

(5) UASB 法における処理特性とグラニュール内保持菌体量の
非定常解析に関する研究

NON-STEADY STATE ANALYSIS OF PERFORMANCE AND
BIOMASS DEVELOPMENT IN GRANULE OF UASB PROCESS

今井 剛*, 古賀博之*, 浮田正夫*, 関根雅彦*, 中西 弘**, 深川勝之***

Tsuyoshi IMAI*, Hiroyuki KOGA*, Masao UKITA*, Masahiko SEKINE*, Hiroshi NAKANISHI**, Masayuki FUKAGAWA***

ABSTRACT; It is necessary to establish a generalized model to simulate the optimum operating condition of UASB process for controlling or predicting the actual operation. In this study, a model which was able to express unsteady growth of active and inert (decay biomass and extra cellular polymer) biomasses was developed based on the results of experiment to comprehend perpendicular distributions of biomass in UASB reactor. The developed model was demonstrated available in comparison with the experimental results. At first, the model was considered as a single layer model, and then it was developed to layered model. The single layer model could express unsteady growth of active and inert biomasses in UASB reactor. Furthermore, the layered model could also express the perpendicular distributions of biomass in UASB reactor.

KEYWORDS; Modeling, simulation, UASB process, granule, granulation, anaerobic wastewater treatment.

1. はじめに

生物学的嫌気性処理法である上向流嫌気性スラッジブランケット (Upflow Anaerobic Sludge Blanket: UASB) 法¹⁾は高負荷を許容し、かつ高効率の処理法として食品工場等からの高濃度有機性廃水の処理を中心に世界各国で急速に普及している^{2),4)}。最近では、高温菌のグラニュール化に関する研究^{5),6)}や100kg-COD/m³/dayという超高負荷を許容する反応器に関する研究等も行われている⁷⁾。このUASB法は低コスト・省エネルギー、さらにエネルギー回収が可能であるという利点を有するが、嫌気性菌の増殖速度が遅いため、スタートアップ期間の菌体のグラニュール形成に多くの時間を費やさなければならないという欠点も有し、グラニュール形成の促進が重要な課題である。これまでにポリマーの添加^{8),9)}、鉄分・カルシウムの添加¹⁰⁾等によってグラニュレーションを促進させるという研究がなされている。これらの研究は添加剤を使うことによって、菌の凝集を効率的に行い、またグラニュール自身の比重を増加させることによって、ウォッシュアウトを防ぎ、グラニュール形成までの期間を短縮しようとするものである。これらの研究からわかるように、良好なグラニュールを早期に形成させるためにはグラニュール内の保持菌体量を効率よく増加させる必要がある。一般に添加剤等を加えない場合には、この保持菌体量を増加させる手段として水理学的滞留時間あるいは流入基質濃度の上昇による流入負荷の上昇が主に用いられている。この流入負荷の上昇法は現在のところ段階的に上昇させる方法が経験的に用いられているが、その最適な負荷の上昇方法は確立されているとはいえない。これは、負荷上昇の方法が幾通りも考えられ、それを全て実験的に把握することがきわめて困難であるからである。そこで、最適な流入負荷を実験に実験により求めるのではなく、数理モデルによるシミュレーションによって推定できれば、かなりの省力化となり、その工学的貢献度も極めて高い。これまでもUASBのモデル化に関する研究は行われてきている^{11),12)}が、その数は少ない。近年、廃水処理に関わる微生物学の発展とともにグラニュール内の微生物種やその分布が明らかにされてきており^{13),16)}、各微生物の基質消費に関する生理学的な知見も蓄積されてきている。これらの知見を利用して処理すべき物質ごとにその分解を担う微生物濃度を与えてモデルを構築することで、非定常かつ長期的な処理過程を表現できるモデルを構築することが可能となる。

したがって、本研究の目的は、グラニュール形成過程における非定常かつ長期的な処理過程及び菌体の挙動を表現できる数理モデルを構築し、その有効性を実測値との比較により評価することである。

* 山口大学工学部社会建設工学科 (Department of Civil Engineering, Yamaguchi University)

** 大阪工業大学土木工学科 (Department of Civil Engineering, Osaka Institute of Technology)

*** 宇部工業高等専門学校物質工学科 (Department of Chemical and Biological Engineering, Ube National College of Technology)

2. 実験装置及び方法

2.1 実験装置

本実験で用いたパイロットスケールのUASB装置の概略を図1に示す。UASB装置は機能的にスラッジベッド、スラッジブランケット及び沈降式気液固三相分離器の3つの部分に分けられる。また装置は、内径が92mm、高さが1500mm、有効容積は10.52ℓである。反応槽内の温度はウォータージャケットによりメタン生成菌を恒常的に保持するのが容易な35.0℃に維持した。基質は4℃以下で貯蔵し、リアクターの底部からチューブポンプにより流入させ、処理水はリアクターの上部から溢流して処理水量測定槽に流出させた。生成ガスは硫化水素を除去するための酢酸亜鉛吸収塔を経た後、湿式ガスメーターでその量を測定した後に排出させた。また、UASB槽内には10cm間隔で11カ所のサンプリングポートが設置しており、グラニューールや槽内水がサンプリングできるよう設計されている。なお、実体顕微鏡及び電子顕微鏡(SEM)による観察は、1番下のサンプリングポートから採取したものについて行った。

