

(8) 活性汚泥法における生物量と基質量の挙動に関する研究

京都大学工学部 宗 宮 功
" ○河村 清史
厚 生 省 粕 谷 明 博

1. はじめに

実際の都市下水を処理する活性汚泥法の機能評価や運転操作の高度化には、下水中有機物質量の半分以上を占め、曝気槽で活性汚泥と混合されるともはや分離しえない浮遊性有機物質の取扱いが重要である。このような観点から、生物量指標としてDNAを、生物活性量指標としてRNAを導入し、浮遊性基質量を定量して、基礎的な現象把握を行なってきた。^{1) 2)}

本論文では、都市下水を連続的に処理する過程における生物量と基質量の挙動に検討を加える。

2. 実験装置ならびに実験方法

2-1 実験装置

O市終末処理場流入下水を京都大学工学部衛生工学教室水質汚濁シミュレーション設備内の活性汚泥法パイロットプラントに導水し、処理実験を行なった。実験は生物学的硝化脱窒を含んだ窒素の挙動の検討も含めて、活性汚泥生成過程の検討と活性汚泥濃度制御下でのプラントの機能評価とを行なった。途中、データ欠如の期間も含めて6月22日～10月22日の4ヶ月の運転とデータ収集を行なった。

実験装置ならびに容量、採水地点を図-1に示す。流入水流量は $1 \text{ m}^3/\text{hr}$ を返送汚泥流量は $2 \text{ m}^3/\text{hr}$ を目標とした。図-1に示すごとく脱窒槽を設け、返送率を2倍にしたことは炭素源、アルカリ剤無添加での生物学的硝化脱窒の検討を加えるた

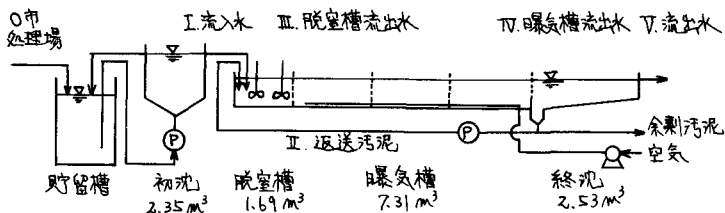


図-1 実験装置概要図と採水地点

めであったが、窒素の挙動については別の機会に報告することとする。なお、実験は6月22日に開始したが、7月13日までは返送ポンプからの漏水があり、7月26日以降は余剰汚泥の引抜きを行なった。

2-2 実験方法

8月4日～10日、9月2日～8日、10月18日～22日は、物質収支による検討を目的としてI～Vの5ヶ所で8時間おきに1日3回の採水を行ない、採水地点ごとに等量コンポジットしてサンプルを得た。その他については、流入水(I)、曝気槽流出端混合液(III)、流出水(V)の3つについて1日1回の採水で得たものをサンプルとした。

1日3回の採水はいづれの地点も0時、8時、16時としたが、1日1回の採水については、あらかじめ検討した流入水質、流出水質の平均水質出現時刻と各槽の理論的滞留時間とから流入水を13時に、曝気槽流出端混合液を16時に、流出水を17時に採水した。

各サンプルについて重クロム酸カリウム法によるCOD³⁾、Burtonの変法によるDNA、紫外吸光度を利用した方法によるRNA⁴⁾を測定した。

3. 実験結果とその考察

実験は前述のように前後4ヶ月間にわたったが、ここでは漏水や余剰汚泥引抜き等の影響のない7月14

日～25日のデータを中心に検討する。この間のデータを一括して図示すると、図-2を得る。

3-1 流入水、流出水中の有機物質

流入水中のT-CODは105.0 mg/l～187.2 mg/lで平均140.1 mg/lであるのに対して、S-CODは25.5 mg/l～58.2 mg/lで平均37.7 mg/lとかなり低かった。両者の差であるP-CODは平均でみると全体の73%をも占めることになる。これに対して流出水では、T-CODが14.8 mg/l～33.0 mg/l(平均16.5 mg/l)で88.2%の平均除去率であり、S-CODが7.8 mg/l～15.1 mg/l(平均11.2 mg/l)で70.3%の平均除去率であった。平均除去率94.8%を示すP-CODが全体の除去率を上昇させていることがわかる。

