

マイクロプラスチックの海洋物理学

九州大学 応用力学研究所

磯 辺 篤 彦

Physical oceanography on microplastics

Atsuhiko Isoe, Research Institute for Applied Mechanics

*E-mail : aisobe@riam.kyushu-u.ac.jp

1 はじめに

10年以上前の研究開始当初は、背景流動場に流される単純な粒子追跡モデルで十分な成果が上がる(論文が稼げる)と楽観していた海洋プラスチックごみやマイクロプラスチックが、開始後すぐ意外と手強いことに気づいた。いま世界を見渡せば、このテーマについては、6時間に一編のペースで論文が量産されている(ただし日本発の論文は2%程度; 2020年 Scopus による)。研究者が爆発的に増えた背景の一つに社会的要請があることは疑いない。しかし、専門の似た読者が多いと想定できる「ながれ」誌であれば気楽に書かせてもらおうが、社会的要請だけで研究などできるものではなかろう。研究者が爆発的に増えた理由の大部は、なによりテーマがチャレンジングであるからだ。そして、先駆的ないくつかの仕事を除いて、ほぼ研究の歴史がゼロに等しく、先進国から発展途上国まで世界の研究者が横一線に並んだ、近現代では稀なテーマであるからだろう。

1940年代のセルロイドから始まったプラスチック生産は、2015年までに累計83億トンに達して、うち49億トンが廃棄された¹⁾。その中で適正処理されず屋外に投棄された量は年間で約3000万トンに至り²⁾、年間200万トン前後は海に流出するとの推計がある^{3,4)}。安価なプラスチックであれば大量に廃棄され、そして一部が環境に流出するのである。

海水より軽く腐食分解しない丈夫な物質が、永い地球史にあって初めて大量に海に流れ込んでいる(生産量の半分を占めるポリエチレンやポリプロピレンの比重は海水より軽い)。そして、次節にある通り海洋生態系への干渉が危惧されている。生態系を含む地球環境は、プラスチックによって変質していくのか、あるいは、どこかにプラスチックを運び去

り、破碎・吸収して、生態系から切り離す機能を持つのか。人為物に対する地球環境の復元機能(レジリエンス)をプラスチックで量る。本稿が、このチャレンジに多くの流体研究者が目を向ける機会となれば幸いに思う。

2 マイクロプラスチックとはなにか

海岸漂着した海ごみのうち、個数比にして約7割は廃棄プラスチックである⁵⁾。漂着したプラスチックごみを半年ほど放置すれば紫外線などによる劣化が進行し⁶⁾、これに海岸砂との摩擦や寒暖差による伸縮といった物理的な刺激が加わって、破碎が繰り返されるらしい。こうして生成されるプラスチック微細片のうち、特に大きさ5mm以下のプラスチック片を、私たちはマイクロプラスチックと呼んでいる(写真1)。いまのところ、発見された最小サイズは数十 μm 程度であるが⁷⁾、地球環境下でどの程度まで破碎が進行するかよくわからない。また、どの程度の時間をかけて破碎が進行するかも不明である。マイクロプラスチックの発生機構の解明や発生量推定は、現在、このテーマにおける最重要課題の一つである。

それほど小さなマイクロプラスチックが、なぜ環境負荷となるのだろうか。プラスチック表面に吸着しやすい海水中の化学汚染物質が、マイクロプラスチックの誤食を通して海洋生物に移行する。そして、これが体内で脱着したのち何らかのダメージを与える危惧がある⁸⁾。加えて、未使用のプラスチックビーズを水棲生物に摂食させ、発現した障害を報告した実験結果も数多く報告されている⁸⁾。毒ではないが栄養にもならないプラスチックの大量摂取は、生物にとって大きな負担なのだろう。いまのところ、

実海域におけるマイクロプラスチック浮遊量は海洋生物にダメージを与えるほどではないが、このままのペースで浮遊量が増加を続ければ、2060年代には誤食した海洋生物にダメージが現れるとの予測がある⁹⁾。

