

二枚貝類は体表からプラスチック粒子を取り込む

Bivalves take up plastic particles from the body surface

国立研究開発法人海洋研究開発機構 地球環境部門 海洋生物環境影響研究センター 生田 哲朗 (Ikuta, Tetsuro)

海のプラスチック問題

海洋プラスチック問題というと、レジ袋を啞えたウミガメや、大量のプラスチックごみが胃から見つかったクジラなどが度々紹介される。しかしカメやクジラには大変申し訳ない見方ではあるが、それは単に彼らが可哀想という感情的な問題なのだろうか？

プラスチックは、利便性が高く耐久性があり安く製造できるため、現在、私たちの生活の様々な場面で使用されている。しかし、その大半が使い捨てであり、適切に管理・処理されなかったものは環境中に流出し、最終的には海に流れ着く¹⁾。プラスチックは可塑剤、難燃剤、紫外線安定剤などの添加剤を加えて製造加工され、さらに水環境中のプラスチック表面には疎水性の残留性有機汚染物質 (POPs) が吸着することが知られている。こうした添加剤や吸着物質の一部は強い毒性を持ち、内分泌かく乱作用や発癌性などが認められている。プラスチックは環境中に出ると、波や紫外線などの影響を受け、小さなプラスチック粒子となっていく。また、タイヤの摩耗粉塵や化学繊維くず、スクラビング剤など環境流出時にすでに微細な粒子となっているものもあり、その多くが海に流れ出ている。直径5 mm以下のプラスチック粒子はマイクロプラスチックと呼ばれており、これらは環境からの回収が難しく、分解しにくいので、環境中に長期間残留すると考えられている¹⁾。このようなマイクロプラスチックが生物の体内に入ること、添加剤や吸着物質に起因する化学的影響や、消化管の閉塞、組織構造の劣化などの異物としての物理的影響、さらにはプラスチックにコロニーを作る病原性微生物の感染症などによる生物学的影響をもたらす可能性があり、海洋生態系やヒトの健康への影響が懸念されている²⁾。カメやクジラの話は象徴的ではあるが、海洋プラスチック問題は私たちの未来を左右する、もっと身近に迫った問題である。

二枚貝類のプラスチック汚染

二枚貝類は一般に濾過食であり、鰓によって食物やマイクロプラスチックを含む大量の海水中の粒子を濾過する。また分布域が広く比較的採取が容易である上に、海底の決まった場所にとどまるため、二枚貝類はプラスチック汚染の指標生物として注目されている。実際これまでに、世界中の様々な種類のイガイ類、カキ類、アサリ・ハマグリ類、イタヤガイ (ホタテガイ) 類などの体からマイクロプラスチックが検出されている³⁾。これは養殖・販売されているものも例外ではなく、貝類を食べることによって、現在世界では1年に1人あたり平均751個のマイクロプラスチックを摂取しているとの試算もある³⁾。なかでもアジアは二枚貝から検出されるマイクロプラスチック量が北米やヨーロッパと比べて多い³⁾。二枚貝自身への影響としては、免疫系の機能低下、呼吸機能の不調、エネルギー消費の増加、組織構造の劣化、遺伝子発現変化など、マイクロプラスチックやその添加・吸着物の摂取に起因する

変化が観察されている⁴⁾。

濾過による経口摂取で消化管に入ったマイクロプラスチックの多くはそのまま排出される。消化管内での滞留時間はプラスチックに含まれたあるいは吸着した化学物質の汚染可能性と関係すると考えられる。小さい粒子ほど比較的速やかに体外に排出されるが、一部は消化管上皮を通過して循環系などに入る「トランスロケーション」と呼ばれる現象が報告されており、こうして組織内に入り込んだ粒子は体内で長い時間残留することが予想される⁵⁾。

