

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：82115

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820234

研究課題名(和文) 砂浜海岸におけるプラスチック漂着ゴミの滞留時間モデルの開発

研究課題名(英文) Development of a model for estimating a residence time of plastics on sandy beaches

## 研究代表者

片岡 智哉 (Kataoka, Tomoya)

国土技術政策総合研究所・その他部局等・研究官

研究者番号：70553767

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：海洋環境中に存在するプラスチックは、海岸で紫外線等に暴露されることで急激に劣化・微細化し、マイクロプラスチックになる。本研究は、プラスチックが海岸に漂着してから再漂流するまでの滞留時間を計測し、その決定要因を明らかにするものである。海岸漂着プラスチックは、海浜近くの流れや波により再漂流して指数関数的に減少していた。このことから線形システム解析に基づいたマイクロプラスチック(MP)の発生量の評価手法を構築した。さらに、海岸漂着プラスチックの動きを調べることで、海浜流が再漂流に寄与していることを明らかにし、海浜流の水平スケールや発生確率が滞留時間を決定する重要な指標であることを示した。

研究成果の概要(英文)：Plastics in the marine environment rapidly break down due to the light-induced degradation and biodegradation on a beach, and thus would become microplastics. In this study, we have investigated a residence time of plastics on a beach and factors determining the residence time. Plastics were backwashed offshore due to nearshore hydrodynamics, and their remnants decrease exponentially. As an application of exponential decay of plastics, we have established a method for evaluating an amount of microplastics generated on a beach based on a linear system analysis. On the other hand, remnant plastics were moved corresponding to the nearshore current pattern. This indicates that the nearshore currents would contribute to the backwash of plastic from the beach. We conclude that the horizontal scale of nearshore current structure and frequent of nearshore current occurrence are important indexes for estimating the residence time of plastics on the beach.

研究分野：海岸工学

キーワード：海洋プラスチック 滞留時間 線形システム解析 海岸清掃効果 海浜流 和田浜海岸

### 1. 研究開始当初の背景

プラスチック製の海ゴミは、今や海洋生態系への脅威として認識されている (Wilcox, PNAS, 2015)。海洋プラスチック起因の環境汚染は、プラスチックが紫外線等により劣化・微細化し、マイクロプラスチック (microplastics; 以下, MP) となることで悪化の一途をたどる。特に、海岸ではプラスチックの劣化・微細化が急速に進行するため、MP の主要な発生源であると認識されている (Andrady, MPB, 2015)。一方で、プラスチックは、その海岸に居続ける訳ではなく、風・波等の作用により再び沖合に流出する (再漂流する)。従って、海洋中でのプラスチックの輸送過程や MP の発生過程において、それらが海岸に漂着してから再漂流するまでの滞留時間が重要なパラメータとなるが、研究開始当時において全く明らかになっていなかった。

### 2. 研究の目的

本研究では、海岸が MP の主要な発生源であることに着目し、砂浜海岸におけるプラスチックの滞留時間を計測し、その決定要因を調べることで、滞留時間を推定するためのモデルを開発することである。

### 3. 研究の方法

まず、海岸漂着プラスチックの滞留時間を計測するためには、その海岸におけるプラスチックの残余数の時間変化を把握する必要がある。そこで、本研究では東京都新島村和田浜海岸をフィールドにして 2011 年 9 月から 2013 年 9 月までの間、2-3 ヶ月間隔で漂着するプラスチックに個体識別番号を記す現地調査 (以下、個体識別調査) を実施して残余数を計量した。残余数の時間変化の把握に加えて、滞留時間の決定要因を明らかにするため、各々のプラスチックの漂着位置をハンディ GPS で計測して調査間のプラスチックの動きを調べるとともに、海岸背後の山頂にビデオカメラを設置して和田浜海岸沖合の海浜流動場の観測を実施した。

