

(14) 下水汚泥の好氣的・嫌氣的分解性に関する研究

A STUDY ON AEROBIC AND ANAEROBIC DEGRADABILITIES OF SEWAGE SLUDGE

寺 町 和 宏* 高 桑 哲 男*

Kazuhiro TERAMACHI* Tetsuo TAKAKUWA*

ABSTRACT ; Biological degradability of sewage sludges was studied by aerobic and anaerobic digestion experiments. The following results were obtained. (1) The primary clarifier sludge produced at lower overflow rate was more rapidly decomposed than that at higher overflow rate in the batch aerobic digestion process, while the difference was little in the anaerobic one. (2) In the batch aerobic digestion process of waste activated sludge, the ultimate decomposition level became higher as the overflow rate of primary clarifier was increased. (3) In the semi-continuous digestion process of mixed sludge, the specific decomposition rate in the anaerobic digestion at 37°C was fairly higher than the aerobic digestion at 20°C for short digestion time, while the difference was little for long digestion time. (4) The percentage of anaerobic decomposition was rapidly increased for 10 days and was nearly the same after then. The highest percentage was 93 on a basis of the degradable mass. The soluble COD was not increased in the digester until about 6 to 8 days. (5) In the anaerobic digestion process of the mixed sludge oxidized by the preceding aerobic digestion, the solid liquefaction rate in the early stage was not so affected by the remaining degradable mass, while the overall gas production rate per decomposed volatile solid was reduced by about 25% compared to the original value of 800 ml/g of the mixed sludge.

KEYWORDS ; sludge treatment, degradability, overflow rate, digestion.

1. はじめに

下水汚泥の分解性を初沈汚泥と余剰汚泥にわけて考えると、通常、前者は最初沈殿池水面積負荷によって異なり、後者は有機物負荷によって異なると考えられる。それら汚泥の質的な違いを表わすおおまかな指標として、初沈汚泥では粒径が、余剰汚泥では汚泥令があげられよう。汚泥令は前駆プロセスである最初沈殿池の水面積負荷によって変化させうる。したがって、下水汚泥の安定化(度)という観点からその好気性およびけん気性消化性を考えるとき、汚泥処理にいたるまでの両汚泥に含まれる浮遊性有機物の酸化分解の程度が重要となる。以上のことから、本研究では以下の3点について検討した。1) 流入下水中の浮遊性有機物の好気・けん気分解性、2) 最初沈殿池水面積負荷の異なる下水の処理によって得られる活性汚泥の好氣的分解性、3) 混合汚泥の好気およびけん気性消化。

2. 回分実験による下水汚泥の好気・けん氣的分解性

(1) 初沈汚泥の好氣的・けん氣的分解性 最初沈殿池汚泥として除去される浮遊性有機物の好氣的・けん氣的分解性を検討するために、2とおりの供試汚泥F、Cを次の操作によって得た。分流式住宅団地下水処理場において水量と水質がともにピークを示す朝と夜の時間帯の流入下水を等量混合したものを水面積負荷100m³/日で有効容積60 lの円筒形上向流式沈殿池に流入させ、その流出下水を水面積負荷30m³/日で固液分離した汚泥を汚泥Cとする。このときの越流下水を1~2°Cの冷室で18時間沈殿させて得た沈殿汚泥を汚泥Fとする(供試下水中の存在比は約7対3であった)。8 lの円筒形タンクを用い、20°C、植種なしで行なった回分式好気性消化実験および5 lの広口ビンを用い、長さ10cmのかくはん子で間欠か

* 北海道大学工学部衛生工学科 : Department of Sanitary Engineering, Hokkaido Univ.

くはんし、消化温度37°C、pH約7.0で行なった回分式けん気性消化実験の結果を図-1～3に示す。

まず、好気性消化実験の結果を示した図-1より、MLVSS、MLVSS% (以下VSSと略記)、重クロム酸法による全COD (COD_T) のいずれにおいても、比較的細かい粒子のSSから成ると考えられる汚泥Fのほうが分解速度と分解量がともに大きい。図-3はMLVSSの分解率(t日後のMLVSS/初期MLVSS)を示すもので、汚泥C、Fの最大分解率はそれぞれ50%、78%程度となり、汚泥Cには好氣的に分解されにくい有機物がかなり含まれていたと考えられる。同図には通常の負荷条件で運転されているE市下水処理場の活性汚泥(VSS: 74%、SRT: 8.7日)の好気性消化実験結果も示されており、その分解速度は汚泥Cと同程度となっている。これにくらべて汚泥Fはかなり分解しやすい有機物であるといえよう。また図-1 (iii) に示したように、エアレーション時間とともにCOD_Tが大きく減少しているのに対して溶解性COD (No. 5Cろ紙使用、COD_Fと略記) の変化が小さいことから、MLVSSの減少は酸化分解によるものと考えることができる。一方、けん気性消化においては溶解性CODが約2,000mg/l残存し、ガス化反応は不十分であったが、以下では断らない限り可溶化とガス化を合わせて、MLVSSの分解とする。図-2よりMLVSSの分解速度は初期には汚泥Fのほうが大きい、分解率がほぼ飽和に達する6～8日までの平均値としては両汚泥について大差がない。これは先に述べた好気性消化の場合との大きな違いである。MLVSSの最終分解率は汚泥Cで約80%、汚泥Fで約75%であり、汚泥Cについては好気性消化にくらべると約30%も増加している。このことから、好気性消化で分解しにくい有機物がけん気性消化で効果的に分解されたと考えることができ、その有機物としてはけん气的条件下で加水分解反応を受けやすいトイレトペーパーなどの繊維状物質があげられよう。さらに図-3の結果より、汚泥Fについては分解速度に差はあるが、最終分解率は好気性とけん気性のいずれにおいても同程度とみなすことができる。

