

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26450481

研究課題名(和文) 森林流域での流木動態を組み込んだ懸濁態栄養塩の流出解析

研究課題名(英文) Analysis of suspended nutrient export based on in-stream wood dynamics in a forested catchment

研究代表者

芳賀 弘和 (HAGA, Hirokazu)

鳥取大学・農学部・准教授

研究者番号：90432161

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：森林流域を流れる小河川に存在する流木の集合体(ログジャム)は、水の流れや水質に影響を及ぼす要素である。しかし、ログジャムの目詰まり要素である小径流木の役割には不明な点が多い。本研究では、源流域河川において流量変動とログジャムが河川水の懸濁物質濃度に及ぼす影響について明らかにすることを目的とし、小径流木の除去と食塩水のトレーサー注入実験を行った。その結果、小径流木の除去に伴う水の流下速度の変化は、流路区間の河床変動の規模に左右された。さらに、中小出水における河川水の濁度は、流木除去により1～2桁高まった。水質形成にとって、ログジャムの目詰まり要素としての小径流木の重要性が示唆された。

研究成果の概要(英文)：In forested headwater catchments, in-stream wood and wood accumulations (logjams) can play important roles in regulating streamflow because of their geomorphic and hydraulic characteristics. However, there have been only a few detailed studies of the roles of small in-stream wood (SW). In this study, to clarify the effects of streamflow fluctuations and logjams on suspended sediment concentrations, we conducted a SW removal experiment with salt tracer injections. Changes in tracer velocities with the SW removal depended on the channel bed evolution. In addition, turbidity during the small to medium scales of storm flow events after the SW removal was higher by 1 to 2 order of magnitudes than that before the removal. These results imply that SW as a clogging component of logjams is important for stream water quality in forested headwater catchments.

研究分野：森林水文学

キーワード：流木 ログジャム 除去 懸濁態 トレーサー

1. 研究開始当初の背景

湖沼や内湾などの閉鎖性水域の富栄養化対策の結果、家庭や工場から発生する汚濁負荷量は年々減少している。しかし、閉鎖性水域の汚濁度合い、すなわち栄養塩(窒素やリン)の濃度に大きな変化はなく、その原因として田畑や森林等の非特定汚染源からの負荷が指摘されている(日本水環境学会, 2012)。このため、非特定汚染源からの栄養塩の負荷量を正確に把握することは急務であり、とりわけ、国土の大部分を占める森林からの栄養塩の流出負荷量データの収集と栄養塩の流出機構の解明は重要な課題となっている。

閉鎖性水域に流入する窒素やリンの量を把握するには、溶存態のみならず懸濁態も対象とすることが不可欠である。例えば、湖水中の食物連鎖において、生物の直接的利用の点で重要なのは溶存態であるが、湖底の嫌気化、巻上げ、堆積物からの溶出という点では懸濁態が重要である。これまでの研究で、森林河川での懸濁物質の濃度変動は、観測サイト間、及び地域間での差が非常に大きいことが指摘されている(例えば、Ide et al. 2009; For. Ecol. Manage.)。また、Bilby & Likens (1981; Ecology) が示したように、森林河川での懸濁物質は流路内障害物(特に、流路を横断する状態で堆積している流木やログジャムと呼ばれる流木の集合体)の流下物捕捉作用を強く受ける特徴があり、濃度変動と流路内障害物との密接な関係が指摘されている。しかし、森林からの懸濁態栄養塩の流出についての研究例は非常に少ない。表1に示すように、森林立地や物質循環の分野では、硝酸やリン酸等の溶存物質については多くの研究例があるが、懸濁態の栄養塩についてはほとんど例がない(篠宮ら 2006; 水環境学会誌)。河川工学や砂防工学の分野では、浮遊砂(SS)やウォッシュロードという観点から懸濁物質が研究されている(Hotta et al. 2007; Hydrol. Process.)が、栄養塩としての評価はなされていない。また、渓流水文学や河川生態学の分野では、河川流路内での栄養塩の変換過程が詳細に研究されているが、流域からの流出負荷量はほとんど対象とされない(Wondzell et al. 2009; J. Hydrol.)。

