

国立環境研究所特別研究報告

Report of Special Research from the National Institute for Environmental Studies, Japan

SR - 86 - 2009

省エネルギー型水・炭素循環 処理システムの開発 (特別研究)

Development of wastewater treatment system
that enables recycling of carbon-energy

平成18～20年度

FY2006～2008

NIES



独立行政法人 国立環境研究所

NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES

<http://www.nies.go.jp/>

省エネルギー型水・炭素循環処理 システムの開発 (特別研究)

Development of wastewater treatment system
that enables recycling of carbon-energy

平成 18～20 年度
FY2006～2008

特別研究「省エネルギー型水・炭素循環処理システムの開発」

(期間 平成18～20年度)

特別研究責任者：珠坪一晃

特別研究幹事：珠坪一晃

特別研究報告書編集担当：珠坪一晃

序

本報告書は、平成18～20年度に実施した特別研究「省エネルギー型水・炭素循環処理システムの開発」の成果を取りまとめたものです。

都市下水や産業排水の主要な処理技術である好気性排水処理（活性汚泥法など）は、その優れた処理性能ゆえ、我が国の水環境保全に大きく貢献しています。しかしながら、好気性排水処理は、曝気電力や余剰汚泥の処理に関わるエネルギーの消費が大きい点が課題であり、省エネルギー型処理技術の開発は急務です。また、開発途上国では水環境汚染が深刻な問題となっていますが、排水処理に関わるエネルギー（運転コスト）を十分に確保できない等の理由から、既存技術である活性汚泥法の普及だけでは対応できない状況にあります。

一方、嫌気性排水処理（メタン発酵）は、曝気動力が不要で、余剰汚泥の発生量が少ないため省エネルギー型の処理技術として有望です。しかし、嫌気性排水処理では、有機物の分解とメタン（エネルギー）への転換を担うメタン生成細菌等が活性化する条件に制約があるため、都市下水や食品製造排水等の低有機物濃度、かつ常温で排出される排水への適用は困難とされてきました。

この様な背景のもとに、本特別研究では、有機性排水処理に関わるエネルギー消費量の大幅削減が可能な処理技術の確立を目指して、（1）生物膜メタン発酵法による低濃度産業排水の無加温処理技術の開発、（2）嫌気性処理と省エネルギー型好気性処理との組み合わせによる都市下水の実証処理試験に関する研究を遂行してきました。

その成果として、1) 新規の生物膜メタン発酵法であるグラニューク汚泥床法の開発とメタン生成細菌群の活性化と高効率保持を実現化するための運転方法の最適化（間欠処理水循環等）により、今まで好気性微生物処理の範疇であった低有機物濃度（300-1,000 mgCOD/L）、低水温（10-20℃）の排水に対するメタン発酵処理法（省・創エネルギー処理）の基礎を確立しました。2) 嫌気性処理（UASB）と省エネルギー型の好気性処理（DHS）との組み合わせによる都市下水の実証処理試験の結果、無加温運転で年間を通じて良好な処理水質を維持した上で、活性汚泥法と比較して消費エネルギーの7割削減を達成しました。また、低温下で、下水の嫌気処理を安定的に行うために必要な装置の運転条件に関する知見も得ました。

今後、本研究の成果を、有機性排水処理の省エネルギー化とそれに伴う温室効果ガスの削減、開発途上国における排水処理技術の普及などの施策に結びつけ、水環境および地球環境の保全に役立てていきたいと考えています。

本研究を推進する上で、研究所内外の多くの方々にご協力とご助言を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

平成21年9月

独立行政法人 国立環境研究所
理事長 大垣 眞一郎

目 次

1	研究の目的と経緯	1
1.1	研究の背景と目的	1
1.2	研究の構成	1
2	研究の成果	3
2.1	生物膜メタン発酵法による低濃度産業排水の無加温処理技術の開発	3
2.1.1	はじめに	3
2.1.2	低濃度有機性排水の連続処理試験の概要	3
2.1.3	グラニュール汚泥床法による低濃度排水の常温メタン発酵処理特性の評価(系列1)	4
2.1.4	排水温度低下の影響評価(系列2)	6
2.1.5	排水有機物濃度低下の影響評価(系列3)	8
2.1.6	グラニュール汚泥床の実低濃度産業排水処理への適用(系列4)	11
2.2	嫌気性処理と省エネ型の好気性処理との組み合わせによる都市下水の実証処理試験 (下水の無加温嫌気処理特性評価)	13
2.2.1	はじめに	13
2.2.2	回分集積培養による固形有機物分解特性の評価	13
2.2.3	集積培養体の菌相解析	15
2.2.4	実証プラントによる都市下水の処理特性評価	17
2.2.5	UASB槽保持汚泥の物理的性状解析	19
2.2.6	UASB槽保持汚泥の微生物学的特性の評価	20
2.3	まとめと今後の展望	23
[資料]		
I	研究の組織と研究課題の構成	27
1	研究の組織	27
2	研究課題と担当者	27
II	研究成果発表一覧	28
1	誌上発表	28
2	口頭発表	29
3	書籍	33
4	特許出願	33

1 研究の目的と経緯

1.1 研究の目的

我々の日常生活や産業活動の結果、有機物を含む排水、いわゆる“有機性排水”が多量に排出されている。例えば平成16年度における水使用量（≒有機性排水の排出量）は、生活用水162億 m³/年、工業用水121億 m³/年（国土交通省 土地・水資源局 水資源部資料）と莫大である。またこれらの排水の大部分は、有機物濃度が低く（300–1,000 mgCOD_{CR}/L、以下本文中の COD は COD_{CR} を示す）、気温の変化に応じて常温（10–25℃）で排出されている。

国内や先進国においては、水環境保全のため、有機性排水は工場あるいは下水処理場において、好気性微生物処理（活性汚泥法など）を施されている。好気性処理では良好な処理水質が確保出来るが、排水に空気（酸素）を送り込むための曝気電力消費は莫大（例えば都市下水処理では、国内総電力消費の0.6-0.7%の電力を消費）であり、また有機性排水の好気性処理の結果、多量の余剰汚泥（＝産業廃棄物）が発生している。それ故、既存の排水処理システムの運転維持の結果、多量の化石燃料由来 CO₂（概算で約800-1,500万 t CO₂/年）が排出されており、水処理に伴うエネルギー消費の削減は急務である。

一方、開発途上国においては、政府開発援助（ODA）などの事業により、好気性排水処理技術が導入されつつあるが、装置の運転維持に関わるエネルギーや費用を捻出することが難しく、技術がなかなか定着しない状況にある。即ち、省エネルギー型の排水処理技術の基礎が確立されれば、開発途上国への技術普及も見込まれる。

嫌気性排水処理（メタン発酵）は、酸素の供給を必要としないメタン生成細菌などの嫌気性微生物を利用し、排水に含まれる有機物の分解・浄化を行う技術である。同技術は、曝気電力のゼロ化による省エネルギー、余剰汚泥の発生量が少ない、メタンエネルギー回収可能等の優れた特長から再注目されて来ており、中・高有機物濃度（2,000–10,000 mgCOD/L）の産業排水処理への適用についての研究と技術の実用化が進行している。

有機物の嫌気分解反応を担うメタン生成細菌は、その大部分が中温度域（35-37℃）に至適温度を持ち、増殖速度が遅い（至適温度における菌体倍加時間 3–4日）こ

とから、安定的なメタン発酵処理を行うためには、装置内に菌体（汚泥）を長時間保持することが必要である。現在、産業排水処理分野での技術普及が進行している上向流嫌気性汚泥床法（Upflow Anaerobic Sludge Blanket: UASB）は、35℃程度にまで加温した排水を上向流で装置内に通水させ、嫌気性細菌を適度な排水の流動条件の下で直径数ミリの顆粒状の膜（グラニュール汚泥）に生長させ、菌体を装置内に高濃度かつ長時間維持することで排水に含まれる有機物の分解除去とメタンへの転換を効率的に行う技術である。

しかしながら、有機性排水の大部分を占める低有機物濃度の食品製造排水や都市下水などに現状技術を適用することは、水処理装置内への菌体高密度保持（生物膜の形成）等の観点から困難であった。また、熱帯を除く大部分の地域の気候条件では、処理を担う中温度域（35-37℃）に至適温度をもつメタン生成細菌に対して排水の温度が低いため（10-25℃）、処理性能を維持するのが困難である。さらに低濃度排水処理では排水を35℃付近にまで加熱するだけのメタンガスが得られないため、処理技術として選択されないのがこれまでの常識とされてきた。

そこで本研究では、排水処理に関わるエネルギー消費の大幅削減（既存好気性処理に対して6-7割削減）を目指し、今まで嫌気性処理が適用されて来なかった低有機物濃度排水の無加温処理に対応可能な、メタン発酵技術の開発を行った。また、食品・飲料製造排水等の低濃度産業排水は、溶解性の有機物が主成分であるのに対し、都市下水は固形性の有機物（セルロース、タンパク質）が主成分であるため、それぞれの排水の特徴に応じたメタン発酵処理技術の開発と評価を行った。

1.2 研究の構成

本研究課題では、産業活動や日常生活の結果多量に排出され、嫌気性処理技術の適用がなされていない、低有機物濃度排水に適用可能な無加温メタン発酵処理技術の開発を行った。

サブテーマ1では、排水に含まれる有機成分が主として溶解性であり、処理の高速化や低コスト化が求められる低濃度産業排水（食品や飲料製造排水を想定）に対応

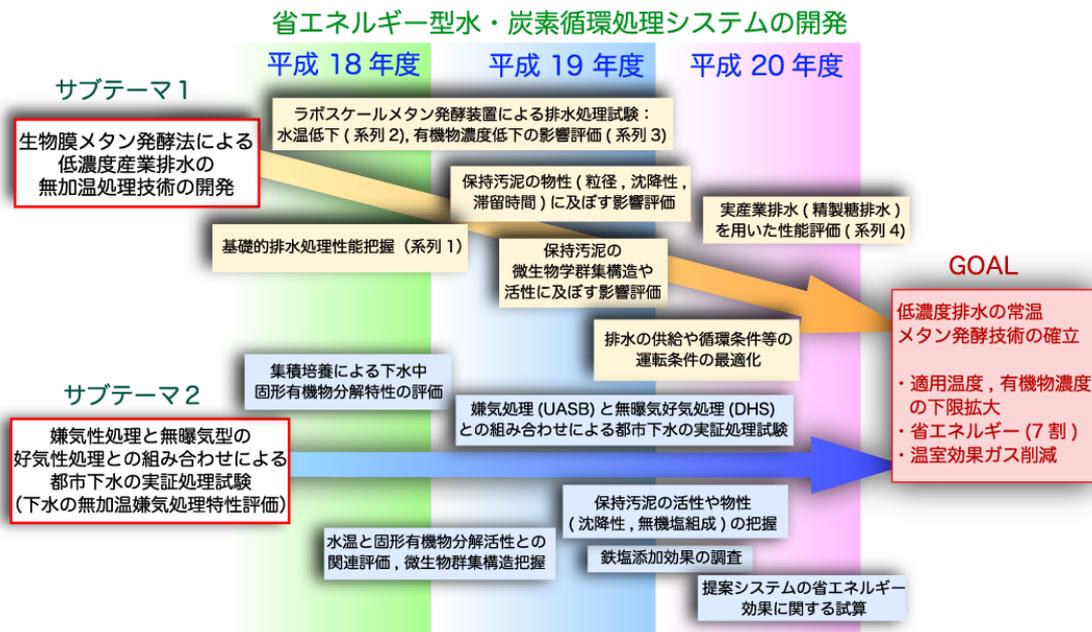


図1 研究のフローチャート図

可能なグラニューール汚泥床法の開発を行った。

サブテーマ2では、排水に含まれる有機物の大半が固形性であり、処理水質の確保と消費エネルギーの削減が求められる都市下水に対応可能な省エネルギー排水処理システムの開発と実証性能評価試験を行った。

図1には、サブテーマごとの実施内容を表す研究フローチャートを示した。以下に、各サブテーマの具体的な実施内容を示す。

サブテーマ1 生物膜メタン発酵法による低濃度産業排水の無加温処理技術の開発

溶解性有機物が主成分であり、嫌気性処理技術が未適用である低有機物濃度かつ、常温（10–25℃）で排出される産業排水に対応可能な省エネルギー型処理技術を確立するため、嫌気性生物膜を利用したメタン発酵法（生物膜メタン発酵法：グラニューール汚泥床法）の開発を行った。

具体的には、数系列のラボスケール試験により、排水温度の低下（20℃より5℃、結果2.1.4）や排水有機物濃度の低下（800 mgCOD/Lより400 mgCOD/L、結果2.1.5）がグラニューール汚泥床法の排水処理性能や保持生物膜の物理的（汚泥濃度、沈降性等）・微生物学的性状（微生物

活性の温度依存性、微生物群集構造）に及ぼす影響評価を行うと共に、低有機物濃度、常温に対応させるための運転条件（排水循環条件、装置）の最適化を行った。

また開発技術の実産業排水への適用性を検証するため、製糖排水の無加温（20℃）処理試験を行った（結果2.1.6）。

サブテーマ2 嫌気性処理と省エネ型好気性処理との組み合わせによる都市下水の実証処理試験（下水の無加温嫌気処理特性評価）

固形性有機物を多く含む都市下水の省エネルギー型処理技術の開発を目標として、嫌気性処理（上向流嫌気性汚泥床法：UASB）と好気性ろ床（下降流懸垂スポンジろ床、Down Flow Hanging Sponge：DHS）の組み合わせによる都市下水の実証処理試験（処理規模：50 m³/day）を通年で行い、水温低下が下水の嫌気性処理特性に及ぼす影響評価と安定運転のための基礎知見の収集、また提案処理システムのエネルギー削減効果の評価を行った（結果2.2.4）。

また、下水に含まれる固形有機物の分解特性の評価（回分集積培養、結果2.2.2）と実証プラント嫌気槽における保持汚泥特性評価により固形性有機物の低温条件における嫌気分解特性を評価した（結果 2.2.5, 2.2.6）。

2 研究の成果

2.1 生物膜メタン発酵法による低濃度産業排水の無加温処理技術の開発

2.1.1 はじめに

本研究課題では、メタン発酵排水処理技術の適用がなされてこなかった低濃度産業排水の無加温処理に対応可能な、嫌気性グラニューール汚泥床法（Anaerobic Granular Sludge Bed）の開発を行った。

低水温、低有機物濃度という条件下では、有機物の嫌気分解を担うメタン生成細菌が不活性化してしまい、また菌体の倍加時間も至適条件と比較して長くなる。さらに、低温条件下では水の粘性が高まり排水（基質）と微生物との接触性が低下する、生成したバイオガスが生物膜（グラニューール汚泥）から分離しにくくなる（=菌体流失の要因）などの問題がある。そのため、メタン生成細菌等の増殖や活性維持に不利な条件下では、如何にして十分な量の菌体を長時間排水装置内に保持出来るかが安定した排水処理性能発揮の鍵となる。

グラニューール汚泥床法では、増殖の遅いメタン生成細菌などが装置外に流失せず集積化出来る“場”を与えるため、グラニューール汚泥を植種源として使用した。また、処理水の循環を行って汚泥床（グラニューール汚泥が充填されている層を示す、図 2、⑤参照）における排水の上昇線流速を高く維持することで、排水と微生物との接触性およびグラニューール汚泥からのガス分離性を向上させた。

このような発想に基づいたメタン発酵排水処理リアクターを複数系列作製し、低濃度排水の低温下での連続処理実験により排水処理性能を評価した。また、水温や排水有機物濃度の低下が排水処理性能、保持汚泥の物性や微生物学的特性に与える影響の評価を行い、提案するメタン発酵排水処理技術の運転条件最適化のための基礎データを収集した。

2.1.2 低濃度有機性排水の連続処理試験の概要

低濃度有機性排水の連続処理試験には、独自に設計・作製した 3 系列のグラニューール汚泥床リアクターを用いた。排水処理試験の概要を表 1 に示す。また図 2 には、グラニューール汚泥床リアクターの概要図（系列 1）を示した。全容積は系列 1：16.8 L、系列 2、3：2.0 L であ

り、リアクター上部（気固液分離装置、Gas Solid Separator :GSS）より排水を取り出し、装置底部より循環させ、上昇線流速（5.0 m/h）を与えることで排水と微生物との接触効率の向上と、生成ガスの分離促進を図った。植種汚泥として産業排水処理メタン発酵槽（35℃で運転）より採取した中温グラニューール汚泥（生物膜）を用いた（系列 1）。供給排水は、食品や飲料製造排水を模したスクロース、酢酸、プロピオン酸、酵母エキスを炭素源（COD 比 4.5:2.25:2.25:1）とする合成排水で、無機栄養塩類、重炭酸ナトリウムを含む（表 2）。合成排水の

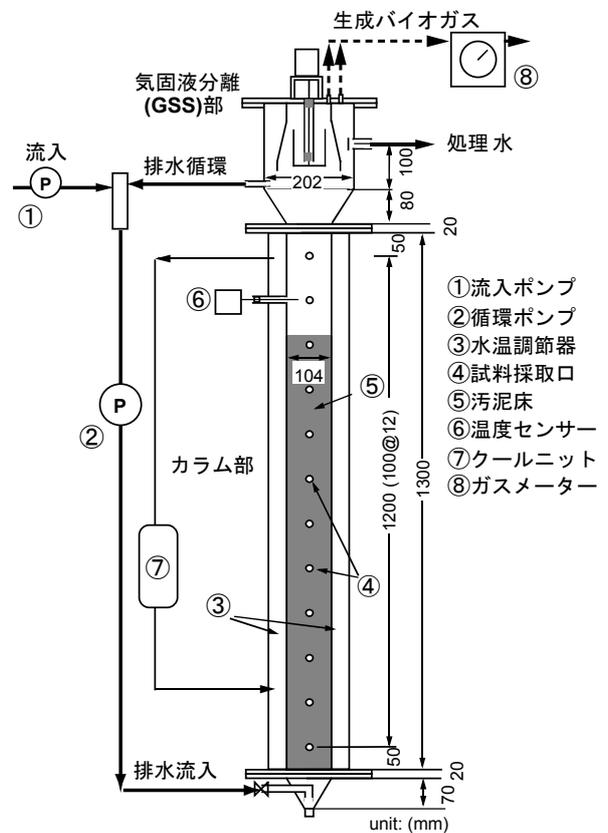


図2 排水処理試験に用いたグラニューール汚泥床の概要（系列1）

表1 グラニューール汚泥床リアクターによる低濃度有機性排水の連続処理試験の概要

系列	1	2	3
全容積 (L)	16.8	2.0	2.0
排水COD (mg/L)	600-800	600-800	300-400
水温 (°C)	20	15→10→5	20
上昇線流速 (m/h)	5.0	5.0	5.0

*実験期間中に変更（詳細は2.1.3項を参照）

表2 連続排水処理試験に用いた合成排水の組成

炭素源は系列1, 2で使用時の濃度を示した。系列3では、炭素源のみ表2の半分の濃度とした。

Carbon source, Inorganic nutrients	mg / L	Trace Element	mg / L
Sucrose	360 (as COD)	FeSO ₄ ·7H ₂ O	7
CH ₃ COONa	180 (as COD)	CoCl ₂ ·6H ₂ O	0.17
Yeast Extract	80 (as COD)	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.15
CH ₃ CH ₂ COOH	180 (as COD)	H ₃ BO ₃	0.06
NH ₄ Cl	37	MnCl ₂ ·4H ₂ O	0.5
KH ₂ PO ₄	33	NiCl ₂ ·6H ₂ O	0.04
MgCl ₂ ·6H ₂ O	13	CuCl ₂ ·2H ₂ O	0.027
CaCl ₂ ·2H ₂ O	33	Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	0.025
Trace Element X2000	0.5 ml/L		
NaHCO ₃	1200		

COD濃度は、系列1, 2では600-800 mgCOD/L, 系列3では300-400 mgCOD/Lに設定した。

系列1リアクターは水温20℃, 流入排水濃度600-800 mgCOD/Lで運転を行い、低濃度排水の常温下での排水処理特性や汚泥滞留時間 (Sludge Retention Time: SRT) に関する情報収集を行った。この系列1での培養汚泥を植種として用い系列2, 3の立ち上げを行った。

