

# 下水汚泥の酸発酵技術

## Acid Fermentation Process for Sewage Sludge as Sludge Recycling Technology

藤原 茂樹 FUJIWARA Shigeki JFE エンジニアリング エンジニアリング研究所 水システム研究部  
局 俊明 TSUBONE Toshiaki JFE エンジニアリング エンジニアリング研究所 水システム研究部水環境グループマネージャー・工博  
木原 泰彦 KIHARA Yasuhiko JFE エンジニアリング 水エンジニアリング事業部 主幹

### 要旨

JFE エンジニアリングでは、独立行政法人科学技術振興機構の委託開発事業として、「下水汚泥酸発酵システム」の開発をした。本技術は、嫌気性微生物の働きと、超音波・アルカリ併用処理によって、下水汚泥を分解するとともに、高濃度の有機酸を回収するもので、2004年5月、独立行政法人科学技術振興機構より成功認定を受けた。本報ではシステムの概要を記し、処理量 2.5 m<sup>3</sup>/d の装置を用い、発酵槽滞留時間 2 日、発酵槽温度 30 ~ 35°C において、固形物 (SS : suspended solid) の平均減少率 50.8% を得た結果について報告する。

### Abstract:

JFE Engineering developed “acid fermentation process for sewage sludge” on commission from Japan Science and Technology Agency. This technology aims to decompose sewage sludge and recover high levels of organic acid from sewage sludge, using anaerobic bacteria, alkalis, and ultrasonic treatment. The authors report here the scheme of this process and the results showing an average solid decomposition rate of 50.8% secured by using a pilot scale plant of 2.5 m<sup>3</sup>/d, under the condition of fermentation tank at 30-35°C and retention time in the fermentation tank of 2 days.

### 1. はじめに

わが国では、毎年乾燥重量に換算して約 200 万トンの下水汚泥が発生している。下水道普及率の向上にともなって、汚泥発生量はさらに増加する傾向にある。汚泥は嫌気性消化、焼却処理、建築資材利用などにより減量化・資源化処理が行われているが、処理施設の建設費、維持管理費および運転費などが大きく、また、汚泥の最終埋立地も不足しているため、汚泥の発生を抑制する技術や、汚泥の有効利用技術が求められている。

下水処理過程で発生する汚泥には、流入下水に含まれる浮遊物質が沈殿した生汚泥と、下水が好気的な生物学的反応を受けることによって増殖した微生物を主体とする余剰汚泥がある。

従来の汚泥発生抑制技術は、余剰汚泥を物理化学的に可溶化し、水処理過程に返送することによって汚泥の発生を抑制する技術であり、汚泥の有効利用は考慮されていなかった。また、物理化学的可溶化技術は、微生物の細胞膜を破壊することによって、細胞質を溶出させるものであり、微生物の割合が少ない生汚泥を対象とした場合、投入エネルギーあたりの可溶化率が小さいという問題があった。

一方、資源化技術としての堆肥化や汚泥焼却灰の建設資

材化には、(1) 生産物の使用地域が限定される、(2) 輸送距離が長くなると不経済になるという問題があった。

JFE エンジニアリングでは、広島大学の西尾尚道教授の発案を基に、アルカリ添加超音波処理と酸発酵プロセスを組み合わせることによって、下水汚泥中の固形物 (SS: suspended solid) 成分を分解し、効率よく有機酸を生成させることを目的とした下水汚泥酸発酵システムの開発を進めてきた<sup>1)</sup>。この技術は、科学技術振興事業団 (現: 独立行政法人科学技術振興機構) の委託開発事業として実施し、2004年5月に同機構より成功認定を受けた。

本報では、開発した下水汚泥酸発酵システムの概要と、実証実験装置の運転状況について報告する。

### 2. 下水汚泥酸発酵システムの概要

Fig. 1 にシステムの概要を示す。図中の破線で囲んだ範囲が科学技術振興機構の委託開発事業の範囲であり、短い反応時間で汚泥の固形成分の分解と、酢酸やプロピオン酸などの低級脂肪酸を主体とする高濃度有機酸生産を目標として開発を行った。生成した高濃度有機酸を含む汚泥は、下水高度処理における脱窒用還元剤としての利用や、嫌気性消化の原料としての利用を想定している。

