

上向流式嫌気性ハイブリッドブランケット リアクターの特性

張 振家¹・深川勝之²・浮田正夫³・中西 弘⁴

¹学生会員 工修 山口大学大学院博士後期課程 (〒755 山口県宇部市常盤台2557)

²正会員 工博 宇部工業高等専門学校教授 物質工学科 (〒755 山口県宇部市常盤台2557)

³正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科

⁴正会員 工博 大阪工業大学教授 工学部土木工学科

UASB装置内に嫌気性ろ床部を設けて上向流式嫌気性ハイブリッドブランケット(Uplow Anaerobic Hybrid Blanket: UAHB)リアクターを構築した。さらに、攪拌を行わない方式を導入することによって、装置の処理特性についての実験的研究を行った。①嫌気性ろ床を設置することにより、スタートアップ段階でのグラニュール化が促進され、同時に有機物除去率を向上させることができた。②処理水還流など人為的な攪拌を行わない条件下で、装置の高さ方向では微生物学的環境条件に応じた酸発酵性細菌、メタン発酵性細菌の棲み分けが行われた。その結果、単一装置内で2相嫌気性消化反応の特徴を有する自己造粒型UAHB処理プロセスを構築した。また、その自己造粒汚泥の形成機構について推定した。

Key Words : anaerobic wastewater treatment, UAHB process, granulation, bacterial distribution

1. はじめに

近年、有機性排水の嫌気性処理法は排水からのエネルギー回収ができる方法としてみなおされている。特に、新世代型高効率嫌気性処理プロセスといわれる上向流式嫌気性スラッジブランケット (Uplow Anaerobic Sludge Blanket: UASB) リアクターは、十数年前にLettingaら¹⁾によって開発されて以来、食品産業を中心に中・高濃度の有機性排水処理に現在世界で約200基、日本で約35基の実用装置が稼動している^{2), 3)}。しかし、UASB法などの自己造粒型処理プロセスでもっとも重要な汚泥の造粒特性についての基礎的知識の集積は十分ではなく、効率のよいグラニュールの生成、安定したスタートアップ、適用可能な排水の種類拡大など多くの課題が残されている。

UASB反応装置は機能的にスラッジベット(以下、ベット)、スラッジブランケット(以下、ブランケット)および沈降式気液固三相分離器の3つの部分に分けられる。この装置は従来の上向流式嫌気性ろ床における充填材の閉塞と短絡流の問題を解決するために、その改良法として生まれたものである⁴⁾。しかし、特にスタートアップ段階では汚泥のメタンガス

生成活性の増加とともに活発なガス発生で生じ、その攪拌作用による汚泥の流出を、沈降式の汚泥分離装置のみによって防ぐことは困難である。多くの場合このことによりスタートアップでの失敗を招いている。また、ブランケット部で浮遊している微小なグラニュール性汚泥はガス発生活性が高く、気泡を伴っているので、重力沈降法のみによっては分離しにくいものである。このため負荷を高めるとブランケット部の大量のメタン菌が流出し、2~3日内で装置内の生態バランスが崩れ処理能力の喪失を招いてしまう。この種の苦勞はおそらくUASBの研究に携わってきたほとんどの人が経験していることと思われる。このため最近、浮遊汚泥捕集機能をもつ嫌気性ろ床の利点を生かした高効率メタン発酵装置として、上向流嫌気性ハイブリッド (Uplow Anaerobic Hybrid Blanket: UAHB) 型のリアクターが注目されるようになった。この種の装置は①従来のUASB装置の上部に嫌気性ろ床部を設けたもの⁵⁾、②従来の上向流式嫌気性ろ床における充填材の体積を縮小し、下部の自己造粒部を拡大したものに分類できる。両者は改良の接近方法が異なるものの結果的には同じ装置となる。しかし、現実のUASB装置ではベット区

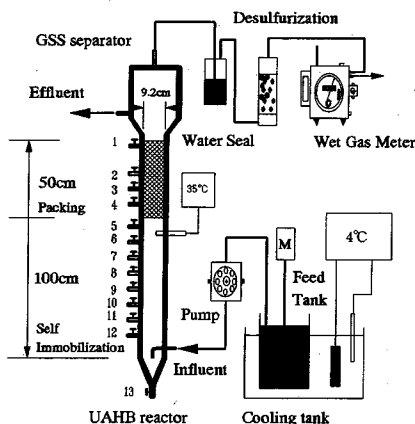


Fig. 1 Schematic of the experimental apparatus

の厚さが50~100cm程度である。ベッド区と三相分離器の間にあるブランケット区は有機物除去効率が低い空間であり、反応部としてこの部分はデッドスペースとなっている。そこで、UAHBは従来のUASB装置のデッドスペースの一部を有効利用した改良法とも考えられる。これまでUAHB法に関するいくつかの研究が行われているが⁵⁾⁻¹²⁾、研究の注目点はほとんど装置の処理性能、特にスタートアップ段階完了後の処理性能に重点が置かれていた。有機物をメタンガスに変換させる過程において、嫌気性生物反応の逐次反応特性を活用し、早期に安定したより高効率の処理性能を達成するための操作方式の最適化に関する研究は十分に行われていない。

本研究では、このUASB装置内に嫌気性ろ床部を設けて上向流式嫌気性ハイブリッドブランケット(UAHB)リアクターを構築した。さらに、攪拌を行わない方式を導入した場合の装置の処理特性、自己造粒汚泥の形成機構について実験的検討を行った。

2. 実験

(1) 実験装置および方法

本研究に用いたUAHBリアクター実験装置の概略をFig. 1に示す。リアクターは反応部と三相分離器からなり、ポリプロピレン製のカラムを用いた。反応部は内径92 mm、下部の自己造粒区は高さ1000 mm、上部のろ床区は高さ500 mmである。反応部の容積は10.52 L (自己造粒部7.20 L, ろ床部3.32 L)で、ろ床部にはプラスチック製の紐状充填材を充填(空隙率98%)してある。三相分離器は内径180 mm、水の貯留容積は3.57 Lである。リアクターはウオーター

