

京都大学工学部 工博 正 員 合 田 健

〃 正 員 中 西 弘

〇 〃 工修 学生員 宗 宮 功

§ 1. 緒 論

本研究では、下水の浄化機構のうち流入基質の除去反応について、Conventional法を主体としたが、設定条件として反応をより簡明に表示するためにも、(1)ばつ気そうは押し出し流れ型であり、基質と汚泥とは同一流動を示す。(2)流入水質・水量については、一日の平均値を対象とする意味から日変化はない。(3)ばつ気は好気性反応を維持するに十分でありかつ汚泥を浮上さすに十分な攪拌力を有することとした。

下水の汚染度をBOD₅あるいはSSとして示すが、それぞれ総括的汚染指標として用い、さらに、浄化プロセスに流入する基質を溶解性基質と浮遊固形性基質とに分割して検討する。浮遊固形物については、ばつ気そうの混合攪拌や最終沈殿池での沈降過程で汚泥に混入し、Sludge Ageに近い時間のばつ気をうける。一方溶解性基質は、ばつ気そうでの微生物反応により除去されるものが主であろう。

多くの場合、下水量や水質はかなりの日変動を示し、これに応じて微生物群の変化や活性度変化が認められる以上、浄化プロセスの理論的考察は困難であるが、本研究では総括的な浄化機構を追求する意味で、(1)浄化過程の数式表示、(2)浄化限界、(3)操作因子についての検討などを研究の主目標とした。

§ 2. 溶解性基質の除去反応

微生物群による除去式として、すでに各種提示されているが、ここでは基質が高濃度域から低濃度域まで成立するとされているMichaelis-Menten型の式を中心として考察する。

(1) 高濃度域における除去反応

基質減少表示はMichaelis-Menten型の式を、また汚泥の増減には汚泥に関する収支式を用いると、それぞれ次のように示される。

$$(dL/dt) = -(k_n L S) / (k_m + L) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$(dS/dt) = -a (dI/dt) - k_3 S \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで a 、 k_n 、 k_m 、 k_3 は定数、 L は溶解性基質濃度、 S は活性汚泥濃度を示す。基質の時間変化を知るため、両式から S を消去すると、

$$(L^2 + k_m L) (d^2 L / dt^2) - k_m (dL / dt)^2 - \{ (a k_n - k_3) L^2 - k_3 k_m L \} (dL / dt) = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

となる。1階積分して、定数に $C = (dL/dt)_{t=0}$ を代入すると

$$(dL/dt) = (L / L + k_m) \{ -k_n S_0 - (a k_n - k_3) (L_0 - L) + k_3 k_m \log (L_0 / L) \} \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。さらに解析的に L を求めることはほぼ不可能で、右辺各項を比較してみる。

各定数につ　　は合田，中西¹⁾が示した結果から， $k_n \div 0.07 \sim 0.80$ ， $k_m \div 100 \sim 1000$ ， $a \div 0.4 \sim 0.7$ ， $k_3 = 0.006 \sim 0.0003$ を与え， $L_o = 100 \sim 1000$ ， $S_o = 1000 \sim 4000$ を与えると，

$$Y_1 = -k_n S_o \div -10^2, \quad Y_2 = -(ak_n - k_3)(L_o - L) \div 10^0 \sim 10^1$$

$$Y_3 = k_m \cdot k_3 \log (L_o/L) \div k_m \cdot k_3 \cdot \log (100) \div 10^0 \sim 10^{-2}$$

