

研究種目：基盤研究（S）

研究期間：2005～2009

課題番号：17106007

研究課題名（和文）都市内水資源の持続的活用のための次世代MBR開発

研究課題名（英文）Development of next generation MBR for sustainable utilization of urban water resources

研究代表者

山本 和夫（YAMAMOTO KAZUO）

東京大学・環境安全研究センター・教授

研究者番号：60143393

研究成果の概要（和文）：都市内水資源の持続的活用に資する次世代型MBRとして、運転エネルギー効率を飛躍的に向上させることを目指し、高集積膜モジュールを開発した。傾斜板を無酸素槽に挿入した汚泥沈降促進機構を実証し、汚泥濃度管理法の確立と環境低負荷型維持管理を実現した。エネルギー回収型MBRの開発と合わせて超高度処理型小規模分散水資源涵養システムを構築すること目指し、大規模集合処理用、小規模分散処理用の2種類のプロトタイプを提示した。

研究成果の概要（英文）：This research aims at innovation of a new submerged MBR to be used for creation of a sustainable urban water cycle system. Two prototypes were developed for small-scale decentralized wastewater treatment and large scale centralized wastewater treatment. This has been accomplished by the following: significant improvement of energy efficiency by developing a compact module, establishment of a control method of sludge concentration by introducing an acceleration of sludge settlement device, such as inclined plates, to achieve an environmentally friendly maintenance, and creation of small scale decentralized urban water cycle system with accomplishing both advanced treatment and energy recovery.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	29,400,000	8,820,000	38,220,000
2006年度	13,700,000	4,110,000	17,810,000
2007年度	13,700,000	4,110,000	17,810,000
2008年度	13,700,000	4,110,000	17,810,000
2009年度	13,700,000	4,110,000	17,810,000
総計	84,200,000	25,260,000	109,460,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・土木環境システム

キーワード：次世代MBR、メンブレンバイオリアクター、高度処理、都市水再生利用、水資源の持続的活用

科学研究費補助金研究成果報告書

1. 研究開始当初の背景

既存の水システムを見直し、都市内に持続型水資源を確保し、環境と共生しつつ賢く水を使いまわす水システムへの革新が強く求められる。そのための水再生技術として膜技術、中でもメンブレンバイリアクター（MBR）が注目されている。しかし現状では、水質が良くてもエネルギー多消費であったり、未消化経口医薬品等の微量化学物質の環境への拡散の懸念を払拭できる技術としては不十分であったり、まだMBRの持つ潜在的可能性を十分に引き出しているとは言えないという背景があった。

2. 研究の目的

そこで本研究は、如上の問題意識の下、都市内水資源の持続的活用に資する次世代型のMBR開発を目的とした。具体的には、現在、主流となっている第2世代と言われる浸漬型MBRに対し、以下の項目の技術革新を行い、大規模集合処理用、小規模分散処理用の2種類のプロトタイプを提示するとした。

(1) モジュール設計概念の革新による高集積モジュールの開発と運転エネルギー効率の飛躍的向上（「高集積モジュールの開発」と略す）

(2) 汚泥沈降促進機構の導入による汚泥濃度管理法の確立と環境低負荷型維持管理の実現（「環境低負荷型汚泥管理」と略す）

(3) ナノ濾過嫌気MBRの開発によるエネルギー回収・超高度処理型小規模分散水資源涵養システムの構築（研究申請時の目的。進捗状況評価時には、ナノ濾過嫌気MBRを嫌気不織布・好気NF-MBRの開発に変更して評価を受けた。）（「エネルギー回収型MBRの開発」と略す）

3. 研究の方法

基礎実験は大学内実験室で行ったが、実下水を用いた長期試験については、都内の実下水処理場における実験フィールドにパイロットプラントを設置して実験を行った（平成17-19年度は芝浦水再生センター内、平成20-21年度は砂町水再生センター内）。また、開発した高集積膜モジュール表面のマイクロ流れの計測は、分担者の実験室（函館高等専門学校）において実施した。

4. 研究成果

主要な研究成果は以下のとおりである。

(1) 高集積膜モジュールの開発

PE（ポリエチレン）製中空糸精密ろ過膜を束ね、間に逆洗排水を抜くためのスペーサーを挿入し、中空糸膜束の外側を固定するメッシュ構造のバッフルネットを巻いたモジュールを作成した（写真1）。

