

絶滅危惧種「ザリガニ」の保全に必要な環境条件の解明

要旨

1. はじめに

2. 方法

2. 1 野外調査

2. 1. 1 ザリガニ調査および環境要因の測定

2. 1. 2. データ解析

2. 2 室内実験

2. 2. 1 実験水路

2. 2. 2 実験の設定

2. 2. 3. データ解析

3. 結果

3. 1 野外調査

3. 1. 1 ザリガニ出現予測モデル

3. 1. 2 ザリガニの微生息場所環境と局所密度

3. 2 室内実験

4. 考察

4. 1 河川環境の影響

4. 2 溪畔環境の影響

4. 3 保全対策について

4. 4 おわりに

参考文献

北海道大学北方生物圏フィールド科学センター 西 川 潮

要旨

本研究は、絶滅危惧種、ザリガニ (*Cambaroides japonicus*) の保全に重要な生息環境に関する基礎情報を得ることを目的に、野外調査と室内実験を行った。野外調査は、夏季、北海道の 22 の小河川において行い、ザリガニの生息環境の指標として、河川と渓畔の環境双方を記録した。その結果、22 河川中 12 河川においてザリガニが確認され、ザリガニの生息する河川は勾配が大きく、平均流速が早く、そして隠れ家となる巨礫が多く出現した。しかしながら、ザリガニは、急流河川においては非常に限られた面積を占めているたまり（淵や岸近くの流れの緩い部分）にしか認められず、このような微生息場所において、局所的にみると非常に高密度で生息していた。一方、いっけんザリガニの生息に最適と思われる、勾配が小さく、平均流速が弱い、たまりがほとんどの割合を占めるような河川では、ザリガニはほとんど認められなかった。また、ザリガニの生息する河川と生息しない河川では渓畔組成が異なった。ザリガニの生息する河川では、遷移初期種であるヤナギ属 (*Salix*) やハンノキ属 (*Alnus*) が優占し、下層植生に笹がほとんど見られないのに対して、ザリガニが生息しない河川では遷移中期種であるヤマグワ (*Morus bombycina*) やトチノキ (*Aesculus turbinata*)、オニグルミ (*Juglans ailanthifolia*) が優占し、笹 (*Sasa*) の被度が著しく高かった。夏に採取した葉を用いた室内実験の結果から、笹は、ザリガニが分解することのできない悪質な餌資源であることが証明された。また、ザリガニの葉の選好性は葉の硬さ（柔らかいほど好む）や炭素=窒素比（低いほど好む）と相關していた。これらの結果を踏まえて、ザリガニの分布を制限していると考えられる河川環境と渓畔環境の機能的役割を考察する。

1. はじめに

人間活動の影響を受けて、近年、急速に生物多様性が失われつつある。ザリガニ類は全世界から約 550 種が記載されているが、約 400 種のザリガニを擁する米国において、その絶滅率は、現在の 10 年に 0.2 種から、将来的には 10 年に 4 種になると推定されている¹⁾。この絶滅推定値は、淡水性生物では二枚貝（10 年に 6 種の絶滅率）に次いで高い¹⁾。

日本には在来ザリガニ (*Cambaroides japonicus* de Haan ; 以下ザリガニ) が 1 種のみ存在するが、これは日本固有種でもある²⁾。ザリガニは北海道、青森県、秋田県および岩手県の河川や湖沼に分布する²⁾。近年、ザリガニは、森林伐採や外来種移入、乱獲、水質汚染などの影響を受けて、その生息数が激減している²⁾ため、環境省レッドデータブックでは絶滅危惧Ⅱ類に指定されている。ザリガニは、秋田県大館市では天然記念物指定されているものの、当該個体群はすでに絶滅し³⁾、天然記念物は過去の遺物となっている。ザリガニの分布に関しては、これまで、北海道や本州における大まかな分布状況が報告されている^{2) 4)}が、生息域環境の定量的研究は行われていない。本研究の目的は、ザリガニの生息にとって制限要因となっている環境要因を特定し、それらの環境要因からザリガニの生息密度に関する予測モデルを作成すること、そして、溪畔植生のどのような葉（特性）がザリガニの餌資源として重要であるかを実験的に検証することにある。これらは、ザリガニの、1) 生息場所や餌資源として重要な河川環境要因や溪畔環境要因を特定する、2) 分布を制限している環境要因の下限値や上限値を提供するといった面で本種の保全に必要不可欠である。本研究はまた、将来的に本種をモニタリングする際や、より大規模な分布予測モデルを作成する際、調査項目となる環境要因を絞り込む上で重要な基礎資料を提供することが期待される。

本研究の遂行にあたり、長谷川功氏、松木佐和子氏、田上正典氏、鈴木加奈氏、原田真見氏、根岸知子氏には多大な協力をいただいた。松木佐和子氏には溪畔林の機能の解釈について有意義な指摘をいただいた。川井唯史氏と古賀崇氏には、ザリガニの分布に関する情報を提供していただいた。そして、第 25 回魚類系統研究会（2003 年 12 月札幌市開催）の参加者の方々には、結果の解釈や保全政策について、長時間に渡り建設的な議論を交わしていただいた。これらの方々に心より感謝申し上げる。

2. 方法

2. 1 野外調査

2. 1. 1 ザリガニ調査および環境要因の測定

野外調査は、主に、2003年7月上旬から7月下旬にかけて、北海道中央部の22の小河川において行った（保全上の理由により調査地の公表は控える）。地元住民の話によると、調査地域には40～50年前まではすべての河川でザリガニが見られたそうだが、ここ数十年の間に農薬散布や森林伐採の影響を受けて、次々とザリガニが姿を消していったそうである。調査河川は水面幅（各河川における11のトランゼクト平均）が0.5～4.8m（平均値±標準偏差=1.5m±1.0）、流量は0.003～0.321m³/s（平均値±標準偏差=0.026m³/s±0.069）、そしてpHはほぼ中性（6.76～7.64；カスターACT pHメーターD-21、堀場製作所）であった。各河川において、任意に15～25mのリーチを選定し、箱めがねを用いて、下流から上流にかけて礫や倒木をめくりながらザリガニを探した。ザリガニの探索調査は各リーチにおいて1回のみ、15分から90分かけて行った。ザリガニが捕獲された微生息場所は台形や三角形などの図形に近似し、最外角に目印を置いて、後に環境計測を行った。各近似図形の境界区域上には3～8箇所の環境測定点を設け、水深と流速、底質組成を測定した。水深は定規を用いて測定した。流速は電磁流速計（M2000、Marsh-McBirney Inc.）を用いて水面から0.6の位置の流速を測定した。底質は測定地点直下の底質を岩盤、細礫（最大径<264mm）、巨礫（最大径>264mm）のいずれかに分類し、各礫質の出現頻度を算出した。各環境要因の平均値を用いてザリガニ微生息場所の環境特性とした。捕獲されたザリガニは、性別判定後、眼窩=頭胸甲長（眼窩後端から頭胸甲中央部後端までの距離）を測定し、元の生息場所に逃がした。

ザリガニの生息環境の指標として、河川環境と渓畔環境の双方を測定した。水温、溶存酸素および伝導度はYSI85（YSI Inc.）を用いて、調査地の標高はGPS（測定誤差±3m；eTrek Vista、Garmin Inc.）を用いて測定した。次に調査区を下流から上流にかけて11本の等間隔の横断線（トランゼクト）に分割し、さらに各トランゼクトを4分割して、5箇所ずつ交点を設けた。各トランゼクトの、両岸に接する2交点をのぞく中心部の3交点において、水深、

