

(21) 活性汚泥法における汚泥発生量推定のための基礎的研究

北海道大学工学部 高桑哲男
同 ○寺町和宏

1 はじめに

活性汚泥法による都市下水の処理により発生する下水汚泥の量について処理条件を厳密に規定した上で検討された例は少なく、たとえばBOD負荷量当りの汚泥発生量や下水処理水量当りの汚泥発生量に関する数値には不確かなものが多いようである。そこで本研究では、まずエアレーションプロセスの前駆プロセスとしての最初沈殿池の水面積負荷を変化させて下水の沈殿実験を行い、最初沈殿池流出水のSS、BOD、CODの測定から、下水処理における生物分解プロセスへの有機物負荷とその水質組成に関して検討した。同時に下水中の浮遊性有機物の性質をBOD反応から検討し、浮遊性有機物の生物分解の可能性を明らかにした。次いで、より合理的な余剰汚泥の算定方法を考えるため、溶解性下水と浮遊性有機物濃度の異なる下水を用いた実験を回分式と連続流式の2とおりで行い、浮遊性有機物の汚泥への転換率を明らかにするとともに、BODとCODを基準とした余剰汚泥発生量に関する基礎的な係数を示した。また、活性汚泥法における処理条件の違いによる初沈汚泥と余剰汚泥それぞれの発生割合および全下水汚泥量の増減の可能性について論究した。

2 BOD 曲線からみた浮遊性有機物の生物分解性

通常の都市下水中有機物のうち浮遊物に由来する割合は約50%と大きい。したがって無機の土粒子の流入がなく有機性の割合が大きい初沈汚泥および余剰汚泥の発生量について考える場合、有機性浮遊物（以下SS）の最初沈殿池での除去とそのエアレーションタンクでの分解率の両方についての考察が必要となる。そこでまず、BODを生物分解性の指標と考え、2とおりのふるい分け方法で得た下水のBOD曲線を求めることによってSSに由来するBODを比較検討した。

1) SSを粒径で分類した場合 住宅団地下水処理場（分流式、処理人口2万6千人、流達時間0.5~1.5時間）にて破砕機通過後の流入下水を採取し、350 μ のふるいを通したもの（下水A、SS = 225 mg/ ℓ ）44 μ のふるいを通したもの（下水B、SS = 105 mg/ ℓ ）およびワットマン濾紙GF/F（0.7 μ ）で濾過した溶解性下水（下水C）の3段階に分けた。

採水時刻が10時と12時の試料についての希釈法BOD曲線を図-1に示す。上段の図がBOD曲線であり、各下水で大きな差がみられる。下水Aから下水CのBODを差引いた（A-C）曲線がSSに由来するBOD（以下SS・BODと略記する）と考えることができ、SSに由来するBODは溶解性BODよりもやや高いことから、下水の全BODに占めるSS・BODの割合が相当なものであることがわかる。また、用いた下水のCODに対する下水CおよびSS（A-C）のBOD比の経日変化を示す下段の図より、浮遊性有機物と溶解性有機物のいずれについても全有機物に対するBOD反応量が等しいと言え、このことは両有機物成分の類似性をうかがわせる。

ii) SSを沈降速度で分類した場合 上向流円形最初沈殿池（直径55cm、容量110 ℓ 、塩ビ製）を用い、

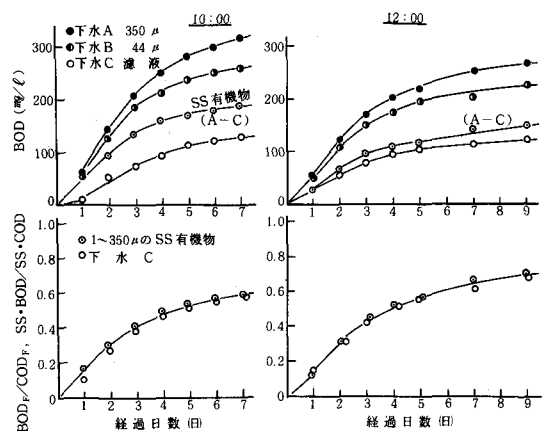


図-1 ふるい分けした下水のBOD曲線

水面積負荷の異なる最初沈殿池流出水（以下、沈後水と略記する）について同様な検討を行った。水面積負荷が 6、38 $m^3/m^2 \cdot \text{日}$ のものを沈後水 Q_1 、 Q_2 、濾過したものを沈後水 Q_0 とする。BOD 曲線は図-2 に示すとおりであり、変化パターンは先の場合と同様であるが、SS・BOD が溶解性 BOD よりやや低い点が異なる。

