

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

FUNDAMENTAL STUDY ON FRACTURE CONDITIONS OF HERBS IN RIVERS UNDER FLOODING

加茂川優紀¹・二瓶泰雄²

Yuki KAMOGAWA and Yasuo NIHEI

¹ 学生員 学 (工) 東京大学大学院新領域創成科学研究科自然環境学専攻 (元東京理科大学学部生)

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

Although a main source of marine litter is known to be herbs grown thick in rivers, there were little information for flowing conditions of herbs due to fluid forces. The purpose of the present study is to clarify fracture conditions of herbs in rivers under flooding conditions. In this study, we conducted field measurements of the amounts of herbs and in-situ herb pulling tests in Edogawa and Oohorigawa Rivers. Fluid forces on herbs were also evaluated using numerical simulation. The results for leaves of herbs indicate that leaves were partially carried out in a flooding event mainly due to fluid forces. The results for caules of herbs revealed that the caules were also flowed in a flooding condition because caules broke due to bending moments from fluid forces.

Key Words: marine litter, herb, fracture, flood, fluid force, pulling test

1. 序論

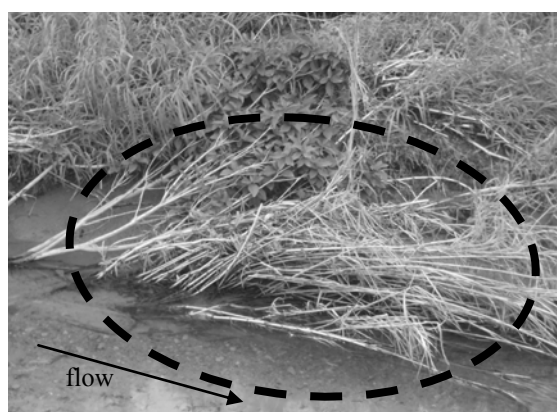
沿岸域に漂着する多量のゴミは、環境・海洋生物に悪影響を及ぼすとともに、回収のための多くの労力や処理費用を必要としている^{1)~4)}。そのため、これらの漂着ゴミは近年社会問題化しており、我が国では海岸における良好な景観及び環境を保全することを目的とした「海岸漂着物処理推進法」が H21 年に施行された。

上述した海岸の漂着ゴミとしては、プラスチック製品やペットボトル等の“人工系”ゴミが主に注目されることが多いが¹⁾、実際の漂着ゴミや海表面上の浮遊ゴミ回収量としては、人工系ゴミよりも植生や流木等の“自然系ゴミ”の方が多い。これらのゴミの大部分は陸域起源であり、出水時に河川を経由して海域等の流入する漂流ゴミの大部分は植生等の“自然系”ゴミが占めていると指摘されている⁵⁾。⁶⁾。このため、自然系ゴミを中心としたゴミ問題を解決するには“流域一貫ゴミ管理”を行う必要があり、そのためには、流域内におけるゴミの発生量や河川経由の漂流ゴミ輸送量、海岸への漂着量、海底面での堆積量等という“ゴミ動態”を総合的に把握

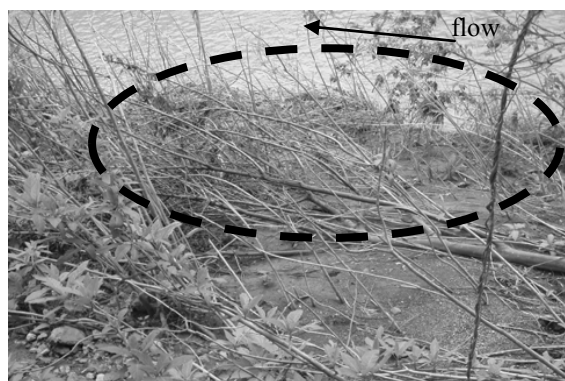
する必要がある。

このうち流域内における自然系ゴミの発生過程としては、出水時に河川内に繁茂する植生（木本類や草本類）が破壊・流出されることが想定される。これらに対する既存の研究としては、木本類に関する検討事例はいくつか散見されるものの^{7), 8)}、海域へのゴミ流入量の大部分を占める草本類に関しては未検討である。