Table 1 Operational conditions

Phase number	TOC conc. (mg.L ⁻¹)	HRT (d)	TOC loading (kg.m ⁻³ .d ⁻¹)
1	3475	1.8	1.9
2	3475	0.9	3.9
3	3475	0.65	5.4
4	5213	0.5	10.4
5	3475	0.5	7.3

Table 2 Composition of synthetic wastewater

Constituent	Concentration (g.L ⁻¹)	
	Phase 1-3,5	Phase 4
glucose	9.0	13.5
CH ₃ COONa	4.0	6.0
K ₂ HPO ₄	0.2	0.2
(NH ₄) ₂ SO ₄	0.2	0.2
NH ₄ HCO ₃	0.2	0.44
CaCl ₂ ·2H ₂ O	0.35	0.2
NaHCO ₃	2.0	3.0
TMS (mL.L ⁻¹)	2.0	2.0

ジャケットにより35°C~37°Cに保温されている。基質は4°C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導入される。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入される。生成したガスは硫化水素を除去するための酸化鉄吸収塔を経た後、湿式ガスメータで測定されて排出される。反応部は100 mmの間隔でサンプリングできるようにしてある。

本実験では反応部の容積10.95 Lをリアクターの有効容積とした。実験条件をTable 1に示す。リアクターの水理的滞留時間HRT(反応部の容積に対応、負荷も同じ)を1.8 dから0.5 dまでに徐々に小さくしてTOC負荷を増大させた。Phase 1では種汚泥を投入してから1日静置し、ガス生成機能が回復したのち、HRT=1.8 dで7日運転した。Phase 2, 3ではそれぞれHRT=0.9, 0.65 d, Phase 4, 5ではいずれもHRT=0.5 dの条件で運転した。流入水のTOC平均濃度はPhase 1, 2, 3, 5は3475 mg.L⁻¹, Phase 4は5213 mg.L⁻¹である。運転期間はPhase 2, 3は90日, Phase 4は72日, Phase 5は41日、全運転期間は290日間であった。

Table 3 Composition of trace metal solution

Constituent	Concentration (mg.L ⁻¹)
FeCl ₂ .4H ₂ O	2,000
H ₃ BO ₃	50
ZnCl ₂ .2H ₂ O	50
CuCl ₂ .2H ₂ O	40
MnCl ₂ .4H ₂ O	500
(NH ₄) ₆ MoO ₇ .2H ₂ O	50
AlCl ₃	30
CoCl ₂ .6H ₂ O	150
NiCl ₂ .6H ₂ O	100
Concentrated HCl	2 (mL.L ⁻¹)



Photo. 1 The biofilm in the filter

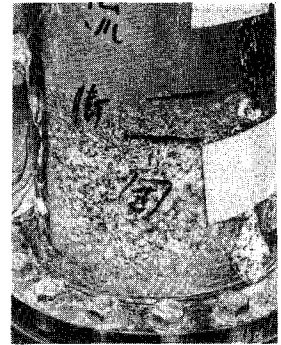


Photo. 2 The granule phase in the bed (70 days later)

(2) 装置の特性

本UAHBリアクターは装置内を攪拌することを行わない条件下で運転している。

リアクターの反応部はその態様によって大きく、①グラニュール汚泥によって形成されるベッド区、②微小なグラニュールと綿状の汚泥が浮遊しているブランケット区、③ろ床区、の3つの部分に分けられる。

(3) 供試原水および種汚泥

本実験で用いた原水はグルコースと酢酸ナトリウム (TOC比4:1) および必要な無機塩類および微量元素を含む合成排水である。その組成をTable 2, 3に示す。

種汚泥は都市下水処理場における汚泥消化槽から採取したもので、実験装置に6 L(13.9gT-VS.L⁻¹)投入した。

(4) 分析

有機物の濃度は溶解性全有機性炭素(TOC)の濃度で表現し、島津TOC-5000型測定計によって測定した。ガス組成および揮発性脂肪酸(VFA)の組成と濃度はそれぞれTCDおよびFIDガスクロマトグラフ法により測定した。グラニュールの観察は光学顕微鏡法¹⁴⁾と走査型電子顕微鏡法¹⁵⁾に基づいて行った。

3. 結果および考察

(1) UAHBの運転特性

a) 運転経過の概略

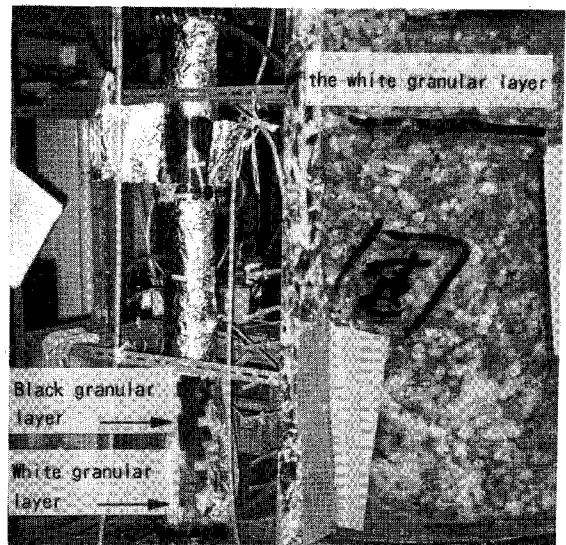


Photo. 3 The colour of granule in the bed

本実験は1992年6月24日から開始された。宇部市東部下水処理場の消化汚泥6 Lを装置に投入してから10月14日までの約4か月間は、装置の改良、充填材の選択および運転方法の把握などのことを行った。10月14日には装置を洗い、ふたたび同量の消化汚泥を投入して正式の実験を始めた。

