

(2) 活性汚泥の浄化機構に関する研究

京都大学工学部

宗宮 功

//

○河村 清史

//

安福 秀章

//

粕谷 明博

1 はじめに

活性汚泥による下水の浄化過程を把握する場合、一方では基質としての下水の評価をどうするかという問題があり、他方では反応主体である活性汚泥をどう評価するかという問題がある。前者については、すでに基質の酸化の際のエンタルピー変化量と BOD, CODcr の関係から、下水中の有機物は微生物への栄養としては、溶解性のものと浮遊性のものとは差のないことを明らかにしている¹⁾。

本論文では、最初沈澱池を経てエアレーションタンクに入る下水中にもなお多量に存在するこのような浮遊性有機基質をも考慮した活性汚泥の浄化機構を、デオキシリボ核酸 (DNA) を生命体量指標とすることによって検討する。

2 活性汚泥の量と質の指標

従来、活性汚泥の量ならびに質の把握を行なう場合、種々の指標が採用されてきた。各種指標を微生物の代謝過程との関連でまとめると図-1 のようになる。これらの指標のいずれを用いるかは、どのような情報を得たいかという目的によって異なることは自明である。

各種の指標の経時変化を単純な系である活性汚泥の好氣的消化過程における浮遊性部分について示したものが図-2 である。

使用した汚泥は、〇市終末処理場の返送汚泥を 297 μ のふるいを通して砂やゴミを除去したものである。この汚泥を水道水で数回洗浄後、空ばっ気し、適宜採水して測定した。このデータにもとづいて得られたのが図-2 の各曲線群である。なお、pH はリン酸緩衝液によって中性付近に保ち、水温は恒温室内で実験を行なうことによって約 23°C に保った。蒸発水量の補正は、採水直前に水道水を蒸発量分添加することによって行なった。

図-2 とすでにわかっている各指標の生物化学的意義とから、これらは以下のように分類できる。

i) 汚泥全体の挙動をしめす指標… SS, VSS, COD

これらは汚泥量を一括してとらえるもので、SS が有機物と無機物を含むのに対して、VSS や COD は主として有機物をあらわす。いずれもほぼ同じパターンで減少している。

ii) 生命体をしめす指標… DNA

生命体に不可欠の成分であり、図-1 にしめした指標の中では、もっともよく生命体量を表現していると思われる。初期にはいく分の増加をしめし、その後徐々に減少している。

iii) 生物活性をしめす指標… ATP, 酸素消費速度, RNA

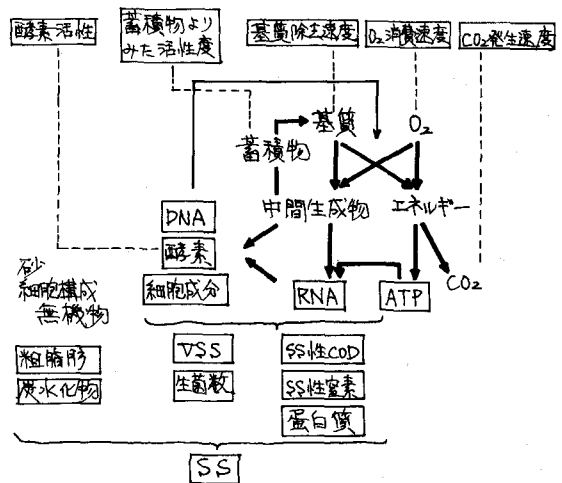


図-1 活性汚泥の量と質の指標

生物の時々刻々の活性をしめす指標と考えられるが、時間経過とともに著しく低下し、一定値に近づく傾向にある。RNAは前二者ほど大きな低下はないが、同様の傾向をしめしている。

- IV) その他…有機性窒素、蛋白質、炭水化物
これらは、細胞中に高い割合で存在するもので、炭水化物は初期に急激に減少し、I)とよく似ている。また、蛋白質はいく分DNAのパターンと似ているが、有機性窒素は蛋白質と類似ではない。

このような指標の変化は、従来のように好気性消化過程を微生物の減少を伴う自己分解過程とのみ解することに異論をはさむ余地を与える。

DNAとCODの挙動に着目すると、この過程は明らかにつぎの2つの部分に分けられることがわかる。

- 1) CODの減少が大きく、DNAはあまり変化しないか、幾分増加する部分。
- 2) CODの減少とDNAの減少がほぼ平行している部分。

この事実と、先にふれた浮遊性有機基質の活性汚泥への付着あるいは吸着を考えると、好気的消化過程は、汚泥中に未だ代謝されていない浮遊性有機基質が存在し、初期の間はこれを代謝しているが、それが終了した段階からは、微生物の死滅減少を伴う自己分解過程のみが進行するものと仮定しうる。

