

兵庫県安室川における希少藻類 チスジノリの生育適地の推定

Estimated the habitat suitability of the endangered algal species “*Thorea okadae*”
in Yasumuro River of Hyogo Prefecture, Japan

瀧健太郎¹・関基²・堀江史生³・杉野伸義⁴・大沢剛士⁵・三橋弘宗⁶
Motoi SEKI, Kentaro TAKI, Fumio HORIE, Nobuyoshi SUGINO, Tsuyoshi OSAWA, Hiromune MITSUHASHI

¹正会員 工修 滋賀県土木交通部河港課 (〒520-8577 滋賀県大津市京町4-1-1)

²正会員 工修 財団法人リバーフロント整備センター (〒102-0082 東京都千代田区一番町8)

³非会員 工修 八千代エンジニアリング株式会社 (〒161-8575 東京都新宿区西落合2-18-12)

⁴正会員 株式会社環境総合テクノス (〒541-0052 大阪府大阪市中央区安土町1-3-5)

⁵非会員 理修 神戸大学発達科学部 (〒161-8575 東京都新宿区西落合2-18-12)

⁶非会員 理博 兵庫県立人と自然の博物館 (〒678-1205 兵庫県三田市弥生が丘6)

In this case study, to manage the appropriate discharge regime and stream channel, we estimated the habitat suitability of endangered algal species *Thorea okadae* in Yasumuro River at Hyogo prefecture. Firstly, we investigated the distribution of *Thorea okadae* and physical environmental characteristics as four hydraulic parameters, solar radiation and surface water temperature. We analyzed the correspondence between algal occurrence and the environmental parameters by statistical test. Secondly, we predicted the potential distribution of the algae using ecological niche modeling which is based on logistic regression analysis and bootstrap resampling method. Finally, we estimated the total area of suitable micro-habitat on each discharge by application of the model. Our result indicated that the peak of the area in discharge is at 0.95 m³/s, which is slightly higher than regular discharge level, therefore.

Key Words : *Thorea okadae*, ecological niche modeling, stream ecosystem
habitat suitability, endangered species, discharge management

1. はじめに

(1) 安室川と希少藻類チスジノリ (*Thorea okadae*)

兵庫県上郡町を流れる二級河川安室川は、千種川水系に属し、流域面積65km²、流路延長17kmの中小河川で、下流部には絶滅危惧種に指定されている希少藻類チスジノリ (*Thorea okadae*) が分布する (図-1)。

チスジノリは、日本固有の淡水産紅藻類で、兵庫県では絶滅種に、環境省RDBでは絶滅危惧Ⅱ類に指定されており、国内でも産地が限定されている。チスジノリは雌雄異株で、大型の配偶体 (写真-1左)、受精後接合子上に発達する果胞子体、シャントランシア期の小型の胞子体 (写真-1右) の三世代を交代する生活環を持つ。

安室川では、1960年代から「珍しい藻」として地元で知られ、1991年11月にチスジノリとして生物学的に同定された¹⁾。また、安室川では、有性世代の配偶体は秋から春にかけて出現し、無性世代のシャントランシア期の胞子体 (以下、「シャントランシア体」と呼ぶ) は周年で

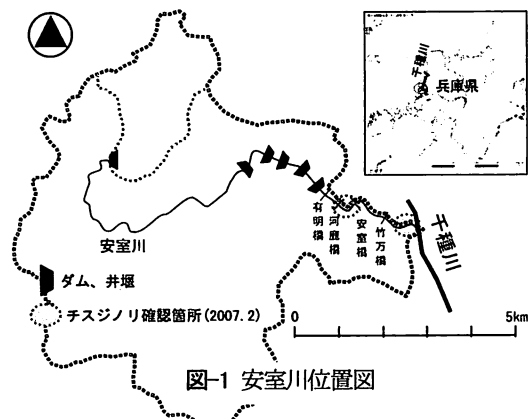


図-1 安室川位置図

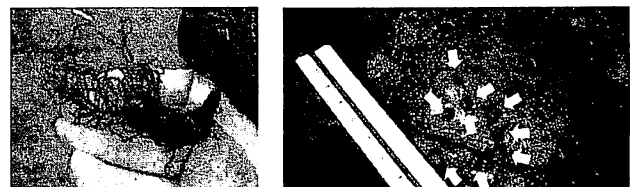


写真-1 配偶体 (左) とシャントランシア期の胞子体 (右)