食べなければ影響は無い？

深海の熱水噴出域や湧水域にはしばしば、地中から供給される硫化水素やメタンなどの還元物質の酸化エネルギーで有機物合成を行う化学合成微生物を生産者とする、化学合成生物群集がみられる。その優占種であるシロウリガイ類やシンカイヒバリガイ類などの二枚貝類は、鰓の上皮細胞に共生する化学合成細菌に栄養を大きく依存しており、鰓の濾過による摂食は無いが、あってもかなり限定的と考えられている。この特異な特徴を持つ二枚貝類は、固有性が高く人為的な環境破壊の影響を受けやすい脆弱な生物群といえ、その生態系保全の重要性は高い。二枚貝を始めとした動物へのマイクロプラスチックの影響を報告したこれまでの研究の多くは、経口摂取によるものを対象としている。二枚貝のプラスチック汚染が、主に濾過食を介した取り込みによるものと仮定すると、共生細菌に栄養依存する二枚貝での汚染はほぼ無いと予想される。しかし、プラスチック粒子が二枚貝の体表から体内に侵入することを示唆する報告もあり⁶⁾、多くのプラスチック粒子は最終的に深海に行き着くとされているため、著者らは、経口摂取以外の経緯による二枚貝類のマイクロプラスチック汚染についても適切に調査する必要があると考えた。

POPs が深海性化学合成二枚貝から検出

POPsとして知られるPCB (ポリ塩化ビフェニル) やPBDE (ポリ臭素化ジフェニルエーテル) は疎水性で水にはわずかにしか溶けず、藻類やプラスチック粒子などの水中の有機物粒子に容易に吸着する。両者共に近年規制が進む一方、世界中で採取された様々な生物から検出されているが、深海生物のPOPsの分布については、魚類を除いて情報は未だ少ない。著者らは、海洋生態系におけるPOPsの汚染の広がりを理解するために、人口の多い地域の近くに位置する相模湾初島沖 (深度857-1205 m) から採取したシロウリガイ類 (*Phreagena* spp., 過去30年間ほぼ10年毎に採取されたサンプル) とシンカイヒバリガイ類 (*Bathymodiolus japonicus*)、および人間活動から比較的離れた伊豆・小笠原海域の明神海丘 (深度1235 m) に生息するシンカイヒバリガイ類 (*B. septemdiarium*) のPCBとPBDEの含有量を測定した (図1)。その結果、PCBは調べた全ての試料から検出され、総PCB (含まれる塩素の数によって10種類に分けられる同族体の合計) 量は脂質重量あたりで18-110 ng/g (平

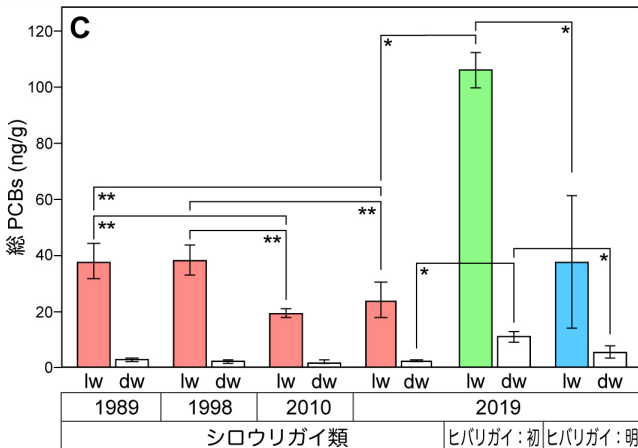
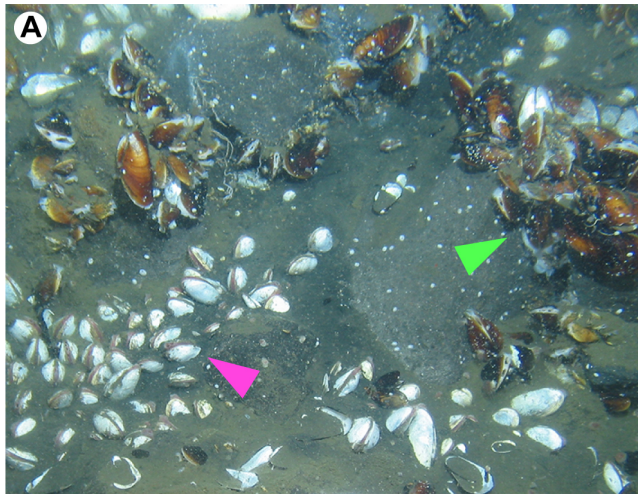


