生物によるマイクロプラスチックの 細粒化とその体内動態

大 嶋 雄 治 *

キーワード：マイクロプラスチック，細粒化，水生生物，メダカ，体内動態

1. はじめに

プラスチックは開発されてまだ100年にも満たないが、その使用は爆発的に拡大し、今や人間の生活に不可欠なものとなった。その一方で、年間約3000万トンのプラスチックが環境中に放出され¹⁾、一部は海洋に流れ込んでいる。水圏に流れ込んだプラスチックは浮遊・沈降すると考えられていたが、徐々に劣化・分解され細粒化し、顕微鏡で観察するレベル(粒径5 mm以下)のプラスチック粒子(microplastics, MPs)が世界中の水環境から検出された。今後、水環境中でMPsが増加することは不可避であり、その生態影響の解明が急がれる。科学的知見の集積をまず行い、それに基づくリスク評価を行うことが重要である。ここでは筆者がこれまでに行ったMPsに関する研究を中心にその一端を紹介したい。

2. マイクロプラスチックの生成機構

MPsは、主に波浪や物理的な動きによる破壊、紫外線等による劣化により生成すると推定されているが²⁾、一方では生物の摂餌過程におけるMPsの生成も報告されており興味深い。Dawsonらは、オキアミに27–32- μm 粒状ポリエチレン蛍光ビーズを投与すると、細くなった1 μm 程度の蛍光ビーズが同時に観察されることから、オキアミはMPsをかみ砕いている可能性が高いとしている³⁾。また、ハマトビムシにプラスチック袋を与えると細断化したとしている⁴⁾。Jangらは多毛類イソメの1種の体内から0.3–3.8 mmの発泡スチロール断片を報告しており、本種が発泡スチロールをかじっていることを証明している⁵⁾。

筆者は、これまで渚域に生息する等脚目の一種であるフナムシを用いた環境汚染の調査を行い、体内よりトリブチルスズ⁶⁾、放射性セシウム⁷⁾、重油成分芳香族炭化水素⁸⁾など複数の汚染物質を同時検出した。化学物質の汚染が顕著でない所に生息するフナムシでも多種の化学物質が検出される理由として、フナムシが化学物質を吸着したプラスチックゴミを摂餌することがその原因の一つと推定した。この仮説を検証するため、アミノ酸を少量塗布した発泡スチロール(FPS)やウレタンフォームを与えると、フナムシはそれぞれ2, 8.3 mg/g-bw/dayの量を摂食し(Tsuruda, 投稿準備中)、その糞からは細長く圧縮された特徴を持つFPSが回収された。興味深いことに、細長く圧縮された形状のFPSが瀬戸内海から報告されている⁹⁾。よってフナムシは有害物質を吸着したFPSを食べることで有害物質の体内濃度が上昇すると同時に、ポリスチレン(PS)-MPsの生成に寄与している可能性が考えられた。さらに、フナムシはFPSのみを餌として1ヵ月半生存し、絶食させた対照区より有意に長く生存した(図1、

図1 発泡スチロールを与えたフナムシの生存率

Tsuruda., 投稿準備中). 近年, プラスチックレジ袋を分解する蛾の一種が報告され¹⁰⁾, その中腸線からPEを分解する真菌が検出¹¹⁾, PSを分解する昆虫も報告された¹²⁾. 一般に生物の消化管内には細菌や真菌類が共生しており, それらがプラスチックを分解・同化している可能性が考えられた.

現在MPsは沿岸, 深海, 熱帯, 南極, 大気中存在し, 藻類, 動物プランクトン, ベントス, 甲殻類等無脊椎動物から魚類, 海棲哺乳類までほとんどの消化管から検出され, 影響が懸念されている¹³⁾. その体内濃度は, 生息場所等に左右されるが, 例えば魚類では1個体当たりMPsの数は概して 10^{-1} /個体程度である¹⁴⁾. しかし今後濃度が増加することは明らかであり, MPsの生体内蓄積性や体内動態の解明が急がれる.

