

課題名	F-072 トキの野生復帰のための持続可能な自然再生計画の立案とその社会的手続き。		
課題代表者名	島谷幸宏（九州大学大学院工学研究院環境都市部門流域システム工学研究室）		
研究期間	平成19－21年度	合計予算額	173,974千円（うち21年度 56,857千円） ※予算額は、間接経費を含む。
研究体制	<p>研究体制</p> <p>(1) 採餌環境としての河川生態系の評価 （九州大学大学院工学研究院、徳島大学大学院）</p> <p>(2) 採餌環境としての水田・草地生態系の評価（東京大学大学院）</p> <p>(3) エサ場創出維持技術の確立（新潟大学大学院）</p> <p>(4) 営巣環境としての森林生態系の評価 （新潟大学大学院、新潟大学農学部）</p> <p>(5) GISによる水田・河川・森林環境情報の一元的管理システムの確立 （埼玉大学大学院）</p> <p>(6) 中国におけるトキの生態情報の収集（財団法人山階鳥類研究所）</p> <p>(7) 国内放鳥トキの生態情報の収集（新潟大学）</p> <p>(8) トキの生息環境を支える地域社会での社会的合意形成の設計 （東京工業大学大学院）</p>		
1. 序（研究背景等）	<p>環境省は、国産トキの絶滅後、遺伝的に同一とされる中国産トキの保護増殖を推進し、飼育下において100羽を超えるまでになり、新潟県佐渡島では、2007年の秋には10羽、2008年秋には20羽のトキが試験放鳥され、トキ野生復帰に向けた準備は着々と進められている。環境省は、2015年に小佐渡東部に60羽のトキを定着させるという目標を設定し、佐渡島の野生復帰ステーションにおける野生復帰訓練や、島内における餌場環境整備を実施している。また、新潟県や佐渡市も環境省と歩調を合わせ、これまで「トキの島づくり事業」「トキのふるさと再生事業」「新潟県トキ野生復帰推進計画」「トキと暮らす郷づくり認証制度」を策定し社会基盤整備を進めてきた。</p> <p>このような取り組みが展開される一方、佐渡島内における住民のトキの野生復帰に対する意識は思うような高まりを見せていない。その背景として、トキの野生復帰を推進する関連諸機関の組織横断的なネットワークが十分機能しておらず、トキを佐渡で定着させるという最終目標に向けた、具体的かつ統一的な生息環境再生ビジョンが打ち出されていないことが大きい。そのため、放鳥後に起こりうる事態の予測が困難なため地域住民の不安を招き、自然再生に対し高い意識を持つ農家や市民の先行的取り組みを地域限定的なものにしている。このような背景の中、試験放鳥されたトキの生態情報や地域の社会的情報の変化も組み込み、社会の実情にあった自然再生計画を立案し、それを推進するための社会的合意形成が強く望まれている。</p>		
2. 研究目的	<p>本研究の目的は、2015年までに60羽定着を目指す現在の放鳥・定着スケジュールの中で、「自然的・社会的環境に適合した持続的な自然再生計画を立案すること」である。そして達成目標はその自然再生計画を地域に定着させることである。本研究は、自然の仕組みを再生するグループと社会の仕組みを再生するグループから構成される。自然の仕組みを再生するグループでは、「トキが持続的に生息できる生息環境の保全・整備プログラム」を、自然科学的な観点から現実的なレベルで示すことを目的とする。放鳥が予定される佐渡全域を視野に、エサ場となる水田や河川環境、あるいは営巣場所となる森林環境の情報をGIS上でデータベース化した上で、ハビタットレベルでの生物量データを組み込み、ランドスケープレベルの再生プログラムを立案・提案することを目指す。そして、社会の仕組みを再生するグループでは、行政および市民と連携し、上記プログラムを地域社会に定着させるための社会的合意形成のシナリオを描くことを目指す。</p>		
3. 研究の方法	<p>(1) 採餌環境としての河川生態系の評価</p> <p>1) 堰が魚類の移動に与える影響の解明・落差の改良とその効果の検証：佐渡島の30余の河川において魚類の分布と取水堰の調査を実施し、堰が通し回遊魚各種に与える影響について調べた。</p>		

また、佐渡島の国仲平野東部を流れる天王川においては、河川内および河川～水路～水田を魚類が自由に移動できるよう、佐渡地域振興局や北陸農政局と協力して、堰の改良・落差の改良・水田魚道の設置を行った。その後、魚類の現存量や多様性に対し、どのような変化が生じたのかを調査し、改良効果を検証した。

- 2) 河川や水路における魚類の移動性：ドジョウなどの個体にPITタグ（個体を識別するための磁気チップ）を埋め込み、その移動をリモートモニタリングした。
- 3) 河川および水田水路地帯におけるドジョウのハビタットモデルの構築と再生シナリオのシミュレーション：佐渡島の7つの河川においてドジョウの分布調査およびGIS等による環境評価を行い、ドジョウの分布を予測するモデルを、一般化線形モデル（GLM・ポアソン分布）と赤池情報量基準（AIC）を用いて構築した。同様に約200の水田水路地点においてドジョウの分布と環境要因を調べ、同様に一般化線形モデル（GLM・ロジスティック分布）とAICを用いてベストモデルを探索した。
- 4) 佐渡島のドジョウにおける遺伝的特性の解明：佐渡島のドジョウの遺伝的特性を明らかにするため、佐渡島と新潟市周辺を広域にサンプリングし（佐渡島：61地点；新潟市周辺：14地点）、遺伝子解析を行った（ミトコンドリアDNA、CR領域）。

（2）採餌環境としての水田・草地生態系の評価

水田・草地生態系はトキの採餌環境として最も重要な環境のひとつである。餌となるカエル類やバッタ類は種類によって発生する局所環境や地域、季節が異なる。そこで本研究は、トキの餌候補となる複数の種を対象に、その密度を決定する要因を局所と景観双方から明らかにする。この情報をもとに佐渡島における餌分布予測図を作成し、費用対効果の高い再生地候補を抽出するとともに、局所要因と個体数の関係性から、再生地での局所管理について提案することを目的とした。

対象種は過去の記録や試験放鳥後の餌利用歴と現存量をもとに、ヤマアカガエル、モリアオガエル、ツチガエル（佐渡固有未記載種）、コバネイナゴを選定した。手順として最初に小佐渡地区を中心に各餌生物の密度決定に関わる要因を統計モデルから抽出した。次に景観要因が重要と考えられた広域分布種（ヤマアカガエル、モリアオガエル、コバネイナゴ）については、モデルをもとに佐渡島における餌の生息適地マップを作成し、採餌環境としての効果的な水田管理・再生への提言を行った。

（3）エサ場創出維持技術の確立

トキの主要な採餌場所は水田、河川、湖沼などの湿性環境といわれている。新潟県佐渡島ではそれら湿性環境のうち水田が約8割を占める。そのため、圃場整備や耕作放棄により水生生物の生息数や生物多様性が低下した水田をいかに再生させるかが、トキの生息環境再生を効率的・効果的に進める上で重要なポイントとなる。本サブテーマは、水田をトキの好適な採餌環境として再生・維持することに加え、水田生態系の生物多様性を向上させることを目的として、生態学的評価に基づく水田の管理手法を確立することを目指した。本研究では、水田生態系に対する通年湛水の効果に着目し、耕作水田を対象とする場合には「江（水田内の小土水路）」の新規創出が、休耕田を対象とする場合には「常時湛水」という処理が採餌環境の整備において有効であると考え、トキの主要な餌生物を含む生物現存量および種多様性の視点から、それらを創出した際の効果を水田の立地環境を考慮して検証した。さらに、水田生態系における生物多様性の決定要因を探るため、食物網構造を解析するための炭素および窒素の安定同位体比分析を実施した。

（4）営巣・ねぐら環境としての森林生態系の評価

- 1) 佐渡島における営巣、ねぐら環境としての森林の評価と再生技術の開発：空中写真の判読により、小佐渡東部の新穂地区と西部の羽茂地区で樹林区分図を作成した。新穂地区ではトキ野生復帰ステーションを中心とした半径約5kmの範囲、羽茂地区では約5km×7kmの範囲の山林を対象とした。新穂地区の判読区分図に1km四方の任意のメッシュを被せ、メッシュごとに毎木調査を行った。毎木調査は樹種、樹高、胸高周囲長、生枝下高、および3m未満木本の植被率をそれぞれ計測、記録した。さらに、トキがとまれる枝の有無を記録した。
- 2) ナラ枯れ発生林分における更新特性の把握：ナラ枯れの発生により広葉樹二次林の更新がどのように進んでいくのかを、限られた調査期間内で明らかにするため、人工的に創出されたサイズの異なるギャップの更新、再生過程を調査した。調査地は新潟県阿賀町の広葉樹二次林で、

人工ギャップサイズは50㎡未満を小(S)、50㎡以上150㎡未満を中(M)および150㎡以上400㎡未満を大(L)とした。調査はギャップ内とその周辺の閉鎖林冠下に16～24個の1m四方のコドラートを設置して行った。各コドラートで全天空写真を撮影し、光環境を評価した。植生調査では、出現した全植物種名、高木の本数などを記録した。

- 3) 森林におけるトキの天敵である中型食肉目の行動特性把握：佐渡島で蔓延しているナラ枯れが、テン、タヌキおよびイタチの中型食肉目の行動・生息状況に及ぼす影響を、カメラトラップを用いて調査した。調査はナラ枯れ発生からの経過年数の異なる新潟県三条市（被害発生：1996年～）、阿賀町（2001年～）、関川村（2004年～）およびナラ枯れ被害未発生山形県小国町の4調査地で行った。各調査地における野生動物相を把握するため、赤外線センサーカメラを設置した。誘引餌としてマテバシイ、ソーセージ、およびリンゴの3種類を用いた。

(5) GISによる水田・河川・森林環境情報の一元的管理システムの確立

本サブテーマでは、水田、河川、森林環境情報の時間情報と空間情報を1つのシステム内で扱うことができるGISを用いた一元管理システムを提案し、具体的なシステムの構築を行った。その結果、トキの生息に必要な水田、河川、森林といった環境情報をGIS上で一元的に管理する体制を整えることができ、(1)～(4)のサブテーマから得られた採餌環境および営巣環境情報と併せ、佐渡におけるトキの生息地管理計画を立案するためのGISを中心とした情報基盤システムを構築した。

