

ISSN 1346-7328

国総研資料 第738号
平成25年 6月

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.738

June 2013

新規漂着ゴミ量に対する海岸の線形応答特性

片岡 智哉・日向 博文・加藤 茂

Analysis of a beach as a linear input/output system of marine litter

Tomoya KATAOKA, Hirofumi HINATA, Shigeru KATO

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

新規漂着ゴミ量に対する海岸の線形応答特性

片岡智哉*・日向博文**・加藤茂***

要 旨

東京都新島村和田浜海岸において2011年9月から1～3ヶ月間隔で漂着ゴミ（プラスチック製漁具）の個体識別調査を行い、各調査間に漂着したゴミ群の海岸上での存在量が、時間と共に指数関数に従って減少することを明らかにした。この指数関数的な減少（出力）は、新規漂着ゴミ量（入力）に対する線形応答であり、これを用いて和田浜海岸の新規漂着ゴミ量に関するシステム特性（増幅特性及び位相特性）を明らかにした。システム特性は、海岸における漂着ゴミの滞留時間（和田浜海岸における滞留時間 $\tau_r = 209$ 日）に依存し、滞留時間が長い（短い）海岸では、新規漂着ゴミ量に対する海岸上での存在量の増幅率と位相差はいずれも、大きく（小さく）なる。海岸のシステム特性を知ることにより、自然災害や流出事故に起因した様々な漂着ゴミ量のシナリオに対する海岸の応答（海岸上のゴミの存在量）を予め評価することが可能になる。

キーワード：線形応答解析，海岸漂着ゴミ，滞留時間，和田浜海岸

*沿岸海洋・防災研究部 沿岸域システム研究室研究官

**沿岸海洋・防災研究部 沿岸域システム研究室長

***豊橋技術科学大学 建築・都市システム学系 准教授

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国土交通省国土技術政策総合研究所

電話：046-844-5025 Fax：046-844-1145 e-mail: kataoka-t852a@ysk.nilim.go.jp

Analysis of a beach as a linear input/output system of marine litter

Tomoya KATAOKA*
Hirofumi HINATA**
Shigeru KATO***

Synopsis

Exponential decay of the amount of new marine litter on Wadahama Beach, Nii-jima Island, Japan revealed from 20-month mark-recapture experiments demonstrates a linear response of the beach to target item inputs. Here we show the amplitude and phase characteristics of the beach as a time-invariant linear input/output system. The system characteristics are fully determined by the residence time of the items ($\tau_r = 209$ day), and the amplitude and phase lag of the response of the beach to litter inputs are larger (smaller) on the beach with longer (shorter) residence time. Understanding the system characteristics enables us to evaluate the response of the beach to various marine debris inputs.

Keywords: linear response analysis, marine litter, residence time, Wadahama beach

*Researcher of Coastal Zone Systems Division , Coastal, Marine and Disaster Prevention Department
**Head of Coastal Zone Systems Division , Coastal, Marine and Disaster Prevention Department
***Associate professor of Architecture and Civil Engineering, Toyohashi University of Technology
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-468-44-5025 Fax : +81-468-44-1145e-mail:kataoka-t852a@ysk.nilim.go.jp

目 次

1. はじめに	1
2. 個体識別調査法と応答解析手法	1
2.1 個体識別調査	1
2.2 線形応答解析	3
3. 結果及び考察	4
3.1 残余関数	4
3.2 和田浜海岸の線形システム-積分型表現-	7
3.3 和田浜海岸の線形システム-微分型表現-	8
4. 線形応答解析から明らかになった今後の課題	9
5. 結論	10
謝辞	10
参考文献	10

1. はじめに

プラスチック製品は、いまや我々人類の生活に必要な不可欠なものである。その一方で、適切に処理されなかったプラスチック製品は海ゴミとなり、世界中の海洋・海岸に蓄積し (Barnes et al., 2009), 絡まりや誤飲等による海洋生物への危害が報告されている (Derraik, 2002)。また、最近では我が国の海岸多くの海岸で目撃されている特定の漁業用ブイに、EU の規制値を超える鉛が含まれていることも報告されている (Nakashima et al., 2012)。また、Nakashima et al.(2012)は、精微な室内実験を行い、含有する鉛が降雨の作用によって海岸に溶出する可能性があることを指摘した。

一方、海岸に漂着したゴミはその海岸に滞留し続けるわけではない。Garrity and Levings (1993)や Bowman et al. (1998)の現地調査結果からわかるように海岸に漂着したゴミはいずれ再漂流する。Garrity and Levings(1993)は、パナマ沿岸の4海岸ではゴミが海岸に漂着してから再漂流するまでの時間(すなわち、滞留時間)が概ね1年以内であると言及している。滞留時間は海岸の地形や風・波浪によって異なると考えられ、ゴミが溜まりやすい(滞留時間が長い)海岸やゴミが溜まりにくい(滞留時間が短い)海岸が存在する。したがって、海岸での滞留時間は、ゴミによる海岸環境汚染(例えば、海岸への鉛の溶出量)を評価する際の重要な指標になると考えられる。

これまでに行われてきた海岸でのゴミのモニタリングの多くは、ある時点のゴミ存在量を計測するものである(例えば、Ryan et al., 2005; Kataoka et al., 2012)が、これだけでは滞留時間を測ることはできない。すなわち、ある時に漂着したゴミを一つの集団とし、その集団に属するゴミが砂浜に残留している量(残余量)の減少過程を観測する必要がある。これにより残余率(ある集団の初期漂着量に対する残余量の比率)の時間変化(すなわち、残余関数)を得ることができる。詳細については後述するが、この残余関数を時間に関して積分することでゴミの平均滞留時間を計算することができる(2.1節)。なお、Garrity and Levings (1993)は、滞留時間について言及しているが、この方法に従って厳密に計算しているわけではない。

外洋域に目を転じると、海洋数値モデルを用いた漂流ゴミの移流拡散過程の予測や再現計算も数多く行われている(例えば、Yoon et al., 2010; Kako et al., 2011; Maximenko et al., 2012)。これらの計算により、海岸沖合のゴミの漂流量を知ることができる。海岸沖合を漂流しているゴミが風や波の作用によって海岸に打ち上げら

れるため、海岸沖合での漂流量は新たに海岸に漂着するゴミ量(新規漂着量)と相関があると考えられる。このことから以後、沖合におけるゴミの漂流量を沖合からの新規漂着量とみなすことにする。

