

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 23 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420499

研究課題名(和文) 橋梁部の超過洪水現象の粒子法を用いたモデル開発

研究課題名(英文) Development of the SPH model for flooding at a bridge

研究代表者

木村 延明 (KIMURA, NOBUAKI)

九州大学・工学研究院・学術研究員

研究者番号：40706842

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題は、気候変動下の豪雨による洪水現象において、橋梁に集積する流木によって引き起こされる越水現象に着目し、先行研究によって実施された橋梁・流木集積等のモデルを利用した室内実験の結果を参考にして、その結果を再現するための数値モデルの開発と現地への適応(過去の洪水事象に応用)を行うものであった。流木による越水現象を再現するために粒子法を用いた数値モデルの開発に焦点を当て、モデルの妥当性を室内実験の結果と比較することで検討した。その校正されたモデルを利用し、橋梁付近での越水時の水位高上昇とその要因(流木量、橋梁形状、流入量)に対して、主要因分析を行い、洪水のメカニズムの解析を行った。

研究成果の概要(英文)：Worldwide climate change has resulted in severe flooding in Japan in the last decade. Some floods were caused by the substantial accumulation of driftwood or debris at bridges crossing rivers in mountainous areas. In this study, for a two-dimensional open channel, we conducted a laboratory experiment and numerical simulation with and without driftwood modeling to clarify the physical mechanism of a flood event resulting from driftwood accumulation at a bridge. Open-source software SPHysics, implementing a smoothed particle hydrodynamics method, was calibrated with data of the water level measured near a miniature bridge in the laboratory experiment. The simulation clearly showed that the particle-like flow was scattered by the bridge girder and dammed up by the bridge in the upstream direction. By changing the quantity of driftwood, we analyzed the effect of a flood on a bridge.

研究分野：水工学

キーワード：洪水モデル 流木集積 粒子法 橋梁

1. 研究開始当初の背景

(1) IPCC (2012) によれば、過去 10 年間に地球規模の気候変動により異常気象が頻繁に発生したことが報告され、将来的には近年の状況よりも更に厳しい異常気象が起こる可能性があることが警告されている。近年日本では、スーパー台風による集中豪雨や梅雨前線による亜熱帯型の非常に強い豪雨が起きている。実際に直近の過去 10 年間で、大雨や台風による顕著な災害をもたらした 8 例もの気象災害が発生している(気象庁「災害をもたらした気象事例 平成元年～現在まで」: www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/index.html)。例えば、平成 24 年 7 月九州北部豪雨(国土交通省報告)では、短時間(豪雨降り始めから 3~6 時間)内に集中的な豪雨に見舞われ、突発的で破壊的な出水が発生した。これは、亜熱帯地域(例えば台湾)で見られる様な洪水現象(Hsu et al., 2003)に類似するものである。この出水は、多くの流木を含んだ濁流を河道にもたらし、橋梁の欄干部分や橋脚間の河道を塞ぐことにより氾濫の原因を作り、その結果、橋梁自身の破損や橋梁付近とその上流域で家屋浸水等の被害が発生するものであった(図 1)。



図 1 大分県竹田市 橋梁付近洪水被災現場 (平成24年7月九州北部豪雨災害 調査団報告書より)

(2) 本研究では、この亜熱帯型に類似する出水に起因し、且つ流木と橋梁が関係する洪水現象に着目する。類似する過去の調査分析や室内実験・数値実験等の文献について以下に述べる。一般的に、流木が橋梁に集積し桁下空間(クリアランス)が詰まることにより、その周辺で発生する洪水や土石流は物損や人的被害を大きくする(石川, 2006)。水槽実験を用い、橋梁の水量通水断面と橋脚に堰止められた流木の特徴との関係(足立・大同, 1957)、橋脚間隔と流木の本数による流木の集積頻度の解析(奥澤, 1998)、流木の集積と水位上昇の検討(坂野, 2003)など橋梁と流

