

優れた処理能力の秘密の一端が明らかに

# ヤクルト方式水浄化システムを支える固有の微生物群



解説 佐賀大学農学部助教授 柴谷 孝

微生物の働きを活用して生活排水や工場排水などを浄化するヤクルト方式水浄化システムの性能の高さは各地で実証されていますが、その秘密の一端はこのシステムにだけ多く住みついているサイトファーガなどの細菌群にあることが佐賀大学の柴谷孝助教授らによって解明され、今年度の日本微生物生態学会で発表されます。

このシステムの特長、新しく発見された細菌群などについて柴谷先生に解説していただきました。

## 水資源小国・日本

地球は別名「水の惑星」と呼ばれるほど水の豊かな惑星で約14億km<sup>3</sup>の水がありますが、人類が比較的容易に利用できるのはそのうちのわずか0.01%、約10万km<sup>3</sup>に過ぎないとされています。

一方、日本には「三尺流れて水清し」、「水に流す」、「糞(みそぎ)」など水の浄化能力の高さを物語る言葉があります。これは、日本は水に恵まれており、汚れ

たもの、穢れたものも水に流してしまえば自然にきれいにしてくれることを人々が知っていたからでしょう。

しかし、これはまだ日本の人口が少なく、生活様式が簡素だった時代のことです。

雨(雪)となって大地に降り注いだ水は、河川や湖沼、森林や土壌、地下水などにいったん蓄えられたあと海に注ぎ、蒸発して再び雨や雪となるという自然のサイクルの中で汚濁物質が浄化されるのですが、水の自浄能力を超えて汚濁が進むと、水は死んでしまいます。

表1 環境のBOD値

河川、湖沼のBOD値	
1 ppm	イワナ、サマメが住める
2 ppm	アユが住める
3 ppm	フナ、ハヤが住める
5 ppm	汚濁の限界
10 ppm	自浄能力の限界
20 ppm以上	河川、湖沼の腐敗が進む
生活排水のBOD値 (1人1日当たり)	
風呂・洗濯水	7~8 ppm
水洗便所排水	260 ppm
台所排水	600 ppm

表1は水質汚濁の度合いを示す指標の一つであるBOD値(生物化学的酸素要求量)を示したものです。BOD値というのは水中の有機物を微生物が分解する際

に消費する酸素の量をppmで示したもので、数値が高いほど汚濁が進んでいることを表しています。河川や湖沼の自浄能力の限界が10ppmであるのに対し、生活排水のBOD値ははるかに高く、生活排水をそのまま流していると、河川や湖沼の水の量がよほど豊富でない限り、水は自浄能力を失い腐敗してしまうのです。

日本は決して水に恵まれている国ではありません。図1は日本の年間降水量と人口1人当たりの年間降水量・水資源量を世界各国と比較したもので、日本の年間降水量は約1,700mmと世界でも恵まれています。これを人口で割った1人当たりで見ると年間約5100m<sup>3</sup>と世界平均(約22,000m<sup>3</sup>)を大きく下回り、砂漠の国と思われているイラン(約6,000m<sup>3</sup>)やサウジアラビア(約10,000m<sup>3</sup>)よりも少ないのです。しかも近年は気温の上昇などの影響もあって降雪量や降水量が減少しつつあることが心配されています。

現在、日本では資源の有効利用と環境保護の観点から、資源ごみなどのリサイクル運動が行われていますが、水もまた重要な資源であり、一度使った水をきれいにして身近な環境に戻すことが必要なのです。

