

海洋アライアンスシンポジウム

第15回 東京大学の海研究
「海洋プラスチック研究のゆくえ」



要旨集

2020.10.15(木)13:00-16:50

オンライン開催

ご挨拶

海洋環境の保全、海洋鉱物生物エネルギー資源の持続的利用、海上交通の安全、海洋権益の確保などの観点から海洋を取り巻く状況は年々変化しています。また、研究活動であっても排他的経済水域 (EEZ) 内での調査には厳しい制限が設けられ、さらには国家管轄権外区域の海洋生物多様性 (BBNJ) に注目が集まるなど、様々な角度から海洋学のあり方を考えるべき時代となってきています。つまり、ステークホルダーの顕在化が特徴になってきており、益々、海を取り巻く問題は多様化かつ複雑化し、自然科学と国際海洋法や海洋政策などの社会科学を融合させた教育や研究が求められ、学内でも海洋に係わる部局を横断した協力関係がさらに必要になってきています。一方で、ステークホルダーとして積極的に関与したくないものの、あまりに深刻な事態に直面し、海洋に関わる人々だけでなく広く一般社会が問題解決に向けて努力しなければならない海ゴミ・海洋プラスチック問題が顕在化してきました。これは、国連が主導し我が国が目指す「SDGs実施指針」の8分野の1つである「生物多様性、森林、海洋等の環境保全」とも関連して大きな社会問題となってきています。

そこで、本年度の海洋アライアンスの第15回「東京大学の海研究」シンポジウムは、「海洋プラスチック研究のゆくえ」と題して実施することになりました。この研究は、東京大学FSI-日本財団プロジェクトとして日本財団からの助成を受けて実施されているものであり、同様に助成を受けている海洋学際教育プログラムの中の学生教育の一環としても実施されています。さらに、今回は国連工業開発機関 (UNIDO) とも連携した展開についても発表があります。

本シンポジウムは、2007年7月に、7つの研究科、5つの研究所、1つの研究センターを中心として発足した海洋アライアンスが実施するものですが、海洋アライアンスは、2020年4月に東京大学海洋アライアンス連携研究機構として改組を行い、より自発的で柔軟な体制での機動的な社会連携を目指すことになりました。具体的には先に示したSDGsを念頭に、海に関わる現代的課題の発掘とその解決のために必要な基礎科学・応用科学の探究を行う一方、学際的な海洋問題に即応可能とする高度海洋人材の育成に取り組んでいます。今回のシンポジウムは海洋アライアンス連携研究機構の新たな展開の第一歩となる記念すべきシンポジウムであり、人為的海洋環境改変と関連したこれからの海洋研究・教育に資するシンポジウムとなることを期待しています。



海洋アライアンス連携研究機構 機構長
東京大学教授 新領域創成科学研究科 / 大気海洋研究所

木村伸吾

SHINGO KIMURA

海洋アライアンスシンポジウム

第15回 東京大学の海研究 「海洋プラスチック研究のゆくえ」

PROGRAM

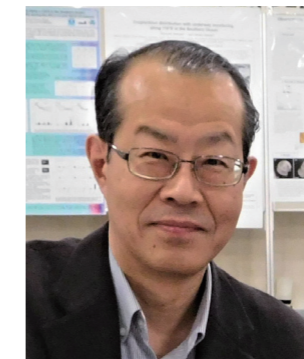
13:00-13:05	開会挨拶・趣旨説明 木村伸吾（海洋アライアンス連携研究機構 機構長 東京大学教授 新領域創成科学研究科/ 大気海洋研究所）	
13:05-13:10	東京大学 FSI-日本財団プロジェクトの 概要 道田豊（海洋アライアンス連携研究機構 副機構長 東京大学教授 大気海洋研究所）	1
13:10-13:35	海洋マイクロプラスチックの実態解明 津田敦（東京大学教授 大気海洋研究所）	4
13:35-14:00	保管サンプル再解析による時空間分布変動の把握 高橋一生（東京大学教授 農学生命科学研究科）	8
14:00-14:25	マイクロプラスチックの生体影響 酒井康行（東京大学教授 工学系研究科）	12
14:25-14:50	海洋プラスチックごみの削減方策に関する研究 高村ゆかり（東京大学教授 未来ビジョン研究センター）	16
15:00-15:25	生分解性プラスチックの動向 岩田忠久（東京大学教授 農学生命科学研究科）	20
15:25-15:45	UNIDO との共同プロジェクトの現状 山本光夫（東京大学准教授 農学生命科学研究科）	25
15:45-16:05	海洋学際教育プログラムの成果報告 保坂直紀（東京大学特任教授 新領域創成科学研究科/大気海洋研究所）・学生	29
16:05-16:45	研究の方向性に関する議論 モデレータ 保坂直紀（東京大学特任教授 新領域創成科学研究科/大気海洋研究所）	
16:45-16:50	閉会挨拶 八木信行（海洋アライアンス連携研究機構 副機構長 東京大学教授 農学生命科学研究科）	

ご挨拶

2015年のG7ドイツ・エルマウサミットにおいて、進行する海洋プラスチック汚染の問題が取り上げられ、国際社会の重要課題として認識されるようになりました。ある見積もりによれば、このまま海洋に流出するプラスチックごみが増え続ければ、2050年くらいには海に生息する魚の総重量を超えるとも言われ、対策が急務になっています。2019年の大阪G20サミットにおいて、「大阪ブルーオーシャンビジョン」が参加国間で共有され、2030年までに海洋プラスチックの追加的汚染をゼロにすることが合意されました。2020年7月からは「レジ袋有料化」も始まるなど、海洋プラスチックごみ削減に向けた取り組みが本格化しています。

東京大学では、2019年から日本財団との協力により、海洋プラスチックごみの削減に向けて学術面から貢献する研究プロジェクトを開始しました。ここでは、実態について未解明の部分が多いマイクロプラスチック、中でも1mm以下の大きさのものを主たるターゲットとした研究や、海洋プラスチックごみの効果的な削減方策などに関する研究を展開しています。海洋プラスチック汚染の対策は、幅広い学問分野の知見を必要とします。この研究プロジェクトには、学内外の多くの研究組織が参画し、学際的研究を進めています。

本シンポジウムは、東京大学海洋アライアンスが毎年開催している「東京大学の海研究」シンポジウムとして企画されました。上記プロジェクトを中心とし、それ以外の研究を含め、これまでの研究成果や進捗状況について参加者の皆様と共有し、研究の展開に関する今後の方向性や、より効果的な海洋プラスチックごみ削減方策について考えてみたいと思います。



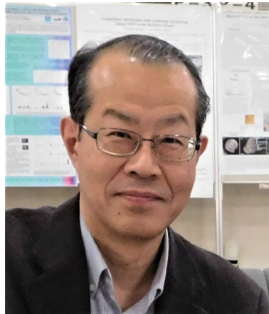
海洋アライアンス連携研究機構 副機構長
東京大学教授 大気海洋研究所

YUTAKA MICHIDA

東京大学 FSI-日本財団プロジェクトの概要

道田豊

(海洋アライアンス連携研究機構 副機構長 東京大学教授 大気海洋研究所)



東京大学大気海洋研究所附属国際連携研究センター長・教授
 海洋アライアンス副機構長
 専門は、海洋物理学、海洋情報、海洋政策。博士(理学)
 84年海上保安庁水路部, 00年東京大学海洋研究所助教授
 07年同教授
 11~15年ユネスコ政府間海洋学委員会(IOC)副議長
 15年第8回海洋立国推進功労者表彰
 海洋調査技術学会会長, 漂着物学会副会長
 1958年広島市生れ

YUTAKA MICHIDA

海洋プラスチックに関する研究は古く1970年代から行われていますが、特にこの10年は盛んに行われるようになり、とりわけ2015年以降は、同年のドイツ・エルマウサミットにおける議論を契機として、国際的な海洋研究コミュニティにおいてキーワードの一つになっています。

東京大学においても、従来から関係の研究者がそれぞれ科研費等による研究を進めてきていますが、2019年度からは日本財団から研究費を受け、同財団との協力のもとで海洋プラスチックに関する研究に3か年計画で取り組むことになりました。これが、「東京大学FSI-日本財団海洋プラスチックごみ問題に対する科学的知見充実化プロジェクト」です。

この研究プロジェクトは次の3つのテーマで構成されています。また、直接的研究活動に加えて、国内外の関係者との連携を強化するためのネットワーク作りも目指しています。(図1)

- ①「海洋マイクロプラスチックに関する実態把握」
- ②「マイクロプラスチックの生体影響評価」
- ③「プラスチックごみ発生フローの解明と削減・管理方策の検討」

このうち、①と②は、海洋マイクロプラスチック、なかでも実態の解明が進んでいない1mm以下のプラスチックを主たる研究対象として、自然科学の立場からその実態解明と生体影響に関する研究を進めています。海洋中のマイクロプラスチックについては未解明の部分が非常に大きく、その実態や生体影響についての研究は、最終成果に至るまでには少々長期的視点も必要と思われます。ただ、昨今の国内外の情勢を考えると、マイクロプラスチック発生のもとにもなるプラスチックも含め全体としての削減方策を検討する必要があると考えています。そのため、社会科学的視点も含めて③の研究を並行して推進するという研究体制をとっています。

3つのいずれの研究にも大気海洋研究所の研究者が参画しているほか、①には生産技術研究所、農学生命科学研究科から、②には工学系研究科、薬学系研究科、および東京農工大学からも加わっています。③については、公共政策大学院、未来ビジョン研究センター、農学生命科学研究科、さらには京都大学の参画も得て進めています。

日本財団FSI基金*による海洋ごみ対策プロジェクト 2019-2021

Act I. 海洋プラスチックごみ問題に関する研究
 日本財団との協力のもと、海洋プラスチックごみ問題対応の基盤となる科学的知見を充実させ、信頼できる科学的根拠に基づき正しく問題を伝える。このため、東京大学を中核とし、他大学・研究機関と連携することにより以下の取り組みを推進する。

- ・テーマ1 海洋マイクロプラスチックに関する実態把握
- ・テーマ2 マイクロプラスチックの生体影響評価
- ・テーマ3 プラスチックごみ発生フローの解明と削減・管理方策の検討

Act II. 海洋プラスチックごみ問題の対策
 日本財団と東京大学の共催により、幅広い学術領域の国内外の専門家やステークホルダーと、海洋プラスチックごみ問題に関する意見交換、情報発信、削減・管理方策の提案等を行う。

1. 海洋プラスチックごみ問題の対策・研究プラットフォーム構築
2. 国際的ラウンドテーブルの設置
3. プラスチックごみの削減・管理方策の提案

*未来社会協創基金FUTURE SOCIETY INITIATIVE FUND

図1:プロジェクトの全体構成

以下、各研究テーマについてそれぞれ概要を紹介します。

①テーマ1「マイクロプラスチックの実態把握」(図2)

このテーマは、4つのサブテーマ、「OMNIコンセプトによるモニタリングバイ設計」「マイクロプラスチック鉛直分布の粒子径依存性」「海洋表層と海底泥におけるプラスチック粒子サイズ分布把握」および「日本周辺海域70年間の海洋プラスチックごみ時系列変化」で構成されています。

