

漂着ごみ量の測定に必要な海浜ごみの砂浜からの流出による消失半減期

岡野 多門・森田 晃
鳥取大学大学院工学研究科, 化学・生物応用工学専攻

Elimination Half-life Measurement of Beach Litter in Order to Estimate
the Amount of Floating Marine Litter That is Washed Ashore

Tamon OKANO and Akira MORITA
Department of Chemistry and Biotechnology, Graduate School of Department of Engineering,
Tottori University, Tottori, 680-8552 Japan
E-mail: okano@chem.tottori-u.ac.jp

Abstract: The amount of marine litter released from each country is reflected in the amount of beached litter originating from each corresponding country. Therefore, the monitoring results are instrumental in improving the measures to prevent the outflow of waste. However, the actual quantity washed ashore minus the quantity of outflow is the change of accumulated quantity on beach. Therefore, we measured the elimination half-life of litter items on eight beaches facing the Sea of Japan, and classified the items the beached quantity of which are possible to be measured. Consequently, it is impossible to measure the beached quantities of debris of polystyrene foam and plastic bags because of their instant transport even by weak wind. The elimination half-life of PET bottles from the beaches is about one month, because some of them contain residues or sand. Therefore the beached quantities of most of plastic bottles are considered possible to be measured by monthly monitoring. Disposable lighters and glass bottles are not affected by wind transport, and their elimination half-lives are around three months. However, it is difficult to measure the beached quantity of plate-like debris thinner than disposable lighters, because they are buried and exposed by blown sand.

Key Words: Floating marine litter, Elimination half-life, Beached PET bottle, Washed-up lighter, Beach debris

1. はじめに

人工素材ごみが世界中の海岸に大量の堆積していることが知られるようになり、海岸清掃が広く奨励されている^[1, 2]。しかし世界の海岸線は 78 万 km をこえ、人員的にも費用からも清掃は困難で、また清掃だけで海洋浮遊ごみを減らすことはできない。最も重要なことは、ごみの流出防止である^[1]。とりわけ、急速に消費水準を上昇させている環太平洋アジア諸国にとって、流出防止は喫緊の課題である^[3]。しかし、先進国の対策も不完全で、例えば日本や韓国では幾つもの対策が講じられているが、ごみは流出を続け、海岸に大量のごみが流れ着き、溜まっている^[4-8]。ごみが隠れて捨てられたり^[8]、過失から流出したりするため^[9]、予期できないごみ種も多く、机上の対策では十分に機能しない。流出防止の実効性を上げるためには、まず流れ着くごみ種とその量を認識し、流出や排出の原因の排除を行い、さらに投棄や排出を抑止する射的対策が必要である。

流れ着く量は漂着ごみ量で、海岸に溜まっている量が堆積ごみ量である。漂着量の調査は著者ら以外に行われていないが、堆積ごみ量の調査は広く行われている。しかし現在でもアメリカでは汀線距離 500m^[10]、イギリスや韓国では 100m^[11, 12]、日本では 10m^[4]と 5m^[13]の堆積ごみの調査範囲が推奨され、さらにごみ量の単位は面積当たりと汀線長さあたりが混用されている。さらに堆積ごみ調査の多くは観光地海岸で行われ、観光客の投げ捨てごみを含むすべての海浜ごみを調査の対象としている。しかし各国から漂着するごみ種と量は季節によって異なり、漂着したごみは海岸から流出して行く。その流出速度はごみ種によって異なり^[14, 15]、漂着量が多くても流出の速いごみの堆積量は少なく、漂着量が少なくても流出の遅いごみの堆積量は多くなる。すなわち、特定の季節の各国からの各ごみ種の堆積量は海浜の汚れを示す尺度であり、各国からの年間の排出量を反映しないため、各国での射的を射た排出抑制策に寄与しない。海岸ごみはごみ種の数だけある“入水と出水量

が異なる穴あきバケツモデル”にたとえられる。バケツに溜まっている水量が堆積ごみ量に相当し、それは入水量に当たる漂着ごみ量ではない。したがって、各国からの年間の漂着量を測るためには、流れ着く量に対して流出する量が十分に少ない期間の量を測り、それを連続して続け、その1年間の積算値が年間漂着量となる。最近、浮遊ごみの漂着と流出を連続的にモニターできるカメラの使用が行われているが^[16]、しかし遠方のカメラから流れ着いたごみ種の排出国を示す文字やバーコードをすべて正しく識別することは不可能である。したがって、カメラを用いる方法は各国での固形廃棄物の管理体制の改善を目的とする調査には適さない。

ごみ種と由来国の正確な同定には、海岸での観測者による文字や記号の確認が不可避である。しかし、カメラと異なり、観測者による海浜での連続の繰り返し調査の間隔には限度があり、それによって漂着量を測定できるごみ種に限られる。流出速度はごみの存在地点までの海水面の遡上に関係する。そこで、干満差が小さく、広い砂浜の多い鳥取県の砂浜の特徴を利用し、主要ごみ種の流出による砂浜からの半減期についての測定を行い、日本海側で漂着量が測定できるごみ種の決定と、連続調査に必要な時間間隔について報告する。

2. 調査と測定の方法

2.1 陸向きの強い季節風による漂着由来ごみの後背樹林帯への移送

定性的調査は風移送されやすいごみ種の流出速度が風移送されないごみ種より流出速度が速いと想定して行った。調査地は鳥取県の北条砂丘海岸の $35^{\circ}30'0.5''N$, $133^{\circ}46'30.3''E$ と $35^{\circ}30'0.4''N$, $133^{\circ}46'38.3''E$ の2点の汀線方向の200mを基準に、汀線から垂直方向に100mの後背松林までの範囲で、2005年12月9日に調査予定のごみ種を撤去し、2006年3月10日に漂着由来ごみの分布状態を調べた。ごみ種は目測で体積が 100cm^3 以上の発泡ポリスチレン、短辺が5cm以上のプラスチック袋類、原形の半分以上をとどめるペットボトルとライター、割れていないガラス瓶である。

