

メタン発酵と排水処理

Methane Fermentation and Wastewater Treatment

田村 博 山本 勝也 高松 誠昇

■ TAMURA Hiroshi ■ YAMAMOTO Katsuya ■ TAKAMATSU Seisho

産業分野、中でも食品工業では、工場排水の有機物負荷が高いため、排水処理設備の多大なスペースや高額な維持管理費が課題であった。近年、排水処理技術は、従来の標準活性汚泥法に替わり、環境配慮型システムであるメタン発酵法の導入で大きく改善している。メタン発酵システムは更に、食品加工工場以外の分野への適用を広げていくことが期待されている。

東芝は、メタン発酵システムの代表的な技術であるUASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) を中心に、その応用や周辺技術として、2ステージシステム、生物脱硫装置及びストリップング技術などを加え、排水処理技術を事業化している。

In the industrial field, particularly in the food industry, the organic load of industrial wastewater is so high that reducing the space of wastewater treatment facilities and cutting maintenance costs have arisen as issues. The conventional activated sludge process for treating wastewater has been replaced in recent years by improved wastewater treatment technology incorporating a methane fermentation process, realizing an ecologically friendly system. Application of the methane fermentation system is expected to expand from food-processing factories to various new fields.

Toshiba has been developing wastewater treatment technologies based on the upflow anaerobic sludge blanket (UASB) system, including a double-stage UASB system, biodesulfurizing system, and hydrosulfide stripping system, as well as applications for these technologies.

1 まえがき

水質汚濁防止法が公布された1965年当時は、好気性微生物（活性汚泥）により有機物を酸化反応で分解、処理する標準活性汚泥法が排水処理の主流であった。構成が単純で運転方法に幅を持たせることができる一方で、処理槽内に空気を送り込むブロワの消費電力が大きいことや、発生する余剰汚泥の処理にコストがかかるという課題がある。

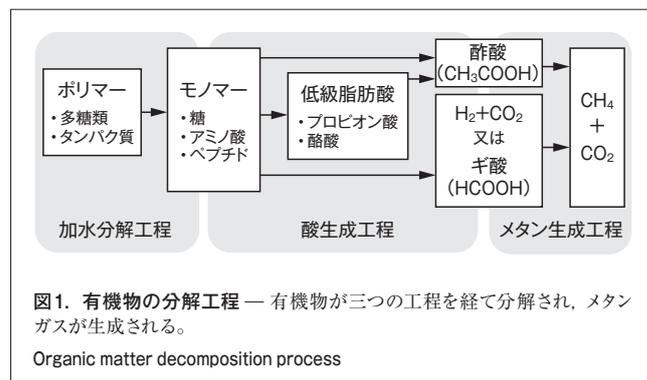
東芝は、この排水処理の分野で、省エネや環境負荷低減の観点から、メタン発酵システムの代表的な設備である上向流式嫌気性汚泥床 (UASB:Upflow Anaerobic Sludge Blanket) を基に独自のシステムを開発してきた。

ここでは、主に食品加工工場での排水処理設備の概要、当社が開発した独自技術とその適用例、及び技術の将来動向について述べる。

2 生物処理の基本原則

排水の処理は、物理化学処理と生物処理に大別される。物理化学処理の設備は、沈殿池、加圧浮上装置、及び脱水機などで構成されるが、排水中の溶存性有機物の処理が困難なため、食品加工工場の排水処理では生物処理が主体となる。生物処理は更に、微生物が酸素を必要としない嫌気性処理と、酸素を必要とする好気性処理に分類される。

嫌気性処理は、最終段階でメタン (CH₄) ガスが得られること



からメタン発酵処理とも呼ばれる。これは外部からの酸素供給を必要としない生物反応で、図1に示す三つの工程から成る。まず、加水分解工程では、多糖類やタンパク質などの高分子（ポリマー）物質が、糖やアミノ酸などに低分子（モノマー）化される。次の酸生成工程では、酢酸 (CH₃COOH) などの低級脂肪酸が生成される。最後のメタン生成工程では、有機物がメタンと二酸化炭素 (CO₂) に分解される。分解の代表例として酢酸の場合を次に示す。