ところで、海岸でモニタリングされたゴミの存在量と海洋数値モデルで予測・再現された新規漂着量にはどのような関係にあるのであろうか。前述のように海岸に漂着したゴミはある滞留時間をもっていずれ再漂流する。そのため、海岸上のゴミの存在量を海洋数値モデル等により予測・再現するためには、沖合からの新規漂着量と海岸上でのゴミの存在量の応答関係を知る必要がある。また、この関係を知ることができれば、海岸でモニタリングされたゴミの存在量を基に沖合の漂流量を計算することができ、海洋数値モデルの予測・再現結果を検証することができるかと期待される。そこで、本研究では東京都新島村和田浜海岸でゴミの平均滞留時間を測るための現地調査を行い、その現地調査結果を基に、沖合から海岸への新規漂着量と海岸でのゴミの存在量の応答関係を明らかにすることを目的とする。

本報告の構成を以下に示す。まず、第2章では東京都新島村和田浜海岸で行った個体識別調査と応答解析手法について説明する。第3章では本研究で測られた滞留時間と応答解析の結果を示し、続く第4章では本研究の結果を踏まえて今後の展開について述べる。最後の第5章で本報告の結論を述べる。

2. 個体識別調査法と応答解析手法

2.1 個体識別調査

現地調査は、東京都新島村の西岸に位置する和田浜海岸で行った(図-1)。和田浜海岸は延長約1km、幅30~50mの砂浜海岸である。2011年9月から調査を開始し、その後1~3ヶ月間隔で行い、現在も継続して調査している。具体的な観測日を表-1に示す。調査範囲は1回目と2回目の調査を除き、和田浜海岸全延長で実施している。第1回目の調査では和田浜海岸北側より南に100mの範囲のみを対象に開始したが、その後の調査で漂着したゴミが沿岸方向(汀線に平行な方向)に移動していることが確認されたため、第2回目の調査では北側より南に約200mの範囲、第3回目以降は和田浜海岸全延長を対象に調査を実施した(図-1(d))。

個体識別調査では3種類の中国製の漁業用ブイを対象とした(図-2)。これらを対象とした理由は2つある。一つは我が国の多くの海岸でこれらのブイが漂着していることが確認されているためである。全国の海岸に漂着

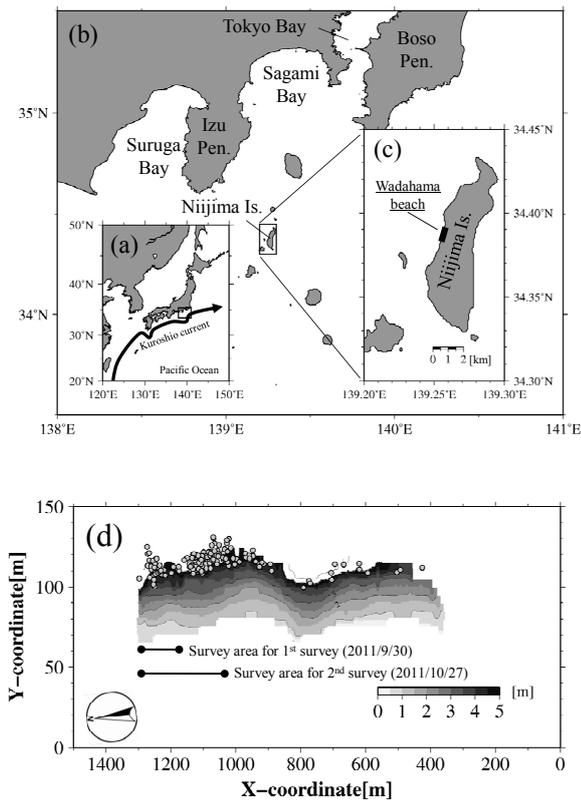


図-1 東京都新島村和田浜海岸の位置と海浜地形。(a) 日本周辺海域, (b) 関東周辺海域, (c) 新島拡大図, (d) 2011年11月24日における3種類のブイの分布(灰色の丸印)と和田浜海岸地形。(d)中の黒丸付バーは1回目と2回目の調査範囲を示す。海岸地形は2011/11/25に筆者らがRTK-GPS(Trimble, Trimble 5800 II)を用いて計測したものである。

しているこれらのブイを対象とすることで、将来、複数の海岸で得られたこれらのブイの滞留時間を相互に比較し、滞留時間を決定する物理的要因を明らかにすることに繋がると考えられる。もう一つは、これらのブイのうち Type2 には、Nakashima et al.(2012)によって高濃度の

表-1 個体識別調査日。()内の数字は調査 No.を示す。

2011	2012	2013
9/30-10/1 (1)	1/26-1/28 (4)	2/27-3/1 (10)
10/28-10/30 (2)	3/23-3/25 (5)	5/8-5/10 (11)
11/23-11/26* (3)	6/28-6/30 (6)	8/21-8/23 (7)
	11/9-11/10 (8)	12/27-12/28 (9)

* 調査期間中に高波浪が発生し、漂着ゴミの分布が大きく変わったため、高波浪発生前後で個体識別調査を2回実施した。

鉛が含まれていることが報告されているためである。

和田浜海岸の背後には急な浜崖がある。浜崖上を調査したところ、これらのブイが見つかることはなかった。したがって、風や波によってブイが浜崖を乗り越え、背後地にまで移動することはない。また和田浜海岸には人の出入りがほとんど無い。これは我々が同海岸に設置している Web カメラの画像からも確認できる (<http://www.ysk.nilim.go.jp/kakubu/engan/enganiki/umigomi/>)。したがって、多くの人が歩行することで海岸地形の形状に影響を与えることは考えにくい。また、後述するように、砂浜に滞留するブイの数(残余数)の時間変化が指数関数で良く近似できること、各々調査から得られた残余数の減少率が、レジャー等で新島島内に最も人が集まる夏季に小さくなっていることを考えると、人によって調査対象のブイが持ち去られたことはほとんど無いものと考えられる。

滞留時間を測るために、まず、各調査時に新たに発見したブイ一つ一つに識別番号を記入した(図-2)。ブイ個々の動きを把握するためにブイの緯度経度をハンディ GPS (GARMIN, GPSMAP 60CSx) で計測した。GPS の計測誤差は±3m 程度である。記入し終わったブイは、発見した場所に戻した。以前の調査で識別番号を記入したブイを発見した場合、識別番号が消えないように同じ識別番号を再度上書きし、新たに発見したブイと同様にその緯度経度をハンディ GPS で計測した。各調査時には2



