

マイクロプラスチックの海洋からの効果的な回収は可能か



随 筆

西 嶋 茂 宏*

Is it possible to remove microplastics from the ocean effectively?

Key Words : Microplastics, Electromagnetic Archimedes' method, removal

1. はじめに

近年、マイクロプラスチックの被害の可能性についての議論がなされるようになってきた。と言うのも、2016年のダボス会議（世界経済フォーラム年次総会）で、毎年800万tのプラスチックごみが海洋に流出し、2050年までに海洋中に存在するプラスチック（海洋プラスチック）が重量ベースで魚の量を上回るという予測が報告されたことが[1]、耳目を集めた原因と思われる。また、時は前後するが、2015年のG7エルマウ・サミット首脳宣言においても、海洋環境の保護の観点から海洋ごみ（特にプラスチック）が世界的な課題であることが認識された経緯もある[2]。

ここではこのマイクロプラスチックの回収の可能性について、福井工業大学の学生と共に議論してきたことを随筆として紹介したい。

2. マイクロプラスチック

2-1 マイクロプラスチックはなぜ注目されるのか

マイクロプラスチックというのは、大きさが5mm以下のプラスチックのことを指すが、なぜマイクロプラスチックが取り立てて問題にされているのであろうか。それは微細なサイズであるがゆえに、一度、海洋に流出したら回収がほぼ不可能であること。また、密度が小さいため海流に乗り長距離を移

動し問題を地球規模にすること（大気中での拡散も見つかっている）。

さらに、小海洋生物が餌と誤認し摂取しやすく、それらに付着した残留性有機汚染物質（Persistent Organic Pollutants 例えば製造過程で使用される添加物、あるいは海中には低濃度でしか存在しないPCBやDDEがマイクロプラスチックに吸着し周辺海水の 10^5 - 10^6 倍に濃縮されることもある[3]）が、食物連鎖による生物濃縮によって生態系に、さらには人間の健康に影響を及ぼす危険性があるからである。実際のところ、現在では人間への影響は確認されていないが（マイクロプラスチックそのものが魚類の成長を阻害することは報告されている）、その影響が顕在化する以前に対処することは、社会的不安を事前に払拭する意味からも重要であると考えられる。

2-2 そもそもマイクロプラスチックとは

ここでマイクロプラスチックの正体について考えてみる。上述したように5mm以下になったプラスチックのことであるが、これは大きさによる分類である。それゆえ他の大きさのプラスチックも有り、元の形状を残すマクロ・プラスチック、5mmより大きなメソ・プラスチック、5mmより小さく数 μm より大きなマイクロ・プラスチック、そしてそれより小さいナノ・プラスチックである[4]。（少し違和感を持つ命名ではあるが）。

また、生成過程（発生源）による分類もあり、もともとの大きさがマイクロプラスチックの範疇に入るものもあって、これを一次マイクロプラスチックと呼んでいる。つまり、製品や原料としてこのサイズで作られたもので、マイクロビーズ（洗顔剤やクリームに含有される）やレジンペレット（製品を製造する原料となる粒状プラスチック）がある。一方



* Shigehiro NISHIJIMA

1952年10月生まれ
大阪大学 大学院工学研究科 原子力工学専攻 (1982年)
現在、福井工業大学 工学部 原子力技術工学科 教授 工学博士
原子力工学 超電導応用
TEL : 0776-29-2676
FAX : 0776-29-7891
E-mail : nishijima@fukui-u.ac.jp
nishijima_prf@yahoo.co.jp

で、元は大きな形状であったのであるが、紫外線による劣化や波等による機械的破碎によって生ずるマイクロプラスチックもある。これを二次マイクロプラスチックと呼んでいる [5]。

