統計手法による河道内植生消長 シミュレーションモデルの構築 DEVELOPMENT OF SIMULATION MODEL WITH PREVALENCE OF RIVER VEGETATION BASED ON STATISTICAL METHODS

岩見 聡¹・赤松 良久² Satoshi IWAMI and Yoshihisa AKAMASTU

¹正会員 理修 株式会社オリエンタルコンサルタンツ 環境部 (〒151-0071 東京都渋谷区本町3-12-1)
²正会員 博(工)山口大学大学院 理工学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

As a practical tool for planning and implementation of forestation measures in maintenance management of rivers, a simulation model with vegetation growth and disappearance in river channels by statistical methods was constructed for Saba River. First, we defined the vegetation transition rank that integrates the plant communities and the vegetation transition type that represents the pattern of change in vegetation transition rank. Then, the decision tree analysis was performed as the model with vegetation growth and disappearance. In this analysis, we set the vegetation transition type and the vegetation transition rank as objective variables and height difference, distance from water's edge, dimensionless tractive force and distance from the upstream weir as explanatory variables. This model revealed that the contribution of distance from the upstream weir is large, reflecting well the features of Saba River with a lot of weirs. Effect of distance from the upstream weir was discussed and analyzed by random forest.

Key Words : vegetation transition , decision tree analysis, random forest, Saba River

1. はじめに

全国の河川では、ハリエンジュやヤナギ類等による河 道内での樹林化が進行し、量的・質的な治水安全度の低 下や礫河原の減少による生物多様性への悪影響などが懸 念されている。河川管理者は、河道掘削や樹木伐採等の 対策を講じているが、土砂の再堆積や再樹林化もみられ る.公共事業に対するコスト縮減が求められている中で、 河川毎、場所毎に異なる具体的な樹林化の要因を明らか にして、河道内の植生消長を予測、評価するモデルを構 築することは、解決すべき危急の課題となっている.

河道内の植生消長シミュレーションモデルについては、 李ら¹⁾や藤田ら²⁾を端緒として、土砂動態を含めた植生遷 移の過程をモデル化する研究が行われ、これまで多くの 知見が得られているが、植生消長の素過程を積み重ねて 樹林化の全容を説明するまでには至っていない.そのた め、最近では、中村ら³⁾、今村ら⁴⁾、田頭ら⁵⁾のように、 モデルを統計手法により構築する試みも行われるように なっている.これらの研究は、河川水辺の国勢調査の植 生図を活用して、河道内の植生と物理環境との関係を説 明している点で共通するが、植生図は、年次毎に植物群 落の統合、新設が行われており、群落同士を単純に比較 することができない.また,凡例の数も多く,植生消長 の分析には,群落をまとめる工夫も必要となる.そのた め,中村ら³や今村ら⁴は,年次毎の植生消長のパターン を整理し,代表的な植物群落に着目してモデルを構築し ている.また,田頭ら⁵は,植物群落を目的変数,物理 環境を説明変数としてクラスター分析を行い,「植物群 落が立地する場の物理環境の類似性に基づき類型化した 空間単位」として「群落クラスタ」を提案している.一 方,本研究では,後述するように植生遷移の方向を考慮 して植物群落を「植生遷移ランク」に統合し,「植生遷 移タイプ」として植生遷移ランクの変化の方向(樹林化 や草地化)を整理した上で,植生消長のモデル化を行っ ている.

統計手法によるモデルは植生消長の素過程をブラック ボックス化するが、現場の植生消長の実態を説明する実 用的なモデルになる可能性がある.また、構築したモデ ルの他河川への適用の難しさについても標準的な構築手 法が提示されれば克服できる課題と考えられる.

本研究は、河川の維持管理における樹林化対策を計画、 実施するための実用的なツールとして、統計手法により 河道内植生消長シミュレーションモデルを構築し、今後 の樹林化対策に資することを目的とした.



