

河川漂流ゴミ輸送量に関する 自動モニタリング技術の検討

AN AUTOMATIC MONITORING TECHNIQUE
FOR FLOATING-LITTER TRANSPORT IN RIVERS

尾ノ井龍仁¹・二瓶泰雄²・片岡智哉³・日向博文⁴

Tatsuhito ONOI, Yasuo NIHEI, Tomoya KATAOKA and Hirofumi HINATA

¹学生員 学(工) 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻修士課程
(〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

²正会員 博(工) 東京理科大学准教授 理工学部土木工学科(同上)

³学生員 学(工) 国土交通省国土技術政策総合研究所 沿岸海洋・防災研究部沿岸域システム研究室
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

⁴正会員 博(工) 国土交通省国土技術政策総合研究所 沿岸海洋・防災研究部沿岸域システム研究室(同上)

For comprehensive managements for marine debris including inland area which is known to be a source of marine debris, it is necessary to monitor the behavior of floating-litter in rivers and coasts. In the present study, we presented an automatic and continuous monitoring technique for floating-litter transport L in rivers by using a video image monitoring and a new image processing technique. In this technique, image pixels of floating-litter are detected using spatial gradient of image colors P' larger than a threshold value P'_{th} which is related to image colors in pixels of no floating-litter. The results indicated that L evaluated by the technique gave good agreement with the observed data in several floods in the Edogawa River, demonstrating the fundamental performance of the present technique.

Key Words : *floating litter, flood, automatic monitoring, marine debris, image processing*

1. 序論

沿岸域における漂流・漂着ゴミ問題は、これまで環境面や処理費用・労力の観点で問題視されて来た^{1)~4)}。最近では、我が国で発生し海に流出した震災がれきが太平洋を挟んだ米国やカナダに到着した事例が各地で報告され⁵⁾、グローバルな環境問題としての漂着ゴミ問題が改めてクローズアップされつつある。

沿岸部におけるゴミ堆積状況を把握するために、多くの海岸でモニタリングが行われているが、一斉清掃のように直接ゴミを採取して行われることが一般的である⁶⁾。最近では、Kataokaら⁷⁾がプラスチックなどの漂着ゴミを自動抽出できる画像解析法を開発し、それを用いてWEBカメラから送られてくる海岸の画像データから海岸の漂着ゴミ量を自動連続的にモニタリングし、一部をHPで公開している⁸⁾。また、HFレーダーや数値シミュレーション等を用いて、沿岸部における漂流ゴミの位置予測や海岸への漂着予報も行われている^{9)・10)}。このように、沿岸域における漂着ゴミのモニタリング技術は大

きく進展しており、ゴミ漂着の実態解明が進みつつある。

一方、漂流・漂着ゴミの発生要因としては、陸域が大半を占めることが想定される。そのため、陸域から河川を經由して沿岸域に運ばれる漂流ゴミ輸送量をモニタリングする必要がある。それに対して、著者らは、出水時河川において漂流ゴミの直接採取やビデオモニタリングを行い、河川漂流ゴミには植生などの自然系ゴミが多いなど、出水時のゴミ輸送量の実態を明らかにしつつある^{11)~15)}。また、Watanabeら¹⁶⁾はWEBカメラを用いた流木のモニタリングを行っている。このように、ビデオを用いて、草本や流木を含む漂流ゴミ輸送量のモニタリングが行われているものの、これらの画像解析は自動化されておらず、目視によるゴミ判別が施されており、画像解析に膨大な時間を要する。

本研究では、河川漂流ゴミの自動モニタリング技術を新たに提案することを試みる。ここでは、河川水表面を鉛直方向に撮影したビデオ画像に対して水表面を浮遊する漂流ゴミの抽出を、上記の画像解析法(本手法)により行い、目視によるゴミ判別の方法(従来法)と比較・

