

令和 4 年 5 月 25 日現在

機関番号：56101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04375

研究課題名（和文）多様な流木堆積過程を検討可能な流木対策工設計支援システムの構築

研究課題名（英文）Development of a Practical Numerical Analysis Method for Designing a Retention Facility of Woody Debris

研究代表者

長田 健吾（Osada, Kengo）

阿南工業高等専門学校・創造技術工学科・准教授

研究者番号：30439559

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、流木の流下・堆積過程を説明できる新たな3次元流木解析モデルを開発した。本モデルは、流木挙動を表現する3次元個別要素法と洪水流解析を組み合わせたものである。本モデルの特徴は、洪水流解析に平面2次元・3次元ハイブリッド流体解析を採用したことであり、これにより一般的な流れの3次元計算に比べて短い計算時間で効率よく3次元流れの情報を得ることを実現した。解析モデルの検証のため、流木流下・堆積に関する基礎的な実験データとの比較を行った。その結果、開発した解析モデルは、流木の堆積形状や水位上昇などを再現することができ、流木の流下・堆積過程を説明するための有用なモデルであることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

流木による災害を軽減するために、流木補足工や貯木池などの対策施設が計画・設計される。このような対策施設の立案は、現状では主として模型実験により施設設計が行われているが、検討段階で数値解析を活用できれば、検討の幅が広がり、より有効な施設設計が実施できる。本研究で構築した3次元流木解析モデルは、流木の流下過程、堆積形状、堆積割合、堆積による水位上昇といった流木対策施設を設計する上で基本的に知りたい情報を得ることが可能で、施設設計の高度化・効率化に向けて有用なツールになり得ると考えられる。

研究成果の概要（英文）：This study presents a new 3-D numerical model to explain the woody debris conveyance and accumulation processes in rivers with piers or a debris retention facility. This model combines a 3-D flood flow model and a 3-D distinct element method (DEM) for simulating woody debris behavior. The most characteristic of this model is that the 2-D and 3-D hybrid flow model is adopted for the flood flow analysis. This hybrid approach led the method to run much faster than did a full 3-D flow simulation, and the method effectively obtains information regarding 3-D flow velocity. The method was calibrated and validated using flume data on woody debris conveyance and accumulation. Comparison of the method's predictions and the flume results showed that the proposed method is capable of accurately simulating woody debris conveyance and accumulation in rivers with bridge piers or a debris retention facility.

研究分野：水工水理学

キーワード：水工水理学 流木災害 洪水 防災減災

1. 研究開始当初の背景

山地および河道内から発生した流木群が、川幅の狭い河道で橋脚に堆積すると、河道閉塞による堤防越水、河岸侵食および橋梁自体の被災など大規模な災害に発展する危険性があることから、流木問題は治水上解決すべき重要課題の一つとなっている。これら流木による災害を軽減するために、流木補足工や貯木池などの対策工が計画される。このような対策工の立案は、現状では主として模型実験により施設設計が行われているが、検討段階で数値解析を活用できれば、検討の幅が広がり、より有効な施設設計が実施できる。河道内の流木対策工の設計に対し、様々な流木堆積パターンの検討が可能で、実用的解析法の構築が求められている。

既往の流木解析モデルは、流木を剛体として扱う2次元、3次元のモデル化が進められてきた。このようなモデルは、太く変形しない流木の堆積過程の検討に対しては有用なモデルである。一方、実際の堆積で見られるように、幼木や枝など変形する流木が橋脚や太い流木に絡むことで、より大きな堆積物を形成することもあり、橋脚への堆積過程を説明する上で流木の曲げ変形を無視することは出来ないと考えている。

2. 研究の目的

本研究では、これまでのモデルで一般に扱われてきた剛体流木と、曲げ変形を伴う流木が混在した状況を一体的に扱うことができる新たな3次元流木解析モデルを開発する。剛体・曲げ変形の両流木材料を用いた流木実験を実施し、本解析法による結果と比較検証することで、剛性・曲げ変形流木が混在する流木群の流下・堆積過程、河道閉塞による水位上昇などについて十分な説明力を有する解析法の構築を目指す。