### 4. 研究成果

本研究の主要な成果は、(1) 海岸漂着プラスチックの残余数が沖合への再漂流によって指数関数的に減少することを明らかにしたこと、(2) 海岸清掃による環境負荷軽減効果 (以下、海岸清掃効果) の定量的評価手法を構築したこと、(3) プラスチックの沖合への再漂流過程に海浜流が寄与することを明らかにしたこと、の 3 つである。以下、各成果の概要を示す。

(1) 各調査時に新規発見されたプラスチックを 1 つの群と考え、各群の残余数を計量し、初期数で除すことで、残余率を計算した。興味深いことに、どの群の残余率も指数関数的に減少していた。そこで、縦軸に残余率をと

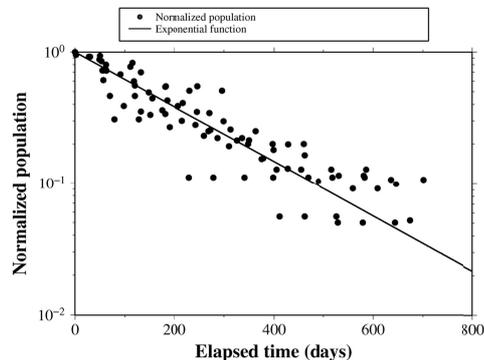


図-1 和田浜海岸における海岸漂着プラスチックの残余関数

り、横軸に各調査日からの経過日数をとって次式の指数関数で近似したところ、95%信頼水準において統計学的に有意な関係が得られた ( $n = 104, R^2 = 0.852, P = 6.47 \times 10^{-47} < 0.05$ )。

$$h(t) = \exp(-t/t_r) \quad (1)$$

ここで、 $h(t)$  は残余率、 $t$  は経過時間、 $t_r$  は平均滞留時間である。これを  $t$  で積分すれば、 $t_r$  を得ることに得ることができる。結果として、和田浜海岸にプラスチックの平均滞留時間は 224 日 (98% 信頼区間: 208 日-244 日) であった。残余関数が指数関数で表現できることは、図-1 から分かる通り、時間に対して一定確率で再漂流していることを意味する。和田浜海岸 ( $t_r = 224$ ) の場合、1 日当たり存在量の 0.5% ( $= \exp(-1/224)$ ) が沖合に再漂流する。

(2) 海岸漂着プラスチックの残余数が図-1 のように指数関数的に減少することは海岸を線形システムとみなすことができることを意味する。そこで、線形システム解析に基づき、海岸清掃による MP の発生抑制効果の評価手法を開発した。

新規漂着量  $x(t)$  と残余関数  $h(t)$  を用いると、存在量  $y(t)$  は次式の畳み込み積分で表現できる。

$$y(t) = \int_0^t x(t)h(t-t)dt \quad (2)$$

ここで、 $t$  は経過時間である。これに個々のプラスチックからの MP 発生率  $p(t)$  を導入すると、海岸に漂着している全てのプラスチックからの MP 発生率  $y_f(t)$  及び MP 発生量  $Y_f(t)$  はそれぞれ次のように評価できる。

