生物多様性保全と減災の両立を目指した河川氾濫原ネットワーク（EcoNet-DRR）管理手法の高度化

研究予算：運営費交付金
研究期間：平 31～令 3
担当チーム：自然共生研究センター
研究担当者：中村圭吾、林田寿文、宮川幸雄、森照貴、大槻順朗、末吉正尚、東川航

【要旨】
遊水地を造成する際、元は氾濫原であった場所を候補地とする場合が多い。生物多様性保全の観点から、遊水地に氾濫原環境を創出することは重要であるが、どのような環境や景観要素を取り入れるべきかを判断する手法は検討されてこなかった。本課題では、水際の移行帯における微環境の異質性が昆虫類の多様性を高めることを実験的に確かめた。また、水域景観の多様性を 1km 四方ごとに数値化した「さとがわ指数（SGI）」を開発し、魚類およびトンボ類の多様性との関係から、SGI が淡水生物多様性の指標として有用である可能性を示した。SGI は、生物多様性保全に資する遊水地の環境デザインや造成候補地の選定においても有用である可能性が示唆された。
キーワード：気候変動、流域治水、氾濫原、グリーンインフラ、ポテンシャルマップ

1. はじめに

洪水を安全に流下させるために、ダムや堤防を中心に整備が進められてきたが、治水対策を加速させる動きとして、新たに土地を確保して遊水地を整備する計画も全国の河川で検討されている。遊水地とは、川に隣接した低地に洪水を一時的に貯めることで最大流量を減少させ、洪水後にゆっくりと川へ戻す施設であり、確保された低地の利用方法には様々な選択肢がある。例えば、遊水地として整備された後も農地としての利用が続けられる場合もあれば、公園やグラウンドに改変する場合もある。遊水地の候補となる場所の多くは河川沿いの低地であり、従来は氾濫原と呼ばれる洪水時に冠水する領域である。氾濫原は陸域と水域の中間的な特徴を持ち、生物多様性保全の観点から重要な景観要素とされているため、遊水地として整備された後の土地利用を工夫することで、治水施設でありながら生物多様性にとって大きなプラスになる可能性がある。

生物多様性保全の観点も取り入れた遊水地は、「自然災害の被害に遭いやすい土地の利用や開発を避けることで、被災する可能性を低下させるとともに、生態系の持続的な管理、保全と再生を行うことで、災害に強い地域をつくる」という「生態系を活用した防災・減災（Ecosystem-based Disaster Risk Reduction : Eco-DRR）の考え」に適合するものである。これは人工構造物の整備による社会資本の整備だけでは、老朽化や維持コストの増大が懸念されていることに加え、地域の住民の生活と切り離すことなく、つながりを持つことのできる場としての役割も期待されて提案された考えである。さらに、国土交通省では、川の中を主とした「多自然川づくり」から流域の「河川を基軸とした生態系ネットワーク（Ecological Network：EcoNet）の形成」へと視点を拡大しているところであり、川に隣接する遊水地は流域へと視点を広げる端緒として位置づけることができる。このように、Eco-DRR と EcoNet の考えは遊水地を基点に重ねることができると考え、EcoNet-DRR として生態系ネットワークの形成と活用を踏まえた防災・減災へと発展できる可能性がある。

EcoNet-DRR として重要となるのは、まずは遊水地内の土地利用であり、氾濫原の生息場機能を高める要素の特定である。氾濫原には湿地や池沼が存在することが多く、遊水地においてもそれらを人為的に創出することは可能である。氾濫原にみられる水際の移行帯では環境の異質性（土壌表面構造の複雑さや、土壌水分量の微勾配など）が大きく [1]、水辺生物の生息状況に影響するものと考えられる。移行帯の環境異質性が人為的に維持されている渡良瀬遊水地（群馬県邑楽郡）では多くの氾濫原依存種が確認されており、オサムシ上科やトンボ類を含めた水辺の希少な昆虫類が安定的に生息している [2]。しかし、水辺生物に対する環境異質性の影響については知見が乏しく、人工的に整備する際に留意すべき事項については整理されていない。

