

砂州上の植物群落分布の再現モデル

古東 哲¹ 岸本 崇² 岡部 健士³ 鎌田 磨人⁴

¹学生会員 徳島大学大学院工学研究科(〒770-8506 徳島市南常三島町2丁目1番地)

²学生会員 徳島大学大学院工学研究科(〒770-8506 徳島市南常三島町2丁目1番地)

³正会員 工博 徳島大学工学部教授(〒770-8506 徳島市南常三島町2丁目1番地)

⁴正会員 学術博 徳島大学工学部助教授(〒770-8506 徳島市南常三島町2丁目1番地)

本研究では、河道内植生の動態予測モデルの基礎とするために、河状履歴指標から現存植生分布図を再現するモデルの構築を試みた。その手法としては、PHABSIM の概念を参考に著者らが提案している選好度モデルとニューラルネットワークモデルの2種をとりあげた。説明変数とする河状履歴指標の選び直し、および前者のモデル構造の再検討をしたのち、四国・吉野川に形成された一つの交互砂州で観測された植生図の再現を実行した。その結果、両モデルともにある程度の再現性を有することが検証されたが、このように物理環境の因子のみから植生図の再現を行うことには精度上の限界があることも認識された。

Key Words : riparian plant-communities, vegetation map, habitat attribute, preference curve, neural network model

1. まえがき

近年、我が国では、中・下流域の河道内において植生の繁茂が顕著である。河道内植生は、河川の治水・環境機能に多大な影響を及ぼしており、その適切な維持・管理が求められている。そのためには、植物群落の分布と動態の定量的把握、およびその将来予測法の確立が必要である。

これまでに、河川水辺の植物群落と局所的な物理環境との関係に関する調査・研究が盛んに行われている。例えば、辻本ら¹⁾は、手取川の植物群落の分布が主として比高に支配されていることを示した。また、砂田ら²⁾も、釜無川を対象に草本類の被覆面積を 5m×5m のメッシュデータとしてとりまとめ、それと比高との関係を回帰分析した。李³⁾らは、多摩川を例に、植生域の拡大には表層細粒土砂の堆積が重要な役割を果たしていることを示したのち、その拡大過程のシナリオを描き、瀬崎ら⁴⁾らは、逆に草本流失のシナリオを紹介した。さらに、辻本ら⁵⁾は、手取川と安倍川を例に挙げ、ダム建設によって、洪水による植生破壊の機会が減少し、河道で樹林化が進行した過程を航空写真および年最大流量データから示したのち、植生の繁茂・破壊モデルを用いて植生域の面積

の変遷を数値シミュレーションしている。そして、著者らも徳島県吉野川下流域の交互砂州群に着目した調査・研究を進めてきた。現地で詳細な植生調査を実施し、植物群落の分布状況を把握するとともに、河床の不安定性、水分条件、洪水時の流体力の大きさなどという物理環境の履歴を代表するいくつかの指標（以下、河状履歴指標と呼ぶ）から植物の立地特性を議論してきた^{6),7),8)}。さらに、植生動態予測法の構築に向けた第一歩として、既存の植生図を 10m×10m メッシュデータとして整理し、河状履歴指標を説明変数として現存植生図を回帰的に再現する手法も提案した⁹⁾。この方法は魚の生息環境の定量的評価モデルである PHABSIM¹⁰⁾を参考にしており、まず各種植物の物理環境履歴への選好度曲線を作り、これを利用して各メッシュを優占する植物の種類を識別するもので、選好度モデルと名付けている。ただし、本モデルを適用した結果は、メッシュ単位でみだ的中率が約 45%で満足できるものとはいえず、さらなる改善の必要性が指摘された。

本文では、植生図の再現精度をより向上させるために、以下のようなことを行っている。まず、再現モデルの説明変数として用いる河状履歴指標を生態学的観点から再検討し、新たな指標を選定する。ついで、著者らが提案

