

東京大学 ○山本貴弘
同上 味埜 俊
同上 松尾友矩

1. 目的

現在都市下水からリンを除去する処理プロセスとして嫌気好気法が普及しつつある。嫌気好気法においてリン除去の中心的役割を担っていると考えられているのがポリリン酸蓄積細菌 (Polyphosphate Accumulating Organisms, 以下PAO) である。PAOがこの処理プロセスにおいて卓越する原因は、嫌気工程においてすばやく有機物を摂取しPHAとして体内に蓄積できるからである。このときに必要な還元力は好気工程であらかじめ蓄えられていたグリコーゲンを分解することによって得ていると考えられている。一方、IWAQは嫌気好気プロセスのモデルとして Activated Sludge Model No.2(ASM2)を提案しているが、ASM2はグリコーゲンに関する代謝を考慮していない。よって、グリコーゲンの代謝に関する動力学定数を決定し、ASM2をグリコーゲンの代謝を含めたモデルに改善する必要がある。そこで本研究では、SRTの異なる2つのリアクターを運転し定常状態での汚泥蓄積多糖類量を測定することにより、グリコーゲンの自己分解定数の値を求めた。さらに、PAOの菌体自体の自己分解定数とグリコーゲンのそれとを比較することにより、PAOの有機物代謝におけるグリコーゲンの意味を考察した。

2. グリコーゲンの自己分解定数の計算方法

2.1 定常状態における基質の収支

嫌気好気法の嫌気工程・好気工程を通じて汚泥内蓄積グリコーゲンの含有量はダイナミックな変化を示すが、プロセス全体を通じての平均的仮想的な基質摂取速度およびグリコーゲン代謝速度を考えることにする。汚泥菌体に取り込まれた有機基質は菌体増殖・グリコーゲン合成・PHA合成などに使われる。このとき、基質摂取速度を以下のように定義する。

$$\begin{aligned} r_s &= \Delta S / \theta & r_{\text{Glycogen}} &= \Delta S_{\text{Glycogen}} / \theta & (2.1) \\ \text{プロセス全体の滞留時間} & & & : \theta \\ \text{摂取された基質量} & & & : \Delta S \\ \text{そのうちグリコーゲン合成のために用いられる部分} & & & : \Delta S_{\text{Glycogen}} \\ \text{摂取された基質量のうちグリコーゲン合成のために用いられる部分の割合} & & & : \beta \\ \text{平均的比基質摂取速度} & & & : r_s \\ \text{そのうちグリコーゲン合成の寄与分} & & & : r_{\text{Glycogen}} \end{aligned}$$

このとき、 $r_{\text{Glycogen}} = \beta \cdot r_s$

微生物の一般的な増殖動力学にならひ、グリコーゲンも合成と自己分解が同時に進行し、その一部は自己分解のために目減りすると考えると

$$\begin{aligned} r_s \cdot \text{Glycogen} &= r_G \cdot \text{Glycogen} + r_M \cdot \text{Glycogen} & (2.2) \\ r_G \cdot \text{Glycogen} &: \text{グリコーゲンの合成速度(mgC/L)} \\ r_M \cdot \text{Glycogen} &: \text{グリコーゲンの自己分解速度(mgC/L)} \end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned} \mu_{\text{Glycogen}} (\text{mgC Glycogen/mgVSS/d}) &: \text{単位MLVSS単位時間あたりのグリコーゲン蓄積量} \\ \eta_{\text{Glycogen}} (\text{mgC Glycogen/mgC}) &: \text{単位基質消費量あたりのグリコーゲン蓄積量} \\ b_{\text{Glycogen}} (\text{mgC Glycogen/mgVSS/d}) &: \text{単位MLVSS単位時間あたりのグリコーゲン自己分解量} \end{aligned}$$

で定義される値を導入すると、(2.2)より

$$\mu_{\text{Glycogen}} = -\eta_{\text{Glycogen}} r_s \cdot \text{Glycogen} = -\eta_{\text{Glycogen}} (r_G \cdot \text{Glycogen} + r_M \cdot \text{Glycogen}) \quad (2.3)$$

もしグリコーゲンの自己分解が起こらず、摂取された基質が全てグリコーゲンになったとすると

$$\mu_{\text{Glycogen}} = -\eta^*_{\text{Glycogen}} r_G \cdot \text{Glycogen} \quad (2.4)$$

$\eta^*_{\text{Glycogen}} (\text{mgC Glycogen/mgC})$: 単位基質消費量あたりのグリコーゲン最大蓄積量

なる η^*_{Glycogen} を考えることができる。これを使って b_{Glycogen} は

$$b_{\text{Glycogen}} = -r_M \cdot \text{Glycogen} \eta^*_{\text{Glycogen}} \quad (2.5)$$

