

荒川熊谷地区を対象とした 河道内の樹林化予測モデルの開発

DEVELOPMENT OF A SIMULATION MODEL FOR FORESTATION IN ARAKAWA RIVER

黒田直樹¹・西村達也²・関根秀明³・浅枝隆⁴・石井豊昭⁵

Naoki KURODA, Tatsuya NISHIMURA, Hideaki SEKINE, Takashi ASAEDA, Toyoaki ISHII

¹正会員 工修 株式会社建設技術研究所 中部支社河川部 (〒460-0003 愛知県名古屋市中区錦1-5-13)

²正会員 工博 株式会社建設技術研究所 東京本社河川部 (〒330-0071 埼玉県さいたま市浦和区上木崎
1-14-16 CTIさいたまビル)

³非会員 株式会社建設技術研究所 東京本社環境部 (同上)

⁴正会員 工博 埼玉大学大学院教授 理工学研究科環境制御工学専攻
(〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)

⁵非会員 国土交通省関東地方整備局荒川上流河川事務所河川環境課
(〒350-1124 埼玉県川越市新宿町3-12)

In recent years, sandbars consisting of gravel have been disappearing from many rivers in Japan. In Arakawa River such phenomenon has been observed from the latter half of 1970's. However, much of the vegetation on the sandbar was flushed by the flood caused by typhoon 9 in September, 2007, and the reproduction of vegetation was observed about 1 year later. The methodology for effective management of tree growth in rivers has not yet been established.

In this study, we developed the simulation model that could predict long-term tree growth and flushing of trees on the sandbar of Arakawa River. Using this model, we reproduced the flushing of trees during the flood of September, 2007, and forestation of the sandbar in the last 30 years. Furthermore, we conducted simulation for the next 5, 10, and 15 years for a middle-term prediction of sandbar forestation.

Key Words : *forestation, Robinia pseudoacasia L. Biomass, simulation model, sandbar, flood, bed material*

1. はじめに

近年、わが国の多くの河川において砂礫河原が減少し、これに伴う河道内樹木の拡大が顕在化している事例が確認されている。砂礫河原は、カワラバタやカワラヨモギに代表される河原環境固有の動植物の生息・生育場であること、河川特有の原風景を形成する要素であることなどから、環境上、保全・回復が重要な課題である¹⁾。また、河道内樹木の拡大は、生物相の変化をもたらすという環境面の問題に加え、洪水時に河積阻害の要因となること²⁾、樹木群により生じる偏流の発生による護岸や根固の安全性の低下要因となることなどから治水上の問題となる³⁾。また、このような河道内に繁茂した樹木は、洪水によって流出し、流木量の増加要因となっている³⁾。

関東地方を流れる荒川水系荒川の中流部（以降、「荒川熊谷地区」と呼ぶ）においても、他の河川と同様に、昭和50年代頃から砂州上に樹木群が繁茂しはじめ、砂州

が固定化されてきていた^{4),5)}。しかし、平成19年9月に発生した台風9号の大出水により樹木群の多くが倒伏・流出し、一年後には再び繁茂するという、樹木群の拡大、流出、再生までの状況が現地観測等により記録された。

このような樹木群の繁茂によって、治水や環境上問題となっている河川では、樹木群の伐開等が試行的に行われている⁶⁾が、河道内樹木の効率的・効果的に管理、あるいは、砂礫河原の保全・回復のための手法は今日でも確立されていない。その要因は、木本類の消長機構を考慮できるモデルが不十分であるため、対策後の木本類の長期（対策の効果の持続性）の予測が困難であること、木本類の洪水時の流出機構を考慮できるモデルが未確立であることが挙げられる。植生の消長を予測するモデルの研究は最近行われてきている^{7),8)}。藤田ら⁷⁾は、平面二次元河床変動計算モデルと植生の遷移機構モデルを組み合わせ、河道流量の変化による河床変動と植生の遷移・流出機構を再現している。このモデルは、植生の流出現

象を簡単な水理量で判断しており、木本類の侵入は考慮しているが、成長までは考慮することができていない。八木澤ら⁸⁾は、洪水によって破断・倒伏した破壊形態が植生遷移を遅らせる効果を取り入れた植生動態モデルを構築し、植生の破壊、回復、拡大現象を再現しているが、砂州の地形変化による植生流出や木本類の生長については考慮していない。