した選好度モデルについて見直しを行い、改善の方向性を模索する。さらに、他の形式の再現モデルとしてニューラルネットワークをとりあげ、その再現性能を調べる。

ところで、河道内植生の動態には河状履歴指標で代表されるような物理的環境条件だけでなく、植物相互の競争・競合や植物による環境形成作用（土壌の質や日照条件の改変など）も大いに関与している¹⁰⁾。したがって、その時間的な断面である植生図を河状履歴指標のみから再現することには自ずと限界がある。筆者らは、この点を十分に認識しながらも、本文では再現性を最大限に向上させる方向を探っている。

2. 再現対象の植生図



図-1 調査区間と砂州の概要

再現の対象とする砂州は、1級河川吉野川の下流部に設置された柿原堰と第十堰の間に存在している交互砂州群の1つであり、河口からの追加距離が約19～21kmに位置している（図-1）。図-2は1994年に実施された植生調査をもとに、現地スケールで10m×10mのメッシュデータとして描いた植生図である。植物社会学的には合計12種の異なった優占種の群落を確認したが、図では、それらを6種および裸地に統合している。この理由は、本研究が目指す植生図の再現は主として河道の粗度評価への利用という河川工学的な立場で進められている

ことにあ。すなわち、粗度の観点から植物群落を類型化するには、個体の流体抵抗特性が類似した種の区別はとくに必要がないし、被度・群度の小さい種は無視しても差し支えない。例えば、シナダレスズメガヤ、チョウジタデ、オオフトバムグラなどは貧栄養である裸地に侵入してくるパイオニア的植物であるが、その生残期間はさほど長くない、植被率も小さいことからこれらを裸地に含めた。また、アカメヤナギとネコヤナギは共存性が高く、流体抵抗特性も類似していると思われたため、これらをヤナギ群落として統合した。このほか、オギやツルヨシの群落の中に散在するノイバラやチガヤの群落なども前者のいずれかに含めた。

3. 河状履歴指標の選定

前報⁹⁾で提案した選好度モデルの説明変数としては5種の河状履歴指標（累加河床変動量、累加絶対河床変動量、平均比高、冠水時間率、冠水時平均摩擦速度）を採用した。これらの指標の値は、まず、評価期間を1981年～1992年の12年間とし⁷⁾、各定期横断測量断面に等間隔で201個づつ設定した標定点について、横断測量成果や流量・水位の時系列資料をもとに、不等流計算も行いつつ計算した。ついで、図-2の植生図におけるメッシュごとの指標値を、先に算出された指標値をもとに、3次スプライン内挿法により推定した。

上記の5種の指標は、ある期間内における物理環境の平均的な傾向を表わしているが、これだけの情報で任意の地点に出現する群落の種類を精度よく判断することは困難なようで、事実、先述したとおり再現精度は50%にも満たなかった。そこで、以下においては、河道内の多様な物理環境に対する植物の応答特性を再度整理しつ

