

余剰汚泥の資化—汚泥の前処理について—

佐納良樹*・奥村正秀*・有賀 修*・大滝浩司*

Pre-treatment of Excess Sludge from the Organic Waste
Water Processes

Yoshiki SANO, Masahide OKUMURA, Osamu ARIGA
and Koji OTAKI

1 はじめに

我が国では都市下水及び有機性産業廃水の処理に好気性微生物の働きを利用する、活性汚泥法が広く使われている。しかし活性汚泥法は排水中の汚染物質を微生物の形に変換して系外へ取り出すことを基本原理としているものであるから、量の多少を問わず必然的に余剰汚泥が発生しその処理処分という困難な問題に直面することになる。

現在、生物処理過程からの余剰汚泥と処理に関しては嫌気醗酵工程を経てコンポスト化することも行なわれているが¹⁾ 大部分は脱水後、焼却によって減量し埋立て処分されている。これは処分に要する経費の問題だけでなく物質の循環という点から見ても決して好ましいことではない。特に長野県のような場合はその立地条件から見て安易な埋立て処分方法は採るべきでないと思われる。

しかし、余剰汚泥自体は価値ある物質を含んでいないし、潜在的なエネルギー量も低レベルであるから汚泥をそのまま利用することは不可能であろう。そこで、このような汚泥に多少の手を加え微生物の働きにより、より利用価値の高い物質に変換することが望まれる。

近年、嫌氣的消化(メタン醗酵)によらずに高BOD値の廃水を光合成菌により直接処理する方法が小林²⁾により提唱され幾個所かで実用化されている。しかし先述のように我が国では活性汚泥法が広範囲に普及し、下水処理場からの余剰汚泥だけで $3,428 \times 10^4$ m³(含水率97%の濃縮汚泥基準, 1981年)³⁾に達している以上、光合成菌による直接的廃水処理の他に余剰汚泥の処理処分方法を確立することが急務であると考えられる。

生汚泥に適当な嫌氣的処理を施せば、分解の初期段階として酢酸を主とする低級脂肪酸が生成する⁴⁾。他方、光合成菌の一種である紅色非硫黄細菌(Rhodospseudomonas)はタンパク質含量が高く、各種アミノ酸も豊富

であり畜産・水産飼料、有機肥料としても大変利用価値が高いといわれている²⁾。しかもこの菌は光エネルギーの存在下で低級脂肪酸のうちでも特に酢酸を良く利用する特性をもっている。

このようなことから微生物の力を利用して余剰汚泥を価値ある物へ変換し、同時に処理処分問題の困難性を和らげることが望まれる。このような観点からわれわれは余剰汚泥を基質として紅色非硫黄細菌を増殖させることを試みて来た⁵⁾。その結果、増殖の状況は余剰汚泥からの酢酸の生成程度にかかっていることがわかったので、本研究では特に汚泥の前処理効果について検討した。

2 実験方法

2-1 供試汚泥の集積

上田市所在のし尿処理場から提供を受けた活性汚泥を種汚泥として表1に示した組成⁶⁾の人工廃水でfill & draw方式により汚泥の集積ならびに諸性質の安定化をはかった。なお汚泥集積は5 l又は10 lの円筒容器で行ない集積期間中次項に述べるi)~vii)の7項目について測定を行なった(なお、汚泥の集積安定化のための期間は最大14日間である)。

2-1-1 汚泥の諸性質の測定⁷⁾

以下の7項目について下水試験方法⁷⁾にしたがい測定した。

- i) 活性汚泥沈降率(SV₃₀)
- ii) 活性汚泥浮遊物(MLSS)
- iii) 透視度
- iv) pH
- v) 溶存酸素濃度(DO)
- vi) 活性汚泥有機性浮遊物(MLVSS)
- vii) 汚泥指標(SVI)

2-2 光合成菌の培養

信州大学繊維学部に近い常田池周辺の雑排水溝から採取した底泥を500mlメスシリンダに入れ表2に示した、

* 信州大学繊維学部
Fac. Text. Sci. & Technol., Shinshu Univ.

表1 汚泥集積用人工廃水⁶⁾

成分	濃度 (g/l)	使用量 (1 l 当り)
グルコース	0.5	0.5 g
MgSO ₄ · 7H ₂ O	22.5	0.27 ml
FeCl ₃ · 6H ₂ O	0.25	
NH ₄ Cl	44.6	
K ₂ HPO ₄	21.7	
KH ₂ PO ₄	8.5	
Na ₂ HPO ₄ · 12H ₂ O	44.6	1 ml
NH ₄ Cl	1.7	
CaCl ₂	27.5	1 ml
ポリペプトン	0.15	0.15 g

