

THINKING SUSTAINABILITY RESEARCH



RYOTA NAKAJIMA, Ph.D.

海洋学者  
日本-アジア

中嶋亮太 海洋プラスチック-深海に溜まる永遠に消えないごみ

日本語のオリジナル版

安価で耐久性に優れたプラスチック製品は私たちの生活を向上させてきたが、同時に海洋へと流出する膨大な量のプラスチックごみが深刻な環境問題を引き起こしている。ほとんどのプラスチックは微生物に分解されず、海に永遠に残り続けるため、海洋は次第にプラスチックで溢れていく。世界で最も深いマリアナ海溝や北極海、南極海でもプラスチックの痕跡が見つかり、プラスチックのない海洋はもはや存在しないと言える。この記事では、私が所属する国立研究開発法人海洋研究開発機構（JAMSTEC）の研究チームが進めてきた研究成果を交えながら、海洋プラスチックごみ問題の現在とこれからについて述べる。

■大量生産と大量廃棄

世界中で年間約4億トンのプラスチックが生産されており、これは全人類の体重とほぼ同等だ。プラスチックの大量生産は1950年に始まり、2017年までの合計生産量は約92億トンになる。廃棄されたプラスチックは70億トンを超え、そのうち10%がリサイクルされ、14%が焼却され、残りの大部分は埋め立てられたり環境中に放出されたりした。リサイクルされたプラスチックが再びリサイクルされる率は約10%に過ぎず、現在のリサイクルプロセスは持続可能ではない。

■世界の6割以上のプラスチックごみがアジアから流出  
海洋で見つかるプラスチックごみのうち、大部分の80%は陸上に由来し、主に日常生活で使用される使い捨て

てプラスチックが排水や風によって海に運ばれる。残りの20%は漁業等の海洋活動から発生するプラスチックである<sup>2</sup>。年間に陸上から海へと流出するプラスチックごみ量の推定値には幅があり、50万トンから最大で1000万トンとされている<sup>3,4,5</sup>。プラスチックが完全に回収・処理されれば海洋への流出は防げるが、問題は適切に管理されていないプラスチックごみである。これには野ざらしのごみや、ごみ箱から溢れたごみ、不法な埋立地のごみなどが含まれる。これらの「管理不十分なプラスチックごみ」の一部が結果的に海へと流出する。世界全体で発生する管理不十分なプラスチックごみは年間6000万~9900万トンもあるが、そのうち60%以上がアジアから発生している<sup>6</sup>。

陸上から海へのプラスチックの流出は、大雨の後や台風やハリケーンの通過後に特に顕著である。日本の相模湾で、台風通過直後にプラスチックの観察した際、河川を通じて湾内に流れ込んだプラスチックや木屑が海面全体を覆っていた。海面に浮かぶマイクロプラスチックの量を<sup>7</sup>調べると、台風通過前と比較して1300倍に増加していた。しかし、湾内に流出した大量のプラスチックごみは、海流によって速やかに広い外洋へと運ばれてしまう (Fig. 1)。

### ■行方不明プラスチックの謎

海洋に流出したプラスチックの総量についてはさまざまな推測があり、2500万トンから1億トン以上とされる<sup>8</sup>。しかしながら、海表面に実際に浮いているプラスチックは、全体の約10%に相当する数十万から数百万トン程度である<sup>9</sup>。残り90%のプラスチックの行方が分かっておらず「行方不明プラスチック」と呼ばれるが、おそらく大部分は深海に沈んでいる。

多くの人がプラスチックごみは海面を浮かぶイメージを持っているかもしれないが、藻類やフジツボなどの生物付着や粒状有機物との凝集などによって重くなり、最終的には沈んでしまう。例えば、食品包装用の袋の多くは最初は水に浮いているが、生物付着等によってやがて沈む。実際に深海に行くと、場所によっては多くの食品包装が見られる (Fig. 2)。

まだ行方不明プラスチックを説明できるほど大量のプラスチックは海底から見つかってはいないが、日本近海の深海底が最も怪しいプラスチックごみ集積地のひとつである。その理由を以下に述べる。

### ■日本は海洋プラスチックのホットスポット

日本周辺の海域は、日本海を北上する「対馬暖流」と太平洋を北上する「黒潮」という二つの主要な海流の影響を受けている。これらの海流は東アジアや東南アジアからの大量のプラスチックごみを運んでくるため、日本の近海ではマイクロプラスチックの濃度が高い。過去の研究によると、日本周辺海域のマイクロプラスチック濃度は世界平均の27倍もあり、日本の海がプラスチック汚染の集中地であることが示されている<sup>10</sup>。同様のことが深海底でも観察される可能性が高い。