流出水中のDNA、RNAは実測していないため、流出水中のP-CODと曝気槽中のDNA/P-COD、RNA/DNAとから推定したがいずれも小さく図-2には示していない。これに対して流入水中には1mg/l前後のDNAとDNAの1～2倍のRNAが存在していた。本下水は、台所廃水や尿さらには土壌を浸透した地下水を大きな割合で含んでいることから微生物の流入が予想され、DNA、RNAが計量されたものとする。図-2中斜線部はDNA/0.03で与えた生物性COD¹⁾を示しているが、平均で35.6 mg/lありP-CODの35%を占めている。

全実験期間の流入水中のCODの分布を示すと図-3がえられる。初期の約10日間では変動が大きい、その後はS-COD/T-CODやP-COD/T-COD、さらに生物性COD/P-CODすなわち、浮遊性有機物質に占める生物性CODの割合のいずれもかなり一定していた。全データの平均でみると、S-CODはT-CODの27%でP-CODはT-CODの73%であった。

また、生物性CODはT-CODの28%を占め、流入COD中の72%が基質であることがわかる。さらに、生物性CODはP-CODの39%を占め、P-CODの61%が浮遊性基質として計量された。これらの関係は前述した7月14日～25日についてもほぼ同様であった。

3-2 曝気槽中の有機物質

7月14日～25日は余剰汚泥の引抜きを行わず汚泥のため込みを行っており、図-2に示すようにP-COD、DNA、RNAのいずれもが上昇している。DNAは右側縦軸のスケールで示されるが、左側縦軸で生物性CODに読みかえられる。これで見ると生物性CODと浮遊性基質CODの比はほぼ一定で、各々P-CODの50%程度であるが、流入水中では生物性CODがP-CODの約35%で、浮遊性基質CODが約65%であったこ

