

# 河床変動と土壌の栄養塩循環を考慮した 河道内の草本・樹林動態解析モデルの開発

NUMERIAL MODELLING FOR HERBACEOUS-PLANT AND WOODY SUCCESSION  
INTEGRATING CHANNEL MORPHOLOGY AND SOIL NUTRIENT PROCESSES

小澤宏二<sup>1</sup>・板谷越朋樹<sup>1</sup>・岡村誠司<sup>1</sup>・兵藤 誠<sup>1</sup>・浅枝 隆<sup>2</sup>

Koji OZAWA, Tomoki ITAYAGOSHI, Seiji OKAMURA, Makoto HYODO, Takashi ASAEDA

<sup>1</sup>正会員 いであ(株)建設統括本部 水圏事業部 河川部 (〒154-8585 東京都世田谷区駒沢3-15-1)

<sup>2</sup>正会員 埼玉大学大学院 理工学研究科 教授 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区大久保255)

Most rivers in Japan have currently accelerated vegetation growth due to human interventions, e.g., dams and weirs. Such accelerated growth resulted in reduced habitat heterogeneity, gravel riverbed, and flood conveying capacity by increased flood water stages, etc. Even though some models were developed to quantitatively analyze herbaceous-plant and woody succession, they have only introduced vegetative growth rates statically as a function of their flood levels but not addressed its dynamic succession processes. Firstly, we developed a numerical model for herbaceous-plant and woody succession that integrates soil nutrient and morphological processes. Secondly, we selected, as a research field, a middle reach of the Sagami River and analyzed spatiotemporal patterns of vegetative succession and morphological processes. Thirdly, we verified and showed applicability of the developed model.

**Key Words :** *herbaceous plant, wood, succession, soil nutrient, morphological process, two-dimensional riverbed variation model*

## 1. はじめに

近年、わが国の多くの河川で進行する樹林化は、河川管理の様々な局面において支障を及ぼしている。河道内の砂州や河岸における樹林化は河川特有の原風景を形成する砂礫河原を減少させ、河川固有の生態構造を大きく改変している。更に河道内樹木への遷移と拡大は低水路の固定化に伴う偏流の発生や洪水時の河積阻害を誘発するなど、治水上の安全性を低下させる要因になっている。

河道内の植生消長や樹林化に至るプロセスについては、これまでに数多くの研究がなされており、植生消長モデルとして、藤田ら<sup>1)</sup>は先駆的植物の侵入・安定植生域の拡大から樹林化に至る植生の遷移過程と土砂動態を組み合わせた植生消長の長期シミュレーションを提案し、八木澤ら<sup>2)</sup>は植生の侵入・繁茂領域の拡大を河川の物理環境と関連付けてモデル化し、樹木の破断・倒伏による樹齢の巻き戻し効果を反映した植生動態を再現している。樹林化モデルとしては、宮本ら<sup>3)</sup>による流量変動のインパクトを考慮した河道内樹木動態の確率過程モデルなどが提案されている。しかし、いずれも河道の物理機構よ

り植生消長や樹林化プロセスを個別に解明したものであり、河川の物質循環や生態系代謝等の植生の生理機構を考慮したモデルには至っていない。植生消長と樹林化プロセスを一体的に捉えるためには、河道の物理機構に加え、水・土砂・栄養塩といった河川での物質循環を考慮することが必要である。すなわち、砂州における土壌の細粒化や栄養塩濃度の増加が植生バイオマスを拡大させ、樹林化を促進する要因の一つである<sup>4)</sup>ことに着目し、河床変動と植生の生理機構を関連付けてモデル化することが必要である。こうした試みによる研究事例<sup>5)</sup>はこれまでもあるが、河床変動による土壌栄養塩の更新を表現できる実用的なモデル開発までには至っていない。

本研究では、これまでに経験的に得られてきた、草本・樹木の生長過程と土壌栄養塩循環の関係<sup>6)</sup>を用いて、長期的な視点からの河道及び樹木管理ツールとして、河床変動と土壌の栄養塩循環を考慮した河道内の草本・樹林動態モデルを開発するものである。