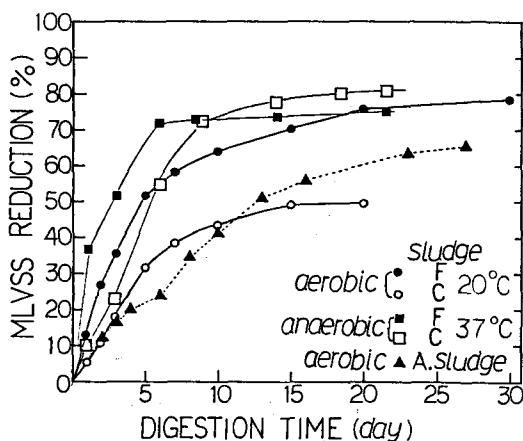


Fig. 3. Relation between percentage of MLVSS reduction and digestion time.

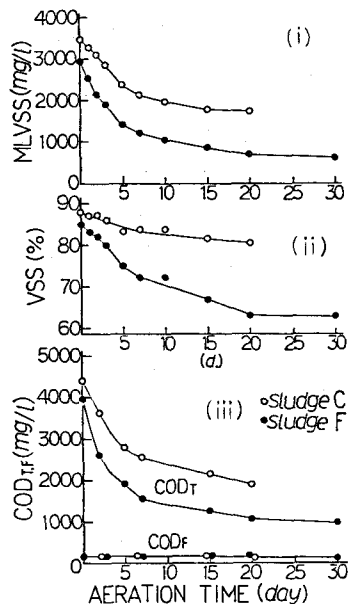


Fig. 1. Changes of MLVSS, VSS and COD during aerobic digestion of primary sludge in the batch reactor.

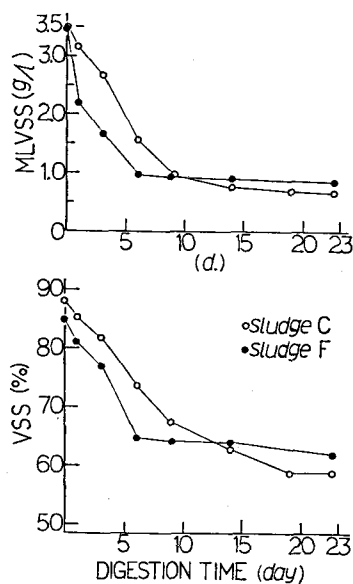


Fig. 2. Changes of MLVSS, and VSS during anaerobic digestion of primary sludge in the batch reactor.

Table 1. Experimental conditions.

sewage	overflow rate (m/d)	SS (mg/l)	COD _T (mg/l)	COD _F (mg/l)	organic loading	SRT (d)
A	15±2	88	360	200	0.76	4.1
B	63±5	180	425	200	0.99	3.6
C	95±5	260	520	200	1.07	2.2

The unit of organic loading is kg-COD/(kg-VSS · d).

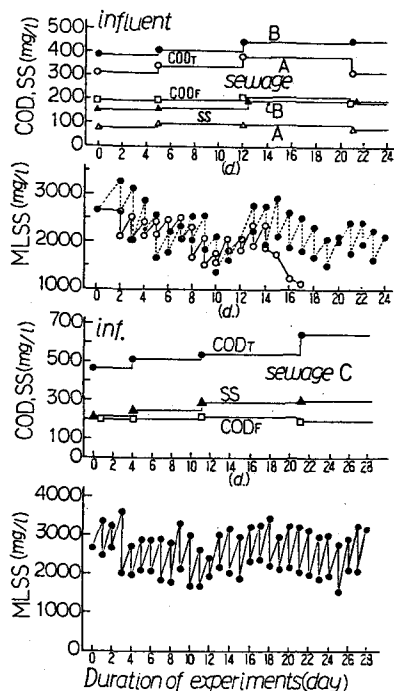


Fig. 4. Changes of influent COD and SS, and MLSS during the experiment.