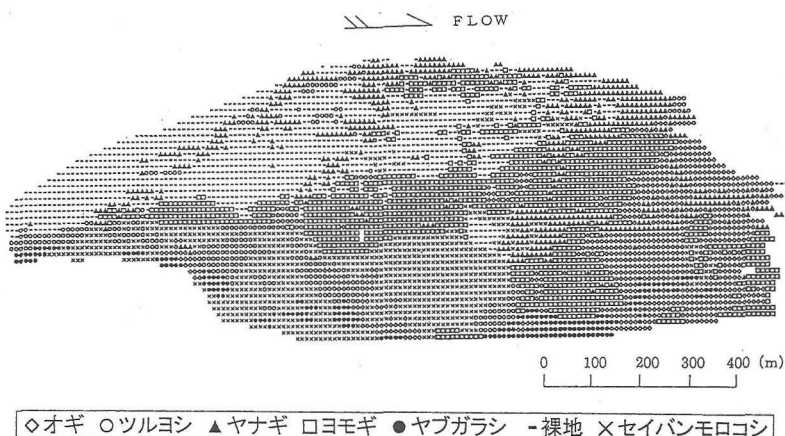


図-2 メッシュデータ化された砂州上の植生図

つ、新たに考慮すべき指標を選出する。

まず、地盤の水分条件は植物の定着・成長を支配する重要な因子であり、それを定量的に表現する指標として、年平均水位を基準にした地盤高として定義された平均比高を用いてきた。この指標によって、年間を通しての平均的な水分の得やすさは評価できる。ただし、とくに我が国では河川流量の年内変動が大きく、ある時期、植物が利用可能な水が枯渇する状況が生じやすい。このような渇水期の影響を評価するために、年最小流量時の水位に基準をおく比高にも着目することとし、その期間内平均として「平均渇水期比高」を新たに導入する。また、河床が局所的に見て平坦であるか、あるいは凹凸を呈しているかということも、浸透性が高い河床内層の水分条件を左右する重要項目であろう。そこで、標定点を中心とする凹凸状況を、各年の局所的な河床横断形状に2次関数を当てはめる場合の2階微係数で評価することにし、この期間内平均として定義された「平均地形凹凸度」も取り入れる。

つぎに、河床の不安定性は植物の埋没や流失に関係する因子である。これまで、河床の変動動向（上昇か下降か）および河床の不安定さを表わす指標としては、それぞれ累加河床変動量および累加絶対河床変動量と命名した指標を用いてきた。ところが、例えば、ヤナギ類は個体の大半が埋没しても地下部に新しい根茎を形成するが、大半の草本類ではそれができないなどのように、植物の種類によって、埋没・流失に対する耐性は異なっている。また、河床の上昇と下降が植物に及ぼす影響の機構は別であることは言を待たない。そこで、河床変動の状況をより詳細に表現することを目的として、新たに「累加河床上昇量」および「累加河床下降量」と呼ぶ2種の指標を定義する。両者は、評価期間内の各年を河床の上昇年と下降年に分け、それぞれについて別々に変動量を累加したものとする。

さらに、出水による冠水あるいは流体力の作用は、それぞれ植物の窒息による衰弱や死滅あるいは破壊や流失の原因となる。そのような出水の規模や頻度を評価する指標として、すでに冠水時間率および冠水時平均摩擦速度を定義している。ただし、これらの指標値は、通年の平均的な量として求めることにしているので、たとえ短時間であっても植物の破壊につながるような強い流体力が作用したという履歴は必ずしも的確に評価されない。そこで新たに、植物に破壊的なダメージを及ぼすような流体力の大きさを評価するものとして年最大流量発生時の摩擦速度、大きい流体力が発生する頻度を代表するものとしてある閾値以上の流量の洪水期間に限定した冠水時間率にも注目し、これらの期間内平均値として「平均年最大摩擦速度」および「平均洪水期冠水時間率」を定義する。なお、本調査対象区間については、冠水時間率

を求める際の流量の閾値は $1,000\text{m}^3/\text{s}$ と設定された。

本研究では、まず、以上のようにして新たに選出された6種の河状履歴指標に、これまでも用いてきた5種の指標を加えた合計11種の指標群を再現モデルに入力する説明変数の候補とした。そして、後述する手法による再現に適用することを通して、試行錯誤的に取捨選択していくことにした。

4. 植生図の再現モデル

図-2のような植生図の各メッシュで優占する植物の種類を前節で示した指標群から判定する方法としては種々のものが考えられるが、本文では、著者ら⁹⁾が提案した選考度モデルおよびニューラルネットワークモデルに着目している。前者は、魚類の生息環境評価手法の一つとして知られている PHABSIM¹⁰⁾ からヒントを得たもので、あらかじめ出現可能な植物の種類ごとに、それぞれの指標に対する選好度曲線を作成しておく。そして、各メッシュについては、まず、別途に算定した指標値群から植物の種類別、指標別の選好度を求め、ついで、それらを累加的あるいは累乗的に結合した結果の比較により優占種を割り出す。この種の方法は多分に経験的側面を持つが、その判断過程を分析すれば、多様な物理環境に対する植物固有の応答特性を整理して把握することができる。一方、後者の内容についての解説は省略するが、関連因子が多い複雑な非線形システムの入・出力関係を精度良く記述する手法として広く利用されている。ただし、その本質はブラックボックスモデルの域を出ないので、最終的に得られたモデル構造から優占種の決定機構までも垣間見ることは困難である。

