

<論 文>

余剰濃縮汚泥の液化を伴う二段消化方式による下水汚泥の処理

木 田 建 次* イ ク バ ル *

Treatment of Sewage Sludge by Two-Series Digestion with Liquefaction of Thickened Surplus Sludge

Kenji KIDA* and IKBAL*

* Departement of Applied Chemistry, Faculty of Engineering, Kumamoto University, 2-39-1, Kurokami, Kumamoto 860 Japan

Abstract

Primary sludge and thickened surplus sludge were separately digested in a mesophilic and a thermophilic anaerobic digestion. As a result, the primary sludge was digested easier in the mesophilic digestion than the thickened surplus sludge. However, in the thermophilic digestion vice versa occurred. On the basis of these results, a two-series digestion process with a thermophilic liquefaction of only thickened surplus sludge was proposed (hereafter called modified two-series digestion process).

In the thermophilic liquefaction of the thickened surplus sludge, the maximum volumetric loading rate of VSS of $14\text{g}\cdot\text{l}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ (HRT, 1.8d) could be achieved with respect to liquefaction of the sludge. On the other hand, in the mesophilic digestion of the mixture of thickened surplus sludge liquefied and primary sludge, the maximum volumetric loading rate of VSS of $8\text{g}\cdot\text{l}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ (HRT, 2.3d) could be achieved. In order to evaluate the performance of the modified two-series digestion process, a conventional mono-phase digestion was also investigated. As a result, the maximum volumetric loading rate of VSS in the modified two-series digestion process was about twice as much as that in the conventional process. The VSS digestion efficiency also increased up to about 10% compared to that in the conventional process at the same volumetric loading rate of VSS.

Key words : two-series digestion, liquefaction, primary sludge, surplus sludge

1. はじめに

下水汚泥の嫌気性消化は一世紀にわたる技術であるが、下水道施設設計指針¹⁾に基づく加温式汚泥消化および無加温式汚泥消化の消化日数はそれぞれ30日および60~80日であり、反応速度が非常に遅い。さらに、消化率が低いといった問題点がある。しかも、汚泥処理設備の占める割合は下水処理設備の30~40%であり、運転経費は全体の50%を占めている²⁾。

汚泥の消化率を向上させるために、李ら³⁾は前処理

として余剰汚泥を120~175°Cの条件で加熱処理しているが、加熱エネルギーを削減するか余剰濃縮汚泥を用いた検討が多くなされている。例えば、Haug⁴⁾は処理温度100~225°Cの条件で、Hiraokaら⁵⁾は圧力3 kg·cm⁻²、処理温度60~100°Cの条件で加熱処理の効果を、最近ではAokiら⁶⁾は加熱前処理および酵素添加の効果を検討している。また、余剰濃縮汚泥のアルカリ蒸解の検討もStukeyら⁷⁾により行われている。これらすべての研究において汚泥消化率が9~30%の範囲で向上したと報告されている。しかし、このような前

* 熊本大学工学部応用化学科 〒860 熊本市黒髪2-39-1

処理方法は実際の下水処理場ではいまだ採用されていない。この理由として加熱処理やアルカリ処理することによりランニングコストが上がるためと考えられる。

そこで、我々はランニングコストを上げることなく汚泥の消化速度および消化率を上げるためのプロセスの開発を目的として検討した。まず、初沈汚泥および余剰濃縮汚泥の中温 (37°C) および高温 (53°C) 消化について検討した。この結果に基づき、余剰濃縮汚泥だけをまず液化処理する二段消化方式 (以後、二段消化変法とする) を考察し、その性能を評価した。

2. 実験方法

2.1 下水汚泥

処理試験に供した初沈汚泥および余剰濃縮汚泥は熊本市の東部浄化センターから提供されたものであり、その成分組成を Table 1 に示した。汚泥の成分は提供された日によりバラツキがあったので、回分式処理試験では初沈、余剰濃縮汚泥および混合汚泥の VSS 濃度が $5.8\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ になるように希釈して用いた。また、連続処理試験では初沈および余剰濃縮汚泥の VSS 濃度がそれぞれ約 18 と $27\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ になるように調整して用いた。なお、混合汚泥は現場の汚泥発生量から初沈および余剰濃縮汚泥を容積比で 3 : 1 に混合して調製したものである。