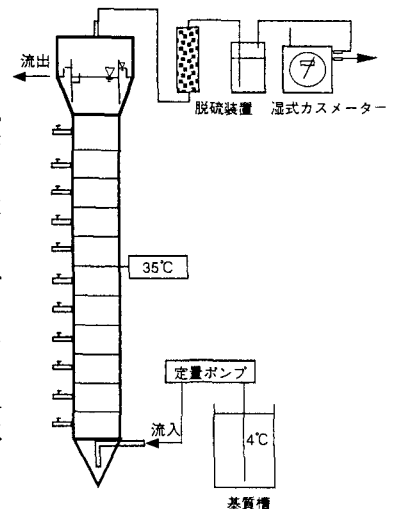


図1 UASB装置概略図

2.2 実験方法

装置の運転条件は表1に示す通りである。流入負荷の上昇は、表に示すように水理学的滞留時間(HRT)を短縮させる、あるいは流入基質濃度を上昇させることにより行った。流入容積負荷の計算は有効容積をベースに計算した。なお、連続運転を開始するにあたり、菌体を馴致させるためにrun0として1週間の回分運転を行った。本研究では種汚泥として、山口県A市下水処理場から採取した消化汚泥(種汚泥:SS=22,000mg/ℓ)を反応槽に6.0ℓ投入し、10.52ℓまで水道水を投入した。基質としては、これまでの研究からグラニューール化が促進されやすいとされるグルコースを主炭素源として用いた。

表1 実験装置の運転条件

Run No.	運転時間 (hr)	流量 (ℓ/day)	基質濃度 (mg/ℓ)
run0	0~860	5.0	1000
run1	860~1290	7.5	1000
run2	1290~2300	15.0	1000
run3	2300~2680	15.0	1500
run4	2680~3830	15.0	2000
run5	3830~	15.0	4000

表2にその人工基質の組成を示す。表に示すようにグルコースの他に、菌の増殖に必要な無機塩類、pH緩衝剤として NaHCO_3 、 K_2HPO_4 及び菌の培養を促進させるために酵母エキスをを用いた。この表に示した基質を適宜希釈して表1の流入基質濃度に調整した。

表2 濃縮基質の組成 (10,000mg-COD/l)

Glucose	9385 (g/ℓ)	A	(NH_4) $_2$ HPO_4	350.0 (g/ℓ)
A	2.00 (mℓ/ℓ)	B	KCl	75.0 (g/ℓ)
B	10.00 (mℓ/ℓ)		NH_4Cl	85.0 (g/ℓ)
C	1.00 (mℓ/ℓ)		$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	42.0 (g/ℓ)
NaHCO_3	6.0 (g/ℓ)		$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	81.0 (g/ℓ)
K_2HPO_4	4.0 (g/ℓ)		$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	25.0 (g/ℓ)
酵母エキス	100 (mg/ℓ)		$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1.8 (g/ℓ)
		C	$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	150.0 (g/ℓ)

2.3 バイアル回分実験

UASB反応槽内の菌体量分布を把握することを目的に、装置の高さ方向の汚泥の基質消費活性を調べるためのバイアル回分実験¹⁷⁾を行った。ここで、基質消費活性とはグルコース、酢酸、プロピオン酸、酪酸、水素を単独基質として与えた場合の、それぞれの基質を消費する速度をVSS当たりで求めるもので、それぞれの基質を資化する菌体がどの程度存在するかの指標となるものである。

バイアル回分実験は以下のように行った。

UASB槽内のグラニューールを専用注射器(口径5mm)によって、空気に触れないようにサンプリングし、バイアル瓶に分取する。ただし、このバイアル瓶は窒素置換後ブチルゴム栓及びアルミニウムキャップで密栓され嫌氣的雰囲気中に保たれている。なお、すべてのバイアル瓶内に酸化還元指示薬であるレサズリン(1mg・ℓ⁻¹)および還元剤として硫化ナトリウム(Na_2S 、250mg・ℓ⁻¹)を添加し、還元状態が維持されていたことを確認した。初期濃度が1000mg-COD・ℓ⁻¹となるように上述の基質をそれぞれ単独で添加し、基質が消費されていく過程を把握するための回分実験を行った。ただし、基質が水素の場合は水素ガスをガスタイトシリンジにより10ml(250mg-COD・ℓ⁻¹相当)加圧状態でバイアル瓶に添加し、その減少過程を把握した。

2.4 分析方法

分析項目及びその方法を以下に示す。SS、VSSは下水試験方法¹⁸⁾(日本下水道協会編)によった。pHはガラス電極

(堀場製作所、D-12) を用いて測定した。全有機炭素 (TOC) 及び溶解性有機炭素 (DOC) は全有機炭素計 (島津製作所、TOC-5000) により測定した。揮発性脂肪酸 (VFA) は、ガスクロマトグラフ法 (島津製作所、GC-14A 及び GC-8APF) により測定した。発生ガス量は湿式ガスメーター (品川計測器製作所、W-NK-1B) により測定し、ガス組成はガスクロマトグラフ法 (島津製作所、GC-8APT) により測定した。細胞外ポリマーの分析については付録に記載した。また、汚泥の観察は実体顕微鏡 (オリンパス、SZ-PT) 及び走査型電子顕微鏡 (日立製作所、S-2300) により行った。

