

ISSN 1346-7301

国総研研究報告 第54号

平成 26 年 7 月

国土技術政策総合研究所 研究報告

RESEARCH REPORT of National Institute for Land and Infrastructure Management

No.54

July 2014

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

片岡智哉

Measurement and application of average residence time of marine plastics on beaches

Tomoya KATAOKA

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

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

片岡智哉*

要 旨

海岸における海洋プラスチックの滞留時間を把握することは、海洋プラスチック起因の環境リスクを評価し、効果的な海岸清掃を講じる上で、必要不可欠である。本研究では、海洋プラスチック起因の環境リスク評価に向けた第一歩として、東京都新島村和田浜海岸においてプラスチック製の漁業フロートの平均滞留時間の計測及びその決定要因の一つである再漂流過程の物理メカニズムの解明を行った。さらに、平均滞留時間を用いた海岸清掃効果の評価手法を提案し、効果的な海岸清掃について提言した。

和田浜海岸における漁業フロートの残余数は指数関数的に減少し、平均滞留時間は224日（208日-242日）であった。一方、海岸に残った漁業フロート（残余フロート）は、遡上イベントで沿岸方向に動き、海岸沖合にある潜堤背後に集積していた。沿岸方向の動きを一次元移流拡散方程式で表現して数値実験を行ったところ、潜堤背後から漁業フロートが沖合に再漂流することがわかった。潜堤背後は、沿岸流の収束域となり、沖合への戻り流れが発生する。したがって、漁業フロートは沿岸流によって輸送され、沿岸流の収束域である潜堤背後に集積し、その一部が潜堤背後で発生した沖合への戻り流れによって、再漂流した可能性が示唆された。

次に、漁業フロートの残余数が指数関数的に減少したことから、線形システム解析に基づいた海洋プラスチック起因の2つの環境リスク（海岸へのプラスチックに含有する重金属の溶出及びプラスチック微細片の発生）に対する海岸清掃効果の評価手法を開発した。海岸清掃効果は、海洋プラスチックの新規漂着量の変動周期（新規漂着周期）に対する滞留時間の比に強く依存し、その比が大きい程、海岸清掃効果は高くなる。また、海岸清掃効果は、清掃時期にも依存し、海岸における海洋プラスチックの存在量の極大時期で最も高い。したがって、効果的な海岸清掃を実施するため、海洋プラスチックの滞留時間、新規漂着周期及び存在量の極大時期を各海岸で計測することが重要である。

キーワード：海洋プラスチック、平均滞留時間、個体識別調査、海岸清掃効果、線形システム解析

*沿岸海洋・防災研究部 沿岸域システム研究室研究官
〒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

Measurement and application of average residence time of marine plastics on beaches

Tomoya KATAOKA*

Synopsis

It is crucial to understand average residence time of marine plastics on beaches to evaluate environmental risks caused by marine plastics. As the first step to evaluate the environmental risks, we measured the residence time of plastic fishery floats on Wadahama Beach in Niiijima Island, Japan, and investigated the physical mechanism of the important process determining the average residence time, that is how the floats were backwashed offshore from Wadahama Beach. And, we suggested a method of evaluating beach cleanup effects (BCEs), and established strategies for effective beach cleanup.

The population of remnant floats decreased exponentially. The average residence time of the floats on the beaches was calculated from the exponential decay, which is 224 days (208–242 days). The floats on the southern (northern) area were moved northward (southward) in the alongshore direction by the swash of wind waves. Consequently, the floats were highly concentrated on the area corresponding to the lee of the low-crested structures (LCSs) offshore from Wadahama Beach. We also attempted to identify where the floats are backwashed offshore (backwash transect) by solving a one-dimensional advection-diffusion equation for the alongshore movement of the floats. The advection-diffusion solution significantly identifies the lee of LCSs as the possible backwash transects. This demonstrates that the floats are transported in the alongshore direction by longshore currents, and are backwashed offshore in the transport process by return flows generated on the lee of LCSs by breaking waves.

Considering beaches as a time-invariant linear system determined by the average residence time of marine plastics on the beach, we suggest a method for evaluating BCEs for beach pollution from toxic metals contained in marine plastics, and fragmentation of marine plastics on the beach. Considering that various beaches have different residence times, BCEs depend strongly on the ratio of the average residence time to the period of temporal variability of the input flux of marine plastics (plastic input period), and increase as the ratio becomes greater. Furthermore, the BCEs also depend on the timing of beach cleanups: beach cleanups are more effective if done when the remnants of plastics reach the local maximum (peak time). Therefore, it is crucial to understand the three factors for effective cleanups: the average residence time, the plastic input period and the peak time.

Keywords: marine plastics, average residence time, mark-recapture experiment, beach cleanup effects, linear system analysis

*Researcher of Coastal Zone Systems Division , Coastal, Marine and Disaster Prevention Department
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. 序論	1
1.1 海洋プラスチック汚染	1
1.2 海岸における海洋プラスチックの滞留時間	2
1.3 研究目的	2
2. 海岸における海洋プラスチックの滞留時間と動きの計測	4
2.1 はじめに	4
2.2 個体識別調査法と使用データ	4
2.3 個体識別調査の結果	7
2.4 漁業フロートの減少率, 集積率, 動きに関する考察	14
2.5 2章のまとめ	20
3. 和田浜海岸での海洋プラスチックの滞留時間を決める物理メカニズム	22
3.1 はじめに	22
3.2 再漂流区画の特定方法	22
3.3 和田浜海岸における再漂流区画	25
3.4 再漂流過程と滞留時間に関する考察	27
3.5 3章のまとめ	31
4. 平均滞留時間を用いて海岸清掃効果の評価	33
4.1 はじめに	33
4.2 海岸清掃効果の評価方法	33
4.3 線形応答と海岸清掃効果の滞留時間依存性	36
4.4 海岸清掃効果に関する考察	40
4.5 4章のまとめ	42
5. 結論	43
謝辞	44
参考文献	44
付録 A 3次スプライン補間法	47

1. 序論

1.1 海洋プラスチック汚染

世界中の海岸には多種多様の漂着物が存在し、流木や海草などの自然起源物は元より、ガラス製品やプラスチック製品などの人為起源物も数多く漂着する。1990年代より世界中の研究者が海岸での漂着物調査を行ったところ、漂着物の半数以上はプラスチック製品であった (Derraik, 2002)。また、海洋を漂流し、海岸に漂着したプラスチック (以下、海洋プラスチック) による様々な環境リスクが指摘され始め、現在では地球規模の環境問題として広く認識されている (The NOAA Marine Debris Program: <http://marinedebris.noaa.gov/>)。

プラスチックは軽く、頑丈で、成型が容易であるため、1970年代頃より大量生産され、2010年には世界年間生産量が2億6500万tに上った (Plastic Europe, 2011)。生産量の増大に比例して、我々の生活の中で多くのプラスチックが利活用されるようになった。プラスチックにより我々の生活の利便性が向上する一方で、不要になったプラスチック製品の不適切な処理が、海洋中にプラスチックを流出させる結果を招く。海洋へのプラスチックの流出原因は、船舶からの海洋投棄だけではない。海洋環境中に存在するプラスチックの多くは、陸域で不法投棄され、河川を経由して海洋に流出した陸域起因のプラスチックである (Ryan et al., 2009)。このような経緯で海洋に流出したプラスチックは、海流に乗って輸送され、流出した場所から遠く離れた海域や海岸に集積する (例えば, Ryan et al., 2009; Barnes et al., 2009; Law et al., 2010)。

海域や海岸に集積した海洋プラスチックは、海洋生物に危害を加える。例えば、プラスチック製の漁網や釣り糸が絡まり、身動きがとれなくなったため、死亡した海亀が発見された (例えば, Gregory, 2009)。また、多くの海鳥の体内からプラスチックが発見され、海鳥が食餌として誤飲していることがわかった (例えば, Moser and Lee, 1992; Shaw and Day, 1994; Gregory, 2009; Boerger et al., 2010; van Franeker et al., 2011)。誤飲したプラスチックは消化されずに体内に蓄積していくため、海鳥は食欲をなくし、栄養失調を引き起こす (Derraik, 2002)。このような海洋プラスチックによる海洋生物への危害が明らかになってきたのは、1990年以降であった (Gregory, 2009)。

2000年以降になると、海洋プラスチック起因の海洋環境及び海洋生態系の化学物質汚染が危惧され始めた。海洋プラスチックは、様々な過程で化学物質を含有する。

例えば、鉛 ($\text{Pb}(\text{C}_{18}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$) は、製造過程において PVC ポリマーを材料とするプラスチック製品の安定剤として混入される (Minagawa, 1996)。一方、鉛は生物に対して有害であるため、ヨーロッパ連合 (EU) は、鉛を "Restriction of Hazardous Substances (RoHS)" に指定して、その混入量に規制を設けている (EU, 2003)。近年、海岸に漂着した PVC フロートから製造過程で混入した鉛が海岸に溶出し、海岸環境を汚染する可能性が示唆された (Nakashima et al., 2012)。また、海洋プラスチックは、ストックホルム条約で有害性が認められた残留性有機汚染物質 (Persistent Organic Pollutants; 以下, POPs) を吸着させる性質をもつ (Mato et al., 2001)。POPs は、世界中の海域において低濃度に分布しており、疎水性をもつため、海洋プラスチックの表面に高濃度で集積する (Mato et al., 2001)。Takada (2006) は、世界中の海岸に漂着したプラスチック製造の中間材料であるレジンペレットを集め、様々な POPs が高濃度に集積していたことを明らかにした (Ogata et al., 2009)。最近では、海洋プラスチックは、海域におけるこれらの有害化学物質の輸送媒体として機能している可能性が指摘されている (Mato et al., 2001; Nakashima et al., 2012)。さらに、これら有害化学物質の含有・付着した海洋プラスチックを海洋生物が体内に取り込むことで海洋生態系における食物連鎖への悪影響が懸念されている (Thompson et al., 2004)。

海洋プラスチックは、耐久性が高いため、容易に分解されず、寿命が長い。そのため、海洋に流出した後、海流に乗って長距離を輸送される。多くの海洋学者は、海洋数値モデルを用いて海洋での漂流物の動態を調べている (例えば, Kubota, 1994; Kako et al., 2011; Maximenko et al., 2012)。Kubota (1994) は、地衡流に風で駆動される Ekman Drift と波で駆動される Stokes Drift を加えた流動モデルを用いて、北太平洋のハワイ諸島の北西部周辺海域に漂流物が集積することを明らかにした。実際に、浮遊ブイの軌跡からこの海域に漂流物が集積することが確認されている (Maximenko et al., 2012)。

一方、海洋プラスチックは、この輸送過程において紫外線、熱や波などによる物理的外力により劣化していき、macro (> 20 mm), meso (2–20 mm), micro (0.06–2 mm), nano (< 0.06 mm) の大きさになるまで微細化する (Gregory and Andrady, 2003)。これらの海洋プラスチックのサイズについては様々な定義があるが、本研究では Gregory and Andrady (2003) 及び Ryan et al. (2009) に基づいて定義した。海洋プラスチックの微細片 (micro-plastics 及び nano-plastics, 以下、微細プラスチック) は、すで

に世界中の海洋や海岸で目撃されている（例えば, Barnes et al., 2009; Cooper and Corcoran, 2010; Law et al., 2010）．例えば, Cooper and Corcoran (2010)は、漂流物の集積海域であるハワイ諸島に、多くの微細プラスチックが漂着していることを明らかにした．大陸から遠く離れたハワイ諸島では、長距離を漂流して漂着するため、微細プラスチックの集積地であるともいえる．微細プラスチックは、海洋環境中から除去することは困難である．さらに、海洋生物の体内に取り込まれやすいため、海洋プラスチックの微細片の増加は、海洋生態系への危害を加速させる結果を招くであろう．

1.2 海岸における海洋プラスチックの滞留時間

海洋プラスチックは、ある海岸に漂着した後、その海岸に居続けるのではなく、沖合に再漂流する．Bowman et al. (1998)は、地中海に面したイスラエル沿岸の6つの海岸における漂着物（自然起源物及び人為起源物）の収支を調べた．彼らは、高波浪が発生した時期に海岸からなくなった漂着物の量（再漂流量）が多いことから、漂着物が波・風作用によって沖合に再漂流することを示唆した．

本研究では、海洋プラスチックが海岸に漂着してから再漂流するまでの時間を滞留時間と称する．現時点で、滞留時間に着目した研究例は、ほとんど存在しない．Garrry and Levings (1993)は、カリブ海に面したパナマ沿岸の4海岸で1×50 mの区画を設定し、区画内における漂着物の残存量の時間変化を調べた．この結果に基づいて、区画内における漂着物の滞留時間が1年未満であることを言及した．Kataoka et al. (2013a)は、東京都新島村和田浜海岸においてプラスチック製の漁業用フロートを対象にその残余数を調べ、海岸における漁業フロートの滞留時間を明らかにした．

滞留時間を把握することには、海洋プラスチックの真の輸送過程の解明、微細プラスチックの発生量の評価及び海洋プラスチックの効果的な削減方策の検討といった3つの意義がある．海洋プラスチックは、様々な海岸で漂着－再漂流過程を繰り返しながら、海流によって輸送されていくため、海岸での滞留時間を無視して真の輸送過程の解明は困難である．前述のとおり、現時点で海洋プラスチックの輸送過程に関する研究例は多くある（例えば, Kako et al., 2011; Maximenko et al., 2012）が、海浜近くの漂着－再漂流過程を考慮している研究例はほとんどない．また、海洋プラスチックは、海岸からの熱や太陽光に含まれる紫外線の影響により、著しく劣化が進行する．その劣化速度は海上を漂流するよりも海岸に漂

着する方が速い（Andrady, 2011）．したがって、海岸での海洋プラスチックの滞留時間が、微細プラスチックの発生に係る重要なパラメータであると考えられる．さらに、滞留時間を把握することで、海岸清掃の効果（海岸環境への負荷軽減）を評価することが可能になると考えられる．さらに、この評価に基づいた戦略的な海岸清掃の方策（例えば、い・つどこで海岸清掃をやるべきか）を検討することが可能となるであろう．例えば, Kako et al. (2010)は、長崎県五島市奈留町大串海岸でWebカメラを用いて海洋プラスチックの漂着量の連続モニタリングを実施し、漂着量は1ヶ月未満の周期で大きく増減することを明らかにした．海洋プラスチックの漂着量は、沖合から漂着する量と沖合に再漂流する量の収支で決まると考えられる．特に、沖合に再漂流する量は、海岸での滞留時間に依存すると考えられ、滞留時間が長い海岸ほど海洋プラスチックは溜まり易いであろう．したがって、より多くのゴミを除去可能な効果的な海岸清掃を実施するために、海岸での海洋プラスチックの滞留時間を把握することが必要不可欠となる．

また、一般に、海洋プラスチックの海洋環境からの除去は、海岸清掃に依存している．国土交通省や港湾管理者が我が国の閉鎖性内湾域において海洋環境の保全及び船舶の航行安全に資するため、清掃船を用いたプラスチック等の人為起源及び流木等の自然起源の漂流物の洋上回収が実施されている（Kataoka et al., 2013b）．しかし、洋上回収は、海岸清掃に比べて、少ない労力で海洋プラスチックを回収できるが、清掃船の維持管理に係るコストが必要となる上、活動主体も限定される．これに対して、海岸清掃は、活動主体が限定されず、だれもが海洋プラスチックの除去に貢献することができる．すでに、米国 NGO の Ocean Conservancy は、1990年代頃から世界中のボランティアを募って年一回の定期的な海岸清掃を実施している．したがって、海岸清掃の効果を定量的に評価し、戦略的な海岸清掃を実施することで、海洋プラスチックによる海洋環境への負荷を効果的に軽減できると考えられる．

1.3 研究目的

本研究では、海岸に漂着した海洋プラスチックの滞留時間とその決定要因を明らかにし、滞留時間を考慮した効果的な海岸清掃方策について提言することを目的とする．本研究のフローを図-1.1に示す．

まず第2章では、Kataoka et al. (2013a)に基づいて海岸における海洋プラスチックの滞留時間を計測し、滞留時間の決定要因を明らかにするため、海岸での海洋プラス

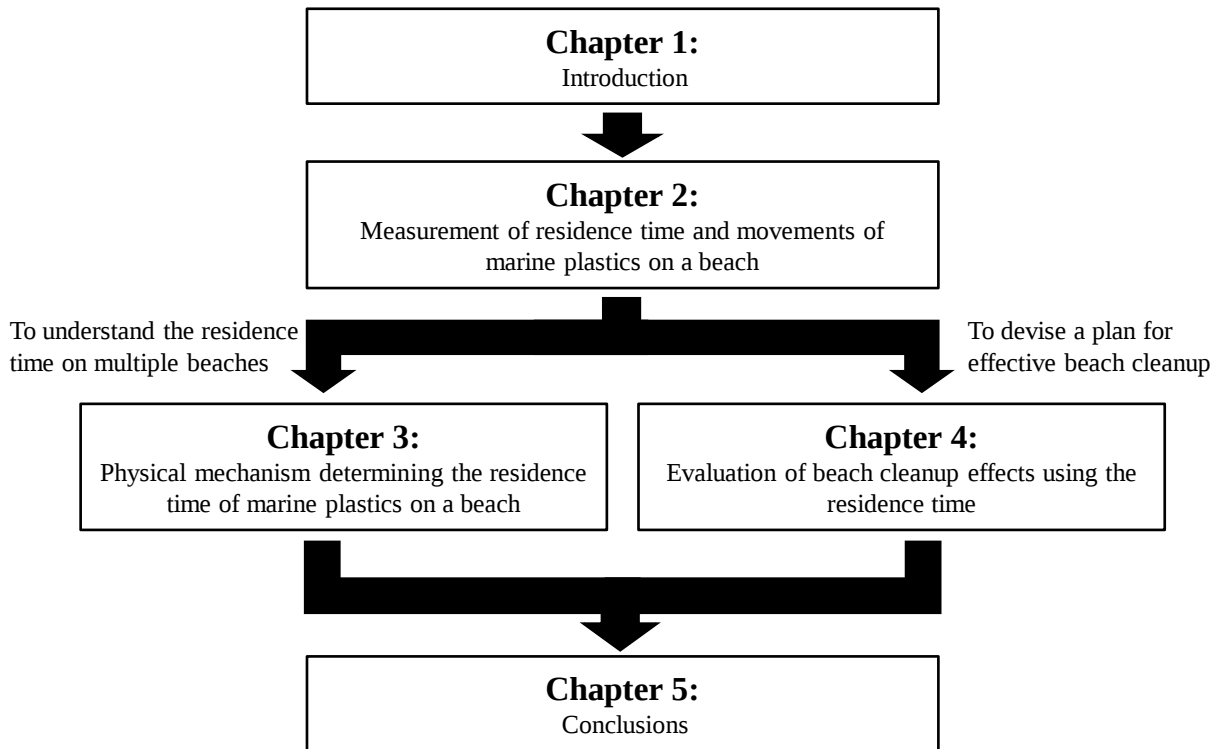


図-1.1 本研究のフロー

チックの動きを計測する。海岸における海洋プラスチックの漂着量は、再漂流することで、減少していくと考えられる。そこで、Takeoka (1984)が提案した内湾域における海水交換の基本的概念に基づき、海岸における海洋プラスチックの残余数の時間変化を妥当な関数で近似し、海岸での海洋プラスチックの残余関数を決めることで、滞留時間を明らかにすることを試みる。さらに、単に海岸での海洋プラスチックの滞留時間を計るだけでなく、滞留時間を決めている物理メカニズムを明らかにするため、再漂流して海岸からなくなるまでの海洋プラスチックの動きを調べる。

続く第3章では、第2章で調べた海洋プラスチックの動きに基づき、滞留時間の決定要因の一つである再漂流過程の物理メカニズムを明らかにする。滞留時間は、海浜地形や風及び波浪の影響を受け、海岸に応じて異なると考えられる。そのため、単に一つの海岸で滞留時間を計測しただけでは、本質的に意味がない。世界中の様々な海岸で滞留時間を計測して初めて戦略的な海岸清掃方策を検討することが可能になる。滞留時間を計測するために、多大な労力を必要とする現地調査を多地点で行うことは困難であるが、滞留時間を決める再漂流過程の物理メカニズムを明らかにすることで、将来、海浜地形や波浪統計量をパラメータとして滞留時間を推定することが可能になると考えられる。

第4章では、2つの海岸清掃効果（すなわち、海洋プラスチックに含有する重金属等の海岸環境への溶出量及び海洋プラスチックの微細片の発生量の低減）に着目し、第2章で得られた残余関数に基づき、その評価方法を提案する。さらに、滞留時間によるこれらの海岸清掃効果の依存性について調べ、効果的な海岸清掃方策について提言する。

最後の第5章では本研究で得られた知見について総括する。

2. 海岸における海洋プラスチックの滞留時間と動きの計測

2.1 はじめに

海岸での滞留時間を計測することは、海洋プラスチックによる海洋環境への負荷を評価するのに必要不可欠である。例えば、Andrady (2011)は、海洋プラスチックは海洋中を漂流しているよりも海岸に漂着している方が紫外線や熱により著しく劣化が進行するため、海岸が微細プラスチックの主要な発生源であると指摘した。

しかしながら、現時点で海岸での海洋プラスチックの滞留時間の計測を目的とした研究例はほとんどない。世界中の海岸で行われている多くの現地調査は、海洋プラスチックの漂着量及び種類を区別し、それらの時空間的な特性を調べるものである（例えば、Walker et al., 1997; Williams and Tudor, 2001; Kusui and Noda, 2003; Ivar do Sul and Costa, 2007; Ryan et al., 2009; Ribic et al., 2012）。これらの調査は、長期的に海洋プラスチックの漂着量やその種類を調べていくことで、漂着量の時間変動のトレンドを明らかにするものである。

滞留時間を計測するためには、海洋プラスチックの残存量の時間変化を知ることが必要である。そこで、海洋プラスチックの個体識別調査（mark-recapture (MR) experiment）を実施する。個体識別調査は、主として動物や魚の生存数及び繁殖数を調べ、これらに関連したパラメータを決めるために実施されている。個体識別調査を海岸における漂着物に関する研究に適用した研究例がいくつかある（例えば、Garrity and Levings, 1993; Bowman et al., 1998; William and Tudor, 2001）。これらの調査では、研究対象とした漂着物に調査時毎に異なる色のスプレーを塗布しながら、海岸をいくつかの区画に区切り、各区画における漂着量を記録した。この調査は、各調査時に新規に発見した漂着物を1つの群として、各群に属する漂着物の残存量や各群の漂着物の漂着区画の時間変化を把握することが可能になる。

Garrity and Levings (1993)は、カリブ海沿岸にあるパナマの19海岸で1 m × 50 mの調査区画を海岸に設け、個体識別調査を実施した。海岸における漂着物の滞留時間が1年未満であり、陸向き強風とこれに伴う高波浪により、漂着物の減少量は、雨季（5月–11月）よりも乾季（12月–4月）の方が大きいことを指摘した。また、地中海沿岸にあるイスラエルの6海岸で実施した個体識別調査に基づき、Bowman et al. (1998)は、海岸後浜に残る漂着物の量は海浜地形（例えば、海岸幅、砂の粒径）が寄与し

ていることを指摘した。William and Tudor (2001)は、海岸表面における滞留時間は、漂着物の大きさと海岸の砂の粒径の大小で決まると指摘した。例えば、砂の粒径よりも小さい漂着物は、砂の中に埋まってしまうため、海岸表面における滞留時間は短くなることを指摘した。

本章は、前報であるKataoka et al. (2013a)に最新の調査データを加えた海岸における海洋プラスチックの滞留時間を明らかにし、滞留時間の決定要因を調べるため、海洋プラスチックが漂着してから再漂流するまでの動きを明らかにすることを目的とする。

2.2 個体識別調査法と使用データ

(1) 研究フィールド

和田浜海岸は、東京から南に約150 km離れた伊豆七島の1つである新島西岸に位置している（図-2.1a）。黒潮は、非大蛇行接岸流路及び大蛇行流路を取るとき、新島の周辺海域を通る（例えば、Hinata et al., 2005）。和田浜海岸は、海岸延長が900 m、海岸幅が30–50 mであり、平均粒径（ d_{50} ）が1.43 mmの粗粒砂海岸である。海岸は、海水浴場等での利用がなく、年間通して人の出入りはほとんどない。海岸の背後には、標高432 mの宮塚山があり、東風が遮られている。夏から秋に発生する台風や秋から冬の北西季節風の影響により、強風及びうねりを伴う高波浪が来襲する。和田浜海岸の後浜の海浜勾配（ $\tan \beta$ ）は、0.09–0.18（すなわち、 $\beta = 5^\circ$ – 10° ）であり、後浜背後にある $\tan \beta = 0.70$ （すなわち、 $\beta = 35^\circ$ ）の浜崖により後背地につながっている。この急勾配の浜崖により、基本的に風圧の影響を受けにくい海洋プラスチック（例えば、PETボトルの蓋）は、浜崖で阻害されるため、後背地に移動することはほとんどない。実際に、PETボトルやビニール袋など風圧の影響を強く受ける海洋プラスチックは和田浜海岸の後背地で見つかっているが、PETボトルの蓋など風圧の影響を受けにくい海洋プラスチックは、打ち上がっていなかった。また、和田浜海岸の汀線から100 m沖合において、東京都が4つの潜堤（潜堤延長: 250 m, 250 m, 100 m, 150 m）を建設している（図-2.1b）。潜堤幅は35 mであり、潜堤上面は、平均水面（Mean Water Level, 以下、MWL）下1.5 mに位置する。

(2) 研究対象プラスチック

個体識別調査では、3種類のプラスチック製漁業用フロートを対象とする（図-2.1c）。Type 1の大きさ及び重さは、13.0 cm（長さ）×2.4 cm（径）及び38.8±5.4 gであり、Type 2の大きさ及び重さは、13.1 cm（長さ）×7.8

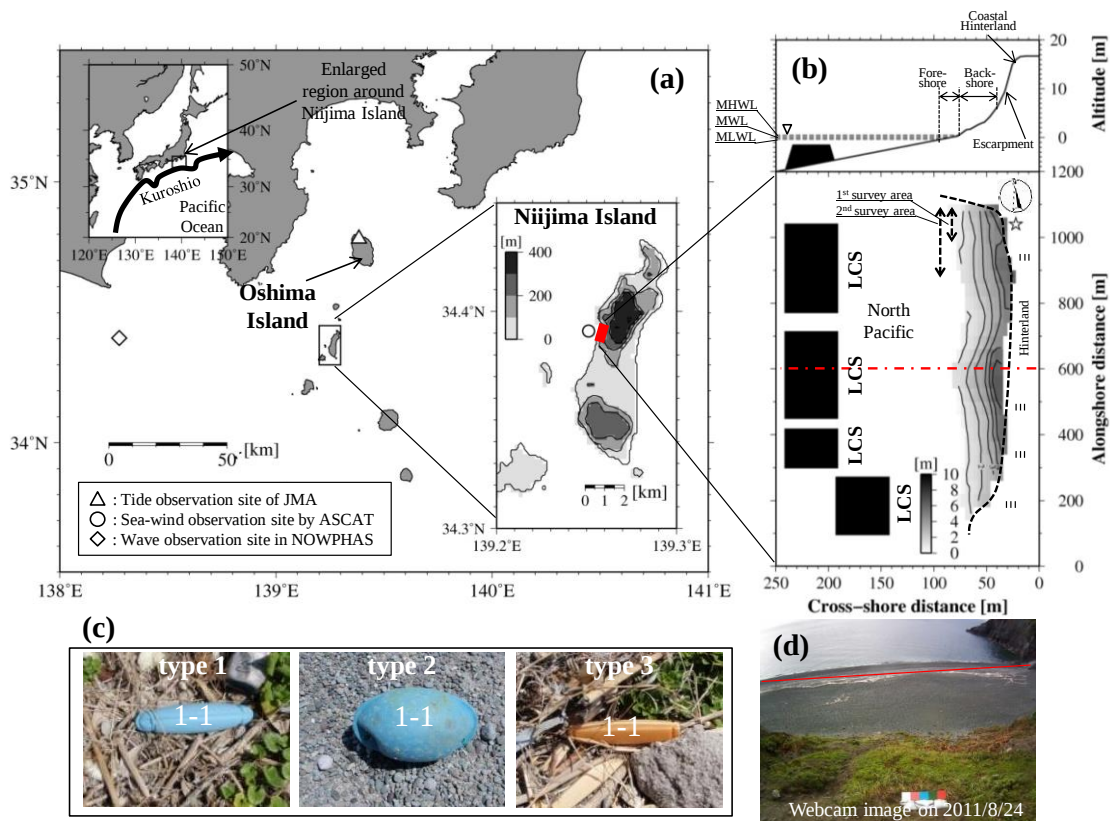


図-2.1 研究フィールドと研究対象プラスチック。

(a) 新島及び観測点 (△: 大島潮位観測所 (気象庁); ○: 海上風 (ASCAT); ◇: 御前崎沖 GPS 波浪計 (NOWPHAS)) の位置。(a)内の新島拡大図にある濃淡は島内の標高を意味する。(b) 和田浜海岸の拡大図であり、海浜地形及び Web カメラの設置地点を、それぞれ濃淡及び☆印で示す。和田浜海岸は海岸幅に対して延長が長いので、岸沖方向距離は沿岸方向距離に対して 3.2 倍大きくしている。(b)の上図は、海岸の断面図 (下図の赤い一点鎖線) であり、沖合にある黒いボックスは、潜堤 (Low-Crested Structures: LCSs) を意味する。(c) 研究対象プラスチックの写真。(d) 2011 年 8 月 24 日に撮影された Web カメラ画像。赤い実線は、海岸の後浜と前浜の境界線を意味する。

cm (径) 及び 134.0 ± 15.6 g であり、Type 3 の大きさ及び重さは 11.0 cm (長さ) $\times$ 1.9 cm (径) 及び 12.8 ± 0.7 g である。これらのフロートを研究対象プラスチックとして選出した理由は、3 つある。第一に、これらの漁業フロートは、冬季に強い北西風が吹いたとしてもほとんど動かず、風圧の影響を受けにくいためである。風圧の影響を受けやすい海洋プラスチック (例えば、PET ボトル) は、容易に浜崖を超えて後背地に上がるであろう。風圧の影響を受けにくい海洋プラスチックを対象とすることで、和田浜海岸から無くなったフロートは、再漂流したと考えることができる。実際に、各調査時に後背地で研究対象の漁業フロートを観測されたことはなく、浜崖を超えて移動することはほとんどないと推察される。第二に、これらの漁業フロートは、日本全国で観測されているためである。広域に漂着している海洋プラスチックを調査対象とすることで、和田浜海岸の滞留時間と他地点のそれを比較することができる。第三に、Type 1 には、

