

有機性汚染物質を資源化，無害化するバイオリアクタ技術

Bioreactor Systems to Produce Valuable Resources from Organic Waste and Detoxify Organic Hazardous Materials

池田 理夫
IKEDA Michio

松代 武士
MATSUSHIRO Takeshi

足利 伸行
ASHIKAGA Nobuyuki

自然の生態系では物質が過不足なく循環し、理想的な環境を形作り、そこでは微生物が大きな役割を担っている。しかし、われわれ人類の活動によって、生態系は本来の処理能力をはるかに超えた負荷を受け続け、様々な環境問題が生じている。

当社では、微生物の能力を取り出し効率化することで、有機性汚染物質から有用物質を生産・無害化する技術の開発を進めてきた。ここでは、微生物を用いて生ごみを分解し、有用なバイオガスを回収する生ごみバイオガス化システムと、難分解性物質である有機塩素化合物を分解・無害化するバイオリアクタについて述べる。

In the natural ecosystem, materials have been circulated without deficiency and the harmony of the environment has been maintained over a long period of time. Microorganisms have played an important role in this process. Recently, however, human activities have overloaded the natural ecosystem, far exceeding its processing capacity and giving rise to serious environmental problems.

Toshiba has been developing technologies to produce valuable resources from organic waste and detoxify organic hazardous materials by stimulating the natural capacities of microorganisms. Here, we present our biogas production system for kitchen waste and our bioreactor system for the decomposition of chlorinated organic compounds.

1 まえがき

本来、地球の生態系では、食物連鎖の中で物質は過不足なく循環し、理想的な環境を形作っていた。このような物質循環の中で、微生物は老廃物や排泄(はいせつ)物、更には有害物質の分解などに関与し、この生態系における物質の循環に重要な役割を担ってきた。

ところが、産業革命以降の大量消費社会の到来と生活様式の激変に伴う人口の急増とによって、われわれ人類は地球生態系の処理能力をはるかに上回る大量の廃棄物を排出し、環境へ大きな負荷を掛け続けた。そして、その負荷は物質循環のアンバランスを引き起こし、様々な形での環境の悪化として問題になってきている。

当社では、より良い環境の実現を目指して、自然の生態系内で発揮されている微生物の能力を取り出し、その効率を向上させることにより生活排水や廃棄物を資源化、無害化する技術の開発を進めてきた。

ここでは、微生物を用いて生ごみを分解し、有用なバイオガスを回収する生ごみバイオガス化技術と、難分解性物質である有機塩素化合物の分解・無害化技術について述べる。

2 生ごみバイオガス化技術

生ごみは、一般家庭をはじめ外食産業やホテル、食品メーカーなどから年間2,000万t(トン)排出されており、それら

の大部分が焼却後、埋立て処分されているのが現状である。

しかし、資源循環型社会システム構築への取組みが推進されるなか、コンポスト^(注1)化、バイオガス化などの技術開発が行われている。特に、微生物によって生ごみをバイオガス(主成分はメタン)に分解し、エネルギー回収を行うバイオガス化システムでは、得られたバイオガスを燃料電池に供給することにより、ダイオキシンや窒素酸化物を排出しないクリーンな高効率発電システムの構築が可能なシステムである。

従来技術では、生ごみを水などで希釈してから処理していたが、当社が独自に開発中の生ごみバイオガス化システムでは、生ごみを希釈することなく処理可能となった。以下、システムの概要と処理性能について述べる。

2.1 システムの構成

当社生ごみバイオガス化システムの構成を図1に示す。

このシステムは、生ごみを破碎しスラリー(懸濁液)化する貯留槽、バクテリアによって生ごみをメタンに分解するメタン化槽、バクテリアと処理水を分離する汚泥濃縮槽、バイオガスを電気と熱に変換するコージェネレーション設備、分離液を2次処理し河川放流する好気性処理設備から構成される。

