

ダム貯水池における流木発生特性 に関する研究

STUDY ON THE CHARACTERISTICS OF DRIFTWOOD INTO DAM RESERVOIRS

倉橋実¹・角哲也²・永谷言³・川村育男⁴・石田裕哉⁵・水野直弥⁶

Makoto KURAHASHI, Tetsuya SUMI, Gen NAGATANI, Ikuo KAWAMURA, Hiroya ISHIDA, Naoya MIZUNO

¹正会員 修(工) 京都大学防災研究所 水資源環境研究センター (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

²正会員 博(工) 京都大学防災研究所 水資源環境研究センター 教授 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

³正会員 博(工) (株)建設技術研究所 大阪本社ダム部 (〒541-0045 大阪府中央区道修町1-6-7)

⁴正会員 博(工) (株)建設技術研究所 北海道支社河川室 (〒060-0003 札幌市中央区北3条西3-1-6)

⁵正会員 修(工) (株)建設技術研究所 東京本社ダム部 (〒103-8430 東京都中央区日本橋浜町3-21-1)

⁶非会員 学(理) (株)建設技術研究所 東北支社環境・社会部 (〒980-0014 仙台市青葉区本町2-15-1)

This paper describes the relationships between the amount of driftwood and annual sedimentation, and the annual maximum discharge into reservoirs about 44 dams in Japan. As a result, the correlation coefficient of the amount of driftwood with the annual maximum discharge is higher than with the annual sedimentation, not concerned with the catchment area size, and the located regions. And based on the result, we derived the equations for estimating the amount of driftwood into reservoirs for risk management and asset management. These proposed equations are applied to the actual heavy rains that produced large quantities of driftwood into the reservoir.

Key Words : *driftwood into reservoir, sedimentation, annual maximum discharge, correlation, estimation equation for amount of driftwood*

1. はじめに

近年、局所的な豪雨が増加傾向にあり、豪雨に起因する流木災害が各地で数多く発生している。そのような背景のもと、流木の流出、災害リスク、生態機能、ダム管理、河道管理などの各観点を考慮した「総合流木管理」の体系化の必要性が提言¹⁾されている。しかしながら、流木と共にダムで捕捉される土砂は、流砂系の連続性に配慮した流域一貫の総合土砂管理が実践段階となつていのにに対して、流木については、その移動形態に不明な点が多いなど、流木の発生・流出特性等に関する知見が不足しているのが実情である。そこで、永谷ら²⁾は平成26年9月豪雨により洪水流出とともに大規模な流木流出が発生した漁川ダム流域を対象として、流木発生量、堆砂量、雨量、流入量の経年データを整理した。その結果、流木発生量はこれまで堆砂量(土砂量)と関連づけられる事例が多かった(例えば、石川ら³⁾)ことに対して、漁川ダム流域では、堆砂量よりも流入量との相関が高く、

流木発生量の推定に向けて、流入量と関連付けることが有効となる可能性があることを示している。ただし、この結果は流域面積が113.3km²と比較的小さい流域のみを対象としたものであり、地域特性や流域面積が異なった場合の流木発生特性については未確認であった。

一方、ダムの流木管理の現場では、突発的な大規模洪水時を対象としたリスクマネジメントの観点と、常時～中規模洪水時を対象としたアセットマネジメント(日常の維持管理費や木材資源の活用など)の観点の両面からダム毎の流木流入量の予測精度の向上が必要になってきている。

本研究においては、漁川ダムでの検討結果を踏まえ、経年的な流木発生量(流木回収量)が観測されている全国の直轄管理ダム、(独)水資源機構管理ダムから所在地域、流域規模を考慮して44ダムを抽出し、ダム貯水池での流木回収量とダム堆砂量、ダム流入量の関係を整理した。また、それらの相関関係から流木の発生特性について考察するとともに、リスクマネジメント・アセットマネジメント双方の観点から、流木発生量の推定式を提案した。