流速ならびに底質組成を記録し、合計 33 交点における平均値を算出した。底質は 33 地点における岩盤、細礫および巨礫の各出現頻度を算出した。勾配は調査地の上流端と下流端の落差を元に測量により求めた。シルト(微細物質)流下量の測定は 9 月上旬に補足的に行った。各調査地から 5 箇所のたまりを任意に選定し、直径 5 cm のガラス製ペトリ皿を 1 個ずつ設置した。16 時間から 24 時間後、堆積したシルトをガラス纖維濾紙(Whatman GF/F、Whatman Inc.)に濾過したのち乾燥(60°C、48 時間)させ、単位時間あたりのシルト流下量(5 箇所における乾燥重量の平均値)を求めた。ザリガニの捕食者として重要と考えられる魚類は、その存否を目視により確認した。渓畔環境は、調査区の両岸において幅 5 m ずつの調査区を設定し、調査区内の胸高以上の樹木すべてを対象に毎木調査を行った。樹木は図鑑^{5)～8)}を用いて、可能な限り種まで分類した。出現した樹種は 30 種以上であったため、両岸における各樹種の基底総面積をもとに優占種を数種に絞り、また、種単位では標本数が少なくなるものについては属レベルでまとめ、解析を行った。さらに、デジタルカメラ(最大画素数: 130 万画素、COOLPIX910、ニコン)に魚眼レンズ(0.21×、画角 180°、フィッシュアイコンバータ FC-E8、ニコン社)を装着し、下流から上流の 5 等分トランゼクト中央部において、合計 5 枚の林冠写真を撮影した。撮影した画像は、フリーウェアの LIA for Win32(v0.376 β1)⁹⁾を用いて林冠植被率を求め、調査地ごとに(5 枚の)平均値を算出した。下層植生は優占種(ササ属 *Sasa*)の葉部被度を目視により推定し、両岸における平均被度を算出した。

2. 1. 2 データ解析

データ解析には、主に、統計パッケージ SAS(v8.2、SAS Institute)のロジスティック回帰(PROC LOGISTIC)を用いた。従属変数と相關の見られた独立変数(環境要因)に関しては、一般化線形モデル(PROC GENMOD)の estimate オプションを使って、ザリガニが出現する場合と出現しない場合の環境要因の下限値又は上限値を求めた。一般化線形モデルでは従属変数(ザリガニの存否)は二項分布を想定し、リンク関数はロジット(η)を用いた。これは通常のロジスティック回帰と同一である¹⁰⁾。

$$\eta = \log(\pi / (1-\pi)) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_p x_p \quad (2 \cdot 1)$$

ただし、πは従属変数の出現確率、β₀は切片、x_iは独立変数、β_pは独立変数x_pの傾きである。
 πは(2・1)式を変形した次式より求められる。

$$\pi = e^{\eta} / (1 + e^{\eta}) \quad (2 \cdot 2)$$

モデルの適合度を示す統計量としては Hosmer and Lemeshow Goodness-of-fit (HL) 検定を用いた。この統計量は P 値が大きな値 ($P > 0.05$) を示すほどモデルの適合度が高いという性質を持つ¹⁰⁾。また、モデルの予測精度を示す指標としては \tilde{R}^2 を用いた¹¹⁾。これは、ロジスティック回帰においても決定係数の最大値が 1 をとるように、通常の R^2 を修正した、調節済み決定係数である¹¹⁾。ザリガニ存在・不在予測モデルの正判別率は、クロスバリデーションを用いて評価した¹⁰⁾。

環境変数は、単変量ごとに従属変数との相関を調べた後、変数間の相関が 0.75 未満のものを選抜し、変数減少法（基準値 $P = 0.2$ ）を用いた多重ロジスティック回帰を施した。溪畔樹種に関しては、0 の値が多く最尤推定が困難であったため、exact オプションを用いて正確（ロジスティック）検定を行った¹⁰⁾。正確検定では、検定統計量が離散的な場合、検定が保守的になることが知られている¹²⁾。この問題を緩和するため、観測された結果の半分の確率にそれより極端な結果の確率を加えたものとして定義される¹²⁾ mid- P 値を用いた。

2. 2 室内実験

2. 2. 1 実験水路

2003 年 10 月 17 日から 11 月 1 日にかけて、北海道大学苫小牧研究林のプレハブにある 12 本の循環式人口水路を用いて室内実験を行った（図 2・1）。人工水路は、塩化ビニール製のパイプ（直径 40 cm、長さ 2.0 m）を縦方向に二分して作成し、台座を用いて地面から 1 m 程度上方の位置に固定した。水路の上流端および下流端には、塩化ビニール板を接着して水が保持される構造とした。さらに、水路の下流端付近の底部に塩化ビニール製パイプ（直径 5 cm、高さ 12 cm）を貫通させ（排水口）、排水パイプ上端には、ザリガニが吸い込まれるのを防ぐ目的で、プラスチック製の園芸用メッシュ（最大径 2.5 cm）を貼り付けた。排水パイプ直下には、プラスチック製の貯水タンク（約 80 l）を設置し、電磁ポンプを通して、再び水路に水が供給される仕組みにした。水路内には、井戸水で洗浄した砂利（最大径 4~15 mm）を敷き詰めた（最大深が 5 cm 程度）。

実験水路には井戸水を循環させた（最大水深 12 cm、流速 5~10 cm/s）。実験期間中の平均

水温は $13.4^{\circ}\text{C} \pm 2.1$ (1 標準偏差) (幅 8.4~18.0°C)、そして 12 本の水路における実験開始前の溶存酸素は $8.89 \text{ mg/l} \pm 0.11$ (平均 ± 1 標準偏差)、 25°C における伝導度は $79.4 \pm 1.1 \mu\text{S}$ (平均 ± 1 標準偏差) であった。実験期間中は、毎日 7 時から 19 時の間、各水路の真上に設置された蛍光灯 (2600 ルクス) が照射されるように、タイマーを用いて設定した (光周期= 昼 12 時間 : 夜 12 時間)。

