

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—*

磯辺 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##

Beach Litter and Oceanography —Our Research Outcomes and Future Perspectives—

Atsuhiko Isobe, Hirofumi Hinata, Satoquo Seino, Sin'ya Magome, Shin'ichiro Kako,
Etsuko Nakashima, Azusa Kojima and Hiroshi Kaneko

人工的な海岸漂着物（海ゴミ）に関する既往研究を概説するとともに、海ゴミ漂着量のウェブカメラを用いたモニタリング技術や、発生源の逆推定技術の開発に取り組んだ研究プロジェクトについて紹介する。また、効率のよい海ゴミ回収事業や、海洋学研究者の海ゴミ問題への積極的な関与を提案する。

A brief description of previous research projects with respect to beach-litter issues is given in this review. In addition, we introduce our research project, which establishes a beach-litter monitoring system using webcams, and which develops an inverse method to identify litter sources. Also proposed in this review is an effective beach-litter clearance procedure, and possible contributions of oceanographers on the beach-litter issue.

キーワード：海ゴミ，数値モデル，モニタリング，サイエンスカフェ

1. はじめに

漂着物を集めに海岸を散策する楽しみも、海岸が漂着物で覆われ、散策に難が生じるようでは成り立たない。そして残念ながら、最近の日本海や東シナ海に面した海岸では、これが現実となった場所も少なくない (Fig. 1 a)。以降、本稿では、流木や海藻などを除いた人工の海岸漂着物を海ゴミ（漂流・漂着ゴミ）と呼ぶ。世界の海岸に漂着した海ゴミは、個数比で7割程度がプラスチックを材質としている (Derraik (2002)¹⁾の Table 1 の平均値で66%)。重量比にしても、例えば東シナ海に面した五島列島では、海ゴミに占めるプラスチック製品の割合

が74%²⁾に、日本海に面した複数の砂浜海岸での調査では平均54%³⁾に達している。海ゴミに占めるプラスチックゴミの大きな割合は、軽く頑丈なプラスチック製品の利点があるが、そのまま、水に浮き、分解されずに遠方まで輸送されるといった、海ゴミとなる条件をよく満たすため

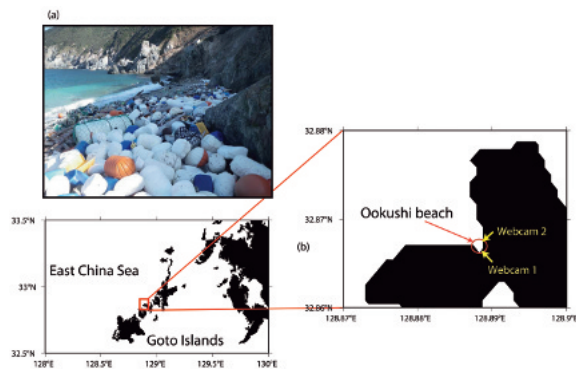


Fig. 1 (a) Beach litter photograph taken at Goto Islands, (b) the location of Goto Islands, and enlarged map around Ookushi beach. Two yellow arrows denote positions and directions of webcams 1 and 2.

* 2011年11月20日受理, 2011年12月19日受理

** 愛媛大学沿岸環境科学研究センター

† 国土交通省国土技術政策総合研究所

†† 九州大学大学院工学研究院

三洋テクノマリン株式会社

一般社団法人 JEAN

連絡先：磯辺篤彦，愛媛大学沿岸環境科学研究センター

〒790-8577 松山市文京町2-5

E-mail: aisobe@ehime-u.ac.jp

であろう。

生活用品や漁具、はては医療器具といった海ゴミの多様性^{4,5)}をみると、ゴミの発生源を特定の場所や時期に求めることは合理的でない。海ゴミは、例えば海岸や海洋で投棄されたものだけではなく、街中の日常生活や経済活動に起因し、川を経て海に至るものである。人の日常や国の経済規模が少なくとも現状を維持するならば、今後の海ゴミ発生量に劇的な減少は考えにくい。そして、環境中で分解されないプラスチックゴミは、ひとたび投棄されれば、海岸や海洋から消え去ることがない。このような入口があって出口のない状況が続く以上、世界の海ゴミは増加を続けざるを得ない。そして、海岸の観光資源としての価値を維持するため、今後も多くの人手と資金が費やされ、場所によっては、後述するような生態系へのリスクが顕在化するかもしれない。

海ゴミ問題の軽減には、海ゴミの環境からの出口を大きくすること、すなわち、海ゴミの効率的な回収が求められる。現在、日本では、海岸漂着物処理推進法（2009年施行）に基づく国の財政支援のもと、地域行政が海ゴミ回収事業を主導している。しかし、限られた予算で実施される年数回の海岸清掃が、はたして効果的か否か、明確な答えを見出すことは難しい。そもそも、海ゴミ全ての回収は現時点で既に不可能である。海洋でプランクトンネットを曳いた経験のある研究者や海洋技術者ならば、プランクトンと同時に採取される微細プラスチック片（microplastics；Andrady, 2011⁶⁾やCole, 2011⁷⁾のレビュー参照）を目にしたことがあるだろう。これらは、化粧品などに混入される製造段階から微小なもの（ <0.1 mm；primary microplastics⁷⁾）に加え、紫外線照射や温度変化で脆弱になったプラスチックゴミの表面が、波や流れが与える機械的な刺激によって剥離したもの（secondary microplastics； $<$ 数mm；⁷⁻⁹⁾）である。再利用の経路から外れたプラスチックは、いずれ微細片となって海を漂い¹⁰⁾、既に“Here there and everywhere¹¹⁾”に分布域を広げた現状では、これらを回収する方法がない。

これ以上の海ゴミ問題の拡大を防ぐためには、出口を大きくするだけではなく、環境への入口を小さくすること、すなわち発生量の削減が必要である。海流や風が遠方に運ぶ海ゴミは、その発生源と漂着国が異なる場合も多い。すでに1980年代初頭には、ミッドウエイ環礁で死んだアホウドリの消化器官から109個に及ぶプラスチック片が採取され、うち108個の表面に日本語を確認したとの報告がある¹²⁾。最近でもYouTubeなどを見れば、日本発の海ゴミが、北太平洋の亜熱帯循環に乗ってアメリカ西海岸沖に達すると的一般向けの啓発番組を、数多く目にすることができる（例えば、<http://www.youtube.com/watch?v=en4XzfR0FE8>）。

一方で、日本の海岸には、日本を発生源とする海ゴミ（海岸での投棄ゴミを含む）の他に、東アジア各国が起源と考えられる海ゴミが、数多く漂着している現実がある^{13,14)}。そもそも、海洋循環とは大洋をめぐる巨大な渦であって、海ゴミを運ぶ海流に上流と下流の区別はない。この中において、海ゴミの漂着国は同時に海ゴミの発生源国である。海ゴミ漂流・漂着量の削減には、結局のところ、海流に面した多くの国々が、共に、環境へのゴミ排出量を最小限にする社会に変わる以外にない。

海ゴミ問題の軽減に科学はどこまで貢献できるだろうか。環境省・環境研究総合推進費の助成を受けた海ゴミ研究プロジェクト（以降、プロジェクトとのみ表記）のフェイズⅠ「平成19年～21年：D-071市民と研究者が協働する東シナ海沿岸における海岸漂着ゴミ予報実験（研究代表：磯辺／愛媛大）」と、フェイズⅡ「平成22年～平成24年：B-1007海ゴミによる化学汚染物質輸送の実態解明とリスク低減に向けた戦略的環境教育の展開（研究代表：磯辺／愛媛大）」での現在までの成果を踏まえ、本稿では、海ゴミ回収の効率化や海ゴミ発生量の削減に、特に海洋学の立場から寄与できることを考える。

2. 海ゴミ問題に関する科学的知見

本節では、プロジェクトの背景となった既往研究を紹介する。海ゴミ研究は広く学際的であって、関連する文献に遍く目配りすることは難しいが、研究の質を担保しつつ、インターネットを通しての入手に便宜を図るため、本稿全体を通して、特段の理由がない限りは、レビュージャーナルに掲載された英語論文や、入手が容易な書籍の引用を心掛けた。

