

海洋プラスチックごみが生物多様性に及ぼす影響について

五十嵐 敏郎

要旨

地球上の生物は過去 5 度の大量絶滅を経験した。近い将来に 6 度目の大量絶滅が起こる可能性が議論されている。その可能性の一つとして、海洋に投棄されたり、陸上から河川や運河を通して海洋に流れ着いたプラスチックごみに起因する、人為的な影響による海洋生物の大量絶滅が危惧されている。

本報告では、最初に海洋中のプラスチックごみの現状と将来予測を明らかにする。我々が考えている以上に深刻になっている。海洋プラスチックごみのなかでも、5mm 以下と定義されるマイクロプラスチックが生態系に大きな影響を及ぼす。マイクロプラスチックの発生原因について述べるとともに、数量的な実態についても推定する。マイクロプラスチックが生態系に及ぼす影響に関する最近の研究事例を紹介する。研究は緒に就いたばかりであり、今後多くの研究が行われ実態が明らかにされると予想される。続いて、本論文の主軸となる海洋中のプラスチックごみの防止策やマイクロプラスチックの生成防止策について、金沢大学で進めている「劣化を総合的に科学する」プロジェクトの紹介も含めて述べる。最後に、海洋プラスチックごみ問題から透けて見える、プラスチック製品を開発する際の「思い込み」のワナについて言及する。縮小社会の考えを普及する時にも、私たちが幸せになるために成長が必要だという「思い込み」をどのように克服していくかがポイントになると考える。

I. はじめに

地球の生物は過去 5 度の大量絶滅を経験した。

最初の大量絶滅は約 4 億 4 千万年前のオルドビス末期に発生し、地球上の生物の 85% が死に絶えた。地球上のほぼすべての生物は海中に生息しており、海の大量絶滅と言える。絶滅の原因については未だに不明だが、ガンマ線バースト説が有力視されている。一方、リビア砂漠に掘られた深さ 2000m の穴から採掘した化石の分析から、奇形率が予想より 100 倍高く、重金属濃度が最大で予想より 10 倍高かった結果が得られ、高濃度の有毒金属が原因とする新説が出された (Vandenbroucke 2015)。

2 度目の大量絶滅は今から約 3 億 7 千万年前のデボン紀後期に発生した。この絶滅の特徴は暖

かい海に住む海洋生物に特化して起きたことである。淡水種に比べて海生種の絶滅率が高く、また、海生種でも、高緯度に生息する種より、低緯度に生息する腕足類の絶滅率が高い。地球上の生物の82%が死に絶えた。何らかの理由で海水中の酸素が無くなってしまいう「海洋無酸素事変」が原因と考えられている。一方で、緯度による偏りなどから、海水温の低下とする説もある。

3度目の大量絶滅は約2億5800万～2億5100万年前のペルム紀末期に発生した。短期間に2度発生し地球史上最大規模の絶滅とされ、地球上の生物の実に96%が死に絶えた。原因は謎に包まれているが、有力なのが巨大プルーム説で、マントルを流れるマグマが地球上に溢れ出し超大規模な火山噴火が発生したのが原因とされる。一説にはこの時期に巨大隕石の跡があり、これが大量絶滅の原因ではないかとも言われている。

4度目の大量絶滅は2億1千万年前の三疊紀末に発生し、地球上の生物の76%が死に絶えた。様々な説があるが、有力なのが隕石衝突説で、カナダに巨大隕石衝突跡があり、これが大量絶滅のきっかけになったと言われている。

5度目の大量絶滅は6550万年前の白亜紀に発生し、恐竜を始めとして地球上の70%の生物が息絶えた。原因はユカタン半島に落ちた巨大隕石と考えられる。爆発と衝撃で地球の気候が一変し、食物が枯れ果て、それを食べる草食恐竜が死に絶え、それを食べる肉食恐竜が死に絶えた。最新の研究によると、巨大隕石と同時期に地球の火山活動が活発化していることが判明した。隕石と火山の両方がこの絶滅の原因になっている。

最後の絶滅から6500年以上が経過し、人間が大繁殖している現在、地球は「6度目の大量絶滅の途中」とあるという説があり、生物学者の7割がこの説を支持している(Harris 2007)。過去地球を襲った5度の大量絶滅は、何百年という時間をかけて徐々に絶滅していったとされている。人間以外の生物が徐々に排斥されている現状は、6度目の大量絶滅の始まりと言えなくもない。5度の絶滅は何らかの自然現象の結果だった。しかし将来訪れる地球史上6度目の大量絶滅の原因は「人間」であるのかもしれない。巨大隕石や大地震などの天変地異におびえる前に、地球との接し方を変える必要があるのかもしれない。海洋生物のみに起き地球上の生物の82%が死に絶えたデボン紀後期の2度目の大量絶滅は、海水中の酸素が無くなってしまいう「海洋無酸素事変」が原因と考えられている。海水中の酸素がなくなった原因は不明だが、海洋プラスチックごみを放置し続けるとプランクトンの異常発生による無酸素化やプラスチックごみに吸着したPCBなどの有害物質に起因する海洋生物の大量絶滅が起こる可能性が否定できない。オルドビス末期に発生した最初の大量絶滅も、対象は海中生物であり、最近出された有毒金属が原因という説が気になる。

Ⅱ. 海洋中のプラスチックごみ

1. プラスチック廃棄量とリサイクル量の推移（米国）

米国環境保護庁（EPA）の資料を図1に示す。プラスチック廃棄量は1960年から2010年までの50年間で20倍に増え、次の20年で年率5%増加し2倍に増えると予想されている。リサイクルされるプラスチック量も1990年ごろから増えているが、廃棄量には追いつかないのが現状である（MacCombs and Biddle 2016）。

