

B-16 地球温暖化抑制のための CH₄、N₂O の対策技術開発と評価に関する研究

(9) 東北アジア地域における CH₄、N₂O 抑制のための汚水・汚泥の適正処理技術開発

③ 湿地帯、酸化池、水生植物植栽地等のエコエンジニアリングシステムを用いた CH₄、N₂O 発生抑制技術開発

研究代表者 国立環境研究所地域環境研究グループ 稲森悠平

環境庁国立環境研究所

地域環境研究グループ 開発途上国環境改善（水質）研究チーム 稲森悠平・水落元之
孔海南 (EF フェロー)

平成 8 年～9 年度合計予算額 4,000 千円

(平成 9 年度予算額 2,000 千円)

〔要旨〕 本国際交流研究は、生活排水を処理する土壌トリフ、湿地帯、酸化池等からの CH₄、N₂O 等の地球温暖化ガスの発生を抑制できるエコエンジニアリングシステムを活用した地球温暖化ガス対策技術を開発し、日本等先進国だけでなく、中国等の近隣諸国も含めて汎用化することを目的としている。

平成 8 年度において日本と中国の土壌トリフ処理施設での CH₄、N₂O ガスの発生の実態調査と室内ベンチスケール土壌トリフでの物質収支の解明による CH₄、N₂O ガスの発生特性を解析し、両国における土壌トリフからの CH₄、N₂O ガスの放出原単位はいずれにおいても同様に生活排水を処理する活性汚泥法より数百倍高くなることが明らかとされた。また、中国側に土壌トリフ処理施設を普及した場合に巨大な放出量となることから、適切な抑制対策の開発と普及が重要と考えられた。

平成 9 年度には両国の国立試験機関に設置された同じ密閉ガス回収空間を設置したベンチスケール土壌トリフでの物質収支の解析による CH₄、N₂O ガスの発生に関するメカニズムを解明と CH₄、N₂O ガスの発生と ORP との関係性を解析し、微量通気法を導入した CH₄、N₂O ガスを抑制する循環式嫌気ろ床・土壌トリフシステムを開発する研究を行った。研究成果としては土壌トリフの CH₄、N₂O ガスの高放出の主なメカニズムはその内部の好気状態と局部的嫌気部分が併存することが構造的な原因であること、土壌トリフにおいて ORP を +150mV 以上或いは -10mV 以下に維持すれば N₂O ガスの発生を抑制できること、また、微量通気方式を適用することにより ORP を +300 ～ 400mV 程度に維持でき、CH₄、N₂O ガスの放出をそれぞれ約 1/2、1/3 抑制できることがわかった。即ち本研究で開発された微量通気方式等を組み込んだ総合的 CH₄、N₂O ガスの抑制対策を導入する循環式嫌気ろ床・土壌トリフは中国へ応用可能な地球温暖化ガス抑制手法であり、生活排水を高度処理できる土壌トリフシステムであることがわかった。

本研究で開発された CH₄、N₂O のガス抑制する循環式嫌気ろ床・土壌トリフシステム等の中国に実証試験と普及の可能性の検討を更に行うことが重要である。

〔キーワード〕 CH₄、N₂O、抑制技術、土壌トリフ、ORP、微量通気法、中国

1. 序

中国等の開発途上国で用いられている生活排水を処理する土壌トリフ、湿地帯と酸化池等処理施設の CH_4 、 N_2O ガスの発生源としては非常に大きいこと (Bartlett ら) がわかっているものの具体的な対策技術に関する研究は国内外ともほとんどなく、更には土壌トリフからの CH_4 、 N_2O ガス制御についての情報は皆無であるし、またこのような場における硝化脱窒促進と N_2O ガス発生との関連も明らかにされていない。本国際共同研究では特に生態系に人為的な工学技術を導入して莫大な予算を投ずることなく環境改善を可能ならしめる方式であるが、その導入が大きく期待できる中国等近隣諸国では手が付けられていないのが現状である。そのため中国等の近隣諸国を含めた国際交流研究による開発研究を行うことにより地球温暖化抑制対策の国際化を可能ならしめ温暖化ガス抑制に大きく貢献できると考えられる。

中国において湖沼、河川、内湾等閉鎖性水域の深刻な水質汚濁環境問題と水資源不足問題の解決を図るために、生活排水対策と処理水再利用対策は極めて緊急に推進すべき重要課題として位置づけられている。一方、《日本国政府と中華人民共和国政府との環境保護協力協定 (1994.3 から)》に基づいて開催された日中両国政府環境保護合同委員会第一～三回会議で継続合意された協力活動に基づいて、日中両国の担当部門としての日本国立環境研究所と中国科学院応用生態研究所との中国の国情に適した生活排水の処理土壌トリフプロセスの開発についての国際共同研究は 1994 年から開始された。1995 年 3 月に上記の両部門はこれまでの国際共同研究を発展するように、これから更に協力して地球温暖化ガスを抑制する技術を中国の生活排水処理土壌トリフプロセスに組み込んで中国に普及することが必須であるとの合意に達した。

本国際交流研究は、平成 8 年度において日本と中国の土壌トリフ処理施設での CH_4 、 N_2O ガスの発生の実態調査と主な土壌処理技術の室内ベンチスケール装置で物質収支の解明による CH_4 、 N_2O ガスの発生特性を解析した。日中両国において土壌トリフの処理施設での調査およびベンチスケール装置での検討のいずれにおいても、 CH_4 、 N_2O ガスの放出原単位はそれぞれ $9.3 \sim 13.9 \text{g CH}_4 \cdot \text{m}^{-3}$ と $8.2 \sim 12.2 \text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $3.0 \sim 4.5 \text{g CH}_4 \cdot \text{m}^{-3}$ と $3.3 \sim 5.0 \text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}$ であり、同じ生活排水を処理する活性汚泥法より数百倍高くなることが明らかとされた。また、中国側に土壌トリフ処理施設を普及した場合を試算すると CH_4 、 N_2O ガスはそれぞれ $43,800\text{T} \sim 65,700\text{T} \cdot \text{CH}_4 \cdot \text{yr}^{-1}$ と $48,200\text{T} \sim 73,000\text{T} \cdot \text{NO}_2 \cdot \text{yr}^{-1}$ という巨大な放出量となることから、適切な抑制対策の開発と普及が重要と考えられた。