図-2 個体識別調査の対象とした3種類の漁業用ブイ。(a)に識別番号の記載例を示す。

～4人で和田浜海岸全延長を最低3往復して、記録漏れのゴミが無くなるまでブイを隈なく搜索した。

これを繰り返すことで、前回と今回の調査の間に新たに海岸に漂着したブイの数（初期漂着数）、調査間に海岸沖合へ再漂流したブイの数（再漂流数）、および過去の調査で発見し、海岸上に滞留しているブイの数（残余数）の時間変化を計測することが可能となる。そして、各調査で新たに発見したブイすべてを一つの群とし、各群の残余数を初期漂着数で無次元化することで、残余関数 $h(t)$ を得ることが出来る。この残余関数 $h(t)$ を(1)に代入して、時間 t に関して広義積分することで、ブイの平均滞留時間 τ_r が求まる (Takeoka, 1984)。

$$\tau_r = \int_0^{\infty} h(t) dt . \quad (1)$$

本手法で滞留時間を計算するためには、各群の残余数の減少過程が分かればよい。1回目と2回目の調査範囲は和田浜海岸の一部 (図-1(d)) であるが、2回目の調査を除き、それ以前に発見したブイの残余数は、和田浜海岸全延長を搜索して記録している。ただし、2回目の調査における1回目の調査時に発見したブイの残余数は、和田浜海岸全延長での残余数ではないため、ここでの解析には用いていない。また、厳密には1回目(2回目)の調査で発見されたブイ群から求めた滞留時間は、北側100m(200m)に存在していたブイの和田浜海岸全域における滞留時間となる。3～6回目の調査では、新たに漂着したブイの19(50)%が北側100m(200m)に存在していた。このことから、1回目及び2回目の調査範囲は、和田浜海岸における新規漂着量の集積域であると考えられ、これらの調査に基づいて求めた滞留時間も、概ね和田浜海岸全域に漂着したブイの和田浜海岸における滞留時間を表していると考えられる。

2.2 線形応答解析

現地観測では個々のブイの位置の変化(動き)を計測しているが、ここでは解析の第1ステップとして、個々の位置は無視し、和田浜海岸全体を1つの線形ブラックボックスとみなし、そのシステム特性を明らかにすることを目標としている。沖合から海岸に新たに漂着する単位時間当たり Flux 量(すなわち、新規漂着量)を線形システムに対するインプット $x(t)$ とし、海岸上におけるゴミの存在量を線形システムからのアウトプット $y(t)$ とする。この場合、個体識別調査から求めた漂着ゴミの残余関数 $h(t)$ が、線形システムの単位インパルス応答に相当する (図-3)。

線形システムを数学的に表現するには、積分型と微分型の二つの表示方法がある。前者(たたみ込み積分)は、一つのシステムへの入力と出力の関係を概念的に理解するのに都合が良く、システム内部機構に立ち入ることなしに、システム特性を理解しうる。一方、機械系や電気系のように man-made system では、一つ一つのシステム構成要素の特性とそれらの組み合わせが分かっているから、これらの数学的表現を集めて微分方程式で入出力の関係が記述できる。勿論、前者と後者を関連づけることは簡単である(日野, 1977)。

ここでは、まず前者の方法を用いて、和田浜海岸の周波数応答特性一様な周期で変動する漂着ゴミのインプット $x(t)$ (すなわち、沖合からの新規漂着量) に対して、アウトプット $y(t)$ (すなわち、海岸上における存在量) がどのように増幅され、どの程度位相がずれるのかを調べた。その後、海岸での存在量 $y(t)$ の時間変化を支配する微分方程式を明らかにした。これは後者の表現方法を用いてシステムを記述しておいた方が、将来、解析の発展が望めるからである。

(1) 積分型のシステム表現

システムに対するインプットとアウトプットはインパ

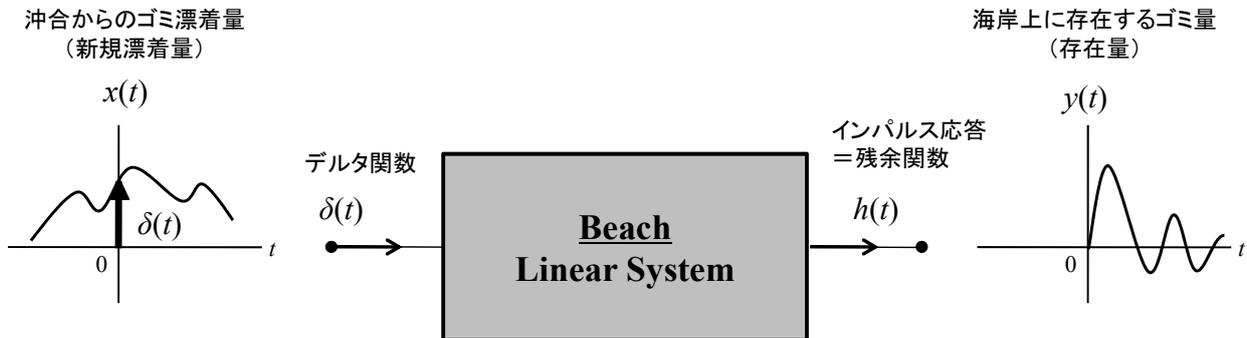


図-3 線形システムの概念図

ルス応答を用いて以下の様に表せる.

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

$$\begin{cases} Y(s) = \frac{X(s)}{Z(s)} + \frac{G(s)}{Z(s)} = H(s)X(s) + H(s)G(s), \\ Z(s) = a_0s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_{n-1}s + a_n, \\ G(s) = (a_0s^{n-1} + a_1s^{n-2} + \dots + a_{n-2}s + a_{n-1})y(0) \\ \quad + \dots + (a_0s + a_1)y^{(n-2)}(0) + a_0y^{(n-1)}(0). \end{cases} \quad (7)$$

これをフーリエ変換すると周波数領域におけるシステム入出力の関係が記述できる.

$$Y(\omega) = H(\omega)X(\omega). \quad (3)$$

ここで, $H(\omega)$ は

$$H(\omega) = \int_0^\infty h(t)e^{-i\omega t} dt = \alpha(\omega) + i\beta(\omega). \quad (4)$$

であり, 周波数応答と呼ばれる. 周波数応答 $H(\omega)$ は, 個体識別調査から得られた残余関数 $h(t)$ のフーリエ変換である. そして, 線形システムの増幅特性 $A(\omega)$ と位相特性 $\theta(\omega)$ は以下の様に計算できる.

$$\begin{cases} A(\omega) = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \\ \theta(\omega) = \tan^{-1} \frac{\beta}{\alpha} \end{cases}. \quad (5)$$

これは, 個体識別調査から残余関数が得られれば, その海岸のシステム特性 (すなわち, 増幅特性と位相特性) が分かることを示す.