3. MPsのメダカ体内における吸収・蓄積・排泄

水生生物体内に取り込まれたMPsは, いずれ体外へ排泄されると予想されるが, 体内での挙動は明らかでない. 筆者らは, メダカ (*Oryzias latipes*) へMPsを投与し, その濃縮と体内動態を解析した. 2ヵ月齢のメダカを用い, 粒径2, 20 μm のPS (10^6 p/L), 20 μm のポリエチレン (PE, 10^6 p/L), および200 μm PE (10^4 p/L) 暴露区の4グループを設定, 各試区あたり3水槽を用い, 1Lの水槽に25個体ずつ入れ, 2週間暴露した. 暴露終了後, MPを含まない飼育水に替えて2日に1回換水しながら, さらに10日間かけて体内のMPを排泄させた. 経時的にサンプリングしたメダカは, 透明化処理を行った後, 消化管内のMPsを蛍光顕微鏡 (BZ-X810, Keyence, Japan) を用いて行った. 得られたMPsの体内濃度からOECD test guideline 305に従い生物濃縮係数や排泄速度等の値を得て後述のシミュレーションに用いた.

MPs計数の結果, すべての暴露区においてメダカの消化管にMPsが取り込まれていた (Liu et al., 投稿中). 暴露開始1日目でMPsの体内濃度は急激に上昇し, その後暴露期間変化しなかった. しかし14日間暴露終了後清浄な水で飼育したところ, MPs粒子数は急激に減少し21日~24日目には消化管内のMPsはほぼ排泄された (図2). 動

(Liu et al., 投稿中)

図2 粒径2, 20 μm PS, 20 μm PE および200 μm PE に暴露したメダカにおけるMPs体内濃度変化

力学の解析を行った結果, 実験で用いたMPsは最大100倍程度濃縮されたが, その吸収と排泄は急速であり, 平均1日程度しか体内に滞留しないと考えられた. なお2 μm PSは排泄期終了時でも0.01 mg/kg以下と極少量ではあるが, 組織中に残存が確認された. この原因として, 2 μm PS-MPsが腸管組織細胞間隙へ貫入した可能性が考えられた.

4. MPsのメダカ再生産への影響

我々はメダカを用いてポリスチレンPS-MPs粒子 (2 μm , 10^6 個/L) を2週間暴露した結果, その産卵とその胚の生存には全く影響を与えなかったが (図3), 消化管内では細胞接着に關与するカド

図3 2 μm PS-MPを2週間暴露したメダカ産卵ペアにおける産卵数(A)とその胚の生存率(B)¹⁵⁾

ヘリン等いくつかの遺伝子の発現が有意に上昇しており, PS-MPs が消化管組織内に貫入したことが示唆された¹⁵⁾. 新品のMPsを暴露した European sea bass¹⁶⁾, Zebrafish¹⁷⁾, Spined Stickleback¹⁸⁾で生存に影響がないことを報告している. Rochmanらは新品のPE-MPsはメダカの産卵に影響を与えないが, 現場海水で3ヵ月処理したMPでは卵膜タンパク質遺伝子の発現低下を報告しており¹⁹⁾, 吸着した化学物質の影響が懸念される. 淡水産ヨコエビ *Hyalella azteca*²⁰⁾ やミジンコ *Daphnia magna*²¹⁾ では産卵が低下したとの報告がある.

5. 化学物質の生物蓄積におけるMPのベクター効果

次に, MPsによる化学物質の取込仲介(ベク

ター) 効果を検討した. メダカにアントラセン(ANT, 0.1 mg/L) 及び MPs (PE, 200 μm , 1×10^4 個/L) を単独もしくは共存下で7日間暴露後, 3日間排泄させた. ANT区およびANT+MPs区の魚体内ANT濃度は暴露終了7日目で差がなかった(図4). 得られた結果より吸収, 排泄係数を求め, さらに共暴露区において, 水相からANTのメダカ体内への蓄積を見積もった結果, ANT+MPs区で魚体ANTの約6割が水経由で取り込まれ, 残り4割がMPs経由だと推定された. ANTの一部はMPs経由で取り込まれたと推定されMPsのベクター効果が示された(図5). いくつかの室内実験で同様にMPsは疎水性物質のベクターとなることが証明されている²²⁻²⁴⁾. しかしそれらは定量的に評価できておらず, 筆者ら

図4 アントラセンを単独もしくは MPs 共存下で7日間暴露後, 3日間排泄させたメダカにおける平均体内濃度の変化²⁵⁾
* : $p < 0.05$

図5 アントラセン (ANT, 0.1 mg/L) と MPs (200 μm , 1×10^4 個/L) を共暴露したメダカにおける体内濃度のシミュレーション²⁵⁾