製造過程で安定剤として添加された鉛を多く含み、その含有量が EU の定める規制値を超えていたと指摘されたためである (Nakashima et al., 2012)。さらに、Nakashima et al. (2012) は、含有する鉛がフロート表面を囲む雨水に溶け出し、その汚染水が海岸に溶出する可能性があることを指摘した。環境への負荷が大きい海洋プラスチックを対象とすることで、環境リスク (例えば、海岸への鉛の溶出量) の評価につながる。なお、現時点で Type 2 及び 3 に重金属が多く含有しているかについては、明らかになっていない。

(3) 個体識別調査

滞留時間を計測し、海岸上でのフロートの動きを把握するため、2011 年 9 月から 1-3 ヶ月の頻度で個体識別調査を実施した。一回目 (調査日: 2011 年 9 月 30 日) 及び二回目 (調査日: 2011 年 10 月 27 日) の個体識別調査では、それぞれ和田浜海岸北部の 100 m 及び 200 m の調査

範囲（図-2. 1b）で実施した。それ以降の調査では、和田浜海岸全延長を対象として個体識別調査を行った。各調査では、3種類の漁業フロートに調査回数と個体番号からなる個体識別番号を付与し（図-2. 1c）、元の漂着位置に戻した。さらに、漂着位置を測定誤差が ± 3 m（水平）のハンディ GPS（GPSMAP 60CSx, GARMIN）で測位した。各調査時には、個体識別番号を付与していないフロートが見つからなくなるまで、限無く搜索した。

この個体識別調査を定期的に実施することで、漁業フロートの漂着量の時系列、集積率、及び動きを取得することが可能となる。フロートの漂着量の時系列は、前回から今回の調査間で新たに漂着していたフロート（新規漂着; immigration）、海岸に残ったフロート（残余; remnant）、再漂流して無くなったフロート（再漂流; emigration）、埋没等により一度無くなったが、再出現したフロート（再出現; reemergence）の4つの状態に分類して計算した。これに加えて、滞留時間を計測するため、各調査時の新規漂着フロートを一つの群とみなし、各群の新規漂着数に対する残余数の比、すなわち、各群の残余率の時系列を計算した。

本研究では、海岸を沿岸及び岸沖の各方向に対して100 m及び5 m間隔の区画に分割して、各区画におけるフロートの集積率をハンディ GPS で測位した緯度経度に基づいて計算した。各区画の集積率は、海岸全体の漂着数に対する各区画の漂着数の比で計算される。ハンディ GPS では、精度よく漂着高を計測することはできない。そこで、後述する海浜地形を得るためにリアルタイムキネマティック（Real-Time Kinematic, 以下、RTK）GPS（Trimble 5800 II, Trimble）で測位した標高データを用いて（2.2 節 (4)参照）ハンディ GPS で測位した漂着位置に相当する漂着高を決め、鉛直方向の集積率を0.5 m間隔で計算した。以上のようにして、沿岸、岸沖及び鉛直の3方向におけるフロートの集積率を3つの状態（新規漂着、再漂流、及び残余）に対して計算した。再漂流フロートの集積率は、再漂流する直前の調査時に発見したフロートの漂着位置に基づいて計算した。

さらに、ハンディ GPS で測位した漂着位置に基づき、調査間における残余フロートの移動距離を計算することで、沿岸及び岸沖のそれぞれの方向における動きを調べた。また、集積率と同様に、ハンディ GPS 及び RTKGPS で測位した漂着位置と標高を用いて、調査間の移動距離を計算することで鉛直方向の残余フロートの動きを調べた。

(4) 海浜地形測量

RTKGPS を用いたポイント測量に基づき、和田浜海岸の海浜地形を測量した。ポイント測量では、沿岸及び岸沖方向において、それぞれ10 m及び5 m間隔を目安に緯度経度及び標高を計測した。RTKGPS の計測誤差は、水平及び鉛直方向ともに、 ± 5 mmである。

各調査時には、任意点でポイント測量しており、測位点は等間隔ではない。そこで、他調査時に測量した海浜地形データを比較するため、最近傍法及びスプライン関数を用いて沿岸及び岸沖方向に5 mの等間隔な格子点における標高データセットを作成した。まず、格子点から半径 R の円内に含まれる測位点までの距離に応じた重み関数 w_i を適用した最近傍法で、5 m 格子点の標高値を内挿した。

$$\bar{z} = \sum_{i=1}^n z_i w_i / \sum_{i=1}^n w_i, \quad w_i = (1 + 9r_i^2 / R^2)^{-1} \quad (2.1)$$

ここで、 $\bar{z}$ 及び z_i は、それぞれ各格子点において内挿された標高値及び半径 R の円内に含まれる RTKGPS での測位点における標高値を示す。沿岸及び岸沖方向の測位点間隔が、それぞれ10 m及び5 mであることを加味し、半径 R を7 mとした。 n は半径 R の円内にある測位点の数である。

最近傍法では、半径 R 内に既知の測位点がなければ、内挿することができない。そこで、最近傍法で計算された格子点を既知点として用い、3次スプライン補間法（McKinley and Levine, 1998）を沿岸及び岸沖のそれぞれの方向に対して適用することで、最近傍法で計算できなかった格子点における標高値を内挿した。3次スプライン補間法の詳細については、付録 A を参照されたい。

(5) 波浪、海上風及び潮位データ

個体識別調査で得られたフロートの漂着量の変動及び動きの要因を考察するため、波浪、風及び潮位の観測データを用いた。

本研究で対象とした漁業フロートは、風圧の影響を受けにくい、遡上した波が漂着位置に到達しない限り、動くことはない。そこで、2011年8月に和田浜海岸北部（図-2. 1aの☆印）に設置した Web カメラで撮影された画像データ（図-2. 1d）を用いて、調査間における遡上イベントの回数をカウントした。Web カメラはタイマスイッチで制御されており、毎日7:00-15:00の間、2時間毎に稼働して海岸を撮影している。Web カメラの画像に前浜と後浜の境界線（図-2. 1d中の赤線）を決め、この線を遡上した波が越える時を遡上イベントとして定義した。得られた遡上イベント回数を調査間の日数で除することで遡上イベントの発生確率を計算した。

Web カメラ画像による遡上イベントの特定は、遡上高等の詳細については不明である。そこで、国土交通省が運営する Nationwide Ocean Wave information network for Ports and Harbours (NOWPHAS) システムにおいて新島から西方に 90 km の静岡県御前崎沖合 (図-2.1a の◇印) で観測された波浪データを用いて次式で遡上高 (Runup Height) を計算した。

$$\frac{R}{H_0} = \xi \quad (2.2)$$

ここで、 R は平均水面 (MWL) からの遡上高であり、 H_0 は沖合有義波高である。 ξ は次式で定義されるイリバーレン数である (Battjes, 1974)。

$$\xi = \frac{\tan \beta}{(H_0/L_0)^{1/2}} \quad (2.3)$$

ここで、 $\tan \beta$ は海浜勾配であり、海浜地形測量に基づき、0.14 とした。 L_0 は次式で与えられる沖合波長である。

$$L_0 = (g/2\pi)T_0^2, \quad (2.4)$$

ここで、 g は重力加速度 (9.81 m s^{-2})、 T_0 は有義周期である。イリバーレン数は、波の沖合波形勾配の平方根に対する海浜勾配の比であり、波浪条件に対して動的な海浜地形の陰しさとして解釈できる。

これら波浪データに加えて、欧州気象衛星開発機構 (European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT)) が運営する Meteorological Operational Polar (METOP) 人工衛星に搭載された Advanced Scatterometer (ASCAT) で計測された海上風データを用いた。ASCAT によって全球の海上風データが、経度及び緯度方向ともに 0.25° 間隔で取得されており、インターネットを介して無償で公開されている (http://podaac.jpl.nasa.gov/DATA_CATALOG/ascatinfo.html)。ただし、計測範囲は、人工衛星の軌道に依存するため、未計測領域が存在する。そこで、Kako et al. (2011) が ASCAT で計測された海上風データに最適内挿法を適用したデータセットを用いて、和田浜海岸沖合 (図-2.1a 中の○印) の格子点における海上風データを用いた。

また、残余フロートの新規漂着量の時間変動と黒潮の流路変動との関係を調べるため、気象庁により新島から北方約 50 km に位置する大島の岡田港 (図-2.1a の△印) で 2011 年 9 月から 2013 年 5 月に観測された潮位データを用いた。観測された潮位データは大気圧の影響を受けている。そこで、大島特別地域気象観測所で計測された海面気圧を用いて、潮位データの気圧補正を行った。気圧補正量 ΔH は、標準大気圧 P_0 ($=1013 \text{ hPa}$) との気圧差との静力学的な関係に基づき、次式で表される。

$$\Delta H = (P(t) - P_0) / \rho g \quad (2.5)$$

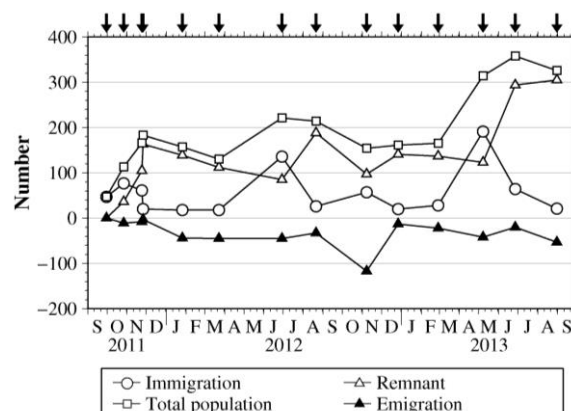


図-2.2 漁業フロートの新規漂着量、残余量、存在量及び再漂流量の時系列変動。

図中の記号の意味は図下のボックス内に示す。図上の黒矢印は、個体識別調査実施日を意味する。

ここで、 ρ 及び g は、それぞれ海水密度 (1.03 g cm^{-3}) 及び重力加速度 (9.81 m s^{-2}) であり、 $P(t)$ は大島特別地域気象観測所における海面気圧である。補正した潮位データから平均満潮位 (Mean High Water Level, 以下, MHWL), 平均水位 (Mean Water Level, 以下, MWL) 及び平均干潮位 (Mean Low Water Level, 以下, MLWL) を計算した。

2.3 個体識別調査の結果

(1) 漁業フロートの漂着量と滞留時間

個体識別調査で得られた各状態に応じた漁業フロートの各種数量を表-2.1 に示す。存在量 (total population) は、新規漂着量 (immigration) と残余量 (remnant) の合計を意味する。図-2.2 は、漁業フロート 3 種の新規漂着量、残余量、存在量及び再漂流量の時系列である。新規漂着量は、2011 年 10 月、2012 年 6 月及び 2013 年 5 月に極大、再漂流量は、2012 年 11 月に極大となった。その結果、存在量は、2011 年 11 月、2012 年 6 月及び 2013 年 6 月に極大となった。図-2.2 は、3 種の漁業フロートの合計値の時系列であるが、漁業フロート各種の時系列にも同様の変動パターンが確認された (表-2.1)。新規漂着量の変動パターンが一致することは、3 種の漁業フロートの沖合での挙動や分布が似通っていることを意味する。また、再漂流量の変動パターンの類似は、海岸から沖合への再漂流過程も似通っていることを意味する。したがって、漁業フロート 3 種を区別することなく、以後の解析を行った。

漁業フロートの各群 (各調査時に発見した新規漂着フロート) の残余量の時間変化を表-2.1 に示す。各調査時には、存在量に対して少量 (平均 6%) ではあるが、再

表 2.1 各調査で得られた漁業フロートの各状態に応じた数量と各群の残余数。
各群の残余数の括弧内の数字は、再出現したフロートの数量を意味する。各群の残余数には、再出現したフロートの数量をそれ以前の残余数に加算した。第2回調査における第1回調査の残余数 (* 印) は、和田浜海岸北部の200mの範囲内の数値であるため、図-2.3及び図-2.4においては無視する。

Experiment No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Experiment date	2011/09/30	2011/10/27	2011/11/24	2011/11/26	2012/01/26	2012/03/23	2012/06/29	2012/08/21	2012/11/08	2012/12/27	2013/02/27	2013/05/08	2013/06/27	2013/08/31
Type 1														
Immigration	10	4	9	1	1	0	14	4	2	2	4	24	8	3
Remnant	0	8	11	20	21	19	14	27	14	16	12	10	34	34
Total population	10	12	20	21	22	19	28	31	16	18	16	34	42	37
Emigration	0	2	1	0	0	3	5	1	17	0	5	6	0	8
Reemergence	0	0	0	0	1	0	4	0	3	3	1	3	1	1
Type 2														
Immigration	18	30	31	3	8	4	29	7	16	3	8	65	19	11
Remnant	0	14	42	72	59	49	40	56	29	42	36	31	92	108
Total population	18	44	73	75	67	53	69	63	45	45	44	96	111	119
Emigration	0	4	2	1	16	18	13	13	34	3	8	13	4	3
Reemergence	0	0	0	1	2	5	9	0	4	4	1	13	1	5
Type 3														
Immigration	19	43	21	16	9	14	93	15	39	15	16	102	37	7
Remnant	0	14	52	71	59	44	31	105	54	83	89	82	168	163
Total population	19	57	73	87	68	58	124	120	93	98	105	184	205	170
Emigration	0	5	5	2	28	24	27	19	66	10	9	23	16	42
Reemergence	0	0	1	3	4	7	9	1	6	5	3	44	4	8
All types														
Immigration	47	77	61	20	18	18	136	26	57	20	28	191	64	21
Remnant	0	36	105	163	139	112	85	188	97	141	137	123	294	305
Total population	47	113	166	183	157	130	221	214	154	161	165	314	338	326
Emigration	0	11	8	3	44	45	45	33	117	13	22	42	20	53
Reemergence	0	0	1	4	7	12	22	1	13	12	5	60	6	14
Cohort Population														
No.1	47 (0)	36 (0)*	34 (1)	34 (2)	28 (2)	17 (0)	12 (3)	10 (0)	6 (3)	6 (0)	6 (1)	6 (3)	5 (0)	5 (0)
No.2	-	77 (0)	71 (0)	71 (2)	52 (5)	38 (2)	27 (8)	23 (1)	12 (4)	10 (2)	8 (0)	7 (2)	7 (0)	4 (1)
No.3	-	-	61 (0)	58 (0)	44 (0)	34 (6)	25 (7)	21 (0)	13 (2)	11 (2)	10 (0)	7 (4)	7 (0)	6 (2)
No.4	-	-	-	20 (0)	15 (0)	12 (4)	6 (1)	5 (0)	4 (1)	4 (3)	4 (0)	1 (0)	1 (0)	1 (0)
No.5	-	-	-	-	18 (0)	11 (0)	8 (3)	7 (0)	4 (0)	4 (2)	2 (0)	2 (1)	2 (0)	2 (0)
No.6	-	-	-	-	-	18 (0)	7 (0)	6 (0)	2 (0)	2 (1)	2 (0)	1 (0)	1 (1)	1 (0)
No.7	-	-	-	-	-	-	136 (0)	116 (0)	48 (3)	46 (2)	38 (1)	35 (22)	34 (1)	27 (2)
No.8	-	-	-	-	-	-	-	26 (0)	8 (0)	8 (0)	7 (0)	6 (3)	5 (1)	4 (0)
No.9	-	-	-	-	-	-	-	-	57 (0)	50 (0)	44 (3)	31 (18)	29 (2)	29 (0)
No.10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20 (0)	16 (0)	14 (7)	11 (0)	11 (1)
No.11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28 (0)	13 (0)	13 (0)	12 (1)
No.12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	191 (0)	179 (0)	158 (7)
No.13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	64 (0)	45 (0)
No.14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21 (0)

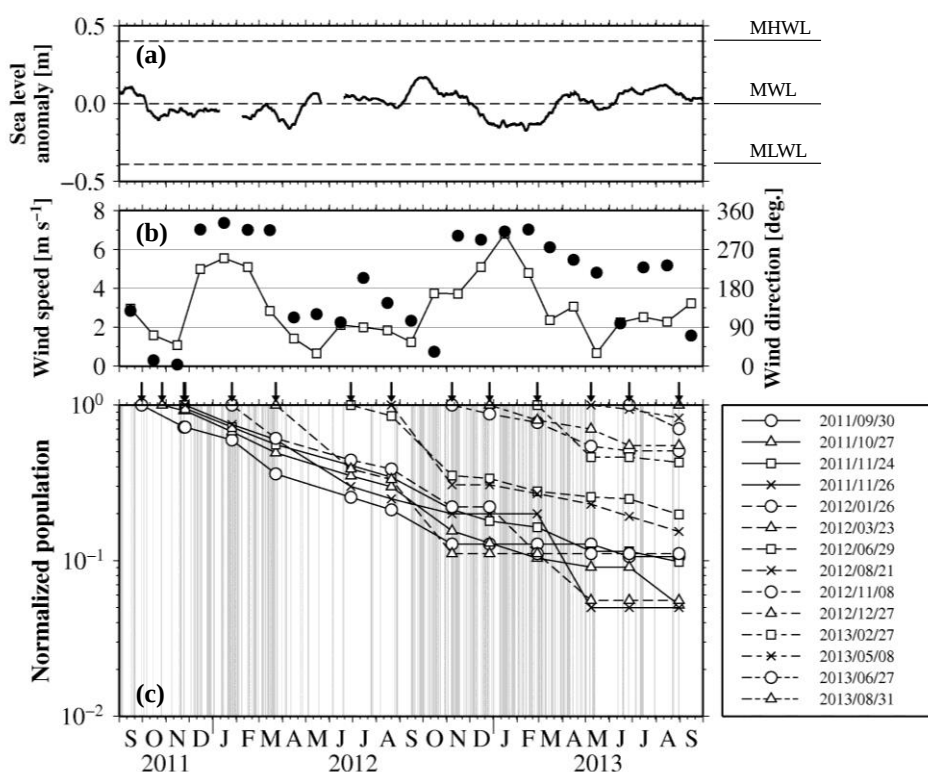


図-2.3 残余率の時間変化と潮位，海上風及び遡上イベントの時系列比較．

(a) 気象庁の大島観測所（図-2.1a 中の△印）における実測値を気圧補正して 30 日間移動平均した潮位．(b) 和田浜海岸沖（図-2.1a 中の○印）で観測された海上風の月平均風速（□印付きの実線）及び月平均風向（●印）．月平均風向は北方向から時計回りの角度で示す．(c) 各調査で新規発見された漁業フロート群の残余率の時系列．黒矢印は調査日を意味し，薄灰色の実線は，Web カメラ画像で確認された遡上イベント日を意味する．

出現したフロート（reemergence）があった．これらは，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．そこで，本研究では，一度なくなってから再出現するまでの間も和田浜海岸に漂着し続けていたと判断し，それ以前の残余量に再出現量を足し合わせることにした．一方，各調査時に後背地を搜索したが，漁業フロートは発見されなかった．したがって，表-2.1 に示す残余量の減少は，漁業フロートが海岸から沖合への再漂流に起因すると考えられる．

各群の残余量を新規漂着量で無次元化した残余率の時系列を図-2.3c に示す．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．横軸を経過時間として，各群の残余率の時系列を重ねたのが図-2.4 であり，これを指数関数 $h(t)$ ($= \exp(-kt)$) 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高い相関が得られた．

($n = 104$, $R^2 = 0.852$, $P = 6.47 \times 10^{-47} < 0.05$) ．

$$h(t) = \begin{cases} \exp(-4.471 \times 10^{-3} t), & (t \geq 0) \\ 0, & (t \leq 0) \end{cases} \quad (2.6)$$

ここで， t は経過時間（単位：日）である．式(2.6)を広義

積分（積分区間： $t = 0 - \infty$ ）すると，滞留時間が指数関数の係数 k の逆数（すなわち， $\tau_r = 1/k$ ）で求められ，和田浜海岸における漁業フロートの平均滞留時間 τ_r は，224 日（7.5 ヶ月）であった．平均滞留時間 τ_r の 95%信頼区間は，係数 k の 95%信頼区間と対応して，208 日 ($= 1 / (4.471 \times 10^{-3} + 0.340 \times 10^{-3})$) から 242 日 ($= 1 / (4.471 \times 10^{-3} - 0.340 \times 10^{-3})$) であった．基本的に，研究対象とした漁業フロ

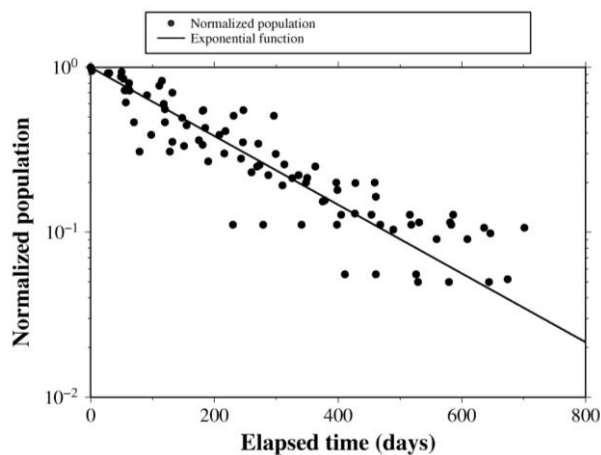


図-2.4 和田浜海岸における残余関数．

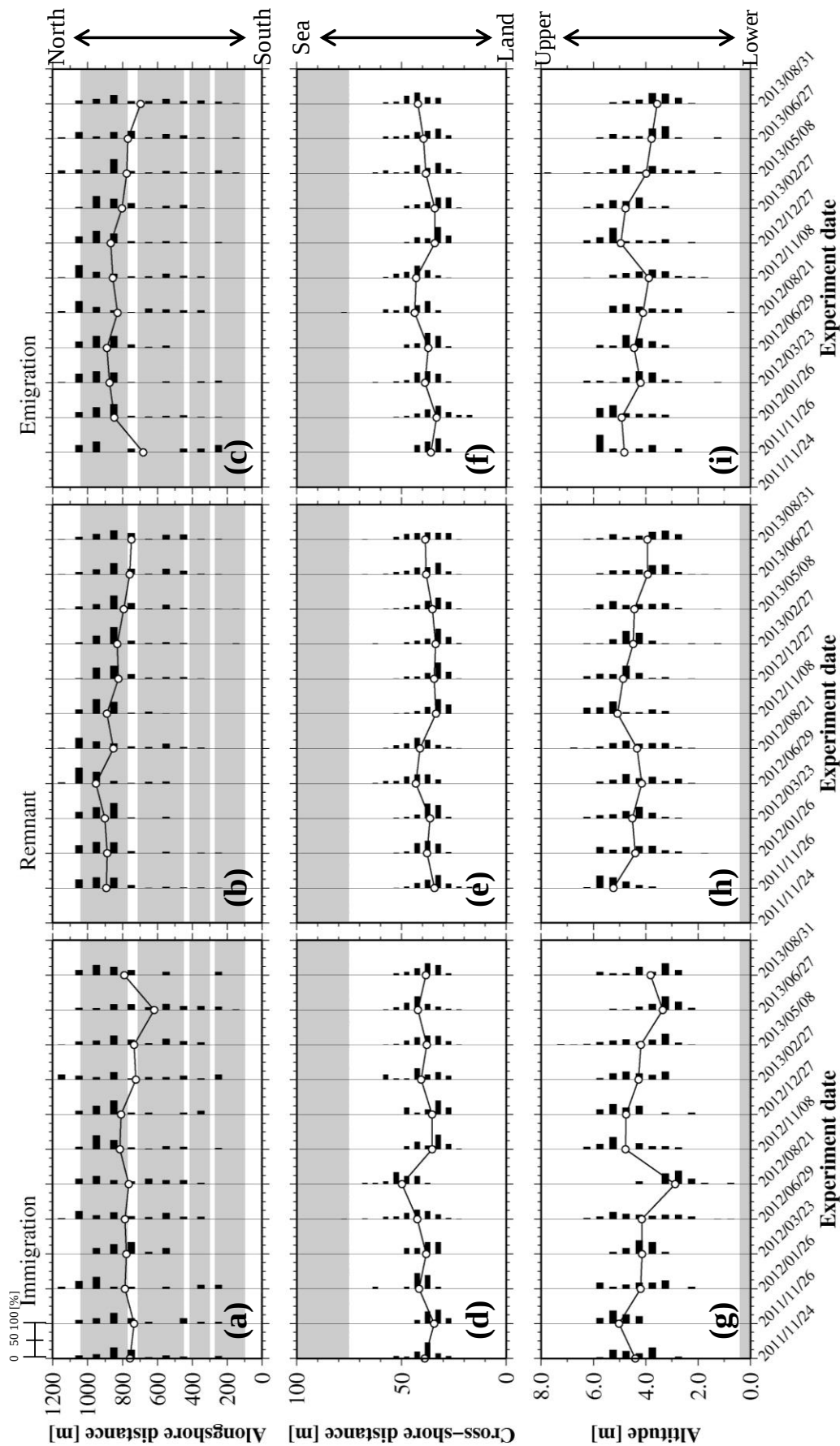


図-2.5 各調査における漁業フロートの集積率の空間分布。

沿岸方向における新規漂着フロート (a)、残余フロート (b) 及び再漂流フロート (c) の集積率、鉛直方向における新規漂着フロート (d)、残余フロート (e) 及び再漂流フロート (f) の集積率、岸沖方向における新規漂着フロート (g)、残余フロート (h) 及び再漂流フロート (i) の集積率の長さは、集積率を意味し、○印付き実線は、漁業フロートの平均位置を意味する。(a) の左上にそのスケールを示す。薄灰色のハッチは、前浜と後浜の境界線 (図-2.1d 中の赤い実線) から海側 (d)-(f)、平均満潮位 (MHWL) 以下の標高 (g)-(i) を意味する。

ートは、遡上した波によって動かされ、風圧の影響のみによって動くことはほとんどない。そのため、漁業フロートは、間欠的に発生する遡上イベントで再漂流すると考えられる。それにもかかわらず、残余率の時間変化が指数関数でよく近似できたことは興味深い。これは、漁業フロートが毎日一定の割合（和田浜海岸の場合: $1 - \exp(-kt) = 0.5\%/日$ ）で再漂流するとみなすことができることを示唆する。さらに、海岸を漁業フロートに関する線形システムと仮定することができ、存在量が新規漂着量の線形応答であると解釈することができる。漁業フロートに関する海岸のシステム特性の詳細については、第4章で述べる。

(2) 漁業フロートの空間分布

各調査時における新規漂着（Immigration）、残余（Remnant）及び再漂流（Emigration）フロートの集積率の空間分布を図-2.5に示す。図-2.5a-図2.5c、図-2.5d-図2.5f及び図-2.5g-図2.5iは、それぞれ沿岸、岸沖及び鉛直方向の集積率である。なお、第1回（2011年9月実施）及び第2回（2011年10月実施）の調査で得られた空間分布は、和田浜海岸全延長の空間分布が得られていないため、図-2.5中には示していない。

残余及び再漂流フロートの沿岸方向における集積率は、最北の潜堤背後（沿岸方向距離: 700 m-1100 m）で高い（図-2.5b及び図-2.5c）。一方、残余及び再漂流フロートに対して新規漂着フロートの沿岸方向における集

積率は、比較的均一に分布している（図-2.5a）。

一方、岸沖方向における漁業フロートの集積率は、何れの状態も岸沖方向距離が20 mから50 mの範囲で高い（図-2.5d-図2.5f）。残余フロートの岸沖方向の集積分布は、夏季に沖方向にシフトする。これは、2012年6月及び2013年5月に多くのフロートが、汀線近くに漂着したことに起因する（図-2.5d及び図-2.2の○印）。その後、秋季及び冬季の季節風で発生した高波浪の影響により、残余フロートの集積分布は、岸側にシフトする。和田浜海岸の海浜地形は、沖合方向に向けて標高が低くなるため、この岸沖方向の集積分布に対応して、鉛直方向の集積分布も同様の季節変動を示す（図-2.5g-図2.5i）。すなわち、2011年11月から2012年1月及び2012年11月から2013年2月における岸沖方向（鉛直方向）の集積分布は、全体的に岸側にシフトする（高くなる）。2012年1月から2012年11月及び2013年2月から2013年8月における岸沖方向（鉛直方向）の集積分布は、全体的に沖側にシフトする（低くなる）。

第1回及び第2回を除いた全調査時の沿岸方向における新規漂着（Immigration）、残余（Remnant）、存在（Total population）及び再漂流（Emigration）フロートの平均集積率を図-2.6に示す。沿岸方向における平均集積率は、100 m区画毎の全調査の合計数量を海岸全延長の合計数量で除して計算した。どの状態の沿岸方向の集積率も、潜堤の背後（図-2.6中の薄灰色ハッチ）に相当する中央部（沿岸方向距離: 400 m-600 m）と北部（沿岸方向距離:

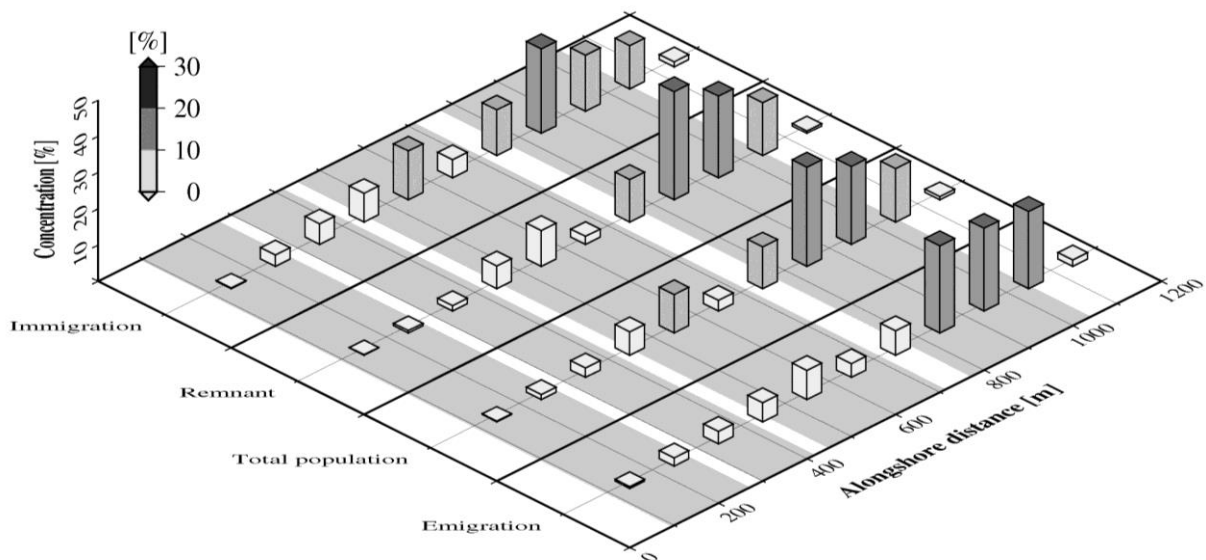


図-2.6 全調査における沿岸方向の漁業フロートの平均分布。

薄灰色ハッチは、沿岸方向における潜堤の投影範囲を意味し、ボックスの長さ及び濃淡（カラースケールは図中の左上に示す）は集積率を意味する。

表-2.2 各調査間における漁業フロートの動き、減少率及び遡上イベントの発生確率.