OMNI(Ocean Monitoring Network Initiative)コンセプトによるモニタリングバイ設計では、市民参加型のマイクロプラスチック観測を目指しています。非専門家にも扱いやすい観測機器を作成して市民参加型の観測を展開することにより、一般の方々に海洋プラスチックごみの問題を自らの課題と捉えてもらうことにもつながると期待しています。続く二つのサブテーマでは、海水中に流れ出たプラスチックがどのように微小化し、それが最終的にどこに行っているのか、まずは鉛直分布に関する観測事実をもとに、力学的モデルも用いて推定しようとしています。海洋中に出たプラスチックは、物理的・化学的・生物的要因によって微小化の過程をたどるものと思われる。この過程は不可逆的、すなわち一方的に微小化していくものと考えるのが妥当ですが、詳細はよくわからないままです。すでに先行研究でも一部示されているように、プラスチック粒子の海水中での物理的振舞いはその密度(比重)によって異なると考えられることから、海洋表層における混合の影響や、沈降・浮遊・浮上過程が材質別にどのような実態となっているか、解明が期待されます。四つ目のサブテーマでは、過去70年間にわたる日本近海の海洋生物(プランクトン)サンプルが水産関係研究機関に保管されていることに着目し、このサンプルの試供を受けて、マイクロプラスチックという観点から分析直すこととしています。70年という時間スケールは、ちょうどプラスチックが使われ始めて爆発的に普及してきた年代と合致しており、分析の結果によっては、日本近海における海洋プラスチック汚染がいつごろから進んできたのか、時系列情報が得られるものと期待されます。

②テーマ2「マイクロプラスチックの生体影響評価」(図3、図4)

このテーマは2つのサブテーマ、「食物連鎖の中でのプラスチック関連物質の挙動と遺伝子応答」「マイクロプラスチックの細胞組織への導入機構と人体影響評価」で構成されています。

海洋プラスチックによる潜在的な生体への影響は広く懸念されており、このことが海洋プラスチックごみ問題に社会の注目が集まる一つの要因であると言ってよいと思われます。プラスチックには、生産過程で種々の化学物質が添加されていますし、プラスチックはその化学的特性により、いろいろな化学物質を吸着し、そのうち生体に有害なものがプラスチック粒子を通じて生物に取り込まれる恐れのあることが以前から指摘されています。そこで、一つ目のサブテーマでは、人為起源汚染物質のバックグラウンドレベルが高くない離島などの海岸を対象フィールドとし、その離

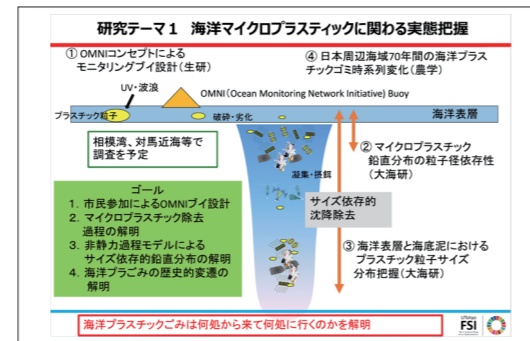


図2: テーマ1の概要

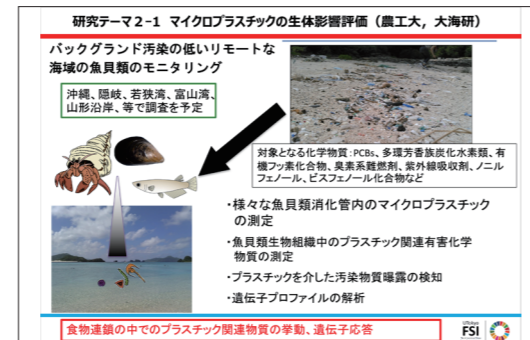


図3: テーマ2の概要「食物連鎖の中でのプラスチック関連物質の挙動と遺伝子応答」

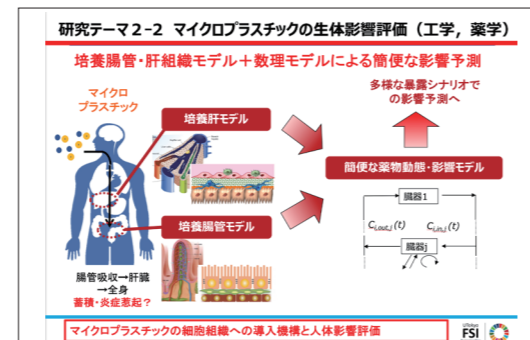


図4: テーマ2の概要「マイクロプラスチックの細胞組織への導入機構と人体影響評価」

島の中で海岸漂着プラスチックの多い場所と少ない場所で採集した生物を比較して、それら生物体に取り込まれている生体に影響がありうる化学物質の量に差異が見られるか検討を進めています。また、併せてプラスチック起源で生体に取り込まれた化学物質に対する遺伝子応答に関しても、イガイやジャワメダカなどの試験生物を用いて実験研究を進めています。

微小化した海洋プラスチック粒子を動物が食べた場合、ある程度の大きさを持つ粒子であれば消化管を通過し、比較的短時間のうちに体外に排出されると考えられるため、消化管にとどまっている時間スケールにおける影響を検討すればよいはずである一方、さらに微小化したものは腸管細胞を通じて体内に取り込まれる可能性もあります。そうしたことが起こるとすれば、より長期にわたる曝露による生体影響を考慮に入れる必要があるでしょうから、二つ目のサブテーマでは、培養した腸管細胞をごく微小なマイクロプラスチック粒子を含む水に曝露して、当該粒子の取り込みの有無やその程度を調べています。

③テーマ3「プラスチックごみ発生フローの解明と削減・管理方策の検討」

マイクロプラスチックの実態に関しては科学的に未解明の部分が多いと述べましたが、そのことを理由に、海洋プラスチックを取りまく現状を座視してよい状況ではないとも考えています。ただ、海洋に流出しているプラスチックの量は、生産されるプラスチックのほんの数%であるため、効果的な対策のためには、生産から使用後にごく一部が海に漏れ出す一連のプロセスについてマテリアルフローをより精緻化することが必要となります。さらにそれを踏まえて、効果的な対策のための制度面での検討や生活様式の変革を含むプラスチック利用に関する社会の合意形成などが不可欠でしょう。自然科学的研究だけでは、直接的にはこれらの課題解決は難しく、東京大学の社会科学系の研究者が中核となり、京都大学の研究者も加わって、こうした研究に取り組み、その成果をもとに、政策オプションの提示などにつなげることができればと考えています。

プラスチックごみは、一度海中に流出してしまうと、海岸に漂着するものや漁業活動に伴って回収されるものを除けば、現状では事実上回収不能です。そのため、使用済みのプラスチックを極力環境中に流出させない方策が必須となります。例えば、洪水など非常時に意図しないプラスチックごみの流出があり、それを100%防ぐことができないとすれば、使用するプラスチックの全量を減らす努力もまた必要ということになります。リサイクルの推進ももちろん重要な対策です。

考えられる一連の対策は、それらが「心ある人たち」だけの行動に留まっていたら目標の達成はおぼつかないと思います。大げさに言えば、これは一種の社会変革です。リサイクルの推進一つとっても、プラスチックを製造している側の人々も巻き込んだ対策にする必要がありますので、その実現に向けて隘路は何か、その解決策は何か、検討すべき課題は多岐にわたります。

(道田豊「海洋プラスチックの実態解明に関する研究」(港湾荷役, Vol. 65, 126-132, 2020)から一部抜粋して追記および再構成をしました。)

海洋マイクロプラスチックの実態解明

津田敦

(東京大学教授 大気海洋研究所)



1987年東京大学大学院農学研究科博士過程修了(農学博士)。東大海洋研究所助手、北海道区水産研究所室長を経て、2003年に海洋研究所助教授、2011年より教授。専門は生物海洋学、特に動物プランクトンの摂餌生態、生活史。趣味は海洋文学の読書。

ATSUSHI TSUDA

海洋プラスチックゴミの何が分かっていないか？何をやるべきか？

【はじめに】

プラスチックは、石油を原料とした合成樹脂であり、加工が容易で生物化学的に安定な素材として1960年代以降に日用品に多く使用されるようになった。難分解性であるため、廃棄されたプラスチックは、水系を通じて最終的には海洋に流入すると考えられる。プラスチックは水よりも比重の軽いものが多く、これらは平均的には数年間、海洋の表層を漂い、漂着したり何らかのプロセスで除去されていると考えられる。海洋プラスチックは現在、大きな環境問題の一つとして取り上げられるが、解決しておかねばならない問題が二つある。一つは、海洋におけるプラスチックごみの運命である。またもう一つは、我々人を含む生物への影響である。本講演では、海洋におけるプラスチックの運命に関する問題に我々がどう取り組むのかをご紹介します。

【海洋におけるマイクロプラスチック循環の作業仮説】

海洋には様々な粒子が懸濁しているが、そのほとんどは生物または生物起源の粒子である。細菌、植物プランクトン、動物プランクトン、魚、海獣類などが生物粒子であり、それらの死骸、糞、マリンスノーのような凝集体が生物起源粒子である。一般的に小型生物の方が成長速度が速く、摂餌や凝集によって粒子は大型化し、大型粒子の寿命は比較的長い。これら合成と分解のプロセスがバランスし、海洋粒子のサイズ組成は一定の比率に保たれている。さて、プラスチック粒子は、これらの循環やバランスに組み込まれているのだろうか？一般的に定量されているプラスチック粒子(5mm以上)が海洋表層において数年の滞留時間を持つことは、上述の循環にプラスチック粒子が組み込まれていないことを示唆する。しかし、もっと小型のプラスチック粒子はどうだろうか？例えば、植物プランクトンと同等の大きさ(およそ1-100 μ m)になったプラスチックはどうだろうか？この大きさの粒子を摂餌するのは、視覚を持たない小型の甲殻類や単細胞生物であり、魚類などに比べると誤食の確率は高くなる。また、凝集プロセスも、大型の浮力を持った粒子では凝集しても沈降には至らないが、小型の粒子であれば非選択的にかからめとり沈降除去すると予想される。すなわち大型粒子としてのプラスチックは、生物過程、物質循環過程に取り込まれず海を漂うが、紫外線や砕波によって小型化し、1-100 μ m程度になった途端、生物過程、物質循環過程に取り込まれ日の単位で海洋表面から除去される可能性がある(図1)。その最終的な行先は海底である。

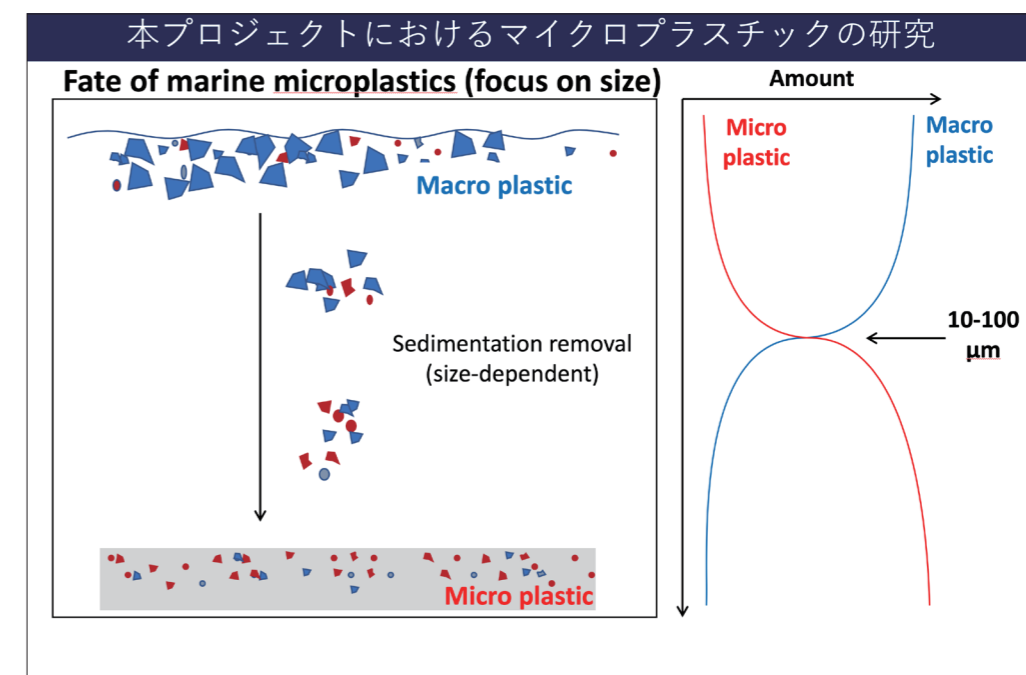


図1：海洋プラスチック粒子のサイズと水中、海底における分布に関する作業仮説

【測定にかかわる問題点】

以上のような仮説を検証するには、第一に植物プランクトンサイズになったプラスチック粒子がどこにどのくらいあるかを調べなくてはならない。現在顕微FTIRで検出できるプラスチック粒子は10 μm程度であるため、それ以下は現行法では難しいが、ミクロプランクトンと呼ばれるサイズレンジ(20-200 μm)は測定可能である。しかし、大きな障害となるのは夾雑物であって、これは生物起源粒子と鉱物粒子(コアサンプルの場合)がある。またマイクロプラスチック粒子は凝集や摂餌と言うプロセスを考えた場合、有機物が付着していると考えられる。このため、第一に有機物を分解除去し、比重による選別を行うのが常法であるが、キチンなど比較的難分解な有機物も多いため、この条件設定を決める必要がある。現在、沿岸域で採取した水試料、コア試料を対象として条件の絞り込みを行っている。