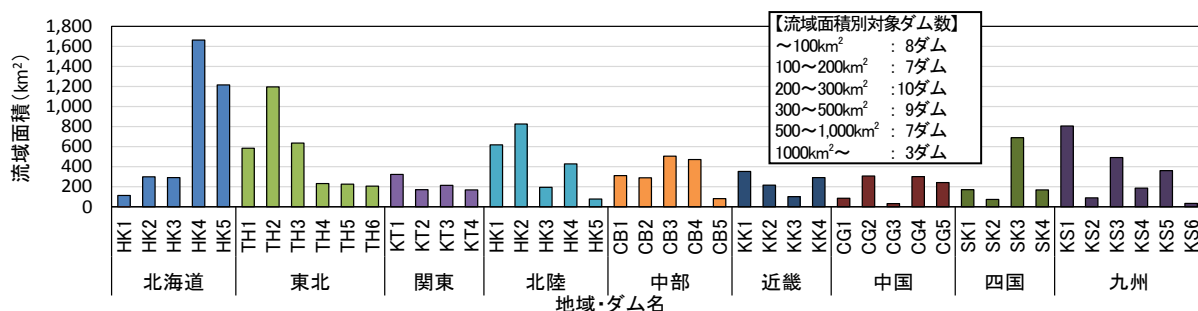


図-1 対象ダムの所在地域と流域面積

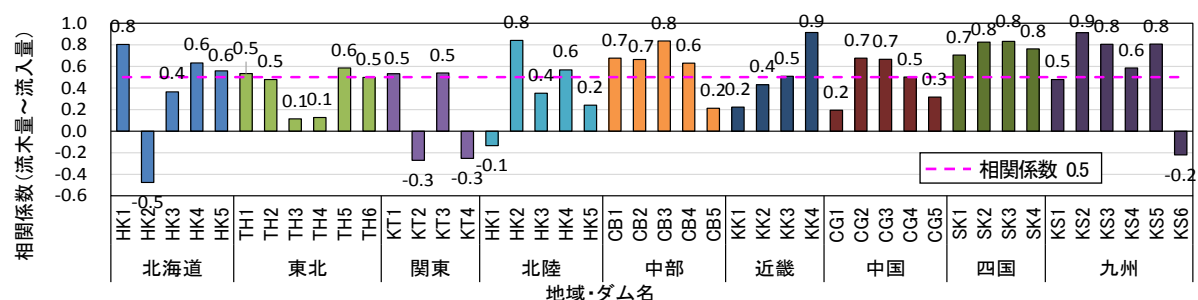


図-2 対象ダムの年流木回収量と年最大流入量の相関係数

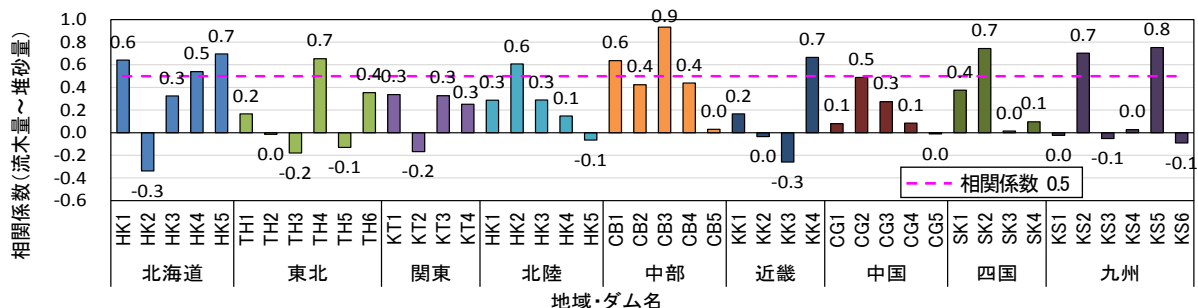


図-3 対象ダムの年流木回収量と年堆砂量の相関係数

2. 検討対象ダム及び使用データ

(1) 検討対象ダムの選定

ダム流域を対象とした助川ら⁴⁾の研究成果によると、流木発生量は、流域面積や森林面積率との相関が高い可能性があると考えられている。このことを踏まえ、流木の発生特性は、地域特性（所在地域）、及び流域面積の影響を受ける可能性があると考え、①地域別（北海道～九州地方）に5ダム程度、②極力さまざまな流域面積を対象、③統計期間を確保するためにダム完成後10年程度以上経過、といった視点に基づいて、全国の直轄管理ダム、(独)水資源機構管理ダムから44ダムを選定した。選定44ダムの所在地域と流域面積は図-1に示すとおりである。