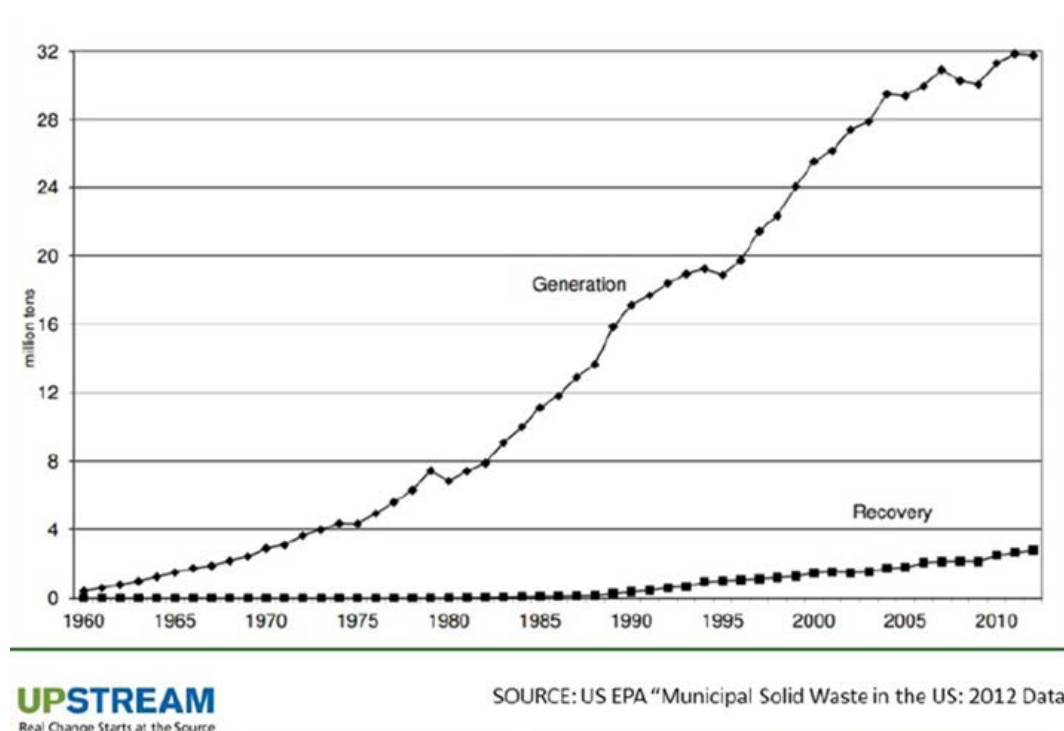


図1：1960年～2012年のプラスチック廃棄量とリサイクル量（MacCombs and Biddle 2016）

プラスチック業界は、用途に合わせて超硬質プラスチックから超軟質プラスチックまで様々な種類を開発し上市した。また、ガラス繊維や炭素繊維などとの複合化や多層フィルムの開発などで使用目的に合わせて用途を拡大してきた。その結果、年率2%で増加する鉄や年率3%で増加する紙などの他材料と比較して年率6%で増加するなど生産量の伸びが著しい（MacCombs and Biddle 2016）。種類の増加、複合化や多層化はいずれもプラスチックのリサイクルを困難にしており、今後リサイクル量を増やす上で大きな障害となる。

プラスチックの製造原料についてみると、生物資源（バイオマス）から作られたプラスチック

として定義されるバイオプラスチックは1980年のICI社による共重合ポリエステル工業生産の開始以来様々な種類が開発・上市されてきたが、現在でもその使用量は合計で1%にとどまり、リサイクルプラスチックを合わせても10%にしか過ぎず、残り90%は相変わらず化石燃料由来である(Nandan 2017)。

大量生産されたプラスチックはどのような行方をたどるのだろうか。米国では合計で7800万トンのプラスチックが使用される。このうち32%が環境中に流出し、40%が埋め立てられ、焼却されるのが14%で、リサイクルされるのは14%に過ぎない。環境中に流出する32%のプラスチックが森林や海洋のごみとなり、生物多様性に悪影響すると考えられる(Elle Macarthur Foundation 2016)。

環境中に流出する可能性が最も高い包装・容器についてはプラスチック容器のリサイクル率が13.8%であり、紙容器の76.1%、鉄製容器の72.2%、アルミニウム容器の38%、ガラス容器34.1%と比較して大幅に低い(Mackerron 2017)。今後リサイクル率を上げていく可能性があるかと前向きにとらえるか、リサイクルが困難な材料と考えるか？高機能化を目指して多種類化、複合化、多層化が進展していることから後者の可能性が高い。

2. 海洋プラスチックごみの現状と将来

図2に示すように、海洋プラスチックごみ問題は、どれくらいの量のプラスチックが海洋に流出するのか、マイクロプラスチック問題とは何か、マイクロプラスチックの生態系に及ぼす影響、海洋中のプラスチックごみの防止策やマイクロプラスチックの生成防止策に集約される(五十嵐ら 2017)。

海洋ごみは、海洋に流出した廃棄物の総称で、海岸に漂着した「漂着ごみ」、海面や水中を漂う「漂流ごみ」、海底に堆積した「海底ごみ」に分けられる(松田 2015)。人工物であるプラスチックは海洋中で分解するのに400年ほど要するため、海洋ごみは海洋プラスチックごみ問題に集約される。海洋に流出するプラスチックごみの量については様々な説があるが、ジョージア大学が海に面した192カ国のプラスチック廃棄物発生量約2億7500万トンのうち480万トンから1270万トン(全体の1.7%~4.6%に相当)が海に流出したと推計している(鈴木 2016; Jambeck 2015)。Eunomiaの推計では、年間で約1200万トンの海洋プラスチックごみが発生し、そのうち1%が海の表面を漂い(漂流ごみ)、5%が海岸に漂着し(漂着ごみ)、残りの94%は海底に堆積するとされる(漂着ごみ)(Eunomia 2016)。2014年に全世界で行われた分析結果から海洋プラスチックごみの総量は2億5千万トンと推定されており、2014年時点で海に生息す

