研究論文

高濃度分離濃縮下水汚泥の特性と微生物活性助剤(サポニン)添加の嫌気性消化に対する影響について

The Effects of the Qualities of Separately High-concentrated Sludges and Dosing Bio-active Reagent (Saponin) on the Anaerobic Digestion of Sewage Sludge

長坂 實上*・佐藤 義典*・山下 尚晃*

ABSTRACT

The anaerobic digestion of sewage sludge was carried out. The sludge used was the mixed sludge of centrifugally thickened excess sludge (TS about 4%) and gravitationally thickened sludge (TS about 5%) from treatment plant of separate sewerage system, and the bio-active reagent (saponin 5ppm) was dosed in the anaerobic digestion tank. The temperature of tank was 35°C in the mesophilic digestion. The retention time of sludge was 20, 15, 10 or 7 days. The volume of produced gas was about 20 times compared with that of feed sludge. The produced gas volume per feed organic substance was 0.4~0.55 [ℓ/g-VTS]. The concentration of H₂S and CH₃SH in the gas was remarkably decreased by dosing saponin.

Key Words: sewage sludge, separately high-concentrated sludge, anaerobic digestion, mesophilic digestion, bio-active reagent(saponin).

要 旨

下水汚泥の嫌気性消化実験を行った。使用した汚泥は分流式下水処理場の遠心濃縮余剰汚泥（固形物濃度約4%）と重力濃縮汚泥（固形物濃度約5%）の混合汚泥であり、そこに微生物活性助剤（サポニン、5ppm）を添加した。消化槽の温度は35度の中温消化であり、消化日数は20日、15日、10日および7日とした。ガス発生倍率は約20倍であり、また、投入有機物あたりのガス発生量は0.40~0.55 [ℓ/g-VTS]であった。また、ガス中の硫化水素およびメチルメルカプタンの濃度はサポニンの添加により大きく減少した。

キーワード：下水汚泥、高濃度分離濃縮汚泥、嫌気性消化、中温消化、微生物活性助剤（サポニン）

1. はじめに

近年、下水道整備は水質改善の切り札として位置づけられ普及率もようやく55%に達するに到った。このような状況の下で下水道の普及率の向上と共に汚泥の処理および処分方法が問題となっている。本来、排水処理では汚水を処理することを目的とするが、その際、汚濁物質は汚泥として回収され、除去される。汚泥の処理プロセスとしては、濃縮、嫌気性消化、脱水、焼却および溶融等種々な方法が提案されている。汚泥処理の多くは性状が処理場毎に異

なるため一般的な取扱い法がない。さらに、良好な処理状況を判定する基準がない等の理由から効率的な処理へのマニュアル化が進んでいない。

汚泥の濃縮や嫌気性消化について、一般的な解説書では現実的な課題に対応しきれない部分が多い^{1)~3)}。たとえば、発生汚泥量と実施施設の容量の違いが大きい場合がある。また、有機物割合(VTS/TS)が78%と83%または83%と88%の5%の違いで取扱い方を大きく変える必要があるが、この事は解説書にはほとんど記述されていない。また、最近では比較的維持管理が容易で創エネルギーに役立つ処理方

* 茨城大学工学部物質工学科
Minoru NAGASAKA, Yoshinori SATO, Naoaki YAMASHITA

1998年10月30日受付
1999年3月5日受理

図-1 下水処理場フローの概略

法として濃縮工程に分離濃縮を採用する処理場が増加している。それら処理場では、余剰汚泥は機械濃縮で約4%に濃縮され、また、生汚泥は重力濃縮で約5%まで濃縮される。このようにして得られた汚泥(平均4.5%)を嫌気性消化することができれば多量のガス発生と汚泥固形物分の減少を同時に効率良く進行させることができる。高濃度嫌気性消化についてはいくつかの報告があるが^{4,5)}その数は少なく十分とは言えない。

本研究では高濃度嫌気性消化槽を建設中の実施設の分離濃縮汚泥を使用し、実験室で種々な条件で嫌気性消化を行い、その結果を実施設に反映することを目的に実験を行った。また、より効率的な消化を

行わせるために、活性汚泥による有機性排水の処理⁶⁻⁸⁾および汚泥の嫌気性消化⁹⁻¹¹⁾において有効性が報告されている微生物活性助剤(サポニン)の添加の実験も行った。

2. 実 験

茨城県内のI処理場は標準的な分流式下水を処理する施設である。フローの概略を図-1に示す。この施設は設計能力2.5万m³/日に対して、流入水量は平均2万m³/日である。実験に使用した濃縮汚泥および余剰汚泥はそれぞれ重力濃縮槽および遠心濃縮機の出口部分から採取した。その汚泥を濃度調整せずそのまま等

