

ENDOCRINE DISRUPTER NEWS LETTER

September 2024
Vol. 27 No.2

Japan Society of Endocrine Disrupter Research
日本内分泌攪乱物質学会(旧 環境ホルモン学会)

<http://www.jsedr.org/>

目次

巻頭言..... 1

INFORMATION.....10

研究最前線 2

第2号

巻頭言



東京農工大学
農学部
高田 秀重

プラスチックによる環境汚染の調査・研究は海岸漂着および海洋を漂流する比較的大きなプラスチックから始まったが、マイクロプラスチック(5mm以下のプラスチック)、さらにはナノプラスチック(1 μm未満の微細プラスチック)にまで対象が広がってきた。マイクロ/ナノプラスチックによる汚染は大気や堆積物に広がり、極域や深海底も含む地球全体に及んでいることが近年の研究から明らかにされてきた。海洋だけでなく、河川や土壌など陸域での研究も進められている。生物による摂食・取込も、クジラやウミガメなど大型海洋生物の消化管からのレジ袋等の廃棄された製品の検出だけでなく、劣化・微細化したプラスチックやレジンペレット・マイクロビーズ

の海鳥、魚、貝からの検出、さらに人の組織や血液中からもマイクロ/ナノプラスチックが検出され、プラスチック汚染は生態系の隅々まで広がっている。人への曝露という点では、そもそもプラスチックは製造直後から劣化が始まり、プラスチックの使用に伴い、人はマイクロ/ナノプラスチックに曝露される点とプラスチックが添加剤やモノマーも含む化学物質、その多くが内分泌攪乱化学物質の曝露源である点は忘れてはならない視点である。特に、プラスチックの微細に伴いポリマーマトリクスに保持されていた添加剤の生物利用性の増加は、これまでの添加剤規制では考慮されてこなかったプロセスである。今回の特集では様々な環境媒体中のプラスチックの分布を内分泌攪乱の視点を加えながら概観してみたい。

化学物質の運び屋としてのマイクロプラスチック

熊本大学大学院自然科学教育部

山原 慎之助

マイクロプラスチック（以降, MPs）による環境問題に社会的関心が高まっている。MPs中に高濃度で含有されるプラスチック添加剤（以降, 添加剤）は, 生体内の脂性成分中で効率的に溶出し, 生体組織中に蓄積されることが知られている¹⁾。添加剤には, 内分泌攪乱性や生殖毒性等が懸念されるフタル酸エステル系可塑剤やベンゾトリアゾール系紫外線吸収剤などが含まれ, その生体リスクが懸念されている。一方で, 実環境中でMPsと添加剤の双方をモニタリングし, その動態を調査した例は限られている。本稿ではオープンダンピングサイト（点源）と道路塵埃（面源）について, MPsと添加剤の環境動態を調査した研究事例について紹介する^{2,3)}。

オープンダンピングサイト周辺土壌中からは, 乾燥土壌1 kgあたり最大で約170,000個のMPsが検出された。また主要な添加剤としては, Di(2-ethylhexyl) phthalate (max.: 12,000 ng/g dw) 等のフタル酸エステル類やTris(2-chloroisopropyl) phosphate (max.: 1,700 ng/g dw) 等のリン酸エステル類が検出された。興味深いことに, 土壌中のこれら添加剤の総濃度とMPsの重量換算濃度の間には有意な正の相関関係が確認され（図a上）, ダンピングサイト内部で採取した土壌コア試料においても同様の関係が見られた（図a下）。これは, 土壌中から検出された添加剤の多くはMPsに由来するものであること, すなわちMPsが添加剤の運び屋（carrier）として機能していることを示している。これまでPOPsを含めた疎水性有機汚染物質の環境動態は, 水・オクタノール分配係数に従った有機炭素成分への吸脱着や, ヘンリー定数に従った大気移行に基づいて議論されてきた。本結果は, プラ添加剤の環境動態が化学物質の物性だけでなく, MPs粒子の環境動態に強く依存することを示唆している。その後, 調査対象のダンピングサイトでは覆土処理が行われ, 覆土8か月後に周辺土壌中のMPs濃度は1/2に, 添加剤濃度は1/3に軽減した。

一方, 面源である道路塵埃においては, 点源と比較して流出源が広く分布するため, 対策を講じることが難しい。そのため, 面源由来のMPsの環境負荷を軽減するには「どのプラ製品がどの程度MPsの発生源として機能しているか」を特定し, その製品に対して適切な策を講じることが大切である。そこで, 道路塵埃中に含まれるMPsと道路上で頻繁に使用されるプラ製品中の添加剤組成を比較することでMPsの発生源解析を試みた。その結果, 点字ブロックや道路塗装, 路面標示材と類似の添加剤組成を示すMPsが塵埃中から多数検出された（図b）。これは, 道路塵埃から検出されたMPsがそれら製品に由来することを示している。発生源解析の結果, 当該地域の道路塵埃中MPs（タイヤ摩耗片を除く）の60%が道路塗装, 23%が点字ブロック, 8.3%が路面標示材に由来することが分かった。さらに, 路面塗装中には, Dicyclohexyl phthalateや DnBP等のフタル酸エステル類が約1.0% (w/w)含まれていたほか, 路面標示材は, Octocrylene (0.30%) やUV-531 (0.70%) といった紫外線吸収剤を高濃度に含有していた。また, 点字ブロックには黄色顔料由来のPb (3.8%) やCr (0.64%) など高濃度の無機系添加剤も確認された。これら高濃度の懸念物質を含有するMPsが生体内に取り込まれた際に生じる生体影響について今後も研究を進めていく必要がある。

参考文献

- 1) Tanaka *et al.*, 2020. *Curr. Biol.*, **30**, 723-728.
- 2) Yamahara *et al.*, 2024. *STOTEN* **948**, 174827
- 3) Yamahara *et al.*, 2024. *STOTEN* **932**, 172808 .

