

食品の安全・品質に関する技術講座 第110回

食品の包装技術と環境汚染(2)

プラスチックごみと人の健康

Plastic Debris and Human Health

キーワード：マイクロプラスチック，ナノプラスチック，添加剤，食物連鎖，生物増幅，生態毒性，炭素収支，氷晶核，血液脳関門
 Microplastic, Nanoplastic, Additives, Food chain, Biomagnification, Ecotoxicity, Carbon budget, Ice nucleus, Blood-brain barrier

広海 十朗 Juro HIROMI 陶 慧 Kei TAO

1. はじめに

筆者の一人の広海は、海洋環境科学を専攻する立場から、海洋に流出するプラスチックごみのもたらす海洋生態系への脅威に主たる関心を寄せてきた。しかしながら、プラスチックごみが一方的に海へと流出するだけではなく、シーフード食を通じて人へと還流し、遂には人の健康に脅威となる可能性も見えてきた。さらには、大気中に存在するプラスチックが直接的または間接的に人の健康を脅かす可能性も指摘されるようになるなど、プラスチックごみ問題は想像以上に深刻である。本講座では、プラスチックごみの持つ危険性について、まず海洋生態系へのインパクトという視点から概述し、次いで人の健康への脅威、さらには気象異変の要因を示唆する最近の知見を紹介し、最後にプラスチックごみを削減するための提言を述べる。

プラスチック問題は、第一義的には海洋環境の問題であった。2010年に世界で生産されたプラスチックの総量は2億7000万トンで、そのうち、海に流出したプラスチックは480万～1270万トン（中央値875万トン）と推定されている。すなわち、海に漏れ出る率は1.8～4.7%（中央値3%）である。これに基づき、Jambeck et al.¹⁾はインフラ構造に適正な改良がなされず今後も陸から海に流入し続ければ、海に蓄積する累積量は2025年までに今の10倍にもなる、と警告した。また、1950年代から2015年までに生産された累積プラスチックは83億トンで、2050年までに累計で330億トンの生産が見込まれる。これに漏れ出る率3%をかけると10億トンのプラスチックが海に蓄積するものと推定される。この量は世界の海の魚類の全生物量の8億トンを超える²⁾。

本稿では、プラスチックごみ問題について人の健康との関わりに主眼を置くものではあるが、先

ずは海におけるプラスチックの挙動についてプラスチックの基本に関わる知識を含めて解説する。

2. 海に流入したプラスチックの挙動

図1は海の生態系におけるプラスチックの挙動を模式的に示すものである（山下ほか³⁾）。プラスチックはそのサイズにより、マクロプラスチック macroplastic（数cm～数十m）、マイクロプラスチック microplastic（5mm以下、以下MPと表記）、さらに小さなものをナノプラスチック nanoplastic（1μm以下、EUでは0.1μmすなわち100nm以下という定義。以下NPと表記）のように分類される。MPは一次MPと二次MPに分類され、前者は元々が微小なマイクロサイズであり、たとえばパーソナルケア商品（スクラブ洗顔、マイクロビーズなど）のスクラブ粒、これは5.で後述するように下水処理場を経由していずれは海に流出する。ほかにも、化学繊維の衣類の繊維くず（マイクロファイバー）、これは大気中に浮遊し、または洗濯の排水から下水処理場を経て海に流出するものもある。車両タイヤからの粉塵なども含