## 2. 河床変動と土壌の栄養塩循環を考慮した草本・樹林動態解析手法

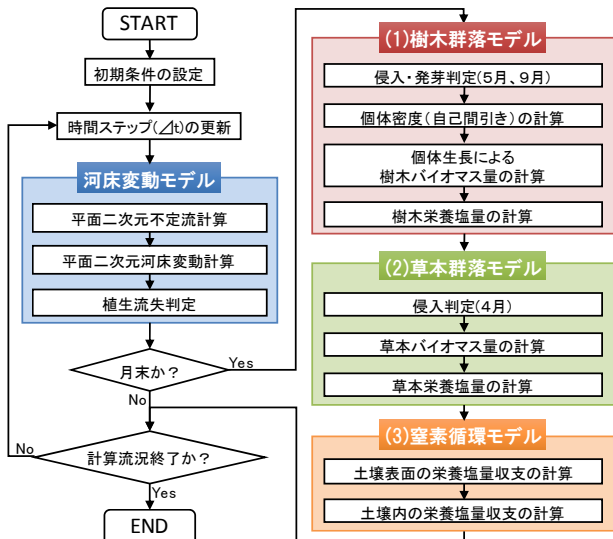


図-1 河床変動と栄養塩循環を考慮した草本・樹林動態解析モデルの計算フロー

モデルは、(1)樹木群落モデル、(2)草本群落モデル、これらが枯死・分解することで生ずる(3)窒素循環モデル、洪水に伴う砂州の地形変化や植生流失、土壌表層の窒素濃度の更新を行う(4)河床変動モデル（二次元河床変動計算）から構成される（図-1）。

以下に(1)~(4)の概要を示す。(1)~(3)に示す植生の生長特性は、荒川・多摩川等における既往知見<sup>6)</sup>を適用した。ただし、植生の生長特性は河川毎の実態に応じて設定することが望ましく、今後詳細な調査を行う必要がある。

### (1) 樹木群落モデル

樹木群落は、河岸樹木の代表種として、カワヤナギ、ハリエンジュ、エノキを対象とする。既往の観測<sup>7)</sup>より、これらの樹木の種子繁殖及び初期生長特性を表-1のように定める。生長特性の把握が不十分なエノキについて、ここではハリエンジュの特性を代用するが、植生の生長特性については、今後詳細な調査を行う必要がある。

樹木個体の形態は、多くの場合、幹の直径のアロメトリー式で与えられる<sup>8)</sup>。ここではさらに幹の直径と樹齢との関係式から、樹木形態、バイオマスを樹齢との関係で表す。年間の生長量は、幹・枝、及び根のバイオマス ( $AGB$ と $BGB$ )はAsaeda et al. <sup>9)</sup>による樹齢( $AGE$ )を用いたアロメトリー式より求まる(表-2)。sal, robの添字はそれぞれ、ヤナギ類、ハリエンジュである。また、落葉前の葉のバイオマス( $LB$ )、樹冠幅( $CW$ )についても示す。

### (2) 草本群落モデル

草本類の生長は、表-3のように土壌中の窒素濃度のほか、土壌水分、洪水時の河床変動、平水位からの比高、樹木による陰影を強く受ける。

式(1)は、様々な河川の砂州で採取された草本類のバイオマス量 $AGB$ と土壌窒素濃度 $TN$ の関係<sup>6)</sup>である。

$$AGB = AGB_{max} [TN^{2.5} / (TN^{2.5} + 0.04^{2.5})] \quad (1)$$

式(2)は、草本類バイオマスと土壌粒径の関係<sup>6)</sup>である。

表-1 樹木の種子繁殖及び初期の生長特性

樹木	ヤナギ類	ハリエンジュ(エノキ)
種子散布に影響する洪水	種子散布後3週間以内に生じた洪水 (5月)	8月~9月の洪水
萌芽箇所	洪水時水位から0.5m以内 (土砂堆積域)	
	0.1mm < $D_{50}$ < 1mm	細粒土砂の堆積箇所
萌芽密度(本/m <sup>2</sup> )	39 (本/m <sup>2</sup> )	0.3 (本/m <sup>2</sup> )
自己間引き (本/m <sup>2</sup> )	$\frac{20}{AGE^2}$	$\frac{0.3 \cdot 8^4}{8^4 + AGE^4}$
平水位からの比高	0.8m以上	1.0m以上

表-2 樹齢( $AGE$ )を用いたアロメトリー式

項目	アロメトリー式
幹・枝のバイオマス $AGB$	$AGB_{sal} = 0.0195 AGE_{sal}^{4.45}$ $AGB_{rob} = 0.00141 AGE_{rob}^{4.63}$
根のバイオマス $BGB$	$BGB_{sal} = 0.0111 AGE_{sal}^{3.51}$ $BGB_{rob} = 0.00456 AGE_{rob}^{3.65}$
葉のバイオマス $LB$	$LB_{sal} = 0.089 AGE_{sal}^{1.05}$ $LB_{rob} = 0.023 AGE_{rob}^{1.0}$
樹冠幅 $CW$	$CW_{sal} = 32.9 DKH_{sal}^{1.14}$ , $AGE_{sal} = 1.92 DKH_{sal}^{0.51}$
膝高直径 $DKH$	$CW_{rob} = 69.0 DKH_{rob}^{0.775}$ , $AGE_{rob} = 2.39 DKH_{rob}^{0.49}$