る魚の総重量の1/5に達し(Mackerron 2017), 2050年には魚の総重量を上回るとの予測が2016年1月に開催された世界経済フォーラム(ダボス会議)で示され, 海洋プラスチックごみ問題が大きな注目を集めた(鈴木 2016; World Economic Forum 2016)。

海洋プラスチックごみの排出国ベスト5はアジア諸国が占めている。第1位が中国で最大で年間500万トン弱を排出する。以下, インドネシア, フィリピン, ベトナム, スリランカと続き, 20位の米国の排出量を大幅に上回っている(Jambeck 2015)。これらの諸国で生産されるプラスチックの管理が不十分なこともあるが, 実際にはリサイクル困難なプラスチックごみが欧米・日本からアジアの発展途上国に持ち込まれ, 川・運河・湖に捨てられて最終的に海洋に流れてしまう(McCombs et al. 2015)。アジアの発展途上国の倫理問題に矮小化させるのではなく先進諸国も一緒に対策を考える必要がある。



図2: 海洋プラスチックごみ問題の全体像 (五十嵐ら 2017)

Ⅲ. マイクロプラスチック問題

1. マイクロプラスチックの発生原因と発生量

海洋プラスチックごみの中で特に生態系への影響が大きいのが, 5mm以下の「マイクロプラスチック」である。「マイクロプラスチック」には大きく分けて2つの発生原因がある。

① 元々が5mm以下の小片として製造されたプラスチックで一次マイクロプラスチックと呼ば

れる。この中にはマイクロビーズと呼ばれるミクロン以下の小さなプラスチック微粒子がある。ポリエチレンやポリプロピレンでつくられる。化粧品などに含まれ、下水処理施設のフィルターを通過し、河川を経て海に流れる。量的には少ないが微細な故に質的な問題は大きい。また、ペレットと呼ばれるプラスチック製品の原料も含まれ、加工場から河川を通じて海に流れる。その他、塗料粉やタイヤ粉、繊維くずなどが含まれる。推計ではタイヤ粉が29万トン、ペレットが23万トン、塗料粉が22.6万トン、繊維くずが19万トン、マイクロビーズが3.5万トンと推計され、合わせて年間95万トンが海洋に流れ出す (MacCombs and Biddle 2016)。

② 河川を通じて、あるいは直接海に捨てられたプラスチック製品 (レジ袋やペットボトルその他もろもろ) が、紫外線や波の力で劣化し、5mm以下の小さな破片になったもので二次マイクロプラスチックと呼ばれる。実態はベールに包まれ不明であるが、一説では年間約100万トン発生すると言われる (UNEP 2016 ; MacCombs and Biddle 2016)。

2015年に発表された推計では、2014年時点での全世界の海洋中のマイクロプラスチック粒子の累計数は14.9兆個~51.2兆個になると言われる (Sebille et al. 2015)。2014年に行われた九州大学と東京海洋大学が合同で行ったマイクロプラスチック採集調査で、日本周辺の海域での海面近くの浮遊密度が海水1m³当たり3.7個との結果が得られ、他海域に比べて際立って高い密度であり日本周辺の海域は「マイクロプラスチックのホットスポット」であるとされた (鈴木 2016; Isobe et al. 2015)。

2. マイクロプラスチックの生態系に及ぼす影響

ここでは、海洋プラスチックごみ、とりわけマイクロプラスチックの海洋に住む生物への影響について述べる。現時点では問題が少ないとされているが、このまま何も対策せずに放置して海洋プラスチックの総量が海にすむ魚の総量を上回る事態になれば、食物連鎖を通じてやがては人間の健康面にも影響しかねない (鈴木 2016 ; 高田 2017 ; 兼廣 2017)。

「マイクロプラスチック」は大きさが小さいが故に次に示す大きな問題を抱えている。

- ① 同じ重量でも表面積が大きくなり、海水中に存在するPCBなどの有害な有機化合物を吸着しやすい (友は友を呼ぶ)。最大100万倍まで濃縮されるとも言われる (兼廣 2017)。
- ② 海鳥や魚類が餌にするオキアミが食べる藻類は、海中で自然に分解するときには硫黄臭のあるジメチルスルフィドを発生する。海鳥はジメチルスルフィドの硫黄臭を頼りにオキアミのいる餌場に行く。海に浮かぶマイクロプラスチックは藻類が繁殖する絶好の足場になる。その結果、海鳥が有害物質を高濃度に濃縮したマイクロプラスチックを

オキアミと間違えて誤食し、固体数の減少が始まる。魚も同様に誤食する可能性が高い。

- ③ 海鳥や魚類の個体数の減少による海の生物多様性が損なわれることに加え、食物連鎖を通じて人間の体内にもマイクロプラスチックに濃縮された有害物質を取り込むことになる（兼廣 2017）。魚を多く食べる日本人も関心を持つべき問題である。

