

微好気-好気法で馴養された活性汚泥による 生物分解性プラスチック (Polyhydroxyalkanoate) の生産

岩本 友里奈¹・佐藤 弘泰²・味埜 俊³・松尾 友矩⁴

¹学生会員 工修 東京大学学生 工学系研究科都市工学専攻 (〒113 文京区本郷7-3-1)

²正会員 工博 東京大学助手 工学系研究科都市工学専攻 (〒113 文京区本郷7-3-1)

³正会員 工博 東京大学助教授 工学系研究科都市工学専攻 (〒113 文京区本郷7-3-1)

⁴正会員 工博 東京大学教授 工学系研究科都市工学専攻 (〒113 文京区本郷7-3-1)

生物分解性プラスチックであるポリヒドロキシアルカノイト (PHA) を活性汚泥を用いて生産する方法について検討した。嫌気好気式活性汚泥法の嫌気工程に微量の空気を供給する微好気-好気法を用いることにより、系内に高いPHA生産力をもつ微生物を集積することができた。その微生物を用いてPHA生産実験を行った結果、微好気工程で供給される微量の空気量が微生物のPHA生産能力 (PHA蓄積速度・蓄積継続時間・炭素源のPHAへの変換率) に影響を与えることが明らかになった。観察された最大のPHA蓄積率は汚泥の乾燥重量の62%であった。また蓄積されるPHAポリマーの構成成分は3-ヒドロキシ酪酸と3-ヒドロキシ吉草酸であった。

Key Words: polyhydroxyalkanoate, biodegradable plastic, microaerobic-aerobic, activated sludge

1. はじめに

プラスチックは便利な特性ゆえに広く普及しているが、その利用に伴って発生するプラスチック廃棄物は、焼却した際の高熱や有害ガスの発生、埋め立てた際の可塑剤の漏出、生態系への悪影響など種々の問題を引き起こしている。そこで、環境中で微生物の働きにより炭酸ガスまで完全に分解される生分解性プラスチックが「環境に優しい」新しい素材として注目されている。ポリヒドロキシアルカノイト (Polyhydroxyalkanoate, 以下, PHAと略す) はそのひとつであり、イギリスでは水素細菌 (*Alcaligenes eutrophus*) を用いて工業生産も行われており¹⁾、また、種々のPHA生産微生物の検索や分離も行われている^{2),3)}。しかし、まだコストが高くその削減が望まれている。

一方、リン除去技術として知られている嫌気好気式活性汚泥法 (以下, 嫌気好気法) では、活性汚泥がその代謝の中でPHAを蓄積することが知られてい

る。その代謝とは、嫌気工程では菌体内に蓄積していたポリリン酸を分解することによりエネルギーを得て有機基質を摂取しそれをPHAとして蓄積し、続く好気工程では菌体内に蓄積していたPHAを酸化分解したエネルギーを使って増殖やポリリン酸の再蓄積を行うというものである^{4),5),6),7)}。廃水処理プロセスとして運転される嫌気好気法における通常の代謝の中では、PHAの最大蓄積は嫌気工程の最後に観察され、その蓄積量は乾燥菌体重量の10~20%程度である。さらに、嫌気好気法の汚泥を取り出し別のリアクター内で適当な条件でPHAの生産を行わせると、乾燥菌体重量の30~40%のPHA蓄積率を達成することができる^{8),9)}。しかし *A. eutrophus* の純菌が80%程度蓄積する¹⁰⁾のに比べるとこの蓄積率は低い値であり、嫌気好気法の汚泥を用いたPHA生産には限界がある。

本研究では、よりPHA生産に適した活性汚泥を得ることを目的として、嫌気-好気法からヒントを得て考案した微好気-好気法について検討を行った。

微好気-好気法における微好気条件とは、酸素供給が制限されているために溶存酸素濃度がほとんどないような条件である。微好気条件への酸素の供給速度が活性汚泥のPHA生産能力に及ぼす影響について検討し、さらに、PHA生産を行う条件や、生産されるPHAの組成についても検討を行った。

2. 実験方法

SBR式の微好気-好気法リアクターにより活性汚泥を馴致し、そこから得られた汚泥を取り出して好気条件下で炭素源となる有機物を投与してPHAを生産させるバッチ実験を行った。