Shomura and Yoshida (1985；“NOAA-TM-NMFS-SWFC-54”のキーワードで検索とダウンロード可)¹⁵⁾やCoe and Rogers (1997)¹⁶⁾にある通り、主として1970年代より、多くの海ゴミ漂着量の調査が実施されてきた。先述したとおり、プラスチック製の海ゴミは、細かくなっても環境から消え去ることがない。そのため、世界の海岸や海洋における海ゴミの漂流・漂着量は、プラスチック生産量の増加¹⁷⁾に伴って、70年代から現在に至るまで、増加の一途をたどっているだろう。増加する海ゴミは、海岸の観光資源としての価値を損なうだけではない。最近の研究では、海棲哺乳類や海亀の誤飲や絡まり（Derraik, 2002¹⁾と、これの引用文献参照）、鳥類^{18,19)}、甲殻類²⁰⁾、貝類²¹⁾、そして魚類²²⁾による微細プラスチック片の誤食など、生物への悪影響が指摘されている。また、プラスチック製の海ゴミや、プラスチックの中間材料であるレジンペレットからは、残留性有機汚染物質（Persistent

Organic Pollutants ; POPs)が検出されている^{23~28)}。Teuten *et al.* (2009)²⁹⁾は、これら汚染物質が、プラスチックゴミから海洋・海岸環境へ移行する可能性を、1次元の拡散モデルを利用して検討している。さらに、例えば鉛は塩化ビニルに安定剤として添加される場合があり³⁰⁾、プラスチックゴミから周辺環境への有害重金属の移行も懸念される²⁾。

海ゴミ問題を、海岸清掃に費やされる際限のない人的・経済的負担や、生態系へのリスクといった最悪のシナリオに拡大させないためには、費用対効果の大きい海ゴミ回収事業の継続的な実行が望まれる。当然ながら、事業への資金や労力の効果的な投入には、基礎情報として、海ゴミ漂着量と回収・処理費用の正確な見積もりを要する。環日本海環境協力センター (2006)³¹⁾は、日本の海岸への海ゴミ漂着量を年間に約186,000 t (回収費を除くゴミ処理費用で63億円) と見積もっているが、これは2000年から2006年にかけて調査した、主として日本海周辺における海ゴミ漂着量の平均値4.4 kg/100 m²を、各年の調査期間である1か月間の漂着量とみなし、さらに、日本の海岸線総延長35,219.3 kmと海岸の奥行10 m、そして12か月を乗じて求めたものである。調査がゴミの多い河口近傍で行われたこと、この種の調査は、海ゴミのない清浄な海岸では行われないことを考慮すれば、数字の意味するものは漂着量の上限値であろう。Kusui and Noda (2003)³⁾では、2000年の9月から11月における日本の海岸への海ゴミ漂着量を、平均で2.1 kg/100 m²と算出している。数字の違いをもたらす原因の一つに、3.1節で実証するような海ゴミ漂着量の時間変動の大きさがある。

上述の海岸調査や、United Nations Environment Programme /International Oceanographic Commission (UNEP/IOC, 2009)³²⁾が推奨する方法、さらには、南極を含む世界の海岸で行った最近の調査^{33~38)}では、海岸に設けた数百 m 幅の区画内に漂着した大きさ1-2 cm 以上の海ゴミを、目視あるいは手作業で回収し、数や重量、さらに材質や元製品の種類を記録している。手作業である以上、高頻度の海岸調査を、長期間にわたって継続することは難しい。週1回の海岸調査を行ったSilva-Iniguez and Fischer (2003)³⁵⁾でも、調査の継続期間は5か月間でしかない。それでもRibic (1998)³⁹⁾は、毎月海岸調査を6年間にわたって継続することで、興味深い海ゴミ漂着量の時系列データを得ている。しかし、温帯低気圧の通過や季節風などに起因して、海ゴミを運ぶ海流や風は、数日から1年、場合によっては経年的な幅広い周期帯で変動するであろうし、海ゴミ漂着量も、このような風や海流の変動にตอบสนองする可能性が高い。数か月に1回

程度の粗い調査頻度で得た時系列には、エイリアジングの影響が心配され、その解釈は容易でない。実際、Ribic (1998)³⁹⁾は、6年間に及ぶ各月データを得ながらも、データの線形トレンドだけに議論を留めている。効果的な海ゴミ回収事業の策定に資するような、高頻度で継続的な漂着量モニタリング手法の確立が望まれる。

海ゴミ問題軽減のためには、漂着量に応じた効率的な海ゴミ回収事業の策定とともに、発生量の削減が必要である。大幅な削減には、海流系に面した多くの国々が、共に、環境へのゴミ排出量を最小限にする社会に変わる必要がある。それを実現する社会基盤は、道端に捨てられたゴミの行く末を知る良き市民であり、このような市民の啓発に海洋学が果たしてきた役割は、すでに重要である。日本周辺を起源に持つ漂流物が、亜熱帯循環に乗ってハワイ北東部の収束域(米国メディアの呼称に従えば、Eastern Garbage Patch, もしくはGreat Pacific Garbage Patch⁴⁰⁾)に到達するとの研究は、船舶漂流データを利用したWakata and Sugimori (1990)⁴¹⁾や、海洋循環モデル上で漂流実験を行ったKubota (1994)⁴²⁾を嚆矢とし、最近でもMaximenko *et al.* (2011)⁴³⁾が、衛星追尾型の漂流ブイデータをもとに先行研究と同様の結果を得ている。そして、先述したYouTubeにある啓発番組は、このような知見を基に作成されているのであろう。東アジアの縁辺海を例にとれば、海流と風圧流による漂流モデル(付記1)を用いた漂着ゴミ輸送過程の再現計算^{44,45)}や、発生源の特定¹⁴⁾、さらに予報計算⁴⁵⁾が行われている。現在は、研究者へ高品質の表層海流データを無償提供する海洋循環再解析プロジェクトがあり(日本ではJapan Coastal Ocean Predictability Experiment 2 (JCOPE 2)^{46~48)}とData assimilation Research of the East Asian Marine System (DREAMS)⁴⁹⁾の2つ)、これらと海上風の再解析データ(例えばJapanese Re-Analysis 25 years⁵⁰⁾)や衛星風データ(Advanced Scatterometer (ASCAT) データ⁵¹⁾)を組み合わせることで、高精度の漂流モデルの構築が可能である。そもそも、街中に捨てたゴミが海ゴミになって世界のどこかに漂着し、これが地域の観光産業や環境へのリスクになるとは、教養や想像力がなければ思い至ることはできない。高度化した漂流モデルで得た海洋学の知見は、今後も優れた教材として市民の教養を高め、想像力を喚起するだろう。この積み重ねが、ゴミ排出量削減に向けたコモンセンスの形成につながることを期待したい。

ただ、おそらく米国の視聴者に向けた先述のYouTube動画は、アメリカ周辺に海ゴミが届く事実を示すところで終わる。大多数の市民は、海ゴミの来し方に関心を持つが、行く末には興味が薄いようである。海ゴミ発生

源の特定のみに使われる海洋学の知見は、海ゴミの加害国と被害国を分ける粗雑な善悪二元論の科学的背景でしかない。海ゴミ発生源の特定技術は有用であるが、発生源だけではなく、ゴミの漂着先にまで市民の興味が至らなければ、ゴミ発生量を最小化する社会は実現しないだろう。