2.2 嫌気性消化シード

高温および中温嫌気性消化のための植種汚泥 (以後、消化シードとする) としては、それぞれ熊本市の中部および東部浄化センターから提供されたものを用いた。これらの消化シードは、混合汚泥を用いてそれぞれ VSS 容積負荷 3 および $2\text{g}\cdot\text{l}\cdot\text{d}^{-1}$ の条件で draw-and-fill 方式により馴養した後、処理試験に使用した。

Table 1 Components of sewage sludge

	Primary sludge	Thickened surplus sludge
TOC ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	409~1,214	21~135
IC ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	0~79	26~81
VFA ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	936~1,906	ND
SS ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	20,400~33,730	29,930~35,750
VSS ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	15,860~23,420	24,610~28,700
Ash ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	4,300~10,310	5,220~8,050
pH (-)	4.0~6.3	6.0~6.8

TOC, IC and VFA concentrations were analyzed in the supernatant of the sludge.

Annual average temperature of the sludge is 21°C.

2.3 初沈汚泥および余剰濃縮汚泥の回分式処理試験

Fig. 1 は使用した装置の概要を示している。消化槽は実容積 400ml の試薬ビン (SIBATA 500) であり、この消化槽 4 基に馴養した高温もしくは中温消化シード 350ml と、初沈汚泥もしくは余剰濃縮汚泥 50ml をそれぞれ別々に加えた。処理温度 53°C もしくは 37°C 、攪拌速度 300rpm の条件で回分式処理試験を行い、初沈および余剰濃縮汚泥の消化に及ぼす高温および中温消化の影響を調べた。ただし、添加した消化シードの VSS 濃度は $10\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ であり、初沈もしくは余剰濃縮汚泥の VSS 濃度は $5.8\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ であった。

2.4 二段消化変法による下水汚泥の処理

2.4.1 余剰濃縮汚泥の高温液化

使用した液化反応装置は、Fig. 2 に示したように実容積 1.7l の攪拌型リアクター (Jar Fermentor MBF Eyla Tokyo Rikakikai Co. Ltd., Tokyo) であり、このリアクターに馴養した高温消化シード 1.7l を加えた。その後、余剰濃縮汚泥をポンプ P-1 により $140\text{ml}\cdot\text{d}^{-1}$ の流量で連続的に液化槽に供給し、処理温度 53°C 、攪拌速度 100rpm の条件で処理試験を行った。反応液はポンプ P-2 により消化槽から連続的に引き抜かれた。汚泥供給量を段階的に上げることにより VSS 容積負荷の検討を行った。なお、処理が安定したデータを得るために同一条件で 2~3 週間運転した。