リアクターに種汚泥を投入して1日静止し、HRTを4段階、TOC負荷を5段階に分けて約300日間運転した。本実験ではグラニュールの形成から安定したグラニュール層が達成されるまでに経過した期間をスタートアップ期間とした。この期間はPhase 1からPhase

2の後半まで約3カ月間であった。運転中の観察によると、生物膜の形成はグラニュールの形成より約1カ月速く、その時ガスの発生はろ床区に集中するようであった。約40日目から、反応部上部のろ床区には生物膜が形成し始めた。約70日で汚泥のグラニュールが完成された。ろ床区における生物膜の写真(1992.12.8)をPhoto. 1に示し、ベッド区におけるグラニュール層の写真(1992.12.5)をPhoto. 2に示した。この時ベッド区のグラニュール層は12 cm程度であった。その後、グラニュール層の厚さは急速に増加して、約5カ月以降は45~50 cmまでになり安定した。完成したベッド区の写真(1993.5.14)をPhoto. 3に示した。この写真から分かるように、この時ベッド区のグラニュール層の色は下約20~30 cm(サンプリング点10号のところ以下)の高さ範囲では灰白、これ以上の部分は灰黒の色となった。全運転期間におけるHRT, TOC負荷, ガス生成速度および処理水TOC濃度の経時変化をFig. 2に示した。以下, スタートアップ期間およびグラニュール形成後の安定した期間における運転特性について考察する。

b) スタートアップ期間における装置の運転特性 (7) 有機物除去率の変化

Fig. 2に示したように, スタートアップ期間における処理水TOC除去率は, 運転開始最初の60%から急速に増加し, 10日目以降は90%以上のTOC除去率が達成された。従来のUASB法では, スタートアップ期間における汚泥のウォッシュアウトを防止するために, 低負荷と長いHRTの方式で運転している。このためこの期間における装置の処理能力の向上はほとんど期待できない。これに対して, 本UAHBリアクターでは, スタートアップ期間でも高効率の処理能力を発揮することができた。

(4) ガス生成速度の変化

Fig. 2に示したように, ガス生成速度(自己造粒区の容積に対応, 以下同)は運転時間の増加に伴って大きくなっている。同じ運転段階(Phase 2)ではガスの生成速度は, 汚泥の馴致にしたがってほぼ直線的に上昇した。7日目から40日目までのガス生成速度は平均3 NL.L⁻¹.d⁻¹程度であった。40日目以降はほぼ直線的に上昇した。このことは装置内の嫌気性細菌の活性および濃度が急速に回復・上昇することを示す。

c) 安定したグラニュール形成後の装置運転特性

(7) ガス生成特性

Fig. 2に示したように, 40日目以降は負荷とHRT

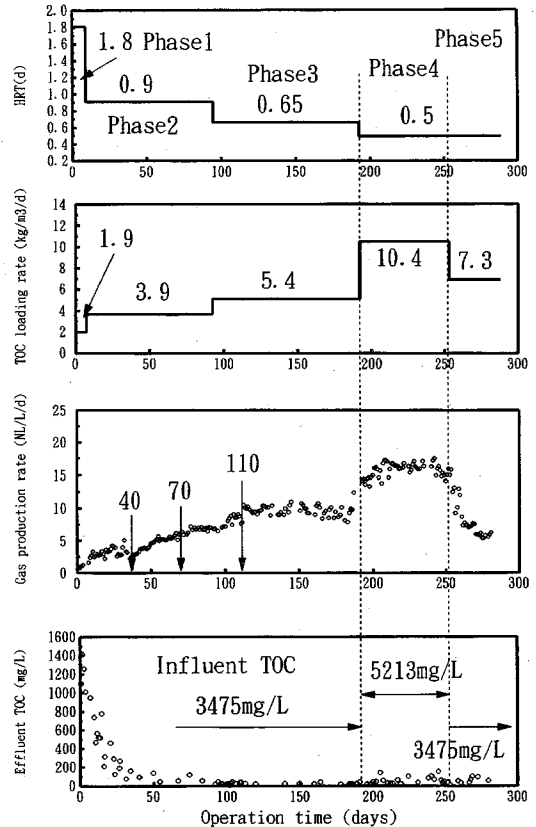


Fig. 2 Course of HRT, TOC loading rate, Gas production rate and Effluent TOC in the UAHB

の変化にもかかわらず, 処理水TOC濃度は200mg.L⁻¹程度で安定し, TOC除去率はほぼ95%~98%であった。安定状態に達したガス生成速度はPhase 2の後半(約75日目以降)では6.4 NL.L⁻¹.d⁻¹, Phase 3では9 NL.L⁻¹.d⁻¹, Phase 4では17 NL.L⁻¹.d⁻¹程度であった。生成した消化ガス中のメタン含有率は60%~70%程度であった。このとき, メタンガスの転換収率はPhase 2の後半では0.834 Nm³.CH₄.kg-TOC⁻¹, Phase 3では0.847 Nm³.CH₄.kg-TOC⁻¹, Phase 4では0.831 Nm³.CH₄.kg-TOC⁻¹程度であった。一方, 本実験で用いた人工合成排水に対しては, そのTOC値とTOD値との関係はTOD/TOC=2.35であるため, 1 kgのTODから0.356~0.362 Nm³のメタンが生成した。この値は理論値の0.35¹³⁾にほぼ一致している。

一方, TOC負荷をPhase 4の10.4 kg.m⁻³.d⁻¹からPhase 5の7.3 kg.m⁻³.d⁻¹まで減少させると, ガスの生成速度は大きく低下した。Phase 5では, ガスの生成速度は6