3. プロジェクトの成果

3.1 海ゴミ漂着量のモニタリング

海ゴミ輸送が時空間変動の大きな風や海流に支配される以上、高頻度での実施が困難な手作業による漂着量調査では、調査時期によるばらつきが大きすぎて、取得したデータの解釈が難しい。海洋学を例にとれば、再解析データを提供するに至った最近の飛躍的な技術的進歩には、海面水温や海面高度といった基礎的的海洋情報の衛星リモートセンシングと、膨大なデータの高速配信を可能にしたインターネットの寄与が大きい。もちろん、衛星によるリモートセンシングは解像度が粗すぎて海ゴミには適用できないが、やはり、リモートセンシングとインターネットを利用することで、高頻度で継続的な漂着量モニタリング手法の開発が期待される。プロジェクトでは、高台に設置したウェブカメラ（ライブカメラ）を用いることで、継続的な海ゴミ漂着量のモニタリングを行った⁵²⁾。

五島列島の奈留島にある大串海岸を見下ろす高台に設置した2台のウェブカメラ（Fig. 1 b）で、2008年5月から現在（2011年12月）まで、90分毎の海岸撮影を継続中である。ウェブカメラ1で撮影した海岸写真（Fig. 2 a）には、散乱する多数の海ゴミが撮影されており、特に漁業用と思われる発泡スチロール製の白いブイが目立つ。画像データ（jpg ファイル）は、ISDN 回線を経由して契約プロバイダのファイルサーバに転送され、研究室では、保存された画像データを、インターネットを介して取得している。現行プロジェクトでは、このようなウェブカメラによるモニタリングを、日本列島を囲む10

Table 1 Beach-litter measurements using a balloon on the Ookushi beach

	Areas covered by litter (m ²)	mass per unit area (kg/m ²)	total mass (kg)
22 October 2009	123.5	5.8±2.1	716±259
31 July 2010	490.8	8.2±2.6	4,025±1276
5 March 2011	248.0	11.5±2.7	2,852±670

か所で継続中であり、全ての画像データをウェブ上で公開している（<http://www.ysk.nilim.go.jp/kakubu/engan/enganiki/umigomi/>）。

本研究では、海ゴミによる海岸の被覆面積を漂着量の指標とした。同一場所へ海ゴミの堆積が重なれば、被覆面積と、海岸におけるゴミ重量や体積は一致なくなる。しかし、ゴミが画像一杯に写っている場合は別にして、一般的に海ゴミ被覆面積と、重量や体積との相関関係は否定しにくいだろう。Nakashima *et al.* (2011)²⁾は、2009年10月に、ヘリウムガスを充てんしたバルーン（Sky Catcher, 長菱設計）にデジタルカメラを取り付け、大串海岸全体を空撮して海ゴミ被覆面積を算出した。並行して、同海岸における任意の10か所に設けた2 m×2 m 枠内で海ゴミ重量を計量し、単位面積当たりの重量を推算した。被覆面積に単位重量をかけた総重量は約700 kgであったが、その後実施した2回の調査では、実際に、被覆面積の増加に応じた総重量の増加が確認されている（Table 1）。

高台のウェブカメラは海岸を斜め上方から撮影するため、被覆面積の算出には、真上から見た画像に変換する幾何補正を要する。まず、背景色と区別しやすい青色シート（1 m×1 m）をマーカーとして、10枚程度を海岸の適当な位置に置き、GPSでそれぞれのシート位置を計測する。その後、任意に設けた原点から、各シートまでの距離を算出して、これらが写真と実海岸で相似となるように画像を回転させる（Fig. 2 b）^{52, 53)}。ウェブカメラの設置位置と撮影角度は固定されるので、1度のマー



Fig. 2 Photographs taken by webcam 1: (a) the original photograph taken by webcam 1, (b) the photograph after applying the projection transformation to (a). The panel (c) is the lightness map on which pixels with the lightness greater (lesser) than the threshold value in (b) are colored in white (black).

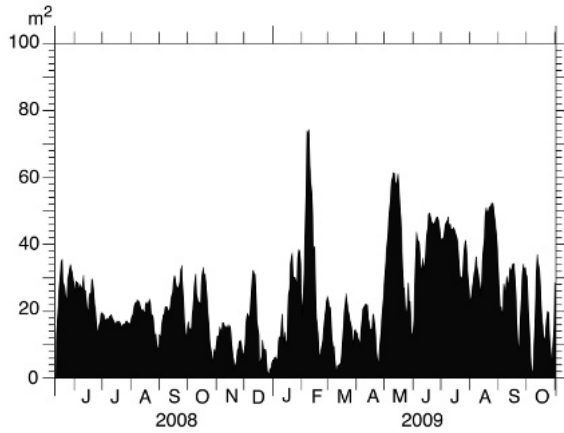


Fig. 3 Time series of the area covered by litter monitored by webcam 1.

カー撮影で決定した回転角度は、それ以降に撮影される全ての画像に共通である。当該海岸の海ゴミは比較的明るい色合いのものが多いため (Figs. 2 a, b), 実写真と見比べながらの試行錯誤を経て, RGB 値からの1次変換で得る輝度が, 90以上となるピクセルを海ゴミと判定した (Fig. 2 c). 海ゴミと判定されたピクセル数に, 真上画像における1ピクセルの面積を乗じることで, 海ゴミ被覆面積を得た。ただし, 太陽光の照り返しが海ゴミに誤判定されることを防ぐため, 1か月間の画像ごとに, 輝度90を超える期間が30%以下のピクセルは, 被覆面積の計算から除外した。

上述の手順で得た, 2008年5月から2009年10月までの, 大串海岸における海ゴミ被覆面積の時間変化を Fig. 3 に示す。ただし, 生データには, 天候悪化による視界の変化に起因する数日周期の変動が現れる。そこで, 実際にも海ゴミ被覆面積の短周期変動は考えられるものの, 7日間の移動平均を施すことでデータを平滑化している。それでも, 被覆面積には1~2か月程度の周期的変動が顕著である。Fig. 3の時系列と, 周辺の Quick Scatterometer/Seawinds データとの相関を見た Kako *et al.* (2010b)⁵²⁾によれば, 海ゴミ被覆面積の急な増加は, 海から海岸方向に風が吹く時期によく一致する。ただし, 面積の減少は必ずしも海向きの風が強くなる時期に起こらず, 波高や潮時, さらに大潮期との一致など, いくつかの複合的な要因が考えられる。

3.2 海ゴミ漂流モデルと発生源の特定手法

日々の表層流データと海面風データを利用すれば, 時々刻々と変化する海流や風に乗って表層を浮遊する物体の漂流モデルが構築できる (付記1)。そして, 漂流モデルの表層流ベクトルと風ベクトルを逆に向け, 海ゴミの漂着海岸周辺に仮想粒子を投入すれば, 流れと風を溯る粒子の追跡によって発生源が特定される (逆方向粒

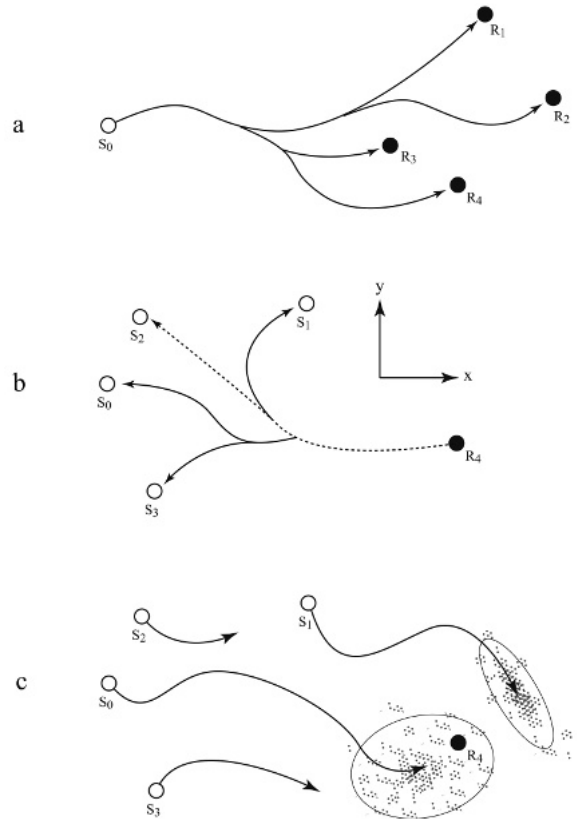


Fig. 4 Schematic diagram of two-way particle tracking models (PTMs). Objects released from the true source, S_0 , reach the four receptors, R_1 , R_2 , R_3 , and R_4 in (a). An observer finding the objects at the receptor R_4 attempts to specify the true source, and finds the source candidates, S_0 , S_1 , S_2 , and S_3 , using a backward-in-time PTM in (b). Thereafter, the source candidates except the true source S_0 are rejected in a forward-in-time PTM in (c). See the text for details.