(註) 水道水に溶かして 1 l とする。

表 2.1 光合成細菌用基礎培地⁸⁾

成分	濃度 (g/l)
NH ₄ Cl	1.0
NaHCO ₃	1.0
K ₂ HPO ₄	0.2
CH ₃ COONa	6.0
MgSO ₄ · 7H ₂ O	0.2
酵母エキス	0.1
NaCl	0.5

表 2.2 光合成細菌用無機塩類⁸⁾

成分	濃度 (mg/l)
FeCl ₃ · 6H ₂ O	5.00
CuSO ₄ · 5H ₂ O	0.05
H ₂ BO ₃	1.00
MnCl ₃ · 4H ₂ O	0.05
ZnSO ₄ · 7H ₂ O	1.00
Co (NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	0.50

(註) 基礎培地 1 l 当り無機塩類溶液 10 ml を加える。

酢酸ソーダを主成分とする基質液⁸⁾を加えて十分に混合した後、流動パラフィンで表面を覆う。このシリンダを白色蛍光灯 (10W) 4 本を光源とする光照射箱内 (温度は約 33°C) に静置すると 4~5 日で光合成細菌 (主として紅色非硫黄細菌) が増殖しシリンダ壁面に紅色の斑点が付着し始めた^{*)}。このようにして生じて来た斑点を集めて種菌とし 200 ml ぶ卵瓶に満した基質液 (組成は表

*) 紅色非硫黄細菌よりやや遅れて綠色硫黄細菌が増殖し始めるがここでは無関係な菌である。なお本研究で培養する微生物は、すべて混合培養系である。

2.1 及び表 2.2) に植種して前述の底泥の場合同様光照射箱内に静置、紅色非硫黄細菌の増殖・集積を行なった。

2-3 汚泥の前処理

前述の 2.1 項により集積した汚泥を 4~5 時間静置、沈降させた後^{**)} 上澄液を捨て、沈積した固形分のみ遠心分離 (12,000 rpm, 15 分間) にかけた。得られた湿潤汚泥 30~50 g に磨砕剤として平均径約 0.1 mm のガラス球又は磨砕用アルミナ (和光純薬製) を所定量加えさらにトリス緩衝液 50~70 ml を添加して乳鉢で 30 分間又は 50 分間磨砕操作を行なった。磨砕後、約 3 規定の NaOH 溶液で pH を 9.0 に調整、さらに液面に流動パラフィンを約 0.5 cm 厚さに流して空気を遮断した。恒温槽での静置温度は 30°C である。個々の処理条件は表 3 に一括して示した。

表 3 汚泥の前処理実験条件

Run No.	磨砕操作			初期 pH	温度 (°C)	酢酸濃度 (最高値, %)	備考
	磨砕剤	添加量	磨砕時間 (分)				
1	—	0	30	9.0	30	0.056	
2	ガラス球	1:1	"	"	"	0.087	
3	—	—	—	6.6	"	0.045	生汚泥
4	ガラス球	1:1	50	9.0	"	0.070	
5	"	1:2	30	"	"	0.088	
6	"	"	50	"	"	0.095	
7	アルミナ	"	"	"	"	0.200	
8	"	"	"	6.6	"	0.160	
9	—	—	—	"	35	0.068	生汚泥

2-4 酢酸の定量及び菌濃度の測定

前処理後静置した汚泥液を 24 時間毎に空気に触れぬ様注意しつつ攪拌し、その都度約 5 ml ずつ採取、遠心分離にかけ更にその上澄液をメンブランフィルター (孔径 0.45 μm) で濾過した。濾液をガスクロマトグラフにかけ、汚泥の分解により生成する酢酸の濃度を追跡した。すなわち、水素炎イオン化法により次の条件で定量した。

ガラスカラム 6×3 φ 1.5 m, 充てん剤ガスクロ工業製 SP-1200, UniporTS, カラム温度 110 °C, 検出部温度 250 °C, 注入部温度 250 °C, キャリアガス N₂ 流量 52.8 ml/min, 空気流量 600 ml/min, 水素ガス 20 ml/min, 試料注入量 1 μl, 減衰率 1×10² 又は 5×10²。