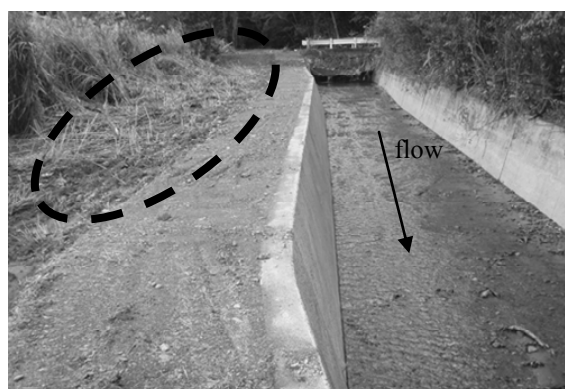
そこで本研究では、河川における自然系ゴミ発生量の予測手法確立を最終目的として、その第一歩として、出水時における河川内に繁茂する草本類の破壊条件の一端を明らかにすることを試みる。そのために、まず、草本類の破壊形態を、大出水後の現地河川での観測結果に基づいて整理する。次に、このような草本類の破壊形態の発生条件を検討するために、大河川（江戸川）や中小河川（大堀川）の草本類を対象に、①出水前後を含む繁茂状況調査、②簡易引張試験、③流体力算定のための流況シミュレーションや ADCP 調査のデータ解析、を実施する。なお、本調査期間では、大堀川のみ出水イベントが発生し、江戸川では植生が繁茂する高水敷を冠水するほどの洪水は生じなかったため、本論文では、主に



(a) 倒伏 (山間川)



(b) 葉部分・全体流出 (住用川)



(c) 茎部分・全体流出 (山間川)

図1 出水後による草本類の変形・破壊形態の様子 (2010年10月20日の奄美豪雨後に撮影)

大堀川の結果を中心に記述する。

2. 草本類の破壊形態の分類

河川における草本類の破壊形態の一例として、2010年10月に生じた奄美大島での豪雨後⁹⁾における草本類の変形・破壊状況の様子を図1に示す。これは、氾濫が生じた奄美大島南側の住用湾に注ぐ住用川と山間川の写真であり、豪雨災害から約2ヵ月後に撮影されたものである。これより、草本類の変形・破壊形態としては、流下方向に大きく倒れる「倒

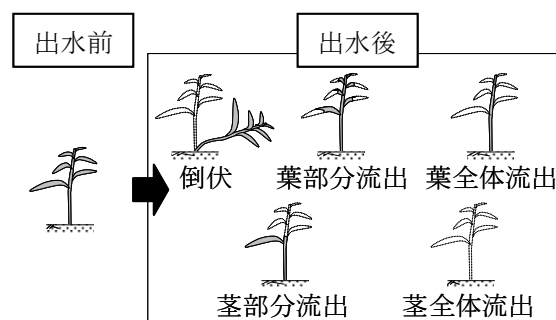


図2 草本類の変形・破壊形態に関する模式図

伏」(同図(a))、茎から葉が全部もしくは一部分取れた「葉部分・全体流出」(同図(b))、茎の全体もしくは一部分が抜け出した「茎部分・全体流出」(同図(c))が見られ、このうち「茎全体流出」は抜根¹⁰⁾に相当している。

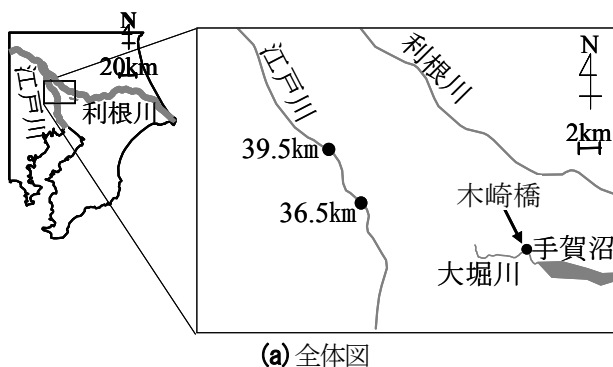
これらの変形・破壊形態の形成要因としては、当然のことながら、出水時において草本類に作用した大きな流体力が挙げられるが、茎全体流出に関しては局所洗掘により根ごと流出する可能性もある。本論文において対象とする草本類の変形・破壊形態は図2に模式的に示すものであり、この中では本観測では見られなかった洗掘による茎流出は扱わない。