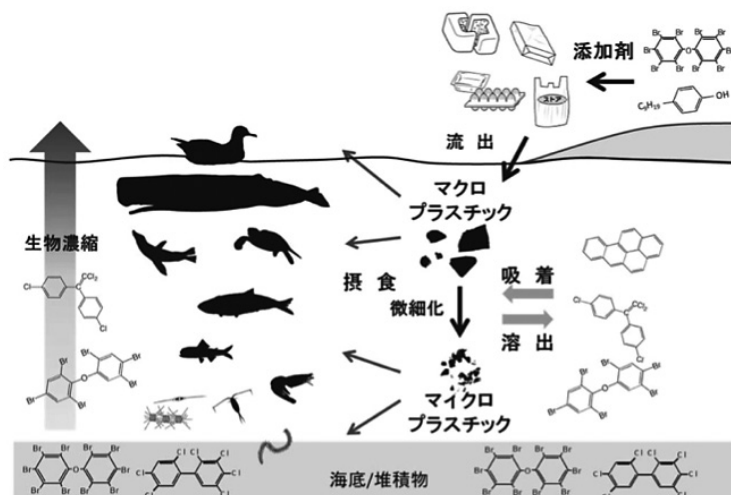


図1 海洋生態系におけるプラスチックの挙動（山下ほか³⁾）

まれ、大気中に浮遊したまま移動するものや、雨とともに海や陸に降下するものもある。二次MPはマクロサイズのプラスチック製品が劣化・破碎し、微細化したものである。改めて図1を見ると、まず、通常はマクロプラスチックが海に流出され（これに加えてレジンペレットという加工・成型前のプラスチックの原料となるものが、直径数mmの粒の状態で流出する場合もある）、波浪や紫外線などにより破碎、微細化、すなわちMP、そしてNPへと変化し、これらは摂食を経て海洋動物に体内に入る。またあるものは、海底へと沈降し堆積物の一部になり、そこに生息する底生動物に摂食される。プラスチックを摂食した動物は内臓損傷、炎症反応、摂食障害を招き、腸閉塞あるいは窒息死に至る可能性がある。とりわけNPは危険である。淡水の魚類（ヨーロッパナ）の実験報告であるが紹介する。Mattsson et al.⁴⁾は実験的にヨーロッパナにNP（粒径が40nmのポリスチレン粒子）を暴露した結果、実験魚の腸、精巣、肝臓からポリスチレン粒子が検出された。さらに、NPは血液－脳関門を通り抜け、脳に蓄積したことを確認した。6.で後述するように100nm未満のプラスチックは生物のすべての器官に吸収される。

水揚げされた魚介類はシーフードとして人の口に入る。Tanaka and Takada⁵⁾は東京湾で採集されたカタクチイワシ64個体の約8割の消化管から合計150粒（1尾当たり平均2.3粒）のMP（約8割が0.1～1mm）を見つけた。魚類をはじめとする多くの食用海産物（たとえば、貝類、カニ、エビ、海藻など）中から検出されたMPについては実に多くの報告例があり、数量や形状などについてはWHO⁶⁾に詳しい。Danopoulos et al.⁷⁾は、2017年の一人当たりのシーフードの年間消費量は20.39kg（内訳は魚類が15.21kg、貝類が2.65kg、甲殻類が2.06kg、頭足類が0.47kg）というFAO⁶⁾に基づき、シーフードを消費することで一人当たり年間で最大53864粒のMPを取り込むと試算した。摂取による人体への影響は未解明だが、安全だという証拠もない。予防原則に基づき食品からの摂取量を減らす対策が必要だ。以上のとおり、シーフードは人の体にプラスチックの入るルートの一つであるが、まだほかにもある。これについては6.で後述する。

3. プラスチックの主要な添加剤と毒性

表1に示すとおり、プラスチックには様々な添加剤が使用されている。ノニルフェノール（NP）は酸化防止剤としての用途のほかにも腐食防止剤、また界面活性剤として工業用の洗浄剤にも広く使われている。内分泌攪乱作用が知られ、2012年には我が国の環境基準法に基づく水質汚濁に係る生活環境の保全の基準の項目として新たに加えられた。その基準値は海域の例を示すと、水域類型により異なり0.7μg/L以下、あるいは1μg/L以下である。ビスフェノールA（BPA）はポリカーボネートの原料、またポリ塩化ビニル（いわゆる塩ビ）の可塑剤としても利用される。内分泌攪乱作用が知られ、日本の食品衛生法ではプラスチック製品からの溶出試験規格を2.5μg/ml（＝2.5ppm）以下としている。アミン系の酸化防止剤のうち、6PPDは老化防止剤としてゴムタイヤに添加されるが、走行中に摩耗した粉塵は環境中で変性し6PPDキノンとなり、ギンザケに対する急性毒性が知られる（たとえば、Tian et al.⁸⁾）。紫外線吸収剤のベンゾトリアゾール類やベンゾフェノン類も内分泌攪乱作用や生殖毒性を持つ。フタル酸系のDEHP（フタル酸ジエチルヘキシル）やDINP（フタル酸ジイソノニル）は可塑剤の代表的なものであるが、主にポリ塩化ビニル（PVC）のなどのプラスチックを柔らかくするために使用される。これらもまた、発がん性、生殖毒性、内分泌攪乱作用が知られる。ポリ臭化ジフェニルエーテル（PBDE）は、動物や人に対して毒性（発がん性、内分泌攪乱作用、神経毒など）を持つものも知られている。

