

乱れの構造に関する研究(第二報)

東京大学 正 工 修 ・ 松尾友矩

ゝ ゝ 太田 博

ゝ 野間一夫

I はじめに

昨年⁽¹⁾の報告においては、i) 流体運動における運動学的な構造が衛生工学の対象とするいろいろなユニット・プロセスの諸反応に対して大きな係りを持っていること、ii) しかもその係り方は Camp が示した G 値、あるいは攪拌装置などのマクロな形のエネルギー損失、平均的な攪拌速度だけでは表わしきれないこと、iii) Ω とか基質除去速度と呼ばれているものは、それを含む流体の運動(定性的な意味における乱れ)の影響を受けるものとされてきてはいたが、もしそれがあるとすれば、含まれる汚泥などの“浮遊物質”が流体運動のミクロな構造に影響を与えその結果として各種の物質移動に影響を与えるというようなメカニズムが考えられることなどについて報告した。

この過程で問題となってきたことは、定性的な意味の大きい“流体運動の影響”と“浮遊物質濃度が単位の反応速度へ与える影響”との関係を明らかにしていかなければならないということであった。

浮遊物質を含んだ流体運動の解析は土木の分野においては、従来土砂の掃流の問題とか汚泥の輸送の問題として研究されてきており、また最近では日野等の解説⁽²⁾・実験⁽³⁾によって紹介されてきた糸状の高分子である Polyox (Polyethylene Oxide) の流体運動におよぼす力学的効果に関する研究も進められてきている。しかし、なおサスペンションの力学が十分に解明されているわけではなく、活性汚泥のような対象を相手とする系に関しての情報は非常に不足しているのが実情であると思われる。

おそらくこのテーマはそう簡単に近づくものではないことも明らかであろうが、一方では浮遊物質を含む流体の運動学的な指標を臆測データから整理していき、他方では、汚泥濃度のようなものが反応に影響を与える実例をさがし、その程度、特性を調べていくという作業を、当面はこの二つを必要以上に関連させない方がよいのかもしれないが、続けていくことがどうしても必要なのであろうと考えている。

今回の報告においては、i) 電界型の小型アロペラ式流速計を使っての浮遊物質を含む流体の運動特性について、ii) 活性汚泥の酸素消費速度に対する浮遊物質濃度の影響について、を中心として考えてみることにする。

II 流体運動について

1) 目的と概要

繰返して同じようなことを述べることになってしまうが、今回の実験においては、流体運動の解析の一環として変動流速のエネルギー密度分布 (Power Spectra)、マイクロ・スケール (Eulerian Micro Time Scale) を求めることを一つのてきとして考えてみようとするものである。

解析の対称とするものは、スキムミルクを基質として馴養してきた活性汚泥の汚泥濃度を変えた混合溶液の散気式のアレーションに伴う流体運動と旅回流の向きに平行に隔壁を挿入した場合の流体

運動とである。後者のデータは昨年行なった^前実際のデータをそのまま使っている。しかし、昨年のデータに関しては昨年の報告の訂正をかねておことわりをしなければならぬことがある。それは、流速の測定（プロペラ式の流速計のパルス数をキムリブレーションカーブから流速に変換するときには回転数とパルス数（回転数の4倍）をとり違えてしまい流速の絶対値を小さく測定してしまっていた）にミスがあったことが明らかになったことである。

昨年の解析においては絶対値というよりは各種の指標の相対的な傾向を論じたものであったので、全体的な論旨にはあまり影響はしないものと考えているが今回計算し直した結果を改めて示し、訂正に替えさせて頂きたいと思う。

2) 実験方法

i) 装置, その他

主な装置, その他は昨年報告したものと同じである。

略図を図-1に示す。

昨年使った流速計はホトセル式のものであったが、今回は汚泥中で測定するために電界式の接点をもったプロペラ式の流速計を使用した。

ii) 条件

実験条件を表-1, 表-2, 表-3に示す。

表-1 ケース・1 汚泥濃度を变化させる。

記号	8000	4000	2000	1000	water
MLSS濃度 ^{mg/l}	7940	3940	1900	870	0

表-2 ケース・2 隔壁間隔を変える。

記号	A	C	E
間隔	隔壁なし	6 cm	2 cm

表-3 空気量(ケース1, ケース2に共通)

記号	I	II	III
空気量	13.9 l/min	21.4 l/min	30.3 l/min

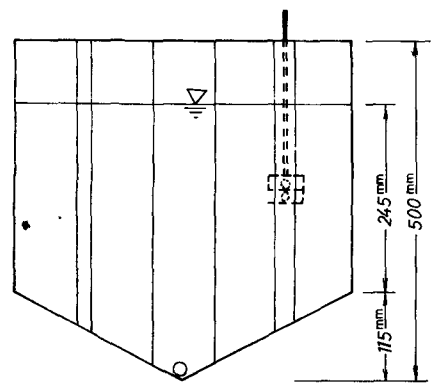
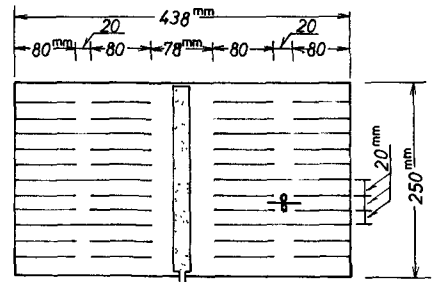


図-1 水槽略図

iii) 乱流指標の計算

流速を $U = \bar{U} + u$ とするとき

表-4 乱流指標

各乱流指標は次のように示される。

但し, $\bar{U} = \frac{1}{T} \int_0^T U \cdot dt$

$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u \cdot dt = 0$

① 平均流速 ; \bar{U}

② 乱流強度 ; $\bar{u} = \sqrt{\bar{u}^2}$

③ 相対強度 ; $i = \bar{u}/\bar{U}$

④ Eulerian Time Correlation ;

$R_E(t) = \overline{u(\tau)u(\tau-t)}/\bar{u}^2$

	\bar{U}	\bar{u}^2	\bar{u}/\bar{U}	I	M_t	\bar{P}	$\eta = \bar{P}/\bar{u}^2$
8000 I	21.9	35.3	0.272	1.169	0.207	17.8	0.504
Ⅱ	23.5	64.2	0.341	0.518	0.206	32.2	0.502
Ⅲ	24.5	72.0	0.346	1.970	0.208	36.4	0.505
4000 I	20.7	36.6	0.293	1.350	0.208	18.4	0.504
Ⅱ	23.7	64.6	0.340	2.190	0.209	32.7	0.505
Ⅲ	24.7	95.4	0.397	0.146	0.209	47.6	0.499