2.2 粗粒の砂浜での海浜ごみの風と波の遡上による移送

鳥取空港の西側の $35^{\circ}31'42.3''N$, $134^{\circ}8'8.5''E$

を中心とする砂浜で、2007年5月下旬から7月初旬まで、および9月から12月中旬まで、風と波の遡上による海浜ごみの移送について毎日の調査を行った。この海岸は汀線から垂直方向に約30mまでの範囲が砂浜で、平均斜度は約5度、砂の粗粒率は2.44で平均粒子径は0.3~0.6mm、その後背地はなだらかな草地である。上記の点から両側に40m余りの地点に、汀線に垂直方向のテトラポットの波止めがあるため調査期間中の地形変化は小さく、海水面と海浜面の交線の位置変化は2m余りであった。

周辺からライター、キャップ付きの小型ペットボトル(500~650ml容積)と栄養ドリンク瓶(100~120ml容積)を集め、容器の内容物は捨て、ドリンク瓶および重量が25gから34g程度の標準的なペットボトルは空のままキャップを閉め、他のペットボトルには約500mlの海水を入れ、すべてのごみに印を付けた。水入りボトルとドリンク瓶とライター1個はそのまま砂上に置き、他のライターは上面を砂面と同じ高さにして置き、それに0.5cm~1cm程度の砂をかけ、空ペットボトルは砂面を3cmほど掘った所に置いた。これらの5個を直径0.5m程度の範囲内にまとめて1組として、海面と海浜面の交線から上方24mの地点を起点に、汀線に垂直の下方に向けて2mごとに1組ずつを置き、さらに汀線方向の10mごとに3列並べた。低波時は汀線に垂直方向に12組の最大計36組、波の高い日の最少は6組で計18組となった。

調査は16時を目標に行い、位置の移動と飛砂による変化を調べ、その後位置や飛砂の影響を修正し、欠損部を補い、翌日の調査に備えた。設置日数は150日以上であるが、有効な調査回数は88回で、調査の完結後にごみを撤去した。風速は鳥取空港の値で、最大波高は鳥取空港沖のナウファスの値を用いた。

2.3 細粒の砂浜での飛砂によるライターの埋没と露出の影響

鳥取空港北側の奥行幅が約40mの砂浜の中央部の $35^{\circ}32'3''N$, $134^{\circ}10'19''E$ の周辺で2007年の11月から12月に飛砂によるライターへの影響を調べた。この砂浜の粗粒率は1.53で、平均粒子径は0.15mmから0.3mmである。砂浜上に1辺10mの正方形を書き、汀線に垂直方向の1mごとに11ヶ所、汀線と平行方向の5mごとに3列の計33ヶ所に、各2個のライターを設置した。1個は砂面上に置き、他の1個は砂面を1cmほど掘り、ライターの上面を砂面と同じ高さにして、それに0.5cm~1cmほどの砂をかけた。1

日後の16時すぎに調査を行い、各組の1個、あるいは2個のライター面の半分以上がそれぞれ埋没あるいは露出していた場合を変化として記録し、その後に変化を修正して翌日の調査に備えた。ただし、波の遡上を受けて位置が変化した場合は調査結果から除いた。なおこの調査では鳥取空港での最大風速と1mm以上の降雨の測定値を用いて分析した。

2.4 漂着ライターの8海岸での流出速度の測定と年平均の半減期

下記の8海岸の砂浜の汀線500m区間で、2006年6月から2008年9月まで調査を行った。2006年6月から2007年5月までの月ごとに12回、実際に漂着したライターの4面に海岸と漂着月が特定できる印を付け、漂着地点を変えず、人為的な影響を避けるために砂面から2cm程度の深さに埋めた。翌月に砂浜上に表出している印付けライターを調べ、そのライターを再度2cm程埋め込んだ。印付の終了後も表出ライターの調査を続け、2cm程の埋め込みを2008年9月まで繰り返した。これらの海岸はほぼ北向きで、その西端の位置はA; 35°29′9.2″N, 133°16′48.7″E, B; 35°30′5.7″N, 133°44′13.3″E, C; 35°30′12.4″N, 133°50′53.7″E, D; 35°31′5.2″N, 134°2′6.6″E, E; 35°31′44.3″N, 134°8′17.1″E, F; 35°32′25.6″N, 134°11′54.6″E, G; 35°33′22.8″N, 134°15′47.2″E, H; 35°36′0.1″N, 134°21′29.2″Eである。これらの位置の略図は図1に示す。

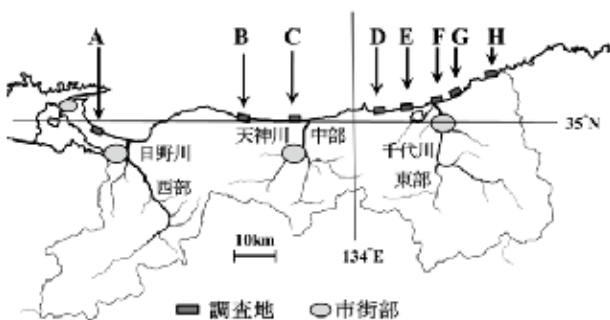


図1 鳥取県の主要市街部と河川と調査地の位置

2.5 漂着ペットボトルと栄養ドリンクの流出速度と半減期の決定

漂着した容積1L未満の小型ペットボトルと栄

養ドリンク瓶の流出速度の測定は2006年11月から2007年12月まで前記のC, E, Gの3海岸の各500m区間で、2012年12月から2014年1月まではB, D, E, Gの4海岸の500m区間で行った。これらの漂着ごみの内容を捨てずそのまま、キャップのないペットボトルは容器本体にペンやスプレーで漂着月の印を付け、ふた付き容器は漂着月と場所を記した生分解性テープをふたと容器の間に挟み、漂着していた位置も向きも元の状態に戻して置いた。2006年からの調査では印付け後の月次調査において撤去したが、2012年からの調査では撤去までの日数を延長し、最長の放置日数は49日間とした。

3. 結果と考察

3.1 漂着ごみ量と堆積ごみ量の相違

海洋浮遊ごみの漂着は断続的であるが、海浜からの流出も断続的に起こっている。したがって、一定期間での漂着数と流出数および海浜上に残留しているごみの変化数、すなわち堆積数の変化との関係を個数で記すと式1となる。

$$\text{堆積数の変化数} = \text{漂着数} - \text{流出数} \quad (1)$$

あらかじめ海浜上の堆積数をゼロとして調査を始めても、一定期間後の堆積数は、漂着数から流出数を引いた個数となる。流出数の測定は、堆積ごみに印を付け、新しく漂着するごみと区別ができるようにして、一定期間の後に、印の付いたごみの減少数からできる。それによって測定できた流出数が十分に少ないとみなせる期間内に海浜上に溜まっているごみ数が漂着数と近似できる。続いて再度、海浜上に溜まっているごみを撤去し、また流出数が十分に少ない期間内に溜まった個数を漂着数と近似する。その調査を連続して繰り返すことで、各調査の漂着数の積算値が年間やある季節の期間の漂着数の近似値となる。

