

(3) 回分式活性汚泥における負荷速度と Sphaerotilus natans の増殖の関係

INFLUENCE OF LOADING RATE ON GROWTH OF Sphaerotilus natans
IN THE SEQUENTIAL BATCH REACTOR ACTIVATED SLUDGE SYSTEM

山本(池本)良子*・小森友明*・松井三郎**

Ryoko Ikemoto YAMAMOTO*, Tomoaki KOMORI*, Saburo MATSUI**

ABSTRACT; A sequential batch reactor activated sludge system was operated on several feeding schedule using artificial wastewater made up of glucose and peptone and influence on sludge settleability of the loading rate which meant volumetric organic loading during the feeding period was examined. When the loading rate was low, Sphaerotilus natans grew predominantly. The polysaccharide storage capacities and carbohydrate metabolism rates were examined using the activated sludge capacity test. When the loading rate was low, filamentous bulking sludge which had the low polysaccharide storage capacity and the fast metabolism rate was produced. A simple kinetic model of storage and metabolism was developed to explain the growth of filamentous bacteria in the activated sludge. The kinetic model could express the activated sludge metabolism of carbohydrates in both the capacity test condition and the operating condition very well. Using the model, the competitive growth of floc forming bacteria and filamentous bacteria was calculated. It was suggested that at the high loading rate operation, floc forming bacteria which had high polysaccharide storage capacity became dominant, while at the low loading rate operation, filamentous bacteria which had the low polysaccharide storage capacity and the high metabolism rate could become dominant.

KEYWORDS; Activated sludge, sequential batch reactor activated sludge system, filamentous bulking, Sphaerotilus natans, polysaccharide storage, loading rate, kinetic model.

1. はじめに

回分式活性汚泥法はバルキングが発生しにくいことや処理水質が安定している等から、近年の制御技術の発展にともない、主に小規模処理施設として注目を浴びている方式である。しかし、この方式の最大の特徴であるバルキング制御に関しては、運転方法によって必ずしも満足のいく結果とはならない。特に、廃水注入を連続的に行う方式ではしばしば沈降性が悪化するが上澄み排出量を全体の1/2以下にして運転を行っているケースが多いため、かろうじて汚泥の流出をまぬがれているようである。バルキング問題が解決すれば沈殿後の汚泥界面が低下し上澄み排出量を増加させることにより、より効率の良い処理が可能となると考えられる。また、近年開発が進んできた汚泥界面検出装置により界面ぎりぎりまでの上澄みの排出を行うことも有効となるであろう。

活性汚泥のバルキングに関しては古くから多くの研究が行われてきた。特に、Sphaerotilus natansを原因とするバルキングの研究報告は多く認められる。Sezginら¹⁾は、Sphaerotilus natansの増殖は曝気槽内の低DOによるものであることを報告し、さらにRichardら²⁾はSphaerotilus natansのDOに対する親和性がZoogrea ramigeraと比較して高いことを実験的に証明してる。Chudobaら³⁾は基質濃度勾配説を提案し、さらにCechら⁴⁾はバルキング汚泥と非バルキング汚泥の呼吸速度を測定することによりモノー式の半飽和定数 K_s と最大増殖速度 μ_{max} を求め、基質濃度勾配説でSphaerotilus natansの増殖を説明してい

* 金沢大学工学部土木建設工学科 (Department of Civil Engineering, Kanazawa Univ.), ** 京都大学工学部付属環境微量汚染制御実験施設 (Laboratory for Environmental Micropollutants, Kyoto Univ.)

る。また、基質濃度勾配説で説明できない部分を、活性汚泥微生物の基質蓄積 (Accumulation) 能力に着目し、糸状性細菌は蓄積能力が無いが非常に小さいがフロック形成細菌が蓄積物を代謝してその能力をすべて回復できるほどの曝気時間がない場合には優勢に増殖できるという Accumulation regeneration 説により説明している^{5), 6)}。安田ら⁷⁾は飢餓時間比説を提示して、同様に細胞内の貯蔵物質を代謝する時間が十分でない場合に糸状性細菌が増殖すると報告している。しかし、両者とも細胞内の蓄積貯蔵物質を直接測定することは行っていない。筆者ら^{8), 9)}は細胞外の粘性物質および細胞外に吸着されている高分子基質と細胞内の炭水化物を分けて測定する方法を開発するとともに、その方法を用いて活性汚泥微生物の貯蔵能力を測定する方法を提案した。そして、グルコースとペプトンを主体とする人工廃水を用い、連続式および基質を全量一度に投入してから曝気を開始する回分式培養において、基質と微生物の接触時の負荷量である接触負荷量が小さい場合に *Sphaerotilus natans* の増殖が起こり、その原因は *Sphaerotilus natans* の多糖類貯蔵能力が小さいためであることを実験的に検討し報告した。本研究では、同様の人工廃水を用いて運転方法を種々の運転サイクルの回分式活性汚泥法に拡張して、*Sphaerotilus natans* の増殖に対する多糖類貯蔵能力の関わりをさらに検討した。その際、接触負荷量を定義することができないため、運転のパラメーターとして廃水注入時間中の負荷速度を定義した。さらに、従来までの研究報告に基づいた貯蔵過程を考慮した簡単な代謝モデルを構築し、モデルの妥当性を検討するとともに、本モデルを用いてフロック形成細菌と糸状性細菌の競合増殖としてバルキング発生の説明をおこなった。