⑤ Eulerian Integral Time Scale ;

$$T_E = \int_0^{\infty} dt R_E(t)$$

⑥ Energy Spectra ;

$$E(n) = 4\bar{u}^2 \int_0^{\infty} dt R_E(t) \cos 2\pi n t$$

⑦ Eulerian Micro Time Scale ;

$$1/\tau_E = 2\pi^2 \bar{u}^2 \int_0^{\infty} dn \cdot n^2 E(n)$$

⑧ 乱流のエネルギー

$$\int_0^{\infty} dn \cdot E(n) = \bar{u}^2$$

連続量として u を扱う一般的な乱流指標は上記のように表わされるが、数値計算を逐めていくためにはいわゆるランダムプロセスの解析で開発されてきている方法を使うことになり、その形で表わせば次のように書き直すことになる。

$$\textcircled{9} R_E(t) : R_{uu}(k) = \frac{1}{N-k} \sum_{j=1}^{N-k} u(t_j) u(t_j+k) \quad (k=0, 1, 2, \dots, m)$$

$$\textcircled{10} T_E : T_t = \Delta t \sum_{k=0}^m R_{uu}(k)$$

$$\textcircled{11} E(n) : P(r_m \cdot \frac{1}{2}\Delta t) = \Delta t \{ R_{uu}(0) + 2 \sum_{k=1}^{m-1} R_{uu}(k) \cos(2\pi \cdot \frac{r}{2m} \cdot k) + (-1)^r R_{uu}(m) \}, \quad (r=0, 1, 2, \dots, m-1)$$

$$\textcircled{12} \tau_E : M_t \cdot \frac{1}{u_0^2} = \frac{2\pi^2}{u_0^2} \cdot \left(\frac{1}{m \cdot \frac{1}{2}\Delta t}\right) \sum_{r=0}^{m-1} (r_m \cdot \frac{1}{2}\Delta t)^2 P(r_m \cdot \frac{1}{2}\Delta t)$$

$$\textcircled{13} \bar{P} = (r_m \cdot \frac{1}{2}\Delta t) \sum_{r=0}^{m-1} P(r_m \cdot \frac{1}{2}\Delta t)$$

⑬ [r の変域が ($r=0, 1, \dots, m-2$) と $m-1$

までになっているのは、特別の理由があってではなく普通は m までとするものようです。]

解析に使ったデータは、ケース1の場合で0.2秒で960個、ケース2の場合で0.5秒で960個をとり $m=91$ とした。最大周波数はケース1で2.47、ケース2で0.989である。

3) 結果と検討

求めた各種の乱流指標をケース1、ケース2を通して表-4に示す。

i) エネルギー・スペクトルについて

ケース1の場合のMLSS濃度7940 mg/l のものとWaterのものについて空気量を変えたときのエネルギー・スペクトルを図-2、図-3に、空気量をIIとしたときの各MLSS濃度のスペクトルを図-4に示す。ケース2の3種類の隔壁間隔のスペクトルを図-5、図-6、図-7に示す。

2000 I	20.7	46.5	0.330	3.895	0.207	23.6	0.519
Ⅱ	21.7	71.9	0.391	2.052	0.209	36.0	0.501
Ⅲ	21.6	96.8	0.456	3.138	0.210	49.6	0.512
1000 I	18.5	50.4	0.385	0.749	0.207	25.4	0.504
Ⅱ	20.8	77.9	0.425	1.941	0.210	39.4	0.506
Ⅲ	17.7	117.6	0.611	2.441	0.211	59.3	0.513
Water I	24.8	43.9	0.265	3.312	0.209	21.9	0.507
Ⅱ	27.1	68.8	0.306	5.317	0.211	35.5	0.516
Ⅲ	26.8	95.2	0.364	1.252	0.213	47.7	0.501
A I	11.1	10.8	0.296	22.385	0.522	6.16	0.569
Ⅱ	12.7	12.6	0.279	7.984	0.525	6.75	0.538
Ⅲ	15.9	15.2	0.245	16.606	0.528	8.49	0.560
C I	16.6	2.32	0.092	0.649	0.555	1.14	0.494
Ⅱ	18.4	2.98	0.094	1.214	0.549	1.48	0.499
Ⅲ	19.0	3.64	0.100	4.088	0.558	1.84	0.506
E I	16.7	0.451	0.040	0.682	0.566	0.224	0.496
Ⅱ	19.3	0.738	0.044	0.768	0.566	0.368	0.499
Ⅲ	19.5	1.756	0.068	0.910	0.548	0.891	0.508

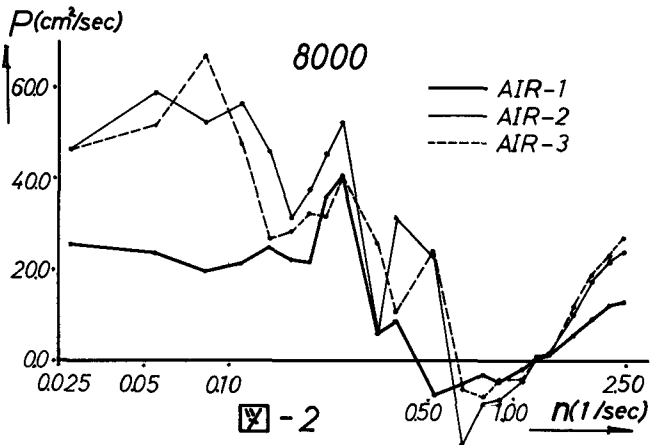


図-2

図-2~図-7を通してみると、Virki, Merrill, Mickle & SmithがPlyox^(*)を使つての実験の際に得たり、教科書などに示されているものに比べて非常に異なつたパターンを示していることが分かる。どうもエネルギーセクトルに関する知識が不勉強のため不足しているのが、残念ながらこの差が何を意味しているのかわからかにすることができない。

しかし、その相対的な傾向として次の五つの点には注意する必要があると思われる。

α) 隔壁を入れることはいわゆる乱れのエネルギーの減少には非常に効果の大きいものであり、しかも周波数の小さい領域により効果的である。

β) この事実との直接の関係は明らかではないが、マイクロスケール、 $\delta \cdot a \sim \lambda$ の影響の与え方(昨年報告)とを考慮合わせると、隔壁を入れることの効果を測る一つの視点になるものと考えられる。

