

した提案システム (Fig. 1 の破線内) を想定し、四つの従来システムとの経済性比較を行った。提案システムでは、下水汚泥を重力濃縮した後、熱処理し、その分離液は固定化メタン発酵、濃縮熱処理汚泥は直接脱水・焼却処分とした。熱処理に必要なエネルギーは、焼却排ガスからの回収蒸気によりまかなわれる。一方、従来システムは、重力濃縮、嫌気性消化、凝集剤添加脱水、乾燥・焼却の各工程の組み合わせとした。Table 1 に、前述の実験結果をもとに設定した提案システムの設計条件を示す。

処理汚泥固形物量を 20 ton-DS/日とした場合の経済性試算結果を Table 2 に示す。ここで、総維持管理費とはシステム全体に必要なランニングコスト（電力費+燃料費+薬品費+上水費+残渣の場外処分費）を示し、生産エネルギー価とは余剰メタンガス量をコスト

ト換算したものである。

従来システムはいずれも、総維持管理費が生産エネルギー価を上回り、年間およそ 2.1~2.9 億円のランニングコストを要するのに対し、提案システムでは、生産エネルギー価がランニングコストを上回るという試算結果となった。

本研究は NEDO の委託調査研究の一部として実施したものであり、広島大学工学部発酵工学科の永井史郎教授より数々のご指導をいただきましたことに深謝いたします。

文 献

- 1) Nishio, N., Kayawake, E., Nagai, S.: *J. Ferment. Technol.*, 63, 205 (1985).
- 2) 栢分英助, 鳥山明夫, 河杉忠昭: 日本醸酵工学会大会要旨集, p. 84 (1984).

6. 上向流式嫌気性汚泥床 (UASB) 法の処理性能と

メタン菌によるグラニューールの形成

従来にない高負荷で廃水処理できる UASB 法の成立要因は、メタン菌を主体とする嫌気性微生物が直径 1~5 mm のグラニューール (顆粒状凝集体) を形成することである。これはいわば構成微生物によって生産されるバイオポリマーによる自己固定化 (Self-immobilization) であって、人工的な固定化微生物にはない種々の特長を有している。

本稿では、UASB 法のプロセス的特徴と処理性能およびメタン発酵微生物によるグラニューールの形成機構について、著者の研究を中心に紹介する。

1. UASB 法のプロセスの特徴

UASB プロセスは概念的には古くからあった方式であるが、¹⁾ 現在のようなプロセスとして完成したのはオランダにおいてなされた研究開発による。²⁾ 本プロセスは、発酵槽形状およびプロセス構成ともに従来の高負荷メタン発酵法に比較して単純で、Fig. 1 に模式的に示したように単なる筒形槽内の汚泥槽を上向流 (通常は一過流) 的に廃水を通してメタン発酵処理するものである。やや複雑な構造部分として発酵槽上部に設ける気-固-液分離部があるが、機械設備を伴わないため操作上の困難性はほとんどない。

本法が高負荷処理プロセスとして成立する理由は、

メタン菌その他の嫌気性菌が直径 1 mm 以上のグラニューールを形成することによって、発酵槽内菌体濃度を 50,000 mg DS/l 以上に高めることができるためである。本法によって処理可能な廃水としては、有機酸類を多量に含む廃水および容易に酸発酵して有機酸化する有機物を含む廃水であるが、前段に酸発酵プロセスを設けて 2 相方式 (酸発酵, メタン発酵分離方式) とすることによって多種類の有機性廃水の処理に適用できると考えられている。³⁾

2. UASB 法の処理性能

UASB プロセスの始動運転方法とプロセスの最適操作条件を知るために、以下のような実験を行った。

発酵部容積 2.0 l, 気-固-液分離部 1.7 l のベンチスケール UASB 実験装置を用いて、酢酸, プロピオン酸, 乳酸を主な組成物とする人工廃水 (COD_{cr} 約 4,000 mg/l) を処理した。始動運転で最も留意しなければならない点として、負荷の増加方法とグラニューール形成状態について調べるとともに、グラニューール化したメタン発酵微生物に対する許容負荷について検討した。また、中温発酵 (33°C) と高温発酵 (55°C) のいずれが UASB 法に適しているかについても検討した。

