

## 嫌気性処理技術

多川 正 環境装置事業部  
水処理本部  
計画部  
第2計画室  
工学博士

### まえがき

近年嫌気性処理の世界において注目を浴びている微生物たちは、大気中に酸素がなかった大昔から地球に生息していた。誕生から数十億年のときを経てそれらは、活躍の場を広げつつある。つい30年前までの嫌気性処理といえば微生物は余剰汚泥の減量化や尿尿処理に実用化されていた程度であったが、近年増殖の遅い嫌気性微生物を効率よく反応器に保持し、かつ微生物と排水との接触効率を高めることが可能な様々なタイプの微生物固定型嫌気性废水处理装置の開発により、一気に普及した経緯がある。現在ではその処理対象も広範囲に及び、食品廃棄物、家畜糞尿といった、これまでは焼却・埋め立て処理されていた有機性固形物を対象とした嫌気性処理(メタンエネルギー回収)の導入も盛んである。

しかしながら、この劇的な嫌気性処理の普及とは相反して嫌気環境下における有機物の分解挙動やそれに関与する複雑な微生物とその生態系は未だに不明な点が多く、現状においても反応器の運転、計画に関しては経験的要素に依存する点が多い。今後さらなる安定・確実なプロセスの管理、微生物の持つ能力を最大限に引き出す(=高効率化)ためには、これらの知見を収集することが不可欠である。

本稿では、当社における嫌気性処理の技術と適応を確認するとともに、嫌気性処理の研究開発ではblack box的扱いをしてきた、嫌気性微生物群衆の解析について、遺伝子情報を利用した解析例について紹介する。

### 1. 嫌気性処理方式とPANBICシステム

嫌気性処理における成功の良否は、前述のとおり

いかにして増殖の遅いメタン生成菌を反応器系外流出させることなく高濃度かつ安定的に保持できかであるが、その方式を大別すると表1のように<sup>1)</sup>。また、図1に2000年度における全世界の嫌気性処理の導入実績を、(a)適応廃水種および(b)反応器の種類別に示した<sup>2)</sup>。本調査結果では総導入1330件のうち、UASBは全体の58% (775件)でトップであり、次点で固定床方式(AF)が11%(111件)、膨張床、内部循環方式などの高負荷型がそ

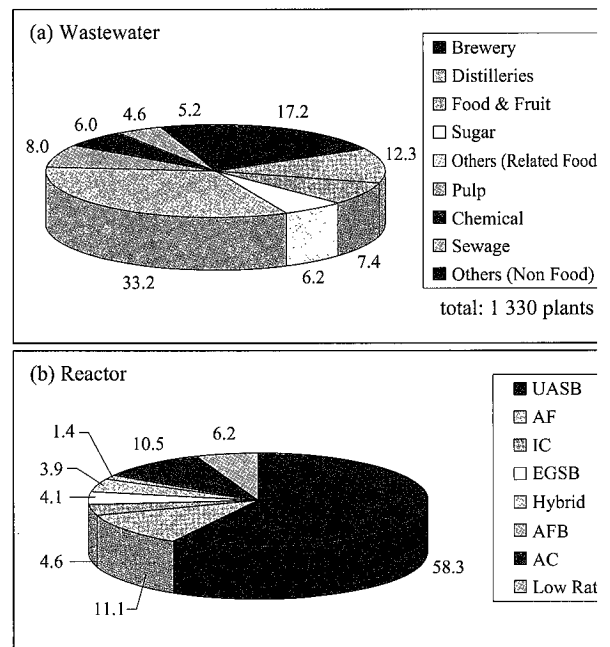


図 1 嫌気性処理設備の導入状況  
(a) 廃水種および (b) リアクタ形式  
Fig.1 Applications of full-scale anaerobic reactor built the world; (a) type of wastewater, and (b) reactor configurations

表 1 嫌気性処理技術の分類

Table1 Classification of anaerobic wastewater/waste treatment systems

Wastewater and Waste	Reactor Configurations	Principles	SP Tradename
<b>Organic Wastewater</b> <b>Easy-degradable Wastewater</b> (ex; Brewery, Food Industrial Wastewater) Suspended Solids Low Inhibitory and/or Toxicity None  <b>Refractory Wastewater</b> (ex; Leachates, Chemical Wastewater) Suspended Solids High Inhibitory and/or Toxicity High Levels	Anaerobic Pond Anaerobic Contact Process (AC) Anaerobic Sequencing Batch Reactor (ASBR)	Biomass Separation (Lamella Separators and Flotation)	PANBIC-F (Fixed-bed) 26 Users  PANBIC-G (Granule) 12 Users  PANBIC-H (High-rate) 12 Users
	Anaerobic Fixed-bed (AF) (Upflow, Downflow) Anaerobic Fluidized Bed (AFB)	Biofilms Adhesion on Fixed Packing Adhesion on Fluidized Media (GAC)	
	Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Anaerobic Baffled Reactor (ABR)	Self-immobilization Granule	
	<b>High-rate, Advanced Reactor System</b> Expanded Granular Sludge Bed (EGSB) Hybrid UASB Internal Circulation (IC)		
<b>Organic Solid Waste</b> Excess Sludge Municipal Solid Waste (MSW) Livestock Night Soil	Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR) with Post Treatment Sludge Decomposition Process (S-TE process) Activated Sludge, Biological Nutrient Removal	Complete-Mix Plus Sedimentation, Dewatering	PAMEDIS  PANBIC-BIGADAN