(2) 微分型のシステム表現

基礎方程式として以下のような常微分方程式を用いるのが一般的である.

$$a_0 \frac{d^n y}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{dy}{dt} + a_n y = x(t). \quad (6)$$

ここで, $a_n (n=0, 1, \dots)$ は定数であり, 時間的に変化しない. (6)をラプラス変換すると,

となる. ここで, $Z(s)$ のことをインピーダンス, $H(s)$ を伝達関数という. $H(s)$ はインパルス応答のラプラス変換である.

$$H(s) = \frac{1}{Z(s)} = L[h(t)]. \quad (8)$$

インピーダンス $Z(s)$ の形は, 基礎方程式だけに關係して初期条件には無關係である. 一方, $G(s)$ は基礎方程式の左辺と初期条件の両方に依存するが, インパルス $x(t)$ (すなわち, 沖合からの新規漂着量) には依存しない. また, 初期条件が全て 0 であれば $G(s)$ も 0 となる. ここで重要な点は, 個体識別調査から得られた残余関数 $h(t)$ のラプラス変換からインピーダンス $Z(s)$ あるいは伝達関数 $H(s)$ を計算することで, 基礎方程式の定数係数 $a_n (n=0, 1, \dots)$ を求めることが出来る点である. これにより, アウトプット $y(t)$ (すなわち, 海岸上における存在量) の時間変化を支配する基礎方程式を観測から推測することが出来るのである.

また, (7)の第一式の逆ラプラス変換から基礎方程式(6)の解を求めることが出来る.

$$\begin{aligned} y(t) &= L^{-1} \left[\frac{X(s)}{Z(s)} \right] + L^{-1} \left[\frac{G(s)}{Z(s)} \right] \\ &= x(t) * \left(L^{-1} \left[\frac{1}{Z(s)} \right] \right) + L^{-1} \left[\frac{G(s)}{Z(s)} \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

ここで, *はたたみ込み積分を表しており, 式(9)は式(2)と一致していることが分かる. これによって積分型表現と微分型表現が容易に関連づけられることが分かる.

3. 結果及び考察

3.1 残余関数

調査対象とした3種類のブイそれぞれの量の変動を図-4に示す. ここでは各調査時における和田浜海岸上でのゴミの量 (存在量もしくは Remnant), 各調査時に新た

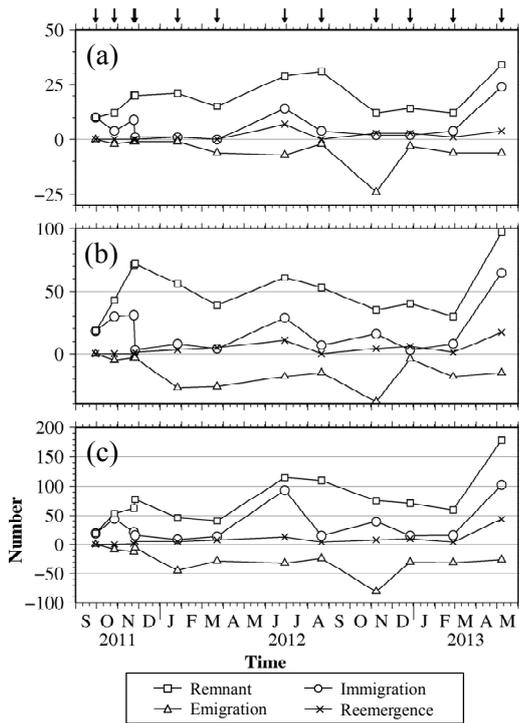


図-4 調査対象ブイそれぞれの量の変動。

(a) Type1, (b) Type2, (c) Type3.

に発見したゴミの量（移入量もしくは Immigration），調査間に海岸沖合に再漂流したゴミの量（移出量もしくは Emigration），前回までの調査で一度海岸上から無くなったが，各調査時に再び出現したゴミの量（再出現量もしくは Reemergence）の 4 つの量に分けて各々の時系列を示す。なお，存在量は過去の調査で発見したゴミの残

余量と移入量の合計である。再出現したゴミの多くは，海岸表面下に一度埋没し，風や波の作用により海岸が侵食され，再度海岸表面に出たものと推察される。

3 種類のブイの量の変動パターンがよく類似していることが分かる。移出量についてみると，3 種類のブイはともに 2012 年 11 月に極大値，2012 年の夏季に極小値をとる。このことは，3 種類のブイの和田浜海岸上での動きが似ていることを示している。そこで，3 種類のブイを区別することなく線形応答解析を行う。また，移入量については 2011 年の冬季と 2012 年の夏季に極大となる。このことから，新島沖合での 3 種類のブイの漂流量の変動パターンがほぼ同じであるものと推測される。その結果として，海岸上での存在量は，いずれのブイも 2011 年の冬季と 2012 年の夏季において極大となり，2012 年の春季と 2012 及び 2013 年の冬季に極小となっている。

各調査時の新たに発見したゴミを 1 つの群とみなし，以降の調査時の各群の残余量をその群の移入量で無次元化して計算した残余率の時系列を図-5 に示す。本研究において再出現量は，一度なくなってから再出現するまでの間も和田浜海岸の表面下に存在していたと判断し，それ以前の残余量に足し合わせて残余率の時系列を作成している。全体的に残余率は漂着直後に急激に減少し，その後，減少量が徐々に小さくなる。また，2012 年の夏季に減少率が小さくなっているように見える。これは，沖合波浪特性の季節変化と関係しているものと考えられるが，ここでは減少率の季節変化については考慮しない，あるいはより長い時間スケールで海岸の応答特性を調べ