## 一般的な汚水処理法は「活性汚泥法」と「接触ばっ気法」

生活排水や工場排水を浄化する方法として、最も広く採用されているのが微生物の力を借りて排水中

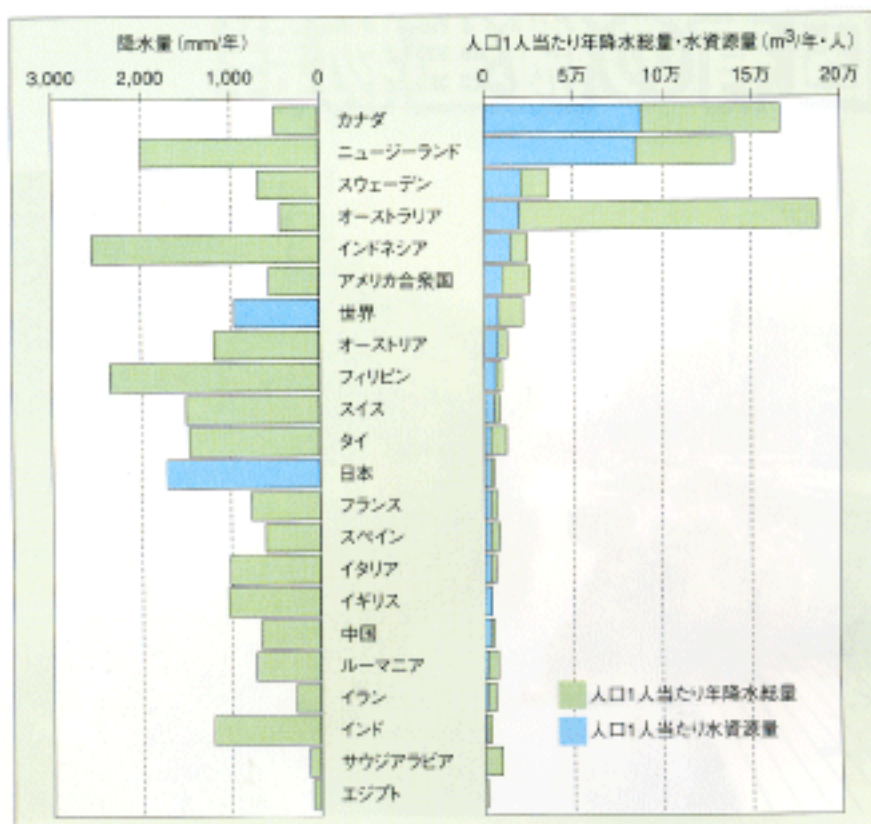


図1 世界各国の降水量等の比較

(国土交通省水資源部のデータから)

の汚濁物質を除去する方法で、大きく分けて「活性汚泥法」と「接触ばっ気法」の2種類があります。

活性汚泥法は、排水に活性汚泥という生きた微生物の塊を浮遊させて空気を送り込み(ばっ気)、これら微生物によって有機物を酸化・分解させてその後、汚泥を沈殿させて回収するという方法で、都市下水や工場排水の処

理などに用いられています。

「接触ばっ気法」というのは、水中に微生物の住みかとなるろ材(濾材)を沈めて空気を送り込み、ろ材の表面にできた生物膜(バイオフィルム)の働きによって有機物を酸化・分解するという方法で、ろ材を水中に浸漬し、微生物をろ材に固定させて生物膜を作ることから「浸漬ろ床法」、「固定ろ床法」、あるいは「生物膜法」とも呼ばれています。

## 最大の特徴はヤクルト容器を利用したろ材に

ヤクルト方式水浄化システムも、この接触ばっ気法の一つですが、最大の特徴はろ材にヤクルト容器(65ml)の底を抜いたもの(以下ヤクルトろ材)を使用していることで、1970年代の初期に、当時、衛生工学の第一人者だった京都大学の岩井重久教授によって考案されたものとされています。その後、いろいろな方が研究に取り組み、実用化したのが当時、鹿児島第一大学の石井勲教授だったことから石

