

総説 (Review)

漂着マイクロプラスチック調査から見た海洋プラスチック汚染

池貝 隆宏

(神奈川県環境科学センター)

Marine plastics pollution as seen from the beached microplastics survey

Takahiro IKEGAI

(Kanagawa Environmental Research Center)

キーワード：漂着マイクロプラスチック，相模湾，発生源，黒潮，発泡スチロール破片

1 はじめに

2023年はSDGs対象期間の折り返し点に当たるが、Sustainable Development Report¹⁾によれば、海洋環境に係るSDG14「海の豊かさを守ろう」の世界平均の達成度は、4段階のうち最低ランクにあたる"Major challenges"と評価された。2030年の目標達成が困難なことが浮き彫りにされたといえるが、その最大の原因が海洋プラスチック汚染であることは言を俟たない。プラスチックの海洋流出がはじめて確認されたのは1950年代とされる²⁾が、今では流出量は年間800万トン以上に増加、対策を講じなければ2050年までにその総重量が魚類を上回る³⁾と推計されている。こうした深刻な海洋プラスチック汚染の中でも近年世界的に注目されているのが、マイクロプラスチック(以下、MP)である。MPのサイズは、国連の海洋汚染専門家会議(GESAMP)では5mm以下"an upper size limit of 5mm"²⁾と定義しているが、環境省は"5mm未満"⁴⁾と整理している。5mmを境にサイズを区切るという点で両者に本質的な違いはない。MPは、樹脂ペレットやスクラブ剤として化粧品に含まれるマイクロビーズのように小さなサイズに成形され外的作用による細片化をあまり受けずもとの形状を保持している一次MPと、プラスチック製品などが環境中で劣化し細かく砕けた二次MPに大別され、形態や材質が多様である。

微小なプラスチックが海洋生物の脅威となりうるのが初めて指摘されたのは1972年⁵⁾であるが、そのリスクが本格的に世界で共有されたのはMPの定義が定まる7年前、微小プラスチックが海洋中の希薄な有害化学物質を高濃度

に吸着し海流に乗ってこれを遠隔地へ輸送する媒体として振る舞う⁶⁾ことが指摘された2001年以降である。MPの海洋中の総量はおよそ5兆個⁷⁾と推計されているが、その分布は一様ではなく、環流に集積する傾向があり、その挙動は粗大なプラスチック漂流物と共通する。北太平洋環流に近い日本近海もMPの漂流量が多く、個数濃度は172万pieces/km²で全海洋平均の27倍も高い⁸⁾という推計値もある。すなわち、日本近海はMPの削減対策を積極的に推進すべき海域であるといえる。

MPの削減について国際的な議論が本格化したのは、2015年のエルマウサミットからである。これ以降、欧米諸国は、マイクロビーズの化粧品使用の禁止(米、2015年)、使い捨てプラスチック容器の利用禁止(仏、2016年)などの法制化や使い捨てプラスチックの流通禁止を目的とした特定プラスチック環境影響低減指令の発効(EU、2019年)などの対策を速やかに開始した。Jambeck *et al.*⁹⁾は、海洋に流出しうるプラスチックの利用区域を海域から50km圏として、ここからの流出量が2010年において480~1,270万トンあり、その1/3が中国やフィリピンに由来すると推計している。海流によって遠隔地から輸送されるというMPの典型的な挙動を考えれば、日本近海のMP削減には黒潮上流に位置する東アジア地域の対策の推進が不可欠といえるであろう。一方、国内からも河川を通じてMPが海域へ流出していることが確認されていることから^{10,11)}、前述の国際的な対策のみならず、国内対策を進めることも重要である。MP削減に資する主要な国内対策には、MPの各種製品への使用抑制や排出削減の努力義務を規定した

海岸漂着物処理推進法の改正（2018年）、使い捨てプラスチックの排出削減目標や使用済みプラスチックのリユース・リサイクル目標を設定したプラスチック資源循環戦略の策定（2019年）、多様なプラスチック製品に関する包括的な資源循環体制を強化する仕組みを導入したプラスチック資源循環促進法の制定（2021年）などがあげられる。

神奈川県では、こうした内外の状況に歩を合わせて、2016年の県議会第3回定例会で神奈川県沿岸域のMP問題が取り上げられ、地方自治体としてできる削減対策の基礎となる調査研究の推進が要望された。神奈川県環境科学センター（以下、環境科学センター）では、この要望を踏まえ、翌2017年から相模湾を対象にMPの調査研究に着手した。地方自治体としては最も早い時期から取組を開始し、現在まで継続して実施している。海洋MPに対する調査研究の取組分野は、①環境中の分布と挙動の解明、②発生源の解明、③MPに由来する化学物質の実態把握、④生態系・人健康への影響評価、⑤モニタリング手法の構築、⑥環境中分布の将来予測、⑦代替物質・技術の開発、の7分野に概ね区分できると思われる。環境科学センターでは、地方自治体が実施する削減対策に資するという視点から、①～③の分野を対象に、ローカルな実態把握と発生源の解明につながる調査研究を実施してきた。

本稿では、これまでに環境科学センターが実施した海岸漂着MPに関する研究のうち①及び②に関する調査に焦点を当てる。これまで不明な点が多かった発泡スチロール破片の挙動に着目してこれらの調査結果を改めて整理し、相模湾のMP漂着の特徴を明らかにするとともに、そこから浮かび上がる海洋プラスチック汚染の課題についても言及する。なお、本稿に掲載したMPのサイズは、前述のGESAMPの定義で整理したものである。

2 海岸の漂着マイクロプラスチック調査

2.1 調査手法の確立

日本近海のMPの漂流量は、環境省が2014年から調査しており¹²⁾、その方法はニューストネットを使用し海面を漂流するMPを採取するもので、世界的にもこの手法を用いた研究例が多い¹³⁾。これに対し、環境科学センターは漂流

MPではなく、海岸の漂着MPに着目し、これを採取する方法を選択した。これは、次の理由による。

陸域近傍に漂流するMPは、サイズが数mm程度まではnear-shore trapping¹⁴⁾により海岸漂着と流出を繰り返し、その過程で紫外線による光酸化分解により細片化が進行¹⁵⁾するが、数mm以下に破碎されるとnear-shore trappingが効かなくなり、沖合に広がる¹⁴⁾ことがわかっている。この陸域近傍のMPの挙動は、東京湾、駿河湾、伊勢湾及び瀬戸内海でニューストネットを用いて行われた漂流MP調査¹⁶⁾と環境科学センターが行った相模湾沿岸の漂着MP調査のサイズ分布の比較からも明らかである。漂流MPでは1.6mm以下のMPが全体の60%を占めるのに対し、漂着MPではその半分の31%であり¹⁷⁾、沖合には沿岸に比べてサイズの小さなMPの漂流量が明らかに多い。このMPの分布からいえることは、海岸はMPの製造現場であると同時に、その漂着量は沖合とは異なる陸域近傍の漂流状況を直接反映する、ということである。つまり、ローカルな陸域近傍の分布状況を把握することは漂着MPでも可能と考えられる。漂着物採取は、試料採取に要する手間や経費の点で海上の漂流物採取より優れており、後述するように一般参加を前提とした調査にも活用できることから、地方自治体が行う調査の手法としてメリットが大きい。しかし、検討を始めた時点では、漂着MPの定まった調査法はまだなかったため、まず、試料採取法の検討から着手した。

海岸では、漂着MPは満潮線上に偏在している。ここに一定面積を持つ採取区画を設け、区画内の漂着物を砂ごと採取しメッシュサイズ4.75mmの篩を通過したものを1つのサンプルとする試料採取法を検討した。満潮線は、漂着物が汀線と平行に帯状に連なる形状を呈しているが、漂着物が集積する幅は数10cm程度のため、採取区画の一边は満潮線の幅をはみ出さない長さとして40cmとした。40cm四方の採取区画内の漂着物を表面から3cm分を砂ごと採取すると、サンプル量は小型の家庭用バケツ半分程度となる。試料採取後に実験室に持ち帰ってから行う篩分けと比重分離を用いたMP分取工程の作業量を考慮すると、現場での採取量はこの程度が上限と考えている。

三浦半島突端の城ヶ島と真鶴岬を繋ぐ相模湾の海岸の総延長距離は154km¹⁸⁾に及ぶ。長い海岸線を持つ相模湾沿岸の漂着MP調査の本質は、複数の海岸の漂着状況を比較することに他ならない。具体的には、海岸ごとのサイズ別の漂着個数分布を比較することで、漂着状況の違いを見ることになる。複数の海岸の状況を統計的に適正に比較するためには海岸ごとの漂着状態の代表値を求める必要があるが、これは採取区画を設ける位置とサンプルの採取数に大きく依存すると考えられる。検討の結果、満潮線上の漂着物が多いところを目視で2か所選んで採取点とし、そこに採取区画を設けて得られた2サンプルの平均値をその海岸の代表値とする方法を設定した¹⁹⁾。木片などの漂着物が多いところにはMPも多く漂着しており、そこを狙って採取していることから、この方法で得られる代表値は満潮線上の最大ベースの漂着量といえる。漂着物の多寡は目視で判別するため恣意性を排除しきれないが、均等間隔で設定した採取点から得られる平均ベースの数値と比べてばらつきが少なく¹⁹⁾、代表値として優れていると考えている。