3 新しい浄化モデルの考え方

上に述べた仮定に基づいて、活性汚泥の浄化機構を考えるならば、汚泥量を生物量のパラメータとして液相からの基質除去を考える従来の浄化モデルにかわって、汚泥そのものを生物と非生物とに分離して考える浄化モデルが必要ながことが明らかである。

あるバッチ状態の系で有機物が浄化されている場合を考えると、その系での有機物の変化量は概念的には(1)式によって表現できる。

$$(\text{系内の有機物の変化量}) = (\text{溶解性有機基質の代謝による変化量}) + (\text{浮遊性有機基質の代謝による変化量}) + (\text{生物の増減に伴う生物性有機物の変化量}) \quad (1)$$

ただし、有機物量は右辺の3項の有機物を等しく表現しうる重クロム酸カリウムCODで評価する。

生物量がDNAで代表されると考えることによって、生物量の増減はDNAの増減で表現することができるが、これは(2)式で表現できる。

$$(\text{DNAの変化量}) = (\text{溶解性有機基質の代謝によるDNAの変化量}) + (\text{浮遊性有機基質の代謝によるDNAの変化量}) + (\text{自己分解によるDNAの変化量}) \quad (2)$$

4 モデルの確立

前節で述べた概念表現(1)式、(2)式を数学的に表現するために、いくつかの実験を行なって必要な情報を得た。

以下に、検討を加えた順に従って実験方法、諸係数の決定方法等を述べる。

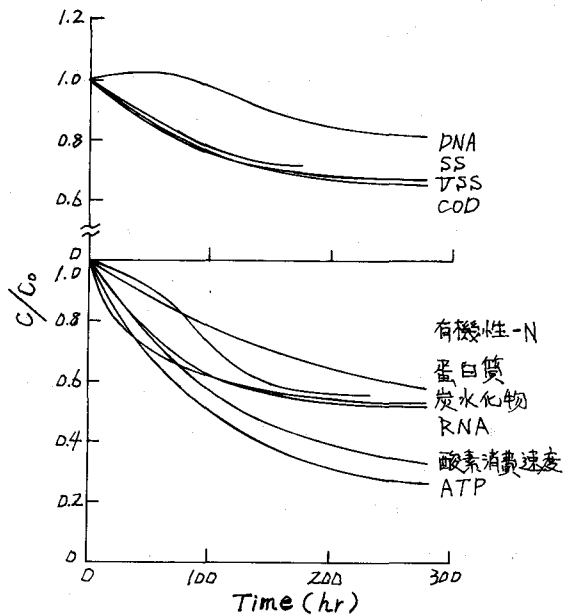


図-2 好気的消化過程における指標の変化

4-1 浮遊性有機基質の代謝と自己分解

浮遊性有機基質の代謝過程と自己分解の過程を検討する。

4-1-1 実験方法

使用した汚泥は、〇市終末処理場返送汚泥 (Run I) ならびに、京都大学工学部衛生工学科所属の水質汚濁シミュレーション設備で運転中の活性汚泥プラント (都市下水利用) のばっ気槽汚泥 (Run II, Run III) である。

各汚泥は 297 μ のふるいで砂やゴミを除去した後、水道水で数回洗浄した。浮遊性有機基質の補強のために、Run I No. 1 では処理場流入水を静置した後の沈澱物を Run II No. 3, No. 4 ではパイロットプラントの生汚泥を 297 μ のふるいでろ過し、数回水洗して添加した。

これらの汚泥ならびに下水沈澱物を適量水道水中に入れ、全量を 20 l として、35 l ポリバケツ中で空ばっ気した。

なお、水温は実験を恒温室で行なうことによって約 22~25 $^{\circ}\text{C}$ の間に保ち、有機物代謝や硝化による pH 変動を避けるため、リン酸緩衝液を添加し、pH を 7~8 の間に保った。さらに蒸発量は水道水で補正した。

