

〔醸酵工学 第56巻 第6号 782-787. 1978〕

下水処理廃棄汚泥の固体培養処理と乾燥

大井 進・奥村 逸雄・寺田 邦男*・色摩 勝司*
山田 啓成*・山本 武彦

大阪市立大学理学部, *大阪市役所下水道局

A drying method of sewage sludge through aerobic solid state cultivation. OI, S., I. OKUMURA, K. TERADA,* K. SHIKAMA,* K. YAMADA,* and T. YAMAMOTO (*Faculty of Science, Osaka City University, Sugimotocho, Sumiyoshiku, Osaka, *Sewerage Bureau, Osaka City, Minami-oogimachi, Kitaku, Osaka 558*) *Hakkokogaku* 56: 782-787. 1978.

Digested sludge produced from wastewater treatment plants in Osaka was subjected to aerobic solid state cultivation to obtain fertilizer or improver of farm soil. Species of *Fusarium* and *Streptomyces* were selected as the inoculum for alkaline (pH 12) and acidic sludge (pH 4.2, treated with Fe^{2+} and H_2O_2). Both digested sludges immediately after production were almost free from aerobic microorganisms. The seed culture obtained using the same sludge was mixed with equal or ten times weight of digested sludge. Wood chips or sawdust was added to the sludge in 5 to 10% by weight to enhance the aerobic state. The mixture was piled up in a mound on an air pipe with many holes. The test was done on a scale of 2 to 3 tons and the average atmospheric temperature at noon during the test was 8~14°C. The piled sludge generated heat in 4 to 9 days, and the temperature rose to 55~60°C. Then, compressed air was blown to dry the mixture.

The dried sludge appeared to be soil rich in humic materials, but showed much less colloidalilty than the original digested sludge. It was easy to handle and transport. However, the ratio of C/N was changed by the culture, being somewhat decreased in the acidic sludge and considerably increased in the alkaline sludge. In the dried sludge, various microorganisms other than the inoculum were observed.

下水処理場で産出する汚泥は有毒重金属などを含有しない限り、肥効的に極めて勝れていることは多くの研究で明らかにされている。¹⁻³⁾しかし汚泥は乾燥困難で、また乾燥物とした場合も水が加わると膠質状を呈し、取り扱い上難点がある。

しかし汚泥に好気性菌、特に糸状菌を生育せしめると熱発生のため水分は減少し、また物性的により乾燥しやすくなり、また乾燥物は腐蝕質的団粒となって上述の加水時膠質性はなくなり、水に投入しても均質分散を起こさない。しかも肥効ないし土質改善効果はほとんど変わらないといわれる。

汚泥を微生物の発生する熱によって乾燥する、あるいは乾燥を容易にするための研究例⁴⁾は比較的少ない。本研究は、汚泥に通気改良剤として鋸屑あるいは公園樹木剪定枝細片を添加して、微生物を増殖させ、発生する呼吸熱を利用して汚泥の水分をどの位減少させる

ことができるかを、またこのように発酵させた汚泥乾燥物の物性はどうかについて現場的スケールで実験したものである。この研究について報告する。

実験方法

実験装置 実験は前面空建物内で行った。間口は3.05 m と 3.20 m の2種で、奥行は5.4 m、屋根はスレートで高さ3.0 m、床はコンクリートとした。建物の南面が開いている。

床面の中央部はU型溝とし、それに塩化ビニール製送風管(直径、20 cm; U型溝に埋没した長さ4.5 m; 円管上方に3列に穴を設けた。)を取り付けた。最大送風量は25 m³/min、各送風管はそれぞれ2.5 m³/minの細管で送風量を調節した。コンクリート床面への最大汚泥堆積量は高さを1~2 mとした場合約10 tまで可能であった。

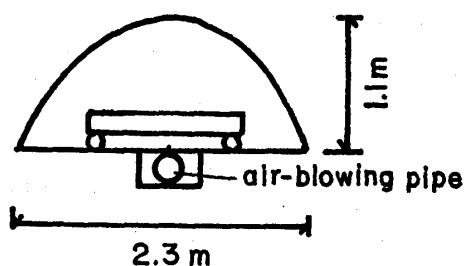


Fig. 1. A cross section of sludge mound piled on wood frame and air blow pipe.

