

新潟大学災害・復興科学研究所
共同研究報告書

北陸地方の河川複合災害の予測・減災に関する基盤技術

研究代表者氏名 木村 一郎¹⁾

研究分担者氏名 安田 浩保²⁾

1) 富山大学 都市デザイン学部 都市・交通デザイン学科 2) 新潟大学 災害・復興科学研究所

研究要旨

急峻な地形と湿潤な気候を背景とする北陸地方河川における水・土砂・流木の三者が関わる複合災害について、その予測と減災計画立案に資する基盤技術を構築した。複合災害のメカニズムは複雑で、理論的アプローチは困難なことから、構築する技術は数値シミュレーションモデルを主要ツールと位置づけ、固・液混相流の力学体系を基に、当該地方の河川特性を極力反映させたモデル化を行い、実用的精度と経済性の両立を図った。構築した数値シミュレーションモデルを既往の室内模型実験結果と同条件で実行し、計算結果と実験結果を比較することにより、構築した数値解析モデルの妥当性を検証した。特に、流木の流水中の挙動や捕捉過程、着床、再浮上等を再現するモデルについて、その妥当性と実用性が示された。また、流木の捕捉過程の三次元性については、木村らの提案した流木リチャードソン数という無次元数が支配パラメータとなる点を確認した。

A. 研究目的

北陸地方の河川は地形が急峻で、年間を通じた湿潤な降水にも恵まれ、豊富な流量、活発な土砂輸送、多量の流木の流送などにその顕著な特性が認められる。このような河川の災害は、水流のみによるものよりも、水・土砂・流木からなる複合災害の様相を呈しており、その基盤となるのは固・液混相流の力学体系に他ならない。ところが、既往の河川災害のモデルは、単相（水のみ）、あるいは二相（水と土砂）によるものがほとんどで、北陸地方の河川災害の特性を十分再現できるものとはなっていない。

本研究では上述の既往モデルの問題点を鑑み、河川複合災害として、流木と水、さらに土砂が加わった複合災害を定性的、定量的に再現、予測でき、ハード、ソフト両面の減災技術の構築に資する基盤ツールを構築することを目的とするものである。特に、水単独の災害に比べて、水・土砂災害、さらにこれに流木の加わった災害は、一般に時間変化が急激で、人命に関わる確率が高く、喫緊な課題といえる。多様な地形や気象条件、さ

らには将来にわたる気候変動にも柔軟に対応するため、アドホック的なモデル化は極力避け、固・液混相流としての力学機構をそのフレームワークに置きながら、モデル係数の同定には北陸地方の河川災害データを極力反映させる。構築する技術は、経済性、柔軟性、迅速性のいずれにおいても優れる数値シミュレーションモデルを中心に置き、GUI システムを有するフリーソフトウェアとしてこれを整備し、web 上で公開することで、プログラミング等の特別な知識が無くとも利用可能な形で公開し、迅速な技術を図ることも本研究の目的の一つとした。

B. 研究方法

(1) 研究方法の概要

本研究で構築する数値解析ツールは、次の2つである。

モデル①：河川流・流木の固・液二相をともに三次元で再現するモデル。

モデル②：河川流・土砂輸送・流木の三相をいずれも二次元で再現するモデル。

(2) モデル①の概要

液相については、三次元のレイノルズ平均されたナビエ・ストークス方程式と連続式を基礎式とする。三次元モデルを必要とする理由としては、北陸河川のような急流河川では流木挙動が容易に三次元的となることや、河川蛇行部などの二次流の卓越する場への適用の必要性などによる。また、複雑な境界条件や水面振動に適応するため、移動一般曲線座標系による基礎式を用い、スタガード格子上のベクトルの反変成分を変数とする基礎式を用いた。

乱流モデルとしては、剥離・再付着流の再現性や第二種二次流を再現する必要性等から、二次非線形 RANS 型モデルを採用し、乱れエネルギーおよび乱れエネルギー散逸率の輸送方程式も連立して解くものとした。