系列2リアクターは水温を15℃, 10℃, 5℃と段階的に低下させ、温度低下が排水処理性能等に及ぼす影響を評価した。

系列3リアクターは水温を20℃に固定し、排水有機物濃度を系列1の半分(300-400 mgCOD/L)に低下させ、有機物濃度低下の影響を評価した。

有機物負荷の上昇は、全ての系列で、排水COD濃度を一定として、排水滞留時間 (Hydraulic Retention Time: HRT) の短縮により行った。

なお排水処理性能を把握するため、定期的に流入水および処理水を採取し、COD濃度、硫酸塩濃度、揮発性脂肪酸 (Volatile Fatty Acid: VFA) 濃度の測定を行った。また生成バイオガスについても、ガス発生量、ガス成分組成の測定を定期的に行った。

開発技術であるグラニュール汚泥床法では、メタン生成微生物等を含む生物膜 (グラニュール汚泥) を高濃度かつ長い滞留時間で維持することが、不適条件下 (低有機物濃度, 低温) での排水処理性能確保の鍵となる。そこで、各系列の排水試験において、定期的に保持汚泥 (菌体) 濃度の測定、汚泥物性 (汚泥沈降指標 = Sludge Volume Index: SVI) の評価を行いグラニュール生物膜

の形成状況の把握を行った。また保持汚泥のメタン生成能の把握と、メタン生成細菌群の低温条件への順応性を評価するために、各試験温度 (10℃, 15℃, 20℃, 35℃) におけるメタン生成活性の測定 (供与基質, 酢酸: 酢酸資化性メタン生成細菌, H₂/CO₂: 水素資化性メタン生成細菌, プロピオン酸: 水素生成酢酸化細菌 [Acetogenic 菌]) を行った。

さらに排水処理実験期間における保持汚泥中の細菌相 (微生物群集構造) の変化を把握するため、汚泥試料からDNAを抽出し、メタン生成細菌 (古細菌) に特異的な16S rDNA配列を標的としたPCR増幅と増幅産物の変成剤濃度勾配ゲル電気泳動 (Denaturing Gradient Gel Electrophoresis: DGGE法) による分離により、生物膜の主要構成細菌群をDNAバンドとして検出した。検出されたバンドDNAの塩基配列を決定することで、試料中に存在する細菌群の近縁種を同定した。

2.1.3 グラニュール汚泥床法による低濃度排水の常温メタン発酵処理特性の評価 (系列1)

系列1では、低有機物濃度排水の常温下でのメタン発酵排水処理特性の把握と汚泥保持に関する基礎知見の収集を目的とし、図2に示したグラニュール汚泥床リアクターを用いた連続排水処理試験を行った。本系列では、流入排水の有機物濃度を600-800 mgCOD/Lと既存メタン発酵処理技術 (UASB法) の下限値 (約2,000 mgCOD/L) の1/3程度に設定し、水温20℃ (既存技術では下限値30-35℃) 条件下で排水処理試験を行った。なお処理水の循環を常時行うことで、汚泥床部で5.0 m/hの上昇線流速を与えた。

図3に系列1リアクターによる排水処理性能を示す。排水滞留時間 (HRT) 12 h, COD容積負荷1.6 kgCOD/m³/dで運転を開始し、80-90%の良好なCOD除去率が得られたため、それ以降HRTの短縮により負荷を上昇させた。運転開始76日目には、HRT 1.5 hで容積負荷12.0-12.8 kgCOD/m³/dに達した。この運転条件下でのCOD除去率は65-73%であり、処理水質は若干悪化したものの、安定した処理性能を維持出来た。またメタン回収率は60%前後であり、本提案システムでは低有機物濃度排水を常温 (20℃) で処理しているにも関わらず、安定的な排水処理 (有機物除去) とメタン回収が可能であることが分かった。

許容できる有機物負荷としては、既存の中温 (35℃)

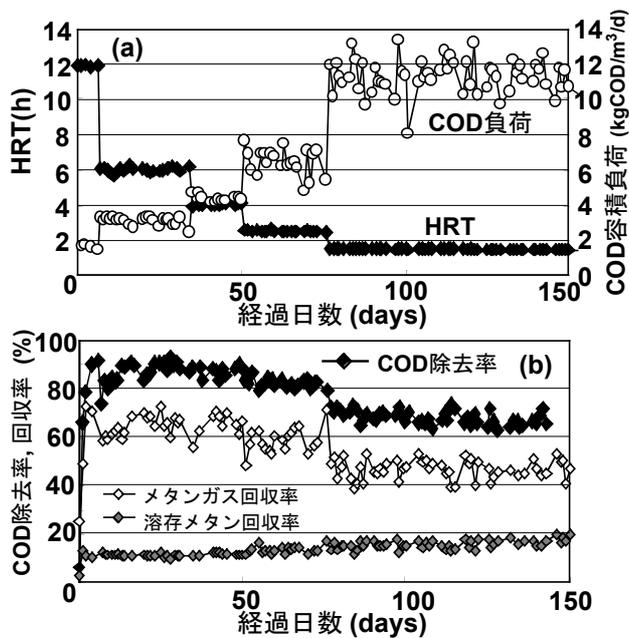


図3 系列1リアクターによる排水処理試験結果, (a)HRT と COD 容積負荷の経日変化, (b)COD 除去率とメタン回収率の経日変化

メタン発酵法 (UASB 法) と同等で, 活性汚泥法 (好気性処理) と比較して数倍高く, 高い処理能力を安定的に発揮できた。

メタン発酵不適条件下 (低有機物濃度, 常温) での安定的な排水処理性能の維持のためには, 装置内に十分な量の汚泥を保持し, 増殖速度の遅いメタン生成細菌群の集積化を促す長い汚泥滞留時間 (Sludge Retention Time: SRT) を維持する必要がある。そこで, 系列1における汚泥滞留時間の算定を行った (図4)。

運転開始後50日目頃 (HRT 4 h, COD 容積負荷4-4.8 kgCOD/m³/d) までは, SRT は数十日から数百日の間で大きく変化した。その後, HRT を2.5 h に短縮させたところ (容積負荷7.2-7.7 kgCOD/m³/d), SRT は平均で約

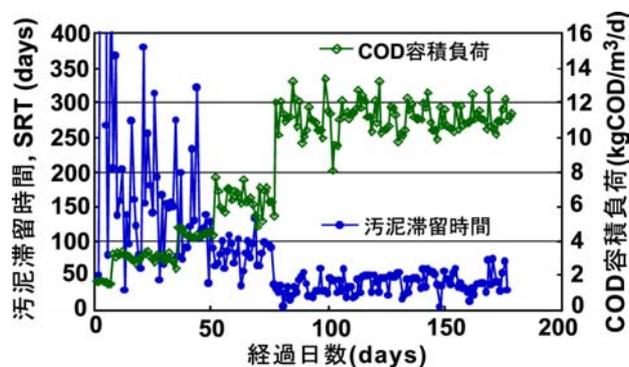


図4 保持汚泥の汚泥滞留時間 (SRT) と COD 容積負荷の経日変化

83日となった。HRT 1.5 h (容積負荷12-12.8 kgCOD/m³/d) 時には, SRT は更に短縮されるが, 平均で約37日の汚泥滞留時間を維持できた。メタン発酵処理において主要な酢酸資化性メタン生成細菌として知られている *Methanosaeta soehngenii* (*Methanothrix*) の至適温度 (37°C) 条件下における倍加時間は, 約3.4日である。リアクターの運転温度である20°C条件下では, 増殖速度は数分の一に低下すると考えられるが, 本装置では平均37日と長い汚泥滞留時間 (SRT) を維持できたことから, 増殖の遅いメタン生成細菌群をグラニュール汚泥内に高密度に集積化でき, その結果, 低有機物濃度排水の常温メタン発酵処理が可能であったと考えられる。例えば, 本グラニュール汚泥床保持汚泥の20°Cでの酢酸からのメタン生成活性は, 植種中温グラニュールに対し, 運転開始後254日目には25倍以上 (0.5 gCOD/gVSS/d) にまで増加した。

また, 水温20°Cで排水処理試験を行った系列1における COD 除去量と保持汚泥量の変化より算定した保持汚泥の増殖収率と死滅定数は, $Y_g = 0.13$ [gVSS/gCOD] (0.14 [gCOD-VSS/gCOD-removed]), $K_d = 0.0001$ [1/day]であった。増殖収率については中温 (35°C) 培養汚泥の2倍程度の値であり, 死滅定数は中温汚泥の1/5-1/10と低かった。常温 (低温) 度条件下においては, 至適増殖温度 (35-37°C) と比較して明らかに細菌群の活性は低下する。そのため, 菌体の死滅速度の低減と除去された有機物の菌体増殖への利用が進んだと考えられる。

本提案のグラニュール汚泥床法における排水循環効果の検証のために, 上昇線流速5.0 m/hにて HRT 1.5 h を達成後, 循環流量の変更により7.5 m/h, 2.5 m/h と順次, 上昇線流速を変化させ, 排水処理状況や保持汚泥の物性変化を調査した。その結果, 流入排水濃度 600-800 mgCOD/L の条件においては上昇線流速5.0 m/h での運転が処理水質と保持汚泥性状の維持に最適であった。それに対し, 線流速7.5 m/h 時には明らかに処理水質が悪化する傾向にあった。この結果は, 数値シミュレーションによっても検証され, 過大な上昇線流速の付与は, 汚泥床部での有機物濃度低下による微生物の不活性化を招くことが分かった。一方, 線流速 2.5 m/h 時は, 処理水質の悪化は見られないが, 生成バイオガスの分離性能低下による保持グラニュール汚泥の浮上が観察された。

2.1.4 排水温度低下の影響評価（系列2）

系列2では、排水温度の低下がグラニューール汚泥床法の排水処理性能や保持汚泥性状に与える影響を調査し、開発メタン発酵技術の適用が可能な水温範囲の評価を行った。

水温低下の影響評価試験には、全容積2.0 Lのグラニューール汚泥床リアクター（図5）を用いた。系列2では、排水有機物濃度を600-800 mgCOD/L、HRTを3-4 hに制御した。連続排水処理試験において水温を15°C、10°C、5°Cと段階的に低下させ、排水処理性能や保持汚泥性状に対する影響評価を行った。なお植種汚泥は、水温20°Cで長期運転を行った系列1より採取したグラニューール汚泥を用いた。処理水循環は、系列1と同様に常時行い、汚泥床部で5.0 m/hの上昇線流速を与えた。

図6に系列2の連続排水処理試験における除去COD量の変化を示した。排水温度の低下（20°C[植種]から15°C、15°Cから10°Cへの低下）により、一時的にCOD（有機

物）除去量の低下が見られるが、興味深いことに運転の継続に伴って徐々に除去COD量が増加し、処理性能は回復する傾向を示した。この様に、グラニューール汚泥床法は、水温10°Cまでは十分な処理性能（15°C運転時のCOD除去量の93%、容積負荷 4 kgCOD/m³/dに相当）を発揮できることが分かった。保持汚泥の物性調査の結果、低温度条件下での運転にも関わらず、汚泥沈降指標(SVI)は常に20 mL/gVSS程度と良好な値を維持しており、著しい沈降性の悪化は観察されなかった。また、保持汚泥濃度についても、若干の低下が生じるものの、約40 gVSS/L前後の高濃度汚泥保持が可能であった。グラニューール汚泥床の低温下での優れた汚泥保持能（=菌体滞留時間の保持）が、安定した処理性能発揮に大きく寄与していると考えられる。一方、水温を5°Cに低下させると、最終的に15°C運転時のCOD除去量の44%（3.53 gCOD/day）にまでCOD除去量が低下した。また水温5°Cの条件下では、排水処理性能の低下と共に、保持汚泥の物性の悪化（沈降性悪化、汚泥濃度減少）が進行し、最終的にSVIは32 mL/gVSS、汚泥濃度は22 gVSS/Lとなった。

以上の運転結果より、グラニューール汚泥床ではその良好な汚泥保持能により水温10-15°Cの低温条件下での低濃度排水の処理に対応出来ることが分かった。

系列2では、水温低下が保持汚泥の微生物学的な特性に及ぼす影響を評価するため、各試験温度条件下での保持汚泥のメタン生成活性の把握と、16S rRNA遺伝子を標的としたDGGE法によるメタン生成細菌相の解析を行った。

図7に各活性測定温度条件下におけるメタン生成活性の増加率（植種汚泥[0日目]の活性に対する10°C馴致汚泥[196日目]の活性増加率）を示した。これより、酢酸基質

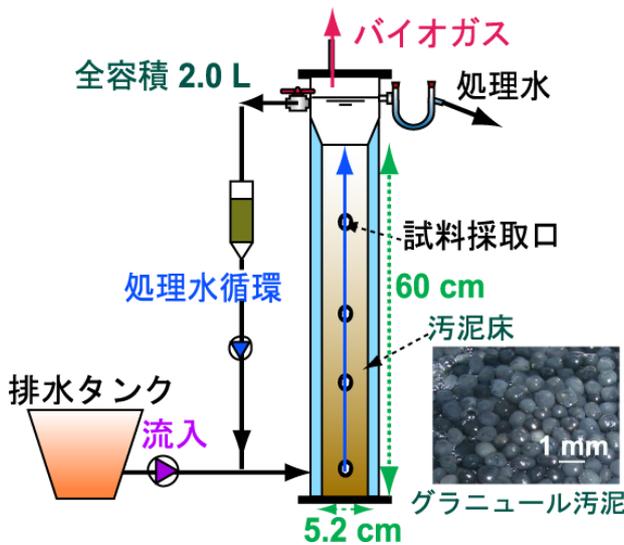


図5 グラニューール汚泥床リアクターの概要（系列2, 3）

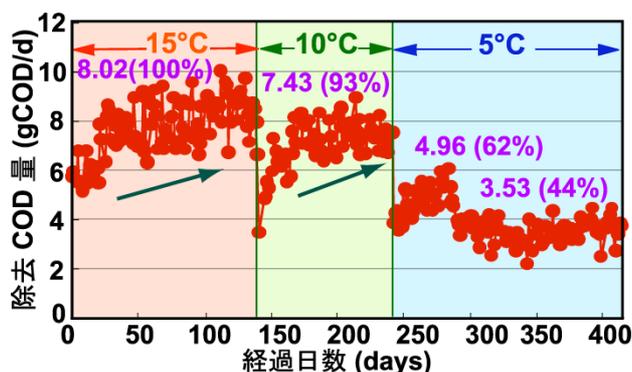


図6 水温低下に伴う除去COD量の変化（系列2）

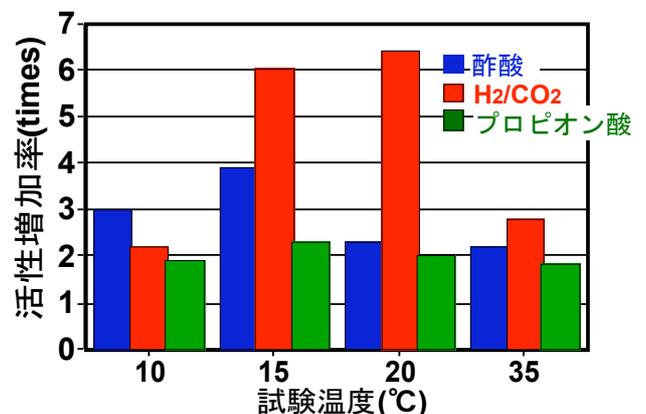


図7 低温培養に伴う各試験温度条件下におけるメタン生成活性の増加（196日目の活性の0日目の活性に対する増加率）

(酢酸資化性メタン生成細菌)では10-15°Cでの活性増加が、水素基質(H₂/CO₂,水素資化性メタン生成細菌)では15-20°Cでの活性増加率が大きく、低温運転に伴い低温耐性のある中温性メタン生成細菌の集積化が示唆された。特に、水素基質の15-20°Cでの活性増加率は6倍以上と、他の基質や温度条件での増加率(2-4倍)と比べて明らかに大きかった。これに対して、プロピオン酸基質(Acetogenic菌)については、全ての温度条件下において活性増加率に差が見られなかった(温度依存性に变化無し)。

図8には、系列2保持汚泥のメタン生成細菌相の変化をDGGE法により解析した結果を示した。保持汚泥中には、水素資化性メタン生成細菌として *Methanobacterium formicicum* の近縁種(バンド2)が、また酢酸資化性メタン生成細菌として *Methanosaeta concilii* (バンド4)

の近縁種が水温20°Cから5°Cの範囲で運転温度の低下によらず多く存在することが分かった。また水温の15°Cから10°Cへの低下に伴い、一部の *Methanobacterium* に近縁な細菌群(バンド1, 3)の減少と水田などの常温環境下での存在が確認されている水素資化性 *Methanospirillum* (バンド5)に近縁な細菌群の集積化が確認された。

低温運転に伴い保持汚泥中での増加が確認された水素資化性 *Methanospirillum* 属細菌に対して、より詳細な系統学的情報を得るため、運転開始後242日目(10°C運転時)の汚泥試料について Methanomicrobiales 目 (*Methanospirillum* 属を含む)の古細菌に関するクローン解析を行った。図9に得られたクローンの系統学的な位置を示す。図中の色付の文字が、今回得られたクローンを示す。その結果、得られた41クローン中の40クローン

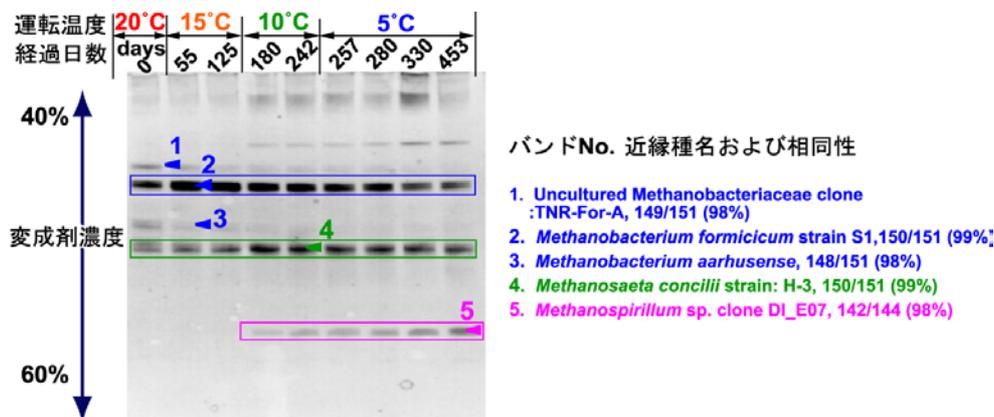


図8 DGGE法によるメタン生成細菌相の解析結果

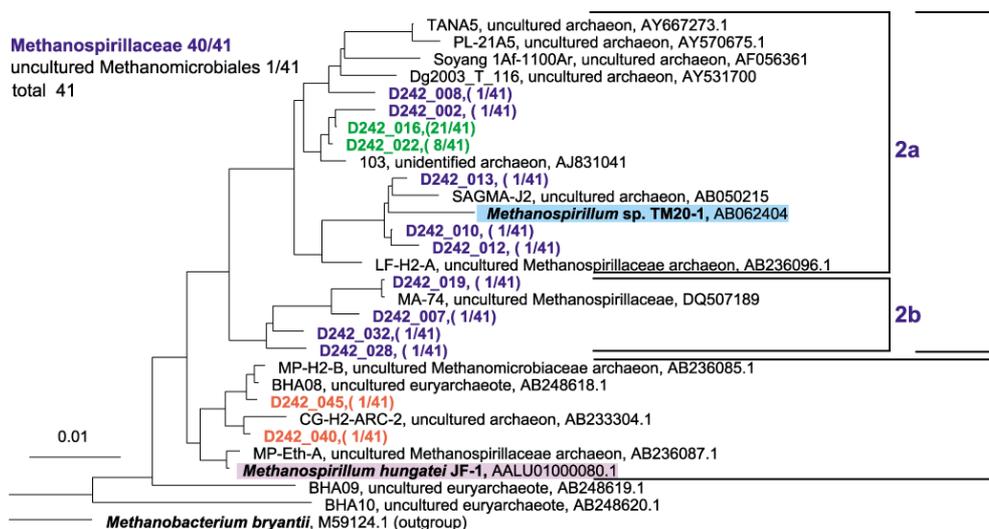
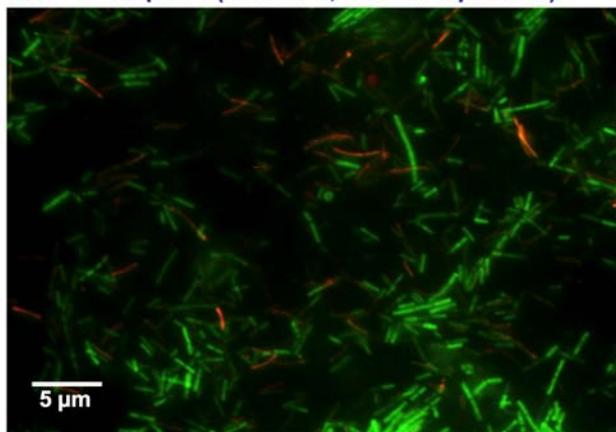


