

シリーズ マイクロプラスチック (4)

# 拡大する海洋 (マイクロ) プラスチック問題とその解明

拡大する海洋 (マイクロ) プラスチック問題の中で、特に①国際的取り組み、②海洋で浮遊する PE・PP 系マイクロプラスチックの生成 (光酸化・細分化) と行方 (消失メカニズム: 微細化、海洋生物との関わり合い、海洋垂直混合)、③使用時に発生するマイクロプラスチック (タイヤ摩耗、衣類洗濯 (マイクロファイバー)、塗料劣化 (道路標示や船舶))、④海洋 (マイクロ) プラスチックのグローバルな物質収支 (海岸、海面、海底の存在量推定) に焦点を当て調査した。

2022 年 10 月



**株式会社 旭リサーチセンター**

シニアリサーチャー 府川 伊三郎

## まとめ

- ◆海洋に排出される廃プラスチック（以下、廃プラ）の量は年々増加している（現在、推定年間約 1,100 万トン）。放棄された漁具、海岸漂着ごみ、海洋生物と人間の健康への影響などが重要な海洋プラスチック問題である。また、海洋プラスチック問題がトリガーとなりプラスチック循環経済問題に拡大した。両問題に共通する容器包装用シングルユースプラスチックの規制が世界的に進んでいる。（P. 3～6）
- ◆海洋プラスチック問題に関する国際的取り組み（UNEP、G7・G20 など）を年表にまとめた。欧米日からの廃プラ輸出は中国の輸入禁止とバーゼル条約改定により年間最大約 700 万トンから約 350 万トンに半減し、海洋への廃プラ排出の削減につながっていると考えられる。2022 年 3 月の国連環境総会（UNEA5.5）で「プラスチック汚染を終わらせる：法的拘束力のある合意に向けて」の決議が採択され、2024 年までに合意案が決定される。（P. 7～10）
- ◆海洋に漂流するマイクロプラスチック（以下、MPs）とはこれまでニューストンネットにて採取された 350  $\mu\text{m}$  以上のものを意味してきたが、10～350  $\mu\text{m}$  の微粒子が個数的には大量に存在することが判明した。微粒子化が進んでいることは明らかで、従来法では海洋中の MPs 密度は低く見積もられていると指摘されている。（P. 11～15）
- ◆使用中に発生する MPs（タイヤ摩耗、衣類洗濯（マイクロファイバー）、塗料（道路標示や船舶）のうち、タイヤ摩耗は微粒子であり、また発生量（欧州で 50 万トン/年発生）が多いことから人間の健康への影響が調査されている。欧米は排水処理場で発生するマイクロファイバー含有汚泥を肥料として農地に散布するため、海洋へのマイクロファイバーの排出量が多い。（P. 15～22）
- ◆環境中の MPs が広範囲に調べられ、MPs 汚染が海洋・海岸、河川・湖沼、陸域、大気のすべてに広がっていることが明らかとなった。  
それらの情報から、MPs とマクロプラスチックのそれぞれについて、発生源と輸送ルートマップにまとめた。この際、大雨や台風・洪水などによりプラスチックが陸域や河川から海への急激な流出することを考慮する必要がある。片岡・日向らは

海洋のマクロプラスチックと MPs が海岸に漂着した後、再度海に戻ることを実験的に証明し、海岸での平均滞留時間を明らかにするとともに、数学的にモデル化した。

(P. 23～28)

◆PE・PP・PS は大気暴露下での光酸化により、分子量低下とカルボニルインデックスの増加が観察される。PE フィルムの場合、1年以上大気暴露すると分子量が2万を切り、力学強度を失い細分化する。カルボニルインデックスは海洋浮遊の MPs の解析に利用できる。

(P. 29～31)

◆プラスチックの比重（密度）と海洋での浮沈の関係について9項目検討し、浮遊するPE・PPの MPs が沈降する条件を挙げた。

(P. 31～35)

◆浮遊 MPs の消失ルートとして、350  $\mu\text{m}$  以下への微粒子化、海洋の垂直混合、バイオフィアウリングなど海洋生物との関わり合いによる沈降、PE の微生物による生分解などが提案されている。微粒子化がまず起こり、次いでその他ルートが並行して進むものと考えられる。どのルートが支配的かはまだわかっていない。そして、消失した MPs は最終的に海底に沈むであろう。このため、(深海) 海底のプラスチック調査が活発になっている。

(P. 36～41)

◆海洋プラスチックの海洋（表面・海柱・海底、沿岸・近海・遠洋）と海岸での挙動の知見をまとめ、マップを作成した。これには、海洋への排出源、浮遊 MPs の消失、浮遊プラスチックの海岸への漂着と海への再移動、海岸と海洋での MPs 化、重いプラスチックの沈降などが含まれる。

(P. 41～42)

◆2022年に九州大学の磯辺篤彦教授が MPs の消失を盛り込んだ世界初の海洋プラスチックの物質収支・シミュレーションを発表した。不適切に処理された廃プラのうち、海洋プラスチックの比率は約5%と予想より少ない結果であった。ただし、2016年に発表された eunomia のシミュレーションに比べ、海洋や海岸に存在する海洋プラスチックの量は増加している。

(P. 42～45)

◆安全上の課題として、プラスチック中の各種添加剤の海洋への拡散、ナノプラスチックの生物細胞壁透過、海洋プラスチックを核とする有害な生物集団形成などが挙げられている。

(P. 45)

# 目次

はじめに .....	1
用語・略語 .....	1
1. 海洋(マイクロ) プラスチックごみの量的拡大と問題点 .....	3
1.1 海洋 (マイクロ) プラスチックごみの量的拡大 .....	3
1.2 海洋プラスチックごみとマイクロプラスチックの問題点 .....	4
1.3 海洋プラスチック問題からプラスチック循環問題に拡大 .....	5
2. 海洋プラスチック問題に対する国際的状況 .....	7
2.1 国際的取り組みの歴史 .....	7
2.2 欧米日からの廃プラの輸出量半減 .....	8
2.3 UNEP の歴史的決議：「プラスチック汚染を終わらせる」 .....	9
3. マイクロプラスチックの多様化と拡大 .....	11
3.1 マイクロプラスチックのサイズと浮遊マイクロプラスチックの微細化 .....	11
3.2 材料、材質の多様化・拡大 .....	15
3.3 使用時に発生するマイクロプラスチック (種類とその発生量) .....	17
3.4 タイヤ摩耗とその安全性 .....	19
3.5 マイクロファイバー (MF) : なぜ欧米で多く、日本では少ないのか .....	20
3.6 マイクロ&マクロプラスチックの発生源と輸送ルート .....	23
4. 進む海洋 (マイクロ) プラスチック問題の解明 .....	29
4.1 光酸化・細分化によるマイクロプラスチックの生成 .....	29
4.2 プラスチックの比重(密度)と海洋中での浮沈 : PE はいつでも海に浮かぶか? ...	31
4.3 浮遊マイクロプラスチックの消失とプラスチックの海底への沈積 .....	36
4.4 マクロ&マイクロプラスチックの海洋での挙動 .....	41
4.5 世界の海洋プラスチック量のシミュレーション .....	42
4.6 生態系や人間の健康への影響に関する調査研究 .....	45
おわりに .....	46
参考文献 .....	47

## はじめに

本レポートは、2017～18年に発行したARCレポート3編（参考文献1）の続編である。それから4年以上が経過し、海洋（マイクロ）プラスチック問題は多方面に拡大し、早急な問題の解明と対策が求められている。

2022年3月2日にUNEP（国連環境計画）は、UNEA5.2（国連環境総会5.2）において「プラスチック汚染を終わらせる：国際的な拘束力のある合意に向けて」と題する決議を採択した。決議本文の冒頭に、プラスチック汚染として、マイクロプラスチックとプラスチックの海洋汚染が明記されている。

この歴史的な合意がなされた機会に、もう一度海洋プラスチック問題の状況をまとめることを考えた。ただ、ここ数年この分野についての研究論文が急増し<sup>1</sup>、また国際機関、各国、関係団体による調査や取り組みも多数発表されている。さらに、海洋プラスチック問題は広範囲の技術専門分野にまたがっていることから全体をレビューすることは至難の技で、ケミストの筆者の実力をはるかに超えている。そこで偏るのだが、個人的に関心があるテーマに絞って、かつ技術的に理解できる範囲でまとめてみた。

関心のあるテーマは、国際的状況、海洋で浮遊するPE・PP系マイクロプラスチックの生成と行方、使用時に発生するマイクロプラスチック（タイヤ摩耗、衣類洗濯（マイクロファイバー）、塗料劣化）、海洋（マイクロ）プラスチックの物質収支（海洋と海岸）である。

## 用語・略語

### (1) 全般(順不同)

- ・海洋プラスチックごみ（本レポートではマクロプラスチックを同義語で使用）：プラスチックの各種成形品（レジ袋、発泡シート、ボトル、容器など）のごみのこと。
- ・マイクロプラスチック（MPsと略す）：通常、直径5mm以下のプラスチック。ただし、断面積の径が5mm以下で長さが5mm以上のもの（ファイバーなど）も含む。

---

<sup>1</sup> Zhouら Marine Pollution Bulletin Volume 179, June 2022, 113712  
2004～2017年の海洋マイクロプラスチックに関する文献発表件数推移を調査。2015年約500件、2016年約700件、2017年は約1,100件と急増している。2015～2017年の3年間で全体の発表件数の約70%を占める。

- ・浮遊マイクロプラスチック：比重が軽く海洋中で浮く PE・PP・EPS（発泡 PS）などのマイクロプラスチック。
- ・一次的マイクロプラスチック：直径 5 mm以下のプラスチックのペレットやビーズ。
- ・二次的マイクロプラスチック：マクロプラスチックが紫外線と酸素により光酸化分解し、強度を失い崩壊・細片化してできたマイクロプラスチック粒子。
- ・ナノプラスチック：マイクロプラスチックのうちのナノオーダーのもの。
- ・マイクロビーズ (MB)：スクラブ剤用などの 1mm 以下の粒子（球状 PE など）。
- ・シングルユースプラスチック（使い捨てプラスチック）：容器包装用途のものが多い。
- ・光酸化 (photo-oxidation) と崩壊・細分化 (degradation・fragmentation)  
PE・PP・PS などは、酸素の存在下、紫外線による光酸化反応により、高分子鎖切断され（分子量が低下し）、末端にカルボニル基などの官能基が生成する。臨界分子量（約 2 万）を下回ると力学強度を失い、力が加わると崩壊・細分化する。
- ・ALDFG (Abandoned, Lost or otherwise Discarded Fishing Gear)：放棄されたもしくは投棄された漁具。UNEP がこの用語を使用。
- ・ゴーストフィッシング：ALDFG により魚類や甲殻類を永遠にトラップしてしまうこと。トラップされた魚類、甲殻類は死んでしまうので、水産資源にダメージを与える。
- ・POPs (Persistent Organic Pollutants)：残留性有機汚染物質、例は PCB（ポリ塩化ビフェニル）、PBDE（ポリ臭化ジフェニルエーテル：樹脂用難燃剤）など。

## (2) ポリマー略語:表2参照

## (3) 欧米の政府機関、業界協会など

- ・UNEP (United Nations Environment Programme)：国連環境計画。
- ・UNEA (United Nations Environment Assembly)：国連環境総会。UNEP の決定機関。
- ・GESAMP (Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection)：海洋環境保護の科学的事項に関する専門家合同グループ。

# 1. 海洋(マイクロ)プラスチックごみの量的拡大と問題点

## 1.1 海洋(マイクロ)プラスチックごみの量的拡大

Jambeck ら (2015)<sup>2</sup> は、世界で不適切な処理により海洋に放出された廃プラ (マクロプラスチック) は 2010 年に約 800 万トンになると推定した (表 1)。その後プラスチックの生産量は年々増加しているため、海洋への廃プラ排出量も増加していることは間違いない (UNEP は現在、約 1,100 万トンとしている (P.10 参照)。恐ろしいのは、プラスチックは分解しにくいので、年々蓄積することである。

表 1 海洋プラスチック廃棄物排出量の推定

2010年 世界合計 480～1270万トン (800万トン)

順位	国名	排出量 (万トン)	沿岸人口(百万)
1	中国	132～353	263
2	インドネシア	48～129	187
3	フィリピン	28～75	83
4	ベトナム	28～73	
5	スリランカ	24～64	
20	米国	4～11	113
30	日本	2～6	

中国は世界全体の 28%を排出

出所: Jambeck et.,al, Science (2015)

また後に、Jambeck 自身が「見直してみると、米国の排出量は 51～145 万トンで世界第 3 位から第 12 位に当たる」ことを発表し、米国が主要排出国であることを指摘した (Law, Jambeck ら (2020))<sup>3</sup>。

表 1 に示すように、排出量の多くが中国と東南アジアであり、これらの国々の排出量を減らすことが緊急の課題である。東南アジアの国々では容器包装が従来の天然素材からプラスチックに急激に変わり、廃プラ処理設備が追い付かない状況にある。このため、一部の容器包装プラスチックの使用を規制している。また、インド政府は、当面容器包装のプラスチック化をストップするかスローダウンする方針を発表している。

インドネシアなどでは、既に国連の指導や先進国の援助により廃棄物の適正処理に向けた対策が講じられている。日本も経済産業省がインドネシアへの支援を進めている。

<sup>2</sup> Science, 347(6223), 768-771 <https://doi.org/10.1126/science.1260352>

<sup>3</sup> The United States' contribution of plastic waste to land and ocean. Sci Adv 30 Oct 2020 Vol 6, Issue 44. doi: eabd0288 <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.abd0288>

## 1.2 海洋プラスチックごみとマイクロプラスチックの問題点

次の3つの問題点が以前から指摘され、現在も問題は継続している。

### (1) 放棄された漁具(ALDFG; Abandoned, Lost or otherwise Discarded Fishing Gear)

水産資源の減少（ゴーストフィッシング、魚の漁網への絡まりなど）。海水より軽い漁具や（浮きのついた）重い漁具が海岸に漂着。重い漁具は海底に沈降して蓄積。日本は近海海底からの漁具の回収費用に10年で100億円をかけてきた。

### (2) 沿岸・海岸の漂着ごみ:外観、観光資源を汚す

清掃費用（日本 年間30億円）。ボランティア活動が貢献。

なお、漂着ごみの除去は海岸でのマクロプラスチックのマイクロプラスチック化を防止するので、二重に有効である。

注：UNEPは(1)と(2)を合わせて、2014年に130億ドルの経済的損失があるとしている。

### (3) 海洋生態系と人間の健康への影響

魚や海鳥のマイクロプラスチックの誤食、マイクロプラスチックの POPs 吸着、食物連鎖による人間（ヒト）の健康への懸念などである。

健康への影響についての各国や国際研究機関の見解を環境省が下記のようにまとめている。現状、影響ありとする明確なエビデンスは出ていないが、海洋中のマイクロプラスチック密度の増加など汚染の進行により状況が変わるかもしれない。

環境省資料(Plastics Smart):マイクロプラスチックの健康影響に関する各国・国際機関の見解

「マイクロプラスチックの健康影響については、現時点では評価するための十分な知見は得られていない。」

○米国(食品医薬品局):健康影響については知見が得られていない。

○英国(保健省):現状では暴露、有害性はほとんど定量化されていないためリスクを評価できない。

○欧州食品安全機関:環境中のマイクロプラスチックの暴露によるヒト健康については信頼可能なリスク評価を実施するにはデータが不十分。

○FAO(国際連合食糧農業機関):現状で得られている知見からは食の安全を脅かすとはいえないが、十分な知識は得られていない。

○GESAMP(海洋環境保全の科学的側面に関する合同専門家グループ):現在観察されている密度では、ヒトへの健康リスクが顕著に高まっていることを示唆する証拠はほとんどない。



### 1.3 海洋プラスチック問題からプラスチック循環問題に拡大

海洋プラスチック問題が世界の注目を浴び、それがトリガーとなりプラスチックの循環経済（リサイクル）問題に拡大した（一時はシフトしたのではとの印象があった）<sup>4</sup>。



リサイクル（あるいは 3R）はこれまでずっと取り組まれてきたが、なかなか実績が上がらない、いわば永遠の課題であった。海洋プラスチック問題が脚光を浴び世界的に危機感が高まったことを「てこ」に、リサイクルを強力に推進しているようにみえた。「青い海と美しい海岸を守ろう」などの海洋プラスチックのスローガンはわかりやすく多くの人の共感を呼んだ。

この二つの問題はいずれも解決すべき重要な環境問題であるが、よく考えてみると、海洋プラスチックごみは不適切処理されたプラスチックの問題であり、対象はプラスチック消費の 5%以下である。一方、プラスチック循環経済はプラスチック消費の 95%以上が対象の問題である。したがって、両者は本質的に異なり、対策も異なるはずである。半面、この二つの問題を密接に関係付けたのは容器包装用シングルユースプラスチックであった<sup>5</sup>。プラスチック全体の約 6 割を占め、ポリオレフィン（PE・PP）、PET（ボトル）、（発泡）ポリスチレンが主要材料である。海洋漂着ごみの多くがこの容器包装材である。シングルユースプラスチックは短期間の 1 回使用だが、化石資源を消費

