

マイクロプラスチックによる海洋汚染と環境への影響 ～環境に優しいプラスチックの利用～

東京海洋大学 名誉教授

兼廣 春之



1 プラスチックによる海洋汚染

プラスチックは安価で、丈夫で腐らないという特徴をいかして、さまざまな分野に利用されてきた。一方で、自然環境中では分解されにくい性質があるため、使用後の処理などの環境問題の原因ともなっている。近年、プラスチックによる環境汚染は陸上だけでなく海洋でも起こっており、海に流れ出たプラスチックを海亀や海鳥が飲み込んだり、オットセイ、アザラシなどの海洋動物に漁網やロープが絡んだりといった生物被害例が数多く報告されている。国連環境計画(UNEP)によると、海洋に流出するプラスチックごみの量は1年間に数百万トン～1,000万トンに達すると推定されている¹⁾。

海洋に流出したプラスチックや漁網、ロープは海流によって運ばれ、はるか遠くの外国の海岸にまで流れ着く。また、海底に沈んでしまうものも多くある²⁾。特に、刺し網やカゴなどの漁具は海に流出した後も魚を獲り続ける、いわゆる、ゴーストフィッシングの原因となっている。こうしたプラスチックや漁具の海洋への流出は、沿岸域だけでなく深海にまで及んでおり、早急な対策が必要とされている(図1: JAMSTEC提供)³⁾。



相模湾1100m



日本海溝6270m

図1. 深海の海底に堆積するプラスチックごみ

2 環境にやさしい生分解性プラスチックの開発

こうしたプラスチックによる海洋汚染対策として、近年、環境にやさしいプラスチック（いわゆる、生分解性プラスチック）の開発・利用が検討されている。生分解性プラスチックとは、使用中は合成プラスチックと同等の性質を維持し、廃棄後は天然の素材と同じように、速やかに環境中（土壌や河川水、海水）の微生物により炭酸ガスと水に分解されるプラスチックである。このような生分解性プラスチックを利用した低環境負荷型のプラスチックの開発は、私たちが持続可能な社会を維持していく上で重要な課題の一つである。

3 生分解性プラスチックの種類

現在、研究開発されている生分解性プラスチックは次の三つのタイプに分けられる。

- (1)天然物タイプ：セルロース、デンプン、キトサン、などの天然高分子を原料とする熱可塑性プラスチック
- (2)微生物産生タイプ：バクテリアやカビなどの微生物が作り出すバイオポリエステルを原料とするプラスチック
- (3)化学合成タイプ：化学的・生物学的に合成された原料から合成された脂肪族系ポリエステル（ポリ乳酸（PLA）、ポリカプロラクトン（PCL）、ポリブチレンサクシネート（PBS）、ポリブチレンサクシネートアジペート（PBSA）など）

これらの生分解性プラスチックは、環境中の微生物により最終的にすべて炭酸ガスと水に分解される。

表1. 代表的な生分解性プラスチックの種類と構造

脂肪族ポリエステル	構造
PCL	$[-O-(CH_2)_5-CO-]_n$
PBS	$[-O-(CH_2)_4-O-CO-(CH_2)_2-CO-]_n$
P(3HB)	$[-O-CH(CH_3)-CH_2-CO-]_n$
PLA	$[-O-CH(CH_3)-CO-]_n$

この他に、汎用のプラスチック（ポリエチレン等）にデンプンをブレンドした部分崩壊型のプラスチックなども開発されている。部分崩壊型のプラスチックの場合、デンプンの部分

は分解するがプラスチックの部分は分解しないまま残ってしまうので、通常、生分解性プラスチックとは言わない。

上の三つのタイプの生分解性プラスチックの中で、現在、実用化が期待されているのは、(3)のタイプの脂肪族系のポリエステルである。このタイプのプラスチックは、汎用の合成プラスチックと同じように熱可塑性があり、自然環境中での微生物分解性も兼ね備えたプラスチックである。

これらの生分解性プラスチックは、すでにゴミ袋やコップ、食品容器・包装材などの日用品に利用され始めており、その他にも農業用マルチフィルムや苗ポット、釣り糸・漁網などの農林水産資材としての利用も期待されている。

生分解性プラスチックの分解は自然環境中(土壌、河川、海洋)の微生物(プラスチック分解性を持つ微生物)が分泌する分解酵素によって起こる。分解酵素によりプラスチックは低分子化合物に分解され、最終的に炭酸ガスと水にまで完全に分解される。