(6) 中国におけるトキの生態情報の収集

トキの野生個体群が存在する中国陝西省において、トキが要求する生息環境を把握し、その結果を佐渡におけるトキ個体群の生息地管理計画立案に資することを目的とした。

- 1) 営巣環境解析：中国トキの100地点の営巣位置と巣立ち数情報と衛星データから解析した土地被覆状況などの環境から、営巣適地を予測するモデルを構築し、これを佐渡全域に外挿して営巣適地を求めた。
- 2) 餌環境の日中比較：トキの餌環境を評価するため、中国の野生個体と佐渡の放鳥個体を対象に、餌場環境ごとの採餌行動とその季節変化を比較した。
- 3) 中国トキをめぐる社会環境：中国陝西省洋県および寧陝県におけるトキの野生復帰実験と、近年のトキ生息および飼育状況に関する既存の研究資料を整理するとともに、現地調査を通じて最新の情報を収集し分析を行った。

(7) 国内放鳥トキの生態情報の収集

2008年9月25日にトキ10羽（♂5♀5）が、ハードリリース法で試験放鳥され、翌年の2次放鳥では、2009年9月29日～10月3日においてソフトリリース法で20羽（♂8♀12）が放鳥された。放鳥されたトキのうち、1次放鳥では6個体（♂5♀1）に、2次放鳥では9個体（♂1♀8）にGPSテレメトリー装置が装着され、日中3時間ごとの位置情報が蓄えられた。蓄えられたGPS位置データは、3～10日ごとに上空の気象衛星NOAAで回収され、アルゴシステムを通して得られる仕組みである。装着した15個のGPSテレメトリー装置のうち、1次放鳥の5羽（♂4♀1）と2次放鳥の5羽（♀5）が順調に稼働し、放鳥後の移動データを蓄積できた。GPS発信器が装着されていない個体および定位時間以外の位置情報については、モニタリングチームによる観察、および一般からの目撃情報によって個体の位置データを蓄積した。2010年2月末現在、7,689地点のGPSデータと17,248地点の観察位置情報が蓄積されている。これらの位置情報のうち、観測精度の高いデータのみをGISに取り込み、1次放鳥個体と2次放鳥個体の移動パターンの比較解析、およびトキが選択した景観要素の解析を行った。また、埴出から埴入までの1日、個体の行動追跡を実施した。各季節で観察可能な全個体を対象とし、定期的に観察個体を選択した。調査項目は、イベントレコーダソフトを用いて、1時間毎に1～2回、10分間の詳細な行動を秒単位で記録した。また、10分間の行動観察の合間に注目個体の3分間の餌の飲み込み回数、餌種、採餌ハビタット、および地域名を記録した。行動調査は、毎月1～2回の頻度で約1週間実施し、観察可能な全ての個体を対象とした。これらのデータを統合し、採餌餌種、および採餌ハビタットの季節変化を解析し、警戒頻度や採餌高率に影響を与える要因について解析を行った。

(8) トキの生息環境を支える地域社会での社会的合意形成の設計に関する研究

自然環境保護の問題にかかわる社会的合意形成の成果を基礎にして、トキの歴史的・文化的コ

ンテクトの解明および野生復帰に関係するステークホルダーの特定を行い、野生復帰時に課題となる事項および地域づくりのシナリオを、現地のステークホルダーとのワークショップを重ねながら明らかにすることを目的とした。研究は、主に次の3つの方法にもとづいて実施した。

- 1) 社会的合意形成ワークショップの実践：自然環境保護の問題にかかわる社会的合意形成の成果を基礎にして、多様なステークホルダーを対象とするワークショップ「佐渡めぐりトキを語る移動談義所」を開催し、トキ野生復帰にかかわる関心・懸念（インタレスト）の把握を進めながら、ステークホルダーの特定を行った。また、現地のステークホルダーとの意見交換を重ねながら、トキ野生復帰において課題となる事項および地域づくりのシナリオを明らかにし、課題の改善・克服に向けて実現可能な取り組みを具体化するサポートを行った。
- 2) ヒアリング調査：ワークショップで収集した意見を踏まえ、必要に応じてヒアリング調査を行った。トキの野生復帰に対して消極的な意見を示す人びとにインタビューを行い、思いや不安の詳細と来歴を明らかにした。また、研究の最終年度では、移動談義所の取り組みについて評価を行うため、活動に参加経験のある行政関係者、地域住民に対して、ヒアリングを行った。
- 3) 文献調査：トキ保護、自然再生事業の推進、合意形成、市民参加、環境教育、倫理などに関する文献、環境保全事業・トキ野生復帰事業に関する自治体・行政関係文書、地域の歴史的文書（市町村史、地域団体の活動文書など）を調査した。

4. 結果及び考察

(1) 採餌環境としての河川生態系の評価

- 1) 分布調査の結果、堰の高さが各魚種に与える影響が明らかになった。たとえばアユは落差100cm以上の堰、アユカケは50cm以上の堰を遡上できない。また、堰改良後にアユカケが遡上するようになったが、それ以外に大きな変化は見られなかった。堰の改良だけでなく、河川全体の再生が必要であると考えられる。一方、水田においては、魚道を設置した水田で大幅な魚類資源量の増加が確認され、魚道の設置が極めて有効であることが示唆された。
- 2) リモートモニタリングの結果、多くの個体が降雨時に移動していることがわかった。現在、多くの取水堰において、水量が減らされるという理由から魚道が設置されないが、本研究結果より、降雨時に水が流れるのであれば、魚道としての機能は十分に果たされる、と考えられる。
- 3) 河川においては、夏は水中植生（正の相関）、泥の割合（正）、コンクリート床の割合（負）、周囲の湖沼面積（正）、および周囲の水田面積（正）が、冬は河畔林（負）、泥の割合（正）、および周囲の水田面積（正）が、ドジョウの現存量を左右する要因となっていることが明らかになった。また、水路および水田地帯においては、周囲の水田面積、水路-水田間の移動可能性、水路の状態（土水路・コンクリートU字工水路）によって分布が制限されていることが明らかになった。これ以上の圃場整備を抑制し、水路-水田間の落差を解消するのが現実的な再生シナリオであると考えられる。
- 4) 佐渡島でまとまったクレードは特に確認されず、多くのハプロタイプは本土における既知のものと同じ、もしくは近縁であった。地史的にも佐渡島は本土や大陸と陸続きであったことはなかったとされ、佐渡島のドジョウは歴史的な人為移入によるものと考えられる。また、ドジョウの放流がなされているところは、ハプロタイプ多様性が高く、遺伝的にも異質なものに分類された。

(2) 採餌環境としての水田・草地生態系の評価

統計モデルの目的変数として、ヤマアカガエルとモリアオガエルは卵塊数、ツチガエルとコバネイナゴは相対密度とした。説明変数は、局所要因（水田のサイズや耕作状況、水路の形状、畦の草丈、各季節の水深など）、景観要因（調査地を中心とした任意の範囲に占める森林や水田率、林縁、道路、河川長など）、空間自己相関（調査地点の位置情報、隣接水田の餌密度）から種によって適切な変数を選び、すべての説明変数の組み合わせについて一般化線型モデルを作成した。そのなかから、目的変数を最も説明する最適モデルを情報量基準（AIC）により選択した。餌生物の個体数と局所要因は野外調査、景観要因はGIS上で入手した。その結果、局所要因とし

て、ヤマアカガエルは水深と水路サイズ、モリアオガエルは水深と水田サイズ、コバネイナゴは畦の草丈と耕作状況が重要であり、ヤマアカガエルとモリアオガエルでは水深が6～10cm程度で卵塊数が最大に、コバネイナゴでは草丈が30～40cm程度で個体数が多くなることが示された。ツチガエルについてはすべての局所要因（各季節の水深、水路数、水田面積、隣接カエル密度）が採択されたが、相対的に冬場の水深が重要であることが示唆された。また、景観要因として、ヤマアカガエルは半径300m以内に森林が6割程度の環境、モリアオガエルは半径1,000m以内に森林が多い環境、コバネイナゴは半径600m以内に水田割合の多い環境が餌密度の決定に関わることが示された。次に最適モデルを用いて佐渡島全域の密度分布を予測したところ、ヤマアカガエルは平野部と山地が接する山際や谷戸全面の水田、猿八や静平といった小佐渡丘陵内の水田に多かった。モリアオガエルは、ヤマアカガエルよりも山間部が中心で全体の生息適地は少なく、谷戸では最奥部に限定され、猿八や静平などのヤマアカガエルと共通する生息適地もみられた。また、コバネイナゴは平野部の水田地帯が生息適地とされた（図1）。早春から初夏の餌資源として重要なヤマアカガエルやモリアオガエルでは、特に谷戸の水田や猿八などの山間部の水田において冬期湛水を行うことが効果的であり、またヤマアカガエルについては森林との連結性確保のための水路蓋の設置も有効であろう。晩夏から秋に増加するコバネイナゴでは国仲平野において畦の草丈を適度に維持すること、また冬の餌資源として利用可能なツチガエルでは、平野部での冬期湛水に加え、水田が中干される夏場に水を維持することで増加が期待される。

（3）エサ場創出維持技術の確立

江および常時湛水環境の創出は、創出1年目から水生生物群集の生物現存量および種多様性を顕著に増加させ、かつその効果は2年目も持続することが明らかとなった。生物量の増加は分類群ごとに立地環境により異なっており、コウチュウ目では平場と里山のいずれの環境においても増加した一方、トンボ目幼虫においては里山環境でのみ増加した。この傾向は種数においても同様にみられた。それに対し、休耕田における陸生生物および土壌動物の生物量は、湛水処理により減少した。これらの結果から、水生生物の種数もしくは個体数には、水田内の局所的要因のみならず水田周辺の立地環境要因も影響を及ぼすことが明らかになった。そこで、これらの動物群における出現傾向の違いをもたらず要因について、環境傾度に対する種の分布の対応づけを正準対応分析（CCA）により行った結果、コウチュウ目は立地環境よりも水中の栄養分や動物プランクトンといった水田内の局所的要因に影響を受ける一方、トンボ目幼虫は森林特性など景観要因の影響を強く受けることが明らかとなった。