子追跡モデル)。例えば, Batchelder (2006)⁵⁴⁾は逆方向粒子追跡モデルを用いた1週間の計算を行うことで, 一時性プランクトン (meroplankton) の起源を求めることに成功している。ただし, 海ゴミの運動には不可逆な水平拡散過程が含まれるため, 例えば数か月以上にも及ぶ逆方向の追跡計算には無理がある。

Isobe *et al.* (2009)⁵⁵⁾は, 移動が数か月以上に及ぶ海ゴミのような漂流物の起源推定のために, 双方向粒子追跡モデルを提案している (Fig. 4)。真の発生源である S_0 に投入した複数の粒子が, R_1 から R_4 に漂着した状況を考える (Fig. 4 a)。ここで, R_4 にいる観察者が漂着粒子の発生源の特定を試みるとしよう。ただし, R_4 への漂着時期は, 定期的な海岸調査やウェブカメラによって既知と仮定する。表層流と風を逆に向けた逆方向粒子追跡モデルを用いることで, 漂着時期に R_4 に投入した複数粒子は S_0 海岸に向けて帰っていくが, 漂流モデルに拡

散過程（ランダムウォーク）を含む以上、戻る位置は S_0 だけにはならず、例えば S_1 海岸から S_3 海岸まで分散するだろう (Fig. 4 b). ここで S_0 から S_3 の全ての“発生源候補”のうち、確からしい発生源（真の発生源ではなく）の推算を行う. すなわち、表層流と風を元に戻して（順方向粒子追跡モデル）、逆方向粒子追跡モデルで発生源候補 ($S_0 \sim S_3$) に粒子が到達した時期から、それぞれの発生源候補に複数粒子を投入する. それぞれの発生源候補から漂流を始めた粒子は、表層流と風に運ばれつつも、拡散過程によって次第に分散していこう. その後、実際に R_1 での漂着が観察された時期まで、順方向計算を継続する. このとき、それぞれの発生源候補から投入した粒子群毎に、粒子群の平均位置と、粒子群が分散する主軸方向とこれに直交する方向で、粒子位置の標準偏差を計算する. 主軸（主軸に直交する）方向の標準偏差の2倍を長軸（短軸）に取ることで、粒子群の平均位置を中心とした楕円を描くことができる (Fig. 4 c). 例えば、 S_0 から投入した粒子群の作る楕円が内側に R_1 を含めば、標準偏差の2倍を軸長とする楕円内にあるので、これは有意水準5%で発生源と認められる. とところが、 S_1 から投入した粒子群の作る楕円は、内側に R_1 を含まないため、この発生源候補は棄却される. Kako *et al.* (2010a)¹⁴⁾では、藤枝ほか(2006)⁵⁶⁾にしたがって、五島列島の福江島で2008年7月に回収した使い捨てライターにある電話番号から投棄位置を推察し、これと、双方向粒子追跡法で有意判定された発生源を比較した (Fig. 5). とともに長江河口以北に発生位置がない点など、両者の分布には、よい一致がみられる.

さらに、Kako *et al.* (2010a)¹⁴⁾は、五島列島で2年間にわたって計量した隔月の海ゴミ漂着数を利用し、未定乗数法と上述の双方向粒子追跡法を組み合わせることで、同島に漂着する海ゴミ（風圧流を受けにくいペットボトルのフタを想定）の発生位置、発生月、そして発生量を逆推定した (Fig. 6). このように逆推定された海ゴミの発生源情報（位置、月、発生量）を、再解析データなどが提供する現実的な表層流や風で駆動する漂流モデルに与えれば、実海岸における海ゴミ漂着量の再現も可能である. 実際、Kako *et al.* (2011a)⁴⁵⁾は、漂流モデルにおける五島列島周辺への粒子到達数と、前節のウェブカメラで得た海ゴミ被覆面積の時間微分（増減率）の時系列を比較し (Fig. 7), 被覆面積の時系列を1か月後方に遅らせることで、二つの時系列がよく一致することを見出した. 1か月の位相差の原因は不明だが、そもそも Kako *et al.* (2011a)⁴⁵⁾の漂流モデルは、発生位置で発生月に1度だけ粒子を集中投入しており、1か月程度の時間スケールでは現象を解像できない. 以上のように、海ゴミの増加のみならず、風向や潮時など複合的な要因が考えられる海岸における海ゴミの減少も、周辺海域でのゴミ漂流数が精度よく計算されていれば再現が可能である.

Fig. 7をみると、黄海・東シナ海上での台風の通過時（図中のグレーの線）には、ゴミ漂着量の再現性が著しく低下することがわかる. 台風時の高波高では、波の山と谷でゴミを輸送する海上風も複雑に変化するであろうし、ストークスドリフトの表現や、海面エクマン層の微細な解像も、特に強風下における海ゴミ輸送には重要か

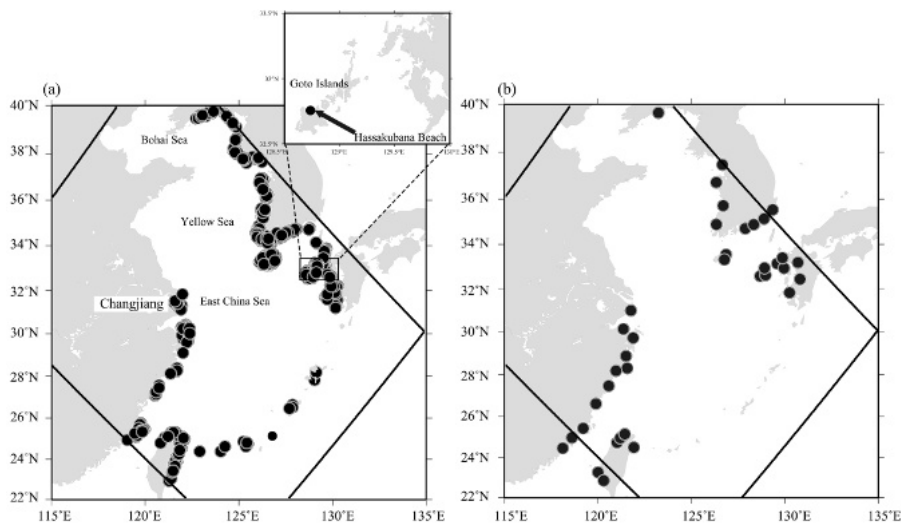


Fig. 5 Disposable-lighter sources derived from the two-way PTM experiments (a) and those derived from beach surveys at the Hassakubana beach (b). The location of the beach in Goto Islands is shown in the inset map in the panel (a). The rotated square in the panel indicates the model domain.

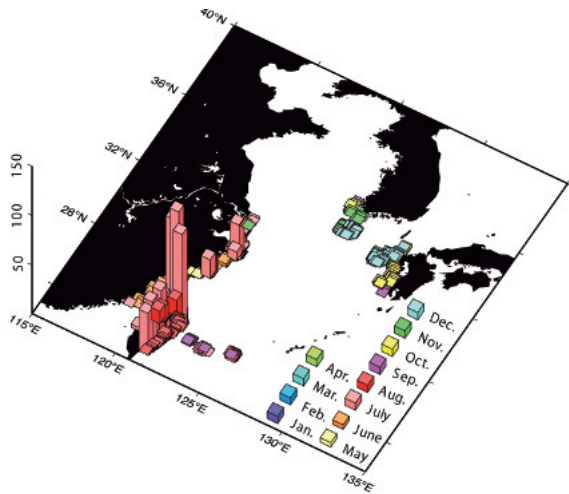


Fig. 6 Plastic-bottle cap outflows from each source detected in the two-way PTM experiments.