<sup>4</sup> 2018 年 1 月に EU が「プラスチック循環経済下のプラスチック戦略」を発表し、世界の化学工業にインパクトを与えた。

<sup>5</sup> ARC リポート: 府川伊三郎 シングルユースプラスチックとそれを取り巻く国際的動き 2019 年 8 月 [https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc\\_report/pdf/rs-1037.pdf](https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1037.pdf)

して、焼却処分すると温室効果ガスを発生する。また無料や安価なことからポイ捨てされやすい。

また、PE・PP・PSは、陸上や海岸で紫外線に当たり、力が加わると光酸化反応（Photo Oxidation）と崩壊・細分化（Degradation・Fragmentation）によりマイクロプラスチック（通常、定義は直径5mm以下の粒子）を生成する。これは二次的マイクロプラスチックと呼ばれ、海洋表面を漂流し、粒径が小さいので海洋生物（動物プランクトンから大きな魚まで）が誤食する。

以上のことから、国際的に容器包装用シングルユースプラスチックの使用削減策が実施されている。

表2に各種汎用プラスチックの①比重（密度）、②光酸化反応によるマイクロプラスチック化のしやすさ、③主用途、④日本の廃プラの発生量をまとめた。海水より比重の小さい軽いプラスチックは、PE・PP・発泡PSである。一方、海水より比重が大きい重いプラスチックは、PS・PVC・PETである。また、合成繊維（ポリエステル、ポリアミドなど）はすべて海水より比重が大きい。

表2 汎用プラスチックの特性、用途、廃プラ発生量（日本）

プラスチック名	比重 (g/cc)	マイクロプラスチック化のしやすさ	主用途	廃プラの発生量 (2020年)
(線状) 低密度ポリエチレン (LDPE、LLDPE)	0.91~0.93	なりやすい	容器包装材料 (フィルム、シート)、農業フィルム 絶縁用電線被覆	290万トン
高密度ポリエチレン (HDPE)	0.94~0.965	なりやすい	容器とボトル・包装材料 (F&S) パイプ、クレート、雑貨	
ポリプロピレン (PP)	0.90~0.92	なりやすい	容器とボトル・包装材料 (F&S) 自動車バンパー、自動車部品、電気製品、雑貨	190万トン
発泡ポリスチレン (発泡PS: EPS)	0.01~1.05	なりやすい	カップ麺容器、トレイ、シート 魚箱、緩衝材、断熱材	96万トン (ABS、ASを含む)
ポリスチレン (PS)	1.04~1.09 (浮くかどうかの境界)	なりやすい	食品用などのトレイ・シート、容器 電気製品	
ポリ塩化ビニル (PVC)	1.16~1.30	なりにくい	建設・住宅 (パイプ、雨どい、壁紙、タイル)、 電線被覆	66万トン
ポリエステル樹脂 (PET)	1.34~1.39	なりにくい	飲料水用PETボトル、シート・トレイ、容器、 各種ボトル	その他樹脂 150万トン
ポリエステル繊維	1.34~1.39	なりにくい	衣料、漁網	
ポリアミド (PA) 繊維	1.13	なりにくい	漁網、衣料、産業資材	プラスチック 循環利用協会
備考	海水比重は 1.03	光酸化反応と 崩壊・細片化	色地はシングルユース	

出所：旭リサーチセンター作成。

## 2. 海洋プラスチック問題に対する国際的状況

### 2.1 国際的取り組みの歴史

海洋プラスチック問題は一国では解決できない国際問題であり、長年国連の UNEP がリーダーシップをとって海洋環境の保全に取り組んできた（表 3）。UNEP の決定機関である UNEA は 2014 年の UNEA1 以来海洋プラスチック問題を重要課題として取り上げ、法的拘束力のある規制をつくることを目指した。しかし、米国の反対がありなかなか実現しなかったが、ようやく 2021 年の G7 サミットで米国が同意したことから、2022 年 3 月の UNEA5.2 で、「プラスチック汚染を終わらせる：国際的な拘束力のある合意に向けて」と題された歴史的決議が採択され、早ければ 2024 年までに合意案が決定される。

これまでの UNEP・UNEA、G7・G20、EU・米国・中国の動き、バーゼル条約改定などを表 3 にまとめた。この中で、日本のトピックスは、2019 年 6 月の G20・大阪サミットにおける「大阪ブルーオーシャンビジョン」がある。2050 年までに海に流失するプラスチックごみをゼロにすることを目標にしている。

表 3 海洋プラスチック問題に関する国際的動き

年	月	項目	内容
1997		チャールズ・モア（海洋環境調査研究者）	北太平洋の巨大ごみベルトに遭遇。後に単行本「プラスチックの海」発行。
2014	6	UNEA 1（第1回国連環境総会）	「海洋プラスチック廃棄物およびMPs」に関する決議が採択。
2015	6	G7・エルマウ・サミット・首脳宣言	宣言付属書「海洋ごみ問題に対するためのG7行動計画」。
	9	国連持続可能な開発サミット：SDGs	「持続可能な開発のための2030アジェンダ」が採択。17のSDGs目標。
	12	米国 マイクロビーズ禁止	オバマ大統領が禁止の法律に署名。
2017	7	G20・ハンブルク	「海洋ごみに対するG20行動計画」合意。
	12	中国廃プラ輸入禁止実施	これにより欧州、米国、日本から中国への輸出は実質なくなる。
2018	1	EU・プラスチック戦略発表	循環経済（リサイクル）への移行加速、容器包装材料の削減など。
	6	G7・シャルルボアサミット	「海洋プラスチック憲章」が提案されるが、米国と日本は署名せず。
2019	5	バーゼル条約締約国会議で条約改定	汚染された廃プラスチックの国境を越えた移動と処分を規制する改定（実施は2021年）。
	6	G20・大阪サミット 「大阪ブルーオーシャンビジョン」	2050年までに海に流失するプラスチックごみをゼロにする。
2021	6	G7・イギリスサミット	米国を含むG7各国が、22年初めに国連が交渉を開始するプラスチック汚染に関する協定に賛成することを表明。
	7	G20 環境省会議 廃プラ埋め立て地からの流出防止と漁具の放棄防止に取り組み、シングルユースプラ削減に努力	
2022	3	UNEA 5.2・ナイロビ	「プラスチック汚染を終わらせる：国際的な拘束力のある合意に向けて」と題する歴史的決議が採択される。

出所：各種資料より旭リサーチセンター作成。

## 2.2 欧米日からの廃プラの輸出量半減

2015 年頃、欧米日からリサイクル目的で、最高年間 700 万トン近い廃プラが中国を中心に東南アジアに輸出されてきた。リサイクルプロセスで発生する廃プラの洗浄水が水質汚染になることなどが問題になり、中国は 2017 年 7 月に廃プラの輸入禁止を発表し、同年 12 月 31 日より輸入を禁止した。また 2021 年にバーゼル条約改定の施行により汚染廃プラの輸出は実質禁止となった。このため、2017 年以降、欧米日の廃プラ輸出は大幅に減少して、半分の約 350 万トンになった（図 1）。

筆者はこの約 350 万トンの廃プラ輸出の減少は、世界の海洋プラスチックごみ削減につながったと考えている。というのは、輸出廃プラから選別により再生材になる比率は約 20%といわれ、残りは廃棄される。廃棄物の中には一部不適切に処理され、海洋に流れ込んでいたものが少なくないと推定される。

なお、リサイクルのために輸出される廃プラとしては PET ボトルのように単一で、汚れも少なくリサイクルしやすいものから、食品が付着した容器包装（汚染された混合廃プラ）までである。米国の家庭から出されたプラスチックビンが輸出されていたが、これは後者である。

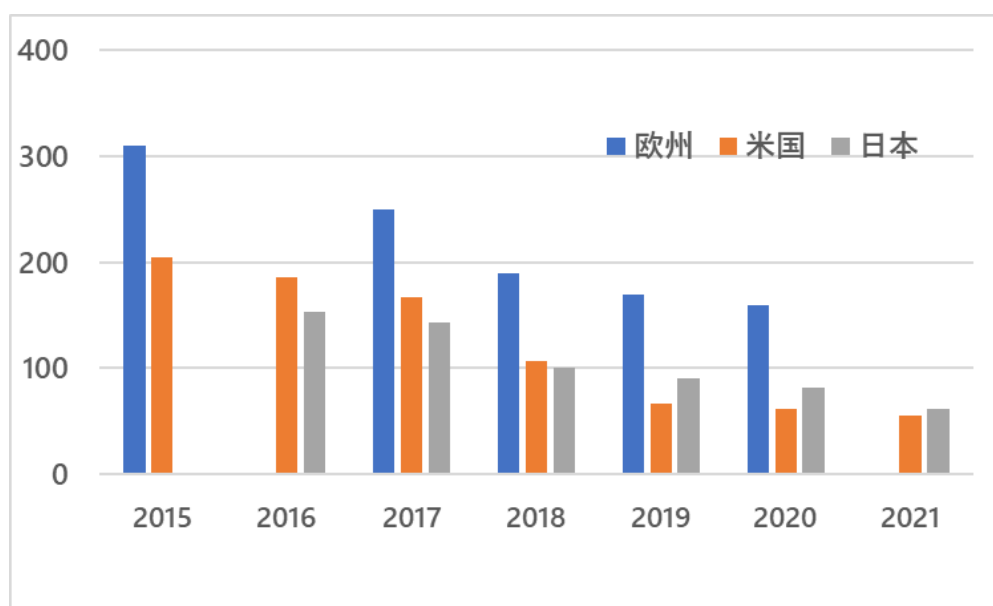


図 1 欧州、米国、日本の廃プラ輸出の年次推移(単位:万トン)

出所：欧州、米国、日本の発表資料より旭リサーチセンターが作成。

## 2.3 UNEP の歴史的決議:「プラスチック汚染を終わらせる」

「End plastic pollution: towards an international legally binding instrument (プラスチック汚染を終わらせる: 国際的な拘束力のある協定書(合意)に向けて)」と題された歴史的決議が国連 UNEA5.2<sup>6</sup> で採択された。

決議本文<sup>7</sup>の冒頭に、プラスチック汚染として、マイクロプラスチックとプラスチックの海洋汚染が明記されている。なお、今回の決議はプラスチックの海洋汚染だけでなく、プラスチック循環経済(への移行)問題も含んでいるのが特徴である。具体的内容は 2024 年末までに決定する予定で、どんな国際的な拘束力のある協定書(instrument)(合意(agreement))案になるか注目される。

以下、UNEP のプレスリリースを転載する。

「UNEP プレスリリース<sup>8</sup>、ナイロビ、2022 年 3 月 2 日—国家首脳、環境大臣、その他の国連加盟国の代表者は、本日ナイロビで開催された第 5 回国連環境総会(UNEA5.2)で、プラスチック汚染を終わらせ、2024 年までに国際的な法的拘束力のある合意を形成するという歴史的決議を承認した。決議は、プラスチックの製造、設計、廃棄を含む、プラスチックのライフサイクル全体を扱うものである。この決議は、日本を含む 3 か国の初期決議案に基づいてつくられたもので、政府間交渉委員会(INC: Intergovernmental Negotiating Committee)を設立し、2022 年にその作業を開始し、意欲的に 2024 年末までに世界的な法的拘束力のある合意案を完成させることを目指している。①プラスチックのライフサイクル全体の多様な代替策、②リユースとリサイクルが可能な製品・材料の設計、③技術へのアクセス、能力構築(capacity building)、科学のおよび技術的協力を促進するための国際協力強化のニーズなどを反映する法的拘束力のある協定書(合意)を提示することになる。(中略)

<sup>6</sup> UNEA は UNEP の決定機関。

<sup>7</sup> <https://wedocs.unep.org/xmlui/bitstream/handle/20.500.11822/39764/END%20PLASTIC%20POLLUTION%20-%20TOWARDS%20AN%20INTERNATIONAL%20LEGALLY%20BINDING%20INSTRUMENT%20-%20English.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

<sup>8</sup> <https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/historic-day-campaign-beat-plastic-pollution-nations-commit-develop>

プラスチックの生産量は1950年の200万トンから2017年には3億4,800万トンに急増し、5,226億米ドルの世界産業となり、2040年までに生産能力が2倍になると見込まれる。プラスチックの生産と汚染が、地球に与える3つの影響（気候変動、自然の喪失と汚染）は、次のように危機的である。

- ・プラスチックへの暴露は人間の健康に害をおよぼす可能性があり、プラスチックの野焼きは大気汚染の一因となる。
- ・2050年までに、プラスチックの生産、使用、廃棄に関連する温室効果ガス排出量は、地球温暖化を1.5℃に制限するという目標の下での許容排出量の15%を占めるようになるであろう。
- ・海洋および沿岸の800以上の生物種が、摂取（ingestion）、絡み合い（entanglement）、およびその他の危険によるこの汚染の影響を受けている。
- ・年間約1,100万トンのプラスチック廃棄物が海洋に流入している。これは2040年までに3倍になる可能性がある。
- ・サーキュラーエコノミー（循環経済）への移行により、2040年までに海洋に流入するプラスチックの量を80%以上削減できる：バージンプラスチックの生産を55%削減する。2040年までに政府支出を700億米ドル節約する：温室効果ガス排出量を25%削減する。そして、主に南半球で70万人の追加雇用を創出する。」

上記 UNEP のプレスリリースでは、プラスチック循環経済の方が前面に出て、海洋プラスチック問題解決の具体策（放棄漁具など）にあまり触れていないのが気になる。海洋プラスチック問題が後回しにならないようにしてほしいものである。



### 3. マイクロプラスチックの多様化と拡大

当初は海岸に漂着するプラスチックごみや海洋表面を漂流するマイクロプラスチックに焦点が当てられたが、図2のように問題は多方面に拡大している。

これらの項目について、本章（マイクロプラスチックの多様化と拡大）と次の第4章で説明する。

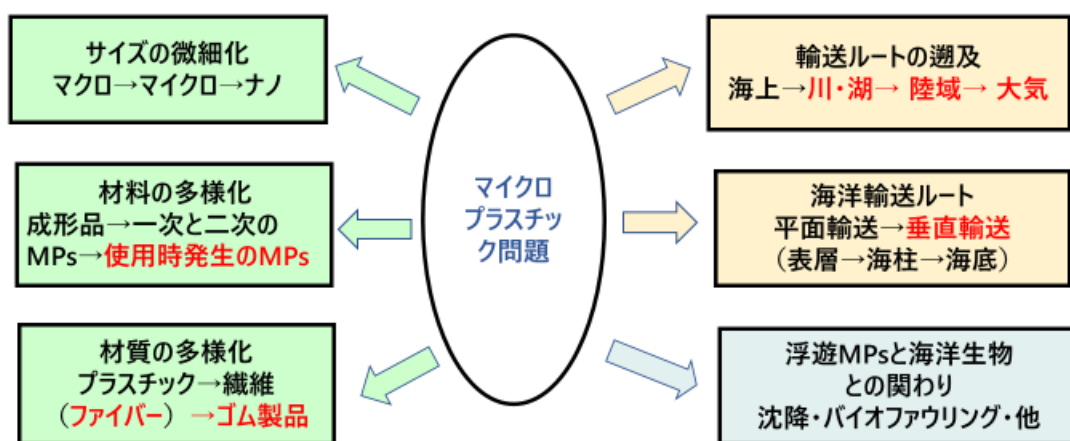


図2 多様化・拡大するマイクロプラスチック問題

出所：各種資料より旭リサーチセンター作成。

#### 3.1 マイクロプラスチックのサイズと浮遊マイクロプラスチックの微細化

##### (1) マイクロプラスチックのサイズ

サイズがより微細なものに調査・研究が拡大している。すなわち、マクロ→マイクロ（5 mm～350  $\mu$  m）→**マイクロ（350  $\mu$  m～1  $\mu$  m）**→ナノ（1  $\mu$  m以下）である。次の項で説明するように、マイクロプラスチックのうち 350  $\mu$  m 以下の微粒子が海洋中で存在することが証明された。また、ナノサイズのは、海洋生物の細胞壁を通過することから安全性が懸念されている（P. 45「4.6 生態系や人間の健康への影響に関する調査研究」を参照）。

##### (2) 浮遊マイクロプラスチック（PE・PP・発泡 PS）の粒径

###### ① 従来の測定技術（網目 350 $\mu$ m のニューストンネットを使う方法）

従来法のニューストーンネットによるマイクロプラスチックの採取法（図 3）と日本沿岸の海流（図 4）、日本沿岸のマイクロプラスチック密度（濃度）分布（図 5）を示す。図 5 は、環境省が定期的に毎年測定しているデータである。