図-1 植生遷移ランクと植生遷移タイプ

表1	水理計算の計算条件

計算範囲	距離標-1.2km~26.2km(国直轄区間)
対象期間	H12~H17およびH17~H22
地形条件	H12~H17はH15,H17~H22はH20の横断測量約
	果を使用
格子条件	一般座標系(縦断方向に約20m,横断方向に1
	分割)
植生条件	H12~H17はH12, H17~H22はH17の植生図」
	り、草本群落、木本群落を抽出し、前者は草語
	0.5m,後者は樹高3.5mとして設定
流量条件	期間最大 H12~H16:613.52m³/s(H16)
	流量 H17~H21: 1346.75 m³/s(H21)
	平水流量 8.87m ³ /s(H14~H25の平均)

2. 方法

(1) 研究対象地

本研究は佐波川を対象とした.当該河川は、山口県の 中央部をほぼ南流する.周防山地の三ヶ峰に発して、大 原湖(佐波川ダム)を経て周防灘に注ぐ、幹川流路延長 56km,流域面積460km²の一級河川である.流域の土地 利用は、山地が約90%を占めるが、谷底平野と下流部の 三角州および干拓地には農耕地が分布している.

本研究の対象区間は、国の直轄区間である-1.2km~ 26.2kmとしたが、この区間には現在、14基の取水堰(可 動堰6基、固定堰8基)が存在する.また、河道内にはヤ ナギ林や竹林がみられ、樹林化も進行しているという状 況にある.

(2) 植生遷移ランクと植生遷移タイプの定義

本研究では、植物群落を、植生遷移の方向も考慮して、 ①湿生草本群落、②乾生低茎草本群落、③乾生高茎草本 群落、④湿生木本群落、⑤乾生木本群落に区分し、これ を「植生遷移ランク」と定義した。

植生遷移ランクを用いると、前後の年次の植生図を比 較することで植生の消長が把握できる.たとえば、図-1 に示すように、H12の植生図で植生遷移ランクが③乾生 高茎草本群落であった場所が、H17の植生図で①湿生草 本群落~⑤乾生木本群落のどの植生遷移ランクになって いるかを追跡する.この植生遷移ランクの変化のパター ンを「植生遷移タイプ」と定義した.



植生遷移タイプには、植生遷移ランクが増加するパ ターン(図-1の③→④⑤等)と減少するパターン(図-1 の③→①②等)があるが、本研究では、前者を「樹林 化」、後者を「草地化」とした.

(3) 植生遷移ランクの設定

植生遷移ランクを物理環境からさらに区分するため, 植生遷移ランク毎に植物群落を目的変数,比高,水際か らの距離,無次元掃流力の平均値と標準偏差を説明変数 としてクラスター分析により分類した.

物理環境の各項目は、河川の流動・河床変動解析ソフトウエアであるiRIC-Nays2DH⁶⁰を用いて水理計算した結果から算出した.計算条件は表-1に示すとおりである. このうち、河川流量は漆尾水位観測所のデータを用いた(図-2,3).

(4) 植生遷移タイプの分析

H10, H15, H20の横断測量結果からiRIC-Nays2DHに より水理計算と同一の計算格子を生成し, H12, H17, H22の河川水辺の国勢調査の植生図と重ね合わせ, 格子 上の植物群落を抽出して, 植生遷移ランクで区分した.



植生遷移タイプは、植生遷移毎にH12とH17, H17と H22を対比して、植生遷移ランクが増加するパターン (樹林化)と減少するパターン(草地化)を抽出した.

(5) 植生消長シミュレーションモデルの構築

a)モデルの構成

植生消長シミュレーションモデルは、まず、植生遷移 タイプ(植生遷移ランクの変化の方向)を予測し、つい で、植生遷移ランクが増加(樹林化)または減少(草地 化)する箇所での植生遷移ランクを予測する構成とした. 本研究では、前者を「植生遷移タイプモデル」、後者を 「植生遷移ランクモデル」とした(図-4).

b)モデルの構築

モデルの構築には決定木分析を用いた. 植生遷移タイ プモデルでは、目的変数は、植生遷移ランクの増加(樹 林化)、減少(草地化)、変化なしの3タイプとした. 植生遷移ランクは、水理計算の計算格子と植生図を重ね 合わせ、格子上のランクを抽出した.説明変数は、 iRIC-Nays2DHによる水理計算結果から算出する比高、 水際からの距離、無次元掃流力および上流堰からの距離 とした.計算には、H12~H17、H17~H22の全てのデー タを使用した.