ぞれ4%程度で追従しており最近急速に導入実績を伸ばしている。

現状は処理対象により廃水および固形性廃棄物に分類され、その性状や嫌気性分解性により、それぞれ特徴のある反応器の中から最適なプロセスを選定する。現在のニーズとしては少ない敷地面積で高グレードの処理水が要求されるため、単位反応器当たりには保持する微生物量の多いUASBやEGSBなどの適応が多く、当社でもこれらの処理方式はPANBIC-G, Hの登録商標にて扱っており、現状24(G+H)基の納入実績がある。この高い微生物保持量は、微生物自身の持つ凝集・集塊機能を利用して沈降性の非常に優れたグラニューロ状の汚泥形成・保持することにより実現される。グラニューロの形成メカニズムについてはまだ完全には解明されていないが、微生物自身の持つ機能に依存するため、微生物に対して阻害/毒性をおよぼす物質の流入や栄養塩類不足、高濃度のSS成分の反応器内への流入はグラニューロの流出・崩壊を招き、プロセスの長期間の安定性を欠く原因となる。

このような廃水種の処理には、水質変動や阻害物質(とくに、化学工場廃水に多い)に対しても安定性の高い固定床方式が有利となり、当社でもPANBIC-Fの商標として販売している。また、固形性廃棄物に対しては処理対象によりPAMEDISおよびBIGADAN方式による対応が可能で、当社は広範囲の廃水・廃棄物種に対して適応可能な嫌気性処理技術を保有している。

## 2. 廃水・廃棄物からメタンガスまでの複雑な道のり

図2に嫌気環境下における有機物の連続代謝と関与する微生物種について示した<sup>3)</sup>。好気性微生物と

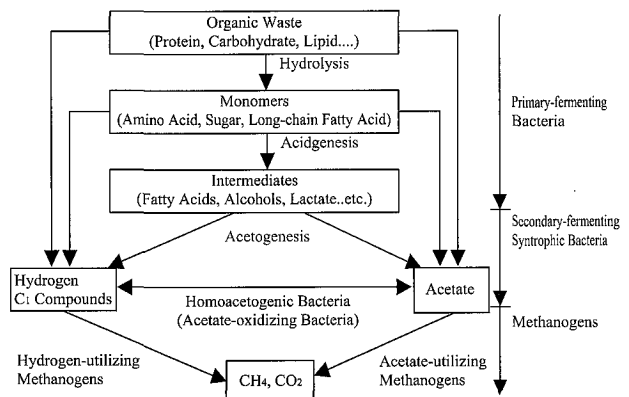


図 2 嫌気性環境下における有機物の連続代謝

Fig.2 Pathway of anaerobic biodegradation through the various trophic groups of microbes

くらべ、その嫌気性微生物の際だった特徴は、物質の分解の各ステップがまったく別の微生物種によって担われていることであり、かつそれぞれの微生物種が密接な共生関係を形成しなければ反応全体が絶対に進行しない点にある。たとえばグルコースなどの非常に単純な有機物の分解にも、有機酸を生成する発酵性微生物、生成した有機酸から酢酸および水素を生成する嫌気共生細菌、生成した水素および酢酸からメタンを生成するメタン生成細菌といった、少なくとも4~5種類の微生物の連携プレーにより分解が終了する。この点が、嫌気環境下での微生物生態の解析を困難にさせてきた大きな原因である。

## 3. グラニューロ汚泥 その高度に集積された専門家集団

グラニューロ汚泥の形成はPANBIC-G, H法の成否を決定する重要な現象である。しかしながらこれまでのグラニューロ汚泥の評価方法は沈降性や粒径といった物理化学的性状、メタン転換速度等に代表される生態学的性状、実体顕微鏡や電子顕微鏡とい

た形態学的観察などであり、グラニュール内部にて、“誰が(微生物)? 何処で? 何をやっているのか?”といった重要な情報については、モデル等からの推察でしか知ることはできなかった。

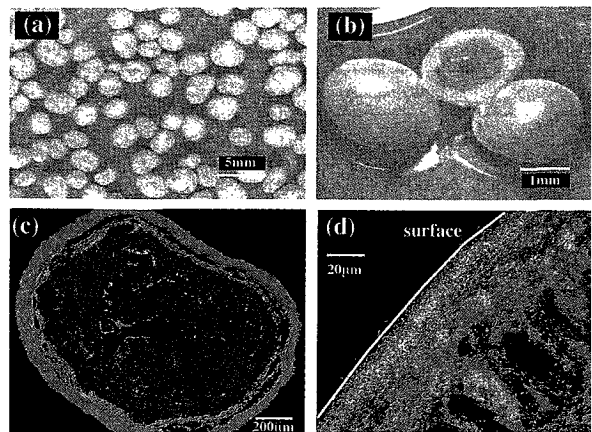
しかしながら、近年の微生物遺伝子情報データの蓄積より、グラニュール内部にて、上記の疑問に回答できる様々な解析ツールが開発されてきた。ここでその一例として16 SrRNA 遺伝子を標的としたFISH法 (Fluorescence *in situ* hybridization) を適用した結果を写真1に示した。