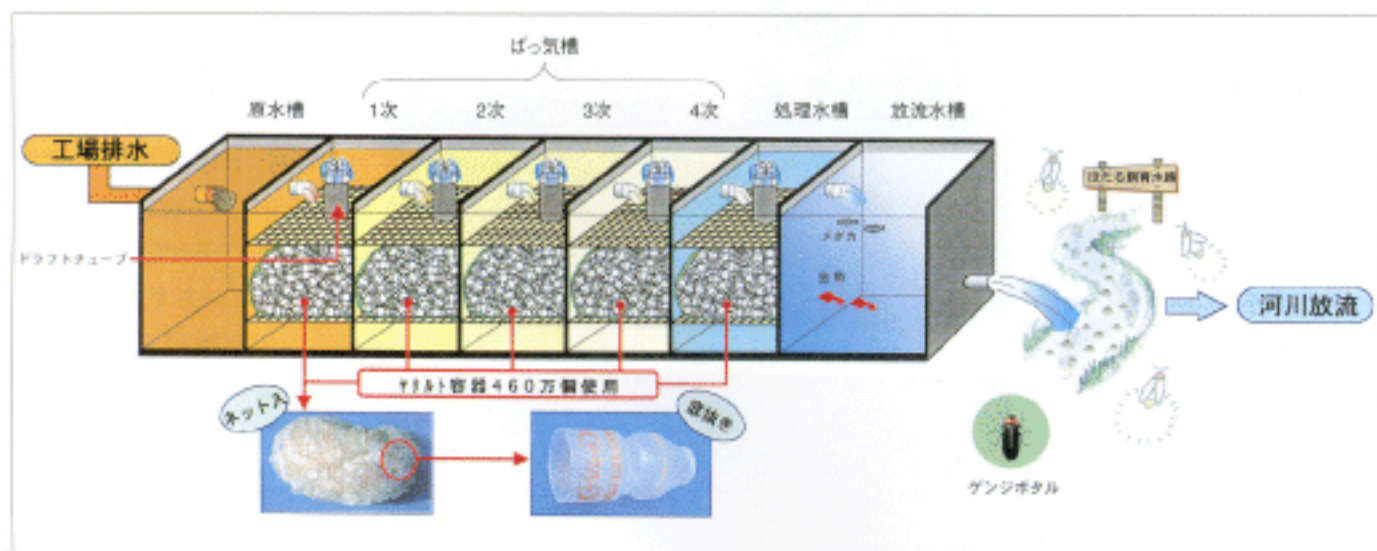


図2 ヤクルト方式水浄化システム（佐賀工場）の模式図

井式あるいは第一工業大学方式とも呼ばれたこともありますが、その後、改良に改良を重ねられ、現在はヤクルト企業グループである（株）エーアンドジーによってシステム化され、各地でその処理能力の高さが注目されています。

このシステムの特徴をみてみましょう。

図2はヤクルト本社佐賀工場の排水処理システム（ばっ気槽4系列）のうち1系列の断面を模式化したものです。

工場排水は原水槽に貯留されたあと、ばっ気槽に流入します。1次槽から4次槽までの各ばっ気槽にはヤクルトろ材がランダムに充填されており、このシステムでは計460万個のヤクルトろ材が使われています。

それぞれのばっ気槽の中央には空気を送り込むドラフトチューブが設けられており、ばっ気槽内を好気的な環境にしています。ろ材の表面には、排水中の有機物を餌として増殖した微生物が定着して生物膜を作り、この微生物群の働きによって排水が浄化されます。

佐賀工場のシステムでは、BOD値500～600ppmだった原水が、ばっ気槽を通過する間に1～2ppm、透視度は実に2mにまで浄化され、放流水槽ではメダカや金魚が泳げるほどきれいで透明になっています。また、同工場では浄化槽からの放流水による人工の小川を敷地内を作ってゲンジボタルを飼育しており、今では地元の名所の一つになっています。

このシステムは工場排水を対象にしたものですが、



図3 八木原地の「アメンボ島」（静岡県沼川市）



図4 「青いミミズ」が設置された学園院大学・直洗の池（東京都豊島区）

ヤクルト方式にはこのほかにも「アメンボ島（浮島タイプ）」（図3）、「青いミミズ（水中型水循環タイプ）」（図4）などいろいろなバリエーションがあります。いずれも水が停滞した池や湖沼など閉鎖性水域の水質浄化を目的に開発されたもので、「青いミミズ」というのは、

細長いパイプの中にヤクルトろ材を充填した接触酸化室とポンプ室を設け、水を浄化すると同時にポンプで噴水や水の循環を行い景観をよくするというものです。細長いパイプの形状が土壌浄化に役立つミミズに似ていること、さらに汚れた水を青い清流にしたいという願いを込めて「青いミミズ」と命名されたシステムですが、ここでもヤクルトろ材の表面に出来上がった生物膜が重要な働きをしています。