本研究では、荒川熊谷地区を対象に、樹林化の長期的な予測、および洪水時の木本類の流出状況を表すため、平面二次元河床変動解析モデルに、木本類のバイオマスを考慮した生長モデルの組み込み、洪水時における木本類の流出機構の組み込みを行い、平成19年9月洪水における木本類の流出状況、近年30ヵ年における河道内樹木の拡大状況の再現性を確認した。さらに、中期的な予測として、5年、10年、15年後における河道内樹木群の挙動を定量的に明らかにしたものである。

2. 荒川熊谷地区の樹林化の現状

(1) 荒川熊谷区間の概要

荒川熊谷区間は、河口からおよそ75kから85kの区間に位置し、河床勾配は約1/400、代表粒径は約30mmのセグメントIに属している。

荒川熊谷区間が位置する荒川の中流部では、カワラバッタやコアジサシ等の砂礫河原特有の生物が確認されている一方、砂州上の比高の大きい個所などでは、外来種であるハリエンジュの繁茂が見られる。木本類の構成は、ヤナギ類、ハリエンジュ、ネムノキが上位3位を占めている。

(2) 平成19年9月洪水による樹木の流出状況

平成19年9月の台風9号において、荒川では大出水が発生し、熊谷水位観測所では、既往最大水位を記録した。寄居地点流量規模は約4300m³/sであり、平成11年8月に発生した大規模な洪水につぐ洪水であった。

平成19年9月洪水前後の航空写真は、写真-1の上から2番目と3番目のものであり、この洪水において、特に砂州上で多くの木本類が流出した。この砂州では、洪水の前後において木本類の全数調査を実施しており、その結果を図-1に示す。これより、合計4295本中約半数の木本類が流出したことがわかる。

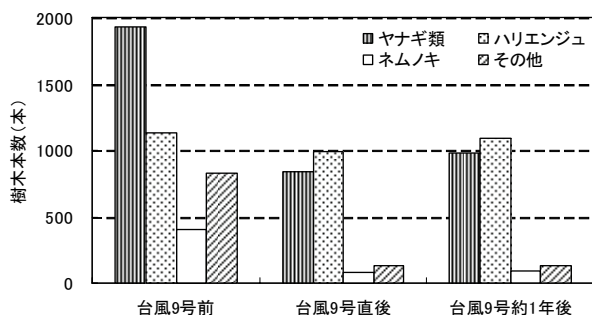


図-1 木本類の全数調査結果

(3) 平成19年9月洪水後の樹木の再繁茂状況

砂州上では、平成19年9月洪水から約1年3ヶ月後の平成20年12月にも木本類の全数調査を実施しており、再繁茂した木本類の種類、位置を平面図上にプロットすると図-2のとおりとなる。これより、再繁茂の形態は、倒伏木から再生成長する場合と、種子の漂着による萌芽の場合とに分類することができ、前者の割合のほうが支配的であること、洪水後の約1年間で、木本類が再繁茂する状況となっていることが確認できる。