平成 9 年度は両国の国立試験機関に設置された同じ密閉ガス回収空間を設置したベンチスケール土壌トリフで物質収支を解析することにより CH_4 、 N_2O ガスの高放出に関するメカニズムを解明し、特に土壌トリフにおける ORP、水量負荷量と CH_4 、 N_2O ガスの発生との関係を解析し、中国をはじめとする開発途上国の国情に合う、 CH_4 、 N_2O ガスの発生抑制可能な ORP を高いレベル維持でき、微量通気法を導入する循環式嫌気ろ床・土壌トリフシステムを開発することを目的として試験研究を行った。

2. 研究方法

2.1 実験装置と実験条件

実態調査対象となる日本側の土壌トリフ処理施設は、京都府瑞穂町の生活排水処理施設である。すなわち均一散水浸潤層と通気技術の導入された尿尿排水を処理する嫌気濾床・土壌トリフ施設で、規模が 20 人程度で、嫌気濾床の HRT が 24 時間、土壌トリフの水量負荷が $100\text{L} \cdot \text{day}^{-1}$ で、土壌トリフ

では標準土壌を使用しており、処理施設の排水負荷と処理性能が安定していることを確認した上で、土壌トレンチから発生した CH_4 、 N_2O 等地球温暖化ガスサンプルを採取し、1～2回/月の頻度で地球温暖化ガスの放出実態調査を行った。

実態調査対象の中国側の土壌トレンチ処理施設については、共同研究の相手としての中国科学院応用生態研究所が直接担当する国家重点環境プロジェクト外のモデル事業の一つとしての遼寧省沈陽市の沈陽工業大学学生宿舎における生活排水の嫌気濾床・土壌トレンチ施設であり、土壌トレンチ処理方式は標準的毛細管浸潤法で、規模が日本側の処理施設よりかなり大きい1,000人程度で、処理水量が約 $50\text{m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$ であり、嫌気濾床のHRTは日本側より短い約14時間で、土壌トレンチの水量負荷は日本側と同じように $100\text{L} \cdot \text{day}^{-1}$ に設定した。土壌は現場の土壌を使用し、排水が屎尿排水と食堂排水、雑排水も入る生活系排水である。この処理施設の特徴は水不足を解決するために、生活排水量の70%程度が処理水として回収され、直接トイレ洗浄用水と園芸用水として再利用され、再利用水質目標が $\text{BOD} < 30\text{mg/l}$, $\text{SS} < 30\text{mg/l}$ であり、それ以外に、土壌トレンチの地表に大豆等農産物を栽培する方式である。土壌トレンチの処理施設の CH_4 、 N_2O 等地球温暖化ガスの放出実態については、日本側と同一方法と頻度で調査される。

日中両国の国立試験機関に設置された実験室内ベンチスケール土壌トレンチは担体を充填された容量1Lの嫌気濾床と5Lの土壌トレンチから構成され、原水が嫌気濾床の下から流入され、充填された担体層で嫌気発酵処理した後に土壌トレンチの上部に設置された散水管から流入され、受皿で土壌毛細管現象で緩速浸潤散され、土壌層で浄化され、浄化された処理水を土壌トレンチの下部の不透水部分に貯めた後に流出するようになっている。微量通気方式とは土壌トレンチの土壌層の下部に散気管を設置し、パワで微量空気を散気管を通して酸素を供給する方式である。循環方式とは土壌トレンチで浄化された処理水を再度嫌気ろ床の下から流入させる方式である。土壌トレンチの上部にガス回収する2Lの密閉空間が設置されている。図1は毛細管式ベンチスケール土壌トレンチの概要である。日本側では土壌トレンチの土壌は黒ぼく土を使用し、排水はつくば市内ある団地の生活系排水を用いた。中国側のベンチスケール土壌トレンチの土壌は中国東北地方の黒土を使用し、排水は中国科学院応用生態研究所内職員宿舎からの生活系排水を用いた。

微量通気方式による CH_4 、 N_2O ガスの抑制効果についての実験条件は、4基の毛細管方式ベンチスケール土壌トレンチについては2基を通気量 $0.2\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$ に設定した通気系と2基を非通気系として運転するようにした。通気系と非通気系のいずれにおいても1基を土壌トレンチの流出水を嫌気濾床に循環比2で循環し、別の1基を循環しない運転条件に設定した。非循環系土壌トレンチの水量負荷は $100\text{L} \cdot \text{day}^{-1}$ とし、循環系の水量負荷は $300\text{L} \cdot \text{day}^{-1}$ とした。

水量負荷によるORPと CH_4 、 N_2O ガスの発生抑制の影響について実験条件は、4基の毛細管方式ベンチスケール土壌トレンチは通気量 $0.2\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$ に、循環比2に設定し、水量負荷が非循環系の場合にそれぞれ 200L 、 150L 、 100L 、 $50\text{L} \cdot \text{day}^{-1}$ 、循環系の場合にそれぞれ 150L 、 100L 、 75L 、 $50\text{L} \cdot \text{day}^{-1}$ (循環水を

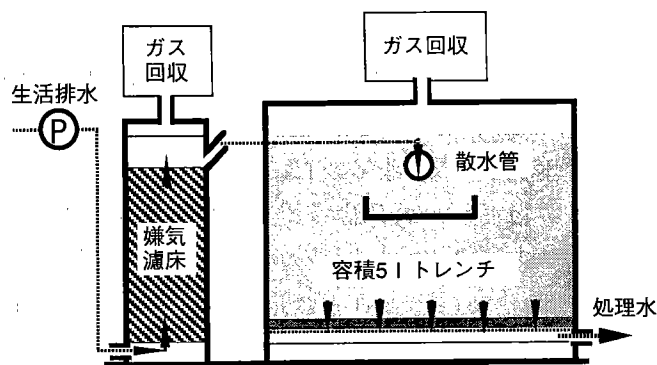


図1 ベンチスケール土壌トレンチの概要

含む水量負荷 450L、300L、225L、150L・day⁻¹)の各 4 段階に設定し、循環系と非循環系ともに 12 週間後の ORP と CH₄、N₂O ガスの発生状況で評価を行った。実験装置は 20 °C 恒温室に設置した。