Experiment number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Experiment date	2011/9/30	2011/10/27	2011/11/24	2011/11/26	2012/1/26	2012/3/23	2012/6/29	2012/8/21	2012/11/8	2012/12/27	2013/2/27	2013/5/8	2013/6/27	2013/8/31
Experiment period [days]	27	28	2	61	57	98	53	79	49	62	70	50	65	65
Spatial movement of the floats during experiment period														
Alongshore movement distance [m]														
Average	4.61	3.25	-8.91	-16.97	37.79	107.87	4.16	92.02	-25.98	-7.48	6.86	2.76	5.98	
Standard deviation	4.44	33.72	52.31	85.11	126.29	116.43	14.95	169.21	70.13	65.77	151.23	35.81	25.21	
Movement velocity [m day ⁻¹]	0.16	1.20	26.16	1.40	2.22	1.19	0.28	2.14	1.43	1.06	2.16	0.72	0.39	
Cross-shore movement distance [m]														
Average	0.18	-0.64	2.23	-2.55	1.40	-7.65	1.53	6.96	0.19	1.62	-0.98	-1.72	-0.25	
Standard deviation	6.06	3.79	4.61	4.76	4.80	8.69	4.76	10.76	5.29	6.44	6.87	4.43	4.16	
Vertical movement distance [m]														
Average	-0.04	0.03	0.22	-0.86	0.13	-0.29	0.21	0.71	0.00	-0.21	-0.35	-0.39	0.07	
Standard deviation	0.77	0.51	0.58	0.85	0.79	1.05	0.82	1.58	1.04	0.82	1.06	0.85	0.55	
Decrease of remnants during experiment period														
Survival ratio	0.77	0.93	0.98	0.76	0.71	0.65	0.85	0.45	0.92	0.85	0.75	0.94	0.85	
Decreasing rate [%]	0.98	0.26	0.91	0.45	0.59	0.43	0.30	1.00	0.18	0.26	0.42	0.13	0.25	
Swash event during experiment period														
Frequency [days]	5	5	2	31	38	16	4	40	34	37	41	9	13	
Event probability [%]	19	18	100	51	67	16	8	51	69	60	59	18	20	

700 m–1100 m) で高く、潜堤の開口部で低い傾向がある。

(3) 漁業フロートの動き

各調査時から次の調査までの沿岸、岸沖及び鉛直方向の残余フロートの移動距離を図-2.7に示す。各調査間における移動距離の平均値(図-2.7中の○印)は残余フロートの移動方向を意味し、移動距離の標準偏差(図-2.7中のエラーバー)は残余フロートの動きの大きさを意味する。移動距離の平均値及び標準偏差の具体的な数値については表-2.2に示す。なお、第1回(2011年9月実施)及び第2回(2011年10月実施)の調査は、和田浜海岸全延長を対象としていないため、図-2.7中には示していない。

各調査間において残余フロートは、南北のどちらの沿岸方向にも動かされていた(図-2.7a)。特に、4つの調査間(2012年1月–3月;2012年3月–6月;2012年8月–11月;2012年2月–5月)において沿岸移動距離の標準偏差は大きく(図-2.7a中の黒矢印)、116 mから169 mであった(表-2.2)。一方、沿岸移動距離の平均値(図-2.7a中の○印)は、2つの調査間(2012年3月–6月;2012年8月–11月)で大きく、全体的に残余フロートが北方向に動かされていた。

残余フロートは、海岸上において遡上した波によって押されるため、基本的に陸側へ移動すると考えられる。例えば、2012年8月から同年11月においてほとんどの残余フロートが陸側へ移動している(図-2.7b)。興味深いことは、残余フロートは陸側に移動するだけでなく、

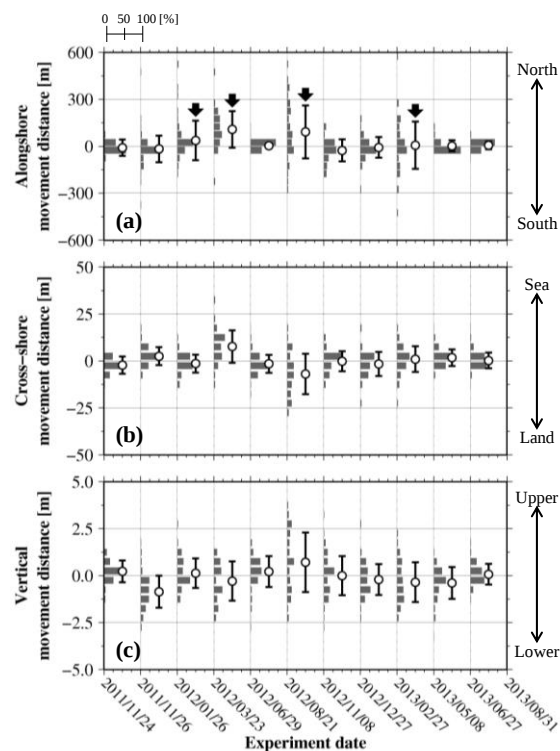


図-2.7 各調査間における沿岸(a)、岸沖(b)及び鉛直(c)方向の漁業フロートの移動距離。

灰色のバーは移動距離の頻度を意味し、長さのスケールは(a)の左上に示す。各調査間における平均移動距離及び移動距離の標準偏差は、それぞれ○印及びエラーバーで表示する。例えば、2011年11月26日から2012年1月26日までの移動距離の頻度は、横軸における各日付の格子線の間に示している。(a)中の黒矢印は、漁業フロートが沿岸方向に100 m以上移動した調査間を意味する。

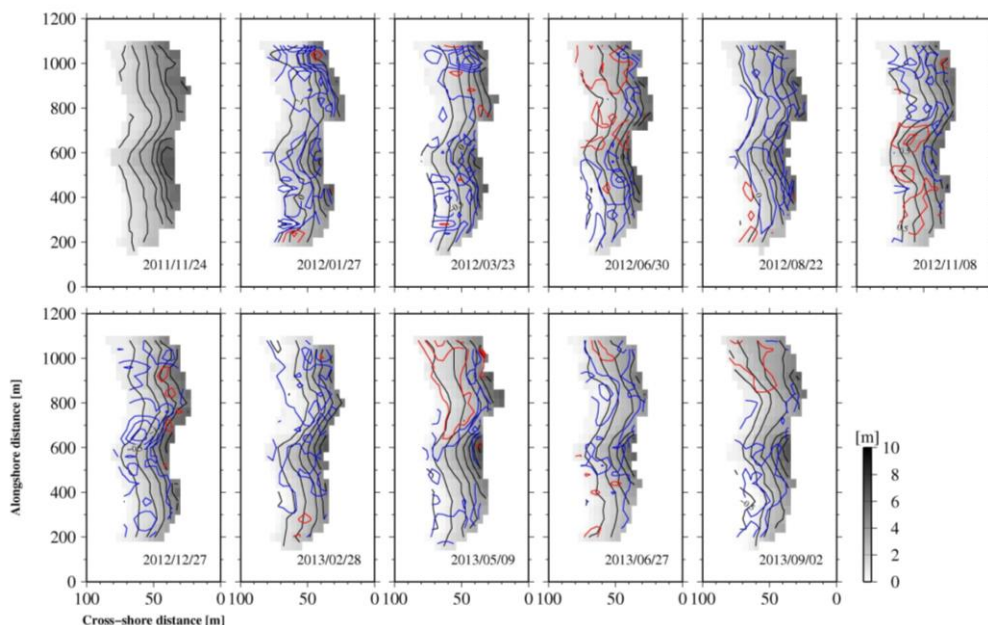


図-2.8 各調査における海浜地形。

赤と青のコンターは、それぞれ調査間における堆積高及び浸食高(間隔は0.5 m)を意味する。

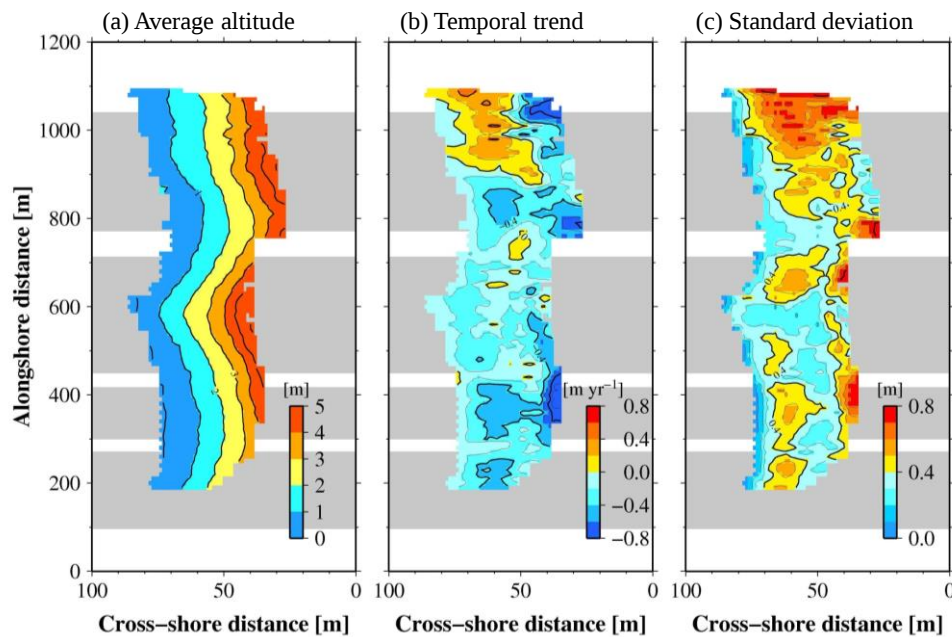


図-2.9 全調査間における海浜地形変化.

(a), (b) 及び(c)は、それぞれ平均標高、地形変化の線形トレンド、標高の標準偏差を示す。カラースケールを各図の右下に示す。薄灰色ハッチは、沿岸方向における潜堤の投影範囲を意味する。

海側にも移動することである。例えば、2012年3月から同年6月において多くの残余フロートが海側へ移動しており（図-2.7b）、その岸沖移動距離の平均値は、海側へ7.65 mであった（表-2.2）。

集積分布と同様に、基本的に鉛直方向の移動距離の変動パターンは、岸沖方向の移動距離の変動パターンと対応し、残余フロートが全体的に陸側（海側）へ移動すると、漂着高は上がる（下がる）（図-2.7b 及び図-2.7c）。

(4) 和田浜海岸の海浜地形変化

各調査間における海浜地形の変化を図-2.8に、海浜地形測量に基づいて計算した標高の平均値、標準偏差及び線形トレンドを図-2.9に示す。全調査期間（2011年11月-2013年8月）を通して、和田浜海岸の汀線は、中央部（沿岸方向距離: 500 m-700 m）と北部（沿岸方向距離: 900 m-1100 m）で海側に張出していた（図-2.9a）。しかし、北部の標高の変動は、中央部のそれに比べて大きい（図-2.9c）。各点における標高の時間変動から計算した標高の線形トレンドを図-2.9bに示す。北部では0.0-0.6 m yr⁻¹の割合で堆積していたのに対し、それよりも南側では0.0-1.0 m yr⁻¹の割合で浸食されていた（図-2.9b）。海岸の南部から北部への沿岸漂砂を示唆している。

2.4 漁業フロートの減少率、集積率、動きに関する考察

和田浜海岸において漁業フロートは、指数関数的に減少していた。指数関数的な減少の物理メカニズムを調べるにより、様々な海岸における滞留時間の推定に役立てることができる。ここでは、漁業フロートの減少過程の決定要因について考察する。まず潮位、海上風及び遡上イベントの観測データと残余率の時間変動を比較する。和田浜海岸は海岸幅（岸沖方向）に対して海岸延長（沿岸方向）が非常に大きい。そこで、沿岸方向の動きに着目して、漁業フロートの減少過程との関係を調べる。また、再漂流フロートの分布（図-2.6）は、再漂流フロートを最後に確認した漂着位置の頻度を意味し、再漂流過程の物理メカニズムを明らかにするための重要な情報であろう。この再漂流頻度は、和田浜海岸沖合にある潜堤背後に相当する中央部（沿岸方向距離: 400 m-600 m）と北部（沿岸方向距離: 800 m-1100 m）で高く、残余フロートの集積率と分布パターンが類似していた（図-2.6）。そのため、和田浜海岸における残余フロートの集積は、漁業フロートが再漂流に至るまでの重要な過程であると考えられる。そこで、沿岸方向における残余フロートの動きと集積率を比較することで、和田浜海岸における残余フロートの集積メカニズムについて考察する。

(1) 潮位、海上風及び遡上イベントとの比較

ここでは、気圧補正した潮位と平均水面水位（MWL）の偏差（以下、潮位偏差）の30日間移動平均（図-2.3a）、

海上風の月平均値 (図-2.3b) 及び遡上イベント (図-2.3c) を残余率の時間変化と比較する。

潮位や波高が高い場合、遡上イベント時に波が残余フロートの漂着高に到達する可能性が高まるため、残余率の減少に寄与すると考えられる。例えば、2012年9月-11月には潮位偏差が高い時期に対応して残余フロートの減少率が高かったが、2013年6月-9月には潮位偏差が高い時期にもかかわらず、減少率は低かった (図-2.3a 及び 図-2.3c)。すなわち、潮位変動と残余フロートの減少率に有意な関係が見られなかった。

また、海上風や遡上イベントも残余フロートの減少率と有意な関係は見られなかった。例えば、和田浜海岸は西向きの海岸であるため、西寄りの風によって遡上イベントが頻繁に発生すると考えられる。実際に、2012年11月-2013年4月にかけて比較的強い西寄りの風が和田浜海岸沖合で観測されており (図-2.3b)、これに対応して同期間において遡上イベントが頻繁に発生していた (図-2.3c)。2012年8月-11月に残余フロートの減少率が高かったが、2012年11月-2013年2月に減少率は比較的低く、残余フロートの減少率の時間変化は、調査期間によって大きく異なっていた (図-2.3c)。

一方、漁業フロートの新規漂着量の時間変動と黒潮の流路変動に有意な関係があった。例えば、黒潮は2011年9月、2012年5月、2012年9月-11月、2013年4月及び2013年7月-8月に非大蛇行接岸流路をとり、新島周辺海域を通過していた (海上保安庁, 2013)。いずれの期間も潮位偏差が正值となっていたことから、黒潮が新島に接近していたと考えられる (図-2.3a)。和田浜海岸における漁業フロートの新規漂着量は、2012年6月及び2013年5月に極大であった (図-2.2中の○印)。この時期は、黒潮が新島に接近した直後に相当し、新島に漂着した漁業フロートが黒潮によって輸送されてきたことを示唆する。

(2) 残余フロートの減少率と沿岸移動距離の関係

2.4節(1)で述べたように、再漂流による残余率の時間変化と観測データとの単純な比較では、再漂流過程の決定要因の特定に至らなかった。ここでは、残余フロートの沿岸方向の動きと減少率の関係について調べる。

残余フロートの沿岸移動距離の標準偏差を各調査間の日数で除して、調査間における沿岸移動速度を計算した。計算した沿岸移動速度を表-2.2に示す。2011年11月24日-26日における沿岸移動速度が、他の調査間のそれに比べて非常に大きくなった (表-2.2)。これは、調査間の日数が2日間であったためであり、他の調査間の日数

と著しく異なるため、残余フロートの減少率との比較において対象外とした。和田浜海岸では残余率が指数関数的に減少することを踏まえ、各調査間における残余フロートの減少率 γ を次式で計算した。

$$\gamma = 100 \times \left[1 - \left(\frac{y(t_1)}{y(t_0)} \right)^{\frac{1}{\Delta t}} \right] \quad (2.7)$$

ここで、 $y(t_0)$ はある調査時 ($t = t_0$) における存在量であり、 $y(t_1)$ は次の調査時 ($t = t_1 = t_0 + \Delta t$) における $y(t_0)$ の残余数である。 Δt は各調査間の日数である。したがって、 $y(t_1)/y(t_0)$ は各調査間における漁業フロートの生存率を意味する。式(2.7)で計算された残余フロートの減少率を表-2.2に示す。残余フロートの減少率は調査間に応じて異なり、0.0%-1.0%の値をとり、減少率の平均値は0.5%である。ここで計算した減少率の平均値は、和田浜海岸における漁業フロートの平均滞留時間から計算した再漂流確率と一致する (すなわち、 $1 - \exp(-1/224)$)。

沿岸移動速度と残余フロートの減少率との関係を図-2.10に示す。ただし、調査範囲と調査間日数が大きく異なるため、2011年9月30日-11月26日までの観測データは無視した。沿岸移動速度は、残余フロートの減少率と95%信頼水準において統計学的に有意な相関があった ($n = 10$, $R = 0.68$, $P = 0.0319 < 0.05$; 図-2.10a中の実線参照)。この有意相関は、沿岸方向の漁業フロートの動きが再漂流過程に寄与していることを示唆し、沿岸方向の動きが大きいほど残余フロートの減少率は高くなることを意味する。

多くの漁業フロートは、和田浜海岸の後浜に漂着していたことから、各調査間における遡上イベント発生確率と漁業フロートの沿岸移動速度を比較した (図-2.10b)。沿岸移動速度は遡上イベント発生確率とも95%信頼水準において統計学的に有意な相関があった ($n = 10$, $R = 0.77$, $P = 0.009 < 0.05$; 図-2.10b中の実線参照)。したがって、漁業フロートは遡上した波によって動かされ、遡上イベントの発生頻度によって沿岸方向の漁業フロートの沿岸移動速度が決まることを示唆する。

以上のように、沿岸移動速度は残余フロートの減少率と遡上イベント発生確率の各々と統計学的に有意な相関があったが、残余フロートの減少率と遡上イベント発生確率には統計学的に有意な相関が認められなかった ($n = 10$, $R = 0.27$, $P = 0.443 > 0.05$)。これは、遡上イベントの発生確率には、遡上イベントの規模については考慮されていないためであると考えられる。遡上イベントの発生規模が大きいほど、遡上した波によって漁業フロートが動かされる頻度が高まると推察される。したがって、

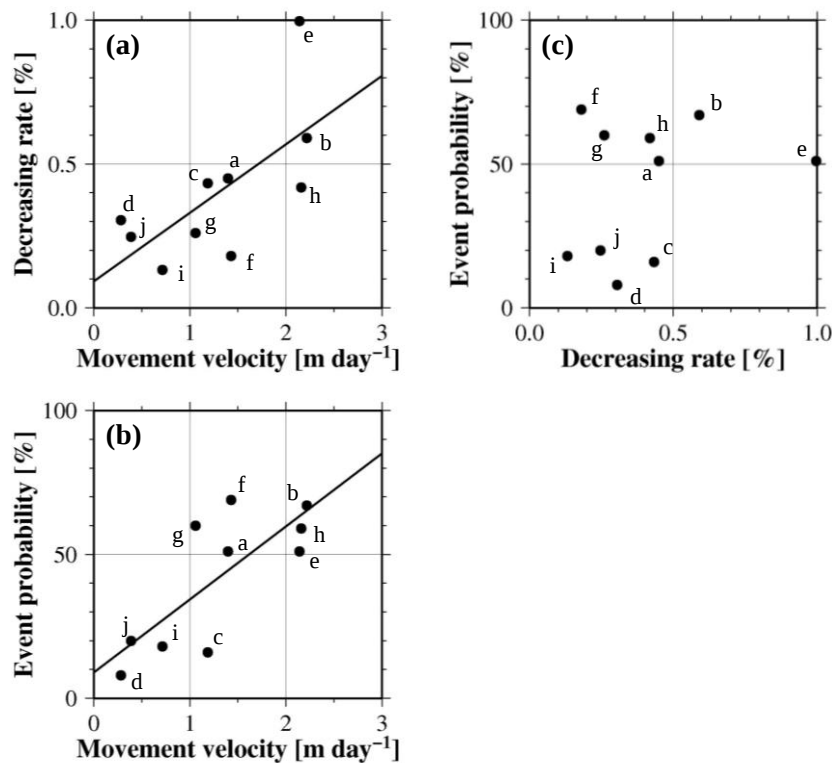


図-2.10 各調査間における漁業フロートの移動速度、減少率及び遡上イベントの発生確率の関係。

各図に、漁業フロートの移動速度と減少率の関係 (a)、漁業フロートの移動速度と遡上イベントの発生確率の関係 (b)、漁業フロートの減少率と遡上イベントの発生確率の関係 (c)を示す。(a)及び(b)中の実線は回帰直線である。各図中のアルファベットは、図-2.11及び図-2.12の図番号と対応する。

残余フロートの減少率は、遡上イベントの頻度だけでなく、遡上イベントの規模が寄与しているであろう。

(3) 残余フロートの動きの決定要因

残余フロートの減少率は沿岸移動速度と統計学的に有意な相関があった(図-2.10a)ことから、沿岸方向における残余フロートの動きは、漁業フロートの再漂流過程における重要な決定因子であろう。そこで、2011年11月26日-2013年8月31日における各調査間の残余フロートの動きの決定要因を調べた。各調査時における100m区画毎の存在量に対する次の調査時における各100m区画への移動率を図-2.11に示す。

多くの調査間では、各区画に漂着していた残余フロートは南北のいずれの方向にも移動している(図-2.11a, 図-2.11d, 図-2.11f, 図-2.11g, 図-2.11i及び図-2.11j)。これに対して、4つの調査間における漁業フロートの移動パターンが異なっていた。2012年3月-6月及び同年8月-11月には、どの区画に漂着していた漁業フロートも全体的に北方向に移動している(図-2.11c及び図-2.11e)。また、2012年1月-3月及び2013年2月-5月には、海岸南部(海岸北部)にあった漁業フロートは北

方向(南方向)に大きく移動していた(図-2.11b及び図-2.11h)。その結果、これら4つの調査間において沿岸移動距離の標準偏差が、他の調査間に比べて大きくなった(図-2.7中の黒矢印)。また、2つの調査間(2012年3月-6月及び同年8月-11月)において沿岸移動距離の平均値が、いずれも100mとなった。

式(2.2)で推定した時間当たり遡上高の時系列(図-2.12中の濃灰色ハッチ),NOWPHASの御前崎沖のGPS波浪計で観測された主波向(図-2.12中の●印)及びWebカメラ画像から確認した遡上イベント時期(図-2.12中の薄灰色バー)を図-2.12に示す。和田浜海岸において遡上高及び遡上イベントの発生頻度は、春季(4月-6月)及び夏季(7月-9月)に低く、秋季(10月-12月)及び冬季(1月-3月)に高くなる。また、波向が180°(北向き:和田浜海岸に対して南から入射)から270°(東向き:和田浜海岸に対して西から入射)の範囲にある時、しばしば推定した遡上高が2mを超えていた(図-2.12)。多くの残余フロートは、標高が2mから7mの範囲に分布していた(図-2.5h)。これと対応して、各調査間を通して遡上高が2mを頻繁に超えるとき(図-2.12b, 図-2.12c, 図-2.12e, 図-2.12f, 図-2.12g及び図-2.12h)、多くの

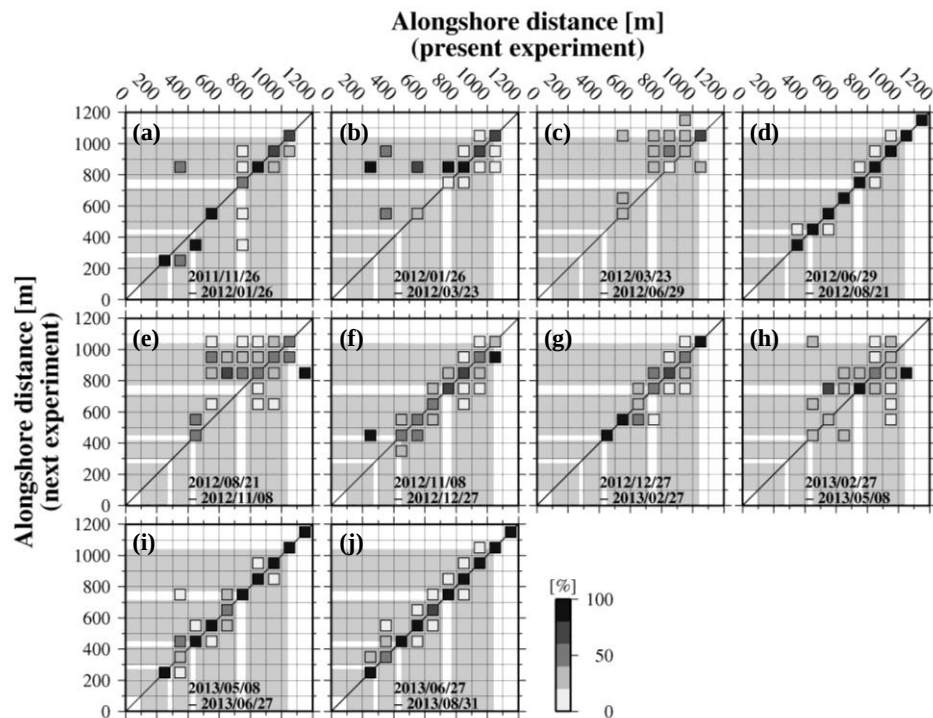


図-2.11 各調査間における 100 m 区画単位の移動率。

横軸及び縦軸は、それぞれ今回及び次回調査における沿岸方向移動距離を意味し、薄灰色ハッチは、沿岸方向における潜堤の投影範囲を意味する。□印が、斜線よりも左上（右下）に位置する場合、北方向（南方向）に動いたことを意味する。□内の濃淡は移動率を意味し、(j)の右にそのスケールを示す。

残余フロートが沿岸方向に動かされていた（図-2.11b, 図-2.11c, 図-2.11e, 図-2.11f, 図-2.11g 及び図-2.11h）。逆に、各調査間を通して遡上高が 2 m を超えるような遡上イベントが少ないとき（図-2.12a, 図-2.12d, 図-2.12i 及び図-2.12j），漁業フロートはほとんど動いていない（図-2.11a, 図-2.11d, 図-2.11i 及び図-2.11j）。特に、残余フロートの平均漂着高（図-2.5h 中の○印）を超える遡上イベント（図-2.12c, 図-2.12e 及び図-2.12h の黒矢印）が発生していた期間に、多くの漁業フロートが沿岸方向に対して長距離移動していた（図-2.11c, 図-2.11e 及び図-2.11h）。これらの大きな遡上イベントは、2012 年 6 月 19 日、同年 8 月 28 日、同年 9 月 30 日及び同年 10 月 15 日-18 日に日本の南岸に接近した台風（気象庁, 2012a），もしくは 2012 年 4 月 3 日及び 2013 年 4 月 7 日に異常発達した温帯低気圧（気象庁, 2012b, 2013）によってもたらされた。したがって、調査間に台風等に起因した高波浪が伴う大きな遡上イベント時に、残余フロートは沿岸方向に大きく動かされる。

