

ゴミのない美しい海を目指して
－漂流・漂着ゴミ等海ゴミの現状と対策－

沿岸海洋研究部長

戀塚 貴

ゴミのない美しい海を目指して

－ 漂流・漂着ゴミ等海ゴミの現状と対策 －

沿岸海洋研究部長 戀塚 貴

1. はじめに

沿岸域の環境問題については、これまでは水質や底質、生態系が注目されてきたが、最近では海洋を漂流し或いは海岸に漂着するゴミ（漂流・漂着ゴミ）などに代表される海ゴミの問題が、我が国だけではなく世界各国で注目されてきている。ゴミは、国内の河川や海岸等から出てくるものや船舶や漁業等の活動から発生するもの、海外から流れ着くものなど様々である。これらは、景観の悪化、漁業活動や船舶航行へ影響など、経済社会活動に様々な影響を及ぼすばかりではなく、海鳥など海域の生物の活動を阻害したり、プラスチック等のゴミに付着する化学物質が生態系に取り込まれる恐れがあることが指摘されている。また、増大する漂着ゴミの回収に当たっては、ボランティアや NGO の活動が主力をなしていること、運搬や処理費用が市町村に拠っておりその負担が大きいこと、人が立ち入ることのできない海岸においてはそもそも回収作業自体が困難であることなど、十分な対応が行われているとは言い難い状況にある。海底に沈むゴミは有効な回収手段もない。

漂流・漂着ゴミ等海ゴミのこのような影響を軽減するには、まず海洋への流出を防止すること、そしていったん流出したゴミは速やか海上で回収することが必要となる。

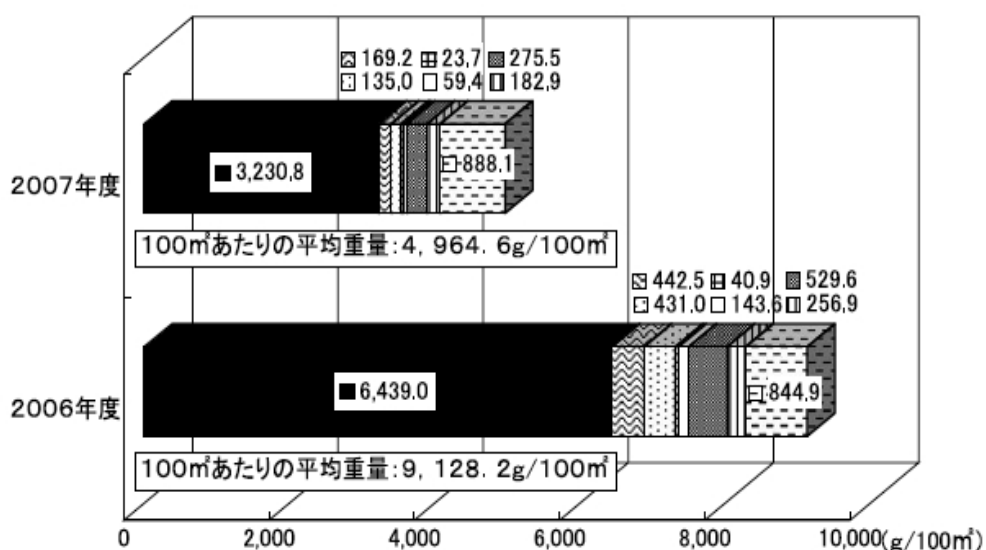
本講演では、漂流・漂着ゴミ等海ゴミについて、その現状と問題点、そして漂流・漂着ゴミの有効な回収に向けて国土技術政策総合研究所沿岸海洋研究部が行っている研究について紹介する。

2. 海ゴミとは

2. 1 海ゴミの種類

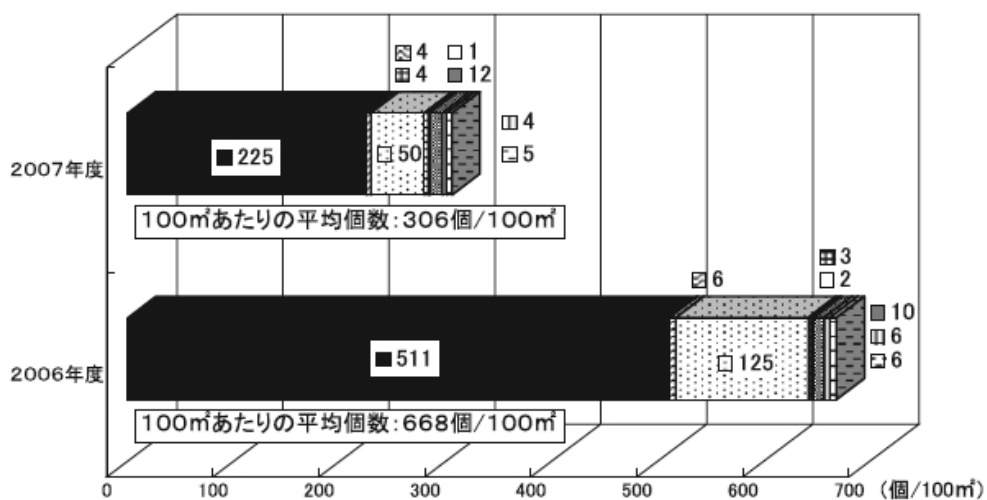
海洋にあるゴミ（海ゴミ）は存在場所で大きく分類すると、海面に漂うゴミ（漂流ゴミ）、海底に沈降するゴミ、そして海岸に漂着するゴミ（漂着ゴミ）に分けられる。図－1、図－2は（財）環日本海環境研究センターが2006年と2007年の2年間に全国100海岸で行った漂着ゴミの回収調査をまとめたものである。重量、個数ともにプラスチックが圧倒的に多く、重量で65～71%、個数で75%程度を占めている。また、海岸で比較的目立つ発泡スチロールは、重量では2.7～4.7%程度であるが個数では16～19%程度となっている。プラスチックは、自然界で分解しない、紫外線などで劣化し微細化すると回収不可能になる、海洋でPCBなど化学物質を取り込む等厄介なゴミとして認識されている。

■プラスチック類 □ゴム類 □発泡スチロール類 ▨紙類 □布類 ■ガラス・陶磁器類 ▨金属類 □その他の人工物



図－１ 漂着ゴミの平均重量（100㎡当たり）

■プラスチック類 □ゴム類 □発泡スチロール類 ▨紙類 □布類 ■ガラス・陶磁器類 ▨金属類 □その他の人工物



図－２ 漂着ゴミの個数（100㎡当たり）

（図－1， 2 出典：（財）環日本海環境協力センター「海辺の漂流物調査結果（データ集）」2007 年度）

2. 2 海ゴミの状態

海ゴミは漂流・漂着ゴミが我々の目に付きやすいが、ゴミの中でも海水より比重の大きいビンや缶等の金属製のゴミ、一部のプラスチックは海底に沈んでいく。図－3 は瀬戸内海における研究例であるが、年間で流入量のおおよそ16%、700 t のゴミが溜まっているという。海に沈むゴミは漂流・漂着ゴミと違い回収する手段が乏しく、沈んだゴミは年々堆積しているものと思われる。