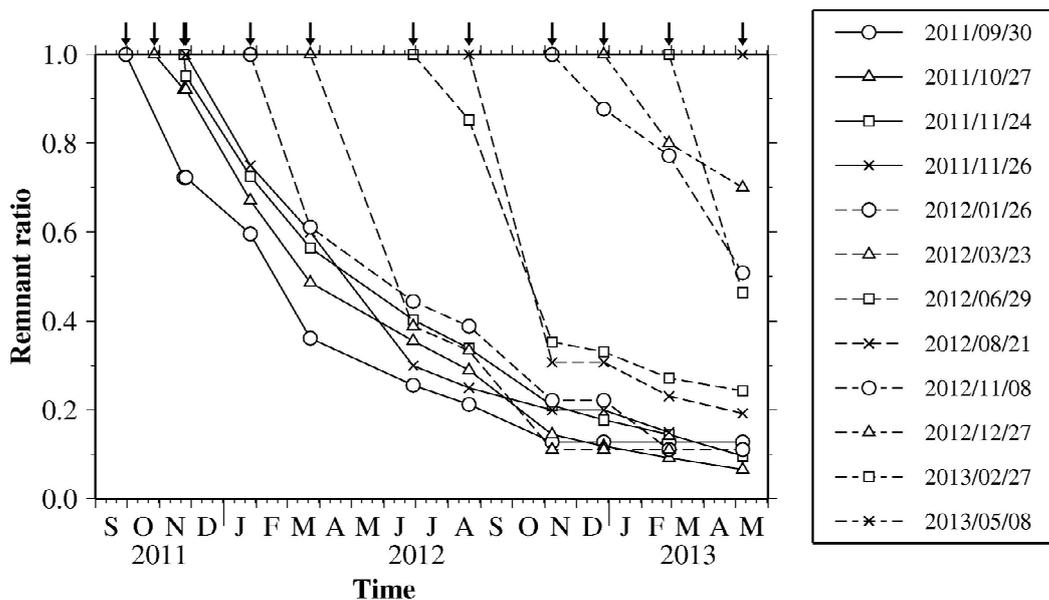


図-5 3 種類のブイの残余率の時系列。凡例を図の右に示し，図の上の矢印は調査日を示す。

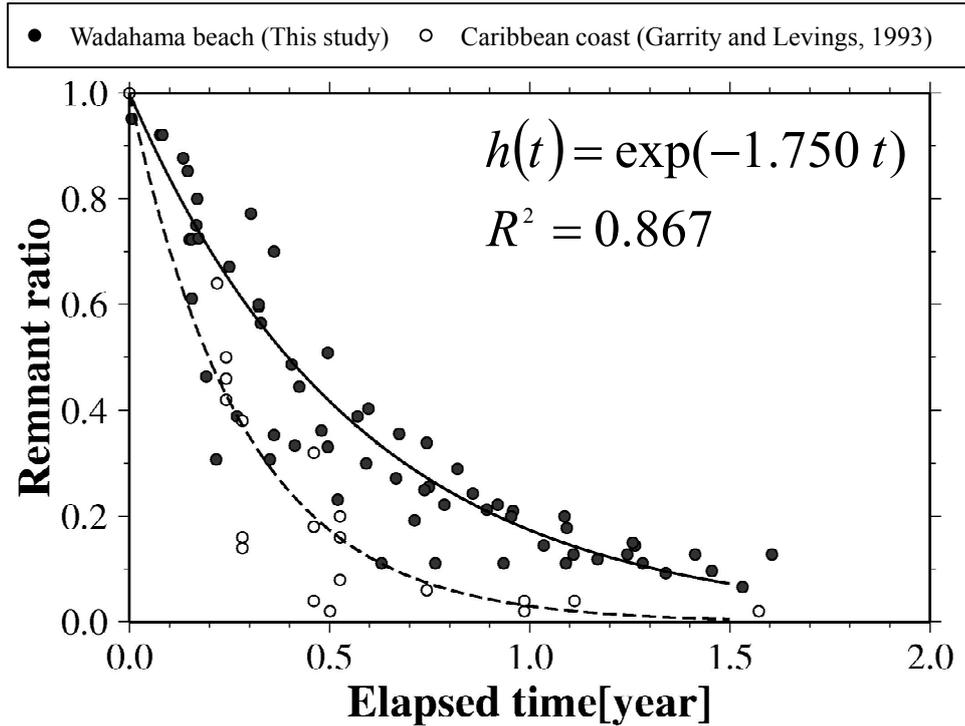


図-6 残余関数の比較.

凡例を図上に示す. 太実線及び太破線はそれぞれ, 本研究及び Garrity and Levings (1993)の残余率の近似曲線である. 本研究で得られた残余関数を図中の右上に示す.

ることとする. これは基礎方程式(6)の係数が時間的に変化しないことと対応している. 残余率が増加しているのは, 残余量に再出現量を含めたためである. しかし, 各調査時の存在量に比べ, 再出現量は少ないことから, 本研究ではこの影響を無視し, 以下の解析を行った.

全ての調査で得られた残余率の時系列の最初の観測日を原点 ($t=0$) として重ねたのが図-6である. 指数関数的に残余率が小さくなっていることがみてとれる. そこで, 残余率の時間変化を指数関数によって近似したところ, 有意な高い相関が得られた ($R^2=0.867, P<0.01$).

$$h(t) = \begin{cases} \exp(-kt) & (k = 1.750, t \geq 0) \\ 0 & (t < 0) \end{cases} \quad (10)$$

“3つのブイの和田浜海岸における”平均滞留時間 (k の逆数) は(10)を(1)に代入して

$$\tau_r = \int_0^{\infty} h(t) dt = \frac{1}{k} = 0.571 \text{ year} = 209 \text{ day}. \quad (11)$$

となる. 和田浜海岸に漂着した3種類のブイは, 平均的には約7ヶ月後に沖合へと再漂流する. この値から Type2のブイ1個あたりから海岸に溶出する鉛量が見積もることが可能となる.

得られた残余関数 (すなわち, 式(10)) と調査間の移入量を用いて, 海岸上の存在量と調査間の移出量の再現計算をした (図-7).

$$\begin{aligned} y_n &= a_n + y_{n-1} e^{-k(t_n - t_{n-1})} \\ &= a_n + \sum_{m=0}^{n-1} a_m e^{-k(t_{m+1} - t_m)}, \\ z_n &= y_{n-1} (1 - e^{-k(t_n - t_{n-1})}) \\ &= \sum_{m=0}^{n-1} a_m (1 - e^{-k(t_{m+1} - t_m)}). \end{aligned} \quad (12)$$

ここに $a_n (n=1, 2, \dots)$ は調査間 ($t=t_{n-1}$ から $t=t_n$ までの間) における移入量, $y_n (n=1, 2, \dots)$ は $t=t_n$ における海岸上での存在量, $z_n (n=1, 2, \dots)$ は調査間 ($t=t_{n-1}$ から $t=t_n$ までの間) における移出量である. 前述したように, 今回, 残余率の減少過程に季節変化が見られたが, それらを無視して残余関数を決定した (3.1節参照). そのため, 再

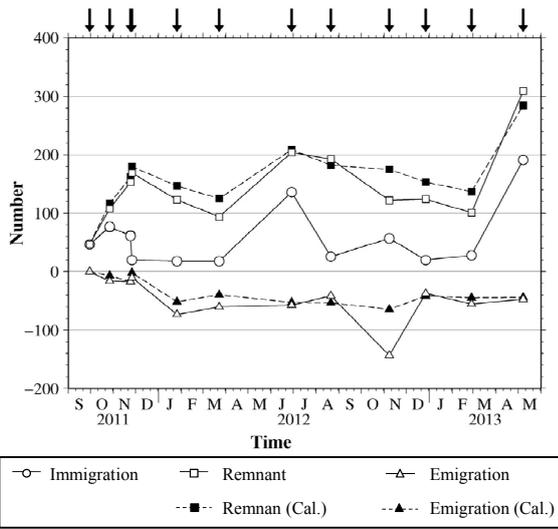


図-7 3種類のブイの海岸上の合計存在量と沖合への合計再漂流量の再現計算との比較。
図の下に凡例を示し、図の上の矢印は調査日を示す。

現計算で得られた海岸上での存在量及び調査間の移出量は、個体識別調査で得られたそれらと若干の差があるけれども、時系列の変動パターンについてはよく再現することができている。