量混合して使用した。汚泥の採取は通常2週間に1度採取し、冷蔵庫(5℃)に保管し、毎回分取して投入した。種汚泥としては、分流式で高濃度嫌気性消化を行っている他の下水処理場からの消化汚泥を使用し、約80日間馴致した後、サポニンの添加実験(添加濃度:5mg/ℓ)を開始した。実験に使用した嫌気性消化装置(20ℓ)の概略を図-2に示す。消化槽はサポニン無添加槽とサポニン添加槽の2系列で行った。消化槽の温度は中温消化の35℃で一定とし、槽内の消化汚泥量は維持管理の都合で18ℓとした。後半の消化日数の短い時には、著しい発泡も見られ消化汚泥量を15ℓとした。消化日数(平均汚泥滞留日数)は20日、15日、10日および7日であった。汚

泥の投入は通常1日1回であったが、消化日数が短くなると1回の投入量が増えるので1日2回とした。消化日数と汚泥投入間隔の関係を表1に示す。

測定項目は、投入汚泥および消化汚泥については総固形物濃度(TS)、有

図-2 実験装置の概略図

表1 消化日数と汚泥投入間隔の関係

消化日数 [day]	消化温度 [°C]	汚泥投入 間隔[hr]	運転日数 [day]
20	35	24	77
15		24	49
10		12	21
7		12	14

機物濃度(VTS)、酸度、アルカリ度、揮発性有機酸濃度等であり、発生ガスについては全発生量、ガス組成(CO_2 および CH_4)、 H_2S および CH_3SH の濃度等であった。ガス組成および揮発性有機酸濃度はガスクロマトグラフィー(検出器:TCDまたはFID)により測定した、 H_2S および CH_3SH の濃度はガス検知管(ガステック製)により測定した。通常の分析は主に下水試験方法に従って行った。

3. 実験結果および考察

3.1 投入汚泥

嫌気性消化槽への投入汚泥は生汚泥を重力濃縮した濃縮汚泥と返送汚泥を遠心濃縮した余剰汚泥を等量混合した混合汚泥であった。処理場から採取した濃縮汚泥と余剰汚泥の総固形物量(TS)と有機物濃度(VTS)および有機物割合(VTS/TS)を図-3のa)およびb)に、またそれぞれの揮発性有機酸濃度を図-4に示す。図-3より、余剰汚泥のTSは4%前後とほぼ一定であるのに対し、濃縮汚泥のTSは3~6%と大幅に変動した。濃縮汚泥の濃度の変化は汚泥の投入量と引抜量の管理の質に関係し、非常に重要な問題である。一般的に、投入汚泥濃度を高くすれば投入汚泥量を少なくでき、消化日数も長くなり、ガス発生量も増加する。さらに、後に続く脱水汚泥量も減少する等など維持管理で利点が多い。それ故、投入汚泥濃度は高濃度に維持することが好ましい。有機物割合を見ると濃縮汚泥では約88%、また、余剰汚泥

a) 余剰汚泥

b) 濃縮汚泥

図-3 投入汚泥のTS, VTSおよび有機物割合の経日変化

図-4 投入汚泥の揮発性有機酸(酢酸換算)の経日変化

では約82%であり、それぞれにあまり大きな変動は見られなかった。分流水下水処理場の余剰汚泥と濃縮汚泥では有機物割合はほぼ同じか、または余剰汚泥の方がやや高い傾向にある⁴⁾。しかし、I 処理場では、曝気槽の運転を硝化・脱窒型の高度処理に近い運転をしているためか余剰汚泥の方が約6%低い値であった。一般に、汚泥の腐敗が進むと酸性発酵により揮発性有機酸が生成し、pH が低下する。図-4 から、余剰汚泥は活性汚泥を濃縮したものであり揮発性有機酸はほとんど検出されていない。これに対し、濃縮汚泥に対する値は、実験開始の3月中は1,000 mg/ℓ以下であったものが80日から120日経過（6月から7月）にかけて3,000 mg/ℓ以上にまで増加した。このことは3月の水温が低く腐敗の進行の遅い時期から徐々に水温が上昇し、腐敗が進行し易くなったためと考えられる。したがって濃縮槽の維持管理には汚泥の腐敗を考慮することが重要である。図-5 に投入有機物量を示す。投入汚泥の有機物濃度が一定であれば投入有機物量は消化日数毎に計算され、消化日数一定の期間中は一定になるはずである。しかし、投入汚泥濃度の変化により投入有機物量 $[g-VTS/\ell \cdot day]$ が変化することがわかる。特に、消化日数10日と7日を比較すると投入有機物量にあまり差がない。このことは濃縮汚泥濃度（TS）が約6%から約4%に急激に30%以上減少したことによるものである。