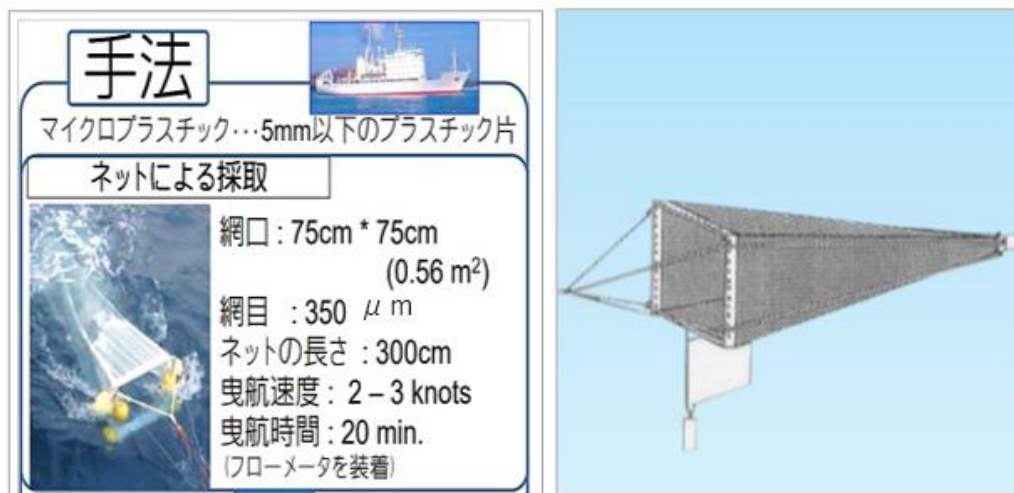


図 3 ニューストーンネットによるマイクロプラスチックの採取法

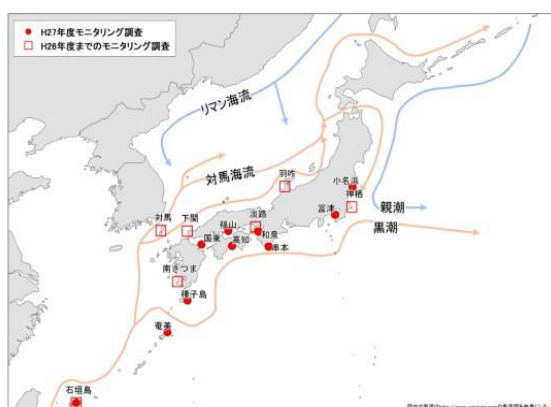


図 4 日本列島を取り巻く海流

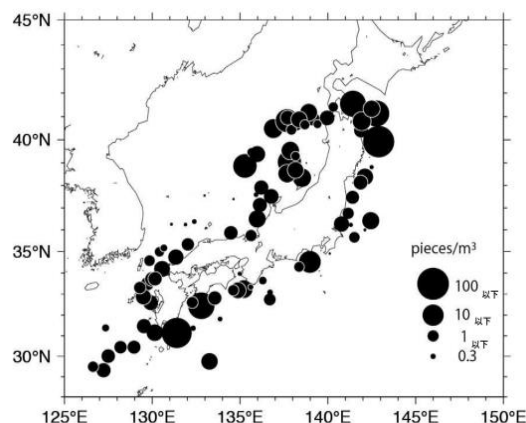


図 5 マイクロプラスチックの密度分布(2014~2015年)

図 3~5 の出所：ARC リポート rs-1020（参考文献 1②）、元資料は環境省。

図 6 は、図 5 の元データから筆者が作成したマイクロプラスチック密度別の測定地点数である。1m<sup>3</sup> 当たり 100 個以上の高密度な地点が 6 か所あるが、全体としてはかなり密度が低いことがわかる。また、近い場所で大きな密度差がありマイクロプラスチックが偏在していることが特徴である。その原因は、海流や垂直混合など



物理的海洋学で明らかにされつつある<sup>9</sup>。なお、北太平洋でも同様なマイクロプラスチックの偏在が見られる（ARCレポート rs-1026（参考文献 1③）図 17）。

図 7 はマイクロプラスチックのサイズ分布である。大きい粒子が順次細分化していけば、粒径の小さい粒子の個数が急速に増加することは当然である。ただし、重量は粒径の 3 乗に比例すると仮定して計算してみると、大きい粒子（例：4.8～4.9mm）と小さい粒子（例：0.8～0.9 mm）の重量はあまり変わらない。

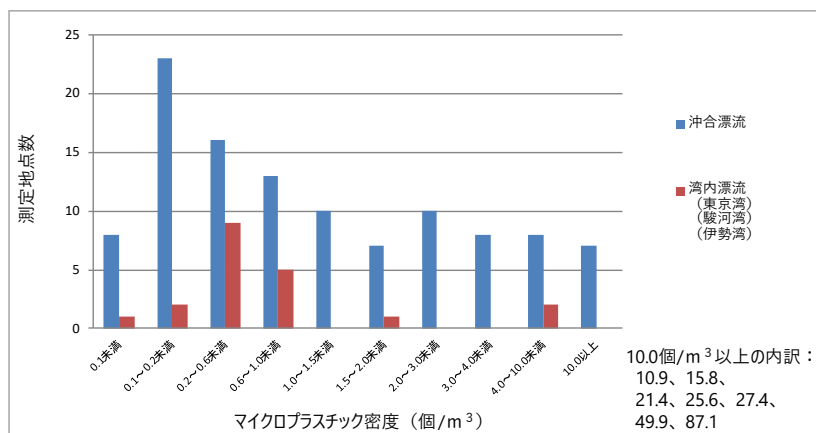


図 6 マイクロプラスチックの密度別の測定地点数別個数分布(2014～2015年)

出所：図 5 の元資料を基に旭リサーチセンター作成（ARCレポート rs-1020（参考文献 1②））。

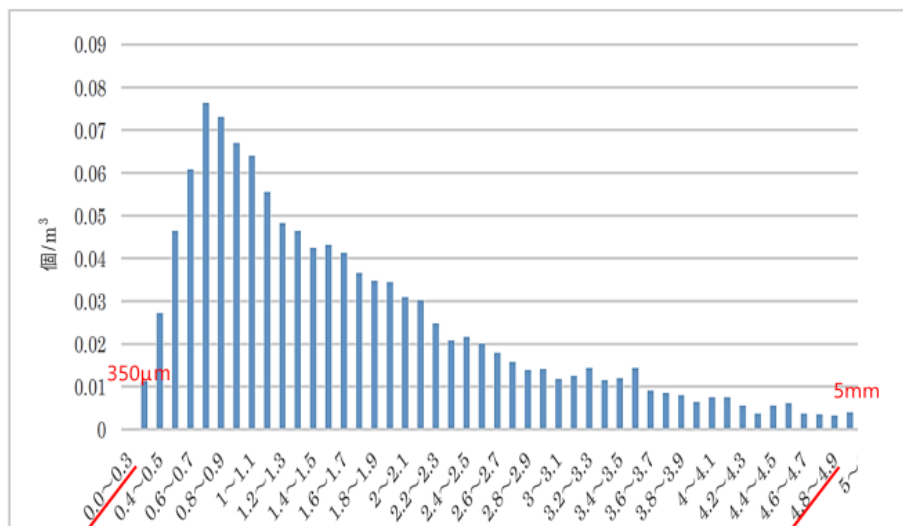


図 7 マイクロプラスチックのサイズ (mm)

出所：参考文献 1②、元資料環境省。

<sup>9</sup> 例えば、Kukulka ら（2012） The effect of wind mixing on the vertical distribution of buoyant plastic debris, Geophys. Res. Lett. 39 L07601  
<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2012GL051116>

## ②最新測定技術：微細ネット（網目 350 $\mu\text{m}$ 以下）使用

最近、ニューストーンネットより網目の細かいネットを使用することで、10～350  $\mu\text{m}$  の微細マイクロプラスチックの存在が明らかになったことは特筆すべきことである。

Enders ら (2015)<sup>10</sup> は、既に 2015 年に 10  $\mu\text{m}$  のネットを使い、図 8 のサイズ分布を発表している。

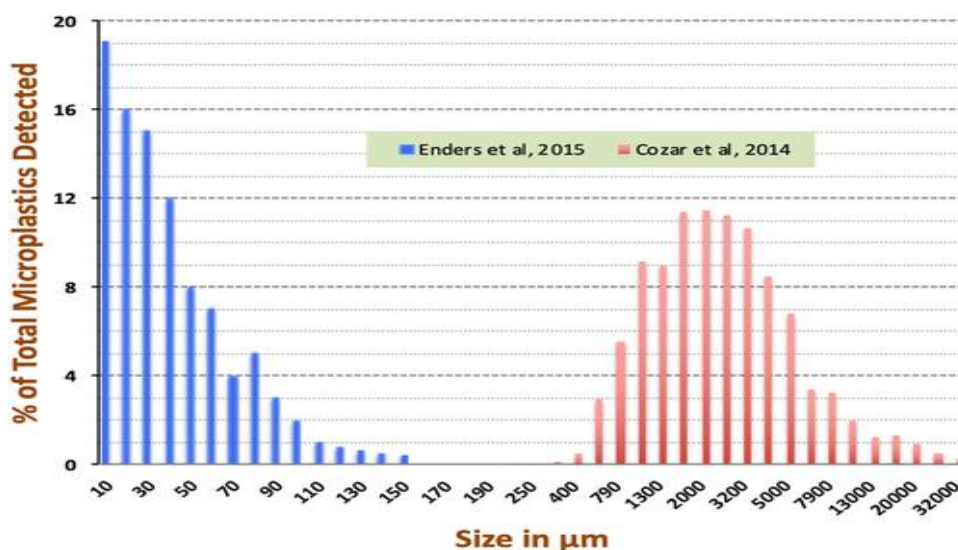


図 8 10  $\mu\text{m}$  ネットと 400  $\mu\text{m}$  ネットで測定したマイクロプラスチックの粒径分布

注：測定した 2 つのサンプルは異なる。

出所：参考文献 4。

Lindeque ら (2020)<sup>11</sup> は、100  $\mu\text{m}$ 、333  $\mu\text{m}$ 、500  $\mu\text{m}$  のネットを使い、トロール法で海洋表面のマイクロプラスチックを測定した。100  $\mu\text{m}$  ネットで採取したマイクロプラスチックの個数は、333  $\mu\text{m}$  ネットの 2～5 倍、500  $\mu\text{m}$  の 10 倍であった。Noren (2007)<sup>12</sup> は水柱 (図 18 参照) での測定で、80  $\mu\text{m}$  メッシュは 450  $\mu\text{m}$  メッシュの 1,000 倍のマイクロプラスチックを採取した。Kang ら (2015)<sup>13</sup> は、河口のサンプルで 330  $\mu\text{m}$  メッ

<sup>10</sup> Enders, K., Lenz, R., Stedmon, C. A., & Nielsen, T. (2015). Abundance, size and polymer composition of marine microplastics  $\geq 10 \mu\text{m}$  in the Atlantic Ocean and their modelled vertical distribution. *Marine Pollution Bulletin*, 100(1), 70-81. <http://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.09.027>

<sup>11</sup> Lindeque ら Are we underestimating microplastic abundance in the marine environment? A comparison of microplastic capture with nets of different mesh-size *Environmental Pollution* Volume 265, Part A, October 2020, 114721 <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114721>

<sup>12</sup> F. Norén Small Plastic Particles in Coastal Swedish Waters KIMO Sweden (2007)

<sup>13</sup> J.-H. Kang et al., *Mar. Pollut. Bull.*, 96 (2015), pp. 304-312

シユでは0.63~860個/m<sup>3</sup>であったものが、50μmのハンドメッシュでは21~15,560個/m<sup>3</sup>採取した。Coverntonら(2019)<sup>14</sup>は8μmメッシュを使い、63μmメッシュの5.8倍のマイクロプラスチックを採取した(マイクロプラスチックにはマイクロファイバーが多かった)。Barrowら(2017)<sup>15</sup>は、グラブ(grab)サンプリング法で従来法のニューストンネット法に比べ、3桁以上の数のマイクロプラスチックを捕捉できることを示した。

これら論文の著者(研究者)は、従来のニューストンネットでは、マイクロプラスチック密度を低く見積もっている(underestimate)と強調している。そして、動物プランクトンをはじめとする小さな海洋生物にとっては、350μm以下の微細マイクロプラスチックはより誤食しやすいと述べている。

### 3.2 材料、材質の多様化・拡大

歴史的に、図9のような順序で海洋プラスチック発生源が問題になった。

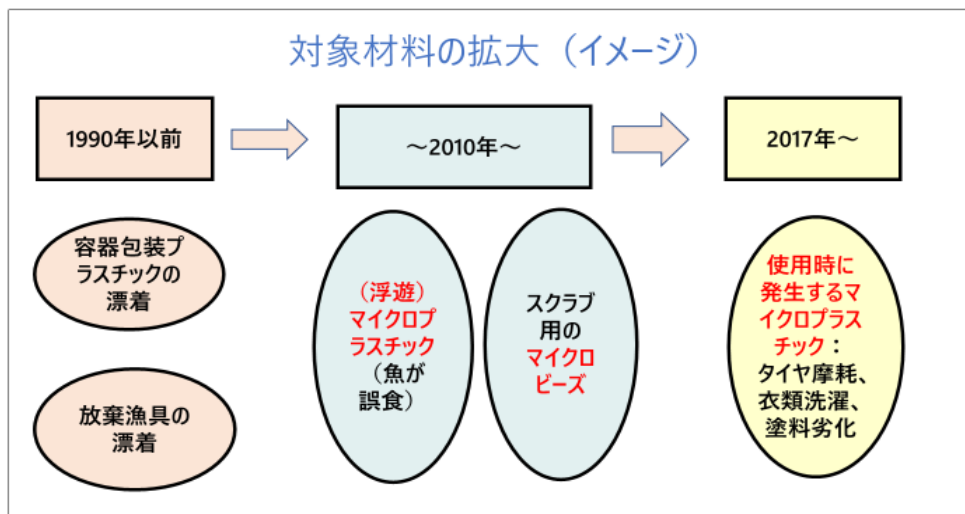


図9 プラスチック材料問題の拡大

出所: 各種資料より旭リサーチセンター作成。

<sup>14</sup> G.A. Covernton et al., Sci. Total Environ., 667 (2019), pp. 124-132

<sup>15</sup> A.P. Barrows et al., Grab vs. neuston tow net: a microplastic sampling performance comparison and possible advances in the field, Anal Methods, 9 (2017), pp. 1446-1453

以前から放棄漁具や容器包装プラスチックが海洋を漂流し、また海岸に漂着する問題はあったが、社会の関心度は低かった。ところが 2008 年頃に世界の研究者が 5 mm 以下のプラスチックを「マイクロプラスチック」と呼ぶようになった<sup>16</sup>ことから社会の関心が高まった。マイクロプラスチックとはいったい何なのか、その言葉が人の関心を引いたのである。

そして 2014 年頃に、化粧品用（スクラブ剤）に用いられていたマイクロビーズ（MB：図 10）が、使用后洗い流して下水に排出されることから緊急の問題として取り上げられた。

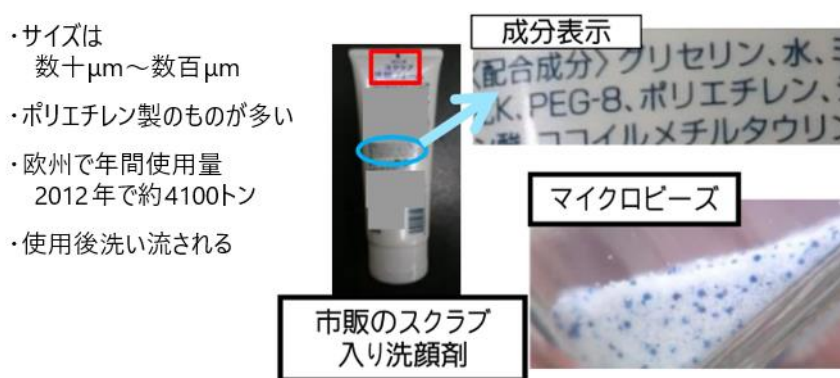


図 10 スクラブ用マイクロビーズ

出所：環境省資料（右の写真）に文章追加（左部分）。

米国（2015 年）やイギリス（2018 年）などはすぐ使用禁止に踏み切ったが、日本や欧州は自主規制した<sup>17</sup>。天然素材に代替可能なことから、大手化粧品メーカーはマイクロビーズの使用を取りやめ、天然素材に切り替えた。これによりマイクロビーズ問題はほぼ解決したが、欧州の団体が次いで「使用時に発生するマイクロプラスチック」の問題を取り上げた。タイヤ摩耗、衣類の洗濯で発生するマイクロファイバー、塗料の劣化粒子である。これにより、材質もプラスチックからゴム、繊維、熱硬化性樹脂（塗料）に拡大した。

<sup>16</sup> [https://ec.europa.eu/environment/marine/good-environmental-status/descriptor-10/pdf/GESAMP\\_microplastics%20full%20study.pdf](https://ec.europa.eu/environment/marine/good-environmental-status/descriptor-10/pdf/GESAMP_microplastics%20full%20study.pdf) 論文 P.14 参照

<sup>17</sup> EU（ECHA など）はマイクロプラスチックについて広範かつ詳細な調査を行い、近々規制を発表するといわれたが、まだ発表されていない模様である。 <https://echa.europa.eu/hot-topics/microplastics>  
<https://echa.europa.eu/documents/10162/05bd96e3-b969-0a7c-c6d0-441182893720> (2019 年 8 月)

