

しなりを有する植生模型を用いた水理実験*

秋田大学理工学部

室橋 慧太

秋田大学大学院理工学研究科 齋藤 憲寿・渡辺 一也

1. はじめに

近年、河川では大雨による水害が増加している。その一例として、2023年7月に秋田県五城目町にて馬場目川の氾濫が発生した。水害を引き起こす要因として考えられるのが流木と植生である。斜面崩壊や土砂崩れにより、河道周辺の樹木が河道内に供給され、堆積することで氾濫を発生させる¹⁾。河道内の植生は流水抵抗の働きをし、水位が上昇することで洪水が発生する²⁾。既往研究として、植生が流れに与える影響に関する研究、流木の挙動に関する研究などが行われているが、植生と流木が相互作用する際の研究は行われていなかった。それを踏まえて、剛体植生³⁾を用いたもの、柔軟植生⁴⁾を用いたもので、流木が相互作用する際の検討が行われたが、材料や形状によってしなり方が異なるという問題があった。そこで、しなり後の形状を固定させた植生を用いることで、しなりによる影響に着目して実験を行った。

2. 研究対象

本研究では、秋田県五城目町に位置する、県内最大級の二級河川である馬場目川を対象とした。馬場目川圏域河川整備計画より、流路長 47.5 km、流域面積 910.5 km² である。中流部に存在する富津内川合流点（西の橋～保呂瀬）の川幅は 30～50 m となっている。川幅 30 m の河川とし、縮尺を 1/100 として実験を行った。馬場目川を対象とした理由として、柔軟植生であるヤナギ類が豊富でしなりの影響を考慮し易いためである。

3. 実験条件

(1)水路

実験で用いる造波水路の概略（側面）を図-1 に示す。幅 0.30 m、高さ 0.50 m、水路長 12.0 m、勾配 1/300 である。水路内には植生層を設置し、0.80 m 上流側から流木 40 本を毎秒約 3 本ずつ投下して行った。これは、秋田県の荒川に流入した流木数⁵⁾を参考としている。水路壁面の影響を抑制するため水路中央に投下した。流木長、植生の密生度、流量の3種類のパラメータを変更し、流木堆積時の流木の挙動、流木堆積率、水位上昇率について検討を行った。各実験は5回ずつ行っている。

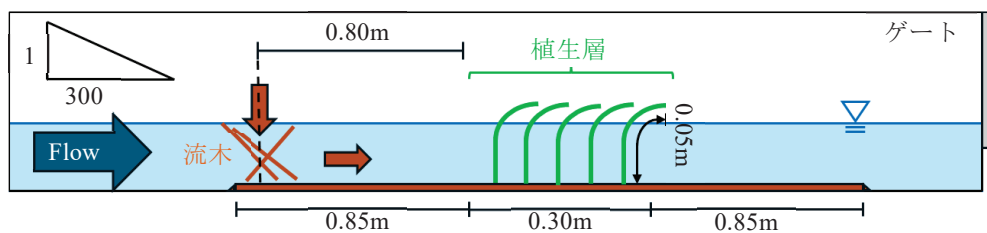


図-1 造波水路の概略（側面）

* Hydraulic experiments using flexible vegetation models by Keita MUROHASHI, Noritoshi SAITO and Kazuya WATANABE

(2)流木模型

流木模型を図-2 に示す。植生として秋田県に多く存在する杉を対象としており、長さ 10 m, 15 m, 20 m の 3 種類で、直径 0.5 m を想定している。実験では、1/100 スケールの長さ 100 mm, 150 mm, 200 mm で直径 5 mm のものを使用した。比重は乾燥状態で 0.40~0.48, 湿潤状態で 1.06~1.22 である。既往研究の直立植生では、乾燥状態で 0.42~0.50, 湿潤状態で 0.81~0.88 である。