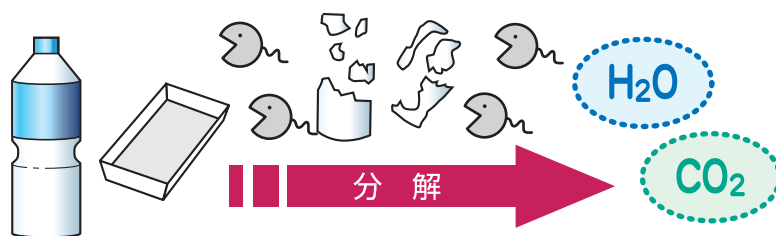


図2. 微生物による生分解性プラスチックの分解

4 海水中における生分解性プラスチックの分解

脂肪族ポリエステル系の生分解性プラスチックについては、これまで土壌や河川水中での微生物分解の研究は行われてきたが、海水中での分解性についてはほとんど研究されていない。海水中でこれらのプラスチックは分解するのだろうか。どのくらいの時間で分解するのだろうか。

数種類の脂肪族ポリエステルについて、異なる海域の海水中で分解性を比較した。海水中でのプラスチックの分解試験は、BODテスターによる酸素消費量の測定により行った(JIS K 6950: 好気的環境下におけるプラスチックの生分解試験)。

ここでは、2種類の脂肪族ポリエステル(ポリカプロラクトン(PCL)とポリヒドロキシブチレート/バリレート(PHB/V))について、東京湾の4ヶ所の海水中で分解試験(水温20℃)を行った結果を図3に示す。

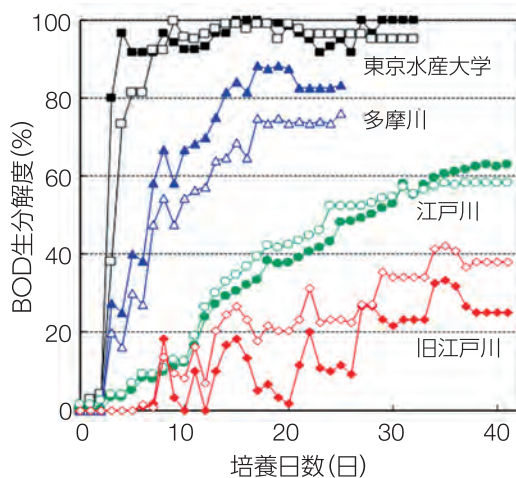


図3. 異なる海水中における生分解性プラスチックの分解
(黒塗り:PHB/V、白塗り:PCL)

試験した4ヶ所の海水中で、浸漬後3～7日頃から酸素消費量が急激に増大し、プラスチックが分解し始めた。さらに、時間とともに酸素消費量は増大し、速いもので7日くらいで完全に分解(分解度100%)していた。海域ごとの分解の速さは、東京水産大学>多摩川>江戸川>旧江戸川の順であった。分解の遅かった江戸川周辺の海水中での分解度は1ヶ月後で40～60%であった。海水中におけるプラスチック(PCL及びPHB/V)の分解は分解微生物の有無、種類、数等によって強く影響を受ける。また、海水中の微生物の種類や数は海域だけでなく、同じ海水でも水温や時期等によって大きく変動することに注意する必要がある。

5 海水中の微生物の変動とプラスチック分解微生物

通常、環境中に存在する微生物の数(生菌数)は土壌中が最も多く、1g中に 10^9 個程度いるといわれているが、それに対して、海水中には1mlあたり $10^3 \sim 10^6$ 個程度しかない。

先に述べたように微生物の種類や数は環境条件(場所、水温、時期)によっても大きく変動する。海水中にプラスチックを分解する微生物は本当にいるのだろうか。どのくらいいるのだろうか。

海水中の微生物は土壌に比べてかなり少ないが、それでも多数の微生物(群集)が存在する。海水中にいる微生物(群集)のうちプラスチックを分解する微生物がどのくらいいるのか、それらがプラスチックの分解にどのように関わっているかを調べるために、

