

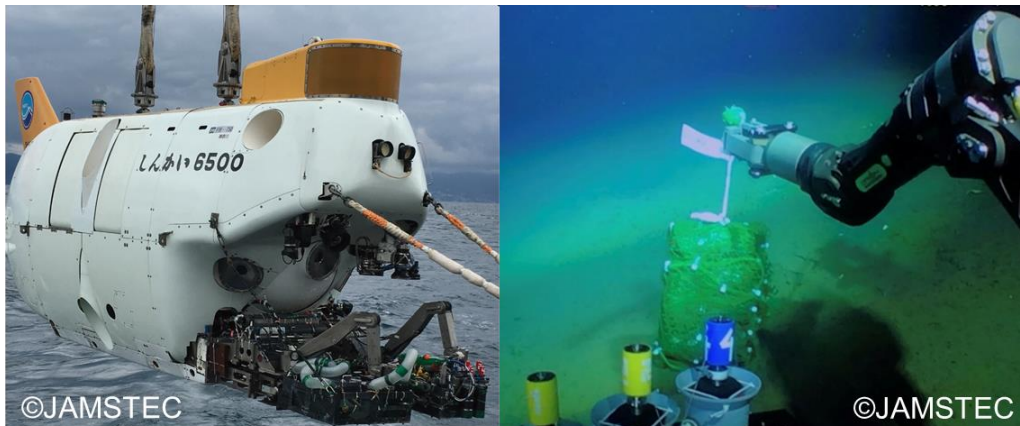
PRESS RELEASE

2024年1月26日
国立大学法人東京大学
国立研究開発法人海洋研究開発機構
国立大学法人群馬大学
独立行政法人製品評価技術基盤機構
国立研究開発法人産業技術総合研究所
日本バイオプラスチック協会

生分解性プラスチックは深海でも分解されることを実証 ——プラスチック海洋汚染問題の解決に光明——

発表のポイント

- ◆さまざまな生分解性プラスチック（ポリ乳酸を除く）が、水深や環境の異なる日本近海の5地点の深海底（757 m～5,552 m）のいずれでも、微生物により分解されることを、世界で初めて明らかにしました。
- ◆生分解性プラスチックを分解する新たな分解微生物を深海から多数発見し、それらが世界中のさまざまな海底堆積物に存在することも明らかにしました。
- ◆分解が実証された生分解性プラスチックは、世界中のいずれの海域においても分解されると考えられ、世界的なプラスチック海洋汚染問題の解決に貢献すると期待されます。



有人潜水調査船「しんかい 6500」（左）により生分解性プラスチックを深海底に設置している様子（右）

概要

東京大学、海洋研究開発機構、群馬大学、製品評価技術基盤機構、産業技術総合研究所、日本バイオプラスチック協会は、様々な生分解性プラスチック（注1）（ポリ乳酸（注2）を除く）が、神奈川県の大磯沖（水深757 m）、静岡県の大井町沖（水深855 m）、伊豆小笠原島弧海底火山付近の明神海丘（水深1,292 m）、黒潮続流域の深海平原（水深5,503 m）、日本最東端の南鳥島沖（水深5,552 m）の全ての深海底（注3）で、微生物により分解されることを世界で初めて明らかにしました。

生分解性プラスチック表面には無数の微生物がびっしりと付着し、時間と共にサンプル表面に粗い凸凹ができて、生分解が進行する様子が観察されました（図1）。深海における生分解速度は、水深が深くなるにつれて遅くなるものの、全ての深海底で生分解されることも確

認められました。水深約 1,000 m の深海底では、本研究で用いた生分解性プラスチックで作製したレジ袋は、3 週間から 2 ヶ月間で生分解されることも計算により推定されました。

今回、菌叢解析（16S rRNA 遺伝子アンプリコンシーケンシング（注4））およびメタゲノム解析（注5）により、深海から生分解性プラスチックを分解できる新たな分解微生物を多数発見することにも成功しました。さらに、発見した分解微生物は、世界中のさまざまな海底堆積物（注6）にも生息していることが明らかになり、分解が実証された生分解性プラスチックは、世界中のいずれの深海でも分解されると考えられます。