### 3.3 使用時に発生するマイクロプラスチック(種類とその発生量)

コンサルタント会社の eunomia の二つのデータと OSPAR のデータを発表順に紹介する。

#### (1)eunomia 2016年6月発表<sup>18</sup>

世界の一次マイクロプラスチックは 95 万トンで、内訳はタイヤ摩耗 27 万トン、ペレット漏洩 23 万トン、衣類（繊維）洗濯 19 万トン、建築用塗料劣化 13 万トン、道路用塗料劣化 8 万トン、意図的に添加マイクロビーズ（化粧品など）3.5 万トン、船用塗料 1.6 万トンである。

#### (2)OSPAR Commission が 2017 年に発表したデータ

OSPAR は欧州 15 か国と EU が共同して北大西洋の海洋環境保護のために活動する組織で、1992 年に大会（OSPAR Convention）が開かれスタートした。OSPAR 海域に排出されるマイクロプラスチックの量を 2017 年に発表した（図 11）。

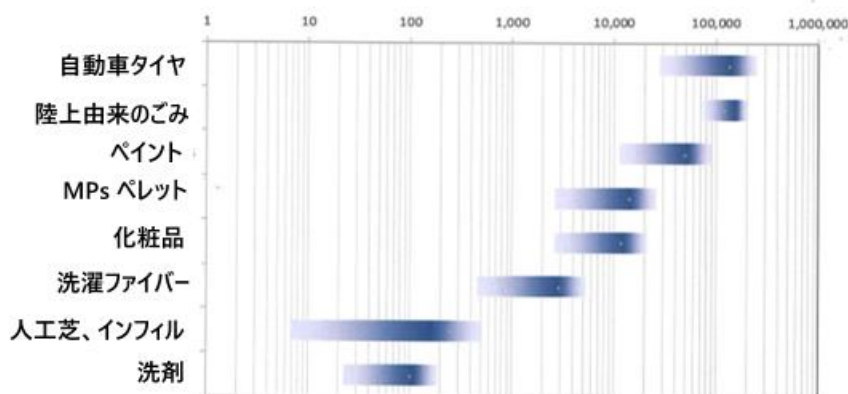


図 11 OSPAR 海域に排出されるマイクロプラスチック(単位トン)

注：青色地の中の白点が中央値

出所：OSPAR Assessment document of land-based inputs of microplastics  
in the marine environment <https://www.ospar.org/documents?v=38018>

<sup>18</sup> eunomia(2016) Plastics in the Marine Environment 1st June 2016  
<https://www.eunomia.co.uk/reports-tools/plastics-in-the-marine-environment/>  
[https://safety4sea.com/wp-content/uploads/2016/06/Eunomia-Plastics-in-the-Marine-Environment-2016\\_06.pdf](https://safety4sea.com/wp-content/uploads/2016/06/Eunomia-Plastics-in-the-Marine-Environment-2016_06.pdf)

(3) EU 委員会のために ICF&Eunomia が共同で作成したマイクロプラスチックに関する最終報告書(2018年2月)<sup>19</sup>

図 12 は使用時に排出されるマイクロプラスチックのデータである。自動車タイヤが 50 万トンと圧倒的に多い。このうちの約 27 万トンは地上に降下 (図 12 の Soil)、約 13 万トンは排水処理場で分離された汚泥の農地散布 (図 12 の Waste Management)、約 10 万トンは水路に入る (図 12 の Waterways) となっている。

発生量は大きい順に、自動車タイヤ、道路塗装、使用前プラスチック、衣類の洗濯、建築物塗料、人工芝、自動車ブレーキの摩耗、船舶用塗料になっている。

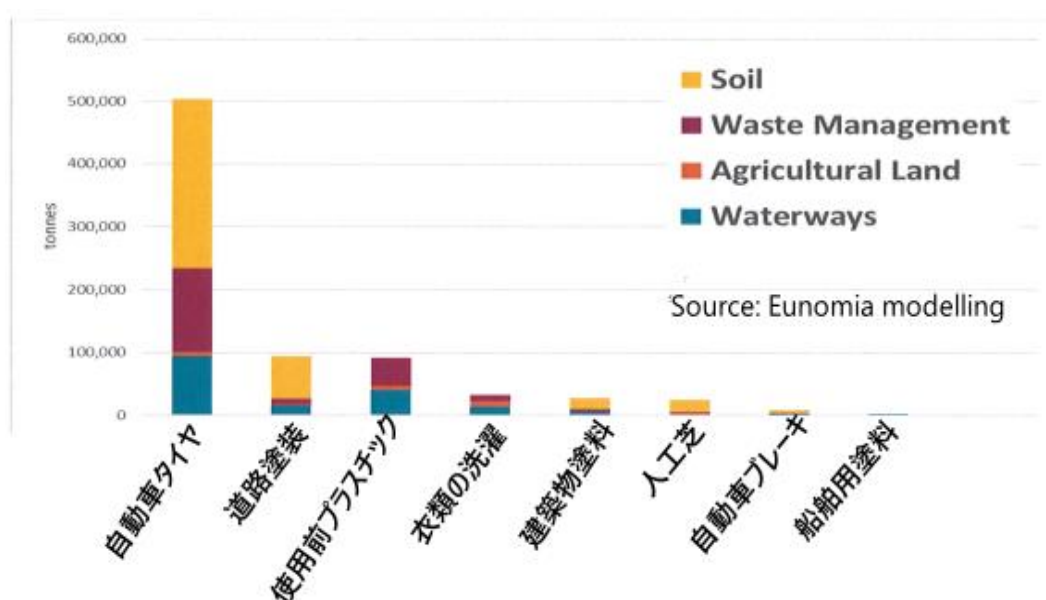


図 12 マイクロプラスチックの発生量とその行方 (EU)

出所：EU 委員会(2018)、脚注 19。

そして、Surface Waters (Waterways と同じ) に排出されるマイクロプラスチックは全体で 17.6 万トン/年 (7.2~28 万トン/年の中央値) である。内訳として、最も多いのは、タイヤの摩耗 (中央値 9.4 万トン/年) と製造時のペレットの漏洩 (同 4.1 万トン/年)、次いで道路マーキング (同 1.5 万トン/年)、衣類 (繊維) の洗濯 (同 1.3 万トン/年) である。これだけで 16 万トンになる。

<sup>19</sup> [https://ec.europa.eu/environment/marine/good-environmental-status/descriptor-10/pdf/microplastics\\_final\\_report\\_v5\\_full.pdf](https://ec.europa.eu/environment/marine/good-environmental-status/descriptor-10/pdf/microplastics_final_report_v5_full.pdf)

### 3.4 タイヤ摩耗とその安全性

#### (1) EU 委員会

EU 委員会は2021年5月20日に「Microplastic pollution from tyre-wear : a review of source, emissions and risk」を発表した<sup>20</sup>。その要旨によれば、「タイヤ摩耗がマイクロプラスチック汚染の主要部分を占めている。そのタイヤ摩耗の環境密度（濃度）とこの排ガス以外の自動車排出物の影響について焦点を当てて、今回文献レビューを行った。今回のレビューから、食物連鎖を介した摂取によるポテンシャルリスクに関するデータがないこと、また長期モニタリングまたは粒子の生態毒性学的影響（ecotoxicological effects）に関する情報がほとんどないことがわかった」。

この発表からするとまだ、十分な安全性試験が行われていない模様である。

この報告書でEU委員会は、欧州のTRWPの発生量を150万トンとしている<sup>21</sup>。TRWPは“tyre-and road-wear particles”の略で、タイヤ摩耗と道路（塗装）摩耗を含む実際に発生している混合粒子である。また、EU委員会は、実際のTRWPを用いた各種安全性テストの必要性を述べている（現状の研究は粉碎したタイヤ粒子を使ったテストが多い）。

また、TRWP対策として、①暴風雨（stormwater）および流出水（runoff）の処理システムの設置、②粒子状物質をキャッチすることを考慮した道路の設計と維持、③耐久性の低いタイヤ、特にタイヤ摩耗粒子の最大の発生源である heavy-duty（重量）車両（トラック、バス、その他重機車）用の耐久性の低いタイヤを市場から排除することを挙げている。

#### (2) The World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)

WBCSDのTire Industry Project (TIP)<sup>22</sup>のTRWPに関する報告書（2020年7月23日発行）<sup>23</sup>によれば、

①TRWPの人類や環境に対する顕著なリスクは認められない。淡水系環境での毒性は低

---

<sup>20</sup> [https://ec.europa.eu/environment/integration/research/newsalert/pdf/561na4\\_en-microplastic-pollution-from-tyre-wear-a-review-of-source-emissions-and-risk.pdf](https://ec.europa.eu/environment/integration/research/newsalert/pdf/561na4_en-microplastic-pollution-from-tyre-wear-a-review-of-source-emissions-and-risk.pdf)

<sup>21</sup> 150万トンは図11に比べ多い。EUも過大と感じているようだ。TRWPの半分は、道路の凹みに入って、大気には出ないといっている。

<sup>22</sup> WBCSDのTIPには、BS、Michelinなど大手タイヤメーカー10社が参画している。

<sup>23</sup> <https://www.wbcSD.org/Sector-Projects/Tire-Industry-Project/Resources/Tire-Road-Wear-Particles-Papers>



い。人間の吸入時の安全性をチェックするために行ったラットのモデル試験結果では低レベルの毒性であった。

②TRWP にはゴムだけでなく、道路（摩耗物）や周辺環境の物質が含まれている。

③TRWP は、最高レベルで PM10（ $10\mu\text{m}$  以下）を 3% 以下、PM2.5（ $2.5\mu\text{m}$  以下）を 1% 以下含む（平均値は PM10 を 1% 以下、PM2.5 を 0.3% 含む）。

また、TIP のホームページビデオで TRWP が説明されている<sup>24</sup>。それによれば、TRWP は粒径が 70-100 $\mu\text{m}$ 、TRWP にはタイヤ摩耗成分と道路塗料成分が半々含まれている。水より比重は大きく、水中では沈む。TRWP 排出物の行方としては、①大気には 2% と少ない（大気排出物は PM10 を 1%、PM2.5 を 0.3% 含む）、②土壌に降下するものが約 60% と多い、③淡水中に入るもの 6%、④河口（海）まで行くもの 2~5%、⑤Stormwater management（暴風雨の時の緊急用貯水池など）で除去されるもの約 18% である。

また、TRWP の長期暴露による安全性リスクを試験中である。

### 3.5 マイクロファイバー(MF):なぜ欧米で多く、日本では少ないのか

#### (1) 定義

元々マイクロプラスチック（5mm 以下）の定義にはマイクロファイバーが含まれていた。海洋学者はマイクロプラスチックという言葉を用いて、当初より 5mm 以下のプラスチック粒子だけでなく、直径 5mm 以下のマイクロファイバーを含んだ意味で使用していた。大西洋で採取されるマイクロプラスチックにはプラスチック粒子だけでなく、マイクロファイバーが相当含まれているためであろう。

#### (2) 海洋中および空気中の密度(濃度)

欧米ではマイクロプラスチックのうちのマイクロファイバーの比率がかなり高く、一方、日本は欧米に比べマイクロファイバーの比率ははるかに低い。その結果として、欧米では貝（ムール貝など）にファイバーが検出されることが多いが、日本では少ない。

表 4 に文献の一例を示す。また、表 6 の Thompson（2004）らと Beer ら（2017）のマ

<sup>24</sup> <https://www.wbcso.org/Sector-Projects/Tire-Industry-Project/Resources/Science-Driven-An-introduction-to-Tire-Industry-Project-research-on-tire-and-road-wear-particles> 2022 年 6 月視聴



マイクロプラスチックの観測データはほとんどがマイクロファイバーである。

マイクロファイバーの素材であるポリエステルやポリアミドなど合成繊維の比重は 1 以上であるが、海洋表面に漂流し、ニューズトンネットでマイクロプラスチックとして採取される (P. 33 参照)。

また、表 4 には屋外と屋内の大気中のマイクロファイバーの密度 (濃度) を示す。このデータでは、屋内は屋外よりも密度が高い。また、パリ周辺ではマイクロファイバーが年間 3~10 トン/年降下するという。かなりの量である。空気中もマイクロファイバーに汚染されている。

表 4 海洋中・大気中のマイクロプラスチック粒子とマイクロファイバーの密度

採取場所	海の位置	MPs数	MPs粒子	マイクロファイバー	出典
			含有比率%および種類・ファイバー径		
相模湾 (日本)	表面水	約10万粒/km <sup>2</sup>	PE・PPなど粒子 約83%	マイクロファイバー 約7%	JAMSTEC 中嶋 亮太 (2022)
			(MPsの組成: PE約60%、PP約30%、その他樹脂約3%、 マイクロファイバー約7%)		
Gulf of Main (米国)	coastal waters n=2,755		14% fragment 2% microbeas	84% fiber (直径 5~282μm、 長さ160μm~13mm)	Lindequeら (2020)
English Channel (イギリス)	coastal waters n=22,666		19% fragment 4% microbeas	77% fiber (直径5~350μm、 長さ55μm~8mm)	
global coastal and open ocean	volunteer citizen scientists	11.8±24.0 個/リットル (1-liter grab samples)	9% 粒子	91% マイクロファイバー (長さ100 μm~ 1.5 mm のものが77%) 材質は、合成繊維57%、セミ合成繊維 12%、非合成繊維31% (n=113)	Barrowら (2018)
カリフォルニア州モ ントレー (米国)	水中100m~ 5,000m	1~12個/m <sup>3</sup>		ポリエステル繊維とナイロン繊維が 優勢	Choyら (2019)
世界中の海岸線: 市民ボランティアがサンプル収集				85%以上がマイクロファイバー	Carr (2017)
屋内空気			1.0~60.0ファイバー/m <sup>3</sup>		Drisら (2017)
屋外空気			0.3~1.5ファイバー/m <sup>3</sup>		
屋外空気	パリ周辺の2,500km <sup>2</sup> のファイバー降下量		3~10トン/年	2~355 particles/m <sup>2</sup> /day	Drisら (2016)

注: n はサンプル数。

出所: 出典に基づいて旭リサーチセンターが作成。以下は出典。

JAMSTEC 中嶋亮太 (2022) <https://www.env.go.jp/content/900539054.pdf>

Lindequeら (2020) <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114721>

Barrowsら (2018) Environmental Pollution, 237, 275– 284. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.02.062>

Choyら (2019) Scientific Reports, 9(1), 7843. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44117-2>

Carr (2017) Integrated Environmental Assessment and Management, 13(3), 466–469.

<https://doi.org/10.1002/ieam.1916>

Drisら (2017) Environmental Pollution, 221, 453– 458. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.013>

Drisら (2016) Marine Pollution Bulletin, 104, 290– 293.