γ) 浮遊物質を含む流体の場合は全体的なパターン、絶対値ともあまり変化があらわれていないのに、周波数領域で $\pi=0.5 \sim \pi=1.4$ の間で浮遊物質濃度が濃くなるほど小さくなつていく傾向が認められることが注目される。しかし、このことのもつ意味は不明である。Virki等がPolyoxを溶かした場合の結果としてInertial Sabrangeが消滅したような例を報告しているが、これ以上のコメントはここでは不適当であると考えている。

δ) 図-3と図-5は実験条件としては同一のものであつたが、再現性は乏しいようであつた。ケースIとケ

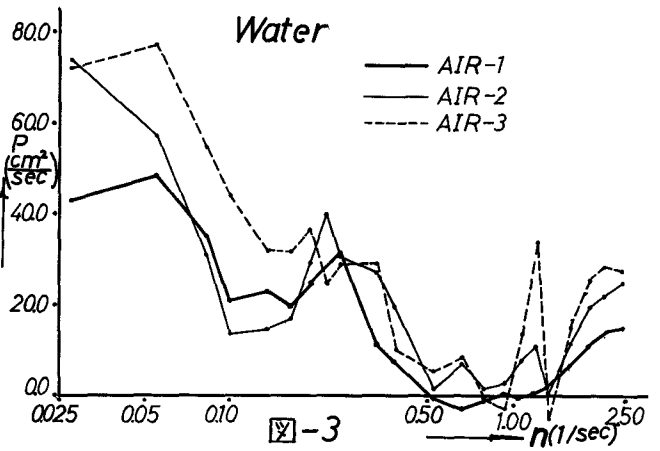


図-3

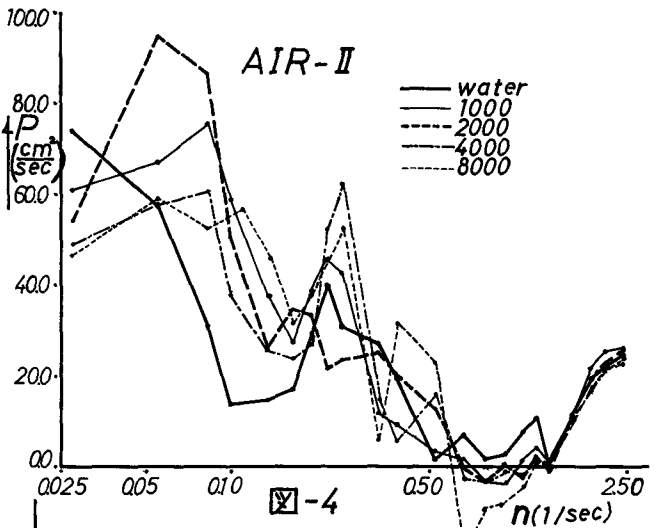


図-4

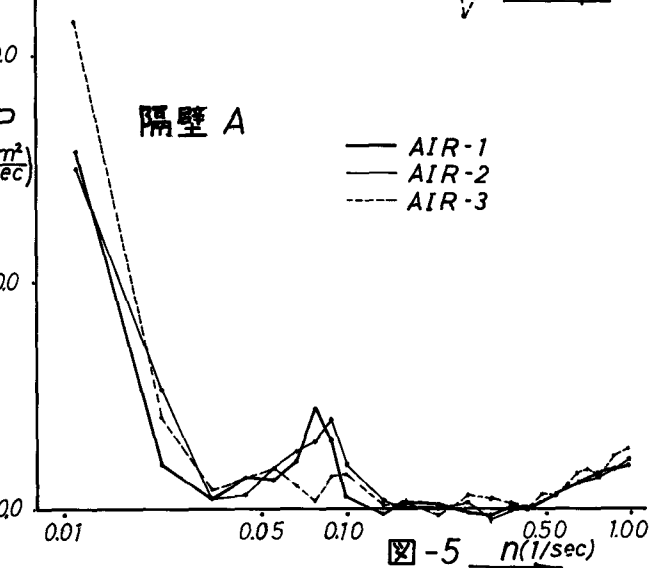


図-5

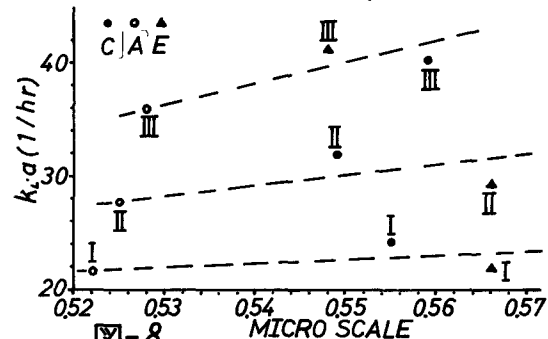
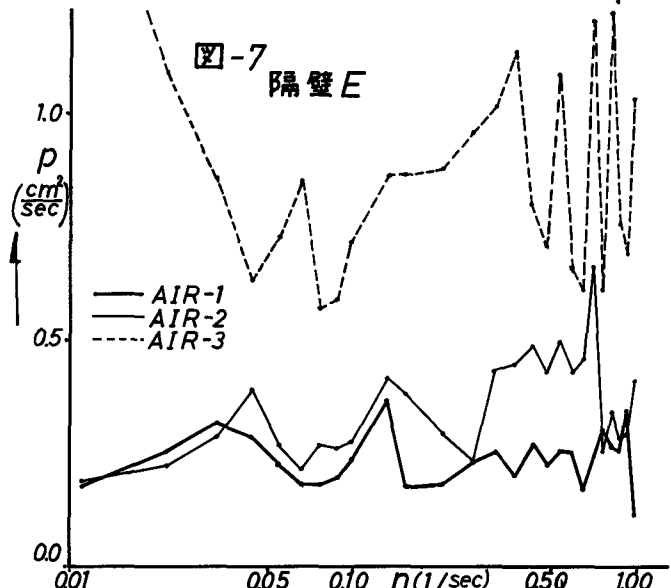
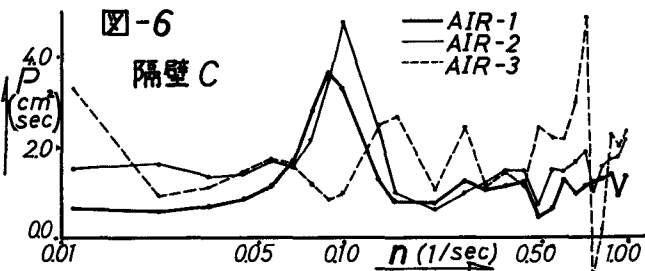
ケース2の中ではそれぞれ一応一定の傾向が認められ、実験条件の細い変化、流速計のレスポンスの問題とも合わせて今後もう一度検討しなければならないだろう。②のでも述べた周波数領域にして $\eta=0.5 \sim \eta=1.4$ において負のパワーが得られていることは、次に考えるマイクロスケールを求める際の影響としても今後注意しなければならないようである。

iii) マイクロスケールについて

表-4に示したマイクロスケールの値を見ると、①ケース1とケース2の絶対値の差が他の乱流指標に比べて大きすぎる。②特にケース1についてははっきりしているが、浮遊物質の濃度が小さくなるほど、空気量が大きくなるほどマイクロスケールの値が極めてわずかづつではあるが、一定の傾向を持って大きくなっている。③ケース2においてはC-Ⅱ, E-Ⅲが少し小さめになっているが、他の指標とは逆にA-C-Eの順に値が大きくなっていく傾向が認められる、といった点が注目される。