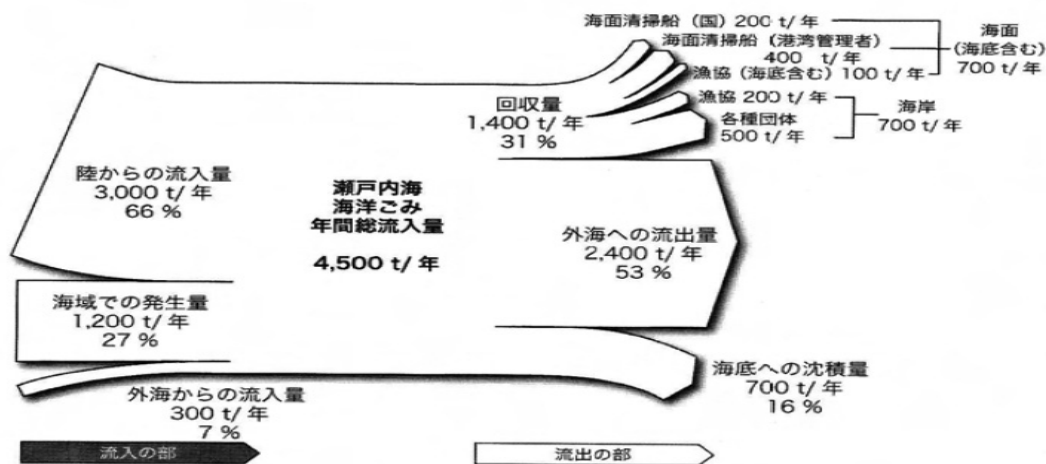


図-3 瀬戸内海における海ゴミの状況 (出典：2010日本沿岸域学会誌 藤枝ら)

2. 3 海ゴミの発生源

こうしたゴミはもともと自然界にあるものではないので、当然人間の活動域に発生源がある。それを陸上起因か水上起因かに分類したものを図-4に示す。陸上起因とは、山間部や田園地帯、都市等からはからずも下水道や河川に流れ出したり、或いは不法投棄(路上でのポイ捨てなども含む)による生活系、産業系のゴミである。水上起因とは、海上を航行する船舶からのゴミや漁業系のゴミなどのことを言う。発生源と

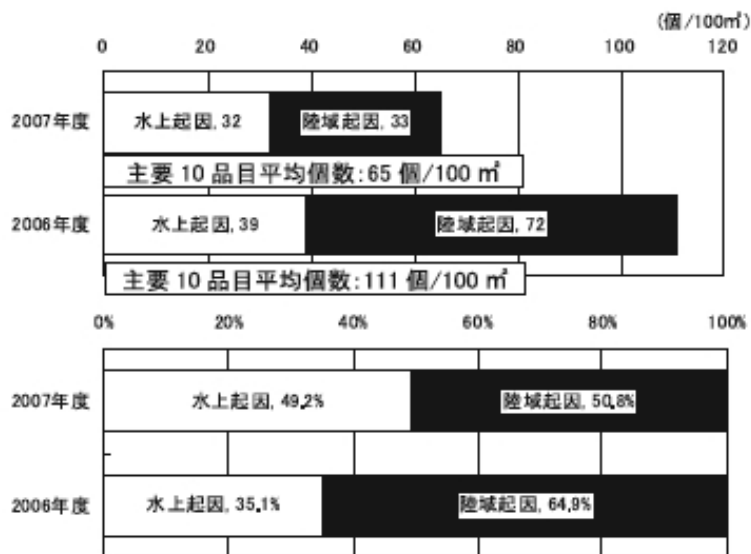
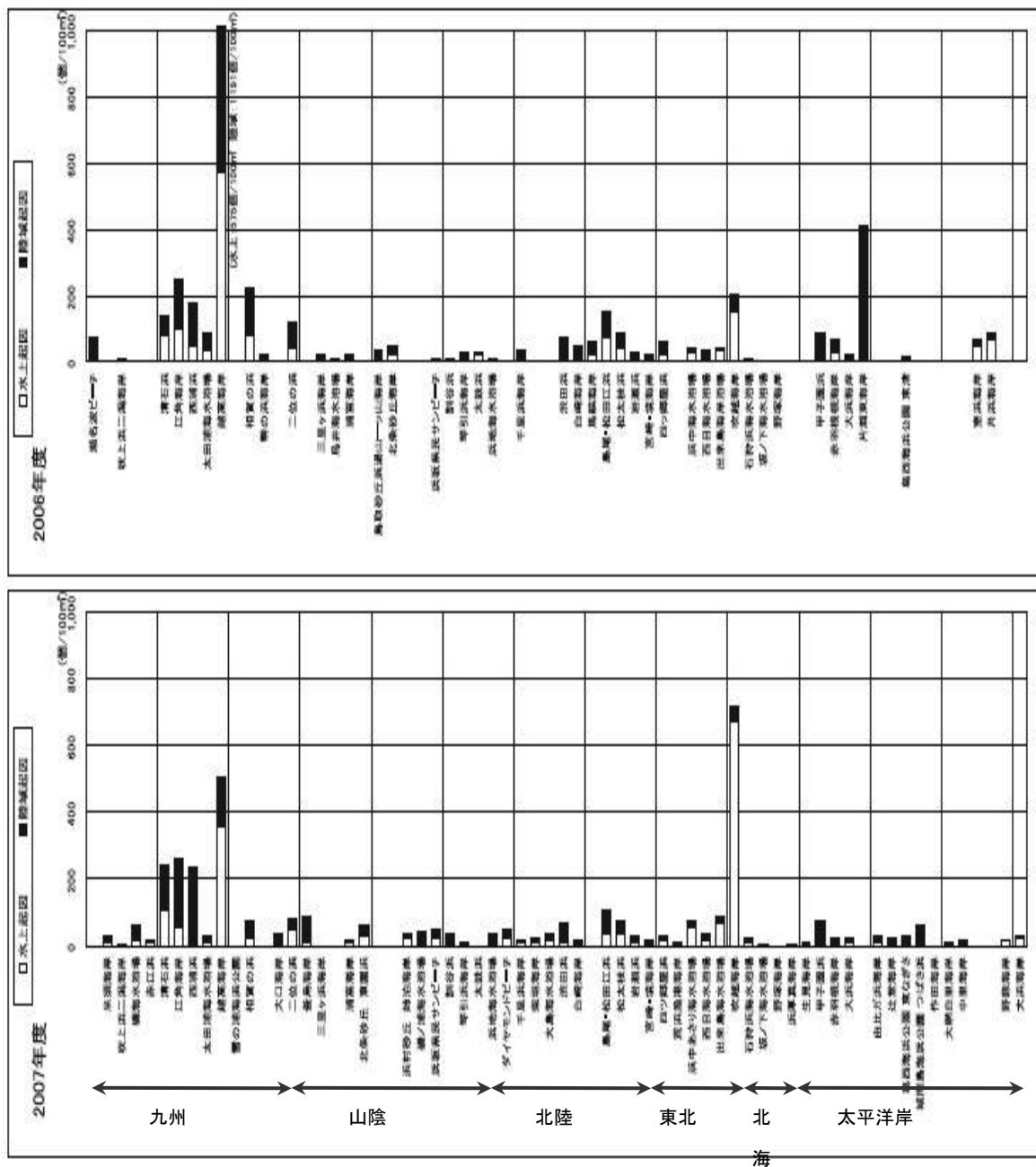


図-4 発生起因別個数 (100㎡当たり)

(出典：(財) 環日本海環境協力センター「海辺の漂流物調査結果 (データ集)」2007年度)