2. 実験方法

実験に用いた回分式活性汚泥培養装置の概要を Fig. 1 に示す。装置は 20 l のアクリル円筒であり、底部は円錐型となっている。また、タイマーと液面制御装置により自動的に流入、曝気、沈殿、廃水の工程を繰り返す事ができる。本装置を用い、Table 1 に示す Run 1～8 の運転を行った。すべて、グルコースとペプトンを主体とする人工廃水を用い、容積負荷を一定とするように運転を行った。Run 1～4 は 1 日 4 回廃水の流入を行うもので、流入の時間をそれぞれ 40 分、1 時間、1.5 時間、2 時間に設定した。この間すべて曝気を行っている。その後曝気のみを 5 時間目まで行い、約 1 時間沈殿の後上澄み液を 14 l 排出した。Run 5～8 は 1 日 1 回の工程を繰り返す運転であり、容積負荷を同一とするために Run-1～4 の 4 倍の濃度の廃水を用いている。それぞれ、流入時間を 2、6、8 および 23 時間に設定した運転を行った。それぞれの運転における容積負荷は一定であるが、実際に装置に負荷される速度が異なっているため、本研究では負荷速度という概念を導入する。これは廃水流入中、1 時間当たり 1 l の装置に負荷される有機物の量 (ここでは COD_{cr}) を示すものであり、サイクルの異なる運転でも同一の見方で評価することができる。余剰汚泥は 1 日 1 回沈殿直前の混合液から槽内水量全量の 1/5 に当たる 4 l を引き抜くこととした。上澄み排出量が多かったため、沈降性が悪化した場合には汚泥の流出を招き、SRT は一定とはならなかった。

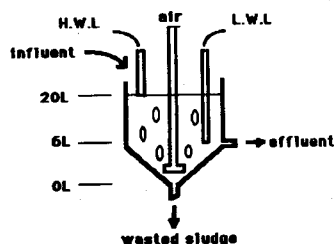


Fig. 1 Experimental set up of sequential batch reactor.

Table 1 Experimental procedures of cultivation of activated sludges.

Run No.	Feeding schedule			Synthetic Waste-water*	Loading Rate (gCOD/L.hr)
	cycle	feeding time (hrs)	aeration time (hrs)	settling time (hrs)	
Run 1	4 times-a-day	0.67	4.33	1	1/4 GP 0.548
Run 2	4 times-a-day	1.0	4.0	1	1/4 GP 0.368
Run 3	4 times-a-day	1.5	3.5	1	1/4 GP 0.245
Run 4	4 times-a-day	2.0	3.0	1	1/4 GP 0.184
Run 5	once-a-day	2.0	21.0	1	GP 0.735
Run 6	once-a-day	6.0	17.0	1	GP 0.245
Run 7	once-a-day	8.0	15.0	1	GP 0.184
Run 8	once-a-day	23.0	0	1	GP 0.064

*Composition of GP waste is as follows: glucose 1g/L; peptone 1g/L; allylthiourea 0.01g/L; KH₂PO₄ 0.01g/L.

運転開始後、ほぼ毎日余剰汚泥を用いてMLSS、SVIおよびSVIC (SV₃₀を30%以下まで希釈して求めたSVI)¹⁰⁾の測定を行った。SVICは、汚泥を30分後に圧密状態にまですることによりMLSSの影響を除いて沈降性を比較できる指標であり、糸状性細菌の現存量と関係があることを報告している。本実験では運転条件によって沈降性が非常に悪化し、16倍にまで希釈しても全く沈降しない場合があった。そこで、このような汚泥に関してはSVICの値を ∞ と表現することとした。バルキングの度合いを評価するためには、糸状体長を計測することにより、その現存量を調べるのが最も良いと考えられる。また、Run 2およびRun 3以外の運転では、生成汚泥の多糖類、PHB 貯蔵能力および基質代謝能力を調べるために、運転開始後2週間以上経過した後の余剰汚泥を用いてFig. 2 に示すような活性汚泥能力試験⁸⁾を行った。更に、培養装置内での微生物代謝を知るために、1 サイクルの装置内の液相および汚泥内炭水化物、蛋白質の経時の変化を能力試験に準拠して測定した。本論文ではこれを装置内試験と呼ぶこととする。炭水化物の分析にはアンスロン法(グルコース基準)¹¹⁾を、蛋白質の分析にはローリー法(牛血漿アルブミン基準)¹²⁾を、アミノ酸分析には高速液体クロマトグラフィアミノ酸分析装置を用いた。また、汚泥内 PHB測定にはDick assay¹³⁾を一部改良して用いた。それぞれの測定日には糸状性細菌の現存量の指標として糸状体長の計測¹⁴⁾も行った。

3. 実験結果および考察

Fig. 3 はそれぞれの運転におけるSVICの変化を示したものである。Run 1 および 5 以外の運転ではすべて、*Sphaerotilus natans* を原因とするバルキング状態に至った。沈降性が悪化し始める時期は注入時間が長い方が速い傾向にあった。Fig. 4 は負荷速度と運転開始2週間後以降のSVICの平均値の関係を示したものである。負荷速度が小さな運転ほど沈降性の悪い汚泥が生成されることがわかる。Fig. 5 は負荷速度と実験日の糸状体長の関係を示したものであるが、負荷速度の小さな運転では*Sphaerotilus natans* の増殖量が多いことがうかがえる。以上より、負荷速度の小さな運転では*Sphaerotilus natans* の増殖に有利であり 汚泥の沈降性が悪化すると考えられる。

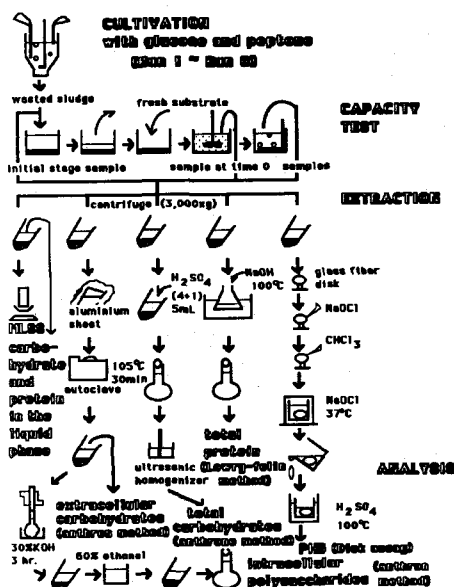


Fig. 2 Experimental procedure of the activated sludge capacity test.