日本近海には、巨大な深海ごみの集積場所が少なくとも2か所存在すると予想されている。1つ目は四国沖の「黒潮・再循環域」の海底であり、2つ目は房総半島沖の「黒潮続流・再循環域」の海底である (Fig. 3)。「黒潮・再循環域」と「黒潮続流・再循環域」では、表層の海流が強く渦を巻きながら循環しており、この海流により日本や東アジア、東南アジアから運ばれてくるプラスチックごみが海流の渦に巻き込まれて集積している。そのため渦によって集積したごみが沈降することで海底に大量のごみを輸送し、巨大なごみの堆積が深海底に形成されていると考えた。

#### ■日本の深海底に溜まるプラスチック

我々の研究チームは、まず「黒潮続流・再循環域」の海底調査を実施した。この海域は、陸から500 kmも離れており、水深は5000 mを超える。有人潜水調査船「しんかい6500」を使って、水深5700 mから5800 mの海底を調査したところ、多くの使い捨てプラスチックが見つかった (Figs. 4 and 5)。1平方キロメートルあたり約5000個のマクロプラスチックごみ（直径25 mm以上のプラスチック）が発見された<sup>11</sup>。これは、かつての認識を覆すほど多い数である。深海底のプラスチックごみの数は陸から離れるほど少なくなることが常識であったが、今回の結果はそれを否定する結果となった。また、北太平洋の他の海域から同様の水深帯の深海底で調べられたマクロプラスチックごみの数に比べて2桁も多かった。

さらに「黒潮続流・再循環域」の深海底の堆積物に含まれるマイクロプラスチック濃度を調べたところ、堆積物1グラムあたりに約600粒のマイクロプラスチックが確認された<sup>12</sup>。これは陸に近い深海底の値よりも一桁高く、また地中海や北大西洋の堆積物中のマイクロプラスチック濃度と比べて数倍から数千倍も多い。

JAMSTECのスーパーコンピュータ「地球シミュレータ」を用いた流れ場のシミュレーションによると、この地域の深海底に見られるプラスチックごみは遠くの海底から水平方向に運ばれてきたものではなく、この地域の海表面に集まったプラスチックごみが上層から直接沈んできたものであることがわかった<sup>11</sup>。これらの研究も含め、日本周辺の深海底のプラスチック濃度が他の海域に比べて非常に高いことが明らかになりつつある。

深海底で発見されるごみの大部分は、ポリ袋や食品包装などの使い捨てプラスチック製品である。「黒潮続流・再循環域」の深海底からは、1984年製造と記された（回収時で）35年以上前の食品包装がほとんど無傷かつ印刷も鮮明なまま見つかった (Fig. 6)。深海は水温が低く、また紫外線が届かないため、プラスチックを劣化さ

せる要素がない。その後の調査で、1973年や1984年に製造された食品包装など、半世紀前に捨てられたごみが見ついている。深海に堆積したプラスチックは「消えないごみ」として海底に残り続ける。

#### ■中深層に蓄積する微小マイクロプラスチック

先ほどは深海底の話をしたが、海底だけでなく、中深層の海中でもプラスチックが溜まる層があることが最近の研究から見えてきた。北太平洋におけるマイクロプラスチックの研究から、水深2000 mの中深層にマイクロプラスチックが多量に存在することが明らかになったのだ<sup>13</sup>。特に、直径が数十 $\mu$ m程度の非常に小さなマイクロプラスチックがこの中深層に蓄積していることがわかった。

海面に存在するマイクロプラスチックは、生物付着等によって次第に深海へ沈んでいくが、沈降する過程でその表面の有機物が微生物によって消費され、プラスチックを沈める因子が失われてしまう。これにより、一見すると再び浮上しそうに思うが、これらの極小粒子は簡単には浮上せず、さらに分解しにくい有機物がプラスチック表面に残るため、浮かび上がることも沈むこともない状態が続く。結果として、海の中深層にマイクロプラスチックが層を成して蓄積されている実態が見えてきた。海洋プラスチックの約80%は炭素で構成されるが、海中のプラスチック濃度は指数関数的に増え続けているため、このような「溜まり場」ではプラスチックの炭素量が生物系の有機炭素量に匹敵する可能性があり、そうなった時の生態系や物質循環への影響が懸念されている<sup>14</sup>。

