

マイクロプラスチック化する廃プラスチック類 漂着ゴミの海生生態系への汚染リスク

山口 晴幸^{1*}

¹元防衛大学校建設環境工学科 (〒236-0053 神奈川県横浜市金沢区能見台通45-13-103)

* E-mail: hareyuki@oregano.ocn.ne.jp

漂流・漂着ゴミによる海洋・海岸汚染問題が地球規模的に深刻度を増す中、漂流・漂着ゴミの大半を占める廃プラスチック類ゴミに起因した海生動植物生態系への汚染リスクが顕在化しつつある。炭素(C)と水素(H)を主成分とした高分子化合物であるプラスチック類には用途・機能等に応じて、可塑剤、難燃剤、着色剤などの成形助剤や添加剤が混入されており、これらの混入剤には微量ではあるが、重金属類や残留性有機汚染物質などの有害化学物質が含有されている場合がある。また、廃プラスチック類ゴミは、海洋での漂流や海岸への漂着過程で、波風、塩分、紫外線、降雨等の下に曝されて劣化し、破断・破砕を繰り返して細片化するため、摂食による海生生態系への汚染リスクが一層高まることが指摘されている。

本報告では、主に、1998年から着手し19年間に至る沖縄島嶼での漂着ゴミ汚染の実態を分析すると共に、海浜域での微細化したマイクロプラスチック(大きさ5mm以下の細片)の調査方法や廃プラスチック類ゴミに起因する汚染リスクの化学的評価について論述している。

Key Words : *marine litter, Okinawa islands, waste plastic, maicroplastic, heavy metal, ecosystem*

1. はじめに

沖縄島嶼の海岸域にはサンゴ白砂浜やマングローブ湿地・干潟などが多く、世界的にも貴重な亜熱帯海洋性動植物生態系が育まれており、野趣豊かな自然景観や独特の自然環境が形成されている。また、島嶼の島岸線や沿岸域は、昨今特に、経済的視点から重要視する観光資源としての場であるばかりではなく、古来より、伝統的な海食資源の宝庫であると同時に、沖縄独特の「ニライカナイ」などの民俗的土着信仰と融合し、歴史・文化の発展史を古代から見詰め続けてきた敬虔的な処でもある。古琉球人のDNAが濃縮された発展史の恩恵が蓄積された島岸線や沿岸域の健全な自然景観・環境の子々孫々への伝承は、必然的にあるべき姿であると願っている。

ここでは、1998年から着手・継続してきた沖縄島嶼での漂着ゴミ調査(19年間)の成果を基調に、深刻化を増す近隣アジア諸国からの海洋越境ゴミによる汚染実態と、汚染リスクの観点から廃プラスチック類の化学的な分析評価を試みている。同時に、海生生態系への汚染リスクが高まる微細化したマイクロプラスチック(大きさ5mm以下の細片)を、海浜域で定量的に評価するための調査

方法などについて提案・考察し、防止・軽減対策等に関する今後の課題や動向などについて検討を試みている。

2. 世界的に深刻度を増す漂流・漂着ゴミ汚染

海洋を漂流するゴミや海岸に漂着するゴミの問題は、年々、世界的に深刻度を増しており、地球規模的な環境問題としての広がりを見ている。

我が国では、漂流・漂着ゴミ問題に関して、2007年頃から国内削減方策モデル調査を開始し、2009年7月には「海岸漂着物処理推進法」を施行して、軽減防止・回収処理対策等の確立に向けた実践的な取り組みを継続してきている。

また、近年では、世界的に関心が高まり、国際的な取り組みも進展しつつある。2015年4月に開催された日中韓3か国の環境相会合では、漂着する海洋ゴミ対策が行動計画に含まれることが採択されている。本年、2016年5月の伊勢志摩サミットに合わせて富山市で開催されたG7環境相会合では、漂流・漂着ゴミ対策などについて意見が交わされている。中でも、廃プラスチック

ク類ゴミが微細化したマイクロプラスチックの海生生態系への汚染リスクの問題が取り上げられ、G7 各国が発展途上国などと連携して海洋への拡散状況の観測や回収に取り組んでいくことが確認されている。

