

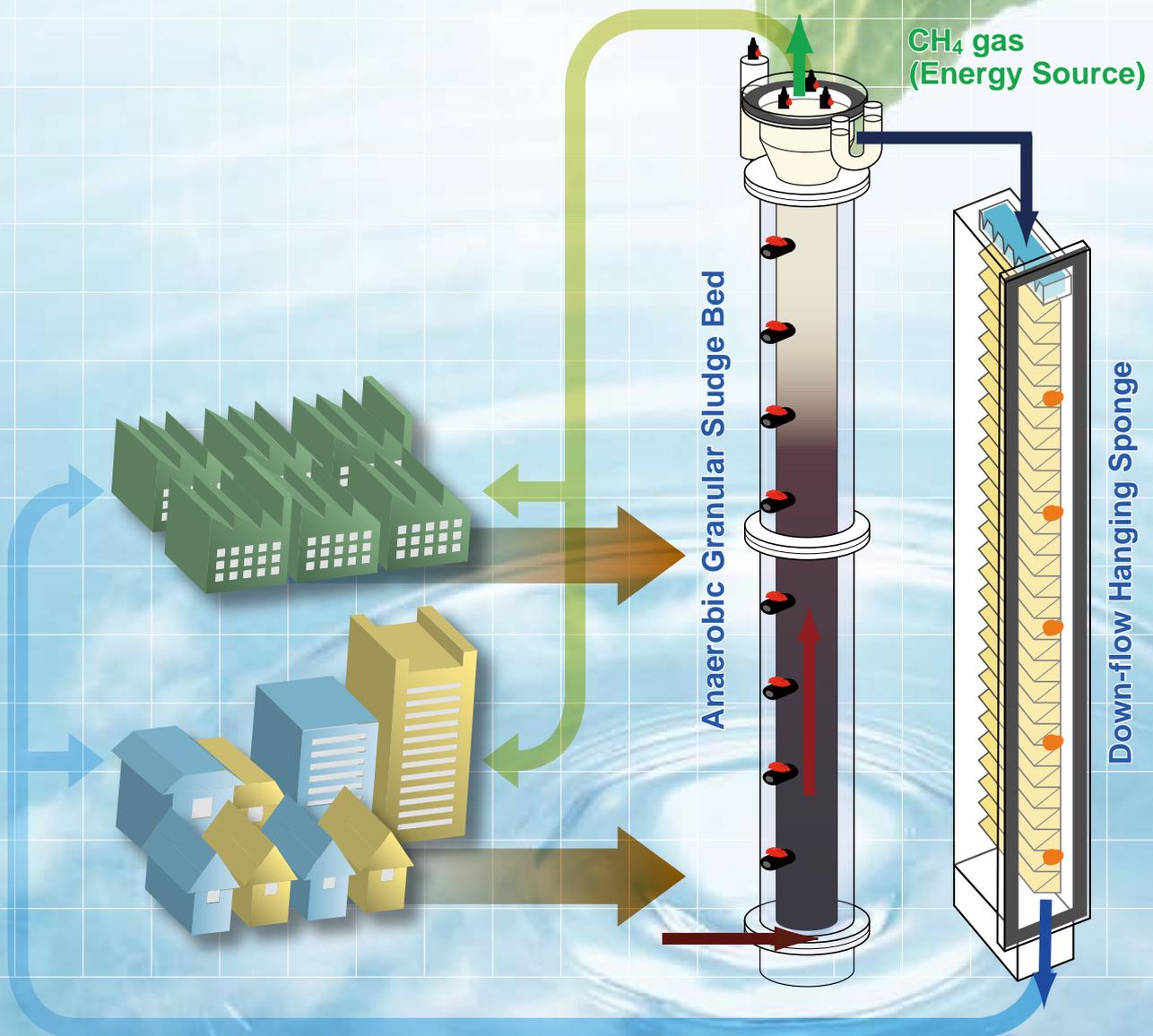


環境儀

NO. 35 JANUARY 2010

国立環境研究所の研究情報誌

環境負荷を低減する 産業・生活排水の処理システム ～低濃度有機性排水処理の「省」「創」エネ化～



独立行政法人

国立環境研究所

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

産業・生活排水の処理エネルギーを大幅に削減し、
低濃度有機性排水からエネルギーを創り出します。





産業活動のあるところ、人が生活するところには必ず廃棄物ならびに排水が発生します。なかでも排水は産業排水が年間 120 億トン、生活排水が同じく 160 億トンにものぼり、日本一の貯水量を誇る琵琶湖とほぼ同量の排水が国内で毎年発生しています。その多くは水環境保全のために工場や下水処理場において排水処理を施され、河川に放流されるとともに、その一部は環境用水や工業用水などに再生されています。発生した余剰汚泥は消化ガスや焼成して建設資材などに再生・活用されつつあります。

しかしながら、現在の排水処理には生活・産業排水合わせて国内電力のほぼ 1.5%に相当する膨大なエネルギーが曝気電力などで消費されており、その削減は時代の要請となっています。下水処理にも省エネ機能を組み込んだシステムの開発が急務となっているのです。

今回紹介する排水処理技術は、処理に多くのエネルギーを要した低濃度／低・常温の有機性排水を、嫌気性微生物を利用することで、飛躍的ともいえる低エネルギーで高速処理することを実現したシステムとして注目を集めています。「省」エネルギーであるとともにメタンガスを効率よく生成する「創」エネルギーの機能も併せ持ち、次代を担う有機性排水の処理法として多くの期待が寄せられています。

C O N T E N T S



環境負荷を低減する 産業・生活排水の処理システム ～低濃度有機性排水処理の「省」「創」エネ化～

- Interview
研究者に聞く!!..... p4～9
- Summary
グラニューロ汚泥床メタン発酵処理技術
の開発と実証処理試験 p10～11
- 研究をめぐって
嫌気性排水処理(メタン発酵)技術の
研究動向 p12～13
- 『低濃度有機性排水の無加温メタン発酵処理技術/
産業・生活排水の「省」「創」エネルギー処理』技術開
発の歩み p14

● 本研究に関する成果は以下の URL で紹介されています。
<http://www.nies.go.jp/kanko/tokubetu/sr86/sr86.pdf>
 ● 表紙：グラニューロ汚泥床（生物膜流動型メタン発酵リアクター）の模式図を示している。7 頁を参照。

Interview 研究者に聞く!!