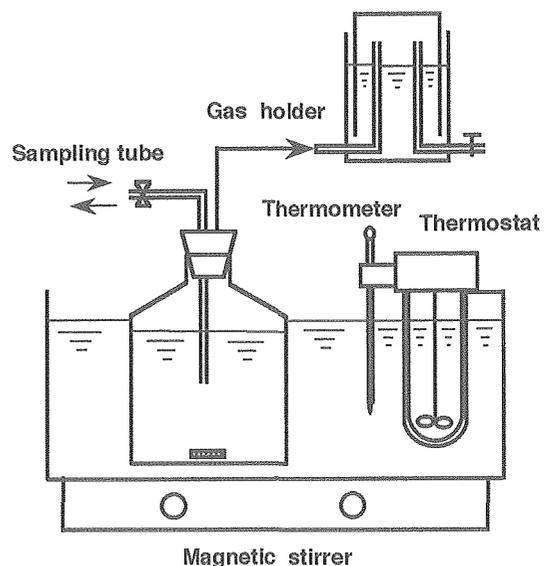


Fig. 1 Schematic diagram of equipment for batch anaerobic digestion

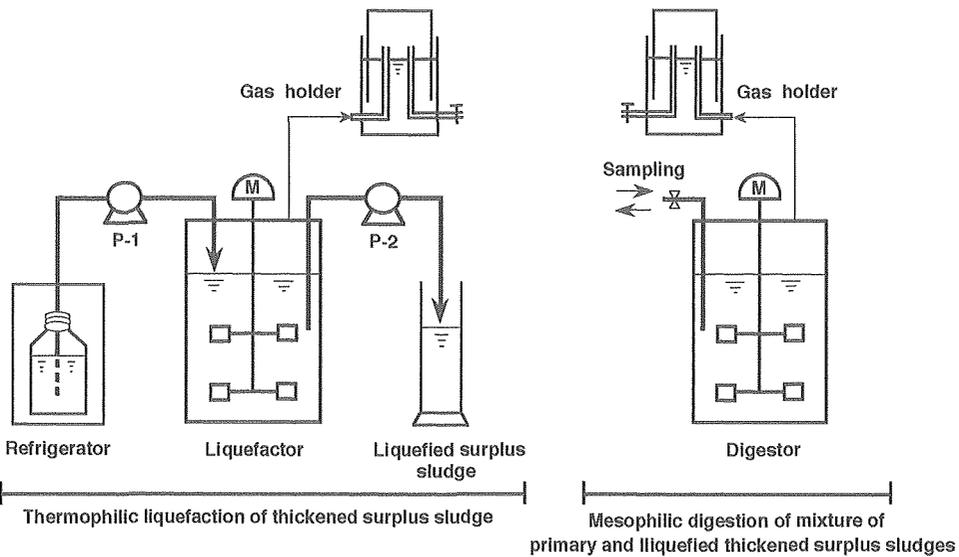


Fig. 2 Schematic diagram of two-series digestion of sewage sludge with liquefaction of thickened surplus sludge

2.4.2 初沈汚泥と液化処理余剰濃縮汚泥からなる混合汚泥の中温消化

初沈汚泥中には比較的大きな固形物が含まれていたため、本処理試験は draw-and-fill 方式で行った。Fig. 2 に示したように消化反応槽は、実容積3.5lの攪拌型リアクター(model LF-60; Labotec, Tokyo)である。このリアクターに馴養した中温消化シードを3.5lになるように加えた後、初沈汚泥と液化処理余剰濃縮汚泥を容積比で3:1に混合した汚泥(以後、液化処理混合汚泥とする)を draw-and-fill 方式で投入し、処理温度37°C、攪拌速度300rpmの条件で処理した。液化処理混合汚泥投入量を段階的に上げるにより VSS 容積負荷の検討を行った。なお、draw-and-fill 方式は消化槽の攪拌機を30分間停止後、一定量引き抜き、その後同一量の液化処理混合汚泥を加えた。この操作は VSS 容積負荷 $5g \cdot l^{-1} \cdot d^{-1}$ 以下では一日一回行ったが、それ以上の負荷では一日二回行った。また、処理が安定したデータを得るために同一条件で2~3週間運転した。

2.5 従来法(中温消化)による混合汚泥の消化

使用した消化槽および処理試験方法は、上述した液化処理混合汚泥のものと同じであった。ただし、投入した汚泥は初沈汚泥と余剰濃縮汚泥を容積比でそれぞれ3:1に混合したものであった。

2.6 分析方法

汚泥の VSS 濃度および灰分は、工場排水試験方法 JIS K 0102-1986の強熱減量から算出した⁸⁾。

処理液の TOC および有機酸濃度は、すべて10,000 rpm、10分間遠心分離した上澄液について分析した。TOC 濃度は全有機炭素計(TOC-500, 島津, 京都)を用いて赤外線ガス分析法により分析した⁸⁾。有機酸の分析は、高速液体クロマトグラフ(880-PU, 860-CO, 日本分光, 東京)を用い、有機酸分析用カラム(Shim-pack SCR-101H, 島津)で分離した後、BTB 溶液で発色させ紫外可視分光検出器(870-UV, 日本分光)450 nm で吸光度を測定するポストラベル法⁹⁾で行った。

発生ガス中のメタン含量は、パケットカラム(Porapak Q, Gasukuro Kogyo Inc., Tokyo)を取り付けた TCD ガスクロマトグラフ(KOR-2G, Gasukuro Kogyo)を用いて測定した。

