

土砂動態と栄養塩循環を考慮した 新たな植生消長モデルの開発

DEVELOPMENT OF A SIMULATION MODEL FOR RIPARIAN FORESTATION BASED ON SEDIMENT DYNAMICS AND NUTRIENT DYNAMICS

黒田直樹¹・浅枝隆²・渡邊敬史³

大石三之³・金山拓広⁴

Naoki KURODA, Takashi ASAEDA, Takashi WATANABE
Mitsuyuki OOISHI, Takuhiro KANAYAMA

¹正会員 工修 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）

²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

³非会員 株式会社建設技術研究所 東京本社環境部（〒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）

⁴非会員 工修 株式会社建設技術研究所 東京本社河川部（同上）

The authors have developed the vegetation model which considers soil nutrient cycle. In this study, at first, we improve the vegetation model by updating of the flush mechanism of trees and addition of the mechanism that the trees require TN from atmosphere. Then, we simulated the change of the vegetation by the soil nutrient cycle on a sandbar. As a result, we confirmed that the robinia decrease when the soil nutrient increase.

Therefore, we show that the vegetation model we have developed is able to estimate the vegetation change in the river or river forestation, and that we have possibility to control the vegetation in the river channel by the water quality management of the dam or the basin development.

Key Words : River forestation, Sedimentation and erosion, N itrogen dynamics,
Dynamic Riparian Vegetation Model:DRIPVEM

1. はじめに

河道内の草地化・樹林化の拡大は、近年全国の河川で顕在化してきている。河道内の草地化・樹林化の進行は、自然環境の面では、生物の生息・生育場の変化を伴い、例えば、カワラヨモギやカワラバタ、コアジサシ等の砂礫河原特有の生物の減少をもたらしている事例が報告されている¹⁾。また、治水面では、河積阻害による治水安全度の低下や樹林化の進行に伴う洪水時の偏流発生、及びこれに伴う護岸や横断工作物等の構造物の安全性の低下等の事例が報告されている²⁾。一方で、河道内の樹木は、上記のような負の影響だけではなく、日陰の創出、水温上昇の抑制や営巣林としての価値等の正の側面も有している³⁾。

このように、河道内の草地化・樹林化の影響や効果は、多面的にとらえる必要があると考えられるが、河道内の自然環境を正確に理解し、目標とする状態に向けて、効果的・効率的に河道を管理していくためには、管理によ

る効果や課題を適切に予測できるツールが有効である。

我が国では、河道内の草地化・樹林化の拡大を含む植生消長を予測するため、これまで多くの数値解析モデルが開発されている。例えば、藤田ら⁴⁾は、河床変動計算モデルと植生の遷移機構を組み合わせることで、洪水時の河床変動による植生の流失と非洪水期の植生の侵入過程を再現・予測できるモデルを開発している。しかし、このモデルは、洪水期間中の草本類の倒伏及びたわみによる粗度係数の変化や、樹木の流失と生長は考慮していない。また、八木澤ら⁵⁾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、流体力による植生の破壊、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失や木本類の生長は考慮していない。

上記を踏まえ、筆者らは、植生消長の要因として、従来から考えられている上記のような砂州の地形変化や流体力に加え、新たに栄養塩の動態に着目した研究を進めてきた。具体的には、植生を介した生長過程における土

壤中栄養塩の循環が植生消長に大きく寄与していることを現地調査にて確認した上で⁶⁾、土壌中の窒素量変化を考慮した植生消長モデル（DRIPVEM：Dynamic Riparian Vegetation Model）を開発してきた^{7, 8)}。さらに、著者らが実施した実河川の樹木調査を踏まえ⁶⁾、樹種別の流失特性や土壌への窒素の供給源となる大気負荷、窒素固定、冠水による栄養塩供給の影響が河道内草本分布や樹木分布に影響を及ぼすことを明らかにしてきた。

そこで、本研究ではまず、「樹種別の流失機構」及び「大気からの窒素の吸収機構」を組み込むことにより、既往の植生消長モデル⁸⁾を改良した。次に、研究対象とした砂州上の土壌中窒素量の感度分析を行い、従来から研究対象となることが多い流水や土砂の攪乱に加え、新たに流水の水質管理による河道内植生の制御の可能性及び必要性を示したものである。