地域環境の保全に密接に結びつく有機性排水の処理は、私どもにとって最も身近な問題のひとつです。排水処理に利用される微生物の可能性に興味を引かれて研究を始めた水環境質研究室の珠坪一晃（しゅつぽ・かずあき）さんは、新たな発想で、低濃度／低・常温の有機性排水に対する画期的処理法を確立しており、今回はその成果をお聞きました。



珠坪一晃／水環境質研究領域 水環境質研究室 主任研究員

「省」エネ＋「創」エネで 排水処理技術の新たな道を拓く

活性汚泥法や 嫌気性排水処理法の欠点を補う 新しい有機性排水処理技術の確立

Q: 珠坪さんが開発した有機性排水の処理技術は現在、各方面から高い評価を得ています。その内容を説明していただく前にまず、排水処理技術の現状と研究に着手された着眼点からお話ください。

珠坪: 生活排水や産業排水として排出される有機性排水の処理は、私どもの生活環境に直接影響するだけに非常に重要です。法規制の強化等により排水処理のインフラ整備と技術革新は大きく進展してきましたが、そのポイントは処理水質の確保と再生水・汚泥の再資源化などにあります。自治体の下水処理センターや事業所単位の処理施設も整備され、排水処理能力は大きく向上しています。そのなかで現在は活性汚泥法と呼ばれる好気性の微生物を利用して有機物を分解させ

る生物処理法が有機性排水処理の主流となっているのです。

Q: 有機物の分解促進に曝気処理を行う方法ですね。

珠坪: 活性汚泥法は1912年ごろにイギリス等で実用化され、処理水質や安定性に優れるため我が国の水環

Note

①好気性排水処理（活性汚泥法／曝気処理）

酸素を利用して生育する微生物を利用して、水中の有機物を分解し、排水を浄化処理する技術の総称です。処理水質に優れていることから、活性汚泥法として多くの排水処理施設で利用されています。しかし、微生物の生育のために水中に酸素を送り込む曝気が必要なことから電力消費量が多いという欠点があり、好気性微生物は分解した有機物の40～50%を菌体合成に使うため余剰汚泥（余剰菌体）の発生量が多く、その処理・処分（焼却・埋立）に多大なエネルギー（費用）を要することが問題点としてあげられています。

■「低濃度有機性排水処理システム」の研究開発の背景と目的





環境保全にも大きく寄与してきました。近年では余剰汚泥を利用して、メタン発酵による消化ガスの回収、汚泥の溶融・結晶化による建設資材(スラグ)の製造など、廃棄物を有効利用しようという気運が高まっています。

しかしこの方法は好気性の微生物をつかうため、排水に空気(酸素)を溶かし込むための曝気処理が必要であり、また水処理の過程で余剰汚泥が大量に発生するなどの問題点が以前から指摘されてきました。いいかえれば曝気処理の動力や、余剰汚泥の処分に多くのエネルギーを消費することが解決すべき課題となっています。

②嫌気性排水処理

酸素の存在しない環境で生育する嫌気性微生物を利用して排水の浄化を図る技術の総称です。水中への酸素導入のためのエネルギーが不要で、余剰汚泥の発生量が少ない(好気性微生物の1/5~1/10程度)等の特長を有するため、省エネ型の排水処理法として期待されています。

③有機物濃度 COD

CODはChemical Oxygen Demand(化学的酸素要求量)の略。排水や水環境(河川、湖沼など)の有機物等による汚れの度合いを示す指標。水質汚濁防止法に基づいて排水の下水放流が可能なCOD濃度についても基準が定められており、その値はおよそ0.6~0.8gCOD/L程度です。

Q: それでは化石燃料の使用に伴うCO₂の発生量も多く、低炭素社会の流れに沿うことができません。

珠坪: 国内では現在、産業排水が年間120億トン、生活排水(都市排水)が同じく160億トンにものぼり、その量は琵琶湖の貯水量にほぼ匹敵します。これらの有機性排水処理の曝気動力等につかわれる電力は国内総電力消費量の約1.5%程度になっており、発生する余剰汚泥は有機系産業廃棄物の40%と膨大なものです。活性汚泥法のネックのひとつは余剰汚泥を大量に発生することであり、汚泥を再処理するためのエネルギー投下とコストも無視できません。結果、CO₂発生量も産業排水、生活排水合わせて年間800~1500万トンになり、その削減が急務です。

Q: 大きなエネルギー負担ですね。

珠坪: その通りです。そこで私どもは活性汚泥法の代替技術は何かと考えたときに、消費エネルギーや余剰汚泥の発生量が削減でき、メタンガス等のエネルギー回収が可能な嫌気性微生物利用の処理システムに着目したのです。

Q: 嫌気性ということは、曝気処理も不要になります。

珠坪: 嫌気性排水処理はメタン発酵法ともいわれ、最終生成物として回収したメタンは、天然ガスの主成分であるので燃料としても利用することができます。おっしゃる通り曝気動力も不要で、汚泥の発生も少ないのが特長です。すでに生ごみ等の有機性廃棄物や高濃度の産業排水の処理には、嫌気性処理技術(35~55℃で処理)が適用され、資源循環処理が実現されつつあります。

ところが問題なのは、処理対象の有機性排水の有機物濃度の指標であるCODが“2~10g/L”と高濃度でなければならず、有機物の分解を担うメタン生成細菌の活性を維持するために30~35℃に加熱して処理する必要があることなのです。CODが“0.3~1.0

目標設定と開発のステップ

目標 低濃度有機性排水の処理エネルギーを大幅に削減

■第1ステップ

「曝気動力が不要」「余剰汚泥の発生量が少ない」「メタン(エネルギー)回収が可能」などの特性を持つ嫌気性処理(メタン発酵)に着目。

■第2ステップ

低・常温で低濃度の有機性排水では嫌気性微生物は不活性になるが、その課題解決のために生物膜を利用した「グラニュー汚泥法」を開発。
*嫌気性微生物は、30~35℃、排水濃度2~10gCOD/Lで活性化。

- 低濃度排水(0.4gCOD/L)の高速(処理時間1~1.5時間)、高効率処理(COD除去率90%以上)を実現。処理エネルギーコストの約70%を削減。
- メタンガスの回収により「省」に加えて「創」エネルギー化を実現。

実証開発・試験

■ラボレベル

グラニュー汚泥床法による有機性排水の無加温メタン発酵処理技術を開発。

*詳細は10ページのSummaryを参照してください。



■プラント建設

鹿児島県に処理プラントを設置し、嫌気性処理と無曝気型の好気性処理との組み合わせにより生活排水(固形有機物含有)の実証処理試験を実施。
*詳細は11ページのSummaryを参照してください。



g/L”と低く、常温（10～25℃）で排出される生活排水などには適用が困難でした。低濃度・低温では嫌気性微生物が不活性化する、というのが大きな要因だったのです。

Q:「曝気動力が不要」「余剰汚泥の発生量が少ない」「メタン（エネルギー）回収が効率よく行える」などの多くの利点を持つ嫌気性排水処理ですが、適用範囲が限定されていた-----。