3. 研究方法

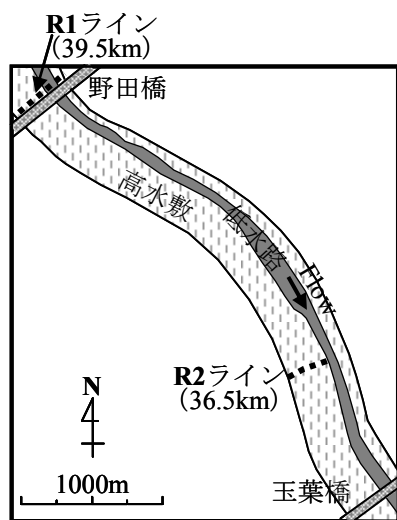
(1) 草本類繁茂状況調査

河川における草本類の繁茂状況やその非定常変化を把握するために、図3に示す大河川の江戸川及び手賀沼に流入する中小河川(大堀川)において草本類繁茂状況調査を実施した。調査地点としては、幅400mの複断面河道である江戸川では、同図(b)に示すように低水路側岸や高水敷を含む二断面(河口から39.5km, 36.5km, それぞれR1・R2ラインと呼ぶ)としており、野田橋直上流のR1ラインでは両岸にて、R2ラインでは右岸のみとした。調査地点数はR1, R2ラインにて各々10とした。また、大堀川では、河口地点から1.4km上流の湾曲部である木崎橋における低水路水際(左岸側4箇所)とした。

調査方法としては、まず江戸川では、①コドラート(0.5m四方)内の草本類を直接採取し、草本類現存・枯死量の計測や種類同定を行った。さらに、②特定の草本類サンプルにマークし、それらの胸高直径や高さを計測した。この①と②に関する追跡調査を2010年8月～11月において月一回の間隔で実施した。なお、この観測期間中には高水敷全体を冠水する出水は生じなかったため、出水前後における草本類の繁茂状況変化を捉えることはできなかった。



(a) 全体図



(b) 江戸川における詳細マップ

図3 現地観測サイトの位置

一方、大堀川では、上記②の調査を特化し、マークされた特定サンプルの葉の長さや茎の高さ、直径を計測した。調査日は2010/11/9と12/7であり、この間の12/3には特定サンプルの一部が冠水・流出する程度の出水が生じた。そのため、後述するように、大堀川の観測結果に基づいて出水前後の草本類の流出状況を検討する。また、地表付近に堆積する枯死した草本類が出水時に流出するかどうかを把握するため、枯死した草本類を特定サンプルのある地点の傍に出水前に設置し、出水後の流出状況を確認した。なお、両河川における優占種はヨシ、クサヨシ、オギ、セイバンモロコシ等である。

(2) 現地引張試験

次に、倒伏を引き起こす抗力モーメント M や茎や葉が破断するときに作用する流体力 F を評価するため、両河川において繁茂している草本類の茎や葉の現地引張試験を行った。ここでは、図4に模式的に示すように、持ち運び容易なデジタルフォースゲージ (ZP-500N, イマダ(株)製) を対象サンプルの茎もしくは葉の所定の位置に取付け、水平方向に引っ張

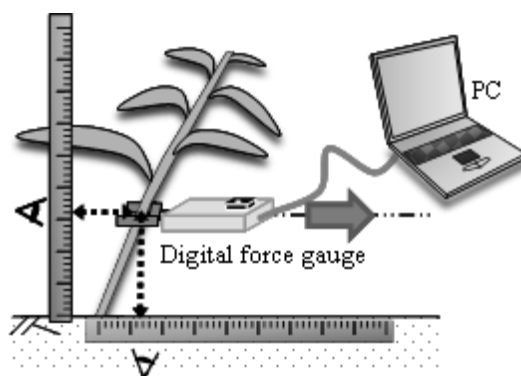


図4 現地引張試験に関する模式図

る。このデジタルフォースゲージは、時々刻々の引張力を記録することや対象物の破断時の最大荷重を計測できるものであり、notePCに接続して連続的にデータを記録する。観測地点としては、上記(1)の草本類繁茂状況調査を行った地点の周辺とした。