一方、好気性処理は酸素を必要とする反応で、酸化により有機物分解を行うもので、標準活性汚泥法が代表的な例である。ほとんどの下水処理場はこの方式又はその変法を採用している。酢酸の分解例では、酸素 (O₂) との反応により水 (H₂O) と二酸

化炭素が得られる。

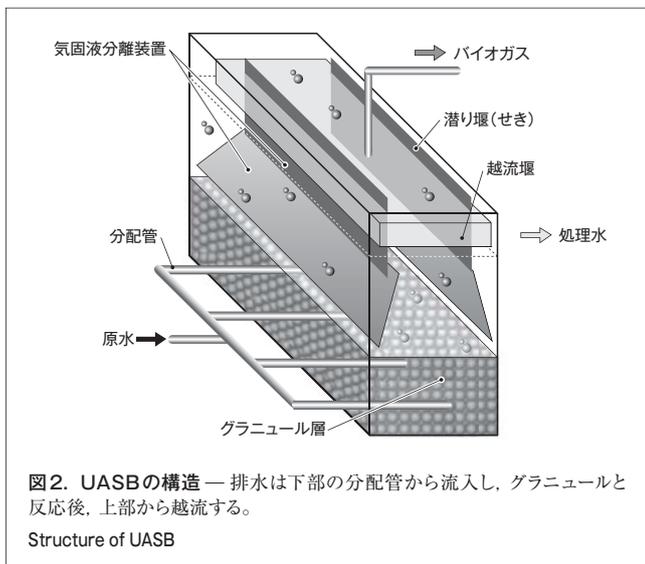


このように、酸素の必要性の有無や、エネルギー資源として利用できるメタンガス生成の有無など、処理方式により大きな違いがある。

3 UASBの特徴

UASBは、1980年にオランダのLettingaらによって開発された排水処理方式であり⁽¹⁾、効率の良い嫌気性処理設備として食品加工工場を中心に世界的に導入され始めている。日本では1985年に最初の設備が作られており、当社は独自開発を行って1995年に1号機を製作した。

UASBの概略構造を図2に示す。底部から排水を流入さ



せ、下部のグラニュール層で反応させた後にオーバフローさせる沈殿槽一体型の装置である。反応に関与する嫌気性微生物はグラニュールと呼ばれ、直径1～2mmの球状で底部に沈んでいる（図3）。UASBの菌体濃度は通常30,000～60,000 mg/Lと高濃度化されており、従来の好気性設備に比べて大幅な省スペース化を実現できる。

反応装置の大きさは、メタン発酵槽面積 S (m²) を(1)式により計算して決定する。

$$Li=Ci \times Qi=Lv \times S \times Hv=Lc \times Cv \times S \times Hg \quad (1)$$

ここで、有機物指標としてBOD (Biochemical Oxygen Demand；生物化学的酸素要求量) を用い、 Lv は容積負荷 (kg-BOD/m³・容積/d)、 Lc は汚泥負荷 (kg-BOD/kg-菌体/d)、 Cv は菌体濃度 (kg/m³)、 Qi は流入水量 (m³/d)、 Ci は流入

BOD濃度 (kg-BOD/m³)、 Li は原水BOD負荷量 (kg-BOD/d)、 Hv はメタン発酵槽水深 (m)、及び Hg はグラニュール層厚み (m)である。

また、UASBは反応槽内の上向流速を1 m/h程度に保つため、処理水の一部を循環させているが、これには次のような利点がある。

- (1) 酸性原水に対する重炭酸ソーダなどによるpH緩衝機能
- (2) 回転流によるグラニュールの自己造粒化機能
- (3) グラニュール層の膨張によるガス抜け機能
- (4) 休止後運転開始前の槽内加温
- (5) 流入水質変動の緩和
- (6) 下部での低級脂肪酸蓄積の回避

