

ズになったものを指す(高田 2018)。カタクチイワシ *Engraulis japonicus* 等のろ過食性魚類や、魚類の仔魚の消化管より、マイクロプラスチックが検出されたことが報告されており(Tanaka and Takada 2016、牛島ら 2018、Gove *et. al* 2019)、食物連鎖を介した生態系への影響も懸念されている。さらに、2016年の世界経済フォーラム年次総会では、世界の海に漂うプラスチックごみの量が、2050年までに重量換算で魚の量を超すと予測する報告書が発表された(Elle MacArthur Foundation 2016)。このような状況の中、2019年6月に大阪で開催されたG20大阪サミットでは、2050年までに海洋プラスチックごみの流出をゼロにすることを目標とし、対策を強化することが参加各国により確認された(外務省 2019)。

一方、我が国における海岸に漂着したごみの回収は、ボランティアなどを主体とした人手による活動が主流となっている(小島・眞 2007、国土交通省港湾局海岸・防災課 2010)。海洋漂流ごみ問題に対する世界的な関心が高まる中(Moore and Phillips 2012、重化学工業通信社 2019)、海岸漂着ごみの回収は、海洋漂流ゴミを減少させるための対策として、今後さらなる強化が求められるものと考えられる。

ところで、日本海における海岸漂着ゴミの継続的なモニタリングについては、五島列島(奈良島の大串海岸)においてウェブカメラを用いた調査が行われた事例があり、漂着ごみの被覆面積の変動には1~2ヶ月程度の周期性が認められている(磯辺ら 2012)。一方、海洋漂着ゴミの量的変動について、その主要因と考えられる気象や海象による影響を分析するには、海岸漂着ごみの移出入や滞留の量的な把握が必要である。このためには大小様々な海岸漂着ごみに対し、モニタリングの対象とする漂着ごみに一定の基準を設け、中長期的な追跡を行う必要がある。

そこで本研究では、鳥取県における海岸漂着ごみの効果的な回収手法を検討する基礎的な情報の集積を目的とし、鳥取県東部に位置する鳥取砂丘海岸において、ペットボトルを指標とした漂着ごみの挙動に関するモニタリング調査を実施した。さらに、その結果について、気象(風向・風速)及び海象(波浪)との関連性について解析した。

2. 材料と方法

2.1 調査地について

調査地として、鳥取砂丘海岸(鳥取市福部町湯山)を設定した。範囲は海岸に沿った距離280mを設定し(北

緯35°32'53"、東経134°14'15"から、北緯35°32'57"、東経134°14'25")、幅は海岸線から後浜の急斜面の下までとした(Fig.1)。なお、当該海岸は観光客の往来等はあるものの、調査期間中に海岸清掃などが行われておらず、年間を通じた海岸漂着ごみの挙動を把握するうえで、人為的な影響は少ない場所と判断した。

2.2 漂着したペットボトルの計数方法

2018年10月13日から2019年10月13日までを調査期間とし、月1回の頻度で合計13回の調査を実施した(Table 1)。調査時には、調査範囲内で発見した飲料用ペットボトルをすべて計数し、また新たに漂着したペットボトルにはTable 1に示す色の油性ラッカーを用いてマーキングした。前月の調査以前にすでにマーキングしてあるペットボトルには、色が落ちないように、再び同色のマーキングを施した。すなわち、第一回目の調査である2018年10月13日の調査では、調査範囲内に漂着していた全てのペットボトルを赤色でマーキングして計数した。第2回目の調査となる2018年11月10日の調査では、マーキングの無いペットボトルには水色でマーキングを行い、すでに赤色のマーキングがされているペットボトルには赤色で再度マーキングした上で、色

