

(22) 熱処理汚泥の嫌気性消化に関する検討

建設省土木研究所
同

佐藤 和明
館山 祐清

1. はじめに

下水汚泥の処理において嫌気性消化法は、汚泥の減量安定化を図る目的で、最も一般的に用いられてきているプロセスである。嫌気性消化処理はまたメタン成分を主とする有用なガスの発生を伴うものであり、最近ではこの消化ガスを利用した発電システムが導入されるなど、下水汚泥の資源的利用を図るプロセスとしても期待されている。土木研究所では、消化ガスの有効利用という観点から調査をすすめてきたが、今回その一環として、余剰活性汚泥に熱処理を行うことにより、汚泥のガス発生能力を高める技術について実験による検討を行ったものである。

下水処理場で発生する汚泥のうち、最初沈澱池汚泥のガス発生量は、投入有機物当り $0.4 \sim 0.6 \text{ l/gvs}$ となっているものに対し、余剰活性汚泥のガス発生能力は、 $0.2 \sim 0.4 \text{ l/gvs}$ とかなり低くなっていることが認められている¹⁾。下水汚泥または都市ゴミを対象として、そのガス発生能力を高めるための前処理技術の検討がいくつか行われているが、最近外国の研究者グループにより、前熱処理により下水汚泥または都市ゴミの生物分解性が大きく上がりうることを示された^{2), 3), 4)}。これらの成果によれば、熱処理の効果はとくに余剰汚泥で顕著であり、ガス発生量が50%から70%増加することが示されている。著者らも、この余剰汚泥に対する熱処理効果については、既に予備の実験によって確認している⁵⁾。

元来、余剰汚泥は濃縮脱水し難いものといわれているが、熱処理を加えることによりこういった汚泥性状が改善され、且つガス発生量が大幅に増大することになれば、ここに検討する前熱処理技術は、かなり実現性の高いものとなつてこよう。このような観点から、本実験では熱処理を加えた余剰汚泥を対象として連続実験によりガス発生量の増加を定量すると共に、消化汚泥の濃縮脱水性、脱離液の臭気、色度について検討したものである。

2 実験方法

1) 実験供試汚泥とその前熱処理

実験に供した余剰汚泥は、家庭下水を主とする下水処理場の返送汚泥ピットより採取したものであるが、当処理場のエアレーション時間は約10時間であり、ある程度安定化した余剰汚泥であるものと考えられる。汚泥の採取は、実験期間中数回に別けて行ったが、V S成分などの変動は少く、大体同一の性状を有する汚泥を実験に用いることができたものとする。汚泥は実験室において遠心分離器により濃縮され、濃度約25%に調整された。

汚泥の熱処理は、図-1に示す5 l規模の熱処理装置によって行った。熱処理温度は3段階選び、それぞれ、120℃、150℃、180℃とした。熱処理時間は30分としたが、図-2に示すように昇温および冷却にかなり時間がかかっている。熱処理した汚泥は約4℃の冷蔵庫内に保存し、実験に供した。

2) 嫌気性消化実験

実験に用いた嫌気性消化実験装置を図-3に模式的に示す。実験タンクは20 lの規模であり、35℃の恒温水槽の中にセットされている。今回は、熱処理装置の容量の制約から実験槽内の汚泥量を10 lとして

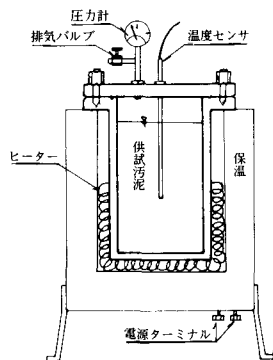


図-1. 熱処理装置

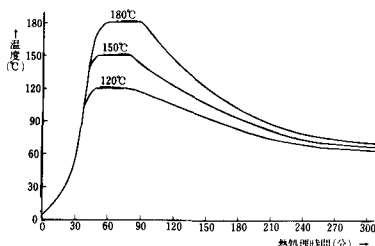


図-2. 熱処理温度条件

実験を行っている。汚泥の投入引抜きは、内径 9 mm のチューブポンプにより行っており、20 日消化の条件で 1 日 1 回、10 日消化の条件で 1 日 2 回の半連続投入引抜の形態である。なお 1 回の投入引抜き時間は約 3 分、所定の時間にタイマー作動により自動的に投入引抜きが行われた。発生ガス量は、ドラム容量 0.2 l の湿式ガスメーターにより計測された。又、ガスメーターを出たガスは、一時 5 l 容量のガスタンク貯留されるが、これは汚泥引抜き時に、実験タンク内に外気が侵入するのを防ぐためである。

