

(15) 酸加熱処理の一段および二段嫌気性消化への適用

高島 正信^{1*}・田中 義人²

¹福井工業大学工学部原子力技術応用工学科 (〒910-8505福井市学園3-6-1)

²メインテナンス調査設計株式会社 (〒564-0062大阪府吹田市垂水町3-15-27)

* E-mail: takasima@fukui-ut.ac.jp.

下水汚泥の一段および二段嫌気性消化に酸加熱処理を組み込む効果について検討した。酸加熱処理は170℃、1時間、pH 約5 (硫酸使用) で実施し、一段消化 (35℃, HRT20日) では前処理として、二段消化 (第一槽: 55℃, HRT5日, 第二槽: 35℃, HRT15日) では中間処理として組み込んだ。106日間の連続運転の結果、一段消化コントロール48.7%, 同酸加熱処理65.8%, 二段消化コントロール52.7%, 同酸加熱処理67.6%のVSS減少率が得られ、酸加熱処理によって大幅に汚泥分解が高まった。また、汚泥脱水性が著しく向上し、リン酸溶出量も増加した。一方、メタン生成量に変化は少なく、多量の色度生成も確認された。よって、汚泥量の減少、脱水性の向上やリンの回収には酸加熱処理は有効であると結論付けられた。

Key Words : Acidic thermal treatment, anaerobic digestion, dewaterability, one-stage process, sewage sludge, two-stage process.

1. はじめに

近年、わが国の下水汚泥処理・処分においては、焼却による減量化等から、バイオガスや汚泥燃料等の資源・エネルギーとしての活用・再生に転換が図られている¹⁾。活用・再生の手段として挙げられている項目のうち二つが嫌気性消化とリン回収である。

リンは、枯渇資源であることが認識され、その回収の必要性が叫ばれて久しい。三大栄養素の一つであるため下水汚泥の緑地利用では必須の成分であるが、セメント原料としての建設資材利用や、炭化によるエネルギー利用においては必ずしも必要でないと思われる。とくに近年定着したセメント利用においては、リンがセメント固化に悪影響を及ぼすことが知られている²⁾。したがって、緑地利用を除くと、下水汚泥からの除去・回収が望まれる元素である。

下水汚泥の嫌気性消化について歴史的に見ると、高温消化³⁾、二相消化⁴⁾や温度相分離消化 (TPAD)⁵⁾などの著名な改良がなされてきた。さらに、難分解な汚泥成分も破壊して全体の汚泥分解を向上させるために、加熱処理^{6, 7)}、オゾン処理⁸⁾などの物理化学的処理の併用も試みられてきた。現在、物理化学的処理等を併用した実規模の

嫌気性消化システムとして、Cambia社による下水汚泥の前濃縮+前加熱処理の工程を組み合わせたものの普及が進んでいる⁹⁾。

筆者らは以前、加熱処理を組み込む場合のさまざまな処理プロセス形態を検討し、後処理と中間処理のプロセス形態がほぼ同等の効果を持ち、前処理より優れることを報告した¹⁰⁾。そのときには温和な温度条件である120℃を採用したが、加熱処理の最適温度と報告されている170~180℃付近^{11, 12)}では結果が異なることもありうる。加熱処理を最適温度で、かつpH酸性下の条件で行う酸加熱処理については、後処理のプロセス形態で実施済みである¹³⁾。また、筆者らは、嫌気性消化システムに硫酸が添加されるとき、リン酸が多量に汚泥から溶出することを報告した^{14, 15)}。下水汚泥からのリン酸溶出量を増大させることができれば、汚泥処理の過程においてリン回収が達成できることになる。

以上のような背景を基に、本研究では、酸加熱処理に最適温度条件である170℃と強酸として硫酸を用いたとき、1) 下水汚泥の一段および二段消化にそれぞれ前処理、中間処理として酸加熱処理を施し、その効果を把握する、および2) これらの処理プロセス形態におけるリン溶出について検討する、ことを目的に実験を行った。

2. 実験方法

(1) 供試汚泥

供試汚泥は、福井市内の合流式下水処理場から採取した濃縮汚泥を（計2回採取）、均一な化学的性状を保つために-30℃で凍結保存しておいたものである。これを数Lずつ解凍し、投入汚泥濃度が高濃度消化にほぼ該当する4～5%になるように上澄み液を捨てた後、二枚羽根の付いた攪拌機で1時間以上微細化してから使用した。また、解凍後は冷蔵庫に保存したので、投入時の温度ショックを防ぐため、マントルヒーターで暖めてから投入した。以前実施した実験では、このような保存・解凍方法が生分解性および脱水性へ及ぼす著しい影響は見られていない¹⁰⁾。