3. 結果および考察

3.1 初沈汚泥および余剰濃縮汚泥の回分式消化に及ぼす温度の影響

Fig. 3 は中温消化における希釈した初沈および余剰濃縮汚泥の回分処理試験結果を示している。初沈および余剰濃縮汚泥ともに処理試験直後のガス発生量は大きかったが、3~4日後以降特に余剰濃縮汚泥のガス発生速度は低下した。これは消化液中の有機酸濃度が $100mg \cdot l^{-1}$ 以下に低下していることから、液化もしくは酸生成反応が律速になったためと考えられた。また、Fig. 3 には希釈した混合汚泥を処理した時のガス発生(▽)の経日変化だけを示したが、両汚泥の中間的な変化を示した。

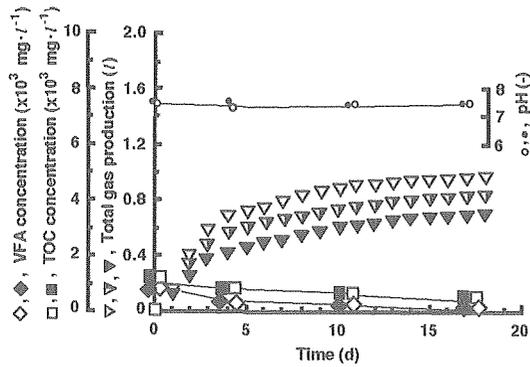


Fig. 3 Changes in gas production, pH, the concentrations of TOC and VFA during mesophilic digestion (37°C) of sewage sludge.

◇, □, ▽, ○, primary sludge; ◆, ■, ▼, ●, surplus sludge; ▿, mixed sludge

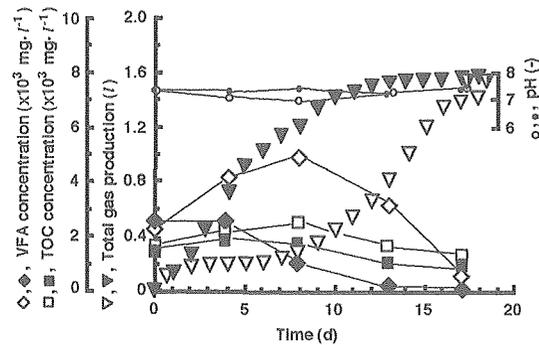


Fig. 4 Changes in gas production, pH, the concentrations of TOC and VFA during thermophilic digestion (53°C) of sewage sludge.

Symbols are the same as in Fig. 3

Fig. 4 は高温消化の回分処理試験結果を示している。中温消化と異なり、初沈汚泥および余剰濃縮汚泥で大きな相違が見られた。初沈汚泥では処理試験開始直後から有機酸濃度が増加し、8日後に約5,000mg・l⁻¹となった。この期間、有機酸が蓄積したためガスはほとんど発生しなかった。しかし、余剰濃縮汚泥では処理試験開始直後からガスが発生し、10日後に全ガス発生量は約1,500mlとなった。この値は中温消化で得られた値の約2倍であった。また、中温消化同様混合汚泥についても検討したが、そのガス発生の経日変化は図示しなかったが両汚泥の中間的変化を示した。従来、余剰汚泥は消化されにくいとされていたが、高温消化により比較的容易に分解されることが分かった。

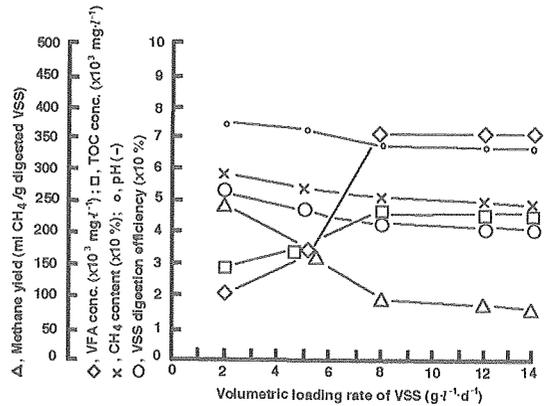


Fig. 5 Effects of volumetric loading rate of VSS on the efficiency of anaerobic treatment in the thermophilic liquefaction (53°C) of thickened surplus sludge

3.2 二段消化変法による汚泥の処理

上述結果から下水汚泥の処理法として、余剰濃縮汚泥だけを先に高温液化する二段消化方式を採用することにした。すなわち、まず余剰濃縮汚泥を高温液化する。その後、液化処理された余剰濃縮汚泥と初沈汚泥を混合し、この液化処理混合汚泥を中温消化により処理するものである。

