

平成 21 年 5 月 29 日現在

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2006～2008

課題番号：18201011

研究課題名（和文） 磁化活性汚泥法～磁気分離を活用した生物学的水処理の新展開

研究課題名（英文） Magnetic Activated Sludge Process～New Development of

Biological Wastewater Treatment Utilizing Magnetic Separation

研究代表者酒井 保蔵（SAKAI YASUZO）

宇都宮大学・工学研究科・准教授

研究者番号：70186998

## 研究成果の概要：

磁気分離を用いた新しい活性汚泥法である磁化活性汚泥法についてパイロットプラントを用いた実証研究が行なわれ、維持管理が容易で有機物と窒素の除去も同時に行なう水処理を長期間余剰汚泥の引抜きなしで運転できることを確かめた。汚泥の磁気分離では汚泥濃縮率が重要な因子となることが示された。また磁化活性汚泥は排水成分の大幅な変動に対して多様な微生物を保持できるため高い適応性を示すことがわかった。

## 交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	19,000,000	5,700,000	24,700,000
2007 年度	10,800,000	3,240,000	14,040,000
2008 年度	9,500,000	2,850,000	12,350,000
年度			
年度			
総計	39,300,000	11,790,000	51,090,000

研究分野：水処理，生物工学，磁気分離工学

科研費の分科・細目：環境学・環境技術・環境材料

キーワード：水処理，磁化活性汚泥法，磁気分離装置，汚泥削減，微生物，畜産廃水処理

## 1. 研究開始当初の背景

20 世紀は石油をめぐって争いが起こったが、21 世紀は水をめぐって世界が争うことになるかもしれないと言われほど安全な水の

確保は人類の持続的発展にとって重要な課題になりつつある。現在でも毎年 200 万人の子供が水が原因の病気で死亡していると国連が指摘している。中国などの新興国でも安

全な水の供給は確保が問題となり、農産物輸出国での農業用水の不足は世界の食糧需給を脅かす可能性も指摘されている。

河川、湖沼、地下水など淡水の水環境保全是水資源の基盤となるものであるが、これを支えている基幹技術の一つとして活性汚泥法がある。この方法は微生物の汚水浄化作用を利用して下水などの有機性汚濁水の浄化をおこなう方法である。下水処理はほとんどがこの方法で浄化処理されているなど、100年の歴史をもち、社会的に大きな役割を持つだけでなく、多くの研究者が現在も研究対象としている大きな学術分野でもある。

この方法には解決されていない基本的な課題があり、一つは比重が水とほとんど同等の微生物を水処理の最終段階で浄化された水と分離しなければならない点である。沈降分離には2~3時間を要し、沈降性を確保するため凝集性の良好な微生物を優先的に増殖させるデリケートな運転管理が要求される。現在、多くの活性汚泥水処理プラントで凝集性が低下するバルキングと呼ばれる問題が発生していると報告されている。もう一つの課題は余剰汚泥の発生である。微生物は汚水中の有機物を分解・同化することで水を化するため微生物の増殖は避けられない。1kgの有機物を分解するためにその半分である0.5kgの微生物が増殖すると言われる。国内の下水処理だけで2億m<sup>3</sup>の余剰汚泥が発生していると言われ、99%の水を含むため、汚泥の濃縮、脱水、焼却処理には大きなエネルギーと手間が費やされている。産業廃棄物の内訳を見ても汚泥は約半分を占めており大きな二次的環境負荷を発生させていると言える。

一方で、微生物の浄化作用を利用した活性汚泥法は理にかなった優れた面をもっており、曝気するだけで水中の溶存有機物が浄化されるため安価で良好な処理水を得られる利点がある。汚泥の発生も原則として凝集剤を用いないため微生物増殖分だけであり、物理化学的水処理法よりずっと少ない。我々はこれら生物学的水処理法の利点を活用しつつ、2つの大きな基本的課題を解消するために磁気分離を導入するアプローチを提案した。活性汚泥は強磁性粉の一つであるマグネタイト(Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)粒子を強く吸着し、混合するだけで簡単に一体化させることができる。磁性粉と一体化した汚泥ブロックは磁石で持ち上げることが可能となるなど簡単に水と分離できるようになる。また通常の水処理プロセスでは汚泥ブロックと強磁性粉が分離することはなかった。これにより活性汚泥法を磁気分離で運転することが可能となった。マグネタイトは水に不溶であり、自然界に存在する砂鉄と同じ成分で安全性も高い。我々は磁気分離できる活性汚泥を我々は磁化活性