本研究成果により、将来の海洋プラスチック汚染の抑制に貢献する優れた素材として、生分解性プラスチックの研究開発の進展が期待されます。

本研究成果は、国際科学専門誌「Nature Communications」オンライン版（日本時間 2024 年 1 月 26 日）に掲載されます。

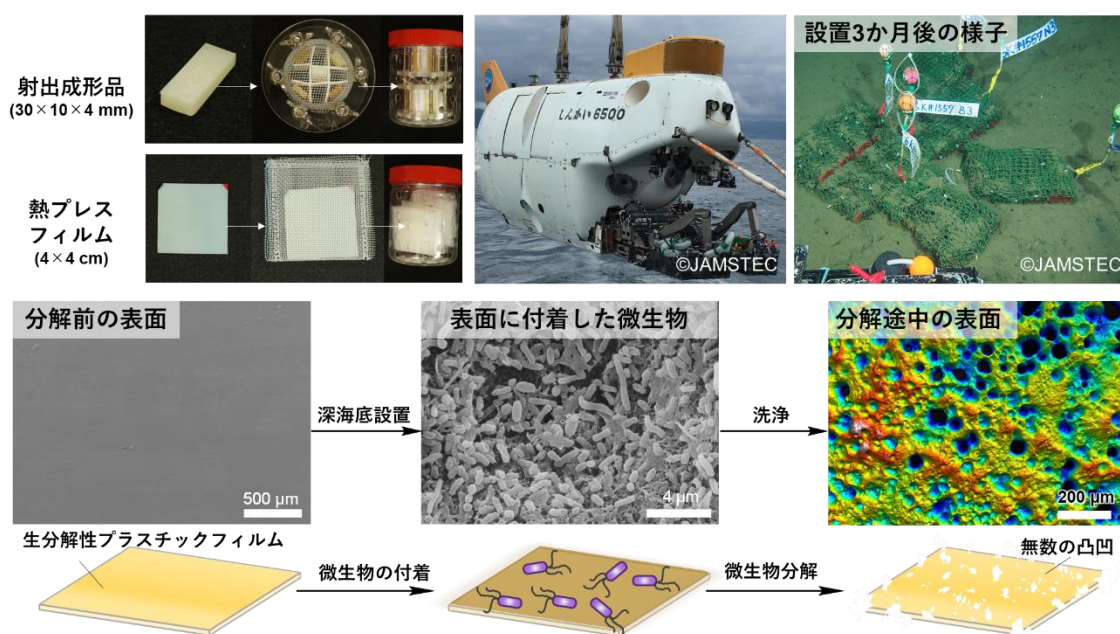


図 1：深海における生分解性プラスチックの分解微生物による生分解

有人潜水調査船「しんかい 6500」により深海底に設置して 3 ヶ月後の生分解性プラスチックサンプルには、マリンスノー（注7）が堆積している様子が観察されました。サンプル表面に付着した無数の微生物の作用により、サンプル表面にクレーターが形成するように生分解が進行することが明らかになりました。

発表内容

<研究背景>

現在、世界中で年間約 4 億トンのプラスチックが生産され、毎年約 800 万トンのプラスチックごみが海洋に流出していると報告されています（*Science* 347, 768 (2015)）。私たちが普段使っているポリエチレンやポリプロピレンに代表される汎用プラスチック（注8）は、山、川、湖、海のいずれの環境においても分解しないプラスチックであり、現在、あらゆる環境下で微生物の働きにより二酸化炭素と水にまで完全に分解される「生分解性プラスチック」の開発が望まれています。

これまでポリ乳酸や微生物産生ポリエステル（注 9）などを始めとする多くの生分解性プラスチックが開発され、コンポスト（注 10）での生分解性および土壌、河川、湖、浅海域などにおける環境生分解性の評価が行われてきました。しかしながら、海洋プラスチックごみが最終的に行き着く深海環境において、生分解性プラスチックが本当に生分解されるのか、生分解性プラスチックを分解できる微生物が深海に存在しているのかについては、これまで誰も証明していませんでした。