3.2 消化汚泥

消化汚泥の物性としては pH、酸度、アルカリ度、揮発性有機酸、TS、VTS 等多数測定している。それらのうち消化の様子を表し、維持管理上で重要である TS、VTS および消化率を図-6 に示す。TS および VTS は50日以降徐々に上昇している。これは投入汚泥濃度が5%以上のことが度々あったことによるものである。これ

図-5 投入有機物量の経日変化

図-6 嫌気性消化汚泥の TS、VTS および消化率の経日変化

と同様に、消化日数7日の部分で急に TS および VTS が減少している。これも前に述べたように投入

汚泥濃度の急激な低下によるものである。一般的な言い方をすれば投入汚泥の濃度の大きな変化も消化汚泥の物性には徐々にしか現れない。消化率（図一6）は消化日数20日の55%から7日の45%に徐々に減少している。これは汚泥の消化槽内の滞留日数が短くなり、十分消化しない汚泥が排出され結果として消化率が低下したためである。しかし、消化日数7日の場合、投入汚泥の濃度が極端に低下したことを考え、この部分を除いて考えると、消化日数10日も消化率は48%であり順調に消化が進行していた。言い換えれば投入汚泥濃度5%では消化日数10日まで消化可能であった。また、有機物負荷は $4.5\text{g-VTS}/\ell \cdot \text{day}$ まで消化可能であった。サポニン添加の効果については消化汚泥のTS、VTSおよび消化率（図一6）のいずれについても大きな差は見られなかった。

3.3 発生ガス

投入汚泥量に対するガス発生量、すなわちガス発生倍率は嫌気性消化の経済性や維持管理上重要な指標である。図一7にガス発生倍率を示す。発生倍率は12~22倍と大きく変化している。この変化の大きな部分は投入汚泥の変化によると考えられる。濃縮汚泥と余剰汚泥は1:1の割合で投入されているにもかかわらず、濃縮汚泥のTSの経日変化とガス発生倍率の経日変化は図一3の投入汚泥のTSの経日変化とよく一致する。それゆえガスは主に濃縮汚泥から発生したものと考えられる。濃縮汚泥と余剰汚泥のガス発生能について今後より詳しい実験が必要である。投入有機物1gあたりのガス発生量を1週間毎に平均した結果を図一8に示す。平均ガス発生量は $0.40\sim 0.55 [\ell/\text{g-VTS}]$ であり、文献値とほぼ同じであった^{1,2,10)}。また、これらの値は消化日数やサポニン添加の有無によってもあまり変わらなかった。

図一7 嫌気性消化汚泥のガス発生倍率（0℃換算）の経日変化

図一8 投入有機物1gあたりの平均ガス発生量（0℃換算）の経日変化

図一9 嫌気性消化ガス中のメタン濃度の経日変化

これらの結果は、サポニン添加によりガス発生量が増加したとする菅原の結果と異なった⁹⁻¹¹⁾。発生ガス中のメタン濃度を図-9に示す。メタン濃度は50～70%まで変化すると考えられるが、一般的には60～65%が多い^{1,2)}。本実験ではメタン濃度は58～60%の間にあり、サポニン添加による差はなかった。また、消化日数7日の後半では両系とも少し低下した。

消化ガスの悪臭の原因物質であり、腐食性もある硫化水素(H_2S)およびメチルメルカプタン(CH_3SH)の濃度変化を図-10に示す。硫化水素はサポニン無添加槽の場合、全期間を通してほぼ一定の値であった。サポニン添加槽では消化日数20日および15日の前半まではサポニン無添加槽とほぼ同じ値であった。しかし、実験開始後100日経過頃(消化日数15日後半)から硫化水素濃度の急激な低下が見られた。一方、メチルメルカプタンの濃度はサポニン添加開始、約90日以降、サポニン添加系の方が低くなり、120日以降検出されなくなった。このような濃度変化について、菅原もサポニン添加開始約90日後に硫化水素濃度の急激な減少があったと報告している⁹⁾。したがってこの減少はサポニン添加の効果と考えられる。