生育することを確認している²⁾。

しかし、生育に必要な環境条件等はほとんど明らかにされておらず、保全対策を検討するには、分布状況と物理環境要因との関連性を解明することが不可欠である。

(2) 安室川自然再生計画検討委員会

安室川では、1980年代前後に、営農形態の変化、土地利用の高度化等に対応するため、河道拡幅、多目的ダム建設、農業用井堰の改築等の水害対策と水資源開発が進められた。その結果、瀬・淵、たまり、湧水の減少、砂州の陸域化など、河川環境の劣化が進んだ。チスジノリ(配偶体)も1995年3月以降、確認されなくなった。

このような中、兵庫県西播磨県民局は、2002年12月に「安室川自然再生計画検討会」(以下「検討会」)を発足させ、チスジノリ生態の解明に向け、毎月の悉皆調査など、専門家による様々な調査を行った。2004年1月には約9年ぶりにチスジノリを再確認した。しかし、その後も生育数は不安定に変動し、絶滅の危機は払拭できていない。また検討会において、過去の調査記録を集約したところ、冬期の配偶体の出現が夏期の洪水規模に関係する可能性が示唆された³⁾。さらに、これまで安室川では未確認であったシャントランシア体を発見し、識別して詳細な分布調査を行えるようになり、生息場所の立地条件との対応関係を検討できるようになった。

また、その結果、経験的ではあるが以下のような作業仮説を設けることにした²⁾³⁾⁴⁾。

仮説1) 普段からある程度の深さ(0.34±SE0.09m)と流れがある場所、

仮説2) 川底がきれいな場所、

仮説3) 日陰など日光が届きにくい場所、

仮説4) 湧水付近、

これらの条件は、チスジノリと競合関係にある付着藻類の一次生産が抑制されやすく、シルトなどの堆積が生じ難い条件だと考えられる。

兵庫県西播磨県民局は、検討会での調査結果を踏まえ、2004年10月に「安室川自然再生計画」を策定し、①人工的な河床攪乱と、②流れの多様性(瀬・淵、湧水等)を有する河道の再生、を重点施策に位置づけた⁴⁾。2005年度には農業用井堰群の連続転倒によるフラッシュ放流や人力による河床攪乱(通称「川を耕す」施策)を実験的に実施し効果を確認、以降の継続実施を決定した²⁾⁵⁾。

さらに2006年度には、チスジノリにとって好ましい河道形状を検討するため、チスジノリの適地条件に関する経験的仮説の検証と、適地判定及び環境変化後の適地面積の推定手法を開発した。本稿では、これらのチスジノリの適地条件に関する検討結果を報告する。

2. チスジノリ分布情報と物理特性の整理

(1) 調査区間の設定とメッシュ分割

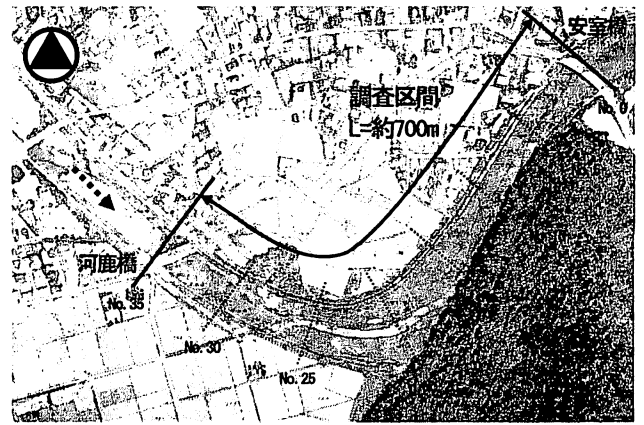


図-2 調査区間

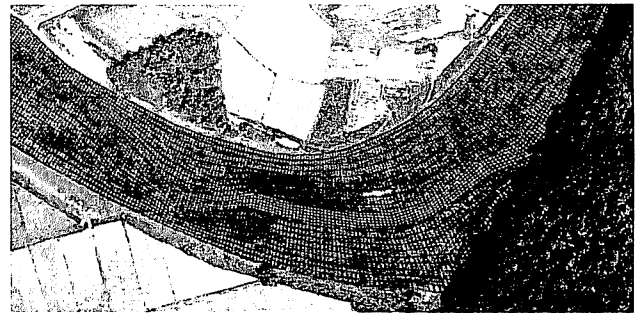


図-3 メッシュ分割

表-1 チスジノリの有無に対応したメッシュ数

個体の有無	メッシュ数	備考
あり	93	配偶orシャン
(うち、配偶体)	16	配偶体
(うち、シャントランシア体)	80	シャン
なし	1728	個体なし

(評価対象メッシュ数 1821)