3. 研究の方法

(1) 当初計画との相違点

研究開始当初、3次元流木解析法として構築を目指していたのは平面2次元洪水解析と3次元流木追跡モデル(3次元個別要素法)の組み合わせであった。それまでの現地への適用¹⁾などを通じて、この組み合わせで良いと考えていたが、本研究で橋脚への流木堆積に関する基礎実験を行いこのモデルを適用したところ、橋脚などへの流木の堆積過程を再現するためには3次元流れ(鉛直方向流速)を取り扱えるモデルが必要であることが判明した。そこで当初計画から外れることになるが、流れの3次元解析と3次元流木追跡モデルの組み合わせモデルの開発を進めた。このような3次元流木解析の完成を目指した方が、流木解析の精度が格段にアップし、対策の立案や施設の設計に大いに役立つと考えたからである。また、曲げ変形を表現できるモデルについては、平面2次元解析との組み合わせモデルは構築済であるが²⁾、流れの3次元解析との組み合わせは計算負荷が非常に大きくなることから、本研究では曲げ変形モデルと3次元流体解析との組み合わせモデルの構築や検証は行わなかった。

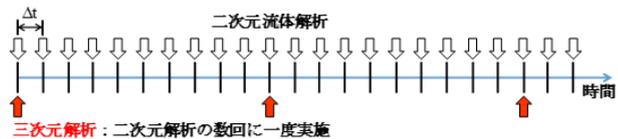


図-1 2次元解析と3次元解析の計算頻度の例

(2) 平面2次元—3次元ハイブリッド流体解析の構築と3次元流木追跡モデルとの組み合わせモデルの構築

本研究では、二瓶ら³⁾によって提案された平面2次元—3次元ハイブリッド流体解析モデル(S,N座標)の方法を参考に、一般座標系のハイブリッドモデルを構築した。平面2次元計算と3次元計算により構成される本手法は、図-1に示すように平面2次元計算については毎時刻計算を実施するのに対し、3次元計算は、数回～数十回に一度計算を行うという枠組みである。3次元計算を毎時刻行わない代わりに、補正項や流速補正作業を通じて平面2次元解析と3次元解析の互いの情報を交換しながら、解析を進める。従って、通常の3次元計算に比べると、かなり時間的に早く3次元流れの計算結果を得ることができる。また、3次元計算を行う必要がない箇所は、平面2次元計算のみでの解析に容易に切り替えることができるため、実河川などを対象にする場合、有用