PCR-DGGE法(変性剤濃度勾配ゲル電気泳動法)による微生物群集の変動解析を行った。

DGGE法は環境中の微生物から核酸をPCR増幅し、塩基配列の違いにより微生物を分離する方法である。DGGE法は、異なる微生物を電気泳動バンドとして分離、可視化できるため、環境中(海水)にどのような種類の微生物(例えば、生分解性を有する微生物やそれ以外の微生物など)が存在しているか、を判別することができる。DGGEゲル上のバンドの位置やバンドの数を比較することにより、場所(海水)や培養前後、時間経過(今回の実験では、海中浸漬による微生物分解の進行による)などの試料間の微生物群集の変化や比較が可能となる。

プラスチックの微生物分解にともなう海水中の微生物群集の変動解析は以下のように行った。海水中に4種類のプラスチックフィルム(生分解性3種(PCL、PHB、PHBV)と、対照として分解性の無い合成プラスチックのPMMAフィルム)の計4種のプラスチックフィルムを海中に浸漬し、一定時間ごとに、フィルム表面に付着した微生物(群集)を取り出し、その遺伝子解析を行い、海水中からフィルム上に付着した微生物群集の(種類、数)の変動を調べた(図4)。

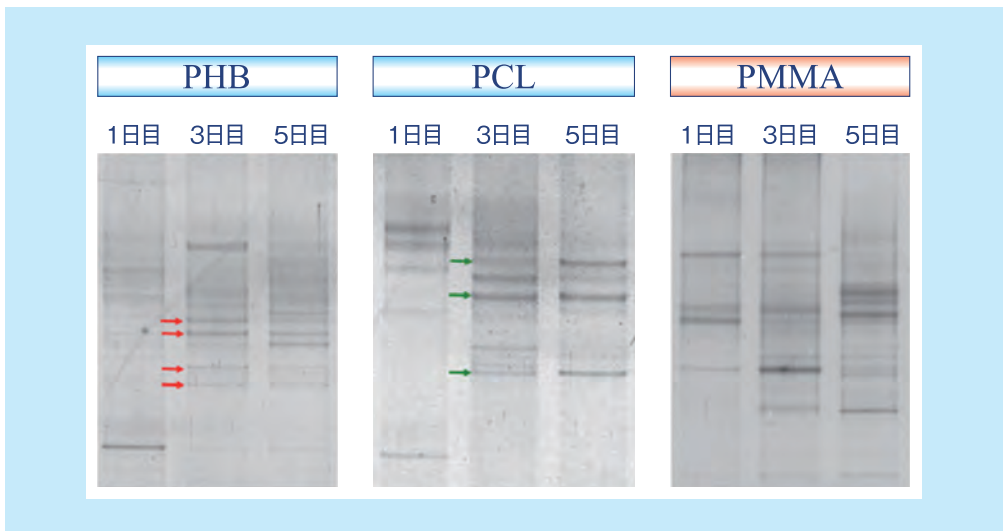


図4. DGGE法による海水中の微生物群集の解析

フィルムを海中に浸漬した直後から海中にいる微生物がプラスチックフィルムの表面に付着し始め、1日後には 10^5 個/cm²に達していた(生菌数)。それに対してプラスチック分解微生物は浸漬直後はほとんど確認されなかったが、浸漬12時間以降から増え始め、2～3日後には $10^3 \sim 10^4$ 個/cm²に増えていた。

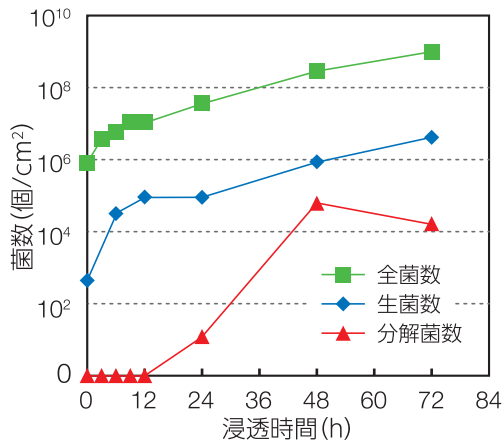


図5-a. 海水中に浸漬したPCLフィルム表面に付着した菌数の変動

実際に、海中に浸漬した生分解性プラスチック(PCL及びPHB)フィルムの表面の分解状態を観察すると、浸漬2日目頃から徐々に分解が起こり始め、3～4日後にはかなり分解が進行していた。