調査区間は、チスジノリの生育が確認され、測量データ等の基礎情報が充実している中流域約700m(河鹿橋～安室橋:千種川合流点から約3.0km付近)とした(図-2)。

さらに、統計処理ができるように、調査区間を一般座標系でメッシュ分割し、メッシュ毎にチスジノリの有無と物理特性に関する情報を与えることとした。メッシュは流下方向には2m間隔で分割、横断方向には平水時(0.8m³/s)の水際線で流路と陸上部とを区分し、流路内を7分割(概ね2m間隔)、陸上部では左右岸ともに9分割(0.1m～4m)とした(図-3)。

各メッシュの標高は、横断測量(測点間隔20m、2006年6月)の成果を線形補間して与えた。

また、チスジノリは水生藻類であることから、平水時(0.8m³/s)に確実に冠水しているメッシュのみを航空写真から判読して抽出し、解析対象とした。

(2) チスジノリの分布情報

チスジノリの分布情報については、生活環のうち視認可能な配偶体とシャントランシア体について、2006年4月から2007年2月までの悉皆調査(2ヶ月毎)時に小型座標

計測装置を用いて詳細な位置情報を把握し、各メッシュに有無情報を与えた。その結果、評価対象の全1821個のメッシュのうち、「配偶体あり」の情報を持つのは16個、「シャントランシア体あり」の情報を持つのは80個、共に「なし」は1728個となった(表-1)。

(3) 適地条件を代表する物理特性

チスジノリの分布情報と比較する物理特性は、適地条件に関する作業仮説を踏まえ、次のように選定した。

a) 水理諸量(水深・流速・摩擦速度)

仮説1)を検証するため水深と流速を選定した。また、仮説2)を検証するため河床に作用する摩擦速度を選定した。摩擦速度は、堆積する微細粒分の流下や競合藻類の剥離を評価できる諸元⁹⁾として、チスジノリの立場からみた川底のきれいさを代表させた。

これらの水理諸元は、本調査区間での適用性が確認されている既存の平面二次元解析モデル⁶⁾を用いて、平常時(0.8m³/s)、砂州冠水時(20m³/s)、平均年最大流量時(80m³/s)ごとに算出し、各メッシュに与えた。

b) 日照時間

仮説3)を検証するため、チスジノリの分布情報と比較する物理特性として日照時間を選定した。個体が経験する照度(の積算値)は、日照の時間帯、天候、水深、にがり等の影響を受けるが、今回は現場での実用性(調達の容易さ)も考慮し、単純に日照時間で比較した。周辺地形と太陽高度から、夏至、冬至及び春分・秋分の計3パターンで水面の日照時間を算定し、各メッシュに与えた。周辺地形については、国土地理院の1/25,000地形図から地盤高データを作成し、水面の日照時間に影響がありそうな橋梁や河畔林等の微地形は現地にあわせて補正した。

c) 表面水温

湧水付近は年間を通じて水温が安定し、冬期は周辺より高水温となる。そこで今回は、湧水の影響を冬期の表面水温に代表させ、仮説4)を検証することとした。

2004年1月に小型ヘリコプターから空撮した熱赤外線画像を処理して、表面水温(最大水温・平均水温)を各メッシュに与えた。

(4) チスジノリ分布と物理特性との関係

次に、チスジノリ分布と物理特性との関係を整理するため、チスジノリの有無で分類したメッシュ群ごとに、各物理特性値の平均及び標準偏差を算定した。

算定した結果を図-4から図-9に示す(紙面の都合上一部のみ)。なお、図中の軸項目は表-1の備考欄の標記に準じている。また、個体の有無等でメッシュ数に偏りがあるまま単純平均をとったため、いずれの結果も、「全地点(1821個)」の値は「個体なし(1728個)」の値に、「配偶体(93個)」の値は「シャ(80個)」の値にほぼ支配されている(()内は該当メッシュ数)。