3.2 和田浜海岸の線形システム-積分型表現-

和田浜海岸を線形システム（和田浜システム）とみなすと、(4), (5), (10)から周波数応答 $H(\omega)$ および増幅特性 $A(\omega)$ と位相特性 $\theta(\omega)$ が計算できる。

$$\begin{cases} H(\omega) = \frac{k - i\omega}{k^2 + \omega^2} \\ A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{k^2 + \omega^2}} \\ \theta(\omega) = -\tan^{-1}\left(\frac{\omega}{k}\right) \end{cases} \quad (13)$$

図-8 に“3種類のブイに対する”和田浜システムの増幅特性 $A(\omega)$ と位相特性 $\theta(\omega)$ を示す。インプット（新規漂着量： $x(t)$ ）に対してアウトプット（存在量： $y(t)$ ）の位相は必ず遅れる。インプットの変動周期が長くなる程、増幅率は大きくなりアウトプットは大きくなる。反対に、インプットとアウトプットの位相差（時間差ではない）は小さくなる。

和田浜海岸におけるシステム特性を詳細に調べるため、仮想的なブイの新規漂着量に対応した海岸での応答（す

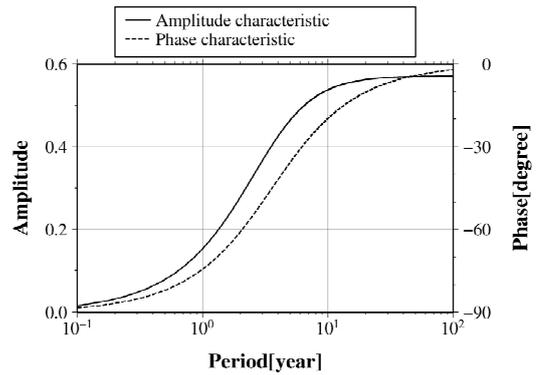


図-8 和田浜海岸におけるシステム特性。

なわち、海岸上でのブイの存在量）を計算した。まず、初期状態で全くブイが漂着していないと仮定し、ある一定のブイの新規漂着量 (x_0 : 100 個/年) に対して、海岸がどのように応答（すなわち、和田浜海岸における存在量がどう変化）するのかを計算する（図-9(a)）。なお、存在量は個数であるのに対し、新規漂着量は Flux の次元を有することに注意を要する。

十分時間が経過すると、(14)より和田浜海岸上におけるブイの存在量は $x_0\tau_r$ に、つまり新規漂着量 x_0 に滞留時間 τ_r ($=0.571$) を乗じた値に収束することが分かる。

$$\begin{aligned} y(t) &= \int_0^t x_0 e^{-k(t-\tau)} d\tau \\ &= \frac{x_0}{k} (1 - e^{-kt}) = x_0\tau_r (1 - e^{-t/\tau_r}). \end{aligned} \quad (14)$$

(14)の第二式において ω を無限大にすれば同様の答えが得られる。これは沖合からの新規漂着量が同じであっても滞留時間の長い海岸の方が、最終的に海岸上の存在量が多くなる—ゴミ回収に労力が必要となる—ことを示している。また、その一定値に落ち着くのにより時間がかかる。

続いて、新規漂着量が周期的 ($T = 0.25$ 年) に余弦関数に従って変化する場合について調べてみる（図-9(b)）。漂着量が負の値をとるのは現実的ではないが、ここではシステムの応答特性を調べることを目的としているので問題ない。

$$\begin{aligned} y(t) &= \int_0^t x_0 \cos(\omega_0\tau) e^{-k(t-\tau)} d\tau \\ &= \frac{x_0}{\sqrt{k^2 + \omega_0^2}} \left\{ \cos(\omega_0 t + \theta) - \frac{k}{\sqrt{k^2 + \omega_0^2}} e^{-kt} \right\}. \end{aligned} \quad (15)$$

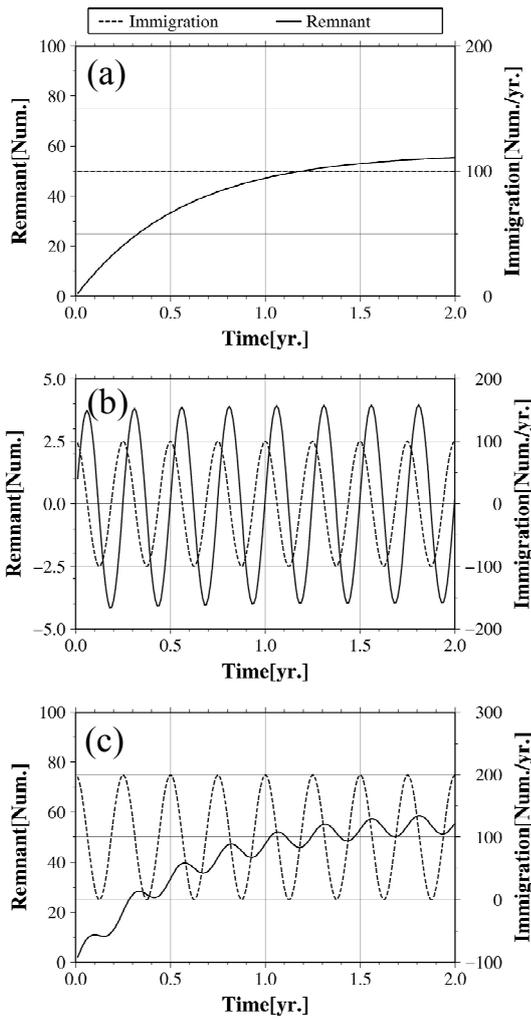


図-9 和田浜海岸上における存在量の応答計算例。(a) 定常な新規漂着量を与えた場合、(b) 周期的な新規漂着量を与えた場合、(c) (a)と(b)を合わせた新規漂着量を与えた場合。

ここに

$$\theta = -\tan^{-1}\left(\frac{\omega_0}{k}\right) = -\tan^{-1}(\omega_0 \tau_r). \quad (16)$$

であり、沖合からの新規漂着量の変動周期が同じであっても滞留時間の長い海岸の方が位相差 θ は大きくなる。また、十分時間が経過すると、存在量は

$$y(t) \rightarrow \frac{x_0}{\sqrt{k^2 + \omega_0^2}} \cos(\omega_0 t + \theta). \quad (17)$$

に近づく。インプットに対する増幅率は $1/\sqrt{k^2 + \omega_0^2}$ となり、(13)の第二式と一致する(振幅: $100 \text{ 個/年} \times 0.0397 = 3.97$)。また、アウトプットはインプットに対し約 85 度位相が遅れる。一定の新規漂着量と周期的な新規漂着量があった場合、海岸上での存在量 $y(t)$ は、(14)と(15)の和で表現され、図-9(c)のようになる。この場合、最終的には海岸上での存在量 $y(t)$ は(18)に収束する。

$$y(t) \rightarrow \frac{x_0}{k} + \frac{x_0}{\sqrt{k^2 + \omega_0^2}} \cos(\omega_0 t + \theta). \quad (18)$$