【実態把握班の活動】

実態把握班の活動は上記、微小サイズプラスチックの把握に加え、数値計算による微小プラスチックの分布(水平、鉛直)再現、黒潮域における過去70年間の海洋プラスチックの変遷解明、OMNIブイコンセプトによる海洋プラスチック観測の普及と啓発となっている(図2)。時間の許す限り、これら成果についても紹介したい。

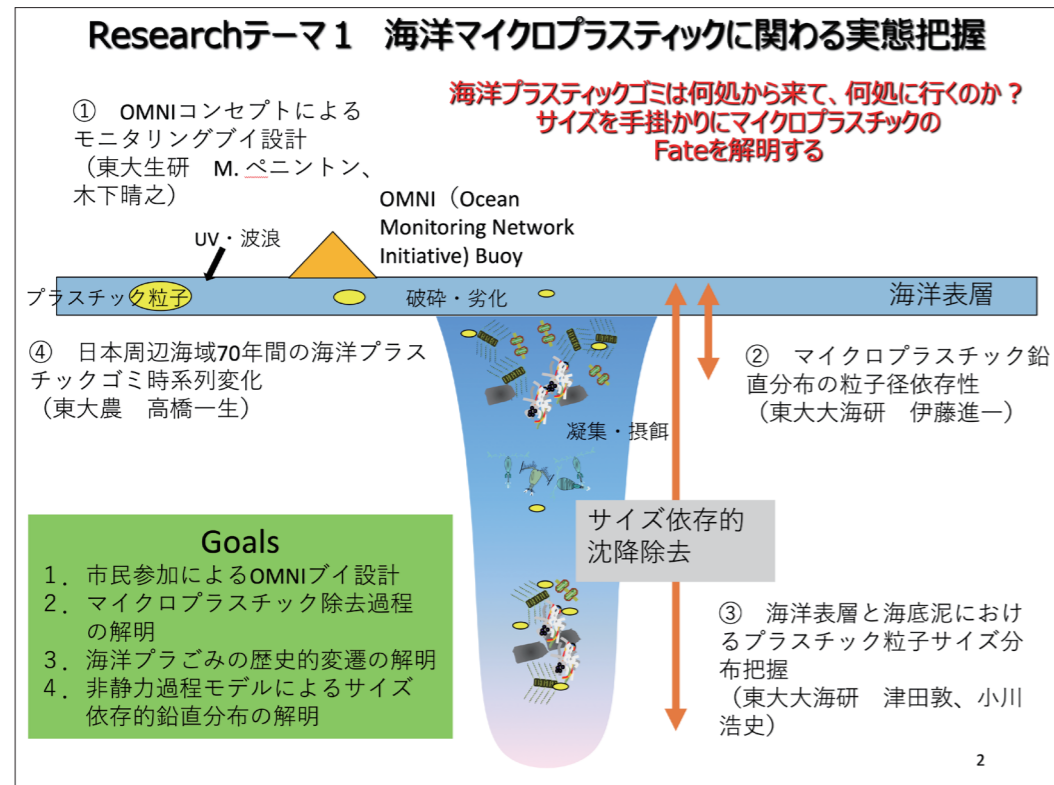


図2: 研究班「海洋マイクロプラスチックに関わる実態把握」の全体構成

保管サンプル再解析による時空間分布変動の把握

高橋一生

(東京大学教授 農学生命科学研究科)



1996年東京大学大学院農学生命科学研究科博士課程修了
 1996年 国立極地研究所研究員
 1997年 創価大学工学部助手
 2000年 水産庁東北水産研究所研究員
 2004-2005年 スウェーデン王立アカデミー・イエーテボリ大学クリス
 テンバーグ海洋研究所客員研究員
 2011年 東京大学大学院農学生命科学研究科水圏生物学専攻水圏
 生物環境学研究室准教授
 2019年 同教授、博士(農学)

KAZUTAKA TAKAHASHI

海洋でのプラスチックゴミ汚染が顕在化し問題となっている。海洋プラスチック汚染は当初、大型プラスチックゴミが海鳥や海棲は虫類、ほ乳類等への「絡まり」や「誤食」により、これらの生物の生残を脅かす点で注目された。さらに近年では摂食されたプラスチックを媒介として有害化学物質が食物連鎖を通じて濃縮され、生態系全体に影響を与えることが危惧されている。とくに大きさが5mm以下の「マイクロプラスチック」は、魚類を初めとする水産生物や動物プランクトンなどの餌料サイズと重なることから、これらの生物に誤って摂食されることにより海洋生物生産の基盤を脅かす可能性が指摘されている。現在、海洋には、毎年500万トンを超えるプラスチックが流入していると見積もられているが、その9割以上の行き先が不明のままである。プラスチック汚染が海洋生態系に与える影響を適切に評価するためには、陸域から流入後、海流によって輸送されるプラスチックゴミの動態を正確に把握することが重要である。

現在、海洋にはどの程度のプラスチックゴミが漂流しているのだろうか？これまでの様々な調査結果から、世界の海洋表層には1平方キロメートルに平均で数万個レベルのプラスチックゴミが漂っていると見積もられている(図1)。とくに北太平洋は、他の海域に比べて汚染レベルが桁違いに高い。これは、適切な廃棄物処理施設が十分に備わっていない東南アジア沿岸諸国や、プラスチック生産量上位を占める米国、中国、韓国、日本、台湾等が流域に存在しているためである。これらの国を含む沿岸各国から海洋に流出したプラスチックは、黒潮がその一部を形成する亜熱帯循環流により輸送され、やがて世界で最もプラスチック汚染が進んだ海域として知られる「太平洋ゴミベルト(Great Pacific Garbage Patch)」に集積するとみられているが(図1)、実測データが大幅に不足しており、その動態は十分に理解されていない。演者の所属研究室は、北太平洋移行域表層のプラスチックゴミ分布とその時空間動態を明らかにすることを目的とし、水産研究所(現 国立研究開発法人 水産研究・教育機構)が長年継続してきた定期調査試料に含まれているプラスチックゴミの再解析を進めている。本公演ではこれまでの研究結果の一端を紹介する。

まず、現在の汚染実態を把握するための解析を行った。試料として2016年に北太平洋移行域(東経142度～西経170度)の77測点表層(採集深度0～1m)から得られたニューストーンネット試料を使用した。調査海域は日本周辺海域と「太平洋ゴミベルト」をつなぐ黒潮統流域を含み、北太平洋のプラスチック汚染動態を把握する上で重要な海域である。プラスチックゴミは、全体の95%にあたる73の観測点で検出された。この結果は、1990～2000年代に行われた同海域の結果(81～86%)と比べて高く、移行域でプラスチック汚染域が拡大していることを示している。また、プラ

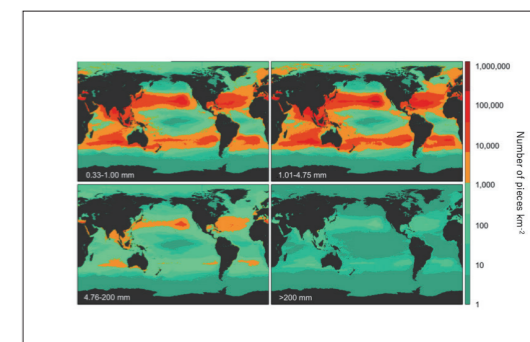


図1: 実測データと海流モデルから推定された海洋表層プラスチックゴミ密度(個数/km²)水平分布推定結果の一例(Eriksen et al, 2014: PLoS ONE 9(12): e111913. doi:10.1371/journal.pone.0111913). それぞれのパネルは異なるサイズクラス(0.33-1.00 mm, 1.01-4.75 mm, 4.76-200 mm, >200 mm)を示す。東部北太平洋カリフォルニア沖に存在するとくに分布密度の高い海域が「太平洋ゴミベルト」に相当する

スチックゴミの分布は均一ではなく、三陸沖から西経160度の範囲において局所的に密度の高い海域が複数箇所形成されていることがわかった(図2)。調査海域東端にあたる北緯39~41.5度、西経160~170度の海域ではとくに密度の高い海域が確認された(図2)。高密度のプラスチックゴミが観測された海域は概ね高水温の海域と一致し、亜寒帯よりも亜熱帯海域側にプラスチックゴミが多いという従来の知見を裏付けた(図3)。西経170度以東の高密度域を除いた日本近海から西経170度に至る移行域のプラスチック密度平均値は $56,364 \pm 65,781$ 個/㎥であり、80年代後半~2000年代の報告値と同程度の値を示した。一方、西経170度以東の高密度域の平均密度は、 $975,660 \pm 1,251,329$ 個/㎥と高く、これは2000年~2010年代の調査で報告された「太平洋ゴミベルト」中心部の値に匹敵する高さであった。本研究で検出された西経160~170度の高密度域は、これまで予想されている「太平洋ゴミベルト」のプラスチック集積予想海域よりもさらに北方外側に位置している。従って本研究の結果は、黒潮統流により定常的に供給されているプラスチックゴミによって「太平洋ゴミベルト」領域が拡大している可能性を示している。

本調査海域は、移行域東西方向約4,000kmの範囲を網羅し、日本を離岸した後、新たなプラスチック供給源を流域にもたない。このため東西方向のプラスチック組成の変動は、海流輸送に伴うプラスチックゴミの動態を反映していると考えられる。本調査で検出されたプラスチックの素材についてフーリエ変換赤外分光光度計(FIR)で測定したところ、調査海域では常にポリエチレン(54.9%)とポリプロピレン(37.4%)が大部分を占め、これにポリプロピレンとポリエチレンの重合体(4.8%)、発泡スチロールの素材であるポリスチレン(2.0%)が次ぐことが示された(図4)。

この組成は海域全体で概ね共通していたが、海水より密度の大きいポリスチレンの割合は東の海域ほど有意に低下することが明らかとなった。またサイズ組成においては、ほとんどの測点で1~2mm区分のものが最も多く、日本周辺を含む他の太平洋海域からの報告と一致した。一方、高密度域を含む西経170度以東の海域では、より小さい1mm未満のプラスチックが最も多いという特徴を示した。さらに形状組成においては、東の海域ほど薄膜(フィルム状)のプラスチックの割合が増加し、色においては日本近海で最優占していた白色の割合が東進するに従って低下し、高密度域では透明なものが数において最も優占していた。以上の結果から、黒潮によって輸送されるプラスチックゴミのうち、海水より密度が小さく海流の抵抗を受けやすい薄膜状のポリエチレン、ポリプロピレンが、より遠くまで運ばれやすく、さらに輸送

