

活性汚泥の基質代謝に及ぼす培養 F/M の影響

東北大学 正 松本 順一郎

東北大学 学 〇江 成敬次郎

3-1 はじめに

活性汚泥法による廃水処理は、活性汚泥を構成する一群の微生物集団と、廃水中に含まれる有機物との生化学的反応を主体としている。従って、廃水処理プロセスを効果的に遂行するためには、これらの反応を適正にコントロールする事が主要な問題の一つとなる。これまでにも、活性汚泥と基質との反応に関連した様々な研究が行われて来っており、物理的・化学的環境条件、反応物質濃度、活性汚泥微生物相、基質の種類等について検討されている。しかしながら、それらはいずれも浄化作用に及ぼす一時的な影響について考えられているものがほとんどである。反応物質の一つである活性汚泥は生物体であり、その生物体がそれぞれどのような環境条件で培養されていたのか、それを質的に規定するという事を考えるならば、浄化作用に影響を与える反応物質の質的な側面からの考察という事から、培養条件についての研究が必要であると思われる。これまで、活性汚泥のバルキングとの関連において培養条件の検討がなされているが、活性汚泥の浄化機構を説明するための一つのアプローチという意味からも、更に系統的な研究が必要であると考えられる。そこで今回は、活性汚泥の基質除去作用、及び呼吸作用に及ぼす培養 F/M の影響について実験を行い、若干の知見が得られたので報告したい。

3-2 活性汚泥の馴致、培養方法並びに実験材料

実験に用いられた活性汚泥は、宮城県船岡し尿処理場曝気槽から採取した活性汚泥を種汚泥として、グルコースとグルタミン酸ソーダを有機成分とする基質に約6ヶ月間馴致したものである。こうして馴致された汚泥を所定の培養条件で定常培養し、それを実験に用いた。

用いられた基質は、表-1 に示した組成をもつ原液を、適当な濃度になるよう水道水で希釈したものである。又、これには、PH調整のためのリン酸緩衝液 (KH_2PO_4 50% + K_2HPO_4 200%) を、水道水1ℓ当たり 1 ml の割合で添加した。

活性汚泥の培養には、図-1 に示した装置を用いた。運転方式は曝気時間 7 hr、泥殿時間 1 hr の fill and draw 式であり、1サイクルの給排水量は 5ℓ、混合液全量は 10ℓ で培養した。又、曝気時間、泥殿時間及び給排水量は、各々タイマーと液面制御器を用いてコントロールした。

培養 F/M (800%ss/日) は 0.20 ~ 0.02 までの 5段階であった。各培養条件の、培養期間中の MLSS、投入 BOD、F/M、PH 等を、平均

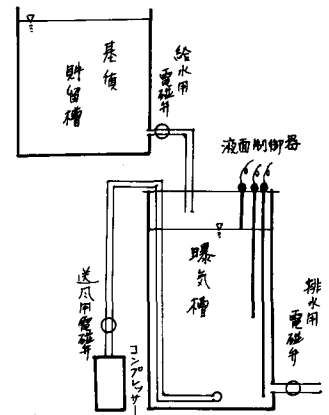


図-1 培養装置

成 分	原液1ℓ中の濃度	成分重量百分
グルコース	50g	45.8%
グルタミン酸ソーダ	50g	45.8%
塩化ナトリウム	5g	4.6%
塩化カルシウム	2.5g	2.3%
硫酸マグネシウム	1.7g	1.5%

表-1 基質の組成

値として表-2に示した。

F/M	投入BOD	MLSS	投入水PH	処理水PH	BOD除率	SVI	温度	溶気量
$\frac{g\text{BOD}}{g\text{SS}\cdot\text{日}}$	$\frac{mg}{l}$	$\frac{mg}{l}$	—	—	%	—	℃	$\frac{\%}{min/l}$
0.80	1190	2975	7.5	8.1	99	50	室温	0.35
0.37	650	2400	7.5	8.1	97	38	"	"
0.25	280	1890	7.6	8.2	96	43	"	"
0.10	210	3890	7.2	8.1	98	25	20	"
0.02	75	2040	7.3	8.0	96	27	20	"