以上を踏まえ、森林流域における渓流水の懸濁態栄養塩の濃度変動と河川流路内の流木動態との関係を明らかにすることは不可欠であり、閉鎖性水域の富栄養化対策、水環

境保全に配慮した森林管理手法、及び流木の流出制御法の構築にとって有益であると確信し、本申請に至った。

2. 研究の目的

日本では一般に、流木は災害因子として注目されることが多いが、それは浮遊状態や土石流状態で移動する場合である。しかし、そのような大規模な移動は、斜面崩壊や土砂流出に伴って生じる低頻度かつ空間的に限られた現象である。つまり、源流域の流木は、多くの場合ほとんど移動することはない。流路内に数年~数十年滞留しつづけることになる。したがって、流木はその災害的側面よりもむしろ河川地形学・生態学・水環境学的側面の方が重要となる場合が多いと考えられる。中国山地中部の源流域河川(中小規模の出水時の水深<30 cm, 川幅<1.5 m)において著者らがこれまでに調査した結果では、流木はほとんど動かないことが明らかになっており(年移動距離< 5m)、今回は流木の災害的側面は対象とせず、以下のことを明らかにすることとした。ただし、流木の動態(位置、サイズ、密度、腐朽状態等の変化)を把握することは、流木の流出制御法を考える場合に不可欠であり、結果的には流木災害対策にも通じる点を有する。

- ・文献レビューを行い、懸濁態の窒素とリンの濃度に影響しうる諸要因(表面浸食や林道の有無、林相の違い、流木量の違い等)ごとに濃度変動の幅を整理する。
- ・著者らが2009年以降水文・水質観測と河川測量観測を実施している森林流域をコントロール流域とし、その近隣に新たに処理流域を設ける。
- ・これらの流域から流出する窒素とリンについて溶存態と懸濁態の占める割合を定量化する。
- ・流木の処理(除去・投入)によって変化が予想される流路粗度、流水の一時滞留時間、河床に堆積する懸濁物質量、及び懸濁態濃度と流量との関係について明らかにする。
- ・流路内からの懸濁態の供給ポテンシャルを表すパラメータとして流木量と経過時間を組み込んだ懸濁態濃度推定モデルを提案する。

3. 研究の方法

研究対象河川は、2009年以降著者らによる水文観測の実績がある鳥取大学・蒜山の森(岡山県真庭市)の天谷流域に設定した。懸濁態の窒素とリンの流出に流木が及ぼす影響を把握するために、当初はコントロール流域と処理流域を設け、それぞれにおいて流木の除去実験と投入実験を行う対照流域法を採用する計画であった。しかしながら、コントロール流域として予定していた河川の量水堰堤に貯まった土砂を排除するのに想定を大きく上回る時間を要したため、代替手段として単独流域法を採用する計画へと変更し

表1. 各分野において栄養塩に関連する主な項目

	・森林立地学 ・物質循環学	・河川工学 ・砂防工学	・渓流水文学 ・河川生態学
Input	降雨, 施肥	河岸浸食 表面浸食	落葉リター
流路内	?	濃度分布 輸送過程	N, Pの生産・消費 河床間隙水の流れ
Output	NO ₃ PO ₄	浮遊砂(SS) ウォッシュロード	?

た。また、これに伴い、可能な限り多くの出水イベントを対象として河川水の懸濁態濃度を解析するために、連続的に運用が可能な濁度計によってデータ（濁度）を得ることとした。これは、この流域における著者らのこれまでの調査結果（懸濁態窒素と懸濁態リンの濃度はSS濃度と強い相関がある）から、濁度を把握することで栄養塩濃度の挙動が十分理解できると考えたからである。

対象とした河川区間（リーチ）に存在していた流木は、サイズ、量、堆積形態を把握した。河川からの除去流木は、小径流木（直径が10cm未満のもの）とした。また、流木動態について検討するために、以下に述べるトレーサー注入実験区間よりも下流に分布する流木の密度（比重）、腐朽度（ピンを用いた貫入試験に基づく）、強度、及び年間移動距離を把握した。強度の評価については、当初計画に入れていなかったが、流木動態を検討する上で鍵になると考えられたため本研究に組み込んだ。

流木除去が水の流れに与える影響を把握するために、食塩水トレーサーの注入実験を行った。これは、流木除去前の約1年間に3回と除去直後の約1ヶ月間に3回行った。併せて、河川の地形測量を行った。

さらに、流木除去が懸濁態濃度に与える影響を把握するため濁度観測は、除去前の約2ヶ月間（当初は1年間で予定していたが前述の事情により変更した）をキャリブレーション期間として、リーチの上流端と下流端で行った（濁度の測定間隔は10分）。除去後は、約6ヶ月間において同様に測定した。