＜研究内容＞

本研究では、有人潜水調査船「しんかい 6500」（注 11）とフリーフォール型深海探査機「江戸っ子 1 号」（注 12）を用いて、生分解性プラスチックと汎用プラスチックを深海に 3 ヶ月から 14 ヶ月間設置し、それらサンプルの重量や形状の変化、表面に付着した微生物の解析を行いました（図 2(a)）。生分解性プラスチックとしては、微生物産生ポリエステル（PHA）やポリ乳酸を始めとする生分解性ポリエステルとセルロースアセテートを始めとする多糖類エステル誘導体（注 13）を検討しました。また同時に、浮遊プラスチックごみが多い東京湾に面した海洋研究開発機構の岸壁（神奈川県横須賀市、水深約 5 m）にも同様のサンプルを設置し、生分解速度の比較も行いました。

深海に設置したサンプルを 3 ヶ月から 14 ヶ月後に引き上げ、フィルムや射出成形体の重量と厚みの変化、表面に付着した分解微生物の解析を行いました。その結果、汎用プラスチックとポリ乳酸は全く分解されないのに対し、ポリ乳酸を除く他の生分解性ポリエステルと多糖類エステル誘導体はいずれの深海底でも分解されることがわかりました。

深海と岸壁における生分解速度（ $\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{day}$ ）を比較すると、岸壁の分解速度に対して、水深 1,000 m の深海では 5 分の 1 から 10 分の 1、水深 5,000 m の深海では約 20 分の 1 でした（図 2(b)）。この生分解速度の低下は、水深が深くなることによる水圧や水温などの環境変化に加え、微生物の存在量や多様性が減少するために引き起こされると考えられます。今回実験に用いた生分解性プラスチックの一つである微生物産生ポリエステルでレジ袋（一般的な厚さ = 15 μm ）を作製したとして、初島沖（水深 855 m）での分解速度を用いて深海における分解期間を計算すると、約 3 週間から 2 ヶ月間で分解されると予想されました（図 2(c)）。