2. 研究対象領域における樹林化の状況

(1) 研究対象領域

研究対象地区である荒川熊谷地区は、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1に属している。

荒川熊谷地区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箇所などでは、外来種であるニセアカシアの繁茂が見られる。木本類の構成は、ヤナギ類、ニセアカシア、ネムノキが上位3位を占めている。

(2) 荒川熊谷地区の樹林化の状況

荒川熊谷地区の平成12年と平成18年の航空写真を比較したものを写真-1に示す。また、平成18年12月に実施された航空レーザ測量結果から、ある光源に対応する地形の影を描画することにより、平面図を立体的に表現した陰影図を図-1に示す。これより、平成12年における対象砂州は、植生はほとんど認められない。これは、平成11年9月に、荒川で寄居観測所において戦後第二位の最高水位を記録した洪水が生起しており、この際に砂州上の植生が流失したものと考えられる。一方、平成18年の航空写真を見ると、研究対象の砂州上には、ほぼ一面に植生が繁茂しており、平成12年以降に植生の繁茂領域が拡大したことが見て取れる。

この砂州上における土砂の堆積領域と洗掘領域の植生の繁茂状況を写真-2に示す。写真-2の破線は、現地にて目視で確認した土砂の堆積領域と河床の洗掘領域の境界を示す。これより、土砂の堆積領域では草本類はまばらであるのに対し、洗掘領域では密生している状況であることが分かる。この要因として、洪水による土砂の堆積により洪水前に生育していた草本類が枯死することに加え、堆積土砂は、礫に付着したシルトや粘土分の細粒分

がフラッシュされ貧栄養状態となっており、植生が侵入しにくくなっているためと推察される。

一方、洗掘領域には草本類が密生して繁茂している。この理由として、洗掘領域は周辺に比べて窪地となっており、洪水後の流水や降雨に伴い栄養塩が集積されることにより、植生の繁茂を促進させると筆者は考えている。

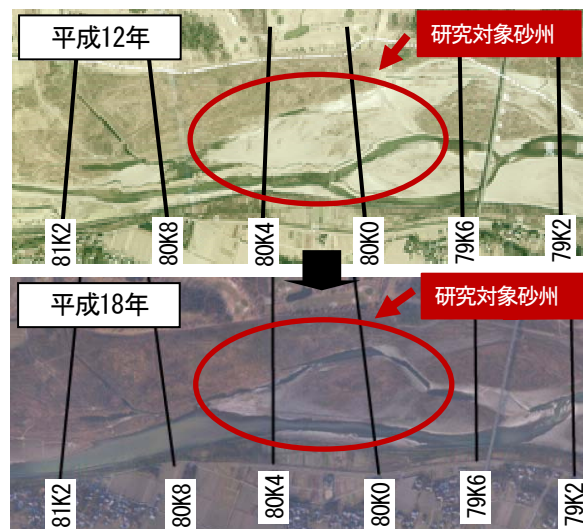


写真-1 研究対象砂州の変遷（荒川熊谷地区）

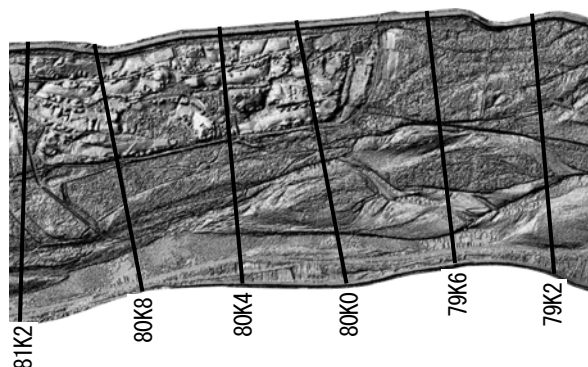


図-1 研究対象砂州の地形（陰影図）【平成18年12月】



写真-2 堆積領域と洗掘領域の植生繁茂状況
（79.7k左岸側の砂州上より下流を望む）【H22年時点】

3. 植生消長モデルの改良

(1) 既往の解析モデルの概要

2. (2) で述べたような砂州上の河床変動や栄養塩の供給と循環による植生消長への影響を予測評価するため、筆者がこれまで開発してきた植生消長モデル (DRIPVEM) の詳細は既報^{7,8)} のとおりであるが、ここでは概要を述べる。

モデルの仕様を表-1に、モデルの全体像を図-2に示す。水理計算と河床変動の計算は、一般座標系の平面二次元不定流¹⁰⁾ 河床変動 (混合粒径) 計算モデルを基本とし、浅枝らにより開発された植生消長計算のための栄養塩収支計算モデルを付加したものである。モデルのうち、植生消長の考慮方法は以下のとおりである。