安定同位体比分析によると、水田内の食物網は、水中の懸濁態有機物（POM;植物プランクトンを含む）と表泥上に堆積した有機物が一次生産者（物）であり、魚類が最高次の消費者という構造であった。この食物網構造は立地環境によらず、水田、江、湛水休耕田で共通して見られた。一方、一部のコウチュウ目やトンボ目幼虫といった水生昆虫類は、上述の一次生産者とは異なる一次生産者を基点とする食物網に属していると考えられた。これらの結果から、水田の水生生物群集は、水田内の食物網に属する生物群と、水田外の食物網から水田内へ移動してきた生物群の両方から構成されることが示唆された。以上の結果から、水田における水生生物の種多様性を増加させ、トキの餌生物量を増産するためには、水田の立地環境を考慮した上で、通年湛水処理を施すことが重要であると考えられた。

（4）営巣・ねぐら環境としての森林生態系の評価

1) 新穂地区の樹林区分は、約半分の面積が落葉広葉樹二次林（以後Dとする、50.3%）であり、次いでスギ林（以後Cとする、21.0%）、アカマツ林（以後Pとする、6.4%）、突出木がある落葉広葉樹林（以後DHとする、6.3%）であった。各林相がモザイク状に分布し、最も優占する落葉広葉樹林が山際から山間地まで広く分布するのに対し、まとまった面積のアカマツ林は山間地だけに分布した。林冠突出木が存在する落葉広葉樹高木林は、山間部を中心にまとまった面積で分布していた。これらの落葉広葉樹高木林をトキ営巣環境の整備に有効に利用すべきであると考えられた。トキの定着が確認されている羽茂地区も、新穂地区同様に約半分の面積が落葉広葉樹林（50.8%）であったが耕作地・休耕地・果樹園が24.5%を占めているのが特徴的であった。新穂地区のDの林冠層を構成する主な樹種別の、林冠層におけるP木（トキがとまれる枝を有する木）の出現率から、樹種間でP木の出現率に差異が生じていると考えられた。また、同じ樹種について作成した胸高直径階別のP木の出現率によると、ほとんどの樹種で胸高直径10cmまたは20cmよりP木の出現率が増加していた。これらの結果は、トキのとまり木を

確保するために除間伐施業を実施する際に指針となり得ると考えられた。P木およびP木+P'木(トキがとまれる枝を有するが、周囲に空間がない木)の全立木に対する割合では、P木+P'木の割合が増加している。そのため、混み具合が改善されればトキのとまり木がより確保されると考えられた。以上より、小佐渡地域の森林はトキの休息・ねぐら林としての利用が可能であること、密度管理によりさらに好適な森林を創出できることが検証・確認された。トキのねぐら、休息環境創出の対象として重要であると考えた水田・湿地に面した山際には、コナラなどの落葉広葉樹にスギ、アカマツ、およびヒバの針葉樹が混交した針広混交林が分布していた。針葉樹と広葉樹コナラの大径高木のほとんどがとまり木を有するとともに、林縁だけでなく林内に生育する幹にもとまり木があった。一方、マダケが混交した林分では、マダケが上層林冠を占め、他の樹木の生育、特に枝の伸長、樹幹の拡大を阻害していた。これらの調査結果などをふまえ、トキの休息・ねぐら環境創出の対象として重要であると考えた水田・湿地に面した山際に生育する林分において、施業モデル林としての林相改良を実施し、当該地域における標準的な除間伐手法、基準を得た。具体的には、下層木～亜高木を除伐し、上層林冠木を保残する除伐区と、上層林冠木についても一定の胸高直径以下の幹を間伐する除間伐区の2パターンを造成した。なお、何れの林分においてもマダケをすべて伐採した。

- 2) 創出されたギャップでは、サイズが大きいほど林床は明るくなり、種組成は大きく変化した。年経過とともに林冠が閉鎖し、低木も成長して、ギャップ内の光環境が悪化すると、林床の種組成はギャップ創出前の林床環境に戻り、種組成も創出前に近づいた。コドラート当りの出現種数の変化では、S・M・Lの全てで創出前～1997年に高木種、低木種、草本種いずれかのタイプについて種数の増加が見られた。高木種はS・Lサイズで、低木種はM・Lサイズで、草本種はLサイズのみで増加していた。したがって大きなギャップは様々な植物種にとって更新に好適な場であることが示唆された。これは、S・Mサイズに比べ、Lサイズではより多くの種が高頻度で出現したことからも裏付けられた。大きなギャップは植物が成長する上で必要不可欠な光と水が十分供給され、それが種数の増加に寄与したと考えられる。高木種の総種数の変化では、S・Lサイズで創出前～1997年に種数が増加した。かつての薪炭林には、ナラ林等の比較的単純な構造の広葉樹林として長期にわたって維持されてきた林が多い。近年のナラ枯れは、そのような林の構造と組成を劇的に変えつつある。設定後15年を経た人工ギャップの更新状況からは、ナラ枯れパッチの大きさによってその後の更新状況と林床植生の組成が異なることが示唆された。特に大サイズの人工ギャップには多様な高木種と植生が更新し、その後、徐々にギャップ創出以前の構成に戻りつつあることも明らかになった。
- 3) ナラ枯れ発生からの経過年数に伴い、撮影種数は減少した。しかし、ナラ枯れ発生からの経過年数と出現頻度との関係は種類ごとに異なっており、一定の傾向はみられなかった。すなわち、中型食肉目の出現頻度は、タヌキとテンで逆の傾向があり、タヌキではナラ枯れ発生からの年数が経っているほど出現頻度が高くなったのに対し、テンでは逆に低くなった。なお、イタチではもともと出現頻度も低く、経過年数との関係はみられなかった。

(5) GISによる水田・河川・森林環境情報の一元的管理システムの確立

本サブテーマでは、水田、河川、森林環境情報の時間情報と空間情報を1つのシステム内で扱うことができるGISを用いた一元管理システムを提案し、具体的なシステムの構築を行った。その結果、トキの生息に必要な水田、河川、森林といった環境情報をGIS上で一元的に管理する体制を整えることができ、(1)～(4)のサブテーマから得られた採餌環境および営巣環境情報と併せ、佐渡におけるトキの生息地管理計画を立案するためのGISを中心とした情報基盤システムを構築した。

(6) 中国におけるトキの生態情報の収集

まず、中国のトキ営巣位置と巣立ち雛数の情報を用い、営巣適地を予測する統計モデルを構築したところ、起伏、林縁形状、広葉樹林の割合、針葉樹林の割合、および住宅地の割合の5変数で構成されるモデルが最適となり、各変数のモデル係数のうち起伏のみが負でその他は正に寄与していた。営巣適地モデルを佐渡全域に外挿し営巣適地と評価された地域は、大佐渡南西部、小佐渡東部、および小佐渡南西部にかけて遍在していた。生息適地に関する情報は、生息地再生など保全計画の立案に有効となろう。つぎに、トキの餌環境を評価するため、中国の野生個体と佐渡の放鳥個体を対象に、餌場環境ごとの採餌行動とその季節変化を比較した。餌環境は、冬期のぞけば日本の方が恵まれており、これは比較的エネルギー量の多いドジョウが豊富に存在する

ためと考えられた。しかし日本では、冬期にドジョウやミミズの減少の影響でエネルギー獲得効率が著しく低下していた。一方、中国における餌環境は採餌効率やエネルギー獲得効率は日本より低い、特定の餌生物にかたよらず、季節変動も日本より少なかった。中国では、河川は採餌経験の乏しい幼鳥に重要なエネルギー供給源となっている可能性があり、今後の餌環境の管理・改善に、これらの点は検討に値する。1981～2009年の29年間における中国の野生トキ個体群の消長から、個体群回復の原因を明らかにした。最近10年間はトキ繁殖期の降雨量の変化が繁殖成功率に影響があると考えられた。また、洋県と寧陝県で実施したトキ放鳥実験個体の繁殖状況を、野生トキ29年間の繁殖実績と比較した結果、放鳥個体は野生個体より繁殖能力が低いことが明らかになった。現在、地域住民の協力を得てトキの個体数は順調に増えているが、餌場環境に悪化の兆しがあり懸念される。トキ生息地の自然環境と社会環境の変化に注目し、適切な措置が求められる。

(7) 国内放鳥トキの生態情報の収集

1次放鳥と2次放鳥において佐渡島内における放鳥直後の個体の分散パターンには差が認められた。放鳥後1ヶ月以内に1次放鳥個体は国仲平野および小佐渡全域に分散したのに対して、2次放鳥個体の多くは放鳥場所近くに留まり、すぐに群れを形成した。トキに装着したGPSは、日中3時間ごとにトキの位置を定位するため、各個体の3時間ごとの平均移動距離が求められる。放鳥後1ヶ月間の平均移動距離は、1次放鳥個体で 1533 ± 156.3 (SE)mであり、2次放鳥個体 1055 ± 143 (SE)mと比べて有意に大きかった。また、2次放鳥個体では、放鳥後1ヶ月を過ぎると2月まで移動距離が1000m以下で行動圏も安定していた。この放鳥後の移動パターンの差は、ハードリリースか、ソフトリリースかという放鳥方法の違いによるところが大きいと考えられる。1次・2次放鳥のいずれも繁殖期に入ると雌が島内を放浪する傾向がみられたが、1次放鳥個体の雌は、すべて島外に分散したのに対して、2次放鳥個体では12個体中2個体が島外に分散したのみであった。このような雌の分散パターンの放鳥間の違いは、2次放鳥では群れが形成されたこと個体数が多いこと、縄張りを持っている1次放鳥個体がすでに野外にいたことなどが影響を与えていると考えられた。

