

課題名	D-071 市民と研究者が協働する東シナ海沿岸における海岸漂着ゴミ予報実験		
課題代表者名	磯辺篤彦（愛媛大学 沿岸環境科学研究センター 環境動態解析部門）		
研究期間	平成19－21年度	合計予算額	180,312千円（うち21年度 64,599千円） ※上記の予算額は、間接経費を含む。
研究体制	<p>(1) 海洋数値モデルによるゴミ発生源の特定と漂着予報（愛媛大学）</p> <p>(2) NGO/CBO/地域住民と連携した海岸踏査による漂着ゴミの実態調査（九州大学）</p> <p>(3) 短波海洋レーダーによる漂流ゴミ収束域の特定と数値モデルの精度検証 （国土技術政策総合研究所）</p> <p>(4) 空撮による漂流ゴミ収束域の調査（産業技術総合研究所）</p>		
1. 序	<p>近年、東シナ海に面した五島や対馬などの島嶼部や九州沿岸には、漁具やプラスチック製品、または医療廃棄物に至るまで様々なゴミが大量に漂着し、各地方自治体はその対応に苦慮している。特に、過疎化が進む沿岸部や島嶼の被害が大きく、これらの地域では、大量の漂着ゴミを拾い集める十分な人口がないため、処理が自治体財政に過度な負担を強いている。その対策に、ようやく国家レベルで制度が整備されつつあるが、科学技術面からの貢献は、著しく立ち遅れているのが現状であった。</p> <p>東シナ海沿岸の漂着ゴミについては、これまでも、専門家やNGOによって海岸踏査による地道な調査が続けられてきた。しかし、漂着ゴミの削減に向けた国際ルール作りに欠かせない、漂着ゴミの海上における経路の推算はきわめて困難であった。これまでは、ゴミに記載された文字など、わずかな手がかりを頼りに、発生源の推定がなされているのが現状である。経路推算の困難さは、ひとえにゴミが浮遊する東シナ海の海流情報が貧困で、海洋学にこのような社会的ニーズに応えるだけの力量が無かったためである。当然、ゴミ漂着予報など望むべくもなかった。</p> <p>最近の海洋観測技術の高度化、シミュレーション技術の向上、計算機環境や既存データセットの整備によって、このような社会的ニーズに応えるまでに力量を上げた海洋学の現況を踏まえ、私たちは本研究を実施した。本研究の特徴は、これまで地道な調査を続けてきたNGOや地域のNPOと海洋学の専門家が連携し、遂行していく点にある。</p> <p>本研究の最終的な目的の一つは、漂着ゴミが発生する場所や時期の特定である。この情報は、海洋投棄物削減を目指して関係各国（あるいは地域）間で行う協議に欠かせないものとなるだろう。さらに本研究では、ゴミの漂着時期の予報や、沿岸域におけるゴミ収束域の特定を目的としている。例えば、海岸での人的な漂着ゴミ回収に対しても、その効果的な人員配置が可能になる。あるいは、ゴミ回収船等が予報された時期に収束域に赴くことで、海岸到達前に漂着ゴミの効率的な回収ができるようになるかもしれない。以上のような、漂着ゴミの削減や、海岸漂着前の効率的な沖合回収が現実のものとなれば、長大な海岸での非効率的な回収に要する費用が大幅に削減され、また、海岸は美観を取り戻すことになる。これらの社会的・経済的意義の大きさは計り知れない。</p>		
2. 研究目的	<p>本研究課題の概略を図1に示す。まず、NGO/NPOと共に海岸踏査を行うサブテーマ2で、五島列島八朔鼻海岸（図2）に設けた定点海岸での<u>漂着ゴミ量の時系列</u>を、さらに広域調査で<u>漂着ゴミ量の空間分布</u>を明らかにする。サブテーマ1の数値モデリングによって、この結果を再現するコンピュータ・シミュレーションを用い、<u>ゴミの発生源を逆算</u>し、さらには<u>ゴミの漂着時期予報</u>に取り組む。短波海洋レーダーで表層海流観測を行うサブテーマ3では、<u>漂流物の洋上での収束域を特定（すなわち漂着場所を予想）</u>する手法を<u>確立</u>する。<u>漂流ゴミ監視技術の確立</u>を目指すサブテーマ4で、予報時期や場所の精度検証を行う。</p>		

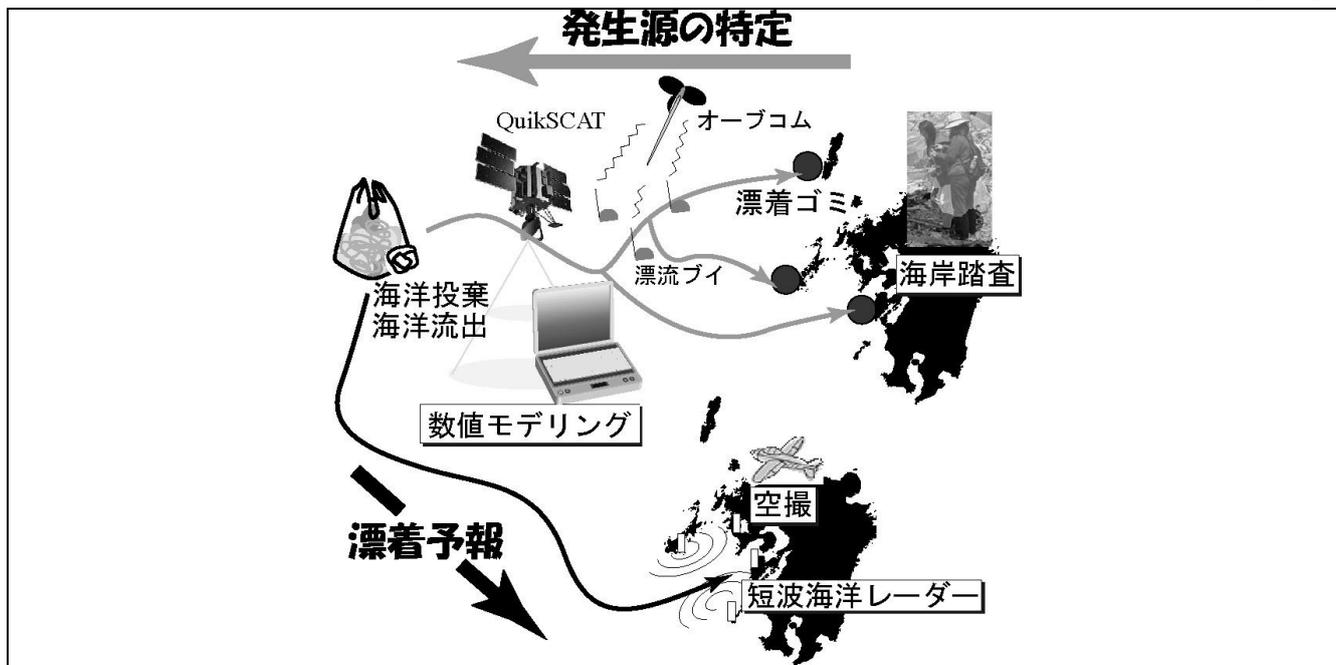


図1 研究課題の概略

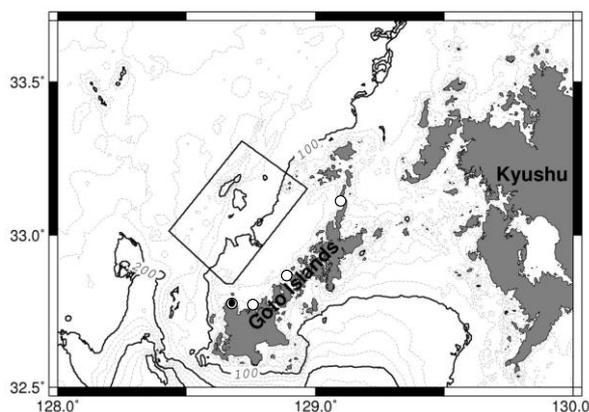


図2 長崎県・五島列島。白丸はサブテーマ(3)がHFレーダーを設置した場所。黒丸は風速計の設置位置。福江島八朔鼻海岸は最も南の白丸周辺に位置する。四角形はおおよそのレーダー観測範囲

3. 研究の方法

(1) 海洋数値モデルによるゴミ発生源の特定と漂着予報(サブテーマ1)

まず、黄海・東シナ海の海流分布を計算する海洋循環数値モデル(シミュレーション)と、この海流によって挙動が決定される仮想粒子追跡モデルを用いた双方向粒子追跡法によって、本研究課題が定点に選んだ長崎県五島列島に漂着するゴミの起源地推定を行う。この手法では、まず、流れを逆向きにしたモデル海洋の海流の中に、ゴミに見立てた仮想粒子を五島列島から流して、たどり着いた海岸を漂着ゴミの起源地候補にする。続いて、向きを元に戻した海流の中を、起源地候補より投入した粒子群が移動して五島周辺に到達するか否かをもって、統計的に有意な漂着ゴミの発生源・発生時期を特定するものである。つぎに、五島列島・八朔鼻海岸において、地域住民やNGOとともにサブテーマ(2)が得るゴミ漂着量データを用いて、それぞれの起源地におけるゴミ発生量を、ラグランジュの未定乗数法によって逆算する。

海洋循環数値モデルと仮想粒子の追跡モデルを用いて、逆推定したゴミの発生源・発生時期・発生量に従って粒子を投入し、五島列島周辺に漂着するゴミ量の再現計算や予報計算を行う。この際、再現計算にはモデルに人工衛星観測風データを与え、予報計算には一カ月予報風(MSM)を与える。再現計算や予報計算の精度検証には、サブテーマ(4)が実施するウェブカメラによる海岸ゴミ漂着量時系列データを利用する。さらに、予報計算の技術やウェブカメラによる漂着量モニタリング技術を利用して、効率的な海岸清掃時期の選定手法を提案する。

(2) NGO/CBO/地域住民と連携した海岸踏査による漂着ゴミの実態調査(サブテーマ2)

漂着ゴミ量の年変動を明らかにするために、長崎県五島列島福江島の八朔鼻海岸において、平成19年9月の調査開始時から平成22年1月までの2年半、漂着している全てのゴミを回収する2ヶ月ごとの定点調査を行った。海岸を微地形の差異に基づいて複数の区画(汀線方向13区画、岸沖方向最大3区画)に分け、海岸内の場所の違いによる漂着ゴミ量・種類の違いを調べた。区画毎に回収したゴミは、世界共通の国際海岸クリーンアップ(ICC)のデータカードに従い、種類毎に数量、重量、体積(標準的な家庭用ゴミ袋の数に換算)を計測した。また、代表的なアイテムであるペットボトル、ペットボトル等のキャップ、使い捨てライター、漁業用フロートなどは、本体やラベルの文字から起源地を推定し、計数した。

さらに、主としてペットボトルと使い捨てライターを拾得し、ラベルや本体の文字情報から起源地を推定する広域調査を、平成19年度冬季から年1-2回実施した。実施地と時期は、①福岡県福岡市海の中道(2008年9月、2009年3・9・12月)、②長崎県長崎市野母崎(2009年2月、2010年1月)、③鹿児島県南さつま市吹上浜(2009年3・11月)、④沖縄県沖縄本島沿岸(2009年3・10月)、⑤沖縄県石垣島(2009年3月、2010年2月)、⑥沖縄県西表島(2009年3月)であった。

本研究プロジェクト全体の研究成果を地域社会に還元した。例えば定点調査を行った福江島において成果報告会等を開催し、海岸漂着ゴミ問題や調査結果の啓発・普及活動を実施した。

(3) 短波海洋レーダーによるゴミ収束域の特定と数値モデルの精度検証(サブテーマ3)

福江島、奈留島、そして中通島にそれぞれ2局、1局、1局のHFレーダーを設置した(図2)。これらのHFレーダーの中心周波数は24.515MHz、送引周波数幅は100KHzである。これにより、五島列島西岸沖60km四方程度の海域の表層流速を1.5kmの空間分解能で計測することが可能である。観測は、2007年12月から2010年2月までの2年以上の期間で行った。測定間隔は1時間であり、1回当たりの計測時間は20分間である。HFレーダー観測結果を利用してFinite-time Lyapunov Exponent (FTLE)を計算し、Lagrangian Coherent Structure(LCS)のマッピングを行った。このマップを応用することで、表層流の時間変動履歴の効果を考慮した、単に表層流の収束発散を見るよりも曖昧さの少ない、リアルタイムの漂流物の集積域判定手法を開発する。特に、本研究では、流体粒子を引き付ける境界として作用する不安定多様体(Attracting Coherent Line, ACL)をゴミ収束域と仮定し、ACLが実際に海洋表面の漂流物の集積域となっているかどうかを検証していく。本提案方法の検証を行うため、セスナ機による漂流ゴミの撮影(サブテーマ(4))に加えて、人工衛星による表層水温(SST)およびクロロフィルa(chl.a)画像を利用した。また、海岸および海上における風速データ、および五島列島西岸沖における密度の気候値を利用しLCS発生メカニズムについて検討を行った。LCSの発生メカニズムについて検討することは、効率的なゴミ洋上回収の計画策定や経済的実現性の検証にも役立つと考えられる。

(4) 空撮による漂流ゴミ収束域の調査(サブテーマ4)

ウェブカメラ(ライブカメラ)を五島列島・奈留島・大串海岸に2基設置し、2008年5月より、90分毎の漂着ゴミに覆われた海岸撮影を2009年10月まで実施した。ウェブカメラによって得られる画像は、海岸の漂着ゴミに対して斜め上方から撮影されているので、漂着ゴミの量を定量的に把握するために、射影変換処理により真上から見た画像に変換した。その後、漂着ゴミと判別される画素を抽出し、画像から漂着ゴミに覆われた面積を算出した。全観測期間の画像を用いて、漂着ゴミの海岸被覆面積の時系列を作製した。

セスナ機やデジタルカメラを搭載したバルーン(図3)による洋上撮影を実施し、海ゴミ識別処理を準リアルタイムで行うことを試みた。ここでは、画像の色彩をCIELUVのUV座標上で第1~第4象限に分類し、第3象限に入る画素を海、第1象限を海ゴミ(自然漂流物を含む)とする簡易なゴミ識別手法を採用した。第2・第4象限は反射光などのノイズと判定した。



図3 デジタルカメラ搭載のバルーン

4. 結果及び考察

(1) 海洋数値モデルによるゴミ発生源の特定と漂着予報(サブテーマ1)

五島列島の漂着ゴミを対象に、発生源でのゴミ発生量を推定した結果を図4に示す。ここでは、海岸での回収量が多かったペットボトルのふたを対象にしている。図中のバーの高さがゴミ発生量を、またバーのトーンが発生月を示している。バーがない海岸は、全くゴミを出していないか、あるいは、ゴミを出しても全く八朔鼻海岸に漂着しないことを表している。台湾沿岸や長江河口以南の中国大陸沿岸でゴミ発生量が多く検出され、また、その時期は夏季に集中している。これは、冬季に同じ場所から投棄されたゴミは、日本沿岸には到達しないことを意味している。

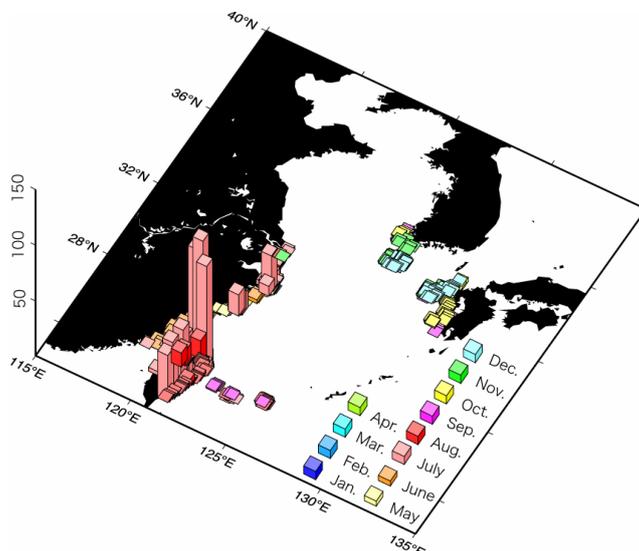


図4 逆問題として推定したペットボトルのふたの発生量。バーの高さが個数で、トーンが発生月を示す。

図5に、実際に八朔鼻海岸に漂着したふたの量と、モデルの同海岸への漂着量を比較した。モデルには、図4に推定された発生量に相当する仮想粒子を、それぞれの発生源から投入した。図5の漂着量は国別に分けている。国別にみても両者はよく一致しており、漂着ゴミの発生源および発生量推定に当たって、本サブテーマで試みた方法論の確かさが伺える。秋季から冬季にかけてゴミ漂着数が増加し、この時には中国や韓国からのものが増える事実が、再現計算でも良く表現されている。さらに、サブテーマ(4)が開発したウェブカメラによる海岸被覆面積の時系列と、モデルが再現する時系列は驚くべき一致を示した(サブテーマ(4)で後述)。また、本モデルによって、五島列島周辺に漂着するゴミ数の一カ月予報を行い、その精度の高さを確かめた。

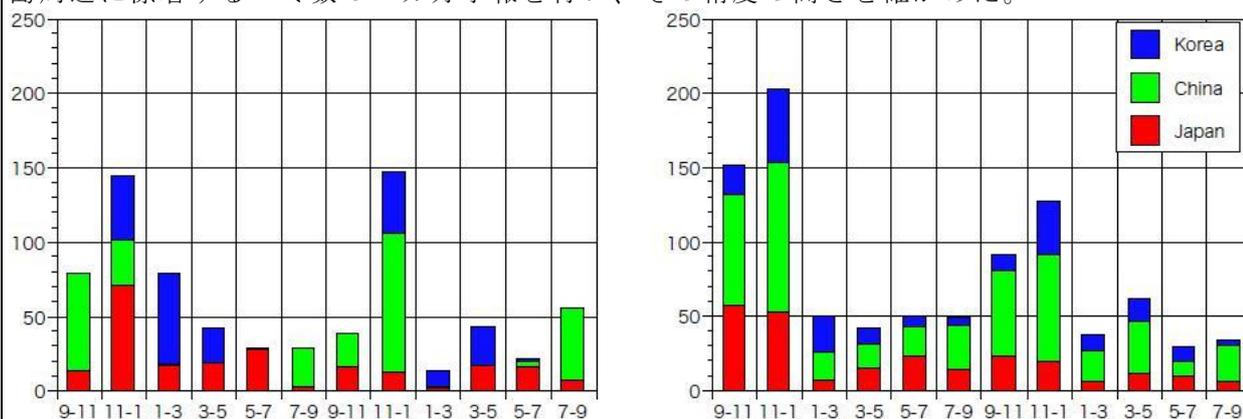


図5 2008年から2009年にかけて、八朔鼻海岸に漂着したペットボトルのフタの国別時系列。縦軸は個数で、横軸の例えば9-11は9月から11月に漂着した数を意味する。左は実際の漂着数(サブテーマ(2)で取得したもの)。右はモデルを用いた再現結果。起源地ごとに結果を分けている。

(2) NGO/CBO/地域住民と連携した海岸踏査による漂着ゴミの実態調査(サブテーマ2)

五島列島福江島八朔鼻海岸における定点調査によって、漂着ごみの種類、個数、区画ごとの1年間を通じた高精度のデータを得た。図5の左に示したペットボトルのふた以外に、代表的なアイテムであるペットボトル漂着数(国別割合)の年変動を、図6に示す。推定起源地は、ラベルや本体の

文字から「日本、韓国、中華系、その他」に分けた。なお、中華系とは、日本語以外で漢字の記載があるもので、中華人民共和国、中華民国（台湾）、香港は区別していない（ラベルの詳細調査からは、バーコードや製造地などより細かい情報に着目して、さらに3国に分離しているが、現地調査の現場では、上記の分類が適切な作業量であった）。このグラフから、卓越する起源国が季節によってスイッチしながら変動していることがわかる。すなわち、冬季は韓国、春季から夏季は日本、夏季は中華系が多かった。このような詳細な年変動は、国内外を通して初めて取得されたデータセットである。この漂着ゴミ起源国のスイッチングのメカニズムとして、冬季は北部から北西の季節風によってゴミが移動し、夏季には東シナ海を北東に流れる対馬暖流によって移動することを示唆している。

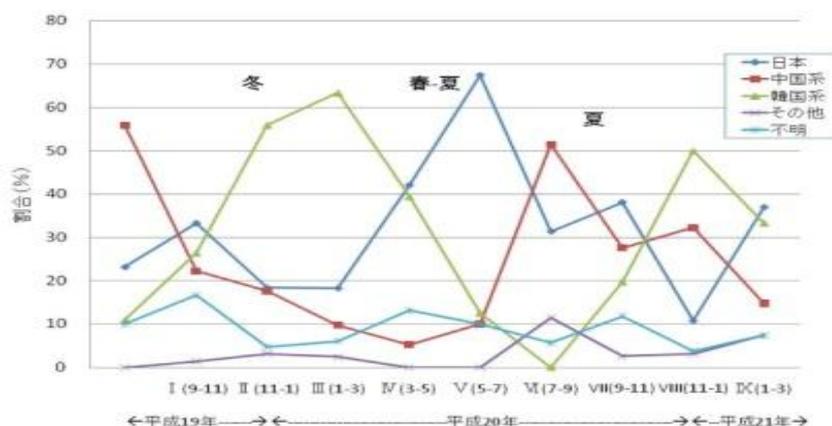


図6 ペットボトルの国別割合の推移。図の縦軸は総数に占める起源国別の割合で、横軸は図5と同じである。

つづいて、広域調査で明らかにしたペットボトル漂着量の製造国別の分布を図7に示す。ほとんど全てが日本、中国系（中華人民共和国、台湾）、韓国系の製品であった。大まかな傾向として、卓越する製造国は、福岡、鹿児島で回収されたボトルでは日本であり、沖縄本島、先島諸島では中国や台湾であった。南西諸島では概ね中華系の卓越が明瞭であるが、その多くは本州に届いていないことが分かる。これは、サブテーマ(1)が明らかにした、中国南部から大量のゴミが出ている(図4)わりには、中華系のゴミが五島に卓越するわけではない(図5)事実と符合する。

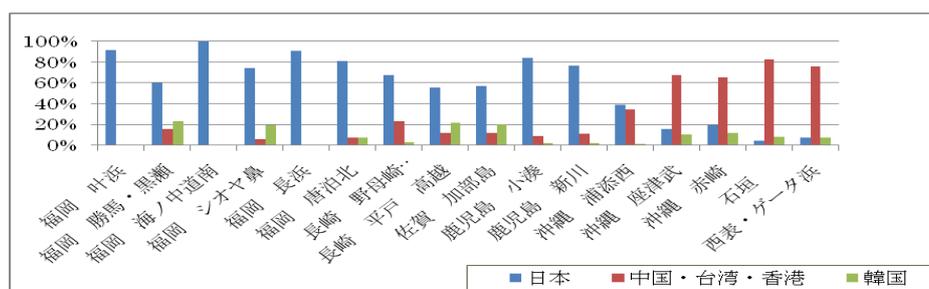


図7 東シナ海沿岸広域調査での福岡から先島諸島までの漂着ペットボトルの日本・中華系・韓国産の割合

(3) 短波海洋レーダーによるゴミ収束域の特定と数値モデルの精度検証(サブテーマ3)

空撮(サブテーマ(4))による実際の漂流ゴミ分布とFTLE分布の比較を行った(図8)。空撮は2009年7月23日に行った。当日は、この時期には珍しく北東風が卓越し、南西に向かう沿岸ジェットとその内側に低気圧性渦が発生していた。そして、2008年10月と同様に、この低気圧性渦の内部およびその周囲に螺旋状のACL(漂流物の集積が予想される水域)が発生していた。図には空撮により確認された漂流ゴミの位置を重ねてプロットしている。これらのゴミのほとんどが発泡スチロールゴミであったが、図中白丸で囲んだ領域にのみ流れ藻が確認された。発泡スチロールゴミの分布はFTLE分布と対応していないが、流れ藻はLCS周辺に位置していたことが分かる。これは、発泡スチロールゴミの一部あるいは大部分が海面上に表出しているため、その移動には風圧流が大きな影響を与えているが、流れ藻は海面付近の海中を移動しているため、海流に対してほぼ完全に受動

的に移動しているため、と考えられる。以上の空撮との比較より、FTLEの計算に基づくゴミ集積域の検出によって、風圧流の影響を受けにくいゴミの集積場所の検知に有効であることが証明された。

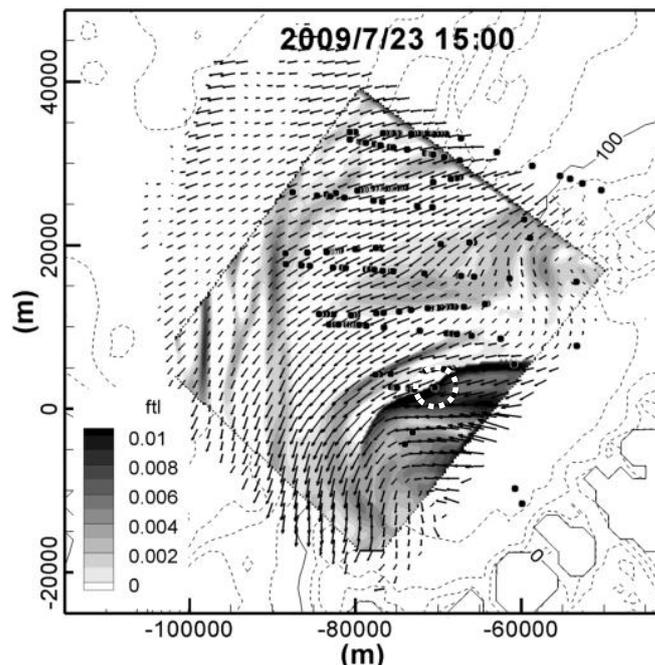


図8 サブテーマ(4)の空撮により確認されたゴミの分布(黒丸)と同時期の流速ベクトルおよびFTLE場。濃いトーンほど漂流物の強い集積が予想される水域。白点線で囲んである領域には流れ藻が、その他の場所には発泡スチロールゴミが漂流していた。

(4) 空撮による漂流ゴミ収束域の調査(サブテーマ4)

図9にウェブカメラ画像を解析することで得た、2008年5月から2009年10月までの漂着ゴミによる海岸被覆面積の時系列を表す(時間微分をとって増減量に変換後、標準偏差で規格化した)。図から分かる様に、漂着ゴミ量は単調に増えるわけではなく、増減を繰り返す。また、季節・経年変化と共に、一ヵ月以下の短い時間スケールでも変動をしていることがわかる。これは、北西風の強化と漂着ゴミ量の増大が直接関係していることに起因することが、周辺海上における風分布との比較によって明らかとなった。図9にはサブテーマ(1)による再現計算におけるゴミ漂着量の時系列も併せ示す。両時系列をそのまま比較した上図では両者の一致は結論しがたいが、実際のゴミ被覆面積の時系列を一ヵ月後方(過去)にシフトさせた下図をみると、両者は驚く程に一致していることが分かる。このことは、サブテーマ(1)で開発した黄海・東シナ海における漂流再現モデルの精度の確からしさ、さらには、逆推定した漂着ゴミ発生源や発生時期、そして発生量の確からしさを証明するものであるが、それでも台風通過時での精度は

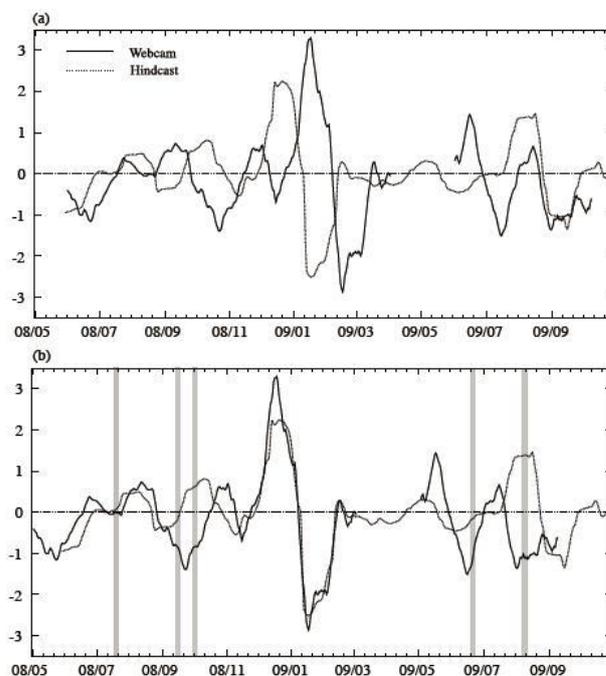


図9 ウェブカメラによって得た大串海岸の漂着ゴミ被覆面積時系列(実線)とサブテーマ(1)による再現計算結果(上図)。下は被覆面積時系列を一ヵ月過去にシフトさせたもの。時間微分を取って、それぞれの標準偏差で規格化した。台風の通過時を灰色のバーでしめす。

落ちることが分かった。

2009年7月に船舶曳航型バルーンにより撮影された画像を船上のノートパソコンに無線送信し、その画像を5分以内に解析して、海ゴミ位置を自動検出するシステムの開発に成功した(図10)。本サブテーマの手法では、CIELUV色素空間中で第一象限に位置する画素を赤色に、それ以外を黒に塗った。この処理を施すと、左図に写った褐色の漂流物(目視によって流れ藻であることが確認された)は、右図では赤いドットとして抽出される。このように、本手法を用いることで、洋上での空撮による漂流物早期検出が可能となった。

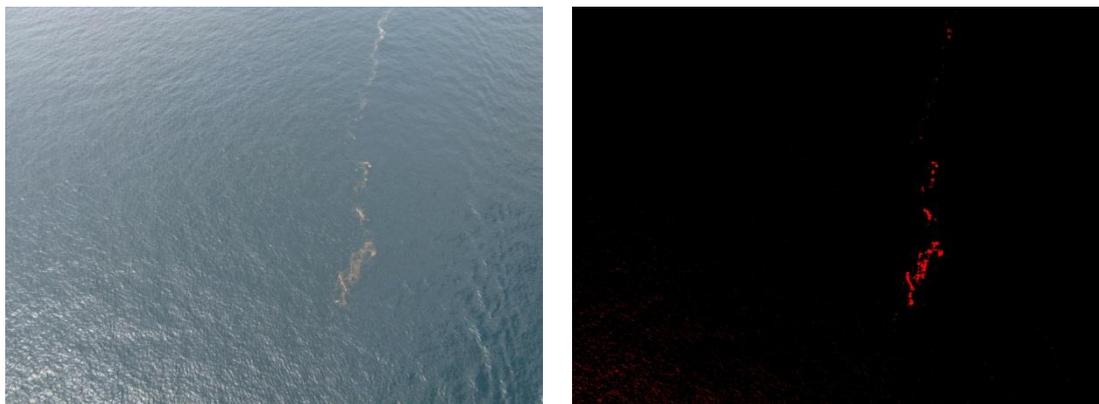


図10 バルーン画像と画像解析で検出された自然漂流物

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

- 双方向粒子追跡法と未定乗数法による、漂着ゴミの発生源・発生時期・発生量の逆推定手法を開発した。漂着ゴミ問題のみに限らず、たとえば浮遊性の大型クラゲの発生源推定等、多様な用途が見込まれる。
- 漂着ゴミの漂着量を再現し、あるいは一カ月先までの漂着量を予報する数値モデルを開発した。(2)に後述する効率のよい海岸清掃事業の提案に資するものである。
- 研究者と地域住民やNGOとの協働作業による海岸漂着物データの取得が、その後の科学的展開に耐えうる水準になることを証明した。本研究課題は、海岸調査における今後の良い前例となる。
- HFレーダー観測と力学系理論を応用したゴミ集積海域の特定方法を提案した。具体的には、Finite-time Lyapunov Exponent (FTLE)の計算に基づくLagrangian Coherent Structure(LCS)のマッピングを行い、LCSと空撮による漂流ゴミ分布との比較を行うことで本提案方法の精度検証や物理的根拠を考察した。
- ウェブカメラによる90分間隔の一年半にわたる海岸ゴミ被覆面積の時系列作成に成功した。これによって、漂着ゴミの増減要因を解析する研究に道を拓いた。
- セスナ機やバルーンを用いた空撮で、洋上から漂流物を準リアルタイムに検出する技術開発に成功した。

(2) 環境政策への貢献

- ウェブカメラによるリアルタイムの海岸ゴミ漂着量モニタリング技術と、予報技術を利用することで、効率の良い海岸ゴミ回収計画の提案が可能となった。たとえば、図11は大串海岸に設置したウェブカメラ画像で求めた海岸ゴミ被覆面積の時系列である。そして、図12は、ゴミ被覆面積が30m²になったタイミング(破線)で海岸清掃を行ったと仮定した場合の被覆面積時系列である。60%のゴミ削減が達成されると予想される。さらに、一カ月先の漂着量が予報できることを前提に、一カ月後のゴミ量が現在量から自然減となるならば清掃活動をスキップすることもできる。このように、本研究課題によって、効率のよい海岸ゴミ清掃事業を、効果を定量的に予想しつつ立案することが可能となった。 今後は手法の普及に努めていく。

