

[原 著]

神奈川県沿岸におけるマイクロプラスチック漂着状況の 空間的・時間的変動

池貝隆宏*・三島聡子・小林幸文

The spatial and temporal variability about beached microplastics on the coast of Kanagawa prefecture

Takahiro IKEGAI *, Satoko MISHIMA and Yukifumi KOBAYASHI

摘 要

神奈川県沿岸のマイクロプラスチック汚染状況を把握するため、相模湾4地点及び東京湾1地点の海岸で漂着マイクロプラスチックの調査を行い、漂着状況の空間変動と時間変動を調べた。

空間変動については、満潮線の漂着状況の特徴が海岸間で大きく異なることが分かった。この差は、外洋由来ではなく、内陸の発生源由来のマイクロプラスチックの影響を強く受けたことにより生じたことと推定された。満潮線に漂着したマイクロプラスチックの一部は海風により内陸側へ輸送されるが、その傾向はペレットで顕著に表れた。また、満潮線に漂着するマイクロプラスチックのサイズ分布は、沿岸を漂流するマイクロプラスチックに比べて大きいものの割合が高くなることが分かった。

時間変動については、気象の影響として沖から陸に向かう風向の強風が長時間続いたときに漂着量が増加し、台風時の漂着量は平時の3倍に達することが分かった。季節変動では、相模湾沿岸では季節風の影響を受け、沖から陸に向かう風が卓越する春期に沖合の漂流マイクロプラスチックが陸域近くに輸送されてその密度が高くなるため、漂着量が増加すると推定された。一方、マイクロプラスチックの材質構成は、期間を通じて大きな変化は見られなかった。

2つの海岸で漂着が確認された小粒径の発泡ポリスチレン球の由来を推定したところ、クッション材として利用される微小発泡ビーズの可能性が高いと推定された。こうした製品の適正な処理が重要であることが示唆された。

Abstract

In order to understand microplastic pollution in the coastal areas of Kanagawa Prefecture, we surveyed beached microplastics on the coast at 4 sites in Sagami Bay and 1 site in Tokyo Bay. We also examined spatial and temporal variations in microplastic distribution and characteristics.

Spatially, the characteristics of microplastics that accumulated at the high tide line differed between the coastal sites. We presume that this difference was caused by the influence of microplastics derived from inland sources only, not by microplastics from the open ocean. Some of the beached microplastics at the high tide line were transferred inland by the sea breeze, and this tendency was observed in the distribution of resin pellets. In addition, we found that the proportion of large-size microplastics was higher at the high tide line than in

神奈川県環境科学センター, 〒254-0014 神奈川県平塚市四之宮 1-3-39

* 連絡責任者: ikegai.gt76@pref.kanagawa.jp

microplastics drifting at the sea surface near the coast.

Temporally, we found that the amount of beached microplastics greatly increased when weather conditions allowed strong onshore winds to persist for a long time. The amount of microplastics deposited during typhoon conditions was three times the amount deposited during normal weather conditions. Seasonally, we found that the density of drifting microplastics in coastal areas increased as a result of prevailing seasonal winds transporting drifting microplastics from offshore to the coasts. The amount of beached microplastics around Sagami Bay increased during the spring, however the composition of beached microplastics did not change significantly during this period.

By observing small expanded polystyrene spherules beached along 2 coasts, we determined that these spherules were likely micro-foaming beads used as cushioning material in packaging. We suggest that proper treatment and disposal of such products is important for controlling coastal microplastic pollution.

キーワード：漂着マイクロプラスチック、沿岸部、地域間比較、季節変動、由来推定

Key words: Beached microplastics, Coastal areas, Regional comparison, Seasonal variability, Source estimation

1. はじめに

国連の海洋環境保護の科学的側面に関する専門家会合によれば (GESAMP, 2015), マイクロプラスチック (MP) とはサイズが 5 mm 以下のプラスチックの総称である。MP には、工業原料のペレットやパーソナルケア製品にスクラブ剤として含まれるマイクロビーズなどの一次 MP のほか、プラスチックごみや化学繊維が環境中で劣化し細片化した二次 MP が含まれ、形態や材質が多様である。もともと石油から製造されたプラスチックは有機性汚染物質との親和性が高いため、MP は海中の低濃度の残留性有機汚染物質を吸着・濃縮し、輸送媒体となって遠隔地に拡散させる作用を持つことが明らかにされ (Mato *et al.*, 2001; Endo *et al.*, 2005; Ogata *et al.*, 2009), 世界的に注目されるようになった。魚類による MP の摂食も報告され (Rochman *et al.*, 2015; Tanaka *et al.*, 2016), 海洋生態系全体に MP 汚染が拡大しているとする指摘もある (山下ら, 2016)。こうした状況を踏まえ、国際的な海洋 MP 汚染対策の必要性が 2015 年の G7 エルマウサミットや 2017 年の G7 ボローニャ環境大臣会合等において議論されたところである。

MP の海洋中の総量はおよそ 5 兆個 (Eriksen *et al.*, 2014) と見積もられているが、日本近海の漂流 MP は特にその量が多く、個数濃度は 1,720,000 pieces/km² で全海洋平均値の 27 倍も高いことが明らかにされた (Isobe *et al.*, 2015)。したがって、

日本近海は MP 削減対策を積極的に推進すべき海域であると言える。また、日本国内からも河川を通じて MP が海域へ流出していることが確認されていることから (二瓶ら, 2018), 国際的な削減対策のみならず、国内対策を進めることも重要である。海域に流出する MP の特徴は内陸に存在する発生源の種類や分布状況によって変動すると推測されるため、地域の特性に応じた国内対策を講じるには、日本沿岸域のローカルな MP 汚染状況を把握する必要があるが、こうした取組はまだ十分に行われていないのが現状である。

本研究では、神奈川県沿岸の MP 汚染状況を把握し MP の発生源対策に資する情報を獲得することを目的に、海岸に分布する漂着 MP の調査を行った。沿岸の MP の分布を把握するには漂流 MP を直接採取し評価することが基本であるが、漂着 MP に着目したのは次の 2 つの理由による。

まず、海岸に分布する漂着物には海岸直近に浮遊する漂流物であることから、MP の漂着状況は陸域近傍の漂流 MP の分布状況を直接反映すると推測される。そのため、調査に係る労力が比較的少ない漂着量調査を広域的に行い、複数の海岸の漂着量が比較できれば、沿岸の分布状況を推定する手がかりになると考えられる。

次に、サイズが数 mm 以上のプラスチック片は沖合に比べて陸域近傍の漂流量が多く、海岸近くに滞留しやすいことが知られている。この現象は near-shore trapping (Isobe *et al.*, 2014) と呼ばれ

るが、このために海岸近くのプラスチック片は潮汐と波の作用で陸と海の間を行き来する。陸に漂着したプラスチック片は砂浜上で紫外線による光酸化分解 (Cole *et al.*, 2011) により細片化し、数 mm 以下に破碎された後に沖合に再拡散する (Isobe *et al.*, 2014) ことがわかっている。すなわち、沿岸に漂流する MP は海岸で形成されると言えることから、海岸における漂着状況に関する知見は削減対策立案の観点から重要と考えられる。