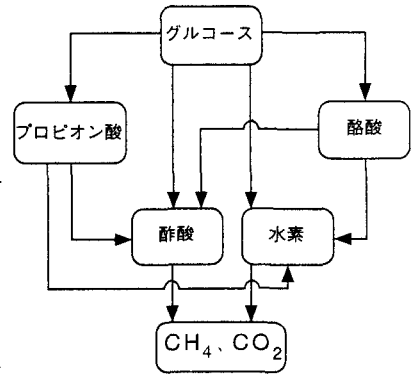


図2 グルコースの分解経路

3. グラニュール内保持菌体量のモデル化

UASB槽内のグラニュール形成過程における処理過程及び反応槽内の菌体量の挙動を表現できる数理モデルを構築する。

3.1 菌体に関する仮定

本モデルにおける仮定及び条件を以下にまとめる。

- ①菌体の増殖はMonod式にしたがう。
- ②菌体の存在形態として、グラニュールを形成している状態で存在する付着型と槽内に浮遊している状態で存在する浮遊型の2種類を考慮した。
- ③菌体は活性菌体¹⁹⁾、死滅菌体 (不活性菌体)²⁰⁾、細胞外ポリマー²⁰⁾の3種類を仮定した。
- ④基質の処理に関わる菌体量は動力学的に求められる活性菌体量¹⁹⁾とする。
- ⑤細胞外ポリマーは全ての活性菌がその増殖量に比例して生成する。
- ⑥死滅菌及び細胞外ポリマーはその存在量に比例して分解される。
- ⑦グルコースを基質としているため、その分解経路は、プロピオン酸を経由する場合と酪酸を経由する場合とが考えられる²¹⁾²²⁾が、実験期間を通して水素分圧が $10^{-6} \sim 10^{-4}$ atm程度に維持されていたため、図2に示すようなプロピオン酸及び酪酸の両方を経由する分解過程を仮定した。したがって、考慮する菌として、グルコース分解菌、酪酸分解菌、プロピオン酸分解

表3 基質及び菌体収支式

(基質) $\frac{dS_i}{dt} = \frac{Q(S_{i-1} - S_i)}{V} - (1 + \alpha) \cdot \frac{1}{Y} \cdot \frac{\mu_m \cdot S_i \cdot X_{a,i}}{K_S + S_i} + \left(\frac{dS_i}{dt} \right)_{\text{production}} + D_{\text{sub}} (S_{i-1} - 2 \cdot S_i + S_{i+1})$	(活性菌) $\frac{dX_{a,i}}{dt} = \frac{\mu_m \cdot S_i \cdot X_{a,i}}{K_S + S_i} - K_d \cdot X_{a,i} - K_e \cdot X_{a,i} + K_f \cdot X_{as,i} + D_b \cdot (X_{a,i-1} - 2 \cdot X_{a,i} + X_{a,i+1})$ $\frac{dX_{as,i}}{dt} = \frac{Q(X_{as,i-1} - X_{as,i})}{V} + \frac{\mu_m \cdot S_i \cdot X_{as,i}}{K_S + S_i} - K_d \cdot X_{as,i} + K_e \cdot X_{a,i} - K_f \cdot X_{as,i} + D_b \cdot (X_{as,i-1} - 2 \cdot X_{as,i} + X_{as,i+1})$
(細胞外ポリマー) $\frac{dX_{pb,i}}{dt} = \alpha \cdot \frac{1}{Y} \cdot \frac{\mu_m \cdot S_i \cdot X_{a,i}}{K_S + S_i} - K_e \cdot X_{pb,i} + D_b \cdot (X_{pb,i-1} - 2 \cdot X_{pb,i} + X_{pb,i+1})$ $\frac{dX_{ps,i}}{dt} = \frac{Q(X_{ps,i-1} - X_{ps,i})}{V} + \alpha \cdot \frac{1}{Y} \cdot \frac{\mu_m \cdot S_i \cdot X_{as,i}}{K_S + S_i} + K_e \cdot X_{pb,i} + D_b \cdot (X_{ps,i-1} - 2 \cdot X_{ps,i} + X_{ps,i+1})$	(死滅菌) $\frac{dX_{ab,i}}{dt} = K_d \cdot X_{a,i} - K_B \cdot X_{ab,i} - K_e \cdot X_{ab,i} + D_b \cdot (X_{ab,i-1} - 2 \cdot X_{ab,i} + X_{ab,i+1})$ $\frac{dX_{as,i}}{dt} = \frac{Q(X_{as,i-1} - X_{as,i})}{V} + K_d \cdot X_{as,i} - K_B \cdot X_{as,i} + K_e \cdot X_{ab,i} + D_b \cdot (X_{as,i-1} - 2 \cdot X_{as,i} + X_{as,i+1})$
X_a: 活性菌体量 (mg-COD/ℓ)、X_p: ポリマー量 (mg-COD/ℓ)、X_d: 死滅菌体量 (mg-COD/ℓ)、S: 基質濃度 (mg-COD/ℓ)、μ_m: 最大比増殖速度 (day⁻¹)、Y: 収率 (mg-COD_菌/mg-COD_{基質})、K_S: 飽和定数 (mg-COD/ℓ)、K_d: 死滅係数 (day⁻¹)、K_e: 剥離係数 (day⁻¹)、K_f: 付着係数 (day⁻¹)、K_B: 分解係数 (day⁻¹)、K_W: 死滅菌の分解から基質への転換係数 (-)、α: 基質からポリマーへの転換係数 (-)、D_{sub}: 基質流動係数 (day⁻¹)、D_b: 付着流動係数 (day⁻¹)、D_s: 浮遊流動係数 (day⁻¹)、添字の0は流入、bは付着、sは浮遊、jは分割された第j層を示す。	