汚泥、それを用いた水処理プロセスを磁化活性汚泥法と呼んでいる。さらに、固液分離が容易になったため、反応槽に微生物を従来法の数倍濃度に保持し、容積負荷を従来程度に維持しながら、低汚泥負荷運転で余剰汚泥を抑制した運転管理が可能となった。余剰汚泥を引き抜かない運転をおこなっても反応槽における微生物の増殖と死滅・自己分解がバランスして余剰汚泥ゼロエミッションでの運転も可能となった。自然界で汚濁物質が分解浄化され、生態系のバランスがとれている状況を水処理プロセスで再現することが可能となったと言える。

本研究はこれらの特徴により、画期的な水処理法として注目され、Nature News やアメリカ化学会 Environmental Science and Technology Newsなどで紹介された。

この方法をさらに発展させ、消化脱窒などへの応用や実用化に向けた基礎的な技術的問題点を解決するために2006年度から研究を開始した。

## 2. 研究の目的

本研究では、パイロットプラントによる長期にわたる余剰汚泥ゼロでの水処理の検討、磁化活性汚泥の磁気分離装置の性能に係わる諸因子の解明、汚泥と強磁性粉の吸着メカニズムの解明、磁化活性汚泥法の革新的な処理フローの検討、磁化活性汚泥生態系の検討、6)国内外における磁化活性汚泥研究者ネットワークの構築・育成を目的として研究をおこなった。

## 3. 研究の方法

ドラムタイプ、円板タイプなど各種の磁化活性汚泥分離装置を制作し、磁化活性汚泥の分離実験をおこなった。また宇都宮市水再生センターに設置した8m<sup>3</sup>の曝気槽をもつ磁化活性汚泥法のパイロットプラント(図1)を用いた長期の下水処理試験を継続した。また5Lの曝気槽をもつベンチスケール実験装置を製作し、低温環境での硝化プロセスの検討を行なった。また、流入する汚濁物質が変動した場合の分解活性について通常の活性汚泥法の運転条件と余剰汚泥を引き抜かない磁化活性汚泥法の運転条件で比較検討を行なった。遺伝子解析手法による菌叢解析もおこなった。



図1 宇都宮市下水処理場に設置した磁化活性汚泥法パイロットプラント。1日50人分の下水を処理する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 研究の主な成果

各種の磁気分離装置による磁化活性汚泥の磁気分離では汚泥の剥離操作の重要性が指摘された。また磁石上での汚泥の濃縮度が活性汚泥法における沈降汚泥の濃縮度と同様な考え方ができ、濃縮度が増加するほど磁気分離装置を小型化できることが示された。また磁石上での濃縮度が曝気槽の汚泥濃度に近づくほど磁気分離量を増加させる必要があり、曝気槽での汚泥濃度の上限が磁気分離の濃縮度で制限されることが定量的に示された。磁気力による汚泥の濃縮では1日以上かける沈降分離に比べて磁石ドラムの1回転の間に含水率90%程度までの濃縮脱水が原理的に可能であることが示唆された。磁気力を利用することで濃縮率を改善するための凝集剤や脱水助剤を必要とせず、簡便で高速な汚泥の濃縮・脱水が構築できる可能性がある。

パイロットプラントを用いた長期の水処理試験では、研究期間中、50人分の下水処理に相当する一日15m<sup>3</sup>の下水処理を継続しておこなった。その結果、比較的低濃度の有機汚濁排水に対して余剰汚泥ゼロミッションで長期の水処理を継続できることが示された。流出水中には微生物が自己硝化した結果と思われる低濃度の有機懸濁物質が漏出するがBOD、COD値は通常活性汚泥法と同等の値を維持できた。磁性粉の汚泥からの脱離など認められず長期にわたりまったく磁化活性汚泥の機能に問題はなかった。また余剰汚泥を引き抜かないことから硝化菌の増殖に有利であり、曝気槽における硝化活性は高く、硝化が進行した。間欠曝気をおこなうことで脱窒率は60~70%となり、単一槽で生物学的窒素除去も可能であり、下水の高度処理も簡単におこなうことができた。

畜産排水への磁化活性汚泥法の適用についてもベンチスケールでの実験によって検討され磁化活性汚泥法では10℃~15℃でも硝化が進行することが示された。これは余剰汚泥を引き抜かないことにより増殖の遅い硝化菌が曝気槽に保持され、高い硝化活性を有しているためと考えられた。また、実際の畜産廃水でも溶存酸素の制御によって硝化・脱窒をおこなうことができた。

流入する排水中の有機物が大きく変動した場合の適応性についてベンチスケールの実験装置で検討された。フェノールを主成分とする排水とポリペプトン・グルコースを主成分とする排水を交互に導入した場合、余剰汚泥を引き抜く活性汚泥法では馴養された汚泥が引き抜かれてしまうため、2~3週間変動する前の排水に対する分解能力をほとんど失ってしまうのに対して、余剰汚泥を引