酸発酵処理を受けることによって、投入した下水汚泥の

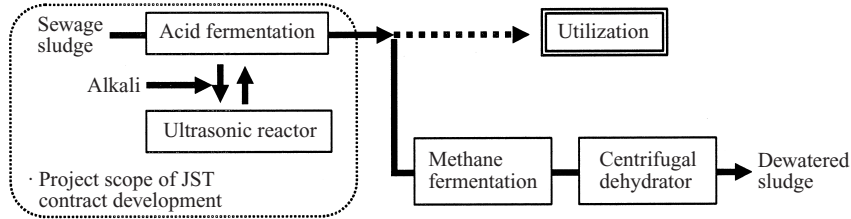


Fig.1 Schematic diagram of acid fermentation process for sewage sludge

生物易分解性成分の一部は酸生成細菌の菌体に変換される。酸発酵処理をした汚泥の一部を引き抜き、アルカリを添加した後、超音波処理を行うことで、増殖した酸生成細菌の細胞膜を破壊し、細胞質を溶出させる。溶出した細胞質は生物易分解性成分であるため、酸発酵過程に返送することで、有機酸に変換される<sup>2)</sup>。

試験方法<sup>3)</sup>に準拠した方法で行い、揮発性脂肪酸はDIONEX社製イオンクロマトグラフDX-120、分離カラムは同社IonPac ICE-AS1を使用して分析を行った。本稿では、揮発性脂肪酸を有機酸とし、ギ酸、酢酸、プロピオン酸、酪酸、吉草酸の質量和をVFA (volatile fatty acid) と定義した。

### 3. 実証実験

#### 3.1 実証実験装置

実験プラントは横浜市下水道局北部汚泥処理センター内に設置した。実験プラントの写真を**Photo 1**に、概要を**Fig. 2**に示す。同センターの濃縮汚泥槽から4～5%に濃縮された汚泥をポンプアップし、1日1回2.5 m<sup>3</sup>の汚泥を酸発酵槽に投入した。汚泥投入と同時に、酸発酵槽の汚泥が排出されるよう、酸発酵槽の抜き出しは越流方式とした。汚泥入替時間以外は汚泥循環ポンプにより、汚泥を循環するとともに、20% NaOH水溶液を所定量添加し、超音波照射を行った。酸発酵槽は二重円筒管構造とし、外側に温水を供給し、所定温度を保った。運転条件を**Table 1**にまとめて示す。

#### 3.2 分析方法

実験期間中、所定の間隔で投入汚泥と処理汚泥の性状分析を行った。また、比較対照として、実施設の消化汚泥を採取し、同様に性状分析を行った。固形成分の分析は下水

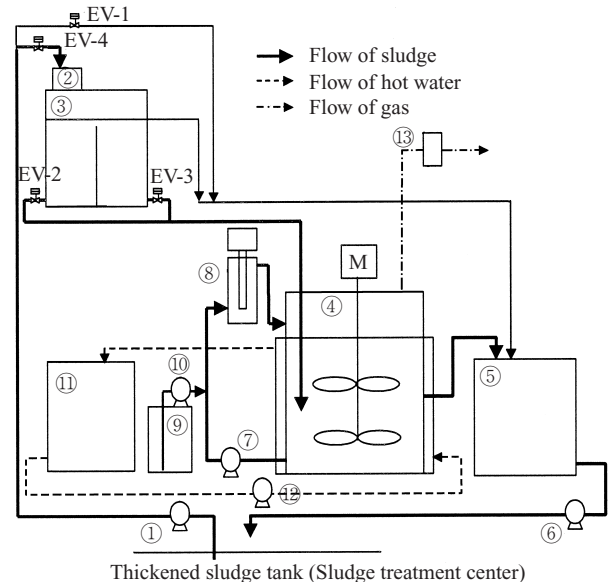


Fig.2 Schematic diagram of demonstration plant



Photo 1 Panoramic view of demonstration plant

Table 1 Operating conditions of demonstration plant

Acid fermentation tank	
Effective volume (m <sup>3</sup> )	5
Solid retention time (d)	2
Temperature (°C)	30-35
Solubilization conditions	
NaOH addition rate	4 kg/m <sup>3</sup> -input sludge (Constant injection during sludge circulation pump working)
Electrical consumption of ultrasonic generator	10 kWh/m <sup>3</sup> -input sludge (2 kW ultrasonic generator)