(2) 使用データ

本研究は、流木発生量と堆砂量、ダム流入量の関係性を評価することを目的としている。そこで、検討対象ダムの年流木回収量、及び年堆砂量データは、国土交通省水管理・国土保全局 河川環境課 流水管理室より貸与頂いたデータベースより整理した。なお、当該データベー

スでは、主に平成8年～平成25年までの年流木回収量データ、管理開始～平成25年までの年堆砂量データが収集・整理されている。また、年最大流入量については国土交通省 水文・水質データベースより収集・整理した。

3. 流木発生量と堆砂量・ダム流入量の相関分析

(1) 年流木回収量と各諸量の相関係数の算出

選定した検討対象44ダムについて、各ダムの年流木回収量、年堆砂量及び年最大流入量の経年データを整理し、それらをもとに年流木回収量～年最大流入量関係、年流木回収量～年堆砂量関係の相関係数を算出した。なお、相関係数を算出したダム毎の各諸量については、最もデータ数の少ない年流木回収量データの存在期間（平成8年度以降のみ）に合わせて整理した。対象ダム毎の相関係数を整理した結果を図-2、図-3に示す。

(2) 流木発生量と堆砂量・ダム流入量の相関分析

図-2、図-3に示した対象ダムにおける年流木回収量と年最大流入量、年堆砂量の相関係数をもとに、各相関係

数の関係を整理した結果を図-4に、算出した各相関係数と流域面積の関係を整理した結果を図-5に示す。これらの結果より、漁川ダムのみを対象とした永谷ら²⁾の研究結果と同様に、流域面積の大小によらず、年流木回収量との相関は全体的に年堆砂量よりも年最大流入量の方が高く、半数以上のダムで相関係数が0.5以上を示していることが確認できる。これは堆砂量は、斜面崩壊により生産された土砂が河道を經由してダムに流入するまで数年オーダーの時間スケールとなるのに対して、流木は主に洪水流の表面に浮遊してほぼ1洪水で流下し、流入量の時間スケールと同程度となる傾向にあるためと考えられる。なお、年最大流入量、年堆砂量ともに負の相関を示すダムが散見される。これらについては、堆砂量及び流木回収量の観測精度が十分ではないことや、あまり大規模な出水が発生していないため、外力との対応関係が明確ではないことなどに起因していると考えられる。

4. 流木発生量の確率評価

前章での検討により、多くのダムで年流木回収量と年最大流入量には、正の相関があることを確認した。本章では、年流木回収量と年堆砂量、年最大流入量の確率評価を実施し、大規模な流木発生現象と大規模洪水の発生現象の再現期間の関係を検討した。

(1) 標本の整理

確率統計解析の対象とする各諸量の標本は、極力統計期間を長く確保するため、年流木回収量、年堆砂量は今回入手した国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課流水管理室所有のデータベースで整理されていた全データ、年最大流入量は水文・水質データベースで公開されている全データを使用した。具体的には、ダム毎に若干異なるものの、年流木回収量は平成8年～平成25年、年堆砂量はダム管理開始～平成25年、年最大流入量は平成5年～平成25年までを基本とした。これらの開始年度よりも完成年度が新しいダムについては、完成年度～平成25年までを対象とした。

(2) 確率統計解析の実施

水文統計ユーティリティを用いて、検討対象44ダムの各諸量について確率統計解析を実施した。また、大規模な流木発生現象の発生特性を把握することを目的として、確率統計解析の対象とした期間内に発生した各諸量の最大値を整理し、その最大値について発生確率の評価を実施した。各諸量の確率評価に用いる確率分布関数は水文統計ユーティリティによる確率統計解析結果からSLSCの最も小さい確率分布関数を採用した。検討対象ダムにおける各諸量の最大値の確率評価結果を図-6に示す。対象とした諸量毎に統計期間や最大値の発生年度が異なる