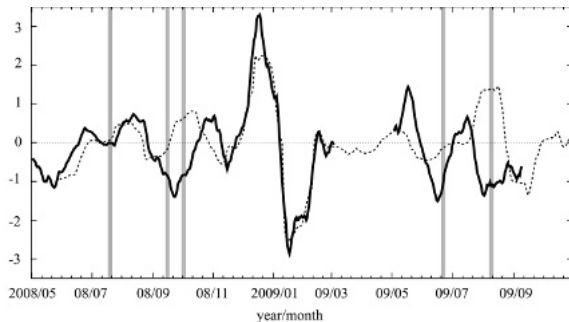


Fig. 7 Temporal variations of the time derivative of webcam-observed (bold solid line) and hindcasted (broken line) quantities of beach litter. Time series of quantities of beach litter observed using the webcam is shifted backward by 30 days. The time series are normalized using each standard deviation. Gray bars denote the period during which the typhoons passed over the East China Sea.

もしれない。また、Kako *et al* (2011a)⁴⁵⁾では、表層流データに海洋循環モデルの出力結果を用いたが、これをJCOPE2やDREAMSといった再解析データに切り替えれば、さらなる精度の向上が期待できる。

4. 海ゴミ問題軽減に向けた提案

4.1 海ゴミ回収事業の効率化

海ゴミ問題の軽減には、海ゴミの環境からの出口の拡大、すなわち効率的な回収事業が必要である。海洋に漂流する海ゴミの回収は困難であるため、回収事業は海岸での海ゴミ清掃が主体となる。現在は、海岸漂着物処理推進法に基づく国の財政支援を受けて、日本各地で海ゴミ回収事業が実施されている。しかし、限られた予算の枠中での実施である以上、海水浴場など地域経済にとって重要な海岸に集中した、年に数回程度のものにならざ

るを得ない。ここで、Fig. 3に示した海岸の海ゴミ被覆面積の推移を見ながら、年に数回程度が行われる海ゴミ回収事業の効果を考える。なお、Fig. 3の時系列を得た五島列島奈留島の大串海岸は、崖下に位置するアクセスの悪さもあって、撮影期間中の海ゴミ回収は実施されていない。よって、図に現れている被覆面積の増減は、自然に起きるものである。

ここで、2009年2月上旬に回収事業が実施されたとしよう。この時期の海ゴミは突出して多く、作業には多大の人的・経済的負荷を要するだろう。しかし、実は何もなくても、半月も待てば海ゴミは自然に激減してしまう。すなわち、回収事業に要した費用も労力も、ほとんどが無駄ということになる。あるいは、2008年12月下旬に海ゴミ回収事業が実施されたとしよう。この時期の海ゴミ被覆面積は、期間を通して最小であって、回収作業は容易であろう。しかし、美しくなった海岸も、その1か月後には回収事業の直前を大きく上回る海ゴミに覆われてしまう。この場合も、やはり事業に要した費用や労力は、ほとんどが無駄となる。

次に、海岸での回収事業の時期を、一定のルールに従って決定する。ウェブカメラによるモニタリングを利用して、例えば被覆面積が 30 m^2 になった時点で、海岸に漂着している全ての海ゴミを回収するとしよう。ここで、このルールに従って海ゴミを回収した場合の、海ゴミによる海岸被覆面積の推移を計算してみる。ある時刻 t におけるゴミ被覆面積 $f(t)$ と、それから Δt 経過した時点での被覆面積 $f(t+\Delta t)$ の関係は、

$$f(t+\Delta t) = f(t) + \frac{df}{dt} \Delta t \quad (1)$$

と表される。右辺第1項に被覆面積が 30 m^2 になったとき0を代入することで、海岸での海ゴミの回収事業を表現する。右辺第2項の時間変化率（海岸への漂着率や減少率）は、風や潮時、そして沖に漂流する海ゴミ量などの外的条件で左右される。したがって、被覆面積の一定割合に固定するような、すなわち、その時々々の被覆面積に比例させるような与え方はしない（比例すれば、海ゴミは自然には無くならないといった解になる。そしてこれは事実と反する）。ここでは、右辺第2項に、実際の外的条件で決まったFig. 3の時間変化率をそのまま用いる。ただし、被覆面積が負になった場合は0に置き換える。

Fig. 3の海ゴミに対して、各季節に一度程度（90日毎）の回収事業を実施した場合の被覆面積の推移をFig. 8aに示す。年4回の回収事業の時期を、図中に破線で示している。この場合、海岸での年平均の海ゴミ被覆面積は、まったく回収事業を行わなかった場合に比べて

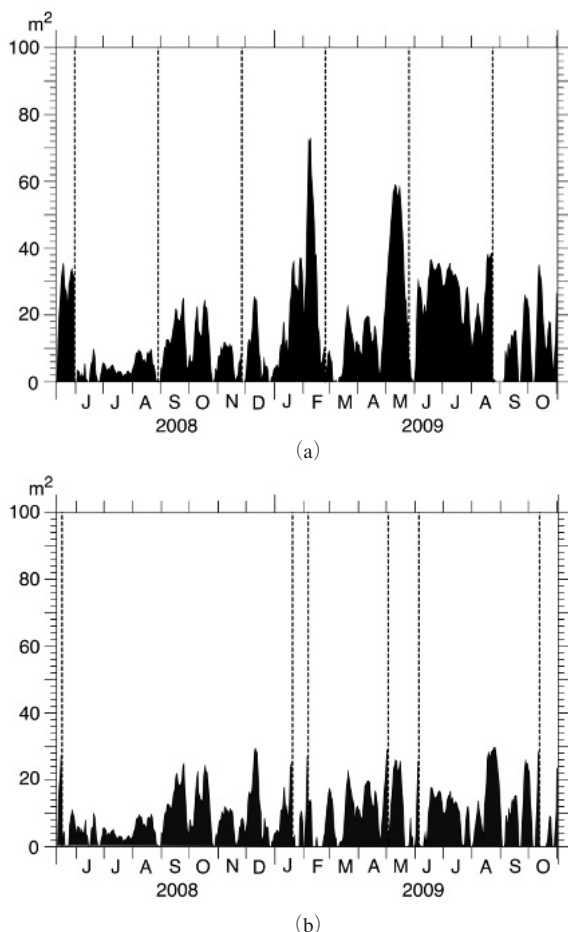


Fig. 8 Time series of areas covered by beach litter (a) by assuming that litter clean-up work is carried out every 90 days, and (b) by assuming that work is carried out when the area reaches 30 m². The dotted lines indicate the dates of clean-up work.

40%減となる。一方、先述のルールに従って、被覆面積が30 m²になった時点で海岸での全回収を実施した場合、やはり実施のタイミングは年に4回程度 (Fig. 8 bの破線) となるが、この場合の被覆面積は、回収事業を行わなかった場合から60%減となる。回収事業を行うべき被覆面積は海岸によって異なるであろうし、これは、ウェブカメラによる1年程度のモニタリングと、上述のような推算を経て決定されるものである。加えて被覆面積の決定は、例えば、放置した海ゴミから海岸に移行する汚染物質のリスクといった、科学的な根拠に基づくべきだろう。さらに、推算にあたって仮定した時間変化率 ((1)式の右辺第2項) の与え方には、風速や潮時に依存させるなどの工夫が必要かもしれない。いずれにせよ、海ゴミを運ぶ海流や風は幅広い周期帯で変動するものであって、海ゴミ漂着量も、このような風や海流の変動に追随する。自然の状況を踏まえ、適当な時期に実施する現況の海ゴミ回収事業には、改善の余地が大きいよう

である。プロジェクトで開発した漂流モデルに予報風データを与えることで、Kako *et al.* (2011a)⁴⁵⁾は、五島列島における1か月の海ゴミ漂着量予報を行っている。漂着予報と組み合わせれば、1か月先の被覆面積を予想して、あらかじめ人員と資金を手配することも可能である。