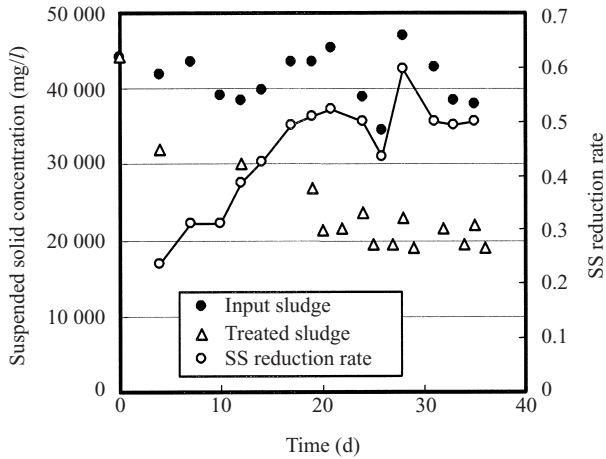


Fig. 3 Changes in suspended solid concentration of sludges and SS reduction rate from start up

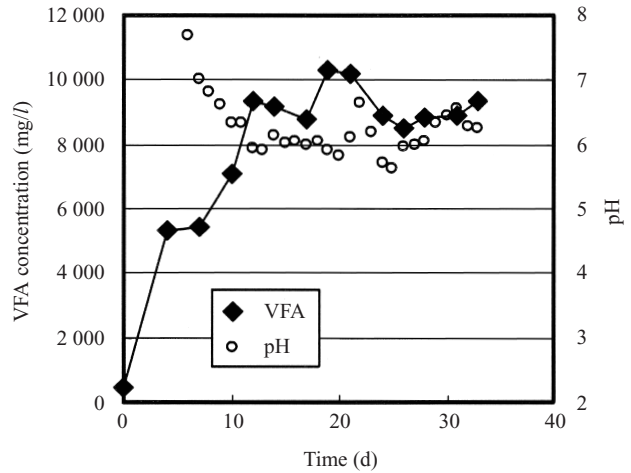


Fig. 4 Changes in VFA concentration and pH of treated sludge from start up

Table 2 Sludge composition (average value) (mg/l)

	Input sludge	Effluent sludge (This study)	Digested sludge (Sludge treatment center)
Total solid	43 600	40 900	25 200
Volatile total solid	36 300	29 300	17 300
Suspended solid	41 300	20 500	21 100
Volatile suspended solid	35 200	15 400	14 400
Formic acid	0	0	0
Acetic acid	400	4 300	10
Propionic acid	400	2 800	0
Butyric acid	300	1 100	0
Valeric acid	100	1 000	0

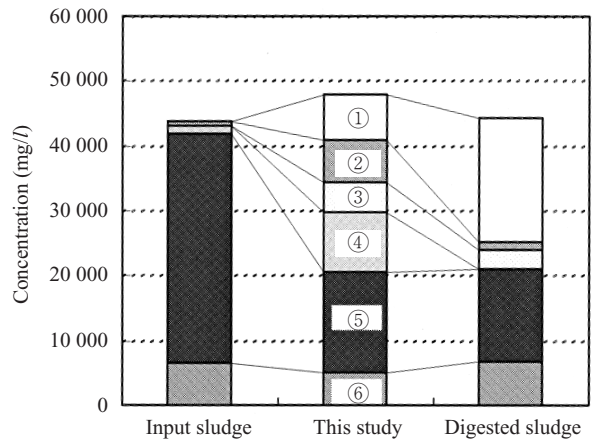
### 3.3 汚泥減容化効果

投入汚泥と処理汚泥のSS濃度とSS減少率の経日変化をFig. 3に示す。また、実験期間中の投入汚泥、酸発酵処理汚泥、実施設の消化汚泥性状の平均組成をTable 2に示す。ここで実施設の消化汚泥とは、北部汚泥処理センターの消化汚泥であり、投入汚泥を計画消化温度35°C、計画消化日数30日<sup>4)</sup>で嫌気性消化を行った後の汚泥である。

投入汚泥のSS濃度は大きく変動しているが、処理汚泥SS濃度は安定的に減少した。槽内が定常状態になった後は、投入汚泥性状変動と同様にSS濃度に変動が認められたものの、定常期とみなした実験開始20日後以降、15日間の平均SS減少率は50.8%となった。Table 2に示すように、定常期の酸発酵汚泥の平均SS濃度は20 500 mg/lであり、消化汚泥の平均SS濃度21 100 mg/lとほぼ同等の値であった。このとき実施設のSS減少率は49.8%であった。この値は従来型消化施設で得られているSS減少率と同程度の値である。なお、従来型消化施設では、減少したSSはCH<sub>4</sub>を主成分とする消化ガスへ変換されるが、本システムでは、VFAを主成分とする溶解性有機物へと変換される。