解析にもちいたグラニュール汚泥は直径2~3mm程度の整った粒径をしており(a), メスにて半分に切断した断面は2~3(白色, 黒色)の層状構造を示している(b)。写真(c)は真性細菌(緑: 酸生成菌)のみを特異的に検出するDNAプローブと古細菌(赤: 主にメタン生成細菌)を検出するDNAプローブを適用して二重染色した結果である。グラニュール外部は酸生成菌が多く存在し、グラニュール内部に進むにつれてメタン生成細菌が多く存在することが解り、前述の疑問に対して以下の回答がえられる。

	誰が?	何処で?	何をやっているのか?
グラニュール	酸生成菌群	表層付近	廃水から有機酸を生成
	メタン生成細菌	内部	生成した有機酸からメタンを生成

さらに、写真(d)は水素を基質として利用するメタン生成細菌(赤)と酸生成菌(緑)の二重染色結果であるが、図2でも示したとおり、有機酸の生成と同時に生じた水素を水素資化性メタン生成細菌がグラニュール表層付近に位置することですみやかに利用し、メタンを生成するといった、非常に効率のよい空間的配置を形成していることがわかる。

この、検出するプローブの組み合わせは目的に応じて自由に構成することが可能で、さらに解析の困難な嫌気性共生細菌(プロピオン酸分解共生細菌<sup>4)</sup>,  $\beta$ 酸化細菌<sup>5)</sup>など)と水素除去のパートナー(水素資化性メタン生成菌, 硫酸還元菌)といった組み合わせ解析や定量化<sup>6)</sup>, 高温性のメタン生成細菌と中温性のメタン生成細菌の識別<sup>7)</sup>, グラニュールの浮上の原因となる糸状菌の異常増殖<sup>8)</sup>といった、よりミクロな解析かつ、プロセス管理への応用にも近い解析にも適用されている。また、蛍光の強さは各微生物の活性と強い相関関係にあるため、微生物の至適濃度を大きく超えた塩(Na)濃度にて培養されたグラニュール汚泥では蛍光が点在程度しか観察されず、内部はまったく活性がない(蛍光がない)な



(a) Whole View of the Retained Granular Sludge;  
 (b) Cross Sectional View of the Sliced Granular Sludge  
 (c) and (d) Cross Sectional Views of Granular Sludge Hybridized with 16SrRNA-targeted Oligonucleotide Probes Viewed CLSM  
 (c) Hybridized with Domain *Bacteria* (EUB338, Green) Domain *Archaea* (ARC915, Red)  
 (d) Hybridized with Domain *Bacteria* (EUB338, Green) and Family-specific Probe for Hydrogen-utilizing *Methanog Methano-bacteriaceae* (MB1174, Red)

写真1 UASBリアクターにて形成されたグラニュールの生態学的構造解析

Photo 1 Microbial-ecological structure analysis of granules as developed in the UASB reactor

どの詳細な情報がえられるようになり、その解析データの意義は大きい。

## むすび

嫌気性処理技術の第2のブレイクスルーは、いにして正直な嫌気性微生物群の機嫌をとるかにかかっている。すなわち、彼らの生態学的特性を認識、握して、彼らの機嫌を損なう条件(温度, 阻害/性物質濃度, 共存化合物など)があらかじめ設備討段階で判明している場合には対策を検討することで、不幸にも発生したトラブル等に対しては現状汚泥診断で、あるいは回復操作期におけるデータ蓄積により、強力な“ソフト”的嫌気性処理技術確立されていくものと期待する。

## [参考文献]

- 1) Speece, R. E.: *Anaerobic Biotechnology for Indust Wastewaters*, Archae Press, 1996
- 2) Macarie, H.: *Wat. Sci. Tech.*, vol.42, 5-6, (2000) p.201-214
- 3) Schink, B.: *Mol. Bio. Rev.*, 61, (1997), p.262-280
- 4) Imachi, H. et al.: *Appl. Environ. Microbiol.*, 66, (2000), p.3 608-3 615
- 5) Hansen, K. H. et al: *Appl. Environ. Microbiol.*, (1999), p.4 767-4 774
- 6) Tagawa, T. et al: *Wat. Sci. Tech.*, 42, 3-4, (2000) p.77-82
- 7) 多川正他: *環境工学研究論文集*, 38, (2001), p.15 162
- 8) Sekiguchi, et al.: *Appl. Environ. Microbiol.*, 67, (2001), p.5740-5749