

「環境低負荷型の社会システム」

平成 8 年度採択研究代表者

渡辺 義公

(北海道大学工学部 教授)

「質の利用を中心にすえた新しい都市水代謝システムの構築」

1. 研究実施の概要

20 世紀は科学技術の進歩と人口の急増（100 年で約 4 倍）が特徴の世紀である。その裏返しとしての環境問題も深刻化した。さらに、世界の水使用量は約 11 倍に増加し、世界銀行や国連の報告でも、水問題が 21 世紀における最大の課題であると警告している。

本研究では構造的な渇水と水質汚濁に対処できない 20 世紀型の一過型都市上下水道システムに代わる、質の利用を中心にすえた新しい都市水代謝システムの構想を提案し、それを構築するための要素技術の開発を行う。

本プロジェクトの主な研究テーマは、1)二元水道と下水再利用のための、分離膜を用いた精密水処理システムと凝集・高速固液分離・生物膜・分離膜を組み合わせた超高度下水処理システムの開発、2)水処理汚泥に含まれるリンのリサイクルのための機能性酵素の利用、3)水処理用新素材（吸着剤、酸化促進触媒）の開発、4)高感度水質計測システムの開発、である。

これまでに、粉末活性炭と浸漬型 MF 膜を組み合わせたハイブリッド膜処理システムの構築、MF・UF 膜のファウリング機構、植物根分泌酸性フォスファターゼの遺伝子解析、ジルコニアメソ構造体と素吸着剤の製造、ソニックスプレー噴霧器を用いたプラズマイオン源質量分析装置の試作、等の研究成果を得ている。

研究プロジェクト後半の 2 年半で、札幌市創成川下水処理場に設置した超高度下水処理プラントを運転しながら、開発した要素技術の有効性を確認する。

2. 研究実施内容

昨年度に引き続き、提案する新しい都市水代謝システムを構築するために必要な要素技術の開発を行った。以下に研究成果をまとめる。

(1) 二元水道と下水再利用のための水処理技術：

- a) 溶解性有機成分除去のためのハイブリッド MF 膜処理システムを構築した粉末活性炭と浸漬型 MF 膜ろ過装置を組み合わせたハイブリッド膜処理装置では、活性炭による主膜ファウリング物質であるフミン質の吸着によって、膜透過流束が

高く維持され、透過水の有機物濃度も低くなった。さらに浸漬槽に蓄積された微生物による酸化作用によって、透過水のアンモニア性窒素とマンガンの濃度も極めて低くなった。

b) MF・UF 膜のファウリング機構

膜細孔より大きい高分子フミン質による膜ろ過抵抗が、Ruth のろ過式を変形した式により解析できることを明らかにした。ケーキ層による細孔密度の低下と孔内吸着による細孔径の減少によるとして、膜ろ過に伴うろ過抵抗の増加を記述する数学モデルを作った。実験データとモデル値との比較から、細孔径の減少が膜ファウリングの主原因であることを確認した。

c) 鉄と重合シリカから構成される新しい凝集剤(PSI)を用いた、凝集・高速固液分離・生物酸化を組み合わせた高効率下水処理システムを開発した

高速固液分離槽（噴流攪拌固液分離槽、JMS）の分離効率を上げるために、後段に傾斜管沈殿部を設けた。それによって、沈殿分離水の濁度は 10 度以下になった。よって、沈殿分離水を生物酸化しながら膜分離する超高度下水処理システムの構築が可能となった。PSI は現在多用されているポリ塩化アルミニウムと同等の凝集力を持ち、汚泥処理・処分面から、下水処理に適した凝集剤である。

d) 下水処理生物膜の分子生物学的解析

16rRNA を標的とする蛍光遺伝子プローブを用いた FISH (Fluorescent In Site Hybridization) 法と共焦点レーザー走査型顕微鏡による画像解析を併用して、下水処理に利用する生物膜の構造と機能の関係を明らかにする手法を開発した。

(2) 水処理汚泥に含まれるリンの農業利用のための機能性酵素の活用：

a) ルーピン根から分泌される酸性フォスファターゼ (Apase) の根圏における分布と有機態リン酸化合物分解能

Apase 活性は根の区画で最も高く、根から離れるにしたがって低下し、3 mm 以上離れた区画では極めて低かった。有機態リン酸の減少量は Apase の活性と対応しており、根から分泌された Apase は有機態リン酸化合物から無機リン酸を放出する機能を発現することが確認された。

b) ルーピンにおける分泌性 Apase の分泌能と合成部位の解析

ウェスタン解析によって分泌性 Apase タンパクの集積量を、ノーザン解析によって mRNA の集積量を調査したところ、双方ともに活性の上昇と同様のタイムコースで増加した。分泌された Apase の活性を活性染色法によって検出したところ、リン欠如処理区では根の全域から分泌されること、また分泌の誘導が 6 ～12 時間で高まることが示された。組織化学的局在性を調査した結果、本酵素は細胞間隙から根の表皮細胞に多く集積したがリン欠如処理区ではあまり集積は見られず、タンパク質合成後ただちに分泌されることが示された。

c) ルーピンにおける分泌性 Apase 遺伝子の解析

P 処理を施したルーピンの根の RNA から Apase をコードする 2 種類の cDNA、LASAP1 および LASAP2 を単離した。LASAP1 は細胞膜・壁に存在して根の表面に到達する有機態リン酸化合物を分解し、LASAP2 は根から分泌されて有機態リン酸化合物を分解する機能をもつことが示された。この 2 種類の Apase が存在してそれぞれが機能することは本研究によって初めて示された。