3.2.1 余剰濃縮汚泥の高温液化に及ぼす VSS 実積負荷の影響

Fig. 5 は高温液化反応に及ぼす VSS 容積負荷の影響を示している。VSS 容積負荷 2 g・l⁻¹・d⁻¹では生成有機酸濃度は約2,000mg・l⁻¹であり、反応はガス化反応まで進んでいた。この時の VSS 消化率および供給 VSS 当たりのガス発生量それぞれ52%, 215ml・g⁻¹であり、バイオガス中のメタン含量は約58%であった。しかし、VSS 容積負荷を 5 g・l⁻¹・d⁻¹以上になると残存有機酸濃度は増加し、消化された VSS 当たりのメタン生成収率(以後、メタン生成収率とする)も240mlから155mlに低下した。VSS 容積負荷 8 g・l⁻¹・d⁻¹では有機酸濃度は7,000mg・l⁻¹(酢酸, 3,800mg・l⁻¹; プロピオン酸, 1,600mg・l⁻¹)となり、生成ガス量も80 ml・g⁻¹ of VSS と大幅に低下したが、メタン含量は51%であった。さらに、VSS 容積負荷を12, 14g・l⁻¹・d⁻¹と段階的に上げたが、有機酸濃度は一定しており、VSS 消化率およびメタン生成収率もほぼ一定していた。この間、槽内の pH を制御しなかったが、図示したように pH は6.7~6.9に維持された。これは汚泥中のバッファー効果が高かったためと考えられる。しかし、VSS 容積負荷を16g・l⁻¹・d⁻¹に上げると、図示しな

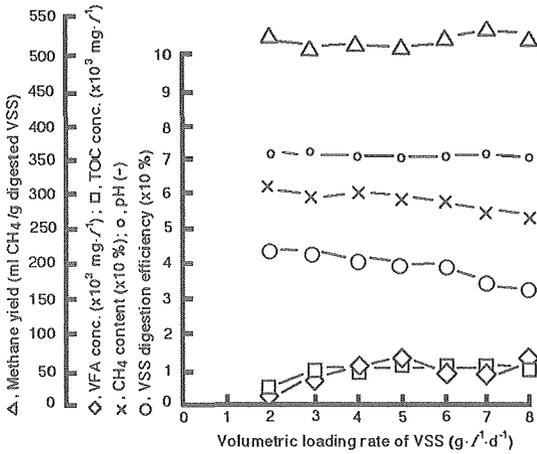


Fig. 6 Effects of volumetric loading rate of VSS on the efficiency of anaerobic treatment in the mesophilic digestion (37°C) of mixed sludge composed of the primary sludge and the thickened surplus sludge liquefied

かったが槽内の TOC, 有機酸および VSS 消化率は急激に減少し, 安定した液化処理が行えなくなった。

以上の結果から, 本処理工程は余剰濃縮汚泥の高温液化処理工程と考えられ, その時の最大 VSS 容積負荷は $14 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ であった。

3.2.2 液化処理混合汚泥の中温消化反応に及ぼす VSS 容積負荷の影響

初沈汚泥と VSS 容積負荷 $14 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ で液化処理された余剰濃縮汚泥を, 現場の汚泥発生量から容積比で 3 : 1 に混合した汚泥 (以後, 液化処理混合汚泥とする) を中温消化処理試験に供した。Fig. 6 に示すように, VSS 容積負荷を $2 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ から段階的に $8 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ (滞留時間 2.3 日間) まで上げたが, 残存する有機酸濃度はほとんど増加することなく, また供給 VSS 当たりのガス発生量もほぼ一定していた。しかし, VSS の消化率は VSS 容積負荷の増加とともに約 10% 低下した。また, この間のバイオガス中のメタン含量は 62 から 53% に減少したが, メタン生成収率は若干変動するものの約 $520 \text{ ml CH}_4 \cdot \text{g}^{-1}$ of digested VSS とほぼ一定していた。消化槽内の pH は 7.1~6.9 と安定しており, VSS 容積負荷 $8 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ でも安定して処理できることが分かった。さらに, VSS 容積負荷を $9 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ に上げたが, 残存有機酸濃度は急激に増加し, ガス発生量も大きく低下し, 安定した処理ができなくなった。