珠坪: このことが研究開発のポイントを定めるきっかけとなり、出発点になりました。それならば嫌気性排水処理（メタン発酵）の適用範囲、すなわち水温の下限と有機濃度の下限を大幅に拡大すればいいのではないかと。低温または常温の低濃度有機性排水を加温せずに処理できるメタン発酵処理技術の開発を目指したのです。従来の活性汚泥法や嫌気性排水処理法の欠点を補う新しい有機性排水処理技術の確立です。

微生物のもつ可能性に興味を引かれたのが原点

Q: 発想の転換であり拡大ですね。そのような発想を生み出す原点はどこにあったのですか。

珠坪: 私は、もともと土木工学の出身で、排水処理の知識はあまりありませんでした。卒業研究のテーマを選ぶときに、微生物を利用する排水処理技術を研究していた先生（大学の先輩）から技術の概要を聞き、微生物のもつ可能性に興味を引かれたのが原点ですね。ハードの積み重ねの土木と比べて排水処理は生物を扱うことからソフト的な要素が強く、未知の部分があります。進学に際しても、水処理研究で先進的な大学院を選び、卒業後も大学の助手を勤めた後、環境プラントメーカーなどで、石油汚染土壌のバイオレメディ



グラニュール汚泥 有機物の分解とメタン生成を担う

エーション（微生物による汚染浄化）や、廃棄物のメタン発酵処理に関する研究をしていました。

Q: 2003年に国立環境研究所に入社されています。

珠坪: 長期的な観点で水処理技術の研究を進めたいと考え国立環境研究所に入社しました。先ほどからお話している、「低濃度の有機性排水を加温せずに処

Note

④メタン発酵のメカニズム

酸素の存在しない嫌気条件下では、有機物は酸生成細菌群による作用を受け、低級脂肪酸（酢酸）と水素、炭酸ガスにまで分解されます。その後、酢酸および水素、炭酸ガスはメタン生成細菌によってエネルギーとしてのメタンガスにまで転換され、排水中から有機物が除去されます。これら一連の嫌気的な有機物分解・メタン生成反応をメタン発酵といいます。得られたメタンはエネルギーとして利用が可能なため、資源循環型の処理技術としても有効です。

⑤メタンガス

メタンは最も単純な構造の炭化水素で、1個の炭素原子に4個の水素原子が結合した分子です。メタン発酵では、廃棄物や排水に含まれるバイオマス由来の有機物がメタンとして回収できるため環境負荷の低いエネルギーといえます（右ページのバイオマス/カーボンニュートラルを参照）。無味無臭の気体で、都市ガス（燃料用のガス）などに使用されています。

■メタン発酵の排水処理分野での利用拡大を目指して

メタン生成細菌

- ・土壌・水田などの自然環境、反芻動物の胃などに生息
- ・殆どが中温性（35～37℃が至適温度）、高温性（55～65℃）の細菌



常温（10～20℃）で多量に排出される排水処理への適用は困難



常温で不活性化してしまうメタン生成細菌は、増殖が非常に遅い細胞が分裂して倍になる時間 7～14日



増殖の遅いメタン生成細菌を水処理装置内に長時間保持して有効に利用するための基礎技術開発



酢酸を利用してメタンを生成する *Methanosaeta* 属細菌



たのです。最終年度には開発成果に対して高い評価をいただき、その評価に基づいて研究期間が2008年まで3年間延長されました。2006年からは、所内の競争的資金（特別研究）やナショナルプロジェクト等の大型予算を獲得し、民間企業等と共同研究を行うなどにより実用的な研究に移っています。足取りをたどってみると、当研究所を含め約20年間にわたって微生物を利用した水処理技術の研究に携わっていることとなります。

理できる無加温メタン発酵処理技術」の開発は、国立環境研究所に入所してから本格的に取り組むことになりました。ちょうど若手研究者を対象としたNEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）の研究助成金を得て、それから2005年までの3年間、低濃度の産業排水を加温せずにメタン発酵処理をする研究を続け

「グラニューール汚泥床法」の開発で ブレイクスルー 低濃度有機性排水の無加温メタン発酵技術を確立

Q: それでは研究開発のプロセスと成果を具体的にお聞きしたいとおもいます。

珠坪: 2004年に、メタン生成細菌をグラニューール状生物膜に集積させ、長時間保持するための装置およびその運転法の開発を行いました。グラニューールとは顆粒という意味ですが、グラニューール状生物膜とは嫌気性の微生物（細菌）で構成される直径数ミリの顆粒状に生長した膜状物質をいいます。1粒に何兆個という微生物が集積しています。嫌気性のメタン生成細菌は好気性細菌に比べて増殖が遅いことが知られていますが、それだけに各顆粒に付着・集積した嫌気性のメタン生成細菌をうまく増殖させ、コントロールするのが「グラニューール汚泥床法」なのです。メタン生成細菌が有機性排水に流されることなく、装置内に集積して溶解性の有機物を分解し、メタンガスを発生させる機能を有しています。グラニューール汚泥床法の開発が、新たに有機性排水処理技術を確立するためのブレイクスルーとなりました。適度な有機物負荷と運転期間中の優れた菌体保持機能の維持により、低水温（10～

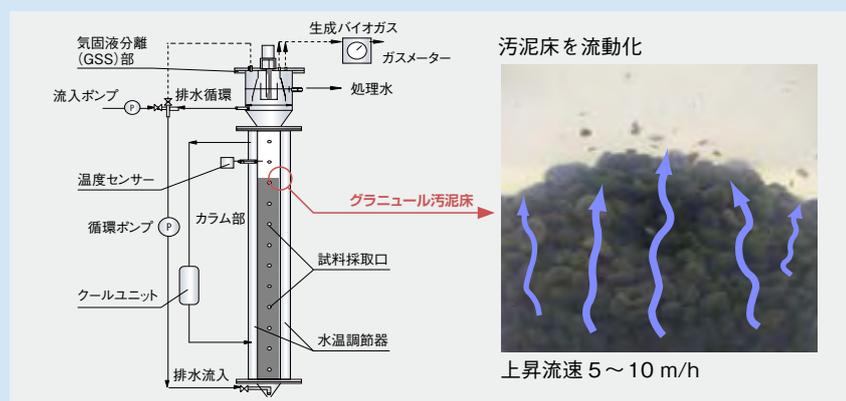
⑥メタン生成細菌

メタンを生成することで生育エネルギーを得る嫌気性細菌をメタン生成細菌といいます。自然界の嫌気的条件下に幅広く生息しており、特に湖沼底の堆積物、水田、哺乳類の消化管などに多く、地球上で放出されるメタンの大半を合成しています。分類上はすべての種が古細菌ユリアーキオータ門に属しており、起源は古いと推測されています。35～37℃の中温域、55～65℃の高温域での生育が活発で、増殖速度が好気性の微生物と比較して遅いことが特徴です。