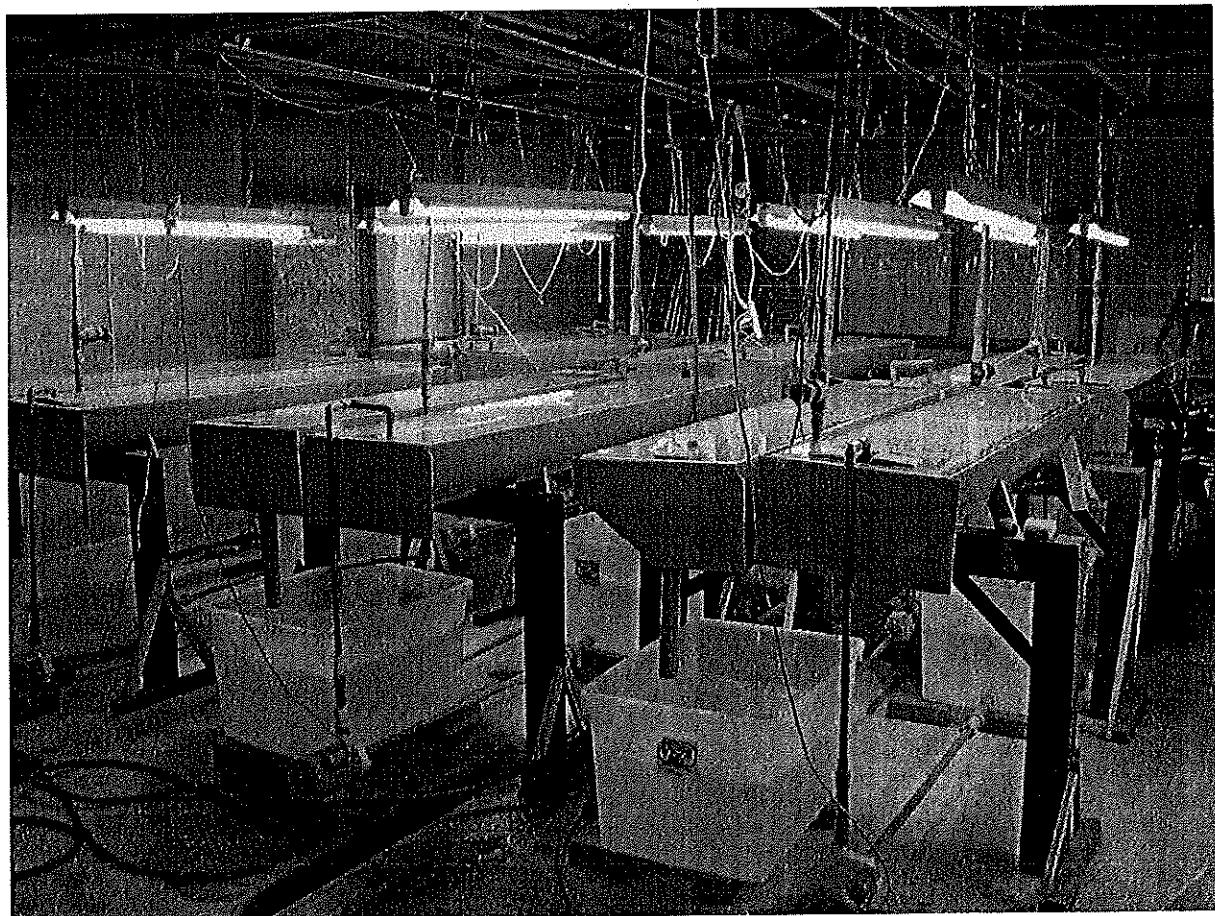


図2・1 北海道大学苫小牧研究林の循環式実験水路(長さ 2.0 m、幅 40 cm)。

2. 2. 2 実験の設定

野外調査における渓畔植生の優占種を用いて、ザリガニの葉に対する選好性を調査した。実験に用いた種は、オノエヤナギ (*Salix sachalinensis* Fr. Schm.)、エゾノバッコヤナギ (*Salix hultenii* Kimura)、ミヤマハンノキ (*Alnus maximowiczii* Callier)、ヤマグワ (*Morus bombycina* Koidz.)、トチノキ (*Aesculus turbinata* Blume)、オニグルミ (*Juglans ailanthifolia* Carr)、イタヤカエデ (*Acer mono* Maxim.)、オヒヨウ (*Ulmus laciniata* Mayr)、シナノキ (*Tilia japonica* Simonkai)、およびネマガリダケ (*Sasa kurilensis* (Rupr.) Makino et Shibata)

(笹の優占種)の 10 種である。2003 年 8 月下旬に調査地から生葉を採集し、乾燥機を用いて 30°Cで 3 日間乾燥させた。実験に先立って、葉は種ごとに 5 g (± 0.1 g) ずつ計量し、個別に洗濯ネット（網目サイズ）に詰めて、井戸水で満たした循環水槽の中に 17 日間置いた（平均水温土標準偏差=13.9°C \pm 0.9）。これは、ザリガニが葉を餌資源として利用できるようになる前に菌類やバクテリアの働きによって葉が柔くされている必要があるためである。17 日目に循環水槽から葉を取り出し、各種につき 4 セットずつは実験用、別の 4 セットずつは乾燥重量測定用、そして残りの 1 セットは葉の硬さと化学成分分析用とした。実験用の葉は 1 セットごとに重ねて中央部をカールクリップ（VP4004 黒色、ラッキーコーポレーション）で挟み、リーフパックを作成した。リーフパックは各植物種につき 1 セットずつ計 10 セット、各水路に投入した。別の 4 セットのリーフパックは 50°Cで 3 日間乾燥させたのち乾燥重量を測定（初期重量）した。葉の分析用に取り分けたリーフパックについては、各リーフパックから 4 枚の葉を任意に選び、各葉につき 3箇所ずつ、葉脈を避けて葉肉にプッシュプルゲージ（CPU ゲージ、アイコーエンジニアリング）を貫通させ、その抵抗値を測定した。葉の硬さは 1 種につき 12 箇所の平均値を用いた。葉の硬さを測定した後の葉は、化学分析を行うまで冷凍保存した後（-30°Cで 3 ヶ月以内）、凍結乾燥（-50°C、1 週間）し、電動ミルを用いて粉碎した。炭素量と窒素量は、各植物種につき 2~12 mg の粉碎試料を取り NC アナライザー（NC-900、住化-島津）を用いて測定した。総フェノール量の測定には Folin-Ciocalteu 法¹³⁾を、縮合タンニン量の測定にはブタノール塩酸法¹³⁾をそれぞれ用いた。炭素量や窒素量、総フェノール量、縮合タンニン量の測定の際は 1 植物種につき 4 反復ずつ測定を行い、解析にはそれらの平均値を用いた。

12 本の水路には 3 つの処理区を 4 反復ずつ無作為に割り当てるが、ここでは本研究の目的に直接関連のある 2 処理区（ザリガニ区、対照区）8 水路のデータのみを扱う。ザリガニは 2003 年 6 月に北海道中央部の湖において素手により捕獲し（保全上の理由により生息地は公表しない）、実験に用いるまで、北海道大学苫小牧地方研究林の流下水槽で飼育した。水質の悪化と水温上昇を防ぐため、流下水槽は井戸水をかけ流しにし、苫小牧地方研究林を流れる幌内川川床から拾ってきた落ち葉（主にヤチダモ *Fraxinus mandshurica* var. *japonica* Maxim）やミズナラ *Quercus crispula* Blume、イタヤカエデ）を、餌や隠れ家として加えた。また、7 日に一度、猫用のマグロの缶詰を餌として与えた。ザリガニ区には各水路につき 5 四（12.5

匹/ m^2) の雄ザリガニ (眼窩=頭胸甲長: 18.3~31.3 mm、湿重量: 2.74~17.46 g) を投入し、水路間で体サイズ組成と重量組成がほぼ同じになるようにした。一方、対照区は、ザリガニ以外 (菌類やバクテリア、流れによる物理的破碎など) による分解量を測定する目的でザリガニは投入しなかった。実験を開始してから 7 日目に、各実験水路の貯水タンクの水を 9 割程度、新しい井戸水と交換した。実験期間中に死亡したザリガニは取り除き、体サイズがほぼ同じ個体と入れ替えた。死亡した個体は 1 個体のみであった。

2. 2. 3 データ解析

統計解析は汎用ソフト SAS (v8.2、SAS Institute) の一般線形モデル (PROC GLM) を用いて行った¹⁰⁾。実験データは完全無作為スプリット=プロット法 (completely randomized split-plot design) として解析し、植物種 (葉) の相対重量 (最終乾燥重量/初期乾燥重量) を独立変数として用いた。処理区の効果を検証する際はブロック × 処理区を第一誤差として扱い、植物種 × 処理区の効果を検定する際は残りの誤差項 (ブロック × 植物種、ブロック × 処理区 × 植物種) をまとめて第二誤差として扱った。分散分析の前提条件である等分散性と正規性を満たすため、植物種の相対重量には逆正弦変換 ($\arcsin\sqrt{x}$) を施した。統計的有意差は、特別表記がない限り $\alpha = 0.05$ において評価した。処理区 × 植物種が有意であった場合は、植物種ごとに一元配置分散分析を施して処理区間の比較を行った。その際、第一種の過誤を犯す確率を少なくするため、sequential-Bonferroni 補正¹⁴⁾ を行い、有意水準を補正した。

3. 結果

3. 1 野外調査

3. 1. 1 ザリガニ出現予測モデル

調査を行った 22 河川中 12 河川においてザリガニの生息が確認されたが [平均密度土標準偏差 = 2.0 ± 1.6 匹/ m^2 (幅 0.6~5.7)]、残り 10 河川ではザリガニの生息は確認されなかった。