<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.01.006>

### (3) マイクロファイバーの発生源

マイクロファイバーの発生源としては、衣類の洗濯、人工芝、漁網、養殖用漁具、ロープ、ネットがある。材質は、衣類はポリエステルが多く、人工芝はポリアミド、PE、PPが多く、漁網はポリアミド 6 が多く、養殖用漁具（漁網以外のロープ、ネット）は PE や PP が多い。

衣類洗濯によるマイクロファイバー発生は日本では少なく、欧州では多い。日本は洗濯機にフィルターが付けられているので、大部分除去される。また排水（下水）処理場でほとんどが沈殿除去され、マイクロファイバーを含む下水汚泥は焼却される。一方、欧州はファイバーが出やすい洗濯方法であること、洗濯機にフィルターが付いていないことがありマイクロファイバーの発生が多い。フランス政府は洗濯機にフィルターを付けることを義務付けた。さらに欧米では、排水処理場で分離した下水汚泥には肥料成分が含まれているので、かなりの割合で農地に散布する。散布されたマイクロファイバーは農地を汚染し、また大雨などにより直接河川に流れ込み、最終的に海に入る。

下水処理場では流入するマイクロファイバーだけでなく、マイクロプラスチック粒子も除去される。下水処理場ではマイクロプラスチック全体は、90～99%除去されるという（参考文献 3）。また、日本大学 中村倫明教授は環境省・学術シンポジウム（2022年）で、船橋市の高瀬下水処理場の除去率は 99.9%、同市西浦下水処理場の除去率は 99.7%で、イギリスや米国など（97.8～99.9%）と比較して同程度と発表した<sup>25</sup>。

また雨水と下水を一緒に処理している集中下水処理場では、大雨の時に処理できなくなり、マイクロプラスチック（マクロファイバーを含む）がオーバーフローするといわれる。これについては、欧米も日本も状況は同じである。

---

<sup>25</sup> 環境省 海洋プラスチックごみ学術シンポジウム(2022) [http://www.env.go.jp/water/post\\_125.html](http://www.env.go.jp/water/post_125.html)  
<https://www.env.go.jp/content/900539057.pdf>

### 3.6 マイクロ&マクロプラスチックの発生源と輸送ルート

この項（3.6）では、用語のマイクロプラスチックが頻出するので、MPs と略す。

#### (1)MPs 汚染の拡大

海洋汚染プラスチックの発生源を「海岸/海洋表面水→河川・湖沼（淡水）→陸域→大気→室内空間」とたどる中で、汚染範囲が極めて広いことが確認された。

まず、海洋で浮遊するMPsが問題になったが、2016年頃に海に流れ込む河川・湖沼、陸域でのMPsの存在が国内外で集中的に調査された。その結果、MPsはどこの国の河川・湖沼、陸域にも存在することがわかった。ヨーロッパアルプスのような人里離れた高山でもMPsの存在が確認された。MPsが大気中を浮遊・移動したものと考えられる。水路系だけでなく、大気系もMPsの重要な輸送ルートになっているわけである（表4参照）。このように、環境中のどこにでもMPsが拡散している。なお、河川・湖沼のMPs密度は季節性があり、また大雨、台風・洪水が陸域や水路にあったMPsを一気に押し流すため、世界各地のMPs密度のデータを単純に比較することは難しい。

一方、海洋では測定しやすい海洋表面のMPsの密度測定から始まって、海柱、海底、深海海底に測定範囲が拡大した。海洋表面の測定に比べ、海柱、海底、深海海底での測定は難しいが、特殊な装置や潜水船を使用して測定されている。そして、海洋のほとんどすべての場所でMPsが観測されている。

Erni-Cassolaら（2019）は、過去の文献を収集した後に信頼性の高いデータに絞り、海洋表面、海柱、深海海底、海岸近くの海底におけるMPs密度と組成をまとめた（表5）。

表5 海洋表面、海柱、深海海底、海岸近くの海底におけるマイクロプラスチック(MPs)密度と組成

採取場所（世界） nは文献数	海の位置：深さ	MPs密度	マイクロプラスチックの組成（%）				
		1m3当たり	PE	PP	PS	PET・PA・アクリル	その他（不明を含む）
n=17	sea surface：0~1m	0.1~1個/m3	42	25	5	5	23
n= 4	water column：3~50m		9	3	2	64	22
n= 3	deep sea	10の4乗以上/m3	2	3	5	77	13
n=13	intertidal sediment(海岸近く)	10の3乗~4乗/m3	18	5	5	20	52

出所：Erni-Cassolaら Journal of Hazardous Materials Volume 369, 5 May 2019, Pages 691-698  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389419301979>

この手法は meta-analysis と呼ばれる。表 5 からわかるように、海洋表面は浮遊性の PE・PP・PS が優勢であるが、海柱、海底ではポリエステル (PET)・ポリアミド (PA)・アクリルのマイクロファイバーが優勢になっている。

## (2) マイクロプラスチック (MPs) の発生源と輸送ルート

これまでの情報を基に、MPs の発生源と輸送ルートを図 13 にまとめた。

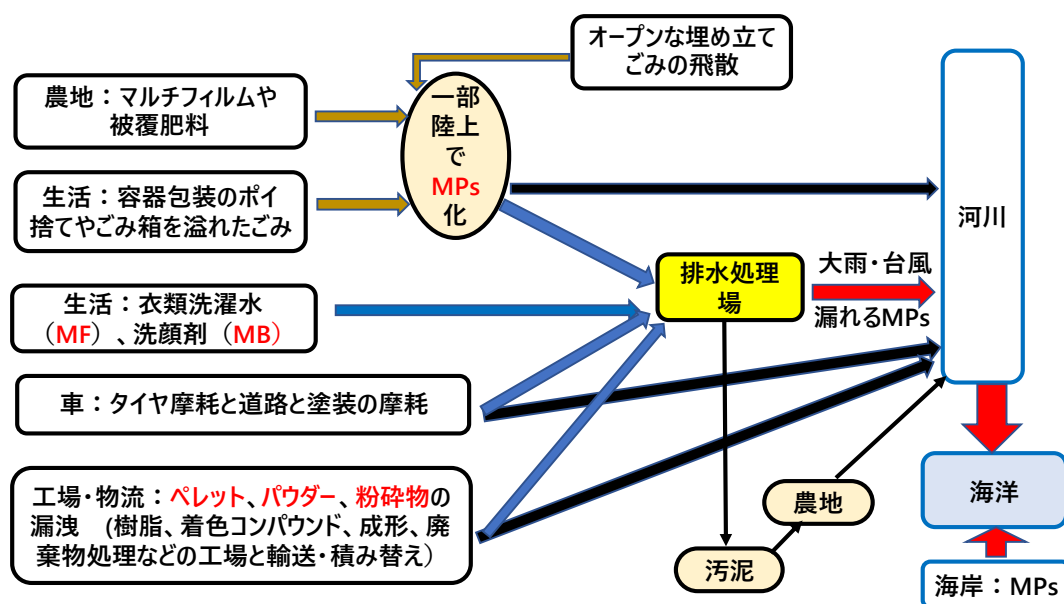


図 13 マイクロプラスチック(MPs)の発生源と輸送

出所：各種資料より旭リサーチセンター作成。

ポイントとしては、

- ①埋め立てといっても実際は廃プラを野積みしているものが発展途上国には多いと指摘されている。日光暴露されるのでポリオレフィンなどは光酸化で劣化するし、また風によって陸地に飛散するといわれる。陸地に飛散したポリオレフィンは長期間の屋外暴露で MPs 化しやすい。
- ②陸域や水路にある MPs は大雨や台風・洪水の時に一挙に海洋に運ばれる。また、前述のように集中排水処理場は大雨、台風・洪水時には処理能力を超え、捕捉できなかった MPs は下流に流失し、最終的に海に排出される。

③海岸に漂着あるいは捨てられたポリオレフィン<sup>26</sup>は、海岸の高温と強い紫外線で光酸化してMPs化しやすい。また、海岸にあるMPsは、マクロプラスチックと比較して、かなり速い速度で海に移動する（P. 26の(4)参照）。

④プラスチックの製造工場（バージンペレットや重合パウダー<sup>26</sup>）だけでなく、着色コンパウンド工場（着色ペレットやコンパウンドペレット）、成形工場、廃棄物リサイクル・処理工場（ペレット、パウダー、微細粉碎物）での漏洩がある。自動車廃棄物のASR（automotive shredder residue）中のプラスチックも含まれる。世界的に、コンパウンド・着色工場での漏洩等や不適切処理が多いとされる。プラスチックの輸送時の漏洩（港湾、物流倉庫、移動時、詰め替え）もある。

### (3) 海洋に排出されるプラスチック廃棄物（マクロプラスチック）の発生源

MPsと同様に、これまでの情報を基にプラスチック廃棄物（マクロプラスチック）の発生源をリストアップし、マップを作成した（図14）。

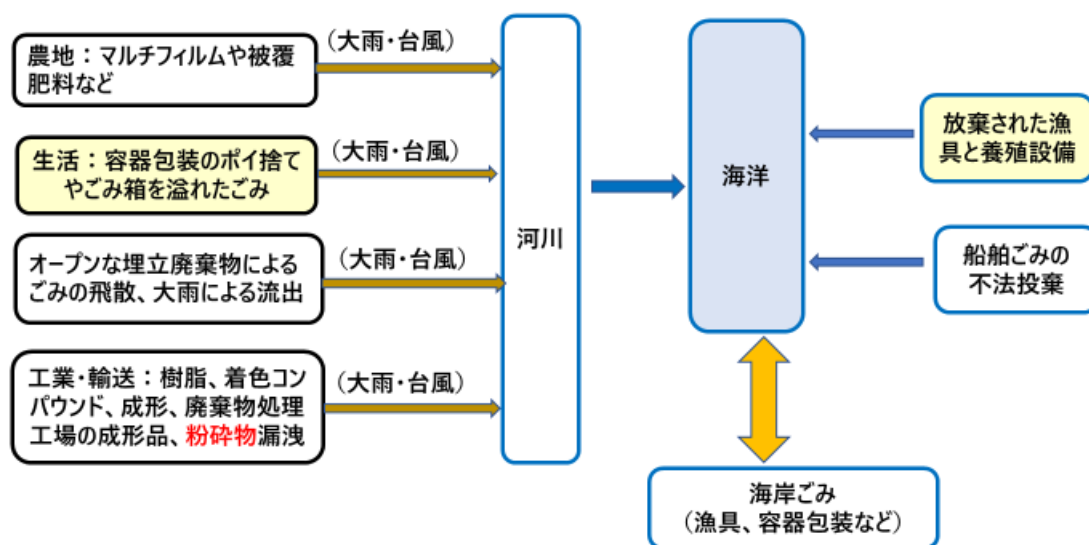


図14 海洋マクロプラスチックの発生源と輸送

出所：各種資料より旭リサーチセンター作成。

<sup>26</sup> プラスチック（樹脂）の製品形態：ペレット（代表的な製品形態：円柱状あるいは球状のもの）、パウダー（密度が約0.5の球状のもの）、ビーズ（真比重と同じ密度で球状のもの）。

ポイントとしては、

- ①プラスチック成形品廃棄物（特にシングルユースの容器包装：PET ボトル、レジ袋、トレー、ボトル、キャップ、カトラリー、発泡体など）のポイ捨てやレジ袋入りの家庭ごみの不法投棄などの不適切処理。
- ② 漁具廃棄物（漁網、ロープ、養殖用器具など）の放置などの不適切処理。浮きをついた漁具は海岸に漂着し、浮きのない重い漁具は海底に沈積する。  
OSPAR は、漁具廃棄物の欧州の実態、対策（漁具の設計、リサイクルなど）について詳細な報告書を発表している<sup>27</sup>。従来漁法だけでなく養殖も ALDFG の主要な発生源であることが示されている。
- ③樹脂工場、着色コンパウンド工場、成形工場、廃棄物処理・リサイクル工場での成形品とその機械的粉碎物の漏洩や不適切処理と、輸送時の漏洩（港湾、物流倉庫、移動時、詰め替え）がある。前述のように、世界的には、コンパウンド・着色工場での漏洩等や不適切処理が多いとされる<sup>28</sup>。
- ④発展途上国の野積み場所は、低地が多く大雨や台風・洪水により流失し、海洋に流れることが多いと指摘されている<sup>29</sup>。

#### (4) 海洋プラスチックごみの追跡・監視システム

定点カメラ、ドローン、標識やセンサーを組み込んだドリフター、GPS などを用い、また AI を駆使して、海洋、海岸、河川でのプラスチックごみの追跡・監視システムが構築されつつある。これにより海洋プラスチックごみの移動と存在量が明らかになる。

また、Maximenko ら（2019）は グローバルな統合的海洋プラスチックごみ観測システム（Integrated Marine Debris Observing System（IMDOS））の構築を目指している（参考文献 6）<sup>30</sup>。世界の数多くの有力な海洋学研究者が参画している。

---

<sup>27</sup> <https://www.ospar.org/documents?v=42718>

<sup>28</sup> Ocean Conservancy & McKinsey Center Stemming the Tide: Land-based strategies for a plastic-free ocean <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/business%20functions/sustainability/our%20insights/saving%20the%20ocean%20from%20plastic%20waste/stemming%20the%20tide%20full%20report.ashx>

<sup>29</sup> Brand ら（2017）. Potential pollution risks of historic landfills on low-lying coasts and estuaries. Wiley Interdisciplinary Reviews Water, 5, e1264. <https://doi.org/10.1002/wat2.1264>

<sup>30</sup> Maximenko N et al 2019, Towards the integrated marine debris observing system, Front. Mar. Sci. 6 447 <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2019.00447/full>

この分野の一つの注目すべき研究成果は、日本の Kataoka（片岡）と Hinata（日向）らによる漂着プラスチックごみ（マクロプラスチック）の海岸での平均滞留時間を推定するためのモデル（式）の開発である（2013 年発表）<sup>31</sup>。海岸に漂着したプラスチックごみは海岸にずっととどまるわけではなく、一部は波や風の手で海に戻る（再漂流すること）は知られていたが、どの程度の期間、海岸に滞留するかは全くわかっていなかった。

片岡・日向らは、海洋に比べ温度が高くかつ紫外線が強い海岸での速い MPs 化に注目していた（海岸は MPs 化のホットスポットと呼んだ）。海岸での平均滞留時間を解明できれば、海岸でのマクロプラスチックの MPs 化速度を推定することができる。

片岡・日向らは、新島の海岸に漂着している小型のフロート（浮き）に識別番号を付け、定期的にフロートがどれだけ海岸に残っているかを調べる（個体識別調査）により、フロートが指数関数的に減少することを発見した（図 15）。図 15 より、海岸での平均滞留時間（1/e：図 15 では 209 日）を求めた。それを基に、海洋から海岸への打ち上げられる速度とそれらが再度海洋に戻る速度を推定できる線形数式モデルを開発した。それを利用して、海岸清掃による MPs の発生抑制効果の評価手法も開発した。

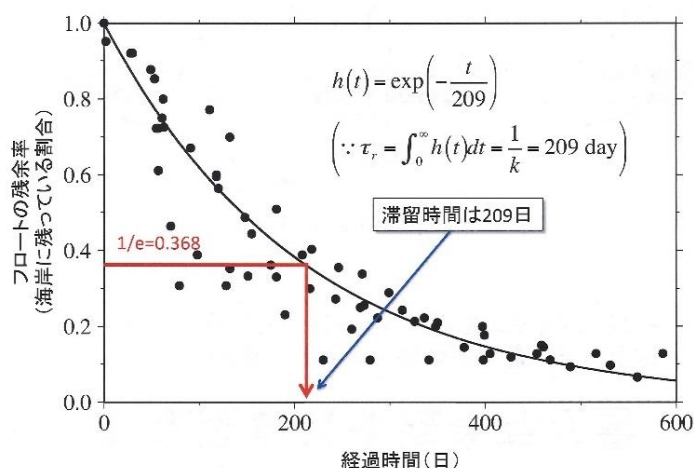


図 15 フロート数の経過日数による指数関数的減少

出所：脚注 31 の 1. の講演資料。原典は脚注 31 の 3. の論文(2013)。

<sup>31</sup> 1. 講演資料 片岡、日向 [http://www.cee.ehime-u.ac.jp/~kaigan/images/marine\\_litter.pdf](http://www.cee.ehime-u.ac.jp/~kaigan/images/marine_litter.pdf)  
<https://meetings.pices.int/publications/presentations/PICES-2014/2014-S8/S8-1520-Hinata.pdf>  
 2. 科研費成果報告書 <https://kaken.nii.ac.jp/file/KAKENHI-PROJECT-25820234/25820234seika.pdf>  
 3. 論文 T. Kataoka, H. Hinata, S. Kato: Analysis of a beach as a time-invariant linear input/output system of marine litter, Mar. Pollut. Bull., 77 (2013), pp. 266-273



片岡・日向らは、2013年の発表以降の2015～17年に関連する研究成果を発表している<sup>32</sup>。そして、海岸にあるMPsは、海岸にあるマクロプラスチックに比べはるかに速く（10～100倍）海に戻ることも明らかにした（脚注32の③）。

#### (5)大雨、洪水による陸上のマイクロ&マクロプラスチックの海洋への大量流出

JAMSTEC（国立研究開発法人海洋研究開発機構）のプレスリリースの抜粋を紹介する。台風時のプラスチックの海洋への大量流出に遭遇している。

「2022年1月13日：2019年に関東地方に上陸した「令和元年房総半島台風（台風15号）」の通過前後に、相模湾で海表面のプラスチック量の変化を調査した結果、台風通過直後のプラスチック量は、台風通過前に比べ数量換算で約250倍、重量換算で約1,300倍に増加した。しかし、台風通過からわずか3日後には台風通過前の量に戻っていたことも明らかとなった。そこで粒子追跡シミュレーションを実施したところ、台風によって湾内に流入したプラスチックの大半はただちに湾外（外洋）へ流出してしまうことがわかった。海洋に流入するプラスチック量の推定には、台風のようなイベントを考慮することが重要である。」

環境省の学術シンポジウム（2022）において、より詳細な発表があった<sup>33</sup>。

台風到来3日前のマイクロプラスチック（5mm以下）の組成はPE 60%、PP 30%、PS 数%であったが、台風通過1日後はPE 17%、PP 5%、PS 77%であった。PSは発泡PS（発泡スチロール）であった。

同様にメソプラスチック（5～25mm）についても、台風到来3日前の組成はPE 80%、PP 15%であったが、台風通過1日後はPE 40%、PP 20%、PS 37%であった。PSは同じく発泡PS（発泡スチロール）であった（数字（%）は引用文献の表を読み取ったもので、正確には元資料を参照）。

---

<sup>32</sup> ①Kataoka, T., Hinata, H., Kato, S.: Backwash process of marine macroplastics from a beach by nearshore currents around a submerged breakwater, *Marine Pollution Bulletin*, 101, 539-548 (2015).

②Hinata, H., Kataoka, T.: A belt transect setting strategy for mark-recapture experiments to evaluate the 1D diffusion coefficient of beached litter in the cross-shore direction, *Marine Pollution Bulletin*, 109, 490-494 (2016).