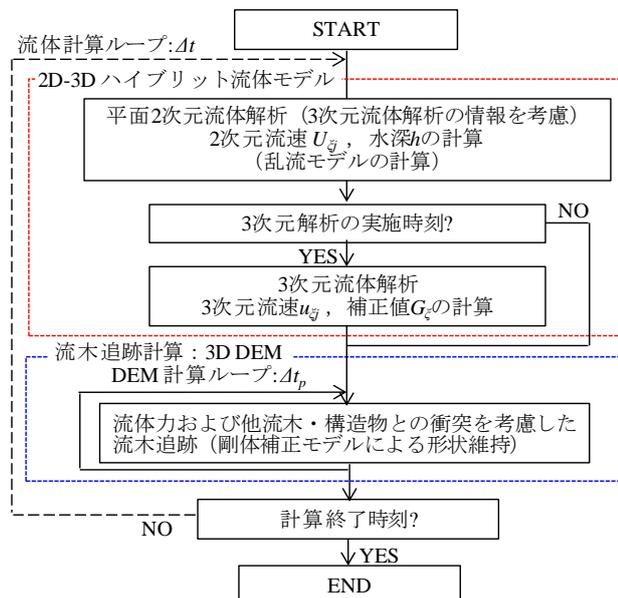


図-2 計算過程

な計算法であると考えられる。図-2に、ハイブリッド流体解析モデルと3次元流木追跡モデルを組み合わせて構築した3次元流木解析モデルの全体的な流れ図を示す。流木形状は、いくつかの球形粒子をつなぎ合わせて表現し、流木間の衝突力を計算するとともに、流体との相互作用を考慮した。衝突力などにより流木形状が崩れるため、剛体補正モデル⁴⁾により流木形状を維持するように計算を行う。また、流体解析に流木の存在を考慮するために、上記ハイブリッド流体解析モデルにFAVOR法⁵⁾を取り入れた。このFAVOR法の組み込みは、実験結果を用いた検証を進める上で導入が必要と判断したもので、これを導入しなければ流木堆積による水位上昇量の再現が困難であった。

(3) 流体解析の移流項の精度向上

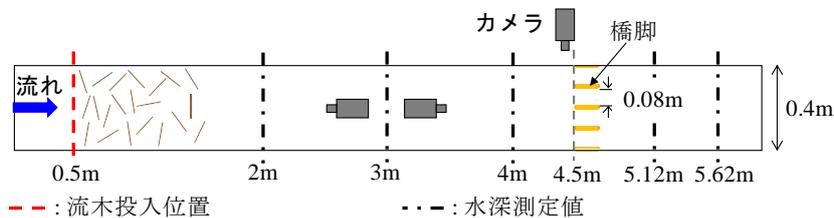
R1年度までは、流体解析の移流項に1次元風上差分を適用したモデルで計算を行っていた。しかし、後述する一般河道を模した基礎実験を進める上で、渦運動が流木挙動に与える影響を無視できないことが判明した。そこで、新たに移流項に3次元風上差分を適用したモデルと、このモデルに乱流モデルを組み込んだ2つの流体解析を構築し、流体解析の精度向上を図った。ここで、乱流モデルに関しては、平面2次元のk方程式のみを計算する簡易な扱いとした。本モデルの構築過程では、いくつかの乱流モデルを試みたが、これらの方法で安定した計算モデルを構築することが出来なかった。おそらくハイブリッドモデル特有の問題と考えられ、3次元解析を平面2次元解析の数回に一度の頻度で実施していること、また互いの情報を共有しながら計算するといったことを行っているため、これらが乱流モデルの安定性に影響したと考えられる。

4. 研究成果

(1) 直線水路を用いた基礎実験の実施とそれを用いた解析モデルの検証結果

流木の流下と橋脚堆積過程に関する基礎実験を実施した。図-3に、実験施設の概要と流量・流木長を変化させた各実験ケースを示す。水路は、幅0.4m、勾配1/2000の直線水路であり、橋脚5本を0.08m間隔で設置した。実験に使用した流木は直径5mm、密度650kg/m³（濡らした状態で測定）のヒノキで、長さ0.12mと0.10mの2種類を100本ずつ投入した。図-4（左）に、Case1における流木堆積状況の一例を示す。

この実験に解析モデルを適用し、検証を行った。図-4（中）は、研究当初に構築を目指していた平面2次元流体解析と3次元流木追跡モデル（3次元個別要素法）の組み合わせモデルによる解析結果である。橋脚上流での流木の沈み込みが全く再現できていないことが分かる。この結果



Case No.	Q (m ³ /s)	Length of woody debris (m)	Case No.	Q (m ³ /s)	Length of woody debris (m)
Case 1	0.007	0.12	Case 3	0.007	0.10
Case 2	0.010	0.12	Case 4	0.010	0.10