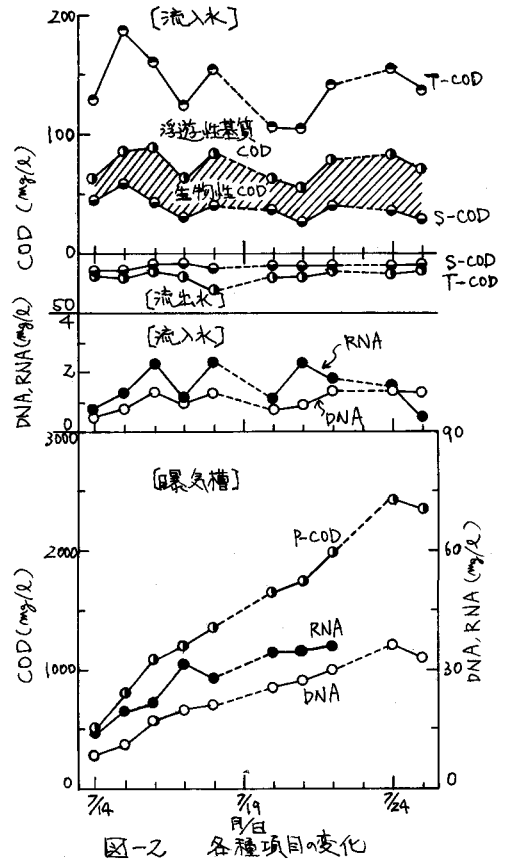


図-2 各種項目の変化

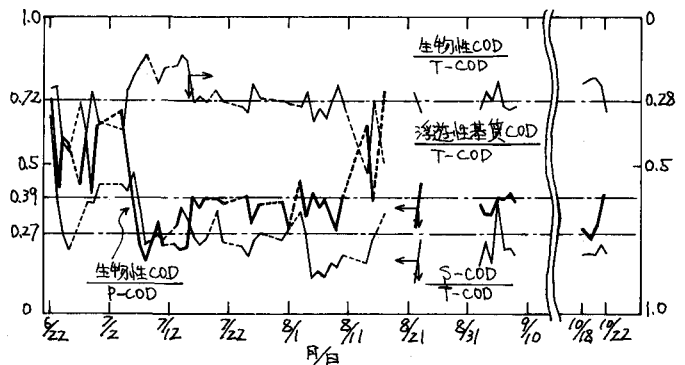


図-3 流入水中の各種CODの分布

とを考えると生物性CODの割合が増している。

RNAは7月23日～25日にデータが欠如しているが、DNAとの差がほぼ一定であり、RNA/DNAすなわち単位生物量あたりの活性量が減少傾向にあった。

4. 活性汚泥プラント内での各種項目の挙動

前節で示したデータをもとにして、活性汚泥プラント内での各種項目の挙動について検討する。

4-1 物質収支による検討

7月14日～25日の正味流入負荷量の累積値を図-4に示す。ここで、正味流入負荷量は13時の流入水質Cin (mg/ℓ)と17時の流出水質Cout (mg/ℓ)の差に、流入水流量Q (m³/hr)をかけ1日当りに換算したものであり、式(1)で示される。

$$\text{正味流入負荷量} = 24 \cdot (C_{in} - C_{out}) \cdot Q \times 10^{-3} (\text{kg/day}) \quad (1)$$

図-4には、各種項目の代謝による増減量を示した。これは、7月14日の系内存在量に前記正味流入負荷量を逐次加算して得た代謝がないとした場合の7月15日以降の推定存在量から相応する日の実測存在量を引いたものである。プラスは減少を示しマイナスは増加を示す。これと比較するために正味流入負荷量の累積値はプラスでしめしている。図中斜線部が系の増加量である。

なお、系内存在量は3回の週間変化測定の実験データから曝気槽濃度Caer (mg/ℓ)に装置容量11.53 m³をかけたもので近似しうることがわかったので、式(2)で求めた。

$$\text{系内存在量} = 11.53 \cdot Caer \times 10^{-3} (\text{kg}) \quad (2)$$

なお、データ欠如の7月19日、22日については前後の平均値から推定した。

S-CODについては正味流入負荷量が系での減少量であるため、前者のみをしめしている。

浮遊性基質CODについては明らかに代謝による減少がみとめられるが、未反応のまま系内にたまりこむ量が相当大きい。平均的にみて、正味流入負荷量の $\frac{1}{3}$ が代謝され、残り $\frac{2}{3}$ がたまりこんでいる。

生物性CODつまりDNAについては明らかに合成による増加がみとめられる。この増加量と正味流入負荷量を比較すると、後者の方が1.5倍程度大きい。黒丸で示した増加量は実際は合成と分解の差であるが、大半が生細胞によるものであるのに対して、流入水中のDNAには多分に死細胞のものを含む可能性があり、両者のDNAをまったく同列に扱いきれないと思われるが、これを無視するとこの期間に増加したDNAの半分以上が流入水からの持ち込みとなる。

P-CODは浮遊性基質CODの減少と生物CODの増加とのためにみかけ上ほとんど変化なく、流入水中のP-CODがそのままたまり込んだようにみえる。これらの結果、T-CODについては、正味流入負荷量の25%程度の代謝があったことになる。RNAの増減には一定傾向はない。いく分の合成がみとめられたが、みかけ上は流入負荷量がたまり込んだようになっている。