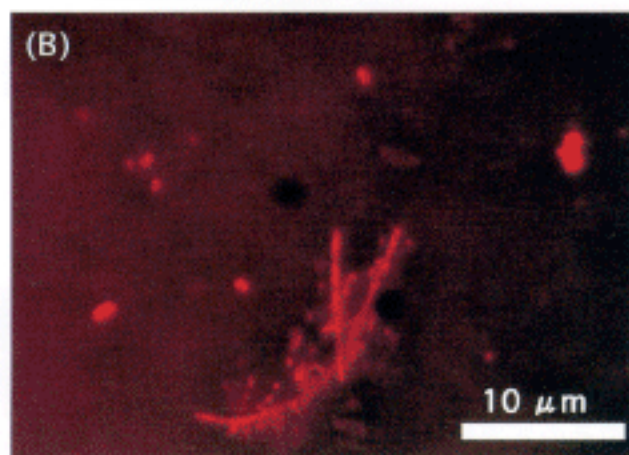
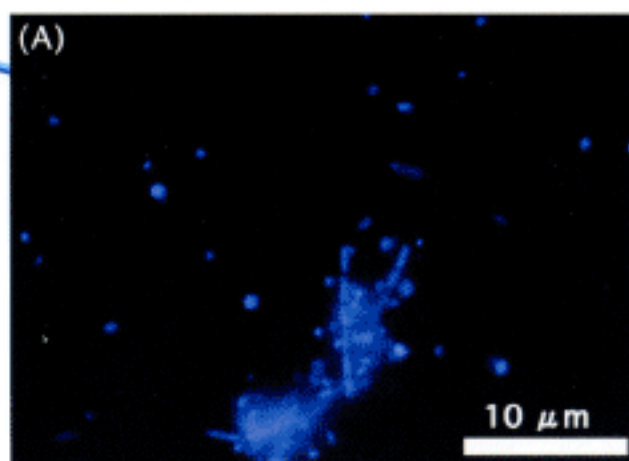


図5 ヤクルト方式による家庭用合併浄化槽の試料を解析したFISH法による生物膜の構造の画像。(A)は全細菌の画像、(B)はサイトファーガ群のみを特異的に検出した画像

いう粒子を持っており、この中にある16sという大きさのRNAの塩基配列が生物の種によって違うことがわかっています。FISHは、この塩基配列にだけ相補的なプローブ(遺伝子断片)を作製し、そのプローブを蛍光標識して試料を処理すると、細菌ならば目的の菌種あるいは菌群だけが蛍光顕微鏡下で蛍光を発して観察できるという手法です(図5)。特定の菌(群)だけを染め分ける手法といってもいいでしょう。また、この手法を使うと、試料中の微生物の形状や数

を知ることもでき、分子進化に即した細菌類の系統樹も作られています。

そこで、全ての細菌類(真正細菌)を検出するプローブ(EUB338)と、真正細菌の中でもとくに水処理に関連すると予想される細菌群を検出するプローブを作製しました。このプローブを使って検出される細菌群は表2のようなグループに分けられます。

このうち、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ のグループはいずれもプロテオバクテリアという大きな細菌群に属し、通常の水環境や活性汚泥方式の浄化槽などから多く検出される細菌群です。もう一つのサイトファーガ/フラボバクテリアグループというのは好気性あるいは通性嫌気性の

## 分子生物学的手法による細菌叢の解明

これらヤクルト方式の浄化能力の優れていることは各地で実証されており、その秘密がこの方式にだけ特徴的に住みついている微生物群にあるのではないかということは以前から推測されていました。しかし、微生物の培養ができなかったため、どのような微生物叢が構成されているのかは謎とされていました。

自然界にはいたるところに微生物が住みついており、私たちの生活と密接な関係を持っていますが、これら微生物の99%は生きてはいても培養できないVNC(Viable but nonculturable)状態にあるため、その種類や働きを知ることができなかったのです。私たちの腸内には数百種類の細菌が住みついており、その30~70%は培養が可能だとされていますが、これは例外中の例外といってもいいでしょう。

しかし、ここ10年の間に分子生物学的手法で微生物を培養せずに分析する技術が飛躍的に進歩し、これまでVNC状態にあった微生物の解明ができるようになりました。その手法の一つにFISH(Fluorescence *in situ* hybridization)法があります。