さて、上述した2種のモデルのうち、ニューラルネットワークモデルは数学モデルとしてほぼ確立されたものであるが、選好度モデルは検討の緒にいたばかりであり、いくつかの基本的な問題が残されている。その第1は、選好度曲線の作成法にある。PHABSIM では、現地で観測された環境指標と各魚種の個体数の関係が選好度 (preference) を示すものとみなし、個体数を 0~1 の間で規格化して選好度曲線としている。これを参考に前報⁹⁾では、まず、植物群落の種類別にその分布域内における各種指標値の相対頻度分布図を描き、さらに PHABSIM と同様に相対頻度を 0~1 の間で規格化したものを選好度曲線とした。しかし、その後の検討で規格化には問題があるのではないかと疑問が生じた。すなわち、魚の場合には自らが好む環境条件が満足される場所を求めて自由に移動できるので、最大個体数に対応する環境条件を有する場を等しく選好度（換言すれば満足度）=1の場所とすることが妥当であるが、植物は、発芽し、定着を開始した場所から適地を求めて移動するな

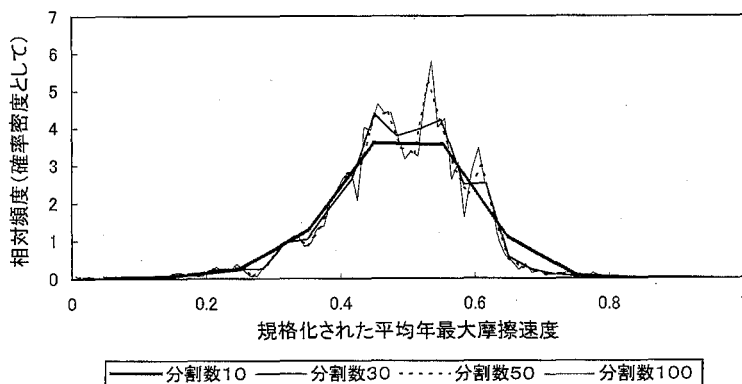


図-3 分割数が頻度分布に及ぼす影響 (ヨモギ群落)

どの能力を持たないので、選好度の最大値を指標の種類に係わらず1と統一することには無理があるように思われる。しかも、前節で選定された指標群には植物にとって有利・不利なものが混在しているから、相対頻度分布は選好度と解釈するよりも環境適応性の尺度と見なすのがむしろ妥当であろう。このようなことから本文では、相対頻度分布を規格化することなく、いわゆる選好度曲線（名称までは敢えて変えない）として使用することの効果を検討している。以上のほか、各種の指標に対して求められた選好度をいかに結合することも重要である。この点について、著者らは単純な累加あるいは累乗を試行し、後者の形式がより適当であることを確認したが、指標ごとの重みを変えることや、ロジスティックモデルに代表されるような非線形回帰モデルの利用なども検討する価値があるように思われる。ただし、これらについては今後の課題としておく。

5. 適用結果ならびに考察

ここでは、選好度モデルとニューラルネットワークモデルによる植生図の再現結果を紹介する。ただし、図-2に示した6種の凡例のうち、セイバンモロコシ群落については、これが最近、高水敷の畑地から逸脱したもので、当該砂州における物理環境履歴の影響をほとんど受けていないと推察されることから、再現対象から外すことにした。また、第3節で選り出した11個の指標については、モデルへの適用をととして有用性を比較・検討しながら取捨選択した。この過程についての記述は省略するが、最終的にはつぎの8指標が選別された。