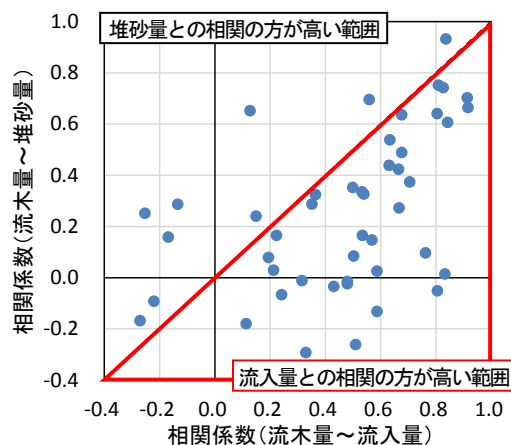


図-4 ダム毎の流木量と堆砂量・流入量の相関係数の関係

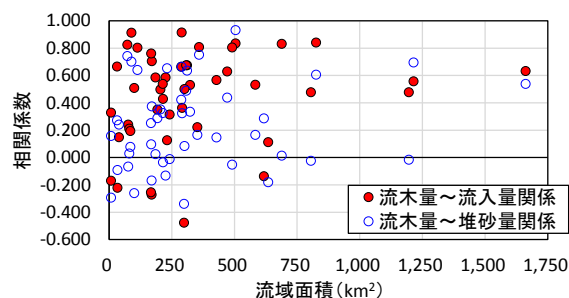


図-5 相関係数(流木量～流入量・堆砂量)と流域面積の関係

ため、厳密な評価はできないものの、図-6に示す結果から、年流木回収量の発生確率は年最大流入量の発生確率と概ね同程度となるダムが多く、流入量と流木発生量には一定の対応関係があるものと想定される。一方、年堆砂量と年流木回収量の発生確率には関係はバラつきが大きい。このことから、流木発生量は、堆砂量よりも流入量と関連づける方が妥当であると評価できる。

5. 流木発生量推定式の提案

(1) 検討方針

前章までの検討により、貯水池での流木回収量は堆砂量と関連づけるよりも流入量と関連付ける方が妥当であると考えられる。よって、本研究では対象ダムの各年の年最大流入量と年流木回収量の関係から設定される回帰式により、流木発生量の推定を試みるものとした。ここで、本研究で使用した流木回収量データは各年の全体量であるが、その大部分が当該年度内に発生した最大洪水時に発生したと考えるものとした。

また、流入量($Q_{in,max}$)、流木量(V_w)の絶対値は流域面積の影響を受けるため、流域面積で除した比流入量($q_{in,max}$)、比流木回収量(発生量)(v_w)で評価し、ダム毎に異なる流域面積の直接的な影響を排除した。