プラスチックは自然環境中で分解されにくいいため、廃棄処理問題や生態系への影響などが懸念されている。プラスチック廃棄物による環境汚染は陸上だけでなく海洋でも多く起こっていて、海洋に流出したプラスチックごみ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むことによる生物被害例が報告されている（清野 2012）。海に流れ出たプラスチックや漁網、ロープなどは海流に運ばれ、はるか遠くの外国の海岸にまで流れ着く。特に、刺し網やカゴ漁具などの漁業系廃棄物は流出後、海中や海底に沈み、漁業資源を獲り続ける、いわゆるゴーストフィッシング（幽霊漁業：流出により人の管理を離れてしまった漁網などが海中や海底で漁業資源を獲り続けること）問題を引き起こしており、その対策が緊急課題となっている。こうしたプラスチックや漁業系廃棄物による海洋汚染は沿岸域の海底だけでなく深海にまで及んでおり、地球の海全体に広がっている（兼廣 2017）。

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年々増えていて、これらのプラスチックを餌と間違えて飲み込んで、毎年 100 万羽以上の海鳥と 10 万頭以上の海洋哺乳類が死んでいると報告されている。近年、海洋に流出したマイクロプラスチックを動物プランクトンや小魚や海鳥が餌と間違えて飲み込んでいる事例が数多く報告されるようになった。欧州では北海の養殖場のムール貝やフランス産のカキの身から微小プラスチックが見つかっている。日本でも、東京湾で釣ったカタクチイワシ 64 匹中 49 匹からマイクロプラスチックが検出されるなど（高田 2017；兼廣 2017）、マイクロプラスチックを飲み込むことによる生物への影響が懸念されている。海洋プラスチックごみは、海洋に流出した時点で哺乳類や大型魚類が摂食し、紫外線や波力などで細片化しマイクロプラスチックになると小型魚類が摂食し、さらに紫外線や波力で微細化して微細マイクロプラスチックになると低次栄養段階生物による取り込みが行われるなど海洋生物全体の生態系に影響して生物多様性を損なう可能性が高い。

マイクロプラスチックは疎水性で、海水に微量溶存する有害化学物質（殺虫剤や難燃剤など）を吸着する性質を持っている。動物プランクトンや小魚がマイクロプラスチックを飲み込むことでこうした有害な化学物質を体内に取り込む可能性があり、食物連鎖によって人にも影響を与える可能性がある。実際に、世界各地の海域や海岸から採集されたマイクロプラスチックからポリ塩化ビフェニル（PCB:コンデンサー等の絶縁油）やポリ臭化ジフェニルエーテル（PBDE:プ

プラスチック難燃剤に使用)などの有機汚染化学物質(POPs)が検出されており、これらの汚染化学物質が環境中(海水)から吸着したものであると推測されている(兼廣 2017)。マイクロプラスチックから検出されたPCBやPBDEなどの濃度は海水に含まれている濃度の数万倍~百万倍も高い濃度のもも見られ、プラスチックに吸着することで高濃度に濃縮されることがわかってきた。近年、世界各地でマイクロプラスチックを飲み込んだ動物プランクトンや小魚の事例が多く報告されており、飲み込んだマイクロプラスチックを通してのPOPsの生物への化学毒性の影響が懸念されている。

高濃度に投与した室内実験の結果ではあるが、プラスチックに吸着した化学物質により、プラスチックを摂食した生物(メダカ、ゴカイ)の肝機能の障害が観測されている。

オーストラリア東部のアカアシミズナギドリ(*Puffinus carneipes*)の幼鳥の胸部羽毛および胃内容物からプラスチックが採取されており、プラスチックを高レベルで摂取した幼鳥ほど衰弱の程度が高いことが分かり、オーストラリアの海洋環境の悪化を示唆している。これらの知見は、この種が継続して個体数を減らしている原因を説明するのに役立ち、海洋のプラスチックの汚染レベルが憂慮すべき状態にあることを示している(Tanaka et al. 2013)。

マイクロプラスチックに吸着したPOPs化合物が生物(プランクトンや魚、鳥など)に与える毒性等の影響についてはまだ不明な部分が多いが、ここ数年の研究でプラスチックに含まれる化学物質が生物組織に移行することまではわかってきた。そのような現象がどれくらいの規模で広がっているはわかっていない。他の鳥では?他の海域では?魚類や哺乳類では?これらの疑問は今後の研究による。

魚類・哺乳類・海鳥について起こっていることだが、海洋プラスチックごみが増えれば人間でも起こるかもしれない。「炭鉱のカナリア」と考えて予防原則的な対応が必要である。

IV. マイクロプラスチックの生成防止策

一次マイクロプラスチック対策と二次マイクロプラスチック対策に分けて考える。

一次マイクロプラスチックは元々が微細な粒子であるため、海洋に流出した後で回収することは不可能である。このため、徹底した発生抑制が必要である(兼廣 2016)。一次マイクロプラスチックの中で化粧品などに意識的に混合されるマイクロビーズについては、使用禁止等の規制が進んでいる(鈴木 2016)。EUでは2014年12月にEU環境理事会の会合で、化粧品や洗剤へのマイクロプラスチックの使用禁止を求める共同声明を提出し(Council of the European

Union 2014) , 米国連邦議会は 2015 年 12 月に「マイクロビーズ除去海域法」を可決した (US Congress 2015)。しかし、他の一次マイクロプラスチックについては、実態把握も不十分であり、対策はほとんど手が付けられていない。最近になって、ベルリン工科大学が「環境におけるタイヤ摩耗粉塵」と題する研究プロジェクトでコーディネーターを務め、道路排水中のタイヤの摩耗から発生する一次マイクロプラスチック量を把握する研究に取り組み始めた。ドイツだけでその量は年間 6 万トンから 10 万トンと推定されており、雨水とともに下水に流れ込み、最終的に海洋に達しているとみられるが、その実態は不明なままである (BMBF 2017)。