菌、酢酸資化性メタン生成菌、及び水素資化性メタン生成菌の5種類の基質利用活性菌を仮定した。

3.2 モデルの構築

まず、連続運転開始時からの非定常過程を表現できる単槽モデル(UASB装置を単一の完全混合槽と仮定したもの)を構築した。次に単槽モデルを基礎として処理水質・菌体量の非定常な挙動を表現できる多層モデル(UASB装置を鉛直方向に11層に分割し、それぞれの槽内を完全混合槽と仮定したもの：図1参照)を構築した。この多層モデルは装置の高さ方向の基質及び菌体量分布を表現することを目指したものである。さらに、この多層モデルにおいて上昇線流速及びガス発生により基質・菌体が各層間において流動できるように考慮した。表3に基質・菌体の収支式を示す。ただし、この表に示した各収支式は第j層における多層モデルのものであり、単槽モデルにおいては、流動の項を除いたものとなる。この表に示すように、基質に関しては、流入してくる基質から流出するものを減じ、生成される基質(基質が分解されて生成するもの、あるいは死滅菌の分解により生成するもの)を加え、活性菌により消費されるもの及び細胞外ポリマーに変換されるものを減じた。活性菌については、付着型と浮遊型を考慮し、付着型の菌は系外への流出がなく浮遊型の菌のみ系外へ流出するものと仮定した。付着型の活性菌体量に関しては、活性菌の増殖分から死滅分とグラニүүлからの剥離分を減じ、浮遊菌がグラニүүлへ付着するものを加えた。浮遊型に関しては、系内に流入する菌体から系外へ流出するものを減じ、増殖分及びグラニүүлから剥離するものを加え、死滅分とグラニүүлへの付着分を減じた。死滅菌についても、付着型と浮遊型を考慮した。付着型の死滅菌体量に関しては、活性菌の死滅分から分解するものとグラニүүлからの剥離分を減じた。浮遊型に関しては、系内に流入する菌体から系外へ流出するものを減じ、浮遊型の活性菌の死滅分及びグラニүүлから剥離するものを加え、分解する分を減じた。細胞外ポリマーについても同様に付着型に関しては、活性菌により生成するものから分解するもの及びグラニүүлからの剥離分を減じた。浮遊型に関しては、系内に流入するものから系外へ流出するものを減じ、グラニүүлから剥離するものを加え、分解する分を減じた。

4. 結果及び考察

4.1 流入負荷の上昇によるグラニүүл形成と連続運転結果

図3に容積負荷、HRT、流入基質濃度、メタンガス発生量、処理水中のCOD、VFA濃度の経時変化を示す。HRTを運転開始時の2.1dayから0.7dayまで短縮させることによって、また、流入基質濃度を1000mg-COD/ℓから4000mg-COD/ℓへと上昇させることで、容積負荷を最初の0.5kg-COD/m³/dayから段階的に5.7kg-COD/m³/dayまで上昇させた。