(2) 回帰式の考え方

回帰式は、式(1)、式(2)に基づく原点を通る1次式とした。また、突発的な大規模洪水時の流木発生量は、

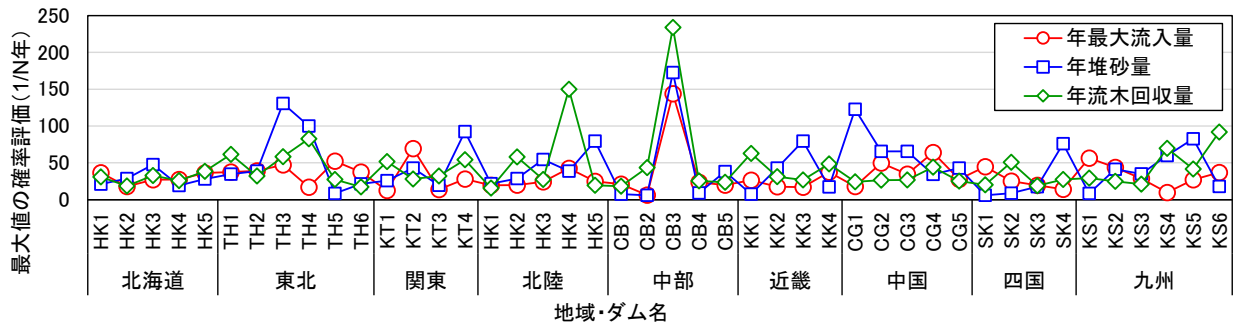


図-6 各諸量の対象期間内最大値の発生確率評価結果

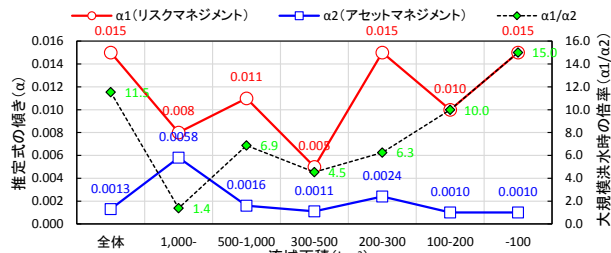


図-7 流域面積別の流木発生量推定式の傾き

表-1 流木発生量推定式の傾き及び大規模洪水時の倍率

分類	推定式の傾き*		大規模洪水時の倍率 ($\gamma = \alpha_1/\alpha_2$)
	α_1	α_2	
全体	0.015	0.0013	11.5
>1,000km ²	0.008	0.0058	1.4
1,000~500km ²	0.011	0.0016	6.9
500~300km ²	0.005	0.0011	4.5
300~200km ²	0.015	0.0024	6.3
200~100km ²	0.010	0.0010	10.0
100km ² <	0.015	0.0010	15.0

* 年比流木量の単位を千 m³/km² として整理

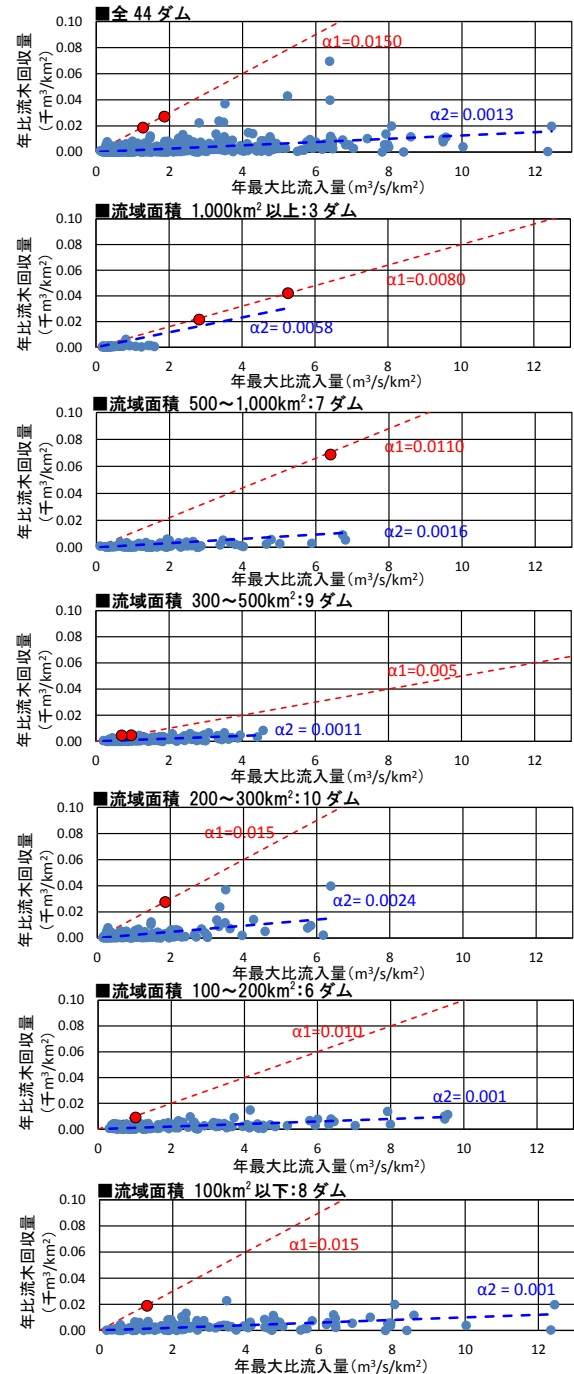
常時～中小洪水時のトレンドとは大きく異なる²⁾と考え、大規模洪水時の流木発生に対するリスクマネジメントに活用することを想定した式(1)と常時～中規模洪水時の流木発生に対するアセットマネジメントに活用することを想定した式(2)の2種類に分けて推定式を設定した。