は初めてベクター効果を定量的に試算した²⁵⁾。

6. 最後 に

現時点における MPs の濃度およびこれまで得られた知見だけで判断すると魚類への直接的かつ急性的な影響は考えにくい。しかし、海洋には二枚貝や動物プランクトン等濾過性の生物が生息しており、それらに対する影響が懸念される。また、MPs は化学物質の蓄積に一部寄与している可能性があり、間接的影響が懸念される。さらにこれまで実験に使った MPs はすべて新品であり実環境中にある劣化した MPs ではない。MPs の材質は多岐にわたり、それぞれの劣化度、形状、可塑性、添加剤、吸着した有害化学物質等異なり、これらの要因を整理しながら影響を評価していかなければならない。このまま MPs 汚染が進行すれば、水環境の修復は困難になる。プラスチックの水環境への流出を防がなければならない。

謝辞：本研究の一部は環境研究総合推進費（SII-2-2（2）、JPMEERF18S20206）および日本化学工業協会が推進する LRI（19_R05-01）により支援されました。

参考文献

- 1) Jambeck, JR., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, TR., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R., Law, KL.; Plastic waste inputs from land into the ocean, *Science*, **347**, p.768-771, 2015.
- 2) Moore, CJ.; Synthetic polymers in the marine environment: A rapidly increasing, long-term threat, *Environmental Research*, **108**, p.131-139, 2008.
- 3) Dawson, AL., Kawaguchi, S., King, CK., Townsend, KA., King, R., Huston, WM., Bengston Nash, SM.; Turning microplastics into nanoplastics through digestive fragmentation by Antarctic krill, *Nature Communication*, **9**, 1001, 2018.
- 4) Hodgson, DJ., Bréchon, AL., Thompson, RC.; Ingestion and fragmentation of plastic carrier bags by the amphipod *Orchestia gammarellus*: Effects of plastic type and fouling load, *Marine Pollution Bulletin*, **127**, p.154-159, 2018.
- 5) Jang, M., Shim, WJ., Han, GM., Song, YK., Hong, SH.; Formation of microplastics by polychaetes (*Marphysa sanguinea*) inhabiting expanded polystyrene marine debris, *Marine Pollution Bulletin*, **131**, p.365-369, 2018.
- 6) Undap, SL., Matsunaga, S., Honda, M., Sekiguchi, T., Suzuki, N., Khalil, F., Shimasaki, Y., Oshima, Y.; Accumulation of organotins in wharf roach (*Ligia exotica* Roux) and its ability to serve as a biomonitoring species for coastal pollution, *Ecotoxicological Environmental Safety*, **96**, p.75-79, 2013.
- 7) Qiu, X., Undap, S., Honda, M., Sekiguchi, T., Suzuki, N., Shimasaki, Y.; Pollution of radiocesium and radiosilver in wharf roach (*Ligia* sp.) by the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **311**, p.121-126, 2017.
- 8) Honda, M., Qiu, X., Koyama, J., Uno, S., Undap, SL., Shimasaki, Y., Oshima, Y.; The Wharf Roach, *Ligia* sp., A Novel Indicator of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Contamination in Coastal Areas, *International Journal of Environmental Research*, **12**, p.1-11, 2018.
- 9) Sagawa, N., Kawaai, K., Hinata, H.; Abundance and size of microplastics in a coastal sea: Comparison among bottom sediment, beach sediment, and surface water, *Marine Pollution Bulletin*, **133**, p.532-542, 2018.
- 10) Bombelli, P., Howe, CJ., Bertocchini, F.; Polyethylene bio-degradation by caterpillars of the wax moth *Galleria mellonella*, *Current Biology*, **27**, p.R292-R293, 2017.
- 11) Zhang, J., Gao, D., Li, Q., Zhao, Y., Li, L., Lin, H., Bi, Q., Zhao, Y.; Biodegradation of polyethylene microplastic particles by the fungus *Aspergillus flavus* from the guts of wax moth *Galleria mellonella*, *Science of the Total Environment*, **704**, p.135931-135939, 2020.
- 12) Yang, Y., Wang, J., Xia, M.; Biodegradation and mineralization of polystyrene by plastic-eating superworms *Zophobas atratus*, *Science of the Total Environment*, **708**, p.135233-135240, 2020.
- 13) Booth, AM., Sørensen, L.; Handbook of Microplastics in the Environment, Springer International Publishing, p.1-24, 2020.
- 14) Sun, X., Li, Q., Shi, Y., Zhao, Y., Zheng, S., Liang, J., Liu, T., Tian, Z.; Characteristics and retention of microplastics in the digestive tracts of fish from the Yellow Sea, *Environmental Pollution*, **249**, p.878-885, 2019.
- 15) Assas, M., Qiu, X., Chen, K., Ogawa, H., Xu, H., Shimasaki, Y., Oshima, Y.; Bioaccumulation and reproductive effects of fluorescent microplastics in medaka fish, *Marine Pollution Bulletin*, **158**, p.111446-111452, 2020.
- 16) Pedà, C., Caccamo, L., Fossi, MC., Gai, F., Andaloro, F., Genovese, L., Perdichizzi, A., Romeo, T., Maricchiolo, G.; Intestinal alterations in European sea bass *Dicentrarchus labrax* (Linnaeus, 1758) exposed to microplastics: Preliminary results, *Environmental Pollution*, **212**, p.251-256, 2016.
- 17) Lei, L., Wu, S., Lu, S., Liu, M., Song, Y., Fu, Z., Shi, H., Raley-Susman, KM., He, D.; Microplastic particles cause intestinal damage and other adverse effects in zebrafish *Danio rerio* and nematode *Caenorhabditis elegans*, *Science of the Total Environment*, **619-620**, p.1-8, 2018.
- 18) Katzenberger, TD.; Assessing the Biological Effects of Exposure to Microplastics in the Three-Spined

