 金正淑, 南光鉉, 稲森悠平, 金時浚: 包括固定化した担体を用いた活性汚泥法の性能評価, 日本水処理生物学会第 37 回神奈川大会, 相模原, (2000. 11)
 6. 稲森悠平, 水落元之, 三上真樹生, 富永和樹, 野田尚宏, 木持謙, 常田聡, 平田彰: 循環式硝化脱窒法における N_2O 発生特性におよぼす SRT 等の運転操作条件の影響, 日本水処理生物学会第 37 回神奈川大会, 相模原, (2000. 11)
 7. 稲森悠平, 水落元之, 石川樹理, 富永和樹, 木持謙, 古屋昇: 温室効果ガス N_2O の浄化槽放出量の実態調査, 日本水処理生物学会第 37 回神奈川大会, 相模原, (2000. 11)
 8. 稲森悠平, 稲森隆平, Preeti Dass, 大内山高広, 岩見徳雄, 藤井邦彦, 水落元之, 杉浦則夫: 生態工学技術としての土壌・水生植物植栽浄化法における栄養塩類除去と CH_4 , N_2O の発生抑制機構の解明, 日本水処理生物学会第 37 回神奈川大会, 相模原, (2000. 11)
 9. 富永和樹, 木持謙, 水落元之, 稲森悠平, 角野立夫, 松村正利: 包括固定化 *Alcaligenes faecalis* の硝化・脱窒機能の低水温条件下等における評価, 第 35 回日本水環境学会年会, 岐阜, (2001. 3)
 10. 金正淑, 南光鉉, 稲森悠平: 固定化法による温暖化ガス抑制および動力学的解析, 第 35 回日本水環境学会年会, 岐阜, (2001. 3)
 11. 稲森悠平, 水落元之, 三上真樹生, 野田尚宏, 常田聡, 平田彰, 富永和樹, 木持謙: 循環式硝化脱窒活性汚泥法における微生物群集構造と N_2O 発生特性の解析, 第 35 回日本水環境学会年会, 岐阜, (2001. 3)
 12. 稲森悠平, 水落元之, 大森威宜, 古屋昇, 大内山高広: タイ王国を対象としたラグーンによる生活排水処理特性と N_2O 発生ポテンシャルの解析, 第 35 回日本水環境学会年会, 岐阜, (2001. 3)
 13. 稲森悠平, 水落元之, 木持謙, 石川樹理, 古屋昇, 富永和樹: 生活排水対策としての浄化槽からの季節変動を考慮した N_2O 放出量のインベントリー調査・解析, 第 35 回日本水環境学会年会, 岐阜, (2001. 3)
 14. 稲森悠平, 稲森隆平, 田中修三, 水落元之, Preeti, D., 杉浦則夫: 生態工学システムとしての植物・土壌浄化法における N・P 除去, 温室効果ガス発生特性, 第 35 回日本水環境学会年会, 岐阜, (2001. 3)
 15. 稲森悠平, 金子直哉, 木持謙, 水落元之, 野田尚宏, 三上真樹生, 常田聡, 平田彰: 循環式硝化脱窒法における運転操作条件と N_2O 発生との関係解析, 日本水処理生物学会第 38 回大会, 神戸, (2001. 11)
 16. 藤井邦彦, 孔海南, 水落元之, 稲森悠平, 戎野棟一: 無循環多段式嫌気ろ床・土壌トレンチの長期運転による温暖化ガス発生および窒素リ除去特性, 第 36 回日本水環境学会年会, 岡

山, (2002. 3)

17. 稲森悠平, 水落元之, 金子直哉, 野田尚宏, 常田聡, 平田彰, 木持謙: 生活排水の循環式硝化脱窒法における DO 制御と N_2O 発生特性との関係解析, 第 36 回日本水環境学会年会, 岡山, (2002. 3)
18. 金正淑, 稲森悠平, 水落元之, 金時浚: 高度好気・嫌気膜分離活性汚泥法への *Alcaligenes faecalis* 固定化担体投入における窒素除去および N_2O 発生抑制効果の解析, 第 36 回日本水環境学会年会, 岡山, (2002. 3)
19. Noda, N., Kaneko, N., Mikami, M., Kimochi, Y., Tsuneda, S., Hirata, A., Mizuochi, M., Inamori, Y.: Effects of SRT and DO on N_2O reductase activity in anoxic-oxic activated sludge system, 2002 IWA The 5th specialized conference on small water and wastewater treatment systems, Turkey, Istanbul (2002. 9)
20. 孔海南, 水落元之, 稲森悠平, 木持謙, 藤井邦彦: BOD, 窒素, リン同時除去を目的とした非循環二段式土壌トレンチシステムによる生活排水処理—中国での実証的適用事例—, 日本水処理生物学会第 39 回大会, さいたま, (2002. 11)
21. 稲森悠平, 中尾昇平, 木持謙, 水落元之, 戎野棟一, 金子直哉, 常田聡, 平田彰: 生活排水対策システムの硝化液循環の有無における CH_4 , N_2O の放出特性の解析, 日本水処理生物学会第 39 回大会, さいたま, (2002. 11)
22. 金子直哉, 野田尚宏, 木持謙, 常田聡, 平田彰, 水落元之, 稲森悠平: 循環式硝化脱窒法における DO 濃度が N_2O 発生特性および微生物群集構造に及ぼす影響解析, 日本水処理生物学会第 39 回大会, さいたま, (2002. 11)
23. 稲森隆平, 井上武雄, 桂萍, 岩見徳雄, 水落元之, 稲森悠平, 松村正利: アシ・マコモ・ガマを用いた栄養塩類除去と温室効果が抑制特性, 日本水処理生物学会第 39 回大会, さいたま, (2002. 11)
24. 木持謙, 孔海南, 桑原享史, 桂萍, 水落元之, 稲森悠平, 須藤隆一: 生態工学活用型水処理システムにおける CH_4 , N_2O 発生特性の比較解析, 日本水処理生物学会第 39 回大会, さいたま, (2002. 11)
25. 金子直哉, 野田尚宏, 常田聡, 平田彰, 木持謙, 稲森悠平, 水落元之: 亜酸化窒素還元酵素 (*nosZ*) に基づく嫌気好気活性汚泥法における微生物群集構造解析, 第 37 回日本水環境学会年会, 熊本, (2003. 3)
26. 稲森悠平, 水落元之, 中尾昇平, 戎野棟一, 木持謙, 金子直哉, 常田聡, 平田彰: 水温変動および硝化液循環の有無の浄化槽プロセスにおける CH_4 , N_2O の発生特性解析, 第 37 回日本水環境学会年会, 熊本, (2003. 3)

(3) 出願特許 なし

(4) 受賞等 なし

(5) 一般への公表・報道等

①朝日新聞 (2001 年 11 月 19 日, 全国版, アシやマコモが温室効果を抑制—メタンガスを分解)

11. 成果の政策的な寄与・貢献について

土壌処理については, 中国において, 数百—数千人規模での生活系排水処理施設として, 複数地域で実用運転が開始されており, 水環境修復・改善技術として, 大きく貢献しつつある。