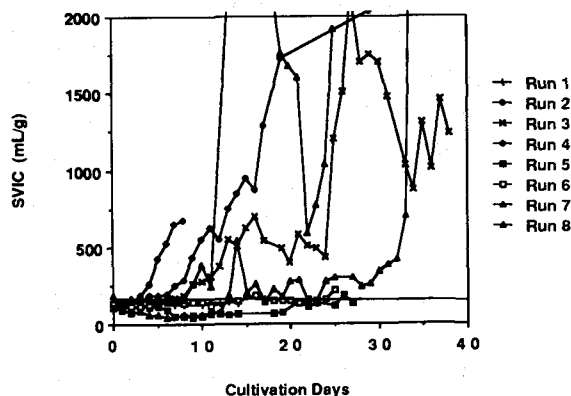


Fig. 3 Course of SVIC

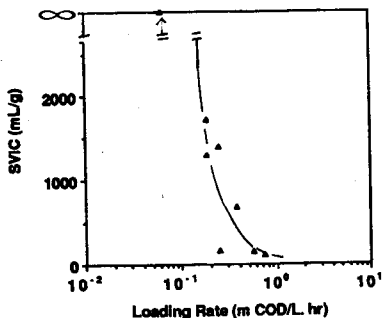


Fig. 4 Relationship between loading rate and SVIC of produced sludge.

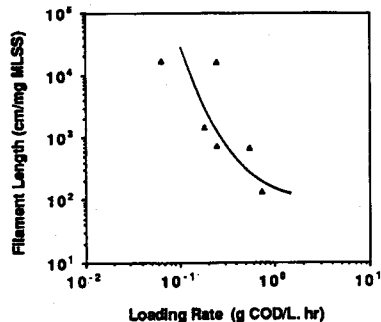


Fig. 5 Relationship between loading rate and filament length of produced sludge.

筆者らは *Sphaerotilus natans* の増殖とその多糖類貯蔵能力の関係について実験的検討を行ってきた。本研究でも、生成した汚泥の貯蔵能力を調べるために活性汚泥能力試験を行った。Fig. 6 は能力試験の典型例として Run 1 の結果を示したものである。液相からの炭水化物、蛋白質の除去に伴い細胞内に多糖類および PHB が貯蔵されることがわかる。特に、多糖類貯蔵量は多く、回分式運転で生成した活性汚泥においても、貯蔵過程が炭水化物の代謝に大きく影響していると考えられる。また、液相からの炭水化物の除去は直線的であるが、蛋白質（アミノ酸 + ローリー法蛋白質）の除去は 1 次反応的でありアミノ酸の除去が先行している。これは蛋白質の除去が加水分解律速となっていることを示唆するものである。図中の混合液内全炭水化物は液相の炭水化物濃度と汚泥内全炭水化物濃度の和を表しており、この変化は炭水化物の代謝分解を表していると考えられる。混合液内全炭水化物はほぼ直線的に減少しており、炭水化物代謝速度は 0 次反応で表すことができる。MLSS は貯蔵物質を含んだものであるが、水分計により測定した値のばらつきが小さかったこと、通常微生物量の指標として用いられる全蛋白質量は本研究では基質中に蛋白質を含んでいるためその吸着量も含まれてきて適切ではないことから、初期値からの汚泥内全炭水化物の増加量を MLSS から差し引いた値を微生物量とした。図中の貯蔵量は単位微生物量当りで示してあるが、本研究では液相中に利用可能な基質が存在する間は貯蔵物質が分解されることはないかと仮定して、貯蔵量の最大値をその貯蔵能力（ここでは飽和貯蔵容量と定義する）と見做すこととする。汚泥内全炭水化物と（細胞内多糖類 + 細胞外炭水化物）の差がフロックを構成する炭水化物と chudoba の言う蓄積（Accumulation）に相当すると考えられるが、その値に殆ど変化が認められないため、回分式活性汚泥法で生成した汚泥においても蓄積過程は炭水化物代謝に重要な役割は果たしていないものと考えられる。

Fig. 7 は装置内試験の典型例として Run 1 の結果を示している。廃水流入中でも炭水化物はその除去が速いため液相中に殆ど検出されてこないが、蛋白質はやや検出されている。また、廃水流入中に貯蔵多糖類の増加が認められるが、その量は能力試験で得られた飽和貯蔵容量と比較すると非常に少なかった。このことより、活性汚泥微生物は生存および増殖に必要なもの以外の余分の炭水化物のみを細胞内に貯蔵していると考えられる。

Fig. 8 は負荷速度と能力試験から求められた多糖類および PHB の貯蔵能力の関係を示したものである。負荷速度が大きな運転になると特に多糖類貯蔵能力が大きな汚泥が生成されていることがわかる。PHB の貯蔵量は多糖類貯蔵量と比較して非常に少なく最大でも微生物量の 1% を占めるに止まっており、本実験の範囲内では活性汚泥微生物代謝に与える影響は小さいものと考えられる。Fig. 9 は SVIC と多糖類貯蔵能力の関係を従来までに得られている結果^{8), 9)} と合わせて示したものである。これらはすべて同一の廃水組成で培養を行った汚泥であり、バルキングの原因微生物はすべて *Sphaerotilus natans* である。従来から指摘してきたように、SVIC の大きな即ち *Sphaerotilus natans* の多く増殖した汚泥は多糖類貯蔵能力が