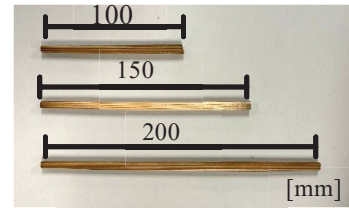


図-2 流木模型

(3)植生模型

図-3 に植生模型を示す。これは、積層式 3D プリンター (Creality Ender3 V3 SE) で印刷をしたものであり、材料として PLA 樹脂を使用している。高さ 5 m の柔軟植生を対象とし、全長を 1/100 スケールの 50 mm として半分の 25 mm の位置でしなり始めるように設計をした。材料によってしなり方が異なるが、しなり形状を固定することでしなりによる影響に着目することができる。なお、既往研究では、直立の剛体植生として直径 6 mm, 長さ 50 mm の真鍮を使用していた。

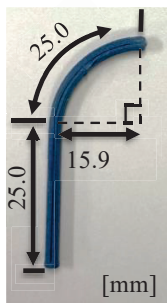


図-3 植生模型

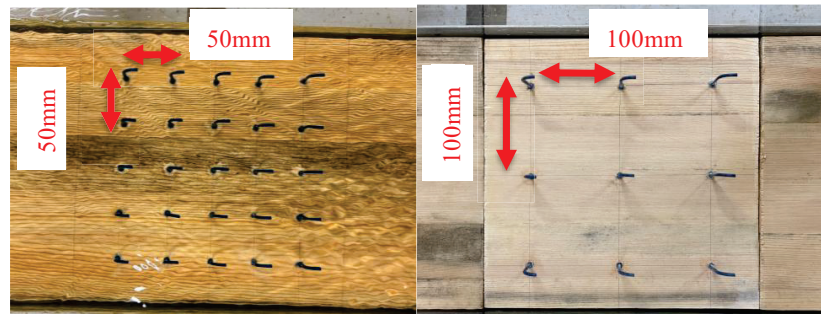


図-4 植生の密生度(左：高密度度，右：低密度度)

図-4 に植生の密生度を示す。植生層の範囲は 300 mm×300 mm の正方形であり、配置として高密度度、低密度度の 2 種類を使用した。高密度度は 50 mm 間隔で 25 本 (5 本×5 列), 低密度度は 100 mm 間隔で 9 本 (3 本×3 列) の植生模型を設置している。これは既往研究の大森ら³⁾と同様の配置である。密生度の計算式⁶⁾を式(1)に示す。

$$a_s(\%) = n_s D_s / S_s^2 \quad (1)$$

a_s は密生度 (%), n_s は単位領域中の植生本数, D_s は植生の直径 (m), S_s は単位領域一辺の長さ (m) である。密生度について、赤堀ら⁶⁾は 0.30 を粗, 0.70 を中, 2.50 を密としている。大森ら³⁾は、高密度度を 1.67, 低密度度を 0.60 として植生を作成。本研究では、高密度度を 0.80, 低密度度は 0.30 として植生模型を作成した。

(4)流量

秋田県五城目町馬場目川の計画高水流量 (680 m³/s) を基準とし、洪水流量 (833 m³/s), 平水流量 (558 m³/s), 低水流量 (286 m³/s) に設定した。縮尺より, 0.0083 m³/s, 0.0056 m³/s, 0.0029 m³/s である。算出にはフルードの相似則を用いている。

(5)植生模型の選定実験

植生の直径を決める段階で、外力の影響で形状変化しない植生模型を選定した。高密生度の一列を用意し、洪水流量 $0.0083\text{m}^3/\text{s}$ 、流木長 200mm を 40 本束ねたものを用いて行った。直径を 0.5mm 間隔で変化させていった結果、直径 3.0mm で元の形状からそれ以上変形しなかったため、これを採用した。また、植生前後の水位変化についても検討した。図-5 に選定時の水位の測定位置（上面）を示す。左側が流木なし、右側が流木堆積時の様子である。手前の方から、植生前後に①～⑤と番号を振っており、その位置の水位を計測した。