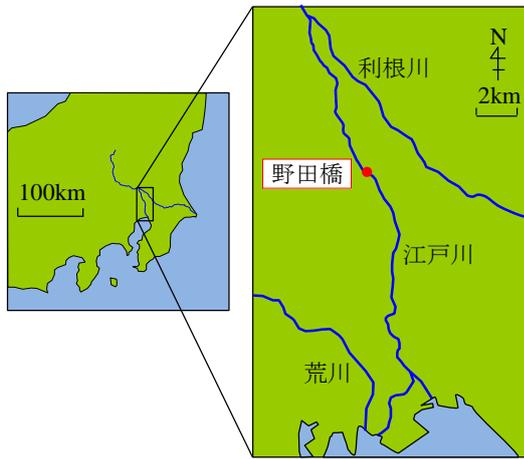


図-1 江戸川・野田橋

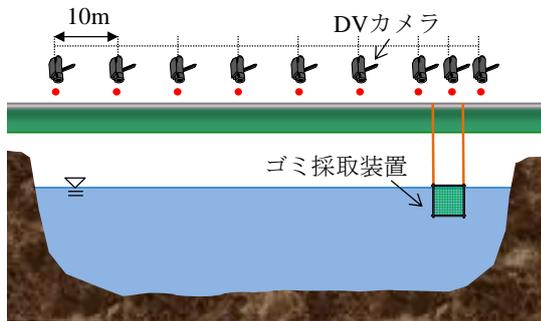


図-2 ビデオモニタリングの模式図

検討する。画像解析対象は、著者らが河川漂流ゴミの直接採取を行っている江戸川とし、いくつかの台風出水時におけるデータとする。これにより、本手法の河川漂流ゴミ輸送量の推定精度を検証すると共に、精度向上のための画像解析法の改良も試みる。

2. 現地観測・データ解析方法について

(1) 現地観測サイトと画像データ取得状況

漂流ゴミ輸送モニタリングが行われたサイトは、図-1に示すように、東京湾に流入する大河川の一つである江戸川・野田橋（河口から+39km）である。この地点では、低水路幅 100m、右岸側高水敷幅 300mの複断面河道となっている。低水路河岸から高水敷にかけてヨシやオギ等といったイネ科植生やヤナギ等の低木が繁茂している¹⁴⁾。観測断面を通過するゴミ輸送量を算出するために、図-2のように、デジタルビデオ(DV)カメラ(XDR-XR550V, SONY(株)製)を用いて漂流ゴミ輸送状況のビデオモニタリングを行う。ここでは、横断面全体の輸送状況を把握するために、ビデオモニタリングは横断面内の複数地点で行っている。また、画像解析データと比較するために、ゴミの直接採取も行っており、採取場所は図-2に示すように、低水路の右岸側である。DVカメラの具体的な撮影方法やゴミ採取装置による漂流ゴミの回収方法につい

ては、著者らの論文^{11), 12)}を参照されたい。本論文で用いるデータは、ゴミの直接採取とビデオモニタリングが同時に行われた 2010/9/24, 10/31, 11/1 のものであり、この時の天候はそれぞれ曇り、曇り時々雨、晴れであった。またビデオモニタリングのみの観測として 2011/9/2 の結果も用いる。

(2) 従来法の概要

従来法¹²⁾である目視によるゴミ判別手法の概要を述べる。まず、得られた動画を適当な時間間隔で静止画に分割し、各画像上に幅 1m の検査線を設定する。目視でゴミを判定し、その検査線上に占めるゴミの割合 D_f を求める。また、直接採取された漂流ゴミの単位幅輸送量 L と画像解析結果 D_f の相関関係を調べ、その関係式に基づいてビデオモニタリング結果のみから横断面全体のゴミ輸送量を算出している。

(3) 本手法の概要

本手法では、撮影された水表面上の漂流ゴミの有無を区別するために、RGB 値の空間勾配に着目する。一例として、出水時に漂流ゴミを撮影した画像（江戸川・野田橋, 2011/9/2 16:18 撮影, 図-3(a)）において、ある高さ ($y=200[\text{pixel}]$) における線上の RGB 値の合計 P 及びその空間勾配 P' を求めた結果を図-3(b)に例示する。ここでの空間勾配 P' の算出には、エッジ抽出に使われる sobel filter¹⁷⁾に基づく次式を用いる。

$$F_{k,l} = \begin{pmatrix} P_{i-1,j-1} & P_{i,j-1} & P_{i+1,j-1} \\ P_{i-1,j} & P_{i,j} & P_{i+1,j} \\ P_{i-1,j+1} & P_{i,j+1} & P_{i+1,j+1} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$DX_{k,l} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad DY_{k,l} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$P'_x = \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^3 F_{k,l} DX_{k,l}, \quad P'_y = \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^3 F_{k,l} DY_{k,l} \quad (3)$$