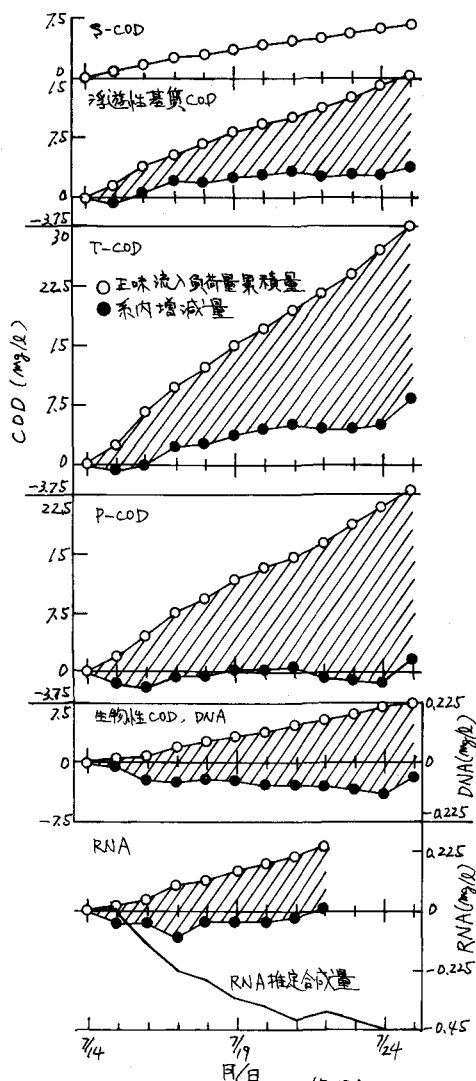


図-4 各種項目の物質収支

S-CODと浮遊性基質CODの和を基質と考え、これの減少量が微生物による代謝を受けたものと考え、正味流入負荷量の55%程度のものが代謝をうけたことになる。

合成DNA量/代謝COD量をもとめると、数値の安定した17日以降では平均で0.013となった。自己分解を考慮すると真の合成量はいく分大きくなり、この比も若干上昇することも考えられるが、回分式実験でえた0.011~0.017の値に近い。RNAについて、合成RNA量/代謝COD量をもとめると回分式で得た0.05よりはるかに小さく、合成と同時に進行している分解の影響が大きい。ちなみに回分式実験でえた0.05を用いると、図-4の直線がえられる。

4-2 各種CODの系内貯留の検討

各種CODについて、系内存在量/正味流入負荷量を求めて図-5に示した。この比をA値とするが、各種CODの滞留時間であり、P-CODについてはSludge Ageに近い。

S-CODを除くと、P-COD、生物性COD、浮遊性基質CODのいずれについても上昇傾向がみとめられ、これらがたまり込んでいくことが明らかである。分母、分子とも1日1回のサンプルのデータに依っているため、ばらつきがあるが、A値の大きさは生物性COD、P-COD、浮遊性基質CODの順である。これらはいずれも数日~10数日という値を示し、流入負荷量の大小が直接大きく影響するとは考えられない。これに対してS-CODは、分子を低く見積っている可能性があり、これを2倍にしたとしてもA値が0.4日前後であり、流入負荷量の大小がショックとして作用する可能性が大きいことがわかる。

浮遊成分のA値が指標によって異なることは流入水中の浮遊物質と活性汚泥の組成が異なるためである。このことは汚泥コントロール指標としてのSludge AgeとSRTを比較するとき後者の方が同一性状の汚泥が分母分子にくるという意味で合理的である。