(1)SBR式微好気-好気リアクターの運転

図-1に示すSBR式微好気-好気リアクター（容量10L）を、窒素曝気45分、および基質投入15分、微好気1時間、好気3時間、沈殿1時間、計6時間のサイクルで運転した。流入水を供給する前に窒素曝気を行い、リアクター内に残存する酸素を除去した。基質の組成は表-1に示すとおりであり、COD_{Cr}として約650mg/lの基質を1サイクルあたり6L供給した。すなわち、1サイクルあたりのCOD_{Cr}流入量は3.9gであった。また、HRTは10時間、SRTは6~8日で運転した。リアクターは20℃の恒温室内に設置した。

微好気工程、および好気工程での酸素の供給は次のようにして行った。微好気条件では、空気を高圧ポンプからマスフローコントローラを介してリアクターに供給した。微好気条件下では内部液の混合のため、および供給した酸素の溶解効率をあげるためにリアクター内のガスをポンプにより循環した。一方、好気工程ではエアープンプ（約5l/min）により空気を供給した。運転期間は320日で、その間運転条件は微好気工程での空気供給量を変更した以外は一定とした。運転したリアクターが1系列だけであったため、一定の微好気空気供給量でSRTの3倍から6倍程度運転して馴致し、必要なデータを取得してから、微好気工程への空気供給量を変更して馴致しなおすということを繰り返した。

検討した微好気工程での空気供給量はリアクター内の汚泥混合液1Lに対して0, 0.02, 0.05, 0.06, 0.12, 0.33, 0.1 ml/min/lである。これは、1サイクルあたりに流入するCOD_{Cr}の0, 0.09, 0.22, 0.26, 0.51, 1.3, および4.3%にあたる酸素を微好気の1時

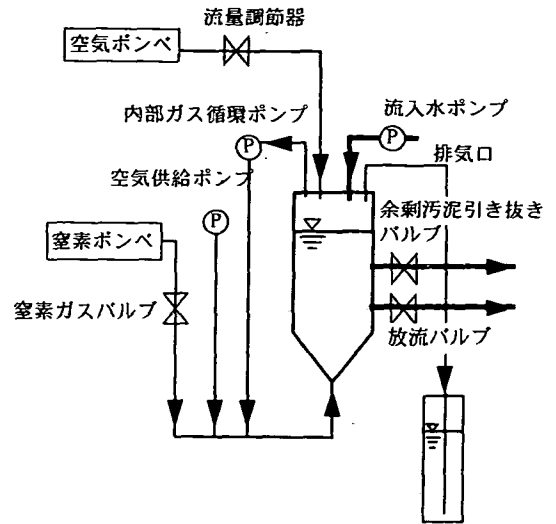


図-1 微好気-好気式リアクター

表-1 基質組成

酢酸	196
プロピオン酸ナトリウム	217
ペプトン	167
酵母エキス	62.5
CaCl ₂	27
MgCl ₂	121
KCl	117
NH ₄ Cl	97
K ₂ HPO ₄	75

(単位mg/l)

間で供給したことに相当する。

(2)PHA生産バッチ実験

前節(1)に述べたSBR式の微好気-好気法リアクターを各微好気空気供給量で汚泥滞留時間の3倍程度馴致した後、PHA生産バッチ実験を行った。PHA生産バッチ実験は、微好気-好気リアクターの好気工程の終了時に汚泥混合液を1L取り出し、そこに炭素源を投与し、十分に曝気を行った好気条件下で行った。PHA蓄積能力を持った活性汚泥であれば、この条件で短時間に効率よくPHA生産が行われることを著者らは報告している¹¹⁾。投与する炭素源の種類・量・投与方法はその実験の目的によって以下のように変えて行った。

まず、各微好気-好気条件で馴養された活性汚泥のPHA蓄積速度を調べるために、投与する炭素源を

酢酸ナトリウム1000mgC/lに統一してPHA生産のバッチ実験を行った。

次に炭素源の投与量・投与方法を検討した。まず炭素源投与量の影響を見るために実験開始時に投与する酢酸ナトリウムの濃度を1000, 2000, 3000mgC/lの3段階に設定して実験を行った。次に投与方法を検討するために、炭素源を一度に供給するのではなく数時間おきに何回かに分けて供給してPHAの生産を行わせた。その結果をもとに、最適な投与方法により最大でどのくらいのPHA蓄積が達成できるかを検討した。