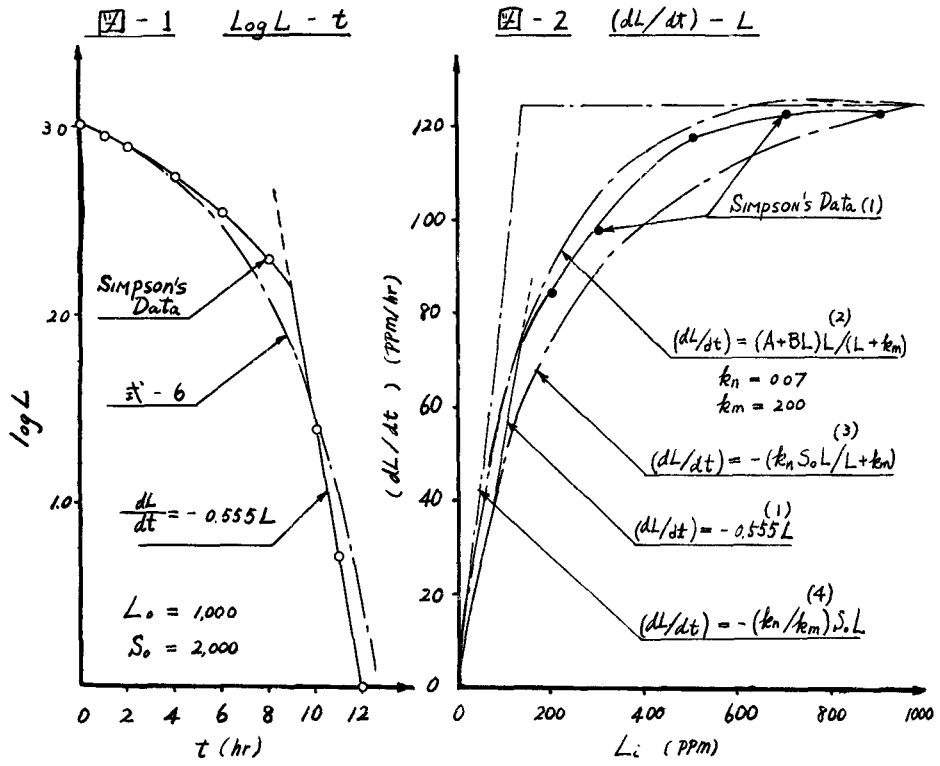
となり，結局 Y_3 を無視しても高々1%の誤差であろう。そこで式(4)はつぎのようになる。

$$(dL/dt) = (L/L+k_m)(A+BL) \dots\dots\dots (5)$$

ここで， $B = ak_n - k_3$ ， $A = -k_n S_o - (ak_n - k_3)L_o$
これを積分するとつぎのようになる。

$$(L/L_o)\{(A+BL)/(A+BL_o)\}^{-(1-\frac{A}{k_m B})} = \exp [At/k_m] \dots\dots\dots (6)$$

Simpson²⁾がグルコースを基質とした場合の基質時間変化図を示しているが，これは図-1のごとく高濃度の1000 (ppm) からの基質変化である。基質が150 ppm までで反応が異なっているが，



150 ppm 以上を対数増殖期，150 ppm 以下を増殖減衰期と説明している。式(6)に $k_n = 0.07$ (BOD ppm/hr/ssppm)， $k_m = 200$ (ppm)， $k_3 = 0.004$ (1/hr)， $a = 0.6$ を与え，濃度変化を示すと図-1中の式(6)曲線となり，Simpson の結果とかなりよく一致している。汚泥の基質除去速度を求めてみると図-2となる。これには Simpson のデータから推定した曲線(1)，式(6)より求めた曲線(2)，Michaelis-Menten 式示で $S = S_o$ とした曲線(3)，2相説から求まる曲線(3)を示した。Simpson

の結果は式 (6) から求めた基質除去速度とかなりよく一致している。結局，高濃度域において 70 ～ 80 % の除去率を求めようとする場合，汚泥の増加にともなう除去速度の増加を考えれば，Michaelis-Menten型の式で近似できる。また低濃度域においては，1 次反応として除去速度を示しても，かなりよい近似ができることが図 - 2 から知られる。

(ii) 低濃度域における除去反応

溶解性基質濃度の消滅速度を一次式として示す。 $(dL/dt) = -k_1SL$ (7)

低濃度域においては，基質除去が反応開始後数 10 分間に主体があることや基質の分解反応は水中からの基質消滅時間よりややおくれる⁴⁾ ことから，式(7)を $S = S_0$ 。(ばつ気そう流入部 MLSS)として積分し， $t = 0$ で $L = L_b$ とすると， L_r を返送汚泥上澄液基質として

$$L = L_b \exp [-S_0 t] \dots\dots (8), \quad L_b = (L_i + rL_r)/(1+r) \dots\dots\dots (9)$$

