

ダム流木に関する考察と流木量推計の試み

A STUDY ON DAM DRIFTWOOD PROBLEM AND ESTIMATION OF THE DRIFTWOOD VOLUME

吉田 登¹
Noboru YOSHIDA

¹システム工学部教授

近年, 台風や集中豪雨が多発し, 土石流や地すべり等に伴い発生した流木が橋梁等の構造物に集積して洪水氾濫の拡大を招き, 海に流出して漁業活動に被害を与えるなどの影響が生じている. 特にダムでは流木などの漂流物がダム貯水池内に流入し, ダム管理上の障害となるために適宜引き上げられ, 一般廃棄物として焼却等により処分せざるを得ず, 費用面を含めてダム管理上の問題となっている. 本稿では, ダム流木の発生要因や有効利用に関するこれまでの知見を整理し, 次いで降水量とダム流木発生量との関係について考察する. さらに現在, 取り組んでいる画像解析を用いたダム流木量の推計技法の開発について紹介する.

キーワード: 流木, ダム, 降水量, 画像解析, 災害

1. はじめに

近年, 台風や集中豪雨が多発し, 土石流や地すべり等とともに流下した樹木が橋梁等の構造物に集積して洪水氾濫の拡大を招き, 海に流出して漁業活動に被害を与えるなどの影響が生じている. ダムは, 河川の氾濫を防ぐ治水, 電力や生活用水を確保する利水など, 我々の生活にとって重要な役割を果たしているが, これらの気候変動に伴う堆砂物や流木などの漂流物がダム貯水池に流入し, ダム管理上の障害となるため, 適宜引き上げられ, 一般廃棄物として焼却等により処分されている.

2011年には台風12号による集中豪雨が紀伊半島を襲い, 人命損失や様々な構造物等の被害とともに大量の流木が発生した. このような集中豪雨はその後も毎年のように全国各地で発生している. 著者は, 台風12号後の災害ボランティア活動に参加する中, 和歌山県日高川町の椿山ダム貯水池を埋め尽くす流木(図-1参照)に遭遇し, これが流木問題を考える端緒となった. この集中豪雨では約18,600 tの流木が発生し, 和歌山県ではその一部を資源として有効利用する無償提供に取り組んだことが報告されている¹⁾. 和歌山県以外でもこのように流木の有効利用を図る取り組みはみられるものの, まだ一部に限定されているのが実情である.

こうした発生流木の有効活用を図るためには, 各地での優れた有効利用事例の知見を共有し, 利活用の組織, 制度や利活用可能な技術, 対象工法, 仕様等を含めたし

くみを整備することが社会的な課題である. 同時に, 今後も増大すると思われる集中豪雨をふまえて, 流木を安定的に活用してゆくためには, まず基礎となる情報として, ダム流木の発生機構や発生状況を把握することが重要であると考えられる. 和歌山大学では和歌山県の協力を得て, ダム流木の定点観測を行うとともに, 統計解析を用いた降雨量と流木量とのモデル化や画像解析を用いたダム湖面画像からの流木抽出に関する研究に取り組んでいる. 本稿は, まず既往文献等をもとにダム流木の発生や有効利用に関するこれまでの知見を整理し, 次いで前述の研究内容について紹介することを目的とする.



図-1 ダム流木(椿山ダム, 2011年9月撮影)

2. ダム流木の発生要因と有効利用

(1) ダム流木の発生要因

流木に関する問題は古くて新しい問題だといわれる。小松ら²⁾によると、流木は沖積河川（土砂が堆積してできる平坦な沖積層を流れる河川）において発生するものと山地・溪流部において発生するものとに大別され、いずれも激しい降雨がその原因であるものの、両者で発生機構がかなり異なるとされている。沖積河川の場合は、主に洪水に伴う河岸の浸食により氾濫原（高水敷）に生えていた樹木自体が洪水の流体力で流されることにより生じるとされる。これに対して山地・溪流部では、河畔林や溪畔林といった樹木が沖積河川と同様に洪水によりそれ自身流されるという場合もあるが、主に山地に生育する樹木が土石流等により土砂と流木が一体となって流下することにより生じるとされることから、土石流の副産物ととらえることができる。

