

流木流出の一連の過程に基づく、 流木流出統合物理モデルの構築

東北大学工学研究科土木工学専攻 准教授
小森 大輔

2016年北海道・東北豪雨および2017年九州北部豪雨にて大規模な流木流出が発生した小本川および筑後川にて流木の発生過程・流木天然ダムの消長・流木流出過程の現地調査を実施し、流木流出には降水イベント時の流木発生を伴う大規模流木流出と、通常時の流域内に堆積した流木が再移動する基底流木流出の2種類の流木流出特性が存在することを明らかにした。そこで、斜面崩壊モデルを応用した発生流木量推定モデルと、推定された発生流木量を入力値とする流木流出特性を反映させた流木の堆積・再移動・流出量を推定する貯留関数モデルを構築した。

構築したモデルを北上川水系および筑後川水系のダム流域に適用した結果、四十四田ダム流域を除いた5ダム流域にて高い再現性が得られた。再現性が得られたダム流域の流木流出特性を比較した結果、南日本は北日本に比べ流木の堆積期間は短く、流域内の堆積流木量は少ないという Seo et al. (2015) と一致する傾向が示された。

Key Words :流木流出, ダム流域, 斜面崩壊, 堆積流木量, 貯留関数モデル

1. はじめに

河川における流木は、枯死、風倒、河岸侵食、斜面崩壊、土石流及び森林施業といった生物的・物理的・人為的要因が複合的に作用し流出する¹⁾。例えば、流木の発生源である山林では、森林量は年々増加しており着実に樹木が生育している。さらに、地球温暖化に伴う時空間的に集中した豪雨の頻発が重なり、2014年広島土砂災害、2016年北海道・東北豪雨災害、2017年九州豪雨災害、2018年西日本豪雨災害、2019年東日本台風豪雨にて甚大な流木災害が発生したことは記憶に新しい(図-1)。ダムは、流木を捕捉することより、下流河川における洪水被害の拡大を未然に防止する大きな効果を有している。しかし、ダム貯水池に流出した流木(以後、流出流木量とする)は放流設備の損傷や閉塞の要因ともなり、2017年には長野県裾花ダムにて流木による洪水吐ゲートの障害が発生した(図-1)。

このように、近年の日本に限らず増加している流木災害は、今後の気候変動による影響を考慮すると、これまで通りの防災施設社会基盤のままでは不十分であることが危惧されている。しかしその防災施設社会基盤の一律拡充には膨大な費用がかかるので、農山村の森林管理と連携した流域総合治水による防災技術が求められており、効果的な流域総合治水には今後の気候変動に伴う水循環変動が流木災害に与える十分な影響評価が必要不可欠である。そ

のためには、流出流木量の長期モニタリングと流出流木量の推定手法の確立が重要であることが、著者が委員を務めた「ダム貯水池の流木対策等に関する検討会」(国土交通省)でも指摘されている²⁾。しかしながらそのような防災・減災技術に資する研究開発は、日本においても途上であり、社会からのニーズに未だ応えることができていない。

関連する国内外の研究動向は、流木の発生要因や河川における流木の流出動態に関する様々な研究(例えば Lienkaemper and Swanson³⁾; Nakamura and Swanson⁴⁾; Moulin and Piégay⁵⁾; Seo and Nakamura⁶⁾)はこれまでに行われてきたが、発生した流木が河川へ流出するまでの動態(森林内における流木の堆積)は未だ明らかにされていない。流木の堆積を扱った研究は、清水⁷⁾は、人為介入のない北海道沙流川支



図-1 近年発生した全国の流木被害

流パラダイ川にて、長期モニタリングにより流木と土砂の段階的・時系列的な流出過程の概念を提示した。また、Seo et al.⁸⁾は、北日本の3流域と南日本の3流域の現地調査より北日本は台風や集中豪雨が稀であり堆積流木量が多く堆積流木量が流出流木量の制限要因であること、南日本では北日本と比較して堆積流木量が少ないため発生流木量が流出流木量の制限要因であることを示した。このように、発生した流木は山林内や沢の狭窄部で塞き止められ、天然流木ダム流域を形成（堆積）し段階的に流出することにより、流木の発生・堆積・再移動・流出という一連のプロセスの理解が重要である。しかし、流木流出の一連のプロセスに基づくモデルは未だ開発されていない。

そこで本研究は、2016年北海道・東北豪雨および2017年九州北部豪雨にて大規模な流木流出が発生した小本川水系および筑後川水系にて流木の発生過程・流木天然ダムの消長・流木流出過程の現地調査を実施し、流木流出の一連のプロセスに基づくモデルを構築する事を目的とした。なお、紙面の都合より本概要では現地調査の記述は割愛し、モデル構築および流木流出の特性解析に関して詳述する。

