

汚泥消化の高率化に関する研究

早稲田大学理工学部 正 員 遠藤郁夫

学生員 近藤千秋

1. 緒論

下水汚泥の処理および処分については、内外とも多くの研究並びに議論が活発に行なわれている。汚泥を肥効成分の回収の意味で土壤改良資材に使用する場合、或は海洋投棄をするにしても、汚泥中の病原菌と寄生虫卵など疫学的見地からの検討が必要である。また、汚泥の流体輸送に際しても生汚泥のグリースが管壁に付着して損失水頭を著しく増大するなどの問題がある。これらの諸問題に対して、総合経費の観点より、一般に汚泥消化はめり効果的である。しかしながら、汚泥消化槽は、約30日間の長い消化日数を必要とし、消化槽の容量が大きくなり建設費が11じりしくめさむ欠点がある。そこで、消化の高率化が種り提起され、検討されてるが、系統的研究は未だなされてるないともいえる。筆者らは汚泥消化の高率化について、特に負荷の面から考察し、高率消化法と接触消化法について検討を加えたものである。

2. 実験方法

実験装置を図-1に示した。消化温度33°C、消化日数としては、5、10、15、20、25、30、35、40および60日とした。生汚泥の投入は1日1回とし、攪拌は生汚泥投入後、全体が均一になる程度、手で振盪した。

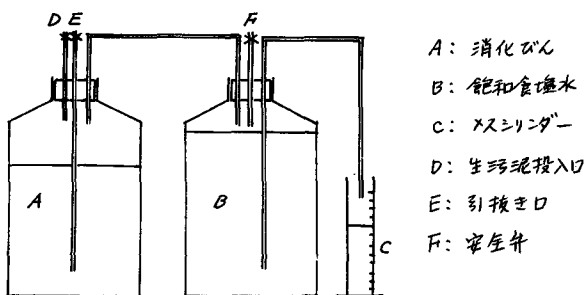


図-1 実験装置

高率消化法を検討するため、消化日数を15日とし、投入生汚泥の濃度を2、3、4、5、および6%として実験を行なった。また、接触消化法に関する実験は、消化日数を5日とし、消化槽内混合液濃度を2、3、4、5、および6%、投入生汚泥濃度を1%および2%とした。

種汚泥は東京都S下水処理場の消化汚泥に1/10量の生汚泥を加えて馴養したものである。種汚泥および生汚泥の性質を表-1に示した。

3. 実験結果と考察

3.1 汚泥消化の負荷

消化温度33°C、消化日数5、10、

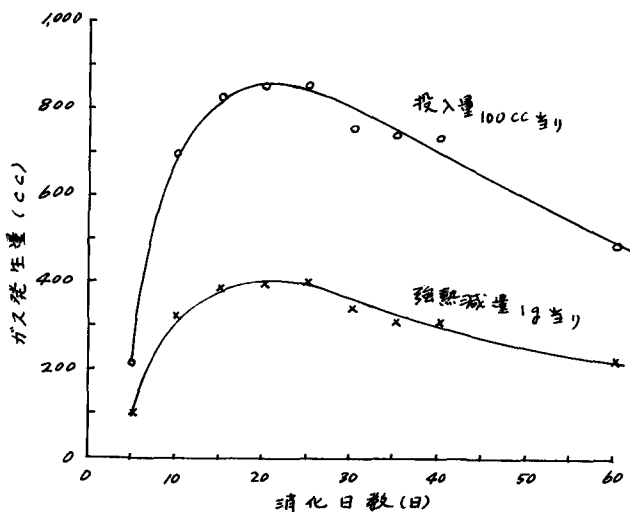


図-2 消化日数とガス発生量

15, 20, 25, 30, 35, 40 および 60 日として半連続投入実験を行なった。図-2 は消化日数とガス発生量との関係である。ガス発生量は消化日数の増加と共に急激に増大し、15~25 日消化の範囲では硫酸減量 1g 当り 400 cc/日 (投入量の 8 倍) に達する。33°C におけるし尿消化では 360~385 (6.5~7 倍) である。