ダム流木の場合は後者の山地・溪流部から発生する流木が土砂とともにダム貯水池に流入したものと考えられる。山地・溪流部での流木発生機構を大まかに示すと図-2のとおりであり、激しい降雨が引き起こす土石流等に伴う立木等の滑落・流下が流木発生の主な原因であるが、それには樹種や林齢等が影響を及ぼす。例えばよく知られることとして、山地・溪流部からの流木の樹種としては一般にスギが卓越するとされているが、この原因はスギが水分の多い谷筋に植えられ、ヒノキが日当たりのよい斜面中腹に植えられることに起因する。

流木については、流木の発生から流下・堆積までのプロセスがきわめて複雑であること、流木の発生源は山地

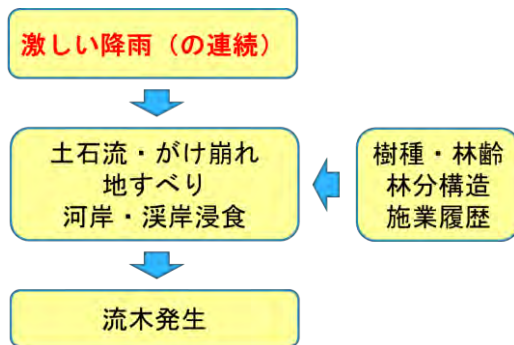


図-2 山地・溪流部での流木発生機構の概要

や河畔、河道等の樹木であるため林学と土木の境界領域ゆえの苦手意識があったこと等により、過去には流木発生機構や対処法に顕著な進歩がみられなかったが、1980年代の後半には、土木研究所等の研究により徐々にその発生機構が解明されてきた。例えば、石川ら³⁾は、流木の起源を、立木だけではなく過去に発生した倒木等の流出によるものも主要な発生原因として整理を行っている（表-1）。さらに、石川ら⁴⁾は、水理模型実験により山地・溪流部における流木の段階的な堆積・再移動機構を明らかにしている。すなわち、まず第1段階として大雨時に斜面崩壊によって流木と土砂が斜面下端の流路に流入し、土石流となってさらに下流へ移動するか、もしくは流路を閉塞して流木の天然ダムを形成する。次に第2段階として上流部の1次・2次谷で形成された小規模の流木ダムや、流下して下流の3次・4次谷で堆積した流木による大規模な流木ダムにおいて、谷筋の流路で様々な流木の堆積が進む。さらに第3段階として、その後の大きな出水によりこれらの天然の流木ダムが破壊され、下流へ流出する。これらの天然の流木ダムはその過程で河床地形を大きく変化させ、土砂の動態と流木流出に大きな影響を与えることが知見として示されている。

小松らは、水系を一貫して流木を捉えることの重要性を指摘している。すなわち、流木災害は流木の発生、流下、堆積というプロセスの中で生じるものであり、ダムの建設のように、ある地点で流木災害軽減対策をとることが、プロセス自体を変形させ、その下流の流木流下・堆積現象に変化を与えるというものである。また、国内の人工林の林齢級は増大していることから今後、流木の太さや長さは大きくなっていくこと、また間伐された樹木が林地内に放置される傾向にあることが流木流出の増加要因となっていることを指摘している。

(2) 流木の有効利用

ダム流木はこれまで一般廃棄物として焼却処理されてきたが、廃棄物処理法の改正により野焼きが禁止されて以降は処理業者による適正委託処理が必要となり、費用要因となっている。本来、流木は木質バイオマスであり、資源としての活用が望まれるものである。

和歌山県を襲った2011年の台風12号の際には、その発生流木量は推計で、約18,600 t（処分費：約240,000 千円）に上ったとされている。また、その約3割に相当す

表-1 流木の発生原因(石川ら)³⁾

流木の起源	流木の発生原因
立木の流出	① 斜面崩壊の発生に伴う立木の滑落 ② 土石流の発生に伴う斜面からの立木の滑落・流下 ③ 土石流の発生に伴う溪岸・溪床浸食による立木の流出 ④ 洪水による河岸・河床の浸食による立木の流出
過去に発生した倒木等の流出	① 病虫害や台風等により発生した樹木（林床上）等の土石流、洪水による流出 ② 過去に流出して河床上に堆積したり河床堆積物中に埋没していた流木の土石流、洪水による再移動 ③ 雪崩の発生・流下に伴う倒木の発生とその後の土石流、洪水による下流への流出 ④ 火山の噴火に伴う倒木の発生とその後の土石流、洪水による下流への流出

る約5,200 tの流木が再利用可能と考えられたため、県では速やかに無償提供のしくみをつくり、その結果、約半数にあたる約2,700 tの流木を再利用し、処分費換算で約48,000千円のコスト削減効果をもたらしたことが報告されている⁹⁾。