プラスチックから溶出（滲出）した添加剤は、水溶性ではなく脂溶性なので生体内に蓄積する可能性がある。こうして食物連鎖の過程に入り込むことで生物濃縮（biomagnification 生物増幅ともいう）し、栄養段階の高い動物の体内では元の濃度よりもはるかに高濃度になることもありうる。もう一つの化学的な脅威は、プラスチックは疎水性が高く（親油性）、油とくっつきやすいので、水中に存在する様々な汚染物質（たとえば、PCB、DDTなどの残留性有機汚染物質（POPs）や、ベンゾピレンなどの多環芳香族炭化水素（PAHs））がプラスチックに吸着しやすいことである。これらの物質は発がん性

表1 プラスチックの主要な添加剤

酸化防止剤	フェノール系 アミン系	ノニルフェノール（NP）、ビスフェノールA（BPA）、ジブチルヒドロキシトルエン（BHT）など 6PPD（N-（1,3-ジメチルブチル-N'-フェニル-1,4-フェニレンジアミン）
紫外線吸収剤	ベンゾトリアゾール系、ベンゾフェノン系	ベンゾフェノン、2-ハイドロオキシベンゾフェノン
可塑剤	フタル酸系	フタル酸エステル類（DEHP、DINPなど）
難燃剤	臭素系	ポリ臭化ジフェニルエーテル（PBDEs）
透明化剤	リン酸エステル金属塩系、ソルビトール系	ジベンゾグリデンソルビトール、ジ-アリキル-ベンジリデンソルビトール
帯電防止剤	グリセリン、脂肪酸、エステル類、界面活性剤、カーボンブラック	

が知られる。プラスチック由来の化学物質の生物組織への移行は摂食実験や飼育実験により証明されている（たとえば Teuten et al.⁹⁾, Tanaka et al.¹⁰⁾）。化学物質とアレルギーとの関係も確認されている。たとえば、ダニアレルゲンをあらかじめ接種したマウスに DEHP を投与すると、アトピー性皮膚炎を増悪させることが報じられている¹¹⁾。

4. 海洋生態系の機能に対する潜在的脅威

人間の生存は食料や水、気候の安定など生態系から無償で与えられる様々な恵みにより支えられている。2001年から2005年にかけて行われたミレニアム生態系評価(MA)ではこの恵みを生態系サービスと呼んだ。生態系サービスは供給サービス、調整サービス、文化的サービス、そして以上の3つのサービスを根底から支える基盤サービスの4つに分類される。これらの中で調整サービスは、生態系が持つ機能の一つである物質循環機能のなせる“技”である。図2に2020年代における地球の炭素循環の模式図を示す¹²⁾。化石燃料の燃焼や森林破壊と土地利用によって、炭素重量に換算して年間に約109億トンが大気中に放出される。そのうち、51億トンが大気中に残留し、34億トンが森林に、25億トンが海洋に吸収される。炭素（二酸化炭素）が海洋に吸収されるには、溶解ポンプ、生物ポンプ、そしてアルカリ度ポンプというメカニズムが働く。生物ポンプとは文字どおり生物が主役となるポンプである。これを簡単に言うと、植物プランクトンは二酸化炭素を吸収し光合成によって有機態の炭素を合成するが、この後、中・深層に沈降することなく表層で枯死・分解するなら、再び二酸化炭素として海水に戻るだけのことになるので中・深層へと運ばなければ

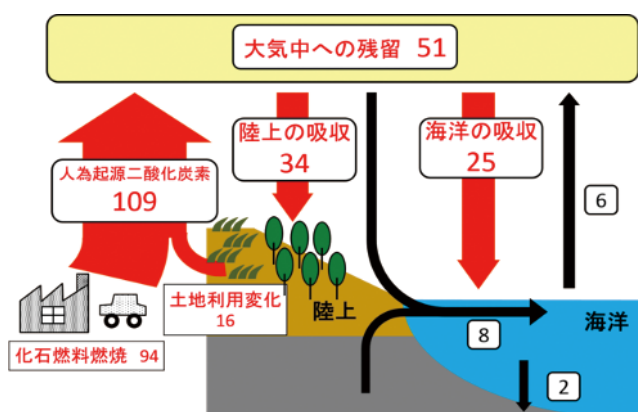


図2 人為起源炭素収支（2020年代）の模式図

IPCC (2021)をもとに気象庁が作成。各数値は炭素重量（トン）に換算したもので、もっとも細い矢印およびその数値は産業革命前の状態を、より太い3つの矢印およびその数値は産業活動に伴い変化した量を表す。2010～2019年の平均値（億トン炭素）を1年あたりの値で表す（気象庁HP¹²⁾）。