以上の条件下で、各 Run とも約 300 時間の空ばっ気を行ない、10 回前後の採水を行なった。

4-1-2 測定項目と測定方法

有機物量を把握するために、重クロム酸カリウム法による COD を採用した。サンプルそのものの COD と、これを東洋濾紙 No. 5c で濾過した濾液の COD を測定し、この差を汚泥の COD とした。

生命体量を把握するために、各サンプルについてデオキシリボ核酸 (DNA) を測定した。これは金子²⁾ が活性汚泥中の核酸測定用に採用した方法によって、核酸の精製抽出を行ない Burton の変法によって測定した。

4-1-3 結果と考察

得られた結果の一部を図-3 にしめす。このうちの Run I No. 2 のデータが図-2 に利用されているが、COD と DNA の変化パターンは他の場合も同様になることがわかる。とくに、Run II No. 3, No. 4 には多量の生汚泥が入っており、DNA の増加傾向が著しい。

汚泥量の減少を微生物の自己分解とみなした従来の概念では十分説明できないことを示すとともに、浮遊性有機基質の代謝が無視しえないことを示している。

得られたデータにもとづいて浮遊性有機基質の代謝過程と、真の意味での自己分解過程とを検討するが、つぎの2つの仮定を設ける。

- i) 活性汚泥の COD は DNA に基づいて定まる生物性 COD と、全 COD とこれとの差である浮遊性有機基質 COD (以下、基質 COD) とから成る。
- ii) 汚泥のみの場合、長時間ばっ気していくと、COD と DNA の減少カーブがほぼ平行になるが、このとき COD はすべて生物性 COD とする。

以下において段階的に検討を加えるが、元デ

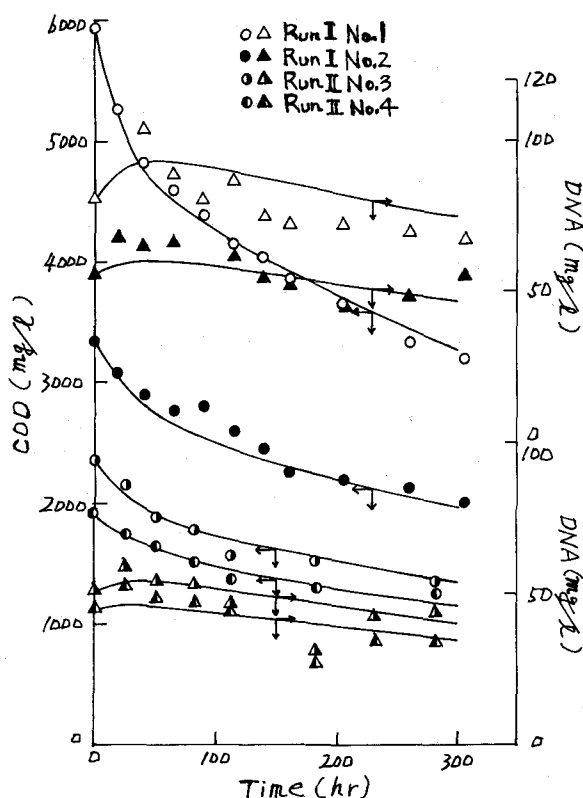


図-3 好氣的消化過程における COD と DNA の変化

ータは幾分バラツキがあるので、これらを基にして曲線を描き、外挿で求めたデータを使用する。また、Run II No. 3, No. 4 の2つのケースについては、多量の生汚泥を加え、他と幾分様子を異にするので、別途に考察する。

〈単位 DNA あたりの生物性 COD〉

返送汚泥のみ、あるいはばっ気槽汚泥のみの4ケースについて DNA/COD を求め、150 時間前後経過した後の平均をとると表-1 のようになる。

仮定 ii) に従って、DNA/COD が 0.03 であるとき、活性汚泥は浮遊性有機基質を保持しておらず、この比率が微生物の DNA/COD であるとみなす。このとき、DNA 1 mg/ℓ が COD 33.3 mg/ℓ に相当する。Run I No. 2 について COD/VSS を求めると DNA/COD が 0.03 のとき約 1.4 であり、DNA/VSS は 4.2 % となる。これは金子²⁾ が純菌の値として示している 4.1 % に近い。

〈基質 COD〉

仮定 i) により、各測定時の全 COD から DNA/0.03 によってもとまる生物性 COD を引くことによって基質 COD をもとめる。この基質 COD は 100 時間までにほぼなくなる。