3.3 従来法による混合汚泥の中温消化

Fig. 7 は従来の中温消化 (37°C) により, 初沈汚泥と余剰濃縮汚泥を容積比で 3 : 1 に混合した汚泥を処

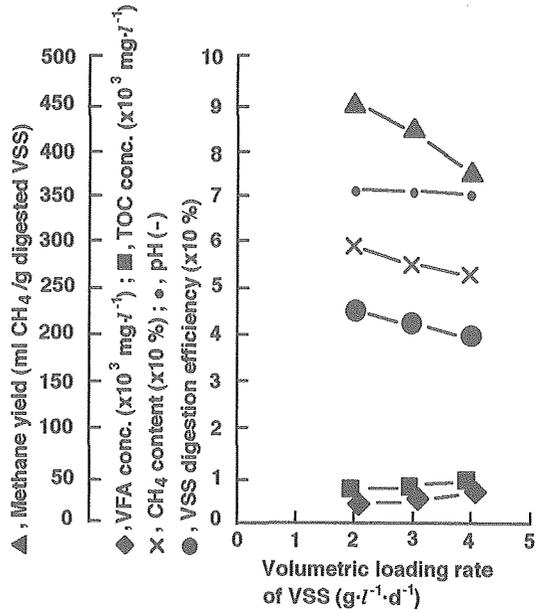
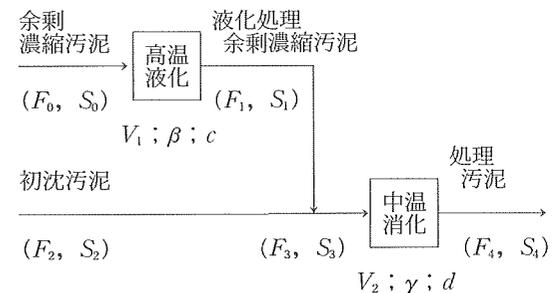


Fig. 7 Effects of volumetric loading rate of VSS on the efficiency of anaerobic treatment in the conventional mesophilic digestion (37°C) of mixed sludge composed of the primary sludge and the thickened surplus sludge

理した時の結果を示している。VSS 容積負荷を 2 から $4 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ に段階的に上げて行くと VSS 消化率, メタン含量およびメタン生成収率は低下するが, 各条件において安定した処理ができた。しかし, VSS 容積負荷を $5 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ に上げると残存有機酸濃度は増加し, 安定した処理ができなくなった。

3.4 二段消化変法の評価

二段消化変法の性能を上述した従来法と比較するために, 二段消化変法の全 VSS 容積負荷, 全 VSS 消化率および消化された全 VSS に対するメタン生成収率を, 次の工程図に記載した記号を用いて誘導した。



ここで F, S および V はそれぞれ汚泥の供給量 ($\text{l} \cdot \text{d}^{-1}$), 汚泥の VSS 濃度 ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$) およびリアクターの実容積 (l) である。 α は初沈汚泥と余剰濃縮汚泥中の

VSS 濃度比, β および γ はそれぞれ高温液化および中温消化反応での VSS 消化率とした。また, c および d はそれぞれ高温液化および中温消化反応での供給 VSS 1 g 当たりのメタン生成量 ($\text{ml CH}_4 \cdot \text{g}^{-1}$ of VSS) とした。

α , β , γ はそれぞれ式(1)から式(3)で表される。

$$\alpha(-) = S_2/S_0 \quad (1)$$

$$\beta(-) = (S_0 - S_1)/S_0 \quad (2)$$

$$\gamma(-) = (S_3 - S_4)/S_3 \quad (3)$$

まず, それぞれの汚泥の供給量において $F_0 = F_1$, $F_3 = F_4$ として, 供給量および VSS 量の収支を取った。

$$F_2 : F_0 = 3 : 1 \quad (4)$$

$$F_3 = F_1 + F_2 = F_0 + F_2 \quad (5)$$

$$F_3 \cdot S_3 = F_0 \cdot S_1 + F_2 \cdot S_2 \quad (6)$$

余剰濃縮汚泥中の VSS 濃度 S_0 は, 式(6)に式(1), (2), (4), (5)を代入し, 誘導すると次式で表される。

$$S_0 = 4S_3 / (1 - \beta + 3\alpha) \quad (7)$$

全 VSS 容積負荷 L ($\text{g} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) は, 高温液化槽および中温消化槽の総容積に対する VSS 容積負荷と定義すると次式で表される。