一方、処理水の循環があってもグラニュール層をワンパスで通過するため、活性汚泥法に比べて菌体と排水の接触効率が悪いという欠点がある。



4 東芝の独自技術

ここでは、当社で開発した独自の技術について概要を述べる。

4.1 気固液分離装置 (GSS : Gas Solid Separator)

メタン発酵槽内部にある、発生したガスをグラニュールや排水と分離し回収する装置で、一般に排水中でガスを回収する方式が主流であるが、回収ガス配管にグラニュールが閉そくする可能性がある。これに対し、気相部で回収を行う方式を採用してこの問題を回避している。更に、ガスによって運ばれたグラニュールの流出防止用として潜り堰（せき）を越流堰の手前に設置している。

4.2 2ステージUASBシステム

UASBを直列に2段つなぎ、排水とUASBの菌体との接触効率が低いという点を改良している。下水道放流の場合には、節水あるいは水のリサイクルを行って使用水量を減少させるなどの理由により水質濃度が高くなり、UASB 1段では

BOD除去率が90%前後であるため下水放流基準を満たせない場合がある。そこで、BOD 5,000 mg/L以上の排水の下水道放流用にBOD除去率が96%以上を達成するシステムを開発し、2基を納入した。

4.3 生物脱硫装置

好気性微生物の硫酸化細菌の作用で硫化水素を硫黄単体又は硫酸に変換し、バイオガス中の腐食性ガスである硫化水素を除去する装置である。従来の生物脱硫は、アルカリ度の高い排水を循環してバイオガスと接触させ脱硫を行う方式であったが、一般の食品加工工場では、排水のアルカリ度が低く、操業中のpH低下による処理性能の低下が起るため、適用が困難であった。そのため主に乾式脱硫に頼らざるを得ず、脱硫剤の費用がかさむという課題があった。そこで、排水を循環させない掛流し方式にしてpH低下を小さくした生物脱硫装置を開発し、食品加工工場へ適用できるようにした。これにより脱硫コストの大幅な削減を可能にした。

4.4 ストリッピング技術

排水中の硫化水素による生物阻害を防ぐ技術である。食品加工工場の中には紙パルプ排水や廃糖蜜排水のように硫酸イオン濃度の高い排水がある。バイオガスを脱硫後、再びメタン発酵槽の排水中に吹き込んで、硫化水素の気液平衡を崩すことにより排水中の硫化水素を気相に追い出し、これを繰り返すことで排水中の硫化水素を生物阻害レベル以下に低減できる。

5 納入事例

ここでは、2001年に稼働開始した国内最大級のプラントである、じゃが芋でん粉製造施設の排水処理設備について述べる。

この排水の特徴は、有機物のほとんどがタンパク質であることである。じゃが芋は光合成で得られたでん粉を順次芋(地下茎)に蓄えるので、芋の糖質のほとんどが分子量2万程度と大きいでん粉である。芋をつぶしてでん粉を遠心分離すると、排水の成分はでん粉以外のタンパク質が主成分となる。約2%のタンパク質を含んだ排水の有機物負荷はじゃが芋1t当たり30kgのBODになり、1日平均1,500tの芋を処理するので、1日当たりの処理BODは45tになる。

でん粉工場の排水処理では、次に示すような課題を解決することで、設備の安定した運転を実現している。

- (1) プラントが季節稼働であるため、停止期間中の微生物の保存方法
- (2) 芋に含まれるタンパク質分解阻害物質であるPI (Protease Inhibitor) への対策
- (3) 11月末以降の冬季期間における凍結対策
- (4) 硝化反応熱による好気性菌阻害への対策
- (5) 脱窒のためのBOD濃度と窒素(N)濃度の比(BOD/N比)の確保

