

狩野川水系柿田川における在来水生植物の 生育ポテンシャルマップを用いた自然再生の検討と実施

Consideration and Implementation of Natural Restoration using Growth Potential Maps for Native Aquatic Plants in Kakita River, Kano River System

自然環境グループ 研 究 員 伊 藤 岳
自然環境グループ 主任研究員 内藤 太輔
技 術 参 与 瀧 健太郎

本研究では、湧水河川である静岡県柿田川を対象に、希少水生植物であるミシマバイカモ (*Ranunculus nipponicus* var. *japonicus*) の生育ポテンシャルマップを試作した。このマップは、ミシマバイカモの実際の生育データを応答変数、物理環境のシミュレーションデータを説明変数とした一般化線形モデルにより生育確率の空間分布を表現したものである。2024 年度に柿田川自然再生事業の一環として実施されたミシマバイカモ再生試験において、作成したポテンシャルマップと特定外来生物オオカワヂシャ (*Veronica anagallis-aquatica*) の分布を重ね合わせ、4 箇所試験地を特定して移植実験をしたところ、移植後 5 ヶ月を経過した時点において、3 箇所でミシマバイカモの活着が確認された。

キーワード：ポテンシャルマップ、湧水、水生植物、ミシマバイカモ、外来植物駆除、GLM、自然再生事業

This paper summarizes an outline of a survey conducted in FY 2000 and results on the nationwide state of coastal refuse. There is a variety of problems in the conservation of coastal environments. They include a decline in sandy beaches because of earth and sand supply shortages, the detrimental effects of humans and coastline conservation facilities on ecological systems, and refuse that has drifted ashore. Of these problems, countermeasures for the refuse problem mainly consist of symptomatic therapies such as the citizenry of the region or volunteer organizations carrying out cleanup activities on a daily basis and have not reached resolving the root causes. A true picture of coastal refuse was not clear in the first place. Therefore, surveys were conducted at 380 beaches throughout the country. Coast administrators carried out the surveys in cooperation with local government, citizens and others. The total length of the coastlines surveyed was approximately 520 km, and the number of people who participated was over 94,000. The estimated national average for refuse weight was 6.3 tons per kilometer of coast. Natural refuse such as seaweed or driftwood accounted for approximately 60% and man-made refuse such as plastics, glass and metals was about 40%. Products close at hand in our daily lives such as plastic bottles and beverage cans were the largest proportion of the man-made refuse.

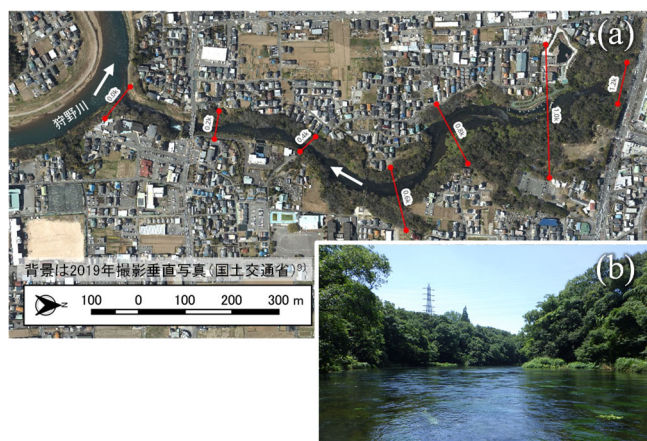
Key Words: *Habitat Potential Map, Spring Water, Aquatic Plants, Ranunculus nipponicus* var. *japonicus*, *Removal of alien plants, Generalized Linear Model, Nature Restoration*

1. はじめに

柿田川は静岡県清水町に位置し、一級河川狩野川に合流する延長 1.2km の河川である（図－1）。本河川は富士山麓で降った雨水や雪どけ水が地下水となって湧出した湧水河川であり、その湧出量は 1 日約 110 万 m^3 以上と言われる¹⁾。このため、年間を通して非常に安定した水環境や、湧水環境に依存するミシマバイカモ、ナガエミクリ (*Sparganium japonicum*)、ヒンジモ (*Lemna trisulca*) 等の希少な水生植物の生育をはじめ、他河川では見られない独特の生態系が形成されている¹⁾。

