

出水時河川における草本類の流出条件と流出量の検討

STUDY ON MODELING OF HERB-FRACTURE CONDITIONS IN A RIVER UNDER FLOODS AND ITS OUTFLOW

堀田琢哉¹・二瓶泰雄²・川崎貴志¹・尾ノ井龍仁¹
Takuya HOTTA, Yasuo NIHEI, Takashi KAWASAKI and Tatsuhito ONOI

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)

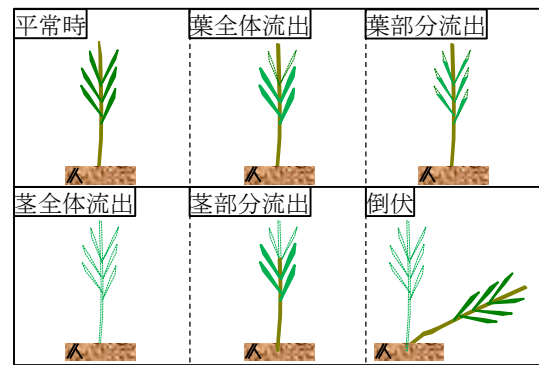
For comprehensive management for marine debris, a key issue is to develop a numerical tool for generation, movement and deposition of floating litter in rivers, one of main sources of marine debris. In this study, we evaluated fracture conditions of herb in a river under flood conditions. For this purpose, we conducted field measurements for the amounts of herbs before and after the floods, and ADCP measurements in the Edogawa River. The measured results indicated that herb-fracture conditions under various fluid forces were evaluated for leaves and stalks, separately. A 2D river-flow simulation was performed to evaluate the outflow of herbs in the field site using the above modeling of herb-fracture conditions.

Key Words : floating litter, herb, flood, fracture, marine debris

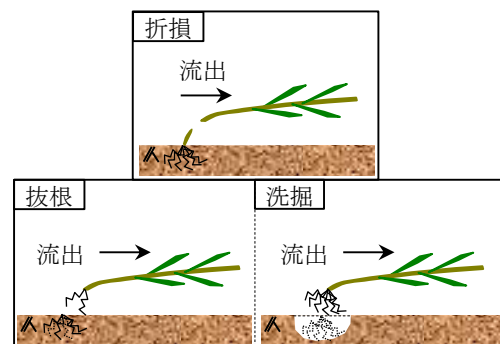
1. 序論

洪水時には流域から河川を介して沿岸域に様々な物質が輸送される。代表的なものとしては、土砂や窒素・リン、有機物等が挙げられる^{1)・2)}。これらは、溶存態もしくは懸濁態として輸送され、そのサイズは大きく見積もって土砂スケール (1mm~1cmオーダー) である。一方、より大きな物質の輸送としては、流木が挙げられる。山間部では、洪水時に大量の流木が運ばれ、ダムや沿岸域に堆積し、その処理が問題となる³⁾。この流木のスケールは、1mもしくは10mオーダーに達する。これらの中間的な10cm~1mスケールの物質として、河川に繁茂する草本類が挙げられる。草本類も出水時に流出し、それらが沿岸域に大量に漂着し、その処理に関する費用・労力の問題や港湾における航行障害など「漂着ゴミ問題」として注目されている^{4)~6)}。

これら様々な物質の発生・流出 (流失) 条件としては、土砂に関しては岩垣式⁷⁾ のような限界掃流力等を用いる評価法がほぼ確立されている。また、流木についても、樹木の破壊・流失限界に関する検討が行われている⁸⁾・⁹⁾。一方、草本類の破壊・流出条件に関する検討事例は限定されており^{10)・11)}、上記のゴミ輸送との関連研究は皆



(a) 流出・変形



(b) 茎全体流出の要因

図-1 草本類の流出形態・要因の分類

無である。河川内の草本類は、沿岸漂着ゴミの主要ソースの一つであり、流域圏全体でのゴミ管理を推進する上では、河道部における草本類の流出状況や流体力条件との関連性を把握することは必要不可欠である。

