

# 最上川における漂流ごみ全体及び流木輸送量の把握と漂流ごみ対策技術の検討

## STUDY ON TOTAL FLOATING-LITTER AND DRIFTWOODS TRANSPORT IN MOGAMI RIVER AND COUNTERMEASURES FOR FLOATING-LITTER

南まさし<sup>1</sup>・二瓶泰雄<sup>2</sup>・西島拓駿<sup>3</sup>・片岡智哉<sup>4</sup>・日向博文<sup>5</sup>  
Masashi MINAMI, Yasuo NIHEI, Hirotoishi NISHIJIMA, Tomoya KATAOKA  
and Hirofumi HINATA

<sup>1</sup>正会員 修 (工) パシフィックコンサルタンツ(株) (〒980-0811 宮城県仙台市青葉区一番町1-9-1)

<sup>2</sup>正会員 博 (工) 東京理科大学教授 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

<sup>3</sup>非会員 学 (工) (株)大林組 (〒461-8506 愛知県名古屋市東区東桜1-10-19)

<sup>4</sup>正会員 博 (工) 国土交通省国土技術政策総合研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

<sup>5</sup>正会員 博 (工) 愛媛大学大学院教授 理工学研究科生産環境工学専攻 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

Although marine debris is a main environmental issue in coasts, total floating-litter and driftwood transport through rivers are still unclear. In this study, we carried out an automatic and continuous monitoring system for floating-litter transport in Mogami River and evaluated total floating-litter transport and driftwoods transport. The results indicated that the total floating-litter and driftwood transport in flood conditions was at least several hundred times that in low-flow conditions. Driftwood transport was about 10 % of the total floating-litter transport. To collect the floating-litter in rivers, we conducted 3D flow simulation for measure performance of a new design in which several fences are set at outer bank in rivers.

**Key Words :** floating litter, driftwood, marine debris, image analysis, countermeasure for debris

### 1. 序論

海ごみは海岸や沿岸海域を漂流し、その一部は海岸に漂着している。これらの海ごみは、景観・水底質環境の悪化といった環境面や多大な処理費用・労力を要するため世界的な沿岸環境問題となっている<sup>1)・2)</sup>。また、海域のみならず、河川に漂流・堆積している“川ごみ”も注目されつつある<sup>3)</sup>。特に、海ごみの起源として、約8割が陸域であるとの報告<sup>4)</sup>から、海・川ごみを分けることなく、ごみの発生源である陸域を含めた海・川ごみ対策の立案及び管理が必要となっている。

漂流ごみは、一般に、草本類や木本類などの自然系ごみと、ガラス瓶やプラスチックなどの人工系ごみに分類される<sup>5)</sup>。後者としては、プラスチックが細分化し、生物の摂取が容易となるマイクロプラスチック (MP) の問題も指摘されている<sup>6)・7)</sup>。このうち、MPを含む人工系ごみは水底質環境や生態系への影響が懸念されるため注目される一方、漂流ごみ全体の体積としては大部分を自然系ごみが占めている<sup>5)・8)</sup>。また、自然系ごみの一つである「流木」は、最近、橋にせき止められること

により河道閉塞が生じ、それに伴い洪水氾濫が引き起こされるといった防災面においても注目されている。

以上のことから、流域圏の海・川ごみ管理・対策の実現には、陸域から河川、海岸に至るごみの発生・輸送・漂着過程を、可能な限りごみの種類別に明らかにすると共に、漂流ごみ対策技術の確立が強く求められている。それに対して、著者らは、他に先駆けて、出水時河川において漂流ごみの直接採取やビデオモニタリング、GPSフロート調査を実施している<sup>5)・8)~12)</sup>。最近では、インターバルカメラの撮影画像と画像解析手法を用いる河川漂流ごみ輸送量の自動連続モニタリングシステムを構築している(南ら<sup>13)</sup>、以下、前報と称す)。これにより、河川を通過する漂流ごみ輸送量の連続モニタリングや定量評価が可能となっている。しかしながら、そこでは、漂流ごみの種類は不明であり、特に防災・環境面でのインパクトが大きい流木の輸送量については抽出できていない。また、海ごみ発生量を減らすべく、河川において漂流ごみ捕捉技術が必要となるが、一般に、それらの検討すら行われていないのが現状である。