固相については、流木を流木径程度の長さスケールを直径とする球体の接続で表現する方法とした。この方法のメリットは、複雑な流木形状にも柔軟に対応できること、流木同士の衝突を容易に DEM (個別要素法) で考慮できることなどが理由であるが、計算機記憶容量や計算機負荷については、既往の単要素モデルや二要素モデルには劣る。この点はトレードオフ問題であるが、本研究では北陸地方の河川のように急流河川の場合には、流木同士の衝突や、障害物への流木の衝突などの現象を精度よく再現することが重要と考え、球体群モデルを採用することとした。

(3) モデル②の概要

液相については水深積分されたレイノルズ方程式および連続式に基づく基礎式方程式系を用いる。乱流モデルは比較的簡単なゼロ方程式モデルとしたことで、計算機負荷を低減させた。また、河床変動の計算モデルとして、オイラー型のエクスマー方程式と、芦田・道上モデル、あるいはマイヤー・ペーター・ミュラーモデルによる流砂量フラックスの半経験式を組み合わせたモデルとした。なお、液相と土砂相の具体的なモデルとしては、IRIC 上にソルバーとして一般公開されている、Nays2DH のものをほぼそのまま採用した。なお、この液相のモデルについても一般曲線座標系によっており、複雑な河川形状に柔軟に対応できる。

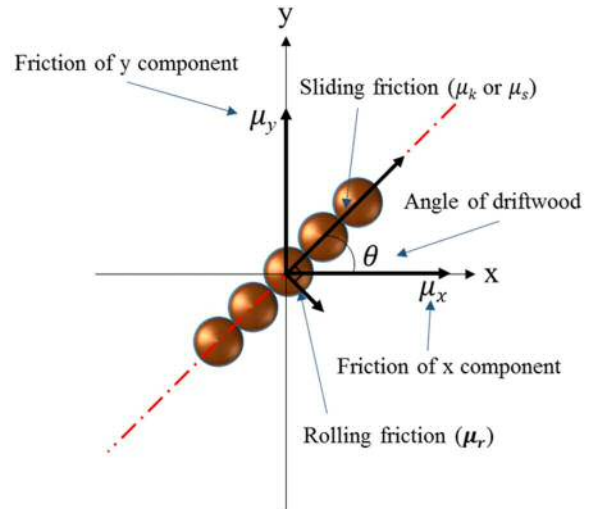


図1 モデル②における球体群配置の様子

固相については、モデル①と同様に、球体群モデルを用いた。流木を構成する粒子の様子を図1に示す。球体群モデルを用いる理由は理由は前述のモデル①で述べたとおりである。ただし、モデル②では比較的広範囲の現象の再現を低い計算機負荷で行うことを想定し、流木挙動についても平面二次的モデルとした。

流木の挙動で浮力が重要な役割を担う。水深が十分大きい場合、重力と浮力がバランスし、流木は水面吹きに浮いた状態となる。一方、水深が浅くなると状況によって流木は河床に接触し、河床からの反力の影響を受ける。水深がごく浅くなると、もしも根が片側に存在する場合、流木は方見た状態で河床に着床する。流木と河床の相互作用の有無を考慮する場合、まず、水深が十分大きい場合の喫水(水面から流木底面までの鉛直方向距離)を計算する必要がある。この喫水より水深が大きいと流木は河床に接触せず、もしもこれより小さいと流木は河床に接触する。そこで、水深が十分大きい場合の流木の喫水に相当する水深を臨界水深(critical draft for wood motion: CDM)を定義し、この値と水深を比較することで接触の有無を判定した。

底面との接触があると判定された場合、河床と流木との摩擦を考慮する必要がある。この摩擦には、流木の姿勢と流水の向き、流木の移動方法が大きく関与する。すなわち、流木が流木軸方向に移動する場合は、滑動型の移動となり、流木軸と直角方向(横方向)への移動の場合、転動(rolling)型の移動となる。転動の摩擦係数は滑動の摩擦係