iii) 沈後水の短時間 BOD 反応 以上 2 つの実験は BOD ビンを用いた 30~50 倍希釈という非常に薄く、かつ速度が遅い反応であったが、次に下水有機物濃度がより高い状態で行った BOD 反応について検討する。9 時、15 時、21 時に採取した下水の沈後水 Q_1 （水面積負荷 4.8 $m^3/m^2 \cdot \text{日}$ ）、沈後水 Q_2 （46 $m^3/m^2 \cdot \text{日}$ ）、沈後水 Q_0 （東洋濾紙 No. 5 C）について、図-3 の装置を用いて微量な酸素消費速度の経時変化を調べた。この方法は最初に下水を曝気して溶存酸素濃度を高め、次いで密封状態でおよそ 1 時間毎に下水を採取し、溶存酸素濃度の変化を測定するものである。溶存酸素濃度が 1 mg/l

程度になったときは、あらかじめストックしておいた各下水を再び曝気して溶存酸素濃度を高めた。下水はスターラーにより 10 分間に 30 秒の割合で撹拌をした。希釈倍率と植種条件は、9 時と 21 時に採取した下水については 4 倍希釈で実プラントの活性汚泥を 20 mg/l 植種し、16 時の下水は 3 倍希釈で無植種とした。水温は $20 \pm 2^\circ C$ とした。各下水の水質を表-1 に、実験結果を図 4 に示す。図中の破線は沈後水 Q_2 、 Q_1 と溶解性下水 Q_0 との差を表す。ただし (ロ) の実験では沈後水 Q_0 の反応にラグがみられたので図に示したように時間軸を移動させた。図の結果より、SS・BOD が存在することは先の例と同様であるが、沈後水 Q_0 との比較ではかなり小さな値を示している。しかしながら BOD₅ に対する溶解性 BOD と SS・BOD の割合を示した図-5 では、たとえば反応 7 時間における Q_0 の BOD に対する SS・BOD の割合はいずれの時刻に採取した下水についてもおよそ 2 分の 1 の値を示していることから初期の浮遊性有機物の分解速度は溶解性有機物の約 1/2 の大きさであると考えることができる。また、

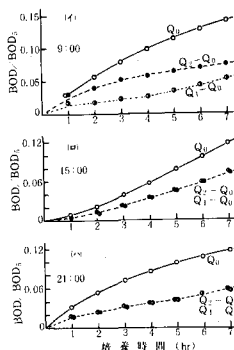


図-5 短時間 BOD と BOD₅ の関係

採水時刻	下水の種類	SS mg/l	BOD mg/l	COD mg/l	BOD/COD (%)
9:00	Q_0	0	273	366	0.75
	Q_1	91	352	487	0.72
	Q_2	243	447	589	0.76
	$Q_1 - Q_0$	91	79	121	0.65
	$Q_2 - Q_0$	243	140	223	0.78
	$Q_2 - Q_1$	152	81	142	0.57
16:00	Q_0	0	164	269	0.61
	Q_1	74	243	340	0.71
	Q_2	125	288	397	0.73
	$Q_1 - Q_0$	74	50	71	0.70
	$Q_2 - Q_0$	125	95	128	0.74
	$Q_2 - Q_1$	51	45	57	0.79
21:00	Q_0	0	261	363	0.72
	Q_1	78	340	475	0.72
	Q_2	146	401	563	0.71
	$Q_1 - Q_0$	78	79	112	0.71
	$Q_2 - Q_0$	146	174	200	0.70
	$Q_2 - Q_1$	68	95	113	0.70