一方、特定外来生物のオオカワヂシャや要注意外来生物のコカナダモ (*Elodea nuttallii*)、ノハカタカラクサ (*Tradescantia flumiensis*) 等が侵入しており、特にオオカワヂシャに関しては、2003 年頃に初確認されてから 10 年足らずのうちに柿田川全域に分布を拡大し、同所的に生育する在来水生植物への被圧や交雑の影響が懸念されている（図－2）¹⁾。

このような状況を受け、2011 年に柿田川に関係する学識者、自然保護団体、行政等からなる「柿田川自然再生検討会」が設置され、柿田川における自然環境の保全・再生をより具体的に進めるための「柿田川自然再生計画」が策定された。



図－1 (a) 柿田川の空中写真, (b) 柿田川の河道内写真



図－2 水中で混生するミシマバイカモとオオカワヂシャ

2012 年からは本計画に基づき、地元住民や自然保護団体、行政等が協働して、在来水生植物の再生を目的とした外来水生植物の駆除を継続的に実施しており、2012 年時点と比べるとオオカワヂシャの高密度域が減少するなど、一定の成果が得られている²⁾。一方で、在来水生植物の指標にしているミシマバイカモにおいては、生育面積は増加したものの高密度域の増加には至っておらず²⁾、このような状況を受け、2017 年からは外来水生植物を駆除した後に人為的な移植を実施することを視野に入れ、ミシマバイカモの再生試験が開始された³⁾。

本研究では、こういった取組みをより戦略的に進めていくためのツールの一つとして、在来水生植物の生育ポテンシャルマップ（以下「PM」という）を作成した。また、これに基づき、在来水生植物の再生を効果的に実施できると推定される場所を抽出し、自然再生事業の一環として実施する再生試験の試験地選定を行った。

2. 生育ポテンシャルマップ (PM) の作成

在来水生植物の実際の生育データ（以下「応答変数」という）とシミュレーションに基づく柿田川全域の物理環境データ（以下「説明変数」という）から、在来水生植物の生育適地と考えられる物理環境条件を統計解析により予測し、PM を作成した。詳細な作成手順について、以降に示す。

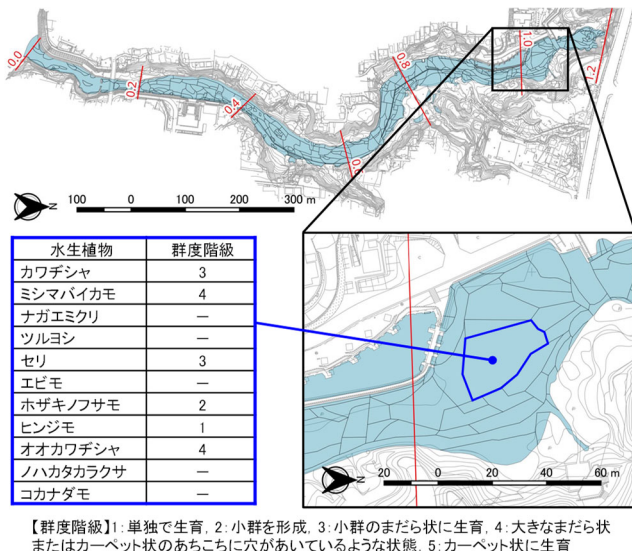
2-1 在来水生植物の生育データ

柿田川では「柿田川自然再生計画」に基づき、2012 年から国土交通省による水生植物の詳細分布調査（以下「詳細分布調査」という）が実施されている。本調査は、毎年夏季に柿田川全域を踏査して在来種及び外来種を含めた主な水生植物 11 種（表－1）についての植生図を作成するもので、一般的な植生図と異なる点として、一つの区画（ポリゴン）に対して複数の種が紐づけられていること、各種について、区画内での群度階級⁴⁾が記録されていることが挙げられる（図－3）。これは、柿田川における外来・在来水生植物の面的な広がりとその生育密度を的確に把握するために、植物群落の分布の仕方に着目した群度階級での記録が適していたことによる。