$$P'_{i,j} = \sqrt{P_x'^2 + P_y'^2} \quad (4)$$

これは、対象とする画素 (i,j) における色の空間勾配を求めるために、 (i,j) を含む周囲の 9 画素における RGB 値(式(1))に式(2)の行列式を掛けたものの二乗和である(式(3), (4))。同図に示された P' と P を見ると、漂流ゴミがある箇所では、RGB 合計値 P には若干変化が見られるものの、色の空間勾配 P' は大きく変動している。ここで、生画像から確認できる水面波の箇所でも色 P の変動は生じるが、色の空間勾配 P' は漂流ゴミと比べると相対的に低い値を示している。すなわち、漂流ゴミのある画素では、色の空間勾配 P' が大きく、この P' を用いることによ

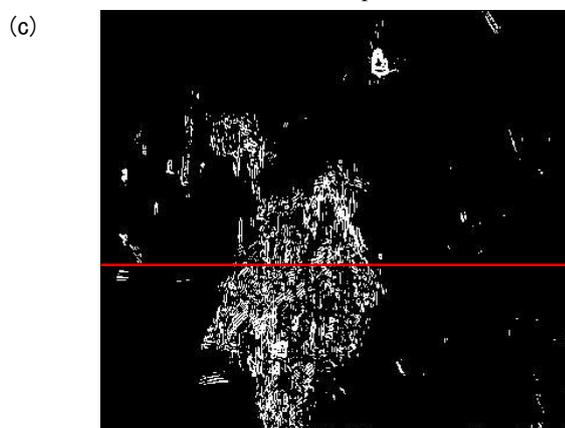
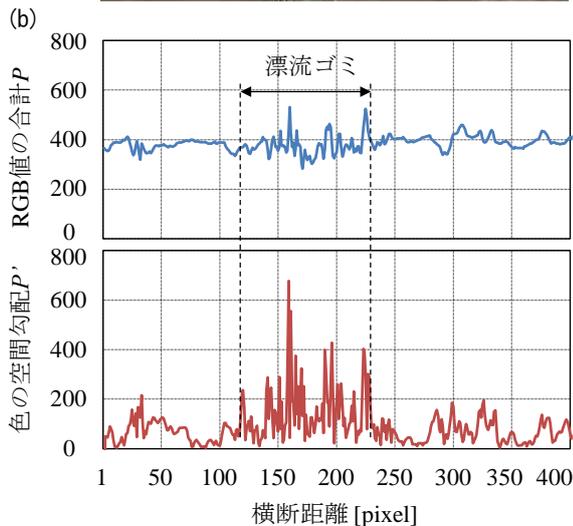
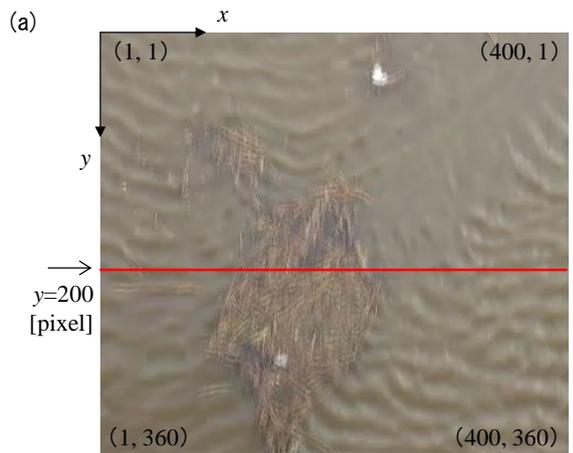


図-3 本手法による漂流ゴミ位置の抽出例（生画像(a)とある線上におけるRGB値の合計 P とその空間勾配 P' の x 方向変化(b), それによるゴミ判定後の画像(c), 撮影日: 2011/9/2 16:18)

り、漂流ゴミと周囲の水面を区別できているものと思われる。この際、漂流ゴミの有無を判別する閾値 P'_h を200として、その閾値を越える P' の画素を漂流ゴミメッシュと見なすと、図-3(c)の二値化された画像のようにゴミを判別できることとなる。ここで対象とする河川漂流ゴミの大部分は植生などが占めるため、本手法でも適用できると考えられるが、海ゴミで多く見られるプラスチックなどは色の空間勾配が低いことが予想され、別途検討が