- ・累加河床変動量
- ・累加河床上昇量
- ・累加河床下降量
- ・平均渇水期比高
- ・平均洪水期冠水時間率
- ・冠水時平均摩擦速度
- ・平均年最大摩擦速度
- ・平均地形凹凸度

(1) 選好度モデル

前節で述べたように、選好度モデルで用いる選好度曲線としては、相対頻度を0~1の間で規格化したものと、規格化を行わないものの2種が考えられる。以下においては記述の都合上、前者および後者をそれぞれ曲線A（規格化あり）および曲線B（規格化なし）と呼ぶことにしておく。

ところで、曲線AおよびBを具体的に作成する場合、すなわち優占植物の種類の条件付きで指標値の頻度分布図を作成する際には、変量を取りうる値の幅（全ての指標には、あらかじめ個々に、注目する砂州全体でみたときの最大値と最小値の間で、統一的な規格化を施しておくのが望ましい）を、どの程度に細分割するかが問題となろう。図-3は、一例として、ヨモギ群落内の平均年最大摩擦速度をとりあげ、分割数が頻度分布曲線の形状に及ぼす影響を描いたものである。図より、分割数を小さくすると頻度分布の性状に歪みが生じることが確認される。逆に大きくしてゆくと、一部にノイズに相当するような振動が現れているが、ノイズか否かの判断は難しい。適切な分割数については、再現結果と実績の適合性も勘案しながら検討してゆく必要がある。

さて、図-4は、曲線AおよびBを用いる場合のそれぞれについて、相対頻度分布図を作成する際の分割数と再現精度との関係を描いたものである。ここに、再現精度は、メッシュごとに観測された優占種とモデルによる識別結果とが一致するか否かを判定したのち、対象としたメッシュの総数に対する一致が見られたメッシュの数の百分率として表され、群落の種類別ならびに砂州全体の結果が示されている。

まず、砂州全体として見る場合、再現精度と分割数の関係は、曲線A,Bではほとんど変わらず、最高で70%程度の精度が得られている。ただし、分割数については後述するような問題がある。これに対して、群落の種類ご