NL.L⁻¹.d⁻¹程度で、また物質収支から算出した値は 0.418Nm³-CH₄.kg-TOC⁻¹ (メタン転換率は0.178 Nm³ kg-TOD⁻¹) 程度で、他のPhaseのほぼ半分であった。本実験中の観察によると、負荷の増加とともにベッド区下部の灰白色のグラニュール層の厚さも増加した。一旦負荷を変化させると、この層の厚さが安定するまで約1カ月間掛かった。この期間はリアクター内での嫌気性細菌の構成が変動する期間である。Phase 5の運転期間はわずか41日間であったため、この変動期間にあると考えられる。

(1)有機物の除去特性

Fig. 3はPhase 4 (237日目) とPhase 5 (275日目) における同じHRT条件下での装置の高さ方向におけるTOC濃度の変化を見たものである。TOC濃度はベッド区ではほぼ直線的に減少し、80~85%のTOCがここで処理された。またこの図から分かるように、流入基質の濃度を変化させると、ベッド区のTOC濃度の分布にも大きな変化が起こる。したがって、ベッド区の厚さとHRTの両方とも変わらない本条件下では、流入基質濃度を減少させると、ベッド上部にある微生物に対して基質の供給が不十分となる。

ブランケット区ではTOC濃度は変化しなかった。ろ床区ではその入り口から約25 cmのところまでTOC濃度は変化し、ここで除去されたTOCの量は装置全体で除去された量の15~20%程度であった。

一方、pHは灰白色のグラニュール層では pH=5~5.3、灰黒色のグラニュール層ではpH=6.5~7、ろ床区の出口ではpH=7~8であった。嫌気性細菌は本来灰白色であるが、本実験になるグラニュールの色は、原水中の色素物質の吸着や硫酸還元作用によってFeSなどの硫化物の生成・吸着などにより生じたものであると考えられる。本実験の場合は後者の原因に属する。しかし、本実験ではベッド区下部は酸性であったため、硫化物の吸着が生じなかったと考えられる。pH=5以下ではメタン生成菌の機能が抑制されるので、本実験ではベッド区のグラニュール層を酸発酵層(灰白色部分)とメタン発酵層(灰黒色部分)に分けた。以下はこの2カ所のグラニュールの細菌相構造の解析からさらに酸発酵層の存在を確認する。

(2)リアクター内の汚泥の性状

a)高さ方向の汚泥濃度変化

Fig. 4はPhase 4の237日目における高さ方向の汚泥濃度分布を示したものである。ベッド区下部30 cm程度はぎっしりグラニュールのつまった固定床のよ

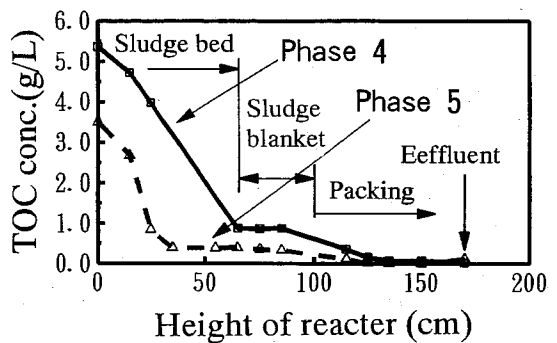


Fig. 3 Profile of TOC conc. in the UAHB

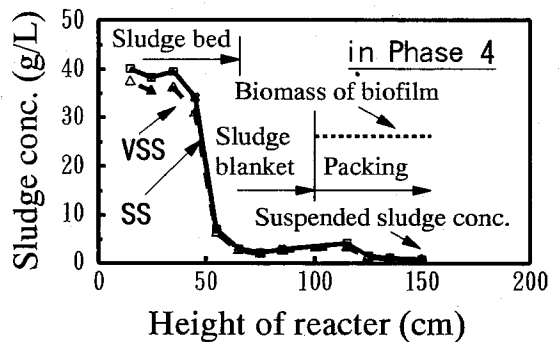


Fig. 4 Profile of sludge conc. in the UAHB

うな状況であるのに対し、ベッド区上部15~20 cmは下部より汚泥量が少なく膨張状態にあった。ろ床区における充填材の空隙に蓄積している汚泥は、ブランケット区における浮遊している汚泥よりも多く、そのほとんどは下部20 cm程度に集中しているようであった。ろ床区の生物膜の量は本実験が終わった時に、充填材に付着した生物膜を剥離させて、平均MLSSとして定量した。その量は約26 g.L⁻¹であり、VSS/SSは約73%であった。図中の点線はMLSS濃度である。

b)グラニュールの粒径分布及び構造

攪拌を行わない本実験では、上下部分でグラニュールの大きさが異なってくる。基本的には大きい粒子ほど下部に集中するはずである。そこで、画像解析装置(PIAS-1画像計算ソフト使用)を用いてその等価円の直径(Hey wood diameter)を測定した。結果をFig. 5に示す。グラニュールの粒径は底部から10 cmの位置で0.1~3.5 mm、平均0.93 mm、20 cmの位置で0.1~3.0 mm、平均0.96 mm、30 cmの位置では0.1