しては、陸上起因が50～65%と若干多いが、水上起因のゴミも多く、発生源対策を考える際陸上の対策だけではだめなことが伺える。

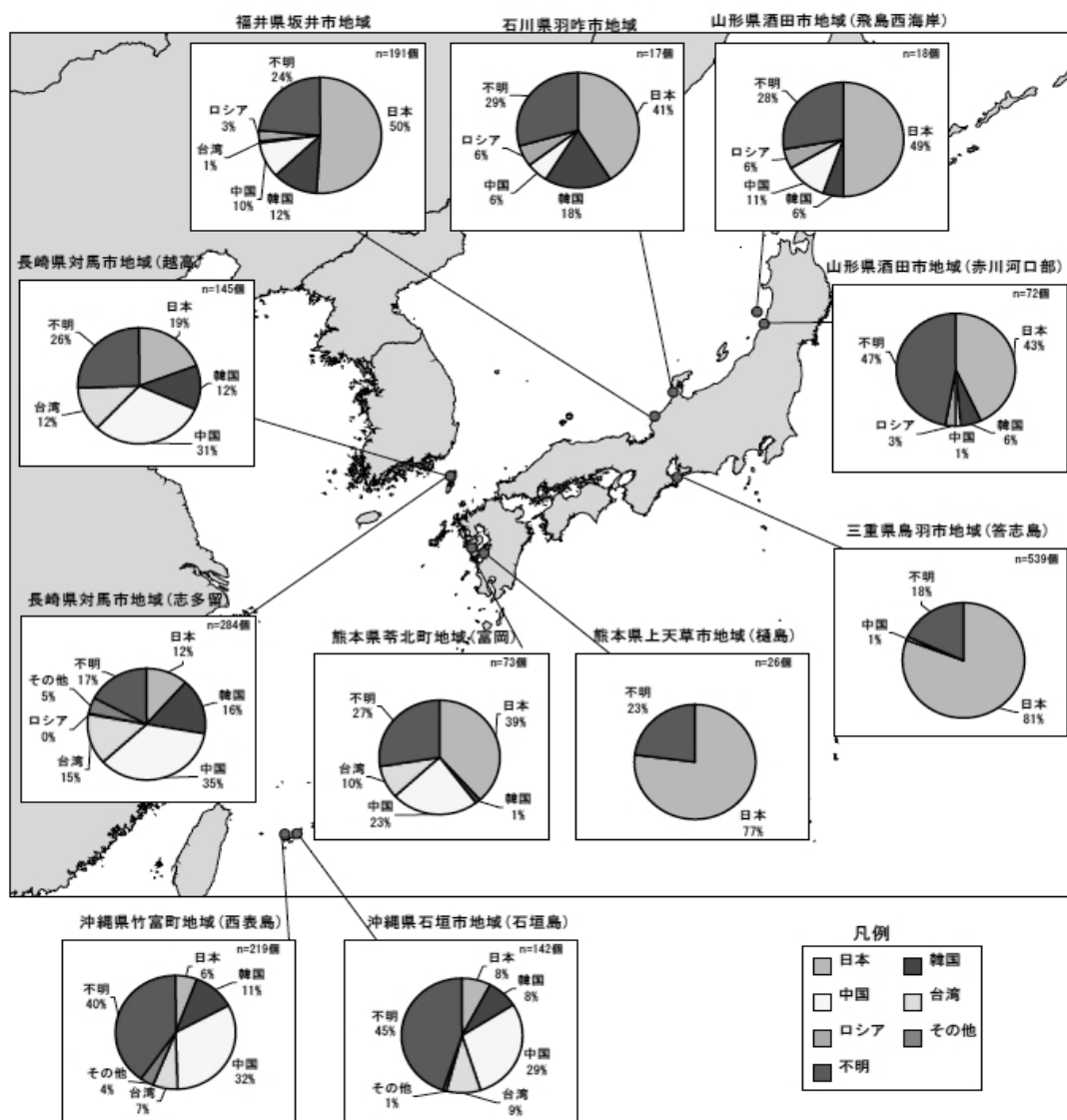
また、漂着地域別に陸上・水上起因を示したのが図-5である。地域により発生源割合が大きく異なることが伺えるが、九州や東北では水上起因(漁業系)のゴミの割合が大きく、太平洋側では陸上起因がほとんどである。地域によって海ゴミを減らす対策の対象が異なることがわかる。



図一5 地域別発生起因別個数 (100㎡当たり)

(出典：(財) 環日本海環境協力センター「海辺の漂流物調査結果 (データ集)」2007年度)

さらに、海ゴミは海洋を漂う事から、当然海洋に面する国々が発生源になっていることが容易に予想される。図一6 我国に漂着したペットボトルを国別に集約したものである。南西諸島や九州西部では中国のものが多く、九州から日本海を北上していくと、対馬では中国に加え韓国、台湾のものが多くなり、更に行くと日本のものが多くなる。一方、太平洋側では日本のものがほとんどである。南西諸島、九州西岸や日本海側では我国の対応だけでは海ゴミの問題は解決できない。



図ー6 ペットボットの国別集計 (個数)

(出典：環境省「漂流・漂着ゴミに係る国内削減方策モデル調査総括検討会報告書」2009年)

2. 4 海ゴミの影響

2. 4. 1 経済への影響

①景観の悪化

日本は長大な海岸線を抱えており、沿岸部では人口の集積が高いところが多く、また海水浴や観光地などの場も多い。更には、ヨットやウインドサーフィンなどマリンスポーツの場でもある。このようなところでの漂流・漂着ゴミ等は、景観の悪化を招き、地域や観光地としてのイメージダウン、レジャー客の減少につながる。ゴミの中には、針のついた注射器などの医療機器や薬品類などが混じっている場合などもあり、身体への直接的な影響も懸念される。



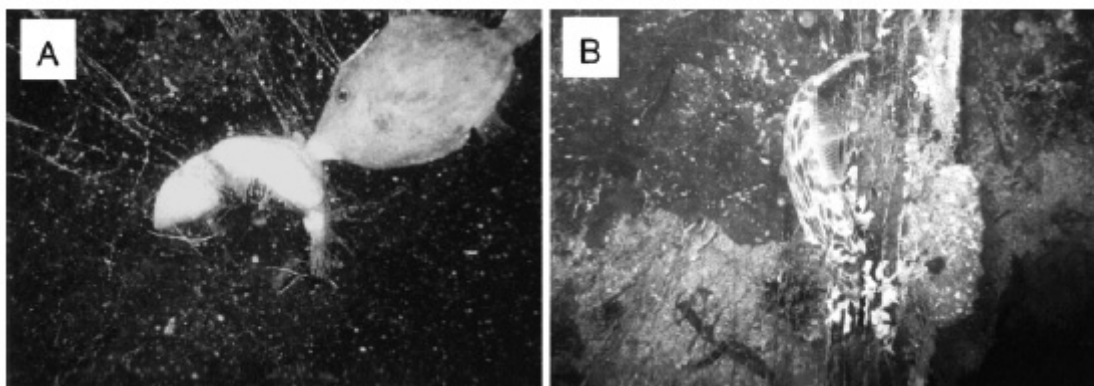
写真－１ 壱岐対馬国定公園の海岸



写真－２ 五島列島の海岸

②水産資源へのダメージ

細かく微細化したプラスチックが小魚や海苔、モズクなどの海藻へ混入したり、海底に堆積したゴミにより海老などいわゆる底ものの商品価値が落ちるなどの風評被害の危険がある。また、海ゴミによる漁網など漁具の破損などが生じている。特に漁具については、被害を受け予期せず海域に放出されたものや不法投棄によるものが、捕獲機能を有したままゴミとなり、もともと耐久性が高いため長期間にわたって魚介類を捕捉するなど、水産資源に悪影響を及ぼしていることが問題視されている。



写真－３ 廃棄された漁網に捕捉された魚介類

(出典：「逸失底刺網のゴーストフィッシング能力の経時的変化と死亡数推定」 仲島淑子 松岡達郎、日本水産学会誌 Vol. 70 (2004))

③船舶航行等の安全性の阻害

2009年9月に約5,000本の流木が東シナ海で発見された。これは、その前月に台湾に上陸した台風8号の影響だと思われるが、流木を回収し安全が確認されるまで鹿児島－種子島－屋久島間の高速船が全便欠航した。更に、25隻の漁船についてプロペラが破損する事態となり、地域の生活、経済に大きな影響を与えた。この3年前にも五島で大量の流木があり漁船や漁具等への被害が生じている。



写真一 4 2009.9. 東シナ海での流木回収状況 (出典：第 10 管区海上保安本部)