この測定器を用いて、抗力モーメント M と破断時の引張力 (実際の洪水時では流体力に相当) F を計測する。まず、抗力モーメント用の試験手順としては、茎の所定高さ Z (底面より0.5mか1.0m) に測定器を取付け、水平方向にある一定の力 D を約10秒間作用させ、根元を原点とした測定器取付け位置の水平・鉛直距離を測る。この力 D を段階的に増加させてこの一連の作業を繰返し、抗力モーメント $M (=DZ)$ と水平面からの茎の傾き θ を調べる。なお、測定器本体に水準器を取り付けて、引張方向が水平となっていることを確認している。一方、葉・茎破断時の引張力 F の計測には、葉や倒伏した茎が流れとほぼ平行になった状態で流出することを想定し、葉や茎の先端や根元に測定器を取付け、葉や茎の軸方向に引張力を与え、破断時の値のみを記録する。測定器取付け位置が葉や茎の先端もしくは根元の結果を、ここでは、各々全体及び部分流出と想定する。

(3) 水理学的観点からの流体力推定

観測サイトである大堀川や江戸川を対象として、出水時において河川内に繁茂する草本類に対する流体力を推定することを試みる。まず、上記調査期間中に出水が生じた大堀川では、流速計測は行っておらず、水位 H の計測データと観測断面の $H-Q$ 式しか無いため、ここでは、加藤ら¹¹⁾による簡易数値モデルを用いる。具体的には、調査を行った横断面において時々刻々の水位と流量データを入力条件とし、この簡易数値モデルにより水深平均流速 $\bar{u}$ の横断分布を算出する。この結果を用いて上記の現地引張試験結果と比べるために、倒伏モーメント M は、対象草本類が繁茂した横断位置における水深平均流速 $\bar{u}$