き抜かない磁化活性汚泥法は1カ月程度ポリペプトン・グルコースを主成分とする排水を処理した後もフェノールを主成分とする排水を十分分解できる活性を維持していることが示された。遺伝子解析手法を利用した菌叢解析をおこなったところ磁化活性汚泥では多様な菌叢が維持されていることが示唆された。

磁化活性汚泥法の研究者ネットワークの構築・育成については、電気学会の調査専門委員会あるいは磁気分離研究会を中心として活動をおこなった。2006年、2008年夏には磁気分離・磁気力制御夏の学校を宇都宮大学で開催し、全国から磁気分離に興味をもった学生・研究者・企業関係者が数十名集まって研究発表会、磁気分離に関する講習会をおこなった。また、2008年8月にはオックスフォードラウンドテーブル、2009年1月にはバングラデシュ・植物学会の国際会議で磁化活性汚泥法についての招待講演をおこない、交流を深めた。

##### (2) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

本研究の成果は100年間の歴史がある活性汚泥法の大きな2つの課題を解消しうる可能性を学術研究レベルで示したものである。微生物は、本来、自己分解作用をもち、十分な微生物に対して適量の有機物負荷が与えられれば生態系のバランスを保ちながら有機物を分解・無機化する能力をもっている。従来の活性汚泥法では沈降分離法による固液分離能力の限界から2g/Lの汚泥しか曝気槽に保持できないために栄養過多となり微生物を引き抜くことで生態系のバランスを保つプロセスを構築した。磁気分離は数倍濃度の活性汚泥微生物を分離できることから通常の活性汚泥法とほぼ同じ容積負荷でも、汚泥負荷としては数分の1の負荷量とすることができ、余剰汚泥引抜きをおこなわずに生態系の増殖と死滅・分解のバランスを維持できるようになった。同様の運転条件(汚泥の高濃度化による余剰汚泥減量)は膜分離法でも試みられているが、膜分離は自己硝化後に残る菌体由来の難分解性有機懸濁物質を曝気槽に戻すために曝気槽内の懸濁物質濃度は上昇し続け、余剰汚泥ゼロでの運転はできない。磁気分離は活性汚泥微生物だけを磁力によって回収するために難分解性懸濁物質の蓄積は避けることができた。50人相当の下水処理という実用に近い実験スケールで3年間の継続的な実証試験をおこなったことは大きな意義があると考えられる。実証研究において、余剰汚泥の引抜きが必要ないだけでなく、固液分離のトラブルが原理的に軽減され、維持管理も簡便化できることが示された。

### (3)今後の展望

磁化活性汚泥法は余剰汚泥を発生せず、有機廃水を従来の活性汚泥法に比べて簡単な運転管理で浄化できることが明らかになりつつある。負荷変動に対しても適応性が広く、汚泥処理が必要な場合には脱水操作も磁気力を利用した方法が活用できる。これらの利点は、現在、深刻な問題となりつつある新興国や発展途上国の水環境保全に有効な技術となる可能性をもっている。従来の活性汚泥法をこれらの地域で利用した場合には、維持管理上の技術的な問題、大量に発生する余剰汚泥の無害化の問題などが、磁化活性汚泥法では解決できる可能性を有するためである。これらの国の研究者との交流を深め、磁化活性汚泥法研究を発展させてゆきたいと考えている。

また、国内の下水処理だけでも、下水汚泥の発生は脱水汚泥としておよそ 7000 万トン(80%水分)と言われ、これらの脱水・焼却(場合によっては溶融)に要するエネルギー消費も非常に大きいものと予想される。余剰汚泥発生を抑制させることでこれらの汚泥処理に消費されていた化石燃料を節約し、大量のCO<sub>2</sub>を削減できる可能性がある。これらの点についても定量的な検討をおこなってゆきたい。

□磁化活性汚泥の生態系については遺伝子解析的な手法ではほとんど検討されていない。磁化活性汚泥法は余剰汚泥の引抜きを行わないことを原則とするため、増殖の遅い硝化菌をはじめ、様々な微生物が増殖できる可能性がある。また、磁気分離ではマグネタイトをよく吸着する活性汚泥フロックを分離する一方で、マグネタイトをほとんど吸着しない糸状菌は分離できず、磁気分離装置を通過させる特性がある。そのため、磁化活性汚泥法では糸状菌は曝気槽にとどまることができず優占種となることはほとんどない。このような磁気分離の選択分離性の生態系への影響についても、遺伝子解析手法を使って今後検討してゆきたいと考えている。

