

# 海洋プラスチック汚染の現状と今後

九州大学 応用力学研究所 教授 磯辺 篤彦

## 要 旨

本報告では、海洋プラスチックごみの発生源やマイクロプラスチックへの破砕過程、それらの行方や今後の研究課題について解説した。これまで海域に流出したプラスチックごみの総量約 2500 万トンの 67%は、マイクロプラスチックに破砕したのち、海水より重い素材のため海底に沈むか、生物付着などを介した沈降などを経て、海岸や海面近くから姿を消したと推計された。ただし、現在確認される海洋プラスチックの総量は、これまで陸域に投棄されたプラスチックごみの約 5%に過ぎず、残りの 95%は陸で行方不明となっている。

## 1. はじめに

安価なシングル・ユース(使い捨て)プラスチックは、総じて大量に消費され、大量に廃棄され、そして一部が環境中に流出する。プラスチック循環利用協会の集計<sup>1)</sup>によれば、現在、わが国では年間で約 900 万トンのプラスチックが廃棄され、このうち 84%は焼却熱回収や輸出を含むリサイクルに、残りの 16%は埋め立てや焼却廃棄(単純焼却)されている。合わせて 100%だが、実のところ、年間で 14 万トン程度(1~2%)の廃棄処分されたプラスチックは、回収経路から外れて環境中に漏れると推算されている<sup>2)</sup>。世界全体で環境漏出する廃棄プラスチック量は年間 3,200 万トンであり<sup>2)</sup>、そのうち 200 万トン前後は、街中から川を介して海に流出し、海洋ごみ(海洋での漂着ごみと漂流ごみ)となるらしい<sup>3)</sup>。実際に、漂着ごみのうち個数比にして約 70%は廃棄プラスチックなのである<sup>4)</sup>。ここでは、最近の研究成果をもとに、流出したプラスチックごみによる海洋汚染の現状と今後の研究課題を紹介する。

## 2. 海洋プラスチックごみの発生

海洋プラスチックごみは、漁業をはじめ海洋に投棄されたものを含むが、それは全体の 20%程度に過ぎない(集計によって、この割合はさらに下がる場合がある)<sup>5)</sup>。行楽客が海岸で不用意に捨てたプラスチックごみもあるが、過去 5 年間に海岸調査された海岸漂着ごみの多様性をみれば、海岸利用だけでごみの起源を説明するこ

とは合理的でない<sup>6)</sup>。多様なごみの種類が示唆するところは、私たちの日常が海洋プラスチックごみの発生源であることだろう。

特に捨てる前提で使われる使い捨てプラスチックは処理が個人に委ねられて管理が難しく、回収経路からの 1~2%程度の漏れは避けがたい。最近になって、私たちは世界の川や海岸、そして海面から深海までに発見された 1200 万件に及ぶ海洋ごみ(プラスチック以外も含む)の調査結果を発表した<sup>7)</sup>。この論文によれば、これまで最も多く見つかった海洋ごみは、テイクアウト食品に用いる使い捨てプラスチックで、これらが全体の 2/3 程度を占める。中でも最多はレジ袋のようなプラスチック・バッグで、全体の約 14%であった。

海岸に漂着したプラスチックごみを半年ほど放置しておけば、紫外線や寒暖差による劣化が進行し、これに海岸砂との摩擦などの物理的な刺激が加わることで破砕する<sup>7)</sup>。破砕が進んでサイズが 5 mm を下回った微細片を、私たちはマイクロプラスチックと呼んでいる(写真 1)。同じ期間を陸に置いたものに比べ、海中に置いた場合はプラスチック劣化の進行は遅い<sup>7)</sup>。そもそも海中であれば、水温は気温ほど変動しないし、物理的な刺激は海岸に比べて弱い。これらを勘案すれば、主なマイクロプラスチックの生成機会は漂流中ではなく、漂着後の海岸であると考えられる。

例えば東京都新島の和田浜海岸では、漂着プラスチックごみの平均滞留時間(漂着から海へ再漂流するまでの時間)は約半年と見積られている<sup>8)</sup>。この期間は、海岸の地形条件や、気象・海象条件にも依存するだろうが、