(2) 実験装置および運転方法

検討した4種類の処理プロセス形態を表-1に整理する。表中①および②は一段消化、③および④は二段消化の処理プロセス形態である。①と③はそれぞれ一段消化、二段消化のコントロールとして利用し、酸加熱処理を②は前処理として、④は第一槽と第二槽の間に中間処理として組み込んだものである。二段消化では、第一槽が高温55℃、第二槽が中温35℃に制御したTPAD方式とした。いずれの処理プロセスにおいても消化槽HRTのトータルは20日に統一した。

嫌気性消化槽としてはガラス製三角フラスコに流出入管とガス管を通したゴム栓で密閉したものを用い、1日1回基質の投入と汚泥の引き抜きを行う準連続式で運転した。中温消化槽は流入量80mL/日、温度約35℃（恒温室内）、回転振とう100rpmの条件に設定し、有効容量は一段消化が1.6L、二段消化の第二槽が1.2Lであった。二段消化の第一槽にあたる高温消化槽は③と④の共通として一基のみ用い、流入量200mL/日、温度約55℃（リボンヒーターとサーモスタットによる）、回転振とう140rpm、有効容量1.5Lの条件で運転し、第二槽で使われなかった第一槽消化汚泥は分析サンプルとして用いた。発生したガスは、ガスバック（CCK、ジーエルサイエンス、東京）に捕集した。

酸加熱処理は、容積2.5Lの圧力容器（TZA100-15K-LG、

ユニコントロールズ、東京）を用いて170℃、1時間の条件で実施し、このとき処理後pHが約5になるように硫酸（有害金属分析用、和光、東京）の添加量を調整した。この処理は1週間分をまとめて週1回実施した。酸加熱処理された汚泥は中和せずそのまま消化槽に投入し、消化槽においても実験開始時を除きpH調整を行わなかった。

種汚泥は、二段消化の高温第一槽には生ごみ代替物（10%ドックフード）を基質としてHRT10日、温度55℃で約1ヵ月間高温酸生成処理していたものを1/2希釈して、中温の消化槽には下水汚泥を基質としてHRT20日、温度35℃で数ヵ月間中温消化していたものを使用した。その濃度は高温用がSS17.6g/L、VSS14.8g/L、中温用がSS19.6g/L、VSS8.5g/Lであった。

(3) リン分画

実験終盤において、消化汚泥中リンの分画をMederios *et al.*¹⁰⁾の方法に従って実施した。手順は、汚泥試料10mL（乾燥重量として0.2～0.3g程度）を約40mLのPP製遠心管に採り、高速遠心（15,000rpm、10分間）して上澄み液を除いた後、まず20mLの1M NaOH溶液を用いて室温で16時間振とう抽出した。その後、高速遠心した上澄み液に8mLの3.5M HClを加え16時間静置し、その上澄み液を非Ca結合無機態P画分（Al、Fe等の酸化物や水酸化物と結合）の抽出液とした。次に、1M NaOH抽出後の沈殿物に20mLの1M HCl溶液を加え、室温で16時間振とうし、高速遠心後の上澄み液をCa結合無機態リン画分とした。以上の残差が固形性の有機態Pとなるが、本実験ではTPから溶解性TP、非Ca結合無機態およびCa結合無機態Pを差し引くことによって算出した。

(4) 分析方法

分析は週1回の頻度で実施し、分析方法は主としてStandard Methods¹⁰⁾に従った。溶解性液は、15,000rpmで10分間高速遠心した後、0.45μmメンブレンフィルターを用いたろ過により作成した。

COD_{Cr}は分光光度計（DR/4000U、Hach、Colorado、米国）を用いたClosed Reflux Colorimetric Method（Standard Methods 5220 D）で実施した。TP分析の前処理には、適

表-1 検討した処理プロセス形態

No.	段数	名称	フロー*
①	一段消化	コントロール	下水汚泥→消化槽(35℃, 20d)
②		前酸加熱処理	下水汚泥→前酸加熱処理→消化槽(35℃, 20d)
③	二段消化	コントロール	下水汚泥→第一消化槽(55℃, 5d)→第二消化槽(35℃, 15d)
④		中間酸加熱処理	下水汚泥→第一消化槽(55℃, 5d)→中間酸加熱処理→第二消化槽(35℃, 15d)