$$v_w = \alpha_1 \times q_{in_max} \quad (1)$$

$$v_w = \alpha_2 \times q_{in_max} \quad (2)$$

ここで、 v_w ：対象期間における発生比流木量(m³/km²)、 q_{in_max} ：対象期間における最大比流入量(m³/s/km²)、 α_1 ：大規模流木発生時の流木量と流入量の関係を表す係数(s) (=流木量と流入量の関係のうち最大となる傾き)、 α_2 ：流木量と流入量の平均的な関係を表す係数(s) (=流木量と流入量の全データに基づく回帰式の傾き)である(図-8参照)。なお、回帰式の設定は、複数ダムのデータを横並びで評価するため、比流量、比流木量を用いるが、個別ダムでの発生流木量の推定では、式(1)、式(2)の両辺に流域面積を掛けることになることから、 α_1 、 α_2 は同様の値とし、式(1)、式(2)における比流入量(q_{in_max})の代わりに流入量(Q_{in_max})を使用することで直接発生流木量を算出可能となる。

回帰式の設定にあたっては、対象44ダム全体からの設定の他、流域面積別(1,000km²以上、500～1,000km²、



※：α₁の傾きの設定根拠

図-8 流域面積別流木発生量推定式の設定

300～500km², 200～300km², 100～200km², 100km²以下)に6区分して検討した。

(3) 流木発生量推定式の設定

流域面積別に設定した推定式の傾き α_1 , α_2 , 及び平常時と大規模洪水時の流木発生量の倍率(流木発生量強度の変動率)を表す $r(=\alpha_1/\alpha_2)$ を整理した結果を図-7, 表-1に示すとともに, 流域面積別の年最大比流入量と年比流木回収量の関係を図-8に示す。この結果より, 流域面積が200km²～300km²の場合を除くと流域面積が小さいほど α_1 の値(流木発生強度)が大きくなり, 大規模洪水時の流木発生強度の倍率 r の値も大きくなる傾向が確認できる。これは, 流域面積が大きい場合には, 流木発生の素因・誘引となる流木発生源の空間分布特性や降雨の空間分布特性が, 流域評価ではある程度均される一方で, 流域面積が小さい場合には, 流木発生源への降雨の有無が直接的に流木発生量に影響するため, 大規模洪水時の流木発生量が劇的に増加することを示しているものと想定される。このことから, 本研究で設定した推定式は, ダム流域での流木発生～貯水池流入現象の物理的な特性をある程度反映できていると考える。

表-1に示す提案式によると, 大規模洪水時の流木発生強度の倍率 r は流域面積が小さいほど大きくなる傾向があり, 5.0～15.0程度の値となっている。これは, 例えば中小規模洪水の5倍程度の流量の大規模洪水が発生した場合には, 流木量は中小規模洪水時の25倍～75倍(=流量規模5倍×流木発生強度5～15倍)程度となる可能性を示唆している。

(4) α_1 , α_2 の適用範囲の設定

図-8において, α_1 の傾きの決定根拠となる年最大比流木量～年比流木回収量関係を示したダムとその時の流木回収量の発生確率を整理した結果を表-2に示す。同表より, α_1 の決定根拠となった流木発生現象の発生確率の最小値は概ね1/30年(≒1/26:CB4ダム)である。このことから, 本研究においては, リスクマネジメント用の流木発生量の推定式(α_1)は概ね1/30～1/50年確率規模以上の洪水を対象とし, それ以下の規模の洪水については, アセットマネジメント用の推定式(α_2)を用いることを提案する。なお, 上記の確率評価は発生流木量を対象としているが, 図-6に示した通り, 大規模流木発生現象と大規模流量発生現象の発生確率は概ね同程度となると想定できることから, 発生流木量推定における洪水規模(対象外力規模)の評価は流入量を対象にするものとした。また, α_1 設定ダムの所在地域には特に偏りは見られないことから, 大規模洪水時の流木発生特性には, 地域特性はあまり影響しない可能性があるものとする。

6. 実ダム流域への適用

表-2 α_1 設定ダムと設定時流木回収量の確率評価

分類	α_1 設定ダム		流木回収量の最大値の発生確率
	地域	ダム名	
流域面積別	>1,000km ²	北海道 HK5ダム	1/39年
	1,000～500km ²	中部 CB3ダム	1/234年
	500～300km ²	中部 CB4ダム	1/26年
		中国 CG4ダム	1/44年
	300～200km ²	東北 TH4ダム	1/82年
	200～100km ²	関東 KT4ダム	1/54年
	100km ² >	九州 KS6ダム	1/92年