図1 (A) 相模湾初島沖のシロウリガイ類 (紫矢頭) とシンカイヒバリガイ類 (緑矢頭). (B) 明神海丘のシンカイヒバリガイ類 (青矢頭). (C) 各採集年代の試料から検出された総 PCB 濃度. 初: 初島沖, 明: 明神海丘, lw: 脂質量あたりの濃度, dw: 乾燥重量あたりの濃度. *, **: 統計的有意差 ($p < 0.05$). エラーバーは標準偏差 ($n = 3$). 文献7) から改変.

均 = 44 ng/g, 標準偏差 = 32) であった (図1C)⁷⁾. この値は、東京湾 (3000 ng/g) や大阪湾 (2000 ng/g) など、日本の人口密集域付近で採取された浅海性のイガイ類から検出された PCB 濃度を大きく下回るが、他のアジアや欧米諸国のいくつかの地点のイガイ類で検出されたレベルと同程度である⁷⁾. この結果は、PCB が摂食によることなく体表から完全あるいは大部分取り込まれたことを示している. わずかに水に溶けた PCB が溶解物として生体の中に取り込まれたというのが一つ

の可能性として挙げられるが、PCB を吸着したプラスチックなどの有機物粒子が細胞内へ取り込まれた可能性もある.

一方 PBDE については、脂質量あたりの総 PBDE 量 (含まれる臭素の数によって10種類に分けられる同族体のうち、調べた7種の合計) はどの試料でも検出限界以下か一部検出されてもごく僅か (脂質量あたり 1.4 ng/g 以下) であった⁷⁾. しかし、僅かであってもプラスチックの添加剤として広く利用されている PBDE が非摂食性の化学合成二枚貝から検出されたことは、体表からのプラスチック粒子の取り込みの可能性を示唆するものとして注目される.

二枚貝類が体表からマイクロプラスチックを取り込む仕組み

エンドサイトーシスは、細胞膜の形態変化によって細胞が細胞外の物質を取り込む過程の一つであり、なかでも貪食 (ファゴサイトーシス) と呼ばれる現象は、細胞が直径約 0.5 μm 以上の粒子状物質を取り込むエンドサイトーシスの一形態である. 過去に二枚貝におけるマイクロプラスチックの取り込みを調べた研究では、消化管で起こる取り込み過程の前の最初の段階として、濾過過程における鰓上皮細胞のエンドサイトーシスによる細胞内への取り込みを推定している⁸⁾. しかし、鰓の細胞における貪食によるマイクロプラスチックの取り込みに関する生理学および組織学的な細胞レベルでの証拠は示されていなかった. そこで著者らは、摂食が限定的な深海性二枚貝でも、鰓の細胞が貪食によってマイクロプラスチックを取り込み汚染する、という仮説を立て、これを検証するため、蛍光標識した人工ポリスチレンビーズ (直径 1 μm) をシンカイヒバリガイ (*B. japonicus*) の鰓に24時間曝露し、ビーズ取り込みの現象を確認する実験を行った⁹⁾. その結果、ビーズは鰓の表面側に位置する細胞に多く取り込まれ、ワートマニンとラトランクリン A という2種の貪食の阻害剤が共に、ビーズの取り込みに対して抑制効果があることが分かった (図2A-D). また、蛍光顕微鏡と電子顕微鏡の連続的の観察を行ったところ、ビーズは生体膜からなる小胞に包まれていることが分かった (図2E, F). さらに同様の観察を浅海性のミドリイガイ (*Perna viridis*) の鰓で行ったところ、シンカイヒバリガイと同じように、ビーズが細胞内の膜小胞に包まれていることが確認された (図2G). こうして深海性および浅海性二枚貝類は、貪食によって鰓の表面からマイクロプラスチックを細胞内に取り込むことがはっきりと示されたことになる⁹⁾.