細菌を含むすべての生物は細胞内にリボソームと

表2 FISH法プローブで検出できる細菌群と既知の菌

系統群	既知の菌
$\alpha$ -プロテオバクテリア群	アグロバクテリウム、プレブレンディモナス、ニトロバクテラ(硝化菌)、バラコッカス、ライゾビウム(根粒菌)
$\beta$ -プロテオバクテリア群	アシドボラクス、アルカリゲネス、コマモナス、スフェロテリルス、ズーグレア、ピトレオシラ
$\gamma$ -プロテオバクテリア群	アシネトバクテラ、アエロモナス、大腸菌、メチロモナス、モラクセラ、シュドモナス(腸炎菌)
サイトファーガ/フラボバクテリア群(CF)	バクテロイデス、サイトファーガ、フレキシバクテラ、フラボバクテリウム、ウィークセラ

グラム陰性の桿菌で、自然の水環境などから検出されているグループです。

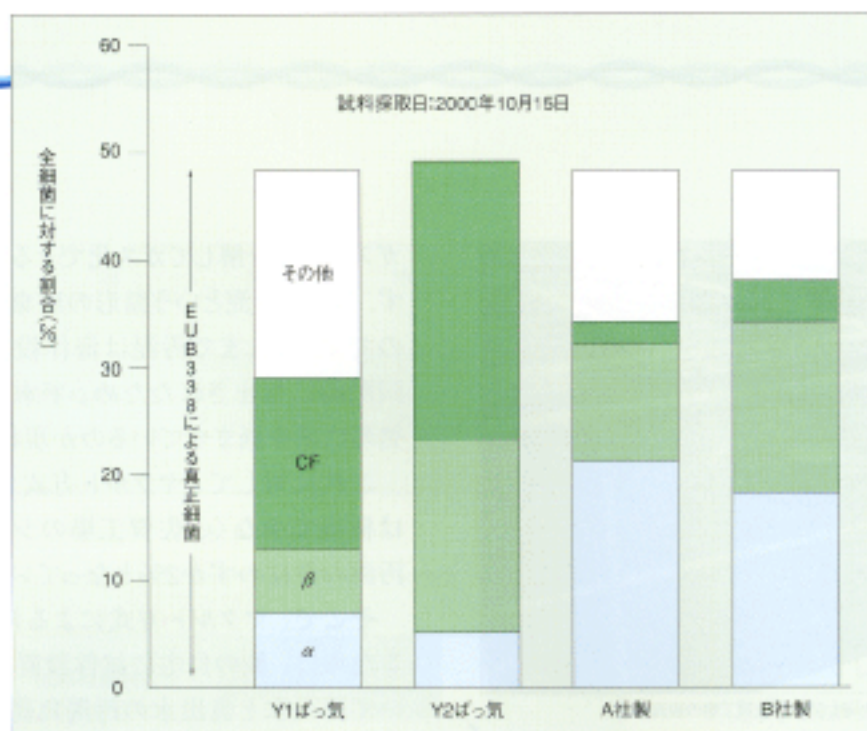


図5 FISH法による家庭用合併浄化槽の細菌叢の解析  
(Yはヤクルト方式TS氏宅、A社製はMU氏宅、B社製はH氏宅。いずれも佐賀県小城町所在)

## ヤクルト方式に特徴的な サイトファーガ群 (CF)

この手法を使って、ヤクルト方式と他の浄化槽の細菌叢の違いを調べてみました。分析の対象にしたのは、佐賀県小城町の家庭用合併浄化槽のほか、修景池で稼働している「青いミミズ」、ヤクルト佐賀工場

の排水処理システムでろ材表面に発達している生物膜の細菌叢です。家庭用合併浄化槽の細菌叢の違いをみたのが図6です。このうちYというのがヤクルト方式の浄化槽で、A社とB社製も接触ばっ気方式の浄化槽ですが、波型のプラスチック板をハニカム状にしたろ材を使っています。また、この分析に先立ち、各浄化槽の最終処理水の水質を調べていますが、ヤクルト方式ではBOD値が平均3ppmだったのに対し、他の製品は10~20ppmとバラツキがあり、全窒素量、大腸菌群数、発生汚泥量などもヤクルト方式のほうが優れていることがわかっています。

