

1. はじめに

流木は大規模出水の際に災害を助長する因子として注目されるが、中小出水を含め平水時にも様々な注目すべき側面がある。また、流木と言っても長さが 10 m を越えるものもあれば 1 m に満たないものもあり、それらの機能も様々である。国外では、生態学、地形学、水質化学等の多様な視点から流木に関する研究が行われており、河川管理に流木を利用したものも増えている。しかし、国内では災害の側面以外からの流木研究は例が少ない。森林管理の現状を考えると、今後は水、土砂、栄養物質の移動を理解する上で流木は鍵となると思われる。本稿では、平水時と中小出水時を対象に、流木が水・物質流出に与える影響について概観し¹⁾、著者らが近年実施している小径流木の研究²⁾について紹介したい。

2. 流木が水流出に与える影響

森林流域内を流れる河川において流木が作り出す代表的な地形として、階段状河床構造がある。これは、流れの落差を伴う階段状の地形（ステップ）と深くて流れの緩やかな淵（プール）の連続する構造を持った地形である。このため、流水のエネルギーを効果的に減じ、流路の安定性や土砂移動の制御を考える上で極めて重要な地形であるが、流木がその形成に関わる場合には効果は高いと言われている。特に、多数の流木が集合体（ログジャム、デブリダム等）を形成した場合には、大きなステッププールを伴うため、流れに対する作用は一段と大きなものになる。このような流木の作用を理解するために、流路地形の幾何形状、水理特性、及び滞留土砂の量や粒径について以前から調べられている。

流木が関与する地形は、中小規模の出水に対して安定である場合が多いと言われており、洪水流の到達時間を遅らせる効果があるとされている。Gregory et al.³⁾によると、約 4 km の流路区間（流域面積 11 km²）でデブリダムを除去し、上下流での出水ピークのラグタイムを評価したところ 10~100 分のオーダーでデブリダムの遅延効果が確認されている。しかしながら、流量規模の影響や降雨一流出応答の不均質性（降雨強度や流域の湿潤条件に強く依存する現象）のため、そのような地形による洪水流の遅延効果の一般性を示すことは難しく、現状では研究例も極めて少ない。洪水流の到達時間やラグタイムは、雨水の流出経路や崩壊タイプ・崩壊土砂量の指標とされる場合があり、流路内に遅延効果がどの程度あるかを知ることは重要な課題となりうる。その際に、流木が関与する地形は無視できないと思われる。

近年、河川での物質循環研究において河床間隙水域の重要性が指摘されている。その中では、表流水と河床間隙水との交換がいかに関与するかを把握することが鍵となっており、流木がもたらす流れの複雑さや滞留場の不均質性の寄与にも注目が集まっている。例えば、Wondzell et al.⁴⁾は流木によって流れが堰上げられることにより、流路内と河床間隙水域内の動水勾配が変化し、さらには地下部の流れが変化することを報告している。これは、流木によって流路付近での水の流出経路が複雑になっていることを意味しており、森林流域の河川において平水時の水流出を理解する上では重要な点と思われる。

3. 流木が物質流出に与える影響

流木の集合体は、流れに対する障害物となりうるため、流下してくる土砂や落葉・落枝を効果的に捕捉することが知られている。このため、河川生態学の分野では栄養の貯蔵庫として生態系を支える重要な要素として認識されている。Bilby⁵⁾の研究では、流路内（区間長 175 m）に存在していたデブリダムをすべて除去することにより、流量増加に対する溶存物質（< 0.45 μm）の濃度の増加率はわずかであったが、細粒状物質（0.45 μm~1 mm）と粗粒状物質（> 1 mm）の濃度の増加率は著しく大きいことが示された。このことは、流木は、デブリダムを形成することにより流下する粒状物質を一時的に捕捉し、粒状物質の流域外への流出量を制限していることを意味している。流木に由来するデブリダムは、当然ながら永久的にその場所に存在しつづけるわけではなく、腐朽とともに部分的に壊れたり、出水によって全体が壊れたりすることになる。

また、流木そのものが有機物の供給源となることも考えられる。Ward and Aumen⁶⁾の研究では、流木の単位表面積当たりの削剥速度を求めて評価した結果、少なく見積もっても単位流路面積あたり 100 g y⁻¹ m⁻²であり、この値は細粒状有機物の流路内滞留量の約 2 倍、流路内へ供給される落葉が 1 年間に産出する細粒状有機物量の約 50%に相当することを示した。このことは、流木が細粒状有機物の生産源として大きな役割を果たしていることを示唆している。

さらに、水質という点で流木が物質流出に影響を与えるとみることにもできる。平水時の河川水質は水利用の点からは水量と並んで重要な項目であるが、河川水が流下する過程で上述のような河床間隙水域