図9 保持汚泥への集積化が確認された *Methanospirillum* 属細菌の系統学的な位置(運転開始後242日目,水温10°C運転時の汚泥試料)
Methanomicrobiales 目の古細菌に特異的な16S rRNA 遺伝子をPCR増幅しクローン解析に供した。

Green: ARC915 (Domain Archaea)
Red : Mspi614 (Cluster 2, *Methanospirillum*)



Sludge sample (Day 242, 10°C)

図10 Fluorescence in-situ hybridization(FISH)によるクラスター2（常温対応）*Methanospirillum* 属細菌の検出
図中の赤色細胞が遺伝子プローブによって検出された常温対応の *Methanospirillum* 属細菌の存在を示す。運転開始後242日目（水温10°C時）に採取したグラニュール汚泥を分散処理し、FISH 法による解析に供した。図中の緑色の細菌細胞は、メタン生成古細菌の存在を示す。

が *Methanospirillum* 属に属するものであり、そのうちの38クローンが常温環境中から得られたクローンや20°Cでの培養により単離された TM20-1株を含むクラスター2（常温対応クラスター）に属していた。一方、代表菌株である中温性の *Methanospirillum hungatei* を含むクラスター1に属するクローンは2つのみであった。

そこで、クラスター2に属する *Methanospirillum* 属細菌の16S rRNA 配列に特異的な遺伝子プローブ（Mspi641）を設計し、運転開始後242日目（10°C運転時）の汚泥試料に対して FISH 法（Fluorescence in-situ hybridization）を適用した。図10に FISH 法による常温対応 *Methanospirillum* 属細菌（クラスター2）の検出例を示す（赤がクラスター2に属する *Methanospirillum* 属細菌の細胞、緑がメタン生成古細菌の細胞）。FISH 法による細菌数計測の結果、クラスター2に属する常温対応の

Methanospirillum 属細菌の存在率は、低温培養の前後で、全古細菌の細胞数の0.5%程度（0日目）から7%程度（242日目、10°C運転時）にまで大幅に増加することが確認出来た。なお、低温培養汚泥に存在する中温性の *Methanobacterium* 属細菌（図8、DGGE 法による解析で検出されたバンド1, 2, 3）の細胞数は、全古細菌細胞に対して5%程度の存在率であった（242日目）。

以上の結果より、常温対応の *Methanospirillum* 属細菌の集積化が、低温下での水素資化性メタン生成活性の増加（図7）に貢献したものと推測される。現在までのところ、低温に耐性を持つメタン生成細菌を排水処理装置の中で集積化して利用出来た例は本研究以外に無い。優れた汚泥保持能を発揮するグラニュール汚泥床法は、十分な汚泥滞留時間の維持により細菌群集構造最適化のための“場”を提供することが出来るため、メタン発酵不適条件への優れた適用性を示したと考えられる。

2.1.5 排水有機物濃度低下の影響評価（系列3）

系列3では、流入排水の有機物濃度の低下が、グラニュール汚泥床リアクターの排水処理性能や保持汚泥性状に与える影響の評価を20°C条件下において行った。

排水の連続処理実験は全容積2.0 Lのグラニュール汚泥床リアクターにより行った（図5）。植種汚泥として、水温20°Cで長期間運転を行った系列1リアクターの保持グラニュールを用いた（植種量46 gVSS/reactor）。供給排水はスクロース:酢酸:プロピオン酸:酵母エキスを炭素源とする合成排水で、有機物濃度は系列1の半分（300-400 mgCOD/L）に設定した。HRTは1 hに設定し（運転開始初期の20日間を除く）、COD容積負荷は、約6.0-9.6 kgCOD/m³/dとなった。流入排水及びリアクターの温度は20°Cに制御した。

表3に、系列3における連続排水処理試験の条件を示す。実験開始101日目まで（Phase A）は、常時処理水の循環

表3 系列3における連続排水処理試験の条件

	Day 0-21	Day 21-101	Day 102-123	Day 124-283	Day 284~
運転 Phase	A		B1	B2	C
上昇線流速 (m/h) および運転モード	5.0 m/h (循環モード)		0.7 m/h (ワンパスモード, 30分) + 5 m/h (循環モード, 10分)		
流入 ORP (mV)	-		+22~-70	-140~-170	
処理水 ORP (mV)	-223~-207		-191~-155	-249~-227	-249~-227
COD負荷 (kgCOD/m ³ /day)	4.8-6.4	6.0-9.6			
HRT (hr)	1.5	1.0			

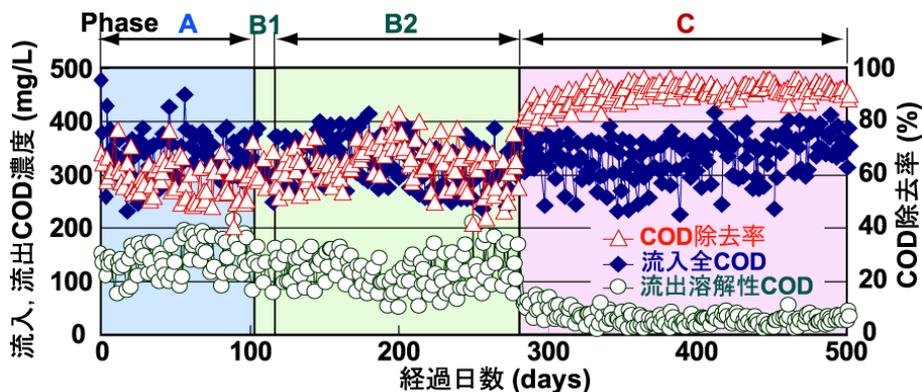


図11 連続排水処理実験における流入・流出 COD 濃度および COD 除去率の経日変化 (系列3)

を行う循環モード(上昇線流速5.0 m/h)で運転を行った。その後、102日目(Phase B, C)より、汚泥床部の有機物濃度維持(微生物活性化)を目的とした排水循環を行わないワンパスモード(線流速0.7 m/h)と、汚泥床での排水短絡防止と生成ガスの汚泥からの分離を促す循環モード(処理水循環, 線流速5.0 m/h)を30分, 10分の間隔で繰り返して運転を行った(間欠処理水循環法)。また, Phase B2(124日目)より, 硫化ナトリウムの添加により流入水の酸化還元電位(Oxidation Reduction Potential: ORP)を-150 mV前後に維持した。Phase B終了時には, 保持汚泥量が大幅に減少したためグラニューク汚泥を実験開始時と同量になる様に加えた後, Phase Cの運転を行った。連続処理実験期間中は定期的に保持汚泥濃度, 汚泥の沈降性(汚泥沈降指標: SVI)を測定し, 生物膜形成状況の把握を行った。

図11にグラニューク汚泥床リアクターによる低濃度排水の処理性能(流入・流出 COD 濃度, COD 除去率)の経日変化を示す。これより, 実験期間を通じて流入水の COD 濃度は250-400 mgCOD/Lであった。HRT 1.5 hで運転を開始し, 運転開始後22日目には HRT 1 h, 容積負荷6.0-9.6 kgCOD/m³/dに達した。HRT 1 h時のPhase Aにおける平均 COD 除去率は57%であり, 系列1の流入 COD 濃度600-800 mgCOD/L時の COD 除去率(70-75%, 同一負荷条件時)よりも明らかに低下した。また, 保持汚泥の沈降性の悪化(SVIの上昇)も観察された(図14参照)。

Phase Aでは, 処理水循環によりリアクター汚泥床部で5.0 m/hの上昇線流速を与えているため(循環モード), 処理水循環により汚泥床での供給有機物濃度が低下し, 微生物活性低下の要因となっていることが予測された。そこで, 排水循環有り(循環モード, 5.0 m/h), 無し(ワ

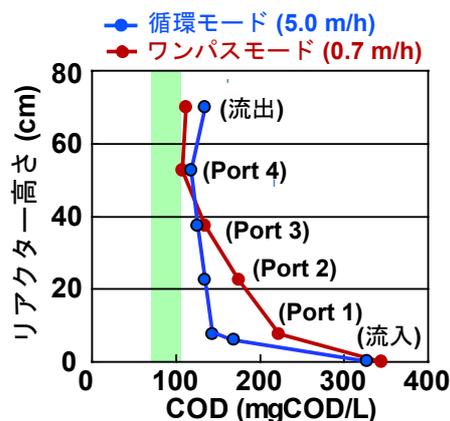


図12 リアクター高さ方向の COD 濃度勾配

ンパスモード, 0.7 m/h)の条件下でリアクター高さ方向の COD 濃度勾配を調査した(図12)。その結果, 処理水循環を伴わないワンパスモードで明らかな処理水質の向上が確認された。主要な酢酸資化性メタン生成細菌である *Methanosaeta* の酢酸に対する半飽和定数(K_s)は60-100 mgCOD/L前後であることが知られており, 処理水循環を行う循環モードでの運転では, 汚泥床での COD 濃度不足により保持汚泥の微生物活性の低下を招くことが分かった。そこで, 102日目以降(Phase B, C)は, 汚泥床部の有機物濃度維持(=微生物活性化)のため排水循環を行わないワンパスモード(線流速0.7 m/h)と, 汚泥床での排水短絡防止と生成ガスの汚泥からの分離を促す循環モード(処理水循環, 線流速5.0 m/h)を30分, 10分の間隔で繰り返す運転方法(間欠処理水循環法, 特許公開 2008-036529)を考案し, 運転を継続した。

図13には, 連続運転期間のメタン生成量とメタン回収率(除去 COD 量を100%とした場合に, メタンとして回収される COD の割合)を示した。また図中には, 各運

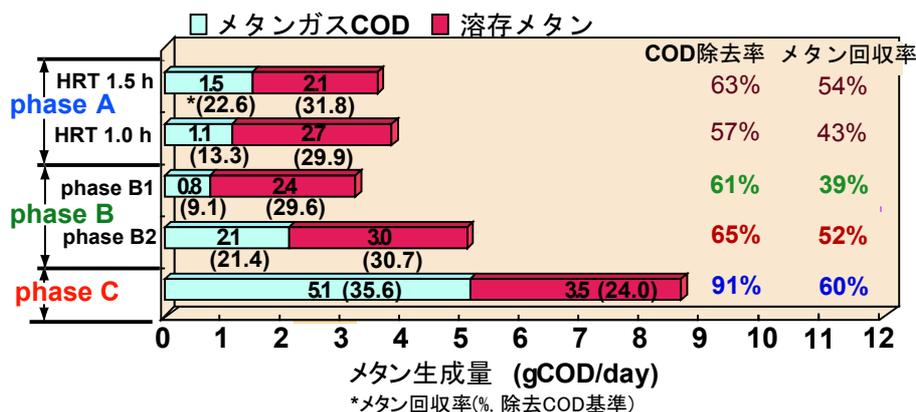


図13 各運転条件下におけるメタン生成量の変化 (図中には、各運転条件下における平均 COD 除去率とメタン回収率も示す)

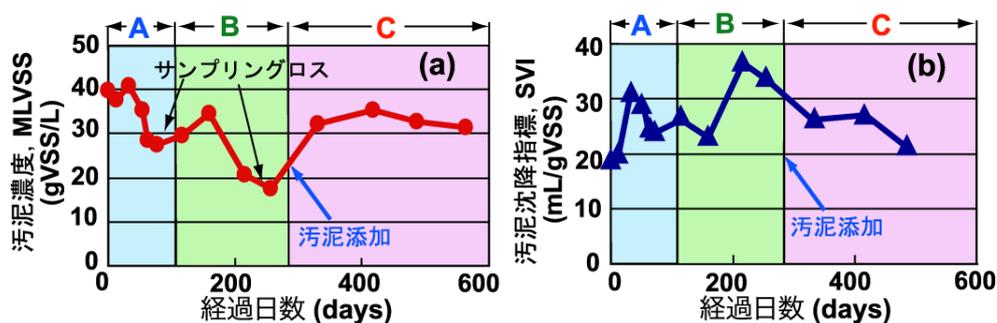


図14 連続排水処理試験における保持汚泥の物理的性状の変化, (a)汚泥濃度の経日変化, (b)汚泥沈降指標の経日変化

転条件における平均メタン回収率, COD 除去率も示した。Phase B1ではワンパスモードと循環モードの組み合わせによる排水供給により, COD 除去率は Phase A よりも約4%向上したが, 一方で明らかなメタン回収率の低下 (約4%) を招いた。

循環モードでの運転時は, ORP (酸化還元電位) の低い嫌気処理水と混合された状態で排水が供給されるが, ワンパスモードでの運転では, 汚泥床に排水が直接供給される。Phase B1における供給排水の ORP は+20から-77 mV と比較的高かったことからメタン発酵反応に障害を及ぼした可能性が考えられた。そこで Phase B2(124日目)より, 硫化ナトリウム (3 mgS/L) の添加により供給排水の ORP 低下を試みた。その結果, 流入水の ORP は-150 mV 前後で維持され, 明らかなメタン回収率 (約13%) と COD 除去率 (約4%) の向上が見られた (Phase B2)。なお実低濃度排水に関しては, -100から-150 mV 程度の ORP を確保出来ている場合が多い。本研究で使用した合成排水は, 水道水により調合しているため ORP が高かったと推測される。

Phase B2では, ワンパスモードと循環モードの組み合わせ運転と, 流入水の ORP 制御により明らかに排水処理性能は向上したが, 汚泥濃度の低下 (サンプリングロスを含む) および保持汚泥の沈降性の悪化は継続的に生じた (図14)。そこで, 284日目にリアクター運転開始時の汚泥量と同じになるようにグラニューク汚泥を加え (VSS 量として28.5 g を添加), 運転を継続した (Phase C)。その結果, COD 除去率は91%にまで飛躍的に向上し, その後200日以上安定的に運転を行うことが出来た (図11, Phase C 参照)。また, Phase C におけるメタン回収率は60%にまで増加した (図13)。なお本実験では, 回収メタンの約4割が溶存態であった。さらに, Phase C においては, 保持汚泥の物性 (MLVSS 濃度, SVI) も200日以上 of 長期間良好に維持することが出来た (図14)。

流入 COD 濃度の変化がグラニューク汚泥床リアクターの間欠処理水循環運転時の有機物除去性能に及ぼす影響を評価するため, 回分排水供給試験を行った。回分排水供給試験では, 各運転モード (ワンパス, 循環) で COD 濃度の異なる排水 (100-400 mgCOD/L) を一定時

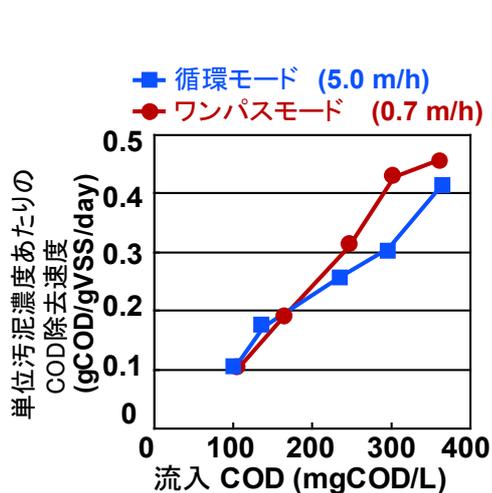


図15 単位汚泥濃度あたりの COD 除去速度に及ぼす流入 COD 濃度と排水循環条件（運転モード）の影響

間（HRT の3倍以上）供給し、リアクター高さ方向の COD 濃度勾配を測定した。これより、それぞれの排水循環条件における単位汚泥濃度あたりの COD 除去速度を算定した（図15）。その結果、流入排水濃度250-400 mgCOD/Lの範囲ではワンパスモードでの運転により明らかに COD 除去速度が向上した。我々は、流入 COD 濃度600-800 mgCOD/L の条件（系列1）においてもワンパスモードでの運転により COD 除去速度が向上することを確認している。一方、流入 COD 濃度が200 mgCOD/L未滿の条件では、ワンパスモード、循環モードでの COD 除去効率（速度）に大きな差は見られなかった。

この様に、グラニューール汚泥床法における処理水循環条件等の最適化により、極低有機物濃度排水（250-400 mgCOD/L）に対応可能な高効率メタン発酵処理法を確立することが出来た。

2.1.6 グラニューール汚泥床の実低濃度産業排水処理への適用（系列4）

本研究では、省・創エネ型の排水処理法であるメタン発酵技術の適用範囲を飛躍的に拡大するため、技術が未適用な低有機物濃度、低温の有機性排水に対応可能なメタン発酵リアクター“グラニューール汚泥床”の開発を行ってきた。本項では、低濃度・低温排水対応メタン発酵技術（グラニューール汚泥床）と省エネルギー型後段好気処理法（懸垂型スポンジろ床、Down-flow Hanging Sponge: DHS）との組み合わせによる実産業排水（製糖

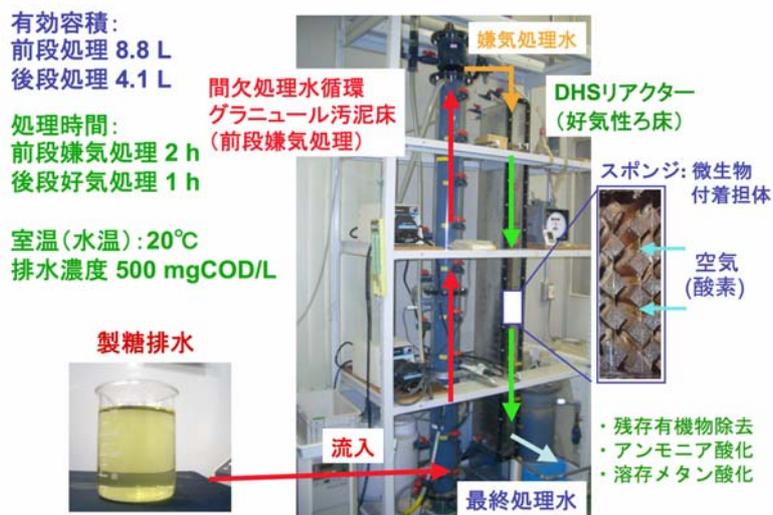


図16 実低濃度産業排水処理システムの概要図

排水)の処理試験を行い、開発排水処理技術の実用可能性評価を行った。

製糖排水の連続処理実験は、前段に嫌気性処理であるグラニューール汚泥床（間欠処理水循環グラニューール汚泥床）、後段に省エネ型好気性ろ床（DHS）を組み合わせた処理システム（系列4）により行った。図16に処理システムの概要図を示す。前段のグラニューール汚泥床は、容積8.8 L でタイマー制御により処理水循環を行った（2.1.5において開発した間欠処理水循環法）。60分間を1サイクルとし、最初10分間は排水供給と共にリアクター内部の上昇線流速が5.0 m/hr になるように処理水循環を行った（循環モード）。残り50分間は排水の供給のみを行った（ワンパスモード、上昇線流速 1.0 m/h）。後段の好気性ろ床（DHS）は処理水質向上のために設置した。DHS では微生物付着担体として高さ2.5 cm、幅4.0 cm、奥行き20.5 cm の三角柱状のスポンジを用いた。このスポンジ単体を塩化ビニル板に排水流下方向に対して垂直に計40個配置したカーテン型のろ材を密閉容器内に懸垂して設置した。なお、スポンジの総体積は4.1 L である。また、この好気性ろ床では、処理水に含まれる溶存メタンの酸化のために、ろ材を配置した密閉容器に小型エアポンプにより空気の導入を行った。通常の活性汚泥法では、水中に空気を導入するための曝気操作に関わる電力（曝気電力）が非常に大きいことが知られている。本好気性ろ床システムでは、ろ床部に空気を大気圧下で導入出来るため、曝気に関わる電力の大幅な削減が可能である。グラニューール汚泥床で処理された嫌気処理水は、