図-3 橋脚を設置した直線水路実験の概要

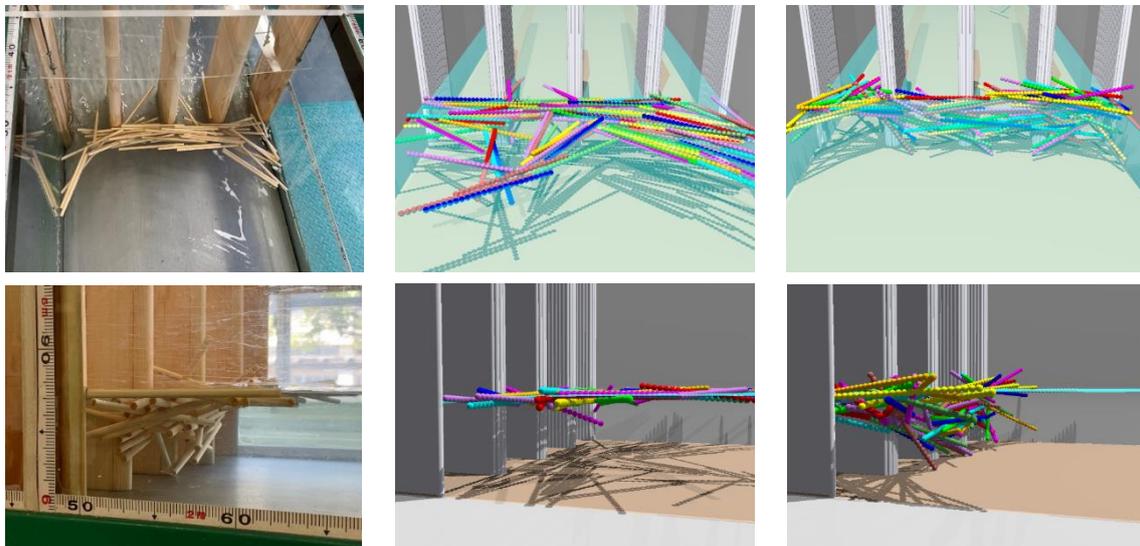


図-4 実験結果（左）と解析結果の比較

（中：平面2次元流体解析，右：平面2次元—3次元ハイブリッド流体解析）

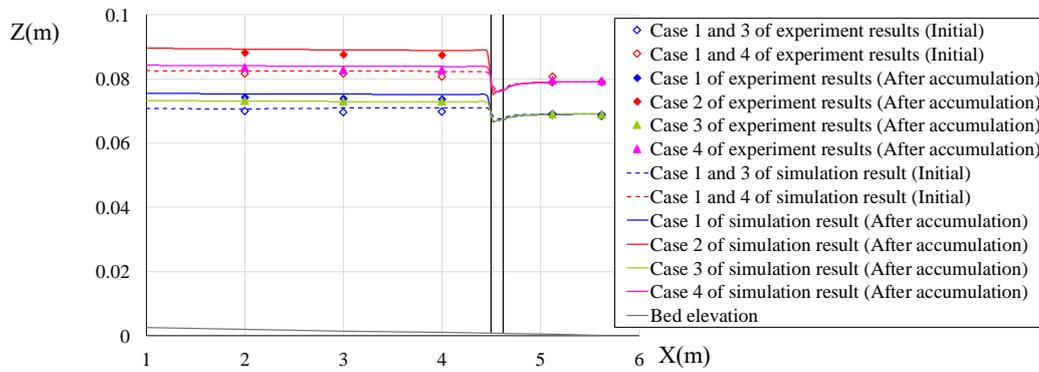


図-5 水面形の実験結果と解析結果の比較

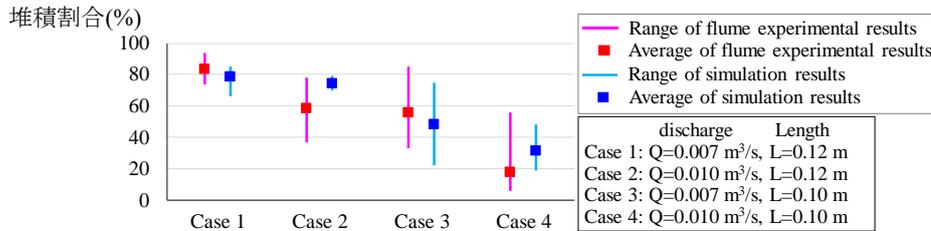


図-6 流木堆積割合の実験値と解析値の比較

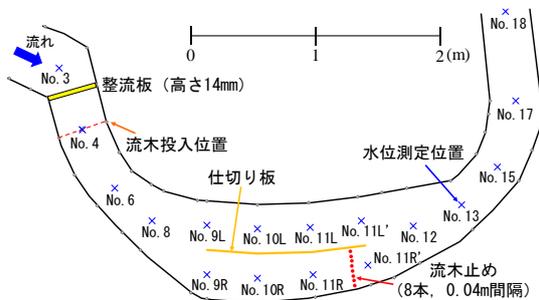


図-7 実験装置の概形

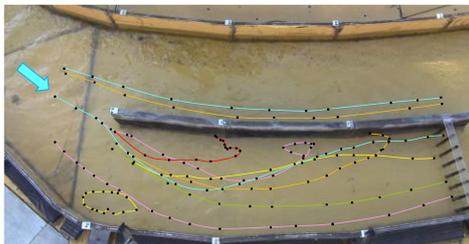


図-8 色紙の追跡により得られた流線

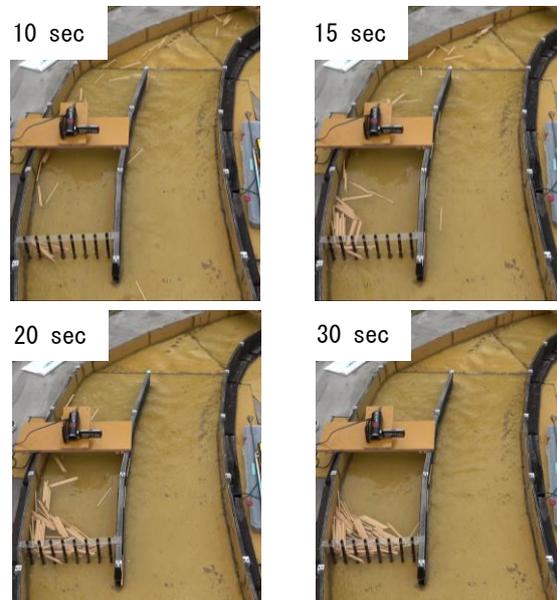


写真-1 流木の流下・堆積過程



写真-2 流木止めへの堆積状況 (60 秒後撮影)

から鉛直流速ベクトルの必要性を実感した。図-4 (右) は、平面 2 次元-3 次元ハイブリッド流体解析を用いた新たな 3 次元流木解析モデルを実験に適用した結果である。平面 2 次元流体解析のみの結果と比べると、実験で見られる流木の沈み込みを再現できていることが分かる。