

下水汚泥を活用したバイオプラスチック生産

～下水処理で発生する廃棄物の高付加価値資源への転換～



研究ノート

井上大介*

Bioplastic production using waste activated sludge ~Challenge to convert wastes generated from wastewater treatment to high value-added resources~

Key Words : Bioplastic, Polyhydroxyalkanoates, Wastewater treatment, Waste activated sludge

1. はじめに

下水道は、都市の健全な発達、公衆衛生の向上、及び公共用水域の水質保全を目的とする重要な都市インフラである。2017年度末には、国内の下水道の人口普及率は78.8%に達し、都市部ではほぼ100%となっている。

下水道を通して終末処理場（下水処理場）に集約された下水の大部分は活性汚泥法を用いて処理された後、水環境に還元される。他方、活性汚泥法による下水処理過程では、下水中の浮遊物質が生汚泥として最初沈殿池で除去され、さらに、容易に沈降しない浮遊物質や溶解性物質が活性汚泥微生物によって分解され、それに伴って増加した活性汚泥が余剰汚泥として最終沈殿池で除去される。下水処理で発生するこれらの汚泥は、産業廃棄物として処理されるが、その発生量は国内の産業廃棄物量の2割程度を占めている。地球温暖化問題や資源・エネルギー需給の逼迫等が顕在化する中、下水処理場においても循環型社会・低炭素社会に向けた貢献が求められており、大量発生する下水汚泥の資源・エネルギーへの転換が重要課題の一つとなっている。

下水汚泥の構成成分のうち、無機分は建設資材、有機分（バイオマス）は肥料等やエネルギーとして主に利用される。2015年度におけるリサイクル率は全体で68%に達しているが、その大半は建設資

材または肥料として利用されており、下水汚泥の約8割を占める有機分の資源・エネルギー化が未だ低水準であり、その有効利用の促進が望まれている。近年では、再生可能エネルギー固定価格買取制度等の後ろ盾もあり、嫌気性消化によるバイオガス（メタン）への転換や固形燃料化などの導入が全国的に進められつつあるが、エネルギーよりも付加価値の高い資源に転換する技術の開発・導入はほとんど進んでいない。一方で、下水汚泥は、資源・エネルギーの主な需要地である都市部において、私たちの日々の生産活動に伴って発生し、質・量ともに安定しているバイオマスであり、さらに、既設の下水道システムによって能動的に下水処理場に集約されるという特徴を有していることから、下水汚泥を高付加価値資源に転換する技術を確立することができれば、下水処理場をバイオリファイナリ拠点に発展させることもできる。

本稿では、下水汚泥を活用した高付加価値資源生産の一例として、筆者らが取り組んでいるバイオプラスチックの一種、“ポリヒドロキシアルカン酸（PHA）”の生産の可能性について紹介したい。

2. ポリヒドロキシアルカン酸（PHA）

PHA（図1）は、ある種の微生物がストレス条件下で炭素・エネルギー貯蔵物質として細胞内に蓄積する脂肪族ポリエステルである。PHA（実際にはPHAの一種であるポリヒドロキシ酪酸（PHB））の合成は1926年に *Bacillus* 属細菌で初めて報告され、

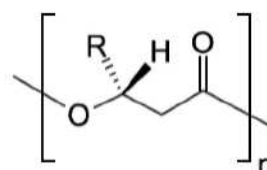


図1 PHAの構造式



* Daisuke INOUE

1978年4月生まれ
大阪大学大学院 工学研究科 環境工学
専攻 博士後期課程 (2005年)
現在、大阪大学大学院 工学研究科
環境・エネルギー工学専攻 准教授
博士(工学) 生物環境工学
TEL : 06-6879-7673
FAX : 06-6879-7675
E-mail : d.inoue@see.eng.osaka-u.ac.jp

現在では、多様なグラム陽性・陰性細菌及び一部の古細菌がPHAを合成することが知られている^{1,2)}。

バイオプラスチックはバイオマスプラスチック(原料に再生可能なバイオマスを使用)と生分解性プラスチック(微生物によって分解可能)の総称であるが、PHAは、その両方の特性を有しており、さらに、生物学的に合成されることから³⁾、石油系プラスチックに代替する極めて有望な環境適合型バイオプラスチックとみなされている。さらに、約150種も存在するモノマーの単重合、共重合によって多様な物性を発揮し、生体適合性にも優れることから、梱包容器や衛生用品、医療器具、農林水産用資材など、非常に幅広い用途での利用が期待される³⁾。