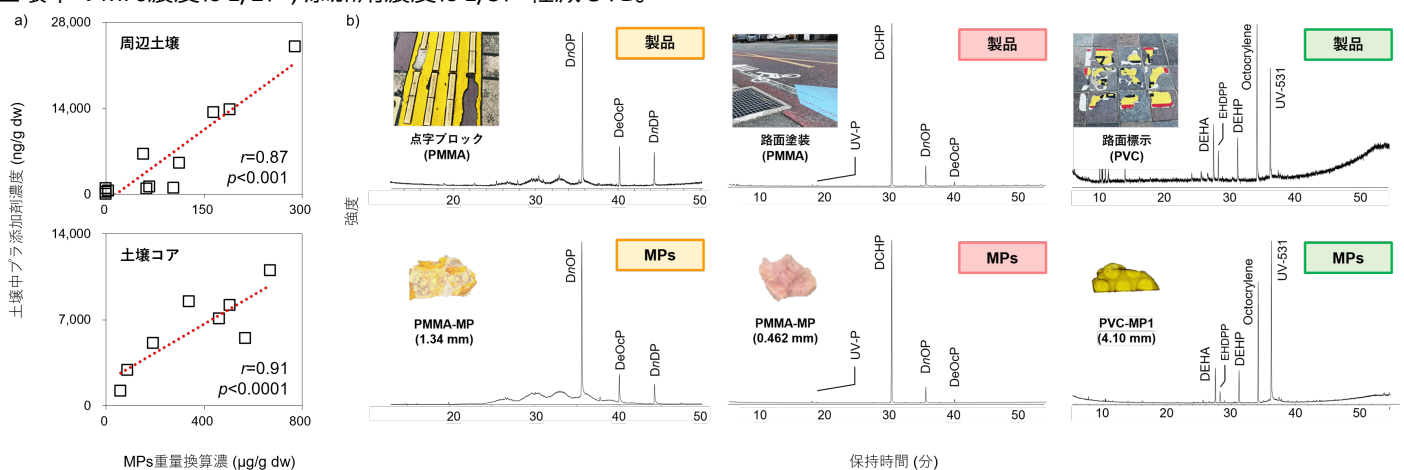


図 a) オープンダンピングサイト周辺土壌 (上) と土壌コア (下) 中のMPとプラスチック添加剤濃度の関係, b) 道路周辺で使用されるプラ製品と道路塵埃から検出されたMPs中の添加剤組成比較 (GC-MS)

別府湾海底に堆積するマイクロプラスチック—75年間の変遷—

愛媛大学大学院理工学研究科 教授

日向 博文

海洋に流出したプラスチックは、様々な要因によって微細化し、5mmよりも小さくなった破片をマイクロプラスチック（以下、MP）と呼ぶ。海洋生物相によるMPの摂取は、摂餌量の減少、免疫反応の亢進などに加え、残留性有機汚染物質や添加剤の移行を促進する可能性がある（Cole et al., 2013）。将来における生態系影響を演繹的に予測するためには、まずは数値モデルを使って海洋プラスチックの長期動態を再現する必要がある。特に、海洋環境を構成する様々なレザバー（海岸、海底、海水、生態系など）内のストックとレザバー間のフラックスの再現が重要となる（Hardesty et al., 2017）。ただし、長期再現計算用の検証データは、北太平洋や北大西洋表層など一部の海域を除いてほとんど存在しない。既に1970年代初頭には北大西洋表層でMPの存在が報告されているが（Carpenter and Smith, 1972）、全世界で海洋プラスチックの研究が盛んに行われるようになったのはここ10年である。

MPは、2 mm以下のサイズになると1) バイオフィーム形成によるバルク比重の変化、2) 凝集体あるいは3) 糞粒への取り込みによって沈みやすくなる（van Sebille et al., 2020）。海底は海洋プラスチックの主要なシンクの一つであり（Woodall et al., 2014）、静穏な海底は海洋プラスチック汚染の記録媒体となり得る。ただし、正確な堆積年代測定のためには、ある程度の底質の堆積速度が必要となる。外洋海底は、静穏であっても堆積年代測定が必要なMPフラックス（存在量ではない）の記録媒体としてはあまり適してはいない。別府湾の湾奥（最大水深72 m）は、この条件を満たす数少ない海域である（Kuwae et al., 2023）。湾奥には冬季の一時期を除いて貧酸素水塊が形成され、また、海底付近の流速は $< 5 \text{ cm/s}$ と小さい。これらにより、底質の生物学的、物理的擾乱が抑制される。

Hinata et al. (2023) は、1940年から2015年までの75年間のMP（0.3 mm–5.0 mm）堆積フラックスの変遷を、11本のコア解析と既往の研究結果（Tsugeki et al., 2017; Takahashi et al., 2020）に基づいて明らかにした。1958.8–1961.0年の堆積層から最初のポリプロピレン破片が発見された。以降、堆積フラックスは、長期間で見ると線形的に増加しつつ、1970年代、1990年代と2010年代に極大値（線形トレンドからの偏差）を持つ20年周期の変動が重なっていた。さらに、この20年周期変動はクロロフィル α 堆積フラックス偏差（線形トレンドからの偏差）と有意な正の相関を示した。この相関関係は、提案されている上記1)–3)の沈降メカニズムを支持している。ただし、観測結果はあくまでも相関関係を示していることに注意が必要である。別府湾の基礎生産は栄養塩制限であり、栄養塩の供給源は河川と外洋である。黒潮の接岸に伴い発生する底入潮が、豊後水道を介して西

瀬戸内海一帯に栄養塩を供給する（Kaneda et al., 2002）。黒潮が接岸したり、降雨量が増加し別府湾への栄養塩供給量が増加すると、表層を漂うMPは沈みやすくなる。瀬戸内海では、環境保全や漁業資源管理の観点から陸域からの栄養塩流入量を制御してきた歴史がある。著者らの結果は、人為的な栄養塩制御が、瀬戸内海のMP動態を変える可能性を示唆している。