表-3 草本類の繁殖時期及び初期の生長特性

草本類	ツルヨシ	ヨシ	オギ	その他の草本
発芽時期	4月末			
土壌水分(粒径評価)	$D_{50} > 2mm$	$D_{50} < 2mm$	$D_{50} < 2mm$	—
河床変動の許容	$0.0 < \Delta z < 0.1$	$0.0 < \Delta z < 0.2$	$0.0 < \Delta z < 0.2$	$0.0 < \Delta z < 0.1$
平水位からの比高	0.0-0.5m	0.5-2.0m	2.0m以上	0.0m以上

表-4 植物体内の窒素濃度 (%) <sup>4)</sup>

	葉	茎	根
ヤナギ類	2.0	0.4	0.9
ハリエンジュ	3.0	0.6	1.4
大型イネ科植物	3.0	0.6	1.0
その他	3.0	1.0	1.0

$$AGB_g = AGB_{max} [2.5^3 / \{2.5^3 + (2 + \log D_{50})^3\}]$$

$$AGB_o = AGB_{max} [3^2 / \{3^2 + (2 + \log D_{50})^2\}] \quad (2)$$

ここに、 $AGB_g$ 、 $AGB_o$ はそれぞれ、大型イネ科植物、他の草本群落を表す。バイオマス量の最大値 $AGB_{max}$ は、大型イネ科植物で1,500gDW/m<sup>2</sup>、他の植物で400gDW/m<sup>2</sup>である。(gDW : 乾燥重量)  $D_{50}$ は50%粒径である。

また、樹木の陰影によって草本類バイオマスが減少する割合を示す係数 $S_H$ は、以下のように表される<sup>9)</sup>。

$$S_H = 1 - 2 LB / [\pi (C_W/2)^2] \quad (3)$$

### (3) 窒素循環モデル

落葉後、時間 $t$ の間の分解量 $B_D$ は、地面に落下した葉のバイオマス $Leaf(1-a)$ に対して次式で表わされる<sup>9)</sup>。

$$B_D(t) = Leaf(1-a)(1 - \exp(-kt)) \quad (4)$$

分解速度を示す係数 $k$ は植物の種類、地表面の状態によって異なるが、 $k=0.0024$ (/yr)とした<sup>10)</sup>。 $a$ は落葉の際の転流の割合であり平均0.3とした<sup>11)</sup>。

草本類の場合には、 $Leaf$ を地上部バイオマス $AGB_H$ に読み替え、地下茎に転流する割合 $a$ は草本類全体で扱う

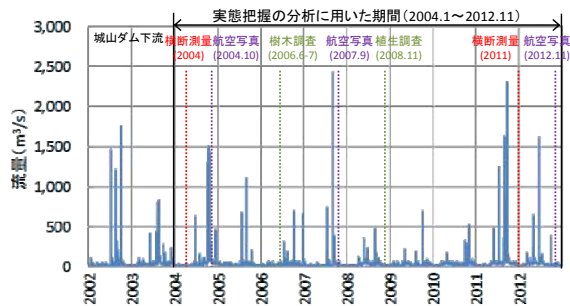


図-2 城山ダム下流地点の時刻流量ハイドロ

場合には $a=0.3$ でよい<sup>11)</sup>。

植物体内のバイオマス量に対する窒素濃度(%)は、これまでの観測結果より表-4のようにまとめられる<sup>4)</sup>。

また、出水後0.5m以上の河床上昇が生じた場合、栄養塩をほとんど含まない土砂が堆積したものとみなし、土壌窒素濃度TNを初期化するものとした。

#### (4) 河床変動モデル

流れと河床変動の解析は、一般座標系における平面二次元不定流解析と混合粒径の平面二次元河床変動解析を組み合わせた解析<sup>12)</sup>を用いた。掃流砂量は芦田・道上式<sup>13)</sup>により計算した。浮遊砂の河床からの浮上量は板倉・岸の式<sup>14)</sup>により計算し、流水中の浮遊砂濃度の移流拡散方程式により浮遊砂量を計算した。河床材料粒度分布の計算には交換層モデル<sup>15)</sup>を用いた。