二次マイクロプラスチックについては様々な対策が考えられる。

もっとも基本的な対策はすべての国民がプラスチックの廃棄を適切に行うことである。これには、安易にプラスチックを廃棄する不適切な行動を規制したり、適切なごみ収集システムを構築して機能させたり、ごみ埋立地を適切に管理することなどが含まれる。G7 伊勢志摩サミットに先駆けて 2016 年 5 月に富山市で開催された G7 環境大臣会合では、①環境面で健全な廃棄物管理等のための資金調達のための推進、並びにベスト・プラクティスの共有、②海洋ごみの削減、特にプラスチックごみ回収・処理活動、③適切な機関との協働による国際連携、④個人の行動変容をもたらす啓発活動及び教育活動、⑤モニタリング手法の標準化及び調和に向けた取組の 5 つの優先的な施策が合意されたが (環境省 2016) , 実際に効果を挙げることは困難な状況である (鈴木 2016)。

通常のプラスチックが環境中で分解するのに 400 年も要することから、もっと環境中で分解しやすいバイオプラスチックへ転換を促進するという考えられる。海洋中に流出する前に分解させたり、海洋中でも速やかに分解させるという考えである。しかしながら、使用中の物性低下が顕著等の理由で、全プラスチックのたった 1%にとどまっている (Nandan 2017)。

最近では、使い捨てプラスチックの製造を禁止する法案が提出され実行に移されようとしている。2014 年 8 月には米カリフォルニア州でレジ袋を禁止する法案が成立し、2014 年 11 月には EU が加盟国へレジ袋削減案策定を義務づけ、2025 年までにレジ袋の消費を 1 人 1 年 40 枚まで削減するとの目標を設定した。米国や EU 以外にも世界各国でレジ袋の規制が始まっている。フランス・イタリア・エリトリア・ルワンダ・ブータン・バングラディッシュ・カメルーンなどの国々は使用禁止を目指し、スウェーデン・フィンランド・オランダ・ドイツ・オーストラリア・スペイン・ボツワナ・南アフリカ・韓国などの国々は有料化を目指し、デンマーク・ベルギー・ルクセンブルク・アイスランド・アイルランド・ケニアなどの国々は課税することで規制しようとしている (高田 2017)。

飲料水などで多量に消費されるペットボトルでも規制の動きがあり、2014年3月には米サンフランシスコ市でペットボトルでの飲料水の販売が禁止され、2016年9月にはフランスで「プラスチック製使い捨て容器や食器を禁止する法律」が成立して2020年からの施行を目指している（高田 2017：Mosbergen 2016）。

プラスチックごみを減らすためにはプラスチックを削減すること（Reduce）、元の製品に再利用すること（Reuse）、収集・分別して他の製品にリサイクルすること（Recycle）が重要で、それぞれの頭文字を取って3Rと言われる。3Rで処理できなかったプラスチックごみはプラゴミ発電用の燃料に使用する。3Rにも優先順位があり、Reduce、Reuse、Recycleの順である。

プラスチックを削減するためには、レジ袋などの短期用途を減らして建材・パイプなどの長期用途にシフトすることが重要である。しかし、図3で示されるように、代表的な汎用樹脂であるポリエチレンやポリプロピレンはフィルム・シート用途が多く、そのうち約半分が使い捨て用途である（五十嵐 2012）。建材やパイプ用途などの長期用途が増えない理由として、プラスチック製品の劣化の程度をフィールドで非破壊法により正しく評価する方法がないことにあると考え、劣化の開始や進行のメカニズム、材料破壊に至るメカニズムを化学的のみならず物理的にも解明する目的で「（高分子材料の）劣化を総合的に科学する」という名の研究プロジェクトを2016年に金沢大学を拠点として立ち上げた。プロジェクトの目標は、高分子材料の劣化メカニズムの解明、非破壊劣化診断法の開発、フィールドで使用可能なプロトタイプの新規劣化診断装置の完成と実証実験である。現在までに4大学、3公立研究所に加えていくつかの民間企業が主旨に賛同して参加している。プロジェクトに参加する機関が、それぞれ得意とする知見や知識をプラットフォーム上に持ち寄り議論するコンソーシアム型の研究・開発を進めることを目論んでいる（五十嵐ら 2016）。このプロジェクトはプラスチックを削減するだけでなく、元の製品に再利用することにも役立つ。

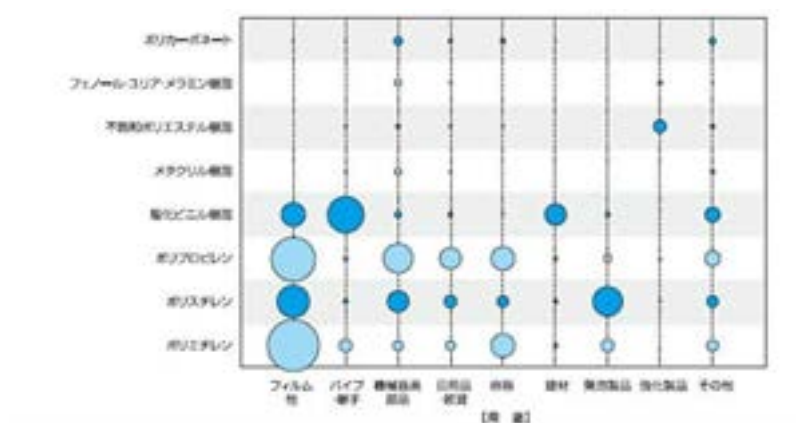


図3 主要樹脂の用途別使用量（2010年）（五十嵐 2012）

一般に、異なる種類のプラスチックを混合して成形すると製品の物性が大幅に低下する。従ってプラスチックをリサイクルする場合には同種類の製品を集めることと種類ごとに分別することが必須であり、エネルギーが必要でありコストもかかる。単一素材で複数素材を組み合わせた製品と同様な機能を持った製品を開発することでリサイクルしやすいプラスチック製品となる。