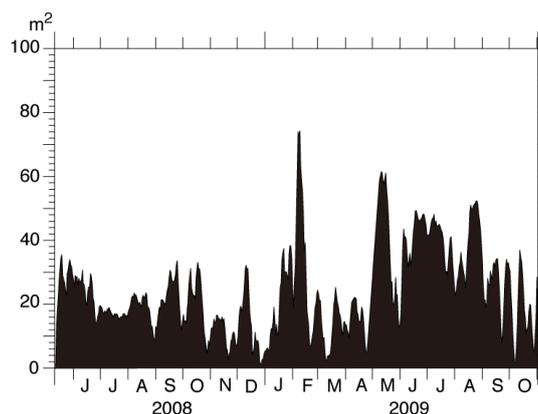


図 1.1 大串海岸のウェブカメラ画像を解析して算出した、海岸ゴミ被覆面積の時系列。一週間の移動平均を施している。2008年5月より2009年10月のもの

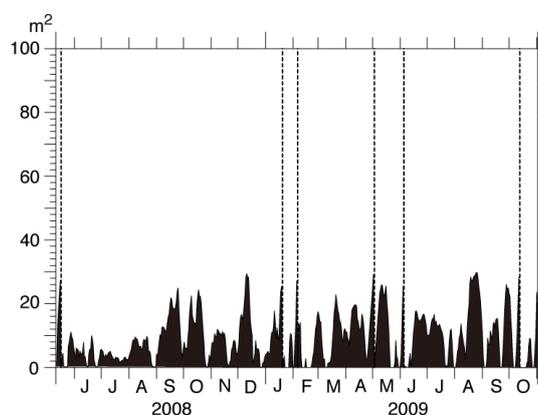


図 1.2 図 1.1 と同じだが、破線の時点(被覆面積 30m^2 を超えたタイミング)でゴミ漂着数を 0 にしたもの。

- 国土交通省・農林水産省による「中長期的な展望に立った海岸保全検討会」（社会資本整備審議会の下部部会）に、海岸環境分野の委員として参加している（平成18～20年）。そこでの議論で、海岸漂着物への対策の強化、地域社会が海岸環境保全に担う役割の明確化を提案し、最終提言草稿案に反映された（中長期的な展望に立った海岸保全検討会提言 P9、10、15、19 参照）。
http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/past_shinngikai/shinngikai/coastal_protection/pdf/5-s01.pdf
- 本研究で提案したFTLE分布に基づくゴミ集積海域の特定方法は、今年度（平成22年度）国土交通省中部地方整備局が運用している伊勢湾における漂流ゴミ回収支援システムに応用される予定である。また、今後、東京湾、大阪湾、紀伊水道、有明海におけるHFレーダー解析と人工衛星画像等を利用し他の海域における本提案方法の有効性を検討し、国土交通省全国海洋環境・技術課長会議等の場で示すと共に、それらの海域で運用されているゴミ回収支援システムへの応用展開を図っていく。
- サブテーマ(4)が海岸および洋上ゴミモニタリングに有効に活用している状況を踏まえ、H20年度に国土交通省の漂流ゴミ回収船にバルーン撮影装置が導入された。

6. 研究者略歴

課題代表者：磯辺篤彦

1964年生まれ、愛媛大学大学院工学研究科修了、博士(理学)、現在、愛媛大学沿岸環境科学研究センター教授

研究参画者

(1) : 磯辺篤彦 (同上)

(2) : 清野聡子

1964年生まれ、東京大学大学院農学系研究科水産学専攻修士課程修了、博士(工学)、現在、九州大学大学院工学研究院環境都市部門准教授

(3) : 日向博文

1966年生まれ、東京工業大学大学院理工学研究科修了、博士(工学)、東京工業大学工学部助手、現在、国土技術政策総合研究所沿岸域システム研究室長

(4) : 馬込伸哉

1974年生まれ、九州大学大学院総合理工学府博士後期課程修了、博士(理学)、現在、産業技術総合研究所産総研特別研究員

7. 成果発表状況 (本研究課題に係る論文発表状況。)

(1) 査読付き論文

- 1) 張弼勲・磯辺篤彦・松野健・清水学 “東シナ海における漂流ブイの追跡モデルとその応用”. 沿岸海洋研究, 45, 125-135, 2008
- 2) 日向博文, 諸星一信, 金津伸好 “HFレーダーによる漂流ゴミ回収効率化の試み. 沿岸海洋研究”. 45, 105-114, 2008.
- 3) Isobe, A. “Recent advances in ocean-circulation research on the Yellow Sea and East China Sea shelves” Journal of Oceanography, 64, 569-584, 2008.
- 4) Isobe, A., S. Kako, P.-H. Chang, and T. Matsuno “Two-way particle tracking model for specifying sources of drifting objects: application to the East China Sea shelf” Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 26, 1672-1682, 2009
- 5) Seino, S., Kojima, A., Hinata, H., Magome, S. and Isobe, A. “Multi-Sectoral Research on East China Sea Beach Litter Based on Oceanographic Methodology and Local Knowledge” Journal of Coastal Research, Special issue 56, 1289 - 1292, 2009.
- 6) 清野聡子 “水産業の公益性と市民・行政・漁業者の役割, 市民参加による浅場の順応的管理” 水産学シリーズ, 162、恒星社厚生閣, pp.87-106, 2009.
- 7) Kako, S., A. Isobe, S. Yoshioka, P.-H. Chang, T. Matsuno, S.-H. Kim, J.-S. Lee “Technical issues in modeling surface-drifter behavior on the East China Sea shelf” Journal of Oceanography, 66, 161-174, 2010
- 8) Kako, S., A. Isobe, S. Seino, and A. Kojima “Inverse estimation of drifting-object outflows using actual observation data” Journal of Oceanography, 66, 291-298, 2010
- 9) Kako, S., A. Isobe, S. Magome “Sequential monitoring of beach litter using webcams” Marine Pollution Bulletin, in press.
- 10) Hinata, H., N. Kanatsu, and S. Fujii “Dependence of Wind-Driven Current on Wind Stress Direction in a Small Semienclosed, Homogeneous Rotating Basin” J. Physical Oceanography, in press.

(2) 査読付論文に準ずる成果発表 (社会科学系の課題のみ記載可)

記載該当事項なし

D-071 市民と研究者が協働する東シナ海沿岸における海岸漂着ゴミ予報実験

(1) 海洋数値モデルによるゴミ発生源の特定と漂着予報

愛媛大学

沿岸環境科学研究センター

磯辺篤彦

※〈研究協力機関〉 愛媛大学沿岸環境科学研究センター 加古真一郎

平成19～21年度合計予算額 44,328千円

(うち、平成21年度予算額 19,124千円)

上記の予算額は、間接経費を含む。

[要旨] 漂着ゴミの発生源や発生量の、数値モデルによる高精度推定手法の確立に取り組んだ。まず、あらかじめ海洋循環モデルで求めておいた海流の向きを逆にして、漂流ゴミの着岸場所にモデル粒子群を投入し、発生源候補まで粒子群を遡らせる逆追跡実験を行う。その後、発生源候補から粒子群を再投入し、ゴミが着岸した時期に、モデル粒子群が広がっている範囲(標準偏差の二倍を長軸とする楕円の範囲)に注目する。そして、ゴミの着岸場所が、その範囲内にあるか否かでもって、粒子を再投入した発生源候補の有意性(95%信頼限界)を検証する。この双方向粒子追跡法の精度検証を、実際に五島列島の海岸に漂着した使い捨てライターを用いて行った。発生源分布をライターに記載された電話番号から推定し、追跡法で特定した発生源と比較したところ、両者には良い一致が見られた。つづいて、五島列島福江島の八朔鼻海岸で得た海岸ゴミ漂着量データを用いてゴミの発生源を推定した。さらに各発生源での発生量を、八朔鼻海岸における実際のゴミ回収量をもとに、ラグランジュの未定乗数法を用いた逆問題の解として推定した。人工衛星観測風で駆動した数値海洋循環モデルに、推定した発生量に相当する粒子数を各発生源から流して、モデルの五島周辺に到達した粒子数と、実際の海岸での回収量、およびウェブカメラで推定したゴミ漂着量を比較し、本研究で推定した発生源情報や手法の精度を確認した。さらに、気象庁提供の予報風データを用いて、発生源と発生量を数値モデルに与えた海岸ゴミ予報システムを構築し、ゴミ漂着一か月予報をインターネット上で公開した。そして、予報技術やウェブカメラを用いたゴミ監視技術を駆使した効率良い漂着ゴミ回収手法を提案した。

[キーワード] 双方向粒子追跡法、漂着ゴミの発生源推定、発生量推定の逆問題、ゴミ漂着量予報システム、漂着ゴミ回収事業の効率化

1. はじめに

近年、東シナ海に面した五島や対馬などの島嶼部や九州沿岸には、漁具やプラスチック製品、はては医療廃棄物に至るまで様々なゴミが大量に漂着し、各地方自治体はその対応に苦慮している。特に、過疎化が進む沿岸部や島嶼の被害が大きく、これらの地域では、大量の漂着ゴミを拾い集める十分な人口がないため、処理が自治体財政に過度な負担を強いている。その対策に、ようやく国家レベルで制度が整備されつつあるが、科学技術面からの貢献は、著しく立ち遅れているのが現状である。

東シナ海沿岸の漂着ゴミについては、これまでも、専門家やNGOによって海岸踏査による地道な調査が続けられてきた。しかし、漂着ゴミの削減に向けた国際ルール作りに欠かせない、漂着ゴミの発生源や発生量の推算是きわめて困難であった。これまでは、ゴミに記載された文字など、わずかな手がかりを頼りに発生源の推定のみがなされているのが現状であった。これは、ひとえにゴミが浮遊する東シナ海の海流情報が貧困で、海洋学にこのような社会的ニーズに応えるだけの力量が無かったためである。当然、ゴミ漂着予報など望むべくもなかった。

最近の海洋観測技術の高度化、シミュレーション技術の向上、計算機環境や既存データセットの整備によって、このような社会的ニーズに応えるまでに力量を上げた海洋学の現況を踏まえ、サブテーマ(1)では、まず、漂着ゴミの発生源場所や発生時期、さらには発生量を高精度で推定する手法の確立を目指す。さらには、漂着ゴミの漂着時期の数値予報手法の確立に取り組む。海岸漂着ゴミの発生位置の特定は、ゴミの海洋投棄や海洋流出を抑制するための国際的なルール作りへ向けての重要な基礎資料となるだろう。さらに、ゴミの漂着時期が精度よく予報できれば、人的・経済的負荷が大きい現行の海岸ゴミ回収作業は、著しく効率化できる可能性がある。

サブテーマ(1)の科学的・技術的意義は、ようやく直截の社会貢献が可能なまでに体裁が整った東シナ海における海洋学を、漂着ゴミといった社会的ニーズの高い問題に初めて適用することにある。そして、海外からのゴミ漂着といった、政府間では事実認識や合意形成が困難な国際的な環境問題に対し、NGOやCBOの力を得つつ、科学技術的知見に基づく実効性を伴った提案を行っていく。

2. 研究目的

(1) ゴミ発生源の特定と漂着予報

本研究課題のうちサブテーマ(2)によって、2007年9月から2010年1月までの2ヶ月に一度、長崎県五島市福江島八朔鼻海岸において、海岸漂着ゴミの回収・計量調査が実施された(サブテーマ(2)の詳細様式を参照)。その結果、ペットボトル、ペットボトルのふた、使い捨てライター等の文字情報をもとにして発生源を推定し、その割合の季節変化を知ることが可能となった。このデータを用いることで、ペットボトルのふたやライターを対象に、後述する双方向粒子追跡実験による発生源の推定および、ラグランジュの未定乗数法を用いたゴミ発生量の推算を行う。漂着ゴミの発生源、発生時期、そして発生量が精度良く推定されたならば、周辺海域の海流を再現した海洋循環モデルの中にゴミを模した仮想粒子を推定結果の通りに放流することで、実際のゴミが漂流する様子を計算することが可能となるだろう。サブテーマ(1)では、気象庁提供の予報風を用いることで周辺海域の海流分布の一カ月予報を実施し、この中に仮想粒子を流すことで漂流ゴミ数

値予報に取り組む。なお、数値予報の精度検証のために、サブテーマ(4)と共同して開発したウェブカメラ(ライブカメラ)によるゴミ漂着量連続モニタリングシステムを利用する。

(2) 漂着ゴミの監視・予報技術を用いた海岸管理手法の最適化手法の提案

後述する通り、上記目的(1)に述べたウェブカメラによる海岸漂着ゴミ量のモニタリング技術によって、海岸ゴミ量は時々刻々と大きな変化をみせることが分かった。この場合、海岸清掃事業によってゴミを全回収したところで、タイミングが悪ければ、すぐに大量の新たなゴミが押し寄せることもあるだろう。逆に、多大な労力をかけての清掃活動を経なくとも、速やかな自然減が見込まれる時期もあるだろう。サブテーマ(1)では、上記の海岸清掃活動、あるいは漂着ゴミ量の計量調査を実施するにあたって、最も効率のよい実施時期の決定手法を提案する。このため、上記目的(1)により達成された、ウェブカメラによるリアルタイムの海岸ゴミ蓄積量のモニタリング技術と、ゴミ漂着量の数値予報システムを活用する。

3. 研究方法

(1) ゴミ発生源の特定と漂着予報

1) 双方向粒子追跡法

a. 数値モデル

双方向粒子追跡法には、時々刻々と変化する海流分布を計算する海洋循環数値モデルと、このモデルの海流によって挙動が決定される仮想粒子の追跡モデルを用いる。海洋循環モデルには、Princeton Ocean Model (Blumberg and Mellor, 1987¹⁾)をベースにしたChang and Isobe (2003)²⁾と同じものを用いた。風応力の算定には、対象年の衛星観測(QuikSCAT)風データを用いた。また、Takikawa and Yoon(2005)³⁾に従って、対馬海峡を挟む潮位差を換算して対馬海峡の流量とした。それ以外の、黒潮流量、台湾暖流流量、長江流量、そして降水・蒸発量は、気候的な(10年平均)の年変動を与えている。計算対象年は、手法の精度検証計算を行う2004年と、漂着ゴミの再現計算や予報計算を行う2008年から2009年の二期間とする。図1-1に、2004年における5月から9月まで平均した4m層の流速ベクトル分布を示す。総じて北東向きの海流系が東シナ海の大陸棚上に見受けられる。

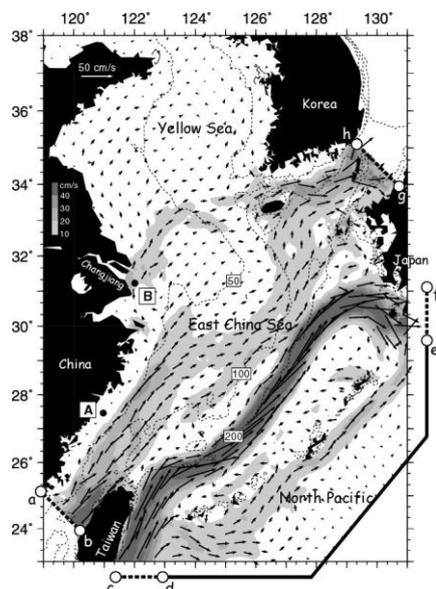


図1-1 数値モデルの領域と5-9月の4m層の平均流速ベクトル。AとBはモデル粒子の投入点で、トーンは流速の大きさを10cm/s刻みで示している。

仮想粒子の追跡モデルは、図1-1に示すような表層下4mの流速分布を用いて行う。ただし、風圧流（漂流物の海表面上部分に当たる風による移動）の影響を考慮するため、海洋循環モデルで求めた表層流速に風圧流速 (U)

$$U = \sqrt{\frac{\rho_a}{\rho_w}} \sqrt{\frac{A_a}{A_w}} \sqrt{\frac{Cd_a}{Cd_w}} W \quad (1)$$

を加えている。ここで添え字のaとwは空気と海水を意味し、 ρ は流体密度、Aは漂流物の射影面積、Cdは流体中に置いた物体の抵抗係数、Wは風速である。抵抗係数は流体の物性に依存しないので、抵抗係数比には1.0が使われることが多い。本研究では、風洞水槽実験を実施することで適正な計数比を求める試みを行った⁴⁾が、やはり1.0を採用することで支障はないとの結論に至った。空中部分の射影面積と水中部分のそれとの比は、実際に漂流する過程で様々な破損状況や形状を取る漂流物を勘案し、1から1/300まで仮想粒子毎にランダムに変化させた。

b. 双方向粒子追跡法⁵⁾

まず、図1-1にある点AとB(発生源)から一万個の粒子を、a. で求めた6月15日のモデル海洋に投入し、8月31日までの各粒子の挙動を計算した。この際、一か月で径40km程度の拡がりをもたらす弱いランダムウォークを与えた。この程度のランダムウォークでも、流速の時空間変動が大きい当海域を移動するにつれ、一万個の粒子は東シナ海全域に広く分散していった(図1-2にBから投入した8月31日の粒子分布を示す)。なお、この実験では、粒子が岸に隣接する格子に12時間以上滞留した場合、これを着岸と見なし、それ以降の粒子追跡を中断している。図1-2にある4点を選び、ここで8月31日に粒子を観測したと仮定し、それら観測位置から真の発生源(図中の白丸)を推定する実験を行った。

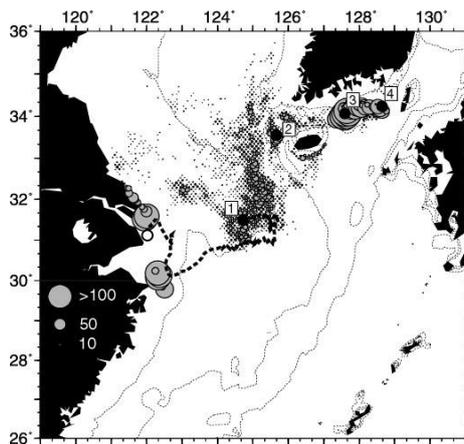


図1-2 B点から投入した8月31日のモデル格子位置での粒子数分布(粒子数を円の径で示す)

ある物体が、図1-3 aの観測位置 R_4 へ時刻Tに着岸したと考えよう。ここに例えば一万個のモデル粒子を投入し、ランダムウォークなしの逆追跡を行えば、破線に沿って全粒子は移動し S_2 に戻るかもしれない(なお、本実験では、人為的なゴミを想定しているので、着岸した時点で発生源に戻ったと考える)。しかし、海域で物体が経験したものと同程度のランダムウォークを粒子群に与えれば、逆追跡法によって S_0 から S_3 などへと、発生源候補は複数個検出されるだろう。

ここでは、発生源候補の全てから、さらに一万個の粒子を投入し、再びランダムウォークを含めた順追跡を行う。このうち S_1 から投入された粒子群は、時刻Tで、楕円の範囲に分布する(図1-3 b)。楕円の長軸長さは、粒子の分散の主軸方向で求めた粒子位置の標準偏差(σ) $\times 2$ を選ぶ。同様にして短軸長さを求める。時刻Tで観測位置 R_4 は、 S_1 から投入された粒子群の 2σ 楕円の外にある。約5%の危険率はあるが、観測位置 R_4 は、 S_1 から投入された粒子群のグループの外にあるとみなされ、棄却される。実際に R_4 で物体を発見したわけであるから、本来棄却されるべきは S_1 であり、これを有意な発生源ではないと考える。一方、図1-3 bの S_0 は有意な発生源とみなす。

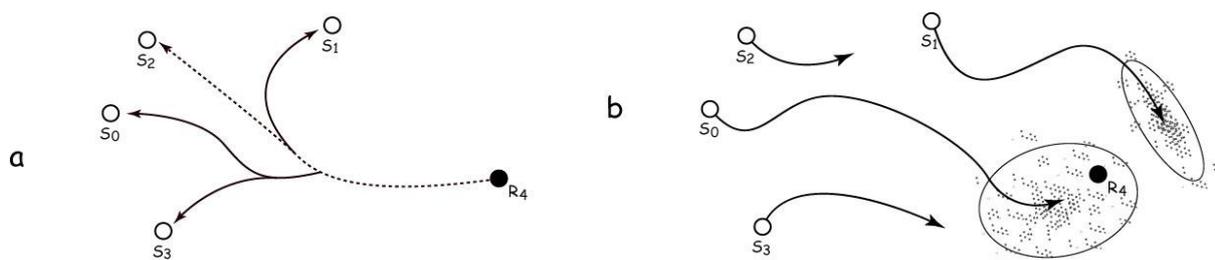


図1-3 双方向粒子追跡法の考え方(詳細はテキスト参照のこと)

2) ラグランジュの未定乗数法による漂着ゴミ発生量の推定⁶⁾

上記手順で求めた発生源からのゴミ発生量を、八朔鼻海岸においてサブテーマ(2)が得たゴミ漂着量データを用いて逆算した。逆問題の解法として、本サブテーマではラグランジュの未定乗数法⁶⁾を採用した。すなわち、各発生源における発生量を未知のベクトル \mathbf{A} で表し、海洋循環モデルによって既知となっている、八朔鼻海岸でのゴミ漂着量に対する各発生源の寄与率ベクトルを \mathbf{B} 、

八朔鼻海岸でのゴミ漂着量をCとおいて、

$$AB=C$$

と定式化した上でAを逆算するものである。このとき、各発生源から海岸に至るまでの、最も効率の良い組み合わせを選択するようにAを解く。

3) 海岸漂着ゴミ量の再現計算と予報、および検証

上で求めたゴミの漂着源や漂着時期、そして漂着量を、海洋循環モデルに投入する仮想粒子の投入場所や投入時期、そして投入量として粒子の追跡モデルを行うことで、黄海・東シナ海(図1-1の領域)に漂流するゴミの時空間分布を推定する。再現計算を2008年5月より、一カ月予報計算を同年12月より開始し、2010年5月(現在)まで計算を継続中である。再現計算にあたっては、先述した衛星観測(QuikSCAT)風データを用いることで、当該年における表層海流の再現性の向上を図った。予報計算には気象業務支援センターが配布している一カ月予報風データを用いた。

再現性の検証には、五島列島・奈留島・大串海岸でサブテーマ(4)が実施したウェブカメラによる海岸ゴミ漂着量データを用いることとした(詳細はサブテーマ(4)参照⁷⁾)。大串海岸に設置したウェブカメラが90分おきに撮影した漂着ゴミのjpg画像から、画素(ピクセル)毎のRGB値を算出し、さらにこれを輝度に変換した後、ある閾値を境に漂着ゴミを表す画素か否かを判定した。そして、ゴミを表す画素の総計からゴミによる海岸の被覆面積を算出した。なお全ての画像は、真上から見た直視画像に変換する幾何補正を施したのちに、面積の算出に供している。サブテーマ(1)では、2008年5月から2009年10月までのゴミによる海岸被覆面積の時系列を求め、これを再現計算ならびに予報計算結果と比較した。

なお、サブテーマ(1)で用いた粒子追跡モデルには、実際のウェブカメラに映っている漂流物の着岸過程は含まれていない。そこで、図1-4に示すような格子範囲を流れる粒子が多くなれば、大串海岸におけるゴミ漂着数も増加するとの仮定を設けた。すなわち、比較する対象は、格子範囲の粒子数の時系列と、ウェブカメラで解析したゴミ被覆面積の時系列である。

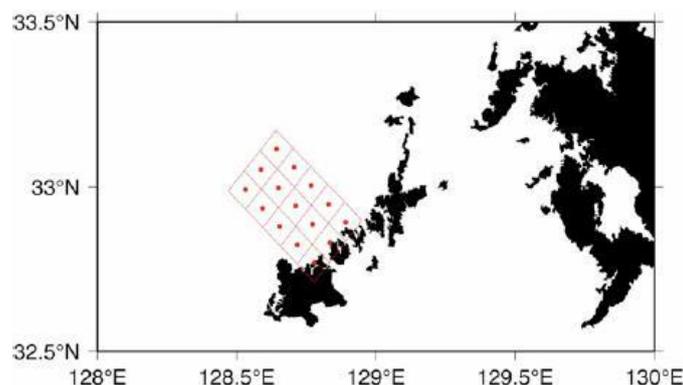


図1-4 粒子追跡モデルの精度検証に用いる粒子数の計量範囲

(2) 漂着ゴミの監視・予報技術を用いた海岸管理手法の最適化手法の提案

ウェブカメラの画像を用いて算出したゴミ被覆面積を漂着ゴミ量(f)とみなし、時刻 t における漂着ゴミ量を、

$$f(t) = f(t_0) + \int_{t_0}^t \frac{df}{dt'} dt'$$

と表現する。 t_0 は t 以前の任意の時刻である。右辺第2項の時間勾配に現実の漂着ゴミ量データを用い、右辺第1項を適当な時期に0とすると、海岸清掃活動を行ったと仮定した後の漂着ゴミ量時系列を得ることができる。サブテーマ(1)では、ウェブカメラがゴミの海岸被覆面積を90分毎に監視しているとの前提に立って、あるしきい値以上にゴミが蓄積した時点で回収を行う場合や、一定間隔(例えば三か月毎など)で回収を行った場合の、回収効率を比較する。さらには、一か月先のゴミ漂着量が予報できるとの前提に立った回収効率を算定する。

4. 結果・考察

(1) ゴミ発生源の特定と漂着予報

1) 双方向粒子追跡法の精度検証

先述したように、2004年6月15日に、図1-1の二か所の発生源A, Bから一万個の粒子を投入する。そのうち8月31日に観測位置に到着した粒子の、発生源を逆算する実験を行った。図1-5左には、発生源Bから投入した実験で、観測位置4(図1-2)から逆追跡で検出した発生源候補のうち、5月と6月に着岸したものを示した。このすべての候補から、粒子数によらず一万個ずつ粒子を流し、8月31日での分布を調べ、有意な発生源を検定した(右)。25ヶ所の発生源候補のうち8割弱が棄却され、有意な発生源は6か所にまで絞り込まれた。

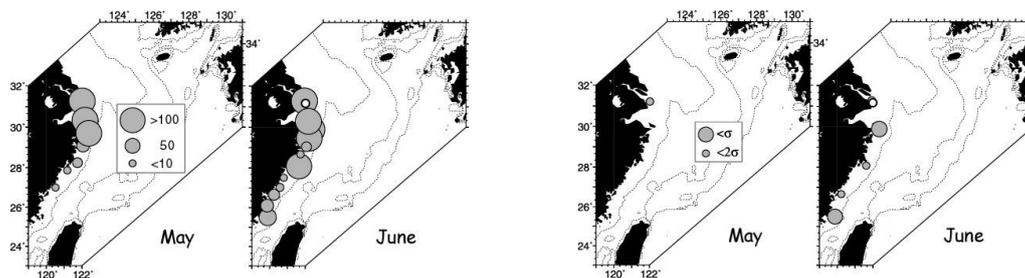


図1-5 逆追跡法で検出した5・6月の発生源候補(左)と、双方向粒子追跡法で有意な発生源と推定された発生源(右)。左図の円の径は発生源候補の粒子数で、右は推定に用いた標準偏差楕円の種類(標準偏差×1と×2の二通りで行った)。発生源B、観測位置4の実験結果のみを示す。

同様の計算を、図1-2にある4点全てについて実施した結果を図1-6に示す。縦軸は検出された発生源と真の発生源の100kmごとに分割した距離で、横軸は検出された月を示す。また、黒丸を付けたピンは、逆追跡によって求めた100km×1か月の枠内にある発生源候補に含まれる粒子数で、白丸を付けたピンは同じ枠内にある有意な発生源の数を意味している。ともに、全体数で割って規格化した。これを見ると、実際に真の発生源から粒子を投入したのは6月であるにもかかわらず、7月から8月にかけての広い範囲で発生源候補が現れている。しかし、これらの候補は双方向の追跡モデルの結果、全てが棄却されており、真の発生源に近い0~400kmの範囲の5月から6月にかけて、有意な発生源が算出されている。

ここには示さないが、真の発生源Aから投入した粒子群に対する実験でも、有意な発生源は真の発生源の周辺に集中した。総じて、逆追跡モデルで検出された発生源候補の60~90%が棄却された。すなわち、本サブテーマが提案した双方向粒子追跡モデルは、有意水準で定量評価できる統計的に有意な発生源の推定に有効である。

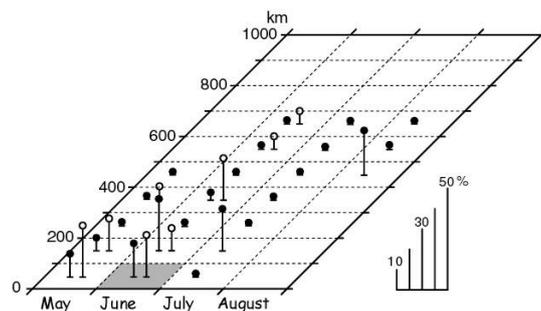


図1-6 発生源Bから粒子を投入した場合の、双方向粒子追跡モデルの実験結果。黒丸付きのピンが発生源候補で、白丸付きのピンが有意な発生源。詳細は本文参照のこと。なお、真の発生源が含まれる枠をグレーで示している。

2) ゴミ発生源の特定と漂着予報

双方向粒子追跡法により推定された、ライター発生源分布を図1-7(a)に示す。図1-7(b)は2008年4月に五島列島で回収されたライターの発生源分布(ライター表面に記載された電話番号より推定)を示したものであるが、(a)と(b)は非常に良く一致しており、推定結果の精度の高さが伺える。

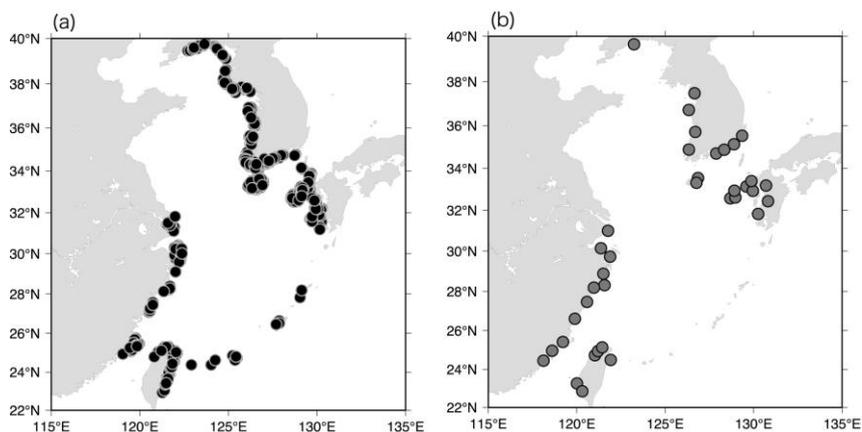


図1-7 数値モデルによって推定されたライターの起源地分布(a)と、海岸踏査の結果得られたライターの起源地分布(b)

逆問題によってゴミ発生源での発生量を推定した結果を図1-8に示す。ここでは、海岸での回収量が多かったペットボトルのふたを対象にしているため、風圧流の効果は考慮されていない。図中のバーの高さがゴミ発生量を、またバーのトーンが発生月を示している。バーがない海岸は、全くゴミを出していないか、あるいは、ゴミを出しても全く八朔鼻海岸に漂着しないことを表している。

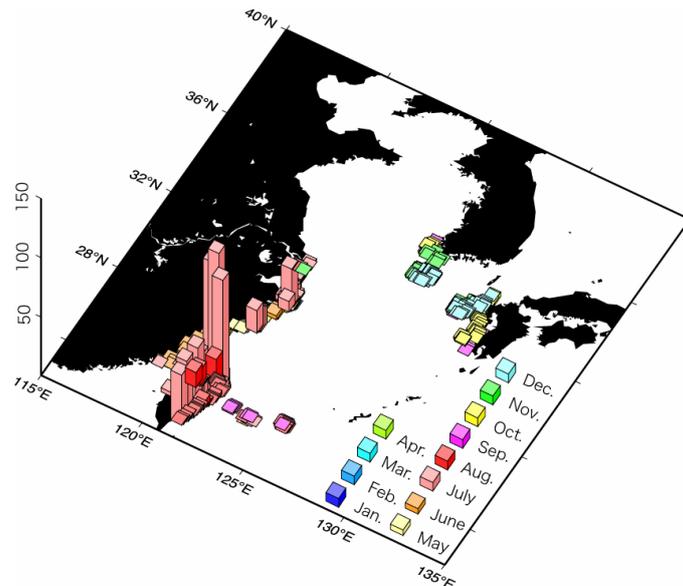


図1-8 逆問題として推定したペットボトルのふたの発生量。バーの高さが個数で、トーンが発生月を示す。

台湾沿岸や長江河口以南の中国大陸沿岸でゴミ発生量が多く検出され、また、その時期は夏季に集中している。これは、冬季に同じ場所から投棄されたゴミは、日本沿岸には到達しないことを意味している。東シナ海に通年存在する北東向きの海流系や、冬季の南向きの中国沿岸流⁸⁾を考えれば、この結果は合理的である。また、韓半島や日本からのゴミ発生も検出され、この量は中国・台湾起源のものより少ない。ただし、八朔鼻海岸でのゴミ漂着量に日韓中の差異は少ないことより、中国系のゴミは発生量の割には日本に到達しにくいことがわかる。