佐渡内の放鳥トキの主な餌は、ドジョウ、ミミズ、カエル、昆虫類であり、サワガニ、アメリカザリガニ等の甲殻類も食べられていた。飲み込まれる餌の約2割がドジョウであったが、ドジョウは他の餌に比べると平均湿重量が重い重量比換算では3～5割を占めていると推定された。季節を通じてドジョウの割合が大きいが、夏期にはミミズの割合が多くなり、冬期には両生類の占める割合が大きくなる傾向が認められた。採餌したマイクロハビタットをみると、冬期および春期には8割が水田を利用したのに対して、夏期になると水田ではほとんど採餌しなくなり、秋期に稲刈りが終わってから水田の利用が増加していた。これは、稲が成長して草丈が伸びると、トキが水田には入れなくなるためであると考えられる。単位時間あたりの摂食回数は場所やマイクロハビタットによって大きく異なり、ドジョウ等の大型の餌が多いところでは平均0.93～1.17回/分と少なく、ドジョウがほとんど採餌できない場所では1.8～2.0回/分と多くなる傾向が認められた。また、1次放鳥の直後のトキは人や車に対して敏感で、警戒に費やす時間が多かったが、季節が進行するにしたがって減少していった。一方、警戒に費やす時間の減少に伴って採餌に費やす時間が増加し、放鳥直後の11月は58%に過ぎなかった採餌時間配分が、2月には75%に増加していた。対照的に、2次放鳥では放鳥直後から群れを形成したため、警戒に費やす時間が少なかった。冬期には餌密度が低くなるものの、利用できる水田(刈田)はたくさんあるため餌不足にはならないであろう。一方、夏期には餌密度は高いが、水田が利用できなくなるため、畦や草地でミミズを採餌することが多くなり、餌場不足が生じる可能性がある。佐渡島に生息可能な個体群サイズの推定のためには、夏期の餌の利用可能性と繁殖期のヒナへのえさを考慮する必要がある。

(8) トキの生息環境を支える地域社会での社会的合意形成の設計

社会的合意形成ワークショップとして、計43回の「佐渡めぐりトキを語る移動談義所」を開催し、ステークホルダー・インタレスト分析を進めるとともに、合意形成の実践を行った。農業従事者が重要な利害関係者であることは事前に予測できたが、潜在的なステークホルダーを見落とさないために、さまざまな年齢・立場の人びとを対象に、トキの野生復帰重点エリア(小佐渡東部地域)よりも広域を対象地域としてインタレスト分析、合意形成実践を進めた。ワークショップ参加者の属性は、農業従事者、漁業従事者、地域づくり関係者、環境保全活動関係者、主婦、

高齢者、小中学生、佐渡市職員、新潟県職員、環境省職員、大学研究者などである。参加人数は、延べ約1300人である。ワークショップでの意見交換や中国でのトキの生態にかかわる文献を踏まえると、放鳥後、広域なエリアでトキの飛来が考えられること、農業のほか観光産業も大きく変化する可能性があることが明らかになり、佐渡島で暮らすすべての人をトキの野生復帰事業のステークホルダーとして認識し、佐渡島の自然再生計画にかかわる合意形成を進めていくことが必要であることが示された。トキの野生復帰事業重点エリアとして、小佐渡東部に鳥獣保護区が設定されているが、実際の潜在的ステークホルダーは、指定エリアよりも広域に存在することが明らかになった。また、ワークショップでは、地域の人びとのトキに対する関心があまり高くないことが確認された。多くのワークショップ参加者は、トキの野生復帰よりもむしろ、過疎化、少子高齢化に伴う福祉や教育の問題により高い関心を示していた。このような状況を踏まえると、さまざまな主体が参加可能な合意形成の場を整備し、トキの野生復帰にかかわる自然再生計画について話し合う試みをはじめたとしても、実際に参加をする人は少ない可能性がある。トキと地域の課題をつなげながら考え、地域の人びとが自らの地域の課題として認識するきっかけづくりが重要である。

本サブテーマでは、トキの野生復帰に向けた自然再生計画に関する社会的合意形成において、1)柔軟なゾーニングの解釈、2)地域のステークホルダーの関心を踏まえた自然再生事業の推進、3)行政機関間、各行政機関内部の組織、NPO、市民グループ等の組織、団体間の連携推進、4)トキの歴史的コンテクスト発掘の試み、5)世代をつなぐ活動の推進が重要であることを示した。また、このような点を考慮しながら合意形成を推進するには、1)島内外を都合する合意形成プロセスをプロジェクトとして構築すること、2)情報伝達・共有の活発化を図ること、3)地域の主体的な活動、地域間をつなぐ活動をサポートする体制を整備すること、4)多様な行政主体、大学など研究機関間をつなぐマネジメント体制を整備することが重要である。

5. 本研究により得られた成果

本プロジェクトでは、上述したようにサブテーマの個別成果が得られ、さらに、プロジェクト全体の成果としては以下のものがある。自然の仕組みを再生するグループでは、自然再生シナリオを作成する上で不可欠な情報プラットフォームとして、佐渡島における農地・森林・河川などの自然基盤情報や道路・集落などの社会基盤情報を広域に集積・統合したGISデータベースの構築を推進した（サブテーマ5）。さらにそれを活用した景観解析と生物量調査に基づき、トキの主要な餌生物である両生類、ドジョウ、バッタ類などの全島の餌資源マップ（サブテーマ1・2）と中国産トキの営巣適地情報から推定した好適営巣地マップ（サブテーマ6）、さらに佐渡島において放鳥されたトキの生息場所利用マップ（サブテーマ7）を作成・統合することで、自然再生を効果的・効率的に進めるべき再生重点候補地を佐渡島内において抽出した。これらのプロセスを通じて得られた景観スケールでの再生重点候補地に対し、本プロジェクトにおいて有効性を検証したさまざまな農地・河川・森林再生技術（サブテーマ2・3）を立地環境あるいは集落状況に応じて選択的に導入することにより、景観スケールから局所スケールに配慮した具体的な再生シナリオを提示することが可能となった。

社会の仕組みを再生するグループ（サブテーマ7）では、トキの野生復帰に向けた自然再生計画に関する社会的合意形成において、1)柔軟なゾーニングの解釈、2)地域のステークホルダーの関心を踏まえた自然再生事業の推進、3)行政機関間、各行政機関内部の組織、NPO、市民グループ等の組織、団体間の連携推進、4)トキの歴史的コンテクスト発掘の試み、5)世代をつなぐ活動の推進、が重要であることを明らかにした。また、このような点を考慮しながら合意形成を推進するには、1)島内外を都合する合意形成プロセスをプロジェクトとして構築すること、2)情報伝達・共有の活発化を図ること、3)地域の主体的な活動、地域間をつなぐ活動をサポートする体制を整備すること、4)多様な行政主体、大学など研究機関間をつなぐマネジメント体制を整備すること、が重要であると帰結した。

（1）科学的意義

サブテーマ1：分断された水系ネットワーク（河川－水路－水田）の再生を試み、その効果を事前事後の調査から定性・定量的に評価した。また、河川に設置された堰の高さが各魚種の分布に与える影響を明らかにし、対象魚種に応じて改良すべき構造物の抽出が可能となった。サブテーマ2：生物の個体数がどの空間スケールで決定されるかという問いは、生態学の最も重要な課題のひとつである。個体数決定に影響する生物の移動分散スケールを直接把握することは通常困難

を極めるが、本サブテーマでは、情報量基準を用いた探索的な統計解析により、生物種ごとに有効な空間スケールと景観要因、局所要因を同時に推定することができた。サブテーマ3：水田へ実験的に創出した通年湛水環境（江および）が、トキの餌生物を含む水田の生物量と生物多様性へ与える効果を、生態学的評価に基づいて検証した。その結果、これら2つの湛水方法が、年間を通じた生物量と種多様性の増加に対して有効な方法であることが実証された。サブテーマ4：今後、区分された林相毎の具体的な林分構造のデータと、放鳥されたトキが実際に林相区分されたどの林分を利用したかデータとを重ね合わせることにより、野生生物の生息環境復元、創出における森林施業の有効性を検証することが可能になる。サブテーマ5：佐渡市と連携して農地GISの基盤を作り、さらに、連携する自然系サブテーマのGIS情報を統合する仕組みを構築した。サブテーマ6：中国産トキの営巣情報を用い、営巣適地および巣立ち雛数を予測するモデルを構築し、それを佐渡に外挿することにより潜在的な営巣適地を予測できた。またトキの中国野生個体群と日本の放鳥個体の採餌行動を比較し、成鳥と幼鳥における餌の内容や利用する餌場の違いを初めて明らかにした。サブテーマ7：国内のトキの詳細な生態行動はこれまで知られていなかった。特に、冬期のトキの餌としてミミズが重要であるという知見は過去には知られていなかった。放鳥方法の違いが、放鳥後の個体の分散様式の違いに与える影響を定量化できた。同一場所での放鳥方法の違いが与える影響を評価できた例は他にはない。サブテーマ8：自然再生事業には多様な主体が関与することから、ステークホルダー間の軋轢が生じる可能性が高く、多様な主体間の合意を形成する「社会的合意形成」を組み込みながら、事業を円滑に進める必要がある。本サブテーマでは、トキの野生復帰事業を通じて、持続的な自然再生計画の立案に向けた社会的合意形成の諸条件を示し、環境分野における合意形成技術の確立へ寄与できた。