*カッコ内は運転温度とHRT。

切に希釈した後、ペルオキシ二硫酸カリウム分解法 (Standard Methods 4500E-N C) を適用した。PO₄-Pはアスコルビン酸法 (Standard Methods 4500-P E) によりDR4000U型分光光度計を用いて測定した。色度はADMI法 (Standard Methods 2120 E) によりDR4000U型分光光度計と1インチ試料セルを用いて測定した。汚泥の脱水性はCST (Capillary Suction Time, Standard Methods 2710 G) で把握したが、これにはCSTメーター (Type 304B, Triton Electronics, Essex, 英国), CST専用ペーパーと汚泥量6.4 mLを用いた。CSTはろ紙上の小カラムに入れられた汚泥から脱水される速度を測るもので、CST値を対応するSS濃度で割ることによって汚泥濃度の影響を補正することが一般的である¹⁹⁾。

CH₄, CO₂およびN₂のガス成分はTCD検出器付きガスクロマトグラフ (GC-9A, 島津製作所, 京都) を用い、カラムPorapak Q, キャリアガスAr; 40mL/min, カラム温度40℃, 注入口温度120℃, 検出器温度120℃で分析した。また、ガス中H₂Sの測定には、ガス検知管 (No. 4L または 4H, ガステック, 神奈川) を用いた。

3. 実験結果および考察

(1) 実験経過と処理プロセスの比較

本実験は106日間にわたり運転し、その間の経過を消化汚泥のVSS濃度、VSS/SS比、脱水性およびPO₄-P濃度とメタン発生量で代表させて図-1に示す。

供試下水汚泥の濃度は平均してTS約43%, VTS約2.9%。酸加熱処理における硫酸添加量は平均して一段消化0.035±0.005mL/日 (0.010±0.002mL/g-SS), 二段消化0.049±0.008mL/日 (0.016±0.003mL/g-SS) であった。酸加熱処理が組み合わせられると、消化汚泥のVSS濃度およびVSS/SS比は組み合わせられなかったものとの間で徐々に差が生じ、VSS濃度は10g/L以下、VSS/SS比は0.4程度に中盤以降は減少した。二段消化の第一槽については、高温消化でもVSS濃度およびVSS/SS比は他よりもかなり高いままだった。また、消化汚泥の脱水性 (SS濃度当りのCST値) および溶出リン酸の濃度においても、変動が大きかったものの酸加熱処理の有無による違いが明白であり、酸加熱処理が施されると大幅に脱水性は向上し、溶出リン酸の濃度は上昇した。これらの結果とは対照的に、メタンガス発生量については処理プロセスごとの差が終始小さかった。二段消化の高温第一槽については、70日目ごろからわずかながら安定なメタンガスの発生が観察され始めた。