供試汚泥 汚泥材料として平野下水処理場産（塩化鉄，消石灰法，アルカリ性 pH 12）と中浜下水処理場産（塩化鉄，過酸化水素処理法，弱酸性 pH 4.2～4.4）の脱水汚泥を用いた。脱水汚泥中の炭素対窒素の比率は 7:1～10:1 の間で微生物の生育には，汚泥標品によっては窒素過剰であった。また pH，水分含量（75～80%）なども好気性糸状菌の速やかな生育にはやや不適当であった。そこで，ある程度外部より炭素源を添加し，かつ水分率を低下せしめる必要が考えられた。

種菌 40 l 容ポリ製バケツの底に多数の穴をあけ，さらに約 10 cm の高さにいわゆるあげ底になるように内底をはめ込んだ。空気置換用に内径 2 cm のゴムホース 2 本を上方から内底に通して設置した。

脱水汚泥（平野）32 kg，鋸屑 2 kg，鉄 2 kg，米糠 900 g と種菌（平野下水処理場産アルカリ汚泥の場合は一種の不完全菌を選びこれを鋸屑を用いて麹式に培養したもの）3.4 kg を良く混合したのち水 1 l を撒水し，上述容器中に盛り込み 10°C に放置した。仕込み後 5 日目に深さ 20 cm の点で温度 50°C 以上に達したので切り返しを行った。通常 8 日間培養を行った。このようにして種汚泥を 1 t 用意し，本実験に供した。中浜下水処理場からの弱酸性脱水汚泥には放線菌を用いて同様方法で調製した種汚泥を用いた。

汚泥への添加物と菌接種汚泥の堆積法 主として広葉街路樹の剪定で得られた小枝をまず 50 cm に切り，次いで，ローラーで割砕したものをチップとして汚泥に添加した。米松を主体とした鋸屑も用いた。

堆積方法は上記実験場の床面の通気管を中心線として，それに添ってかまぼこ状に堆積した。また，通気効果を良くするため送風管の上に枕木で木枠を作りかぶせた。木枠の大きさは幅 1.05 m，高さ 25 cm，奥行 4.5 m であった（Fig. 1）。

温度の測定 堆積した汚泥の中央断面部分に Fig. 2 に示すように，温度測定用抵抗棒（a から e まで）を挿入し，経時的に品温の変化を記録した。f は気温測

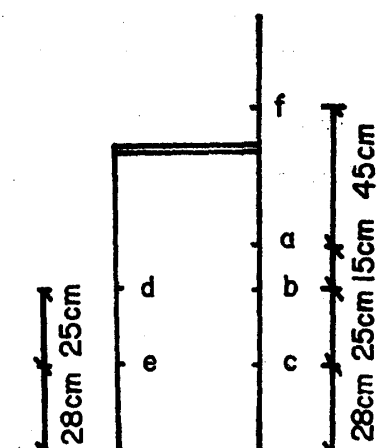


Fig. 2. Thermometer sensors inserted in sludge mound for temperature measurement.

定記録用とした（Fig. 2）。

分析 水分（Kett 赤外線分析計 F-2BII 型式により 200 g の試料について行った），pH，含有機物量および C/N 比を測定した。水分減少率は式（1）に従って算出した。

水分減少率：

$$\frac{(\text{初発水分含量}) - (\text{最終水分含量})}{(\text{初発水分含量})} \quad (1)$$

発酵汚泥中の微生物菌数の計測 堆積汚泥の温度測定点部分を採取し，常法に従い希釈法にて寒天平板培養し，接種 2 日目に生育の認められた微生物群を接眼顕微鏡によるか，または塗沫標本としたのち検鏡し，微生物菌数を計測した。糸状菌は Czapek 寒天培地，細菌はブイヨン培地，放線菌は Emerson の培地，酵母は麦芽汁寒天培地上に生育したものを検鏡計測した。