$$L = \frac{F_0 \cdot S_0 + F_2 \cdot S_2}{V_1 + V_2} \quad (8)$$

式(8)の逆数を取ると次式となる。

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{(F_0 \cdot S_0 + F_2 \cdot S_2) / V_1} + \frac{1}{(F_0 \cdot S_0 + F_2 \cdot S_2) / V_2} \quad (9)$$

式(9)に式(1), (2)および式(4)~(7)を代入すると式(10)となる。

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{(1 + 3\alpha)(F_0 \cdot S_0 / V_1)} + \frac{1}{\{(1 + 3\alpha) / (1 - \beta + 3\alpha)\}(F_3 \cdot S_3 / V_2)} \quad (10)$$

上式で, $(F_0 \cdot S_0 / V_1)$ および $(F_3 \cdot S_3 / V_2)$ は高温液化反応および中温消化反応における VSS 容積負荷である。

全 VSS 消化率 $D(-)$ は次式で表される。

$$D = \frac{F_0 \cdot S_0 + F_2 \cdot S_2 - F_4 \cdot S_4}{F_0 \cdot S_0 + F_2 \cdot S_2} = 1 - \frac{S_4}{(F_0 \cdot S_0 + F_2 \cdot S_2) / (F_0 + F_2)} \quad (11)$$

式(11)に式(1)~(4), (6)を代入すると, 全 VSS 消化率 D は次式のように初沈汚泥と余剰濃縮汚泥中の VSS 濃度比 α と, 高温液化および中温消化反応での VSS 消化率 β および γ で表される。

$$D = \frac{\{1 + 3\alpha - \beta + (\beta/\gamma)\}\gamma}{(1 + 3\alpha)} \quad (12)$$

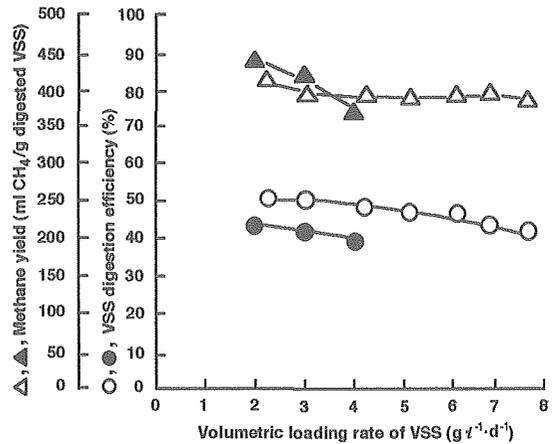


Fig. 8 Comparison of performance between the two-series digestion with the thermophilic liquefaction of thickened surplus sludge and the conventional digestion. Closed symbols, the two-series digestion; open symbols, the conventional digestion

また, 消化された全 VSS に対するメタン生成収率 M ($\text{ml CH}_4 \cdot \text{g}^{-1}$ of digested VSS) は次式で表される。

$$M = \frac{c \cdot F_0 \cdot S_0 + d \cdot F_3 \cdot S_3}{L \cdot D} \quad (13)$$

式(13)に式(2), (4)~(8)および(12)を代入し整理すると, M は次式で表される。

$$M = \frac{c + d(1 - \beta + 3\alpha)}{\{1 + 3\alpha - \beta + (\beta/\gamma)\}\gamma} \quad (14)$$

そこで, 式(10)および(12)に高温液化反応における $(F_0 \cdot S_0 / V_1)$ および β および c に最大 VSS 容積負荷 $14 \text{g} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ およびその時の VSS 消化率 43% と供給有機物 1 g 当たりのメタン生成量 $34 \text{ml CH}_4 \cdot \text{g}^{-1}$ of VSS を代入した。また, 中温消化反応における $(F_3 \cdot S_3 / V_2)$ および γ および d に, Fig. 6 に示した各負荷およびその時の VSS 消化率とメタン生成量を代入した。なお, 各負荷でのメタン生成量 d は低負荷から示すと 229, 212, 204, 192, 197, 184, 172 $\text{ml CH}_4 \cdot \text{g}^{-1}$ of VSS であった。