神奈川県沿岸において、多様な形態の MP を網羅して漂着状況を報告したものはこれまでになく、調査はペレットに限られる (山口, 1998; 栗山ら, 2002)。両調査結果を比べると、ペレットの漂着量は地点によって大きな違いがみられる。調査方法が異なるため単純な比較はできないが、両調査で共通する地点で漂着量にかなりの隔たりがあり、例えば鵠沼海岸付近のデータで比較すると 10 倍以上の差がある。この差が調査方法の違いに起因するのか、あるいは調査時期 (山口 (1998) は 1997 年 7 月~1998 年 4 月, 栗山ら (2002) は 1998 年 1 月~1999 年 12 月) の違いに起因するのかは定かではない。一方、日本プラスチック工業連盟では 2001 年以降関連事業所に対してペレットの漏出防止対策を指導していることから (岸村,

2017), 両調査以降にペレットの漂着状況が変化している可能性がある。本研究では、調査対象を MP 全体に広げ、現時点における MP 漂着量の空間分布や時間変動を定量的に把握することに主眼を置いて調査を実施した。

2. 方法

2.1 調査対象海岸及び調査時期

MP 漂着量は、単位面積当たりの重量若しくは個数で表示 (Hidalgo-Ruz *et al.*, 2012) されるが、個別の MP の重量測定が困難であることから、本研究では漂着量を個数で評価した。

漂着 MP 調査は、多くの場合砂浜海岸で行われる (Hidalgo-Ruz *et al.*, 2012)。これは、漂着したプラスチック片の劣化反応が主に砂浜上で進行すること (Cole *et al.*, 2011) 及び砂浜海岸は試料採取点の条件を調査地点間でそろえやすいためと推測される。そこで、本調査においても砂浜海岸を対象に調査対象海岸を選定した。神奈川県は、三浦半島の東側を東京湾、その西側から真鶴岬にかけて南側を相模湾に面しており、多くの砂浜海岸を有する。その中から地点間の距離及び近傍の流入河川の位置を勘案し、東京湾側の久里浜海岸 (横須賀市)、相模湾側の逗子海岸 (逗子市)、鵠沼海岸 (藤沢市)、高浜台海岸 (平塚市) 及び山王網一色海岸 (小田原市) の計 5 地点 (これ以降、海岸名称から海岸の語を省略して記載) を調査対象海岸に選定した (表 1 及び図 1)。最も離れている山王網一色と久里浜の直線距離は 50 km である。相模湾では、

表 1 調査地点一覧

海岸名	近傍河川	浜幅	試料採取日
逗子 (逗子市)	田越川	50 m	春: 2017.5/25
			秋: -
			冬: -
鵠沼 (藤沢市)	引地川	80 m	春: 2017.5/9□, 5/25■
			秋: 2017.9/22
			冬: 2018.1/17□
高浜台 (平塚市)	相模川	80 m	春: 2017.5/31
			秋: 2017.9/22
			冬: 2018.1/30□
山王網一色 (小田原市)	酒匂川	120 m	春: 2017.5/31
			秋: -
			冬: 2018.2/14□
久里浜 (横須賀市)	平作川	20 m	春: 2017.5/25
			秋: -
			冬: -

*試料採取日の印は、□が満潮線のみ、■が潮上帯のみ、無印が満潮線・潮上帯ともに採取したことを示す。

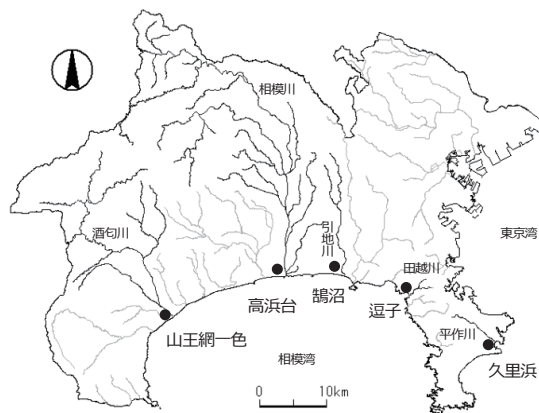


図 1 調査地点図

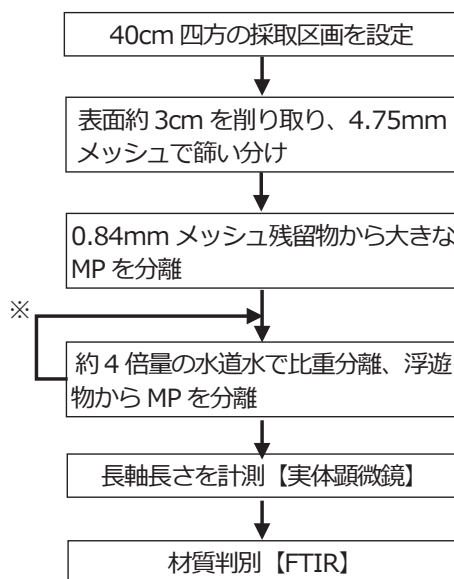
黒潮分派流の一部が三浦半島の西岸から湾内を反時計回りに回るため（松山ら，1980），条件をそろえるために東京湾側の久里浜を含め，試料採取点を近傍の流入河川の右岸側に設定した。

調査時期は，天候が安定し観光客も少ないために採取がしやすい2017年5月（春期），台風18号最接近日の4日後の9月22日（秋期），2018年1～2月（冬期）とし，9月を除いて前10日間に平均風速10 m/s超，時間雨量10 mm超の強風，強雨がでない日を選んだ（表1）。なお，5月は梅雨による出水期前であり，各海岸の年間を通じた平均的な状況の比較に相当と考えられる。また，9月22日は海岸清掃の前であり，台風による漂着の状態を十分に保存していると考えられる。調査対象地点は，5月は全地点，9月は鶴沼と高浜台で行い，気象による漂着量の変動を調べた。さらに，冬期は鶴沼，高浜台及び山王網一色の3地点で行い，春期の状況と比較した。

2.2 試料採取，MP分離及び分析方法

山口（1998）や栗山ら（2002）のペレットの調査では，満潮線に漂着が多いことが報告されている。砂浜上で形成されたMPが海上に流出するとき，潮汐や波が直接作用する海岸の部位は満潮線である。そこで，各調査対象海岸の主たる調査部位は満潮線とした。調査対象海岸の事前調査を行ったところ，海岸によっては潮上帯にMPが分布しているところがあった。先行研究でも満潮線以外の部位を調べた報告もある（Hidalgo-Ruz *et al.*, 2012）。そこで，各海岸の潮上帯も調査部位に加えた。これ以降，満潮線上のMPの存在について漂着，潮上帯のMPの存在について分布の語を用いる。