漂着プラスチックごみが劣化するのに十分な時間である。

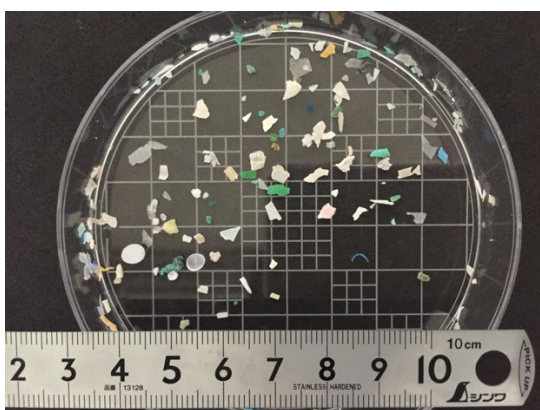


写真1 日本海で曳網採取されたマイクロプラスチック

このように、プラスチックごみが漂流と海岸漂着、そして再漂流を繰り返すことで、次第に細かなマイクロプラスチックが生成されるのであろうが、詳細な生成機構については、ほとんど研究が進んでいない。環境中に漏出したプラスチックごみが劣化と破碎を繰り返してマイクロプラスチックに変化するまで、どれほどの時間規模を要するのか。プラスチックは自然環境下でどこまで細かく破碎するのか。たとえ高分子化学やプラスチック材料工学の専門家であっても、マイクロプラスチックに至るまでの劣化は、これまで研究の動機付けがなかったであろう。ただ、世界の海洋における浮遊マイクロプラスチックの広がりを見れば、プラスチック製品が世界に出回ってのち現在までの約 70 年という期間は、廃プラスチックが海洋に流出し、大量のマイクロプラスチックが生成され、そして海洋に広く浮遊するには十分であったことだけは確かである。

### 3. 海洋プラスチックの行方

川から海に至ったプラスチックごみは、漂流と漂着を繰り返しつつ、それでも分解に数百年から数千年を要するとされる<sup>9)</sup>。よって海洋に存在し続けるプラスチックごみであるが、その総量の推算是難しい。荒天のたび漂着と再漂流を繰り返す漂着プラスチックごみの総量を、海岸で正確に見積もる体制は、わが国のみならず世界で整っていない。海岸でごみの漂着数を目視で計量することはできるが、そもそもアクセスの悪い海岸では調査

ができない。漂着と再漂流は天候の荒れるタイミングで繰り返されて、数ヶ月や一年に一度程度の調査であれば、平均的な漂着数を決定することは難しい。まして、海洋に漂うマイクロプラスチックの総量は船舶からの目視観測に頼って、高い精度は期待できそうにない。

それでも、Eriksen et al. (2014)<sup>10)</sup>は、最近までの観測結果と数値シミュレーションと合わせた解析に基づいて、世界の海に浮遊するプラスチックごみの総量(マイクロプラスチックを含む)を、約 25 万トンと見積もった。そして、一年間の環境流出量が 3,200 万トン(うち海洋流出が 200 万トン)であるにもかかわらず、そして過去 70 年以上もプラスチックを使い続け、そして捨て続けてきたにもかかわらず、現在の海洋で現存量がわずか 25 万トンという少なさが、世界の研究者を戸惑わせた。これでは、環境中に捨てられたプラスチックごみのほとんどは行方不明ということになる。

この海で消えたプラスチックごみの行方について、最近になって私たちが発表した論文(Isobe & Iwasaki, 2022)<sup>11)</sup>を紹介しよう。年間で約 200 万トンに及ぶ川から海に流出するプラスチックごみと、その 20%となる漁業プラスチックごみを世界の海に与え、海流に乗せて移動させ、行方を追跡した粒子シミュレーションである。海洋表層(海面から<1 m 水深程度まで)に漂う海洋プラスチックを対象とした。このシミュレーション実験は、1961 年から現在までの期間を想定して行った。プラスチックごみの現在の投入量をベースに、河口のある国ごとに GDP 推移に比例させて投入量を経年変化させた。結果として、期間全体では世界の海に総計で約 2,500 万トンに及ぶプラスチックごみを投入した。シミュレーションの中で、プラスチックごみに見立てた仮想粒子は、海岸漂着と海への再漂流を繰り返し、次第に劣化と破碎が進んでマイクロプラスチックとなって、最後には海洋表層から消えるように設定した(観測できないほどの微細片化、生物付着に伴う深海への沈降、海岸砂への吸収などが、すでに報告されている)。

このシミュレーション実験の結果は、これまで世界の海で観測された浮遊マイクロプラスチック量や、海岸漂着したプラスチックごみの量をよく再現するものであった。この研究によって明らかになったプラスチックごみの行