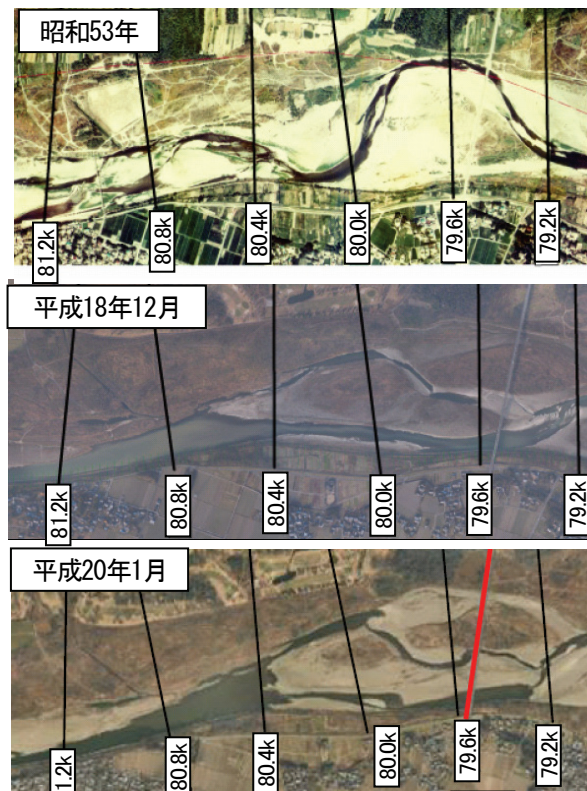


写真-1 荒川熊谷区間の砂州の変遷

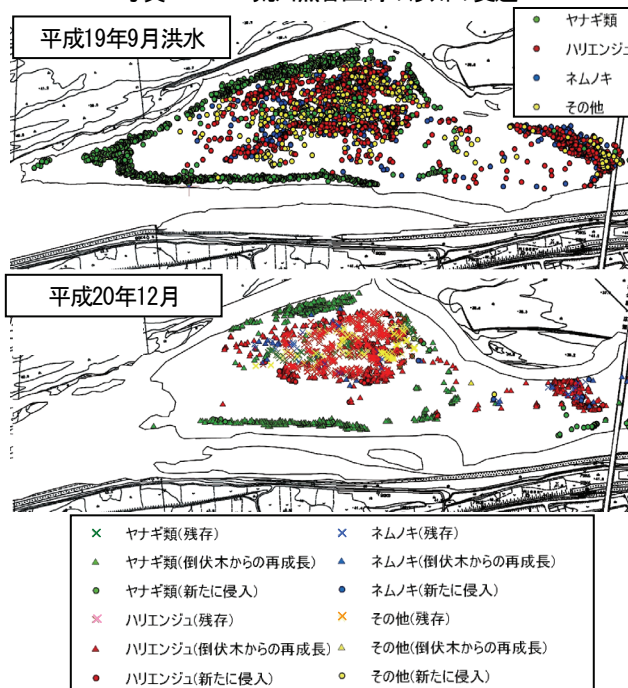


図-2 平成19年9月出水前後の繁茂状況

3. バイオマスを用いた植生消長モデルの概要

(1) 植生消長モデルの構成

本研究で用いる植生消長モデルは、河道内の流れや河床変動状況を解析する物理環境予測モデルと植生の生長・流出を表すモデルによって構成されており、計算フローは図-3のとおりである。モデルの概要を以下に示す。

a) 物理環境予測モデルの概要

物理環境予測モデルは、洪水時等の平面的な流況および河床変動状況を解析することができるモデルとして、長田ら⁹⁾による一般座標系を用いた平面二次元流れの解析手法に、混合粒径の河床変動計算モデルを組み合わせたものである。モデルの基本仕様を表-1に示す。

b) 植生生長モデルの概要

植生の生長モデルは、木本類と草本類に分け、以下のようモデル化した。

表-1 平面二次元河床変動計算の基本仕様

項目	細目	内容
水理計算	手 法	一般座標系平面二次元不定流計算
流砂量計算	限界掃流力	Egiazaroffの修正式
	掃流砂量	縦断方向：芦田・道上式 横断方向：長谷川の式
	浮遊砂量	Lane-kalinske式
	沈降速度	Rubey式
河床変動計算	上流端供砂条件	平衡流砂量
	河床変動計算	砂礫の粒径別の連続式
離散化手法等	数値解析	有限体積法
	移流項	一次精度の風上差分
	時間積分	Adams-Bashforth 法