ダム財団法人ダム水源地環境整備センターでは、全国約200ダムでアンケート調査を実施し、ダム貯水池で捕捉されている流木量と利用実態を明らかにしている。これによると、直轄ダムや水機構ダムでは全体の55%のダムが有効利用（利活用と処分の併用を含めると82%）に取り組んでいるのに対して、県ダムでの有効利用は県ダム全体の20%（併用を含めると38%）にとどまっていることが明らかにされている。有効利用の方法としてはチップ化が約半数を占め、その他には堆肥化、薪材、炭が挙げられている。

牧ら⁹⁾はダム貯水池で捕捉されている流木量と利用実態を調査している。牧らの行った調査で回答を得たダムからの流木量の合計は約7万m³/年であり、これは熱量に換算すると、石炭換算約2万トンに相当する。これを全国の流域面積比で拡大推計すると全国のダムの総流木量は約66万m³/年（石炭換算約21万トン）となる。すなわち、毎年、石炭約21万トン分の燃料が山からダムへ運ばれてくるということになる。今後、流域単位で関連主体の連携によりこれらのダム流木を活用する取り組みが求められる。

3. 降水量とダム流木発生量との関係

ダム流木の直接的な原因は土砂災害や洪水氾濫であり、これらは降水量と密接な関係がある。これまで牧ら⁹⁾はダム貯水池で捕捉されている流木量と利用実態を調査し、流木量に影響を及ぼす要因について分析をおこなっているが、流木量を説明する変数として年間降水量を用いたため、集中豪雨などの影響をうまく反映できず、ダムごとの流木発生量を推計するには至っていない。そこで、日降水量を用いて年間流木発生量を推計するための分析を試みた。

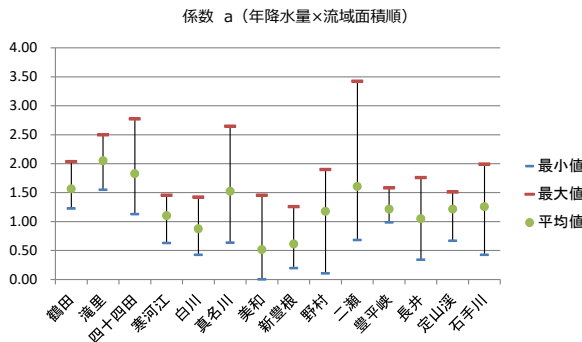


図-3 係数aの分布

(1) 分析対象とするダム

ダム管理事務所のホームページにおいて経年的に年間流木発生量が掲載されている事例を収集し、結果として15のダム（寒河江ダム・四十四田ダム・新豊根ダム・真名川ダム・石手川ダム・滝里ダム・長井ダム・鶴田ダム・定山溪ダム・二瀬ダム・白川ダム・美和ダム・豊平峡ダム・野村ダム・弥栄ダム）におけるデータを得た。

(2) 年間流木発生量を決定するパラメータの推計

年間流木発生量 y を、日降水量 Q_i の関数である日流木発生量の年間の累計値として設定する。日流木発生量の関数には線形、指数、対数、累乗等の代表的な近似式を設定してモデル化することを考える。本来、日降水量に対応する日流木発生量のデータがあれば、両者の関係を散布図等で表現してあてはまりのよい近似式を設定できるが、一般に日流木発生量のデータを調査しているダムは殆どないと思われるため、近似式を予め想定することとする。これまでの知見⁹⁾から、年降水量と年流木発生量には相関がないことが分かっているから線形近似は除き、また降水量が0の場合に流木量も0であると考えて指数近似も除く。対数近似ではデータの変化率が急速に増加した後横ばいになるため集中豪雨時に流木の発生量が甚大になる状況にはそぐわないと考え、ここでは降水量の増大とともに流木発生量が加速度的に増大する累乗近似によるモデル化を考え、パラメータ a 、 b を用いて下式のように定義する。

$$y = \sum_{i=1}^n a * Q_i^b$$

但し、 y ：年間流木発生量（m³/年）、 Q_i ： i 日の日降水量（mm）、 a ：流域の規模に関連するパラメータ、 b ：日降水量に対する日流木発生量への影響（感度）に関連するパラメータ

すなわち、あるダムにおける各年の年間流木発生量に対して、パラメータ a 、 b を与えた場合にその年の日降水量データから計算される日流木発生量推計値の年間累計としての年間流木発生量の推計値と実績値との残差が最小となるときの a 、 b の値を、Excelソルバーを用いて求める。なお、ダムでの日降水量の測定値が得られなかった