PHAの工業生産は、欧米や中国、ブラジルの企業において既に行われており、国内でも、株式会社カネカが、3-ヒドロキシ酪酸と3-ヒドロキシヘキサノ酸の共重合体(商品名:アオニレックス)を製造している。現在の工業生産では、PHA高生産微生物である*Cupriavidus necator*や遺伝子組換え微生物が利用されているが、純菌を用いた製造プロセスでは、使用する基質や製造装置の滅菌など厳重な製造管理が求められるため、結果的に石油系プラスチックに比べて数倍高い製造コストを要することになり、普及拡大の重大な障害の一つとなっている。

3. 下水汚泥を活用したPHA生産の試み

従来の純菌を用いたPHA製造に代わる新たな可能性として、近年、複合微生物群集の活用が世界的に研究されている。特に、下水処理に用いられる活性汚泥は多種多様な微生物の集合体であり、リン除去に関わる微生物によるPHA合成が古くから知られていることなどから、PHA生産への利用に最も有望な複合微生物群集とみなされている。筆者らの研究でも、複数の活性汚泥から分離した従属栄養細菌のうち少なくとも75%がPHA合成能を有することが確認され、活性汚泥(あるいは余剰汚泥)がPHA生産に活用し得ることを明らかにしている⁴⁾。下水汚泥をPHA生産のバイオ触媒として用いる場合、装置類の滅菌は必ずしも要求されないことから、グルコースや酢酸のような純粋基質だけでなく、糖や脂肪酸をある程度の濃度で含む産業排水もPHAを合成するための基質として利用することができる。すなわち、下水汚泥をPHA生産触媒として利用す

ることにより、PHA製造に係るコストの削減に加えて、廃棄物(下水汚泥及び産業排水)処理、及びそれに要するコストやエネルギーを削減することが可能となる。

しかし、活性汚泥のように雑多な微生物で構成される複合微生物群集の中には、当然のことながら、PHA生産能がない、あるいは弱い微生物も存在する。さらに、PHA合成に利用できる基質の種類は微生物種ごとに異なっている。そのため、一般的には活性汚泥の総体としてのPHA生産能はそれほど高くない。様々な下水処理方式の活性汚泥を対象として、PHA生産に好適とされる窒素・リン欠乏条件下で酢酸からPHBの合成・蓄積を検討した過去の研究では、24時間後までの細胞重量あたりのPHB蓄積が最大でも25%(w/w)を下回り⁵⁾、工業生産に使用される純菌(80-90%)に比べると格段にPHA生産能に劣ることが明らかとなっている。

そのため、複合微生物群集をPHA生産に利用する場合、雑多な微生物の中からPHA生産能に優れたものを選択的に優占化(集積)させることが重要なステップとなる。その集積法として、近年では、Feast-famine法(またはAerobic dynamic feeding法)が最も広く使用されている。この集積法では、過剰の基質が存在するfeast期と基質が欠乏するfamine期を交互に作り出すことにより、feast期に基質からPHAを合成して貯蔵し、famine期にそのPHAを消費して生存することのできるPHA生産微生物を選択的に集積することができる(図2)。デルフト工科大学のグループによる研究では、この方法で活性汚泥から集積したPHA生産微生物群集がわずか7.6時間で細胞重量あたり89%ものPHAを蓄積したことが報告されており⁶⁾、工業生産に利用され