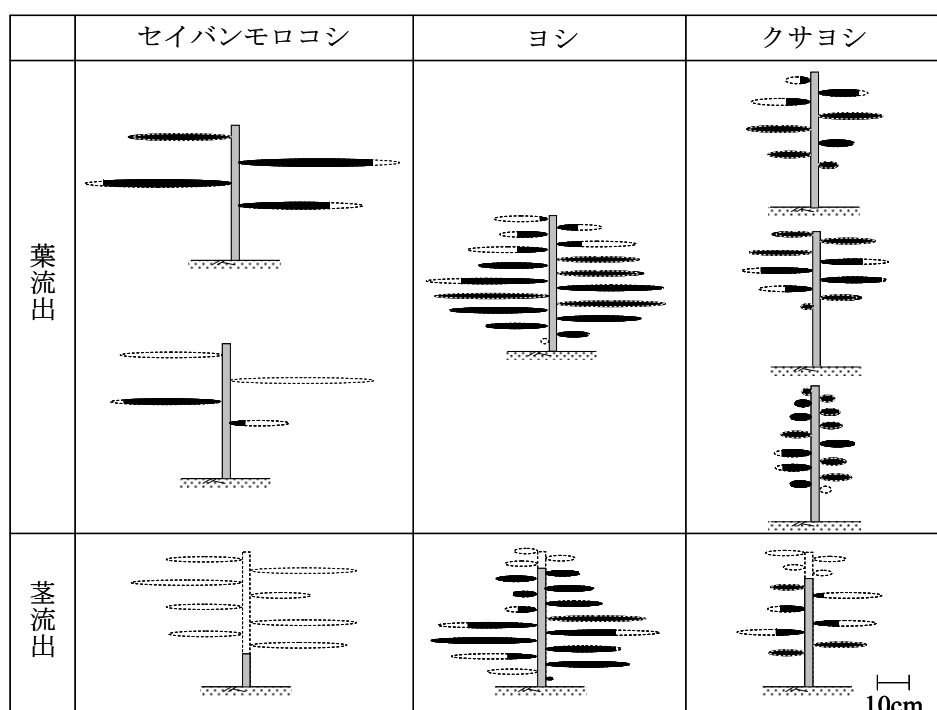


図5 出水前後における葉や茎の繁茂・流出状況（大堀川）

と水深 h 、抗力 D を用いて、次式により与えられる。

$$M = D \frac{h}{2} \quad (1)$$

$$D = \frac{1}{2} A_D \rho C_D \bar{u}^2 \quad (2)$$

ここで A_D は抵抗を受ける草本類の投影面積であり、 C_D は抵抗係数（=2.0）、抗力 D の作用点高さは水深の半分と仮定する。一方、葉や茎が破断する際に作用する流体力 F は、破断時に葉や茎が流れと平行に傾くことを想定すると、葉もしくは茎の表面に作用する摩擦応力 τ_0 を用いて次式のように表される。

$$F = A_F \tau_0 = A_F \rho C_f \bar{u}^2 \quad (3)$$

$$C_f = gn^2 / h^{1/3} \quad (4)$$

ここで A_F は抵抗を受ける茎もしくは葉の表面積、 C_f は底面摩擦係数、 n はマニングの粗度係数（=0.10m^{-1/3}s）である。

一方、観測期間中に出水が発生しなかった江戸川では、近年で最も大きかった台風 0709 号出水時の流体力を推定する。そこでは、著者らが行った超音波ドップラー流速分布計 ADCP による流速・流量調査結果（39.5km 断面のみ）¹²⁾ を用いる。ここでは横断面における ADCP 移動観測を行ったため、このデータより水深平均流速の横断分布が得られ、式（1）～（4）より、草本類に作用する倒伏モーメント M と流体力 F を推定する。

4. 結果と考察

（1）出水時の葉・茎の流出状況

出水時の葉や茎の現存量変化を調べるために、大堀川での出水前後の葉や茎の繁茂状況を図5に示す。ここでは、優占種であるセイバンモロコシとヨシ、クサヨシを対象に、葉や茎の長さを出水前は点線で、出水後は黒塗りで示す。また、葉の軸方向長さのみ精緻に描写し、その他は模式的に示す。これより、葉の全体・部分流出や茎の部分流出が生じているのはどの種類でも共通するが、それらの流出状況は草本類の種類により異なる。例えば、葉の流出率（＝葉の流出した長さ／出水前の全長）は、セイバンモロコシで32%、ヨシで20%、クサヨシで14%であり、クサヨシの葉流出率が相対的に少ない。一方、茎については、セイバンモロコシで流出した茎長さは全長の約70%であるが、クサヨシの場合には全長の約20%であり、茎流出率も種類により変化している。

一方、枯死した草本類の流出状況としては、大堀川では、出水前に河岸に設置された枯死した草本類の束は、出水後には全て流出していた。このように、流水に晒されると枯死した草本類は簡単に流出してしまうことが示された。