プラスチックの種類としては、製造量が多い材料がマイクロプラスチック化していると考えられるが、それらはポリエチレン (PE)、ポリプロピレン (PP)、ポリ塩化ビニル (PVC) である [6]。しかしながらマイクロプラスチックは海を浮遊して問題となることを反映して、PE や PP が多い (海水の密度は 1.024 でポリ塩化ビニルは 1.35-1.45 である)。ただポリスチレン (PS) の密度は 1.04-1.09 であるがフロートなどの漁具として発泡スチロールの形態で利用されたものがマイクロプラスチック化している。

では実際どの形態のマイクロプラスチックの量が海洋中に多いのであろうか。マイクロプラスチックは、主として海岸で破碎されて生成される二次マイクロプラスチックが多いとされている [7]。ちなみに日本近海で浮遊しているマイクロプラスチックの約 0.8% が球状のマイクロビーズであることが報告されている。ただ同程度の粒子の内でのマイクロプラスチックの約 10% を占めていた [8]。また、横浜市内に限られた領域の海洋調査の結果ではあるが、二次マイクロプラスチックの方が一次マイクロプラスチックよりも割合が多い (2/3 以上) ことが報告されている [9]。

2-3 二次マイクロプラスチックの発生

問題となるのは多くは二次マイクロプラスチックであることが分かったが、具体的にどのように発生しているのであろうか。そのヒントが以下である [7]。メソプラスチックとマイクロプラスチックの存在量を海岸から沖合まで分布を取ってみると、メソプラスチックは沖合での存在確率が低く海岸近傍での存在確率が高くなっている。一方、マイクロプラスチックは海岸から沖合まで存在確率は高いままである。

この現象を説明するモデルが提案され [7]、それはメソプラスチックが優先的に海岸に打ち上げられ、紫外線による光化学的プロセスによる劣化や波の機械的な力による破碎を受け 5mm 以下のマイクロプラスチックとなるというモデルである。破碎で発生したマイクロプラスチックは引き潮に巻き込まれ沖合に流出し海洋に拡散すると考えると現象の説明が

つく。この説明では二次マイクロプラスチックの発生メカニズムも包括しており、メソプラスチックの破碎は紫外線による光化学的プロセスによる劣化や波の機械的な力によるとされ、従来のモデルと整合性が取れている。波によるメソプラスチックやマイクロプラスチックの移送についても考察がなされている。

2-4 日本近海のマイクロプラスチック

現在、海へ流入している海洋プラスチックごみは、アジア諸国からの発生によるものが、全体の 80% 強を占めると言われている。このため、問題となる二次マイクロプラスチックの発生もこの地域で高いものになっている。実際その濃度も、日本を含む東アジア海域が最も多く 172 万個 /km²、北太平洋の約 27 倍、世界平均の 16 倍と言われている。つまり日本近海は、マイクロプラスチック発生頻度の最も高い海域の一つと考えられているのである。

基本的にはマイクロプラスチックは海水より密度が低いことが理由で (主にポリエチレンやポリプロピレン) 海面近傍を浮遊しており、海流に乗り長距離を移動するため、前述したように問題を地球規模にしているのである。一方で、最近の研究でマイクロプラスチックは 3~数年で海洋表層から消失することが指摘された [10]。

これは漂流中に表面が生物膜あるいは付着生物で覆われ密度が高くなること、プランクトンや魚類に摂取されその排出物とともに沈降する等の複数の消失過程が存在する。事実、深海底でも高濃度のマイクロプラスチックが発見されており、問題は海洋表面のみならず全深度にわたる問題となる可能性があると言える。

3. マイクロプラスチック回収の可能性

3-1 現在の対策

このように問題をはらんだマイクロプラスチックの問題に対処するにはどのようにすればよいのであろうか。現在行われている対処法としては、使い捨てプラスチックの削減が主な対策となっている。また、二次プラスチックの発生場所である海岸漂着物の除去が行われているが、その発生機構からすると有効な方法である [7]。さらに長期的な対処法としては生分解性プラスチックに現プラスチックを置き