2.2 中温発酵技術

当社技術の特長としては、まず、37℃付近の中温域で活性の高い中温メタン菌を使用していることが挙げられる。

中温メタン菌はアンモニアに対する耐性が高く、通常の生

(注1) 生ごみや家畜の糞尿などを堆積し、発酵させて作る有機質の肥料。

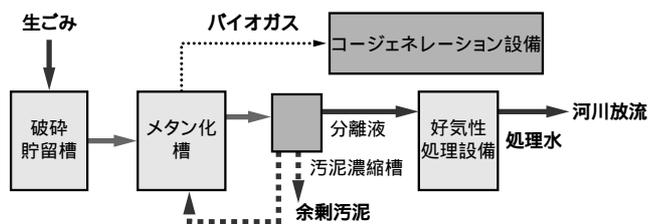


図1. 生ごみバイオガス化システムの構成 中温メタン発酵と汚泥濃縮による分離技術を組み合わせることにより、微生物の高濃度維持を実現し、従来システムに比べ1/2のコンパクト化が図られた。

Configuration of biogas production system for kitchen waste

ごみバイオガス化システムで利用されている高温メタン菌(最適温度が55 付近)のおよそ2倍のアンモニア濃度である5,000 mg/L(リットル)まで安定してメタン発酵を行える特長を持っている¹⁾。

一般に生ごみバイオガス化処理では、メタン化槽内にアンモニアが発生し、生ごみを希釈することなく処理した場合にはメタン化槽内のアンモニア濃度はおよそ5,000 mg/Lとなる。このため、従来の高温メタン菌を用いたシステムでは、生ごみを水などで2倍程度に希釈する必要があり、装置が大型化していた。しかし、中温メタン菌はアンモニア耐性が高いので、生ごみを希釈することなく処理可能となり、従来技術に比べてシステムのコンパクト化が可能となった。

2.3 加水分解過程の促進

生ごみバイオガス化における当社技術のもう一つの特長として、貯留槽を加温することにより加水分解過程を促進する技術(以下、2相プロセスと呼ぶ)が挙げられる。

生ごみガス化原理の概念を図2に示す。生ごみバイオガス化処理は、加水分解 酸発酵 メタン発酵の順で進む逐

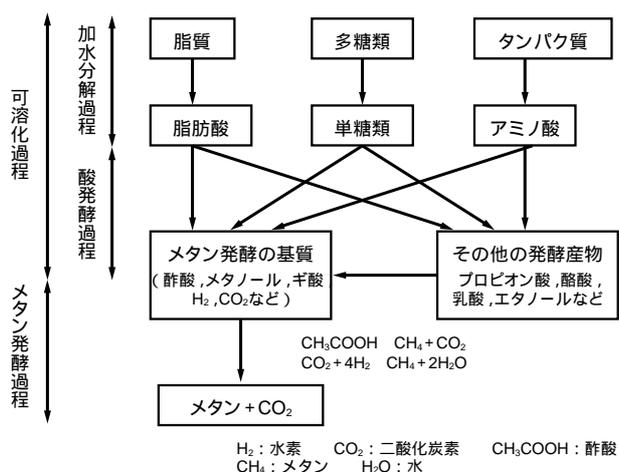


図2. メタン発酵における分解過程 有機物は加水分解過程、酸生成過程及びメタン生成過程という多段階の逐次反応を経由して、メタンに分解される。

Methane fermentation process of organic material

次反応である。従来のシステムでは、これらの反応を一つの処理槽で進めていた(以下、単相プロセスと呼ぶ)ため、加水分解反応が全体の反応速度を律速(速度を決めること)し、反応効率が悪いという問題点があった。

単相プロセスと2相プロセスの性能を比較した結果を図3に示す。当社技術である2相プロセスは、従来技術である単相プロセスで急激な除去率の低下が観察された12 kg/m³/dにおいても92.4%の除去率を保った。