表3・1 環境要因とザリガニ出現パターンのロジスティック回帰の結果(最尤法による推定)。オッズ比は独立変数が1単位増加した時のザリガニ出現確率の増加量。 R^2 は調整済み決定係数¹¹⁾で、モデルの予測精度を示す。モデルの正判別率はクロスバリデーションを用いて算出した。各変数の自由度は1。^{*} $P < 0.05$, ^{**} $P < 0.01$

| 項目 | Wald χ^2 統計量 | P値 | オッズ比 | R^2 | 正判別率 (%) |
|---------------------------------------|-------------------|---------|------|-------|----------|
| 溶存酸素 (mg/l) | 5.76 | 0.016* | 8.85 | 0.471 | 77.3 |
| 伝導度 ($\mu\text{S}/\text{cm}$, 25°C) | 2.74 | 0.098 | ... | ... | ... |
| 水温 (°C) | 5.04 | 0.025* | 0.43 | 0.469 | 72.7 |
| シルト流下量 | 0.39 | 0.53 | ... | ... | ... |
| 平均水深 (cm) | 1.05 | 0.40 | ... | ... | ... |
| 平均流速 (cm/秒) | 4.75 | 0.029* | 1.25 | 0.463 | 77.3 |
| 流量 ($\text{m}^3/\text{秒}$) | 0.88 | 0.35 | ... | ... | ... |
| 岩盤 (%) | 0.56 | 0.46 | ... | ... | ... |
| 細礫 (%) | 5.45 | 0.020* | 0.91 | 0.453 | 77.3 |
| 巨礫 (%) | 6.03 | 0.014* | 1.16 | 0.527 | 77.3 |
| 標高 (m) | 4.18 | 0.041* | 1.05 | 0.462 | 77.3 |
| 勾配 (%) | 6.75 | 0.009** | 1.38 | 0.558 | 77.3 |
| 魚類 (+/-) | 0.22 | 0.64 | ... | ... | ... |
| 林冠被度 (%) | 0.17 | 0.67 | ... | ... | ... |
| 笹の被度 (%) | 5.97 | 0.015* | 0.95 | 0.486 | 77.3 |

今回、ザリガニの生息が確認されなかった10河川中4河川は、1年から50年前までの間に、地元住民によってザリガニの生息が確認されている。残り6河川に関しては、ザリガニが過去に生息していたかどうかに関する情報は得られなかった。単変量ロジスティック回帰分析の結果、ザリガニの生息する河川は、生息しない河川と比べて、溶存酸素が高い、水温が低い、平均流速が早い、細礫が多い、巨礫が多い、標高が高い、勾配が緩い、そして下層植生の優占種である笹の被度が少ない傾向が見られた(表3・1、図3・1)。これらの環境要因からザリガニの出現確率を予測したところ、ザリガニは、溶存酸素が10.9 mg/l以上、水温

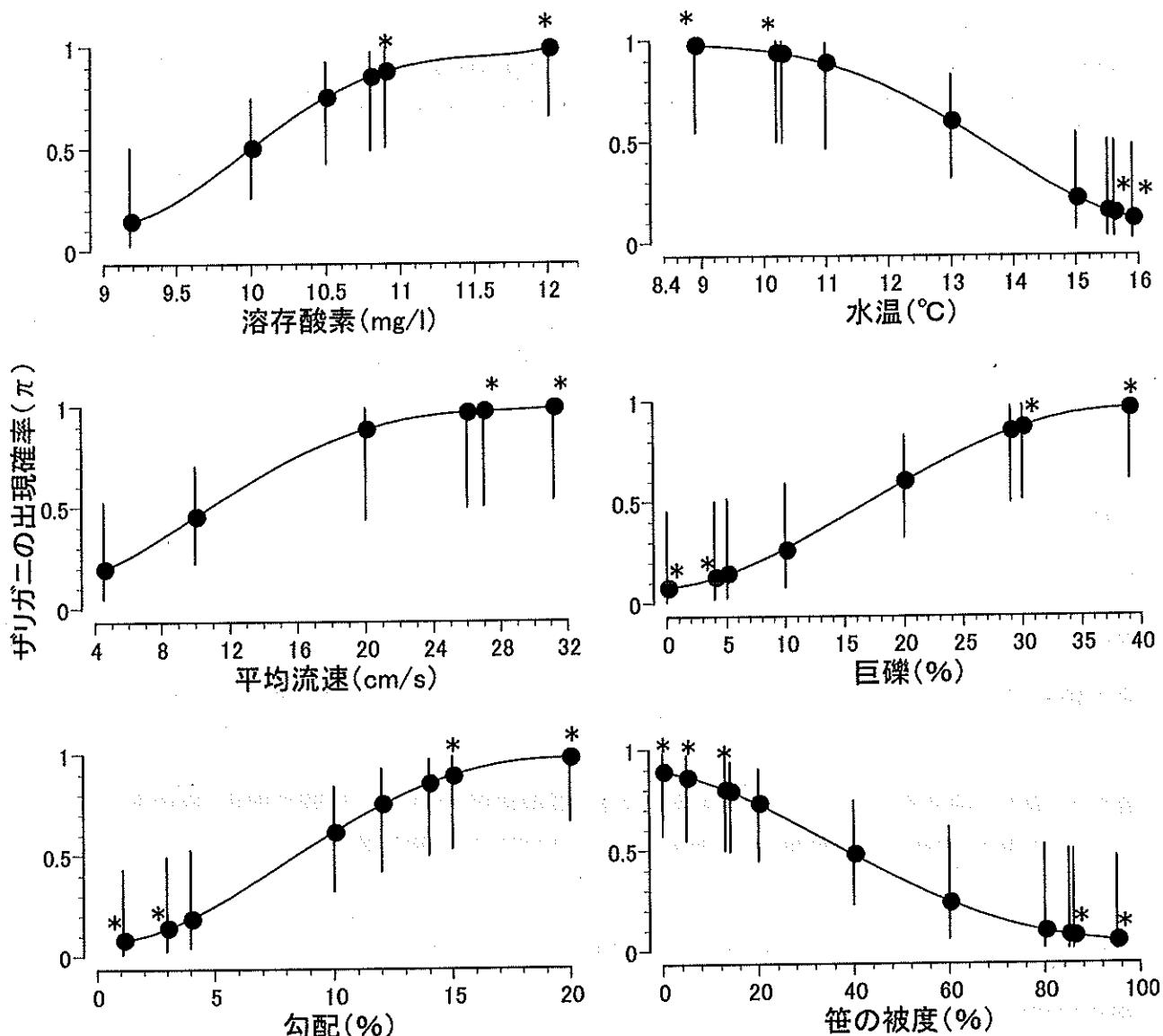


図3・1 河川環境要因から予測したザリガニの出現確率(中央値±95%信頼区間)。アスタリスクで示した出現確率は5%水準で統計的に有意(χ^2 検定)。

が10.2°C以下、平均流速が毎秒27cm以上、細礫の出現頻度が57%以下、巨礫の出現頻度が30%以上、標高が167m以上、勾配が15%以上、そして笹の被度が13%以下の河川において統計的に有意に出現することが明らかになった(図3・1、表3・2)。これらの変量をそれぞれ単独でロジスティック回帰に取り入れた場合、ザリガニ出現の有無の正判別率は72.7~77.3%であり、いずれの場合もモデルの適合度が高かった(HL検定:すべて $P > 0.1$) (表3・1)。一方、伝導度やシルト流下量、平均水深、岩盤の出現頻度、魚類の存否、そして林冠被度はザリガニの出現と相關が見られなかった。また、ザリガニの存在が確認された河川に限

表3・2 一般化線形モデル(ロジスティック回帰)を用いて予測された、ザリガニが出現する環境値の範囲と出現しない環境値の範囲。表3・1でザリガニの出現を有意に説明する物理化学的要因についてのみ算出した。空欄は、5%水準で統計的に有意な限界値が認められなかったもの。

| 項目 | ザリガニが出現する範囲 | ザリガニが出現しない範囲 |
|-------------|-------------|--------------|
| 溶存酸素 (mg/l) | 10.90~12.01 | ... |
| 水温 (°C) | 8.9~10.2 | 15.6~15.9 |
| 平均流速 (cm/秒) | 27.0~31.2 | ... |
| 細礫 (%) | 0~57 | 97~100 |
| 巨礫 (%) | 30~39 | 0~4 |
| 標高 (m) | 167~171 | ... |
| 勾配 (%) | 15~20 | 1~3 |
| 笹の被度 (%) | 0~13 | 86~95 |