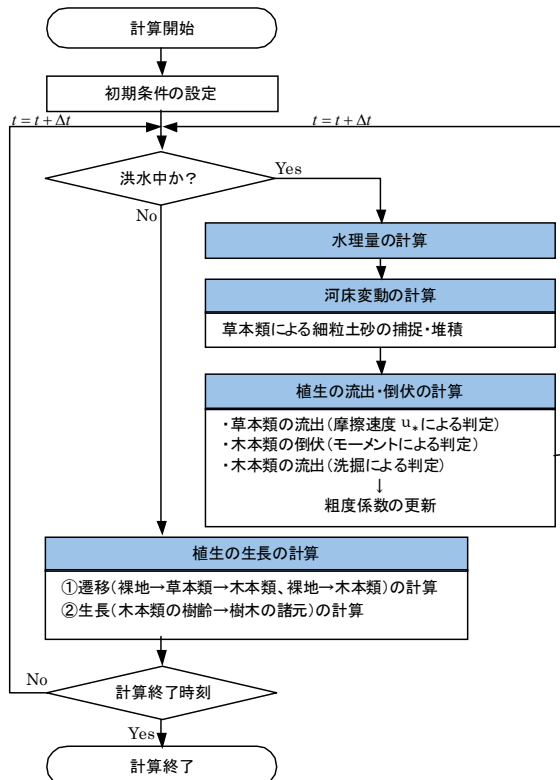


図-3 バイオマスを用いた植生消長モデルの計算フロー

木本類については、裸地や草本類からの遷移、および遷移後の樹高や胸高直径等の生長を考慮した。遷移については、藤田らが提案している植生消長の計算手法⁷⁾の考え方を用いた。生長モデルについては、浅枝らが流れのない状態での木本類を対象に、年間生長量を次式に示すバイオマス量によってモデル化することが有効であることを示しており^{10),11)}、そのモデルを用いることにした。

$$\frac{dB_T}{dt} = \sum_{i=layer} Ph_{(i)} B_n - \sum_{n=organ} \left\{ \left[\beta_n \theta^{T-T_0} \left(\frac{K_{Rage}}{K_{Rage} + age} \right) + C \right] + \gamma_n \theta^{T-T_0} \left(\frac{K_{Dage}}{K_{Dage} + age} \right) \right\} B_n \quad (1)$$

ここに、 B_T ：総バイオマス、 B_n ：器官毎のバイオマス、 $Ph_{(i)}$ ：高さ方向に分割した層*i*における総生産量、 n ：器官 (*Leaf, Branch, Stem, Root*)、 β_n ：最大呼吸量、 θ ：代謝量に対する温度の影響を表す係数、 age ：樹齢、 C ：係数、 γ_n ：最大枯死量、 T ：日気温、 T_0 ：20℃、 K_{Rage} ：呼吸に対する老化の影響に対する半飽和係数、 K_{Dage} ：枯死に対する老化の影響に対する半飽和係数である。

バイオマス量は、樹齢の関数として定式化され、木本類の主要な組織である葉、枝、幹、埋没幹、および根毎に算出される。検討にあたっては、荒川熊谷地区における現地調査結果から、樹齢を胸高直径の関数として設定することにより、バイオマス量と胸高直径の相互変換を可能としたほか、後述する木本類の流出関数に反映した。

草本類については、地上部は毎年更新されるため、木本類に対する射光の影響は少ないことから、木本類の生長に対する影響は考慮しないものとし、次のとおりモデル化した。草本類の成長は、裸地の継続年数と細粒土砂の堆積厚に大きく影響を受ける。そのため、藤田ら⁷⁾の提案したものと同様に、裸地の継続年数と細粒土砂の堆積厚により侵入するモデルを用いた。

c) 植生流失モデルの概要

草本類の流失は土壌の流失に伴って生ずる。そのため、出水時において河床に働く掃流力の大きさに従い倒伏・流出させる方法⁷⁾を用いることにした。具体的には、河床を構成している河床材料の最大粒径が移動するような掃流力が発生した場合には、草本類は流出しているものとして想定し、対象区間における河床材料の最大粒径（概ね100mm）に対応する移動限界摩擦速度0.28m/sを流出条件とした。

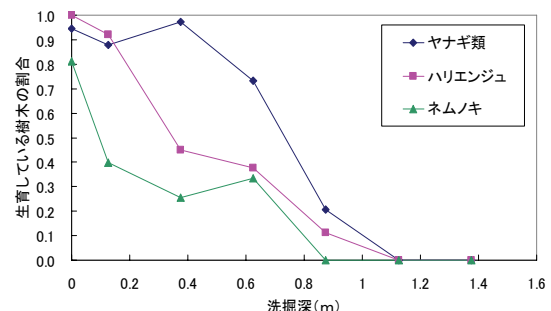


図-4 洗掘深と生存していた個体数の割合

木本類は、出水時の冠水区域に作用する流水モーメントにより倒伏する^{12),13)}ほか、河床洗掘に応じて流出するものとした。倒伏については、樹木の倒伏限界モーメント M_c と樹木に作用する流水モーメント M を求め、 $M \geq M_c$ となったときを条件とした。 M_c および M の算出方法は「河川における樹木管理の手引き」の考え方¹³⁾に従った。流出については、平成19年9月洪水後に対象砂州において、洗掘深と生存していた木本類の個体数の割合を調査し、図-4の結果を得ていることから、ここでは、図中の3種類の植生の平均値として、0.5mの洗掘深で50%の樹木が流出、1.0m以上の洗掘深では全ての樹木が流出するものとした。

