

ISSN 1346-7301

国総研研究報告 第51号

平成24年12月

国土技術政策総合研究所 研究報告

RESEARCH REPORT of National Institute for Land and Infrastructure Management

No.51

December 2012

Webカメラを用いたプラスチックゴミ漂着量の計測手法の開発
と多地点連続観測

片岡智哉・日向博文・加古真一郎

Sequential monitoring of quantity of colored macro plastic debris using a new
technique for detecting pixels of plastic debris from webcam images

Tomoya KATAOKA, Hirofumi HINATA, Shin'ichiro KAKO

国土交通省 国土技術政策総合研究所

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

Webカメラを用いたプラスチックゴミ漂着量の計測手法の開発 と多地点連続観測

片岡智哉*・日向博文**・加古真一郎***

要 旨

本研究では山形県酒田市飛島に設置したWebカメラ撮影画像を用いて様々な色のプラスチックゴミ (Plastic Debris, 以下, PD) の画素を検出するための手法 (Method using the Ellipsoid Body, 以下, MEB) を開発した。MEBは明度を用いてPD画素を検出する既往手法と比べて様々な色のPD画素を検出できるという点で優れていた。さらに山形県酒田市飛島を含む対馬暖流沿い日本沿岸4地点に設置したWebカメラ撮影画像にMEBと射影変換手法を適用することでPD漂着量を計算して各地点における約1年間の時系列変動を明らかにした。本研究で計算されるPD漂着量には約18%の計測誤差はあるが、PD漂着量の時系列変動を高時間分解能で得られることに成功した。Webカメラを用いてPD漂着量を多地点で計測することにより、今後PD漂着量の変動要因の詳細な調査、環境負荷を考慮した計画・重点的な海岸清掃及び海ゴミの輸送実態の解明に利活用できるであろう。

キーワード：Webカメラ，プラスチックゴミ，遠隔計測，CIELUV

* 沿岸海洋・防災研究部 沿岸域システム研究室研究官
** 沿岸海洋・防災研究部 沿岸域システム研究室長
*** 愛媛大学 沿岸環境科学研究センター 特任助教
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国土交通省国土技術政策総合研究所
電話：046-844-5025 Fax：046-844-1145 e-mail: kataoka-t852a@ysk.nilim.go.jp

Sequential monitoring of quantity of colored macro plastic debris using a new technique for detecting pixels of plastic debris from webcam images

Tomoya KATAOKA*
Hirofumi HINATA**
Shin'ichiro KAKO***

Synopsis

We have developed a technique (Method using the Ellipsoid Body (MEB)) for detecting pixels of colored macro plastic debris (PD) using images taken by a webcam installed on Sodenohama beach, Tobishima Island, Japan. The MEB demonstrates superior performance in detecting PD pixels of various colors compared to the previous method which used lightness values. We computed the quantity of PD by applying a projective transformation and MEB to photographs taken by webcams installed at four coastal locations in Japan along the Tsushima current, and calculated a one-year time series of the PD quantity at each site. Although the error of measuring the PD quantity was about 18%, we successfully obtained the time series of the PD quantity with high time resolution. In the future, measurement of the PD quantity at multiple sites using webcams will enable us to clarify the transportation processes of PD in oceans, to clean up beaches systematically and to investigate the mechanism of variability of the PD quantity.

Keywords: Webcam, colored macro plastic debris, remote monitoring, CIELUV

* Researcher of Coastal Zone Systems Division , Coastal, Marine and Disaster Prevention
** Head of Coastal Zone Systems Division , Coastal, Marine and Disaster Prevention Department
*** Ph.D. of Center for Marine Environmental Studies, Ehime University
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-468-44-5025 Fax : +81-468-44-1145 e-mail:kataoka-t852a@ysk.nilim.go.jp

目 次

1. はじめに	1
2. プラスチックゴミ漂着量の計測方法	2
2.1 Webカメラ撮影画像の取得方法	2
2.2 CIELUV色空間を用いたColor Referenceの作成	2
2.3 プラスチックゴミ画素の検出方法	4
2.4 プラスチックゴミ漂着量の計算方法	5
3. 結果	6
3.1 既往手法とのプラスチックゴミ画素の検出率の比較	6
3.2 プラスチックゴミ漂着量の多地点連続観測	7
3.3 プラスチックゴミ漂着量と風向風速の比較	8
4. 考察	8
4.1 プラスチックゴミ漂着量の計測誤差について	8
4.2 プラスチックゴミ漂着量の変動要因に関する一考察	9
4.3 Webカメラを用いたプラスチックゴミ漂着量計測の優位性	9
5. まとめ	10
謝辞	11
参考文献	11

1. はじめに

世界のプラスチック生産量は 1950 年から 2010 年までに 1.7Mt/yr から 265Mt/yr に増加している¹⁾。プラスチック製品はいまや我々人間の生活に必要な不可欠なものである。その一方で適切に処理されなかったプラスチック製ゴミ (Plastic Debris, 以下, PD) が世界中の海洋・海岸に蓄積し²⁾, 絡まりや誤飲等による海洋生物への危害³⁾⁷⁾, PD に含有する化学物質による海洋・海岸環境の汚染や生態系への影響⁸⁾が懸念されている。また海岸に漂着する PD は漂着地周辺から発生したものだけでなく、遠隔地で発生したものが直接、あるいは漂着・再漂流を繰り返しながら海流によって輸送される。この様に、PD による環境問題は典型的な越境問題であり、近年、地球規模の環境問題の 1 つとして認識されつつある³⁾。この PD による環境問題を解決するためには、PD の発生時期、発生場所、発生量を明らかにし、海流によるその輸送経路や輸送量 (以下、輸送実態) を解明することが重要である。これにより初めて PD の発生を抑制するための啓発活動や発生量抑制による各海岸への漂着量の削減効果を示すことが可能となる。海岸に漂着した PD は波などによりいずれ再漂流し、海流の下流域の海岸に PD が輸送される。したがって、PD 輸送実態を明らかにできれば、清掃活動を行った海岸より下流に位置する海岸への漂着量の削減効果を示すことも可能となる。

近年、Kako et al. (2011)⁹⁾は長崎県五島市福江島八朔海岸における人力による PD の海岸調査と東シナ海を対象とした海洋数値モデルを併用して、八朔海岸に漂着した PD の発生時期・発生場所・発生量を逆推定し、逆推定結果を基に Hindcast 実験を行うことで同市奈留島大串海岸における PD 漂着量の時系列変動を再現することに成功した。発生時期・発生場所・発生量を逆推定できるという点でこの手法は輸送実態の解明に貢献できる。この研究で逆推定された発生量は八朔海岸における PD 漂着量を元に推定されたものであり、八朔海岸に漂着しなかった PD の発生源からの PD 発生量については推定することができない。しかしながら、彼らの手法を多地点における海岸調査と併用することでより多くの発生源からの PD 発生量を把握することができる。

これまでに PD の漂着状況を把握するための人力による海岸調査が世界中で数多く行われ、ゴミの発生国 (言語やバーコードを基に特定)、発生国別漂着量 (数、重量、体積) とその種類の把握がなされてきた¹⁰⁾¹³⁾。これらの調査のほとんどが月 1 回もしくは 2 ヶ月 1 回の頻度で実施される海岸調査である¹¹⁾。しかし、人力に基づい

た海岸調査には多くの労力と費用が必要となるため、多地点での同時調査は事実上不可能である。これに対して、最近、Kako et al. (2010)¹⁴⁾は長崎県五島市奈留島大串海岸に設置された Web カメラを用いて PD 漂着量の連続観測を行い、1 年半の時系列変動を明らかにした。彼らの計測手法は Web カメラの撮影画像から PD 画素を明るさの指標である明度を基に検出し、検出された PD 画素数から PD 漂着量として PD に覆われた面積 (以下、被覆面積) を計算するものである。この手法により PD 漂着量の遠隔自動計測が可能となるため、PD 漂着量の多地点観測に応用できるものと期待される。しかしながら、彼らは明度を用いて PD 画素を検出することで白などの明るい色のゴミについては検出できたけれども、青や赤のような明度の低い色については検出することができなかった。彼らは大串海岸に漂着する PD の多くが白い発泡スチロール製の漁業用ブイであることから、この検出手法を適用したが、大串海岸のように漂着する PD の多くが白い漁業用ブイであるとは限らない。また、後述するが、乾燥した流木を発泡スチロールゴミとして誤検出してしまう可能性もある (3.1 節)。そのため、この画像解析手法では明度の低いゴミや流木が相対的に多く漂着している海岸では PD 漂着量の時系列変動を得ることが困難である。