と表すことができる。

よって(2.3)、(2.4)、(2.5)より

$$\begin{aligned} r_s \cdot \text{Glycogen} &= r_G \cdot \text{Glycogen} + r_M \cdot \text{Glycogen} \\ \rightarrow -\mu_{\text{Glycogen}} / \eta_{\text{Glycogen}} &= -\mu_{\text{Glycogen}} / \eta^*_{\text{Glycogen}} - b_{\text{Glycogen}} \eta / \eta^*_{\text{Glycogen}} & (2.6) \end{aligned}$$

を得る。

2.2 グリコーゲンの生成と流出の関係

流入水中にグリコーゲンは存在しない。また、放流水中のグリコーゲンは無視できると仮定する。リアクター内のグリコーゲンは微生物による合成によってのみ増加し、余剰汚泥の引き抜きによってのみ減少することから、次の関係が得られる。

$$\mu_{\text{Glycogen}} X V = q X_e P_{\text{Glycogen}} \quad (2.7)$$

(グリコーゲンの生成) (グリコーゲンの流出)

X (MLSS/L) : リアクター内汚泥濃度

V (L) : リアクター容積

q (L/d) : 余剰汚泥引き抜き量

よって、

$$\mu_{\text{Glycogen}} = q X_e P_{\text{Glycogen}} / X V = P_{\text{Glycogen}} / \theta_c \quad (\because \theta_c = X V / q X_e) \quad (2.8)$$

X_e (mgSS/L) : 余剰汚泥のMLSS濃度

P_{Glycogen} (mgC_{Glycogen}/mgVSS) : グリコーゲン含有率

と書ける。

グリコーゲン含有率は現実には一定であるとは限られないが、本研究では実験結果より求めた代表値の定数として扱う。

2.3 グリコーゲンの自己分解定数

(2.7)、(2.8) より

$$(\beta / \eta_{\text{Glycogen}}) = (\beta / \eta_{\text{Glycogen}}) (1 + b_{\text{Glycogen}} \theta_c / P_{\text{Glycogen}}) \quad (2.9)$$

$$\beta / \eta_{\text{Glycogen}} = - \beta r_s \cdot \text{Glycogen} / \mu_{\text{Glycogen}} = - r_s / \mu_{\text{Glycogen}} \quad (\because (2.1))$$

を得る。

P_{Glycogen}を定数にすると(2.9)はθ_cの一次式となり、複数のθ_cにおけるβ/η_{Glycogen}の値を測定し一次回帰することによりb_{Glycogen}の値を決定することができる。菌体の自己分解定数も同様の動力学解析から計算できる。

すなわち、式(2.9)を参照して

$$(\alpha / \eta_{\text{PAO}}) = (\alpha / \eta_{\text{PAO}}) (1 + b_{\text{PAO}} \theta_c) \quad (2.10)$$

b_{PAO} (mgSS/mgVSS/d) : 単位MLVSS単位時間当たりの菌体の自己分解量

α : 摂取された基質量のうち菌体自体の合成のために用いられる部分の割合

3. 実験方法

20℃の恒温室内で、SRTを8日(以後リアクターA)と20日(以後リアクターB)に制御した2系列の連続式嫌気好気リアクターを運転した。滞留時間は嫌気工程が1.6時間、好気工程が4.8時間である。汚泥返送率は100%に設定した。また、種汚泥は、東京都河島下水処理場の嫌気好気汚泥を用いた。図1にリアクターの模式図を示す。基質の組成を表1に示す。これら二つのリアクターが1995年1月上旬より1996年2月上旬までの約3ヶ月間運転された。週1回の割合でモニタリングのためデータを取り、最後の1週間は集中的に4回(1/27, 1/29, 2/1, 2/3)データを取った。測定した項目と測定方法を表2に示す。本研究における諸計算は、この最後の4回の測定データに基づいている。とくに、グリコーゲンについては、混合液中の多糖類濃度を測定し、それを混合液中のグリコーゲン濃度とみなして計算した。また、PAOの自己分解定数についても混合液中の汚泥量の測定値をPAOの量とみなして計算した。

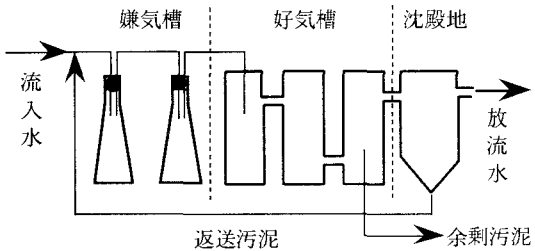


図1 連続式嫌気好気リアクター

表1 基質の組成

基質	濃度(mg/L)
CH ₃ COOH	374
KCl	70
MgCl ₂	151
CaCl ₂	22
Pepton	167
Yeast Extract	37
NaHCO ₂	247
K ₂ HPO ₄	60