⑦バイオマス／カーボンニュートラル

バイオマスは有機物であるため、燃焼させると二酸化炭素が排出されます。しかし、これに含まれる炭素は、バイオマスが成長過程で光合成により大気中から吸収した二酸化炭素に由来するため、バイオマスを燃焼しても全体としてみれば大気中の二酸化炭素量を増加させていないとされています。この性質をカーボンニュートラルと呼びます。

■排水処理メタン発酵リアクター（グラニューール汚泥床）の構造とグラニューール汚泥



増殖の遅いメタン生成細菌を装置外に流出させず効率的に維持するため、沈降性に優れたグラニューール汚泥を利用しています。また、処理水の循環を行って汚泥床部での排水の流速を高く維持（約5 m/h）することで、排水と嫌気性細菌との接触性とグラニューール汚泥からのバイオガスの分離性を向上させました。

15℃)、低有機濃度 (0.6 ~ 0.8 gCOD/L) の排水処理を効率よく行えるようになったのです。微生物の不活性化を招く要因も特定して、従来、嫌気性排水処理技術のネックであった、処理水の水質確保も実現させています。発生するメタンガスも、バイオマス由来の有機物であることからカーボンニュートラルの性質を有しており、環境に優しいエネルギー源であるといえます。

Q: 研究成果を発表してすぐに、国際的にも高い評価を得ました。

珠坪: 嫌気性排水処理に関する国際会議 (Anaerobic Digestion 2007) において高い評価を得るとともに、第 41 回環境工学研究フォーラム自由投稿セッション賞 (2005 年) を受賞しました。

Q: メカニズムのポイントは微生物のコントロールにあるようですね。

珠坪: メタン発酵技術の発酵とは、有機物を微生物により分解させ、メタンガスという有価物を得ることにあります。有機物の分解とメタンの生成には、複数種の微生物が関わっていますが、なかでも増殖の遅いメタン生成細菌をいかにして上手く利用し制御するかがポイントになるのです。中温で管理しないと活性化しなかったメタン生成細菌が、生物膜状に増殖すると長時間装置内に滞留できるようになり、低温でも分解速度を維持するのです。細菌が滞留する“場所”をつくることで細菌の活性が維持できるという予感がありましたが、この着想が有効であると実証され、世界でも注目される技術として認知されたことは大きな喜びです。

水処理研究の変遷のなかで、1990 年代から分子生物学を用いた解析が行われ、汚染物質の分解に関わる微生物の分析は環境分野でも主流になりつつあります。日本はこうした微生物の有用性や機能についての情報収集に優れており、それをもとに微生物解析とそ



研究室で稼働するメタン発酵排水処理装置 (リアクター)

の有効利用を進めたことで、水処理技術の開発は世界のトップクラスに位置しています。

従来法に比べて 70%以上もの消費エネルギーを削減 無曝気、無加温で高速・高効率処理

Q: ラボレベルの研究では、処理技術がさらに進化しているようです。

珠坪: ラボでは独自に設計した試作型の排水処理装置 (リアクター) を用いて、さまざまな模擬産業排水の処理試験を行っています。最近では、装置の処理性能やメタンガスの回収性能、微生物の量や種類の変化などに関する基礎的な情報を収集し、従来法ではメタン生成細菌が不活性化してしまうほどの低有機物濃度、低温の有機性排水にも適用可能な運転方法 (間欠処理水循環法) を開発することに成功し、複数の特許出願を行っています。今まで以上の低濃度排水 (0.4 g COD/L) の高速 (処理時間 1 ~ 1.5 時間) ・高効率処理 (COD 除去率 90%以上) を実現する道筋をつけました。

具体的には、固形性の有機物の混入が少なく質が安定している産業排水の場合、この方法を使えば、活性

■有機性排水の処理性能に関する開発技術と従来技術との比較

●嫌気性排水処理技術の適用下限を大幅に拡大。

従来の嫌気性排水処理では処理が困難であった低濃度有機性排水 (0.3 ~ 1.0 gCOD/L) を無加温条件下 (10 ~ 25℃) でメタン発酵処理することが可能となりました。

●高効率処理を実現

生物膜の利用による排水処理時間の大幅短縮と、無曝気型の好気性処理法の組み合わせにより、良好な処理水質の維持を実現しました。

●大幅に省エネ化

従来の好気性処理に比べ 75%程度の省エネ化が期待できます。

	適用排水の温度	適用排水の濃度
好気性排水処理 (活性汚泥法) ~ 従来技術 ~	◎ 10 ~ 25℃ 好気性微生物の広い温度適用性	△ 0.2 ~ 0.6 gCOD/L 高濃度排水に不適
従来型嫌気性排水処理 (UASB 法) ~ 従来技術 ~	× 30 ~ 35℃ 排水の加温が必要 中温嫌気性細菌の利用	△ 1.5 ~ 3 gCOD/L 低濃度排水に不適
嫌気性排水処理 (グラニューク汚泥床法) ~ 開発した技術 ~	◎ 10 ~ 25℃の常温で処理可能 常温対応の嫌気性細菌を保持	◎ 0.3 ~ 3 gCOD/L 嫌気性微生物の活性維持方法を開発



鹿児島県の下水処理場に設置した実証試験のためのパイロットプラント



汚泥法では従来 10 時間ほどかかっていた処理時間を 2 ～ 3 時間程度にまで短縮できます。設備のスペースも小さくてすみ、それだけ低コストに抑えられます。

この技術は「低濃度有機性排水の無加温メタン発酵技術」としてすでに確立しており、次は実用化に向けたステップに入ります。現在、民間企業との共同研究で、実際に製糖排水の無加温条件（20℃）での処理性能の評価を行い、より効率的で安定的な運転方法の研究を継続しているところです。（ラボで稼働する排水処理装置については 10 ページの Summary をご参照ください）

Q：生活排水処理の実証プラントを建設し、性能評価試験も行っています。成果はいかがでしたか。

珠坪：NEDO 助成のナショナルプロジェクトとして鹿児島県の下水処理場で行いました。生活排水は産業排水と異なり固形の有機物が多く含まれ、水量や水温の変動も大きいため、技術の適用評価を行うためには、下水処理場において実証試験を行う必要があったのです。水質の安定性や省エネルギーの効果（電力消費量の削減、余剰汚泥の削減）を調査しましたが、好気性排水処理法（活性汚泥法）と同等の処理水質を年間通して安定的に発揮でき、曝気動力を必要としないこと、余剰汚泥の発生を大幅に削減できたことから、従

来法に比べて 70%以上の消費エネルギー削減を実現しました。大きな成果です。（実証プラントについては 11 ページの Summary をご参照ください）

Q：本技術の有用性が確実に実証されています。今後の普及が楽しみです。

珠坪：適用排水の種類が限定され、処理水質が悪いなどの理由で実用的な規模での導入が遅れていた嫌気性のメタン発酵排水処理技術ですが、本研究開発を通じて適用可能な排水の有機物濃度や温度の下限が大幅に拡大され、良好な処理水質も得られることが実証されています。都市排水だけでなく農村集落排水処理にも有効ですし、これまでの食品産業だけでなく、幅広い産業分野に拡大して、排水処理に当たって省エネならびにコストの削減をはかる企業、メタンなどバイオガスの有効利用技術開発を行う企業にも適用を広げていただきたいものです。資本投下を大きく掛けられない開発途上国の排水処理にも有効です。