実験結果

汚泥の通風式固体培養 実験は平野脱水汚泥について 5 回，中浜脱水汚泥について 3 回行った。実施期間は昭和 52 年 12 月末から昭和 53 年 4 月初旬，すなわち厳冬期から早春にわたって行った。汚泥の性状，取り扱い総重量，チップの混合割合や発酵乾燥後の分析の結果は Table 1 の通りである。

発酵中の品温および水分含量の変化は次の通りであった。

1) 平野脱水汚泥の場合 脱水汚泥 1.0 t，種汚泥 1.0 t とチップ 0.1 t を混合し，高さ 60 cm，幅 1.8 m，奥行 5.0 m のかまぼこ状に堆積し，上面は扁平とした。温度測定点は堆積高の関係上 a 点は外気に曝されることとなった。2 日目以降 c 点の品温上昇ははげしく，

Table 1. Analysis of sludge before and after fermentation and air-blowing.

Source of sludge	Before or after fermentation	Temperature check site	pH	Moisture content %	Organic materials %	C %	N %	C/N ratio	Wt of sludge ratio of mixing
Hirano	before		11.2	75	12.5	5.1	0.67	7.6	Sludge: seed sludge: wood chips (1:1:0.1), total 2.1 tons
	after	b	5.1	67	14.3	5.6	0.44	12.7	
		c	4.8	36	30.9	11.9	0.94	12.7	
Nakahama	before		4.2	75	13.5	6.0	0.58	10.3	Sludge: seed sludge: wood chips (1:1:0.7), total 2.17 tons
	after	b	4.6	67	19.5	4.9	0.62	7.9	
		c	4.2	29	41.4	13.7	1.7	8.1	
Hirano + Shaft blast water sludge	after		12.4	75	13.0	5.1	0.17	7.2	Sludge: shaft blast water sludge: seed sludge: sawdust (1:2:0.04:0.11), total 3.15 tons
			6.5	40	1.0	—	—	—	
		a	7.0	57	9.6	2.5	0.25	10.0	
		b	7.2	33	9.9	2.6	0.17	15.3	
		c	5.1	17	5.6	0.4	0.03	13.3	

4日目には67°Cに達した。この間の毎日正午の外気温の平均は8°Cであった。6日目に25 m³/minの送風を開始し、72時間行った。品温上昇経過はFig. 3で終了時の水分含量はb点で67.3%, c点で35.7%で、水分減少率はそれぞれ10.3%, 52.3%であった。

2) 中浜脱水汚泥の場合 中浜脱水汚泥1.0t; 種汚泥1.0t, チップ0.17tを混合し、前回の実験と同じ要領で堆積した。品温は3日目以降に上昇し、9日目にはc点で58°C, e点で52°Cに達した(この間の毎日正午の外気温は平均9°Cであった)。9日目から25 m³/minの送風開始48時間行った。終了時の水分含量はb, c点でそれぞれ67.3%, 28.9%で水分減少率はそれぞれ10.3%, 61.5%であった。品温上昇経過をFig. 4に示した。

3) 平野脱水汚泥と高炉水滓混合の場合 平野脱水汚泥は脱水直後(水分含量78%)は粘着性がつよく取り扱いが困難なため、製鉄所の高炉水滓(石英質の砂状結晶)を混合して積みあげた。平野脱水汚泥1.0tに対し高炉水滓2.0t ラワン材鋸屑の微粉末0.15tを混合し、それに水道水140lを散水(高炉水滓はわずかに吸湿性あり)したのち、種汚泥20kgを混合して実験を開始した。

種汚泥量は上述2例の1/5量としたため、増殖はかなり遅れた。しかし品温は9日目にa点で37°C, b点で55°C, c点で53°C, d点で55°C, e点で49.5°Cに達した(この間の毎日正午の外気温は平均14.5°Cであった)。品温の分布は前後7回行った実験の中で最も良好と考えられた。送風は9日目から25 m³/minで