①の問題は、ケース1とケース2の算出の際の周波数領域の違いがその原因のひとつではないかと考えられ、現在検討中ではあるが、まだ結果を得られていないので講演時にコメントしたい。さらに、②の②でふれた負のパワーの問題とも合わせて考えるとき、以下のマイクロスケールに対する検討はもう一度考え直さなければならないかもしれないと考えている。

②③に現れた現象が何を意味しているのかについては、“そもそもマイクロスケールという量が流体運動の中でいかなる“物理的意味”を持っているのか?”という素朴な疑問に答えられずにいる著者等にとっては、残念ながらよく分からないところである。しかし、試みに、昨年報告した $k_2 \alpha$ はケース2の条件でのデータであることを利用して、得られている $k_2 \alpha$ 値(10秒単位のもの)とケース2で求めたマイクロスケールの関係をプロットしてみると、図-8に示されるような“右上りの傾向が認められると期待できそうな結果が得られる。



ケース1においては着者等の予想としては、 ϵ_{LA} に対する浮遊物質の影響はここに得られているように差が3ケタ目でしか現れてないマイクロスケールではとても表わしきれないだろうと思われざる訳であるが、他の乱流指標に比べれば非常に“よい”傾向を示す指標であると考えられる。

このことはまた、②、③で述べた傾向が今までに得られている ϵ_{LA} に関する情報とは矛盾していないことも示している。しかし現在の段階では、これ以上に ϵ_{LA} とマイクロスケールの関係に興味を持たせることは不適當であろう。

著者等としても、“マイクロスケール”をひとつのきりかきと考えており、大きな期待も持っているが、それにはもっと高い周波数領域まで含めた“マイクロスケール”が定量化されなければならないのだろうと考えている。

Ⅳ) 流速計の効率について

Plata & Bennett⁽¹⁰⁾が流速計の変動流速の周波数領域に対するレスポンスの効率を示す概念として示しているもののアナロジーから

$$\eta = P/\bar{u}^3$$

を測定効率と定義し、表-4の最後の例に示す。

η がいずれも0.5近辺の値であることは、ケース1については、周波数が247以上の領域に、ケース2については、0.989以上の領域に残り半分のエネルギーが含まれていることを意味している。これは現在使っている流速計での“乱水”の議論は、半分までの議論でしかないことを示す訳であり、最大の限界はやはりこの辺にあったようである。

いずれにしても、気泡あるいは浮遊物を含む流体の流速をもつと、忠実に測定できる測定装置の開発が、是非必要になってきたようである。

Ⅲ 酸素消費速度について

1) 目的と概要

活性汚泥に限らず、酵母、菌類、バクテリアなどの酸素消費速度に関する研究は従来からも内外の研究者達によって色々な角度から数多くの研究が行なわれてきている。

生物体による酸素消費速度（呼吸速度とも呼べるもの）は、測定法そのものにしても、ワールアルグ検圧計の改良、最近では溶存酸素電極の性能の向上などに助けられて簡便になってきており、ある意味ではルーティン化された指標としての位置を持っていると考えられる。

しかしなお、測定に入る前の条件、特に、攪拌の影響、エアレーションの影響については相対的な形でしか研究されていないのが実情であろう。

著者等はその間の関係に興味を持ちつつ、広くいえば流体運動と生物反応との関係の問題として考えながら研究を続けてきている。現在までのところ、なかなか的確に流体運動と結びつけられないではいるのだが、(Ⅱ章におけるマイクロスケールにひとつの手がかりはつかめるのではないかと期待しているが)、流体中に含まれる浮遊物質 (MLSS) がなんらかの動きを持っており、酸素消費速度をはじめとして、基質除去の機構などの生物反応において、非常に重要なパラメーターとなっていることを認めてきている。

過去の多くの研究者の中でもMLSS濃度を変えた実験データは、非常に少ないようである。しか

も、Lamb, Westgarth, Rogers & Vernimmen⁽¹⁵⁾, Siegel & Gadem⁽¹⁶⁾, Tsao & Kempe⁽¹⁷⁾などは、MLSS濃度 (Cell濃度) には関係しないというデータを示している。また、Sawyer & Nichols⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾は、表-5に参考として示すように、かなり大きな影響と思われるデータを得ていながら、その論文の中で“バラツキの大きい指標だから……”というように、いたって消極的な評価しか与えていない。Hixson & Garden⁽¹⁹⁾はMLSS濃度による変化と見なせそうなデータを示しているが、これは逐時的な変化も含めて入れたものではなく、Sawyer等は30年以上も前の論文であり、現在のところ著者等の論点は、どうも声が小さいようである。

今回の実験においては、i)汚泥の種類を増やしてみる。ii)測定を気相と液相の両方で行ない比較してみる、ということをお願いとして、酸素消費速度に対するMLSS濃度の影響のあらわれ方を調べてみたい。

表-5 Sawyer & Nichols⁽¹⁸⁾ (1939)

Comparison of Base Rates of Oxygen Utilization of Activated Sludges at 20°C on the Basis of Suspended Solids Concentration

Sludge	S.S. Conc. in p.p.m.	Base Rate in ppm. of O ₂ per Hour	Mg of O ₂ per Hour per Gram of Sludge
AA	4 320	34	7.9
2E	4 480	30	6.7
D	5 200	45.5	8.7
E	5 360	52	9.8
2A	5 560	20	3.6
2C	8 720	37	4.5
A	9 400	21	2.25
C	10 120	21.5	2.12
A	10 240	19.0	1.85