次に、EcoNet-DRR として整理すべきなのが流域と

しての視点であり、例えば遊水地の候補地が流域の中でどういった生物多様性保全上の価値を有するか、もしくは遊水地を整備することで流域として生物多様性保全に寄与できるか、といった評価が必要と考えらえる。しかし、現状では遊水地の整備による治水機能の向上は数値化できる一方で、生物多様性保全への有効性など環境機能の効果は定量化されていない。そのため、EcoNet-DRR としての高い価値が想定されたとしても環境面では定性的な評価に留まってしまい、遊水地の候補地が複数あるような場合に、環境の側面からそれらを比較検討することが困難な状況にある。

遊水地の整備に伴う環境機能としては、水際の創出といった狭域スケールでの効果に留まらず、地域や流域といった広域スケールにおける効果も期待される。森林や畑地、市街地といった広域スケールで捉える「景観の多様性」と生物多様性の関係は、陸域を対象に数多く研究されており、景観が多様であることの重要性が示されてきた。一方、河川、池沼、水田といった水域景観の多様性が、淡水の生物多様性に及ぼす影響は検討されてこなかった [3]。遊水地を整備することは、水域景観の多様性やそのつながりを向上することにつながるものと考えられるため、地域や流域といった広域スケールでの影響を理解することは重要である。

以上の諸問題に鑑み、本課題では次の 2 つを目的として検討を行った。①実験河川にて水際環境の操作実験を実施し、移行帯としての水際における環境異質性が水辺の昆虫類の生息場利用に与える影響を検証する。②水域景観の多様性を地域ごとに数値化する「さとがわ指数（SGI）」を開発し、SGI と淡水生物多様性の関係を検証することで、EcoNet-DRR としての遊水地の評価手法について検討する。指数の名称として用いた「里川（さとがわ）」とは、人々にとって身近な水域を意味すると同時に、流域の水循環全体に関わるあらゆる水域を指す言葉である [4]。

2. 研究方法

2.1 水際環境の操作実験

実験河川において、5 m ×10 m の区画を高水敷に整備した（図 1a）。本実験では、図 1a 赤枠内に示した、高さ 30 cm の畦で仕切られた 16 面の実験区画（B 河川右岸（BR）・左岸（BL）、C 河川右岸（CR）・左岸（CL）にそれぞれ 4 面ずつ）を用いた。これらの実験区画に対して、2021 年 5 月に、下記の 2 つの処理を施した。処理①： 8 面の実験区画において、直径約 40 cm、深さ約 20 cm の微小な窪地を 1 面あたり