二段消化第一槽でメタン発生があった実験終盤の71~106日間 (測定回数計6回) を定常期とみなし、測定

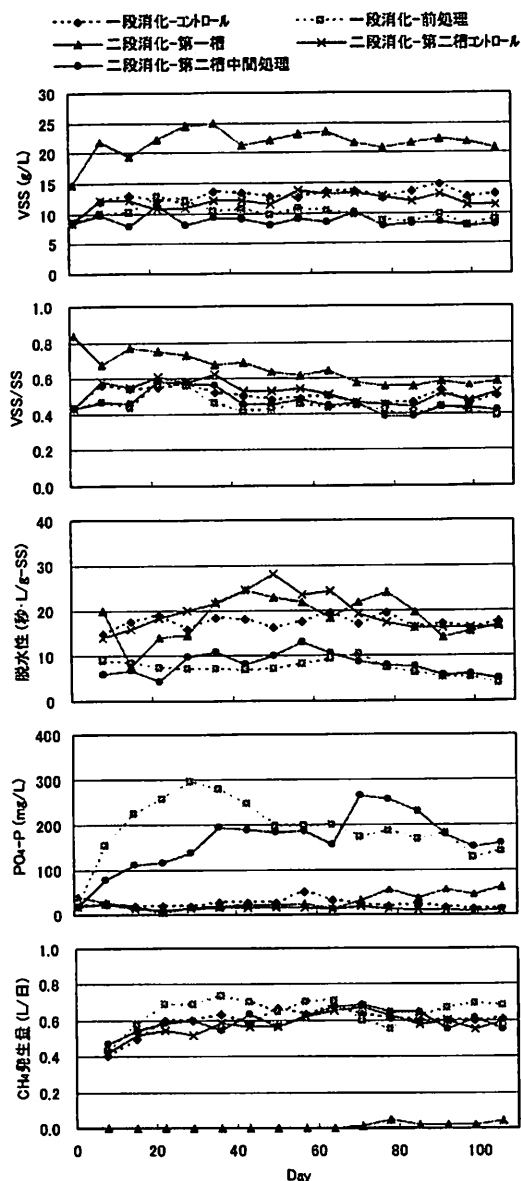


図-1 経日変化

結果と処理効率のまとめをそれぞれ表-2, 表-3に、総メタン発生量 (二段消化の場合は第一槽と第二槽の合計。なお、二段消化第一槽からのメタン発生量は流入量80mL/日に換算) を図-2に示す。

まず、下水汚泥の有機物分解性をVSS減少率で見ると、終盤における平均値は一段消化-コントロール48.7%, 一段消化-前処理65.8%, 二段消化-コントロール52.7%, 二段消化-中間処理67.6%となった。典型的な中温嫌気性消化における汚泥減少率はSS30~40%, VSS45~55%程度

表-2 測定結果まとめ (最終6回の平均±標準偏差)

	流入汚泥	一段消化			二段消化			
		コント ロール		前酸加熱 処理汚泥	共通	コント ロール		中間酸加熱 処理汚泥
		消化汚泥	酸加熱 処理汚泥	消化汚泥	第一槽 消化汚泥	第二槽 消化汚泥	酸加熱 処理汚泥	第二槽 消化汚泥
TS(g/L)	43.0±3.8	29.6±2.4	40.5±3.1	24.6±2.2	40.2±2.6	28.2±2.6	39.1±2.0	23.8±2.0
SS(g/L)	39.8±2.0	28.1±1.2	30.6±0.6	21.5±1.4	38.1±1.2	26.0±2.6	29.8±1.9	20.2±1.5
VTS(g/L)	28.5±2.9	14.4±0.8	26.0±2.7	12.1±0.9	26.4±1.9	13.4±1.4	23.6±1.3	11.2±0.9
VSS(g/L)	26.1±1.5	13.4±0.8	17.1±0.5	8.9±0.7	21.6±0.6	12.3±0.9	15.8±1.4	8.5±0.9
COD _{Cr} (g/L)	46.4±1.7	22.2±0.9	44.6±3.1	19.0±1.5	44.4±2.1	21.7±2.4	42.6±2.1	18.4±1.1
S-COD _{Cr} (g/L)	4.4±1.3	0.6±0.4	14.5±0.2	2.8±0.4	9.6±0.8	0.9±0.4	16.2±0.5	3.8±0.4
T-P(mg/L)	606±42	—	—	—	—	—	—	—
PO ₄ -P(mg/L)	18±6	18±6	75±13	163±24	48±11	12±4	124±24	207±50
色度(ADMI)	2060±300	2430±470	11300±1800	6220±230	5000±1640	1850±500	15500±3100	6370±280
脱水性(秒・L/g-SS)	8.0±2.5	17.0±0.9	0.6±0.1	6.3±2.4	18.6±3.9	17.0±1.2	0.7±0.4	6.8±1.5
pH	5.8±0.1	7.2±0.1	4.9±0.1	7.3±0.1	5.5±0.3	7.3±0.1	4.9±0.1	7.3±0.1
ガス発生量(L/d)	—	0.97±0.02	—	1.05±0.09	0.08±0.04	0.93±0.06	—	0.99±0.09
ガス発生量(L/g-VTS)	—	0.42±0.01	—	0.46±0.04	0.03±0.02	0.41±0.03	—	0.43±0.04
ガスCH ₄ (%)	—	63.0±0.8	—	60.4±1.0	35.4±4.6	64.9±1.4	—	62.0±1.3
ガスCO ₂ (%)	—	35.3±0.8	—	37.6±1.0	57.7±1.8	32.9±1.5	—	35.4±1.1
ガスH ₂ S(ppm)	—	13±2	—	155±45	489±296	10±3	—	295±123

表-3 処理効率まとめ (最終6回の平均±標準偏差)