これらの結果からは、有意差までは確認できなかった

が、概ね作業仮説を肯定する傾向は見られた。以下に、物理特性ごとに確認された傾向を述べる。

a) 水理諸量(水深・流速・摩擦速度)

図-4に示すように、配偶体は平常時の水深が比較的深い箇所に分布する傾向が見られた。一方、シャントランシア体には顕著な傾向が見られなかった。

また、図-5に示すように、配偶体、シャントランシア体ともに、平常時の流速が比較的早い箇所に分布する傾向が見られた。さらにその傾向はシャントランシア体でより明瞭に見られた。

これらの結果は、チスジノリ(配偶体)はある程度の水深と流速が必要であるとの仮説1)及び2)と合致する。また、シャントランシア体は、配偶体に比べ、水深の小さい箇所でも生育できることが示唆された。

次に、図-6及び図-7に示すように、平水時(0.8m³/s)と平均年最大流量時(80m³/s)の摩擦速度とチスジノリの分布関係を整理したところ、次の結果が得られた。

- ・配偶体、シャントランシア体ともに、平水時の摩擦速度が大きい箇所に生育しやすい(結果①)。
- ・配偶体はシャントランシア体に比べ、平常時(0.8m³/s)に摩擦速度の大きい箇所(流速が早い箇所)では生育しにくい(結果②)。

結果①は、チスジノリはきれいな川底を好むとの仮説2)と合致する。

また結果②は、配偶体は大きく広がりがある形状をしているため(写真-1)、小型のシャントランシア体よりも、流水抵抗を受けやすく流失しやすいことが原因であると考えられる。実際に、悉皆調査時にも、小さな力で配偶体が切れて流失する場面がしばしば見られた。また、農業用井堰の連続転倒によるフラッシュ放流実験(2005年9月実施)で発生させた10m³/s程度の小洪水で、16株の配偶体のうち3株が流失したことを確認している。

b) 日照時間

日照時間(夏至)とチスジノリ分布との関係を図-8に示す。ここでは、日照時間の小さい箇所に配偶体が分布しやすい傾向が見られた。この結果は、日陰など日光が届きにくい場所を好むとの仮説3)と合致する。一方、シャントランシア体については、顕著な傾向が確認できなかった。冬至、春・秋分でも同様であった。

c) 表面水温

表面水温(最大水温)とチスジノリ分布との関係を図-9に示す。配偶体については、表面水温の低い箇所に分布する傾向が見られた。シャントランシア体には顕著な傾向が見られなかった。平均水温についても同様であった。

これらの結果は、冬季の水温が高い場所、湧水付近をチスジノリが好むとの仮説4)に否定的であった。これは仮説そのものが誤っているか、偶然特異な結果が得られたか、湧水の影響を冬期の表面水温に代表させることが誤っている可能性が考えられる。今後も継続して調査を進める必要がある。