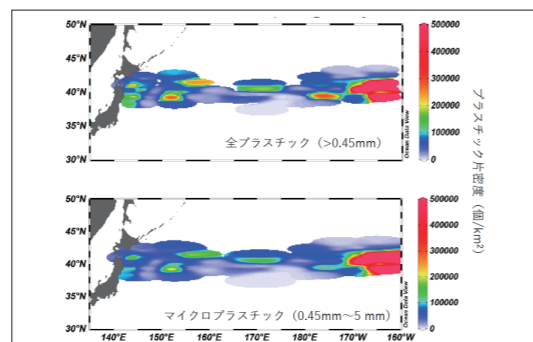


図2:本研究によって実測された北太平洋移行域におけるプラスチックゴミ密度の水平分布

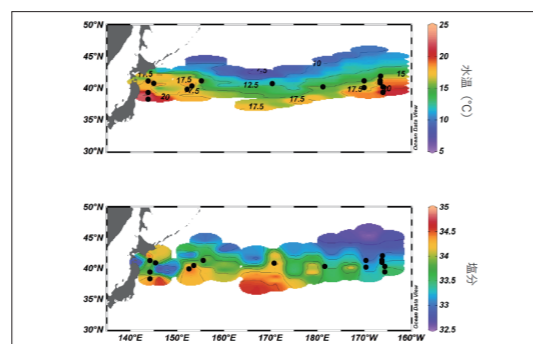


図3:調査海域の表層水温(上)および塩分(下)の水平分布とプラスチック高密度域との関係。プラスチックゴミが高密度(>10万個/㎥)で分布していた測点を黒丸で示した

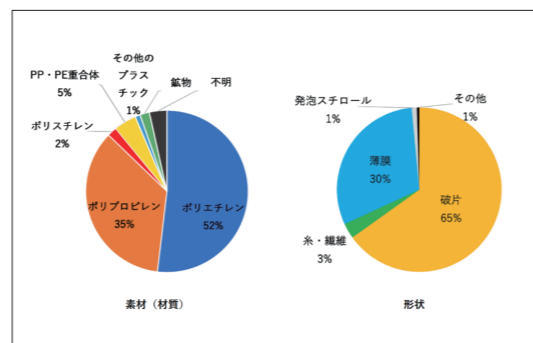


図4:本研究によって北太平洋移行域より採集された浮遊物の材質(左)および形状(右)別個数組成

の過程で耐候性の低い透明のものが紫外線による光分解の作用を受け、1mm以下にまで細分化され西経170度以東にみられた高密度域を形成する一因となっていたと推測される。

今回示した移行域の調査結果は、北太平洋のプラスチック汚染が今現在も急速に進行していることを示している。この海洋プラスチック汚染が生態系に与える影響を理解するためには、その時間的変動を明らかにすることも重要な課題の一つである。プラスチックが発明されて以降、海洋のプラスチックゴミが増加の一途を辿ってきたことは間違いない。これまでの研究報告から、その密度は80年代以降指数関数的に増加したと推定されるが、その知見は断片的であり、また70年代以前については実測データが存在しない。このようなデータの欠落は、プラスチックの発明以降、現在に至る汚染状況がどのように進行し、今後どのような影響を生態系に与えるのかという点について根拠を伴った議論を行うことを困難にしている。水産研究所の定期採集試料には1949年にまで遡る調査試料が含まれており、現在これらの試料解析から日本周辺海域、とくに黒潮~黒潮統流域における過去70年以上のプラスチックゴミの変動を明らかにするための分析を進めている。現時点で1957年の試料からプラスチックと思しき小片が複数発見されており(図5)、今後、FTIRによりその素材や劣化度などについて詳細な解析を行う予定である。プラスチックであることが確定すれば最も古い記録となるが、調査を進めることでさらに年を遡って検出される可能性もある。このような保管サンプルに含まれるプラスチックゴミの再解析は、「太平洋ゴミベルト」に代表される世界で最も海洋プラスチック汚染の進んだ北太平洋の汚染実態把握に寄与するだけでなく、日本を含む北太平洋沿岸諸国が戦後の経済発展に伴い海洋に累積的与えてきた環境負荷を可視化するという点において大きな意義を有する。一旦海洋に流出したプラスチックゴミの回収は困難であり、これ以上の汚染を根本的に食い止めるには使用量削減と効果的な処理システムの構築、これらを支える個人の意識改革が不可欠である。本プロジェクトから発信される成果がその一助となることを期待している。

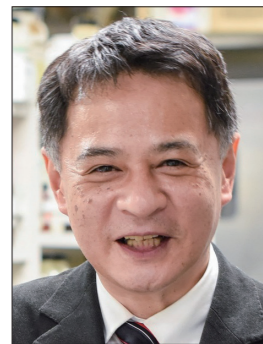


図5:長期保管試料から検出された浮遊物。幾つかの粒子はプラスチックの可能性があり、今後、素材や劣化度について詳細な分析を進める予定である

マイクロプラスチックの 生体影響

酒井康行

(東京大学教授 工学系研究科)



博士(工学)(東京大学)。生物化学工学を基礎として、培養ヒト細胞を用いた薬剤・環境中化学物質の評価や再生医療のための組織構築に関する研究を遂行中。研究室ウェブサイトは <http://orgbiosys.t.u-tokyo.ac.jp/sakai/index.php>

YASUYUKI SAKAI

はじめに

近年、自然環境中に排出された廃プラスチックに由来する微粒子、マイクロプラスチック(MP)に関心が集まっている。中でも最終的に海洋に排出されたものの水生生物への影響は顕著であり、その抑制と解決は喫緊の課題といえよう。一方で、水生生物の食物連鎖を通じた人体への曝露影響も懸念されている。実際に2018年、Schwabらによって、8人のボランティアの排泄物から、10gあたり平均約20個のMP(粒径50~500 μ m)が検出されたとの報告がなされ、わが国でも大きく取り上げられた¹⁾。ヒトが経口的に摂取する水や食物にMPが含まれており、それが人体に曝露されていることは疑いようがない。

しかしながら現状では、経口的に曝露されたMPの人体影響は未だ解明は十分ではない。WHOは2019年8月22日のニュースリリースにて、MPの人体影響の更なる研究推進と汚染の進行抑止を呼び掛けた²⁾。これは、飲料水中のMPによる健康上のリスクの最新の分析結果に基づくもので、粒径150 μ m以上のものは人体に吸収される可能性が低いと想定される一方で、データは極めて限られているが、ナノサイズのMPは体内に入り分布すると予想される³⁾。動物を用いたMPの曝露実験は少数ながら存在し、小さなMPほど腸管から吸収されやすいが³⁾、数~数十 μ mの大きさのものでも経口摂取で体内に取り込まれ、1か月の繰り返し曝露にて胃・腸管・肝臓・腎臓・肺などに分布、代謝への悪影響が見られたと報告されている⁴⁾。もちろん、排泄物での実曝露量に比べる、4-5桁大きな値での実験であること、一方でヒトでは曝露が最大で数十年で継続すること、を考慮すると、今後正確な取り込み・分布のメカニズム解明と定量的な評価、実曝露を踏まえた、実際のヒトでのリスク評価を行っていく必要があるといえる。

ヒト培養腸管モデルの利用

このためのアプローチとして我々は、ヒト臓器細胞を生体外で培養して臓器モデルとし、そこでメカニズム解明と定量的な評価を行い、それらの結果を簡便な薬物動態モデルシミュレーション用いて人体へ積み上げる手法の開発に取り組んでいる(図01)。

このようなヒト培養臓器モデルを用いた評価手法は、動物の使用を避けつつヒトでの評価を可能とすることから将来の発展が期待されているものである。

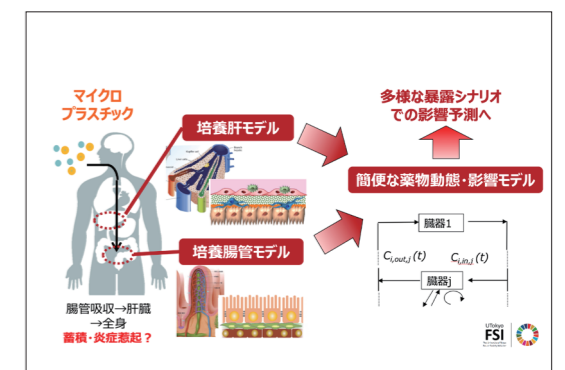


図01: 培養腸管モデル・培養肝モデルと数理モデルを用いた予測方法の概要

はじめに、経口摂取されたMPが人体に入るのか、排泄物としてそのまま影響なく人体を離れるのかのキーである腸管での吸収に焦点を当てた。MPのような微粒子が腸管から体内に取り込まれる過程は図02のようにいくつかのメカニズムが考えられるが⁵⁾、その大きさ依存性を生理学的な培養モデルで系統的に検討した例は少ない。そこで我々は、図02で示した予想されるメカニズムが再現される生理学的な腸管モデルを、Shulerらのモデルを参考⁶⁾に作成し、蛍光修飾したポリスチレンビーズ(50, 100, 500 nmの3種)の72時間までの体内への透過を計測した。これらは、MPというよりナノプラスチック(NP)と呼ばれるべきものである。この培養モデルは、腸管上皮を主に形成する腸管吸収上皮細胞、粘液分泌細胞(杯細胞)、そして腸管免疫を惹起するためにバクテリアを積極的に取り込む特殊な上皮細胞であるM細胞からなるものである。M細胞は、別の血球細胞を共存させることで、腸管吸収上皮細胞が部分的に変化し、上皮層の中に形成される。

まず、粘液層の存在はNPの体内取り込みを明らかに抑制した。粒径ごとのメカニズムを見てみると、50および100 nmのNPは上皮細胞間のタイトジャンクションを透過して体内に容易に取り込まれることが観測された。一方、500 nmの大きなものでは、M細胞の形成を行わない腸管モデルでは取り込みは大幅に抑制されたが、M細胞を予め形成させた場合には透過が顕著に促進された。またこの取り込みは、M細胞へと変化した吸収上皮細胞部分で起こっていることが確認できた。動物実験で数 μm 程度の大きな粒子も体内に取り込まれると報告されているが⁴⁾、これだけ大きな粒子の上皮からの取り込みは考えにくいことから、この現象がM細胞経路である可能性は高いと考えている。ちなみに、実際の腸管ではM細胞に取り込まれた物質は毛細血管でなくリンパ管に入る。そこには免疫細胞が集積しており、貪食から抗原提示まで、バクテリアに対するのと同様に一連の免疫反応が惹起される可能性は存在する。一方、リンパ液は最終的には心臓近くで静脈に注ぐことから、動物実験で見られた複数臓器への分布が起こったのではないかと推察している。

おわりに

ヒトへのMP・NPの影響は、数少ない動物実験・ヒト排泄物そして培養腸管モデル等を用いた検討に基づく限り、現状の汚染レベルで短期間に人体に影響が出るとは考えにくい、長期に曝露された場合の人体への多様な影響は不明である。汚染レベルが進行すれば、何らかの影響が出始める可能性はあり、研究の一層の遂行と真に役立つ排出削減が望まれる。