図4に示す現在のシャンプー容器は蓋と本体の素材が異なるため、リサイクルするために別々に集める必要があるが、蓋の部分と本体を同じポリプロピレン（PP）で成形できれば、分離・分別することなくリサイクルが可能になる。図5に示すように、剛性が求められる蓋の部分は通常のPPで射出成形し、柔軟性が求められる本体部分は軟質PPで成形することでリサイクル可能なシャンプー容器が開発される（Valente 2016）。

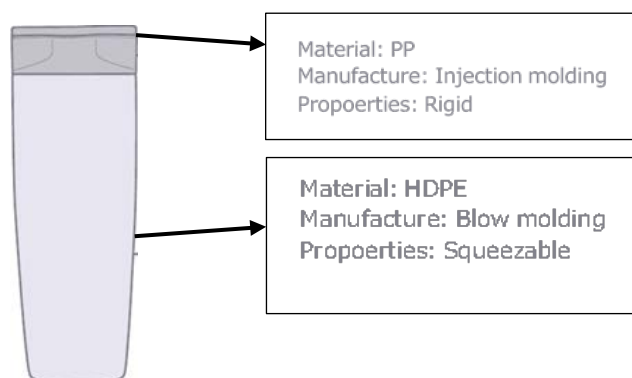


図4：現在のシャンプー容器（Valente 2016）

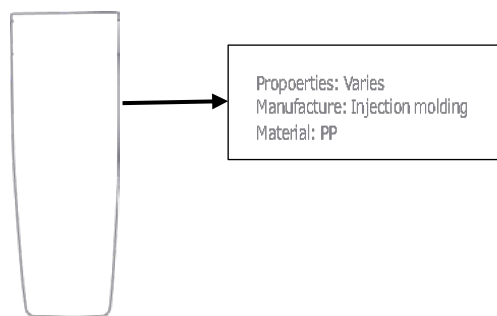


図5：未来のシャンプー容器（Valente 2016）

さらに一歩進めて、図6に示すウツボカズラ（食虫植物）の構造を参考に、図7に示す蓋のない構造にすれば100%リサイクル可能になる（Valente 2016）。意味のイノベーション、意味のデザインをさらに進め（安西洋之ら 2017：ベルガンティ 2017），このような製品が開発される時代が待ち望まれる。このような複雑な構造を持つ製品を通常のプラスチック成形法で成形することは困難であったが、層の上に材料を付着させて新しい層を形成することで物体を3次元形状の数値表現から作成するプロセスとして定義される3Dプリンティング技術や（五十嵐 2015：五十嵐 2016），それに時間変化を加えた4Dプリンティング技術であれば複雑な形状を有する成形体でも成形可能と思われる（五十嵐 2017）。



図6：ウツボカズラ（食虫植物）
（Valente 2016）

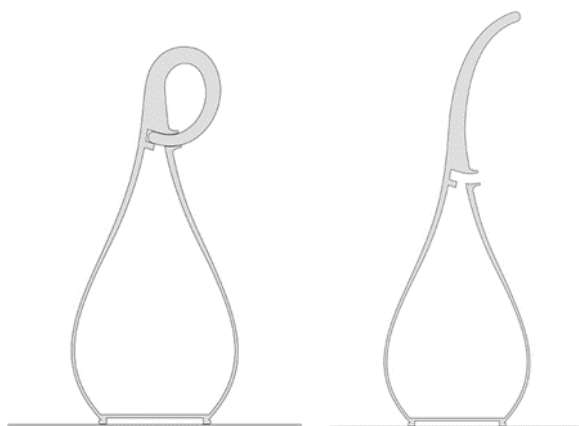


図7：未来のシャンプー容器（蓋のない構造）
（Valente 2016）

プラスチックのリサイクルを困難にしている要因として下記の点が指摘される。

- ① プラスチックに使用する樹脂の種類が非常に増えた。2000種とも言われる。
- ② 添加剤の種類も増え、樹脂と添加剤の組み合わせで、プラスチックの種類は天文学的

な数まで達した。

③ プラスチックを何層も積層させた製品が開発され上市された。

④ 樹脂/添加剤に繊維状や粒状のフィラーを配合した製品が開発され上市された。

これらは顧客や市場の要求に合わせて高機能化を図った結果であり、単純な構造が最良な構造である (Simple is best.) という大原則から逸脱している。

図8に示す食品保存用の多層容器を例に取り上げる。

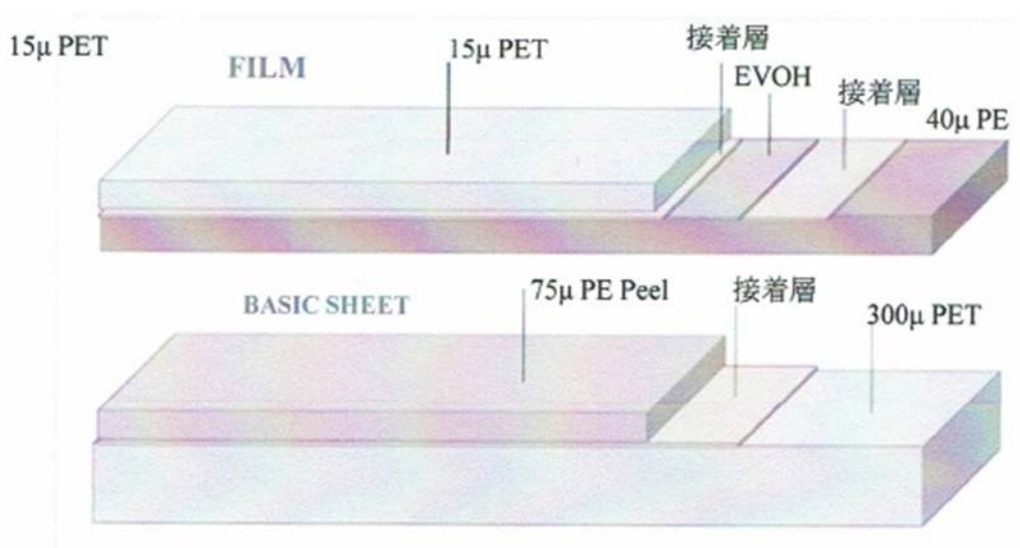


図8：食品の長期保存が可能な多層トレーの例 (Kosior 2016 の図を参考に作成)