PM の作成にあたっては、2013 から 2022 年の過去 10 年分の詳細分布調査結果を使用した。柿田川自然再生では群度 3 以上を高密度域と評価して、これらの増加を一つの目標としている。このため今回は、在来種の高密度域が安定して生育できる箇所を予測することを目的として、過去 10 年の調査の中で対象種が群度 3 以

表－１ 詳細分布調査で記録されている水生植物

在来種	カワヂシャ・ミシマバイカモ・ナガエミクリ・ツルヨシ・セリ・エビモ・ホザキノフサモ・ヒンジモ
外来種	オオカワヂシャ・ノハカタカラクサ・コカナダモ



図－３ 柿田川の詳細分布調査データのイメージ

上で記録された回数が５年以上である箇所（在）と５年未満の箇所（不在）とに分けた在・不在データを応答変数とした。

なお、本稿では実際に自然再生事業における試験地選定で使用したミシマバイカモのPMを例にとって作成手順を説明するが、同様の手順で、ナガエミクリ、セリ、ホザキノフサモ、ヒンジモのPMも作成した。

２－２ 物理環境データ

水生植物の生育に影響を与える環境要素としては、水深、流速、河床材料、水温、水質、日照など様々なものが考えられるが、今回は、既存の測量成果やソフトを用いたシミュレーション等から面的データの入手が可能であった水深、流速、日射量を説明変数として選定した。

（１）水深・流速

水深及び流速は、既往の定期縦横断測量成果及び流量観測成果、2023年度に現地で実施した補足的な流量観測結果を基に、フリーの水理解析ソフトであるiRIC (version 3.0.19)のNays2DHソルバーを用いてシミュレーションした。

計算領域は柿田川全川の0.0kpから1.2kpとし、50mピッチの横断測線を基準に河川横断方向に32分割（約1.5～4m間隔）、縦断方向に384分割（約1～6m間隔）した計算格子の各交点に測量成果の標高を与えた。なお、在来水生植物の生育データは2013年

表－２ 現地での流量観測結果

測線	流量	下流(0.35kp)に対する割合
1.05kp 付近	5.06 m ³ /s	0.48
0.85kp 付近	10.76 m ³ /s	1.03
0.35kp 付近	10.48 m ³ /s	1.00

から2022年の調査結果を用いたが、水深及び流速のシミュレーションにおいては、湧水河川である柿田川は出水攪乱を受けることが少なく¹⁾河道形状は大きく変化していないという仮定のもと、直近(2020年度)の測量成果を地形データとして与えた。河道の粗度係数は、0.03を一律に設定した。

境界条件の設定にあたっては、詳細分布調査が毎年8月から9月に実施されているため、柿田川の下流端(0.1kp付近)で実施されている定期流量観測の8月から9月(2018～2022年)の平均値12.12m³/sを用いた。なお、湧水河川である柿田川は、河道内に点在する湧出箇所から水を得て流量を徐々に増やしながら流下している。そこで流程に沿った流量変化を把握するため、2023年7月に現地で流量観測を実施した。その結果、上流(1.05kp付近)の流量は下流(0.35kp付近)の約48%であり、0.85kp付近に到達する頃には、下流と概ね同じくらいの流量になっていることが明らかになった(表－２)。このため、0.85kp付近と1.05kp付近との流量の比を上記の12.12m³/sに乘じ、上流端に与える流量は5.70 m³/sとした。残りの6.42 m³/s(12.12 m³/s－5.70 m³/s)については、1.05kpから0.85kpの間に仮想の流入水路を設定し、横流入として与えた。下流端水位は、地形データに基づく等流計算とした。