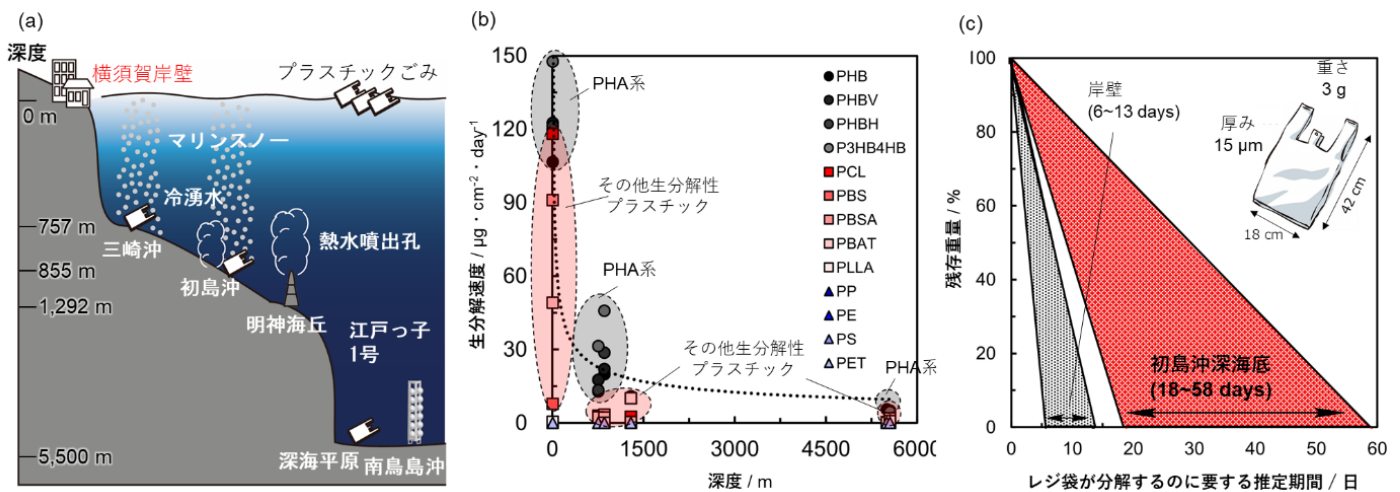


図 2 深海における生分解速度と生分解性プラスチックで作製したレジ袋の深海分解推定期間

走査型電子顕微鏡を用いて深海に設置したプラスチック表面の様子を観察したところ、汎用プラスチックとポリ乳酸のサンプル表面にはほとんど微生物が付着していなかったのに対し、生分解性プラスチック表面には多数の微生物がびっしりと付着する様子が観察されました（図1）。付着した微生物の菌叢解析（注14）の結果、深海設置から数ヶ月は好気的な微生物が付着し、時間と共に嫌気的な微生物へと菌叢が変化することもわかりました（図3）。これはサンプル表面に時間と共にマリンスノーが堆積し、好気的条件から嫌気的条件（注15）へ変化したことが原因と考えられます。サンプル直下の海底堆積物中に生息する微生物の菌叢解析を行ったところ、嫌気的条件になった状態のサンプル表面の菌叢とほとんど同じでした。

サンプル表面に付着した微生物の菌叢解析およびメタゲノム解析を行い、生分解性プラスチックを分解する微生物産生ポリエステル（PHA）分解酵素（注16）や、ポリエステルラーゼ（注17）、クチナーゼ（注18）の遺伝子の塩基配列を有する新たな微生物を6種類発見しました。発見した微生物は世界中の海底堆積物に存在することがわかり、今回分解が実証された生分解性プラスチックは日本近海のみならず、世界中の海域で生分解されると考えられます。