	本研究				参考 ¹⁾			
	一段消化		二段消化		一段消化		一段消化	
	コント ロール	前酸加熱 処理	コント ロール	中間酸加 熱処理	コント ロール	後酸加熱 処理・塩酸	コント ロール	後酸加熱 処理・硫酸
VTS減少率 (%)	49.5±2.9	57.5±3.1	53.2±4.8	59.6±3.7	33.5	58.0	40.4	63.3
VSS減少率 (%)	48.7±3.1	65.8±2.8	52.7±3.4	67.6±3.3	33.6	69.2	41.4	73.1
COD _{Cr} 減少率 (%)	52.1±2.0	59.0±3.2	53.3±5.2	60.3±2.4	38.7	65.3	45.9	69.2
COD _{Cr} 回収率 (%)	94.7±1.4	89.8±5.1	94.2±4.6	89.1±5.4	100.4	82.3	97.2	79.5
メタン化率 (COD _{Cr} %)	46.8±1.1	48.9±4.3	48.5±3.3	49.4±4.1	39.1	47.6	43.1	48.8
リン溶出率 (%)	3.0±0.9	26.9±4.0	2.0±0.6	34.2±8.2	2.4	4.0	1.2	22.2
脱水性(秒・L/g-SS)	17.0±0.9	6.3±2.4	17.0±1.2	6.8±1.5	9.4	7.5	11.0	7.5
色度(ADMI)	2430±470	6220±230	1850±500	6370±280	420	1410	410	1590

であるので¹⁾、本実験の一段消化-コントロールの結果はその範囲内であった。コントロール同士を比べると二段消化の方が一段消化より約 4%高く、また、酸加熱処理が組み合わされるとVSS減少率が 15~17%も改善された。一方、VTS減少率で見ると、VSS減少率ほど酸加熱処理の有無による差が開いていないが、これは酸加熱処理によって色度成分などの難分解性有機物が残存するためであると考えられる。

表4には、処理プロセス間の VSS 減少率の有意差を t 検定によって統計的に解析した結果を示す。有意水準 95%において、酸加熱処理が組み合わされたときのみ

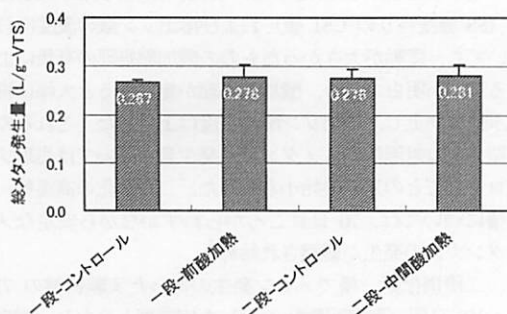


図-2 総メタン発生量 (最終6回の平均と標準偏差)

表4 VSS 減少率のt検定

	一段消化 コントロール	一段消化 前酸加熱処理	二段消化 コントロール	二段消化 中間酸加熱処理
一段消化—コントロールとの比較	—	<u>10.04</u>	2.12	<u>10.25</u>
一段消化—前酸加熱処理との比較	—	—	<u>7.29</u>	0.98
二段消化—コントロールとの比較	—	—	—	<u>7.71</u>

注) 下線は、有意水準95% ($t(10,0.05)=2.228$) において有意な差があることを示す。

VSS 減少率に有意な差が見られ、組み合わせられないもの同士（一段消化-コントロールおよび二段消化-コントロール）と組み合わせられたもの同士（一段消化-前酸加熱処理および二段消化-中間酸加熱処理）の間には有意な差が見られなかった。この解析結果から、一段消化、二段消化といった段数よりも酸加熱処理組み込みの方が、汚泥分解に対する影響が断然大きいと解釈される。

本実験の二段消化は、前述したようにTPAD方式で実施した。Vandenburgh and Ellis¹⁰⁾や小林ら¹⁷⁾のTPADに関する既往研究を参考にすると、一段目の高温消化で二段目よりメタンガスが多く回収され、そのときには高温消化における汚泥分解効果もすこぶる高いようである。本実験では、高温酸生成+中温メタン生成のような形式の二段消化になって高温消化槽で十分なメタン生成に至らず、これが一段消化と二段消化の間の差が小さかった主な理由であると思われる。また、Vandenburgh and Ellis¹⁰⁾は一段目高温消化槽の滞留時間が5.7日だと発泡が激しいため7.4日に延ばさざるえなかったという観察結果も報告しており、良好な高温メタン発酵には滞留時間5日では不足していた可能性がある。

