

1. はじめに

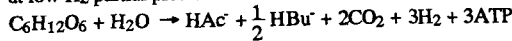
嫌気性廃水処理プロセスにおける微生物生態の研究が進行するにつれて、処理プロセスをより効率的にかつ安定に運転管理する手段を検討するための知見が蓄積されてきている。例えば、揮発性脂肪酸（VFA）の分解における菌種間の水素伝達や水素に関するメタン生成菌と硫酸塩還元菌の競合など、水素にかかわる物質変換過程とプロセスの安定性の関係や微生物間の相互作用などが工学的にも検討¹⁾されてきている。また、高負荷条件での処理槽の運転で見られるプロピオン酸の蓄積が、水素分圧の上昇と関連づけられて議論²⁾されてきている。しかしながら、水素分圧が変動するような条件下での処理過程を、定量的に再現・予測できるように熱力学計算を含めた形でのモデル化や、モデルによる水素分圧の変動やそれに伴う揮発性脂肪酸の濃度変化を検討している研究はほとんど見あたらない。

本研究では、UASB汚泥を用いたグルコース分解活性試験における水素分圧とVFA濃度の経時変化を再現できるように、反応自由エネルギー計算を含めた嫌気性処理過程の数値モデルを展開し、実験結果を用いてモデルを検証した結果を報告する。

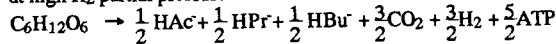
2. モデルの概要

Fig.1 に示すようなグルコースの分解経路を考え、従来の検討^{3), 4)}を基礎に高水素分圧と低水素分圧での分解反応式を以下のように設定し、ある水素分圧で反応が切り替わるようにした。

at low H_2 partial pressure



at high H_2 partial pressure



VFAの分解についても、グルコースの分解経路の切り替えと同様に、切り替え水素分圧を含む項を速度式に追加して反応の進行と停止を表現した。また、水素分圧はその生成と消費がバランスしていると仮定して求める。熱力学計算は水素にかかわる反応について行い、グルコース分解では2つの

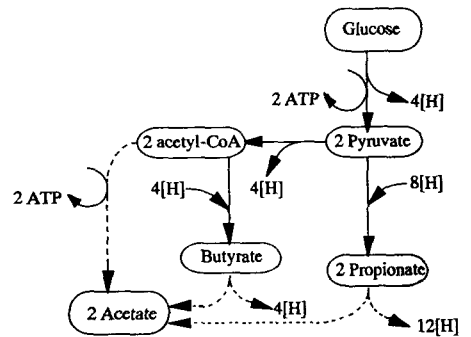


Fig.1 Degradation Process of Glucose and VFA

Table 1 Mass Balance and Rate Equations

Mass Balance	Components	RC	RP
Solute $\frac{dC}{dt} = -RC + RP$	Glucose	$\frac{k_G [C]}{K_{SG} + [C]} X_G = R_C^{GL}$	0
	HBu	$\frac{k_B [C]}{K_{SB} + [C]} M_B X_B = R_C^{HBu}$	$\frac{5}{12} (1 - Y_G) R_C^{GL}$
	HPr	$\frac{k_P [C]}{K_{SP} + [C]} M_P X_P = R_C^{HPr}$	$\frac{7}{24} (1 - M_G) (1 - Y_G) R_C^{GL}$
	HAc	$\frac{k_A [C]}{K_{SA} + [C]} X_A = R_C^{HAc}$	$\left[\frac{1}{6} (1 - M_G) + \frac{1}{3} M_G \right] (1 - Y_G) R_C^{GL}$
Biomass $\frac{dX}{dt} = R_G - R_D = Y RC - bX$	H2	$\frac{k_H [C]}{K_{SH} + [C]} X_H = R_C^{H^2}$	$+\frac{4}{5} M_B (1 - Y_B) R_C^{HBu} + \frac{4}{7} M_P (1 - Y_P) R_C^{HPr}$
			$\left[\frac{1}{8} (1 - M_G) + \frac{1}{4} M_G \right] (1 - Y_G) R_C^{GL}$
			$+\frac{1}{5} M_B (1 - Y_B) R_C^{HBu} + \frac{3}{7} M_P (1 - Y_P) R_C^{HPr}$

C : Substrate or product concentration
X : Biomass concentration
RC : Consumption rate
RP : Production rate
RG : Growth rate
RD : Decay rate or Disappearance rate

M= $\frac{K_H}{K_H + [H_2]}$
k : Rate constant
K_S : Saturation constant
K_H : Switch function constant
Y : Growth yield

Subscript G: Glucose
B: Butyrate (HBu)
P: Propionate (HPr)
A: Acetate (HAc)
H: Hydrogen (H₂)

Table 2 Values of Kinetic Parameters and Initial Concentrations

Parameters	Glucose	HBu	HPr	HAc	H ₂
k [mg COD _{cell} ⁻¹ day ⁻¹]	1.12	0.65	0.19	0.15	0.96
K_S [mg/l] or [ppm] for H ₂	192	90	20	20	1340
b [day ⁻¹]	0.10	0.02	0.02	0.02	0.02
Y [mg COD _{cell} mg ⁻¹]	0.15	0.04	0.04	0.04	0.04
C at $t=0$ [mg/l] or [ppm] for H ₂	1037	1	14	22	12
X at $t=0$ [mg COD _{cell} /l]	150	40	20	50	5.5