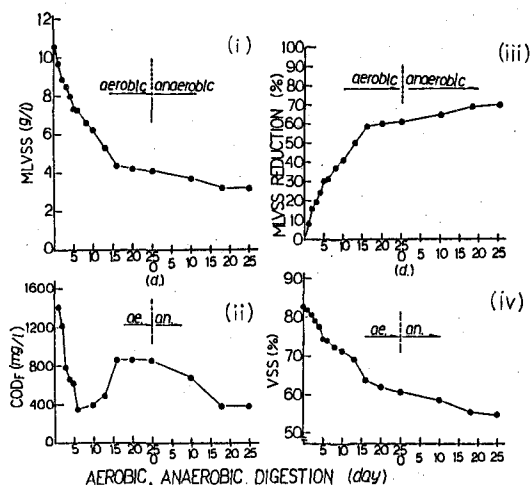


Fig. 7. Aerobic digestion and succeeding anaerobic digestion of mixed sludge.

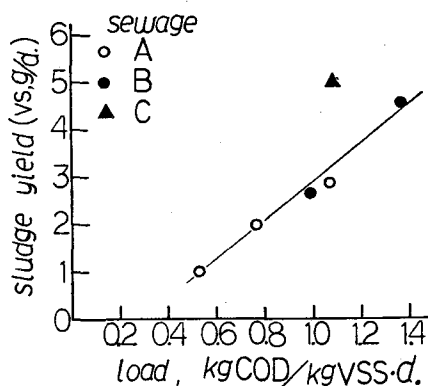


Fig. 5. Relation between sludge yield and COD loading.

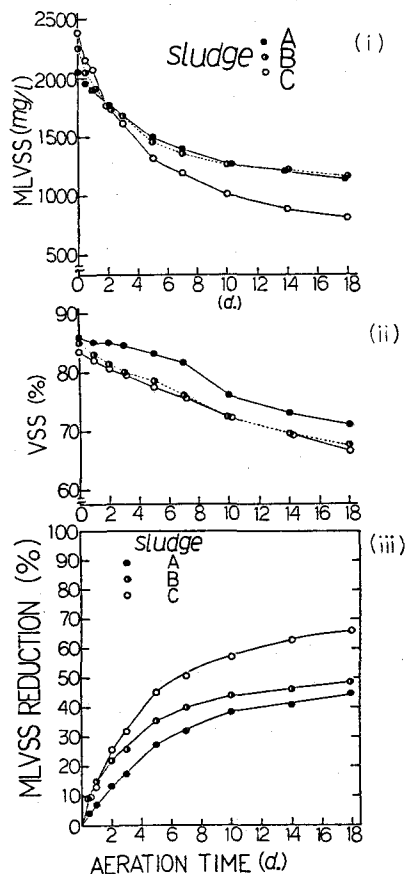


Fig. 6. Changes of MLSS, VSS and MLVSS reduction percent during the batch aerobic digestion process of the activated sludge fed with the sewage written in Table 1.

(2) 水面積負荷の異なる最初沈殿池流出下水の活性汚泥処理実験と余剰汚泥の好氣的分解実験

前記混合下水を表-1に示す3とおりの水面積負荷で運転して得た流出下水を活性汚泥処理し、得られた3種類の活性汚泥の好氣的分解性を調べた。実験装置はエアレーション部が6 l、沈殿部が2.5 lの連続流式完全混合タンクであり、流入下水は腐敗と沈殿を防ぐために冷却・かくはんしながらカムポンプで注入した。エアレーション時間はいずれも6時間、水温は $18 \pm 1^\circ\text{C}$ とし、MLSSは1日1回混合液を引抜いて制御した。実験条件ならびに引抜き前後のMLSSの平均値、引抜き汚泥量と処理水SSから求めた汚泥令(SRT)を表-1に、運転状況を図-4に示す(処理水質や汚泥の沈降性については既報¹⁾を参照)。

まず、図-5には他の三つの実験結果と合わせて有機物負荷と余剰汚泥発生量の関係を示す。下水AとBについては負荷の増大による汚泥発生量の増加傾向が同様であるのに対し、下水Cではこの傾向を大きく上まわっている。このことから、比較的細かい粒子から成ると考えられる下水A、BのSSが相当に分解しやすいものであると推察される。

次に、それぞれの下水でじゅん養された活性汚泥A、B、Cの好氣性消化実験結果を図-6に示す(水温は $18 \pm 1^\circ\text{C}$)。図-6(iii)より高水面積負荷の流出下水でじゅん養された活性汚泥ほど最終分解率が高くなっており、また、この傾向は表-1に示したSRTの大小関係とも対応していて、SRTが短いほど最終分解率が高い。しかし、活性汚泥Cの最終分解率は活性汚泥Bよりも高いが、初期の分解速度はむしろ活性汚泥Bのほうが高い傾向を示している。これは前記(1)の結果からわかるように、活性汚泥Bには分解性の高い比較的細粒の浮遊性有機物が多く含まれ、活性汚泥Cには難分解性のSSの含有割合が高かったためと考えることができる。一方、図-6(ii)、(iii)から、最終分解率は初期VSSが最も低かった活性汚泥Cで最高となり、初期VSSが最も高かった活性汚泥Aで最低となっている。これらのことから、活性汚泥の好氣的分解を考える場合には、エアレーションタンクにおける負荷条件やSRTとともに、最初沈殿池における操作条件を考慮に入れるべきであるといえよう。