興味深いことに、台風が発生した 2 つの調査間に、漁業フロートの多くが、全体的に北方向へ動かされた（図-2.11c 及び図-2.11e）。特に、2012 年 8 月-同年 11 月における残余フロートの減少率が全ての調査間の中で最大

であった（図-2.10c 中の e）。また、2012 年 3 月-同年 6 月には、遡上イベントの発生確率が低かったにも関わらず、減少率が相対的に大きかった（図-2.10c 中の c）。以上のことから、和田浜海岸における北方向への漁業フロートの動きが、沖合に再漂流させる重要な要素であると推察される。

(4) 残余フロートの動きと集積率の関係

残余フロートの多くが北方へ動かされた 2 つの調査間（図-2.11c 及び図-2.11e）を除くと、南北のどちらの方向にも残余フロートが動いていた。にもかかわらず、残余フロートが、海岸北部（沿岸方向距離: 700 m-1100 m）に集積していた点は興味深い。残余フロートの動きと集積率の関係を調べるため、新規漂着フロートとして発見されてから 2013 年 8 月 31 日までの軌跡を示したものを図-2.13 に示す。例えば、2012 年 6 月の調査時における新規漂着フロートは、比較的均一に分布した。それが、時間の経過とともに、南北方向に動きながら、最終的に海岸中央部（沿岸方向距離: 400 m-600 m）と北部（沿岸方向距離: 700 m-1100 m）に収束していた（図-2.13g）。

漁業フロートが海岸中央部や北部への集積メカニズムを考察するため、沿岸方向における残余フロートの平均

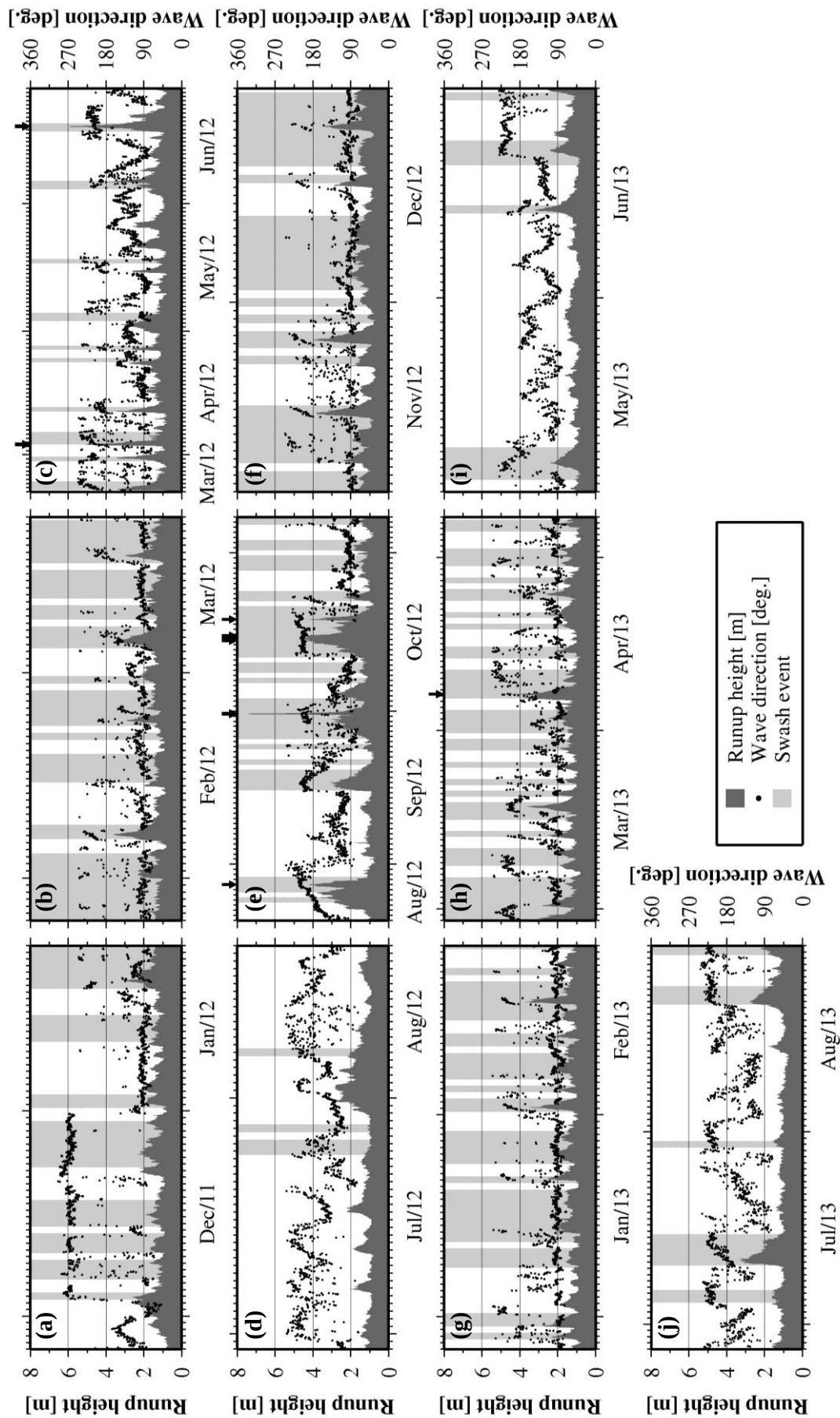


図-2.12 各調査間における和田浜海岸の遡上高と御前崎沖のGPS波浪計 (図-2.1a中の◇印) で観測された主波向。主波向は北から時計回りの角度で表しており、例えば、南から来る波は、180°となる。凡例は(j)の右に示す。図上の黒矢印は、遡上高が各調査間における残余フロートの平均漂着高 (図-2.5b中の○印付き実線) より高い時期を意味する。

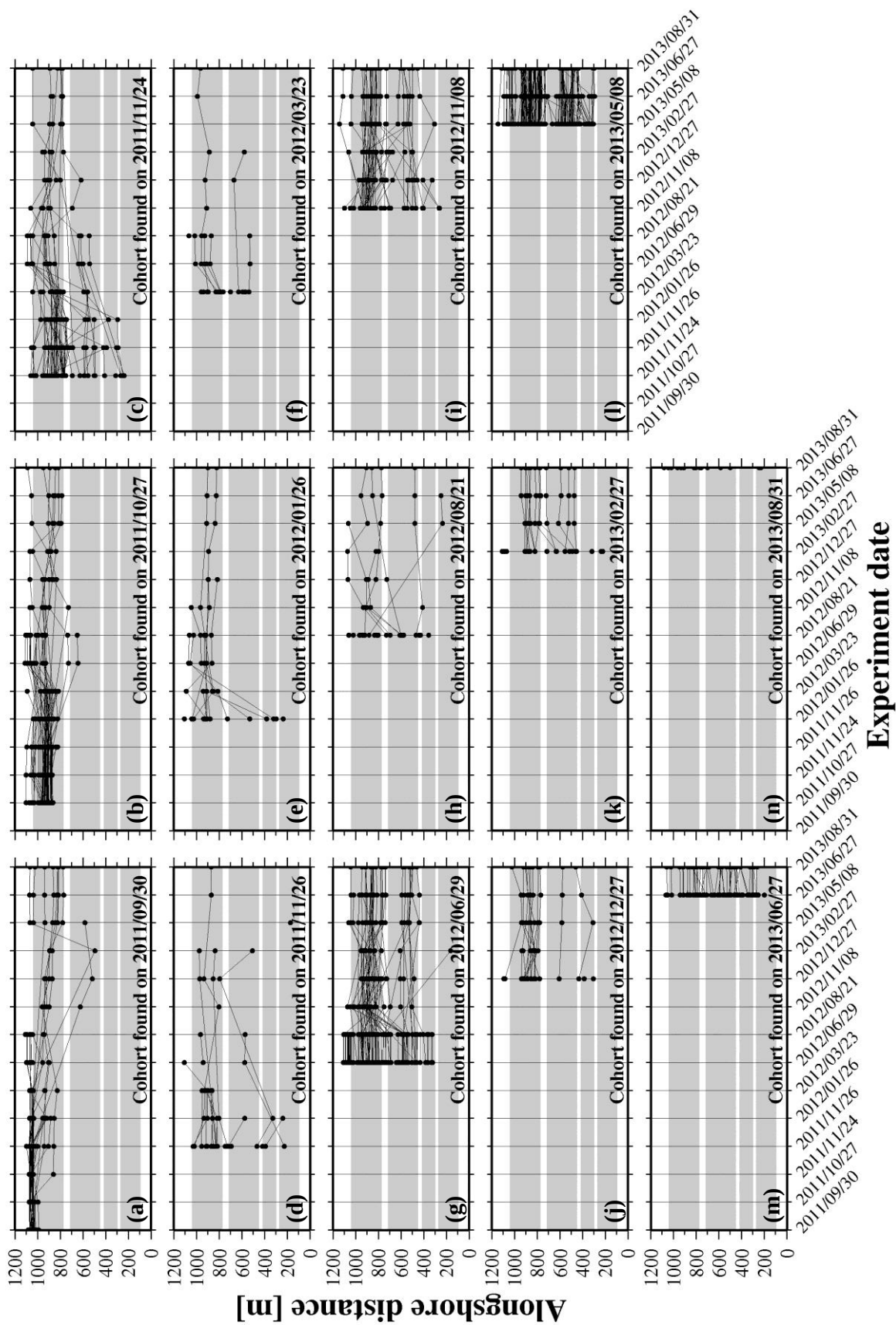


図-2.13 各調査時の新規漂着フロートの沿岸方向における漂着位置の軌跡、薄灰色のハッチは、沿岸方向における漂着の投影範囲を意味する。

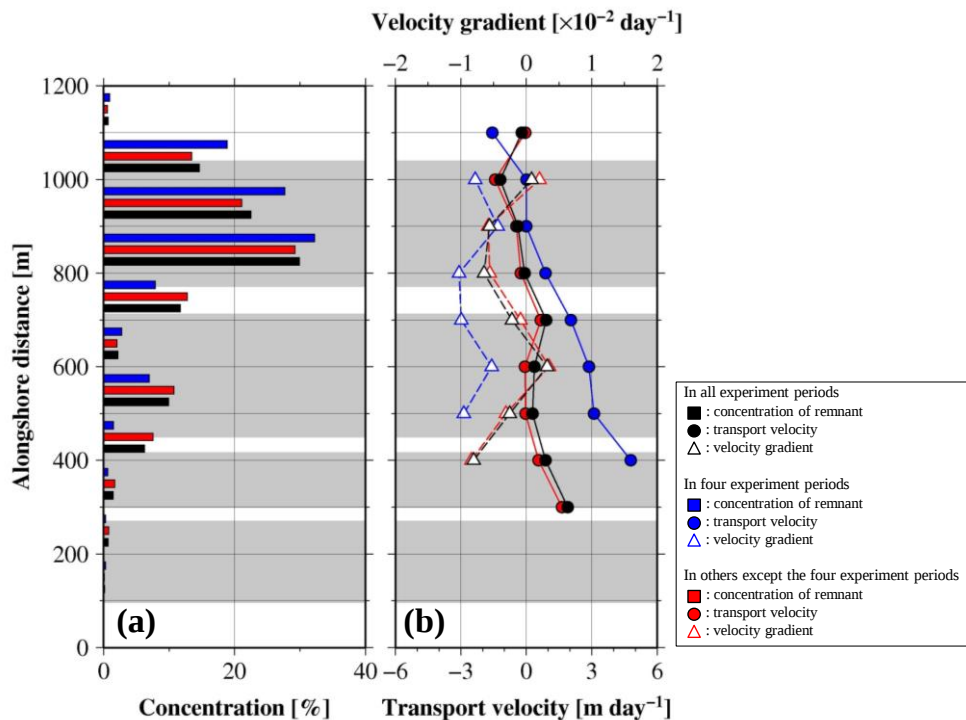


図-2. 14 全調査間における残余フロートの集積率(a)と平均輸送速度(b)の関係.

記号及び色の凡例は、右下のボックス内に示す。なお、青色の記号の凡例における4つの調査間は、図-2. 11b、図-2. 11c、図-2. 11e及び図-2. 11hに示す期間を意味する。薄灰色ハッチは、沿岸方向における潜堤の投影範囲を意味する。

分布（図-2. 6）と各 100 m 区画における平均輸送速度を比較した（図-2. 14）。平均輸送速度は、第4回（2011年11月26日実施）から第14回（2013年8月31日実施）までの各調査間における個々のフロートの移動距離をその日数で除すことで輸送速度を計算し、前回の調査時の漂着位置に基づき、各 100 m 区画における個々のフロートの輸送速度を平均することで計算した。

沿岸方向における残余フロートの集積率の分布（図-2. 14a中の黒バー）は、2011年11月26日から2013年8月31日までの全調査間における平均輸送速度（図-2. 14b中の黒い●印）の分布と対応している。沿岸方向距離が400 m–600 m及び700 m–1000 mの範囲において平均輸送速度勾配は、収束値（図-2. 14b中の黒い△印）であり、これに対応してこれらの範囲内において残余フロートの集積率は高かった（図-2. 14a中の黒バー）。沿岸方向距離が800 mより南部（北部）にある残余フロートは、平均的に北方（南方）へ輸送されていた（図-2. 14b中の黒い●印）。結果として、残余フロートの集積率が、最北の潜堤背後（沿岸方向距離：700 m–1100 m; 図-2. 14a中の黒バー）で高くなった。

一方、残余フロートの動きが大きかった4つの調査間（図-2. 11b、図-2. 11c、図-2. 11e及び図-2. 11h）における平均輸送速度を計算したところ、2011年11月26日

–2013年8月31日の全ての調査間における平均輸送速度に比べて、南部から北部への輸送が強化された（図-2. 14b中の青い●印）。結果として、4つの調査間における残余フロートの集積率は、全調査間における残余フロートの集積率（図-2. 14a中の黒バー）に対して海岸北部への集積率が高かった（図-2. 14a中の青バー）。逆に、これら4つの調査間を除く6つの調査間（図-2. 11a, 2. 11d, 2. 11f, 2. 11g, 2. 11i及び2. 11j）における平均輸送速度（図-2. 14b中の赤い●印）及び残余フロートの集積率（図-2. 14a中の赤バー）は、全調査間におけるそれらと類似していた。このことから、和田浜海岸には、海岸中央部（沿岸方向距離：400 m–600 m）と海岸北部（沿岸方向距離：700 m–1100 m）に漁業フロートを集積させるメカニズムがあることを示唆された。また、残余フロートの動きが大きかった4つの調査間のうち、2012年1月–3月の調査間を除いて台風や異常発達した温帯低気圧に起因する大きな遡上イベントがあった（図-2. 12c、図-2. 12e及び図-2. 12h）。したがって、和田浜海岸では、間欠的な大きな遡上イベントで北方への輸送が強化され、海岸北部での集積率が高くなることが示唆された。

2.5 2章のまとめ

海洋プラスチックが漂着してから再漂流するまでの滞

留時間を計測するため、東京都新島村和田浜海岸において2011年9月から2年間かけて、3種の漁業フロートを対象に個体識別調査を実施した。個体識別調査により、和田浜海岸における漁業フロートの滞留時間、集積率及び動きを明らかにし、以下の知見を得た。

各調査時に新たに発見した漁業フロートの漂着量（新規漂着量）は季節的に変動し、初夏（2012年6月及び2013年5月）に極大となる傾向があった。この新規漂着量の時系列変動に対応して、各調査時における漁業フロートの全量（存在量）の時系列変動も初夏に極大であった。一方、和田浜海岸から無くなった漁業フロートの量（再漂流量）は、2012年11月に極大であった。

全調査における新規漂着フロートの残余数の時間変化は、指数関数で非常によく近似することができ、和田浜海岸における漁業フロートの残余関数を得た。残余関数から和田浜海岸における漁業フロートの平均滞留時間が224日（7.5ヶ月）であった。

各調査時に漂着していた漁業フロートを新規漂着フロートもしくは残余フロート、無くなった漁業フロートを再漂流フロートとして分類し、各分類における漁業フロートの空間分布を得た。各分類における沿岸方向の集積率の分布は、いずれも類似しており、潜堤背後に相当する中央部（沿岸方向距離: 400 m–600 m）及び北部（沿岸方向距離: 700 m–1100 m）で高かった。また、岸沖方向では、後浜（岸沖方向距離: 20 m–50 m）で集積率が高かった。鉛直方向における集積率の分布の時間変化は、岸沖方向におけるそれと同様の季節変化を示した。

漁業フロートは、遡上イベント時に沿岸方向（南北方向）に移動する。沿岸方向の漁業フロートの動きは、残余フロートの減少率と Web カメラ画像から得られた遡上イベントの発生確率と有意な相関があった。このことから、漁業フロートの沿岸方向の輸送が、再漂流過程に寄与していることが示唆された。

各調査間における個々のフロートの移動距離から沿岸方向 100 m 区画毎の全調査間における平均輸送速度を計算したところ、海岸中央部（沿岸方向距離: 400 m –600 m）と海岸北部（沿岸方向距離: 700 m–1100 m）に平均輸送速度勾配の収束域があり、残余フロートの集積率の分布と一致していた。このことから、和田浜海岸では、沿岸方向に漁業フロートが動くことによって、海岸中央部と北部に漁業フロートが集積していたことが明らかとなった。さらに、台風や異常発達した温帯低気圧に起因した大きな遡上イベントにより、北方への輸送が強化され、海岸北部に集積しやすくなることが示唆された。

3. 和田浜海岸での海洋プラスチックの滞留時間を決める物理メカニズム

3.1 はじめに

海岸における海洋プラスチックの滞留時間は、海洋プラスチック起因の海洋環境リスクを評価する上で非常に重要である（1.2 節参照）。東京都新島村の和田浜海岸において 2 年間の個体識別調査を実施し、漁業フロートが海岸に漂着してから再漂流するまでの平均滞留時間を計測することに成功した（2.3 節 (1)参照）。しかし、個体識別調査に基づく滞留時間の計測を複数海岸で実施することは困難である。複数海岸における滞留時間を明らかにするためには、それを決める物理メカニズムを明らかにすることが必要不可欠である。滞留時間の決定要因を明らかにすることで、個体識別調査を行うことなく、複数海岸における滞留時間を把握することが可能になるであろう。そこで、本章では滞留時間を決める物理過程の一つとして考えられる再漂流過程（すなわち、海岸に海洋プラスチックが漂着した後、沖合へ再漂流する（海岸から無くなる）までの過程）に着目する。

海洋プラスチックの再漂流過程において、波の遡上高が重要な因子の一つであろう。Bowman et al. (1998)は、地中海に面したイスラエルの 6 つの海岸において、各調査で異なる色のスプレーを用いて、ゴミを新規漂着、残余及び再漂流の 3 つに分類し、各分類の量を把握した。加えて、各調査時に海岸岸沖方向にいくつかの区画に分割し、区画毎の量を計測した。彼らはゴミがそれ以前の波の遡上高付近に集中して分布し、次にその高さまで波が遡上することで、ゴミは再漂流すると言及した。

和田浜海岸では、沿岸方向による漁業フロートの動きと再漂流による漁業フロートの減少率に有意な相関があった（図-2.10a; 2.4 節 (2)参照）。したがって、単に波が遡上したことにより、海洋プラスチックが再漂流するわけではなく、沿岸方向における海洋プラスチックの動きが再漂流過程において重要である。

さらに、和田浜海岸では、沿岸方向による漁業フロートの動かされることで、海岸に残った漁業フロート（残余フロート）は、海岸中央側（沿岸方向距離: 400 m–600 m）と海岸北部（沿岸方向距離: 700 m–1100 m）に集積していた。この沿岸方向における残余フロートの集積分布は、海岸からなくなる（再漂流する）直前の調査における漁業フロートの漂着位置の頻度（再漂流頻度）の分布と類似していた。すなわち、残余フロートの集積率の高い区画は、再漂流頻度も高い。再漂流頻度は、海岸からなく

なる（再漂流する）前の漂着位置に基づくため、厳密には漁業フロートが沖合に再漂流した場所を示すものではないが、再漂流過程の物理メカニズムを明らかにするための重要な手掛かりであると考えられる。

本章の目的は、海岸における海洋プラスチックの滞留時間の決定要因を把握するための第一歩として、和田浜海岸における漁業フロートの再漂流過程の物理メカニズムを明らかにすることである。そこで、和田浜海岸を沿岸方向に対していくつかの区画に区切り、漁業フロートがどの区画から再漂流しているのか（すなわち、再漂流区画）を数値実験に基づいて詳細に調べる。和田浜海岸が岸沖方向の海岸幅（30 m–50 m）に比べて沿岸方向の海岸延長（900 m）が長い海岸であることを考慮し、漁業フロートの沿岸方向の動きを一次元移流拡散方程式で表現して、その方程式解に基づき再漂流区画を特定する。

3.2 再漂流区画の特定方法

(1) 区画滞留時間の計算方法

和田浜海岸における漁業フロートの再漂流区画を特定するため、海岸（図-2.1b 中の 200 m–1100 m）を 100 m 区画に分割し、各区画における滞留時間（区画滞留時間）を計算する。ある調査時に各 100 m 区画にあった漁業フロートは、次回調査までの間、他の区画に移動するか、沖合に再漂流するかの 2 つの可能性が考えられる。そのため、区画滞留時間は、和田浜海岸における漁業フロートの再漂流区画の特定に対して有益な情報になると考えられる。

個体識別調査で計測した漁業フロートの漂着位置を用いて、2 つの区画滞留時間を計算する。すなわち、(1) 各

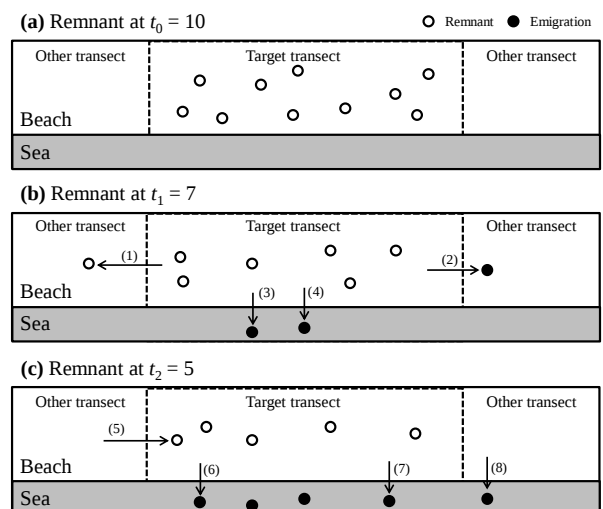


図-3.1 平均 RT1 の計算に係る概念図。
図の右上に○印の色の意味を示す。

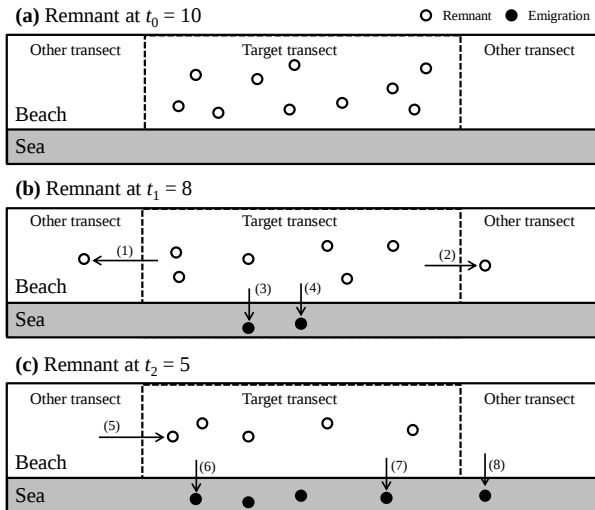


図-3.2 平均 RT2 の計算に係る概念図。
図の右上に○印の色の意味を示す。

区画で新規に発見した漁業フロートが、沿岸方向への移動もしくは沖合への再漂流によりその区画から無くなるまでの滞留時間 (Residence Time 1; 以下, RT1) と (2) 各区画で新規に発見した漁業フロートが、沖合への再漂流により和田浜海岸から無くなるまでの滞留時間 (Residence Time 2; 以下, RT2) である。

図-3.1 に RT1 の計算方法の概念図を示す。各調査間に対象区画 (Target transect) から他の区画に移動した (図-3.1b 中の(1)及び(2))、もしくは沖合に再漂流した (図-3.1b 中の(3)及び(4)、図-3.1c 中の(6)及び(7)) フロート

の数を除き、対象区画に残ったフロートの残余数を計算する。ただし、一度、対象区画から他の区画に移動したが、再度対象区画に戻ってきた場合 (図-3.1c 中の(5))、第2回 ($t=t_1$) 及び第3回 ($t=t_2$) の残余数に加えることとした。

次に、図-3.2 に RT2 の計算方法の概念図を示す。図-3.1 と異なる点は、海岸上の他の区画に移動しても残余数として数えている点である。これら 2 つの方法で得られた残余数の減少過程を指数関数で近似し、時間に関して広義積分する (2.3 節 (1)参照) ことにより、RT1 及び RT2 を計算する。

(2) 数値実験フロー

数値実験のフローを図-3.3 に示す。数値実験では、沿岸方向の漁業フロートの動きを次式に示す一次元移流拡散方程式で表現する。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial(uc)}{\partial x} = D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + f, \quad (3.1)$$

ここで、 $c(x, t)$ は、任意時刻 t における漁業フロートの集積率であり、沿岸方向を x 軸にとる。式(3.1)の左辺第二項の u は漁業フロートの沿岸方向の輸送速度であり、式(3.1)の右辺第一項の D_x は沿岸方向の拡散係数である。式(3.1)の右辺の f は再漂流項を意味する。現時点で海岸から沖合へどのように再漂流しているか (例えば、沖合への輸送速度) はわかっていない。そのため、和田浜海岸におけ

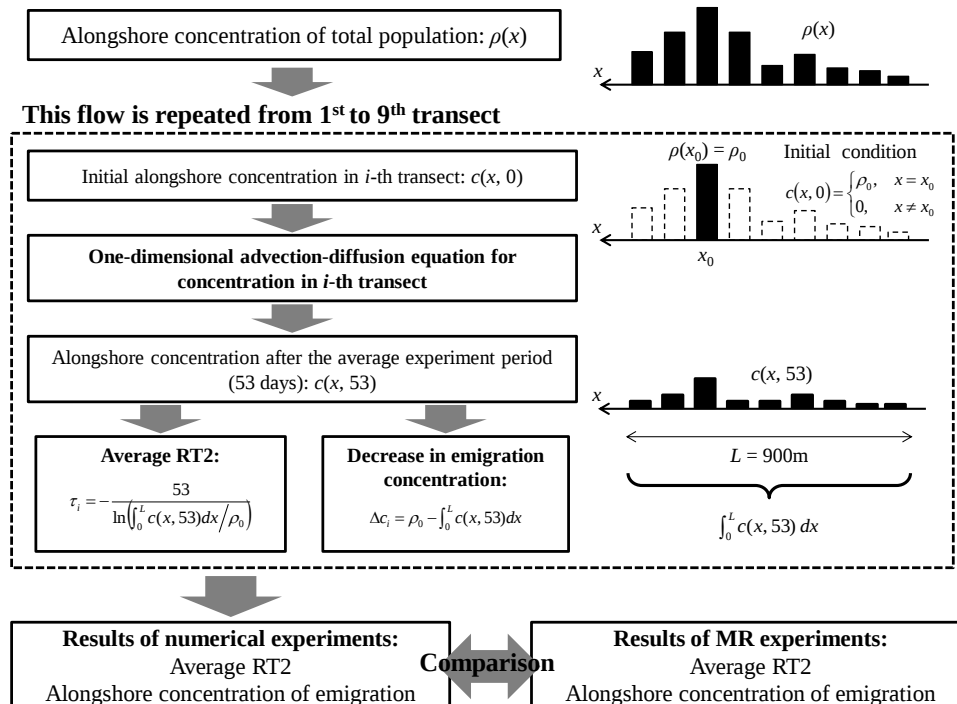


図-3.3 数値実験のフロー図。

る漁業フロートの平均滞留時間に基づき、一定の再漂流確率（すなわち、0.5%/日；2.3節(1)参照）で漁業フロートを減少させる。

式(3.1)の移流拡散方程式を陽的差分法で解き、53日（個体識別調査の調査間平均日数）後の残余フロートの集積率を計算する。なお、陽的差分法の詳細については、3.2節(3)で詳細に述べる。ここで、初期条件は個体識別調査で得られた全調査間の平均的な新規漂着フロートの集積率（図-2.6中のImmigration）を用いる。

$$c(x, 0) = \begin{cases} \rho_0, & x = x_0 \\ 0, & x \neq x_0 \end{cases} \quad (3.2)$$

ここで、 x_0 は計算格子の沿岸方向距離であり、 ρ_0 は $x = x_0$ における新規漂着フロートの集積率であり、 $x = x_0$ 以外の集積率を0とする。境界条件は、沿岸方向距離が200mに相当する南端（ $x = 0$ m）及び1100mに相当する北端（ $x = L = 900$ m）における漁業フロートの沿岸方向におけるフラックスは0とする。

$$u = 0, \frac{\partial c}{\partial x} = 0, \quad x = 0, L \quad (3.3)$$

i 番目の計算格子の新規漂着フロートの集積率を初期条件として、53日後の残余フロートの集積率を計算することで、再漂流頻度及び区画滞留時間が得られる。実際の個体識別調査では、再漂流によって無くなる直前の調査で計測した漂着位置に基づき、再漂流頻度（図-2.6）を計算した（2.2節(3)参照）。そこで、まず計算格子 i における漁業フロートの減少量 Δc_i を次式で計算する。

$$\Delta c_i = \rho_0 - \int_0^L c(x, 53) dx \quad (3.4)$$

全計算格子における漁業フロートの減少量を計算し、その合計値で規格化することで再漂流頻度 ϕ を計算する。

$$\phi = \Delta c_i / \sum_{k=1}^n \Delta c_k \quad (3.5)$$

また、和田浜海岸では漁業フロートが指数関数的に減少することを踏まえ、計算格子 i の区画滞留時間を53日後の残余フロートの集積率の合計値と初期の漁業フロートの集積率との比を用いて次式で計算できる。

$$\tau_i = - \frac{53}{\ln \left(\int_0^L c(x, 53) dx / \rho_0 \right)} \quad (3.6)$$

式(3.6)で得られた区画滞留時間は、3.2節(1)におけるRT2に相当する。

客観的に再漂流区画を特定するため、格子分割数 n に応じた再漂流区画候補の全ての組合せに対する再漂流頻度（ ϕ ）及びRT2（ τ_i ）を計算する。

$$\sum_{k=1}^n \frac{n!}{k!(n-k)!} \quad (3.7)$$

計算された再漂流頻度及びRT2と個体識別調査で得られたそれらを比較して、統計学的に有意な相関にあるか否かで妥当な組合せ再漂流区画を特定した。

(3) 陽的差分法

式(3.1)に中央差分を適用し、一次元移流拡散方程式を書き換えると、次式を得る。

$$c_i^{k+1} = c_i^k + \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[u_i \left(\frac{c_i^k + c_{i-1}^k}{2} \right) - u_{i+1} \left(\frac{c_{i+1}^k + c_i^k}{2} \right) \right] + D_x \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (c_{i+1}^k - 2c_i^k + c_{i-1}^k) + f \quad (3.8)$$

ここで、 Δx と Δt は、それぞれ格子間隔と時間間隔である。格子間隔は、再漂流頻度及び区画滞留時間を計算した区画幅に合わせて100mとする。計算時間間隔 Δt は、3600s（1時間）とする。 c_i^k は時間 k （ $= 1, 2, \dots$ ）における計算格子 i （ $= 1, 2, \dots, 9$ ）の漁業フロートの集積率を意味する。数値実験では、定常的な漁業フロートの輸送状態を考え、 u_i は全個体識別調査間における漁業フロートの平均輸送速度（図-2.14b中の黒い●印；表-3.1参照）を用いる。全区画における平均輸送速度の標準偏差の平均値（ $4.84 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ ；表-3.1参照）に格子間隔 Δx （ $= 100 \text{ m}$ ）を乗じた値（ $4.84 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ）を拡散係数 D_x を用いる。 c_i^k 及び u_i の沿岸方向（ x 軸）における計算格子の位置関係を図-3.4に示す。

式(3.8)の再漂流項 f には、計算格子が再漂流区画候補か否かによって、次式を適用する。

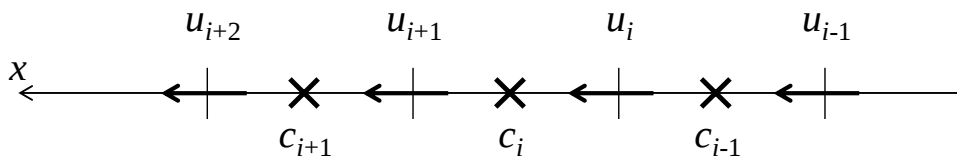


図-3.4 式(3.8)における変数（ c : 漁業フロートの集積率、 u : 漁業フロートの速度）の格子位置。

表-3.1 各格子点における平均輸送速度と輸送速度の標準偏差.