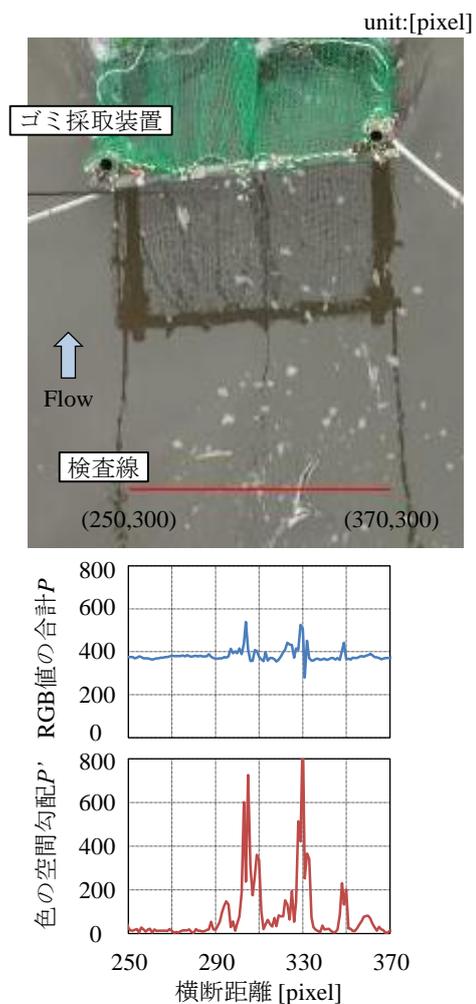


図-4 ある画像の検査線上におけるRGB合計値 P とその空間勾配 P' の横断分布 (2010/9/24 9:06, ゴミ採取地点)

必要である。また、このようなやり方で河川漂流ゴミを抽出できているのか及びゴミ判別のための閾値の設定など検討すべき課題があり、その検討結果を以下に示す。

3. 結果と考察

(1) 漂流ゴミ判別に対する本手法の基本性能の検証

漂流ゴミ輸送量算定を目的とした本手法の基本性能を調べるために、本手法と従来法によるゴミ判別状況を比較する。ある画像 (2010/9/24 9:06 撮影, ゴミ採取地点) を対象に、従来法において必要となる検査線を設定し、この検査線上におけるRGB合計値 P とその空間勾配 P' の横断分布を図-4に示す。ここでは、ゴミの直接採取と同時に撮影が行われたものであり、ゴミ採取装置の上流側に検査線を設定し、ゴミ採取量と従来法によるゴミ判別結果の相関式を求めるのに使用された画像である¹³⁾。なお、図中の横軸は、対象画像の左上を原点とし、そこからの画素数を表示している。これより、画像から漂流ゴミが判別できる位置では、色の空間勾配 P' が顕著に高

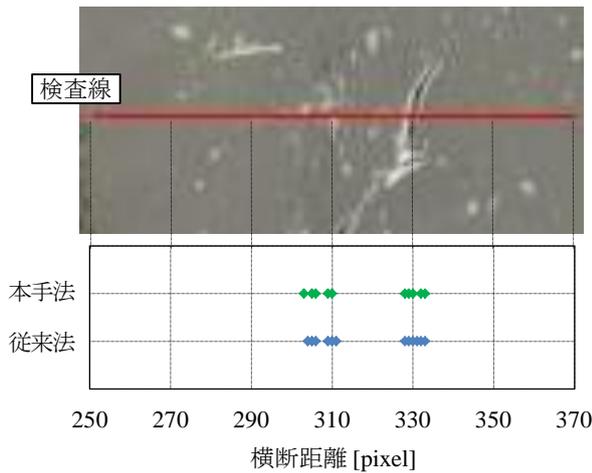


図-5 本手法と従来法により判定された検査線上における漂流ゴミ画素位置の横断分布 (閾値 $P'_{th}=300$)

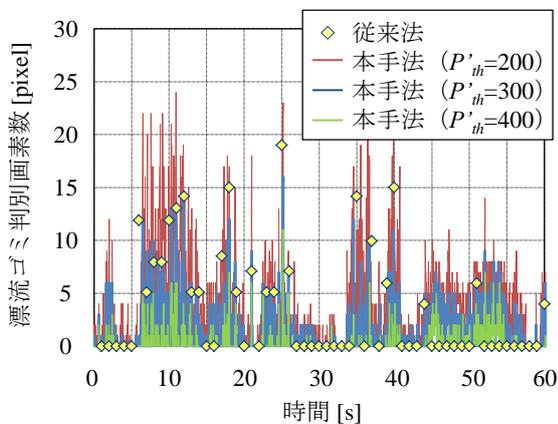


図-6 本手法と従来法による漂流ゴミ判別画素数の時間変化 (2010/9/24 9:06:10から1分間)