(3) 混合汚泥の消化実験—最終消化量とVSS変化率について—

初沈汚泥と余剰汚泥の混合汚泥について、十分に好氣性消化した上でさらにけん氣性消化し、分解率とVSS%の変化パターンを検討した。

初沈汚泥は350 lのタンクを利用し、水面積負荷を約 $20\text{m}^3/\text{日}$ で運転したときの沈殿汚泥であり、余剰汚泥は家庭下水を主とした都市下水処理場から得た(SRT: 7~8日)。初沈汚泥はMLSSが 19.1g/l 、VSSが88.7%、余剰汚泥はMLSSが 10.15g/l 、VSSが76.9%であり、これらを1対2で混合した。消化温度は好氣性で $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、けん氣性で $37 \pm 1^\circ\text{C}$ とした。実験結果を図-7に示す。同図(i)に見られるように、MLVSSの分解速度はエアレーション15日目までが高く、以後急激に低下している。同図(iv)に示すVSSの変化もMLVSSの減少に対応している。好氣性消化に引続くけん氣性消化によるMLVSSの変化量は少なく、分解率で約10%増加しただけであることから、25日間の好氣性消化で可分解有機物の大部分がすでに分解していたとみることができる。ここで得られた最終分解率70%に相当する有機物を便宜的に可分解量とよび、後の考察で用いることにする。

次に、消化過程における汚泥のVSS変化率を調べるために、汚泥中のVSS部分だけが分解するとして計算したときのMLVSS分解率とVSS%の関係を図-8に示す。一般には、VSSが高い汚泥ほど消化(分解)が進むにつれてVSSの低下の度合いが大きいと考えられやすいけれども、図の計算結果は初期VSSが高いもののほど分解初期のVSSの変化が小さく、逆に初期VSSが低いもののほど分解初期のVSSの変化率が大きいことを示しており、VSSの変化率は分解率の目安とならない。図中のプロットは混合汚泥と初沈汚泥Cの消化実験におけるMLVSS分解率とVSSの関係を示したもので、ほぼ計算結果と一致している。

3. 半連続式による混合汚泥の好氣・けん氣性消化実験

ここでは、混合汚泥の好氣性およびけん氣性消化実

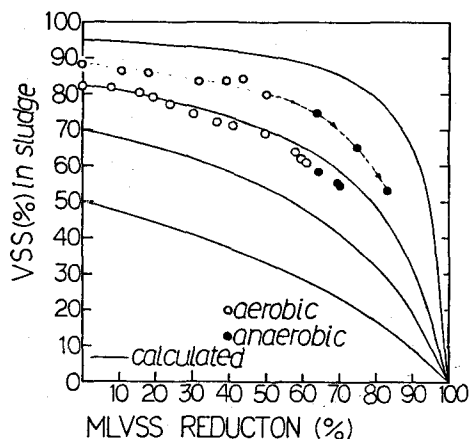


Fig. 8. Relation between VSS in the sludge and MLVSS reduction percent.

験を行ない、両消化法における有機物分解速度を比較するとともに、質の異なる下水汚泥のけん氣的分解性をみるために好気性酸化汚泥を投入汚泥とした実験を行なった。

(1) 平均滞留時間(消化日数)と有機物分解率 好気性消化実験には20、35 lの円筒形エアレーションタンクを、けん氣性消化実験には図-9に示す装置を3台併用した。汚泥の投入は1日1回の半連続式とし、水温は好気性で $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、けん氣性で $37 \pm 1^\circ\text{C}$ とした。かくはん速度は50~70rpm、pHは 7.0 ± 0.2 に制御した。分析試料には、好気性実験では汚泥投入前に引抜いたものを、けん氣性実験では汚泥を投入しながら投入日量の約1/3が入った時点までに引抜いたものを供した。MLSSは3,000rpmで5分間遠心分離して得た100ml2本の測定値の平均値とした。

まず好気性消化実験について、供試した混合汚泥の混合比率、VSS、有機物負荷、投入汚泥濃度、消化汚泥濃度、 COD_F を図-10に示す。水理学的平均滞留時間(以下HRTと略記)を変更して長くするときは同図(i)に示すように一時的に負荷を大きく下げて運転した。同図(iii)に示すように、HRT5日、8日の場合には投入汚泥濃度の上昇によって消化汚泥濃度も上昇しているが、MLVSS分解率はHRTの増大によって大きくなっており、また、同図(iv)よりVSSはHRTが増大するにつれて低下していることがわかる。 COD_F は前記の回分実験結果と同程度であり、濃度の変化は空気量の影響と推定された。