図1-9に、実際に八朔鼻海岸に漂着したふたの量と、推算発生量を各発生源から流したモデル内での同海岸への漂着量を比較した。両者はよく一致しており、漂着ゴミの発生源および発生量推定に当たって、本サブテーマで試みた方法論の確かさが伺える。また、この図を発生国別に描き直し、実際の八朔鼻海岸に漂着した国別の漂着数と比較する(詳細はサブテーマ(2);図1-10)。秋季から冬季にかけてゴミ漂着数が増加し、この時には中国や韓国からのものが増える事実が、再現計算でも良く表現されている。

この結果を用いて、現在、本サブテーマでは八朔鼻海岸への漂着予報実験を実施している。最新予報は、本研究課題のホームページである<http://www.umigomi.com>で公開中である(図1-11)。

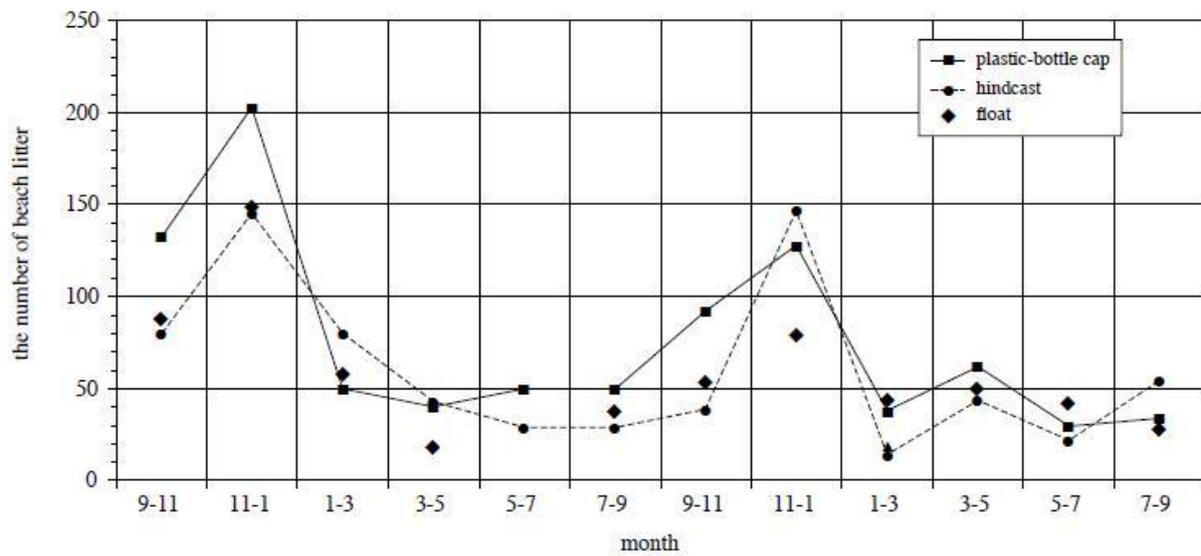


図1-9 モデルの八朔鼻海岸におけるペットボトルのふたの漂着量(●)と実際の漂着量(黒四角；■)の比較。縦軸は個数で横軸は月。たとえば9-11は9月から11月にかけての漂着数を意味する。2008年から2009年にかけてのデータを用いた。実際の漁業用ブイの漂着数(◆)と併せ示す。

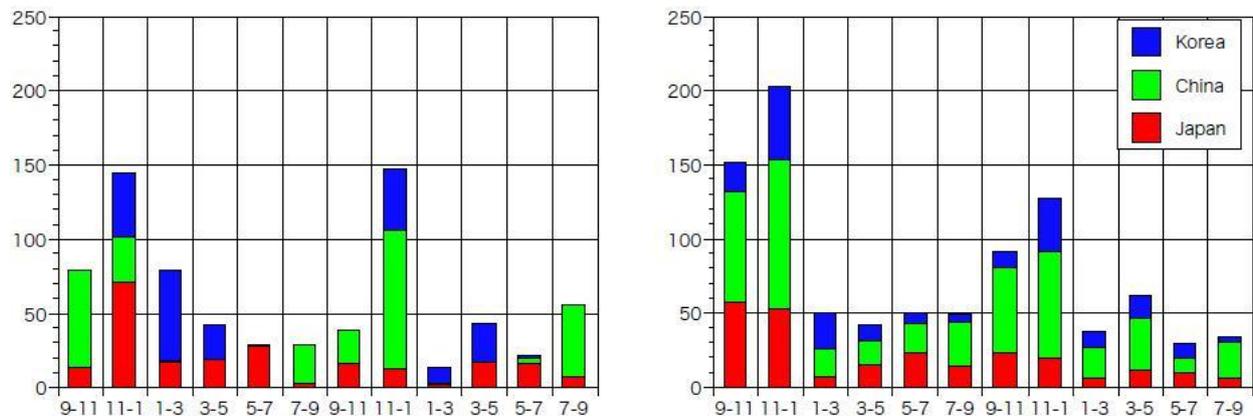


図1-10 八朔鼻海岸に漂着したペットボトルのフタの国別時系列。縦軸と横軸の意味は図1-9と同じ。左は実際の漂着数(サブテーマ(2)の図2-1と同じデータを使用)。右はモデルを用いた再現結果

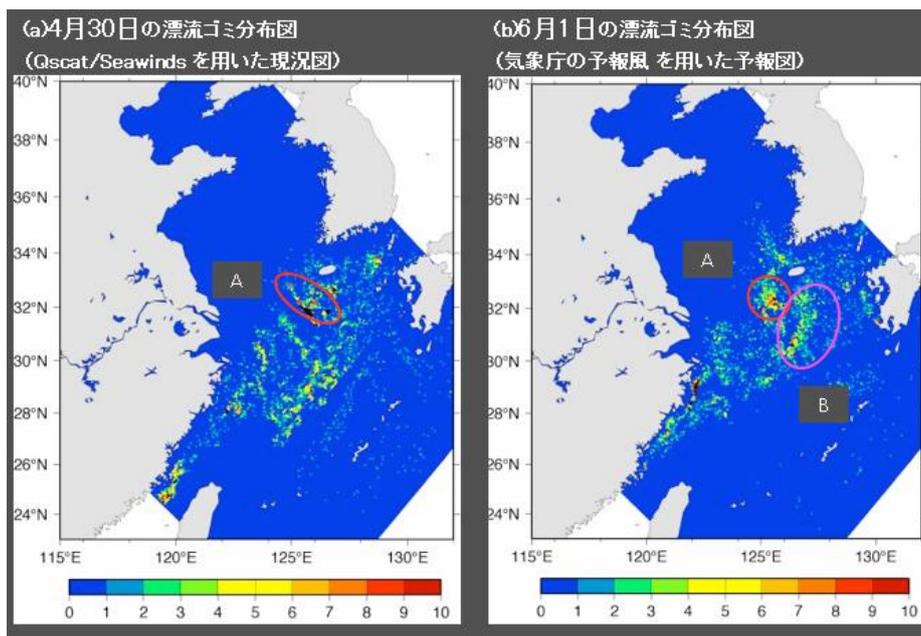


図1-11 インターネットで公開している東シナ海における漂流ゴミの現況推定分布(左)と、予報風を用いた予想分布(右)

3) 精度検証

図1-12に、ウェブカメラで求めた大串海岸におけるゴミ被覆面積と、図1-4の格子位置に滞留する再現計算におけるモデル粒子数の時系列を示す。比較にあたっては、一カ月以下の時間変動を移動平均で除去し、それぞれの標準偏差で規格化することによって、大まかな傾向を抽出した。両時系列をそのまま比較した上図では両者の一致は結論しがたいが、実際のゴミ被覆面積の時系列を一カ月後方(過去)にシフトさせた下図をみると、両者は驚く程に一致していることが分かる(相関係数:0.6)。このことは、サブテーマ(1)で開発した黄海・東シナ海における漂流再現モデルの精度の確からしさ、さらには、逆推定した漂着ゴミ発生源や発生時期、そして発生量の確からしさを証明するものである。一カ月のシフトが必要な理由は明確にはできなかったが、そもそも、五島周辺を滞留する漂流物(モデル)と、実際に海岸に漂着するゴミ量に時間差が出るのは当然であろう。また、本モデルでは一カ月毎に粒子を発生源から投入しているため、一カ月以下の時間解像度を持たない。この一カ月の物理的意味を遡及することは困難であると考えられる。

また、量時系列が合わなくなる時期に注目すると、これが黄海・東シナ海を台風が通過した時期に一致することは興味深い。すなわち、台風に伴う風圧流(風によって漂流物が直接押される効果)、風浪による移動、海洋表層での乱れに伴う大きな漂流物輸送に、本サブテーマで構築したモデルは十分に対応できていないことを意味する。とはいうものの、漂着ゴミが増加する冬季での一致などかんがみるに、構築したモデルはゴミ漂着量の再現計算に際して十分に実用性があると言えよう。図1-13に、再現計算の結果と、同時期に予報風を用いて求めた漂着予報数の時系列を比較する。漂着予報数は、再現計算結果と同様に図1-4に示す格子範囲内に滞留する予報計算時でのモデル数である。予報計算にあたっては、予報風に切り替える直前までの再現計算結

果を初期値とし、予報風の長さである一カ月先までの計算を行った。この手順を、次の一カ月で再び実施して予報計算を継続した。再現計算と予報計算の結果は良く似ており、予報計算の精度は図1-12に示された再現計算と同程度の精度を持っていることが分かる。すなわち、サブテーマ(1)で構築したシステムによって、漂着ゴミ量の一カ月予報が可能となった。

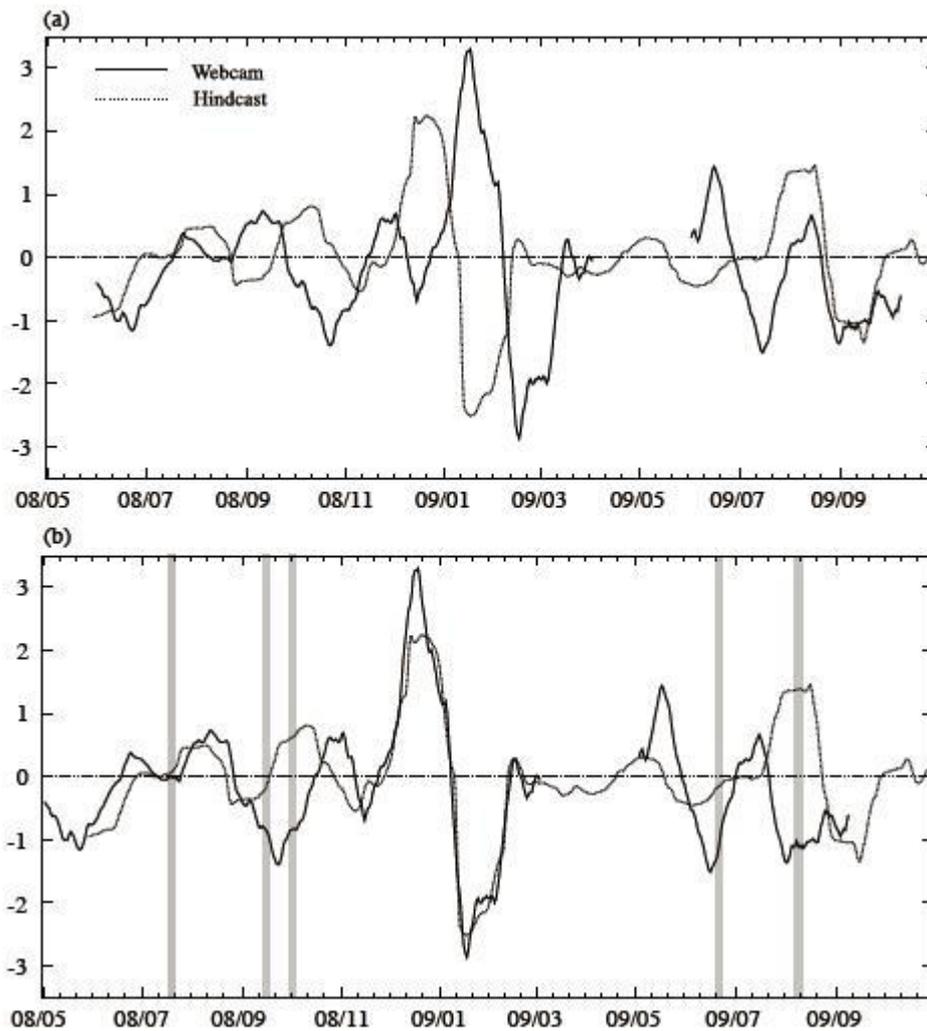


図1-12 ウェブカメラによって計算した大串海岸のゴミ被覆面積(実線)と再現計算結果(破線)の時系列(上図)。横軸は年(下2ケタ)/月を意味し、縦軸は漂着数(再現計算の場合は漂流数)を標準偏差で規格化したもの。下図は、ウェブカメラの時系列を一カ月過去にシフトさせたもの。灰色のバーは黄海・東シナ海に台風が通過した時期

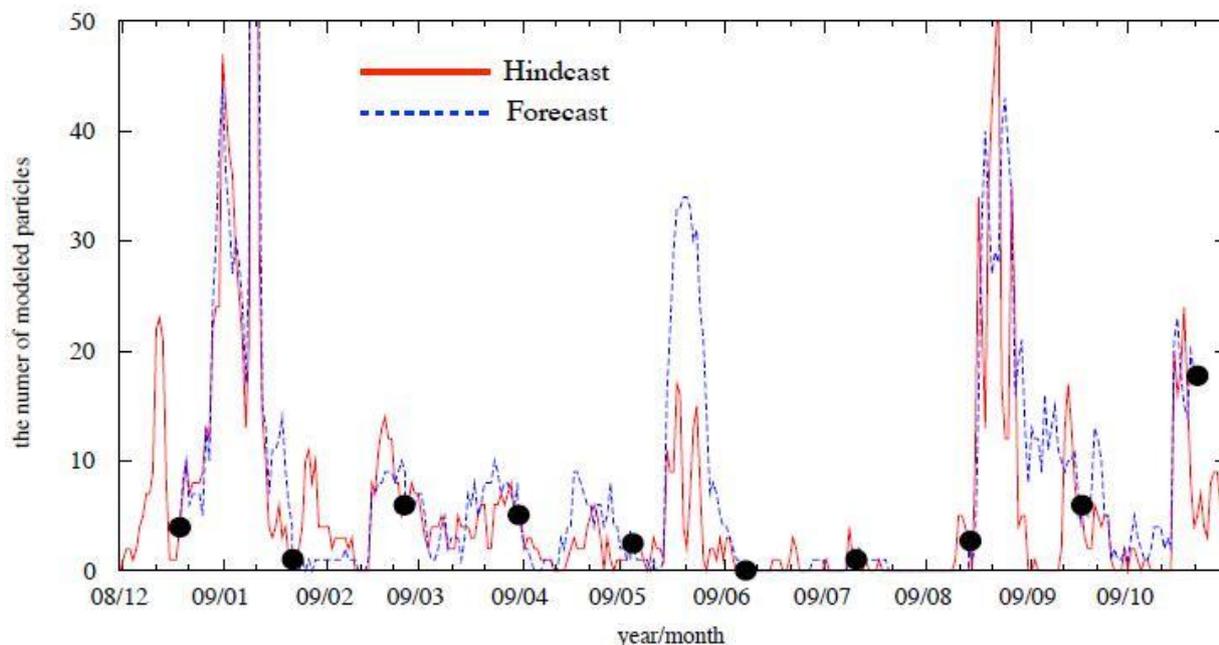


図1-13 再現計算結果(Hindcast;実線)と予報計算結果(Forecast;破線)の時系列。図1-4の格子範囲に滞留するモデル粒子数を縦軸に、2008年12月よりの時間を横軸にとった。黒丸はそれぞれの一カ月予報を開始したタイミングを表す。

(2) 漂着ゴミの監視・予報技術を用いた海岸管理手法の最適化手法の提案

ウェブカメラ画像を解析して得たゴミの海岸被覆面積時系列データを用いて、海岸清掃に伴うゴミ蓄積量の変化量を計算する。まず、効果を検証する年に、2回の清掃活動を6カ月の間をあげて任意の時期に行うとしよう。清掃時期をいつに選んでも、漂着ゴミ量は年平均で図1-14(すなわち清掃回数0)の75%程度にしかならない(図は略)。すなわち年2回程度の海岸清掃では、次々に押し寄せる漂着ゴミにはあまり効果がない。3カ月毎の年間4回で、ようやく年平均で60%にまで漂着ゴミ量は減少する(図1-15)。

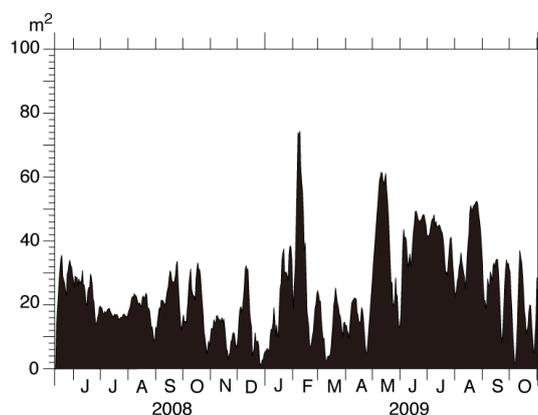


図1-14 大串海岸のウェブカメラ画像を解析して算出した、海岸ゴミ被覆面積の時系列。一週間の移動平均を施している。2008年5月より2009年10月のもの

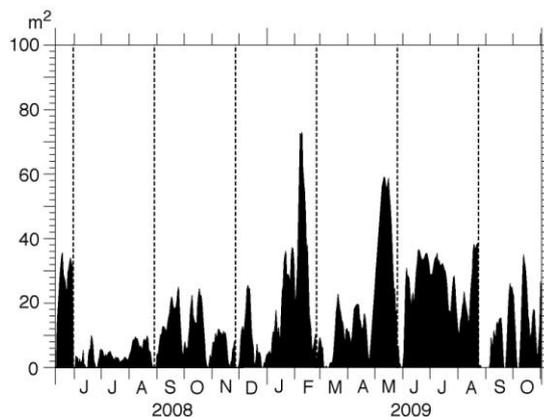


図1-15 図1-14と同じだが、破線の時点(3カ月毎)でゴミ漂着数を0にしたもの

次に、リアルタイムで監視しているゴミ被覆面積が 30m^2 を超えたタイミングで清掃活動を行うとしよう(図1-16)。この時も年間4回程度の清掃活動となるが、漂着ゴミ量は図1-14に比べて40%にまで減少する。さらに、一カ月先の漂着量が予報できることを前提に、一カ月後のゴミ量が現在量から自然減となるならば清掃活動をスキップする条件を与える。この場合、ゴミ量が40%程度まで減少する効果を維持しつつ、年間の清掃回数を3回に減らすことができる(図は略)。

すなわち、サブテーマ(4)で構築したウェブカメラによる海岸監視システムとサブテーマ(1)で開発した予報モデルを用いることで、適正な海岸清掃時期の選定や、またゴミ削減量の推定が可能となる。

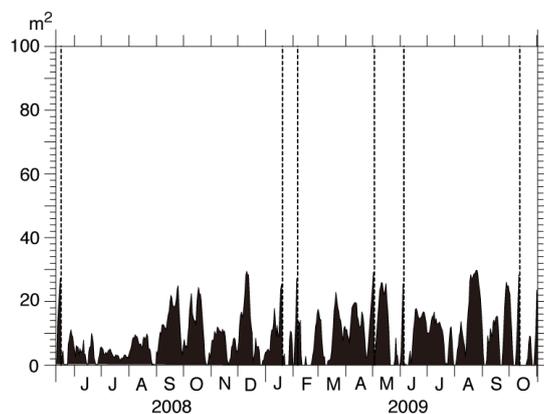


図1-16 図1-14と同じだが、破線の時点(被覆面積 30m^2 を超えたタイミング)でゴミ漂着数を0にしたもの。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

双方向粒子追跡法と未定乗数法による、漂着ゴミの発生源・発生場所・発生量の逆推定手法を世界で初めて開発した。手法の精度検証のため、長崎県五島列島に漂着した使い捨てライターの発生源を特定した。実際の発生源分布をライターに記載された電話番号から推定し、特定した発生源と一致することを確認した。さらに、人工衛星観測風で駆動した数値海洋循環モデルに、推定した発生量に相当する粒子数を各発生源から流して、モデルの五島列島に漂着した粒子数と実際の海岸での回収量を比較した。これによっても、本研究で開発した手法の精度の高さを確認した。さらには、サブテーマ(4)と共同して、ウェブカメラ(ライブカメラ)を用いた海岸ゴミ被覆面積のモニタリング手法を確立し、上述したモデルによる漂着再現量と比較した。この結果、逆推定した発生源情報や、それをもとに構築したゴミ漂着再現モデルの高精度が証明されたが、台風時期に精度向上の余地があることが分かった。また、本モデルに予報風データを与えることで、高い精度でのゴミ漂着量の一か月予報に世界で初めて成功した。一連の海岸漂着物の発生源と発生量の推定手法や、漂着量の再現・予報モデルは、漂着ゴミ問題のみに限らず、たとえば浮遊性の大型クラゲの発生源推定等、多様な用途が見込まれるものである。

(2) 地球環境政策への貢献

本サブテーマで明らかにした漂着ゴミの発生源情報(位置、時期、発生量)は、今後、漂着ゴミ発生源と推定された国や地域との、ゴミの海洋投棄や流出の削減に向けたルール作りへの基礎資料を提供するだろう。本サブテーマでは、気象庁の予報風データで海洋循環モデルを駆動し、漂着ゴミの発生源や発生量推定分布に基づいてモデル内に仮想ゴミを流すことで、一か月先までの五島列島におけるゴミ漂着予報を試験的に運用し、予報概況のコメントと共に <http://www.umigomi.com>にて公表している。ウェブカメラによるリアルタイムの漂着量モニタリング技術と、予報技術を利用することで、効率良い海岸ゴミ回収計画の提案を行い普及に努めていく。また、船舶の安全航行を担保する流木の洋上位置情報の提供など、速報性が要求される漂流物追跡にも、本予報システムは有効に機能した(末尾の海上保安新聞コピーを参照)。景勝海岸への大量のゴミ漂着への警報など、有効活用を図ることが可能な利用法の周知に努めていく。

6. 引用文献

- 1) Blumberg, A. F. and G. L. Mellor (1987): A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. p. 1-16, In, Three-Dimensional Coastal Ocean Models, Coastal Estuarine Sci., vol. 4, edited by N. S. Heaps, AGU, Washington, D. C.
- 2) Chang, P.-H. and A. Isobe (2003): A numerical study on the Changjiang diluted water in the Yellow and East China Seas. J. Geophys. Res., 108(C9), doi:10.1029/2002JC001749.
- 3) Takikawa, T., and J.-H. Yoon (2005): Volume transport through the Tsushima Straits estimated from sea level difference. J. Oceanogr., 61, 699-708.
- 4) 磯辺篤彦(2009): 市民と研究者が協働する東シナ海沿岸における海岸漂着ゴミ予報実験. p. 161-204, In, 地球環境研究総合推進費平成20年度研究成果-中間成果報告集II-, 環境省地球環境局総務課研究調査室, 315p.

- 5) Isobe, A., S. Kako, P.-H. Chang, and T. Matsuno (2009): Two-way particle tracking model for specifying sources of drifting objects: application to the East China Sea shelf" *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26, 1672-1682.
- 6) Kako, S., A. Isobe, S. Seino, and A. Kojima (2010a): Inverse estimation of drifting-object outflows using actual observation data" *J. Oceanogr.*, 66, 291-298.
- 7) Kako, S., A. Isobe, S. Magome (2010b): Sequential monitoring of beach litter using webcams" *Marine Pollution Bulletin*, 60, 775-779.
- 8) Isobe, A. (2008): Recent advances in ocean-circulation research on the Yellow Sea and East China Sea shelves" *J. Oceanogr.*, 64, 569-584.

7. 国際共同研究等の状況

本サブテーマで使用している海洋循環数値モデルは、もともとサブテーマ担当者と張弼勳博士（韓国/気象研究所）が構築したものであり、本研究課題遂行中も、モデルの改良に関する共同研究体制を維持している（論文（査読あり）の1,3）。また、粒子追跡モデルの検証に用いた漂流ブイ実験（誌上発表/論文（査読あり）の4）は、韓国のCheju大学のSang-Hyun Kim博士、およびNational Fisheries Research and Development InstituteのJoon-Soo Lee博士との共同研究である。

8. 研究成果の発表状況

（1）誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) 張弼勳・磯辺篤彦・松野健・清水学"東シナ海における漂流ブイの追跡モデルとその応用". *沿岸海洋研究*, 45, 125-135, 2008
- 2) Isobe, A. "Recent advances in ocean-circulation research on the Yellow Sea and East China Sea shelves" *Journal of Oceanography*, 64, 569-584, 2008.
- 3) Isobe, A., S. Kako, P.-H. Chang, and T. Matsuno "Two-way particle tracking model for specifying sources of drifting objects: application to the East China Sea shelf" *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26, 1672-1682, 2009
- 4) Kako, S., A. Isobe, S. Yoshioka, P.-H. Chang, T. Matsuno, S.-H. Kim, J.-S. Lee "Technical issues in modeling surface-drifter behavior on the East China Sea shelf" *Journal of Oceanography*, 66, 161-174, 2010
- 5) Kako, S., A. Isobe, S. Seino, and A. Kojima "Inverse estimation of drifting-object outflows using actual observation data" *Journal of Oceanography*, 66, 291-298, 2010
- 6) Kako, S., A. Isobe, S. Magome "Sequential monitoring of beach litter using webcams" *Marine Pollution Bulletin*, 60, 775-779.

<査読付論文に準ずる成果発表>

- 1) なし

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 磯辺篤彦 “東シナ海沿岸の海岸漂着ゴミ予報実験～市民と研究者の協同～”. Ship & Ocean Newsletter, 205, 2-3, 2009

(2) 口頭発表（学会）

- 1) 磯辺篤彦・清野聡子・日向博文・馬込伸哉・小島あずさ・渡辺宏之・張弼勳：日本海洋学会秋季大会(2007)「市民と研究者が協働する東シナ海沿岸における海岸漂着ゴミ予報実験」
- 2) 磯辺篤彦・張弼勳・加古真一郎・松野健：日本海洋学会春季大会(2007)「海洋数値モデルによるゴミ発生源の特定と漂着予報—双方向粒子追跡モデルの有効性—」
- 3) 加古真一郎・磯辺篤彦・張弼勳：日本海洋学会春季大会(2007)「海洋数値モデルによるゴミ発生源の特定と漂着予報—オーブコムブイ漂流経路の再現実験—」
- 4) Watanabe, H., A. Isobe, H. Hinata : 14th PAMS/JECSS Workshop (2007) “Hindcast modeling of driftwood behavior on the East China Sea shelf”
- 5) Isobe, A., S. Seino, H. Hinata, S. Magome, and A. Kojima : Workshop on “Establishment of cooperative sea under common understanding on the marine environment of the East China Sea” (2007) 「East China Sea marine-litter prediction experiment conducted by citizens and researchers」
- 6) 前田一行・磯辺篤彦・日向博文：日本海洋学会秋季大会(2008)
「数値モデルと短波海洋レーダーを併用した五島西岸における潮目位置検出の試み」
- 7) 合戸崇司・磯辺篤彦・馬込伸哉：日本海洋学会秋季大会(2008)
「FVCOM を用いた五島西岸沖での潮汐フロント再現計算の試み」
- 8) 吉岡俊・磯辺篤彦・加古真一郎：日本海洋学会秋季大会(2008)
「漂流物輸送過程における風圧流依存性に関する研究」
- 9) 加古真一郎・磯辺篤彦・張弼勳・清野聡子・小島あずさ・大我かおり・由比良雄：日本海洋学会秋季大会(2008)
「双方向粒子追跡実験によるゴミ発生源の特定」
- 10) 磯辺篤彦：日本海洋学会秋季大会(2008)
「対馬・台湾海峡の流量連続性に関する測流データのメタ解析」
- 11) 磯辺篤彦・日向博文・加古真一郎・吉岡俊：日本海洋学会春季大会(2009)「風洞水槽実験に基づく漂流物の風圧流速の定式化」
- 12) 加古真一郎・磯辺篤彦：日本海洋学会春季大会(2009)「海洋数値モデルによるゴミ発生源の特定と漂着予報」
- 13) 加古真一郎・馬込伸哉・磯辺篤彦：日本海洋学会秋季大会(2009)「海洋数値モデルによる

漂着ゴミ予報実験とその精度検証」

- 14) Isobe, A. : 15th PAMS Workshop (2009) “Behavior of Changjiang Diluted Water as a passive tracer on the East China Sea shelf” *2009年よりPAMS/JECSS workshopより名称変更
- 15) Kako, S., and Isobe, A. : 15th PAMS Workshop (2009) ”Shelf circulation and its related drifting-object transport in the East China Sea”
- 16) 加古真一郎・磯辺篤彦・馬込伸哉：日本海洋学会春季大会(2010)「Webカメラを用いた海岸漂着ゴミ連続観測」
- 17) 中島悦子・磯辺篤彦・出来紀子・加古真一郎・馬込伸哉・板井啓明・高橋真：日本海洋学会春季大会(2010)「長崎県五島列島における漂着ゴミと化学汚染」
- 18) 磯辺篤彦・加古真一郎・馬込伸哉：日本海洋学会春季大会(2010)「漂着ゴミの監視・予報技術を用いた海岸管理の効率化」
- 19) 中島悦子・磯辺篤彦・加古真一郎・馬込伸哉・板井啓明・高橋真：第19回環境化学討論会(2010)「長崎県五島列島における漂着ゴミと化学汚染」

(3) 出願特許

- 1) 特に記載すべき事項はない。

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

- 1) 漂流漂着ゴミの科学（2008年12月11日、長崎大学多目的ホール、観客100名程度）

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 毎日新聞（2008年12月29日、関西版）
- 2) 読売新聞（2009年1月5日、全国版夕刊、プロジェクト全般について科学面で紹介）
- 3) フジテレビ・スーパーニュース（2009年4月20日、漂着予報の成果について5分ほど紹介）
- 4) 韓国KBS放送・環境スペシャル（2009年6月24日、漂着予報の成果について10分ほど紹介）
- 5) 海上保安新聞（2009年10月29日、予報モデルを用いた流木位置予報について）

(6) その他

- 特に記載すべき事項はない。

D-071 市民と研究者が協働する東シナ海沿岸における海岸漂着ゴミ予報実験

(2) NGO/CBO/地域住民と連携した海岸踏査による漂着ゴミの実態調査

九州大学大学院工学研究院環境都市部門 清野聡子

<研究協力者>

J E A N/クリーンアップ全国事務局	小島あずさ・五島宏・佐藤千綾
長崎大学 教育学部	中西弘樹
長崎大学 水産学部	阪倉良孝
鹿児島大学 水産学部	藤枝繁
五島市役所 生活環境課・岐宿支所・三井楽支所・奈留支所・富江支所	
海ごみドットコム	由比良雄
(株)光栄測量設計	平田政昭

平成19～21年度 合計予算額 46,748千円

(うち、平成21年度予算額 12,512千円)

上記の予算額は、間接経費を含む

[要旨] 海岸漂着ゴミの季節変動、起源地の解明と対策法の開発のため、NGO/CBO/地域行政との協働で調査を行った。長崎県五島列島福江島八朔鼻海岸で、NGO、市役所、地域住民らの協力を受け、隔月で漂着ゴミの量と内容の「定点調査」を行った。島内での定点の地形や方角の特性を把握するため、調査項目をペットボトルの起源地に絞り、15地点で夏季と冬季の年2回「島内広域調査」を実施した。さらに広域的分布の把握のため、福岡県から沖縄県にかけて6か所の調査点を設定し、夏季と冬季の年2回、各地点1-3回の「東シナ海沿岸広域調査」を行った。定点調査の結果、特にペットボトルや漁業用発泡スチロール製フロートの漂着量の、秋季から冬季の急増が明らかになった。代表的な漂着物をペットボトルとし起源地を調べたところ冬季は韓国、春季から夏季は日本、夏季は中華系(中国、台湾、香港)と、この主な3つが次々とピークがずれスイッチして交代するパターンが明らかとなった。島内広域調査では、定点を含む北部から西部の海岸は定点同様に韓国系と中華系が混在するが、南部は中華系、特に北西部は韓国系が卓越するパターンを示した。製品ラベルから、東シナ海沿岸で経済発展している主要都市名が判読された。東シナ海沿岸広域調査では、沖縄本島、先島諸島では中華系、福岡から長崎の九州西岸は韓国系、鹿児島は国内が多く、地理的分布の特徴が見られた。多大な人的負荷を要する海岸漂着ごみ調査の枠組形成も行った。地元の岐宿地区を中心に、研究者と協働する市民参加の研究体制を構築し、地域行政、NGO、さらに研究経験者のインタープリターの重要性を確認した。調査の求心力醸成には「地域知に基づく仮説検証型の研究手法」の有効性が示された。「市民調査マニュアル」を作成し、市民モニタリング手法を開発した。越境的環境問題は、国家間ではデリケートだが、NGO、研究者が地域を支援する枠組は利害関係がなく具体的なため訴求力を持つ。さらに国際会議でも多セクター協働の解決の発信が重要であろう。