本研究では、前報と同じく、海ごみ問題が顕在化している山形県最上川における河川漂流ごみ輸送量モニタリ

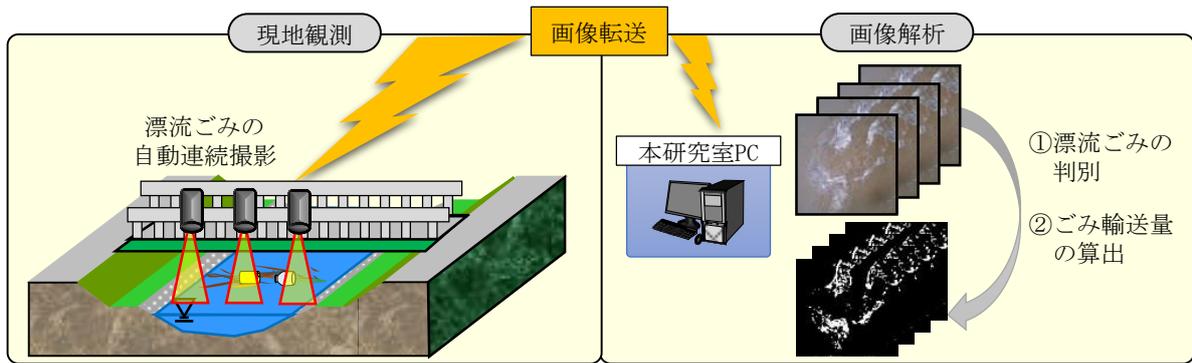


図-1 本モニタリング手法の基本的構成

ングを実施し、最上川における漂流ごみ全体の輸送量及び流木輸送量を計測・算出し、年平均輸送量や流木サイズ分布を定量評価する。また、漂流ごみ輸送の特徴を踏まえた効率的な漂流ごみ捕捉方法を提示する。

## 2. 現地観測・データ解析方法の概要

### (1) 河川漂流ごみモニタリング手法の基本構成

前報において開発された河川漂流ごみの自動連続モニタリング手法の基本的な構成に関する模式図を図-1に示す。まず、現地観測では、橋上に複数台のカメラを設置し、鉛直下向きに河川水表面を撮影する。これにより、横断方向に非一様な漂流ごみ輸送量分布の計測にも対応可能である。また、ネットワークを用いて撮影画像を転送し、PC上において画像解析を行い、各画素の漂流ごみの判別及び漂流ごみ輸送量の算定を行う。これより、無人・自動かつリアルタイムで河川漂流ごみ輸送量モニタリングが可能なシステム構成となっている。

本論文では、対象サイトのインターネット環境が必ずしも良好でないことと、リアルタイムで漂流ごみを把握する必要が小さかったため、画像転送は行っていない。そのため、用いるカメラとしては、比較的安価であり、任意の時間間隔（1秒～24時間）で長時間の撮影ができるタイムラプスカメラ（TLC, CBR-200, BRINNO社製）を選定している。また、漂流ごみ全体に関しては、自動抽出が可能な画像解析法<sup>13)</sup>を構築しているが、流木抽出に関する画像解析の自動化には着手できなかったため、流木に関しては目視での解析を行う。漂流ごみのうち、自然系の植生や人工系ごみの種類判定に関しては研究対象としておらず、別途検討する予定である。なお、本手法を適用できない夜間（18時～翌6時）では、後述の図-6に示す各輸送量 $L$ と流量 $Q$ の相関関係（ $L$ - $Q$ 関係）を作成し、それを用いて補間を行っている。

### (2) 観測サイトと現地観測状況

本研究における観測サイトは、前報と同じく、図-2に

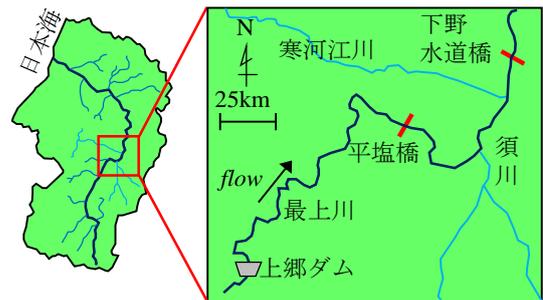


図-2 観測対象サイト

示す最上川・下野水道橋（河口から114km）と平塩橋（河口から132km）の2断面である。最上川は全長229km、流域面積7,040km<sup>2</sup>であり、両地点の流域面積は下野水道橋では3,527km<sup>2</sup>、平塩橋では2,086km<sup>2</sup>である。この2断面間には、支川である須川（流域面積696km<sup>2</sup>）と寒河江川（流域面積478km<sup>2</sup>）が合流しており、これら支川からのごみの流入も考えられる。