また、酢酸以外の炭素源として、プロピオン酸、酪酸、吉草酸、カブロン酸、グルコース、およびエタノールを用いて同様のバッチ実験を行い、PHAの蓄積速度や蓄積されたPHAの組成について検討した。

バッチ実験中のpHは7~8になるように調節した。バッチ実験で測定した項目は、MLSS, MLVSS, 溶存有機態炭素(DOC), 汚泥内多糖類、およびPHAである。DOCは島津TOC-500を用いて測定した。汚泥内多糖類はアンスロン法により、またPHAはメチル化分解・ガスクロマトグラフ法¹²⁾により分析した。

3. 結果

運転開始後200日程度はMLSSが3000mg/l前後であったが、200日を過ぎた頃からバルキングが発生し、運転終了の320日まで1000mg/l前後で推移した。以下の結果は特に断らない限りMLSSが1000mg/l程度の時期にとられたものである。

(1) 微好気-好気式SBRリアクターの運転

微好気-好気法リアクターを異なった微好気空気供給量で運転したときの1サイクルにおける、DOC・PHA・汚泥内多糖類の経時変化を図-2に示す。実験ごとにMLSS濃度に違いがあるため、PHAおよび多糖類の蓄積量は実験開始時のMLVSSの値で除して標準化して示した。なお、どの実験においても、微好気条件下では溶存酸素濃度は検出限界以下(0.1mg/l以下)であった。

図-2Aに示すように、微好気工程では顕著な基質の摂取は観察されなかった。基質は続く好気工程で摂取され、いったんPHAとして汚泥内に蓄積されてから代謝された(図-2B)

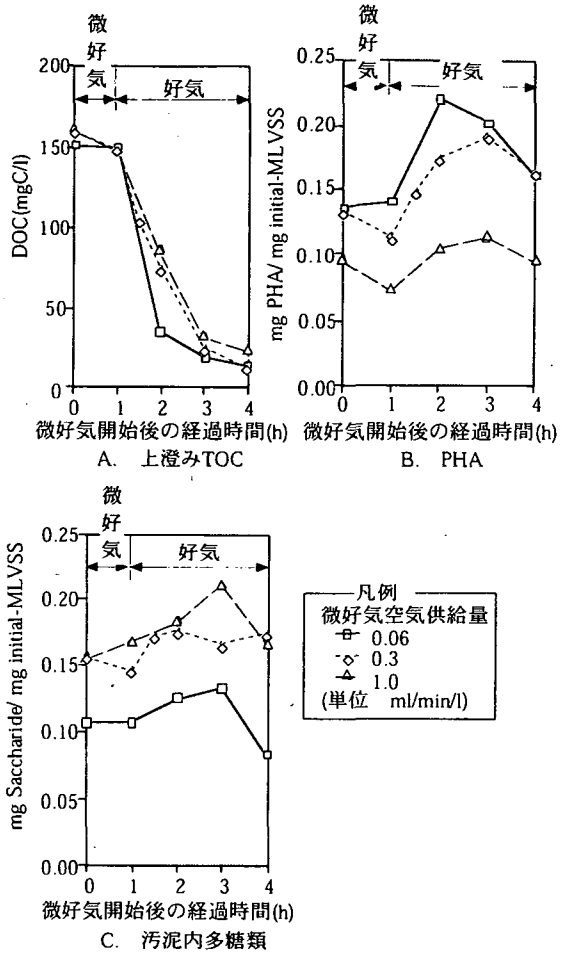


図-2 SBR式リアクター1サイクル内の代謝

図-3に基質摂取が行われている間の、摂取した基質のPHAおよび汚泥内多糖類への変換率を示す。なお、変換率は微好気空気供給量0.06ml/min/lの場合には好気条件のはじめの1時間、0.3および1.0 ml/min/lの場合には好気条件のはじめの2時間について計算した。微好気空気供給量が低いほどPHAとして蓄積する比率が高く、汚泥内多糖類についてはどの微好気空気供給量においても同じように転換率が低かった。