4.2 海ゴミサイエンスカフェ

海ゴミ問題の軽減には、回収事業の効率化による出口の拡大だけではなく、海ゴミ発生量の削減によって、環境への入り口を小さくする必要がある。3.2節で紹介した発生源の特定手法は、もちろん、発生源における市民や行政へ向けて、ゴミ削減への努力を要請するために有効である。しかし、海ゴミ問題の軽減には、結局のところ、海流に面した多くの国々が、共に環境へのゴミ排出量を最小限にする社会に変わらなければならない。そのような社会の実現に必要な政策や市民運動の具体的な提案は、海洋学の手が届く範囲を大きく超えているが、それでも、市民が教養と想像力によってゴミの漂着先にまで心が及ぶよう、地道な海洋学の啓発活動は重要である。また、このような啓発活動が、政策や市民運動のあり方を議論する契機となるかもしれない。日本では、1990年以降、全国200以上の海岸で年2回の海岸クリーンアップ活動が実施されている。この活動には、毎年約3~5万人程度が参加し、海ゴミ問題の実態を目の当たりにするとともに、自身の捨てるゴミの行方について考察するプログラムが組まれている。そして、このような啓発活動においては、海流に運ばれる海ゴミの行方の正しい理解のために、海洋学研究者の積極的な関与が強く求められている。最近では、税金を使って研究を行う科学者の説明責任として、市民に向けて直接に研究成果を解説する機会が増えつつある。お茶を飲みながらの気楽な座談形式となる場合が多く、サイエンスカフェと称される。今後、多くの海洋学研究者が、海ゴミ問題に関心を寄せる市民への啓発活動に参加するモデルとなるよう、プロジェクトでは「海ゴミサイエンスカフェ」を実施している。

海ゴミサイエンスカフェの目標は、海ゴミのない世界の実現である。このような世界の実現が、モラルだけではなく、ゴミ投棄に対する法的規制や海ゴミ回収事業の策定などの社会システムに依る以上、サイエンスカフェの参加者には、市民と研究者だけではなく、地域行政の担当者も含まれるべきである。しかし、一部を除けば、「市民」や「地域行政の担当者」にアクセスできる海洋学研究者は少ないであろう (本稿の第一著者は、できない典型である)。所属学会や所属組織が運営する場合は別として、サイエンスカフェへの敷居が高いのは、市民ではなくむしろ研究者ではないか。海ゴミサイエンスカ

フェでは、非営利団体 (Nonprofit Organization ; NPO) が、市民や地域行政、そして研究者との仲立ちをしている。具体的には、本稿共著の JEAN (<http://www.jean.jp>) と、同団体と連携している各地域の NPO や個人である。それぞれの地域で、NPO は普段の活動を通して行政とのパイプや市民への多種多様な告知ルートを持ち、また規模の大小を問わずイベント開催にノウハウを持つ。NPO と連携したサイエンスカフェは、研究者にとって運営の負荷が少ないため、無理のない参加が可能である。

海ゴミサイエンスカフェ (Fig. 9) では、先述したウェブカメラや漂流モデルを用いたプロジェクトの成果を紹介しつつ、海流が運ぶゴミの発生源や漂着先について、海洋学の知識を踏まえた解説を行う。状況によっては、海岸での海ゴミ回収や、ゴミが含有する汚染物質 (次節) 計量のデモンストレーションを行うこともある。最

近では、学校や地元企業と連携して小学生に講演をする機会も増えた。海ゴミサイエンスカフェでは、ゴミ排出量の最小化に向けた政策や市民運動のあり方にまで、議論が発展するようなプログラム進行を心がける。サイエンスカフェの事前には、プログラムの進行を、研究者、NPO、市民の代表、そして行政担当者間でよく練っておく。「海ゴミで覆われた海岸」というイメージが風評被害を引き起こさないよう、講演での表現を入念にチェックし、サイエンスカフェを地域の実情に合わせたものにするためである。

このような海ゴミ問題に関する NPO と研究者との連携は、韓国の OSEAN (<http://www.osean.net>) と海洋学研究者との間でも始まりつつある (Bang Inkweon, 私信)。また、中国で海ゴミの調査・研究を行う機関である National Marine Environmental Monitoring Center の研究者も、NPO (大連市 Environmental Protection Volunteers



Fig. 9 Location of the beach-litter science café and selected photographs. Yamagata (1) with photos of a science café and a lecture to elementary school students at a shopping mall, Sado Island (2), Matsuyama (3), Fukuoka (4), Goto Island (5) with a photo of an excursion around beaches, Ishigaki Island (6) with a photo of science café, and Iriomote Island (7), respectively.

Association ; <http://www.depv.org.cn>) との連携を重視しているようである (第一著者が両機関へ2011年6月訪問した際の見聞による)。海ゴミ問題の原因と解決策が社会性の強いテーマである以上、研究者とNPOの連携は、国の違いを問わず自然の成り行きであろう。NPOを社会への窓口にした啓発活動によって、海洋学がゴミ排出量を最小化する社会の実現に少なからず貢献し、そして、海ゴミのない世界が東アジアで先駆的に実現することを期待したい。

5. おわりに

Fig. 10の写真は、2011年3月の同日に、同じ石垣島で撮影した二つの海岸である。Fig. 10aは著名な観光地である川平湾で、当日も大勢の観光客が訪れている砂浜に海ゴミは見当たらない。一方、市街地からアクセスの悪い島の北端に位置し、観光にも漁業にも利用されない平野海岸では、漂着した海ゴミが放置されている (Fig. 10 b)。観光業などのビジネスになる海岸は、その価値を維持するための頻繁な清掃活動によって清浄に保たれ、ビ



(a)



(b)

Fig. 10 Photographs of (a) Kabira beach, a popular sightseeing place at Ishigaki Island, and (b) Hirano beach, an inaccessible beach located at the northern tip of the same island. These two photographs were taken on the same day.

ジネスにならない海岸は海ゴミに覆われていく。このような海ゴミに対する海岸の二極化は、ゴミ回収に要する費用や労力に限りがある以上、現状ではやむを得ないことである。

注意したいのは、海ゴミは目障りなだけではなく、海岸・海洋生態系にとっての脅威となる可能性¹⁾であり、そしてプラスチックゴミがPOPsや重金属を運ぶ媒体となり、さらに、これらがゴミを離れて周辺環境へ移行する可能性^{2,29)}である。プラスチックゴミが媒介する汚染物質の環境への移行は、杞憂に終わるか、将来の環境リスクとして備えるべき現実か。プロジェクトでは、現在、全国の海岸に漂着したプラスチックゴミに含有する重金属の計量と、海ゴミに覆われた海岸への重金属溶出量の算定を進めている。もし、海ゴミが将来の環境リスクならば、現状では放置されがちなビジネスにならない海岸においても、リスク軽減のための積極的なゴミ回収が求められる。プロジェクトでは、研究成果を、国内外の研究者コミュニティだけではなく、海ゴミサイエンスカフェを通じて市民や地域行政と共有している。継続的で効率的な海ゴミ回収事業の策定に、政策立案と立案への市民参加を促すためである。ゴミの排出量を最小化する社会が実現し、それでも漂着した海ゴミは継続的・効率的に回収され、海ゴミのない世界が来ることを、そして、この海ゴミという憂鬱な研究テーマから、一日でも早く解放されることを心より願っている。

謝 辞

本研究プロジェクトは、平成19~21年度環境省地球環境研究総合推進費 (D-071)、および平成22~24年度環境省環境研究総合推進費 (B-1007) の助成を受けて行われている。推進費のアドバイザーボードである久保田雅久教授 (東海大)、松野健教授 (九州大)、高田秀重教授 (東京農工大) による多くの有益な助言に深甚なる謝意を表す。また、愛媛大 CMES の同僚、漂着ゴミに悩む各地域の皆様、卒業生を含む長崎大、九州大、愛媛大の学生諸君の協力を深く感謝する。査読者の改訂に対する助言に深謝する。

