

生分解性プラスチック素材を分解する水中微生物を琵琶湖深層部まで探せ！

工藤 慎治 (滋賀県立大学 環境科学研究院)

1. はじめに

プラスチック製品を取り巻く環境が変化し始めている。われわれの身近な生活に関わるものとしては、2020年7月から日本全国の小売店でプラスチック製のレジ袋が有料化した。これは、世界規模でプラスチックごみによる海洋汚染が深刻化しているためである。これらの現状を踏まえ、わが国ではプラスチックの代替素材の開発・促進を重点的に実施していく方針が打ち出され、代替素材を利用した製品として生分解性プラスチックが注目され始めている。生分解性プラスチックは自然界の微生物の働きで最終的に二酸化炭素と水に完全に分解されるものであり、環境低負荷型の製品といえる。この生分解性プラスチックは自然環境中で素材を分解する微生物の存在や微生物による分解条件が重要といえるが、環境中の微生物の情報について十分に把握されていない。また、国内で流通している生分解性プラスチックは土壌中やコンポスト（微生物が活発になる条件下での処理施設・装置を使用）での分解を前提としたものが多く、海洋汚染を解決に導く水環境中で分解する生分解性プラスチック素材について着目されていない。

そこで本研究では、生分解性プラスチック素材（高分子ポリマー）のうち水中で分解が確認されており、工業的に生産しやすいポリカプロラクトン（PCL）に注目し、琵琶湖湖水中にPCL分解菌が生息しているかどうかを確認することを目的とした。

2. 実験方法

試料水は、夏季（2020年9月9日）および冬季（2020年11月12日）に琵琶湖北湖の第一湖盆沖合（北緯35.368°、東経136.098°）で、水深2.5 m（表層）、40 m（中層）、80 m（深層）の湖水をそれぞれ採水した。実験は、3つの深度の湖水とPCL有無の組み合わせによる実験区と対照区を設定し、暗条件下、20°C一定の恒温庫内で、試料水をゆっくりと攪拌させながら生物化学的酸素要求量（BOD）の経時変化を28日間モニタリングした。また、28日間の実験前後で湖水の水質（pH、電気伝導率（EC）、溶存酸素量（DO））が変化するかどうかが計測した。PCLの分解過程で生じる中間生成物の形態については、28日間の実験前後の湖水をそれぞれ吸引ろ過し、ろ紙（粒子態）はCHNコーダーで、ろ液（溶存態）はTOC計でそれぞれ炭素量を測定した。

3. 結果と考察

微生物は有機物を分解する際に酸素を消費するため、水質汚染の指標の一つであるBODを計測し、PCLの有無による実験結果を比較することで、微生物による分解が行われたかを評価できる。BODセンサーの実験条件を表1に示す。採水した試料水は250 mLで実験を行い、生分解性プラスチックを入れた条件の実験ではPCLを1.25 g添加した。調査結果は夏季と冬季で同じ結果が得られたため、以降は夏季の結果についてのみ示す。

夏季の琵琶湖の表層水、中層水、深層水を用いたBODモニタリング実験（28日間）の結果を図1に示した。PCLなしの条件では、各層の試料水においてBODの値が全く変化しなかった。本条件では、密閉容器内の圧力変化を試料水中の酸素消費量に変換して0~250 mgO₂/Lまで1 mgO₂/L単位のスケールで計測できる。また、同一試料における各センサーの器差誤差は2 mgO₂/Lを超えないことを

表 1. 試料水の実験条件.

センサーNO.	条件
1	表層水 (250 mL) + PCL (1.25 g)
2	中層水 (250 mL) + PCL (1.25 g)
3	深層水 (250 mL) + PCL (1.25 g)
4	表層水 (250 mL)
5	中層水 (250 mL)
6	深層水 (250 mL)

事前に確認した。これらのことから、琵琶湖の自然環境を反映した試料水の条件（PCLなし）でのBOD値は本装置で検出下限値以下であったといえる。滋賀県琵琶湖環境部（2020）の2019年度の琵琶湖水質調査では、夏季の北湖のBOD平均値は0.5 mgO₂/Lであったことが報告されており、調査地のBOD値がかなり低いことについて本実験結果と一致していた。

つぎに、PCLありの条件についてみると、3つの深度のうち、深層水でのみBOD値が増加したことが分かった。この結果は、琵琶湖の深層水中にPCL分解菌が生息していたことを示唆している。ただし、夏季の深層水+PCLのBOD値は、実験開始から15日目以降で上昇し始めており、有機物が分解され始めるまでに大きなタイムラグがあったことが明らかになった。