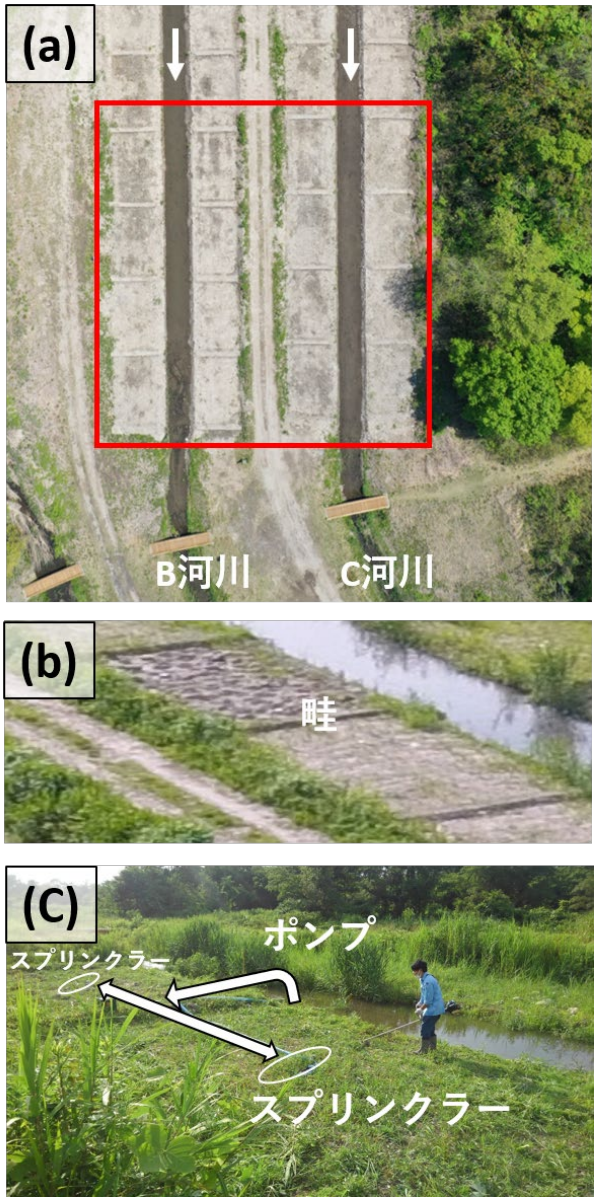

図 1. (a) 実験河川における高水敷エリア（赤枠内を実験に利用）。白矢印は流れの方向を示す。(b) 凸凹区（左上）と平坦区（右下）。(c) 河川水の汲上げとスプリンクラーによる散水システム（1 台のポンプで 2 面の実験区に散水）。

約 100 カ所作出し、掘り返した土を用いて同区画内に同数の小山を作ることで、土壌表面の凸凹構造を形成した（図 1b 左側）。残りの 8 面の実験区画は、平らな土壌表面に手を加えず無処理区とした（図 1b 右側）。処理②：8 面の実験区画において、太陽光パネルの電力を用いて河川の水をポンプアップし、スプリンクラーを通して区画の全面に散水できるシステムを構築した（図 1c）。5 月下旬に全区画の草刈りを行ってから散水を開始し、散水は太陽光による発電が可能な 9:00～9:30、13:00～13:30、17:00～17:30 の 3 つの時間

帯に毎日、10 月中旬の実験終了まで継続した。ただし、雨天の日は散水無しとした。これら 2 処理により、4 種類の処理区（凸凹散水 RW、凸凹非散水 RD、平坦散水 FW、平坦非散水 FD）を作成した（図 2）。散水により、RW 区の窪地には半恒常的な水溜まりが