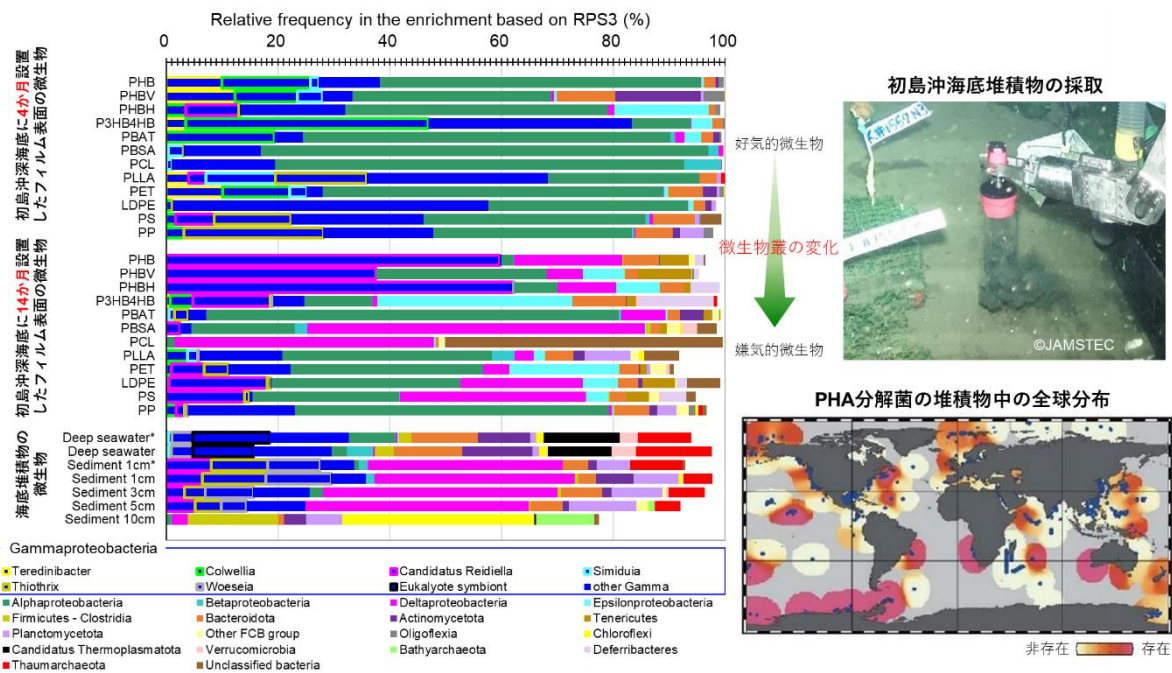


図3 生分解性プラスチック表面と海底堆積物に生息する微生物の菌叢解析と新たに発見した分解微生物の堆積物中の全球分布

初島沖の深海底に4ヶ月設置したフィルム表面には好気的な微生物（青や緑色）のみ存在したが、14ヶ月後には嫌気的な微生物（ピンク色）が支配的になっていくことがわかりました。また、14ヶ月後のフィルム表面の微生物菌叢は、海底堆積物中の菌叢とほぼ同じでした。新たに発見した微生物産生ポリエステル（PHA）分解菌が世界中の海底堆積物中に存在することもわかり、PHAは世界中の海で生分解されると考えられます。

＜今後の展望＞

本研究により、海洋プラスチックごみが最終的に行き着くと考えられている深海底でも、生分解性プラスチックは微生物により分解されることが証明されました。プラスチック製品は可能な限り回収して、リサイクルすることが必要です。しかし、全てのプラスチックを回収することは不可能であり、環境中に流出するものも多々あります。従って、海洋流出の避けられない製品などには、生分解性プラスチックを適切に使用することが必要不可欠であり、生分解性

プラスチックは、将来の海洋プラスチック汚染の抑制に貢献する優れた素材であると言えます。今後は、使用中は優れた物性を持続的に発揮、使用後に、仮に海洋に流出したら分解が始まるとともに、可能な限り速やかに分解する海洋分解開始機能を有する高性能な海洋生分解性プラスチックの開発が期待されます。

論文情報

雑誌名 : Nature Communications (2024 年 1 月 26 日オンライン版公開)

題名 : Microbial Decomposition of Biodegradable Plastics on the Deep-sea Floor

著者名 : T. Omura, N. Isobe, T. Miura, S. Ishii, M. Mori, Y. Ishitani, S. Kimura, K. Hidaka, K. Komiyama, M. Suzuki, K. Kasuya, H. Nomaki, R. Nakajima, M. Tsuchiya, S. Kawagucci, H. Mori, A. Nakayama, M. Kunioka, K. Kamino and T. Iwata* (*責任著者)