実験タンクは 4 器用意し、それぞれコントロールとしての無処理余剰汚泥、120℃熱処理汚泥、150℃熱処理汚泥、180℃熱処理汚泥を投入汚泥とし、同時平行的に実験をすすめた。

実験開始時に、タンク内に封入した消化汚泥は、予備実験において上述の処理場から採取してきた余剰汚泥を消化したものを用いた。当初封入した消化汚泥量は 6 l であり、1 日 250 ml の実験供試汚泥を約 4 週間投入することにより、消化汚泥の賦活を行うと共に、実験タンク内の汚泥量を 10 l とした。

20 日間消化の負荷条件で 8 週間実験を行い、続いて 10 日消化の条件で 4 週間消化実験を継続した。

3) 測定項目

測定はガス量を毎日計測すると共に、週に 3 回ガス成分をガスクロマトグラム法により測定した。汚泥成分については、pH を週に 3 回、酸度、アルカリ度、TS、VS を週 1 回の頻度で計測すると共に、TOC、COD_{cr} 窒素、リンなどの測定を必要に応じて行った。このうちいくつかの項目については、汚泥を遠心分離 (3000 rpm 10 分) した上澄液を脱離液サンプルとして測定を行った。以上の計測は、下水試験方法に準拠している。但し、全炭素および全窒素の分析は CN コーダーにより行った。

汚泥の脱水性については、リーフテストを行うと共に CST 試験により評価を行った。

消化ガスおよび汚泥の臭気濃度については、三点比較式におい袋法により、嗅覚閾値の希釈倍数を統計処理しその臭気濃度を求めた。又、代表的な臭気成分について、ガスクロマトグラム法によりその濃度を計測した。脱離液の色度については、JIS (工業用水試験法) に準じて測定を行った。

3. 実験結果

1) ガス発生量および消化状況

ガス発生の変化図を図-4 に示すが、コントロール汚泥に較べ熱処理汚泥は実験当初からかなり発生ガス量が高くなっていることが示されている。20 日消化条件において、コントロール汚泥で 1 日約 1.5 l の発生ガス量であるのに対し、120℃熱処理汚泥で 2.5 l から 3 l、150℃、180℃の熱処理汚泥で 3～3.5 l のガス発生をみている。ガス発生の状況は負荷条件を変えた場合、ほぼ一週間以内に所定のガス発生量まで達しており、かなり安定した消化状況であると推察できる。グラフには多少のガス発生の変動が示されているが、ガスメーターの作動または投入ポンプのトラブルなどに起因するものが多い。なお 10 日消化の 3 週目にガス発生量の低下がみられるが、これは投入汚泥の濃度調整を誤り低濃度の汚泥を投入してしまったことによる。

表-1, 2, 3 に投入汚泥および消化汚泥の成分を示す。実験期間中、消化汚泥の pH は殆ど同一の値を示し、コントロール系で、7.0、120℃で 7.3、150℃、180℃の槽で 7.4 であった。コントロール槽の消化汚泥は色相も活性汚泥の色が残る、明らかに未消化物が残っている状態であったが、揮発性有機酸は 10ppm

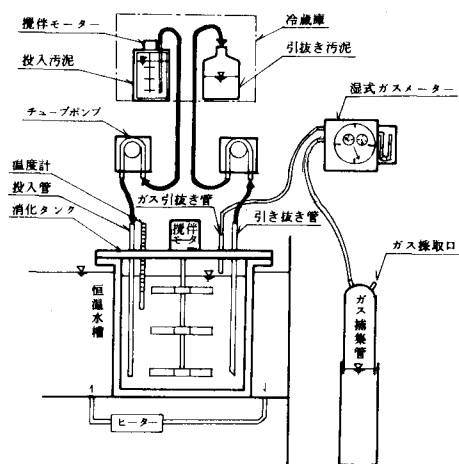


図-3 消化実験装置

程度でしか認められていない。よって、この pH 値が他よりも多少低い値をとるのは、窒素成分の可溶化が少いことなどに関係しているものであり、いわゆる消化状況の悪化に起因しているものでない。