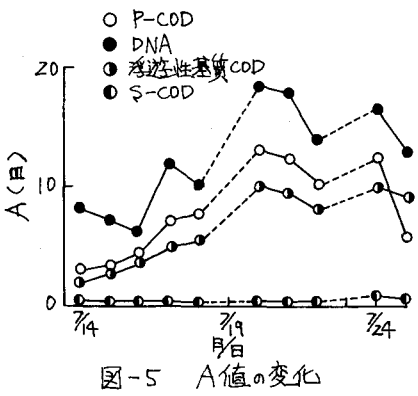


図-5 A値の変化

5. 生物量と基質量の挙動についてのシミュレーション

7月14日~25日の期間における生物量と基質量の挙動について動力学的な検討を加える。

5-1 浄化モデル

すでに、DNA、RNA、浮遊性基質CODを導入した浄化モデルについて、2~3の検討を行なっている¹⁾²⁾が、ここではこれらを改良したモデルを図-6に示す。このモデルでは、基質を溶解性基質と浮遊性基質に分画する。溶解性基質は活性汚泥と接触後瞬時に吸着されるものがあるが、これとその後除去過程で除去されたもの、さらに浮遊性基質の加水分解産物とが溶解性基質プールに入り、ここから代謝過程に入ると考える。この過程でDNA、RNAが関与するが、合成も行なわれる。

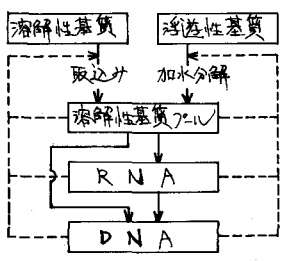


図-6 モデル概要図

系内のCODは図-7のように分画する。付着性CODは溶解性CODのうち活性汚泥と混合すると瞬時に吸着されるもので、いづれも長時間ばつ気後も代謝されずに残余する部分があり、難分解性CODとした。詳細については紙面の都合で割愛するが、いくつかの回分式実験のデータをもとに、図-7に示した各COD、DNA、RNAの挙動を図-6のモデル

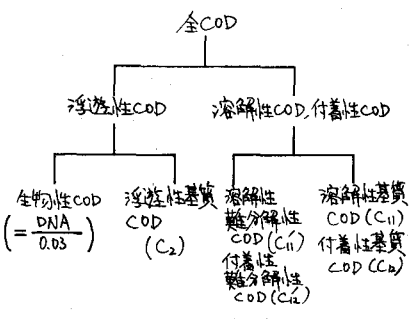


図-7 CODの分類

表-1 モデル式のまとめ

溶解性基質COD, C_{10} の除去	
$dc_{10}/dt = -k_{11} \cdot C_{11} \cdot (1 - C_{12}/DNA/S)$	(3)
浮遊性基質COD, C_2 の加水分解	
$dc_2/dt = -k_2 \cdot C_2 \cdot RNA \cdot (1 - C_{12}/DNA/S)$ ($k_2 \cdot L \cdot C_2/DNA \leq 5$ の C_2 について)	(4)
溶解性基質プール中の溶解性基質COD, C_{12} の変化	
$dc_{12}/dt = k_{11} \cdot C_{11} \cdot (1 - C_{12}/DNA/S) + k_2 \cdot C_2 \cdot RNA \cdot (1 - C_{12}/DNA/S) - k_{12} \cdot C_{12} \cdot RNA$	(5)
DNAの変化	
$dDNA/dt = \alpha \cdot k_{12} \cdot C_{12} \cdot RNA - k_3 \cdot DNA$	(6)
RNAの変化	
$dRNA/dt = \beta \cdot k_{12} \cdot C_{12} \cdot RNA - k_4 \cdot (RNA - \gamma \cdot DNA) - \gamma \cdot k_3 \cdot DNA$	(7)
溶解性COD, C_5	
$C_5 = C_{11} + C_{11}'$	(8)
浮遊性COD, C_7	
$C_7 = C_{12} + C_{12}' + C_2 + DNA/0.03$	(9)