(1) 激増する近隣アジア諸国からの海洋越境ゴミ

昨年、2015年6月、環境省により、我が国の漂着ゴミの調査結果が初めて公表されている¹⁾。2013年度の全国での漂着ゴミ量の総計は31万トン～58万トンと推計されており、そのうちの35%がプラスチック容器や漁具類等の人工物とされている。特に、沖縄県や日本海沿岸域では、中国製や韓国製の近隣アジア諸国からの海洋越境ゴミが大半を占め、2010年から5年間での漂着ペットボトルは、沖縄県石垣市では中国製が82%、山口県下関市では韓国製が55%と報告されている。一方、兵庫県淡路市の瀬戸内海や茨城県神栖市の太平洋沿岸ではそれぞれ日本製が98%と82%を占め、沿岸域の海流や季節的風向等によって、海岸域での漂着ゴミの国籍や発生源にかなり相違のあることが指摘されている。

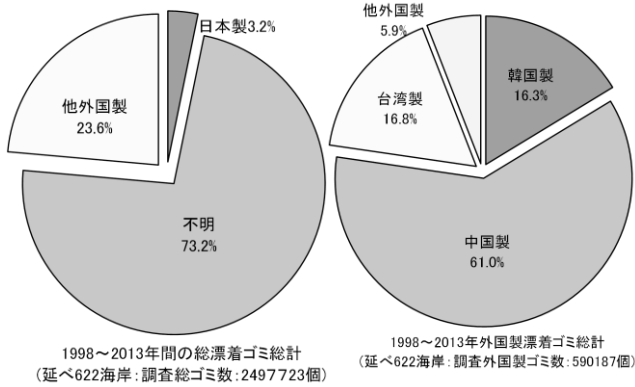


図1 琉球列島での16年間の総漂着ゴミ量の国籍分析

筆者が長年取り組んできた沖縄島嶼での漂着ゴミ調査では、各島嶼自体からのものはせいぜい3%程度で、環境省も指摘したように、中国製ゴミを中心とした近隣アジア諸国からの海洋越境ゴミが主体となっているのが特徴である。沖縄県での1998年～2013年までの16年間に亘る漂着ゴミ2,497,723個の分析結果のまとめでは(図1)、日本製ゴミは3.2%、外国製ゴミが23.6%、不明ゴミが73.2%であった²⁾。沖縄県の場合には、7割以上は判別不能な不明ゴミとなっている。不明ゴミはラベルや表記文字等が消失していて、国籍判別のできない漂着ゴミである。長期間・遠距離漂流した漂着ゴミほど不明ゴミとなる可能性が高くなることから、外国製ゴミの漂着が圧倒的に高い沖縄県での不明ゴミには、近隣アジア諸国からの外国製ゴミがかなり含まれているものと考えている。

国籍が判別された外国製ゴミでは、中国製ゴミが61.0%、台湾製ゴミが15.8%、韓国製ゴミが16.3%、他外国製ゴミが5.9%で、外国製ゴミの6割以上は中国製ゴミが占めていた。経年的な分析では、沖縄県の漂着ゴミ量は16年間で約8.3倍に増大しており、そのうち中