①植生の侵入は、平水位及び融雪洪水水位から領域で決定

②①のうち、木本類の侵入では、細粒土砂の割合を考慮

③植生の流失は、洪水時の河床変動高で決定

④草本類と木本類の生長と枯死は、砂州上の土壌中窒素や降雨由来の栄養塩の供給により、「栄養塩循環モデル」、「草本バイオマスモデル」、「樹木バイオマスモデル」を介して決定される。

上記の①から④の特徴のうち、特に、④の草本類と木本類の生長と枯死の機構は、他の植生消長モデルではこれまでに考慮されていない栄養塩の循環と草本類・木本類の生長を考慮したものであり、本モデルの特徴である。

(2) 解析モデルの改良

河道内の樹木群は、ヤナギ類やニセアカシア、ネムノキ等の様々な樹種により構成されており、侵入、生長、流失のライフサイクルにおける消長特性は、樹種ごとに異なる。このため、植生消長モデルの木本類の消長機構を短期的・長期的に精度よく評価するためには、樹種別の消長特性を適切に考慮する必要がある。本研究では、Asaeda et al. が実河川で行った現地調査結果⁹⁾ から、樹種別に以下の式に示す算定式 (1) を導入した。

$$TrRatio = \exp(-((erod(i, j) / Aksrc(isp))^2) \times (iage^2 / (3.0^2 + iage^2))) \quad (1)$$

ここに、 $TrRatio$: 残存率 (%), $erod(i, j)$: 洪水時の計算メッシュごとの河床洗掘深(m), $iage$: 樹齢, $Aksrc(isp)$: 樹種 isp ごとの係数 (ヤナギ : 0.745, ニセアカシア : 0.475, ネムノキ : 0.475)

さらに、樹木の生長に用いられる窒素の供給源は、土壌中窒素量により変化することが明らかになっている⁶⁾。具体的には、図-3に示すように、土壌中の窒素が0.1%程度以下の場合、落葉中のすべての窒素分は大気由来であり、0.3%程度以上の場合にはすべて土壌由来となることが確認されている。本研究では、この関係を用いて、土壌中の窒素が0.2%以下の場合、樹木は大気からも窒素を吸収するものとし、落葉による窒素供給を土壌中窒素量に加え、大気由来の窒素吸収の考慮を可能とした。

表-1 植生消長モデル (DRIPVEM) の仕様

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
	植生の抵抗	植生高さとお水深の比、倒伏状態に応じて設定 (植生の生長に伴う粗度係数変化への対応)
	樹木群の抵抗	樹木諸元から透過係数を算定し、粗度係数へ換算 (生長・流失による抵抗変化への対応)
	植生の侵入	平水位以上の領域
	樹木の侵入	ヤナギ 平水位から融雪期水位の領域
		ニセアカシア 前年の洪水ピーク水位から50cmの領域
河床変動計算 (混合粒径)	植生・樹木群流失条件	ヤナギ・ニセアカシア共通 土壌中の細粒土砂 (1mm) の割合が15%以上となる領域
		植生 河床洗掘による流失、河床堆積による枯死を考慮
	限界掃流力	樹木 河床洗掘深に応じた樹木群流失率を設定
		Egiazaroff式 (芦田・道上による修正式)
	掃流砂量	主流方向 : 芦田・道上式、横断方向 : 長谷川式
	浮遊砂量	Lane-kalinske式
離散化手法等	沈降速度	Rubey式
	河床変動計算	流砂の連続式
	数値解析	有限体積法
栄養塩収支計算	時間積分	Adams-Bashforth法
	土壌栄養塩	植生・樹木の栄養塩摂取量、供給量、分解量及び大気、洪水を踏まえた栄養塩収支計算
	植生バイオマス	栄養塩、生長、影、河床粒度の影響を考慮したバイオマス量の計算
	樹木バイオマス	・アロメトリー式を介した樹木生長計算 ・栄養塩摂取量、供給量、分解量の計算