#### ■プラスチックがもたらす問題

海洋へ流出するプラスチックは、多様な影響を生態系や生物に及ぼすことが分かっている。プラスチックがもたらす問題はいくつもあるが、ここではプラスチックの誤食について述べる。人間は意図的にプラスチックを食べることはないし、もし誤って小さなプラスチック片を摂取しても、消化されずに体外に排出される。しかし、多くの海洋生物はプラスチックを誤って餌と認識し摂取してしまう。プラスチックに餌の匂いがつくことが要因のひとつである<sup>15</sup>。一部の海鳥はプラスチックを餌と勘違いし、それを雛に与える。これにより、雛の胃にプラスチックが蓄積され、消化管の閉塞や栄養不足による死に至る。大きなプラスチック片を摂取した場合、消化管が物理的に傷つくこともある。魚類においても、調査された約500種類の中で60%以上が体内にマイクロプラスチックを保持していることが確認された<sup>16</sup>。イワシなどの小魚は、海中のプランクトンを丸呑みする際にマイクロプラスチックも一緒に摂取

してしまう。海水中のマイクロプラスチック濃度が高くなれば、マイクロプラスチックの摂取を避けることはできなくなる。すでに700種を超える海洋生物がプラスチックを誤食しているが<sup>17</sup>、海洋のプラスチック濃度は年々増加しており、生物に取り込まれる量も増えていくだろう。

日本の研究チームによれば、海中のマイクロプラスチック濃度が1立方メートルあたり1グラムを超えると、海洋生物に顕著な悪影響が出ると指摘されている<sup>18</sup>。特に北太平洋の表層では、2060年代にその濃度を超える可能性があると予測されているが、海底ではプラスチック量がより多いためさらに早く悪影響が現れるかもしれない。また、プラスチックに含まれる添加剤による有害化学物質の影響も考慮する必要がある。以下に述べる通り、これらの化学物質は長期にわたって環境に残り続け、広範囲にわたり影響を及ぼす可能性がある。

#### ■プラスチックの添加剤に毒性が

マイクロプラスチックは、そのサイズが小さければ消化されずに便として体外に排出されるため、現在のマイクロプラスチック濃度では特に生物に直接的な問題はないと考えられている。しかし、問題はプラスチック自体の

毒性ではなく、プラスチックに含まれる有害な化学物質（添加剤）である。これらの添加剤には、生物に有害な影響を及ぼすものが含まれる場合がある。例えば、プラスチックの難燃性を高めるために使われてきたPBDEs（ポリ臭化ジフェニルエーテル）は、かつて電化製品や家具に広く使用されていた。しかし、その環境への持続性や生物への蓄積性、長距離移動性、生殖に対する毒性が問題視され、PBDEsはストックホルム条約で残留性有機汚染物質（POPs）に指定され、使用や製造が禁止されている。同様に、プラスチックの紫外線耐性を高めるBZT-UVs（ベンゾトリアゾール系紫外線吸収剤）のUV-328、ヘキサブロモシクロデカン（HBCD）や一部の有機フッ素化合物（PFOA）などのプラスチック関連化学物質が最近POPsに指定された。

これらの添加剤はプラスチックから抜け出しやすく、生物がプラスチックを摂取すると消化液で抽出されて体内に移動し、脂肪に蓄積される。生物が有害化学物質を含むプラスチックを直接あるいは間接的に摂取することにより、これらの有害化学物質が体内に蓄積されることがある。我々が日本の深海に生息するサメの肝臓に含まれるプラスチック添加剤の調査を行ったところ、捕獲された8種の全ての深海サメから高濃度のPBDEsが検出された<sup>19</sup>。このような有害物質は生物濃縮により、食物連鎖の上位に位置する生物に特に多く見られる。同様に、

水深9000mを超える超深海の海底で採取されたカイコウオオソコエビという甲殻類からは、BZT-UVsのUV-328が検出された<sup>20</sup>。これらの結果は、深海の隅々までプラスチック由来の化学物質汚染が及んでいることを示す (Fig. 7)。

#### ■プラスチックとの正しい付き合い方

日々大量のプラスチックが陸から海に流れ出ており、一度海に入ると回収はほぼ不可能である。浜辺や河川から漂着ごみを回収することは可能だが、これは海に流入するごみのごく一部に過ぎない。既に海に入ってしまったプラスチックごみは回収が難しいため、新たなプラスチックの流出を防ぐことが重要である。このためには、海洋で最も多い「使い捨てプラスチック」への対策が必要となる。