Hinata et al. (2023) では、別途計測した別府湾表層のMP濃度を利用することで、MP片の平均沈降速度を50–60 m/dayと見積もった。これは、海水中に存在する多くの粒子状物質と同程度の沈降速度である。別府湾では、表層から沈み始めたMP粒子は、 $\tau = 1\text{--}2$ 日程度で海底に到達する。別府湾の海底には、堆積フラックスに含まれる数日～10日程度の時間スケール（ $> \tau$ ）の変動まで記録するポテンシャルがある。ただし、それを可能にするには、底質自体の堆積速度が十分大きい必要がある。その時間スケールに対応した厚さでコアサンプルをスライスする必要がある。水深が大きくなる程、記録可能な時間スケールも長くなる。例えば、水深6,000 mの外洋では、この速度で沈んだ場合、100–120日程度の時間がかかる。この沈降速度と72 mという最大水深の関係が、別府湾海底をマイクロプラスチック汚染の優れた記録媒体にしているもう一つの理由である。

以上、著者らは、MP堆積フラックスと海水中の生物活性関連のシグナルとの有意な相関、さらにはMPの平均沈降速度を現地観測に基づいて初めて提示することに成功した。これらの成果は、MPの沈降プロセスモデルの発展に大きく貢献するものと期待している。

参考文献

- Cole, Matthew, et al. "Microplastic ingestion by zooplankton." *Environmental science & technology* 47.12 (2013): 6646-6655.
- Hardesty, Britta D., et al. "Using numerical model simulations to improve the understanding of micro-plastic distribution and pathways in the marine environment." *Frontiers in marine science* 4 (2017): 30.
- Carpenter, Edward J., and K. L. Smith Jr. "Plastics on the Sargasso Sea surface." *Science* 175.4027 (1972): 1240-1241.
- Van Sebille, Erik, et al. "The physical oceanography of the transport of floating marine debris." *Environmental Research Letters* 15.2 (2020): 023003.
- Woodall, Lucy C., et al. "The deep sea is a major sink for microplastic debris." *Royal Society open science* 1.4 (2014): 140317.
- Kuwae, Michinobu, et al. "Beppu Bay, Japan, as a candidate Global boundary Stratotype Section and Point for the Anthropocene series." *The Anthropocene Review* 10.1 (2023): 49-86.
- Hinata, Hirofumi, et al. "A 75-year history of microplastic fragment accumulation rates in a semi-enclosed hypoxic basin." *Science of the Total Environment* 854 (2023): 158751.
- Tsugeki, Narumi K., et al. "Temporal variations in phytoplankton biomass over the past 150 years in the western Seto Inland Sea, Japan." *Journal of oceanography* 73 (2017): 309-320.
- Takahashi, Shin, et al. "Characterization of mono- to deca-chlorinated biphenyls in a well-preserved sediment core from Beppu Bay, Southwestern Japan: Historical profiles, emission sources, and inventory." *Science of The Total Environment* 743 (2020): 140767.
- Kaneda, Atsushi, et al. "Periodic intrusion of cold water from the Pacific Ocean into the bottom layer of the Bungo Channel in Japan." *Journal of oceanography* 58 (2002): 547-556.

マイクロおよびナノプラスチック大気汚染の健康・環境リスク

早稲田大学 理工学術院

大河内 博

1. はじめに

マイクロおよびナノプラスチック (micro- and nanoplastics; MNPs) は新たな環境汚染物質である。海洋マイクロプラスチック (marine microplastics; MMPs) は実粒径 (Feret径) では“目に見える”0.3 – 5 mmが対象であるが、このサイズは直ちに重力沈降するので大気では重要ではない。大気中マイクロプラスチック (Airborne microplastics: AMPs) は100 μm 未満が対象であり、“目に見えない”ことから見過ごされてきた。大気降下物から数百 μm のマイクロファイバーが検出され (Dris et al., 2016), その存在が注目されるようになった。

2. 健康リスク

MNPsは、肺 (Amato-Lourenço, 2021; Jenner et al., 2022), 胎盤 (Ragusa et al., 2021), 痰 (Huang et al., 2022), 血液 (Leslie et al., 2022), 心臓 (Yang et al., 2023), 脳 (Campen et al., 2024) など人体からも検出されている。体内動態としては実粒径 (Feret径) が重要である。ナノプラスチック(NPs)は細胞膜を透過して血液によって全身を循環し (Rajendran and Chandrasekaran, 2023), 血液脳関門を通過して脳内に蓄積することが指摘されている (Campen et al., 2024)。

MNPsの健康リスクは未解明であるが、MNPsはフタル酸エステル、臭素系難燃剤などの添加剤を含み、PAHsや重金属などの有害物を表面に吸着しており (ベクター効果), 生殖毒性, 発がん性, 変異原性が懸念されている。ヒト肺上皮細胞試験により呼吸系疾患 (Dong et al., 2020) が報告されており, 糞便中MPsと炎症性腸疾患に相関がある (Yang et al., 2022)。また, 頸動脈プラークからMNPs (PEとPVC) が検出された患者の追跡調査によると, 心筋梗塞, 脳梗塞などによる死亡リスクが高い (Marfella et al., 2024)。

モデル研究によると, 呼吸による経気道吸収がMNPsの最大体内摂取経路である (Nor et al., 2021)。したがって, 肺胞に達する空気動力学径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$ 以下 (PM_{2.5}) のAMPs, 空気動力学径0.1 μm 以下 (PM_{0.1}) の大気中ナノプラスチック (Airborne nanoplastics; ANPs) の解明が求められている。

3. 環境リスク

大気中マイクロおよびナノプラスチック (airborne micro- and nanoplastics; AMNPs) は, 気候変動, 水循環, 極域生態系破壊への関与が指摘されている。廃プラスチックの劣化により温室効果ガスであるメタンが放出されるが (Royer et al., 2018), 上空では強い紫外線に曝されるためメタン放出速度は地上より速い。地球温暖化に寄与する可能性がある。一方, AMNPsは表