植生遷移ランクモデルでは、目的変数は植生遷移ラン クとし、説明変数は、植生遷移タイプモデルと同一とし た.計算には、前後の年次で植生遷移ランクが増加また は減少したデータを使用し、前者を樹林化モデル、後者 を草地化モデルに適用した.

モデルの精度は、同じデータを用いて実測値と計算値 が一致する割合(適合率)により確認した.なお、決定



木分析には,統計解析ソフトウエアであるR3.1.3の "rpart"パッケージ⁷⁾および"rpart.plot"パッケージ⁸⁾を用いた.

3. 結果

(1) 植生遷移ランクの設定

a)水理計算結果

水理計算は、出水時と平水時を対象とし、出水時は、 期間最大流量(H12~H16は613.52m³/s, H17~H21は 1346.75 m³/s)のハイドログラフからピーク時を挟む72 時間について実施した.また、平水時は、平水流量 (8.87m³/s)を与えて、同様に計算した。

説明変数とした比高と水際からの距離は平水流量時, 無次元掃流力は河床材料の粒径を40mm(計算範囲の中 央粒径の平均値)とし,期間最大流量におけるピーク時 の計算値を用いた.

無次元掃流力の分布を図-5に示す. H17~H21は岸寄 りを除き全域で大きな値を示したが,期間最大流量も H12~H16の約2倍となっていた.

b) クラスター分析結果

乾生低茎草本群落および湿生木本群落について,水理 計算から算出される比高,水際からの距離,無次元掃流 力を説明変数として,クラスター分析を行い,同様の立 地環境を有する植物群落に区分した(図-6).

乾生低茎草本群落は、カナムグラ、カワラヨモギ・カ ワラハハコ等とチガヤ、シバ、シナダレスズメガヤ、ヨ モギ・メドハギ等、湿生木本群落は、コウライヤナギ (低木)、クズ、ノイバラ等とコウライヤナギ等にそれ ぞれ2分された.以下、乾生低茎草本群落(A)、同(B)、 湿生木本群落(A)、同(B)として区分する.

表−2 カテゴリー毎の立地環境((平成12年,	17年,	22年)
-------------------------	---------	------	------

	比高		水際からの距離		無次元掃流力	
遷移ランク	(m)		(m)		$(\times 10^{-2})$	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
湿生草本群落	0.7	0.8	21.2	23.6	4.76	4.82
乾生低茎草本群落(A)	1.2	1.2	26.0	20.0	3.00	3.99
乾生低茎草本群落(B)	2.8	1.4	48.3	26.8	0.75	2.21
乾生高茎草本群落	1.9	1.4	39.9	24.7	1.53	3.00
湿生木本群落(A)	0.8	1.0	20.5	20.7	2.98	3.82
湿生木本群落(B)	1.1	1.3	29.6	29.1	3.03	4.01
乾生木本群落	1.8	1.5	33.8	27.2	2.15	3.94

表-3 植生消長の分析に用いる植生遷移ランク

①湿生草本群落		
②乾生低茎草本群落	(A)	比高の小さい場所等に立地
③乾生低茎草本群落	(B)	比高の大きな場所等に立地
④乾生高茎草本群落		
⑤湿生木本群落(A)	比福	高の小さい場所等に立地
⑥湿生木本群落 (B)	比福	高の大きな場所等に立地
⑦乾生木本群落		



乾生低茎草本群落と湿生木本群落の立地環境をみると, 表-2に示すように,比高や水際からの距離により区分さ れていることが分かる.結果として,植生遷移ランクは 表-3に示す7区分となった.対象範囲のうち,落合堰~ 尾倉堰における植生遷移ランクの分布を図-7に示す.乾 生木本群落は,落合堰の下流ではH17に拡大し,H22も 維持されているのに対し,湿生草本群落は,落合堰と尾 倉堰の間ではH17とH22に拡大している.

(2) 植生遷移タイプの分析

H12, H17, H22の植生図とH10, H15, H20の地形 (iRIC-Nays2DHの計算格子)を重ね合わせ,格子上の 植生遷移ランクを抽出し,H12~H17とH17~H22の植生 遷移タイプ毎の格子数をカウントした(表-4).