試料の採取からMPの分析に至る一連の手順を図2に示す。満潮線上の漂着物の多い部位を目視で2点選び，そこに40 cm四方の採取区画を設定し，表面の砂堆積物をすくい取り，4.75 mmメッシュのふるい通過物を試料とした。採取区画は，局所的な海浜流系の影響を受けないよう50 m以上離れた。この採取方法で2区画の平均を求めることにより，MP採取数と粒度分布の地点代表性を担保し，MP漂着量の最大レベルを把握できる（池貝ら，2017）。潮上帯の試料採取でもこの採取法を使用し，各海岸で計4区画分の砂堆積物を試



※ 浮遊物がなくなるまで繰り返す。

図2 マイクロプラスチック分離分析手順

料として採取した。なお，試料には短軸長さ4.75 mm未滿かつ長軸長さがそれ以上のプラスチック片も含まれるが，こうしたプラスチック片もMPとして扱った。

試料は実験室に持ち帰り，0.84 mmメッシュのふるいの残留物からあらかじめ大きなMPをピンセットで分離後，すべての砂堆積物について水道水を用いた比重分離を行い，浮遊物からMPを分離した。比重分離に用いた器具は，500 mLガラスビーカー及びステンレス製のスパーテルとピンセットである。MPの判別は目視によるため，分離できるものは概ね0.3 mm以上のMPに限られる。今回分離した最もサイズの小さなMPは0.28 mmの発泡ポリスチレン（PS）破片であった。パーソナルケア製品に含まれるマイクロビーズのサイズは平均が0.254 mm（田中，2018）であるため，この分離法では完全に分離することが困難であり，実際に，分離したMPの中にマイクロビーズは含まれていなかった。しかし，漂流MPを採取する海洋調査では世界的に0.3 mm程度の目合いのプランクトンネットが多く使用されている（Hidalgo-Ruz *et al.*, 2012; Isobe *et al.*, 2015）ことを踏まえ，本研究もこの方法で採取できる0.3 mm以上のMPを対象とした。

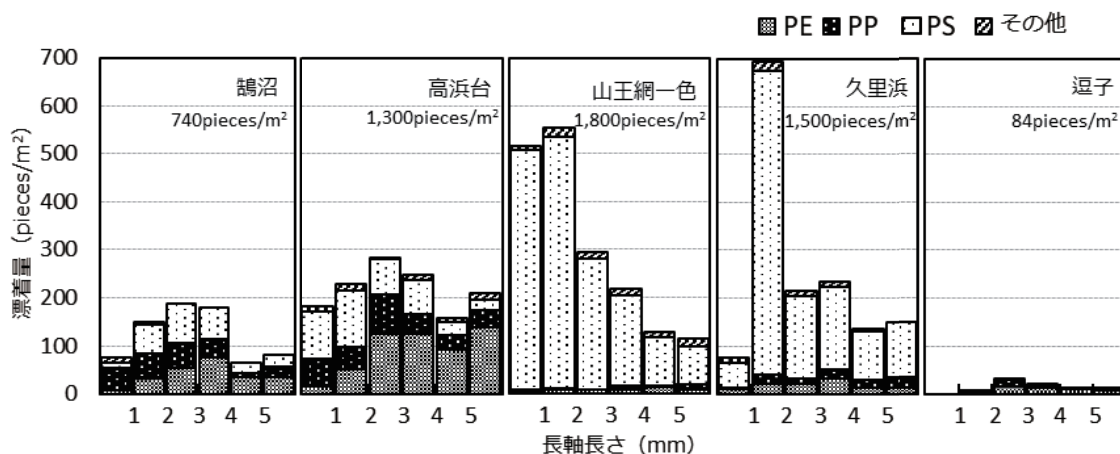


図3 マイクロプラスチックの材質別満潮線漂着量の地域間比較
図中の数値は、総数を表す。

分離したMPは、OLYMPUS製実体顕微鏡SZ61を使用し、1個ずつ顕鏡して形状と色を分類し、長軸長さを計測して写真撮影した。MPの材質は、赤外吸収スペクトルで判別した。赤外吸収スペクトルの測定は、日本分光製赤外分光光度計FT/IR-4600を用いたATR法(TGS検出器)または同装置に赤外顕微鏡Irtron μ IRT-1000を装着した顕微反射法(MCT検出器)を使用した。材質を判別したMPは、材質ごとに分けて各海岸の満潮線または潮上帯ごとの総量として重量を測定した。

3. 結果及び考察

3.1 MP漂着状況の空間変動

3.1.1 海岸間における漂着状況の比較

調査対象海岸ごとのMPの漂着状況の違いを検討した。全地点調査を実施した2017年5月の満潮線の漂着状況を図3に示す。漂着MPの主要材質は、ポリエチレン(PE)、ポリプロピレン(PP)及びPSであった。また、エチレン酢酸ビニル共重合樹脂、PETを含むポリエステル樹脂、ポリウレタン、ポリアミドの他、赤外吸収スペクトルの2,850~3,000 cm^{-1} 付近にC-H伸縮の明瞭な吸収があり、顕微鏡観察による外観の特徴からプラスチックと推定されるものがあり、これらはその他として分類した。

全地点の漂着状況を比較すると、材質構成及び漂着量に大きな違いが見られた。調査を行った5地点を漂着状況の特徴からI~IIIの3種に区分し

た。I型はPEとPPの割合が高い海岸(鶴沼, 高浜台)、II型はPEとPPが少なくPSの割合が高い海岸(山王網一色, 久里浜)、III型は総漂着数が少なくPEとPPの比率がI型に類似した海岸(逗子)である。I型及びIII型の海岸ではPEとPPを合わせた比率は鶴沼61%, 高浜台63%, 逗子73%であった。II型の海岸のPS比率は山王網一色91%, 久里浜83%であった。

相模湾東部の三浦半島側では大陸棚が発達しており、西部に比べて海底が浅く海底構造が異なる。このため、前述のとおり相模湾の潮流は反時計回りが主体であるが(松山ら, 1980)、東部では逆向きの流れに変わることも知られている(Iwata *et al.*, 1989)。この潮流の違いが逗子でMPの漂着量が他地点に比べて少なかった原因の一つと考えられる。逗子は、河口左岸側が岬状の地形をなす田越川の右岸側に形成された砂浜海岸である。田越川は、調査地点の近傍5河川の中では最も流域面積が狭いため(図1)、内陸からのMPの発生量も最も少ないと推測される。これに加えて逆向きの潮流の影響により、田越川から流出したMPは右岸側の海岸に到達せずに湾内に流出したと推測される。このため、逗子のMP漂着量は他の海岸に比べて少なかったものと考えられる。

MPの形態を見ると、どの海岸も二次MPである破片の比率が高かった。逗子では破片以外の形態のMPの漂着は確認できず、破片の構成比が最も低かった山王網一色でも破片は全体の55%を