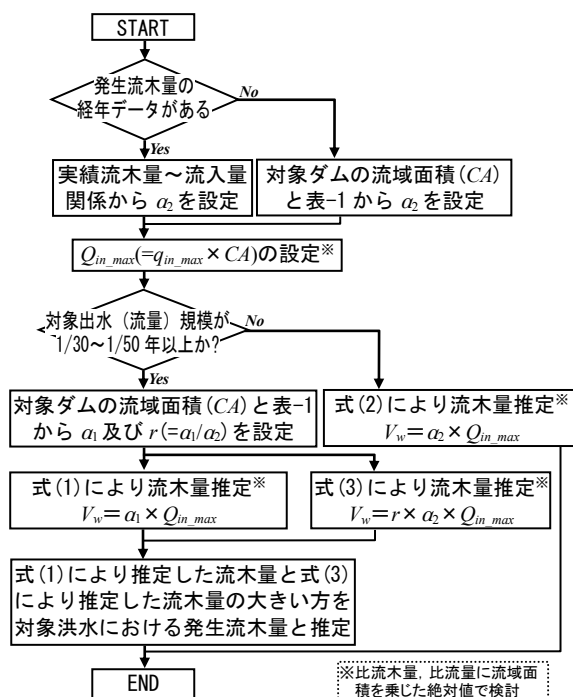


図-9 流木発生量の推定フロー

本研究で提案した流木発生量推定式を, 実際に大規模な流木流出が発生した漁川ダム²⁾における平成26年9月洪水に適用し, 推定式の妥当性を確認した。

(1) 対象洪水の概要²⁾

漁川上流域では, 平成26年9月11日に発生した低気圧に伴う豪雨により大規模な洪水が発生した。漁川ダムでは, 計画流量(超過確率100年)の600m³/sを超える約820m³/sの流入量を記録し, 既往最大洪水となった。また, この大規模洪水に伴い, 約33千m³の流木と約650千m³の土砂が貯水池に堆積した。なお, 本研究での提案式は平成25年までのデータで検討しており, 当該洪水のデータは使用していない。

(2) 検討手順

本提案式を用いた流木発生量の推定手順を図-9に示す。実績流木量の経年データがあるダムでは, 通常時の推定式の傾き α_2 は, 表-1に示した流域面積別の値だけでなく, 個別ダム毎にも推定可能である。その場合は, 個別ダムで設定した α_2 を優先することを想定する。ただし, これまでに発生していないような大規模洪水時の流木発生量

を推定する場合には、個別ダムで設定した α_2 と表-1に示す大規模洪水時の流木発生強度の倍率 r を用いて下式により流木発生量を推定し、表-1に示す α_1 を用いた式(1)からの推定流木量と比較して、大きい値を推定値として採用することがリスクマネジメントの観点からは妥当と判断した。

$$V_w = r \times \alpha_2 \times Q_{in_max} \quad (3)$$

ここで、 r :大規模洪水時の流木発生強度の倍率である。

(3) 検討結果

漁川ダムの平成26年9月洪水を対象に提案式を適用した結果を表-3に示す。図-10に示す漁川ダムの実績データから α_2 を設定し、その後、H26.9洪水における実績流入量と本研究で提案した r の値を用いたケース、表-1に示す α_1 と実績流入量を用いたケースの2ケースで発生流木量を推定した。その結果、H26.9洪水時の推定発生流木量は約12~37千 m^3 となり、実績値の33千 m^3 とほぼ一致している。この結果より、本研究で提案した流木発生量推定式は概ね妥当なものになっているものと評価する。