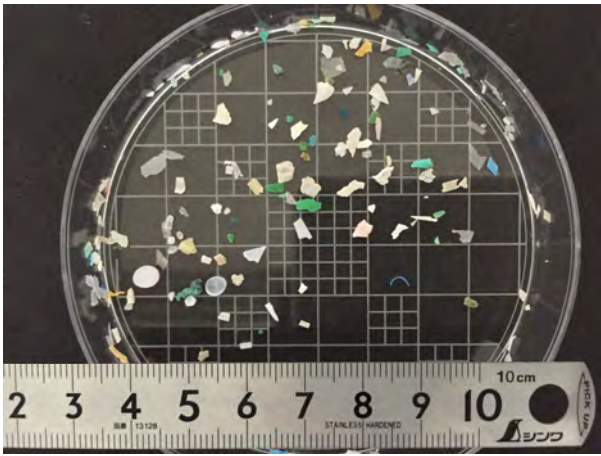


写真1 日本海で採取したマイクロプラスチック

3 浮遊マイクロプラスチックの調査

2010年代の前半には、まだ採取方法や単位に統一性がなく、異なる研究で得た浮遊量の比較や統合が困難であった。今では複数のガイドラインが公開され¹⁰⁻¹²⁾、論文による採取方法の差異は目立たなくなっている。

いま最も頻繁に行われている浮遊マイクロプラスチックの採取は、動物プランクトンの採取に準拠した海面近くの曳網による。これは、目合い0.3mmのニューストーン・ネット(海面近くに浮遊する稚魚やプランクトンを採取する観測器具)を調査船で水平方向に数十分間曳網し、この間にネットを通過する海水に含まれるマイクロプラスチックを漉し採るものである。浮遊マイクロプラスチックは、ほとんどがポリエチレンやポリプロピレンで海水よりも軽いため、ネットは海面近く(海面から深さ1m程度)に固定している。すなわち、浮遊するマイクロプラスチックの調査とは、海面下1mまでの海洋表層に浮遊する、0.3mm程度までの大きさのプラスチック片に限定したものである。分析方法の限界もあって、このあたりが現在のマイクロプラスチック観測が対象としているサイズの限界である。稀には複数のネットを鉛直方向に連結した水平曳網によって¹³⁾、あるいは特定の深度からの取水^{14,15)}によって、マイクロプラスチックの鉛直分布を定量する場合がある。

続いて、採集したマイクロプラスチックを海水ごと実験室に持ち帰り、目視で判別したプラスチック片を丁寧にピンセットで取り出していく。それでも、小さなプラスチック片は、生物起源の微細片と区別

をつけにくい。この場合は、分光学的な方法(フーリエ変換赤外分光光度計などの利用)によって材質判定を行う。顕微鏡で拡大してサイズ(最大長さ)を計測したのち、マイクロプラスチックの数を集計する。

4 浮遊マイクロプラスチックの輸送過程

4.1 海洋科学委員会(SCOR)のレビュー

最近になって、海洋科学委員会(SCOR)の浮遊ごみ輸送とモデリングの作業部会(WG 153, FLOTSAM)が発表した総説¹⁶⁾では、海洋ごみの輸送に関わる海洋物理過程を、大規模海洋循環、サブメソ規模の輸送過程、ストークス・ドリフト、内部波、風による輸送(風圧流あるいは windage)、ラングミュア循環、鉛直混合、結氷や解氷に伴う輸送、河川プリュームや沿岸前線、沿岸流や表面波、津波や洪水など極端現象、そして生物輸送に分けて解説を加えている。本稿で全過程を解説することはできないが、沿岸と外洋域の水平輸送、そして鉛直方向の分布について、以下に解説する。包括的な解説は上記の総説を参照されたい。

4.2 沿岸海洋での水平輸送

海水より比重の小さなマイクロプラスチックは海面近くを浮遊するため、海流による輸送に加え風波による体積輸送(ストークス・ドリフト)を考慮する必要がある。その事実を最初に指摘した Isobe et al., (2014)¹⁷⁾に従って、まず、マイクロプラスチックの沿岸海洋における輸送過程について述べる。