国製ゴミは27.3倍に激増していた。即ち、近年の沖縄県の漂着ゴミの増大は、中国製海洋越境ゴミの急増が大きな要因となっている(図2)。

沖縄島嶼への海洋越境ゴミの大量漂着は、巨大人口を抱える中国の大都市が大陸沿岸域にも集中しており、爆発的な経済成長下での大量消費・大量廃棄社会から吐き出さ

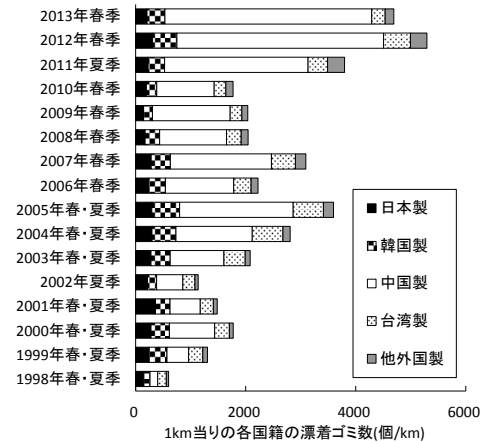


図2 各国籍での漂着ゴミ量の16年間の推移

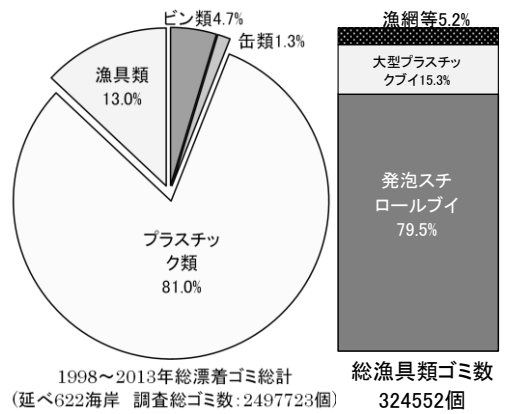


図3 廃プラスチック類ゴミが80%以上占める漂着ゴミ

れた膨大な量のゴミの河川・沿岸域・海洋への不適切な投棄によるものと考えている。殊に、冬場には、黒潮海流に乗り北・北西風に運ばれ、毎年、大量漂着を繰り返してきている。

(2) 激増する廃プラスチック類ゴミの脅威

流木や海藻類の分解可能な自然系ゴミを除くと、沖縄島嶼での漂着ゴミの種類は生活廃棄物と漁業廃棄物が大半である。その中で、総ゴミ数の81.0%はペットボトル等のプラスチック類ゴミである。回収・除去処分の厄介な漁具類ゴミ(発泡スチロールブイ、大型プラスチックブイ、漁網塊等)は13.0%であるが、そのうちの79.5%を発泡スチロールブイ、15.3%をプラスチックブイが占めている(図3)。

膨大な量の海洋越境ゴミが漂着する沖縄島嶼では、長期間・遠距離漂流した廃プラスチック類ゴミが大半で、漂流・漂着過程で塩分・紫外線・降雨等に曝されて劣化し、破片化したもや破碎を繰り返して微細化したマイクロプラスチックの漂着も多い(写真1)。

ちなみに、米国ジョージア大の研究チームによる報告では³⁾、2010年に世界の海に流出したプラスチック類ゴミは480万トン～1270万トンに上るとの推定結果



写真1 マイクロプラスチックの漂着状況

が報告されている。国別の流出量では、中国が世界合計の28%(132万トン～353万トン)を占め最も多く、次いで、インドネシアが約10%(40万トン～127万トン)、3位がフィリピンの6%(29万トン～76万トン)で、近隣アジア諸国の流出量が上位を占めており、日本は30位(0.4%、1.9万トン～5.1万トン)にランク付けされている。

今後も、近隣諸国の人口増加に伴いプラスチック製品類の生産・需要も一層拡大し、消費・廃棄による海への流失・海浜への漂着は、益々増大することが懸念される。

3. 廃プラスチック類ゴミの有害性

石油化学製品である廃プラスチック類ゴミが破損・劣化・腐食することで曝露される有害化学物質は、海浜・干潟・湿地の土壌・水質汚染を誘発し、しいては貴重な海浜植物や底生生物等に対して甚大な汚染リスクとなることが懸念されている。

また、最近では、漂流・漂着過程で破碎を繰り返し、微細化したマイクロプラスチックには、残留性有機汚染物質(PCB, PBDE など)が高濃度で吸着していることが科学的に検証されており⁴⁾、直接的な生物体内への取り込みによる海生生態系への汚染リスクの顕在化が懸念されている⁵⁾。

特に、プラスチック類ゴミを主体とした近隣アジア諸国からの海洋越境ゴミが激増する沖縄島嶼では、我が国でも独特の希少な亜熱帯海洋性動植物生態系が形成されている。深刻化する漂着ゴミによる汚染リスクを軽減・防止し、海洋・海浜環境の保全推進を図っていく上においても、廃プラスチック類を主体とした漂着ゴミからの有害化学物質の曝露性、海生生物体内への有害化学物質の取り込み実態に関する科学的検証・実証が重要となる。

このような科学的な取り組みは、深刻化する漂着ゴミ問題に対して一層強く警鐘を鳴らすことに繋がり、放置・停滞の許されない迅速な回収・除去の必要性を広く周知徹底させ、軽減・防止対策の更なる促進を図っていくためにも重要である。