選定時の水位変化の様子（側面）を図-6 に、選定時の水位変化を図-7 に示す。赤は上流、水色は下流であり、点線は流木なしのとき、実線は流木堆積時の水位を表している。上流の平均水位は 24.1mm 増加、下流の平均水位は 18.8mm 減少した。これは、植生と流木だけでなく、板材の段差による影響も大きいと考える。下流（流木堆積時）では①と⑤のみほとんど水位変化していない。これは、流木の端部と壁面の間を通る水が影響しているためであると考えられる。

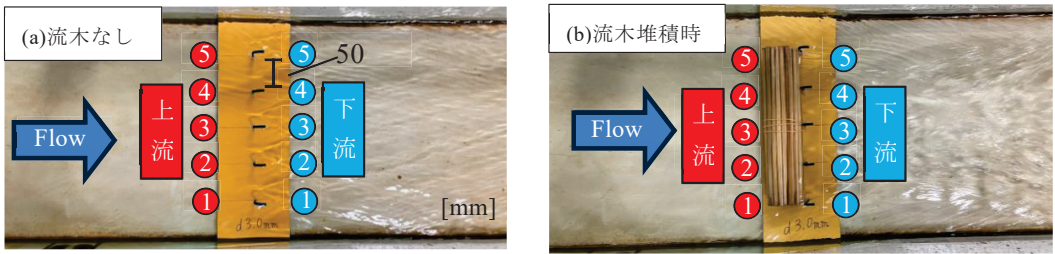


図-5 選定時の水位の測定位置（上面）

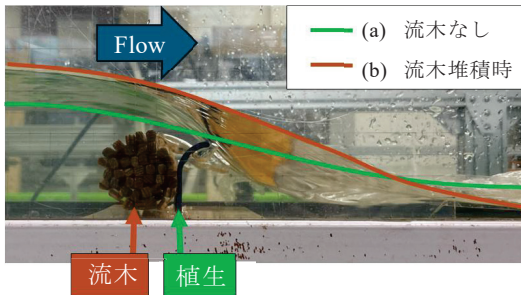


図-6 選定時の水位変化の様子（側面）

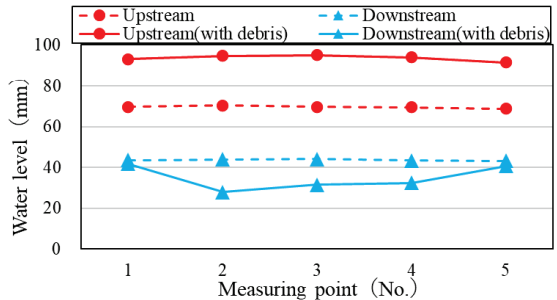


図-7 選定時の水位変化

4. 実験手法

植生模型の選定時、板材の段差と壁面による流れへの影響があることが確認できた。それを踏まえ、 0.3m の植生層前後に 0.85m の板材を設置し、段差の部分にはスロープ材を設け、流れに影響が出ないように実験を行った。

流木堆積時の①流木の挙動、②流木堆積率、③水位上昇率について検討した。①流木の挙

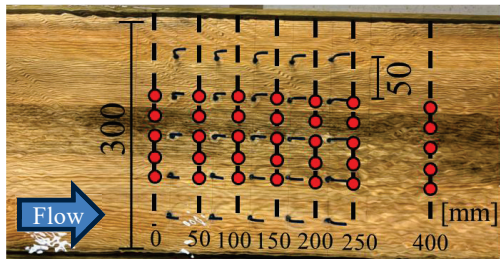


図-8 高密生度植生層の水位測定位置（上面）

動では、水路の上面および側面から、植生層に堆積する流木の挙動を、写真や動画を用いて観察した。②流木堆積率では、全流木本数（100%）とし、植生層に堆積した流木の本数を堆積率として式（2）で算出した。③水位上昇率では、流木堆積時の植生各列の水位を平均で算出し、

$$\text{流木堆積率(\%)} = \frac{\text{植生に堆積した流木本数}}{\text{全流木本数}} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{水位上昇率(\%)} = \frac{\text{流木堆積時の水位(mm)}}{\text{流木なしの水位(mm)}} \times 100 - 100 \quad (3)$$