2. 2 黒潮の湾内流入がない場合の漂着状況

MPの劣化反応による細片化は主に砂浜で進行すること¹⁵⁾及び調査場所の条件をそろえやすいという地形的特徴を踏まえ、調査対象海岸は、砂浜海岸の中から選定した(図1)。相模湾沿岸では、東から逗子海岸、鶴沼海岸、高浜台海岸及び山王網一色海岸の4か所、これに比較のため東京湾側の久里浜海岸を加えた5か所を定点として調査を実施した¹⁷⁾(以下、海岸名称から海岸の語を省略して記載)。これらの海岸はいずれも河口に隣接しており、相模湾の4か所については調査地点を河口の西側に設定した。相模湾には反時計回りの循環流(図1拡大図部分に表示)が常在し、伊豆小笠原海嶺上を通過する黒潮軸流の位置に応じてその潮流の強弱が変動する²⁰⁾。この循環流は、黒潮が沖合で南下すると潮流が弱くなったり、逆向きになるケースもある²⁰⁾ようだが、大抵の場合は反時計回りで、その場合、沿岸部では西向きの流れとなる。調査地点を河口の西側に置くことで、潮流に運ばれる海上の漂流MPと河口から流出する内陸由来のMPをともに採取することができる。調査は天候による変動をできるだけ排除できるよ

うに、荒天時調査を除き前10日間に平均風速10m/s超、時間雨量10mm超の強風、強雨がない日に試料採取を行った¹⁷⁾。

2017年5月から2018年5月までに、入込観光客の影響で砂浜が荒れる夏期を除いた3シーズンに延べ15回調査を行った。この一連の調査で採取した漂着MPは、非定常排出による漂着分を除く²¹⁾と、85%が二次MPでその形態はほとんどが破片であり、材質はポリエチレン24%、ポリプロピレン18%、最も漂着量が多かったのはポリスチレンの52%(以下、これら3種を主要3材質と総称)であった²²⁾。このうち、ポリスチレンは、ほぼすべてが発泡スチロール破片であった。発泡スチロール製の梱包材で保護された製品の箱を開封したとき、梱包材のくずが箱の内部に残っている様子を目にすることがある。海岸に漂着する発泡スチロール破片は、この箱に残ったくずを押しつぶしたような形状をしており、色はもとの白色の場合もあるが、汚れが付着して薄灰色～薄褐色を呈しているものも多く、環境中での滞留時間が長いことを伺わせる。主要3材質は見かけの比重が1より小さく海面に浮くため、満潮線上のMPの大部分を占める。この期間の試料採取時には、伊豆諸島北部から相模湾にかけて冷水域が存在した影響で、平年に比べて黒潮の相模湾への流入は少なく、相模湾への黒潮の影響は平年より弱かつ

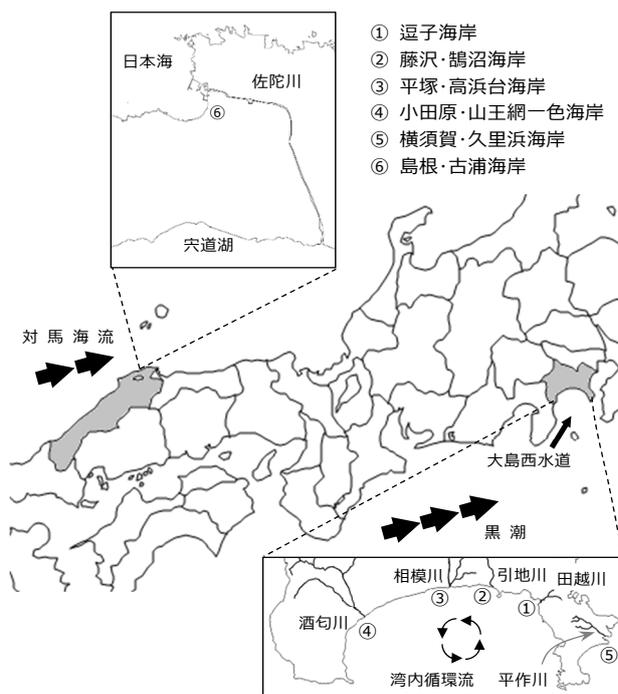


図1 調査地点図

たことを確認している¹⁷⁾。15回の調査のうち、2017年及び2018年の5月の調査結果から非定常排出による漂着分を除外して算出した平均的な漂着状況を図2に示した²²⁾。5月は梅雨による出水期前であり、天候も比較的安定していて各海岸の年間を通じた平均的な状況の比較に相当と考えられる。

この結果を見ると、漂着状況は海岸によって大きく異なることがわかる。もし、黒潮によって相模湾内に流入する外洋由来のMPの影響が大きければ、黒潮流入によって強められた湾内循環流²⁰⁾の作用で相模湾沿岸の4つの海岸の漂着状況は類似したものとなると推測されるが、そのようにはならなかった。この漂着状況の違いは、外洋由来のMPより、河川を經由して内陸から湾内に流出したMP、すなわち内陸の発生源の違いが大きく影響していると推測される。

漂着MPが近隣の河川を經由して海岸に到達したことを立証するため、吸着化学物質を指標として鶴沼と引地川を対象に調査を行った。引地川は流域の発生源の関係で河川水中の有機フッ素化合物の一種パーフルオロオクタンスルホン酸(PFOS)の濃度が特異的に高い²³⁾。一方、鶴沼の海水のPFOS濃度は河川水に比べてかなり低いのにに対して、鶴沼の漂着MPのPFOS吸着量は他の海岸のものに比べて特異的に高かった²²⁾。これらの結果及び漂着MPに吸着したPFOSのMP/水分配係数の検討から、鶴沼に漂着したMPに吸着したPFOSは引地川を流下中に河川水から吸着したと考えるのが合理的であ

ることがわかった²⁴⁾。

黒潮の影響が弱ければ河川流出の影響が相対的に強く出るのは当然の帰結ともいえるが、相模湾沿岸に漂着するMPには内陸由来のものが相当量あり、内陸における削減対策が大きな意味を持つことをこれらの結果は示唆しているわけであり、その意味で重要なデータであると考えている。

2.3 漂着量の面的把握

相模湾沿岸の漂着MP調査の定点は、自前の調査としては作業量の観点から前述の4か所が限界であるが、定点以外の海岸の漂着状況も興味深い課題といえる。MP問題は一般の方々の関心も高いため、一般参加による調査を企画し、2019年10月から翌年1月の期間に調査を行った。この調査は、クラウドファンディングで集めた資金で採取器具を調達し、参加を希望する一般の方々に貸し出して希望する海岸で試料採取を行い、分離したMPを環境科学センターに持ち込んでもらい、MPのサイズの計測と材質判別は環境科学センターが行うという分担で実施した。

一般参加型調査の試料採取の方法は、定点調査の方法と比べると、40cm四方の採取区画内の満潮線の漂着物を表層から3cm分砂ごと採取する点は共通しているが、次の点で作業手順を変更している(()内に定点調査の方法を記載)。

- (1) 有色のMPが凡そ100個集まるまで場所を変えて最大10回まで採取を繰り返す(漂着物が多い部位を2点選んで採取)

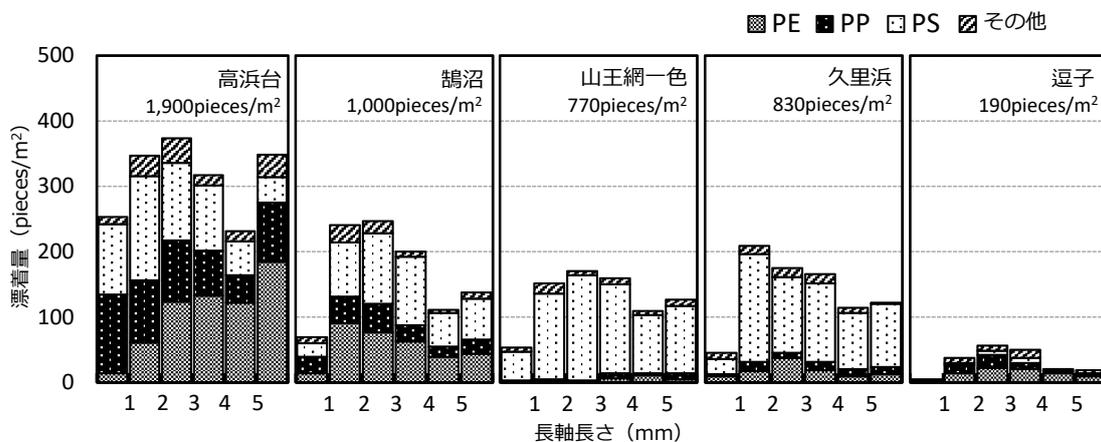


図2 各海岸の春期における代表的なマイクロプラスチック漂着状況²²⁾

2017年及び2018年の春期漂着量の非定常漂着分補正後の平均値。図中の数値は、総漂着数を表し、PEはポリエチレン、PPはポリプロピレン、PSは発泡性のものを含むポリスチレンを表す。

- (2) 4.75mm の篩を通過し 2.00mm の篩上の残留物を MP 分取の対象サンプルとする (MP 分取対象サンプルは 4.75mm の篩通過物全量)
 - (3) 対象サンプルからピンセットを用いて目視で MP を分取する (目視によるピンセット分取と水道水による比重分離を併用して分取)
- 上記の変更は、海岸において MP の分取までの操作が完了するよう、比較的短時間で誰にでもできる手順として設定したものである。分取は最終的に目視によることから、見た目では MP とは判別しづらい形状のもの (例えば、汚れた発泡スチロール破片や後述する被覆肥料殻など) は写真を提示して説明し、取り漏らしがないように配慮した。

一般参加型調査の調査地点は東京湾側の 2 か所を含む 27 か所となった。このうち漂着個数が最大となったのは茅ヶ崎市のヘッドランドであり、樹脂ペレットの比率が他の調査地点に比べて突出して高かった²⁵⁾。ヘッドランドは海岸の浸食を防ぐために作られた T 字型の突堤で、潮流が海岸と突堤の間に回り込み砂が沖合に流されるのを防ぐ機能を持っているため、MP を含め海上の漂流物が集積しやすい地形といえる。付近に河口は存在しないため、この地点の MP 漂着の機序は定点の 4 か所の海岸とは異なり、相模湾内の漂流 MP のみが関与しそれが潮流と地形の影響により漂着することが判明した²⁵⁾。図 2 に示した定点の漂着状況を見ると、漂着 MP のパターンは、主要 3 材質が混在する型 (高浜台、鵜沼)、ポリスチレンが優勢な型 (山王網一色、久里浜)、総漂着量が非常に少ない型 (逗子) に分けられるが¹⁷⁾、一般参加型調査ではこれ以外にポリエチレンが優勢な型 (鎌倉市・由比ガ浜、鎌倉市・材木座など) とポリプロピレンが優勢な型 (二宮町・中村川河口、大磯町・葛川河口) が存在することが判明した²⁵⁾。