占めた。ペレットはI型の海岸で多く見られ、高浜台で7%、鶴沼で3%であり、II型の山王網一色と久里浜ではともに0.2%にとどまった。一方、II型の山王網一色と久里浜では、直径が0.8~1.5 mm程度のPSの微小球体（以下、「PS球」）の比率が高かった。PS球の構成比は山王網一色が45%、久里浜が32%であったのに対し、鶴沼と高浜台はともに8%であった。PS球のサイズは、山王網一色1.1 mm ± 0.3 mm、久里浜1.2 mm ± 0.2 mmで、最顆粒径は山王網一色0.8 mm以上0.9 mm未満、久里浜1.1 mm以上1.2 mm未満であった。このPS球の発生源の推定結果を3.3に記載した。

東アジアの海域に漂流するMPは黄海や東シナ海が起源であり、これが海流により日本近海に輸送される (Isobe *et al.*, 2015)。本研究で採取したMPも海流により外洋から輸送されたものが多いとすれば、黒潮の影響を受ける相模湾の4地点ではMPの漂着状況は類似すると推測される。神奈川県水産技術センターの観測によれば、調査を行った2017年5月、9月、2018年1~2月は伊豆諸島北部から相模湾にかけて冷水域があり、平年に比べて黒潮系の海流の相模湾への流入は少なく、相模湾への黒潮の影響は平年より弱かった。したがって、海岸による漂着状況の違いは、黒潮によって湾内に流入する外洋由来のMPより、内陸から湾内に流出したMP、すなわち内陸の発生源の違いが大きく影響していると考えられる。高浜台と鶴沼で多く見られたペレットの漂着は、それぞれ相模川と引地川の流域に存在するプラスチック成型事業所からの漏出の影響、山王網一色と久里浜で多く見られたPS球の漂着は、3.3で後述するPS球の流出がそれぞれ酒匂川と平作川の流域で発生し、その影響を受けたものと考えられる。

Sagawa *et al.* (2018) は2016年8~9月に広島湾6地点で漂着MP調査を行い、MP漂着量の範囲は80~18,060 pieces/m²、PSの漂着量が全体の90%を占めた。PSの発生源は、調査地点周辺の海上に設置された養殖施設のフロートと考えられている。こうした海上に漂流するMPの影響を受けた調査事例として、Kim *et al.* (2015) による韓国ソヤ島の調査及びFok *et al.* (2017) による中国広東の調査がある。2013年6月に行われた黄海上にあるソヤ島3地点の調査では、MP漂着量の範囲

は1,133~118,168 pieces/m²、PSが86.8~99.7%であり、PSの発生源は広島湾と同様に養殖施設のフロートと考えられている。ただし、調査地点のうち朝鮮半島に面した1地点では、他の2地点で1%未満であったPPの比率が12.2%と高かった。2015年6月に行われた広東8地点の調査では、MP漂着量の範囲は248~17,505 pieces/m²、PSが96%を占め、最大漂着地点の近傍にある台風時の船舶待避所である台風シェルターがPSの発生源と考えられている。これら先行研究の材質構成は、ソヤ島の調査における朝鮮半島の発生源の影響を受けた1地点を除いてそれぞれの調査地点間で類似している。海上に漂流するMPの影響が大きい場合にはその影響が及ぶ範囲において、MPの漂着状況は類似すると推測される。広島湾の調査対象範囲は、調査地点間の距離は最大で40 kmであり、本研究と同等の規模の領域を対象としているが、本研究のような顕著な材質構成の差はみられなかった。本研究の調査対象海岸には先行研究で指摘されたような沿岸の発生源はないことから、本研究における漂着MPは、沿岸または海上の発生源に由来し海上から輸送されたMPの影響は小さく、内陸の発生源に由来し近傍河川から流出したMPの影響の方が大きいと考えられる。

3.1.2 同一海岸における漂着及び分布状況の比較

同一の海岸における部位の違いによるMPの漂着及び分布状況の違いを検討した。各海岸の満潮線漂着量に対する潮上帯分布量の比を表2に示す。

潮上帯のMPの分布はペレットと他種MP(3.1.2

表2 春期及び秋期における各調査海岸のマイクロプラスチックの満潮線漂着量に対する潮上帯分布量の比

海岸名・季節	ペレット	他種MP
鶴沼・春	11	1.2
鶴沼・秋	0.11	0.16
高浜台・春	3.5	0.13
高浜台・秋	0.14	0.05
久里浜・春	3.0	0.37
逗子・春	-*	3.3
山王網一色・春	0	0.14

*潮上帯分布量13 pieces/m²、満潮線に漂着なし。

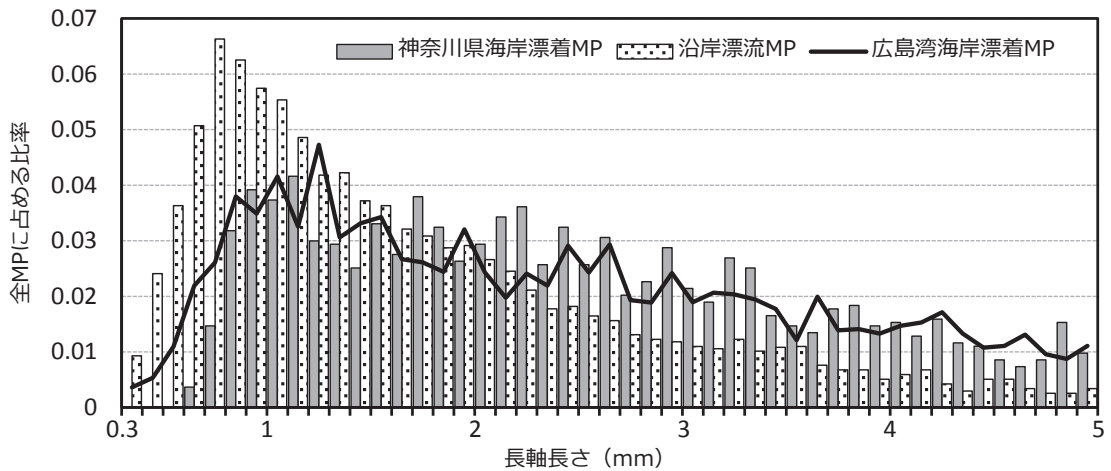


図4 夏～秋期における海岸漂着及び沿岸漂流マイクロプラスチックのサイズ分布比較

凡例の「神奈川県海岸漂着 MP」は 2017 年 9 月の鵜沼及び高浜台の 2 地点の漂着 MP, 「沿岸漂流 MP」は Isobe (2016) による 2016 年 9～10 月の東京湾, 駿河湾, 伊勢湾及び瀬戸内海の 26 地点の漂流 MP, 「広島湾海岸漂着 MP」は Sagawa *et al.* (2018) による 2016 年 8～9 月の広島湾 6 地点の漂着 MP を表す。