表-1 汚泥汚泥および生汚泥の性質

汚泥消化は若干多量ともいえる。消化日数 25 日以上ではガス発生量は次第に減少している。ガスの発生量が、20 日消化付近で最大を示しているが、このことは他の二、三の消化¹²⁾実験でも同様の結果が得られている。

			pH	TS	VS	COD(消)	COD(明)	BOD	PLN 度	有機酸
汚泥消化	種汚泥		7.6	39105	18594	7055	8284	1514	4250	—
	生汚泥		5.5	38556	21908	7637	8072	6191	2750	1380
高率消化	種汚泥		7.3	37218	18672	11546	9012	1545	2900	—
	生汚泥	2%	5.9	18724	11280	7118	4923	3777	1000	535
		3%	5.8	28558	17166	10402	6749	6248	1200	782
		4%	5.7	38152	22840	13156	9131	8236	1400	1017
		5%	5.7	46962	28240	15338	11116	9258	1600	1294
		6%	5.7	56292	33236	—	—	10500	—	—
	種汚泥									
接触消化	生汚泥	1%	5.4	9652	5564	1868	1850	2704	—	652
		2%	5.0	16720	10234	5706	3540	4271	—	1169

消化日数とガス発生量との関係を半対数紙にプロットすると図-3 のような関係が得られた。ガスの発生状況を細菌の成長相と照合して考えると、ガスの発生量が最大値を示す

表-2 20 日消化および 12 日消化の負荷

消化日数	容積負荷	槽内混合液の蒸発残留物 100 kg 当りに対する負荷	槽内混合液の硫酸減量 100 kg 当りに対する負荷
20 日	TS 1.9 kg/m ³ /日	TS 6.7 kg/TS 100 kg/日	TS 1.0 kg/VS 100 kg/日
	VS 1.1 kg/m ³ /日	VS 3.1 kg/TS 100 kg/日	VS 7.1 kg/VS 100 kg/日
	BOD 0.34 kg/m ³ /日	BOD 1.0 kg/TS 100 kg/日	BOD 2.3 kg/VS 100 kg/日
12 日	TS 3.2 kg/m ³ /日	TS 7.1 kg/TS 100 kg/日	TS 2.6 kg/VS 100 kg/日
	VS 1.8 kg/m ³ /日	VS 5.0 kg/TS 100 kg/日	VS 11.3 kg/VS 100 kg/日
	BOD 0.56 kg/m ³ /日	BOD 1.6 kg/TS 100 kg/日	BOD 3.5 kg/VS 100 kg/日

20 日消化は、細菌学的には対数発育期の最上端に位置することが考えられ²⁾、有機物を最大速度で除去することになる。したがって、1 次消化槽は対数発育期のこの点で運転すべきである。しかしながら、その点を維持するためには、絶えず食物を供給しなければならぬから、汚泥消化槽が単槽、20 日消化の場合には、生汚泥が混入する恐れがある。³⁾⁴⁾