この条件で得られたガスクロマトグラムから半値幅法によって酢酸の定量を行なった。

つぎに光合成細菌の増殖状況は光電比色計 (島津製作

**) 本研究ではこのように静置、沈降させた汚泥を余剰汚泥とみなした。

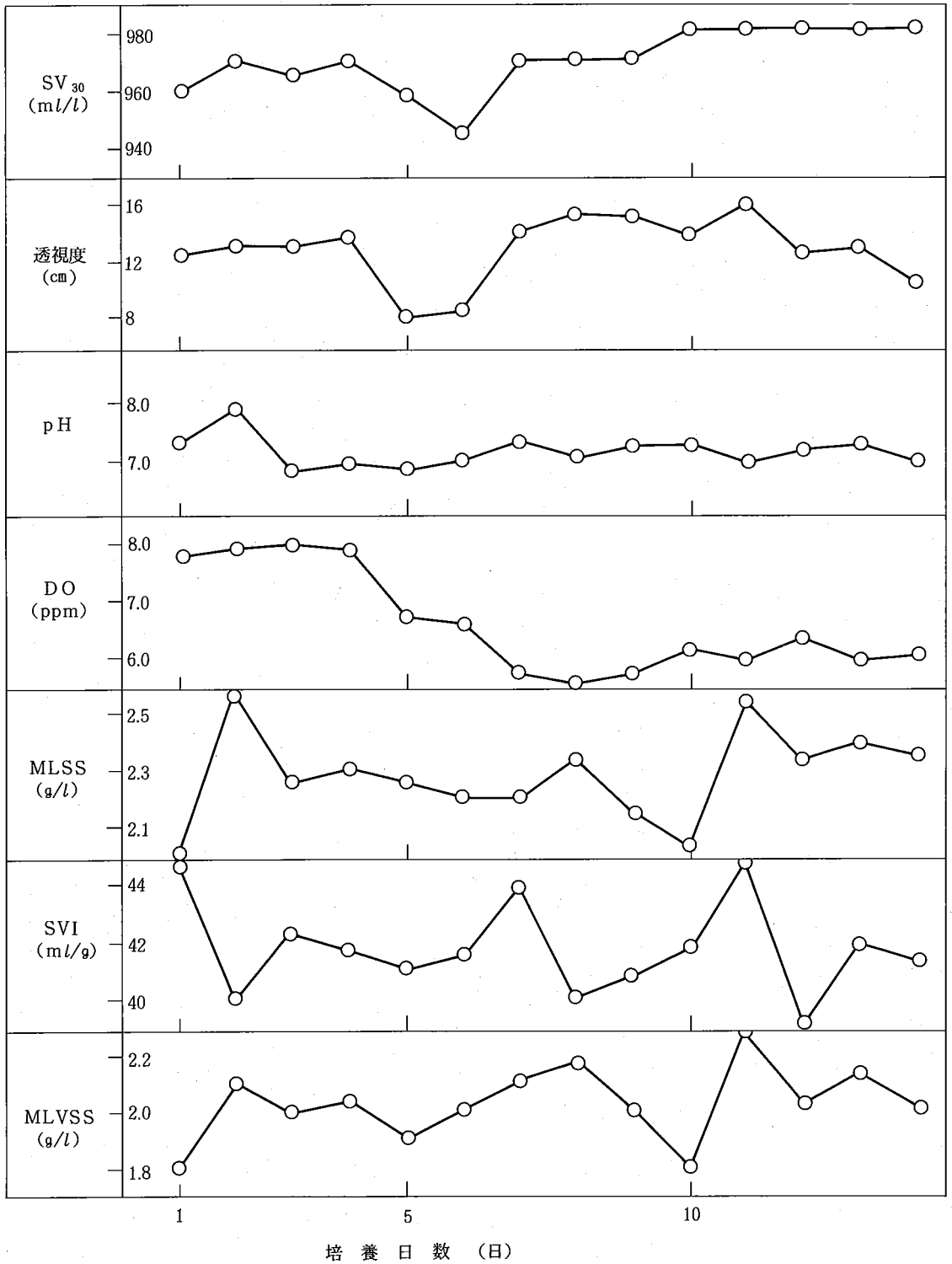


図1 供試汚泥の性質

所製 SP-200 型) を用い 475nm における吸光度から求めた。

2-5 光合成菌の添加

前述の 2-2 項によりあらかじめ集積しておいた光合成細菌の懸濁液を 12,000 rpm で 20 分間遠心分離し湿潤菌体を蒸留水で洗浄し再度遠心分離にかける。他方、酢酸の蓄積濃度が最高に達したと思われる時点で前処理汚泥の上澄液 19 ml を試験管に取り上澄液 1 ml 当り光合成菌数が 1.0×10^5 ケになるように上述の湿潤菌体を加え^{*} 約 33°C に保たれた照射箱内に静置した。このようにして以後の菌濃度及び酢酸濃度の変化を調べた。