基質 COD は COD に関する一次反応のパターンで代謝されるとすると、その過程は

$$dC_{21}/dt = -k_{21} \cdot C_{21} \cdot \text{DNA} \quad (3)$$

で表現される。ここに、 C_{21} は浮遊性有機基質 COD、 k_{21} は C_{21} の代謝速度定数である。

各実験について、初期3点を利用し、 C_{21} と DNA の積を横軸に、 $-dC_{21}/dt$ を縦軸にプロットすると図-4 をうる。これより、 $k_{21} = 6.3 \times 10^{-4}$ (1/DNA mg/ℓ · hr) がえられる。

〈自己分解〉

従来、空ばっ気下の汚泥の変化を自己分解と称してきたが、ここでは、約 150 時間空ばっ気後の COD と DNA がほぼ平行して減少する段階を微生物のみが減少する段階とみなし、この過程を自己分解過程と考える。

DNA の自己分解は DNA について一次反応であると仮定すると、(4)式で表現できる。

$$d\text{DNA}/dt = -k_3 \cdot \text{DNA} \quad (4)$$

ここに、 k_3 は自己分解速度定数である。

浮遊性基質を補強した Run II No. 3, No. 4 を除いた場合について、150 時間目と 250 時間目の DNA の平均値を横軸にとり、その間の DNA の変化速度のマイナス値つまり $-d\text{DNA}/dt$ を縦軸にとれば図-5 を得る。これより自己分解定数 $k_3 = 1.22 \times 10^{-3}$ (1/hr) を得る。

〈基質 COD 減少量から合成 DNA への転換〉

基質が代謝されていく過程で、基質の一部が新たな微生物を形成するが、これを DNA の増加としてとらえ、転換率をもとめる。

各実験において、一つ前の時刻の DNA が自己分解で減じたとした時の DNA を採水時の DNA から減じた差をその間に合成された DNA とみなす。この値をその間の基質 COD 減少量に対してプロットすると図-6 を得る。これより

$$\text{合成 DNA 量} = 0.011 \cdot \text{基質 COD 減少量} \quad (5)$$

の関係が成り立ち、微生物についての DNA/COD は 0.03 であるから、COD 量で表現すると(6)式になる。

表-1 長時間ばっ気後の DNA/COD

実験番号	DNA/COD
Run I No. 2	0.0300
Run II No. 1	0.0293
Run II No. 2	0.0295
Run III No. 1	0.0302

注) Run I No. 1 は 0.0300

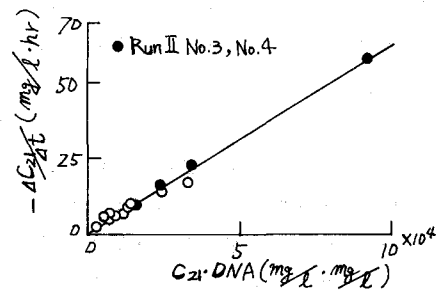


図-4 k_{21} の決定

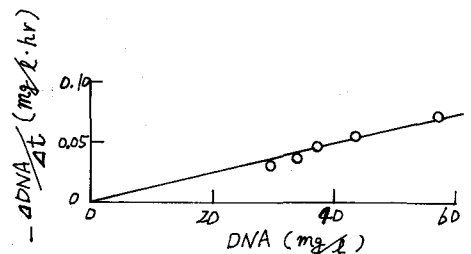


図-5 k_3 の決定

合成生物性 COD 量 = 0.37・基質 COD 減少量

(6)

〈代謝されにくい基質 COD〉

多量の生汚泥を加えた Run II No. 3, No. 4 の基質 COD を片対数紙上にプロットすると図-7 を得る。これによると基質 COD の減少が2つの過程から成っている。

いま、基質 COD の中に代謝されやすい部分と、代謝されにくい部分があると考え、図中斜線部を前者とし、後半は後者のみが代謝されるとする。前者はこれまでのべた基質 COD と同様の部分と考えられ、そのようにみなした時の結果が図-4、図-6 の黒丸である。

この代謝されにくい基質 COD も一次反応に従って減少すると仮定すると、

$$dC_{22}/dt = -k_{22} \cdot C_{22} \cdot \text{DNA} \quad (7)$$

で表わされる。ここに、 C_{22} は代謝されにくい浮遊性有機基質 COD、 k_{22} は C_{22} の代謝速度定数である。

図-7 の後半部の2点の COD と DNA それぞれの平均値の積で、その間の COD の変化速度のマイナス値を除すと、 $2.79 \times 10^{-5} \text{ (1/DNA mg/l} \cdot \text{hr)}$ と $2.88 \times 10^{-5} \text{ (1/DNA mg/l} \cdot \text{hr)}$ が求まる。データが2つしかないが、これらの平均値である $2.84 \times 10^{-5} \text{ (1/DNA mg/l} \cdot \text{hr)}$ を k_{22} とする。 k_{21} の 1/10 のオーダーである。

