

第5章 結論

本論文は流木災害対策を念頭に、自然河道と不透過型砂防ダムにおける堆積・再移動を論じてきた。以下章ごとに、内容と成果を要約して記述し結論とする。

第1章では流木の発生場所が、山腹・溪岸・溪床・その他家屋や木造建造物の所在地であることをとりあげ、その原因として立木・倒木・過去に発生した流木の再流出が主な発生原因であることを示した。研究に先立ち、これまで明らかになっていること、不明な点を明確にするため、過去の流木に関連する論文を分類し紹介した。その結果これまであまり行われていない分野が明らかとなり、流木災害の防止・軽減に役立てることを念頭に、特に自然河道と不透過型砂防ダムにおける流木の堆積、その流木が再移動を開始する条件を把握することを本論文の目的とした。また流木の定義がこれまで確立されていなかったため、本論文では災害につながる流木を対象とし、長さ1 m以上かつ直径5 cm以上で過去に樹立、あるいは存在していた場所から一度でも移動したことがあるものを、伐木も含めて流木と定義した。

第2章では過去の流木による災害、または流木が被害を助長した災害を紹介した。その中でも近年発生した栃木県余笹川災害、鹿児島県垂水市災害を、現地踏査、資料の解析を通して流木の発生源・堆積状況を明らかにした。その結果、余笹川では古い氾濫原の溪畔林が豪雨による洪水で流出したものであることが判明した。溪畔林が河川内に侵入して植生している場所は全国どこでも見られる光景であり、流域住民に注意を喚起するものである。また流木の堆積場所が構造物、溪畔林、河床上に分類できたことにより、以降の章で堆積・再移動を論じる上で貴重な資料となった。垂水市の場合、流木流下途中に不透過型砂防ダムが設置してあり、流木を捕捉したダム、捕捉できなかったダムで明暗を分けた。中でも飛岡川上流堰堤は流木発生前既に満砂状態であったにもかかわらず、流木捕捉率80%を示した。流木対策指針(案)では、満砂状態の不透過型砂防ダムは流木捕捉能力がほとんどないものとして取り扱われているが、このような実態を踏まえて不透過型砂防ダムにおける流木捕捉機構の検討が必要であることが明らかとなった。

第3章では流木の堆積を、自然河道と不透過型砂防ダムについて述べた。自然河道については流木災害現場で実際に堆積した事例を調査し、その原因について考察した。立木・巨礫によって流木が横断して捕捉されるという特徴を取り上げ、自然を利用した流木対策の可能性を示した。また不透過型砂防ダムの流木捕捉事例よりその堆積位置は、水通しに

接して堆積、土砂とともに堆砂地内に堆積、堆砂地上での堆積に分類できた。さらに過去の資料から、未満砂・満砂状態での砂防ダムによる流木・土砂捕捉率を示したところ、満砂状態の砂防ダムにおける流木捕捉率の変動が大きいことが判明し、この原因は流木長さ和水通し幅の関係にあるものと考え以下に捕捉率推定式を考案した。

$$T = T_{\max} - (T_{\max} - T_0) \cdot e^{-\frac{k}{2T_{\max}} M^2}$$

ここに、 T ： 流木・土砂捕捉率

M ： 水通し幅より長い流木の“流木混入率”

T_{\max} ： 流木・土砂捕捉率上限値

T_0 ： “流木混入率”が0%の時の流木・土砂捕捉率

k ： 土石流規模や流木の質（長さ・直径）によって決まる定数

この式を実証するための模型実験を行い、その結果流木が水通しを閉塞して堆積する場合にこの式で推定可能なことを確認した。流木が堆砂地上に堆積する場合と、水通しを閉塞する場合の違いが水理量にあるものと推測し、無次元流量を用いてその判別を行った。これらの結果を基に、不透過型砂防ダムによる捕捉率の具体的な推定方法を提示した。

第4章では流木の再移動について、やはり自然河道と不透過型砂防ダムについて論じた。自然河道では特に水位の低下に伴い河床との摩擦により堆積した流木について河床粒径の違いに着目し、円柱形木材を流木に見立てて実験を行った。流木の移動しやすさを表す指標を考案し、流木の移動に関わる水理量、流木の物性、河床砂礫粒径、流木上流側に発生する洗掘、等と比較した。その結果、流木直径と河床砂礫径の比（相対直径）が18前後の時、最も流木が移動しやすくなることを示した。さらに移動限界水深と流木直径の比（無次元水深）により、流木が移動しない領域、滑り移動を開始する領域、浮遊する領域を示し、滑り移動が発生するのは無次元水深が0.35～0.685の範囲であること、この上限値は流木比重により異なること、滑り移動の領域にあっても流木移動指標が0.3より小さいと流木は移動しないことを表した。また不透過型砂防ダムにおいては流木の流下形態によりその再移動条件が異なることを示した。土石流形態の場合は流木が土砂に覆われると再移動しにくいこと、掃流形態の場合は水位の上昇により浮遊することによる再移動があることを実験で確認した。

このように本研究により明らかになり、今後の流木災害対策に活用できる成果もあるが、

本文中でも記述したとおり流木の調査事例は少なく、未解明な部分を補うために行った実験も限られた条件の下に行っており、実態の一部を把握したにすぎない。以下に、今回の研究成果を具体的に災害対策に活用する上での今後の課題を記す。

1) 自然河道での堆積と再移動

立木、巨礫などに流木が横断して捕捉された事例は、流木の長さが立木及び巨礫の間隔より長いことが必要条件であった。しかし十分条件ではなく、長くても流下してしまう場合もある。確実な堆積を期待するためには必要十分条件、すなわち流木長と立木・巨礫間隔長さの比との関係、流木の流下経路と立木・巨礫の配置との関係などを知ることが必要である。またこれらの関係を対策に利用するには、立木及び巨礫の土石流に対する安定度が問題となる。土石流により堆積した流木が移動してしまうようなことがあれば、立木は流木化し、巨礫は土石流の破壊力を高め、被害を増長する方向に働く。自然状態のままで対策に利用するには限度があり、ある程度安定化のために手を加えることが必要と考えられ、具体的な手法の確立が今後の課題であろう。

自然河道で堆積している流木のうち、今回は円柱形の木材を流木と仮定してその移動限界を求めたが、河川上流には根や枝を残した流木も存在しており、これらの移動限界についても知る必要がある。また複数の流木が重なり合って大量に堆積し、その上流側に土砂を捕捉し天然ダムを形成している事例もある。このような流木が崩壊して再移動すると大きな災害につながる可能性があり、力学的な考察とともに経年変化に伴う流木の腐食過程、その強度変化についても考えていく必要がある。

2) 不透過型砂防ダムでの堆積と再移動

満砂状態の不透過型砂防ダムによる流木捕捉率の推定方法を示したが、実験条件が限られており今後の研究課題は多い。実際流木を含んだ土石流が砂防ダムの袖上部を越流して流下した事例もあり、実験で行ったような4つのパターン以外の状況が発生することも考えられる。袖を越流する要因として流下する土砂及び流木量と土砂調節量との比、流木到達前の土砂堆砂勾配、流下速度等が考えられる。特に今回は流木を運ぶ土石流の粒径・水路勾配を限定した実験条件で行っており、流速係数の大きい泥流などにより運ばれた場合や、より急な流下勾配の堆積条件は異なることが予想される。実態の把握とともにこれらの条件を変化させた実験などによるアプローチも必要であろう。