分析の結果、ヤクルト方式ではサイトファーガ群が最優勢を占めていたのに対し、A社、B社製ではβ、αグループが多く、この傾向に季節変動はありませんでした。このうち、βグループに属するスフェロテイルス、ズーグレアなどは活性汚泥式の主要菌とされており、ハニカムろ材を用いた接触ばっ気式は活性汚泥型に近い細菌叢になっていることがわかりました。

同じ方法で、「青いミミズ」とヤクルト佐賀工場のシステム中の細菌叢を調べた結果が図7ですが、「青いミミズ」も家庭用のヤクルト方式合併浄化槽と似た細菌叢になっていました。

興味深いのは佐賀工場の結果で、1次槽と2次槽はサイトファーガ群が少なく、α、βが優勢という活性汚

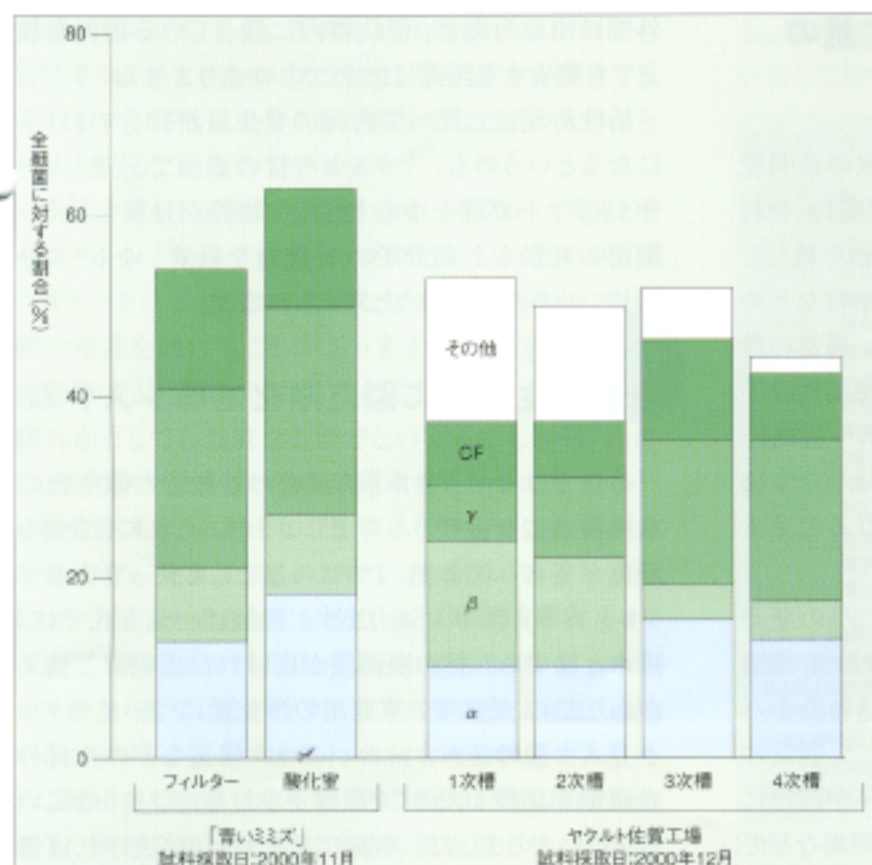


図7 明確水浄化システム「青いミミズ」とヤクルト佐賀工場排水処理施設におけるFISH法による細菌叢の解析



図8 透明度が高く、メダカや金魚も泳いでいる佐賀工場の放流水槽

泥式に近い細菌叢になっているのに対し、3次槽、4次槽では典型的なヤクルト方式の細菌叢になっていたことです。これは、有機物が多くBOD値が高い排水中では活性汚泥式型の細菌叢が対応しているのに対し、有機物が少なくなった排水中ではサイトファーガ群が多くなり、BOD値が数ppmという清澄な水を作っていることを示唆しています。(図8)