(2) 解析手順

解析は、図-3に示すように、洪水時には時刻流量、平水時には日流量を与え、物理環境予測モデルによって平面的な水理量と河床高を算出した。その後、攪乱が生じない平水時には草本類や木本類が毎年侵入・生長し、出水時の流出条件に達した時点で倒伏、流出するものとして計算を行った。木本類の侵入は支配面積の大きいハリエンジュを対象とした。植生の遷移は、裸地状態の年数と細粒土砂の堆積厚によって判定するものとし、現地の状況から草本類は1年と8cmとした。木本類は、平成19年9月洪水後の侵入状況から、細粒土砂の堆積厚に関係なく1年間で侵入するものとした。

4. モデルの検証

(1) 平成19年9月洪水の検証

構築した平面二次元流解析モデルについて、草本類・木本類の流出状況の再現性を確認するため、平成19年9月洪水を対象に検証計算を行った。

a) 計算条件

計算条件は表-2に示すとおりである。初期河道は、平成19年9月洪水前の平成18年航空レーザ測量データを用いた。草本類の粗度係数は、草本類の繁茂領域を対象に、平成19年9月洪水の再現粗度係数 ($n=0.040$) を一律で与えた。木本類の粗度係数については、樹木諸元より得ら

表-2 計算条件 (平成19年9月洪水の検証)

項目		内容
初期河道		平成18年航空レーザ測量データ
対象区間		76.4k (熊谷観測所) ~82.0k
検証対象期間		平成19年9月洪水
下流端水位		熊谷観測所時刻水位
上流端流量		寄居観測所時刻流量
低水路	みお筋	平成19年9月洪水再現粗度係数 ($n=0.022$)
粗度係数	植生	草本類: 平成19年9月洪水再現粗度係数 ($n=0.040$) 木本類: 透過係数を用いた粗度係数
高水敷粗度係数		平成19年9月洪水再現粗度係数 ($n=0.050$)
河床材料		みお筋: 当該区間におけるH16河床材料調査 砂州上: 砂州上の河床材料調査結果 (H19調査)
供給土砂量・粒径		供給土砂量 : 流砂能力見合いの土砂量 供給土砂粒径: H16河床材料調査

れる透過係数から求めた。透過係数の算定に必要となる木本類の諸元は、平成19年9月洪水前に実施された木本類の全数調査結果をメッシュごとに集計し、その平均値を与えた。

b) 計算結果

図-5は、洪水後に観測された左右岸痕跡水位と計算による最高水位とを比較したものである。計算水位は痕跡水位の縦断的变化を概ね再現できていることがわかる。また図-6は、草本類・木本類の流出状況の再現計算結果を示したものである。この図を見ると、特に本研究で着目している木本類の流出状況についても、実績をよく再現できていることがわかる。

(2) 中期間の検証

a) 計算条件

中期間の草本類・木本類の消長の再現性を確認するため、近年約30カ年を対象に検証計算を行った。中期的な検証計算の条件は表-3に示したとおりであり、計算期間は、昭和50年から平成19年の約30年間とした。初期河道は、昭和49年定期測量データを用いた。境界条件は、上流端に寄居観測所の観測流量を与え、下流端に熊谷観測所の水位を与えた。初期条件である昭和49年当時の木本