汚泥消化槽の限界消化日数は図-2 から、10~15 日消化、特に 12 日消化が考えられる。表-

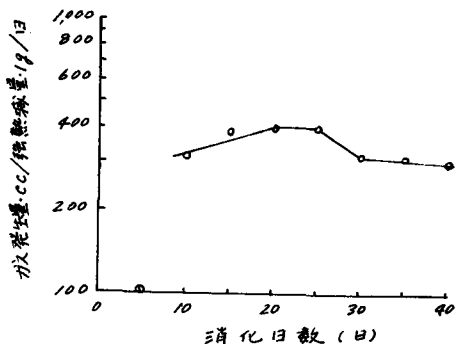


図-3 消化日数とガス発生量

2は対象発育期の最上端としての20日消化、および限界負荷としての12日消化の負荷について、それぞれを示したものである。BODの限界負荷は $3.5 \text{ kg/V.S } 100 \text{ kg/日}$ 、20日消化は $2.3 \text{ kg/V.S } 100 \text{ kg/日}$ である。したがって汚泥消化槽は、単槽の場合は少なくとも限界消化日数として20日消化が必要である。25日消化は、細菌学的には発育減衰期(Declining Growth phase)であり、消化の程度はめなり進むものと考えられ、単槽の場合最小消化日数として25日消化を考慮することができ、30日消化は発育減衰期から死滅増加期が現われており、消化の程度は十分進んでいるものと考えられる。汚泥の消化の程度をどの程度にするかは問題があるにせよ、単槽の汚泥消化槽は、20～30日消化とすることが必要である。

二段消化の場合、1次消化槽は20日消化、二次消化槽の消化日数は5～10日が必要となる。しかし、この場合の消化汚泥は、図-5からわかるように、十分消化を受けたものである。また、1次消化槽の負荷の許容範囲は、BOD $0.5 \sim 0.3 \text{ kg/m}^3/\text{日}$ でもあり、標準活性汚泥法の負荷と殆ど同じであることは興味が深い。

図-3において、10日消化から25日消化までのガス発生量を一つの直線で近似すると、ガス発生量はその範囲では単分子反応型式に従い、次の様な近似式であらわすことができた。

$$G = 2.95 \times 10^{2.00585T} \quad (1)$$

(10～25日消化)

G: ガス発生量, cc/V.S lg/日

T: 消化日数, 日

脱り液のBODと消化槽内混合液のBODを図-5に示した。ガスの場合と同様に、限界消化日数は12日消化と考えられ、脱り液、混合液のBODはそれぞれ200 ppm, 1700 ppmであった。

ガス発生量、組成(図-6)およびBODから、良好な消化状態が得られようと考えられた15～25日消化の範囲では、ガスの発生量は $3.85 \sim 4.10 \text{ cc/V.S lg/日}$ 、有機酸は約100 ppm、槽内混合液の強熱減量は蒸発残留物の48%であった。