付記1 漂流モデル

漂流モデル (粒子追跡モデル) とは、海洋循環モデルや再解析データが与える表層流速データと、ASCAT などの衛星風データや再解析データ、あるいは大気循環モデルが与える海上風データを用いて、漂流物を模した仮想粒子の移動を計算する数値モデルである。ある時刻 t における粒子の位置ベクトル X^t と、 Δt 後の位置ベクトル $X^{t+\Delta t}$ との関係を

$$X^{t+\Delta t} = X^t + U\Delta t + \frac{1}{2} \left(U \cdot \nabla_H U + \frac{\partial U}{\partial t} \right) \Delta t^2 + R \sqrt{2K_h \Delta t} (i, j) \quad (\text{A-1})$$

と表現することで、時々刻々と変化する粒子位置を計算する。ここで、 U は表層流速データが与える東西・南北方向成分と、同じ方向成分の風圧流（後述）の和、 ∇_H は水平発散、 R は0から1の範囲の乱数、 K_h は海洋循環モデルが与える水平拡散係数、 i と j は、それぞれ、東西方向と南北方向の単位ベクトルを表す。一般的に、流速や風速は格子データで提供されるので、 U の決定には、粒子の位置に応じた空間補間を要する。高次の補間（例えば fourth-order Runge-Kutta scheme）を用いる場合もあるが、A-1式の右辺第4項のようなランダムウォークを与える場合には、線形補間で十分である⁵⁷⁾。

漂流物が、空中に出た部分に受けた風の抵抗によって移動する速度を、風圧流 (U_L ; lee-way drift) と呼ぶ。空中と水中で受ける抵抗の静力学的平衡から、風圧流の東西と南北成分は風速 (W) の同方向成分を用いて

$$U_L = \sqrt{\frac{\rho_a}{\rho_w}} \sqrt{\frac{A_a}{A_w}} \sqrt{\frac{Cd_a}{Cd_w}} W \quad (\text{A-2})$$

と与えられる⁵⁸⁾。ここで ρ_a と ρ_w は空気と海水の密度、 A_a と A_w は平面に投影した空中部分と水中部分の面積、 Cd_a と Cd_w は空中と水中での抵抗係数を表す。ペットボトルを例にとっても、フタがある場合や飲み残しがある場合など、海ゴミは様々な状態で漂流する。よって、投影面積の比 $\sqrt{A_a/A_w}$ を一意に決定することは現実的ではない。例えば、Kako *et al.* (2010a)¹⁴⁾ では、使い捨てライターの漂流計算に際して、多数の粒子に1から1/300の間で変わる乱数を与えている。抵抗係数の比 $\sqrt{Cd_a/Cd_w}$ には、1を使う場合が多い^{58,59)}。形状や径、さらには投影面積比の異なる様々なブイを風洞水槽に流す実験を行った Isobe *et al.*, (2011)⁶⁰⁾によれば、径が1mに近づく大型のゴミでない限り、抵抗係数の比として1は妥当な値である。

参考文献

- 1) Derraik, J. G. B. (2002) : The pollution of the marine environment by plastic debris : a review. *Marine Pollution Bulletin*, **44**, 842-852.
- 2) Nakashima, E., A. Isobe, S. Magome, S. Kako and N. Deki (2011) : Using aerial photography and in situ measurements to estimate the quantity of macro-litter on beaches. *Marine Pollution Bulletin*, **62**, 762-769.
- 3) Kusui, T. and M. Noda (2003) : International survey on the distribution of stranded and buried litter on beaches along the Sea of Japan. *Marine Pollution Bulletin*, **47**, 175-179.

- 4) JEAN (2009) : クリーンアップキャンペーン2009レポート, クリーンアップ全国事務局 (2011年より, 一般社団法人 JEAN に名称変更), 126pp.
- 5) JEAN (2010) : クリーンアップキャンペーン2010レポート, 一般社団法人 JEAN, 76pp.
- 6) Andrady, A. L. (2011) : Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, **62**, 1596-1605.
- 7) Cole M., P. Lindeque, C. Halsband and T. S. Galloway (2011) : Microplastics as contaminants in the marine environment : a review. *Marine Pollution Bulletin*, in press.
- 8) Gregory M. R. and A. Andrady (2003) : Plastics in the marine environment. p.379-401, In, *Plastics and the Environment*, ed. A. Andrady, John Willy & Sons, New Jersey.
- 9) Corcoran, P., M. C. Biesinger and M. Grifi (2009) : Plastics and Beaches : a degrading relationship. *Marine Pollution Bulletin*, **58**, 80-84.
- 10) Thompson R. C., Y. Olsen, R. P. Mitchell, A. Davis, S. J. Rowland, A. W. G. John, D. McGonigle and A. E. Russell (2004) : Lost at sea : where is all the plastic ? *Science*, **304**, 838.
- 11) Ivar do Sul, J. A., A. Spengler and M. F. Costa (2009) : Here, there, and everywhere. Small plastic fragments and pellets on beaches of Fernando de Noronha (Equatorial Western Atlantic). *Marine Pollution Bulletin*, **58**, 1229-1244.
- 12) Petit T. N., G. T. Grant and G. C. Whittow (1981) : Ingestion of Plastics by Laysan Albatross. *Auk*, **98**, 839-841.
- 13) Seino, S., A. Kojima, H. Hinata, S. Magome and A. Isobe (2009) : Multi-sectorial research on East China Sea beach litter based on oceanographic methodology and local knowledge. *Journal of Coastal Research*, special issue, **56**, 1289-1292.
- 14) Kako, S., A. Isobe, S. Seino and A. Kojima (2010a) : Inverse estimation of drifting-object outflows using actual observation data. *Journal of Oceanography*, **66**, 291-298.
- 15) Shomura and Yoshida (1985) : Proceedings of the workshop on the fate and impact of marine debris, NOAA technical memorandum, 581pp.
- 16) Coe, J. M. and D. B. Rogers (1997) : *Marine debris, sources, impacts and solutions*, Springer-Verlag, New York, 432pp.
- 17) 日本プラスチック工業連盟, <http://www.jpif.gr.jp>
- 18) Cadée, G. C. (2002) : Seabirds and floating plastic debris. *Marine Pollution Bulletin*, **44**, 1294-1295.
- 19) Yamashita, R., H. Takada, M. Fukuwaka and Y. Watanuki (2011) : Physical and chemical effects of ingested plastic debris on short-tailed shearwaters, *Puffinus tenuirostris*, in the North Pacific Ocean. *Marine Pollution Bulletin*, in press.
- 20) Murray, F. and P. R. Cowie (2011) : Plastic contamination in the decapod crustacean *Nephrops norvegicus* (Linnaeus, 1758). *Marine Pollution Bulletin*, in press.
- 21) Browne, M. A., A. Dissanayake, T. S. Galloway, D. M. Lowe and R. C. Thompson (2008) : Ingested microscopic plastic translocates to the circulatory system of the mussel, *Mytilus edulis* (L.). *Environmental Science & Technology*, **42**, 5026-5031.
- 22) Boerger, C. M., G. L. Lattin, S. L. Moore and C. J. Moore (2010) : Plastic ingestion by planktivorous fishes in the North Pacific Central Gyre. *Marine Pollution Bulletin*, **60**, 2275-2278.
- 23) Mato, Y., T. Isobe, H. Takada, H. Kanehiro, C. Ohtake and T. Kaminuma (2001) : Plastic resin pellets as a transport medium for toxic chemicals in the marine environment. *Environmental*