このように、海岸を線形入出力システムとしてとらえることで、様々な災害や人的事故、あるいは対策シナリオに対する海岸の応答(すなわち、海岸上のゴミの存在量)を予め評価することができるようになる。これは、線形応答解析の大きな利点である。例えば、今後何らかの対策を講じて沖合からの新規漂着量が減少した場合に、どのくらい時間でどの程度海岸からゴミが無くなるか、あるいは今後沖合からの新規漂着量が増加した場合に、海岸上の存在量はどの程度に収束するのかといったシミュレーションを行うことも可能となる。

最近、Kataoka et al. (2012)は Web カメラを用いて海岸上にあるゴミの存在量 $y(t)$ を連続的に観測することに成功した。これにより現地調査に比べ、低コスト・小労力で複数の海岸上の存在量を計測することが可能となった。一方、海洋数値モデル(例えば、Yoon et al., 2010 ; Kako et al., 2011 ; Maximenko et al., 2012)で海岸沖合における漂流量(ここでは沖合からの新規漂着量を $x(t)$ とみなす)を計算することができる。したがって、本研究で得られた海岸での応答特性を用いることで、海洋数値モデルで予測された海岸沖合における漂流量を Web カメラシステムで計測された海岸上の存在量を使って検証することが可能となる。すなわち、(3)の逆フーリエ変換(式(19))から求めた $x'(t)$ と数値モデルによる予測結果 $x(t)$ を比較すれば良い。これにより海岸の増幅率や位相遅れを考慮でき、より精度の高い比較検証を行うことが可能となる。

$$x'(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{Y(\omega)}{H(\omega)} e^{i\omega t} d\omega. \quad (19)$$

3.3 和田浜海岸の線形システム-微分型表現-

(8)と(10)から和田浜システムの伝達関数とインピーダ

ンスが決まる.

$$H(s) = \frac{1}{Z(s)} = L[e^{-kt}] = \frac{1}{s+k}. \quad (20)$$

(7)の第二式と(20)を比較から(6)の次数と係数は以下の様になる.

$$n=1, a_0=1, a_1=k. \quad (21)$$

よって, 残余数の時間変化を記述する方程式は

$$\frac{dy(t)}{dt} + ky(t) = x(t). \quad (22-1)$$

あるいは,

$$\frac{dy(t)}{dt} + \frac{y(t)}{\tau_r} = x(t). \quad (22-2)$$

となる. (22)は単純な連続式であり, 海岸上のブイの存在量 $y(t)$ の時間変化(左辺第一項)は, 沖合からのブイの新規漂着量(右辺)と海岸から沖合への再漂流量(左辺第二項)の差で決まることを意味する. そして, 沖合への再漂流量は, その時の存在量に比例する. その比例定数 k ($1/\tau_r$)は, $[1/T]$ の次元を持つ輸送係数である (Takeoka, 1987).

ここで, $t=t_0$ において $y=y_0$ の境界条件を用いて(22)を解くと,

$$y(t) = \int_{t_0}^t x(\tau)e^{-k(t-\tau)}d\tau + y_0e^{-k(t-t_0)}. \quad (23)$$

を得る. (23)の第一項は $t=t_0$ 以降の新規漂着量に関する残余量, 第二項は $t=t_0$ における海岸への存在量 y_0 に関する残余量を示す. (23)を用いることで, ある時の海岸上の存在量をシミュレーションすることができる.

4. 線形応答解析から明らかになった今後の課題

線形応答解析から, 輸送係数 k あるいは滞留時間 τ_r が決まれば, ここで示したように, 残余関数が指数関数で近似できる海岸のシステム特性を明らかにすることができる.

きる. 例えば, パナマのカリブ海に面した4つの海岸においても, ある時に海岸に漂着したゴミの集団の数が指数関数的に減少していることが見て取れる (Garrityand Levings, 1993).

Garrityand Levings (1993)の Fig. 3から残余数を読み取り, 残余率を計算して本研究で得られた結果と比較した(図-6). 前述したように, 彼らはこの残余関数から厳密に平均滞留時間を求めている. そこで, 本研究と同様の方法で, 残余率の時間変化を指数関数で近似して残余関数を決め, (1)を用いて平均滞留時間を計算した. 彼らが調査した4つの海岸における平均滞留時間は, 3.5ヶ月であり, 和田浜海岸における平均滞留時間(7ヶ月)より短かった.

彼らの調査結果から求めた滞留時間が短いには2つの理由が考えられる. 一つは彼らが各海岸の一部(延長: 50m)しか実施していないためである. すなわち, 沿岸方向にゴミが移動し, 調査範囲(50mの範囲)外に出てしまった可能性がある. 彼らの結果から求められるのはあくまでも50mの区間における滞留時間なのである. 実際に和田浜海岸では, 沿岸方向に100m以上の距離をゴミが移動していることを確認した(2.1節). もう一つは彼らが各海岸に漂着するすべてのゴミを対象に残余数を計測したためである. 彼らが対象としたゴミの中には風圧の影響を受けやすいPETボトルや発泡スチロール製のゴミも含まれている. 風圧の影響を強く受けるゴミは, 風によって沖合や背後地に移動しやすく, 滞留時間が短くなると考えられる. そのため, 平均滞留時間が和田浜海岸におけるブイのそれよりも短くなったと考えられる. ここで最も重要な点は, 別の海岸におけるゴミの残余関数を指数関数でうまく近似できたことである.

では, 海岸の滞留時間(あるいは輸送係数)を決める要因は何であろうか. 滞留時間は何の関数として表されるのであろうか. 将来, 滞留時間をモデル化できれば, 労力を必要とする個体識別調査を行うこと無しに海岸のシステム特性を把握することが出来るようになるだろう. 例えば, 自然災害等で大量のゴミが沖合に流出した場合, 数値モデルと線形応答解析を組み合わせることで各海岸での漂着量とその時間変化を予測することが可能となる. これによって, 広域的な始点に立った効果的な対策を講じることが可能となるであろう.