Q：最後に読者の方々へのメッセージがありましたらお話しください。

珠坪：私たちの日常生活や産業活動の結果、多量の排水が日夜にわたって排出されています。普段はあまり気に掛けることはないとおもいますが、これらの排水処理のためにたくさんのエネルギーが消費され、エネルギー使用にともない温室効果ガスが発生しています。

水を無駄に使わない、汚さないなどの努力は個人個々でできることであり、そのような心掛けの積み重ねでエネルギーや温室効果ガスの削減もできるのです。

この機会に、日ごろどのように水を使っているか、どのように使われているか、そして汚れた水がどのようにして浄化、処理されているか等について考え直すきっかけになっていただければ幸いです。

処理水質	処理時間	余剰汚泥発生量	処理エネルギー
◎ BOD 5 ～ 10 mg/L 好気性微生物を利用	△ 10 ～ 12 時間 遅い	× 0.5 kg/gBOD 多量の余剰汚泥が発生	× 0.5 ～ 0.6 kWh/m ³ 処理エネルギー大
△ BOD 50 ～ 100 mg/L 嫌気性微生物利用	○ 5 ～ 8 時間 やや遅い	◎ 0.07 kg/gBOD 余剰汚泥の発生が少ない	◎ 0.07 kWh/m ³ (好気性処理に比し) 87%削減
◎ BOD 5 ～ 10 mg/L 嫌気性処理の効率化と無曝気 後段好気性処理との組合せ	◎ 2 ～ 8 時間 速い (高速処理、省スペース)	◎ 0.08 kg/gBOD 余剰汚泥の発生が少ない	◎ 0.06 ～ 0.13 kWh/m ³ (好気性処理に比し) 75%削減

●有機物濃度 BOD

BOD は Biochemical Oxygen Demand (生物化学的酸素要求量) の略で、好気性微生物によって分解される有機物量を微生物による酸素消費量 (mg/L) として示したものです。排水処理後の処理水は、河川等に放流されるため、処理水の流入により河川水の酸素が消費され魚類等が死滅しないよう、処理水の BOD 濃度の上限が水質汚濁法等によって定められています。

グラニューール汚泥床メタン発酵

低濃度/低・常温の有機性排水を対象としたメタン発酵での基礎技術の確立とともに、実証プラントを建設し

●ラボにおける技術開発

「グラニューール汚泥床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確立」

ラボスケールリアクターを研究室に設置。嫌気性微生物を高密度に凝集したグラニューール生物膜を用いて排水処理を行う基礎技術（処理プロセス）の開発を行うとともに、嫌気性微生物の特性（群集構造・基質代謝機構）の解明を行ってきました。その結果、常温に対応可能なメタン生成細菌群を生物膜内に保持する方法や、低有機物濃度の条件下においてもメタン生成細菌の活性を維持する運転方法（グラニューール汚泥床法、間欠処理水循環法等）を確立しました。

最終的な結果として、低濃度排水（0.3～1.0 gCOD/L）の無加温（10～15℃）処理において、従来法の数倍の高速処理（1～4時間）を達成、世界最高レベルの処理能力を実現しています。また後段に無曝気好気処理のリアクターを設置し、十分な水質を得ることも可能となりました。現在は技術の実用化を目指し、実産業排水（製糖排水）を用いた性能評価試験を行っているところです。

実産業排水処理試験の条件

処理時間：
前段嫌気性処理 2h
後段好気性処理 1h
室温（水温）：20℃
排水濃度：0.4～0.5 gCOD/L

前段嫌気性処理
（間欠処理水循環グラニューール汚泥床：IR-GSB）



グラニューール状生物膜



低温対応メタン生成細菌の集積化

実産業排水（低濃度、常温）






嫌気性処理水

後段無曝気好気性処理（DHSリアクター）

嫌気性処理水

空気（自然通気）

最終処理水

流入

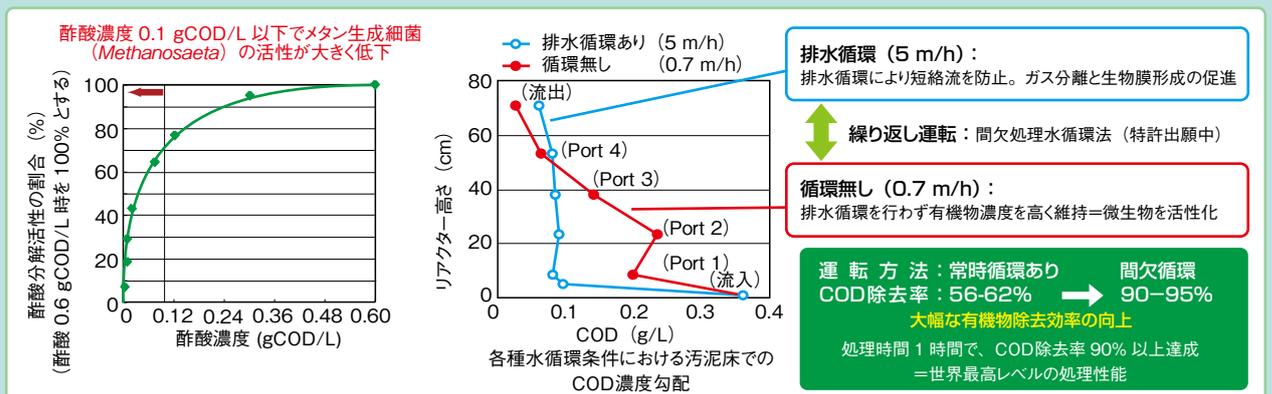
間欠的な排水循環

スポンジ：微生物付着担体

スポンジ担体の上部より嫌気性処理水を滴下するだけで、空気中の酸素を排水中に取り込みつつ、担体に付着した好気性微生物の働きで排水の浄化が進行します。極めてエネルギー消費が少なく、水質も良好です。