汚泥固形物の減量という観点からデータをみると、明らかに熱処理を加えた汚泥の消化減量は大きくなっており、ガス発生量の増加を裏付けるものである。

全炭素の分析値からは、熱処理により可溶化された部分の炭素が、かなりの程度ガス化されていることが推察される。しかし、消化脱離液中に残存する有機炭素量は、熱処理汚泥のもので高く、いわゆる熱処理により生成された可溶性有機物も全部が生物分解されるという関係とはなっていない。

表－4 に、各投入汚泥、消化日数に対応したガス発生量およびガス成分をまとめたものを示す。ガス成分については実験期間中殆ど一定しており、熱処理汚泥で多少炭酸ガス成分が高く出ている。

投入 V S 当りのガス発生量は、コントロール汚泥で 0.16 ℓ/gvs でかなり低い値に留っているが、120℃の処理条件で 0.3 ℓ/gvs、150℃、180℃で 0.4 ℓ/gvs 近くと余剰汚泥としては高い値を示している。

20日消化と10日消化間でガス発生量を比較すると熱処理汚泥に関しては、投入汚泥量当りのガス発生量は

表－1. 投入汚泥成分表

	pH	アルカリ 度 mg/L	酸 度 mg/L	T S mg/L	V T S mg/L	CODCr mg/L	T - C mg/L	T - N mg/L	NH ₄ -N mg/L	T - P mg/L
コントロール	6.53	570	601	24,300	18,500	23,800 (268)	8,190 (520)	1,810	120	412 ²⁾ (74)
120℃	6.47	437	593	24,500	18,600	22,200 (4720)	8,880 (2750)	1,870	163	418 (75)
150℃	6.10	393	990	24,300	18,500	20,700 (6030)	8,970 (3980)	1,850	197	412 (111)
180℃	5.45	189	1,200	24,300	18,100	23,200 (12300)	8,510 (5290)	1,840	241	415 (133)

() : 脱離液, 1) : TOC, 2) : オルトリン

表－2. 20日消化汚泥成分表

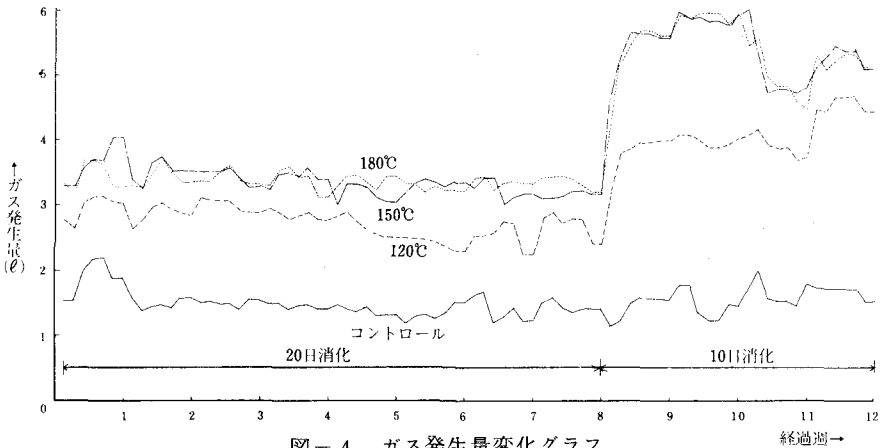
	pH	アルカリ 度 mg/L	酸 度 mg/L	T S mg/L	V T S mg/L	CODCr mg/L	T - C mg/L	T - N mg/L	NH ₄ -N mg/L	T - P mg/L
コントロール	7.02	1,880	859	21,100	15,200	17,300 (653)	7,420 (493)	1,740	363	412 ²⁾ (113)
120℃	7.35	3,580	1,130	16,700	11,000	12,400 (1,570)	5,810 (764)	1,670	808	392 (99)
150℃	7.39	3,800	1,120	15,400	9,680	11,500 (1,810)	5,520 (978)	1,780	919	409 (111)
180℃	7.48	3,910	1,080	14,000	8,380	10,700 (3,220)	5,270 (978)	1,710	971	389 (108)