$$y_f(t) = \int_0^t p(t-t)x(t)h(t-t)dt \quad (3)$$

$$Y_f(t) = \int_0^t y_f(t)dt \quad (4)$$

ここでは、式(4)の MP 発生量モデルの応用例として、和田浜海岸 ( $t_r = 224$ ) での海岸

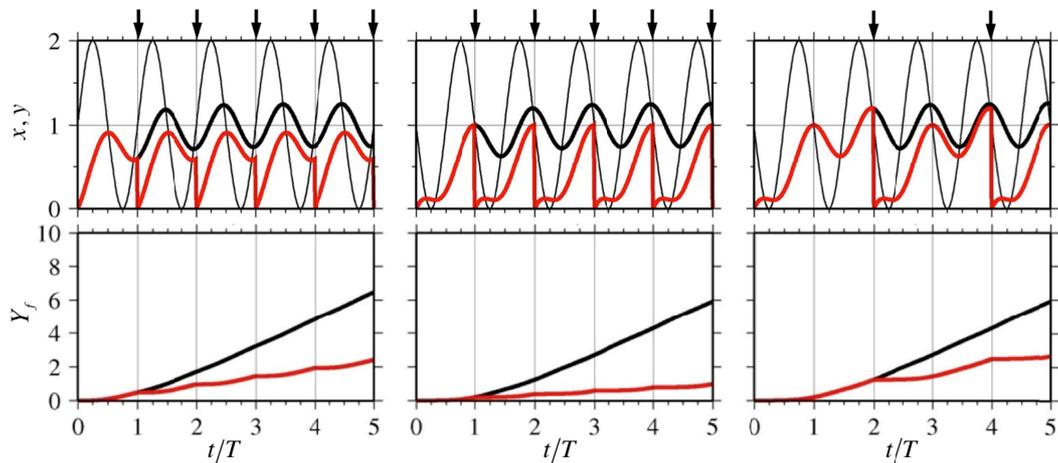


図-2 和田浜海岸で定期清掃の実施有無による存在量 ( (a), (c)及び(e) ) 及び MP 発生量 ( (b), (d)及び(f) ) の時系列変化 .

( (a)及び(b): 清掃時期が 1 年 1 回極小の場合, (c)及び(d): 清掃時期が 1 年 1 回極大の場合, (e)及び(f): 清掃時期が 2 年 1 回極大の場合 )

清掃による MP 発生抑制効果( 海岸清掃効果 ) を評価した。まず海岸清掃効果を評価するために 2 つの仮定を導入する。まず新規漂着量の変動を周期 365 日の正弦波とする。これは、個体識別調査の結果、和田浜海岸での新規漂着量が毎年 6 月頃に極大値を有していたことに起因する。そこで、次式で定義する新規漂着量を仮定した。

$$x(t) = 1 + \sin(2\pi t/T) \quad (5)$$

さらに、プラスチックが時間に比例して微細化していくことを仮定し、個々のプラスチックからの MP 発生率  $p(t)$  を

$$p(t) = p_0(t-t) \quad (6)$$

とした。

以上の仮定を踏まえて、和田浜海岸でのプラスチックの存在量と MP 発生量をそれぞれ式(2)及び式(4)で評価すると、図-2 になる。計

算したプラスチック存在量と MP 発生量から海岸清掃効果によるプラスチックの削減を考慮すると、図-2 の赤線になる。ここで、1 年 1 回の定期清掃を極小時期に行う場合 ( 図-2(a)及び(b) )、1 年 1 回の定期清掃を極大時期に行う場合 ( 図-2(c)及び(d) )、2 年 1 回の定期清掃を極大時期に行う場合 ( 図-2(e)及び(f) ) の 3 パターンの海岸清掃を想定した。1 年 1 回の定期清掃を極小時期に行う場合、5 周期後 (  $t=5T$  ) における MP 発生量を 63% 抑制することが可能である。これに対して、同頻度で清掃時期をずらして極大時期に行えば、84% の MP の発生を抑制することが可能になる。すなわち、同頻度であっても、プラスチックの漂着量が多い時期にやれば、MP 発生量を抑制できることを意味する。一方、2 年 1 回の定期清掃を極大時期に行えば、MP 発生量を 55% 削減することができる。この発生抑