表-2 記号・係数一覧表

記号	意味	単位	値
C_{11}	溶解性基質COD濃度	mg/L	
C_{11}'	溶解性難分解性COD濃度	mg/L	
C_{12}	溶解性基質プール中COD濃度, 付着性基質COD濃度	mg/L	
C_{12}'	付着性難分解性COD濃度	mg/L	
C_2	浮遊性基質COD濃度	mg/L	
C_5	溶解性COD濃度	mg/L	
C_7	浮遊性COD濃度	mg/L	
DNA	DNA濃度	mg/L	
RNA	RNA濃度	mg/L	
k_{11}	溶解性基質COD除去速度定数	1/hr	1.5×10^{-1}
k_{12}	溶解性基質プール中CODの代謝速度定数	1/(RNA mg/L hr)	1.0×10^{-2}
k_2	浮遊性基質CODの加水分解速度定数	1/(RNA mg/L hr)	8.0×10^{-4}
k_3	DNAの自己分解速度定数	1/hr	1.22×10^{-3}
k_4	RNAの分解速度定数	1/hr	2.2×10^{-2}
α	代謝COD量の合成DNA量への換算係数	—	0.011
β	代謝COD量の合成RNA量への換算係数	—	0.017
γ	自己分解期の RNA/DNA	—	0.05
γ	自己分解期の RNA/DNA	—	0.35, 0.6
S	溶解性基質プール中の単位DNAあたりの飽和溶解性基質COD濃度	—	36

ルを考慮して数式表示し表-1を得た。また、使用した記号の説明及び係数値を表-2にまとめた。

溶解性基質の除去、浮遊性基質の加水分解の各々の速度が溶解性基質プールの不飽和度の関数になること、浮遊性基質CODは、浮遊性基質COD/DNAのある値をこえる部分については加水分解に関与しないことの基質の濃度効果を考えた。

このモデルによる回分式実験のシミュレーション結果の例を実測値とともに図-8に示すが、ほぼ満足いく結果が得られた。

5-2 連続系の動力学的検討

表-1に示したモデル式を連続系へ適用するにあたって装置の流動特性を知る必要があるが、食塩を用いたトレーサー実験の結果を完全混合槽の槽別モデルで近似した。すなわち脱窒槽を流入水と返送汚泥の流入する0.5 m³とのこり1.19 m³に、曝気槽を各3.66 m³の2槽に分け、最終沈澱池を0.84 m³の上澄水ゾーンと1.69 m³の汚泥ゾーンに分けた。

さらに、脱窒槽と最終沈澱池の汚泥ゾーンの取扱いが問題となる。両槽とも1 mg/l以下ではあるがDOが存在する反面、脱窒が生じており、好気性の生物反応と嫌気性の生物反応が生じているとみなせる。

溶解性基質CODの除去は、自身の濃度と溶解性基質プールの不飽和度のみに依存していると考えているため、曝気槽でと同様の現象が生じていると考えた。その他の基質、DNA、RNAの変化については、曝気槽での反応の $\frac{1}{2}$ に相当する速度定数での好気性反応で代用した。

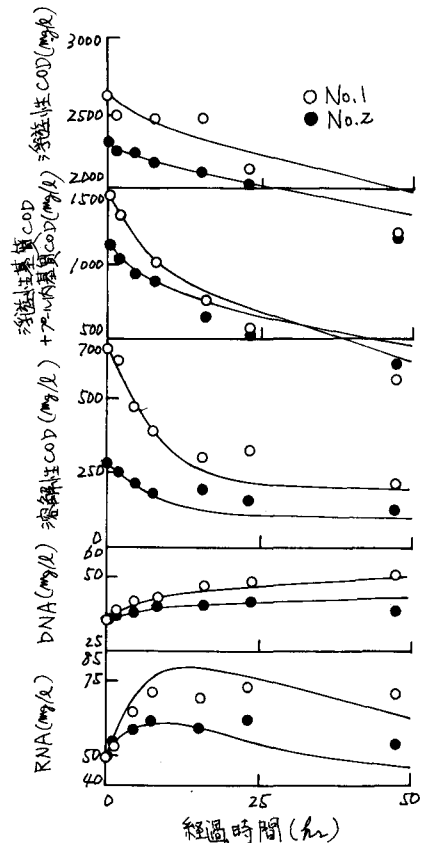


図-8 回分式実験シミュレーション例

以上の仮定のもとで、7月14日の実測値にもとづく初期値を与え、平均流入水流量、平均返送汚泥流量、13時の流入水質を各日の代表水質とした流入水質濃度を与えて、表-2に示したパラメータを用いてシミュレーションした結果を図-9に示す。計算はRKG法によって3分きざみで行なった。