### 3.4 VFA生成状況

処理汚泥中のVFA濃度および処理汚泥pHの変化を



①Digestion gas, ②Dissolved inorganic matter (Incl. NaOH), ③Dissolved organic matter, ④VFA, ⑤Particle organic matter, ⑥Particle inorganic matter

Fig. 5 Changes in input sludge components after acid fermentation and methane fermentation (Digested sludge: Collected from sludge treatment center)

Fig. 4に、Table 2に示したデータをもとに本システムを適用した場合、通常の消化法を適用した場合における投入汚泥の組成変化をFig. 5に示す。Fig. 5における消化ガスは、汚泥減少分をすべて消化ガスに変換されたと仮定して計算した結果を示した。

Fig. 4に見られるように実験初期においてはアルカリ添加量にVFA生成量が追いつかず、汚泥pHが8程度であったが、VFA生成とともに低下した。定常期においては、投入汚泥1 m<sup>3</sup>あたり4 kgのアルカリ添加を続けたが、処理汚泥のpHは6~7の範囲に収まった。

Fig. 5より定常期における処理汚泥の溶解性有機物の平均濃度は13 900 mg/lであり、平均VFA濃度は9 200 mg/lであった。溶解性成分の66%がVFAであり、残りは糖類やアミノ酸など、生物易分解性の有機物であると推定された。投入汚泥を基準とすると、投入汚泥VTSの38%が可溶化し、投入汚泥VTSの25%に相当するVFAが生成した。

### 3.5 実証実験のまとめ

本システムでは酸発酵槽滞留時間2日で、平均SS減少率50.8%という値を得た。この値は、従来型消化施設で得られているSS減少率とほぼ同等の値である。ここで、減少したSS成分は、本来 $\text{CH}_4$ まで分解されるはずの有機物であり、本システムではVFAを主成分とする溶解性有機物として液中に残存している。生成したVFAは生物易分解性有機物であるため、下水高度処理における脱窒用還元剤としての使用も可能である。生成したVFAの還元剤としての能力がメタノールと同等であると仮定した場合、本実証実験装置では、1日あたり23kgのメタノールに相当するVFAを生成できる見込みとなった。

## 4. おわりに

超音波とアルカリを併用した可溶化処理を、酸発酵後の汚泥に適用することにより、短い滞留時間で高い固形物減少率と高い有機酸生成率を得ることができた。

今後、本システムの実施設への適用を考えた場合、酸発酵後の汚泥が脱窒用還元剤としてどの程度の性能を有するのか、また、固形物を含有する汚泥を水処理系へ返送することによって、水処理系の運転状況や処理水質がどのように変わるのかを把握することで、小規模下水処理施設向けの汚泥減容・有機酸利用システムの構築が可能となる。

また、本システムは有機酸生成装置としての適用のほか、嫌気性消化施設の前処理装置としての適用も可能である。室内実験において、NaOH添加・超音波処理により可溶化

を促進させた酸発酵汚泥を用いて嫌気性消化を行ったところ、従来の嫌気性消化と比較してガス発生量が25%増え、汚泥が20%程度減量化することを確認した<sup>1)</sup>。

今後は、嫌気性消化の前処理として、本システムの適用性を検討し、中・大規模下水処理施設向けの汚泥资源化装置として普及拡大を図る予定である。

本研究を遂行するにあたり、広島大学教授西尾尚道先生より多大なご指導をいただきました。また、横浜市下水道局北部汚泥処理センターの皆様には実験場所と試料のご提供にご協力いただきました。ここに深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 藤原茂樹, 木原泰彦. “下水汚泥酸発酵システムの開発”. 第40回下水道研究発表会講演集. 2003, p. 1069-1071.
- 2) 清水達雄, 工藤憲三, 那須義和. 嫌気性消化プロセスによる余剰汚泥のメタンガスへの変換機構と速度論的解析. 下水道協会誌. vol. 29, no. 339, 1992, p. 82-92.
- 3) 日本下水道協会編. 下水試験方法. 1997.
- 4) 平成13年度下水道統計.



藤原 茂樹



局 俊明



木原 泰彦