面劣化や生物膜形成により親水性が増加して雲凝結核や氷晶核となり (Ganguly & Ariya, 2019), 雲形成を促進する可能性がある。雲形成は地球冷却化に寄与し, 地球規模の水循環に影響を及ぼす可能性がある。MNPsが大気を通じて外洋, 極域などの遠隔地への輸送が指摘されており (Allen et al., 2021, 2022), 脆弱な極域生態系の破壊を引き起こすことが懸念されている。

4. 大気中マイクロ/ナノプラスチックの現状

AMPsは欧州と中国の都市域での報告が多く, 個数濃度として0.01 (西太平洋) ~5650 (北京) 個/ m^3 の範囲である (Revelle et al., 2021)。質量濃度の報告例はほとんどない。オーストリア・グラーツにおけるPM_{2.5}中AMPs質量濃度 (PET: 50%, PP: 27%, PE: 23%) は平均で238 ng/ m^3 (最大: 557 ng/ m^3) であり, PM_{2.5}質量濃度の平均0.67%, 有機物の1.7%であった (Kirchsteiger et al., 2023)。

Zhao and Chen (2021) は, 中国・珠江デルタ地域の94カ所で採取したPM_{2.5}中プラスチック添加物163種類を, 有機リン酸エステル (OPE), フタル酸エステル (PAE), PAE代替品, ビスフェノール類似体, 紫外線安定剤, 酸化防止剤に分類して存在量を調べた。プラスチック添加量総量は610 – 49,400 $\mu\text{g/g}$ であり, PAE (中央値: 2710 $\mu\text{g/g}$) が他グループよりも1~3桁大きく, 次いでPAE代替品 (540 $\mu\text{g/g}$), OPE (76.2 $\mu\text{g/g}$) であった。米国西部でギンザケの急性死亡を引き起こし, 高い毒性があることが判明したN-(1,3-ジメチルブチル)-N'-フェニル-p-フェニレンジアミンキノン (6PPDQ) が大気エアロゾルから検出されており, 大気中濃度は0.54 – 13.8 pg/ m^3 であった (Cao et al., 2022)。6PPDQは自動車タイヤゴムの酸化防止剤として添加されている6PPDがオゾン酸化されて生成することから, AMNPsに含まれることになる。

5. おわりに

大気中マイクロおよびナノプラスチックの報告例は増えてきているが, 採取・前処理・計測法に関する国際的標準手法が確立されていないため, 観測結果を単純比較できない。また, 健康リスク評価や大気圏動態解明に不可欠な空気動力学径分布に関する報告もほとんどない状況である。

このようなことを背景として, われわれは環境研究総合推進費「大気中マイクロプラスチックの実態解明と健康影響評価 (略称: AMΦプロジェクト)」 (JPMEERF2021500; 2021年~2023年), 「大気中マイクロ/ナノプラスチックの海洋-陸域相互作用と劣化機構 (略称: ATM-HAPP)」 (JPMEERF20245004; 2024年~2026年) により, 国際標準となりうる採取・前処理・計測法を確立し, 国内17箇所, 地球規模の発生源と想定される東南アジア4カ国で観測を行っている。ATM-HAPPでは, プラスチック燃焼生成

物や6PPDQもターゲットにしている。最新報告 (Cottom et al., 2024) によると、インドが世界最大のプラスチックゴミ排出国であり、世界の5分の1を占めている。サハラ以南のアフリカ (ナイジェリア)、東南アジア (インドネシア) がインドに続く。現在、インド、アフリカ諸国との共同観測も検討している。

ここでは、誌面の都合で我々の研究成果をご紹介できなかったが、劣化AMPsは体内摂取後に有害物質を生成し続け、呼吸系疾患を引き起こすことが分かってきている。これまで考えられてきたPM_{2.5}とは異なるメカニズムで健康影響を引き起こす可能性がある。ご関心があれば是非とも皆さまと共同研究をしたい。大気中マイクロおよびナノプラスチック研究は黎明期であり、日本が世界をリードできる分野である。

最後に、このような機会を与えていただいた編集委員会に感謝の意を表す。

*1 大気中に浮遊している粒子は繊維状、破片状など様々な形を有しており、密度も異なるので、密度1 g/cm³ (水の密度) をもつ球形粒子と同じ速度で空気中を落下する場合の粒子径のこと。決められた吸引速度で空気を吸引すれば、エアロゾルを空気動力学径毎に採取できる装置が市販されている。