海岸に漂着したゴミが再漂流するという事は, 当然, 滞留時間は波の統計量や波や風が引き起こす流れに依存していると推測される. また, Bowman et al. (1998)はイスラエルの地中海に面した9つの海岸で現地調査を行い, 漂着ゴミの収支を比較した. その比較結果から, 再漂流

量過程には、海岸の地形、特に海岸の幅や砂や石の粒径が重要であることを指摘した。粒径が大きい場合、ゴミが石にトラップされるため一旦漂着したゴミは再漂流し難いことを彼らは強調している。この他にも海岸の勾配は波の遡上高に影響しており、再漂流過程には重要な要素であると考えられる。また、和田浜海岸で実際に現地調査していた際、ペットボトル等の軽いゴミが風圧によって容易に移動し、一部は再漂流し、また一部は海岸の奥へと移動するところを目撃した。よって、ゴミの実質の密度（空隙を考慮した密度）も滞留時間に影響を与えていると推測される。即ち、

$$\tau_r = \tau_r(S(\omega), B, \gamma, d, \rho, \dots). \quad (24)$$

ここに、 $S(\omega)$ は沖合での波浪スペクトル、 B と γ はそれぞれ海岸の幅と傾斜、 d は粒径、 ρ はゴミの実質密度である。今後は、波浪の現地観測や数値計算、さらには地形測量等に基づいて滞留時間（あるいは輸送係数）のモデル化を行っていきたいと考えている。

5. 結論

本研究では東京都新島村の和田浜海岸で日本全国の多くの海岸に漂着している3種類の中国製漁業ブイを対象として個体識別調査を行い、調査結果を基に線形応答解析を行った。

個体識別調査は2011年9月から開始し、1~3ヶ月の間隔で現在も継続して実施している。調査ではブイ一つ一つに個体識別番号を記入するとともに、各々の漂着位置をGPSにより計測し記録している。これにより、調査と調査の間に沖合から海岸に新たに漂着したブイの数（新規漂着量）、その間に沖合に再漂流したブイの数（再漂流量）及び各調査時に海岸に存在していたブイの数（存在量）を取得することが可能になる。さらには各調査時に新たに漂着していたブイの群の残余数の時間変化を知ることができる。

調査の結果、3種類のブイの新規漂着量、再漂流量及び存在量の時間変化が類似していた。これは3種類のブイの和田浜海岸上での動きが似ていることを示している。そこで、これら3つのブイを区別することなく、残余率（各群の残余数/各群の初期漂着数）の時間変化を調べた。残余率の時間変化は指数関数でよく近似できることがわかった（ $R^2 = 0.867, P < 0.01$ ）。この残余関数から“3つのブイの和田浜海岸での”平均滞留時間を計算したところ、

7ヶ月であった。

和田浜海岸を線形システム（和田浜システム）とみなすと、この残余関数はインパルス応答に相当する。このインパルス応答をフーリエ変換し、和田浜システムのシステム特性（増幅特性及び位相特性）を得た。このシステム特性を知ることにより、様々なシナリオ（新規漂着量の時間変化）に対する海岸の応答（砂浜上のゴミの存在量）を予め評価することができる。逆に海岸でモニタリングされたゴミの存在量（例えば、Kataoka et al., 2012）から海岸沖合での漂流量（≈海岸への新規漂着量）を計算することもできる。推定された海岸沖合での漂流量を海洋数値モデルで予測・再現されたそれと比較することにより、システム特性（増幅特性や位相特性）を考慮した検証が可能となる。

また、和田浜システムの基礎方程式を明らかにした。和田浜システムの基礎方程式は単純な連続式で表現され、海岸上のゴミの存在量の時間変化は沖合からのゴミの新規漂着量と海岸から沖合への単位時間当たりの再漂流量の差で決まることがわかった。

本研究で示したのは“3種類の漁業用ブイの和田浜海岸での”平均滞留時間である。今後、この平均滞留時間を決める要素を詳細に調べ、滞留時間を簡易に計算できるモデルを構築していきたいと考えている。これにより本研究で実施したような個体識別調査を行わなくても海岸のシステム特性を把握することが可能となる。また、あらゆる海岸の平均滞留時間を得ることで、ゴミによる海岸環境への影響評価（例えば、海岸への鉛の溶出量）や重点的に清掃すべき海岸を科学的根拠に基づいて選定することが可能になると考えている。

(2013年5月31日受付)

謝辞

本研究は平成22~24年度環境省環境研究総合推進費（B-1007）、およびJSPS科研費25820234の助成を受けて行われている。また、本研究を実施するにあたり、井上隆信教授（豊橋技術科学大学）及び青木伸一教授（大阪大学）より多くの有益な助言を頂いた。また、現地観測では岡辺拓巳助教（豊橋技科大）、藤良太郎氏（国総研交流研究員（国際航業㈱））に協力頂いた。ここに記し深甚なる謝意を表する。

参考文献

- 日野幹雄(1977):スペクトル解析, 朝倉書店, 296 pp.
Barnes, D.K.A., Galgani, F., Thompson, R.C. and Barlaz, M. (2009): Accumulation and fragmentation of plastic

- debris in global environments, *Phil. Trans. R. Soc. B*, **364**, 1985–1998.
- Bowman, D., Manor-Smasonov, N. and Golik, A. (1998): Dynamics of Litter Pollution on Israeli Mediterranean Beaches: a Budgetary, Litter Flux Approach, *J. Coast. Res.*, **14**(2), 418–432.
- Derraik, J.G.B. (2002): The pollution of the marine environment by plastic debris: a review, *Mar. Pollut. Bull.*, **44**, 842–852.
- Garrity, S. D. and Levings, S. C. (1993): Marine Debris along the Caribbean coast of Panama, *Mar. Pollut. Bull.*, **26**, 317–324.
- Kako, S., Isobe, A., Magome, S., Hinata, H., Seno, S. and Kojima, A. (2011): Establishment of numerical beach-litter hindcast/forecast models: An application to Goto Islands, Japan, *Mar. Pollut. Bull.*, **62**, 293–302.
- Kataoka, T., Hinata, H. and Kako, S. (2012): A new technique for detecting colored macro plastic debris on beaches using webcam images and CIELUV, *Mar. Pollut. Bull.*, **64**, 1829–1836
- Maximenko, N., Hafner, J. and Niiler, P. (2012): Pathways of marine debris derived from trajectories of Lagrangian drifters, *Mar. Pollut. Bull.*, **65**, 51–62.
- Nakashima, E., Isobe, A., Kako, S., Itai, T. and Takahashi, S. (2012): Quantification of toxic metals derived from macroplastic litter on Ookushi Beach, Japan, *Environ. Sci. Technol.*, **46**, 10099–10105.
- Ryan, P. G., Moore, C. J., Van Franeker, J. A. and Moloney, C. L. (2009): Monitoring the abundance of plastic debris in the marine environment, *Phil. Trans. R. Soc. B*, **364**, 1999–2012.
- Takeoka, H. (1984): Fundamental concepts of exchange and transport time scales in a coastal sea, *Cont. Shelf Res.*, **3** (3), 311–236.
- Yoon, J.-H., Kawano, S. and Igawa, S. (2010): Modeling of marine litter drift and beaching in the Japan Sea, *Mar. Pollut. Bull.*, **60**, 448–463.

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 738

June 2013

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写のお問い合わせは

〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1
管理調整部企画調整課 電話:046-844-5019