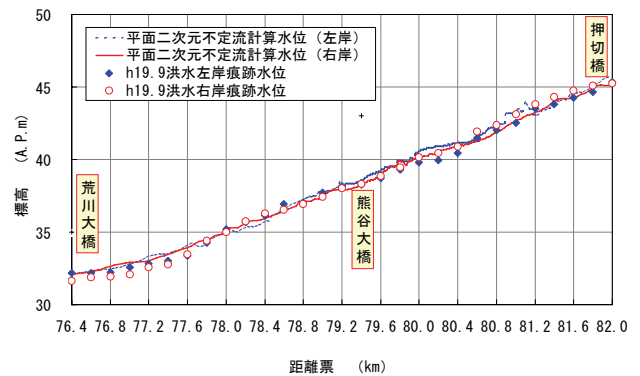


図-5 痕跡水位再現計算結果

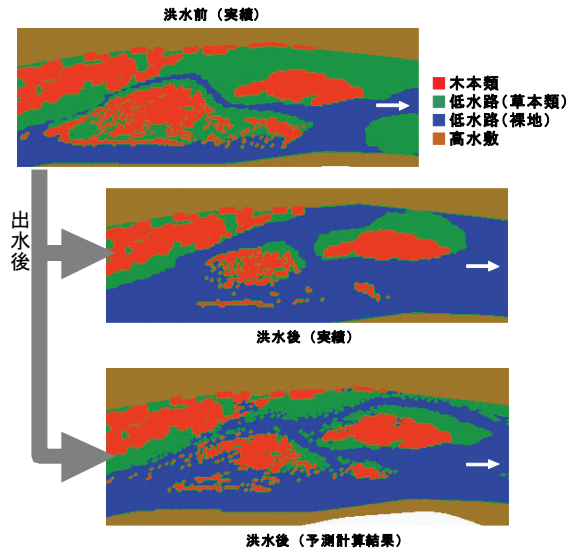


図-6 草本類・木本類の流出状況再現計算結果 (平成19年9月洪水の検証結果)

表-3 中期間の検証の計算条件

項目	内容
初期河道	昭和49年定期測量データ
対象区間	76.4k(熊谷観測所)～82.0k
検証対象期間	昭和50年～平成19年
下流端水位	熊谷観測所時刻水位
上流端流量	寄居観測所流量
低水路 粗度係数	みお筋 植生 n=0.030
高水敷粗度係数	平成19年9月洪水の検証と同じ
河床材料	
供給土砂量・粒径	

類の諸元および繁茂状況は不明であったため、航空写真より判読した植生の繁茂領域はすべて草本類として扱い、初期条件とした。木本類の生長に関するパラメータ（アロメトリー）は当該区間の優先種のひとつであるハリエンジュのものを与えた。

b) 植生の繁茂状況の検証結果

図-7は、初期状態、平成20年時点の実績値と計算結果の草本類・木本類の分布状況を示したものである。荒川大橋上流箇所等においては若干実績と計算結果に差が見られるが、熊谷大橋直下の砂州上の木本類の繁茂状況については概ね再現できていることが分かる。

また、図-8は樹高の検証計算結果を示したものである。なお実績値は、平成19年9月洪水後の平成20年時点の樹高である。計算結果と実績値ともに、樹高は約4～6m程度となっている領域が多くなっており、計算結果は実績値を概ね再現できている。

5. 樹林化の予測

木本類の生長および流出について、再現性の確認ができたことを踏まえ、中期的な木本類の繁茂予測を行うこととした。

(1) 予測計算条件

予測計算条件は表-4に示したとおりである。初期河道は、平成19年9月洪水後の河道とし、対象期間は、大規模出水が長期にわたり生じなかった昭和58年～平成11年の17年間を対象とした。その他の計算条件は中期間の検証計算と同じあり、ハリエンジュが侵入するものとして想定している。

(2) 予測計算結果

図-9は、草本類と木本類の平面分布の予測計算結果を示したものである。なお、計算では植生が流出する規模の洪水が発生しない限り生長を続けるものとした。計算結果を見ると、5年後にはすでに草本類・木本類が侵入し始め、10年後には、砂州を含む広範囲において、木本類の領域が大幅に拡大することが分かる。図-9は、計算期間中に大出水が発生しない条件での結果であることに注意が必要であるが、今後、平成19年9月洪水後に再生