漂着数を測るための繰り返し調査の時間間隔は、そのごみ種の海浜からの流出速度によって決まる。各国の排出抑制策の改善を目的とする調査では、排出由来国の正確な帰属が必須で、観測者による調査が不可避である。観測者による調査の実施可能な間隔を1ヶ月程と仮定すると、流出による半減期がおおよそ1ヶ月より短いごみ種の漂着数の測定はできない。すなわち、流れ着くごみ種であっても、すべてのごみ種の漂着量を測ることはできない。

3.2 漂着ごみの風による影響

風による外力は対象物の投影面積に比例し、抗力は重量に比例する。このため比重が大きくても重量の小さな微小物は風で移送されやすく、他方で低比重でも体積の大きなごみは風移送されにくい。砂の比重は2~3程と大きい、一般的な浜砂は風速5m/sec前後から動き始める。他方で発泡ポリスチレンの比重は0.02前後と小さいが、1kg以上のフロートは風速5m/sec程度では、自然にできた凹凸のある砂浜上から動かない。そこで風移送されやすいごみ種の海浜からの流出は速いと仮定し、実際の海岸で、実際の漂着物の風移送を季節風の強い冬期に定性的に調べた。

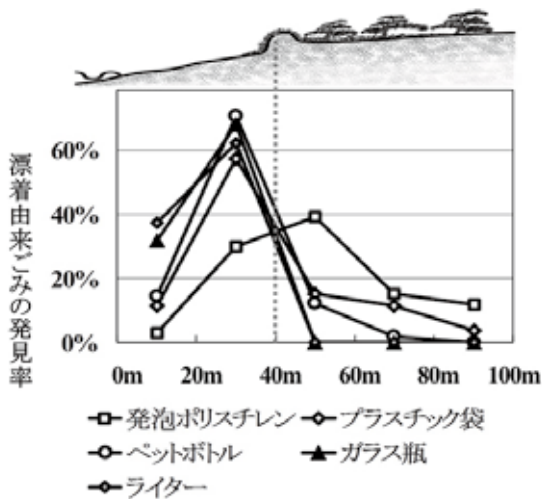


図2 主要ごみ種の砂浜と後背防風林内の分布

海浜と後背樹林帯を含む調査範囲のごみを12月にすべて撤去し、翌年の3月に漂着したごみの分布を調べた。この間の鳥取空港での最大風速は北北西21m/secで、調査地の海岸での最大風速も同程度と思われる。調査地の地形とごみの分布を図2に示す。発泡ポリスチレン破片は33個で、その内の22個が約2mの高さの土手をこえた防風林内で、プラスチック袋の26個の内の8個、ペットボトル48個中の7個が防風林内に見られた。他方でライター16個とガラス瓶22個はすべて海浜側で見つかった。したがって、ライターとガラス瓶の調査範囲を海浜に限ることができるが、土手をこえたごみ種では、調査範囲の限定が困難である。

防風林内のペットボトルは全数の15%で、そのすべてが空ボトルで、6個は土手の基部にあった。

防風林内には草木が多く、冬期の海向きの風（南風）は弱いため、防風林側から土手をこえて海浜側に戻る風移送は考えられない。したがって防風林内の個数が3ヵ月間に土手をこえた全数と判断できる。すなわち、調査間隔を3ヶ月より短くすることで、漂着数の測定を海浜の範囲だけで行うことができると思われる。

3.3 写真で見る漂着由来ごみの風移送

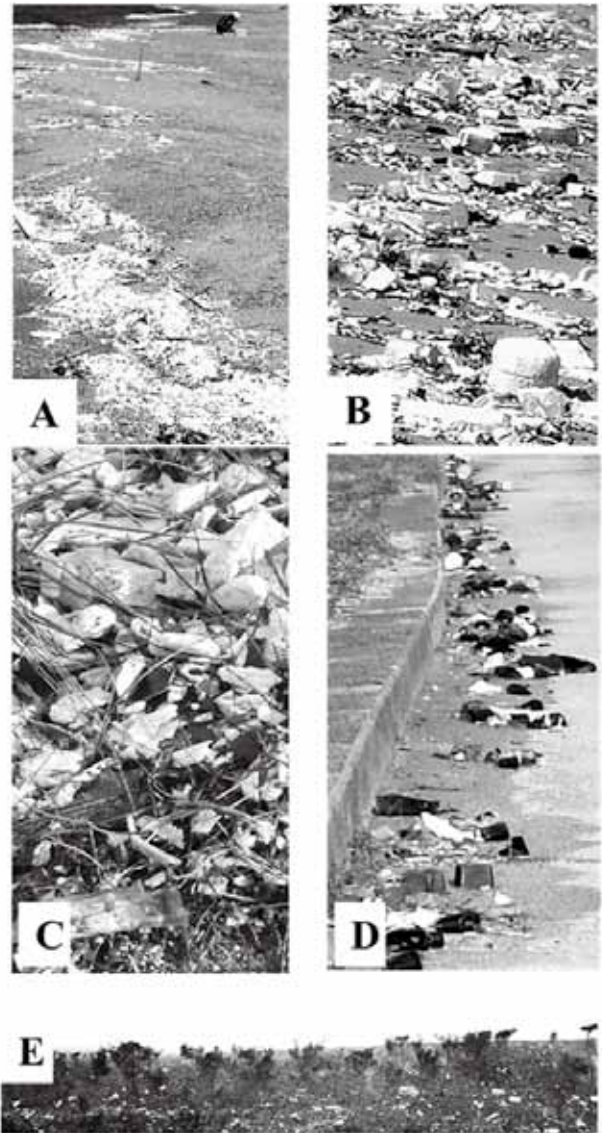


図3 発泡ポリスチレン破片の選択漂着と海浜から風で移送された低比重の軽量ごみ

最も風で移送されやすいごみ種は発泡ポリスチレンの微小破片で、特にビーズ法の発泡体は機械的強度だけでなく、ベンジル位の炭素の結合が光開裂しやすいために劣化が速く、容易に微細な破