開発した高集積MF膜モジュールを染料排水処理に適用したところ、汚泥濃度（MLSS）11g/L、膜差圧（TMP）5kPa以下で約6ヶ月間の長期安定運転に成功した（図1）。

写真1

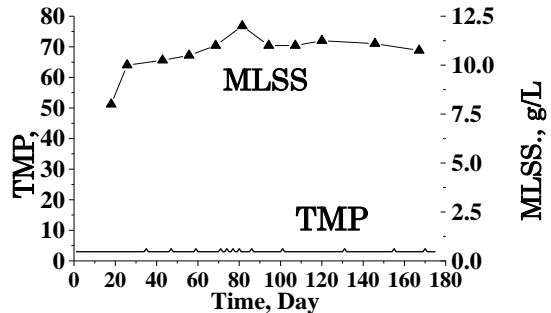
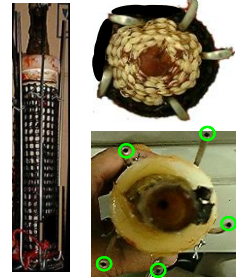


図1 高集積膜モジュールの長期性能試験結果

開発した高集積中空糸膜モジュールの表面、特に写真1のモジュール周囲を取り巻く黒色のバッフルネット近傍の表面マイクロ流れの計測を、以下の写真やレイアウトで示す計測装置を用いて行った。

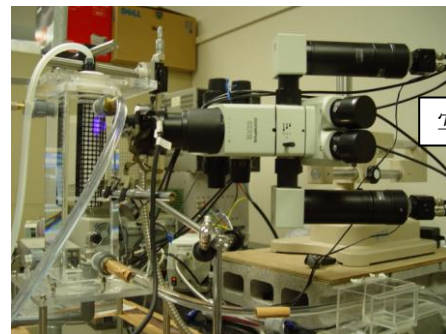
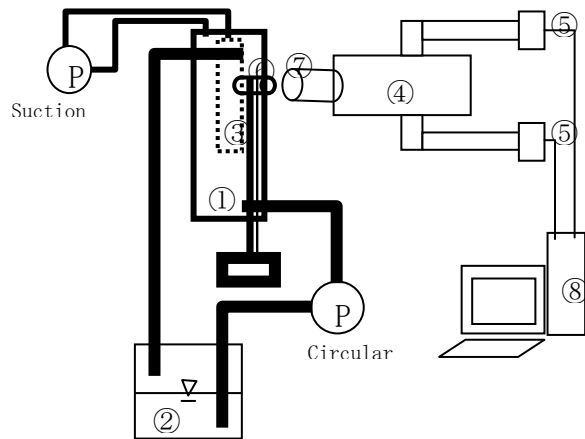


写真2



如上のレイアウト図において、①流体計測

用チャンバー、②貯留槽、③メンブレンモジュール、④実体顕微鏡、⑤CCDカメラ(インターレス)、⑥紫色レーザー、⑦カットオフフィルター、⑧画像取込用コンピュータである。蛍光パーティクル(4 μ m)、を用いてマイクロ流れを計測した結果の代表例を図2に示す。

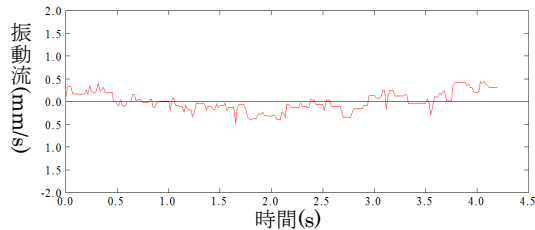


図2 膜表面上層(バブルネット下部空間)の流れの揺らぎ

流速のスペクトル解析を行った結果、途中経過で報告した高周波の渦に関しては、その後の再現実験や精査により、ポンプの振動を拾っている可能性が高いことが判明したが、低周波(1サイクル/秒)の渦は確実に存在し、この膜近傍の構造物による低エネルギー流れの中での後流渦をどうファウリングコントロールに生かしていくか今後の研究の展開の方向を明確にできた。

以上の研究成果は、JSPS FIRSTのメガトンウォーターシステム(中心研究者栗原優)の中のサブテーマ「資源生産型革新的下水処理統合膜システムの開発(サブテーマリーダー山本和夫)に発展的に継承され、商業生産可能な革新膜モジュールに結実することが期待される。