() : 脱離液, 1) : TOC, 2) : オルトリン

表－3. 10日消化汚泥成分表

	pH	アルカリ 度 mg/L	酸 度 mg/L	T S mg/L	V T S mg/L	CODCr mg/L	T - C mg/L	T - N mg/L	NH ₄ -N mg/L	T - P mg/L
コントロール	6.89	1,520	855	20,400	15,100	17,100 (678)	7,590 (306)	1,600	242	415 (100)
120℃	7.28	3,110	1,090	15,600	10,500	12,400 (1,650)	5,730 (980)	1,550	682	398 (93)
150℃	7.32	3,510	1,140	14,200	9,090	11,500 (1,810)	5,220 (910)	1,590	818	386 (100)
180℃	7.47	3,530	1,100	12,600	7,760	13,300 (3,280)	4,850 (1,150)	1,590	924	373 (88)

() : 脱離液, 1) : TOC, 2) : オルトリン



図－4. ガス発生量変化グラフ

大体同程度となっており、消化状況は安定したものであることを裏付けている。10日消化のコントロール汚泥の投入汚泥量当りのガス発生量は、20日消化に比べ約半量となっているが、pH、揮発性有機酸などの分析値は異常値を示しておらず、単にガス発生量のみが低く抑えられている結果となっている。

2) 消化汚泥の濃縮・脱水性状

図-5に1ℓのメスシリンダーを用いて汚泥の沈降濃縮性を測定した結果を示した。なお、消化汚泥のサンプルは20日消化の最後の実験週に得られたものである。コントロールおよび120℃熱処理汚泥に関しては、殆ど沈降が生ぜず、その消化汚泥も同様であった。150℃熱処理汚泥の沈降性はかなり幅があり、脱離液相が殆ど出ないものから容量約50%近く汚泥が濃縮されるものまで種々のものがみられた。一方その消化汚泥は常に汚泥と脱離液の分離が生じ、24時間後には容量として30~50%の脱離液が得られた。180℃の熱処理汚泥の沈降濃縮性は極めて良く、1時間後には既に汚泥量は20%に濃縮された。180℃消化汚泥は若干沈降性は悪く、1時間後には40%に濃縮され、その後も緩慢な濃縮が続き、24時間後には容量約20%まで濃縮された。

熱処理汚泥およびその消化汚泥の脱水性についての比較検討をリーフテストおよびCSTテストにより行った。表-5にその結果を示すが、対象とした汚泥は、8時間濃縮し脱離液を除いた濃縮汚泥であり、消化汚泥は10日消化時のものを用いた。当初無薬注の条件で汚泥の脱水性を比較できるものと考えたが、脱水性は180℃熱処理汚泥でも極めて悪く、適当な薬品調整をした条件で、通常のろ過速度が得られている。180℃の熱処理汚泥では、汚泥固形物量に対して塩化第二鉄10%、消石灰25%の薬添条件で、消化汚泥も共に通常のろ過速度になっているに対し、150℃の熱処理汚泥では、約2倍の薬添量を必要としている。熱処理汚泥とその消化汚泥の脱水性状の差異については、明確な答を得るところまで到っていないが、同程度または消化汚泥で多少低下するといった結果と理解できよう。このことは、上述の汚泥の濃縮性状で得られた結果と相通ずるものであり、熱処理汚泥の濃縮・脱水性状は、嫌気性消化後も多

表-4. ガス発生量および成分の比較

供試汚泥	消化 条件	ガス成分			投入汚泥 1ℓ当りガス 発生量(L)	投入汚泥1ℓ 当りメタンガ ス発生量(L)	投入VS1ℓ 当りガス発 生量(gvs)	投入VS1ℓ 当りメタンガ ス発生量 (gvs)
		CH ₄	CO ₂	その他				
コントロール	20日	71.3	27.4	1.3	2.87	2.05	0.16	0.11
	10日	70.3	27.6	2.1	1.68	1.18	0.10	0.07
120℃	20日	70.7	28.6	1.7	5.58	3.95	0.30	0.21
	10日	70.6	28.9	0.5	4.61	3.25	0.28	0.20
150℃	20日	68.6	30.6	0.8	6.58	4.51	0.36	0.25
	10日	68.5	31.2	0.3	5.21	3.57	0.32	0.22
180℃	20日	68.6	30.1	1.3	6.85	4.70	0.38	0.26
	10日	68.3	31.4	0.3	5.25	3.59	0.34	0.23