以上の結果は微好気-好気リアクターがバルキングを起こしていた時期のものである。バルキングは糸状微生物(形態学的な特徴からEikelboomの分類によるType 021Nと推定される)により起こされており、これが細胞内にPHAを多量に蓄積しているのがPHA染色後の顕微鏡観察により確認された。

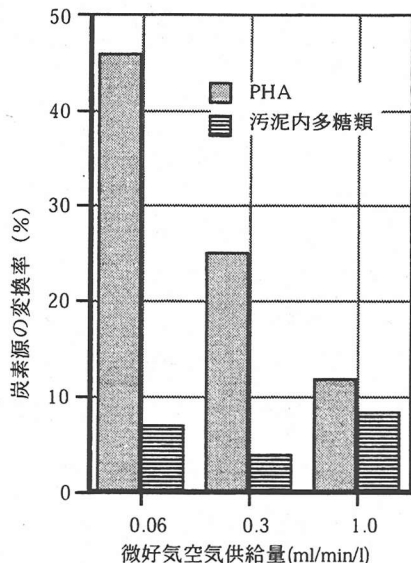


図-3 炭素源の変換率

(2) PHA生産リアクターによるバッチ実験における PHA蓄積速度の比較

図-4に、各微好気-好気条件で馴養した汚泥を用いたバッチ実験の基質投与後4時間における単位初期汚泥量あたりのPHA蓄積速度を示す。図中、白抜きの点はバルキングを起こす以前の時期（微好気-好気式リアクターの運転で200日以前）にとられたデータであることを示す。微好気空気供給量0.02~0.12 ml/min/lでの馴養汚泥のPHA蓄積速度は、嫌気好気条件(0 ml/min/l)および0.3, 1.0 ml/min/lでの馴養汚泥の蓄積速度に比べて速い傾向が見られた。すなわち、微好気量が多すぎても少なすぎてもPHA蓄積速度は低下していた。

図-5に各バッチ実験における炭素源のPHAへの変換率を示す。図中の白抜きの点は、やはりバルキングを起こす以前の時期のものである。微好気空気供給量が0.12 ml/min/l以下で馴養した汚泥の場合、変換率は40~50%であったが、微好気空気供給量がそれ以上では変換率が低下する傾向が見られた。

以上のことより、生成速度および炭素源の転換率の両点において、PHA蓄積菌の集積に最適な微好気空気供給量が0.02~0.12 ml/min/lの範囲内にあることが分かった。

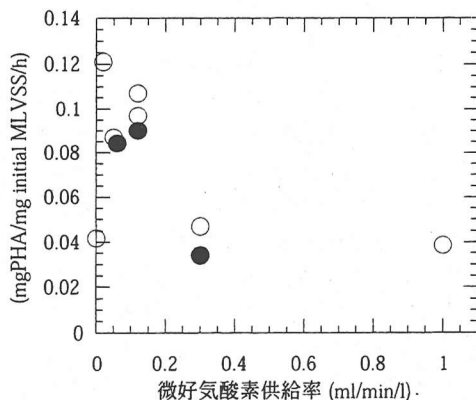


図-4 活性汚泥のPHA蓄積速度の比較

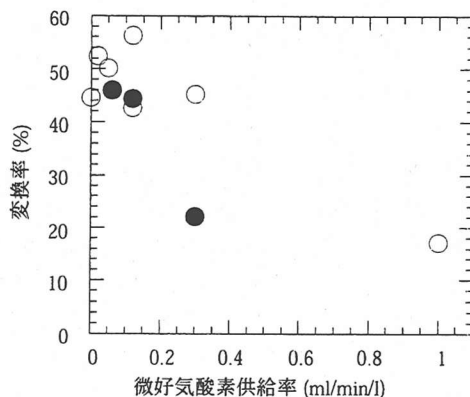
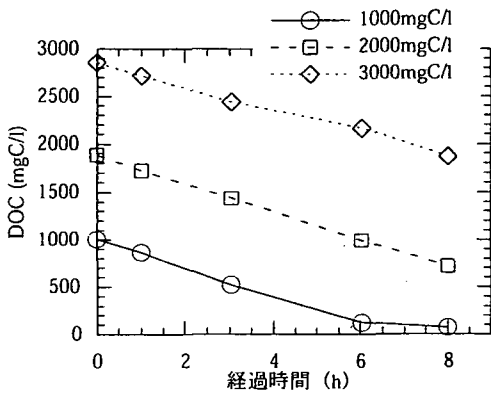