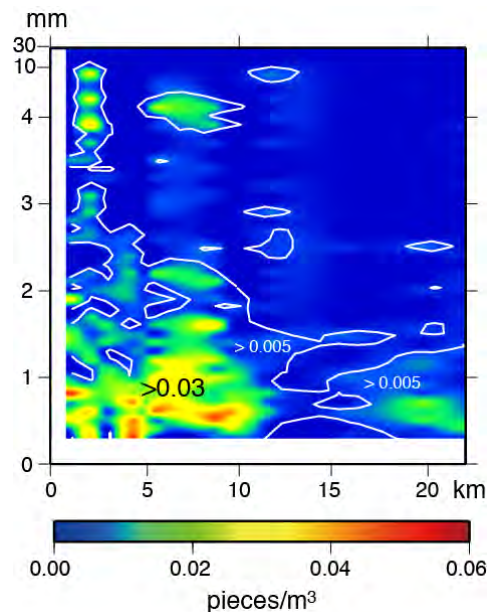


図1 瀬戸内海で採取したマイクロプラスチックの浮遊濃度(トーン)。

まず、実際に西部瀬戸内海における複数の観測点で採取したマイクロプラスチックを使って、プラスチック片のサイズ(最大長さ)を縦軸に、観測点から海岸までの距離を横軸にして、浮遊密度分布を描いてみよう(図1)。ただし、河口で採取したマイクロプラスチックは除いている。図の左側に位置する海岸近くでは、マイクロプラスチックからメソプラスチック(5 mm以上のプラスチック片)まで、幅広いサイズのプラスチック微細片(以降、マイクロプラスチックとメソプラスチックを合わせて「プラスチック微細片」と表記)が採取できた。ところが興味深いことに、沖合(図の右側)からは、大きめのプラスチック微細片が消えてしまう。比較的大きなプラスチック微細片は海岸近くを漂流し、細かくなったマイクロプラスチックのみが、遠く沖合にまで分布を広げている。

この観測結果を踏まえて、Isobe et al. (2014)¹⁷⁾は、沿岸海洋におけるプラスチック微細片の漂流モデルを提案した。比重の小さな微細片は、海水中で浮力を得て上昇する。その速さ(終端速度)は、浮力と周辺海水による摩擦力の平衡で決まる。小さな物体ほど、体積のわりに表面積が大きいので、浮力よりも摩擦力が効いて上向きの終端速度が小さくなる。よって、波や風による乱れが強い海洋最表層で、終端速度の小さなマイクロプラスチックは深い層を漂流し、一方でメソプラスチックは海面近くを漂う傾向にある。

さて、海上で寄せては返す波は海水を完全には返しきらず、結果として波の寄せる方向に緩やかな流れ(ストークス・ドリフト)を生成することがある。総じて浅海の波は海岸へ向かうため、ストークス・ドリフトも岸に向かう。風波に伴うストークス・ドリフトは海面で最速となり、下層にいくほど速度を落とす。結果として、海面近くを漂うメソプラスチックは、速いストークス・ドリフトによって選択的に海岸へと流れ寄せられる。

海岸近くまで寄せたメソプラスチックには漂着機会が増える。漂着すれば紫外線や寒暖差で劣化が進行し、加えて海岸砂との摩擦など物理的な刺激でマイクロプラスチックに破碎されていく。小さなマイクロプラスチックになってしまえば、波にさらわれて再び海へと漂流を始め、今度はストークス・ドリフトに運ばれることなく、海流によって海岸を離れ遠く沖合へ向かう。沿岸海洋は、メソプラスチックをマイクロプラスチックへと、効率よく破碎を進行させる機能を持つ。

このようなストークスドリフトの重要性は、沿岸海洋のみならず、縁辺海¹⁸⁾や外洋¹⁹⁾における浮遊マ

イクロプラスチック輸送でも指摘されている。

4.3 大洋の循環

本節は思考実験である。大洋の海洋プラスチック循環を実証的に論じるには、まだ現場観測データが不十分で、漂流するマイクロプラスチックについて、いくつかの集積域の存在が指摘される程度なのである^{9, 20, 21)}。それでも、断片的な情報は、いくつかの興味深い海洋プラスチック循環の描像を垣間見せている。

