報 文

熱、酸、アルカリ処理した余剰活性汚泥の嫌気性消化（2）

Anaerobic Digestion of Excess Activated Sludge Pretreated with Heat
Acid and Base for Increasing Digestibility

松 川 康 夫*

3.3 消化条件の検討

以上で前処理条件の検討を終り、次に消化条件の検討に移った。

3.3.1 負荷量とガス発生量、処理液性状等との関係

表10に負荷量とガス発生量、処理液性状等を検討した結果を示す。この実験では汚泥量（MLSS）の増減も見するため、試料はSSを除いた酸処理汚泥（pH1，120℃，60分）の汙液を使用し、中温で12日間半連続試験した。実験期間が12日間では定常状態には至っておらず確定的なことは言えないが、一応次のような傾向が見られた。

初発汚泥濃度（SS）を高くすると、ガス発生量の増加、CH₄含有率の増加、処理液の浄化の向上が見られた。（①，②，③の比較）。負荷量を上げると、ガス転換率（投入有機物当りガス発生量）の低下、CH₄含有率の低下、処理液の悪化が見られた。（④，②，⑤の比較）。有機物負荷が同じでも濃度を下げて液量負荷を

高くして滞留日数を短くすると、CH₄含有率の低下、処理液の悪化が見られた。（④と⑧，⑥と⑨の比較）。処理液抜取りを混濁液の状態では採取すると上澄液採取に比べて、著しいMLSSの減少、ガス発生量の減少、CH₄含有率の低下、処理液の悪化が見られた。（②と⑦，④と⑥，⑧と⑨の比較）。上澄液採取の場合でもMLSSは減少したが、これは基質濃度が低すぎるためと思われる。

これらの結果から消化効率を上げるためには、高MLSS運転と投入基質の濃縮による滞留日数の延長を図ることが良いことがわかる。高MLSS運転を行うと菌体量が増えSRT（汚泥滞留時間）が長くなるので、高負荷量の運転が可能になる^{16），17）}。嫌気性汙床などSRTを長くする処理方法は嫌気性処理の最近の動向である^{18）}。高MLSS運転は、投入汚泥の機械濃縮と引抜汚泥を機械濃縮して返送することで達せられる。汚泥を濃縮すると液量が少くなり加熱エネルギーが少なくなる大きな利点があるので、これも最近の動向とな

表10 負荷量とガス発生量、処理液性状等との関係

Run	初発SS (%)	液量負荷 (ml/ℓ・日)	滞 留 日 数 (日)	有機物濃度 (%)	有機物負荷 (g/ℓ・日)	処理液抜取り	ガ ス 発生 量 (ml/ℓ・日)	当入有機物当りガス発生量 (ml/g- vs)	MLSS減少率 (%)	上澄液COD分解率 (%)	CH ₄ (%)	上澄液揮発性有機酸 (mg/ℓ)	pH
①	1	100	10	0.8	0.8	上澄液	200	250	11	80	56	1500	7.65
②	2	"	"	"	"	"	270	340	12	80	61	1400	7.67
③	4	"	"	"	"	"	350	440	9	85	66	1210	7.65
④	2	50	20	"	0.4	"	180	450	6	92	59	980	7.58
②	"	100	10	"	0.8	"	270	340	12	80	61	1400	7.67
⑤	"	200	5	"	1.6	"	400	250	18	72	48	2160	7.64
⑥	"	50	20	"	0.4	混濁液	100	250	49	92	55	1020	7.54
⑦	"	100	10	"	0.8	"	200	250	73	78	53	1610	7.65
⑧	"	100	10	0.4	0.4	上澄液	180	450	13	89	54	930	7.43
⑨	"	"	"	"	"	混濁液	100	250	73	88	49	960	7.45
試 料													
			TS	有機物	SS	pH	COD	揮発性有機酸					
(酸処理汚泥汙液)			1.98%	0.76%	0.00%	6.13	4,000mg/ℓ	2,110mg/ℓ					

* 奈良県土木部下水道計画課 Yasuo MATSUKAWA

0388-9459/85/0400-0286 \$02.00/0 ©1985 Env. Cons. Eng. Assn.