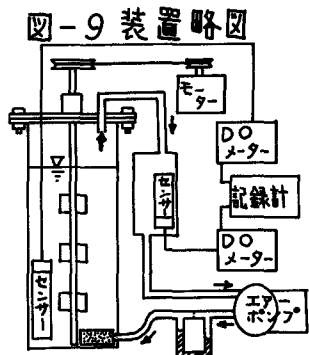
Base Rate - Rate of oxygen utilization by activated sludge alone after twenty-four hours aeration without feeding

注) 表中 Sludge の列の AA, 2E, A は汚泥の種類を示す記号。

2) 実験方法

i) 装置

図-9に示すような円筒形の水槽 (反応槽) を中心として、クローズドに維持された系からなっており、気体はエアポンプによって反応槽に送られる。気相、液相 (反応槽) にそれぞれ酸素電極を封入し、酸素の変化を測定していく。装置全体は、20°Cに保たれた恒温室の中に設置されている。



ii) 汚泥の種類

グルコース汚泥: (グルコース, KH₂PO₄, Na₂HPO₄, (NH₄)₂SO₄, 水道水) 写真-1

ミルク汚泥: (ミルク, 水道水) 写真-2。

ii) 条件

a) 空気量の条件を表-6にまとめる。

表-6 空気量の条件

空気量	記号	1	2	3	4	5	6
	(l/min.)	0.65	1.02	2.59	3.87	4.78	5.56
k _L a の測定	MLSS なし	○	○◎	○◎	○◎	○	○
	グルコース (1000mg/l)	○	○◎	○◎	○◎	○	○
	グルコース (2400mg/l)	/	◎	/	◎	/	/
	ミルク (6500mg/l)	/	◎	◎	◎	/	/
	ミルク (1600mg/l)	/	◎	/	◎	/	/
酸素消費速度	グルコース	○	○	/	○	/	/
	ミルク	/	○	/	○	/	/

注) k_La の ◎印は図-10, ○印は図-11に対応する。

c) 汚泥濃度

グルコース汚泥: 12960 mg/l, 5,930 mg/l

ミルク汚泥 : 7,860 mg/l, 3,720 mg/l

(MLSS の濃度は遠沈法で測定)

d) 回転

180rpm ~ 190rpm の一種類, 攪拌翼 (4cm x 2cm) 3枚

3) 結果と検討

i) $k_L a$ について

MLSS の種類, 濃度の影響を⁽²⁰⁾主として図-10に, 空気量の影響を図-11に示す。 $k_L a$ (数値はすべて自然対数で表示) への影響は次のようにまとめよう。

a) MLSS が $k_L a$ に与える影響は, MLSS の種類によって非常に異なることが分かる。従来からも糸状の菌類などにおいて, その特異性が論じられてきていたが, 写真-1, 2を比べてもそれほどの特徴ある変化もないのに, これだけの差が現れたことは, 注目しなければならないと思う。

b) グルコース汚泥の場合にその MLSS 濃度がかかなり高いにもかかわらず, その影響が相対的に小さい。しかし空気量が大きくなるにしたがい, その影響が現れるようになってくる。この事実, インプットエネルギーが小さい (空気量が小さい) 方により影響が現れるのではないかという予想とは反対の結果となっている。なお, 汚泥を含む $k_L a$ の測定に際しては, 汚泥を煮沸し, 昇汞を加え, 汚泥の呼吸を止めておいた。

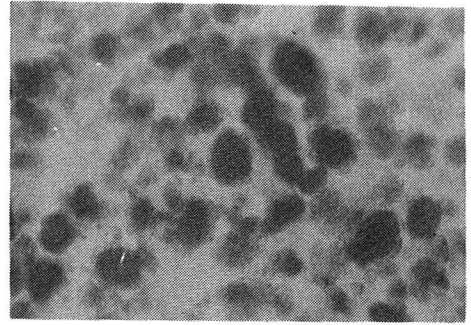


写真-1

500 μ

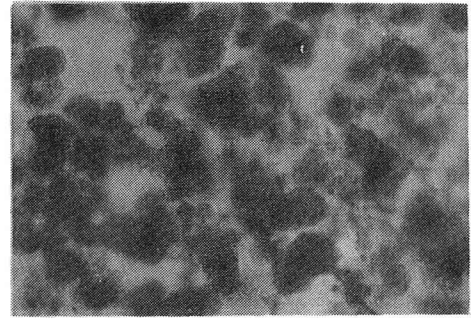


写真-2

500 μ

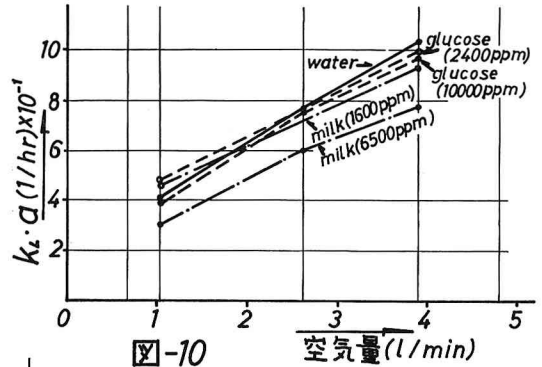


図-10

空気量 (l/min)

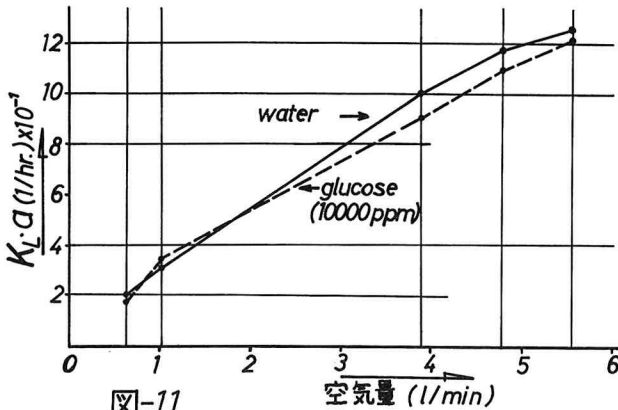


図-11

空気量 (l/min)

ii) 酸素消費速度について

得られた結果を表-7に示す。ここに示したデータは, 一回の測定値である。表中最後の列に示した濃度差の項は, 絶対値の比較になるので, 精度の点で少し落ちると思われる。しかし, 速度の項は, 予備実験との関係からして以下の議論には耐え得る。

a) 酸素消費速度の計算

気相-液相-生物, の間の酸素の取支を定式化してみると, ここでは Bennet & Kempe⁽²²⁾ が主張する“気相-生物”という経路は, T_{sao}⁽²³⁾の最近の論文などを考慮して, ここでは無視し得る量として考えれば, 次のように示すことができる。

$$\frac{dC_w}{dt} = -f(r) \cdot g(s) + K_L \cdot A (C_A - C_w) \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{dC_A}{dt} = -K_L \cdot A (C_A - C_w) \dots\dots\dots (2)$$