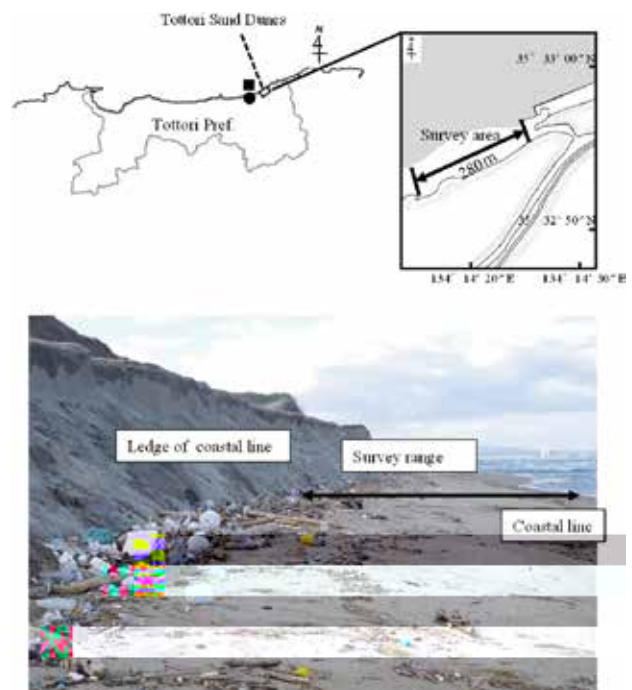


Fig. 1 Maps and photograph showing survey area (Upper: maps showing the east side of the Tottori Sand Dune. Solid circle and solid square indicate the observation points of wind and sea wave, respectively. Lower: a photograph showing survey range settled from the coastal line to the ledge along coastal line)

Table 1 Marking colors for newly drifted PET bottles at each survey date

Survey date	Marking color for newly PET bottles
2018 13-Oct	Red
10-Nov	Light blue
9-Dec	Yellow
2019 19-Jan	Green
24-Feb	Blue
21-Mar	Pink
15-Apr	Black
14-May	Gold
28-Jun	White
22-Jul	Yellow green
19-Aug	Brown
19-Sep	Silver
13-Oct	No color

毎に計数した。第3回目以降も同様に、新規に漂着したペットボトルに Table 1 に示す色でマーキングを施した上で、色毎に計数した。このような手法で調査範囲内に漂着していたペットボトルの総本数、新規漂着本数、前回からの残留本数を把握した。なお、最終調査日である2019年10月13日の調査ではマーキングは行わず、調査範囲内のペットボトルを全て回収した上で、マーキングの色毎に計数した。

本研究では、調査範囲内での漂着ごみの移出入と滞留の実態を把握することを目的としたため、追跡対象とする海岸漂着ごみをペットボトルに限定することとした。なお最終調査日である2019年10月13日には、調査範囲内

にあった木材、流木などを除く人工の海岸漂着ごみを可能な限り回収したが、回収したゴミ全体の重量213kgに対し、ペットボトルの占める割合は14.6% (31kg、中に入っている水分の重量を含む) であった。

2.3 気象、海象データの収集と処理

風 (風向、風速) のデータは国土交通省気象庁のホームページによる「過去の気象データ・ダウンロード (観測点: 湖山)」を用いた。また、波浪 (有義波高、有義周期、波向) のデータは国土交通省港湾局のホームページの全国港湾海洋波浪情報網ナウファスによる「波浪データのダウンロード (観測点: 鳥取港)」を用いた。いずれも2018年10月13日から2019年10月13日までの観測データを用いた。なお、両観測点とも、調査箇所の概ね西方7.5kmに位置する (Fig. 1)。観測点と調査箇所の間には島などの地形的な障害もなく、調査箇所の気象、海象データとして利用することは妥当と判断した。

風速データについては、風向データを元に、式 及びにより北向き成分と東向き成分に分解した。なお、北向き成分、東向き成分とは、それぞれ南から北に向かうベクトル、西から東へ向かうベクトルを正の値とするもので、後述の波力についても同様とする。