注) 10日消化条件では、表-1に示した投入汚泥の値を補正して計算した。

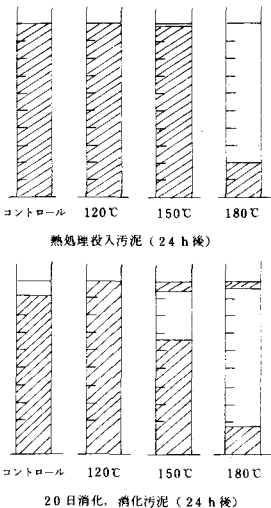


図-5. 熱処理汚泥、消化汚泥の沈降性

表-5 熱処理汚泥・消化泥の脱水試験結果

汚泥の種類	汚泥濃度 (%)	薬添率		ろ過時間		ケーキ厚 (mm)	ろ液量 (mℓ)	剥離性	ケーキ重量 (g)	乾ケーキ重量 (g)	ケーキ水分 (%)	ろ過速度 (ℓ ₂ /時)	CST 秒
		FeCl ₃ (%)	Ca(OH) ₂ (%)	吸着份	脱水份								
投入180℃	6.50	0	0	2	4	2.0	135	不良	22.6	5.0	77.9	5.0	201
投入180℃	"	10	25	2	4	10.0	455	良	160.7	26.2	83.7	17.4	66
投入180℃	"	20	50	2	4	16.0	515	良	216.0	35.0	83.8	35.0	65
消化180℃	3.99	0	0	2	4	1.0	95	不良	4.9	1.3	73.5	11.3	307
消化180℃	"	10	25	2	4	6.0	520	良	68.9	12.2	82.3	12.2	27
消化180℃	"	20	50	1	4	16.0	735	良	189.6	32.8	82.7	40.3	23
投入150℃	2.22	10	25	2	4	2.0	360	不良	23.6	3.0	87.3	3.0	47
投入150℃	"	20	50	1	4	9.0	590	良	115.5	14.9	87.1	17.9	27
消化150℃	2.15	10	25	2	4	1.0	150	不良	12.7	2.0	84.3	2.0	199
消化150℃	"	20	50	1	4	7.0	695	良	73.2	11.5	84.3	13.8	16

条件 ろ過面積 0.010m² ろ布 No P74
真空度 400mmHg

少低化することはあるものの、大きく変化するものではないと考えられる。

3) 消化汚泥の臭気および脱離液の色度

実験期間中、熱処理汚泥の槽から発生する消化ガスの臭気がかなり強度であるのが観察された。表-6に20日消化最終週の消化ガスの臭気濃度および代表的な臭気成分の分析結果を示したが、硫化水素が熱処理のケースで1000ppm以上となっており、臭気濃度を規定する主成分であることが推察される。下水汚泥の消化では通常、消化状況が悪化すると硫化水素濃度があがるという関係にあるが、前述の様に消化状況は安定したものであるため、熱処理による汚泥成分の変化がガス中の硫化水素濃度の上昇に関係しているものと考えられる。

表-7には、熱処理汚泥およびその消化汚泥の臭気の測定結果を示した。臭気の捕集は、汚泥試料200mlを30℃の条件で窒素ガスを曝気(10L/時)することによって行い、この曝気ガスを測定に供したものである。結果をみると、消化により汚泥の臭気がかなり軽減することが示されており、熱処理に特有のアルデヒド臭も消化汚泥では少なくなっている。