い値を示している。そこで、このデータに対して、色の空間勾配がある閾値 P'_{th} を上回る画素と従来法の見視で判別されたゴミ位置の横断分布を図-5に示す。ここでの閾値 P'_{th} は 300 とする。これより、目視による従来法と自動判別可能な本手法によるゴミ判別された画素はほぼ同様の位置に検知された。また、これらの画素数は本手法、従来法でそれぞれ 9, 10 [pixel] となり、両者は概ね一致している。これより、本手法は従来法と同程度の精度で漂流ゴミを判別し得る可能性があることが示唆された。

(2) 漂流ゴミ判別用の閾値 P'_{th} の設定

より多くのデータを用いて、本手法による漂流ゴミ判別精度を調べるために、図-4, 5 と同一地点・時刻で一分間連続して撮影された動画データ (1800 枚の静止画像) を用いて、本手法と従来法により得られた漂流ゴミ判別画素数の時間変化を図-6に示す。ここでは、本手法における色の空間勾配の閾値 P'_{th} を 200, 300, 400 とした場合の結果を表示している。また、従来法の見視解析は 1 秒間隔で実施された。これより、本手法による結果は時間

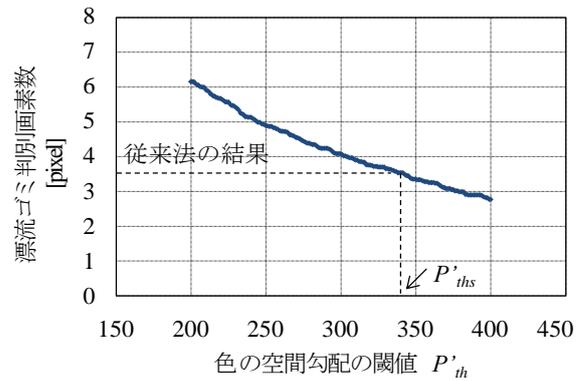


図-7 本手法における漂流ゴミ判別画素数の平均値と色の空間勾配の閾値 P'_{th} の関係 (2010/9/24 9:06:10 から 1 分間の全データを対象)

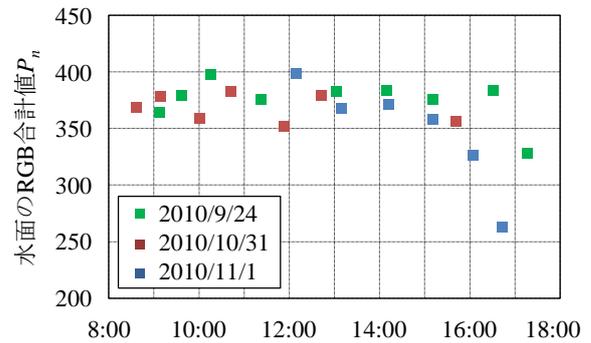


図-8 各観測日における漂流ゴミが無いと判別された画素における RGB 合計値 P_n の時間変化

変動が大きいものの、全体的な時間変化パターンは従来法と概ね類似する。また、閾値が大きくなると、ゴミと判別される画素数は減少していることが分かる。

上記と同じ動画データに対して、色の空間勾配の閾値 P'_{th} を様々に変化させ、漂流ゴミと判別された画素数の平均値を算出した結果を図-7に示す。ここでの平均値は 1 分間の全データに対するものである。また、図中には、従来法により判別された結果の平均値も表示している。これより、前述した結果と同様に、閾値 P'_{th} が大きくなると漂流ゴミ判別画素数は小さくなる。この動画データの場合では、従来法のゴミ判別画素数 3.5 [pixel] と最も近い閾値 P'_{th} は 342 となっている。このように、色の空間勾配の閾値 P'_{th} の設定を適切に行えば、漂流ゴミの判別を精度良く行えるが、画像解析の自動化を行う上では、閾値の設定を何らかの形で行う必要性が生じる。