DOI : 10.1038/s41467-023-44368-8

URL : <https://www.nature.com/articles/s41467-023-44368-8>

発表者・研究者等情報

東京大学

大学院農学生命科学研究科

生物材料科学専攻

岩田 忠久 教授

大村 拓 研究当時 : 博士課程

込山 活哉 研究当時 : 修士課程

技術基盤センター

木村 聡 技術専門職員

海洋研究開発機構

磯部 紀之 副主任研究員

石井 俊一 副主任研究員

石谷 佳之 特任研究員

野牧 秀隆 上席研究員

中嶋 亮太 主任研究員

土屋 正史 副主任研究員

川口 慎介 主任研究員

群馬大学

大学院理工学府分子科学部門

粕谷 健一 教授 兼 : 同大学食健康科学教育研究センター センター長

食健康科学教育研究センター

鈴木 美和 助教

製品評価技術基盤機構

三浦 隆匡 主任
森 美穂子 研究当時：専門官
日高 皓平 主任
紙野 圭 課長

産業技術総合研究所

中山 敦好 主任研究員

日本バイオプラスチック協会

森 浩之 顧問

注意事項（解禁情報）

日本時間 1 月 26 日 19 時（英国時間：26 日午前 10 時）以前の公表は禁じられています。

研究助成

本研究は、下記の支援により実施されました。

- NEDO 委託事業「NEDO 先導研究プログラム／エネルギー・環境新技術先導研究プログラム／様々な生分解性プラスチックの海洋分解性評価（課題番号：P14004）」（研究代表者：東京大学・岩田忠久、海洋研究開発機構・磯部紀之、研究期間：2019 年度～2020 年度）
- 内閣府・戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「革新的深海資源調査技術」「江戸っ子 1 号」を利用した深海底での生分解プラスチック分解試験（研究体制：日本バイオプラスチック協会、海洋研究開発機構、東京大学、産業技術総合研究所、研究期間：2019 年度～2021 年度）
- NEDO 委託事業「海洋生分解性プラスチックの社会実装に向けた技術開発事業／海洋生分解性に係る評価手法の確立（課題番号：P20008）」（研究代表者：産業技術総合研究所・国岡正雄、東京大学・岩田忠久、製品評価技術基盤機構・紙野圭、研究期間：2020 年度～2024 年度）
- NEDO 委託事業「ムーンショット型研究開発事業／地球環境再生に向けた持続可能な資源循環を実現／生分解開始スイッチ機能を有する海洋分解性プラスチックの研究開発（課題番号：JPNP18016）」（研究代表者：群馬大学・粕谷健一、東京大学・岩田忠久、海洋研究開発機構・野牧秀隆、研究期間：2020 年度～2024 年度）
- 科学研究費補助金「基盤研究 A（課題番号：19H00908）」（研究代表者：岩田忠久、研究期間 2019 年度～2023 年度）
- 大型放射光 SPring-8、フロンティアソフトマテリアル FSBL「課題番号：2019B7270, 2020A7223, 2021A7222」（研究代表者：岩田忠久、研究期間 2019 年度～2021 年度）

補足説明

深海設置場所

- ・神奈川県三崎沖（水深 757 m）：大型のプラスチックごみが多く集積している深海底
- ・静岡県初島沖（水深 855 m）：マイクロプラスチックを取り込んだ深海生物が報告されている深海底

- ・伊豆小笠原島弧海底火山付近の明神海丘（水深 1,292 m）：海底火山で水温や pH などの環境が特殊な深海底
- ・黒潮続流域の深海平原（水深 5,503 m）：海底堆積物にマイクロプラスチックが多く集積している海域
- ・日本最東端の南鳥島沖（水深 5,552 m）：人間活動や海流によるマイクロプラスチックの集積などの影響が少ない深海底

用語解説

- (注1) **生分解性プラスチック**：自然環境中に存在する微生物が分泌する分解酵素により、水に可溶性低分子化合物にまで分解されたのち微生物体内に取り込まれ、最終的に二酸化炭素と水にまで完全に分解されるプラスチック。
- (注2) **ポリ乳酸**：乳酸がエステル結合により重合したポリマー。生分解性プラスチックとして位置付けられるが、工業用コンポスト条件下でのみ分解され、一般の土壌や河川水などでは分解しない。
- (注3) **深海**：一般に水深 200 m より深い海のこと、海洋全体の 95% を占めている。
- (注4) **16S rRNA 遺伝子アンプリコンシーケンシング**：バイオフィーム中の微生物の全 DNA を回収し、生命が持つ普遍的な遺伝子である 16S rRNA 遺伝子の配列を網羅的に増幅・解読することにより、微生物の菌叢を解析する手法である。培養を介さないため、より現場の微生物叢を正確に見積もることが可能となる。
- (注5) **メタゲノム解析**：バイオフィーム中の微生物の全 DNA を回収し、全 DNA を網羅的に解読して微生物群集のゲノム配列を解析する手法である。16S rRNA 解析とは異なり、全ゲノム配列を対象とするため、微生物群集中で優占している微生物については、その微生物が有する機能・代謝遺伝子の解析が可能である。
- (注6) **海底堆積物**：海の底に、鉱物などの無機粒子、生物の遺骸、糞、などが溜まってできた、細かい粒子の集まり。海域や海底地形によって、その組成や存在する微生物の種類が異なる。
- (注7) **マリンスノー**：海洋表層から深海底へと沈降する粒子状有機物のこと。植物プランクトンや動物プランクトンの遺骸、糞、鉱物粒子、バクテリアなどからなる。沈んでいく様子が雪が降っているように見えるため、マリンスノーと呼ばれる。
- (注8) **汎用プラスチック**：ポリエチレン、ポリプロピレン、ポリスチレンなどプラスチックの約 8 割を占める熱可塑性プラスチックで、生活用品や工業製品などに大量に使われている。基本的に、石油から合成され、生分解性は有していない。
- (注9) **微生物産生ポリエステル**：糖や植物油を原料として、微生物体内で生合成されるエステル結合を持ったポリマー。ポリ[(R)-ヒドロキシブチレート]やその共重合体の総称 (PHA) で、自然環境中の他の微生物が分泌する分解酵素によって、二酸化炭素と水にまで完全に生分解される。
- (注10) **コンポスト**：生ごみなどをたい肥化する施設。家庭用コンポストと工業用コンポストがあり、ポリ乳酸は、温度が 60°C 以上、湿度が 60% 以上の工業用コンポストでのみ分解する。
- (注11) **しんかい 6500**：海洋研究開発機構が保有する水深 6,500 m の深さまで潜ることができる有人潜水調査船。
- (注12) **江戸っ子 1 号**：東京下町工場を中心とするプロジェクトで開発されたフリーフォー型深海探査機。観測目的に応じた派生型が開発されており、本研究では 1 年間の長期観測が可能な「江戸っ子 1 号 365 型」が使用された。
- (注13) **多糖類エステル誘導体**：セルロース、デンプン、パラミロンなど、単糖がグリコシド結合で長くつながったものを多糖類と呼ぶ。多糖類の持つ水酸基をエステル基で置換したポリマーをエステル誘導体と呼び、熱成形可能なプラスチックにしたもの。
- (注14) **微生物の菌叢解析**：バイオフィームなどの微生物群集中に含まれる微生物の種類や存在量を網羅的に解析することであり、微生物群集の組成を評価することができる。