2.2 測定方法

土壌トレンチから発生した CH₄、N₂O ガスの採取方法は日中両国の担当者の事前打ち合わせより下記のように統一方法で行うこととした。すなわち両国のベンチスケール土壌トレンチにおいては、日本側の八木らの方法を統一方法とし、土壌トレンチから発生した CH₄、N₂O 等ガスの放出実態調査について、底の無い 50L のチャンパーを土壌トレンチの表土から 10cm 以上の深さに埋め、チャンパー内にガスを採取する時に圧力をバランスさせるための外の空間と連通した 1L テトラパックを付け、ベンチスケール土壌トレンチから発生した CH₄、N₂O 等ガスの放出実態調査について、その上部の密閉空間内にガスを採取する時に圧力をバランスさせるための外の空間と連通した 1L テトラパックを付けた。密閉空間が完全な開放状態から密閉した時点を 0 分間とし、30 分間の密閉空間内の CH₄、N₂O ガス濃度増加量からガス発生量を求めた。密閉空間内のガスはミボンプ(柴田 MINI PUMP MP-2N) 1.2L・min⁻¹ 程度の低流量で 1L テトラパックに 0.2L 程度がサンプルを採取し分析に供した。

水質と採取した CH₄、N₂O ガスの分析方法は下記のように統一方法で行った。また水質分析は嫌気濾床と土壌トレンチの流入水、流出水、最終処理水を対象とした。水質測定項目は以下の方法で分析した。

(1)BOD (生物化学的酸素要求量) : 直接希釈法を用いて分析した。

(2)COD (化学的酸素要求量) : 100 °C 過マンガン酸カリウム法で分析した。

(3)TOC (全有機性炭素) : ガラス濾紙 (Whatman GF/C フィルター) でろ過した濾液について有機性炭素分析計 (日本側が島津製作所製、TOC-5000 型、中国側が島津製作所製、TOC-10A 型) で分析した。

(4)T-N (全窒素)、NH₄-N (アンモニア窒素)、NO₃-N (硝酸性窒素) : 上記の同じ濾液について、日本側が TRAACS 800 型 Analytical Console 分析計で分析し、中国側が化学分析方法で分析した。

(5)DO (溶解酸素) : 直接希釈法また、隔膜電極法を用いて、日本側が TOA 電気製 DO マーターで分析し、中国側が化学分析方法で分析した。

(6)pH : 日本側が TOA 電気製 pH マーターで分析し、中国側が中国製 pH マーターで分析した。

(7)SS (浮遊物質) : ガラス繊維濾紙 (Whatman GF/C フィルター) 法を用いて分析した。

(8)T-P (全リン) : リン酸イオン態リンの測定法であるモリブデン青 (アスコルビン酸) 吸光度法を用いて上記の同じ濾液について、日本側が TRAACS 800 型 Analytical Console 分析計で分析した。

CH₄ ガスの分析については、日本側が島津製作所ガスクロマトグラフ GC-8 型 (水素炎イオン化検出器) 使用し、ガスクロマトグラフの操作条件は次の通りであり、キャリアガスが N₂60ml・min⁻¹、カラムと検出器温度は 60 °C および 80 °C である。N₂O ガスの分析については、日本側が島津製作所ガスクロマトグラフ GC-8 型 (電子捕獲検出器) を使い、ガスクロマトグラフの操作条件はキャリアガスを He30ml・min⁻¹、カラムと検出器温度は各々 80 °C とした。

土壌トレンチの ORP 測定方法は、日本側が東和電波製 RM-12P の ORP マーターで、電極は比較電極と白金電極を採用して分析した。

3. 実験結果

3.1 土壌トレンチの処理施設の水質調査結果

日本側の京都工場と中国側の沈陽工業大学における土壌トレンチ処理施設における流入水と処理水の水質データによると、流入水の有機物負荷 BOD は日本側と中国側がそれぞれ $252\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ と $266\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ で、大差がなく、処理水の BOD がそれぞれ $2.7\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ と $26\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ で、処理水の BOD の除去率がそれぞれ 99% と 90% で、日本側の処理水質の方が良ことがわかった。流入水の窒素負荷 T-N が日本側と中国側がそれぞれ $192\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ と $87\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ で、処理水の T-N がそれぞれ $148\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ と $63\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ で、処理水の T-N の除去率はそれぞれ約 23% と 28% で、大差のないことがわかった。

3.2 土壌トレンチ処理施設とベンチスケール土壌トレンチからの CH_4 、 N_2O 等ガスの放出状況

日本側の京都工場における土壌トレンチ処理施設と中国側の土壌トレンチ処理施設から CH_4 、 N_2O 等地球温暖化ガスの関連データによると、 CH_4 、 N_2O 等地球温暖化ガス Flux の平均値がそれぞれ $9.3 \sim 13.9\text{g CH}_4\cdot\text{m}^{-3}$ と $8.2 \sim 12.2\text{g N}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $3.0 \sim 4.5\text{g CH}_4\cdot\text{m}^{-3}$ と $3.3 \sim 5.0\text{g N}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-3}$ であり、中国側の土壌トレンチ処理施設からの CH_4 、 N_2O 等地球温暖化ガス Flux は日本側と比べてそれぞれ日本側の 32% と 40% 程度で少ないことがわかった。

図 2 は日中両国の土壌トレンチ処理施設からの CH_4 、 N_2O の発生特性の比較について示したものである。図 2 に示すように日本側の土壌トレンチ処理施設の地温が 8 月の約 20°C から 2 月の 10°C 以下にまで低下した理由で CH_4 と N_2O ガスの Flux は、それぞれ 8 月の $12.9 \sim 19.3\text{g CH}_4\cdot\text{m}^{-3}$ と $11.7 \sim 17.5\text{g N}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-3}$ から 2 月の $7.2 \sim 10.0\text{g CH}_4\cdot\text{m}^{-3}$ と $6.5 \sim 9.8\text{g N}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-3}$ まで低下する傾向がみられた。これらは中国側の土壌トレンチ処理施設において CH_4 と N_2O ガスの Flux が低下する傾向がみられる理由と同じと考えられる。

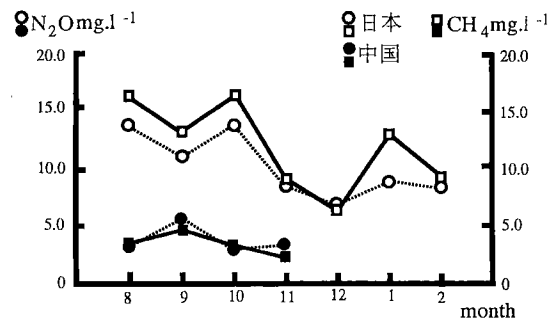


図2 中日両国の土壌トレンチにおける N_2O 、 CH_4 ガス発生特性の比較

日本側の実験室内設置されたベンチスケール土壌トレンチと中国側のベンチスケール土壌トレンチからの CH_4 、 N_2O 等地球温暖化ガスに関連データによると、 CH_4 、 N_2O 等地球温暖化ガス Flux の平均値はそれぞれ $7.4\text{g CH}_4\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $5.7\text{g N}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-3}$ と $7.1\text{g CH}_4\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $4.6\text{g N}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-3}$ であり、日中両国間の実験室内においても、設置された同じベンチスケール土壌トレンチで、また同じ生活系排水を処理する場合、 CH_4 の Flux はほぼ同じで、 N_2O の Flux は中国側が 20% 程度低く、大差がないことが確認された。