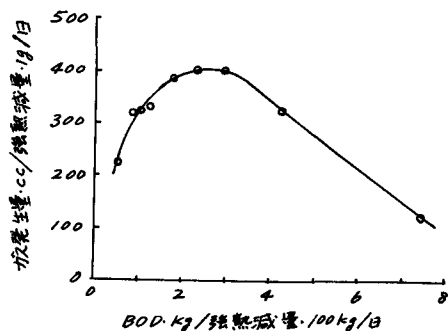


図-4 BOD負荷とガス発生量

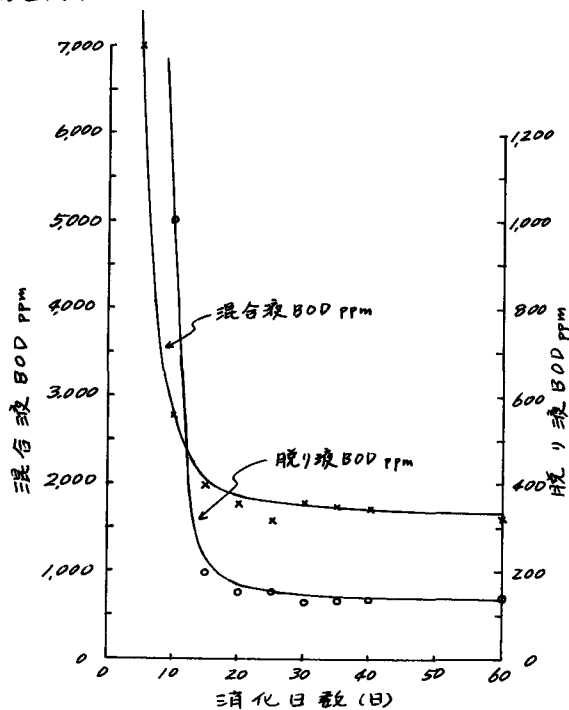


図-5 消化日数とBOD

図-3に見られるように、5日消化のガス発生量は著しく小さい。しかも有機酸濃度は794 ppmで、汚泥消化における有機酸の最大許容濃度 2,000~3,000 ppm に比べれば、必ずしもメタン産生菌 (*methan-producing bacteria*) の活性を阻害する程度とは考えられな。結局、有機酸が堆積してゐないことゝ、5日消化は“wash out”であらうと考えられる。すなわち、細菌の増殖速度が希釈速度に追いつけなくなったためであらう。具体的に諸常数を使って説明するための実験的研究は現在検討中であるが、数式的には Monod の式によつて一応、次の様に説明することが出来る。すなわち、容積 V の一連の発酵槽に投入が F l/h で供結された場合、 X と S とに関する物質収支は (図-7) ,

X につて

$$V \frac{dX_n}{dt} = F X_{n-1} - F X_n + V \left(\frac{dX_n}{dt} \right) \quad (2)$$

$$\frac{dX_n}{dt} = D(X_{n-1} - X_n) + \mu_n X_n \quad (3)$$

$D: F/V = \text{希釈率} = 1/(V/F) = 1/\theta$
平均停留時間の逆数

S につて

$$V \frac{dS_n}{dt} = F S_{n-1} - F S_n + V \left(\frac{dS_n}{dt} \right) \quad (4)$$

$$\frac{dS_n}{dt} = D(S_{n-1} - S_n) - \frac{1}{Y_{X/S}} \mu_n X_n \quad (5)$$

$Y_{X/S}$: 菌体収率

単槽 ($n=1$) が定常状態にある場合は、

(3)式から

$$\mu_1 = D = \mu_{\max} \frac{S_1}{K_s + S_1} \quad (6)$$

$$S_1 = \frac{D K_s}{\mu_{\max} - D} = \frac{K_s}{\mu_{\max}/D - 1} \quad (7)$$

$D \ll \mu_{\max}$ では

$$S_1 = \frac{D K_s}{\mu_{\max}} \quad (8)$$

(5)式から

$$X_1 = Y_{X/S} (S_0 - S_1) \quad (9)$$

となる。

$D \ll \mu_{\max}$ と見なせる範囲では、 S_1 は D の増加に比例して増加する (8式)。この様に、 D の値が小さいところでは槽から流出する細菌濃度 X_1 は (9) 式より、ほぼ $Y_{X/S} S_0$ となる。しかしながら、 D が $\mu_{\max}$ に近づくにつれて、 S_1 の値は急激に増加し、 S_0 に近づくから、結局 X_1 の値は 0 に近づく wash out が起こることになる。

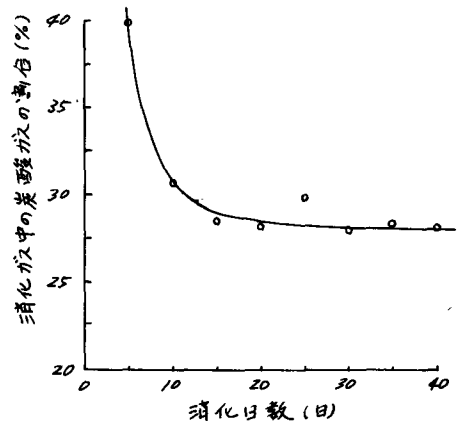
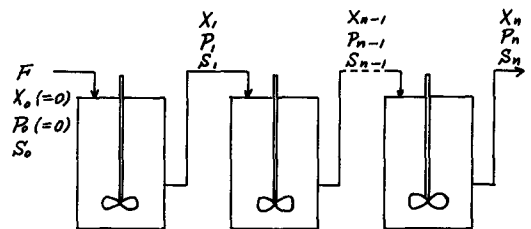