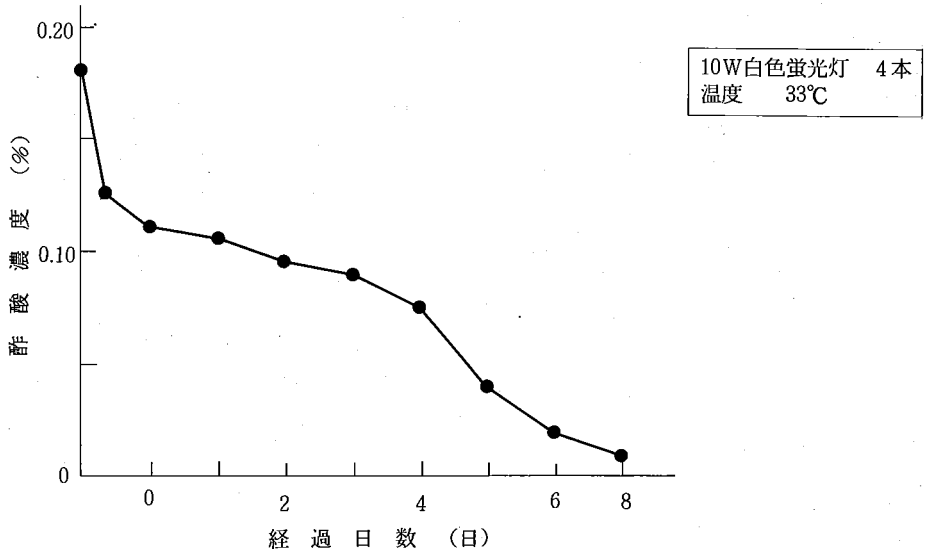


図2 光合成細菌による酢酸の利用

3-2 汚泥の前処理

余剰汚泥を構成する固形分のはほとんどすべてはズーグレアなどを主体とするフロック形成菌ならびに糸状細菌、糸状菌を主体とする糸状微生物の細胞から成る。これらの細胞はいずれも機械的強度の大きい細胞壁に包まれているから細胞構成成分を細胞外へ取り出すには何等かの方法で細胞壁を破壊するか又は透過性をよくせねばならない。このようなことから微生物細胞の破碎方法として多くのものが提唱されているが、実用化に最もつなぎ易い、磨砕剤による破碎について検討し、アルカリ浸漬についても言及することにする。

3-2-1 磨砕操作及び磨砕剤(ガラス球)の効果

まずはじめに磨砕操作そのものの効果及び磨砕の際添加する磨砕剤(ここではガラス球を使用した)の効果を調べた。実験条件は表3に整理して示し、そのうち磨砕

* 遠心分離後の湿潤菌体を 500 ml の蒸留水に懸濁し、菌体数を計測したところ 20×10^5 ケ/ml であった。そこでこの懸濁液 1 ml を上澄液 19 ml に添加してよく混和した。

3 実験結果及び考察

3-1 供試汚泥の諸性質及び光合成菌の集積状況

表1に示した、グルコース・ペプトンを主成分とする人工下水で14日間集積ならびに性質の安定化をはかった結果の1例を図1に示した。測定項目によっては多少不安定なものもあるが全般的にはほぼ一定した性質を有していると思なせる。また2-2項で述べた光合成菌の培養期間中に酢酸が消費される状況をガスクロマトグラフで追跡した結果を図2に示した。図からわかるように酢酸は減少を続け、3日目には肉眼でもはっきりと基質液が紅色に着色して来たことが確認出来た。

剤を全く加えない場合と、ガラス球を1:1に加えて得た結果を図3に示した。図から明らかな様にたとえガラス球のような不完全な磨砕剤でも液中の酢酸濃度は全期間に亘って高く磨砕剤としての効果が明白に認められた。酢酸濃度測定の間隔が1日毎であるため濃度変化の細部は不明であるが、磨砕剤なしの場合は3日後に、磨砕剤使用のものでは4日後に酢酸濃度が最高に達し、その後は比較的急速に濃度が低下した。3~4日で酢酸濃度が低下したのは酸酩酵作用の減衰と共にメタン生産菌による酢酸の消費(嫌気酩酵の第2段階)が進行し始めたためであろう。

3-2-2 磨砕剤(ガラス球)の混合割合及び磨砕時間

図3の結果に基づき磨砕剤としてガラス球を使った時の使用量及び磨砕操作続行時間の影響を調べるため表3に示した条件で得た結果を図4に掲げた。実験条件の違いにより多少のバラツキがあるがいずれも3~4日で酸濃度は最高に達した後徐々に濃度が減少した。酸濃度の最高値は0.05~0.1%であって嫌気消化の際に見られる

Run No.	磨砕剤	添加割合	磨砕時間(分)	初期 pH	
⊗	1	加えず	—	30	9.0
○	2	ガラス球	1:1	30	9.0
●	3	加えず	—	—	6.6