表-1 実験に用いた下水の水質

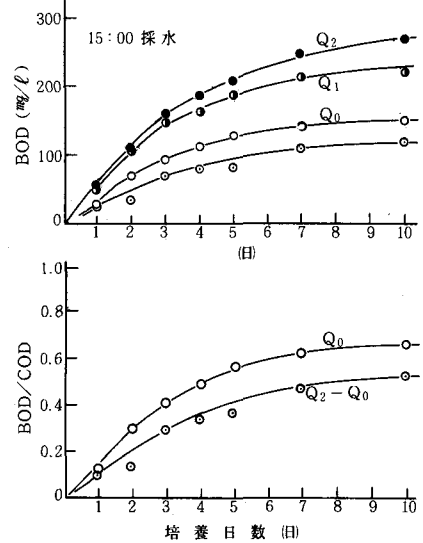


図-2 沈降速度で分けた下水の BOD 曲線

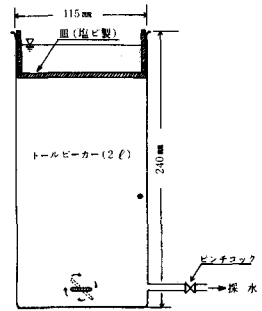


図-3 短時間 BOD 曲線の測定装置

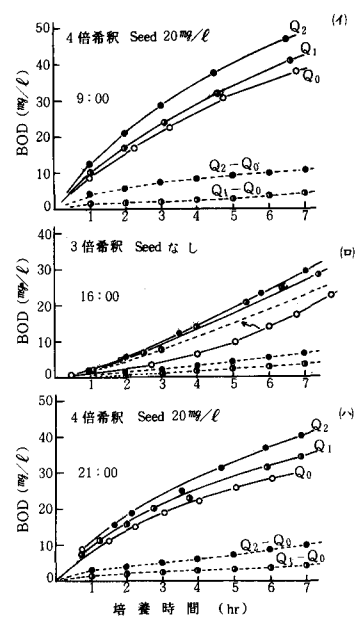


図-4 下水の短時間 BOD 曲線

表一に示してあるようにBOD/COD比がいずれの沈後水についても0.7前後とはほぼ一定値を示していることから、BODを微生物による易分解性有機物の尺度と考えれば、沈降速度が48m/日以下の浮遊性有機物と溶解性有機物における易分解成分の割合はほぼ等しいことを表しているとみなすことができよう。さらに、他のデータを加えてBODとCODの相関を示した図一6より溶解性成分 Q_0 とSSを含む Q_1 および Q_2 の間に質的には大きな差がないと言うことができる。

3 単位SS当りのBODと水面積負荷の違いによる沈後水の水質変化

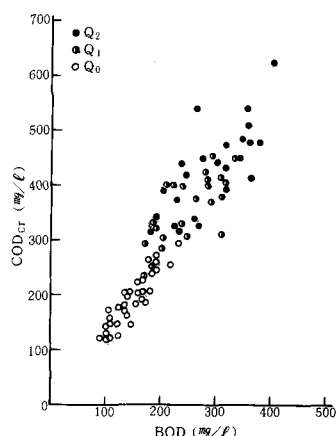
単位SS量に対するSS由来BODの割合を濃度比で表し、これをSS・BOD係数と呼ぶことにする。その値を沈後水 Q_1 、 Q_2 に分け、表一のデータの他に本研究を通して得られたデータとともに図一7に示す。SS・BOD係数の平均値は沈後水 Q_1 で0.83、 Q_2 で0.78と

得られた沈後水 Q_1 の値が Q_2 にくらべてやや高いのは粒径が小さいためと考えられるが、粒径の大きなSSをも含む Q_2 にくらべてその差は大きいとは言えない。

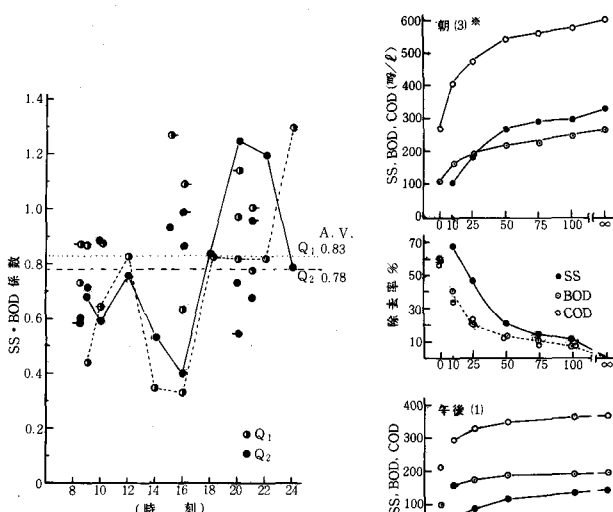
次に、最初沈殿池の水面積負荷を広範囲に変化させて得られる沈後水のSS、BOD、CODを調べ曝気槽への流入負荷を量と質の観点から検討する。家庭下水の代表的な水質を示す

試料を得るように、採水時刻として8:30～、15:00～、19:30～の時間帯を選び、計6回の実験を行った。実験用下水は、流入下水を約500ℓのポリタンクに汲み上げ、それを定量ポンプで水面積負荷が100、75、50、