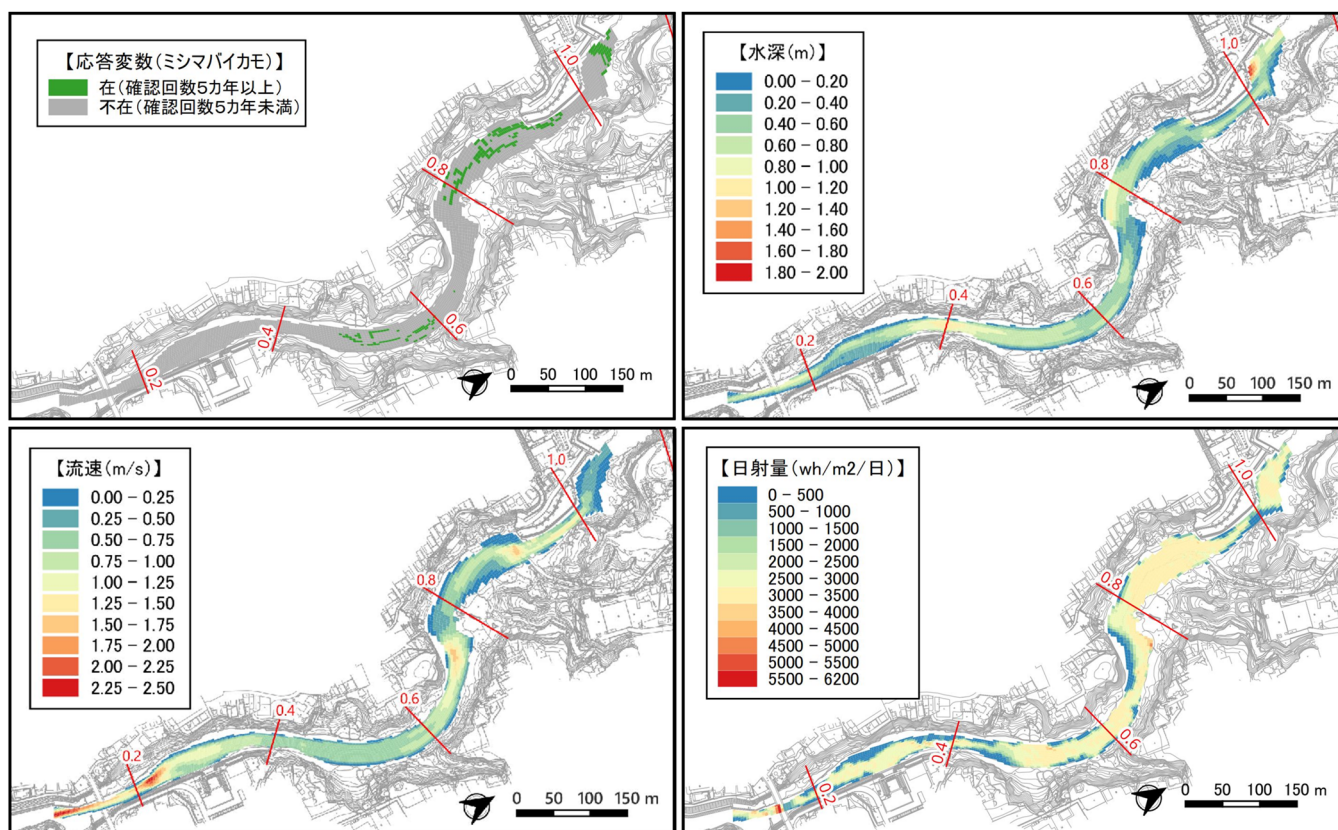
（２）日射量

日射量は、直近(2019年度)の航空レーザ測深(以下「ALB」という)成果を基に、フリーの地理情報システムであるQGIS (version 3.28.7)のGRASSプラグインを用いてシミュレーションした。

具体的には、2mメッシュの地形データ及び詳細分布調査が実施されている8月下旬(1年の中の243日目と仮定)の太陽高度から、各メッシュにおける1日あたりの総日射量を計算した。

使用した地形データは、柿田川の両岸の殆どが急傾斜地に成立した河畔林に囲まれており(図－１)、河道内の日照条件はこれらに大きく左右されていると考えられたことから、柿田川周辺の樹冠や構造物の表層を捉えたALB点群データから作成した。