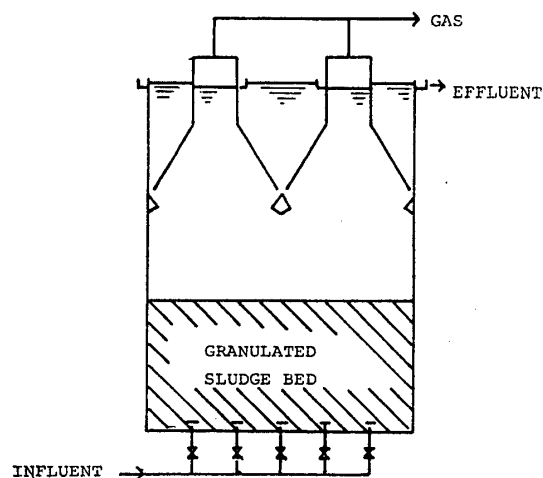
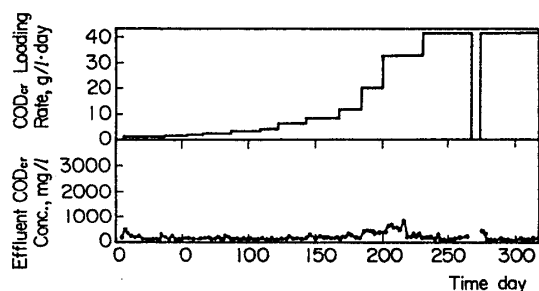
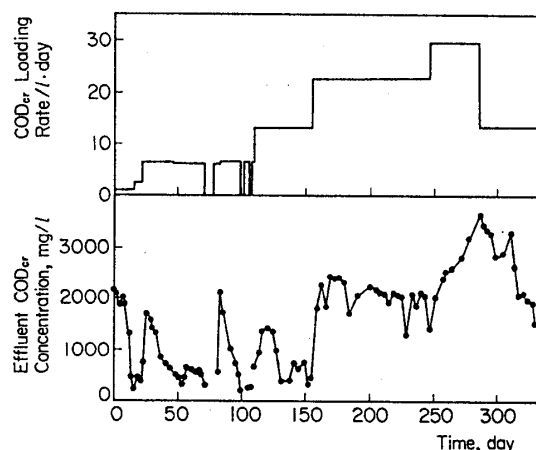


Fig. 1. Schematic diagram of UASB process.

中温発酵による実験においては、下水汚泥の中温消化汚泥(グラニュール化していないもの)を用いて、発酵部に対する容積負荷 $0.3 \text{ g COD}_{\text{cr}}/\text{l} \cdot \text{日}$ (菌体負荷 $0.04 \text{ COD}_{\text{cr}}/\text{g DS} \cdot \text{日}$) で運転を開始した。中温発酵全期間を通じて得られた実験結果は Fig. 2 に示す通りである。処理水中に残留する有機酸がほぼ消失するのを待って徐々に負荷を増大させたところ、嫌気性菌体によるグラニュールの形成が容積負荷 $3 \text{ g COD}_{\text{cr}}/\text{l} \cdot \text{日}$ の条件頃から確認され始め、 $6 \text{ g COD}_{\text{cr}}/\text{l} \cdot \text{日}$ の負荷では $1 \sim 2 \text{ mm}$ の比較的粒径の揃ったグラニュールによって汚泥層が形成された。一旦グラニュール汚泥層が形成された後は、指数関数的に負荷を増大することが可能となり、最終負荷として $42 \text{ g COD}_{\text{cr}}/\text{l} \cdot \text{日}$ で3か月間以上実験を継続したが処理性能は安定していた。しかし、 $42 \text{ g COD}_{\text{cr}}/\text{l} \cdot \text{日}$ のような高負荷条件では、グラニュール化汚泥量の増加速度が大きくなり、定期的な余剰菌体の引き抜きが必要とされた。