2mm 以下の MP が採取できない一般参加型調査では、定点調査の結果とは直接の比較はできないものの、海岸地形によっては内陸由来の MP の影響を一切受けない漂着が発生する場所があることや内陸の発生源の多様性など、定点調査だけでは把握できなかった情報が得られた。こうした一般参加型調査は、人員や予算の限られた地方自治体の研究機関としてメリットの大きな調査手法と考えられるため、今後も活用が期待される。

2. 4 天候及び季節による漂着量の変動

2018 年 5 月までに実施した定点の調査のうち、2017 年 9 月は荒天時調査として平成 29 年台風 18 号最接近日の 4 日後に実施した¹⁷⁾。これを含め 2018 年 11 月までに調査を 5 回行った高浜台の MP 漂着量と材質構成の推移を図 3 に示した²²⁾。図 3 の 5 回の調査のうち 2018 年 5 月までの 4 回は、相模湾内に黒潮の流入がなかったことは前述のとおりである。

台風直後の 2017 年 9 月の漂着量は、年間を通じた最大値に近いと考えている²²⁾。この台風は 9 月 17 日午後には大阪付近に再上陸し北東方向に本州を縦断し、神奈川県に最接近したのは中心位置が平塚から約 220km 離れた新潟県上越市付近にあった 17 日夜半と推定される²⁶⁾。このときの気象状況の特徴は、相模湾で南～南南西の 10m/s 以上の強風が 18 日 0:30 から明け方 5:00 にかけて吹き続けたことである¹⁷⁾。この強風により、沖合に漂流する MP が海岸のある北方向に輸送され、これが連続的に打ち上げられたために漂着量が増加したと推測される¹⁷⁾。さらに、台風直後は 3mm 未満の発泡スチロール破片の漂着量が 3.3 倍に増加する¹⁷⁾ など、5 月の調査よりサイズの小さな MP の増加が顕著であった。この結果は、2. 1 で述べた「沖合には沿岸に比べてサイズの小さな MP の漂着量が多い」という海上の MP の分布とも整合する。加えて、沖合に漂流する小サイズの MP は、発泡スチロール破片が多いことが推測される。これを立証するため、今後の荒天時調査の継続が望まれる。

南風が吹くときに漂着量が増加する、という

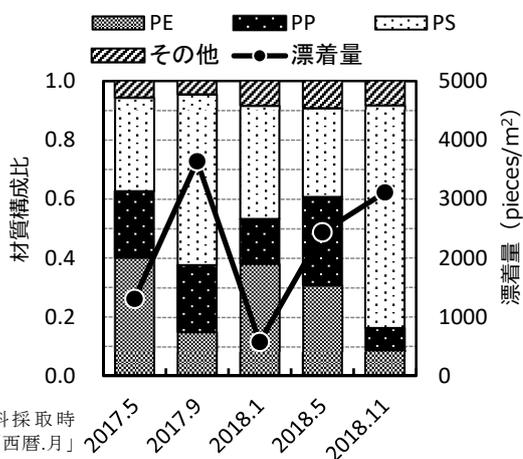


図 3 高浜台の漂着マイクロプラスチックの漂着量と材質構成の推移²²⁾

台風時に発生した状況を踏まえて図3を見ると、2018年11月のデータ以外は寒候期は暖候期に比べて漂着量が大きく減少する、という特徴があることがわかる。この特徴は、相模湾内の他の定点調査地点でも同様であった¹⁷⁾。この季節変動が発生する主要な原因は、季節風と考えられる。相模湾沿岸では、1月には陸域近傍に漂流するMPを沖合へ運び去る効果が高い北寄りの風向が卓越し、5月にはその逆の効果がある南寄りの風向が卓越する¹⁷⁾。東西に延びる海岸線を有する相模湾沿岸では、漂着量はこの季節風の影響を直接受け、暖候期には寒候期に比べて陸域近傍に漂流するMPの密度が高くなり、漂着量が増加すると推測される²²⁾。

2.5 黒潮の湾内流入がある場合の漂着状況

図3において、2.4で言及していない2018年11月のデータは、黒潮の影響を受けたものである。この調査の2週間ほど前から、黒潮軸流が八丈島の北側を通過し黒潮北縁は新島まで北上しており、大島西水道（位置を図1に太矢印で表示）に強い潮流が存在していたことが判明している²⁷⁾。大島西水道は、伊豆小笠原海嶺を西から東へ横切る黒潮の最北の通路になっており、ここを通過して相模湾に流入する黒潮の流量は毎秒180万トンと見積もられている²⁸⁾。これらのことから、この時期の相模湾は黒潮の影響を受けていたとみて間違いはない。この時期はすでに季節風の風向は北向きに変わっているため、黒潮の影響がなければ漂着量は暖候期より減少しているはずである。2018年11月は少雨で降水量は平年値の26%に過ぎなかったことから、河川を通じてもたらされる内陸由来のMP量も少なかったと推測される²⁷⁾。それにもかかわらず、漂着量は台風直後の漂着量に匹敵するほどに増加している。

2018年11月のデータで漂着量以外に目を引く特徴としては、小サイズのMPが多いこと及び材質としてポリスチレンの比率が高いことの2点があげられる。サイズについては、高浜台の漂着MPの最頻サイズは図2が2mm以上3mm未満（全漂着の20%）であるのに対し、2018年11月は1mm以上2mm未満（同24%）であり、3mm未満の発泡スチロール破片の漂着量は図2に比べて4.3倍に増加した。材質については、全漂着に占めるポリスチレンの比率は図2が31%であるのに対し、2018年11月は

76%²⁷⁾であった。2018年11月のデータを見る限り、黒潮が相模湾に流入するときは、小サイズの発泡スチロール破片の比率が大きく増加するといえる。これは、2.4で述べた台風時の特徴とも一致する。

以上の結果から、黒潮流入時に発生する漂着量増加の要因として、次の2つの可能性が考えられる。

- (I) もともと沖合には小サイズの発泡スチロール破片が漂流しており、これが流入した黒潮の潮流によって陸側へ輸送され漂着する
 - (II) 黒潮には小サイズの発泡スチロール破片が含まれており、これが直接漂着する
- (II)の場合、漂着量の増加分には黒潮によってもたらされた外洋由来のMPが含まれる、ということになる。この小サイズの発泡スチロール破片の発生源については、3.7で詳述する。

2.6 他海域との比較

MPの発生源の違いによる影響を検討するため、他海域でも漂着MP調査を行った。調査地は、島根県松江市鹿島町恵曇（えとも）の砂浜、古浦である（図1の⑥）。集水域面積は21.7km²と狭く、その79%が山林で、MPの発生源となりそうな規模の大きな事業所はない。砂浜の北端に漁港があり、そのさらに北側には海食崖が発達しており、西から流れてくる対馬海流が海食崖にぶつかるような地形となっている。砂浜には佐陀川という水路が隣接しているが、これは河川ではなく日本海と宍道湖を結ぶ運河なので、宍道湖側から流下物が流れてくることもない。この場所で、相模湾が黒潮の影響を受けた2018年11月に調査を行った。

結果は、漂着量が高浜台の3,100pieces/m²に対して古浦が290,000pieces/m²と、黒潮の影響により漂着量が多かった高浜台の約94倍に達した。一方、材質構成はどちらもポリスチレンの比率が高く（高浜台76%、古浦87%）、これらはすべて発泡スチロール破片であり、最頻サイズも1mm以上2mm未満で共通していた²⁷⁾。その外形的特徴も2.2で述べた概観形状で一致していた。古浦では、これだけの量のMPの発生源は陸域に存在しないことから、この漂着MPの大部分は海域由来と判断した²⁷⁾。

文献調査により古浦に漂着する大量の発泡スチロール破片の由来を調べたところ、発生源は黄海の韓国沿岸で行われている海面養殖施設の

フロートの破片である可能性が極めて高いことが判明した²⁷⁾。これは、2013年に韓国インチョン沖の黄海上にあるソヤ島で行われた漂着MP調査²⁹⁾との比較により明らかになったもので、ソヤ島の漂着状況が古浦にきわめて類似しており、漂着MPの主体である発泡スチロール破片を海上養殖施設のフロート由来と特定していることによる²⁹⁾。国内でも、広島湾に漂着する発泡スチロール破片の発生源はカキ養殖施設のフロートの破片とする報告があり³⁰⁾、海面養殖施設のフロートとMPとしての発泡スチロール破片は、きわめて関連性が高いと考えられる。この事実を東シナ海における黒潮の流れに照らすと、発泡スチロール破片の古浦への輸送経路が次のように推定できる。

沖縄の西方海上を北東方向に流れる黒潮は、トカラ海峡を抜けて太平洋に出る手前で北方向に分派流を分岐する。この分派流は済州島の南方海上でさらに2つに分離し、1つが黄海暖流として黄海へ、もう1つが対馬海流として日本海へ流入する³¹⁾。黄海暖流は黄海の中央付近から流入し北進するが、やがて中国大陸沿岸水及び朝鮮半島沿岸水として陸域沿岸を南下する流れとなって黄海を流出する³²⁾。黄海の朝鮮半島沿岸に海上養殖施設由来の破片が浮遊するなら、これは朝鮮半島沿岸水によって南方に押し流され、東シナ海に出たところで対馬海流に捕捉され、日本海に輸送される、と考えるのが合理的である。この推定は、東アジアの海域に漂流するMPの起源は黄海や東シナ海⁸⁾とする先行研究の指摘とも一致するものである。