ならない。「運び役」は動物プランクトンが植物プランクトンを摂食して排泄される糞粒（faecal pellets）である。つまり、糞粒は生物ポンプの一部として海洋における有機物の中・深層への鉛直フラックスの増加に寄与するのである。Cole et al.¹³⁾はMPの存在が生物ポンプに与える影響を知る目的で室内実験を行った。粒径が20.6 μmのポリスチレンMP（1000個/mL）と天然の餌（単細胞藻：～1650細胞/mL）の中で、代表的な動物プランクトンであるカイアシ類 *Calanus helgolandicus* の飼育をしたところ、その糞粒の排泄量は有意に減少し（ $p < 0.001$ ）、沈降速度は2.25倍も遅くなり、また糞粒はバラバラになりやすくなった。つまり、MPは動物プランクトンによる植物プランクトンの摂取量を減らし、また糞粒の性質や沈降速度を変える働きがあり、その結果、海洋の炭素の吸収能を減退させる潜在性を帯びている。

5. プラスチックの陸圏・気圏における挙動と人体への侵入ルート

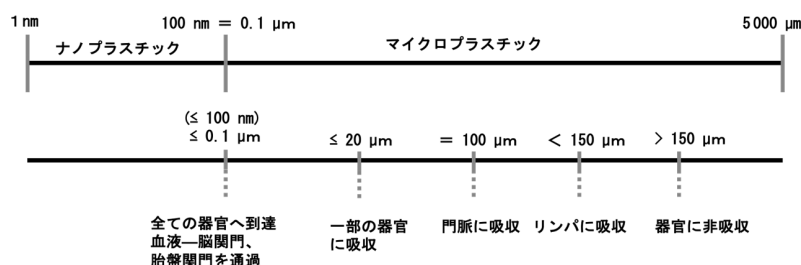
近年になってMPやNPは、海洋へ一方的に流入する以外に、海洋から大気へと還流することや海洋—大気間で循環することの重要性も注目されている（たとえば、Allen et al.¹⁴⁾）。この理由は以下のとおりである。すなわち、大気中に浮遊するMPやNPはエアロゾルとともに検出されており¹⁵⁾、これらのプラスチックの存在は雲を形成する氷晶核となることから、将来的に人為的気候変動をもたらすかもしれない¹⁶⁾。また、大気中のこれらのプラスチックは、強い紫外線によって劣化が進むことでメタンやエタンなどのガスを発生することが確認されている¹⁷⁾。ことから、大気中のMPやNPは温室効果を促進するという可能性もある。

人間の住む陸圏におけるプラスチックごみの発生と移動について述べる（表2）。化学繊維衣類の洗濯によって、プラスチックごみ（マイクロファイバー）は下水処理場を通して河川そして最終的には海へと至る。一方、物干し乾燥中の衣類から出る繊維くずや走行する車両のタイヤの摩耗粉塵は、直接大気や水圏へと移動する。また、洗い流しのスクラブ粒子は、使用後に下水処理場を経て、河川そして最終的には海へと至る。これ以外にも発生源として農耕地やごみ処理場などがある。

以上のプラスチックごみは、以下のようなルートを通じて人体へと移動するものと考えられる。すなわち、大気中のプラスチックごみは人の呼吸により肺に侵入し、河川水や海水のプラスチックごみは水道水、ミネラル水、牛乳、ジュースなどの飲み物、塩、砂糖、ハチミツ、ビールなどの製造過程で混入し、やがては人体（消化管）へ、またパーソナルケア商品の洗顔クリームやスキンクリームなどのマイクロビーズのように皮膚から体