表-2 培養結果

3-3 培養F/Mと汚泥のバルキングとの関係

高いF/Mで培養された汚泥は、それぞれある培養期周後に汚泥のバルキングを起した。図-2に、培養F/Mとバルキングとの関係を示した。ここで、バルキング日数は、SVIが100になるまでの培養期間と定義されている。

各培養F/Mでのバルキング汚泥の顕微鏡写真を写真-1～写真-3に示した。写真-1は、汚泥が正常な時のフロックであり、写真-2と写真-3はそれぞれ培養F/M=0.80と0.25の汚泥のバルキング状態のものである。尚、培養F/M=0.37の汚泥は、顕微鏡観察の限りでは培養F/M=0.25の汚泥と同じ様な状態であった。これらのバルキング汚泥の顕微鏡観察によると、培養F/Mによってバルキング汚泥にも相異があり、F/M=0.80で培養された汚泥は、培養開始後10日目頃から汚泥は白味を帯び、糸状菌の発達が目立った。一方F/M=0.25、0.02の場合には、培養開始後各々50日、80日目頃から黒褐色の大きなフロックが生成し始め、そのフロックの周囲から繊維毛のように糸状の微生物が発達した。

これは、カビ性の活性汚泥と考えられる。¹⁾

このように、グルコースとグルタミン酸ソーダを基質とした場合には、培養F/Mが大きくなると汚泥はバルキングを生じやすくなり、一方培養F/Mによってそのバルキングの状態は一律ではない事が観察された。尚、この基質の理論的C/Nは10であり、これに尿素を添加してC/Nを低くしても、バルキングに対する改善は観察されなかった。

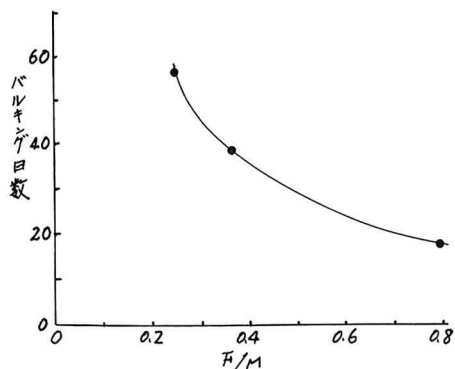


図-2 培養F/Mと汚泥のバルキング

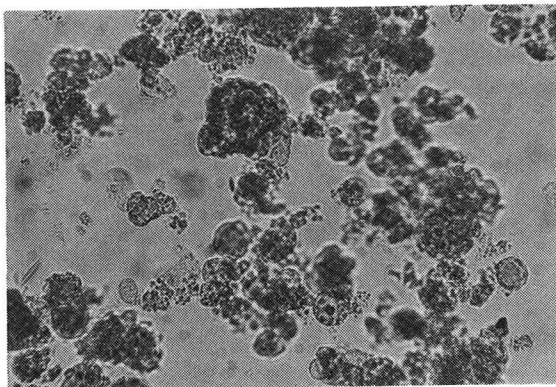


写真-1 正常時のフロック

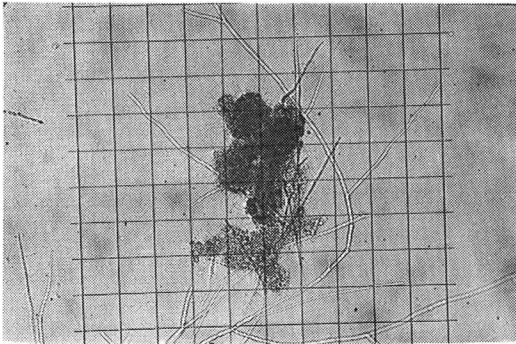


写真-2 バルキング汚泥(培養F/M=0.25)