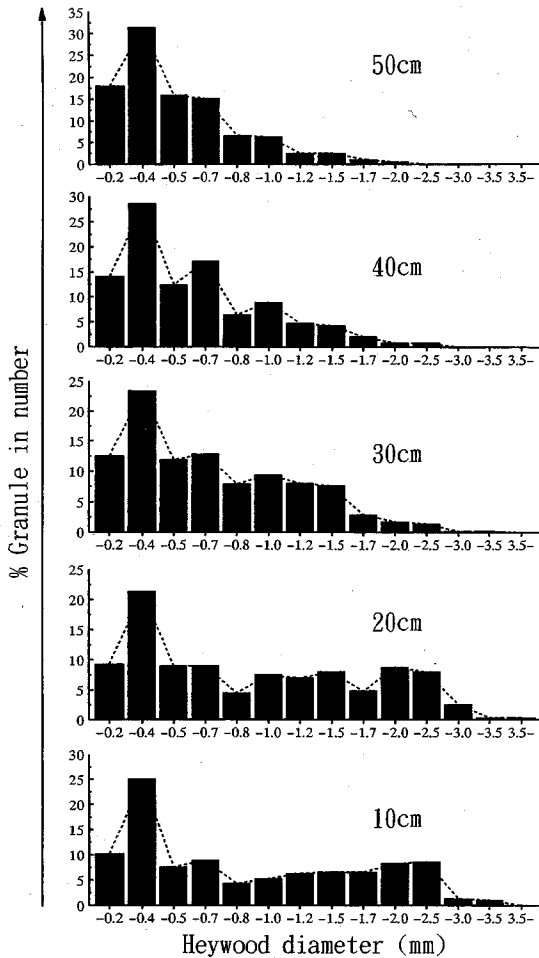


Fig. 5 Distribution of granule size in sludge bed (in Phase 4)

～2.5 mm, 平均0.67 mm, 40 cmの位置で0.1～2.5 mm, 平均0.56 mm, 50 cmの位置で0.1～2.0 mm, 平均0.48 mmであったが, いずれの高さのところでも直径0.2～0.4 mmのグラニュールが一番多い。

Photo. 4は走査型電子顕微鏡により観察された, 灰白色のグラニュールの写真である。これらのグラニュールの形状はだいたい球状となるが, 発達した大きなグラニュールは, 二つ以上の小さいグラニュールが合体したものと考えられる。

Photo. 5は灰黒色のグラニュールの写真を示したものである。小さいものは球状となり, 大きいものは扁平状となっている。

一方, 何れのグラニュールに対しても, グラニュール内の細菌の密度は表面から中心へだんだん小さく

なり, また, 直径1 mmの以上のグラニュールでは中心部が空洞となっていることが観察された。これはグラニュールが成長の限界に達した後に崩壊する原因となるものと考えられる。

c) ブランケット区における浮遊性汚泥の性状

Photo. 6にブランケット区における浮遊性グラニュール汚泥の様子を示した。これらのグラニュールの大きさは直径0.1～0.5 mm程度であり, ベッド区のグラニュールが崩壊したものかあるいはグラニュールの幼体と考えられる。

Photo. 7はブランケット区から採取した汚泥をただちに顕微鏡観察したものである。微小気泡がグラニュール内部で生成している様子を示しているもので, 活性が高く, 成長段階にあることが分かる。これらのフロックまたは, 微小グラニュールは自身から気泡を放出するため沈降性がない。

(3) 微生物相の構造

a) ベッド区における細菌相

Photo. 8は灰白色のグラニュールの電顕写真である。グラニュールの細菌相は桿菌と球菌により構成されていた。これに対して, 灰黒色のグラニュールの細菌相は糸状菌と同じ種類の球菌と思われる細菌により構成されていることが分かった (Photo. 9)。この種の桿菌と球菌はそれぞれ酸発酵性細菌と水素酸化性メタン生成菌と思われる^{16), 17)}。糸状菌は *Methanothrix sp.* 細菌と思われる¹⁸⁾。水素酸化性メタン生成菌は全グラニュール層に満遍なく分布しているため, 水素分圧を下げる意味で重要な役割を果たしている。

先に述べたが, この灰白色のグラニュールはベッド区下部 (厚さ約20～30 cm) の酸性層に集中し, 灰黒色のグラニュールはベッド区酸性層上部のアルカリ性層に集中していた。その現象を本節の細菌相解析の結果と合わせて考えると, 酸発酵性グラニュール層が存在することが確認できる。すなわち, 本実験条件下では, ベッド区のグラニュール層は機能的に酸発酵作用を主とする酸発酵層とメタン発酵を主とするメタン発酵層に分けられる。このようなグラニュール層構造は2相嫌気性消化の特徴を有していると考えられる。

従来の知見によると, UASBグラニュールは糸状性の *Methanothrix sp.* 細菌とそれ以外の細菌, 特に酸発酵細菌を含む桿菌, 球菌が混在するとしており, 時に多層構造を有している⁹⁾。しかし, 本実験では

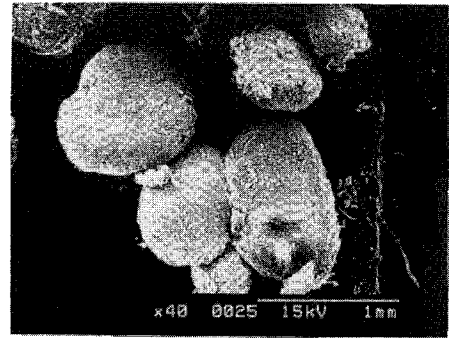
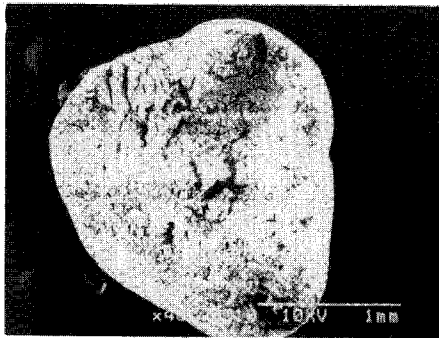
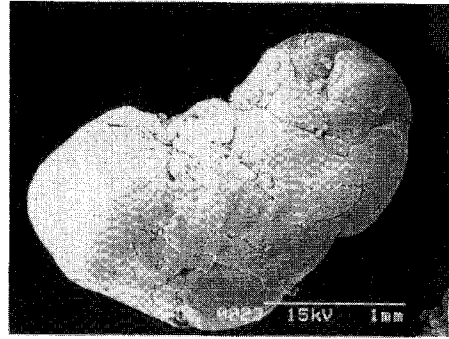
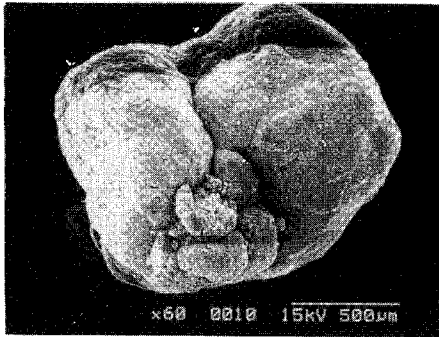