（2）流体力による葉・茎流出の実現可能性

葉・茎の流出が草本類への流体力により実現する可能性を調べるために、大堀川と江戸川における葉と茎の部分・全体流出時の引張力計測データ（中央・

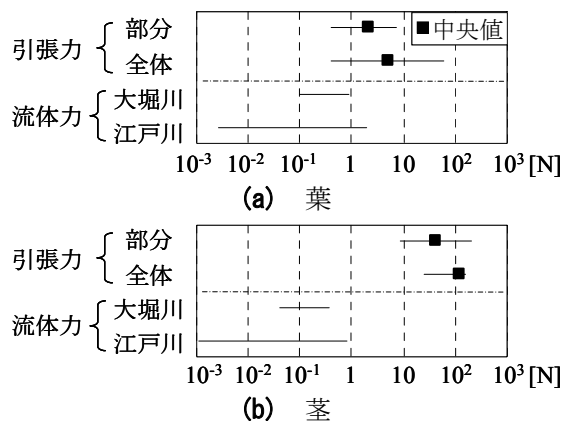


図6 葉・茎の流出時の引張力計測データと流体力推定値の比較

表1 葉流出時における引張力の中央値

	セイバンモロコシ	クサヨシ	ヨシ
部分[N]	1.45	1.70	2.90
全体[N]	8.45	3.05	21.80

最大・最小値)及び両河川における流体力推定値を図6に示す。引張試験結果より、葉の部分・全体流出はそれぞれ0.4~7.2N、0.4~57.4N、茎の部分・全体流出は各々8~205N、26~157Nとなっており、茎流出時の引張力は葉よりも1, 2 オーダー大きい。一方、大堀川での流体力推定値は、引張試験による葉流出範囲には入るが、茎流出範囲より十分に小さい。この傾向は、江戸川での流体力推定結果についても確認される。流体力推定値は洪水規模により変化するが、ここでの対象出水規模が年最大規模相当であるため、洪水時の流体力により葉流出のみは生じ得ることが示唆された。なお、草本類にゴミや別途流出した植生が巻きつく付加抵抗⁸⁾が大きくなるので、流体力による茎流出の可能性も考えられるが、それに関連する実測データを取得できなかったため、今後の検討課題とする。

葉の流出特性が植生種により異なる要因を調べるために、各種の葉流出時引張力の中央値を表1に示す。葉の部分流出は1.5~2.9Nとなり、種間の流出引張力の差は小さい。これより草本に作用した流体力が流速の空間変化により異なっていた可能性が高く、今後平面二次元解析により検討する必要がある。

(3) 茎流出の要因検討

前述したように、茎流出は洪水時の流体力のみでは生じないが、実際には茎の部分流出は発生した(図5)。この要因を明らかにするために、草本類への倒伏モーメント M と草本類の傾き θ の相関図を図7に示す。図中には現地引張試験結果及び大堀川におけ

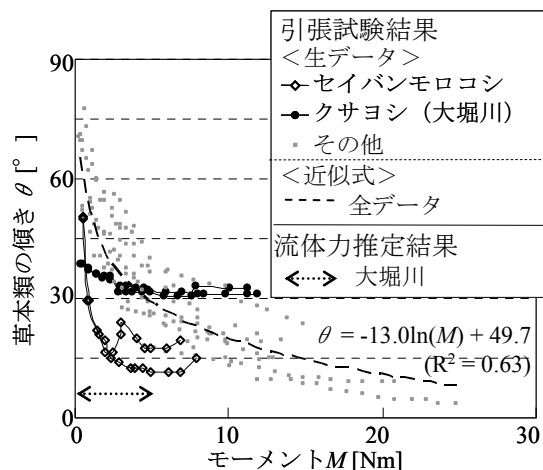


図7 倒伏モーメント M と草本類の傾き θ

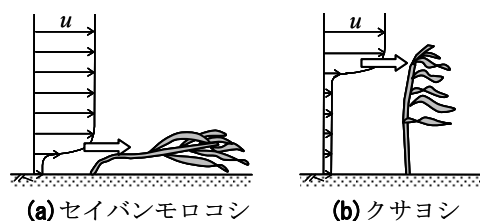


図8 種類別茎流出のメカニズム

る流体力による倒伏モーメントの推定結果を示す。これより、傾き θ は抗力モーメント M と共に指数的に減少するが、その様子はセイバンモロコシの方がクサヨシよりも顕著である。流体力により草本類は十分倒伏され、出水時大堀川においてセイバンモロコシは最大で約 10° まで傾くことになる。

上記の結果を反映して、種類別の茎流出メカニズムを模式的にまとめたものを図8に示す。このように、倒伏を繰り返すと茎が部分的に折れる可能性は高く、同一モーメントでも傾きが大きいセイバンモロコシでは茎下部から折れやすいものと考えられる。一方、倒れにくく直立に近いクサヨシでは流体力の作用点がある茎上部で折れるため、倒伏のし易さの違いにより茎流出状況が変化したものと思われる。

(4) 出水時江戸川における草本類流出状況の推定

江戸川における草本類流出状況としては、高水敷が冠水して流速1m/sを越える台風0709号と同程度の大規模出水時では、大堀川と同じようなメカニズムにより、現存の葉・茎流出は生じるものと考えられる。また、図9に示すように、草本類の現存量と枯死量の経月変化を見ると、草本類の現存量が当然多いものの、枯死量も現存量の7~33%も存在していることが分かる。大堀川における観測結果より、出水により枯死した草本類の流出が確認されたことから、江戸川においても枯死した草本類の流出は起きており、出水規模によっては枯死した草本類の流出量が現存量よりも大きくなる可能性も考えられる。