それぞれの水位上昇率を式(3)で算出した。高密度植生層の水位測定位置（上面）を図-8に示す。植生各列の前後（0～250 mm の位置）、植生層後方（400 mm の位置）で水位の測定位置を5か所ずつ設けた。水位の測定にはポイントゲージを用いている。壁面側の植生は、壁面による流れの影響を受けてしまうため、中央側の水位を測定し、その平均を算出して水位上昇率を求めた。

5. 実験結果

高密度植生層を用いて流量3種類、流木長3種類で計9パターンの実験を行った。また、大森ら³⁾の剛体植生との比較を行った。流木なしのときの各流量の水位を図-9に示す。既往研究と本研究において、どの流量でも上流側から下流側にかけて水位が右肩下がりになっている。植生層のみでも水位に影響を与えていることが分かる。これを基準に流木堆積時の水位変化を評価した。

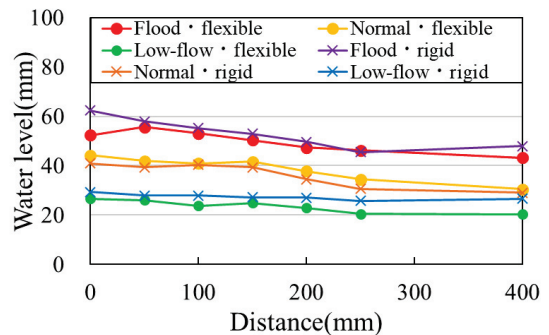


図-9 流木なしの各流量における水位

(1)流木の挙動

高密度・洪水流量における流木堆積率の様子を図-10に示す。上段が本研究のしなりを有する植生、下段が既往研究の剛体植生であり、それぞれ側面から観察したものである。剛体植生において、流木長200mmでは上流部に、150mmと100mmでは植生層後方に堆積する傾向にある。しなりを有する植生では、流木長にかかわらず一列目に堆積しやすい傾向にあった。流木長が短くなるにつれて、植生層後方にも堆積していることが確認できる。どちらの植生で

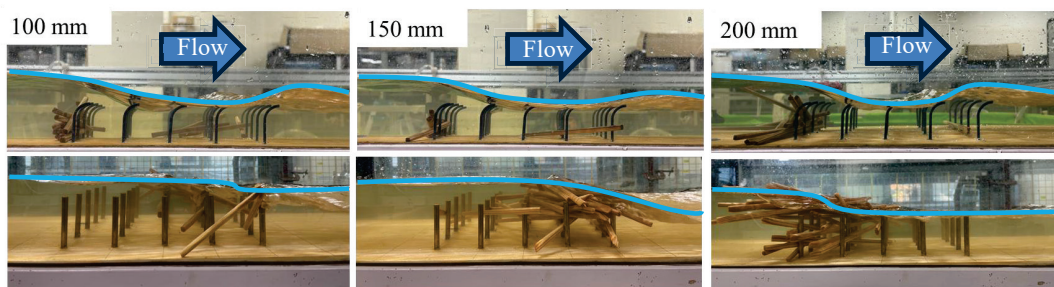


図-10 高密度・洪水流量における側面から見た流木堆積時の様子
上段：しなりを有する植生，下段：剛体植生

も流木は植生上部を通過していったが、しなりを有する植生では後方に堆積する流木は少なく流下していくものが多かった。また、図-10を見ると、それぞれの植生で流れが異なっている。剛体植生では、流木の堆積前後で水位が上昇および減少しているが、しなりを有する植生では、堆積位置を起点に上昇と減少を繰り返すような波形となっている。低水流量時、平水流量時では、流木長にかかわらず、どちらの植生でも同様に一列目に堆積する傾向にあった。また、低水流量では、植生層に到達しない留まる流木が確認できた。