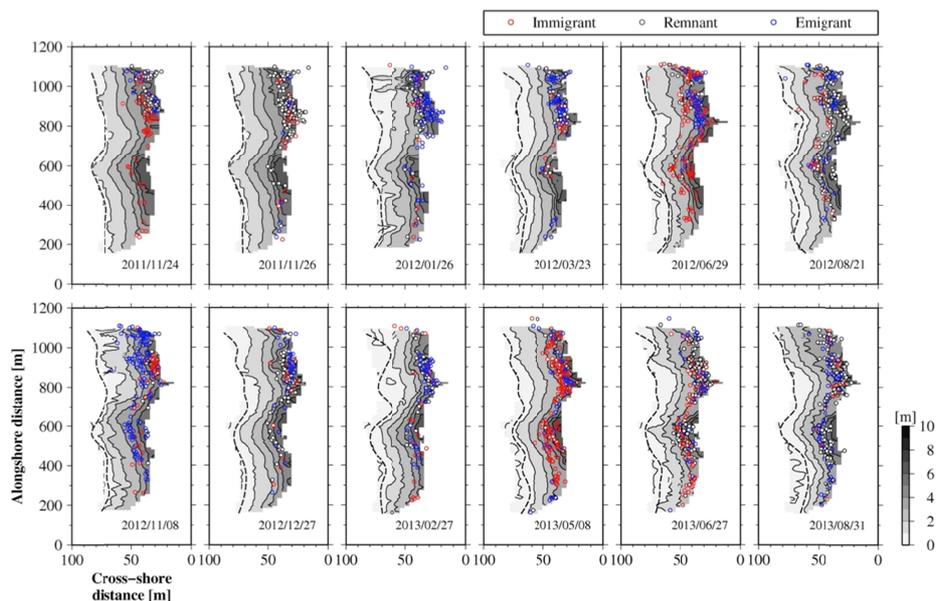


図-3 各調査時における海浜地形と海岸漂着プラスチックの平面分布 .  
( 太破線は期望平均満潮位を意味する . )

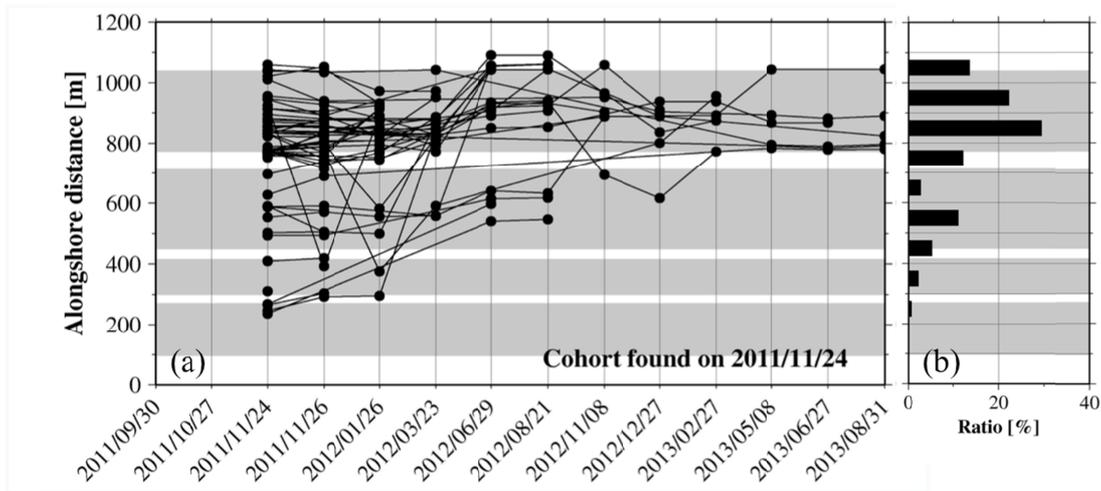


図-4 2011年11月24日に新規発見したプラスチックの沿岸方向の軌跡(a)と全調査期間におけるプラスチックの平均集積率(b)

(灰色ハッチは沖合にある潜堤の沿岸方向の位置を意味する)

制効果は1年1回の定期清掃を極小時期に行った場合と大差はなく、労力を半分にしたにもかかわらず、1年1回の定期清掃を極小時期に行う場合と同等の効果が得られる。一般に、海岸清掃には多くの労力や費用が必要とされる。もし隔年でしか海岸清掃を行えないのであれば、存在量が極大時期に海岸清掃を実施すべきである。以上のようにして、海岸清掃を実施する前にそれらによる清掃効果を調べることでより効率的かつ効果的にMP発生量を抑制することが可能になる。