[キーワード] 海岸漂着物、定点調査、モニタリング、市民参加、地域知

1. はじめに

日本各地の海岸では、現在、漂着ゴミが深刻な越境的環境問題となっている¹⁾。特に東シナ海沿岸では国内外由来の漂着ゴミ量が圧倒的に多く、従来の地域住民による人力による回収では処理しきれないのが現状である。そのため、漂着過程の科学的解明に基づいた漂着ゴミ対策の効率的な方法、例えば数値モデルによる漂流予報や、予報に基づく効率的な洋上回収が希求されている。将来、この数値モデルによる漂流予報を実用化するためには、高頻度にサンプリングされた海岸ゴミ漂着量実測データに基づく、数値モデルの精度検証や改良を行っていく必要がある。実際、これまでも数多くの海岸漂着ゴミ調査が行われ、漂着ゴミに対する有益な知見が蓄積されてきた。しかしながら、漂着ゴミ量の季節変化など時間変動の詳細については、なお不明な点が多く残されたままである。

そこで、サブテーマ2においては、特にゴミ漂着量の時間変動と起因地の解明を目的とした。長崎県五島列島福江島北の八朔鼻海岸で、NGO、市役所、地域住民らの協力を受け、隔月で漂着ゴミの量と内容の定点調査を行った。島内での定点の地形や方角の特性を把握するため、島内広域調査を15地点でペットボトルの起因地に絞り本年度1-2回実施した。さらに広域的分布の把握のため、福岡県から沖縄県にかけて6か所の調査点を設定し、本年度1-2回の沿岸広域調査を行った。

多大な人的負荷を要する海岸漂着ごみ調査の枠組形成も行った。地元の岐宿地区を中心に、研究者と協働する市民参加の研究体制を構築し、地域行政、NGO、さらに研究経験者のインタープリターの重要性を確認した。住民や地域行政が持つ「地域知に基づく仮説検証型の研究手法」の有効性が示された。

これらの多セクター協働の調査研究に基づいて、越境的環境問題の解決に効果的な発信や参加の方法も東アジアの海洋環境情勢を見ながら考えていく。

2. 研究目的

本サブテーマの第一の目的は、対馬暖流と大陸からの季節風の両方の影響が検出しやすい地理的位置にある五島列島において、従来無い高精度の時空間変動を検出するため密な漂着ゴミの「定点調査」を行い、漂着ゴミの量、起因地、種類の季節変動データを取得することである。平成19年度に詳細調査を、20年度にモニタリング・モードの集約した調査を、21年度に住民主体でも継続可能な調査法を開発、実施を目的とした。

定点調査に加え、定点とは別に島内と沿岸の広域調査を行い、定点とのゴミの量や種類の違いを調べる。そして、定点調査と広域調査の結果を併せて、ゴミ漂着量の広範囲の時空間分布を推察していく。これらゴミ漂着の基礎データは、サブテーマ1にとって、漂着ゴミ発生源や漂流経路特定のためのモデルの再現目標となる。

定点調査地の検証精度を上げるため、「島内広域調査」を実施した。福江島内でも海岸が面する方向、地形により漂着ゴミの内容が異なる可能性があるため、島内の15地点において、起因地情報が多いペットボトルの起因地情報の取得に絞り、夏季と冬季の年1-2回実施により、島全体と季節変動の把握の可能性を調べる。

さらに、「東シナ海沿岸広域調査」では、東シナ海沿岸全体での地理的分布を把握するため、福岡県から沖縄県にかけて6か所の調査地点を設定し、夏季と冬季の年1-2回実施する。

また、NGO/CBOと連携して調査を進める本サブテーマでは、学会での講演やシンポジウムのほか、特に研究成果の社会還元についても重視している。

調査推進過程を、住民や地域行政が持つ「地域知に基づく仮説検証型の研究手法」としてとらえなお

し、地域ベースで多セクター協働の研究を行う意味を考察する。

また、インターネット、地域ワークショップを通じた市民への研究成果の還元や国、地方自治体の審議会や委員会を通じた研究成果の政策への還元を行っていく。

越境的環境問題では、国際関係への配慮も念頭においた研究推進体制が望まれるが、地域に根ざした調査体制による対策への参加や環境意識の向上は、国を超えた地域の共通課題の解決の方策を探る上で重要である。越境的環境問題の解決には、環境系の国内、国際会議に、地域社会、地方自治体、NGO、研究者と多セクター協働で参加する方法論も検討した。

3. 研究方法

(1) 現地調査

1) 高精度定点調査

漂着ゴミ量の時間変動を明らかにするために、長崎県五島列島福江島北部八朔鼻海岸（図2-1）において、平成19年9月の調査開始時から平成22年1月までの2年半、漂着している全てのゴミを回収し、その後、2ヶ月ごとに定点調査を行った。これは、サブテーマ1が行う数値モデルによるゴミ発生時期、発生源特定と漂着予測のための基礎データとしては、実際の漂着ゴミ量の時間変動データが必要不可欠であるからである。

平成19年度は初年度で詳細調査を行った。海岸過程と併せた考察を行うため、海岸を微地形の差異に基づいて複数の区画（汀線方向13区画、岸沖方向最大3区画）に分け、海岸内の場所の違いによる漂着ゴミ量・種類の違いを調べた。区画毎に回収したゴミは、世界共通の国際海岸クリーンアップ（ICC）のデータカードに従い、種類毎に数量、重量、体積（標準的な家庭用ゴミ袋の数に換算）を計測した。また、代表的なアイテムであるPETボトル、ペットボトル等のキャップ、使い捨てライター、漁業用フロートなどは、本体やラベルの文字から起源地を判読、計数した。

また、PETボトルラベルに記載された国名、製造地、製品名を判読した。

2) モニタリング・モード定点調査

高精度の調査を平成19年9月から平成20年9月の1年間継続したが、研究者以外のセクターの人々にとっては、分類や計数作業の負荷が大きいと判断された。一方、本プロジェクトの期間中のみならず、今後も研究成果を社会的に根付かせるためには、中長期的なモニタリング体制が必要と考えられる。そのため、主に現地の住民による中長期的なモニタリング法が必要と考えた。そこで、平成20年度後半以降は、モデルの検証にも活用でき、かつ一般の人にもわかりやすい代表的なアイテム（上述）に絞った「モニタリング・モードの定点調査法」による簡易調査を考案し、実施した。

本研究では、特に起源地の情報が重要なため、文字情報が多いPETボトルを重点的に調べた。（ただし、風や流れの外力の受けやすさが、アイテムの形状や水面上への露出度合で異なるため、サブテーマ1で、その物理特性を検証した。）

3) 島内広域調査

定点調査地の検証精度を上げるため、「島内広域調査」を実施した。福江島内でも海岸が面する方向、地形により漂着ゴミの内容が異なる可能性があるため、島内の15地点において、起源地情報が多いペットボトルの起源地情報の取得に絞り、漂着ゴミが多い夏季と冬季に絞り、2008年7月、2009年1～3月、

2009年7月、2010年1月の夏季と冬季の2時期に実施した。

予め漂着物が多い海岸の情報を地域住民や行政から得て地点を選定し、各海岸でペットボトル約100本、ライターを目処としてサンプリングした。ラベルや本体の文字情報から起源地を判別した。

4) 東シナ海沿岸広域調査

さらに、東シナ海沿岸全体での地理的分布を把握するため「沿岸広域調査」として、福岡県から沖縄県にかけて6か所の調査地点を設定し、平成19年度冬期から年1-2回実施した。実施地と時期は、①福岡県福岡市海の中道(2008年9月、2009年3・9・12月)、②長崎県長崎市野母崎(2009年2月、2010年1月)、③鹿児島県南さつま市吹上浜(2009年3・11月)、④沖縄県沖縄本島沿岸(2009年3・10月)、⑤沖縄県石垣島(2009年3月、2010年2月)、⑥沖縄県西表島(2009年3月)であった。上述の島内広域と同様に、各海岸でペットボトル100本、ライターを目処としてサンプリングした。ラベルや本体の文字情報から起源地を判別した。各地域での調査地点の選定では、研究経験を有する現地のエコツアーガイドなどの協力を得た。

(2) 地域知を活用した調査法・モニタリング手法の開発とマニュアルの作成

定点調査の参加経験のある住民の意見を取り入れ、島内広域調査が発展した。その際の調査地の位置や時期の選定では、行政として漂着ゴミ収集事業をしている五島市役所生活環境課、同岐宿支所、調査に参加した地域住民、海岸の状況に詳しい地域の測量技師らから、情報提供をしていただいた。総合すると、「夏は台風の影響で南部、冬は季節風の影響で北部にゴミが多い」であった。本研究プロジェクトチームが有する、対馬暖流や冬季の季節風の卓越的な外力など沿岸海洋学的な知見と併せて、島内広域調査地の選定を行った。

この調査推進過程を、住民や地域行政が持つ「地域知に基づく仮設検証型の研究手法」としてとらえなおした。さらに、地域外の研究者やNGOだけでなく、地域ベースで多セクター協働の枠組で研究を行う意味を考察した。また、市民参加の調査では、各セクターを結ぶインタープリターの存在も重要と考えられる。調査協力者のうち、本研究開始当初の枠組である、研究者/NGO/CBO/地域行政だけでなく、「研究経験のある市民」「探究心のある住民」「地域技師」の役割に注目し、その役割を考察した。

最終的に、住民や市民参加による調査法、モニタリング手法を開発し、マニュアルを作成した。

(3) 越境環境問題への解決の枠組の検討²⁾

越境的環境問題の解決には、国際的課題を諸国の人々が協力して対処する方策が必要である。そのために、本調査の枠組の有効性を検討した。地域社会での国際的環境問題の受容は、海外由来のゴミという実物を経て実存的に伝わるが、一方、自分たちが相手方にどう呼びかけるかの方法論をつくるため、各地の市民が参加する国内集會に本調査の協力者の地域住民を派遣し、国際會議にNGOのJEANとの共同参加を計画、実施した。

(4) 啓発・普及

定点調査地がある福江島において、海岸漂着ゴミ問題や調査結果の啓発・普及を実施した。

学校教育については、五島市教育委員会へ、調査に参加した住民を通じて提案した。地域の海ごみの対策には、市役所職員との議論を進め、問題点を明らかにした。

また、地域メディアでの報告は、五島列島のタブロイド版地域誌の五島新報との連携を行った。

調査参加者が、地域調査の会を組織し、自主的な活動を開始するにあたって、調査法などの支援を行った。調査で中心的な役割を果たしている住民については知識や経験を深める機会の提供として、平成20年度に学会シンポジウムへ、平成21年度には、国、自治体や市民活動を行う団体や個人の国内集会であるJEANが主催する「海ごみサミット」（下関）への参加を進めた。

また、海ごみ問題の対策について、海岸における焚火など低温度でのゴミ焼却（いわゆる野焼）の問題点や再拡散の防止の意義など、地域への知見の移転を進めた。

4. 結果・考察

（1）現地調査

1) 定点調査

定点調査を昨年度に引き続き行い、漂着ごみの種類、個数、区画ごとの1年間を通じた時間変動の高精度のデータが得られた。代表的なアイテムであるPETボトルの時間変動の結果を、図2-1に示す。

起源地として、ラベルや本体の文字から「日本、韓国、中華系、その他」と分けた。なお、中華系とは、日本語以外で漢字の記載があるもので、中華人民共和国、中華民国（台湾）、香港の記載があるものである。（ラベルの詳細調査からは、バーコードや製造地などより細かい情報に着目して、さらに3国に分離しているが、現地調査の現場では、上記の分類が適切な作業量であった。）このグラフからは、卓越的な起源地がスイッチしながら時間変動していることがわかった。冬季は韓国、春季から夏季は日本、夏季は中華系が多かった。このような、詳細な結果は、国内外で初めて取得されたデータセットである。

この漂着ゴミ起源地のスイッチングのメカニズムとして、冬季は北部から北西の季節風が連続的に吹き、夏季には台風の影響により東シナ海沿岸部から大量のごみが海域に流出した場合、それが対馬暖流により運ばれてきている可能性を示唆している。

また、定点調査でペットボトル、浮き、ライター、蓋類の量の変動は、ほぼ同調しておりゴミ全体の量と個別のアイテムの量は対応している（図2-2）。

なお、定点への日本製品の漂着を地域行政と住民と検討したが、定点調査地の八朔鼻海岸に隣接する鱒川流域では沿岸の人口がさほど多くなく、島内発生の廃棄物回収も比較的順調であることから、福江島内での発生よりも、地域外からの漂着が多い可能性も考えられる。今後、島内広域調査や沿岸広域調査と併せて考察が必要である。

2) モニタリング・モード定点調査

モニタリング・モードの定点調査として、市民、住民、行政など研究者以外のセクターが続けやすい方法を検討した。その結果、漂着ゴミの代表アイテムのうち、PETボトル、ライターは取り組みやすく、蓋類や浮までは対応可能であるとわかった。

高精度定点調査とのデータの連続性を確保した、PETボトルの時間変化は図2-1に示した。サブテーマ1で開発するモデルとの照応のため時系列データが必要だが、図2-2のように全量を詳細に分類・計数しなくても代表アイテムにより時間変化が検出可能とわかった。

また、定点に漂着したPETボトルのラベル判読から起源地の都市名を調べたところ、韓国のプサン・済

州島、中華人民共和国の上海・温州・杭州・厦門、中華民国の台南、宜蘭、花蓮、南投、高雄など東シナ海沿岸の主要都市の名前が認められた。日本製品は、ラベルの記載が本社の東京の住所がほとんどで製造地の情報を得るのが困難であった。

3) 島内広域調査

福江島島内広域調査では、PETボトルから製造国が判別しやすい点に着目し、1海岸100本を目途に、夏季と冬季の2回、海流と季節風の影響がそれぞれ強い時期(図2-3)が終わり、切り替わる時期に実施した。2008年7月には7地点、冬季の2009年1-3月、7月、2010年1月には15地点の計4回のサンプリングを行った。ラベルや本体の文字情報や形態の特徴から製造国を特定した。

図2-4に、島内海岸での製造国別の分布を示す。ほとんど全てが日本、中華系(中華人民共和国、台湾)、韓国系の製品であった。島内広域調査では、定点を含む北部から西部にかけての海岸は定点同様に韓国系と中華系が混在し、南部は中華系、北西部は韓国系が卓越するパターンを示した。特筆すべきは、主要な3系統以外のサンプルも得られたことで、例えば2008年7月調査の629本のうち、ベトナム(5)、マレーシア(3)、シンガポール(3)、UAE(4)、チリ(1)、オーストラリア(1)、無ラベルなど起因地が判別不能なボトルが14%含まれていた。

これらは、洋上投棄もしくは、南シナ海から東シナ海に流入したゴミの連続的な北上、製造地と起因地間の流通などの考慮の必要性を示している。本プロジェクトでは、調査結果の提示対象を国内および近隣諸国への協力依頼を考えてきたが、シンガポールやUAEの製品が数パーセントながら定常的に採集される点からみて、五島周辺の国際航路を通過する船舶からの投棄の常態化が疑われる。これらの国は、交際貿易の拠点港を擁し、そこで購入した製品が船で運搬されて廃棄物として拡散している。

越境的な環境問題の解決には、沿岸国と航路利用者の国際団体などへの対策の呼びかけが必要である。

これは、調査地の選定から実施可能な内容まで、地域住民や市役所に積極的に相談に乗っていただきながら形成した内容である。住民がその年の気候や風など自らが生活の中で体感している現象に沿った興味に従って主体的に実施できる調査内容である。

4) 東シナ海沿岸広域調査

ペットボトル漂着量の製造国別の分布を図2-5に示す。ほとんど全てが日本、中華系(中華人民共和国、台湾)、韓国系の製品であった。傾向としては、卓越する製造国は、日本産は福岡、鹿児島であり、中国・台湾が沖縄本島、先島諸島であった。日本産のものは、釣などの海岸利用者の投棄と思われるものも多く、漂着物との判別は採集時の産状の丁寧な観察が必要である。また、同じ沿岸でも製造国分布の割合が異なる場合もあるが、その海岸に作用する海流・潮流・風から考察する必要がある。

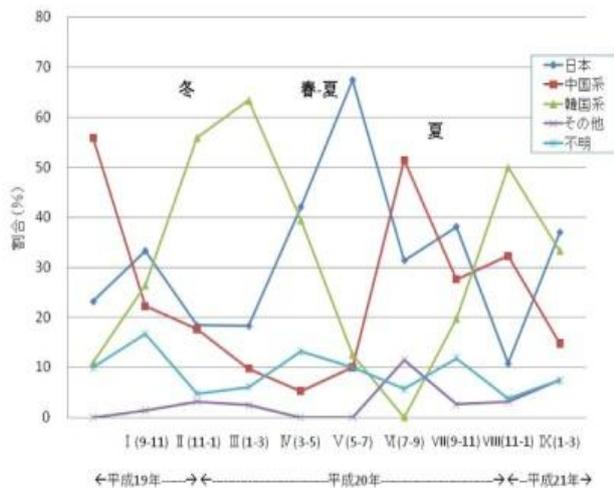


図 2-1 定点調査での漂着ペットボトルの季節変動

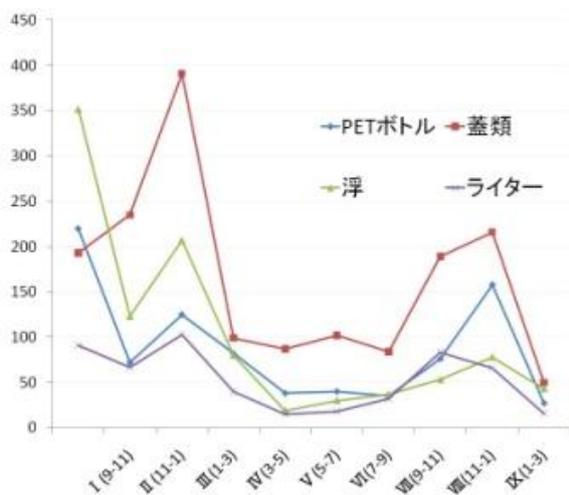


図 2-2 定点調査での代表的な漂着物の季節変動。

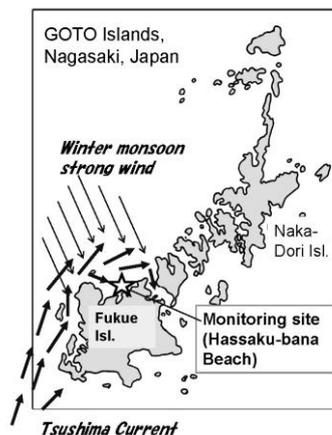


図 2-3 福江島の漂着物の外力の対馬暖流とに対する住民の「地域知」。

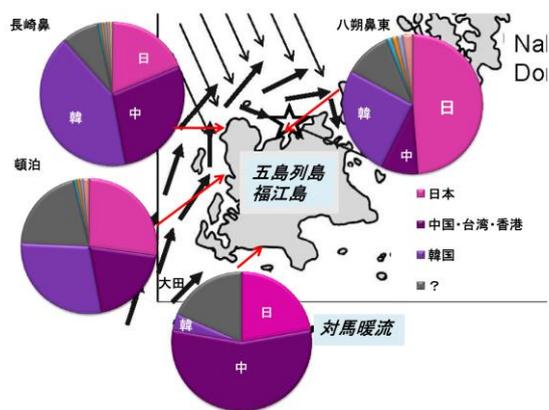


図 2-4 福江島島内調査におけるペットボトルの製造国の分布

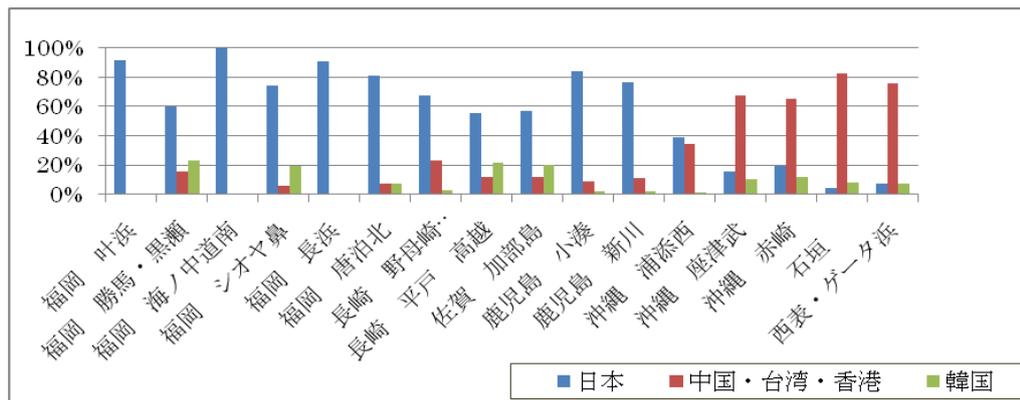


図 2-5 東シナ海沿岸広域調査での福岡から先島諸島までの漂着ペットボトルの日本・中華系・韓国産の割合

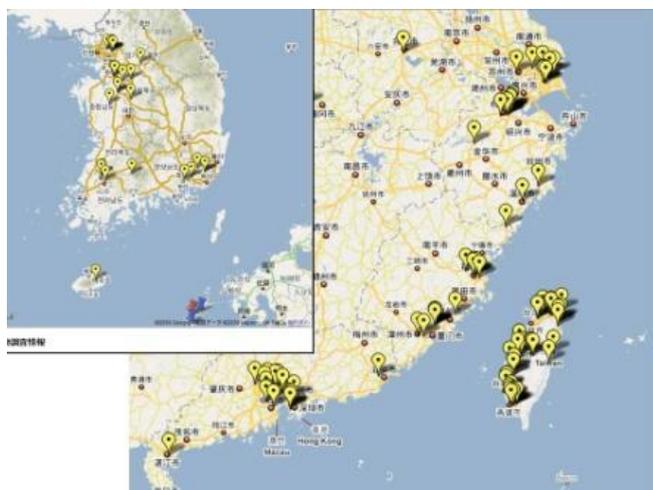


図 2-6 五島列島に漂着したペットボトルの製造地の分布（近隣諸国分）

(2) 地域知を活用した調査法の開発と越境環境問題への解決の枠組の検討

福江島で海岸漂着物に対する地域知と研究の作業仮説のすり合わせを行った。島民によれば、①島の南北で漂着時期、内容が異なる、②冬季には島の北西部と北部では季節風が吹く時期に大量漂着する、③夏季には、島の南部に台風の時期に漂着が多い、という。地域での海岸掃除や市役所の漂着ゴミ撤去事業は、この知見をもとに行われている。

五島列島福江島への漂着は、対馬暖流と季節風の2つの外力と、沿岸地形の複合的なメカニズムではないかと、島民は漠然とではあるが認識している（図2-3）。

定点調査や島内広域調査の設計ではこれらの知見を、既存情報として大いに参考にした。調査研究が進行してきた現在、改めてこのプロセスを見直してみると、「地域知による仮説の形成と、学術知による検証の過程」といえる。

「地域知」の重要性は、環境政策でも国際的にも重視されている。しかし、その実証性は途上であり、科学者コミュニティでもその重要性はさほど認識されていない。最先端の沿岸海洋学や海岸環境学の研究が、地域知との接点で進展し、環境保全や対策に貢献するプロセスとしても、本研究の位置づけが見出された。

(3) 越境環境問題への解決の枠組の検討

越境的環境問題では、①科学的データ、②国際的利害を超えた議論、が必要と考えられるが、海岸漂着ゴミの問題は、これらのみでは科学の精度の論争に終始したり、国際的利害の調整や合意形成が困難で解決しないことが考えられる。図2-6に示すように、五島列島に漂着したペットボトルは、島内からは発生が少ないと思われるのに、国内さらに北東アジアの沿岸近隣諸国の主要都市ほぼ全部から発生しているような状態である。果たして誰にどのように呼び掛けるのかは、それらの都市もまた沿岸住民がいて同じ問題を被る可能性があるとの視点に立たないと、加害者と被害者の関係が先鋭化することになる。実証的なデータによる直接的な非難を行うと、国際間の協力が減速する懸念がある。特に、①については製造国ではあっても投棄の主体が誰かは、国際航路での洋上投棄などを考えれば原因者は国を特定できない不特定多数の人となる。そのため本調査で、図2-6のような情報の可視化を行い、発生源とのつながりを特定していく努力を高めつつも、③地域の窮状を国家を超えて訴える視点、が不可欠と考える。

その場合には、地域住民の個人、清掃のフロントにある自治会、海岸漂着ゴミの回収事業を実施する市町村行政、国際問題と地域を結ぶ地方自治体が主体である。さらに根拠となる科学的データに、これらの人々やセクターが関わって、地域にとってブラックボックスでないことも必要と考えられる。本研究では地域住民が、参加したデータ取得に始まり、モニタリング・モードや島内広域調査、さらに東シナ海沿岸広域調査への派遣を通じて、調査の主体となっていくことが重要である。

その際、地域住民が国際的な問題に関心はもっても対応は難しいので、五島市役所のような地域行政が全体の進行管理や対策にとって最重要である。こういった地域行政に対しては、国や県による研修や情報取得の機会提供が少ないため、フィールドワークに入るNGOや研究者からの直接の情報提供が重要となる。また、NGOや研究者も現場で起きていることを直接聞くことができる。

後述するように、国際会議の場で、このような「地域ベース」の主体が直接話をする機会の提供も重要と考える。実際に、東アジアの海洋環境では日本も加盟している国連機関であるPEMSEA（東アジア海洋環境パートナーシップ）などで試みが始まっている。

(4) 啓発・普及

海岸漂着ゴミの対策には、ゴミの投棄の防止やゴミ発生軽減の啓発・普及が必要である。その一方で、これらのプロセスそのものに調査関係者が参加したデータが活用されていく体験が重要であり、それを通して、一般論ではなく自らのデータで取得した参加感、人によっては責任感も生まれる。

海岸漂着ゴミの「市民調査マニュアル」は、海ゴミの市民調査を先行して行ってきたJEAN、現場作業を担当した方々、広域調査を実施した協力者により作成されたものである。今後、協力者や参加者の意見を取り入れて活用していくが、現在のバージョンは多くの意見を入れた内容のため、初めて現場で調査を行う人向けには、研究者、NGOや調査経験者の市民が実地で調査を行い、そこに同行することで段取りを学び、簡易版マニュアルはリマインダー的に利用するなど考えられる。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

なによりも、科学者と地域住民、NGOの連携によって、科学調査に耐える水準でデータ取得を維持でき

た成果を強調したい。そして、定点における漂着ゴミ調査を高頻度に行うことによって、漂着ゴミの量、種類、製造国の季節変動をとらえることに成功した。その結果、冬季に韓国、春季から夏季に日本、夏季に中華系とゴミの起源地のスイッチングが起こっていた。これは漂着ゴミの漂流・漂着メカニズムが、対馬暖流と冬季の季節風の組み合わせであり、季節により度合が異なることが明らかとなった。また、海岸微地形との対応の実データにより、プラスチック破片が海岸材料として漂砂と同様の挙動を示す可能性を指摘した。

また、福江島内広域調査により、定点を含む北部から西部にかけての海岸は定点同様に韓国系と中華系が混在し、南部は中華系、北西部は韓国系が卓越するパターンを検出した。これも、漂着ゴミへの上述の海流と季節風の影響を裏付けた。福江島で、日中韓以外の東南アジア、外航船保有国や国際港所在国の製品も数パーセントだが定常的に採集された。これは国際航路での海洋環境保全に問題提起を行い、国際協力を呼び掛けるデータとなろう。

(2) 地球環境政策への貢献

国土交通省・農林水産省による「中長期的な展望に立った海岸保全検討会」（社会資本整備審議会の下部部会）に、海岸環境分野の委員として参加した。そこでの議論で、海岸漂着物への対策の強化、地域社会が海岸環境保全に担う役割の明確化を提案し、最終提言草稿案に反映された。（中長期的な展望に立った海岸保全検討会提言 P9、10、15、19参照。

http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/past_shinngikai/shinngikai/coastal_protection/pdf/5-s01.pdf

6. 引用文献

- 1) 小島 あずさ, 眞 淳平 (2007): 海ゴミ-拡大する地球環境汚染, 中公新書, 中央公論新社, 232.
- 2) 清野聡子(2009); 水産業の公益性と市民・行政・漁業者の役割, 市民参加による浅場の順応的管理, 水産学シリーズ, 162 巻、恒星社厚生閣, pp. 87-106.

7. 国際共同研究等の状況

本プロジェクトの目標として、学術および市民レベルの場の形成があった。特に韓国のNGOとの連携は進めることができた。これは毎年のように直接顔を合わせて日韓の関係者とともに集中的に行えたことによる。

また、東アジアの海洋環境の国際協力体制については、近年進展が目覚ましく、日本が必ずしも先進国と言えないほど、他国の成長が著しい。後述するPEMSEAの会合では、アジア諸国が、生態系保全や沿岸地域の社会問題については、既にNGOを含む多セクター協働による環境対策を行っている分野が増えている状態を把握できた。また環境技術の展開を、実際の都市をサイトとして国際会議を開催しながら国際的な人間関係を醸成していく国家政策が必要と考える。以下、3年間の経過を述べる。

- ① 平成19年12月：第1回アジア太平洋水サミット（別府）で沿岸環境と地域社会に関するサイドイベントを開催し、そのテーマの一つに海ごみを取り上げ韓国のNGOの韓国海洋救助団の李鍾明環境政策部長を招聘した。本プロジェクトの調査協力者との交流もふくめ、日本側のNGOのJEANの協力者の研究者や地域活動を行う市民と直接会うことで、相互理解が深まった。
- ② 平成20年10月：海ごみサミットに韓国NGOの韓国海洋救助団の李鍾明環境政策部長を招聘。JEANや地

域活動を行っている市民とワークショップや討議を行った。近年問題になっているポリタンクの大量漂着問題について日本では万の単位での漂着が見られる点は、韓国側ではあまり把握されていなかったが、五島奈留島での写真などを本プロジェクトから提供し、1海岸あたり数百個の漂着が見られる実態などを伝えた。この規模の廃棄物流出は個別の漁村でのミスではなく、大がかりな不法投棄である可能性もあるため、国際的な環境汚染問題の防止のため日韓両国政府に監視を強化する要請を行うことを確認した。

- ③ 平成21年10月：中国の沿岸都市である廈門（アモイ）をオーシャンウィークに合わせて研究期間や大学、関係個所を訪問した。本プロジェクトでは国際的な市民の協力体制を目指しているが、韓国とはJEANの既存の活動があるため可能であったが、中国は市民団体の状況がわかりにくいいため、沿岸環境問題対応として国際的に開かれている地域での活動の可能性を模索した。アモイは、後述するPEMSEAのパラレルサイトとしても、国際的に沿岸環境を守る都市として窓口になっている。特に毎年10月に国際会議のオーシャンウィークを開催し、アフリカの政府や専門家の招聘など含めて多様な国際活動が展開されている。アモイは歴史的には早くから欧米の大学との交流が盛んで、海洋生物学や沿岸環境科学が発展してきた。海岸漂着ゴミの研究者は見いだせなかったが、アモイ大学の沿岸域管理や政策、生態系保全の研究室を訪問することができた。アモイ市内は日本の神戸のような都市として環境管理を強化しているため、市内の水域や街中の散乱ゴミは人海戦術で処理しているためきれいな街であった。しかし郊外や農村部では、排水路や住宅の周辺に多くの散乱ゴミがみられ、流域全体でのゴミ対策が行われないと流出するゴミの減量は実現しないため、今後は中国が自主的に流域の廃棄物対策を進めるのを期待し、何らかの応援の方策を考える必要がある。なお、アモイは工業化も進んでおり、漂着ペットボトルにはアモイで製造された製品も多く見られている。
- ④ 平成21年11月：国連機関のPEMSEAのマニラでの東アジア海洋会議E A S 2009(East Asia Seas Congress 2009)にブース出展を、JEANと共同で行った。NGOと科学者の協働と題した。東アジアの沿岸環境研究者、NGO関係者との意見交換が行え、交流が進んだ。PEMSEAでは、国レベルだけでなく、地方自治体の交流も重要視している。今回は本プロジェクトの協力自治体に参加していただくのは言語の壁や地方公務員の海外出張の課題があり難しかったが、将来的には日本の海ゴミ問題で顔の見える当事者としての自治体の参加は不可欠である。

特に、2010年に日本で開催される生物多様性条約締約国会議において、アジアの経済発展に伴う海ごみの急増など様々な沿岸環境問題を、アジア的な視点や思想でどのように沿岸域管理と生物多様性保全を行うかを議論した。

- ⑤ 平成22年1月：LOICZ（沿岸域における陸域－海域相互作用研究計画（「地球圏－生物圏国際共同研究計画IGBP」と「地球環境変化の人間社会側面に関する国際研究計画（IHDP）」のコアプロジェクトの一つである国際共同プロジェクト）科学委員会議長のアリス・ニュートンAlice Newton教授（ノルウェー／ポルトガル）を五島にご案内した。沿岸環境関連学会連絡協議会シンポジウムに東京大学の山室真澄教授により招聘された際、日本の沿岸環境問題の代表的な場所を訪問したい旨、照会があった。特に越境的環境問題は国際間の合意形成と科学者の役割が重要なため、五島の海岸漂着ゴミ問題と地域社会の存続の状況を伝えた。現地では市役所、調査に参加している住民らと共に現地を案内し、海ごみは環境問題であるとともに、沿岸地域社会の存続への脅威であると説明を行った。特に、地域の食文化は海岸生態系に依存しており、「海藻祭」も生態系の劣化とともに衰退した。この事実ニュートン教授は心を打たれ、シンポジウムでも言及された。このように重要な研究者を現地に地域行

政や住民と共に案内し、多セクターの調査が行われている点をアピールすることは、日本が漂着ゴミ問題ではフォーカルポイントとして役割を果たすことが期待される。学会での論文発表に加え、現地への案内は重要である。

- ⑥ 平成22年3月：韓国の海洋環境保護団体（NGO）のOSEAN、韓国の昌南（チャンウオン）での水フォーラムでの発表を行った。これはOSEANの前身である韓国海洋救助団とJEANの協働が国際的に進み、その一環としてJEANとの研究活動を続けてきた研究者として先方が講演の機会を設けて下さった。これらは①②のような毎年の交流の機会を日本側の研究者が作ってきた関係性の発展と考えられる。また、海ごみは、沿岸環境問題の重要課題の一つであるとして、韓国のラムサール条約東アジア事務局、同昌南事務局、マサン湾再生プロジェクトなど沿岸環境関係者を訪問、意見交換、研究打合せを行った。

8. 研究成果の発表状況

（1）誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) Seino, S., Kojima, A., Hinata, H., Magome, S. and Isobe, A. “Multi-Sectoral Research on East China Sea Beach Litter Based on Oceanographic Methodology and Local Knowledge” Journal of Coastal Research, Special issue 56, 1289 - 1292, 2009.
- 2) 清野聡子 “水産業の公益性と市民・行政・漁業者の役割，市民参加による浅場の順応的管理” 水産学シリーズ，162、恒星社厚生閣，pp.87-106，2009.
- 3) Kako, S., A. Isobe, S. Seino and A. Kojima “Inverse Estimation of Drifting-Object Outflows Using Actual Observation Data” Journal of Oceanography , 66 291-297, 2010.

