河道内植生の種間競争・拡大を考慮した 砂州地形及び植生変化の数値解析

NUMERICAL SIMULATION OF BAR MORPHOLOGY AND VEGETATION DYNAMICS WITH CONSIDERATION OF INTERSPECIFIC COMPETITION AND EXPANSION OF RIPARIAN VEGETATION

酒井紀誓¹・戸田祐嗣²・辻本哲郎³

Norichika SAKAI, Yuji TODA and Tetsuro TSUJIMOTO

¹学生会員 名古屋大学大学院 工学研究科(〒464-8603名古屋市千種区不老町)

²正会員 博(工) 名古屋大学大学院准教授 工学研究科(〒464-8603名古屋市千種区不老町)

³フェロー 工博 名古屋大学大学院教授 工学研究科(〒464-8603名古屋市千種区不老町)

The expansion of riparian vegetation on floodplain has been reported in many Japanese rivers, and it would be necessary to understand vegetation dynamics for both flood protection and ecological conservation. In this study, a numerical simulation model was presented to describe river-bed evolution and vegetation dynamics with interspecific competition and expansion of riparian vegetation. The numerical simulation was performed under conditions at the downstream reach of the Yahagi river. The results of the simulation show that the present simulation model can predict the long term trend of vegetation coverage and the rates of immigration and destruction fairly well.

Key Words : riparian vegetation, expansion of vegetation, interspecific competition, bar morphology, numerical simulation

1. はじめに

1970年代以降, 日本の多くの河川で河道内の植生繁茂域の拡大が報告されている. 植生域の拡大は, 河川の洪水流下能力の低下や流木被害を引き起こし, 微細土砂の堆積, 高水敷の形成や川幅の縮小¹⁾といった河道地形の形成に影響を与えるなど, 治水面での河川管理上の課題となる. 一方で, 環境面では砂州上での樹林化進行により白州河原が減少し, そこでの生息場構造も変質されてきた. 治水, 環境の両面から河道内植生の繁茂動態を把握する必要性は高まっている.

これまで, 現地踏査, 数値解析などを用いて河道内の植生繁茂, 樹林化に関する研究が行われており, 植生繁茂と洪水履歴・地形変化・土砂動態などとの関係性について検討されてきた. 例えば, 清水ら²⁾は渡良瀬川の調査から小規模出水と細砂の堆積が安定した樹林地の形成につながると指摘している. 辻本ら³⁾は手取川でダム建設に伴う流況の変化に注目し, 流況の平滑化により樹林化が生じたと指摘している. また, 砂州上での植生生理・生態特性の把握とそれに基づく群落拡大予測手法の

構築⁴⁾, 植生解析と洪水時の流れ・河床変動解析とを合わせた河道内植生繁茂解析手法⁵⁾が提案されるなど, 河道内植生動態, 樹林化機構の把握や繁茂動態予測モデルの構築はここ10年程の間に目覚ましく進展してきている状況である. このように, 河道内の植生動態については, メカニズム面から多くの研究が行われるようになっており, その知見は今後の河川植生管理に有用なものである.

しかし, 既往の研究では, 植生動態メカニズムの解明を主な目的としているため, 河川内の特定の砂州といったリーチスケール程度の範囲に対象を絞り, 実際のハイドログラフを入力した解析を実施するなど, 時空間的に詳細な検討が行われることが多かった. 河川管理の視点から見た場合, 河道内での植生繁茂の特徴をより広域的な視点から把握すること, また, 数十年程度の長期的傾向からその特徴を把握することは重要と思われる. このような観点から戸田ら⁶⁾は, 航空写真を活用し, 広域, 長期的な植生動態の分析を行っている. その結果, 川幅, 流量などから算出される河道のマクロな特性値が植生動態と大きく関わっていることを指摘している.

砂州は河道内植生の生息基盤を提供し、一方で、植生は砂州地形形成に影響を及ぼす。このような植生と河道地形の相互作用を表現するには、比較的長期間の解析が必要となり、その中では、植生の成長・拡大・種間競争などの生物過程を取り入れた解析が重要になるであろう。そこで、本研究では植生繁茂と河道特性の関係性を把握するための第一歩として、草本類・木本類の種間競争と植生域拡大を考慮した植生繁茂動態と河床変動を解析する計算モデルを構築し、矢作川下流域を想定した河道条件下で20年程度の長期スケールでの数値解析を行った。