以上の解析手法を用いることで、土壌の栄養塩濃度の変化、それに伴う植生バイオマスの予測が可能になる。

### 3. モデル検証河川の植生消長と河床変動の実態

#### (1) モデル検証河川の概要

河川生息場環境は、土砂移動や洪水による河床地形の侵食や堆積の結果として形成されるものであり、生息場環境の不均質性は、その時間的・空間的な変動履歴により規定される<sup>16)</sup>。河川の植生消長も、このような地形の変動履歴の結果として形成されると考えられる。草本・樹林動態モデルの開発にあたっては、植生や地形の変化が見られる動的な環境を表現できる必要がある。

そこで、航空写真や河道横断測量成果、樹木調査、時刻流量等の基礎データが存在し、近年においても河床地形の堆積や侵食、及び植生の繁茂や消失が見られる相模川16.0k~20.0kをモデル検証河川として、植生消長と河床変動の実態を把握した。本区間のセグメントは2-1、河床勾配は1/500、代表粒径 $d_{60}=60\text{mm}$ の砂礫床の河川である。上流22.0kには高低差の大きい磯部頭首工、更に上流には城山ダム、沼本ダム、相模ダム等のダム群が建設されて縦断的な土砂移動が分断されている。本区間は、この状況下において砂礫が存在する希少な区間であり、河床形態は交互砂州を形成し、洪水時には砂州が下流へ

伝播することで、かろうじて植生変化や河床変動が生じる区間である。なお、本区間に繁茂する特徴的な樹木群落はヤナギ群落、エノキ群落、及びハリエンジュ群落であり、草本類はオギ群落とツルヨシ群落である。

実態の把握を行う期間、及びデータの存在状況について、城山ダム下流地点の時刻流量ハイドロと合わせて示したものを図-2に示す。横断測量成果は2004年度及び2011年度、航空写真は2004年10月、2007年9月、2012年11月、樹木群落調査が2006年6~7月、植生調査が2008年11月に実施されているため、全体として2004年初め~2012年末までの変化を把握した。

#### (2) 植生及び地形変化の実態

植生及び地形変化については、航空写真が撮影された2004年10月、2007年9月、2012年11月の3時点を対象に、航空写真を拡大して2006年の樹木群調査結果と比較し、目視により樹木・草本群落を判定することで分布位置及び種類を推定した。更に、繁茂及び流出の変化を把握するため、2時点の分布位置を重ね合わせて、前の時点に対して変化のない箇所、新たに樹木・草本群落が入り込んだ箇所、流出した箇所を特定した(図-3)。

2004年10月と2007年9月の2時点間の変化について、2007年9月の航空写真は、約2,400 $\text{m}^3/\text{s}$ の大規模洪水の発生直後に撮影されたものである。流出したのは、17.4k~17.8kの中州に繁茂していたツルヨシ群落(草本)、18.2~18.6k左岸の砂州上のエノキ群落(樹木)、19.0~19.6k右岸のオギ群落(草本)等である。一方で、新たに侵入したのは、16.6k~16.8k左岸及び17.4k右岸のヤナギ群落、18.4k~18.8k右岸のツルヨシ群落等であった。

2007年9月と2012年11月の2時点間の変化については、2011年9月に約2,300 $\text{m}^3/\text{s}$ の大規模洪水、2012年6月に約1,600 $\text{m}^3/\text{s}$ の中規模洪水を受けてから約半年後の変化を見たものである。流出したのは、17.8k~18.6kの砂州上のエノキ群落等である。一方で、新たに侵入したのは、16.2~16.6k左岸、及び17.2k~17.6k中州、18.4k~18.6k右岸のツルヨシ群落、17.4k右岸のヤナギ群落等であった。また、いずれの時点間においても高水敷上の樹木には大きな変化は見られなかった。

これらの特徴とまとめると、洪水による流出が大きいのは、ツルヨシ群落、オギ群落、ヤナギ群落、エノキ群落であった。一方で、侵入が大きいのはツルヨシ群落及びヤナギ群落であり、砂州上で変化が生じることが分かった。流出に着目して植生の変化と交互砂州の位置関係を見ると、砂州の上流側は水衝部となるため、河岸が侵食されやすく、植生が流出しやすい状況となっている。また、17.8~18.2k左岸、及び18.6~19.0k右岸周辺等、砂州の下流側で土砂堆積が生じる箇所では、植生が繁茂していないことが分かる。これらの特性は、2004年度と2011年度の横断測量成果に基づく河床変動高分布図(図-4)を見ても、砂州の上流側で侵食し、交互砂州が下流