さて、全球の海洋循環を概略すれば、南極と北極で冷やされた海水が深く沈み込み(deep convection)、中緯度や赤道域の深層を広がりつつ、ゆっくりと湧昇をして表層に戻る(deep convection から 2000 年ほどを要する)というものである。表層に戻った海水は、亜熱帯循環や亜寒帯循環の中を移動しつつ、長い年月をかけて両極のどちらかに到達し、再び deep convection に吸い込まれていく。ここに、海水より比重の軽いマイクロプラスチックを流せば、どこに行き着くだろうか。プラスチックは自然では分解しづらい。そのため、浮遊する状況が続く限り、コンベアベルトに乗って運ばれるように、いつかは両極のどちらかに到達するかもしれない。しかし、浮力のため deep convection に吸い込まれることなく、両極の表層海洋にマイクロプラスチックが蓄積するのではないか。

Isobe et al. (2017)²²⁾ は、南極海におけるマイクロプラスチックの浮遊密度を調査し、大陸からタスマニアにかけて配置した 5 点で浮遊密度を調べた。南極大陸から遠方の測点では、ほとんどマイクロプラスチックが検出されなかったが、大陸に近接する 2 点でのみ、北太平洋に匹敵する浮遊密度が観測された。一度限りの 5 点の観測で結論づけることはできないが、Isobe et al. (2017)²²⁾ は、先述した deep convection によるマイクロプラスチックの蓄積について言及している。高濃度のマイクロプラスチックは、北極のグリーンランド周辺やバレンツ海でも観測される(Cózar et al., 2017)²³⁾。彼らは、北極海が「プラスチック・コンベアベルトの dead end」であるとの仮説を提案した。極域は浮遊マイクロプラスチックの sink として機能するのだろうか。

4.4 鉛直混合

マイクロプラスチックの 80-90%は、海水よりも比重の小さなポリエチレンやポリプロピレンである¹⁷⁾。海が極限まで静穏ならば、全てのマイクロプラスチックは海面に浮くことだろう。もちろん、実際の海洋表層には物質を攪拌する乱流鉛直混合があり、

マイクロプラスチックの浮遊密度(ここでは海水単位体積あたりの浮遊個数で定義; 例えば個 m^{-3})は海面から指数関数的に減少していく。実際に採取ネットを鉛直方向に連結した浮遊層は海面から深さ 1 m 程度までに集中するようである¹³⁾。ただし、その分布は観測時の気象・海象条件に大きく左右される。海面より上向きを正とした水深(z)に対して、浮遊密度(N)の変化は、

$$N = N_0 e^{\frac{w}{A_0} z}, \quad (1)$$

と表現されることが多い²⁴⁾。ここで、 N_0 は海面近くでの浮遊密度で、通常の水平曳網調査によって得る観測値はこれである。 w はマイクロプラスチックが浮力を得て上昇する終端速度で、実験値として

$$w = 0.002\delta, \quad (2)$$

と置くことができる¹³⁾。式中の δ はマイクロプラスチックの最大長さ(mm)で、(2)式が算出する鉛直流速の単位は m s^{-1} であることに注意されたい。定数($w = 5.3 \text{ mm s}^{-1}$)を用いて代替することもある¹³⁾。さらに、

$$A_0 = 1.5u_*kH_S, \quad (3)$$

であり、ここで u_* は摩擦速度($=0.0012U_{10}$)、 U_{10} は海面上 10mの風速(m s^{-1})、 k はカルマン定数(0.4)、そして H_S は1/3有義波高(m)である。

マイクロプラスチックの鉛直分布は、式(1)–(3)に示すとおりに観測時の波高や風速に依存する。従って、海域で採集したマイクロプラスチックの浮遊密度 N_0 は、その場限りのものであって、同じ位置でも他の観測日との比較や、あるいは他海域との比較はあまり意味がない。Isobe et al. (2015)²⁵⁾では、マイクロプラスチック観測の二次的なデータ処理として、(1)式の無限遠までの鉛直積分値($M = N_0 A_0 / w$; 単位は、例えば個 km^2)を求め、この鉛直混合に依存しない積分値を利用した海域比較や季節変動の検証、あるいは統合データセットの作成を提案している。また、以上の議論から明らかのように、マイクロプラスチック観測では、同時に風速と波高をメタデータとして記録する必要がある。