2. 数値計算モデル

(1) 数値計算モデルの概要

本研究で用いる数値計算モデルは、洪水時における河道内の流れや土砂移動状況を解析する河床変動モデルと平水時の植生の成長・種間競争・植生域拡大を解析する植生繁茂種間競争モデルによって構成されており、計算フローは図-1のとおりである。モデルの概要を以下に示す。

(2) 流れ・河床変動モデル

流れ場の解析には、一般曲線座標系 (ξ, η) 上で記述された水深平均されたReynolds方程式を用いた(長田⁷⁾。河床せん断力はManning則より与え、河道内植生による形状抵抗については抵抗係数と植生密度の関数として運動方程式中に入れられている⁸⁾。また、流砂形態として掃流砂を考え、縦断方向にはMPM式⁹⁾、横断方向には長谷川式¹⁰⁾をそれぞれ用いて掃流砂量を計算し、河床高の変化を求める。

(3) 種間競争・増殖・拡大モデル

草本類—木本類の種間競争・増殖・拡大モデルに関しては、植物種間の競争が主に光合成に必要となる日射の獲得によって引き起こされるものとした。草本類が高さにおいて優位にたてば、木本類へ到達する日射量は草本によって遮蔽されることにより減少し、反対に木本類が高さにおいて優位にたてば、草本類へ到達する日射量は木本によって遮蔽されることにより減少する。草本類、木本類の成長については、Boysen Jensen¹¹⁾より光合成による生産量と呼吸による代謝量の差で表されるとした。植生繁茂域の平面的な拡大については、どのような拡大をしていくのかについて明確に把握されていないのが現状である。そこで今回は、植生の拡大を拡散の形で表現するものとし、その拡大速度については現地の植生繁茂変遷との整合性を持たせるように拡散係数を設定することにした。草本類、木本類の単位時間あたりのバイオマスの変化量は次式のようになる。

図-1 数値計算モデルのフロー

$$\frac{\partial M_i}{\partial t} = P_i - R_i + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xi} \frac{\partial M_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yi} \frac{\partial M_i}{\partial y} \right) \quad (1)$$

ここに、 M_i : バイオマス、 P_i : 生産量(光合成量)、 R_i : 代謝量(呼吸量)、 k_{xi} , k_{yi} : x 方向、 y 方向の拡散係数であり、添え字 $i(=g, t)$ は草本類(g)、木本類(t)を区別する指標である。

植生群落内における単位高さの植生層による光合成速度は以下のMonod 型関数で与えられるものとする¹²⁾。

$$p_i = \frac{I}{I + I_{ci}} p_{\max i} \quad (2)$$

ここに、 p_i : 光合成速度、 I : 任意の群落深さ z での照度、 I_{ci} : 照度に対する半飽和定数、 $p_{\max i}$: 最大光合成速度である。

植生群落内における日射の獲得量については、MONSISAEKI¹³⁾より以下の微分方程式で与えられるものとする。

$$\frac{\partial I}{\partial z} = -\lambda I \quad (3)$$

ここに、 λ : 係数である。式(3)より植物群落内の日射量は減衰の形で表される。係数 λ は以下の形で表される。

$$\lambda = k_i F_{ci} \quad (4)$$

ここに、 k_i : 吸光係数、 F_{ci} : 積算葉面積指数(葉層の任意の深さまでの個葉全部の葉面積合計値を群落占有土地面積で割った値)である。日射の獲得による種間競争を考慮するため、草本類と木本類が混在している群落深さ

については、 λ が草本、木本それぞれの吸光係数と積算葉面積指数の積を足し合わせた値で表されるものとする。式(3)に種間競争を考えた λ を用いた場合、単一種を考えた場合より群落深さにおける照度の減衰は激しく、種間競争による草本、木本の日射の獲得量の減少について表現している。また、後述する植生の幹部については、葉が存在しないものとしており、光合成による生産が行われていないので照度を考える必要がなく、幹部での照度は0として考え、照度の減衰もないものとした。

以上の関数に基づき、式(2)で表される単位体積あたりの光合成速度を、群落高さから地表面まで積分することにより単位面積当たりの生産量 P_i を求めた。植生の地上部高さを l_i としたときの生産量 P_i は以下のようになる。

$$P_i = \int_0^{l_i} p_i dz \quad (5)$$

植生の緑部、茎、根の高さの比は一定のまま成長するものとし、それぞれの比を l_{li} 、 l_{li} 、 $l_{ri}(l_{li} + l_{li} + l_{ri} = 1.0)$ とすると、植生の地上部高さは以下のようになる。