積極的にリサイクルすれば解決すると安易に考える人は多い。現在の世界のプラスチックリサイクル率は約10%であるが、リサイクルされたプラスチックが再びリサイクルされる割合もまた約10%であり、永続的にリサイクルされる訳ではない。リサイクルは抜本的な解決策ではなく、プラスチックの使用量を減らし、生産を削減することが重要である。特に「使い捨てプラスチック」の削減が必要で、持続可能な未来に向けてプラスチック以外の代替材料への転換が求められている。

生分解性プラスチックは水と二酸化炭素に分解される特性があり、海洋でも分解する生分解性プラスチックの開発が進められている<sup>21</sup>。しかし、海洋生分解性プラスチックも、すぐに分解されるわけではなく、長期的には通常のプラスチックと同様の環境問題を引き起こす可能性がある。そのため、海洋生分解性プラスチックの使用は特定のリスクを伴う用途に限定されるべきだろう。

プラスチック汚染への対策意識は世界的に高まっており、2022年3月の国連環境会議では、2025年までにプラスチック問題の解決に向けた国際条約を作成する準備を始めることで、175カ国・地域が合意した。プラスチックの生産と使用に良い意味で大きな変化が起きることに期待したい。

#### 参考文献

<sup>1</sup> R. Geyer, J. R. Jambeck, K. L. Law, Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science advances* 3, e1700782 (2017).  
C. Morales-Caselles, J. Viejo, E. Martí, D. González-Fernández, H. Pragnell-Raasch, J. I. González-Gordillo, E. Montero, G. M. Arroyo, G. Hanke, V. S. Salvo, An inshore-offshore sorting system revealed from global classification of ocean litter. *Nature Sustainability* 4, 484-

493 (2021).

<sup>2</sup> J. R. Jambeck, R. Geyer, C. Wilcox, T. R. Siegler, M. Perryman, A. Andrady, R. Narayan, K. L. Law, Plastic waste inputs from land into the ocean. *science* 347, 768–771 (2015).

L. J. Meijer, T. Van Emmerik, R. Van Der Ent, C. Schmidt, L. Lebreton, More than 1000 rivers account for 80% of global riverine plastic emissions into the ocean. *Science advances* 7, eaaz5803 (2021).

<sup>3</sup> M. L. Kaandorp, D. Lobelle, C. Kehl, H. A. Dijkstra, E. van Sebille, Global mass of buoyant marine plastics dominated by large long-lived debris. *Nature Geoscience* 16, 689–694 (2023).

<sup>4</sup> L. Lebreton, A. Andrady, Future scenarios of global plastic waste generation and disposal. *Palgrave Communications* 5, 1–11 (2019).

<sup>5</sup> R. Nakajima, T. Miyama, T. Kitahashi, N. Isobe, Y. Nagano, T. Ikuta, K. Oguri, M. Tsuchiya, T. Yoshida, K. Aoki, Plastic after an extreme storm: The typhoon-induced response of micro-and mesoplastics in coastal waters. *Plastic Pollution in the Bay Areas*, (2022).

<sup>6</sup> A. Isobe, S. Iwasaki, The fate of missing ocean plastics: Are they just a marine environmental problem? *Science of the Total Environment* 825, 153935 (2022).

<sup>9</sup> E. Van Sebille, C. Wilcox, L. Lebreton, N. Maximenko, B. D. Hardesty, J. A. Van Franeker, M. Eriksen, D. Siegel, F. Galgani, K. L. Law, A global inventory of small floating plastic debris. *Environmental Research Letters* 10, 124006 (2015).

<sup>10</sup> A. Isobe, K. Uchida, T. Tokai, S. Iwasaki, East Asian seas: a hot spot of pelagic microplastics. *Marine pollution bulletin* 101, 618–623 (2015).

<sup>11</sup> R. Nakajima, M. Tsuchiya, A. Yabuki, S. Masuda, T. Kitahashi, Y. Nagano, T. Ikuta, N. Isobe, H. Nakata, H. Ritchie, Massive occurrence of benthic plastic debris at the abyssal seafloor beneath the Kuroshio Extension, the North West Pacific. *Marine Pollution Bulletin* 166, 112188 (2021).