$$V_N = -\cos \theta_{WIND} V$$

$$V_E = -\sin \theta_{WIND} V$$

V_N : 風速の北向き成分
 V_E : 風速の東向き成分
 V : 風速
 θ_{WIND} : 風向の方位角

また、波浪データについては、谷口ら (2016) を参考に、式 により波の持つ力学的なエネルギーの指標とし

Table 2 Results of PET bottle counts for each survey date

Survey date	Number of PET bottles			Breakdown of marking colors (marking date)												
	Total	Newly drifted	Already marked	Red	Light blue	Yellow	Green	Blue	Pink	Black	Gold	White	Yellow green	Brown	Silver	No color
				2018			2019									
				13-Oct	10-Nov	9-Dec	19-Jan	24-Feb	21-Mar	15-Apr	14-May	28-Jun	22-Jul	19-Aug	19-Sep	13-Oct
2018 13-Oct	449	449	-	449												
10-Nov	322	55	267	267	55											
9-Dec	418	225	193	167	26	225			36	35	23					
2019 19-Jan	747	472	275	167	18	142	472									
24-Feb	690	320	370	71	17	99	183	320				62		1	5555 (
21-Mar	445	63	382	50	15	21	49	122	146	69						
15-Apr	369	107	262	36	6	18	73	98	31	107						
14-May	238	23	215	26	5	10	56	62	21	35	23					
28-Jun	185	66	119	15	4											

て波力指数を算出した。さらに、式 及び により北向き成分と東向き成分に分解した。

$$P_W = H_S^2 T_S \dots\dots\dots$$

P_W : 波力指数

H_S : 有義波高

T_S : 有義周期

$$P_{WN} = -\cos \theta_{WAVE} P_W \dots\dots\dots$$

$$P_{WE} = -\sin \theta_{WAVE} P_W \dots\dots\dots$$

P_{WN} : 波力指数の北向き成分

P_{WE} : 波力指数の東向き成分

θ_{WAVE} : 波向の方位角

P_W : 波力指数

2 4 ペットボトルの計数データと気象及び海象データとの相関

ペットボトルの計数データについては、1日あたりの増加本数（以下、 $PET_{I/Day}$ と記す）、1日あたりの減少本数割合（以下、 $PET_{DR/Day}$ と記す）を求め、気象及び海象データとの相関解析に用いた。

$PET_{I/Day}$ は調査間隔の差を考慮し、式 により各調査日に新規にマーキングした本数（本）を調査間隔（日）で除して求めた。

$$PET_{I/Day} = \frac{PET_I}{Day} \dots\dots\dots$$

$PET_{I/Day}$: ペットボトルの1日当たりの増加本数（本/日）

PET_I : 調査期間中に増加した（新規にマーキングした）ペットボトルの本数（本）

Day : 前回の調査日からの日数（調査間隔）（日）

$PET_{DR/Day}$ は、調査間隔及び前回調査時に漂着していたペットボトルの本数を考慮し、式 によりマーキング済みのペットボトルの減少本数（本）を前回のペットボトルの総本数（本）と調査間隔（日）で除して求めた。

$$PET_{DR/Day} = \frac{PET_D}{PET_L \times Day} \times 100 \dots\dots\dots$$

$PET_{DR/Day}$: 1日当たりの減少本数割合（%/日）

PET_D : マーキング済みペットボトルの前回調査からの減少本数（本）

PET_L : 前回調査時のペットボトルの総本数（本）

Day : 前回の調査日からの日数（調査間隔）（日）

上記の式で求めた $PET_{I/Day}$ と $PET_{DR/Day}$ について、気象、海象データより調査期間毎に算出した統計値（平均値）や集計値（一定値以上の観測回数）との相関を解析した。

ただし、気象、海象データの集計値については欠測値や調査間隔（日数）の違いを考慮し、式 により補正値を算出した後、 $PET_{I/Day}$ および $PET_{DR/Day}$ との相関分析

に処した。

$$C = \frac{A \times D_{all}}{(D_{all} - D_{abs}) \times Day} \dots\dots\dots$$

C : 補正後の一定値以上の観測回数

A : 実際の一定値以上の観測回数

D_{all} : 各調査期間における総データ数

D_{abs} : 各調査期間における欠測回数

Day : 前回の調査日からの日数（調査間隔）（日）

3 . 結果

3 1 調査範囲内のペットボトルの増減

調査範囲内におけるペットボトルの総本数については、11月から1月まで増加し、1月に最大の747本となった。1月以降は減少に転じ、7月に最小の160本になった後、再び増加した（Table 2、Fig. 2）

$PET_{I/Day}$ については、調査開始時の10月13日から11月10日の間は1.96本/日と低い値であったが、11月10日から2月24日は10本/日前後（最大は2018年12月24日から2019年1月19日の11.51本/日）と高い値で推移した（Fig. 3）。2月24日から8月19日は2本/日前後と低い値（最小は2019年6月28日から7月22日の0.458本/