そのため、著者らは、草本類の流出状況調査を開始し、**図-1**に示す草本類の流出形態である「葉及び茎の部分・全体流出」のうち、「茎の全体流出」以外の破壊形態を記録し、それらと流体力の関連性を検討した（加茂川・二瓶¹²⁾、以下、前報と呼ぶ）。本研究では、前報の成果を発展させて、多角的な現地観測や河川流シミュレーションを行い、葉・茎の流出状況の実態解明や茎や葉の流出条件モデルの構築を行うと共に、これらの流出条件モデルに基づいて河道内からの草本類流出量を推定することを試みる。ここでは、江戸川を対象として、1) 出水前後における草本類流出状況調査、流出要因解明を目的として、2) 超音波ドップラー流速分布計（以下ADCPと呼ぶ）による洪水流調査と3) 現地引張試験、さらに、4) 著者ら独自の手法^{13)~15)}に基づく洪水時のゴミ輸送量調査、という四種類の現地観測を行う。これに加えて、5) 平面二次元河川流モデル¹⁶⁾に基づいて、観測対象区間における洪水流シミュレーションを実施し、本計算結果から出力される流速・水深データと上記の草本類流出条件モデルを用いて、出水時における草本類の流出量を定量評価する。

2. 現地観測方法の概要

(1) 研究サイトと観測日程

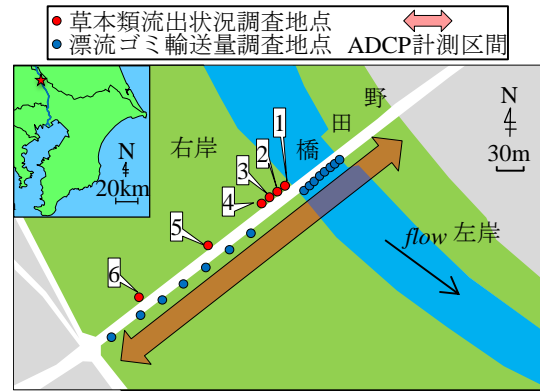
上述した観測が行われたのは、**図-2**に示すように、江戸川・野田橋（河口から39.2km地点）である。江戸川は、低水路幅100m、堤間幅400mの複断面河道であり、この地点では、右岸側に高水敷が広がっている。ここでは、低水路と高水敷の境界部では、低木のヤナギが点在すると共に、この境界部から高水敷にかけてヨシやオギの草本類の群落広がっている¹²⁾。また、高水敷は、ゴルフ場やグラウンドとして利用されている。

この江戸川では、2011年度には2回の台風出水が生じた。**図-3**に示すように、一つ目は台風12号（2011/9/2～9/6、H.W.L.: 8.69Y.P.m）であり、二つ目は台風15号（2011/9/21～22、H.W.L.: 9.21Y.P.m）であり、いずれも高水敷が冠水するほどの中規模出水であった。それに合わせて、以下の4つの観測を実施した。

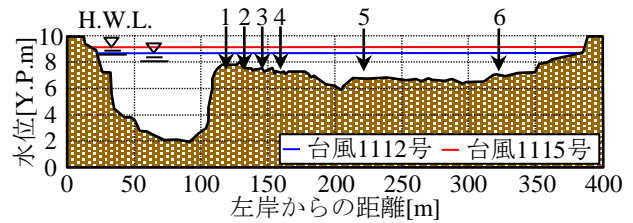
(2) 観測概要

a) 草本類流出状況調査

まず、出水前後の草本類流出・破壊状況を捉えるために、対象断面の高水敷6地点において、卓越する優占種



(a) 平面図



(b) 横断面図

図-2 江戸川・野田橋における観測地点

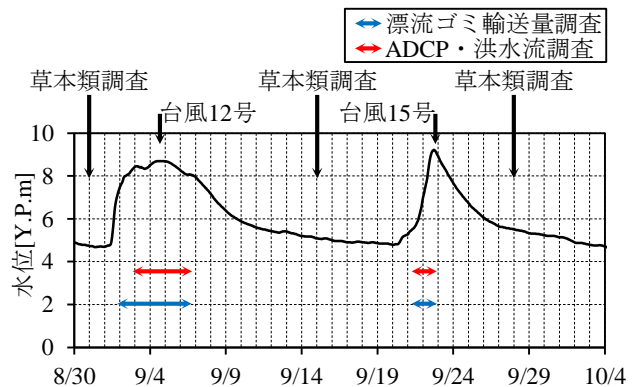


図-3 観測日程と出水発生状況（水位は、江戸川・野田地点のデータ）

（主にヨシとオギ）を選定し、それらの繁茂状況を調べた。具体的には、選定された草本の胸高直径や茎の高さ、付いている全ての葉の長さを計測しており、各地点で3本以上を対象とした。また、各地点において4本の草本にマークし、洪水前後の有無を調べて茎全体の流出有無を把握した。観測日は、2011/8/31、9/15、9/28であり、二つの台風の前後のデータを比べることで、出水時の流出状況を把握可能となる。