我々の研究プロジェクト (<http://www.icataquo.jp/umigomi>) では東アジア海域における PD の輸送実態を明らかにするため、日本全国沿岸 9 地点に Web カメラを設置し、PD 漂着量をモニタリングしている。本研究ではこれらのモニタリング 9 地点のうち、まず山形県酒田市飛島袖の浜海岸に設置した Web カメラ撮影画像を用いて明度の低い色も含めた様々な色の PD 画素を検出できる画像解析手法を開発する。その後、対馬暖流沿いの日本沿岸 4 地点 (北海道稚内市抜海海岸、山形県酒田市飛島袖の浜海岸、石川県輪島三ツ子浜海岸、長崎県対馬市棹崎海岸) (図-1(a) の設置地点拡大図) に設置した Web カメラ撮影画像に開発した手法を適用することで、他地点での適用性を確認するとともに、各海岸での PD 漂着量の時系列変動を明らかにすることを目的とする。

本報告の構成を以下に示す。第 2 章では Web カメラを用いた画像の取得方法及び得られた画像から PD 漂着量を計算するための画像解析手法について説明する。第 3 章では開発した手法による検出率と Kako et al. (2010)¹⁴⁾の手法による検出率を比較することで、開発手法の有効性について確認し、多地点に設置された Web カメラ撮影画像への適用性及び Web カメラ設置地点近傍で観測された風向風速データとの比較を示す。第 4 章では PD 漂

着量の計測誤差や変動要因について考察し、WebカメラによるPD漂着量の計測手法の優位性及び海ゴミ対策への応用例について述べる。最後の第5章で研究成果のまとめを述べる。

2. プラスチックゴミ漂着量の計測手法

2.1 Webカメラ撮影画像の取得方法

Webカメラを設置した海岸は管理者や地域住民等にヒアリングをし、経験的にPD漂着量が多く、かつレジャーとしての利用がないことを考慮して選定した。各地点のWebカメラモニタリングシステムは2010年10月から2011年9月にかけて順次設置され(図-1(a))、カメラ本体(IP7361, Vivotek)、太陽光パネル(DC080-12, Denryo)、バッテリー(DC-31, AC Delco)、タイマスイッチ(H2F-31, Omron)、モバイルルータ(DCR-G54/U, IO Data Device)及びモバイルカード(L-05A, LG Electronics)で構成される。Webカメラの稼働時刻はタイマスイッチで制御され、毎日7:00から15:00の間、2時間毎に稼働させる。各稼働時刻において3分毎に5回撮影を行い、1日あたり25枚の画像を得ている。撮影画像はFOMA回線を通じて研究所にFTP転送されるとともにカメラ本

体内蔵のSDHCカードに保存される。このようにして撮影されたWebカメラ画像の一部を当研究室のホームページで公開している(<http://www.ysk.nilim.go.jp/kakubu/engan/enganiki/umigomi/>)。

2.2 CIELUV色空間を用いたColor Referenceの作成

海岸には様々な色のPDが漂着しており、その色は日射状況(日射量や日射角度)によって変化する。PD画素を検出するためには予め日射によるPDの色の変化を考慮したColor Reference(以下、CR)を定義する必要がある。本研究ではCRを定義するのに色差の概念を利用する。色差は知覚的な色の違いを定量的に示したものであり、ある色空間における2点間の距離で定義される¹⁵⁾。空間内の色差が均等になるように補正された色空間の1つとして国際照明委員会(CIE)が策定したCIELUV色空間がある¹⁶⁾。CIELUV色空間は明度 L^* 、赤-緑の属性値 u^* 、黄-青の属性値 v^* をもつ3次元空間である。

Webカメラの撮影画像は各画素にRGB値をもっている。後述するが、RGB色空間は空間内の色差が均等でないため、この色空間を用いてCRを作成することが難しい。そこで、本研究ではWebカメラの撮影画像がもつ各画素のRGB値をCIELUV色空間の(L^* , u^* , v^*) (以

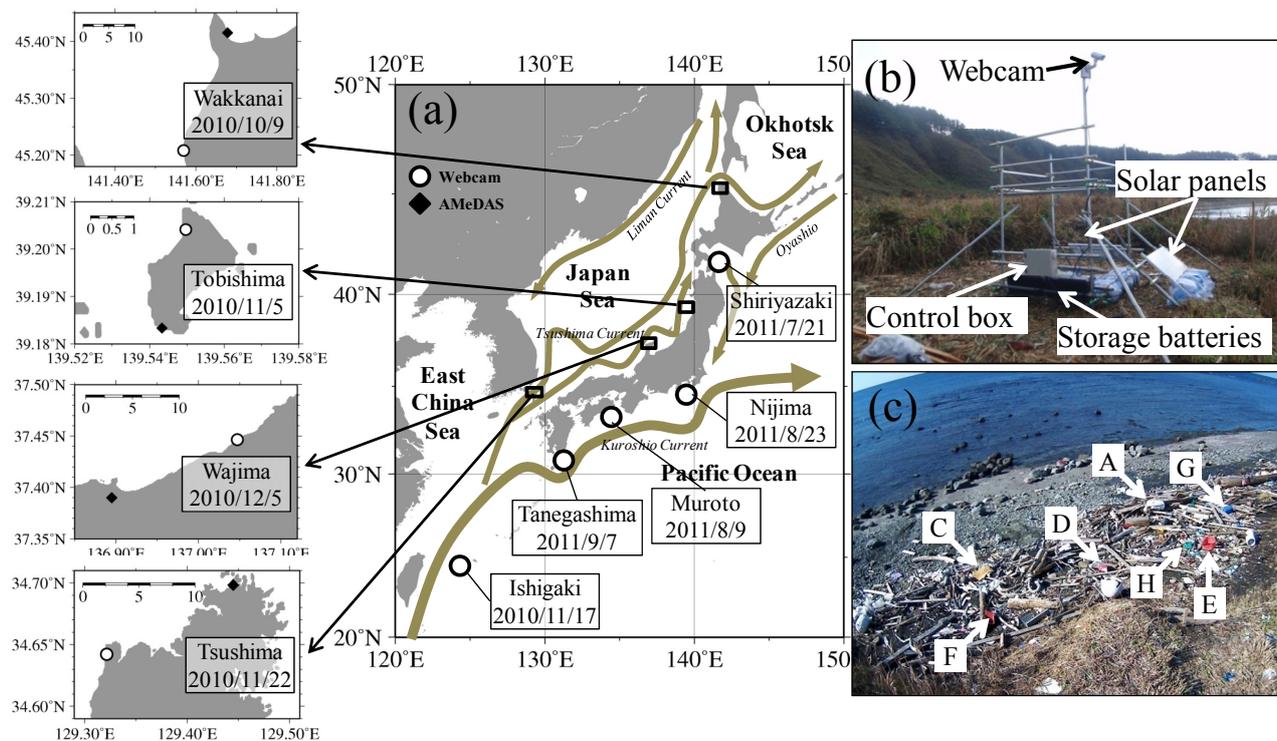


図-1 Webカメラの設置位置と日本周辺の海流(a)と飛島に設置したWebカメラ(b)とその撮影画像(c)。 (a)の左図は解析4地点周辺の拡大図であり、丸印はカメラの設置地点、ダイヤ印はアメダスの観測所を示す。設置地点周辺の拡大図内に地点名とWebカメラ設置日を示す。また(c)には図-2(b)の楕円体(2.2参照)の作成に用いたPDを示す。

下, CIELUV 値) に変換¹⁷⁾し, 空間内の色差が均等になるように補正された CIELUV 色空間において CR を作成する.