図-6 消化日数と炭酸ガス



F = 培地流入速度 P = 生産物濃度
 X = 菌体濃度 S = 制限基質濃度

図-7 n 槽からなる連続発酵槽

3.2 高率消化法

汚泥消化の高率化を計るため、槽内混合液濃度を高め、大きな負荷で消化槽を運転管理しようとする試みが、Sawyer, Morgan, Torrey, Schmidt および Bloodgett⁵⁾ によって種々検討が加えられ、実際の攪拌方式にも CRP 法、およびドルオリバー法などがある。しかしながら、負荷の面からの検討は必ずしもなされていらない。

汚泥の中温消化における限界消化比数は 1/2 は消化であることが認められた。そこで消化比数を 1/5 は消化とし、投入生汚泥濃度を 2, 3, 4, 5 がよび 6% として半連続投入実験を行なった。消化槽からの引き出しは攪拌混合液とした。図-8 に見られるように、1/5 は消化では投入生汚泥濃度が 4.7% 以上になるとガスの発生が急激に減少し、過負荷の状態が生じた。BOD 負荷との関係を図-9 に示した。限界負荷は、BOD 負荷では、 $3.5 \text{ kg/V.S } 100 \text{ kg/日}$ ($0.56 \text{ kg/m}^3/\text{日}$)、蒸発残留物負荷では $22.6 \text{ kg/V.S } 100 \text{ kg/日}$ ($3.2 \text{ kg/m}^3/\text{日}$)、強熱減量負荷では $11.3 \text{ kg/V.S } 100 \text{ kg/日}$ ($1.8 \text{ kg/m}^3/\text{日}$) であった。結局限界負荷は 3.1) の場合によく一致して 1/3 ことが認められた。しかし、Morgan の報告の、強熱減量 $3.2 \text{ kg/m}^3/\text{日}$ に比べれば約 $1/2$ に相当して 1/3。

図-10 は、投入生汚泥の濃度を 2, 3, 4, 5 がよび 6% として、混合液を引き出した場合の消化槽内の蒸発残留物濃度の変化状況である。これらの曲線から、投入生汚泥の濃度の約 75% の濃度で槽内が維持されていることがわかる。

従って、消化槽からの引き出しに際し、特に汚

泥管理を行なわなければならない限り、投入生汚泥濃度を 6% とした場合、消化槽内混合液濃度は 4.5% 以上にすることはできない。その場合の蒸発残留物負荷は、 $9 \text{ kg/V.S } 100 \text{ kg/日}$ となり、表-2 に示す通り最早限界負荷とも言える。高率消化の立場からすれば、攪拌、固形物濃度およびスカムの発生などを考慮すれば、消化汚泥と脱り液を分離して引き出すことは著しく困難である。従って、混合液を引き出し、二次槽或は濃縮槽で分離するか、或は直接水洗して脱水処分することになる。この際、二次槽