2相プロセスは、貯留槽を加温することで律速反応である加水分解反応を促進し、それに伴って固形成分の可溶化が促進され、システム全体としての分解効率が向上する。

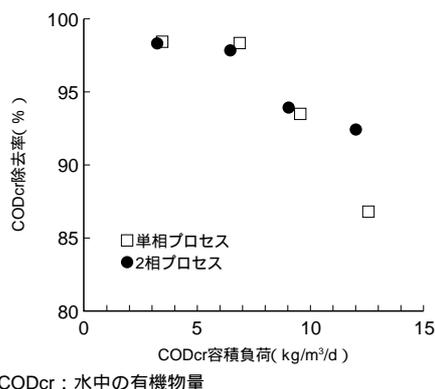


図3. 単相プロセスと2相プロセスにおける有機物除去率の比較

2相プロセスを採用することにより、固形成分の可溶化が促進され、有機物の分解速度が向上した。

Removal efficiencies of CODcr in single-phase and two-phase processes

3 有機塩素化合物分解技術

トリクロロエチレン(以下、TCEと略記)などの有機塩素化合物は、化学的に安定で優れた脱脂能力を持つことから、かつては機械部品の脱脂洗浄剤やドライクリーニングの洗浄剤として年間数万tが製造・消費されていた。しかし、近年各地の地下水から環境基準値を超える濃度の有機塩素化合物が検出されるに至り、有機塩素化合物による土壌及び地下水汚染の浄化・修復が急務となっている。

当社では、微生物の能力を用いた、環境負荷が少なく、処理コストの低い浄化技術の開発を目的として、自然界から有機塩素化合物分解能を持つ独自の微生物を分離した。以下に、分解菌と土壌及び地下水浄化用バイオリアクタシステムについて述べる。

3.1 有機塩素化合物分解菌の探索

分解菌は自然界に生育する微生物をそのまま取り出すことを目的として、各地で収集した土壌及び地下水サンプルから、TCEに対する耐性を持つ微生物を分離し、次にそれらについて、TCE分解能を評価することで選抜した。その結

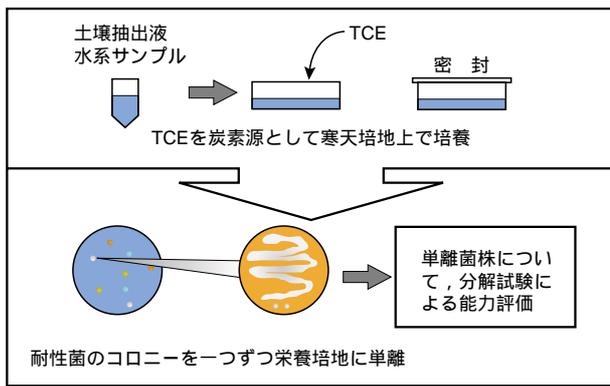


図4. 有機塩素化合物分解菌の探索法 環境中から、まずTCEに対する耐性微生物を分離し、それらについて有機塩素化合物分解能を評価することで、効率よく分解菌の探索が行える。
Schema for isolation of chlorinated organic compound-decomposing microbes

果、TCE耐性菌230株を得て、その中からTCE分解能を持つ細菌YMCT-001株、YMCT-002株の2株を分離することができた。

分解菌探索のスキームを図4に示す。

詳細な同定試験の結果から、この2株は同じ種に属するグラム陽性の好気性短桿菌(たんかんきん)であり、*Janibacter*属の新種であると判断し、新種*Janibacter brevis*(以下、*J.brevis*と略記)と命名した⁽²⁾。また、同定試験と平行して実施した人体に対する安全性評価試験の結果、*J.brevis*には感染性、病原性、体内生残性及び毒性は認められないことを確認した⁽³⁾。

*J.brevis*の走査型電子顕微鏡写真を図5に示す。

3.2 分解菌の特性

*J.brevis*による有機塩素化合物分解試験の結果を図6に



図5. *J. brevis*の走査型電子顕微鏡像 YMCT-001株、YMCT-002株は、*Terrabacter*属に近縁の*Janibacter*属の新種として*J. brevis*と命名した。
SEM micrograph of *J. brevis*