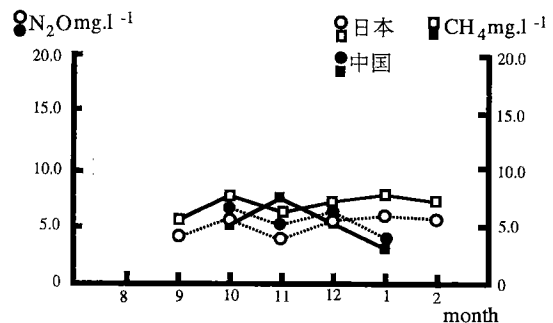


図3 中日両国のベンチスケールにおける N_2O 、 CH_4 ガス発生特性の比較

図 3 は日中両国のベンチスケール土壌トレンチからの CH_4 、 N_2O の発生特性の比較について示したものである。図 3 に示すように日本側の 20°C 恒温実験室に設置したベンチスケール土壌トレンチからの CH_4 と

N₂O ガスの Flux は安定する傾向がみられていたが、中国側の実験室に設置したベンチスケール土壌トレンチには室温が秋から冬に徐々に低下につれて CH₄ と N₂O ガスの Flux が低下する傾向がみられた。

3.3 中国の土壌処理プロセスの CH₄、N₂O 等地球温暖化ガスの放出総量の試算

中国側における土壌トレンチ処理施設からの CH₄、N₂O 等ガスの関連データに基づき、生活排水を処理する土壌トレンチ処理施設からの CH₄、N₂O の放出原単位は、3.0 ~ 4.5gCH₄・m³ と 3.3 ~ 5.0gN₂O・m³（生活排水）と試算された。中国の東北、西北、華北地方の約 2 億人の範囲に土壌トレンチ処理施設を普及する場合に、2001 生活排水/人程度の排水量で試算すれば、この処理方式の土壌トレンチからの CH₄、N₂O ガスの放出総量はそれぞれ 43,800T ~ 65,700T・CH₄・yr⁻¹ と 48,200T ~ 73,000T・NO₂・yr⁻¹ となる。中国の土壌トレンチからの CH₄、N₂O ガスの放出総量は日本国内の下水処理場の下水処理と汚泥焼却との二つ過程からの CH₄、N₂O ガスの放出総量の 8,300T・CH₄・yr⁻¹ と 2,940T・NO₂・yr⁻¹（下水処理の 110T・NO₂・yr⁻¹ と汚泥焼却の 2,830T・NO₂・yr⁻¹ と合計値、建設省土木研究所下水道部調査、1995 年）よりそれぞれ約 7 倍と 20 倍高くなることがわかった。

中国における各種人為的な CH₄、N₂O の発生源のそれぞれの放出量はまだ解明されていないところであるが、上記の土壌トレンチからの CH₄、N₂O の放出総量は巨大な放出量となることは間違いなく、適切な抑制対策を取らなければならないと考えられる。

3.4 土壌トレンチでの窒素の物質収支

ベンチスケール土壌トレンチでの窒素の物質収支の解明を続け、平成 8 年 9 月～平成 9 年 8 月の一年間の水質データと CH₄、N₂O 等の地球温暖化ガスデータに基づいてベンチスケール土壌トレンチにおける窒素に関する物質収支を試算した。図 4 は日本側のベンチスケール土壌トレンチの窒素物質収支であり、原水の T-N を 100% とすると、嫌気濾床でほぼ窒素の形態の 100% が NH₄-N になり、土壌トレンチで約 27% の窒素が消費され、土壌トレンチの窒素消費は微生物同化、硝化-脱窒反応によるガス態の N₂、NO、N₂O になること等と推定されるが、得られた N₂O ガスの放出データに基づく解析によると、消費された窒素分の約 26% が N₂O ガスとして放出されることがわかった。これらの値は原水 T-N の 100% に対して約 8.0% を占め、Flux に換算して 4.0gN₂O・m³ という高い原単位になり、また残った約 73% の NO₃-N が処理水として放流されることがわかった。

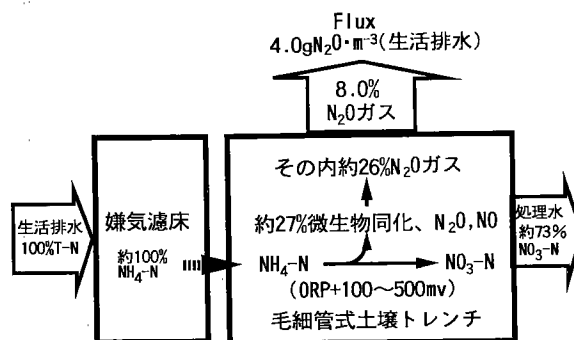


図4 ベンチスケール土壌トレンチの窒素物質収支

消費された窒素分の約 26% が N₂O ガスとして放出されることがわかった。これらの値は原水 T-N の 100% に対して約 8.0% を占め、Flux に換算して 4.0gN₂O・m³ という高い原単位になり、また残った約 73% の NO₃-N が処理水として放流されることがわかった。

ベンチスケール土壌トレンチの N₂O ガスへの転換率は、N₂O ガス高転換率といわれる単独処理浄化槽の転換率の 0.4 ~ 1.1%（建設省土木研究所下水道部調査、1995 年）より更に数倍～十倍高く、その N₂O ガスの放出原単位は活性汚泥法下水処理場からの放出原単位の 10mgN₂O・m³（建設省土木研究所下水道部調査、1995 年）より 400 倍高くなることがわかった。

3.5 土壌トレンチからの CH₄、N₂O ガスの放出メカニズム

生活排水を処理する土壌トレンチは、活性汚泥法等と同じように微生物が排水中の有機炭素と有機

窒素を代謝する微生物原理は同じであるから、原水負荷が高過ぎたり、酸素供給が不十分であったり、攪拌が不十分であったり局部的に嫌気性化した場合、原水の C / N 比のバランスが悪い場合、pH の高低等の原因で排水処理システムからの CH₄、N₂O ガスより多く放出するのは共通する原因と考えられるが、土壌トレンチの上記のような共通原因で活性汚泥法より CH₄、N₂O ガス数百倍高く放出することは考え難く、特有的な放出メカニズムがあると考えられる。