- ・曝気動力不要
- ・残存有機物除去
- ・アンモニア酸化
- ・溶存メタン除去

■メタン生成細菌の酢酸資化特性を考慮した運転の最適化





処理技術の開発と実証処理試験

酵処理法の開発にあたっては、研究室（ラボレベル）で試験運転によるデータ収集を行ってきました。

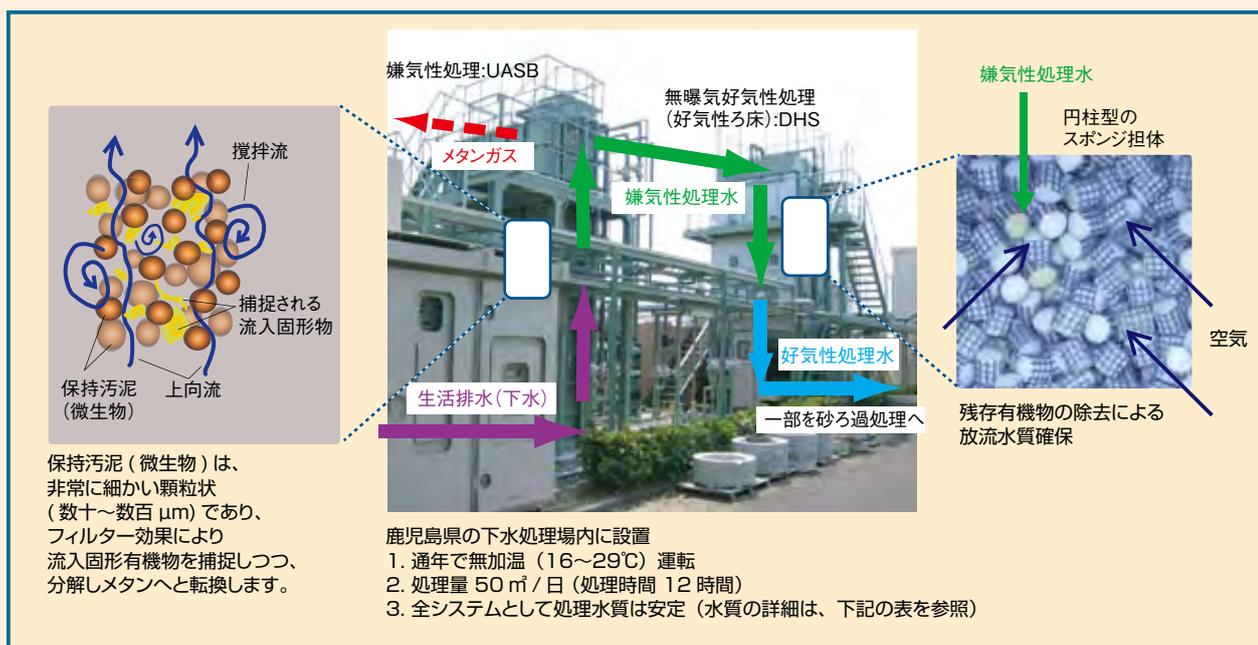
●実証プラント建設による排水処理試験とデータ収集 「嫌気性処理と無曝気好気性処理との組み合わせによる生活排水の実証処理試験」

生活排水（下水）は有機性排水の大半を占め、水洗トイレ由来の固形性有機物が主成分です。また水質や水温の変動も大きいため、その状況に適した技術の開発が必要です。このような背景のもとに、今回開発した嫌気性処理法と省エネルギー型好気性処理法との組み合わせによる実証処理試験を鹿児島県の下水処理場にパイロットプラントを建設して行いました。

その結果、年間を通して無加温（16～29℃）で良好な処理水質を維持した上で、活性汚泥法に比較して

約70%以上の消費エネルギー削減を達成しました。また低温下でも嫌気性処理を安定的に行うための運転条件を見出すことができるなど大きな成果を得ています。

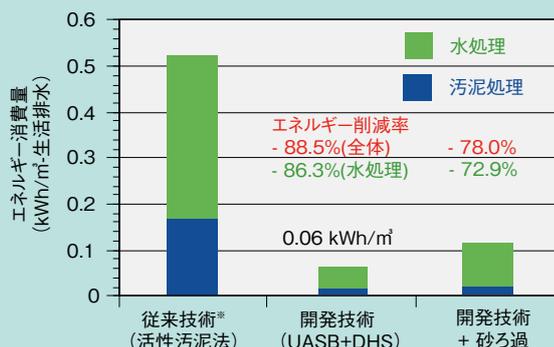
現在、開発途上国では生活排水による水環境汚染が問題となっていますが、排水処理に要するエネルギー（運転コスト）を十分に確保できない等の理由から、活性汚泥法だけでは対応できない状況にあります。本研究成果を開発途上国での排水処理にも反映させ、水環境を含めた地球環境の保全に役立てていきたいものです。



■実証プラントにおける生活排水の処理水質とエネルギー消費量の比較表

	処理水質 (mg/L)	
	全 BOD	SS (固形物)
従来法 (活性汚泥法)	8	5
開発技術 (UASB+DHS)	11	15
開発技術+砂ろ過	5	5

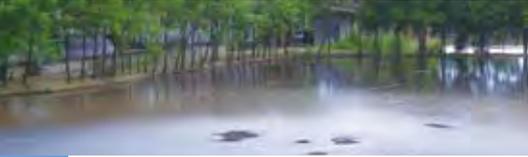
処理水質：運転期間後半（約 300 日）での平均、水温 16～29℃の無加温運転



※小規模処理施設（10,000 m³/日未満）

嫌気性排水処理（メタン

低濃度有機性排水を対象にした無加温メタン発酵処理技術を開発。曝気するとともに、最終生成物としてメタンガス（エネルギー）を回収する「省」



■世界では

メタン発酵（Methane Fermentation）とは、酸素の無い嫌気条件下で複数種の嫌気性細菌の代謝作用により有機性排水・廃棄物等に含まれる有機物をメタン（ CH_4 ）と炭酸ガス（ CO_2 ）にまで分解する反応の総称です。メタンは天然ガスの主成分であるため、エネルギーとしての利用が可能であり、有機性廃棄物の資源化技術としても着目されています。また、水中に酸素を送り込むための曝気動力が不要で、余剰汚泥（排水処理に伴い発生する増殖菌体）の発生量も少ないため省エネルギー型の処理法として知られています。特に、畜産廃棄物や生ごみ、余剰汚泥等の有機性廃棄物の処理において同様な原理を用いた処理技術は嫌気性消化（Anaerobic Digestion）として知られ、すでに100年以上の応用の歴史があります。

メタン発酵の排水処理への適用については、1980年代、オランダを中心とする国家的な技術開発プロジェクト等の推進により、現在、産業排水処理で広く用いられている上昇流嫌気性汚泥床法（Upflow Anaerobic Sludge Blanket:UASB法）の基礎が確立されました。その後、1980年代後半～1990年代には、食品系の産業排水を中心として世界的に技術の普及が図られました。またブラジル、メキシコ、インドなど熱帯地域の開発途上国では、維持管理の簡便さやコストの安さから、嫌気性処理（UASB法）が都市下水処理に適用されています。