開始し48時間行った。

水分含量は送風終了時a点で57.1%, b点で33.2%, c点で17.3%で、水分減少率は初発水分含量平均51.5

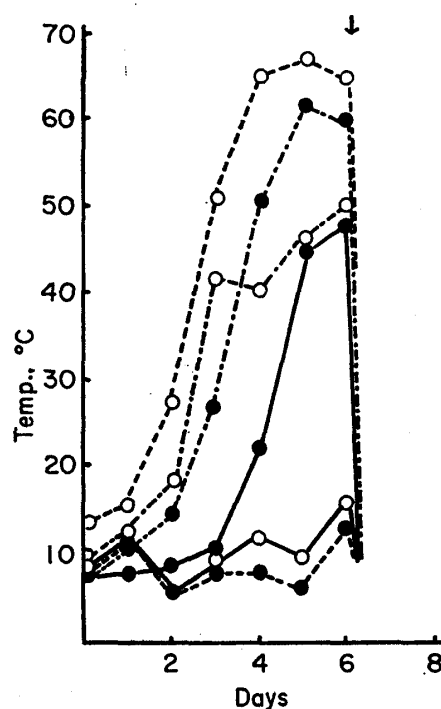


Fig. 3. Change in temperature during aerobic fermentation of Hirano (alkaline) sludge. (The mixture of equal weights of sludge and seed sludge, and 0.1 tons of wood chips (2.1 tons in total) was fermented.) Temperature measured at: —○—, a; —□—, b; —△—, c; —●—, d; —■—, e; ...●..., atmospheric temperature.

↓, air was blown to dry the mixture.

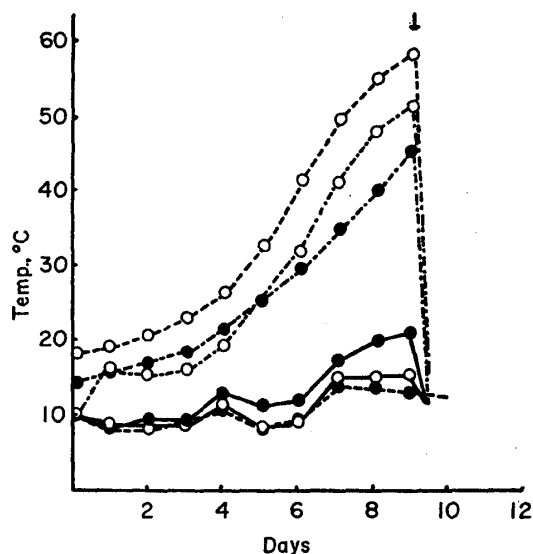


Fig. 4. Change in temperature during aerobic fermentation of Nakahama (acidic) sludge. (The mixture of equal weights of sludge and seed sludge, and 0.17 tons of wood chips (2.17 tons in total) was fermented.) The symbols are the same as in Fig. 3.

%に対し、a点では10.9%の増加したが、b点で35.5%、c点では66.4%の減少率であった (Fig. 5).

4) 菌の培養・乾燥の前後に於ける汚泥の pH, 有機物量, C/N 比 各汚泥の水分含量, pH, 有機物量, C/N 比等をまとめて Table 1 に示す。平野脱水汚泥では発酵開始前の pH は 11.2, C/N 比は 7.6, 発酵乾燥後では pH 4.8~5.1, C/N 比は 12.7 となり, 相対的に N 量は減少した。事実好気発酵中, 強烈なアンモニア臭を発生した。

一方中浜脱水汚泥では, pH は発酵開始前後に於いて大差ないが, C/N 比は 10.3 から 8.1 となって減少, すなわち相対的に C 量が減少した。

発酵中に於ける汚泥水分の減少

1) 最高品温到達時点の水分含量 外気温平均 2~8°C で, 本実験規模その他条件の場合, 種汚泥を混合し, 堆積後最高品温に達するのに早い場合は 4 日遅い場合は 9 日 (但し接種量が少なかった。) かった。