2. 流木流出統合物理モデルの構築

著者の既往研究⁹⁾より流木の発生要因として斜面崩壊が重要であることが明らかとなったことから、著者の既往研究¹⁰⁾に基づき、各ダム流域内の斜面崩壊箇所を特定し、現地踏査で測定した森林密度を用いて発生流木量を推定した。また、著者の既往研究⁹⁾より流出流木量の極大値は多量の流木の発生を伴う降水イベント時に観測されることが示された。更に現地踏査より、通常時は流域内に堆積している流木が再移動して流出していること推察されたことより、流木流出の早い流出特性と遅い流出特性を表現する2段直列タンクモデルを構築し、流木の堆積状況を推定することを試みた。

(1) 対象流域

北上川水系に位置する四十四田ダム流域（流域面積：1196km²）、御所ダム流域（流域面積：635km²）、湯田ダム流域（流域面積：583km²）、石淵ダム流域（現・胆沢ダム流域面積：154km²）、田瀬ダム流域（流域面積：740km²）、および筑後川水系の寺内ダム流域（流域面積：51km²）の計6つのダム流域を対象とした。

(2) 斜面崩壊モデルによる発生流木量の推定

a) 傾斜度

基盤地図情報より入手した10mメッシュのDEM（Digital Elevation Model）を用いてGISにより50mメッシュに変換し、陰影起伏を算出した。求めた陰

影起伏より各メッシュの傾斜度を算出した。

b) 降水量

過去の災害事例（例えば2000年東海豪雨時の矢作ダム流域、2003年台風10号時の二風谷ダム流域、2016年台風10号時の滝ダム流域）より、流木が発生する際には大きな降水量が伴うことが推察された。そこで、流木が発生する時の降水イベントは各ダム流域内における年最大降水イベントであると仮定した。ダム流域毎に隣接する複数のAMeDAS観測所を選択し、それら観測所の1時間降水量を用いて、毎時の観測所平均の1時間降水量（以下、流域平均1時間降水量）を算出した。得られた流域平均1時間降水量を用いて24時間降水量（以下、流域平均24時間降水量）を算出した。得られた流域平均24時間降水量の中から各年の最大流域平均24時間降水量を記録した時間の各観測所の24時間降水量を抽出し、GISにより逆距離加重法で内挿した。以上より得られた各流域内の各50mメッシュ内の値を用いた。

c) 土質パラメータ

現地調査において採取した土砂サンプルから表-1aおよび表-1bの土質パラメータを得た。

d) 斜面崩壊モデル¹⁰⁾

斜面の安定性は安全率FSで表し、滑りに抵抗する力と滑りを起こさせる力の比で表される。つまり、せん断強度をせん断応力で除することで求めることができる。FS値の算出に用いた式を式(1)に示す。

$$FS = \frac{c' + \cos\beta^2 \cdot m[\gamma_{sat} + (D-1) \cdot \gamma_t] \tan\phi'}{\cos\beta \cdot \sin\beta \cdot m \cdot [\gamma_{sat} \cdot \gamma_t + (D-1) \cdot \gamma_t]} \quad (1)$$

m ：地下水位(mm), γ_{sat} ：飽和単位体積重量(kN/m³),

γ_t ：湿潤単位体積重量(kN/m³), ϕ' ：内部摩擦角(degree),

表-1a 北上川水系における土質パラメータ¹¹⁾

パラメータ	数値	単位
間隙率	0.501	-
透水係数	0.65	cm/hour
粘着力	10.30	kPa
内部摩擦角	28.70	degree
飽和単位体積重量	15.20	kN/m ³
湿潤単位体積重量	14.80	kN/m ³
水の単位体積重量	9.81	kN/m ³
表層土厚	5.00	m

表-1b 筑後川水系における土質パラメータ¹²⁾

パラメータ	数値	単位
間隙率	0.601	-
透水係数	1.728	cm/hr
粘着力	14.70	kPa
内部摩擦角	28.5	degree
飽和単位体積重量	17.1	kN/m ³
湿潤単位体積重量	14.4	kN/m ³
乾燥単位体積重量	11.6	kN/m ³
水中単位体積重量	7.29	kN/m ³
水の単位体積重量	9.81	kN/m ³
土粒子比重	2.56	-

c' : 粘着力(kPa), β : 傾斜度(degree), D : 表層土厚(mm)
 地下水位を算出するにあたり, 地下水浸透高は式(2)で表される.