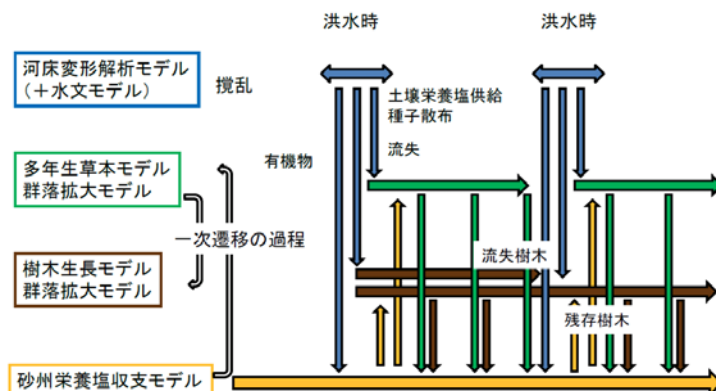
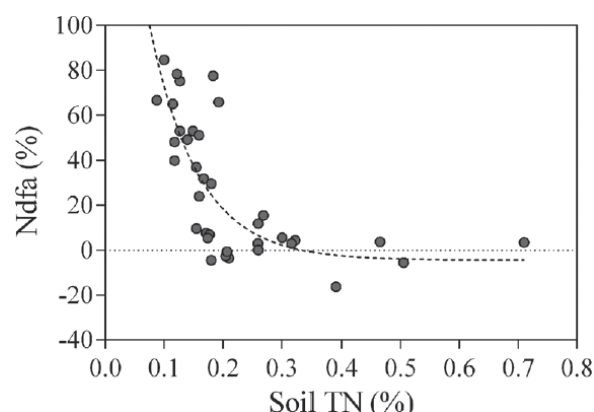


図-2 植生消長モデル (DRIPVEM) の全体像



※Ndfa : 葉に占める大気由来の窒素量の割合

図-3 土壌中窒素量と葉に占める大気由来の窒素量の割合⁶⁾

(3) 解析モデルの検証

a) 計算条件

改良した植生消長モデルの妥当性を確認するため、表-2に示す条件により検証計算を行った。検証期間は、検証に必要となる河床形状や植生分布、河床材料等の実績データが得られている期間として、平成12年から平成18年の7年間を対象とした。この当該期間は、写真-1に示すように、研究対象砂州における植生繁茂領域の面積が拡大した時期でもある。また、表-2に示した条件のうち、

(1) ②で述べた「草本類の流失」は、洪水時に堆積では枯死、洗掘では流失するものとし、枯死・流失を規定する堆積高と洗掘高は、検証計算の再現性を踏まえ、2年目以降は15cmとした。ただし1年目は、草本の生長の度合い（根のはり具合）を考慮し、今後精査が必要であるものの、ここでは5cmとした。

b) 検証結果

検証計算結果として、砂州上の地被状況の再現計算結果を図-4に示す。これより、外来種として問題となっているニセアカシアに着目し、平成18年時点における実績の地被状況と比較した。この結果、図中の丸で囲った領域は、改良前のモデルではニセアカシアの繁茂がみられるのに対し、改良後のモデルでは、ニセアカシアの繁茂は見られない。図-4の下図に示した既往の調査結果¹¹⁾では、図中の枠で囲んだ砂州上の水際領域の樹種はヤナギが主体であり、ニセアカシアはほとんど繁茂していないことが確認されており、今回の樹種別の洪水時の流失条件の見直しにより、地被状況の再現性が向上していることが分かる。

なお、研究対象砂州上におけるニセアカシアの主な繁茂領域は、79.8kの測線上に位置しているが、当該領域の検証結果は、改良後のモデルでは、繁茂面積がわずかに減少しているものの大きな違いは見られない。また、ヤナギ及び草地の繁茂領域はモデルの改良前後で大きな違いは見られないが、いずれも写真-1で示したように、研究対象砂州上の大半の領域で植生が繁茂している状況を再現できている。なお、樹木における大気からの窒素吸収機構の組み込みによる再現性の向上の検証は、5.②で後述するように、今後の課題とした。

4. 土壌栄養塩量の感度分析

(1) 予測計算条件

2. (2) で述べたとおり、砂州上の植生の繁茂状況は、洪水時の流体力や河床変動だけではなく、栄養塩の供給状況によっても影響を受ける。このことは、流域開発やダム貯水池の富栄養化により高い栄養塩濃度の放流水が上流から供給された場合に、それに伴い河道内の植生の繁茂状況にも影響をもたらす可能性があることを示している。

ここでは、改良した植生消長モデルを用いて、流域開発やダム放流に伴う栄養塩供給量の変化による影響を把握するため、砂州上の土壌中栄養塩量を変化させた場合の予測計算を行った。