上記の窒素の物質収支に関する図 4 により、土壌トレンチにおいては嫌気濾床からの NH₄-N が 9 割以上 NO₃-N に転換され、また、ORP が +100 ~ +400mV になったことにより、土壌トレンチについては硝化反応が適正に進行していると考えられる。しかし、土壌トレンチ内の土壌団粒構造で、団粒土壌表面は好気性であったとしても内部は嫌気性に成り易いことが分かった。また、土壌トレンチ処理方式では浄化槽等の完全混合状態と異なり、散水管周辺の土壌に先に原水中の汚濁分が浸透し、残った汚濁分が順次に周りの土壌に緩速浸潤散し、そのため汚濁負荷が散水管周辺の負荷の高い部分から集水管周辺の低い部分まで勾配分布になり、散水管周辺部が嫌気性になったことも分かった。即ち土壌トレンチ全体として好気硝化反応が行われるが、構造的に局部に嫌気部分が存在して嫌気性反応が同時に行われていると考えられる。このことは ORP が +457mV であった場合でも CH₄ ガスの放出が認められたことから裏付けられる。

土壌トレンチにおける N₂O ガスの放出するメカニズムは多種複雑な微生物の関与する反応が考えられるが、その中に土壌中に生息する菌類の好気脱窒反応からの N₂O ガス発生の可能性もまた残っている。上記のことから主なメカニズムは土壌トレンチの硝化反応によるものと嫌気過程から放出している N₂O ガス、主な放出は嫌気過程から放出している N₂O ガスと考えられる。なお、CH₄ ガスの放出のメカニズムは単純な嫌気過程から放出しているものと考えられる。

3.6 土壌トレンチにおける ORP と CH₄、N₂O ガスの発生との関係

毛細管方式(非通気非循環系)ベンチスケール土壌トレンチの散水管周辺部、受皿上部、受皿側部、集水管上部等六つ観察点の試験開始から 3 週目と 52 週目の ORP 分布状況については図 5,6 に示す通りであり、3 週目の時点において受皿部の ORP が +47mV 程度、受皿側部の ORP も +457mV 程度にした。52 週目の時点において受皿部の ORP が -189mV 程度、散水管周辺部の ORP が -62mV 程度に低下し、受皿部、散水管周辺部等広い範囲の嫌気性区域が出現したことが確認された。

なお、本報告書には上記の六つ観察点の中に主な微生物反応区としての受皿側部の ORP を選んでベンチスケール土壌トレンチの代表的 ORP として評価する。

図 7 は平成 8 年 8 月～平成 9 月 7 月の一年間

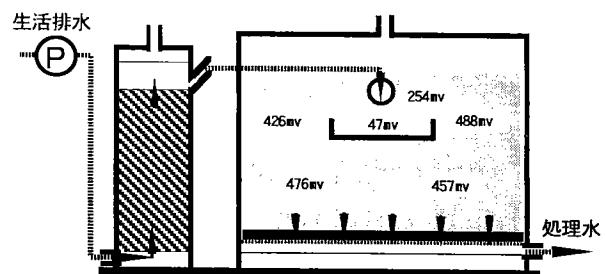


図5 ベンチスケール土壌トレンチの3週目の ORP分布状況

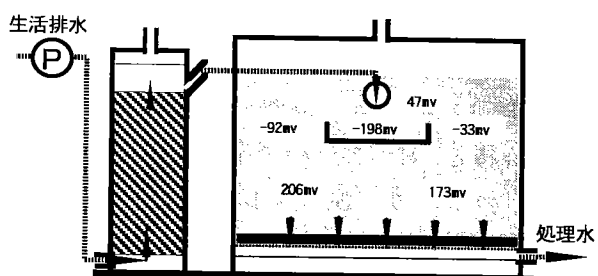


図6 ベンチスケール土壌トレンチの52週目の ORP分布状況

に毛細管方式ベンチスケール土壌トレンチにおける ORP と CH₄、N₂O ガスの発生の経日変化について示したものであり、土壌トレンチの3週目における ORP は約+457mv の高いレベルであるのに、CH₄、N₂O ガスの Flux はそれぞれ 4.8gCH₄・m⁻³、4.2gN₂O・m⁻³ でかなり高い放出が確認された。その後 ORP は徐々に低下し、32週目における ORP は約+48mv にまで低下し、CH₄、N₂O ガスの Flux はそれぞれ 7.5gCH₄・m⁻³、7.1gN₂O・m⁻³ で、56.3%、69.1% 程度上昇した。約一年運転した後の ORP は約-62mv 以下まで低下し、CH₄ ガスの Flux は 13.4gCH₄・m⁻³ にまで高くなり、3 倍近く上昇した。N₂O ガスの Flux は ORP が+150mv から-10mv にまで低下する間に約 7~8gN₂O・m⁻³ の範囲内であり、大きな変動はなく、ORP が-10mv 近くなると、N₂O ガス Flux は逆に徐々に低下し、約一年運転した後に ORP 約+457mv の場合の N₂O ガスの Flux の 4.6gN₂O・m⁻³ と同じレベルに戻った。

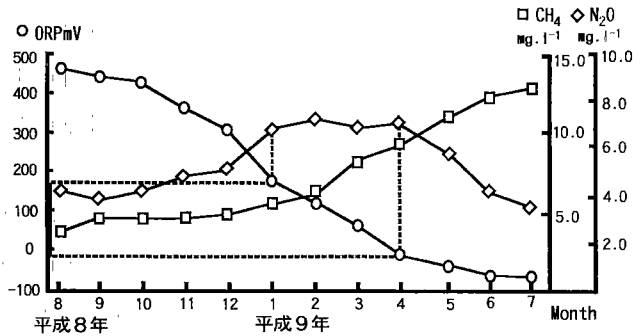


図7 ベンチスケールにおけるORPとCH₄、N₂Oの発生経日変化

上記のベンチスケール土壌トレンチにおける ORP と CH₄、N₂O ガスの発生の経日変化をまとめてみると、CH₄ ガスの発生は ORP の低下につれて単純に上昇する傾向を示すが、N₂O ガスの発生は ORP の +150mV ~ -10mV の間 (N₂O 高放出区間と考えられる) で高くなる傾向がある。即ち毛細管方式では ORP を高いレベルに維持すれば CH₄ ガスを抑制でき、ORP を +150mV ~ -10mV 以外 mv 範囲に維持すれば N₂O の発生を抑制できる。但し、もし土壌トレンチの ORP を -10mV 以下の嫌気性の条件で運転すれば、N₂O の発生を抑制できる反面、CH₄ ガスの発生上昇、土壌トレンチの詰まり易いと有機物分解能低下等のいくつかの短所があるので、CH₄ と N₂O ガスの両方抑制、土壌トレンチの処理性能の安定性と有機分解能高く維持等ことの総合的立場を考えると高い ORP を維持する運転条件は土壌トレンチの CH₄、N₂O ガスの発生抑制する最適な運転条件であると考えられる。