という、いわば地下部の影響を強く受けることが示唆されている。一見して流路の表面のみで流れに影響を及ぼしているような流木であっても、その存在が地下部の流れを介して水質に影響するという点は見逃されやすく、今後の森林流域における河川水質研究ではこのような流路内の過程を積極的に考慮する必要があると思われる。

したがって、森林流域における物質流出は、流木の腐朽や削剥の過程、及びデブリダムのような集合体の形成と破壊の過程と密接に関連していることが推察される。また、物質流出は、流木が関与する地形がもたらす流下物の一時貯留と放出の繰り返しによってコントロールされるため、流域末端での物質流出量は流路内の流木の違いによって大きく異なる場合があることが示唆される。

4. 小径流木の研究²⁾

ここでの小径流木のサイズの目安は、直径が 10 cm 未満、長さ 1 m 未満のものである。小径流木は溪流生態学分野の研究で扱われることがあり、古くはその流下と滞留の過程に力点が置かれ、近年では流域から流出する炭素量を評価する際や分解過程を評価する際に着目されている。また、小径流木はログジャムやデブリダムの目詰まり要素として機能するものであり、水や物質の流出を抑制する要素として重要である。しかし、現状では研究例は少なく、著者らが文献調査を行ったところ、その基本的な物性値である密度、含水率、腐朽状態、強度などに関する情報ですら限定的であった。

そこで著者らは、これらの物性値について中国山地中部の溪流にあった 5 カ所のログジャム (28, 40, 41, 77, 129 ha) から採取した小径流木を対象に実態調査を行い、次のような結果を得た。i) 水の密度よりも大きな湿潤密度を持った小径流木が全体の約 4 割を占め、それらの多くは土砂に部分的に埋没して滞留したものであった。ii) 小径流木の湿潤密度と体積含水率の間に有意な正の相関があった。iii) 小径流木の容積密度の特徴は滞留場の水分環境と酸素環境の違い、すなわち腐朽環境の違いとして解釈できた。iv) 腐朽度が高い小径流木ほど曲げ強度は小さかった。v) 広葉樹と針葉樹のヤング係数と曲げ強度との関係は異なっており、広葉樹よりも針葉樹の方が外力に対してたわみやすかった。これらより、小径流木の流下現象では流木が河床と接しながら動く過程が無視できないこと、ログジャム内での小径流木の腐朽状態の偏りがログジャムの部分的破壊をもたらすうること、樹種の違いによって流下物の一時的貯留と放出のパターンが異なりうることを示唆された。

これまでがそうであったように、直径が数 10 cm、長さが 10 m を越えるような大径流木（ログジャムの骨格となる流木）と比べると、小径流木は研究上無視されがちな存在である。しかしながら、骨格となる流木間の隙間を埋めて流下物捕捉構造物としてログジャムの機能を強化したり、腐朽とともにその隙間を再形成し流下物を放出したりする点は、小径流木が流路地形と土砂滞留にもたらすマイナーチェーン効果であるため、小径流木の存在を無視することはできないと考えられる。さらに、平水時や中小出水時における水・物質流出現象を理解するためには、小径流木の物性値や機能を評価することの意義は大きく、結局のところその理解は大規模出水時の流出現象を理解することにも繋がると考えられる。

5. おわりに

本稿では、土石流や斜面崩壊に伴う大規模出水時の流木の移動や流出現象には触れなかった。しかしながら、平水時や中小出水時を対象とした流木動態の研究は、大規模出水時の初期条件に関する研究とも捉えることができ、防災上も決して無駄なものではないと思われる。近年、日本の森林では水源涵養や土砂流出防備の強化を背景にした間伐等の伐採が進んでおり、施業に伴って河川へ入る残材などが流木化する可能性が高い。今後は、大径流木と併せた小径流木の動態研究や流域からの水・物質流出に与える流木の影響について長期的研究が望まれる。

引用文献

- 1) 芳賀ら (2006) 森林流域からの倒木や流木の流出. 水環境学会誌, 29 : 207-213.
- 2) Haga et al. (2017) Properties of small instream wood as a logjam clogging agent: Implications for clogging dynamics based on wood density, water content, and depositional environment. *Geomorphology*, 296: 1-10.
- 3) Gregory et al. (1985) The permanence of debris dams related to river channel processes. *Hydrological Sciences Journal*, 30: 371-381.
- 4) Wondzell et al. (2009) Changes in hyporheic exchange flow following experimental wood removal in a small, low-gradient stream. *Water Resources Research*, 45, W05406.
- 5) Bilby (1981) Role of organic debris dams in regulating the export of dissolved and particulate matter from a forested watershed. *Ecology*, 62: 1234-1243.
- 6) Ward & Aumen (1986) Woody debris as a source of fine particulate organic matter in coniferous forest stream ecosystems. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 43: 1635-1642.