また、柿田川ではここ数十年で水際の樹木が水面



図－4 統計解析に供した応答変数及び説明変数のメッシュデータ



図－5 作成したミシバイカモのPMと2023年オオカワヂシャ高密度域の重ね合わせによる試験地選定

を被覆する面積が拡大傾向にあり、これに伴う日照条件の変化や在来動植物への影響が懸念されている⁵⁾。この状況を再現するため、日射量を計算したメッシュのうち樹木の水面被覆範囲と重なるメッシュを抽出し、これらの日射量については、林内外での照度測定結果の比を基に、樹木の被覆に伴う減衰量を考慮した。樹木の水面被覆範囲及び林内外の照度測定結果については、いずれも自然再生事業の一環として過去に実施された柿田川の河畔林に関する現地調査結果を使用した。

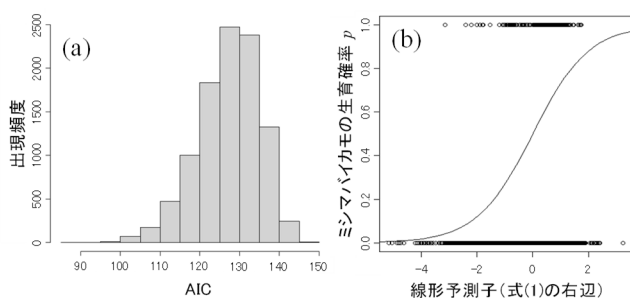
2-3 統計解析

PMのベースには、水深及び流速の水理解析に使用した計算格子をポリゴンデータに変換したものを使用した。なお、本研究では低水路内における水生植物の生育ポテンシャルの予測を目的とすることから、水際線より陸側のメッシュは解析対象から除外した。また、水理解析の計算結果が不安定になりやすい上流端付近のメッシュも除外し、残った合計3,457メッシュに対して、作成した応答変数及び説明変数のデータを与えた(図-4)。説明変数については、水深及び流速はメ

ツシュの四隅の平均値を、日射量はメッシュ内に存在する計算結果の平均値を与えた。これらのメッシュについて、一般化線形モデル (GLM) によるロジスティック回帰分析を実施し、得られた回帰式から、各メッシュにおけるミシマバイカモの生育確率（在と判定される確率）を算定した（図－5）。ミシマバイカモの生育確率と物理環境の回帰式は、次式のように表すことができる。

$$\log\left(\frac{p}{1-p}\right) = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 \quad (1)$$

ここに、 p ：ミシマバイカモの生育確率、 X_1 、 X_2 、 X_3 ：水深、流速、日射量、 α ：回帰係数（切片）、 β_1 、 β_2 、 β_3 ：回帰係数（水深、流速、日射量）である。また、母集団となる 3,457 メッシュは不在メッシュが大半を占めている。このようなデータから信頼性の高い予測を行うためには、応答変数間での標本数に大きな偏りが生じないよう無作為抽出したデータでの解析を繰り返し、それらの平均をとる手法が適している⁶⁾。このため本研究では、3,457 メッシュから在・不在それぞれ 50 メッシュをランダムサンプリングして回帰式を構築することを 10,000 回繰り返し、これらの結果を、モデルの良し悪しを判断する際に用いる AIC（赤池情報量規準）からヒストグラム化した。最終的に採用する回帰係数は、このヒストグラムの最頻値群における平均値とした（図－6、表－3）。これらの統計解析には、フリーの統計処理ソフトである R(version 4.3.1) を使用した。



図－6 (a) 10,000 通りの解析結果の AIC 分布
(b) 全メッシュの在・不在の実測値（プロット）と AIC 最頻値群の平均から取得した回帰曲線（実線）