③H. Hinata, K. Mori, K. Ohno, Y. Miyao, T. Kataoka: An estimation of the average residence times and onshore-offshore diffusivities of beached microplastics based on the population decay of tagged meso- and macrolitter, *Mar. Pollut. Bull.*, 122, 17-26(2017)

<sup>33</sup> <https://www.env.go.jp/content/900539054.pdf>



## 4. 進む海洋(マイクロ)プラスチック問題の解明

海洋プラスチック問題の解明には地球物理学・海洋学の力だけでなく、例えばマイクロプラスチックの生成と行方については高分子化学の力が必要である。マイクロプラスチックの海洋生態系への影響や海洋生物との関わり合いについては海洋生物学の力が必須である。海洋プラスチックごみの発生源についてはプラスチック廃棄物管理の力が、そして大気、陸域、河川・湖沼、海洋の環境については環境化学の力が必要である。これら関連分野の統合的・学際的取り組みが期待される（図 16）。

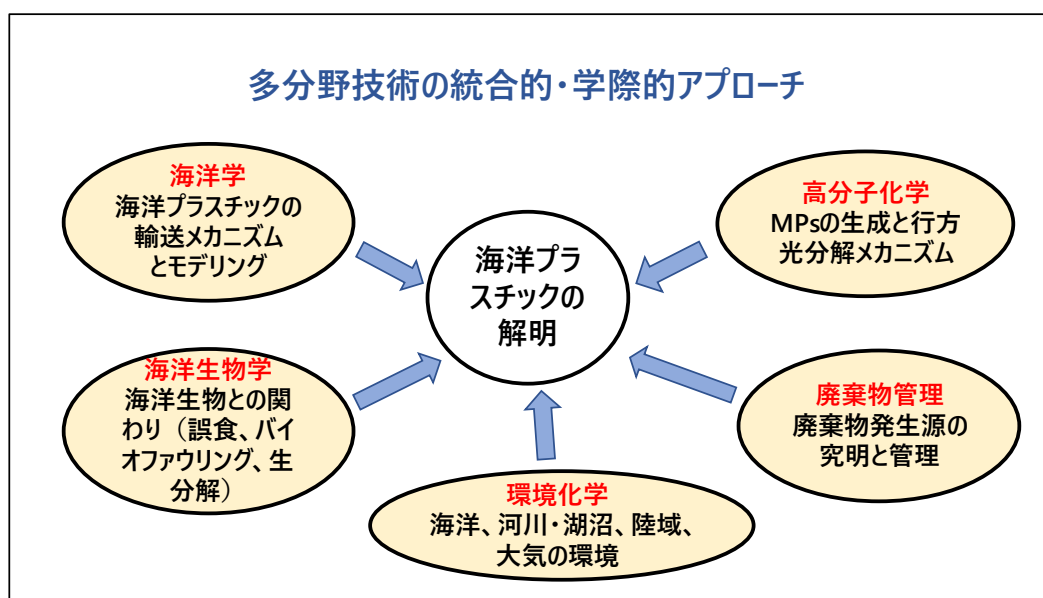


図 16 多分野技術を統合的・学際的アプローチ

出所：各種資料より旭リサーチセンター作成。

### 4.1 光酸化・細分化によるマイクロプラスチックの生成 (ARC リポート rs-1026(参考文献1③))

PE・PP・PS など主鎖が炭化水素でできているプラスチックは酸素存在下（空气中）で紫外線に当たると高分子鎖が分解して分子量が低下し、官能基のカルボニル基が生成する。分子量 11 万のバージン PE を、1 年間屋外で日光暴露すると分子量が 2 万（強度に関する臨界分子量）以下に低下し、引っ張り強度を失う。このため、力が加わると、形状を維持できず崩壊する（参考文献 7）。これが、光酸化・細分化による二次的マイクロプラスチックの生成である。

## (1)旭化成(株)と九州大学との共同研究(2022)<sup>34</sup>

旭化成(株) 基盤技術研究所の大久保らは、PE フィルムを紫外線照射し、照射時間によるカルボニルインデックスの増加と平均分子量の低下の測定を行い、定量的な相関関係を明らかにした。また力学強度を失う照射時間も明らかにした。この基礎データを使って、日本近海とフィリピン近海のマイクロプラスチックのフィールドサンプルのカルボニルインデックスの分布を測定した。なお、詳細は続編(シリーズ マイクロプラスチック(5))で紹介の予定である。

## (2)光酸化と細分化のメカニズム

実際のフィールドでの光酸化を考えると、マルチフィルムなど農業用フィルムや肥料被覆用樹脂(いずれも PE 製が多い)は長期間の農地にとどまるので、マイクロプラスチック化しやすい。野積みされたごみ、ポイ捨てされたごみも長期間屋外に放置されるとマイクロプラスチック化するだろう。

現在、海洋学者が重視しているのは、海岸での漂着マクロプラスチックのマイクロプラスチック化である。光酸化反応は温度依存性があり、10℃温度が上がると速度は2倍になるといわれる。日本の夏場の海岸の砂の上は40℃以上になっているので、光酸化反応は相当速い。また、赤道周辺の常夏の国では年間を通して高温なので、海岸に漂着したマクロプラスチックのマイクロプラスチック化はよく進むはずである。

光酸化劣化スピードは海岸>陸地>>海水表面、河川中>水柱(Water column)>海底と考えられている。海水中は陸地より温度が低く、また水により紫外線が遮られやすいからである。さらに、海洋漂流中のプラスチックにはバイオフィームが付着することが多いので、これも紫外線を遮断することになる(図18参照)。

Biber ら(2019)は、光酸化反応は材質的にPE、PP、PSで起こり、その中では、PSがどの環境下(空気中や海水中など)でも光酸化反応で最も崩壊しやすいと述べている<sup>35</sup>。

<sup>34</sup> 環境省 海洋プラスチックごみ学術シンポジウム(2022) [http://www.env.go.jp/water/post\\_125.html](http://www.env.go.jp/water/post_125.html)  
<https://www.env.go.jp/content/900539055.pdf>

<sup>35</sup> Biber ら Marine Pollution Bulletin, 141, 595-602 (2019).

また、水中や海水中では、プラスチック中の酸化防止剤、熱安定剤、紫外線防止剤などの添加剤が溶出することが知られている。添加剤が抜けたプラスチックはより光酸化反応を受けやすい。添加剤のない状態のバージン PE は熱がかかると架橋しやすく、バージン PP は熱がかかると分解（解重合）しやすいことが知られている。添加剤がなくなった海洋プラスチックの安定性がどうなっているか興味があるところである。

また、PE の架橋といえば、PE 成形製品のうち電線被覆、パイプ（架橋 PE 管）、回転成形品には架橋 PE がある。架橋 PE は光酸化反応を受けても重合度が下がりにくく、長期間に海洋でマイクロプラスチックとして浮遊しているのではないかと推定される。

光酸化により脆弱になったフィルムは、ちょっと力を加えるだけでこなごなになる。一方、分厚い成形品は光酸化で表面から劣化し、クラックが入り細分化（fragmentation）し、いくつかの碎片（細片）ができ、さらにそれぞれの碎片がまたいくつかに細分化して多数のマイクロプラスチック粒子ができる。このような細分化の繰り返しルート以外にも表面がデラミネーションや粉化するルートもある。九州大学の高原淳教授と長崎大学の中谷久之教授が微細化のメカニズムについて、高分子学会機関誌の『高分子』（2021）で解説している<sup>36</sup>。また、Song（2017）<sup>37</sup> にも紫外線劣化と物理力による細分化について報告している<sup>37</sup>。

今後さらに、フィールド条件、あるいはそれに近い条件での実験研究が期待される。

## 4.2 プラスチックの比重（密度）と海洋中での浮沈：PE はいつでも海に浮かぶか？

プラスチックの比重が海洋中の浮沈を決める決定的な要因である。ただ、海水より比重の小さい軽いプラスチックはいつも海洋で浮くと単純に考えていたが、どうも事はそう簡単ではないようである。

各種プラスチックの比重を表 2（P.6 参照）に示した。海水より比重の小さいものは PE、PP、発泡 PS で、その他のプラスチック（PS、PET、PVC、PA、PC）や合成繊維（ポ

---

<sup>36</sup> 高原淳 高分子 70 巻 1 月号 (2021) p.12、中谷久之 高分子 70 巻 1 月号 (2021) p.21

<sup>37</sup> Songら(2017), Environ. Sci. Technol., 51 (2017), pp. 4368-4376  
<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.6b06155>

リエステル、ポリアミド、アクリルなど) はすべて海水より比重が大きい。合成ゴムの BR・SBR は生ゴム状態での比重は 1 以下であるが、実際のタイヤなどのゴム製品はカーボンブラックやシリカを配合して加硫してつくられるので比重は 1 以上になる。

ここで、海水中でのプラスチック、繊維、ゴム製品の浮き沈みについて整理してみた。まずは自明なところから始まり、文献情報の紹介へと続く。

#### (1) 浮力の大きい中空成形品

キャップをした空の PET ボトルや HDPE 製灯油缶、漁具用のプラスチック製の浮き、発泡体 (PS 製や PU (ポリウレタン) 製の緩衝材・断熱材) は、空気の浮力が格段に大きいので間違いなく海中で浮く。

#### (2) ポリオレフィン配合物

PE・PP には無機フィラーや各種添加剤が練り込まれることが多い。通常、無機フィラーや添加剤の比重は 1 以上なので、配合物の比重が 1 を超えることがある。代表例はバンパーに使われる自動車用 PP 配合物 (その廃棄物は ASR) で、タルクが多量に含まれているので沈む。

#### (3) 比重 1 以上の重いプラスチック

重いプラスチックは海底に沈積する (定量的な実証データは少ないが、これは間違いなさそう)。河川の底に沈む重いプラスチックは川の流れ (特に大雨や台風・洪水) に押し流され、海洋に輸送され、海底に沈積する。

#### (4) 発泡ポリスチレン (発泡 PS)

これは、海中で浮くが気泡に水が入れば沈む (参考文献 5)。発泡体表面は緻密なスキン層で覆われていて水は入りにくいですが、発泡体は強度が弱いので割れやすい。割れると、断面の気泡から水が入る。通常、連続気泡なので、1 か所から水が入れば、気泡全体に水が広がる。

#### (5) 形状と浮力

浮くか沈むかは、材料の比重だけでなく形状にも依存し、物体の浮力と抵抗力のバランスで決まる。ポリ袋は閉じて 1 枚のフィルム状になっていると浮きやすく、ポリ袋

が開いて水がいっぱい入った状態では浮きにくい。JAMSTEC の深海海底のビデオ映像で、開いたポリ袋がふらふらと浮いているのが印象的である。

#### (6) マイクロファイバー

マイクロファイバーの素材であるポリエステル、ポリアミド、アクリルの比重はいずれも 1 以上であるが、海洋表面に漂流しニューズトンネットで採取されるのはなぜであろうか。この現象を説明した資料は見つからなかった。おそらくファイバーの中に微小な空気が含まれており、空気が海水に置換しないためであろう。

#### (7) 垂直混合

比重 1 以下のポリオレフィン (PE・PP) マイクロプラスチックは海面をいつも浮いているとは限らない。ポリオレフィンの比重は 0.9~0.965 で、海水 (比重 1.03) との比重差は 0.07~0.13 と大きくないので、海水の垂直移動で一時的に、あるいは永遠に表面から消えることがある。

垂直輸送を誘発する様々な外洋プロセスが紹介されている (参考文献 4 (Table 1))。それによれば、①ラングミュア循環 (垂直移動距離 5~50m、平均垂直速度 数~20 cm/s)、②Vertical mixing induced by breaking waves (波が壊れることにより誘導される垂直混合) (同 10m 以下、同 5 cm/s)、③Convective cells (対流セル) (同 10~1000m、沿岸部同 2~4 cm/s)、④ (Submesoscale) Front ((サブメソスケール) フロント) (同約 40m、同 1 cm/s)、⑤Ekman pumping (エクマン・ポンピング: 鉛直流) (同数 10~数 100m、同数 10m/year (数  $\mu$  m/s)) である。

このうち、ラングミュア循環は風の列でできる渦巻状の海水の流れである。図 17 のように、プラスチックは表面に一列に集まる。プランクトン生物も同様に表面に一列に集まり、プラスチックと近接する。このため、プラスチックのバイオフィウリング (バイオコーティング) が盛んになるだけでなく、絡み合ったり、誤食したりする機会が増える (参考文献 4)。

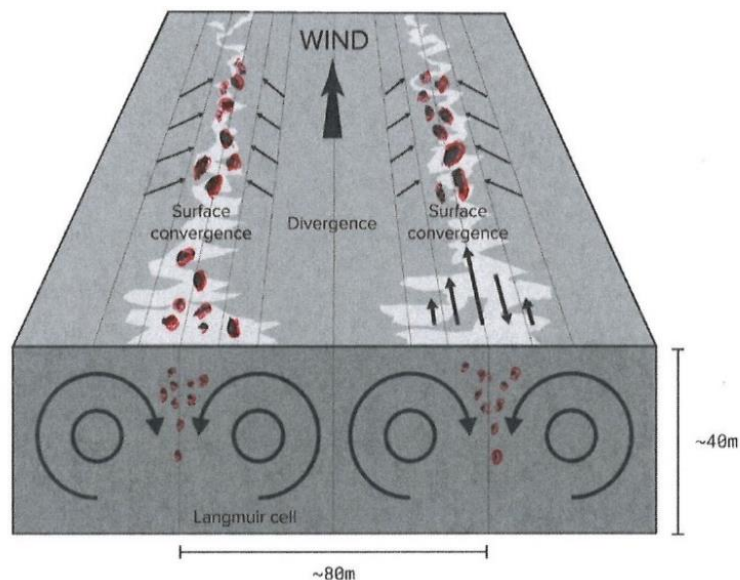


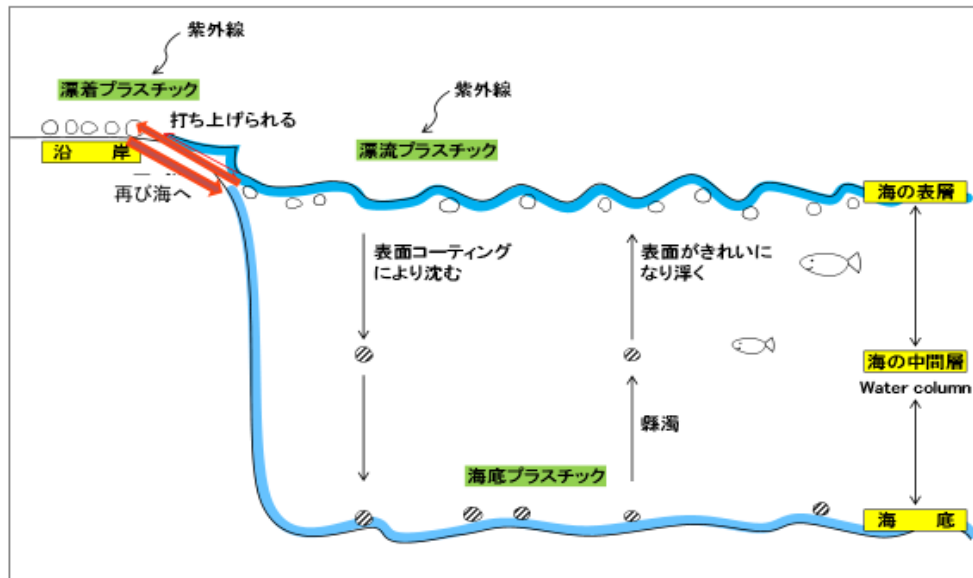
図 17 ラングミュア循環

注：周囲が赤色の黒色物体はプラスチックで、ラングミュア循環の表面に集まる（Surface convergence:表面収束）。WIND の方向は Divergence（分散）である。

出所：参考文献 4 (Sebilleら The physical oceanography of the transport of floating marine debris, Environ. Res. Lett. 15 (2020) 023003) の Figure 3。

#### (8) バイオフィウリング (バイオコーティング、バイオフィルム)

マイクロプラスチックに海洋生物が付着してバイオフィルムが形成され、比重増によりマイクロプラスチックが沈む。沈んだマイクロプラスチックからバイオフィルムがはがれると、マイクロプラスチックは上昇し、海洋表面に達する。この現象は、頻繁に起こっていることが知られている（図 18）。



陸上・河原・海岸が紫外線で最も崩壊しやすい。次が海洋の表層、海中・海底は遅い。

図 18 浮遊マイクロ(マクロ)プラスチックの海洋と海岸での挙動

出所：ARC リポート rs-1026 (参考文献 1 ③)

(GESAMP 資料と UNEP 資料を参考に旭リサーチセンター作成)。

### (9) 粒径とバイオフィウリング

Ryan (2015)<sup>38</sup> は、球形粒子が微粒子化すると、粒子の体積 (V) は半径の 3 乗に比例し、表面積 (S) は 2 乗に比例するので、粒子の体積当たりの表面積の比率 ( $S/V = a(1/r)$ ) は、粒子が細くなるにつれて大きくなる。したがって、より微粒子ほどバイオフィルムの付着量比率が高く沈みやすいと考えた。フィールド実験により、沿岸から離れて沖合に行くにつれて採取されるマイクロプラスチックの粒径が大きくなることを見だし、この仮説を証明した。沿岸から沖合に行く間により微細なマイクロプラスチックはバイオフィウリングにより沈降しやすいためである。

<sup>38</sup> Does size and buoyancy affect the long-distance transport of floating debris? Environ. Res. Lett. 10, 1-6 (2015) <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/10/8/084019>