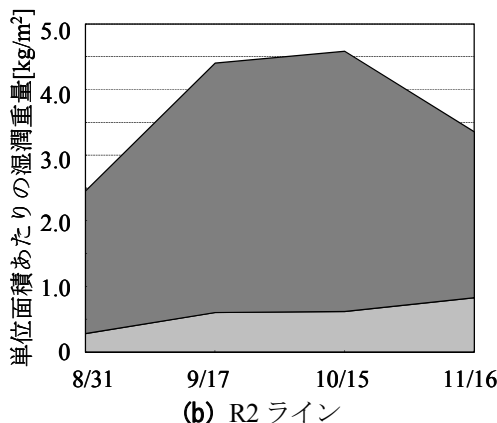
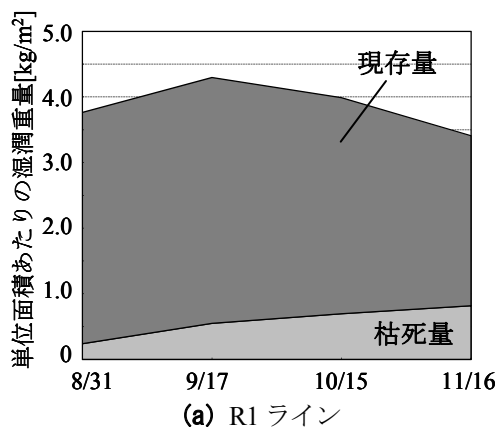


図9 草本類の現存量・枯死量の経月変化（江戸川）

なお、現存や枯死した草本類の流出量の比較に関する定量的な議論は現存のデータのみでは実施できないため、今後より多くの観測データを蓄積して検討する予定である。

5. 結論

本論文では、出水時における草本類の破壊条件を把握するために、草本類繁茂状況調査や草本類の引張試験、流体力推定の数値シミュレーション等を実施した。得られた主な結論は以下のとおりである。

- 1) 大堀川では、出水前後にて草本類における葉全体・部分流出や茎部分流出が生じていることが確認された。その流出状況は種により異なり、葉や茎の流出率はセイバンモロコシが相対的に大きく、クサヨシが小さいことが示された。また、枯死した草本類も流水に晒されて流出したことが確認された。
- 2) 引張試験結果と流体力推定結果より、葉の全体・部分流出は流体力により起こり得るが、茎の部分流出は流体力のみでは生じないことが明らかとなった。
- 3) 茎部分流出の要因としては、草本類が倒伏を繰り返すと茎が部分的に折れてしまうことが考えられる。また、同一モーメントでも傾きが大きいセイバンモロコシでは茎下部から折れ易いが、その一方、

倒れにくく直立に近いクサヨシでは流体力の作用点がある茎上部で折れ、倒伏のし易さの違いにより茎流出状況が変化したものと思われる。

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）によって実施された。また、奄美大島における調査の一部は、自然災害協議会からの助成により行われた。国土交通省関東地方整備局江戸川河川下流事務所には、現地観測実施に際して便宜を図って頂いた。榎セルコ・飯島氏には植生種の同定作業で貴重な助言を頂いた。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) 小島あずさ，眞淳平：海のゴミー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：ディスプレイ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) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) (財)リバーフロント整備センター編：河川における樹木管理の手引き，三海堂，pp.154-171，1999.
- 8) 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.
- 9) 竹林洋史：2010 年 10 月奄美大島豪雨災害調査速報，河川災害に関するシンポジウム，pp.24-28，2011.
- 10) 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.
- 11) 加藤靖之，二瓶泰雄，重田京助：簡易数値モデルに基づく粒径別掃砂量の算定，水工学論文集，Vol.53，pp.679-684，2009.
- 12) 岩本演崇，二瓶泰雄：H-ADCP 計測と河川流シミュレーションに基づく複断面河道の洪水流量モニタリング，水工学論文集，Vol.53，pp.1009-1014，2009.

(2011. 5. 19 受付)