CR の作成手順を以下に示す. まず, CR の作成には風や波の影響によって PD の漂着位置が変わらない期間 (1 週間程度) を選定し, その期間に得られた撮影画像を利用する. なお, 季節的な日射量の変動を考慮するため, 特定月の 1 週間だけではなく, 複数月の撮影画像を目視でゴミが動かされていないことを確認しながら, CR の作成に用いる期間を選定する. このようにして選定した期間内に漂着したすべての PD を対象として CR を作成するためのサンプル画素を選択する. 1 つの PD であっても表面の傷などによる凹凸により光の反射強度が異なるため, 色が不均一となる. また PD に影がかかるとその色が変わる. そこで本研究では個々の PD から 50 画素をサンプル画素として選定した. ただし, PD 以外の画素の誤検出を防ぐ (2.3 節参照) ため, 白色の PD については影がかかりにくい表面からサンプル画素を選定した. こうして選定された各画素の RGB 値を CIELUV 値に変換し¹⁴⁾, CIELUV 色空間内における色の分布を調べると, その 3 つの平面 (L^*-u^* , L^*-v^* , u^*-v^*) において楕円状に

表-1 飛島の Web カメラ撮影画像から PD 画素を検出するための CR の作成に用いた期間とサンプル画素数及び画像合成手法で使用した閾値

Typical color	Ellipsoid body	Periods ^a	Number of selected pixels	Threshold values	
				Nov./10-Mar./11	Apr./11-Aug./11
white	A	p1, p2, p3, p4, p5	41755	0.6	0.8
yellow	B	p2, p3, p4, p5	23491	0.5	0.5
	C	p1	8712	0.6	0.6
red	D	p1, p3, p4, p5	19100	0.5	0.6
	E	p1	5000	0.5	0.5
	F	p1, p2, p3, p4, p5	24000	0.5	0.5
green	G	p1, p2, p3, p4, p5	62000	0.5	0.5
blue	H	p1, p3, p4, p5	33200	0.5	0.5

^aPeriods: p1, November 21-27, 2010; p2, December 14-21, 2010; p3, February 16-22, 2011; p4, April 1-7, 2011; p5, May 18-24, 2011

分布する (図-2(a)). ここでは示さないが, 同様に RGB 色空間における色の分布を調べてみると, 色空間内の色差が均等でないため, PD の色の変化は楕円分布にならず, CR の作成が困難である. そこで本研究では CIELUV 色空間を用いて, 3 平面における色の分布を楕円近似する (図-2(a)中の太線) ことで, それを CR として用いる.

それぞれの楕円の中心は各 PD の CIELUV 値の平均値 (図-2(a)の星印) である. 楕円の長軸 (短軸) の方向は各座標の 2 つの CIELUV 値の分散共分散行列の第一 (第

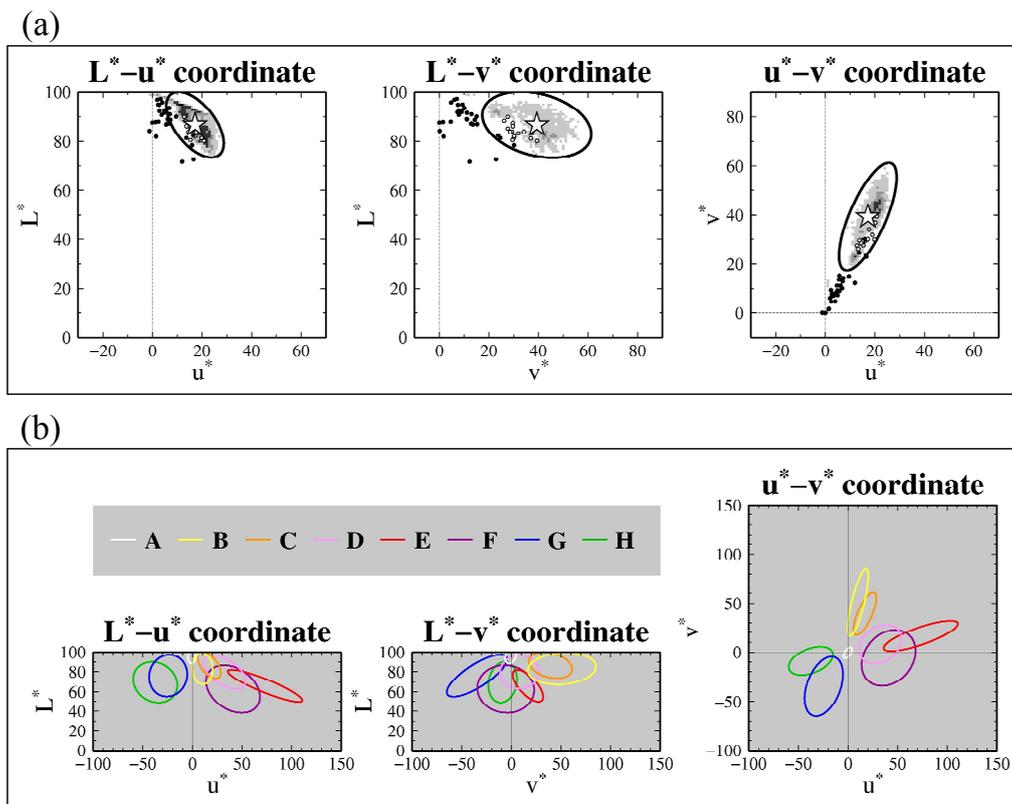


図-2 CIELUV 色空間における PD (図-1(c)中の C) の色の空間分布(a)と各色の楕円体(b). (a)中の丸印は各座標における流木画素の CIELUV 値の散布図であり, 白丸が楕円体内に位置する CIELUV 値, 黒丸が楕円体外に位置する CIELUV 値を示す. (b)の色凡例を図下に示し, アルファベットは図-1(c)と対応している.

二) モードの固有ベクトルによって決定される。また長軸(短軸)の長さを長軸(短軸)方向における CIELUV 値の平均値と各 CIELUV 値との色差の標準偏差の2倍で定義する。その長軸(短軸)方向の標準偏差は各座標の第一(第二)モードの固有値の平方根である。こうして得られた各平面の楕円は CIELUV 色空間における楕円体の各平面への投影図に相当する。本研究ではこの楕円体を Web カメラ撮影画像から PD の画素を検出するための CR として用いる。

CR を作成するために選定した期間毎に、各 PD のサンプル画素から楕円体を作成し、その中心位置、軸の長さ、軸の向きから判断して白、黄、赤、緑、青の5色に分類する。ただし、知覚的に同色であっても楕円体の中心位置、軸の長さ、軸の向きが異なる場合は必要に応じて細分する。飛島では黄と赤については細分し、計8つの CR 楕円体を作成した。このようにして作成した飛島の CR 楕円体を図-2(b)に示し、その作成に用いた CR の作成諸元を表-1に示す。ただし、本研究では背景色と同化してしまう透明な PD (例えば、ペットボトル)、岩や影と同色である黒色の PD (例えば、漁業用ブイ) については CR を作成せず、検出対象外とした。これらの色の PD を検出対象外とした影響については 4.1 節で述べる。

2.3 プラスチックゴミ画素の検出方法

CIELUV 値がいずれかの楕円体内に位置する画素を PD とするが、気象条件によっては流木や植生等の画素の

一部が誤検出される。例えば、飛島では濡れた流木の画素は、楕円体 C 内に位置することで PD として誤検出される(図-2(a)中の丸印)。

このような誤検出による影響を最小限にするため、ある一定期間(以下、合成期間)に得られた複数枚の画像を用いて誤検出された PD 以外の画素を除去する。具体的には、まず合成期間中の全画像を用いて、各画素位置での CIELUV 値が 2.2 節で作成した楕円体の中に位置する頻度を計算する。なお、合成期間に応じて画像枚数が異なるため、頻度は CIELUV 値がそれぞれの楕円体に属した回数をその期間の画像枚数で規格化した値とする。各画素において最も高頻度に属した楕円体の色をその画素における代表色とし、その頻度が予め楕円体毎に設定した頻度の“閾値”より大きい画素を PD とする。

この画像合成による PD 画素の検出精度は、その合成期間と頻度の閾値に依存するため、これらの値を適切に設定する必要がある。例えば、合成期間が長い場合、その間の日射量変化が相対的に大きくなるため流木等の誤検出が抑制される一方で、PD が風や波で動かされる確率が高くなるため、PD 画素自体の検出精度が低下する可能性が考えられる。そこで本研究では合成期間を1~7日の間で変化させ、最も効果的に流木等の画素を除去でき、かつ PD 画素を検出できる合成期間を決定した。対馬については飛塩によるレンズカバーの汚れが原因で解析に使用できない画像が多かった。そこで、合成期間の画像枚数を増やすことを目的として合成期間を7日間(画像