$$R = P - Q_R - E \pm S \quad (2)$$

R : 地下水浸透高(mm), P : 降水量(mm),
 Q_R : 地表面流出量(mm), E : 蒸発散量(mm),
 S : 土壌水分の貯留量(mm)

また, 地表面流出量は総降水量と地表面より土壌に浸透した降水量の差分であることより, 式(3)で表される.

$$Q_R = P - I \quad (3)$$

I : 地表面より土壌に浸透した降水量 (地表面浸透量)

ここで, 降水量に比べて蒸発散量および土壌水分の貯留量は非常に小さく, 式(2)において両者の地下水浸透高への影響が小さいと考えた場合, 式(2)と式(3)より以下の式が導出される.

$$R = I \quad (4)$$

よって本研究では, 地下水浸透高は地表面浸透量に等しいとみなした.

地表面浸透量の算出に用いる透水係数は, 傾斜面に適応した Green-Ampt 式¹³⁾より算出した. ここで, 地質は均一であり, 初期土壌水分量は一様に分布していると仮定した. なお, 今回と同様の条件により, 浸透強度に関する十分な結果を得られることは既往研究¹⁴⁾¹⁵⁾により示されている. 式(5)に浸透率を算出する式を示す. 式(6)に浸透強度を算出する式を示す.

$$i = k \left[\cos\beta + \frac{(\psi \cdot \Delta\theta)}{I(t)} \right] \quad (5)$$

$$I(t) - \frac{(\psi \cdot \Delta\theta)}{\cos\beta} \ln \left[1 + \frac{I(t) \cdot \cos\beta}{(\psi \cdot \Delta\theta)} \right] = k \cdot t \quad (6)$$

k : 透水係数, $\Delta\theta$: 体積含水量変化, t : 時間
 ここで, 飽和領域の地下水流は定常に基づいており, 以下の式より地下水流量が算出できる (式(7)).

$$q = IA \quad (7)$$

q : 地下水流量, A : セルの面積
 また, ダルシー則からも地下水流量が算出できる.

$$q = b \cdot k_s \cdot m \cdot \sin\beta \quad (8)$$

b : 幅

よって, 式(7)と式(8)より, 地下水位を算出した.

$$m = \frac{AI}{k_s b \sin\beta} \quad (9)$$

e) 発生流木量の推計¹⁰⁾

国土数値情報の土地利用データより対象流域の森林地域を選定し, 選定された森林地域内にて $FS < 1$ のメッシュを抽出した. この総メッシュ数に, 調査から得た森林密度 0.0121 本/ m^2 を乗ずることで, 各ダム流域の流域内で発生した流木の本数を算出した. 流木の体積はフーベル式 (式(10)) より算出した.

た.

$$V = LA_m \quad (10)$$

V : 流木 1 本当たりの体積, L : 倒木の長さ,

A_m : 倒木の中心部の面積

ここで, 式(10)に示したフーベル式は倒木に対して用いられる式であるため, 今後流木となりうる立木に対して用いられるよう式(10)を修正し, 式(11)として用いた.

$$V = HA_{BH} \quad (11)$$

H : 立木の樹高, A_{BH} : 立木の胸高部の面積

立木の樹高と胸高部は, 現地調査で得られたデータを基に, モンテカルロ法を用いて 1 本当たりの体積の代表値 ($0.76m^3$) を決定し, 流域内全域で発生した流木の総体積を算出した.

以上より算出した発生流木量は, 森林地域全面で計算しているため, 発生流木量を過剰に算出している. そこで, 以下の手順で流木が発生箇所からダム流域貯水池に到達するまでの流出に関する要因を考慮した.

- 1) 算出した発生流木量を森林面積(km^2)で除し, 単位面積当たりの発生流木量(m^3/km^2)を算出した.
- 2) 国土数値情報の公開する河川データより森林地域内の総流路長(km)を算出した.
- 3) 谷部に到達し, 流路に流出する流木のみを考慮するため, 経験的に流路から $0.02km$ を流出する範囲と仮定し, これに流路総延長, 単位面積当たり発生流木量を乗じ, 発生流木量を算出した. 採用した $0.02km$ は経験的に決めた値であることから今後調査を通して妥当性を検証する必要がある.

(3) 貯留関数モデルによる流出流木量の再現¹¹⁾

降水イベント時と通常時の異なる 2 つの流出特性を考慮した, 2 段直列タンクモデルを構築した (図-2). 1 段目のタンクにおいて降水イベント時の早い流出特性 (大規模流木流出) を表現し, 2 段目のタンクにおいて流域内に堆積された流木が流出する遅い流出特性 (基底流木流出) を表現している.