植生遷移タイプ数は7区分(H12またはH17)×7区分 (H17またはH22)の49タイプであり、植生遷移ランクが増 加するパターンは樹林化、減少するパターンは草地化を 表している.

佐波川における植生遷移ランクの変化をみると,H12 ~H17は「増加」が「減少」を上回り,樹林化が優勢で あったのに対し,H17~H22は「増加」と「減少」が同 程度で,樹林化と草地化が拮抗していたことが分かる.

表-4 佐波川における植生遷移タイプ				
植生遷移タイプ	植生遷移の傾向			
相生遷移ランク 平成12年 平成17年 湿生草本群落 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 二	●樹林化 ・湿生草本群落→湿生木本群落 (A)(B)・乾生木本群落 ・乾生低茎草本群落(B)→乾生木本 群落 ・湿生木本群落(A)→湿生木本群落 (B)			
植生遷移ランク 平成12年 平成17年 湿生草本群落 乾生低茎草本群落(B) 乾生低茎草本群落(B) 乾生木本群落(B) 過生木本群落(B) 乾生木本群落(B)	●草地化 ・乾生高茎草本群落→湿生草本群 落,乾生低茎草本群落(B) ・湿生草本群落(A)→湿生草本群落 ・乾生木本群落→乾生低茎草本群 落(B),乾生高茎草本群落,湿生木 本群落(A)			
植生選移ランク 理生草本群落 乾生低茎草本群落(B) 乾生低茎草本群落(A) 湿生木本群落(B) 酸生木本群落(B) 酸生木本群落	●樹林化 ・湿生草本群落→湿生木本群落 (A)(B),乾生木本群落 ・乾生低茎草本群落(B)→乾生高茎 草本群落			
植生選移ランク ^{平成17年} 湿生草本群落 乾生低茎草本群落(B) 乾生低茎草本群落(B) 乾生低茎草本群落(B) 湿生木本群落(B) 乾生木本群落(B) 乾生木本群落	●草地化 ・乾生高茎草本群落→湿生草本群 落,乾生低茎草本群落(B) ・湿生草本群落(B)→湿生草本群落 ・乾生木本群落→湿生草本群落・乾 生低茎草本群落(B),湿生木本群 落(B)			

注) 植生遷移ランクが変化した箇所について、円の大きさは各年次の植 生遷移ランク毎の格子数、線の太さは植生遷移タイプ毎の格子数を示す。



図-8 植生遷移タイプモデル(乾生低茎草本群落(A)) C1:樹林化, C2:草地化, C3:変化なし, V1:比高(m), V2:水際からの距離 (m), V3:無次元掃流力(×10²), V4:上流堰からの距離(m)

期間最大流量はH12~H16よりH17~H21の方が大きく, H12~H17とH17~H22の植生遷移タイプの相違は河川流 量によるものと考えられた.

なお、河道内の植生は出水規模に応じて年単位で消長 するが、表-4の植生遷移タイプは、河川水辺の国勢調査 における植生図の更新間隔である5年に1回の出水規模で の植生消長を示していることになる.

(3) 植生消長シミュレーションモデルの構築a) 植生遷移タイプモデル

植生遷移タイプモデルの一例を図-8に示す.乾生低茎 草本群落(A)では、無次元掃流力が0.016未満で上流堰か らの距離が1962m未満の場合または比高が1.8m以上の場 合に樹林化し、それ以外の条件では湿生草本群落に遷移 することを表している.

表-5 植生遷移タイプモデルの概要

植生漂我ランク	説明変数	適合率		
恒工造物ノンノ	(ルートノード)	H17	H22	
①湿生草本群落	比高	0. 788	0.675	
②乾生低茎草本群落(A)	無次元掃流力	0.801	0. 605	
③乾生低茎草本群落(B)	比高	0. 645	0.750	
④乾生高茎草本群落	無次元掃流力	0. 504	0. 520	
⑤湿生木本群落(A)	上流堰からの距離	0.655	0. 518	
⑥湿生木本群落(B)	上流堰からの距離	0. 700	0. 791	
⑦乾生木本群落	上流堰からの距離	0, 683	0, 608	