っている²⁾。

3.3.2 各処理汚泥の負荷量実験

無処理，熱処理，酸処理各汚泥について1週間ごとに負荷量を上げて半連続試験した。熱処理条件は140℃60分，酸処理条件はpH2で140℃60分にした。酸処理汚泥は処理後中和した。この実験では消化効率を上げるために種汚泥も試料汚泥も遠心分離機で濃縮した。種汚泥はSS5%に濃度調整し，試料汚泥は無処理汚泥の有機物濃度3.0%を基準にして濃度調整した。熱処理及び酸処理汚泥は処理によって有機物が約1割揮散し有機物濃度は2.9%になった。表11にこれらの試料汚泥の分析結果を示す。

表11 試料汚泥の分析結果

	全固形分 (%)	有機物 (%)	SS (vol·wt%)	SSvol/ SSwt (ml/g)	粘度* (cps)	上澄液 COD (mg/l)	pH
無処理	3.29	2.96	3.08	23	9000	37	7.9
	3.39	3.05	3.28		8500	74	6.7
	3.19	2.95	70…3.07		8300	106	6.9
熱処理	3.20	2.86	1.97	14	820	6530	5.4
	3.26	2.93	1.85		280	7080	5.3
	2.99	2.73	25…1.53		270	6110	5.5
酸処理	3.37	2.87	1.70	13	160	7780	6.2
	3.39	2.87	1.48		70	8940	6.7
	3.25	2.83	20…1.36		40	8520	6.9

SSvol %は5,000 rpm 10分遠沈汚泥のV/V %
* BH型粘度計，20 rpmで測定

余剰活性汚泥は無処理ではSSvol/SSwtが23ml/gで非常にかさばっており，濃縮すると3%程度の低濃度でも9,000cpsの高粘度になり流動が困難になった。しかしこれを熱処理あるいは酸処理すると汚泥量(SS)が1.5～1.8%に減少し，またSSvol/SSwtは13～14ml/gとなって汚泥の圧密性が増すとともに，粘度が100～300cpsと著しく低下して取り扱いが容易になった。これらの利点は消化工程での高MLSS運転や脱水汚過工程での汚過性の向上に大きく寄与するものと思われる。

次にこれらの処理汚泥を中温及び高温で半連続式消化させた。負荷量は液量負荷50～300ml/l・日(滯留日数20～3.3日)，有機物負荷1.5～9.0g/l・日で，1週間ごとに順次上げていった。また消化槽内MLSSを5%の高濃度に維持するため，引抜汚泥の一部を遠心濃縮して返送した。中温消化の実験結果を表12及び図-13～14に，高温消化の実験結果を表13及び図-15～16に示す。

この実験では1週間ごとに負荷量を上げていったため各負荷量で定常状態には至っておらず，結論を述べるにはかなり無理な実験ではあるが一応次のような知

見が得られた。

消化槽内MLSSを5%の高濃度に維持した場合，液量負荷300ml/l・日(滯留日数3.3)，有機物負荷9g/l・日でも発酵が維持できた。消化効率(有機物当りのガス発生量)は低負荷では中温と高温に差はないが，高負荷では中温は低下きみであるが高温は良好で，高温の場合はさらに高負荷でも安定した発酵が可能と推測された。最高効率は，中温の場合は有機物負荷4.5g/l・日，滯留日数6.7日の時に，無処理で100ml/g-vs，熱処理で350ml/g-vs，酸処理で500ml/g-vsとなり，高温の場合は有機物負荷9.0g/l・日，滯留日数3.3日の時に，無処理で200ml/g-vs，熱処理で500ml/g-vs，酸処理で600ml/g-vsとなった。中温の場合は無処理～熱処理～酸処理間の差が大きい，高温の場合は無処理と熱処理の効率が向上し中温ほどは差がなかった。無処理の場合，高負荷では消化効率は中温に比べて高温は2倍になった。また無処理の場合は低負荷でも常に中温より高温の方がガス発生が優った。これは53℃では無処理汚泥が低温熱分解を受けているためと思われる。一般に高温消化は中温消化よりも管理が難しいと言われているが，この実験ではMLSSが高濃度であるため発酵は安定しており，中温消化よりも反応速度が大きく高負荷に対する安定性も良好で，ガス発生に関しては中温よりも高温の方が良好であった。