連続運転開始直後は処理水中のCODは約1000mg-COD/ℓと高かったが、速やかに減少し各runの初期において

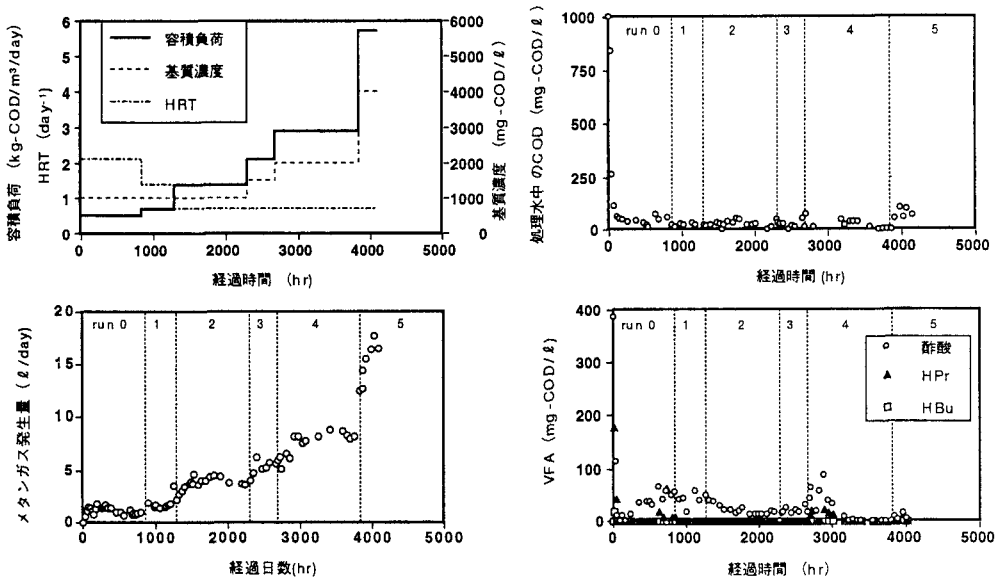


図3 UASB装置の運転結果：容積負荷、HRT、流入基質濃度、メタンガス発生量、処理水中のCOD、VFA濃度の経時変化

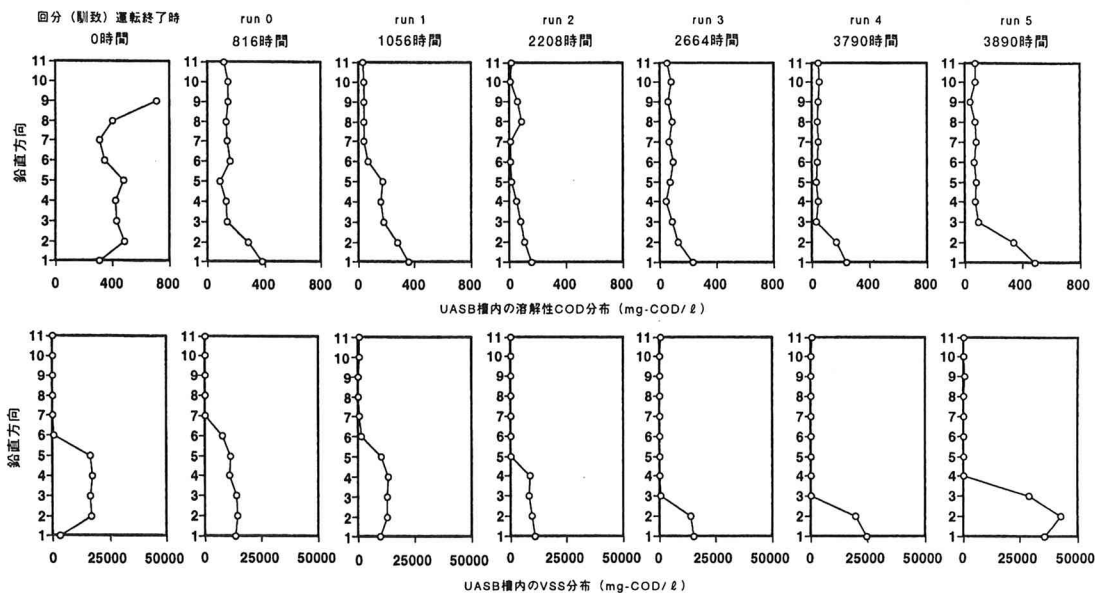


図4 UASB装置の高さ方向の溶解性COD及びVSSの分布の経時変化

も負荷の上昇にもかかわらず、良好な処理水質が得られた。処理水中のVFAに関しては、そのほとんどが酢酸であったが、蓄積は認められなかった。

run 3、4、5のそれぞれの初期においてガスの生成量は増加したが、これは負荷の上昇に対応する装置内の処理を担う菌の増殖に伴うものであると考えられ、ガスの生成量は負荷の上昇にしたがって増加したものと判断できる。ガス発生量の結果からも処理は順調に行われていたと判断できる。

図4に各runにおけるUASB槽内の溶解性COD及びVSSの分布を示す。これらの図から、槽内の溶解性CODの高さ方向の分布をみると、処理のほとんどはスラッジベッド部で行われており、特にグラニュールが形成された約3ヶ月後から、その傾向が顕著に現れていることがわかる。グラニュール形成後のSEMによる観察写真を写真1に示す。槽内のVSSの高さ方向の分布をみると、グラニュールが形成され、その密度が増加してベッドの高さが一旦低くなり、スラッジベッド底層部でのVSSが増加した後に上層へ発達している状況がよく認められる。

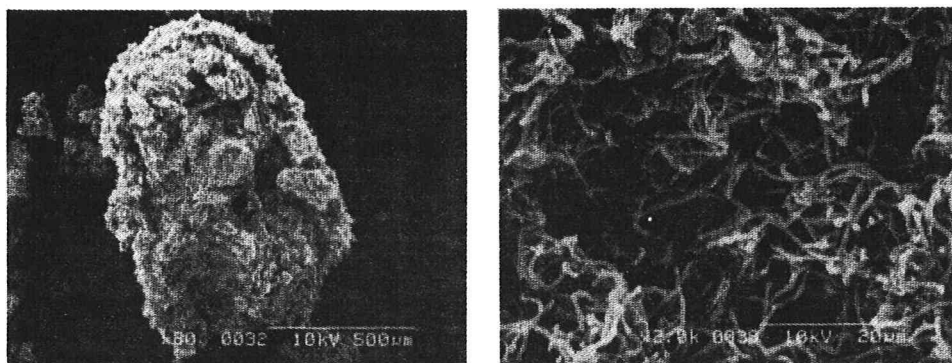


写真1 SEMによるグラニュール（生成初期：運転開始後95日目）及びその拡大（表層）写真

4.2 単槽モデルの有効性に関する評価

構築された単槽モデルによる計算値と連続運転結果からの実測値を比較し、モデルの有効性を検討する。表4に示す動力学係数^{19),20),23)}を用いて、構築した単槽モデルにより数値解析を行った。飽和定数に関してはグラニュールとして存在する菌と浮遊状態で存在する菌とで値が異なると考えられる。また、グラニュール内には基質濃度分布が存在することが知られており、浮遊菌と付着菌を同様に完全混合状態として扱うことには多少問題があると考えられる。

しかしながら、ここではモデルの簡略化のため同じ値を用いた。また、本モデルでは浮遊菌のグラニュールへの付着及びグラニュールからの剥離を各菌体量の存在量に比例すると仮定しており、剥離係数と付着係数の和で見かけの剥離係数となる。付着係数に関しては文献値がなかったため、総合的な値として剥離係数のみを与え、付着係数を 0 day^{-1} とした。今後さらにデータを蓄積し、グラニュール及び浮遊菌のそれぞれの飽和定数の推定、グラニュール内の基質濃度分布のモデルへの組み込み、浮遊菌のグラニュールへの付着係数の推定等を行う必要がある。なお、計算の初期値として有効容積、流量、基質の流入濃度には実験値を用いた。活性菌体量の初期値は回分実験結果から推定した。細胞外ポリマー量は実測値を用いた。死滅菌体量は総 VSS 量から活性菌体量及び細胞外ポリマー量を差し引いて求めた。

図5は単槽モデルによる UASB 槽内からの流出 COD 濃度の計算値と実測値を比較したものである。計算値は全て run の負荷上昇に対して流出 COD 濃度に関して多少のピークがみられた。実測値では run1 から run2 への流量での負荷上昇ではほとんど影響がみられず、基質濃度での負荷上昇の方が流出 COD 濃度に与える影響が大きかったことがわかる。この図から全体的にモデルによる計算値は実測値とよく一致していることがわかる。図6は反応槽内の活性菌体量の単槽モデルによる計算値と実測値とを比較したものである。図から計算値はほぼ実測値を再現できていることがわかる。また、この図から run3 以降において活性菌体量が大幅に増加したが、これは容積負荷の上昇によるものと考えられる。図7は細胞外ポリマーの単槽モデルによる計算値と実測値を比較したものである。細胞外ポリマーはグラニュール形成に関する重要な要素であるとされている²³⁾。細胞外ポリマーも活性菌体量と同様に run3 より大幅に増加した。図から本モデルによる計算値は