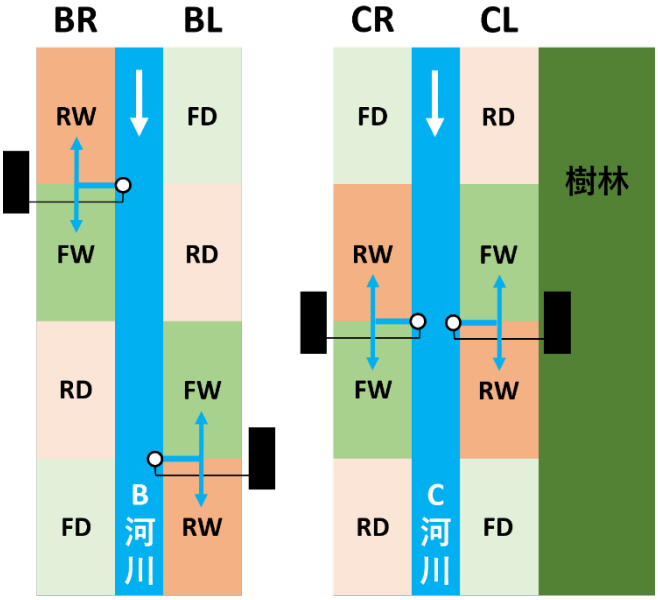

図 2. 各処理区の位置関係。白丸および黒四角は、それぞれポンプおよびソーラーパネルを示す。白矢印および水色矢印は、それぞれ流れの方向および散水の方向を示す。

生じた。

6 月から 9 月の各月の中旬に、地表徘徊性のコウチュウ目オサムシ上科を対象としたピットフォールトラップ調査を実施した。1 つの調査区画に対し、プラスチックカップ（9oz、78φ×99 mm）を 1m 以上離して 10 個、カップの入り口と地面の高さが同じになるように埋め込み、2 晩の間放置した。トラップにより採集されたオサムシ上科を研究室へ持ち帰り、種同定を行った。なお、6 月調査時の 1 回のみ、土壌硬度および土壌水分を調査区画単位で 5 回ずつ計測した。調査結果の統計解析は、下記の 2 つを実施した。①すべての調査で得られたオサムシ上科各種の個体数データを用いて、Bray-Curtis 指数に基づく非多次元尺度法により、各調査区の群集構造の座標付けを行った。また、k-means 法によるクラスタリング結果に基づいて群集をグルーピングした。同時に、林縁の有無、土壌硬度、および土壌水分量が群集構造に与える影響を、環境変量の並べ替え検定（10,000 回）により解析し、統計的に有意な効果のみ（$p<0.05$）、nMDS 上にベクトルでプロットした。なお、土壌硬度および土壌水分量は、5 回計測の平均値を解析に用いた。②採集されたオサムシ上科の種数、個体数、種ごとの個体数のそれぞれに対する土壌表面構造（R vs. F）、散水の有無（W vs. D）およびこれらの交互作用の効果について、調査月と河岸を変量効果とした一般化線形混合モデル（GLMM）により解析した。応答変数としたオサムシ上科の種数および個体数は、対数リンク関数を用いてポアソン分布によりモデル化した。一方、種ごとの個体数については 0 データが多かったため、負の二項分布を仮定してモデル化した。

2.2　さとがわ指数（SGI）の開発と有用性の検討

さとがわ指数（SGI）は、1km^2 範囲における河川や池沼、水田などの水域景観の多様さを表す指標として開発した。開発に際して、各省庁が公開する水田、自然湿地、ため池、湖、河川、農業用水路および市街地の各土地被覆に関する GIS データに基づき、日本の三次メッシュの 1km 四方を計算格子とした。淡水生物多様性の決定要因として知られる水景観の不均質性、水際の長さ、小河川（農業用水路を含む）の密度の 3 要素を SGI の計算式に取り入れ、それぞれ独立の項として下記のとおり算出した。まず、水景観の不均質性は $1 - \sum_{i=1}^{S} p_i^2$（S：空間単位おける土地被覆タイプの数、p_i：グリッドセル内の土地被覆タイプ i の割合）で定義されるシンプソンの多様度指数（*SDI*）により定量化した。本研究の *SDI* には、上記に列挙した各水域および都市部を含む残りの陸域の面積割合が含まれる。陸域の面積割合（*T*）の効果を除し、市街地の割合（*U*）の負の効果を考慮するために、*SDI* には$(1 - T)(1 - U)$を乗じた。一方、水際長（*Sl*）（km）および小流域密度（*Sd*）（km）は、水域景観として正の効果を持つと考え、それぞれ $1 - 1/(Sl+1)$、$1 - 1/(Sd+1)$と定義し、加算されるものとした。0 から 1 の値をとる 3 項のそれぞれの重要度は、対象とする生物分類群や季節、標高によって異なると考えられるため、式中ではこれらを等価に足し合わせることとした。SGI がとりうる値を 0 から 1 の範囲とするため、式全体に 1/3 を乗じた。

$$\mathbf{SGI} = \frac{1}{3}\left\{SDI(1-T)(1-U) + \left(1 - \frac{1}{Sl+1}\right) + \left(1 - \frac{1}{Sd+1}\right)\right\}$$

土地被覆が均質で水際や小河川のないセル（1km^2）の SGI 値は最小値の 0 をとる。水域の土地被覆が多様かつ水際と小河川が豊富であり、都市部に該当する面積を有しないセルでは、最大値の 1 に近づく。