片を生じやすい。図3Aの上方に釣り人が写っているが、ここで漂着した発泡ポリスチレン破片に大型物は見られず、発泡ビーズ1個から数百個程度の微小破片だけが選択的に漂着している。漂着帯と汀線との距離が1m~2mであることから、岸向きの風の弱い、波の低い日に打ち上げられたことが分かる。発泡ポリスチレンの破片が風で容易に移送されることはWebカメラで確認されて報告されているが^[16]、乾燥あるいは脱塩乾燥すると微風でも飛散する。他方で、図3Bは高波時の漂着で、微細破片は少なく、中型の発泡ポリスチレン破片が選択的に漂着している。重要な事は、図2Aでも2Bでも、発泡ポリスチレン以外のごみは極端に少ない。この事実は、発泡ポリスチレン破片と他のごみが海上で自然分離され、さらに発泡ポリスチレン破片の大小も、自然に分離されることが分かる。したがって、発泡ポリスチレンの量を測っても、それは排出を反映しない。

図3Cは波の達しない海浜最上部の吹き溜まりで、通常ビーズ法発泡ポリスチレン破片が大量に堆積し、少数のカップ麺や納豆、食品トレイなどの発泡ポリスチレンペーパーや、重量が5g前後のプラスチック製の空の袋や容器類、非発泡トレイなどが少数含まれている。図3Dは強風後の遊歩道に風移送された漂着由来ごみで、重量5g前後の黒い苗木ポットや10g程度までの四角の豆腐容器、小型の空袋などが見える。砂浜上にもこれらのごみ種は残っていたが、遊歩道上のごみとは異なり、それらには砂水が入っていた。

遊歩道にペットボトルと発泡ポリスチレン破片は少ないが、ペットボトルの多くは草地をこえた遊歩道まで達せず、発泡ポリスチレン破片はさらに後背樹林帯まで飛散していた。図3Eは松の植林のため、広葉樹が伐採された直後の写真で、5m余りの高さの浜崖上の稜線を飛び越えた数百g程度までの中小型の発泡ポリスチレン破片が多く見られ、これらが飛散する過程で、空中での風選を受け、帯状に堆積していることが分かる。これらの写真から風移送を受けやすいごみ種の順序を定性的に知ることができる。これらのように、海浜外に用意に風移送されるごみ種は流出速度だけでなく、調査範囲の設定からも漂着数量を測ることは不可能である。

3.4 空のペットボトルの風移送

ペットボトルは世界中で広く使用され、アジアの海域でも深刻なごみ種である^[5]。前記のように

空ペットボトルは冬期の強風でも、あまり空中飛散しないが、砂浜上を転がることはしばしば目撃される。そこで、原形をとどめた500ml前後の容量の漂着由来ボトルを拾い集め、比重が0.06前後の標準的な空ボトルを、漂着後に凹凸のある砂浜面に止まると想定し、砂面を3cm程掘ってボトルを置き、同時に海水を約500ml入れた漂着ボトルを一組として置き、24時間の内に風で動いたか否かを調べた。すなわち、水入りボトルは風で動かず、空ボトルだけが移動した場合を風移送とみなし、水入りも空ボトルも動かなかった組数に対する割合を、24時間の最大風速に対してプロットし、図4で示す。

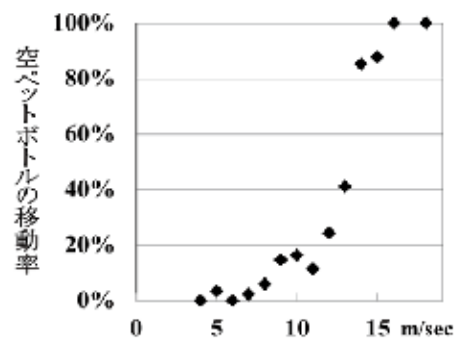


図4 設置後24時間における空ペットボトルの移動率と最大風速

水入りボトルが動かなかった全組数は2,371で、その内で最大風速が7m/sec以下の日の組数は727であった。最大風速が7m/sec以下の日の内の空ボトルだけが動いた組数は16であった。この移動率は非常に小さく、人や動物による移動も否定できないため、最大風速7m/sec以下では転がり移送は起こらないと判断した。最大風速が8~10m/secになると、風移送が明確に確認できるようになった。

図2や図3から、10g程度までのプラスチックの空の袋類やトレイ、苗木ポットなどの軽いごみは、空ペットボトルより風で動きやすいことが分かる。ところで最大風速が7m/secまでの日は週に複数回あり、最大風速10m/sec近くの日も月に複数回ある。したがって、ペットボトルの流出速度の測定は、他のごみ種の流出速度を推測するために重要である。

3.5 波の遡上と風による海浜ごみの移動

波の遡上位置が順次低下すると複数の漂着ごみ帯

が見られる場合がある^[17]。前記の水入りと空ペットボトルの調査はその漂着ごみ帯をモデルとした。ただし、実際にはさらに空ドリンク瓶とライター2個の計5個を1組とした調査である。ドリンク瓶とライターの1個は砂面上に置き、他のライターは少し埋めて上から砂をかけ、海水面と海浜面の交線から垂直方向に24mの地点から汀線に向かって1組ずつ、2mごと置き、24時間後の設置地点からの移動および飛砂によるライターの埋没と露出を変動と定義して調べた。有効な調査回数は88回で、変動した個数を設置数で除した値を変動率として、海水面と海浜面の交線からの距離でプロットして、図5で示した。