2. 4. 2 環境への影響

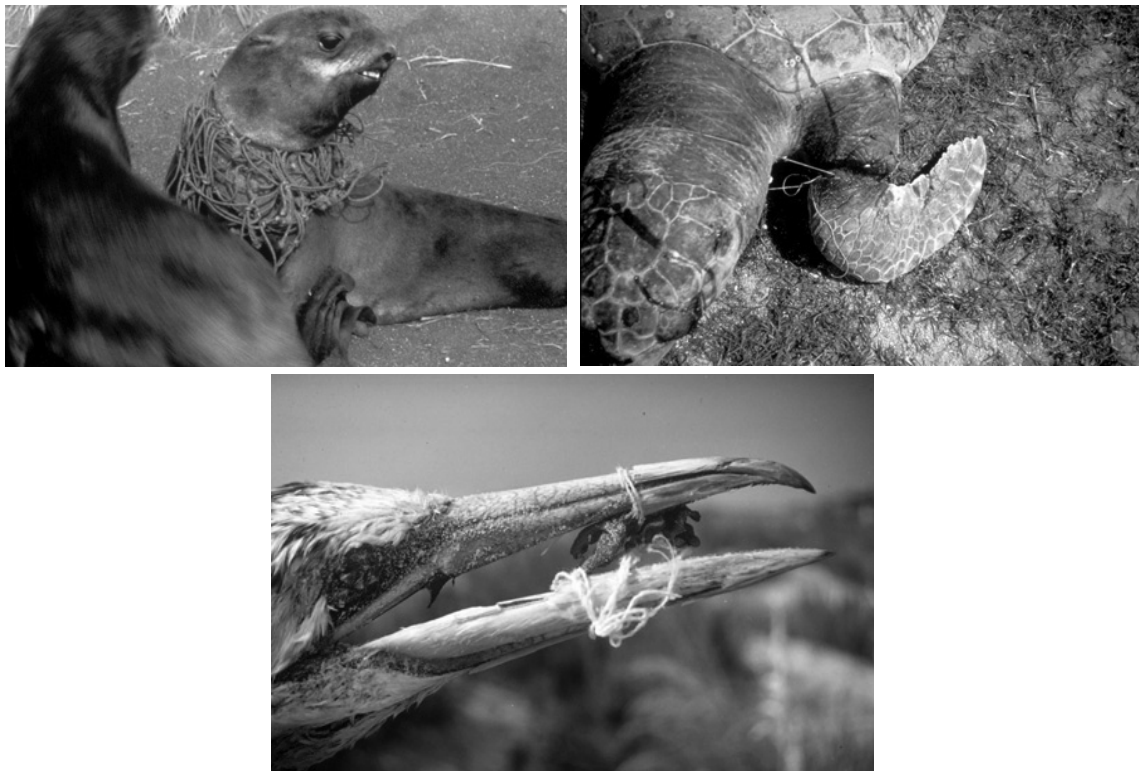
①生物への被害

漂流ゴミなどは海洋生物に直接的影響を与えている。例えばオットセイの首に漁網やロープが絡みついているのが世界の多くの海で目撃されている。また、海亀や海鳥に絡みつくと例も多数報告されている。漁網などは一旦絡みつくと自身でそれを取り除くことはほぼ不可能で、漁網自体はナイロンなどでできているため朽ちることがない。生物は体力の消耗、行動の制約、食物捕捉の困難などで最終的には命を落とすことが多い。プラスチックを餌と誤り魚や海鳥が誤飲、誤食していることも多い。ミッドウェー環礁では親鳥がヒナにプラスチック片を与えているのがしばしば目撃されているが、プラスチックは消化されないため胃に蓄積しヒナの成長や生命への影響が懸念されている。



写真一 5 海鳥の死骸と胃にあったと思われるプラスチックゴミ

(http://commons.wikimedia.org/wiki/Main_Page)



写真—6 体に漁網等が絡まったオットセイなど

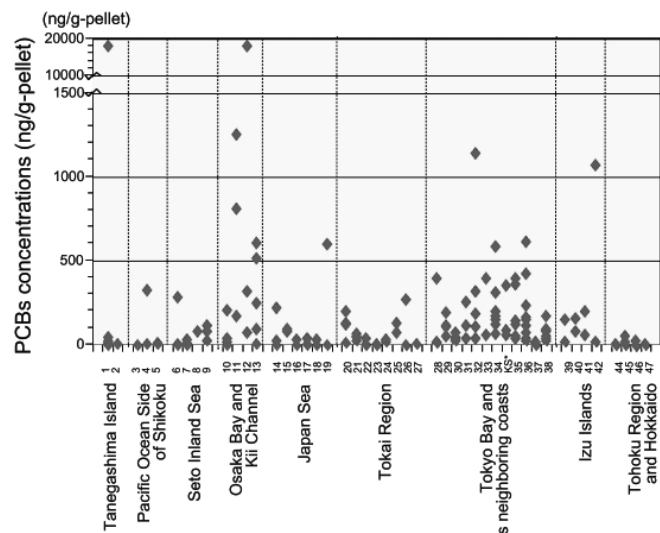
(<http://marinedebris.noaa.gov/>)

②生態系への影響

プラスチックは紫外線により微細化されるが、漂流中にこの表面に化学物質

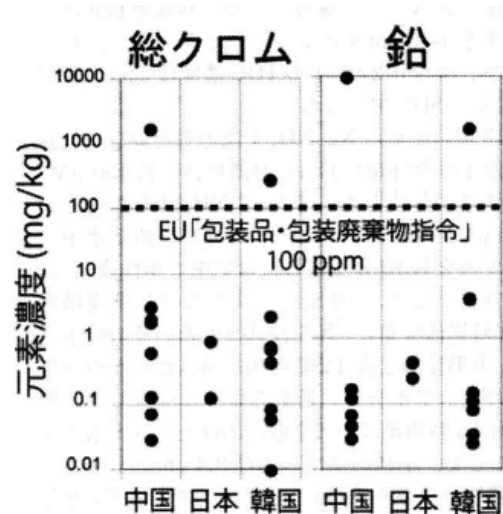
(DDT,PCB等)が吸着する。図—7は日本の海岸で採取されたレジンペレット（プラスチック製品等の原料）の表面に付着したPCBの状況を示しているものであるが、高濃度のものも観測されている。また、プラスチック内に添加物として含まれる有害物質

(重金属など)が海洋に溶出する。更に、図—8にあるように生産国によってはペット



図—7 レジンペレットに付着するPCB量 (出典：東京農工大学高田研究室 <http://www.tuat.ac.jp/~gaia/Index.html>)

ボトルのキャップにEU基準を大幅に上回るクロム、鉛が含まれていることも確認されている。これらが魚、鳥などの生物に取り込まれた場合の生態系への影響が危惧されるが、最近では生態系の底辺にある動物性プランクトンが微細プラスチックを捕食しているという報告もあり、その影響は甚大であると思われる。



図ー8 中国・日本・韓国の漂着ペットボトルキャップに含まれる総クロム、鉛
(出典：中島ら，日本海洋学会秋季大会、2010)

3. 海ゴミ対策の抱える問題

一旦海ゴミとなったものは、プラスチックのように自然に戻らないものが多いことから、回収処理を行うことが必要である。しかしながら、既述のようにその量は膨大であり、様々な種類があり、中には危険なものも存在する。また、近づくことのできない崖下などの場所での回収や、微細化したプラスチックの回収は困難を極める。回収しても、塩分や付着物によりリサイクルは難しく、焼却もできない。処理費用は例えば対馬市の場合年間に9億円程度かかるという試算であり、財政上の大きな負担はゴミの回収を躊躇させる。