私も酸素による食品の腐敗を防ぐことで食品の長期保存が可能になれば、流通段階での食品ロス率が低下し、食糧自給率向上に貢献するはずだと信じて酸素不透過性フィルムを懸命に開発した。しかし、思惑と相違し、食品の長期保存が可能になるとかえって食品ロスが増えるという矛盾した結果を知り愕然たる思いである。米国での調査結果であるが、農場から消費者まで10日かかる場合には食品ロス率が40%にあるのに対し、農場から消費者まで2日の場合には食品ロス率が5%に低下する (Clear 2017)。技術の粋を集めた多層フィルムはリサイクルを困難にするだけでなく食品ロス率も大幅に上げる。

再利用することもリサイクルすることもできずに海洋に流出したプラスチックごみが細片化してマイクロプラスチックになり、微細化して微細マイクロプラスチックになるのを防ぐ方法はあるのだろうか。私たちが金沢大学で進めている「劣化を総合的に科学する」プロジェクトでは、プラスチックごみが海洋中や岸辺で細片化するメカニズムを解明し、細片化を防止する手法を開発することも目標の一つに挙げている。生分解性のあるバイオプラスチックとは真逆の対

策である。海洋中ではプラスチックごみが均一に分布しているわけではなく、北太平洋渦流、北大西洋渦流、南太平洋渦流、南大西洋渦流、インド洋渦流の5カ所に高濃度で集中している（5Gyres と呼ばれる）（高田 2017）。細片化されたり微細化されたら集めるのは困難であるが、元の形状を保っておれば、容易に集める技術も開発することが可能だという考えに立っている。

V. おわりに

私たちは様々な事柄について、「思い込み」の呪縛に囚われている。海洋プラスチックごみ問題についても、「思い込み」の事例がいくつか指摘される。

「プラスチック製品のリサイクルが進めば、ごみ問題は解決する」という「思い込み」。プラスチック製品は市場（顧客）の要求に合わせて高機能化・高性能化を進めており、それがプラスチック産業を活性化させる基本と考えて原料の樹脂や添加剤の種類を増やしてきた結果、それらを組み合わせることで無数の配合（レシピ）が生じ無数の製品が生まれた。プラスチックの製造では、種類の異なるプラスチックを熱融着や接着剤を使用して積層した多層フィルムを開発・上市し、様々な繊維を配合して配向させた CFRP（Carbon Fiber Reinforced Plastic）や GFRP（Glass Fiber Reinforced Plastic）を開発・上市した。これらはいずれもプラスチック製品のリサイクルを極めて困難にし、分離・分別に膨大なエネルギーを必要とする。リサイクルの難易を考慮しないで製品開発を行ってきた結果である。

「酸素を通しにくい多層フィルムを開発して食品の長期保存が可能になれば、食品ロスが減るはずだ」という「思い込み」で製品開発を行ってきた。しかし最近の米国で行われた調査では、食品の長期保存を可能にしたハイバリアーフィルムが食品の流通時間の長期化や流通経路の複雑化を可能にし、結果として農場や流通段階での食品ロスを増やしている。なんという皮肉だろう。

最近、自動車の軽量化のために外装材として CFRP を用いるための研究開発が活発に行われ、学会でも主要なテーマとして頻繁に取り上げられている。これも、「自動車の外装材は鉄に近い比剛性を持つ必要がある」という「思い込み」である。1908年にヘンリー・フォードが T 型フォードを発売した時に、多種類のプラスチックが存在していたなら、彼は軽量化や成形の容易さ、デザインや着色の容易さから鉄ではなくプラスチックを採用していたかもしれない。そうであれば、自動車は現在の仕様とは全く違っており、超硬質から超軟質まで可能なプラスチック材料の持つ幅広い特性を生かして、軟質素材を外装材に持つ自動車が主流になっていたかもしれな

い。自動車に絡む死傷者数は大幅に減少し、テロに利用されるおそれもなかったであろう。

これらはプラスチック材料に関する「思い込み」のワナであるが、私たちの生き方に対しても「思い込み」のワナがある。有り余るモノに囲まれていることが幸せだとか、使いもしないカネを持っていることが幸せだと思ひ込み、そのためには常に成長することが必要だと錯覚していないだろうか。有り余るモノを持ち、有り余るカネを持った人もいずれは亡くなる。すると残された遺族は有り余るモノを処分するのにエネルギーとコストと労力が必要だし、有り余るカネが残されると遺族の間で醜い争いが起こり兄弟間で憎しみ合うという悲劇が生まれる。

エンドレスな成長（対前年比〇%増という加速度的な成長）は化石燃料資源や化石水資源などの有限な資源の枯渇をもたらし、人類社会を悲劇へと導く。私たちは成長すれば幸せになるという「思い込みのワナ」を払拭しなければならない。