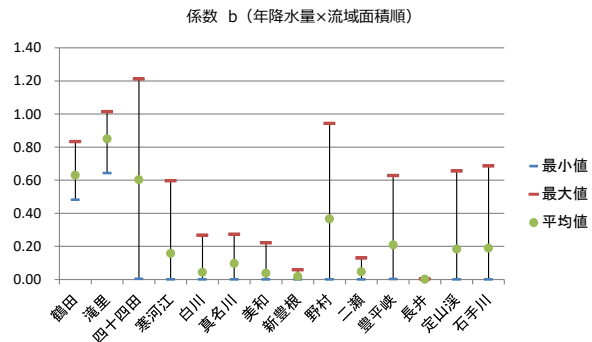


図-4 係数bの分布

ため、ここではダム近傍に所在するアメダス観測点のデータを用いた。

(3) パラメータの推定結果

累乗近似により実績値との誤差を0.1%未満として降水量と流木発生量との関係を定式化することができた。推計されるパラメータa, bは同じダムであっても、年によって値は変化する。ここでは、図-3~4に各ダムにおけるパラメータa, bの最大値, 最小値, 平均値の分布を示す。グラフの横軸で、左側に位置するダムほど流域内の年間降水量が大きい。係数aは累乗近似式を対数変換した場合の定数項に相当するが、その平均値は0.5~2.0の間に分布しており、ダムの降水量規模とはほぼ無関係にばらばらしている。一方、係数bは、累乗近似式を対数変換した場合の降水量に対する比例係数に相当し、図-4をみると降水量規模の大きいダムでは相対的にその値が大きい様子が見受けられるが、事例数が15と少ないため、より多くのダム事例について確認を行うことが課題と考えられる。

(4) 個々のダムにおけるパラメータの分布

個々のダムにおけるパラメータの分布について、係数bを例としてダム流域の降水量規模との関係を図-5に示す。降水量規模とbとが概ね比例するプロットもみられるが、一方で同じダムで同規模の降水量であっても、bの値は年によって大きく異なるプロットもみられる。例えば寒河江ダムで1999年は3159mm, 2000年は3293mmであったが流木量は209m³, 1440m³であり、このような降水量パターン等が影響している可能性も考えられる。

この分析では、15のダムを対象として累乗近似式にもとづく降水量と流木発生量との関係について考察を行い、

実績値との誤差を0.1%未満として降水量と流木発生量との関係を定式化することができた。対数変換時に定数項となるパラメータaはダムの降水量規模によらず変動し、降水量の係数となるパラメータbは降水量規模との関係が伺われた。より詳細には、個々のダムでの降水パターン等の影響等が考えられる。

4. 画像解析によるダム流木量の推計技法の開発

降水量とダム流木との関係を詳細に調べるためには、降水量データに対応するダム流木量を定量的に把握することが重要となる。和歌山大学では、椿山ダムをフィールドとして、流木量を監視するための定点観測を継続している(図-6)が、画像解析により観測画像から流木を自動検出することができれば、ダム流木処理業務の支援はもとより、前述の降水量とダム流木量との関係といった流木発生機構を解明することにも繋がるのが期待される。現在、和田⁹⁾による最近傍識別器を用いた色ターゲット検出の技法をダム流木検出に適用する技術開発に取り組んでいる。

(1) 画像検出手法

これまで、廃棄物研究の分野では、流木を含む河川や海岸での漂流ゴミに対して、RGBの閾数値(合計値や空間勾配)を算出して漂流ゴミを判別する閾値として用いる手法⁷⁾や、RGB値を空間内の色差が均等になるように補正された色空間値(CIELUV色空間値)に変換してその発生頻度をもとに閾値を求める手法⁸⁾等が開発されてきた。これらは一般に情報統合を行って「ターゲット色らしさ」を判断するスカラー値をもとに識別する手法で