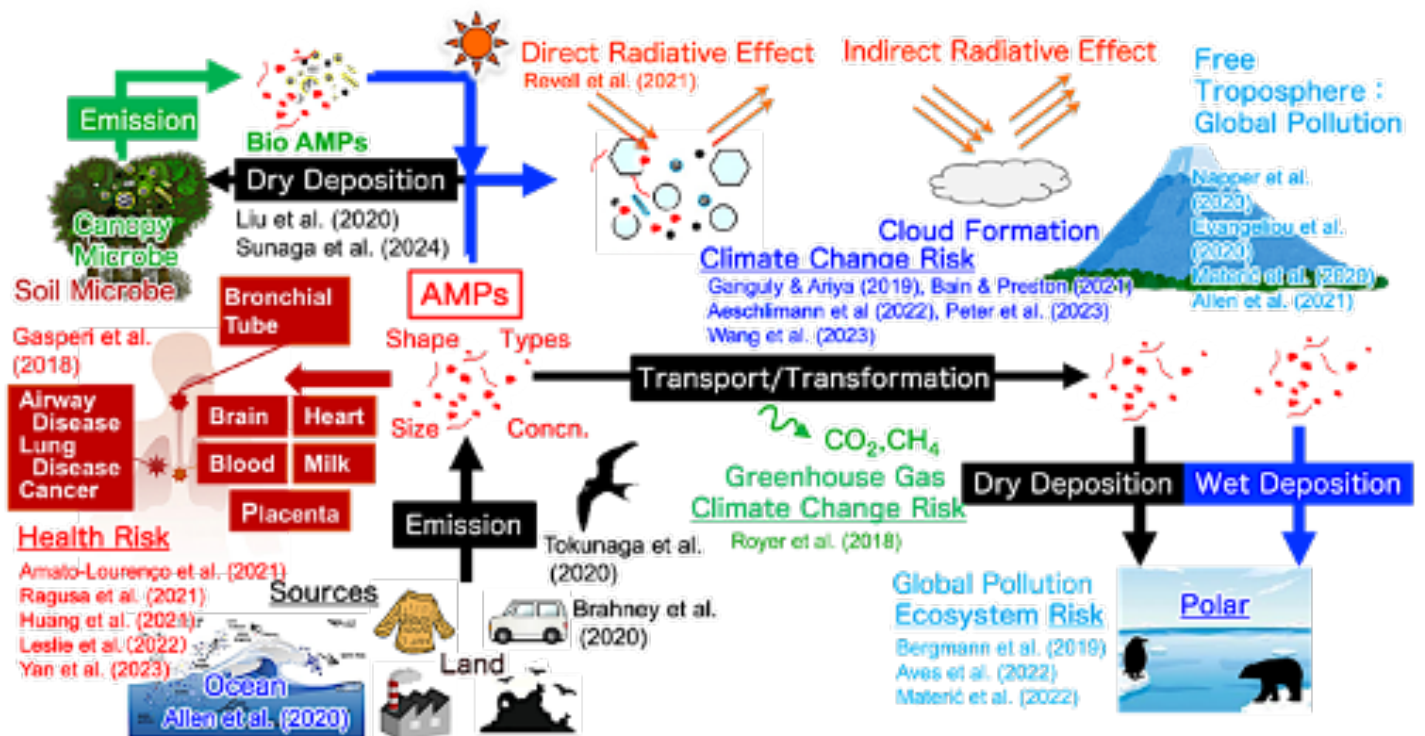


図1 大気中マイクロおよびナノプラスチックの環境運命と健康・環境リスク

マイクロプラスチックの生態影響に関する考察

愛媛大学農学部生物環境学科

鑑迫 典久

近年、海洋プラスチックごみ（海ゴミ）による環境汚染が問題になっており、その中の特に微細なプラスチック粒子がマイクロプラスチック（Micro Plastic：MP）と定義され、海水域だけでなく淡水や、土壌、大気まで様々な系から様々な濃度で検出されている。微生物から大型哺乳類までのあらゆる生物が摂取していることが確認され、生態系全体への何らかの影響が懸念されている。しかしMPの生物影響とマクロプラスチック（いわゆる海ごみ）の影響は区別する必要がある。例えば海洋で魚類、海鳥、アザラシ、ウミガメなどの海産動物が海ごみによって傷つけられたり死んだりしていると報告されているが、それらは漁網などに絡まったり、ポリ袋を餌と間違えて摂取するなどであり、MPの作用とは異なる。環境省の環境白書には、海ごみの環境影響として、“生態系を含めた海洋環境の悪化や海岸機能の低下”、“景観への悪影響”、“船舶飛行の妨害”、“漁業や観光への営業”などの4点が挙げられているが、MPの生態影響については、“具体的な影響は必ずしも明らかにはされていません”と記載されている。MPは、海洋哺乳動物に取り込まれても、食餌と同様に排泄されるため消化管を閉塞するとは考えられず、景観や船舶の航行に影響することもない。当初のMPの有害性は、洗顔剤にスクラバーとして含まれるプラスチックビーズによって目の角膜が傷ついたことに端を発する。その後、下水処理場や環境中で分解され難いこと、海洋を漂って長距離移動すること、などの性質から、POPs（Persistent Organic Pollutants：残留性有機汚染物質）の性質に似ているとされて話題になった。確かに、ヒトを含む野生生物は非意図的にMPを摂取しているため、何らかの悪影響があるのではないかという不安と懸念が先行しているが、その実態は不明の点が多い。EUは「大気、水、土壌の汚染ゼロに向けて」の行動計画の中で、2030年までに海上のプラスチックごみを50%、MPを30%削減する必要があると述べており、2030年に向けたEUの生物多様性戦略では、MPが生物多様性損失の5つの主要な直接的要因の1つとして挙げられている。ただし委員会の主任科学顧問グループは、「現在入手可能な証拠によれば、現時点ではMP汚染は人間や環境に広範なリスクをもたらさないが、（年々その発生量が増加していることなど）懸念すべき重大な根拠があり、予防措置が必要である」と述べている。

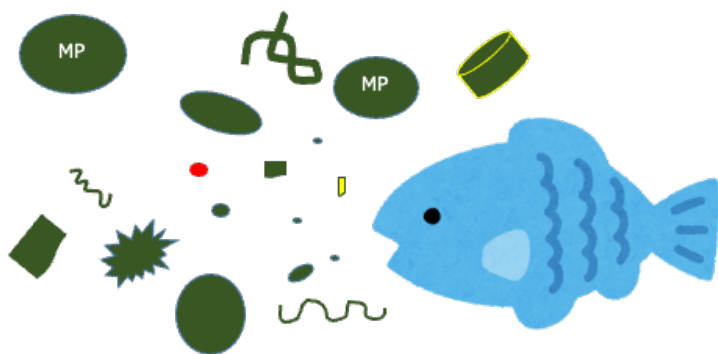
最近の国際的な定義によると、少なくとも1次元が5cm以上のものをマクロプラスチック、5mm～5cmをスモールMP、1mm～5mmをラージMP、1μm～1mmをMP、1μmよりも小さい粒子をナノプラスチックと分類している（ISO 24187）。また「漂流マイクロプラスチックのモニタリング手法調和ガイドライン（環境省2020）」では、0.3～5mmのMPが調査対象となっている。一方、サイズを生物側視点で見ると、ヒトを含む大型の生物は一部の