表-2 検証計算条件

項目	内容
初期河道	平成12年定期測量データ
対象区間	78.0k~81.2k
検証対象期間	平成12年~平成18年の7年間
下流端水位	H12河道HQ式 (準二次元不等流解析による結果)
上流端流量	寄居観測所流量
低水路 粗度係数	低水路 n=0.020 高水敷 水位と草本類の倒伏状況から設定
樹木群	【初期値】平成18年樹木調査から設定 【生長】アロメトリック式を使用
河床材料	平成20年調査結果
供給土砂量	掃流力見合いの流砂量
初期土壌中窒素量	275g/m ² (研究対象砂州の観測結果)

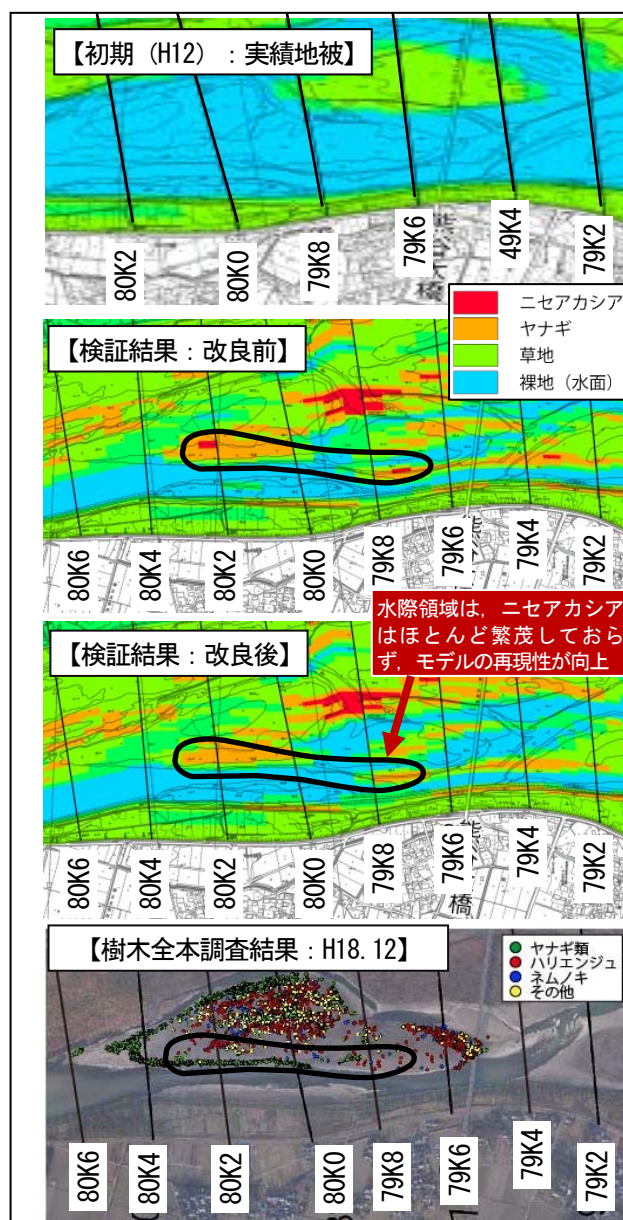


図-4 検証計算結果

予測計算条件を表-3に示す。初期河道は、平成19年現況河道とし、予測期間は、平成12年から平成21年の10年間とした。上流端に与える流況は、植生が最も繁茂する状況を予測するため、融雪洪水の流量ハイドログラフをつなぎ合わせたものを用いた。砂州上の土壤中栄養塩量は、植生分布への感度を把握するため、表-4に示すように、感度分析的に1～500g/m²の6ケースを設定した。

表-3 予測計算条件

項目	内容
初期河道	平成19年定期測量データ
対象区間	78.0k～81.2k
初期地被状況	裸地（研究対象砂州の全伐採を想定）
検証対象期間	平成12年～平成21年の10年間
下流端水位	H16河道HQ式（準二次元不等流解析による結果）
窒素供給	大気からの取り込み考慮あり（改良後モデル）
樹木の流失	樹種別の流失関数を考慮（改良後モデル）

表-4 初期土壤中窒素量の条件

パラメータ		設定値
初期 土壌中窒素量 (g/m ²) ※	ケース1	1
	ケース2	10
	ケース3	50
	ケース4	100
	ケース5	275 (検証計算と同じ)
	ケース6	500
降雨による窒素供給量 (g/m ² ・yr)		3.0