表3・3 条件つき正確(ロジスティック)検定による、渓畔樹種とザリガニ出現の関係(自由度=1)。オッズ比は独立変数が1単位増加した時のザリガニ出現確率の増加量。 $*P < 0.05$, $**P < 0.01$ 。

| 項目 | Probability | 統計量 | mid- <i>P</i> 値 | オッズ比 |
|--------------|-------------|-----|-----------------|-------|
| 遷移初期種 | | | | |
| ヤナギ属 (+/-) | 0.0248 | | 0.019* | 11.13 |
| ハンノキ属 (+/-) | 0.0046 | | 0.003** | 15.01 |
| 遷移中期種 | | | | |
| ヤマグワ (+/-) | 0.0344 | | 0.026* | 0.14 |
| トチノキ (+/-) | 0.0433 | | 0.053 | 0.15 |
| オニグルミ (+/-) | 0.0433 | | 0.053 | 0.15 |
| オヒヨウ (+/-) | 0.2972 | | 0.53 | ... |
| シナノキ (+/-) | 0.3001 | | 0.54 | ... |
| 遷移後期種 | | | | |
| イタヤカエデ (+/-) | 0.3538 | | 0.82 | ... |

定して、魚類捕食者のいる河川（6 河川）といない河川（6 河川）間でザリガニの体サイズ組成を比較したところ、統計的な差は認められなかった（一元配置多変量分散分析；密度：Pillai's Trace = 0.42, $F_{6,6} = 0.89$, $P = 0.54$ ；出現頻度：密度：Pillai's Trace = 0.64, $F_{5,6} = 0.67$, $P = 0.66$ ）。

ザリガニの生息する河川と生息しない河川では渓畔樹種の優占種も異なった（表 3・3）。ザリガニが生息する河川は、生息しない河川と比べて、ヤナギ属（エゾノバッコヤナギとオノエヤナギ）やハンノキ属（ミヤマハンノキとケヤマハンノキ）が出現する確率がそれぞれ約 11 倍（オッズ比 11.13）および 15 倍（オッズ比 15.01）であるのに対し、ザリガニが出現しない河川においては、ヤマグワやトチノキ、オニグルミの出現確率がザリガニ不在河川の約 7 倍（オッズ比 0.14～0.15）であった。

相互に相關の低い独立変数のうち、ザリガニの存在に重要と思われる、水温、勾配、巨礫（主効果および交互作用）を用いて、変数減少法による多重ロジスティック回帰を行った結果、勾配と巨礫がモデルに採択された（表 3・4）。なお、渓畔樹種に関しては、モデルが不安定になるため、多重ロジスティック回帰モデルに取り込むことはできなかった。クロスバリデーションを行った結果、勾配と巨礫を説明変数とするモデルがザリガニ出現の有無を正しく予測する割合（正判別率）は 86.4%、調節済み決定係数 (\bar{R}^2) は 0.760 であった。さらに、HL 検定の結果 ($P > 0.6$) から、このモデルの適合度は高いと判定された。

表3・4 変数減少法を用いた多重ロジスティック回帰の結果。調整済み決定係数 (\bar{R}^2)¹¹⁾ はモデルの予測精度を、Hosmer and Lemeshow Goodness-of-fit(HL) 検定はモデルの適合度をそれぞれ示す。クロスバリデーションによるモデルの正判別率は 86.4%。各変数の自由度は 1。

| 項目 | Wald χ^2 統計量 | P 値 | オッズ比 |
|--------|-------------------|-------|------|
| 切片 | 0.086 | 0.77 | |
| 勾配 (%) | 4.41 | 0.036 | 7.06 |
| 巨礫 (%) | 3.55 | 0.059 | 7.30 |

$$\bar{R}^2 = 0.760$$

$$HL \text{ 検定: } \chi^2 = 6.63, df = 9, P = 0.68$$

3. 1. 2 ザリガニの微生息場所環境と局所密度

水深、流速、岩盤の頻度、細礫の頻度、および巨礫の頻度を独立変数に用いた多変量分散分析の結果、ザリガニの微生息場所環境は、ザリガニ河川における調査区内の平均的な環境と異なった（一元配置多変量分散分析：Pillai's Trace = 0.45, $F_{5,18} = 2.90$, $P = 0.043$ ）。環境要因ごとに分散分析を施した結果、ザリガニの微生息場所は、ザリガニ河川の平均値と比べて、平均流速が有意に低く（一元配置分散分析：MS = 8.98, $F_{1,22} = 14.10$, $P = 0.0011$ ）、水深がやや浅かった（MS = 3.72, $F_{1,22} = 4.25$, $P = 0.051$ ）（図3・2）。岩盤、細礫、および巨礫の出現頻度は調査区内の平均と微生息場所の平均間に統計的な差は認められなかった（ $P > 0.2$ ）。この結果は、ザリガニは急流河川の中でも流速の緩い、浅い部分（たまり）に生息することを意味する。このような微生息場所におけるザリガニの局所密度は 7.0 ± 2.9 匹/ m^2 （平均値 ± 1 標準偏差）（幅 2.0~12.1 匹/ m^2 ）であった。

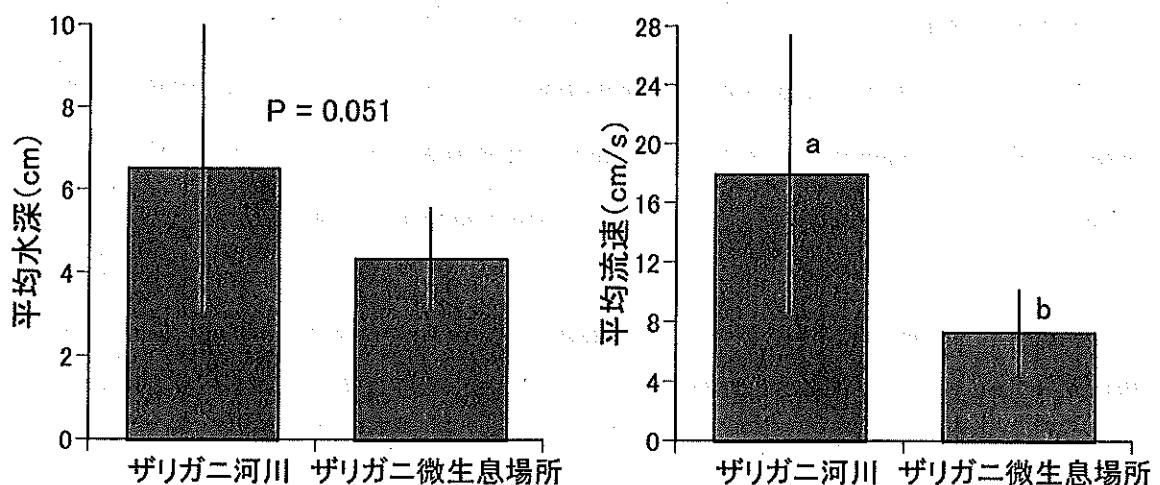


図3・2 ザリガニ河川（調査区内の平均値）とザリガニの微生息場所における水深と流速（平均値 ± 1 標準偏差）。棒グラフ上の異なるアルファベットは5%水準で統計的有意差を示す。

3. 2 室内実験

15日間の実験期間中、ザリガニによる葉の分解量は植物種ごとに大きく異なった（スプリ

表3・5 スプリット・プロット分散分析統計量のまとめ。処理区の検定には「水路(処理区)」(第一誤差)を、葉の種類および処理区×葉の種類の検定には「残さ」(第二誤差)をそれぞれ誤差項として用いた。

| 項目 | 自由度 | MS | F | P値 |
|----------|-----|-------|--------|---------|
| 処理区 | 1 | 0.709 | 100.91 | <0.0001 |
| 水路 (処理区) | 6 | 0.007 | 0.94 | 0.47 |
| 葉の種類 | 9 | 0.210 | 28.02 | <0.0001 |
| 処理区×葉の種類 | 9 | 0.029 | 3.88 | 0.0008 |
| 残さ | 54 | 0.007 | | |