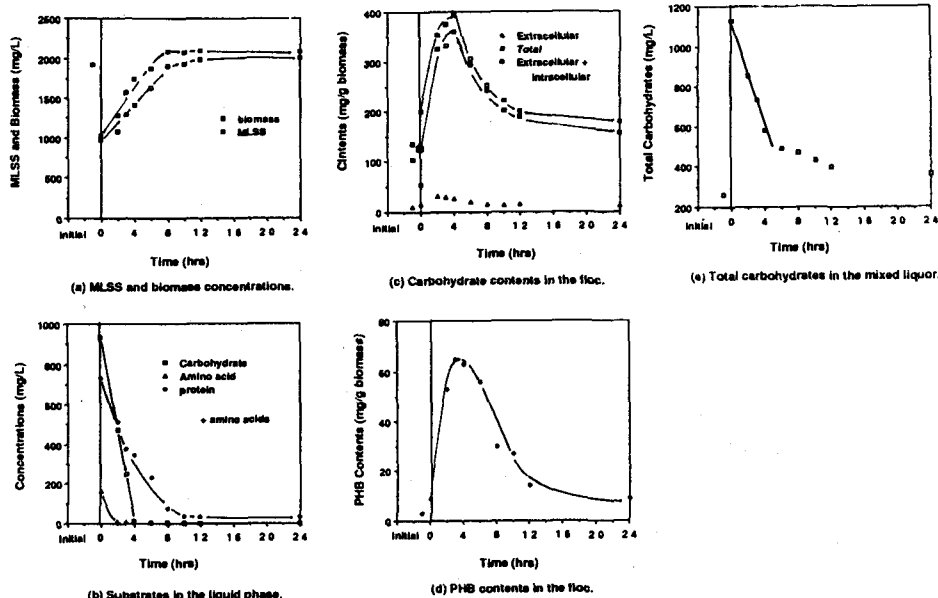


Fig. 6 An experimental result of the capacity test with the activated sludge from Run- 1.

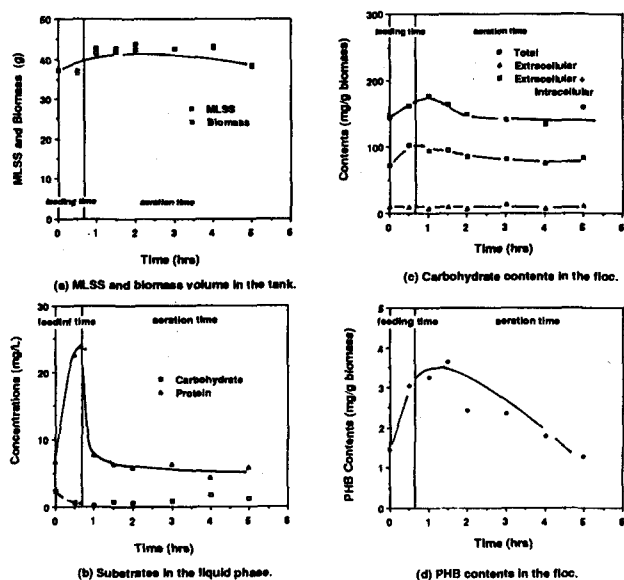


Fig. 7 An experimental result of the operating condition of Run-1.

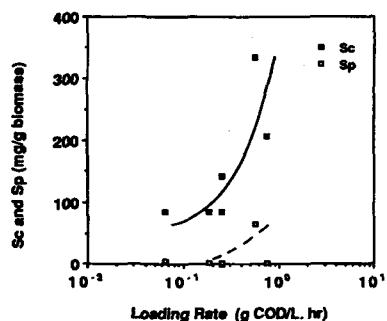


Fig. 8 Relationship between loading rate and specific storage capacities. Sc: Specific storage capacity of polysaccharides, Sp: Specific storage capacity of PHB

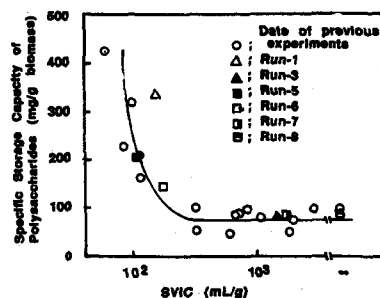


Fig. 9 Relationship between SVIC and specific storage capacity of polysaccharides.

小さい事がわかる。これは、*Sphaerotilus natans* が多糖類を貯蔵する能力がないかまたは小さいことを示唆するものである。

能力試験において、混合液内全炭水化物（液相炭水化物＋汚泥内全炭水化物）の変化速度からそれぞれの汚泥の炭水化物分解速度定数（ K_3 ）を求めた。Fig. 10は負荷速度と炭水化物分解速度定数の関係を示したものである。負荷速度が小さな運転では炭水化物の分解速度が速い汚泥が生成されている傾向にある。見方を換えれば、*Sphaerotilus natans* の多く増殖した汚泥は炭水化物を速く分解することができることになる。これは糸状性細菌である*Sphaerotilus natans* がその形態から酸素の摂取に有利であると考えれば説明が付く現象と考えられる。本実験は、DOは十分の条件で行っているが、DOが律速となるような条件ではこの速度にもっと大きな差がつくものと推定される。これはJenkins らの研究グループの低DO説¹⁾。

²⁾ の考え方を指示するものである。以上の事を考え合わせると、*Sphaerotilus natans* は貯蔵能力が小さい分だけフロック形成細菌に対して不利であるが、代謝速度が大きい分だけ有利となり、貯蔵にまわす余裕の炭水化物が存在しないような運転条件下では優勢に増殖できるものと考えられる。このことを次章で速度論的に説明することとした。

4. 活性汚泥の代謝モデル

本研究では活性汚泥微生物の貯蔵を考慮した代謝機構をFig. 11に示すような簡単なモデルで表すこととする。本モデルでは、有機基質は大きく炭水化物と蛋白質に別けて考えている。多糖類は吸着、加水分解を経て細胞内に取り込まれるが、本研究では基質中の炭水化物として単糖類であるグルコースを用いているのでこの過程は考慮していない。炭水化物は細胞内に取り込まれた後、多糖類合成と代謝（呼吸および細胞合成）に利用されるが、貯蔵とは利用可能な有機基質がなくなった場合にそなえての反応であると考えられるため本モデルでは液相に利用可能な炭水化物が存在する間は貯蔵多糖類は分解されることはなく、利用可能な炭水化物が消失した時点で分解が始まるとしている点に特徴がある。それぞれの速度は次の様な式で表すことができる。

① 多糖類貯蔵速度 r_1

活性汚泥中の微生物はそれぞれ固有の飽和貯蔵容量を持っており、貯蔵速度は貯蔵容量の不飽和量に比例するものとした次式のような津野ら¹⁵⁾ の提案した式で表すことができる。

$$r_1 = K_1 \cdot (S_c - S/M) \cdot M$$

S : 貯蔵多糖類濃度 (mg/L)

S_c : 飽和貯蔵容量 (mg/g微生物)

M : 微生物濃度 (g/L)

K_1 : 貯蔵速度定数 (/hr)

本モデルでは貯蔵物質は利用可能な有機物が液相に存在する間は分解されることはないと仮定しているため、 S_c は前述したように能力試験において貯蔵量の最大値から求めることができる。能力試験において

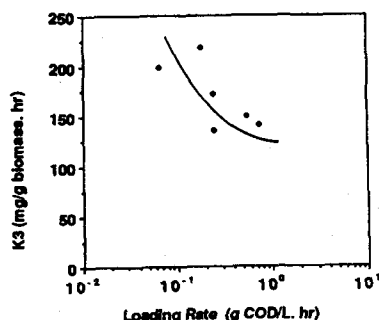


Fig. 10 Relationship between loading rate and metabolic rate of carbohydrates.