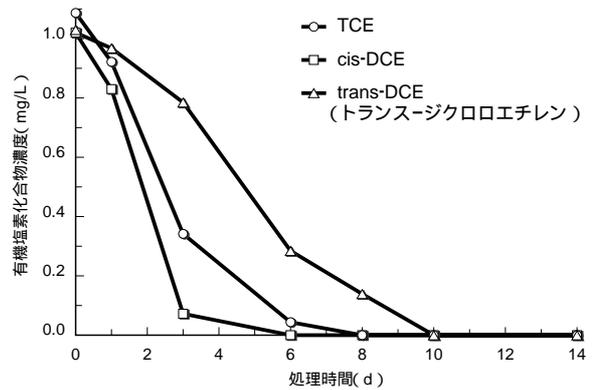


図6. *J. brevis*による各種有機塩素化合物の分解 *J. brevis*は、特定の活性化処理を施さなくても、各種有機塩素化合物を分解することができる。
Decomposition of various chlorinated organic compounds by intact *J. brevis*

示す。*J. brevis*は、従来の分解菌では必要であった活性化処理を行わなくても、TCE、シス-ジクロロエチレン(以下、cis-DCEと略記)など複数の有機塩素化合物1 mg/Lを10日以内に分解した。また、*J. brevis*による有機塩素化合物の分解はフェノールの添加によって活性化されることから、この反応は、フェノールなどの芳香族を分解する酵素が有機塩素化合物分解に関与する“共代謝”による分解であると推測された。フェノールで活性化した*J. brevis*による有機塩素化合物分解試験の結果を図7に示す。

フェノールによる活性化処理を行うことで*J. brevis*の分解能は活性化され、TCE、cis-DCE(各20 mg/L)が共存する場合でも両物質ともに3日以内に検出下限以下まで分解し、活性化処理を行わない場合に比べ著しい活性の向上が認められた。

*J. brevis*によるTCE分解を実施した系内からは、TCE分

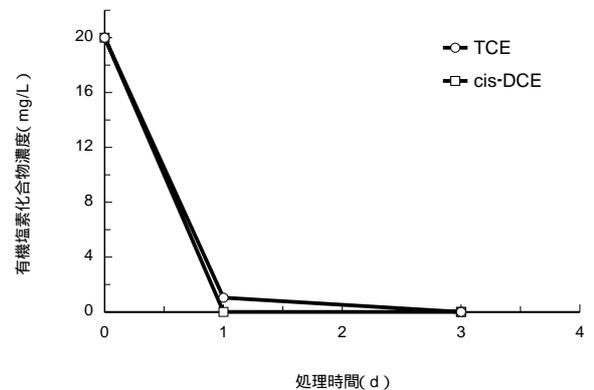


図7. 活性化処理後の*J. brevis*による有機塩素化合物の分解 *J. brevis*の有機塩素化合物分解能は、フェノールによる活性化処理により著しく活性化される。
Decomposition of chlorinated organic compounds by enzyme-induced *J. brevis*

解の中間産物とされる有害な塩素化酢酸は検出されておらず、かつ、塩素イオン濃度の増加が検出されたことから、TCEは最終的には炭酸ガスと塩素イオンとに完全に分解されたものと推測する。

このように、当社が独自に見いだした有機塩素化合物分解菌*J.brevis*は、人体に対して安全な細菌であり、有機塩素化合物の分解においても有害な反応生成物は生成しない。また、通常の状態でも有機塩素化合物を分解でき、その分解活性はフェノール処理によって容易に活性化できるという特長を持っている。これらのことから、*J.brevis*を用いれば、環境負荷が低く、また処理効率の高い土壌・地下水浄化技術を実現できるものと考えられた。

3.3 有機塩素化合物処理バイオリアクタ

*J.brevis*を用いてガス状の有機塩素化合物を分解及び無害化するバイオリアクタシステムの模式図を図8に示す。このバイオリアクタの特長は、*J.brevis*を固定化担体に担持^(注2)