(2) 環境政策への貢献

サブテーマ1, 2：自然再生事業では従来ほとんど重視されてこなかった「有効な再生場所の選定」を、トキの主要な餌生物ごとに抽出することができた。これは、どこで何をやればどの生物の増加が見込めるか、という実践的な指針の提供に寄与するものであり、費用対効果の高い地域を抽出する科学的手続きとして、他事業に対しても有効な視点である。サブテーマ3：水田の生物現存量と種多様性を増加させるために有効な水田管理の手法を確立し、また水田生態系の水生生物群集が、水田内の局所要因のみならず、水田の立地環境である景観要因によって決定されることを示した結果から、具体的な水田の再生手法を提案できた。サブテーマ4：マツノザイセンチュウ病被害やブナ科樹木の萎凋枯死被害など、外来種、気候変動などにより消失、劣化が進んでいる森林の保全について、基礎的な知見を得ることができた。サブテーマ5：GISを用いた時空間情報の統合により、広範囲を対象にした自然再生シナリオ作成が可能となり、今後進められる他地域における生物の野生復帰や自然再生において、本研究のアプローチは大いに参考となる。サブテーマ6：中国産トキの営巣情報を用いて、営巣適地および巣立ち雛数を予測する統計モデルを構築した。この予測モデルは、佐渡のみならず、今後トキの再導入が計画される国内外予定地の生息地評価や再生手法の策定に広く用いることができるため、生物多様性保全という視点から地球環境政策に大きく貢献できる。サブテーマ7：専門家会合で冬期の餌の必要量を計算し、必要最小限の採餌状況の監視手法を提案し、放鳥トキモニタリングに採食状態のモニタリング項目を追加し、野生復帰事業に役立てた。放鳥方法の違いが行動に与える影響は、今後、世界各地で行われている再導入計画の成功へ大きな情報をもたらすと考えられる。サブテーマ8：「新・生物多様性国家戦略」などの国際的政策は、環境の科学的認識のほか、市民参加、知識の共有、省庁間連携など、社会的側面を考慮する重要性を明示している。本サブテーマで進めている社会的合意形成プロセスの理論とモデル構築に関する研究は、地域にとって持続可能で、かつ多様な生き物が生息可能な環境づくりに向けて、これらの側面から政策に貢献するものである。

6. 研究者略歴

課題代表者：島谷幸宏

1955年生、九州大学工学部卒業、博士（工学）、現在九州大学大学院工学研究院教授

研究参画者

(1) 1) 島谷幸宏（同上）

2) 河口洋一

1970年生、新潟大学農学部卒業、学術博士、現在徳島大学大学院リソテクノサイエンス研究部准教授

(2) 宮下 直

1961年生、東京大学農学部卒業、博士（農学）、現在東京大学農学生命科学研究科准教授

- (3) 関島恒夫
1963年生、筑波大学第2学群卒業、博士（農学）、現在新潟大学大学院自然科学研究科准教授
- (4) 1) 紙谷智彦
1952年生、新潟大学農学部卒業、農学博士、現在新潟大学大学院自然科学研究科教授
2) 箕口秀夫
1959年生、新潟大学農学部卒業、農学博士、現在新潟大学農学部教授
- (5) 大沢 裕
1953年生、信州大学工部卒業、工学博士、現在埼玉大学大学院理工学研究科教授
- (6) 1) 山岸 哲
1939年生、信州大学教育学部卒業、理学博士、現在（財）山階鳥類研究所所長
2) 尾崎清明
1951年生、東邦大学理学部卒業、現在（財）山階鳥類研究所標識研究室室長
3) 蘇 雲山
1951年生、北京第二外国語大学卒業、農学博士、現在（財）山階鳥類研究所客員研究員
- (7) 永田尚志
1960年生、九州大学理学部卒業、現在新潟大学大学院自然科学研究科准教授
- (8) 桑子敏雄
1951年生、東京大学文学部卒業、博士（文学）、現在東京工業大学大学院社会理工学研究科教授

7. 成果発表状況（本研究課題に係る論文発表状況）

(1) 査読付き論文

- 1) Su, Yunshan (2008) Conservation and management of the Asian Crested Ibis in China. *J. Disaster Research* 3:216-225.
- 2) 豊田光世, 山田潤史, 桑子敏雄 (2008) 「佐渡めぐり移動談義所」によるトキとの共生に向けた社会環境整備の推進に関する研究, *自然環境復元研究* 4: 51-60.
- 3) 川本思心, 浅羽雅晴, 大石麻美, 武山智博, 関島恒夫, 島谷幸宏, 西條美紀 (2009) トキ野生復帰に関するサイエンスカフェの企画・準備・実施の記録と分析—理系研究者による対話活動を支援するための手法の検討—. *科学技術コミュニケーション* 5: 19-40.
- 4) 関島恒夫 (2009) 種の保存とランドスケープ-21世紀における自然と人との共生のあり方を考える—トキの野生復帰を目指した自然再生シナリオの立案. *ランドスケープ研究* 72: 385-389
- 5) 蘇雲山, 河合明宣 (2009) トキ再導入プロジェクトの日中韓比較—生物多様性保全と農業環境政策の課題—. *放送大学研究年報* 27: 75-91
- 6) 吉尾政信, 加藤倫之, 宮下直 (2009) 水田環境におけるバッタ目昆虫の分布と個体数を決定する環境要因—佐渡島におけるトキの採餌環境の管理にむけて. *応用生態工学* 12:99-107
- 7) Y. Kano, Y. Kawaguchi, T. Yamashita, and Y. Shimatani (2010) Distribution of the oriental weatherloach, *Misgurnus anguillicaudatus*, in paddy fields and its implications for conservation in Sado Island, Japan. *Ichthyological Research* 57: 180-188
- 8) 山下奉海, 河口洋一, 谷口義則, 鹿野雄一, 石間妙子, 大石麻美, 田中亘, 斉藤慶, 関島恒夫, 島谷幸宏. 佐渡島の小河川における魚類を対象とした農業用取水堰改良効果の検証. *応用生態工学会誌*. (印刷中)

(2) 査読付論文に準ずる成果発表（社会科学系の課題のみ記載可）

- 1) 桑子敏雄 (2008) トキをどう野にかえすか, 大学授業がやってきた! 知の冒険, 桐光学園特別授業, 水曜社: 86-96
- 2) 桑子敏夫 (2008) 風土の視点からの河川計画. *計画行政*. 31: 333
- 3) 桑子敏雄 (2008) 多自然川づくりと社会的合意形成. *水環境学会誌*. 31: 333
- 4) 豊田光世 (2009) トキと共に生きる島づくりと加茂湖・天王川再生. *水資源・環境研究*. 21: 74-78

F-072 トキの野生復帰のための持続可能な自然再生計画の立案とその社会的手続き

(1) 採餌環境としての河川生態系の評価

国立大学法人 九州大学

大学院工学研究院 環境都市部門 流域システム工学研究室 島谷幸宏

国立大学法人 徳島大学

大学院ソシオテクノサイエンス研究部 生態系管理工学研究室 河口洋一

平成19～21年度合計予算額 61,569千円

(うち、平成21年度予算額 17,653千円)

※予算額は、間接経費を含む。

[要旨] 本研究ではおもに以下の4点において調査研究を行った。

(1) 「堰が魚類の移動に与える影響の解明・落差の改良とその効果の検証」：佐渡島の30余の河川において魚類調査と散在する取水堰の計測を行い、堰がどのように通し回遊魚の分布に影響を与えているか調べた。その結果、魚種により影響を受ける堰の高さは違っていることが明らかになった。また、天王川においては、魚類の移動を妨げていると思われる河川の堰の落差を解消し、水路と水田を連続的に繋げる魚道の設置を行った。河川においては、大きな変化は見られなかったものの、遡上能力の低い回遊魚であるアユカケが改良後に上流で確認された。一方、水田においては、魚道を設置した水田で大幅な魚類資源量の増加が確認された。

(2) 「河川や水路における魚類の移動性」：ドジョウなどの個体にPITタグ（個体を識別するための磁気チップ）を埋め込み、その移動をリモートモニタリングした。その結果、魚類は降雨時に移動していることが明らかになった。

(3) 「河川および水田水路地帯におけるドジョウのハビタットモデルの構築と再生シナリオのシミュレーション」：佐渡島の7つの河川および約200の水田水路地帯において、ドジョウの分布調査とGIS等による環境評価を行い、ドジョウの分布を予測するハビタットモデルをGLMとAICを用いて構築した。その結果、周囲の水田面積や水路-水田間の移動可能性などがドジョウの分布を制限していることが明らかになった。

(4) 「佐渡島全域におけるドジョウの遺伝的特性」：佐渡島のドジョウの遺伝的特性を調べたところ（ミトコンドリアDNA、CR領域）、佐渡島でまとまったクレードは特に確認されず、多くのハプロタイプは本土における既知のものと一致、もしくは近縁であった。佐渡島のドジョウは歴史的な人為移入によるものと考えられる。また放流地域において遺伝的攪乱も確認された。

[キーワード] 堰、ドジョウ、分断化、ハビタットモデル、ミトコンドリアDNA

1. はじめに

トキは、河原、畑、水田や湿地、ため池の周辺など、おもに水辺環境で採餌し、小魚、カエル、サンショウウオ、バッタ、タニシ、ミミズ、カタツムリなど、多様な小動物を採食する^{1) 2) 3) 4)}。一方でトキの放鳥においては、野外の採餌環境はトキが野生状態で存続できるだけの健全な状態が保たれているのか、また、これらの生物は十分に現存しているのだろうか、といった懸念に対して十分に調査研究を行い、現場にフィードバックしながら実施されなければならない。放鳥後、トキはおもに水田および水田の周囲で採餌していることが報告されている。水田環境ではおもに、ドジョウやメダカなどの小魚、タニシ、カエル類、サンショウウオ類、バッタ類などが生息しており、これら小動物がトキのエサになっているものと考えられる。中でもドジョウをはじめとする魚類は、トキにとって特に重要なエサ資源であるため^{4) 5)}、その野外での現存量は今後のトキ放鳥の成否に大きく影響を与えるものと考えられる。ただし、ドジョウをはじめ水田を生息場所として利用する小魚の多くは、その生活史の中で河川と水田を動的に往来している^{6) 7)}ため、水田そのものの環境のみならず、河川・水路・水田を結ぶ魚類の移動可能性や、河川における魚類現存量に大きく依存していると考えられる。また、佐渡島ではトキ放鳥に伴い、養殖されたドジョウが各地で放流されている。そのために在来のドジョウが遺伝的な攪乱を受けている可能性がある。一方で、佐渡島に生息する在来のドジョウについて遺伝的な情報はこれまでになかった。これらの状況を踏まえ、本研究では以下のように多角的な視点から調査を行った。

2. 研究目的

(1) 堰が魚類の移動に与える影響の解明・落差の改良とその効果の検証：佐渡ヶ島の内水面においては、魚類が河川・水路・水田間を自由に移動するには、途中で移動困難と思われる落差が多く存在し(図1)、そのために現存量や多様性が大きく損なわれている可能性がある⁸⁾。そこで本研究では、実際に堰が魚類各種にどのような影響を与えているのか、特に堰の高さに注目して明らかにする。また、実際に水路・水田間に魚道を設置したり、河川の堰の落差を解消したりして魚類の生息環境の連続性を物理的に確保し、その後魚類がどのように応答したのか、定量的に検証する。