3.7 微量通気方式による高い ORP 維持と CH₄、N₂O ガスの発生抑制効果

土壌トレンチにおける高い ORP を維持する方法は、適正な原水負荷、原水均一散水構造、間欠散水、土壌の通気性改善と酸素提供等の種々の方法が考えられるが、最も効率的な方法と考えられる微量通気方式による土壌トレンチの高い ORP 維持と CH₄、N₂O の発生抑制効果について検討を行った。

図 8 は微量通気方式における ORP と CH₄、N₂O ガスの発生経日変化、図 9 は微量通気方式による高い ORP 維持と CH₄、N₂O の発生抑制効果について示したものであり、試験開始時点に通気系と非通気系ともに土壌トレンチの ORP は約+490mv で、通気系の CH₄、N₂O の Flux は 5.4gCH₄・m⁻³、3.2gN₂O・m⁻³ に対して、非通気系の CH₄、N₂O の Flux は 5.2gCH₄・m⁻³、3.4gN₂O・m⁻³ で大差がなかったが、約

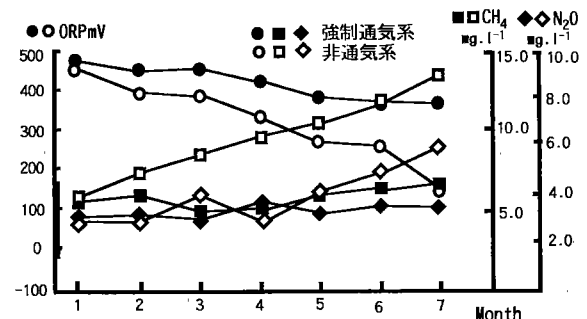


図8 微量通気方式におけるORPとCH₄、N₂Oの発生経日変化

7ヶ月間の運転結果によると通気系の ORP は少々低下したものの約+400mv 維持でき、通気系の CH_4 、 N_2O の Flux はそれぞれ $6.6\text{gCH}_4\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $3.7\text{gN}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-3}$ になり、スタート時点と比べるとそれぞれ 22.2%、15.6%上昇した。非通気系における ORP が徐々に低下し、約+140mv まで低下した、 CH_4 、 N_2O の放出がそれぞれ $14.3\text{gCH}_4\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $5.7\text{gN}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-3}$ まで徐々に上昇して、スタート時点と比べるとそれぞれ 175%、67.6%上昇した。即ち約 7ヶ月間の運転結果をみれば非通気系と比べると通気系の方はそれぞれ 53.8%、35.1%抑制できることがわかった。

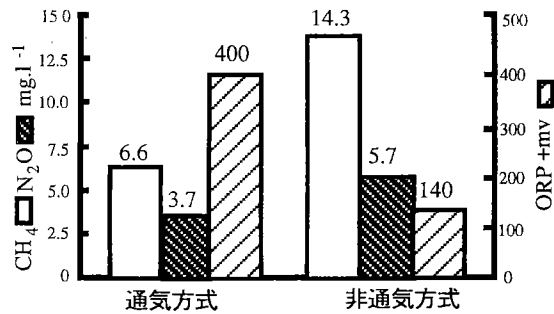


図9 微量通気方式による高いORP維持と N_2O 、 CH_4 ガス発生抑制効果

3.8 水量負荷による ORP と CH_4 、 N_2O ガスの発生抑制の影響

土壌トレンチの水量負荷は土壌トレンチの詰まりに関する要因と言われるが、 CH_4 、 N_2O ガスの発生抑制と高い ORP 維持に関係する重要要因と考えられる。そのために水量負荷による土壌トレンチの高い ORP 維持と CH_4 、 N_2O ガスの発生抑制効果について検討を行った。なお、循環方式の導入する場合に水量負荷は更に 3 倍(循環比 2 に設定する場合)になり、 CH_4 、 N_2O の発生抑制に対してマイナス効果がある可能性を配慮して循環式嫌気ろ床・土壌トレンチ方式を採用して試験を行った。

図 10、11 は非循環系と循環系土壌トレンチにおける 12 週間の運転後の各水量負荷による ORP と CH_4 、 N_2O ガスの発生の影響について示したものであり、図 10 の非循環系の水量負荷は、 $50\text{L}\cdot\text{day}^{-1}$ から $100\text{L}\cdot\text{day}^{-1}$ に上昇して ORP が 400mv 程度から 300mv 程度に低下したが、 $100\text{L}\cdot\text{day}^{-1}$ を越えて 150L 、 $200\text{L}\cdot\text{day}^{-1}$ になると、ORP が急に 300mv 程度から 100mv 程度更に 100mv 以下に低下し、 CH_4 ガス発生が $3.4 \sim 7.8\text{gCH}_4\cdot\text{m}^{-3}$ から急に $18.4 \sim 29.2\text{gCH}_4\cdot\text{m}^{-3}$ の倍以上に上昇し、 N_2O ガス発生も $2.8 \sim 4.1\text{gN}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-3}$ から急に $8.4 \sim 8.7\text{gN}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-3}$ の倍以上に上昇した。図 11 の循環系の場合を見れば、水量負荷は、 $50\text{L}\cdot\text{day}^{-1}$ から $75\text{L}\cdot\text{day}^{-1}$ に上昇した場合に ORP が 400mv 程度から 200mv 程度に低下し、 100L 、 $150\text{L}\cdot\text{day}^{-1}$ になると、ORP が急に 0mv 近い更に嫌気性状況になり、 CH_4 ガス発生が $5.4 \sim 8.4\text{gCH}_4\cdot\text{m}^{-3}$ から急に $28.0 \sim 54.5\text{gCH}_4\cdot\text{m}^{-3}$ の数倍から十倍程度に上昇し、 N_2O ガス発生も $3.9 \sim 6.0\text{gN}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-3}$ から急に $7.1 \sim 11.7\text{gN}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-3}$ の倍以上に上昇した。水量負荷 $150\text{L}\cdot\text{day}^{-1}$ に設定した循環系土壌トレンチは、2 倍の循環比を含めて