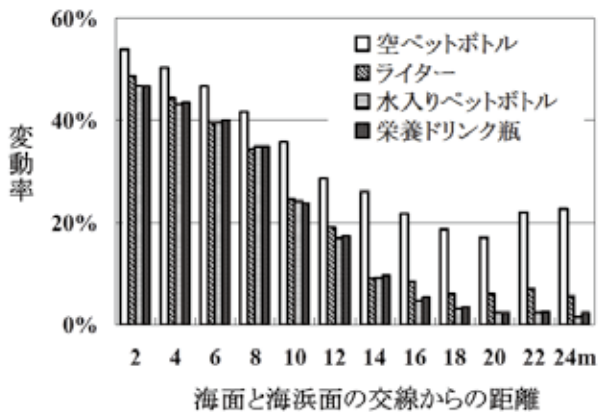


図5 設置後24時間における風と波の遡上による海浜ごみの変動

汀線から上方に向かうにつれて、すべてのごみ種の変動率が小さくなる。この主因は波の遡上で、砂浜の上部まで波が達する日は少ないからである。空ペットボトルの変動率が他のごみ種に比べて大きい原因は風移送による。下方では空ペットボトルと他のごみ種の変動率の相違が小さく、風移送より波の遡上による移送される日が多いことを示す。

水入りペットボトル、ドリンク瓶、ライターの3者の変動率はどの地点でもほぼ同じで、いずれのごみ種も調査期間中の最大風速18m/secまで、風移送を受けないことを示す。さらに波の遡上では、砂をかけて埋めたライターも他のごみ種と同時に動いている。すなわち、表出物も砂中の深さが浅い埋没物なら、いずれも同じように波の遡上で移送され、上記3種の高比重ごみ種に対しては、風に比べて波の遡上水の移送力が圧倒的に強いことを示す。遡上水の流速は通常、風に比べて遅い

が、比重は空気の約800倍で、風より大きな外力と、さらに海水の浮力によって抗力を弱めることで移送を容易していると考えられる。

ここでの調査では飛砂の影響を小さくするために、砂の平均粒子径の大きな0.3~0.6mmの鳥取空港西側の海岸を選んだが、それでも16m以上の地点でライターの変動率は水入りボトルやドリンク瓶より4%前後、すなわち88回の調査中で延べ3回ほど高い。その原因は背の低いライターが飛砂による埋没と露出の影響を受けているからである。この調査期間の最大風速は15m/secが6回、16m/secと18m/secが各1回で、ライターに影響をおよぼすこの海岸での飛砂の発生には15m/sec以上の風速が必要であることが分かる。

調査範囲の汀線方向の両側の各20mを含む計60mの範囲と上方の20mまで範囲内に、移動して残っていた個数を残留数として、10月31日より測定を始めた。その結果、空ペットボトル、ライター、水入りペットボトルと栄養ドリンク瓶の2者を合わせたそれぞれの積算変動数は300個、293個、251個で、積算残留数(残留率)は158個(53%)、202個(69%)、185個(74%)であった。空ペットボトルの設置数は後2群のごみ種の半数であるが、変動数は後2群よりむしろ多く、逆に残留数は少ない。ライター、水入りペットボトル、栄養ドリンク瓶の残留率はいずれも70%前後であるが、残りの約30%が調査範囲外に再漂着した可能性が否定できない。したがって24時間の波の遡上で沖合に流し出される確率は30%より低いことと言える。

調査期間中の最高の有義波高は4.54m、次いで3.77m、さらに3m以上の日が5回あった。これに対応して24mをこえて波が遡上した回数は2回、14mまで遡上した回数が8回あった。仮に、有義波高が3mで汀線から14mまで遡上したと仮定すると、砂浜の斜度が5度であるため、海水面から高度約1.2mまで遡上することになる。この1.2mの上昇は太平洋側の大潮での干潮と満潮の潮位差より、むしろ小さい。波の遡上と潮汐による海水面の上昇はいずれも海浜ごみの流出を促すが、両者の作用には大きな相違がある。波は岸向きの風で高まり、波が遡上する過程で海浜ごみを浜の上部に押し上げ、流れ下る過程で一部のごみを流し落とす。しかし、岸向きの風がごみの流下を押し留め、さらに遡上水は流れ下る過程で砂に浸み込み、水量の低下によって浮力と流し落とす力を弱める。それでも一部のごみは砕波帯に流れ落ちるが、再度岸向きの風と波で打ち上げられる。そのため、

24 時間での波の遡上で沖へ流出する確率は前記のように 30%より低い結果となる。他方で、潮汐変化の大きな海浜では、風が沖向きや無風に近くて波が低くても、潮汐で海面が上昇する。それによって海浜ごみは浮き上がる。しかし、上記のような風波による流出を止める作用がないため、引き潮になると大半のごみが沖に流出して行く。満潮は日に 2 回、大潮は月に 2 回あり、引き潮時のごみの流出を瀬戸内海では日常的に見ることができる。したがって、潮汐変化の大きい海岸ではすべてのごみ種の流出速度が速く、海浜ごみ量が少なくても漂着量が少ないとは言えない。

3.6 ライターの飛砂による埋没と露出

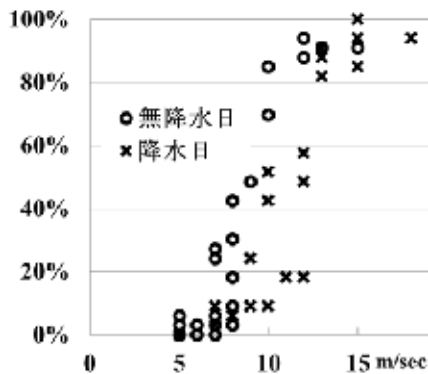


図 6 設置後の 24 時間における飛砂によるライターの変動率と最大風速

背の低いごみ種は飛砂による埋没と露出から、砂浜上への出現数を変化させる。その影響を鳥取空港北側の平均粒子径が 0.15mm~0.3mm の細かい砂浜で調査した。ライター 1 個は砂面上に置き、他の 1 個はライター上面を砂面と同じ高さに置いて、それに 0.5cm~1cm ほどの砂をかけて 1 組とした。24 時間後に砂面上に置いたライターの半分以上が埋没か、埋めたライターの半分以上が露出のいずれか、あるいは両方が起こった組を変化と定義し、波の遡上によって移送された組を除き、両者とも変化しなかった組数に対する変化した組数の割合を、無降雨日と降雨日に分け、最大風速に対してプロットした。図 6 から分かるように、この浜では最大風速 5m/sec 程度から飛砂が発生するが、ライターの埋没と露出に明らかな影響がみられるのは最大風速 7m/sec 程度からである。降雨日の飛砂は起こりにくいが、最大風速 10m/sec 前後から降雨によらず飛砂の影響が明確となり、13m/sec 以上では激しくなった。しかしライター