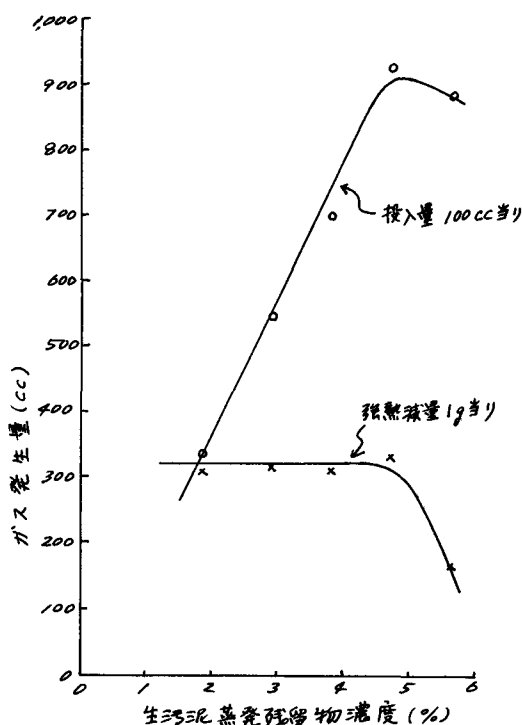


図-8 15日消化の場合の投入生汚泥蒸発残留物濃度とガス発生量

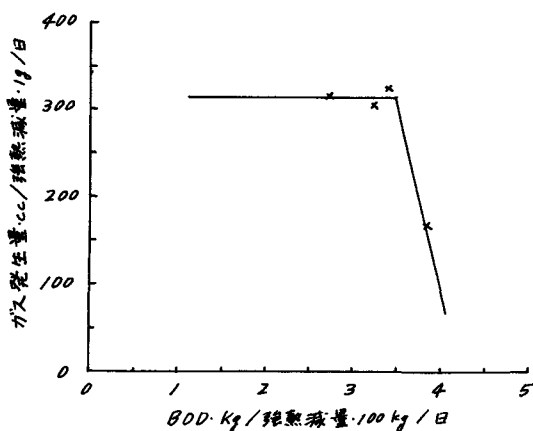


図-9 15日消化の場合のBOD負荷とガス発生量

或は濃縮槽には、何らかのスラムブレイカーが必要となろう。

このように二次槽から消化汚泥の返送など複雑な汚泥管理をしなければ、15日消化に對しては、投入生汚泥濃度は6%までが限界である。一方、蒸発残留物濃度が、6~8%になると、槽内の攪拌混合に問題があるといわれるから、高率消化の消化日数は15日消化、投入生汚泥濃度を6%とすれば槽内固形物濃度を特に管理することなく、引き出し液は混合液でよいことになるから、プロセスとしては最も簡単で合理的な設計条件といえよう。表-3は以上の条件で消化槽を運転管理した場合の混合液の性質である。従来しばしば主張されていた10日消化と8日消化の滞留日数⁵⁾では、汚泥管理の必要がでてきてプロセスは非常に複雑かつ困難なものになろう。

3.3 接触消化法

消化日数を小さくして、なおかつ消化槽の運転管理を容易なものにするためには、投入生汚泥の濃度を小さくする必要がある。この様な考え方に近い消化法としては接触消化法⁷⁾⁸⁾⁹⁾がある。消化日数を5日消化として、投入生汚泥濃度を1%および2%とした場合の各消化槽の負荷を表-4に示した。限界負荷として表-2の値を用いると、投入生汚泥濃度2%では、槽内固形物濃度が5%および6%の場合だけであった。1%の場合には表-4に見られるように、4%、5%および6%の場合がそれぞれ限界負荷以下であった。投入生汚泥濃度1%の場合の、BOD負荷とガス発生量との関係を図-11に示した。良好な消化状態が得られたものとして、ガスの発生量を、理想気量1g当り400ccとすると、明らかにBOD負荷は35kg以下が該当する。また、各消化槽の脱り液の性質は表-5に示した通りである。また、表-6は消化槽内の分層率を示したものである。図-10によれば許容負荷内では、投入生汚泥濃度1%の場