木が引き起こす洪水の定性的な物理的メカニズムが解明されてきた。水槽実験を補完、あるいは独自の計算手法の開発から実施された数値実験について、現象を平面二次元、あるいは鉛直二次元で簡潔化した水槽実験の再現計算により基本的な発生メカニズムを探究してきた(例: 後藤ら, 2001)。Shrestha et al. (2009) は、河川上流域での土石流発生を想定し、土石流量と流木形状を変化させて、流木を含んだ土石流が堰き止め構造物(グリッドダム等)に集積する過程、及び土石流量の時間変化を空間 3 次元的な水槽実験と数値実験を用いて検討した。その結果、構造物の形状と流木の運動の違いにより集積密度が異なる事を結論づけた。更には、平面 2 次元数値モデルで複雑な流木形状(枝付き)が及ぼす構造物に対する流木の集積状態と水位上昇の検討も行われた(清水・長田, 2007)。過去の研究成果から、構造物周りにおける流木の集積と水位上昇の過程においては、構造物自体の特性と流木運動の特性が強い影響を与える事が理解され、また流木の数やそれ自体の運動・形状をより詳細に考慮する事で現実的な現象により近い形へのモデル化が進んだと考えられる。

2. 研究の目的

(1) 空間 3 次元の橋梁と河道において、流木の集積過程とそれに伴う水位上昇の物理過程を、橋梁の特性パラメータを変化させる事によって、定性的・定量的に解明すること。  
 (2) 橋梁と流木の衝突過程と水位上昇に伴う水圧変化による力学的運動量とエネルギー保存則より、橋梁の脆弱性を可視化すること。  
 (3) 前者(1)の物理過程を解明後に、アプリケーションとして、ここで開発される洪水モデルを使用し、平成 24 年 7 月の九州北部豪雨で確認された超過洪水現象の事例について、実際の地形を再現して数値計算を実行し、当時発生した洪水現象の再現を試みる。後者は、洪水モデルからの流れの解と流木の衝撃力の相互作用の現象を同時に解いて流木を伴う出水に対しての橋梁の脆弱性を可視化することを試みる(図 2 参照)。

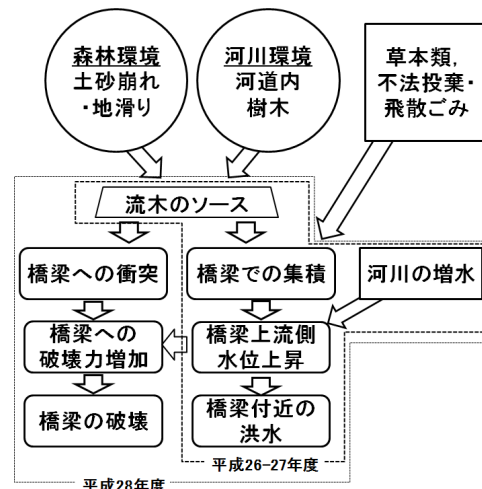


図 2 明らかにすること

### 3. 研究の方法

(1) 研究代表者の所属する研究グループ等は、平成 24 年 7 月九州北部豪雨の後の現地調査を行い、水・土砂災害からの被害状況と今後の適応策をまとめた（土木学会九州北部豪雨災害調査団, 2013）。その調査の中で得られた知見の 1 つは、橋脚・橋桁・欄干に数多くの流木や塵芥が集積して河積を狭め、その周辺、及び上流では河川水の越水被害が複数報告されている事である。この越水現象を解明するためのキーワードは、流木形状・運動、橋梁への集積過程、流木積中の水位上昇過程、及び橋梁の構造物特性であると考えられる。本研究では、Lucy (1977)らが開発した非計算格子系で構造物の大幅な変形や砕波流の複雑現象を粒子単位に細分化して表現できる粒子法を使用する。と言うのも橋梁や堤防を乗り越えるような越流現象では、不連続な流れの自由表面が出現するので、計算領域を微細な粒子単位の空間情報で扱うことが重要だからである。この粒子法は、非圧縮性流体と圧縮性流体の系統があるが、Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)法を採用する。既に SPH 法を用いて行われた洪水計算の研究も存在する（例：Ghazali and Kamsin, 2008）。本研究では、テンソル計算の不安定性を改良した SPH (Monaghan, 1992) に基づいて開発され、離散的で且つ微細な自由表面を持つ流体運動の解析と、加えて防波堤等の構造物の設定や浮遊物等との連携運動も同時に解析できるオープンソフトウェアの SPHysics (wiki.manchester.ac.uk/sphysics/index.php/SPHYSICS\_Home\_Page/)を採用し、流木の集積や越流の特性を組み込んだ数値流体シミュレータを開発した。また、研究代表者の所属する研究グループでは、開水路を使用した流木と橋梁による水位上昇等の室内水槽実験を実施しており、その室内実験の結果を用いて数値モデルの再現計算の妥当性を検討した。研究推進は以下のステップを経て行われた。