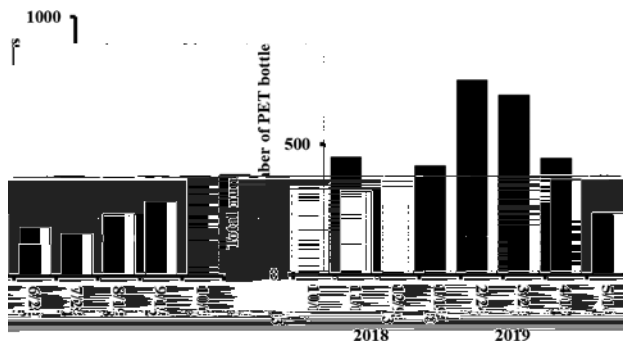


Fig. 2 Total numbers of PET bottles on the surveyed beach at each survey date

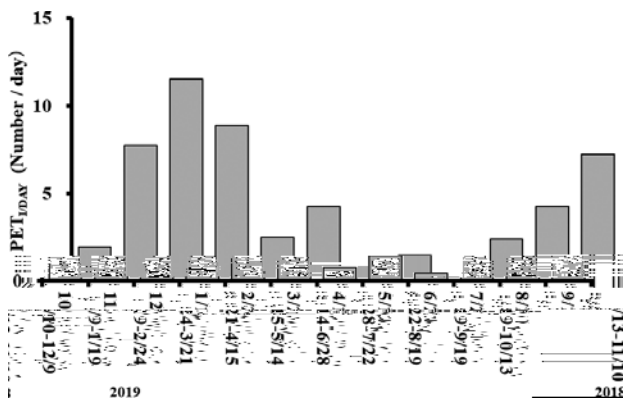


Fig. 3 Increase in numbers per day of PET bottles ($PET_{I/Day}$) at each survey period

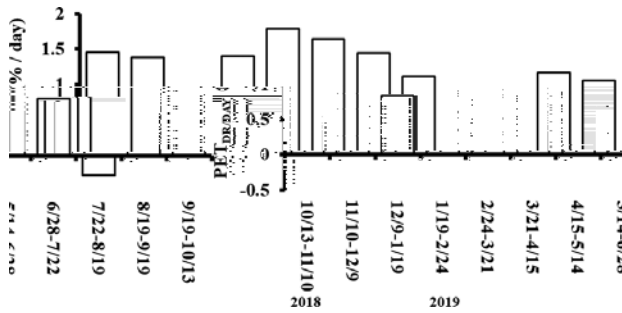


Fig. 4 Decrease in rates per day of PET bottles (PET_{DR/Day}) at each survey period

日)で推移したが、8月19日以降は再び増加に転じた。PET_{DR/Day}については、顕著な季節的傾向は認められず、期間を通じて1%前後であった(Fig.4)。なお、7月22日から8月19日のPET_{DR/Day}は、負の値を示しているが、これは砂没していたペットボトルが海岸浸食によって再び表出し、7月22日の総本数より8月19日の調査時の残留本数が多かったため(Table 2)、見かけ上は負の値となったものである。

3 2 ペットボトルの増減と気象、海象データとの関係

PET_{I/Day}、PET_{DR/Day}と気象、海象データから求めた統計値や集計値との相関係数をTable 3に示す。PET_{I/Day}は、気象、海象データの多くの統計値、集計値との間で有意な相関が認められた。一方、PET_{DR/Day}については、いくつかの値と統計的に有意な相関は認められたものの顕著な傾向は確認できなかった。

PET_{I/Day}と風の関係については、平均風速など多くの統計値や集計値との間で有意な相関が確認された。風向による成分分解前の風速の値については、風速7.5m以上の観測回数と最も高い正の相関が認められた(Table 3、Fig.5)。また、風向により成分分解した値については、北向き成分では-7m以下(即ち南向き成分が7m以上)の値の観測回数、東向き成分では3m以上の値の観測回数と最も高い正の相関が認められた(Table 3)。