表3には、参考として一段消化に酸加熱処理を後処理のプロセス形態で組み合わせたときの結果も載せてある（酸加熱処理条件のうちpHは約6、それ以外は本実験と同じ）。下水汚泥は合流式下水処理場から採取されたことにより雨水の影響を受けやすく、ひいては汚泥分解性の変動も大きいため明確に結論づけられないが、低かったコントロールのVSS減少率が後酸加熱処理を組み込むと2倍近くに上昇しており、後処理プロセス形態の汚泥分解に対する効果が顕著である。

図2に示す総メタン発生量については、どの処理プロセスでも似通っており、とくに一段消化-前処理、二段消化-コントロールおよび二段消化-中間処理においてほぼ同等であった。ちなみに、一般に得られる消化ガス発生量は有機物1kg当り500~600L（メタン濃度60~65%）と報告されている¹⁵⁾。本実験では、投入VTS1kg当りのガス発生量は500L未満と低めであった。一段消化-前処理と二段消化-中間処理は汚泥分解は著しく改善されたが、酸加熱処理に硫酸を使用したことによって、メタン前駆物質が硫酸塩還元反応に消費されたはずである。今回の硫酸添加量では、流入COD₀のうち一段消化

0.5g/L、二段消化0.7g/Lの消費になると理論計算される。また、酸加熱処理時における有機物損失も若干存在するため、酸加熱処理を組み込んだ処理プロセスでは有機物分解に比例したメタンガス発生量につながらなかったと考えられる。

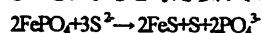
消化汚泥の脱水性は、酸加熱処理が施された一段消化-前処理と二段消化-中間処理では平均63~68秒・L/g-SSと、施されなかった場合の17.0秒・L/g-SSと比べ半分以上に改善されていた。汚泥脱水性は加熱処理温度が上がるほど改善されることがHaug et al.⁶⁾によって報告され、また、pH酸性でさらに改善されることが筆者¹⁰⁾によって観察されているので、このような大幅な改善も納得できるところである。

加熱処理の欠点として色度生成がある。一段および二段消化のコントロールと比べると、酸加熱処理が組み込まれた消化汚泥の溶解性液は色度が3倍ほどに上昇していた。以前、筆者¹⁰⁾はpHがおおむね3~8の範囲において低pHほど色度生成が抑制されることを報告した。しかし、既報¹⁰⁾の酸加熱処理条件であるpH約6でも約3倍色度が上昇していることから、今回の処理pH約5への低減は明白な差異を示すほどの効果がなかったか、あるいは色度生成が投入汚泥の性状に影響された可能性がある。

(2) リン溶出

消化汚泥中PO₄-Pの平均濃度は両コントロールでは10数mg/Lであったが、硫酸を用いた酸加熱処理が組み込まれるとはるかに高い200mg/L前後に達している。これは、流入TPに対するPO₄-P溶出率として、コントロールでは2~3%であるのに対し、一段消化-前処理では26.9%、二段消化-中間処理では34.2%と比較的高い値に相当する。

薬品またはガス状のH₂Sによる化学的なPO₄の溶出は、下式に示すようにリン酸鉄態のFe(III)がH₂Sによって還元され、これに伴いFe(II)による硫化鉄の生成とPO₄の放出が起こることによると考えられている¹⁸⁾。



この式に基づく化学量論から、1molのP当り1.5molのSが必要となる。筆者らは、嫌気性消化槽に硫酸が投入されると、硫酸塩還元反応によって微生物学的に生じたH₂Sが上式のように作用すると前報¹¹⁾で考察した。大下ら¹⁹⁾

によると、 H_2S 処理後に残存する主なリンの形態はAl塩、Ca塩とTOC共存物であると推定されている。

硫酸添加量から、一段消化-前処理では 170mg/L (= 0.42mmol/L/日)、二段消化-中間処理では 240mg/L (= 0.59mmol/L/日) の PO_4 -Pの溶出が可能であると計算される。実際は、一段消化-前処理が 163mg/L、二段消化-中間処理が 207mg/Lの定常値となっており、コントロールが 12~18mg/Lと低かったことを考慮すると、添加した硫酸のおよそ 80%が有効に作用したと推測される。