今回は河川水表面を漂流するごみを効率的に捉えるために、下野水道橋に3台、平塩橋に2台のインターバルカメラを設置した。カメラの撮影設定は、解像度1280×720[pixel]、撮影間隔は10秒とした。観測期間は長くて2014年6月から2015年1月であり、その間、台風1408、1418、1419号と来襲し、このうち台風1408号は年最大出水となり、支川（吉野川）の洪水氾濫も生じた。本研究では、これらの台風出水を主な解析対象とする。

### (3) 画像解析手法

タイムラプスカメラで得られた静止画に対して、漂流ごみ全体及び流木の抽出と輸送量算出を行う。まず、漂流ごみ全体に関しては、前報と同じく、物体のエッジ抽出に用いられるsobel filter<sup>14)</sup>を用いて、各画素のRGB値の合計値 $P_n$ の空間勾配 $P'$ を求め、その $P'$ がある閾値 $P'_{th}$ を上回る画素を漂流ごみメッシュとして判別する。その際、漂流ごみを存在形態としてバラバラ型と塊型に分類し、塊型ごみの場合には色の空間勾配 $P'$ に対して移動平均操作（5×5画素）を行い、それに対して新たに閾値 $P'_{th}$ を設定し、漂流ごみの判別を行っている。本手法の詳細や有効性に関しては前報を参照されたい。

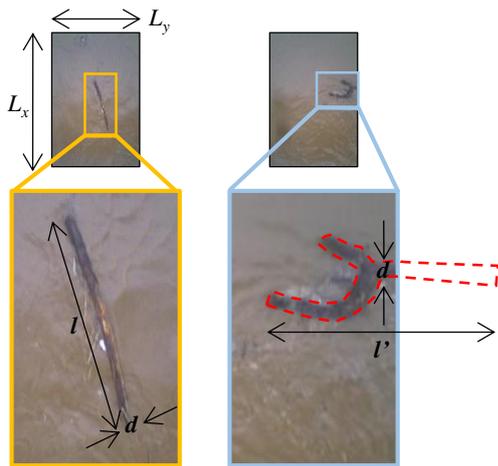


図-3 撮影画像と流木判別状況（左：流木が全て写るケース，右：流木が見きれぬケース）

前報の画像解析手法では、流木や人工系・植生の自動判別はなされていない。そこで、本論文で対象とする流木に関しては、その数と大きさを撮影画像中から目視によって判別する。まず、図-3に示すように、撮影画像中から、所定の長さ（本研究では0.5m）以上の流木を見つける。その際、水位変化に伴ってカメラと水面までの距離 $Z$ も変化するため、1画素のサイズと距離 $Z$ の関係式を別途求める。得られる流木としては、図中左側のように全体が写っているものは全長 $l$ と直径 $d$ を直接測れるが、図中右側のように流木が見切れるケースもある。そこで、見切れた流木については、直接計測できた流木の直径から、5cm以下、5~10cm、10cm以上の3つに分類し、それぞれについて全長 $l$ と直径 $d$ の相関関係を求め、それを用いて直径 $d$ から全長 $l$ を推定する。また、撮影時間間隔 $\Delta t$ が粗いと流木が画像に写らずに流下するため、カウントされた流木本数に $U\Delta t/L_x$ を掛け補正する（ $U$ ：平均水表面流速、 $L_x$ ：流下方向撮影範囲）。さらに横断面全体の流木輸送量を求めるには各カメラで得られた本数に $b/L_y$ を掛ける（ $b$ ：1台のカメラがカバーする横断幅、 $L_y$ ：横断方向撮影範囲）。また、河川（河口から12km、27km地点の砂州）や最上川河口周辺海岸に堆積している流木サイズも計測した（2015/8/31実施）。