好気性ろ床の上部から滴下されることで酸素を取り込み、スポンジ内に捕捉された好気性微生物により処理される。

グラニューール汚泥床は20℃培養メタン発酵グラニューール汚泥（系列1）を、好気性ろ床は活性汚泥を植種し、運転温度は共に20℃に制御した。HRTは装置の立ち上げ時を除き前段の嫌気処理で2h（後段好気処理は約1h、システム全体で3h）に設定し運転を行った。

実験開始41日目までは系列1～3と同様の合成排水を供給して処理実験を行った（表1参照）。なお、合成排水のCOD濃度は600mg/Lに設定した。実験開始42日目に供給排水を実製糖排水へと切り替えた。製糖排水は濃縮溶液を実排水と同等レベルのCOD濃度500mg/L前後になるように水道水で希釈して使用した。なお、製糖排水は定期的に工場より採取し実験に供したため水質の変動があった（硫酸塩濃度等）。実験開始84日目以降は、処理水質の改善のため製糖排水に重炭酸ナトリウム（pH緩衝剤）、無機栄養塩、微量金属の添加を行った。

図17に連続排水処理実験の結果を示す。(a)は処理水の全COD濃度、グラニューール汚泥床のみと後段処理を含めた全COD除去率、(b)はグラニューール汚泥床における除去CODに対するメタン転換率と硫酸還元反応の除去CODに対する寄与率を示した。実験開始時は合成排水

を供給し、システム全体のHRTを6h（前段4h、後段2h）に設定して運転を行った。運転開始後15日目以降は、システム全体のHRTを3h（前段2h、後段1h）とし、グラニューール汚泥床での有機物負荷は、5-6kgCOD/m³/dとなった。合成排水供給時の全COD除去率はグラニューール汚泥床で90%、後段処理を含めて98%程度と良好であった。

実験開始42日目に実製糖排水への切り替えを行ったところ、しばらくは排水処理性能が維持されるが、その後、グラニューール汚泥床でのCOD除去率が60%前後にまで低下し、処理水にノルマル酪酸等の中間代謝VFAの蓄積、処理水pHの低下（pH7.2→6.6）も観察された。供給した製糖排水は微生物生育に必要な栄養塩濃度が低かった（1mgNH₄-N/L以下）ため、実験開始77日目より排水に無機栄養塩、微量金属類、重炭酸ナトリウム（pH緩衝剤）を添加し運転を行った。その結果、処理性能は回復し安定的な処理水質が得られるようになった。

最終的な処理成績として、グラニューール汚泥床のみで全COD除去率85%、流出全COD濃度49mg/Lを達成した。嫌気処理水中のVFA濃度は常時低かったため、処理水中の残存CODはサトウキビ由来の色素成分等の

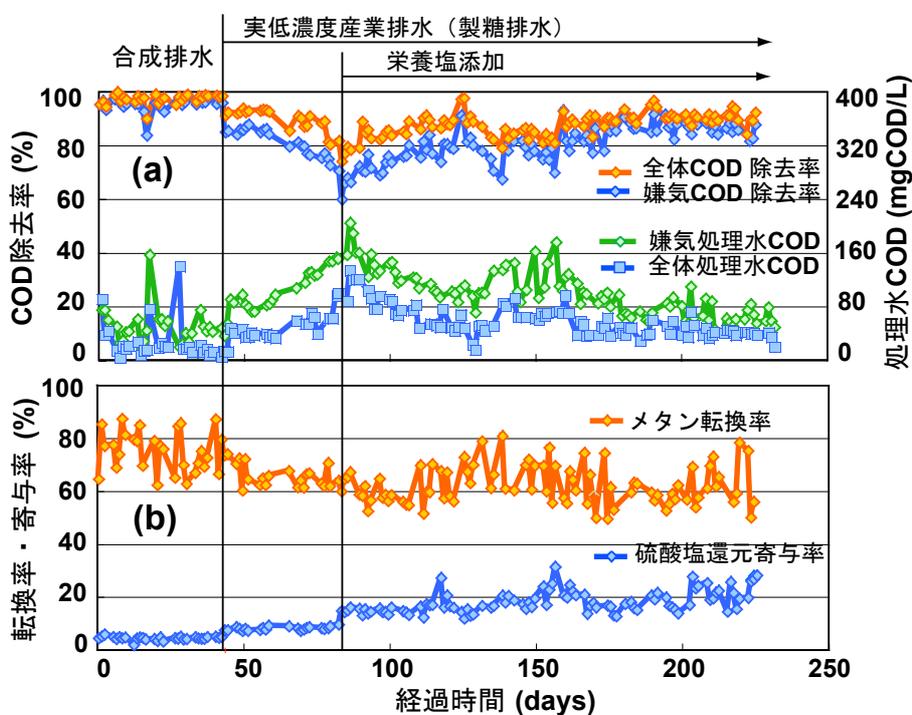


図17 間欠処理水循環グラニューール汚泥床と好気性ろ床 (DHS) との組み合わせによる低濃度産業排水（製糖排水）の処理性能、(a)はシステム全体および嫌気処理（グラニューール汚泥床）のCOD除去率および処理水COD濃度、(b)はグラニューール汚泥床における除去CODに対するメタン転換率と硫酸塩還元による除去CODへの寄与率を示した。

難分解性有機物であると考えられた。また、後段の好気性ろ床も含めると COD 除去率は約90%に達し、好気処理水での全 COD 濃度は約 33 mg/L となった。

排水の環境中（河川など）への放流では、COD_{MN} および BOD 濃度が判断基準（約30-60 mg/L）となっているが、本研究におけるグラニュール汚泥床と後段好気性ろ床（DHS）との組み合わせによる処理では、最終的に流出全 COD_{MN} 23 mg/L（嫌気処理のみで37 mg/L）、全 BOD 3 mg/L（嫌気処理のみで28 mg/L）と実用化に十分な処理水質を確保出来た。また、開発システム全体の HRT は3 h であり既存好気性処理法と比較して2-3倍高速な処理が行えた。

製糖排水には砂糖の原料であるサトウキビ由来の硫酸塩が比較的高濃度に含まれる。それゆえ、メタン生成による有機物除去に加え、硫酸塩還元反応による有機物除去も生じていた。本実験系（系列4）のグラニュール汚泥床における硫酸塩還元反応による有機物除去量は全除去 COD 量の22%に達しており、メタン回収率（除去 COD 量の64%）に対して比較的大きかった（図17(b)）。硫酸塩還元反応により生じる硫化物は、メタン生成細菌に対する阻害物質として知られているが、硫化物がある程度生成することで、メタン発酵槽内の ORP を低く維持出来るという利点もある。

低有機物濃度排水のメタン発酵処理では、生成したメタンの大部分が処理水中に溶存して環境に放出される。メタンは、強温室効果ガスであるため、処理水中からのメタンの回収や除去はメタン発酵処理において重要である。本研究では、後段処理の好気性ろ床（DHS）において、ろ材を密閉容器内に配置することで溶存メタンの大気放散を防止し、かつ好気性微生物との接触を図ることで、処理水中に含まれる溶存メタンの微生物酸化を試みた。なお、好気性ろ床容器への空気（酸素）の導入は、小型のエアポンプにより行った。その結果、50-60%程度の溶存メタンの酸化が可能であった（結果示さず）。本研究の関連プロジェクトにおいて、メタン発酵処理水の後段処理として密閉型の好気性ろ床を2段組み合わせることで（1段目の好気性ろ床では気液平衡による溶存メタンの回収を、2段目のろ床では残った溶存メタンの酸化を行う）溶存メタンの95%以上を回収・除去出来ることが実証された。低濃度排水のメタン発酵においては、処理水質の確保と溶存メタンの回収・除去が可能な後段処理（密閉型の好気性ろ床）の設置が重要であるといえ

る。

2.2 嫌気性処理と省エネ型の好気性処理との組み合わせによる都市下水の実証処理試験（下水の無加温嫌気処理特性評価）

2.2.1 はじめに

我々の日常生活に伴い排出される都市下水（生活排水）は、下水処理場において好気性微生物処理が施されている。しかしながら、下水処理に関わる電力消費は大きく、また好気性処理の結果、多量の余剰汚泥（=有機物分解に伴い増殖する菌体）が発生するため、省エネルギー型の下水処理システムの開発が求められている。

排水処理にエネルギー（コスト）をかけることが出来ず、また平均水温も高い、メキシコ、ブラジル、インドなどの開発途上国では、都市下水の処理に嫌気性処理（UASB 法）の適用がなされている。しかしながら、嫌気処理のみでは満足する水質は得られず、また平均気温が比較的低い、熱帯地域以外の国々では、微生物の活性低下による処理性能の悪化も予測される。また都市下水には、排泄物由来の固形性有機物（セルロース、タンパク質）が多量に（全 COD の 4 割から 6 割）含まれており、低温下で分解率速になり易いという報告もある。

以上の様な背景から、本研究では、下水に含まれる浮遊固形有機物（Suspended Solid: SS）の常温条件下での分解に関する基礎的知見収集を目的として、下水の SS 成分やセルロースを基質とした回分集積培養実験を行った。また、嫌気性処理（メタン発酵処理）と好気性ろ床（下降流懸垂スポンジろ床、Down Flow Hanging Sponge: DHS）の組み合わせによる都市下水の実証処理試験（処理規模:50 m³/day）を通年で民間企業との連携により行い、水温低下に対する嫌気性処理の安定性向上に関する検討や提案システムのエネルギー削減効果について検証を行った。

2.2.2 回分集積培養による固形有機物分解特性の評価

都市下水に含まれる固形性有機物の常温条件下における嫌気分解の様相を調査するため、集積培養を行った。

集積培養は容量720 mLのセルムバイアル瓶を用いて20°C条件下（120 rpm振とう）で行った。バイアル瓶には、リン酸緩衝液や無機栄養塩類を含む培地を分注し、植種汚泥と合わせて液量を200 mLとした。供給固形有機物として、下水SS（下水処理場最初沈殿池汚泥）、セル

ローズ（粉末濾紙）、タンパク質（大豆タンパク）、スターチ（炭水化物）を用いた（初期濃度 1.8*~2.4 gCOD/L,* 下水SS）。植種汚泥は、都市下水中温消化汚泥を用い、酢酸等の蓄積を防ぐため、20℃培養グラニュール汚泥も混合添加した（初期汚泥濃度：9-10 gVSS/L、消化汚泥と分散処理グラニュール汚泥を1:1[w/w]で混合）。定期的にメタン生成量を測定し、投入有機物の80%以上がメタン化した時点で、培養液の採取と基質の再投入を行った。

図18に下水SSおよび下水に含まれる固形性有機物の主要構成成分であるセルロース、スターチ、タンパク質を炭素源に用いた集積培養系におけるメタン生成の様相を示した。集積培養は、投入有機物（COD）の80%程度がメタンに転換した時点で、培地の引き抜きと基質の投入を繰り返す半回分培養で行った。

スターチ、セルロース等の糖系の基質では、投入COD量の90%以上がメタンに転換され良好な分解の進行が観察された。また、これらの集積培養系では中間代謝有機物であるVFA（揮発性脂肪酸）の蓄積も観察されな

かった。下水SS、タンパク質などのタンパク成分を含む基質では、メタン生成量が投入CODの80%程度と若干低かったが、分解の進行は概ね良好であった。但し、タンパク質集積培養系では培養期間の後半で、タンパク質の分解の結果生じるアンモニアによる微生物阻害（VFAの蓄積）が観察された。

本集積培養の様に、有機物負荷および水温が、ほぼ一定（汚泥負荷 0.01-0.03 gCOD/gVSS/d、水温 20℃）で維持される条件下では、中間代謝脂肪酸の蓄積も観察されず、有機物のメタンへの転換が遅滞なく進行していたことから、固形有機物分解の第一段階である加水分解・酸生成反応が律速であることが確認された。

基質の投入を数回（培養期間 80 日以上）繰り返した後、固形有機物の分解に関わる細菌の集積度合いと、得られた集積培養体の固形有機物分解活性（=酸生成活性）の温度依存性を調査するために、回分活性試験を行った。集積培養汚泥をリン酸緩衝液で洗浄を行った後、容量 124 ml のセルムバイアル瓶に分注し（液量 50 mL）、各

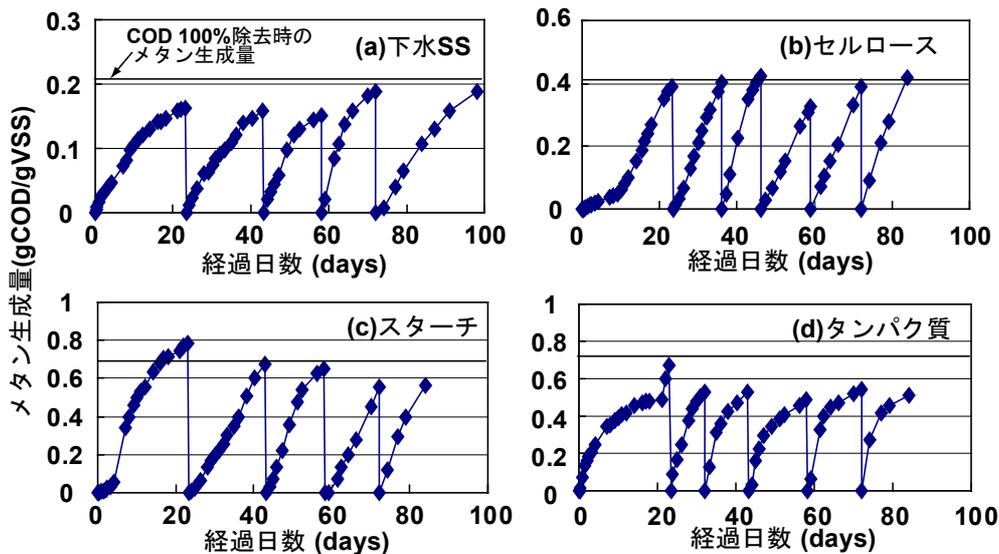


図18 各集積培養体におけるメタン生成の様相，供与基質(a)下水SS，(b)セルロース，(c)スターチ，(d)タンパク質

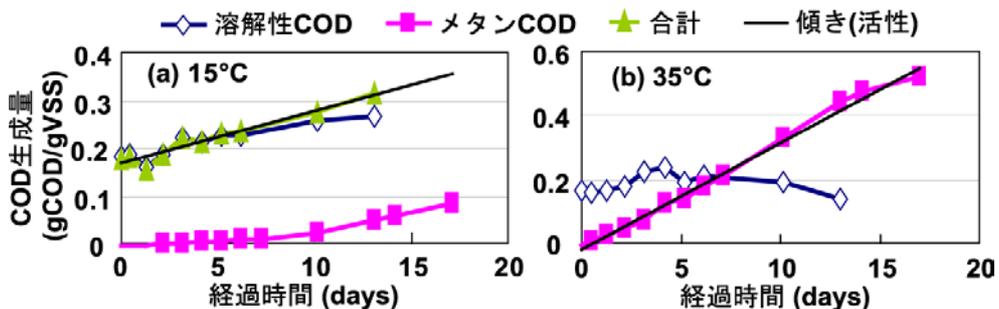


図19 下水SS集積培養体における溶解性CODとメタン生成の様相，(a)試験温度15℃，(b)試験温度35℃

集積基質の分解活性(溶解性 COD[VFA 等の有機酸]とメタンの生成量)を水温 10-35°Cの温度条件下で測定した。

図 19 に下水 SS 集積培養体における溶解性 COD の蓄積とメタン生成の様相を示した。水温 15°C 条件下では、酸生成の進行による溶解性 COD (VFA) 濃度の増加とメタン生成の両方が観察されたため、それらの合計を酸生成活性とした。一方、35°C 条件では、溶解性 COD の増加は観察されずメタン生成のみが確認されたため、メタン生成速度を酸生成活性とした。嫌気微生物の至適温度である中温条件 (35°C) では、生成した VFA (揮発性脂肪酸) は速やかにメタンへと転換されていることから、固形有機物の加水分解・酸生成反応が律速段階であると考えられる。一方、低温 (15°C) では、反応初期段階では VFA の残存が認められ、メタン生成の開始に遅延期間が存在した。これより、メタン生成細菌は温度低下に対して感受性が高く、一時的に活性が低下し易いことが推測される。しかし、メタン生成の開始以降は、VFA 濃度の増加はみられず、結果的には、固形有機物の酸生成反応が律速となることが推測された。

図 20 に各集積培養体の酸生成活性の温度依存性を示した。酸生成活性は、図 19 に従い、各温度条件下における溶解性 COD の増加速度とメタン生成速度の合計として示した。

集積培養体の酸生成活性の温度依存性は、基質に応じて傾向が異なった。下水 SS, セルロース集積培養体の酸生成活性は、易分解性のタンパク質やスターチ集積培

養体と比べて 1/10 程度と明らかに低かった。

下水 SS 集積体の酸生成活性に着目してみると、試験温度 20°C 時には、約 0.02 gCOD/gVSS/d とセルロース集積培養体と同程度の酸生成活性値を示すが、水温 15°C では活性値が半減した。この傾向はセルロース集積培養体においても同様であり、冬期に水温が 15°C 程度にまで低下すると下水に多く含まれる固形有機物 (SS) の分解速度の急激な低下を招くことが分かった。

スターチおよびタンパク質集積培養体の酸生成活性は、下水 SS やセルロース集積培養体と比較して 10 倍程度高かった。スターチ集積培養体の酸生成活性は、水温低下の影響を受けやすいが、タンパク質集積培養体の活性は水温低下が生じて減少しにくかった。

2.2.3 集積培養体の菌相解析

常温下での固形有機物の加水分解・酸生成にかかわる細菌を同定するため、集積培養体の菌相解析を行った。集積の進行に応じた菌相変化の様相を観察するため、定期的に集積培養汚泥を採取し、そこから抽出した 16S rRNA 遺伝子 (16S rDNA) を標的として、DGGE 法による解析を行った。なお DGGE 解析は酸生成細菌群 (真性細菌, Domain Bacteria) についてのみ行った。

図 21 に集積培養体の DGGE 法による菌相解析結果を示した。変性剤濃度勾配ゲルによる電気泳動により、異なる配列をもつ細菌由来の遺伝子をバンドとして検出した。