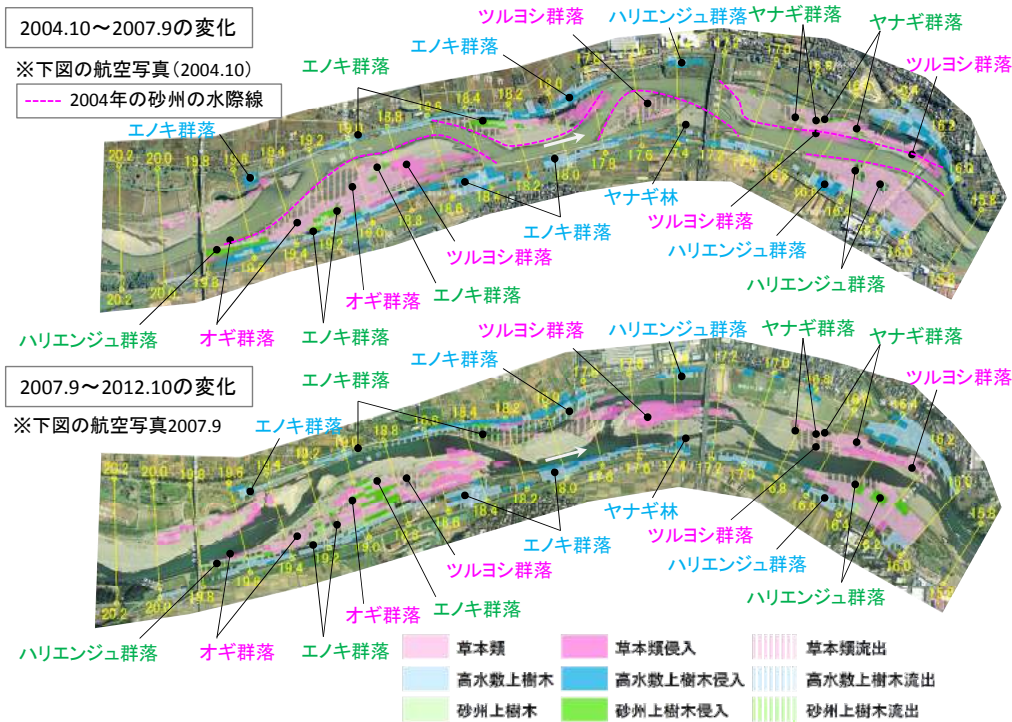


図-3 植生及び地形変化の実態（航空写真による判読）

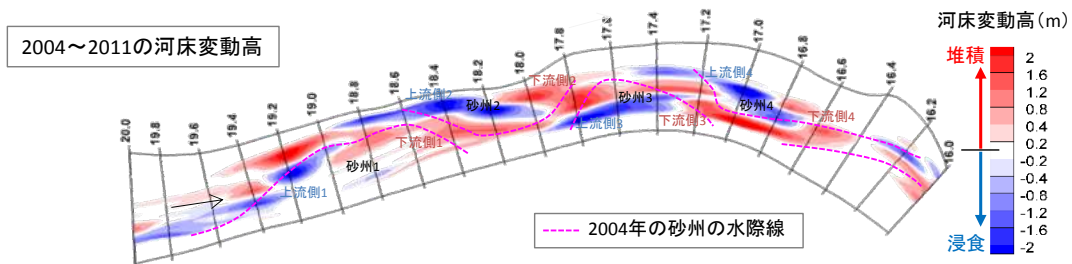


図-4 河床変動高分布図（横断測量成果による差分）

表-5 解析条件

項目	設定内容
検討区間	相模川16.0k～20.0k
対象流況	2004年1月～2012年11月（約9年間）
初期河道	2004年測量
メッシュ分割	横断間隔：約10m，縦断間隔：約40m
下流端水位	16.0k地点のH-Q関係
粗度係数	低水路： $n=0.036$ ，高水敷： $n=0.022-0.080$
上流端供給土砂	掃流砂・浮遊砂：平衡給砂量 $\times 0.95$
初期河床材料粒度分布	2005年度河床材料調査結果(16粒径)
初期樹木・草本分布	2004年10月の航空写真より判読
樹木・草本流失条件	$U_* > U_{*D90}$ (90%粒径の礫の移動限界摩擦速度) または、0.5m以上の洗掘が生じた場合
初期の土壤栄養塩(TN)	河川水中の栄養塩量 $1.5(\text{g}/\text{m}^3) \times 0.01\%$
河川からのTN供給量	〃
大気からのTN負荷量	$1.55(\text{g}/\text{m}^2/\text{yr})$
土壤の層厚	0.5m（樹木・草本の根圏深さ）
河床変動によるTN変化	0.5m以上の土砂堆積によりTNを初期化