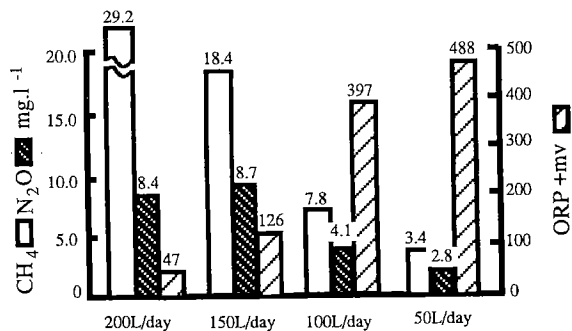


図10 非循環系の水力負荷によるORPと N_2O 、 CH_4 ガスの発生の影響

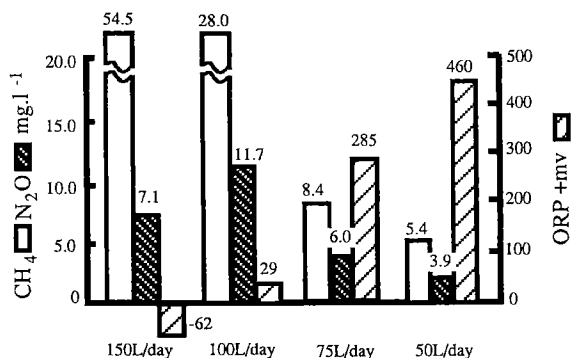


図11 循環系の水力負荷によるORPと N_2O 、 CH_4 ガスの発生の影響

考えると実際水量負荷 $450\text{L}\cdot\text{day}^{-1}$ になる厳しい水量負荷になって、12 週間の運転後の状態をみると、土壌トレンチの内部に既にべたべた的水溜まりで持続運転不能状態になった。

CH_4 、 N_2O ガスの発生抑制する立場を考えると、非循環系の水量負荷は、 $100\text{L}\cdot\text{day}^{-1}$ 以下に、循環系土壌トレンチの場合に更に低くなり、 $75\text{L}\cdot\text{day}^{-1}$ 以下に設定することが適正な運転条件であることがわかった。

3.9 中国の国情に合う CH_4 、 N_2O ガスの発生抑制土壌トレンチ技術に関する総合討論

生活排水を処理する土壌トレンチシステムは、本国際共同研究の初年度の日中両国での調査成果により確かにトレンチ内部の好気状態と局部的嫌気部分が併存する特殊な構造的な原因で、活性汚泥法等他の同様生活排水を処理方式と比べると、 CH_4 、 N_2O ガスの放出がかなり高い方式であることがわかった。しかし、中国をはじめとする開発途上国における生活排水処理システム（勿論 CH_4 、 N_2O 等地球温暖化ガスの放出抑制技術を含む）の開発においては、その国の経済レベル、産業レベルと維持管理レベル等に合うように配慮をしなければ、実施あるいは普及できない。土壌トレンチシステムは維持管理が容易で、無電力運転でき、特に建設費用と維持管理費用が活性汚泥法等と比べて数分の一程度過ぎない等の利点を考えると、中国の国情をみた場合、土壌トレンチ方式を他の CH_4 、 N_2O 等地球温暖化ガスの放出低い方式に転換することは環境行政、経済レベル、技術レベル等面で容易ではないと考えられるため、むしろ既に建設済み土壌トレンチを簡易な CH_4 、 N_2O ガスの抑制方式に改造して対応し、新設する土壌トレンチは両国共同の開発されてきている CH_4 、 N_2O ガスの抑制技術を導入するのが適切と考えられる。

本国際共同研究により、土壌トレンチにおける CH_4 、 N_2O ガスの高放出の主なメカニズムはその内部の好気状態と局部的嫌気部分が併存する特殊な構造が原因と考えられるが、トレンチの ORP を $>+150\text{mV}$ レベルに維持すれば CH_4 と N_2O ガスの両方放出の抑制が可能であり、単純な微量通気対策を適用することにより ORP を $+300 \sim +400\text{mV}$ レベルに維持でき、 CH_4 、 N_2O ガスの放出量をそれぞれ約 1/2, 1/3 程度抑制でき、適正な水量負荷に設定することにより CH_4 、 N_2O の放出量を抑制できることが解明された。上記の対策は施設構造が簡単で、低コストで維持管理が容易な対策と言え、中国の現場にすぐ実施可能といえる。

本国際共同研究では、本研究の開発された技術をメイン対策として、更に日中両国における既に開発されてきている様々土壌トレンチの CH_4 、 N_2O ガス抑制に活用可能な技術と対策を組み込んで、中国をはじめとする開発途上国に実施、普及できる CH_4 、 N_2O 等地球温暖化ガスの放出抑制する総合的土壌トレンチシステムを提案することを考えている。

4. 本研究により得られた成果

本国際交流研究の平成 9 年 7 月 1 日～平成 10 年 3 月 31 日においてベトナム実験装置で CH_4 、 N_2O の発生のメカニズムの解明と CH_4 、 N_2O の発生抑制する技術開発はほぼ計画通りに達成されたが、得られた研究成果は以下のようにまとめられる。

- (1) 日中両国において土壌トレンチの処理施設での調査およびベトナム装置での検討のいずれにおいても、土壌処理システムからの CH_4 、 N_2O 等地球温暖化ガスの放出量は間欠曝気活性汚泥法より数十倍高くなることがわかった。
- (2) 日中両国における土壌トレンチ処理施設からの CH_4 、 N_2O の放出原単位はそれぞれ $9.3 \sim 13.9\text{gCH}_4$

・ m^3 と $8.2 \sim 12.2\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^3$ 、 $3.0 \sim 4.5\text{g CH}_4 \cdot \text{m}^3$ と $3.3 \sim 5.0\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^3$ であった。