ただし, C_A: 気相の酸素の%濃度(空中の酸素を100%とする。)

C_w: 液相の酸素の%濃度(空気で飽和した水中の酸素を100%とする。)

K_LA: 見掛けの k_L・A (1/hr.)

r: 単位MLSS当り汚泥の酸素消費速度 (mg O₂/gr. MLSS・hr.)

f(r): r を%濃度へ換算した量

S: 汚泥のMLSS量 (mg/l)

g(s): 汚泥の全量 (gr.) (S・V_w)

V_w: 液相の体積 (l)

(1), (2)式から

$$f(r) \cdot g(s) = \frac{dC_w}{dt} + \frac{dC_A}{dt} \dots\dots\dots (3)$$

$$-K_L \cdot A = \frac{dC_A}{dt} / (C_A - C_w) \dots\dots\dots (4)$$

と変形される。

(3)式の右辺をmg・O₂の単位に変換するためには, 気相の体積をV_A, O₂の分圧を1/5気圧, 液相の体積をV_w, 20°Cにおける飽和溶解酸素濃度を9.1mg/lとして

$$\frac{dC_A(mg)}{dt} = \frac{dC_A}{dt} \times V_A \times \frac{1}{5} \times \frac{273}{22.4 \times 293} \times 32 \times 10^3 \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{dC_w(mg)}{dt} = \frac{dC_w}{dt} \times V_w \times 9.10 \dots\dots\dots (6)$$

V_A = 0.85 l, V_w = 1.6 l として数値計算を行なえば

$$r_A \cdot S \cdot V_w = 226.5 \times \frac{dC_A}{dt} \dots\dots\dots (7)$$

$$r \cdot S \cdot V_w = 226.5 \times \frac{dC_A}{dt} + 14.56 \times \frac{dC_w}{dt} \dots\dots\dots (8)$$

(ただし, r_Aは気相だけで測定したと仮定したときに求める酸素消費速度) と求められる。

b) 単位MLSS当りの汚泥の酸素消費速度

a) によって計算された結果を表-8に示す。表の最後の列にある“比率”というのはグルコース, ミルクのそれぞれにおいて, MLSS濃度の低い方を1としたときの酸素消費速度の割合を示したものである。

今回の実験においては, r と r_A間の絶対値的な差の問題とともに, r, r_Aのそれぞれにおける“

表-7 酸素消費速度の測定値

	MLSS濃度	空気量(%)	dC _A /dt (%/hr.)	dC _w /dt (%/hr.)	C _A -C _w (%)
グルコース汚泥	12960 (mg/l)	0.65	9.00	8.51	7.46
		1.02	8.73	8.88	4.29
		3.87	8.10	8.22	0.18
	5930 (mg/l)	0.65	4.77	4.50	3.66
		1.02	4.89	4.89	2.68
		3.87	4.20	4.38	0.10
ミルク汚泥	7860 (mg/l)	1.02	6.18	6.12	3.99
		3.87	6.12	5.91	0.93
	3720 (mg/l)	1.02	3.72	3.48	2.25
		3.87	3.84	3.84	0.12

表-8 単位MLSS当りの汚泥の酸素消費速度

	空気量(%)	12960 (mg/l)		5930 (mg/l)		比率
		r _A	r	r _A	r	
グルコース汚泥	0.65	r _A	0.98	1.14	0.864	
		r	1.04	1.26	0.865	
	1.02	r _A	0.96	1.16	0.825	
		r	1.00	1.24	0.821	
	3.87	r _A	0.89	1.00	0.885	
		r	0.94	1.07	0.877	
ミルク汚泥	1.02	r _A	1.11	1.42	0.782	
		r	1.18	1.51	0.784	
	3.87	r _A	1.11	1.46	0.760	
		r	1.18	1.52	0.773	

比率 ρ が示す傾向をたしかめることが、ひとつのねらいでもあった。 r_A の“比率 ρ ”には r の“比率 ρ ”よりももう少し大きくMLSSの影響が現れるはしないかという“期待”であったが、それは式(1)、(2)を仮定し、それが成立するものであれば、最初からの外れであったようである。

“比率 ρ ”が r より小さくなっていることは、著者等の主張から予想された通りであったが、ここではさらに、グルコースとミルクの場合の“比率 ρ ”の差に注意していきたい。

汚泥の形状は写真-1,2に示すように、フロックの径は、ミルクの方がいくらか大きいこと、グルコースの方が小さいフロックの集合体であるような印象を与えるような構造を持っていることその他は、ほとんど同じような形状をしている。汚泥に対する表現はいたって感性的であり、“比率 ρ ”の差が何に起因するのかは明らかではないが、グルコース汚泥、ミルク汚泥、Sawyer等の汚泥と小さくなっていく傾向の類推として、もし説明する因子があるとすれば、汚泥のいろいろな意味における“性質 ρ ”が、MLSS濃度の影響のしかた、程度に大きな因果関係を持つことになっていることが推定される。このことは、 k_d の測定に際してのグルコース汚泥とミルク汚泥の差としても現れるという形で裏付けが得られていることを意味し、また逆に、汚泥、生物体の種類によっては、MLSS濃度の影響を受けにくいものもあることを示しているといえる。

この実験を通じて得られたことをさらに簡単に整理するならば、① Sawyer等が求めたデータは、測定法(Sawyer等の実験方法は、気相下の速度で測っている。)の差というよりは使用した汚泥の“性質 ρ ”によって大きく影響されていると考えられること。② 気相で測定する場合でも、MLSS濃度は単位汚泥の酸素消費速度に影響を与えること。③ 気相-液相-生物体という O_2 移動のプロセスにおいては(k_d がある程度以上大きければ)、生物体が O_2 を消費するメカニズムが律速となり、したがって、MLSS濃度の影響もその段階での効果として現れること、といえよう。