(2) SPHysics のテストとプログラムの改良について、SPHysics のテスト計算を実施した。例えば、このソフトウェアの制約や適用性のテスト、及び係数やパラメータの変化に伴うモデルの感度解析を行った。次に、本研究で重要要件となる河道を流れる複数本の流木運動のモデル化と橋梁等の構造物の設定、及び構造物自身の変形と破壊現象のモデル化等を行い、それぞれのモデル化について組み込み用のプログラム（モジュール）を作成した。なお、モジュールを組み込んだ改良版モデルは以下に MDY-SPHysics と記述する。

(3) 水槽実験データに基づく再現計算について、構造物（橋梁）周りの流木の運動、その集積過程、集積した流木群がクリアランスに詰まる状況、その影響に拠る橋梁の河積の減少、欄干の堰き止め効果の強化、結果として発生する水位上昇などについての物理現象の基礎的な解明は、現地調査や観測データに基づき設計された鉛直 2 次元の室内水槽実験

を利用して行われた（図 3 上/中段、実験の簡略図）。その室内水槽実験で得られた結果に対して、MDY-SPHysics を用いて再現計算を行った。なお流木は単体浮遊物としてモデルの中に組み込むことも可能であるが、複雑運動のシミュレーションを行うことになり検証が困難になるので、橋梁への流木の集積状況を簡易化して、数値モデルに組み込んだ数値シミュレーションのみを実施した。なお、モデル内部の係数や流木運動や集積過程に対する未知のパラメータ等の検討も行った。室内実験では、橋の構造上の変化量（橋桁長さや幅、橋脚の高さ等）、流木の形状（長さ、枝等）、流入量の大きさを広範囲に変化させて、多数条件での実験を実行するのは非常に困難である、従って計算結果の妥当性を検証済みの数値モデルを使用し、それぞれの変化量を変化させる事によって、未知のパラメータ値の有効範囲を効率的に推定した（図 3 下段）。

(4) 実際に発生した洪水現象の再現計算について、大分県竹田市で発生した洪水を対象に、

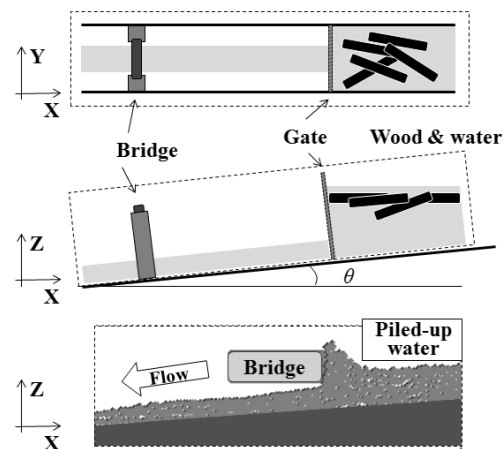


図 3 水槽実験と数値実験（例）

地形情報・時系列の流量・水位情報等のデータをモデルに入力する。河川の湾曲部を再現するために一般化座標系を導入する。実際の現象で発生した流木の形状や運動モーメント、集積過程の不確定性（時系列的に全てを把握できない）や複数流木の運動により生じる複雑性を、簡潔で且つ起こりえた複数の条件設定のもとで数値実験を計画した。この計画では、モデルの改良やパラメータの再設定等を通して、より実現象に近い計算結果の検証、流木の集積過程がどの様に洪水を引き起こしたのか等の解明が含まれる。