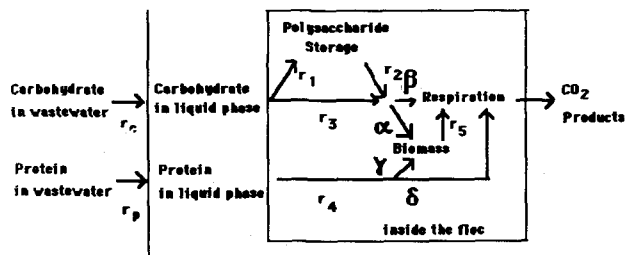


Fig. 11 A schematic concept of the kinetic model.

は $dC/dt = r_1$ で表すことができるため、 K_1 は能力試験における S および M の時間変化より求めることとした。

② 多糖類分解速度 r_2

液相に利用可能な炭水化物が消失した後、貯蔵多糖類は次式のように 1 次反応で分解されるものとする。

$$r_2 = K_2 \cdot S / M \cdot M$$

K_2 : 分解速度定数 (/hr)

K_1 は能力試験において液相からグルコースが除去された後の多糖類消失速度定数として求めることができる。

③ 炭水化物代謝速度 r_3

能力試験の結果、混合液内全炭水化物（汚泥内全炭水化物 + 液相炭水化物）の減少が直線的であったため、炭水化物の代謝速度は 0 次反応で表すことができる。

$$r_3 = K_3 \cdot M$$

K_3 : 代謝速度定数 (mg/g微生物・hr)

K_3 は前述したように能力試験において混合液全炭水化物の消失速度から求めた。

④ 蛋白質分解速度 r_4

蛋白質分解は前述したように加水分解が律速となると考えられる。そこで、蛋白質の分解速度は加水分解速度として 1 次反応を仮定した。

$$r_4 = K_4 \cdot P \cdot M$$

P : 蛋白質濃度 (mg/L)

K_4 : 蛋白質分解速度定数 (/g微生物/L・hr)

K_4 は能力試験において蛋白質（ローリー法蛋白質 + 全アミノ酸）濃度の変化より求めることができる。アミノ酸を測定していない場合にはペプトンのアミノ酸含量より初期値を設定して求めた。

⑤ 自己分解速度 r_5

$$r_5 = K_5 \cdot M$$

K_5 : 自己分解速度定数 (/hr)

K_5 は能力試験において液相から基質が消失した後の微生物量の変化より近似した。

能力試験において液相炭水化物 C 、蛋白質 P 、貯蔵多糖類 S および微生物濃度 M の変化は次式で表すことができる。

① 液相に利用可能な炭水化物が存在する間

$$dC/dt = -r_1 - r_3 \quad dP/dt = -r_4 \quad dS/dt = r_1$$

$$dM/dt = \alpha \cdot a_3 \cdot r_3 + \gamma \cdot a_4 \cdot r_4 - r_5$$

② 液相から利用可能な炭水化物が消失した後

$$dP/dt = -r_4 \quad dS/dt = -r_2$$

$$dM/dt = \alpha \cdot a_3 \cdot r_2 + \gamma \cdot a_4 \cdot r_4 - r_5$$

α : 微生物合成に利用される炭水化物の比率 γ : 微生物合成に利用される蛋白質の比率

a_3, a_4 : 転換係数

α, γ, a_3, a_4 は、最終微生物量から平均的な値として求めた。本実験範囲内ではグルコースとペプトン濃度比を一定に保ってあるため、平均的な値を用いても差し支えないと思われる。

各能力試験結果より係数を求め、初期値問題として各時間の C, P, S, M の計算をアダムス法により行った。Table 2 に求められた係数をまとめて示した。Fig. 12, 13 は代表例として貯蔵能力の大きい Run 1 と貯蔵能力の小さい Run 3 の能力試験における実験値と計算値を比較したものである。両者は良く一致しており、本モデルにより能力試験における活性汚泥微生物の代謝を表すことが可能であると考えられる。その他の実験においても同様な結果を得ることができた。

次に、本モデルを実験装置で行っている連続注入の運転条件に拡張することを試みた。基本的には概念図 (Fig. 11) にあるように基質注入速度 r 。および r_c が加わってくる。能力試験で求められた係数はその污泥の固有の能力を表していると考えられるので、その値を用いることとした。また、装置内試験の結果、通常運転中の貯蔵量は能力試験で求められた貯蔵能力よりもずっと小さかったことより、活性污泥微生物は常に代謝を優先し余裕の炭水化物が存在する場合にのみそれを貯蔵することができると仮定した。これらの仮定を踏まえて、それぞれの運転条件での1サイクルの細胞内外の炭水化物および蛋白質量の時間変化の計算を行った。Fig. 14, 15 は代表例としてRun 1および3の装置内実験の結果と計算値を比較したものである。両者は比較的良く一致しており、本モデルにより活性污泥微生物の貯蔵、代謝を表すことができると考えられた。

5. 競合増殖計算

Table 2より、各値を比較すると、前述したように S_c と K_3 でバルキング污泥と非バルキング污泥の間に大きな差が認められた。すなわち、糸状性細菌はフロック形成細菌と比較して多糖類貯蔵能力が小さいが代謝能力が大きいと見做すことができる。そこで、それらの能力差による糸状性細菌とフロック形成細菌との競合増殖としてバルキングの発生をとらえた計算を行うこととした。計算条件は次のように設定した。

(1) 貯蔵能力が大きく代謝速度の遅い微生物群: M_1 (フロック形成細菌) と貯蔵能力が小さく代謝速度の速い微生物群: M_2 (糸状性細菌) の2種類のみが存在すると仮定する。Run 1では糸状性細菌は重量比で1%以下であり殆どがフロック形成細菌とみなしてもよいと考えられるため、 M_1 の多糖類貯蔵容量および代謝速度係数はRun 1の値 ($S_c = 334$, $K_3 = 150$)を用いた。一方Run 3ではフロックも存在していたため、存在割合を次

Table 2 Coefficients of the kinetic model.