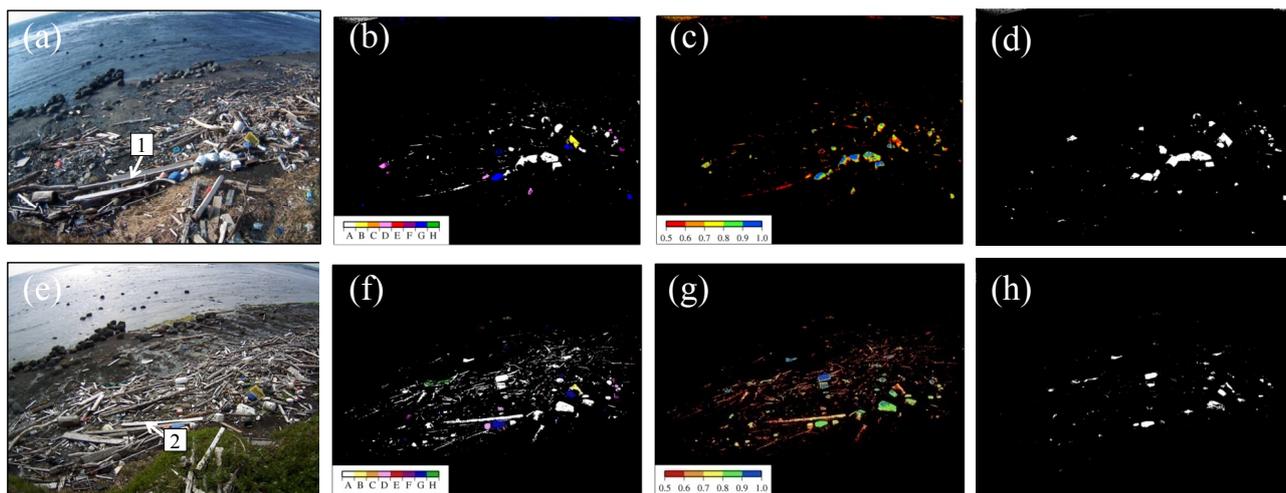


図-3 (a)と(e)はそれぞれ 2010 年 12 月 20 日と 2011 年 5 月 8 日における飛島の Web カメラ撮影画像。(b)と(c)はそれぞれ 2010 年 12 月 19 日-21 日における各画素が最も高頻度に属する楕円体とその頻度(以下、これら 2 つの図を合わせて、“頻度図”と称す)を示す。ただし、ここでは頻度が 0.5 以上の画素のみを示している。同様に(f)と(g)は 2011 年 5 月 7 日-9 日における頻度図を示す。(d)と(h)は各楕円体に属する頻度が表-1 に示す閾値を超える画素のみを白く表示した PD 画素の検出画像である。

枚数：最大 175 枚）とし、その他の地点については 3 日間を合成期間として決定した。

次に頻度の閾値については季節に応じた日射状況（例えば、日射量）の差異を踏まえて決定する。例えば、2010 年 12 月 19 日-21 日（図-3(a)）及び 2011 年 5 月 7 日-9 日（図-3(e)）に撮影された飛島の Web カメラ画像から CR によって各画素が PD として検出された頻度を計算する。日射量が低い 12 月には流木画素の一部（図-3(a)中の 1）が白色の CR（図-2(b)中の A）によって検出される頻度は 0.6 以下（図-3(b)と(c)）であるのに対し、比較的日射量の高い 5 月の流木画素（図-3(e)中の 2）のそれは 0.8 以下（図-3(f)と(g)）となった。本研究ではこのようにして月毎に最適な頻度の閾値（表-1）を設定することで、日射状況の差異による流木等の誤検出の影響を除去し、PD 画素を検出した（図-3(d)及び(h)）。

2.4 プラスチックゴミ漂着量の計算方法

本研究では Kako et al. (2010)¹⁴⁾と同様に、PD の被覆面積を漂着量の指標として用いた。Web カメラ撮影画像は斜め上方から撮影されているため、被覆面積を計算するためには真上からの直視画像に変換する必要がある。Magome et al. (2007)¹⁸⁾は、任意の地点を原点にとった地理座標と画素座標の幾何学的な関係を表す式(1)を定義し、これを用いて Web カメラ撮影画像から真上から見た

直視画像に変換する方法を提案した。

$$X = \frac{b_1x + b_2y + b_3}{b_4x + b_5y + 1}, \quad Y = \frac{c_1x + c_2y + c_3}{c_4x + c_5y + 1} \quad (1)$$

ここで、 (X, Y) と (x, y) はそれぞれ地理座標と画素座標であり、単位はメートルである。 b_i と c_i ($i=1, 2, \dots, 5$)は地理座標と画素座標の幾何学的な関係を決定するための変換係数である。ここでは各点の高さについては考慮していないため、 $b_4 = c_4$ 及び $b_5 = c_5$ である。本研究ではこの変換係数を 4 点以上の地理座標と画素座標の関係から最小自乗法を用いて計算する¹⁷⁾。そこでまず任意点を原点にとった地理座標を計算するため、各地点の Web カメラの撮影範囲内に位置の基準となる 10 個の目印（ここでは 1 m×1 m のブルーシート）をランダムに配置し、各シートの中心位置での緯度経度を RTK-GPS (Trimble 5800 II, Trimble) で計測する。次に各シートの中心位置の画素座標を取得するため、シートを配置した状態の海岸を Web カメラで撮影する。10 枚の内、緯度経度の計測精度が良い 5 枚のシートを選択して、それらの中心位置における両座標から変換係数を計算する。求めた変換係数を用いて式(1)からすべての画素座標に対する地理座標を計算することで、真上からの直視画像に変換することができる。

この射影変換手法で計算される撮影範囲内のある区

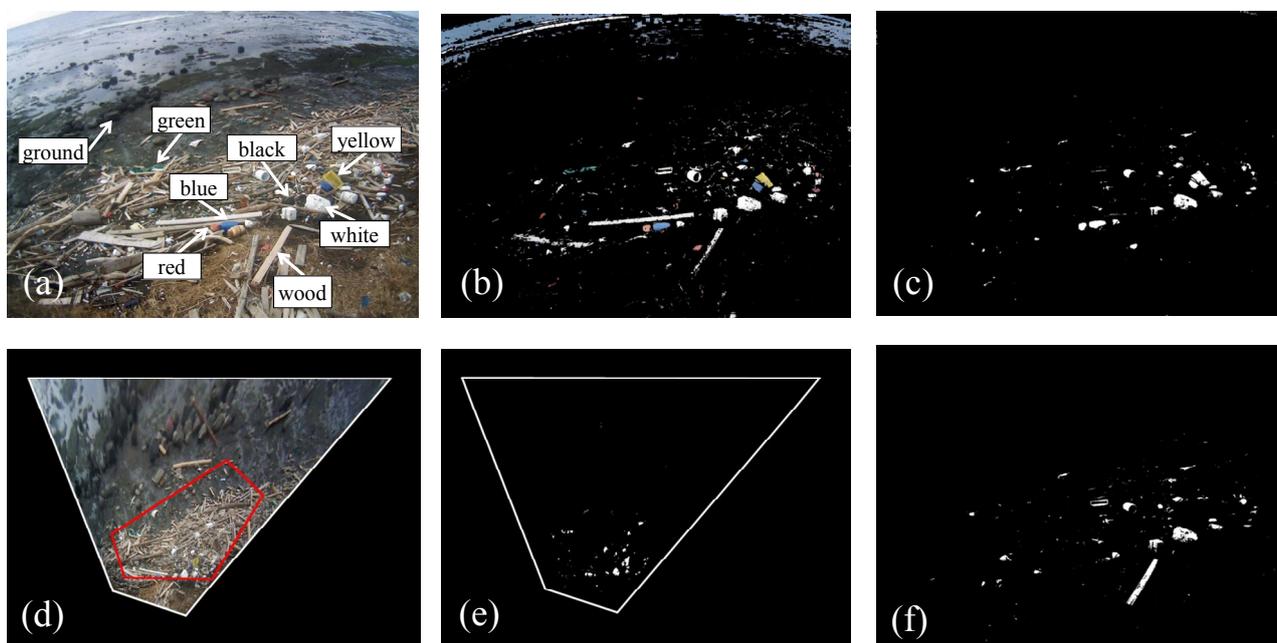


図-4 (a)は 2011 年 2 月 7 日の Web カメラ画像であり、(b)はその画像 1 枚から CR を用いて PD 画素を検出した画像である。(c)と(f)はそれぞれ MEB と ML (L90-C08) によって PD 画素として特定された画像である。(d)と(e)はそれぞれ(a)と(c)の画像を射影変換して得られた真上からの直視画像である。(d)の赤枠は面積計算の精度検証に用いた領域を示す。