平均輸送速度 (Average) は、図-2.14 中の黒丸と対応する.

Grid number	Alongshore distance [m]	Transport velocity in each grid			
		Average		Standard deviation	
		[m s ⁻¹]	[m day ⁻¹]	[m s ⁻¹]	[m day ⁻¹]
9	1000	-1.39×10 ⁻⁵	-1.20	2.39×10 ⁻⁶	0.21
8	900	-4.35×10 ⁻⁶	-0.38	2.59×10 ⁻⁶	0.22
7	800	-8.41×10 ⁻⁷	-0.07	1.64×10 ⁻⁶	0.14
6	700	1.06×10 ⁻⁵	0.91	8.48×10 ⁻⁶	0.73
5	600	4.29×10 ⁻⁶	0.37	3.24×10 ⁻⁶	0.28
4	500	3.26×10 ⁻⁶	0.28	4.32×10 ⁻⁶	0.37
3	400	1.02×10 ⁻⁵	0.88	2.71×10 ⁻⁶	0.23
2	300	2.19×10 ⁻⁵	1.89	1.33×10 ⁻⁵	1.15
Average standard deviation				4.84×10 ⁻⁶	0.42

$$f = \begin{cases} -\alpha \frac{c_i^k}{\rho_b^k}, & (\text{再漂流区画候補である場合}) \\ 0, & (\text{再漂流区画候補でない場合}) \end{cases} \quad (3.9)$$

ここで、 α は平均滞留時間 τ_r (224 日) に基づいて計算された単位時間間隔 Δt (1 時間=1/24 日) における再漂流確率であり、 $1-\exp(-\Delta t/\tau_r) = 1-\exp(-1/224/24) = 1.9 \times 10^{-4}$ である。 ρ_b^k は時間 k における選出された全再漂流区画候補の集積率の合計値である。

式(3.3)に中央差分を適用すると、境界条件は次式のよに差分化される。

$$\begin{cases} u_i = 0, \frac{c_i^k - c_{i-1}^k}{\Delta x} = 0 & (i=1) \\ u_{i+1} = 0, \frac{c_{i+1}^k - c_i^k}{\Delta x} = 0 & (i=9) \end{cases} \quad (3.10)$$

差分方程式を陽的差分法で解く場合、計算の安定性を確保するため、次式の Courant-Friedrichs-Levy (CFL) 条件を満足するように適切に Δx と Δt を決めなければならない。

$$\begin{cases} u_i \Delta t / \Delta x \leq 1 \\ D_x \Delta t / \Delta x^2 \leq 0.5 \end{cases} \quad (3.11)$$

u_i の最大値 ($2.19 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$)、 D_x ($4.84 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$)、 Δx 及び Δt を式(3.10)に代入すると、 $u_i \Delta t / \Delta x = 7.88 \times 10^{-4} \leq 1$ 、 $D_x \Delta t / \Delta x^2 = 1.74 \times 10^{-3} \leq 0.5$ となり、いずれも CFL 条件を十分に満足する。

3.3 和田浜海岸における再漂流区画

(1) 区画滞留時間

計算された区画滞留時間 (RT1 及び RT2) 及び指数関数近似をしたときの統計量 (決定係数 R^2 及び 95%信頼区間) を表-3.2 に示す。また、区画滞留時間と残余フロートの集積率の関係をみるため、残余フロートの集積率 (図

-2.6 参照) も併せて表-3.2 に示す。

第 1 区画及び第 5 区画において、漁業フロートの集積率が低く、有意な指数関数近似が得られなかったため、RT1 を計算することができなかった。全体的に、平均 RT1 は、和田浜海岸全体における漁業フロートの平均滞留時間 (224 日; 2.3 節 (1) 参照) より短かった。これは、沿岸方向への移動が各区画における漁業フロートの減少に寄与したためである。第 7 区画における平均 RT1 が、海岸全体の平均滞留時間 (224 日) に最も近く、95%信頼区間の幅も同等であった (34 日; 2.3 節 (1) 参照)。これは、例えば第 7 区画内だけで個体識別調査を実施したとしても、海岸全体の平均滞留時間と同等の滞留時間が得られることを意味する。すなわち、適切に区画を選定して個体識別調査を実施することで、効率的に平均滞留時間を計測することができる。平均滞留時間を計測するのに適切な区画選定方法については、3.4 節 (2) で詳細に述べる。

一方、平均 RT2 は、計算区画に応じて 213 日から 518 日の範囲をとり、殆どの区画において海岸全体の平均滞留時間より長かった。これは沿岸方向に漁業フロートが動くことに起因する。平均 RT1 は、沿岸方向への移動と沖合への再漂流で滞留時間が決まるのに対し、平均 RT2 は沖合への再漂流のみによって滞留時間が決まる。この平均 RT1 と平均 RT2 の偏差を計算することで、各区画の沿岸方向への移動のしやすさを把握できる。すなわち、この偏差が大きい (小さい) 区画は、沿岸方向に移動する頻度が高い (低い) 区画となる。計算した平均 RT1 と平均 RT2 の偏差を表-3.2 に示す。第 1 区画及び第 5 区画は、平均 RT1 が計算できなかったため、データなしとした。第 7 区画及び第 8 区画において平均 RT1 と平均 RT2 の偏差が、他の区画のそれに比べて著しく小さい。この 2 区画については、漁業フロートの収束域となっており (2.4 節 (4) 参照)、残余フロートの集積率も他に比べて高い (表-3.2)。したがって、これら 2 区画は、他の区画に移動する頻度が低い区画であり、換言すると、沖合に再漂流する頻度が高い区画であるといえる。

(2) 移流拡散計算

和田浜海岸を 100 m 間隔で 9 区画に分割して (すなわち、式(3.7)において $n = 9$)、全 511 通りの再漂流区画候補の組合せで、再漂流頻度 (式(3.5)) と区画滞留時間 (RT2; 式(3.6)) を計算した。移流拡散計算が個体識別調査の結果をよく再現する (統計学的に有意な関係にある) 再漂流区画候補の組合せは、511 通りの内、28 通りである。表-3.3 に特定された 28 通りの移流拡散計算及び個体識別調査の再漂流頻度と平均 RT2 の統計量 (相関係数、回帰

表3-2 残余フロートの集積率と区画滞留時間の関係.

Transect number	Alongshore distance [m]		Remnant concentration [%]	Number of floats found	RT1 of floats found in a single transect					RT2 of floats found in a single transect					Difference between RT1 and RT2 [days]
	Start	End			Average RT1 [days]	95% confidence interval [days]			R^2	Average RT2 [days]	95% confidence interval [days]			R^2	
						Minimum	Maximum	Difference			Minimum	Maximum	Difference		
9	1000	1100	15	176	136	116	163	46	0.72	260	217	325	107	0.35	125
8	900	1000	23	236	143	128	163	35	0.76	222	199	251	52	0.76	79
7	800	900	30	259	198	182	216	33	0.86	264	241	291	50	0.84	66
6	700	800	12	129	124	104	153	49	0.76	300	247	384	138	0.58	176
5	600	700	2	44	–	–	–	–	–	518	373	849	476	0	–
4	500	600	10	114	154	125	201	77	0.64	348	300	414	114	0.67	194
3	400	500	6	76	185	146	251	105	0.58	313	250	421	171	0.38	129
2	300	400	1	45	57	51	65	14	0.97	213	153	349	196	0.50	156
1	200	300	1	24	–	–	–	–	–	403	270	791	520	0	–

表-3.3 数値実験で特定された再漂流区画の 28 通りの組合せ.

太字は図-3.5 に示す 5 通りの再漂流区画の組合せを意味する.

Combination number	Backwash transect number	Comparison of emigration concentration			Comparison of average RT2		
		Correlation coefficient	Slope	Intercept	Correlation coefficient	Slope	Intercept
1	1 9	0.86	1.37	-0.04	0.72	5.47	-1027.75
2	2 8	0.91	1.22	-0.02	0.75	2.51	-399.14
3	3 8	0.91	1.08	-0.01	0.69	1.26	-70.83
4	1 2 8	0.90	1.11	-0.01	0.69	2.29	-356.94
5	2 7 8	0.92	1.28	-0.03	0.67	1.83	-177.43
6	2 7 9	0.98	1.29	-0.03	0.69	1.89	-207.31
7	2 8 9	0.94	1.37	-0.04	0.78	3.70	-637.52
8	3 7 8	0.92	1.20	-0.02	0.69	1.40	-63.94
9	3 7 9	0.98	1.20	-0.02	0.73	1.36	-70.34
10	3 8 9	0.94	1.27	-0.03	0.77	2.09	-223.73
11	1 2 8 9	0.93	1.29	-0.03	0.72	3.38	-584.79
12	1 3 7 8	0.91	1.13	-0.01	0.68	0.98	-13.81
13	2 3 7 8	0.91	1.08	-0.01	0.81	1.09	-61.39
14	2 3 7 9	0.98	1.06	-0.01	0.75	1.06	-60.86
15	2 4 7 8	0.91	1.06	-0.01	0.78	0.57	91.62
16	2 4 7 9	0.98	1.04	0.00	0.69	0.51	97.88
17	3 7 8 9	0.99	1.31	-0.03	0.67	2.02	-167.94
18	1 3 7 8 9	0.99	1.25	-0.03	0.70	1.44	-103.21
19	2 3 6 7 8	0.86	0.99	0.00	0.67	0.55	93.07
20	2 3 6 7 9	0.93	0.97	0.00	0.72	0.51	91.06
21	2 3 6 8 9	0.97	1.03	0.00	0.81	0.74	29.89
22	2 3 7 8 9	0.99	1.20	-0.02	0.85	1.60	-171.42
23	2 4 7 8 9	0.99	1.19	-0.02	0.79	0.95	15.88
24	1 2 3 7 8 9	0.98	1.16	-0.02	0.72	1.45	-147.41
25	2 3 4 7 8 9	0.98	1.06	-0.01	0.73	0.75	36.19
26	2 3 6 7 8 9	0.97	1.11	-0.01	0.78	0.91	12.69
27	2 3 4 6 7 8 9	0.96	1.00	0.00	0.74	0.52	99.09
28	1 2 3 4 6 7 8 9	0.96	0.96	0.00	0.79	0.34	127.97

直線の傾き及び切片)を示す.

再漂流頻度は, 再漂流区画候補の組合せに依存せず, 個体識別調査の結果と比較的よく一致する. 一方, 平均 RT2 は, 再漂流区画候補の組合せに依存して統計量にばらつきがある. 回帰直線の傾きは 0.34 から 5.47 の範囲にあり, 切片は-102.75 から 127.97 の範囲にある(表-3.3).

特定した 28 通りの再漂流区画候補の組合せから, 再漂流頻度及び平均 RT2 の計算結果と個体識別調査の結果との誤差が 20%以内(回帰直線の傾きが 0.8 から 1.2 の範囲)である組合せに着目すると, 5 通りの再漂流区画の組合せ(組合せ番号: 12, 13, 14, 23 及び 24; 表-3.3 の太字参照)が選出される. これら 5 通りの組合せにおける再漂流頻度と平均 RT2 の沿岸方向の分布及び相関図を図-3.5 に示す. 図-3.5a-図-3.5e の左図にある黒矢印は, 特定した再漂流区画候補の位置を示す. 第 1 区画から第 4 区画(沿岸方向距離: 200 m-600 m)及び第 7 区画から第 9 区画(沿岸方向距離: 700 m-1100 m)が再漂流区画として特定された. 特に, 4 つの区画(第 2 区画, 第 3 区画, 第 7 区画及び第 8 区画)が高頻度に再漂流区画として特定された. これら 4 つの再漂流区画は, 残余フロートの集積率が高

い区画に相当し, 平均輸送速度の収束域に相当する.

3.4 再漂流過程と滞留時間に関する考察

(1) 和田浜海岸における再漂流過程

図-3.6 に和田浜海岸における再漂流過程の概念図を示す. 遡上高が 2 m 以上の遡上イベント時における御前崎沖にある GPS 波浪計(図-2.1a 中の◇印)で観測された主波向は 180°-270°の範囲にあった(図-2.12). 沖合から伝搬してきた波は, 屈折により和田浜海岸に直角入射し, 和田浜海岸沖合にある潜堤(Low-Crested Structures (LCSs))上で砕波するであろう. 多くの研究によって潜堤-汀線の上に 2 つの循環流が形成されることが確認されている(例えば, 下園ら, 2004; Martinelli et al., 2006; 栗山ら, 2007). まず, 潜堤直上において砕波による質量輸送が生じ, 潜堤の開口部で沖に向かった流れ(以下, 汀線近くの沖向きの流れを"離岸流"と称する)が発生することで, 時計回り循環流が形成される. 逆に潜堤より汀線側で反時計回りの循環流が形成され, 潜堤の中央部に離岸流が形成される. その結果, 汀線付近では, 潜堤の背後(開口部)で, 沿岸流の収束域(発散域)が形成

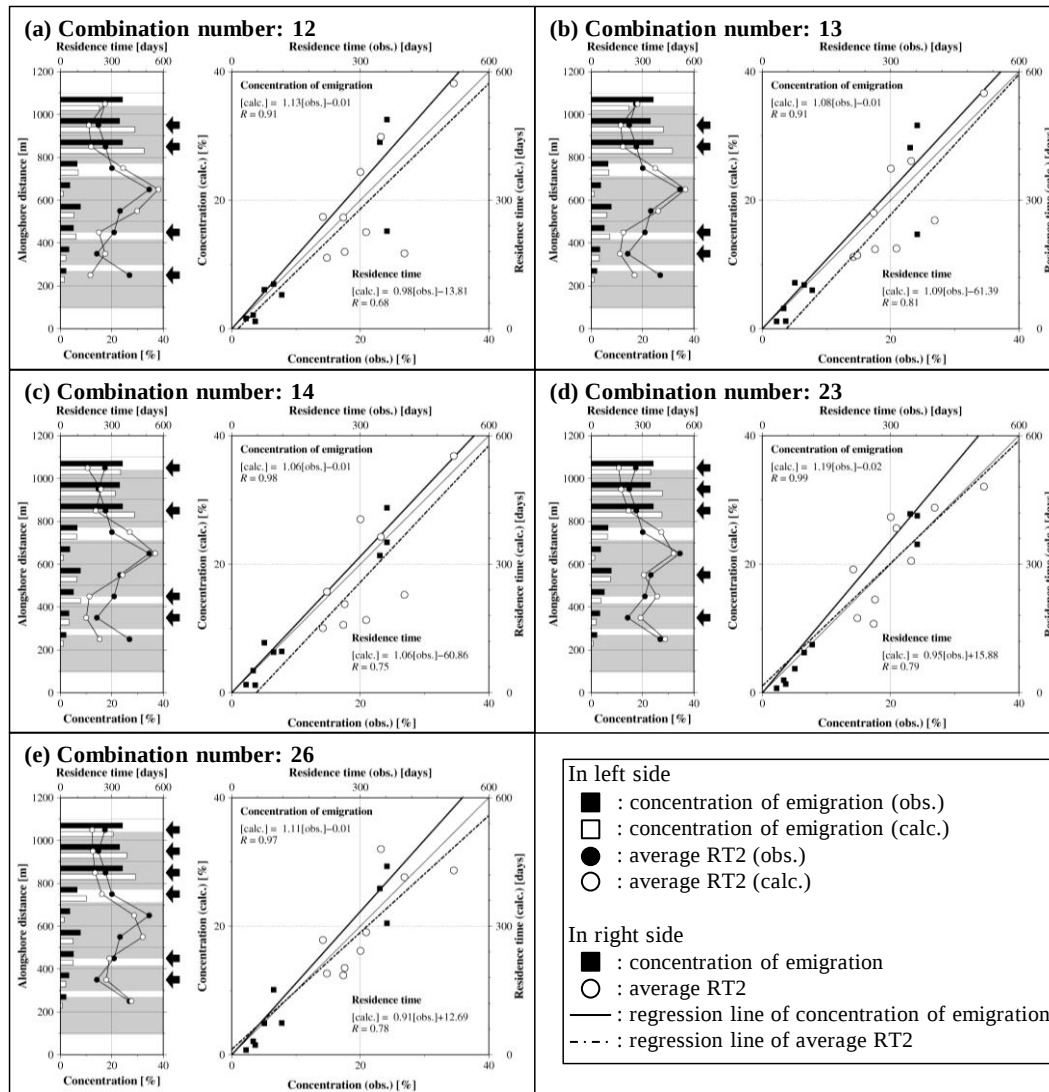


図-3.5 再漂流区画の5通りの組合せにおける再漂流頻度と平均 RT2 の数値実験による再現性。

各図の組合せ番号は、表-3.3 と対応する。各図の左側は沿岸方向における再漂流頻度（下軸）及び平均 RT2（上軸）の分布の比較を示し、薄灰色ハッチ及び黒矢印は、それぞれ沿岸方向における潜堤の投影範囲及び特定された再漂流区画を意味する。各図の右側は個体識別調査と数値実験による結果の相関を示す。記号の凡例を右下のボックス内に示す。

される。この沿岸流の形成パターンに対応して、再漂流区画が潜堤背後で特定された（3.3 節 (2) 参照）。したがって、漁業フロートは、沿岸流によって輸送され、漁業フロートの多くは、もう一度海岸に漂着するが、一部の輸送された漁業フロートが、潜堤背後に発生した離岸流（図-3.6 中の赤破線矢印）によって沖合に再漂流する可能性が示唆された。

(2) 滞留時間の決定要因

本研究及び既往研究で得られた知見に基づき、滞留時間の決定要因について総括する。海岸における海洋プラスチックの滞留時間は、遡上イベントの規模及び頻度、海浜流系の形成パターン、海浜地形及び海洋プラスチック

の種類に依存すると推察される。

遡上イベントの規模が大きく、かつ頻度が高くなると、漁業フロートが海浜流によって沿岸方向に輸送され、離岸流によって再漂流する機会が高まり、漁業フロートの減少率が高くなると考えられる。例えば、2012 年 3 月から同年 6 月の調査間に、遡上イベントの発生頻度が低かったけれども、台風等による単一の大きな遡上イベントが発生したため、0.42%/日の確率で漁業フロートが再漂流していた（表-2.2）。逆に、2013 年 2 月から同年 5 月の調査間には、台風等の大きな遡上イベントはないけれども、比較的小さな遡上イベントが頻繁に発生した結果、前述の単一の遡上イベントの寄与が大きい調査間と同等の確率（0.43%/日）で再漂流していた（表-2.2）。これ

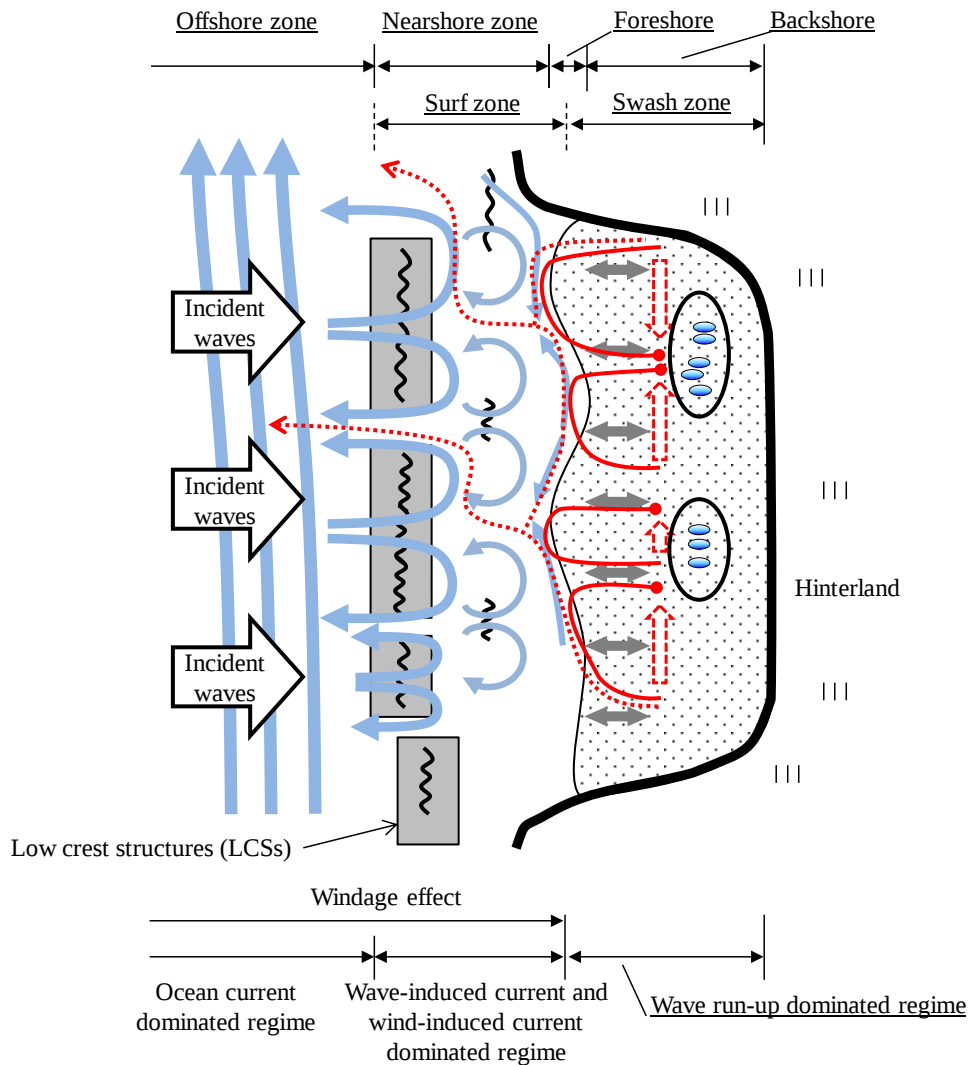


図-3.6 和田浜海岸における漁業フロートの再漂流過程の概念図。

水色及び灰色の矢印は、それぞれ沖合又は海浜近くの流れ及び波の遡上を意味する。赤色の矢印は漁業フロートの動きを意味し、楕円は漁業フロートの集積域を意味する。

は、比較的小規模な遡上イベントが頻度よく発生する期間と遡上イベントの発生頻度は低い、単一の大規模な遡上イベントが発生する期間における再漂流確率が同じであることを示唆する。

また、海浜流系の形成パターンによって、沖合への戻り流れの発生間隔や発生位置が決まるであろう。和田浜海岸では、潜堤により海浜流系の形成パターンが固定されていると推察される。しかし、一般には、海浜流系の離岸流の形成位置は、沿岸砂州（バー）の形成に応じて変動する（例えば、Lippmann and Holman, 1990）。したがって、潜堤がない一般海岸では、バーの形状に依存する海浜流系の形成パターンを把握することが必要であると推察される。

また、海岸幅が広い程、滞留時間が長くなるであろう。例えば、Bowman et al. (1998)は、地中海に面したイスラ

エルの6海岸における調査結果を比較して、海岸幅の広い海岸では漂着物量が多いことに気づき、海岸幅等の海浜地形が漂着物の存在量を決める重要な要素であると指摘した。また、Kataoka et al. (2013a)は、和田浜海岸における漁業フロートの指数関数的減少が岸沖一次元の拡散方程式で支配されると仮定し、滞留時間が海岸幅の2乗で決まることを示唆した。2.2節(2)で述べたように本研究で対象とした漁業フロートは、風圧の影響を受けにくい。しかし、PETボトルや発砲スチロール製の漁業ブイなどの風圧によって動かされやすい海洋プラスチックは、再漂流過程における寄与は、波浪や海浜流に加えて風の寄与も大きいと推察される。実際に、和田浜海岸において漁業フロートは浜崖を超えて後背地に移動することはなかったが、PETボトルやビニール袋等の海洋プラスチックは、後背地でしばしば発見されている。したがって、

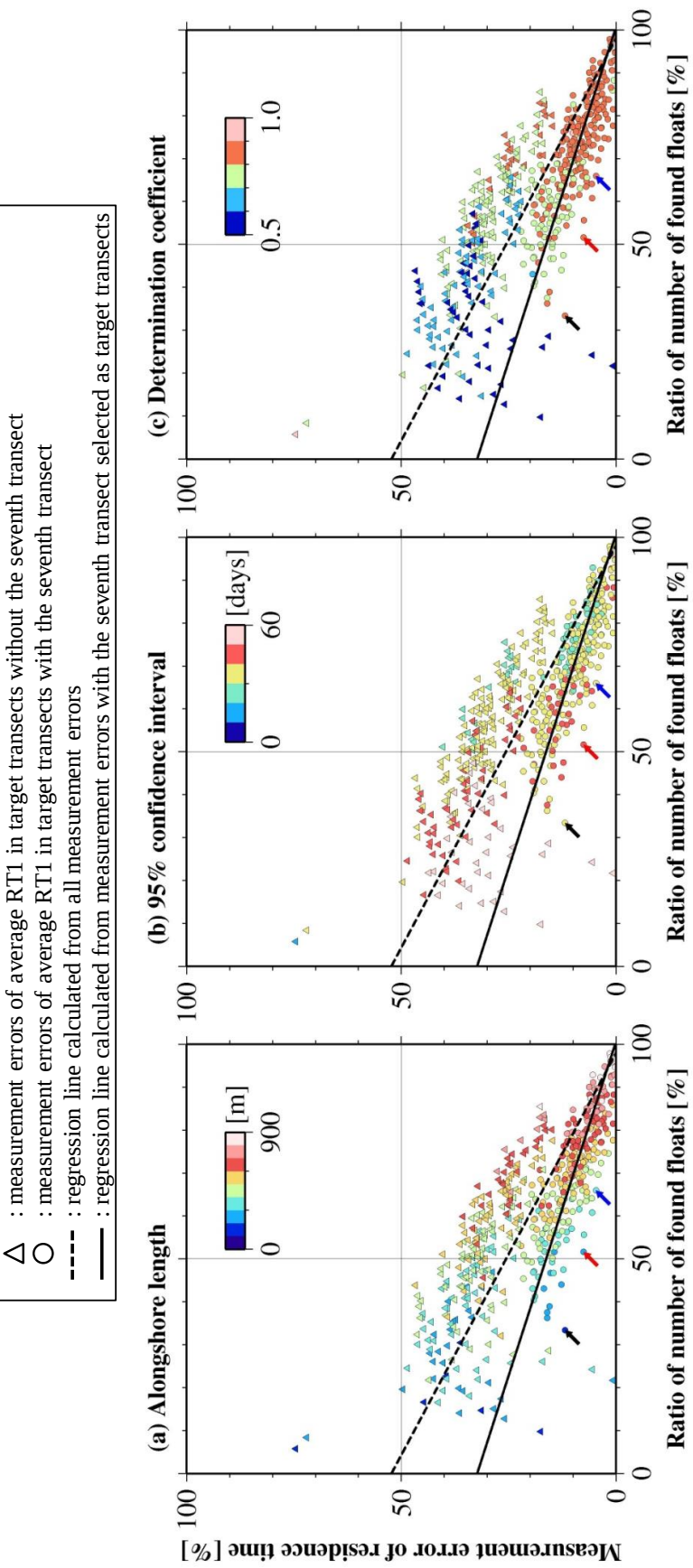


図-3.7 平均滞留時間の計測誤差と漁業フロートの発見率の関係。
記号及び線の凡例は図上に示す。(a),(b)及び(c)の記号の色は、それぞれ調査対象区画の総延長、95%信頼区間幅及び指数関数近似の決定係数を意味する。黒色、赤色及び青色の矢印は、それぞれ第7区画、第7-8区画及び第7-9区画で個体識別調査を実施した場合の平均滞留時間の計測誤差を意味する。