図中には主要な細菌由来の DNA バンドと相同性解析

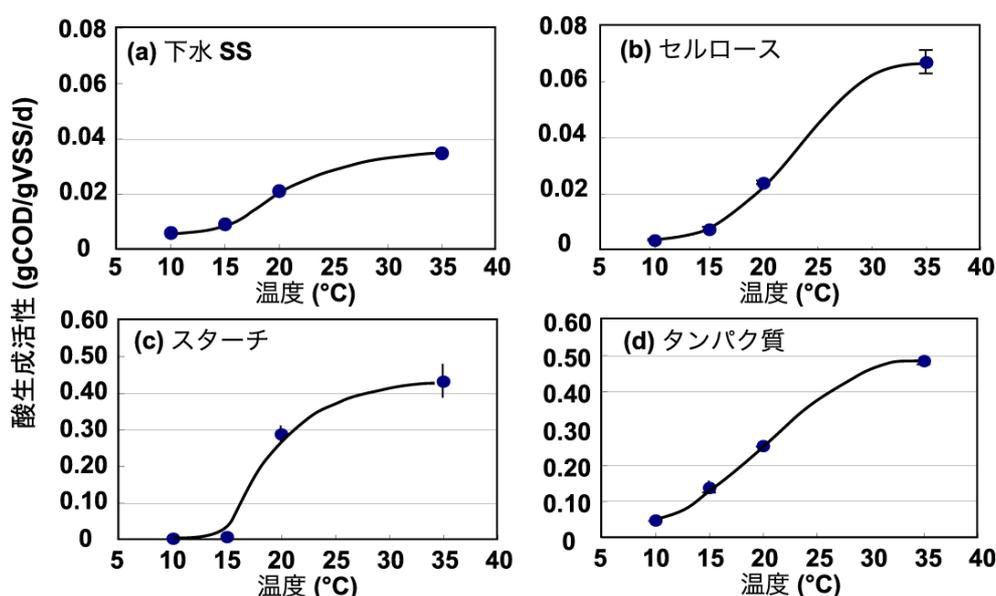
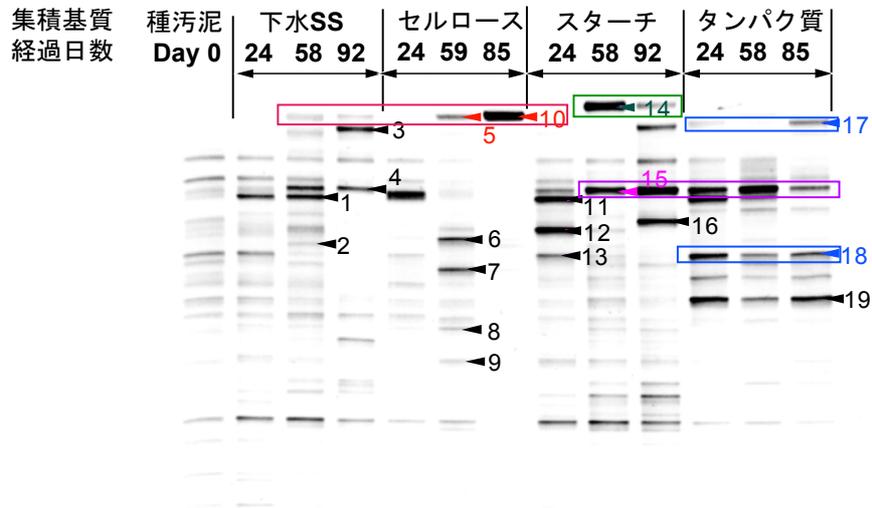


図20 各集積培養体の酸生成活性の温度依存性, 供与基質(a)下水 SS, (b)セルロース, (c)スターチ, (d)タンパク質



バンドNo.	近縁株名	相同性
1	Uncultured Bacteroidetes bacterium clone RBE2CI-81, EF111172	189/189 (100%)
3	Iron-reducing enrichment clone CI-A12 clone CI-A12, DQ677004	189/189 (100%)
4	Uncultured Bacteroidetes bacterium clone edNE9, DQ886173	189/189 (100%)
5,10	Uncultured Bacteroidales bacterium, clone:MgMjR-018, AB234405	180/189 (95%)
11	Uncultured Bacteroidetes bacterium clone RBE2CI-81,EF111172	189/189 (100%)
12	Uncultured bacterium clone 060H11_B_SD_P93, CR933297	188/190 (98%)
13	Uncultured bacterium clone EFS-54, EF190148	162/164 (98%)
14	Uncultured bacterium clone 060G11_B_SD_P93, CT574152	189/189 (100%)
15	Uncultured Bacteroidetes bacterium clone edNE9, DQ886173	188/189 (99%)
16	Uncultured bacterium clone RL247_aaj24g10, DQ800147	167/171 (97%)
17	Uncultured bacterium clone M11, DQ640943	182/189 (96%)
18	<i>Trichococcus collinsii</i> strain RBE2CD-24, EF111215	194/195 (99%)

図21 DGGE 法による集積培養体の菌相解析結果 (16S rRNA 遺伝子, Domain Bacteria)

の結果 (近縁種名) を示した。この結果より、集積培養の継続に伴って、供与基質の違いによる菌相の変化が観察された。また、主要な DNA バンドの殆どが未同定の細菌群であった (バンド 18 を除く)。

例えば、セルロースの集積培養系では、バンド 5, 10 に示す Uncultured Bacteroidales 目に近縁な細菌の優占化が生じ、下水 SS の集積系においても同様のバンドの存在が確認された。下水 SS の集積培養系やスターチ、タンパク質の集積培養系では Uncultured Bacteroidetes 門に近縁な DNA バンド (下水 SS: バンド 1,4、スターチ・タンパク質: バンド 15) の優占化が生じた。一般的な中温条件における有機物の加水分解・酸生成には、*Clostridium* 属細菌などの Firmicutes 門に属する細菌群が関わっていることが知られているが、今回の集積培養では全ての炭素源において Bacteroidetes 門 (下位に Bacteroidales 目を含む) に属する細菌の優占化が確認された。

バンド 5,10 に示した Uncultured Bacteroidales 目に近縁な細菌は、セルロースの希釈培養系でも優占化し、

常温下でのセルロース分解への関与が示唆された。またバンド 5,10 の細菌の特異的検出が可能な遺伝子プロー

Green : EUB338 (Domain Bacteria)
Red : BC581 (Uncultured Bacteroidales bacterium, DGGE Band 5,10 in Fig. 21)

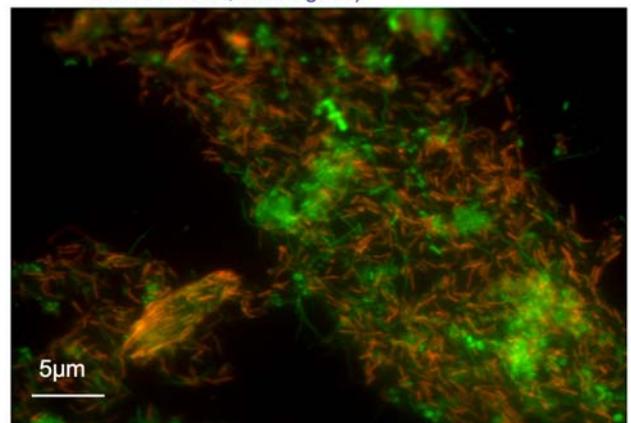


図22 FISH 法による常温対応のセルロース分解細菌の検出
図中の赤色の蛍光を呈する細胞がセルロース分解に関与する Uncultured Bacteroidales 細菌 (図21の DGGE バンド5, 10に対応) の存在を示す。赤色の細胞が、セルロース繊維の表面に付着している様子が観察出来る。セルロース集積培養汚泥を分散処理し、FISH 法による解析に供した。図中の緑色の細菌細胞は、真性細菌の存在を示す。

ブを開発し、FISH法によりセルロース集積培養体での存在を確認したところ、セルロース繊維の表面にこれらの細菌が付着する様相が観察された(図22)。

以上の結果より、下水SS及びセルロースの20℃条件下における集積培養で、セルロース分解菌が集積された事が強く示唆され、実規模の装置においても、これらの細菌の利用の可能性が示された。

2.2.4 実証プラントによる都市下水の処理特性評価

都市下水の嫌気性処理は、平均気温(水温)の高い熱帯地域においてのみ実規模導入が行われている。熱帯以外の大部分の地域では水温が低いため、都市下水に多量に含まれる固形性有機物の分解が律速となること、また嫌気性処理のみでは、十分な放流水質が得られないことが技術の普及を妨げている大きな要因である。

そこで本研究では、都市下水の省エネルギー型処理技術の確立を目指し、嫌気性処理(メタン発酵処理、UASB)と省エネ型の好気性処理(下降流懸垂スポンジろ床、DHS)との組み合わせによる実下水の実証処理試験(処理規模:50 m³/day)を通年でを行い、水温低下に対する嫌気性処理の安定性向上や後段処理の付加による水質の改善効果に関する評価、提案処理システムのエネルギー削減効果の算定を行った。本実証処理試験は、NEDOプロジェクトにおいて民間企業との連携により、鹿児島県国分隼人クリーンセンターにて行われたものである。また、本実証試験と並行して、新潟県長岡市中央浄化センターにてUASB法による下

水処理試験(処理規模:4 m³/day)を行った。

図23には、都市下水の実証処理試験装置の概要を示した。スクリーン通過後の都市下水は、前段の嫌気性処理槽(UASB)においてメタン発酵処理され、その後、後段の省エネ型好気性処理槽(好気性ろ床:DHS)に送られる。また、処理水質確保のため、好気性ろ床による処理後の排水の一部は、砂ろ過処理を行った。好気性ろ床には、カーテン型のスポンジ担体が充填されており、嫌気処理水を装置の上部から滴り落とすことで、大気中の酸素を取り込み、スポンジに付着した好気微生物により仕上げ処理がなされる。本後段処理システムでは、曝気電力を大幅に削減出来るため、排水処理の省エネルギー化が期待出来る。

都市下水の連続処理試験は、2007年5月より、無加温条件下で600日間以上の期間行った。嫌気性処理槽に中温消化汚泥を植種して下水の通水を開始し、その後、後段の好気性ろ床と連結して運転を行った。流入下水の平均水質は、全COD 402 mg/L(溶解性COD 96.3 mg/L)、全BOD 165 mg/L(溶解性BOD 38.5 mg/L)、SS 208 mg/Lであった。

図24に、実証処理試験装置による都市下水の処理性能を示す。流入下水の水温は、外気温の変動に伴い16℃から29℃の間で変化した。UASB槽(嫌気性処理槽)では、下水に含まれる固形性物質(SS)の約68%が除去されていた。また全BODについても、約75%がUASB槽で分解されたことから、UASB槽は下水に含まれる固形性有機物の大半を捕捉し、可溶化・分解する役割を担っていたことが分かる。

運転開始後170日目以降、水温が20℃を下回った時点で、UASB槽のSSおよびBODの除去性能が悪化した。この時、UASB槽では、保持汚泥の沈降性及び濃度が十分に維持出来ておらず(図26)、流入してくる下水中の固形有機物と保持汚泥の一部が系外に流出している状況であった。しかしながら、後段の好気性ろ床(DHS)による仕上げ処理を行うことで、最終的な処理水質は良好に維持出来た。

UASB槽の処理水質悪化後は、一時的に(235日目から274日目の39日間)流入水量を40 m³/dayに減少させて運転を行うことで、処理性能は比較的短期間で回復した。そのため、275日目(2008年3月1日)より流入流量を50 m³/dayに戻して運転を継続した。

運転開始後500日目以降の秋期・冬期における運転で

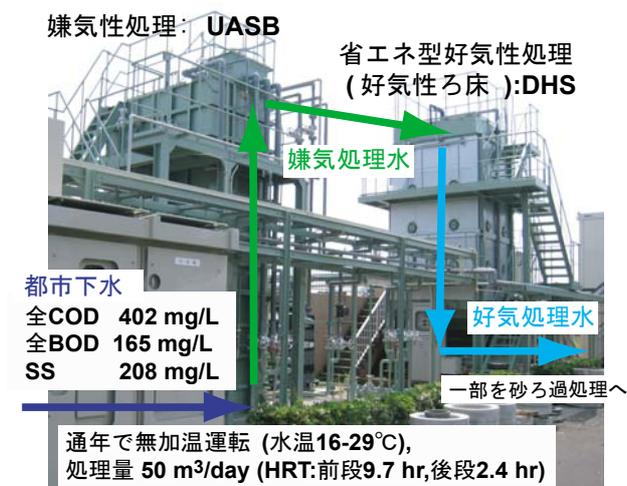


図23 都市下水の実証処理試験装置の概要、嫌気性処理(UASB)と省エネ型好気性処理(DHS)との組み合わせによる都市下水の無加温処理試験、実証試験装置は鹿児島県の国分隼人クリーンセンター内に設置した。

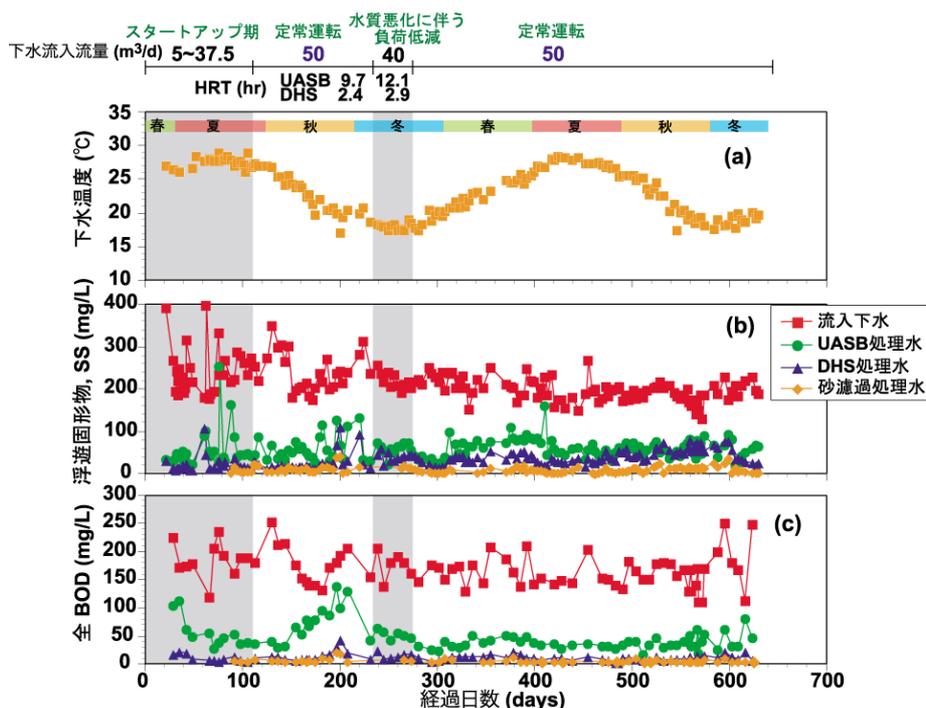


図24 嫌気性処理(UASB)と無曝気型好気処理 (DHS) との組み合わせによる都市下水の連続処理性能, (a) 下水温度の経日変化, (b) SS 濃度の経日変化, (c) 全 BOD 濃度の経日変化, 本データの取得は NEDO プロジェクト「無曝気・省エネルギー型次世代水資源循環技術の開発」において行われた。

は、嫌気槽保持汚泥の物性（沈降性、濃度）が良好に維持されていたため、前年度の低温期に観察された処理水質の悪化も無く、50 m³/day での安定運転が可能であった。

UASB 槽処理性能の評価より、下水の無加温処理における嫌気槽の安定運転のための有機物負荷の上限は、およそ 1.0 kgCOD/m³/d (0.4 kgBOD/m³/d) であることが分かった。

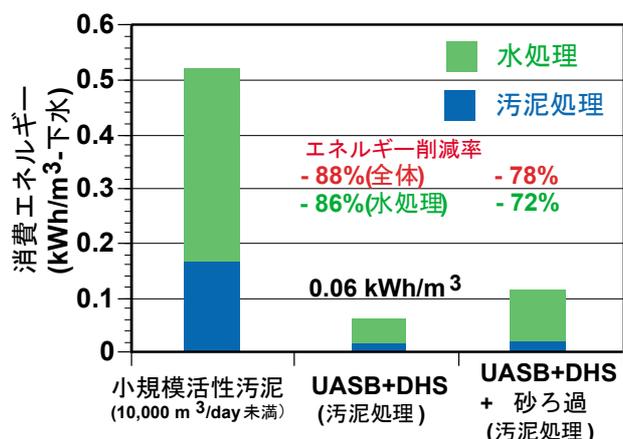


図25 下水処理に関わる消費エネルギーの比較
既存処理法（活性汚泥法）と提案処理法（UASB+DHS）による下水1 m³処理時の消費エネルギーを示した。図中には、活性汚泥法との比較による提案処理法のエネルギー削減率も示した。

本下水処理システムによる最終的な処理水質は、処理水全 BOD で 11 mg/L と既存の好気性処理技術（国分単人クリーンセンターで稼働中の活性汚泥法、全 BOD 8 mg/L）と同等な処理水質を発揮することが出来た。なお、本システムによる処理水 SS 濃度は 15 mg/L と、既存好気性処理法（SS 濃度 5 mg/L）と比較して若干高いが、砂ろ過処理により、SS 濃度を 5 mg/L にまで低減が可能であった。なお、砂ろ過処理により処理水の全 BOD も 5 mg/L にまで低減された。

本実証処理試験装置による下水処理に関わるエネルギー消費量を図 25 に示す。なお、実証処理試験装置によるエネルギー消費量は、下水 1 m³ の処理に必要な電力 (kWh) として表示した。これより、既存処理法である活性汚泥法（好気性微生物処理）では、水処理（主として曝気動力）および汚泥処理を合わせて約 0.52 kWh/m³ の電力を消費するが、UASB 法（嫌気性処理）と DHS（好気性ろ床）との組み合わせによる下水処理では、電力消費はわずかに 0.06 kWh/m³ と 88%ものエネルギー削減率を達成出来た。なお、提案システムの後段に、放流水質の確保のため砂ろ過処理を組み合わせた場合でも、78%のエネルギー削減が可能であった。

実証試験における消費エネルギーの評価では、DHS（好気性ろ床）で発生した余剰汚泥は焼却等により処分

するとして算定したが、余剰汚泥は前段の UASB 槽に返送処理することが可能である。その場合は、更なるエネルギー消費量の削減が期待出来る。

本処理技術は、省エネルギーであるため、下水処理に関わるランニングコストを非常に低く抑えることができる。加えて、運転管理も比較的簡単であることから、開発途上国への技術導入・普及が期待される。

2.2.5 UASB 槽保持汚泥の物理的性状解析

UASB 槽（嫌気性処理槽）での都市下水処理性能の安定化のためには、槽内に沈降性に優れた汚泥を高濃度に保持することが重要である。そこで、実証都市下水処理プラントが稼働した 2007 年 5 月以降、定期的に UASB 槽保持汚泥の物理的性状を調査した。表 4 に汚泥試料の採取日と採取時の水温を示した。保持汚泥の物理的性状として汚泥濃度 (MLSS, MLVSS), セルロース含量, 汚泥沈降指標 (SVI), 無機元素含量の測定を行った。

図 26 に UASB 槽の保持汚泥濃度 (MLVSS 濃度) と汚泥沈降指標 (SVI) の経日変化を示した。UASB 槽には中温消化汚泥を植種したが、運転開始初期に汚泥の流失が生じたため、54 日目に再植種を行った。その結果、運転開始後 85 日目には、一時的に汚泥濃度が 23 gSS/L (17 gVSS/L) 程度にまで増加するが、汚泥の沈降性が

悪かったため、再度汚泥の流失が生じ、運転開始後 155 日目には、汚泥濃度は 13 gSS/L (9 gVSS/L) 前後にまで低下した。水温が 20℃ を下回る 170 日目以降に、UASB 槽の処理性能悪化が観察されたが、汚泥 (微生物) 保持量が少なく、槽全体として有機物除去能を維持出来なかったといえる。

本研究の実施以前に、グラニュール汚泥床リアクターの都市下水処理への適用性を評価し、SS の除去能は分散状の汚泥を槽内に維持した既存の UASB 法の方が優れていることが明らかとなっている。そのため、本実験では初期添加汚泥 (植種汚泥) として分散状の消化汚泥を使用した。沈降性に優れた消化汚泥が入手出来ず、結果的に汚泥流失が生じた。このことから、下水処理 UASB 槽の立ち上げに際しては、植種汚泥の沈降性を十分配慮する必要がある。

運転開始後 246 日目以降は、保持汚泥の沈降性が改善されると共に、保持汚泥濃度が徐々に増加し、最終的に 25-28 gSS/L (19-21 gVSS/L) に達した。また、最終的な保持汚泥の汚泥沈降指標 (SVI) は、50 mL/gSS 以下と一般的なグラニュール汚泥と同等の優れた沈降性を示した。なお UASB 槽では、保持汚泥全体のグラニュール化は生じなかった。