### 3. 観測結果と考察

#### (1) 出水時漂流ごみ全体・流木輸送量の時間変動特性

出水時最上川における河川漂流ごみ全体及び流木の輸送状況を把握するために、上流側（平塩橋）と下流側（下野水道橋）の断面全体を単位時間あたりに通過する漂流ごみ全体の輸送量及び流木輸送量の時間変化を図-4に示す。ここでは、例として両断面のデータが同時に良好に取得できた台風1418号出水時における結果（体積換算）を表示している。また、流量としては、国交省の水

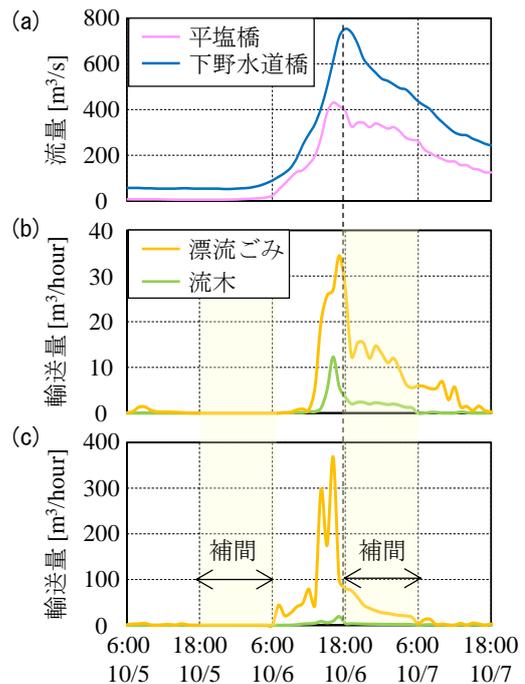
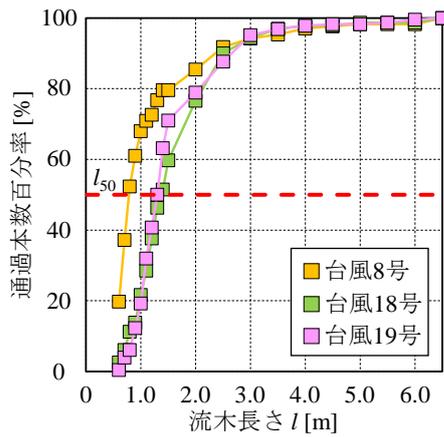


図-4 流量(a)及び漂流ごみ全体・流木輸送量（平塩橋(b)、下野水道橋(c)）の時間変化（台風1418号）

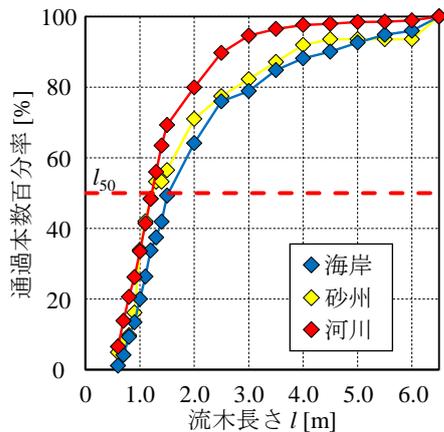
文水質データベースより平塩橋では中郷観測所、下野水道橋では下野観測所のデータを表示する。これより、両地点における漂流ごみ全体・流木輸送量のどちらも流量と共に増加し、概ね流量のピーク時にピークを迎え、その後減少し、翌日にはほぼ0となった。これらのピーク時における各輸送量を平常時と比べると、平塩橋では概ねごみ全体は200倍、流木は1100倍、下野水道橋ではごみ全体は480倍、流木は720倍となっている。このときの流量の比率がそれぞれ、55倍、13倍であることから漂流ごみ全体や流木の輸送が出水時に卓越していることが分かる。また、両断面における河川漂流ごみ全体と流木の輸送量を比較すると、河川漂流ごみ全体、流木共に、下流側の下野水道橋が上流側の平塩橋よりも大きくなっている。また、本出水イベント全体における漂流ごみ全体と流木輸送量は、下野水道橋では全体が $1903\text{m}^3$ 、流木が $93\text{m}^3$ 、平塩橋では全体が $384\text{m}^3$ 、流木が $51\text{m}^3$ となっており、漂流ごみ輸送量全体に対して流木の占める割合は概ね1割程度となっている。なお、残りの9割の大半は植生などの自然系ごみが大半を占めていた。