図1. 佐渡島の取水堰（久知川）

(2) 河川や水路における魚類の移動性：効果的、経済的な水系ネットワークシステムの構築を検討するため、魚類の移動を行う環境条件について検証を行う。特に降雨に注目し、効率的な魚道設置の方法について考察する。

(3) 河川および水田水路地帯におけるドジョウのハビタットモデルの構築と再生シナリオのシミュレーション：トキは特にドジョウを好んでエサとする³⁾。そこで本研究では、佐渡島においてドジョウの現存量を決定する要因について詳細を明らかにし、河川および水田水路地帯それぞれにおいて、そのハビタットモデルを構築する。また、これらのモデルからドジョウを保全するための河川環境要因の管理手法と自然再生適地をシミュレーションし、具体的な保全策を提言することを目的とする。

(4) 佐渡島のドジョウにおける遺伝的特性の解明：佐渡島のような離島では、純淡水魚のように海を越えて移動する能力のない生物は遺伝的に隔離されるため、独自の進化を遂げ易く、本土と同じ種でも遺伝的な固有性を持つ場合が多い⁹⁾。一方佐渡島では、トキ放鳥に伴い養殖されたドジョウが各所で放流されており、遺伝的な攪乱が懸念されているが、佐渡島のドジョウについて遺伝的な情報は皆無である。そこで本研究では、まずは佐渡島各地のドジョウの遺伝的特性を、ミトコンドリアDNAの調節領域 (CR) を用いて明らかにすること、また、放流により遺伝的な攪乱を本当に受けているのかどうかを検証する。

3. 研究方法

(1) 堰が魚類の移動に与える影響の解明・落差の改良とその効果の検証：佐渡島の34河川85地点において (図2)、エレクトリックショックにより捕獲調査を行い、主な通し回遊魚 (主にアユ、アユカケ、カンキョウカジカ、シマヨシノボリ、トウヨシノボリ、ルリヨシノボリ、スミウキゴリ、シマウキゴリ、ミミズハゼ) について、一定長さ (河川長さ50m) あたりの個体数をそれぞれカウントした。さらに、現存するすべての堰についてその分布と堰の高さを計測し、これら堰が上記魚類の分布にどのように影響を与えているのか、特に堰の高さに注目して解析した。

また、天王川においては、実際に堰を改良して魚道を設置し、その効果を検証した (図3)。天王川は流域面積約7.0km²の小規模河川で、川幅は5~8m程度である。本研究ではこの天王川において、1) 移動障害や落差の改良工事、2) 改良効果の検証、の2つの点について調査した。1) 移動障害改良工事：2007年5月と12月に、魚の移動を妨げていると思われる2つ地点 (図3のAとB) において、垂直落差を解消し、斜面化、さらに途中に不定形のブロックをいくつか設置して、魚が遡上しやすいように改良した (図4)。また、2007年12月には、河川と繋がる水路の入り口において (図3のC、E)、魚が遡上しやすいように土嚢を積み、強化ネットを固定することで斜面を形成した。また、2008年3月には、水路-水田間において、2カ所にコンクリート製の魚道を設置し (図3のF、G)、1ヶ所には、中にキンラン (金魚の人工産卵水草) を通したコルゲート管を設置して (図3のD)、連続性を確保した。



図2. 通し回遊魚の分布調査地点.

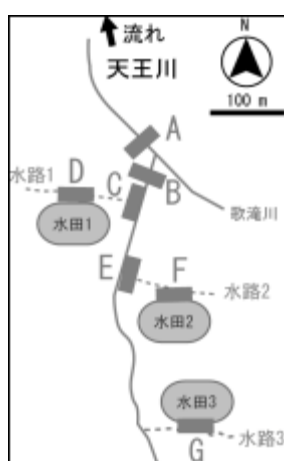


図3. 堰改良地点の概要図.

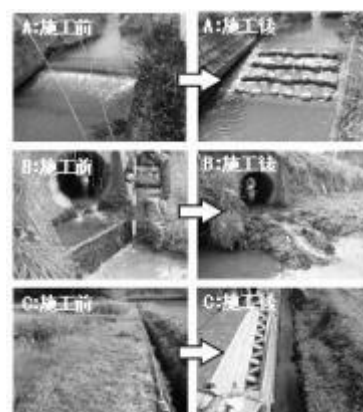


図4. 天王川における移動障害改良工事の例.

(2) 河川や水路における魚類の移動性：ドジョウやヨシノボリなどの魚種の各個体にPITタグと呼ばれる小型の磁気チップを埋め込み、放流後どのように移動しているのかを、PITタグ読み取りアンテナ（図5）によりモニタリングした。また、天王川付近の降雨についての情報を気象庁の過去データから取得し、降雨と移動との間に関係があるのかどうか調べた。



図5. 水路の入り口に設置されたPITタグ読み取り機. PITタグを保持した個体が通過すると記録される.

(3) 河川および水田水路地帯におけるドジョウのハビタットモデルの構築と再生シナリオのシミュレーション：佐渡島の国仲平野と小佐渡東部地区の7つの水系（国府川・天王川・久知川・河崎川・野浦川・赤玉中川・河内川）において、8月に53地点、3月に27地点の調査区（各50m）を設け、捕獲調査を行った。

各調査地点においては、魚類現存量を決定すると思われる河川環境の要因を現場の調査（水中植生の程度、河畔林の程度、流速、泥の割合、コンクリート床の割合、河底の礫サイズ）およびGIS（集水面積、標高、周囲の土地利用など）から求めた（表1）。これらの要因の全組み合わせに対して、一般化線形モデル（GLM：分布型は負の二項分布）をあてはめ、最小のAICを

表1 ドジョウの個体数を説明するのに用いた説明変数の一覧

説明変数	変数の概要
局所要因	
水中植生	岸際の中にある植生を3段階評価(0、1、2)
河畔林	河畔林を3段階評価(0、1、2)
流速	cm/sec
流速 ²	流速の二乗項
泥	川底に占める泥の割合 %
コンクリート	コンクリート床の割合 %
石サイズ	河底にある石の平均粒径 cm
景観要因	
湖沼面積	指定円形バッファー内における湖沼面積 ha
水田面積	指定円形バッファー内における水田面積 ha

持つ組み合わせを最適モデルとして採用した。さらにこの最適モデルを、GISソフトを用いて地図上にあてはめて視覚化した。ただし、水中植生などGISから得ることのできない現場の要因については平均値を代入した。

また、佐渡島の185の水田水路地帯において、ドジョウ生息の有無と、水田の環境調査を行った。これらのデータから、上記と同様にドジョウのハビタットモデルを構築した。ただし、目的変数を1（ドジョウが生息する）もしくは0（ドジョウが生息しない）とし、説明変数は、周囲の水田面積、標高、傾斜、水路の状態（土水路・コンクリートU字工）、水田形態（用排兼用・用排分離）、ポンプアップ用水、掛け流し用水の7つの変数を用いた。これらの要因の全組み合わせに対して、一般化線形モデル（GLM：分布型は二項分布）を

表2. 堰改良地点（図3のA, B）上下流における、改良前後の魚類相. 改良前（○）は2006年春～冬, 改良後（●）は2007年春～冬および2008年春, 夏.

和名	堰下流			堰上流		
	2006	2007	2008	2006	2007	2008
アユ	○	●	●	○	●	●
ウグイ	○	—	—	—	—	—
タモロコ	○	●	●	○	●	●
モツゴ	○	●	—	○	●	●
フナ属	○	●	●	○	●	●
タイリクバラタナゴ	○	—	●	○	—	—
ドジョウ	○	●	●	○	●	●
メダカ	○	—	—	—	—	●
ヨシノボリ属	○	●	●	○	●	●
チチブ属	○	●	●	—	—	—
ウキゴリ属	○	●	●	○	●	●
アユカケ	○	●	●	—	●	—

用いた。これらの要因の全組み合わせに対して、一般化線形モデル（GLM：分布型は二項分布）を

あてはめ、最小のAICを持つ組み合わせを最適モデルとして採用した。また、水路-水田間のギャップを解消したシナリオや、圃場整備がこのまま進んだことを想定したシナリオについても同様の方法でハビタットモデルを構築し、地図上に当てはめた。

(4) 佐渡島のドジョウにおける遺伝的特性の解明：佐渡島の61地点、新潟市周辺の14地点において、ドジョウをサンプリングし、ミトコンドリアDNAのCR領域の遺伝子コードを解読した(計287個体、840bp)。このようにして得たハプロタイプを、既知のハプロタイプ¹⁰⁾と比較し、遺伝的解析を行った。遺伝的解析では、近隣結合法(ブートストラップ2000回)により系統樹を得た。