換えるのも有効であろう。いずれも重要な対処法であるが、中長期にわたる対処法であると言える。

では、現存の海洋のマイクロプラスチックはどうしたらよいのであろうか。残念ながらマイクロプラスチックを海洋から回収する工学的手法の検討は国内外で行われているとは言えない。ただ、上述したようにプラスチックの使用を制限することで、さらなる海洋中のマイクロプラスチックの増加を防ごうとしているのが現状である。これは海洋という大規模な対象に対して効果的で具体的な、技術的に可能な手法が存在しない事が理由の一つである。また、数 mm 程度のマイクロプラスチックを効率よくかつ海洋を汚染せず分離できる手法が見当たらないことも、いま一つの理由である。事実、網ですくい取る手法は実際上不可能である。

3-2 電磁アルキメデス法

前置きが長くなった。我々が考案した手法は電磁アルキメデス法という手法である。懸濁媒（この場合は海水）に電流を流すと同時に磁場を印加し、懸濁媒にローレンツ力を生じさせる。媒質をノズルから放出すれば電磁推進船の原理である。ここでは媒質を放出させず閉じ込めておく。すると媒質にはローレンツ力が静水圧のように働くであろう（バランスが悪いと媒質の対流を引き起こすことになるが）。この媒質の中に電気絶縁物が懸濁している状況を考えると、絶縁物には電磁力は働かないので、懸濁媒に働く電磁力は絶縁物にとっては周りの懸濁媒の圧力が大きくなったと同様な挙動をすると考えられる。ローレンツ力が下方に働く条件だとすると、初期に沈降していた絶縁物は浮上することになるであろう。これがゆえに、この現象は電磁アルキメデス法と呼ばれることがある。（常磁性媒質を磁場下に配置し懸濁粒子を浮上させる手法を磁気アルキメデス法と呼ぶことに似ている。）

この現象は 1950 年代に D. Leenov らによって解析されており [11]、それによると絶縁物球に働く力は次式で表される。

$$\mathbf{F} = -3/4 \cdot V \cdot \mathbf{J} \times \mathbf{B}$$

ここで V は絶縁物の体積、 \mathbf{J} および \mathbf{B} は電流密度と磁束密度である。式に負号が点いているのは、電磁力と反対方向に力が働くことを意味している。

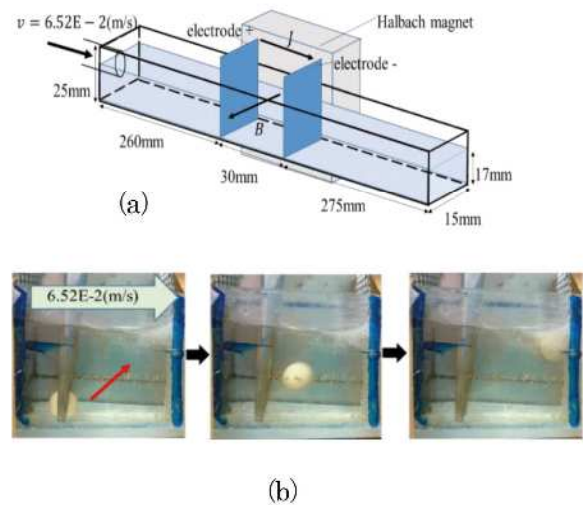


図1 電磁アルキメデス法によるマイクロプラスチックの分離。(a) メッシュ状電極を使用した装置の概念図。(b) 高密度球状のプラスチック (6mm ϕ) の浮上実験。下流に流されつつ浮上する。

本検討ではこの現象を利用してマイクロプラスチックを濃縮することを考えている。図1に電磁アルキメデス法によるプラスチックの基礎的な浮上実験の様子を示した。確かに浮上させ得ることが分かる。この現象を利用すれば、マイクロプラスチックを浮上あるいは特定方向への誘導が可能となる。

3-3 広大な海洋に対する考え方

上述の技術が実現可能だとしても対象が広大な海洋であり処理する海水も膨大である。この問題に対しても対処する考え方を構築しておかなければその実現性は乏しいものとなる。