自体はこの調査期間中の最大風速の 18m/sec でも風移送されなかった。

最大風速が 10m/sec 前後の日は月に数回あるため、飛砂はその度に発生し、背の低いごみは埋没と露出を繰り返していると推測される。多くの砂浜で、砂はレジンペレットやそれ以上の重量の板状ポリオレフィン破片より先に風移送される。実際に背の低いごみが埋没していることは良く知られているし^[4,17,18]、浅く砂中に埋没していたポリオレフィンのレジンペレットや破片が波の遡上水で浮き上がり、砂上に露出する現象は良く見られる。したがって、埋没と露出を繰り返すライターより背の低いごみ種の漂着量の測定は困難である。しかも浮遊性の破片類は主に民生由来のポリオレフィン製のごみから発生した古いごみで、漂着重量の多い漁業用品にはポリ塩化ビニルなどの比重が重い素材が多く用いられ、またロープは超極細の繊維状に劣化するため、いずれも海浜上で目視できない^[21]。製品ごみの流出を削減することは、ポリオレフィン破片を削減し、海域生物への脅威の削減することである。したがって、それらの漂着量や堆積量を測る意義は小さい。

3.7 漂着ライターの流出速度

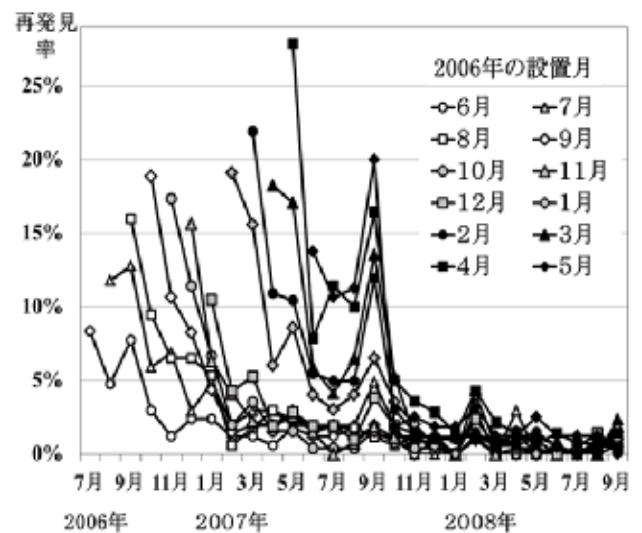


図 7 汀線 500m 区間の 8 海岸に漂着したライターの再発見率

漂着ライターの流出速度は、著者らが漂着量の月次調査を続けてきた 8 海岸の各 500m 区間の延べ 4 km の砂浜で測定した。調査海岸数が多い理由は異常漂着や河川の影響などを平均化するため^[6,19,20]、汀線距離 500m はその海岸一帯の漂着量を

推定するための最少の範囲で^[20]，また漂着ごみの汀線方向への移送による調査範囲からの逸脱の影響を小さくするためでもある．各海岸の各月に漂着したライターに，海岸名と漂着月を示す印を付け，人為的な乱れを避けるために，漂着していた地点で，砂面から2 cm程度埋めて設置した．その翌月に砂上に露出している印付ライターを調べ，それらを再度，砂面より2 cm程埋め込み，同時に新しく漂着したライターに海岸名と新しい月の記号を付けて埋め込んだ．このような印付けを連続して12ヶ月続け，印付けの終了後も月ごとの調査を続けた．

印付けしたライターの総数は2249個，各月の印付の数は102個から269個の範囲である．図7に各月の再発見数の割合を折れ線グラフで示した．設置後の期間が長くなると，発見率が低下するが，しかし調査月による変動が大きく，7月と8月の発見率は低い，逆に9月は増加していた．すなわち，7月と8月の少ない出現数は海への流出ではなく砂中埋没が原因で，9月の発見率の増加は埋没ライターの露出が原因である．8月から10月の変化は，A海岸を除く7海岸で同じように起こっていたため，この変動は離れた海岸にも同時に影響を与える気象が原因と判断できる．そこで気象の影響を年平均化するために，設置後の経過月数で発見数を集計し，図8左で示した．1ヶ月後の発見数は374個と著しく少ないが，2ヶ月後は224個で，その後もゆっくりと減少していく．したがって，1ヶ月後の著しく少ない発見率は砂中埋没が主因で，海への流出数は少ないことが分かる．

$$-dF/dt=kF \quad (2)$$

$$\ln F = -kt + \ln F_0 \quad (3)$$

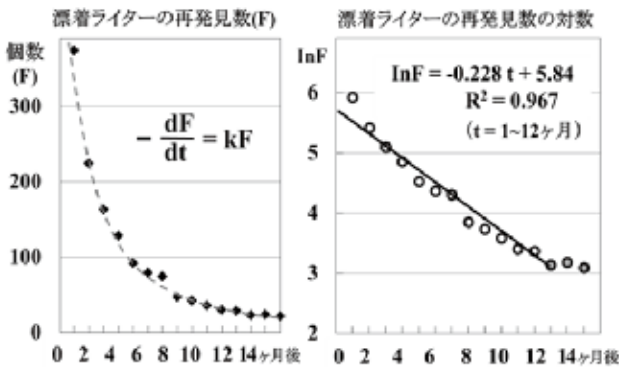


図8 ライターの漂着後の月ごとの再発見数と海へ流出する速度定数 (k)

ライターが時間 (t) に1次で海へ流出して減少すると仮定すると，減少速度は式2で表せる．ここでFは発見数，kは流出する速度定数である．この式を積分すると式3となる．切片の F_0 は印付け総数に対する仮定の砂上の表出数である．発見数の対数を期間に対してプロットした結果が図8右で，設置後12ヶ月まではほぼ直線的に減少し， $\ln F = -0.228t + 5.84$ で近似できる．すなわち，海に流出することで減少する速度定数は $-0.23M^{-1}$ で，年平均の半減期は $\ln 2/k$ より，約3.0ヶ月と計算できる．設置後12ヶ月以上の長期になると流出は減少する．