Run No.	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	S_c
Run 1	1.81	0.04	150	0.26	0.01	334
Run 3	1.33	0.08	172	0.32	0.01	85
Run 5	1.88	0.06	141	0.28	0.02	213
Run 6	1.89	0.05	136	0.29	0.01	145
Run 7	1.43	0.04	218	0.38	0.01	91
Run 8	1.24	0.05	199	0.28	0.03	45

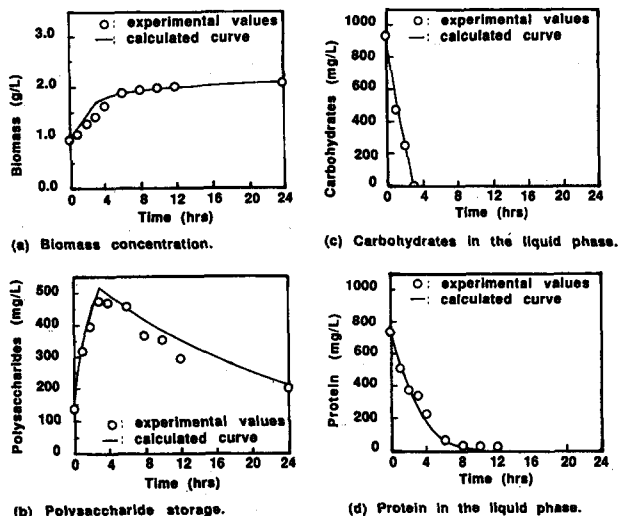


Fig. 12 The experimental results and calculated curves of the capacity test with the activated sludge of Run 1.

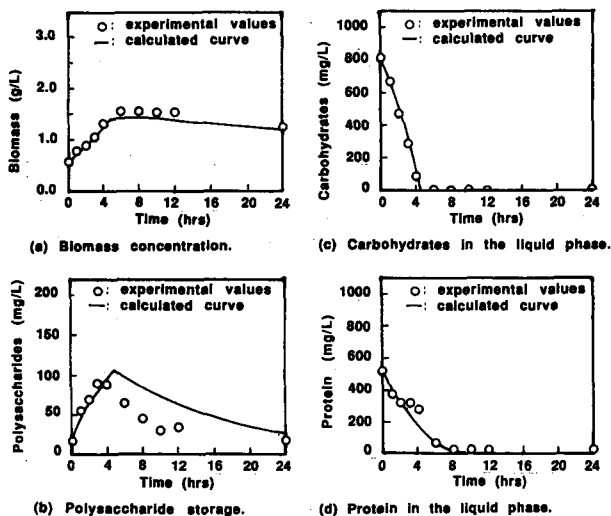


Fig. 13 The experimental results and calculated curves of the capacity test with the activated sludge of Run 3.

のように推定した。出現した *Sphaerotilus natans* の径は $0.8 \sim 0.9 \mu\text{m}$ (平均 $0.85 \mu\text{m}$ を用いた), 長さは $29,460 \text{ cm/mg}$, 含水率 20% とすると重量比で 84% が糸状性細菌ということとなる。顕微鏡観察によると視覚的にもフロックの存在割合が $10 \sim 20\%$ 程度であったため, 16% 程度と仮定して糸状性細菌 M_2 の値を求めた ($S_0 = 31.5$ $K_3 = 176$)。その他の係数は同一 (ここでは Run 1 の値を用いた) とした。

(2) 初期投入汚泥の微生物量は M_1 が 98.5% , M_2 が 1.5% に設定した。これは(1)と同様に計算すると糸状体長で約 530 cm/gMLSS , SVIC で約 150 mL/g に相当しており, 種汚泥として用いた実処理場活性汚泥の値 (糸状体長が数百 cm/gMLSS , SVIC が $100 \sim 150 \text{ mL/g}$) に近い値である。

(3) 1 日 1 回の汚泥の引き抜きを考慮した。

(4) 沈殿時間中には変化は起こらないものと仮定した。

(5) M_1 , M_2 の濃度から(1)と同様糸状性細菌の平均径を W (本実験では $0.85 \mu\text{m}$), 含水率を 80% として次式のように糸状体長 FL を換算し, Fig. 16 に示すような糸状体長と SVIC の関係から沈降性の変化を求めた。

$$FL = \frac{M_1}{M_1 + M_2} \cdot \frac{1}{(W/2 \times 10^{-4})^2 \times \pi \times 0.2}$$

(6) 実験装置内での沈降性は SVIC の値と同様と仮定して, 沈降性の変化に伴う装置からの汚泥の流出を以下のように考慮した。即ち, 実験装置全容量が 20 l で上澄みが 14 l 排出されるので $SV_{30} < 30$ では汚泥の流出は起こらないが, $SV_{30} > 30$ では流出後の汚泥量は流出前の $30/SV_{30}$ となる。

以上の条件により, 1 日 4 回基質注入のサイクルで注入時間を変化させて計算を行った結果を Fig. 17 に示す。(c) 40 分注入, (d) 1 時間注入, (e) 1.5 時間注入, (f) 2 時間注入がそれぞれ Run 1, 2, 3, 4 に対応する。基質注入時間が短い (負荷速度が大きい) とフロック形成細菌 M_1 が多糖類を多く貯蔵し優勢に増殖しているが, 貯蔵能力の小さな糸状性

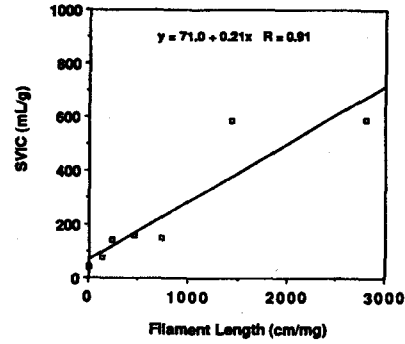


Fig. 16 Relationship between filament length and SVIC.