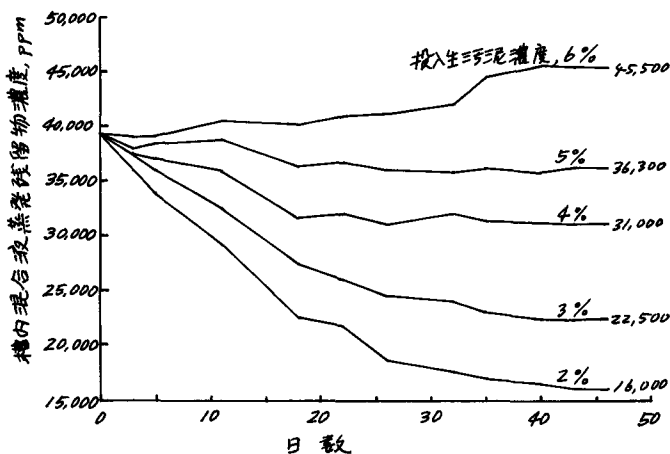


図-10 槽内混合液の蒸発残留物濃度の変化

表-3 15日消化における槽内混合液の性質

投入生汚泥 蒸発残留物 ppm	T.S ppm	V.S ppm	V.SのT.S に対する %	pH	COD(自溶) ppm	COD(吸) ppm	BOD ppm
20,000	15,993	7,640	47.8	7.2	4,726	3,640	902
30,000	22,509	10,586	47.0	7.2	6,760	4,940	1,279
40,000	30,812	14,954	48.5	7.3	8,888	6,070	1,526
50,000	36,293	17,389	48.0	7.4	10,571	7,310	2,003
60,000	45,503	21,783	48.5	7.4	12,510	9,190	2,192

表-4 5日消化における負荷

消化槽内 混合液濃度 %	蒸発残留物負荷, kg/T.S 100kg/日	
	投入生汚泥濃度 1%	投入生汚泥濃度 2%
2	16.7	20.0
3	11.0	13.2
4	8.3	10.0
5	6.6	8.0
6	5.6	6.7

限界負荷
以下

合は、引き出し汚泥濃度は0.75%でよいことになる。その0.75%の汚泥が3/5出せるかどうか、所定の消化槽内固形物濃度を維持できるかどうかになる。したがって、先ず脱り液を引き出し、ついで槽内混合液を引き出すことになる。例えば槽内固形物濃度が6%の場合には、引き出し全量のうち、脱り液95.5%、混合液4.5%という割合になるが、5日消化という滞留日数では、5%と6%という槽内固形物濃度を維持することはできない。投入生汚泥濃度が2%の場合も同様なことがいえる。槽内固形物濃度が3~4%ならば、表-6から脱り液は全体の35~55%位存在するから、投入生汚泥濃度1%の場合は、同容量の0.75%の消化汚泥を引き出すことが極めて容易である。この場合は全量のうち、脱り液83%、混合液17%という割合である。

5日消化の接触消化法では、汚泥管理の面から、槽内固形物濃度を3~4%とすると、負荷から投入生汚泥濃度は1%となる。この場合の消化槽の運転管理は、先ず投入量の83%の脱り液を消化槽の中央部より引き出し、次いで槽内を十分攪拌し、混合液を17%引き出す。週刻に引き出した混合液は生汚泥と混合して消化槽に投入する。脱り液の性質は表-5に示してある様に、蒸発残留物は $1200 \sim 1300 \text{ ppm}$ で、BODも $700 \sim 1000 \text{ ppm}$ の範囲のものが得られるから、現行のものに比較すると、著しく二次処理の負荷を軽減できるものと考えられる。又、混合液は濃度が3~4%でしかも量的には投入量の17%位であるから、水洗して直接排水処分すればよい。

4. 総括および結論

汚泥消化の高率化について一連の実験的研究を行なった。今回は負荷の面から検討を加え、従来の汚泥消化、高率消化および接触消化について、限界負荷を用いて系統的考察を行なった。これらの実験の総括的な結論は次のとおりである。

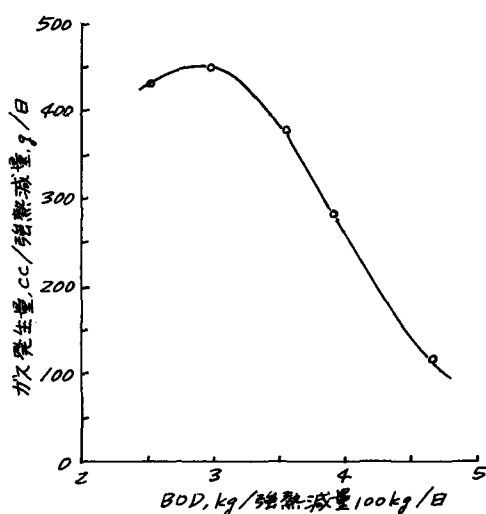


図-11 BOD負荷とガス発生量
(5日消化, 投入濃度1%)