橋脚上流の水面付近に流木が堆積することにより、下降流が発生し、その作用により流木は徐々に沈み込むことが解析結果から明らかとなった。図-5 に、堆積前後の水面形の実験値と解析結果 (計算 4 回の平均値) の比較を、図-6 には堆積割合 (幅と平均値) の実験結果と解析結果の比較を示す。流木堆積による水位上昇量と堆積割合について、実験値とのずれも見られるが、概ね実験の傾向を再現できた。直線水路での基礎的な流木実験に解析モデルを適用することで、流木堆積過程における流れの鉛直方向流速の役割を認識することができ、橋脚に堆積する流木群の堆積形状および水位上昇量などを再現可能な 3 次元解析モデルを構築することが出来た。

(2) 流木捕捉施設を有する水路実験の実施とそれを用いた解析モデルの検証

流木捕捉施設を有する一般河道形状での検討を実施するために、図-7 に示すような水路実験を実施した。蛇行部の外岸側に流木止め 8 本 (0.04m 間隔, 直径 0.01m) を有する流木捕捉施設 (河道と流木捕捉施設の間に仕切り板あり) を設置した。河床勾配は約 1/1000, 水路上下流の水路幅が約 0.4m, 蛇行部となる水路中央付近の水路幅が約 0.8m となっている。河道内に設置される流木捕捉施設が蛇行部外岸に設置されることが多いことから、このような形状とした。