### 4. 研究成果

(1) 先行研究として水槽を利用した室内実験が行われた（図 4）。この実験では、橋梁上流側前面の水位高の計測を行い、流木の集積密度の程度によってどの程度の水位上昇が発生するのかを評価した。なお、橋梁前面に集積する流木について、多数の流木群を代替的に評価可能な簡易的なモデル化が行われた

(図4下段).なお流木の集積状況に基づく4つのケースで室内実験が行われた(表1).

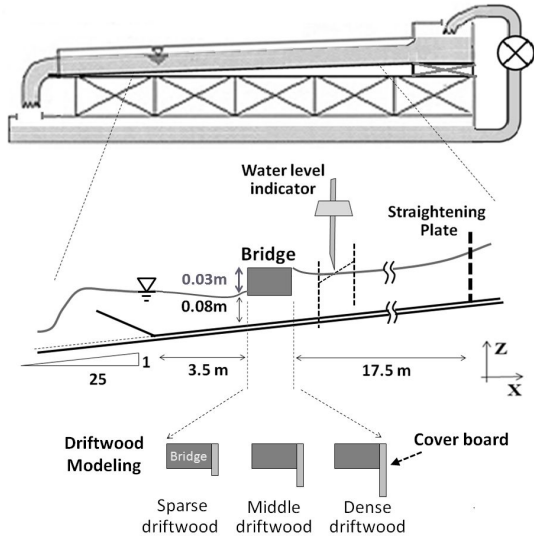


図4 室内実験装置(上段), 計測方法(中断), 流木のモデル化(下段)

表1 流木の集積状況に対応するテスト  
(各カラム: ケース名, カバー板の長さ, 断面減少率)

Case	Length of cover board (m)	Ratio of reduction of the cross section (%)
Case 1	0.00	0.0 (No driftwood modeling)
Case 2	0.01	12.5
Case 3	0.03	37.5
Case 4	0.05	62.5

この室内実験の結果について数値モデルを用いてのパラメータや係数等の調整を行いながら再現のための数値シミュレーションを行った. 数値シミュレーションの設定は, 室内実験の設定を参考にし, 図5に示されるように, ダムブレイクの設定で上流側から粒子群を下流方向へ流すようにした. その下流域で橋梁を設置し, 更にその橋梁上流側前面で流木の集積に対応する鉛直方向に伸延板(カバー板)を設置した.

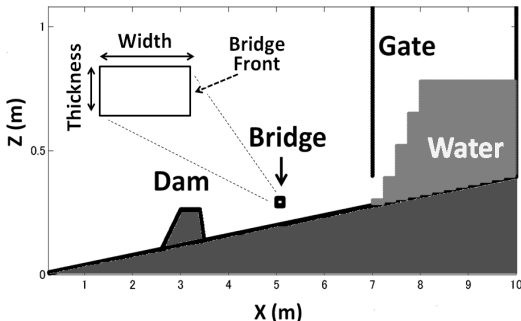


図5 数値シミュレーションの設定

数値シミュレーションの結果は, 図6で示されるように, 橋梁前面での流木の集積状況による水位上昇が室内実験と比較された.