方は次の通りである。

これまで世界の海に流出した 2500 万トンのプラスチックごみのうち、約 26%(650 万トン)は目視できるサイズのプラスチックごみとして、約 7%(175 万トン)はマイクロプラスチックとして、いまも世界の海で漂流と漂着を繰り返している。そして、約 67%(1,675 万トン)は、マイクロプラスチックに破砕したのち海水より重い素材のため海底に沈むか、あるいは上記の消失過程を経て海岸や海面近くから姿を消したと推計された。

#### 4. 海洋生態系への影響

人目に付きやすいプラスチックごみであれば、これが海岸に大量に蓄積することで景観汚染となることは容易に想像がつく。また、化学繊維のロープや漁網の海洋生物への絡まりや、プラスチック片の海鳥による誤食は、インターネットで画像も多く出回って、よく知られた海洋プラスチック汚染の実態であろう。それでは、人目につきにくいマイクロプラスチックについて、その海洋環境影響はどのようなものだろうか。

まず、小さなマイクロプラスチックであれば、容易に海洋生物に誤食される。実際に、これまで鯨から動物プランクトンに至る多種多様な海洋生物の体内からマイクロプラスチックの検出が報告されている。すでに海洋生態系に広く深くマイクロプラスチックが侵入したことを疑う研究者はいないであろう。

海を浮遊するにつれて表面に吸着する海水中のポリ塩化ビフェニル(PCBs)など残留性有機汚染物質や、もともとプラスチックに含まれる添加剤は、マイクロプラスチックと共に誤食を通して海洋生物に移行する。そして、体内で脱着したのち何らかのダメージを与える危険がある<sup>12)</sup>。化学汚染物質だけではなく、添加剤を含まない未使用のプラスチックビーズを水棲生物に摂食させ、発現した障害を報告した「粒子影響(粒子毒性)」の実験結果も、最近になって数多く報告されている<sup>12)</sup>。障害の種類は、死亡率の上昇や体長の低下、あるいは炎症など様々である。いずれ毒ではないが栄養にもならないプラスチックを摂取することは、生物にとって種の劣化につながる大きな負担なのである。

ただ、いまのところ、マイクロプラスチック由来の障害が実海域の生物に見つかったとの報告はない。まだ実海域での浮遊数が、海洋生物に影響を与えるほど多くはないのだろう(図 1 上)。それでも私たちの研究<sup>13)</sup>によれば、50 年後の太平洋ではマイクロプラスチック浮遊量が他の浮遊懸濁物と比べて優位となり、粒子影響が海洋生物へ負担を与えるほどになると予測された(図 1 下)。ただ、この予測は、曳網調査を主体とした現在の観測体制で採取できる、数百  $\mu\text{m}$  以上のマイクロプラスチックを対象としている。細かなマイクロプラスチックは、網目を抜けて採取できないのである。一方で、粒子影響を論じた実験は、それよりも二桁以上はサイズの小さなマイクロビーズを用いることが多い。実験と観測(および観測を再現するよう調整されたシミュレーション)にはサイズのギャップが大きく、まだ海洋生物の影響を予測するには課題が残る。

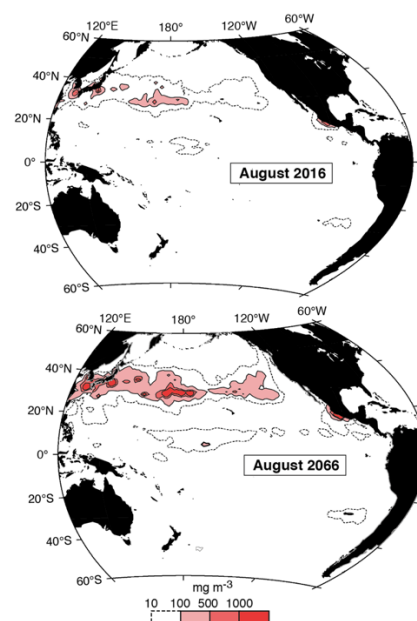


図 1 太平洋における 8 月の浮遊マイクロプラスチック重量濃度(上:2016 年現在,下:2066 年). Isobe et al. (2019)<sup>13)</sup>によるシミュレーション結果

#### 5. 今後の研究課題

上述したシミュレーション結果 (Isobe & Iwasaki, 2022<sup>11)</sup>)によって、1960 年代から現在までに海洋流出したプラスチックごみは、約 2,500 万トンに上ると推定された。2,500 万トンを与えたことによって、過去から現在までの海洋プラスチック現存量が、シミュレーションで精度