なお、研究の最終年度には流木の投入実験に基づく解析を計画していたが、平水時であるにも関わらず濁度が測定限界を超える場合が頻繁に起こる（濁度計がレンジオーバーする）とともに、流路内の流木集積により水位観測が途絶えるなど多くの不具合が生じた。このため、本報告では流木除去実験の結果に基づく成果に限定して述べることにした。

4. 研究成果

ログジャムの骨格となる大きな流木の隙間を塞いでいた小径流木を除去し、平水時の食塩水トレーサーの流下速度を流路ユニット（リーチ全体を6つの分割し、ユニットとした）で調べた結果、除去前よりも除去後の方が流下速度は大きくなった。除去後の流量が除去前の約半分であっても、これと同様の結果となるユニットがあった。河川測量の結果、このようなユニットでは河床が低下し、河床勾配が増大していたことから、トレーサーの流下速度が増したと考えられた。また、ログジャムから流れ出した土砂が堆積し河床が上昇したユニットではそのような土砂による間隙を流れる水が増え流下速度が低下したかもしれない。いずれにせよ、ユニット間の流水の流下速度（あるいは流路内滞留時

間）の違いは流木除去に伴う河床変動の違いと密接な関係があることが示唆された。

リーチ上流端と下流端において、出水規模と濁度の関係を調べた結果、出水時における濁度の上昇は、流木除去に関わらず下流端の濁度の方が高かった。また、リーチ下流端における除去前と除去後の比較では、除去前であれば濁度にほとんど変化がみられなかったような小規模出水であっても、除去後には1-2桁大きくなる結果となった（図1の破線で囲まれた部分）。これはオレゴン州の河川において流木除去に伴う土砂の変化量を調べた Beschta (1979) の報告（6.7倍の上昇）よりも大きな変化であった。また、融雪出水に伴う濁度変化では、リーチ下流端において急上昇する場合が見られた（図2）。これらの結果から、流木除去に伴ってログジャムに貯留されていた土砂が不安定化し、わずかな流量上昇に対しても大きく反応する土砂が流路内に分散していたことが推察された。

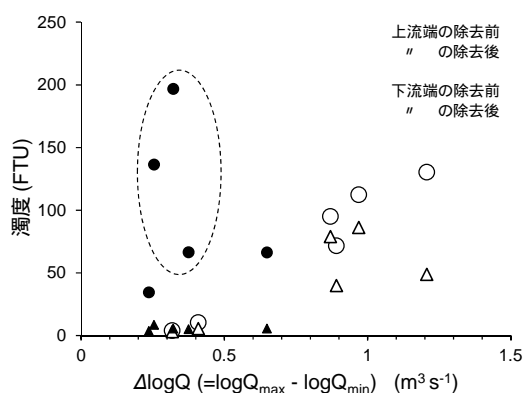


図1 流木除去区間の上流端と下流端における出水規模と濁度との関係。出水規模として、イベントの最大流量 Q_{max} と初期流量 Q_{min} の対数の差($\log Q$)を用いた。

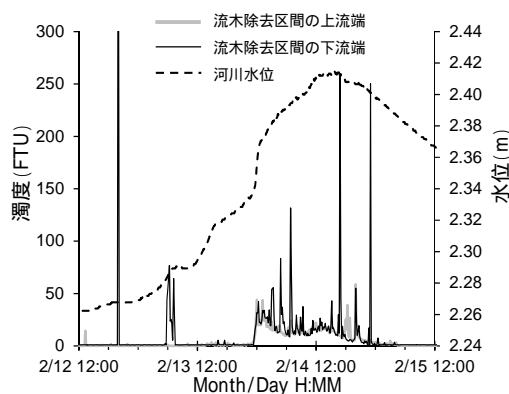


図2 流木除去から約4か月が経過した時の融雪出水に伴う水位変化と濁度変化

小径流木の密度を滞留場ごとに整理した結果、土砂に埋没していた流木よりも部分的に水没していた流木の方が容積密度は小さく（図3）、腐朽が進行していることが示唆された。また、腐朽度と強度の関係を調べた結果、腐朽が進むにつれて曲げ強度とヤング係数は大きく低下することが確認された。ただし、広葉樹（主に、ナラ類）と針葉樹（スギ、

ヒノキ)とでは、曲げ強度とヤング係数の関係が異なっており、広葉樹よりも針葉樹の方がしなりやすかった(図4)。このことから、樹種によってログジャムの目詰まりの発生や消長のパターンが異なることが示唆された。