図-5 炭素源のPHAへの変換率

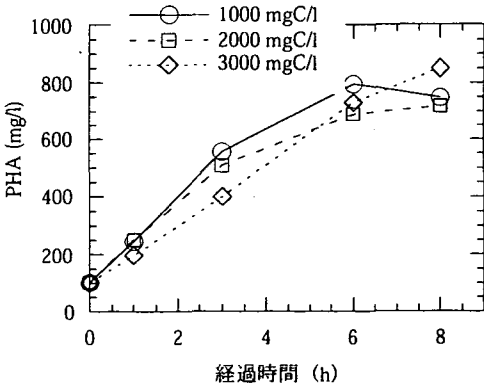
(3) 炭素源投与量および投与方法の検討

図-6に炭素源の初期濃度がPHA蓄積に与える影響を示す。これよりPHAの蓄積速度は有機物の初期濃度にはほとんど依存しないことがわかる。

図-7では実験開始時だけでなく、バッチ実験途中で炭素源を徐々に入れていく方法をとった。投与方法(i)では初期に1000mgC/lを与えたのみであり、投与方法(ii)では、3時間後、6時間後、9時間後に500mgC/lずつ炭素源を追加した。また、投与方法(iii)では6時間後に1000mgC/lを追加した。図より、どのような方法で炭素源を供給しても、PHA蓄積速度は一定であったことがわかる。図-7のAにおいて投与方法ii)の例を見ると、炭素源投与後6時間で上澄み炭素源は一度ゼロになり、その後炭素源が供給されている。この時Bで投与方法ii)の結果を見ると、上澄中の炭素源がなくなった6時間の時点でPHA蓄積は一旦とまったが、その後炭素源が供給されたために再びPHAの蓄積が行われた。このように



A. DOCの経時変化



B. PHAの経時変化

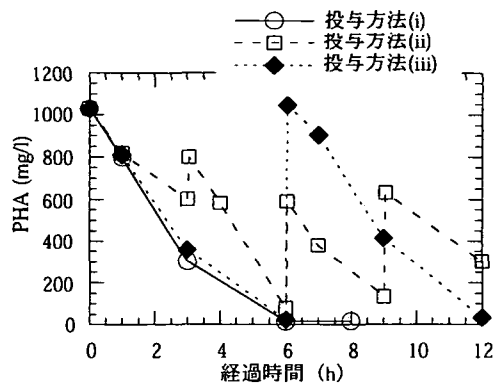
図-6 炭素源濃度の影響に関する検討

一度炭素源が不足しても、更に供給すればPHA蓄積は同じ速度で再開されることも分かった。

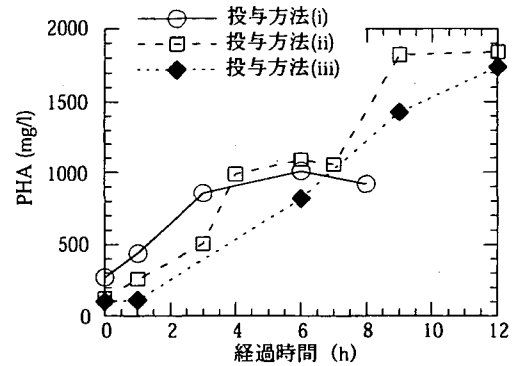
(4)PHAの最大蓄積量

(3)より、PHA蓄積速度は供給する炭素源の濃度や方法によらず一定であることが分かった。そこで、上澄水中に常に炭素源が存在するように適宜炭素源を供給して長時間のPHA生産を行うことにより、微好気-好気法の活性汚泥により達成しうる最大のPHA蓄積量がどの程度であるかを調べた。図-8に、微好気空気供給量0.06, 0.12, および0.3 ml/min/lで馴養した汚泥を用いて実験を行った結果を示す。