画の面積（図-4(d)中の赤枠）と RTK-GPS による実測値から計算した面積を比較したところ、座標変換による誤差は 5.0%であった。他地点についても同様の比較を行ったところ同程度以下の精度（稚内 0.2%，輪島 1.0%，対馬 4.2%）であることが確認された。被覆面積はこの射影変換手法を PD が検出された画像（図-3(d)や(h)）に適用し、PD の画素数に射影変換する際に定義する 1 画素当たりの面積（飛島 16 cm²，飛島以外 25 cm²）を乗じることによって計算できる。

3. 結果

3.1 既往手法¹⁴⁾とのプラスチックゴミ画素の検出率の比較

Kako et al. (2010)¹⁴⁾が明度を用いて PD 画素を検出した結果、明度の低い色（例えば、青や赤）の PD 画素は検出されなかったけれども、彼らが設定した明度の閾値（85 と 90）よりも低い明度を閾値として用いれば、明度の低い PD 画素も検出できる可能性がある。そこで、本研究で開発した手法（Method using the Ellipsoid Body, 以下、MEB）と明度による PD 画素の検出方法（Method using the Lightness, 以下、ML）によって PD 画素の検出を行い、検出率の比較を行った。比較には飛島で 2011 年 2 月 4 日-15 日に撮影された画像を用いた。ML における明度の閾値として 80 (L80)と 90 (L90)を用いた。さらに、ML についても 2.3 節に基づいた画像合成手法を適用する。画像合成手法における合成期間は 3 日間とし、頻度の閾値は 0.7 (C07), 0.8 (C08)及び 0.9 (C09)の 3 つとした。したがって、ML としては 6 つのケース (L80-C07, L80-C08, L80-C09, L90-C07, L90-C08, L90-C09) で PD 画素を検出し、MEB と各ケースの ML の検出率を比較した。

MEB 及び ML の L90-C08 で PD 画素を検出した画像を図-4(c)及び(f)にそれぞれ示す。MEB では黒色を除きどの色の PD の画素も検出される。1 枚の画像解析から誤検出された流木画素（図-4(b)）は画像合成手法を適用することで基本的には除去される（図-4(c)）。一方、ML では白色の PD 画素の検出には成功しているけれども、その他の色の PD 画素は検出されていない。また流木画素も誤検出されている。

次に Web カメラ撮影画像の中から比較期間（2011 年 2 月 4 日-15 日）において風や波によって動かされなかった 5 色の PD 及び流木の画素を選択し、これら選択画素に対する両手法の検出率を比較した。なお、PD 及び流木の選択画素数を図-5 に示す。比較に際してこの選択画素

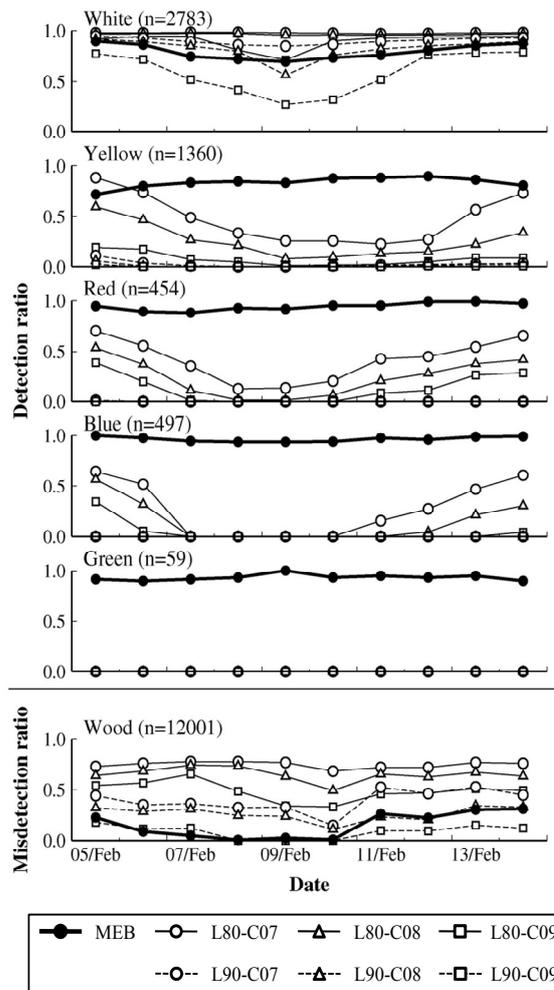


図-5 MEB と ML による PD 検出率と誤検出率の比較。選択画素数を各グラフの左上に示し、凡例を図下に示す。

数に対する各手法による PD の検出画素数の比を PD 画素の“PD 検出率”と定義し、各手法による流木の誤検出画素数の比を流木画素の“誤検出率”と定義する。両手法では 3 日間の画像解析手法によって検出されるため、PD 検出率及び誤検出率を 3 日間の中間日の値として計算した。例えば、2011 年 2 月 5 日の PD 検出率及び誤検出率は同月 4 日-6 日の Web カメラ撮影画像を解析して計算される。

MEB についてみると、各色の PD 検出率は 0.7 より高く、比較期間における各色の平均 PD 検出率は白：0.79，黄：0.83，赤：0.94，青：0.97，緑：0.93 である。誤検出率についてみると 0.31 が最高であり、平均誤検出率は 0.15 であった。

一方、ML についてみると、白の平均 PD 検出率は L90-C09 を除いた 5 ケースで 0.8 より高かった (L80-C07:0.98, L80-C08:0.96, L80-C09:0.90, L90-C07:

0.90, L90-C08 : 0.82, L90-C09 : 0.59) . 他の色の PD 検出率は ML のどのケースにおいても MEB のそれと比較して小さかった. 特に L90 の 3 ケースでは白を除いた他の色の PD 画素はほとんど検出されなかった. L80 の 3 ケースでは黄, 赤及び青の PD の画素は検出されたけれども, 緑の PD 画素は検出されなかった. MEB による平均 PD 検出率 (0.83) は ML のどのケースのそれよりも高かった (L80-C07 : 0.70, L80-C08 : 0.62, L80-C09 : 0.51, L90-C07 : 0.49, L90-C08 : 0.44, L90-C09 : 0.31) . ML の L90-C09 を除いた 5 ケースにおいて誤検出率は MEB のそれよりも高い. L90-C09 の誤検出率は MEB のそれよりも低いが, 白の PD 検出率は MEB のそれよりも低い. ここでは示さないが, この比較を 2011 年 5 月 1-13 日でも行ったところ, 同様の結果が得られた.

ML を利用した場合でも明度の閾値を低く設定することで白以外の色の PD 画素も検出することができるが, それらの PD 検出率は MEB のそれよりも低い. 更に流木の誤検出率は MEB のそれよりも高い. 以上のことから様々な色の PD や流木が漂着している海岸で Web カメラを用いたモニタリングを行う場合, ML に比べて MEB の方が有効な方法であるといえる. ただし, 白色の PD の漂着量が支配的な海岸では ML も有効な手法であることが再確認された.