Photo. 4 The outline and cleavage of granule in white granular layer

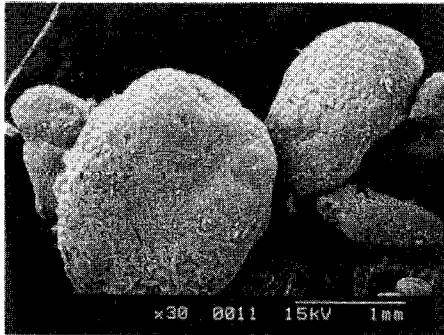


Photo. 5 The outline of granule in black granular layer

*Methanothrix sp.*細菌と酸発酵細菌との共生は確認できなかった。

b) ブランケット区における細菌相

ブランケット区に浮遊しているものは、綿状のフロック汚泥とグラニュール性汚泥に分けられる。ここで最も興味深い現象は、*Methanosarcina*属を主として*Methanothrix sp.*との共生 (Photo. 10) によって

構成されているグラニュール、および綿状のフロック汚泥の細菌群は束状のように増殖している *Methanothrix sp.*のみによって構成されている (Photo. 11) ことである。この現象は、これまで報告されていなかったものである。

c) ろ床区における細菌相

Photo. 12は運転70日目のろ床区における生物膜の細菌相構成を示したものである。糸状菌と *Methanosarcina*細菌が優占種であることが分かった。

(4) UAHBプロセスの機構

a) 分相的な微生物の増殖

Fig. 6は運転開始から汚泥が安定するまでのリアクター内の変化の様子を模式的に表したものである。最初はリアクター自己造粒区に消化汚泥を投入し、高負荷の基質供給によって汚泥が膨張し、浮遊性汚泥は次第に上部のろ床区により捕獲されて付着・成長した。それと同時に、ろ床区より下では全体的にpHが低下し、それに伴い酸発酵が優勢となった。このた

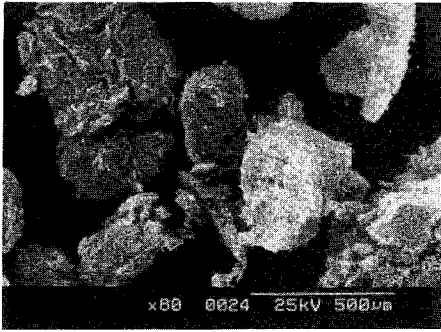


Photo. 6 The size of granule in blanket layer

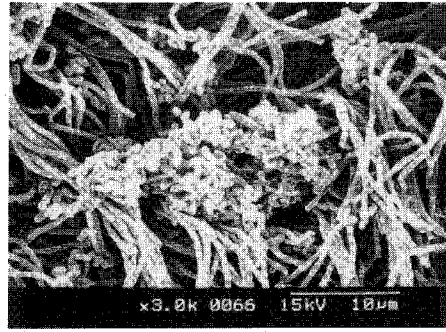


Photo. 9 Bacterial structure on the surface of methanogenic granule

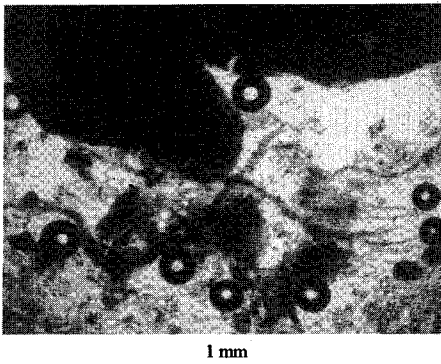


Photo. 7 Visualization of gas production from blanket sludge

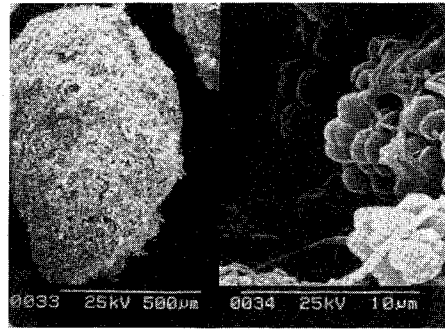


Photo. 10 Granules mainly consisting of *Methanosarcina* sp. -like bacteria

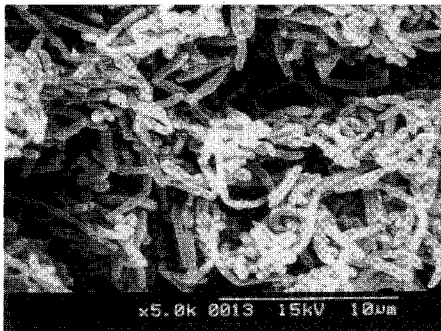


Photo. 8 Bacterial structure on the surface of acidogenic granule

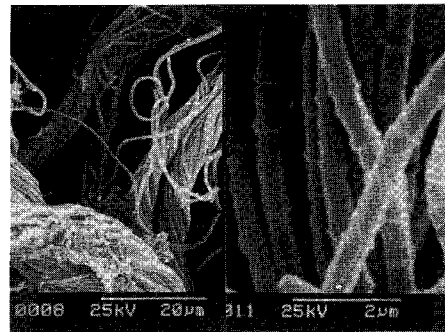


Photo. 11 Methanothrix-like bacteria in a flock of blanket sludge

め、先ず装置の底部には灰白色のグラニュールが形成し始めた。約2カ月でベッド部の灰白色のグラニュール層(約12cm)と上部の生物膜の形成は完了し、ガス生成の位置は上部のろ床区に集中することおよびブランケット部のpHは6以下であること