表2 陸上におけるプラスチックごみの発生ならびに移動先

プラスチックごみの発生源	中間経路	移動先
化学繊維衣類の洗濯排水	下水処理場	河川水、海水
化学繊維衣類の物干し乾燥中の繊維くず	—	大気、水圏
パーソナルケア商品（洗い流しのスクラブ製品）	下水処理場	河川水、海水
走行中の車両タイヤからの摩擦粉塵	—	大気、水圏

図3 哺乳類の体内におけるナノ、マイクロプラスチックの運命 (Lusher et al.²¹⁾)

内へ移動するものもあると思われる。いったいどれほどのMPが存在するのであろうか？

化学繊維の衣類（フリース）の洗濯後の排水中から、最大2gのマイクロファイバーが出たという報告¹⁸⁾がある。ただし、これは化繊衣類の素材（ポリマーの違い）や撚り方、着古しの状態などの条件によっても異なるであろう。Shalumon and Ratanatamskul¹⁹⁾はスクラブ洗顔料内のMPを調べ、ポリエチレン粒子が多く、その粒径は素材により異なるが242～902μmの範囲にあることを明らかにした。皮膚の角質層は1μm以上の粒子は通過させない²⁰⁾ので直接体内に入ることはないであろう。しかし、これらのスクラブ粒子は最終的に海に流出し、そこで物理的に破碎されて微細なNPへと変化することになるので、スクラブ製品の生産・利用は避けなければならない。

空気中のMPについては、WHO⁶⁾の報告より屋外の例を紹介すると、少ないものでは平均0.41 MPs/m³（サイズの範囲は12.35～2191μm）、多い方の例では平均282 MPs/m³（サイズ5～30μm）であった。比較的大きなサイズも認められるが、注意しなければならないことは環境中で物理的な変性を経てMPがNPへとさらに小型化することである。飲料水については、WHO⁶⁾にまとめられているように多くの既往値がある。水道水では多い方で1247 MPs/L（サイズの範囲は数μm～数百μm）、ミネラルウォーターにおいては報告例は実に様々で平均的なものは見いだせないが、最大で5.4×10⁷ MPs/Lという値が見られる。ここで、飲料水中のプラスチックの粒径と存在する数量の間には負の相関関係が認められ、サイズが1～5μmのものは数が100～10000粒の範囲にある。食品類についてもWHO⁶⁾に既往値が数多くまとめられている。やはり出現数やサイズの範囲はきわめて広いが、いく

つかの例を挙げれば以下のとおりである。ビールからは4～21 MPs/L（サイズ0.1～5mm）、牛乳では6.5～2040 MPs/L（5～7μm）、塩では2～550 MPs/kg（3～3.5μm）であった。

MPまたはNPが人体に侵入したとして、プラスチックの粒径と器官への侵入の可否について見てみる。図3は哺乳類の体内におけるMPやNPの運命をまとめたものである²¹⁾。150μm（0.15mm）以上のMPは器官に吸収されないと考えられているが、それ以下のサイズのMPは腹腔からリンパへ、そしてリンパ節で合流しながら最終的に鎖骨の下で1本の太いリンパ管に合流し静脈に、さらに循環器系へと移動するものと推定される。20μm程度のMPは一部の器官を通り抜け、もっとも小さな0.1μm未満のものはすべての器官に達し、細胞膜を通過して血液—脳関門や胎盤をも通過できるものと考えられる。

6. 人の体内から発見されたプラスチックと健康被害

Wright and Kelly²²⁾は図3を受けて、NPは肝臓や筋肉そして脳にも現れる可能性があることを指摘したが、2020年に入るとさらに人の血液から²³⁾、母乳から²⁴⁾、そして肺から²⁵⁾もプラスチックが検出されるようになった。また、最近では心臓から²⁶⁾、胎盤²⁷⁾から、さらには精巣、精子から²⁸⁾の報告例も見られる。以下に基本的な検出情報を述べる。