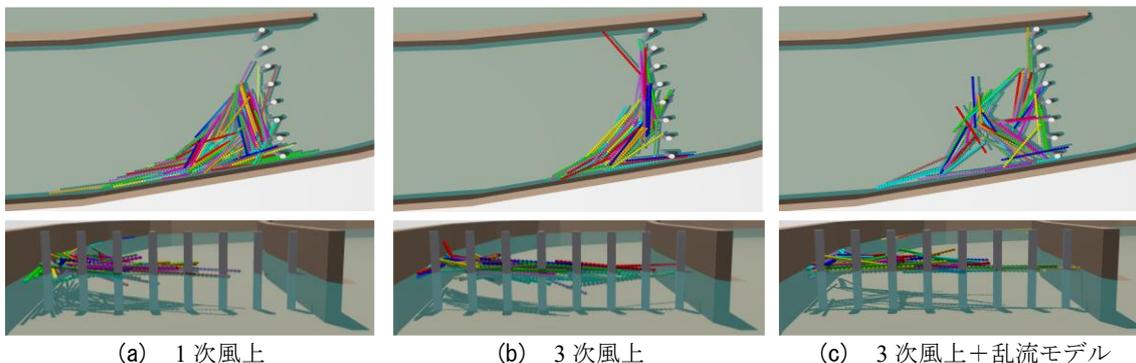


図-9 流木止めへの堆積状況の比較 (60秒後の結果を描画。上：上空から，下：下流側から)

平面的な流況を把握するため、上流から細かく裁断した色紙とインクを流し、その流下の様子を観測した。図-8は、色紙の軌跡を追跡することで得た流線を示す。色紙により得た流線に現れているように、仕切り板で剥離が生じ、仕切り板の外岸側で渦が発生していることが確認できる。また、No.9 外岸部でも常に渦が生じていることが確認できた。写真-1, 2は、実験により得られた流木群の流下・堆積状況の一例を示す。この実験から渦が流木の流下に影響を与えている状況が確認でき、渦により回転する流木や、渦の作用により壁から離れる流木、逆流する流木が見られた。

図-9は、3つの解析モデル(Case1: 1次風上, Case2: 3次風上, Case3: 乱流モデル)により得られた流木の堆積状況を示す。

Case1では、流速ベクトルに乱れがないため、流木群はほぼ同じ向きで流下する結果となる。実験結果に比べて堆積割合が高く、実験結果の堆積形状(写真-2)に比べ、解析の堆積形状は流木止めの右岸側に偏る結果となった。図-9(b)に示すCase2の結果は、Case1に比べると流れの解析では渦の状況を再現でき、流木挙動もこの影響を受けた動きとなるため、実験同様、流木止めの幅いっぱいには堆積する状況となった。乱流モデルを取り入れたCase3は、流れの乱れが強く、4回実施した各解析の流木流下状況が大きく異なり、堆積割合・堆積形状も解析ごとに違いが大きくなった。図-10は、Case2における水面形の堆積前後について実験結果と解析結果の比較を示す(Case3の結果は、Case2とほとんど変わらない結果となった)。Case1では、堆積による水位上昇がほとんど見られない結果となった。上述のように、堆積形状が流木止めの右岸側に偏ったことで、左岸側に流水が通過できる断面が残り、結果として水位変化がほとんど生じなかった。一方、Case2では、流木堆積による水位上昇が生じ、その上昇量は流木止め直上流で実験値とほぼ同じとなった。図-11は、流木堆積割合の実験値と各解析結果の比較を示す。Case1の結果は、上述のように実験値に比べて堆積割合が高い状況となった。Case3は、堆積割合のばらつきが大きく、平均値も一番低い結果となった。Case2は、実験値より若干低い状況となった。以上から、検討した3モデルの中では、流体解析に3次元風上を適用したモデルが、本実験に対しての再現性・安定性が高かったと言える。