3. 在来水生植物の再生試験の実施

3-1 再生試験地の選定

柿田川自然再生事業におけるミシマバイカモの再生試験は 2017 年度から開始され、2023 年度までに生残率の高い移植手法が概ね確立されている。2024 年度の試験目的は、実際にオオカワヂシャを駆除した後にミシマバイカモを移植し、本種への置換が可能かを検証することであった。このため、試験地選定にあたり、作成したミシマバイカモの PM と最新（2023 年度）の詳細分布調査におけるオオカワヂシャの分布を重ね合わせ、オオカワヂシャが高密度に生育しており、且つミシマバイカモの生育確率が比較的高い箇所を検討した。更に移植作業が安全に実施できることも考慮して、最終的に 2m×2m の試験地を 4 箇所選定した（図－5）。試験地は上流から順に、試験地①（1.05kp 右岸付近）、試験地②（0.90kp 右岸付近）、試験地③（0.82kp 左岸付近）、試験地④（0.77kp 流心付近）とした。各試験地におけるミシマバイカモの生育確率は、①：0.748、②：0.670、③：0.664、④：0.556 である。

3-2 再生試験地における移植の方法

柿田川移植作業を、2024 年 5 月 20 日から 21 日に実施した。

ミシマバイカモの移植に先立ち、各試験地に繁茂しているオオカワヂシャを駆除した。駆除は、人の手による抜き取りで実施した。また、過年度の知見でオオカワヂシャの抜き取り後に残存する根茎を除去するよう河床表層を攪拌すると、本種の再繁茂が長く抑制されることが分かっているため⁵⁾、ジョレンを用いて試験地内の河床表層を攪拌した。

ミシマバイカモは通常のバイカモと同じく、長い茎の節々から不定根を出して河床に定着する水草である⁷⁾。本種の移植は、1 株を数 10cm にちぎりヤシマットに巻き付けて作成した移植マットを、生分解性プラスチックのピンで河床に固定する方法で実施した。これは、柿田川における過年度の再生試験の中で検討され、有効性がある程度確認された移植手法である。移植マットは、1 試験地につき 100 個を隙間なく並べて移植した。また、異なる移植手法の有効性を検討するため、試験地④のみ、根ごと掘り取ったミシマバイカモ（10cm、20cm、30cm の 3 通りのサイズで採集）を、移植マットを使用せずにそのまま河床に植栽する方法で移植した（図－7）。

移植後は、10 月まで毎月 1 回のモニタリングを実施し、移植した株の茎長（最も長い茎の長さ）を記録した。試験地①から③は株数が多いため、無作為に選んだ 30 株の茎長を記録した。