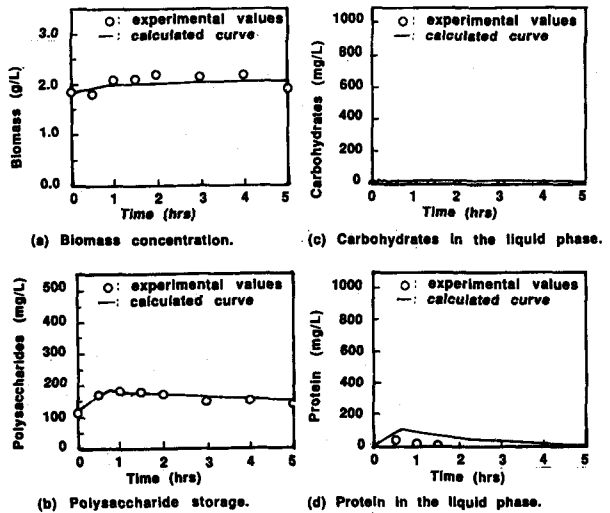


Fig. 14 The experimental results and calculated curves in the sequential batch system of Run 1.

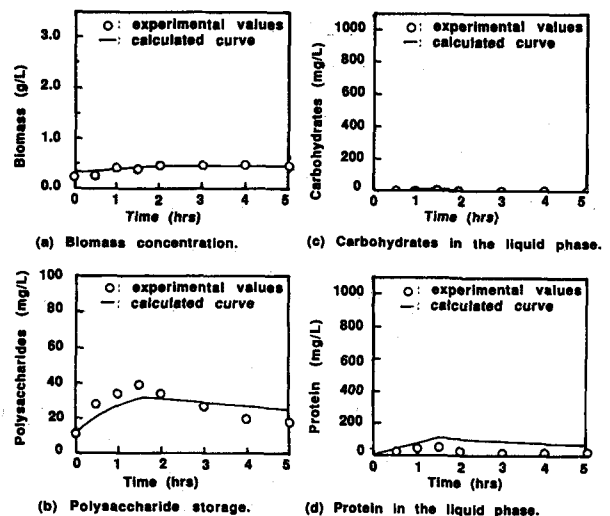


Fig. 15 The experimental results and calculated curves in the sequential batch system of Run 3.

細菌は増殖できずSVICが減少している。一方、基質注入時間が長い（負荷速度の小さな）運転では貯蔵にまわる余裕の炭水化物が存在しないためフロック形成細菌も多糖類貯蔵を行うことができず、代謝速度の速い糸状性細菌の方が優勢に増殖しはじめ沈降性が悪化している。基質注入時間30分でSVICはほぼ一定であり、40分でも僅かに増加した後一定になっていることから、基質注入時間30～40分がバルキングを起こさない限界注入時間であると推定される。計算されたSVICの値の増加速度は実験値よりもかなり遅く値も小さくなっているが、実験において注入時間40分のRun 1でバルキングが起こらず、それ以上でバルキング状態となったことは定性的によく一致している。Fig. 17 は1日1回の基質注入条件で計算を行った結果を示したものである。(b)2時間注入、(d)6時間注入、(e)8時間注入がそれぞれRun 5, 6, 7に対応している。1日4回の基質注入条件と同様に負荷速度が小さい運転ではバルキングが発生することを定性的に良く表している。また、バルキングが起こらない限界注入時間は2時間～2時間40分であり、これは負荷速度で表すと1日4回のサイクルの30分注入～40分と同一の値であった。このことは負荷速度でバルキングを評価することの妥当性を示したものと考えられる。SVICの値が定量的に一致していない原因としては M_1 、 M_2 からのSVICの換算方法等の問題が挙げられるが、バルキングが起こり得るかとうかの定性的評価に関しては本モデルは十分に有効と考えられる。

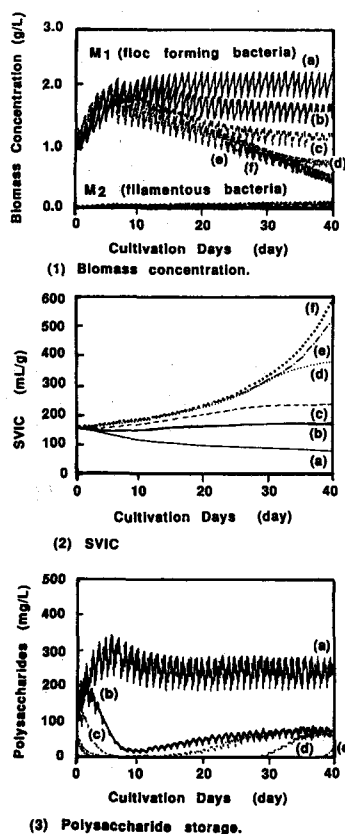


Fig. 17 Competitive growth of microorganisms M_1 and M_2 in sequential batch activated sludge system operated with 4 times-a-day feeding schedule. M_1 (floc forming bacteria) and M_2 (filamentous bacteria) have the specific storage capacity of 334 and 31.5 mg/g biomass, and have the specific metabolism rate of 150 and 176 mg glucose/g biomass.hr, respectively. Feeding times are as follows; (a) 15 min; (b) 30 min; (c) 40 min; (d) 1 hr; (e) 1.5 hr; (f) 2 hr.