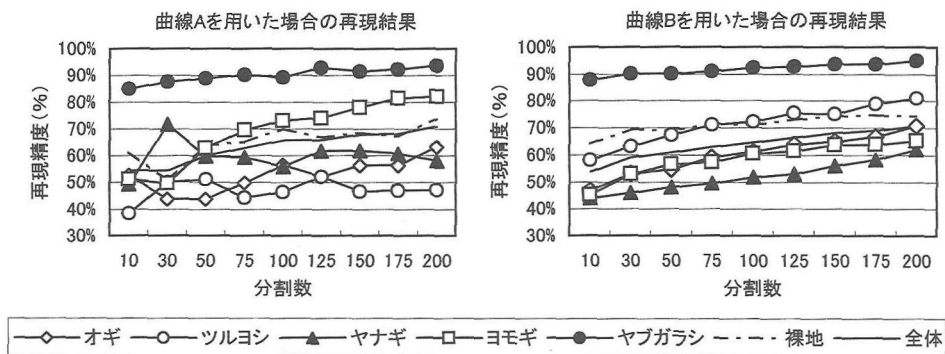


図-4 選好度曲線の相違と分割数による再現精度の変化

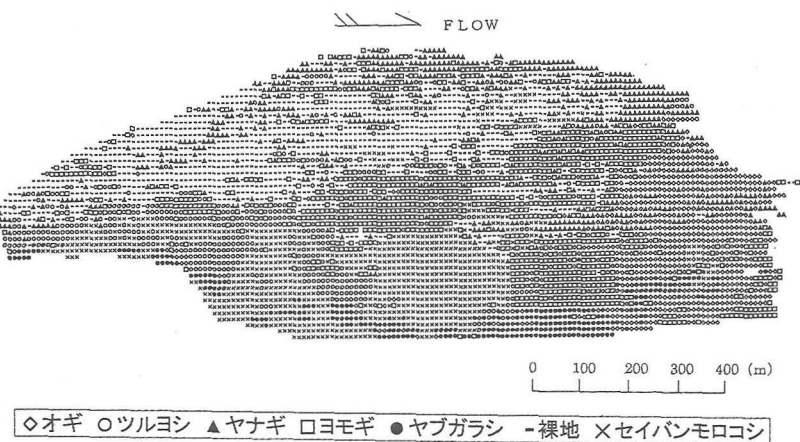


図-5 選好度モデルにより再現された植生図 (曲線 B・分割数 200 を採用)

とにみた関係は、曲線 A, B の使い分けによってかなり大きく異なっている。すなわち、曲線 B の場合には、群落の種類によらず、再現精度が分割数に対して、一様に増加しているのに対して、曲線 A の場合には、両者の関係に系統性がみられない。また、曲線 B の場合には、分割数が大きくなると全ての群落種において一定レベル以上の精度が得られているが、曲線 A の場合には、一部に曲線 B の場合より精度が向上する例もあるものの、そのバラツキが大きい。

以上のことから、植生図の再現においては曲線 B を用いるのが有利であると言えるが、この場合に分割数をどの程度にすべきかについては明確な基準を見出し難い。当初には、分割数をある程度以上にすれば再現精度の向上が頭打ち状態になるものと予想した。しかし、ほとんどの種類の群落で、分割数を 200 などという異常に大きい値にまで近づいても再現精度の増加は止まらない不自然な状況となっている。

図-5 は、上述した再現精度が最も高い場合の結果を

用いて植生図を描いたものである。すでに述べたようにセイバンモロコシは再現の対象から外されたが、この図では、観測された分布域がそのまま転写されている。図-2 とを比較しながら再現状況を分析してみると以下のようである。

一見して、各種の群落の分布位置や分布域の形状は概ね良好に再現されているように思われる。ただし、実績の植生図では、群落境界が滑らか、かつ明瞭であるのに対して、再現結果では、それが断続的になる傾向があり、群落の形状が不鮮明になっている。この傾向はヨモギと裸地およびヤナギと裸地の間においてとくに著しい。これら以外のツルヨシ、オギ、ヤブガラシについては、実績と再現の分布が良好に一致しているといえよう。

最後に図-6 は、本モデルが現植物の判断を誤るパターンを分析したものである。すなわち、モデルによりある種の群落が出現すると判断されたメッシュ群に実際にはどの種の群落がどのような割合で存在していたかを、統一的に百分率で表示している。図より、誤りの大半は

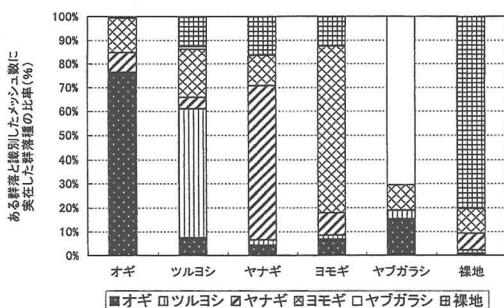


図-6 推定群落内に実在した群落の種類と割合

隣接して成立する種類の群落の間で生じていることがわかる。例えば、ヤナギ群落と判定された場所にそれと隣接する傾向が強いヨモギ、裸地、オギ群落が出現することはあっても、その他の群落の出現は皆無に近い。換言すれば、群落の境界領域に位置するメッシュについて、関係する2種の群落のいずれが出現するか判断が的確になされていないのである。「1. はじめに」でも述べたが、外的攪乱が激しい河道内といえども物理環境条件だけが植生動態を支配しているのではなく、植物相互の競争・競合などもそれに少なからず寄与しているはずである。このような観点ならびに上述した誤りのパターンからすれば、約70%の再現精度は、河状履歴指標のみから植生図を再現する際の限界に近いものかもしれない。つぎに示すニューラルネットワークモデルの適用には、これが複雑な非線形システムの自動的構築法として最も信頼性の高いものであるという認識のもとに、河状履歴指標のみを説明変数とする再現法に期待できる精度の限界を見定めたいという意図も込められている。