となる。今福処理場でえた値では， $m_2 = (L_r/L_i)$ は，平均 1.00 を示した。

一方返送汚泥は自家呼吸によつて分解し，溶解性基質や微細なフロックとして水中に放出されると考えられる。汚泥の分解速度は汚泥濃度に比例するとし，汚泥の減少は

$$(dS/dt) = -k_3S \dots\dots (10), \quad S = S_0e^{-k_3t} \dots\dots\dots (11)$$

となる。ここで k_3 は自家呼吸係数である。単位汚泥が分解し，水中に放出する溶解基質量を b' として示すと，汚泥分解により加わる基質量の時間変化は

$$(dL/dt) = k_3b'S_0 \exp [-k_3t] \dots\dots\dots (12)$$

となる。この基質も汚泥により再利用されるとすれば，基質除去式はつぎのようになる。

$$(dL/dt) = -k_1S_0L + k_3b' \exp [-k_3t] \dots\dots\dots (13)$$

積分し，ばつ気そう滞留時間 $t_a = V/(1+r)Q$ における基質濃度 L_f は

$$L_f = L_b \exp [-k_1S_0 t_a] + \frac{b'k_3S_0}{k_1S_0 - k_3} (\exp [-k_3t_a] - \exp [-k_1S_0 t_a]) \dots\dots\dots (14)$$

となる。この式よりばつ気そうを流出する溶解性基質の濃度を推定できる。

表 - 1 k_1 値

実験者 (文献)	(1/hr , ssppm)
Weston (5)	4.15×10^{-4}
Simpson (2)	$(2.62 \sim 5.49) \times 10^{-4}$
合田, 北井 (6)	$(3.61 \pm 0.69) \times 10^{-4}$
神山 (3)	$0.1695 \sim 0.338$ (1/hr)
Chicago Pump (7)	$(4.58 \sim 13.7) \times 10^{-4}$
藤原 (8)	1.25×10^{-3}
今福でのデータ	5.16×10^{-4}

表 - 2 k_2 値

実験者 (文献)	(1/hr)
McCarthy (9)	7.5×10^{-3}
Weston (5)	6.96×10^{-3}
村田 (10)	$(4 \pm 2) \times 10^{-3}$
Barnhart (11)	$(9.58 \sim 11.46) \times 10^{-3}$
Chicago Pump (7)	2.08×10^{-3}
Eckentelder (13)	$(5.33 \sim 4.40) \times 10^{-3}$
McCabe (12)	$(1.5 \sim 2.14) \times 10^{-3}$

式 (14) にみられる各定数について考察してみる。 k_1 について一般都市下水もしくはグルコースに対する値を調べると表-1 となる。 k_1 のオーダーは 10^{-4} であり、代表値として 5.16×10^{-4} をとる。 k_3 については表-2 がえられた。 k_3 のオーダーは 10^{-3} と考えられ、 $k_3 = 4 \times 10^{-3}$ を代表値とする。 b' 値を単位汚泥のもつ BOD から自家呼吸量を差引いたものとする、 $k_3 = 0.004$ として $b = 1.412 (1 - \exp[-0.004 \times 2.4 \times 5]) \div 0.54$ となる。