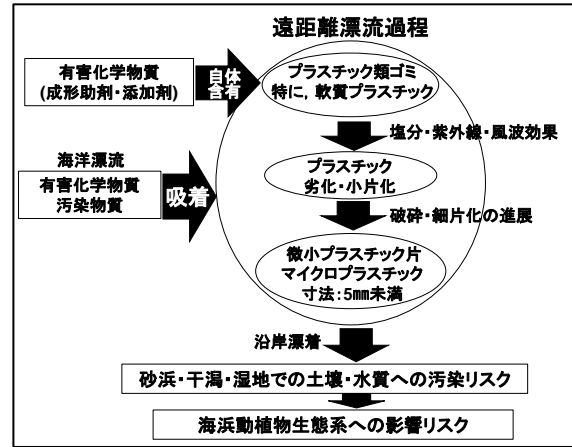


図4 マイクロプラスチックの有害性

(1) 含有・吸着する有害化学物質

プラスチック類は炭素(C)と水素(H)を主成分とした高分子化合物で、用途・機能等に応じて、可塑剤、酸化防止剤、光安定剤、着色剤、難燃剤、帯電防止剤等の各種の成形助剤や添加剤が混入されている。これらの成形助剤や添加剤には微量ではあるが、有害化学物質が混入している場合がある。例えば、着色剤には顔料や染料が使用されており、中でも無機顔料の使用頻度は高い。着色剤の成分元素には鉛(Pb)、亜鉛(Zn)、カドミウム(Cd)、クロム(Cr)、セレン(Se)、アンチモン(Sb)、チタン(Ti)などの有害元素が含まれている。近年ではPb, Cd, Crなどの使用量は減少しているが、黄鉛などは経済面で他顔料への代替が難しく、ポリ塩化ビニルのプラスチック製品などには未だに広く使用されている。他にも特に、臭素(Br)、塩素(Cl)、アンチモン(Sb)、アルミニウム(Al)等は難燃剤として、また可塑剤として塩素(Cl)等が添加・混入されている場合が多い。

上述したように、漂流・漂着過程に紫外線・塩分・降雨や波力・風力の下に曝されて劣化し、破碎・破損を繰り返して微細粒子化したプラスチックの細片は、自身が含有する有害化学物質に加え、吸着した有害化学物質をも広く拡散・運搬する汚染リスクを有している(図4)。取り分け、大きさ5mm以下の微細なプラスチックの細片はマイクロプラスチックと称され、摂食による海洋小生物や砂浜・湿地・干潟に棲息する底生小生物の汚染リスクを高めることに繋がる。さらに、小生物を餌とする大型海生生物(海鳥、魚、海亀など)の体内で濃縮される食物連鎖の危険性が指摘される。

特に、沖縄島嶼では、圧倒的な漂着量を示す中国製ゴミを主体とした近隣アジア諸国からの海洋越境ゴミの深刻な海岸域が多い。当然、生産国の製品規格や素材の違いによって、有害化学物質の種類・添加量は異なってくる。そのような視点から、漂着ゴミによる汚染リスクを科学的に評価することは必須な課題となる。

(2) 重金属類等の有害化学物質の分析評価

筆者は、2005年から、漂着ゴミに起因する有害化学物質の自然環境への汚染リスクを解明するための分析化学的研究にも取り組んできた⁹。これまで、生活廃棄物や漁業廃棄物などの廃プラスチック類を中心に多岐の種類に亘る漂着ゴミを対象として、国籍の相違による素材の影響や化学成分の含有・溶出特性などを把握するために、主に、重金属類等を中心に、土壌・水質基準等に規定されている無機系有害化学物質の定量的評価を試みてきた。その主要な成果は、平成26年度第2回沖縄県海岸漂着物対策推進協議会(2015年3月開催)での会議資料『漂着ゴミからの有害化学物質による海岸汚染リスクの検証・評価に関する調査研究』(沖縄県HP参照)などで詳述している。

大型ブイやフロート類をはじめ、ペットボトル等の容器類を対象に、色調・タイプ・材質等の異なる200サンプル以上の廃プラスチック類の漂着ゴミを国籍別に分類し、含有元素成分組成や溶出する重金属類等の有害元素成分の定量分析を試みている。

特に、プラスチック製品の製造過程で、素材に混入・添加された有害化学物質の把握・評価を目的としており、廃プラスチック類ゴミの漂着サンプルは、予め入念に洗浄(水洗い洗浄と超音波洗浄)したものを用いている。プラスチック素材の含有元素成分組成を蛍光X線分析法で、有害元素成分の溶出量を原子吸光分光分析法でそれぞれ定量している。なお、原子吸光分光分析の前処理に当たる溶出試験では、洗浄後、プラスチック素材を細かく裁断して使用し、また、生物体内への摂食を考慮して、攪拌浸潤液(溶媒液)のpH(HClで調整)を数種類に変えて抽出した溶出液の分析を行っている。