に伝播する状況を確認できた。更に、砂州の下流側で土砂堆積が生じる箇所では、植生繁茂が抑制される傾向にあることが分かり、今後の河川管理を議論する上で、土砂が上流から供給されることの重要性を示す貴重な知見（仮説）が得られた。

このように、河道内における植生消長は土砂の堆積や侵食と密接に関わっているため、開発モデルの検証にあたっては、河床変動と植生消長の特性や関連性に留意して、モデルの再現性や課題を把握し、論じるものとする。

#### 4. 開発モデルの検証および解析結果

3. で実態分析を行った相模川16.0k～20.0k区間における2004年～2012年の河床変動（砂州移動）及び草本・樹林動態現象を対象に、2. で説明した土壌の河床変動と土壌の栄養塩循環を考慮した草本・樹林動態解析モデルの適用性を検討する。

##### (1) 解析条件

表-5に河床変動解析及び草本・樹林動態解析の条件を示す。初期河道形状は2004年度の横断測量より作成し、初期の樹木・草本分布は2004年10月の航空写真より判読した（図-3）。対象流況は2004年～2012年の9年間の実績流況（土砂移動が生じる $300\text{m}^3/\text{s}$ 以上を対象）とし、植生

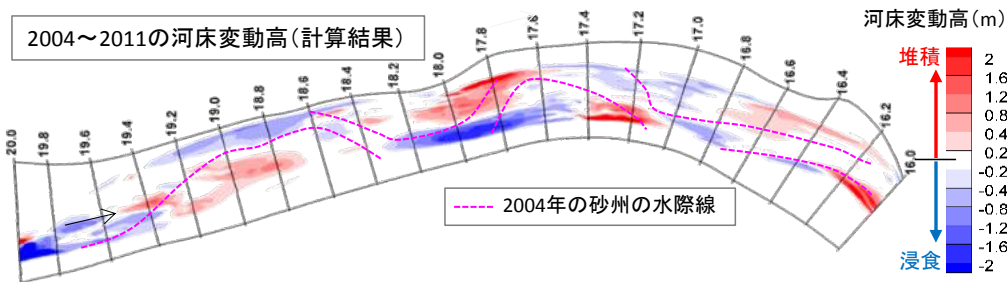


図-5 河床変動高分布図（計算値）

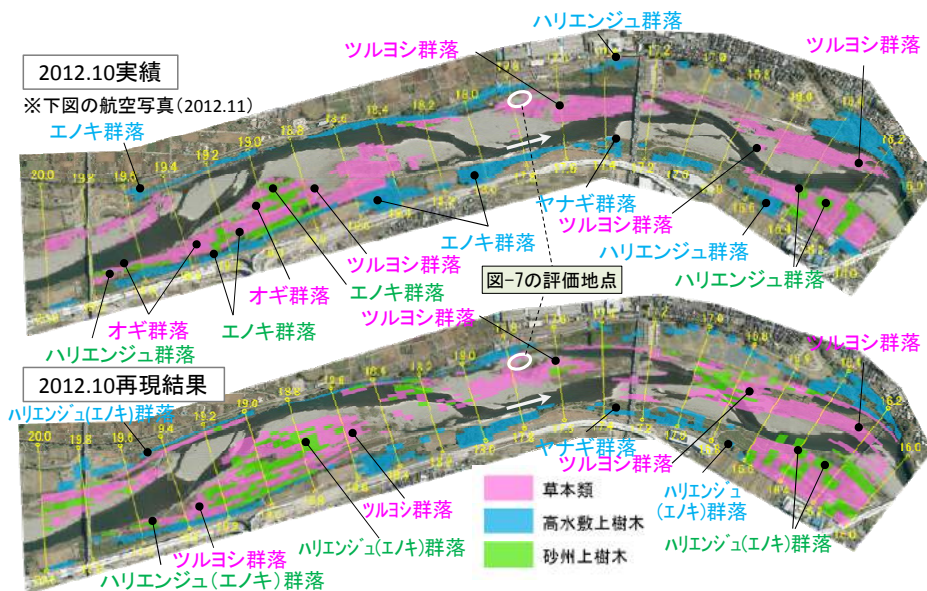


図-6 2012年10月の樹木・草本群落の分布実績と解析結果

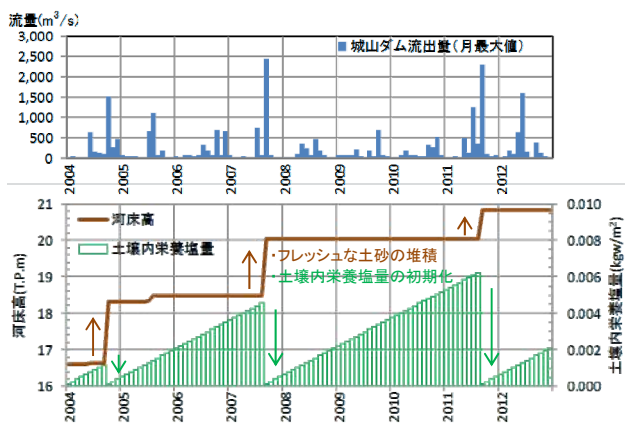


図-7 河床高と土壌内栄養塩量（17.8k左岸，計算値）

侵入は種の定着時期を踏まえ、毎年4月末に草本類、5月末にヤナギ群落、9月末にハリエンジュ・エノキの侵入判定を行った。上流端供給土砂量は平衡供給砂量を基準に解析上流端の20.0k付近の実績河床変動を再現できる量を与えた。樹木・草本が流失する条件は、樹木・草本域において90%粒径の礫が移動する掃流力が生じたとき及び洪水により0.5m以上の洗掘が生じたときとした。