海浜地形や海洋プラスチックの種類によっても滞留時間は異なるであろう。

(3) 効率的な個体識別調査手法

個体識別調査は海岸での滞留時間を把握する有効な手法である。しかしながら、海洋プラスチックが大量に漂着している海岸や延長が非常に長い海岸において、本研究で実施したように海岸の全延長及び漂着するプラスチックの全数を対象として調査することは困難であろう。基本的に海岸一部の区画のみを対象に個体識別調査を行う場合、区画外への沿岸方向への移動が寄与するため、海岸全延長における平均滞留時間（224 日）に比べて過小評価となる（3.3 節(1)参照）。ここでは和田浜海岸で特定区画を選定して個体識別調査を行っていた場合の区画滞留時間（すなわち、平均 RT1）の計測誤差を示し、効率的な個体識別調査手法について言及する。

3.3 節(1)で示したように、和田浜海岸の第 7 区画（沿岸方向距離: 800 m–900 m）における平均 RT1 が、和田浜海岸の全延長を対象とした平均滞留時間（224 日）と最も近かった。ここでは、平均 RT1 と平均滞留時間（224 日）の偏差を平均滞留時間（224 日）で除して、平均 RT1 の計測誤差とした。例えば、第 7 区画のみを対象とした場合の平均 RT1 の計測誤差は、 -12% ($=(198-224)/224$) となる。区画の選定方法による平均 RT1 の計測誤差の依存性を調べるために、数値実験と同様に、和田浜海岸を 9 つの区画に分割し、調査対象区画をランダムに選出する。調査対象区画の全組合せ数は、再漂流区画候補の全組合せと同様に、511 通りである（式(3.7)において $n=9$; 3.3 節(2)参照）。選出した調査対象区画における残余数の時間変化を指数関数近似することで、平均 RT1 を計算した。調査対象区画の全組合せの内、残余数の時間変化を指数関数で近似でき、平均 RT1 が計算できた調査対象区画の組合せは 505 通りであった。

図-3.7 は全調査における新規漂着フロートの総数（すなわち、784 個; 表-2.1 参照）に対する調査対象区画で発見した漁業フロートの総数の比（以下、発見比率）と平均 RT1 の計測誤差の相関図である。○印（△印）は、第 7 区画を含んだ（含まなかった）場合の関係図であり、色は調査対象区画の総延長（図-3.7a）、95%信頼区間幅（図-3.7b）及び指数関数近似の決定係数（図-3.7c）を意味する。

全体的に、計測誤差は漁業フロートの発見比率が大きいくらい小さい。平均 RT1 の計測誤差（図-3.7 中の△及び○印）を漁業フロートの発見比率で回帰する（図-3.7 中の破線）と、95%信頼水準において統計学的に有意な負

の関係が得られる（ $n=505$, $R=-0.77$, $P=6.3 \times 10^{-102} < 0.05$ ）。例え調査対象区画の総延長が同じであっても計測誤差が異なる点が興味深い。例えば、調査対象区画の総延長が 700 m であっても、平均 RT1 の計測誤差は 0% から 40% の範囲で変動する。これは、調査対象区画の選出が滞留時間を計測する上で重要であることを示唆する。

第 7 区画を含んだ場合の計測誤差（図-3.7 中の○印）は、含まなかった場合の計測誤差（図-3.7 中の△印）に比べて全体的に小さくなる。第 7 区画を含んだ場合の計測誤差のみを漁業フロートの発見比率で回帰する（図-3.7 中の実線）と、やはり 95%信頼水準において統計学的に有意な負の関係が得られる（ $n=255$, $R=-0.81$, $P=2.2 \times 10^{-60} < 0.05$ ）。505 通りの平均 RT1 の計測誤差からの回帰直線（図-3.7 中の破線）に比べて、全ての発見比率に対して計測誤差が小さい（図-3.7 中の実線）。このことから第 7 区画は和田浜海岸における平均滞留時間の計測において非常に重要な区画であるといえる。

平均滞留時間の計測に重要な区画か否かは、残余フロートの集積率によって判断することができる。実際に、和田浜海岸において第 7 区画は、全 9 区画の中で残余フロートの集積率が最も高い区画である（表-3.2）。第 7 区画の 1 区画、第 7–8 区画の 2 区画及び第 7–9 区画の 3 区画を調査対象区画として選出した場合の計測誤差をそれぞれ図-3.7 の黒色、赤色及び青色の矢印で示す。明らかに、調査対象区画における残余フロートの集積率が増えたと、計測誤差は減少する。したがって、効率的な個体識別調査を行うためには、海岸における残余フロートの集積率を考慮することが重要である。

3.5 3 章のまとめ

東京都新島村和田浜海岸で発見した漁業フロートの再漂流過程の物理メカニズムを個体識別調査で得られた漁業フロートの動きから詳細に調べた。初めに、各調査時における漁業フロートの漂着位置に基づいて、和田浜海岸の沿岸方向における各 100 m 区画で発見した漁業フロートの滞留時間（区画滞留時間）を計測した。次に、和田浜海岸が沿岸方向に長い海岸であることから、海岸での漁業フロートの動きを一次元移流拡散方程式で表現して再漂流区画を特定した。

まず、各区画で漁業フロートを発見した後、その対象区画のみで残余数を数える場合の区画滞留時間（RT1）と和田浜海岸全延長で残余数を数える場合の区画滞留時間（RT2）を計算した。基本的に、平均 RT1 は、和田浜海岸全体における漁業フロートの平均滞留時間（224 日）に比べて過小になる。9 区画の中でも第 7 区画における

平均 RT1 が、残余フロートの集積率が高いため、和田浜海岸における平均滞留時間と最も近かった。滞留時間の計測において残余フロートの集積率を考慮することが重要であり、これにより効率的に海岸の滞留時間を把握することができる。一方、平均 RT2 は、和田浜海岸における平均滞留時間と比較して過大となる傾向がある。第 7 区画及び第 8 区画における平均 RT1 と平均 RT2 の偏差が、他の区画に比べて小さいことがわかった。平均 RT1 と平均 RT2 の偏差は、沿岸方向への移動する頻度を意味することから、第 7 区画及び第 8 区画は沿岸方向に移動しにくい（もしくは、沖合へ再漂流する可能性が高い）区画であるといえる。

次に、移流拡散方程式を陽的差分法で解き、再漂流区画を特定するための数値実験を実施した。数値実験の結果、4 つの区画（第 2-3 区画及び第 7-8 区画）が再漂流区画として特定された。これらの区画は、残余フロートの平均輸送速度の収束域（空間勾配が負）であり、集積率が高い区画であった。また、これらの区画は、和田浜海岸沖合にある潜堤の背後に位置していた。潜堤背後は、沿岸流の収束域に相当し、沖合への戻り流れ（離岸流）が発生すると推察される。以上のことから、和田浜海岸において漁業フロートは、海浜近くの沿岸流によって沿岸方向に輸送され、輸送されたフロートの一部が潜堤背後に形成される離岸流によって再漂流する可能性が示唆された。

4. 平均滞留時間を用いて海岸清掃効果の評価

4.1 はじめに

海洋環境に流出した海洋プラスチックは、主として海岸清掃によって除去されている。そのため、海岸清掃は海洋プラスチックによる海洋環境リスクを軽減するための重要な活動である。例えば、米国の非政府組織（Non-Governmental Organizations; NGO）である Ocean Conservancy は、世界中でボランティアを募って年 1 回の海岸清掃を毎年実施している（Ocean Conservancy, 2013）。しかし、現時点で海岸清掃の定量的な評価手法はなく、いつ・どこで・どのように海岸清掃を実施すればよいかという問いに誰も答えることができない。そこで、本章では、海岸清掃効果の定量化を試みる。海岸清掃効果を評価する上で、本研究では海洋プラスチック起因の 2 つの海洋環境リスクに着目する。すなわち、海洋プラスチックに含有する重金属の溶出と紫外線・熱劣化による海洋プラスチックの微細片の発生である。

Nakashima et al. (2012) は、前章（第 2 章及び第 3 章）で研究対象とした漁業フロート（図-2.1c 中の Type 1）に、環境に有害な鉛（ $\text{Pb}(\text{C}_{18}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ ）がプラスチックの製造過程で添加されて高濃度に含有していることを明らかにした。さらに、漁業フロートに含有する鉛が、雨水などのプラスチック表面に付着した水を介して、海岸に溶出することを指摘し、その溶出速度を精微な室内実験によって計測した。計測した溶出速度に基づき、長崎県五島市奈留島にある大串海岸に溶出する重金属の総量を推定し、漁業フロート起因となる海岸への重金属汚染のリスク評価をした。リスク評価の結果、現時点で深刻なリスクレベルではないけれども、海洋環境に流出する漁業フロート量の増大や長期的な海岸環境への溶出を考慮すると、環境リスクの一つとして警戒する必要があると指摘した。

海洋プラスチックが太陽光に含まれる紫外線や周囲の熱によって劣化が進行し、微細化が進行する。海洋プラスチックは、海域を漂流するよりも海岸に漂着していた方が、紫外線及び熱によって劣化が急速に進むことが指摘されている（Andrady, 2011）。そのため、海岸は海洋プラスチック微細片の主要な発生源であると考えられる。海洋プラスチックが微細化することで、海洋生態系に取り込まれやすくなる。微細化によって、低次の海洋生物に取り込まれてしまい、将来的に食物連鎖にも悪影響を及ぼす可能性がある（例えば、Mato et al., 2001; Thompson et al., 2004; Andrady, 2011）。

いずれの環境リスクを評価する上で、海岸に海洋プラスチックが漂着してから再漂流するまでの滞留時間が必要不可欠である。2.3 節 (1) で述べたように、和田浜海岸における漁業フロートの滞留時間は、残余数の時間変化（残余関数）を指数関数で近似することで計測された。残余数が指数関数的に減少することで、海岸を線形システムと見なすことができ、海岸のシステム特性（すなわち、増幅特性及び位相特性）を理解することが可能となる（Kataoka et al., 2013a）。そこで、本章では海岸を線形システムと見なして、海岸への重金属の溶出軽減及び微細プラスチックの発生抑制に係る海岸清掃効果（Beach Cleanup Effect, 以下、BCE）の評価手法を提案し、指数関数型のシステム特性をもつ他の海岸における滞留時間による清掃効果の依存性を明らかにすることを目的とする。

4.2 海岸清掃効果の評価方法

(1) 海洋プラスチックに関する海岸のシステム特性

本研究では、和田浜海岸と同様に、海洋プラスチックの残余数が指数関数的に減少すると仮定して、海岸を線形システムと考える。すなわち、線形システム理論における単位インパルス応答 $h(t)$ を次式で定義する。

$$h(t) = \begin{cases} \exp(-t/\tau_r), & \text{for } t \geq 0 \\ 0, & \text{for } t < 0 \end{cases} \quad (4.1)$$

ここで、 t 及び τ_r は、それぞれ経過時間と平均滞留時間である（2.3 節 (1) 参照）。単位インパルス応答をフーリエ変換すると、システム関数 $H(\omega)$ が得られる。

$$H(\omega) = \frac{\tau_r}{1 + (\omega\tau_r)^2} (1 - i\omega\tau_r), \quad (4.2)$$

ここで、 $\omega (= 2\pi/T)$ は角振動数であり、 T は海洋プラスチックの海岸への新規漂着量の変動周期（以下、新規漂着周期）である。式(4.2)からシステム特性（すなわち、増幅特性及び位相特性）が得られる。

$$A(\xi) = \frac{|H(\xi)|}{\tau_r} = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi\xi)^2}}, \quad (4.3)$$

$$\theta(\xi) = \tan^{-1} \frac{\text{Im}(H(\xi))}{\text{Re}(H(\xi))} = \tan^{-1}(-2\pi\xi), \quad (4.4)$$

ここで、 $A(\xi)$ 及び $\theta(\xi)$ は、それぞれ新規漂着量に対する存在量の増幅率及び位相差である。なお、 $A(\xi)$ は滞留時間 τ_r で規格化している。 $\theta(\xi)$ は必ず負の値（ $\theta < 0$ ）をとり、新規漂着量に対して存在量の位相が遅れることを意味する。 ξ は新規漂着周期 T に対する滞留時間 τ_r の比であり、以後、無次元滞留時間と称する。

表-4.1 $\zeta = 10^1$, 10^0 及び 10^{-1} の場合における増幅率 A と位相差 θ

Dimensionless residence time ζ	Normalized amplification factor A	Phase lag θ [degrees]
10^1	1.59×10^{-2}	-89.09
10^0	1.57×10^{-1}	-80.96
10^{-1}	8.47×10^{-1}	-32.14

指数関数型のシステム特性は、基本的に無次元滞留時間 ζ に依存する。もし、新規漂着周期 T が 365 日なら、滞留時間 τ_r が 1 ヶ月、1 年及び 10 年である海岸のシステム特性は、それぞれ 10^{-1} , 10^0 及び 10^1 の無次元滞留時間 ζ で決まる。表-4.1 に無次元滞留時間 ζ が 10^{-1} , 10^0 及び 10^1 である場合の増幅率 A 及び位相差 θ を表す。増幅率 A (位相差 θ の絶対値) は、無次元滞留時間が大きいほど、小さく (大きく) なる (表-4.1)。

(2) 海岸清掃効果 (BCE1) : 海岸への重金属溶出

図-4.1 は、重金属の海岸への溶出軽減に関する海岸清掃効果 (BCE1) の概念図である。Nakashima et al. (2012) に基づくと、重金属は海洋プラスチックの表面を覆う水 (例えば、雨水) を介して海岸に溶出する。海岸清掃を実施することで、海岸環境中にある海洋プラスチック起

因の重金属量 (重金属溶出量) を減らすことができる。BCE1 は海岸清掃を実施した場合としない場合の重金属溶出量の差に基づいて評価する。

海岸を線形システムとして仮定すると、海岸に漂着した全ての海洋プラスチックからの重金属溶出フラックス $y_m(t)$ を次式で評価できる。

$$y_m(t) = \int_0^t v(t-\tau)x(\tau)h(t-\tau)d\tau \quad (4.5)$$

ここで、 $t-\tau$ はある時 (τ) に海洋プラスチックが海岸に漂着してから経過時間 (以下、年齢) であり、 $v(t)$ は海洋プラスチック 1 個からの重金属溶出速度である。また、 $x(t)$ 及び $h(t)$ は、それぞれ新規漂着量及び単位インパルス応答 (式(4.1)) である。重金属溶出量 $Y_m(t)$ は、式(4.5) を時間に関して積分することによって計算される。

$$Y_m(t) = \int_0^t y_m(t')dt' = \int_0^t \left(\int_0^{t'} v(t'-\tau)x(\tau)h(t'-\tau)d\tau \right) dt' \quad (4.6)$$

(3) 海岸清掃効果 (BCE2) : 微細プラスチックの発生

図-4.2 は、海洋プラスチックの微細化に関する海岸清掃効果 (BCE2) の概念図である。海洋プラスチックは海岸で、太陽光に含まれる紫外線や海岸地盤からの熱に暴露されることで、劣化していく (Andrady, 2011)。海洋プラスチックの劣化過程において、表面の剥離及び部分的に損傷を受けることで、少しずつ微細プラスチックが発生し、やがて粉々に砕けると考えられる。

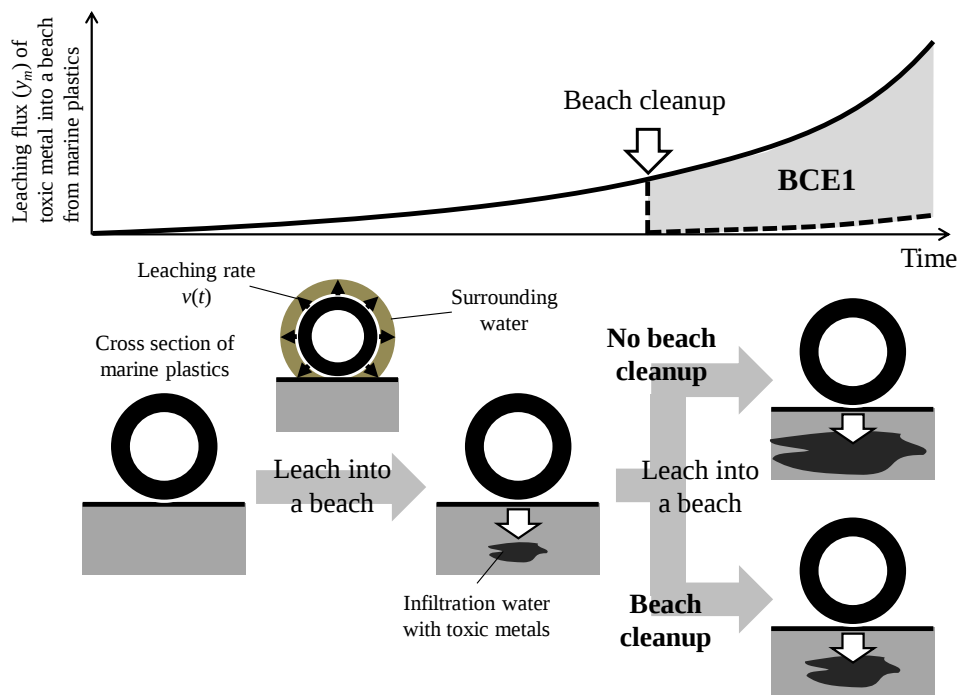


図-4.1 海洋プラスチックから海岸への重金属の溶出に関する海岸清掃効果 (BCE1) の概念図。

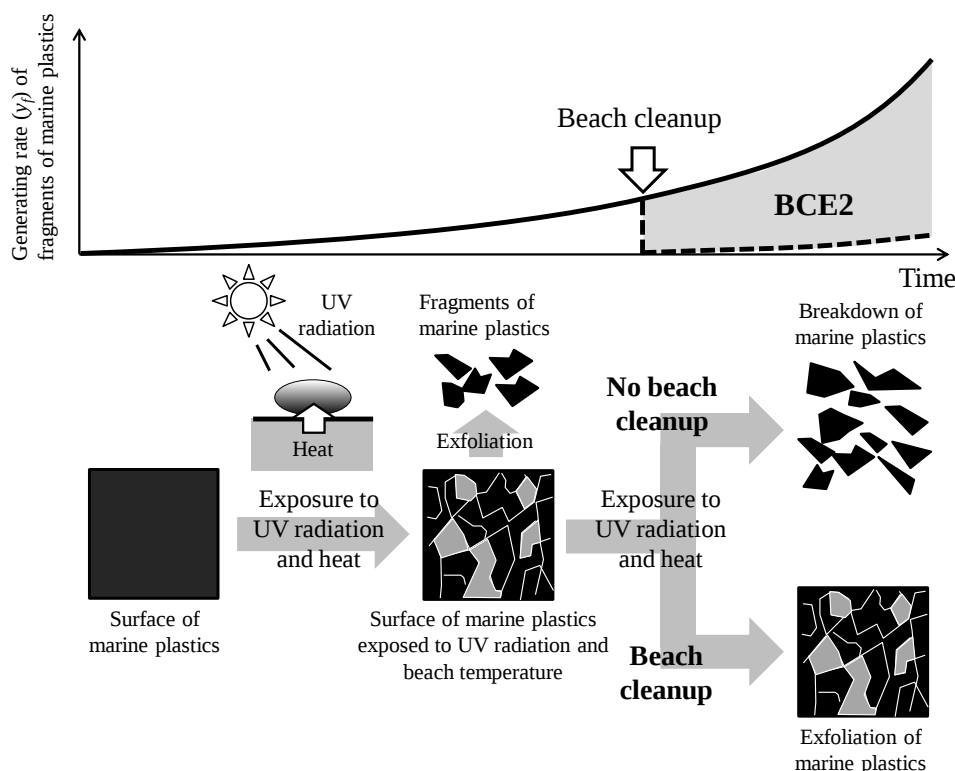


図-4.2 微細プラスチックの発生に関する海岸清掃効果（BCE2）の概念図。

海岸を線形システムとして仮定すると、海岸に漂着した全ての海洋プラスチックからの微細プラスチックの発生速度 $y_f(t)$ を次式で評価できる。

$$y_f(t) = \int_0^t p(t-\tau)x(\tau)h(t-\tau)d\tau, \quad (4.7)$$

ここで、 $p(t)$ は単位時間における海洋プラスチック 1 個からの微細プラスチックの発生確率である。海岸環境中に漂着していた全ての海洋プラスチックからの微細プラスチック発生量 $Y_f(t)$ は、式(4.7)を時間に関して積分することで計算される。

$$Y_f(t) = \int_0^t y_f(t')dt' = \int_0^t \left(\int_0^{t'} p(t'-\tau)x(\tau)h(t'-\tau)d\tau \right) dt'. \quad (4.8)$$

BCE2 は海岸清掃しない場合とした場合の微細プラスチック発生量の差に基づいて評価する。

(4) 海岸清掃効果を評価するための簡易モデル

和田浜海岸において新規漂着量は、黒潮の流路変動に対応して初夏に極大となるような季節的な変動特性をもっていた（2.3 節 (1) 参照）。海洋プラスチックの新規漂着量の季節変動は、地中海に面したイスラエル沿岸の海岸においても確認されている（Bowman et al., 1998）。ここでは、定常成分と周期変動成分からなる新規漂着量を考える。

$$x(t) = x_0 + a \sin(2\pi t/T), \quad (4.9)$$

ここで、 x_0 、 T 及び a は、それぞれ一定の新規漂着量、新規漂着周期及び周期変動の振幅を意味する。基本的に、 $x(t)$ は x_0 及び a の大小に応じて 3 パターンが考えられる（すなわち、 $x_0 > a$; $x_0 = a$; $x_0 < a$ ）。

本研究では、滞留時間による BCE の依存性を簡便に調べるため、3 つの仮定を設けた。(1) 一定新規漂着量 x_0 と周期変動成分の振幅 a が同値である（すなわち、 $x_0 = a$ ）、(2) 海洋プラスチック 1 個からの重金属の溶出速度は時間に対して一定である（すなわち、 $v(t) = v_0$ ）、(3) 海洋プラスチック 1 個からの微細プラスチックの発生確率は年齢に比例する（すなわち、 $p(t) = p_0(t-\tau)$ ）。

重金属の溶出速度及び微細プラスチックの発生確率に上記の仮定を設けると、 $y_m(t)$ 及び $y_f(t)$ は、次式で表現することができる。

$$\begin{cases} y_m(t) = v_0 y_r(t), \\ y_f(t) = p_0 y_a(t), \end{cases} \quad (4.10)$$

ここで、 $y_r(t)$ 及び $y_a(t)$ は、それぞれ海岸にある海洋プラスチックの存在量及び合計年齢を意味する。

$$y_r(t) = \int_0^t x(\tau)h(t-\tau)d\tau. \quad (4.11)$$

$$y_a(t) = \int_0^t (t-\tau)x(\tau)h(t-\tau)d\tau. \quad (4.12)$$

また、 $Y_m(t)$ 及び $Y_f(t)$ は、それぞれ式(4.11)及び式(4.12)を時間に関して積分することで得られ、累積存在量 $Y_r(t)$ 及び合計年齢 $Y_a(t)$ によって表すことができる。

$$Y_r(t) = \int_0^t y_r(t') dt' = \int_0^t \left(\int_0^{t'} x(\tau) h(t' - \tau) d\tau \right) dt' \quad (4.13)$$

$$Y_a(t) = \int_0^t y_a(t') dt' = \int_0^t \left(\int_0^{t'} (t' - \tau) x(\tau) h(t' - \tau) d\tau \right) dt' \quad (4.14)$$

したがって、重金属の溶出速度及び微細プラスチックの発生確率の上記の仮定を設けることで、BCE1（BCE2）が海岸清掃を実施しない場合と実施した場合の存在量（合計年齢）の差によって評価できる。

海岸清掃後の累積存在量 Y_r 及び累積年齢 Y_a は、次式で計算することができる。

$$Y_r(t) = Y_r(t_c) + \int_{t_c}^t y_r(t') dt' \quad (4.15)$$

$$= Y_r(t_c) + \int_{t_c}^t \left(\int_{t_c}^{t'} x(\tau) h(t' - \tau) d\tau \right) dt'$$

$$Y_a(t) = Y_a(t_c) + \int_{t_c}^t y_a(t') dt' \quad (4.16)$$

$$= Y_a(t_c) + \int_{t_c}^t \left(\int_{t_c}^{t'} (t' - \tau) x(\tau) h(t' - \tau) d\tau \right) dt'$$

ここで、 t_c は海岸清掃日を意味する。海岸清掃の有無による累積存在量（累積年齢）の差と海岸清掃を実施した場

合の累積存在量（累積年齢）の比で BCE1（BCE2）を評価する。

4.3 線形応答と海岸清掃効果の滞留時間依存性

(1) 存在量及び合計年齢の時間変動に対する滞留時間依存性

単位インパルス応答 $h(t)$ （式(4.1)）及び新規漂着量 $x(t)$ （式(4.9)）を存在量 $y_r(t)$ （式(4.11)）に代入し、 $y_r(t)$ を $x_0 \tau_r$ で除すと、無次元した存在量 y'_r が得られる。

$$y'_r(\zeta, \xi) = \frac{y_r}{x_0 \tau_r} = y_r'^{const} + y_r'^{sin}, \quad (4.17)$$

$$\begin{cases} y_r'^{const} = 1 - \exp(-\zeta/\xi) \\ y_r'^{sin} = \frac{a}{x_0} A [\sin(2\pi\zeta + \theta) - \sin\theta \exp(-\zeta/\xi)] \end{cases}$$

ここで、 $y_r'^{const}$ 及び $y_r'^{sin}$ は、それぞれ y'_r の定常成分及び周期成分を意味する。 ζ は経過時間 t を新規漂着周期 T で無次元化した経過時間を意味する（すなわち、 $\zeta = t/T$ ）。 A 及び θ は、それぞれ増幅率（式(4.3)）及び位相差（式(4.4)）である。本研究では、 a/x_0 を1とする（すなわち、 $x_0 = a$; 4.2節(4)参照）。

y'_r と同様に、合計年齢 $y_a(t)$ を計算して $x_0 \tau_r^2$ で除すこと

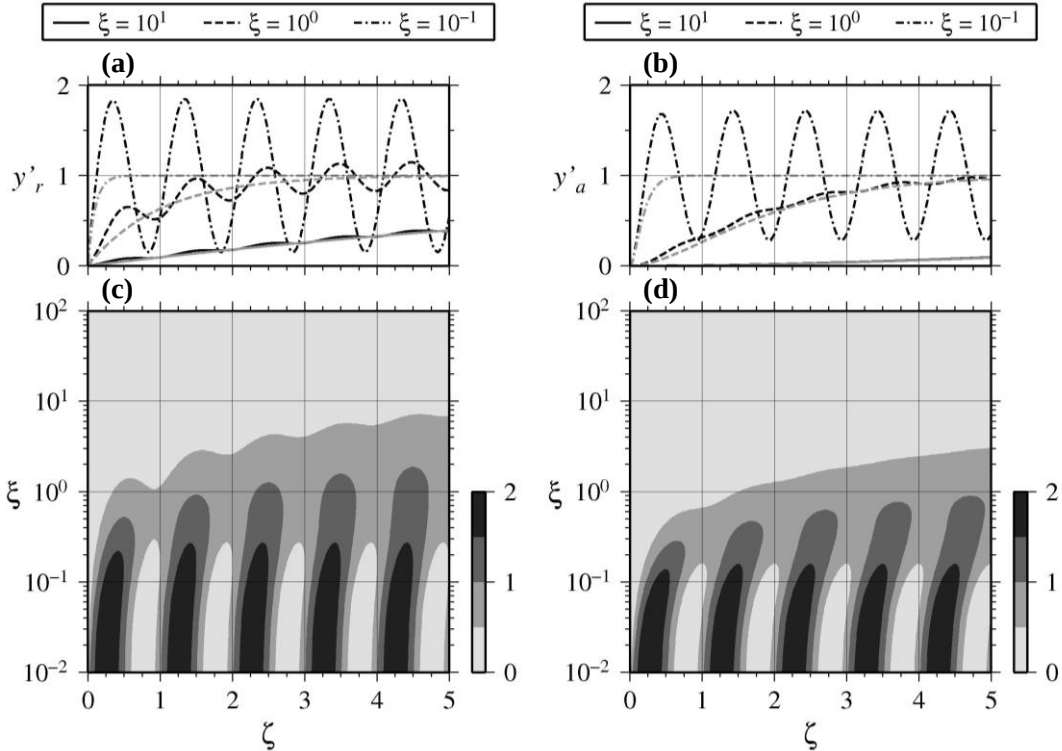


図-4.3 無次元滞留時間 ζ に対する存在量 y'_r と合計年齢 y'_a の依存性。

(a)は、 $\zeta = 10^1$ （実線）、 10^0 （破線）及び 10^{-1} （一点鎖線）の場合における y'_r の変動を表し、(b)は、同様の場合における y'_a の変動を表す。(a)及び(b)中の灰色の線は、 y'_r 及び y'_a の定常成分の変動である。(c)及び(d)では、それぞれ $10^{-2} < \zeta < 10^2$ における y'_r 及び y'_a の変動を濃淡で示し、そのスケールを図の左に示す。