高温発酵法による実験においては、Fig. 3 に示したように、 $12 \text{ g COD}_{\text{cr}}/\text{l} \cdot \text{日}$ 以上の高負荷での処理は不可能であった。高温 UASB 発酵槽においては、中温

Fig. 2. COD_{cr} loading rate and effluent COD_{cr} concentration in methophilic UASB experiment.Fig. 3. COD_{cr} loading rate and effluent COD_{cr} concentration in thermophilic UASB experiment.

発酵の場合とは異なり十分大きなグラニュールが形成されず、菌体濃度を高めることができなかったのがその理由である。

3. メタン発酵微生物によって形成されたグラニュールの特徴およびグラニュール形成機構

中温発酵において形成されたグラニュールの走査型電子顕微鏡観察結果を Fig. 4 に示す。Fig. 4(a) の写真は、グラニュールの全体像で、形状的に楕円状のものが多く、通常のかくはん等では崩壊しない。Fig. 4(b) はグラニュール断面の写真で、Fig. 4(c) はその拡大写真である。これらの写真に示されたように、グラニュールの内部は糸状に増殖した菌が絡まり合った状態になっており、粘質物や無機物はほとんど認められず、十分な空隙が確保されている。したがって、グラニュール内部への基質の浸透および発生ガスの外部への拡散放出が自由になされる状態であることが知られる。

このグラニュール化汚泥はメタン発酵活性が極めて高いものであること、糸状増殖菌が竹節状のセプタムを有すること、糸状菌端部が円盤状に平らに切れているなどの特徴から、グラニュール内部の糸状菌はほとんどが *Methanotrix* 属のメタン菌⁴⁾と考えられる。グラニュール表面は、Fig. 4(d) に示したように薄い粘質層に覆われている。この粘質層には短桿菌が多数増殖しており、粘質物はこれらの菌によって生産されたものと考えられる。

以上に示した結果と、種菌として用いた下水消化汚泥中には糸状に増殖した多量の *Methanotrix* が存在しなかったことから、メタン発酵微生物によるグラニュールの形成に関して次の機構が推定された。UASB