無処理～熱処理～酸処理間の比較で，同一液量負荷，同一HRT(水理学的滯留時間)，同一有機物負荷の場合でも，投入汚泥のSSは無処理>熱処理>酸処理となっているので，消化槽内のMLSSが同一である場合はSRT(固形物滯留時間)は無処理<熱処理<酸処理となり，熱処理や酸処理の場合はSRTが長くなり消化効率の向上と消化の安定性に有利になる。これまでの実験結果から消化効率が無処理<熱処理<酸処理となる要因をまとめると，①細胞破壊による可溶化，②熱変性による基質の改質，③SRTの延長，が考えられる。

CH₄含有率は，熱処理及び酸処理では70%近い含有率が得られたが，無処理の場合は60～65%とやや低かった。また高温の方が中温よりも高めの含有率になった。

処理液(上澄液)のCODは熱処理と酸処理の場合，中温消化で1,600mg/l，高温消化で2,000mg/lになり，上澄液のCOD除去率は中温で80%，高温で70%となつて，処理液の性状は高温は中温より少し劣った。pH

表12 各処理汚泥の負荷量実験結果……中温消化, MLSS 5 %

処理 方法	投 入 汚 泥				ガ ス 発 生 量			CH ₄ (%)	処 理 液				
	液量負荷 (㎖/ℓ・日)	滞 留 日 数		有機物 負 荷 (g / ℓ ・ 日)	総発生量 (㎖/ℓ・日)	投入有機物 当り発生量 (㎖/g - vs)	対液倍率 (×)		MLSS (vol...wt%)	pH	上澄液 COD (mg / ℓ)	COD 除去率 (%)	粘 度 (cps)
		HRT(日)	SRT(日)										
無処理	50	20	32.5	1.48	150	100	3.0		4.92				
	100	10	16.2	2.96	330	110	3.3		4.73				
	150	6.7	10.2	4.58	550	120	3.7		4.89				
	200	5.0	7.6	6.10	450	70	2.3		66...4.73	7.0	165	COD 増 加	
	250	4.0	6.5	7.38	520	70	2.1		71...5.27			COD 増 加	
	300	3.3	5.4	8.85	620	70	2.1	61	77...4.87	6.9	174	COD 増 加	24000
熱処理	50	20	50.8	1.43	430	300	8.6		4.53				
	100	10	25.4	2.86	1000	350	10.0		4.76				
	150	6.7	18.0	4.40	1670	380	11.1		5.32				
	200	5.0	13.5	5.86	1620	280	8.1		58...4.82	7.1	1570	78	
	250	4.0	13.1	6.83	2190	320	8.8		64...5.12				
	300	3.3	10.9	8.19	2000	240	6.7	69	61...4.82	6.9	1590	74	9300
酸処理	50	20	58.8	1.44	580	400	11.6		4.93				
	100	10	29.4	2.87	1440	500	14.4		4.68				
	150	6.7	22.5	4.31	2410	560	16.1		5.34				
	200	5.0	16.9	5.74	2790	490	14.0		56...4.90	7.3	1610	82	
	250	4.0	14.7	7.08	3400	480	13.6		59...4.82				
	300	3.3	12.3	8.49	4000	470	13.3	67	58...5.17	7.3	1650	81	5100