参考文献

- BMBF (Bundesministeriums für Bildung und Forschung) (2017) *Dem Plastik auf der Spur*, 19 October 2017.
- Clear, S. (2017), “Unexpected innovation through design leadership,” *Plasticity Anaheim*, 9 May 2017.
- Ellen Macarthur Foundation (2016), *Home Page*, <http://www.elenmacarthurfoundation.org>.
- Eunomia (2016), *Home Page*, <http://www.eunomia.co.uk/reports-tools/plastics-in-the-marine-environment/>.
- Harris, L. (2007), “National Survey Reveals Biodiversity Crisis - Scientific Experts Believe We Are in Midst of Fastest Mass Extinction in Earth’s History,” *The American Museum of Natural History*.
- Isobe Akihiko et al. (2015), “East Asian seas: A hot spot of pelagic microplastics,” *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 101, Issue 2, p. 618.
- Jambeck, R. J et al. (2015), “Plastic waste inputs from land into the ocean,” *Science*, Vol. 347, Issue 6223, p. 768.
- Kosior, E. (2016), “Creating a Circular Destiny for Plastics with Whole Cycle Product Thinking,” *Plasticity London*, 21 September 2016.
- Mackerron, C. (2017), “Challenges, Risks and Opportunities in Transition to Recyclable Multi-material Packaging,” *Plasticity Anaheim*, 9 May 2017.
- McCombs, R, M. Biddle (2016), “A Big Conversation Suggests Big Questions and Big Answers,” *Plasticity London*, 21 September 2016.

- Mosbergen, D. (2016), *The Huffington Post*, 20 September 2016.
- Nandan, U. (2017), *Plasticity Anaheim*, 9 May 2017.
- Sebille, van Erik et al. (2015), “A global inventory of small floating plastic debris,” *Environmental Research Letters*, Vol.10, No.12, 8 Dec 2015, p. 7.
- Tanaka, K., H. Takada, R. Yamashita, K. Mizukawa, M. Furukawa and Y. Watanuki (2013), “Accumulation of plastic-derived chemicals in tissues of seabirds ingesting marine plastics”, *Marine Pollution Bulletin*, 69(1-2), p.219.
- UNEP (2016), “Marine plastic debris and microplastics: Global lessons and research to inspire action and guide policy change,” Nairobi: United Nations Environment Programm.
<http://www.unep.org/about/sgb/Portals/50153/UNEA/Marine%20Plastic%20Debris%20and%20Microplastic%20Technical%20Report%20Advance%20Copy.pdf>.
- US Congress (2015), “Microbead-Free Waters Act of 2015,” Pub. L. 114-114, 28 December 2015, 129 STAT. 3129.
- Valente, M. (2016), “Designing the shampoo bottle of the future,” *Plasticity London*, 21 September 2016.
- Vandenbroucke, T. et al. (2015), *Nature Communications* 6, Article Number 7966.
- World Economic Forum (2016), “The New Plastics Economy: Rethinking the future of plastics,” January 2016, p. 7. http://www3.weforum.org/docs/WEF_The_New_Plastics_Economy.pdf.
- Yamashita, R., H. Takada, M. Furukawa and Y. Watanuki (2011), “Physical and chemical effects of ingested plastic debris on short-tailed shearwaters, *Puffinus tenuirostris*, in the North Pacific Ocean”, *Marine Pollution Bulletin*, 62(12), p. 2845.
- 安西洋之・八重樫文(2017), 「デザインの次に来るもの」(株)クロスメディア・パブリッシング.
- 五十嵐敏郎(2012), 「回転成形による新規な PE 製品の提案—社会科学的な見地から出発して」『次世代ポリオレフィン総合研究』, Vol.6, p. 120.
- 五十嵐敏郎(2015), 「3D プリンティングはプラスチック産業の救世主になるか?」『日本デザイン学会誌』, 22(4), p. 24.
- 五十嵐敏郎(2016), 「研究総覧：アディティブ・マニファクチャリング」『成形加工』, 28(7), p.288.
- 五十嵐敏郎(2017), 「研究総覧：アディティブ・マニファクチャリング」『成形加工』, 29(7), p.254.
- 五十嵐敏郎・比江嶋祐介・畝山多加志・木田拓充・新田晃平・米澤豊・廣澤寛(2016), 「ポリエチ

- レンの劣化機構と非破壊劣化診断法の開発」, 『次世代ポリオレフィン総合研究』, Vol. 10, p. 95.
- 五十嵐敏郎・比江嶋祐介・木田拓充・新田晃平(2017), 「ポリエチレンの劣化機構の評価」, 『次世代ポリオレフィン総合研究』, Vol. 11, p. 44.
- 兼廣春之 (2016), 「プラスチックによる海洋汚染—マイクロプラスチック問題—」 『化学物質と環境』, No. 137, 2016.5, p. 8.
- 兼廣春之 (2017), 「海洋ごみと生分解性プラスチック」 『JBPA 講演資料』, 2017年3月9日.
- 清野聡子(2012), 「海の漂流・漂着ゴミの生態系や地域社会への影響」 『科学』, 82 巻 4 号, p.433.
- 鈴木良典(2016), 「海洋ゴミをめぐる動向」 『国立国会図書館 調査と情報』, No. 927.
- 高田秀重(2017), 「マイクロプラスチックって何だ」 『海洋プラスチックごみシンポジウム資料』, 2017年8月26日.
- 松田治 (2015), 「沿岸環境の再生と機能回復 (第 63 回) 海ごみ問題はその後どうなっているのか?—漂着・漂流・海底ごみの現状と新たな課題—」 『アクアネット』 18 巻 9 号.
- ベルガンティ, ロベルト(2017), 『突破するデザイン』 日経 BP 社.

(2017年12月18日受理、2018年1月29日採択)