(3) 海岸にあるプラスチックの残余数が指数関数的に減少する要因がわかれば、個体識別調査を実施しなくても滞留時間を推定し、前述したように海岸清掃効果を評価することが可能になる。そこで、本研究では個体識別調査から得られた残余プラスチックの漂着位置の変遷から再漂流過程を推察し、滞留時間の決定要因について考察した。

図-3は各調査時における新規漂着プラスチック (immigrant)、残余プラスチック (remnant) 及び再漂流プラスチック (emigrant) の漂着位置である。新規漂着及び残余プラスチックは、各調査時の漂着位置を意味し、再



図-5 和田浜海岸沖合の海浜流の形成パターン

漂流プラスチックは再漂流によって海岸からなくなる前の調査時の漂着位置を意味している。興味深いことに、いずれの分類のプラスチックは T.P.+2.0 m 以上の位置に漂着している。これに対して、朔望平均満潮位 (図-3中の破線) は T.P.+0.7 m である。従って、これは潮位変動が支配的な平常時にはプラスチックは再漂流せず、T.P.+2.0m 以上に遡上する高波浪時に再漂流することを示唆する。

各調査間におけるプラスチックの漂着位置の変遷に着目すると、沿岸方向に関して北側に集積する傾向があった (図-4(a))。和田浜海岸を延長 900 m を 100 m 間隔の区画で区切り、各区画における残余プラスチックの集積率を計算した (図-4(b))。これは全期間の平均集積率を意味し、和田浜海岸北側に集積していたことを示唆する。

そこで、和田浜海岸北側に集積する要因を調べるため、和田浜海岸背後の山頂にビデオカメラを設置し、高波浪時における海浜流の連続モニタリングを行った。図-5はビデオカメラで観測された動画のスナップショットであり、濁水の移動から赤い矢印の海浜流が形成されており、離岸流の発生区画は、沿岸方向距離が 700 m-800 m 及び 1000 m-1100 m の2区画であった (図-4の縦軸参照)。実際に、これら2区画では、平均集積率が低くなっており、再漂流しやすい場所であることが示唆される (図-4(b))。

以上の漂着プラスチックの漂着位置の変遷から推察される再漂流過程を図-6に示す。まず、和田浜海岸沖合では、北向きの沿岸流が卓越している結果、漂着プラスチックが海岸南側から北側へ移動する。北側に移動したプラスチックの多くは、波により岸向きに押され、再び海岸に再漂着する。一方、一部のプラスチックは、潜堤の両側から離岸流に沿って再漂流する。

従って、このような再漂流過程から滞留時間は、高波浪の発生確率や海浜流系の水平ス

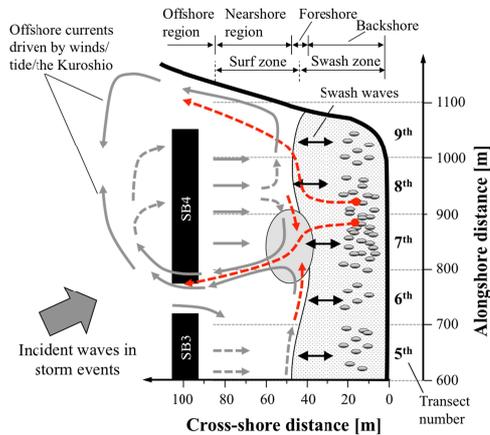


図-6 和田浜海岸における再漂流過程  
 (赤色破線: 再漂流経路、灰色実線: ビデオ観測で確認した海浜流、灰色破線: 推測した海浜流)

ケールに依存することが示唆された。今後、これらをパラメータとして滞留時間を推定するためのモデルを構築していく予定である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計7件)