(2) 環境低負荷型汚泥管理

無酸素槽に導入した傾斜板による汚泥沈降促進機構(図3)の開発に成功した。

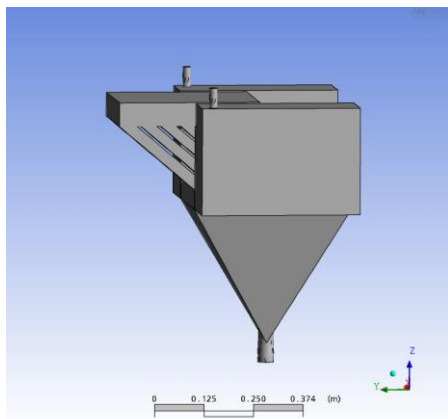


図3 傾斜板を導入した無酸素槽

返送汚泥を流入下水と混合して密度を減少させてから傾斜板下に流入させることにより、好気槽1時間、無酸素槽2時間の滞留時間でかつ汚泥引き抜きなしの条件で都市下水の処理を行い、3ヶ月以上安定した汚泥濃度差の保持(図4)と有機物除去及び窒素除去が得られることを実証した。

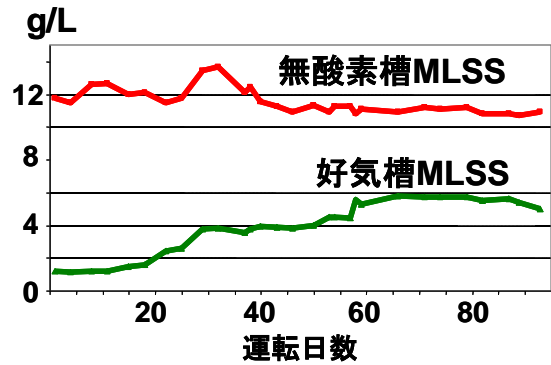


図4 無酸素槽と好気槽のMLSS

さらに、実用化に当たってはコストの面から市販されている傾斜管を使用することが望ましく、傾斜管を挿入した無酸素槽(写真3)を用いた長期実証試験を行った。濃縮汚泥の濃度を安定して20 g/L以上とすることに成功し、運転条件を確立した(図5)。

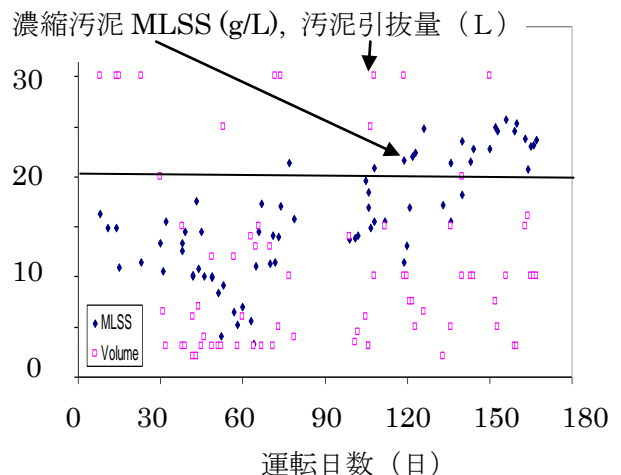
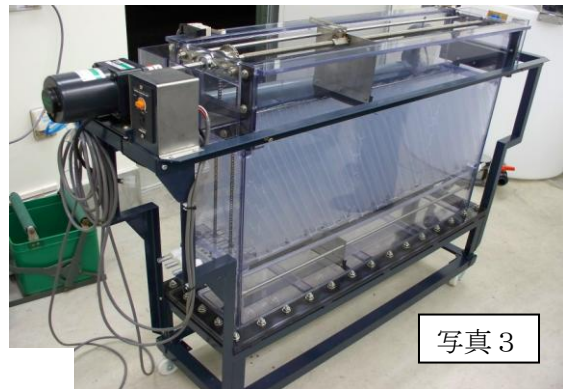


図5 無酸素槽からの濃縮汚泥濃度等

余剰汚泥の最小化には微生物学的視点から分子生物学的手法を用いた微生物群集解析を進めた結果、無酸素槽に膨大な汚泥貯留機能を持たせたことによる特徴として、これまでの活性汚泥法をベースとした下水処理プロセスとは異なり、無酸素槽では *Bacterioides* が優占することを明らかにした。また、ファウリング膜表面の微生物群集の特徴を明らかにした。