本研究では、河道内に設置される流木対策施設の計画・設計に役立つ解析モデルの開発を目的に、実用的な3次元流木解析モデルの構築を行ってきた。当初目的であった曲げ変形も取り扱えるモデルについては十分な検討を実施できなかったが、流れの解析モデルについては当初計画を大きく上回るモデルを構築することができ、流木群の流下・堆積過程や水位上昇量などについて十分な精度で予測可能なモデルを構築することが出来たと考えられる。実用面では、剛体の流木で検討されることが多いため、本研究で開発したモデルは、河道内流木対策施設の計画・設計の高度化と効率化に向けて有用なツールになり得ると考えられる。

参考文献

- 1) 清水義彦, 長田健吾ら: 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.74(5), 2018.
- 2) 長田健吾, 清水義彦: 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.74(4), 2018.
- 3) 二瓶泰雄, 加藤祐一ら: 土木学会論文集, No.803/II-73, 2005.
- 4) Koshizuka, S., Nobe, A., Oka, Y.: Int. J. Numer. Mech. Fluids, 26, 1998.
- 5) Hirt, C.W., Sicilian, J.M.: Flow Science, Inc. Los Alamos, New Mexico, 1985.

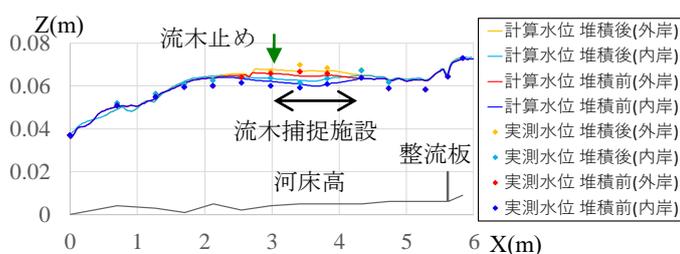


図-10 流木堆積前後の水面形の実測値と解析値の比較 (3次元風上モデル: Case2)

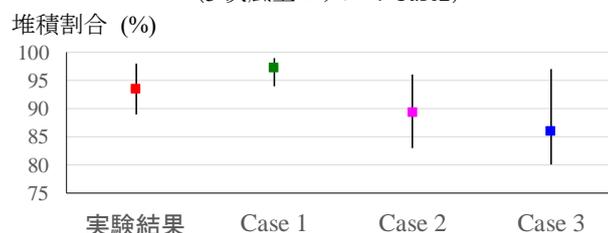


図-11 各解析モデルによる堆積割合と実験値の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 長田 健吾, 清水 義彦, 松本 礼央, Robert ETTEMA	4. 巻 77(2)
2. 論文標題 河道内流木対策施設の設計を支援する3次元流木解析法の開発とその検証	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1(水工学)	6. 最初と最後の頁 I_679-I_684
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejhe.77.2_I_679	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Kengo Osada, Yoshihiko Shimizu, Robert Ettema, Enkhzaya EnkhTUR	4. 巻 10
2. 論文標題 A numerical method for simulating 3-D accumulation of woody debris at bridge piers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The proceedings of 10th Conference on Fluvial Hydraulics, River Flow 2020	6. 最初と最後の頁 1666 - 1675
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Yoshihiko Shimizu, Kengo Osada, Shuji Iwami, Robert Ettema	4. 巻 10
2. 論文標題 A numerical study of retention facilities for accumulating woody debris in rivers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The proceedings of 10th Conference on Fluvial Hydraulics, River Flow 2020	6. 最初と最後の頁 1676 - 1684
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 清水義彦, 長田健吾, 岩見収二	4. 巻 75(2)
2. 論文標題 河道湾曲部に連続配置した流木貯留施設の設計に関する数値解析とその考察	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1(水工学)	6. 最初と最後の頁 I_1429 - I_1434
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejhe.75.2_I_1429	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 清水義彦, 長田健吾, 岩見収二, 草場智哉	4. 巻 74(5)
2. 論文標題 河道に設置した流木貯留施設の効果評価に関する数値解析	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1 (水工学)	6. 最初と最後の頁 I_1069-I_1074
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejhe.74.5_I_1069	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	清水 義彦 (Shimizu Yoshihiko) (70178995)	群馬大学・大学院理工学府・教授 (12301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------