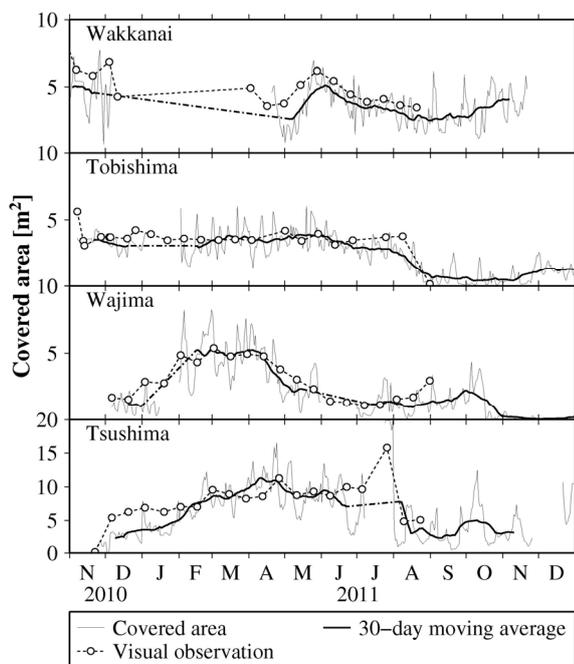


図-6 対馬暖流沿いの日本沿岸 4 地点における PD 漂着量の時系列変動. なお, 図中の凡例を図下に示す.

3.2 プラスチックゴミ漂着量の多地点連続観測

対馬暖流沿いの日本沿岸 4 地点に設置した Web カメラの設置日 (図-1(a)の設置地点拡大図) から 2011 年 12 月 31 日までに得られた撮影画像に対して MEB と射影変換手法を適用して PD 漂着量を計算した. なお, 山形県酒田市飛島以外の 3 地点においても各々の地点で得られた Web カメラ撮影画像から CR を作成し, PD 画素を検出した. ただし, レンズカバーに水滴や潮が付着した画像は解析対象外とした.

画像解析により直接的に得られた PD 漂着量の時系列は数日もしくは 2 週間程度の時間スケールで大きく変動している (図-6) . 実際に Web カメラ撮影画像を目視で確認してもこのような PD 漂着量の短期変動は認められない. こうした短期変動は, 日射状況の差異によって PD 画素の色が大きく変化し, CR で PD 画素として検出されないことや画像合成手法を用いたとしても乾燥した流木等の誤検出を完全には除去できていないことによる.

特に白の PD 画素の検出では日射状況による PD の色の変化の影響を強く受ける. 例えば, 悪天候が数日続くと, 日射量が弱いため, Web カメラ撮影画像では白色の PD が灰色に見える. 白の CR は他の色の CR に比べて空間的に小さい上に画像合成手法で使用する検出頻度の閾値が高い (図-2(b)及び表-1) . こうした影響により PD の色が微小に変化するだけで, 白の PD 画素として検出されない可能性がある. また, どの地点も白の PD として発砲スチロールブイなど比較的比重の小さい PD が多いため, 風によって移動しやすいことも短期変動の原因の 1 つとして考えられる.

これらの気象条件に依存する短期変動を簡易的に除去するため, 30 日間移動平均を適用した (図-6 中の太線) . なお, 図-6 中の 1 点鎖線で示す期間は積雪等の影響による欠測期間である. MEB による PD 画素の自動計測精度と PD 漂着量の時系列変動パターンを検証するため, Web カメラ設置日 (図-1(a)) から 2011 年 8 月 31 日までの 2 週間毎の撮影画像から目視によって PD 画素を検出し, 2.4 節と同様の手順で計算された PD 漂着量 (図-6 中の丸付破線, 丸付破線の○は目視計測日) と比較した. ただし, 本手法では黒色や透明色の PD 画素は検出できない (2.2 節参照) ため, 目視計測においてもこれらの PD 画素を検出対象外とした.

PD 画素の計測誤差は目視計測日における両手法で得られた PD 漂着量の偏差の絶対値を目視計測による PD 漂着量で規格化し, それらの平均値で評価した. その結果, 解析 4 地点における PD 画素の計測誤差は平均で 18% であった (稚内 19%, 飛島 12%, 輪島 20%, 対馬 21%) .

両手法で計算された PD 漂着量の相関を調べたところ、どの地点も有意な正の相関（稚内 0.93，飛島 0.81，輪島 0.94，対馬 0.73）があり、時系列変動は良く一致していた。対馬の相関係数が他の地点に比べて若干低い。これは 2010 年 12 月から翌年 1 月にかけてレンズカバーが頻繁に汚れたことに起因するものである。2011 年 2 月以降はレンズカバーのメンテナンスを高頻度（2 週間一度）に実施したため、両者がよく一致している（図-6）。以上のことから、海岸毎に CR を作成し、画像合成手法における検出頻度の閾値及び合成期間を調整することで本手法が多地点で適用可能であることが確認された。

3.3 プラスチックゴミ漂着量と風向風速の比較

解析 4 地点における PD 漂着量の時系列変動パターンは大きく異なっている（図-6）。飛島と対馬における 2011 年 8 月中の PL 漂着量の急激な減少は、地域住民による海岸清掃によるものであるが、これを除いた PD 漂着量の変動は自然現象によって引き起こされたものである。ここでは PD 漂着量の変動要因の 1 つであり、比較的デ

ータが入手しやすい風向風速と PD 漂着量を比較する。比較に使用した風向風速データは気象庁 (<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>) によって解析地点近傍で観測されたものである（図-1(a)の解析地点拡大図参照）。東西・南北方向の風速と PD 漂着量の 30 日間移動平均を比較した（図-7）。なお、PD 漂着量の破線は欠測期間である（図-6）が、対馬については 2011 年 7 月 26 日の目視計測によって PD 漂着量の急増が確認された（図-6）ため、これを補足情報として図中に示している。

秋期（10-12 月）と冬期（1-3 月）にはどの地点も共通して西寄りの風が卓越しており、特に飛島と対馬ではこの時期に西寄りの強風が連吹していた（図-7）。これは日本海における特徴的な季節風である。この時期に PD 漂着量は対馬と輪島では増加したのに対し、飛島と稚内ではほとんど変化していなかった。春期（4-6 月）と夏期（7-9 月）には秋期や冬期に比べると東寄りの風も吹いており風速は弱い。この時期に飛島と稚内では PD 漂着量がほとんど変化していないが、輪島では 2011 年 4 月に減少し、対馬では 2011 年 7 月に急増していた。このように観測地点によって風速と PD 漂着量の関係に顕著な差異がみられた。

4. 考察

4.1 プラスチックゴミ漂着量の計測誤差について

本研究では黒色や透明色以外の様々な色の PD 画素を Web カメラ画像から検出し、PD 漂着量を計算した。MEB で計算された PD 漂着量と目視で PD 画素を検出して計算された PD 漂着量を比較したところ、解析 4 地点における PD 漂着量の平均計測誤差が 18%であった。従来、人力による海岸調査によって PD 漂着量が計量されてきたが、計測誤差については把握されていない。例えば、藤枝ら（2010）¹⁹⁾は多くの海岸で人力による回収調査を実施して 20L ゴミ袋の袋数からゴミの体積を概算し、瀬戸内海におけるゴミの全量の把握を試みている。この手法では袋内の空隙体積を考慮しないことが誤差要因として考えられるが、誤差の定量的評価は行われていない。これに対し本手法は PD 漂着量の計測誤差を把握した上で、各地点の PD 漂着量を自動的に遠隔計測できるようになったことに大きな意義があると考えている。

Web カメラを用いた PD 漂着量（30 日間移動平均）の計測誤差は日射状況により PD 以外の画素が誤検出されることと PD 画素の一部が検出できないことに起因する。具体的には、PD 以外の画素が誤検出される面積（過大成分）と検出されない PD 画素の面積（過小成分）が移動

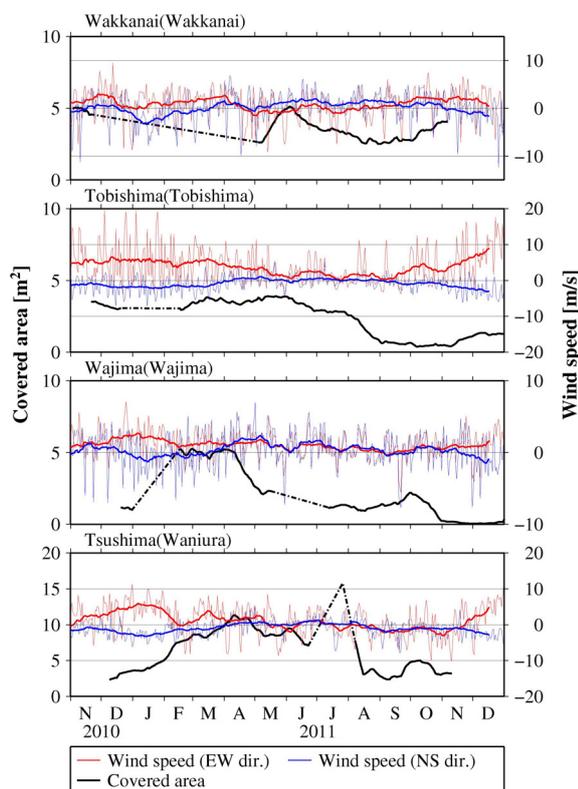


図-7 解析 4 地点における風速と PD 漂着量の比較。なお、観測地点名の隣に気象庁の観測所名を示し、図中の凡例を図下に示す。風速は東西方向では西風、南北方向では南風が正であり、細線は観測された日平均風速、太線は日平均風速の 30 日間移動平均である。