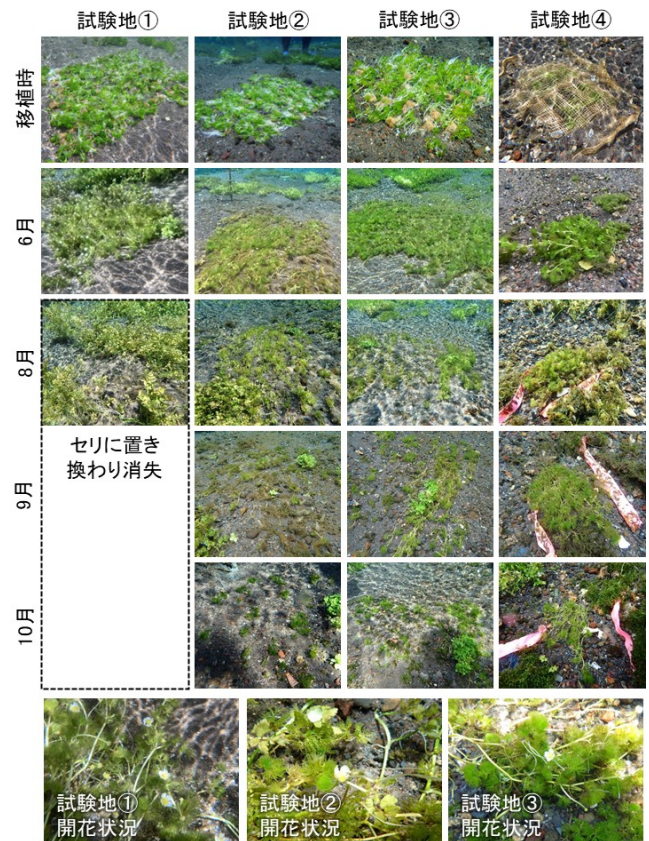
図－7 再生試験の実施状況

4. 結果と考察

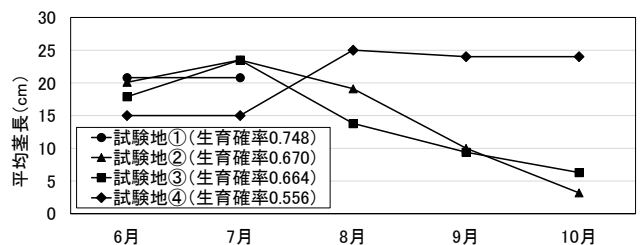
モニタリングの結果、いずれの試験地においても移植から約1カ月経った6月時点で河床に活着していることが確認され、試験地①から③では開花も確認された(図－8)。なお、試験地④では10cmの株のみが生残しており、20cmと30cmの株は6月までの間に流失したものと考えられた。移植をする際にミシマバイカモの供試体を大きくしすぎるとその後の生育に支障をきたしたり、流失の可能性が高まったりすることは過年度の試験においても指摘されており、今回の結果はこれを支持するものであったと考えられる。

その後の経過を見ると、試験地①では、7月まで移植した株の生育が確認されたが、8月時点では在来種のセリに置き換わって消失していた。試験地②、③では、6月から7月にかけて成長し、7月から10月にかけて成長が停滞して密度が疎になっていく様子が確認された。試験地④の10cmの株は、7月から8月にかけて成長し、8月から10月の間は大きな変化が見られなかった(図－9)。いずれの試験地においても自生のミシマバイカモと同じくらいの密度まで成長することはなかったが、夏季以降に成長が停滞すること自体は自生のミシマバイカモにも見られる現象であり、過年度の試験では移植した株が翌春になって成長を再開する様子が確認されていることから、試験地②から④については、来春以降もモニタリングを継続していくことが望まれる。オオカワヂシャは、駆除後に河床を攪拌した効果もあってか、いずれの試験地でも10月まで再繁茂する様子は見られなかった。

各試験地におけるミシマバイカモの生育確率とモニタリング結果を単純に比較すると、生育確率の最も高い試験地①のみが途中で消失し、生育確率の最も低い試験地④が10月時点で茎長が最長となったことから、



図－8 各試験地における移植後の経過写真



図－9 各試験地における移植後の茎長の変化

生育確率と試験結果との間に相関関係は見られなかった。

再生試験では環境条件に加えて移植条件がその後の生育に大きく影響すると考えられる。ここで、純粋に環境条件の予測精度を確かめるため、統計解析に供したメッシュのうち応答変数が不在であったものについて、生育確率の予測結果と2024年詳細分布調査における実際のミシマバイカモの生育状況とを比較した(図－10)。その結果、2024年にミシマバイカモが群度3から5で生育しているメッシュは、明らかにそれ以外のメッシュよりも生育確率が高く、この結果を踏まえると、作成したPMは、自生のミシマバイカモがまとまって生育しやすい環境条件を一定の精度で予測できているといえる。