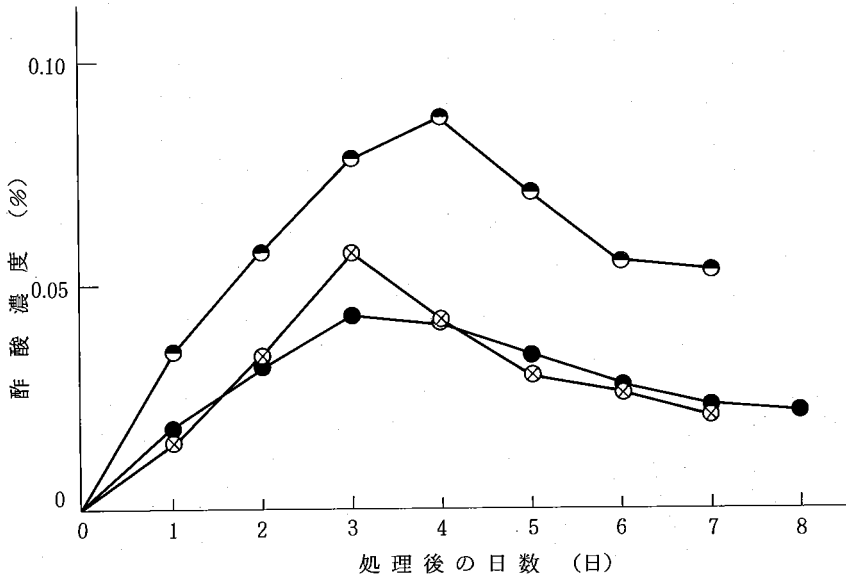


図3 磨砕剤の効果

Run No.	磨砕剤	添加割合	磨砕時間(分)	初期 pH	
○	1	加えず	30	9.0	
●	2	ガラス球	1:1	"	
⊗	4	"	50	"	
●	5	"	1:2	30	"
◎	6	"	50	"	

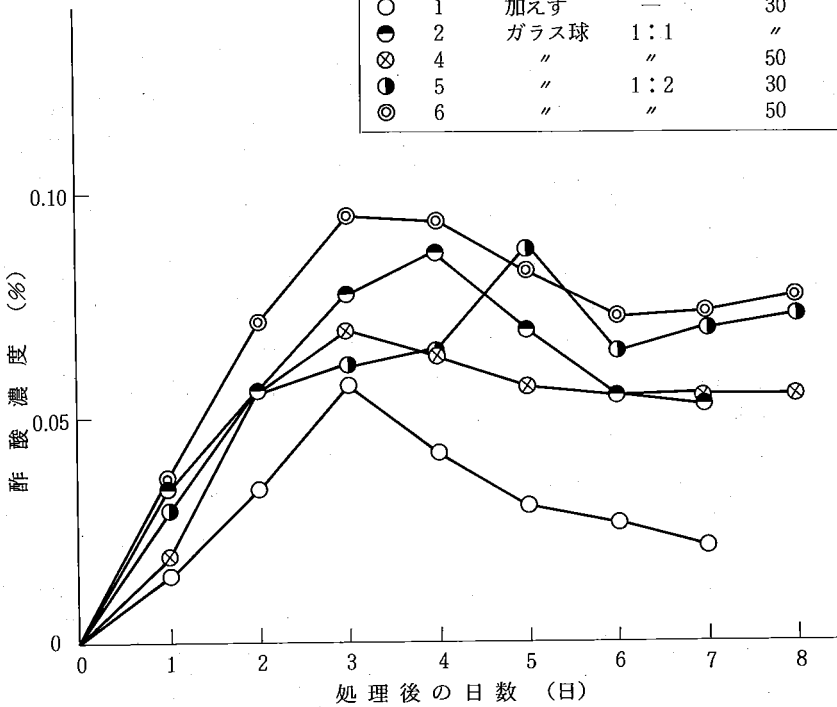


図4 磨砕操作条件の検討

酸濃度約3000 ppm⁹⁾より低かった。また添加する磨砕剤の量比および磨砕時間についてはこの程度の差異では結果にほとんど影響しないと言える。

3-2-3 磨砕剤の種類及び再磨砕の効果

磨砕効果を高めるためにガラス球の替りに磨砕用アルミナ(和光純薬製)を用い前項と同じ条件で磨砕実験を行なった。更に酢酸濃度が最高になった1日後、酢酸濃度が減少し始めた時点で再度磨砕操作(50分間)行ないその効果を調べた。結果を図5に示した。当然の事ながらガラス球より磨砕用アルミナの効果は大きく酢酸濃度は最高0.2%に達した。また再度磨砕の効果もあることは明らかであるが期待した程のものではなかった。なお図には参考までに初期pHを9.0に調整したままで磨砕を全く行わない場合のデータを付記した。

3-2-4 未消化汚泥量(汚泥沈降容量)

上述のような前処理により汚泥を構成する微生物細胞の一部は破碎される筈でありそれに伴って細胞構成成分の一部も分解溶出するから固形分容積の減少がなければならない。そこで残存する未消化汚泥量を汚泥沈降容積で代表させ、沈降容積を8日間に亘って調べた。図は省略したが汚泥沈降容積は処理後1日で25%減少したがその後は徐々に減少するに止まった。8日間の汚泥沈降

容積の減少率を表4に示した。磨砕操作の有無に関係なく固形分の減少率がたかだか40%程度にすぎなかった。すなわち磨砕操作は酸生成には大きな効果があったが、固形分の減少には余り役立っていないことになる。