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 清野聡子 “絶滅危惧地形「砂丘」と生物” 海岸，48（2），64-70，2009.

（2）口頭発表（学会）

- 1) 清野聡子，小島あずさ，五島宏，由比良雄，佐藤千綾，馬込伸哉，日向博文，松本尚之，阪倉良孝，磯辺篤彦：日本水産学会春季大会(2008)「海岸漂着物が沿岸地域社会と海岸生態系に与える影響と対策の方向性—I 長崎県五島列島福江島の事例」
- 2) 清野聡子，小島あずさ，五島宏，由比良雄，松本尚之，佐藤千綾，日向博文，馬込伸哉，磯辺篤彦：日本海洋学会春季大会(2008)「研究者とNGO・地域社会の協働・連携による海岸漂着ゴミ調査における科学技術・社会システム—長崎県五島列島福江島の事例」
- 3) 清野聡子・小島あずさ・五島宏・由比良雄・佐藤千綾・大我かおり・日向博文・馬込伸哉・磯辺篤彦：日本海洋学会秋季大会(2008)「五島列島福江島北部海岸における海岸漂着ゴミの季節変動」
- 4) 清野聡子・小島あずさ・五島宏・佐藤千綾・大我かおり・由比良雄・五島市役所生活環境課・五島市役所岐宿支所・日向博文・馬込伸哉・加古真一郎・磯辺篤彦：漂着物学会第8回伊良湖大会(2008)「長崎県福江島での定点調査による東シナ海の家ゴミの起源と漂流・漂着過程の研究」
- 5) 清野聡子：水産海洋学会シンポジウム(2008)‘漂流・漂着ごみの科学—東シナ海・海ゴミプロジェクトの成果と展開—‘「NGO/CBOによる海岸漂着ごみ調査」

- 6) 清野聡子・小島あずさ・由比良雄・大我かおり・磯辺篤彦：日本海洋学会春季大会(2009)「福江島沿岸における海流・季節風に関する地域知と海岸漂着ペットボトルの起因地構成の分布」
- 7) 清野聡子：第2回海洋アライアンス・シンポジウム(2009)「沿岸域の計画・管理における地域知の生態工学・法制度への展開と国際ネットワーク形成」
- 8) 清野聡子：日本沿岸域学会研究討論会(2009)「日本における海洋保護区の制度設計にむけた既存法制度の課題の整理－国立・国定公園の海岸・海域管理」
- 9) SEINO, S., KOJIMA, A., HINATA, H., MAGOME, S. and ISOBE, A. : 10th International Coastal Symposium, Lisbon, Portugal(2009) “Multi-Sectoral Research on East China Sea Beach Litter Based on Oceanographic Methodology and Local Knowledge.”
- 10) 清野聡子・中西弘樹・櫻井善人・平田政司・由比良雄・小島あずさ：応用生態工学会第13回埼玉大会(2009)「東シナ海沿岸での漂着ゴミによる海浜植物生育地の被覆の現状と対策」
- 11) 清野聡子・由比良雄・大我かおり・小島あずさ：漂着物学会第9回柏崎大会(2009)「漂着ペットボトル拾いで実証する海流と風が織りなす五島列島福江島の漂着物の非対称性」
- 12) SEINO, S. : Intl. Symp. 'Integrated Coastal Management for Marine biodiversity in Asia' (2010) "Multi-sectoral collaboration based on local knowledge and coastal sciences for Asian Marine Protected Areas"
- 13) 清野聡子：沿岸環境関連学会連絡協議会第22回ジョイント・シンポジウム(2010)越境的海洋環境問題の科学研究と問題解決の課題と展望－海岸漂着ゴミ問題を例として
- 14) 清野聡子：韓国昌南水フォーラム(2010)「“東シナ海海ごみプロジェクト“海洋学的方法論と地域知にねざした多セクター協働による海岸漂着ゴミの調査研究」
- 15) 清野聡子・小島あずさ・由比良雄・大我かおり・村井健太・磯辺篤彦：日本海洋学会春季大会(2010)「東シナ海沿岸における海岸漂着ペットボトルの起因地構成の広域的分布」

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催

- 1) 「市民と研究者が協働する東シナ海沿岸における海岸漂着ゴミ予報実験 研究成果地元住民報告会」(平成20年3月10日、五島市役所岐宿支所会議室)
- 2) 水産海洋学会シンポジウム「漂流・漂着ごみの科学－東シナ海・海ゴミプロジェクトの成果と展開－」(平成20年12月11日 長崎大学)
- 3) 「五島の環境を考えよう」(報告会およびワークショップ)(平成21年5月17日、五島市役所会議室)
- 4) 「市民と研究者が協働する東シナ海沿岸における海岸漂着ゴミ予報実験 研究成果報告会」(平成22年1月30日、五島市役所岐宿支所会議室)
- 5) 「市民と研究者が協働する東シナ海沿岸における海岸漂着ゴミ予報実験 研究成果報告会」(平成22年1月31日、五島市役所会議室)

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 長崎新聞 (2007年9月17日, 海岸調査の様子を紹介)
- 2) 五島新報 (2007年9月22日, 海岸調査の様子を紹介)
- 3) 八重山毎日新聞 (2008年2月5日, 海岸調査の様子を紹介)
- 4) 八重山毎日新聞 (2008年3月5日, 海岸調査の様子を紹介)
- 5) NHKニュース(長崎) (2009年7月13日, 海岸調査の様子を紹介)
- 6) NHKニュース(長崎) (2010年1月31日, 成果報告会の様子を紹介)
- 7) 地域紙(隔週刊)「五島新報」にて本プロジェクトおよび五島の海岸環境のコラムを連載(隔週)

***参考資料**

(6) その他

本研究プロジェクトのみによるものではないが、研究期間中に以下の賞を受賞した。

- 日本沿岸域学会出版文化賞(2008)
宇野木早苗・山本民次・清野聡子共編著『川と海—流域圏の科学』(築地書館)
(研究代表者の磯辺も著者の一人)
- 日本海洋学会第1回環境科学賞(2010)
海洋科学の社会還元や沿岸域への市民参加の科学的支援等

D-071 市民と研究者が協働する東シナ海沿岸における海岸漂着ゴミ予報実験

(3) 短波海洋レーダーによるゴミ収束域の特定と海洋数値モデルの精度検証

国土技術政策総合研究所

沿岸海洋研究部 沿岸域システム研究室 日向博文・片岡智哉（平成21年度）

34/22

平成19～21年度合計予算額 59,068千円

（うち、平成21年度予算額 20,977千円）

上記の予算額は、間接経費を含む。

[要旨] HFレーダー観測と力学系理論を組み合わせたゴミ集積海域特定方法を提案した。まず、HFレーダー観測結果を利用してFinite-time Lyapunov Exponent (FTLE)を計算し、Lagrangian Coherent Structure (LCS)のマッピングを行った。続いてLCSの発生位置と渦度分布、人工衛星画像による表層水温 (SST)・クロロフィルa (chl. a)濃度分布との比較、さらには、空撮による漂流ゴミ分布との比較を行い、本提案方法の精度検証や物理的根拠を考察した。これらの比較から、1)渦度極大域の周辺に顕著なLCSが発生すること、2)LCSの位置は基本的にはSST/chl. aフロントの位置と対応しているが、カオスの混合過程よりも乱流的な混合過程が支配的であると考えられる海域に位置するフロントは検出できないこと、3)風圧流の影響を受けない漂流ゴミの集積域はLCSによって精度良く予測できる可能性が高いこと、4)五島列島西岸沖ではLCSの発生には明確な季節変動があり、傾圧不安定によると推測される渦生成が活発な秋季に顕著なLCSが発生することを示した。これら全て実測に基づく一連の成果は分担者らの知る限りこれまでに前例がない。また、GPS漂流ブイ追跡実験から、流れ場が一様な場合にはHFレーダーによって実用的な精度の範囲内で漂流物の追跡が可能なこと、水平循環流が隣り合う双曲点付近における漂流物の追跡には注意が必要なことも示した。

[キーワード] 短波海洋レーダー、Lagrangian Coherent Structure、Finite-time Lyapunov Exponent、渦構造、人工衛星画像、

1. はじめに

海岸漂着ゴミ量を軽減するためには海洋へ流出するゴミ量の低減と洋上における効率的な漂流ゴミの回収が重要である。重機、あるいは人でさえ近づくことができない海岸へ漂着したゴミを回収することは事実上不可能である。人手や重機による漂着ゴミ回収が可能な場合であっても、微細化したゴミの回収作業には多大な労力と費用が必要となる。また、2006年7～8月に九州北西部を中心に漂着した大量の流木問題のように、突発的な災害による被害を最小限にするためにも洋上における回収技術を確認しておくことは重要である。

本サブテーマ分担者は、長崎県に大量の流木が漂着した直後の2006年8月に長崎県五島市を訪問し、主に漁業者や地方公共団体を対象に漂流・漂着ゴミの状況について聞き取り調査を行った。その結果、流木やプラスチック類等の漂流ゴミの多くが、沿岸域に発生する海流の収束域（沿岸フロント）に集積することを確認した。五島列島周辺には主に2種類の沿岸フロントが発生する（図

3-1)。潮汐フロントおよび沖合の暖水と比較的低温の沿岸水の間が発生するフロントである。前者は、成層期（6月～8月）に島の周辺（沖合数km～10km程度）で発生するのに対し、後者は比較的沖合（10km～）で発生し秋季（9月～11月）に顕著となる。

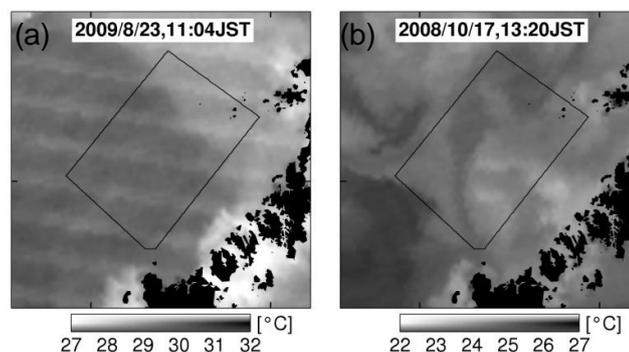


図3-1 五島列島周辺海域において発生する代表的な2種類の沿岸フロント。(a)潮汐フロント、(b)対馬暖流系沖合暖水と低温沿岸水の間が発生するフロント。図中の四角はHFレーダー解析領域を示す。

本サブテーマでは将来における効率的な洋上回収に向け、短波海洋レーダー（以下、HFレーダー）による沿岸表層の広域流況データを応用し、漂流ゴミ収束域の位置の特定技術の開発を行ってきた。後者のフロントは、HFレーダーの観測範囲内に頻繁に発生するため、レーダーによる表層流速を用いた収束域の特定を試みた。その際、近年、海洋や気象など地球流体における混合や輸送過程の理解に応用されるようになった力学系理論を応用した。具体的には、有限時間リアプノフ指数 (Finite-time Lyapunov Exponent: FTLE) の計算に基づく、Lagrangian Coherent Structure (LCS) の一種である不安定多様体 (Unstable Manifold) のマッピングである。一方、前者（潮汐フロント）は、レーダー観測海域の外側（岸側）に位置していたため、数値モデル（サブテーマ1）とのカップリングによってその位置の特定を試みた。

洋上において漂流ゴミを効率的に回収するためには漂流物を追跡する技術も必要である。例えば、一般船舶等から漂流ゴミ発見の通報があった場合、予めゴミの位置と時刻が分かっているため通報を受けてからゴミ回収船が現場付近に到着するまでの間（数時間）の漂流ゴミの追跡が必要となるからである。そこで、HFレーダー観測海域においてGPS漂流ブイの追跡実験を行い、HFレーダーの漂流物追跡能力についても検証した。

2. 研究目的

サブテーマ3の第1の目的は、HFレーダーを用いて、五島列島西岸におけるゴミ集積域を検出することである。サブテーマ1ではゴミ漂流の時期と発生源を予報するのに対し、当サブテーマでは五島列島西岸におけるゴミの集積場所の特定を行うのである。ただし、HFレーダーでカバーしきれない海域、特に岸近くの海域、水道部、瀬戸等が発生する潮汐フロントについては、数値モ

デル（サブテーマ1）とのカップリングによって集積域の位置を特定していく。また、洋上における漂流ゴミ回収のために必要なもう一つの機能である漂流物追跡機能について、GPSブイの漂流実験に基づいて検証する。

3. 研究方法

（1）FTLE分布に基づく漂流ゴミ収束域の特定

1) HFレーダー観測

福江島、奈留島、そして中通島にそれぞれ2局、1局、1局のHFレーダーを設置した（図3-2）。これらのHFレーダーの中心周波数は24.515MHz、送引周波数幅は100KHzである。これにより、五島列島西岸沖60km四方程度の海域表層の流速を1.5kmの空間分解能で計測することが可能である。観測は、2007年12月から2010年2月までの2年以上の期間で行った。測定間隔は1時間であり、1回当たりの計測時間は20分間である。2009年夏以降、落雷や風雪によるレーダー機器の劣化等が原因の欠測が発生するようになった。そこで、本報告では、主に、比較的安定的に計測が行われた2008年の結果について述べる。

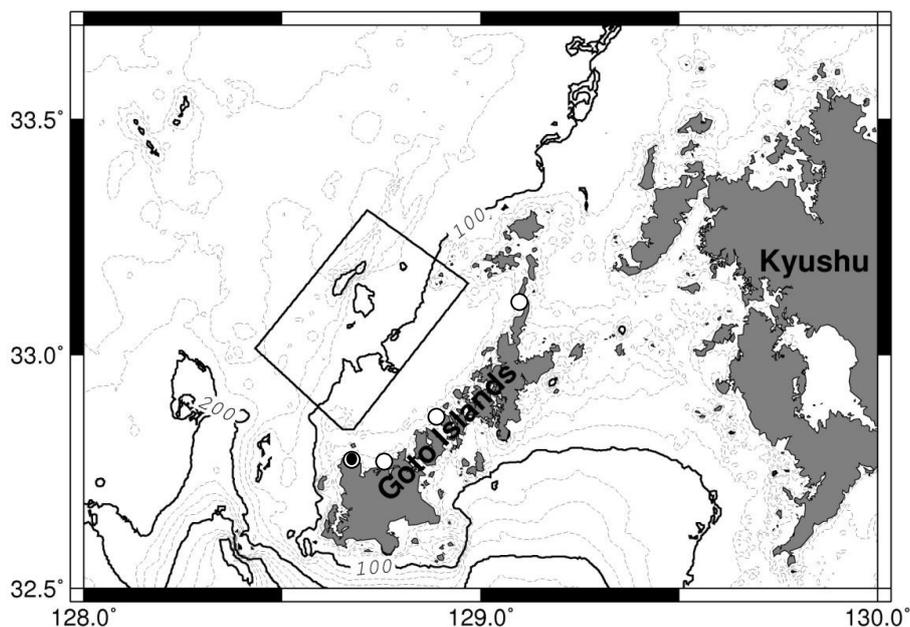


図3-2 研究対象海域。五島列島西岸における黒線で囲んだ領域（60km×40km）は短波海洋レーダーの解析範囲。○はレーダーの、●はレーダーおよび風速計の設置位置を示す。

2) Finite-time Lyapunov exponent (FTLE)

Lagrangian Coherent Structure (LCS)（例えば、Haller and Yuan, 2000¹⁾；Shadden et al., 2005²⁾）のマッピングを応用したゴミ収束域特定方法について説明する。この方法の利点は、履歴の効果を考慮しつつ、中立粒子配置の影響や集積域の判定に関する曖昧さが少ない点である。さら

に、過去のデータを利用するためにリアルタイム情報提供に向いている点も大きな長所である。図3-3(a)にLCSの概念の基本となる定常場における双曲点、およびその周辺場における流体粒子（中立粒子）の振る舞いの概念図を示す。双曲点から伸びる2本の流線（不安定多様体）と、双曲点へ向かう2本の流線（安定多様体）が存在する。定常場では、これらの流線を介した流体粒子の行き来はなく、これら流線は輸送障壁として働く。

ある時刻 ($t=t_0$) において、安定多様体を挟んでわずかな距離で隣り合う流体粒子は、時間の経過とともに互いの距離が急激に大きくなる。反対に、双曲点を挟んで反対側の安定多様体近傍に存在していた流体粒子との距離は不安定多様体を挟んで急激に小さくなる。結果として安定多様体は、流体粒子をはじく境界を、不安定多様体は流体粒子を引き付ける境界として作用する。この2つの多様体をLCSと呼び、安定多様体をRepelling Coherent Line (RCL)、不安定多様体をAttracting Coherent Line (ACL)と呼ぶ。LCSを挟んで近接する粒子間の距離は時間とともに（あるいは時間を遡ると）急激に引き伸ばされるためLCS上でひずみ速度テンソルの固有値が極大値となることが期待される。本研究ではこのACLをゴミ収束域と仮定し、ACLが実際に海洋表面の漂流物の集積域となっているかどうかを検証していく。

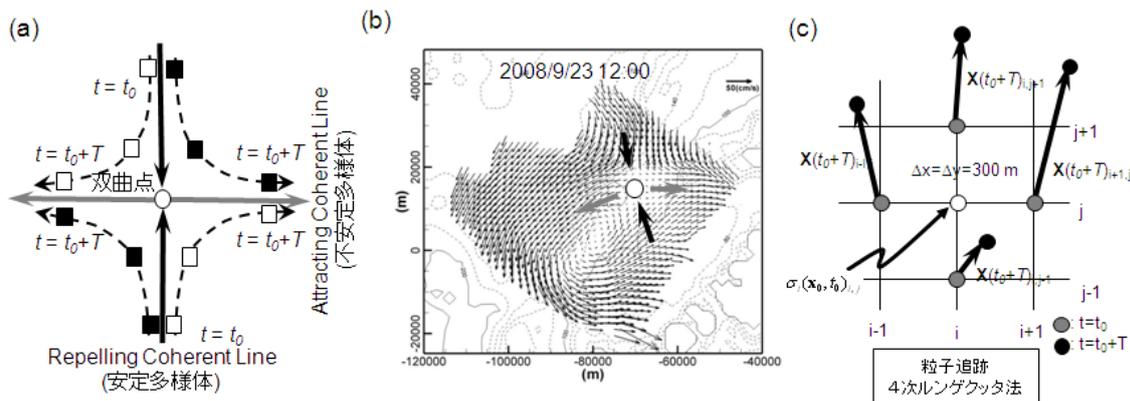


図3-3 (a)双曲点周りにおける水粒子の挙動、(b)五島列島西岸沖表層に出現した双曲点、(c)歪みテンソル計算方法概念図。

五島列島西岸沖にもしばしば双曲点が登場する（図3-3(b)）。実際の海洋表層における流れ場は非定常であるが、適当な時間スケールと空間スケールを設定することにより、双曲点周辺における理想的な粒子の振る舞いが期待できる。具体的には、以下に示す有限時間内における流れ場に近接して置かれた2つの流体粒子間の距離の歪み速度に相当する $\sigma_t(\mathbf{x}_0, t_0)$ (FTLE) 分布を計算する。

$$\sigma_t(\mathbf{x}_0, t_0) = \frac{1}{2|T|} \ln \lambda_{\max}(\mathbf{\Delta})$$

$$\mathbf{\Delta} = \left[\left[\frac{\partial \mathbf{x}(t_0 + T; \mathbf{x}_0, t_0)}{\partial \mathbf{x}_0} \right]^T \left[\frac{\partial \mathbf{x}(t_0 + T; \mathbf{x}_0, t_0)}{\partial \mathbf{x}_0} \right] \right]$$

ここに、 τ は行列の転置を示す。 $\mathbf{\Delta}$ 、 λ はそれぞれCauchy-Green (CG) 歪みテンソルとその固有値である。そして、FTLE分布の極大値がLCSに相当する¹⁾。歪みテンソルの計算方法の概念図を図3-3(c)に示す。CG歪みテンソルの大きさは 2×2 であり、時間 T の間の粒子追跡と中央差分により求

めた。ここでは T として-24時間を採用した。本来、時間 T はLCSの寿命に基づいて決定されるべきである。しかしながら、HFレーダーの観測範囲は限られており、長時間中立粒子を追跡することは不可能である。上式から、時刻 $t=t_0$ におけるACLを検出するためには、現在 $t=t_0$ から時刻 $t=t_0-T$ までのデータがあれば良い。したがって、リアルタイムにACLを検出することが可能となる。

3) 人工衛星画像

本提案方法の検証を行うため、セスナ機による漂流ゴミの撮影（サブテーマ4）に加えて、人工衛星による表層水温（SST）およびクロロフィルa(chl. a)画像についても利用した。利用した人工衛星画像はMODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)に登載されているTerra/AQUAによるものである。データは宇宙航空研究開発機構・地球観測センターのホームページ

(http://kuroshio.eorc.jaxa.jp/ADEOS/mod_nrt_new/index.html) からダウンロードした。

4) 風速、密度データ

海岸および海上における風速データ、および五島列島西岸沖における密度の気候値を利用しLCS発生メカニズムについて検討を行った。LCSの発生メカニズムについて検討することは、効率的なゴミ洋上回収の計画策定や経済的実現性の検証にも役立つと考えられる。また、LCSや表層流況の短時間での変化を調べるために、HFレーダー福江島局（図3-2）に風速計(KADEC21KAZE-C-NR/Kona Systems Inc.)を設置し、毎時の風向・風速を計測した。また、五島列島西岸沖(128.625E, 33.125N)における海面表層風応力トルク($\nabla \times \tau$)の季節変化を調べるために、QuikSCAT/Seawindsによる日平均風向・風速を利用した。データはサブテーマ1が東シナ海の数値計算に用いているものである。密度の気候値(33° N -34° N, 128° E-129° Eの月平均値)は、日本海洋データセンターのホームページ

(http://www.jodc.go.jp/index_j.html) からダウンロードし利用した。

(2) 漂流ブイ追跡実験

初年度(H19)、五島列島におけるHFレーダー設置場所の踏査を行っている間、既存データを用いてHFレーダーの漂流物追跡精度の検証を行った。使用したデータは東京湾沿岸に設置されているHFレーダーの観測データ(<http://www.tbeic.go.jp/>)および2006年10月に関東地整が行ったGPS漂流ブイ観測データである(図3-4)。HFレーダー観測により、東西・南北1.5km間隔の格子上の表層流速が2006年4月より1時間毎に得られている。GPS漂流ブイ観測は、多摩川沖の海域(図3-4中の円で囲まれた海域)において2006年10月20日(大潮期:芝浦日最大潮位差133cm)と10月30日(小潮期:芝浦日最大潮位差99cm)に行なわれた。GPS漂流ブイ(パケット式簡易型漂流ブイ、ゼニライトブイ社製)には、抵抗体に加えて2台の小型電磁流速計(COMPACT-EM、アレック電子株式会社製)を水深0.2mと0.5mに相当する位置に取り付け、1分間隔でブイの動きに対する各層の相対流速を計測した。なお、観測結果の詳細については、日向ほか(2008)³⁾を参照されたい。

(3) 潮汐フロント発生位置の特定—数値モデルの検証—

上述したように、潮汐フロントの発生位置はHFレーダー観測範囲外にあった。そこで、潮汐フロントの発生位置の特定は数値モデル(サブテーマ1)で行い、HFレーダー観測結果は数値モデルの検証に用いた。本レーダー観測では、各視線方向流速の計測時刻は異なっていた。そこで、まず各ビームの視線方向流速を用いて各視線方向調和常数を計算し、それらの値を東西・南北1.5kmの格子点上に空間補間した。その後、最小二乗法を用いてそれらの調和常数を合成することにより、格子点上での潮流楕円を求めた。解析方法の詳細については日向ほか(2005)⁴⁾を参照

されたい。潮流振幅 (U) と水深 (H) から、観測海域内の $\log_{10}(H/U^3)$ 分布を計算し、数値モデルによる分布と比較した。このパラメータは、単位水深当たりの潮流のエネルギー散逸の逆数になっており、数値が小さい程潮流による鉛直混合が活発であることを示している。瀬戸内海ではこのパラメータの値がおおよそ 2.3 の等値線に沿って潮汐フロントが発生する (例えば、Sun and Isobe, 2008⁵⁾)。

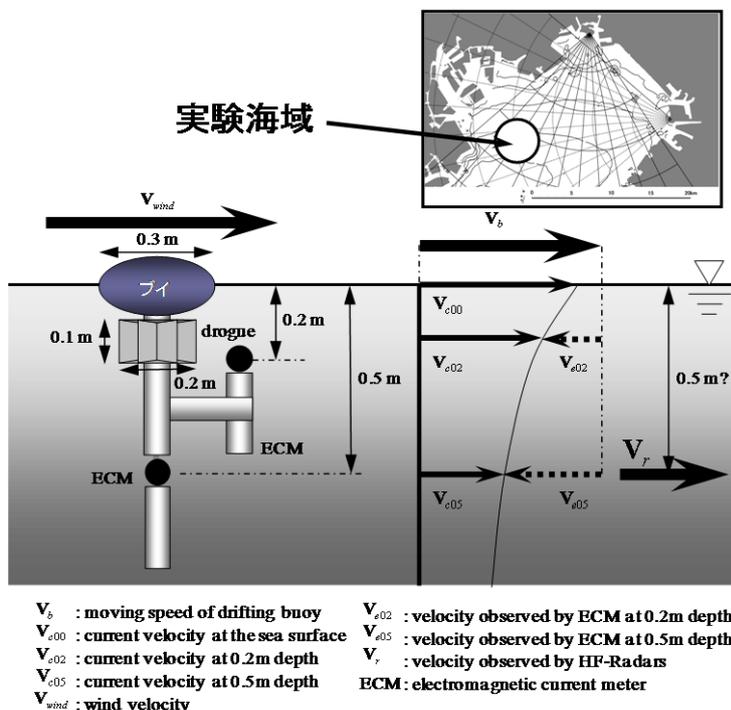


図3-4 東京湾における漂流ブイ実験海域と漂流ブイの構造概略図。海域図中にある放射線状の線はHFレーダーのビームパターンを示す。

4. 結果・考察

(1) FTLE分布に基づく漂流ゴミ収束域の特定

1) FTLE分布と中立粒子の挙動

FTLE分布と人工衛星画像や空撮による漂流ゴミ分布を比較する前に、FTLE分布と中立粒子（漂流ゴミ）の挙動との対応関係について示す。図3-5(a)～(d)に2008年7月13日12:00～7月15日0:00におけるFTLEと中立粒子の分布を示す。比較の為に(a)と同時刻の水平発散と渦度分布も示す(図3-5(e)、(f))。水平発散分布の計算は物質の収束域を検出するための最も一般的な方法である。観測海域東部に円弧状のFTLEの極大域が発生していることが明確に確認できる。この領域がACLに相当する¹⁾。粒子の振る舞いを確認するために36時間の粒子追跡実験を行った。まず、7月13日12:00において、ACLの東側に白色、西側に黒色の中立粒子を東西300m間隔に配置した。36時間の粒子追跡の結果を見ると、時間と共にACLが変形しながら東へ移動しており、2色の粒子はこのACL周辺に徐々に集積していく。この間、2色の粒子はACLを介して互いに混合することはない。一方でACLから離れた海域に位置していた粒子は徐々にその間隔を広げていく。

水平発散場にはパッチ状の収束、発散領域が一点在しており、“一目”でゴミ収束域を判断することは困難である。また、ここでは示さないが、パッチ構造は時間と共に移動し、その値の大き

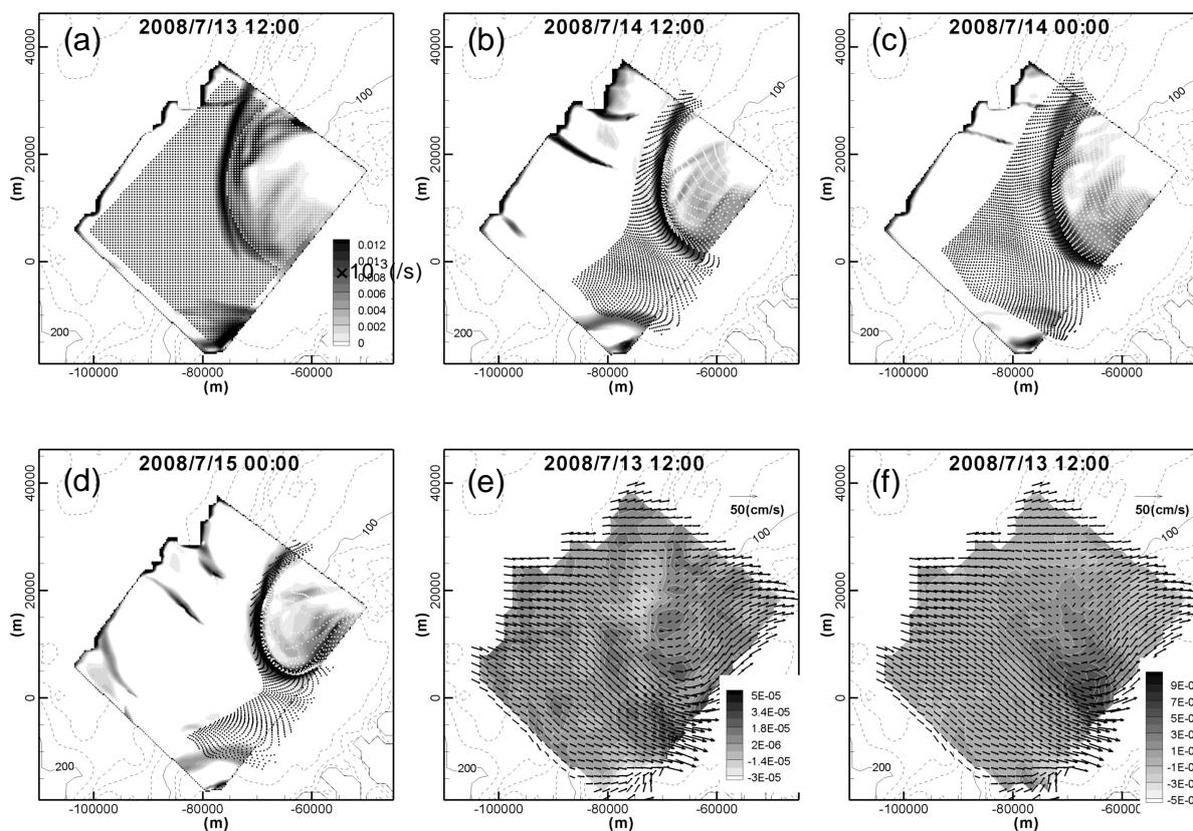


図3-5 (a)-(d) 2008/7/13 - 7/15におけるFTLEと中立粒子の分布。7/13 12:00に円弧状のLCSの東側と西側にそれぞれ白色と黒色の中立粒子を配置。(e),(f)はそれぞれ収束発散場、渦度場。