において、「ペレット以外の MP」を「他種 MP」と記載)で大きく異なっており、潮上帯での分布がなかった春期の山王網一色及び満潮線への漂着がなかった春期の逗子を除けば、後述する台風の影響を受けた秋期の鵜沼以外は潮上帯分布量/満潮線漂着量の比率はペレットの方が他種 MP に比べて大きかった。ペレットは、逗子を含めて他種 MP より潮上帯に蓄積しやすい傾向があると考えられる。特に、鵜沼ではその傾向が大きく、春期の調査において潮上帯の分布量は満潮線の漂着量の 11 倍に達した。鵜沼の潮上帯に分布するペレットは、砂防林の海岸側に発達した砂丘の表面に多く蓄積していた。潮上帯には台風や高波の場合を除いて海水が到達することはないため、潮上帯に分布するペレットは満潮線上に漂着したものが海風により内陸側に輸送され、吹き溜まりの発生しやすい地点に蓄積したものと考えられる。ペレットの形状は、サイズが 3～5 mm の円盤状や円筒状であり、不定形な破片に比べて砂浜表層を移動しやすく、他種 MP より内陸側に蓄積する傾向が大きいと推測される。

台風直後の秋期は、ペレットが潮上帯に蓄積する傾向は鵜沼と高浜台ともに春期より弱まった。潮上帯では、ペレットは台風の強風によって吹き払われたと考えられる。このことから、ペレット

の内陸側での蓄積は、主に平時の海風によって引き起こされると考えられる。

3.1.3 漂着及び漂流状況の比較

漂着 MP と海上の漂流 MP の関連について検討した。本研究では漂流 MP 調査は行っていないため、先行研究の結果と比較した。比較には相模湾の漂流 MP 調査結果を用いるべきであるが、該当する調査データがないため、Isobe (2016) が 2015 年 9～10 月に行った東京湾, 駿河湾, 伊勢湾及び瀬戸内海の調査結果を用いた。この漂流 MP 調査は、東京湾 7 地点, 駿河湾 3 地点, 伊勢湾 10 地点, 瀬戸内海 6 地点の計 26 地点で実施されたものである。Isobe (2016) の調査では材質別の評価を行っていないため、本研究のデータも同様に扱い、Isobe (2016) の調査と同時期である秋期のデータ(調査対象海岸は鵜沼及び高浜台)を用いた。両調査のサイズ分布の比較結果を図 4 に示す。Isobe (2016) の調査の MP 量は海中の個数 (pieces/m³) であるのに対し、本研究の漂着量は砂浜上の個数 (pieces/m²) のため、図 4 の縦軸は全 MP に対する比率とした。さらに、図 4 には Sagawa *et al.* (2018) の広島湾の漂着量調査結果を折れ線で表示した。

Isobe (2016) による漂流 MP のサイズ分布は 0.7 mm が最大で右に裾を引く分布であったのに対

し、本研究の漂着 MP は 1.1 mm が最大で漂流 MP と同様の減少傾向を示すが、最頻サイズより長軸側の減少傾向が漂流 MP に比べて緩やかとなる分布を示した。なお、本研究で採取したすべての MP を対象として作成したサイズ分布にも秋期のデータと同じ傾向が見られた。全 MP に占める比率は、1.6 mm 以下では漂流 MP が漂着 MP より高く、それ以上のサイズでは 1.9 mm を除き逆転した。漂流 MP では 1.6 mm 以下の MP が全体の 60% を占めたのに対し、漂着 MP では半分の 31% であり、1.7 mm 以上の比率は漂流 MP が 40%、漂着 MP では 69% であった。このように漂着 MP が漂流 MP に比べてサイズの大きいものの比率が高くなる傾向を示す理由は、near-shore trapping (Isobe *et al.*, 2014) により、海岸上には細片化途上の MP が集積するが、沖合の漂流 MP は細片化が進行した MP の量が多くなるためと考えられる。

広島湾で行われた Sagawa *et al.* (2018) の調査結果も、本研究と同様のサイズ分布の傾向を示した。3.1.1 で考察したように本研究の漂着 MP は内陸の発生源の影響を強く受けているのに対して、Sagawa *et al.* (2018) の調査による漂着 MP は海上の発生源の影響を強く受けている。本研究と Sagawa *et al.* (2018) の調査結果のサイズ分布が同じ傾向を示したのは、漂着 MP のサイズ分布が発生源の種類や位置の違いより near-shore trapping (Isobe *et al.*, 2014) による陸と海の間を行き来する MP の輸送過程の影響を大きく受けるためと考えられる。

3.2 MP 漂着状況の時間変動

3.2.1 気象による漂着状況の比較

気象状況の違いによる MP の漂着状況の違いを検討した。鵜沼と高浜台について 2017 年台風 18 号上陸後の満潮線漂着状況を春期の平時と比較した結果を図 5 に示す。

秋期（台風後）は、2 海岸ともすべてのサイズで漂着量が増加し、総数はどちらも春期の平時の約 3 倍となった。出水期には河川中の MP 密度は増加するため（二瓶ら, 2018）、3.1.1 で考察したように漂着量が内陸の影響を受けているとすれば秋期の平時における漂着量は春期より多いと推測されるが、これに台風の影響が上乗せされたため、

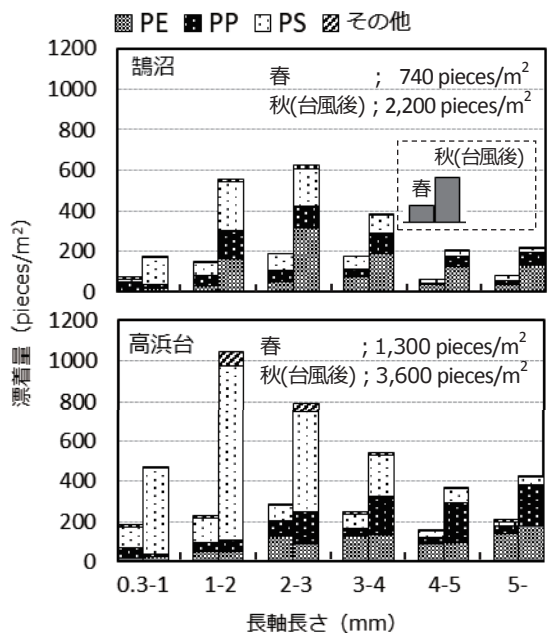


図 5 マイクロプラスチックの材質別満潮線漂着量の気象による変動
図中の数値は、総数を表す。破線で囲った凡例に示すように、並んだ棒の左側が春、右側が秋（台風後）の漂着量であることを表す。横軸の長軸長さ表示の「A-B」は、「A mm 以上 B mm 未満」であることを表す。

この漂着量は年間を通じた最大値に近いと考えられる。

辻堂 AMeDAS の 10 分値によると、台風接近時は 9 月 18 日 0 時 30 分頃から東寄りの風が南に変わり、1 時 0 分を過ぎてから南～南南西の 10 m/s 以上の強風が朝 5 時 0 分頃まで続いた。最大瞬間風速は 2 時 0 分の 26.5 m/s (南) であった。また、平塚の沖合 1 km にある東京大学海洋アライアンス平塚総合海洋実験場の観測による平塚沖の 1/3 波高の 9 月 18 日の最大値は 9 時 0 分の 309.5 cm であった。18 日未明からの南からの強風と波浪により、沖合に漂流する MP が海岸のある北方向に輸送され、これが連続的に打ち上げられたため、漂着量が増加したと考えられる。