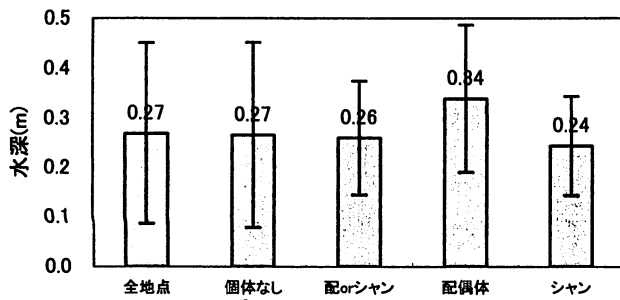


図-4 水深(0.8m³/s時)とチスジノリ分布との関係

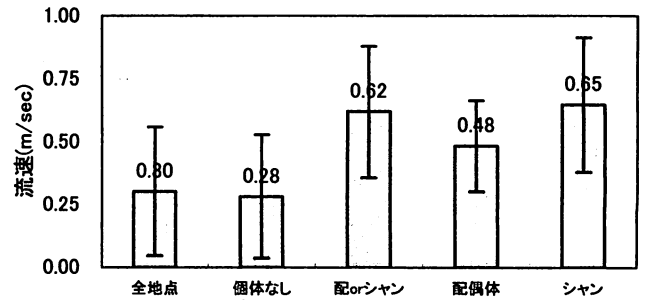


図-5 流速(0.8m³/s時)とチスジノリ分布との関係

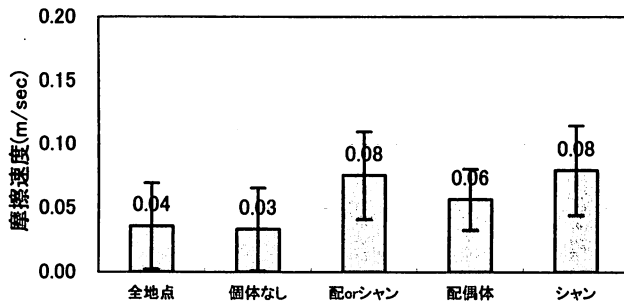


図-6 摩擦速度(0.8m³/s時)とチスジノリ分布との関係

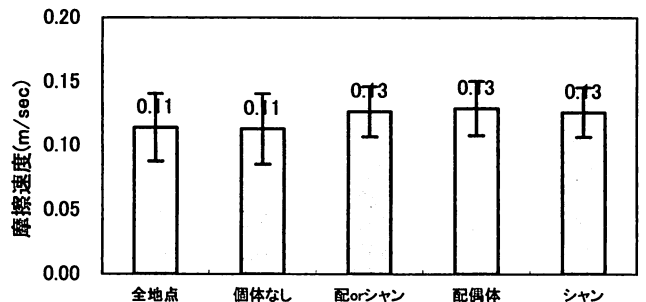


図-7 摩擦速度(80m³/s時)とチスジノリ分布との関係

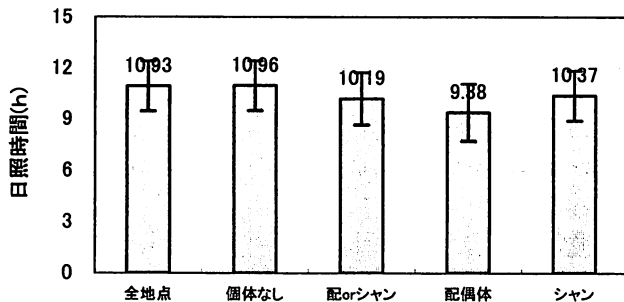


図-8 日照時間(夏至)とチスジノリ分布との関係

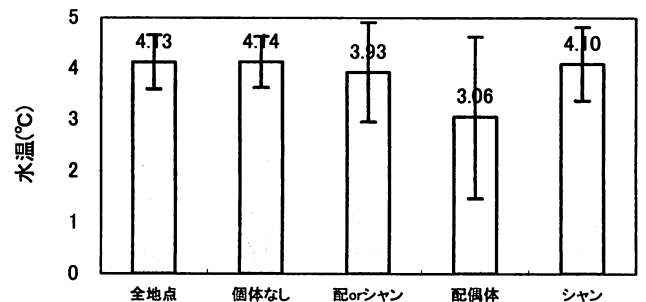


図-9 表面水温(最大)とチスジノリ分布との関係

3. 適地推定の方法

次に (1) 式に示すロジスティック回帰分析によるチスジノリの適地判定モデルを構築した⁷⁾。従属変数はチスジノリの有無とし、独立変数は、表面水温(夏至)、日照時間(最大)、平水時(0.8m³/s)の平均流速、摩擦速度、水深とした。このモデルによる適地・不適地の判定は、メッシュ毎に行なうこととした。

$$\text{logit}(p) = \frac{p}{1-p} = \alpha X_1 + \beta X_2 + \gamma X_3 + \dots + d \quad (1)$$

p : 独立変数(適地確率, チスジノリありと判定される確率)

X_i : 従属変数(各物理特性値), $\alpha, \beta, \gamma, \dots$: 回帰係数

解析対象は、配偶体に比べ多くの個体が確認されているシャントランシア体とした。それでも、表-1で示すとおり、個体ありのメッシュ数に比べ、個体なしのメッシュ数が大半を占めるデータ(zero-inflated data)である。また貴重種の分布情報は、一般に不確実性を伴い、たとえ適地であっても、調査時の見落としや他の様々な要因により個体がたまたま存在しない場合もある。2. では、

個体の有無でメッシュ群を分類し、メッシュ数の差は考慮せず、各メッシュの物理特性の単純平均値を比較したところ有意性を確認できなかったが、このような分布情報の不確実性もその一因と考えられる。

そこで本研究では、個体ありの情報に不確実性があり、個体なしの情報が大半を占めるデータ(zero-inflated data)を用いて適地を推定するため、次のようなモデリングの工夫を行った。