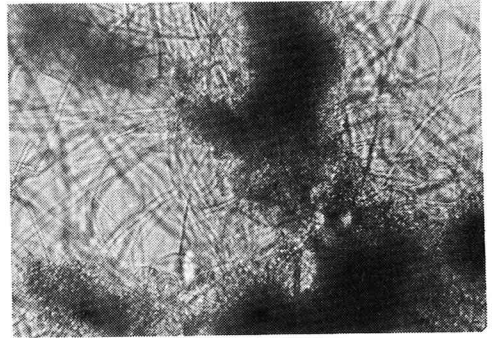


写真-3 バルキング汚泥(培養F/M=0.80)

§-4 基質除去作用に対する培養F/Mの影響

活性汚泥と基質との反応を考へる際、活性汚泥の作用を基質除去作用と呼吸作用とに分けて考へる事が多い。これは、プロセス制御や管理の面からは、基質除去作用が廃水からの汚濁成分の除去、つまり廃水処理の目的であり、呼吸作用がプロセスへの酸素供給と関係をもったので、それぞれの作用についてA諸関連を考へる必要が生ずる。一方、活性汚泥の生理学的側面や代謝反応の面からも、基質除去作用が吸着や基質の細胞内への取り込み等を意味し、呼吸作用が細胞内での基質分解反応を意味すると考へられるので、両者の相互関係を踏まえてそれぞれの反応の特性を考へる事が必要であると思われる。従って、本報告においても、培養F/Mの基質代謝に対する影響を、§-4では基質除去作用に対して、§-5では呼吸作用に対してと分けて考察した。