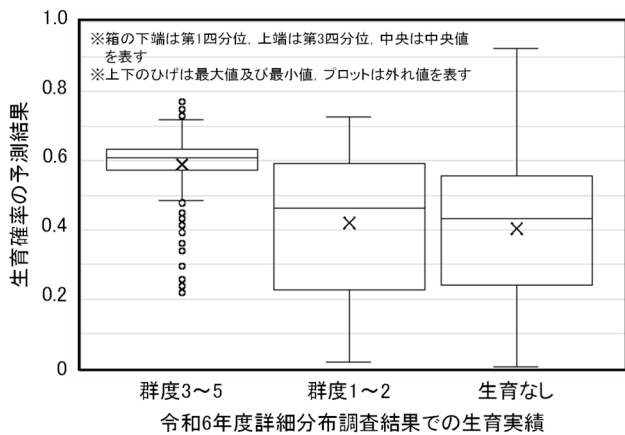


図-10 ミシマバイカモの生育確率と2024年度の生育実績

5. おわりに

本研究では、柿田川の在来水生植物の生育確率を既往の現地調査結果や測量成果に基づく物理環境のシミュレーション結果から予測し、実際に高く予測された場所でミシマバイカモの移植を実施した。その結果、移植した株は河床に活着したものの、年内に自生のミシマバイカモと同じくらいの密度まで成長することにはなかった。また、予測した生育確率と成長量の間にも関係性は見られなかった。これらは単年のモニタリング結果であるため、本種が成長を再開すると考えられる今春以降も移植箇所のモニタリングを継続する予定である。

一方で、統計解析時点で応答変数が不在であったメッシュのうち、2024年に本種が確認されているメッシュは明らかに他のメッシュよりも生育確率が高く予測されており、自生のミシマバイカモの生育適地は、一定の精度で予測できているものと考えられた。

以上を踏まえると、在来水生植物の移植においては、単に自生株が高密度に生育している箇所の環境条件に合わせるだけではなく、移植後において、如何に自生株と同じくらい安定した密度まで成長させるかが一つの重要な要素になると考えられる。この問題を解決するには、移植手法の見直しはもちろんであるが、移植場所の選定においても、対象とする種の成長段階や生育密度により応答変数を変化させたPMを用いることで、効果的に在来水生植物の再生が進められる可能性がある。また、本研究では面的データが比較的簡単に作成できる水深、流速、日射量を説明変数として予測を行ったが、水生植物の生育に影響を与えられと考えられる水温、水質、底質等の他の物理環境条件も解析に供することができれば、予測の精度が向上する可能性がある。

最後に、本研究で行ったような物理環境データに基づく生物の生息・生育確率の予測は、定期的な測量成果や環境調査データが蓄積されている大河川において比較的適用可能性が高いと考えられるが、より緻密なデータが必要になる小河川での作成事例は限られている。柿田川は国土交通省による測量が定期的に行われていること、自然再生事業が長年実施されていること、河道の長期的な変化が少ないこと等から、既往のデータを用いることでPMを作成することができた。このような小河川は多くはないと考えられることから、今後の事例の蓄積により、小河川における簡便かつ高精度な環境評価手法が確立されていくことが望まれる。

本研究は、国土交通省からの受託業務「令和4年度柿田川自然再生事業検討業務」の成果の一部である。本研究に際して、国土交通省中部地方整備局沼津河川国道事務所から貴重なデータを快く提供頂いた。ここに記して謝意を表する。

<参考文献>

- 1) 国土交通省中部地方整備局沼津河川国道事務所：柿田川自然再生計画，
https://www.cbr.mlit.go.jp/numazu/river/pdf/plan_kakitagawa_3.pdf, 2021
- 2) 国土交通省中部地方整備局沼津河川国道事務所：第11回柿田川自然再生検討会資料，
https://www.cbr.mlit.go.jp/numazu/river/pdf/11shiryou_kentoukai-160317.pdf, 2016
- 3) 国土交通省中部地方整備局沼津河川国道事務所：第12回柿田川自然再生検討会資料，
https://www.cbr.mlit.go.jp/numazu/river/pdf/12shiryou_kentoukai-170310.pdf, 2017
- 4) 国土交通省水管理・国土保全局河川環境課：平成28年度河川水辺の国勢調査基本調査マニュアル[河川版]（河川環境基図作成調査編），2016
- 5) 国土交通省中部地方整備局沼津河川国道事務所：第19回柿田川自然再生検討会資料，
https://www.cbr.mlit.go.jp/numazu/river/pdf/19shiryou_kentoukai-240214_02.pdf, 2024
- 6) 大城温，長谷川啓一，上野裕介，井上隆司：動植物の移植・移設先の選定を目的とした生物分布推定モデル3種の比較，環境システム研究論文発表会講演集，43，pp.153-158，2015
- 7) 角野康郎：日本の水草，文一総合出版，2014