PET_{I/Day}と波浪についても、有義波高の平均値など多くの統計値、集計値と相関が認められ、中でも有義波高2m以上の観測回数と特に高い正の相関が認められた(Table 3、Fig.6)。波力指数との関係について、波向による成分分解前の値では20以上の値の観測回数と最も高い相関が認められた(Table 3)。また、波向による成分分解後の波力指数との関係について、北向き成分では-15以下(即ち南向き成分で15以上)の値の観測回数と最も高い相関が認められ、東向き成分については25以上の値の観測回数と最も高い相関が認められた(Table 3)。

Table 3 Results of correlation analysis between aggregated or statistical values from weather or hydrographic condition data and values from PET bottle survey (PET_{I/Day} and PET_{DR/Day})

Data of weather or hydrographic conditions	Aggregated or statistical value	Correlation coefficient	
		PET _{I/Day}	PET _{DR/Day}
Wind velocity (V)	Mean	0.803 **	0.442
	Number of observations		
	5m	0.811 **	0.349
	7.5m	0.832 **	0.282
Wind	10m	0.805 **	0.226
	Mean	-0.355	-0.115
	Number of observations		
	-9m	0.807 **	0.169
	-7m	0.875 **	0.282
	-5m	0.839 **	0.365
	-3m	0.561	0.479
	3m	0.414	0.204
	5m	-0.448	-0.268
	7m	-0.198	-0.035
9m	-0.034	0.041	
Eastward component of wind velocity (V _E)	Mean	0.649 *	0.324
	Number of observations		
	-9m	0.147	-0.596 *
	-7m	0.003	-0.616 *
	-5m	0.073	-0.347
	-3m	0.437	0.175
	3m	0.808 **	0.360
	5m	0.764 **	0.387
Significant wave height (H _s)	7m	0.697 *	0.424
	9m	0.701 *	0.410
	Mean	0.877 **	0.335
	Number of observations		
	1m	0.826 **	0.408
	1.5m	0.893 **	0.270
	2m	0.899 **	0.182
	2.5m	0.891 **	0.112
Wave power index (P _w)	3m	0.766 **	0.034
	3.5m	0.441	0.005
	4m	0.321	-0.029
	Mean	0.848 **	0.193
	Number of observations		
	5	0.817 **	0.390
	10	0.868 **	0.337
	15	0.890 **	0.258
Sea wave	20	0.895 **	0.201
	25	0.888 **	0.170
	30	0.887 **	0.154
	Mean	-0.841 **	-0.162
	Number of observations		
	-30	0.881 **	0.108
	-25	0.881 **	0.130
	-20	0.890 **	0.155
Northward component of wave power index (P _{WN})	-15	0.901 **	0.203
	-10	0.895 **	0.291
	-5	0.854 **	0.365
	5	No Data	
	Mean	0.545	0.202
	Number of observations		
	-30	0.300	-0.042
	-25	0.320	-0.019
Eastward component of wave power index (P _{WE})	-20	0.283	0.007
	-15	0.268	0.034
	-10	0.287	0.034
	0.1	0.287	0.034
	0.2	0.287	0.034
	0.3	0.287	0.034

4 . 考察

4 1 鳥取砂丘海岸における海岸漂着ごみの漂着メカニズム

鳥取砂丘海岸における、ペットボトルを指標とした海岸漂着ごみの挙動に関するモニタリングの結果、調査範囲内のペットボトルの総本数は季節的に大きく変動し、冬場に多く、夏場に少なくなる傾向が見られた(Fig.

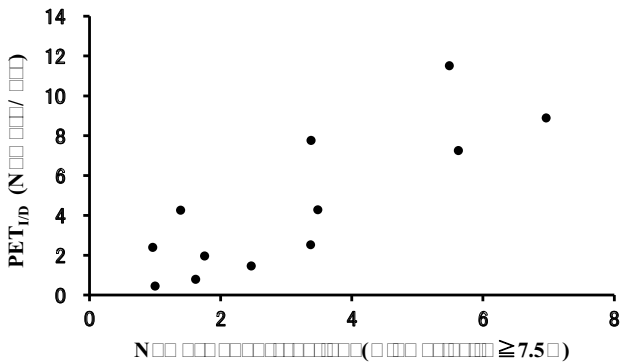


Fig. 5 Relationship between increase numbers per day of PET bottles (PET_{I/Day}) and numbers of observations for wind velocity ≥ 7.5 m