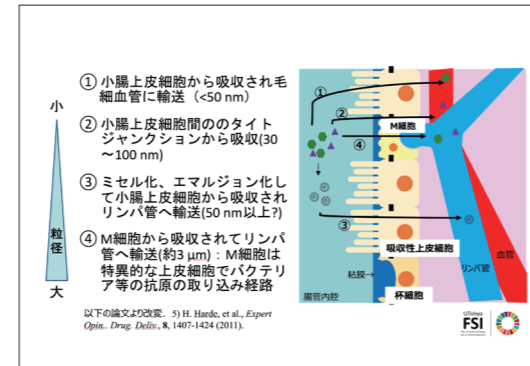


図02:小腸におけるマイクロプラスチックの可能な透過経路

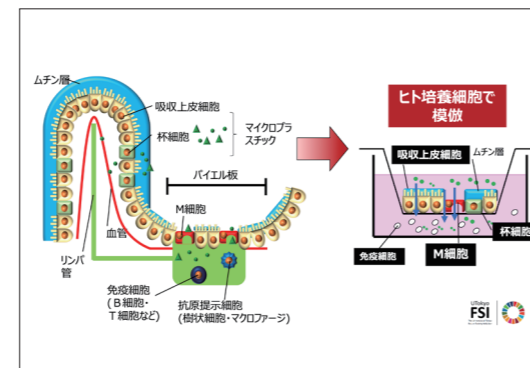


図03:小腸での吸収を模倣するヒト培養細胞からなるモデル腸管

ここで示したヒト培養臓器モデルと数理シミュレーションとを融合利用する新たな手法は、動物を使用することなくヒトでの評価が行える理想的なものであるが、多くの課題がある。現状では、未知の影響に関してはやはり動物実験やヒトでの部分的なデータの結果をまずは信頼しつつ、特にメカニズム解明の視点でそれらを補う手法として役立てていくことが求められる。

謝辞

本研究は、日本財団FSI基金からの補助をもとに2019年度から3年間に予定で実施されている東京大学・日本財団「海洋ごみ対策プロジェクト」によって行われたものである。また、本研究は、研究室の西川昌輝講師・稲村恒亮研究員・大学院生の原祥太氏および鈴木優正氏、本学薬学系研究科の楠原洋之教授・前田和哉准教授との共同研究であることを付記する。

参考

- 1) Schwablら, 欧州消化器病学会2018(日経バイオテク, 2018.10.26)
- 2) WHOニュースリリース, <https://www.who.int/news-room/detail/22-08-2019-who-calls-for-more-research-into-microplastics-and-a-crackdown-on-plastic-pollution>
- 3) Jani et al., J. Pharm. Pharmacol, 42, 821-826 (1990).
- 4) Deng et al., Sci. Rept., 7, 46687 (2017).
- 5) Harde et al., Expert Opin. Drug Deliv, 8, 1407-1424 (2011).
- 6) Mahler et al., Nat. Nanotechnol., 7, 264-271 (2012).

海洋プラスチックごみの削減方策に関する研究

高村ゆかり

(東京大学教授 未来ビジョン研究センター)



専門は国際法学・環境法学。京都大学法学部卒業。一橋大学大学院法学研究科博士課程単位修得退学。名古屋大学大学院教授、東京大学サステナビリティ学連携研究機構(IR3S)教授などを経て現職。気候変動をはじめ国際的環境問題に関する法政策が主な研究テーマ。日本学術会議会員、アジア開発銀行気候変動と持続可能な発展諮問グループ委員なども務める。

YUKARI TAKAMURA

海洋プラスチックごみ問題は、プラスチックの製品や包装が適正に処理されず、環境中に放出され、河川などを通じて海洋に排出されることによって生じている。問題に対処するには、製品の設計から廃棄物管理に至る多様な段階の対策を国際的に協調して強化する必要がある(図1)。2019年の第4回国連環境総会(UNEA-4)において、ノルウェー、日本などが共同で、海洋プラスチックごみ問題への対処のためのグローバルなガバナンスの強化を求める決議案を提案した。国際枠組み強化に向けた交渉を開始する合意には至らなかったものの、UNEAは、科学的知見の収集を国連環境計画(UNEP)事務局長に要請するとともに、UNEA-3で設置された作業部会の任務の一つとして、国際レベルを含む現在の対応の有効性を分析することを要請した。

海洋プラスチックごみに関わる国際制度はいくつかある。1982年の国連海洋法条約は、海洋に関する事項を規律する世界的条約で、海洋環境保護の国家の一般的義務を定めるが、特にプラスチックごみを規制する規定はない。ロンドン海洋投棄条約1996年議定書は、陸域やプラットフォームなどからの海洋へのごみなどの投棄を規制し、プラスチックごみも対象に含まれるが、対象は意図的投棄に限られ、陸域からの流れこみは規制対象とならない。

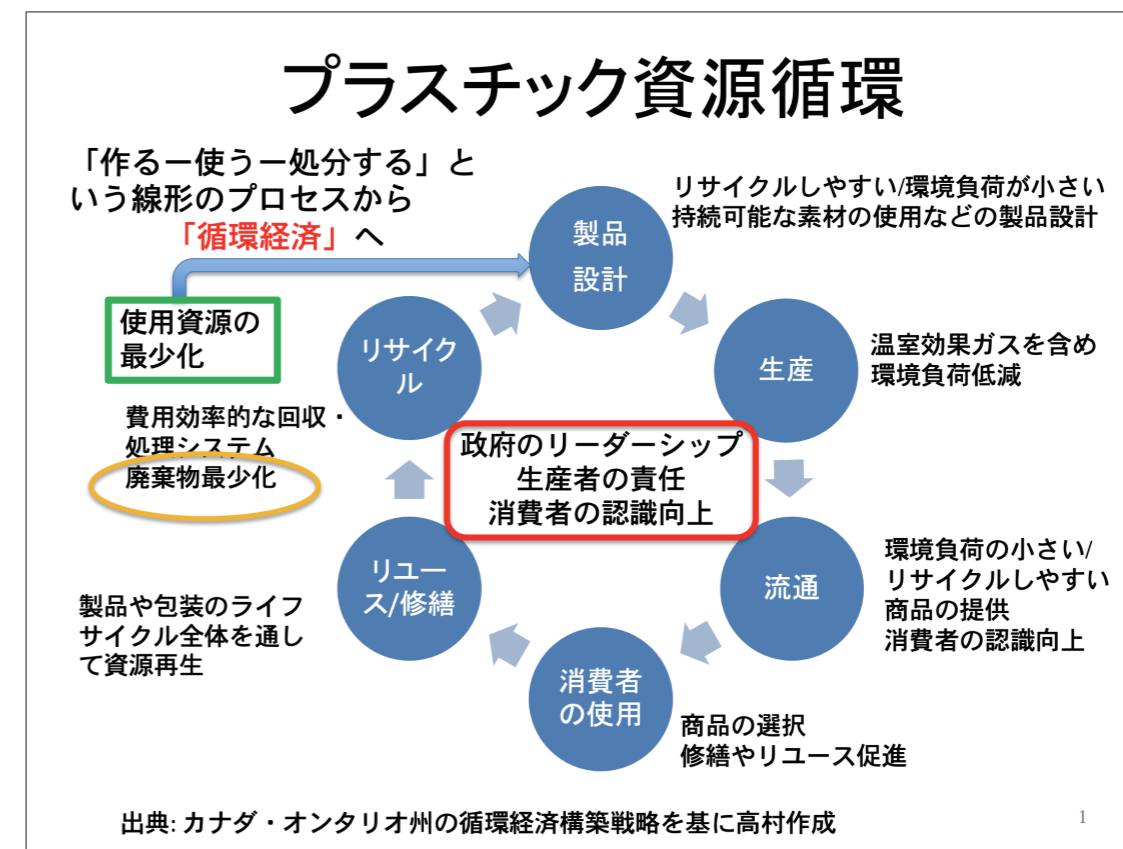


図01

1996年にUNEPの下に設置されたGlobal Programme of Action for the Protection of the Marine Environment from Land-Based Activitiesは、陸域からの海洋汚染に対処しようとするもので、陸域から海に流入するプラスチックごみ対策としては最も適切な枠組みと言える。ただし、原則5年に一度会合を開催するものの、国に対する拘束力を持たず、その有効性については疑問が呈されてきた。UNEPのイニシアティブで1974年から開始した18の地域海プログラムの下での取り組みも進む。

海洋への放出の抑制、削減には、陸域の廃棄物管理の強化も必要である。1989年の有害廃棄物の国境を越える移動を規制するバーゼル条約は、2019年、汚れたプラスチックを附属書IIに追加し、規制対象とした。また、作業部会を新たに設置し、2002年作成のプラスチックごみの適正処理に関するガイドライン改正の検討を決定した。そして、環境中へのプラスチックごみとマイクロプラスチックの排出を相当に削減し、長期的にはゼロにすることをめざす、あらゆる主体が参加できるプラスチック廃棄物パートナーシップ(Plastic Waste Partnership)を立ち上げた。

海洋プラスチックごみ問題の発生には製品の製造から廃棄に至る多段階のフェーズがある。既存の枠組みは、こうした多様なフェーズのうちのいずれかを対象とし、全体として統合的にこの問題を扱う構造になっていない。既存の枠組が十分に機能していないからこそ問題が生じているとも言える。プラスチックごみの主要な排出国の参加が国際枠組みの有効性を高める鍵の一つである。そして、この問題について国々がその政策と協働のあり方を定期的に議論する場を設けること、科学的知見の収集とそのための研究・調査を強化することなどが、将来の対策強化の基盤となる。

生分解性プラスチックの動向

岩田忠久

(東京大学教授 農学生命科学研究科)



岩田忠久
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

- 1989年 京都大学農学部林産工卒業
- 1992年 フランス政府給費留学生・CNRS-CERMAV留学
- 1994年 京都大学大学院農学研究科博士課程修了、京大博士(農学)
- 1995年 日本学術振興会・特別研究員
- 1995年 理化学研究所・基礎科学特別研究員
- 1996年 理化学研究所・研究員
- 2006年 東京大学大学院農学生命科学研究科・助教授
- 2012年 同上・教授
- 2018年 総長補佐

主な受賞
2006年繊維学会賞、2010年ドイツイノベーションアワード、
2018年高分子学会賞

専門：高分子材料学、環境関連高分子、高分子構造学
趣味：水泳、1000円以下のおいしいワイン

TADAHISA IWATA

1. はじめに

現在、海洋マイクロプラスチック問題に代表されるように、非生分解性石油合成プラスチックの廃棄物による環境汚染が地球規模の解決すべき重要な課題となっている。その解決策の一つとして、環境中の微生物によって水と二酸化炭素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る。さらに、エネルギー使用量の増大に伴う化石資源の枯渇、プラスチック焼却に伴う地球温暖化、二酸化炭素排出削減などの社会的要請から、再生可能なバイオマスを出発原料として生産される「バイオマスプラスチック」の重要性も高まっている。現在、「生分解性プラスチック」と「バイオマスプラスチック」を総称して、「バイオプラスチック」と呼ぶことにしている(図1)。

本講演では、生分解性プラスチックの開発現状と今後求められることについて、演者の思いを述べる。

2. バイオプラスチックを正確に理解する

現在、研究開発がなされているプラスチックを、出発原料と生分解性の有無の観点で分類すると、表1に示すように4つのカテゴリーに分類される。

環境にやさしいプラスチックの概念のもと最初に研究開発が進められたのは、土壌、河川水、海水などの環境中で分解する生分解性プラスチックであった。理想的な生分解性プラスチックとは、「使用中は通常のプラスチックと同様に使用でき、使用後は自然界において微生物が関与して低分子化合物、最終的に水と二酸化炭素にまで完全に分解されるプラスチック」と定義されている(図2)。したがって、生分解性プラスチックは、環境保全に貢献するという観点で環境にやさしいプラスチックであり、生分解するという機能に大きな意味があることから、原料が石油であるのか、再生産可能なバイオマスであるのかは問題ではない。

一方、バイオマスプラスチックとは、再生産可能資源であるバイオマスを原料として製造されるプラスチックのことである。大気中の二酸化炭素を光合成により固定化した植物あるいは木質バイオマスを出発原料していることから、たとえ廃棄後に焼却されても、発生した二酸化炭素は再度固定化されるというカーボンニュートラルの概念のもと、環境にやさしいプラスチックとして考えられている。したがって、バイオマスプラスチックが、生分解性を有しているか否かは問題ではない。