そもそもマイクロプラスチックが問題とされるのは、つまるところ生物濃縮により人間への影響が危惧されるからである。つまりマイクロプラスチックを摂取した魚介類に POP が移行するので、その魚介類の摂食が問題となるのである。

このことに気づいて、開発した機器を、火力発電所や原子力発電所からの温排水を養殖用に使用している陸上養殖場に設置することに思いついた。養殖場での魚介類の密度は海洋よりも多いであろうから、その魚介類のマイクロプラスチックの摂取の可能性も大きいのではなかろうか。（あくまで推測である）

日本の海岸線には、火力発電所や原子力発電所が設置されており、大量の海水を取り込み復水器の冷却用に使用されている（大まかに火力発電所で $40\text{m}^3/\text{s}$ 、

原子力発電所で70m³/s)。使用後は、温排水となって放流されているが、その一部は、海産物の養殖用に利用されている。つまり、その温排水にもマイクロプラスチックが存在していることを示唆している。

さて、養殖には陸上養殖と海上養殖があるが、現在、海上養殖から陸上養殖へと注目が移りつつある。これは立地を選ばず、気候に左右されにくく、高い生産性を実現し得るからであり、世界の水産物需要の拡大に応え得る手法として期待されているからである。このため世界的に見ても陸上養殖の普及が加速しつつある。日本でも陸上養殖が盛んになっていくものと考えられる。実際、温排水を利用した日本の陸上養殖ではアワビ、ウニ、ヒラメ等の高級魚を対象とした養殖が盛んである。

このように注目されている陸上養殖であるが、養殖場で使用される温排水中のマイクロプラスチックの濃度と養殖されている魚介類の個体数密度を考慮すると、自然界で魚介類がマイクロプラスチックを摂取する確率よりも、養殖中に摂取する割合の方が高い可能性がある。養殖に用いられる温排水からマイクロプラスチックを除去することは、養殖される魚介類のマイクロプラスチック摂取量を低減することを意味し、安全・安心の魚介類を世界市場に流通させ得ることになり、社会的意義は大きいものと考えられる。

ただし、改めて言及しておくが、現在のところマイクロプラスチックの人体への影響は見つかっていない。ここでの提案は、あくまでの将来発生する可能性のある問題に対しての対策という位置づけである。

4. おわりに

本稿ではマイクロプラスチックの問題点や発生機構についてまとめるとともに、日本近海に存在するマイクロプラスチックについて述べた。この現状を背景として効率的に海洋からマイクロプラスチック

を分離できる可能性のある技術を開発したことを述べた。また、広大な海洋を対象とするのではなく、陸上養殖に供される温排水からのマイクロプラスチックの分離について言及した。

なお門外漢ゆえに記載している内容に筆者の誤解があるかと思われる。ご指摘いただければ幸いです。

参考文献

1. http://www.env.go.jp/water/marine_litter/00_MOE.pdf
2. http://www.env.go.jp/water/marine_litter/00_MOE.pdf
3. Y.Mato et al, Environ. Sci. Technol, 35 2001 PP.318-324
4. http://www.env.go.jp/water/marine_litter/H26okiai_2.pdf
5. http://www.env.go.jp/water/marine_litter/00_MOE.pdf
6. http://www.jpif.gr.jp/5topics/conts/world3_c.htm
7. 九州大学, 沿岸から大洋を漂流するマイクロプラスチックの動態解明と環境リスク評価 (4-1502) 平成27年度~平成29年度, 環境研究総合推進費終了研究成果報告書 H30
8. A. Isobe, Percentage of microbeads in pelagic microplastics within Japanese coastal waters, Marine Pollution Bulletin 110 (2016) pp 432-437
9. 蝦名 紗衣 ら、横浜市内マイクロプラスチック調査 (第1報), 横浜環境科学研究所報 43 (2019) pp26-30
10. A. Koelmans et al., All is not lost: deriving a top-down mass budget of plastic at sea, Environ. Res. Lett. 12(2017) 114028
11. D. Leenov et al., J Chem. Phys. 22(1954)683-688