(2) 流木堆積率

各流量の流木堆積率を図-11に示す。上段が洪水流量、中段が平水流量、下段が低水流量の結果である。剛体植生では、洪水流量、平水流量において流木長が長くなるほど堆積率が高くなる傾向にあるが、低水流量では流木長が長くなるほど堆積率は低くなる傾向にある。しなりを有する植生では、傾向は概ね同じであるが、150 mmのみ傾向から外れている。洪水流量では、剛体植生に比べてしなりを有する植生の方が堆積率を半分かそれ以下に抑えていた（剛体植生：約50～80%，しなりを有する植生：約19～45%）。また、平水流量、低水流量では、しなりを有する植生の方が流木堆積率は大きくなっていた。

(3) 水位上昇率

各流量の水位上昇率を図-12に示す。洪水流量において、剛体植生は上流部や中流部の水位が上昇している（約15～37%）。しなりを有する植生では植生層の一列目で水位が上昇しており（約15～27%）、どの流木長でもグラフの形状が近似した。また、大きな水位上昇はなく、緩やかになっている。平水流量において、剛体植生は植生層の一列目で水位上昇しており、しなりを有する植生は、流木長200 mm、100 mmでは植生層の一列目で水位上昇しているが、150 mmのみ上流部や中流部で水位上昇している。また、400 mmの位置において、剛体植生はどの流木長でも約30%水位が上昇しているのに対し、しなりを有する植生では0%に近づくように水位が上昇している。低水流量において、どちらの植生でも一列目で水位が上昇している。洪水時、平水時と比べて水位上昇率が非常に大きく、しなりを有する植生の流木長200 mmと150 mmでは約100%の上昇率となっている。上昇と減少を終えてから（150 mmの辺りから後方）はどちらも水位が安定している。上昇率は異なるが、どちらの植生においてもグラフの形状が近似している。

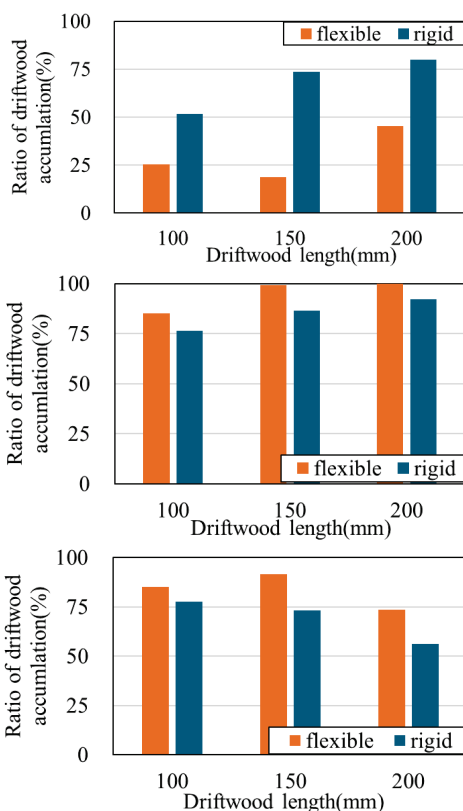


図-11 各流量の流木堆積率
上段：洪水流量，中段：平水流量，
下段：低水流量

6. 考察

(1)流木の挙動

どちらの植生においても、植生上部を越えるように流下したが、しなりを有する植生の方が後方に堆積しにくい結果となった。これは、水位が植生高さよりも高く、しなり部分による影響で流木が堆積せずに後方へ流下しているためであると考えられる。