b) ADCPによる洪水流調査

草本類の流出要因としては、葉の部分・全体流出や茎の部分流出は流体力による破損が考えられるが、茎の全体流出については抜根、折損、洗掘が挙げられる（**図-1(b)**）。これらを調べるために、ADCP流況調査を行い横断面内の流速分布を計測し、葉・茎への流体力や倒伏モーメント、底質移動状況を算定する。本調査を草本類

調査断面（江戸川野田橋）において、台風12号・15号時に実施した。また、底質を採取し、底質粒径分布を把握した。

c) 現地引張試験

草本類流出要因を調べるために、前報と同じく、草本類の簡易引張試験を行い、茎・葉が破壊される時に作用する流体力 F を求める。ここでは、デジタルフォースゲージ（ZP-500N、イマダ(株)製）を用い、葉・茎の先端や根元に測定器を取付け、水平を保ちながらそれぞれの軸方向に引っ張り、破断時の値を流体力として採用する。観測日は草本類流出状況調査と同一とする。

d) 漂流ゴミ輸送量調査

断面全体の漂流ゴミ輸送量を計測するために、ビデオモニタリングを行う。具体的には、野田橋上より河川水面をデジタルビデオカメラ（HDR-XR550V、SONY(株)製）によりほぼ鉛直下向きに1分間撮影した。これを各横断面の低水路9地点、高水路6-7地点で行った。撮影された動画の解析方法は、50秒間の動画を1秒ごとの静止画に変換し、静止画中に幅1mの「検査線」を設け、検査線の単位長さ当たりの漂流ゴミの占める割合 D_f を算出する¹³⁾。直接的にゴミを採取した結果と漂流ゴミ割合 D_f の相関関係から、単位幅ゴミ輸送量に変換し、それを横断面全体にわたり積分してゴミ輸送量を算定する¹⁵⁾。観測期間は両台風出水時の日中である。なお、台風1115号時ではゴミ輸送量が大きい増水期のみ調査を行った。したがって、夜間などの出水中の未観測期間を含む出水時全体のゴミ輸送量算出には、江戸川・野田橋におけるゴミ輸送量 L と水位時間変化率 \dot{H} の相関式を作成し¹⁵⁾、時々刻々の水位データから総ゴミ輸送量を算出した。

(3) 草本類への流体力算定方法

葉及び茎流出状況と草本類に作用する流体力との相関性を調べるために、草本類に作用する流体力を推定する。平常時では、草本類の多くは鉛直に伸びているが、出水時の冠水後には流体力による倒伏モーメントの作用により、草本類は傾いて流れとほぼ平行になるものと考えられる。このことから、葉もしくは茎に作用する流体力 F は、底面摩擦応力 τ_0 を用いて、次式で表される。

$$F = A\tau_0 = A\rho C_f \bar{u}^2 \quad (1)$$

$$C_f = gn^2 / h^{1/3} \quad (2)$$

ここで、 A は対象とする葉もしくは茎の表面積、 ρ は水の密度、 C_f は底面摩擦係数、 \bar{u} は水深平均流速、 n はマンニングの粗度係数(=0.15m^{-1/3}s)¹⁷⁾、 h は水深である。このうち、水深平均流速 \bar{u} に関しては、草本類流出調査