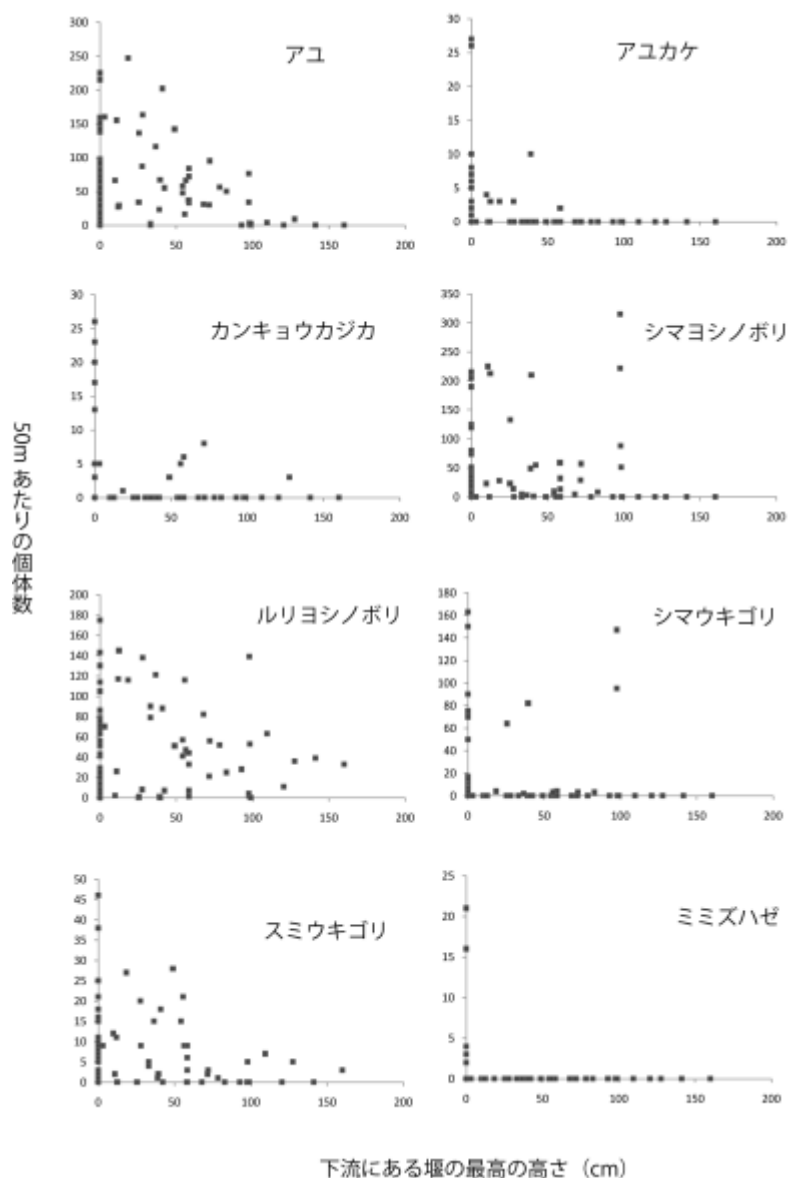


図6. 下流にある堰の高さ(最大)と魚類各種密度の関係。

4. 結果・考察

(1) 堰が魚類の移動に与える影響の解明・落差の改良とその効果の検証: 回遊魚各種の密度と、下流にある最も高い堰の高さとの関係を図6に示す。アユは堰の高さが100cmを超えると、その上流にはほとんど生息していない。アユカケは全魚種の中で最も低い高さの堰に影響を受け、50~60cm以上の堰があると遡上できないようである。カンキョウカジカはアユカケに比べると遡上能力が高く、80cm前後の高さから堰の影響が出始めたが、130cmの堰でも超えることがあった。シマヨシノボリは100cm以上の堰があると、上流へ遡上できないようである。一方ルリヨシノボリは、多少、高い堰の影響を受けてはいるものの、堰の影響はあまり受けていない。シマウキゴリは100cm以上の堰があると、その上流では分布しない。スミウキゴリは60cm以上の高さの堰があると、徐々に遡上への影響が出始めるものの、決定的な堰の栄養はないようである。ミミズハゼは、少しでも落差があると登らないが、これは堰の影響なのか、もともとあまり河川を遡上する生態がないのかは分離できなかった。以上、堰がどのように回遊魚の分布に影響を与えるのかは、

魚種によって違っていた。今後はこの結果をもとにして、取水堰の設計がなされれば、回遊魚類に対して影響を軽減できるかもしれない。特にアユカケは遡上能力が低く、このアユカケを基準にして堰の高さを調整することが望まれる。

落差の改良前（2006年）と改良後（2007年以降）における堰B上流側の魚類現存量を図7、堰A下流と堰B上流の魚類相を表2に示す。堰B上流の魚類現存量に関しては、改良後の方がやや低い値を示したが、大きな変化は見られなかった（図7）。図示はしないが、堰A下流側においても、同様の傾向を示した。その他、魚類密度、多様度指数についても、改良堰上下流で現存量と同様の比較をしたが、堰の改良後にこれらが増加することはなかった。現在のところは、堰の改良は、魚類に大きな影響は与えていないものと考えられる。魚類相に関しては、堰A下流では、改良前の方が多くの魚種が見られ、堰B上流では、種数は変わらなかったが、種組成が変化した（表2）。堰上下流で改良後に出現しなくなった魚類については、堰改良後も採捕個体数が非常に少なく、改良後も調査地付近では採捕されることがあったため、堰改良の影響ではないと考えられる。また、改良後1年目の2007年には、アユカケが改良後に堰B上流で見られるようになった。アユカケは特に遡上能力の低い魚種であるため¹¹⁾、堰の改良によって初めて堰B上流に移動できた可能性がある。以上の結果をまとめると、改良後1年目に改良堰上流にアユカケが遡上するという限定的な効果は見られたが、全体的には堰の改良の明瞭な効果を検出することはできなかつたと結論される。その理由としていくつか考えられるが、大きな要因としては、改良堰上下流の魚類生息地の環境の改善がなされなかったことが考えられる。河川内で、トキの餌となる魚類現存量を増加させるには水系ネットワークの再生のみならず、生息地の環境修復を行わなければならないことが示唆された。

一方、水田2の水田魚道設置前後のドジョウ密度を図8に示す。水田2では、魚道設置前の年にはドジョウが全く見られなかったが、水田魚道を設置した年には、6月、8月にドジョウが確認された（図8：水田2は慣行田のため、7月は中干し期、9月以降は水抜きをされるため水田から水がなくなる）。図示はしないが、湛水された休耕田である水田1、3においても同様にドジョウの密度は顕著に増加した。よって、水路～水田間のつながりが分断されている箇所に水田魚道を設置することは、ドジョウの生息場、産卵場の確保に寄与することが示唆された。今後、トキのエサ資源確保のため、水系ネットワークの修復を行う場合には、顕著な効果の出なかった河川より水路～水田間のネットワークを優先的に修復した方が効果的であることが示唆された。

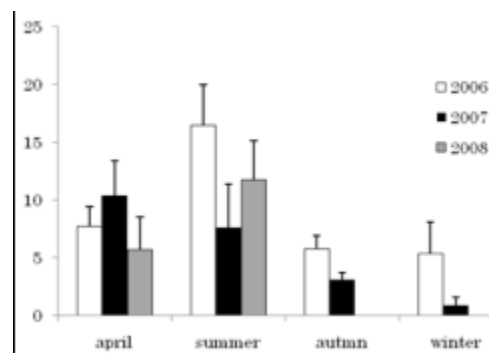


図7. 堰B上流における堰改良前後の魚類現存量.

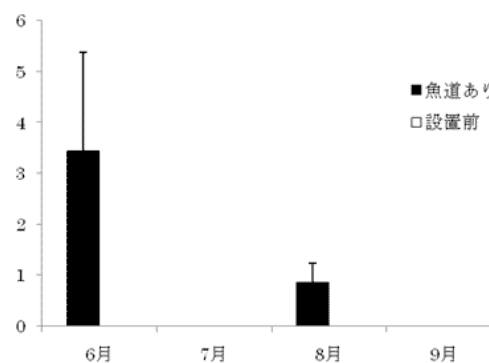


図8. 水田2における水田魚道設置前後のドジョウ密度類現存量.

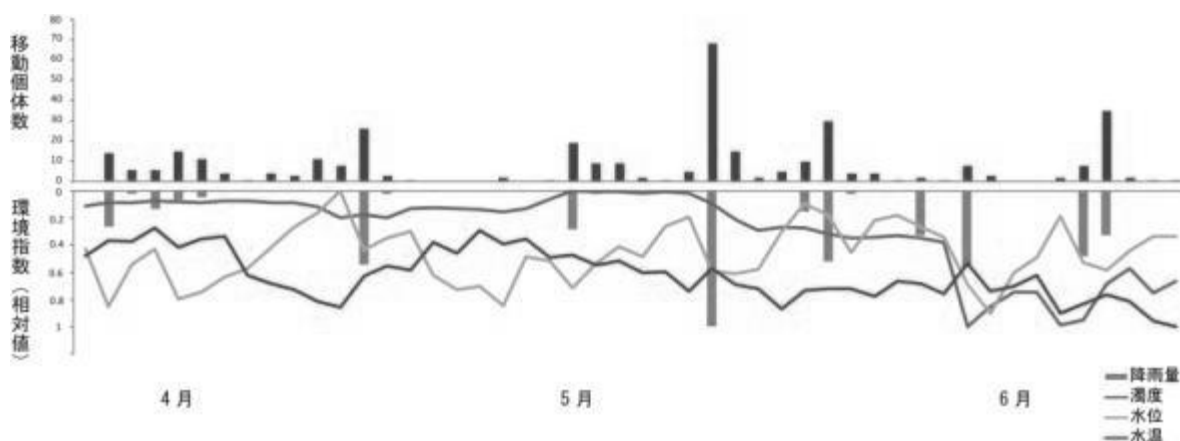


図9. 環境要因と魚類の移動の関係（2008年）. 多くは降雨と関連して移動している.

(2) 河川や水路における魚類の移動性：環境要因（降雨、水位、濁度、水温）と魚類の移動の関係を図9に示す。この図から、魚類の移動は降雨時に偏って行われているのが分かる。水位と降雨については共線的であるため分離できない。特に移動数の多かった2008年5月20日について、より小さい時間スケール評価したものを図10に示す。深夜から雨が降り、早朝6時に雨が強くなると、30分ほど遅れて、急激に大量の個体が移動している。このように、魚類の移動は降雨時に多く起こることが示された。

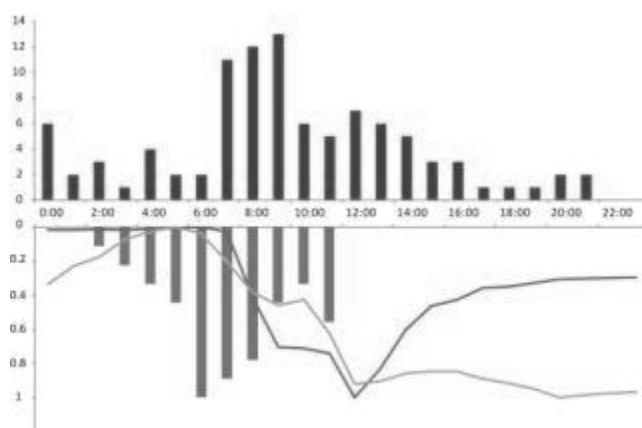


図10. 環境要因と魚類移動との関係（より小さい時間スケール）.