(2)流木堆積率

洪水流量において、しなりを有する植生の方が堆積率は小さくなっていた。(剛体：約 50～80%，しなり有：約 20～40%)。平水流量、低水流量では、本研究の方が堆積率は大きくなっているが、これは既往研究で使用した流木の比重よりも値が大きくなっているため、堆積本数が増加したのが要因として考えられる。

(3)水位上昇率

しなりを有する植生の方が、水位上昇している位置から後方に与える影響が小さくなっており、水位が安定している。これは、しなりの形状によって越流を繰り返すことで流速が低下していることが要因として考えられる。

7. おわりに

今回、高密度植生モデルを用いて合計 9 パターンの実験を行った。洪水流量では、しなりによる影響で流木の堆積を抑制しており、水路の後方に与える影響を小さくすることが分かった。また、流量が小さいほどしなりを有する植生の方では水位が上昇しやすいことが分かった。今後の展望として、同様のパラメータを利用して低密度でも実験を行い、高密度との結果の比較および考察を行う。

参考文献

- 1) 国土交通省, 土砂・洪水氾濫時に流出する流木の対策計画の基本的な考え, <dosyakouzuihanran_ryuuboku_r0508.pdf (mlit.go.jp)>(2025 年 7 月アクセス)
- 2) 吉田圭介, 前野詩朗, 藤田駿佑, 松山悟, 岩城智大, 平井康隆: 旭川における植生分布の経年変化を考慮した洪水流の数値解析, 土木学会論文集 B1(水工学), 第 71 巻, 第 4 号, pp.I_1039-I_1044, 2015.
- 3) 大森蒼士, 齋藤憲寿, 渡辺一也, 自見寿孝: 植生および流木の相互作用が洪水流に与える影響, 東北地域災害科学研究, 第 59 巻, pp.63-68, 2023.
- 4) 坂入海帆, 齋藤憲寿, 渡辺一也, 自見寿孝: 柔軟性を有する植生および流木が洪水流に与える影響について, 東北地域災害科学研究, 第 60 巻, pp.107-112, 2024.
- 5) 松林 由里子: 2017 年秋田豪雨によって水田に堆積した流木の特徴: 東北地域災害科学研究, 第 56 巻, pp.1-6, 2020.
- 6) 赤堀 良介, 春日井 勇輝: 植生内の流れの構造と浮遊砂堆積状況の関連について, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.70, No.2(応用力学論文集 Vol.17), I_753-I_760, 2014.

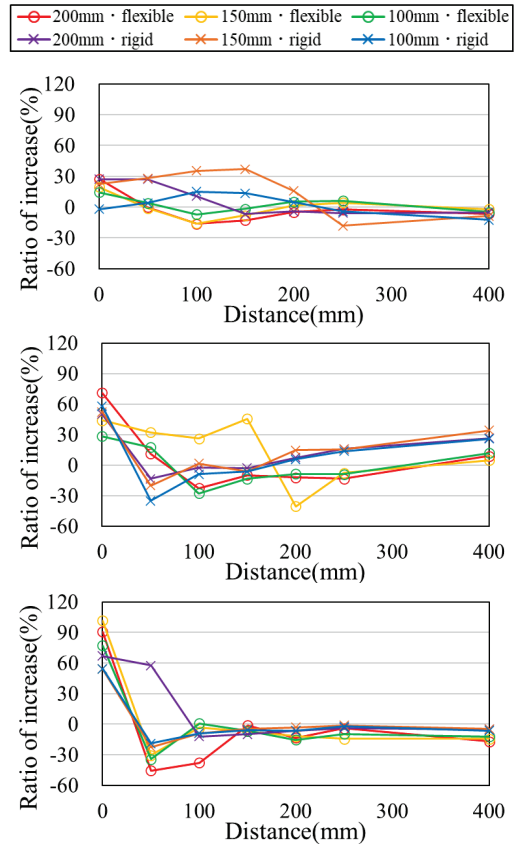


図-12 各流量の水位上昇率

上段：洪水流量，中段：平水流量，
下段：低水流量