Fig. 8 は式(10), (12)および(14)から算出した二段消化変法の VSS 容積負荷とその時の VSS 消化率およびメタン生成収率を示している。また, 従来法で得られた結果 (Fig. 7) を図中に併記した。図から明らかなように二段消化変法で達成された最大 VSS 容積負荷は従来法の約 2 倍であった。また, VSS 容積負荷 $4 \text{g} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ における VSS 消化率は従来法と比較して約 10% 高

かった。これは一般に分解されにくい余剰濃縮汚泥が高温液化反応（酸生成を含む）で40%以上消化されたためと考えられる。メタン生成収率は、VSS容積負荷2および3 $\text{g}\cdot\text{l}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ では二段消化変法の方が若干低かったが、平均385 $\text{m}^3/\text{CH}_4\cdot\text{g}^{-1}$ of digested VSSと従来報告されている値に比べ遜色ないものであった。また、高温液化反応で生成するバイオガスを回収しないとした時のメタン生成収率は、式(14)の c に0を代入し算出すると平均360 $\text{m}^3/\text{CH}_4\cdot\text{g}^{-1}$ of digested VSSとなった。従って、二段消化変法では中温消化反応だけで全体の94%のメタンが生成されることがわかった。

高温液化反応のために余剰濃縮汚泥を昇温しなければならぬが、Table 1 に示したように各汚泥の平均温度は21°Cであることから、液化処理混合汚泥の温度は28.3°Cとなり、中温消化のためにさらに昇温が必要となる。従って、本方式は従来の加温式と比較してもエネルギー消費型にならず、消化速度および消化率を向上させることができた。

4. ま と め

余剰濃縮汚泥だけを先に高温液化する二段消化方式により、最大VSS容積負荷7.7 $\text{g}\cdot\text{l}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ を達成することができた。この値は、従来法で得られた値の約2倍と高いものであった。また、同一容積負荷におけるVSS消化率は従来法に比較し約10%高かった。これは高温液化反応により分解されにくい余剰濃縮汚泥がVSSとして43%消化されたためと考えられる。また、消化VSS 1g当たりのメタン生成収率は平均385 m^3/CH_4 であった。

(原稿受付 1994年8月10日)

(原稿受理 1994年11月14日)

参 考 文 献

- 1) 建設省監修 (1972) 下水道施設設計指針と解説, p.433, (財)日本下水道協会, 東京.
- 2) Rajan, R.V., Lin, J.G. and Ray, B.T. (1989) Lowlevel chemical pretreatment for enhanced sludge solubilization, *J. Water Pollut. Control Fed.*, **61**, 1678-1683.
- 3) 李玉友, 野池達也 (1989) 余剰活性汚泥の嫌気性消化に及ぼす前熱処理および滞留時間の影響, *水質汚濁研究*, **12**, 112-121.
- 4) Haug, R.T. (1978) Effect of thermal pretreatment on digestibility and dewaterability of organic sludges, *J. Water Pollut. Control Fed.*, **50**, 73-85.
- 5) Hiraoka, M., Takeda, N., Sakai, S. and Yasuda, A. (1985) Highly efficient anaerobic digestion with thermal pretreatment, *Water Sci. Technol.*, **17**, 529-539.
- 6) Aoki, N., and Kawase, M. (1991) Development of high-performance thermophilic two-phase digestion process, *Water Sci. Technol.*, **23**, 1147-1156.
- 7) Stuke, D.C. and McCarty, P.L. (1984) The effect of thermal pretreatment on the anaerobic biodegradability and toxicity of waste activated sludge, *Water Research*, **18**, 1343-1353.
- 8) 日本工業標準調査会審議 (1986) 工場排水試験方法 JIS K 0102, 有機物(32-33), TOC(52-55), (財)日本規格協会, 東京.
- 9) Wada, A., Bonoshita, M., Tanaka, Y. and Hibi, K. (1984) A study of a reaction system for organic acid analysis using a pH indicator as post-column reagent, *J. Chromatogr.*, **291**, 111-118.