降水イベント時の早い流出特性は, 山間部で新たに発生した流木や流域内にこれまで堆積していた

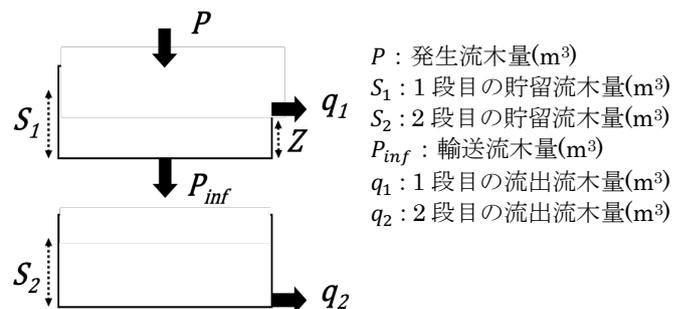


図-2 2 段直列タンクモデルの概念図¹¹⁾

流木が、降水により発生した土石流等により移動し、速やかにダム流域貯水池まで流入する現象である。降水イベント時に発生した発生流木量 P が 1 段目のタンクに投入され、1 段目の貯留流木量 S_1 が、1 段目のタンクの容量 Z を上回った際に q_1 として速やかに流出することで、実現象を表現した。実際に用いた式を以下に示す。

$$\begin{aligned} q_1(m) &= S_1(m) - Z \\ P_{inf}(m) &= b \cdot S_1(m) \end{aligned} \quad [S_1(m) \geq Z] \quad (12)$$

$$\begin{aligned} q_1(m) &= 0 \\ P_{inf}(m) &= b \cdot S_1(m) \end{aligned} \quad [S_1(m) < Z] \quad (13)$$

$$\frac{dS_1}{dt} = P - P_{inf} \quad (14)$$

q_1 : 1 段目のタンクからの流出流木量 (m³/year) ,

S_1 : 1 段目のタンクの貯留流木量 (m³) ,

Z : 1 段目のタンクの容量 (m³) ,

P_{inf} : 2 段目タンクへの輸送流木量 (m³) , b : 係数,

m : 離散時刻 (タイムステップ) (year)

$S_1(m) \leq Z$ により場合分けを行い、式(12)または式(13)により q_1 及び P_{inf} を算出した。式(14)により 1 段目のタンクの貯留流木量を算出した。

流域内に堆積された流木が流出する遅い流出特性は、流域内にこれまで堆積している流木が、腐敗や、天然流木ダム流域が崩れることなどにより再移動し、流出していると考えられる。それらの現象を表現するために 2 段目のタンクにおいて、一価の非線形貯留関数 (式(15), 式(16)) を用いて流域内に堆積している流木が再移動し、 q_2 として緩やかに流出することを表現した。

$$\frac{dS_2}{dt} = P_{inf} - q_2 \quad (15)$$

$$S_2 = k \cdot q_2^p \quad (16)$$

q_2 : 2 段目のタンクからの流出流木量 (m³/year) ,

S_2 : 2 段目の貯留流木量 (m³) , k , p : 係数

ここで数値解析の便宜上、次の変数変換を行った。

$$x = q_2^p \quad (17)$$

式(17)を用いて式(16)を変形し、式(15)の連続式を用いると次式が得られる。

$$\frac{dS_2}{dt} = k \frac{dx}{dt} = P_{inf} - x^{\frac{1}{p}} \quad (18)$$

式(18)の関係式から、次の非線形微分方程式が得られる。

$$\frac{dx}{dt} = f(x) = \frac{P_{inf}}{k} - \frac{x^{\frac{1}{p}}}{k} \quad (19)$$

$f(x)$ を x^* (既知量) のまわりで 1 次の項までテーラ一級数展開すると、次の線形微分方程式が得られる。

$$\begin{aligned} f(x) &= f(x^*) + \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)(x - x^*) \\ &= f(x^*) + a(x - x^*) \\ &= ax + d \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{cases} a = \frac{\partial f}{\partial x} = -\frac{1}{kp} x^{*\frac{1}{p}-1} \\ d = f(x^*) - ax^* = \frac{1}{k} \left(\frac{1}{p} - 1\right) x^{*\frac{1}{p}} + \frac{P_{inf}}{k} \end{cases} \quad (21)$$