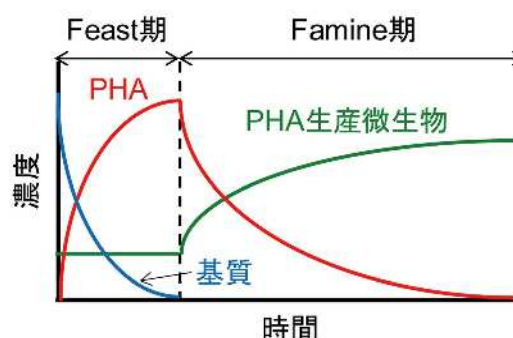


図2 Feast-famine法で集積した微生物によるPHA生産・消費の概念図

る PHA 高生産微生物に匹敵する PHA 生産能を發揮する PHA 蓄積微生物群集を構築することも可能といえる。しかし、その集積には数か月以上を要するという重大な問題がある。筆者らも培養条件を変えて同様に集積を試みたが、細胞重量あたり 60% 程度の PHA 蓄積を達成する微生物群集の集積には 1.5 ヶ月を要した⁷⁾。このため、現状有望と考えられる集積法でも、日常的に発生する下水汚泥の有効利用という位置付けで利用するには無理があると考えられた。

そこで、筆者らの研究グループでは、PHA 生産微生物群集の集積期間の短縮化に取り組んでいる。その結果、上記の従来法における基質の有無による選択圧に加えて、feast 期の後に PHA を蓄積した微生物のみを沈殿によって回収するステップを加え、また、培養槽を工夫することにより、1 週間で 50% 程度（元の活性汚泥の約 3 倍）の PHA 蓄積を達成する PHA 生産微生物群集を構築することに成功している⁸⁾。さらに、最新の研究成果では、2-3 日の集積期間でも同等以上の PHA 蓄積を達成できるところまで来ており、実験室規模の検討ではあるものの、下水処理場で日々発生する下水汚泥を連続的に PHA 生産に活用できる可能性が見出されつつある。

他方、PHA 生産の基質として利用可能な産業排水/廃棄物の開拓にも取り組んでおり、有機物濃度が低く、固形廃棄物ほどの資源価値が見込まれないため、現状ではお金とエネルギーをかけて処理されている食品工場排水などを PHA 生産基質に利用できる手応えを得ている⁹⁾。

4. おわりに

本稿では、下水汚泥を活用した高付加価値資源生産の一例として PHA を取り上げた。下水処理場で発生する下水汚泥を“廃棄物”ではなく、資源を生産するための“バイオ触媒”として捉え、微生物がもつ多種多様な代謝機能を理解し、それらを合理的に活用する技術・システムを開発することにより、下水処理場を、様々な化成品原料やエネルギー資源

を生産し、循環型社会・低炭素社会の中核をなす都市インフラに発展させられる可能性がある（図3）。その実現に向け、著者も関連研究の推進に尽力していきたい。

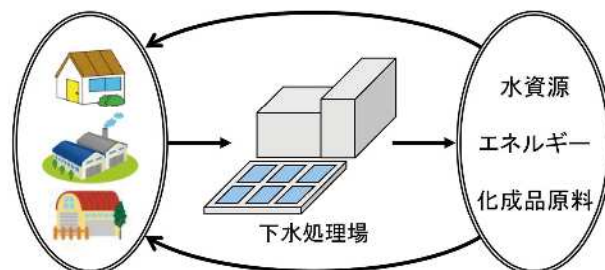


図3 下水処理場を核とした資源循環構想

謝辞

本稿で紹介した筆者らの研究の一部は、JSPS 科研費 JP24681010、JP16H03000、JP18H01570 による助成を受けて実施したものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 大島一史：「バイオプラスチック技術の最新動向」, シーエムシー出版 (2014)
- 2) Lee, S.Y.: *Biotechnol. Bioeng.*, 49, 1-14 (1996)
- 3) Chen, G.Q.: “Plastics from bacteria” Springer (2010)
- 4) Inoue D. *et al.*: *J. Biosci. Bioeng.*, 121, 47-51 (2016)
- 5) Sakai K. *et al.*: *J. Appl. Microbiol.*, 118, 255-266 (2015)
- 6) Johnson K. *et al.*: *Biomacromolecules*, 10, 670-676 (2009)
- 7) Inoue D. *et al.*: *J. Biosci. Bioeng.*, 125, 339-345 (2018)
- 8) 福山ら：第55回下水道研究発表会講演集, 170-172 (2018)
- 9) Inoue D. *et al.*: *Proc. Grand Renewable Energy*, O-Bc-4-3 (2018)