$$l_i = \frac{(l_{li} + l_{li})M_i}{\rho_i A_i} \quad (6)$$

ここに、 ρ_i ：植生の比重、 A_i ：植生の断面積密度である。

また、代謝量 R_i については、McCree¹⁴⁾より呼吸量が成長呼吸量と維持呼吸量との和で表されるものとして以下の式を用いた。

$$R_i = \gamma_i P_i + \mu_i M_i \quad (7)$$

ここに、 γ_i ：成長呼吸係数、 μ_i ：維持呼吸係数である。

(4) 植生侵入条件

植生の侵入は流水散布を想定し、平水時の水位と散布期の平均水位の間において種子が漂着すると仮定する。裸地が更新されずに T_i 年経過した場合には植生が定着する¹⁵⁾とした。航空写真を用いた検討から裸地継続年数を草本は2年、木本は5年とした。与える初期バイオマスについては不明な点が多かったため、冠水頻度に応じて水際で高く比高が高くなるにつれ減少するものとして、次式により与えた(図-2)。

$$M_i = \frac{z_0 - z}{z_0} M_{i0} + M_{i0min} \quad (8)$$

ここに、 z_0 ：平水位と散布期水位の比高差、 z ：平水位と植生定着個所の比高差、 M_{i0} ：水際における初期バイオマス、 M_{i0min} ：冠水頻度0の箇所における初期バイオマスである。これらの値は植生が残存するか破壊されるかに大きく影響を及ぼすと考えられ、今後検討する必要がある。

図-2 植生侵入の概念図

(a) 1974年

(b) 1992年

(c) 2010年

図-3 矢作川30km付近の植生繁茂変遷

(5) 植生破壊条件

植生の破壊は洪水流による地形解析時に考えることとする。植生の破壊には土砂堆積による植生の埋没と河床低下による生育基盤の流出、水流による植生の流出が考えられる。植生の頂部まで土砂が堆積するとき、その植生は埋没したと考える。土砂の堆積が植生高さまで至らない場合には、埋没した分だけバイオマスの地上高さが減少するものとし、平水時での種間競争の解析の際にはその地上高さに基づくバイオマスを与える。河床が低下

図-4 河道横断面形状

図-5 年最大流量の経年変化

していく過程でその変化量が植生の根の深さよりも大きい場合、あるいは、植物種毎に流失限界となる底面せん断力 τ_c^{15} を超える場合には、その地点での植生は流出したと考える。なお、本モデルでは植生埋没をバイオマスの減少で表現しているため、最大高さに達した植生が埋没後に再成長すると考えられ、今後改良する必要がある。

3. 計算想定河川の選定と河道条件の決定

本研究では、次章に示すように、植生の種間競争や拡大・増殖過程を取り入れた河道地形の形成機構に関して、理想化された河道での数値解析を実行する。しかし、理想化された条件下での数値解析モデルを構築する場合においても、対象とする植生種や河床材料、河道地形の大局的な特徴については、現実の河川で起こりうる物理環境、植生種構成を特定する必要がある。そのため、本研究では、矢作川下流域を計算想定河川と設定してモデル構築を行う。すなわち本研究における計算想定河川とは、その河川の詳細な地形や流量条件で計算を実施することを意味する訳でなく、モデルの基本的な構成や計算条件の概ねの値を設定する際の参照とする河川であることを意味する。

図-3に矢作川下流域の砂州上における樹林化の様子を示す。河道に生息している植物は主にツルヨシなどの高さが1~2m程度の草本類と、タチヤナギなどの高さが5~10m程度の本木類に分けることができる。側岸部の水際や中洲には主に草本類が繁茂しており、河道の側岸部で安定化している場所では樹木群が形成され樹林化して

表-1 計算に用いたパラメータ

パラメータ	草本類	木本類	文献
$l_{li} : l_{li} : l_{ri}$	0.9:0.0.1	0.5:0.2:0.3	仮定
$Ai(\text{cm}^2/\text{cm}^2)$	1.0	1.0	仮定
ρ_i	1.5	1.5	仮定
$F_{ci}(\text{cm}^2/\text{cm})$	2.8×10^{-2}	3.3×10^{-3}	17)
$P_{maxi}(\text{g}/\text{cm} \cdot \text{day})$	0.23	0.034	18)
$I_{ci}(\text{lx})$	4000	500	18)
k_i	0.5	3.0	18)
γ_i	0.25	0.05	19)
μ_i	0.05	0.01	19)
k_{xi}, k_{yi}	4.0	2.0	航空写真より仮定
$\tau_{ci}(\text{N}/\text{m}^2)$	120	67	15)
$M_{i0min}(\text{g}/\text{cm}^3)$	6.0	6.0	仮定
$M_{i0}(\text{g}/\text{cm}^3)$	114.0	114.0	仮定

いる(図-3(a), (b)). しかし近年では、水際や砂州下流部においても木本類の繁茂が見られる(図-3(c)).