次に、淡水生物多様性の評価における SGI の有用性を検証した。対象地は、木曽三川流域における濃尾平野とその周辺の丘陵・山地（三重県、岐阜県、愛知県）

とした。対象地の SGI を上記の方法にて算出するとともに、下記の要領で対象地における水辺生物（トンボ類および魚類）の多様性を調査し、両者の空間分布を重ね合わせた統計解析を実施した。

① トンボ類のライントランセクト調査

対象地において、さまざまな SGI の値を持つ 50 のセルを無作為に選択し、これらをトンボ類の調査地とした（図 3）。選択した各セルにおいて、可能な限り多様な淡水環境に沿うように約 500m の調査ルートを設定した。2020 年の 9 月下旬から 10 月中旬に、各ルートに沿って 20 分間のライントランセクト調査を行った。調査ルートの左右 5m 以内に観察されたトンボ類の種と個体数を目視でカウントした。

② 魚類の分布データ

2015 年から 2019 年にかけて主に 1～3 次河川で得られた淡水魚の分布調査データおよび 2011 年から 2020 年にかけて農業用水路で得られた淡水魚の分布調査データ（岐阜県水産研究所による調査データ）を本研究に使用した（図 3）。各調査地点は、瀬や淵など魚類の典型的な生息地が少なくとも 1 組含まれるよう設定されている。対象地においては、合計 1490 点の調査地点が計 408 のグリッドセルに含まれた（図 3）。解析には、在来種のデータのみを用いた。

トンボ類および魚類の多様性と SGI との関係性を一般化線形混合モデル（GLMM）により解析した。応答変数は、トンボ類については観察種数とし、魚類については 1 セル内の調査地点数が 1～52 地点とばらついたため、標本ベースの希薄化（Sample-based Rarefaction）

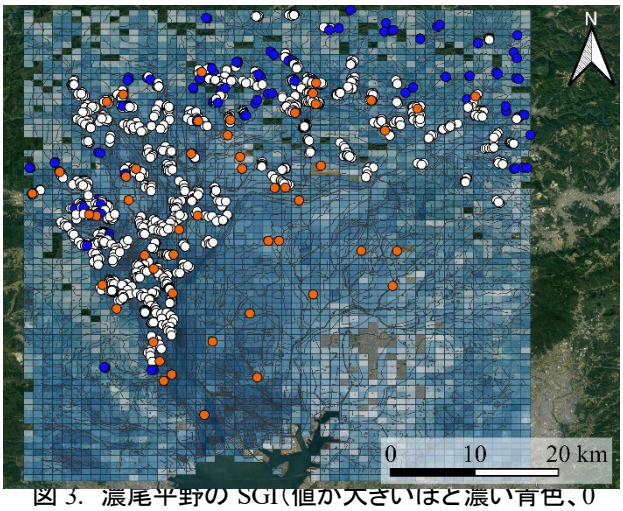

図 3. 濃尾平野の SGI（値が大きいほど濃い青色、0 は無色）と、トンボ類および魚類の調査地点（● :トンボ類の調査ルートの重心、50 地点；● :1~3 次河川の魚類調査地点、100 地点；○ :農業用水路の魚類調査地点、1390 地点）。

により 1 地点あたりの推定種数を求めた。各応答変数は、対数リンク関数を用いてポアソン分布によりモデル化した。トンボ類は水陸の両方を利用するため、SGI および同じ空間単位で植生の不均質性をもとに算出される「改良さとやま指数（M-SI）」[5]の 2 変数を説明変数とした。一方、魚類については SGI のみを説明変数とした。変量効果は、トンボ類については調査日およびセルごとの平均標高とし、魚類についてはセルごとの平均標高のみとした。