汚泥に限らず一般に微生物は機械的強度の極めて大きい細胞壁に囲まれているからこれの破壊には莫大なエネルギーが必要になる。しかし現在までのところ細胞壁の力学的強度の実測値は見当らず、僅かに中村¹⁰⁾が酵母菌体の機械的破壊について解説しているだけである。微生物細胞壁の化学構造¹¹⁾が次第に明らかになりつつあるから化学結合エネルギーの評価を通じて間接的に破壊強度

表4 前処理による固形分の減少

Run No	磨砕操作			初期 pH	静置 日数	汚泥沈降容積減少率 (%)
	磨砕剤	添加量	磨砕時間(分)			
7	アルミナ	1:2	50	9.0	1	25
8	"	"	"	6.6	"	25
10	—			11.0	8	34.7
11	—			9.0	"	30.9
12	—			3.0	"	37.8

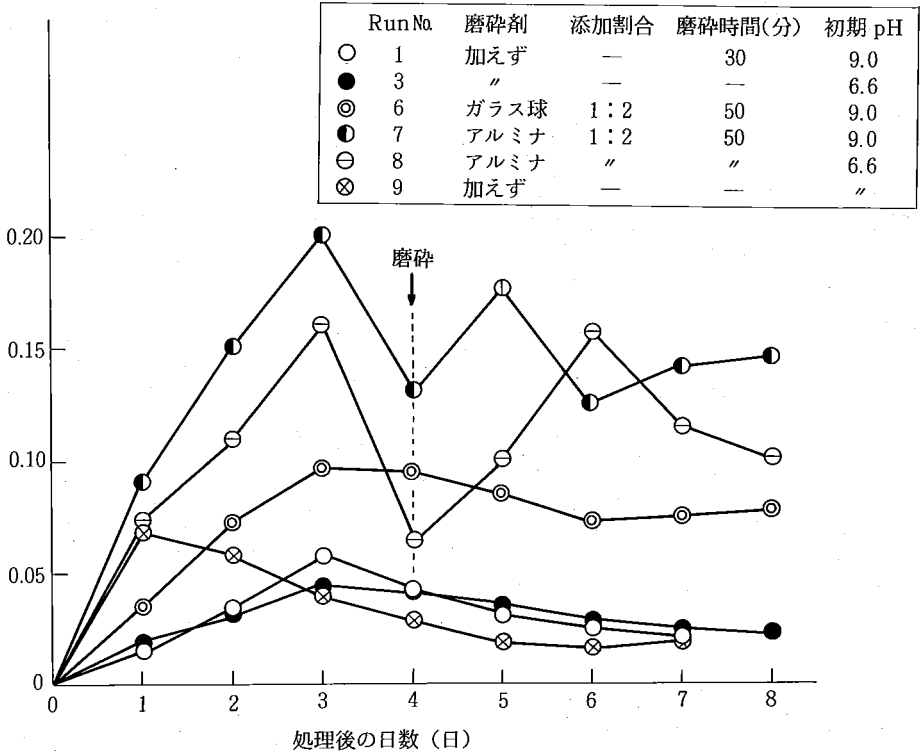


図5 再磨砕の効果

Run No	静置日数	塩類添加量(ml)	(備考)
●	13	5	0
⊗	14	"	0.2
●	15	—	0.2
○	16	5	0

(前処理汚泥の上澄液)
(光合成菌用培地)
(静置生汚泥の上澄液)