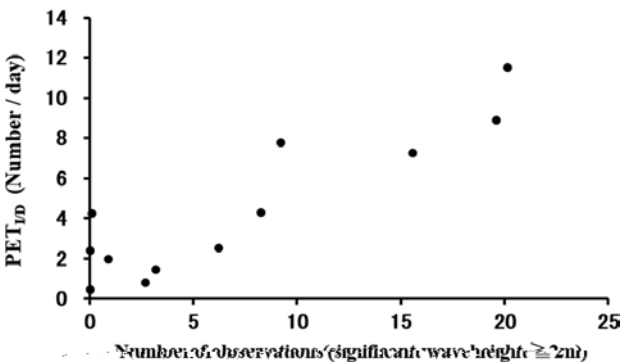


Fig. 6 Relationship between increase numbers per day of PET bottles (PET_{I/Day}) and numbers of observations for significant wave height ≥ 2 m

2) さらに、その総本数の変動については、ペットボトルの増加本数 (PET_{I/Day}) の変動 (Fig. 3) の影響が大きいことが明らかとなった。

ここで、PET_{I/Day} と風速の関係については、平均風速とも正の相関が認められたが、風速7.5m以上の観測回数と最も高い正の相関が認められた (Table 3)。このことは、風速7.5m以上の風が吹くことがPET_{I/Day}の増加に強く影響していることを示唆している。さらには、風向に基づき風速を北向き成分と東向き成分に分解すると、PET_{I/Day}は南向き及び東向きの一定値以上の強い風の観測回数と正の相関が認められた (Table 3)。すなわち、北西からの恒常的な風の発生がPET_{I/Day}の増加に強く影響している可能性を示している。

次にPET_{I/Day}と波浪の関係について、有義波高や波力指数の平均値との間でも正の相関が認められたが、風と同様に、波高では2m以上、波力指数では20以上の観測回数と最も高い正の相関が認められた (Table 3)。さらに波向を勘案し、波力指数を北向き成分と東向き成分に分解すると、南向き及び東向きの強い力を持つ波の

観測回数と正の相関が認められた (Table 3)。

これらの結果を総合的に換案すると、本研究の調査対象となる海岸では、日本海側で冬季に卓越する北西からの季節風により、南東向きに強い力を有する波が発生し、海岸漂着ごみが増加していると解釈された。これは、強い北西の季節風によって砂が堆積することで形成されたといわれる、鳥取砂丘の成り立ち (大槻ら 1999)とも共通する部分がある。

4.2 鳥取砂丘海岸における海岸漂着ごみの減少要因

本研究では、ペットボトルの減少本数割合 (PET_{DR/Day}) に顕著な季節性は見られなかったが、漂着したペットボトルの約1%程度が毎日消失していた (Fig. 4)。このことについて、本研究では調査した海岸からのペットボトルの消失経路として、二つの可能性を考えた。

第一は、漂着したペットボトルが再び海へ流出する経路である。海岸から再流出したペットボトルのその後の輸送経路に関しては、既往知見 (山口 2002、田中ら 2011、磯部 2018) より対馬暖流に乗って北上するものと推測される。

第二に、漂着したペットボトルが風で内陸へ運ばれる、または海岸の砂に埋没する経路である。今回の調査からも、砂への埋没を示唆する結果を確認することができた。例えば、2018年10月13日に赤色でマーキングしたペットボトルの本数について、その後徐々に減少した後、2019年10月13日に再び増加に転じていた (Table 2)。これは砂に埋没していたペットボトルが、再び砂浜表面に出現したためではないかと考えている。鳥取県の海岸で行われた岡野ら (2007) の報告でも、海岸漂着ごみの埋没が確認されている。海岸漂着ごみの再漂流を抑制することも重要であるが、同時に自然遺産として価値が高く、観光資源としても活用されている鳥取砂丘において、海洋ごみの砂中への埋没は問題視すべき案件である。さらには海岸生物への影響も懸念され、今後は海岸における海洋ごみの埋没実態を把握する必要がある。