■国内では

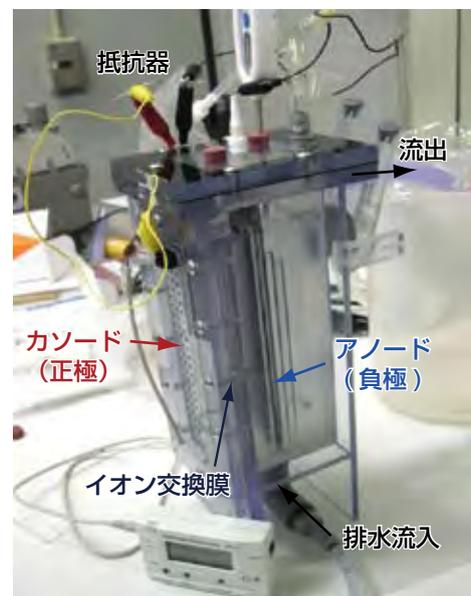
近年、地球温暖化防止、循環型社会の形成、バイオマス利用等の様々な観点から、メタン発酵技術の重要性・有用性が認識され、技術開発が国内においても進んでいます。特に廃棄物処理では、1990年代後半から、「汚泥再生処理センター事業（し尿、浄化槽汚泥等の処理）：旧厚生省」「食品リサイクル法（食品系廃棄物

処理）：農林水産省、環境省、経済産業省（3R政策）」など国策としての事業推進がなされています。2002年12月に閣議決定された「バイオマス・ニッポン総合戦略」には下水汚泥を含む廃棄物系バイオマスのエネルギーまたは製品としての利用推進と技術開発・実用化推進等が盛り込まれています。

有機性排水処理へのメタン発酵技術の適用は、省エネルギー、汚泥削減の要求が高い産業排水に対して1990年代より積極的になされてきました。当初は、欧州からの技術導入が主でしたが、近年では日本独自のメタン発酵処理技術の開発と適用がなされてきています。現在、中・高濃度の産業排水（食品の製造や加工に関わる排水等）の処理に嫌気性処理UASB法が広く用いられており、日本においても200基以上が稼働しています。

■国立環境研究所では

量的に多く、低有機物かつ常温（ $10 \sim 25^\circ\text{C}$ ）で排出される生活排水や食品加工等の産業排水に対しては、嫌気排水処理の鍵となるメタン生成細菌などが不



●微生物燃料電池の基礎研究も開始

発酵)技術の研究動向

よる排水処理と余剰汚泥の処理に要していたエネルギー消費を大幅に削減
「創」エネルギー型の資源循環型排水処理技術の実用化を進めています。



活性化してしまうため省エネルギー処理であるメタン発酵技術の適用が困難でした。

私たちは、メタン発酵処理技術の適用がなされていない、これらの低濃度排水の無加温処理に対応可能な、排水処理技術（グラニュール汚泥床法）やその制御方法などの開発に、海外の研究機関や民間企業と連携して取り組んでいます。

開発を行っているメタン発酵処理法は、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排水処理分野での技術導入の要望が高く、現在実用化を見据えた研究に移行しています。技術の実用化がなされれば、現状の好気性排水処理に対して70%以上もの消費エネルギーの削減が可能になり、水環境保全だけでなく、地球温暖化防止にも大きく寄与できます。

この間、特許出願4件（特許公開2008-36529、メタン発酵による排水処理方法及び装置他）、論文発表15件、学会での口頭・ポスター発表58件など、多くの研究成果を発表してきました。嫌気性排水・廃棄物処理に関する国際会議（Anaerobic Digestion 2007）において高い評価も得ています。また、第41回環境工学研究フォーラム自由投稿セッション賞（2005年）を受賞。NEDO産業技術研究助成事業（2003～2008年）、国立環境研究所特別研究（2006～2008年）、環境省環境技術開発等推進費（2008～2010年）等の競争的資金を得て研究開発を推進してきました。

また、次世代の省・創エネルギー型排水処理技術としての期待が持たれる微生物燃料電池（MFC = Microbial Fuel Cell）に関する基礎研究も開始しました。微生物が有機性排水を分解して自らのエネルギーを獲得する際の代謝能力に注目して、有機物の化学エネルギーを電気エネルギーに変換させるのが微生物燃料電池です。処理にかかる消費エネルギーも少なく、効率的な発電が可能などの優れた特長を有しており、今後の研究成果が期待されます。

■ アジア地域における排水処理の支援

アジア地域の経済発展はめざましく、それに伴い1次・2次産業由来の有機性排水（製糖排水、染色排水、ゴム製造排水、パームオイル製造排水等）の排出量も増大しています。特に、東南アジア地域では需要拡大にともないバイオエタノールなどの生産量が急増しているだけに、有機性排水処理をいかに効率よく行うかが大きな課題となっています。

バイオエタノールの生産原料としては、主に廃糖蜜（サトウキビより砂糖を生産する際に排出される廃液）とキャッサバ（イモ類）が用いられており、例えば廃糖蜜を原料とするエタノール生産では、生産エタノール量の約10倍もの高有機物濃度廃液が排出されます。

これらの廃液は、嫌気池（安定化池）などで処理される場合がほとんどですが、処理時間が長く温室効果ガスであるメタンを大気中に放散する要因となっています。現在、国立環境研究所の特別研究として糖蜜系廃液の適切処理技術の開発を進めています。海外研究機関と連携して、水環境汚染の防止や嫌気池からの強温室効果ガスの発生を抑制する、開発途上国にも普及可能な循環型の廃液処理システムの開発を目指しています。



●生活排水への嫌気性処理技術（UASB法）の適用例（インド）。処理水質が不十分なため、水質維持のための適切な運転方法や後段処理技術の導入が求められている。

『低濃度有機性排水の無加温メタン発酵処理技術／ 産業・生活排水の「省」「創」エネルギー処理』技術開発の歩み

本号で紹介した研究は 2003 年以降、7 年間にわたって技術の高度化に取り組み、現在も継続しています。

2003 年 予備実験の結果をもとに、嫌気性生物膜を用いた省・創エネルギー型排水処理技術開発に関する研究提案を平成 15 年度 NEDO 産業技術研究助成に申請。採択後の 2003 年 10 月から本格的な研究を開始。

2004 年 グラニュール汚泥床法の適用に着手。適度な有機物負荷と運転期間中の微生物滞留時間の維持により、低水温（10～15℃）、低有機濃度（0.6～0.8 gCOD/L）排水の効率的処理の可能性を見出す。

2005 年 低濃度排水のメタン発酵処理において、なぜ微生物の不活性化を招くかの要因を特定。メタン発酵処理水の後段処理法の検討も行き、処理水質確保にも目処をたてる。

2006 年 開発技術の優れた菌体保持機能により、低温対応のメタン生成細菌“*Methanospirillum*”の排水処理利用を可能に。民間プラントメーカーと連携し、NEDO 事業「無曝気・省エネルギー型次世代水資源循環技術の開発」を受託。国立環境研究所特別研究「省エネルギー型水・炭素循環処理システムの開発」を開始。