## 処理水の透明度が高く汚泥発生量の少ないのも特徴

ヤクルト方式のもう一つの特徴は処理水の透明度の高さで、家庭用の合併浄化槽でも透視度1mを超えるのが普通ですが、佐賀工場などでは2mを越えています。透明度を悪くするのが、細菌や植物などの細胞壁を構成している高分子の有機物で、通常の浄化槽中の微生物では分解しきれないため懸濁微粒子(SS)となって水を濁らせるのです。ヤクルト方式の透明度が高いのもサイトファーガ群を主体とした生物膜がSSを吸着して分解していると考えられるのですが、まだ未知の点も残されています。

もう一つの特徴は、発生する汚泥(スラッジ)の量が極端に少ないということです。汚泥というのは、有機物を食べて死んだ微生物の死骸や、分解しきれなかった有機物が泥状になって底に沈殿したもので、通常の活性汚泥法では排水中の有機物の20~30%が汚泥に変換されて残ってしまいます。つまり下水処理場などで行われている活性汚泥法で有機物を炭酸ガスや窒素

ガスにまで分解してガス化できるのは70~80%に過ぎず、残りは汚泥という固形の廃棄物として残ってしまうのです。これまで汚泥は海洋投棄されていましたが、国際的に禁止されたため、下水処理場などではその処理に頭を悩ませているのが現状なのです。

これに対して、ヤクルト方式で発生する汚泥の量は極めて少なく、佐賀工場のシステムから発生する汚泥の量はわずか2%となっています。

そこで、ヤクルト方式による汚泥発生量を推定するために、私の自宅に試作設置した合併浄化槽について流入水と流出水の汚濁負荷、ばっ気槽や沈殿水槽の底に沈殿している汚泥量やバイオフィーム量などを定量し物質収支を計算してみました。なお、この浄化槽は定期的なメンテナンスは行なっていますが、汚泥の引き抜きはいっさいしていません。その結果は図9のように、設置後3.3年間に浄化槽に流入した有機物102kgのうち、放流水のSS分として0.7%が流れ出るだけで、その他としてはヤクルトろ材表面のバイオフィームとして0.5%、沈殿汚泥として1.8%が残っているだけであることがわかりました。外部に出る汚泥と、浄化槽内に残っている汚泥を加えても発生する汚泥は2.5%でしかありません。

活性汚泥法と比べて汚泥の発生量が10分の1以下になるというのも、ヤクルトろ材の表面で発達した、サイトファーガ群を中心とした生物膜が分解しにくい細菌の死骸など高分子の有機物を吸着、ゆっくり分解しているからだろうと考えられます。

## 自然の生態系に似た浄化処理システム

それではなぜヤクルト方式だけ特徴的な微生物の集団構造になっているのでしょうか。それには3つの理由が考えられます。1つはろ材として使っているヤクルト容器の形状にあります。接触ばっ気方式では、排水と接するろ材の表面積が広ければ広いほど効果があります。そこで、家庭用の浄化槽についてヤクルト方式と他のメーカーのハニカム構造などのろ材の表面積を比較したところ、ヤクルト方式は約5倍広いことがわかりました。単純に考えれば5倍広ければ処理能力も5倍高いということになります。しかし、限ら