表 4 動力学係数一覧

	Glu	HAc	HPr	H ₂
$\mu_m(\text{day}^{-1})$ 最大比増殖速度	1.00	0.26	0.19	1.20
$K_S(\text{mgCOD/l})$ 飽和定数	150	20	20	5.0
$Y(-)$ 収率	0.10	0.05	0.05	0.05
$K_d(\text{day}^{-1})$ 死滅係数	0.07	0.05	0.04	0.06
$K_e(\text{day}^{-1})$ 剥離係数	付着菌 0.05, 死滅菌 0.04			
$K_B(\text{day}^{-1})$ 分解係数	0.005			
$K_f(\text{day}^{-1})$ 付着係数	0.00			
K_w 死滅菌の分解から 基質への転換係数	0.05			
α 基質からポリマー への転換係数	0.05			

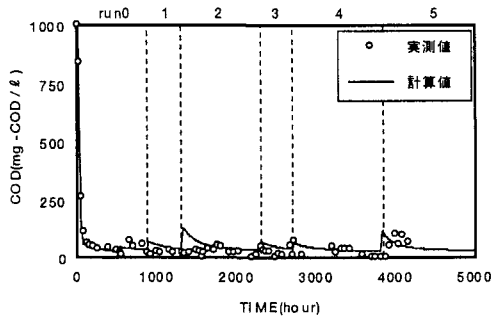


図 5 UASB 槽からの流出 COD 濃度の計算値と実測値との比較

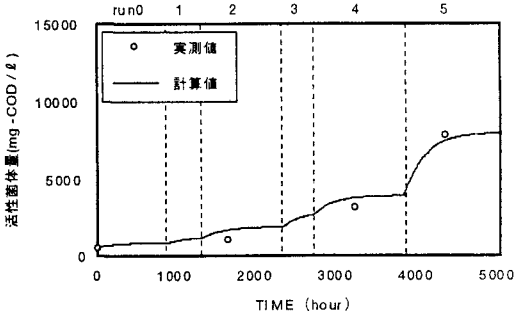


図 6 UASB 槽内の活性菌体濃度の計算値と実測値との比較

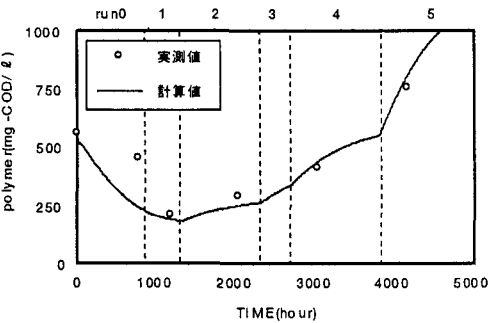


図 7 UASB 槽内の細胞外ポリマー濃度の計算値と実測値との比較

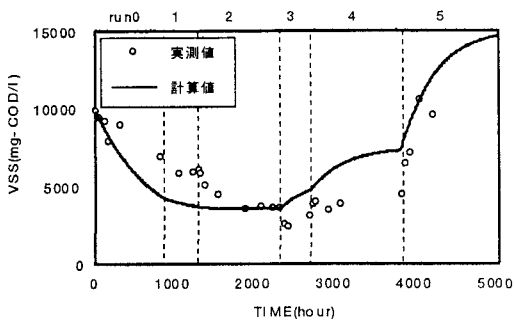


図 8 UASB 槽内の総 VSS 濃度の計算値と実測値との比較

実測値をほぼ再現できたことがわかる。図8にUASB装置内の総VSS濃度の計算値と実測値を比較したものを示す。総VSS濃度とは、上記の活性菌体量、細胞外ポリマー及び死滅菌体量（不活性菌体量）を合計したものである。総VSS濃度の実測値は、run0からrun1まで減少したことがわかる。これは、HRTが長く設定されており、さらに基質濃度も比較的良かったため菌の増殖が抑えられ、増殖する菌より死滅あるいは流出する菌の方が多くなったためと推測される。この総VSS濃度の減少を含めて、計算値は実測値と同じ傾向を再現することができた。

以上の結果から、単槽モデルにより反応槽内での非定常な基質の処理特性ならびに菌体の増殖過程を再現することができたと判断される。

4.3 多層モデルの有効性に関する評価

前項の単槽モデルでは、UASB槽内の鉛直方向の基質濃度分布及び菌体量分布を表現することができない。そこで、UASB槽内の鉛直方向の基質・菌体量分布の非定常な挙動を表現することを目的に、前項にて有効性を確認された単槽モデルを発展させて多層モデルを構築した。ここではグラニュールが形成され、比較的急激な負荷上昇を行った3830時間前後のUASB装置の鉛直方向のCOD濃度、菌体のVSS濃度の計算値と実測値を比較し、非定常過程での再現性を検討した。また、このとき用いた流動係数を表5にまとめた。本モデルでは発生ガスにより流動を受ける影響について、グラニュールが存在するベッド部においてはグラニュール、浮遊菌及び液相（基質）との間にそれほど大きな違いはないと考え、またモデルの簡略化のためにグラニュール、浮遊菌、液相（基質）ともに同じ値を用いた。ただし、グラニュールの流動係数はグラニュールが存在する2つの層間においてのみ設定した。この流動係数は、実測値を最も良く再現できるようにフィッティングにより決定した。したがって、この流動係数が普遍的なものであるかどうかについては、他の反応器による結果に適用を試みることで確認する必要がある。