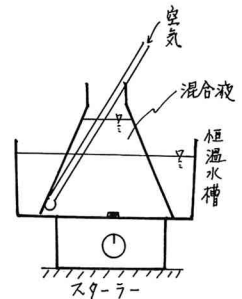


図-3 実験装置

4-1. 実験装置及び実験方法

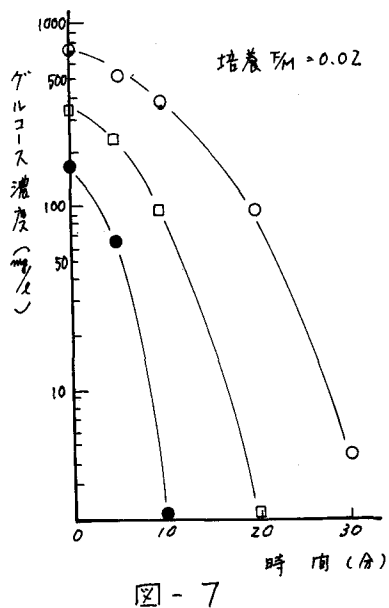
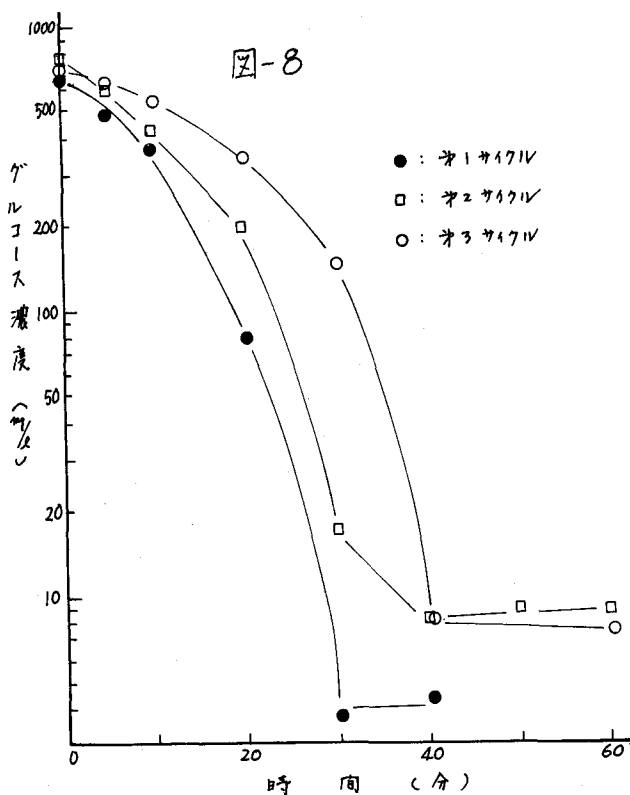
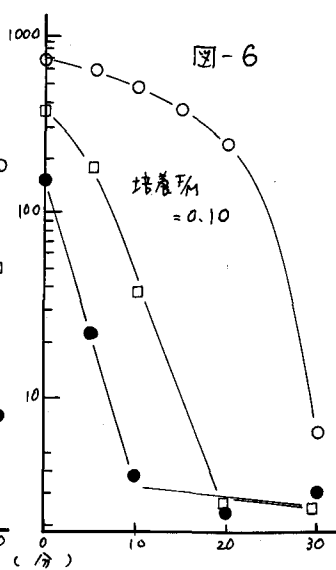
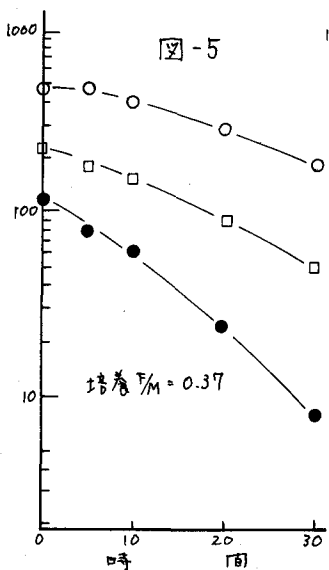
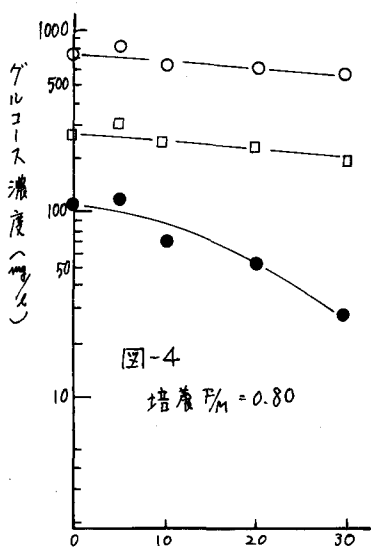
実験装置は図-3に示したもので、混合液量は500 ml、水温 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ で実験を行った。混合液中のグルコース濃度の経時変化は、次の様に求められた。まず所定時刻毎にフラスコから混合液を採取し、直ちにそれを濾過し、その濾液のグルコース濃度を測定した。

実験に用いた活性汚泥は、所定培養曝気槽からfill and drawサイクルの終了時に採取され、それを遠心分離(3000 rpm 5分間)し、蒸留水で3回洗浄した後基質と共にフラスコに投入して実験を行った。この時のF/Mを実験F/Mと称して培養F/Mと区別している。又、グルコースの定量はアンソン法による。

4-2 実験結果及び考察

各F/Mで培養された汚泥に、三糖類の濃度の基質を与え、その時の基質除去作用について実験を行った。各実験のグルコース濃度の経時変化を図-4～図-7に示した。

活性汚泥によるグルコースの除去は一般に基質濃度に関して0次反応で近似できるといわれている。²⁾ 本実験でも0次反応でほぼ近似できる結果が得られたので、その除去速度定数を求め、表-3に示した。これによると、グルコース除去速度は高いF/Mで培養されていた汚泥程低くなり、実



培養 F/M	MLSS (mg/L)	k (1/hr)
0.80	1420	0.130
0.37	2300	0.220
0.10	2441	0.676
0.02	1800	0.680