血液からポリエチレンテレフタレート（PET）、ポリエチレン、ポリスチレンなどが検出され、それぞれの検出濃度の最大は2.4μg/mL、7.1μg/mL、そして4.8μg/mLであった。なお、サイズについては記載がない。母乳においてもっとも多かったポリマーはポリエチレン、ポリ塩化ビニル、ポリプロピレンで、サイズは2～12μmの範囲にあった。数量に関する記載はない。肺については、13の試料中11試料から合計39のMPが検出され、全部で12種類のポリマーが認められたが、もっとも多かったのはポリプロピレンであった。検出された数は平均で1.42±1.50 MPs/g、平均的なサイズは長さが223.10±436.16μm（12～2475μm）、幅は22.32μm（4～88μm）であった。心臓からはPETならびにポリウレタン（PU）が多く検出され、その割合はそれぞれ77%、12%であった。検出された数は試料により異なったが、心臓からはPETが最多で74116 MPs/g検出された。なお、サイズは20～469μmの範囲にあった（20μm未満は検出限界）。胎盤から検出されたプラスチックの多くはポリ塩化ビニル（43.27%）、ポリプロピレン（14.55%）で、検出数の平均値は2.70±2.65 MPs/g（範囲は0.28～9.55 MPs/g）、サ

イズは20.34~307.29 μm の範囲にあったが、多くは100 μm 以下であった。精巣からは平均で 11.60 ± 15.52 MPs/mL、精子では平均で 0.23 ± 0.45 MPs/mL 検出された。両者を通じてポリスチレンが多く(67.7%)、そのサイズは20~100 μm の範囲にあった。ただし、心臓や胎盤のそれぞれから検出されたサイズが469や307 μm のMPは循環器には入りきらないと思われる。

次の問題は、体内にあるプラスチックがもたらす健康被害についてである。この類の知見はまだ多くはない。ここでは人の肝臓、腎臓への健康被害に関する Goodman et al.²⁹⁾の報告を紹介する。ヒト胎児の腎由来の細胞株(HEK293)ならびにヒト肝がん由来細胞株(HepG2)に粒径1 μm のポリスチレンを最大濃度100 $\mu\text{g/mL}$ で暴露して、細胞の増殖、細胞の形、そして代謝の変化を調べた。結果として、細胞の生存能力を減少させることはなかったが、細胞の増殖は抑制され、また細胞は変形し、ポリスチレンの取り込みには有意な変化が生じた。さらには、肝臓と腎臓でROS(活性酸素種)のレベルが上がるのがわかった。ROSを無毒化するSOD2(スーパーオキシド抗酸化酵素)ならびにCAT(カタラーゼ)のポテンシャルを減らすことも裏付けた。

以下に記すのは人ではない、遺伝子改変マウス(C57BL/6)を用いた実験的な研究である。Li et al.³⁰⁾は、タイヤの摩耗粉塵(1 μm 未満のサイズで最多は100 nm)によって肺線維症が誘発されたことを報じている。機能的RNAの一つであるmiR-1a-3pが繊維状のアクチンフィラメントとなって細胞の骨格形成を抑制することも明らかとなった。Kopatz et al.³¹⁾は、ポリスチレンのNPならびにMPを6個体のマウスに経口投与した結果、粒径0.293 μm のものが2時間後にマウス脳内から検出されたと報じた。さらに彼らは、マウスにコンピュータモデリングを駆使した実験から、体内に取り込まれたMPや1 μm のNPが血液—脳関門を通過して脳に到達するためには、その表面に形成される生体分子コロナ(biomolecular coronas)と呼ばれる複合体が重要であり、コロナを構成するコレステロール分子がプラスチックの膜への取り込みを促進することを明らかにした。

7. お わ り に

以上のことから、プラスチックごみは海洋も含めた水圏、陸圏ならびに気圏のいたるところに存在し、現在、人を含むあらゆる生物の健康被害または生存そのものに対する脅威となっていることがわかった。このことが冒頭(はじめに)で、プラスチック問題は第一義的には海洋環境の問題であった、と書いた所以である。今後取り組むべき研究面での課題は、(1)プラスチックの添加剤の生態毒性や人の健康被害に関する知見を飛躍的に増や

すことである。とりわけ人に対しては、内分泌攪乱作用のみならず免疫系への影響をも明らかにしなければならない。また、(2)食物連鎖を通じた添加剤の生物増幅の実態と(3)最終的に人に対して濃縮された添加剤の暴露量、あるいは長期的に蓄積された量と、健康リスクとの関連性を解明することに焦点が当てられなければならない。