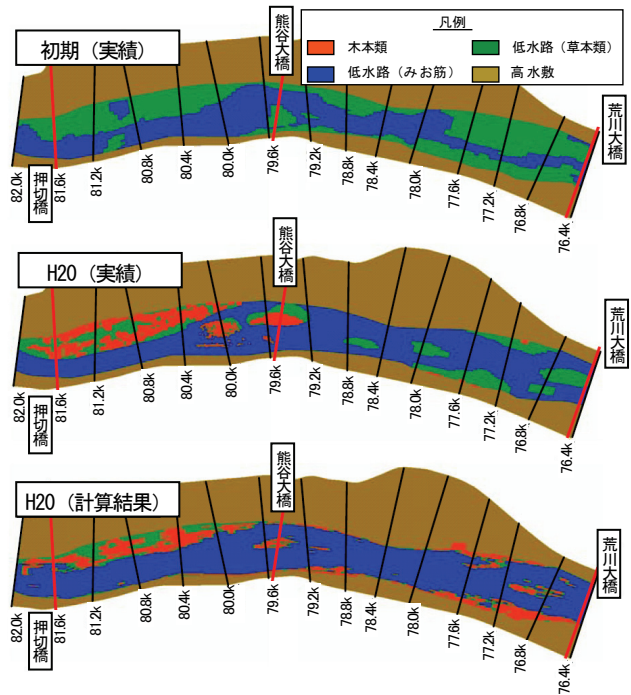


図-7 草本類・木本類の消長状況計算結果

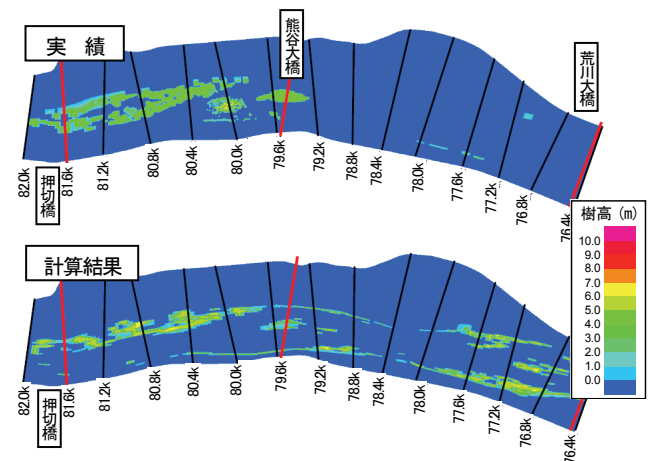


図-8 樹高の再現計算結果

表-4 予測計算条件

項目	内容
計算に用いた流量データ	昭和58年～平成11年(平成11年8月洪水の前まで)の17年間の実績流量
初期河道断面	H19.9洪水後河道 (平成20年1月航空レーザ測量データ)
初期河床材料	砂州表層: 砂州表層の河床材料調査結果(H20調査) みお筋・砂州下層: 平成16年度河床材料調査結果
その他	平成19年9月洪水検証と同じ

した砂礫河原が急速に減少する恐れがあることを示している。また、予測期間とした17年間の後に平成19年9月洪水を仮想的に生じさせた場合の植生の流出状況は、図-9下段の図のとおりとなる。これより、17年間の間に植生域が著しく拡大した場合には、図中に示したように79.6kから80.0k間の砂州上の木本類・草本類が流出していないなど、平成19年9月洪水規模の洪水が生じても、植生が流出しにくくなる恐れがあることがわかる。

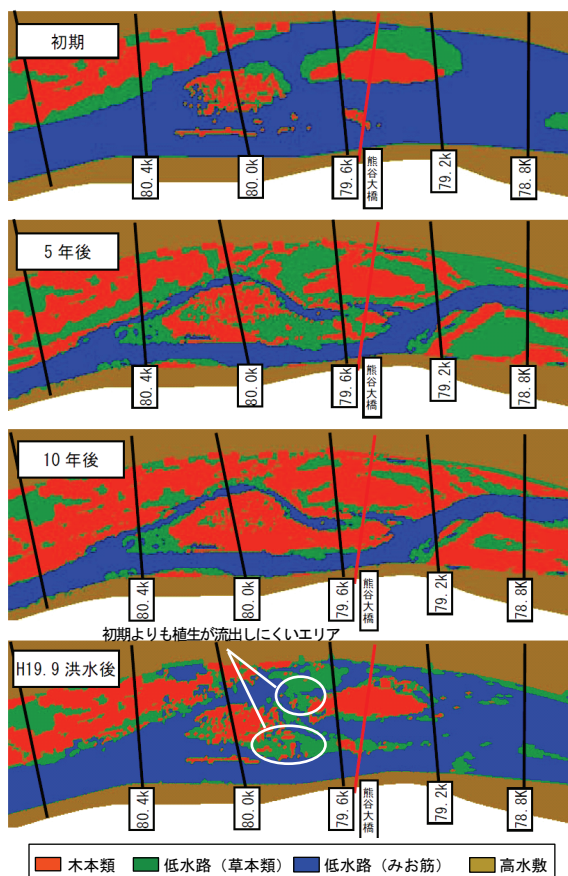


図-9 草本類・木本類の中期的な繁茂予測計算結果

6. おわりに

本研究では、荒川熊谷地区を対象として、樹林化の長期的な予測、洪水時の木本類の流出状況を定量的に予測できるモデルを開発し、以下の結論を得た。なお、開発したモデルは、植生の生長や流出を予測することが可能であるが、今後、種子の漂着と萌芽の関係、木本類の種類に応じた生長、樹種間の競合による生長関数の変化等の知見を収集し、精度を向上させる必要がある。