写真ー7 注射針のついた注射器などの海ゴミ（五島の海岸にて）



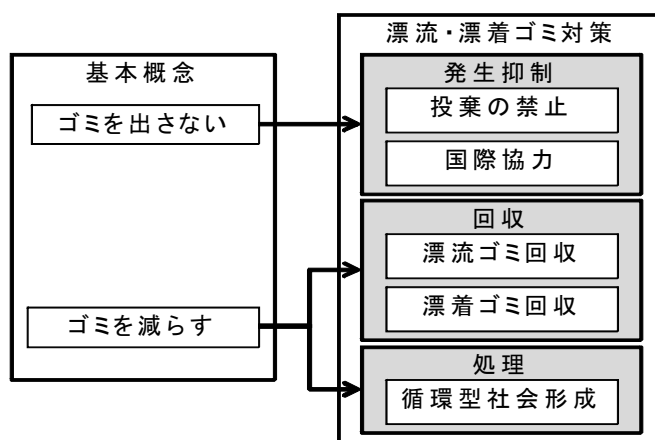
写真ー8 微細化したプラスチック

このような状況の中で、海ゴミの対策は「ゴミを出さない」（発生抑制）という川上から「ゴミを減らす」（回収、処理）という川下まで、総合的な対策を推進していくことが必要である。

発生抑制対策としては、陸や海での発生源において容易に物が流れ出ないような対策やポイ捨て、不法投棄などの更なる規制が必要である。また、海ゴミは諸外国を発生源とするものも存在することから、国際的な連携も重要である。

回収対策としては、海域で漂流しているゴミや漂着ゴミの効率的回収方法の検討が必要である。沈降したゴミの回収は現在有効な手段がないことから、これへの取り組みも今後重要となろう。

処理対策としては、現在リサイクルに向かない海ゴミを循環型で処理できるような技術開発が求められる。



図一 9 海ゴミの総合的対策

（出典：片岡・日向、国総研資料、2009）

4. 現在の国総研における研究状況

現在、国総研沿岸海洋研究部で海ゴミ対策として行っている漂流・漂着ゴミ対策に関する主な研究を紹介する。

4. 1 東シナ海沿岸における海岸漂着ゴミ予報実験

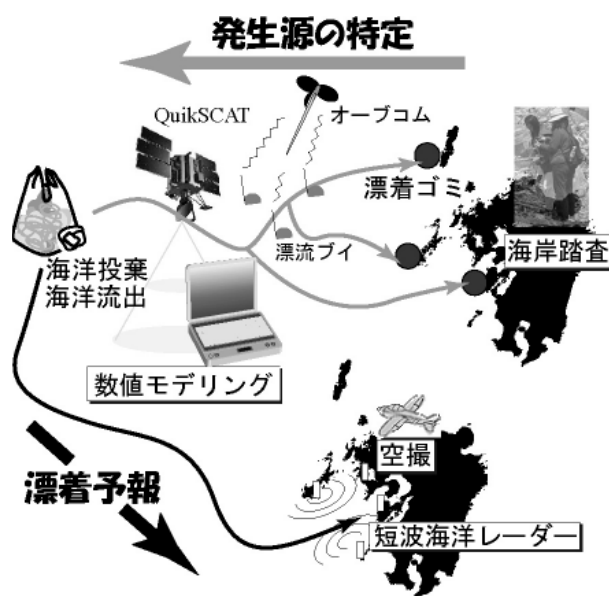
前節まで出述べてきたように、東シナ海に面した五島や対馬などの島嶼部や九州沿岸には大量の海ゴミが漂着し、その対応に苦慮している。そのため、「①発生する場所や時期を特定し、発生場所での各地域の抑制のための取り組みを促す。これは国際ルール作りのためにも有効なデータとなる。②ゴミの漂着時期の予想や沿岸でのゴミ収束域の特定を可能とすることにより、現在多大な費用や労力を要している海岸での回収作業の効率化やゴミ回収船による漂着前での回収が行える。」などの検討が必要とされた。

4. 1. 1 研究内容

本研究は、愛媛大学磯辺篤彦教授が代表となり、愛媛大学、九州大学、五島市、産業技術総合研究所、クリーンアップ全国事務局と国土技術総合研究所が連携して実施したものである。

図一10に研究の概略を示す。まず、五島列島福江島八朔海岸において2ヶ月に一度の割合で漂着ゴミの回収を行う。ゴミは種類別に個数・重量を計測しておく。ペットボトルやライター等はそのラベルから発生源を推測する。豊富な経験と多大な労力を要する漂着ゴミデータの取得は、NGOや地域住民の協力無しには不可能である。続い

てこれらのデータに基づいてコンピュータシミュレーションからゴミ発生源・発生時期・発生量を逆算する。さらにはこれらの計算結果を境界条件として五島列島へのゴミの漂着時期の予報を行う。洋上でゴミを回収するためには集積域の特定が必要である。そこで、短波海洋レーダ（HFレーダ）で得た五島列島西岸沖の表層流分布からリアルタイムに集積海域を推測する。時期、場所の予報精度の検証は、セスナ機やデジタルカメラ搭載のバルーンによる空撮、海岸に設置しているウェブカメラによる漂着ゴミ監視技術に基づいて行う。



図一10 研究の概要



写真－9 漂着ゴミ調査の様子

4. 1. 2 主な研究結果

①海洋数値モデルによるゴミ発生源の特定と漂着予想

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、長崎県五島列島に漂着するゴミの起源地推定を行った。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・八朔鼻海岸におけ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。

五島列島八朔鼻海岸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-11に示す。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示している。台湾沿岸や長江河口以南の中國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。ゴミの投棄は通年で行われていると思われることから、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が伺われる。

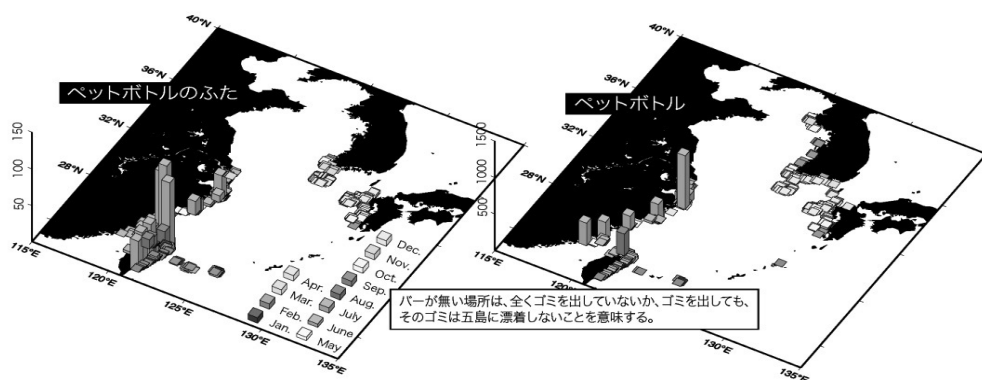


図-11 漂着ゴミの発生源，発生量，発生時期の推定結果

図-12は、実際に八朔鼻海岸に漂着したふたの量と、モデルにより予測した同海岸への漂着量を比較したものである。モデルには、図-11で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ているが、全体の量や季節変動の状況ま

た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あたっての手法の確かさが伺える。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ている。

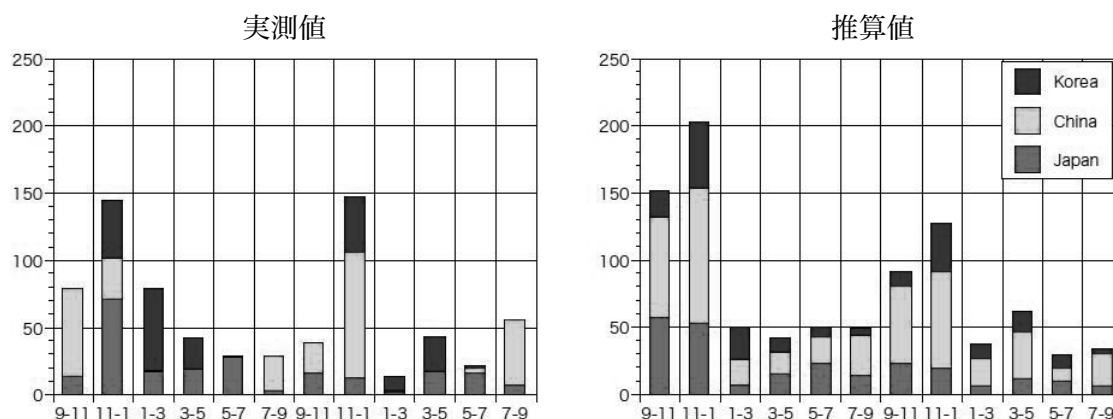


図-12 八朔鼻海岸に漂着したペットボトルのフタの国別時系列 (2008-2009)