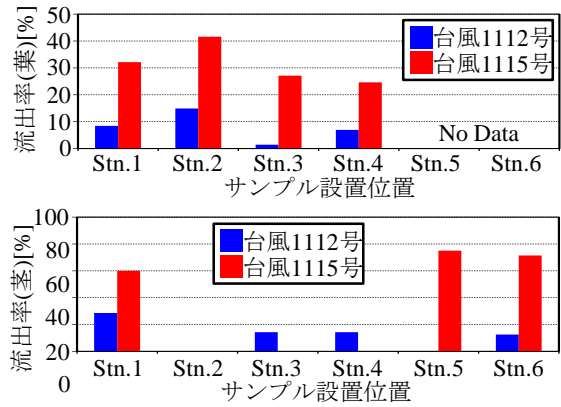


図4 出水後における葉（上）と茎（下）の流出率

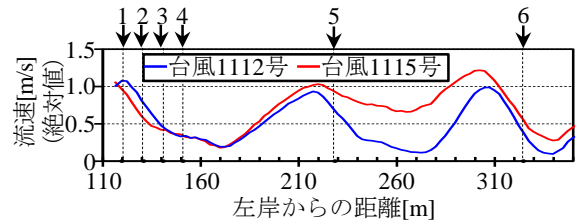


図5 各出水の水位ピーク時に水深平均流速の横断分布（図中の矢印は植生調査地点を示す）

地点におけるADCPデータを与え、また、水深 h については、水位実測値と横断面測量結果から与える。

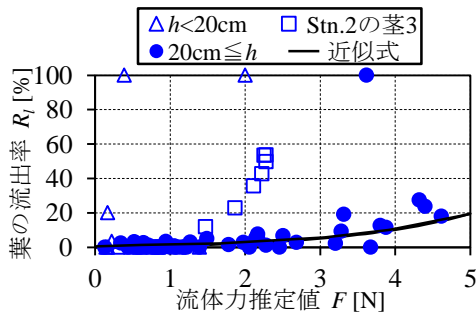
3. 観測結果と考察

(1) 出水時の葉・茎の流出状況

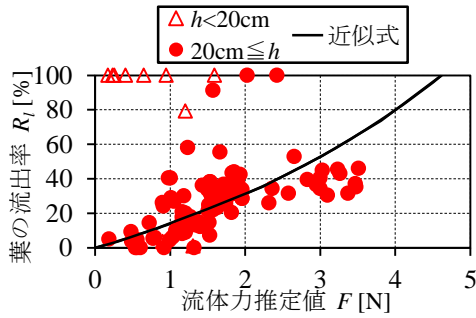
台風12・15号後における葉や茎の流出状況を図-4に示す。ここでの流出率とは、葉では、出水後の葉の長さから出水前の値を引いたものを出水前の葉の長さで除したものであり、それを計測地点毎に平均したものをを用い、破壊形態には葉の部分・全体流出が含まれる。一方、茎に関しては、部分流出が無く、全て全体流出であったので、茎の流出率は対象サンプル中に対する全体流出の割合に相当する。これより、葉では、台風12号時では1~21%、台風15号時では25~52%となり、台風12号時よりも15号時の方が多く流出した。場所的には、低水路に近いStn.1, 2の流出が卓越した。また茎についても、台風15号時の方が大きな流出率を記録している。流出率が大きな地点としては、Stn.1と5, 6が見られる。茎全体流出の要因としては、現地の観察から、低水路から近いStn.1付近では洗掘が見られたが、その他の地点では折損が主であると考えられる。

(2) 出水時における流速横断分布

この流出した草本類に働く流体力を調べるために、ADCPにより得られた右岸側高水路上の水深平均流速の



(a) 台風12号



(b) 台風15号

図-6 葉の流出率 R_l と流体力 F の相関関係

横断分布を図-5に示す。ここで横軸の横断距離は野田橋左岸基準点からの距離であり、各出水の水位ピーク時の結果が表示されている。なお、流速として、主流方向成分でなく、流体力算出に必要な絶対値を採用する。これより、洪水規模の大きい台風15号時の流速レベルが相対的に12号時より大きい。また、流出率の大きかったStn.1やStn.5の流速値は相対的に大きくなっていることが分かる。この高水敷にはゴルフ場があるため、植生群落の間で高流速となる地点（Stn.5や6付近）が見られる。また、低水路から高水敷への横流入により、Stn.1~4においても流速レベルが増加している。

(3) 草本類の葉流出モデル式について

これらの結果に基づいて、出水イベント毎における葉一枚毎の流出率 R_l と作用する流体力 F の相関図を図-6に示す。ここでは、台風12号時と15号時の結果を別々に表示している。また、葉の底面からの鉛直位置 h を20cm以下とそれ以上に分けている。これより、 h が20cm以上の葉に関しては、概ね流体力との関連性が見られ、葉流出モデルとして台風12、15号時について、次式が得られている。