矢作川下流域の河道条件を参考に以下の条件を設定する。河床勾配は1/1000、粒径は一様粒径で5mm、河道断面は図-4に示す複断面水路の直線河道とする。低水路には砂州が発生している状況を想定する。砂州地形は年最大流量に大きく支配されていると考え、平均年最大流量程度の1200m³/sで最初に砂州を形成させる。植生を伴う河床変動では浮遊砂も重要な役割を担っているが、計算を簡便にするため砂州地形変化により大きな役割を持つ掃流砂のみで河床変動解析を行う。なお、形成された砂州は、波長1.5km、波高2~2.5m程度であり、矢作川下流域で形成されている砂州と近い値となっている。また、河床変動は低水路のみで生じ、高水敷上では河床の変動はないものとし、初期条件として砂州上に植生が繁茂していない状態を想定した。

流量については、図-5に示す1971年から1992年までの矢作川若津観測所のデータ¹⁶⁾を用いた。観測所のデータを用いた検討から出水時間はピーク流量によらずほぼ一定であったため、 $T=40(\text{h})$ とした。平水流量は年によらず常に30m³/sとした。本モデルでは、1年のうち年最大流量の洪水が1度だけ発生するとし、それ以外については平水時と仮定する。洪水時のハイドロについては次式を用いて与えた。

$$Q(t) = (Q_p - Q_0) \sin^2\left(\frac{t-t_0}{T} \pi\right) + Q_0 \quad (9)$$

ここに、 Q_p : ピーク流量, Q_0 : 平水流量, t_0 : 出水開始時刻, T : 出水時間 である。また、平水時の流量は変動せず、常に一定流量を与える。洪水時には河床変動の計算、平水時には植生の種間競争・増殖・拡大の計算のみをそれぞれ行う。

植生に関しては、草本類としてツルヨシ、木本類としてタチヤナギを想定し、表-1のパラメータを用いる。ま

た流れの解析において、植生の形状抵抗に関しては植生の密度パラメータは草本類・木本類とも常に一定で密度の変化はおこらないものとし、それぞれ0.03, 0.02(m⁻¹)とした。植生の成長において、季節の変化を考えず群落上の照度は常に一定とし、その値は日陰を想定し9500(lx)とした。

4. 結果と考察

(1) 砂州地形と植生繁茂の時空間的変遷

図-6に砂州地形と植生の経年変化を示す。図-6(a)を見ると、草本類が砂州下流側に繁茂していることが分かる。これは、砂州に侵入した植生が、砂州の上流側では流速が速いために流水や土砂移動によって破壊され易いのに対し、砂州下流側ではそれらの影響を受けにくく残存するためだと考えられる。また図-6(b)～(d)を見ると、草本・木本が砂州の水際付近でライン状に繁茂している。平水位付近では河床変動を受けやすく植生も破壊され易く、種子散布期の平均水位付近では侵入できる植生のバイオマスが小さいためわずかな河床変動でも破壊される(図-2参照)。このため、平水位と散布期平均水位の中間部で優占的に植生が残存する。これらの植生繁茂状況は矢作川の砂州上でも見られ、実際の現象を定性的に表現できていると考えられる。図-6(a)から(d)までの砂州河床高を見ると、砂州はほとんど移動しておらず固定されており、植生繁茂域の河床高も上昇し横断比高差が増大している。これは植生の流速低減効果により植生域での掃流力が限界掃流力以下となり土砂堆積が促されるためである。河床上昇に伴い植生が埋没してしまうが、残存した植生は冠水頻度の低下により出水時の破壊機会は減少する。このように植生の存在により安定した河床が形成され、出水時に破壊されにくく植生繁茂に有利な環境へと変化していると考えられる。

(2) 実河川データとの比較

本数値解析では、実河川の河道条件を単純化した解析を実施しており、詳細な植生空間分布等の比較を行うことは難しいため、大局的な植生動態として植生域が河道に占める割合、侵入率や破壊率などについて計算と実測の比較を行う。ここでは、航空写真を使用し、戸田ら⁹⁾と同様の手法を用いて求めた現地の植生の植被率、侵入率、破壊率の経年変化を比較する。