### 4.3 浮遊マイクロプラスチックの消失とプラスチックの海底への沈積

#### (1) 消失問題

海洋のマクロ&マイクロプラスチックの主体は海洋に浮遊する PE・PP・発泡 PS やマイクロファイバーである。表 6（上表）によれば、その浮遊存在量は海洋へのプラスチック排出量に比べはるかに少ない。また表 6（下表）の定点観測では、毎年海洋プラスチックは排出されるので蓄積して年々増加するはずだが、増加しなかったとの報告が相次いだ。これがマイクロプラスチックの消失問題である。

表 6 世界のマイクロプラスチックの全体量観測(上表)と定点観測(下表)

世界のマイクロプラスチック (MPs) の全体量観測				
論文	観測結果 (使用データ)	シミュレーション	結果	考察 (仮説等)
Eriksenら (2014、米国)	①垂熱帯還流、オーストラリア沿岸、ベンガル湾、地中海②2007～2013年③24回の表層調査④サイズ別に2種のMPs、メソマイクロプラスチック、マクロプラスチックに分類	①海洋学モデルと海洋の垂直混合モデルを駆使し、全体量計算 ②粒径分布のシミュレーション	①個数は5.25兆個で、重量は27万トン ②廃プラ排出量から予想される量に比べ、実際のメソやマクロプラスチックの量ははるかに少ない	MPsを海面から消失させる何らかのメカニズムが働いている。考えられる原因をリストアップ。
Cozarら (2014、スペイン)	(世界の外洋の表層から採取された3,070サンプルのデータを利用)	①MPs全体量の計算 ②粒径分布のシミュレーション	①世界多くて35,000トン (排出量の1%以下) ②2mmがピーク、1mm以下が選択的に消失	1mm以下を消失させるプロセスがある。4つの原因をリストアップ
Sebilleら (2015、イギリスなど7か国)	(世界の海洋プラスチック密度の膨大なデータを利用)	数値モデルを使ってデータを標準化し、海洋循環モデルを組み込む	個数 15～51兆個、重量 93,000～236,000トン (2010年排出量の1%)	原因は粒子密度のデータ不足、モデルの適切さ、MPsの運命の知見不足にある。
世界のマイクロプラスチック (MPs) 定点観測				
論文	観測地年代	観測結果 (使用データ)	結論	考察 (仮説等)
Thompsonら (2004、イギリス)	イギリス沿岸の沈積物中のMPs (MPsはファイバーがほとんど)	1960年代 (0.01個/m <sup>3</sup> ) 1970年代 (0.01個/m <sup>3</sup> ) 1980年代 (0.04個/m <sup>3</sup> ) 1990年代 (0.03個/m <sup>3</sup> )	80～90年代も増加していない。1960～1990年代の間に合成繊維の生産量は6倍になった。	Where is all the plastic? (論文の題名)
Lawら (2010、米国)	北大西洋とカリブ海の6,136地点 (1986～2008)	海洋プラスチックのホットスポットでの海洋密度は増加しなかった。	MPsは増加しなかった。	なし
Lawら (2014、米国)	東太平洋の2,500地点 (2001～2012)	海洋プラスチックのホットスポットでの海洋密度は増加しなかった。	MPsは増加しなかった。	なし
Beerら (2017、デンマーク)	バルチック海 (1985～2015)	表層より少し深い海から採取、MPsの93%がファイバー、プラスチック細片7% 粒径0.1～2mm中心	MPs密度、魚のMPs摂取量ともに増加しなかった。	世界のプラスチック生産量や廃棄量より、地域の経済活動の方がMPsへの影響が大きい

出所：旭リサーチセンター作成 (ARC レポート rs-1026 (参考文献 1③))。



なお、表 6 によれば、Thompson らの観測ではファイバーがほとんどである。また、Beer らの観測では、ファイバーが 93%で、プラスチック細片が 7%である。いずれもファイバーの比率が非常に大きいことが注目される。

## (2) 消失の原因(浮遊マイクロプラスチックの行方(fate))

これまで多方面の技術の専門家によって、粒径 350  $\mu\text{m}$ ~5 mmの「いわゆるマイクロプラスチック」の消失原因が究明され、以下の消失ルートが提案された(表 7)。

- ①微粒子化：前述のように、従来のニューズトンネットに引っかからない 350  $\mu\text{m}$  以下の微粒子が海洋に存在することは、多くの研究者によって明らかになった。
- ②海洋の垂直混合：前述のようにラングミュア循環など各種海洋の垂直混合現象。前述のように、ラングミュア循環ではプランクトンやマイクロプラスチックは一列に集まり近接する。このため、マイクロプラスチックのバイオフィウリング(バイオコーティング)が盛んになるだけでなく、絡み合ったり、海洋生物が誤食したりする機会が増える。
- ③海洋生物との関わり合いで、比重が大きくなり表面から水中や海底に沈降。
  - a. バイオフィウリングにより、表面にバイオフィームができ比重が大きくなり沈降。
  - b. マリンスノー(魚の糞)に取り込まれたり(巻き込まれたり)、付着して沈降。
  - c. マイクロプラスチックを誤食した魚の糞(fecal pellet)とともに沈降。
  - d. 動物プランクトンなどが夜間、海表面で誤食し、昼間は深海に移動(この現象をプラスチックポンプと呼ぶ)することによる表面からの消失。
  - e. 海洋微生物による分解：Brandon ら(2018)<sup>39</sup>はミールワームによる PE の分解を報告している。それは、マイクロバイームによって促進された。
- ④クレイのような無機物に取り込まれたり(巻き込まれたり)、付着して沈降。
- ⑤北極海に集積：マイクロプラスチックがグリーンランド東の海に集積する。また、マイクロプラスチックは氷に取り込まれ、見かけ上消失する。
- ⑥海岸での沈着：海岸のマイクロプラスチックの一部は海岸に沈積する。

---

<sup>39</sup> Brandon ら(2018). Biodegradation of polyethylene and plastic mixtures in mealworms (larvae of *Tenebrio molitor*) and effects on the gut microbiome. *Environmental Science and Technology*, 52(11), 6526-6533

表 7 浮遊マイクロプラスチック(350 μ m 以上)の消失原因(浮遊マイクロプラスチックの行方)

消失の原因	内容	論文の例
光酸化反応による微粒子化(350μm以下に)	海洋に漂流するマイクロプラスチックとはこれまでニューストンネットで採取された350μm以上のものを意味してきたが、10~350μmの微粒子が個数的には大量に存在することが判明した。微粒子化が進んでいることは明らかである。	Chamasら (2020) (光酸化反応)
海洋の垂直混合	①ラングムア循環 ②波を壊すことにより引き起こされる垂直混合 ③対流セル ④(サブメソスケール) フロント⑤エクマン・ポンピング	Sebilleら (2020) 参考文献4
海洋生物の表面付着(バイオフィリング、バイオフィーム、バイオフィルム)	海洋生物の表面付着は、密度を増加させ、沈降するようになる。表面積対体積比の大きい微粒子ほど初期浮力が低く、沈降しやすいことがフィールドで証明された。また、5~50mmのサンプルにバイオフィルムを形成したものは、サイズの小さいものが速く沈降した。すべてが12週間で沈降した。	Zettlerら (2013) Ryan (2015) Fazey and Ryan (2016)
海洋生物の誤食と糞便ペレット	MPsはプランクトン、魚、海鳥、海洋哺乳類によって誤食されることが知られており、誤食されたMPsの一部は最終的に糞便ペレットに入る。	Coleら (2015, 16) Katiya (2017)
	MPsを含むカイアシ類の「糞便ペレット」の沈降率テストした。浮遊性のMPsを含むペレットはそうでないペレットよりも遅い速度で沈み、水柱で断片化したり、他の生物によって消費されたりする可能性が高くなる。	Coleら (2016)
プラスチックポンプ	動物プランクトン、中遠洋魚(ハダカイワシ、ミクトフィドなど)は、昼は表面水中で餌を食べ(MPsを誤食して)、夜に垂直移動により急速に深海に移動する。これは「プラスチックポンプ」と呼ばれ、MPsは深海に運ばれ表面から消失する。	Lusherら (2016) Choyら (2019)
マリンスノー(魚の糞)に取り込まれや付着	実験室試験で、MPsがマリンスノーに組み込まれ沈降速度が増加した。PEは818 m/日、ポリアミドは916m/日増加した。ムール貝はただのMPsよりもマリンスノーに取り込まれたMPsを誤食する可能性が高い。	Porterら (2018)
	MPsはマリンスノーの骨材となる。フィールドのマリンスノーを分析した結果、最高70%にMPsが含まれていた。MPsの粒径は1mm以下、材質はPET、PPなど。実験室実験では、MPsをマリンスノーに組み込むと、沈降速度が大幅に向上し、1日当たり数百mの沈降速度になる。	Zhaoら (2018) de Haanら (2019)
海洋微生物による分解	PEとPPは細胞外酵素により分解され、バクテリアの形と一致するくぼみを形成した。	Zettlerら (2013)
	PEはPSと同じ速度で、ミールワームにより分解される。マイクロバイームにより促進される。CO <sub>2</sub> の発生が最大49%観測された。PE分子量が40%低下する。	Brandonら (2018)
	光酸化したPE・PPのMPsは生分解しやすい形態と考えられるが、完全なCO <sub>2</sub> と水への分解(mineralization)はほとんどあるいは全く起こらない。	参考文献5 p.111~114
	Yuanらの総説：調査論文50件のうち、bacteria(論文12件)、fungi(6件)、バイオフィルム(6件)がMPsを分解することを紹介している。	Yuanら (2020)
	Zeghalらの総説：Marine FungiがプラスチックのDegradationに果たす潜在的役割。PEのfungiによる分解例(論文)が一覧表で数多く示されている。	Zeghal (2021)
浮遊無機物と凝集して沈降	PSビーズ(MPs)は淡水中にある懸濁したクレイ、カオリンのような無機物と凝集して、沈降する。河川中でのタイヤ摩耗や化粧品MBの行方を実験結果とともにモデリング。	Besselingら (2017)
北極海に集積	MPsは北極海の氷に取り込まれ、氷中のMPs濃度は水柱より数桁高い。北極海の氷はMPs消失先(sink)であった。地球温暖化で氷が解け、MPsが放出される。氷中のMPsの粒径やプラスチックの種類も同定。	Obbardら (2014) Peekenら (2018)
	グリーンランドの東の海にMPsが集積する(行き止まり)。	Cozarら (2017)
海岸での沈着	ビーチ、海岸線、沿岸ラグーンには多数のMPsが存在し、またそこはMPs生成の場であり、MPsは海岸に沈着する。また一部は波により海に戻る。	参考文献3 Lotsら (2017)

出所：参考文献 3-5 と出典などを基に旭リサーチセンターが作成。

出典：

- ①Chamasら、 <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acssuschemeng.9b06635>
- ②Zettlerら、 <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es401288x>
- ③Ryan <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/10/8/084019>
- ④Fazeyら、 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749116300264>

- ⑤Cole ら (2015) 、 <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es504525u>
- ⑥Cole ら (2016) 、 <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.5b05905>
- ⑦Katija ら、 <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.1700715>
- ⑧Lusher ら、 <https://academic.oup.com/icesjms/article/73/4/1214/2457960>
- ⑨Choy ら、 <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44117-2>
- ⑩Porter ら、 <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01000>
- ⑪Zhao ら、 <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b03467>
- ⑫de Haan ら、 <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30803674/>
- ⑬Brandon ら、 <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.8b02301>
- ⑭Yuan ら、 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720304782>
- ⑮Zeghal ら、 <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.738877>
- ⑯Besseling ら、 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749116316013>
- ⑰Obbard ら、 <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2014EF000240>
- ⑱Peeken ら、 <http://doi.org/10.1038/s41467-018-03825-5>
- ⑲Peeken ら、 <https://arctic.noaa.gov/Report-Card/Report-Card-2018/ArtMID/7878/ArticleID/787/Microplastics-in-the-Marine-Realms-of-the-Arctic-with-Special-Emphasis-on-Sea-Ice>
- ⑳Cózar ら、 <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600582>
- ㉑Lots ら、 <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.08.057>

現実の海洋では、まず 350  $\mu$  m 以下に微粒子化することによりニューストーンネットでは捕捉されなくなり、「いわゆるマイクロプラスチック (350  $\mu$  m ~ 5 mm)」が見かけ上消失することから始まると考えられる。350  $\mu$  m 以下の微粒子は体積当たりの表面積が大きく、「いわゆるマイクロプラスチック」に比べて、バイオフィウリング、誤食、マリンスノーや無機物の取り込み (巻き込まれ)、微生物による生分解、垂直混合、海岸での沈積など多くの消失ルートが起こりやすいと考えられる。

実際の消失ルートは、複数のルートが関連しながら進んでいるものと考えられるが、どのルートが支配的かはわかっていない。

また、多くのルートが最終的に海洋表面から海柱を経て、海底に沈降することを示唆している。

### (3) (深海)海底におけるプラスチックの蓄積

重いプラスチックははじめから海底に蓄積しているはずであり、浮遊マイクロプラスチックも最後は海底に沈積すると推定される。このため海底における海洋プラスチックの沈積状況は重要な研究ターゲットになった (Kane ら (2019) が総説でまとめている (参考文献 6))。

また、日本近海の海底にあるプラスチックごみの測定については環境省が毎年実施し、結果を発表しているが、大量の海洋プラスチックは見いだされていない（漁具が多く発見されている）。

一方、海洋プラスチックがたまりやすい海底峡谷や深海など、観測しにくい場所での調査が進められている。最近のトピックスとしては、

- ①東京海洋大学 Kuroda ら（2020）<sup>40</sup> は、底引き網（60～70mm メッシュ）で日本近海海底（67～830m）のプラスチックごみを採取して、解析している。その一例として、Hidaka Bay では、2,962 アイテム（52 kg）/km<sup>2</sup> が採取され、89%がプラスチックであった。
- ②深海については、JAMSTEC（国立研究開発法人海洋研究開発機構）の深海調査船しんかい6500（図19）が活躍しており、深海海底で撮影した写真を公開している。

### JAMSTEC（海洋研究開発機構）：しんかい6500

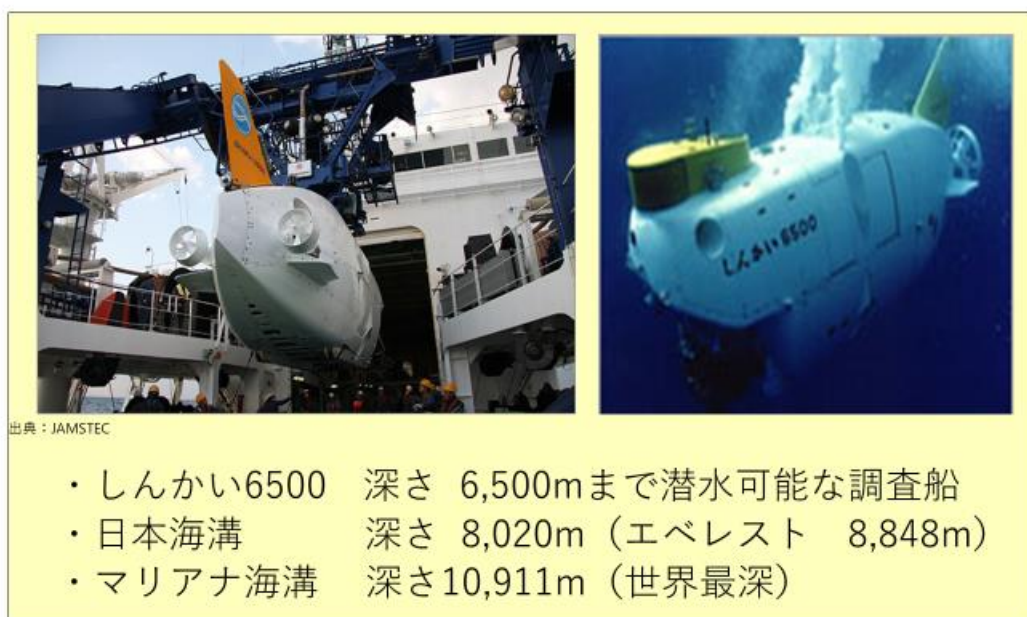


図 19 JAMSTEC(海洋研究開発機構)のしんかい 6500

出所：写真は JAMSTEC、下の文は旭リサーチセンター作成。

<sup>40</sup> “The current state of marine debris on the seafloor in offshore area around Japan.” Mar Pollut Bull 161 (2020):111670

また、最近の 2021 年 3 月 30 日のプレスリリース（抜粋）によれば、「“行方不明プラスチックを探しに深海へ” 房総半島から約 500km 沖、水深 6,000m 付近の海底をプラスチックごみの集積地と見込み調査した結果、ポリ袋や食品包装等の使い捨てプラスチックが大量に見つかった。房総半島沖の大深度の海底に広がるプラスチックごみの密度（平均 4,561 個 /km<sup>2</sup>）は、過去に記録された大深度の海底におけるプラスチックごみと比べて 2 桁も高く、海溝や海底谷など、ごみなどが集まりやすいと考えられる窪地と比較しても高い値を示した。」