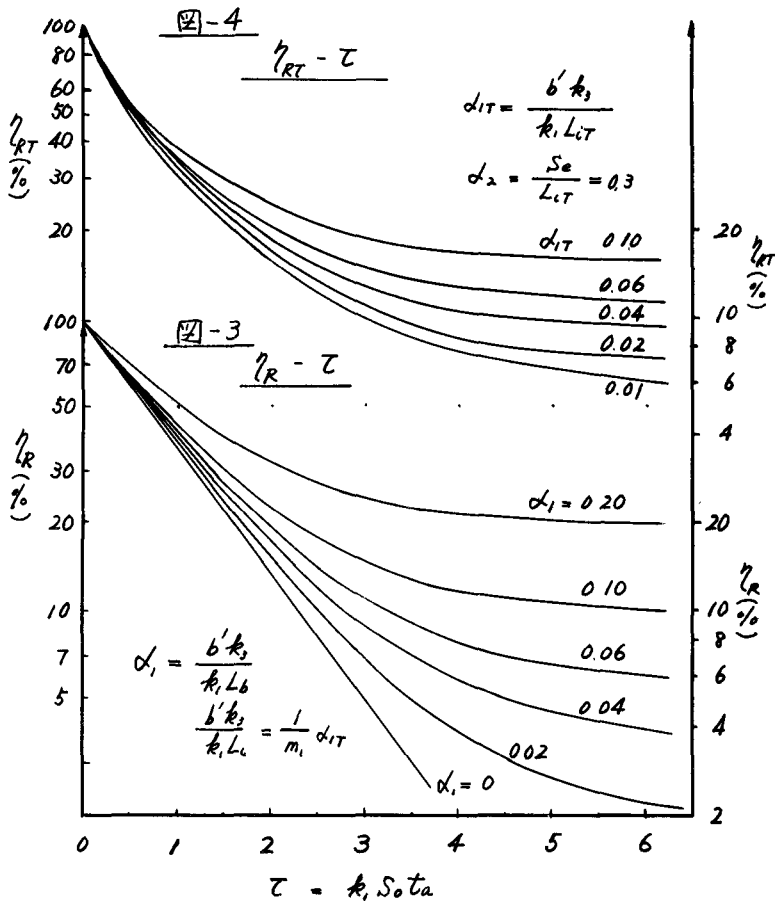
いま、 k_1, k_3, b' を代表値として式 (14) を近似すると、

$$L_f = \frac{b'k_3}{k_1} + (L_b - \frac{b'k_3}{k_1}) \exp[-k_1S_0t_a] \quad \dots\dots\dots (15)$$

となる。これより残存率 (η_R) を (L_f/L_b) として求めると次のようになる。

$$\eta_R = \frac{b'k_3}{k_1L_b} + (1 - \frac{b'k_3}{k_1L_b}) \exp[-k_1S_0t_a] \quad \dots\dots\dots (16)$$

$\alpha_1 = (b'k_3/k_1L_b) \div (b'k_3/k_1L_i)$ をパラメーターとして、 $\tau = k_1S_0t_a$ と η_R との関係を図示すると図-3 をうる。これより τ が 5 以上となれば、溶解性基質の減少はほとんど期待できないことが知られ、 $\tau = 5.0$ ていどが溶解性基質に関する操作限界となろう。



§ 3 最終沈殿池流出水（放流水）の基質濃度

最終沈殿池における溶解性基質の挙動は、いまだ理論的説明が加えられていないが、今福のパイロットプラントのデータから、ばつ気そう流出水基質濃度 L_f と放流水 L_e との関係をみると、 $L_e = k_e L_f$ と近似され、 $k_e = 1.05$ となり若干放流水の方が高い結果となつた。

放流水中の基質濃度を表わす場合、放流水の SS (S_e) を考えねばならない。放流水の SS 単位量あたりの BOD 値 (ξ_e) については、鳥羽のデータから平均 $\xi_e = 0.271$ を得た。放流水中の Total BOD を L_{eT} と示すと、式 (15) からつぎのように示される。

$$\begin{aligned} L_{eT} &= L_e + \xi_e S_e = k_e L_f + \xi_e S_e \\ &= \xi_e S_e + k_e L_b \{ \alpha_1 + (1 - \alpha_1) \exp [-k_1 S_o t_a] \} \quad \dots\dots\dots (17) \end{aligned}$$

一方、ばつ気そうに流入する沈後水の Total BOD を L_{iT} と示すと、Over all の残存率 (η_{RT}) は

$$\eta_{RT} = (\alpha_{iT} + \frac{\xi_e S_e}{L_{iT}}) + k_e \{ m_1 (\frac{1+m_2 r}{1+r}) - \alpha_{iT} \} \exp [-k_1 S_o t_a] \quad \dots\dots\dots (18)$$

となる。ここで $\alpha_{iT} = (b'k_3/k_1 L_{iT})$ 、 $m_1 = (L_i/L_{iT})$ 、 $m_2 = (L_f/L_i)$ である。 m_1 、 m_2 については鳥羽のデータから $m_1 \div 0.692$ 、 $m_2 \div 1.00$ を用いる。式 (18) はつぎのように変形される。