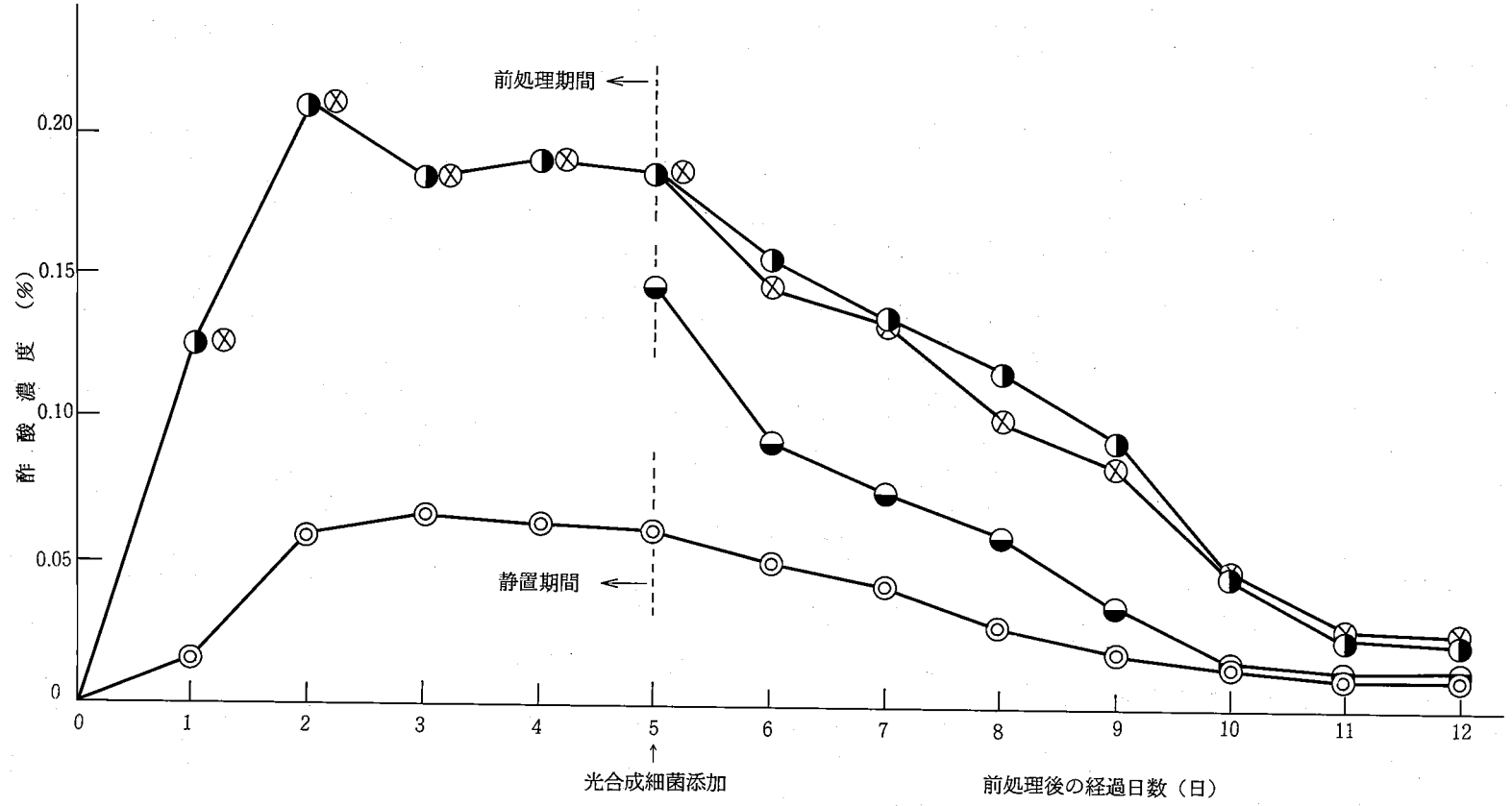


図6 光合成細菌添加実験

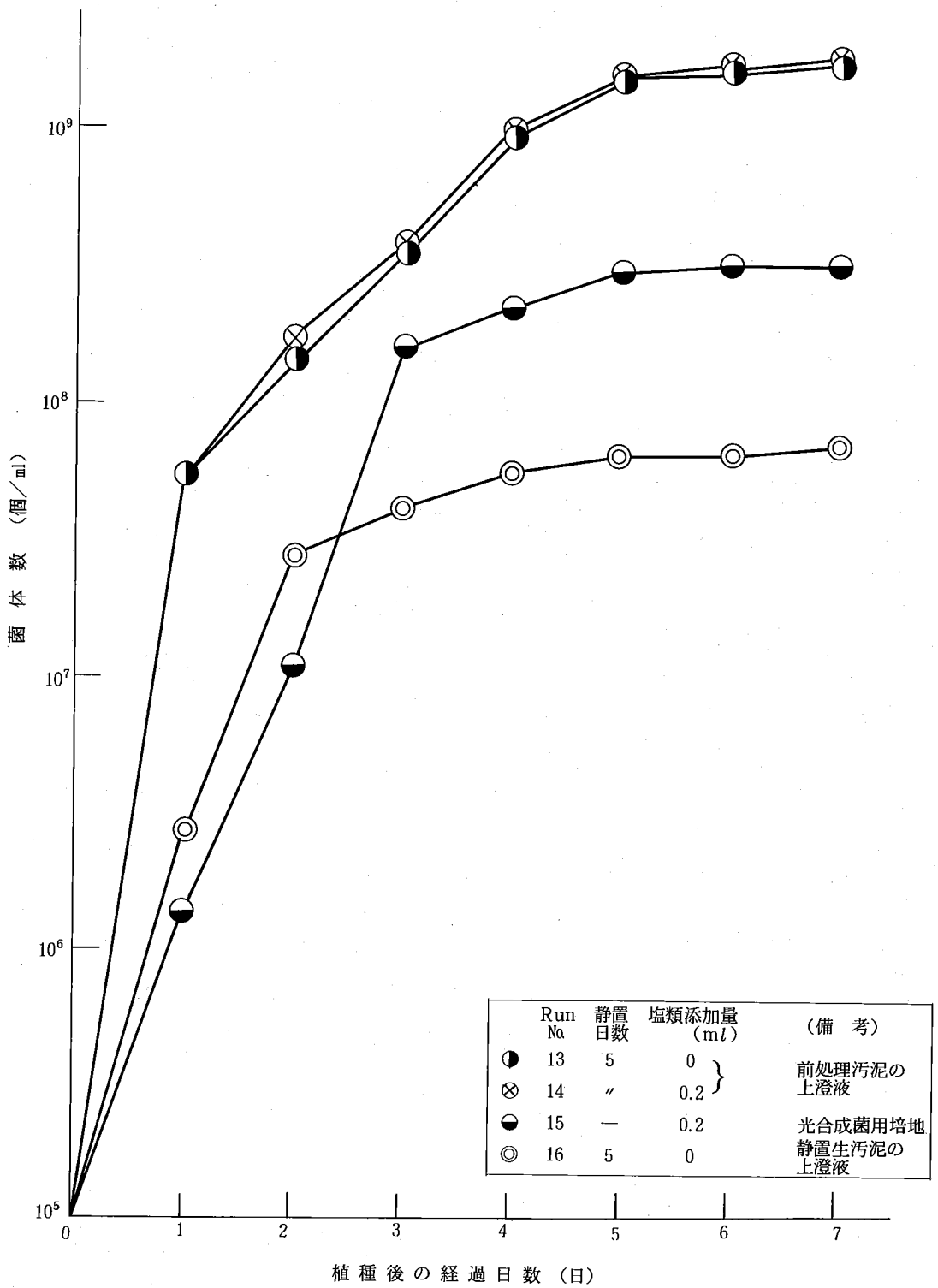


図7 光合成細菌の増殖

表 5 光合成細菌添加増殖実験

Run No	磨 碎 操 作			初期 pH	静置日数	塩類添加量 (mL)	備 考
	磨砕剤	添加量	磨砕時間 (分)				
13	アルミナ	1:2	50	9.0	5	0	前処理汚泥液
14	"	"	"	"	"	0.2	"
15	—			"	—	0.2	光合成細菌用培地
16	—			6.6	5	0	無処理液(生汚泥液)

を推算することもいづれは可能になるであろう。

3-3 光合成菌の増殖

3-2で述べた前処理を行なった汚泥液に表5に示した実験条件で光合成菌を添加，増殖状況を検討した。結果は図6および図7に示した。図6において光合成細菌の添加後，かなり速やかに酢酸濃度が低下したのは光合成細菌に利用されたためである。それは，図6と図3，図4を比較して前者の酢酸濃度の減少速度が後二者のそれより大部大きいことから類推しうることである。さらに図6を見ると前処理液の上澄液のみの場合と上澄液に表2.2に示した微量無機塩類を添加した場合の間に全く差異がない。しかも表2.1及び表2.2の両成分から成る紅色非硫黄細菌集積用基質の場合と比べても酢酸濃度の減少速度にほとんど差がなかった。このことは汚泥を前処理さえすれば紅色非硫黄細菌が十分利用しうことを示唆している。