5 ミッシング・プラスチック

腐食分解しないプラスチックごみであるが、海洋全体に残る総量の推算是難しい。荒天のたび漂着と再漂流を繰り返す漂着プラスチックごみの総量を、海岸で正確に見積もる体制は、わが国のみならず世界で整っていない。まして海洋に漂う総量は船舶からの目視観測に頼って、高い精度は期待できそうにない。それでも、最近までの観測結果を統合したEriksen et al. (2014)²¹⁾は、世界の海洋プラスチックごみのうち、漂流ごみの総量を 25 万トンと見積もって

いる。そして、一年間の海洋流出量が 200 万トン前後であるにもかかわらず、そして過去 60 年以上もプラスチックを使い続け、そして捨て続けてきたにもかかわらず、現在の海洋で現存量がわずか 25 万トンという少なさ(ミッシング・プラスチックのパラドクス)が、世界の研究者を戸惑わせている。環境中に捨てられたプラスチックごみのほとんどは行方不明なのである。

他の観点からミッシング・プラスチックを議論してみよう。式(1)に従えば、調査ができるほど静穏な観測条件であれば、浮遊マイクロプラスチックの大半が曳網調査で捉えられるはずであった。ここで、これまで日本周辺海域で採取した全てのマイクロプラスチックを用いて、浮遊密度(海水単位体積当たりの浮遊個数)をサイズごとにプロットしよう(図 2)。サイズが小さくなるほど、浮遊密度(棒グラフ)の増加が著しい。もちろん、一片のプラスチックが破碎を繰り返せば、次第に細片数は増えていくだろう。従って、この浮遊密度の増加は当然である。

ここで、5 mm サイズのマイクロプラスチック(図 2 の白丸の位置)の総体積(プラスチック密度を一定とすれば総質量)を計算する。続いて、この総体積を一定に保ったまま破碎が繰り返されると仮定し、サイズの減少に応じた浮遊密度を求めた(図中の破線; サイズを直径、その 1/10 を高さとした円柱換算で体積を計算)。すなわち破線は、5 mm サイズの浮遊密度から期待される、各サイズでの浮遊密度の予想曲線である。サイズが 1 mm 程度までは、棒グラフは破線の変化に概ね対応している。ところが、1 mm を下回ったあたりから両者の乖離が目立つ。サイズが小さくなるほど等比級数的に数を増す予想曲線に比べ、海面近くで採取された 1 mm 以下のマイクロプラスチックは、期待されるよりも、はるかに少ない浮遊密度であった。ここでは見やすくするため図の上部を切っているが、実のところサイズが 1 mm 程度の予想曲線は観測値の 5 倍程度に、サイズが 0.5 mm 以下になれば 100 倍程度にまで差が広がる。私たちは予想される浮遊量の 1%程度しか捉えることができていなかったのである。

1 mm 以下のマイクロプラスチックは、どこへ消えたのだろうか。一つの可能性は、採集からの漏れである。たとえサイズが網の目合い 0.3 mm より長くとも、細長い形状であれば網をすり抜けることができる。また、細かなマイクロプラスチックほど浮力を得にくく、深い層に長く滞留しているかもしれない。一方で、長く漂流するうちにバクテリアや藻類といった海洋生物が表面に付着して重くなったマイクロプラスチックは、次第に沈降を始めるとの報告があ

る²⁶⁾。海洋生物が摂食したのち、糞や死骸に混じって海底まで沈降するかもしれない。砂浜海岸での吸収も無視できない²⁷⁾。しかし、ほとんどは未解明かあるいは研究が未着手であり、このミッシング・プラスチックの行方は、いま海洋プラスチック汚染研究の最も重要なテーマの一つである。