表-3

養 F/M が高い程その傾向が顕著であった。

このような除去速度の低下は、培養期間中に進行するものと考え、次の様な実験を行った。 F/M=0.10 で

培養されてゐた汚泥に、実験 $F/M=0.31$ (基質濃度は培養時の約6倍) になる基質を与えて *fill and draw* サイクルを3回行い、その間のグルコース除去について実験を行った。(曝気時間約4hr, 曝気時間終了後汚泥を遠心分離、洗滌し、それに基質を与えた。) *fill and draw* サイクルの1回目から3回目までのそれぞれAグルコース濃度の経時変化を図-8に示した。この図から判るように培養条件より F/M を高くすると、サイクルが進行するにつれて除去速度は低下する。($k_1=0.057$, $k_2=0.472$)

このような除去速度の低下の原因としては、汚泥中の貯蔵物質の蓄積が考えられる。活性汚泥による基質貯蔵については、これまでもいくつかの報告があり、最近では *Walter, C.F., et al.*³⁾, *Engelbrecht, R.S., et al.*⁴⁾, *Takii, S.*⁵⁾ 等が報告している。これらの報告によると、活性汚泥中の貯蔵物質は、基質の種類、 F/M , S/M 等によって影響され、グルコースを基質とした場合には、グリコーゲン様Aポリグルコースが基質添加後急速に蓄積されると言われている。このようにして汚泥中に蓄積された貯蔵物質は、その後の曝気時間中に消費されて行くが、その途中で新たに基質が添加されると、その時の基質除去速度はこうした貯蔵物質によって影響を受けるといわれている。その影響のされ方については、*Walter, C.F., et al.* が、貯蔵物質の減少に比例した除去能力を報告しており、*Takii, S.* は、ポリグルコースの蓄積能力が汚泥中のポリグルコース含量に比例し、グルコース除去能力に関連すると述べている。

又、基質除去速度と有機物負荷との関係について、真柄等は次式で表わされる関係を示している。⁶⁾

$$k = -0.013 \times 10^{-0.729(F/M)}$$

k : MLSS, COD表示の場合の基質除去活性

F/M : $\text{kg COD/kg MLSS} \cdot \text{日}$

筆者等は、活性汚泥の浄化機構を説明するための一つの試みとして、活性汚泥と基質との瞬時的な初期除去率が全体の基質除去率に対する培養 F/M の影響を捉えることを目標として本実験を行ったが、初期除去については、データにばらつきがみられ、培養 F/M との間に有意な関係を示すことができなかった。又、全体の基質除去率については、グルコース、グリタミン酸ソーダを基質とし、曝気時間を7hr. とした場合、今回の培養日数(約20日～50日)の間ではほとんど全ての場合90%以上の除去率を示し、除去率に影響がある以前に汚泥のバクテリア等、活性汚泥の質的な変化が起れた。こうした事は当然基質の種類によっても異なるであろうと思われる。そして本実験で用いたような基質の場合には、曝気時間全体からみると比較的短時間で基質は除去されるが、その後の安定化時間が汚泥の質に関連してくると思われる。この事は、別の側面からみれば除去速度に関連するという事であるが、図-8の結果から、この関係は培養時間と共に変化し、特に高い F/M の場合には定常状態というものをどのように考えるかが非常に重要な問題になると思われる。

3-5 呼吸作用に対する培養 F/M の影響

3-5-1 実験装置及び方法

図-9に示した装置を用い、活性汚泥から発生した炭酸ガスを測定して、呼吸作用について考察した。曝気容器には容量1Lの細口瓶を用いた。活性汚泥混合液に送られる空気は、あらかじめ水酸化バリウム溶液の入ったびんを通して大気中の炭酸ガスを吸収させ、 CO_2 freeの状態にした。

活性汚泥から発生した炭酸ガスは、25mlの水酸化バリウムを含む試験管6本に通して吸収させ、所定時間後にこの水酸化バリウム溶液を硝酸で滴定し、定量を行った。6本の試験管は二組用意されており、連続測定を可能にしてある。