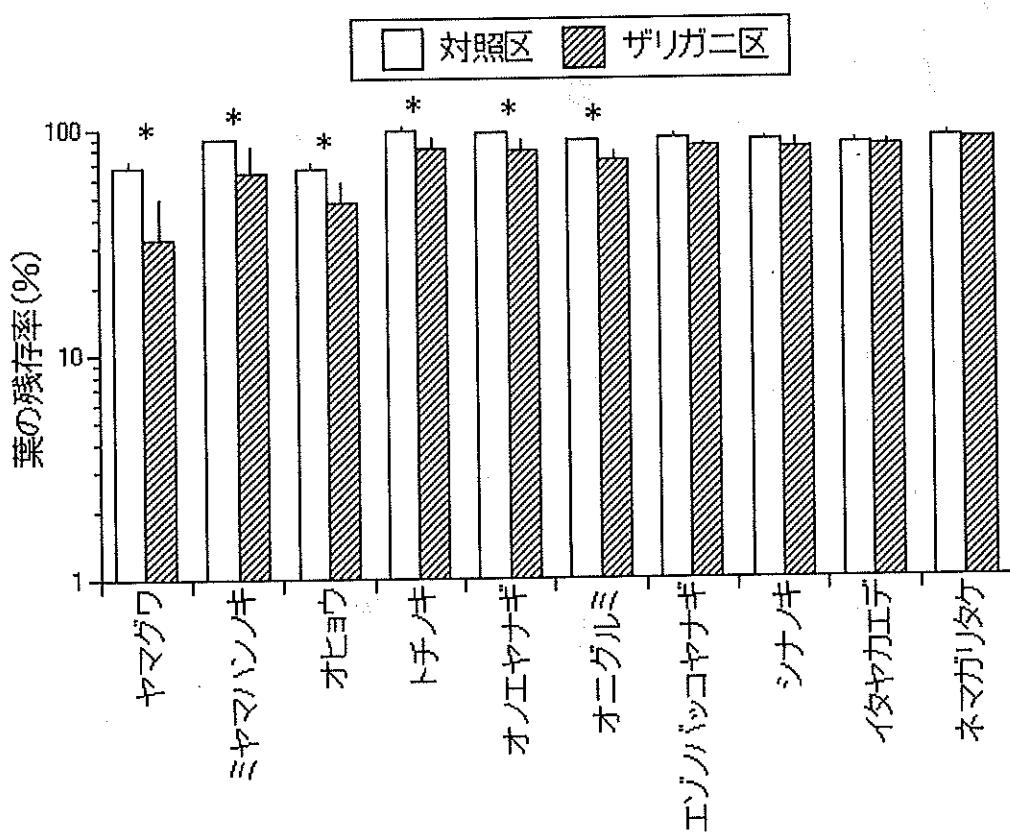


図3・3 対照区(ザリガニなし)とザリガニ区(12.5 匹/ m^2)における葉の残存率。X軸の左から右に行くに従って、正味の葉の分解量(ザリガニ区-対照区)はより低い値を示す。アスタリスクは、sequential-Bonferroni 補正¹⁴⁾による有意水準調節後に処理区間で統計的有意差が認められた植物種。

ット・プロット分散分析：処理区×葉の種類、 $P = 0.0008$ ）（表3・5、図3・3）。対照区と比べて、ザリガニ区で分解がすすんでいた葉は、ヤマグワ、ミヤマハンノキ、オヒヨウ、トチノキ、オノエヤナギ、そしてオニグルミである（図3・3）。対照区における喪失量（物理的破碎と微生物による）で補正したザリガニの平均分解量は、ヤマグワが35.0%、ミヤマハンノキが26.6%、オヒヨウが19.3%、トチノキが16.3%、オノエヤナギが16.2%、そしてオニグルミが15.9%であった。一方、ネマガリダケ（笹の優占種）、イタヤカエデ、シナノキ、

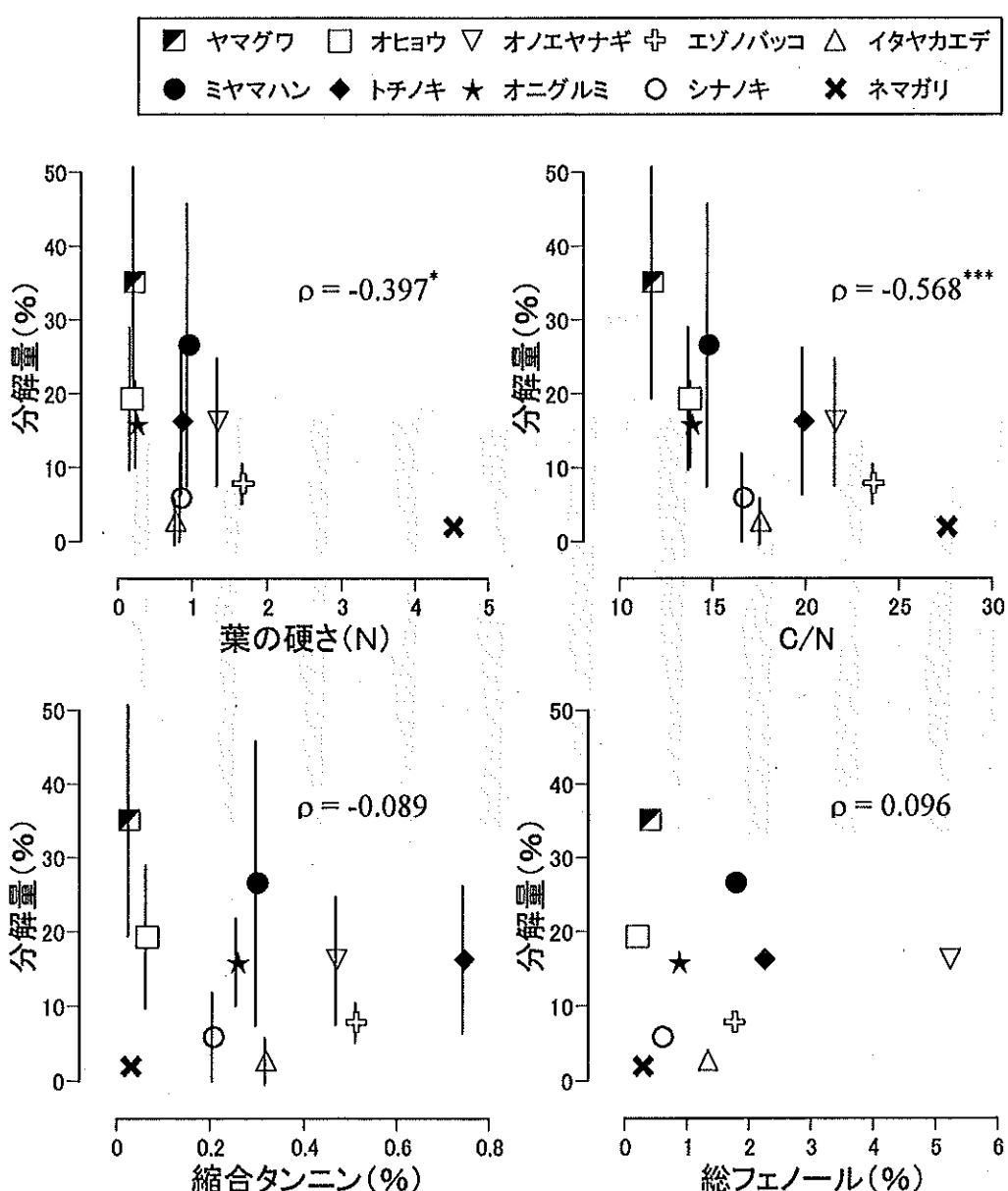


図3・4 スピアマンの順位相関係数(ρ)を用いた、葉の物理化学的要因(3~4 試料の平均値)とザリガニによる落ち葉の分解量(平均値 \pm 1 標準偏差)との相関関係。ザリガニによる分解量は、ザリガニなし対照区における平均分解量を差し引くことにより補正した。 $*P < 0.05$, $^{***}P < 0.001$