※土壌層厚は30cmとした

予測計算結果として、10年後の植生分布の予測計算結果を図-5に示す。これより、以下のことが言える。

- ①図中に丸で囲った研究対象砂州上の植生に着目すると、80.4kから熊谷大橋付近の約79.6kまでの中州の右岸側は、帯状にニセアカシアの繁茂が全ケースにおいて予測されているが、初期土壤中窒素量が増加するほど、ニセアカシアの繁茂面積は減少傾向となることが予測される。
- ②研究対象砂州以外の砂州についてみると、79.8kの左岸側（参考砂州a）には、ニセアカシアが広く繁茂することが予測されるが、①と同様に、初期土壤中窒素量が増加するほど、ニセアカシアの繁茂面積は減少傾向となることが予測される。
- ③一方、79.2k左岸側で予測されるニセアカシアの繁茂領域（参考砂州b）についてみると、初期土壤中窒素量を10から50g/m²に増加した場合に繁茂面積が急激に減少するが、100g/m²では増加し、その後は再び減少傾向となることが予測される。

上記のように、外来種として問題となっているニセアカシアに着目すると、初期土壤中窒素量と10年後の繁茂領域は、場所により傾向が異なり、拡大する領域と減少する領域が認められるが、全体的には、土壤栄養塩量が増加すると草本類の生長が促進され、ニセアカシアの繁茂領域が減少すると予測される。

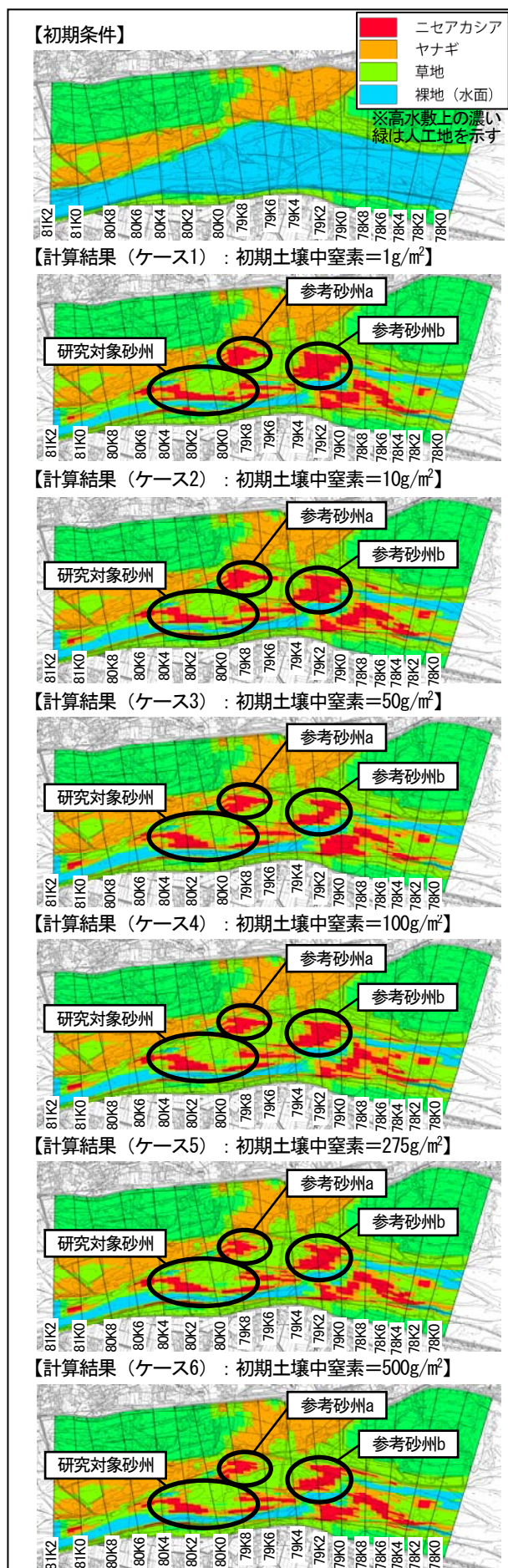


図-5 異なる初期土壤中窒素濃度に対する植生分布の予測結果（10年後）

なお、上記の③の参考砂州bにおいて、ニセアカシアの繁茂面積がいったん減少し、再拡大する理由については、侵入する植生の種類により洪水時の流水に対する抵抗が変化し、植生域を主として河床変動傾向が変化し、結果として、ニセアカシアの侵入条件である前年の洪水ピーク水位以上となる領域に差が生じるためである。