活性汚泥の培養方法、採取方法、蒸留等については9-4で述べた事と同様である。

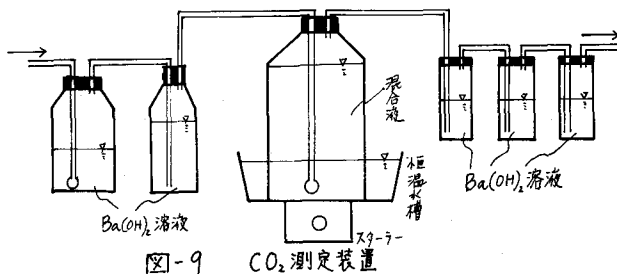


図-9

CO₂ 測定装置

5-2 実験結果と考察

$F/M=0.80, 0.37, 0.25$ で培養された汚泥について、 CO_2 発生速度の経時変化を図-10～図-12に示した。又、曝気時間7 時間の CO_2 全発生量、最大発生速度、自家呼吸速度を表-4に示した。

図-10～図-12より、活性汚泥からの炭酸ガス発生速度は、蒸留添加後30分～1時間で最大となり、 F/M が大きくなるに従ってピーク時間が遅くなる傾向がみられた。又、高い F/M で培養された汚泥では、最大発生速度を与えた後曝気時間を通して漸次発生速度が減少するが、培養 F/M の低い汚泥では、ピークを与えた後急激に発生速度は減少し、ほぼ一定の発生速度になる傾向がみられた。

次に、7 時間での CO_2 全発生量と実験 F/M との関係を図-13に示した。又、蒸留添加前の CO_2 発生速度を自家呼吸速度として、全発生量から自家呼吸量を差し引いたものを正味の発生量と看做し、これと実験 F/M との関係も同時に示した。この図より、 CO_2 全発生量は、実験 F/M と培養 F/M の両方に関係し、正味の発生量は培養 F/M には無関係に実験 F/M とほぼ直線的な関係がみ