近似直線の決定係数は十分に高いが，1ヶ月後の発見数の減少が近似直線に比べて大きく，逆に12ヶ月以降の減少が少ないように見える．この原因は前記のように，汀線に近い位置に漂着したライターの流出が速く，波の遡上頻度の低い砂浜上部からの流出が遅く，海浜上部でライターが残留数が増えたためと考えられる．図8右の切片の F_0 は345個で，年平均の砂中埋没率が85%と計算できる．しかし，深く埋めると飛砂で露出する割合が減ると思われ，実際の漂着ライターの埋没率は85%より低いと思われる．ただし前記のように波が遡上すると埋めたライターのすべてが移動するため，埋めたことによる流出速度への影響は小さいと考えている．この推測は後記するように，波の遡上だけによって流出する栄養ドリンク瓶の半減期がライターの値に近いことから支持される．

海浜ごみは汀線方向にも移送される．そのため8海岸の調査地の両側各300mの範囲の調査を2007年4月に行った．3月までに印を付けたライターの合計数は1949個で，東側の延べ2.4 kmでの発見数は14個，西側の2.4 kmでは5個であった．すなわち，調査地の両側4.8 kmで埋めずに放置していたライターの合計発見数が19個，他方で調査地の延べ4 km区間で3月にすべてを埋めて4月に表出していた数が91個である．この結果は，調査区間が500mと長い場合，調査区間外の両側への逸脱が少なく，それによる海への流出速度定数への影響が小さいことを示す．

調査地のAからH海岸までの直線距離は約100 kmで，調査地の延べ汀線距離はその4%にあたる．しかし，調査の終結までに，印付け海岸と異なる海岸の調査区間で見つけれられたライターの合計数はわずか5個であった．再漂着したライターの埋没率も85%と仮定すると，推定の再漂着数は33個となる．一方，海への流出推定数は2,102個で，それらが単純に4%の汀線距離の異なる調査海岸

に再漂着したと仮定すると、再漂着数は84個と計算できる。すなわち、岸から海に出たライターの一部は調査地に隣接した海浜に流れ着くが、離れた調査地にはあまり漂着せず、外洋に流出して行く割合が高いと予想される。この推測は既報の地名情報のあるライターの調査や鳥取県内の3大川から流出したごみがそれぞれの河口近くの海岸に多く分布していることなどから支持される^[6,19]。

3.8 ペットボトルと栄養ドリンク瓶の年平均の流出速度

上記の8海岸の各500m区間に漂着した小型ペットボトルと栄養ドリンク瓶について、それらの漂着状態を変えずに印付けだけを行い、一定期間後の残留数を調査した。2006年からは3海岸、2012年からは4海岸で、年平均の流出速度を測るためにいずれも12ヶ月間の連続調査を行った。印付け総数はペットボトルで2,742個、栄養ドリンク瓶で1,243個である。放置日数が同じ場合は設置数と再発見数をそれぞれ合計し、[再発見個数]/[設置個数]の値の対数を放置日数に対してプロットし、前記と同様に時間に1次で流出すると仮定し、流出して減少する速度定数から消失半減期を求めた。

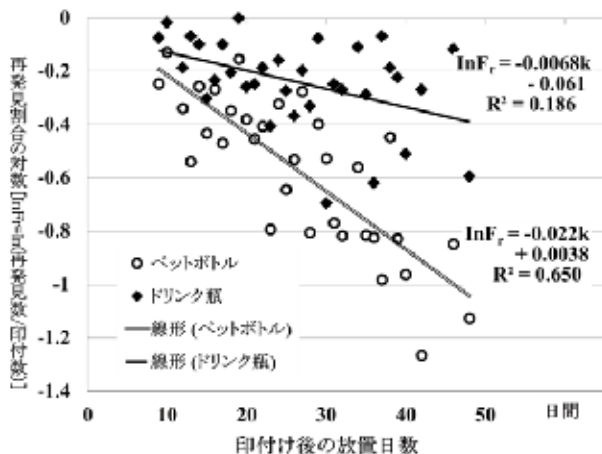


図9 漂着ペットボトルと栄養ドリンク瓶の流出の速度定数(k)

結果を図9に示す。決定係数は低いが、流出速度は明らかに栄養ドリンク瓶よりペットボトルで速い。近似式から求めた栄養ドリンク瓶とペットボトルの年平均の流出速度定数はそれぞれ $-0.0065D^{-1}$ と $-0.022D^{-1}$ である。切片の値の信頼性は低いが、これらはライターより背が高いため、

砂中埋没率はいずれも著しく低いことが明らかである。流出速度定数から計算できる年平均の半減期は栄養ドリンク瓶とペットボトルでそれぞれ約103日と32日である。空のペットボトルは風で容易に動くが、実際に漂着するペットボトルの半減期は約1ヶ月である。これは容器内への異物の残存や風移送を受けにくい潰れた形状のボトルが含まれること、さらに調査区間が広いために汀線方向の風移送を受けても、調査範囲からの逸脱が少なく、さらに他の漂着物や障害物によって止められることが原因と思われる。約1ヶ月の半減期とは、砂浜上の個数が1ヶ月間経過すると半数になることを示すが、実際の漂着は1ヵ月間を通して断続的に起こる。したがって1ヶ月ごとの定期調査からおおまかな漂着数の近似値を得ることができる。栄養ドリンク瓶の半減期は約3.4ヶ月で、ライターの半減期とほぼ同程度である。この結果は、風移送も飛砂の影響も受けにくい、波の遡上だけで動くような多くのごみ種の半減期が3ヵ月余りであることを示唆する。ただし長いロープのように一部が砂に埋もれているごみの半減期はこれらより長いことが分かっている^[16]。これらの結果から、波の遡上位置の変化に比べて潮汐変化の小さな日本海側では、漂着ペットボトルより風移送を受けにくく、飛砂による埋没や露出の影響を受けにくいごみ種の漂着数は1ヶ月ごとの繰り返し調査で測ることができると判断できる。

4. 結論

越境浮遊ごみによる海域汚染は自国の海浜の清掃だけでは解決できない。何よりも各国からのごみの流出を止めることが重要で、そのためには各国から流れ着くごみ種とその量を、信頼される科学的な調査法で測定し、各国に適した実効性の高い流出防止策の実施を促すことが必要である。それを目的とする調査では、すべてのごみを調べる必要はなく、代表的なごみ種の調査だけで十分である。すなわち、ガラスやプラスチックの調味料容器、洗剤や豆腐容器はいずれも家庭の屋内から排出されるため、そこからの代表的なごみ種に対して有効な排出抑制策は、屋内からのほぼすべてのごみ種の流出を抑制できるからである^[9]。さらに排出由来国を示す文字や記号の少ないごみ種^[9]を調べる必要もない。