- (3) 中国側に土壌トリフ処理施設を普及した場合に、放出原単位に基づいて試算すると CH_4 、 N_2O ガスはそれぞれ $43,800\text{T} \sim 65,700\text{T} \cdot \text{CH}_4 \cdot \text{yr}^{-1}$ と $48,200\text{T} \sim 73,000\text{T} \cdot \text{NO}_2 \cdot \text{yr}^{-1}$ という巨大な放出量となることから、適切な抑制対策の開発と普及が重要と考えられた。
- (4) 土壌トリフにおける CH_4 、 N_2O ガスの高放出の主なメカニズムはその内部の好気状態と局部的嫌気部分が併存する特殊構造的な原因であることがわかった。
- (5) 土壌トリフの ORP を高いレベルに維持すれば CH_4 ガスを抑制でき、ORP を $+150\text{mV}$ 以上あるいは -10mV 以下に維持すれば N_2O の発生を抑制できることがわかった。
- (6) 微量通気方式を適用することにより ORP を $+300 \sim 400\text{mV}$ 範囲に維持でき、 CH_4 、 N_2O の放出をそれぞれ約 $1/2, 1/3$ 抑制できることがわかった。
- (7) 土壌トリフの水量負荷は、 $100\text{L} \cdot \text{day}^{-1}$ 以下に、循環系の場合に更に低く、 $75\text{L} \cdot \text{day}^{-1}$ 以下に設定すれば CH_4 、 N_2O ガスの放出少ない運転条件がわかった。

微量通気方式を導入する CH_4 、 N_2O ガスの抑制できる循環式嫌気ろ床・土壌トリフシステムは中国へ応用可能な生活排水を高度処理する土壌トリフシステムがわかった。平成 10 年度に開発された総合対策を組み込んだ微量通気方式循環嫌気ろ床・土壌トリフを中国の遼寧省遼河油田職員宿舎区内の大型土壌トリフに実証試験を行う予定である。

5. 参考文献

- 1) 稲森悠平、細見正明、須藤隆一：地球温暖化の原因となる温室効果ガスの排水処理施設からの発生抑制対策、用水と廃水、Vol.33, No.1, p28-34, 1991
- 2) 水落元之、稲森悠平、佐藤和明：下水処理場からの温室効果気体の放出量の評価解析、日本水処理生物学会第 30 回大会、1993 年 11 月
- 3) 稲森悠平、照沼 洋、水落元之、山本 真、幕田俊信、内田達也、木持 謙：間欠曝気生物学窒素と磷除去と温暖化ガス抑制における嫌気条件の効果、第 28 回日本水環境学会、1994 年 3 月。
- 4) Y. Inamori, M. Mizouchi, H. Terunuma, T. Uchida: Relationship between removal of nitrogen and emission of greenhouse effect gas in intermittent aeration activated sludge process. Water Quality International'94, IAWQ.
- 5) Xiao-Lei Wu, Hai Nan Kong, Motoyuki Mizouchi, Yuhei Inamori, Huang Xia, Qian Yi: Nitrous Oxide Emission From Microorganisms. 日本水処理生物学会誌、Vol.31, No.3, p129-132, 1995
- 6) 孔海南、稲森悠平、水落元之：生態工学を活用した処理システムからの温暖化ガスの発生特性と抑制、第 4 回生物利用新技術研究シンポジウム論文集、p134 ~ 138、大阪、1996 年 12 月
- 7) 孔海南、稲森悠平、水落元之、孫鉄行、李培君：生活排水を処理する土壌トリフからの地球温暖化ガスの放出特性、第 31 回日本水環境学会、1997 年 3 月
- 8) 孔海南、稲森悠平、水落元之：生活排水を処理する土壌トリフからの地球温暖化ガスの発生メカニズムの解析、日本水処理生物学会第 34 回大会、1997 年 11 月
- 9) 孔海南、稲森悠平、水落元之：生活排水の土壌トリフ処理プロセスからの地球温暖化ガスの排出と ORP との関係、第 32 回日本水環境学会、1998 年 3 月

[国際共同研究等の状況]

共同研究名：湿地帯、土壌トリフ、酸化池等のエコエンジニアリングシステムを用いた CH_4 、 N_2O 発生抑制技術

開発

協力案件名：中国の国情に合う土壌浄化法を組み込んだ生活排水高度処理システム開発に関する研究
《日本国政府と中華人民共和国政府との環境保護協力協定》に基づいて開催された
日中両国政府環境保護合同委員会第一～三回会議で継続合意された協力活動

カウンターパート：中国科学院応用生態研究所、所長孫鉄行、地球温暖化ガス研究室長陳冠雄、
土壌汚染研究室長李培君、

参加・連携状況：

平成9年3月に中国側の研究代表者としての中国科学院応用生態研究所長孫鉄行を招聘した。
また平成10年3月12日～19日の間に孫鉄行所長と土壌汚染研究室長李培君等三人を招聘来日
して共同研究について打ち合わせした。平成9年3月6日～9日、5月6日～13日、9月5日～
9日において日本側の研究担当者は訪中して中国科学院応用生態研究所で三回共同研究の計画
と進展について打ち合わせした。両国の担当者ともに本国際共同研究は予定通りに順調に進展し
ていることに対して認識の一致をみ、今後更に効率的な協力を推進することと期待している。

平成10年度には本国際共同研究による開発されたCH₄、N₂Oガスの発生抑制する微量通気法を
導入した嫌気ろ床・土壌トレンチは中国遼寧省遼河油田の職員宿舍区内の大型土壌トレンチに導入される
予定になり、日本側のブローと電気ファン等試験用機材を中国科学院応用生態研究所側にて活用し、
中国の東北地方現地の凍結季節に渡って平成10年度4月から一年程度実証試験する予定になっ
ている。

[研究成果の発表状況]

(1)口頭発表

- ①孔海南、稲森悠平、水落元之：生態工学を活用した処理システムからの温暖化ガスの発生特性と抑制、第4回生物利用新技術研究シンポジウム論文集、p134～138、大阪、1996年12月
- ②孔海南、稲森悠平、水落元之、孫鉄行、李培君：生活排水を処理する土壌トレンチからの地球温暖化ガスの放出特性、第31回日本水環境学会、1997年3月
- ③孔海南、稲森悠平、水落元之：生活排水を処理する土壌トレンチからの地球温暖化ガスの発生メカニズムの解析。日本水処理生物学会第34回大会、1997年11月
- ④孔海南、稲森悠平、水落元之：生活排水の土壌トレンチ処理プロセスからの地球温暖化ガスの排出とORPとの関係、第32回日本水環境学会、1998年3月

(2)論文発表

- ① Xiao-Lei Wu, Hai Nan Kong, Motoyuki Mizouchi, Yuhei Inamori, Huang Xia, Qian Yi: Nitrous Oxide Emission From Microorganisms. 日本水処理生物学会誌、Vol31, No.3, p129-132, 1995