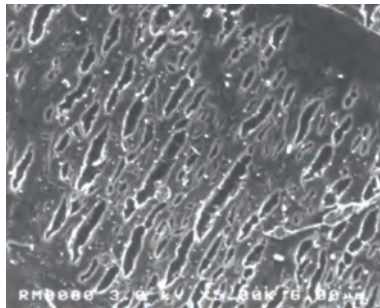


図5-b. 海水中に浸漬3日～4日後のPCLフィルム(微生物による分解が進行)

一方、対照として浸漬した非分解性のPMMAフィルムでは、プラスチックの分解はまったく認められず、プラスチック分解微生物の存在も確認されなかった。

DGGE法による微生物群集の変動解析の結果、海水中に浸漬した生分解性のプラスチックの分解が徐々に起こると並行して、フィルム上のプラスチック分解微生物の数も急激に増えていくのが認められた。

6 深海漁場に浸漬したプラスチックの分解

深海(水深200m以上の海域)は水温が5℃以下と表層に比べて非常に低く、また、海水中の微生物の数も10¹～10²CFU/mlと、表層の海水(10³～10⁶CFU/ml)に比べると非常に少ない。こうした深海環境下でもプラスチックの微生物分解は起こるのだら

うか。深海環境におけるプラスチックの分解に関する研究はこれまでほとんど報告されていない。

実際に、深海の海底に脂肪族ポリエステル繊維を浸漬し、繊維の分解が起こるかどうかを調べた。深海での繊維の浸漬試験は、実際にカニ籠漁業が行われている鳥取県沖の水深2,000mの深海の海底(水温約1℃)で行った。数種類の生分解性繊維(綿、絹、PCL、PHBV、PBS)を海底に浸漬し、10ヶ月後に取り出して、繊維の強度の変化と顕微鏡観察による繊維の分解の有無を調べた⁴⁾、⁵⁾。

10ヶ月間深海に浸漬した天然繊維の綿糸と絹では、繊維の大半は分解していたが、一部は繊維片が残っていた。水温が低く、微生物も少ない深海環境下では、分解性が高いと思われる天然繊維でも、完全に消滅するのに1年近くかかるようであった。

それに対して、脂肪族ポリエステル系の繊維では、天然繊維に比べると分解はかなり遅かったが、浸漬10ヶ月後の繊維の強度はかなり低下していた(PHB/Vで80%、PCLで40%、PBSで10%)。

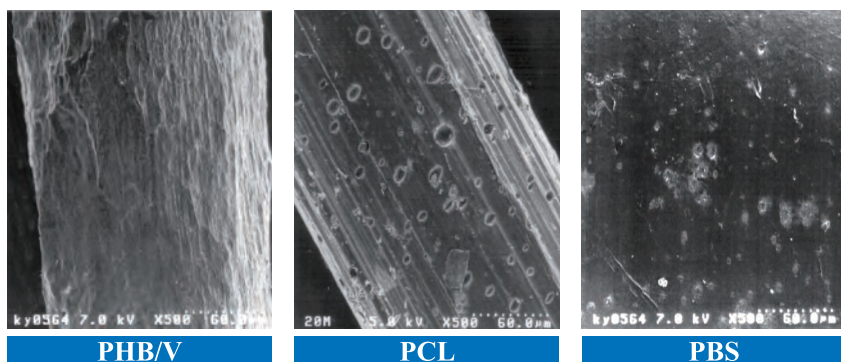


図6. 水深2000mの深海に10ヶ月間浸漬した繊維

顕微鏡写真の結果からも繊維の分解が徐々に進行しているのが認められた。

7 深海(深層水)からのプラスチック分解微生物の単離

深海の調査によれば、近年、プラスチックによる海洋汚染は水深が1,000m以上の深海にまで広がっており、流出した漁具によるゴーストフィッシングの原因になっていることが指摘されている。水深が2,000mの深海漁場でもプラスチックの微生物分解が起こっていることは先にも述べたが、ここでは、深海の海水からプラスチック分解微生物をスクリーニング(分離)し、その遺伝学的性質及び微生物学特性等を調べた結果を示す。