表13 各処理汚泥の負荷量実験結果……高温消化, MLSS 5 %

処理 方法	投 入 汚 泥				ガ ス 発 生 量			CH ₄ (%)	処 理 液				
	液量負荷 (㎖/ℓ・日)	滞 留 日 数		有機物 負 荷 (g/ℓ・日)	総発生量 (㎖/ℓ・日)	投入有機物 当り発生量 (㎖/g - vs)	対液倍率 (×)		MLSS (vol…wt%)	pH	上澄液 COD (mg/ℓ)	COD 除去率 (%)	粘度 (cps)
		HRT(日)	SRT(日)										
無処理	50	20	32.5	1.48	220	150	4.4		5.02				
	100	10	16.2	2.96	510	170	5.1		4.73				
	150	6.7	10.2	4.58	800	170	5.3		5.00				
	200	5.0	7.6	6.10	1100	180	5.5		65…4.50	7.3	584	COD 増 加	
	250	4.0	6.5	7.38	1300	180	5.2		68…5.02				
	300	3.3	5.4	8.85	1770	200	5.9	66	66…5.11	7.3	403	COD 増 加	27000
熱処理	50	20	50.8	1.43	400	280	8.0		5.12				
	100	10	25.4	2.86	1000	350	10.0		4.62				
	150	6.7	18.0	4.40	1160	260	7.7		4.98				
	200	5.0	13.5	5.86	2150	370	10.8		62…4.79	7.3	2180	69	
	250	4.0	13.1	6.83	3410	500	13.6		60…4.65				
	300	3.3	10.9	8.19	3900	480	13.0	70	64…4.58	7.4	1890	69	9700
酸処理	50	20	58.8	1.44	550	380	11.0		4.89				
	100	10	29.4	2.87	1300	450	13.0		4.68				
	150	6.7	22.5	4.31	1770	410	11.8		5.02				
	200	5.0	16.9	5.74	2830	490	14.2		58…4.90	7.3	2240	75	
	250	4.0	14.7	7.08	4030	570	16.1		67…4.86				
	300	3.3	12.3	8.49	4900	580	16.3	69	56…5.14	7.4	2030	76	5700

は正常な値を示しているが、中温の方は少し低下きみで高負荷に対しては限界に近いように思われる。

問題点としては、MLSSを5%の高濃度に維持しようすると高負荷ではSSvol%が50%を越えて投入量の2倍以上の汚泥を引抜き遠沈して返送しなければならなくなるのと、粘度が上昇して10,000cpsを越え流動性が乏しくなる点があげられる。したがって現実的には、MLSSは3%、汚泥返送率は200%まで、粘度は10,000cpsまで、と思われる。

3.4 総合検討

3.4.1 各処理方法のコスト比較

各処理方法について、文献^{(10), (19), (20)}を参考にして液量1,000 m³の消化槽をモデルにして熱収支を計算しコスト比較を行った。表14に計算の基礎に用いた数値をまとめた。

$$\begin{aligned} \text{熱収支} &= \text{回収熱量} - \text{加温熱量} \\ \text{加温熱量} &= \text{投入汚泥の加温熱量} \\ &\quad + \text{消化槽からの放散熱量} \end{aligned}$$

図-13 ガス発生量の経日変化

図-14 負荷量と有機物当りガス発生量との関係

図-15 ガス発生量の経日変化

図-16 負荷量と有機物当りガス発生量との関係

但し熱処理及び酸処理の場合は、投入汚泥の加温には熱交換を行うものとし、消化槽からの放散熱量は熱処理汚泥の保有熱量で賄えるものとする。

- (1) 無処理、中温消化の場合……ガス発生量は100 m³/ton- vs とする

加温熱量 $3,900 \times 10^3 \text{ Kcal/日}$

回収 " $1,650 \times 10^3$ "

差 引 き $\ominus 2,250 \times 10^3$ "

- (2) 無処理、高温消化の場合……ガス発生量は200 m³/ton- vs とする

加温熱量 $6,740 \times 10^3 \text{ Kcal/日}$

回収 " $3,300 \times 10^3$ "

差 引 き $\ominus 3,440 \times 10^3$ "

- (3) 熱処理、高温消化の場合……ガス発生量は500 m³/ton- vs とする

加温熱量 $5,860 \times 10^3 \text{ Kcal/日}$

回収 " $8,250 \times 10^3$ "