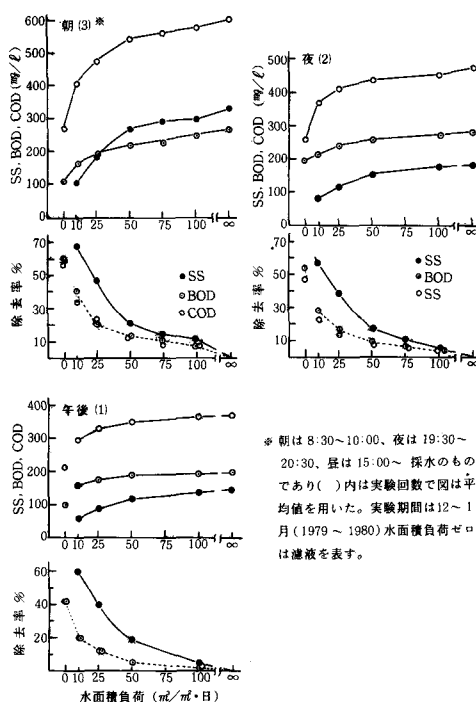
25、10 ($m^3/m^2 \cdot 日$) となるように水量の大きい方から順に沈殿池へ通すことによって得た。図一8の結果(0は濾液∞は原水の水質を示す)より、水面積負荷が25 $m^3/m^2 \cdot 日$ まではBODとCODの変化が大きく、50 $m^3/m^2 \cdot 日$ まではSSの変化が大きいと言える。また、原水に対する除去率は下水濃度が高い朝の下水が最も大きく、下水濃度が低い昼の下水が最も小さい値となっている。これら三つの時刻別除去率の平均値を一応の家庭下水一日の除去率代表値として曝気槽への負荷割合を求めたのが図一9である。図の結果より、水面積負荷の違いは単に曝気槽への有機物負荷量を変えるのみでなく、下水成分の構成自体を変化させることがわかる。次に同じ実験をもとに水面積負荷の違いによるSS・BOD



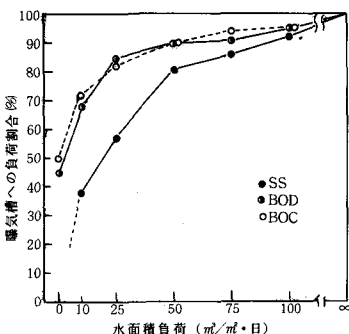
図一6 BOD-COD_{cr} 相関



図一7 SS・BOD係数の通日変化



図一8 水面積負荷と越流水の水質



図一9 水面積負荷と曝気槽への負荷割合

— 168 —

(図一7参照) から類推することができ、妥当な結果であろう。しかしながら Q_2 系と Q_0 系で a 値の差は大きいとは言えず、このことは SS の分解程度が大きいことを予想させる。なお、MLVSS 率は 84~90% の範囲にあって変化幅が小さいので汚泥生成量は MLSS のまま扱った。

次に、沈後水中の SS がどの程度分解するかを検討する。今、沈後水 Q_0 系における溶解性有機物除去量を Q_0 、沈後水 Q_1 中の浮遊性有機物量 (これは 100% 除去されて汚泥になると考える) を Q_1^{SS} 、 Q_1^{SS} の真の汚泥転換率を a_1^{SS} とし、各汚泥生成に関して加法性が成り立つと仮定すれば、(1)式と同様に

$$\Delta S_0 = a_0 Q_0 - b_0 X_0 \quad (2)$$

$$\Delta S_1 = a_0 Q_0 + a_1^{SS} Q_1^{SS} - b_1 X_1 \quad (3)$$

となる。 Q_1^{SS} に由来するみかけの汚泥生成量 $\Delta S_1^{SS} = \Delta S_1 - \Delta S_0$ であるから

$$\Delta S_1^{SS} = a_1^{SS} Q_1^{SS} - b_1 X_1 + b_0 X_0 \quad (4)$$

ここで表一3より b_0 と b_1 および X_0 と X_1 に大きな差がないので、 $b_0 X_0 - b_1 X_1 \ll a_1^{SS} Q_1^{SS}$ と考えることができ、(4)式は

$$\Delta S_1^{SS} \approx a_1^{SS} Q_1^{SS} \quad (5)$$

と簡略化することが可能である。ここで Q_1^{SS} は既知であり、 ΔS_1^{SS} は ΔS_0 が求まれば計算できる。式(2)の代わりに溶解性有機物由来のみかけの汚泥転換率 a'_0 によって表現した次式

$$\Delta S_0 = a'_0 Q_0 \quad (6)$$

を用いることにすれば、 a'_0 の値は BOD と COD 基準について図一12のようになる。 a'_0 の平均値 0.46 (COD 基準) を各回分実験結果に適用して算出した ΔS_0^{SS} を縦軸に、 Q_1^{SS} を横軸にとってプロットすると図13となり、 a_1^{SS} は平均値で 0.79 と得られた。最後に表一3に示した COD 除去量と呼吸量の関係について述べる。各回分実験のエアレーション過程で除去された COD は

COD 除去量 (=初期 COD - 残存溶解性 COD)