が観察された。さらに、約3カ月以降には灰白色のグラニュール層の上に灰黒色のグラニュール層が形成され安定した。前述したように、灰白色のグラニュールは主として酸発酵性細菌群によって構成されてい

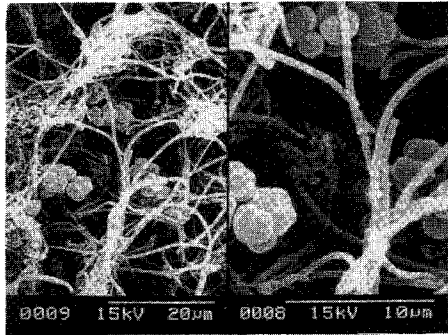


Photo. 12 Bacterial structure on the surface of biofilm in the filter

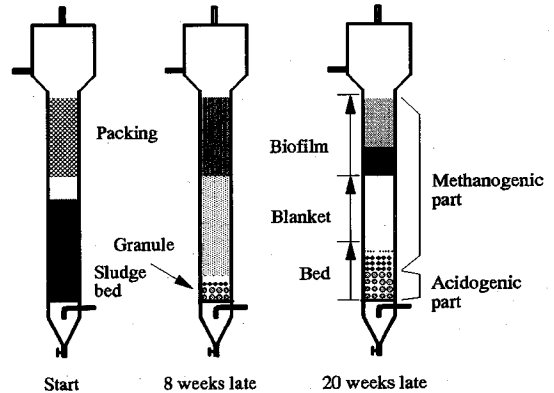


Fig. 6 Development of sludge formation in the UAHB

ることが明らかとなった。このような段階を経て、酸発酵相とメタン発酵相とが明瞭に分離され、しかも自己造粒能を有する高効率の嫌気性処理プロセスが達成されるのである。酸発酵相グラニュール層の厚さはPhase 3では約25 cm, Phase 4では約30 cmであり、負荷の増大とともに厚くなる傾向を示した。メタン発酵相グラニュール層の厚さも同様に変化している。即ち、負荷の増大によってベッド区の容積も増大している。このため、リアクター内の汚泥量（或いは、微生物の活性）は負荷の増減によって自動的に変化している。

以上のように、人為的な攪拌を行わない運転方式を導入することにより、UAHBリアクター内で、従来の自己造粒型嫌気性処理とは異なった微生物学的環境を構築し、新しい概念の自己造粒型嫌気性処理プロセスとして、単一槽式の自己造粒型2相嫌気性処理プロセスが可能となった。

b) グラニュールの形成および再生の機構

自己造粒汚泥の形成メカニズムについていくつかの研究が報告されているが⁽¹⁹⁻²¹⁾、現在のところそれは依然としてはっきりしていない。ここでは装置の高さ部位によって微生物学的環境が異なることに注目して、グラニュールを構成する優占細菌群の分布特性、及びグラニュール汚泥の形状構造についての考察結果より、以下のように自己造粒機構を推定した。①ろ床部を導入することにより、装置内で浮遊性菌体を高濃度に維持することが可能であった。このため、グラニュール形成過程でもっとも重要と思われる菌体コロニーの発育を促進させることができた。②グラニュールの大きさと形状は環境中の基質濃度と関連している。即ち、すべてのグラニュールの成

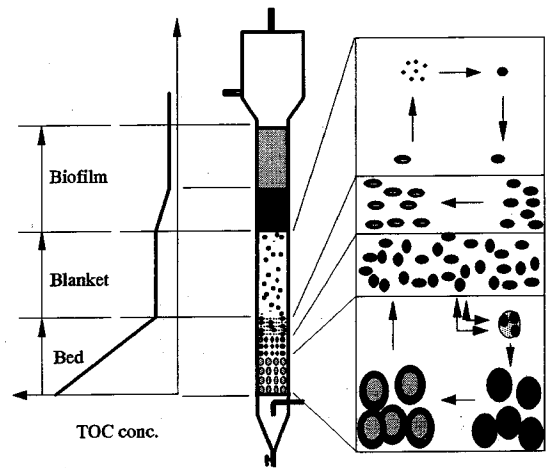


Fig. 7 Mechanisms of granule development and maintenance

長・発達の限界は基質の透過レベルに依存している。基質が得られない菌体は死滅する。これはグラニュール内部の空洞化現象が発生する原因の一つである。

Fig. 7は本UAHBリアクター内のグラニュールの形成・発達・崩壊の様子を模式的に示したものである。ベッド下部の高濃度基質区にある酸発酵相グラニュールは粒径が大きく、糸状性菌の関与がないものである（**Photo. 8**）。これらのグラニュールの構造は、小さい粒子の集合体としての特徴を持つ（**Photo. 6**）ことが明確に観察されたので、その形成機構はコロニー→微小粒子（破壊されたグラニュールの残骸を含む）→微小粒子の合体→発達→グラニュールという過程となると考えられる。酸発酵層と上部のメ

タン発酵層の間では白色と黒色の粒子が混ざった汚泥層が存在しているため、破壊されたグラニューールは、おそらくここに蓄積しているものと考えられる。

メタン発酵相のグラニューールは粒径が比較的小さく、糸状性細菌の *Methanothrix sp.* が優占している構造と球菌の *Methanosarcina* 属が優占している構造の二種類のグラニューールが観察された (Photo. 9, 10)。これらのグラニューールの形成機構も酸発酵グラニューールと同様であるが、形成の場所は主としてブランケット区であると考えられる。即ち、ろ床区への存在はブランケット部の浮遊性汚泥のウォッシュアウトを防止するために有効であり、このことがグラニューールの形成・発達に重要な役割を果たしているものと考えられる。