さも時々刻々変化する。したがって、この水平発散構造からゴミ収束域を“人目”によらず検知するためには、一つ一つのパッチ構造を追跡し、比較的長寿命のパッチ構造を抜き出すことが必要である。しかしながら、そのような計算は複雑で難しいものとなる。水平発散場からゴミの収束域を特定することは、この様に、その空間構造の特徴や場の非定常性により、少なくとも五島西岸沖においては困難である。一方、渦度分布との対応関係を見ると、大きな正の渦度の領域に沿ってLCSが存在しており、渦度との対応関係が良いことが分かる。渦度場との対応関係については4)において詳しく説明する。

以上、FTLE分布に基づくLCSの抽出によってゴミ収束域を特定できる可能性が高いことが分かった。しかしながら、観測海域外で収束したゴミの固まりがその形を保ったまま海域を通過することもあり得る。このようなゴミの固まりをFTLEに基づいて検知することは困難であり、数値モデルによる情報が必要となる(サブテーマ1)。あるいは、このようなゴミの固まりは観測海域においてゴミの集積機構が無いために、観測海域を通過する際に徐々に分散していく可能性が高い。この場合には効率的な回収はそもそも困難となる。

2) 五島列島西岸沖におけるLCSの経年変動特性

図3-6に五島列島西岸沖におけるFTLE、渦度、表層風応力トルク、および密度の季節変化を示す。FTLE、渦度はHFレーダー観測海域内の空間平均値であるが、FTLEについてはLCS上(大まかには図

3-5の黒い部分に相当)での値を抽出して計算している。図を見ると、FTLEには明確な季節変動があり、秋季(10月)に最大、春季(4-5月)に最小となることが分かる。また、その変動は、渦度と良く対応している。FTLEと正/負の渦度との相関係数は、それぞれ0.79と0.67である。つまり、秋季には渦の発生に伴った明確なLCS(ゴミ集積域)が発生している可能性が高い(渦構造との対応関係は4)にて詳述する)。ここでは示さないが、風速には明確な季節変動(冬季に最大で夏季に最小)が存在するが、渦度の駆動力の一つである風応力トルクには明確な季節変動を認めることは出来ない。また、当然であるが、表層と低層の密度差(成層強度)にも明確な季節変動がある。FTLEが最大となる10月には成層構造が存在しているのに対し、FTLEが最小となる4-5月においては成層強度が非常に弱いことが分かる。以下では、渦構造とゴミの集積域(LCS)が1年の中で最も顕著となる10月の結果を中心に述べる。

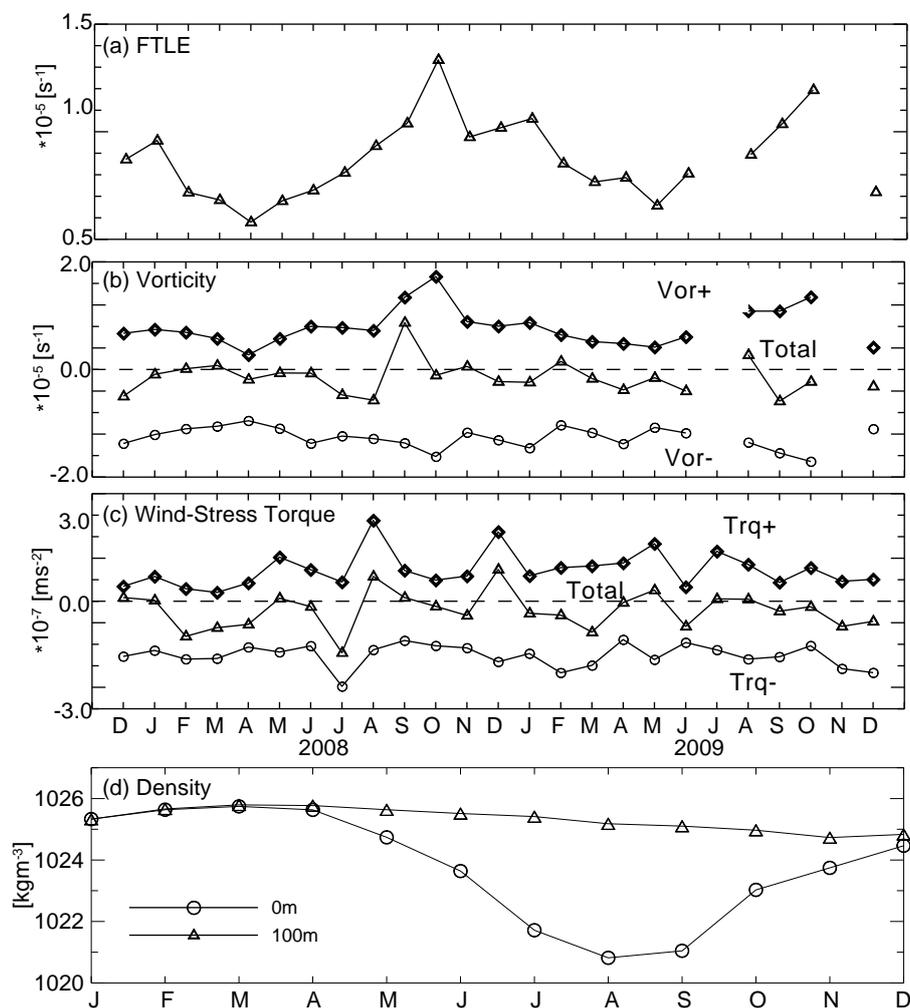


図3-6 (a)FTLE、(b)渦度、(c)風応力トルク、および(d)密度の季節変化。
 なお、密度は五島列島西岸の気候値。FTLEと渦度に明確な相関が認められる。

3) 秋季における表層水温場の構造

2008年10月8日から20日にかけて12枚の表層水温画像を得ることが出来た(図3-7)。10月第1週は北東からの沿岸湧昇モード風が卓越しており、10月8日には五島列島西岸から北西に向かって低温の湧昇水が広がっていることが分かる。解析領域の西側にはマッシュルーム状の形をした暖水

が東へ向かって流入している。その後、14日にかけて北西の風が支配的となるが、再び20日まで北東からの湧昇モード風が卓越し、その後、南東風に変わる。この間の表層水温構造の変化は、3つの冷水塊（低気圧性渦：CE1-CE3）と1つの暖水塊（高気圧性渦：WE1）の動きや相互作用によって記述できる。図3-7(d)にこれら4つの渦の位置を示す。最も注目すべきは、10月15日からの湧昇モード風に伴うCE3の発達と((f)-(m))、CE1やWE1から舌状に伸びた冷水塊や暖水塊がCE3へ巻き込まれることによって発生するSSTの層状構造((i)-(m))である。

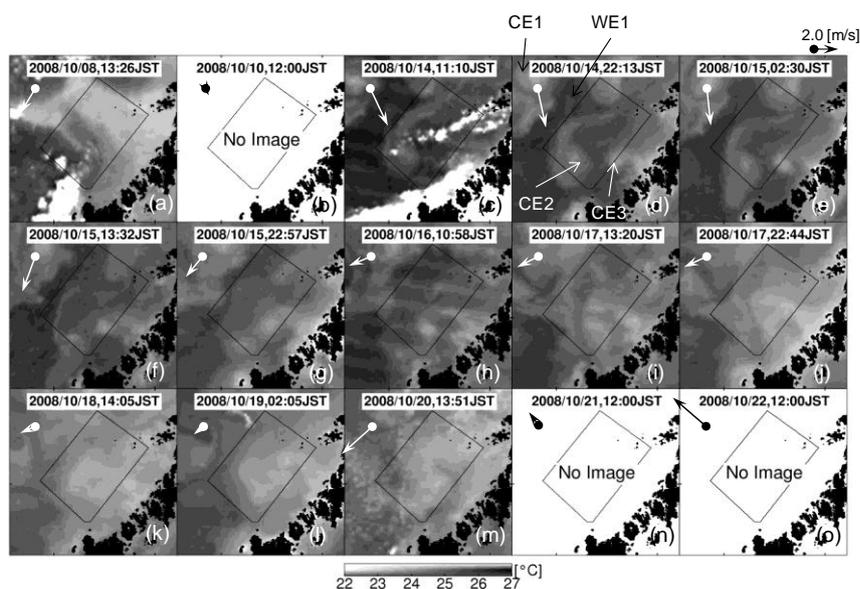


図3-7 2008年10月8日から20日にかけての五島列島西岸沖の表層水温分布人工衛星（MODIS-Terra/Aqua）画像。ベクトルは福江島レーダーサイトで計測された風速。

CE2は北東風によって比較的早い時期に南西に移流されてしまい((c)-(h))、他の渦との相互作用は明確ではない。また、CE2からは北東方向へ細長く伸びる冷水フィラメントが存在するが((d))、15日深夜((g))には周りの海水との混合により明確に認識することは出来なくなる。

4) 秋季におけるLCS-渦構造と風速場との対応

この間におけるFTLEと渦度の分布を図3-8に示す。湧昇モード風によるCE3の発達に伴って、その周辺および内部に螺旋状のLCS（黒い帯状の部分に相当）が発生している((f)-(m))。そしてLCSは概ね渦度の大きな領域の周辺部に位置している。CE3の中心部にはコア状の渦度極大域が存在し、その周辺をLCSが取り囲んでいる((i)-(k))。このような渦度分布との対応は、より大スケールの海洋の流れを対象とした数値実験（例えばWaugh et al., 2006⁶⁾）や理想的な2次元乱流（例えばLapeyre, 2002⁷⁾）においても見いだされている。SST分布との対応関係として、例えば

図3-7(i)と図3-8(i)を比較すると、LCSの位置がCE3の内部や周辺に発達した層状のSST構造と良く対応していることが分かる。このことから、LCSが沖合に発生する水温フロントの位置、すなわちゴミ集積域を上手く予測していることが分かる。螺旋状のLCSは、周辺部から渦中心部へのガイドとして働く。CE1やWE1から伸びた冷水／暖水舌は、このLCSに沿って混合されることなしに渦中心へと輸送される。この様に渦の周囲ではカオス的な水塊の混合（stirring）が乱流的な混合（mixing）に比べて卓越していると考えられる。

ただし、全ての水温フロントがFTLEの計算によって検出できるとは限らない。例えば、CE2から伸びている冷水フィラメント周りのフロントはFTLEでは検出できていない（例えば図3-8(d)）。上述したように、この冷水フィラメントがその後急激に拡散していることから、この冷水塊の周辺ではカオス的混合よりも乱流による混合が支配的であったためと考えられる。仮に、このような消えゆくフロントにゴミが集積していたとしても、その後急激に拡散していくことが予想される。したがって、漂流ゴミの洋上回収という観点からは、このようなフロントは検知出来なくても問題ない。

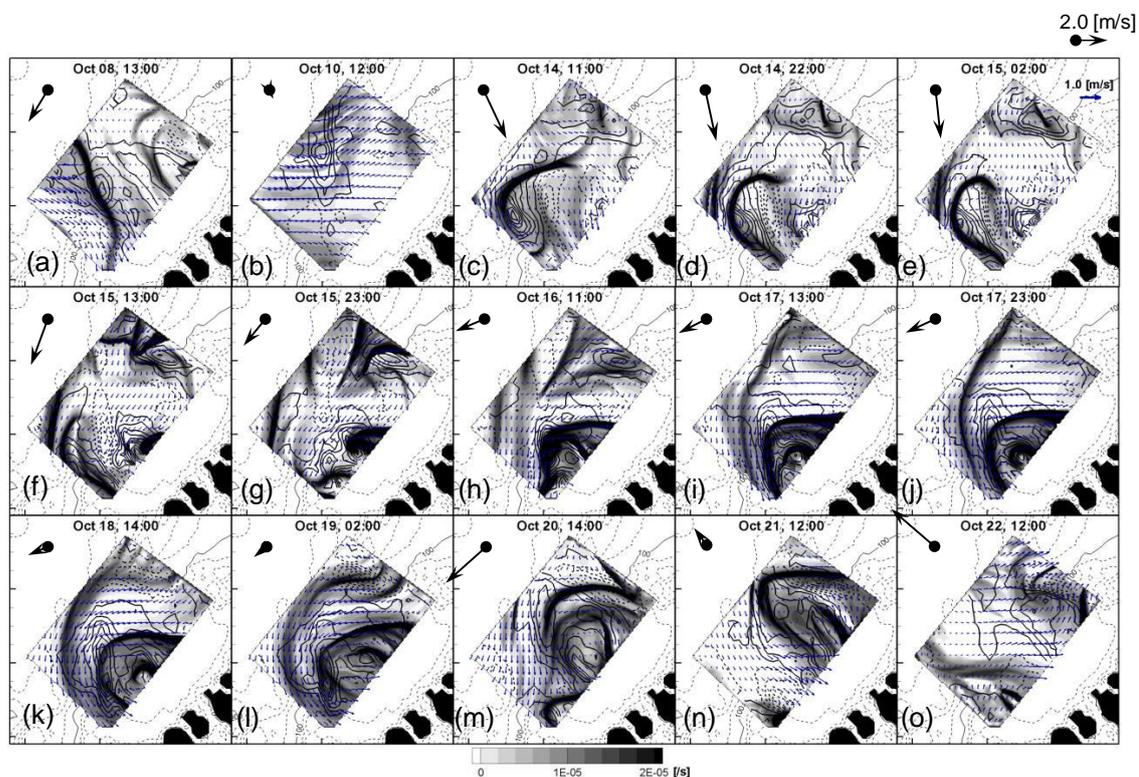


図3-8 2008/10/8 - 10/22におけるFTLE、渦度（コンター）、流速ベクトルおよび風速ベクトルの時空間変化。渦度の大きな領域の周囲にLCSが位置している。

LCS上のFTLEの大きさの風向別頻度分布を図3-9に示す。図3-8からも予想された様に、第1象限（東～北）から風が吹く場合に、FTLEは大きな値となっている。10月の平均風は北風2.2m/sであるが、風向別の頻度としては、第1象限から吹く風が48%を占めていた。渦度とFTLEとの対応関係（図3-6、8）から、このことは第1象限から風が吹く場合、すなわち、湧昇モード風が卓越する場合、他の風向と比較して五島列島西岸沖では渦が発生しやすいことを意味している。ここでは示

さないが、4-5月においてはこのようなFTLE頻度分布の風向依存性は見られなかった。つまり、春期に北東風が吹いても秋季に比べて渦が発達し難いのである。4-5月と10月における海洋の条件で大きく異なっているのは、密度の鉛直分布（成層強度）である（図3-6(d)）。4-5月には上下の水塊が未だ混合しているのに対し、10月では成層構造が残存している。このことから、10月における渦発生、すなわち顕著なLCS発生メカニズムは、北東風によって湧昇した低温湧昇水と沖合暖水の間で発生する傾圧不安定であると推測される。ただし、順圧的な状況において南西に向かう沿岸ジェットが発達した場合でも水平シアによって渦が発生する。現時点ではこの可能性についても完全には否定できない。今後、数値実験等によって渦の発生メカニズムを詳細に検討してく。これにより、渦の持つ時空間スケールや発生頻度、発生時期がより詳細になるだろう。これらはFTLE分布計算に基づく洋上ゴミ回収計画を策定する際に非常に重要な情報となる。

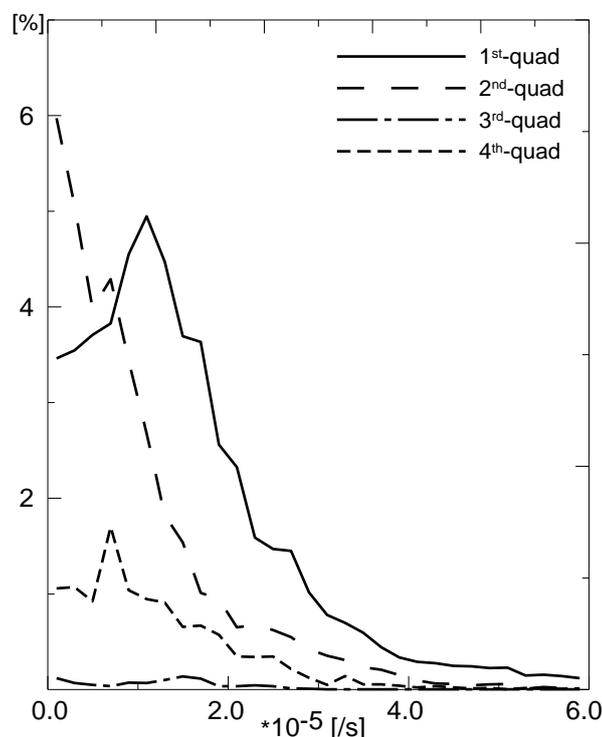


図3-9 2008/10におけるFTLE頻度分布の風向依存性。第1象限からの風、すなわち湧昇モード風の時にFTLEは大きくなる。

5) FTLE分布と漂流ゴミ分布との対応関係

空撮（サブテーマ4）による実際の漂流ゴミ分布とFTLE分布の比較を行った（図3-10）。空撮は2009年7月23日に行った。当日は、この時期には珍しく北東風が卓越し、南西に向かう沿岸ジェットとその内側に低気圧性渦が発生していた。そして、2008年10月と同様に、この低気圧性渦の内部およびその周囲に螺旋状のLCSが発生していた。図には空撮により確認された漂流ゴミの位置を重ねてプロットしている。これらのゴミのほとんどが発泡スチロールゴミであったが、図中白丸で囲んだ領域のみ流れ藻が確認された。発泡スチロールゴミの分布はFTLE分布と対応していないが、流れ藻はLCS周辺に位置していたことが分かる。これは、発泡スチロールゴミの一部あるいは大部分が海面上に表出しているため、その移動には風圧流が大きな影響を与えているが、流れ

藻は海面付近の海中を移動しているため、海流に対してほぼ完全に受動的に移動しているため、と考えられる。

以上、人工衛星画像や空撮との比較より、FTLEの計算に基づくLCSの検出によって風圧流の影響を受けないゴミの集積場所の検知が可能であることが分かった。ただし、残念ながら今回のプロジェクトでは、落雷によるレーダーの故障や気象海象条件によって空撮との直接比較が可能だったのはこの1回だけであった。今後は高分解の人工衛星画像との比較を通じてFTLE分布と実際の漂流ゴミの分布との比較を行っていきたいと考えている。

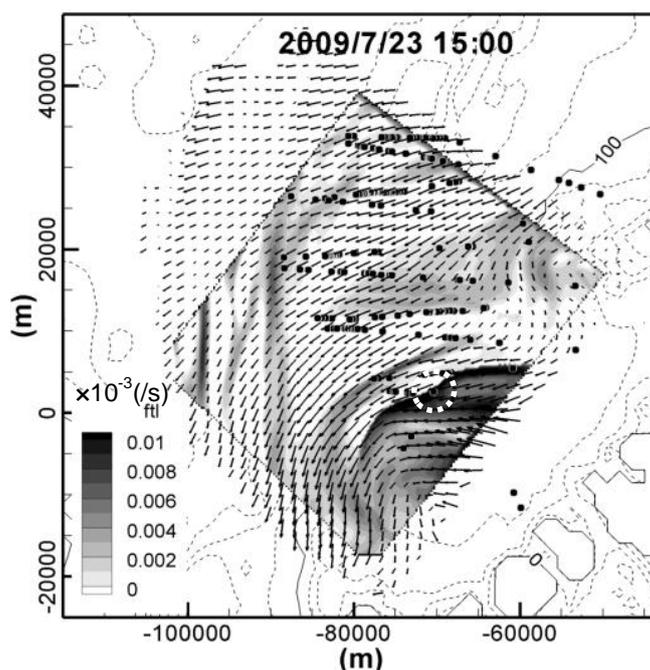


図3-10 空撮により確認されたゴミの分布（黒丸）と同時期の流速ベクトルおよびFTLE場。白点線で囲んである領域には流れ藻が、その他の場所には発泡スチロールゴミが漂流していた。

5) FTLE分布の応用—植物プランクトン分布との対応

FTLE分布計算に基づくLCSの検出はこれまでも植物プランクトンのパッチ状構造の形成メカニズムの解明のために応用されてきた（例えば、Olascoaga et al., 2008⁸⁾）。五島列島は非常に漁業の盛んな地域である。全国で3番目である長崎県の漁獲量の内、約25%が五島列島で水揚げされている⁹⁾。五島列島周辺の植物プランクトン動態について明らかにすることは、この大きな漁獲量を支えている生態メカニズムを解明する上で重要である。ただし、それは本研究プロジェクトの範囲を超えているので、FTLE分布の応用例として、ここでは五島列島西岸沖におけるFTLE分布とMODISによるchl. a濃度分布の比較結果について簡単に紹介するに留める。

図3-11(a)にHFレーダー解析範囲における空間平均chl. a濃度の季節変動を示す。chl. a濃度は2008年から2009年の月別の平均値である。他の沿岸域と同様（例えばOnitsuka and Yanagi, 2005¹⁰⁾）、

春季と秋季にchl. a濃度が極大になっていることが分かる。この2つの季節のうち、秋季には渦構造およびLCSの発生が顕著であり、春季にはそれらは低調となることは先に述べた。そこで、10月におけるchl. a濃度分布のスナップショットと対応するFTLE分布を図3-11 (b)、(c)に示した。低気圧性渦の内部およびその周辺に層状に高chl. a水塊と低chl. a水塊が存在していることが分かる。同時刻のSST画像（図3-7(i)）との対応関係を見ると、両画像は互いにネガポジの関係にあることが分かる。このことは、秋季においては湧昇による低温水が主要な栄養塩の供給源であることを示唆している。また、その層状構造とLCSの分布が良く対応していることも分かる。五島列島西岸沖では、沿岸湧昇モード風による顕著な渦構造が発生する秋季においては、このような渦周辺で高chl. a（低温高栄養塩）水塊と低chl. a（高温低栄養塩）水塊のカオス的混合が顕著であり、それが植物プランクトンの増殖に影響を与えていることが推測される。一方、渦の発生が低調であり、水塊が鉛直的に混合している春季においては、物理的に見れば異なる水塊の水平的なカオス的混合よりも他のメカニズムが植物プランクトンの増殖に寄与していると考えられる。

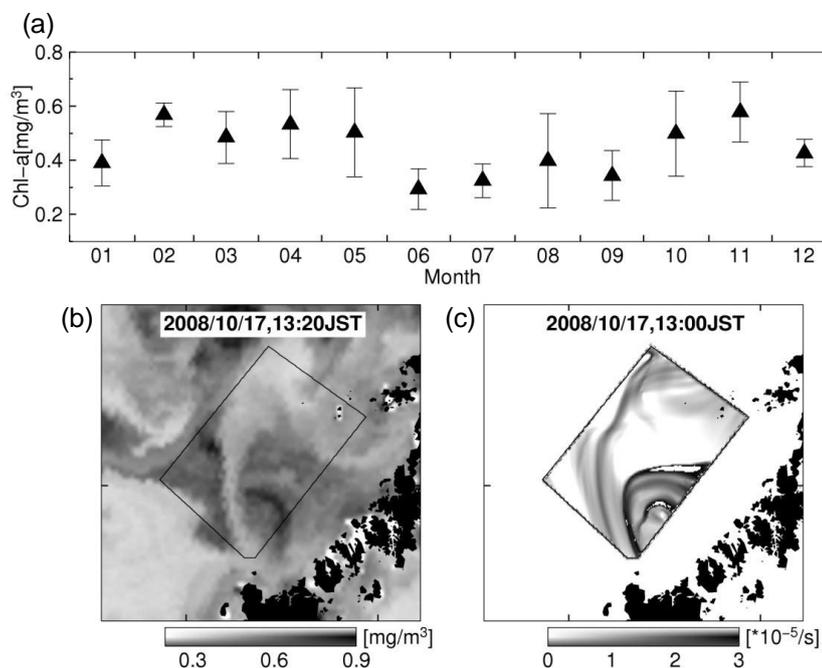


図 3-11 (a)HFレーダー解析範囲内におけるクロロフィルa (chl. a) 濃度の季節変化。

秋季における (b) chl. a 濃度と (c) FTLE分布のスナップショット。

(2) 潮汐フロント発生位置の特定—数値モデルの検証—

図 3-12 に 2007 年 12 月から 2008 年 1 月のデータを用いて求めた M2、S2、K1、O1 潮流クロスと、それぞれの潮流振幅に基づいて計算した $\log_{10}(H/U^3)$ の分布を示す。当海域では M2 潮流成分が最も卓越している。また、半日周潮 (M2、S2) と日周潮 (K1、O1) では主軸方向がそれぞれで同じ傾向を示していることが分かる。半日周潮成分を見ると、観測海域東部では岸に沿った形に、中央部では南北方向を、西部では徐々に北北西—南南東へとその主軸方向を変化させている。福江島北部では、福江島を回り込む形の比較的強い潮流が発生している。ここには示していないが、位相分布から潮汐波は基本的に南から北へと伝搬している。また、福江島北東沖では地形の影響

によると考えられる位相の遅れが認められた。日周潮成分の主軸方向は、観測海域の東部では半日周潮成分と同様岸に沿った形になっている。ただし、観測海域中央から西部にかけてはほぼ一様に北東-南西方向を向いている。位相分布から潮汐波は基本的に南から北へと伝搬していることが分かった。このような半日周潮と日周潮成分の主軸方向や位相分布は、既存の数値モデルの結果（例えば、Guo and Yanagi, 1998¹¹⁾； Matsumoto et al., 2000¹²⁾）にも認められる。

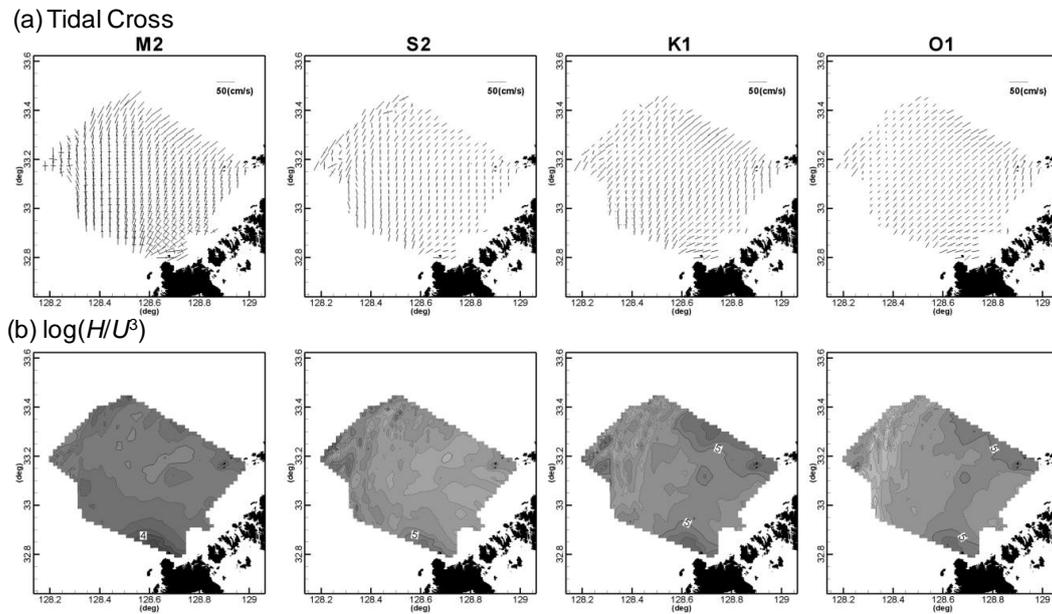


図 3-1-2 (a) 潮流楕円（長軸および短軸）、(b) $\log(H/U^3)$

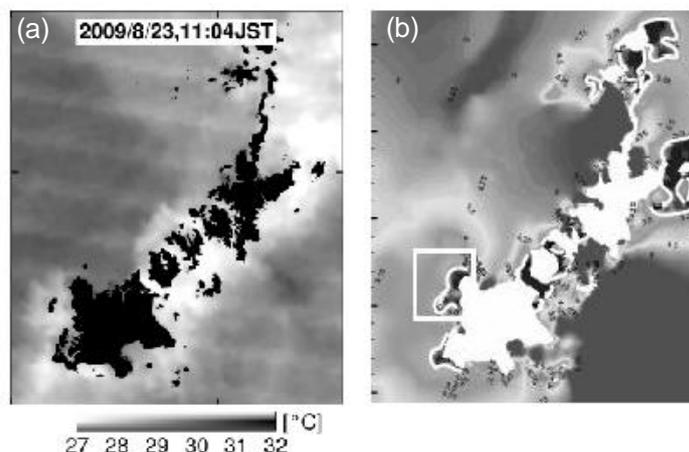


図 3-13 人工衛星 (MODIS) による五島列島周辺の SST 分布 (a) と潮汐モデルの計算結果から求めた $\log(H/U^3)$ の分布。潮汐フロントが発生すると考えられる 3.3 の位置を白線により強調している。なお福江島北西部の四角形はここでは意味はない。

これらの潮流振幅 (U) と水深 (H) を用いて $\log_{10}(H/U^3)$ を計算した。福江島北部海域で全体的に小さな値となっている。M2 潮流では同海域に 3.5 以下の海域が認められるが、それでも瀬戸内海等における潮汐フロント発生海域での値に比べると大きい。HF レーダー観測結果と FVCOM (サブテーマ 1) による計算結果から求めた $\log_{10}(H/U^3)$ を比較したところ、両者は良く一致していることが分かった (相関係数 $R=0.75$)。そこで、図 3-13 に SST の人工衛星画像と FVCOM により求めた $\log_{10}(H/U^3)$ 分布を示す。水温分布は最も成層が発達する 8 月の大潮時のものである。福江島北西部および南西部沖、中通り島東部海域、さらには水道部に潮汐フロントと考えられる潮目が発生している。計算結果では、特に、周辺に潮目ができると考えられる 2.3 の等値線を白線で強調しているが、両者の結果を比較すると、この等値線付近に水温フロントが位置していることが分かる。

(3) GPS 漂流ブイ追跡実験

図 3-14 に GPS で計測した実際の漂流ブイの軌跡、HF レーダーおよびレーダーと 0.5m 層 (レーダーの計測水深に相当) に設置した電磁流速計から推定したブイの軌跡を示す。レーダーによる観測結果だけを利用した場合、約 6 時間後の追跡誤差は約 1.4km であった。漂着ゴミ発見の通報を受けてから現地に到着するまでの時間 (数時間) や目視で漂流ゴミを発見できる距離 (1km 程度) を考慮すると、レーダーだけを用いたブイ追跡計算結果は実用的な要求精度を満足していると言える。これに対し、0.5m に位置する電磁流速計の観測値を併用してブイの移動速度を推定することによりブイの追跡精度は著しく向上し、観測終了時における差はわずか約 110m となった。このことは、表層を漂流するブイの動きとレーダーの測定水深である 0.5m の流速に差があること、したがって強風や成層の影響で流速シアが発達する場合、海面付近を漂流するゴミの追跡計算を精度

良く行う際には、流れの鉛直シアを考慮することが重要になることを示している。比較の為にレーダーと0.2m層に設置した電磁流速計からブイの位置を推定してみたが、両者の差は観測終了時には約2.2kmと最大となった。

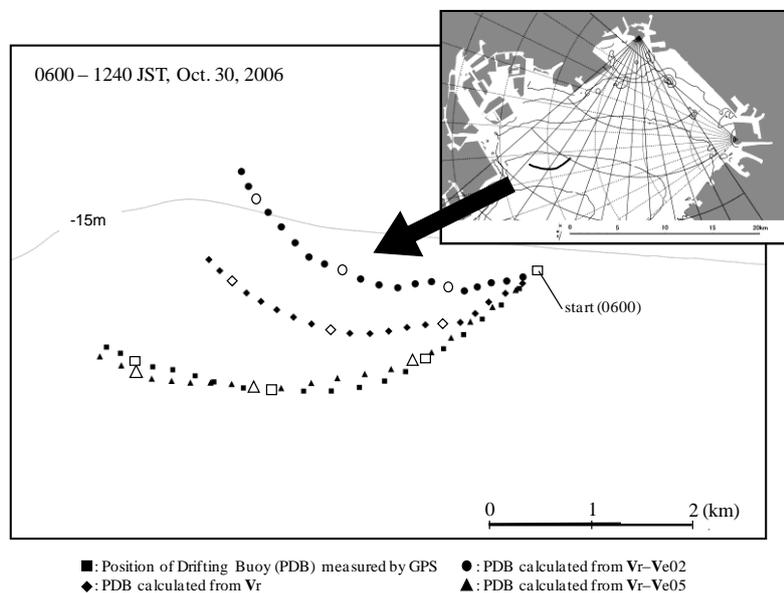


図 3 - 1 4 2006年10月30日における約6時間の漂流ブイ追跡実験結果。

2006年10月20日の追跡実験の結果を図3-15に示す。約11時間の追跡計算による誤差は、レーダーだけを利用した場合、約1.3kmとなり、30日と同様に実用的な精度を満足している。しかしながら、30日の場合とは異なり、0.5m水深の電磁流速計のデータを併用しても追跡精度はほとんど向上しなかった。このことは、0.5m水深の流速とHFレーダーの計測値が異なることを意味している。また、当然のことながら0.2m水深のデータを利用しても精度の向上は認められない。いずれの推定結果も上述した要求精度を満足してはいるが、0.5m水深の流速とHFレーダーによる観測結果が異なっていた理由を考察することは、今後の漂流ゴミ回収の効率化を図る上で有益であると考えられる。そこで、HFレーダーで求めた両実験時における湾奥部の残差（25時間移動平均）流に基づいて、両者に差が生じた原因について考察した。