4.3 鳥取県沿岸における海岸漂着ごみ回収対策

海岸漂着ごみの効率的な回収のためには、漂着ごみの季節変化を把握することが重要との指摘がある (環境省水・大気環境局水環境課海洋環境室 2011)。本研究の結果より、鳥取砂丘海岸において多くの海岸漂着ごみを効率よく回収するためには、ごみが減少する前である3月上旬に実施することが最良と判断した。鳥取県内各地の同様の地形的特徴を有する海岸では、同様の傾向が認められると考えられるが、今後は地形的な特徴を有する代

表的な場所にモニタリングポイントを設定し、同様の調査を実施することも視野に入れる必要がある。さらに、今後はより実効性の高い海岸漂着ごみの回収対策を行う必要があり、国や地方公共団体による、科学的根拠に基づく計画的な事業として回収を行う必要も生じよう。東アジア地域の環境先進国として我が国はリーダーシップを発揮すべきであり、このような体制の1日も早い構築が望まれる。

謝辞

本研究は2019年度 TUES 麒麟特別研究の助成により実施されたものです。また、公立鳥取環境大学大学院環境経営研究科の森光建太氏、公立鳥取環境大学環境学部環境学科卒業生の舟木優斗氏、鍛冶美沙里氏、大津裕平氏、梶谷虎太郎氏、工藤達也氏、倉森保乃加氏、城口京加氏、弓立亜美氏、公立鳥取環境大学環境学部環境学科在学生の小林美樹氏、中井耕平氏、松原潤氏、武坂亮氏には、調査活動に際し多大なるご協力を賜りました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- Ellen MacArthur Foundation (2016) "The New Plastics Economy: Rethinking the Future of Plastics" 34 pp.
- 外務省 (2019) 『G20大阪サミット(結果概要) 令和元年6月29日』
- Gove J.M., Whitney J.L., McManus M.A., Lecky J., Carvalho F.C., Lynch J.M., Li J., Neubauer P., Smith K. A., Phipps J.E., Kobayashi D.R., Balagso K.B., Contreras E.A., Manuel M.E., Merrifield M.A., Polovina J.J., Asner G.P., Maynard J.A. and Williams G.J. (2019) "Prey-size plastics are invading larval fish nurseries" *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116天24143-24149, <https://doi.org/10.1073/pnas.1907496116>
- 磯部篤彦・日向博文・清野聡子・馬込伸哉・加古真一郎・中島悦子・小島あずさ・金子博 (2012) 「漂流・漂着ゴミと海洋学 海ゴミプロジェクトの成果と展開」, 『沿岸海洋研究第』 Vol. 49、No. 2、p. 139-151 .
- 磯部篤彦 (2018) 「日本海における浮遊マイクロプラスチックの分布と輸送」, 『生物の科学遺産』 Vol. 72、No. 1、p. 43-48.
- 重化学工業通信社 (編) (2019) 『海洋プラごみ問題解決への道～日本型モデルの提案 増補版』 東京：重化

学工業通信社、295pp.

兼廣春之 (1999) 「プラスチックによる海洋汚染」, 『Journal of the Mass Spectrometry Society of Japan』 Vol. 47、No. 6、p. 319-321.

環境省 水・大気環境局水環境課海洋環境室 (2011) 『海岸清掃事業マニュアル』 49pp.

小島あずさ・眞淳平 (2007) 『海ゴミ - 拡大する地球環境汚染』 東京：中央公論新社、232pp.

国土交通省気象庁 『過去の気象データ・ダウンロード』 <https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php> (最終閲覧日：2020年1月31日)

国土交通省 港湾局 海岸・防災課 (2010) 『海岸漂着物等の効率的な処理に関する事例集』 58pp.

田崎智宏 (2019) 「多面的なプラスチックごみ問題の構造的
理解と経済的手法の活用に向けて」 『環境経済・
政策研究』 12巻、2号、p. 65-68 .

牛島大志・田中周平・鈴木裕識・雪岡聖・王夢澤・鍋谷
佳希・藤井滋穂・高田秀重 (2018) 「日本内湾およ
び琵琶湖における摂食方法別にみた魚類消化管中の

マイクロプラスチックの存在実態」 『水環境学会誌』
第41巻、4号、p. 107-113 .

山口春幸 (2002) 『漂着ごみ 海岸線の今を追って』 東
京：文芸社、263pp.

(投稿日2021年 1 年12日 受理日2021年 8 年 4 日)