また、好気槽MLSSと無酸素槽MLSSの差異は傾斜板ゾーンの上昇流速と関係し、上昇流速が1 mm/sを越えると、その差が顕著でなくなることがわかった(図6)。好気槽と無酸素槽のMLSS濃度の違いが生じる機構については、数値流体力学(CFD)解析ソフトウェアを用いて流動シミュレーションを行った結果、傾斜板を設置し、その下部から汚泥濃度の低い流体を流入させることにより、汚泥濃度の低い軽い流体は、傾斜板天井面に沿って上昇し、そのことで密度成層が保持され流体の混合が抑制される効果が認められた。また、実際の流動試験により、その現象を確認した。

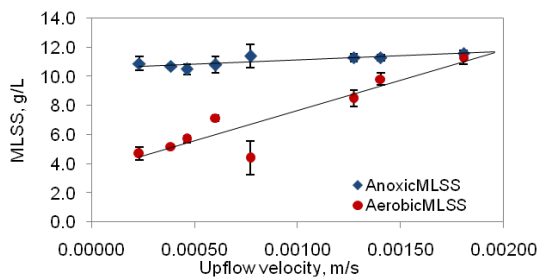


図6 無酸素槽傾斜板ゾーンの上昇流速と無酸素槽MLSS及び好気槽MLSS

本研究成果は、平成19年度よりJST-JICA地球規模課題対応国際科学技術協力「熱帯地域に適した水再利用技術の研究開発(研究代表者山本和夫)に既に展開しており、傾斜管を装備した無酸素槽を有するMBRシステムとして、平成21年度にはデモンストラクションプラントをタイで建設する予定となっている。すなわち、小規模分散処理用のプロトタイプを提示することができた。また、前述の資源生産型革新的下水処理統合膜システムの開発」でも、中核技術として位置付けており、発想を展開させ既存の大規模下水処理場の更新として、最初沈殿池に傾斜管を挿入し汚泥濃縮槽として、より積極的に汚泥を回収しバイオマスエネルギー生産に結び付け、エネルギー自立型下水処理場の実現を目指している。すなわち、大規模集合処理用のプロトタイプを提示することができた。論文発表や招待講演にて注目を集めているが、実用レベルでの研究の展開が確実に進捗していることが最大の成果である。

(3) エネルギー回収型MBRの開発

この研究項目は、学術的成果としての論文発表は多いが、実用に結びつく研究成果としては、当初目指した目標に到達せず、目標を大幅に切り下げざるを得なかった。当初、嫌気のNF-MBRの開発を目指して、高集積NF膜のジュールを試作したが、有機酸の阻止に関してNF膜の性能が期待したレベルに達せず、超高度処理として満足いくプロセスを構成できず、開発を断念した。開発目標をまず嫌気不織布-好気MF-MBRとして、ディスポーザーを使用して生ごみを付加するエネルギー回収型MBRを開発した(図7)。

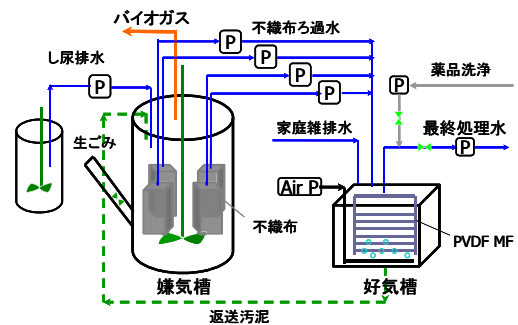


図7 嫌気不織布-好気MF-MBR

開発した嫌気不織布-好気MFの浸漬型MBRにより余剰汚泥を系外排出せずに安定した処理が2年以上継続でき、メタン回収がCOD(化学的酸素要求量)ベースで、総COD投入の60%程度見込め、生ごみを投入しかつ余剰汚泥を発生させない処理を行っているにもかかわらず、MBRシステムとしてのCOD除去率は98%以上を維持した。特に、メタン発酵槽での不織布については、洗浄せずに予備的検討期間を含めて三年半を越える連続運転を継続できたことは特筆に値する。