漂着量が多くても、海浜から速く流出するごみの堆積量は少ない。このため、風移送されやすい軽量の低比重ごみの漂着量や、すべてのごみの流

出速度が速い潮汐変化の大きな海浜での漂着量の測定は困難である。波の遡上に比べて潮汐による海面変動が小さな日本海側では、漂着ペットボトルの半減期より長いごみ種は1ヶ月間隔の繰り返し調査によって漂着数を測ることができる。これらには屋内民生用の洗剤容器や農業用の農薬瓶、漁業用のフロートなど大半の分野からのごみ種の測定が可能である。ただし飛砂による古い堆積ごみの露出や新しい漂着ごみの埋没には注意が必要である^[17,18]。

漂着量は必要に応じて重量で比較すべきで、それを想定し著者らは平均重量を推定しやすいごみ種の分類を行っている。例えばペットボトルは容積を基準に大小の2種に分け^[5]、フロートや漁業用品ごみは複数種に分けて個数調査を行い^[7,21]、それらの平均重量から漂着重量を比較している。迅速に行うことができる個数調査により広い範囲の調査が可能となり、その結果として個々のごみの重量を海浜で測るより正確な測定値が得られる。世界の海域の浮遊ごみの削減には、各国が協動的に有効な排出削減策を実施することが必要である。ただし、潮汐変化の大きな海に面した国では、自国から排出しているごみ種と量を、自国の海岸で測定できないことも想定できる。他国での調査が信頼されるためには、十分に信頼できる科学的な調査法の開発が不可欠である。この目的から著者らは科学的な定量的調査法について検討してきたが、信頼性をさらに高める検討が国内外の研究者によって行われることを期待している。

参考文献

- [1] UNEP: Regional Seas Programme, Marine litter, http://www.unep.org/regionalseas/marine_litter/ (accessed 2014-October-31).
- [2] National Marine Debris Monitoring Program/Lessons Learned, http://water.epa.gov/type/oceb/marinedebris/upload/lessons_learned.pdf (accessed 2014-October-31).
- [3] Kako, S., Isobe, A., Kataoka, T., and Hinata, H.: A Decadal Prediction of the Quantity of Plastic Marine debris Littered on Beaches of the East Asian Marginal Seas, *Marine Pollution Bulletin*, 81, pp.174-184, 2014.
- [4] 環日本海環境協力センター：報告書, http://www.npec.or.jp/3_report/hk-tp.html (accessed 2014-October-31).
- [5] 岡野多門, 安東重樹, 池田圭吾: 日本海に流入する海外からの飲料用ペットボトルの漂流経路, *棄物資源循環学会論文誌*, 22, pp.285 - 292, 2011.
- [6] 岡野多門, 安東重樹, 安本 幹: 漂着ライターの地名情報からみた民生分野からの海域ごみの排出地, *環境科学会誌*, 24, pp.521-530, 2011.
- [7] 岡野多門, 加藤 郁美: 東アジアからの漁業用フロートの漂着実態, *棄物資源循環学会論文誌*, 24, pp.88 - 96, 2013.
- [8] 岡野多門, 安本 幹: 医療・衛生用品廃棄物の漂着実態とそれらの日本での投棄率, *棄物資源循環学会論文誌*, 24, pp.97-104, 2013].
- [9] 岡野多門, 安本 幹, 安藤重樹: 難分解性海浜堆積漂着ごみの性質と分類, *廃棄物資源循環学会*, 21, pp.94-105, 2010.
- [10] National Marine Debris Monitoring Program Report - UNEP: http://www.unep.org/regionalseas/marine_litter/publications/docs/NMDMP_REPORT_0cean_Conservancy__2_.pdf (accessed 2014-October-31).
- [11] Storrer, K. L., McGlashan, D. J., Bonellie, S., and Velander, K.: Beach Litter Deposition at a Selection of Beaches in the Firth of Forth, Scotland, *Journal of Coastal Research*, 23, pp.813-822, 2007.
- [12] Hong, S., Lee, J., Kang, D., Choi, H., and Ko, S.: Quantities, Composition, and Sources of Beach Debris in Korea from the Results of Nationwide Monitoring, *Marine Pollution Bulletin*, 84, pp.27-34, 2014.
- [13] 公益財団法人 海と渚環境美化・油濁対策機構: 発行物, <http://www.umitonagisa.or.jp/html/syuppan.html> (accessed 2014-October-31).
- [14] A.T.Williams, D.T. Tudor: Litter Burial and Exhumation: Spatial and Temporal Distribution on a Cobble Pocket Beach. *Marine Pollution Bulletin*, Vol.42, No.11, pp.1031-1039 (2001)
- [15] 岡野多門, 森田 晃: 広域海岸の漂着ごみ量と堆積ごみ量の指標となるような測定値を得るための適切な調査範囲, 第24回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集,

- pp.21-22, 2013.
- [16]Kako, S., Isobe, A., and Magome, S. : Sequential Monitoring of Beach Litter Using Webcams, Marine Pollution Bulletin, 60, pp.775-779, 2010.
- [17]岡野多門, 安東重樹, 築田哲也, 安本 幹, 宮崎義大: 漂着堆積人工素材ごみの砂浜上の分布とその調査法, 環境科学会誌, 25, pp.432-441, 2012.
- [18]岡野多門, 安東重樹, 安本 幹: 人工素材海浜ごみに対する台風の影響, 廃棄物資源循環学会論文誌, 21, pp.226-235, 2010.
- [19]岡野多門, 安東重樹: 海岸漂着ごみに与える地元投棄ごみと河川の影響, 廃棄物資源循環学会論文誌, 23, pp.232-239, 2012.
- [20]岡野多門, 森田 晃: 広域海岸の漂着ごみ量と堆積ごみ量の指標となるような測定値を得るための適切な調査範囲, 第24回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集, pp.21-22, 2013.
- [21]岡野多門, 森田 晃: 漁業や海運用のロープによる海浜の漂着ごみ汚染, 環境科学会誌, 26, pp.150-157, 2013.

(受理 平成26年11月25日)