次に混合汚泥のけん氣性消化実験について、投入汚泥濃度と消化汚泥濃度、VSSの経日変化、有機物負荷、 COD_F 、投入VS当りのガス発生量を図-11~13に示す。E市下水処理場2次消化タンクの消化汚泥を種汚泥とし、2週間じゅん養した後に実験を開始したが、図-11に見られるようにHRT15日の実験ではガス化反応が十分ではなくHRT25日で良好にガス化反応が進行した。図-13より、HRT6日までは COD_F が増加せず、HRT4日で急激な増

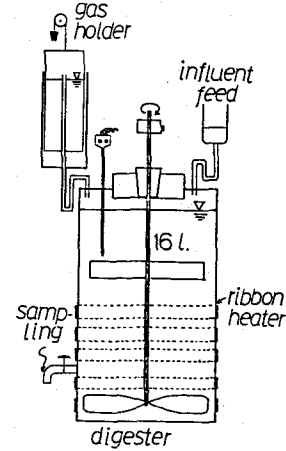


Fig. 9. Anaerobic digestion apparatus.

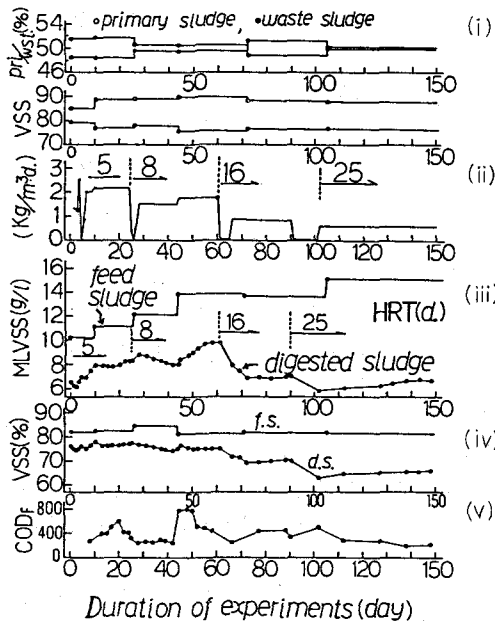


Fig. 10. Changes of sludge mixing ratio, VS loading, MLVSS, VSS and filtrate COD in the course of the experiment.

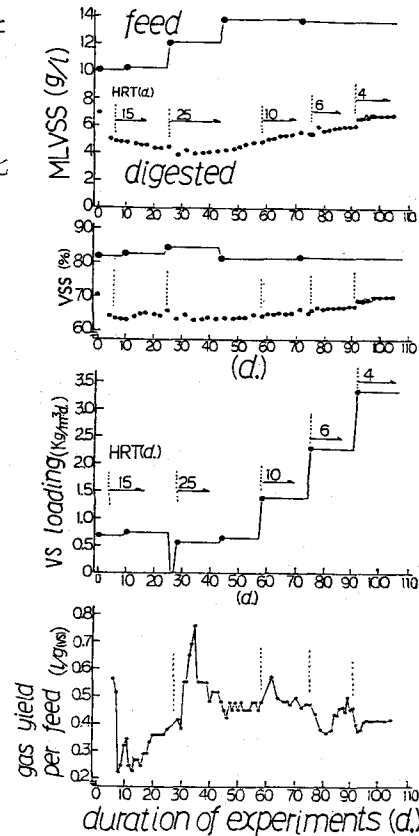


Fig. 11. Experimental conditions and results in the semi-continuous flow anaerobic digestion (HRT: 4 ~ 25 d).

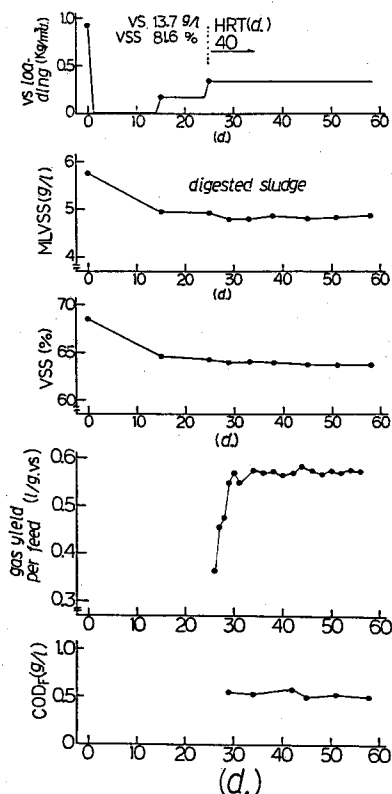


Fig. 12. Experimental conditions and results in the semi-continuous flow anaerobic digestion (HRT: 40 d).