ここで、微生物によるPCL分解プロセスについて議論する前に、PCLが水中にて加水分解するかどうか確認した結果を図2に示す。超純水+PCL有無の実験前のpHは7を下回り、弱酸性を示していた。これは、実験前に超純水を曝気させているため、空気中の二酸化炭素が水中に溶け込んだものと考えられる。モニタリング実験前のPCLの有無によるpHの違いはほとんど見られなかったが、28日後の実験終了時のpH測定値（±1σ）は、PCLありで5.67±0.15、PCLなしで7.57±0.33であった。PCLなしでは実験前後でpHがおおよそ1.5程度増加したことが分かる。

PCLなしでpHが7よりも高くなった理由は、本装置で使用している二酸化炭素吸収剤（KOH）の効果と考えられる。密閉容器内の気相中の二酸化炭素がKOHに吸収されると、気相からの液中への取り込みが減り、液中の二酸化炭素は気相へ放出されやすくなる。一度気相へ放出された二酸化炭素はKOHにより除去されるため、時間経過とともに液中のpHは弱酸性から中性へ変化すると説明できる。一方、実験後のPCLありの条件では、この中性の状態よりもさらにpHが低下していたことから、PCLが加水分解して、酸を生成した結果、実験前よりもpHが低下したと考えられる。このことは、実験後のPCLありの試料水でECが顕著に増加した結果とも整合する。つまり、水中のイオン成分が大幅に増加した理由は、PCLの加水分解生成物が水中へ溶け込んだためである。超純水+PCL有無の条件で実施した28日間の実験前後の水質センサー（pH、EC）の結果より、水中にてPCLから酸が生成していたことが確認できた。

最後に、PCLの分解過程で生じる中間生成物の形態（粒子態・溶存態）について考察する。実験開始から28日後の試料水のTOC濃度についてみると、PCLを添加した試料水は、採水した深度によらずTOC濃度が高くなっていた。このTOCは、PCLの加水分解反応で生成した溶存態の有機物であると考えられる。また、試料水+PCL条件の実験後に吸引ろ過したフィルターを用いて炭素量を測定したところ、フィルター重量中の炭素量の変化は数%程度であり、本実験において粒子態のPCLの重量変化はほとんど見られなかった。これらの結果から、PCLの分解プロセスは、まず水中でPCLが

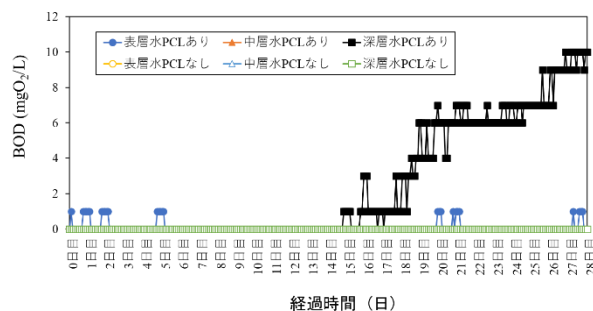


図1. 夏季の3深度におけるBODモニタリング結果。

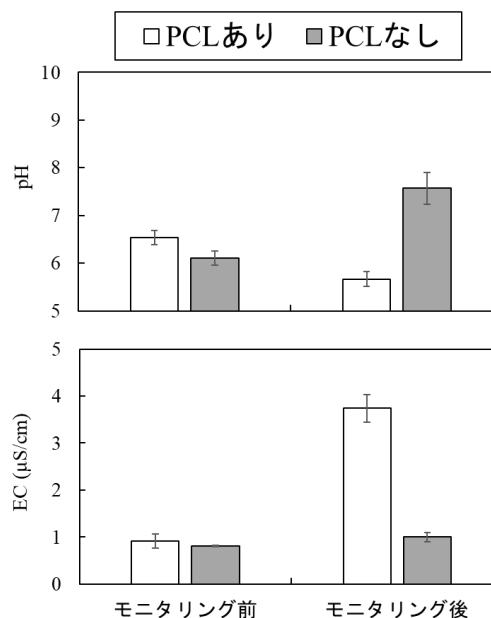


図2. 超純水+PCL有無の水質センサー結果。

加水分解することで酸が生成し、その酸（中間生成物）が微生物に利用されると考えれば、有機物分解が始まるまでのタイムラグについて説明できる。また、表層水や中層水と比べて実験後の深層水の TOC 値に大きな違いが見られなかったことから、深層水中の微生物の活動が直接的に PCL を溶存態に分解していた可能性は低いと考えられる。

4. 謝辞

本研究では、滋賀県立大学環境科学部附属、湖沼環境実験施設の実習調査船「はっさか」を使用させていただきました。琵琶湖での採水では滋賀県立大学環境科学研究院の後藤直成准教授、尾坂兼一講師にお世話になりました。また、東北大学大学院環境科学研究科の栗田大樹助教には生分解性プラスチックについて助言いただきました。ここに深く感謝申し上げます。