初期の土壌内栄養塩量は河川水中の栄養塩量<sup>17)</sup>を基に設定し、毎年の大気からの栄養塩負荷量は神奈川県における実績値<sup>18)</sup>より設定した。

## (2) 解析結果

図-5に解析による2004年～2012年の河床変動コンターを示す。図-4の河床変動実績と解析結果を比較すると、交互砂州が同位相で下流へ伝播する現象、すなわち初期(2004年)における砂州の上流側で洗掘し下流側で堆積する傾向を良く捉えている。ただし、解析区間全体の河床変動量(砂州の移動量)は、実績に比べて計算結果の方が小さい。

図-6に解析による2012年10月の樹木・草本分布を示す。草本については、砂州上流の洗掘域において、17.4k～17.8kの右岸砂州上のツルヨシ群落や19.0k～19.6k右岸のオギ群落等が流失する結果を再現できている。また、砂州下流の堆積域において、16.2k～16.6k左岸、17.6k中州、18.8k右岸で新たに植生が繁茂する実態を再現できている。ただし、18.4k右岸や17.4k左岸等の砂州の下流側では実績と比べて解析の河床変動量が小さいために草本分布の再現性が低くなっている。

樹木については、19.0k付近右岸砂州におけるエノキ群落の繁茂や16.2k～16.4k右岸砂州のハリエンジュ群落の繁茂等を表現できている。全体としては検証期間において樹木群落の大幅な拡大は見られておらず、計算結果でも同様の結果となっている。

また、砂州の下流側でまとまった土砂堆積が生じ

た箇所(17.8k~18.0k左岸や17.2k右岸)では、植生繁茂が抑制される実態を表現できている。これは、洪水によって栄養塩をほとんど含まない(流水で洗われた)フレッシュな土砂が厚く堆積したため、新たに栄養塩が蓄積されるまでの当面の期間は植生が繁茂しづらいものと考えられる(図-7)。土壌内の栄養塩を考慮しない植生モデルの場合、土砂堆積に伴う物理環境変化は植生繁茂を促すことになり、上記のような植生繁茂を抑制する現象を表現できない。