- 1) bootstrap法により、個体なしのメッシュ群から80メッシュ(個体ありのメッシュ数と同数)を10,000回繰り返して抽出して、個体ありのメッシュ群と合わせた10,000組のデータを作成。
- 2) 10,000組のデータについて、ロジスティック回帰分析を行い、統計モデルの回帰係数を決定。
- 3) 次に、10,000個の統計モデルのAIC(赤池情報量規準: Akaike's Information Criterion)を算定⁸⁾⁹⁾。
- 4) AIC値のヒストグラムを作成(図-10)し、AIC最頻値(AIC=110~115)を与える統計モデル群を抽出。
- 5) 4)で抽出したモデル群の回帰係数の平均値を算定し、これらの値を回帰係数とした統計モデルを構築(表-2)。

表-2 ロジスティック回帰分析による適地判定モデルの評価結果

リサンプリング	AIC	ROC分析			回帰係数					
		AUC	感度	特異度	切片	表面水温	日照時間	平均流速	摩擦速度	水深
なし	427	0.891	83.9	82.8	-3.284	0.374	-0.376	8.483	-27.210	0.889
Bootstrap法	45.4	0.895	88.7	81.7	-10.686	1.315	-1.301	18.680	149.539	21.197
	100-105	0.896	88.7	81.9	-0.373	0.200	-0.498	11.887	-18.126	2.439
	105-100	0.895	88.7	82.5	0.113	0.176	-0.498	12.208	-27.165	2.023
	110-115	0.895	88.7	82.7	0.183	0.194	-0.480	11.607	-27.931	1.837
	115-120	0.895	8.7	82.8	0.305	0.195	-0.465	10.644	-25.285	1.662

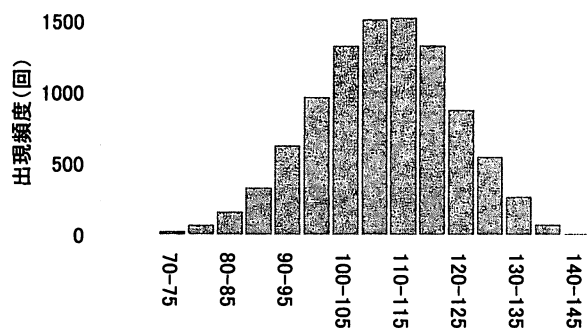


図-10 AIC(赤池情報量規準)のヒストグラム

表-3 Akaike weightによる変数の重要性(IOV)

独立変数	重要性(IOV)
表面水温	0.385
日照時間	0.867
流速(平水時)	0.871
摩擦速度	0.625
水深(平水時)	0.416

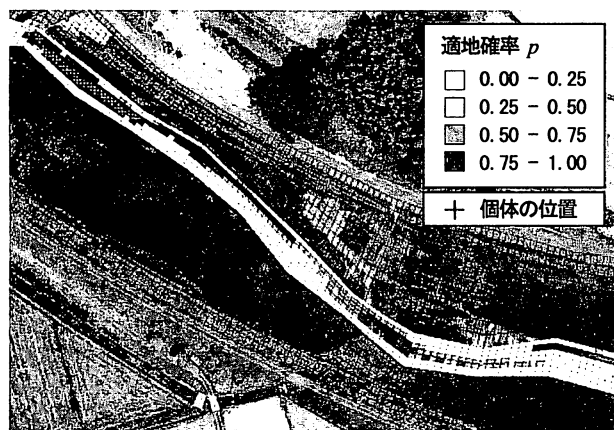


図-11 適地確率とチスジノリの分布(No.10-15付近)

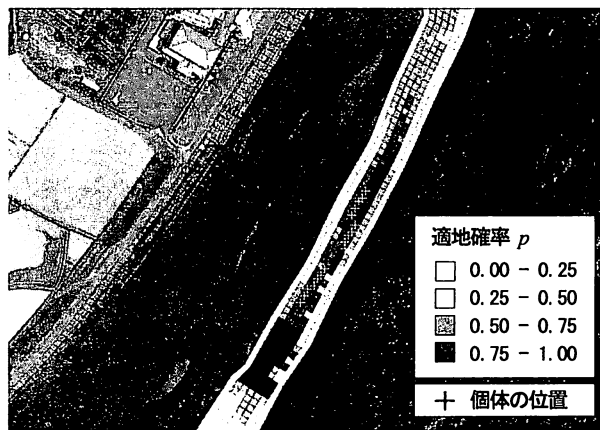


図-12 適地確率とチスジノリの分布(No.30-35付近)