マイクロプラスチックを含むすべてのサイズのMPを摂取できるが、中、小型の野生生物はその体格や食性によって摂取できるMPのサイズが限られてくる。例えば生態毒性試験で使われているメダカやミジンコについて、筆者は（蛍光）ビーズを摂食させて観察したところ、成魚メダカでは直径0.8mm以下、成体ミジンコは30μm程度までは摂取できることを確認できたが、それ以上のサイズは取り込まれないため生態影響は無いと考えられる。通常、生物は好んで（選択的に）MPを食しているとは考えられず、それぞれが自身の“餌”である植物プランクトンまたは動物プランクトンとMPを誤認して摂取しているので、餌と摂取できるMPの大きさがほぼ一致するのは不思議ではない。

環境リスクの推定にリスク・クォティエン（RQ）手法を用いると、 $RQ=PEC$ （予測環境濃度）/ $PNEC$ （予測無影響濃度）で表され、PECには、対象生物毎に食べられる範囲にある大きさのMP量を求める必要がある。しかし生物側にとっての実質PECはISO分類や環境省のガイドラインで示されるMPの大きさ分類と一致しておらず、論文や報告書にある数値を単純に引用してPECとして用いることはできない。もちろんPNECのエンドポイントについてもまだ十分に解明されておらず、リスク評価は難しい。

MPの生態影響について、今回は大きさに関するデータGAPについて述べたが、他にもMPの表面に疎水性物質が吸着して体内移行を促進するという“ベクター効果”問題、プラスチック添加剤の溶出問題、小型の生物が摂取したMPが食物連鎖を通して大型生物に濃縮される問題、ナノプラスチック問題、実験室内試験と環境影響のギャップ問題などが存在すると言われている。もし機会があればそれらについても概説したい。

食べられるMPはどれだ？



マイクロ・ナノプラスチックの体内動態・毒性メカニズムの解明 と野生動物におけるモニタリングの重要性

北海道大学大学院 獣医学院 毒性学教室 博士課程2年
徳長 ゆり香

現代の生活に欠かせない素材であるプラスチックは、環境中で劣化し粒径5 mm以下のマイクロプラスチック (MPs) となり、越境性や残留性の高い地球規模のプラスチック汚染を引き起こしている。とりわけ粒径1 μm以下のナノプラスチック (NPs) は、より高濃度で全球的に分布している可能性が指摘されている。飲食物や呼吸を介して体内に取り込まれたNPsは、腸や肺から循環系に入り、肝臓や腎臓だけでなく関門を通過して脳や生殖器に到達し得ることが分かってきた。その毒性は、諸臓器の機能障害、免疫、神経、生殖発生毒性、遺伝毒性等、個体レベルから生態系への悪影響に繋がり得るものであり、野生動物におけるマイクロ・ナノプラスチック (MNPs) 汚染実態の解明は急務である。

これまで私の研究では、新たな事実として、野生鳥類が大気中のMPsを吸入し、呼吸器系において蓄積していることを突き止めた (Tokunaga et al., 2023) (図)。鳥類の呼吸器系における粒子状物質の動態は未解明であるが、大気汚染に脆弱な鳥類 (Sanderfoot et al., 2017) にとって、大気中MNPsは新たな脅威となる恐れがある。プラスチック生産量は増加の一途を辿り、2050年までに12億トンのプラスチックが埋立地や自然環境中に排出されると予測されている。今後環境中MNPs濃度が上昇していくことは明白であり、長期曝露される野生動物が増えることで、多様な生態系の攪乱に繋がる可能性がある。例えば、海鳥の個体数が過去60年間で約7割減少したと海洋プラスチック汚染との関連が指摘されており (Paleczny et al., 2015)、2050年までに99.8%の海鳥がプラスチックを摂食するという推測 (Wilcox et al., 2015) は、海洋プラスチック汚染が海鳥や海棲哺乳類に対するさらなる脅威となることの警鐘である。

そこで、我々は、未解明の部分が多いNPsについて、体内動態・毒性メカニズムの評価に取り組んでいる。NPsは全身臓器に極めて低濃度で分布し得ることがボトルネックとなって、定量が難しく見過ごされてきたのが現状である。打開策として、重金属の一種パラジウム (Mitrano et al., 2019) 等によるNPs内部の金属標識法が注目されている。金属をトレーサーとした高感度元素分析によりNPsの体内動態を高感度で追跡することができ、臓器中の濃度分布を定量・可視化する上で有望である。これにより、NPsの蓄積性が高い臓器・組織を特定できる可能性がある。

一方、環境中のNPsは、様々な材質で構成され、サイズや形状、化学的性状も一様ではない。これらの要素は、動態や毒性を左右する場合があることが分かってきている (Rummel et al., 2021; Ikuno et al., 2024)。そのため最終的には、自然環境を模

したNPsを用いた毒性試験が求められる。環境中のNPsの同定・定量には、熱分解ガスクロマトグラフ質量分析計 (py-GC-MS) が一般的に用いられる。定量分析に不可欠な材質ごとの標準物質及び内標準物質の作製を含め (Tanaka et al., 2021; 2023)、定量分析法の開発も進んできており、ヒトや野生動物の体内NPsの分析が前進することが期待される。とりわけ、野生動物におけるNPsの汚染実態はほとんど調べられてこなかった。一般に化学物質の感受性には動物種差があり、低濃度であっても種によっては毒性が強く発現する可能性もあるため、野生動物におけるNPsモニタリングと健康影響の解明により、ハイリスク要因を特定し、生態系への影響を考慮した正確なリスク評価管理を行う必要がある。