7. おわりに

(1) 本研究の成果

本研究では、既往研究結果等を踏まえ、経年的な流木発生量(流木回収量)が観測されている全国の直轄管理ダム、(独)水資源機構管理ダムから所在地域、流域規模を考慮して44ダムを抽出し、ダム貯水池での流木回収量と堆砂量、ダム流入量の関係を整理した。その結果、地域、流域面積によらず、流木量は流入量との相関が高く、その関係式は流域面積毎、発生外力規模毎に一定の傾向があることを示した。また、流入量と流木量に相関があることを踏まえ、これまで流域規模での推定が十分に実施されていなかった流木発生量について、リスクマネジメントに活用することを想定した大規模洪水時の流木量推定式とアセットマネジメントに活用することを想定した平常時の流木量推定式に分類した上で、ダム流入量を説明変数とした推定式を提案した。さらに本提案式を実際の貯水池への流木発生現象に適用し、推定式の妥当性を確認するとともに、貯水池管理への適用方法を提案した。

(2) 今後の課題等

本研究では、日本全国各地の44ダムを対象に流木発生量の推定式を検討し、流域面積別の推定式を提案している。しかしながら、流域面積と流木発生量推定式の傾きの関係が想定される傾向と逆転している部分も残される。これは、推定式を設定する際の流域面積の区分毎のダム数が依然十分ではないこと、区分が適当ではないこと等が原因と想定される。また、流域面積区分毎の α_1 を設定した流木回収量の最大値の発生確率にもバラつきが

表-3 流木発生量の推定結果(漁川ダム H26.9洪水)

No.	項目	記号	内容	備考
①	対象流域	-	漁川ダム	
②	流域面積	CA	113.3 km^2	
③	平均年最大流量	-	約100 m^3/s	
④	平均年流木回収量	-	260 m^3	
⑤	平均的な推定式の傾き	α_2	0.003	図-10より
⑥	流木発生強度の倍率	r	15倍	表-1より*
⑦	大規模洪水時の推定式の傾き	α_1	0.015	表-1より*
⑦'	"	$r \times \alpha_2$	0.045	=0.003×15倍
⑧	H26.9 最大流入量(実績)	Q_{in_max}	819 m^3/s	
⑨	H26.9 流木回収量(実績)	-	33千 m^3	
⑩	H26.9 推定流木発生量(式(1))		12.3千 m^3	
⑪	H26.9 推定流木発生量(式(3))	V_w	36.8千 m^3	
⑫	H26.9 推定流木発生量(採用)		36.8千 m^3	⑩⑪の最大値

※CA=113.3 km^2 ≒100 km^2 であることから、100 km^2 以下の値で評価した。

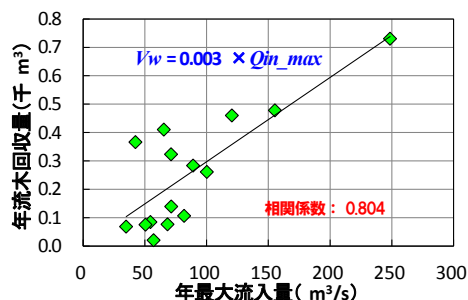


図-10 漁川ダムにおける α_2 の設定

ある。これらの課題については、今後、流木発生量データ、及び対象ダム数をさらに増やすことにより対応可能と考えられる。引き続き、流木発生量に関するデータを蓄積し、対象ダム数を増やしていくことにより、推定式の検証、さらなる精度向上を図っていく所存である。

本提案式は、常時観測されており、治水計画との関連付けも比較的容易である流入量を説明変数としていることから、非常に汎用性、実用性が高いと考える。今後、上記のような対応を実施し、推定式の精度を向上させるとともに、さまざまなダム流域等で本提案式を用いて、洪水規模毎の発生流木量を推定することにより、適切な貯水池管理の一助となることを期待する。

謝辞：本研究の執筆にあたって、国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課 流水管理室より、各種データをご提供頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 京都大学防災研究所水資源環境センター：流域一貫の総合流木管理に向けて、京都大学防災研究所水資源セミナー，2014。
- 2) 永谷言，川村育男，石田裕哉，倉橋実，水野直弥，角哲也：ダム貯水池における流木発生特性に関する一考察，土木学会第71回年次学術講演会，II-128，2016。
- 3) 石川芳治，水山高久，福澤誠：土石流に伴う流木の発生及び流下機構，新砂防，Vol.42，No.3，1989。
- 4) 助川友斗，小森大輔，風間聡：日本全国のダム貯水池における流木蓄積量の統計解析，土木学会第71回年次学術講演会，II-127，2016。

(2017.4.3受付)