- Stickleback (*Gasterosteus aculeatus*) (Linnaeus 1758), PhD. Thesis, University of York, 2015.
- 19) Rochman, CM., Kurobe, T., Flores, I., Teh, S.J.; Early warning signs of endocrine disruption in adult fish from the ingestion of polyethylene with and without sorbed chemical pollutants from the marine environment, *Science of the Total Environment*, **493**, p.656–661, 2014.
 - 20) Au, SY., Bruce, TF., Bridges, WC., Klaine, S.J.; Responses of *Hyaella azteca* to acute and chronic microplastic exposures, *Environmental Toxicology and Chemistry*, **34**, p.2564–2572, 2015.
 - 21) Ogonowski, M., Schür, C., Jarsén, Å., Gorokhova, E.; The Effects of Natural and Anthropogenic Microparticles on Individual Fitness in *Daphnia magna*, *PLoS One*, **11**, e0155063, 2016.
 - 22) Chua, EM., Shimeta, J., Nugegoda, D., Morrison, PD., Clarke, BO.; Assimilation of Polybrominated Diphenyl Ethers from Microplastics by the Marine Amphipod, *Allorchestes Compressa*, *Environmental Science and Technology*, **48**, p.8127–8134, 2014.
 - 23) Bakir, A., O'Connor, IA., Rowland, S.J., Hendriks, J.A., Thompson, RC.; Relative importance of microplastics as a pathway for the transfer of hydrophobic organic chemicals to marine life, *Environmental Pollution*, **219**, p.56–65, 2016.
 - 24) Batel, A., Linti, F., Scherer, M., Erdinger, L., Braunbeck, T.; Microplastic accumulation patterns and transfer of benzo[a]pyrene to adult zebrafish (*Danio rerio*) gills and zebrafish embryos, *Environmental Toxicology and Chemistry*, **35**, p.1656–1666, 2018.
 - 25) Qiu, X., Saovany, S., Takai, Y., Akasaka, A., Inoue, Y., Yakata, N., Liu, Y., Waseda, M., Shimasaki, Y., Oshima, Y.; Quantifying the vector effects of polyethylene microplastics on the accumulation of anthracene to Japanese medaka (*Oryzias latipes*), *Aquatic Toxicology*, **228**, 105643, 2020.

会 告

環境技術学会 新役員の選出

会員各位

第50期 環境技術学会の第1回理事会が、去る9月22日から28日の期間で、メール審議により開催されました。

そこで、第50期–51期の役員について、以下のように選出されましたので、ご報告いたします。

会 長 尾崎博明 (大阪産業大学名誉教授)

副会長 藤井滋穂(京都大学), 古武家善成(元 神戸学院大学)

学術委員長 藤井滋穂 (京都大学)

編集委員長 古武家善成 (元 神戸学院大学)

大会委員長 上野裕士 (内外エンジニアリング㈱)

財務委員長 岩貞正幸 (中川公認会計士事務所)

代表常任理事 廣谷博史 (大阪教育大学)