(2) ニューラルネットワークモデル

具体的な計算方法としては、バックプロパゲーション法を用いた¹²⁾。また、各層におけるニューロン数については、つぎのように設定した。まず、入力層には選好度モデルで採用したものと河状履歴指標を情報としてもつ8個を置き、ついで、それらの情報を中間層の16個に変換・伝達し、最後に出力層では、順序数で表された群落の種類名を6個のニューロンに受け取らせた。また、学習回数は再現精度を最大限に高めるため10,000回と大きく設定した。

まず、ニューラルネットワークモデルによる再現精度を再現対象の全メッシュについて評価すると約75%であり、選好度モデルでのものより約5%高くなったにすぎなかった。ついで、図-7はニューラルネットワークモデルによる結果に基づいて描いた植生図である。選好度モデルによるもの(図-5)と比較して、群落境界がより連続的で滑らかになっているため、上述した再現精度での差以上に適合性が向上したような印象を受ける。ただし、一方では、大規模な群落の分布域から離れて形成された同種の小さな群落は判別されにくい傾向も認められる。さらに、図-6と同様に誤りのパターンを分析した結果、選考度モデルの場合と同じく、群落の境界領域において2種の群落のいずれが出現するか判断を誤っているのが大半であることを確認した。

以上のように、ニューラルネットワークモデルを用いても選考度モデルの場合と大差ない再現性しか得られなかったという結果は、河状履歴指標のみを用いて植生図の再現を試みることに精度上の限界があることを示唆している。もちろん、今後さらに河状履歴指標を精選するなどして精度向上を期することも考えられるが、植生

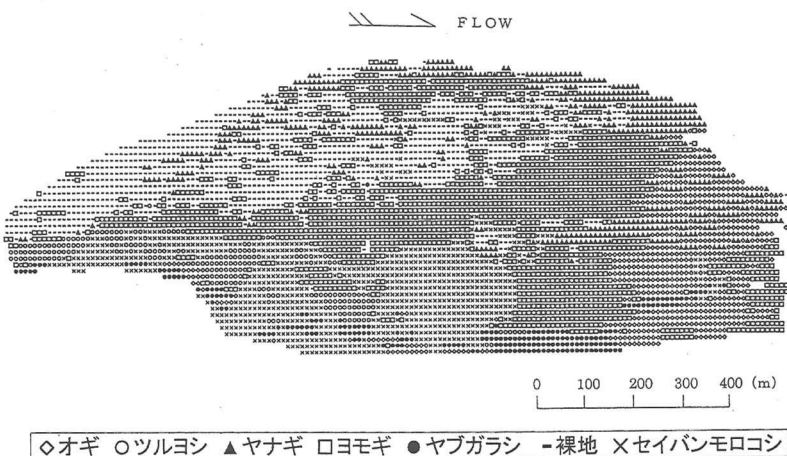


図-7 ニューラルネットワークモデルにより再現された植生図

動態がもともと物理環境のみにより規定されているものではないことからして、そこに目覚ましい成果は期待したい。今後は、植生動態のダイナミックな追跡モデルの開発に転換するのが得策と思われる。