3.4 1サイクル内の消化槽の状態

これまでに示した消化汚泥の性質やガス発生状況は、1サイクルの終わりで投入前に引き抜いた汚泥を使用し、ガス発生量も1日1回の測定によるものである。消化日数が短くなり1回の投入量が増加すると投入直後から時間の経過と共に汚泥物性が変化することが予想される。このような考えから消化日数10日の全揮発性有機酸、累積ガス発生量および液面上の泡の高さの経時変化を図-11、12および13に示す。

図-10 嫌気性消化ガス中の硫化水素およびメチルメルカプタン濃度の経日変化

図-11 嫌気性消化汚泥の揮発性有機酸濃度(酢酸換算)の経時変化(消化日数10日, 12時間サイクル)

図-12 嫌気性消化汚泥の累積ガス発生量(0℃換算)(消化日数10日, 12時間サイクル)

図-13 嫌気性消化汚泥の泡の高さの経時変化
(消化日数10日, 12時間サイクル)

表1に示したように消化日数10日の場合, 汚泥の投入間隔は12時間であり, 朝夕2回投入を行った。図-11から揮発性有機酸は投入12時間後には検出されなくなった。サポニン無添加槽とサポニン添加槽の間で途中多少の差はあるもののその最高値および消失時間ともほぼ同じであり, このグラフからは差はないと考えられる。図-12のガス発生状況から前半と比較して後半ではやや発生速度が低下する。サポニン無添加槽とサポニン添加槽では初期の1~2時間のところで少し差が認められるが, 全体を考えると差はないと考えられる。図-13に発泡による泡の高さを示す。汚泥の性質と泡の高さには強い相互関係があると予測されるが定量化はできなかった。揮発性有機酸濃度(図-11)および泡の高さ(図-13)共に消化日数の変更直後に高い値を示し, その後徐々に低下していった。この事は汚泥の馴致効果によるものと考えられる。

4. まとめ

茨城県内の分流式のI処理場の分離濃縮汚泥を使用し, 嫌気性消化実験を行った。消化温度は35°Cの中温消化で, 消化日数は20日, 15日, 10日および7日であった。微生物活性助剤(サポニン)を添加し, その効果も調べた結果, 次のような事がわかった。

1. 消化日数10日(有機物負荷: 4.5 g-VTS/ℓ・day)まで嫌気性消化は安定して進行した。
2. ガス発生倍率は約20倍であった。
3. 投入有機物あたりのガス発生量は0.40~0.55 [ℓ/g-VTS]で消化日数にほとんど関係なかった。
4. 発生ガス中のメタンの濃度は58~60%であった。
5. 発生ガス中の硫化水素およびメチルメルカプタンの濃度はサポニン添加開始後, 約100~110日後に大きく減少した。
6. 消化率, ガス発生量, メタン濃度等に対してサポニン添加の効果は特に認められなかった。

参考文献

- 1) 岩井重久, 申丘徹, 名取真「改訂下・廃水汚泥の処理」コロナ社(1981)
- 2) 「下水道施設計画・設計指針と解説」日本下水道協会(1994)
- 3) G. Tchobanoglousら著, 松尾友矩ら訳「水質環境工学」技報堂出版(1993)
- 4) 荒又健夫, 陳紹偉, 長坂實上, 佐藤義典, 丸山結「分離濃縮汚泥のガス発生能について—余剰汚泥, 生汚泥および混合汚泥—」第23回下水道研究発表会講演集 pp606~608 (1986, 仙台)
- 5) 清原雄康, 宮原高志, 水野修, 野池達也, 李玉友「高温嫌気消化法を用いた高濃度下水汚泥の処理特性」土木学会論文集, NO601/VII-8, pp35~43 (1998)
- 6) 長坂實上, 田代榮一「サポニンを活用した食肉系高濃度有機排水処理への特性」PPM, 1, pp87~94 (1996)
- 7) 長坂實上, 横田宏行「高濃度含油排水へのキラヤサポニン添加による効率的処理について」茨城大工学部研究集報, 44, pp19~26 (1996)
- 8) 長坂實上, 田代榮一「サポニン添加による高濃度含油排水の処理」用水と廃水, 39(2), pp149~156 (1997)
- 9) 菅原正孝「下水汚泥嫌気性消化におけるサポニン添加効果に関する実験的研究」月刊下水道, 20(5), pp71~73 (1997)
- 10) 菅原正孝「嫌気性消化におけるサポニン添加効果についての実証実験」月刊下水道, 20(2), pp83~86 (1997)
- 11) 菅原正孝「下水処理工程における微生物活性助剤サポニンの利用について」月刊下水道, 21(5), pp89~92 (1998)