図-3には、消化汚泥のリン分画の結果を示すが、酸加熱処理の有無によって傾向が異なっている。酸加熱処理が施されると、固形性非Ca結合無機態および固形性有機態の割合が減少している。この結果から、消化汚泥中の溶解性 PO_4 の上昇は、前術した硫酸塩還元によって生じた H_2S による化学的な PO_4 溶出のみでなく、汚泥分解の向上に伴う固形性有機態Pのリン酸化も寄与していると考えられる。また、変化量は小さかったものの、このように溶出した PO_4 が余剰なCaと結合し、固形性Ca結合無機態画分の増加につながったことも示唆される。

消化汚泥中Pの形態については、Wild *et al.*¹⁹⁾や小松ら²⁰⁾が詳細な水質化学的解析を行っている。前者はリン溶出にはCaがもっとも大きな影響を与えること、後者は正確な解析のためにはP-Ca析出化合物の種類が重要であることを指摘しており、本実験のような硫化物による PO_4 溶出法においても最終的な PO_4 濃度はCaに支配される可能性が高いと思われる。

4. まとめ

本研究では、106 日間の連続実験を通じて、下水汚泥の一段および二段嫌気性消化に酸加熱処理 (170℃, pH 約 5, 1 時間) を組み込んだときの効果と、酸加熱処理の強酸として硫酸を用いたときのリン溶出について検討した。

1) 定常期の汚泥分解を VSS 減少率でみると、一段消化-コントロール 48.7%、一段消化-前酸加熱処理 65.8%、二段消化-コントロール 52.7%、二段消化-中間酸加熱処理 67.6%が得られた。t 検定を用いた統計的解析によれば、酸加熱処理を組み合わせたときのみ処理プロセス間に有意な差があると結論づけられた。また、消化汚泥の脱水性はコントロールの 1/2 以下に改善された。よって、汚泥の分解および脱水性に対する酸加熱処理の有効性が示された。

2) 得られたメタン発生量は酸加熱処理が施されてもコントロールとほぼ同等であり、また、酸加熱処理によってコントロールの約 3 倍の色度が生成された。

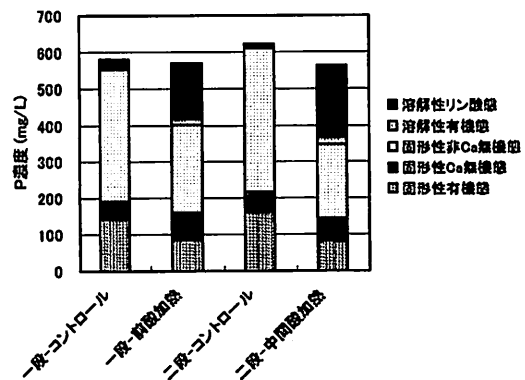


図-3 消化汚泥のリン分画

3) 消化汚泥からの PO_4 -P溶出はコントロールの 10 数 mg/L よりはるかに高い 163mg/L (一段消化-酸加熱処理)、207mg/L (二段消化-中間酸加熱処理) に達し、硫酸を用いた酸加熱処理は PO_4 溶出に有効なことがわかった。また、リン分画の結果から、固形性の非Ca結合無機態Pおよび有機態Pが減少していることが判明し、溶出 PO_4 濃度の上昇は硫酸塩還元によって生成した硫化物のリン酸鉄との置換と、固形性有機態Pの分解向上の両者によるものと推定された。

謝辞

福井市下水道部には下水汚泥の採取を認めていただいた。また、本研究の一部は文部科学省オープン・リサーチ・センター事業および同科学研究費基盤研究 (C) の補助を受けた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 石井宏幸, 鈴木あや子: 下水道資源利用の動向と今後の課題について, 再生と利用, Vol.33, No.123, 34-42, 2009.
- 2) (社) 日本下水道協会: 下水汚泥の建設資材利用マニュアル (案), 2001.
- 3) Buhr, H. O. and Andrews, J. F.: The thermophilic anaerobic digestion process, *Wat. Res.*, Vol.11, 129-143, 1977.
- 4) Ghosh, S. and Klass, D. L.: Two-phase anaerobic digestion, *Proc. Biochem.*, Vol.13, 15-24, 1978.
- 5) Han, Y., Sung, S. and Dague, R. R.: Temperature-phased anaerobic digestion of wastewater sludges, *Wat. Sci. Technol.*, Vol.36(6/7), 367-374, 1997.
- 6) Haug, R. T., Suckey, D. C., Gossett, J. M. and McCarty, P. L.: Effect of thermal pretreatment on digestibility and dewaterability of organic sludges, *J. Water Pollut. Control Fed.*, Vol.50, 73-85, 1978.
- 7) Li, Y.-Y. and Noike, T.: Upgrading of anaerobic digestion of waste activated sludge by thermal pretreatment, *Wat. Sci. Technol.*, Vol. 26(3/4), 857-866,