②ウェブカメラによる漂着量モニタリング技術の開発

図-13 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。図には再現計算におけるゴミ漂着量の時系列も併せ示しているが、両時系列をそのまま比較した上図では両者は一致していないが、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、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



写真-10 ウェブカメラと大串海岸

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落ちることが分かった。

なお、このモニタリング技術と予測技術を活用することで、効率的な漂着ゴミの回収計画の立案が可能となる。図-14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が、年4回ゴミ回収を行う場合でも、春夏秋冬に定期的に行う場合とゴミ被覆面積が 30m^2 になったタイミングで海岸清掃を行ったと仮定した場合、後者がより多くのゴミ削減が達成されるというものである。また、一カ月先の漂着量の予報で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、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。

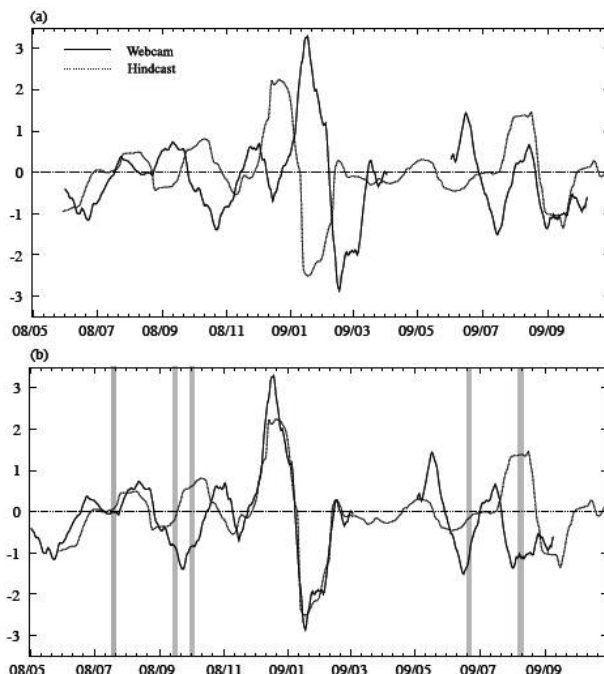


図-13 ウェブカメラによって得た大串海岸の漂着ゴミ被覆面積時系列(実線)と再現計算結果(下図は被覆面積時系列を一カ月過去にシフトさせたもの、台風の通過時を灰色のバーで示す)

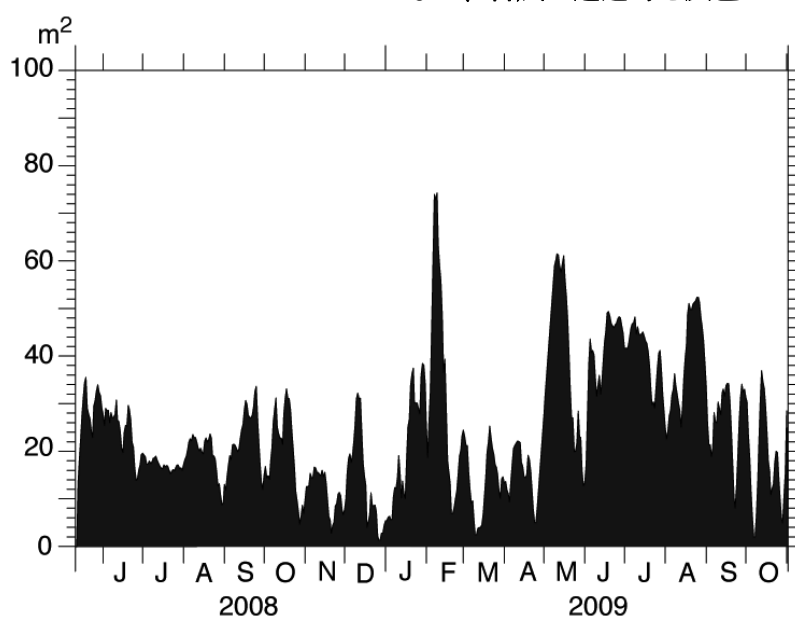


図-14 大串海岸のウェブカメラ画像を解析して算出した海岸ゴミ被覆面積の時系列

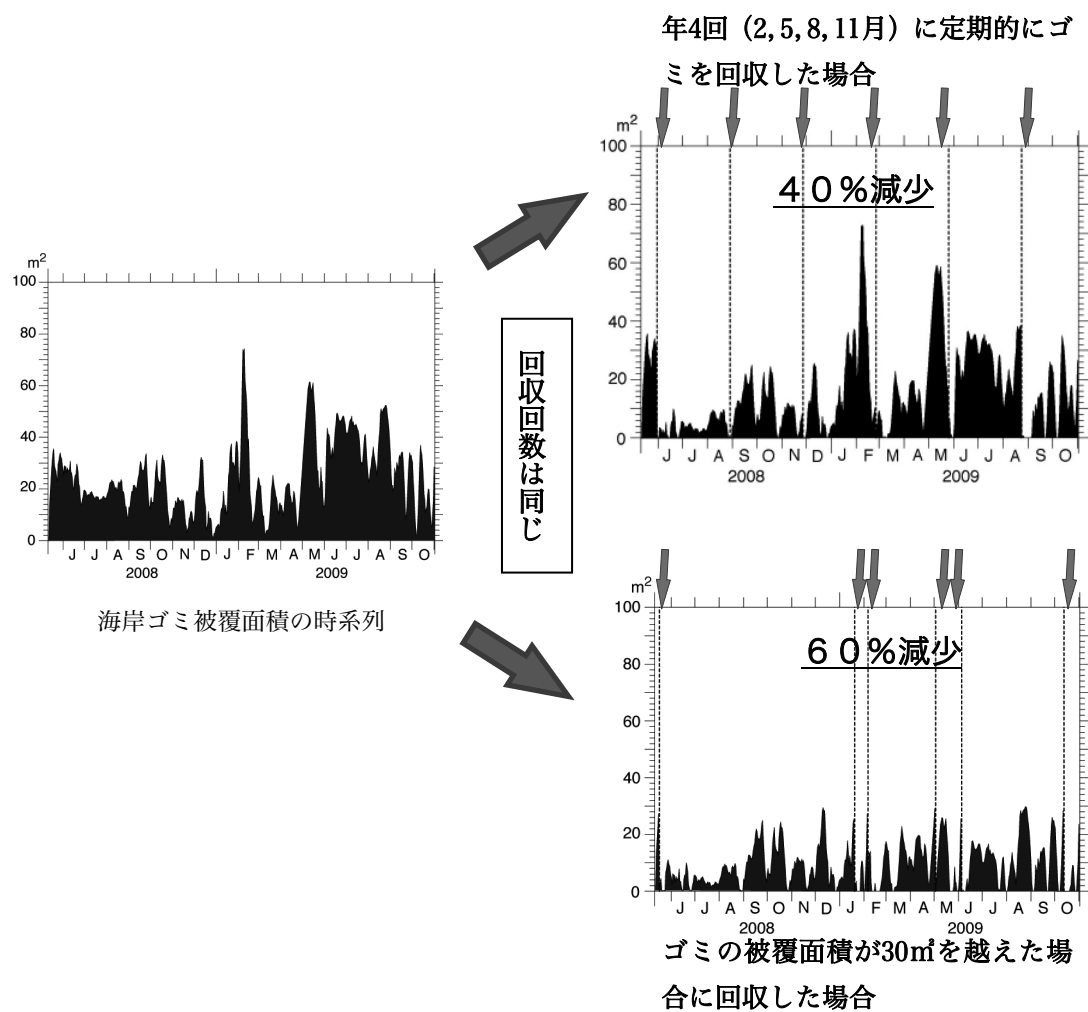


図-15 回収時期による効率の違い

③短波海洋レーダ（HFレーダ）によるゴミ収束域の特定

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レーダを設置し、2007年12月から2010年2月までの2年以上の期間で観測を行った。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