5.1 処理プロセス

排水の処理フローを図4に示す。

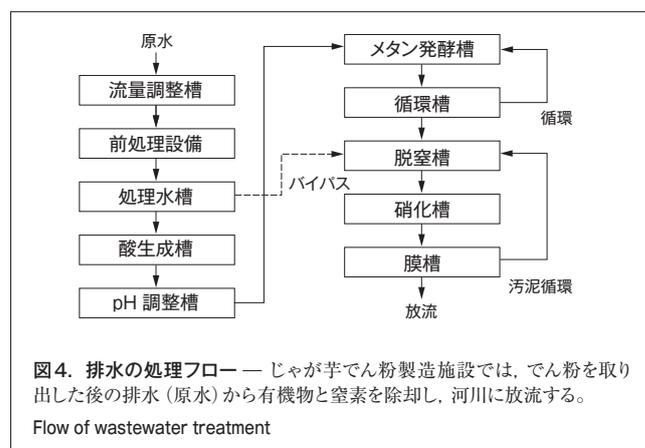


図4. 排水の処理フロー — じゃが芋でん粉製造施設では、でん粉を取り出した後の排水(原水)から有機物と窒素を除去し、河川に放流する。
Flow of wastewater treatment

まず流量調整槽で水量、水質の均一化を行う。1日分の滞留時間を取っているが、実際には次の前処理設備(納入先の既設設備)でタンパク質を除去するためにpHを下げる必要があり、酸発酵はさせるがアミノ酸分解をさせないように、適切な滞留時間で通過させる。

前処理設備では、タンパク質のうち主に固形性のものを高分子凝集剤を使って除去する。その後、処理水槽を経て酸生成槽、pH調整槽と移り、給液ポンプでメタン発酵槽に送られる。pH調整槽では最適温度の37℃までの加温だけを行い、pH調整は行わずにpH4.8程度で給液する。排水中にはタンパク質が多く含まれているため、分解後アンモニウムイオンに変化してpHを上昇させる。そのため水酸化ナトリウムで中和しなくても、安定した処理を行うことができ、その結果、水酸化ナトリウムのランニングコストを低減し(約40百万円/年)、併せてアルカリによるダメージを防止することができた。また、発生したバイオガスをボイラで有効利用するために脱硫を行うが、2006年に納入した生物脱硫装置を乾式脱硫装置の前段に設置することで、脱硫剤コストを数分の1に削減できた(約20百万円/年)。

メタン発酵処理後の排水は、循環槽を経て脱窒槽に送られる。ここでは、循環している硝化液の亜硝酸(又は硝酸)イオンの酸素を使って、嫌気状態で有機物を分解すると同時に窒素ガスを発生させ、窒素を系外に除去する。

また、硝化反応熱の低減とBOD/N比の確保のため、一部の排水を処理水槽から脱窒槽へバイパスしている。最終段の膜槽では、目詰まり防止のため8分運転、1分停止のサイクルでポンプを吸引して透過水を得る。処理水はほかの低濃度排水(15,000 m³/d)とともに別の好気処理設備に送られ、河川へ放流される。

このプラントは、窒素除去を目的に好気性処理に硝化・脱

窒プロセスを組み入れている。窒素除去はBOD除去に比べて水槽の容積も大きくなるので、最近では、浸漬膜と組み合わせて菌体濃度を数倍にし、建設コストの低減や省スペースを図ることが多い。また脱窒のプロセスは、ほとんどが脱窒槽→硝化槽→膜槽の流れであり、膜槽から硝化液を脱窒槽に循環させている。循環流量を原水流量に対してr倍とすると、理論上の窒素除去率は $r/(1+r)$ となる。例えば、原水に対して9倍の流量を硝化液として循環すれば、90%の窒素を除去できる。

5.2 設備と処理状況

前処理設備以外のプラントは、流量調整槽も含めて一体化されており、大きさは8.3(幅)×3.8(奥行き)×7(高さ)mである。生物処理の工程は2系列であり、主反応槽の有効容積は1系列当たり、メタン発酵槽1,828 m³、脱窒槽1,078 m³、硝化槽1,062 m³、及び膜槽1,058 m³である。