サイズ別の漂着量の増加の傾向を比べると、秋期は春期に比べてサイズの小さな MP の増加が顕著であり、2 海岸とも 3 mm 未満の PS の漂着量が 3.3 倍に増加した。最頻サイズは、鵜沼では春期、台風後とも 2 mm 以上 3 mm 未満であったが、高

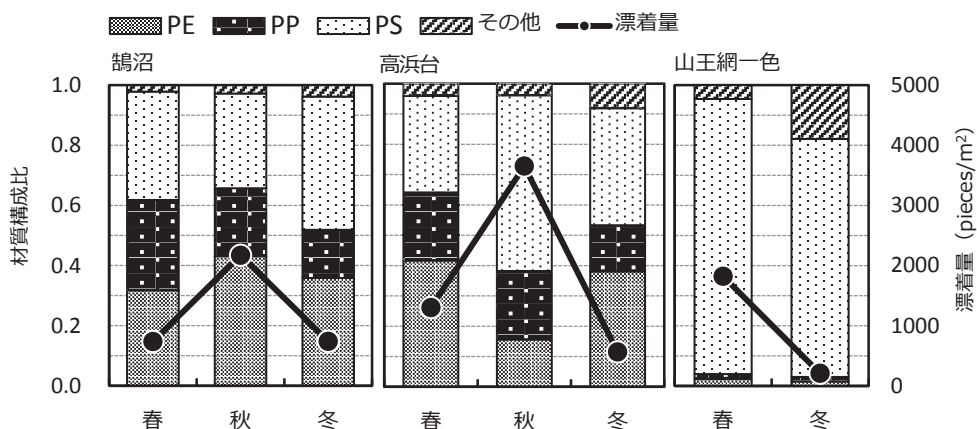


図6 マイクロプラスチックの満潮線漂着量及び材質構成の季節変動

浜台では台風後は1 mm以上2 mm未満のPSが大きく増加した。春期に比べてサイズの小さなMPの割合が増加したのは、near-shore trapping (Isobe *et al.*, 2014)の影響で陸域近傍のMPよりサイズが小さい沖合のMPが海岸に打ち上げられたためと考えられる。

3.2.2 季節による漂着状況の比較

季節の違いによるMPの漂着状況の違いを検討した。冬期の調査を行った鶴沼、高浜台及び山王網一色の漂着量と材質構成の季節変動の状況を図6に示す。

鶴沼と高浜台は、台風後に増加した漂着量は冬期の調査までの4か月のうちに減少し、鶴沼では春期と同レベルであり、高浜台では春期より55%減少した。山王網一色では秋期の調査は行っていないが、冬期の漂着量は春期に比べて88%減少した。前述のとおり、台風後の漂着量は年間の最大レベルと考えられるが、これを除いて平時で比較すると、今回の調査結果からは漂着量は冬期に比べて春期の方が多傾向がみられた。冬期の潮流の状態を確認したところ、春期と同様に黒潮の影響は弱かったことから、黒潮によって湾内に流入する外洋由来のMPの影響は冬期も小さかったと推測される。神奈川県公共用水域水質測定による本研究の調査実施月の河川流量測定値は、鶴沼近傍の引地川が春期1.6 m³/s、冬期1.5 m³/s、高浜台近傍の相模川が春期19.1 m³/s、冬期20.4 m³/s、山王網一色近傍の酒匂川が春期3.8 m³/s、冬期4.8 m³/sであり、春期と冬期で顕著な差はみられな

かった。このことから、内陸の発生源からの排出に季節変動がないとすれば、河川を通じて海域に流出するMP量も春期と冬期で同程度と推測される。また、AMeDASの辻堂と小田原における本研究の調査実施月の日平均風速を比べたところ、その月平均値は辻堂が春期3.1 m/s、冬期2.6 m/s、小田原が春期1.7 m/s、冬期2.0 m/sであり、春期と冬期で顕著な差はみられなかった。このことから、漂着したMPの風による除去を考慮しても、その影響は春期と冬期で同程度と推測される。一方、最多風向を比べると、南東～南西風の頻度は、春期が辻堂で71%、小田原で48%、冬期が辻堂で16%、小田原で3%であり、図6に示す相模湾沿岸の3海岸では、沖合に漂流するMPの陸域近傍への輸送効果が高いと推測される南寄りの風向は、いずれの観測点とも春期が卓越していた。北東～北西風の頻度は、春期が辻堂で29%、小田原で32%、冬期が辻堂で77%、小田原で45%であり、陸域近傍に漂流するMPを沖合へ運び去る効果が高いと推測される北寄りの風向は、いずれの観測点とも冬期が卓越していた。このことから、神奈川県沿岸、特に東西に延びる海岸線を有する相模湾沿岸においては、季節風の影響により春期は冬期より陸域近傍に漂流するMPの密度が高いと推測され、これが漂着量に影響を及ぼし冬期より春期の漂着量が増加した可能性が高いと考えられる。

材質構成については、期間を通じて大きな変化は見られなかった。高浜台では台風時に一時的に

PSの比率が高まったが、冬期は春期とほぼ同様の材質構成比を示した。山王網一色の冬期における漂着量の減少は、春期に全MPの45%を占めたPS球が大きく減少したことが原因であるが、それでもなおPS球の比率は調査した3海岸の中で最も高く（山王網一色15%、鶴沼2%、高浜台7%）、材質構成は冬期と春期でほぼ共通した。3.1.1で考察したように漂着MPの起源は内陸のさまざまな発生源と推測されるが、本研究で採取したMPに関連する発生源では流出する物質構成に大きな季節変動がないと考えられる。気象等の影響で発生する漂着MPの一時的な材質構成の変動は、潮汐と波の作用による漂着と流出の繰り返しの過程で打ち消され、その特徴は9か月間にわたり大きく変化しなかったと考えられる。

3.3 PS球の発生源の推定

春期の調査で山王網一色と久里浜に多く漂着していたPS球の発生源について、発泡スチロール協会へのヒアリングをもとに検討した。

採取したPS球の写真を図7(A)に示したが、色や球体の形状はどちらの海岸のものも同じ白色小球体であり、ビーズ法ポリスチレンフォームの発泡ビーズと判断された。発泡ビーズは、発泡剤となるガスが入った透明な原料ビーズに蒸気を当てて約50倍に膨張させて製造する。採取した発泡ビーズの由来として、(1)一般的な発泡スチロール成形品製造事業所からの発泡ビーズの漏出、(2)一般的な発泡スチロール成形品製造事業所からの原料ビーズの漏出、(3)特殊な発泡ビーズの漏出、の3つのケースが考えられ、それぞれの可能性を検討した。