6. あとがき

本文では、吉野川下流部の交互砂州区間に形成され、植物群落の発達が顕著な一砂州を対象にし、種々の河状履歴指標値からメッシュ形式で整理された現存植生図を再現する手法について検討した。各メッシュで優占する植物の種類の識別法としては、著者らの提案による選好度モデルおよび汎用的なニューラルネットワークモデルの二手法に注目した。まず、モデルの説明変数として用いる河状履歴指標について、河道内の物理環境に対する植物の適応性の観点から再検討した結果、新たに6種の指標を説明変数の候補に追加した。そして、これら6種の指標全てが再現モデルの精度上昇に有効な指標となった。つぎに、選好度モデルの構造について再検討を加え、選好度曲線はその最大値が統一的に1となるよう規格化するのは不合理であることを指摘し、この妥当性を、再現計算への適用を通して検証した。二つの手法による再現精度はほぼ同等で、選好度モデルおよびニューラルネットワークモデルそれぞれにおいて約70%および約75%であった。これらの再現精度は必ずしも十分なものではなく、さらなる改善が必要であるが、一方では、河状履歴指標のみから回帰的に植生図を再現する試みとしては一種の限界に達したとの認識も生じ、植生動態のダイナミックな追跡モデルを開発することの必要性を指摘した。

参考文献

- 1) 辻本哲郎・岡田敏治・村瀬尚：扇状地河川における河原の植物群落と河道特性-手取川における調査，水工学論文集，第37巻，pp. 207-214，1993。
- 2) 砂田憲吾・岩本尚・渡辺勝彦：出水履歴と河道特性が植生域の長期変動に及ぼす影響に関する基礎的研究，水工学論文集，第42巻，pp. 451-456，1998。
- 3) 李参照・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-多摩川上流部を対象にした事例分析-，水工学論文集，第43巻，pp. 977-982，1999。
- 4) 瀬崎智之・服部敦・近藤・和仁・徳田真・藤田光一・吉田昌樹：礫州上草本植生の流出機構に関する現地観測と考察，水工学論文集，第44巻，pp. 825-830，2000。
- 5) 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，2001。
- 6) 岡部健士・鎌田磨人・林雅隆・板東礼子：砂州上の植生と河状履歴の相互関係，徳島大学工学部研究報告，第41号，pp. 25-38，1996。
- 7) 岡部健士・鎌田磨人・湯城豊勝・林雅隆：交互砂州上の植生と河状履歴の相互関係，水工学論文集，第40巻，pp. 205-212，1996。
- 8) 岡部健士・鎌田磨人・小寺郁子：交互砂州上の植物群落分布とこれに及ぼす河状履歴の影響，水工学論文集，第41巻，pp. 373-378，1997。
- 9) 岡部健士・上田幸伸ほか：砂州上の植物群落立地の物理環境特性とこれを利用した群落分布の予測，環境システム研究 Vol. 27，pp. 323-329，1999。
- 10) Nestler, J.M., Milhaus, R.T. & Layzer, J.B. : Instream habitat modeling techniques, *Alternative in Regulated River Management*, edited by Gore, J.A. & Petts, G.E., CDC Press, 1989。
- 11) 石川愼吾：河川と河畔の植生，1997年度（第33回）水工学に関する夏期研修会講義集-Aコース-，pp. A-4-1~A-4-19，1997。
- 12) 市川紘：階層型ニューラルネットワーク-非線形問題解析への応用-，共立出版株式会社，pp. 1-33，1993。

NUMERICAL MODELLING OF PLANT-COMMUNITY DISTRIBUTION ON RIVERINE GRAVEL BARS

Satoshi KOTOH, Takashi KISHIMOTO, Takeshi OKABE, Mahito KAMADA

Two types of numerical methods are examined for reproducing the distribution pattern of plant communities on a gravel bar from habitat attributes. The first is a model that was previously proposed by the authors on the basis of the concept of PHABSIM(Physical Habitat Simulation System) developed for estimating microhabitat availability of fishes. The second is a neural network model. These models are applied to the case of an alternate bar formed in a downstream reach of Yoshino River, Shikoku, Japan. Detailed consideration is given, from an ecological point of view, to habitat attributes to be used for judging the dominant species in small (10m by 10m) mesh areas. Eight habitat attributes are empirically chosen from eleven ideas thought out in the ecological aspects. As for the first model, it is pointed out that species-specific probability density curves of the habitat attributes may be successfully used as preference curves. The validity of both models is found to be similar.