3. 研究結果

3.1 水辺の昆虫類に対する移行帯の環境操作の効果

オサムシ上科のピットフォールトラップ調査においては、全 32 種 3,286 個体が確認された。nMDS による座標付けの結果、調査区画ごとの地表徘徊性オサムシ上科の群集は 5 つのグループに分けられ、林縁の有無（$p < 0.001$）、土壌硬度（$p = 0.008$）および土壌水分量（$p < 0.001$）が群集の類似性に有意に影響していた（図 4）。オサムシ上科の種数に対する土壌表面構造および散水の有無の効果は、両方とも有意でなかった。一方、オサムシ上科の個体数は、平坦区（F）よりも凸凹区（R）で有意に多く（$p = 0.001$）、散水区（W）よりも非散水区（D）において有意に多かった（$p < 0.001$）。説明変数間における交互作用も有意であり（$p < 0.001$）、散水による個体数の減少幅は F よりも R で大きかった。これは、散水時にできる水たまりの総面積が F よりも R で大きいため、陸地面積が後者でより狭まったことによる影響かもしれない。また、凸凹区（R）よりも平坦区（F）で有意に多かった種は 3 種であり（オオナガゴミムシ、$p = 0.017$；オオクロナガゴミムシ、$p = 0.042$；ヒメキベリアオゴミムシ、$p < 0.001$）、非散水区（D）よりも散水区（W）において有意に多かった種も 3 種（ミカワオサムシ、$p < 0.0001$；コガシラアオゴミムシ、$p = 0.006$；ヒメキベリアオゴミムシ、$p = 0.005$）であっ

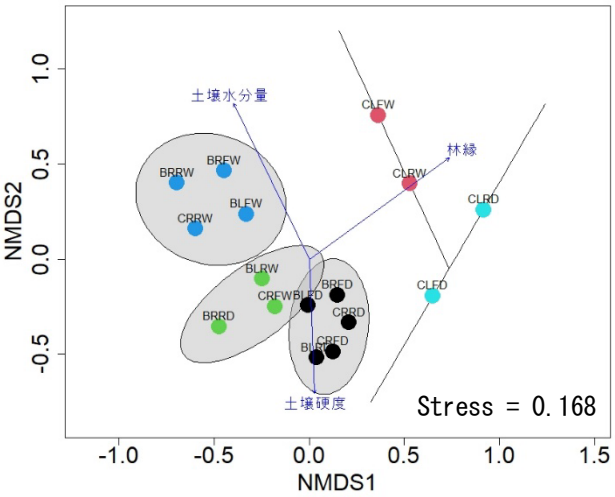

図 4. Bray-Curtis 指数に基づく nMDS による各調査区角のオサムシ上科群集の座標付け。プロットの表記について、例えば BRRW は B 河川右岸（BR）、凸凹散水区（RW）を示す。楕円は k-means 法によるクラスタリング結果に基づく。

た。特にヒメキベリアオゴミムシについては、説明変数間の交互作用が有意であり（$p<0.001$）、散水による個体数の増加幅は R よりも F で大きかった。これは、散水によってできる湿った土壌表面の面積が、水面のできやすい R よりも、水面のできにくい F において大きかったことによる影響かもしれない。以上の結果は、水際のオサムシ上科の個体数が基本的には凸凹して干上がった土壌において多いものの、種によっては平坦で湿潤な土壌で個体数が多くなる場合もあることや、土壌表面の構造により降雨や増水に伴う水面のできやすさが異なる事によって、個体数の変動幅も多様化することを示している。また、移行帯における土壌の表面構造や硬度および水分量の異質性が、水際の地表徘徊性昆虫類の多様性を支えている可能性も示唆された。こうした微環境の異質性に対する応答は、湿地を利用する様々な水辺の生物分類群にも共通する可能性がある。すなわち、氾濫原生息場の機能を持った遊水地などを整備する際、水際の移行帯における生物多様性保全の効果を高めるには、土壌の表面構造や水分量に関する微環境の多様性を創出することが重要であり、通常の整備でもたらされる乾燥した平坦な地盤だけでなく、凸凹部や湿地に近い環境を意識的に創り出すことが効果的と考えられる。