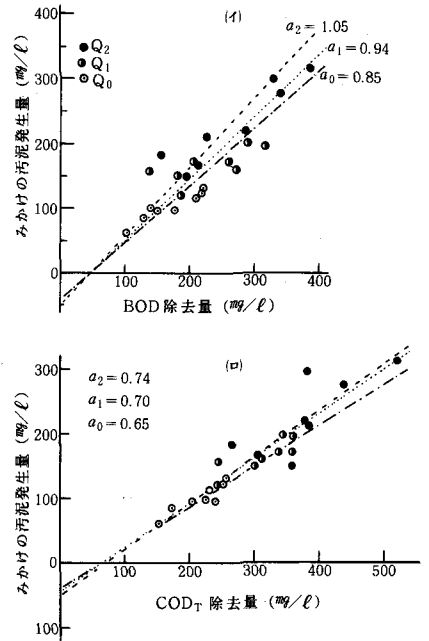
=汚泥に転換した COD + 基質呼吸量 (7)

=真の汚泥生成量 $\times$ 汚泥の COD 当量 + 基質呼吸量

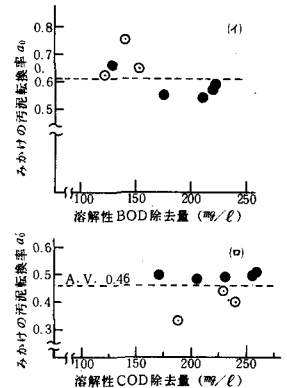
と表すことができ、本式で計算した酸素収支の誤差は表の最右欄のようになる。10%以上の誤差もみられるが、多くは10%以内にとどまっている。

5 連続流パイロットプラント実験による汚泥発生量の検討

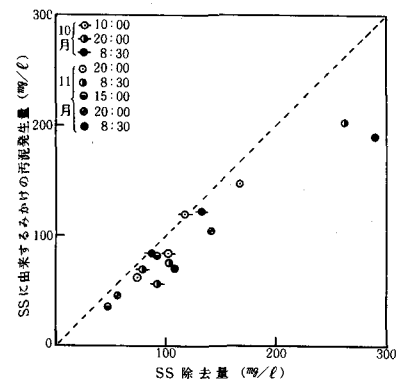
先に述べた住宅団地下水処理場に設置した2系列の連続流パイロットプラントで前節と同様の検討を行った。用いた沈後水は Q_1 系 (表面負荷率 $10 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{日}$)、 Q_2 系 ($50 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{日}$) である。実験装置の概略を図一14に示す。曝気槽容積 40 l 、最終沈殿池容積 30 l 、汚泥返送率 25~30%、水温 20°C 、溶存酸素濃度は 2 mg/l 以上保つように空気を調節した。実験は4回行い、それらの条件と結果の一部を



図一11 BOD、COD除去量とみかけの汚泥発生量の関係



図一12 溶解性BOD、COD除去量とみかけの汚泥転換率



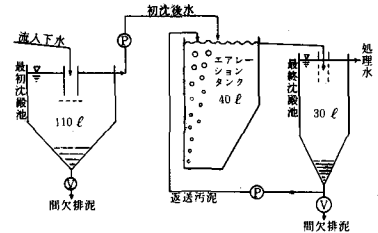
図一13 SS除去量とみかけのSS由来汚泥発生量

表一4に示す。まず、プラントの運転状態は図一15に一例を示すように、MLSSの変動が大きい。これは余剰汚泥引抜量の不整や曝気槽と終沈をつなぐパイプのつまりによる混合液の流出など種々のトラブルによるものである。ただし、汚泥の沈降性は全実験期間を通じて良好であった。みかけの汚泥発生量は毎日の余剰汚泥引抜量とMLSSの変化より算出し、Run I からRunIV までの結果をまとめて図16に示す。(1)式による真の転換率の算術平均は Q_1 系で0.59、 Q_2 系で0.63と得られた。前節の回分実験の値とくらべて約0.1小さい値であるが、この理由の一つとして、連続流プラント実験における自己酸化係数はMLSSの経時変化から求めたのに対し、回分実験における自己酸化係数は内生呼吸速度から間接的に求めたものであることが考えられる。また、真の転換率が $a_2 > a_1$ であることは回分実験の場合と同様であるが、みかけの汚泥発生量に顕著な差異がみられないのは表一4に示してある各RunのCOD-SS負荷の違いがRun IVの Q_2 系を除いてそれ程大きいものではないためと考えることができる。

次に、自己酸化係数とみかけの汚泥発生量から求めた真の汚泥発生量の経日変化の一例を図一17に示す。真の汚泥発生量は大きく変動しているが、図一15に示したように沈後水中のCODやSS濃度の変動は小さく、また、表一5に示すRun IIの期間中に3回測定した自己酸化係数の変化が小さいことから、この真の汚泥発生量の変動は実験誤差と考えられる。一方、前節で示した(6)式にもとづき、SS由来のみかけの汚泥発生量とSS除去量の関係を示したのが図一18である。また、SS由来の真の転換率 a_1^{SS} と a_2^{SS} の平均値はともに0.82と得られた。この値は回分実験結果より得られた数値とよく一致している。ここでSS-COD係数を図一10より1.1とすれば、COD基準の値としては $0.82/1.1 = 0.75$ となる。これに対して、溶解性有機物に由来するCOD基準の真の転換率は図一11(ロ)より0.65であるから、ここでも浮遊性有機物と溶解性