反応式の自由エネルギーが同じとなる水素分圧、VFAの分解では反応の自由エネルギーがゼロとなる水素分圧を求め、それらをそれぞれ反応切り替え水素分圧として与える。厳密には反応は細胞内部で行われ、そこでの物質濃度は反応槽内液濃度と同一とは考えられないが、完全混合条件では両者は線形性が保たれていることが予想され、測定可能な槽内濃度を用いて反応の有無を判断することも意義深いと考えられる。

Table1に代表的な物質収支式と速度式をまとめて示した。溶解性成分として、グルコース、酪酸、プロピオン酸、酢酸、気相成分として水素、炭酸ガス(=0.1atm)、メタン(=0.1atm)を考えた。菌群としては、グルコース分解菌、酪酸分解菌、プロピオン酸分解菌、酢酸利用メタン生成菌、水素利用メタン生成菌を主要なものとして与え、硫酸塩還元菌は考慮していない。

Monod型増殖動力学を基礎として、上述のように水素分圧の影響を考慮する項を積の形で取り込んでいる。また、増殖と基質消費を増殖収率で関連づけた。なお、初期菌体量はTable2に示した増殖動力学定数を用いて、検証用のグルコース消費活性試験と別途行った酢酸消費活性試験から X_G と X_A を求めた。 X_H は、初期水素分圧ピークが再現できるように調整して与え、 X_B と X_P は X_A を基礎として高水素分圧での反応式から求められる酢酸、プロピオン酸、酪酸の生成及び消費のCOD当量比から存在量を推定した。

3. モデルの検証と考察

UASB反応器（流入廃水としてグルコース）の底部汚泥を用いたグルコース消費活性試験における水素分圧とVFAの経時変化結果⁵⁾を用いて検証を行った。まず、自由エネルギー計算を組み込まず一定の切り替え水素分圧($K_{HG}=2000$ ppm, $K_{HB}=2000$ ppm, $K_{HP}=100$ ppm)を用いた結果について検討する。Fig.2に示したように、水素分圧計算値は実測値をオーダーレベルで再現可能であるが、VFAの経時変化は再現できていない。これは、主として反応を切り替える水素分圧を一定として与えたことに起因するものと考えられる。

次に、グルコースの分解やVFA分解の進行を規定すると考えられる反応自由エネルギーをATP生成量も考慮して逐次計算するサブモデルを組み込んだ場合を示す。Fig.3に示したように、酪酸と酢酸の上昇傾向にずれが見られるが、明らかにサブモデルを組み込んだ方が水素分圧の変化とともにプロピオン酸や酪酸の生成、分解の傾向をよく再現できている。このことから、反応切り替え水素分圧を一律に与えるのではなく、熱力学計算結果を用いて設定することにより、より高度に処理特性を予測できることがわかる。

4. まとめ

グルコースの分解過程を対象として、その分解およびそれに続くVFA分解過程を表現するモデルを展開した。その際、反応の自由エネルギー計算を行い、反応を切り替える水素分圧をパラメータとして導入することで、水素分圧だけでなくVFA分解の非定常過程をより高度に再現可能であることが明らかとなった。

<参考文献>

- 1) Haper & Pohland(1986)、Biotech. & Bioeng., 28, 585-602
- 2) 井出(1988)、用水と廃水, 30, 1075-1081
- 3) Mosey(1983)、Water Science & Technology, 15, 209-232
- 4) Sam-Soonら(1991)、Water SA, 16, No. 3, 151-164
- 5) 賈ら(1991)、下水道協会誌論文集, 28, No. 334, 83-92

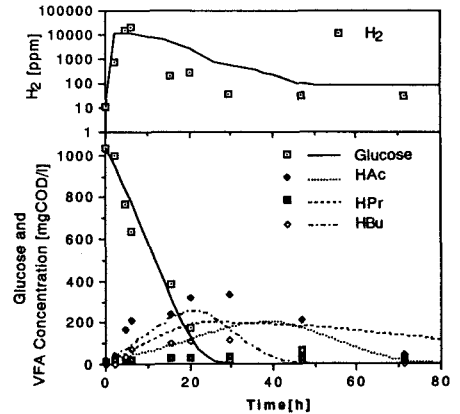
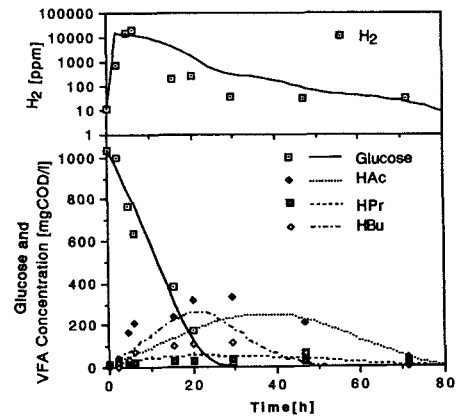
Fig.2 Simulation results with constant K_H values

Fig.3 Simulation results with a modified model considering reaction energetics