#### (2) 流木サイズ分布特性

ここで得られた流木観測結果から流木長さの特徴を把握するために、土質力学で用いられる粒径加積曲線に倣って、流木長さ $l$ の累計加積曲線を図-5(a)に示す。ここでは、3つの出水イベント（台風1408、1418、1419号）において良好にデータを取得することができた下野水道橋を対象とし、縦軸を土砂の通貨質量百分率の代わりに“通過本数百分率”としている。これより、出水時流



(a) 出水イベント間の比較



(b) 河川（流下）と海岸・砂州（堆積）の比較  
図-5 流木長さの累計加積曲線（下野水道橋）

下中の流木サイズ中央値の $l_{50}$ は0.78m~1.37m となり、河川においては流木全体や幹が漂流するケースよりも、折れた枝が漂流するケースが高いことが示された。なお、出水イベント間では累計加積曲線に大きな差はない。

また、河川や海岸の堆積流木のサイズと比較したものを図-5(b)に示す。ここでは、河川や海岸に堆積していた流木に関しては複数地点の結果の平均値を採用し、流下中の流木に関しては下野水道橋における3つの出水時の結果を平均化している。これより、三者は比較的類似しており、河川を流下し、その下流河川や海岸に漂着する流木はそれほど大きさを変えていないことが伺える。

### (3) 漂流ごみ全体・流木のL-Q関係

汚濁負荷評価で一般に用いられる輸送量 $L$ と流量 $Q$ の関係式( $L-Q$ 式,  $L=aQ^b$ ,  $a, b$ : 係数)について、漂流ごみ全体及び流木輸送量に関して検討した結果を図-6に示す。ここでは、観測期間中の3つの台風出水時(1408, 18, 19号)を対象に、平塩橋と下野水道橋それぞれの結果について分けて図示している。これより、いずれの流量においても漂流ごみ全体の方が流木よりも上回る。この $L-Q$ 関係の傾きに相当する係数 $b$ は、ごみ全体では平塩橋1.80, 下野水道橋1.73であるが、流木では同2.90,

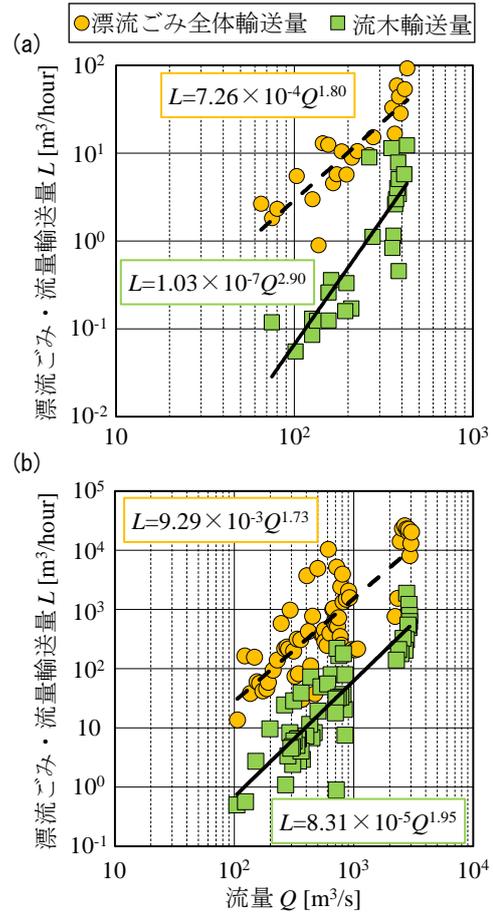


図-6 漂流ごみ全体・流木輸送量に関するL-Q関係 ((a) 平塩橋, (b) 下野水道橋, 台風1408, 18, 19号)

1.95となり、流木のほうが傾きが大きい。これは、今後のデータの蓄積で変化する可能性があるが、大規模出水時に流木発生量が大きくなることから、係数 $b$ が流木>全体となったものと考えられる。

### (4) 年平均ごみ輸送量の推定と比較

最上川の年間の漂流ごみ・流木輸送量の時間変化を調べるために、図-6に示す $L-Q$ 関係より、両断面の流量、漂流ごみ全体・流木輸送量の累積値及び日雨量の時間変化を図-7に示す。これより、漂流ごみ全体・流木のどちらも春から秋にかけて発生する出水時にまとまった量が流出している。また、両断面の累積輸送量を比較すると下野水道橋>平塩橋という順番になっているが、これは2断面の間に合流する2つの支川(須川・寒河江川)による流量規模の違いを反映しているものと推察される。これらの $L-Q$ 関係を用いれば、長期間にわたる漂流ごみ全体・流木の輸送量を評価することが可能となる。