Hinata H. and T. Kataoka: A belt transect setting strategy for mark-recapture experiments to evaluate the 1D diffusion coefficient of beached litter in the cross-shore direction, Marine Pollution Bulletin, 査読有, in press, 2016.  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X16302983>

Kataoka T. and H. Hinata: Evaluation of beach cleanup effects using linear system analysis, Marine Pollution Bulletin, 査読有, Vol. 91, Issue 1, 2015, pp. 73-81.  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X14008273>

Kataoka T., H. Hinata and S. Kato: Backwash process of marine macroplastics from a beach by nearshore currents around a submerged breakwater, Marine Pollution Bulletin, 査読有, Vol. 101, Issue 2, 2015, pp. 539-548.  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X15301387>

片岡智哉: 海岸における海洋プラスチックの滞留時間の計測と海岸清掃への応用に関する研究, 国土技術政策総合研究所研究報告, 査読無, Vol. 54, 2014.  
<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/rpn/rpn0054.htm>

Kataoka, T., H. Hinata and S. Kato: Analysis of a beach as a time-invariant linear input/output system of marine litter, Marine Pollution Bulletin, 査読有, Vol. 77, Issue. 1-2, 2013, pp. 266-273.

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X13006000>

Kataoka, T., H. Hinata and Y. Nihei: Numerical estimation of inflow flux of floating natural macro-debris into Tokyo Bay, Estuarine Coastal and Shelf Science, 査読有, Vol. 134, No. 1, 2013, pp. 69-79.

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272771413004046>

片岡智哉, 日向博文, 二瓶泰雄: 河川から東京湾へ流入する漂流ゴミ量の逆推定, 国土技術政策総合研究所研究報告, 査読無, Vol. 53, 2013.

<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/rpn/rpn0053.htm>

片岡智哉, 日向博文, 加藤茂: 新規漂着ゴミ量に対する海岸の線形応答特性, 国土技術政策総合研究所資料, 査読無, Vol. 738, 2013.

<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0738.htm>

[学会発表](計9件)

片岡智哉, 日向博文, 加藤茂: 海浜流による海岸漂着プラスチックの再漂流過程, 2016年度日本海洋学会春季大会, 16S25-10, 2016.

片岡智哉, 日向博文: 漂着プラスチック滞留時間計測のための調査区画設定方法について, 2016年度日本海洋学会春季大会, 16S25-11, 2016.

片岡智哉, 日向博文, 加藤茂: 海岸に漂着したプラスチックの再漂流過程に関する物理メカニズム, 第61回海岸工学講演会, SS, 2014.

Kataoka, T., H. Hinata and S. Kato: Analysis of a beach as a time-invariant linear input/output system of marine litter, PICES-2014, S8-9476, 2014.

Kataoka, T., H. Hinata and S. Kako: Sequential monitoring of beach litter at multiple sites using webcam, PICES-2014, S8-9505, 2014.

Kataoka, T., H. Hinata and S. Kato: Exponential decay of remnants of plastic litter through an

advection-diffusion process on wadahoma beach, Niijima Island, Japan, 2014 Ocean Sciences Meeting, P1644, 2014.

片岡智哉, 日向博文: 海岸漂着ゴミの滞留時間と海岸清掃の効果, 流域圏シンポジウム, 土木学会水工学委員会環境水理部会, 2013.

Kataoka, T., H. Hinata and S. Kato: Beaches as a linear input/output system of marine debris, 53th ECSA Conference, 09.04, 2013.

片岡智哉, 日向博文, 加藤茂: 新規漂着ゴミ量に対する海岸の線形応答特性, 2013 年度日本海洋学会秋季大会, 143, 2013.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

片岡 智哉 (KATAOKA, Tomoya)

国土技術政策総合研究所・沿岸海洋・防災研究部・沿岸域システム研究室・研究官  
研究者番号: 70553767

### (2) 研究協力者

日向 博文 (HINATA, Hirofumi)

加藤 茂 (KATOU, Shigeru)

加古 真一郎 (KAKO, Shinichiro)