式(19)と式(20)より、次式が得られる。

$$\frac{dx}{dt} = ax + d \quad (22)$$

式(22)の線形微分方程式は式(23)の差分漸化式で表される。 $x^* = x(m)$ の値を使用し、 $\psi(m)$ と $\gamma(m)$ を求めて $x(m+1)$ を算出した。

$$x(m+1) = \psi(m) \cdot x(m) + \gamma(m) \cdot d(m) \quad (23)$$

$$\begin{cases} a(m) = -\frac{1}{kp} \cdot x(m)^{\frac{1}{p}-1} \\ d(m) = \frac{1}{k} \cdot \left(\frac{1}{p} - 1\right) \cdot x(m)^{\frac{1}{p}} + \frac{P_{inf}(m+1)}{k} \\ \psi(m) = e^{a(m)} \\ \gamma(m) = \frac{\psi(m) - 1}{a(m)} \end{cases} \quad (24)$$

任意の離散時間 m における流出量は式(17)の逆変換により次式で求められる。

$$q_2 = x^{\frac{1}{p}} \quad (25)$$

本モデルの同定すべきモデル定数は k , p , b , Z の 4 つである。これらのモデル定数の全ての通りに関して計算を行い、次式の式(26)の RMSE (Root Mean Squares Error) が最小となるようなモデル定数の組を最適なモデル定数として採用した。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (q_{obs} - q_c)^2} \quad (26)$$

N : 観測年数, q_{obs} : 流出流木量 (観測値) ,
 q_c : 流出流木量 (計算値)

以上により算出された流出流木量と、観測された流出流木量 (国土交通省提供) を比較検討した。

3. 結果と考察

(1) 北上川水系¹⁾

表-2 に、各ダム流域における Nash-Sutcliffe (NS) 係数を示す。四十四田ダム流域以外の 4 つのダム流域で、流出流木量に関する高い再現性が得られた。

高い再現性が得られた例として、御所ダム流域における計算結果を図-3、1 段目のタンクに空き容量が占める割合 (空容量率) の変化および、2 段目のタンクの初年度の貯留量を 1 とした時の比貯留流木量の変化を図-4 に示す。2002 年に流出流木量観測

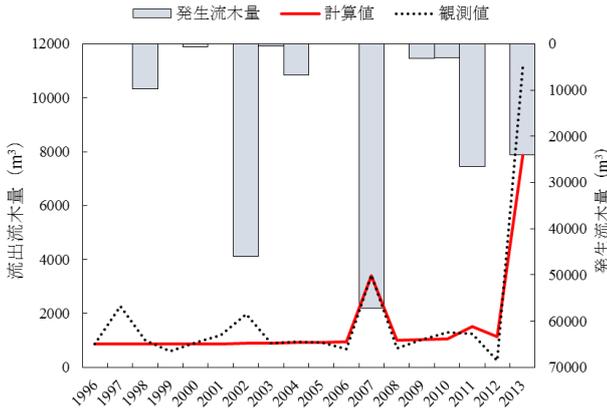


図-3 御所ダム流域の計算結果。横軸は年を示す。¹¹⁾

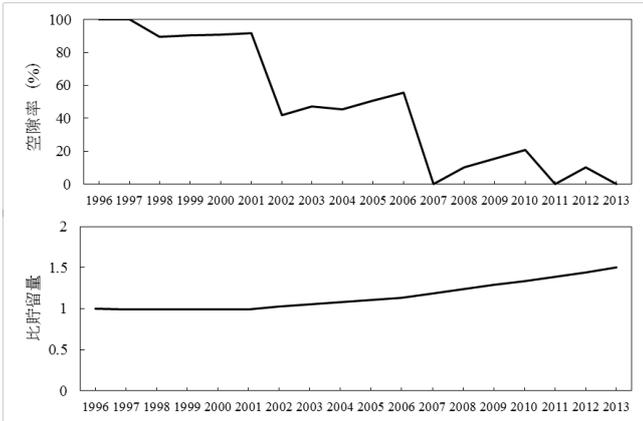


図-4 御所ダム流域の1段目の空容量率(上図)および、2段目の比貯留量変化(下図)。¹¹⁾

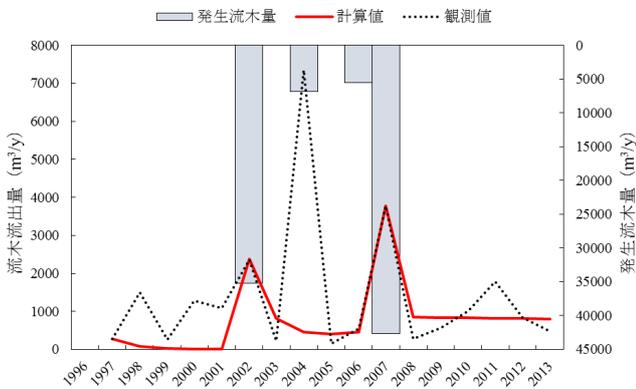


図-5 四十四田ダム流域の計算結果¹¹⁾

値は増加している。計算結果においては大きい発生流木量が推計され、1段目のタンクの空容量率の減少が確認された。しかし、比貯留流木量は1以下であり、顕著な増加傾向は示されていない。また、2007年についても発生流木量と1段目のタンクの空容量率に同様の傾向が示されている。2013年に流出流木量は観測値最大を記録しているが、発生流木量は2002年や2007年と比較して半分程度であった。2012年の1段目のタンクの空容量率が2001年や2006年と比較して小さかったことから、少ない発生流木量でも大きな流出流木量を記録したと推察された。