Run II No. 3, No. 4 以外の場合は、代謝されにくい基質 COD を考慮する必要がなかったことからわかるように、通常の沈後水について考察する場合は $C_{22} \equiv 0$ と考えられると思う。

以上の考察より、浮遊性有機基質を保持している活性汚泥について、(3)(7)式とつぎにしめす(8)式からなる連立微分方程式が成立すると考えられる。

$$d\text{DNA}/dt = \alpha \cdot k_{21} \cdot C_{21} \cdot \text{DNA} + \alpha \cdot k_{22} \cdot C_{22} \cdot \text{DNA} - k_3 \cdot \text{DNA} \quad (8)$$

なお、 α は基質 COD 減少量の合成 DNA 量への転換率である。

また、浮遊物の全 COD を C とすると、これは

$$C = C_{21} + C_{22} + \beta \cdot \text{DNA} \quad (9)$$

で表現できる。ここに、 β は DNA の COD への変換係数である。

表-2 に示すような諸数値を利用し、各パラメータの初期値を与えて、(3)(7)(8)式の連立微分方程式の数値解を RUNGE-KUTTA 法でもとめたが、図-3 に合わせてしめす。ケースによっては、いく分あわないところがあるが、大略、実験結果を説明しうる。

4-2 溶解性有機基質の代謝

溶解性有機基質の代謝過程について検討する。

4-2-1 実験方法

O 市終末処理場流入水中の溶解性有機基質（東洋濾紙 No. 5c 濾液中の有機物をいう）の濃度はあまり高くないため、活性汚泥パイロットプラントの生汚泥を超音波で破碎し、遠心分離後の上澄液を東洋濾紙 No. 5c で濾過した時の濾液を溶解性有機基質を含む下水とみなした。

これをパイロットプラントのばつ気槽汚泥によって浄化するわけだが、浮遊性有機基質の影響を除くため

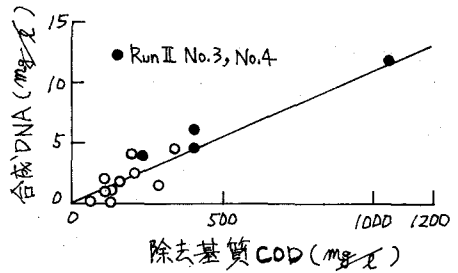


図-6 α の決定

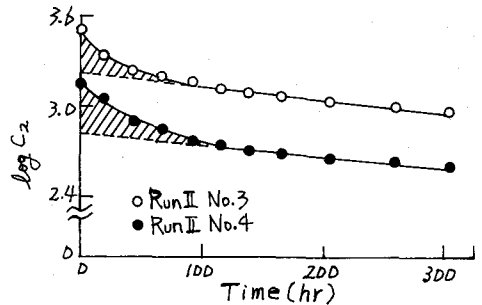


図-7 浮遊性有機基質 COD の変化

表-2 実験より求めた諸定数

定数	数値 (単位)
k_{21}	$6.30 \times 10^{-4} \text{ (1/DNA mg/l} \cdot \text{hr)}$
k_{22}	$2.84 \times 10^{-5} \text{ (1/DNA mg/l} \cdot \text{hr)}$
k_3	$1.22 \times 10^{-3} \text{ (1/hr)}$
α	0.011
β	0.03

に、実験前に300時間以上空ばっ気した。さらに、水道水で数回洗浄後、実験に供した。

上記の下水と汚泥を全量が2ℓになるように適当な割合で用意し、メスシリンダー中でばっ気混合し、完全に均一になったと思われる5～10分後を実験開始時として48時間まで適宜採水した。水温、pHならびに測定項目と測定方法は浮遊性有機基質の代謝実験の場合と同様である。