そしてエゾノバッコヤナギは、ほとんどザリガニによる分解の影響は認められなかった。樹種によって影響力の違いはあったものの、全般的にザリガニは葉の分解に大きく貢献した（スプリット・プロット分散分析：処理区、 $P < 0.0001$ ）（表3・5）。

ザリガニの分解量と葉の物理化学的性質との関係を調べた結果、分解量は葉の硬さおよび炭素=窒素比 (C/N) とそれぞれ負の相関を示したが、葉の縮合タンニンや総フェノールとは、有意な相関関係は認められなかった（図3・4）。

4. 考察

4. 1. 河川環境の影響

予測モデルを用いた解析結果から、ザリガニは、急勾配で、巨礫が多く出現する、急流河川に出現することが明らかになった。さらに、ザリガニの微生息場所の環境を計測したところ、ザリガニは、急流河川の中でも、流速の緩い、浅い部分（たまり）にしか生息しないことが明らかになった。ザリガニの微生息場所の平均流速 (7.35 cm/s) と平均水深 (5.43 cm) が、ザリガニのいない河川の平均流速 (7.96 cm/s) と平均水深 (4.34 cm) と近い値であったことを考慮すると、ザリガニのない河川は、たまりの割合が多いという面においては、ザリガニにとっての生息可能域が多いはずである。反対に、急流河川であればあるほどたまりの割合は少なくなり、ザリガニの生息可能域も限られてくる（図4・1）。このいっけんジレンマとも思える結果について最初に考えられることは、ザリガニにとって隠れ家の存在が重要であるということが挙げられる。ザリガニの出現した河川と出現しなかった河川では巨礫の出現頻度が大きく異なった（図3・1）。このことから、ザリガニはたまりにしか生息しないものの、そこには隠れ家（巨礫）があることが生息地としての前提条件となっているものと思われる。実際、過去の総説¹⁵⁾によると、隠れ家は、ザリガニ類にとってもっとも制限されていると考えられる資源の一つである。隠れ家は、捕食者である鳥類や哺乳類、魚類による捕食圧から身を守るのに有効である¹⁶⁾。本研究では魚類捕食者による影響は認められなかったが、今後は哺乳類や鳥類捕食者の影響も考慮に入れる必要がある。

隠れ家となる巨礫の存在以外にももうひとつ重要な可能性を挙げておきたい。そ

これは急流河川においては、出水時にシルトなどの微細土砂が流されやすいと考えられることである。本研究ではシルトの堆積量を計測した結果、ザリガニの出現とは相関が認められなかつた。しかしながら、これはあくまで、流下シルト量であり、出水時の「シルト掃け」を説明する要因とはならない。海外における研究から、ザリガニ類は微細土砂の堆積に弱いことが報告されている¹⁶⁾。微細土砂が堆積すると、ザリガニは鰐詰まりを起こし、窒息死するためである¹⁶⁾。ただし、この論議は推測の域を出ないため、今後実証研究が望まれる。

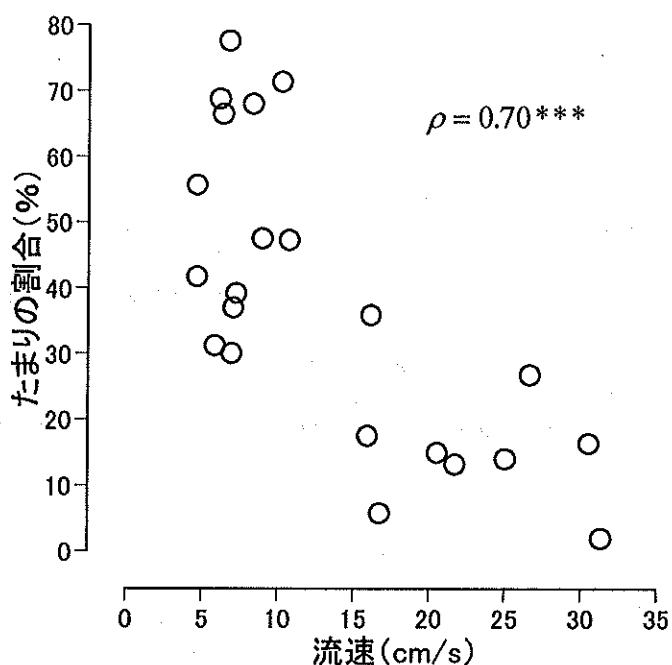


図4・1 スピアマンの順位相関係数(ρ)を用いた、平均流速とたまり(ザリガニが実際に生息する流れの緩い、浅い場所)の相関関係。図は平均流速が早い河川ほどザリガニの生息可能なたまりの割合が減少することを示す。 $***P < 0.001$

4. 2. 溪畔環境の影響

ザリガニの生息する河川は、生息しない河川と比べて、笹の被度が著しく少ないことが明らかになった。さらに、条件付き正確検定から、ザリガニの生息河川ではヤナギ類とハンノキ類といった遷移初期種が多く出現したのに対して、ザリガニのいない河川ではヤマグワやトチノキ、オニグルミなどの遷移中期種と笹が優占していた。笹は乾燥化がある程度進んだ土地に侵入して、その著しい蒸発散量を通じて、いっそう乾燥化を促進させることが報告さ

れている¹⁷⁾。ザリガニは川岸に穴を掘ることが知られている²⁾ため、渓畔の乾燥化は、ザリガニの生息環境の悪化につながると考えられる。さらに室内実験の結果から、ザリガニは笹（ネマガリダケ）の葉を全く分解しないことが明らかになった。これは、おそらく、笹の葉が極端に硬い葉を持つためで（図3・4）、笹は、餌資源としてもザリガニにとって好ましくないと考えられる。

一方、ザリガニが出現した河川で多く見られるハンノキ類やヤナギ類は、攪乱の後にいち早く浸入し定着する遷移初期種である¹⁸⁾。これらは、笹とは反対に、比較的湿潤な土地に生えるため¹⁸⁾、土地に「湿り気」があるかどうかの指標となると考えられる。本研究では、川岸の土地の乾燥状態については直接測定を行っていないため、今後、この点にも注目してザリガニの微生息場所環境の評価を行う必要がある。また、ハンノキ類は根に根粒バクテリアを共生させて窒素固定を行うため、落葉時の窒素の回収率が低く、葉の栄養価が高い¹⁸⁾（窒素含量が高く、炭素=窒素比が低い）。室内実験から、ザリガニは、炭素=窒素比の低い（栄養価の高い）葉をより分解する傾向があったことからも、ハンノキ類の落葉は餌資源として重要であると思われる。室内実験において、ミヤマハンノキは、2番目に多くザリガニに分解された樹種であった。しかしながら、ヤマグワやトチノキなど、ザリガニのいない河川における優占種の葉も、ミヤマハンノキとほぼ同程度ザリガニによって分解されており、他の樹種と比べてハンノキ類が特別好まれるという証拠は得られなかった。これは、本研究では生葉を乾燥させたものを実験に用いたため、落葉した葉で分解実験を行った場合は、特に窒素の回収率の高い樹種では葉の栄養価が低くなるため、ザリガニの葉の選好性も変わってくるであろう。ザリガニ類にとって、もっとも活動性が高くなる夏期³⁾において、ハンノキ類など栄養価の高い葉が餌として供給されることは、成長や生育の面で大きな影響力を持つことが想定される。今後、落葉の栄養価とタイミングにも注目して、渓畔林の機能について調査を進めていく必要がある。

4. 3. 保全政策について

本研究で明らかになったように、ザリガニは急勾配河川の、隠れ家の多いたまりにしか生息しない微生息場所スペシャリストであるため、生息地を保全する際には地形の多様性を維持していくことが大切である。逆に、森林伐採など、水温上昇や土砂の流入につながる人間