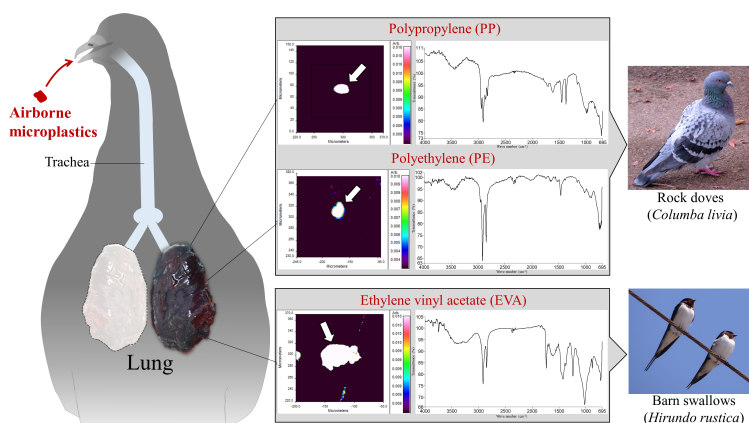


図: 日本に生息する野鳥の肺におけるMPs分析により、カワラバト、ツバメから粒径100 μm以下のポリプロピレン、ポリエチレン、エチレン酢酸ビニルが見つかり、これらは国内で吸入されたことが証明された。

参考文献

- Mitrano et al., 2017. *Nat. Nanotechnol.*, 14: 362-368
- Paleczny et al., 2015. *PLOS ONE*, 10: e0129342
- Tanaka et al., 2021. *Small*, 17: 2105781
- Tanaka et al., 2023. *ACS omega*, 8: 14470-14477
- Tokunaga et al., 2023. *Chemosphere*, 321:138032
- Wilcox et al., 2015. *PNAS*, 112: 11889-11904

プラスチックを介した化学物質の生物濃縮に関する研究

東京農工大学 農学部

水川 薫子

我々のグループではこの10年以上の研究を通して、プラスチックを介した添加剤の生物への移行についてフィールド試料や室内実験を通して明らかにしてきた。本稿ではすでに論文化した臭素系難燃剤および紫外線吸収剤の生物への移行事例と、最新のヒト試料中のマイクロ/ナノプラスチック(MNP)と添加剤の同時分析例について紹介する。

1. 海鳥のプラスチック摂食とポリ臭素化ジフェニルエーテル(PBDEs)の蓄積¹⁻³⁾

北大西洋で混獲されたハシボソミズナギドリの消化管に残存していたプラスチック中に、BDE209やBDE183といったPBDEs製の主成分が含まれていた。その個体の脂肪組織からもBDE209やBDE183が検出されたことから、消化管中プラスチックのPBDEsに由来すると考えられた。その後の研究で、海鳥の胃の中の油分が疎水性の高いBDE209のプラスチックからの溶出を促進すること、オオミズナギドリを用いた飼育実験にて添加剤含有プラスチック摂食により海鳥組織内に添加剤が移行・蓄積することが明らかにされた。

2. 海鳥の尾腺ワックスを用いた世界規模のプラスチック添加剤モニタリング⁴⁾

海鳥が尾腺から分泌するワックスを世界中から収集し、ベンゾトリアゾール系紫外線吸収剤(BUVs)および臭素系難燃剤の蓄積状況を調べた。その結果、世界16地域32種145個体の尾腺ワックスの約半数からいずれかの添加剤が有意に検出され、特にプラスチック摂食の多い種から散発的に高濃度で検出する傾向があった。食物連鎖を通して生物増幅しやすいポリ塩化ビフェニル(PCBs)やDDEと比較すると、PCBsとDDEの間には相関があるものの、PCBsと各種添加剤の間には相関は認められず、PCBsとは異なる経路での添加剤の蓄積が示された。

3. 沖縄離島のオカヤドカリのプラスチック摂食とPBDEsの蓄積・代謝⁵⁾

海洋ごみが大量に漂着する沖縄離島の浜に生息するオカヤドカリ中のPBDEsを調べたところ、漂着ごみの多い浜のオカヤドカリ消化管からは多数のマイクロプラスチック(MP)、肝臓からは環境中では主要ではない多種のPBDEsが検出された。これらの同族異性体は室内実験でBDE209含有MPをオカヤドカリに摂食させた際にも検出され、オカヤドカリがBDE209を吸収・脱臭素化したものであることが示された。

4. アオウミガメのプラスチック摂食とBUVsの蓄積⁶⁾

アオウミガメはプラスチックの誤食が報告されており、小笠原周辺で採取されたアオウミガメの消化管からも高頻度でプラスチックが検出された。脂肪からも散発的にUV326やUV327が検出されたが、海鳥同様PCBsと各BUVs濃度の間に相関はなく、BUVsが食物連鎖に由来しないものであることが予想された。

5. PCBs吸着/添加剤含有MPからムラサキイガイへの化学物質移行実験⁷⁾

PCBsを吸着、または臭素系難燃剤(BDE209・DBDPE)と紫外線吸収剤3種を含むMPをムラサキイガイにそれぞれ摂食させたところ、PCBsおよびBUVs2種の移行が確認された。PCBsの移行率はlogKow7程度までは増加するも、疎水性が高くなりすぎると移行率は減少した。用いた臭素系難燃剤2種はどちらも非常に疎水性が高いために、プラスチックから溶出せず生体内へ移行しなかったと考えられた。

6. 食物連鎖と溶出を考慮したMP経路のカジカへの添加剤移行実験⁸⁾

5と同じ添加剤含有MPを添加した水中でカジカを飼育しアミを給餌した場合(水経路)と、アミに添加剤含有MPを摂食させそのアミをカジカに与えた場合(餌経路)との各種添加剤のカジカへの移行を比較した。餌経路の系では、すべての添加剤において対照区と有意に濃度が上昇し、添加剤を含んだMPを体内に保持したアミを摂食したことでカジカに添加剤が移行したことが示された。一方、水経路の系では、紫外線吸収剤3種のみ対照区より有意に高濃度となり、プラスチックから溶出した紫外線吸収剤が間接的にカジカに蓄積したと考えられた。