一般的な発泡スチロール成形品の製造に供される発泡ビーズのサイズは6~7 mm程度であるため、3.1.1に示した採取したPS球の平均粒径1.1 mm（山王網一色）及び1.2 mm（久里浜）に比べて同様の理由で、約6倍である。したがって、(1)は発生源として当てはまらないと考えられる。原料ビーズが漏出し、温度の高い排水と接触したような場合には、不完全な発泡によってサイズの小さな発泡ビーズが生成する可能性も考えられる。しかし、採取したPS球の最小値は山王網一色0.56 mm、久里浜0.58 mmであり、一般的に多用され

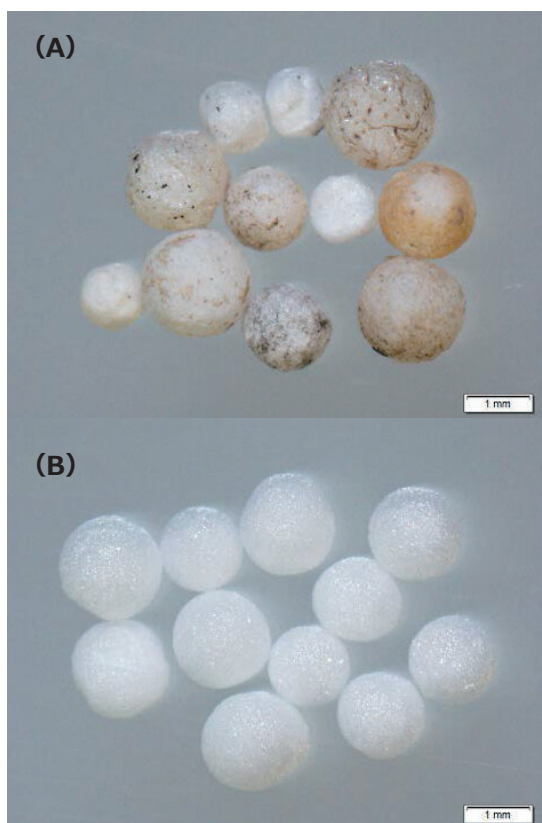


図7 海岸漂着PS球とバージンPS球の外観 (A)は山王網一色で採取したPS球、(B)は家庭用クッションから取り出したPS球、右下のスケールはそれぞれ1 mm。

る原料ビーズのサイズである約1 mmより小さなものが含まれていた。したがって、(2)も発生源として当てはまらないと考えられる。そこで、(3)として一般的に多用されるものより小さな特殊な原料ビーズから製造された発泡ビーズの漏出の可能性を検討した。

漂着していたPS球と類似した特殊な小粒径発泡ビーズを封入材として使用したクッションや枕などの製品が近年増加している。こうした封入材を使用した家庭用クッションから取り出したバージンのPS球を図7(B)に示す。無作為に100個の封入材をクッションから取り出し、そのサイズを計測したところ、 $1.3 \text{ mm} \pm 0.2 \text{ mm}$ 、最頻粒径1.3 mm以上1.4 mm未満であった。形状及びサイズを考慮すると、漂着したPS球はクッションに使用される封入材であり、この封入材が環境中に

出た可能性が高いと考えられる。この種の製品の製造事業所は、発泡スチロール協会によれば関東地方には存在しないとのことから、製造過程で環境中に漏出したものではないと考えられる。最も可能性が高い環境への排出ルートは、廃棄の過程で環境中に漏出したケースと考えられる。廃棄された製品の収集、運搬の過程で破れた製品からの封入材のこぼれや粗大ごみとして処理施設に持ち込まれた廃棄物の破碎工程での漏出などにより、環境中に出た封入材が道路側溝等を通じて最終的に海域に流出した可能性が高いと考えられる。

発泡スチロール協会によれば、製造段階の原料ビーズや発泡ビーズの漏出防止対策は講じられているものの、製品の使用や廃棄段階に関する注意喚起などの取組は特に行っていないとのことであった。このPS球に対しては、ユーザーに対する廃棄時の注意喚起や適正処理が重要であることが示唆された。

4. まとめ

本研究では、神奈川県沿岸を対象に、効果的なMP削減対策を行う上で必要となるMPの汚染状況を把握するため、海岸の漂着MP調査を行い、漂着状況の空間変動と時間変動を調べた。その結果、次のことが明らかとなった。

まず、空間変動として地点差を調べたところ、神奈川県沿岸においては満潮線の漂着状況の特徴は海岸間で大きく異なることが分かった。海流の状況及び海上の漂流MPの影響を受けた他の調査結果との比較から、漂着状況の差は内陸の発生源から河川を通じて流出したMPの影響を強く受けたことにより生じたと推定された。満潮線に漂着したMPの一部は海風により内陸側へ輸送されて潮上帯にも分布し、その傾向はペレットで顕著に表れた。また、満潮線に漂着するMPのサイズ分布は、漂流MPに関する他の調査結果との比較から、沿岸を漂流するMPに比べてサイズが大きいものの比率が高いことが分かった。この傾向は海上の漂流MPの影響を受けた他の漂着MP調査結果でも同様の傾向が認められたことから、発生源の違いではなく、陸と海の間を行き来するMPの輸送過程の影響を反映したものと推定された。

次に、時間変動のうち気象の影響については、

沖から陸に向かう風向の強風が長時間続いたときに漂着量が増加し、台風時には平時の3倍に増加することが分かった。この増加は、沖合に漂流するサイズの小さなMPが連続的に打ち上げられることにより発生すると推定された。季節変動については、相模湾沿岸では季節風の影響が大きく、沖から陸に向かう風が卓越する季節には陸域近傍のMPの密度が高くなり、漂着量も増加すると推定された。東西に延びる海岸線を有する相模湾沿岸では、本研究の調査時期では春期がこのケースに該当し、逆向きの風向が卓越する冬季には漂着量は減少することが分かった。山口（1998）と栗山ら（2002）の2つの調査にみられたペレットの漂着量の乖離の理由の一つとして、このような気象又は季節若しくはその両方の変動による影響が考えられる。一方、材質構成については、期間を通じて大きな変化は見られなかった。本研究で採取したMPに関連する発生源では流出する物質構成に大きな季節変動がないと推定された。

本研究では、海岸間の漂着状況の特徴を3パターンに類型化したが、調査地点数を増やせばこれ以外の漂着のパターンが出てくる可能性もある。逗子でMPの漂着が少なかった理由の一つとして、時計回りの潮流の存在を推定したが、これが一過性のものか定常的なものかを明らかにすることも重要である。季節変動については、相模湾沿岸は風向と海岸線が伸びる方向との関係から季節風の影響を受けやすいと推測される。今後は、季節風の影響を受けにくい海岸との比較が必要になる。今回の調査では最長9か月間の季節変動しか捉えていないが、内陸の発生源の状況が大きく変化しなければ、海岸ごとの材質構成の特徴はさらに長い期間大きく変化しないことも考えられる。これらの課題を明らかにするには継続した調査が必要となる。

山王網一色と久里浜で漂着が確認されたPS球の由来を推定したところ、クッション用ビーズが廃棄の過程で製品から漏出した可能性が高いと推定された。こうした漏出は地点を問わず発生しうることから、他の海岸における漂着状況を調べることも重要と考えられる。