つまり、生分解性プラスチックとバイオマスプラスチックは、環境にやさしいプラスチックとしてひとくりにされることが多いが、決して同じではなく、生分解性という機能に着目しているか、石油からバイオマスへの原料転換に着目しているかで、本来は全く異なるコンセプトのプラスチックである。



図1：環境に優しいバイオプラスチックの循環図

表1 バイオプラスチック (バイオマスプラスチックと生分解性プラスチック)

← 原料転換 →

	バイオマス資源 バイオマスプラスチック	化石資源 石油合成プラスチック
↑ 機能付与 ↓	生分解する 生分解性 プラスチック ・ポリ乳酸 (PLLA) ・微生物産生ポリエステル (PHA) ・ポリブチレンサクシネート/アジバート (PBS/PBSA) ・多糖エステル誘導体 (DS<2.5)	生分解しない ・ポリプロピラクトン (PCL) ・ポリブチレンアジバート/テレフタレート (PBAT)
	生分解しない ・バイオポリエチレン ・バイオポリプロピレン ・バイオPET ・バイオポリアミド ・バイオポリウレタン ・多糖エステル誘導体 (DS>2.5)	生分解しない ・ポリエチレン (PE) ・ポリプロピレン (PP) ・ポリエチレンテレフタレート (PET) ・ポリスチレン (PS) ・ポリ塩化ビニル

表1：バイオプラスチック(バイオマスプラスチックと生分解性プラスチック)

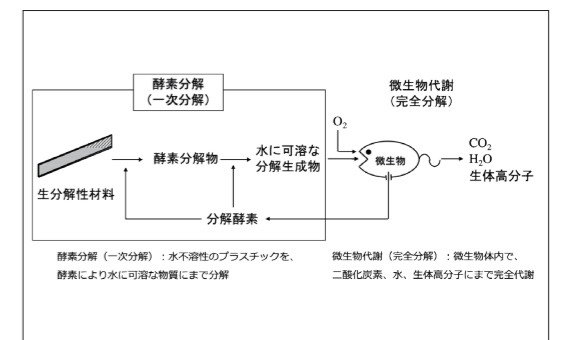


図2：生分解性プラスチックの分解機構(酵素分解と微生物代謝)

特に注意しなければならないことは、バイオマスプラスチックは「植物からつくられたプラスチック」と宣伝されることが多いことから、全て環境中で分解されると誤解されがちである。決してそのようなことはないことを理解しておく必要がある。

3. 生分解性プラスチックの課題と今後求められること!

生分解性プラスチックは「生分解」することに意義がある。生分解性プラスチックの利用用途としては、環境中で利用される分野と分別回収が難しい分野の2つが考えられる(表2)。しかし、その生分解性にも、コンポスト分解、活性汚泥分解、土中分解、河川・湖水分解、海水分解、深海分解などがある。現在、国際標準化機構(ISO)により分解環境に応じた生分解性試験法が順次発行されている。単にフィールド分解試験のみならず、有用分解微生物の単離やそこから得られる精製した酵素による分子レベルでの分解機構の解明も、推進しなければならない重要な基礎研究である。このような「生分解性」の観点から、いくつか必ず将来必要とされる基礎研究を列挙したい。

① 生分解性プラスチックの種類を増やす

現在開発されている生分解性プラスチックは、ポリ乳酸、微生物産生ポリエステル、ポリブチレンアジペートテレフタレート、ポリブチレンサクシネート/アジペートなど、生分解性ポリエステルのカテゴリのみ、数種がわずかに生産されているに過ぎない。演者らは、様々な結合様式を有する高分子多糖類をエステル誘導体化することにより、これまでの石油合成プラスチックにはない、優れた熱的性質や物性を有する生分解性プラスチックの開発に成功している。ポリエステルのみならず、様々な構造と優れた性能を有する生分解性プラスチックを開発し、多様な使用用途に応じた要求性能を満たさなければならない。

② 環境分解性の正確な認識

一口に生分解性プラスチックといっても、どのような環境で分解するのかを明確にし、それを一般消費者にわかるようにしなければならない。そのためには、開発した生分解性プラスチックが実際にどの環境下(コンポスト、活性汚泥、土中、河川水・湖水・海水、深海)で分解するかを正確に把握し、それを表記する制度を確立しなければならない。

例えば、ポリ乳酸はコンポストでのみ分解し、身の回りの土や水環境では分解しない。図3は、筆者らが作製した微生物産生ポリエステルのフィルムの環境水を用いたBOD分解試験の結果である。同一サンプルでも環境により分解の速度が異なることから、一口に環境水といっても大きく異なることを理解しておく必要がある。

筆者らは、NEDO先導研究プロジェクト「様々な生分解性プラスチックの海洋分解性評価(研究代表者:岩田忠久)」で、生分解性プラスチックや石油合成汎用プラスチックからなるフィルム、織

分野	用途
農林水産用資材	多目的フィルム、農業・肥料用の徐放性被覆材
自然環境中で利用される分野	移植用ポット、釣り糸、漁網、ノリなど 荒地・砂漠の緑化用保水素材、工場の保水シート、土のう保、植生ネットなど
野外レジャー用品	ゴルフ、釣り、マリンスポーツなどの使い捨て製品
水処理用資材	沈殿材、分散材、洗剤
有機廃棄物のコンポスト化に有用な分野	食品容器包装資材 生鮮食品用のトレイ、ファーストフードの容器、弁当箱など
	衛生用品 紙おむつ、生理用品など
	日用品、雑貨類 ごみ袋、使い捨てのコップなど

表2:生分解性プラスチックの期待される用途

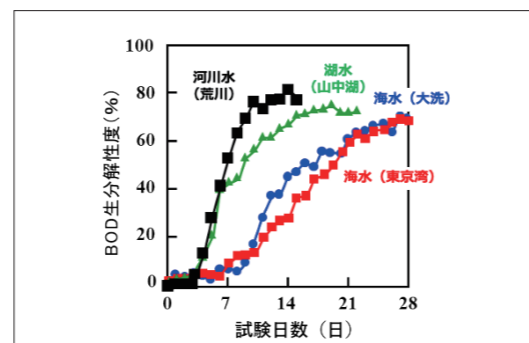


図3: 微生物産生ポリエステル(P(3HB))の環境水を用いたBOD生分解性試験(荒川河川水、山中湖水、東京湾海水、大洗海水)

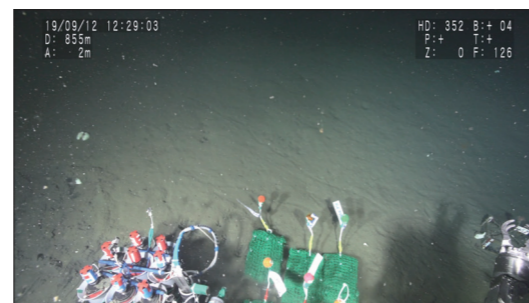


図4: 2019年9月19日に初島沖の深海850メートルに沈めたプラスチックの分解実験

維、射出成型品など74種類を静岡県初島沖の深海850メートルに2019年9月に沈めた(図4)。1年後あるいは2年後に引き上げ、本当に深海で生分解性プラスチックが分解するか、どのような微生物が付着しているかなどを報告したいと思っている。

③ 生分解性開始機能と生分解性速度のコントロール

使っているときは決して分解が起こらず、使い終わって不要となったとき、あるいは、環境中に流出した時、生分解が始まる機能を付与する(図5)。さらに、使用目的に応じて自在にその生分解速度がコントロールされている材料設計を行う。

④ 分解酵素・分解微生物のデータベースの確立

様々な環境下での分解試験の実施を行い、環境中から分解微生物を単離し、一つの微生物がどのような酵素を何種類分泌しているか、あるいは複数の微生物が協同作業でプラスチックを分解しているかなど、分解微生物の観点からの研究を活性化させる。

⑤ 化学構造および分子構造からの生分解性プラスチックのシミュレーション

コンピュータを用いて、環境中で分解しやすい生分解性プラスチックの化学構造をシミュレーションする。さらに、分子鎖構造、結晶構造、高次構造の観点からも、分解速度の予測なども行う。高分子構造学との連携が必要である。

⑥ 本当の意味でのマイクロプラスチック問題の解決

現在問題となっているマイクロプラスチックは、数ミリ角のプラスチックである。今後さらに問題となるのは、衣料の洗濯により排出されるマイクロオーダーの繊維くず、化粧品や歯磨き粉などに入っているナノ粒子など、目に見えないナノプラスチックである(図6)。どのようなプラスチックが、どのような形状で使われているかを正確に判断し、プラスチック表面へ吸着した様々な化学物質、添加剤や分解途中の中間生成物の生体への影響なども含めて、そこから生じる課題を未然に予測し、対策を図ることが必要である。

4. おわりに

海洋マイクロプラスチック問題がクローズアップされ、プラスチックがまるで悪者のようににわかには生分解性プラスチックへの期待が高まっている。「困難だが、実現によって大きなインパクトをもたらされる、壮大な目標・挑戦のこと」を「ムーンショット」という。使っているときは優れた機能を発現し、使用后、仮に自然界に流出した場合、速やかに分解が始まる高機能な生分解性プラスチックの創製が必要である。また、使用目的に応じて分解速度が自在にコントロールできていることも重要な要素である。人類とプラスチックは共存・共栄することに大きな意味があり、次世代の研究者には、大いなる野望を抱き、未知なる世界に向けて挑戦することを期待している。

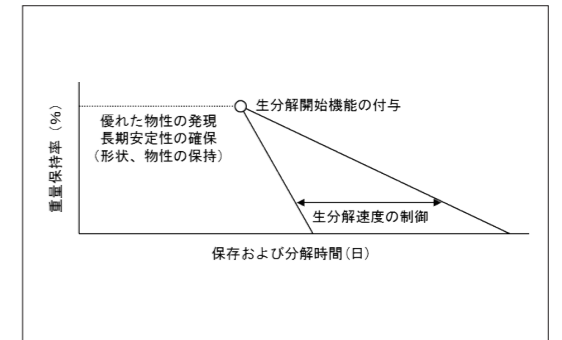


図5:生分解性プラスチックにおける分解開始機能と分解速度の制御の概念図

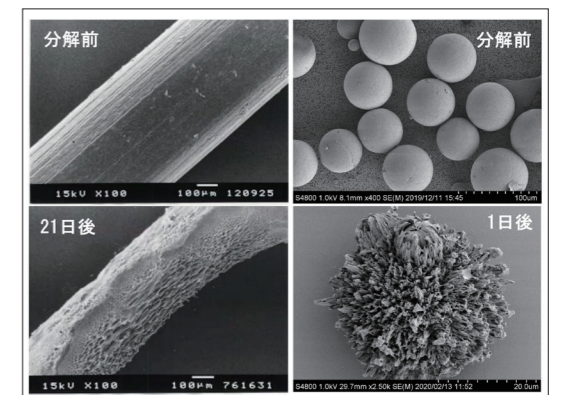


図6:生分解性繊維および微粒子の分解前と分解途中のSEM像

UNIDOとの共同プロジェクトの現状

山本光夫

(東京大学准教授 農学生命科学研究科)



2002年、東京大学大学院工学系研究科博士課程修了(博士(工学))。同研究科助手・助教、東京大学教養学部特任講師・特任准教授、東京大学海洋アライアンス特任准教授などを経て、現職。専門は、水圏環境化学・環境化学工学。環境技術開発と沿岸・海洋生態系保全に関わる研究に従事するとともに、海外インターンシップをはじめとした教育研究活動にも取り組む。