数に比べて通常 1 オーダー程度小さいことが知られている。本研究では既往の研究や実験結果との比較等を考慮して、表 1 に示す値を用いた。

表 1 本研究（モデル②）で用いた摩擦係数の値

摩擦係数	値
静止滑動摩擦係数 (μ_s)	0.4
動滑動摩擦係数 (μ_k)	0.05
転動摩擦係数 (μ_r)	0.001

C. 研究結果

図 3 はモデル①による計算結果の一例である。橋脚を有する開水路中に空中から流木を投入した場合の挙動を再現したものである。橋脚による捕捉の過程が適切に再現されていることが確認できる。一方、図 4 はモデル②による計算結果の一例であり、砂州の形成と流木の着床の様子を示したものである。流木と河床変動の相互作用により砂州形状が変化する様子が再現されている。

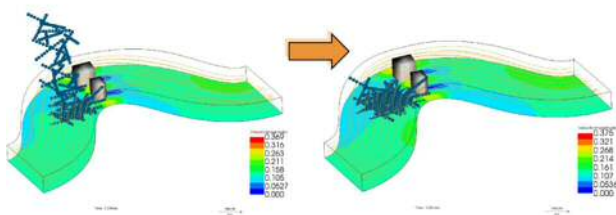


図 3 モデル①による計算結果の例（空中から流木投入，橋脚捕捉過程）

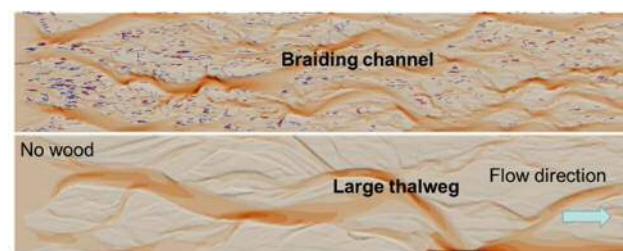


図 4 モデル②による計算結果の例（上：流木有，下流木無，カラーコンターは河床高さを示す）

D. 考察

上の C で示したように、モデル①、モデル②による計算結果は定性的に流木の挙動、水流、流砂との相互作用を良好に再現されることが確認された。また流木の三次元性については、既往の研究のように、無次元数である流木リチャードソン数が支配パラメータとなることが計算結果でも

示された。

E. 結論

本研究により北陸地方の河川の特徴である急勾配の流れ場における水流、流木、河床変動を再現するモデルが構築された。今後より幅広い条件に対して、モデルの妥当性を検討することが必要といえよう。

F. 研究発表

1. 論文発表（掲載誌名・巻号・頁・発行年を記入し、掲載論文あるいは PDF ファイルを別紙で 1 部提出）

[1]Taeun KANG and Ichiro KIMURA: Computational modeling for large wood dynamics with root wad and anisotropic bed friction in shallow flows, *Advances in Water Resources*, vol.121, pp.419–431, 2018.

[2]原田紹臣, 中谷加奈, 木村一郎, 里深好文, 水山高久: 掃流区間におけるコンクリート・スリット堰堤の流木処理機能に関する提案, *土木学会論文集 B1(水工学) Vol.74, No.5*, pp.1075-1080, 2018.

[3]Taeun KANG, Ichiro KIMURA and Yasuyuki SHIMIZU: RESPONSES OF BED MORPHOLOGY TO LARGE WOOD DEPOSITION USING A COMPUTATIONAL HYDRODYNAMIC MODEL, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.B1 (Hydraulic Engineering)*, Vol. 74, No. 5, 673-678, 2018.

[4]I. Kimura and K. Kitazono: Studies on Driftwood Motions around Obstacles by Laboratory and Numerical Experiments, *9th River Flow 2018, E3S Web of Conferences 40*, 2032, pp.1-6, 2018.

2. 学会発表（学会名・発表年月・開催地なども記入）

[1]木村一郎, 妹川陽介, 北園和也: 橋脚周辺の流木の三次元挙動とそのシミュレーション, 第 32 回数値流体力学シンポジウム講演論文集, 東京, 機械振興会館, 論文 C01-4, pp.1-2, 2018.

G. 知的財産権の出願・登録状況（予定を含む）なし