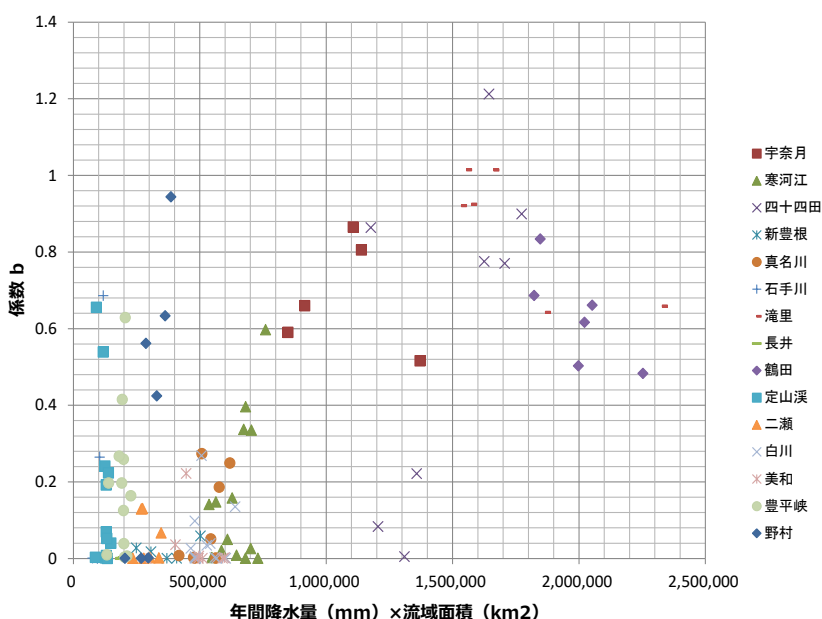


図-5 各ダムにおける流域降水量規模とパラメータbとの関係



定点観測地点



図-6 橋山ダムでの流木定点観測

あり、情報統合のための前提となる環境条件が変化する、あるいは成り立たない場合への対処等が課題とされている。これに対して、事例にもとづく学習 (Case Based Learning, Instance Based Learning) 手法の1つである最近傍識別器 (図-7) は、従来法のような「らしさ」を示すスカラー値への縮約を行わず、色空間内で直接、識別面を設定することで、これらの課題への対処を可能とするものである。

(2) ダム流木画像への適用

和歌山大学システム工学研究科和田教授の開発による、最近傍識別器を用いた色ターゲット検出プログラム (Puppy Linux上に実装したもの) を、定点観測用の

従来法のような「らしさ」を示すスカラー値への縮約を行わず、色空間内で直接、識別面を設定して、色ターゲットを検出

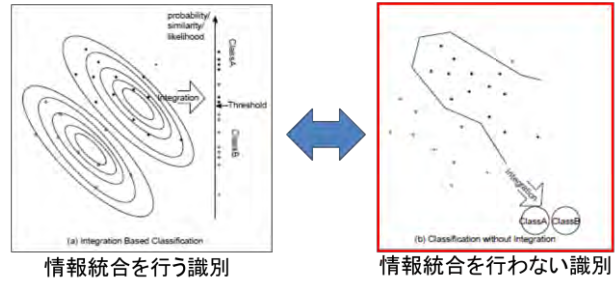


図-7 最近傍識別器の原理 (和田⁶⁾)

Time Lapseカメラ (Brinno社製TLC200, レンズ画角59度 (対角), 焦点距離 $f=3.81\text{mm}$ (35mmフィルム換算 約36mm相当), 記録画素数 $1,280 \times 720\text{pixel}$, 電源持続時間約2.5ヵ月 (1時間に1回の撮影) により撮影されたダム流木動画 (AVI形式) に適用し、ダム流木の抽出を試みる。本プログラムは、元々、ジェスチャや顔認識などへの適用を目的として、和田により開発された技法を、ダム流木画像用に実装したものである。

ダム流木画像 (2014年11月8日6時~16時撮影) に対して、最近傍識別器を用いた色ターゲットを適用した結果を図-8に示す。ダム湖面に堆積する流木については、湖面中央に集積する流木、湖岸に散積する流木を含めて、概ね良好に検出することができた。ダム湖周辺の山々に誤検出が見られるが、これらに対しては、検出対象空間の境界をダム湖面に限定すること等により対処可能と考えられる。一方で、特定時間帯の画像での学習にもとづいて他の時間帯での流木検出を行うと、時間経過とともに、湖面内においても流木の誤検出が顕著になる。これは、日射量や太陽高度、湖面の波立ち状況に起因するものと考えられる。今後、誤検出の要因に関する分析を進