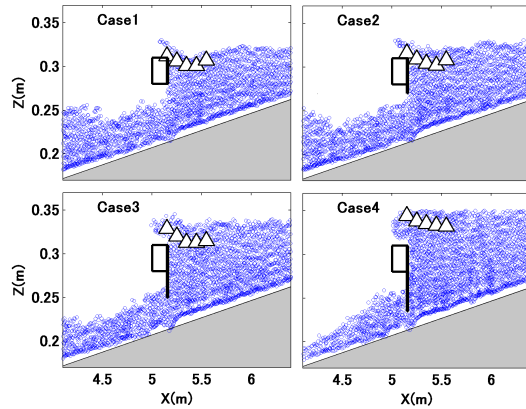


図6 室内実験と数値シミュレーションとの比較(=室内実験, 青粒子群=シミュレーション結果)

室内実験と数値シミュレーションの評価は表2に示す通りである. 流木の集積(流木量)によって引き起こされた橋梁上流側前面付近での水位上昇(堰き上げ効果)について, 数値シミュレーションでは, 最大約7%の誤差率であった. 水位上昇が大きい場合には, 4%程度である. 従って, この数値モデルは堰き上げ効果の状況をほぼ再現したと考えられる.

表2 橋梁前面の水位上昇の比較(各カラム: ケース名, 室内実験結果, 数値シミュレーション結果, 誤差率)

Case	Dam-up (Obs)(m)	Dam-up (Simu) (m)	Error ratio (%)
Case 1	-0.002	0.005	7.4
Case 2	0.000	0.008	7.3
Case 3	0.021	0.026	4.1
Case 4	0.028	0.034	4.5

一連の数値シミュレーションによる解析結果と室内実験の観測結果との比較検討から, 数値モデルの妥当性が示された. この数値モデルを用いて, さらに基本的なテストケースの数値シミュレーションを行った. 例えば, 橋梁の形状や設置位置, また上流からの流量の増減などの条件を設定した数値シミュレーションを行い, それぞれの強権によって生じる結果の特性を調査した(下記の雑誌論文2,3,4). また, 最終目標である洪水が発生した現地への応用は, 現段階では現地データの取得の不備などが原因のために研究途上である. しかし, 観測データがすべて揃っている流域を対象に代替ケースとして過去の洪水状況の再現計算を実施した(下記の雑誌論文1).

(2) 今後の残務処理として, 現在海外ジャーナルに投稿中の1編の論文(内容: 堰き上げ効果の物理的解析)がある. その論文については, エディタや査読者の意見に基づいて, 適切に修正・加筆後に, そのジャーナル紙面上で本研究成果の掲載を目指す予定である.



<引用文献>

- 足立昭平, 大同淳之(1957) 流木に関する実験的研究, 京大防災研究所年報第1号, 1-9.
- 石川芳治 (2006) V 章 流木災害と森林. 森林科学 No.47.
- 奥澤豊(1998) 流木の流下と集積に関する研究. 第4回河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集, 141-146.
- 国土交通省報告 - 平成24年度の災害情報: 平成24年7月九州北部豪雨,  
[http://www.mlit.go.jp/river/saigai\\_jouhou/h24/0712baiu/jouhou.html](http://www.mlit.go.jp/river/saigai_jouhou/h24/0712baiu/jouhou.html), accessible at April 25, 2017.
- 後藤仁志, 酒井哲郎, 芝原知樹(1999) 急激な水面変動を伴う流速場のLagrange型数値解析. 水工学論文集, 第43巻, 509-514;
- 坂野章(2003) 橋梁への流木集積と水位せきあげに関する水理的考察. 国総研資料, 第78号,  
<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryuu/tnn/tnn0078.htm>, accessible at April 25, 2017.
- 清水義彦, 長田健吾 (2007) 流木形状を考慮した個別要素法による橋脚周辺の流木集積過程に関する数値実験. 水工学論文集, 第51巻, 829-834.
- 土木学会九州北部豪雨災害調査団 (2013) 平成24年7月九州北部豪雨災害調査団報告書. 104pp.
- Ghazali J.N. and Kamsin A. (2008) A Real Time Simulation and Modeling of Flood Hazard. Proceedings of the 12th WSEAS International Conference on SYSTEMS, Heraklion, 438-443.
- Hsu M.H., Fu J.C. and Liu W.C. (2003) Flood routing with real-time stage correction method for flash flood forecasting in the Tanshui River, Taiwan. Journal of Hydrology, 283(1-4), 267-280.
- IPCC (2012) Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., Barros V., Stocker T.F., Qin D., Dokken D.J., Ebi K.L., Mastrandrea M.D., Mach K.J., Plattner G.K., Allen S.K., Tignor M. and Midgley P.M. (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA, 582 pp.
- Lucy L.B. (1977) A Numerical Approach to the Testing of the Fission Hypothesis. The Astronomical Journal, 82(12), 1013-1024.
- Monaghan J.J. (1992) Smoothed Particle Hydrodynamics. Annual Review Astronomy and Astrophysics, 30, 543-74.
- Shrestha B.B., Nakagawa H., Kawaike, K., Baba, Y., and Zhang, H. (2009) Numerical simulation on debris flow with driftwood fan deposition. Proceedings of the 28th Annual Meeting of the Japan Society for Natural Disaster Science, 75-76.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