Bennet等が論じている液膜を共有したような形で、気相-生物体への O_2 移動がかなりあるとすれば、循環させる空気量を変化させたときの $\frac{dC_w}{dt}$ 、 $\frac{dC_A}{dt}$ の値にもう少し“ある種の傾向”が現れてもよいように思われる。著者等としては、“もしそういうメカニズムがあったとしても、それは無視し得る程度のものである”という(1)、(2)式を導く仮定は、一応確認されたと考えている。しかし、 r_A が空気量の増大によってはっきりした影響を受けていないことは、 k_d の際のグルコース汚泥に認められた傾向とも合わせて考えると、インプット・エネルギーとの関係としてももう少し検討してみる必要があるように思われる。

c) 見掛けの k_d

式(4)から求められる $K_L A$ と、(第三章1)で実測した k_d との関係は、本来同一のものであるべきであると考えていた。しかし、表-7に実測されている数値を式(4)に代入し、相当する k_d の値とを比較し表-9に示すと、いかにも差が大きすぎる事が分かる。(C_A-C_w)の値の精度もさることながら、何か要因があるように思われ、 k_d と区別して $K_L A$ (見掛けの k_d)と記しておいた。現在までのところ、この理由は判然とせず、何か基本的な考え方に誤りでもあるのではないかと心配している。

そのように $K_L A$ の値そのものについての議論はもう少し待つとしても、気相-液相の O_2 移動に係る影響を見る指標としては、面白い内容を持っているとも考えられ、今後検討していく価値は十分あり

そうに思える。

iii) 基質を添加した場合の酸素消費速度について

ここに報告する実験は、第25回土木学会学術講演会に発表したもの⁽²⁴⁾の補充の意味で原稿提出以後に行なったものについてである。したがって、実験方法その他は、その論文を参照していただくことになる。このときまでの O_2 収支の測定は、液相だけで行なったものである。装置の略図を図-12に示す。使った汚泥はグルコース汚泥で、添加する基質はグルコースである。

結果は表-70、および図-13に示される。

現象的には、 F/M 比一定として求められるカーブが、特に F/M 比の小さいところでは、右上りの傾向を示し、着者等の論拠を一見否定するかに見えること、また、ほぼ一様な酸素消費速度に達する MLSS 濃度の位置の変化の方向(矢印の方向)、が問題となるようである。

前者の指摘はかなり重要な意味を持っているといえる。そこで、 F/M 比という概念をはなれて、そこに(汚泥生物の周辺に)存在する基質濃度の絶対値で整理してみよう。それは基質の密度(濃度)をそろえてデータを比較してみることであり、(今回のデータは実験計画がもう一つ十分でなかったために、ずばり的確な比較ができないのが残念であるが)、図-13に○で囲み点線で結んだものどうしを比べてみることを意味し、結果として、右下りの傾向が得られていると認められるであろうということである。このことは基質のないときには汚泥の周辺にある O_2 密度が、基質を添加した場合は基質の密度が一様であることが必要な条件になっており、そのような場合には、MLSS 濃度の影響が同じ傾向を示すようなメカニズムを通して現れてくると考えてよいことを示している。

またさらに、後段に指摘した矢印の意味も上述の「汚泥が

表-9 見掛けの $k_L a$ ($K_L A$)と $k_L a$

	空気量 (l/hr)	MLSS濃度 (mg/l)	$K_L A$ (1/hr)	$k_L a$ (1/hr)
グルコース汚泥	0.65	12960	1.21	17.7
		5930	1.30	(グルコース) 10000mg/l
	1.02	12960	2.04	33.8
		5930	1.83	(グルコース) 10000mg/l
	3.87	12960	45.0	90.9
		5930	42.0	(グルコース) 10000mg/l
ミルク汚泥	1.02	7860	1.55	29.6
		3720	1.65	(ミルク) 6500mg/l
	3.87	7860	6.66	77.5
		3720	20.4	(ミルク) 4500mg/l

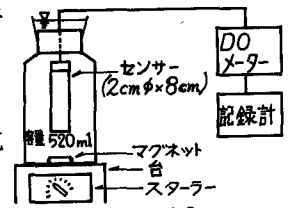


図-12

表-10 基質添加後の最大酸素消費速度(% O_2 /gr.MLSS.min.)

MLSS F/M	8000	6000	4000	2000	1000	300	100
6.0	—	—	—	—	—	5.02	8.04
1.8	—	—	—	—	6.46	5.27	3.20
0.25	6.25	6.53	6.12	6.24	5.65	4.65	—
0.1	5.96	5.41	5.65	5.62	4.53	3.41	—
0.01	4.17	3.80	3.63	2.39	1.30	—	—
0.001	1.36	1.18	0.97	—	—	—	—

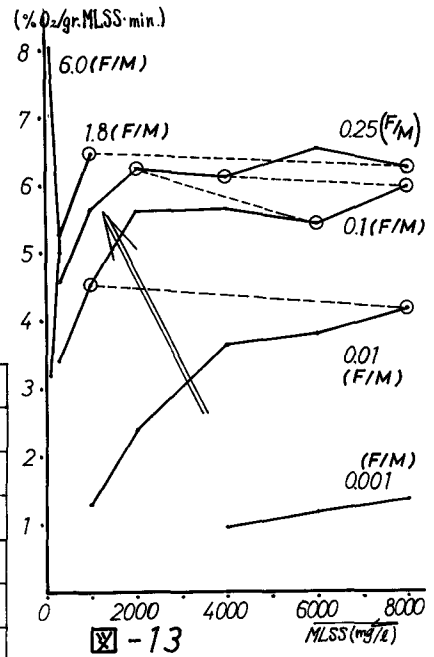


図-13

一定の能力を発揮するためにはその周辺に同程度の基質が存在することが必要であり、 F/M 比というような相対的な表わし方ではその条件を満足させることはできない。”という考え方を裏付けるものであると考えられる。

IV まとめ

かなり広範囲の問題についてコメントを加えてきたが、次の五点をあげてまとめに代える。

1) 流れの場に隔壁を挿入し、流れの区画を小さくしていくことはマクロな意味での“乱れ”を減衰させる効果は非常に大きく、その意味での整流効果は大きなものが期待される。このことはいわゆる傾斜板式の沈澱池の沈澱効率の改善に係る因子としての整流効果を裏付けるものではないかとも考えられる。

2) 現在使っている流速計の測定限界による不十分さ、また、乱流指標としてのマイクロスケールのもつ物理的意味、数値計算上の取扱い方など、もうひとつ分かっていないといった条件つきではあるが、物質移動に関係するようなメカニズムに影響を与えている流体側の条件を示す指標のひとつとしてマイクロスケールが有望であると思われる。