差 引 き $\oplus 2,390 \times 10^3$ "

1日当り、重油281ℓ, 16,860円の利益が出る。

- (4) 酸処理、高温消化の場合……ガス発生量は600 m³/ton- vs とする

加温熱量 $5,860 \times 10^3 \text{ Kcal/日}$

回収 " $9,900 \times 10^3$ "

差 引 き $\oplus 4,040 \times 10^3$ "

1日当り、重油475ℓ, 28,500円の利益が出る。

しかし塩酸及びカセイソーダの薬品量は汚泥1 m³当り1規定濃度でそれぞれ50ℓ必要で、汚泥1 m³当りの薬品代は350円になるので、1日当りの薬品代は、

$350 \text{ 円/m}^3\text{-汚泥} \times 100 \text{ m}^3\text{-汚泥/日} = 35,000 \text{ 円/日}$

したがって差引き

$28,500 - 35,000 = \ominus 6,500 \text{ 円/日}$

となり薬品代を考慮すると利益は出ない。

以上の結果から前処理方法は熱処理(140℃, 60分)が適切である。熱処理の場合は無処理に比べて熱処理設備や熱交換設備等の設備費が高むが、熱処理の効果として汚泥量が約半分になり、また汙過性が向上して脱水工程以後の費用が軽減される利点がある。したがって熱処理と消化工程のみのコスト計算でなく、汚泥処理系全体を通しての経済性評価が必要である。

3.4.2 余剰活性汚泥の消化システムの概要計画

これまでの実験結果から余剰活性汚泥を効率良く消化させるシステムは、濃縮→熱処理→高温消化高MLSS運転システム、が良いと思われる。このシステム

表14 熱収支計算に用いた数値

消化槽容積	1,000 m ³	
表面積	750 m ²	
滞留日数	10 日	したがって投入汚泥量は $1,000 \text{ m}^3/10 \text{ 日} = 100 \text{ m}^3/\text{日}$
消化槽壁の熱貫流率	$0.75 \text{ Kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$	
気温及び生汚泥温度	15℃	
中温消化温度	37℃	
高温	53℃	
熱処理及び酸処理温度	140℃	
ボイラー効率	80%	したがって総熱効率率は $0.80 \times (1 - 0.20) = 0.64$ 64%
配管での熱損失	20%	
熱交換率	70%	
生汚泥の有機物濃度	3%	
消化ガスの発熱量	$5,500 \text{ Kcal/m}^3$	
重油の発熱量	$8,500 \text{ Kcal/ℓ}$	
" 価 格	60円/ℓ	

を拡張した1例を図-17に示す。

このシステムの概要は次のようになる。①余剰活性汚泥は遠心濃縮して水分を減らして加熱熱量を節減する。②濃縮汚泥は熱交換した後、熱処理する。③熱処理汚泥は熱交換して冷却した後返送汚泥と混合して適温にし、高MLSSで高温消化を行う。④引抜汚泥は少量の薬注後遠心濃縮して処理液と濃縮汚泥に分離する。⑤濃縮汚泥は消化槽が所定MLSSになるように返送し残りは加圧汙過して脱水する。⑥脱水ケーキは焼却し廃熱ボイラで得た蒸気は熱処理に使用する。⑦消化ガスはガス発電して経済性の高い電力にしてエネルギー回収した後、廃熱ボイラで熱回収して熱処理に利用する。

このシステムの評価を行うにはまだデータが少ないので、今後詳細かつ長期間の実験が必要である。消化汚泥はもっと高温で再熱処理して無薬注脱水するシステムも考えられる。下水汚泥については種々のシステムについて比較した報告がある^{21)~23)}。下水汚泥についてこのシステムを適用する場合は、初沈汚泥は消化効率が良く沈降性圧密性も良いので、初沈汚泥は重力濃縮し無処理で、熱処理した余剰汚泥と混合して消化するシステムが適当と言われている^{21)~23)}。いずれにしてもこれらのシステムは設備が大掛りになるので大量の排出汚泥のある企業や下水処理場に適用が限られよう。