さらに、漂流ごみ全体の $L-Q$ 関係を用いて最上川の年平均ごみ全体輸送量(2012年~2014年3年間の平均値)を推定した結果と東京湾主要流入河川(荒川, 江戸川, 多摩川)の結果を比較したものを図-8(a)に示す。ここで、最上川の結果は、2つの観測場所の結果に加えて、残流

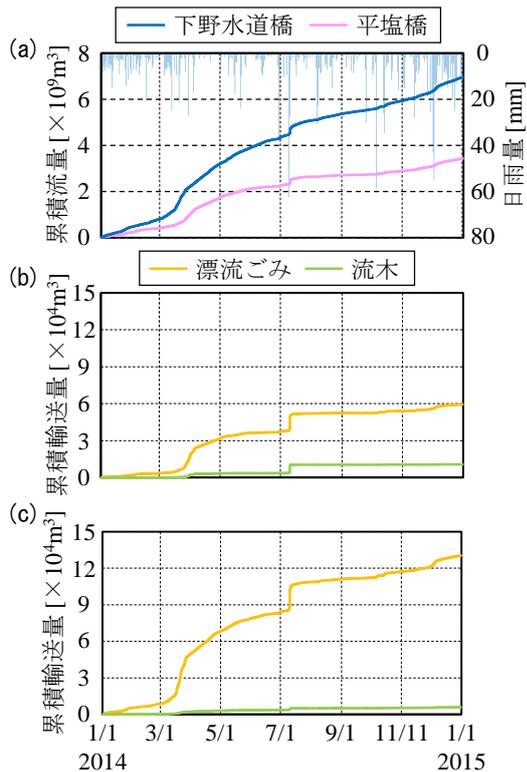


図-7 雨量、流量(a)と漂流ごみ全体・流木輸送量の累積値の時間変化 (b)平塩橋, (c)下野水道橋, 2014/1/1~12/31)

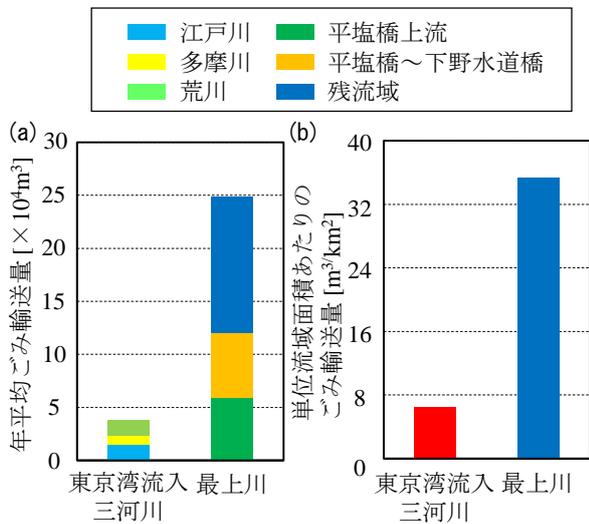


図-8 最上川と東京湾流入河川の年平均ごみ輸送量(a)と単位流域面積あたりのごみ輸送量(b)の比較 (漂流ごみ全体)

域 (全流域から下野水道橋の流域を引いたもの) については流域面積比 (=残流域の流域面積/下野水道橋の流域面積) を掛けている。また、江戸川・多摩川・荒川の3河川については、著者らが別途2006~2008年を対象に行った結果<sup>15)</sup>を示す。これより、最上川から日本海への漂流ごみ流出量は、東京湾のおよそ7倍と非常に大き