このように洪水による河床の変化とそれに伴う栄養塩の収支をモデル化することによって、これらの影響を受ける植生消長を表現できることがわかった。

## 5. まとめ

本論文で得られた主な結論は以下の通りである。

- 1)本研究では、河床変動と土壌の栄養塩循環、草本・樹木群落の繁茂・流失過程を一体として表現する解析モデルを開発し、河川での物質循環に着目した植生消長の実態解明を行った。
- 2)モデル河川とした相模川16.0k~20.0kの植生消長と河床変動の実態から、砂州の上流側では土砂流出に伴う植生流失が確認された。また、下流側の土砂堆積が生じた箇所でも植生の繁茂は確認されない。このことは河道内の植生消長が河床変動と密接に関わりを有することを示唆する。
- 3)解析モデルを相模川に適用した結果、植生消長には河床変動に加え土壌の窒素濃度変化が寄与することを検証できた。すなわち、土砂堆積により河床高が相対的に高くなる箇所では、草本・樹木の定着後の窒素濃度の増加により植生バイオマスが増加する。一方、洪水後に栄養塩をほとんど含まない土砂によって更新される砂州の下流側などでは、植生のバイオマスの増加が抑制される。
- 4)以上より、草本及び樹木群落、窒素循環と河床変動で構成される本モデルが、植生消長の実態解明の有用なツールに成り得ることがわかった。適切かつ健全な河道及び土砂管理の実現には、河道の物理的変化だけでなく、水、土砂、栄養塩などの河川での物質循環に着目し、土砂環境と植生消長の関係を明らかにすることが重要である。

**謝辞：**本研究にあたり、神奈川県より河道横断測量成果、航空写真、樹木調査結果、時刻流量データ、河床材料調査結果等の基礎データを提供して頂きました。ここに、感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 藤田光一, 李 参照, 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.41-60, 2003.
- 2) 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.

- 3) 宮本仁志, 盛岡淳二, 神田佳一, 道奥康治, 魚谷拓矢, 大地洋平, 阿河一穂: 流量変動のインパクトを考慮した河道内樹林動態の確率モデル, 土木学会論文集B1 (水工学), Vol.67, No.4, pp. I\_1405- I\_1410, 2011.
- 4) 浅枝隆, R. Abu Baker, M. H. Rashid: 樹木管理に向けた中流域砂州の植生遷移の動的予測モデルの開発, 土木学会論文集B1 (水工学), Vol.70, No.4, pp. I\_1375- I\_1380, 2014.
- 5) 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
- 6) Asaeda, T, Rashid, M. H. and Abu Bakar, R.: Dynamic modelling of soil nitrogen budget and vegetation colonization in sediment bars of a regulated river, *River Research and Applications* 2014, Published online in Wiley Online library, DOI: 10.1002/rra.2802.
- 7) Asaeda, T, Gomes, P. I. A, Sakamoto, K. and Rashid, Md. H.: Tree colonization trends on a sediment bar after a major flood. *River Research and Applications*, Vol.27, pp.976-984, 2011.
- 8) Lines, E. R, Zavala, M. A, Purves, D.W. and Coomes, D. A.: Predictable changes in aboveground allometry of trees along gradients of temperature, aridity and competition. *Global Ecology and Biogeography*, Vol.21, pp.1017-1028, 2012.
- 9) Asaeda, T, Gomes, P. I. A. and Takeda, E.: Spatial and temporal tree colonization in a midstream sediment bar and the mechanism governing tree mortality during a flood event. *River Research and Applications*, Vol.26, pp.960-976, 2010.
- 10) Zhang, D. Hui, D. Luo, Y. Zhou, G.: Rates of litter decomposition in terrestrial ecosystems: global patterns and controlling factors, *Journal of Plant Ecology*, Vol.1, pp.85-93, 2008.
- 11) Asaeda, T, Siong, K, Kawashima, T. and Sakamoto, K.: Growth of *Phragmites japonica* on a sandbar of regulated river: Morphological adaptation of the plant to low water and nutrient availability in the substrate. *River Research and Applications*. Vol.25, pp.874-891, 2009.
- 12) 岡村誠司, 岡部和憲, 福岡捷二: 洪水流の縦断面形変化と準三次元流解析法を用いた石狩川河口部の洪水中の河床変動解析, 河川技術論文集, 第16巻, pp.125-130, 2010.
- 13) 芦田和男, 道上正規: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第206号, pp.59-69, 1972.
- 14) Itakura, T. and Kishi, T.: Open channel flow with suspended sediments, *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol.106, HY.8, pp.1325-1343, 1980.
- 15) 平野宗夫: Armoring をともなう河床低下について, 土木学会論文報告集, 第195号, pp.55-65, 1971.
- 16) Hyodo, M, Takemon, Y. and Sumi, T.: Spatiotemporal patterns of geomorphological processes determine characteristics of riverine habitat heterogeneity, *River Flow 2014 - Schleiss et al. (Eds)*, pp.2339-2346, 2014.
- 17) 水文水質データベース, <http://www1.river.go.jp/>, 国土交通省.
- 18) 武田麻由子, 小松宏昭: 相模川上流域における大気由来の窒素負荷量調査, 平成21年度 神奈川県環境科学センター報告, pp.62-69, 2009.

(2014. 9. 30受付)