表 5 発生ガス量別の流動係数

発生ガス(l/day)	0～10	10～20	20～30	30～40
流動係数(day ⁻¹)	0.12	0.24	0.48	0.72

図9は多層モデルによる槽内のCOD濃度の鉛直分布の計算値と実測値を比較したものである。実

測値について、負荷上昇直後（3860時間）は負荷上昇前（3790時間）と比べると各層内のCOD濃度は1～11層まで全体的に上昇していたことがわかる。また、負荷上昇直後の3860時間でCODの蓄積が始まり、3890時間ではその蓄積が解消される傾向がみられ、また3層目以上で菌体によるCOD消費がほとんどないことがわかる。図から計算値は、この実測値の傾向をよく再現できていることがわかる。図10はUASB槽内のVSS濃度分布のモデルによる計算値と実測値を比較したものである。負荷上昇前の3790時間には、3層目以上でのVSS濃度の実測値は、かなり低かったことがわかる。しかし、負荷上昇直後の3860時間では、実測値について3層目にもVSS濃度の上昇がみられた。計算値においても各層間の流動による菌の受け渡しの効果により3層目のVSS濃度は増加し、実測値とほぼ一致させることができた。負荷上昇から30時間経過した3890時間においても、3層目のVSS濃度はさらに増加し、計算値も実測値をよく再現することができていることがわかる。

以上の結果から、本研究で構築した多層モデルによりUASB槽内の鉛直方向の

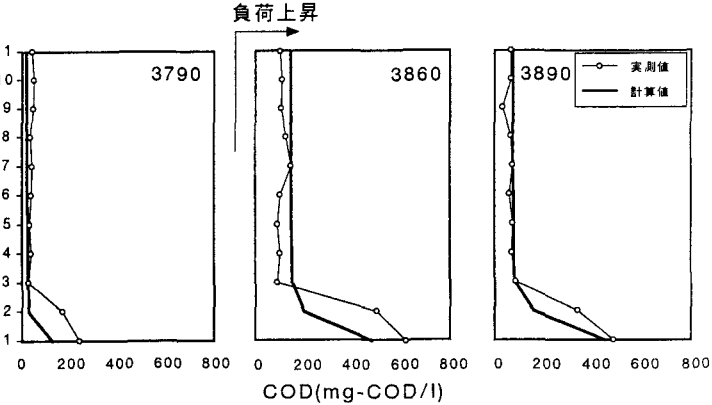


図 9 鉛直方向のCOD濃度の計算値と実測値との比較

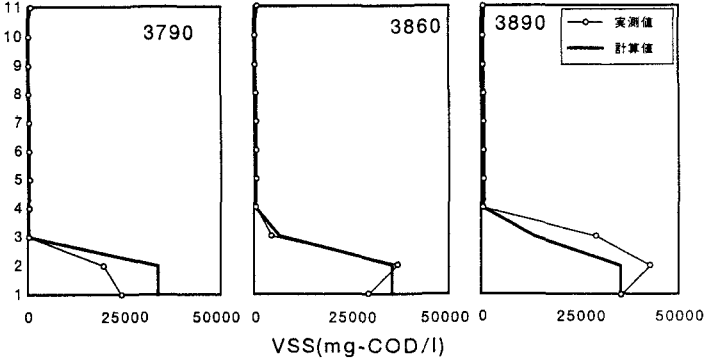


図 10 鉛直方向のVSS濃度の計算値と実測値との比較

非定常な処理応答及び菌の増殖過程をよく再現できたと判断される。

5. おわりに

本研究は、グラニュール形成過程における非定常かつ長期的な処理過程及び菌体の挙動を表現できる数理モデルを構築し、その有効性を実測値との比較により評価した。

以下に本研究で得られた結果をまとめる。

- 1) UASB装置を単一の完全混合槽と仮定して構築した単槽モデルにより、反応槽内での非定常な基質の処理特性ならびに菌体の増殖過程を再現することができた。
- 2) UASB装置を鉛直方向に11層に分割し、それぞれの槽内を完全混合槽と仮定して構築した多層モデルによりUASB槽内の鉛直方向の非定常な処理応答及び菌の増殖過程をよく再現できた。

今後、浮遊菌のグラニュールへの付着あるいは流動係数等、現在はフィッティングによって決定している係数についても、実験的にそれらを推定し、モデルに組み込むことでその精度を上げ、グラニュール形成期間の短縮に有効な流入負荷等が推定できるモデルへと改良する必要がある。

<付録>

UASB装置からグラニュールを専用注射器（口径5mm）を用いてゆっくりと採取し、冷温抽出法²⁴⁾²⁵⁾で細胞外ポリマーを抽出した。その他、EDTAやNaOHによる抽出法²⁶⁾もあるが、ここでは、各細胞の分散状態がよく、細胞内の成分の漏出が最も少ないと考えられ、かつ簡便な手順の冷温抽出法を採用した。

手順を以下に示す。

[冷温抽出法による細胞外ポリマーの分析²⁵⁾]

- (1) 試料に生理食塩水（NaCl：8.5g・l⁻¹）を5ml加え、よく懸濁させたのち30μlのホルマリンを添加する。
- (2) 懸濁液を氷水中で冷却しながら超音波で破碎(100W、5min.)する。
- (3) 懸濁液を超遠心分離(9800G、30min.)した後、上澄み液をポリマー抽出液とする。
- (4) 糖の分析に際して、抽出液中に含まれるホルマリンの発色阻害を除くため、100℃乾燥器内でホルマリンを揮発させ、蒸留水を添加したものを測定に用いる。なお、乾燥操作の定量への影響がないことをグルコースを使用して確認済みである。
- (5) タンパクの分析に際しては、検量線として同量のホルマリンを添加したものを用いる。

抽出成分として糖とタンパクを測定して、両者の合計を細胞外ポリマー量とした。また、この量を懸濁液のVSSで除し、VSSあたりの細胞外ポリマー量を求めた。なお、糖とタンパクの測定は、それぞれAnthrone法とLowry-Folin法によった。