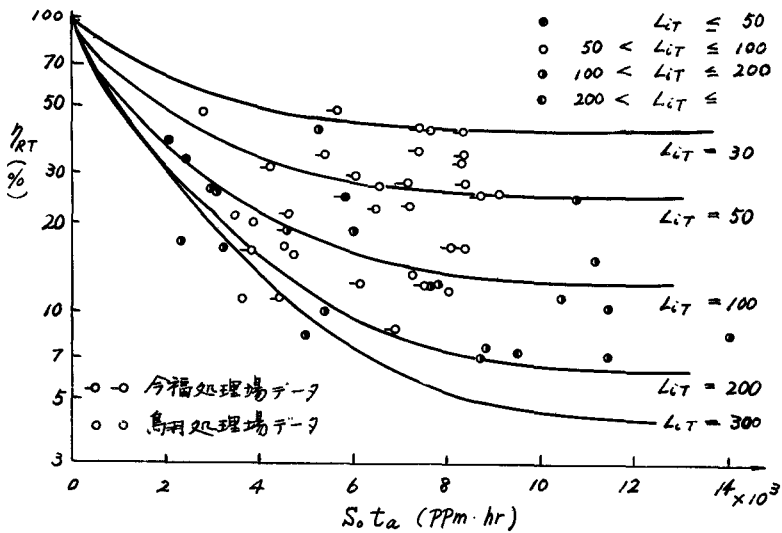
$$\begin{aligned} \eta_{RT} &= 1.05 \alpha_{iT} + 0.271 (\frac{S_e}{L_{iT}}) \\ &\quad + 1.05 (0.692 - \alpha_{iT}) \exp [-k_1 S_o t_a] \quad \dots\dots\dots (19) \end{aligned}$$

いま (S_e/L_{iT}) を 0.3 ていどと考えると、 η_{RT} と α_{iT} との関係は図 - 4 となる。

α_1 をパラメーターとする溶解性基質除去図と比較してみると、図 - 4 では曲線が τ の増加につれなめらかとなつており、 $\tau = 4.0$ 以後における除去はそれほど望めないことが知られる。これは図 - 3 における $\tau = 5.0$ 以後の傾向とよく似ている。したがつて SS の除去効果を考慮すれば、 $\tau = 4.0$ ていどに操作限界があることが知られ、図 - 3 より限界は狭くなつてくる。

いま式 (18) に各定数の代表値を入れ L_{iT} をパラメーターとする $S_o t_a - \eta_{RT}$ の関係を示すと図 - 5 となる。ここで放流水 SS については (S_e/L_{iT}) = 0.3 を与えた。この図から Total BOD L_{iT} が高いほど残存率は少なくなるが、放流水中基質濃度は L_{iT} に無関係にほぼ

図 - 5 基質残存率におよぶ初期濃度の効果



BOD₅ が 12.5～13.0 ppm と示され、放流水基質濃度の限界に差はみられない。また同図中に今福ならびに鳥羽処理場でパイロットプラントにてえたデータを記した。かなりのばらつきが認められるが、代表値をもとに理論式で得た曲線傾向にかなり近いことが知られる。

§ 4 操作因子としてのBOD 負荷率 (kg BOD/day/kg SS)

活性汚泥法の設計ならびに操作管理上の主要示標として、Sludge Age SVI、BOD負荷率(kg BOD/day/kg SS) などがあり、溶解性基質の除去を主体とする反応を考える場合 BOD 負荷率が問題となる。

Conventional 法等における BOD 負荷は、施設管理指針として 0.20～0.40 (kg BOD/day/kg SS) の値が示され、平均値として 0.35 前後で操作すれば最も良好な運転成績がえられると示している。大橋¹⁴⁾も各地の処理場データから、0.30 前後で良好に運転されていると示している。しかし、このように BOD 負荷という因子が直線的に浄化度に関与するかどうかあるいは是認されている BOD 負荷率 0.35 の値を与えれば、他の操作条件がどんなに変化しても成立するものかなど問題であり、検討する必要がある。

ここで、都市下水を対象とする以上、低濃度域における反応を考えれば十分と考えられる。いま式 (18) で反応を示し、BOD 負荷率の浄化に与える効果を検討してみる。

1 般に BOD 負荷率 (B_LT)は次式で示される。

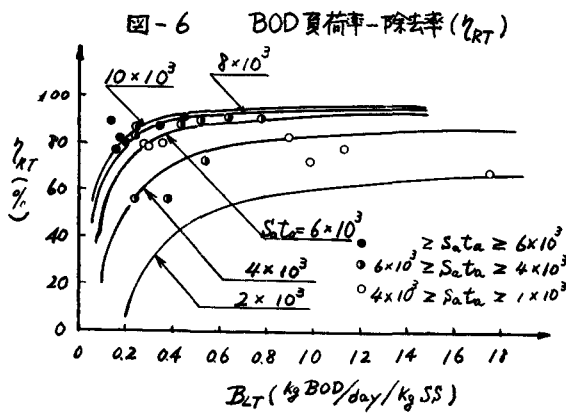
$$B_{LT} = (Q \cdot L_{iT} / V \cdot S_a) \dots\dots\dots (20)$$