加がみられる。このことから、最小6日まで消化日数を短くできる可能性が示される。また、総ガス発生量の推移を各HRTでみると、その差は大きくはないが、40日 25日 10日 6日の順で発生量が大きくなっている。ガス組成はHRTが長くなるとメタン含有率がやや高くなる傾向にあったが、 CH_4 が $62 \pm 3\%$ 、 CO_2 が $35 \pm 3\%$ であった。次に、各HRTにおける最終測定値を定常値とみなして、MLVSS基準の比分解速度：

$$(1 - \text{消化汚泥濃度} / \text{投入汚泥濃度}) / \text{HRT}$$

の値を好気性とけん気性の場合について図-14に示した(けん気性消化ではHRT25および10日については実験期間が短く、定常値として不十分であったが、後示する図-19の結果からHRT6日以上でのVSS分解率の増加が小さいことから数値の信頼性は低くない)。HRTの増大による比分解速度の低下はけん気性消化で著しく、好気性消化で小さい。また、HRTの増大とともに両者が近づく傾向がみられる。反応温度がけん気性消化で 37°C 、好気性消化で 20°C と大きく異なるので、単なる比較は意味がないが、一般的に温度が 10°C 上がれば反応速度が少なくとも1.5倍以上になることを考えると、けん気性と好気性の分解速度は大差ないとみることができよう。このような結果は初沈汚泥をも含めた全酸化法や高効率けん気性消化などを評価する上で有効となる。

(2) 汚泥の酸化分解の程度とけん気性分解性 すでに受けた酸化分解の程度が以後のけん気性分解とどのように関連するかを調べるために、HRT8日の好気性消化を経た混合汚泥(以下、酸化汚泥とよぶ)を投入汚泥としてけん気性消化を行なった。実験結果を図-15、16に示す。

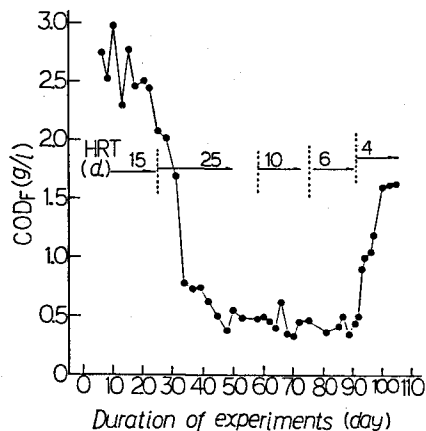


Fig. 13. Changes of filtrate COD in the anaerobic digester.

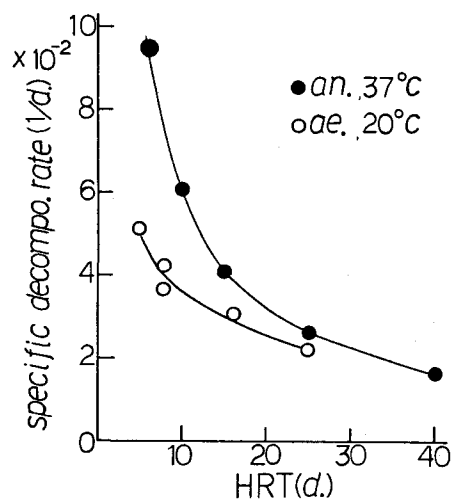


Fig. 14. Effect of HRT on specific decomposition rate.

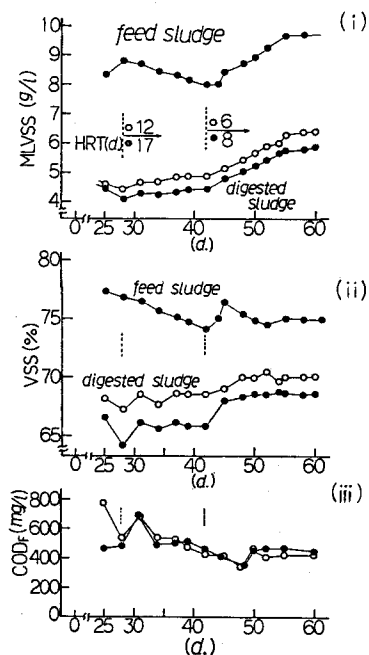


Fig. 15. Experimental conditions and results in the anaerobic digestion with oxidized sludge fed.

図-15(i)、(ii)からわかるように、投入汚泥は好気的分解を受けた汚泥であるから VSS は約75%で生混合汚泥よりも低い、けん気性消化することによってさらに低下し、HRTが長いものほど低VSSとなっている。COD_Fは前項の結果と同程度であった。投入汚泥当りのガス発生量は図-16(ii)に示すように、生混合汚泥(図-11)の場合とくらべて明らかに少なく、いずれのHRTでも約40%減となっている。また、VS減少量当りのガス発生量は図-17に示すように、やはり酸化汚泥のほうが少ない(HRT15日の値はろ液のVTRを用いて MLVSS の増加分を補正した)。換言すれば、MLVSS基準で約30% (後述する可分解量基準では約47%) がすでに酸化分解した汚泥は、けん気性消化におけるVS減少量当りのガス発生量が10~35%減少する。なお、各HRTにおけるVS減少量当りのガス発生量の違いについては今後の検討課題としたい。