(1)流水モーメントにより倒伏し、河床高の変化に応じて流出する機構を平面二次元河床変動計算モデルに組み込んだモデルを用いて、平成19年9月洪水後の木本類の流出状況を再現した結果、提案したモデルは洪水による植生流出に適用できることを示した。

(2)木本類の年間生長量をバイオマス量として予測するモデルを用いて近年約30ヵ年の木本類の拡大状況について検証計算を行った結果、木本類の繁茂の状況や樹高を概ね再現することができ、樹木繁茂予測に適用できることを示した。

(3)構築したモデルを用いて、平成19年9月洪水後の河道を初期条件とし、大規模洪水が生起しなかった昭和58年～平成11年の17年間を対象期間として、5年後、10年後における樹林化の傾向を予測した結果、大規模な洪水が発生しなければ、木本類の領域が大幅に拡大することを

明らかにした。また、樹林化が生長すると平成19年9月洪水のような洪水が発生しても、かなりの樹木が残るため、洪水時に樹木が流出するような管理が必要であることを示した。

謝辞：埼玉大学大学院田中規夫教授には植生の流出条件等について、多大な御助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1)片貝武史, 井上佳菜, 竹下幸美, 辻本哲郎: 木津川砂州における景観要素の構成とその変遷の把握, 河川技術論文集, 第13巻, pp.135-140, 2007.
- 2)石原篤, 末次忠司: 河道内樹木群の治水上的効果・影響に関する研究, 平成17年度国土交通省国土技術研究会指定課題, 2005.
- 3)福岡昭二, 藤田光一: 洪水流に及ぼす河道内樹木群の水理的影響, 土木研究所報告第180号, pp.129-192, 1990.
- 4)坂本健太郎, 渋谷嘉昭, 浅枝隆: 樹林化が進行中の砂州内における樹木の生長特性に関する研究, 河川技術論文集, 第13巻, pp.207-212, 2007.
- 5) Takashi Asaeda, Pattitige I. A. Gomes and Eisuke Takeda: *Spatial and temporal tree colonization in a midstream sediment bar and the mechanisms governing tree mortality during a flood event*, River Research And Applications, River. Res. Applic., 2009.
- 6)清水義彦: 礫床河川の植生化について一河川地形・河床材料と洪水攪乱の視点から一, 第44回水工学に関する夏期研修会資料, 2008.
- 7)藤田光一, 李参熙, 渡辺敏, 塚原隆夫, 山本晃一, 望月達也: 扇状地礫床河道における安定植生域消長の機構とシミュレーション, 土木学会論文集, No.747/II-65, pp.20-33, 2003.
- 8)八木澤順治, 田中規夫: 河道内植生の洪水による破壊・再生を考慮した植生動態モデルの開発, 水工学論文集, 第53巻, pp.1171-1176, 2009.
- 9)長田信寿: 一般座標系を用いた平面二次元非定常流れの数値解析, 水工学における計算機利用の講習会, 講義集, 1999.
- 10)Takashi Asaeda: *Growth of phragmites Japonica on a sandbar of regulated river*, River. , pp.1-18, 2008.
- 11)浅枝隆, シロミ カルラナツス, 藤野毅: 生活史を考慮したアシPhragmites australisの生長の予測解析, 水工学論文集, 第43巻, pp.941-946, 1999.
- 12)八木澤順治, 田中規夫, 福岡捷二: 砂礫州上に繁茂する植生の洪水時流出限界評価, 河川技術論文集, 第14巻, pp.139-144, 2008.
- 13)財団法人リバーフロント整備センター編集: 河川区域内における樹木の伐採・植樹基準の解説, 河川における樹木管理の手引き, 1999.

(2009. 9. 30受付)