次に図7は光合成細菌添加後の菌数の推移を経過日数に対して点描したものである。前述したように本実験での微生物群はすべて混合培養系であるから図中に示した菌数には光合成細菌以外の菌も含まれていることになるが図6の酢酸濃度の減少は光合成細菌の増殖に並行するものであることに間違いない。

4 ま と め

磨砕用アルミナを使用することにより余剰汚泥の酢酸生成濃度が著しく高められることならびに光合成細菌が

その酢酸を十分資化しうることを確かめた。

本実験の一部は後藤信次，堀米達也両君の助力を得た。記して謝意を表する。

文 献

- 1) 仲森啓允，菅健一：化学工学協会第49年会講演要旨集，p. 200，E303 (1984)
- 2) 小林達治：日本土壤肥科学雑誌，46，101，148 (1975)
- 3) 平岡正勝，吉野善彌：汚泥処理工学，p. 155，講談社 (1983)
- 4) 大亦正次郎ら：応用微生物学，p. 252，培風館 (1982) など
- 5) 和田龍男，辻 仁，山崎武志：信州大学繊維学部卒業論文 (1982)
- 6) 中塩真喜美：廃水の活性汚泥処理，p. 308，恒星社厚生閣 (1976)
- 7) 日本下水道協会編：下水試験方法，p. 388 (1974)
- 8) 土壤微生物研究会編：土壤微生物実験法 p. 209，p. 439，養賢堂 (1979)
- 9) 化学工学協会編：生物学的水処理技術と装置，p. 179，培風館 (1978)
- 10) 中村厚三：粉碎，No21，36 (1976)
- 11) 柳田友道：微生物科学 1. 分類・代謝・細胞生理，p. 244，学会出版センター (1980)