表-6 植生遷移ランクモデル(樹林化モデル)の概要

植生漂移ランク	説明変数	適合率		
恒工造物ノンノ	(ルートノード)	H17	H22	
①湿生草本群落	比高	0. 333	0. 412	
②乾生低茎草本群落(A)	上流堰からの距離	0.610	0. 554	
③乾生低茎草本群落(B)	水際からの距離	0. 741	0. 537	
④乾生高茎草本群落	上流堰からの距離	0.816	0.696	
⑤湿生木本群落(A)	上流堰からの距離	0 916	0 787	

表-7 植生遷移ランクモデル(草地化モデル)の概要

枯生連投ニンク	説明変数	適合率		
恒工虐物ノンソ	(ルートノード)	H17	H22	
③乾生低茎草本群落(B)	上流堰からの距離	0. 985	0.968	
④乾生高茎草本群落	比高	0.819	0. 727	
⑤湿生木本群落(A)	比高	0. 719	0. 791	
⑥湿生木本群落(B)	上流堰からの距離	0. 571	0.680	
⑦乾生木本群落	無次元掃流力	0.479	0.368	

モデルの適合率は,**表-5**に示すように,H17,H22と もに乾生高茎草本群落と湿生木本群落(A)を除くと0.6以 上であり,現況再現は概ね良好であった.

b)植生遷移ランクモデル

樹林化モデルとして,湿生木本群落(B)と乾生木本群 落を除く5ケース,草地化モデルとして,湿生草本群落 と湿生低茎草本群落(A)を除く5ケースの計10ケースにつ いて決定木分析を実施した.

樹林化モデル,草地化モデルの一例を図-9,10に示す. モデルの適合率は,表-6,7のように,H17,H22ともに 樹林化モデルでは湿生草本群落と乾生低茎草本群落(B), 草地化モデルでは乾生木本群落を除くと0.6以上であり, 現況再現は概ね良好であった.

決定木分析では、ツリーのノード毎に分割条件を設定 し分類を行うが、分割条件には各ノードに与えられた データを最も良く分割する説明変数が選択される.ルー トノードには全データが与えられているため、最初に選 択された説明変数の寄与が最も大きいことになる.樹林 化モデルでは、ルートノードの説明変数は「上流堰から の距離」が最も多く、樹林化の要因として堰の影響が大 きいことが示唆され、取水堰が多い佐波川の特徴を良く 表していた.

H12~H17とH17~H22で、実測値(現況)と植生遷移 ランクモデルによる計算値(現況再現)を対比し、図-11,12に示す。H12~H17,H17~H22とも、植生遷移ラ ンクの実測値と計算値は概ね同様の分布を示しており、 現況を良く再現している。



図-9 樹林化モデル(乾生高茎草本群落)

C1:湿生草本群落, C2:乾生低茎草本群落(A), C3:乾生低茎草本群落(B), C4:乾生高茎草本群落, C5:湿生木本群落(A), C6:湿生木本群落(B), C7:乾生木本群落, V1:比高(m), V2:水際からの距離(m), V3:無次元掃流 力(×10²), V4:上流堰からの距離(m)



C1:湿生草本群落, C2:乾生低茎草本群落(A), C3:乾生低茎草本群落(B), C4:乾生高茎草本群落, C5:湿生木本群落(A), C6:湿生木本群落(B), C7:乾生木本群落, V1:比高(m), V2:水際からの距離(m), V3:無次元掃流 力(×10⁻²), V4:上流堰からの距離(m)





図-13 部分従属プロットを用いた湿生草本群落から乾生低茎草 本群落(A)または湿生木本群落(A)に遷移するケースでの 上流堰からの距離の影響度の評価

4. 考察

河道内植生消長シミュレーションモデルのうち,樹林 化モデルでは,対象とした佐波川の特徴を反映して,

「上流堰からの距離」の寄与が大きかったが,他河川へ の適用を検討するためには,「上流堰からの距離」の意 味を明らかにしておく必要がある.そこで,決定木分析 の一種で,説明変数の影響度を定量的に評価できるラン ダムフォレストによる分析を行った.なお,分析には統 計解析ソフトウエアであるR3.1.3の"randomForest"パッ ケージ⁹を用いた.