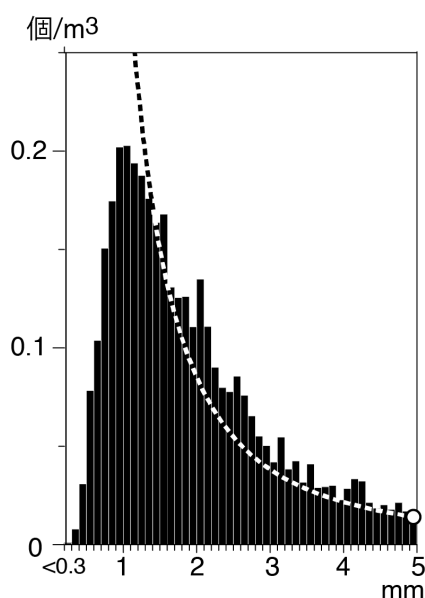


図2 日本周辺海域で採取されたマイクロプラスチックのサイズ分布。横軸はサイズ(最大長さ)で、縦軸は海水一立方メートルあたりに浮かぶマイクロプラスチックの個数。破線は本文参照

6 おわりに

地球環境のレジリエンスが、案外と海洋プラスチックにうまく対応する楽観的なシナリオは次の通りである。破碎を繰り返して細くなったマイクロプラスチックが、生物の付着に伴って次々と海底に沈降し、海底泥に吸収され生態系に干渉しなくなる、あるいは海岸で砂に吸収されてしまう。この場合、海洋プラスチック汚染の回避のため、プラスチックの“環境吸収量”を見極め、これを上回らないプラスチックの流出量に留めることが私たちには求められる。最悪のシナリオは、破碎を繰り返し観測限界の0.3 mmを下回って細くなったプラスチックが、そのまま沈降することなく漂流を続け、すでに私たちの気づかぬうちに相当程度が生態系に吸収されているというものだ。細かなマイクロプラスチックは体内の様々な場所に移動しやすく、誤食した生物のダメージが大きくなるとの報告がある²⁸⁾。

環境流出したプラスチックごみがマイクロプラスチックに破碎する過程や破碎の限界、そして破碎が進んだ微細なマイクロプラスチックの行方など、本

来のシナリオを知るため私たちが取り組むべき研究課題は多い。そして、未だ海洋プラスチック循環の全容解明にはほど遠い現状である。

いま私たちは、海底に沈んだプラスチックの検出や、海底への沈降量を推定すべく、地質学や古海洋学、あるいは古生物学分野の研究者と連携を進めている(2020年 JpGU セッション「地球科学としての海洋プラスチック」)。マイクロプラスチックへの破碎過程(発生過程)を探求すべく、高分子科学分野の研究者との連携研究も始まっている。これまで海洋物理学との連携が希薄だった分野との協働が、海洋プラスチック汚染研究には必要なのだ。新たな観測手法の導入やモデリングの設計を含めて、伝統的な海洋物理学の枠から外に出ることが、このテーマへのチャレンジには必要なのである。

引用文献

- 1) Geyer, R., Jambeck, J. R., Law, K. L.: Production, use, and fate of all plastics ever made, *Science Advances*, (2017) 3:e1700782.
- 2) Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R., and Law K. L.: Plastic waste inputs from land into the ocean, *Science*, 347 (2015) 768–771.
- 3) Lebreton, L., J. van der Zwet, Damsteeg, J.-W., Slat, B., Andrady, A., and Reisser, J.: River plastic emissions to the world's oceans, *Nature Communications*, (2017) 8:15611.
- 4) Schmidt, C., Krauth, T., and Wagner, S.: Export of plastic debris by rivers into the sea, *Environmental Science and Technology*, 51 (2017) 12246–12253.
- 5) Derraik, J. G. B.: The pollution of marine environment by plastic debris: a review, *Marine Pollution Bulletin*, 44 (2002) 842–852.
- 6) Andrady, A. L.: “Microplastics in the environment”, *Marine Pollution Bulletin*, 62 (2011) 1596–1605.
- 7) Enders, K., Lenz, R., Stedmon, C. A., Nielsen, T. G.: Abundance, size, and polymer composition of marine microplastics $\geq 10\mu\text{m}$ in the Atlantic Ocean and their modelled vertical distribution, *Marine Pollution Bulletin*, 100 (2015) 70–81.
- 8) de Sá, L. C., Olivera, M., Ribeiro, F., Rocha, T. L., Fütter, M. N.: Studies of the effects of microplastics on aquatic organisms: What do we know and where should we focus our effort in the future?, *Science of the Total Environment*, 645 (2018) 1029–1039.
- 9) Isobe, A., Iwasaki, S., Uchida, K., Tokai, T.:

- Abundance of non-conservative microplastics in the upper ocean from 1957 to 2066, *Nature Communications*, (2019) 10, 417.
- 10) Masura, J., Baker, J. B., Foster, G., Arthur, C.: Laboratory methods for the analysis of microplastics in the marine environment: recommendation for quantifying synthetic particles in waters and sediments, NOAA Technical memorandum NOS-OR&R-48 (2015) 31 pp.
- 11) GESAMP, “Guidelines for the monitoring and assessment of plastic litter in the ocean”, United Nations Environment Programme, (2019) 123 pp.
- 12) Michida, Y. et al.: Guidelines for harmonizing ocean surface microplastic monitoring methods”, Ministry of the Environment, Japan (2019) 71 pp.
- 13) Reisser, J. et al.: The vertical distribution of buoyant plastics at sea: an observational study in the North Atlantic Gyre, *Biogeoscience*, 12 (2015) 1249-1256.
- 14) Song, Y. K. et al.: Horizontal and vertical distribution of microplastics in Korean coastal waters, *Environmental Science and Technology*, 52 (2018) 12188–12197.
- 15) Lusher, A. L., Bunke, A., O’connor, L., Officer, R.: Microplastic pollution in the Northeast Atlantic Ocean: Validated and opportunistic sampling, *Marine Pollution Bulletin*, 88 (2014) 325–333.
- 16) van Sebille, E. et al.: The physical oceanography of the transport of floating marine debris, *Environmental Research Letters*, 15 (2020) 023993.
- 17) Isobe, A., Kubo, K., Tamura, Y., Kako, S., Nakashima, E., Fujii, N.: Selective transport of microplastics and mesoplastics by drifting in coastal waters, *Marine Pollution Bulletin*, 89 (2014) 324-330.
- 18) Iwasaki, S., Isobe, A., Kako, S., Uchida, K., Tokai, T.: Fate of microplastics and mesoplastics carried by surface currents and wind waves: a numerical model approach in the Sea of Japan, *Marine Pollution Bulletin*, 121 (2017) 85-96.
- 19) Doble, D. et al.: Large impact of Stokes drift on the fate of surface floating debris in the South Indian Basin, *Marine Pollution Bulletin*, 148 (2019) 202–209.
- 20) Cózar, A. et al.: Plastic debris in the open ocean, *PNAS*, 111 (2014) 10239–10244.
- 21) Eriksen, M.: Plastic pollution in the world’s oceans: More than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea”, *PLoS ONE* 9(12) (2014) e111913.
- 22) Isobe, A., Uchiyama-Matsumoto, K., Uchida, K., Tokai, T.: Microplastics in the Southern Ocean, *Marine Pollution Bulletin*, 114 (2017) 623-626.
- 23) Cózar, A. et al.: The Arctic Ocean as a dead end for floating plastics in the North Atlantic branch of the thermohaline circulation”, *Science Advances*, (2017) 3:e1600582.
- 24) Kukulka, T., Proskurowski, G., Morét-Ferguson, S., Meyer, D. W., Law, K.: The effect of wind mixing on the vertical distribution of buoyant plastic debris, *Geophysical Research Letters*, 39 (2012) doi:10.1029/2012GL051116.
- 25) Isobe, A., Uchida, K., Tokai, T., Iwasaki, S.: East Asian seas: a hot spot of pelagic microplastics, *Marine Pollution Bulletin*, 101 (2015) 618–623.
- 26) Long, M. et al.: Interactions between microplastics and phytoplankton aggregates: Impact on their respective fates”, *Marine Chemistry* (2015) 175, 39–46.
- 27) Tura, A. et al.: Three-dimensional distribution of plastic pellets in sandy beaches: shifting paradigms, *Scientific Reports* (2014) 4:4435.
- 28) Lee, K.W., Shim, W. J., Kwon, O. Y., Kang, J. H.: Size-dependent effects of micro polystyrene particles in the marine copepod *Tigriopus japonicus*, *Environmental Science and Technology*, 47 (2013) 11278–11283.