よく再現できたのである。

さて、ここで大きな疑問が浮かぶ。いま世界で環境中に漏出しているプラスチックごみ量が年間 3,200 万トンならば、シミュレーションと同じく GDP 推移に比例させることで、1960 年代から現在までの総量を求めることができ、これは約 5 億トンであった。一方で、プラスチックごみの海洋での総量は、海面近くから姿を消したものを含めて 2500 万トン程度(5 億トンの 5%程度)なのである。残りの 95%はどこに行ったのだろうか。

この陸で消えたプラスチックの行方は、まだよくわかっていない。土壌に吸収されたもの、生物圏が吸収したものの、大気中を浮遊するもの、そして川や湖など陸水中に捕捉されているのだろう。いずれ今まで私たちが認識していた海洋プラスチックは、地球環境に漏れたプラスチックごみにとって氷山の一角にすぎない。これら陸で消えたプラスチックごみは、地球環境におけるプラスチックの巨大なストックであり、海洋流出に至るまでの挙動追跡や、その過程での環境影響評価は、注視すべき今後の研究課題である。

海洋プラスチックや陸のプラスチックごみは、劣化と破碎を繰り返すことで微細片化する。十分に微細片化が進行すれば、いま私たちが曳網調査で採取しているサイズよりも細かなものに変っていくだろう。微細なマイクロプラスチックであれば、数多い実験報告が示すとおり、生物への粒子影響が懸念される。

マイクロプラスチックの地球環境への負荷を考えると、悲観的なシナリオはこうである。曳網調査の網目を抜けるほど微細なマイクロプラスチックは、質量保存を保ちつつ破碎を重ねて、すでに(いずれ)閾値を超えた量が海に浮遊する。誤食を介した種の劣化が小生物に始まって、食物連鎖がつながり大型生物へ影響が波及するだろう。楽観的なシナリオはこうである。海洋表層からマイクロプラスチックが消える事実は、輸送の過程で地球のどこかにプラスチック片が吸収されることを示唆する。例えば、生物付着に伴う重量の増加と深海への沈降である。小さなプラスチック片ほど浮力を得にくい沈みやすいであろう。地球の環境復元機能は、太陽光が届くことで生物生産の活発な海洋表層から、次第にマイクロプラスチックを切り離すのかもしれない。

水より軽く遠方に運ばれつつも、容易に腐食分解しない。いま海に大量に流入するプラスチックごみは、永い地球史にあつて初めて現れた物質である。これによって生態系を含む地球環境は変質していくのだろうか。あるいは地球環境の強靱性によって、海洋プラスチック汚染は回避されるのだろうか。

## 参考文献

- 1) プラスチック循環利用協会: 2018 年プラスチック製品の生産・廃棄・再資源化・処理処分の状況 マテリアルフロー図.(2019).
- 2) J. R. Jambeck, et al.: Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347, 768-771 (2015).
- 3) L. Lebreton et al.: River Plastic emissions to the world's oceans". *Nat. Comm.*, 8(1),1-10 (2017).
- 4) J. G. B. Derrek: The pollution of the marine environment by plastic debris: a review. *Mar. Pollut. Bull.*, 44, 842-852 (2002).
- 5) C. Morales-Caselles et al.: An inshore-offshore sorting system revealed from global classification of ocean litter. *Nat. Sustain*, 4(6),484-493 (2021).
- 6) 磯辺篤彦: 海洋プラスチック問題の真実 -マイクロプラスチックの実態と未来予測-. DOJIN 選書 86, 化学同人, 188pp. (2020).
- 7) A. L. Andradóttir: Microplastics in the marine environment. *Mar. Pollut. Bull.*, 62(8), 1596-1606 (2011).
- 8) T. Kataoka et al.: Analysis of a beach as a time-invariant linear input/output system of marine litter. *Mar. Pollut. Bull.*, 77, 266-273 (2013).
- 9) D. K. A. Barnes et al.: Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Phil. Trans. R. Soc. B* 364, 1985-1998 (2009).
- 10) M. Eriksen et al.: Plastic pollution in the world's oceans: More than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea. *PLOS ONE* 9(12), e111913 (2014).
- 11) A. Isobe & S. Iwasaki: The fate of missing ocean plastics: Are they just a marine environmental problem?. *Sci. Total Environ.*, 825, 153935 (2022).
- 12) L. C. de Sá et al.: Studies of the effects of microplastics on aquatic organisms: What do we know and where should we focus our efforts in the future?. *Sci. Total Environ.*, 645, 1029-1039 (2018).
- 13) A. Isobe et al.: Abundance of non-conservative microplastics in the upper ocean from 1957 to 2066. *Nat. Comm.*, 10(1),1-13, (2019).