2007 年 グラニュール汚泥床の新規運転方法である「間欠処理水循環」を考案。低濃度排水（0.4 gCOD/L）の高速（処理時間 1～1.5 時間）、高効率処理（COD 除去率 90%以上）を実現し、実用化への道筋をつける。

2008 年 民間企業との連携により、精製糖排水の処理試験を開始するなど、技術実用化への具体的検討を開始。環境省事業「クリーン開発メカニズム適用のためのパームオイル廃液（POME）の高効率新規メタン発酵プロセスの創成に関する研究」を開始。

2009 年 国立環境研究所特別研究「資源作物由来液状廃棄物のコベネフィット型処理システムの開発」を開始。

この研究は以下の組織・スタッフにより実施されてきました。

< 研究担当者 >

水と環境研究領域 水環境研究室

珠坪一晃、富岡典子、山村茂樹、對馬育夫（現・東京大学）、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

< 研究協力機関 >

東北大学、広島大学、長岡技術科学大学、長岡工業高等専門学校、岐阜工業高等専門学校、三井製糖株式会社、

Khon Kaen University（タイ）



生活排水や産業排水は、経済成長や生活様式の変化に伴い、量的に増加を続けてきました。好気性微生物による排水処理技術の普及により、これらの排水は適切な処理が行われ、我が国の水環境は健全な状態に保たれています。

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あるといえます。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、既存技術である好気性処理法の普及だけでは対応できない状況にあります。

国立環境研究所では、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、積極的に国内外の研究機関と連携を図り、独自の嫌気性排水処理法（メタン発酵処理技術）の開発に取り組んできました。また、実証処理試験などを通じて技術の有効性を評価し、実用化のための道筋を付けつつあります。

本号で紹介する、有機性排水処理に関する研究の最前線を通して、水環境および地球環境の保全に関する理解が進むことを期待しています。

2010年1月
理事長 大垣眞一郎

環境儀 No.35

—国立環境研究所の研究情報誌—

2010年1月31日発行

編集 国立環境研究所編集委員会

(担当 WG:村上 正吾、珠坪 一晃、橋本 征二、伊藤 智彦、植弘 崇嗣、滝村 朗)

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 16-2

問合せ先 (出版物の入手) 国立環境研究所情報企画室 029 (850) 2343

(出版物の内容) // 広報・国際室 029 (850) 2310

環境儀は国立環境研究所のホームページでもご覧になれます。

<http://www.nies.go.jp/kanko/kankyogi/index.html>

編集協力 株式会社ブルーホップ

〒101-0041 東京都中央区京橋 2-13-10 (京橋 MIDビル B1F)

無断転載を禁じます

「環境儀」既刊の紹介

NO.1	環境中の「ホルモン様化学物質」の生殖・発生影響に関する研究	2001年 7月
NO.2	地球温暖化の影響と対策— AIM: アジア太平洋地域における温暖化対策統合評価モデル	2001年 10月
NO.3	干潟・浅海域—生物による水質浄化に関する研究	2002年 1月
NO.4	熱帯林—持続可能な森林管理をめざして	2002年 4月
NO.5	VOC—揮発性有機化合物による都市大気汚染	2002年 7月
NO.6	海の呼吸—北太平洋海洋表層のCO ₂ 吸収に関する研究	2002年 10月
NO.7	バイオ・エコエンジニアリング—開発途上国の水環境改善をめざして	2003年 1月
NO.8	黄砂研究最前線—科学的観測手法で黄砂の流れを遡る	2003年 4月
NO.9	湖沼のエコシステム—持続可能な利用と保全をめざして	2003年 7月
NO.10	オゾン層変動の機構解明—宇宙から探る 地球の大気を探る	2003年 10月
NO.11	持続可能な交通への道—環境負荷の少ない乗り物の普及をめざして	2004年 1月
NO.12	東アジアの広域大気汚染—国境を越える酸性雨	2004年 4月
NO.13	難分解性溶存有機物—湖沼環境研究の新展開	2004年 7月
NO.14	マテリアルフロー分析—モノの流れから循環型社会・経済を考える	2004年 10月
NO.15	干潟の生態系—その機能評価と類型化	2005年 1月
NO.16	長江流域で検証する「流域圏環境管理」のあり方	2005年 4月
NO.17	有機スズと生殖異常—海産巻貝に及ぼす内分泌かく乱化学物質の影響	2005年 7月
NO.18	外来生物による生物多様性への影響を探る	2005年 10月
NO.19	最先端の気候モデルで予測する「地球温暖化」	2006年 1月
NO.20	地球環境保全に向けた国際合意をめざして—温暖化対策における社会科学的アプローチ	2006年 4月
NO.21	中国の都市大気汚染と健康影響	2006年 7月
NO.22	微小粒子の健康影響—アレルギーと循環機能	2006年 10月
NO.23	地球規模の海洋汚染—観測と実態	2007年 1月
NO.24	21世紀の廃棄物最終処分場—高規格最終処分システムの研究	2007年 4月
NO.25	環境知覚研究の勧め—好ましい環境をめざして	2007年 7月
NO.26	成層圏オゾン層の行方—3次元化学モデルで見るオゾン層回復予測	2007年 10月
NO.27	アレルギー性疾患への環境科学物質の影響	2008年 1月
NO.28	森の息づかいを測る—森林生態系のCO ₂ フラックス観測研究	2008年 4月
NO.29	ライダーネットワークの展開—東アジア地域のエアロゾルの挙動解明を目指して	2008年 7月
NO.30	河川生態系への人為的影響に関する評価—よりよい流域環境を未来に残す	2008年 10月
NO.31	有害廃棄物の処理—アスベスト、PCB処理の一翼を担う分析研究	2009年 1月
NO.32	熱中症の原因を探る—救急搬送データから見るその実態と将来予測	2009年 4月
NO.33	越境大気汚染の日本への影響—光化学オキシダント増加の謎	2009年 7月
NO.34	セーリング型洋上風力発電システム構想—海を旅するウインドファーム	2009年 10月

「環境儀」

地球儀が地球上の自分の位置を知るための道具であるように、「環境儀」という命名には、われわれを取り巻く多様な環境問題の中で、われわれは今どこに位置するのか、どこに向かおうとしているのか、それを明確に指し示すべしという意図が込められています。「環境儀」に正確な地図・行路を書き込んでいくことが、環境研究に携わる者の任務であると考えています。

2001年7月 合志 陽一
(環境儀第1号「発刊に当たって」より抜粋)



このロゴマークは国立環境研究所の英語文字N.I.E.Sで構成されています。
N=波(大気と水)、I=木(生命)、E=Sで構成される○で地球(世界)を表現しています。
ロゴマーク全体が風を切って左側に進むように動くのは、研究所の躍動性・進歩・向上・発展を表現しています。