以上の検討から、海域由来とした古浦の漂着MPは、そのほとんどが対馬海流によってもたらされた黄海の海面養殖施設のフロートを発生源とする外洋由来のMPと判断した²⁷⁾。つまり、相模湾沿岸とは事情が異なり、古浦では海岸の漂着MPの削減を目的とした陸域の対策はまったく意味を持たないことになる。このように、発生源対策を考えるうえで、漂着MPの由来の探索は極めて基本的かつ重要な役割を担う、といえる。

3 漂着マイクロプラスチックの由来の探索

3.1 河川流下マイクロプラスチックの特徴

ここまでの検討で、相模湾における大まかなMP漂着の機序は判明した。次の課題は、それ

がどこから来るのか、という由来の探索である。**2.2**で述べたように、黒潮の湾内流入がない場合の相模湾の漂着MPの多くは内陸の発生源から排出されるので、その発生源と海岸をつなぐ経路としての河川の状態把握を行ったところ、興味深い事実が判明した。それは、河川で検出できないMPが海岸に漂着していたり、逆に河川ではふつうに見られるMPが海岸にはない、というものである。

調査の対象とした河川は、海岸の漂着量が少なかった逗子近傍の田越川を除く4河川(図1)で、2018年8月から2019年3月に実施した。試料採取方法は、まだ環境省のガイドライン³³⁾が示される前であったため、いくつかの点でガイドラインとは手順が異なっている。目合い0.3mmのプランクトンネットにろ水計を取り付けた採取器具を流心に浸漬して表層を流下するMPを採取する点は同じであるが、環境科学センターの調査では通水量をGrubbsの外れ値検定の結果から2m³以上としており³⁴⁾、ガイドラインの推奨通水量の13~14m³に比べてかなり少ない。また、MPの分取工程でガイドラインには30%過酸化水素水による夾雑物の酸化処理及び5.3Mヨウ化ナトリウム溶液を用いた比重分離が記述されている³³⁾が、環境科学センターの方法ではこれらを採用していない³⁴⁾。海岸の漂着量はある程度蓄積性のある量であるのに対し、河川の流下量は瞬時値のため、調査結果は試料採取のタイミングに大きく左右される。この調査では期間中に各河川で4回または5回調査を行ったが、流下量の最大値/最小値比が3.4(平作川)~9.4(引地川)とかなりばらつきのある結果³⁴⁾となった。試料採取のタイミングに加えて通水量の少なさがばらつきを大きくしている可能性が否定できない。しかし、期間中の各河川の加重平均流下量は既往研究³⁵⁾と比較して妥当な数値となっていたことから³⁴⁾、各河川の流下MP量の代表性は確保できているものと考えている。

図4にこの調査から得られた河川流下MPと海岸漂着MPの材質と形態の構成比を示した³⁴⁾。図4において、海岸漂着MPは黒潮の湾内流入がなかった2017年5月から2018年5月の定点5か所の合算値で非定常排出による漂着分を除いた²¹⁾ものである。まず、図4で注目したいのは海岸漂着MPの52%を占めるポリスチレンが

河川ではほとんど確認できなかった (<1%) ことである³⁴⁾。試料採取時のばらつきや降雨直後のファーストフラッシュをとらえることができなかった³⁴⁾ことを考慮しても、河川流下 MP はポリスチレンが極端に少ないといえる。これは、3. 2で述べる発生源である陸域におけるポリスチレンの少なさと整合している。このことから海岸に漂着する発泡スチロール破片は、内陸由来以外の MP、すなわち海域由来 MP が多くを占めることが強く示唆される。

次に着目したいのは、河川流下 MP の形態が海岸漂着 MP に比べて多様なことである。海岸漂着 MP は 85% が破片だが、河川流下 MP は破片の比率は 69% とやや低く、繊維 (14%) やフィルム (16%) という海岸ではほとんど確認できない形態の MP がかなり検出されている³⁴⁾。海岸で繊維やフィルムの漂着がほとんど確認できないのは、河口からの流出後の挙動が破片とは異なるためではないかと考えられる。英国の 17 か所の海岸で行われた調査³⁶⁾によれば、ポリエチレン、ポリプロピレン、ナイロン、ポリエステルなどの繊維が河口や潮下帯の底質から多数検出されている。4 河川の河川流下 MP の繊維で最も多かったポリプロピレン (綿など非プラスチックを含む全繊維中 35%) は、見かけ比重だけから考えれば破片と同様に near-shore trapping¹⁴⁾に起因する海岸への漂着が予想されるが、海岸漂着 MP の結果からその状況が発生していないのは明らかである。相模湾においても、見かけ比重が 1 より大きな他の繊維とともに河口や潮下帯に沈降して堆積している可能性がある。このことから、繊維にはおそらくその形状により near-shore trapping¹⁴⁾が有効に作用しないために、破片のように陸と海上を行き来することはなく、流出後沈降して底質に堆積する、という挙動をとるのではないかと考えられる。河川流下 MP のフィルムで最も多かった材質はポリエチレン (全フィルム中 49%) であったが、同様の理由により海岸には漂着しないのではないかと考えられる。

河川流下 MP の実態をより詳細に調べるには、降雨直後の調査及び河口の底質の調査を行う必要があると考えられる。

3. 2 主要 3 材質の由来

発生源である内陸の調査では、どのような場所からの排出が多いのか、用途地域別のプラス

チック片の路面堆積量を調べた。調査は鶴沼に流出する引地川流域を対象に行い、道路の路肩 2m×0.2m の区画に堆積する 1mm 以上のプラスチック片を採取し、商業、住居、工業、水田の 4 つの用途地域ごとに比較した³⁷⁾。どの用途地域もプラスチック片の材質は海岸漂着 MP に比べて多様であり、PET や PVC など比重が 1 以上の材質も多く、車両の走行量の多い場所では路面塗料の剥離片 (主としてアクリル樹脂) も確認されたが、住居地域は海岸漂着 MP の主要 3 材質の構成比が他地域より突出して高く (72%, 2 番目に高かったのは商業地域の 18%), 質量密度も他地域より有意に大きかった³⁷⁾。以上のことから、住居地域は他の用途地域に比べて河川に流出し海岸に到達するプラスチック片の量が多いと推測され、発生源対策の優先度は住居地域が一番高いと考えられる。

この調査でポリスチレンが採取されたのは住居地域 (構成比 10%) と商業地域 (同 7%) だけであった。この量は、図 2 の鶴沼におけるポリスチレンの構成比 43% と比較して圧倒的に少ない。主要 3 材質の他の 2 種の構成比を見ると、ポリエチレンが住居地域の 25% に対し鶴沼が 32%、ポリプロピレンが住居地域の 18% に

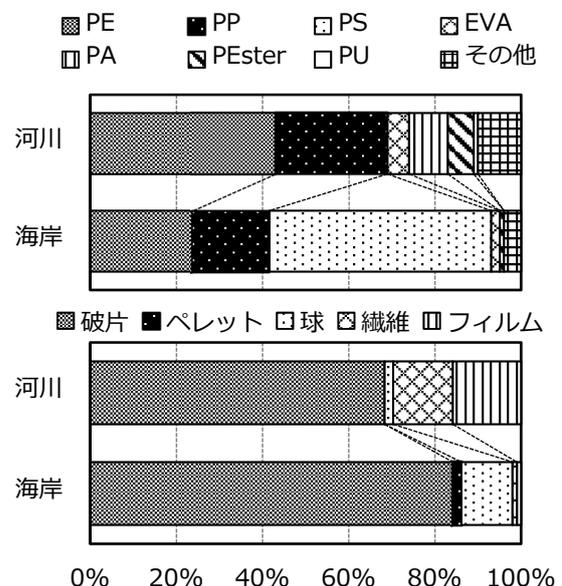


図 4 河川流下マイクロプラスチックと海岸漂着マイクロプラスチックの材質 (上段) 及び形態別構成 (下段)³⁴⁾

材質の PE はポリエチレン, PP はポリプロピレン, PS は発泡性のあるものを含むポリスチレン, EVA はエチレン酢酸ビニル共重合体, PA はポリアミド, PEster はポリエステル, PU はポリウレタンを表す。

対し鵜沼が17%と、ほぼ同等の構成比となっている。この海岸のポリスチレンの多さは内陸からの流出分だけでは説明がつかず、漂着MPにおける発泡スチロール破片は内陸由来以外のMP、すなわち海域由来のMPが相当量含まれていることを強く示唆している。

3.3 樹脂ペレット

ここからは、相模湾が黒潮の湾内流入がなかった2017年5月から2018年5月の定点5か所に漂着したMPのうち、形態的特徴から発生源の把握が容易と考えられるMPについて、その由来と漂着の特徴を整理する。まず、MPのリスクが世界的に共有されるきっかけとなった樹脂ペレットから見ていく。

樹脂ペレットの発生源は、プラスチック成型事業所における原料投入時やフォークリフト運搬時の漏出とほぼ特定されている³⁸⁾。樹脂ペレットの海岸への漂着は1990年代から指摘³⁹⁾されており、当時の調査⁴⁰⁾と比べると漂着量は半減している²¹⁾ことから、2001年から実施されている日本プラスチック工業連盟による対象事業所に対する漏出対策指導⁴¹⁾がある程度奏功したと考えられる。しかし、依然として全漂着MPの3%程度の漂着が続いていることが判明したため、神奈川県では2020年7月に神奈川県生活環境の保全等に関する条例に基づく「環境への負荷の低減に関する指針」を改定し、樹脂ペレットの漏出防止対策を新たに指針に規定した⁴²⁾。

定点5か所の調査では、年間を通じて高浜台と鵜沼の漂着が多く、逗子では漂着が確認できなかった²¹⁾。一般参加型調査においても、三浦半島と小田原以西では漂着量が大きく減少する傾向が見られており²⁵⁾、樹脂ペレットの漂着は相模湾沿岸の中央部付近に集中すると推測される。相模湾中央部に注ぐ相模川、引地川、境川等の河川の流域にある工業地域に存在する発生源からの漏出が疑われる。樹脂ペレットの漂着量には大きな季節変動が認められなかった。したがって、発生源からの漏出は、定常的に発生していると推測される。