写真-11 HFレーダ

の漂流物の集積域判定手法を開発した。特に研究では、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た。

図-16 は空撮による実際の漂流ゴミ分布と FTLE 分布の比較を行ったものである。空撮は 2009 年 7 月 23 日に行ったが、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。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。

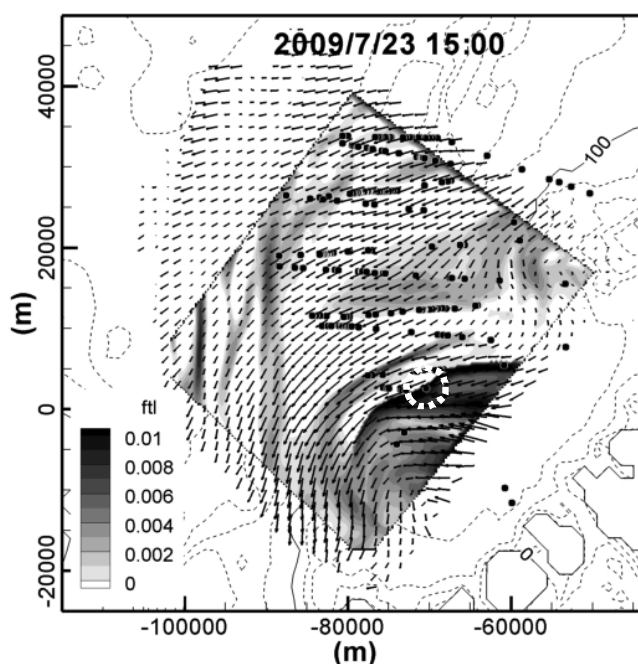
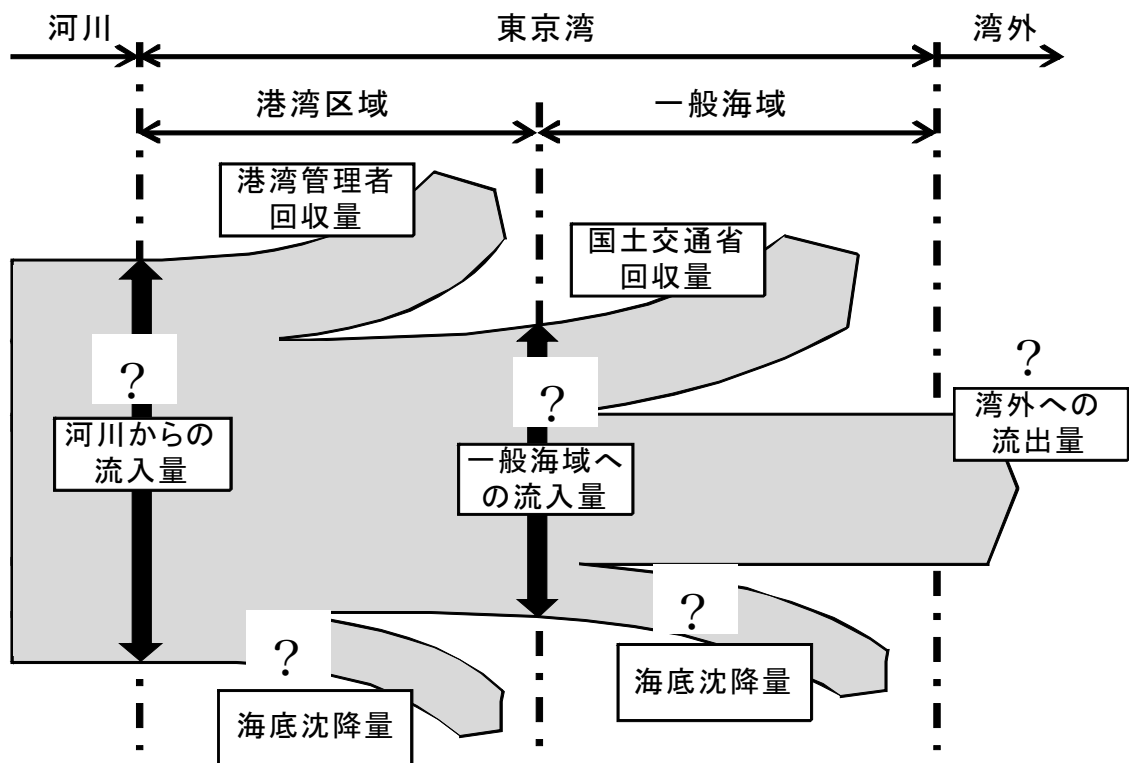


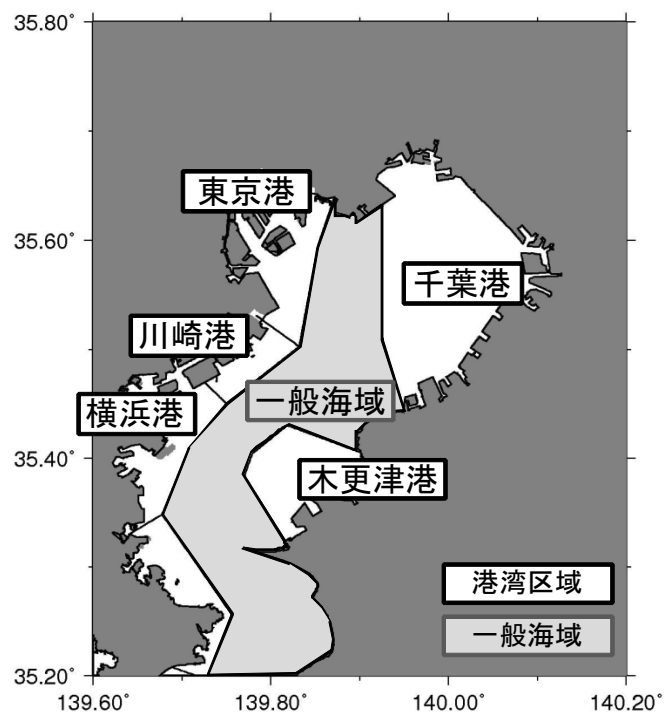
図-16 空撮により確認されたゴミの分布（黒丸）と同時期の流速ベクトルおよび FTLE 場（濃いトーンほど漂流物の強い集積が予想される水域。白点線で囲んである領域には流れ藻が、その他の場所には発泡スチロールゴミが漂流）

4. 2 東京湾における漂流ゴミの収支解析

大都市に囲まれた東京湾には、河川等を通して多くのゴミが流入している。その内、漂流ゴミについては国や港湾管理者が清掃船により年間平均で8,500m³（2004～2008年）を回収しているが、これが東京湾への流入量のどの程度なのか不明である。今後、回収の効率化や環境影響評価に必要な有害化学物質等の輸送量や陸域からの負荷量を検討するためには、ゴミの収支を明らかにする必要がある。