4. 結果と考察

3. で提案した方法によりチスジノリの適地推定を行った。図-11及び図-12に、構築した統計モデルを用いてメッシュ毎に推定した適地確率とチスジノリ(シャントランシア体)の分布関係を示す。ここでは、紙面の都合上、調査区間のうちチスジノリの分布密度が濃い範囲に限って示した。

次に、上記手法によるモデリングの適合性を確認するため、ROC分析による評価を行った。ここでは表-2に示すように、AIC値の範囲別に統計モデルのROC(Receiver Operating Characteristic)曲線を作成し、AUC(Area Under the Curve)値、感度、特異度からモデルの信頼性を評価した¹⁰⁾¹¹⁾。その結果、上記手法にて構築した統計モデル(表-2、AIC=110~115)は、AIC値が最小となるモデル(ベストモデル)よりも、AUC値、感度ともに良好な値が得られ、上記手法によるモデリングの有効性を確認でき

た。なお、表-2に示す感度及び特異度は、適地確率 $p=0.5$ をcut-off値とした場合の値である。

また表-3に、構築した統計モデルのAkaike weightを求め、各独立変数の重要性(IOV: Importance of Variables)を評価した結果を示す。ここから、構築した統計モデルは、シャントランシア体の適地判定に関して、水温及び水深に比べ、日照時間と流速の影響が比較的大きいことが確認できる。

次に、構築した統計モデルを用いて、流量ごとの適地メッシュ($p>0.5$)の数を算定し比較した。与える流量は一定量で、 $0.5\text{m}^3/\text{s} \cdot 0.8\text{m}^3/\text{s} \cdot 0.85\text{m}^3/\text{s} \cdot 0.9\text{m}^3/\text{s} \cdot 0.95\text{m}^3/\text{s} \cdot 1.0\text{m}^3/\text{s}$ の6段階とし、独立変数である流速、摩擦速度、及び、水深を流量ごとに変化させて、メッシュごとの適地確率を算定した。図-13には流量ごとの適地メッシュ数を示す。

この結果から、平水時の流量である $0.8\text{m}^3/\text{s}$ を超えると適地メッシュが増加し、 $0.95\text{m}^3/\text{s}$ で適地が最大になるこ

とが分かる。この値は、チスジノリ保全という視点からみた、流量管理上の一つの目安と考えられる。さらにこの手法は、水理諸元を更新するだけで河道形状の改変後の適地面積の変化も予測できるため、流量管理だけではなく、河道管理への適用も可能と考えられる。

5. 結論

本研究では、チスジノリの分布情報と水理諸元、日照時間、表面水温などの物理特性を詳細に比較することにより、配偶体の適地に関する作業仮説の検証を行うとともに、これまで十分に知られていないシャントランシア体の適地に関する新たな知見を得た。周年の形態であるシャントランシア体に関する適地条件を一定程度明らかにできたことにより、チスジノリの保全・再生に向けた新たな施策展開が期待できる。

また、bootstrap法を用いたリサンプリングにより、ロジスティック回帰モデルを作成し、安室川のチスジノリのように確認数の少ない希少種の適地判定手法を示すことができた。この手法により河道形状や流量変化による希少種の適地面積の増減を予測できるため、今後、具体的な維持流量や河道計画を検討する際の有効なツールとなると期待できる。

本研究では、もの言わぬ、地味で小さなチスジノリの適地条件を探る過程の中で、河川環境を定量的に評価する一手法を提案することができた。これは、他の河川、他の生物の好適環境(例えば、底生動物や魚類の産卵床など)の分析にも適用可能な手法である。この研究の成果が、わが国の中小河川をはじめとした身近な水辺の再生に寄与することを願ってやまない。

謝辞: 本稿は、兵庫県西播磨県民局から財団法人リバーフロント整備センターが2006年度に受託した業務(千種川水系安室川 安室川自然再生計画検討業務(その5))を通じて得られた成果の一部をまとめたものです。