このような色の空間勾配の閾値 P'_{th} は、日射量や太陽高度、河川水の濁度、波立ち状況などの様々な環境要因と関係しているものと思われる。しかしながら、これらの環境要因データの多くを取得できていないため、まず、河川の水の色そのものの特徴を把握する。そこで、前述した検査線上において、「漂流ゴミ無し」と判別された画素における RGB 合計値 P_n の時間変化を図-8に示す。ここで、漂流ゴミ無し判別の条件は色の空間勾配 P' が 50

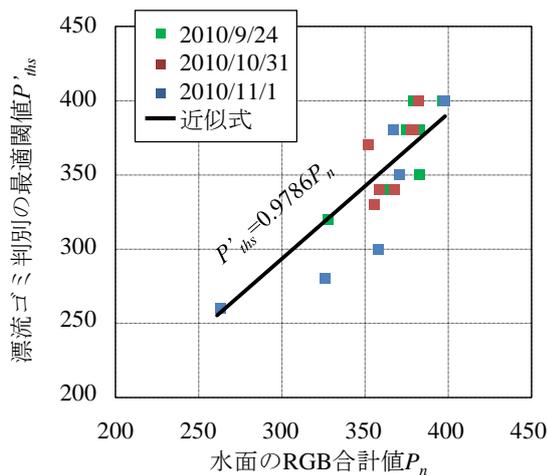


図-9 ゴミ無し判別画素における RGB 合計値 P_n と漂流ゴミ判定の最適閾値 P'_{ths} の相関関係 (図-8 と同じデータ採用)

以下であり、その画素における RGB 合計値を平均したものを P_n としている。また、対象とした画像はゴミ採取を行った 2010/9/24, 10/31, 11/1 であり、対象地点は、ゴミ採取を行った地点である。これより、RGB 合計値 P_n は、日によって変化し、同一日でも時間帯によって異なっている。特に、日が陰る午後 4 時以降では RGB 合計値 P_n は極端に減少している。このように、ゴミ無し画素における RGB 合計値 P_n は日射条件を含めて様々な環境要因の変化を反映しているものと推察される。

この P_n は、漂流ゴミの背景色とも見なせることから、上述したゴミ判別の閾値設定と大きく関わっている可能性がある。そこで、ゴミ無し判別画素における RGB 合計値 P_n と漂流ゴミ判別の最適閾値 P'_{ths} の相関関係を図-9 に示す。ここでは、図-8 と同じ画像データを採用している。また、漂流ゴミ判別の最適閾値 P'_{ths} は、各地点で撮影された 1 分間の動画データに対して、本手法と従来法で判別された漂流ゴミの画素数が最も近くなる色の空間勾配の閾値であり、その一例は既に図-7 に示している。これより、漂流ゴミ判別の最適閾値 P'_{ths} は、ゴミ無し判別画素における RGB 合計値 P_n と共に増加しており、両者の間には、以下に示される相関式が得られた。

$$P'_{ths} = 0.9786P_n \quad (5)$$

上式の相関係数 r は 0.85 であり、概ね良好な相関関係が得られている。以上より、ゴミ無し画素における水の色情報 (RGB 合計値 P_n) を入手すれば、漂流ゴミ判別に必要な色の空間勾配 P' の最適閾値 P'_{ths} を与えることができ、ゴミ判別を精度良く行えるものと考えられる。

(3) 単位幅ゴミ輸送量に関する本手法の推定精度

本手法によるゴミ輸送量推定精度を調べるために、本手法と従来法により判別された漂流ゴミの画素数の時間

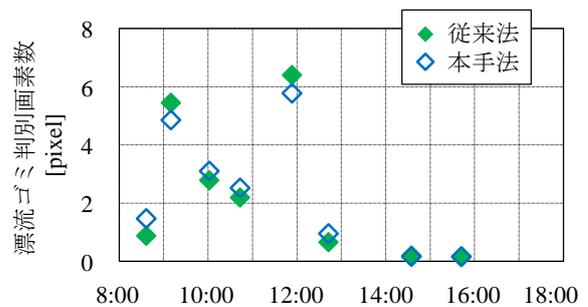


図-10 従来法及び本手法における検査線上の漂流ゴミ判別画素数の時間変化 (2010/10/31)