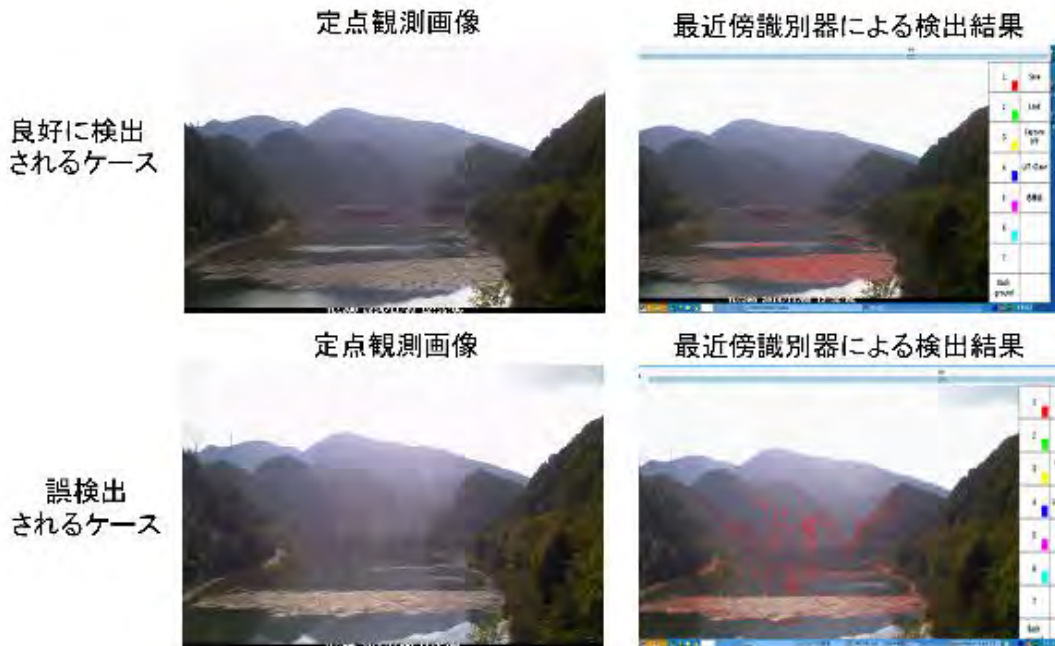


図-8 最近傍識別器によるダム流木の検出結果

め、対処方法について検討を進めていく。

5. まとめと課題

本稿では、まずダム流木の発生要因と有効利用について既往文献から得られる基礎的な知見を整理し、次いでダム流木の直接的な原因である土砂災害や洪水氾濫と密接な関係にある、降水量を対象にダム流木との関係について分析を試みた。さらに、現在取り組んでいる、画像解析を用いたダム流木量の推計技法の開発について紹介した。分析の結果、日降水量の関数により年間の流木発生量との関係を定式化できることを確認したが、個々の降雨イベントごとの流木発生量をモデル化するには、個々の降雨後における流木発生量の観測データの蓄積が必要であり、そのためにも現在の画像解析手法による流木抽出の手法開発を進める必要がある。また今後は、現在あまり有効利用のしくみが整っていない、県所管のダム流木の有効利用策について検討を進めることが課題である。

参考文献

1) 小羽根則光・的場康彦：平成23年台風12号により発生した流

木の無償提供について，平成24年度近畿地方整備局研究発表会論文集，施工・安全管理対策部門：No.16，pp.1-6，2012

- 2) 小松利光監修・山本晃一編：流木と災害，技法堂出版，pp.273，2009.
- 3) 石川芳治・水山高久・鈴木浩之：崩壊・土石流に伴う流木の実態と調査法，土木技術資料，Vol.31，No.1，pp.23-29，1989.
- 4) 石川芳治・水山高久・福澤誠：土石流に伴う流木の発生および流下機構，新砂防，Vol.42，No.3，pp.4-10，1989.
- 5) 牧孝憲・高橋正人・落修一・三宅且仁・尾崎正明：全国のダム流木発生量調査，土木学会論文集G，Vol.63，No.3，pp.22-29，2007.
- 6) 和田俊和：最近傍識別器を用いた色ターゲット検出，情報処理学会論文誌，Vol.44，情報処理学会論文誌，No.SIG17（CVIM8），pp.126-135，2003
- 7) 尾ノ井龍仁・二瓶泰雄・片岡智哉：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，土木学会論文集B1（水工学），Vol. 69，No. 4 p. I_769-I_774，2013
- 8) 片岡智哉・日向博文・加古真一郎：Web カメラ画像解析によるプラスチックゴミ漂着量の多地点連続観測，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol. 68，No. 2 p. I_1471-I_1475，2012

(2016. 12. 16受付)