脱離液の色度の測定結果を表-8に示すが、熱処理によって生成した色度は嫌気性消化では除去されないという結果を示している。

4. 考 察

最近の報文によれば、嫌気性消化の浄化機構は、加水分解、酸生成、メタン生成の3段階を経て完結すると理解されており、とくに下水汚泥など不溶性有機物が主体となる基質を対象とする場合は、第1番目の加水分解過程が嫌気性消化の律速段階となることが考察されている。^{6) 7)} 熱処理により、汚泥中の有機物が可溶化することは、表-1のCOD成分または有機炭素成分がかなりの部分脱離液中に移行するという関係に明らかに示されている。又、本実験結果から可溶性有機炭素量がガス発生量に大きく関与していることが推察できる。表-9に熱処理汚泥中の揮発性有機酸の分析結果を示したが、揮発性有機酸は、熱処理により生成される可溶性有機物の一部分を占めるにすぎないといった関係が示されているものと理解できよう。以上のことは、反対に余剰活性汚泥が通常の消化条件では、可溶化されにくいということを示しているものであり、活性汚泥を構成する菌体有機物を嫌気性消化の基質とするためには、熱処理などの前処理が有効であることを暗示しているものと思われる。

図-6は、実験供試汚泥を20倍に希釈した条件で、クーロメーターによりBOD曲線を求めた結果を示した

表-9. 脱離液中の揮発性有機酸濃度

汚泥の種類	酢酸	プロピオン酸	酪酸	イソ酪酸	イソ吉草酸	ジ草酸	カプロン酸	計
投入コントロール	107	76	7	12	3	19	—	224
120℃	258	129	18	19	5	28	3	460
150℃	233	98	18	16	4	24	2	395
180℃	295	103	14	11	23	5	4	455
消化コントロール*	13	4	4	—	—	—	—	21
120℃	12	4	—	—	—	—	—	14
150℃	11	3	—	—	—	—	—	14
180℃	12	4	—	—	—	—	—	16

* 消化汚泥については20日消化の最終サンプル分析値

表-6. 消化ガスの臭気測定結果

汚泥の種類	臭気濃度	硫化水素 ppm	メチルメルカプタン ppm	備考
コントロール	170,000	220	14	硫化水素臭 臭気強度5
120℃	980,000	1,640	38	"
150℃	4,100,000	2,300	74	"
180℃	9,800,000	3,100	61	"

表-7. 汚泥部分の臭気測定結果

汚泥の種類	臭気濃度	硫化水素 ppm	メチルメルカプタン ppm	アセトアルデヒド ppm	備考
投入コントロール	4,100	0.58	0.11	0.14	臭気強度5
120℃	73,000	0.25	2.91	7.83	" 5
150℃	230,000	0.20	2.84	2.24	" 5
180℃	1,300,000	0.02	0.09	1.24	" 5
消化コントロール	1,700	0.33	0.25	0.12	" 3~4
120℃	550	ND	0.04	0.10	" 4
150℃	980	ND	0.06	0.08	" 4~5
180℃	980	ND	0.04	0.13	" 4

表-8. 脱離液の色度

脱離液の種類	色度
投入コントロール	16
120℃	130
150℃	200
180℃	600
消化コントロール	50
120℃	130
150℃	260
180℃	700

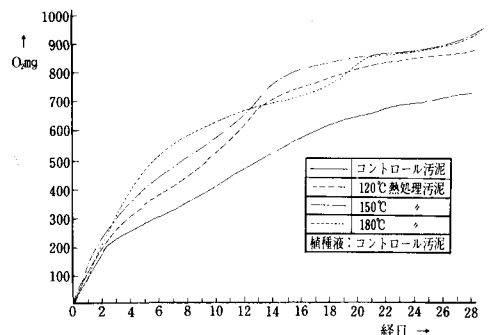


図-6. 熱処理汚泥のBOD変化曲線

ものである。熱処理をすることにより汚泥自体のBOD濃度が上がることは知られているが、今回測定されたガス発生量の増加は、BODの上昇の関係を上廻っている。

Haug³⁾らによって得られた余剰汚泥に対する175℃熱処理によるガス発生量の増分は60%となっているのに対し、今回の実験結果は100%以上の増分を示している。この差異は実験に供したコントロール余剰汚泥のガス発生能力に主に起因しているものであり、Haugらの使用した余剰汚泥のVS当りガス発生量0.26ℓ/gvsに対し、今回の余剰汚泥は0.16ℓ/gvsと大分低くなっている。この様に、熱処理による前処理は、安定化しガス発生能力が低くなっている余剰汚泥に対しより効果を発揮するものと言えよう。