低水温、高水圧の深海域からのプラスチック分解微生物の単離や微生物学的研究

の報告例はこれまでほとんどない。ここでは、深海環境(深層水)中における生分解性プラスチックの分解性について紹介する。

海洋の表層水は、水温は10～25℃と比較的高く、海水中の微生物数は $10^4 \sim 10^6$ CFU/mlの範囲で比較的多い。それに対して、深海になると海水の水温も10℃以下となり、微生物数も 10^2 CFU/ml以下と極めて少ない。こうした環境中にもプラスチック分解微生物はいるのだろうか。

ここでは、まず水深300m～600m、水温2～9℃の3ヶ所の海洋深層水(富山湾深層水及び北海道羅臼深層水、沖縄県久米島深層水)中に3種類の繊維(PCL、PHB/V、PBS)を浸漬し、強度変化を調べた。併せて、試験した深層水中からプラスチック分解微生物を単離した⁶⁾。

PCL、PHB/Vともに、深層水中に浸漬して1ヶ月後くらいから強度低下が起こり、3～9ヶ月で強度が0にまで低下していた。1年間深層水に浸漬した繊維の電子顕微鏡写真を図7に示す。

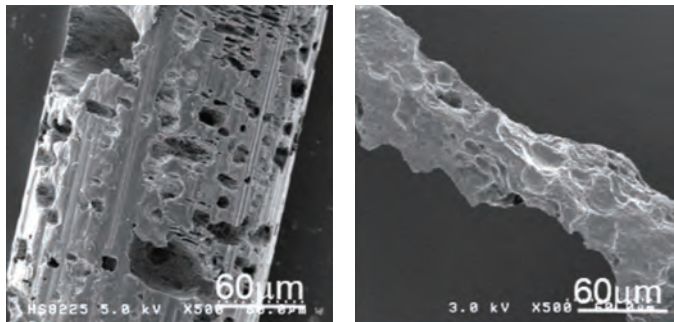


図7. 深層水中に1年間浸漬した生分解性繊維
(左:PCL、右:PHB/V、太さ:約200 μ m)

PCL、PHB/Vともに繊維表面が激しく分解されているのがわかる。特に、PHB/V繊維は分解が著しく、繊維の太さが元の数分の1程度にまで減少していた。

微生物による分解が確認された深層水中からPCL分解微生物の単離を行った。深層水中からのプラスチック分解微生物の単離は次のように行った。PCLグラニュールを懸濁させた培地に浸漬試験に使用した3ヶ所の深層水を塗布し、4℃～25℃で1週間程度培養し、培地に形成されたクリアゾーンからPCL分解微生物の単離を行った(図8)。

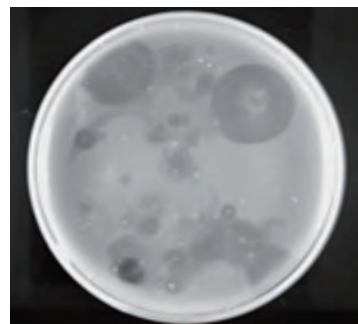


図8. クリアゾーンの形成

その結果、浸漬試験を行った3ヶ所の深層水か

ら数種類のPCL分解微生物の単離に成功した。単離した微生物について、16SリボゾームRNA遺伝子による塩基配列の解析を行った結果、数種類のPCL分解微生物（Pseudomonas属、Alcanivorax属、Tenasibaculum属）を単離することができた。

深層水から単離されたこれらの微生物について、温度（4～50℃）に対する増殖性を調べた結果、至適増殖温度は28～38℃の範囲であった。

単離したPCL分解微生物（富山湾）の中には4～10℃の低温下でも増殖性と分解活性を示す特異な微生物がいることも確認された。

8 深海（日本海溝及び千島海溝）からのプラスチック分解微生物のスクリーニング^{7)、8)、9)}

さらに、水深が5,000m～7,000mの日本海溝及び千島海溝の深海からプラスチック分解微生物のスクリーニングを行った。日本海溝及び千島海溝の海底の水温は1～3℃であり、水圧も50～70MPaと非常に高い。このような深海環境に生息する生物は絶えず低温、高水圧という環境にさらされており、陸上や海洋の表層とは異なった圧力に適応した特異な生物や微生物がいることが知られている。

深海からのプラスチック分解微生物の探索は国立研究開発法人海洋研究開発機構（JAMSTEC）の有人深海調査船「しんかい6500」及び無人探査機「かいこう7K」を使い、日本海溝及び千島海溝（水深約5,000～7,000m）から深海底泥を採取した。