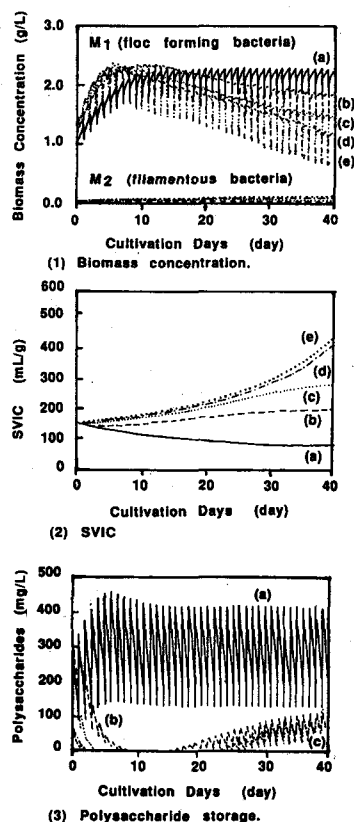


Fig. 18 Competitive growth of microorganisms M_1 and M_2 in sequential batch activated sludge system operated with once-a-day feeding schedule. M_1 and M_2 have the same kinetic coefficients of Fig. 17. Feeding times are as follows; (a) 1 hr; (b) 2 hr; (c) 2 hr 40min; (d) 6 hr; (e) 8 hr.

以上の結果より、バルキングの発生を貯蔵能力が大きい代謝速度の遅いフロック形成細菌と貯蔵能力は小さい代謝速度のやや速い糸状性細菌の競合増殖で説明することができた。実際に炭水化物を多く含む廃水を回分式活性汚泥法で処理する場合、しばしばバルキングに悩まされることとなるが、廃水注入時間を短縮すればこの問題は解決するものと推察される。しかし、実際には注入時間を短くするには大容量の貯留槽とポンプが必要となってくるため、極端に注入時間を短く設定することは必ずしも実用的ではない。そのため、実験室レベルの実験を基に廃水注入時間によるバルキングの予測計算を行うことは有効と考えられる。

6. まとめ

- (1) グルコースとペプトンを主体とする人工廃水を用い、種々の負荷速度での回分式活性汚泥の運転を行った結果、次のことがわかった。
 - ① 負荷速度の小さな運転では *Sphaerotilus natans* の増殖に有利であり、沈降性が悪化した。
 - ② 負荷速度の小さな運転では、多糖類貯蔵能力の小さい汚泥が生成される。
 - ③ 負荷速度の小さな運転では炭水化物代謝速度がやや速い汚泥が生成される。
- (2) 多糖類貯蔵過程を考慮した代謝モデルの構築を行い、モデルの妥当性を検討した結果、本モデルで活性汚泥微生物代謝をほぼ表すことが可能であった。
- (3) 本モデルを用いて、貯蔵能力が大きい代謝速度の小さな微生物群であるフロック形成細菌と貯蔵能力は小さい代謝速度のやや速い微生物群である糸状性細菌との競合増殖として *Sphaerotilus natans* を原因とするバルキング発生を予測計算することが可能であった。

謝辞: 本研究に協力をいただきました金沢大学工学部卒業生、川端衛氏および西野栄司氏(現金沢市役所)に感謝致します。本研究の一部は、文部省科学研究費補助金奨励研究A(No. 62750536)の補助により行いました。

参考文献

- 1) M. Sezgin, D. Jenkins and D. S. Parker: A unified theory of filamentous activated sludge bulking, JWPFCF, Vol. 50, No. 2, pp. 362-381, 1987
- 2) M. Richard, O. Hao and D. Jenkins: Growth kinetics of *Sphaerotilus* species and their significance in activated sludge bulking, Vol. 57, No. 1, pp. 68-81, 1985
- 3) J. Chudoba, P. Grau and V. Ottova: Control of activated sludge filamentous bulking - II Selection of microorganisms by means of a selector, Water Res., Vol. 7, pp. 1389-1406, 1973
- 4) J. S. Cech, J. Chudoba and P. Grau: Determination of kinetic constants of activated sludge microorganisms, Wat. Sci. Tech., Vol. 17, pp. 259-272, 1984
- 5) J. S. Cech and J. Chudoba: Influence of accumulation capacity of activated sludge microorganisms on kinetics of glucose removal, Water Res., Vol. 17, No. 6, pp. 659-666, 1983
- 6) J. Chudoba, J. S. Cech, J. Farkac and P. Grau: Control of activated sludge filamentous bulking - Experimental verification of a kinetic selection theory, Water Res., Vol. 19, No. 2, pp. 191-196, 1985
- 7) 安田正志, 能登雄二: *Sphaerotilus* sp. を原因とする糸状性バルキングと飢餓時間比の影響, 下水道協会誌, Vol. 18, No. 202, pp. 41-49, 1981
- 8) 松井三郎, 山本良子: 活性汚泥の多糖類貯蔵能力及び *Sphaerotilus natans* の出現に及ぼす接触負荷量の影響, 下水道協会誌, Vol. 25, No. 286, pp. 53-63, 1988
- 9) Ryoko Yamamoto and Saburo Matsui: Influence of contact loading on polysaccharide storage and settleability of activated sludge, Wat. Sci. Tech., 1990, 掲載予定
- 10) 松井三郎, 山本良子: 活性汚泥の圧密性凝集性に及ぼす糸状性細菌の役割, 下水道協会誌, Vol. 21, No. 236, 1984
- 11) D. Herbert, P. J. Phipps and R. E. Strange: *Methods in microbiology* (ed. J. R. Morris et al.), 5B, pp. 226, Academic Press.
- 12) O. H. Lowry, N. J. Rosebrough, A. L. Farr and R. J. Randall: Protein measurement with the folin phenol reagent, J. Biol. Chem., Vol. 193, pp. 265-275, 1951
- 13) A. C. Ward and E. A. Dawes: A disc assay for poly- β -hydroxybutyrate, Analytical Biochem., Vol. 52, pp. 607-613, 1973
- 14) 松井三郎, 山本良子: カラーテレビモニターを用いた活性汚泥の糸状性細菌長, 糸状菌長およびフロック投影面積の測定, 下水道協会誌, Vol. 20, No. 224, pp. 12-19, 1983
- 15) 合田健・宗宮功・津野洋: 基質除去ならびに代謝に関する動力学モデル, 土木学会論文報告集, 第213号, pp. 17-28, 1973