小径流木の密度と年間移動距離との関係を現地での流下実験に基づいて調べた結果、大きく(数十m)移動した流木は、密度が 1g cm^{-3} よりも低かった。しかし、そのような低い密度であっても、ほとんど移動しなかった流木もあり、単純に密度のみで移動距離を説明することはできなかった。実験開始時には密度が 1g cm^{-3} より低くても、出水を経験した結果、水中に没している流木もあったことを考慮すると、吸水により密度が 1g cm^{-3} よりも高くなり、浮遊状態ではなく転がりや滑りの状態で河床と接しながら移動したと推察された。また、吸水による密度の上昇割合は、腐朽が進むほど大きいと考えられた。

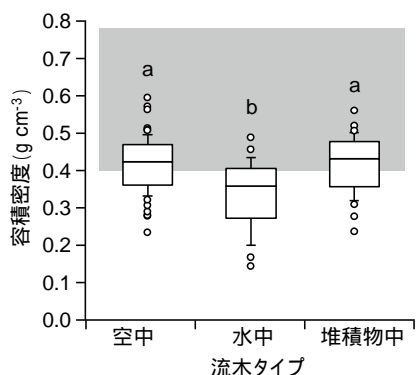


図3 流木の滞留場の特徴で分類した流木タイプと容積密度の分布。

同一個体であっても複数の滞留場に及ぶ場合は、その個体の大部分が占める滞留場でタイプを分けた。つまり、水中タイプであっても、完全に水没しているとは限らない。むしろ完全に水没している場合はわずかであった。同じアルファベットを付したタイプは統計的な有意差がないことを意味する。

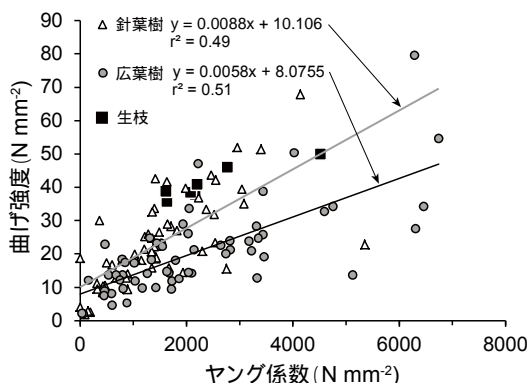


図4 針葉樹と広葉樹の流木における曲げ強度とヤング係数との関係。参照のため、ヒノキの生枝のデータをプロットしている。

以上より、小径流木がログジャムの目詰まり要素として土砂の流路内滞留に寄与している場合、それらの流木を除去することによ

り、懸濁物質の濃度が大きく上昇し下流域の水質に影響を与えうると考えられる。このため、森林管理において災害につながるような流木を除去する際には、一度に多くのログジャムを対象にするよりも、時間的・空間的に対象を分散する方が河川水の濁りを抑えられると思われる。また、小径流木のしなりやすさの点から、広葉樹よりも針葉樹のログジャムの方が目詰まりの解放が起こりやすく、ログジャムが捕捉していた土砂を下流へ放出しやすいかもしれない。このような観点からの流木研究は、国内外を問わずほとんど例を見ないが、森林を抱える地域での流域管理や河川管理を効果的に行うためには、今後必要な点であり、本研究の成果がその基礎的知見として寄与すると思われる。なお、本研究では観測上の不具合により十分に検討できなかった懸濁態濃度のモデル化についても、流木動態と併せて今後の重要課題となるであろう。

<引用文献>

Beschta, R. L. (1979) Debris removal and its effects on sedimentation in Oregon Coast Range stream. Northwest Science, 53: 71-77/

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 2件)

芳賀弘和・小川滋, 森林流域における降雨流出特性と清澄水供給ポテンシャルとの関係, 第128回日本森林学会大会, 2017年3月27日, 鹿児島大学農学部, 鹿児島県・鹿児島市

芳賀弘和・盛石田拓也・森下直哉, 中国山地中部の源流域における小径流木の湿潤密度と乾燥密度, 第127回日本森林学会大会, 2016年3月29日, 日本大学生物資源科学部, 神奈川県・藤沢市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

芳賀 弘和 (HAGA, Hirokazu)
鳥取大学・農学部・准教授
研究者番号: 90432161

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

福富 昭吾 (FUKUTOMI, Shogo)
米田 亜沙美 (YONEDA, Asami)
盛石田 拓也 (MORIISHIDA, Takuya)
森下 直哉 (MORISHITA, Naoya)