嫌気好気法の微生物を用いた場合には、実験開始より10~15時間でPHA蓄積は止まってしまう¹¹⁾。それに比べて、微好気-好気法の微生物を用いると蓄積は長く続いた。なかでも微好気空気供給量0.12 ml/min/lの微生物はPHA蓄積速度が速いうえに、実



A. DOCの経時変化



B. PHAの経時変化

図-7 炭素源投与方法の影響に関する検討

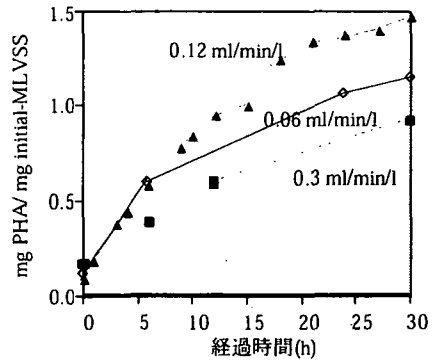


図-8 PHA蓄積最大化実験

験開始30時間後でも生産が持続され、実験開始後30時間で乾燥重量(30時間経過時点でのMLSS)の62%のPHAを蓄積した。これは *A. eutrophus* の蓄積率には劣るが、嫌気好気法汚泥の最大蓄積率が30~40%であったのに比べると非常に大きい値である。また、その他の場合も30時間までPHAの蓄積を継続してい

たが、最終的に達成されたPHAの蓄積率は0.12 ml/min/l の場合が最も高かった。

(5)各種の炭素源の投与

プロピオン酸・酪酸・吉草酸、およびカプロン酸は酢酸と同様にPHAに変換された。奇数鎖の低級脂肪酸であるプロピオン酸、および吉草酸が摂取された場合に蓄積されたPHAの構成成分はほとんど3-ヒドロキシ吉草酸であった。また、偶数鎖の低級脂肪酸である酪酸およびカプロン酸が摂取されたときに蓄積されたPHAの構成成分は酢酸の場合と同様にほとんど3-ヒドロキシ酪酸であった。PHAを分析した際のガスクロマトグラムから判断した限り、蓄積されたPHAは3-ヒドロキシ酪酸と3-ヒドロキシ吉草酸以外の成分は持たなかった。

一方、エタノールやグルコースはほとんど摂取されず、またPHAの蓄積もほとんど観察されなかった。

4. 考察

本研究では、活性汚泥を微好気-好気式の運転により馴致することにより、汚泥のPHA蓄積能力を向上させることを試みた。著者らが微好気-好気法に着目した理由は次のような推測に基づく。

嫌気好気法により馴致された活性汚泥が、嫌気条件下または好気条件下で酢酸などの有機物をPHAとして蓄積することはよく知られている。この場合、PHAを蓄積する菌は主にポリリン酸蓄積菌であると考える。ポリリン酸蓄積菌が嫌気条件下で酢酸を摂取する際、ポリリン酸をエネルギー源として用いて酢酸を細胞内に取り込み、また、摂取した酢酸をPHAに変換するために、グリコーゲンの解糖により供給される還元力を用いる。嫌気好気法から得られる活性汚泥を用いてPHAの合成を行う場合、このように、PHAの蓄積だけでなくポリリン酸やグリコーゲンを同時に代謝する能力を持った菌にPHA合成をさせていると考えることができるだろう。このことは、PHAの生産だけを行おうとする場合、かえって障害になるのではないだろうか。グリコーゲンやポリリン酸の代謝といった余計な代謝系を持たねばならず、また、グリコーゲンを合成する代謝系を持っているということは、条件によってはPHAを合成しないでグリコーゲンを合成してしまうことにもつながるだろう。

微好気-好気法について検討した理由は、以上のような嫌気好気法の欠点を克服するためである。微好気条件下では酸素の供給が制限されている。そのため、グリコーゲンの蓄積や核酸・タンパク質などの細胞構成成分の生産は抑制されるはずである。一方、微量ながらも酸素が供給されているため、微生物は酸化的リン酸化によりATPを生産して炭素源を摂取し、また、TCAサイクルを回転させることにより還元力を生産して摂取した炭素源をPHAに変換することができると考えられる。このように、微好気-好気法を用いて活性汚泥を馴致すれば、微好気条件下で好氣的にPHAを生産し、続く好気条件下で増殖活動を行うような菌を集積することが可能なはずである。そして、微好気条件下での酸素供給率は大きすぎても小さすぎてもいけないはずである。すなわち、微好気空気供給量が大きすぎれば、微好気条件下においてPHA合成だけでなく菌体の増殖などの活動が生じてしまう。また、微好気空気供給量が小さすぎれば嫌気-好気法のようにポリリン酸やグリコーゲンに依存して有機物摂取を行う菌の方が有利になってしまう。