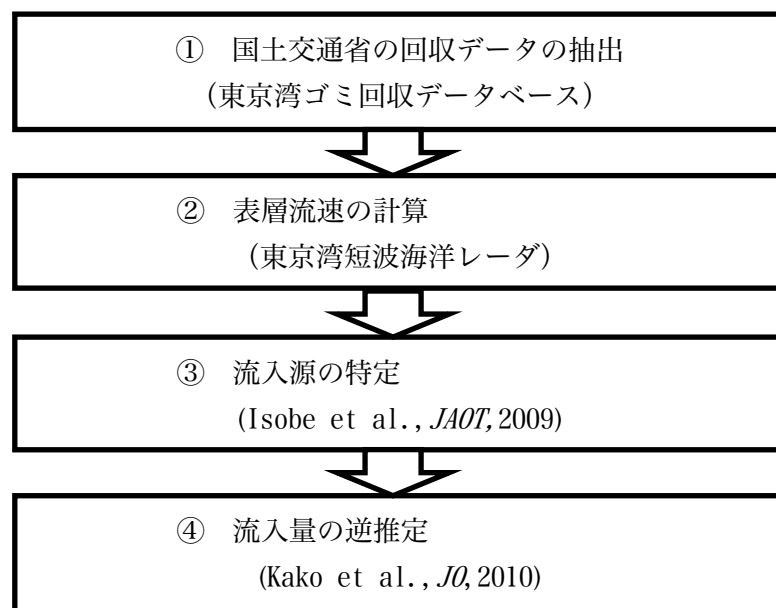
図一17 東京湾のゴミフロー



図一18 国土交通省及び港湾管理者の管轄海域

4. 2. 1 研究内容

収支算定の基本データとして、国交省が行った東京湾の漂流ゴミの回収日、回収位置、回収量を取りまとめた。次に、ゴミの流出源を特定するためHFレーダで観測された表層流速を用いて双方向粒子追跡法 (Isobe et al., *JAOT*, 2009) により流出源の特定を行った。そして、流出源からの流出量を求めるために、ラグランジュ未定乗数を用いた流出量の逆推定法 (Kako et al., *JQ*, 2010) を使い、「ペイクリン」の回収量から流出量を推算している。



図ー19 研究フロー

4. 2. 2 主な研究結果

図ー20は2008年8月28日から同9月22日までの東京港港湾区域から東京湾の一般海域に流入した漂流ゴミの推算結果である。このグラフでは、東京港で港湾管理者が漂流ゴミを回収した状況を合わせ示しているが、予測した東京港からの漂流ゴミの発生状況と実際に東京港で回収された漂流ゴミの傾向が合致している。

また、予測した流入量と回収量との比は3.57となっており、2010土木学会海岸工学講演会で二瓶らが発表した2008年の東京湾へのゴミ流入量と回収量との比(2008年流入量/回収量 $\approx$ 6)と同オーダーとなっている。更に、流入量は河川水位(流量)と大きく関係しているものと思慮されることから、予測量と河川水位との関係を示したのが図ー21であるが、水位の測定箇所と予測位置のずれからタイムラグはあるものの、それを除いた状況では河川水位と予測量の傾向は一致している。

以上から、今回の推計は信頼性が高いと考えられ、各港に適用することにより東京湾全体でのゴミ収支が明らかとなり、漂流ゴミの現状の回収効率を推計することが可能となる。将来は、東京湾のゴミ収束域を特定することで、漂流ゴミの回収効率を上げることができ

る。

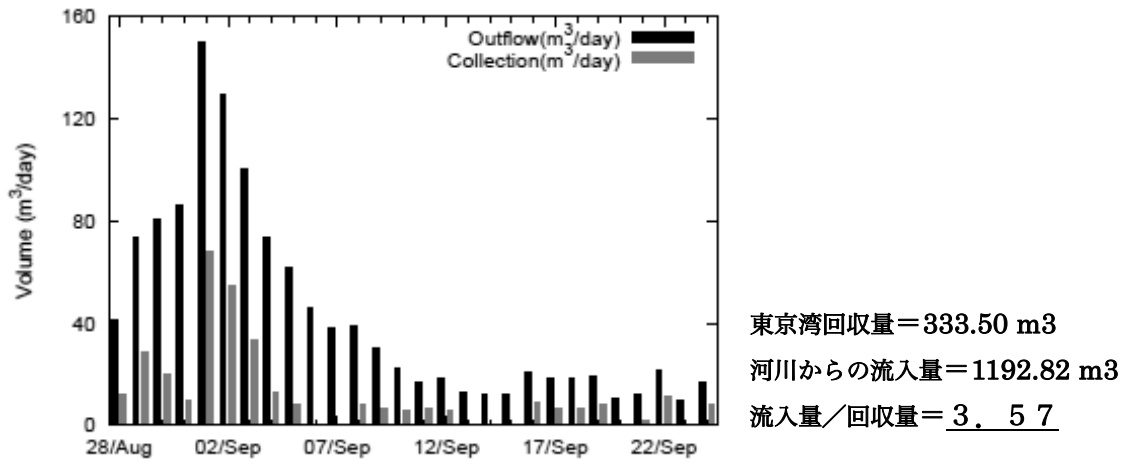


図-20 東京港から東京湾への漂流ゴミ流入量推算結果

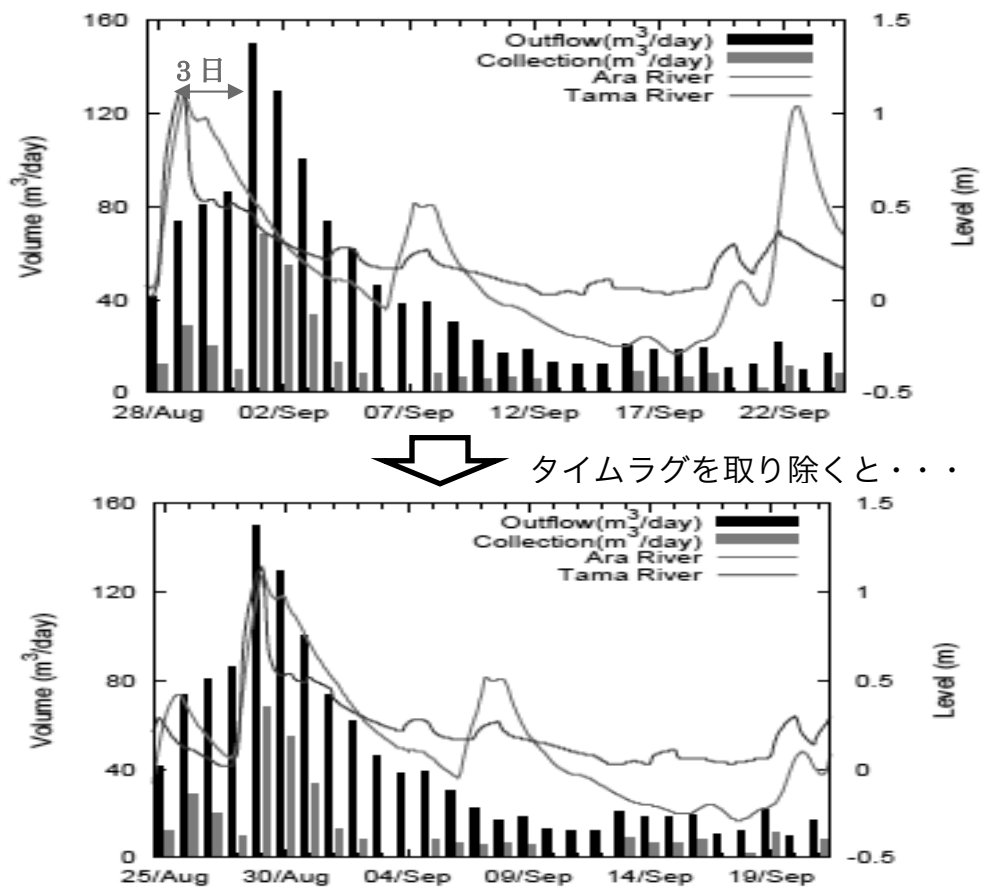


図-21 河川流入量（水位）の推移と推算値の変化

5. おわりに

増大する海ゴミは、我国をはじめ世界中の海洋環境に影響を与え続けている。また、生態系を通じ、最終的には人間の命にも影響を及ぼすことになる。これは、誰が加害者で誰が被害者であるというものではなく、人間すべての責任である。発生から回収、処分に至るソフト、ハードの総合的対応を世界各国との協調の下で進めていかなければならない。今回は、海ゴミの現状と問題点、海ゴミ対策として国総研沿岸海洋研究部で進めている研究の一部を紹介したが、これが海ゴミを考える一助となれば幸いである。