次に比分解速度については、まず前項と同様のプロットを示した図-18の結果(実線)より、HRTが長くなると比分解速度の差はやや小さくなる傾向がみられるものの酸化汚泥のほうが小さい。これは、分解しやすい有機物が好気性消化で酸化分解したためと考えることができるが、供試した投入汚泥のVSSが生汚泥より低値であるから、混合汚泥に占める可分解有機物量を基準として議論する必要がある。そこで、2.(3)で求めた最大分解率(70%)から酸化汚泥中の可分解量を

酸化汚泥中の可分解量 = 生混合汚泥 × 0.7 - 生混合汚泥 × 各HRTの好気性消化分解率

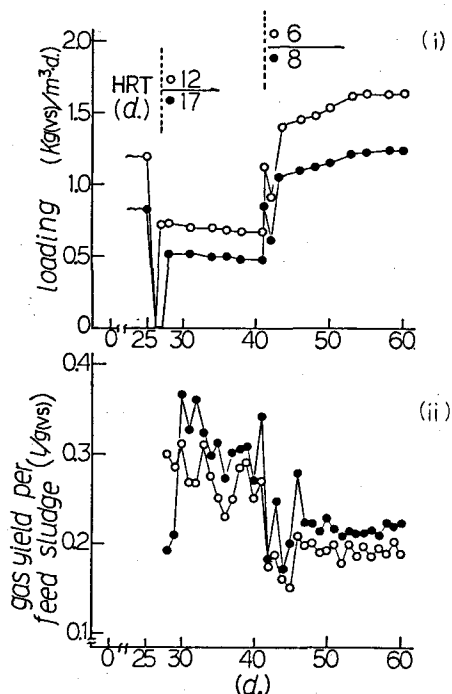


Fig. 16. Organic loading and gas yield in the anaerobic digestion with oxidized sludge fed.

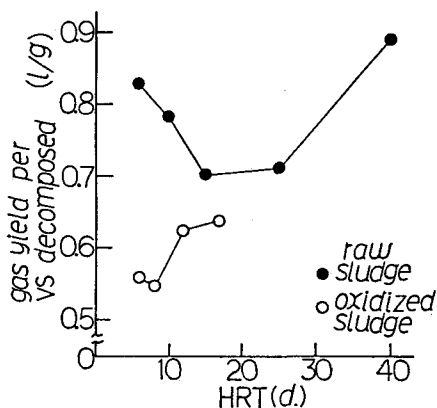


Fig. 17. Relation between gas yield and HRT.

として求め、可分解量基準の比分解速度を算出して図-18の破線で示す。図の結果より、可分解量基準による両汚泥の比分解速度の差はかなり小さくなり、HRTが長くなると両汚泥ではほぼ一致する。また、図-19には生混合汚泥のけん気性消化について、MLVSS基準および可分解量基準の分解率とHRTの関係を示した。図より、MLVSS基準の分解率は高くないが、長HRTにおける可分解量基準の分解率は90%以上を示している。また図の結果より、分解率の点だけからみればHRT10日以上のけん気性消化の効果はさほど高まらないと予想される。さらに同様な結果として、生混合汚泥、HRT8日および16日の酸化汚泥を用いた回分式けん気性消化実験の結果を図-20に示す(このときの遠心分離上澄水のSSが無視できないほど多かったのを、上澄水とろ液の蒸発残留物の測定によってSSを補正した)。図-20(ii)に示すように、初期VSSは酸化の進んだ汚泥ほど低値である。また、同図(iii)に見られるようにMLVSSの減少とともにCOD_pが大きく増加していることから、ガス化反応は不十分であったが、MLVSS基準の分解率および可分解量基準の分解率を図-21に示す。図の結果より、MLVSS基準では酸化が進んでいない汚泥ほど分解速度および最終分解率が高いが、可分解量基準では三者の差は小さい。とくに、生混合汚泥とHRT8日の酸化汚泥の初期分解速度はほぼ等しい。また、同図(ii)において生混合汚泥の分解速度が分解率で約70%までは一定であること、酸化分解率として約30%分解したHRT8日酸化汚泥の分解速度が分解率で約40%の時点から減衰していることから、可分解量の約70%は易分解性であり、残り30%が比較的難分解性であると考えられよう。

4. おわりに

最初沈殿池の運転条件によって量的・質的に異なる初沈汚泥と余剰汚泥の分解性について、好気的およびけん気的の両面から実験的に検討した。主な知見と結果を以下に列記する。