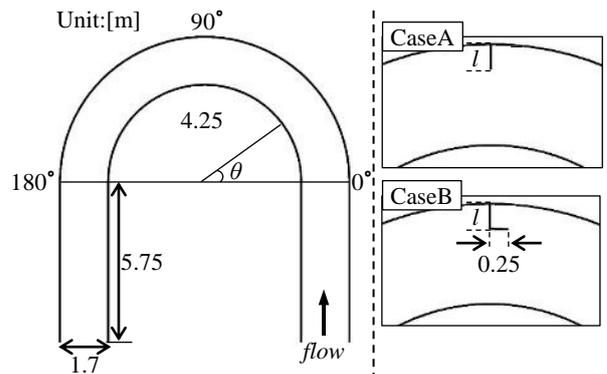


図-9 水路平面形状及び捕捉装置形状

な値となっている。また、それぞれの値を流域面積で除した単位流域面積あたりのごみ輸送量を比較した場合にも (図-8 (b)), 最上川の値は東京湾の5倍近い値となっている。これらより、最上川河口やその周辺海岸では、最上川由来のごみ問題が顕著である可能性が示唆された。

#### 4. 河川漂流ごみ回収方法の数値解析的検討

陸域から海域へのごみ流入抑制には、ごみ発生量を減らす啓発活動に加えて、①陸域から河川へのごみの流入の防止、②河道内における漂流ごみの回収が挙げられるが、ここでは、②に着目する。まず、漂流ごみの基本的な挙動に立ち返ると、GPS搭載フロートを用いて著者らが行ったごみ追跡調査結果<sup>16)</sup>より、最上川では多くのフロートが湾曲部の外岸側を流下し、漂着場所も外岸部に集中していた。このことから、河川漂流ごみを効率的に回収する一手法としては、漂流ごみが多く流れ、かつ漂着しやすい湾曲部外岸側にオイルフェンスのような浮体 (川ごみフェンスと称す) を設置する案が考えられる。

川ごみフェンスの有用性を調べるために、三次元流動計算を実施する。ここでは、三次元汎用海水流動モデルであるDelft3D (Delft Hydraulics開発) を用い、図-9に示す曲率180°の単一湾曲開水路<sup>17)</sup>を対象として三次元流動シミュレーションを行った。計算条件として、上流端水位 $h_u=0.22\text{m}$ 、下流端水位 $h_d=0.17\text{m}$ と固定した定常流計算とする。計算時間間隔 $\Delta t=0.01\text{min}$ 、マンニングの粗度係数 $n=0.01\text{m}^{-1/3}\text{s}$ とした。河道側面の境界条件はno slip条件、乱流モデルは水平方向にLESモデル (スマゴリンスキーモデル)、鉛直方向には $k-\epsilon$ モデルを用いた。川ごみフェンスの形状としては、図-9に示すように、湾曲部外岸側に直線型 (CaseA) とL字型 (CaseB) を設置し、漂流ごみに見立てた水表面上の中立粒子のラグランジュ追跡を行い、フェンスに漂着した中立粒子の数をカウントした。ここでは、設置位置としては、 $\theta=90^\circ$ 、 $135^\circ$ 、 $180^\circ$ とし、フェンスの横断方向長さ $l$ をいくつか変えた。L型のもう一辺の長さは固定した (=0.25m)。

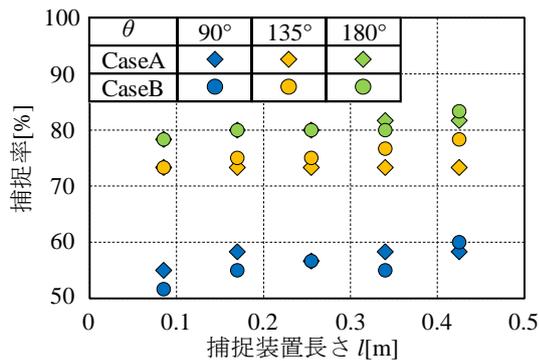


図-10 捕捉装置形状及び設置位置別の粒子捕捉率

計算結果の一例として、各条件化の粒子捕捉率（＝捕捉数／全投入数）を図-10に示す。これより、どちらのケースも、角度 $\theta$ やフェンス長 $L$ が大きくなると捕捉率は向上している。 $\theta=90^\circ$ よりも $180^\circ$ の方が捕捉率は20%も増加した。このように、湾曲部の川ごみフェンス設置の有用性は示されたが、この計算や観測により現地河川での検証が必要であり、今後の課題である。