図9. 深海（日本海溝）の底泥から単離したPCL分解微生物

採取した深海の底泥は船上で直ちに生分解性プラスチックフィルムとともに、4℃、50MPa（水深約5,000mの圧力に相当）の加圧容器に保存した。深海の加圧状態を保ったまま研究室に持ち帰り、深海微生物実験システム（DEEP-BATH）を使ってプラスチック分解微生物のスクリーニングを行った。その結果、30～50MPaの水圧下、0～4℃の低温でも増殖性とプラスチック分解活性を有する微生物の単離に成功した。

9 深海から単離したPCL分解微生物の性状

深海から分離した分解微生物について、16SリボゾームRNA遺伝子による塩基配列の解析を行った結果、深海性の細菌として知られるShewanella属及びMoritella属に近縁の種が確認された。図9(9ページ)に、深海(日本海溝の底泥)から単離したPCL分解微生物の写真を示す。

これらの深海性の微生物について、温度(0～15℃)及び圧力(0.1～70MPa)に対する増殖性を調べた結果、その多くが至適増殖温度4～8℃、至適圧力30～50MPaの低温、高圧に適応した微生物であることが確認された。

一般に、微生物は圧力に対する感受性が異なっており、圧力に対して4つのタイプ(圧力感受性、耐圧性、好圧性、絶対好圧性)に分けられる(図10)。常圧性の微生物は、加圧下で増殖が著しく阻害されるタイプである。耐圧性の微生物は、高圧力下では増殖が阻害されるが、30MPaや50MPaの圧力下では増殖性を維持しているタイプを表す。好圧性の微生物は、大気圧下での生育に比べ、高圧下の方がより良好に生育できるタイプを表す。絶対好圧性の微生物は、大気圧下では増殖せず、加圧下でのみ生育出来るタイプの微生物である。

これら4つのタイプのうち、好圧性微生物及び絶対好圧性微生物は深海環境に特有のタイプであると言える。このような高圧に適応性を示す微生物は、他の微生物には見られない特異的な代謝機構などを有していると考えられる。好圧性微生物や絶対好圧性微生物については、これまでも深海環境から探索が行われてきたが、これまで分離、報告されている例は5属13種しかなく、非常に希少なタイプの微生物である。

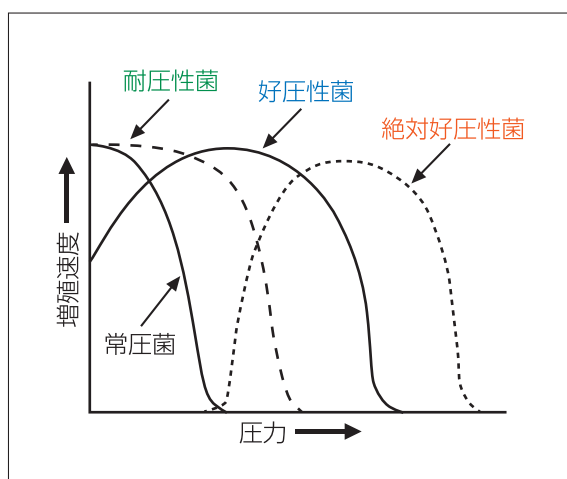


図10. 圧力に対する微生物の分類

今回、深海底泥から分離された好圧性のPCL分解微生物について、DNA-DNAハイブリダイゼーション法などにより近隣微生物種との対比を行った結果、これらの好圧性微生物がこれまでに報告されていない新種の微生物であることが確認された。

低温、高圧環境に適応した生分解性プラスチック分解微生物について、その性状をさらに調べることで深海環境におけるプラスチックの分解機構の解明につながることを期待される。また、これらの好冷、好圧性微生物の持つプラスチック分解酵素は、低温、高圧下でも活性を有する特異的な耐压性酵素であるものと期待される。

10 生分解性プラスチックの利用と今後の展望

表層から水深5,000～7,000mの深海にいたるさまざまな海水中にプラスチック(脂肪族ポリエステル(PCL))を浸漬した結果、ほとんどの海域の海水中でプラスチックの微生物分解が確認された。プラスチックの分解の速さは水温によって大きく影響を受け、水温が高いほど分解は速いが、1～3℃の極低温下でも微生物分解が起こることが確認された。これら分離されたプラスチック分解微生物の遺伝学的解析を行った結果、深海の海域からこれまで報告されていない新規の好圧性プラスチック分解微生物であることがわかった。