漂着した樹脂ペレットの色は、新品に近いものから褐色のものまでさまざまなものが混在していた。変色の原因は、添加物のフェノール系酸化防止剤が劣化してキノン体に変化する⁴³⁾ことにより発生し、漏出してからの滞留時間が

長いほど発色が強くなる。つまり、採取するまで相当長い期間相模湾を漂流していたものが含まれていると推測される。河口から流出した樹脂ペレットは陸と海上を行き来する過程で一部が湾内の循環流(図1)に捕捉されるのではないかと考えられる。2.3で述べた茅ヶ崎ヘッドランドに大量に漂着する樹脂ペレット²⁵⁾は、このような湾内に滞留したものであると推測される。

3.4 ピーズクッション封入材

粒径0.8~1.5mmほどの発泡スチロール製の小球体の漂着が逗子を除く4か所の海岸で確認された²¹⁾。調査期間中に採取したこの小球体の粒径の平均値は0.9mmであり、2mm以下のため一般参加型調査の対象にはなっていない。発泡スチロール協会へのヒアリングから、この小球体はピースクッションの封入材であることが判明した¹⁷⁾。発生源として、当初はこの小球体の製造事業所と製品クッションの製造事業所を疑ったが、関係する事業所は流域に存在しなかったことから、発生源は家庭ごみとして排出された製品クッションと特定した^{17,21)}。

封入材の漂着の特徴は、同一海岸における漂着量が季節とは無関係に大きく変動し、大量漂着と消失を繰り返すように見えることである。例えば、山王網一色では、大量漂着時の漂着量は822pieces/m²(全漂着MPに占める比率45%)であったが、消失時にはその3%にあたる28pieces/m²(同9%)まで減少した²¹⁾。この特徴から、封入材の漂着は不定期に発生する製品クッションの廃棄時に付随して発生する漏出が原因と推測される^{17,21)}。漏出が起こる場面としては、廃棄された製品クッションの収集、運搬過程で破れた外皮からのこぼれや粗大ごみとして処理施設に持ち込まれた廃棄物の破碎工程での漏出などが考えられる¹⁷⁾。製品クッションの廃棄は、生ごみの排出のように定常的なものではないため、大量漂着は廃棄のタイミングに応じて散発的に発生すると推測される。製品クッションに入っている封入材の数は、小さな製品でも数十万個に及ぶため、漏出した封入材が河川から海域に到達すると漂着量は一時的に急増する。しかし、その小ささゆえにnear-shore trapping¹⁴⁾の作用が強く働かないため、漂着したものは徐々に沖合に流出し、大量漂着の影響は次第に消失すると推測される²¹⁾。したがって、

漂着量は散発的に発生する大量漂着の間隔に応じて変動することになる。樹脂ペレットの動きと同様に沖合に出た封入材は湾内の循環流（図1）に捕捉されている可能性があるが、それを裏付けるデータは現時点で得られていない。

3.5 被覆肥料殻

被覆肥料は、肥料成分をプラスチックで被覆し徐々に溶出させる仕組みをもつ粒径3~5mmほどの機能性肥料であり、追肥の省力化等の効果が高いことから近年使用量が増えている農業資材である。内部の肥料成分を溶出し終えた残骸である肥料殻は、薄褐色のつぶれたボール状を呈しており、これが2018年5月の山王網一色に大量に漂着していた²¹⁾。このときの漂着量は4,600pieces/m²（山王網一色の全漂着MPの91%）であり、その材質はエチレン酢酸ビニル共重合樹脂（EVA）が54%、残りがポリウレタンであった²²⁾。なお、一般参加型調査でも被覆肥料殻の漂着は確認されており、定点の調査と同様に山王川河口など小田原市域の海岸への漂着が多い傾向が確認されている²⁵⁾。

被覆肥料殻のMPとしての大きな特徴は、漂着する地域と時期に大きな偏りがあることである。大量漂着が発生するのは、5月の一時期の相模湾西部の海岸に限られる。酒匂川流域の小田原、足柄を中心とする西湘地域の水稲耕作では被覆肥料が使用されており、JA全農かながわへのヒアリングによると県内JA別の水稲用被覆肥料の販売量は西湘地域が最も多かった²²⁾。被覆肥料殻の漂着は、相模湾の東側の海岸でも確認されている^{21,25)}が、漂着量は販売量を反映してわずかであり、定点の高浜台では大量漂着した山王網一色の2%であった²¹⁾。

大量漂着が発生する時期に西湘地域の水田で行われる作業は、代掻きである。その後の調査で、代掻き作業中の水を張った圃場には多量の被覆肥料殻が浮いており、それが用水路を通じて酒匂川の支流に流出していることを確認している⁴⁴⁾。つまり、海岸に漂着した被覆肥料殻は、前年以前に行った施肥によって水田土壌に取り込まれた被覆肥料が代掻きによって表面に掻き出され、流出したものと特定した²²⁾。水田から水を抜く中干しや落水のときも肥料殻の流出が発生するが⁴⁴⁾、圃場の土壌を掘り起こす作業が入る代掻き時の流出量が一番多くなると推測される。被覆肥料は使用後に光崩壊によって比較

的大きな破片に分裂した後、土壌微生物によって生分解するとされているが、施肥後水田土壌中に取り込まれたものには太陽光が届かず光崩壊が起きないために分解が進まず、ほぼそのままの状態で海岸に到達したと推測される。

3.6 人工芝破片

3.3から3.5で示した3種のMPは、いずれも一次MPに区分されるが、この項では典型的な二次MPである人工芝破片を見ていく。人工芝破片は細片化の程度により形態やサイズは多様であるが、緑色を呈すること及びあまり劣化が進んでいない破片の形状から元の製品を家庭用人工芝及び玄関マットと特定した²¹⁾。この人工芝破片は、その色から海岸でもよく目立ち見つけやすいMPであり、人工芝由来のものは片面が曲面で裏側が平面状を呈し、劣化が進んでいない場合は細長く短軸側の一端はR加工を施された形をしたものが多い。この形状から、人工芝マットの突起部が千切れた破片が流出したものと推測される。材質は、86%がポリエチレンで残りがEVAであった²¹⁾。ホームセンターで販売されている人工芝マットは、EVA製はポリエチレン製よりも高価格である。材質の構成比は、この価格差を反映していると考えられる。なお、競技場で利用される人工芝破片は家庭用の人工芝マットとは形状が異なっており、漂着MPのなかに存在する可能性はあるが、現時点で明確に競技場由来と特定できる破片は確認できていない。

人工芝破片は、相模湾沿岸ではどこでも年間を通じて見つけることができる。平常時には、漂着の時期や場所の偏りは他のMPに比べて小さく、定点の調査では、平均で全漂着の7%を人工芝破片が占めた²²⁾。一方、荒天時には、場所によっては漂着量が大きく増加するケースがあった。鵜沼では、台風直後の漂着量が他の時期の4~6倍に増加した²²⁾。漂着MP全体でみると、台風時の増加量は他の時期の1.5~3倍程度であり、台風時の漂着量増加の傾向は明らかに人工芝破片のほうが大きかった。台風時の漂着量の増加は、2.4で述べたように沖合に漂流するMPの陸への打ち上げが主体であるが、人工芝破片の場合はこれに河川の流下MPの増加が上乘せされたものと推測される²²⁾。

人工芝破片の元の製品である人工芝マットや玄関マットは、靴底をこすりつけるような使い

方をすることが多いため、突起部には剪断力が働き、経年劣化によって突起部が根元から破断しやすい。この破断は、天候に関係なく日常的に発生し、生じた破片は周辺の路面に堆積していく。これが、降雨時にファーストフラッシュとして雨水側溝を経由して河川に流出すると推測される。荒天時の調査は鵜沼のほか高浜台でも行っているが、高浜台で鵜沼のような漂着量の増加は確認されなかった。このことから、破片の路面堆積量やファーストフラッシュの影響は河川によっても異なると考えられる。

3. 7 発泡スチロール破片

最後に、漂着量が一番多いMPであるビーズクッション封入材以外の発泡スチロール破片の発生源を検討する。図2に示すポリスチレンの高い比率、すなわち小サイズの発泡スチロール破片の漂着量の多さは、3. 1及び3. 2で述べたように内陸由来だけでは説明がつかず、大部分が海域に由来すると推測される。すなわち、小サイズの発泡スチロール破片の多くは相模湾沿岸で発生したMPもしくは黒潮によってもたらされた外洋由来のMPである可能性が高い。どちらの寄与が大きいかは現時点で不明であるが、この2つの発生源の可能性を考察した。

3. 7. 1 相模湾沿岸の発生源

既往研究^{29,30)}でも指摘されているように、沿岸海域の主要なMP発生源のひとつが養殖を含む漁業である。神奈川県の沿岸漁業生産量は10,200トン/年(2018年)で、このうちの68%が定置網漁業⁴⁵⁾であることから、本稿では漁業生産の主力である定置網漁業をモデルケースとして、海上における生産工程と陸揚げ後の流通工程における発泡スチロール破片生成の可能性を検討した。

3. 7. 1. 1 海上における生産工程

相模湾では、定置網漁業権が設定される大型定置網が三浦市諸磯崎から湯河原町福浦にかけて20か所⁴⁶⁾設置されている。水産庁の報告書⁴⁷⁾によれば、定置網漁業で排出される廃プラスチックは主としてロープと漁網であり、小型定置網の場合にはこれに発泡スチロール製フロートと硬質フロートが加わる。発泡スチロール製フロートを含む小型定置網の廃プラスチック発生量は定置網面積あたり最大で0.18トン/haである。これに20か所の定置網の総面積454.1ha⁴⁶⁾を乗じると、相模湾における廃プラスチック排出量