MITSUO YAMAMOTO

1. はじめに

世界的に深刻な問題となっている海洋プラスチックごみについては、83Mtの石油由来のプラスチックがすでに海洋中に存在し、毎年8Mtのプラスチックが海洋に流れ込んでいると見積もられている¹⁾。この海洋プラスチックごみの排出起源のうち少なくとも80%が陸域起源とされており、陸域からのプラスチックごみ排出削減に焦点をあてた研究及びそれに基づく対策を行うことが重要である。

そこで本研究(プロジェクト)では、プラスチックのマテリアルフローを把握しながら、陸域における最適なプラスチックごみ削減・管理の方策を示すことを目的とした。また海洋プラスチックごみ問題解決には国際的な協力体制の構築が特に重要であることから、海洋アライアンスの総合海洋基盤(日本財団)プログラムの中で構築した国際機関との関係を活かし、グローバルな視点で問題を解決し、国際ネットワークを形成していくことを視野に入れてプロジェクトを進めることとした。

2. 国際連合工業開発機関(UNIDO)との連携

陸域起源の石油由来のプラスチック削減のためには、生分解性プラスチックをはじめとした代替製品の開発が必要であり、代替品を生産・導入するためのマテリアルフローやシステムの確立が望まれる。UNIDOでは、廃棄物管理が不十分でありプラスチックごみ問題が深刻なアフリカ地域を対象として、農業廃棄物を活用した生分解性プラスチックなどの代替品の製造と利用を促進することによる石油由来のプラスチック使用量の削減を目指したプロジェクトが昨年(2019年)から開始された。このプロジェクトを共同して実施する形をとりながら、(1)アフリカにおいて代替品の原料として利用できる農業廃棄物(作物残渣)の賦存量調査、(2)それを原料とした生分解性プラスチックや代替品製造技術等の導入可能性の検討、(3)農業廃棄物収集から生分解性プラスチックや代替品製造に至るまでのシステム設計及び経済性評価、といったアセスメントを実施し、最終的にはプラスチックごみ削減の具体的方策を示すことを目指した²⁾。

UNIDOは、南アフリカ共和国において日本政府と連携して海洋プラスチックごみ対策事業を実施しているほか、エジプト等の国々を対象に、環境にやさしいプラスチックの代替素材などの導入に向けた調査・分析事業を開始している³⁾。本研究(プロジェクト)においては、このうちエジプトでの調査・分析事業を共同で実施することとなった。総合海洋基盤(日本財団)プログラム「海外インターンシップ人材育成プロジェクト」(今年度以降も海洋学際教育プログラムにて継続)では、9つの国際機関・研究機関と連携し学生派遣を2014年度より行ってきたが⁴⁾、UNIDOはこれまで最も多くの学生を派遣してきた国際機関であり(Table 1)、教育面での緊密な連携が本共同プロジェクトの実施につながったものである。

Table 1 Number of students sent to organizations from fiscal year 2014 to 2019

Organizations	Number of students					
	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Food and Agriculture Organization of the United Nations	2	1	1	-	2	-
Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO	-	-	2	-	1	-
International Atomic Energy Agency	-	-	2	2	-	-
International Hydrographic Bureau	1	-	-	-	-	1
International Maritime Organization	-	2	-	2	-	1
International Tsunami Information Center	1	1	-	1	-	-
Pacific Tsunami Warning Center	1	1	-	-	-	1
Southeast Asian Fisheries Development Center	-	1	1	2	-	-
United Nations Industrial Development Organization	-	-	4	5	3	1
University of Maryland Center for Environmental Science Chesapeake Biological Laboratory	-	-	-	1	-	-
Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation	-	-	1	-	-	-
Japan International Cooperation Agency	1	-	-	-	-	-
NOAA Fisheries Service's Southwest Fisheries Science Center	-	-	1	1	-	-
NOAA Pacific Marine Environmental Laboratory	-	1	-	-	-	-
Total	6	7	12	14	6	4

本発表では、UNIDOと共同で行っているエジプトにおける海洋プラスチック削減に向けたプロジェクトの概要とこれまで(特に1年目)の成果について報告を行う。

3. 方法

本プロジェクトは上記の(1)~(3)に沿って進めるものであるが、1年目は(1)及び(2)について検討し、文献調査やインタビュー(対面・オンライン・メール)に基づいて、エジプトにおける最適なプラスチック代替品とその原料となる農業廃棄物を検討・提案することを目指した。UNIDOとともにプロジェクトを効果的に進めるための方法として、これまで培ってきたインターンシップの枠組みを活用した。具体的には、農学国際専攻・IPADS(International Program in Agricultural Development Studies)の演習授業の中で学生が文献調査やインタビュー調査を行った。そして得られた成果をもとに、演習に取り組んだ学生のうち2名がUNIDO本部(ウィーン)でのインターンシップ生として、共同研究者のもとでプロジェクトを進める形をとった。(Fig.1) これによりプロジェクトを東京大学とUNIDOが連携して確実に実施できるだけでなく、学生にとっては国際機関でのインターンシップを通して将来のキャリアパスを検討することができ、研究・教育の両面での成果や効果を期待することができる。以下では、演習やUNIDOでのインターンシップで得られた結果を中心に記述する。

4. 結果と考察

4.1 エジプトにおける農業廃棄物の現状とプラスチック代替品製造への利用可能性

エジプトにおける作物残渣の総量は29.7Mt(2011~2013年の年間平均)であり、そのうちの67.6%は穀物が占める⁵⁾。Fig.2に示す通り、特に多いのが麦わら(37.7%)、トウモロコシ(茎)(16.6%)、稲わら(10.7%)、そしてサトウキビバガス(11.3%、以下、バガス)である。これら高い割合を示す作物残渣がプラスチック代替品製造の原料の候補となるが、最適な原料選択のためには賦存量のみならず、原料輸送や製造施設建設等も含めた製造コストも含めての評価が必要である。

Fig.3はエジプト国内の作物残渣の地域別分布を示したものであるが⁵⁾、麦わらやトウモロコシがエジプト国内の広範囲に分布しているのに対して、バガスはQenaやAswanといった上エジプト(Upper Egypt)のナイル川流域のエリアに集中していることがわかる。さらに、バガスはサトウキビ搾汁後の残渣であり製糖工場が発生することから、作物残渣自体の輸送コストは基本的にはかからないといえる。一方で、稲わらに関してはエジプトではナイルデルタ付近で生産されているものの、プラスチック代替品原料として利用す



Fig. 1 Presentation of the study progress and findings at UNIDO headquarters

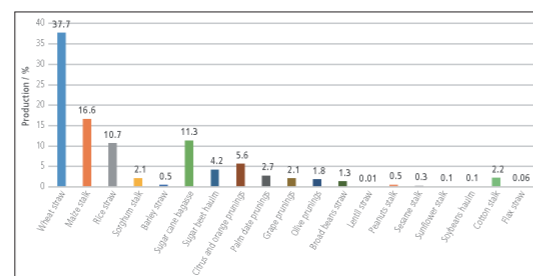


Fig. 2 Shares of residue production by crop⁵⁾

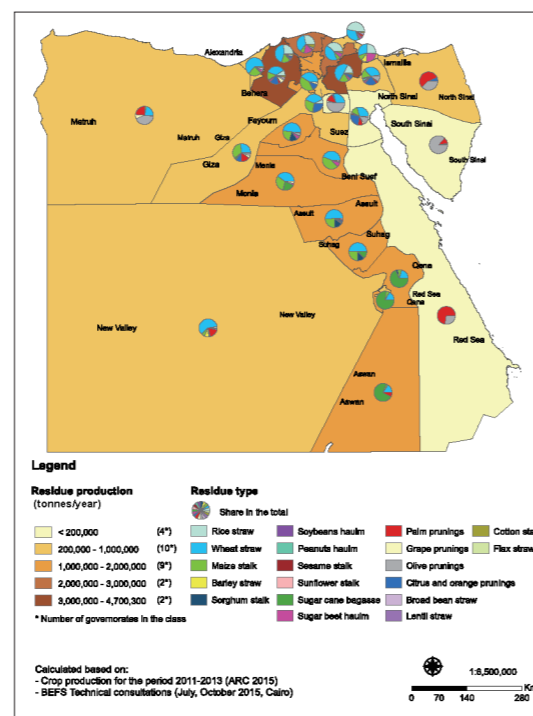


Fig. 3 Map of crop residue production in Egypt⁵⁾

るためには、新たに輸送コストが必要と考えられる。したがって、プラスチック代替品の原料としてはバガスの利用が最も可能性が高いと考え、作物残渣の候補をバガスに絞って詳細に調べていくことにした。

4.2 バガス利用の可能性

プラスチック代替品としては、主に生分解性プラスチックと紙の2つの選択肢がある。代替品製造原料としてバガスを利用するにあたってどちらが適切かを判断するために専門家へのインタビュー調査等を行った結果、コスト面などから紙製造の方が適しているということが示唆された。その上でバガス(繊維)の成分組成を見てみると、セルロースが45-55%含まれており(Table 2)⁶⁾、紙製造原料としての適性が示された。また、すでに2つの企業が、上エジプトにおいてバガスを原料として新聞紙や印刷用紙などを製造していることがわかり、これらの施設をうまく活用できれば、新たな紙製造工場建設の必要がなくなることも考えられた。

その上で、エジプト国内のプラスチック産業やその利用状況について調査を行った結果、プラスチックの消費に関しては、2016年のデータによると全体の用途の25.16%がパッケージ(包装)であることがわかった⁷⁾。また、エジプトにおけるプラスチックフィルム消費量とその内訳については、食品・非食品両方合わせたパッケージの消費量がフィルム全体の7割近くを示す(2014年)⁷⁾ことが確認された。パッケージについては、プラスチックから紙への移行は比較的容易と考えられ、年間に得られるバガスのうち23%が未利用⁵⁾のままであることから、これらをパッケージ向けの紙製造に活用するといったことも可能であると推察される。一方で、エジプトにおけるバガス利用の現状で最も大きな割合を占めているのがエネルギー利用であり、65%にのぼる⁵⁾。カイロ大学の研究者などエジプトの専門家へのインタビューからは、エネルギー利用の方が紙製造よりもコスト面で有利であること、また既設の上エジプトの製紙工場は印刷用紙向けになっていることなどが明らかとなった。したがって、バガスを原料としたパッケージ向けの紙製造については、そのポテンシャル自体はあるものの、上記の課題などを踏まえたより具体的な提案が必要であることが示唆された。

以上の成果を踏まえて現在は、より定量的な評価・試算やシステム設計に向けた検討を行っている段階である。UNIDO本部、UNIDOエジプト事務所、そしてカイロ大学をはじめとする現地の研究者や専門家と連携しながら、エジプトにおけるバガス由来の紙製造に基づくプラスチック削減を目指して、研究とそれに基づく提案を行っていきたいと考えている。

Table 2 Chemical composition of bagasse fibers⁶⁾

Component (%)	Range (%)
Cellulose (%)	45-55
Hemi cellulose (%)	20-25
Lignin (%)	18-24
Pectin (%)	0.6-0.8
Ash (%)	1-4
Extractives (%)	1.5-9

参考文献
 1)UNIDO, "Addressing the challenge of marine plastic litter using circular economy methods" (2019).
 2)M. Yamamoto, "Effective utilization of agricultural waste for reducing marine plastic litter in Africa," Japan-UNIDO Multi-stakeholder Cooperation Dialogue "Partnering for Africa's challenge on plastic litter," United Nations University, October 2019.
 3)在ウィーン国際機関日本政府代表部ホームページ(https://www.emb-japan.go.jp/tpr_ja/b_000112.html).
 4)山本光夫, 野村英明, 木村伸吾「国際的な海洋人材育成に向けたインターンシップの有効性」日本海洋政策学会誌, 7 (2017) 145-157.
 5)FAO, "BEFS Assessment for Egypt - Sustainable bioenergy options from crop and livestock residue" (2017).
 6)S. Yadav, G. Gupta and R. Bhatnagar, "A Review on Composition and Properties of Bagasse Fibers," International Journal of Scientific & Engineering Research, 6(5) (2015) 143-148.
 7)CERADE/PTC (Plastic Technology Center), "Study for Plastic Bags Minimization Project" (2017).