MPは多様な発生源からの微小プラスチックの集合体であるため、さまざまな視点の対策を複合

的に実施しなければ削減はできない。今回の調査で由来を推定したPS球については、現時点で対応されていないユーザーへの注意喚起等の取組が必要と考えられた。MP削減には、こうした個別対策の積み重ねが重要と考えられる。

謝辞

発生源の検討及び貴重なサンプルの提供にご協力をいただいた発泡スチロール協会の武田導弘氏並びに日本プラスチック工業連盟の岸村小太郎氏及び加藤英仁氏、潮流及び波浪の観測結果をそれぞれご提供くださった神奈川県水産技術センターと東京大学海洋アライアンス平塚総合海洋実験場の関係各位に感謝の意を表します。なお、本研究は、平成29年度神奈川県シーズ探求型研究推進事業費により実施しました。

参考文献

Cole M., Lindeque P., Halsband C. and Galloway T. S. (2011) "Microplastics as contaminants in the marine environment: A review", *Marine Pollution Bulletin*, Vol.62, pp.2588-2597.

Endo S., Takizawa R., Okuda K., Takada H., Chiba K., Kanehiro H., Ogi H., Yamashita R. and Date T. (2005) "Concentration of polychlorinated biphenyls (PCBs) in beached resin pellets: Variability among individual particles and regional differences", *Marine Pollution Bulletin*, Vol.50, pp.1103-1114.

Eriksen M., Lebreton L. C. M., Carson H. S., Thiel M., Moore C. J., Borrorro J. C., Galgani F. and Ryan P. G. (2014) "Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighting over 250,000 Tons Afloat at Sea", *PLoS ONE*, Vol.9, e111913.

Fok L., Cheung P., Tang G. and Li W. (2017) "Size distribution of stranded small plastic debris on the coast of Guangdong, South China", *Marine Pollution Bulletin*, Vol.220, pp.407-412.

GESAMP (2015) *Reports and Studies 90 "Sources, Fate and Effects of Microplastics in the Marine Environment: a Global Assessment"*, London:

International Marine Organization.

Hidalgo-Ruz H., Gutow L., Thompson R. C. and Thiel M. (2012) "Microplastics in the Marine Environment: A Review of the Methods Used for Identification and Quantification", *Environmental Science and Technology*, Vol.46, No.6, pp.3060-3075.

池貝隆宏・三島聡子・長谷部勇太・小林幸文 (2017) 「海岸漂着量の評価のためのマイクロプラスチック採取方法」『全国環境研会誌』第42巻第4号, pp.197-202.

Isobe A., Kubo K., Tamura Y., Kako S., Nakashima E. and Fujii N. (2014) "Selective transport of microplastics and mesoplastics by drifting in coastal waters", *Marine Pollution Bulletin*, Vol.89, pp. 324-330.

Isobe A., Uchida K., Tokai T. and Iwasaki S. (2015) "East Asian seas: A hot spot of pelagic microplastics", *Marine Pollution Bulletin*, Vol.101, pp.618-623.

Isobe A. (2016) "Percentage of microbeads in pelagic microplastics within Japanese coastal waters", *Marine Pollution Bulletin*, Vol.110, pp.432-437.

Iwata S. and Matsuyama M. (1989) "Surface Circulation in Sagami Bay: the Responce to Variations of the Kuroshio Axis", *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, Vol.45, pp.310-320.

岸村小太郎 (2017) 「プラスチック海洋ごみ問題への取組」『水環境学会誌』第40巻第10号, pp.366-369.

Kim I., Chae D., Kim S. and Choi S. (2015) "Factors Influencing the Spatial Variation of Microplastics on High-Tidal Coastal Beaches in Korea", *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, Vol.69, pp.299-309.

栗山雄司・小西和美・兼広春之・大竹千代子・神沼二眞・間藤ゆき枝・高田秀重・小島あずさ (2002) 「東京湾ならびに相模湾におけるレジンペレットによる海域汚染の実態とその起源」『日本水産学会誌』第68巻第2号, pp.164-171.

Mato Y., Isobe T., Takada H., Kanehiro H.,

- Ohtake C. and Kaminuma T. (2001) “Plastic Resin Pellets as a Transport Medium for Toxic Chemicals in the Marine Environment”, *Environmental Science and Technology*, Vol.35, No.2, pp.318-324.
- 松山優治・岩田静夫・細田昌広 (1980)「相模湾における流れの観測」『沿岸海洋研究ノート』第18巻第1号, pp.9-17.
- 二瓶泰雄・片岡智哉 (2018)「市街地のごみ堆積状況と河川水中のマイクロプラスチック汚染状況」『用水と廃水』第60巻第1号, pp.48-55.
- Ogata Y., Takada H., Mizukawa K., Hirai H., Iwasa S., Endo S., Mato Y., Saha M., Okuda K., Nakashima A., Murakami M., Zurcher N., Booyatumanondo R., Zakaria M. P., Le Q. D., Gordon M., Miguez C., Siziki S., Moore C., Karapanagioti H. K., Weerts S., McClurg T., Burrell E., Smith W., Van Velkenburg M., Lang J. S., Lang R. C., Laursen D., Danner B., Stewardson N. and Tompson R. C. (2009) “International Pellet Watch: Global monitoring of persistent organic pollutants (POPs) in coastal waters. 1. Initial phase data on PCBs, DDTs and HCHs”, *Marine Pollution Bulletin*, Vol.58, pp.1437-1446.
- Rochman C. M., Tahir A., Williams S. L., Baxa D. V., Lam R., Miller J. T., Teh F. C., Werorilangi S. and Teh S. J. (2015) “Anthropogenic debris in seafood: Plastic debris and fibers from textiles in fish and bivalves sold for human consumption”, *Scientific Reports*, Vol.5, 14340.
- Sagawa N, Kawasaki K and Hinata H (2018) “Abundance and size of microplastics in a coastal sea: Comparison among bottom sediment, beach sediment, and surface water”, *Marine Pollution Bulletin*, Vol.133, pp.532-542.
- 高田秀重・山下 麗 (2018)「海洋プラスチック汚染概論－研究の歴史、動態、化学汚染－」『用水と廃水』第60巻第1号, pp.29-40.
- Tanaka K. and Takada H. (2016) “Microplastic fragments and microbeads in digestive tracts of planktivorous fish from urban coastal waters”, *Scientific Reports*, Vol.6, 34351.
- 田中周平 (2018)「下水処理過程におけるマイクロプラスチックの除去過程」『用水と廃水』第60巻第1号, pp.41-47.
- 山口晴幸 (1998)「大量漂着するレジンベレットによる海岸汚染－相模湾・東京湾沿岸域の実態－」『土木学会誌』第83巻第11号, pp.48-50.
- 山下 麗・田中厚資・高田秀重 (2016)「海洋プラスチック汚染：海洋生態系におけるプラスチックの動態と生物への影響」『日本生態学会誌』第66巻, pp.51-68.
- (2018年5月1日受付, 2019年8月29日受理)