図-5に示した予測計算結果から、初期土壌中窒素量と10年後のニセアカシアの繁茂面積の関係を整理すると図-6の通りとなる。これより、初期土壌中窒素が1~50g/m²にかけて急激に減少し、その後は横ばい、あるいは微減の状況となる結果が得られた。

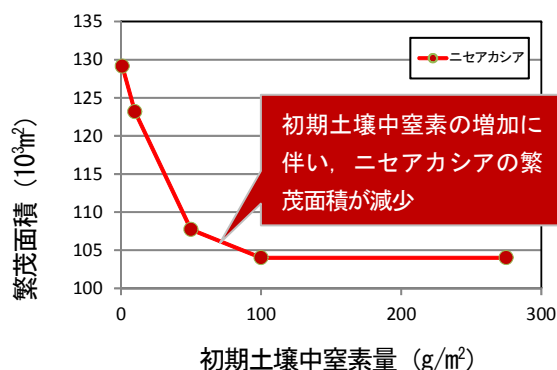


図-6 初期土壌中窒素とニセアカシア繁茂面積（10年後）

5. おわりに

本研究で得られた成果を以下に示す。

- ①外来種として問題となっているニセアカシアを含む樹種別の繁茂状況を精度よく予測できる植生消長モデル (DRIPVEM) を開発した。これより、河道の流下能力の確保や目標とする自然環境を実現するための検討を行う場合に、河道の設定条件に応じた植生の応答の予測・評価が可能となり、効果的・効率的な樹木管理・河道管理に資するものと考えられる。
- ②流域開発（畜産・農業等）やダム放流に伴う富栄養化の影響を簡易的に把握するため、砂州上の土壌中窒素の感度分析を行い、初期土壌中窒素量が増大するほど、ニセアカシアの減少が予測されることを確認した。このことは、河道内の植生管理や樹木管理において、河道内の水理量や河床変動等物理環境のみではなく、水質管理による、河道内植生の制御の可能性・必要性を示すものと考えられる。

なお、本研究で開発したモデルは、以下の課題を有しており、引き続き改良を行っていく予定である。

- ①本研究で開発した植生消長モデルは、他河川での検証が十分ではない。樹林化が進行し、樹木管理が課題となっている全国他河川を対象に、検証を重ね、精度の向上を図り、汎用性を高めていく必要がある。
- ②対象とする樹種がヤナギ類、ニセアカシア、ネムノキの3種であり、その他の樹種を追加するには現地調査による流失特性や生長特性の設定が必要である。

③大気からの窒素吸収機構の組み込みによるモデルの再現性の向上を確認するため、研究対象砂州における土壌中窒素量の平面分布を調査し、検証を行う必要がある。

④本研究では、流域開発やダム放流による影響を簡易的に予測するため、砂州上の初期土壌中窒素量の感度分析を行った。しかし実現象としては、流域開発やダム放流による栄養塩の供給は、上流からの流水によってもたらされるものであり、実現象を正確に考慮するためには、流水による窒素供給を土壌中窒素量に反映するための水質予測モデルとの統合等が必要と考えられる。

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) 福岡捷二, 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.
- 3) 川那部浩哉, 中村太士: 河川生態学, pp. 160-169, 2013.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) Takashi Asaeda, Md Harun Rashid and Kohske Ohta: Nitrogen fixation by Pueraria as a nitrogen source in the midstream sediment bar of a river, ECOHYDROLOGY, Ecohydrol., 2015.
- 7) Takashi Asaeda, Md Harun Rashid and Abu Baker: Dynamic modelling of soil nitrogen budget and vegetation in sediment bars of a regulated river, RIVER RESEARCH AND APPLICATIONS, River Res. Applic. 31:470-484, 2015.
- 8) 平生昭二, 浅枝隆, 坂本健太郎: 植物を介した土壌栄養塩動態モデルを付加した河道地形変動予測モデルの開発, 河川技術論文集, 第18巻, pp. 11-16, 2012.
- 9) Takashi Asaeda, Gomes PIA 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 26:960-976, 2010.
- 10) 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.
- 11) 黒田直樹, 浅枝隆, 西村達也ら: 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, 水工学論文集, 第54巻, pp. 1243-1248, 2010.

(2016. 4. 4受付)