#### 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 4 件)

- ① 酒井保蔵, 磁気力を利用した汚泥処理技術の展望, 超電導Web21, 2009年3月号, 7-8 (2009). 査読無
- ② 迎 春, 梅津一孝, 酒井保蔵, 井原一高, 山城隆樹, ミルキングパーラ排水の磁化活性汚泥法による処理特性, 農業施設, 39, 243-248 (2008). 査読有
- ③ Ying C, Ihara I, Sakai Y, Aoki K, Yamashiro T, Umetsu K, Nitrous oxide

emission from a magnetic activated sludge (MAS) process to treat the dairy milking parlour wastewater, Australian Journal of Experimental Agriculture, 48(1-2), 96-97 (2008). 査読有

- ④ 酒井保蔵, 磁性粉を利用した排水処理技術, JETI, 55(3), 43-45 (2007). 査読無

[学会発表] (計 77 件)

- ① Yasuzo Sakai, Simplification and Stabilization of Biological Water Treatment by Magnetic Activated Sludge Process, Fourth International Botanical Conference, Dhaka, Bangladesh (2009/01/16-18).
- ② Yasuzo Sakai, Simplification and Stabilization of Biological Water Treatment by Magnetic Activated Sludge Process as a Solution of Water Issue in the World, *Oxford Round Table* (regarding the topic of Sustainability: The Ultimate Quest), Exeter College, Oxford, England (2008/08/10-15).
- ③ 酒井保蔵, 磁気力を利用した汚泥濃縮・脱水プロセスとその応用, 第 78 回春季低温工学・超電導学会, 東京・明星大学 (2008/05/26-28).
- ④ 酒井保蔵, 磁化活性汚泥法における磁気分離装置の汚泥濃縮・返送システムとしての機能と特徴, 第 42 回日本水環境学会年会, 名古屋大学 (2008/03/19-21).
- ⑤ 酒井保蔵, 磁化活性汚泥法の研究経過～研究戦略と高度処理、多段処理への応用展開まで, 電気学会・超電導応用電力機器研究会, 東京・産業技術総合研究所・臨海副都心センター (2008/01/24).
- ⑥ 酒井保蔵, 磁化活性汚泥法による畜産排水浄化の展開, 第 9 回畜産衛生に関する帯広ワークショップ, 帯広市・とかちプラザ (2007/12/14).
- ⑦ 酒井保蔵, 磁化活性汚泥法の研究経過～研究戦略と高度処理、多段処理への応用展開まで, 第 2 回日本磁気科学会研究会－分離・分析ワークショップ－, 広島市・広島国際会議場 (2007/11/11).
- ⑧ 酒井保蔵, バイオプロセスに磁気分離を活用するための要点～磁化活性汚泥法を一例として, 第 2 回日本磁気科学会年次大会, 大阪大学 吹田キャンパス (2007/06/06-08).
- ⑨ 酒井保蔵, 磁化活性汚泥法による低温のミルキングパーラ排水からの有機物・窒素除去プロセスの検討, 第 76 回春季低温工学・超電導学会, 千葉大学 (2007/05/16-18).

- ⑩ 酒井保蔵, 磁気分離を利用した新しい排水処理法の特徴と実用化の戦略, 電気学会・超電導応用電力機器研究会, 工学院大学 (2006/09/07).
- ⑪ 酒井保蔵, 磁化活性汚泥法の寒冷地適応性に関する基礎的研究, 第74回春季低温工学・超電導学会, 大阪大学 (2006/05/15-17).
- ⑫ 酒井保蔵, Mihir Lal Saha, 磁化活性汚泥法による染料含有排水処理～ベンチスケールでの基礎研究, 第74回春季低温工学・超電導学会, 大阪大学 (2006/05/15-17).

[図書] (計 2 件)

- ① 酒井保蔵 (共著), (株)エヌ・ティー・エス, 排水汚水・処理技術集成, 561-569, (2007).
- ② 酒井保蔵 (共著), シーエムシー出版, 磁性ビーズのバイオ・環境技術への応用展開, 200-208 (2006).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

酒井 保蔵 (SAKAI YASUZO)

宇都宮大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：70186998

### (2) 研究分担者

飯村 兼一 (IIMURA KEN-ICHI)

宇都宮大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：10272220

梅津 一孝 (UMETSU KAZUTAKA)

帯広畜産大学・畜産学部・教授

研究者番号：20203581

井原 一高 (IHARA IKKO)

神戸大学・大学院農学研究科・助教

研究者番号：50396356

### (3) 連携研究者

ミヒル ラル サハ (MIHIR LAL SAHA)

ダッカ大学・生物学部・教授

研究者番号：

渡辺 恒雄 (WATANABE TSUNEO)

首都大学東京・名誉教授

研究者番号：

前田 勇 (MAEDA ISAMU)

宇都宮大学・農学部・准教授

研究者番号：10252701

岩淵 和則 (IWABUCHI KAZUNORI)

宇都宮大学・農学部・教授

研究者番号：10252701

ほか