は最大で82トン/年となる。これを広島湾におけるカキ養殖のケースと比較する。カキ養殖ではカキパイプ及び発泡スチロール製フロートが主要な廃プラスチックとして排出され⁴⁷⁾、排出量はカキ筏1台あたり0.071トン/台となる。広島湾のカキ筏は約1万台⁴⁸⁾とされるので、広島湾全体の廃プラスチック排出量は710トン/年となる。

廃プラスチック全体に占める発泡スチロール製フロートの比率が不明であるため単純な比較はできないが、相模湾の数値が発泡スチロール製フロートが排出される小型定置網の原単位を大型定置網に当てはめて算出した過大な数値であることを考慮すると、漁業活動で排出される発泡スチロール製フロートは定置網に比べてカキ養殖の方が多と考えられる。廃資材の排出量は使用中の劣化状況と関連が深いと考えられるので、フロート由来の発泡スチロール破片の発生量もカキ養殖に比べて定置網はごく少ないと考えられる。前述のとおり広島湾ではカキ養殖施設のフロート由来の発泡スチロール破片の漂着が確認されているが³⁰⁾、これと比較すると、相模湾の場合は定置網のフロート由来の発泡スチロール破片の発生量は限定的である可能性が高いと考えられる。

これまで海上の発生源に着目した調査は実施したことがないが、定置網のフロート由来の破片の発生状況を確認するには、設置地点直近の海岸における漂着量調査を行う必要がある。

3. 7. 1. 2 陸揚げ後の流通工程

定置網の漁獲物の陸揚げ後の主要な流通経路は、漁港へ陸揚げ→選別・加工・出荷→卸売市場へ配送、というルートとなる。このルート上で介在する発泡スチロール製品が、使い切りの資材として漁港から卸売市場への配送に利用される発泡スチロール製魚箱である。発泡スチロール製魚箱の国内の年間利用量は、約9万トン(2008年)との試算値⁴⁹⁾がある。これを単純に漁獲量(2018年の国内漁獲量442.7万トン⁵⁰⁾)の比で配分すると、相模湾の定置網漁業では年間でおおよそ100~200トンの発泡スチロール製魚箱が利用される勘定になる。この魚箱からの破片の発生が想定される場面は、漁港における梱包・出荷作業、卸売市場における荷解き作業及び廃棄作業と考えられる。このうち、廃棄作業は産業廃棄物として処分、場内に設置した発泡

スチロール減容機を用いて処理，の2通りのケースがあるが，取り扱う対象物が商品でなくなった空箱であるために取り扱いも粗雑になりがちな廃棄作業中に破片が発生するリスクが一番高いと考えられる。

相模湾沿岸には配送の出発地となる漁港が20か所，到着地となる卸売市場が7か所ある。発泡スチロール製魚箱由来の破片の発生状況を確認するには，これらの漁港及び卸売市場に着目した調査を行う必要がある。

3. 7. 2 外洋の発生源

古浦に漂着する発泡スチロール破片は，2. 6で述べたように朝鮮半島沿岸水によって黄海を流出した海上養殖施設由来のフロート破片として説明がつくが，発泡スチロール破片が太平洋側へ漂着するには，対馬海流・黄海暖流が分岐するより前にこれが黒潮に取り込まれていなければならない。すなわち，相模湾沿岸に漂着する発泡スチロール破片が外洋に由来するのであれば，中国大陸沿岸に起源をもつものが含まれると考えるのが合理的である。Evans *et al.*⁵¹⁾は衛星搭載レーダーによる観測から2017年6月下旬と10月下旬にそれぞれ钱塘江と長江の河口を起点とするMPのブルームが九州沿岸に到達したことを確認している。また，岩崎⁵²⁾は粒子追跡モデルを用いて長江河口に投入したMPの挙動を解析し，その一部が年間を通じて黒潮によって太平洋に流されることを示している。これらの結果は，東アジアの海域に漂流するMPの起源は黄海や東シナ海とするIsobe *et al.*⁸⁾の指摘とも一致している。長江と钱塘江はそれぞれ上海の北側と南側から黄海に流入するが，両河川の河口の沖合には浙江省舟山群島がある。この海域は，中国最大の漁場であると同時に，近年は海面養殖が増加している⁵³⁾。特に，舟山群島北部の嵊泗県（しょうしけん）は養殖イガイの中国最大の産地であり，その養殖施設は延縄式⁵⁴⁾とされている。その構造は，イガイ原盤を付けた垂下連をプラスチック浮標に吊るし，この浮標を一条あたり160～170個取り付けたロープを海上に設置するものである⁵⁴⁾。このプラスチック浮標は，写真⁵⁵⁾を見る限り発泡スチロール製と考えられる。その破片がこの海域に存在すれば，钱塘江や長江の河口を起点とするブルームに捕捉され，対馬海流・黄海暖流分岐前の黒潮に取り込まれることが容易に予想される。

2. 6で述べたように相模湾沿岸と古浦に漂着する発泡スチロール破片の外形的特徴が一致するという点も，両者がともに海上養殖施設のフロート由来であることを示唆している。以上のことから，相模湾沿岸に漂着する発泡スチロール破片は，中国浙江省舟山群島で行われるイガイ養殖の施設のフロートに由来する破片を相当量含んでいる可能性が高いと考えられる。

これを立証するには，舟山群島の海域で現にフロートの破片が発生していること及び黒潮の本流に発泡スチロール破片が相当量含まれていることを立証するデータを確認するとともに，2018年11月の一度しか取得できていない黒潮流入時の漂着MP調査をさらに複数回実施し，発泡スチロール破片の漂着量増加についてさらに検証を進める必要がある。

3. 7. 3 黒潮流入時の漂着量増加との関係

2. 4で述べたように，相模湾の沖合には小サイズの発泡スチロール破片が多く漂流すると推測される。3. 7. 1. 1のように定置網のフロートから破片が発生すれば，その破片は直接湾内の潮流により漂流し，3. 7. 1. 2のように発泡スチロール製魚箱から破片が発生すれば，その一部が陸風によって海上に輸送され，同様に漂流することになる。これらが湾内に常在する循環流（図1）に取り込まれ，沖合を漂流していることが考えられる。黒潮の湾内流入時には2. 5 (I) に示した動きによりこれらの漂流MPが海岸に漂着すると考えられる。

一方，3. 7. 2のように黒潮に中国沿岸域由来の発泡スチロール破片が含まれていれば，黒潮流入時にはこれが2. 5 (II) に示した動きにより直接沿岸に漂着する。さらに，湾内に常在する循環流（図1）は黒潮軸流が相模湾に近づくほど潮流が強まる²⁰⁾ことを考えると，湾内に流入した黒潮の潮流に含まれるMPはこの循環流に捕捉され，漂流MPとして湾内に滞留し，2. 5 (I) に示した動きにより海岸に漂着すると考えられる。

4 相模湾のマイクロプラスチック漂着の特徴

ここまで，2017年5月から2018年11月に実施した漂着MP調査及び関連する内陸と河川の調査結果を改めて整理した。この結果から導かれる相模湾におけるMPの漂着の特徴を以下に記載する。

- (1) 相模湾沿岸の MP 漂着は、黒潮の流路に応じて黒潮の影響がある場合と影響がない場合でその状況が異なる。
- (2) 黒潮の影響がない場合、海岸に漂着する MP の材質はポリスチレンが半分以上を占めその大部分は発泡スチロール破片であり、次いでポリエチレン、ポリプロピレンの順に多く、この主要 3 材質で全漂着の 90%以上を占める。
- (3) 黒潮の影響がない場合、近傍に流入河川がある海岸では、内陸由来の MP の影響が大きくなり、漂着状況は流域の発生源の違いを反映し、海岸ごとに異なる様相を呈する。近傍に流入河川がない海岸では、湾内に存在する循環流に補足された漂流 MP が漂着するが、漂着状況は潮流と海岸地形に大きく依存する。
- (4) 漂着 MP の内陸の排出源は、プラスチック片の路面堆積量の状況に照らすと、住居地域の影響を大きく受けていると推測される。しかし、内陸のポリスチレンの堆積量は漂着 MP に比べて極めて少ないことから、黒潮の影響がない場合においても漂着 MP のポリスチレンの多くは海域に由来する MP であると考えられる。
- (5) 黒潮の影響がある場合、内陸由来の MP に海域由来の MP が上乘せされ、その漂着量は黒潮の影響がない場合の数倍に増加する。このとき、小サイズの発泡スチロール破片の漂着量が顕著に増加することから、(4)の海域由来の MP には、小サイズの発泡スチロール破片が多く含まれると考えられる。さらに、この海域由来の MP は湾内の循環流にも捕捉され湾内に滞留すると考えられる。
- (6) MP の漂着量は季節変動し、南風が卓越する暖候期は沖合の漂流 MP が陸に吹き寄せられるため漂着量が増加し、北風が卓越する寒候期は陸域近傍の漂流 MP が沖合に遠ざけられるため漂着量が減少する。
- (7) 荒天時に南風が強く吹くような場合にも(5)の湾内の循環流に捕捉された海域由来の MP が打ち上げられるため、小サイズの発泡スチロール破片の漂着量が大きく増加する。
- (8) 以上のように、相模湾沿岸では黒潮流入時には海域由来の MP の漂着が確認されるが、対馬海流の影響を直接受ける日本海側の海岸に比べて漂着 MP に対する海域由来 MP の寄