以上の推測を、本研究の実験結果と照らし合わせてみると、半分正しく半分誤りだったということができよう。

著者らの推測が正しかった点として、嫌気好気法の汚泥ではMLSSの30%~40%程度のPHA蓄積率が最大であるのに比べて、微好気-好気法で馴致した汚泥では60%を越えるPHA蓄積率を達成することができた。また、図-5および図-8に示したように、PHA蓄積速度および最大のPHA蓄積率は微好気空気供給量0.12 ml/min/l付近で最大であり、微好気空気供給量がそれ以上でもそれ以下でも低下した。こうした実験結果は、微好気-好気法を適切な微好気空気供給量により運転することで、PHA蓄積能力の高い活性汚泥を得ることができることを証明したといえるだろう。

一方、著者らの推測が誤っていた点として、図-3Aに示したように、微好気条件下での有機物摂取がほとんど観察されなかった点があげられる。すなわち、著者らは微好気条件下では好氣的な代謝（酸化的リン酸化によるエネルギー供給、およびTCAサイクルの回転による還元力の供給）によって有機物が摂取されると考えていたのだが、実際には微好気条件下での有機物摂取はそれほど顕著ではなかった。むしろ、有機物摂取は続く好気条件下で活発に

行われた。この結果は、微好気条件の効果が著者らの推測したようなメカニズムによってあらわれたのではないことを示していると考えられる。どのようなメカニズムが働いたのか、今後明らかにしていく必要があるだろう。

なお、本研究では有機物負荷量に対する酸素の供給速度を用いて微好気条件の程度を表現したが、これが最適な方法ではないという可能性は否定できないだろう。特に、本研究では微好気-好気リアクターの運転期間中にバルキングのためにMLSS濃度が大きく変化した。そのことを考えると、最大酸素摂取速度に対する酸素供給速度の割合で示す方法や、酸化還元電位を組み合わせた評価方法についても検討していくべきであろう。

微好気-好気法により得られる活性汚泥が高いPHA蓄積能力を持っているということは、次のような観点から重要である。まず第一に、産業廃水や廃棄物を原料として生物分解性プラスチックを得る方法の一つとして位置づけることができる。二番目として、純菌を用いてのPHA生産と比べてのメリットとして、混合培養系でリアクターを運転することができるであろう。また、純菌系を維持する必要がないということは、雑菌の多い資源を原料として利用するときにメリットとなるだろう。これは、特に産業廃棄物を原料とするときには注目すべき利点かもしれない。また、第三の意義として、微好気-好気法により高いPHA合成能力を持つ細菌を集菌できるので、PHA蓄積菌の探索源として注目することができるだろう。

本研究は微好気-好気プロセスの特性について詳細な検討を行うことはできなかったが、こうした微好気-好気法の可能性に着目してさらに研究が発展することを望む。

5. 結論

本研究により、活性汚泥法によりPHAを生産するために微好気-好気法が非常に有望であることを示すことができた。主な結果は次のようにまとめられる。

1. 微好気-好気法により馴致された活性汚泥は、PHA蓄積速度、PHA蓄積の継続時間、および最終的なPHA蓄積量において嫌気好気活性汚泥よ

り優れていた。達成された最大のPHA蓄積率は62%であった。

2. 微好気-好気法における微好気空気供給量には最適範囲があることを示すことができた。本研究で用いたリアクターの場合、それは0.12ml/min/l付近が最適であった。
3. 微好気-好気法で優占する微生物は、微好気過程では見かけ上は有機基質の代謝を行わず、続く好気過程前半で炭素源を摂取しそれをPHAとして蓄積するという代謝を行っていた。
4. 利用される炭素源は低級脂肪酸であり、蓄積されるPHAポリマーの構成モノマーユニットは3HB・3HVが主体であった。