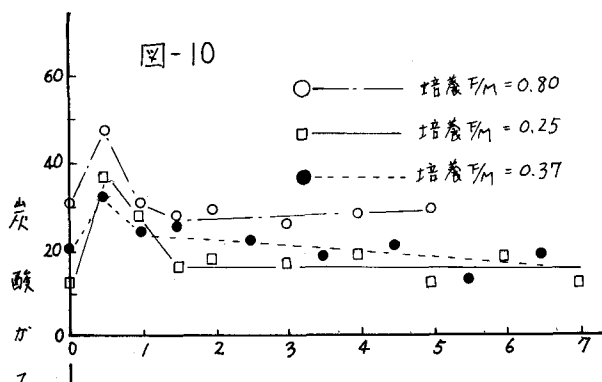


図-10

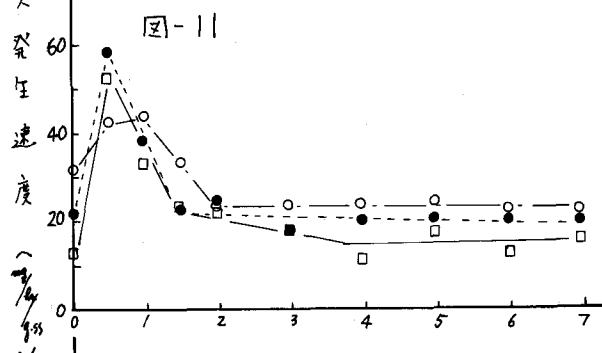


図-11

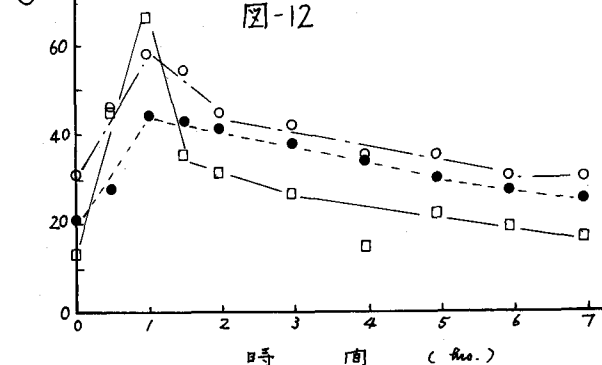


図-12

られた。しかし、自家呼吸従って内生呼吸などのように定義することがいふことについては様々な見解があり、そのどれをとつかによってこうした関係は違ってくるであろう。今回の実験では、7時間の曝気時間で基質がほぼ90%以上除去されており、このために図-13に示されたような関係が得られたものと思われる。

表-4より、自家呼吸速度は、培養F/Mが高くなるにつれて大きくなる傾向がみられた。この場合の自家呼吸は、基質添加前の呼吸作用の状態を示しており、この点を3-4の考察と合せて考えると、本実験の範囲内では基質添加前の呼吸作用の活発な汚泥程基質除去速度が小さくなることを示している。

中西は、自家呼吸量と代謝活性度との間にかなり高度の相関があると述べており、その関係を次式のように表わしている。

$$y = \frac{90x - 338}{0.0135x^2 + x + 1.96}$$

y: 代謝活性度 ($\text{mg O}_2/\text{g SS} \cdot \text{hr}$)

x: 自家呼吸量 (")

又、南部はBOD物質の活性汚泥系内での物質収支について著目V, 返送汚泥の浄化能力とBOD除去速度係数との関係を次のように表わしている。

$$\bar{k} = 0.00134 \times 10^{0.128w}$$

$$k_b = 0.00435 \times 10^{0.254w}$$

ここに $\bar{k}$: 総BOD減少速度係数 ($1/\text{hr}$)

k_b : 吸着を主体とするBOD除去速度係数 ($1/\text{hr}$)

w: $R_i/L_i \cdot Q$

R_i : 返送汚泥BOD Q : 返送汚泥量

L_i : 流入下水BOD Q : 流入下水流量

このような結果は、本実験で得られた傾向と逆の関係を示しているが、本実験では呼吸作用を炭酸ガス発生から検討しており、酸素摂取については観察していないため、今の段階では細かい議論

培養F/M	実験F/M	CO ₂ 全発生量 ($\frac{\text{mg CO}_2}{\text{g SS} \cdot \text{hr}}$)	最大発生速度 ($\frac{\text{mg CO}_2}{\text{g SS} \cdot \text{hr}}$)	自家呼吸速度 ($\frac{\text{mg CO}_2}{\text{g SS} \cdot \text{hr}}$)
0.80	0.21	280	59	30.5
	0.13	—	43.5	28.5
	0.05	180	46.5	32
0.37	0.29	240	44	21
	0.09	165	58.5	21.5
	0.06	142	32.5	21
0.25	0.24	195	66	13.5
	0.12	140	51.5	13.5
	0.07	130	37.5	14