7. ヒト血液からのポリスチレン(PS)およびBUVsの検出(図1)⁹⁾
ゲルクロマトグラフィーで分画したヒト血液の高分子画分を熱分解GC-MSで分析したところ、11検体中4検体でPSがブランクに対して有意に検出された(40 - 555 ng/g)。モノマー画分からはBUVsおよびPCBsがすべての試料で有意に検出されたが、PSやBUVsが比較的高濃度だった試料のPCBs濃度は低く、検出パターンに違いが認められた。この熱分解GC-MSを用いたMNP分析法は現在PSのみに限られているため、MNP汚染の全貌および添加剤との関連を明らかにしていくためには他のポリマーについても分析手法を確立していく必要がある。これらの研究によって、プラスチックに含まれる添加剤は散発的に高濃度で生物の摂食・溶出により吸収・蓄積されるプロセスが示されてきた。このような現象がナノサイズでも生じるか、MNPの研究が発展することで今後明らかになっていくと期待される。

参考文献

1. Tanaka K, et al. (2013) doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.12.010
2. Tanaka K, et al. (2015) doi.org/10.1021/acs.est.5b01376
3. Tanaka K, et al. (2020) doi.org/10.1016/j.cub.2019.12.037
4. Yamashita R, et al. (2021) doi.org/10.5985/emcr.20210009
5. Tanaka N, et al. (2023) doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114812
6. Fukuoka T, et al. (2024) doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116753
7. Takano T, et al. (2024) doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116740
8. Hasegawa T, et al. (2022), doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114343
9. 佐野ら, 第3回環境化学物質合同大会講演要旨集, 2024

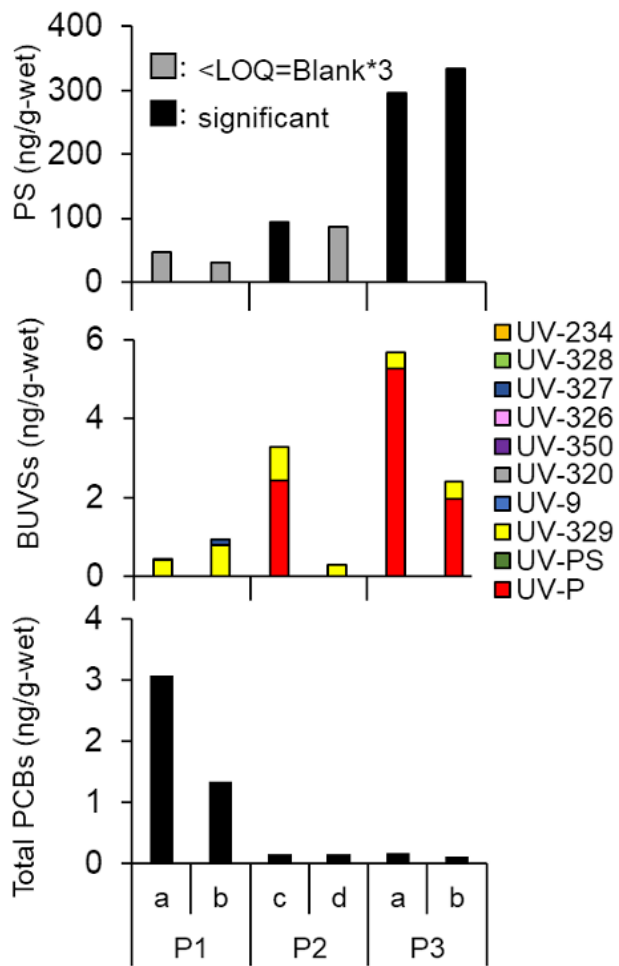


図1 ヒト血液試料中PS(上)、
BUVs(中)およびPCBs濃度(下)

Information

第26回日本内分泌攪乱物質学会研究発表会 開催

日時：2024年12月6日(金)・7日(土) 演題登録：2024年10月10日(木)まで
開催会場：東京大学 弥生キャンパス 参加登録：
 フードサイエンス棟 中島ホール ・早期登録 2024年11月4日(月)まで
大会実行委員長：鑑迫 典久(愛媛大学) ・通常登録 2024年11月5日(火)以降
開催形態：本会単独開催
HP: <https://jsedr.org/A.html>

		早期登録 11月4日(月)まで	通常登録 11月5日(火)以降
会員	一般	6,000円	8,000円
	大学院生・学部生	1,000円	2,000円
非会員	一般	9,000円	11,000円
	大学院生・学部生	4,000円	5,000円

懇親会について：
開催日：2024年12月6日(金) 研究会終了後～
開催場所：研究会会場近郊
参加費：5,000円前後 当日徴収
詳細が決まり次第ご案内いたします。

■日本内分泌攪乱物質学会『賛助会員』募集

現在、本学会の活動をご支援して下さる賛助会員（企業）を募集しております。
一社当たり年間8万円になります。自薦、他薦問いません。
お心あたりありましたら是非本学会事務局までご一報ください。

編集後記

Minderoo財団(Symeonides et al., 2024*)は、疫学調査と人組織中の化学物質の関連について徹底したレビューを行い、プラスチック関連化学物質のフタル酸エステル類、ビスフェノールA、臭素化ジフェニルエーテル類、PCBs、PFASが生殖に関連する疾病や癌、糖尿病など人の健康に悪影響を及ぼしている結論づけている。その他の3千種以上のプラスチック関連化学物質やマイクロ/ナノプラスチックについても、信頼ある測定法を基にした大規模なコホート研究が必要であることが今回の特集からも明らかにされた。

*<https://doi.org/10.5334/aogh.4459>

日本内分泌攪乱物質学会(旧 環境ホルモン学会)
〒141-0022 東京都品川区東五反田1-10-4
エムアイビル4F 株式会社プライムインターナショナル内
Tel: 03-6277-0095 Fax: 03-6277-0118 E-mail:secretariat@jsedr.org