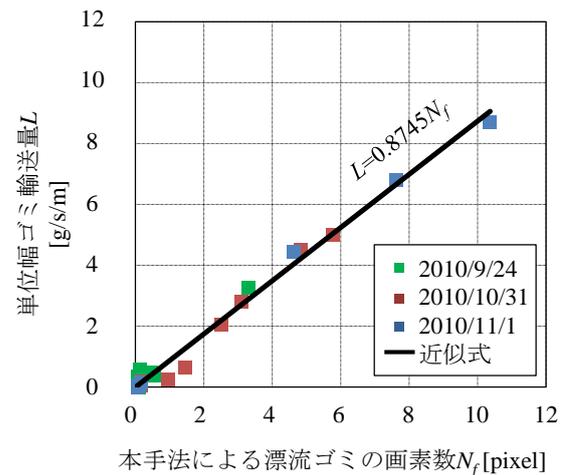


図-11 本手法による漂流ゴミ判別画素数 N_f と単位幅ゴミ輸送量 L の相関図

変化を図-10 に表示する。ここでは、図-8 と同じく、ゴミの直接採取を行った地点における同一の検査線上のデータを対象とし、観測日は 2010/10/31 である。これを見ると、本手法により推定された漂流ゴミの画素数は、従来法と概ね一致した時間変化をしている。このように、漂流ゴミの判別について、本手法は従来法と同程度の精度である。従来法では、目視により一個一個の静止画から漂流ゴミ位置を抽出するため、画像解析を行う時間と労力が膨大になるが、本手法では、それらの手間を大幅に省いた形で高精度にゴミ判別できていることが分かる。

さらに、本手法による漂流ゴミ判別画素数と直接採取された漂流ゴミの単位幅輸送量実測値の相関図を図-11 に示す。これより、本手法による解析結果は実測値と概ね一致しており、次式に示す相関式が求められた。

$$L = 0.8745N_f \quad (6)$$

この相関係数 r は 0.99 であり、本手法の漂流ゴミ輸送量の推定精度が極めて良好であることが明らかとなった。

以上の結果をまとめると、本手法における漂流ゴミ輸送量の推定手順は、図-12 のようになる。

4. 結論

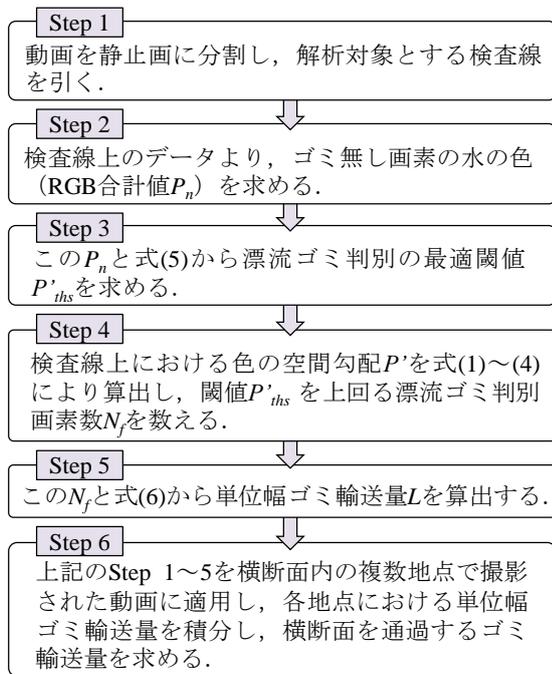


図-12 本手法における解析フロー

本研究で得られた主な結論は、以下の通りである。

(1) 漂流ゴミがある位置では、ゴミの無い水面よりも相対的に P' の変動が大きく、 P' がある閾値 P'_{ths} を上回る画素を漂流ゴミメッシュと見なすことで、画像内のゴミを自動的に判別できる可能性が示唆された。

(2) 漂流ゴミを判別するための最適閾値 P'_{ths} は、漂流ゴミが無いと判別された画素の RGB 合計値 P_n と概ね良好な相関性が見られた。この両者の関係式を用いることにより、画像内における水面の色のみから自動的に最適閾値 P'_{ths} を算出することが可能となり、漂流ゴミ判別を高精度かつ自動的に行うことが可能となった。