4. 結論

本研究では、UASB装置内に嫌気性ろ床部を設け、攪拌を行わない方式を導入することにより、単一槽式の自己造粒型2相嫌気性消化特性を有するUAHBプロセスを構築して、そのスタートアップ特性、有機物の除去特性、および装置中の優勢細菌群の分布特性などについて実験的検討を行った。その結果以下のような結論を得た。

1) 嫌気性ろ床を設置することにより、スタートアップ段階でのグラニューール化を促進させ、有機物除去率を向上させることができた。スタートアップ完了以降は安定した汚泥濃度を維持させ、同時に残余の有機物を除去させることができた。

2) TOCはスラッジベッド部で80~85%、嫌気性ろ床では15~20%除去された。

3) グラニューールの生成・発達・崩壊の機構を推定した。酸発酵性グラニューールはベッド層内で形成・発達・崩壊が行われ、メタン発酵グラニューールはベッド上部とブランケットで同様のことが行われる。このことからブランケット部が重要な役割を果たしていることが明らかとなった。

4) 攪拌を行わない本装置では、酸発酵性細菌、メタン発酵性細菌の棲み分けが行われ、酸発酵の後にメタン発酵を行わせ、嫌気性生物の逐次反応特性を活用して、一槽式の2相嫌気性消化法の自己造粒型処理プロセスを構築することができた。

5) 今後の研究課題として、従来のUASB装置内のブランケット部の高さを低減し、装置高さの合理的

な設計法を検討することが残されている。

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) 永井史郎: UASB考, 水, Vol. 33, No. 3, 1991.
- 3) 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.
- 4) 原田秀樹: 自己固定化法による排水処理技術の動向と課題, 用水と排水, Vol.31, No.1, pp.5-11, 1989.
- 5) 李 玉友, 野池達也他: アミノ酸系排水の嫌気性ろ床および嫌気性ハイブリッドリアクター処理における性能比較, 水環境学会誌, Vol.17, No.2, pp.99-108, 1994.
- 6) Guiot, S. R. and van den Berg, L.: Dynamic performance of an anaerobic reactor combining an upflow sludge blanket and a filter for the sugar waste, *Proceeding of the 39th Purdue Industrial Waste Conference*, pp.705-717, 1984.
- 7) Guiot, S. R., Kennedy, K. J. and van der Berg, J.: Performance of an upflow anaerobic reactor combining a sludge blanket and a filter treating sugar waste, *Biotechnology and Bioengineering*, Vol.27, pp.800-806, 1985.
- 8) Crawford, G. V. and Teletzke, G. H.: performance of a hybrid anaerobic process, *Proceeding of the 41th Purdue Industrial Waste Conference*, pp.196-303, 1986.
- 9) Kennedy, K. J., Gorur, S. S., Elliott, C. A., Andras, E. and Goiot, S. R.: Media effects on performance of anaerobic hybrid reactors, *Water Research*, Vol.23, pp.1397-1405, 1989.
- 10) Boopathy, R. and Tilche, A.: Anaerobic digestion of high strength molasses wastewater using hybrid anaerobic baffled reactor, *Water Research*, Vol.25, pp.785-790, 1991.
- 11) Tilche, A. and Vieira, S. M. M.: Discussion report on reactor design of anaerobic filters and sludge bed reactors, *Water Science and Technology*, Vol.28, No.8, pp.193-206, 1991.
- 12) Arjen Rinzema, Herbert van and Gatzte Lettinga: Anaerobic digestion of triglyceride emulsions in expanded granular sludge bed reactors with modified sludge separators, *Environmental Technology*, Vol.14, pp.423-432, 1993.
- 13) 宝月彦彦: 嫌気性処理による産業廃水からのエネルギー

- ギー回収, 用水と廃水, Vol.33, No.4, pp.41-47, 1991.
- 14) 須藤隆一, 稻森悠平: 生物相からめた処理機能の診断, 産業用水調査会, 1988.
- 15) 原田秀樹, 桃井清至他: 嫌気性細菌の自己造粒化機構を利用したメタン発酵リアクターの高速処理特性, 衛生工学研究論文集, Vol.24, pp.241-251, 1988.
- 16) 銭沢樹他: 沼気発酵微生物学, (中国) 浙江科学技術出版社, 杭州, 1986.
- 17) 松井三郎: 環境微生物工学研究法, 技報堂出版株式会社, 東京, 1993.
- 18) G. B. Patel: Characterization and nutritional properties of *Methanothrix concilii* sp. nov., a mesophilic, aceticlastic methanogen, *CAN. J. MICROBIOL.* Vol.30, pp.1383-1396, 1984.
- 19) 高橋正宏他: 多段反転流式バイオリアクター(MRB)の開発, 土木学会第24回年次学術講演会講演概要集, pp.836-837, 1987.
- 20) 高橋正宏: 多段反転流式バイオリアクターの特性, 衛生工学研究論文集, Vol.25, pp.171-178, 1989.
- 21) 明賀春樹他: 汚泥の自己造粒化に関する一考察, 日本水処理生物学会誌, Vol.8, No. 1, pp.25-31, 1992.
- (1994.4.20 受付)

THE CHARACTERISTICS OF UPFLOW ANAEROBIC HYBRID BLANKET

Zhen jia ZHANG, Masayuki FUKAGAWA, Masao UKITA and Hiroshi NAKANISHI

In this study, the authors set up a contact bed in the upper part of UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), named UAHB (Upflow Anaerobic Hybrid Blanket). Experimental results indicated that: ① The contact bed not only promoted the granulation during the period of start-up, but also improved the organic matter removal. ② When effluent is not recycled acidogenic bacteria exist mainly in the lower part and methanogenic bacteria mainly in the upper part. This reactor developed is a new kind of UAHB reactor which possesses the features of two-phase anaerobic digestion. The mechanisms of granulation in UAHB process were also discussed.