- Science & Technology, **35**, 318-324.
- 24) Endo, S. and R. Takizawa, K. Okuda, H. Takada, K. Chiba, H. Kanehiro, H. Ogi, R. Yamashita and T. Date (2005) : Concentration of polychlorinated biphenyls (PCBs) in beached resin pellets : variability among individual particles and regional differences. *Marine Pollution Bulletin*, **50**, 1103-1114.
- 25) Rios, L. M., C. Moore and P. R. Jones (2007) : Persistent organic pollutants carried by synthetic polymers in the ocean environment. *Marine Pollution Bulletin*, **54**, 1230-1237.
- 26) Ogata, Y. and coauthors (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*, **58**, 1437-1446.
- 27) Frias, J. P. G. L., P. Sobral and A. M. Ferreira (2010) : Organic pollutants in microplastics from two beaches of the Portuguese coast. *Marine Pollution Bulletin*, in press.
- 28) Hirai, H. and coauthors (2011) : Organic micropollutants in marine plastic debris from the open ocean and remote and urban beaches. *Marine Pollution Bulletin*, **62**, 1683-1692.
- 29) Teuten, E. L. and coauthors (2009) : Transport and release of chemicals from plastics to the environment and to wildlife. *Philosophical Transactions, The Royal Society B*, **364**, 2027-2045.
- 30) Andrady, A. L. (2003) : Common plastic materials. p.77-121, In, *Plastics and the Environment*, ed. A. Andrady, John Wiley & Sons, New Jersey.
- 31) 環日本海環境協力センター (2006) : 海辺の漂着物調査報告書 2006年度, 環日本海環境協力センター, 47pp.
- 32) UNEP/IOC (2009) : UNEP/IOC guidelines on survey and monitoring of marine litter. *Regional seas reports and studies no. 186*, IOC technical series No. 83, 117pp.
- 33) Convey, P., D. K. A. Barnes and A. Morton (2002) : Debris accumulation on oceanic island shores of the Scotia Arc, Antarctica. *Polar Biol*, **25**, 612-617.
- 34) Otley, H. and R. Ingham (2003) : Marine debris surveys at volunteer beach, Falkland Islands, during the summer of 2001/02. *Marine Pollution Bulletin*, **46**, 1534-1539.
- 35) Silva-Iñiguez, L. and D. W. Fischer (2003) : Quantification and classification of marine litter on the municipal beach of Ensenada, Baja California, Mexico. *Marine Pollution Bulletin*, **46**, 132-138.
- 36) de Araújo, M. C. B., P. J. P. Santos and M. F. Costa (2006) : Ideal width of transects for monitoring source-related categories of plastics on beaches. *Marine Pollution Bulletin*, **52**, 957-961.
- 37) Santos, I. R., A. C. Friedrich and F. P. Barretto (2005) : Overseas garbage pollution on beaches of northeast Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, **50**, 778-786.
- 38) Bravo, M., M. de los Á. Gallardo, G. Luna-Jorquera, P. Núñez, N. Vásquez and M. Thiel (2009) : Anthropogenic debris on beaches in the SE Pacific (Chile) : Results from a national survey supported by volunteers. *Marine Pollution Bulletin*, **58**, 1718-1726.
- 39) Ribic, C. A. (1998) : Use of indicator items to monitor marine debris on a New Jersey beach from 1991 to 1996. *Marine Pollution Bulletin*, **36**, 887-891.
- 40) Howell, E. A., S. J. Bograd, C. Morishige, M. P. Seki and J. J. Polovita (2011) : On North Pacific circulation and associated marine debris concentration. *Marine Pollution Bulletin*, in press.
- 41) Wakata, Y. and Y. Sugimori (1990) : Lagrangian motions and global density distributions of floating matter in the ocean simulated using shipdrift data. *Journal of Physical Oceanography*, **20**, 125-138.
- 42) Kubota, M. (1994) : A mechanism for the accumulation of floating marine debris north of Hawaii. *Journal of Physical Oceanography*, **24**, 1059-1064.
- 43) Maximenko, N., J. Hafner and P. Niiler (2011) : Pathways of marine debris from trajectories of Lagrangian drifters. *Marine Pollution Bulletin*, in press.
- 44) Yoon, J.-H., S. Kawano and S. Igawa (2010) : Modeling of marine litter drift and beaching in the Japan Sea. *Marine Pollution Bulletin*, **60**, 448-463.
- 45) Kako, S., A. Isobe, S. Magome, H. Hinata, S. Seino and A. Kozima (2011a) : Establishment of numerical beach litter hindcast/forecast models : an application to Goto Islands, Japan. *Marine Pollution Bulletin*, **62**, 293-302.
- 46) Miyazawa Y., Yamane S, Guo X, Yamagata T (2005) : Ensemble forecast of the Kuroshio meandering. *Journal of Geophysical Research*, **110** : C10026 doi : 10.1029/2004JC002426.
- 47) Miyazawa, Y., T. Kagimoto, X. Guo and H. Sakuma (2008) : The Kuroshio large meander formation in 2004 analyzed by an eddy-resolving ocean forecast system. *Journal of Geophysical Research*, **113** : C10015 doi : 10.1029/2007JC004226.
- 48) Miyazawa, Y., R. Zhang, X. Guo, H. Tamura, D. Ambe, JS. Lee, A. Okuno, H. Yoshinari, T. Setou and K. Komatsu (2009) : Water mass variability in the western North Pacific detected in a 15-year eddy resolving ocean reanalysis. *Journal of Oceanography*, **65**, 737-756.
- 49) Hirose, N., H. Kawamura, H. J. Lee and J.-H. Yoon (2011) : Inverse estimation of empirical parameters used in a regional ocean circulation model. *Journal of Oceanography*, **67**, 323-336.
- 50) Onogi, K. and coauthors (2007) : The JRA-25 reanalysis. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **85**, 369-432.
- 51) Kako, S., A. Isobe and M. Kubota (2011b) : High-resolution ASCAT wind vector dataset gridded by applying an optimum interpolation method in the global ocean. *Journal of Geophysical Research -Atmospheres*, **116**, D23107, doi : 10.1029/2010JD015484.
- 52) Kako, S., A. Isobe and S. Magome (2010b) : Sequential monitoring of beach litter using webcams. *Marine Pollution Bulletin*, **60**, 775-779.
- 53) Magome S., T. Yamashita T. Kohama A. Kaneda Y. Hayami, S. Takahashi and H. Takeoka (2007) : Jellyfish patch formation investigated by aerial photography and drifter experiment. *Journal of Oceanography* **63**, 761-773.
- 54) Batchelder, H. P. (2006) : Forward-in-time /Backward-in-time-trajectory (FITT/BITT) modeling of particles and organisms in the coastal ocean. *Journal of Atmospheric Oceanic Technology*, **23**, 727-741.
- 55) Isobe, A., S. Kako, P.-H. Chang and T. Matsuno (2009) : Two-way particle tracking model for specifying sources of drifting objects : application to the East China Sea shelf. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **26**, 1672-1682.
- 56) 藤枝繁・小島あずさ・兼広春之 (2006) : デイスポータルライターの指標とした海岸漂着ごみのモニタリング. 廃棄物学会

- 論文誌, **17**, 117-124.
- 57) Adlandsvik, B., A. C. Gundersen, K. H. Nedreaas, A. Stene and O. T. Albert (2004) : Modelling the advection and diffusion of eggs and larvae of Greenland halibut (*Reinhardtius hippoglossoides*) in the north-east Arctic. *Fisheries Oceanography*, **13**, 403-415.
- 58) Anderson, E., A. Odulo and M. Spaulding (1998) : Modeling of leeway drift. U. S. Coast Guard Research and Development Center Report, CG-D-06-99.
- 59) Richardson, P. L. (1997) : Drifting in the wind : leeway error in shipdrift data, *Deep Sea Research*, **44**, 1877-1903.
- 60) Isobe, A., H. Hinata, S. Kako and S. Yoshioka (2011) : Formulation of leeway-drift velocities for sea-surface drifting-objects based on a wind-wave flume experiment, p. 239-249, In, *Interdisciplinary Studies on Environmental Chemistry -Marine Environmental Modeling & Analysis*, eds. K. Omori, X. Guo, N. Yoshie, N. Fujii, I. C. Handoh, A. Isobe and S. Tanabe, Terrapub., Tokyo.