海面に浮くはずのポリ袋や海面に浮くものが多い食品包装等の使い捨てプラスチックが深海に沈んでいることは意外である。大雨や台風・洪水など異常時に巻き込まれて海底に沈んだものか、平常時も海底に沈むメカニズムがあるのか知りたいところである。

#### 4.4 マクロ&マイクロプラスチックの海洋での挙動

これまでの内容を集約し、マクロ&マイクロプラスチックの海洋、海岸での挙動を図 20 にまとめた。

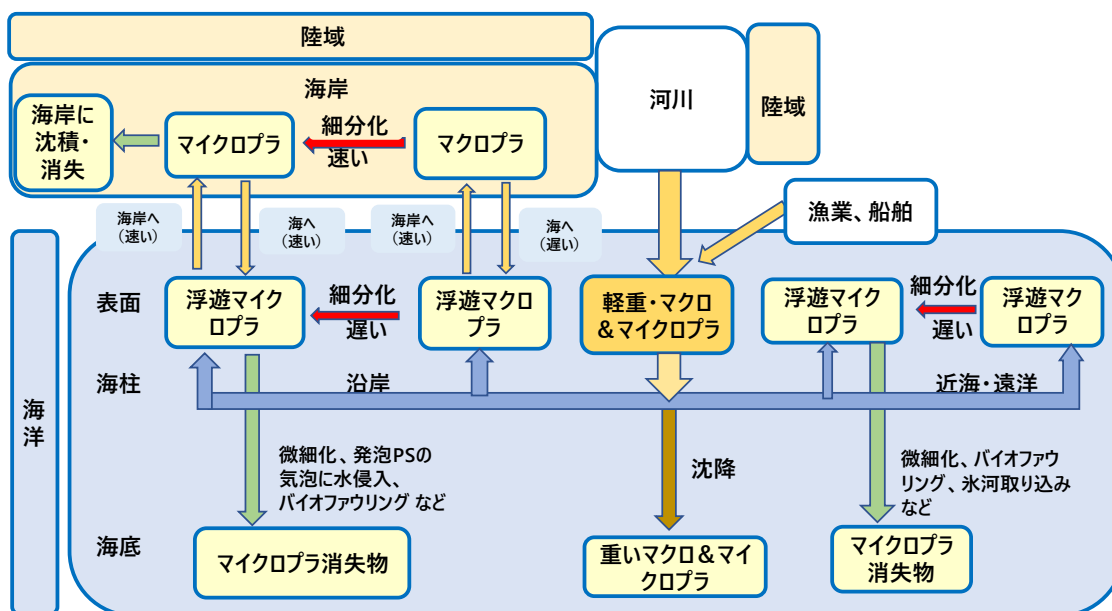


図 20 海洋プラスチック(マクロ&マイクロプラスチック)の海洋・海岸での挙動

出所：参考文献・脚注引用文献を参考に旭リサーチセンター作成。

ポイントとしては、

- ①陸域のマクロ&マイクロプラスチックは河川を通して海洋に廃棄される。船舶・漁業関係のマクロ&マイクロプラスチックは直接海洋に廃棄される。また海岸に直接廃棄されるものもある。陸域由来のものが 80%で、直接海洋投棄が 20%といわれる。また、廃棄プラスチックには軽いプラスチックと重いプラスチックの両方が含まれている。
- ②海洋に廃棄されたもののうち、軽いプラスチックは浮遊し、海流やストークスドリフト（風波による体積輸送）で、海岸に漂着するか、近海や遠洋に漂流する。一方、重いプラスチックは海底に沈降する。発泡 PS は、海中で浮くが細片化して気泡に水が入れば沈む。
- ③近海の浮遊マクロプラスチックは海岸に漂着しやすく、再度海に戻る速度は大変遅い（海岸での平均滞留時間 209 日：P.27 参照）。浮遊マイクロプラスチックは海岸に漂着しやすく、また少し遅いが海に戻る。マイクロプラスチックが海に戻る速度は、マクロプラスチックが海に戻る速度に比べはるかに速い。
- ④海岸は紫外線が強く、温度が高いため、光酸化で細分化しやすい。海岸のマクロプラスチックは細分化して、マイクロプラスチックを新たに生成する。そのマイクロプラスチックの一部は海岸でさらに微細化して 350  $\mu\text{m}$  以下の微粒子となる。海洋中でも光酸化と細分化は起こるが、温度が低く、また紫外線が水やバイオフィルム（バイオフィルム）で遮られるのでその速度は遅い。
- ⑤浮遊マイクロプラスチックは、微粒子化、バイオ関係の関わり合い、垂直混合などの消失ルート（表 7 参照）で沈降する。粒径の小さいものほど沈降しやすい。
- ⑥海岸のマイクロプラスチックの一部は海岸に沈積する。

#### 4.5 世界の海洋プラスチック量のシミュレーション

世界の海洋・海岸のマクロ&マイクロプラスチック密度（濃度）に関する限られた測定データを基に、最新のモデリングとシミュレーションにより、世界のマクロ&マイクロプラスチックの存在量（分布）が推定されている。代表的なものは、Eriksen ら（2014）<sup>41</sup>、

---

<sup>41</sup> 表 4 参照



eunomia (2016)、Lebreton ら (2019)<sup>42</sup>、Isobe (磯辺) ら (2022)<sup>43</sup>の研究である。このうちの著名な eunomia (2016) と最新の磯辺ら (2022) の研究を紹介する。磯辺ら (2022) のシミュレーションはマイクロプラスチックの消失 (除去) を織り込んだ世界初の画期的な成果である。

### (1) eunomia (2016) の発表

eunomia の「Plastics in the Marine Environment<sup>44</sup>」のシミュレーションでは、

- ①2014 年の年間のプラスチックの海洋投入量は 1,220 万トンと推定。内訳は、a. 沿岸部から海洋に廃棄 900 万トン、b. 内陸部から海洋に廃棄 50 万トン、c. 一次マイクロプラスチック (タイヤ摩耗粒子、ペレットの流出、衣類洗濯時のファイバー、塗料劣化粒子、化粧品用マイクロビーズ) 廃棄 95 万トン、d. 漁業による海洋への廃棄 115 万トン、e. 船舶からの海洋への廃棄 60 万トンである。
- ②シミュレーションにより、2014 年における海洋周辺のプラスチック存在量合計は 2,700-6,670 万トンと推定。内訳は、a. 海洋浮遊 27 万トン、b. 海岸 140 万トン、c. 海岸砂に埋没 6 万トン、d. 海底 2,530~6,500 万トン。海底の測定データが十分でなく、バラツキが大きいので幅が広いが、圧倒的に海底に存在するという推定である。推定根拠と推定結果を表 8 に示す。

### (2) 九州大学 磯辺篤彦教授らの論文発表

2022 年 3 月 2 日に九州大学から次のようなプレスリリースがあった<sup>45</sup>。

発表の抜粋：「環境中に漏れた全世界のプラスチックごみ約 60 年分の行方を解析：5% 程度が海に流出し 95% 程度 (約 5 億トン) は陸上で行方不明に」 このたび、九州大学応用力学研究所の磯辺篤彦教授と、(国研) 土木研究所寒地土木研究所の岩崎慎介研究員は、漂流・漂着するプラスチックごみやマイクロプラスチック (プラスチックごみが破碎して

<sup>42</sup> Lebreton (The Ocean Cleanup Foundation, Rotterdam, The Netherlands)ら A global mass budget for positively buoyant macroplastic debris in the ocean Scientific Reports 9:12922(2019)  
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-49413-5>

<sup>43</sup> 【論文情報】掲載誌: Science of the Total Environment タイトル: The fate of missing ocean plastics: Are they just a marine environmental problem? 著者名: Atsuhiko Isobe, Shinsuke Iwasaki  
DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153935: 出所 九州大学プレスリリース  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969722010270>

<sup>44</sup> 脚注 18 と同じ。eunomia Plastics in the Marine Environment 1st June 2016

<https://safety4sea.com/wp-content/uploads/2016/06/Eunomia-Plastics-in-the-Marine-Environment-2016.06.pdf>

<sup>45</sup> 九州大学プレスリリース [https://www.kyushu-u.ac.jp/f/47079/22\\_03\\_02\\_01.pdf](https://www.kyushu-u.ac.jp/f/47079/22_03_02_01.pdf)



できた微細片)の動きを、全世界の海で再現するコンピュータ・シミュレーションを開発しました。シミュレーションを利用することで、世界の海岸に漂着したプラスチックごみ量や、海面近くの漂流マイクロプラスチックの量の再現に成功しました。そして、このシミュレーションを用いて、1960年代から現在までの約60年間に、川から海に流れ出たプラスチックごみや、海洋投棄されたプラスチックごみの行方を解析しました(赤字は筆者)。

シミュレーション結果を表8に示す。

表8 eunomia(2016)と磯辺ら(2022)のシミュレーション結果

eunomia (2016年発表)				磯辺ら (2022年発表)				
プラスチックの存在場所	プラスチックごみ濃度 (文献値)	海洋の長さや広さ	プラスチックごみの推定量	プラスチックごみの存在場所	種類	プラスチックごみの推定量		
単位			万トン			万トン	%	%
海洋浮遊	0.74kg/km <sup>2</sup>	361mkm <sup>2</sup>	27	海洋浮遊	マクロプラスチック	70	2.8	
					マイクロプラスチック	80	3.1	
海岸	1.013kg/km	1.4mkm	140	海岸	マクロプラスチック	590	23.4	
海岸の砂に埋没	110kg/km	0.52mkm	5.7		マイクロプラスチック	100	3.9	
				海洋浮遊・海岸系から除去されたマイクロプラスチック		750	29.8	
海底	70-180kg/km <sup>2</sup>	361mkm <sup>2</sup>	2,530~6,500	海底	重いプラスチック	930	36.9	
海洋関係合計			2,700~6,670	海洋関係合計		2,530	100	4.7
				陸域		51,690		95.3
合計			2,700-6,670	合計		54,220		100
シミュレーションした年			2014年	シミュレーション期間		1961~2017年 (56年間の蓄積)		

出所: eunomiaのPlastics in the Marine Environment (脚注44)、  
Isobeら Science of The Total Environment Volume 825, 15 June 2022, 153935 (脚注43)。

表8の概要は以下の通りである。

- ①不適切に処理されたプラスチックの54,220万トンのうち、海洋に排出されたのは4.7%の2,530万トンに過ぎず、残り95.3%は陸域にある。
- ②海洋プラスチックのうち、目に見えるもので最も多いものは海岸のマクロプラスチックの23.4%であり、海岸のマイクロプラスチック(3.9%)、海洋のマクロプラスチック(2.8%)、海洋のマイクロプラスチック(3.1%)は少ない。目に見え

ない海洋プラスチックは除去（消失：29.8%）と重いプラスチック（36.9%）を合わせて、66.7%を占める。

③eunomia のシミュレーションと比較すると、海洋浮遊のプラスチックや海岸のプラスチックの量が多く、汚染が進んでいることが示唆される。

なお詳細は、このプレスリリース（脚注 45）に記載されている「研究の背景と経緯」および「研究の内容と成果」と、発表論文（脚注 43）を参照されたい。

#### 4.6 生態系や人間の健康への影響に関する調査研究

多くの文献が発表されているが、この分野の専門家でないので重要性やどの程度問題があるかどうかを判断することができない。

話題になっているものを以下、3点挙げた。

①粒径が 20  $\mu\text{m}$  以下のマイクロプラスチック（ナノプラスチックなど）は、海洋生物の細胞膜を通過するので安全性が懸念され、試験が精力的に進められている<sup>46</sup>。

②プラスチック中の添加剤の安全性が懸念されている。マイクロプラスチックは水中（海水中）で添加剤が放出されやすい。特に問題視されているのは、PBDE（難燃剤）などの POPs を含むプラスチックである（PBDE は既に使用禁止になっているが過去のものがある）。関心のある添加剤として、重いプラスチックの PVC やポリウレタンの可塑剤・安定剤や、タイヤ摩耗粒子中の加硫促進剤のベンゾチアゾールがリストアップされている。

プラスチックメーカーは添加剤の安全性についてさらなる注意が必要と痛感した。

③海洋中の（マイクロ）プラスチック片の表面に有毒物（pathogen）を産生する生物群が発生することが懸念されている<sup>47</sup>。

なお、マイクロプラスチックの健康影響に関する各国・国際機関の見解（環境省のまとめ）は、冒頭の P.4 に記した。

---

<sup>46</sup> 相変わらず合成された市販のバージンのマイクロビーズ（分子量が高い、カルボニル基を含まない）を使った安全性試験が多いという。フィールドの二次的マイクロプラスチックを使用した安全性試験をもっと進めるべきとの指摘あり。

<sup>47</sup> 参考文献 5、p.109

## おわりに

筆者の最大の関心事であるマクロプラスチックの生成と行方については、この 4、5 年間でどれくらい明らかになっただろうか。生成機構については、PE の光酸化反応のモデル実験の基礎データを基に、フィールドサンプルの解析が定量的に進められており、結果が期待される（続編で詳細紹介の予定）。また、通常のマクロプラスチック（350  $\mu\text{m}$ ～5 mm）に力が加わって微粒子化し、ニューストンネットでは捕捉されない 350  $\mu\text{m}$  以下の微細粒子が海水中に個数的に大量に存在することが明らかになった。そして、マクロプラスチックの消失についてもいくつかのルート（海洋生物との関わり合いや物理的な海洋の垂直混合など）があることが実証された。ただし、どのルートがどれくらい支配的かはまだわかっていない。完全な解明にはまだ時間を要するだろう。一方、海水中におけるポリオレフィンの微生物による分解に関する実験データが発表されており、今後の解明が期待される。

使用時に発生するタイヤと道路塗装の混合摩耗は量が多いだけに、継続的な調査や安全性評価が必要であろう。一方、欧米のマикроファイバーについては、洗濯機のフィルター取り付け義務化と、排水処理場の汚泥の肥料としての農地散布を規制することにより、大幅に減るであろう。

中国の廃プラ輸入禁止とバーゼル条約改定により、欧米日の発展途上国への廃プラ輸出は半減した。これは画期的なことであり、発展途上国の廃プラ海洋排出量の削減につながったものと考えられる。発展途上国への廃プラ輸出は全廃すべきである。

また UNEP は海洋問題をはじめから取り組んできており、問題解決のための法的拘束力のある国際的合意が必要と長年主張してきたが、今回ようやく実現した。2024 年に決定する合意内容が注目される。ただし、UNEP のプレスリリースでは、プラスチック循環経済の方が前面に出て、海洋プラスチック問題解決の具体策にあまり触れていないのが気にかかる。海洋プラスチック問題が後回しにならないようにしてほしいものである。

前述のように、続編（シリーズ マクロプラスチック (5)）を発行する計画である。旭化成（株）基盤技術研究所の大久保氏らに寄稿をお願いしており、ポリエチレンマイクロプラスチックの解析についての最新の研究成果を紹介いただく予定である。

## 参考文献

1. ARC リポート 府川伊三郎
  - ① 海洋プラスチックごみとマイクロプラスチック (上) 2017. 11  
[https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc\\_report/pdf/rs-1019.pdf](https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1019.pdf)
  - ② マイクロプラスチック 海洋プラスチックごみとマイクロプラスチック(下) 2017. 12  
[https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc\\_report/pdf/rs-1020.pdf](https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1020.pdf)
  - ③ 浮遊する PE・PP マイクロプラスチックの生成と行方 2018. 7  
[https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc\\_report/pdf/rs-1026.pdf](https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1026.pdf)
2. 環境省 Plastics Smart
3. Hale ら A Global Perspective on Microplastics 2020  
Journal of Geophysical Research: Oceans Volume 125, Issue 1 e2018JC014719  
<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2018JC014719>
4. Sebille ら The physical oceanography of the transport of floating marine debris 2020 Environ. Res. Lett. 15 (2020) 023003  
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab6d7d>
5. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2022. Reckoning with the U.S. Role in Global Ocean Plastic Waste.  
<https://nap.nationalacademies.org/catalog/26132/reckoning-with-the-us-role-in-global-ocean-plastic-waste>
6. Kane IA and Clare MA 2019 Dispersion, accumulation, and the ultimate fate of microplastics in deep-marine environments: a review and future directions Front. Earth Sci. 7 80  
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2019.00080/full>
7. 府川伊三郎、井出陽一郎 「マイクロプラスチックとプラスチックリサイクル」  
高分子学会 高分子 70 巻 1 月号 p.16-19 (2021)

<本レポートのキーワード>

マイクロプラスチック、海洋プラスチックごみ、廃プラの輸出、UNEP、UNEA、タイヤ摩耗、使用時に発生するマイクロプラスチック、マイクロプラスチックの消失

(注) 本レポートは、ARCのWEBサイト (<https://arc.asahi-kasei.co.jp>) から検索できます。

このレポートの担当

シニアリサーチャー 府川 伊三郎

E-mail [fukawa.ig@om.asahi-kasei.co.jp](mailto:fukawa.ig@om.asahi-kasei.co.jp)

<https://arc.asahi-kasei.co.jp/contact/>