4-2-2 結果と考察

得られた結果を図-8に示す。CODの減少に対応してDNAがすばやく増加している。

〈溶解性COD〉

溶解性CODのうち、時間が経ても残余している部分は非代謝性のCODとみなし、各測定値よりこれを引いたものが代謝されると考える。溶解性CODについても一次反応に従うと仮定すると、

$$dC_1/dt = -k_1 \cdot C_1 \cdot \text{DNA} \quad (10)$$

と表現できる。ここに、 C_1 は非代謝CODを除いた溶解性COD、 k_1 は C_1 の代謝速度定数である。

浮遊性有機基質の場合と同様 $C_1 \cdot \text{DNA}$ を横軸に、 $-dC_1/dt$ を縦軸にとってプロットすると図-9をうる。これより、 $k_1 = 6.0 \times 10^{-3} \text{ (1/DNA} \cdot \text{mg} \cdot \text{ℓ}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1})$ をうる。

〈瞬時に除去される有機物〉

溶解性有機物のうち一部は瞬時に液相から除去されるが、DNAの合成量について検討することによって C_1 と同様の取り扱いをすべきことがわかった。これを C_1' とすると(10)'式が成立することになる。

$$dC_1'/dt = -k_1 \cdot C_1' \cdot \text{DNA} \quad (10)'$$

これにより、(10)(10)'式とつぎに示す(11)式から成る連立微分方程式が成立する。

$$d\text{DNA}/dt = \alpha \cdot k_1 \cdot C_1 \cdot \text{DNA} + \alpha \cdot k_1 \cdot C_1' \cdot \text{DNA} - k_3 \cdot \text{DNA} \quad (11)$$

(10)(10')(11)式によって行なったDNAと濾液中のCODのシミュレーション結果を図-8にあわせて示す。かなりの部分を説明しうる。

現実の系では、以上の展開のうち、(3)(10)式とつぎに示す(12)式の連立微分方程式系で事足れると考えられる。

$$d\text{DNA}/dt = \alpha \cdot k_1 \cdot C_1 \cdot \text{DNA} + \alpha \cdot k_{21} \cdot C_{21} \cdot \text{DNA} - k_3 \cdot \text{DNA} \quad (12)$$

5 おわりに

DNAを導入することによって、都市下水の浄化機構をより現実的に理解できた。

今後、ここに展開した考え方をより詳しく検討するとともに、連続系に応用していくつもりである。

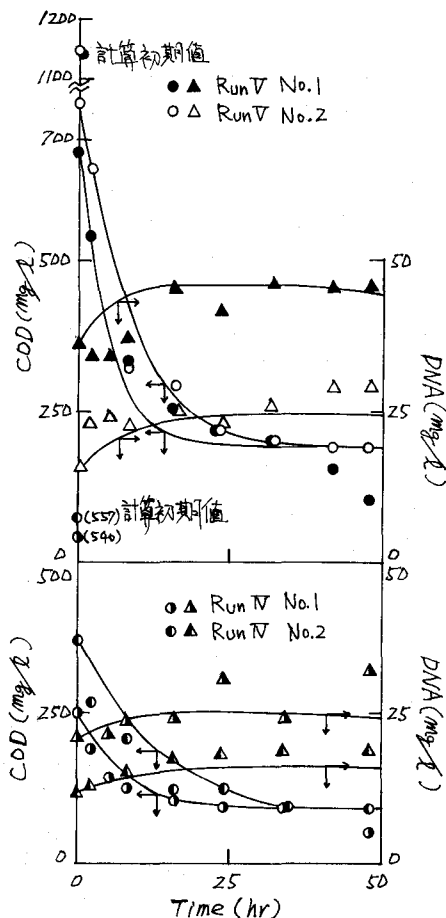


図-8 溶解性基質CODとDNAの変化

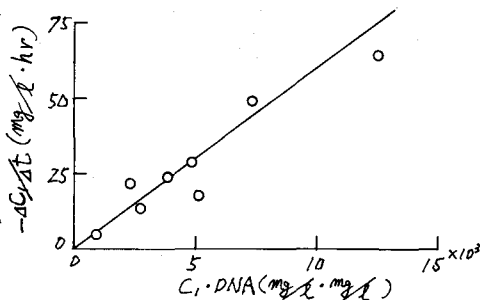


図-9 k_1 の決定

〈参考文献〉 1) 合田健, 宗宮功, 河村清史「都市下水のエネルギー評価と有機物指標」 下水道協会誌 Vol. 11, No. 127(1974) 2) 金子光美「活性汚泥の微生物活性とその評価に関する研究」京都大学学位論文(1974)