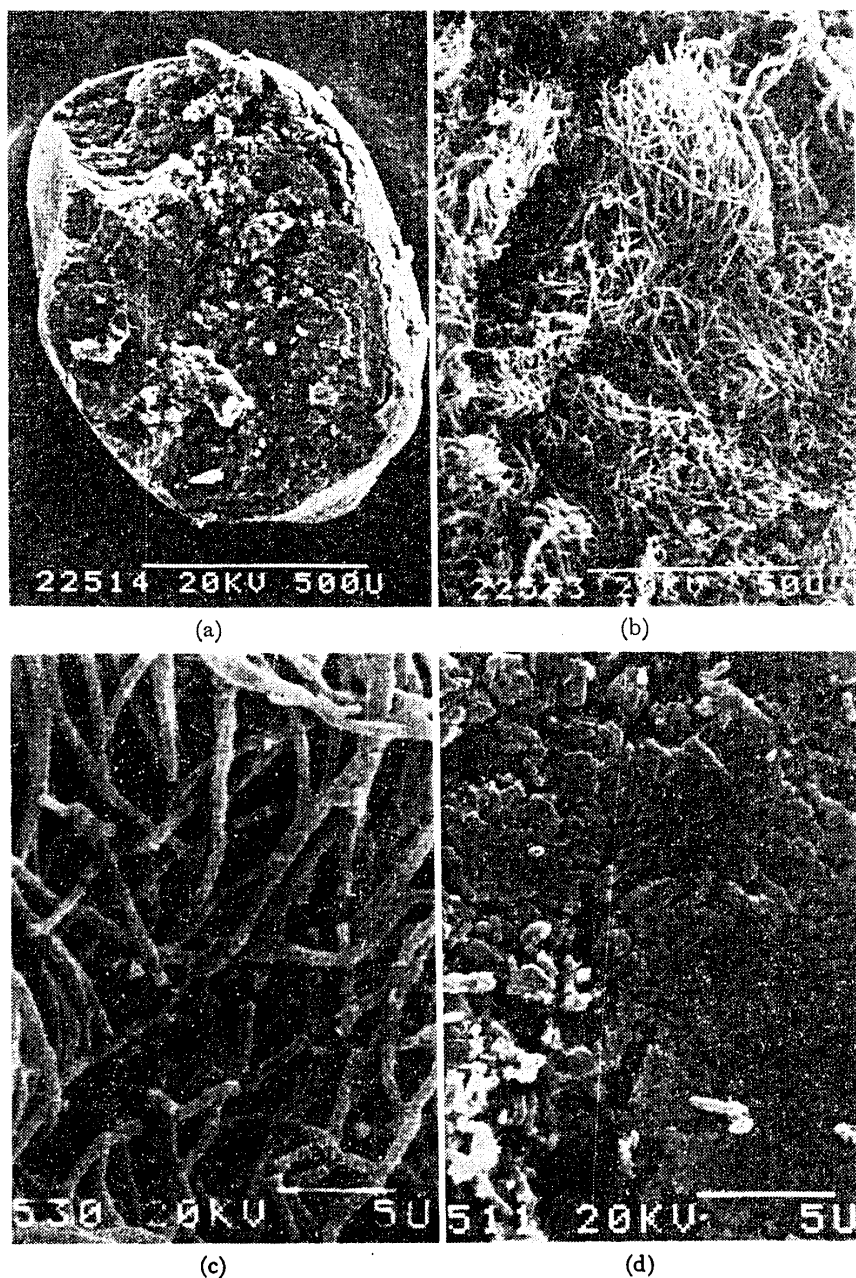


Fig. 4. Scanning electron-micrographs of the granule formed in this experiment.
(a) Total aspect of granule, (b) Inside aspect of granule, (c) Expanded photograph of Photo (b), and (d) Surface aspect of granule.

発酵槽内で糸状に増殖する *Methanothrix* は、発酵槽内で発生するガスの上昇によってもたらされる穏和なくはんによって相互に絡まって塊状化し、その表面にメタン菌以外の有機物分解菌が粘質物を生産しながら増殖して被膜層を形成し、粒状体形状を保持する。

高温 UASB 発酵槽において、前述のように高負荷メタン発酵ができなかったのは、汚泥層が中温発酵で形成されたようなグラニュールによるものではなかつ

たことによっている。ここでの構成メタン菌は *Methanothrix* も若干認められたものの、ほとんどが *Methanosarcina* であって、この菌のクラump状増殖による 0.2~0.5 mm 程度の塊状化汚泥は、ここで用いた UASB 発酵槽に滞留できずに処理水中へと流出し、12 g COD_{cr}/l・日を超える負荷に対応できるだけの汚泥層は形成されなかった。

以上のことより、UASB 法の成立のための条件とし

て *Methanothrix* 属のメタン菌の選択的増殖が重要であると考えられる。

文 献

- 1) Coulter, J. B., Soeda, S., Ettinger, M. B.: *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, SA5, 1089-1 (1956).
- 2) Lettinga, G., van Velsen, A. F. M., Hobma, S. W., de Zeeuw, W., Klapwijk, A.: *Biotechnol.*

Bioeng., 22, 699 (1980).