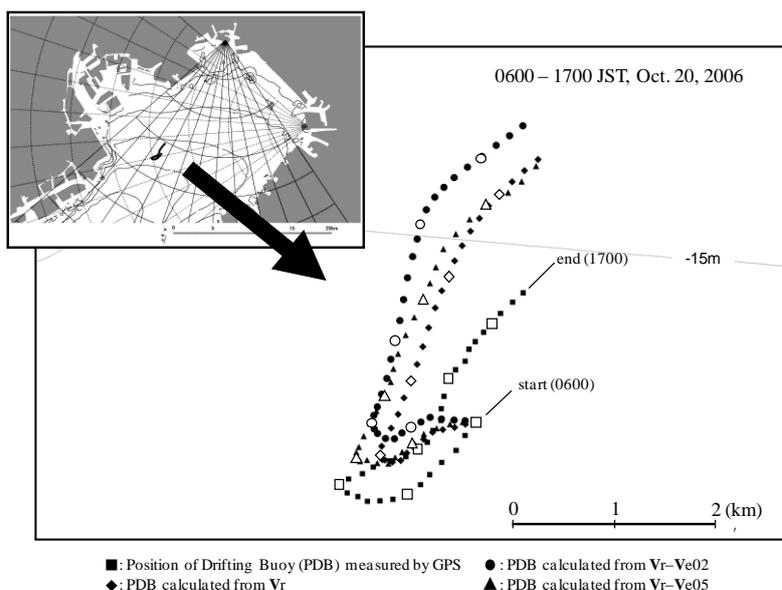
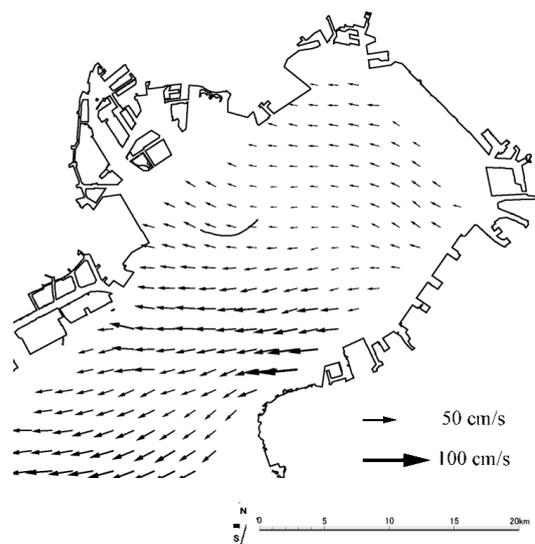


図3-15 2006年10月20日における約6時間の漂流ブイ追跡実験結果。

図3-16に午前10時における湾奥部の残差流を漂流ブイの軌跡と共に示す。10月30日における残差流は北東風の影響を受けた形になっており、湾奥から湾中央へ向かうにつれて流速が徐々に大きくなり、流向は徐々に反時計回りに回転していた。ただし、その変化は穏やかであり、漂流ブイを放流した海域では流向・流速ともほぼ同様であったと考えられる。したがって、HFレーダーの空間分解能（1.5km）は実際の流れ場を把握するのに十分であったと考えられる。10月20日は海上風が非常に弱かったため、10月30日とは異なり海上風の影響を受けたような流れにはなっていない。いくつかの水平循環流が隣り合った形で存在している。漂流ブイを放流した海域は4つの循環流の境界付近、すなわち双曲点付近に位置していたことが分かる。双曲点付近の流れ場をHFレーダーによって正確に計測するためには、実際の流れ場の空間構造を十分に把握できるだけの空間分解能が必要となる。空間分解能が十分でない場合、仮にHFレーダーが0.5m層の流れを計測していたとしても、0.5m水深の電磁流速計データとは異なってくる。つまり、10月20日において両者に差が生じた原因の一つとして、漂流ブイを投入した海域が双曲点付近に位置しており、HFレーダーの空間分解能がその付近の水平構造を正確に把握するには不十分であったことが考えられる。

このように複雑な流れ場において長時間の漂流計算を行う場合にはHFレーダーの水平分解能が重要となる。特に、水平循環流が隣り合う双曲点付近では、HFレーダーで推定した位置における循環流構造が実際と異なった場合、両者の位置の差が時間と共に急激に拡大する可能性もある。レーダーの空間分解能を向上させることは、短波帯における電波の利用状況を考えると現状では困難である。複雑な流れ場における漂流物の追跡を行う際には、確率的な考え方を取り入れ必要もあるだろう。

(a) 1000 JST, Oct. 30, 2006



(b) 1000 JST, Oct. 20, 2006

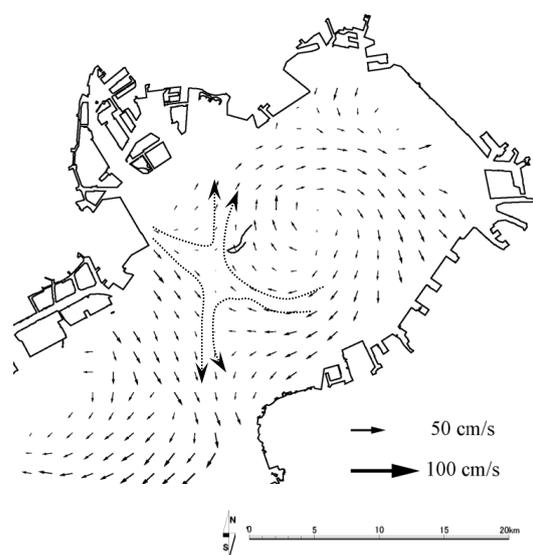


図 3-16 2006年10月30日(a)と20日(b)における表層残差流分布と漂流ブイの軌跡(実線)。

(4) 流れ場から見た五島列島西岸における洋上ゴミ回収の実現性について

HF レーダー観測と数値モデルの併用によって五島列島周辺に発生する潮汐フロントの位置を上手く特定すること出来た。HF レーダー観測期間の人工衛星画像を確認したところ、潮汐フロントは、成層が発達する6月～8月にかけての大潮時に顕著となる可能性が高いことが分かった。また、潮汐フロントは、沖合のフロントと異なり発生場所と発生時期がはっきりしていることから、ここに集積するゴミの回収計画の策定は比較的容易である。しかしながら、成層期にのみゴミ回収専用の船を五島列島に配置することは現実的ではない。ゴミ回収専用の船ではなく、漁船など五島にある船の有効利用等を考えるべきであろう。

FTLEの季節変動から、五島列島西岸沖において漂流ゴミを回収するには、10月が最も効率的であると考えられる。しかしながら、北よりの風が卓越し始める10月の海象条件(波浪)は厳しく、実際の回収作業という観点からは10月が効率的であるとは言えない。今後は、ゴミ収束域の発生頻度に加え、発生場所(港からの距離)や海象条件等を総合的に判断した洋上ゴミ回収の効率性について検討していきたいと考えている。

GPS漂流ブイの追跡実験およびFTLE解析結果から、渦の生成が活発で双曲点が頻繁に出現していると考えられる10月における漂流物追跡は比較的困難であると推測される。一方、渦の発生が低調であり流れ場が比較的一様である春から夏場にかけては高精度の漂流物追跡が可能である。冬季においても北西風による吹送流が卓越し、流れ場は比較的一様であるが、海象条件が厳しいため洋上回収は現実的ではないと考えられる。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

主な科学的成果は、HFレーダー観測と力学系理論を応用したゴミ集積海域の特定方法を提案したことである。具体的には、Finite-time Lyapunov Exponent (FTLE)の計算に基づくLagrangian

Coherent Structure (LCS) のマッピングを行い、LCS の位置と渦度分布や人工衛星画像による SST/chl. a 構造との比較、さらには、LCS と空撮による漂流ゴミ分布との比較を行い、本提案方法の精度検証や物理的根拠を考察した。これらの比較から、1) 渦度極大域の周囲に顕著な LCS が発生すること、2) LCS と SST/chl. a フロントは基本的には対応しているが、カオス的混合過程よりも乱流的な混合過程が支配的なフロントは FTLE 分布からは検知できないこと、3) 風圧流の影響を受けない漂流ゴミの集積域は FTLE 分布から精度良く予測できる可能性が高いこと、4) 五島列島西岸沖においては LCS の発生には明確な季節変動があり、傾圧不安定による渦生成の活発な秋季に顕著な LCS が発生していることを示した。全て実測に基づくこれら項目の比較検討は、分担者の知る限り世界で初めてであり、したがって、実測に基づいた 1)~3) の結果もまた世界で初めてである。さらに、2年以上の長期連続観測に基づく LCS の季節変動をそのメカニズムまで含めた形で示した例も分担者の知る限りこれまでに無い。これらについては、現在 *Geophysical Research Letter* に投稿中である。

(2) 地球環境政策への貢献

本研究で提案した FTLE 分布に基づくゴミ集積海域の特定方法は、今年度（平成22年度）国土交通省中部地方整備局が運用している伊勢湾における漂流ゴミ回収支援システムに応用される予定である。また、今後、東京湾、大阪湾、紀伊水道、有明海における HF レーダー解析と人工衛星画像等を利用し他の海域における本提案方法の有効性を検討し、国土交通省全国海洋環境・技術課長会議等の場で示すと共に、それらの海域で運用されているゴミ回収支援システムへの応用展開を図っていく。

6. 引用文献

- 1) Haller, G. and G. Yuan (2000): Lagrangian coherent structures and mixing in two-dimensional turbulence, *Physica D*, 147, 352-370.
- 2) Shadden, S. C., F. Lekien, and J. E. Marsden (2005): Definition and properties of Lagrangian coherent structures from finite-time Lyapunov exponent in two-dimensional aperiodic flows, *Physica D*, 212, 271-304.
- 3) 日向博文, 諸星一信, 金津伸好 (2008): HF レーダーによる漂流ゴミ回収効率化の試み. 沿岸海洋研究, 45, 105-114.
- 4) 日向博文, 金津伸好, 佐藤健治, 松岡建志, 藤井智史, 高尾敏幸 (2005): HF レーダーによる東京湾の M2 潮流観測. 沿岸海洋研究, 43, 51-60.
- 5) Sun, Y.-J. and A. Isobe (2008): Lagrangian H/U^3 values computed around fronts using a fine-resolution numerical model and ferryboat-monitored SST dataset. *J. Phys. Oceanogr.*, 38, 2575-2586.
- 6) Waugh, D. W., E. R. Abraham, and M. M. Bowen (2006): Spatial variations of stirring in the surface ocean: a case study of the Tasman Sea, *J. Phys. Oceanogr.*, 36, 526-542.
- 7) Lapeyre, G. (2002): Characterization of finite-time Lyapunov exponents and vectors in two-dimensional turbulence, *Chaos*, 12, 688 - 698.
- 8) Olascoaga, M. J., F. J. Beron-Vera, L. E. Brand, and H. Koçak (2008): Tracing the early development of harmful algal blooms on the West Florida Shelf with the aid of Lagrangian

- coherent structures, *J. Geophys. Res.*, 113, c12014, doi: 10.1029/2007JC004533.
- 9) 2008年度長崎県水産白書(2009), 164pp.
- 10) Onitsuka, G. and T. Yanagi (2005): Differences in ecosystem dynamics between the northern and southern parts of the Japan Sea: Analyses with two ecosystem models, *J. Oceanogr.*, 61, 415-433.
- 11) Guo, X. and T. Yanagi (1998): Three-Dimensional structure of tidal current in the East China Sea and the Yellow Sea. *J. Oceanogr.*, 54, 651-668
- 12) Matsumoto, K., T. Takanezawa and M. Ooe (2000): Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: A global model and a regional model around Japan. *J. Oceanogr.*, 56, 567-581.

7. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) 日向博文, 諸星一信, 金津伸好 “HFレーダーによる漂流ゴミ回収効率化の試み”, *沿岸海洋研究*, 45, 105-114, 2008.
- 2) Seino, S., A. Kojima, H. Hinata, S. Magome and A. Isobe “Multi-sectoral Research on East China Sea Beach Litter Based on Oceanographic Methodology and Local Knowledge” *Journal of Coastal Research, Special Issue 56*, 1289-1292, 2009.
- 3) Hinata, H., N. Kanatsu, and S. Fujii: Dependence of Wind-Driven Current on Wind Stress Direction in a Small Semienclosed, Homogeneous Rotating Basin, *J. Phys. Oceanogr.* (in press)

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 日向博文 “漂流ゴミの効率的な回収方法に向けた短波海洋レーダーの利用”, *土木技術*, 第64巻, 第5号, 75-79, 2009.
- 2) 片岡智哉, 日向博文 ” 漂流・漂着ゴミ問題に関連する法令と活動事例の整理”, *国土技術政策総合研究所資料*, No. 548, 2009.

(2) 口頭発表(学会)

- 1) 日向博文 “HFレーダーによる漂流ゴミ回収効率化の試み”, *日本海洋学会春季大会講演要旨集*, 2007.
- 2) 日向博文, 磯辺篤彦, 清野聡子, 馬込伸哉 ” 五島列島西岸におけるHFレーダー観測—市民と研究者が協働する東シナ海沿岸における海岸漂着ゴミ予報実験—”, *日本海沿岸域における海況モニタリングと波浪計測に関する研究集会*, 2007.
- 3) Watanabe, H., A. Isobe and H. Hinata “Hindcast modeling of driftwood behavior on the East China Sea Shelf”, *Proc. of 14th PAMS/JECCS Workshop*, 2007.
- 4) Isobe, A., S. Seino, H. Hinata, S. Magome, and A. Kojima “East China Sea marine-litter

prediction experiment conducted by citizens and researchers”, Workshop on “Establishment of cooperative sea under common understanding on the marine environment of the East China Sea”, 2007.

- 5) 馬込伸哉, 日向博文, 清野聡子, 小島あずさ, 高橋 暁, 磯辺篤彦 “東シナ海沿岸における海岸漂着ゴミ予報実験: 漂流漂着ゴミの空撮と定量化手法の検討”, 海洋学会西南支部・海洋気象学会・水産海洋学会合同シンポジウム(水産大学校), 2007.
- 6) 日向博文, 前田一行, 磯辺篤彦, 清野聡子, 馬込伸哉 “五島列島西岸におけるHFレーダー観測”, 日本海洋学会春季大会講演要旨集, 2008.
- 7) 日向博文, 磯辺篤彦, 清野聡子, 馬込伸哉 “五島列島西岸におけるHFレーダー観測—市民と研究者が協働する東シナ海沿岸における海岸漂着ゴミ予報実験—”, 日本海洋学会春季大会講演要旨集, 2008.
- 8) 日向博文, 藤井智史, 富森康貴, 金津伸好 “風により駆動される閉鎖性海域の表層流”, 日本海洋学会秋季大会講演要旨集”, 2008.
- 9) 前田一行, 磯辺篤彦, 日向博文 “数値モデルと短波海洋レーダーを併用した五島西岸における潮目位置検出の試み”, 日本海洋学会秋季大会講演要旨集, 2008.
- 10) 清野聡子, 小島あずさ, 五島宏, 由比良雄, 佐藤千綾, 大我かおり, 日向博文, 馬込伸哉, 磯辺篤彦 “五島列島福江島北部海岸における海岸漂着ゴミの季節変動”, 日本海洋学会秋季大会講演要旨集, 2008.
- 11) 日向博文 “五島列島西岸沖表層残差流場と漂流ゴミ集積域との関係について”, 日本海洋学会春季大会講演要旨集, 2009.
- 12) 磯辺篤彦, 日向博文, 加古真一郎, 吉岡俊 “風洞水槽実験に基づく漂流物の風圧流速の定式化”, 日本海洋学会春季大会講演要旨集, 2009.
- 13) Seino, S., Kojima, A., Hinata, H., Magome, S., and Isobe, A. “Multi-Sectoral Research on East China Sea Beach Litter Based on Oceanographic Methodology and Local Knowledge”, 10th International Coastal Symposium, 2009.
- 14) Hinata, H. “Lagrangian analysis on the surface current field west of Goto Islands based on High-Frequency ocean radar data”, Proc. of 15th PAMS/JECCS Workshop, 2009.
- 15) 日向博文 “東シナ海における漂着ゴミ予報実験”, 日本沿岸域学会研究討論会講演概要集, 2009.
- 16) 日向博文 “五島列島西岸沖表層残差流場と漂流ゴミ集積域との関係について”, 日本海洋学会春季大会講演要旨集, 2009.
- 17) 日向博文, 片岡智哉 “五島列島西岸沖表層流動場のラグランジュ解析”, 日本海洋学会秋季大会講演要旨集”, 2009.
- 18) 馬込伸哉, 日向博文 “空撮による漂流ゴミ洋上回収の効率化と集積予報の精度検証”, 日本海洋学会秋季大会講演要旨集, 2009.

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催(主催のもの)

・漂流・漂着ゴミの科学—東シナ海・海ゴミプロジェクトの成果と展開(2008年12月11日、長

崎大学総合教育研究棟2F多目的ホール、観客77名)

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし

(6) その他

なし

D-071 市民と研究者が協働する東シナ海沿岸域における海岸漂着ゴミ予報実験

(4) 空撮による漂流ゴミ収束域の調査

独立行政法人産業技術総合研究所

地質情報研究部門 沿岸海洋研究グループ 馬込伸哉

〈研究協力者〉 独立行政法人産業技術総合研究所 地質情報研究部門
 沿岸海洋研究グループ 高橋 暁
 愛媛大学沿岸環境科学研究センター 加古真一郎

平成19～21年度合計予算額 30,168千円

(うち、平成21年度予算額 11,986千円)

上記の予算額は、間接経費を含む。

[要旨] 五島列島大串海岸に設置したウェブカメラによって、漂着ゴミの90分毎の画像データを一年半にわたって蓄積した。そして、サブテーマ(1)と共同で、漂着ゴミの海岸被覆面積の時系列を算出するシステムを開発した。これによって、漂着ゴミは海岸において単調に増加するわけでも、また減少するわけでもなく、一カ月程度の時間スケールで大きく増減を繰り返すことが明らかになった。つづいて、HFレーダーを用いた漂流物の洋上集積情報(サブテーマ(3))の精度検証を行うべく、夏季の大潮期にセスナ機による洋上撮影を実施した。特に、風圧流の影響を受けやすい発泡スチロールと、受けにくい自然漂流物(流れ藻等)の、撮影日における空間分布を求めた。発泡スチロールの分布は、レーダー観測が予想する集積水域に整合しなかった。しかしながら、風圧流の影響を受けにくい自然漂流物の発見場所は、予想された集積位置に整合していた。これによって、表層海流を計測するHFレーダーを用いた漂流物の集積情報は、風圧流の影響を受けやすい漂流物では精度が落ちるが、風圧流の影響を受けにくい漂流物の集積情報には十分に有効であることが証明された。さらに、船舶曳航型バルーンおよびセスナによって海面を撮影し、画像の色彩をCIELUVのUV座標上で第1～第4象限に分類して、第3象限を海、第1象限を海ゴミとする簡易な方法より、画像から準リアルタイムで漂流物を自動検出する手法を開発した。この検出方法を、2009年9月に鹿児島周辺に大量に漂流した流木の航空写真画像に適用して有効性の検証を行った。また、空間解像度の粗い人工衛星の画像データに対しては、近赤外領域の波長帯を用いた検出が有効であることを示した。

[キーワード] ウェブカメラ、海岸ゴミ被覆面積、セスナ機空撮、バルーン空撮、漂流物の準リアルタイム検出

1. はじめに

近年に増加の一途をたどる洋上漂流ゴミや海岸漂着ゴミは、深刻な環境問題となっている¹⁾。こうした漂流・漂着ゴミ(海ゴミ)削減には、発生量の抑制と同時に回収効率の向上が重要であろう。実際、海ゴミの回収・清掃活動は、世界各地のNGO/NPOによる市民活動、国家、地方公共団体、地域の観光業者や水産業者によって古くから取り組まれているものの、古くから変わらない手作業では莫大な労力もむなしく、回収効率が上がっているとは言いがたい。特に、岩や石などが混在する海岸における回収作業は困難を極め、機械化も難しく、今後効率が上がる見込みも少ない。一方、洋上での回収作業は機械化が可能であり、実際に我が国ではゴミ回収船による定期的な清掃作業が行われている海域もある。しかし多くの場合、漂流・集積する時期や場所の特定が難しいため、その効果は必ずしも高くはないのが現状である。例えば、2006年の夏季に、長崎県を中心とした我が国の東シナ海沿岸域に大量の流木が押し寄せた。また、2009年の夏季に台湾を直撃した台風に伴い、その後に沖縄から鹿児島にかけて大量の流木が漂流し、高速船の欠航や漁船の破損などの被害を出した。周辺に集積・滞留した流木は、地元の海運船や漁船の運航を著しく阻害したため、ゴミ回収船による緊急の洋上回収が試みられたが、これらは極めて難航し、被害は数週間にも及んで継続することとなった。かくして被害の現場では、漂流・漂着ゴミの発生量を抑制するための発生源と発生要因の特定だけでなく、漂流・漂着する時期・場所の高精度予報や、洋上回収の効率化が求められている。

プロジェクトD-071「市民と研究者が協働する東シナ海沿岸における海岸漂着ゴミ予報実験」では、海ゴミの発生源の特定と、漂流予報実験が試みられてきた。まず、長崎県の五島列島・福江島・八朔海岸の踏査により、漂着ゴミの種類や量の二カ月毎の時系列を得る(サブテーマ(2))。そしてこれらの情報を元に、数値モデルにより発生源が逆推定され、予報風を用いた漂流経路や接近時期の予報が行われる(サブテーマ(1))。さらに短波海洋レーダー(HFレーダー)により、五島列島西岸沖での海面流速の時空間分布が観測され、漂流ゴミの集積しやすい場所が特定される(サブテーマ(3))。このように想定された漂流時期や洋上集積場所の精度・信憑性・有効性を評価するためには、ゴミの漂流・漂着量を実際に観測し、何らかの形で定量化する必要がある。たとえば人工衛星では、雲や衛星軌道の関係上、撮影の場所とタイミングが制限され、沿岸域特有のノイズが高解像度の識別を困難にする。さらに、一般的な船上撮影では視界が制限される。このように、これまでは漂流・漂着物量の効率的な数量化手法には確立したものがなかった。

2. 研究目的

サブテーマ(4)は、漂流・漂着ゴミの漂流量・漂着量の定量化手法として、セスナ機やウェブカメラからの遠隔撮影を提案する。また、船舶曳航型の気球(バルーン)や航空写真、そして人工衛星画像から、準リアルタイムで漂流ゴミを自動検出するアルゴリズムを提案する。このような手法を駆使して、海岸や洋上における回収効率の向上に資することを目的とする。

3. 研究方法

(1) ウェブカメラを用いた海岸漂着ゴミ連続観測²⁾

Webカメラを五島列島・奈留島・大串海岸に2基設置し、2008年5月より、90分毎の漂着ゴミに覆われた海岸撮影を2009年10月まで実施した(図4-1)。一号機は大串海岸において最もゴミ漂着

の多い場所を、二号機は海岸全体の撮影を行うものである。二基のカメラによって撮影された画像は、その都度ウェブサーバに送信され、<http://umigomi.image.coocan.jp/webcam.php> においてリアルタイムに公開中である。

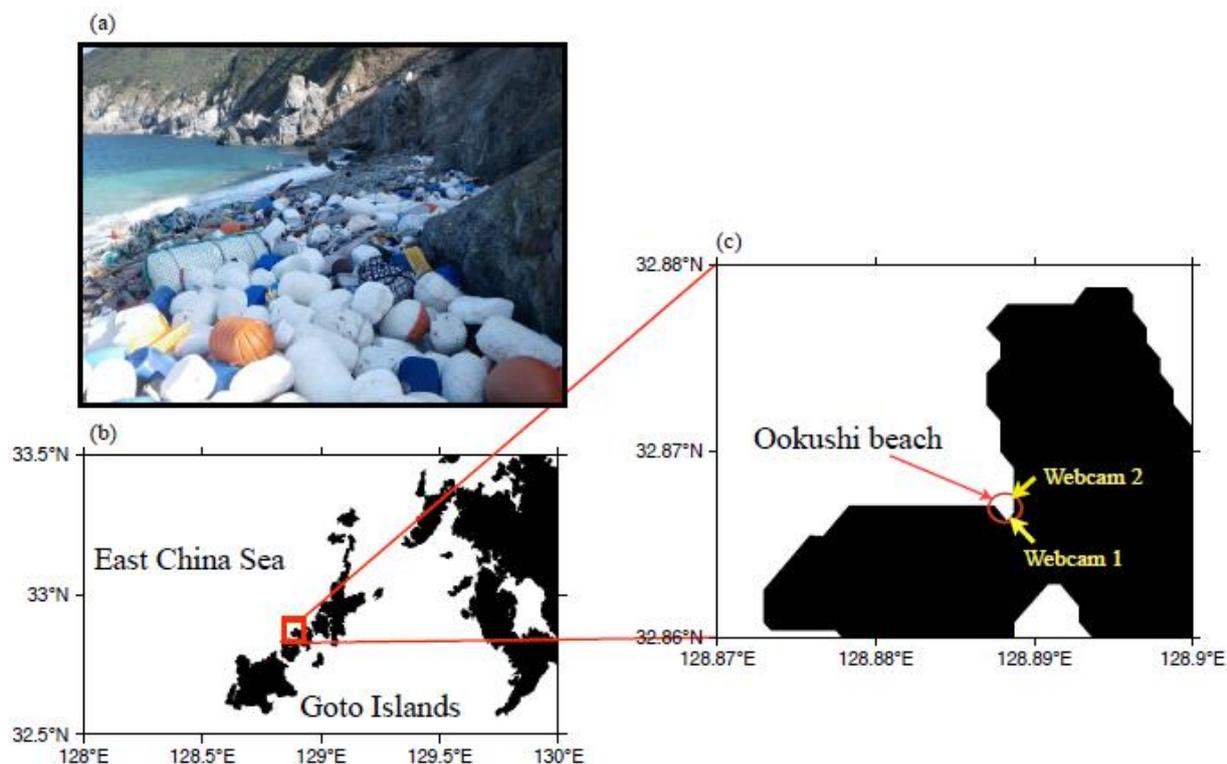


図4-1 ウェブカメラ設置位置の写真(a)と位置(b)、カメラの視線方向(c)

ウェブカメラによって得られる画像は、海岸の漂着ゴミに対して斜め上方から撮影されているため、漂着ゴミの量を定量的に把握するためには、真上から見た画像に変換するための射影変換処理が必要である。そこで、2009年5月と10月に射影変換を行うための基準点測量を行い、Magome et al. (2007)³⁾の方法によって真上画像に変換した(図4-2左から中)。データは全てJPG画像であるので、このままでは客観的な解析は出来ない。そこで本研究では、JPG画像から得られるRGB値を用いて輝度を計算し、閾値によってゴミか否かを判断するとともに、ゴミと判定された画素を白く変えた(図4-2右)。海岸におけるゴミは白色のブイが多く、輝度が高いものをゴミと判断することが妥当であった。試行錯誤の結果、本研究では適正な閾値を90以上とした。画像処理後の解像度は、ウェブカメラ1と2で、それぞれ10 cm²および50cm²であるので、ゴミと判定された画素数にこれらの値を掛けることで、ゴミによる海岸被覆面積を算出した。この面積をウェブカメラ画像取得間隔の90分毎に求め、約一年半にわたる被覆面積の時系列を得た。



図4-2 ウェブカメラ1が得たjpg画像(左)と射影変換後の真上画像(中)、輝度より判定した漂着ゴミ位置の画素分布(右図の白い画素)

(2) セスナ空撮による漂流物の洋上集積位置の検出

HFレーダーを用いた漂流物の洋上集積情報(サブテーマ(3))の精度検証を行うべく、セスナ機による洋上撮影を実施した。H20年度のアンケート⁴⁾により、漂流ゴミが夏季の大潮時に、最も頻繁に発見されることが示された。そこで、2009年の夏季の大潮時(7月23日と9月8日)と冬季の小潮時(12月23日)に、セスナ機助手席から海面を目視観察しながら、セスナ機下部からビデオ撮影を行った。H19年度に設置されたHFレーダーにより、五島列島西岸沖の漂流物集積水域の特定が2009年1月以降は可能となっている。この手法では、レーダーで計測範囲内の漂流物集積水域がリアプノフ指数の水平分布を指標に特定される(詳細はサブテーマ(3)の詳細様式を参照のこと)。このとき、リアプノフ指数が高いほど、漂流ゴミが集積しやすい。本サブテーマでは、リアプノフ指数と比較するための漂流物の水平分布を得るために、まずは目につきやすい発泡スチロールの分布を目視によって調査した。さらに、セスナ下部にビデオカメラを設置し、セスナの軌跡上の画像を取得し分析に供した。

(3) 準リアルタイム海ゴミ検出画像処理

H20年度に出願された特許(8(3)参照)では、海ゴミの被覆面積などの極めて精度の高い定量化を行うことが可能であった。しかしながら膨大な処理演算時間を要するため、船上やセスナ上での解析には不向きであった。そこで、簡易な海ゴミ識別処理を、準リアルタイムで行うことを試みた。簡易な海ゴミ識別処理とは、画像の色彩をCIELUVのUV座標上で第1～第4象限に分類し、第3象限を海、第1象限を海ゴミ(自然漂流物を含む)とする方法である。第2と第4象限は反射光などのノイズとした。

画像解析のために、2009年8月4日に五島福江島西方沖にて、デジタルカメラを搭載した船舶曳航型バルーン(図4-3)およびセスナによる洋上撮影を実施した。また、2009年9月の漂流木災害時の東シナ海における航空写真(海上保安庁提供)、さらには2009年9月の漂流木災害の直前である2009年8月28日に、大量の流木が沖縄西方海域で線状に集積した様子を撮影した人工衛星ALOS/AVNIR-2画像を利用した。

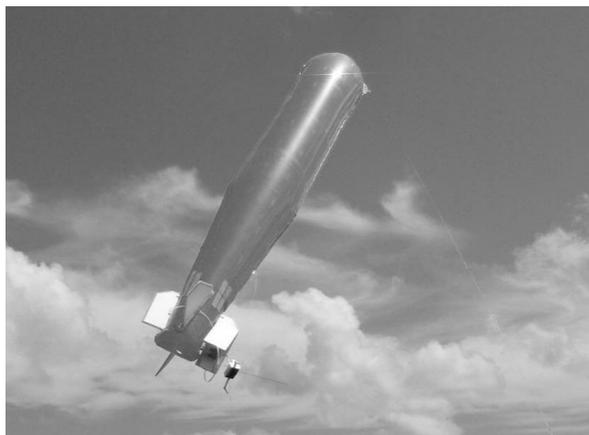


図4-3 デジタルカメラを搭載した船舶曳航型バルーン

4. 結果・考察

(1) ウェブカメラを用いた海岸漂着ゴミ連続観測

図4-4にウェブカメラ画像を解析することで得た、2008年5月から2009年10月までの漂着ゴミによる海岸被覆面積の時系列を表す。大串海岸の全景を撮影するウェブカメラ2の変動と、ウェブカメラ1の変動は有意な相関関係にあり、ウェブカメラ1による時系列だけで、海岸全体のゴミ蓄積量を良く反映することが示唆される。

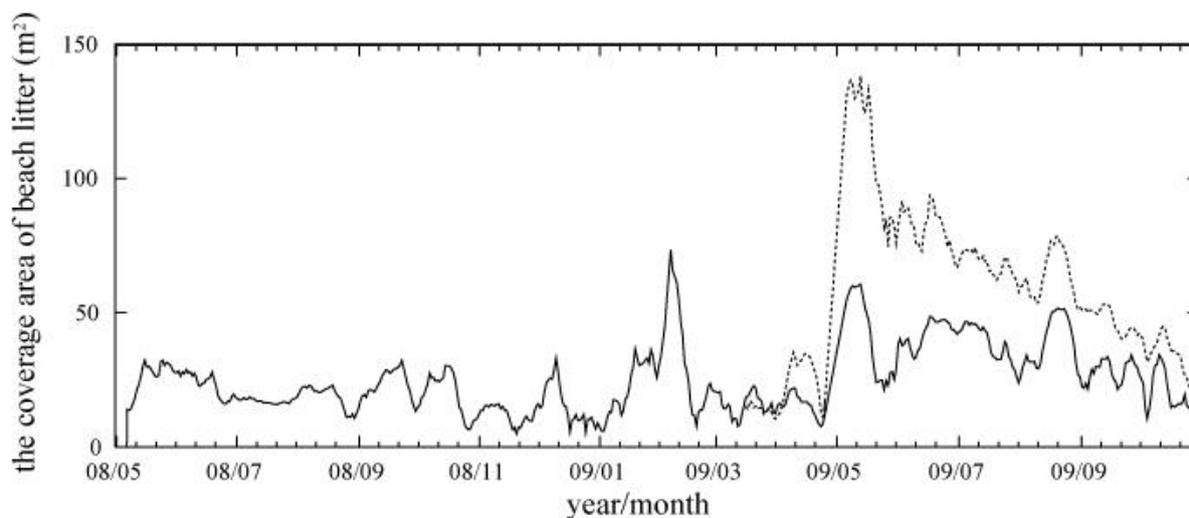


図4-4 大串海岸における海岸漂着ゴミ被覆面積の時系列。実線はウェブカメラ1(図4-1参照)で点線はウェブカメラ2のもの。短周期の変動(主として照り返しが輝度に反映された人為的なもの)を除去するため一週間の移動平均を掛けている。