図5は、プラスチック容器類をはじめ、沖縄島嶼で大量漂着する大型丸ブイ類と小型フロート類での含有元素成分のうち、生態系等に好ましくない有害元素成分・16元素の含有状況を例示している。Cl, Ti, Al, Pb, Zn, Baなどの含有状況が種類・タイプや国籍でかなり

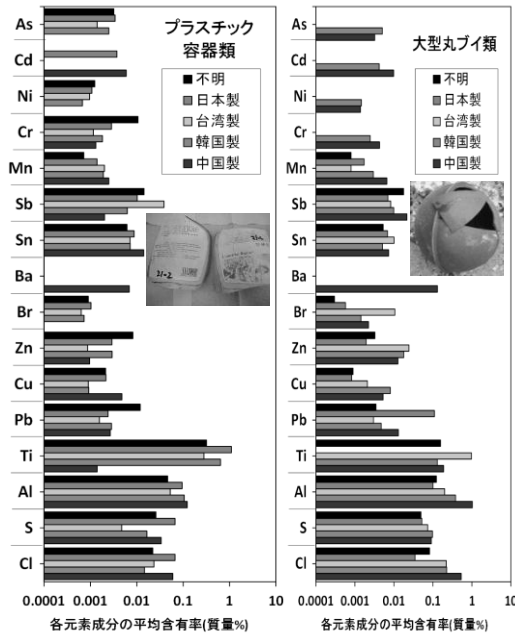


図5は、プラスチック容器類をはじめ、沖縄島嶼で大量漂着する大型丸ブイ類と小型フロート類での含有元素成分のうち、生態系等に好ましくない有害元素成分・16元素の含有状況を例示している。Cl, Ti, Al, Pb, Zn, Baなどの含有状況が種類・タイプや国籍でかなり

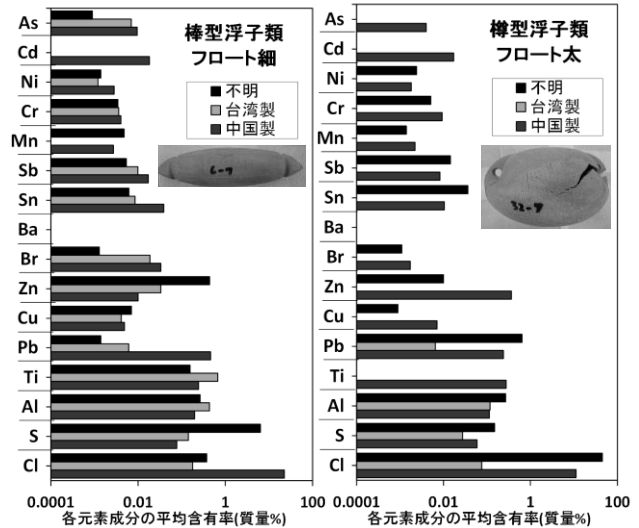


図5 廃プラスチック類ゴミに含有される有害元素成分

明瞭に把握することができる。プラスチック類は炭化水素を基本成分としているが、少量・微量ではあるが各種の有害元素が検出されるのは、既述したように、着色剤(顔料)、難燃剤、絶縁剤、可塑剤、軟化剤、発泡剤等、用途・機能に応じて様々な成形助剤や添加剤が混入されているためと推察される。特に、Br, P, Cl, Sb, Al, Mgは難燃剤として、ZnとTi等は着色剤(顔料)、PとCl等は可塑剤として添加・混入されている可能性が高い。色調に関する詳細な評価は試みていないが、概ねAl, Ca, Si, Ti, Clは色調の相違によらず、いずれの種類・タイプのプラスチック類でも含有量の比較的高い元素成分であった。

また、図6には、プラスチック自体に含有されている有害元素の溶出性を、プラスチック質量1kg当りの溶出量(μg/kg)として、CrとPbの場合を例示している。種類や国籍によって両元素の溶出性は異なるが、Crでは大型丸ブイ類と棒型浮子(フロート細)類、Pbでは棒型浮子(フロート細)類と樽型浮子(フロート太)類で高い溶出性が窺われる。特に、Pbの場合には、中国製浮子類