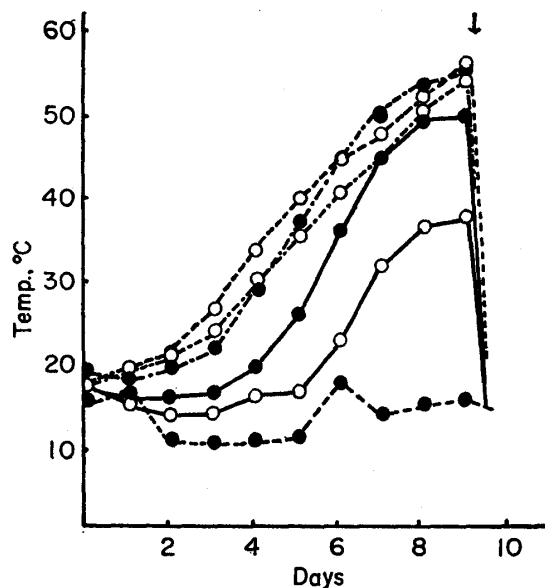


Fig. 5. Change in temperature during aerobic fermentation of Hirano (alkaline) and shaft blast water sludge. (The mixture of Hirano sludge, shaft blast water sludge and sawdust (1:2:0.1), total 3.1 tons, was fermented.) The symbols are the same as in Fig. 3.

その際の水分含量は発酵前のそれに比べて最大 10%, 最小 0.5% の減少にしかすぎなかった。したがって発酵中の水分減少はわずかで, 乾燥はやはり品温上昇後の送風によらざるを得ないと考えられる。もちろん通風による水分除去効率は高温ほど大で, 従って品温は可及的に高くかつ速やかに上昇せしめるのが策と考えられた (Table 2)。

2) 送風による蒸発乾燥の経過 本実験条件では, 下層ほど乾燥は良好であったが, 上層の乾燥はさほどでなかった。これは堆積物の空気通過経路に問題があったためと考えられる。c 点の水分減少率と送風時間の関係を表にまとめて Table 3 に示す。

3) 乾燥物の外観その他 乾燥物はいずれの場合も外観は大小種々の塊りを形成し, それらは容易に圧潰するが灰状とはならず, 水に投入しても汚泥のみの

Table 2. Moisture content of sludge just before air-blowing for drying.

Sludge	Moisture content fermentation		Temperature just before air-blowing, °C	Incubation days	Temperature check site
	before %	after %			
Hirano	74.8	67.7	67.0	6	c
Nakahama	75.3	68.2	58.0	9	c

Table 3. Moisture content of sludge fermented and dried by air-blowing.

Sludge	Temperature check site	Flow rate of air m ³ /min	Moisture content air-blowing		Decrease in moisture content %	Percentage decrease in moisture content %
			before %	after %		
Hirano	b	25	67.7	67.3	0.4	0.6
	c		59.7	35.7	24.0	40.6
Nakahama	b	25	68.2	67.3	0.9	1.3
	c		63.7	28.9	34.8	54.6

Table 4. Microorganisms in sludge aerobically fermented and dried by air-blowing.

Sludge	Temperature check site	Number of microorganisms in 1 g sludge			
		Bacteria ¹⁾	Fungi ²⁾	Streptomyces ³⁾	Yeasts ⁴⁾
Hirano	a	1.2×10 ⁶	4.7×10 ⁵	—	1.0×10 ⁴
	b	1.2×10 ⁷	1.0×10 ⁸	4.0×10 ⁸	—
	c	8.4×10 ⁸	9.0×10 ⁴	1.0×10 ⁵	—
Nakahama	a	1.2×10 ⁶	1.2×10 ⁵	2.0×10 ³	—
	b	4.1×10 ⁶	1.6×10 ⁵	8.0×10 ⁴	1.0×10 ⁴
	c	1.9×10 ⁶	3.0×10 ⁴	2.0×10 ⁴	—

Media employed for the test: ¹⁾ Bouillon; ²⁾ Czapek; ³⁾ Emerson; ⁴⁾ Malt agar.