3.2 淡水生物多様性の評価における SGI の有用性

トンボ類の調査では 19 種（流水性 3 種および止水性 16 種）が観察され、魚類の分布データでは 42 種（流水性 3 種および半止水生 9 種）の在来種が記録されていた。SGI は、トンボ類（$p = 0.004$）および魚類（$p = 0.003$）の種数に対して有意な正の効果を示した。水陸の両方の環境を利用するトンボ類の種数に対しては M-SI も正の効果を示し（$p < 0.001$）、SGI および M-SI の両指数値が高いほど種数が多くなることが示された。また、魚類については、標高が低いほど種数が多くなる傾向もみられた（図 5）。これらの結果より、SGI は淡水生物の多様性を表す指標として有用であり、流域等の広域スケールで求めた SGI の分布は、淡水環境の良否を評価するマップ（ポテンシャルマップ）として扱えることが示唆された。また、トンボ類のように水陸の両方を利用する水辺の生物については、M-SI などの他の指標と SGI を組み合わせた解析によって、生物多様性の推定精度を向上できる可能性も示された。以上より、SGI は流域の環境基盤情報として有用と考えられたため、全国を対象にこれを算出した（図 6）。

遊水地の造成を計画する際、SGI の情報に基づくこ

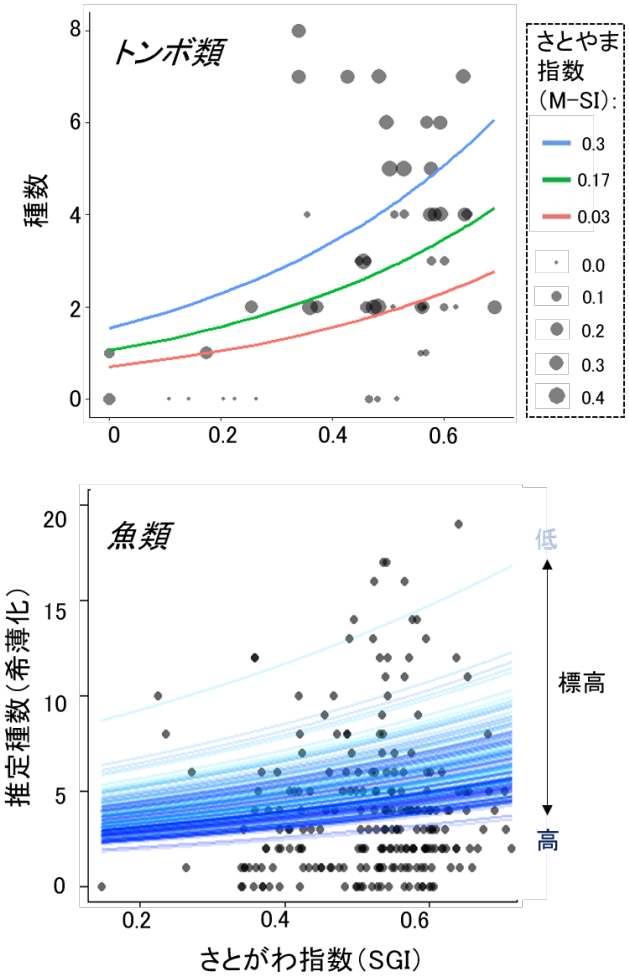

図 5. トンボ類の種数および魚類の推定種数と SGI 値との関係。プロットは実データを示し、曲線は GLMM による推定結果を示す。

とで、遊水地の候補地が生物多様性の観点からどの程度の重要性を持っているのか、そして遊水地にどのような水域景観を整備すれば、生物多様性を向上しうるかの検討が可能となる。遊水地の候補地が複数ある場合においても、それぞれの整備前後における SGI 値の違いを考慮して、候補地間で環境機能の比較や順位付けをすることもできるだろう。

以上により、国内の各地域における淡水生物多様性のポテンシャルを示すことができ、これをもとに遊水地の候補地の選定や整備する際に求められる水域景観の選定に資する手法を提案することができた。