図から分かる様に、漂着ゴミ量は単調に増えるわけではなく、増減を繰り返す。また、季節・経年変化と共に、一ヵ月以下の短い時間スケールでも変動をしていることがわかる。このような漂着ゴミ量の増減を決める要因を調べるために、QuikSCAT/Seawindsによって観測された海上風データとの比較を行った。図4-5は、漂着ゴミ量の時間変化と、海上風の東西・南北成分それぞれの比較結果を示している。ただし、相関係数は、60日間のデータを使い（横軸の日付を中心とした前後30日）、移動平均を計算する要領で一日ずつずらしながら計算したものである。正の相関係数は、西風（西から東へ）および南風成分の強化が漂着ゴミの増大と関係している事を示しており、図4-5においては、東西（南北）成分との相関係数は正（負）の期間が長い。これは、北西風の強化と漂着ゴミ量の増大が直接関係していることを示しており、大串海岸が北西方向に大きく開いた地形である事を考慮すれば、風圧流によって直接漂流ゴミが海岸に打ち上げられていることが示唆される。

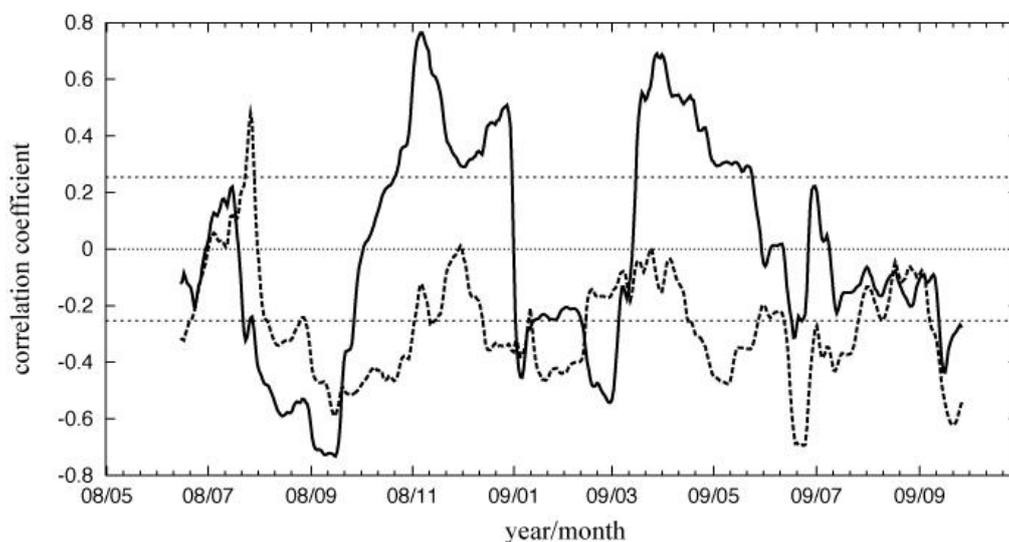


図4-5 漂着ゴミ量の時間変化と海上風データの比較結果。実線は東西成分、点線は南北成分との相関係数をそれぞれ示す。

(2) セスナ空撮による漂流物の洋上集積位置の検出

洋上撮影を行った2009年の9月8日には、HFレーダーの欠測により、リアプノフ指数との比較は出来なかった。また、2009年12月23日は、発泡スチロールや自然漂流物が発見されなかった。しかしながら、2009年7月23日には、発泡スチロール及び自然漂流物が目視観測され、特に自然漂流物はビデオ画像にも記録されているので、リアプノフ指数分布と比較することが可能であった。取得した画像をみると、発泡スチロールは必ずしもリアプノフ指数の高い領域に分布することはない（図4-6）。しかしながら、観測期間中に捉えることに成功した自然漂流物（流れ藻など）の塊が、リアプノフ指数の最も高い海域で観測された（図4-7, 図4-8, 9に空撮画像）。これは、リアプノフ指数がHFレーダーにより観測された表層流の履歴のみを用いて算出されているため、風圧流の影響が考慮されていないことに起因すると考えられる。これらの結果は、風圧流の影響を受けにくい自然系の漂流ゴミなどに対しては、リアプノフ指数による集積予報が有効

であることを示している。

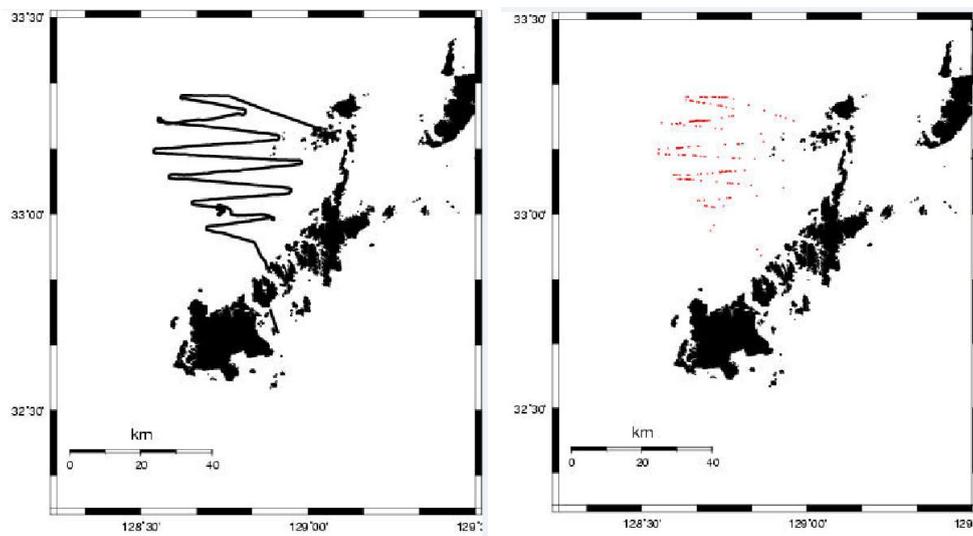


図 4-6 セスナ巡回撮影の航路（左図）と発泡スチロール発見場所（右図のドット）

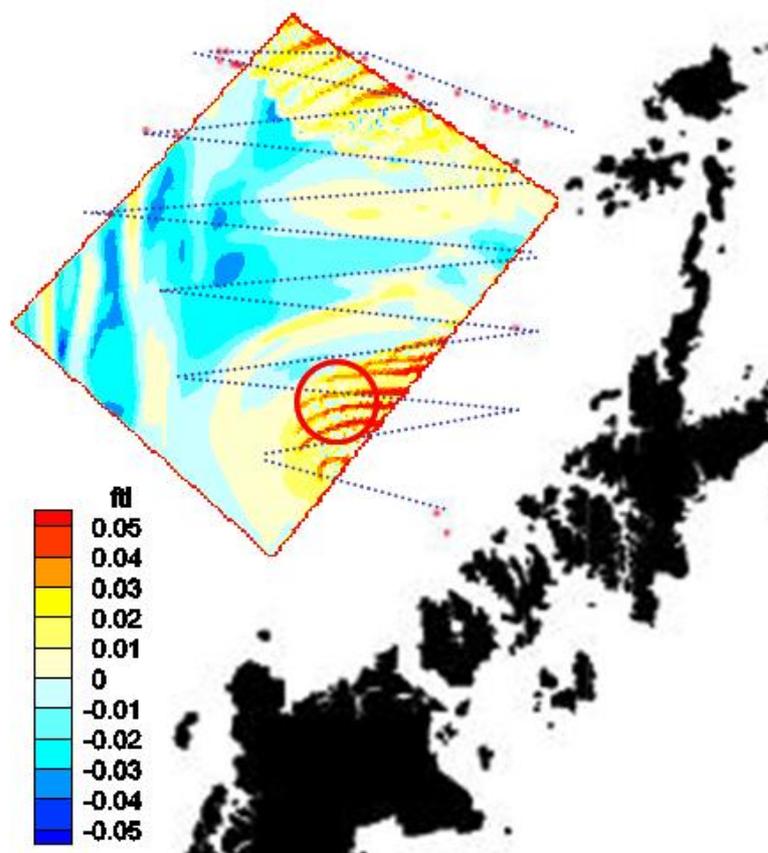


図 4-7 HFレーダーにより予報されたリアプノフ指数分布（値が大きいほど集積しやすい）と自然漂流物の発見位置（大きい丸）

(3) 準リアルタイム海ゴミ検出画像処理

2009年7月に船舶曳航型バルーンにより撮影された画像を船上のノートパソコンに無線送信し、その画像を5分以内に解析し、海ゴミの発見を自動で知らせるシステムの実用試験に成功した(図4-8)。本サブテーマの手法では、CIELUV色素空間中で第1象限に位置する画素を赤色に、それ以外を黒に塗った。この処理を施すと、左図に写った褐色の漂流物(目視によって流れ藻であることが確認された)は、右図で赤いドットとして抽出されている。これは、褐色漂流物のみが第1象限に位置する唯一の被写体であることによる。この画像処理法を用いると、一見すると判別しがたいセスナからビデオ撮影された自然漂流物(図4-7)もまた、容易に識別することができた(図4-9)。さらに、前述した2009年9月の漂流木災害時の航空写真(海上保安庁提供)においても、漂流物を明瞭に識別することができた(図4-10)。

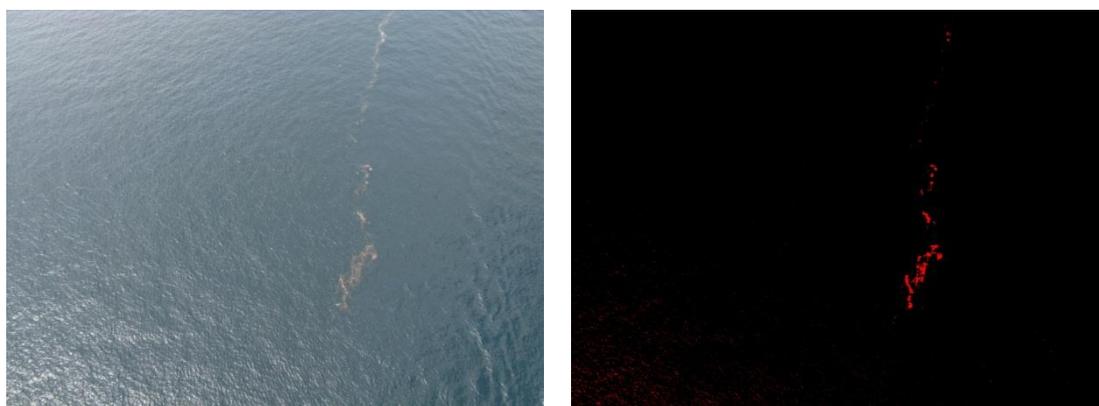


図4-8 バルーン画像と画像解析で検出された自然系漂流物



図4-9 セスナ画像で検出された自然系漂流物

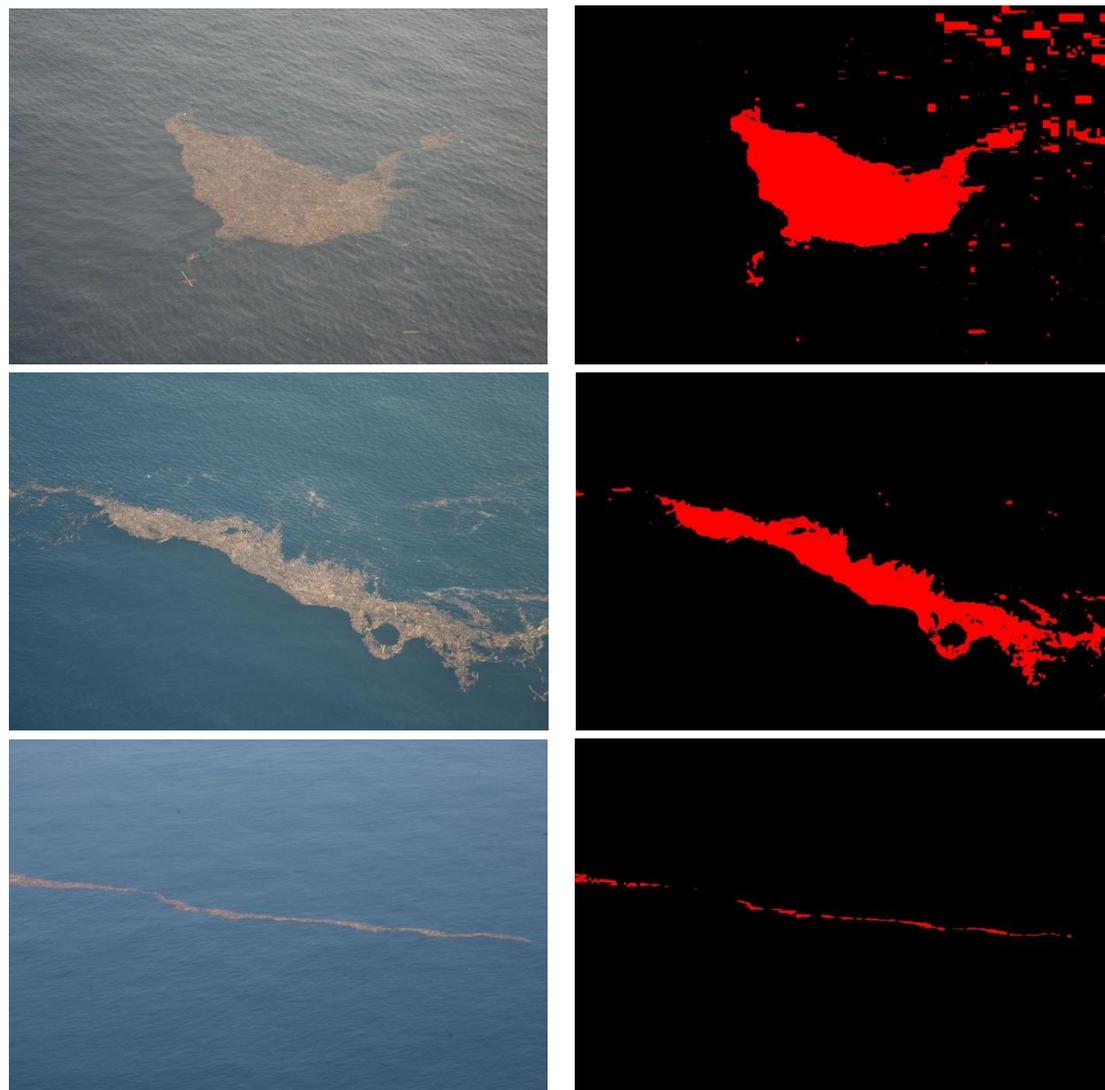


図4-10 航空写真（左図：海上保安庁提供）と画像解析で検出された自然漂流物

2009年9月の漂流木災害の直前である2009年8月28日に、大量の流木の塊が沖縄の西方海域で線状に集積した様子が人工衛星ALOS/AVNIR-2により撮影された（図4-11）。漂流木の線状の集積は、可視画像であるTrueColor画像（図4-12a）だけでなく、近赤外領域の波長帯を含むFalse color（同b）やNatural color（同c）においても鮮明に映し出されていた。

これらの流木集積域が、反射率から計算される植生指標NDVI分布（図4-13）にも鮮明に映し出されていたことは興味深い。また、その約16分後に撮影された別の人工衛星画像MODIS/AQUAの海面水温画像により、漂流木の集積した海域が、海面水温の水平勾配が大きい海域、すなわち水温前線周辺であることが示された（図4-14）。さらに、MODIS/AQUAのクロロフィル-aの画像により、漂流木の集積した海域が、極めて植物プランクトンの多い海域であることが明らかになった（図4-15）。これらのことは、自然漂流物が大量に集積していた海域周辺は、水温前線に典型的に生物生産の高いことを示している。このことは、前線に集積しがちな自然漂流物の検出には、前述のような色素空間における判定法以外にも、植物の検出に有効な近赤外画像が効果的であることを強く示唆するものである。

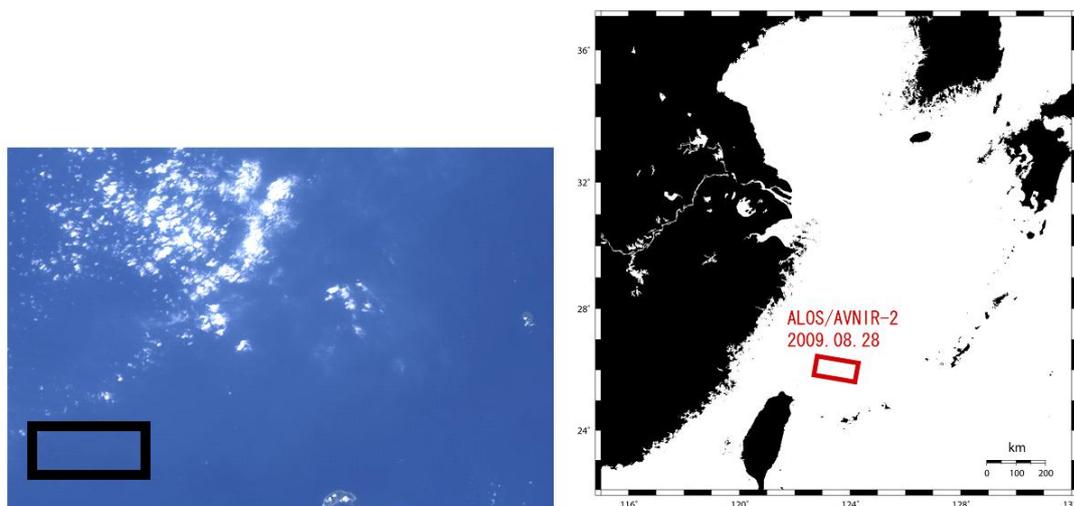


図 4-1-1 人工衛星画像とその位置

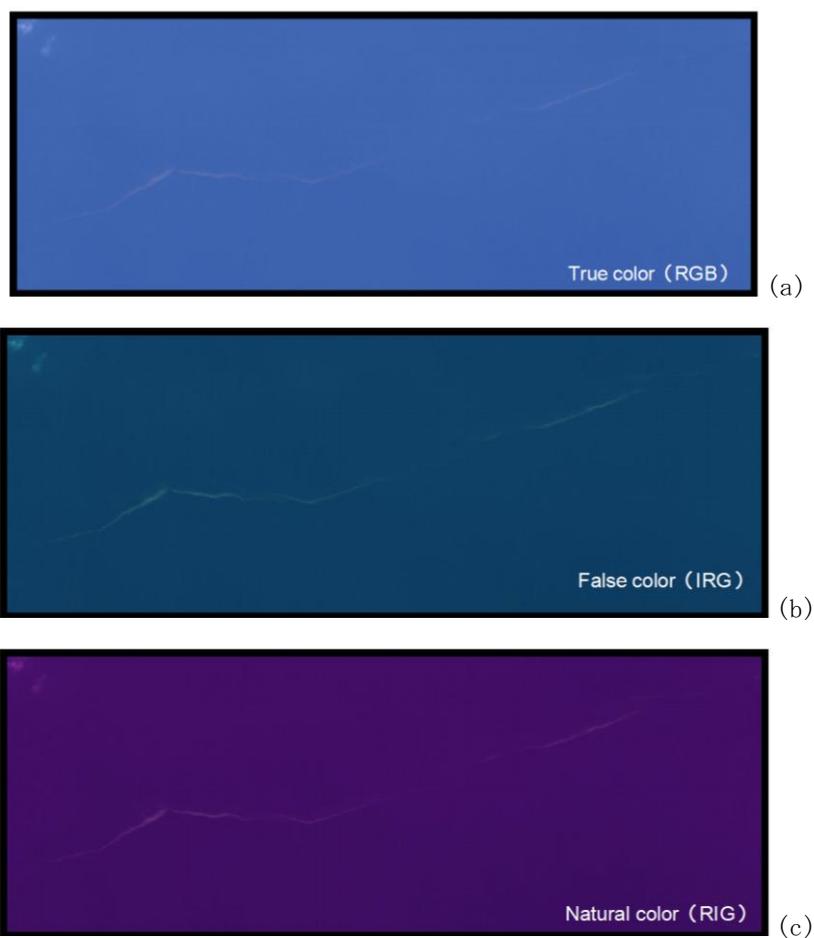


図 4-1-2 人工衛星画像ALOS/AVNIR-2で捉えた沖縄西方海域における漂流木の集積 ((a)左図の四角領域)

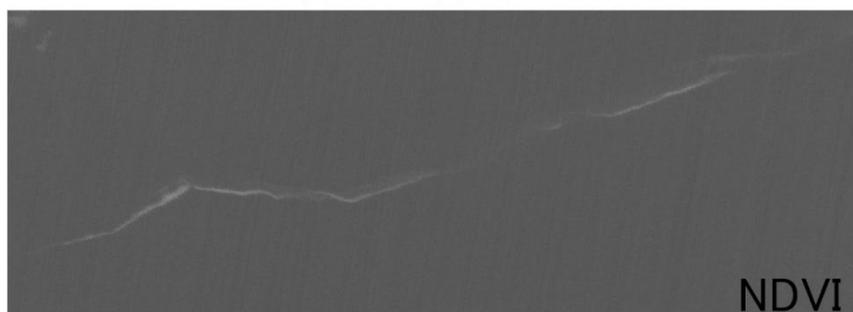


図 4 - 1 3 人工衛星画像ALOS/AVNIR-2の反射率から算出した植生指標NDVI分布

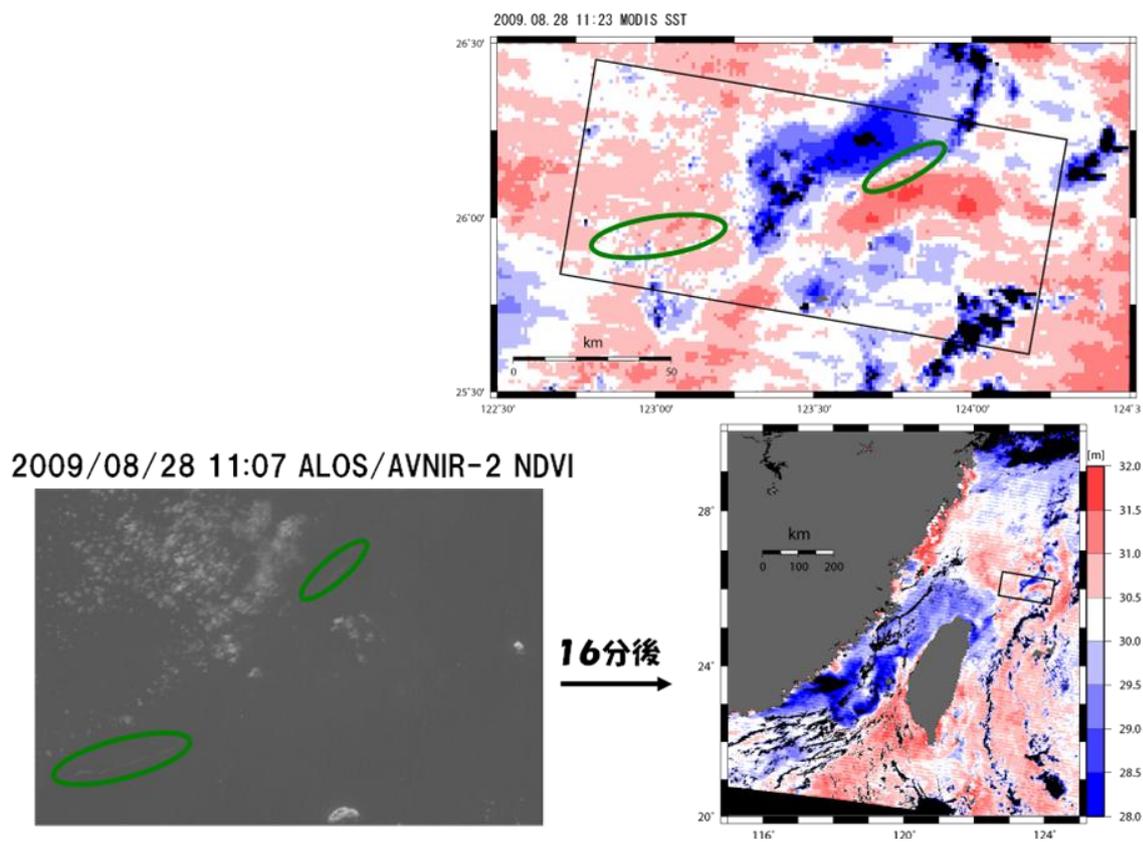


図 4 - 1 4 MODIS/AQUA衛星画像で捉えられた海面水温画像(右下図)。その拡大図が右上図。左下図がその16分前に撮影されたALOS/AVNIR-2衛星画像のNDVI値。楕円は流木が検出された場所

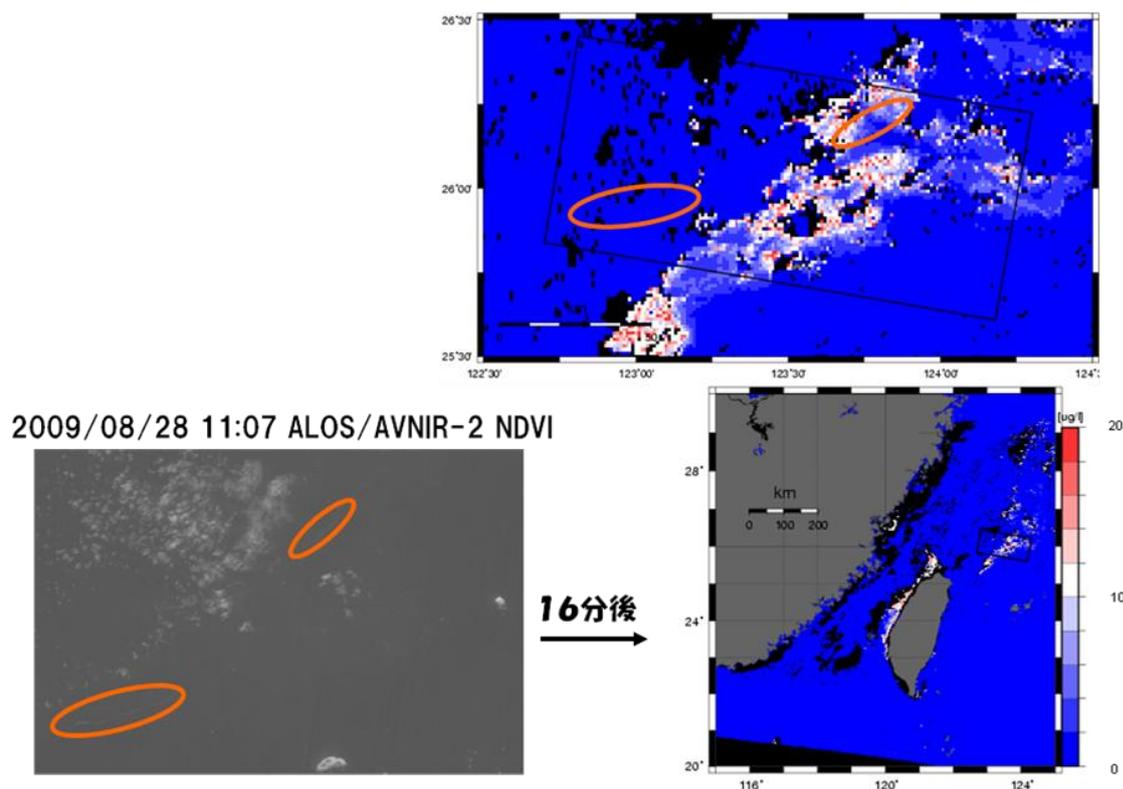


図4-15 MODIS/AQUA衛星画像で捉えられた海面クロロフィル-a画像(右下図)。その拡大図が右上図。左下図がその16分前に撮影されたALOS/AVNIR-2衛星画像のNDVI値。楕円は流木が検出された場所

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本サブテーマでは、セスナ機、バルーン、そしてwebカメラを利用した沿岸域の洋上および海岸ゴミモニタリング手法を開発研究した。洋上を移動する漂流物は、 $\pm 3\text{m}$ 程度の誤差で位置を確定することができる(特許出願中)。この手法は、海ゴミだけではなく、赤潮、クラゲパッチ、藻場、干潟、河川プルーム、流出油、流氷等の定量化はもちろん、海難捜索や航行安全への寄与も期待される。また、ウェブカメラによる海岸ゴミの連続撮影は本サブテーマが初めて成功させたものである。これによって、海岸漂着ゴミの一時間半ごとの被覆面積の時系列解析が可能となり、海岸ゴミの詳細な振る舞いの知見につながることを期待される。

(2) 地球環境政策への貢献

サブテーマ(1)の詳細報告に記載された通り、本サブテーマが開発したウェブカメラによるゴミ漂着量のモニタリングは、効率のよい海岸ゴミ清掃事業に道を拓くものである。今後、成果の公表機会をこれまで以上に持つことで、手法の普及に努めていく。本サブテーマの成果が海岸および洋上ゴミモニタリングで有効に活用されている状況を踏まえ、H20年度に国土交通省の漂流ゴミ回収船にバル

ーン撮影装置が導入された。今後も、船上バルーン撮影の装置・撮影システムを改良し、成果の広報・普及に努める。

6. 引用文献

- 1) 小島あずさ、眞淳平(2007)：海ゴミー拡大する地球環境汚染, 中公新書, 232p
- 2) Kako, S., A. Isobe, S. Magome (2010): "Seaquential monitoring of beach litter using webcams" Marine Pollution Bulletin, 60, 775-779.
- 3) Magome, S., T. Yamashita, T. Kohama, A. Kaneda, Y. Hayami, S. Takahashi and H. Takeoka (2007) : Jellyfish patch formation investigated by aerial photography and drifter experiment, J. Oceanogr., 63, 761-773.
- 4) 磯辺篤彦(2009)：市民と研究者が協働する東シナ海沿岸における海岸漂着ゴミ予報実験. p.161-204, In, 地球環境研究総合推進費平成20年度研究成果-中間成果報告集II-, 環境省地球環境局総務課研究調査室, 315p.

7. 国際共同研究等の状況

ウェブカメラによる漂着ゴミモニタリングは普遍性の高いものであり、韓国・全南大学校・Cho Yang-Ki教授の研究グループと共同で韓国南西部に一基を設置するプランを検討中である。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) Kako, S., A. Isobe, S. Magome "Seaquential monitoring of beach litter using webcams" Marine Pollution Bulletin, 60, 775-779.

<査読付論文に準ずる成果発表> (社会科学系の課題のみ記載可)

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 馬込伸哉、日向博文、清野聡子、小島あずさ、高橋暁、磯辺篤彦”東シナ海における海岸漂着ゴミ予報実験：漂流・漂着ゴミの空撮と定量化手法の検討”，水産海洋研究，72(4)，329-330，2008.

(2) 口頭発表(学会)

- 1) 馬込伸哉，日向博文，清野聡子，小島あずさ，高橋暁，磯辺篤彦：海洋学会西南支部・海洋気象学会・水産海洋学会合同シンポジウム(2007)「東シナ海沿岸における海岸漂着ゴミ予報実験：漂流漂着ゴミの空撮と定量化手法の検討」
- 2) 馬込伸哉・日向博文：日本海洋学会秋季大会(2009)「空撮による漂流ゴミ洋上回収の効率化と

集積予報の精度検証」

- 3) 加古真一郎・馬込伸哉・磯辺篤彦：日本海洋学会秋季大会(2009)「海洋数値モデルによる漂着ゴミ予報実験とその精度検証」
- 4) 加古真一郎・磯辺篤彦・馬込伸哉：日本海洋学会春季大会(2010)「Webカメラを用いた海岸漂着ゴミ連続観測」
- 5) 磯辺篤彦・加古真一郎・馬込伸哉：日本海洋学会春季大会(2010)「漂着ゴミの監視・予報技術を用いた海岸管理の効率化」

(3) 出願特許

- 1) 馬込伸哉：産業技術総合研究所；「洋上監視システムおよび方法」，特願2008-173740，2008年7月2日

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

- 1) 漂流漂着ゴミの科学（2008年12月11日、長崎大学多目的ホール、観客100名程度）

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 朝日新聞西部本社版及びAsahi.com（2009年10月24日、バルーンを用いた空撮実験の紹介）

(6) その他

特に記載すべき事項はない。