我が国は一人当たりのプラスチックごみの排出量が世界で2番目に多い。3R(リサイクル、リユース、リデュース)のうち最優先すべきはリデュースである。加えて、リフィル(詰め替え)も進めたい。さらにはプラスチックの生産の減量化、および使い捨てプラスチックの大幅な減量化に向けて代替品の利用を促進することも喫緊の課題である。国や産業界ならびに国民をあげての取り組みの加速が求められている今、施行から1年経過した我が国の「プラスチック資源循環促進法」は早急に見直される必要がある。その際には、少なくとも欧州委員会の「プラスチック指令」を指針とするべきである。たとえば、同指令にある(1)手軽な値段で容易に入手できるプラスチック製品の販売の禁止、(2)消費の削減を目標にした代替製品の利用、(3)生産者の義務としてプラスチック製品類の廃棄物の管理や清掃にかかる費用の一部を負担すること、(4)回収目標としてデポジット・リファンド制度の導入などである。

文 献

- 1) J. R. Jambeck, R. Geyer, C. Wilcox, T. R. Siegler, M. Perryman, A. Andrady, R. Narayan and K. L. Law : Science, **347**, 768-771 (2015).
- 2) R. W. Wilson, F. J. Millero, J. R. Taylor, P. J. Walsh, V. Christensen, S. Jennings and M. Grosell : Science, **323**, 359-362 (2009).
- 3) 山下麗, 田中厚資, 高田秀重 : 日本生態学会誌, **66**, 51-68 (2016).
- 4) K. Mattsson, E. V. Johnson, A. Malmendal, S. Linse, L. A. Hansson and T. Cedervall : Scientific Reports, **7**, 11452 (2017).
- 5) K. Tanaka and H. Takada : Scientific Reports, **6**, 34351 (2016).
- 6) WHO : who.int/publications/i/item/9789240054608 (2020).
- 7) E. Danopoulos, L. C. Jenner, M. Twiddy and J. M. Rotchell : Environ. Health Perspect., **128**, 126002, doi: 10.1289/EHP7171 (2020).
- 8) Z. Tian, H. Zhao, K. T. Peter, M. Gonzalez, J. Wetzel, C. Wu, X. Hu, J. Prat, E. Mudrock, R. Hettinger, A. E. Cortina, R. G. Biswas, F. V. C. Kock, R. Soong, A. Jenne, B. Du, F. Hou, H. He, R. Lundeen, A. Gilbreath, R. Sutton, N. L. Scholz, J. W. Davis, M. C. Dodd, A. Simpson, J. K. McIntyre and E. P. Kolodziej : Science,