平均によって相殺されるとは限らないためにその差が計測誤差として残るのである。この計測誤差を最小にするためには過小成分と過大成分の各々を小さくすることが必要となる。以下に計測誤差の発生原因を踏まえてそれを最小にするための留意事項について述べる。

PDの一部が検出されないという過小成分の誤差は主としてPDに物の影がかかることに起因する。例えば、PD自体に凹凸があると、日射角度によってPDの凹の部分に陰が落ち、凸部分に比べてその色が暗くなる。また様々なPDが密集して漂着していると、日射角度によっては他のPDの影がかかるためその部分の色が暗くなる。本研究ではこの点を踏まえ、基本的にCRを作成する際には影がかかりやすい凹部分も含めてサンプル画素を選定して作成している。ただし、白色のCRについては乾燥した流木画素が誤検出される可能性が高まるため、影がかかりにくい凸部分のみをサンプル画素として選択して作成している(2.2節参照)。その結果、本研究で使用した白色用のCRは影がかかる部分も対象として作成した場合のそれよりも相対的に小さくなるために白色のPD画素の検出率が低くなった(図-5)。このように過大成分と過小成分の誤差はトレードオフの関係にあり、完全に除去することは困難であるため、移動平均することを念頭におき、PD画素と誤検出される画素の日射状況による色の変化をモニタリングしながら、CRを作成し、その上で画像合成手法の検出頻度や合成期間を適切に設定することが必要となる。

またMEBでは黒色のPD(例えば、黒色の漁業用ブイ)画素は岩盤や漂着物の影の色と同化し、透明色のPD(例えば、ペットボトル)画素はそのPDの背景物(例えば、砂地盤や植生)の色と同化してしまうため、これらの色のPD漂着量は計算できない。今回の解析4地点ではWebカメラ撮影画像を目視で確認する限り、黒色や透明色のPDがほとんど漂着していなかったため、これらを検出できないことによる影響は小さい。しかし、黒色や透明色のPDが相対的に多く漂着する海岸では何らかの方法で黒色や透明色のPD漂着量を加えるような処理が必要となる。例えば、目視で漂着するすべての色のPD画素を検出し、黒色や透明色を除いた全色のPD画素数に対する全色のPD画素数の比を計算しておき、本手法で計算された黒色や透明色を除いた全色のPD漂着量にこの比を乗じることで全色のPD漂着量を推定するといった方法が考えられる。

4.2 プラスチックゴミ漂着量の変動要因に関する一考察

対馬や輪島ではPD漂着量に増減した時期に西寄りの風が観測されていた。解析4地点はいずれも西向きの海岸であるため、西寄りの風が連吹すると、風に伴って生じる波・流れや風圧により漂着量が増減すると推察されるが、同時期に飛島や稚内ではほとんど変化していなかった。このことは岸向きの風が必ずしも漂着量の増減に寄与しないことを示唆している。PD漂着量の増減は基本的に新たに漂着したPD量と波浪などの海象要因により海岸から再漂流したPD量の大小関係で決まると考えられる。また解析4地点は海岸・海底地形が異なるため、同じ岸向きの風が連吹したとしても波の浅水変形過程や形成される海浜流が異なるであろう。

このように、変動要因を詳細に調査するためには各地の海岸・海底地形を踏まえて海岸付近の波や流れを再現し、漂着・再漂流過程を明らかにする必要がある。さらにKako et al.(2011)⁹⁾は東シナ海における数値モデルを用いて粒子追跡計算に基づくHindcast実験を行い、五島列島沖合の漂流ゴミ量の時系列を計算し、五島列島奈留島大串海岸に設置したWebカメラ撮影画像から計算した漂着ゴミ量の時系列¹⁴⁾と比較したところ、両者の変動パターンがよく一致していた。このことはゴミ漂着量の増減は沖合を漂流するゴミ量にも依存することを示唆している。

4.3 Webカメラを用いたプラスチックゴミ漂着量計測の優位性

Webカメラで計測されるPD漂着量はあくまで被覆面積であり体積ではない。また物陰にあるPD量についても直接計測することができない。しかしながら、我々はWebカメラを用いたPD漂着量計測には既往の計測方法と比較して以下のような優位性があると考えている。

Webカメラを用いることでPD漂着量を連続的に取得できるため、その変動要因の解明に役立てられる。これまで世界中で行われてきた数か月毎の人力による海岸調査¹¹⁾では調査間隔よりも時間スケールの短いPD漂着量の変動については不明であるため、自然現象との比較が困難であった。本研究では風データとの比較を示したが、今後、海岸・海底地形を考慮して波や海浜流などの海象データと比較することによりPD漂着量の変動要因の解明が期待できる。

Webカメラを用いたPD漂着量計測は環境負荷を考慮した計画・重点的な海岸清掃にも活用できる。現状ではゴミの漂着状況に応じて適当な時期に年1回の海岸清

掃が行われている。限られた財源の中で環境中に存在する PD を削減するのに最も効果的な海岸清掃を実施するためには、その時期選定が重要である²⁰⁾。磯辺ら(2012)²⁰⁾が示すように Webカメラを用いて計測された漂着量の時系列変動からその海岸における清掃時期の選定基準を定めることで効果的な海岸清掃を行うことが可能である。

また最近 Nakashima et al.(2012)²¹⁾は室内実験に基づきある特定の漁業用ブイに含有する重金属の海岸への年間溶出量を推定した。このような年間溶出量を用いて PD から海岸への化学物質溶出量を評価する際にその海岸の漂着量を計測することは必要不可欠である。したがって Webカメラによって多地点で PD 漂着量を計測し、推定された年間溶出量を用いて PD から海岸への化学物質溶出量を評価することで環境負荷が大きい海岸を重点的に清掃することができる。

またここでは示していないが、MEB では色別に PD 漂着量を評価することも可能である²²⁾。各海岸には漂着する PD の種類には特徴がある。例えば、本研究のモニタリング地点である長崎県対馬市棹崎海岸や Kako et al.(2010)¹⁴⁾のモニタリング地点である長崎県五島市奈留島大串海岸では白い発砲スチロール製の漁業用ブイが多く漂着する。また山形県酒田市飛島では白い漁業用ブイの他、青いポリタンクが多く漂着する。このように海岸に漂着する色別の PD 漂着量において特定の PD が支配的であれば、その特定 PD の発生を抑制することでその海岸の PD 漂着量の削減効果を定量的に評価することもできる。例えば、山形県酒田市飛島では白と青の PD 漂着量が全色の PD 漂着量の 77%を占めていた(白:0.66, 黄:0.08, 赤:0.09, 青:0.11, 緑:0.06)²²⁾。そのため、漁業用ブイと青いポリタンクがなくなれば、飛島袖の浜海岸に漂着する PD 量の 77%を削減できることになる。また色別の PD 漂着量に特定の PD の平均的な高さに乗じることで体積に換算することもできる。実際に海岸清掃を行う前に、このような方法で“予め回収すべき”量が分かっているならば、作業にかかる労力を計る目安となり、適切な費用や人員を手配することも可能であろう。

各海岸に設置した Webカメラシステムは比較的安価なものであり、本研究のように多地点に展開することができる。我々はこの点が Webカメラを用いた PD 漂着量計測の最も大きな利点であると考えている。多地点に展開した Webカメラの撮影画像から本手法を用いて PD 漂着量を計算し、Webカメラによって撮影される海岸面積で割ることで、多くの海岸の PD 漂着密度を計算することもできる。例えば、各都道府県の複数海岸で Webカメラによる PD 漂着量観測を行い、各海岸の PD の漂着密度