(雑誌論文)(計4編)

1. Kimura, N., Y. Sugihara, S. Imagama, N. Matsunaga, A. Tai, A. Hashimoto, and T. Komatsu (2016) Effective dam use for flood control during a heavy rainfall event. In proceedings of the 12th International Conference of the International Institute for Infrastructure Resilience and Reconstruction (I3R2), CD-ROM (pp. 183-190, Published by University of Peradeniya), August 5-7, 2016, Kandy, Sri Lanka (peer review).
2. Kimura, N., A. Tai, and A. Hashimoto (2015) Assessment of a key factor for mechanism of a river flood, caused by driftwood accumulation at a bridge. In proceedings of the 11th International Conference of the I3R2, CD-ROM, August 27-28, 2015, Seoul, South Korea (peer review).
3. Kimura, N. and A. Tai (2014) A flow simulation of a bridge-induced flood in a river using smoothed-particle hydrodynamics (SPH) method. In proceedings of the 19th Congress of the Asia Pacific Division of the International Association for Hydro Environment Engineering & Research (IAHR-APD), CD-ROM, September 22-24, 2014, Hanoi, Vietnam (peer review).
4. Kimura, N., A. Tai, and A. Hashimoto (2014) Simulation of driftwood-induced flooding during high-intensity rainfall using smoothed particle hydrodynamics method. Annual Journal of Applied Mechanics, JSCE (土木学会論文集 A2 分冊 [応用力学]), Vol. 70, No. 2 (応用力学論文集 Vol. 17), I\_777-I\_783 (peer review).

(学会発表)(計4件, 内3回国際会議にて)

- Kimura, N., Y. Sugihara, S. Imagama, N. Matsunaga, A. Tai, A. Hashimoto, and T. Komatsu (2016) Effective dam use for flood control during a heavy rainfall event. The 12th International Conference of the I3R2, August 5-7, 2016, Kandy, Sri Lanka.
- Kimura, N., A. Tai, and A. Hashimoto (2015) Assessment of a key factor for mechanism of a river flood, caused by driftwood accumulation at a bridge. The 11th International Conference of the I3R2, August 27-28, 2015, Seoul, South Korea.
- Kimura, N. and A. Tai (2014) A flow simulation of a bridge-induced flood in a river using smoothed-particle hydrodynamics (SPH) method. The 19th Congress of the IAHR-APD, September 22-24, 2014, Hanoi, Vietnam.

木村延明, 田井明(2014) 流木を伴う橋梁部における洪水現象の数値シミュレーション.

平成 26 年度土木学会全国大会, 2014 年 9 月  
10-12 日, 大阪.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等  
特になし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

木村 延明 (Kimura, Nobuaki)  
九州大学大学院・工学研究院・学術研究員  
研究者番号：40706842

### (2) 研究分担者

なし ( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

田井 明 (Tai, Akira)  
九州大学大学院・工学研究院・准教授  
研究者番号：20585921

### (4) 研究協力者

特になし ( )