<参考文献>

- 1) Lettinga, G., Velsen, A. F. M., Hobma, S. W., Zeeuw, W. and Klapwijk, A.: Use of upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment *Biotechnology and Bioengineering*, Vol.22, pp.699-734, 1980.
- 2) 原田秀樹：嫌気性スラッジブランケット（UASB法）による下・廃水処理、下水道協会誌、Vol.22, No.255, pp 67-77, 1985.
- 3) 永井史郎：UASB考、水、Vol 33, No.3, 1991.
- 4) 依田元之：わが国におけるUASB法の利用動向、食品と開発、Vol.26, No.3, 1992.
- 5) 珠坪一見、原田秀樹、曾 怡禎、桃井清至：高温UASBリアクター保持汚泥のグラニュール形成過程における構造的特性とメタン生成活性の推移、環境工学研究論文集、Vol.31, pp.57-67, 1994.
- 6) 珠坪一見、関口勇地、原田秀樹、大橋晶良、多川正、大関弘和、荒木信夫：16S rRNA標的のモレキュラー・プローブのIn-situ Hybridizationによる嫌気性汚泥微生物叢の生態学的構造解析、環境工学研究論文集、Vol 34, 1997.
- 7) 原田秀樹、珠坪一見、大橋晶良、関口勇地、多川正：新規の多段型高温UASBリアクターによる超高速廃水処理装置の実現化、環境工学研究論文集、Vol.34, 1997.
- 8) Jun LIU, Masao UKITA, W. M. Wu, Hiroshi NAKANISHI, Tsuyoshi IMAI and Masayuki FUKAGAWA: Enhanced granulation in upflow anaerobic sludge blanket reactors by using water absorbing polymer, *J. of Hydraul., Coast and Environ. Eng.*, No.527/II-33, pp.67-75, 1995.
- 9) Tsuyoshi IMAI, Masao UKITA, Jun LIU, Masahiko SEKINE, Hiroshi NAKANISHI and Masayuki FUKAGAWA: Advanced

- start up of UASB reactors by adding of water absorbing polymer, *Wat. Sci. Tech.*, Vol.36, No.6-7, pp.399-406, 1997.
- 10) 依田元之, 西村総介:嫌気性グラニュール汚泥の沈降性に関する研究, 第31回日本水環境学会年会講演集, p.482, 1997.
 - 11) Palms S. S., Wentzel M. C., Dold P. L., Loewenthal R. E., Marais G. V. R. : Mathematical modeling of upflow anaerobic sludge bed (UASB) systems treating carbohydrate waste waters, *Water SA*, Vol.17, No.2, pp.91-106, 1991.
 - 12) Bolle W. L., Van Breugel J., Van Eybergen G. C., Kossen N. W. F., Van Gils W. . An Integral dynamic model for the UASB reactor, *Biotechnol. Bioeng.*, Vol.28, No.11, pp.1621-1636, 1986.
 - 13) 大橋晶良, 渡辺 亮, 原田秀樹:微小電極と数学的モデルによる嫌気性微生物グラニュール内の基質濃度と pH プロファイルの評価, *環境工学研究論文集*, Vol.33, 1996.
 - 14) 山口隆司, 原田秀樹:バクテリン酸・プロピオン酸分解過程における硫酸塩還元細菌と水素生産性酢酸生成細菌の活性に及ぼす硫化物の影響, *環境工学研究論文集*, Vol.33, 1996.
 - 15) 珠坪一見, 原田秀樹, 大橋晶良:高温メタン発酵系における酢酸酸化・水素生成経路のメタン生成経路の生態学的意義, *環境工学研究論文集*, Vol.33, 1996.
 - 16) 山口隆司, 原田秀樹, 久野智明, 山崎慎一, 曾 怡楨:UASB 反応器による高濃度硫酸塩含有廃水の嫌気性処理特性, *環境工学研究論文集*, Vol.34, 1997.
 - 17) 久場隆広, 古米弘明, 楠田哲也:バイアル実験によるメタン生成活性の測定手法に関する検討, *水質汚濁研究*, Vol.13, pp.121-125, 1990.
 - 18) (社)日本下水道協会:下水試験方法・1984年版・.
 - 19) 今井 剛, 楠田哲也:メタン生成流動床における生物膜のモデル化に関する研究, *土木学会論文集*, No.527/II-33, pp.49-59, 1995.
 - 20) 古米弘明, 今井 剛, 楠田哲也:メタン生成流動床の処理特性と付着生物膜の成長過程の非定常解析, *水環境学会誌*, Vol.15, No.11, pp.839-849, November 1992.
 - 21) Thauer R. K., Jungermann K., and Decker K. : Energy Conservation in Chemotrophic Anaerobic Bacteria, *Bact. Rev.*, Vol.41, pp.100-180, 1977.
 - 22) Sam-Soon P. A. L. N. S., Loewenthal R. E., Dold P. L., and Marais, G. V. R. . Hypothesis for Pelletisation in the Upflow Anaerobic Sludge Bed Reactor, *Water SA*, Vol.13, No.2, April, pp. 69-80, 1987.
 - 23) 賈 曉珊, 古米弘明, 楠田哲也:UASB 反応器のスタートアップにおける水素分圧の変化と細胞外ポリマー生成について, *下水道協会誌論文集*, No.4, Vol.28, pp.83-93, 1991.
 - 24) Sutherland I. W. and Wilkinson: Chemical Extraction Methods of Microbial Cells, "Methods in Microbiology" Chap IV, Vol. 5B, Academic Press, 1971.
 - 25) 久場隆広, 古米弘明, 楠田哲也:細胞外ポリマーの簡易抽出法に関する検討, *土木学会第 29 回環境フォーラム講演集*, B-21, 1992.
 - 26) 末吉裕紀, 桃井清至, 小林民枝, 滝沢 智:微生物凝集機構の影響因子に関する研究, *土木学会第 46 回年次学術講演会講演概要集*, 334-335(II・147), 1991.