	τ_7	τ_{12}	τ_{19}
Q_1 系	4.9	4.9	5.3
Q_2 系	4.6	4.9	5.2

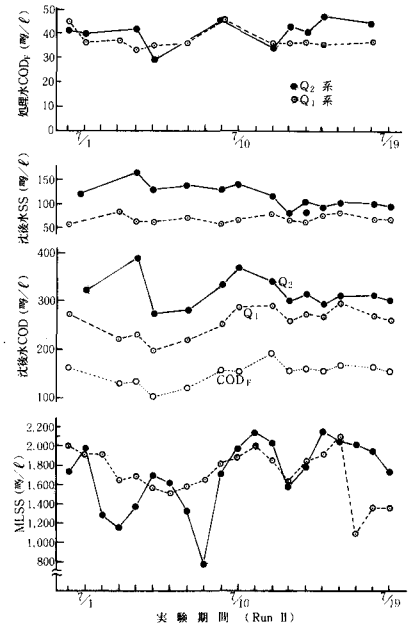
表一5 自己酸化係数 (RunII)



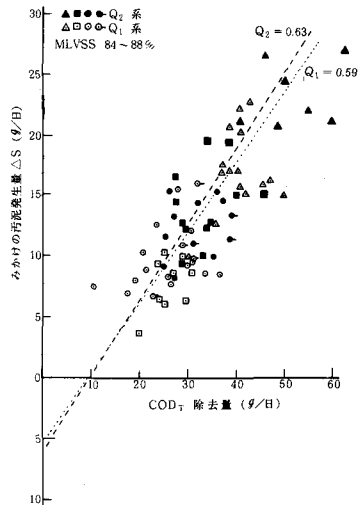
図一14 連続流パイロットプラント

Run No	エアレーション時間 (hr)	曝気槽流入COD (mg/L)	曝気槽流入SS (mg/L)	MLSS (mg/L)	処理水COD _F (mg/L)	COD-SS負荷 _F (gCOD/gSS·d)	自己酸化係数 _F (d ⁻¹)	汚泥転換率 _F (gCOD/gSS·d)
I	4	Q_1 180	47	1,440	39	0.76	4.2	0.56
		Q_2 210	76	1,530	38	0.82	3.9	0.57
II	4	Q_1 255	68	2,160	37	0.71	5.0	0.63
		Q_2 316	115	2,150	41	0.88	4.9	0.59
III	6	Q_1 269	80	1,510	54	0.65	3.8	0.55
		Q_2 310	120	2,250	45	0.49	3.5	0.65
IV	10	Q_1 245	81	1,500	42	0.43	2.9	0.61
		Q_2 280	128	2,550	40	0.29	3.1	0.69

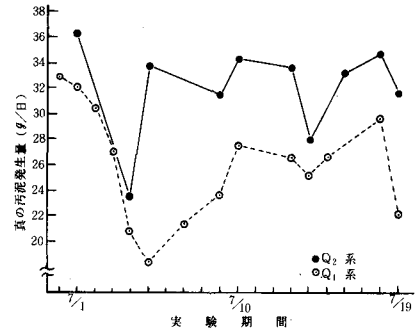
表一4 連続流実験条件と結果



図一15 プラント運転状況



図一16 COD除去量とみかけの汚泥発生量



図一17 真の汚泥発生量の日変化

有機物ではその分解の程度に大きな差がないことが明らかである。

ところで、真の転換率が一定であるとすれば、余剰汚泥発生量は主に(1)式右辺の bX 項が問題となり、 X が一定とすれば自己酸化係数 b の値が ΔS を決定づけることになる。 b 値は細胞内基質量や汚泥令あるいは生物相と関係する因子であるから Run I ~ Run IV で得られた b 値を有機物負荷の関数と考えるとプロットすると図-19 のようになる。 b 値と COD-SS 負荷の間にやや正の相関がみられるが、その変化は小さい。そのような COD-SS 負荷に対して b 値が大きく変化しないという傾向は、曝気槽で汚泥をできるだけ分解し減少させようとする場合に重要であろう。最後に、3.4 節で得られた真の汚泥転換率を COD-SS 負荷に対してプロットすると図-20 のようになる。 a 値は COD-SS 負荷とは無相関であることおよび回分式実験で得られた a 値が連続流プラントで得られた値よりも大きいことが明らかである。後者の理由は確かではないが回分式実験における b 値を決めるために使用される汚泥の COD 当量がやや低めに測定されているためと考えている。