表2 測定項目と分析方法

測定項目	分析方法
MLSS, MLVSS	下水試験方法(1984)
TOC	島津TOC-500
Total Phosphate	過硫酸カリ分解・アスコルビン酸法
Polyphosphate	アスコルビン酸法
Saccharide	アンスロン法
PHA	10%硫酸酸性メタノール中で100℃, 24時間加熱分解し、モノマーのメチルエステル(ヒドロキシ酸メチルエステル)誘導体とした後、ガスクロマトグラフィーにより分離、同定、定量する

4. 実験結果及び考察

4.1 リアクターの運転状況

各反応槽上澄み液中の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度を図2・図3に示す。リアクターAでは放流水中の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度はほぼ0 mgP/Lであった。リアクターBは放流水中に約4mgP/Lの $\text{PO}_4\text{-P}$ が残留していた。嫌気工程では両リアクターとも約60mgP/Lという高い $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度が測定された。4回の測定値に大きなばらつきは認められなかったで、測定を行った期間は、両リアクターは安定してリン除去を行っていたといえる。

4.2 グリコーゲンの自己分解定数

自己分解定数の計算結果を表3に示す。自己分解定数の計算には、グリコーゲンの蓄積量が最大となる好気工程末端での分析値を使用した。表よりグリコーゲンの自己分解定数(0.001(d⁻¹))はPAOの自己分解定数(0.033(d⁻¹))よりも非常に小さかった。一般的には、SRTをより長く設定すると単位重量あたりの汚泥が利用できる有機物量は少なくなるため、微生物はグリコーゲン等の蓄積物質を分解して微生物本体を維持するという代謝を行うと考えられる。よって、グリコーゲンの自己分解定数はPAOの自己分解定数よりも大きくなるはずである。しかし、今回の結果はPAO自身は自己分解しても、グリコーゲンの蓄積量はほとんど変わらないことを示しており、グリコーゲンがPAOの物質代謝において非常に重要な役割を担っていることを示唆している。

グリコーゲンとPAOの物質代謝との関係について、グリコーゲンは、PAOが嫌気条件下で有機物を摂取する際に細胞内の酸化還元バランスを保つ働きをされると考えられている¹⁾。また、微生物が嫌気好気条件下で卓越するためには、嫌気条件下で有機物を獲得するということが必要の条件である。このことから考えれば、今回得られた、グリコーゲン以外の細胞成分の自己分解に比べてグリコーゲンの自己分解が小さいという結果は理に適ったものであると言える。

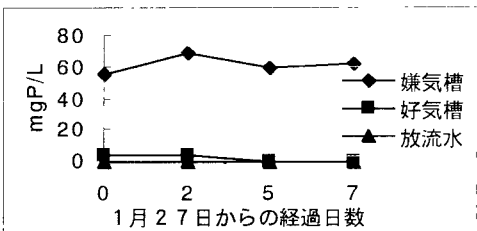


図2 各反応槽上澄み液と放流水中の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度 (リアクターA)

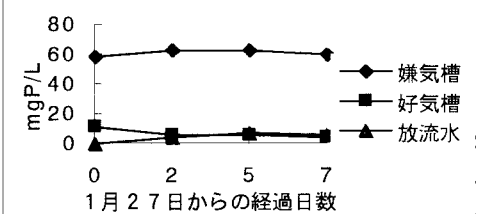


図3 各反応槽上澄み液と放流水中の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度 (リアクターB)

表3 収率及び自己分解定数の計算結果

	収率		含有率		自己分解定数 (d ⁻¹)
	A	B	A	B	
Glycogen	0.045	0.038	0.063	0.071	0.001
PAO	0.725	0.544	1	1	0.033

5. まとめ

連続式嫌気好気リアクターについてSRTの異なる2系列を運転した結果、2章で記述した計算方法によりグリコーゲンの自己分解定数は0.001、PAOの自己分解定数は0.033という値を得た。グリコーゲンの自己分解定数がPAOの自己分解定数よりも小さいという結果は、PAOが嫌気条件下で有機物を摂取する際にグリコーゲンが中心的な役割を果たしている、という考え方に合致している。

<参考文献>

1) Takashi Mino, Wen-Tso Liu, Futoshi Kurisu and Tomonori Matsuo : MODELLING GLYCOGEN STORAGE AND DENITRIFICATION CAPABILITY OF MICROORGANISMS IN ENHANCED BIOLOGICAL PHOSPHATE REMOVAL PROCESSES, Water Science and Technology 31 (2) 25-34 (1995)