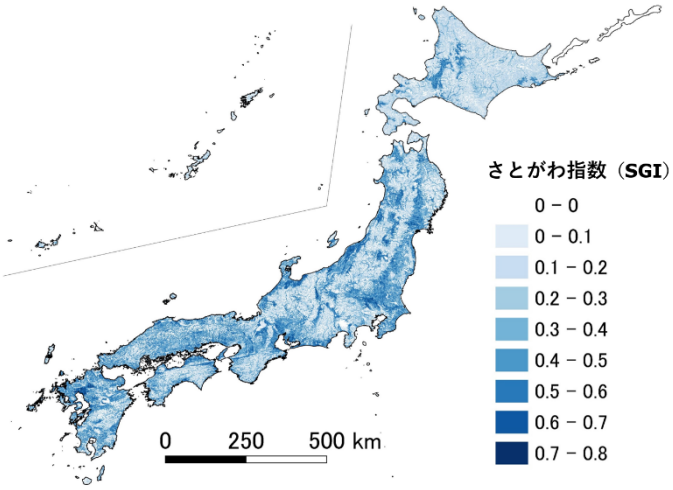

図 6. 淡水生物多様性のポテンシャルマップとしてのさとがわ指数（SGI）の全国マップ。

4. まとめ

本研究では、生物多様性保全と防災・減災の両立を目指した遊水地の形態および配置の選定手法について検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

1) 水際という移行帯において、土壌の表面構造や硬度および水分量といった微環境の異質性が生物多様性に影響していることが分かった。

2) 水景観の不均質性、水際の長さ、小河川密度の 3 つの要因を考慮したさとがわ指数（SGI）を開発したことで、淡水生物の多様性分布の全国的に評価できる可能性が示唆された。

3) SGI を用いることで、遊水地などを整備する際、生物多様性保全に求められる水域景観を特定できる可能性が示唆された。

参考文献

1) Doering M., Freimann R., Antenen N., Roschi A., Robinson C.T., Rezzonico F., Smith T.H.M. & Tonolla D. : “Microbial communities in floodplain ecosystems in relation to altered flow regimes and experimental flooding” Science of the Total Environment, 788, 147497, 2021

2) 一般財団法人渡良瀬遊水地阿久里メーション振興財団：「渡良瀬遊水地」 https://watarase.or.jp/insect/water.html（2022 年 6 月確認）

3) Kadoya T. & Washitani I. : “The Satoyama Index: a biodiversity indicator for agricultural landscapes” Agriculture Ecosystem and Environment, 140, pp.20-26, 2011

4) 鳥越皓之：「里川の可能性―利水・治水・守水を共有する―」新曜社、東京、277p.、2006

5) 吉岡明良・角谷拓・今井淳一・鷲谷いづみ：「生物多様性評価に向けた土地利用累計と「さとやま指数」でみた日本の国土」保全生態学研究、18、pp.141-156、2013

DEVELOPMENT OF ECO-DRR BASED MANAGEMENT METHODS FOR FLOODPLAIN HABITAT NETWORKS

(blank line)

Research Period: FY2019-2021
Research Team: Aqua Restoration Research Center
Author: NAKAMURA Keigo
HAYASHIDA Kazufumi
MIYAGAWA Yukio
MORI Terutaka
OHTSUKI Kazuaki
SUEYOSHI Masanao
HIGASHIKAWA Wataru

(blank line)

Abstract: Environmental design and spatial arrangement of flood control reservoirs are important for freshwater biodiversity conservation and disaster mitigation. We found that the microhabitat heterogeneity at the water's edge increases the diversity of wetland insects. Furthermore, we developed the Satogawa Index (SGI) by quantifying the heterogeneity of aquatic landscapes at 1 km squares. The SGI was revealed to be an indicator of freshwater biodiversity, which contributes in designing environment and spatial arrangement of flood control reservoirs based on the EcoNet-DRR contexts.

(blank line)

Keywords: climate changes, integrated watershed management, floodplain, green infrastructure, potential maps