図-7に1971年から1992年までの年最大流量と植被率、侵入率、破壊率の経年変化の実測と計算結果を示す。これらを比較すると、植被率は全体的に若干過大評価となっているが、経年的な変化の傾向は表現できていると判断できる。本解析では簡略化のため、1年のうちに洪水が1度しか発生しない場合を考えているが、

図-6 砂州地形・植生の経年変化
(上：河床高，中：草本高さ，下：木本高さ)

図-7 植被率、侵入率の経年変化
(左：実測値、右：計算結果)

実際には同年に複数の洪水が発生する年も存在する。このようなケースでは、植生が侵入・定着できず破壊されてしまう範囲が増え、植被率が低くなると予想される。また、植生の侵入率と破壊率について見ると、それらの値の大小については現地の値と同様の関係となっており、植生域の拡大、縮小の傾向については表現できている。

5. 結論

本研究では、種間競争と拡大を考慮した植生繁茂動態と河床変動の解析モデルを構築し、砂州地形と植生変化について数値解析を行った。入力条件や解析手法ともに簡略化したモデルではあるが、現地の植被率の変化や植生の繁茂状況にある程度表現できた。また、砂州地形と植生変化から、河道内植生を伴う河床変動では砂州の固定や比高差の増大など河道特性の変化が生じることを示した。

今後は、川幅や流量などが異なるケースにおいて今回と同様な解析を行うことで、河道特性と植生繁茂との関係性について検討していく予定である。

謝辞：本研究は河川環境管理財団・河川美化緑化助成（助成番号：2010-1（ロ））およびJSPS科学研究費補助金（課題番号：24560620）の補助を受けて実施されたものである。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 藤田光一・Moody,J.A.・宇多高明・Meade,R.H.：ウォッシュロードの堆積による高水敷の形成と川幅縮小，土木学会論文集，No.511，pp47-62，1996。
- 2) 清水義彦・小葉竹重機・新船隆行・岡田利志：礫床河川の河道内樹林化に関する一考察，水工学論文集，第43巻，pp.971-976，1999。
- 3) 辻本哲郎・村上陽子・安井辰弥：出水による破壊機会の減少による河道内樹林化，水工学論文集，第45巻，pp1105-1110，2001。
- 4) 青木信哉・田中規夫・八木澤順治：洪水攪乱影響の違いがツルヨシの形態的特徴と繁茂量・拡大幅に与える影響，水工学論文集，第51巻，pp.1255-1260，2007。

- 5) 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，pp.41-60，2003。
- 6) 戸田祐嗣・古川智文・辻本哲郎：航空写真分析を活用した中部一級河川群の長期的植生動態の比較研究，河川技術論文集，第18巻，2012。
- 7) 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。
- 8) 池田俊介・佐野貴之・福元正武・川村一弘：複断面開水路に生じる大規模水平渦と浮遊砂輸送，土木学会論文集，No.656，pp135-144，2000。
- 9) MEYER-PETER, E.・MULLER, R.：Formulas for Bed-Load Transport, Proc, 2nd Cong. Of Int. Assoc. for Hydr. Struc. Res., pp39-64，1948。
- 10) 長谷川和義：沖積蛇行の平面および河床形状と流れに関する水理学的研究，北海道大学学位論文，1983。
- 11) Boysen Jensen P.：Die Stoffproduktion der Pflanzen. Jena., 1932。
- 12) TAMIYA, H.：Some theoretical notes on the kinetics of algal growth, Bot. Mag. Tokyo 64，pp163-173，1951。
- 13) MONSIM, SAEKI, T.：U'ber den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung fur die Stoffproduktion. Japanese Journal of Botany 14，pp22-52.1953。
- 14) McCree, K. J.：An equation for the rate of respiration of whiteclover plants grown under controlled conditions. — In Prediction and Measurement of Photosynthetic Productivity (ProcIBP/PP Technical Meeting, Trehon), pp. 221-229. 1970。
- 15) 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。
- 16) 水文水質データベース，<http://www1.river.go.jp/>
- 17) Boysen-Jensen, P.：Studies on the production of matter in lights and shadow-plants. — Bot. Tidsskr. 36: 219., 1918。
- 18) KIRA, T・SHINOZAKI, K・HOZUMI, K.：Structure of forest canopies as related to their primary productivity, Plant and Cell Physiology, Vol.10，pp129-142，1969。
- 19) HESKETH, J.D.・BAKER, D.N.・DUNCAN, W.G.：Simulation of Growth and Yield in Cotton: Respiration and the Carbon Balance, Crop Science, Vol.11, No.3，pp394-398，1971。

(2012. 9. 30 受付)