活動は、ザリガニ個体群を壊滅状態に追いやることが想定される。これらを踏まえると、渓畔林をも含めた流域全体をザリガニの保護区として指定する必要がある。

また、ザリガニは絶滅危惧種に指定されているものの、北海道の個体群に関しては、捕獲や取引に関する法律が一切存在しない。むしろ、絶滅危惧種に指定されたことによって、取引価値を吊り上げ、乱獲が後を絶えないという。この理由により、本研究のように、野外調査を行っても調査地を公表することができない。ザリガニ類は、世界的に見ても絶滅率がもっとも高い生物の一つである¹⁾ことを考えると、日本の唯一の在来ザリガニ種で、固有種でもあるザリガニに関しては、一刻も早く法的規制が設けられるべきである。ザリガニに対して適用が可能と思われる法的規制は、環境省の指定する「絶滅のおそれのある野生動植物の種の保存に関する法律[†]（国内希少野生動植物種）」、文化庁の指定する「文化財保護法[†]（天然記念物）」、そして北海道の法律では、2001年12月から施行された北海道希少種保護条例[‡]が挙げられる。国内希少野生動植物種は、現在、鳥類や哺乳類など、アンブレラ種（個体群の維持に広大な生息地を要し、その種を保護することで、同時に傘のように多くの生物を守ることができるような種）が中心、天然記念物は人間の生活と密接なつながりを持つものが対象、そして北海道希少種保護条例は、地域の生態系全体を保全するという趣旨であるが、今のところは植物のみが指定されている。現在、ザリガニは、主に北海道に残されている²⁾こと、そして条例の趣旨を考えると、北海道希少種保護条例がもっとも現実的と考えられる。ただし、ザリガニは環境省レッドデータブックには掲載されているものの、これまでのところ、北海道版レッドデータブック（RDB）には掲載されていない（昆虫類を除く他の水生無脊椎動物も同様）ため、北海道としてはまず、地方版RDBへの掲載から作業をすすめていく必要がある。前述の背景を踏まえると、法的規制の施行とRDBへの掲載が同時に行われることが望ましい。

4. 4. おわりに

本研究は、調査を行った地域において、ザリガニの生息域としてどのような環境要因が重

[†] 総務省行政管理局の法令データ提供システム参照 (<http://law.e-gov.go.jp/cgi-bin/idxsearch.cgi>)

[‡] 北海道庁ホームページ参照 (<http://www.pref.hokkaido.jp/kseikatu/ks-kskky/yasei/tokutei/kishou.html>)

要であるか、予測モデルを通じて定量的解析を行った。特に河川勾配と巨礫の出現頻度を説明変数としたザリガニ出現の予測式は、86%以上の正判別率でザリガニの存否を予測することができた。また、溶存酸素や水温、流速など、単変量でも説明変数としての予測精度が72～77%と比較的高かった。ただし、注意を要するのは、生物種の分布予測モデルは、調査を行った地域や時期にしか通用しないため、今回作成した予測モデルは、必ずしも他の地域では通用しない点である。優占樹種については特に、地域が変われば組成も大きく異なってくることが予想されるが、異なる樹種が同様の機能的役割を果たす可能性は十分に考えられる。そのことを踏まえると、土地の（乾燥状態を表す）指標種として、またザリガニの餌資源として、溪畔林の機能的役割を調べていくことは今後重要と思われる。

ザリガニ類は落ち葉の分解において中枢種的な役割を果たしうる¹⁹⁾ため、陸上生態系と河川生態系の橋渡しを担う重要な生物である。さらに、ザリガニ類は、他の生物が置き換えることのできない固有の生態的役割を持つため²⁰⁾、ザリガニの局所的絶滅は生態系機能や生態プロセスに不可逆的な変化をもたらすことが想定される。その中枢種的な役割を鑑みると、ザリガニ類の保全は、河川生態系における生物多様性の保全につながる²⁰⁾といつても過言ではない。日本の固有種「ザリガニ」に関しては、今後、採捕や取引に関する適切な法的規制を施した上で、その重点保護区を吟味していく必要がある。後者の目的のためには、GISを用いた予測モデル（ギャップ分析²¹⁾）が有効であろう。

参考文献

- 1) Ricciardi, A. and Rasmussen, J.B. (1999) : Extinction rates of North American freshwater fauna, *Conservation Biology* 13, pp. 1220～1222.
- 2) 川井唯史 (1995) : 日本の希少な野生水生生物に関する基礎資料 (II) 分冊, VII. 甲殻類, 社団法人日本水産資源保護協会, pp. 620～624.
- 3) 川井唯史・三宅貞祥・浜野龍夫 (1990) : 分布南限のザリガニ *Cambaroides japonicus* (de Haan) の個体数密度と再生産に関する研究, *Researches on Crustacea* 19, pp. 55～61.
- 4) 斎藤和範 (1996) : 北海道におけるザリガニ類の分布とその現状, *北方林業* 48, pp. 77

~81.

- 5) 高橋秀男・勝山輝男, 監修 (2002a) : 山溪ハンディー図鑑3, 樹に咲く花, 離弁花1, 第2版, 山と渓谷社, pp. 719.
- 6) 高橋秀男・勝山輝男, 監修 (2002b) : 山溪ハンディー図鑑4, 樹に咲く花, 離弁花2, 第2版, 山と渓谷社, pp. 719.
- 7) 高橋秀男・勝山輝男, 監修 (2003) : 山溪ハンディー図鑑5, 樹に咲く花, 合弁花・單子葉・裸子植物, 第3版, 山と渓谷社, pp. 719.
- 8) 佐藤孝夫 (2002) : 新版北海道樹木図鑑, (株) 亜璃西社, pp. 303.
- 9) 山本一清 (2003) : LIA for WIN32 (v0.376 β 1)
(<http://hp.vector.co.jp/authors/VA008416/>)
- 10) SAS Institute (1999) : SAS/STAT user's guide, version 8, volumes. 1~3, SAS Institute Inc., Cary, North Carolina, USA., pp. 3884.
- 11) Nagelkerke, N. J. D. (1991) : A note on a general definition of the coefficient of determination, *Biometrika* 78, pp. 691~692.
- 12) Agresti, A. (2003) : カテゴリカルデータ解析入門 (渡邊裕之他訳), サイエンティスト社, pp. 407.
- 13) Waterman, P. G. and Mole, S. (1994) : Methods in Ecology: Analysis of phenolic plant metabolites, Blackwell Scientific Publications, Oxford, UK., pp. 238.
- 14) Rice, W. R. (1989) : Analyzing tables of statistical tests, *Evolution* 43, pp. 223~225.
- 15) Lodge, D. M. and Hill, A. M. (1994) : Factors governing species composition, population size, and productivity of cool-water crayfishes, *Nordic Journal of Freshwater Research* 69, pp. 111~136.
- 16) Westman, K. (1985) : Effects of habitat modification on freshwater crayfish. In: *Habitat modification and freshwater fisheries*, Alabaster, J. S. (ed), Butterworths, UK., pp. 245~255.
- 17) 高木健太郎・坪谷太郎・井上京・高橋英紀 (1999) : サロベツ湿原のササ群落とミズゴケ群落の蒸発散特性—植物個体の気孔制御の視点から—, 北方林業 51, pp. 185~189.

- 18) 菊沢喜八郎 (1986) : 北の国の雑木林 ツリーウォッキング入門, 蒼樹書房, pp. 220.
- 19) Usio, N. (2000) : Effects of crayfish on leaf processing and invertebrate colonisation of leaves in a headwater stream: decoupling of a trophic cascade. *Oecologia* 124, pp. 608~614.
- 20) Usio, N. and Townsend, C. R. (2004) : Roles of crayfish: consequences of predation and bioturbation for stream invertebrates, *Ecology* (印刷中).
- 21) Scott, J.M., Davis, F., Csuti, B., Noss, R., Butterfield, B., Groves, C., Anderson, H., Caicco, S. D' erchia, F., Edwards, T.C., Ulliman, J. and Gerald, R. (1993) : Gap analysis: a geographic approach to protection of biological diversity, *Wildlife Monograph* 123, pp. 1~41.