進捗状況評価の時に、嫌気不織布-好気NF-MBRのシステム開発を目標として再設定したが、実験フィールドの場所的制約条件が予想外に厳しく、研究項目(2)に研究を集中せざるを得なかった。従って、嫌気不織布メタン発酵、及び好気NF-MBRそれぞれで基礎的研究成果は得られたが、実用に供するためのシステム開発としては、満足いく成果を挙げられなかった。この点は、見通しが甘かったと言わざるを得ない。しかし、食品廃棄物の嫌気バイオガス回収プロセスとしては、前述の「熱帯地域に適した水再利用技術の研究開発」に展開する予定であり、嫌気不織布-好気MF-MBRについては、小規模分散型のプロトタイプを提示できたといえ、最低限の目標は達成できた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 11 件) 以下は主要なもの。

○Hai, F.I., Yamamoto, K., Fukushi, K. (2006) Performance of newly developed hollow-fiber module with spacer in integrated anaerobic-aerobic fungi reactor treating textile wastewater. *Desalination*, 199 (1-3) 305-307.

○Choi, J.H., Fukushi, K. and Yamamoto K. (2007) A submerged nanofiltration membrane bioreactor for domestic wastewater treatment: the performance of cellulose acetate nanofiltration membranes for long-term operation, *Separation and Purification Technology*, 52(3), 470-477

○ Hai, F.I., Yamamoto, K., Fukushi, K., Nakajima F. (2008), Fouling resistant compact hollow-fiber module with spacer for submerged membrane bioreactor treating high strength industrial wastewater, *Journal of Membrane Science*, 317(1-2), 34-42.

○Hai, F.I., Yamamoto, K., Nakajima F., Fukushi, K. (2009), Factors governing performance of continuous fungal reactor during non-sterile operation – The case of a membrane bioreactor treating textile wastewater, *Chemosphere*, 74, 810-817, 2009

○Fontanos, P.M., Yamamoto, K., Nakajima, F., Fukushi, K. (2010), Identification and Quantification of Bacterial Community on the Surface of Polymeric Membranes at Various Stages of Biofouling Using Fluorescence In Situ Hybridization, *Separation Science and Technology*, 45, 1-7.

[学会発表] (計 12 件, 内招待講演 4 件)

以下は、主要なもの。

○D. E. Jin, K. Yamamoto, K. Fukushi, F. Nakajima (2007), Long-term Performance of An Aerobic-Aerobic SMBR System for Advanced Treatment of and Biogas Recovery from Kitchen Food-Waste, Domestic Wastewater and Excess Sludge, Proc. the 4th Leading Edge Conference & Exhibition on Water and Wastewater Technologies, Singapore, June 2007

○須川香苗、大久保孝樹、西野耕一、山本和夫 (2008) メンブランモジュール表面上マイクロ流れの計測手法に関する研究、第 42 回水環境学会年会講演集, p.177 (名古屋, 2007.3)

○P.M.Fontanos, K. Yamamoto and F. Nakajima (2008): Performance of a long term operated inclined plate membrane bioreactor treating municipal wastewater, Proc. IWA Regional Conference Membrane Technologies in Water and Waste Water Treatment, Moscow,

June 2008.

○P.M.Fontanos, K. Yamamoto and F. Nakajima (2009), Effect of upflow velocity on the performance of an inclined plate membrane bioreactor treating municipal wastewater, Proc. IWA Membrane Technology Conference, Beijing, September 2009.

○T. Okubo, K. Yamamoto, K. Nishino (2009), Measurement of micro flow and analysis of stress on surface of compact hollow fiber module, Proc. IWA Membrane Technology Conference, Beijing, September 2009.

○K. Yamamoto (2009), Innovation for sustainable water system, World Economic Forum UT Ideaslab, Dalian, September 2009.

[図書] (計 1 件)

○山本和夫 (2010)、次世代型MBRシステム (第 7 章 2 節、MBR (膜分離活性汚泥法) による水活用技術 (山本和夫監修))、サイエンス&テクノロジー

[その他]

ホームページ等

<http://www.env.t.u-tokyo.ac.jp/yamamoto/lab/project.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 和夫 (YAMAMOTO KAZUO)

東京大学・環境安全研究センター・教授

研究者番号: 60143393

(2) 研究分担者

福士 謙介 (FUKUSHI KENSUKE)

東京大学・サステナビリティ学連携研究機構・准教授

研究者番号: 30282114

大久保 孝樹 (OOKUBO TAKAKI)

函館工業高等専門学校・教授

研究者番号: 20168892

中島 典之 (NAKAJIMA FUMIYUKI)

東京大学・環境安全研究センター・准教授

研究者番号: 30292890