複雑な取り込み経路を踏まえた理解が必要

ここで紹介した著者らの研究ではビーズ取り込みの現象を定量的に捉えるため、暴露実験は自然環境で想定されるプラスチック粒子濃度よりはるかに高い条件で行った. この実験条件では、生息地での実際のプラスチック粒子の汚染状況を直接推察することはできなかったが、今後の研究の基礎となる知見を提供することができた. また、熱水や湧水域のような場所に生息する固有性が高く脆弱な生物は、たとえ非摂食性であっても、あるいは摂食が限定的であっても、プラスチック汚染の影響を受けている可能性に警鐘を鳴らすものとなった. さらに、浅海性イガイにおいても鰓の細胞表面を介してマイクロプラスチックが貪食されることを示した. 同じく海洋性の濾過摂食生物であり、日本をはじめいくつかの国で食用とされているホヤ類でも、実験的に与えたプラスチックビーズの循環系へのトランスロケーションが報告されている¹⁰⁾. こうした二枚貝類以外の生物も、鰓などの体表からプラスチック粒子を取り込む可能性がある. 水生生物の体表を介した汚染によってマイクロプラスチ

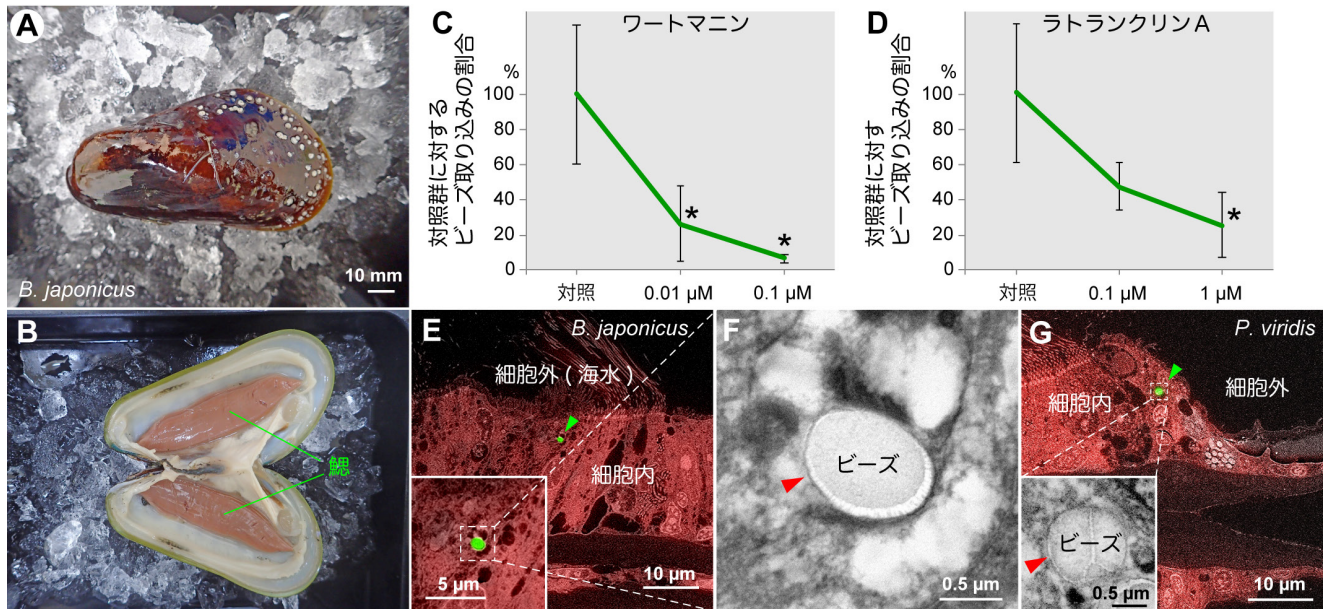


図2 (A・B) ビーズ暴露実験に用いたシンカイヒバリガイ (*B. japonicus*)。 (C・D) 鰓の細胞によるビーズ取り込みに対する2種の食害阻害剤の効果。*: 対照群に対する有意差 ($p < 0.05$)。エラーバーは標準偏差 ($n = 3$)。 (E-G) 蛍光顕微鏡と走査型電子顕微鏡による、鰓細胞内に取り込まれたビーズ (緑矢頭) の連続観察。赤矢頭: 膜小胞。文献9) から改変。