国分隼人クリーンセンターの最初沈殿池汚泥の分析の

表4 都市下水処理嫌気槽(UASB)保持汚泥の採取日と水温

試料採取日	2007.5.31	2007.7.24	2007.8.24	2007.11.2	2008.2.1	2008.5.9	2008.9.19	2008.11.21	2009.1.30	2009.2.26
経過日数	0	54	85	155	246	344	477	540	610	637
水温	-	(28-31.4)	28.9	24.7	16.7	23.4	27.8	21.5	20.6	20.0
	植種	汚泥再投入	高水温期		低水温期		高水温期		低水温期	運転終了時

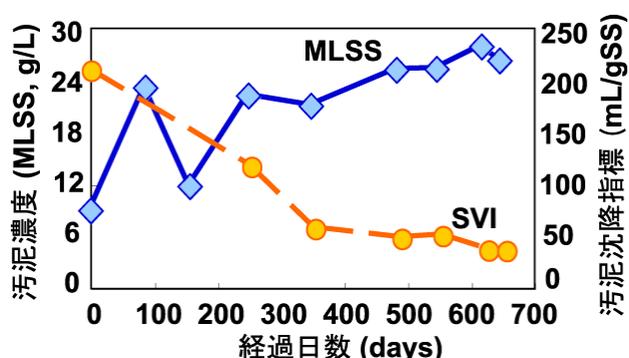


図26 UASB 槽保持汚泥濃度と汚泥沈降指標の経日変化



図27 UASB 槽の処理水温と保持汚泥中のセルロース濃度との関係

結果より、下水に含まれる固形性有機物の 3 割程度 (COD 基準) がセルロースであった。本実証試験では、最初沈殿池を設置せず、スクリーン通過後の下水を直接 UASB 槽に通水している。そこで、UASB 槽における固形有機物の蓄積の様相と水温との関連を調査するため、保持汚泥のセルロース含量の測定を行った (図 27)。その結果、水温の低い冬期 (16.7°C, 246 日目) には、約 1.3 g/L 存在したセルロースが夏場の水温上昇 (27.8°C, 477 日目) に伴い減少することが分かった。その後、水温低下 (20.0°C, 637 日目) に従いセルロースの再蓄積が観察された。これより、冬季の水温低下により、UASB 槽保持汚泥中に下水由来の固形有機物 (セルロース等) が蓄積し、水温の上昇に伴い捕捉された固形有機物の微生物分解が進行することが明らかになった。

以上の結果より、本実験系と同程度の水温 (冬期 15-16°C) であれば、UASB 槽での処理時間を 10 時間程度に保つことで、固形性の有機物を多量に含む都市下水を安定的に処理可能であることが分かった。

UASB 槽保持汚泥の沈降性は、汚泥の無機元素含量に影響を受けることが知られている。前述のように、実証プラントの UASB 槽保持汚泥の沈降性は、運転開始後 250 日目前後まで悪い状況であった。そこで、都市下水の連続処理を行っている 2 系列の UASB 槽 (長岡:新潟県長岡市中央浄化センターに設置の UASB 槽, 国分隼人:本研究において運転を行った UASB 槽) 保持汚泥の無機元素含量を測定した。なお長岡 UASB 汚泥の汚泥沈降指標は 20-30 mL/gSS であり、国分隼人 UASB 汚泥よりも沈降性に優れていた。

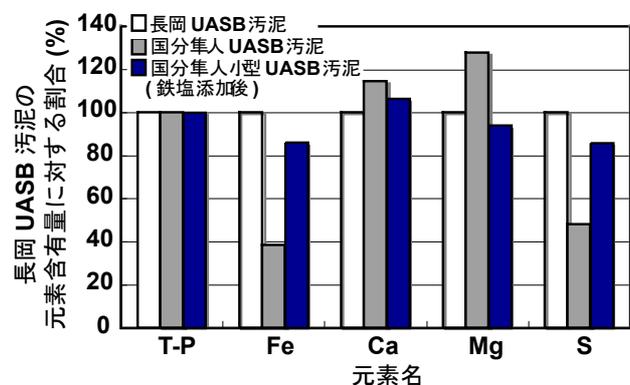


図28 UASB 槽保持汚泥の無機元素含量, 都市下水の連続処理を行っている2系列の UASB 槽 (長岡:新潟県長岡市中央浄化センターに設置の UASB 槽, 国分隼人:本研究において運転を行った UASB 槽) 保持汚泥の無機元素含量を測定した。各元素の含有量は、長岡 UASB 槽保持汚泥の元素含有量に対する割合(%)として示した。

図 28 に長岡および国分隼人下水処理場に設置した UASB 槽保持汚泥の無機元素含量の測定結果 (長岡 UASB 槽保持汚泥の元素含有量を 100%とした時の割合) を示した。長岡 UASB 汚泥と比較して、沈降性の悪かった国分隼人 UASB 槽汚泥は、2008 年 7 月 28 日 (運転開始後 424 日目) の時点で、鉄 (Fe) と硫黄 (S) の含量が長岡 UASB 槽汚泥の半分程度と低かった。なお、都市下水中の鉄塩および硫酸塩の濃度は、それぞれ約 0.4-0.5 mg-Fe/L, 25-39 mgSO₄/L の範囲にあり、国分隼人、長岡で大きな差が見られなかった。

2008 年 11 月末より約 2 ヶ月間、国分隼人クリーンセンター内で、運転条件最適化のために別途運転を行っている小型 UASB (槽容積約 1 m³) の流入下水に対して、鉄塩の添加 (約 2 mg Fe/L, 塩化第二鉄) を行ったところ、保持汚泥中への鉄、硫黄 (硫化鉄等) の蓄積と汚泥保持能の改善 (沈降性の改善と汚泥濃度の増加) を確認出来た (図 28)。

以上の結果より、下水処理 UASB 槽の運転開始にあたっては沈降性に優れる汚泥を選択し保持汚泥量を十分に確保すること、また UASB 槽保持汚泥の沈降性改善のためには、流入下水への鉄塩の添加が効果的であることが分かった。

2.2.6 UASB 槽保持汚泥の微生物学的特性の評価

UASB 槽の安定運転や効率的な下水処理のための基礎知見を収集するため、UASB 槽保持汚泥の微生物学的特性の評価を行った。

UASB 槽保持汚泥のメタン生成活性を、20°Cおよび 35°C条件下で、水素 (H₂/CO₂, 80:20(v/v)), 酢酸, プロピオン酸, セルロース, コントロール (基質無添加) の各基質について定期的に測定した。初期基質濃度は、1.0 -2.0 gCOD/L とし、試験開始後 24 時間程度までのメタン生成速度から単位汚泥重量あたりの活性を求めた。

保持汚泥の菌相解析は、メタン生成細菌群 (Domain Archaea) および酸生成細菌群 (真性細菌, Domain Bacteria) について、DGGE 法により行った。DGGE 法で同定された主要なメタン生成細菌群 (酢酸酸化性 *Methanosaeta* 属細菌, 水素酸化性 *Methanobacterium* 属細菌, 水素酸化性 *Methanospirillum* 属細菌) の動態解析 (16S rRNA 量の測定) を定量 PCR 法 (Quantitative Polymerase Chain Reaction) により行った。

図 29, 30 には、UASB 槽保持汚泥のメタン生成活性

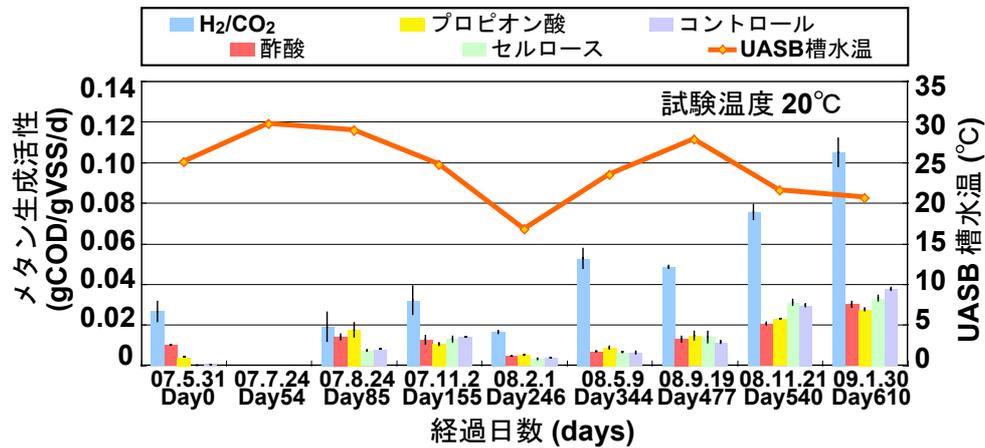


図29 UASB 槽保持汚泥のメタン生成活性 (試験温度20°C)

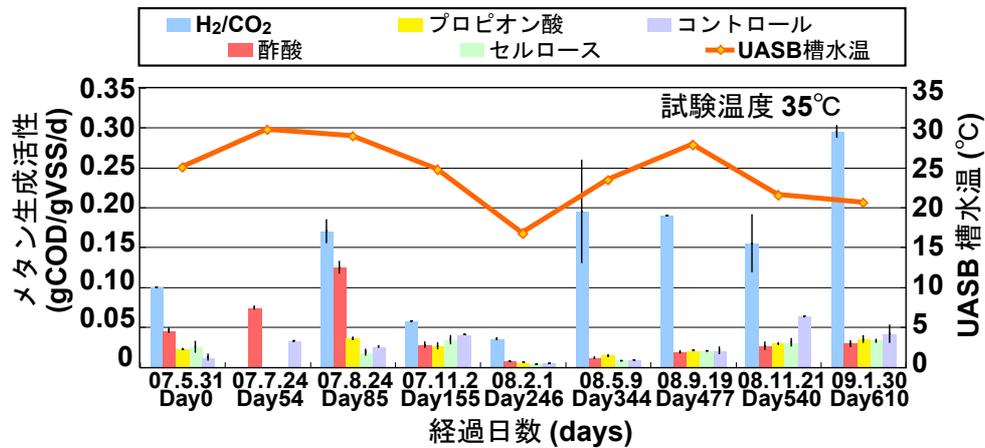


図30 UASB 槽保持汚泥のメタン生成活性 (試験温度35°C)

の変化を示した。メタン生成活性は、20°Cおよび35°C温度条件下で測定した。また図中には、サンプリング時のUASB 槽の水温も表示した。

これより、下水処理 UASB 保持汚泥のメタン生成活性は、水素基質からの活性が高く、それ以外の基質からの活性は、水素資化活性の1/3~1/5程度であった。20°Cにおける活性について着目してみると、汚泥の沈降性が悪く、汚泥濃度の低かった246日目までは、保持汚泥のメタン生成活性は UASB 水温の上昇と下降に伴って増減した。汚泥の沈降性が向上した344日目以降は、UASB の運転継続に伴ってメタン生成活性が徐々に増加する傾向にあった。特に477日目以降は、水温が低下したにも関わらず、20°Cにおけるメタン生成活性は継続的に増加し、最終的に35°Cでの活性と同程度にまで(水素基質を除く)達した。これより、UASB 槽の汚泥保持能の向上は、汚泥中へのメタン生成細菌等の集積化を促進し、水温の変動に対する安定性の確保に有効に作用することが

分かった。

最終的な保持汚泥の20°Cにおけるメタン生成活性は、酢酸やセルロース基質で約0.03 gCOD/gVSS/d程度であり、この値は、図20(b)に示したセルロース集積培養体のメタン生成活性と同程度であった。このことから、UASB 槽内には流入固形有機物の分解に関わる細菌群が集積化したことが示唆される。またこの値は、UASB 槽への固形有機物の過剰な蓄積を回避するための目安となる。

図31には、UASB 槽保持汚泥のメタン生成細菌相(Domain Archaea)のDGGE法による解析結果を、図32には真性細菌相(Domain Bacteria)の解析結果を示した。これより、都市下水処理UASB汚泥中には、酢酸資化性メタン生成細菌として *Methanosaeta* 属細菌が、水素資化性メタン生成細菌として *Methanobacterium* 属細菌が存在することが分かった。特に国分隼人UASBでは、汚泥の保持能が改善された運転期間の後半にかけ

て, *Methanosaeta concilii* および *Methanobacterium beijingense* に近縁な DNA バンドの濃度増加が観察された (図 31)。

また, 真性細菌の菌相解析結果 (図 32) より, 下水固形有機物 (SS) 由来の酸生成細菌が UASB 槽汚泥にも

多少存在するが (図中矢印), UASB 槽汚泥と下水 SS (酸生成槽) の微生物群集は, DGGE のパターンが大きく異なっていた。また国分隼人および長岡汚泥で共通して優占化する細菌群が多数存在することが分かった。これらの共通バンドの大部分 (主要な酸生成細菌の大半) が,

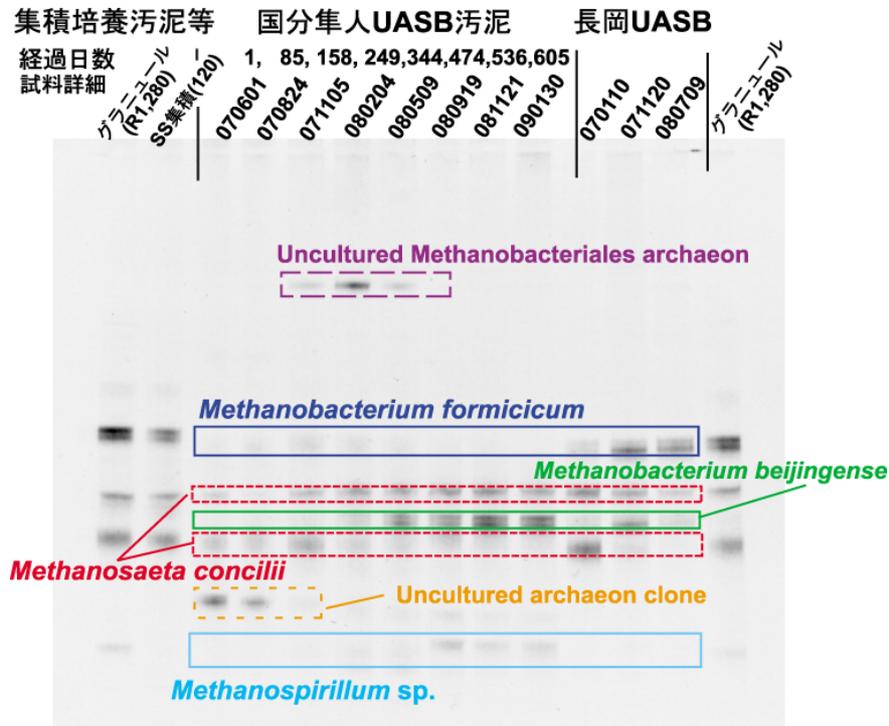


図31 UASB 槽保持汚泥の DGGE 法による菌相解析結果 (Domain Archaea,古細菌)

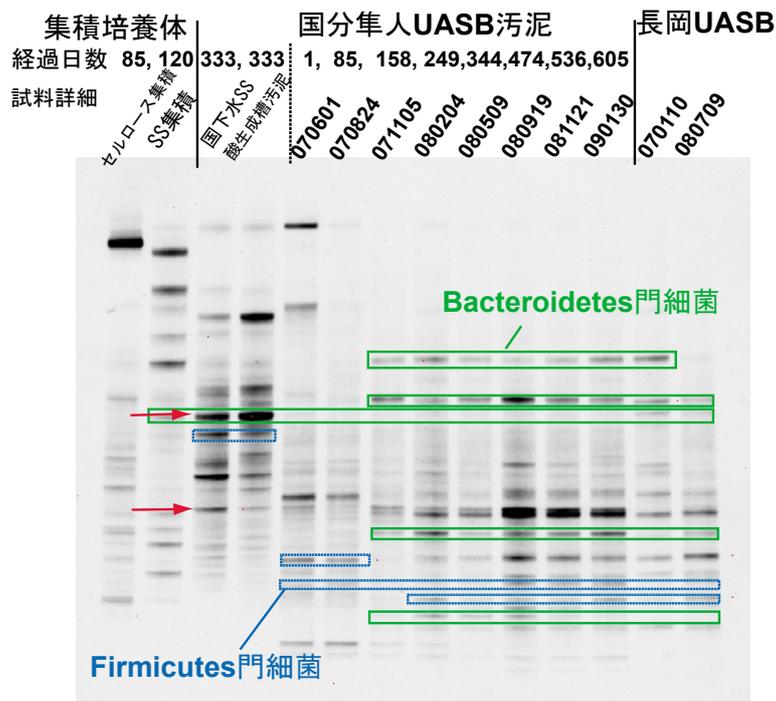


図32 UASB 槽保持汚泥の DGGE 法による菌相解析結果 (Domain Bacteria,真性細菌)

Bacteroidetes 門 (図中実線枠: 緑) や Firmicutes 門 (図中破線枠: 青) に属することが分かった。一般的な中温メタン発酵では、*Clostridium* 属細菌の様な Firmicutes 門に属する細菌が主な酸生成菌であるが、下水処理 UASB では糞便等由来の Bacteroidetes 門に属する酸生成細菌が多く存在し、有機物分解に関与していることが明らかになった。

図 33 には、DGGE 法で検出された主要メタン生成細菌群の 16S rRNA を標的とした定量 PCR 法による動態解析結果を示した。また図中には、汚泥試料採取時の水温と汚泥試料の濃度も示した。汚泥試料から全 RNA を抽出し、逆転写反応により cDNA を合成した試料について、定量 PCR を行った。なお各細菌群の rRNA 量は、汚泥試料 1 gVSS あたりのコピー数として示した。

運転開始後 155 日目の時点で、酢酸資化性の *Methanosaeta* 属細菌と水素資化性の *Methanobacterium* 属細菌の単位汚泥量あたりの rRNA 量は若干増加傾向にあったが、水素資化性の *Methanospirillum* 属細菌の rRNA 量は明らかに減少した。155 日目以降の水温が徐々に低下する条件下でも、*Methanosaeta* 属細菌および *Methanobacterium* 属細菌の rRNA 量は、ほぼ一定で推移し ($1.8 \times 10^{10} \sim 2.0 \times 10^{10}$ コピー/gVSS)、低温 (16-18°C) に曝された 246 日目以降は、これらの rRNA 量は若干低下する傾向にあった (344 日目, 477 日目)。なお 155 日目以降は、保持汚泥濃度の顕著な増大が生じていることから、UASB 槽に存在するメタン生成細菌の全体量としては微増加傾向にあった。

保持汚泥の沈降性が更に改善され、保持汚泥濃度が約 20 gVSS/L に達した 477 日目以降は、*Methanosaeta* 属

細菌および *Methanobacterium* 属細菌の rRNA コピー数は水温の低下に依らず大幅に増加し、 $2.3 \times 10^{11} \sim 3.2 \times 10^{11}$ コピー/gVSS に達した。この傾向は、保持汚泥のメタン生成活性の増加の様相とほぼ合致していることから、下水処理 UASB 汚泥中では *Methanosaeta* 属細菌および *Methanobacterium* 属細菌が主にメタン生成反応を担っており、保持汚泥の沈降性改善 (汚泥濃度増加) により集積化が図られたことが分かった。

一方、*Methanospirillum* 属細菌の rRNA 量は、水温の変化に伴って増減し、コピー数自体も 10^9 コピー/gVSS 未満と明らかに低かった。水素資化性メタン生成細菌は、水素生産菌 (酸生成細菌) と密な共生関係を築いている。都市下水の連続処理試験を行った UASB 槽では、グラニュール汚泥の形成が進行しなかったこと、有機物負荷が低く供給有機物の大部分が固形性で酸生成速度 (水素生成速度) が大幅に低かったこと等の理由により、*Methanospirillum* 属細菌の優占化が生じなかったと考えられる。

2.3 まとめと今後の展望

本研究では、有機性排水処理に関わるエネルギー削減を目標として、適切な処理技術が確立されていない低有機物濃度排水の無加温処理に対応可能なメタン発酵処理技術の開発を行った。