乾燥物を投入した場合と異なり、コロイド状濁りを生じなかった。

発酵汚泥中の微生物と菌数 発酵乾燥前後の平野および中浜脱水汚泥 1g 当たりの生棲微生物菌数を検査計測したところ、発酵前の両汚泥にはほとんど微生物の生棲は認められなかった。一方発酵乾燥後ブイヨン培地で検討した細菌数および Emerson 培地を用いての放線菌数は平野脱水汚泥の方が中浜脱水汚泥に比べ約10倍多く、一方、Czapek 培地で検討した糸状菌は中浜脱水汚泥の方が約10倍多かった。酵母は両汚泥はほぼ同数検出された (Table 4)。

考 察

昭和51年度日本各地の下水処理場廃棄汚泥は約300万tにも達したと報告された。大阪市では下水道の普及率は約93%におよび、昭和52年度現在で大阪市の1日当たり廃棄汚泥量は600t、すなわち年間20万tにも達し、その大半は埋め立て用に運搬投棄されているが、一部は重油を用いて焼却処分さえされている。

本実験で使用した脱水汚泥は平野下水処理場のアルカリ性 (pH 12.4) のものと、中浜下水処理場の弱酸性 (pH 4.2) のものとの2種類で、前者汚泥の水分含量は72~79%、後者汚泥は約75%であった。いずれも脱水

直後はいわゆる“さくい”が、一夜堆積すると流動性を帯び、はなはだ取り扱い困難となる。しかも有機物は乾物中なお50%も残存しており、それを埋め立てに用いたとしてもいずれメタン発酵を起こすこと必定である。一方この脱水汚泥を好氣的に発酵させ、品温が50°C以上に達した時点で送風すれば、粘着物は変化して通気性も高まり、しかも発生した熱のため通風による水分除去が容易となることが明らかになった。もちろん好気発酵、通気条件についてはなお多くの検討すべき点があるが、送風乾燥のコストは僅少であり、従って汚泥を一種の総合肥料に転換することは経済的にも充分成立すると考えられる。

なお本研究で、下水処理場で産せられる廃棄汚泥は少なくとも、本報の方法で試験する限りほとんど無菌であることは注目に値する。また当然のことながら、アルカリ汚泥の好気発酵はNの著しい減少(アンモニア発生による)を来すのに酸性汚泥ではむしろCの減少がはげしく、発酵乾燥汚泥を肥料ないし土質改善剤とする場合、一考を要するところである。

要 約

下水場の廃棄汚泥を肥料あるいは土質改善剤などに活用するため、好氣的に微生物を育せしめたのち、通

風乾燥することを試みた。

実験には大阪市平野および中浜下水処理場の廃棄汚泥（前者は pH 12, 後者は pH 4.2 位, 水分含量は72~78%）を用いた。

1. 汚泥にチップ（広葉街路樹剪定小枝の割砕物）を混合し、これにあらかじめ好気性糸状菌を生育せしめた汚泥を種菌として約当量混合し、かまぼこ状に堆積すると、外気温が 10°C 以下でも 4~9 日で最高品温 60°C 位に達した。これに下方より通気すると、汚泥の水分含量は当初の72~78%から50%に減少せしめることができた。

2. 樹木剪定チップ（あるいは鋸屑）の混合は水分の調節、混合物の取り扱いを容易にするのみならず、微生物の生育を促進すると考えられた。

3. 両汚泥とも脱水直後は好気性微生物は、ほとんど皆無であった。種汚泥としてはアルカリ性汚泥の場合は不完全菌、また弱酸性汚泥の場合は放線菌の一種を選び種菌としたが、発酵終了後の菌数検査の結果、アルカリ性汚泥では細菌および放線菌が多数生棲しており、また弱酸性汚泥ではかび類がやや多数生棲していた。

4. 当然のことながら、アルカリ汚泥の好気発酵では N の減少著しく、一方酸性汚泥は C の減少が相対的に大であった。

5. 乾燥物は極めて取り扱いやすく、かつ汚泥のみの乾燥物とは異なり腐蝕質に富む畑地表土の外観、物性を示した。

文 献

- 1) Hinsley, T. D. (Project Leader): Agricultural Benefits and Environmental Changes Resulting from the Use of Digested Sludge on Field Crops, University of Illinois (1971).
- 2) 大阪市下水道局：下水汚泥の有効利用に関する調査研究（その10年の歩み）p. 85 (1977).
- 3) 大阪市下水道局：下水汚泥の芝におよぼす影響に関する研究報告書，第1報，（昭和51年10月）。
- 4) 微生物利用の廃棄物処理検討会：微生物利用の廃棄物処理に関する技術開発，p. 53, 環境産業新聞社 (1976).

（昭53. 7. 3受付）