【台風12号】

$$R_l = e^{0.605F} \quad (r = 0.74) \quad (3)$$

【台風15号】

$$R_l = 55e^{0.2243F} - 55 \quad (r = 0.54) \quad (4)$$

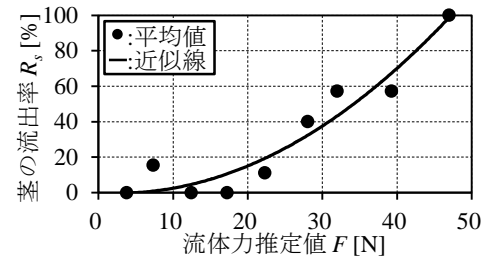


図-7 茎の流出率 R_s と流体力 F の相関関係

ここで、流出率が100%を超えるような流体力が作用する場合は、流出率を100%とする。なお、台風12号時では、Stn.2の一本の茎に付いている葉のデータが他の結果と大きく異なっていたので、ここでは、除外して上記の相関式を求めている。上記の式より、葉流出率と流体力には、概ね良好な相関関係があることが分かる。なお、 h が20cm以下では葉流出率が大きく、100%となるものも多い。これは、底面近くに繁茂する葉は掃流砂の影響を受けるためであり、土砂が堆積して一部埋まった葉も見られた。

台風12号と15号の結果を比べると、同じ流体力でも台風15号時の方が葉流出率は高くなっている。この二つの出水イベントでは最高水位が約0.5m異なっており、台風12号時の水深がStn.1~6では1~2m程度であったので、大きいところでは50%以上の水深増加になっている。さらに、特筆すべき点は、対象地点の植生の多くは、出水前に直立していたが、台風12号時の出水後では倒伏状況になり、台風15号時をこの倒伏状況で迎えていることになる。結果として、冠水時間や流体力を受ける状況が変化しているため、このような出水イベントの履歴の差を反映して、葉流出率のモデル式が異なったものと考えられる。これらの履歴効果を考慮したモデル式を作るには、より多くの観測データが必要となり、今後の課題とする。

(4) 草本類の茎流出率のモデル化

同じく茎流出率 R_s と流体力 F の相関関係を検討する。茎流出率と流体力の相関関係にはある程度のバラツキが見られるため、ここでは、ある範囲の流体力(=5N)毎に茎流出率 R_s を算出し、それと流体力との相関図を図-7に示す。これより、次式の茎流出率モデルが得られた。

$$R_s = 0.0501F^2 - 0.2493F \quad (r = 0.960) \quad (5)$$

これより、茎に関しても流体力 F と流出率 R_s には高い相関がある。以上より、葉や茎に作用する流体力から、それらの流出率を概ね良好な精度で推定し得ることが明らかとなった。