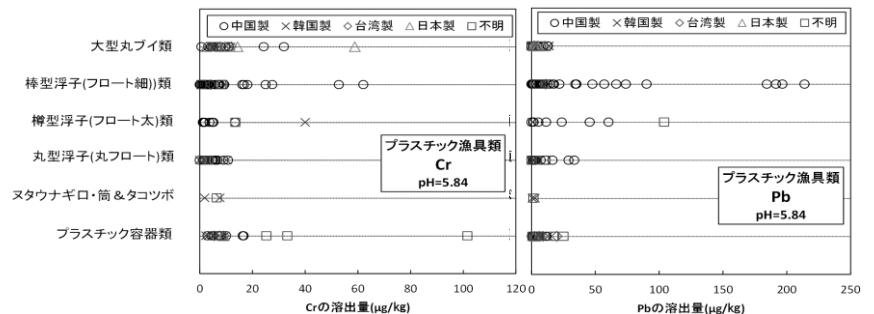


図6 各種廃プラスチック類ゴミからのCrとPbの溶出性

からの溶出性の高いことが分かる。また、図7には両元素を含めた13元素の平均溶出量を種類別にまとめている。CrやPbの他、Zn, Al, Mn, Ba等の有害元素は共通して高い溶出性を呈することが分かる。さらに、図8に例示するように、CrやPbをはじめ各種の重金属類等は酸性度の高い(pHの低い)溶媒液に浸潤させると、一般に、溶解性が高まる傾向がある。そのため、マイクロプラスチック化した微細なプラスチック粒子が海生生物の体内に取り込まれると、酸性度の高い体内液で溶解性が高まり、汚染リスクに拍車がかかることに繋がる。

以上、廃プラスチック類ゴミの漂着は海浜域の土壌・水質汚染に加え、棲息する底生生物などの海生生態系への汚染リスクを高める要因となる。

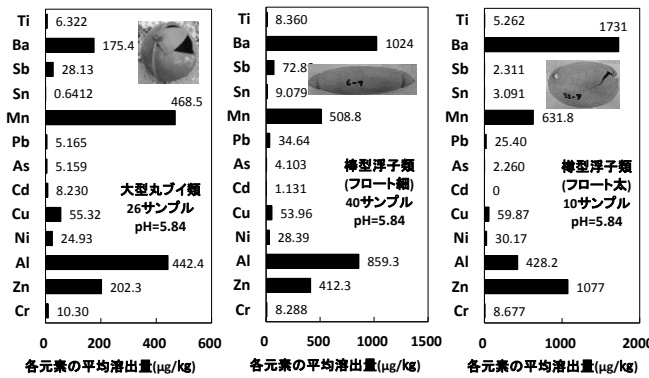


図7 廃プラスチックゴミからの各種有害元素成分の溶出性

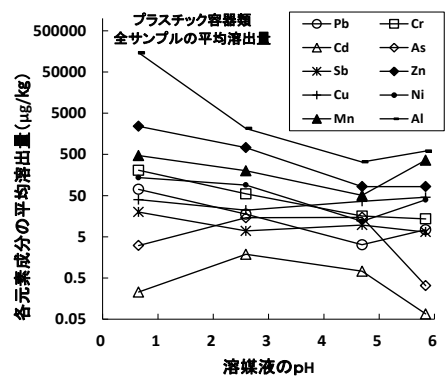


図8 酸性度の増加に伴う溶出性の増大

4. 海浜域でのマイクロプラスチックの定量的評価と漂着実態

上述したように、廃プラスチック類ゴミが、漂流・漂着過程で波風力・塩分・紫外線・降雨等の下に曝され劣化し、破碎を繰り返して大きさ5mm以下の微細粒子化したプラスチックの細片は、総称して、マイクロプラスチックと呼ばれている。プラスチック自体に含有されている有害化学物質に加え、漂流過程で高濃度の残留性有機汚染物質(PCBなど)を吸着することで、摂食による海生生態系への影響や食物連鎖による汚染リスクの拡大が懸念され、早急な対応・対策が世界的に叫ばれている。

だが、海洋・海浜域で、マイクロプラスチックを定量的に評価するための統一的な調査分析方法は確立されていない。ここでは、2016年春季(3月中旬~4月下旬)に実施した沖縄県八重山諸島・宮古島(7島44海岸)での調査結果に基づいて、海浜域に漂着・混在しているマイクロプラスチックを定量的に評価するための調査分析方法を提案すると共に、その漂着実態の一例を提示する。