4. 結 言

- (1) 余剰活性汚泥を効率良く消化させるための前処理方法として100℃以上での熱処理及び酸・アルカリを加えた熱処理が有効な結果を得た。
- (2) これらの前処理によってSSの可溶化が進み、ガ

図-17 濃縮→熱処理→高温消化高MLSS運転システム

ガス発生効率が向上した。可溶化量が多いものほどガス発生量は多いが、可溶化成分のうち全糖溶出量がガス発生量との相関が高かった。

- (3) 無処理、熱処理 (140℃, 60分), 酸処理 (pH 2, 140℃, 60分) 各汚泥を MLSS 5% の高濃度で中温消化及び高温消化した結果、処理汚泥は無処理汚泥の3倍以上のガス発生量があった。また、中温消化よりも高温消化の方が高負荷に耐えガス発生効率がよく、装置の縮小化が期待された。熱処理汚泥を有機物負荷 9 g/l・日、滞留日数 3.3 日で高温消化した時のガス発生量は 500 ml/g-vs となった。
- (4) 薬品代を含めたコスト計算の結果前処理方法は熱処理が適切で、システムとしては濃縮→熱処理→高温消化高MLSS運転システム、が良いと思われる。
- (5) このシステムによってガス発生効率が向上する要因は、①熱処理過程での細胞破壊による可溶化と基質の改質、②濃縮による SRT の延長、③高温消化による反応速度の増大と高負荷への耐性、が考えられる。

謝 辞

本研究の遂行に当り種々御指導をいただきました微生物工業技術研究所室長太宰宙朗氏、奈良文化女子短期大学講師奥井一義氏、並びに試料提供に御援助いただきました三和澱粉工業㈱、奈良市衛生浄化センターの関係者各位に深謝いたします。

本研究は中小企業庁昭和56年度技術開発研究費補助事業で行った^{24), 25)}。

文 献

- 1) 石川他：公害と対策，17, 596 (1981)
- 2) 服部他：月刊下水道，4, (12), 17 (1981)
- 3) 平岡他：環境技術，10, 691 (1981)
- 4) 佐藤：第15回エッセン州下水道研究発表会 (1982)
- 5) 山内他：'79環境技術全国会議，日本能率協会，S 9-2-3 (1979)
- 6) 本多他：廃棄物のメタン発酵，p.151，サイエンティスト社 (1980)
- 7) R.T.Haug：JWPCF，49, 1713 (1977)
- 8) R.T.Haug et al：JWPCF，50, 73 (1978)
- 9) 野池：汚泥の嫌気性消化に関するシンポジウム，環境技術研究会，p.13 (1983)
- 10) 高原編著：廃水の生物処理，p.174，地球社 (1980)
- 11) 藤田：第8回水処理研究会，大阪大学生産技術研究会，p.9 (1979)
- 12) 日本下水道協会：下水試験方法 (1974年版)
- 13) 東大農芸化学教室編：実験農芸化学 (上，下)，第3版，朝倉書店 (1978)
- 14) JIS, K2301：燃料ガス及び天然ガスの分析・試験方法 (1980)
- 15) 柝倉他：環境科学研究報告集，B72-S512・513 (1981)
- 16) 園田他：醸工，43, 396 (1965)
- 17) 園田他：醸工，46, 789 (1968)
- 18) 稲森他：用水と廃水，24, 179, 303 (1982)
- 19) 小越：1981年版汚泥研究年報，理工新社，p.133
- 20) 野池：公害と対策，19, 30 (1983)
- 21) 平岡他：環境技術，10, 945 (1981)
- 22) 吉田：月刊下水道，4 (12), 66 (1981)
- 23) R.T.Haug et al.：JWPCF，55, 23 (1983)
- 24) 松川：中小企業庁昭和56年度技術開発研究費補助事業成果普及講習会テキスト
- 25) 松川他：奈良県工業試験場報告，7, 13, 20 (1982), 81 (1982)