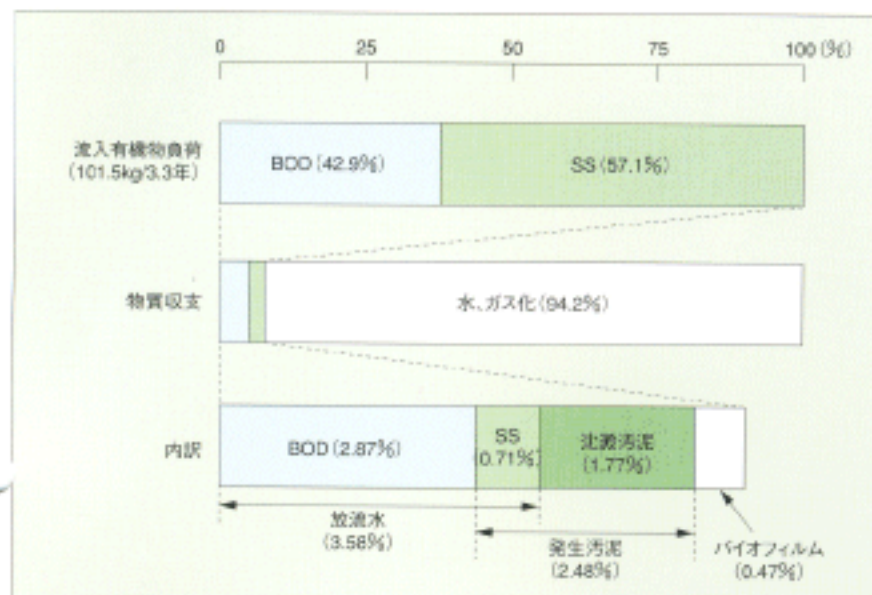


図9 ヤクルト方式合併浄化槽の物質収支

れた大きさの浄化槽でろ材の表面積を広くすると、ろ材表面の生物膜が厚くなって目詰まりを起こす心配があります。現在、家庭用の浄化槽では担体流動方式といって、直径1cm未満の小さな筒状のろ材を使い、目詰まりを防ぐために排水を常に動かす装置が主流になっています。このため生物膜ははがれても目詰まりは起こさないのでありますが、浄化能力も落ちてしまいます。偶然にもヤクルト容器がほどよい大きさや形状を持っていたのでしょ。

次はヤクルト容器の安全性です。ヤクルト容器はポリスチレンというプラスチックでできていますが、プラスチックによっては可塑剤など添加物が溶出し生物膜の発達を妨げることがあります。この点、ヤクルト容器は食品容器として溶出の心配もなく、微生物の住みかとしても最適なものだといえるでしょう。ただし、プラスチックというのは疎水性といって水をはじく性質があり、ろ材として必ずしも最適ではないかもしれません。水になじみやすい親水性の物質を表面にコーティングするなどが改良点として考えられます。

次にろ材とドラフトチューブとの絶妙なコンビネーションがあります。まだヤクルト方式が確立しなかった頃はドラフトチューブはなく、ろ材も流動状態だったため、せっかく定着した生物膜がはがれて処理能力が落ち、剥離した生物膜が浮遊汚濁物質となって透明度を落とす原因にもなっていました。ドラフトチューブ

を立てることによって処理能力が飛躍的にアップしたのです。しかも生物膜を観察すると、細菌や原生動物(べん毛虫やゾウリムシなど)ばかりでなく、ミジンコ、線虫、糸ミミズなどが住みついています。活性汚泥方式や接触ばっ気方式でも原生動物までは見られますが、それより高次な生物集団が見られるのはヤクルト方式だけなのではないでしょうか。ドラフトチューブ方式ではろ材周囲の水流が遅くなり、これらの生物が流されずに住みつけるからです。

自然の河川などでは、石や岩の表面にできた生物膜が水中の有機物を

取り込んで分解し、この生物膜をミジンコや糸ミミズなどが餌として食べ、それらをアユやフナなどが食べるという食物連鎖ができています。ヤクルト方式でも自然の生態系に似た環境が形成されており、これが処理能力を高めていると考えられるのです。しかし、まだ未知な点も多々残されており研究が続いているところです。

## PROFILE

### 染谷 孝 (そめや たかし)

- 1959年 東京に生まれる
- 1978年 東京教育大学農学部生物化学工学科卒業
- 1982年 東北大学大学院農学研究科博士課程農芸化学専攻修了  
『水田土壌のセルロース分解菌の研究』で農学博士号取得
- 1982年 産業医科大学医療短期大学助手(微生物学)  
MRSAなど院内感染の研究に従事
- 1990年 同上大学講師
- 1994年 佐賀大学農学部助教授(土壌微生物学)  
現在に至る



専攻：土壌微生物学、環境微生物学、基礎研究のほか応用として各種の微生物を用いた有機廃棄物の完全分解処理・資源化、グリストラップバクテリア、ヤクルト方式による高度排水処理、石油汚染土壌の微生物浄化などを手がけている。  
学会活動等：日本土壌微生物学会幹事、日本微生物生態学会評議員、廃棄物学会九州支部理事、日本施設園芸協会施設生産衛生管理検討委員会委員、アジア太平洋廃棄物連立シンポジウム学術部会長、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)土壌バイオレメディエーション評価委員会委員担任。

(株) エーアンドジーへのお問い合わせは  
03-5261-6960  
URL: <http://www.yakult.co.jp/ag/>