本研究で開発および運転方法の最適化を行ったメタン発酵処理技術 (間欠処理水循環グラニュール汚泥床法、都市下水の UASB 法と DHS との組み合わせによる処理) により、今まで好気性微生物処理の範疇であった低有機物濃度 (300-1,000 mgCOD/L)、低水温 (10-20°C) の排水の省・創エネ処理の実現化が期待される。本研究で開発を行った排水処理技術は、曝気動力の最小化、余剰汚泥の大幅削減 (好気処理の 8 割削減)、メタン回収が可能であり、省エネ型の好気性処理法 (DHS) との組み合わせにより活性汚泥法と同等の放流水質を確保することが出来た。また開発技術は、低濃度排水の無加温処理において現状の好気処理法と比較してエネルギー消費 (化石燃料由来の CO₂ の発生) を 7-8 割削減でき、当初の研究開発目標を達成することが出来た。以下に、各サブテーマで得られた研究成果をまとめる。

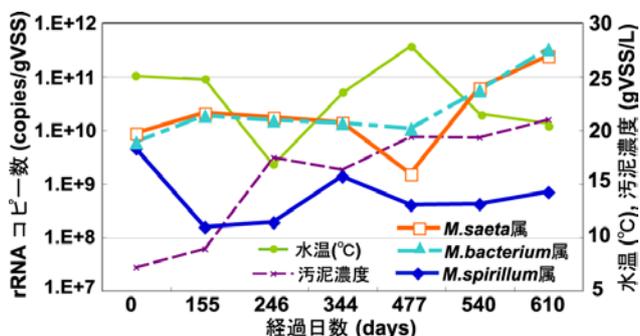


図33 主要メタン生成細菌群の動態解析結果 (16S rRNA を標的とした定量 PCR)

サブテーマ1 生物膜メタン発酵法による低濃度産業排水の無加温処理技術の開発

グラニューール汚泥床法の開発と運転方法の最適化（間欠処理水循環法）により、メタン発酵処理の適用が可能な排水有機物濃度および排水温度の下限を大幅に拡大。

	既存嫌気処理 (UASB法)	開発技術 (グラニューール汚泥床法)
下限 COD 濃度	2,000 mg/L	300-400 mg/L
下限水温	30-35°C	10-20°C

[グラニューール汚泥床法の低濃度排水処理への適用]

低有機物濃度排水 (COD 600-800 mg/L) の低温 (20°C) での処理においても、グラニューール汚泥 (嫌気性生物膜) の植種と処理水循環による物理的な攪拌の付与、適切な有機物の維持により、沈降性に優れたグラニューール汚泥の高濃度保持が可能であった (グラニューール汚泥床法)。その結果、増殖の遅いメタン生成細菌群の集積化に十分な泥滞留時間 (SRT, 40 日前後) を維持出来た (系列 1)。

[排水温度低下の処理性能への影響評価]

水温の低下 (20°C*→15°C→10°C, *植種汚泥の培養温度) に伴い、グラニューール汚泥床法の排水処理効率は一時的に低下するが、低温環境での馴致により処理能力は回復した。また保持汚泥の物性も良好に維持できたことから、水温 10-20°C 程度の排水処理にもメタン発酵技術を適用出来る可能性が示された。水温 10°C 時の許容有機物負荷は、4 kgCOD/m³/d であった。一方、水温の 10°C から 5°C への低下は、排水処理性能と汚泥保持能の著しい悪化を招いた。

[排水温度低下の保持汚泥性状への影響評価]

低温条件でのグラニューール汚泥床リアクターの運転に伴い、保持汚泥中への常温対応の水素資化性メタン生成細菌 (*Methanospirillum* 属細菌) の集積化と低温下 (15-20°C) での水素資化性メタン生成活性の顕著な増加が確認された。グラニューール汚泥床法では、メタン発酵不適条件下でも長い SRT を維持出来るため、今まで集積化・利用が困難であった常温対応の細菌を生物膜に保持し、利用出来たと考えられる (系列 2)。

[排水有機物濃度低下の影響評価と運転法の最適化]

汚泥床部の有機物濃度維持 (メタン生成細菌の活性化) のため排水循環を行わないワンパスモード (線流速 0.7 m/h) と、汚泥床での排水短絡防止と生成ガスの汚泥か

らの分離を促す循環モード (処理水循環, 線流速 5.0 m/h) を繰り返して運転を行う間欠処理水循環法 (特許公開 2008-036529) を考案し、水温 20°C, HRT 1h (有機物負荷 6.0-9.6 kgCOD/m³/d) の条件下で、流入 COD 300-400 mg/L の低濃度排水に対して COD 除去率 90% 以上の高効率処理性能を発揮することが出来た (系列 3)。

[実低濃度産業排水処理への適用性評価]

間欠処理水循環グラニューール汚泥床 (低濃度排水メタン発酵) と DHS (好気性ろ床) の組み合わせによる、低濃度実産業排水 (製糖排水) の 20°C における連続処理実験を行った結果、グラニューール汚泥床のみで全 COD 除去率 85%, DHS も含めると約 90% の高い排水処理性能 (既存好気性処理と同等の水質) を安定的に達成することが出来た。また、開発システム全体の HRT は 3 h であり、既存好気性処理法と比較して 2-3 倍高速な処理が行えた (系列 4)。

[溶存態の温室効果ガス(メタン)の処理]

低有機物濃度排水のメタン発酵処理では、生成したメタンの大部分が処理水中に溶存して環境中に放出され、メタン回収量が減少するのみならず温暖化を促進する。後段処理の好気性ろ床 (DHS) において、ろ材を密閉容器内に配置してメタンの大気放散を防ぎつつ、気液平衡による溶存メタンの回収と微生物酸化を促すことで、溶存メタンの 95% 以上を回収・除去出来ることが分かった (関連プロジェクトの成果)。

サブテーマ2 嫌気性処理と省エネ型好気性処理との組み合わせによる都市下水の実証処理試験 (下水の無加温嫌気処理特性評価)

嫌気性処理 (UASB) と省エネ型の好気性処理 (DHS) との組み合わせによる都市下水の実証処理試験の結果、無加温運転で年間を通じて、良好な処理水質を維持し、消費エネルギーの 7 割以上削減を達成した。

	処理水質	消費エネルギー
既存処理法 (活性汚泥法)	全 BOD 8 mg/L	0.52 kWh/m ³
開発技術*	全 BOD 11 mg/L	0.06 kWh/m ³ (88%削減)
+砂ろ過処理	全 BOD 5 mg/L	0.11 kWh/m ³ (78%削減)

*UASB+DHS

[回分集積培養による固形有機物分解特性の評価]

集積培養試験の結果、下水 SS の分解活性は、水温 20℃ まである程度の値（約 0.02 gCOD/gVSS/d）が維持されるが、水温が 15℃ に低下すると大きく活性が低下した。20℃ での固形有機物の集積培養体の菌相解析の結果、Bacteroidetes 門に属する細菌群の優占化が確認された。また、20℃ 条件下でセルロースの分解に関わる Bacteroidales 目の細菌を特定した。セルロースや下水 SS の集積培養におけるメタン生成と VFA の蓄積の様相から、固形有機物の常温下での嫌気分解では、その加水分解・酸生成反応が律速になることが分かった。

[実証プラントによる都市下水の処理特性評価]

嫌気性処理（UASB）と省エネ型の好気性処理（DHS）の組み合わせによる都市下水の実証処理試験を無加温条件下で 600 日以上期間行い、年間を通じて既存好気性処理（活性汚泥法）と同等な処理水質を維持しつつ、消費エネルギーを 78% 以上削減することが出来た。また、下水の無加温処理における嫌気槽の安定運転のための有機物負荷の上限は、1.0 kgCOD/m³/d（0.4 kgBOD/m³/d）程度であった。

[実証プラント嫌気槽における汚泥性状評価]

冬季の水温低下により、UASB 槽保持汚泥中に下水由来の固形有機物（セルロース等）が蓄積し、水温の上昇に伴い捕捉された固形有機物の微生物分解が進行することが明らかになった。保持汚泥のメタン生成活性の評価より、本実証試験と同程度の水温（冬期 15-16℃）であれば、UASB 槽での固形有機物の負荷を 0.03 gCOD/gVSS/d 程度に保つことで、下水に含まれる固形性有機物の安定処理が可能であることが分かった。また、嫌気槽の安定運転のためには、沈降性に優れる植種汚泥の選択や流入下水への鉄塩の添加等による保持汚泥の沈降性改善が有効であると考えられる。下水処理 UASB 槽では、グラニューク汚泥の形成は殆ど生じなかった。

今後の展望

本技術は、当研究事業を通して格段に実用化のための基礎技術開発と実証データの取得が進み、特に国内の産業排水処理分野や省エネルギー（低コスト）が要求される開発途上国での水処理分野において、本技術を基礎にした炭素循環型の処理を導入したいという高いニーズを

得ている。以下に今後の研究の展望をまとめる。

[適用排水種の拡大]

グラニューク汚泥床法の低濃度産業排水処理分野への普及のためには、種々の有機物組成の排水に対する装置の運転方法や処理システム構成の最適化を図っていく必要がある。特に、食品製造以外で多量に低濃度排水が排出されている紙パルプ工業や化学工業に関連する排水への処理技術の適用性評価が必要である。

[建設・維持管理コストの削減]

嫌気性処理（UASB）と好気性ろ床（DHS）の組み合わせによる都市下水の処理では、排水処理時間は既存の好気性処理（活性汚泥法）と同等であるため、排水処理に用いる反応槽の建設コストは、DHS に充填するスポンジ担体の費用も加味すると、1-2 割増加する見込みである。スポンジ担体製造コストの削減、嫌気槽の効率化による処理時間短縮等により、処理システムの建設コストの削減を図る必要がある。また、開発途上国への技術導入促進のために、現地の研究機関と連携し、現地の技術レベルと経済状況に合わせた処理システムの最適化を行う必要がある。

[栄養塩除去への対応]

都市下水の実証処理試験において、下水に含まれるアンモニア性窒素（有機体窒素を含む）は、後段の好気性ろ床において 80-90% が硝酸性窒素へと酸化されていた。今後は、脱窒反応を促すための、硝化液の返送や脱窒槽の設置など、栄養塩の除去を含めた形での処理システムの最適化が必要である。

[メタンの回収、利用法の検討]

低濃度有機性排水のメタン発酵処理では、生成メタンの大部分が溶存態のメタンとして処理水中に溶け込み系外に排出されるため、より溶存メタンの回収効率を高めるための後段処理法の開発を行う必要がある。

また、メタン発酵の結果得られたメタンガスの利用法としてガスタービン等による発電があるが、メタンの電気への転換効率は 20-25% と低く、廃熱に関しても利用価値が低い。得られたメタンガスを利用価値の高い（経済的にメリットのある）資源として利活用するための手法の開発を行うことで、メタン発酵処理技術の普及を後押しすることが必要である。

[資 料]

I 研究組織と研究課題の構成

1 研究の組織

[A 研究担当者] (現在の職員の現職, 転出者は転出時の職)

水圏環境研究領域

水環境質研究室

珠坪一晃

富岡典子

山村茂樹

對馬育夫*

Wilasinee Yoochatchaval

窪田恵一

アジア自然共生研究グループ

アジア水環境研究室

水落元之

*東京大学

[B 客員研究員]

大橋晶良 (広島大学大学院) (平成19年度～20年度)

荒木信夫 (長岡工業高等専門学校) (平成19年度～20年度)

山口隆司 (長岡技術科学大学) (平成19年度～20年度)

角野晴彦 (岐阜工業高等専門学校) (平成19年度～20年度)

河合俊和 (三井製糖株式会社) (平成20年度)

[C 研究生]

杉江恒彦 (長岡技術科学大学) (平成19年度)

賀澤拓也 (長岡技術科学大学) (平成19年度)

熊倉真也 (長岡技術科学大学) (平成20年度)

永田将弘 (長岡技術科学大学) (平成20年度)

2 研究課題と担当者 (*客員研究員)

サブテーマ1. 生物膜メタン発酵法による低濃度産業排水の無加温処理技術の開発

珠坪一晃・富岡典子・山村茂樹・對馬育夫・Wilasinee Yoochatchaval・窪田恵一, ・大橋晶良*・荒木信夫*・
角野晴彦*・河合俊和*

サブテーマ2. 嫌気性処理と省エネ型の好気性処理の組み合わせによる都市下水の実証処理試験

珠坪一晃・富岡典子・山村茂樹・對馬育夫・Wilasinee Yoochatchaval・窪田恵一, ・大橋晶良*・荒木信夫*・
山口隆司*

II 研究成果発表一覧

1 誌上発表

発表者・(刊年)・題目・掲載誌・巻(号)・頁

角野晴彦, 室田龍一, 大橋晶良, 原田秀樹, 珠坪一晃 (2006) 嫌気性懸垂型スポンジろ床 (AnDHS リアクター) による低濃度有機性排水のメタン発酵処理, 環境工学研究論文集, 43, 23-29

高橋優伸, 山口隆司, 角野晴彦, 荒木信夫, 山崎慎一, 長野晃弘, 珠坪一晃, 原田秀樹 (2006) 硫黄サイクル活性型 UASB/DHS システムによる低温低有機性排水 (不凍液排水) 処理技術の開発, 環境工学研究論文集, 43, 353-358

大河原正博, 西山桂太, 山口隆司, 珠坪一晃, 井町寛之, 原田秀樹, 大橋晶良 (2007) Expanded Granular Sludge Bed (EGSB) リアクターによる実下水処理特性の評価, 環境工学研究論文集, 44, 579-587

大塚勇輝, 橋本尚人, 荒木信夫, 阿部憲一, 川上周司, 山口隆司, 珠坪一晃 (2007) *apsA* mRNA を標的とした FISH 法による硫酸塩還元菌群の検出, 環境工学研究論文集, 44, 633-639

角野晴彦, 室田龍一, 大橋晶良, 原田秀樹, 珠坪一晃 (2007) メタン発酵型散水ろ床「AnDHS 反応槽」による低濃度排水処理, 用水と廃水, 49, 65-72

上村基成, 荒木信夫, 濱口威真, 山崎慎一, 珠坪一晃, 山口隆司 (2008) 2 槽式 UASB- 接触酸化処理システムにおける脱窒素細菌群の動態解析, 環境工学論文集, 45, 389-398

Syutsubo K., Yoochatchaval W., Yoshida H., Nishiyama K., Okawara M., Sumino H., Araki N., Harada H., Ohashi A. (2008) Changes of microbial characteristics of retained sludge during low-temperature operation of an EGSB reactor for low-strength wastewater treatment, *Water Science & Technology*, 57(2), 277-281

Yoochatchaval W., Sumino H., Ohashi A., Harada H., Yamaguchi T., Araki N., Syutsubo K. (2008) Influence of temperature decrease on the physical and microbial characteristics of retained sludge in EGSB reactor for low strength wastewater treatment, *土木学会論文集 G*, 64(4), 297-303

Yoochatchaval W., Tsushima I., Ohashi A., Harada H., Yamaguchi T., Araki N., Syutsubo K. (2008) Changes in process performance and microbial characteristics of retained sludge during low-temperature operation of an EGSB reactor, *Journal of Environmental Science and Health, PART A*, A43(14), 1650-1656

Yoochatchaval W., Ohashi A., Harada H., Yamaguchi T., Syutsubo K. (2008) Characteristics of granular sludge in an EGSB reactor for treating low strength wastewater at 20°C, *International Journal of Environmental Research*, 2(4), 319-328

Yoochatchaval W., Ohashi A., Harada H., Yamaguchi T., Syutsubo K. (2008) Intermittent effluent recirculation for the efficient treatment of low strength wastewater by an EGSB reactor, *International Journal of Environmental Research*, 2(3), 231-238

Yoochatchaval W., Nishiyama K., Okawara M., Ohashi A., Harada H., Syutsubo K. (2008) Influence of effluent-recirculation condition on the process performance of expanded granular sludge bed reactor for treating low strength wastewater, *Water Science & Technology*, 57(6), 869-873

Yoochatchaval W., Tsushima I., Yamaguchi T., Araki N., Sumino H., Ohashi A., Harada H., Syutsubo K. (2009) Influence of sugar content of wastewater on the microbial characteristics of granular sludge developed at 20°C in the anaerobic granular sludge bed reactor, *Journal of Environmental Science and Health, PART A*, A44(9), 921-927

2 口頭発表

発表者・(暦年)・題目・学会等名称・予稿集名・頁

Hayamizu Y., Murota R., Sumino H., Ohashi A., Harada H., Syutsubo K. (2006) Development of anaerobic wastewater treatment by AnDHS reactor for low strength wastewater and low temperature condition, 21st Century COE Program, 6th Int.Symp. Nagaoka Univ.Technol., 6th Int.Symp.Proc., 310

岩城宏幸, 西山桂太, 井町寛之, 大橋晶良, 原田秀樹, 珠坪一晃 (2006) 嫌気性 EGSB リアクターによる実下水の処理特性, 第 40 回日本水環境学会年会, 同講演集, 395

Iwaki H., Nishiyama K., Syutsubo K., Imachi H., Ohashi A., Harada H. (2006) Characteristics of municipal sewage treatment by using EGSB reactor, 21st Century COE Program, 6th Int.Symp. Nagaoka Univ.Technol., 6th Int.Symp.Proc., 302

室田龍一, 角野晴彦, 速水悠二, 大橋晶良, 原田秀樹, 珠坪一晃 (2006) ろ床型メタン発酵槽「AnDHS リアクター」による低濃度有機性排水処理, 土木学会第 61 回年次学術講演会, 同講演概要集, 第 VII 部門, 125-126

Murota R., Sumino H., Ohashi A., Harada H., Syutsubo K. (2006) New anaerobic treatment process “AnDHS reactor” for low strength wastewater at low temperature, 21st Century COE Program, 7th Int.Symp. Nagaoka Univ.Technol., 7th Int.Symp.Proc., 170

Nishiyama K., Okawara M., Syutsubo K., Harada H., Ohashi A. (2006) Anaerobic sewage treatment at ambient temperature by the EGSB reactor, 21st Century COE Program, 7th Int.Symp. Nagaoka Univ.Technol., 7th Int.Symp.Proc., 157

西山桂太, 岩城宏幸, 大橋晶良, 井町寛之, 原田秀樹, 珠坪一晃 (2006) 嫌気性下水処理水に含まれる溶存メタンの DHS 内での消長, 第 40 回日本水環境学会年会, 同講演集, 91

小澤徹, 角野晴彦, 和田清, 珠坪一晃, 大橋晶良, 原田秀樹 (2006) 無曝気型好気性処理の DHS リアクターによる下水二次処理水の残存有機物除去と硝化, 土木学会第 61 回年次学術講演会, 同概要集, 第 VII 部門, 101-102

Ozawa T., Sumino H., Wada K., Syutsubo K., Ohashi A., Harada H. (2006) Nitrification and organic removal of the secondary effluent from activated sludge process by a DHS reactor with no external aeration input, 21st Century COE Program, 7th Int.Symp. Nagaoka Univ.Technol., 7th Int.Symp.Proc., 169

角野晴彦, 珠坪一晃 (2006) 高専間・産学官連携発の消費エネルギーと余剰汚泥を低減する排水処理技術の実現化, 第 5 回産学官連携推進会議 (ポスター)

角野晴彦, 珠坪一晃 (2006) 高専間・産学官連携発の消費エネルギーと余剰汚泥を低減する排水処理技術の実現化, 一日中小企業庁 in GIFU (ポスター)

Sumino H., Hayamizu Y., Murota R., Ohashi A., Harada H., Syutsubo K. (2006) Challenge of low-strength wastewater treatment by novel anaerobic trickling filter at 20°C, 21st Century COE Program, 6th Int.Symp. Nagaoka Univ.Technol., 6th Int.Symp.Proc., 265-267

角野晴彦, 速水悠二, 室田龍一, 大橋晶良, 原田秀樹, 珠坪一晃 (2006) AnDHS (Anaerobic Down-flow Hanging Sponge) リアクターによる低温・低濃度有機性排水に適したメタン発酵処理の開発, 第 40 回日本水環境学会年会, 同講演集, 175