海洋学際教育プログラムの成果報告

保坂直紀

(東京大学特任教授 新領域創成科学研究科/大気海洋研究所)



東京大学理学部卒。同大学院博士課程で海洋物理学を専攻して中退。読売新聞社に入社し、おもに科学部で取材・執筆。同大海洋アライアンス、科学技術振興機構を経て2019年7月から現職。サイエンスライター、気象予報士。著書に「海洋プラスチック」「謎解き・海洋と大気の物理」「謎解き・津波と波浪の物理」など。趣味はヴァイオリン演奏。

NAOKI HOSAKA

社会課題をみつめる海洋学際教育プログラム

漁業資源や海底の鉱物資源、地球温暖化、そしてプラスチックごみ。現代の海洋が抱える問題を解決するには、科学の知が、しかも文理を越えた多分野にわたる複合的な科学の知が必要だ。そうした幅広く深い海洋の知を身につけた若者を育てることを目的に、「海洋学際教育プログラム」が2009年4月にスタートした。東京大学海洋アライアンスが5研究科の協力を得て日本財団の助成で運営し、東大の大学院生なら誰でも履修できる。学生は本来の専攻と並行して副専攻的に海を学び、規定の単位を取得すると大学から正式な修了証が与えられる。

プログラムの特徴は二つある。一つは、いま述べたように学際的事であること。理学や工学、公共政策など各研究科が開講する科目から、プログラムが指定するものを履修する。もう一つは、現代の社会課題を解決すべく、その複合的な知を生かす実践的な訓練を行うことだ。それは、プログラムが独自に設けた必修科目「海洋問題演習」に端的に表れている。

海洋問題演習は、夏休み前に終了するSセメスターと夏休み後のAセメスターの2期に分かれている。Sセメスターでは、3～4分野のテーマについて、それぞれ複数の専門家を招いて講義を受ける。テーマには、その時々で社会が解決を必要としている現代的な問題を取り上げる。2020年度は海洋プラスチックごみ、海洋再生可能エネルギー、マリンバイオセキュリティ、食料安全保障の4テーマを設定した。後期のAセメスターでは、各テーマに則してさらに絞り込んだ具体的な課題ごとに5～10人のグループを組み、現地調査や文献調査で解決策を探り、提言の形にまとめる。

海洋プラスチックごみ問題

2019年度と2020年度に海洋問題演習のテーマとして取り上げた海のプラスチックごみ問題は、いまに始まった話ではない。

プラスチックの使用は、20世紀の半ばから世界で急増した。捨てられた漁具に海の生き物が絡まる「ゴースト・フィッシング」の被害は1960年代から報告されており、これは、漁具の素材として、麻などの天然繊維に代わってプラスチックが使われるようになったことと一致している。

海岸は漂着したプラスチックごみで汚れ、国内外の環境NPOなどが、市民の有志とともに1990年前後から海岸の清掃を始めている。プラスチックごみは景観を損なうだけではない。海に流れ出たレジ袋などをクジラやウミガメが飲み込み、消化管にたまって健康に被害が及んでいる。

海洋プラスチックごみ問題の最近の特徴は、「マイクロプラスチック」が大きくクローズアップされていることだろう。小さなプラスチック片が海岸にたくさん落ちていることは以前から指摘されていたが、今世紀に入ってこれがマイクロプラスチックと命名され、現在ではその生成過程、生き物への影響などについて研究が進展している。

図1: 海洋学際教育プログラムの履修者募集ポスター
新型コロナウイルスの感染拡大で、オンライン開催に変更された



図2: 海岸に打ち上げられた漁網

大きさが5ミリメートル以下のプラスチック片をマイクロプラスチックという。もともと小さいものも、砕けて小さくなったものもある。動物プランクトンと似たサイズのマイクロプラスチックだと、それを魚が食べ、食物連鎖でさまざまな生き物の体内に広まっていく。私たちが着る化学繊維の服からも、たくさんの繊維状マイクロプラスチックが出る。

こうした研究の進展や、それまで「資源」としてプラスチックごみを輸入していた中国が2017年末から輸入禁止に転じたことなどを背景に、2018年はプラスチックごみ削減の動きが世界で高まった。6月にカナダで開かれた主要国首脳会議(G7)では、日本と米国を除く国々が「海洋プラスチック憲章」に合意し、各国が削減に向けて取り組むことを約束した。

こうした社会の流れをにらみ、2019年度の海洋問題演習では海洋プラスチックごみを初めてテーマに取り上げた。市民一人ひとりがこの問題を自覚し、国や自治体による取り組みを超えて社会の動きにつなげるにはどうしたらよいかを考え、提言しようという試みだ。

沖縄に海ごみを見に行った

このテーマのもとに集まった学生は大学院修士課程の12人。海の漂着ごみを見たことのない学生も多く、琉球大学の協力を得て2019年10月末に沖縄本島の海岸を訪れた。車が行き交う道路から離れた入りにくい砂浜には、漁網や浮き、ペットボトルなどのプラスチックごみがたくさん打ち上げられていた。沖縄の「青い海と白く美しい砂浜」は、清掃の努力あつての風景なのだ。

さらに、ごみのポイ捨てをなくす活動をしている琉球大学の学生、自然観察ガイド、沖縄県の廃棄物担当者、生物研究者などからプラスチックごみの現状を聞いた。

そのうえで、12人の学生は6人ずつの2グループに分かれ、プラスチックごみの削減に向けた市民の行動をうながすアイデアを、週1回の授業時間を中心に、それぞれがまとめた。それが、以下の二つである。

①プラスチックごみ問題を解決するための新ラベルの提言

～消費者が当事者意識をもつために～

世界の海に広がるプラスチックごみを減らすには、日本がプラスチックごみを大量に排出している当事者国であることを意識し、削減に向けて努力すべきだ。そのためには、私たちが身の回りの製品を手にするたびに、それを自覚できるようにしてはどうか。

その工夫のひとつが「プラマイ0（ゼロ）ラベル」だ。このラベルをプラスチックを使用した製品に付け、ごみとなったときの処理費用を何円か価格に上乗せする。



図3:河原の砂にも、たくさんのマイクロプラスチックが交じっている



図4:海洋問題演習で訪れた沖縄本島の海岸でごみを拾う学生たち



図5:ごみ処理費用を上乗せした製品につける「プラマイ0ラベル」

経済産業省の調査によると、消費者の76%は、自分のこだわりのあるものなら価格が多少高くても買うという。プラスチックごみを適切に処理して地球環境を守るためなら、それが消費者の「こだわり」にもなるのではないか。プラスチックごみの処理には費用がかかることを視覚に訴え、当事者意識をもってプラスチックごみの削減に取り組んでもらおうというアイデアだ。

単純計算では、たとえばペットボトル1本に5円を上乗せすると、年間10基程度のごみ焼却炉を建設できる。これを、十分な焼却炉をもたない離島などに施設をつくる際の原資とする。

もうひとつが「プラ0（ゼロ）ラベル」。こちらは、それがプラスチックを使っていない製品だということを示す付加価値としてアピールする。製品に数円を上乗せしたうえでラベルを付け、このラベルを集めると景品と交換できる。

消費者に対しては、これが環境に配慮した製品であることを印象づけられる。そうした製品をもつことが「カッコいい」と消費者が思えば、そこに共感の輪が広がる。景品を提供する企業は、環境面での社会貢献を消費者にじかにPRできる。市民を通して企業を巻きこむことができるしくみだ。

②提案:海洋ゴミ市民活動へ

海の環境を守る活動には、多くの団体や個人が参加している。そうした人や団体をつなぐポータルサイト「BLUE SHIP」には約2400団体が登録しており(調査時点)、公益財団法人「かながわ海岸美化財団」によると、ボランティア清掃に参加する人数も年を追って増加している。

しかし、現実には厳しい。訪問した沖縄県環境部では、海岸を清掃しても、2か月もすれば、またたくさんのプラスチックごみが打ち上げられている実情が紹介された。神奈川県・江の島の美化活動を続けているNPO法人「海さくら」のホームページにも、「この活動によって『海がきれいになってきた!』という実感もない」と書かれている。

こうしたなかで、ぜひとも海岸のごみ拾い活動を活性化したい。協力者が増えればごみの回収量は増し、話題性が高まって行政も動く。プラスチックごみに対する市民の問題意識も高まり、プラスチックの使用量が減るかもしれない。厳しい現実にもかかわらず、こうした活動に取り組もうとしているボランティアは、たしかに存在している。まずは多くの市民が動くこと。動きやすくすること。動く気にさせること。そのために、なにかよい方法はないか。

そこで注目したのが「ゲーミフィケーション」という考え方だ。ゲームがもつ「楽しさ」「遊び心」「競争心」などをゲーム以外の事柄に応用し、ゲーム感覚でさまざまな活動やビジネスなどを進めていこうという取り組みだ。スマートフォンのアプリケーションとしても広がっている「ゲーム」には、プレイヤーの自発性や持続性を促し、コミュニケーションの道具として集団での活動を促進する効果もあるとされる。



図6:プラスチック不使用の製品につけて付加価値を高める「プラ0ラベル」

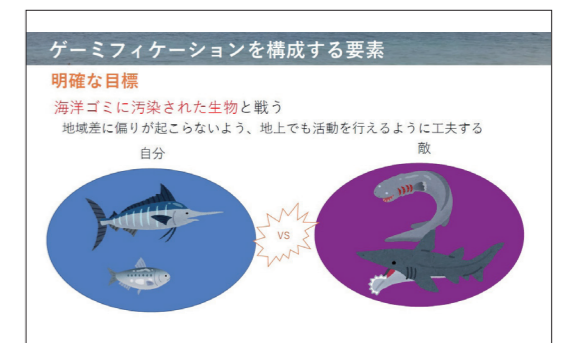


図7:自障の魚たちが、海ごみ汚染で凶悪化した海洋生物と戦うゲーム仕立て

ここで考えるのは、どこかでごみを拾ったことをユーザーどうしが報告しあうといった、フォーラム的なアプリではない。海ごみで汚染されて凶悪化した海洋生物を、自陣の魚たちが倒すという、まさに対戦型のゲームそのものだ。海ごみを拾う活動を実際に行ったり、プラスチックごみの実情を調べたりすると、自陣の戦力が上がる。そこが、海ごみへの関心や活動を高める動機づけになる。ユーザーどうしで競わせてもよし、複数のユーザーが協力して事にあたれば、そこにユーザー間の交流も生まれる。

ユーザーが、ゲーム好きの個人から漁業関係者、市民団体、研究者、さらには自治体関係者などへと連鎖していけば、海をごみから守る動きが、手のひらのスマートフォンを通して社会全体に広がることも期待できる。

アプリを試作するところまでは至らなかった。そのアプリを誰がつくり、誰が管理するかという問題も残っている。だが、ゲームがもつ社会への浸透力の強さを見逃す手はない。

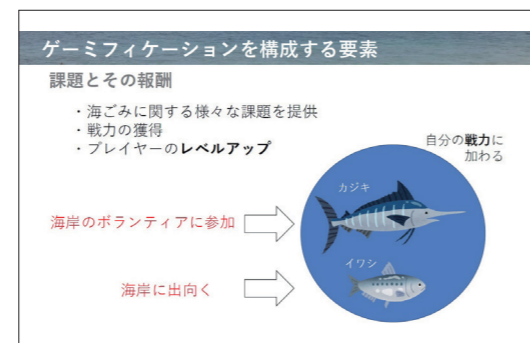


図8: 清掃ボランティアに参加することなどで自陣の戦力がアップする