(1) マイクロプラスチックの調査分析方法の提案

提案するマイクロプラスチックの調査分析フローを図9に提示する。海浜域の代表的な地点を選定して、

1m四方の調査枠を設定し、深さ1~2cm程度の表層部分を掻き集め、5mmふるい通過物質を収集する。海水等の水を入れたバケツ等に水浸して手やヘラで攪拌し、捕集した浮遊物質からマイクロプラスチックを抽出する方法を執っている。水浸・攪拌の操作はプラスチック小片の浮遊が認められなくなるまで海水等の水を入れ替えて、適宜、何度か繰り返す。浮遊物質にはマイクロプラスチックの他、木くず・海藻類・軽石などの異物が多数混在していることから、乾燥後、肉眼的に抽出できる程度(概ね0.5mm以上)の大きさのマイクロプラスチック

(5mm以下)を収集し、その個数と質量を計測して海浜域に漂着・混在しているマイクロプラスチックを定量的に評価する調査分析方法となっている。なお、調査枠内で予め回収した大型のプラスチック破片とふるいに残留した5mm以上のプラスチック片は、劣化によりマイクロプラスチック化する予備軍的な役割を担う可能性が高いので、同時に質量計測して定量評価をする。

だが、現地調査を通して、下記の事項が主要な検討事項と思われた。①海岸長が長い場合、平均的評価のために、調査枠を複数設定する必要があるのか否か、必要であれば、その距離間隔の取り方のこと。②多種類の異物が混在した浮遊物質(5mmふるい通過物質)から、大きさ

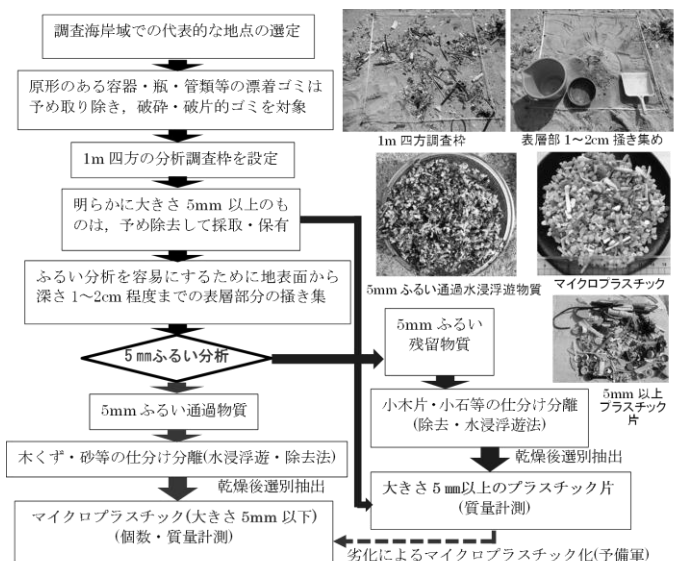


図9 提案するマイクロプラスチックの調査分析フロー

0.5mm程度より小さなマイクロプラスチックの微細片を肉眼で抽出することは非常に難しく、多大な時間と労力を要する。そのためマイクロプラスチックの質的評価ではネグレクトとしてもほとんど問題はないが、個数的評価では何らかの工夫を凝らす必要があること。