通常、16S rRNA 遺伝子を PCR 増幅して解析するが、メタゲノムから解析することもできる。

- (注15) **好氣的条件と嫌氣的条件**：酸素が存在する条件と酸素が存在しない条件。深海底を流れる深層水には、酸素が溶け込んでおり、海底付近は好氣的条件となっている。しかし、マリンスノーの堆積により、プラスチックごみが堆積物中に埋もれていくにつれて嫌氣的条件になる。
- (注16) **微生物産生ポリエステル分解酵素**：微生物産生ポリエステルを分解する酵素。別名、ポリヒドロキシアルカノエート（PHA）分解酵素とも呼ぶ。
- (注17) **ポリエステルラーゼ**：生分解性ポリエステルのエステル結合を水との反応で切断する加水分解酵素。
- (注18) **クチナーゼ**：エステルラーゼの一種で、植物のクチクラを構成するクチンを分解する酵素。クチンと構造が似ている生分解性ポリエステルを分解することができる。

問合せ先

（研究内容については発表者にお問合せください）

東京大学 大学院農学生命科学研究科 生物材料科学専攻
教授 岩田 忠久（いわた ただひさ）
Tel : 03-5841-5266 E-mail : atiwata@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

海洋研究開発機構 海洋機能利用部門 生物地球化学センター
副主任研究員 磯部紀之（いそべ のりゆき）
Tel : 046-867-9674 E-mail : isoben@jamstec.go.jp

群馬大学 大学院理工学府 分子科学部門
群馬大学 食健康科学教育研究センター
教授 粕谷 健一（かすや けんいち）
Tel : 0277-30-1481 E-mail : kkasuya@gunma-u.ac.jp

東京大学 大学院農学生命科学研究科・農学部 事務局 総務課広報情報担当
Tel : 03-5841-8179, 5484 E-mail : koho.a@gs.mail.u-tokyo.ac.jp

海洋研究開発機構 海洋科学技術戦略部報道室
Tel : 045-778-5690 E-mail : press@jamstec.go.jp

製品評価技術基盤機構 バイオテクノロジーセンター（NBRC）
計画課バイオ戦略・広報室
Tel : 03-3481-1933 E-mail : bio-inquiry@nite.go.jp

産業技術総合研究所 バイオメディカル研究部門 生体分子創製研究グループ
主任研究員 中山 敦好（なかやま あつよし）
Tel : 072-751-9064 E-mail : a.nakayama@aist.go.jp