(3) 本手法と従来法により判別された漂流ゴミの画素数の時間変化より、漂流ゴミの判別について、本手法は従来法と同程度の精度であり、また本手法による漂流ゴミ判別画素数と直接採取された漂流ゴミの単位幅ゴミ輸送量実測値の相関係数 r は 0.99 であり、本手法による漂流ゴミ輸送量の推定精度が極めて良好であることが明らかとなった。このように、本手法は従来法と同精度で、かつ、短時間で画像解析が可能となり、極めて有効な自動モニタリング手法となり得る。

なお、WEBカメラなどを横断面内の複数地点に設置して、自動転送される画像データを本手法により自動解析し、河川漂流ゴミ輸送量の自動モニタリング化が実現できるものと考えられ、今後実施する予定である。

謝辞：本研究の一部は、(財)河川環境管理財団の河川整備基金助成事業(研究代表者：二瓶泰雄)によって実

施され、東京理科大学理工学部土木工学科水理研究室学生には、大変な観測作業を実施して頂いた。また本手法の基となる画像解析手法は、平成22~24年度環境省環境研究総合推進費 B-1007(代表者：磯辺篤彦)とJSPS科研費 23656309(代表者：日向博文)の一部補助を受け、環境研究総合推進費及び科研において開発された。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 小島あずさ, 眞淳平: 海のゴミ—拡大する地球環境汚染, 中公新書, pp.1-232, 2007.
- 2) 山口晴幸: 外国から漂着するゴミによる海岸汚染, 土木学会誌, Vol.83, No.3, pp.60-62, 1998.
- 3) 藤枝繁, 小島あずさ, 兼広春之: ディスパーザブライターを指標とした海岸漂着ごみのモニタリング, 廃棄物学会論文誌, Vol.17, No.2, pp.117-124, 2006.
- 4) 岡野多門, 安本幹, 安藤重樹: 人工素材海浜ごみに対する台風の影響, 廃棄物資源循環学会論文誌, Vol.21, pp.226-235, 2010.
- 5) 読売新聞社: 米漂着の震災がれき 大量の生物も, 2012年9月3日.
- 6) 藤枝繁, 小島あずさ, 金子博: 国内海岸漂着ごみのモニタリング手法の整理と今後の進め方, 沿岸域学会誌, Vol.18, No.4, pp.93-100, 2006.
- 7) T. Kataoka, H. Hinata and S. Kako: A new technique for detecting colored macro plastic debris on beaches using webcam images and CIELUV, *Mar. Pollut. Bull.*, Vol. 64, pp.1829-1836, 2012.
- 8) <http://www.ysk.nilim.go.jp/kakubu/engan/enganiki/umigomi/index.html>.
- 9) 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, Vol.45, No.2, pp.105-114, 2008.
- 10) S. Kako, A. Isobe, S. Magome, H. Hinata, S. Seino, and A. Kojima: Establishment of numerical beach litter hindcast/forecast models: an application to Goto Islands, Japan, *Mar. Pollut. Bull.*, Vol.62, pp.293-302, 2011.
- 11) 二瓶泰雄, 若月宣人: 洪水時河川における浮遊ゴミ輸送量計測の試み, 土木学会論文集 B, Vol.66, No.1, pp.19-24, 2010.
- 12) 二瓶泰雄, 白川明宏, 鈴木達裕, 赤松良久: 出水時大河川における浮遊ゴミ輸送特性に関する現地観測と湾内 DO 環境へ及ぼす影響, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.66, No.1, pp.1171-1175, 2010.
- 13) 尾ノ井龍仁, 二瓶泰雄: 水位時間変化率に基づく新たな漂流ゴミ輸送量評価法の提案, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.67, No.2, pp.1076-1080, 2011.
- 14) 加茂川優紀, 二瓶泰雄: 出水時における河川内草本類の破壊条件に関する基礎的研究, 河川技術論文集, Vol.17, pp.239-244, 2011.
- 15) 守田千里, 二瓶泰雄, 尾ノ井龍仁: 携帯電話搭載型フローターによる河川漂流ゴミ挙動の検討, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.68, No.4, pp.1363-1368, 2012.
- 16) Y. Watanabe, H. Shirai and R. Akahori: Observation on flowing driftwoods using remote controlled camera, *Proc. of 18th IAHR-APD, 2012*(CD-ROM, 8pages).
- 17) 奥富正敏: デジタル画像処理, CG-ARTS 協会, pp.116-117, 2012.

(2012.9.30 受付)