ランダムフォレストは、一定の数のデータをランダム にサンプリングして多数の決定木を構築し、その多数決 により分類を行う方法であり、特定の説明変数が分類結 果に及ぼす影響を部分従属プロット(Partial dependence plots)により評価することができる.部分従属プロット のX軸は説明変数、Y軸は着目する区分に分類される確 率の指標であり、両軸の関係は次式で表される.

$$Y = \log p_k(X) - \frac{\sum_{j=1}^{n} \log p_j(X)}{K}$$
(1)

ここで、Kは区分の数、k、jは添数で、kは着目する区 分、jは任意の区分の番号である.また、 $p_k(X)$ 、 $p_j(X)$ はXの値に応じてk、jの区分に分類される確率を示している.

「上流堰からの距離」の部分従属プロットの一例として、植生遷移タイプのうち、湿生草本群落から乾生低茎 草本群落(A)および湿生木本群落(A)に遷移するタイプに ついて図-13に示す.湿生草本群落は、上流堰からの距 離が約2km以下で乾生低茎草本群落(A)に、また、約 2.5km以上で湿生木本群落(A)に分類される確率が高く なっている.

高村ら¹⁰は、佐波川で堰の統廃合の一環として撤去さ れた旧金波堰を対象に、堰の撤去後、複数年間の河床変 動計算を実施し、旧金波堰から2km下流の断面で土砂堆 積が生じていることを示しており、「上流堰からの距 離」にも土砂の堆積や浸食等、長期的な河床変動が関与 していることが示唆される.

5. おわりに

佐波川を対象に,統計手法(決定木分析)により河道 内植生消長シミュレーションモデルを構築した.はじめ に,植生遷移の方向を考慮して植物群落をまとめた「植 生遷移ランク」と植生遷移ランクの変化のパターンを表 す「植生遷移タイプ」を定義した.モデルは,植生遷移 タイプを予測した後,植生遷移ランクの増加(樹林化) と減少(草地化)を予測する構成とした.説明変数は, 比高,水際からの距離,無次元掃流力,上流堰からの距 離であるが,上流堰からの距離の寄与が大きく,多数の 取水堰が設置されている佐波川の特徴を良く表していた. なお,上流堰からの距離には土砂の堆積や浸食等,長期 的な河床変動が関与していることが示唆された.

統計的なアプローチは植生消長の素過程をブラック ボックス化するため、構築したモデルを他の河川にその まま適用するのは難しいが、同様のモデルを構築する道 筋は本研究において示せたと考えている.

参考文献

- 李参熙,藤田光一,山本晃一: 礫床河道における安定植生域 拡大のシナリオー多摩川上流部を対象にした事例分析より-, 水工学論文集,第43巻, pp.977-982, 1999.
- 2)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.41-60, 2003.
- 3) 中村圭吾,芳賀正崇,岩見洋一,今村史子,徳江義宏:統 計的アプローチによる河川における植生予測モデルの検討, 河川技術論文集,第20巻,pp.205-210,2014.
- 4) 今村史子,徳江義宏,日高初淑,中村隆人:長良川の樹林 化実態の把握と要因推定の試み,河川技術論文集,第20巻, pp.211-216,2014.
- 5)田頭直樹,傅田正利,片桐浩司,中西哲,萱場祐一:千曲 川における植生管理のための空間単位「群落クラスタ」とそ の実用性に関する研究,水工学論文集,第59巻,pp.53-58, 2015.
- 6) iRIC研究会: http://i-ric.org/ja/ index.html
- Therneau, T., Atkinson.B., Ripley,B. : Recursive Partitioning and Regression Trees, R package version 4.1-9, 2015, http://cran.rproject.org/web/packages/rpart/index.html
- Milborrow, S. : Plot rpart Models. An Enhanced Version of plot.rpart, R package version 1.5.2, 2015, http://cran.rproject.org/web/packages/rpart.plot/index.html
- Liaw, A., Wiener, M. : Breiman and Cutler's random forests for classification and regression, R package version 4.6-10, 2014, http://cran.r-project.org/web/packages/randomForest/index.html
- 10) 高村紀彰,赤松良久,永野博之: 佐波川における堰の統廃 合後の河床変動についての検討,土木学会論文集B1(水工学), vol.70, No.4, pp.I_1069-I_1074, 2014.

(2015.4.3受付)