- 1992.
- 8) Goel, R., Tokutomi, T., Yasui, H. and Noike, T.: Optimum process configuration for anaerobic digestion with ozonation, *Wat. Sci. Technol.*, Vol.48(4), 85-96, 2003.
 - 9) Kepp, U., Machenbach, I., Weisz, N. And Solheim, O. E.: Enhanced stabilization of sewage sludge through thermal hydrolysis-three years of experience with full scale plant, *Water Sci. Technol.*, Vol.42(9), 89-96, 2000.
 - 10) 高島正信：下水汚泥の嫌気性消化における物理化学処理併用プロセス形態の実験的検討—熱処理を例として，環境工学研究論文集，Vol.40, 303-310, 2003.
 - 11) 高島正信，田中義人：酸加熱処理を組み合わせた下水汚泥の嫌気性消化に関する研究，環境工学研究論文集，Vol.43, 1-6, 2006.
 - 12) 高島正信，田中義人：硫黄サイクルを利用した下水汚泥からのリン・重金属の逐次除去，環境工学研究論文集，Vol.44, 695-702, 2007.
 - 13) Medeiros, J. J. G., Cid, B. P. and Gómez, E. F.: Analytical phosphorus fractionation in sewage sludge and sediment samples, *Anal. Bioanal. Chem.*, Vol.381, 873-878, 2005.
 - 14) APHA, AWWA and WEF: *Standard methods*, 2000.
 - 15) (社) 日本下水道協会：下水道施設計画・設計指針と解説，1994.
 - 16) Vandenberg, S. R. and Ellis, T. G.: Effect of varying solids concentration and organic loading on the performance of temperature phased anaerobic digestion process, *Wat. Environ. Res.*, Vol.74, 142-148, 2002.
 - 17) 小林拓朗，李玉友，原田秀樹，安井英斉，野池達也：温度フェーズと中間オゾン処理を組合わせたプロセスによる余剰汚泥嫌気性消化の促進効果，環境工学研究論文集，Vol.44, 703-712, 2007.
 - 18) 大下和徹，北大路博之，高岡昌輝，加藤文隆，武田信生，松本忠生，檜物良一：薬剤添加による前凝集沈殿汚泥からのリン抽出および回収方法に関する研究，環境工学研究論文集，Vol.42, 335-346, 2005.
 - 19) Wild, D., Kiskialova, A., and Siegrist, H.: Prediction of recycle phosphorus loads from anaerobic digestion, *Wat. Res.*, Vol.31, 2300-2308, 1997.
 - 20) 小松和也，安井英斉，李玉友，野池達也：下水汚泥の嫌気性消化における無機物の溶解析出挙動の熱力学的解析，環境工学研究論文集，Vol.45, 341-348, 2008.

(2009. 5. 22受付)

Application of Acidic Thermal Treatment to One- and Two-Stage Anaerobic Digestion of Sewage Sludge

Masanobu TAKASHIMA¹, Yoshihito TANAKA²

¹Dept. for the Application of Nuclear Technology, Fukui University of Technology

²Maintenance E&D Co., Ltd.

The effectiveness of acidic thermal treatment (ATT) was examined in a 106-day continuous experiment, when applied to one- or two-stage anaerobic digestion of sewage sludge (4.3% TS). The ATT was performed at 170°C and pH 5 for 1 hour (sulfuric acid for lowering pH). The one-stage process was mesophilic at 20 days HRT, and incorporated the ATT as pre-treatment. The two-stage process consisted of a thermophilic digester at 5 days HRT and a mesophilic digester at 15 days HRT, and incorporated the ATT as interstage-treatment. On average, VSS destruction was 48.7% for the one-stage control, 65.8% for the one-stage ATT, 52.7% for the two-stage control and 67.6% for the two-stage ATT. Therefore, the VSS destruction was increased by nearly 20%, when the ATT was combined in both one- and two-stage processes. In addition, the dewaterability of digested sludge was remarkably improved, and phosphorus release was enhanced. On the other hand, the total methane production did not differ significantly, and color generation was observed in the digested sludge solutions with ATT. In conclusion, the anaerobic digestion with ATT can be an attractive alternative for solids reduction and handling, and for phosphorus recovery.