で、無次元化した合計年齢 y'_a もまた、 ζ 及び ξ の関数として表現できる。

$$y'_a(\zeta, \xi) = \frac{y_a}{x_0 \tau_r^2} = y'_a{}^{const} + y'_a{}^{sin}, \quad (4.18)$$

$$\begin{cases} y'_a{}^{const} = 1 - (1 + \zeta/\xi) \exp(-\zeta/\xi) \\ y'_a{}^{sin} = \frac{a}{x_0} A^2 [\sin(2\pi\zeta + 2\theta) - \sin 2\theta \exp(-\zeta/\xi)] \\ \quad - \frac{a}{x_0} A \sin \theta (\zeta/\xi) \exp(-\zeta/\xi) \end{cases}$$

図-4.3c 及び図-4.3d は、それぞれ y'_r 及び y'_a の滞留時間依存性を示す。 y'_r 及び y'_a はいずれも ξ に依存する。滞留時間 τ_r が新規漂着周期 T よりも短い場合（例えば、 $\xi = 10^{-1}$ ）、 y'_r 及び y'_a の定常成分（すなわち、 $y'_r{}^{const}$ 及び $y'_a{}^{const}$ ）は、急速に増加する（図-4.3a 及び図-4.3b 中の灰色の一点鎖線）。逆に、 τ_r が T よりも長い場合（例えば、 $\xi = 10^1$ ）、 $y'_r{}^{const}$ 及び $y'_a{}^{const}$ は、緩やかに増加する（図-4.3a 及び図-4.3b 中の灰色の実線）。 $\zeta \rightarrow \infty$ とすると、 y'_r 及び y'_a は最終的に次式に収束する。

$$y'_r \rightarrow 1 + \frac{a}{x_0} A \sin(2\pi\zeta + \theta), \quad (4.19)$$

$$y'_a \rightarrow 1 + \frac{a}{x_0} A^2 \sin(2\pi\zeta + 2\theta) \quad (4.20)$$

y'_r (y'_a) は、新規漂着量に対して θ (2θ) だけ位相が遅れ、 A (A^2) の振幅で変動する。 $y'_r{}^{const}$ 及び $y'_a{}^{const}$ が 0.9 に到達するまでの時間（以下、収束時間）は、それぞれ 2.3ξ 及び 3.9ξ であり、 ξ に比例する。基本的に、 y'_r (y'_a) の時間変動は、定常成分（すなわち、 $y'_r{}^{const}$ 及び $y'_a{}^{const}$ ）が支配的であり、周期変動成分の寄与率は、増幅率 A で決まる。すなわち、 ξ が大きいほど、周期変動成分の振幅 A が小さくなるため、周期変動成分の寄与が小さくなる。

(2) 累積存在量及び累積年齢の時間変動に対する滞留時間依存性

単位インパルス応答 $h(t)$ (式(4.1)) 及び新規漂着量 $x(t)$ (式(4.9)) を存在量 $Y_r(t)$ (式(4.13)) に代入し、 $Y_r(t)$ を $x_0 \tau_r^2$ で除すと、無次元化した累積存在量 Y'_r が得られる。

$$Y'_r(\zeta, \xi) = \frac{Y_r}{x_0 \tau_r^2} = Y'_r{}^{const} + Y'_r{}^{sin}, \quad (4.21)$$

$$\begin{cases} Y'_r{}^{const} = \zeta/\xi - 1 + \exp(-\zeta/\xi) \\ Y'_r{}^{sin} = \frac{a}{x_0} \frac{1}{2\pi\xi} [-A \cos(2\pi\zeta + \theta) + 1] \\ \quad + \frac{a}{x_0} A \sin \theta \exp(-\zeta/\xi) \end{cases}$$

同様に、累積年齢 $Y_a(t)$ を計算して $x_0 \tau_r^3$ で除すことで、無

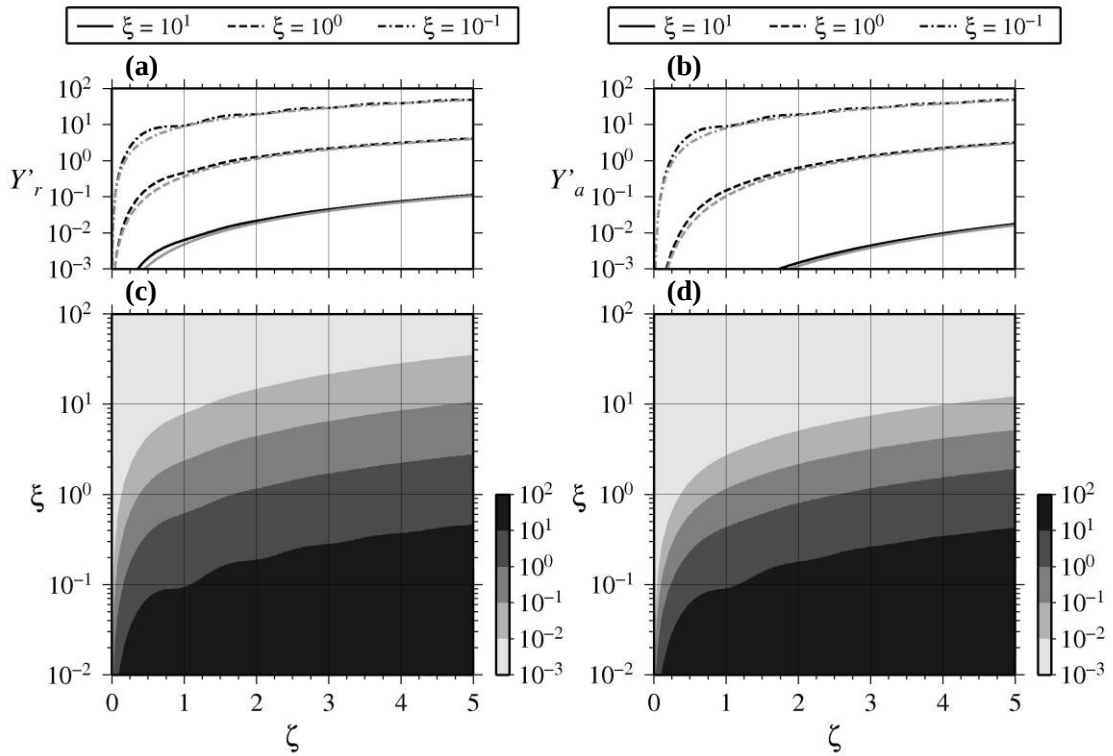


図-4.4 無次元滞留時間 ζ に対する累積存在量 Y'_r と累積年齢 Y'_a の依存性。

(a) 及び (b) の凡例は、図-4.3 と同様である。(c) 及び (d) では、それぞれ $10^{-2} < \xi < 10^2$ における y'_r 及び y'_a の変動を濃淡（対数スケール）で示し、スケールを図の左に示す。

次元化した累積年齢 Y'_a が得られる．

$$Y'_a(\zeta, \xi) = \frac{Y_a}{x_0 \tau_r^3} = Y_a^{rconst} + Y_a^{rsin},$$

$$\begin{cases} Y_a^{rconst} = \zeta/\xi - 2 + (\zeta/\xi + 2)\exp(-\zeta/\xi) \\ Y_r^{rsin} = \frac{a}{x_0} \frac{A^2}{2\pi\xi} [-\cos(2\pi\zeta + 2\theta) + \cos 2\theta] \\ \quad + \frac{a}{x_0} A \sin \theta [(\zeta/\xi + 1)\exp(-\zeta/\xi) - 1] \\ \quad + \frac{a}{x_0} A^2 \sin 2\theta [\exp(-\zeta/\xi) - 1] \end{cases} \quad (4.22)$$

ここで, Y_r^{rconst} 及び Y_r^{rsin} (Y_a^{rconst} 及び Y_a^{rsin}) は, それぞれ Y_r (Y_a) の定常成分及び周期変動成分を意味する．

図-4.4c 及び図-4.4d は, Y_r 及び Y_a の ξ に関する依存性を示す．図-4.3c 及び図-4.3d に示した y'_r 及び y'_a の時間変動に対応して, Y_r 及び Y_a はいずれも ξ が長くなるほど小さくなる．すなわち, τ_r が T よりも短い場合 (例えば, $\xi = 10^{-1}$), Y_r 及び Y_a の定常成分 (すなわち, Y_r^{rconst} 及び Y_a^{rconst}) は, 急速に増加する (図-4.4a 及び図-4.4b 中の灰色の一点鎖線)．逆に, τ_r が T よりも長い場合 (例えば, $\xi = 10^1$), Y_r^{rconst} 及び Y_a^{rconst} は, 緩やかに増加する (図-4.4a 及び図-4.4b 中の灰色の実線)．式(4.19)及び式(4.20)からわかるように, $\zeta \rightarrow \infty$ とすると, Y_r 及び Y_a はいずれも ζ に比例して増加する． Y_r (Y_a) の時間変動も, 周期変動成分に比べて定常成分 (すなわち, Y_r^{rconst} 及び Y_a^{rconst}) が

支配的である． y'_r 及び y'_a と同様に, Y_r 及び Y_a の周期変動成分 (すなわち, Y_r^{rsin} 及び Y_a^{rsin}) の寄与は, ξ が大きいほど小さい．

(3) 海岸清掃の頻度による海岸清掃効果の違い

2.3 節 (1) で示したように, 和田浜海岸における漁業フロートの平均滞留時間は, 224 日であり, 新規漂着量は季節的に変動していた．そこで, 新規漂着周期 T を 365 日であると仮定すると, 無次元滞留時間 ξ は 0.61 (すなわち, $224/365 = 0.61$) となる．海岸清掃は, Ocean Conservancy が総括する International Coastal Cleanups (Ocean Conservancy, 2013) のように年 1 回行われることが多い．そこで, ここでは和田浜海岸で年 1 回もしくは隔年 1 回の海岸清掃を行った場合の海岸清掃効果 (BCE1 及び BCE2) を 4.2 節 (4) に基づいて評価する．

新規漂着量の周期変動成分の位相 θ_c が 2π となるときに毎年, 海岸清掃を実施した場合の y'_r 及び Y_r の時間変化をそれぞれ図-4.5a 及び図-4.5b に示す (太実線: 海岸清掃無し; 太破線: 海岸清掃有り)．また, 同様の時期 ($\theta_c = 2\pi$) に毎年海岸清掃を実施した場合の y'_a 及び Y_a の時間変化をそれぞれ図-4.6a 及び図-4.6b に示す．もし海岸清掃を $\theta_c = 2\pi$ となる時期に実施した時, 5 年後の BCE1 及び BCE2 は, それぞれ 30% 及び 60% となる (表-4.2)．一方, 海

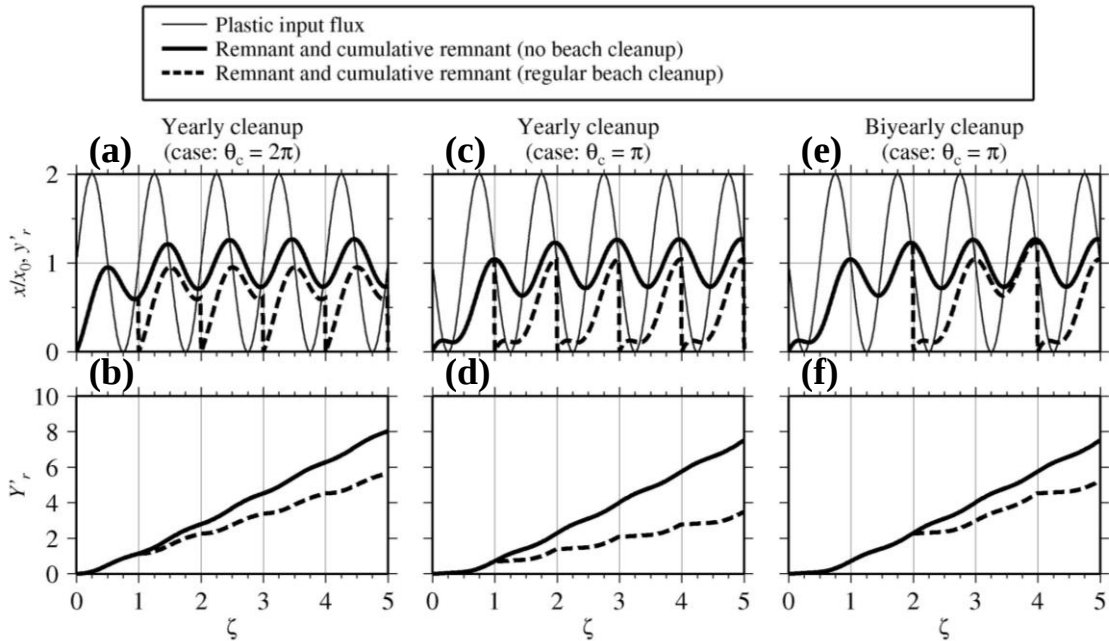


図-4.5 和田浜海岸 (もしくは, $\xi = 0.61$ である海岸) で定期的な海岸清掃の実施有無による存在量 y'_r 及び累積存在量 Y'_r の変動の違い．

新規漂着量の位相が 2π となるとき ($\theta_c = 2\pi$) に毎年清掃した場合, $\theta_c = \pi$ に毎年清掃した場合及び $\theta_c = \pi$ に隔年清掃した場合の y'_r の変動を, それぞれ (a), (c) 及び (e) に示す．また, 同様の 3 つの場合における Y'_r の変動を, それぞれ (b), (d) 及び (f) に示す．線の凡例は, 図上のボックス内に記す．

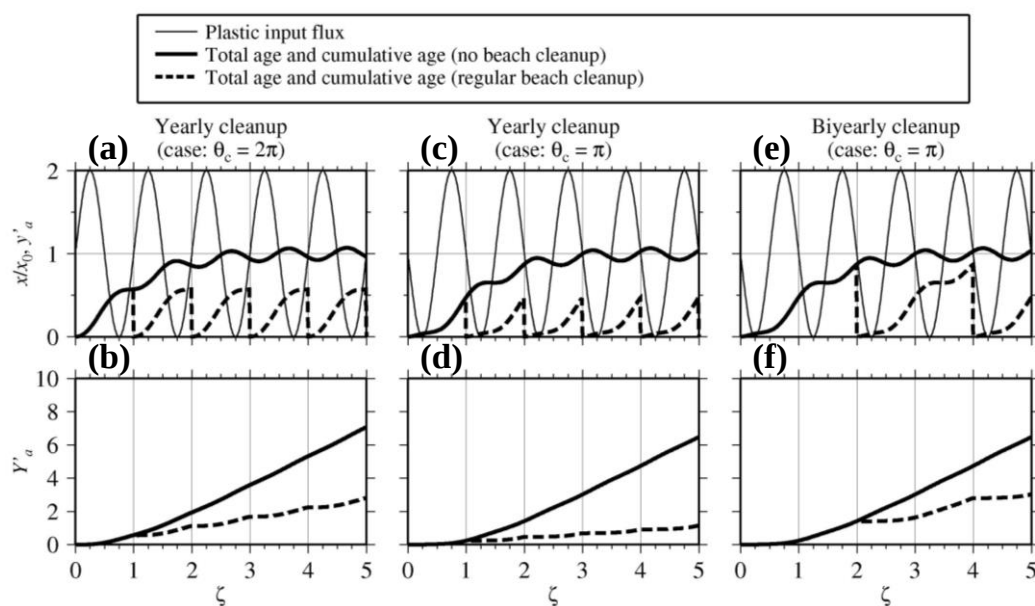


図-4.6 和田浜海岸（もしくは、 $\xi = 0.61$ である海岸）で定期的な海岸清掃の実施有無による合計年齢 y'_a 及び累積年齢 Y'_a の変動の違い。

図の配置及び線の凡例は、図-4.5と同様である。

岸清掃を $\theta_c = \pi$ となる時期に実施した場合の y'_r 及び Y'_r (y'_a 及び Y'_a) の時間変化を、それぞれ図-4.5c 及び図-4.5d (図-4.6c 及び図-4.6d) に示す。この場合、BCE1 及び BCE2 は、それぞれ 54% 及び 82% であり、いずれも大きくなる (表-4.2)。このように同じ頻度であっても海岸清掃の実施時期の違いによって清掃効果は異なり、 $\theta_c = 2\pi$ に海岸清掃を実施するよりも $\theta_c = \pi$ に実施したほうが効果的であるといえる。和田浜海岸（もしくは、 $\xi = 0.61$ となる海岸）において、新規漂着量に対して存在量の位相は -81° だけ遅れる (式(4.4)) ため、 $\theta_c = \pi$ は存在量が極大となる位相に相当する (すなわち、 $\pi/2 - \theta \approx \pi$)。したがって、存在量の極大時期に実施する海岸清掃が効果的であるといえる。

一般に、海岸清掃には多くの労力及び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、存在量の極大時期に海岸清掃を実施すべきであろう。 $\theta_c = \pi$ となる時期に隔年で清掃した場合の y'_r 及び Y'_r (y'_a 及び Y'_a) の時間変化を、それぞれ図-4.5e 及び図-4.5f (図-4.6e 及び図-4.6f) に示す。この場合の BCE1 及び BCE2 は、それぞれ 30% 及び 53% であり、 $\theta_c = 2\pi$ に海岸清掃を毎年実施した場合と同等の効果が得られる (表-4.2)。したがって、清掃時期は、効果的な海岸清掃を実施するための重要な要素の一つである。

表-4.2 和田浜海岸（もしくは、 $\xi = 0.61$ である海岸）における BCE1 及び BCE2。

海岸清掃の実施有無による累積存在量 Y'_r (図-4.5) 及び累積年齢 Y'_a (図-4.6) から計算した海岸清掃効果であり、3つの海岸清掃パターンの詳細については、図-4.5のキャプション参照されたい。

		Yearly cleanup (case: $\theta_c = 2\pi$)	Yearly cleanup (case: $\theta_c = \pi$)	Biyearly cleanup (case: $\theta_c = \pi$)
Dimensionless	No cleanup	8.03	7.51	7.51
cumulative	Cleanup	5.65	3.47	5.25
remnant Y'_r	BCE (%)	30	54	30
Dimensionless	No cleanup	7.07	6.48	6.48
cumulative	Cleanup	2.80	1.15	3.03
age Y'_a	BCE (%)	60	82	53

(4) 海岸清掃効果の滞留時間依存性

和田浜海岸のように単位インパルス応答が指数関数で表現でき、滞留時間が異なる海岸を仮定して海岸清掃効果の滞留時間に対する依存性を調べる。新規漂着量の1周期間に1回海岸清掃を実施した場合の $\zeta=5$ における無次元滞留時間 ξ 及び清掃時期に対するBCE1及びBCE2の依存性を、それぞれ図-4.7a及び図-4.8aに示す。図-4.7a及び図-4.8aの横軸は、存在量が極大となるときの新規漂着量の位相（すなわち、 $2\pi\zeta = \pi/2 - \theta$ ）と清掃時期の新規漂着量の位相 θ_c との偏差 $d\theta$ （以下、位相偏差）である（すなわち、 $d\theta = (\pi/2 - \theta) - \theta_c$ ）。例えば、 $d\theta = 0$ は存在量の極大時期に清掃を実施したことを意味する。図-4.7a及び図-4.8aの縦軸は無次元滞留時間 ξ ，図中の濃淡は、それぞれBCE1及びBCE2を意味する。 ξ が長い海岸で海岸清掃を実施した方が、BCE1及びBCE2が大きい。

図-4.7b及び図-4.8bは、位相偏差 $d\theta$ に対する無次元滞留時間 ξ が 10^{-1} 、 10^0 及び 10^1 である場合の海岸清掃効果の依存性である。 ξ のどの値においてもBCE1は、 $d\theta = 0$ で最大となり、存在量の極大時期で海岸清掃を実施するのが最も効果的である。また、BCE2が最大となる清掃時期は、存在量の極大時期より少しずれるが、 $d\theta = 0$ に海岸清掃を実施しても最大値に近い効果が得られる。したがって、存在量の極大時期に実施する海岸清掃が、重金属の溶出軽減（BCE1）及び微細プラスチックの発生抑制（BCE2）に対して最も効果的である。

一方で、海岸清掃効果の最大偏差（すなわち、海岸清掃効果の最大値と最小値の差）もまた、無次元滞留時間 ξ に依存する。図-4.7c及び図-4.8cは、それぞれBCE1及びBCE2に関する海岸清掃効果の最大偏差の無次元滞留時間 ξ に対する依存性を示す。海岸清掃効果の最大偏差が小さい程、海岸清掃効果が清掃時期に対する依存性が低いことを意味する。無次元滞留時間 ξ が 10^{-1} より小さい海岸で清掃を実施した場合、そもそも海岸清掃効果が小さいため、最大偏差も小さい。興味深いことに、 $\xi > 10^0$ である海岸で清掃を実施するよりも $10^{-1} < \xi < 10^0$ である海岸で清掃を実施する方が、海岸清掃効果の最大偏差が大きい。これは、 Y_r 及び Y_a の周期変動成分の振幅 A が、 ξ が大きくなるほど小さいためである（4.3節(2)参照）。したがって、 $\xi > 10^0$ である海岸で清掃を実施する方が海岸清掃効果の清掃時期に対する依存性が低く、 $10^{-1} < \xi < 10^0$ である海岸で清掃を実施すると、海岸清掃効果の清掃時期に対する依存性が高い。

4.4 海岸清掃効果に関する考察

(1) 海洋プラスチックの環境リスク評価に対する海

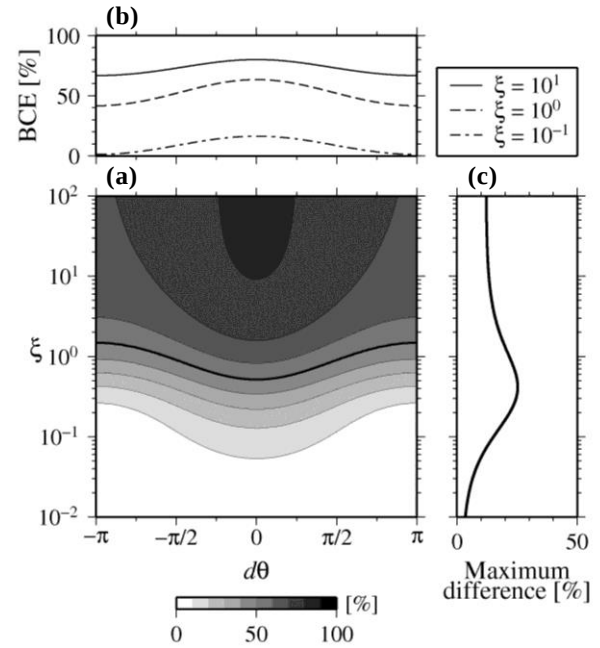


図-4.7 BCE1の無次元滞留時間及び清掃時期に対する依存性。

(a)の縦軸及び横軸は、それぞれ無次元滞留時間 ξ 及び存在量の極大時期と清掃時期の位相差 $d\theta$ を意味する。(a)中のコンター線及び濃淡は、海岸清掃効果を意味し、(a)の下にスケールを示す。(b) $\xi = 10^1$ （実線）、 10^0 （破線）及び 10^{-1} （一点鎖線）の場合におけるBCE1の清掃時期に対する依存性。(c) BCE1の最大偏差（BCE1の最大値と最小値の差）の ξ に対する依存性。

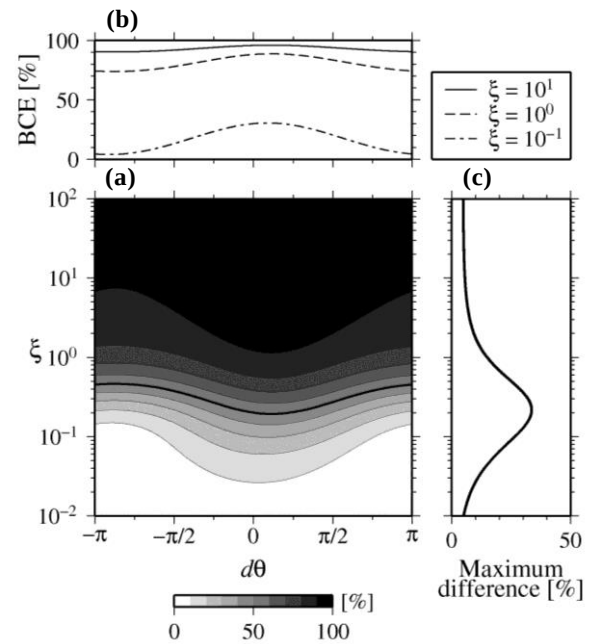


図-4.8 BCE2の無次元滞留時間及び清掃時期に対する依存性。

図の配置及び線の凡例は、図-4.7と同様である。

岸のシステム特性の活用

本研究では、海岸清掃効果の滞留時間に対する依存性を調べるため、海洋プラスチック起源の重金属溶出量及び微細プラスチックの発生量を簡易に評価するためのいくつかの仮定を設けた。すなわち、重金属の溶出速度は一定値 ($v(t) = v_0$) とし、微細プラスチックの発生確率は年齢に比例する関数 ($p(t) = p_0(t - \tau)$) とした。実際には、重金属の溶出速度 $v(t)$ 及び微細プラスチックの発生確率 $p(t)$ は、漂着地の気象環境（例えば、降水量、紫外線量及び気温）によって変化するものであると考えられる。そのため、 $v(t)$ 及び $p(t)$ は漂着地の気象環境に応じて適切な関数を用いる必要がある。もしこれらの妥当な関数を決めることができれば、海岸を線形システムとみなすことで、漂着地の気象環境を考慮した海岸への重金属溶出量（式(4.6)）及び微細プラスチックの発生量（式(4.8)）の環境リスク評価に応用することができるであろう。

例えば、Nakashima et al. (2012)は、漁業フロート（図-2.1c 中の Type 1）から海岸への鉛の溶出速度を計測するのに、Fick の拡散則を適用した。これは、海洋プラスチックの表面から優先的に溶出していき、表面からの距離遠くなると、溶出速度は次第に小さくなることを意味する。これに加えて、実際の漁業フロートからの重金属の溶出過程には、紫外線や熱劣化に伴う表面剥離や物理的外力による傷によって、溶出速度が変化すると推察される。もし $v(t)$ が Fick の拡散則に従い、外傷による溶出速度の変化を無視できるなら、鉛の溶出速度を次のような指数関数で表現することができる。

$$v(t) = v_0 \exp(-t/\tau_m). \quad (4.23)$$

ここで、 v_0 及び τ_m は、それぞれ初期状態の溶出速度及び海洋プラスチックに含有する鉛の全量が海岸に溶出するまでの時間（すなわち、海洋プラスチック内における鉛の平均滞留時間を意味し、以後、平均溶出時間）である。単位インパルス応答 $h(t)$ （式(4.1)）、新規漂着量 $x(t)$ （式(4.9)）及び溶出速度 $v(t)$ （式(4.23)）を海岸への重金属の溶出フラックス $y_m(t)$ （式(4.5)）に代入すると、

$$y_m(t) = y_m^{const} + y_m^{sin}, \quad (4.24)$$

$$\begin{cases} y_m^{const} = v_0 x_0 \beta [1 - \exp(-t/\beta)] \\ y_m^{sin} = v_0 a \beta A' [\sin(2\pi t/T + \theta') - \sin \theta' \exp(-t/\beta)] \end{cases}$$

となる。ここで、 β は平均滞留時間 τ_r と平均溶出速度 τ_m から決まる係数であり、次式で定義される。

$$\beta = \frac{\tau_r \tau_m}{\tau_r + \tau_m}. \quad (4.25)$$

また、 A' 及び θ' は、それぞれ式(4.3)及び式(4.4)中の τ_r を β で置換した新規漂着量に対する溶出フラックスの増幅率

と位相差である。すなわち、重金属溶出フラックスのシステム特性 (A' 及び θ') は、新規漂着周期 T に対する β の比に依存する。したがって、溶出速度を指数関数で定義すると、BCE1 は、無次元滞留時間 ξ に対応する新規漂着周期 T に対する β の比に依存する（4.3 節 (4) 参照）。