今後、微好気条件が活性汚泥のPHA生産能力に与える影響について定量的に明らかにしていくとともに、微好気条件がどのようなメカニズムで活性汚泥のPHA生産能力に影響を与えているのか、明らかにしていく必要があるだろう。また、微好気条件の定義の仕方についても検討を行う必要があるだろう。

参考文献

- 1) Anderson, A.J. and Dawes, E.: Occurrence, metabolism, metabolic role and industrial uses of bacterial polyhydroxyalkanoates. *Microbiological Reviews*, Vol.54, No.4, pp.450-472, 1990.
- 2) 斎藤祐二, 副島敬道, 友沢孝, 土肥義治, 紀谷文樹: 活性汚泥を用いる揮発性低級脂肪酸からの生物分解性プラスチックの生産と評価, 土木学会論文集, No.521/II-32, pp.145-154, 1995.
- 3) Steinbuechel, A. and Valentin, H.E.: Diversity of bacterial polyhydroxyalkanoic acids. *FEMS Microbiology Letters*, Vol.128, pp.219-228, 1995.
- 4) 佐藤弘泰, 味埜俊, 松尾友矩: 嫌気好気式活性汚泥による嫌氣的有機物摂取と生物分解性プラスチックの生成, 第28回衛生工学研究論文集, pp.39-50, 1992.
- 5) Satoh, H., Mino, T. and Matsuo, T.: Uptake of organic substrates and accumulation of polyhydroxyalkanoates linked with glycolysis of intracellular carbohydrates under anaerobic conditions in the biological excess phosphate removal process. *Wat. Sci. Tech.*, Vol.26, No.5-6, pp.933-942, 1992.
- 6) Mino, T., Satoh, H. and Matsuo, T.: Metabolism of different bacterial populations in enhanced biological phosphate removal processes. *Wat. Sci. Tech.*, Vol.29,

No.7. 67-70. 1995.

- 7) Jenkins, D. and Tandoi, V.: The applied microbiology of enhanced biological phosphate removal - accomplishments and needs. , Water Research . Vol.25 , No.12 , pp.1471-1478. 1991
- 8) 上野俊洋, 佐藤弘泰, 味埜俊, 松尾友矩: 嫌気好気式活性汚泥による生分解性プラスチックPHAの好氣的生産, 高分子学会予稿集, Vol.41 , No.9 , pp.3673-3675. 1993.
- 9) 友沢孝, 副島敬道: 嫌気好気式活性汚泥によるPHBの生産, 高分子学会予稿集, Vol.42 , No.6 , pp.2159-2161. 1992.
- 10) Doi, Y. :Microbial Polyesters. VCH Publishers. 1990.
- 11) 岩本友里奈, 佐藤弘泰, 味埜俊, 松尾友矩: 嫌気好気法余剰汚泥のPHA生産能力に関する研究, 環境工学研究論文集, Vol.31, pp.305-313. 1994.
- 12) 佐藤弘泰, 味埜俊, 松尾友矩: PHAの測定とその意味, 環境微生物工学研究法, 土木学会衛生工学委員会編, 技報堂出版, 67-70. 1993.

(1997. 7.22 受付)

PRODUCTION OF BIODEGRADABLE PLASTIC (POLYHYDROXYALKANOATE) BY ACTIVATED SLUDGE ACCLIMATIZED IN THE MICROAEROBIC-AEROBIC PROCESS

Yurina IWAMOTO, Hiroyasu SATOH, Takashi MINO and Tomonori MATSUO

Production of polyhydroxyalkanoates (PHA), a kind of biodegradable plastics, by activated sludge biomass was investigated. Biomass highly capable of producing PHA could be accumulated in a modified anaerobic-aerobic activated sludge process named the microaerobic-aerobic activated sludge process, where small amount of air is supplied to the anaerobic zone. The rate of aeration in the microaerobic phase was found to strongly affect the rate, duration and yield of PHA production by the biomass accumulated in the microaerobic-aerobic process. The observed maximum PHA content was 62% of dry weight of biomass. The monomeric units of the accumulated PHA polymer were mainly 3-hydroxybutyrate and 3-hydroxyvalerate, even though different carbon sources were fed.