6 汚泥発生量に関する試算

前節までに得られた数値にもとづいて活性汚泥法における初沈汚泥および余剰汚泥の発生量に関する試算を行い、下水汚泥量の減少の可能性について検討する。最初沈殿池での除去率には図-8 のデータを用い、流入下水と曝気槽の条件は、流入下水の COD 450 mg/l 、SS 250 mg/l 流入下水量 240 l/日 、曝気槽容積 60 l 、曝気滞留時間 6 時間、水温 20°C 、曝気槽での COD 除去率は一律 90% とする。また、MLSS は $2,000 \text{ mg/l}$ で一定に保たれると仮定する。(1) 式における汚泥の真の転換率 a は前節の連続流プラント実験で得られたものを用いることとし、水面積負荷が $25 \text{ m}^2/\text{m}^2 \cdot \text{日}$ 以下では Q_1 系の 0.59、それを越えた領域では Q_2 系の 0.63 を採用し、自己酸化係数は図-19 より 5×10^{-3} ($1/\text{hr}$) を選んだ。試算結果を図-21 (イ) に示す。また、長時間曝気法を想定して、曝気滞留時間を 18 時間、MLSS を $4,000 \text{ mg/l}$ とし、さらに自己酸化係数を 3×10^{-3} ($1/\text{hr}$) に変えて計算した結果を同図 (ロ) に示す。図 (イ)、(ロ) のいずれも、水面積負荷が $50 \text{ m}^2/\text{m}^2 \cdot \text{日}$ 以下で全汚泥量の減少が大きい。また、最初沈殿池がない状態で考えると、(イ) の場合は全汚泥は $10 \text{ m}^2/\text{m}^2 \cdot \text{日}$ の値を 100 とすれば 27% 減、(ロ) の場合は 40% 減となっている。一方、初沈汚泥と余剰汚泥の割合をみると (イ) の場合 $18 \text{ m}^2/\text{m}^2 \cdot \text{日}$ 付近でそれぞれが同比率になるのに対し、(ロ) の場合は余剰汚泥の発生量が相対的に多いため $35 \text{ m}^2/\text{m}^2 \cdot \text{日}$ 付近で同比率となっている。