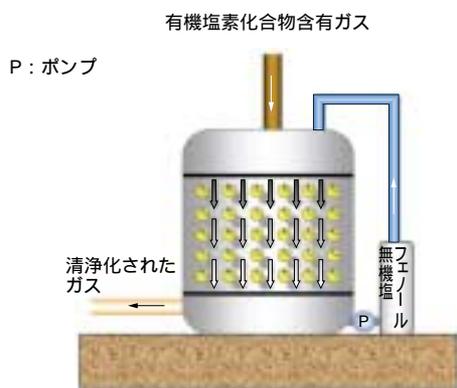


図8. バイオリアクタシステムの模式図 固定化担体による分解菌の高密度充填とフェノールによる活性化条件の最適化により、ガス状有機塩素化合物を効率よく分解及び無害化する。

Conceptual diagram of bioreactor system

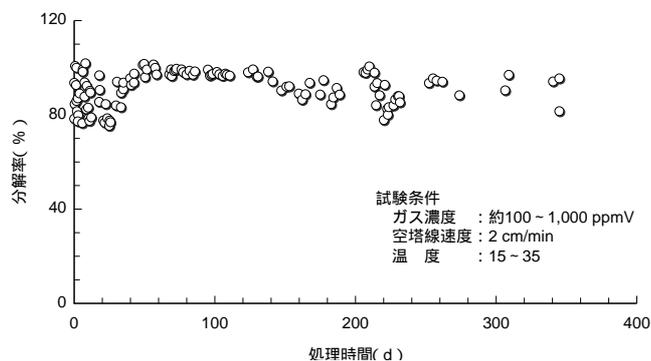


図9. ベンチスケールバイオリアクタシステムによる処理試験結果 処理条件の最適化により、1年以上にわたって環境の変化にかかわらず安定した処理性能を確認した。
Decomposition of gaseous chlorinated organic compounds by bioreactor system

(注2) 担体に微生物を載せたり、固定化すること。

することによって、リアクタ内の菌体量を高めて有機塩素化合物の分解効率を向上させたことである。更に、この分解活性を維持するために、フェノールが無機塩液体培地とともに定期的に供給される。

ベンチスケール規模のバイオリアクタシステムを用いた連続処理試験の結果を図9に示す。フェノール供給による活性維持方法を最適化することで、1年以上にわたり安定した処理性能を維持できた。リアクタ内では年間の環境変化にかかわらず*J.brevis*の世代交代が繰り返され、常に一定の状態が保たれるため、処理性能は固定化担体の物理的な寿命と同程度まで安定して維持できるものと考えられる。

4 あとがき

当社が開発した、生ごみバイオガス化技術と有機塩素化合物分解技術について述べた。

生ごみバイオガス化技術は、中温メタン菌の使用と2相プロセスの採用により、処理効率の向上とシステムのコンパクト化を実現した。

有機塩素化合物分解技術は、独自の分解菌*J. brevis*を自然界から取り出し、分解菌の性質、安全性及び有機塩素化合物分解特性を明らかにした。また、*J. brevis*を用いてガス状有機塩素化合物を分解するバイオリアクタを開発し、処理条件の最適化を図り、1年以上にわたり安定した性能を確認した。今後、実用化を目指して開発を進める。

文献

- 1) 李玉友・汚泥・生ごみなどの有機廃棄物の高温メタン発酵. 水環境学会誌. 21, 10, 1998, p.644-649.
- 2) Imamura, Y., et al. *Janibacter brevis* sp. nov., a new trichloroethylene-degrading bacterium isolated from polluted environments. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 50, 2000, p.1899-1903.
- 3) (株)三菱化学安全科学研究所. “試験報告 好気性細菌10N株のラットを用いた経口投与による単回投与毒性試験(試験番号: 6L208)”. 1997.



池田 理夫 IKEDA Michio

研究開発センター 環境技術・分析センター 研究主務。微生物を用いた環境保全技術の開発に従事。農芸化学学会会員。

Environmental Engineering & Analysis Center



松代 武士 MATSUSHIRO Takeshi

電力システム社 電力・産業システム技術開発センター 社会システム開発部。メタン発酵による有機性廃棄物処理システムの開発に従事。廃棄物学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



足利 伸行 ASHIKAGA Nobuyuki

社会インフラシステム社 社会・産業システム事業部 環境システム技術部主務。メタン発酵による有機性廃棄物処理システムの開発に従事。土木学会会員。

Public & Industrial Systems Div.