数種類の脂肪族系のポリエステルについて、様々な海域(表層～深海)で分解試験を行った結果、すべての海域で微生物分解が起こることが明らかとなった。特に、水温が低く、微生物が極めて少ない深海でも分解が起こることは興味深い結果であった。こうした生分解性プラスチックの利用は、現在問題となっているプラスチック(マイクロプラスチックを含む)による海洋汚染問題を削減するのに効果があるものと期待される¹¹⁾。

現在、生分解性プラスチックは、少しずつ私たちの身近な製品にも利用されるようになってきたが、未だ利用の割合は低い。今後はより性能に優れた生分解性の素材の開発が期待される^{10)、11)}。

引用文献

- 1) J. R. Jambeck, R. Geyer, C. Wilcox, T. R. Siegler, M. Perryman, A. Andrady, R. Narayan and Kara Lavender Law, Plastic waste inputs from land into the ocean in 2010. *Science*, 347, 768-772. (2015).
- 2) 藤倉克則, 奥谷喬司, 丸山正: 潜水船が観た深海生物—深海生物研究の現在, 東海大学出版会, 神奈川. (2008).
- 3) A. Ebisui, T. Murakami, Y. Oyaizu, M. Enoki, H. Kanehiro, S. Wakabayashi and T. Watanabe, Biodegradation of poly(ϵ -caprolactone) monofilament fibers in deep sea water at near 0°C. *Deep Ocean Water Research*, 7, 31-36. (2006).
- 4) 関口峻允, 戎井章, 野村幸司, 渡部俊広, 榎牧子, 兼廣春之: 深層水中における各種生分解繊維の分解と分解微生物の単離, *日本水産学会誌*, 75(6), 1011-1018, (2009).
- 5) 兼廣春之, 榎牧子: ゴーストフィッシング防止対策例としての新素材の利用, *日本水産学会誌*, Vol.72, 936-937, (2006).
- 6) T. Sekiguchi, A. Saika, K. Nomura, T. Watanabe, T. Watanabe, Y. Fujimoto, M. Enoki, T. Sato, C. Kato and H. Kanehiro, Biodegradation of aliphatic polyesters soaked in deep seawaters and isolation of poly(ϵ -caprolactone)-degrading bacteria. *Polym. Degrad. Stab.* 96, 1397-1403, (2011).
- 7) T. Sekiguchi, M. Enoki, H. Kanehiro and C. Kato, Procedure for isolation of the plastic degrading piezophilic bacteria from deep-sea environments, *Jpn. J. Soc. Extremophiles*, Vol. 9, 25-30, (2010).
- 8) T. Sekiguchi, T. Sato, M. Enoki, H. Kanehiro, K. Uematsu and C. Kato, Isolation and characterization of biodegradable plastic degrading bacteria from deep-sea environments, *JAMSTEC Rep. Res. Dev.*, Vol.11, 33-41, (2010).
- 9) 兼廣春之, 関口峻允: プラスチックによる海洋汚染—生分解性プラスチックの利用, *日本家政学会誌*, 暮らしの最前線, Vol.61, 381-385, (2010).
- 10) 兼廣春之, 特集「水環境におけるマイクロプラスチック」巻頭言, *水環境学会誌*, Vol.40(A), No.10, pp.343, (2017).
- 11) 兼廣春之, 関口峻允, 加藤千明, 佐藤孝子, 「新規微生物、及び該微生物を使用して生分解性プラスチックの生分解性を試験する方法」, 特許第5504440号, (2014).

塩化ビニリデン衛生協議会加盟会社(五十音順)

旭化成株式会社 旭化成ホームプロダクツ株式会社 岡田紙業株式会社 株式会社クレハ
興人フィルム&ケミカルズ株式会社 シールドエアージャパン合同会社
ダイセルバリューコーティング株式会社 東タイ株式会社 フタムラ化学株式会社
三井化学東セロ株式会社 ユニチカ株式会社

ビニリデン協だより No.80

2019年2月発行



塩化ビニリデン衛生協議会

〒104-0033 東京都中央区新川1-4-1 住友不動産六甲ビル8階

Tel: 03-6280-5673 Fax: 03-6280-5674 URL: <https://vdkyo.jp/>