(2) 効果的な海岸清掃手法の提案

海岸を線形システムとみなすと、海岸清掃効果を容易に評価することができる。海岸清掃効果は、新規漂着周期 T に対する滞留時間 τ_r の比である無次元滞留時間 ξ に依存し、 $\xi > 10^0$ である海岸における海岸清掃が、相対的に高い効果が得られ、清掃時期に対する海岸清掃効果の依存性が低いことが示唆された（図-4.7 及び図-4.8）。ここでは、海岸清掃効果の滞留時間に対する依存性を考慮した戦略的な海岸清掃方策について考察する。

効果的な海岸清掃手法に関する提案の一つは、滞留時間が 1 年以上である海岸で清掃を行うことである。多くの海岸において、漂着物の存在量の季節的な変動が確認されている（例えば、地中海に面したイスラエル沿岸の 6 海岸: Bowman et al. (1998); 米国ニュージャージー州の海岸: Ribic (1998); 五島列島奈留島大串海岸: Kako et al. (2010); 東京都新島村和田浜海岸: 2.3 節 (1) 参照）。季節的な変動は、支配的な新規漂着周期が 1 年未満であると推察される。滞留時間 τ_r が新規漂着周期 T よりも長い（すなわち、 $\xi > 10^0$ ）ため、滞留時間が 1 年以上の海岸を重点的に清掃することで、高い海岸清掃効果が期待できる。

さらに、 $\xi > 10^0$ である海岸で清掃を実施することで、清掃時期を軽視することができる。4.3 節 (4) で述べたように、全体的には存在量の極大時期に海岸清掃を実施することで最も効果が高い。しかし、清掃時期に対する海岸清掃効果の依存性は、無次元滞留時間 ξ によって異なり、 $10^{-1} < \xi < 10^0$ の海岸で清掃を実施するよりも $\xi > 10^0$ の海岸で実施した方が、清掃時期の違いによる海岸清掃効果の最大偏差が小さい（図-4.7c 及び図-4.8c）。一般に、海岸の清掃時期は、気象条件や清掃実施者の招集などの様々な要因によって支配されるであろう。特に、気象条件は、安全に海岸清掃を実施するのに考慮すべき事項と考えられる。例えば、高波浪時期に存在量が極大となるような海岸では、最も効果的な時期に清掃することができない。 $\xi > 10^0$ の海岸では、存在量の極大時期に海岸清掃が実施できなかったとしても、高い海岸清掃効果が得られる。

効果的な海岸清掃を実施するために、滞留時間、存在量の極大時期及び新規漂着周期を把握することが重要である。滞留時間は 3.4 節 (3) で示した個体識別調査手法に

基づいて計測できる。さらに、滞留時間の決定要因を解明することで、将来的に波浪統計量や海浜地形データを用いて滞留時間を推定できるであろう。

これに加えて、存在量の極大時期や新規漂着周期は、Web カメラを用いた海洋プラスチック漂着量の遠隔連続観測技術を適用することで、把握することができると考えられる（例えば、Kako et al., 2010; Kataoka et al., 2012; 片岡ら, 2012）。例えば、片岡ら(2012)は、対馬海流沿いの4地点（北海道稚内市、山形県酒田市（飛島）、石川県輪島市及び長崎県対馬市）に Web カメラを設置し、Web カメラで撮影された画像に対して各画素の色の情報を用いた画像解析を適用することで、約 1 年間における海洋プラスチックの漂着量の多地点連続観測に成功した。海岸を線形システムと見なすと、新規漂着周期は、存在量の変動周期と一致する（式(4.15)）。例えば、Web カメラを用いて存在量を連続的に計測し、得られた時系列変動をフーリエ変換することで、新規漂着量の卓越変動周期を把握することができる。また、Web カメラによる漂着量の連続観測を長期的に実施することで、統計的に存在量の極大時期を把握することも可能であろう。

4.5 4章のまとめ

海岸を線形システムと見なして海岸清掃効果の定量化手法を開発し、海岸における滞留時間に対する海岸清掃効果の依存性を詳細に調べることで、効果的な海岸清掃方策について提言した。本研究では、2つの海岸清掃効果に着目する。すなわち、海洋プラスチックに含有する重金属の溶出軽減（BCE1）及び微細プラスチックの発生抑制（BCE2）である。

和田浜海岸で得られた漁業フロートの指数関数的減少は、線形システムにおける単位インパルス応答に相当し、これに基づいて海岸のシステム特性（増幅特性及び位相特性）を把握することができる。システム特性は、新規漂着量の変動周期 T に対する滞留時間 τ_r の比で定義される無次元滞留時間 ξ の関数として表される。

BCE1 は、海岸への重金属の溶出速度が一定であると仮定することで、存在量に基づいて評価することができる。また、BCE2 は、単位時間における微細プラスチックの発生確率は海洋プラスチックが海岸に漂着してから時間（すなわち、年齢）に比例すると仮定することで、合計年齢によって評価することができる。

周期的な海岸清掃を実施したとき、海岸清掃効果は、清掃時期及び無次元滞留時間に依存する。 ξ が長くなるほど海岸清掃効果は高く、存在量の極大時期に海岸清掃を実施することで、より高い効果が期待できる。これは、

海岸清掃の実施において存在量の極大時期が重要であることを示唆する。

一方、各々の ξ における海岸清掃効果の最大偏差（すなわち、BCE1 及び BCE2 の最大値と最小値の偏差）もまた、 ξ に依存する。 $10^{-1} < \xi < 10^0$ において海岸清掃効果の最大偏差は大きく、 $\xi > 10^0$ において相対的に小さくなる。これは、 $10^{-1} < \xi < 10^0$ の場合に比べて、 $\xi > 10^0$ の場合の方が、清掃時期による依存性が低いことを示唆する。すなわち、 $\xi > 10^0$ における海岸清掃は、清掃時期に関わらず、高い効果が得られるという観点から効果的であるといえる。

効果的な海岸清掃を実施するために、滞留時間 τ_r 、新規漂着量の変動周期 T 及び存在量の極大時期の 3 つの情報を把握することが必要不可欠である。様々な海岸においてこれらの情報を把握し、 $\xi > 10^0$ である海岸を選定することで、効果的な海岸清掃を実施することが可能になるであろう。

5. 結論

本研究では、海洋プラスチックが海岸に漂着してから沖合に再び流出（再漂流）するまでの滞留時間に着目した。海洋プラスチックの海洋中での動態や海洋プラスチック起因の環境リスクを評価する上で、海岸における滞留時間は非常に重要である。例えば、海洋プラスチックは海流によって海洋を輸送されていく過程で、いくつかの海岸に漂着しては沖合に再漂流するであろう。また、海洋プラスチックは海岸上で紫外線や熱により著しく劣化するため、海岸が微細プラスチックの主要な発生源と考えられる。微細プラスチックの発生により、海洋生態系に容易に取り込まれ、環境リスクは増大するであろう。さらに、世界中における海洋プラスチックの除去は、海岸清掃活動に依存している。基本的に、滞留時間が長い海岸ほど、海洋プラスチックは溜まりやすい。そのため、滞留時間を計測することで、重点的に清掃すべき海岸を選定することができ、より多くの海洋プラスチックを環境中から除去できると考えられる。

そこで、本研究では、海岸における海洋プラスチックの滞留時間を計測し、滞留時間を考慮した効果的な海岸清掃方を提言した。

第2章では、東京都新島村和田浜海岸において、特定の漁業フロートを対象として2011年9月から2年間に渡る個体識別調査を実施し、海岸における漁業フロートの滞留時間を計測した。滞留時間計測に加えて、滞留時間の決定要因となっている物理メカニズムを明らかにするため、漁業フロートの動きも詳細に調べた。

漁業フロートの残余率（残余数/新規漂着数）は指数関数的に減少していた（図-2.4）。この残余率の時間変化を指数関数で近似することで、漁業フロートの残余関数を得た。和田浜海岸における漁業フロートの滞留時間が224日（95%信頼区間: 208日-242日）であることが明らかとなった。指数関数型の残余関数が得られたことから、漁業フロートが滞留時間から決まる一定確率（ $1 - \exp(-1/224) = 0.5\%/日$ ）で沖合に再漂流するとみなすことができる。

一方、沖合に再漂流せずに海岸に残った漁業フロート（残余フロート）は、和田浜海岸の沿岸方向（南北方向）に移動し（図-2.7）、その動きは遡上イベントの発生確率と有意な関係があった（図-2.10a）。また、沿岸方向100 m区画における全調査間に対する個々のフロートの平均輸送速度は、和田浜海岸中央部（沿岸方向距離: 400 m-600 m）及び北部（沿岸方向距離: 700 m-1100 m）が収束

域となっていた（図-2.14a）。その結果、残余フロートは、全調査間を通して和田浜海岸中央部及び北部に集積していた（図-2.6）。以上のことから、和田浜海岸において漁業フロートは、遡上イベントによって沿岸方向に輸送され、和田浜海岸中央部及び北部に集積することが明らかとなった。

第3章では、和田浜海岸における漁業フロートの再漂流過程に関する物理メカニズムを明らかにするため、沿岸方向における残余フロートの動きを一次元移流拡散方程式で表現した数値実験を行った。数値実験では、和田浜海岸（延長: 900 m）を沿岸方向に9つの100 m区画に分割して、漁業フロートが再漂流する可能性が高い区画（再漂流区画）を特定した。

数値実験によって和田浜海岸沖合にある潜堤背後に相当する4つの100 m区画（第2-3区画及び第7-8区画）が再漂流区画として高頻度に特定された（図-3.5及び表-3.3）。これら4つの区画は、残余フロートの平均輸送速度の収束域（空間勾配が負）であり、集積率が高い区画と一致する（表-3.2）。潜堤背後は、沿岸流の収束域に相当し、沖合への戻り流れ（離岸流）が高頻度に発生すると推察される。したがって、和田浜海岸において漁業フロートは、海浜近くの沿岸流によって沿岸方向に輸送され、輸送されたフロートの一部が潜堤背後に形成される離岸流によって再漂流する可能性が示唆された（図-3.6）。

海洋プラスチックの滞留時間は、特定の海岸で明らかにするだけでなく、多地点で計測されることで初めて環境リスクの高い海岸の定量評価につながるであろう。しかし、多地点において個体識別調査を行うことは困難である。第2章の個体識別調査及び第3章の数値実験に基づく、滞留時間は波浪の遡上イベント発生確率、海浜流系の形成パターンや海浜地形で決まると推察される。したがって、今後、波浪統計量や海浜地形をパラメータとした滞留時間を推定するためのモデルを構築することで、多地点における滞留時間の把握に活用することができるであろう。

第4章では、和田浜海岸における漁業フロートの指数関数型の残余関数が得られたことから、海岸を線形システムと仮定して、2つの環境リスク（海洋プラスチック起因の重金属の海岸への溶出（図-4.1）及び微細プラスチックの発生（図-4.2））に関する海岸清掃効果の評価手法を開発した。さらに、滞留時間に対する海岸清掃効果の依存性を明らかにし、効果的な海岸清掃方策について提言した。

2つの環境リスクに対する海岸清掃効果は、新規漂着量

の変動周期（新規漂着周期）に対する滞留時間の比（無次元滞留時間）に依存し、新規漂着周期に対して滞留時間が長い海岸ほど、海岸清掃効果は高い（図-4.7a 及び図-4.8a）。また、海岸清掃効果は清掃時期にも依存し、存在量の極大時期に海岸清掃を実施するのが、最も効果的である（図-4.7a 及び図-4.8a）。清掃時期に対する海岸清掃効果の依存性は、無次元滞留時間によって異なり、新規漂着周期に対して滞留時間が短い海岸に比べて、滞留時間が長い海岸の方が清掃時期に対する依存性が低い（図-4.7c 及び図-4.8c）。

以上を踏まえた本研究での効果的な海岸清掃の提案は、滞留時間が1年以上の海岸で清掃を実施することである。多くの海岸において、漂着物量の季節変動が確認されており、新規漂着周期は1年未満であると推察される。したがって、滞留時間が新規漂着周期より長い場合、高い海岸清掃効果が期待できる。また、清掃時期に対する海岸清掃効果の依存性が低い場合、仮に海岸清掃効果が最大となる存在量の極大時期に海岸清掃を実施できなかったとしても、高い海岸清掃効果が得られるであろう。

また、今後、戦略的な海岸清掃を実施するのに、滞留時間、新規漂着周期及び存在量の極大時期を把握することが必要である。前述の通り、滞留時間は波浪統計量や海浜地形をパラメータとして推定できる可能性がある。また、新規漂着周期や存在量の極大時期は、Webカメラを用いた連続モニタリングが有効である。世界中の海岸における波浪統計量や海浜地形に基づいた滞留時間の推定及びWebカメラ網構築による漂着量の遠隔モニタリングを併用することで、重点的に清掃すべき海岸を選定することができ、戦略的な海岸清掃方策を講じることが可能になるであろう。

（2014年6月2日受付）

謝辞

本研究の論文のとりまとめにあたり、愛媛大学 日向博文教授（元沿岸域システム研究室長）には、研究の基本的な心構えから論文の執筆方法に至るまで終始一貫して懇切丁寧なご指導を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

磯辺篤彦教授（九州大学 応用力学研究所）、高田秀重教授（東京農工大学）、久保田雅久教授（東海大学）、加古真一郎助教（鹿児島大学）、Nikolai Maximenko 上席研究員（ハワイ大学 IPRC）、栗山特別研究官（港湾空港技術研究所）、青木伸一教授（大阪大学）、松本博教

授（豊橋技術科学大学）、井上隆信教授（豊橋技術科学大学）、加藤茂准教授（豊橋技術科学大学）、横田久里子准教授（豊橋技術科学大学）、岡辺巧巳助教（豊橋技術科学大学）には、本研究を実施していく中で、多くの有意義なご助言を頂きました。また、加藤茂准教授及び岡辺巧巳助教には、和田浜海岸での現地調査にもご協力を頂きました。

国土交通省国土技術政策総合研究所及び中部地方整備局港湾空港部の皆様には、研究の遂行にあたり、多大なご協力を頂きました。とりわけ、国土技術政策総合研究所沿岸海洋・防災研究部の鈴木武部長をはじめ、皆様には、多くの激励と貴重なご意見を頂きました。

東京都大島支庁には、和田浜海岸沖合の水深データ及び潜堤の施工計画に係る資料のご提供を頂きました。

Webカメラシステムの構築にあたっては、日本エヌ・ユー・エス株式会社の皆様にご協力を頂きました。また、和田浜海岸での現地調査には、国際航業株式会社の藤良太郎氏にもご協力を頂きました。ここに記して、深甚なる謝意を表します。

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 23656309 及び 25820234 の助成を受けて実施しました。

参考文献

- 海上保安庁（2013）：海洋速報&海流推測図，WWW page: <http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/KAIYO/qboc/index.html>.
- 片岡智哉・日向博文・加古真一郎（2012）：Webカメラを用いたプラスチックゴミ漂着量の計測手法の開発と多地点連続観測，国土技術政策総合研究所研究報告，**51**，12 pp.
- 気象庁（2012a）：台風経路図（2012年），WWW page: http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/typhoon/route_map/bstv2012.html.
- 気象庁（2012b）：日々の天気図（2012年），PDF page: <http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/data/hibiten/2012/1204.pdf>.
- 気象庁（2013）：日々の天気図（2013年），PDF page: <http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/data/hibiten/2013/1203.pdf>.
- 栗山善昭・山口里実・池上正春・伊藤晃・高野誠紀・田中純壺・友田尚貴（2007）：新潟西海岸における大規模潜堤周辺の地形変化特性，土木学会論文集 B，**63**(4)，255-271

- 下園武範・鈴木淳也・佐藤慎司・磯部雅彦 (2004) : 人工リーフ背後における海浜流と漂砂の制御, 海岸工学論文集, **51**, 606–610.
- Andrady, A.L. (2011): Microplastics in the marine environment, *Mar. Pollut. Bull.*, **62**(8), 1596–1605.
- 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
- Boerger, C.M., Lattin, G.L., Moore, S.L. and Moore, C.J. (2010): Plastic ingestion by planktivorous fishes in the North Pacific Central Gyre, *Mar. Pollut. Bull.*, **60**(12), 2275–2278.
- Bowman, D., Manor-Samsonov, 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.
- Cooper, D. A. and Corcoran, P. L. (2010): Effects of mechanical and chemical processes on the degradation of plastic beach debris on the island of Kauai, Hawaii, *Mar. Pollut. Bull.*, **60**(5), 650–654.
- Derraik, J.G.B. (2002): The pollution of the marine environment by plastic debris: a review, *Mar. Pollut. Bull.*, **44**(9), 842–852.
- EU. (2003): Directive 2002/96/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on waste electrical and electronic equipment (WEEE). Off, *J. Eur. Union*, **37**, 19–38
- Garrity, S. D. and Levings, S. C. (1993): Marine debris along the Caribbean coast of Panama, *Mar. Pollut. Bull.*, **26**(6), 317–324.
- Gregory, M. R. (2009): Environmental implications of plastic debris in marine settings entanglement, ingestion, smothering, hangers-on, hitch-hiking and alien invasions, *Phil. Trans. R. Soc. B*, **364**, 2013–2025.
- Gregory, M. R. and Andrady, A. L. (2003): Plastics in the marine environment. In: Andrady, A.L. (Ed.), *Plastics and the environment*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 379–401.
- Hinata, H., Yanagi, T., Takao, T. and Kawamura, H. (2005): Wind-induced Kuroshio warm water intrusion into Sagami Bay, *J. Geophys. Res.*, **110**(C3), C03023.
- Ivar do Sul, J. A. and Costa, M. F. (2007): Marine debris review for Latin America and the Wider Caribbean Region: From the 1970s until now, and where do we go from here?, *Mar. Pollut. Bull.*, **54**(8), 1087–1104.
- Kako, S., Isobe, A. and Magome, S. (2010): Sequential monitoring of beach litter using webcams, *Mar. Pollut. Bull.*, **60**(5), 775–779.
- Kako, S., Isobe, A., Magome, S., Hinata, H., Seino, S. and Kojima, A. (2011): Establishment of numerical beach-litter hindcast/forecast models: An application to Goto Islands, Japan, *Mar. Pollut. Bull.*, **62**(2), 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**(9), 1829–1836.
- Kataoka, T., Hinata, H. and Kato, S. (2013a): Analysis of a beach as a time-invariant linear input/output system of marine litter, *Mar. Pollut. Bull.*, **77**(1-2), 266–273.
- Kataoka, T., Hinata, H. and Nihei, Y. (2013b): Numerical estimation of inflow flux of floating natural macro-debris into Tokyo Bay. *Estuar., Coast. Shelf Sci.*, **134**(1), 69–79
- Kubota, M. (1994): A mechanism for the accumulation of floating marine debris north of Hawaii, *J. Phys. Oceanogr.*, **24**(5), 1059–1064.
- Kusui, T. and Noda, M. (2003): International survey on the distribution of stranded and buried litter on beaches along the Sea of Japan, *Mar. Pollut. Bull.*, **47**(1), 175–179.
- Lippmann, T. C. and Holman, R. A. (1990): The spatial and temporal variability of sand bar morphology, *J. Geophys. Res.*, **95**(C7), 11575–11590.
- Law, K. L., Moret-Ferguson, S., Maximenko, N. A., Proskurowski, G., Peacock, E. E., Hafner, J. and Reddy, C. M. (2010): Plastic accumulation in the North Atlantic subtropical gyre, *Science*, **329**(5996), 1185–1188.
- Martinelli, L., Zanuttigh, B. and Lamberti, A. (2006): Hydrodynamic and morphodynamic response of isolated and multiple low crested structures: Experiments and simulations, *Coastal Eng.*, **53**(4), 363–379.
- Mato, Y., Isobe, T., Takada, H., Kanehiro, H., Ohtake, C. and Kaminuma, T. (2001): Plastic resin pellets as a transport medium for toxic chemicals in the marine environment, *Environ. Sci. Technol.*, **35**(2), 318–324.
- Maximenko, N., Hafner, J. and Niiler, P. (2012): Pathways of marine debris derived from trajectories of Lagrangian drifters, *Mar. Pollut. Bull.*, **65**(1), 51–62.
- McKinley, P. and Levine, M. (1998): Cubic spline

- interpolation. Available at: <http://online.redwoods.edu/instruct/darnold/LAPROJ/Fall98/SkyMeg/Proj.PDF>
- Minagawa, M. (1996): Plastic Additives Application Note; Kogyo Chosakai Publishing Co. Ltd.: Tokyo
- Moser, M.L. and Lee, D.S. (1992): A fourteen-year survey of plastic ingestion by western North Atlantic seabirds, *Colonial Waterbirds*, **15**, 83–94.
- Nakashima, E., Isobe, A., Kako, S. I., Itai, T. and Takahashi, S. (2012): Quantification of toxic metals derived from macroplastic litter on Ookushi Beach, Japan, *Environ. Sci. Technol.*, **46**(18), 10099–10105.
- Ocean Conservancy (2013): International Coastal Cleanup 2013 report: Working for clean beaches and clean water. Available at: <http://www.oceanconservancy.org/our-work/international-coastal-cleanup/2013-trash-free-seas-report.pdf>.
- Ogata, Y., Takada, H., Mizukawa, K., Hirai, H., Iwasa, S., Endo, S., Mato, Y., Saha, M., Okuda, K., Nakashima, A., Murakami, M., Zurcher, N., Booyatumanondo, R., Zakaria, M. P., Dung, L. Q., Gordon, M., Miguez, C., Suzuki, S., Moore, C., Karapanagioti, H. K., Weerts, S., McClurg, T., Burres, E., Smith, W., Velkenburg, M. V., Lang, J. S., Lang, R. C., Laursen, D., Danner, B., Stewardson, N. and Thompson, R. C. (2009): International Pellet Watch: Global monitoring of persistent organic pollutants (POPs) in coastal waters. 1. Initial phase data on PCBs, DDTs, and HCHs, *Mar. Pollut. Bull.*, **58**(10), 1437–1446.
- Plastics Europe (2011): Plastics – the Facts 2011 An analysis of European plastics production, demand and recovery for 2010.
- Ribic, C.A. (1998): Use of indicator items to monitor marine debris on a New Jersey beach from 1991 to 1996, *Mar. Pollut. Bull.*, **36**(11), 887–891.
- Ribic, C. A., Sheavly, S. B., Rugg, D. J. and Erdmann, E. S. (2012): Trends in marine debris along the US Pacific Coast and Hawai'i 1998–2007, *Mar. Pollut. Bull.*, **64**(5), 994–1004.
- 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, *Philos. Trans Roy. Soc. B*, **364**, 1999–2012.
- Shaw, D.G. and Day, R.H. (1994): Colour- and form-dependent loss of plastic microdebris from the North Pacific Ocean, *Mar. Pollut. Bull.*, **28**(1), 39–43.
- Takada, H. (2006): Call for pellets! International Pellet Watch Global Monitoring of POPs using beached plastic resin pellets, *Mar. Pollut. Bull.*, **52**(12), 1547–1548.
- Takeoka, H. (1984): Fundamental concepts of exchange and transport time scales in a coastal sea, *Cont. Shelf Res.*, **3**(3), 311–326.
- Thompson, R. C., Olsen, Y., Mitchell, R. P., Davis, A., Rowland, S. J., John, A. W., McGonigle, D. and Russell, A. E. (2004): Lost at sea: where is all the plastic?, *Science*, **304**(5672), 838–838.
- van Franeker, J.A., Blaize, C., Danielsen, J., Fairclough, K., Gollan, J., Guse, N., Hansen, P.L., Heubeck, M., Jensen, J.K., Le Guillou, G., Olsen, B., Olsen, K.O., Pedersen, J., Stienen, E.W.M. and Turner, D.M. (2011): Monitoring plastic ingestion by the northern fulmar *Fulmarus glacialis* in the North Sea, *Environ. Pollut.*, **159**(10), 2609–2615.
- Walker, T. R., Reid, K., Arnould, J. P. Y. and Croxall, J. P. (1997): Marine debris surveys at Bird Island, South Georgia 1990–1995, *Mar. Pollut. Bull.*, **34**(1), 61–65.
- Williams, A. T. and Tudor, D. T. (2001): Litter burial and exhumation: spatial and temporal distribution on a cobble pocket beach, *Mar. Pollut. Bull.*, **42**(11), 1031–1039.

付録 A 3 次スプライン補間法

3 次スプライン補間法は、既知点間毎にスプライン関数を定義して、各既知点における導関数が連続になるように既知点間のデータを内挿する手法である (図-A.1) .
いま, $(x_1, z_1), (x_2, z_2), (x_3, z_3), \dots, (x_n, z_n)$ という既知点のデータがあるとする. 既知点 i から既知点 $i+1$ におけるスプライン関数 S_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) を次の 3 次多項式で表現する.

$$S_i(x) = a_i(x - x_i)^3 + b_i(x - x_i)^2 + c_i(x - x_i) + d_i, \quad (\text{A.1})$$

ここで, a_i, b_i, c_i 及び d_i は, スプライン関数を決める係数であり, 全ての既知点間におけるスプライン関数の 4 つの係数を決めることで内挿される.

既知点間は全部で n 個あるため, 未知の係数は $4n$ となる. 次の 4 つの条件に基づいて, $4n$ 個の方程式を立てることでこれらの $4n$ 個の未知数を決める.

- (1) 全既知点を必ず通る (方程式数: $2n$) .

$$\begin{cases} S_i(x_i) = z_i \\ S_i(x_{i+1}) = z_{i+1} \end{cases}, \quad (\text{A.2})$$

- (2) 隣り合うスプライン関数の境界点における 1 次導関数は連続である (方程式数: $n-1$) .

$$S'_i(x_{i+1}) = S'_{i+1}(x_{i+1}), \quad (\text{A.3})$$

- (3) 隣り合うスプライン関数の境界点における 2 次導関数は連続である (方程式数: $n-1$) .

$$S''_i(x_{i+1}) = S''_{i+1}(x_{i+1}), \quad (\text{A.4})$$

- (4) 計算領域の両端 ($i = 1, n+1$) における 2 次導関数の値を 0 とする.

$$S''_1(x_1) = S''_{n+1}(x_{n+1}) = 0, \quad (\text{A.5})$$

これらの 4 つの条件に基づいて, b_i に関する連立 1 次方程式を立てる. まず条件(3)から a_i に関する次式が導出される.

$$a_i = \frac{b_{i+1} - b_i}{3(x_{i+1} - x_i)}. \quad (\text{A.6})$$

式(A.2)の第 1 式より, d_i が決まる.

$$d_i = z_i. \quad (\text{A.7})$$

すなわち, d_i は既知点の z 座標から直ちに求まる. 次に, 式(A.7)及び式(A.6)を式(A.2)の第 2 式に代入すると, c_i に関する次式が導出される.

$$c_i = \frac{z_{i+1} - z_i}{x_{i+1} - x_i} - \frac{1}{3}(x_{i+1} - x_i)(b_{i+1} - b_i). \quad (\text{A.8})$$

最後に, 式(A.6)及び式(A.8)を式(A.3)に代入して整理すると, 次式を得る.

$$\begin{aligned} & b_i(x_{i+1} - x_i) + 6b_{i+1}(x_{i+2} - x_i) + b_{i+2}(x_{i+2} - x_{i+1}) \\ &= 3 \left(\frac{z_{i+2} - z_{i+1}}{x_{i+2} - x_{i+1}} - \frac{z_{i+1} - z_i}{x_{i+1} - x_i} \right) \end{aligned} \quad (\text{A.9})$$

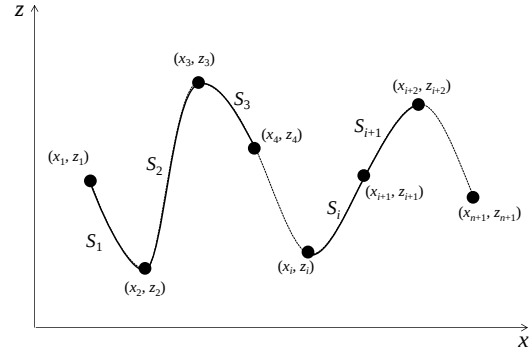


図-A.1 既知点とスプライン関数の関係

ここで, 条件(4)から決まる $b_1 = b_{n+1} = 0$ と式(A.9)を用いると, 全既知点 ($i = 1, 2, \dots, n$) における b_i に関する連立 1 次方程式が得られる.

$$\begin{pmatrix} 6(u_1 + u_2) & u_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ u_2 & 6(u_2 + u_3) & u_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & u_i & 6(u_i + u_{i+1}) & u_{i+1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & \ddots & \ddots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & u_n & 6(u_n + u_{n+1}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_2 \\ b_3 \\ \vdots \\ b_i \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_2 \\ v_3 \\ \vdots \\ v_i \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix}, \quad (\text{A.10})$$

ここで, u_i 及び v_i は次式のとおりである.

$$u_i = x_{i+1} - x_i, \quad (i = 1, 2, \dots, n+1) \quad (\text{A.11})$$

$$v_i = \frac{z_{i+1} - z_i}{x_{i+1} - x_i} - \frac{z_i - z_{i-1}}{x_i - x_{i-1}}, \quad (i = 2, \dots, n) \quad (\text{A.12})$$

式(A.10)の連立一次方程式を解くことで, 全てのスプライン関数の b_i が求まる. さらに, 計算された b_i を式(A.6)及び式(A.8)に代入することで, a_i 及び c_i も計算され, 全ての既知点間におけるスプライン関数 S_i が決まる. 以上により, 計算されたスプライン関数 S_i を用いることで, 既知点間のデータを補間することができる.

国土技術政策総合研究所研究報告

RESEARCH REPORT of NILIM

No. 54 July 2014

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:046-844-5018 〕