3) 酸素消費速度に対する MLSS 濃度の影響は、汚泥の種類にもよるが、確実に存在するといえる。このことは、Sawyer 等が 30 年前に消極的な形で示したデータに積極的な意味を認めて改めて評価し直そうとするものである。Sawyer 等と Lamb 他の実験結果の違いを使った汚泥の“性質”の差だけとして説明してしまうことはいかにも危険であり、ここでいう汚泥の“性質”の差はといった生物学的にはどういうことか、力学的にはどういうことかといった観点からの研究が益々必要になってきたのだと思われる。

いずれにしても、生物反応のメカニズムの中における流体運動の意味を整理していくことは、そのまま、例えば、酸素消費速度といった指標をより一般化し、普遍化していくことになると考えられる。

4) 生物体の酸素消費速度などの生物指標を測っていくときの考え方として、定性的な意味からの生物的相似の条件として F/M 比という概念が一般的に妥当な目安を示すものとして認められてきているが、生物体が基質と出会うメカニズムは何かといった観点から見たとき、 F/M 比のもつ意味については再検討する必要があると思われる。

着者等の主張としては、“生物的相似を保つためにも系の流体運動に関する情報（現在まででは、MLSS 濃度という形でしか定量化されていないが）が必ず必要なのだ”と考えている。

5) 活性汚泥のようなサスペンションの中での物質移動に影響する因子を整理していくこと、サスペンションの運動学的な特性を調べていくことは、その結果を流体力学の系へフィードバックさせてやることによって“乱れ”の解析を推めていく上での一助となると考えられる。

最後に、本研究の間、終始励ましを頂き、お世話下さった、杉木昭典教授、且尚久助手、それに研究会などで討論に参加して下さい下さった皆様に感謝の意を表し本報告を終わります。

なお、乱流指標の計算には東京大学大型計算機センターを利用したことを付記する。

V 参考文献

- (1) 杉木昭典, 松尾友矩, 太田博, 野間一夫; “乱れの構造に関する研究(第一報)”, 第6回衛生工学研究討論会, P.80 (1970)

- (2) 植藤郁夫, 鄭俊錫; "汚泥の管路流動に関する実験的研究", 第4回衛生工学研究討論会, P.22 (1967)
- (3) 日野幹夫; "固液二相流の微細構造", 日本学術会議混相流シンポジウム前刷集, P.21 (1967.11.18)
- (4) 長谷川佐代子, 日野幹雄; "ポリマー種溶液に関する流体力学的な二三の実験" 第13回水理講演集(土木学会), P.97 (1969)
- (5) 川島 普; "下水汚泥の物性に関する考察", 水道協会雑誌, No.269, P.46 (1957), 他川島氏の一連の論文.
- (6) Hinze, J. O. ; "Turbulence", McGraw-Hill (1959)
- (7) 土木学会文献調査委員会(小森修蔵担当); "スペクトル解析の海岸工学への応用", 土木学会誌, Vol.54, No.5, P.65 (1969)
- (8) Blackman, R. B. & Tukey, J. W. ; "The Measurement of Power Spectra", Dover Publications, (New York) (1958)
- (9) Virk, P. S., Merrill, E. W., Mickley, H. S. & Smith K. A. ; "The Toms Phenomenon ; turbulent pipe flow of dilute polymer solutions", J. Fluid Mech. Vol.30, part2, P.305 (1967)
- (10) Plate, E. J. & Bennet J. P. ; "Rotary Flow Meter as Turbulence Transducer", P. A. S. C. E., E. M. Div., EM 6, P. 1307 (1969)
- (11) Tsao, G. T. & Kempe, L. L. ; "Oxygen Transfer in Fermentation Systems - I. Use of Gluconic Acid Fermentation for Determination of Instantaneous Oxygen Transfer Rates" J. Bioch. & Microbiol. Tech. & Eng., Vol II, No.2, P.129 (1960)
- (12) Phillips, D. H. & Johnson, M. J. ; "Aeration in Fermentations" J. Bioch. & Microbiol. Tech. & Eng. Vol. III, No.3, P.277 (1961)
- (13) Borkowski, J. D. & Johnson, M. J. ; "Experimental Evaluation of Liquid Film Resistance in Oxygen Transport to Microbiol. Cell" Appl. Microbio., Vol.15, No.6, P.1483 (1967)
- (14) Zetelaki, K. & Vas, K., ; "The Role of Aeration and Agitation in the Production of Glucose Oxidase in Submerged Culture" Biotechnol. & Bioeng. Vol.X P.45 (1968)
- (15) Lamb, J. C., Westgarth, W. C., Rogers, J. L. & Vernimmen, A. P. ; "A Technique for Evaluating the Biological Treatability of Industrial Wastes" J. W. P. C. F. Vol.36, No.10, P.1263 (1964)
- (16) Siegell, S. D. & Gaden E. L. ; "Automatic Control of Dissolved Oxygen Levels in Fermentations" Biotechnol. & Bioeng. Vol. IV P. 345 (1962)
- (17) Sawyer, C. N. & Nichols, M. S. ; "Activated Sludge Oxidations, I. Effect of Sludge Concentration and Temperature upon Oxygen Utilization" Sewage Works J. Vol.11, No.1, P.51 (1939)
- (18) Sawyer, C. N. & Nichols, M. S. ; "Activated Sludge Oxidations II. A Comparison of Oxygen Utilization by Activated Sludges obtained from Four Wisconsin Municipalities" Sewage Works J. Vol. 11, No.3, P.462 (1939)
- (19) Hixson, A. W. & Gaden, E. L. ; "Oxygen Transfer in Submerged Fermentation" Ind. & Eng. Chem. Vol.42, No.9 P.1792 (1950)

- (20) 杉木昭典, 松尾友矩, 桜井国俊; "活性汚泥が酸素移動におよぼす影響" 第4回衛生工学研究
討論会, P.1 (1967)
- (21) Brierley, M. R. & Steel, R. ; "Agitation - Aeration in Submerged Fermentation" Appl. Microbiol. Vol. 7,
P. 57 (1959)
- (22) Bennett, G. F. & Kempe, L. L. ; "Oxygen Transfer Mechanisms in the Gluconic Acid Fermentation by
Pseudomonas Ovalis" Biotechnol. & Bioeng. Vol. VI, P. 347 (1964)
- (23) Tsao, G. T. ; "Oxygen Absorption in Microbiological Systems of Zero Order Reaction Rate" Biotechnol. &
Bioeng. Vol. XII, P.51 (1970)
- (24) 松尾友矩, 太田博; "浮遊物質濃度の呼吸速度におよぼす影響" 土木学会第25回年次学術講演
会, II-149, P.423 (1970)

以上