表-5 脱り液の性質 (5日消化, 投入濃度1%)

槽内固形物濃度 %	T.S ppm	V.S ppm	PH	COD(消) ppm	COD(残) ppm	BOD ppm	有機物質 ppm	アルカリ度 ppm
2	1,796	1,144	8.2	176	240	1,193	337	425
3	1,300	1,036	8.3	236	168	977	234	475
4	1,252	924	8.4	214	152	755	166	500
5	944	584	8.4	78	72	704	185	600
6	980	600	7.2	74	80	588	21	670

表-6 槽内分層率

槽内固形物濃度 %	スラム %	脱り液 %	汚泥 %
2	13.6	69.1	17.3
3	25.1	54.3	20.6
4	10.3	37.4	52.3
5	0	26.5	73.5
6	0	26.5	73.5

1) 汚泥の中温消化の限界消化日数は12日消化で、この際の負荷は表-2に示した通りで、¹⁰⁾ M_{max} の、良好な消化状態が得られたとして11の負荷量、発熱減量 $1.2 \text{ kg/m}^2/\text{日}$ にのみなりよく合うことが認められた。

2) 汚泥の中温消化における消化日数は、単槽の場合は少なくとも20~30日消化が必要である。二段消化の場合は一次槽を20日消化とし、二次槽を5~10日消化とすべきであろう。

3) 高率消化では、15日消化とし、投入生汚泥濃度を6%とするのが最も消化槽の運転管理が容易である。10日消化とか8日消化では、消化汚泥の返送など汚泥管理の必要ができて、消化槽の運転管理が極めて複雑で、実際上は困難となる。

4) 5日消化の接触消化法では、槽内固形物濃度を3~4%、投入生汚泥濃度1%で極めて良好な消化状態が得られ、槽内の汚泥管理が簡単であるため、消化槽の運転管理は極めて容易であろう。また、良好な脱り液が得られるので、二次処理の負荷も、現行より著しく軽減することができよう。

参考文献

- 1) Hindin, E. and Dunstan, G. H., "Effect of Detention time on Anaerobic Digestion", J.W.P.C.F. vol. 32, No. 9, pp 930~939 (1960).
- 2) 遠藤研夫, "し尿の嫌気性消化に関する基礎的研究", pp 17~47, 土木学会論文集第118号 (4840).
- 3) Chanin, G., "Fundamentals of Sludge Digestions, part I, Biochemical Background", W.S.W., vol. 108, No. 2, pp 55~59 (1961).
- 4) McKinney, R. E., "Microbiology for Sanitary Engineers", pp 118~130, McGraw-Hill (1965).
- 5) 松本順一郎, 遠藤研夫, "汚泥およびし尿の消化について-Ⅱ", 水処理技術, vol. 3, No. 1, pp 31~39 (1962).
- 6) 未発表資料
- 7) McCabe, B. J. & Eckenfelder, W. W., "Biological Treatment of Sewage and Industrial Wastes. Vol. 2", pp 48~60, pp 145~155, Reinhold (1958).
- 8) W. E. Gates, John H. Smith, Shun-Dar Lin, and Charles H. Ris III, "A Rational Model for the Anaerobic Contact Process", J.W.P.C.F. Vol 39, No. 12, pp 1951~1969 (1967).
- 9) Jess C. Dietz, Paul W. Clinebell, and A. L. Strub, "Design Considerations for Anaerobic Contact Systems", J.W.P.C.F. Vol 38, No. 4, pp 517~530 (1966).
- 10) Mueller, L. E. Hindin, E. Lunsford, J. V. and Dunstan, G. H., "Some Characteristics of Anaerobic Sludge Digestion. I Effect of Loading", S. I. W. Vol. 31, No. 6, pp 669~677 (1959).