- 371, 185-189 (2021).
- 9) E. L. Teuten, J. M. Saquing, D. R. U. Knappe, M. A. Barlaz, S. Jonsson, A. Björn, S. J. Rowland, R. C. Thompson, T. S. Galloway, R. Yamashita, D. Ochi, Y. Watanuki, C. Moore, P. H. Viet, T. S. Tana, M. Prudente, R. Boonyatumanond, M. P. Zakaria, K. Akkhavong, Y. Ogata, H. Hirai, S. Iwase, K. Mizukawa, Y. Hagino, A. Imamura, M. Saha and H. Takada : *Philos. Trans. R. Soc., B*, **364**, 2027-2045 (2009).
 - 10) K. Tanaka, Y. Watanuki, H. Takada, M. Ishizuka, R. Yamashita, M. Kazama, N. Hiki, F. Kashiwada, K. Mizukawa, H. Mizukawa, D. Hyrenbach, M. Hester, Y. Ikenaka and S. M. M. Nakayama : *Current Biology*, **30**, 723-728 (2020).
 - 11) H. Takano, R. Yanagisawa, K. Inoue, T. Ichinose, K. Sadakane and T. Yoshikawa : *Environ. Health Perspect.*, **114**, 1266-1269 (2006).
 - 12) 気象庁 HP, https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/mar_env/knowledge/global_co2_flux/carbon_cycle.html : (2023).
 - 13) M. Cole, P. K. Lindeque, E. Fileman, J. Clark, C. Lewis, C. Halsband and T. S. Galloway : *Environmental Science and Technology*, **50**, 3239-3246 (2016).
 - 14) D. Allen, S. Allen, S. Abbasi, A. Baker, M. Bergmann, J. Brahney, T. Butler, R. A. Duce, S. Eckhardt, N. Evangeliou, T. Jickells, M. Kanakidou, P. Kershaw, P. Laj, J. Levermore, D. Li, P. Liss, K. Liu, N. Mahowald, P. Masque and D. Materić, et al. : *Nature Rev. Earth Environ.* **3**, 393-405, <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00292-x> (2022).
 - 15) Y. Wang, H. Okochi, Y. Tani, H. Hayami, Y. Minami, N. Katsumi, M. Takeuchi, A. Sorimachi, Y. Fujii, M. Kajino, K. Adachi, Y. Ishihara, Y. Iwamoto and Y. Niida : *Environ. Chem. Lett.*, **21**, 3055-3062 (2023).
 - 16) M. Ganguly and P. A. Ariya : *ACS Earth Space Chem.*, **3**, 1729-1739 (2019).
 - 17) S. J. Royer, S. Ferrón, S. T. Wilson and D. M. Kari : *PLoS ONE*, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200574> (2018).
 - 18) N. L. Hartline, N. J. Bruce, S. N. Karba, E. O. Ruff, S. U. Sonar and P. A. Holden : *Environ. Sci. Technol.*, **50**, 11532-11538 (2016).
 - 19) C. S. Shalumon and C. Ratanatamskul : *Sci. Rep.*, **13**, 14168, <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41457-y> (2023).
 - 20) M. Schneider, F. Stracke, S. Hansen and U. F. Schaefer : *Dermato-Endocrinology*, **1**, 197-206 (2009).
 - 21) A. Lusher, P. Hollman and J. Mendoza-Hill : *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper.*, No. 615, Rome, Italy (2017).
 - 22) S. L. Wright and F. J. Kelly : *Environ. Sci. Technol.*, **51**, 6634-6647 (2017).
 - 23) H. A. Leslie, M. J. M. van Velzen, S. H. Brandsma, A. D. Vethaak, J. J. Garcia-Vallejo and M. H. Lamoree : *Environ. Int.*, **163**, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107199> (2022).
 - 24) A. Ragusa, V. Notarstefano, A. Svelato, A. Belloni, G. Gioacchini, C. Blondeel, E. Zucchelli, C. De Luca, S. D'Avino, A. Gulotta, O. Carnevali and E. Giorgini : *Polymers*, <https://doi.org/10.3390/polym14132700> (2022).
 - 25) L. C. Jenner, J. M. Rotchell, R. T. Bennett, M. Cowen, V. Tentzeris and L. R. Sadofsky : *Sci. Total Environ.*, **831**, 154907, <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154907> (2022).
 - 26) Y. Yang, E. Xie, Z. Du, Z. Peng, Z. Han, L. Li, R. Zhao, Y. Qin, M. Xue, F. Li, K. Hua and X. Yang : *Environ. Sci. Technol.*, **57**, 10911-10918 (2023).
 - 27) L. Zhu, J. Zhu, R. Zuo, Q. Xu, Y. Qian and L. An : *Sci. Total Environ.*, **856**, 159060, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.159060 (2023).
 - 28) Q. Zhao, L. Zhu, J. Weng, Z. Jin, Y. Cao, H. Jiang and Z. Zhang : *Sci. Total Environ.*, **877**, 162713, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.162713 (2023).
 - 29) K. E. Goodman, T. Hua and Q. X. A. Sang : *ACS Omega*, **7**, 34136-34153 (2022).
 - 30) Y. Li, T. Shi, X. Li, H. Sun, X. Xia, X. Ji, J. Zhang, M. Liu, Y. Lin, R. Zhang, Y. Zheng and J. Tang : *Environ. Int.*, **164**, 107257, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107257> (2022).
 - 31) V. Kopatz, K. Wen, T. Kovačs, A. S. Keimowitz, V. Pichler, J. Widder, A. D. Vethaak, O. Holločzki and L. Kenner : *Nanomaterials*, **13** (8), <https://doi.org/10.3390/nano13081404> (2023).



広海 十郎 Juro HIROMI

北海道大学水産学部水産増殖学科卒業
同大学大学院水産科学研究科中退
日本大学生物資源科学部前教授
博士（農学）

日本大学名誉教授
三洋テクノマリン(株)技術顧問



陶 慧 Kei TAO

日本大学大学院農学研究科食品工学専攻修士
課程修了
博士（生物資源科学）

日本大学生物資源科学部食品開発学科
Department of Food Science and
Technology, College of Bioresource
Sciences, Nihon University
准教授

原稿受理 2024年1月9日