

下水処理プロセスにおける微生物による有機物貯蔵現象の解明と工学的応用に関する研究

佐藤 弘泰 (東京大学大学院新領域創成科学研究科)

この度は榮譽ある賞をいただき、大変光栄に感じております。

嫌気好気式活性汚泥法（生物学的リン除去活性汚泥法、生物脱リン）で見られるポリリン酸蓄積細菌（PAO）やグリコーゲン蓄積細菌（GAO）による嫌気条件下での有機物摂取の生化学的なメカニズムを荒削りながらも説明したというのが私の最初の成果だと認識しています。当時、酢酸の摂取についてはかなり説明力の高いモデルが提案されていましたが、プロピオン酸の摂取については貯蔵形態が十分にはわかっていませんでした。その貯蔵物質の化学構造を推定し、NMRやGC/MSにより検証し、また、定量法を開発して、予測された代謝機構と実測した物質収支が概ね一致することを示すことができました。当時研究室の教授は松尾友矩先生であり、生物脱リンの研究を引っ張っていたのは味埜俊先生です。お二人の導きのもとで、この研究やグリコーゲン蓄積細菌の代謝を含む論文をまとめることができました。また、カナダ政府奨学金をいただいてBritish Columbia大学に留学し、W. Oldham先生の研究室でFred Kochが管理するパイロットプラントで実証実験を行うことができました（今現場が大好きなのは、明らかにFredの影響です）。この頃の成果は今でも引用数が増えていますし、私にとっても一番思い出深いものです。偶然に促された面もありました。1989年の日経サイエンス12月号に「生物が分解するプラスチック」（土肥義治）という論文が掲載され、私が研究対象としていた活性汚泥微生物の蓄積物質ポリヒドロキシアルカン酸（PHA）が、生物分解性プラスチックとして注目されていることを知りました。

その後は、PAOとGAOの競合関係に迫るべく研究を展開しようと思いました。周りを見れば、ちょうど微生物生態学会が産声を上げた数年後であり、日本水環境学会でも活性汚泥ポピュレーションダイナミクス委員会がたちあがり、さらに分子生物学的手法が導入され、研究が急速に活発になろうという雰囲気を感じました。その一方、PAOとGAOの競合関係を明確に決定するような因子には思い当たりません。活性汚泥を用いてPHAを合成しようというプロジェクトもたちあげたのですが、微生物叢が安定しないためかPHA合成能力を安定させることはできません。PAOとGAOの競合もPHA蓄積の不安定性も、活性汚泥微生物生態系に内在する何らかの因子（バクテリオファージや化学物質を介した相互作用）が関与して不安定にさせているのだろうと勘繰っていました。技術者としては安定化させるべく技術を磨くべきだと見る人もいますが、私としては遠回りして現象をしっかり理解した上で対策に結びつけたかった。ただ、私の興味や研究戦略を優先させすぎて、このテーマに携わった学生さんには悪いことをしたかなと、最近少し反省しています。

2000年代は学生にも恵まれ研究室は活発でしたが、インパクトのある成果からは遠ざかってしまいました。

2010年ごろから、微生物による有機物貯蔵現象を下水処理のエネルギー効率を改善するために活用しようと研究の矛先を修正しました。余剰汚泥を汚泥処理に送る前にもう一仕事してもらおうFAREWELプロセス、曇っていたり無風の時は活性汚泥の有機物貯蔵能力に頼って有機物を除去し、風が吹いたりお日さまが出たら積極的に曝気しよう、というような時間差曝気のコセプトを提案しました。

当時提案したことがもう一つあります。下水の管路内浄化です。下水管内に微生物付着担体を設置し、それを下水と空気に交互に触れさせれば、下水に含まれる有機物の酸化分解が促進されるだろうというアイデアです。とくに下水管の上流部は下水の流下は間欠的です。最初は、「担体にすむ微生物は、下水に触れた時に下水中の有機物を摂取貯蔵し、空気にさらされた時に酸素を得て先に貯蔵した有機物を分解するだろう」と説明していたのですが、今では有機物の担体への捕捉は生物的な効果だけでなく物理的あるいは物理化学的な効果によっても引き起こされると考えています。

管路内浄化の研究は初期には積水化学工業株式会社为主导し、同社が撤退した後は私の研究室が多くの方々のお力を得ながら細々と進めてきました。これも偶然なのですが、大学の近くを散歩していたら自治会の看板に「下水道委員会」のチラシが貼ってあるのが目に入り、それがきっかけとなって2013年から2014年にかけての積水との実証実験に結びつきました。その後はいくつかの自治体の下水処理場内に小規模の実験装置を設置させていただき、一部はやめてしまったものの、複数の自治体下水処理場で実験を継続させていただいています。そして、近隣自治体の下水道部局に紹介していただいて、再び自治会所有の下水道システム（コミプラ）で実証実験を始めようとしています。

気がつけば、エネルギー供給や気候変動はますます深刻になり、自然の力を無理なく活用することの必要性が高まっています。私は、管路内浄化はそれに応える技術となるとほぼ確信して開発に取り組んでいます。

下水処理場の微生物による有機物貯蔵をとっかかりとして研究してきました。貯蔵、あるいは貯蓄は投資行動とも関連していて、人間社会でもなかなか奥の深い問題です。もっと奥深く探ることができそうですし、応用の可能性をまだまだ見つけることができるかもしれません。もし本稿を読んでくださった方々が、そう思って興味を持ってくだされば、この上ない幸いです。

最後に、学生時分から教員時代を通じてご指導くださった松尾先生、味埜先生にはこの場を借りてあつく御礼申し上げます。