表-4

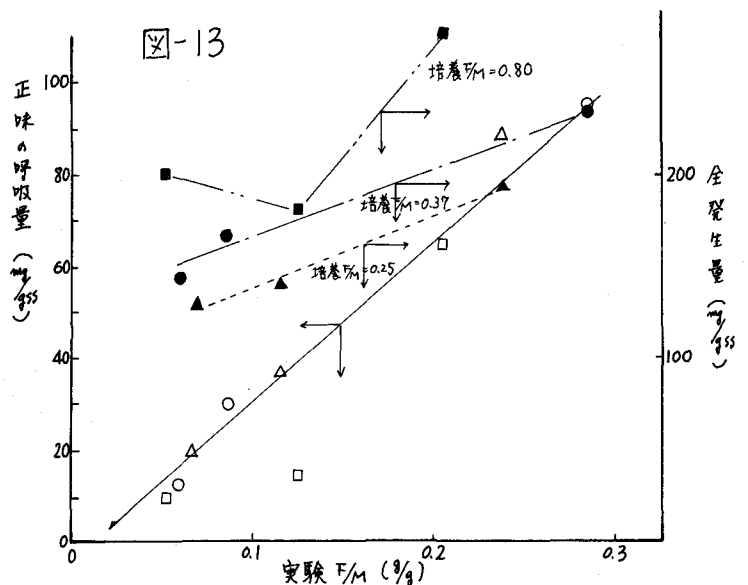


図-13

図-13

図-13

図-13

図-13

図-13

図-13

図-13

図-13

図-13

図-13

図-13

図-13

図-13

図-13

図-13

図-13

図-13

図-13

図-13

図-13

図-13

図-13

図-13

図-13

図-13

図-13

図-13

図-13

図-13

論とすることはできない。しかし、原因の一つとして考えられる事は、本実験では相対的に高い F_M の範囲を取り扱っているという事である。こうした問題については今後の課題として検討を進めて行きたい。

§-6 まとめ

- (1) グルコースとグルタミン酸ソーダを基質とした場合、培養 F_M が高くなる程汚泥のバクテリアが生じやすい。そしてその F_M の値によってバクテリア汚泥の相相も異なる。
- (2) 培養 F_M は基質除去速度に影響を与え、 F_M が高い程それと顕著である。 $F_M=0.01 \sim 0.80$ の範囲では、 F_M の増加につれて除去速度は低下した。
- (3) 活性汚泥の全呼吸量は、培養 F_M と実験 F_M の両方に影響される。又、培養 F_M は自家呼吸量に正の相関をもち、そして $F_M=0.25 \sim 0.80$ の範囲で自家呼吸量と基質除去速度は負の相関をもつ傾向がある。

以上、活性汚泥の基質代謝に対する培養 F_M の影響について検討したが、これらと定量的に取り扱うためには更に多くのデータの種類が必要であろう。又、活性汚泥と基質との反応において、1つの反応物質である活性汚泥の他の因子をどのように表わすかといった問題や、それが反応にどのように関係してくるかという問題も活性汚泥の浄化作用を考へる際に重要である。

今後、こうした見地に立って、活性汚泥に関する様々な現象（除去作用、呼吸作用、吸着初期除去作用、汚泥増殖、バクテリア等）に対する検討と深めて行きたい。

終りに、本実験を行うにあたり当時東北大学学生大島吉雄君の協力を得た。ここに謝意を表したい。

参考文献

- 1) 橋爪健一郎・南部祥一；“長期間定常培養時における活性汚泥性状の変化”，第6回下水道研究発表会講演集 P. 254 ~ 256.
- 2) 例えは 岩井重久・北原高敏；“生体酸化における基質濃度・浄化速度におよぼす影響”，土木学会論文集第159号 P. 40 ~ 48.
- 3) Walters, C. F., et al ; "Microbial Substrate Storage in Activated Sludge", A.S.C.E. SAZ, April, 1968, 257
- 4) Engelbrecht, R. S., et al ; "The Role of Enzymes in the Contact Stabilization Process", 3rd Int. Conf. on Water Pollution Research II-15
- 5) Takii, S., ; "Accumulation of Glycogen-like Polyphucose in Glucose-acclimated Activated Sludge" *fr. Ferment. Technol.*, Vol. 48, No. 6, p. 350 ~ 360, 1970.
- 6) 真柄泰基・林田進；“活性汚泥の基質除去活性に関する研究” 下水道協会誌, Vol. 9, No. 97, P. 19 ~ 25, 1972
- 7) 中西弘；“活性汚泥微生物反応に関する予備的諸問題” 下水道協会誌, Vol. 3, No. 30, P. 12 ~ 19, 1966
- 8) 南部祥一；“酸化と吸着を分離した活性汚泥法の数理モデル” 土木学会第5回衛生工学研究討論会, 77 (1969)