- 1) 初沈汚泥のうち比較的細かい部分の分解性は好気、けん気のいずれにおいても高かった。また、粗い部分の好気的分解性は通常の負荷条件における活性汚泥と同程度であったが、けん気的分解性は高かった。
- 2) 前記1)の結果より、最初沈殿池の水面積負荷を高く維持することは、生成する活性汚泥の分解性が高いため発生汚泥量を減少させる上で有効である。同様に、下水汚泥の好気性消化は余剰汚泥だけでなく、初沈汚泥の大部分に対しても効果が期待される。
- 3) 汚泥中有機物の分解速度や分解率を検討し、10日程度のけん気性消化でおおよそ90%の分解が終わっていること、異種汚泥においてけん気性分解速度の差は小さいことを可分解量を基準にとって示した。
- 4) 下水汚泥のけん気性消化において、ろ液の水質を犠牲にすることなく、消化日数を最小6日程度まで短くできる可能性がある。
- 5) 混合汚泥を対象とし、好気性消化(20℃)とけん気性消化(37℃)の分解速度をくらべた場合、短HRTにおいてけん気性が高く、長HRTにおいて両者の差は小さかった。

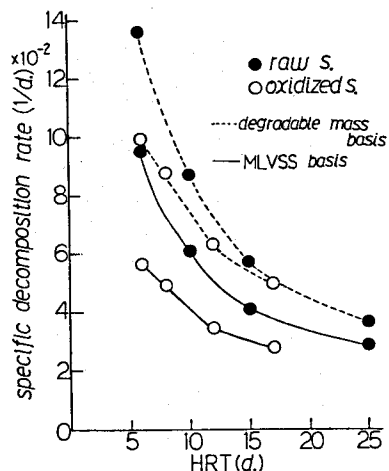


Fig. 18. Effect of HRT on specific decomposition rate.

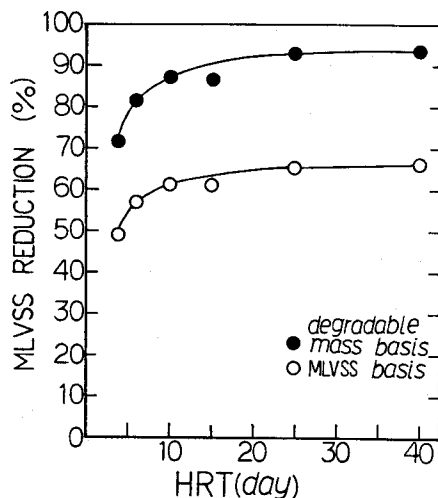


Fig. 19. Relation between MLVSS reduction percent and HRT.

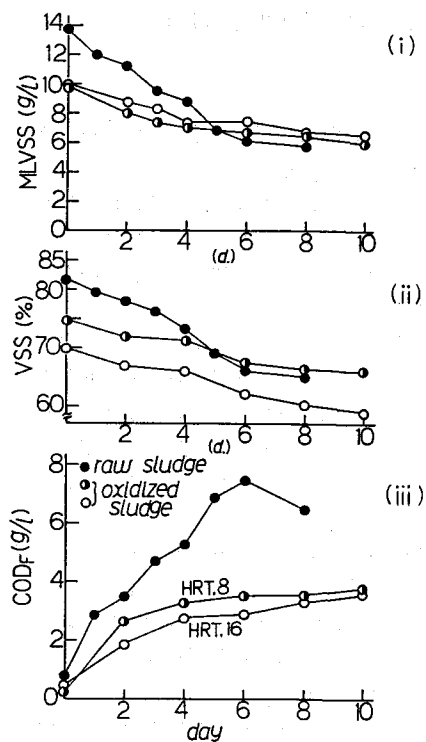


Fig. 20. Changes of MLVSS, VSS and COD_F during the batch anaerobic digestion process.

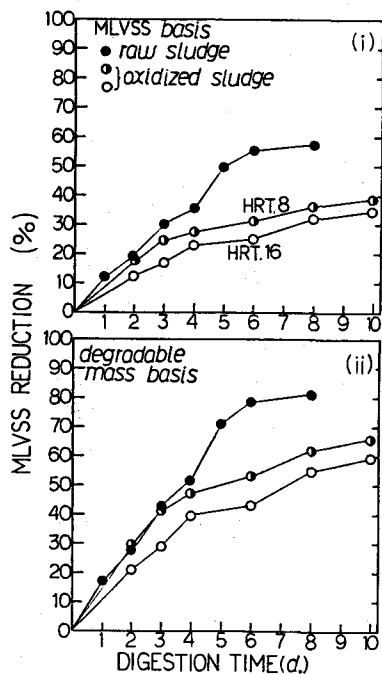


Fig. 21. Changes of MLVSS reduction percent during the batch anaerobic digestion process.

6) 分解速度からみると、可分解量の約70%は分解速度が一定な易分解性有機物であるといえるが、ガス発生量において差があり、可分解量の約47%が分解した酸化汚泥ではVS減少量当りのガス発生量は10~35%少なかった。

今後は、種々の条件下における消化汚泥の固液分離性を調べるとともに、水処理プロセスと汚泥処理プロセスの相互の関連を定量的には握る方向で検討したい。

参考文献

- 1) 寺町和宏・高桑哲男：活性汚泥の沈降性と粒子の効果、昭和58年土木学会年講。