<sup>12</sup> M. Tsuchiya, T. Kitahashi, R. Nakajima, K. Oguri, K. Kawamura, A. Nakamura, K. Nakano, Y. Maeda, M. Murayama, S. Chiba, Distribution of microplastics in bathyal-to hadal-depth sediments and transport process along the deep-sea canyon and the Kuroshio Extension in the Northwest Pacific. *Marine Pollution Bulletin* 199, 115466 (2024).

<sup>13</sup> S. Zhao, T. J. Mincer, L. Lebreton, M. Egger, Pelagic microplastics in the North Pacific Subtropical Gyre: A prevalent anthropogenic component of the particulate organic carbon pool. *PNAS nexus* 2, pgad070(2023).

<sup>14</sup> A. Stubbins, K. L. Law, S. E. Muñoz, T. S. Bianchi, L. Zhu, Plastics in the Earth system. *Science* 373, 51–55 (2021).

<sup>15</sup> M. S. Savoca, M. E. Wohlfeil, S. E. Ebeler, G. A. Nevitt, Marine plastic debris emits a keystone infochemical for olfactory foraging seabirds. *Science advances* 2, e1600395 (2016).

<sup>16</sup> A. Markic, J.-C. Gaertner, N. Gaertner-Mazouni, A. A. Koelmans,

Plastic ingestion by marine fish in the wild. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 50, 657–697 (2020).

<sup>17</sup> S. Kühn, J. A. Van Franeker, Quantitative overview of marine debris ingested by marine megafauna. *Marine pollution bulletin* 151, 110858 (2020).

<sup>18</sup> A. Isobe, S. Iwasaki, K. Uchida, T. Tokai, Abundance of non-conservative microplastics in the upper ocean from 1957 to 2066. *Nature communications* 10, 417 (2019).

<sup>19</sup> R. Nakajima, M. Kawato, Y. Fujiwara, S. Tsuchida, H. Ritchie, K. Fujikura, Occurrence and levels of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in deep-sea sharks from Suruga Bay, Japan. *Marine Pollution Bulletin* 176, 113427 (2022).

<sup>20</sup> R. Nakajima, T. Ikuta, K. Oguri, H. Ritchie, Occurrence of polybrominated diphenyl ethers and benzotriazole UV stabilizers in the hadal amphipod *Hirondellea gigas*. *iScience* 26, (2023)

<sup>21</sup> T. Omura, N. Isobe, T. Miura, S. i. Ishii, M. Mori, Y. Ishitani, S. Kimura, K. Hidaka, K. Komiyama, M. Suzuki, Microbial decomposition of biodegradable plastics on the deep-sea floor. *Nature Communications* 15, 568 (2024)



Fig. 1.  
ニューストンネットで採取されたマイクロプラスチック。大きさが5mm以下のプラスチック片をマイクロプラスチックと呼ぶ。現在、世界の海表面には170兆個を超えるマイクロプラスチックが漂う。

©JAMSTEC



Fig. 2.  
日本の東北沖の海底に堆積するプラスチックごみ（水深660m）。軽いプラスチックも、藻類などの生物が付着

したりして、重くなって沈む。

©JAMSTEC

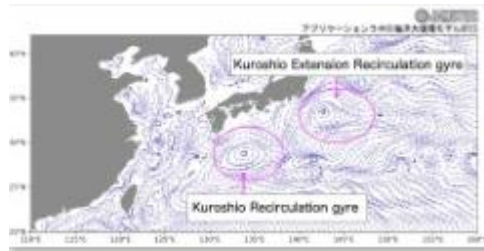


Fig. 3.

日本近海で海洋ごみが集積すると予測された黒潮再循環域 (Kuroshio Recirculation gyre) と黒潮続流再循環域 (Kuroshio Extension Recirculation gyre)。

©JAMSTEC



Fig. 4.

房総半島沖の海底で見つかったポリ袋 (水深5814m)。深海底では袋などの包装ごみが最も多い。

©JAMSTEC



Fig. 5.

水深5813 mの海底で見つかった風船ごみ。風船ごみとしては世界最深記録である。

©JAMSTEC



Fig. 6.

房総半島沖の海底から採取された食品包装（水深5707m）。1984年に製造された印字が読める（回収時で35年前のごみ）。プラスチックは生物によって分解されず、完全に崩壊してなくなるまでに数百年から千年以上かかると考えられている。

©JAMSTEC



Fig. 7.

房総半島沖の水深9200mの海底から採取された甲殻類、カイコウオオソコエビ。その体内からはプラスチックに使われる有害な化学物質（紫外線吸収剤UV-328）が検出された。

©JAMSTEC