なお、表-2のパラメータではいく分実測値とのずれが生じ、ここに示したものは $k_{11}=0.20$, $\alpha=0.013$, $\beta=0.06$ とした値を用いている。また、流出水中のP-CODについては、最終沈澱池流入汚泥の一定割合のものが上澄水ゾーンに流入されるものとし、その割合はシミュレーションより0.15%を与えた。

図-9より、2~3の問題はあるものの、提示した浄化モデルを利用することによって曝気槽内の活性汚泥成分、流入水中のS-CODの変化をおおむねシミュレーションできた。

ただし、DNAが前半いく分高めで浮遊性基質CODが低めになっているが、P-CODがほぼ実測値と等しいことから実測DNAが高く計測され、その結果遊性基質CODの実測性を低くみつもっているものと解せる。

さらに、浮遊性基質CODの計算値が後半小さめと出ているが、これは13時の水質で代表した流入負荷量が実際に流出した負荷量より低めにみつもられたことによると考えられる。

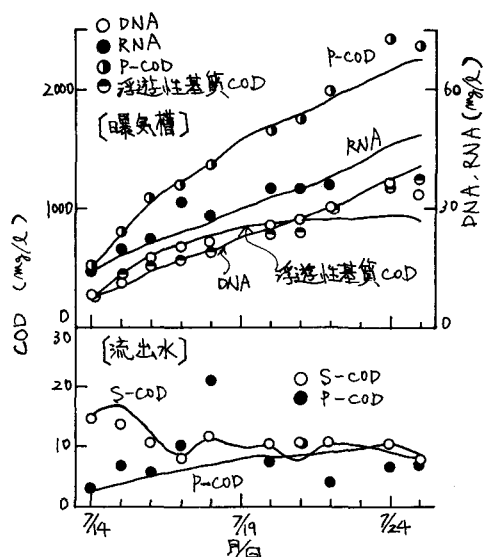


図-9 シミュレーション結果

6. おわりに

浮遊性有機物質を生物性の部分と基質性の部分に分けることによって活性汚泥プロセスでの有機物質の挙動に検討を加えたが、得られた結果を要約する。

- i) 生細胞・死細胞の区別がないが、流入するCODのうち平均28%が生物性CODであり、P-CODに対しては39%がこれであった。
- ii) 曝気槽内活性汚泥では生物性CODと浮遊性基質CODがほぼ同程度あった。
- iii) 物質収支的検討から各種CODの増減を明らかにしたが、生物性CODすなわちDNAは流入下水による持ち込みがかなり重要であることが明らかとなった。
- iv) Sludge Ageに近いA値はDNA、P-COD、浮遊性基質CODの順で大きい。S-CODについては1日以下で、流入水の変動が系にショックとなりうる可能性が大きい、他は数日~10数日でさほどショックとしないと推定しうる。
- v) 提案した浄化モデルを連続系に適用したところ、いくつかの問題はあるもののおおむね現象を説明できた。今後はモデル式を用いて運転操作や設計因子に検討を加える。

最後に、長期にわたる実験に協力された有賀勝則(現 大分県)、有田一彦(現 京都大学大学院)の両氏に謝意を表わすとともに、本研究が文部省科学研究費、一般研究(C)№255208の補助を受けたものであることを付記する。なお、計算は京都大学大型計算機センターのFACOM M-200を利用したことを付記する。

<参考文献>

- 1) 宗宮功, 河村清史, 安福秀章, 粕谷明博, 「活性汚泥の浄化機構に関する研究」第14回衛生工学研究討論会講演論文集(1978.1)
- 2) 宗宮功, 河村清史, 「活性汚泥法における浮遊性基質の挙動」衛生工学研究シンポジウム講演論文集(1978.8)
- 3) APHA, AWWA, WPCF, "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater" 13th ed. (1971)
- 4) 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)