次に、再現性が得られなかった四十四田ダム流域

表-2 各流域における Nash-Sutcliffe (NS) 係数

対象ダム	NS 係数
石淵ダム	0.828
御所ダム	0.852
湯田ダム	0.715
田瀬ダム	0.785
四十四田ダム	-0.046

表-3 流域平均時間降水量より抽出した年最大24時間降水量

AMeDAS観測所	2002年	2004年	2007年
奥中山	156	135	143
葛巻	113	103	90
葛根田	162	109	256
岩手松尾	155	160	184
好摩	172	123	154
荒屋	134	131	177
藪川	129	103	146
平均値	145.9	123.4	164.3

(単位: mm)

表-4 各流域の単位面積当たりの発生流木量、流域内の傾斜度の割合、および2段目における流出率

対象ダム	単位面積当たりの発生流木量 (m³)		2段目の平均流出率 (%)
	最大値	平均値	
石淵ダム	2278	425	3.02
御所ダム	1740	300	0.60
湯田ダム	931	274	0.13
田瀬ダム	1388	163	4.60
四十四田ダム	859	101	370.80

における計算結果を図-5に示す。2004年の流出流木量観測値は極大値7346m³を記録しており、タンクモデルに投入した発生流木量は6888m³であった。2002年と2007年に投入した各発生流木量は35254m³、427216m³であり、2004年に投入した発生流木量よりも小さくなっていった。使用データ期間内最大の流出流木量を記録した2004年の発生流木量が他の年よりも小さくなっている事がタンクモデルで再現性がない原因であると推察された。流域平均時間降水量を用いて抽出した各AMeDAS観測所の年最大の24時間降水量を表-3に示す。2002年は7月11日の台風6号¹⁶⁾により記録した降水量、2004年は9月30日の台風21号¹⁷⁾により記録した降水量、2007年は9月17日に台風11号から変わった温帯低気圧¹⁸⁾により記録した降水量がそれぞれ採用された。それら採用された降水量を比較すると2004年は2002年と2007年よりも小さな降水量であった。更に、降水量が記録された前後を調査した結果、2004年のみ採用された降水イベント前に8月31日の台風16号¹⁹⁾による被害報告が存在した。2004年は1回の降水イベントにより記録した24時間降水

量は他の極大値を観測した年よりも小さいが、同一時期に2回の降水イベントが発生している事から他の年よりも大きな流出流木量を観測したと推察された。本研究では、流木が発生する時の降水イベントは各ダム流域内で年最大降水イベントであると仮定したことより、2004年度のように連続して降水イベントが発生した際の影響を考慮していない。よって、四十四田ダム流域においてはモデルの再現性が得られなかったと推察される。

表-4に各流域の1km²当たりの発生流木量(以下、単位発生流木量)と流域内の傾斜度の割合、 q_2/S_2 (基底流木流出率)を示す。ここで、基底流出率は流域内に堆積した流木の流出しやすさを表すと考えられる。なお、四十四田ダム流域は再現性が得られなかったため基底流木流出率の考察より除外した。基底流木流出率は、石淵ダム流域と田瀬ダム流域は御所ダム流域と湯田ダム流域と比較して大きい事が示された。よって、御所ダム流域と湯田ダム流域は相対的に流木が堆積しやすい流域である事、石淵ダム流域と田瀬ダム流域は相対的に流木が堆積しにくい流域であると推察された。

(2) 筑後川水系¹²⁾

寺内ダム流域において貯留関数モデルを適用した結果と流出流木量観測値との比較を図-6に示す。NS係数は0.963と高い値を示し、寺内ダム流域における流木流出計算の再現性は高いことが示された。すなわち、寺内ダム流域において、流木流出の特性が大規模流木流出と基底流木流出の2種類で説明できることを意味する。

具体的に、発生流木量が大きかった2012年と2017年において、流出流木量の大部分が q_1 、すなわち大規模流木流出によって生じたことが示された。一方で、2012年の流出流木量は2017年ほど高くなく、1段目のタンクの空隙率は2012年に大きく減少し、0となった後、2017年までほぼ回復していないことがわかった(図-7)。すなわち、2012年の豪雨に伴う流木発生により、1段目の容量いっぱいまで流木が溜まり、2017年にさらに6957.4m³もの発生流木量が投入された結果、そのほとんどが大規模流木流出として流出したということが推察された。