(3) ジルコニアメソ構造体ヒ素吸着剤の合成および特性解明

新しいヒ素吸着剤としての、規則的なメソ孔を有するジルコニウム系メソ構造体（以下 Zr 構造体）の合成に成功した。得られた Zr 構造体の XRD パターンと TEM 像から、ヘキサゴナル相の(100)、(110)、(200)、(210)面に対応するピークとヘキサゴナル構造を確認した。Zr 構造体ではラングミュア型吸着が生じ、飽和吸着量は $200 \mu\text{mol/g}$ 、結合定数は $2.16 \times 10^4 \text{ dm}^3/\text{mol}$ と求められた。Zr 構造体は原料中に約 7 %wt% の硫黄を含むことから、Zr 構造体へのヒ素吸着は構造体中の硫黄に関連すると考えられる。

(4) 高感度水質計測システムの開発：

ソニックスプレー噴霧器を用いたプラズマイオン源質量分析装置を試作し、11 種類の農薬が高感度で分離分析できる事を確認した。ヒ素とセレンの分析感度は 7 倍程度に向上し、検出限界は 3ppt に達した。これはヒ素やセレンのイオン化ポテンシャルが 10eV 程度と高いためである。

今後の研究計画

- 1) 新しい吸着剤と MF 膜を組み合わせた高度浄水システムの構築
- 2) 札幌市創成川下水処理場に設置した、凝集・高速固液分離装置と分離膜を組み合わせた高度下水処理プラントの機能評価
- 3) 高感度水質計測システムによる高度下水処理水質の評価
- 4) 機能性酵素による PSI 凝集汚泥からのリン回収効率の作物栽培による検証

3. 主な研究成果の発表（論文発表）

- S. Okabe, T. Matsuda, H. Satoh, T. Itoh and Y. Watanabe, Sulfate reduction and sulfide oxidation in aerobic mixed population biofilms, Water Science and Technology, 37(4/5), 131-138, 1998
- S. Okabe, H. Satoh, T. Itoh, T. Matsuda and Y. Watanabe, Sulfur cycle in microaerophilic wastewater biofilms: microbial activity and Fe-S geochemistry, Proceedings of the International Symposium of the COE Project on Microbial Community and Functions in Wastewater Treatment Processes, University of Tokyo, 125-139, 1998

- Y. Watanabe, S. Kasahara and Y. Iwasaki, Enhanced Flocculation/Sedimentation Process by a Jet Mixed Separator, *Water Science and Technology*, 37(10), 55-67, 1998
- 佐藤久, 岡部聡, 伊藤司, 渡辺義公, 微小電極を用いた微好気性生物, 膜内の硫酸塩還元反応の測定, *水環境学会誌*, 21(6), 367-375, 1998
- Y. Watanabe, K. Hashimoto, T. Hasegawa, S. Kameda and H. Suzuki, Application of Polysilicato-Iron Coagulant to Coagulation of Algae and Municipal Wastewater, *Chemical Water and Wastewater Treatment V* (Proceedings of the 8th Gothenburg Symposium 1998, Sept. 7-9, 1998, Prague), 3-13, 1998
- T. Suzuki, Y. Watanabe, G. Ozawa and S. Ikeda, Removal of soluble organics and manganese by a hybrid MF hollow fiber membrane system, *Desalination* 117 (Proceedings of Membranes in Drinking and Industrial Water Production, Amsterdam), 119-130, 1998
- K. Kimura, Y. Watanabe and N. Ohkuma, Filtration Resistance Induced by Ammonia Oxidizers Accumulating on the Rotation Membrane Disk, *Water Science and Technology*, 38(4/5), 443-452, 1998
- S. Okabe, H. Kuroda and Y. Watanabe, Significance of biofilm structure on transport of inert particulates into biofilms, *Water Science and Technology*, 38(8/9), 163-170, 1998
- 木村克輝, 渡辺義公, 大熊那夫紀, 回転平膜表面に硝化細菌を固定した膜処理プロセスにおけるろ過抵抗に関する研究, *土木学会論文集*, 608(VII-9), 87-95, 1998
- 亀田豊, 清水達雄, 工藤憲三, 小林大, 渡辺義公, 丹保憲仁, 高度処理との連携による湖沼の自然浄化能を利用した水の循環再利用, *水道協会雑誌*, 67(9), 22-30, 1998
- 笠原伸介, 相澤拓, 渡辺義公, 小澤源三, 岡部聡, AOC を指標とした高度浄水処理システムの性能評価, *水道協会雑誌*, 67(11), 12-21, 1998
- 鈴木辰彦, 渡辺義公, 小澤源三, 池田啓一, 循環汚泥接触酸化型 MF 膜処理装置の溶解性マンガンの処理特性, *水道協会雑誌*, 68(2), 2-11, 1999
- 鈴木辰彦, 渡辺義公, 小澤源三, 池田啓一, 粉末活性炭循環型 MF 膜処理装置による高度浄水処理, *水道協会雑誌*, 68(3), 2-14, 1999
- 岡部聡, 内藤初夏, 渡辺義公, FISH 法を用いた都市下水生物膜内におけるアンモニア酸化細菌の空間分布の解析, *水環境学会誌*, 22(3), 191-198, 1999
- 佐藤久, 岡部聡, 渡辺義公, 微小電極および FISH 法を用いた都市下水生物膜内

のアンモニア酸化機構の検討, 水環境学会誌, 22(3), 206-214, 1999
他 6 件