ックがヒトに媒介される可能性については、今後より詳しく検討する必要があるだろう。

海洋中の微小プラスチックは今後も増え続けると予想される¹⁾。今回紹介した研究では、直径1 μmのプラスチック粒子が鰓から貪食によって取り込まれることが示されたが、さらに小さな粒子では拡散によって細胞膜を通過することが示唆された例もあり、粒子径によっては他の仕組みで組織内に運ばれる可能性もある⁶⁾。いずれにしても、海洋生物におけるプラスチックの汚染(とそれに由来する可能性のある化学汚染)の経路は複雑であることが分かってきた。体表から細胞に取り込まれたプラスチック粒子の運命は今のところ不明であるが、取り込んだ生物に化学的、物理的、生理的な影響を与える可能性がある。二枚貝のプラスチック汚染の影響をより深く理解するためには、今後このような複雑な取り込み経路を踏まえた研究が必要と考えている。

引用文献

- Wayman C. and Niemann H. (2021) The fate of plastic in the ocean environment - a minireview. *Environ. Sci. Process. Impacts* 23: 198-212.
- Wright S. L., Thompson R. C. and Galloway T. S. (2013) The physical impacts of microplastics on marine organisms: A review. *Environ. Pollut.* 178: 483-492.
- Ding J., Sun C., Li J., Shi H., Xu X., Ju P., Jiang F. and Li F. (2022) Microplastics in global bivalve mollusks: A call for protocol standardization. *J. Hazard. Mater.* 438: 129490.
- Mkuye R., Gong S., Zhao L., Masanja F., Ndandala C., Bubelwa E., Yang C. and Deng Y. (2022) Effects of microplastics on physiological performance of marine bivalves, potential impacts, and enlightening the future based on a comparative study. *Sci. Total Environ.* 838: 155933.
- Kinjo A., Mizukawa K., Takada H. and Inoue K. (2019) Size-dependent elimination of ingested microplastics in the Mediterranean mussel *Mytilus galloprovincialis*. *Mar. Pollut. Bull.* 149: 110512.
- Al-Sid-Cheikh M., Rowland S. J., Stevenson K., Rouleau C., Henry T. B. and Thompson R. C. (2018) Uptake, whole-body distribution, and depuration of nanoplastics by the scallop *Pecten maximus* at environmentally realistic concentrations. *Environ. Sci. Technol.* 52: 14480-14486.
- Ikuta T., Nakajima R., Tsuchiya M., Chiba S. and Fujikura K. (2021) Interdecadal distribution of persistent organic pollutants in deep-sea chemosynthetic bivalves. *Front. Mar. Sci.* 8: 1735.
- von Moos N., Burkhardt-Holm P. and Kohler A. (2012) Uptake and effects of microplastics on cells and tissue of the blue mussel *Mytilus edulis* L. after an experimental exposure. *Environ. Sci. Technol.* 46: 11327-11335.
- Ikuta T., Tame A., Takahashi T., Nomaki H. and Nakajima R. (2022) Microplastic particles are phagocytosed in gill cells of deep-sea and coastal mussels. *Front. Mar. Sci.* 9: 1034950.
- Messinetti S., Mercurio S., Scari G., Pennati A. and Pennati R. (2019) Ingested microscopic plastics translocate from the gut cavity of juveniles of the ascidian *Ciona intestinalis*. *Eur. Zool. J.* 86: 189-195.