ここでQは沈後水でばつ気そう流入水量 (m³/月)であり、S_aはMLSS、Vはばつ気そう容積、L_iTは沈後水のTotal BODを示す。ここでt_a (hr) = (V/Q) × 24 として示すと、Total BOD L_iTはL_iT = (t_a · S_a · B_LT) / 24 となり、式 (18) に代入すると、基質の除去率 (η_{ET})は

$$\eta_{ET} = 1 - \left\{ \frac{25.2}{B_{LT} \cdot S_a t_a} \left(\frac{bk_3}{k_1} \right) + \frac{6.5 S_e}{B_{LT} \cdot S_a t_a} \right. \\ \left. + 1.05 \left\{ m_1 - \frac{24}{B_{LT} \cdot S_a t_a} \left(\frac{bk_3}{k_1} \right) \right\} \exp [-k_1 S_o t_a] \right\} \dots\dots\dots (21)$$

となる。

いま放流水中 SS 濃度 (S_e)については、正常に運転されている処理場では高々 S_e = 30 (ppm) ていどであると仮定し、前節で用いた各定数 k₁ = 5.16 × 10⁻⁴、k₃ = 4 × 10⁻³、b' = 0.54 を代入する。ここで、S_a ≡ S_o と考え、S_at_a をパラメーターとして、除去率 (η_{ET})と B_LT との関係を示すと図-6となる。B_LT の増加とともに除去率が増加する傾向がみられ、さらに S_at_a の増加につれ η_{ET} も増加している。また各地の処理場で得られた



24時間連続試験データを $S_a t_a$ で区分けして図示した。区別しない場合には、大橋¹⁴⁾が指摘するごとく BOD 負荷率が 0.2 ~ 0.5 くらいで良好な結果がえられている様子がうかがわれるが、理論曲線のごとく $S_a t_a$ でデータを区別してみると実測データは理論曲線とかなりよい一致を示していることが知られる。この図から、 η_{ET} を 80 ~ 90% に保つためには、BOD 負荷だけでなく $S_a t_a$ を与えねばならず、たとえば BOD 負荷を 0.35 と与えても $S_a t_a$ を約 6×10^3 以上としなければ求める結果が得られない事が知られる。

§ 5 結 論

Conventional 法およびこれに近い変法で都市下水を処理する場合の基質除去機構について、反応を数式表示しそこにみられる操作因子について検討を加えた。えられた結果は

- (1) 高濃度域では、汚泥の増加を考慮すれば、Michaelis-Menten 式でうまく近似できる。
- (2) 溶解性基質低濃度域処理では、ほぼ 1 次反応式で反応が近似される。なお、浄化限界は汚泥の自家呼吸量に左右されるが、およそ 4 ~ 10 ppm くらいと考えられる。
- (3) 溶解性基質のばつ気そうにおける除去は $r = k_1 S_a t_a$ が 5 の値で限界となるようであり、 $r \geq 5$ としても高い浄化は期待できない。
- (4) 総括除去率からみると、ばつ気そう操作条件は $r \leq 4$ で十分と考えられる。
- (5) 設計因子としての BOD 負荷率は、単独で与えるより、 $S_a t_a$ 値を同時に与え検討する必要がある。

などである。本研究に関し協力をえた当研究室大学院生李錦栄君に感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 合田・中西：東大阪地域および大・中・小都市下水処理場・処理方式決定までの第 2 期調査（1966）,
- (2) Simpson, J. R., : J. Inst. Sew. Purif., (p171, 1965),
- (3) 神山桂一：第 1 回衛生工学研究討論会講演論文集（1964）,
- (4) 合田・中西：文献(3)と同じ,
- (5) Weston, R. F., 他：Proc. A. I. Ch. E. Annual Meeting (Feb. 1963),
- (6) Ludwig, H. F., Waste Water Treatment Process, Chicago Pump (1960),
- (7) 藤原正弘：京大修士論文（1966）,
- (8) McCarty, P. L. 他：J. W. P. C. F. vol 34, (1962),
- (9) 村田他：久保田鉄工所水道研究所報告 Vol 3 (1964),
- (10) Barnhart, E. L : Proc. of the Sixteenth Industrial Waste Conf. (May, 1961),
- (11) McCabe 他：J. W. P. C. F. Vol 33 (1961),
- (12) Eckenfelder, W. W. 他：Biological Waste Treatment, Pergamon Press (1961),
- (13) 大橋文雄 京大学位論文（1961）