(3) 北上川水系および筑後川水系の比較¹²⁾

第一に、大規模流出について考察するため1段目のタンクに着目し、タンクの空隙率の経年変化の比較を図-7に示す。空隙率が低下した後再び増加するときの速さ(以下、回復速度)に着目すると、湯田ダム流域においては回復速度が速く、御所ダム流域、石淵ダム流域においては中程度、寺内ダム流域、田瀬ダム流域においては遅い傾向が示されている。回復速度が遅いということは、タンクが空になりにくく、受け止められる発生流木量が限られることを意

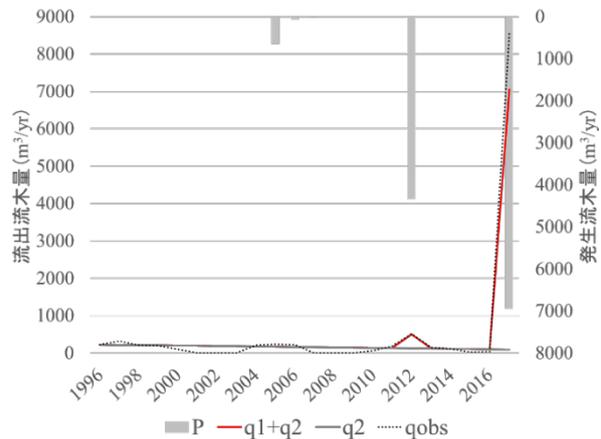


図-6 寺内ダム流域の計算結果¹²⁾

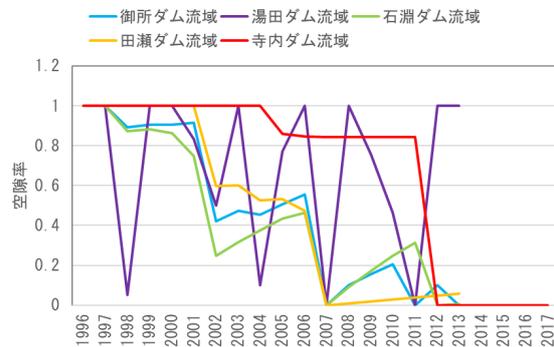


図-7 寺内ダムの1段目のタンクの空隙率

表-5 各ダム流域の流木流出率 (%)

御所ダム	湯田ダム	石淵ダム	田瀬ダム	寺内ダム
0.60	0.13	3.02	4.60	10.06

味していると考えられる。したがって、寺内ダム流域、田瀬ダム流域においては、他のダム流域と比較して流木が発生した際に大規模流出が起きやすくなる可能性が示唆された。

第二に、基底流出について考察するため2段目のタンクに着目する。各ダム流域における q_2 を S_2 で除した値(以下、基底流出率)の18年間(1996年から2013年)の平均値を表-5に示す。基底流出率は、流域内に長期間堆積した流木のうち基底流出として流出する割合、すなわち流出しやすさを表すと考えられる。表-5より、御所ダム流域、湯田ダム流域の基底流出率は低く、堆積した流木が流出しにくい流域であることが推察された。一方、寺内ダム流域の基底流出率は高く、流木が流出しやすい流域であることが推察され、石淵ダム流域、田瀬ダム流域においては中程度であることが推察された。

以上の考察より、寺内ダム流域は岩手県のダム流域よりも堆積した流木が流出しやすく、また流木の発生に伴う流出が起きやすい流域であることが推察された。これは、Seo et al.⁸⁾による南日本の流木流出特性についての仮説を定量的に裏付ける結果が得られた。

4. 結論

本研究では、流木流出メカニズムを理解するために、流木流出の一連のプロセスに基づく流木流出モデルのプロトタイプを世界で初めて構築した。立案したモデルは、堆積流木量およびその再移動も含んだ河川における流木流出ポテンシャルを把握することに活用でき、河川管理やダム管理をより一層充実させる手助けができると確信する。

今後、地球温暖化時代における効果的な流木災害対策に関して、日本全域を対象に、実社会への実装に向けてさらに流木流出の一連のプロセスの理解を進め、生物的・物理的・人為的要因の複合的な作用を定量的に解明することが肝要である。そして、流出流木量の将来予測も視野に入れた、堆積流木量を含めた流出ポテンシャル流木量の推定手法を確立することは、地球温暖化時代への防災・減災対策として非常に重要であると考えられる。