図-7は、実験が終了した段階で、コントロール汚泥と120℃熱処理汚泥を各々、120℃およびコントロールのタンクに逆に投入し、ガス発生量を検討したものである。図より明らかなようにガス発生量の関係は速かに投入汚泥と対応したものとなっており、投入汚泥の性状のみがガス発生量を規定しているという関係が再び示されている。

以上、熱処理を行うことにより余剰汚泥のガス発生量をかなりの割合で上げ得ることが示されたが、熱処理に必要となる熱源が消化ガスの増分で賄えるかどうかの検討が必要となつてこよう。このことについての細い議論は割愛するが、余剰汚泥の熱処理により、初沈汚泥によるガス発生量を含めた全消化ガス量が20%増加するとすれば、熱収支的に十分有利な条件で、余剰汚泥の熱処理と嫌気性消化プロセスが組み合せうるといふ試算を得ている⁹⁾。よつてこの種の技術の実現性を議論するに当たっては、汚泥量の減量および消化汚泥の濃縮・脱水性の改善といったプラス的要因が、いままでも熱処理プロセスに対して指摘されてきた維持管理の困難性、臭気、色度の問題などのマイナス面をどの程度カバーしうるかということに論点が集約されるものと考えられる。

5. 結 論

- (1) 余剰汚泥を熱処理することにより、そのガス発生能力を高めることができる。今回の供試汚泥では、投入有機物当り0.16ℓ/gvsに対し、120℃の熱処理条件で0.30ℓ/gvs、150℃および180℃で0.37ℓ/gvs程度の結果が得られた。
- (2) 濃度2.5%の熱処理余剰汚泥の消化状況は安定したものであったが、消化ガス中に1000ppm以上の硫化水素が認められた。
- (3) 熱処理によるガス発生量の増加の主因は、汚泥中の有機物成分の可溶化にあるものと考えられ、通常の消化条件では消化の機構の第1段階になる加水分解過程がガス発生に大きく関与しているものと考察された。
- (4) 150℃以上の熱処理条件で、余剰汚泥の濃縮・脱水性状の改善がみられたが、この熱処理汚泥の濃縮・脱水性状は、嫌気性消化後も多少低下する可能性はあるものの、大体保持されるものと考えられる。
- (5) 嫌気性消化により、熱処理汚泥の臭気濃度が軽減できる。しかし脱離液の色度の除去は期待できない。

＜参考文献＞

- 1) 佐藤；各種下水汚泥の消化ガス発生量について、土木学会第33回年講（1978）
- 2) R.T.Haug; Sludge Processing to Optimize Digestibility and Energy Production, Journal WPCF, July 1977.
- 3) R.T.Haug et al; Effect of Thermal Pretreatment on Digestibility and Dewaterability of Organic Sludges, Journal WPCF Jan. 1978.
- 4) J.M.Gossett and P.L.McCarthy; Heat Treatment of Refuse for Increasing Anaerobic Biodegradability, NSF/RANN/SE/GI-43504/PR/4/74
- 5) 館山、佐藤；熱処理汚泥の消化ガス発生量の検討、第18回下水道研究発表会（1981）
- 6) 遠藤、松本、野池；嫌気性消化の酸生成における律速段階について、土木学会第35回年講（1980）
- 7) J.E.Eastman, J.F.Ferguson; Solubilization of Particulate Organic Carbon during the Acid Phase of Anaerobic Digestion, Journal WPCF March, 1981
- 8) 土木学会；下水汚泥の処理・処分および利用に関する研究報告書、昭和46年度
- 9) 建設省土木研究所；昭和55年度下水道事業調査費報告、昭和56年5月

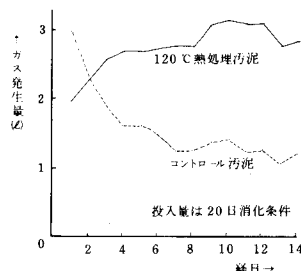


図-7. ガス発生変化グラフ