次に、実際の都市下水処理場でみられるような自己酸化係数 b 値の変化を考慮した上で、曝気滞留時間が

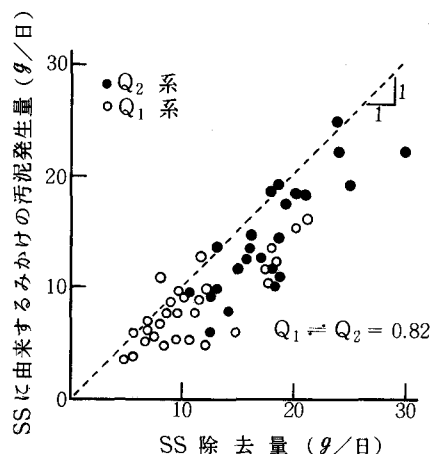


図-18 SS 除去量とみかけの SS 由来汚泥発生量

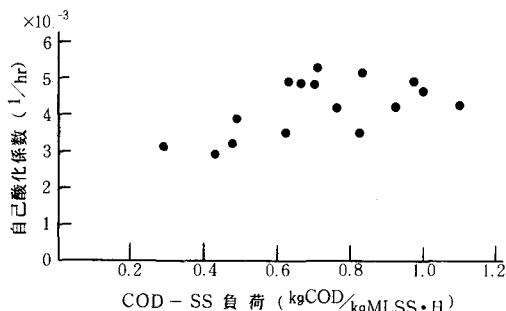


図-19 COD-SS 負荷と自己酸化係数

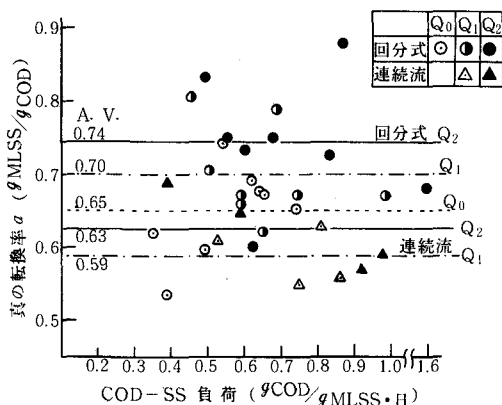


図-20 COD-SS 負荷と真の汚泥転換率

汚泥発生に及ぼす効果を調べてみる。b 値が変化する原因としては水面積負荷の増大による COD-SS 負荷の増大や曝気滞留時間の延長による COD-SS 負荷の減少があげられる。前と同様の流入下水を用い水面積負荷を $50 \text{ m}^2/\text{m}^2 \cdot \text{日}$ 、MLSS $2,000 \text{ mg}/\ell$ と固定した場合について、b 値を曝気滞留時間が $4 \sim 8$ 時間では 3×10^{-3} 、12 時間では 2.5×10^{-3} 、16~20 時間では $2 \times 10^{-3} (1/\text{hr})$ と変えて計算した結果を図-22 に示す。ただし、COD と BOD への換算は図-6 を参考にして $\text{COD } 450 = \text{BOD } 340 \text{ mg}/\ell$ とした。図の結果より、曝気滞留時間の増大とともに余剰汚泥発生量が減少することが示されている。ただし、 $4 \sim 8$ 時間での b 値は通常の都市下水処理場における値であるが、12 時間以降の b 値は全くの推定値である。したがって、今後は COD-SS 負荷あるいは BOD-SS 負荷の違いによる自己酸化係数の変化について活性汚泥の生物相を含めたより広範な検討が必要であろう。

7 おわりに

活性汚泥法による下水汚泥の発生量について、家庭下水を用いた実験にもとづいて検討した結果を以下にまとめる。

- 1) 沈後水中の浮遊性有機物に由来する BOD の濃度は溶解性 BOD と同程度であるが、短時間 BOD 反応からみた分解量は溶解性 BOD の約 $1/2$ である。
- 2) VSS が 80% 以上のとき、SS に対する SS 由来の BOD の比率 (SS・BOD 係数) は $0.3 \sim 1.3$ の範囲で変化するが、平均的には $0.6 \sim 1.0$ の範囲にあるものが多い。また、粒径が大きいと考えられる SS の SS・BOD 係数はやや低くなる傾向があるが、大きく低下することはない。
- 3) 回分式および連続流実験の結果から、SS に由来する SS 基準の汚泥への真の転換率はおよそ 0.8 であった。

- 4) 溶解性下水に由来する COD 基準の汚泥への真の転換率は 0.65、水面積負荷が $50 \text{ m}^2/\text{m}^2 \cdot \text{日}$ 以下における SS を含む下水ではおよそ $0.6 \sim 0.7$ の範囲にあると考えることができる。また、BOD 基準では上記の値を約 0.75 で除した値となる。

- 5) 水面積負荷が $10 \text{ m}^2/\text{m}^2 \cdot \text{日}$ でしかも通常の処理条件で発生する汚泥量にくらべて、水面積負荷をできるだけ大きくした高負荷運転が可能であれば、全下水汚泥 (初沈汚泥 + 余剰汚泥) で最大 27% の減少が期待できるという試算結果を得た。さらに、長時間エアレーション方式を考えると、同じく最大 60% まで減少させることが可能であると予想された。

最後に、本研究を行うにあたり多大な御便宜を受けた北海道江別市大麻団地下水処理場の皆様に厚く謝意を表す。

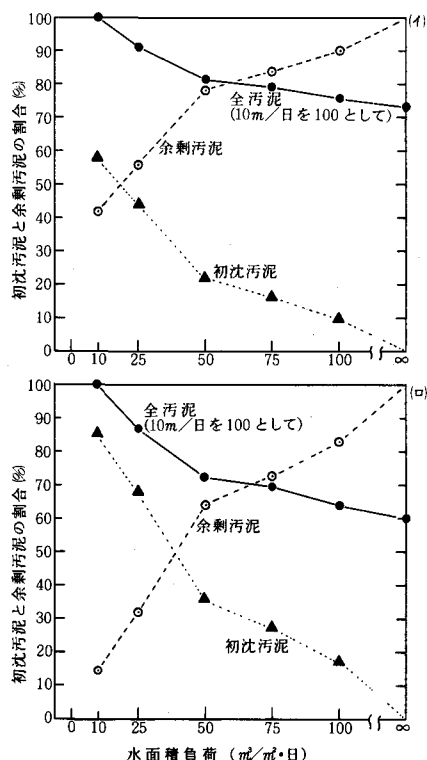


図-21 最初沈殿池水面積負荷と汚泥発生量の割合

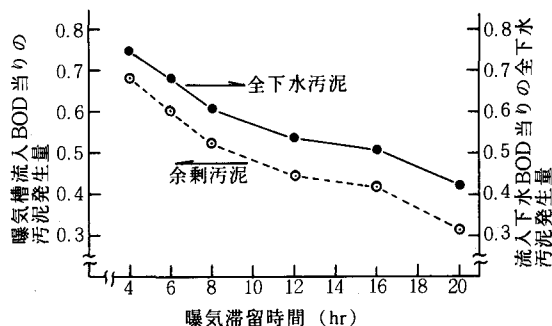


図-22 曝気滞留時間と汚泥発生量の変化 (試算)