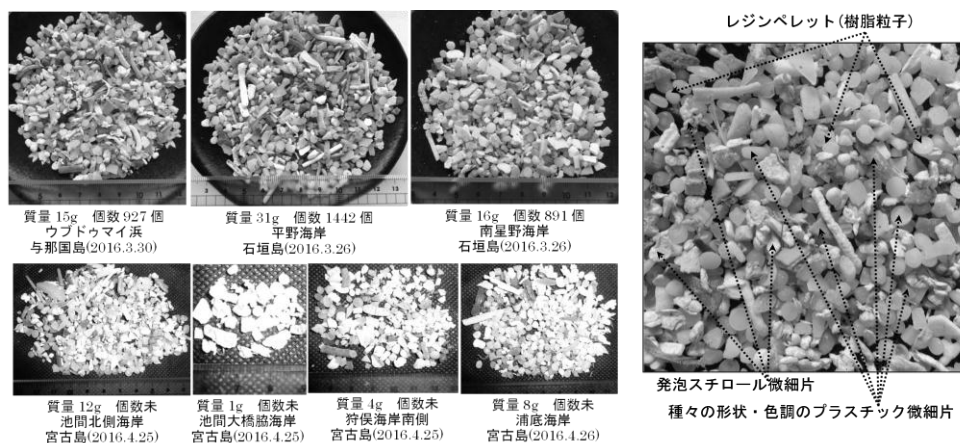


写真2 代表的な海浜域でのマイクロプラスチックも漂着量と主要な構成素材

(2) 沖縄島嶼でのマイクロプラスチックの漂着実態

海岸域でのマイクロプラスチックの漂着実態を定量評価するために開発した上記の方法に基づいて、2016年春季、漂着ゴミ調査に加えて、初めてマイクロプラスチックの調査分析を、沖縄県八重山諸島・宮古島の7島44海岸で実施している。

マイクロプラスチックの漂着状況は、やはり漂着ゴミの多い海岸で高くなる傾向が認められ、しかも、そのような海岸では、マイクロプラスチックの予備軍ともなる大きさ5mm以上のプラスチックの破片量も多くなる傾向にあった(図9参照)。現在、調査結果は整理中であるが、1m四方の調査枠で1000個以上のマイクロプラスチックが確認される海岸もあり(写真2)、5000~10000個を超える海岸も確認されそうである。今後、マイクロプラスチックの漂着量を定量的に評価するために、漂着度合に応じて、海岸にランク付けを図っていきたいと考えている。ちなみに、マイクロプラスチック1000個程度の質量は約15gで、500mlペットボトル容器(様々な形状・種類のものがあるが、1本当りの質量は概ね25~35g/本)に換算すると0.4~0.6本程度に相当する。

マイクロプラスチックは、主に、①様々な形状・色調の微細片、②プラスチック容器類の中間材料であるレジンペレット(樹脂粒子)、③発泡スチロールの微細片から構成されている(写真2)。マイクロプラスチック化する以前の元来の形状・用途・国籍等を知ることは不可能であり、様々な微細片には種々の素材・材質のものが含まれていると思われる。特に、中国製ゴミを主体とした近隣アジア諸国からの海洋越境ゴミの深刻な沖縄島嶼では、マイクロプラスチックには多種類の素材・材質に関連した成形助剤や添加剤が含有されているものと思われる。

5. おわりに

今回初めて沖縄県八重山諸島・宮古島でのマイクロプラスチックの実態調査を通して、今後、下記の事項にも

注視して、廃プラスチック類ゴミの発生源・抑制対策等を検討していく必要がある。

- 1) 海浜域のマイクロプラスチックは、海洋漂流しているものよりも遥かに高密度で漂着・混在している可能性が高い。その要因として、漂着した廃プラスチック類ゴミの劣化がマイクロプラスチックの供給源になっている可能性が指摘される。
- 2) 長期間遠距離漂流して漂着する廃プラスチック類ゴミほどマイクロプラスチック化する可能性が高いことから、海洋越境ゴミの深刻な沖縄島嶼でのマイクロプラスチックの漂着・混在状況はかなり高いものと判断される。今後、比較検討のためにも全国的な調査が求められる。
- 3) 海浜域に漂着・混在したマイクロプラスチックの回収・除去は非常に難しいことから、劣化によってマイクロプラスチック化する以前に、定期的な清掃活動を迅速に図っていくことが、一層重要となる。
- 4) 海浜域に漂着・混在しているマイクロプラスチックは木くずや海藻類の漂着帯にみられることが多いことから、海岸清掃に際しては、そのようなことに注視して回収・除去することを考えていく必要もある。

参考文献

- 1) 読売新聞社：漂着ペットボトル・大半中国製…日本海や沖縄、読売新聞、2015年6月14日発行。
- 2) 八重山毎日新聞社：漂着ゴミ中国製が27倍に増加、八重山毎日新聞、2015年4月26日発行。
- 3) 日本経済新聞社：プラごみの海洋流出・最大で年1270万トン・世界の推計、日本経済新聞、2015年2月13日発行。
- 4) 八重山毎日新聞社：オカヤドカリから有害汚染物質検出、プラ類誤食か、八重山毎日新聞、2015年3月25日発行。
- 5) 東京新聞社：イワシ8割から微細プラスチック おなかに東京湾のごみ、東京新聞、2016年4月9日発行。
- 6) 山口晴幸：沖縄の漂着ゴミと有害物質、土木学会第17回地球環境シンポジウム講演集(B 論文集)、pp.59~70、2009。