与は限定的と考えられる。

- (9) 河川流下 MP には繊維やフィルムが含まれるが、これらは漂着 MP として確認できないことから、河口から流出した後河口付近の底質に沈降し蓄積されている可能性がある。
- (10) 樹脂ペレットは、相模湾中央部付近の海岸に多く漂着し、季節変動がほとんど見られないことから、相模川、引地川、境川等の河川の流域にある工業地域に存在する発生源からの定常的な漏出が疑われる。
- (11) ビーズクッション封入材は、製品クッションの廃棄時における漏出が原因であり、廃棄のタイミングに応じて散発的に大量漂着を引き起こすが、次第に沖合に流出するため漂着量は徐々に減少する。
- (12) 被覆肥料殻は、大量漂着の時期と場所の偏りが大きく、水田の代掻き時に前年以前に施肥したものの残骸が小田原周辺の海岸に大量に漂着する。
- (13) 人工芝破片は、漂着の時期や場所の偏りが小さく、漂着量は平均で全漂着 MP の 7%程度を占める。破片の生成は日常的に起こり、路面に蓄積した破片が降雨時にファーストフラッシュにより流出し海岸に到達すると推測される。
- (14) 発泡スチロール破片については、沿岸の発生源として定置網漁業におけるフロート及び発泡スチロール製魚箱、外洋の発生源として黄海東岸の舟山群島で行われるイガイ養殖施設のフロートが考えられるが、その寄与は現時点で不明である。

5 漂着マイクロプラスチック調査結果から見た海洋プラスチック汚染の課題

これまで実施した漂着 MP 調査を通じて発生源を特定あるいは推測できた MP は、3. 3 から 3. 7 に述べた 5 種類である。ここで、これらの MP のもとになった製品が環境中に出たときに廃棄物であったかどうかについて考えてみる。元の製品が廃棄物であるものは、ビーズクッション封入材だけである。樹脂ペレットは工業原料であり、被覆肥料殻は環境中に放出する施肥の段階では肥料の容器という機能を保持していることから、いずれも廃棄物には当たらない。人工芝破片と古浦に漂着する発泡スチロール破片は元の製品は現に使用しているものであ

るから、当然のことながら廃棄物ではない。細片化して MP になってしまえば、それは不要なプラスチック、すなわち固形状の不要物にあたるから廃棄物としての要件を満たすが、元の製品は廃棄物ではないものがかかなりあることに気づく。これは MP だけの話ではなく、粗大なプラスチック漂流物にもあてはまると思われる。例えば、環境省が 2018 年 11 月に実施した八丈島の漂着ごみ調査⁵⁶⁾では、プラスチック漂着物のうち重量比で 45%が漁網、ロープ、発泡フロートなどの製品であった。これらの中には、製品の使用者には廃棄物という認識はなく使用中に流出し亡失したものがかなり含まれているのではないかと考えられる。MP は環境中に出た「プラごみ」が劣化反応で細片化することで生成する、と説明されることが多いが、漂着 MP のもとをたどると、プラごみではないプラスチック、すなわち現に使用しているプラスチック製品が発生源となっているものがかなり多い状況が見えてくる。これは、裏を返せばプラごみを無くすだけでは MP 問題は解決できない、ということの意味していると考ええる。ここで、特に注目したいのは、人工芝破片と古浦に漂着する発泡スチロール破片である。元の製品は、どちらも屋外使用を前提としたプラスチック製品である。MP 対策を進めるのであれば、このような製品からの破片の生成を低減させる対策が必要になると考える。

昨年施行されたプラスチック資源循環促進法の第 4 条第 3 項は「事業者及び消費者は、プラスチック使用製品をなるべく長期間使用すること」と規定しているが、この条文は屋外で使用するプラスチック製品に対しては注意深く運用する必要があると考える。屋外使用のプラスチック製品の使用期間を安直に引き延ばすことは、破片の生成を促進させる可能性が高いからである。屋外で使用するプラスチック製品は常に紫外線に晒されているため、室内で使用する製品に比べて劣化反応は急速に進行するはずである。紫外線の照射環境下で進行する劣化反応は、反応速度を遅らせることはできても、停止させることはほぼ不可能と考えられる。反応速度を遅らせる手段としては劣化防止剤の高性能化などの方策も考えられるが、添加剤の使用は細片化したときに発生する成分溶出のリスクを高めてしまうためデメリットも大きく、寿命を延長さ

せるだけで抜本的な解決策にはならないと思われる。それよりも、劣化反応の発生を見込んだ上で、劣化による破片の生成が起こる前に製品自体を交換するという手法をとるのが合理的ではないかと考える。本項では、これを使用期限管理と称する。使用期限は製品の材質や使用環境を踏まえて劣化反応試験からあらかじめ設定し、使用開始から所定の期間が経過したら製品の外観に変化がなくても製品を交換する。使用期限は当然のことながら製品ごとに決める必要がある。交換後の使用済み製品は専用の回収ルートを作って行う必要があり、製品交換の手間も増えるため、その実現は簡単ではない。しかし、このような使用期限管理の考え方を社会実装しないと、屋外使用のプラスチック製品から生成する MP を削減することはできないのではないかと考える。

6 おわりに

これまでに実施した漂着 MP 調査から、相模湾沿岸の MP 漂着の機序は概ね明らかにすることができたと考える。こうした MP 漂着の特徴を整理することは、削減対策を立案するうえで重要な知見を提供できるものと考えられる。例えば、発泡スチロール破片の由来が黒潮であるなら、これを対象とした対策を検討しても効果はなく、ポリエチレンやポリプロピレンに特化した削減対策を進めるべきだし、住居地域が主要排出源であるならごみ集積所など住居地域特有の施設に着目してファーストフラッシュを低減させる対策の検討を優先させるべきである。大量漂着を防ぐには、市町村によって異なるビーズクッションの廃棄の方法を統一的に見直したり、すでに指導が始まっている圃場の水をなるべく用水路に放出させない浅水代掻きや流出防止のためのネットの使用等の対策をさらに普及することが重要となる。このように、MP の漂着実態を明らかにすることは、地方自治体にとっては削減対策のターゲットの絞り込みや優先順位の決定に対して重要な知見を提供することにつながると思う。

漂着 MP の調査を開始した 3 か月後の 2017 年 8 月から現在まで、黒潮は大蛇行を継続している。今回の大蛇行は 2005 年 8 月以来 12 年ぶりに発生したもので、これまでは長くても数年で解消していたが、大蛇行期間は観測史上最長

を継続⁵⁷⁾している。これまでの調査では黒潮の湾内流入の頻度はあまり高くはない印象であり、4の(8)では相模湾においては海域由来MPの寄与は限定的と評価している。しかし、黒潮が非大蛇行接岸流路をとるときには典型的な大蛇行流路の時よりも大島西水道の潮流と湾内の反時計回りの循環流が強まる²⁰⁾との指摘もあることから、今後、黒潮の大蛇行が解消して非大蛇行接岸流路をとった場合には、外洋由来の発泡スチロール破片の漂着量が沿岸全域で増加し、漂着状況の海岸間の差がほとんどなくなる可能性がある。また、2.2に示した伊豆小笠原海嶺を横切る黒潮軸流の位置と湾内の循環流の強さの関係を考えると、黒潮が非大蛇行離岸流路をとった場合には発泡スチロール破片の漂着がほとんどなくなり、漂着状況の海岸間の差がより顕著に現れるようになる可能性がある。黒潮の大蛇行が解消した場合には上記のように相模湾沿岸のMP漂着状況が大きく変化することが想定される。今後も、黒潮の動きを注視しながら調査を継続していくことが必要と考えられる。

本稿で述べたMP漂着の特性や個々のMPの由来に関する知見は、確度の高いものもあれば十分なデータが取れていないため、必ずしも確度が高くないものもある。特に、発泡スチロール破片については海域由来MPに占める外洋由来MPの寄与を明らかにすることが必要であり、また、河川流下MPのうち海岸で漂着が確認できない繊維やフィルムの行方についても今後調査が必要な課題であると考え。何が不十分なのかについては本文中に記載したが、今後はこうしたデータを補強し、より確度の高い知見を提供できるよう、検討を進めていくことが重要であると考え。

参考文献

- 1) Sustainable Development Solutions Network: Sustainable Development Report 2023, 23-24 (2023)
- 2) GESAMP: Reports and Studies 90 "Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: A Global Assessment", 9-14 (2015)
- 3) Ellen Macarthur Foundation: The New Plastics Economy, 12-29 (2016)
- 4) 環境省海洋プラスチック汚染対策室: 海洋プラスチックごみの科学的知見について. (2021). <https://www.env.go.jp/content/900543725.pdf> (参照; 2023.10)
- 5) Carpenter, E.J., Anderson, S.J., Harvey, G.R., Miklas, H.P. and Peck, B.B.: Polystyrene Spherules in Coastal Waters. *Science*, 178, 749-750 (1972)
- 6) Mato, Y., Isobe, T., Takada, H., Kanehiro, H., Ohtake, C. and Kaminuma, T.: Plastic Resin Pellets as a Transport Medium for Toxic Chemicals in the Marine Environment. *Environ.Sci.Technol.*, 35, 318-324 (2001)
- 7) Eriksen, M., Lebreton, L.C.M., Carson, H.S., Thiel, M., Moore, C.J., Borerro, J.C., Galgani, F. and Ryan, P.G.: Plastic Pollution in the World's Oceans. *PLoS ONE*, 9, e111913 (2014)
- 8) Isobe, A., Uchida, K., Tokai, T. and Iwasaki, S.: East Asian seas: A hot spot of pelagic microplastics. *Mar.Pollut.Bull.*, 101, 618-623 (2015)
- 9) Jambeck, J.R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T.R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R. and Law, K.L.: Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347, 768-771 (2015)
- 10) 工藤功貴, 片岡智哉, 二瓶泰雄, 日向博文, 島崎穂波, 馬場大樹: 日本国内における河川水中のマイクロプラスチック汚染の実態とその調査手法の基礎的検討. *土木学会論文集 B1(水工学)*, 73(4), I_1225-I_1230 (2017)
- 11) 二瓶泰雄, 片岡智哉: 市街地のごみ堆積状況と河川水中のマイクロプラスチック汚染状況. *用水と廃水*, 60(1), 48-55 (2018)
- 12) 環境省: 平成26年度沖合海域における漂流・海底ごみ実態把握調査報告書. https://www.env.go.jp/water/marine_litter/26_3.html (参照; 2023.8)
- 13) Hidalgo-Ruz, V., Gutow, L., Thompson, R.C., and Thiel, M.: Microplastics in the Marine Environment: A Review of the Methods Used for Identification and Quantification. *Environ.Sci.Technol.*, 46(6), 3060-3075 (2012)
- 14) Isobe, A., Kubo, K., Tamura, Y., Kako, S., Nakashima, E. and Fujii, N.: Selective transport of microplastics and mesoplastics by drifting in coastal waters. *Mar.Pollut.Bull.*, 89, 324-330 (2014)