- 3) Lettinga, G., Hulshoff Pol, L. W., Wiegant, W., de Zeeuw, W., Hobma, S. W., Grin, P., Roersma, R., Sayed, S., van Velsen, A. F. M.: *Third International Symposium on Anaerobic Digestion*, Evans and Foulkner, Inc., Watertown, MA (1983).
- 4) Zehnder, A. J. B., Huser, B. A., Brock, T. D., Wuhrman, K.: *Archives of Microbiology*, 124, 1 (1980).

7. 農産廃物のメタン発酵—酸生成菌の二、三の性質

メタン発酵には大別して、二通りのいわゆる中温と高温の発酵法がある。農産廃物の中温メタン発酵では完全分解、ガス化に約2週間から1か月を必要とする。一方、高温で排出される工場廃液についてはすでに高温発酵が実施され、その高速かつ良好な効率については実証されている。しかし、固形の農産廃物について高温発酵はほとんど試みられていない。

農産廃物は毎年多量に産出されるバイオマス的一部分ではあるが、その構成成分によっては分解、可溶化が困難なため、発酵に供するための前処理にかなりの労力と時間が必要である。近年、物理的手段や、化学的処理方法に工夫が加えられ、完全利用の見通しがつけられつつある。

著者らは牛舎周辺土壌から採集したメタンスラッジを馴養し、農産廃物や野草などについて効率的メタン発酵を試み、中温発酵に比べかなり短時間で完全ガス化を行いうることを明らかにした。¹⁾ 本稿では著者らが取り扱った中、高温スラッジ中の二、三の酸生成菌の諸性質を中心に農産廃物のメタン発酵について考察してみたい。

1. セルロース、キシランなどを材料とするメタン発酵

メタン発酵は基質の加水分解または分解と、酸生成、メタン生成の大別して2相から成立している。農産廃物はリグニン、ヘミセルロース、セルロースなどの難分解性の構成成分からなるため、その加水分解または分解と、酸生成過程の速度と効率が発酵過程全般に影響を及ぼす。著者らの用いた中温スラッジは単糖より主に酢酸を、高温スラッジは酪酸を生成蓄積する。セルロースとキシランを基質とするメタン発酵では、

それらの分解、消費利用はほぼ1次反応で進行する。生成蓄積揮発性脂肪酸量はガス発生 (H_2 と CO_2), CH_4 生成に用いられた量を差し引いた値として表示される。²⁾

高温発酵におけるキシランの分解利用速度係数は 0.341 day^{-1} 、セルロースの場合は反応初期 (0~2日間) の停滞はあるが、3~6日間では 0.385 day^{-1} の1次反応で進行した。一方、中温発酵ではキシランについては、 0.112 day^{-1} 、セルロースについては 0.213 day^{-1} であった。Fig. 1 にキシランを基質とした場合の分解利用とガス発生の経過を示す。

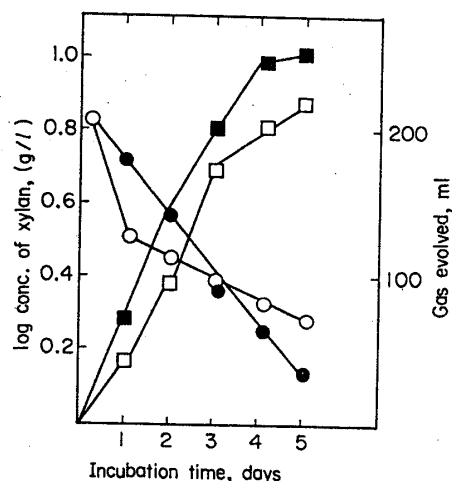


Fig. 1. Hydrolysis, utilization and gas formation from xylan in mesophilic and thermophilic methane fermentations.

—●—, Hydrolysis and utilization of xylan in thermophilic fermentation; —○—, hydrolysis and utilization of xylan in mesophilic fermentation; —■—, gas formation of thermophilic fermentation; —□—, gas formation of mesophilic fermentation.