を計測したとしよう。計測された PD の漂着密度から各都道府県の平均漂着密度とその標準偏差を計算することができる。これにより日本全国における PD の漂着密度マップの作成、各都道府県の平均漂着密度及び標準偏差に海岸面積をかけることで日本全国における PD 漂着量の総量推計を行うことが可能となり、海岸清掃に係る予算配分に活用することができる。

また我々のプロジェクトでは Webカメラを用いて多地点で計測された PD 漂着量を利用して東アジア海域における海ゴミ輸送実態の解明を試みている。本研究では今回解析した 4 地点の他、太平洋沿岸にも Webカメラを設置し、海岸の撮影を行っている(図-1(a)の○)。今後、これらの Webカメラの撮影画像も解析し、PD 漂着量の時系列変動を明らかにするとともに、海洋数値モデルを併用して東アジア海域における PD 輸送実態を解明していく予定である。

5. まとめ

本研究では、平成 22 年度から日本周辺海域の海流に沿った日本全国の海岸に Webカメラを設置し、得られた Webカメラ撮影画像から様々な色の PD 画素を検出する手法を開発した。本研究で開発した検出手法(以下、MEB)と既往研究の明度を用いた検出手法(以下、ML)で PD 画素の検出率を比較したところ、MEB が様々な色の PD の画素を検出するのに有効な手段であることが示唆された。

MEB を対馬暖流沿いの日本沿岸 4 地点に設置した Webカメラ撮影画像に対して適用し、射影変換手法を併用することで Webカメラ設置日から 2011 年 12 月 31 日までの PD 漂着量(被覆面積)を計算した。日射による影響を 30 日間移動平均で除去し、得られた PD 漂着量の時系列変動を目視計測の PD 漂着量と比較したところ、解析 4 地点における PD 漂着量の平均計測誤差は 18%であったが、両者に有意な正の相関があり、時系列変動は良く一致していた。このことから MEB は多地点に対して適用可能な検出手法であり、PD 漂着量の時系列変動を把握するのに有効な手法であることが示唆された。

Webカメラを用いて計測できるような PD 漂着量の高時間分解能な時系列変動を人力による海岸調査で得ることは事実上不可能である。Webカメラを用いた PD 漂着量計測はこのような高時間分解能な時系列変動を多地点で得られるため、PD 漂着量の変動要因の解明、環境負荷を考慮した計画・重点的な海岸清掃及び海ゴミの輸送実態の解明に利活用できることが期待される。今後我々は

本研究で示した PD 漂着量の時系列変動と海洋数値モデルを用いて東アジア海域における海ゴミの輸送実態を解明していきたいと考えている。

(2012年11月15日受付)

謝辞

本研究は平成 22～24 年度環境省環境研究総合推進費 (B-1007) , および JSPS 科研費 23656309 の助成を受けて行われている。また, 本研究を実施するにあたり, 磯辺篤彦教授 (愛媛大), 青木伸一教授 (大阪大), 加藤茂准教授 (豊橋技科大) による多くの有益な助言を頂いた。また, 日本エヌ・ユー・エス(株)の溝口雅彦氏並びに山本直史氏に Web カメラのシステム構築に関して有益な助言を頂いた。ここに記し深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) Plastics Europe (2011): Plastics – the Facts 2011 An analysis of European plastics production, demand and recovery for 2010, 32 pp.
- 2) Barnes, D.K.A., Galgani, F., Thompson, R.C., Barlaz, M. (2009): Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Phil. Trans. R. Soc. B*, **364**, 1985–1998.
- 3) Derraik, J.G.B. (2002): The pollution of the marine environment by plastic debris: a review. *Mar. Pollut. Bull.*, **44**, 842–852.
- 4) Boerger, C.M., Lattin, G.L., Moore, S.L., Moore, C.J. (2010): Plastic ingestion by planktivorous fishes in the North Pacific Central Gyre. *Mar. Pollut. Bull.*, **60**, 2275–2278.
- 5) Moser, M.L., Lee, D.S. (1992): A fourteen-year survey of plastic ingestion by western North Atlantic seabirds. *Colonial Waterbirds*, **15**, 83–94.
- 6) Shaw, D.G., Day, R.H. (1994): Colour- and form-dependent loss of plastic micro-debris from the North Pacific Ocean. *Mar. Pollut. Bull.*, **28**, 39–43.
- 7) Van Franeker, J.A., Blaize, C., Danielsen, J., Fairclough, K., Gollan, J., Guse, N., Hansen, P.L., Heubeck, M., Jensen, J.K., Le Guillou, G., Olsen, B., Olsen, K.O., Pedersen, J., Stienen, E.W.M., Turner, D.M. (2011): Monitoring plastic ingestion by the northern fulmar *Fulmarus glacialis* in the North Sea. *Environ. Pollut.*, **159**, 2609–2615.
- 8) Teuten, E.L., et al., 2009. Transport and release of chemicals from plastics to the environment and to wildlife. *Phil. Trans. R. Soc. B*, **364**, 2027–2045.
- 9) Kako, S., A. Isobe, S. Magome, H. Hinata, S. Seno and A. Kojima (2011): Establishment of numerical beach-litter hindcast/forecast models: An application to Goto Islands, Japan. *Mar. Pollut. Bull.*, **62**, 293–302.
- 10) Sheavly, S.B. (2007): National Marine Debris Monitoring Program: Final Program Report, Data Analysis and Summary. Final Report, *US Environmental Protection Agency Office of Water*, Washington, DC., 76 pp.
- 11) Ryan, P.G., Moore, C.J., Van Franeker, J.A., Moloney, C.L. (2009): Monitoring the abundance of plastic debris in the marine environment. *Phil. Trans. R. Soc. B*, **364**, 1999–2012.
- 12) Seino, S., Kojima, A., Hinata, H., Magome, S. and Isobe, A. (2009): Multi-Sectoral research on East China Sea beach litter based on oceanographic methodology and local knowledge. *J. Coastal Res.*, **56**, 1289–1292.
- 13) Ribic, C.A., Sheavly, S.B., Rugg, D.J., Erdmann, E.S., (2010): Trends and drivers of marine debris on the Atlantic coast of the United States 1997–2007. *Mar. Pollut. Bull.*, **60**, 1231–1242.
- 14) Kako, S., Isobe, A., Magome, S. (2010): Sequential monitoring of beach litter using webcams. *Mar. Pollut. Bull.*, **60**, 775–779.
- 15) Fairchild, M.D. (2005): Color Appearance Models, second ed. *John Wiley*, New York, 385 pp.
- 16) CIE (1986): Colorimetry, second ed., CIE Publ. 15.2, Vienna.
- 17) Kako, S., A. Isobe and S. Magome (2012): Low altitude remote-sensing method to monitor marine and beach litter of various colors using a balloon equipped with a digital camera. *Mar. Pollut. Bull.*, **64**, 1156–1162.
- 18) 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.
- 19) 藤枝繁・星加章・橋本英資・佐々倉論・清水孝則・奥村誠崇 (2010): 瀬戸内海における海洋ごみの収支, 沿岸域学会誌, **22**(4), 17–29.
- 20) 磯辺篤彦・日向博文・清野聡子・馬込伸哉・加古真一郎・中島悦子・小島あずさ・金子博 (2012): 漂流・漂着ゴミと海洋学-海ゴミプロジェクトの成果と展開-, 沿岸海洋研究, **49**(2), 139–151.
- 21) Nakashima, E., A. Isobe, S. Kako, T. Itai and S

Takahashi (2012): Quantification of toxic metals derived from macroplastic litter on Ookushi Beach, Japan. *Environ. Sci. Technol.*, **46**, 10099–10105.

- 22) Kataoka, T., H. Hinata and S. Kako (2012): A new technique for detecting colored macro plastic debris on beaches using webcam images and CIELUV, *Mar. Pollut. Bull.*, **64**, 1829–1836

国土技術政策総合研究所研究報告

RESEARCH REPORT of NILIM

No. 51 December 2012

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写のお問い合わせは

〔 ̄239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1
管理調整部企画調整課 電話:046-844-5018 〕