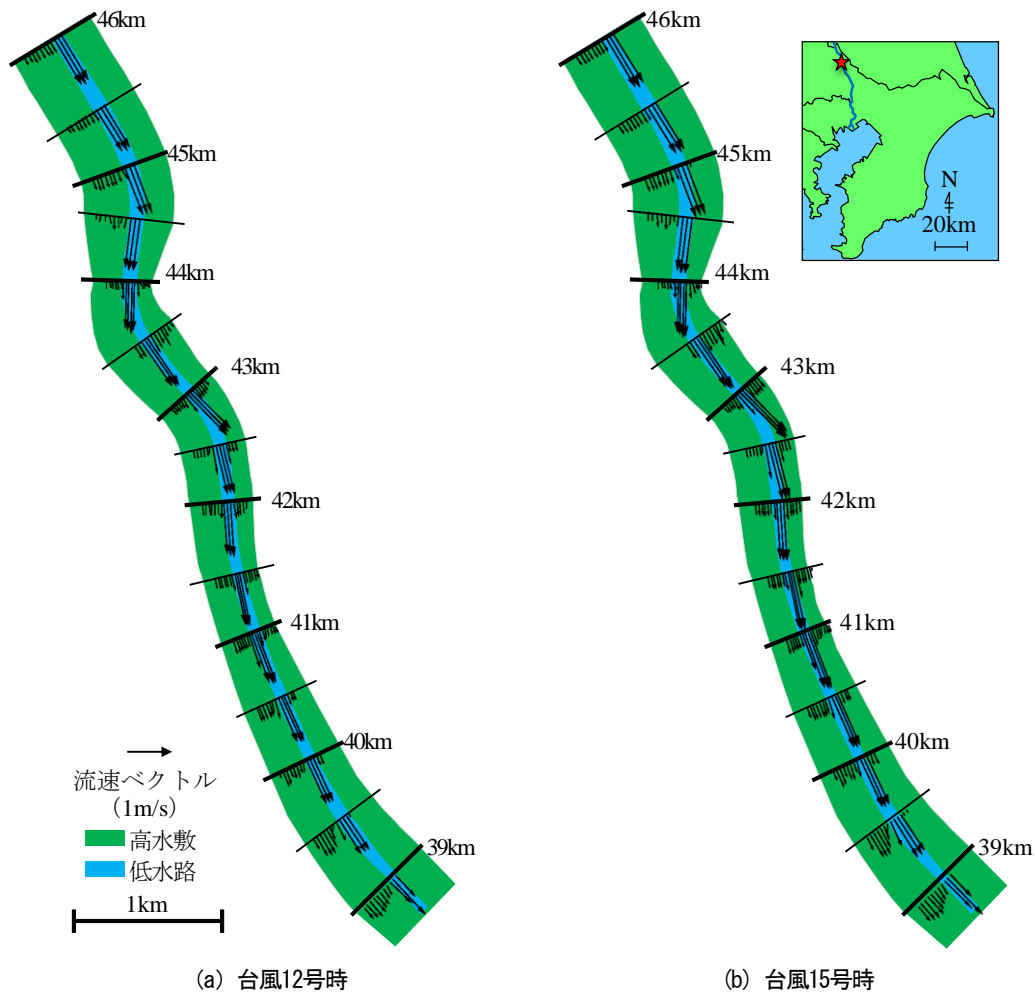


図-8 計算領域全体の流速ベクトル分布

4. 数値解析に基づく草本類流出量の推定

(1) 計算方法・条件

平面二次元場の河川流モデル¹⁶⁾を用いて、観測対象区間における洪水流シミュレーションを実施し、本計算結果から出力される流速・水深データと上記の草本類流出条件モデルを用いて、出水時における草本類の流出量を定量評価する。本モデルは、一般座標系を用いるものであり、元々、一次元モデルと平面二次元モデルのハイブリッド型モデルであるが、今回は、その平面二次元モデルの部分のみを採用している。

計算対象領域は、江戸川河口から39kmから46kmまでの7km区間であり、上下流端ともに国交省の水位観測所が位置している。この区間における植生分布は、加藤・二瓶¹⁶⁾と同様に実測値ベースで与えている。計算期間は台風12号では、2011年9月1日11:00～9月8日11:00、台風15号では、2011年9月19日19:00～9月26日19:00である。初期条件を作成するために、計算期間最初の時刻の助走計算を10時間分実施する。境界条件としては、上下流端

表-1 各出水イベントにおける植生流出量の実測値と推定値

出水イベント	1112号	1115号
実測値[m ³]	358	310
推定値[m ³]	236	613
流出量の割合[%]	0.45	1.18

水位は実測値、また、上流端には実測流量を与えている。出力された計算結果より、水位ピーク時の水深及び流速データを抽出し、それを用いて植生に作用する流体力推定値を算出する。使用する植生のデータとして、茎の長さや葉の数、植生密度（単位面積あたり何本の植生が生えているか）及び茎の直径は現地観測に基づき、代表的な値を与えた。これに加えて、計算で与えられている高水敷上の植生分布を用いて、計算領域における現存する植生の体積を算出した。葉・茎流出モデル式は式(3)～(5)であり、葉流出では出水毎に分けて与えている。

(2) 計算結果

図-8は洪水流シミュレーションの結果の一例として、

計算区間全体における流速ベクトル分布を示している、ここでは、凶化の関係で、500m毎の流速ベクトルの横断分布を表示している。また、台風12、15号時における水位ピーク時の結果を用いている。これより、低水路内では1m/sを越える流速が得られているが、高水敷上では、低水路ほどの流速レベルは無く、また、場所により、その流速差が大きいことも分かる。