一方、流木流出メカニズムには、河畔林からの流出など斜面崩壊以外の要因で流木が発生するケースや、2つ以上の流木流出特性を有するケースなども考えられる。また、四十四田ダム流域における流木流出解析より、流木流出メカニズムの再現性や単年度の推定精度をより良くするためには、発生流木量の予測精度が重要であることが推察された。よって、今後より多くのダム流域において本研究で開発したモデルを適用し、流木流出メカニズムの理解をさらに深めることが課題である。

謝辞：本研究は、気候変動適応技術社会実装プログラム(SI-CAT)、公益財団法人河川財団河川基金、一般財団法人河川情報センター、科学研究費補助金(代表：小森大輔：19H02395)の支援により実施された。各ダム流域貯水池における流出流木量は国土交通省水管理・国土保全局河川計画課より提供いただいた。ここに記し、感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 芳賀弘和, 坂本康, 小川滋：森林流域からの倒木や流木の流出, 日本水環境学会, Vol. 29, No. 4, pp. 207-213, 2006.
- 2) 国土交通省：ダム貯水池流木対策の手引き(案), 2017.
https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/dam7/pdf/damtyosuichiryubokutaisakutebikiH30.pdf
- 3) Lienkaemper, G.W. and Swanson, F.J. : Dynamics of large woody debris in streams in old-growth Douglas-fir forests. *Can. J. For. Res.*, 17:150-156, 1987.
- 4) Nakamura, F. and Swanson, F.J. : Effect of coarse woody debris on morphology and sediment storage of a mountain stream system in western Oregon, *Earth Surface Process and Landforms*, Vol.18, 43-61, 1993.
- 5) Moulin, B. and Piégay, H. : Characteristics and temporal variability of large woody debris trapped in a reservoir on the river Rhone implications for river basin management, *River Research and Applications*, 20, 79-97, 2004.
- 6) Jung II Seo, and Futoshi Nakamura. : Scale-dependent controls upon the fluvial export of large wood from river catchments, *Earth Surface Process and Landforms*, Vol.34, 786-800, 2009.
- 7) 清水収：山地流域における天然流木ダム流域の形成・破壊と流木の流出過程, 砂防学会誌, Vol.62, No.3, p.3-13, 2009.
- 8) Jung II Seo, Futoshi Nakamura, Kun Woo Chun, Suk Woo Kim, Gordon E. Grant : Precipitation patterns control the distribution and export of large wood at the catchment scale, *Hydrological Processes*, DOI:10.1002/hyp.10473, 2015.
- 9) 助川友斗, 小森大輔：日本全国のダム流域貯水池における流木流出量の統計解析, 土木学会論文集 G(環境), Vol.73, No.5, I_5-I_61, 2017.
- 10) Thaipthai Chaithong, Daisuke Komori, Yuto Sukegawa, and Satoshi Anzai : Estimating woody debris recruitment in a stream caused by a typhoon-induced landslide: a case study of Typhoon Lionrock in Iwaizumi, Iwate prefecture, Japan, *Geomatics, Natural Hazard and Risk*, Vol.9, No.1, pp.1071-1084, 2018.
- 11) 小森大輔, 助川友斗, Thaipthai Chaithong, 風間聡：流域スケールでの流出流木量の推計モデルの構築, 河川技術論文集, Vol.25, I_639-I_644, 2019.
- 12) 横山光, 小森大輔, Thaipthai Chaithong : 平成29年九州北部豪雨における寺内ダム流域の流木流出メカニズムの解明, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.75, No.4, I_169-I_174, 2019.
- 13) Chen, L., Young, M. : Green-Ampt infiltration model for sloping surface, *WATER RESOURCES RESEARCH*, Vol.42, pp.1-9, 2006.
- 14) Hsu, S. M., Ni, C. F., and Hung, P. F. : Assessment of three infiltration formulas based on model fitting on Richard's

- equation, J Hydrol. Eng, Vol. 7, No. 5, pp. 373-379, 2002.
- 15) Muntohar, A. S., and Liao, H. J. : Analysis of rainfall-induced infinite slope failure during typhoon using a hydrological-geotechnical model, Environ Geol., Vol. 56, pp.1145-1159, 2009.
- 16) 内閣府：災害対応策資料・2002年（平成14年）台風6号洪水，2002.
- 17) 盛岡地方気象台：災害時気象資料（h16.9.30：台風第21号による暴風・大雨），2004.
- 18) 盛岡地方気象台：災害時気象資料（h19.9.15-18：秋雨前線による大雨），2007.
- 19) 盛岡地方気象台：災害時気象資料（h16.8.31：台風第16号による暴風・大雨），2004.

（共通）