Sumino H., Ozawa T., Okayu M., Nishiwaki M., Syutsubo K., Ohashi A., Harada H. (2006) Tertiary treatment of effluent from activated sludge process by a DHS reactor, 21st Century COE Program, 6th Int.Symp. Nagaoka Univ.Technol., 6th Int.Symp.Proc., 311

Syutsubo K., Yoochatchaval W., Nishiyama K., Okawara M. (2006) Psychrophilic treatment of low strength wastewater by an EGSB reactor, 21st Century COE Program, 7th Int.Symp. Nagaoka Univ.Technol., 7th Int.Symp.Proc., 193

珠坪一晃, 川崎達也 (2006) EGSB リアクターによる有機性排水の低温メタン発酵特性, 第 40 回日本水環境学会年会, 同講演集, 176

Syutsubo K., Kawasaki T., Nishiyama K. (2006) Psychrophilic anaerobic treatment of low strength wastewater by EGSB reactor (Influence of temperature-decrease on the process performance of the EGSB reactor), 21st Century COE Program, 6th Int.Symp. Nagaoka Univ.Technol., 6th Int.Symp.Proc., 313

Takahashi M., Yamaguchi T., Sumino H., Araki N., Yamazaki S., Nagano A., Syutsubo K., Harada H. (2006) Development of low strength wastewater treatment under low temperature conditions by combining of UASB and DHS reactor system enhancing a sulfur-redox cycle action, 21st Century COE Program, 7th Int.Symp. Nagaoka Univ.Technol., 7th Int.Symp.Proc., 172

- Yamaguchi T., Tanikawa D., Ohashi A., Syutsubo K., Miya A., Araki N., Harada H. (2006) Effects of hydrogen partial pressure on volatile fatty acids degradation in thermophilic methanogenic system fed with starch as a carbon source, 21st Century COE Program, 7th Int. Symp. Nagaoka Univ. Technol., 7th Int. Symp. Proc., 173
- Yoochatchaval W., 大橋晶良, 原田秀樹, 珠坪一晃 (2006) The effect of temperature decrease on the process performance of an anaerobic EGSB reactor., 第43回環境工学研究フォーラム, 同講演集, 35-37
- Yoochatchaval W., Nishiyama K., Okawara M., Ohashi A., Harada H., Syutsubo K. (2006) Influence of recirculation condition on the process performance of EGSB reactor for treating of low strength wastewater, 21st Century COE Program, 7th Int. Symp. Nagaoka Univ. Technol., 7th Int. Symp. Proc., 168
- 河野恵, 角野晴彦, 山崎慎一, 青井健, 大橋晶良, 原田秀樹, 珠坪一晃 (2007) 低有機物濃度排水を嫌気処理するグラニューール内部の浄化機構の評価, 平成18年度土木学会中部支部研究発表会, 同講演概要集, 515-516
- 室田龍一, 角野晴彦, 原田秀樹, 大橋晶良, 珠坪一晃 (2007) 学校下水を連続処理する嫌気性散水ろ床(AnDHSリアクター)の特性ー並列運転するUASBリアクターとの比較ー, 第44回環境工学研究フォーラム, 同講演集, 39-41
- 室田龍一, 大岩勇太, 長野聖司, 角野晴彦, 原田秀樹, 大橋晶良, 珠坪一晃 (2007) 嫌気性散水ろ床 (AnDHS リアクター) による校内実排水の処理特性, 第41回日本水環境学会年会, 同講演集, 328
- 室田龍一, 大岩勇太, 長野聖司, 角野晴彦, 大橋晶良, 原田秀樹, 珠坪一晃 (2007) 嫌気性懸垂型スポンジろ床 (AnDHS リアクター) による低濃度有機性排水の低温条件での連続処理, 平成18年度土木学会中部支部研究発表会, 同講演概要集, 521-522
- 西山桂太, 大河原正博, 大橋晶良, 珠坪一晃, 井町寛之, 原田秀樹 (2007) 嫌気性処理水に含まれる溶存メタンのDHS装置によるガス化回収, 第41回日本水環境学会年会, 同講演集, 377
- 大岩勇太, 角野晴彦, 小澤徹, 原田秀樹, 珠坪一晃, 大橋晶良 (2007) 硝化型 DHS/硫黄脱窒リアクターによる下水二次処理水からの低コスト窒素除去システムの開発, 第44回環境工学研究フォーラム, 同講演集, 95-97
- 大岩勇太, 室田龍一, 長野聖司, 角野晴彦, 大橋晶良, 原田秀樹, 珠坪一晃 (2007) 新規な生物膜利用技術 AnDHS(Anaerobic Down-flow Hanging Sponge)リアクターによる実下水の連続処理, 平成18年度土木学会中部支部研究発表会, 同講演概要集, 519-520
- 大河原正博, 西山桂太, 大橋晶良, 珠坪一晃, 井町寛之, 原田秀樹 (2007) Expanded Granular Sludge Bed (EGSB) リアクターによる実下水処理の長期連続性能評価, 第41回日本水環境学会年会, 同講演集, 327
- 小澤徹, 小森弘貴, 東谷拓哉, 和田清, 角野晴彦, 原田秀樹, 珠坪一晃, 大橋晶良 (2007) DHS(Down-flow hanging sponge)と硫黄脱窒リアクターを組み合わせた無曝気型システムによる下水二次処理水の有機物・窒素除去, 第41回日本水環境学会年会, 同講演集, 56
- 小澤徹, 小森弘貴, 東谷拓哉, 和田清, 角野晴彦, 原田秀樹, 珠坪一晃, 大橋晶良 (2007) DHS (Down-flow hanging sponge) と硫黄脱窒リアクターを組み合わせた無曝気型システムによる下水二次処理水の有機物・窒素除去, 平成18年度土木学会中部支部研究発表会, 同講演概要集, 517-518
- Sumino H., Murota R., Ohashi A., Harada H., Syutsubo K. (2007) Low strength wastewater treatment by an Anaerobic Down-flow Hanging Sponge (AnDHS) reactor at low temperature, 11th World Congress on Anaerobic Digestion (AD11), Proceedings CD-ROM, PP1C.2
- 角野晴彦, 室田龍一, 大岩勇太, 原田秀樹, 大橋晶良, 珠坪一晃 (2007) Anaerobic Down-flow Hanging Sponges (AnDHS) リアクターによる校内下水の連続処理, 土木学会第62回年次学術講演会, 同講演集, 445-446
- 珠坪一晃, Yoochatchaval Wilasinee, 對馬育夫, 角野晴彦, 大橋晶良 (2007) グラニューール汚泥床法の最適化による低濃度排水の高効率メタン発酵処理, 第44回環境工学研究フォーラム, 同講演集, 57-59
- Syutsubo K., Yoochatchaval W., Yoshida H., Nishiyama K., Okawara M., Sumino H., Araki N., Harada H., Ohashi A. (2007) Changes of microbial characteristics of retained sludge during low-temperature operation of an EGSB reactor for low-strength wastewater treatment, 11th World Congr. Anaerobic Dig. (AD11), Proceedings (CD-ROM), 7B.2
- 對馬育夫, Yoochatchaval W., 山口隆司, 山村茂樹, 米山 豊, 珠坪一晃 (2007) 常温メタン発酵における主要酸生成細菌の生態学的特性の評価, 第10回日本水環境学会シンポジウム, 同講演集, 46-47
- Yoochatchaval W., Nishiyama K., Okawara M., Ohashi A., Harada H., Syutsubo K. (2007) Influence of effluent-recirculation condition on the process performance of EGSB reactor for treating of low strength wastewater, 11th World Congr. Anaerobic Dig. (AD11), Proceedings (CD-ROM), 1C.4

- Yoochatchaval W., 原田秀樹, 大橋晶良, 珠坪一晃 (2007) Influence of recirculation condition on the process performance of EGSB reactor for treating of low strength wastewater, 第 41 回日本水環境学会年会, 同講演集, 329
- 青木仁孝, 古川卓, 珠坪一晃, 荒木信夫 (2008) Real-time PCR を用いた遺伝子および mRNA の定量における外部標準の選定, 第 45 回環境工学研究フォーラム, 同講演集, 91-93
- Furukawa M., Sekine S., Syutsubo K., Yamaguchi T., Araki N. (2008) Shifts of methanogenic consortium in an expanded granular sludge bed reactor at low-temperature operation, 21st Century COE Program, 8th Int. Symp. Nagaoka Univ. Technol., 8th Int. Symp. Proc., 126
- 古川卓, 関根さち, 荒木信夫, 角野晴彦, 珠坪一晃 (2008) 低濃度排水の無加温嫌気性処理におけるメタン生成古細菌の動態解析, 第 42 回日本水環境学会年会, 第 42 回日本水環境学会年会, 同講演集, 479
- 賀澤拓也, Yoochatchaval W., 杉江恒彦, 山口隆司, 珠坪一晃 (2008) 低温・低濃度排水の EGSB 法によるメタン発酵処理- 排水の糖含有率の変化が処理性能に及ぼす影響評価-, 第 45 回環境工学研究フォーラム, 同講演集, 73-75
- 窪田恵一, Yoochatchaval W., 山口隆司, 河合俊和, 珠坪一晃 (2008) グラニュール汚泥床リアクターの低濃度実排水への適用, 土木学会第 63 回年次講演会, 同講演集 CD-ROM, 7-048
- 草野真一, 山口隆司, 珠坪一晃, 荒木信夫, 大橋晶良, 原田秀樹 (2008) 実下水処理 UASB リアクター内の保持汚泥特性の評価, 第 42 回日本水環境学会年会, 同講演集, 386
- 室田龍一, 西川竜太, 角野晴彦, 大橋晶良, 原田秀樹, 珠坪一晃 (2008) スポンジ担体を用いた嫌気性散水ろ床 (AnDHS リアクター) による学校下水の処理特性と汚泥性状, 第 42 回日本水環境学会年会, 同講演集, 480
- Murota R, Sumino H., Ohashi A., Harada H., Syutsubo K. (2008) A novel anaerobic treatment of low strength wastewater at low temperature in an AnDHS reactor, 21st Century COE Program, 8th Int. Symp. Nagaoka Univ. Technol., 8th Int. Symp. Proc., 125
- Nishikawa R., Murota R., Sumino H., Harada H., Ohashi A., Syutsubo K. (2008) Characteristic of an AnDHS reactor treating sewage from the college compared with UASB as conventional anaerobic process-, 21st Century COE Program, 8th Int. Symp. Nagaoka Univ. Technol., 8th Int. Symp. Proc., 127
- Ohtsuka Y., Kawakami S., Kubota K., Syutsubo K., Yamaguchi T., Harada H., Araki N. (2008) Simultaneous fluorescence *in-situ* hybridization targeting *apsA* mRNA and 16S rRNA in sulfate reducing bacteria, 21st Century COE Program, 8th Int. Symp. Nagaoka Univ. Technol., 8th Int. Symp. Proc., 135
- 大岩勇太, 角野晴彦, 原田秀樹, 珠坪一晃, 大橋晶良 (2008) 硫黄脱窒による下水二次処理水を硝化する DHS リアクターの後段処理, 第 45 回環境工学研究フォーラム, 同講演集, 41-43
- 大岩勇太, 重田晃司, 和田桂児, 角野晴彦, 原田秀樹, 珠坪一晃, 大橋晶良 (2008) 無曝気型硝化槽 DHS リアクターと硫黄を用いた独立栄養型脱窒による下水三次処理, 第 42 回日本水環境学会年会, 同講演集, 293
- 大河原正博, 山口隆司, 井町寛之, 原田秀樹, 珠坪一晃, 大橋晶良 (2008) 嫌気性処理水に含まれる溶存メタンの大気放散防止技術, 第 42 回日本水環境学会年会, 同講演集, 293
- Okawara M., Yamaguchi T., Imachi H., Harada H., Syutsubo K., Ohashi A. (2008) Recovery of dissolved methane in effluent of anaerobic wastewater treatment by DHS unit, 21st Century COE Program, 8th Int. Symp. Nagaoka Univ. Technol., 8th Int. Symp. Proc., 100
- 大塚勇輝, 荒木信夫, 珠坪一晃, 山口隆司, 久保田健吾, 川上周司, 阿部憲一 (2008) 硫酸還元機能遺伝子 *apsA* mRNA を標的とした FISH 法の汚泥サンプルへの適用, 第 42 回日本水環境学会年会, 同講演集, 419
- 大矢明子, 珠坪一晃, 米山豊, 荒木信夫, 上村繁樹, 原田秀樹, 山口隆司 (2008) 無加温下水処理 UASB リアクター保持汚泥性状の定量的評価, 第 11 回日本水環境学会シンポジウム, 同講演集, 83-84
- Pattananuwat N., Koge K., Kawai T., Choeisai P.K., Syutsubo K., Yamaguchi T. (2008) Development of UASBs+DHS system for MSW treatment and decolorization, 21st Century COE Program, 8th Int. Symp. Nagaoka Univ. Technol., 8th Int. Symp. Proc., 110
- 関根さち, 荒木信夫, 珠坪一晃 (2008) 低温条件下におけるメタン生成古細菌群の挙動, 第 13 回高専シンポジウム in 久留米, 同要旨集, 44
- 杉江恒彦, 窪田恵一, Yoochatchaval W., 對馬育夫, 草野真一, 山口隆司, 米山豊, 珠坪一晃 (2008) 都市下水の嫌気処理における有機物分解特性の評価, 第 45 回環境工学研究フォーラム, 同講演集, 35-37

角野晴彦, 和田桂児, 室田龍一, 原田秀樹, 大橋晶良, 珠坪一晃 (2008) スポンジ担体充填型の嫌気性散水ろ床 (AnDHS リアクター)による下水の長期連続処理, 第 45 回環境工学研究フォーラム, 同講演集, 38-40

Sumino H., Kawano M., Aoi K., Yamazaki S., Harada H., Syutsubo K., Ohashi A. (2008) Estimation of glucose profile in an anaerobic granular sludge fed with low strength wastewater by microelectrode, 21st Century COE Program, 8th Int.Symp. Nagaoka Univ.Technol., 8th Int.Symp.Proc., 124

Syutsubo K., Choeisai P.K., Yamaguchi T., Yoochatchaval W. (2008) Characteristics of the distillery wastewater discharged from bioethanol industry in Thailand, 第 42 回日本水環境学会年会, 同講演集, 471

對馬育夫, Yoochatchaval W., 珠坪一晃 (2008) 低温馴養グラニューールの微生物群集構造解析- 低温廃水処理へのメタン発酵技術の適用-, 第 11 回日本水環境学会シンポジウム, 同講演集, 85

Tsushima I., Yoochatchaval W., Yamaguchi T., Yamamura S., Yoneyama Y., Syutsubo K. (2008) Investigation of a novel psychrotolerant cellulose-degrading Bacteroidales species, 12th Int.Symp.Microbial Ecol.(ISME 12), Abstracts, 12, 977

對馬育夫, Yoochatchaval W., 山口隆司, 山村茂樹, 米山豊, 珠坪一晃 (2008) 常温メタン発酵における主要酸生成細菌の同定と動態評価, 第 42 回日本水環境学会年会, 同講演集, 382

Tsushima I., Yoochatchaval W., Yamaguchi T., Yamamura S., Yoneyama Y., Syutsubo K. (2008) Identification and detection of psychrotolerant cellulose-degrading bacteria, 21st Century COE Program, 8th Int.Symp. Nagaoka Univ.Technol., 8th Int.Symp.Proc., 123

Wada K., Shigeta K., Oiwa Y., Sumino H., Harada H., Syutsubo K., Ohashi A. (2008) Development of cost-effective nitrogen removal system from a secondary effluent by combination of DHS and sulfur autotrophic denitrification reactor, 21st Century COE Program, 8th Int.Symp. Nagaoka Univ.Technol., 8th Int.Symp.Proc., 126

Yoochatchaval W., Tsushima I., Tomioka N., Ohashi A., Harada H., Yamaguchi T., Syutsubo K. (2008) Influence of feed composition change on the physical and microbial properties of granular sludge in EGSB reactor at 20°C, 21st Century COE Program, 8th Int.Symp. Nagaoka Univ.Technol., 8th Int.Symp.Proc., 97

平岡大雅, 山口隆司, 長野晃弘, 河合俊和, 鈴木雅人, 珠坪一晃, 山崎慎一, 荒木信夫 (2009) 嫌気性生物処理を主体とした高濃度糖系廃液の処理に関する研究, 第 43 回日本水環境学会年会, 同講演集, 155

松浦哲久, 山口隆司, 角野晴彦, 珠坪一晃, 幡本将史, 大橋晶良 (2009) 嫌気性処理水の溶存メタン回収・酸化型後段処理. 第 43 回日本水環境学会年会, 同講演集, 254

永井寛之, 佐藤浩太, 渡邊高子, 山口隆司, Choeisai P.K., 珠坪一晃, 大橋晶良 (2009) 脱タンパク質化天然ゴム製造工程廃液からの資源回収, 第 43 回日本水環境学会年会, 同講演集, 169

Pattananuwat N., Kawai T., Syutsubo K., Yamaguchi T. (2009) Performance of Combined Two-Phase UASB and DHS System treating concentrated Molasses Wastewater, 第 43 回日本水環境学会年会, 同講演集, 157

佐藤浩太, 永井寛之, 渡邊高子, 山口隆司, Choeisai P.K., 珠坪一晃 (2009) 天然ゴム製造工程廃液を対象とした新規廃液処理システムの開発. 第 43 回日本水環境学会年会, 同講演集, 443

對馬育夫, Yoochatchaval W., 窪田恵一, 山口隆司, 米山豊, 珠坪一晃 (2009) 無加温下水処理 UASB リアクターにおける主要酸生成細菌の同定. 第 43 回日本水環境学会年会, 同講演集, 243

Yoochatchaval W., Kubota K., Tsushima I., Yamaguchi T., Syutsubo K. (2009) Influence of feed composition change on the retained sludge characteristics in a granular bed reactor at 20°C. 第 43 回日本水環境学会年会, 同講演集, 440

Yoochatchaval W., Kumakura S., Tsushima I., Kubota K., Nagata M., Yamaguchi T., Syutsubo K. (2009) Characteristic of anaerobic degradation of Palm Oil Mill Effluent (POME), Int.Symp.Green Technol.Global Carbon Cycle Asia, Proceedings, 187

<招待講演>

Syutsubo K. (2006) High rate methane fermentation of low strength wastewater at low temperature, 21st Century COE Program, 6th Int.Symp. Nagaoka Univ.Technol., 6th Int.Symp.Proc., 271-273

珠坪一晃 (2007) 排水処理における省・創エネルギー、「環境産業技術に関する講演・交流会」へ バイオマスエネルギー (バイオエタノール) 製造技術および次世代型の廃水処理技術 (呉工業高等専門学校地域テクノセンター), 呉工業高等専門学校,

3 書籍

発表者・(刊年)・題目・編著者名・書名・出版社・頁

珠坪一晃 (2008) グラニュール汚泥床法による有機性排水の省・創エネ処理- 低有機物濃度・低温排水への適用-, 西尾尚道, 中島田豊監修, バイオガスの最新技術, シーエムシー出版, 228-236

4 特許

出願人：国立環境研究所

発明者：珠坪一晃

発明の名称：メタン発酵による排水処理方法および装置

特許公開：2008-036529

出願日：平成 18 年 8 月 4 日

特願 2006-213716

出願人：珠坪一晃, 長岡技術科学大学, 国立環境研究所, 国立高等専門学校機構

発明者：大橋晶良, 珠坪一晃, 角野晴彦 他

発明の名称：溶存メタン回収方法及び装置

特許公開：2008-168264

出願日：平成 19 年 1 月 15 日

特願 2007-5968

REPORT OF SPECIAL RESEARCH FROM
THE NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES, JAPAN

国立環境研究所特別研究報告
SR-86-2009

平成 21 年 9 月 30 日発行

編 集 国立環境研究所 編集委員会

発 行 独立行政法人 国立環境研究所

〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16 番 2

電話 029-850-2343 (ダイヤルイン)

印 刷 前田印刷株式会社筑波支店

〒305-0033 茨城県つくば市東新井 14-3

Published by the National Institute for Environmental Studies
16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506 Japan
September 2008

無断転載を禁じます