本研究は、安室川自然再生計画検討会の指導により進められました。特に、平面二次元解析モデルの構築に関しては、神戸大学大学院道典康治教授、株式会社里と水辺の研究所浅見佳世氏(兵庫県立大学客員准教授兼任)にご指導を賜りました。また、摩訶不思議なチスジノリの生態に関しては、兵庫県立大学佐藤裕司教授、西はりま特別支援学校横山正教諭、上郡町立上郡中学校東山真也教諭、同科学部員の皆さんにご指導を賜りました。そして、兵庫県西播磨県民局上郡土木事務所荒柴所長(当時、現淡路県民局県土整備部)、浜野河川砂防課長(当時、現東播磨県民局県土整備部)をはじめとするスタッフの皆さまにはどこまでも前向きに研究する機会と場を与えて頂きました。兵庫県河川計画課松尾主査は、あらゆる場面で陰に陽にと支えて下さいました。

このすばらしい皆さまに心からの感謝を捧げます。

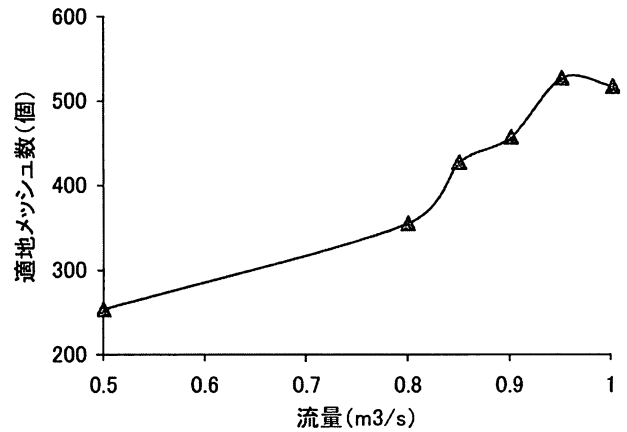


図-13 流量とチスジノリの生育適地面積の関係

参考文献

- 1) 瀬戸良三, 右田清治, 真殿克麿, 熊野茂: 兵庫県安室川産の淡水産紅藻チスジノリとチスジノリ属2種の日本における分布, 藻類, 41, pp355-357, 1993
- 2) 東山真也, 瀧健太郎, 杉野伸義, 横山正, 三橋弘宗, 上郡中学校科学部員: 上郡中学校科学部員による安室川の淡水産紅藻チスジノリ (*Thorea okadae*) を復活させる試み, 人と自然, No.17, pp73-78, 2007.2 杉野伸義, 宮田祥史, 関基, 瀧健太郎, 三橋弘宗, 佐藤裕司, 兵庫県安室川におけるチスジノリの発生と光環境の関係, 日本藻類学会第31回大会, 2007.3
- 3) 佐藤裕司, 横山正, 真殿克麿, 辻光浩, 水野雅光, 魚留卓, 妹尾嘉之, 杉野伸義, 永野正之, 三橋弘宗, 浅見佳世, 道典康治, 原田一二三: 兵庫県上郡町・安室川における淡水産紅藻チスジノリ配偶体の出現—特に河川の流量変化との関係について—, 陸水学雑誌 67, pp.127-133, 2006.
- 4) 兵庫県西播磨県民局: 安室川自然再生計画, 2004.10
- 5) 浜野直樹, 渡部秀之, 瀧健太郎, 眞間修一, 関基: 安室川における既設堰・ダム利用によるフラッシュ放流実験と自然再生の効果検証, 河川技術論文集, 第12巻, pp.259-264, 2006.6
- 6) 瀧健太郎・渡部秀之・中西宣敬・関基・堀江史生・浜野直樹: 兵庫県安室川における河川環境改善に向けた順応的河川管理手法に関する研究, 河川技術論文集, 第14巻(投稿中), 2008.6
- 7) 丹後俊郎, 山岡和枝, 高木晴良: ロジスティック回帰分析, 朝倉書店, 1996
- 8) 小西貞則, 北川源四郎: 情報量規準, 朝倉書店, 2004
- 9) 丹後俊郎: 統計モデル入門(医学統計学シリーズ), 朝倉書店, 2000
- 10) Metz CE: ROC methodology in radiologic imaging. Invest Radiol, 21, pp.720-733, 1986.
- 11) Manel S, Williams HC, Ormerod SJ: Evaluating presence-absence models in ecology: the need to account for prevalence. Journal of Applied Ecology, 38, pp921-931, 2001

(2008. 4. 3 受付)