そこで、この流速データを用いて算出された草本類流出量の推定結果を表-1に示す。ここでは、本推定結果に加えて、この結果と全計算領域内の草本類量の比を取った「流出率」、野田橋において行われたゴミ輸送量調査結果を「実測値」として表記している。また、ここでの「推定値」は、ゴミ輸送量の「実測値」と比べるために、江戸川最上流部の関宿水閘門において、多くの植生ゴミがトラップされ、江戸川におけるゴミ輸送量の大半が関宿水閘門下流部から発生したものと見なせるため、計算領域7km区間(39km~46km)で得られた植生流出量に単純に最上流部までの区間長(39km~59km)の比(=20km/7km)を掛けたものを表示している。すなわち、計算結果から推定される野田橋上流部の植生流出量に相当している。

これより、台風12号、台風15号の出水イベントにおけるゴミ輸送量の実測値は、それぞれ358m³、310m³であった。一方、推定値は、それぞれ236m³及び613m³となっている。このように、実測値と概ね同じオーダーとなっており、前述した葉・茎流出モデル式が概ね妥当であったものと考えられる。

5. 結論

本研究で得られた結論は、以下のとおりである。

- 1) 高水敷に現存する草本類植生は出水イベントによって流出しており、その様子は、出水イベント毎、場所ごとに大きく異なる。
- 2) 葉・茎流出率と流体力の相関関係を検討し、式(3)~(5)の葉・茎流出率のモデル式を得た。
- 3) 上記のモデル式と平面二次元流況シミュレーション結果より、対象領域の草本類の流出量を推定し、河川漂流ゴミ輸送量の実測値と概ね一致したことから、上記のモデル式の一定の妥当性を検証した。

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)によって実施された。国土交通省関東地方整備局江戸川河川事務所には、現地観測実施に際して便宜を図って頂いた。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・分析作業を実施して頂いた。ここに記して深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) 藤田光一：“広域総合土砂(物質)管理”の理念と実践との隔たりをどう埋めるか、月刊海洋, Vol.32, No.3, pp.179-184, 2000.
- 2) 高田秀重：陸域から沿岸海域への物質フラックス, 沿岸海洋研究, Vol.34, No.2, pp.111-117, 1997.
- 3) 後藤岳久, 福岡捷二, 児子真也, 中須賀淳：複断面蛇行河川における洪水流による樹木群の倒伏・破壊機構と樹木管理への活用, 土木学会論文集 B, Vol.66, No.1, pp.47-65, 2010.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 藤枝繁, 小島あずさ, 兼広春之：ディスプレイ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.
- 7) 岩垣雄一：限界掃流力に関する基礎的研究(I) 限界掃流力の流体力学的研究, 土木学会論文集, No.41, pp.1-21, 1956.
- 8) 砂田憲吾, 河野逸朗, 田中総介：出水時における河道内樹木の破壊規模の予測に関する基礎的研究, 水工学論文集, Vol.46, pp.947-952, 2002.
- 9) 田中規夫, 八木澤順治, 佐々木寧, 福岡捷二：河道内樹木の洪水破壊形態と破壊限界値の基盤土壌条件による相違, 水工学論文集, Vol.52, pp.649-654, 2008.
- 10) Coops, H and Velde, G.V.d. : Effects of waves on helophyte stands : mechanical characteristics of stems of *Phragmites australis* and *Scirpus lacustris*, *Aquatic Botany*, Vol.53, pp.175-185, 1996.
- 11) 末次忠司, 藤田光一, 服部敦, 瀬崎智之, 伊藤政彦, 榎本真二：礫床河川に繁茂する植生の洪水攪乱に対する応答, 遷移および群落拡大の特性—多摩川と千曲川の礫河原を対象として—, 国土技術政策総合研究所資料, 第161号, pp.1-137, 2004.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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.I_1076-I_1080, 2011.
- 16) 加藤靖之, 二瓶泰雄：一次元・二次元ハイブリッド型河川流計算法の開発, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.68, No.1, pp.77-89, 2012.
- 17) 日野幹雄：明解水理学, 丸善社, 142p., 1983.

(2012. 9. 30 受付)