全排水量は、設計値が3,000 m³/dであるのに対し、10日に1回の生産ライン洗浄時に排水量が減少することから、2007年度の95日間の稼働日数での平均処理量は2,274 m³であった。そのうち約14%が農地に肥料として散布された。

水質は、原水の平均COD (Chemical Oxygen Demand: 化学的酸素要求量)が20,652 mg/Lである。放流水の設計水質はBODとSS (Suspended Solids; 固形分の浮遊物質)がともに60 mg/L、全窒素が120 mg/Lであるが、処理実績は平均でBOD 3 mg/L、SS 0 mg/L、及び全窒素50 mg/Lと、設計値を満足する運転が達成できている。

6 新技術と将来動向

メタン発酵システムは、蒸気や発電などのエネルギー有効利用を目的にスタートし、現在は省エネあるいは廃棄物の減量化も重要な特長として注目されている。当社は、将来の公共施設も含めた事業所の環境対策として、次のような研究開発を進めている。

- (1) 低濃度排水向けのメタン発酵と無曝気(ばっき)好気性処理の組合せ 後段を散水ろ床としてブロウ動力を削減する
- (2) 高効率の余剰汚泥消化技術 170℃前後の高温で汚泥の細胞膜を破壊し、消化効率を向上させる
- (3) 食品加工工場残さ向けメタン発酵システム 有機性廃棄物からメタンガスを回収し、消化液をUASBで処理する

今後は、食品加工工場の排水処理ではトータルのバランスを考えて、食品残さ、高濃度排水、及び低濃度排水それぞれを適正なシステムで処理することが重要になる(図5)。

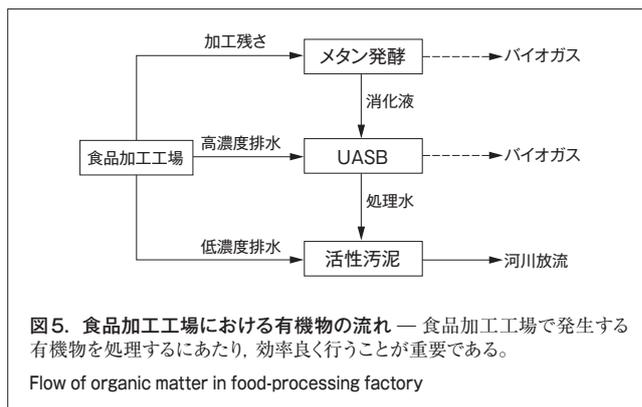


図5. 食品加工工場における有機物の流れ — 食品加工工場で発生する有機物を処理するにあたり、効率良く行うことが重要である。

Flow of organic matter in food-processing factory

7 あとがき

日本には多種多様な食品加工工場があり、国内メーカーの排水処理技術は非常に高い水準にある。オランダのUASB技術をすばやく取り込んで、独自に発展させたのもその一つの表れであり、ここで述べたメタン発酵技術は更に進展すると考えられる。

しかし、今後は、窒素規制の強化あるいは色度や臭気の低減といった、より高度な環境保全の観点から必要な技術が求められる。当社は、今後も更なる努力を続け、常に最先端の技術をこの分野に適用することで社会に貢献していく。

文 献

- (1) Lettinga, G., et al. Use of the upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment. *Biotechnol. Bioeng.* 22, 1980, p.699 - 734.



田村 博 TAMURA Hiroshi

社会システム社 水・環境システム事業部 水資源リサイクル事業推進部主務。排水処理システムのエンジニアリング業務に従事。

Environmental Systems Div.



山本 勝也 YAMAMOTO Katsuya

社会システム社 水・環境システム事業部 公共ソリューション技術部主務。下水道システムの商品企画、研究・開発に従事。環境システム計測制御学会会員。技術士(上下水道部門)

Environmental Systems Div.



高松 誠昇 TAKAMATSU Seisho

社会システム社 水・環境システム事業部 公共システム技術部主務。公共システムのエンジニアリング業務に従事。

Environmental Systems Div.