- 15) Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C. and Galloway, T.S.: Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. *Mar. Pollut. Bull.*, 62, 2588-2597 (2011)
- 16) Isobe, A.: Percentage of microbeads in pelagic microplastics within Japanese coastal waters. *Mar. Pollut. Bull.*, 110, 432-437 (2016)
- 17) 池貝隆宏, 三島聡子, 小林幸文: 神奈川県沿岸におけるマイクロプラスチック漂着状況の空間的・時間的変動: 人間と環境, 45(3), 2-14 (2019)
- 18) 神奈川県県土整備局砂防海岸課: かながわの海岸. (2019) https://www.pref.kanagawa.jp/documents/36492/kanagawanokaigan_light.pdf (参照; 2023.8)
- 19) 池貝隆宏, 三島聡子, 長谷部勇太, 小林幸文: 海岸漂着量の評価のためのマイクロプラスチック採取方法. 全国環境研会誌, 42(4), 54-59 (2017)
- 20) Iwata, S. and Matsuyama, M.: Surface Circulation in Sagami Bay: the Response to Variations of the Kuroshio Axis. *J. Oceanogr. Soc. Jpn.*, 45, 310-320 (1989)
- 21) 池貝隆宏, 三島聡子, 菊池宏海, 難波あゆみ, 小林幸文: 相模湾沿岸域のマイクロプラスチック漂着特性. 神奈川県環境科学センター研究報告, 41, 1-10 (2018)
- 22) 池貝隆宏, 三島聡子, 菊池宏海: 相模湾沿岸におけるマイクロプラスチックの漂着の特徴. 用水と廃水, 62(2), 147-154 (2020)
- 23) 三島聡子: 神奈川県内の河川における有機フッ素化合物の実態. 神奈川県環境科学センター研究報告, 39, 11-18 (2016)
- 24) 三島聡子, 小澤憲司, 中山駿一, 菊池宏海: 相模湾漂着マイクロプラスチックの有機フッ素化合物の吸着実態と流入河川の影響. 環境化学, 30, 66-81 (2020)
- 25) 難波あゆみ, 三島聡子, 五十嵐恵美子, 小松明弘, 坂本広美: 相模湾沿岸における一般参加によるマイクロプラスチック分布調査. 全国環境研会誌, 45(3), 65-71 (2020)
- 26) 気象庁: 台風経路図 平成 29 年(2017 年). https://www.data.jma.go.jp/yoho/typhoon/route_map/bstv2017.html (参照; 2023.8)
- 27) 池貝隆宏, 菊池宏海, 三島聡子: 海洋マイクロプラスチックの海岸漂着特性～太平洋沿岸と日本海沿岸の比較～. 全国環境研会誌, 44(4), 29-34 (2019)
- 28) Taira, K. and Teramoto, T.: Path and Volume Transport of the Kuroshio Current in Sagami Bay and their Relationship to Cold Water Masses near Izu Peninsula. *J. Oceanogr. Soc. Jpn.*, 42, 212-223 (1986)
- 29) Kim, I., Chae, D., Kim, S. and Choi, S.: Factors Influencing the Spatial Variation of Microplastics on High-Tidal Coastal Beaches in Korea. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, 69, 299-309 (2015)
- 30) Sagawa, N., Kawasaki, K. and Hinata, H.: Abundance and size of microplastics in a coastal sea: Comparison among bottom sediment, beach sediment, and surface water. *Mar. Pollut. Bull.*, 133, 532-542 (2018)
- 31) 菱田昌孝, 小野房吉, 小田卷実, 佐藤敏, 打田明雄: 東シナ海の海流・潮流の分離による対馬暖流・黄海暖流の源流の解明. 海洋調査技術, 2(1), 1-9 (1990)
- 32) 近藤正人: 東シナ海・黄海漁場の海況に関する研究. 西海区水産研究所研究報告, 62, 19-66 (1985)
- 33) 環境省水・大気環境局水環境課: 河川・湖沼マイクロプラスチック調査ガイドライン. (2023) <https://www.env.go.jp/content/900543325.pdf> (参照; 2023.8)
- 34) 神奈川県環境科学センター調査研究部マイクロプラスチック研究チーム: 模湾漂着マイクロプラスチック(MP)の実態とその由来の推定<その 1>漂着実態把握と吸着化学物質の測定. <https://www.pref.kanagawa.jp/documents/3464/2mprep20191.pdf> (参照; 2023.8)
- 35) Kataoka, T., Nihei, Y., Kudou, K. and Hinata, H.: Assessment of the sources and inflow processes of microplastics in the river environments of Japan, *Environ. Pollut.*, 244, 958-965 (2019)
- 36) Topmson, R.C., Olsen, Y., Mitchell, R.P., Davis, A., Rowland, S.J., John, A.W.G., McGonigle, D. and Russell, A.E.: Lost at Sea: Where Is All the Plastic?. *Science*, 304, 838 (2004)
- 37) 三島聡子, 小澤憲司, 中山駿一, 菊池宏海, 難波あゆみ, 片岡智哉, 二瓶泰雄: 流域～河川～海岸におけるプラスチック片堆積状況の

- 比較解析の試み～神奈川県引地川流域を例に～. 水環境学会誌, 45(1), 11-19 (2022)
- 38) 日本プラスチック工業連盟: プラスチックペレットを取り扱う業者の皆さまへ.
https://www.jpif.gr.jp/environment/ocean/resin-pellets/doc/leaflet_2021.pdf (参照; 2023.8)
- 39) 山口晴幸: 大量漂着するレジンペレットによる海岸汚染－相模湾・東京湾沿岸域の実態－. 土木学会誌, (83)11, 48-50 (1998)
- 40) 栗山雄司, 小西和美, 兼広春之, 大竹千代子, 神沼二眞, 間藤ゆき枝, 高田秀重, 小島あずさ: 東京湾ならびに相模湾におけるレジンペレットによる海域汚染の実態とその起源. 日本水産学会誌, 68(2), 164-171 (2002)
- 41) 岸村小太郎: プラスチック海洋ごみ問題への取組. 水環境学会誌, 40(10), 366-369 (2017)
- 42) 神奈川県: 環境への負荷の低減に関する指針. <https://www.pref.kanagawa.jp/docs/pf7/jyourai/r2shishinkaisei.html> (参照; 2023.8)
- 43) Endo,S., Takizawa,R., Okda,K., Tahada,H., Chiba,K., Kanehiro,H., Ogi,H., Yamashita,R. and Date,T.: Concentration of polychlorinated biphenyls (PCBs) in beached resin pellets: Variability among individual particles and regional differences. *Mar.Pollut.Bull.*, 50, 1103-1114 (2005)
- 44) 菊池宏海, 難波あゆみ, 五十嵐恵美子, 川原一成, 三島聡子, 坂本広美: 相模湾西部沿岸で採取した特徴的な形態を有するマイクロプラスチックの発生源調査. 全国環境研会誌, 46(2), 17-21 (2021)
- 45) 神奈川県水産技術センター相模湾試験場: 相模湾の定置網漁業. <https://www.pref.kanagawa.jp/docs/jx3/cnt/f532586/p1045256.html> (参照; 2023.10)
- 46) 海上保安庁: 海洋状況表示システム「海しる」。 <https://www.msil.go.jp/msil/htm/main.html?Lang=0> (参照; 2023.10)
- 47) 水産庁: 令和元年度漁業系プラスチック廃棄物の排出・処理の実態把握に向けた調査報告書. (2020). https://www.jfa.maff.go.jp/j/sigen/action_sengen/attach/pdf/190418-14.pdf (参照; 2023.10)
- 48) 塚村慶子, 倉本恵治, 佐々木憲吾, 馬場祥宏: 広島かき養殖における魚類の食害実態調査. 広島県立総合技術研究所 西部工業技術センター研究報告, 52, 48-51 (2009)
- 49) 山本竜太郎, 山内和夫, 林浩志, 岡野利之: 水産物流通における通い容器の活用可能性に関する一考察. 漁港漁場漁村総合研究所調査研究論文集, 21, 59-68 (2011)
- 50) 農林水産省: 海面漁業生産統計調査 (平成30年) . https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/kaimen_gyosei/ (参照; 2023.10)
- 51) Evans,M.C. and Ruf,C.S.: Toward the Detection and Imaging of Ocean Microplastics With a Spaceborne Radar. *IEEE Trans.Geosci.RemoteSens.*, 60, 4202709 (2022)
- 52) 岩崎慎介: 長江河川から流出する浮遊マイクロプラスチックの輸送過程と集積行の特定. 科学研究費助成事業データベース. <https://kaken.nii.ac.jp/> (参照; 2023.10)
- 53) 浪川珠乃, 三浦浩, 伊藤靖: 中国における漁港・漁場・漁村の状況 (香港, 舟山, 台湾) . 漁港漁場漁村研報, 42, 14-25 (2017)
- 54) 楽家華, 増井好男: 中国浙江省嵊泗県におけるイガイ養殖業の成立要因. 地域漁業研究, 54(1), 55-71 (2013)
- 55) AFPBB News: イガイの養殖にいそしむ漁民たち 浙江省舟山市. <https://www.afpbb.com/articles/-/3349605> (参照; 2023.8)
- 56) 環境省: 令和元年度 漂着ごみ対策総合検討業務報告書. https://www.env.go.jp/water/marine_litter/31_1.html (参照; 2023.8)
- 57) 気象庁: 黒潮の大蛇行関連ポータルサイト. https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/db/kaikyo/etc/kuroshio_portal_201710.html (参照; 2023.8)