## 5. 結論

本研究で得られた結論は以下の通りである。

- 1) 出水時の河川漂流ごみ全体・流木輸送量は、平常時と比べてそれぞれ2オーダー、3オーダーも増加しており、河川漂流ごみ全体や流木輸送量は出水時に卓越することが示された。また、漂流ごみ全体に対して流木の占める割合は、概ね1割程度であった。
- 2) 最上川から日本海へと流出する年平均ごみ輸送量は、江戸川・多摩川・荒川の三河川から東京湾へと流出するごみ輸送量のおよそ6~7倍であった。
- 3) 流木長の中央値は0.8~1.4mであり、河川内及び海岸の漂着流木と同程度であることが示された。
- 4) 河川漂流ゴミ回収方法として、河道流況に基づき湾曲部やそのくぼみ域にて川ごみフェンスを設置する手法が提示された。
- 5) 効率的に河川漂流ごみの回収を行うための漂流ごみ捕捉装置の設置位置は、湾曲部の出口付近であることが数値計算により定量的に示された。

河川漂流ごみ対策技術の定量評価を試みたが、今回は限られた条件下でしか川ごみ捕捉装置の定量評価を行っていない。そのため、今後は設置方向や設置位置などの設置条件や水理条件を複数変化させた際の漂流ごみ捕捉率を定量評価し、最適な川ごみ捕捉装置の設置条件を検討することが今後の課題である。

謝辞：本研究の一部は、科学研究費補助金・挑戦的萌芽研究（研究代表者：二瓶泰雄，研究課題番号：15K14043）によって実施された。本研究では、東京理科大学理工学部土木工学科水理研究室学生には、大変な観測作業を手伝って頂いた。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：海のごみ拡大する地球環境汚染，中公新書，pp.1-232，2007.
- 2) 山口晴幸：外国から漂着するごみによる海岸汚染，土木学会誌，Vol.83，No.3，pp.60-62，1998.
- 3) 例えば，<http://www.cleanaid.jp/>（閲覧日：H27年9月21日）
- 4) 藤枝繁，小島あずさ，大倉よし子：日本における国際海岸クリーンアップ(ICC)の現状とその結果，沿岸域学会誌，Vol.20，No.3，pp.33-46，2007.
- 5) 二瓶泰雄，若月宣人：洪水時河川における浮遊ごみ輸送量計測の試み，土木学会論文集 B，Vol.66，No.1，pp.19-24，2010.
- 6) 藤枝繁：瀬戸内海における微小プラスチックごみ，沿岸域学会誌，Vol.24，No.1，pp.57-65，2011.
- 7) 藤枝繁，柴田武志，日高正康，小島あずさ：鳴砂の浜を含む全国30海岸における微小プラスチックの漂着実態，雑漂着物学会誌，Vol.4，pp.9-14，2006.
- 8) 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ごみ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（海洋工学），Vol.66，No.1，pp.1171-1175，2010.
- 9) 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ごみ輸送量評価法の提案，土木学会論文集 B2（海洋工学），Vol.67，No.2，pp.I\_1076-I\_1080，2011.
- 10) 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.
- 11) 守田千里，二瓶泰雄，尾ノ井龍仁：携帯電話搭載型フロートによる河川漂流ごみ挙動の検討，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.68，No.4，pp.I\_1363-I\_1368，2012.
- 12) 尾ノ井龍仁，二瓶泰雄，片岡智哉，日向博文：河川漂流ごみ輸送量に関する自動モニタリング技術の検討，水工学論文集，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.69，No.4，pp.I\_769-I\_774，2013.
- 13) 南まさし，尾ノ井龍仁，二瓶泰雄，西島拓駿，堀田琢哉，船本優月，金子博，大谷明，片岡智哉，日向博文：河川漂流ゴミ輸送量の自動連続モニタリング手法の開発と最上川観測への適用，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.71，pp.I\_1225-I\_1230，2015.
- 14) 奥富 正敏：デジタル画像処理，CG-ARTS 協会，pp.116-117，2012.
- 15) 川崎貴志，二瓶泰雄，尾ノ井龍仁：江戸川・荒川・多摩川における出水時漂流ゴミ輸送量の比較，土木学会年次学術講演会講演概要集第2部，Vol.67，pp.233-234，2012.
- 16) 船本優月，二瓶泰雄，南まさし：江戸川・最上川におけるGPSフロート調査に基づく河川漂流ゴミ挙動の検討，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.72，pp.I\_979-I\_984，2016.
- 17) de Vriend, H.J.: Steady Flow in Shallow Channel Bends, Proefschrift, 1981.

(2016. 4. 4 受付)