一般に魚道の設置においては、水の流れが魚道へと配分されるため、水利権の問題などから設置が敬遠される傾向がある。しかし、本研究から魚類の移動は降雨時に起こることを考慮すると、通常時に魚道に水が流れていなくても、降雨時にさえ水が流れれば、魚道はその機能を十分に発揮することが考える。この考えに基づけば、より魚道が一般的に普及されるかもしれない。

(3) 河川および水田水路地帯におけるドジョウのハビタットモデルの構築と再生シナリオのシミュレーション：河川においては、8月、3月共にバッファサイズ1400mでモデルのAICが最小となった（図11）。この1400mのバッファサイズにおいて、8月の河川のドジョウ個体数に対しては、水中植生（正）、泥床割合（正）、湖沼面積（正）が強い影響を与えることが明らかになった（表3）。一方、3月の河川のドジョウの生息量に対しては、河畔林（負）、泥の割合（正）、水田面積（正）が影響を与えることが明らかになった。これらの結果から得られたドジョウの個体数推定結果を表すポテンシャルマップを図12に示す。8月、3月ともに国仲平野の水田地帯にドジョウの生息適地が集中的に分布していることが分かった。ドジョウが産卵に利用する一時的水域としての水田が同地域に多く分布している。

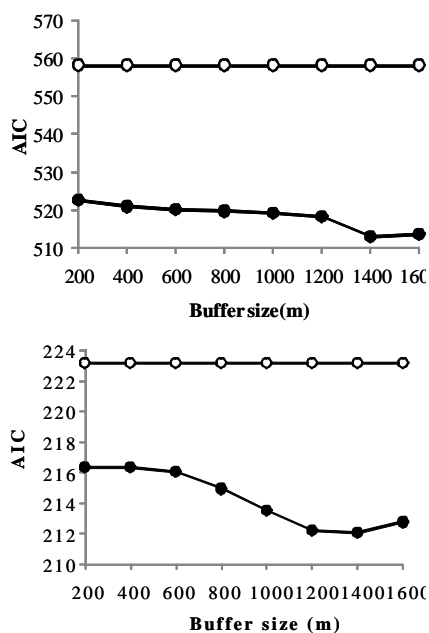


図11. ドジョウの各バッファサイズにおける帰無モデル (○) と全要因の組み合わせから得られた最良モデル (●) のAIC. 上: 8月, 下: 3月.

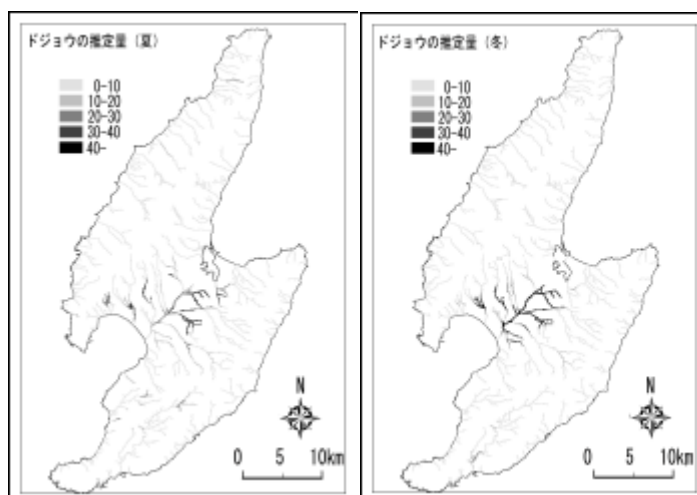


図12. 佐渡島の全河川におけるドジョウのポテンシャルマップ (100mあたりの個体数). 左: 8月, 右: 3月. 濃い線ほどドジョウが多くいる.

本研究で提示したモデルから、河川のドジョウの生息量を増加させるには平野部の水田地帯で、コンクリート護岸を土羽護岸に変え水際の植生を取り戻したり、コンクリート床は落差のない床止めに変えたりするといった対応策が効果的であると考えられる。また水田と水路、水路と河川の落差を解消することや湖沼と河川や水田のつながりを改善することで、景観要因として機能する水田を増やすことも効果的であろう。本研究により、河川のドジョウ生息量を制限する要因は季節により変動することが明らかになった。この要因の変動性はドジョウの保全のさらなる効率化の可能性を示している。すなわち、ドジョウの生息量を制限しボトルネックとなっている季節を特定し、その季節の制限要因を改善することで、よりピンポイントに効率的な環境保全を行うことができる。しかし本研究では8月と3月の2季節のみで調査を行っており、ドジョウの生息量のボトルネックとなる季節を特定するには不十分である。今後の研究により、佐渡のドジョウ生息量を制限するボトルネックとなる季節を特定

表3. ドジョウの個体数を説明する最良モデルの各変数の係数と標準誤差 (SE) .

	局所要因								景観要因					
	切片		水中植生		河畔林		泥床割合 (%)		コンクリ床割合 (%)		湖沼面積 (ha)		水田面積	
	係数	SE	係数	SE	係数	SE	係数	SE	係数	SE	係数			
8月	0.068	0.337	1.783	0.429			0.046	0.016	-0.045	0.026	1.029	0.330	0.005	0.1
3月	0.261	0.447			-0.443	0.203	0.093	0.035					0.014	0.1

したい。

一方、水路水田地帯におけるドジョウの分布を図13に示す。このデータをもとに解析したところ、ドジョウの有無には、周囲の水田面積 (800mバッファ) (正)、水路水田間の連結性 (正)、土水路 (正)、掛け流し灌漑 (負)、ポンプアップ灌漑 (負) が効いていることが分かった。つまり、大規模水田地帯かつ圃場整備が行われていないような水田にドジョウが分布しやすいこと

が明らかになった。図14は、3つの再生シナリオを地図上で表現したものである。現状シナリオ(図14a)は、このまま何もしないシナリオで、ドジョウは主に大水田地帯である国仲平野を中心に分布する。連結性再生シナリオ(図14b)は、水路水田間の連結性を魚道設置などにより確保したことを想定したモデルで、国仲平野のみならず小規模水田地帯である大佐渡地方や小佐渡地方においてもそれなりの確率でドジョウが分布する。一方、圃場整備シナリオ(図14c)は、このまま島全土において圃場整備が進んだものと仮定したモデルで、この場合、国仲地域の中心部を除いてほとんどドジョウが生息しないことになる予想される。以上のことより、水田水路地帯のドジョウの保全においては、これ以上の圃場整備事業を食い止め、水路水田間の連結性を魚道設置などにより確保することが現実的な方策のように思われる。

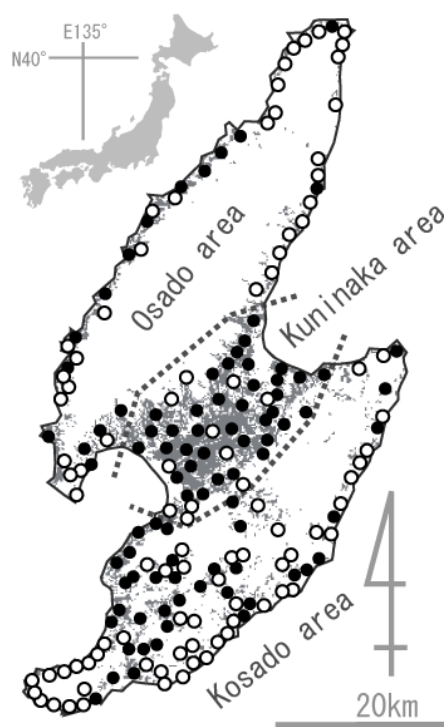


図13. 佐渡島の水田水路地帯におけるドジョウの分布 (●:いる, ○:いない)。

(4) 佐渡島のドジョウにおける遺伝的特性の解明

合計で31のハプロタイプが確認された(図15)。佐渡で確認されたのは27のハプロタイプで、そのうち13のハプロタイプは、新潟周辺もしくはMorishima¹⁰⁾におけるハプロタイプと同等のものであり、本土から移入されたものであることが示唆された。系統樹(図16)においても佐渡で独自のクレードを形成することはなく、既知の色々なクレードに属した。これはAvisse¹²⁾の言うところの「Category II」に属し、系統的に一度分化した多様なクレードが、二次的に佐渡で合流したことを示している。この二次的な接触は、人為的なものにより起こったと考えるのが妥当である

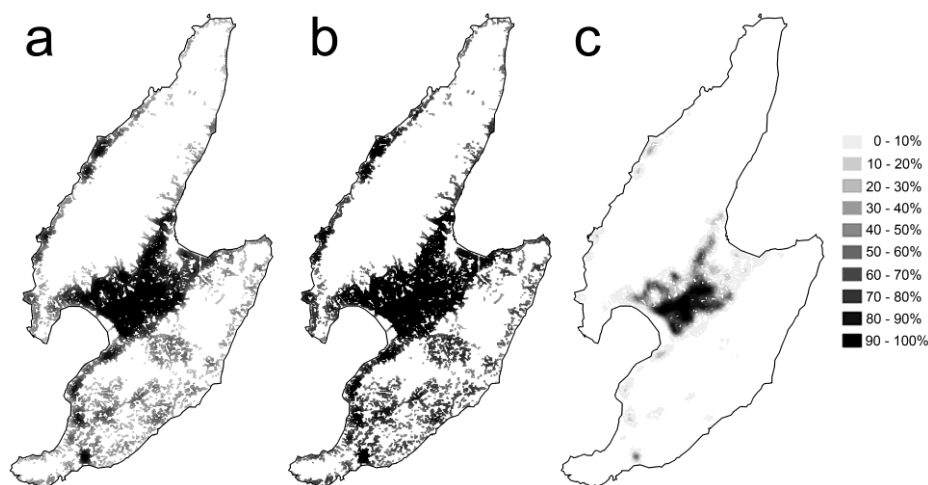


図14. ドジョウの分布における3つのシナリオ. a) 現状シナリオ, b) 連結性再生シナリオ, c) 圃場整備シナリオ.

う。今回佐渡でしか見つかっていないハプロタイプ（図16の▲）も、単に記載がされていないだけで、今後本土で見つかる可能性が十分にある。

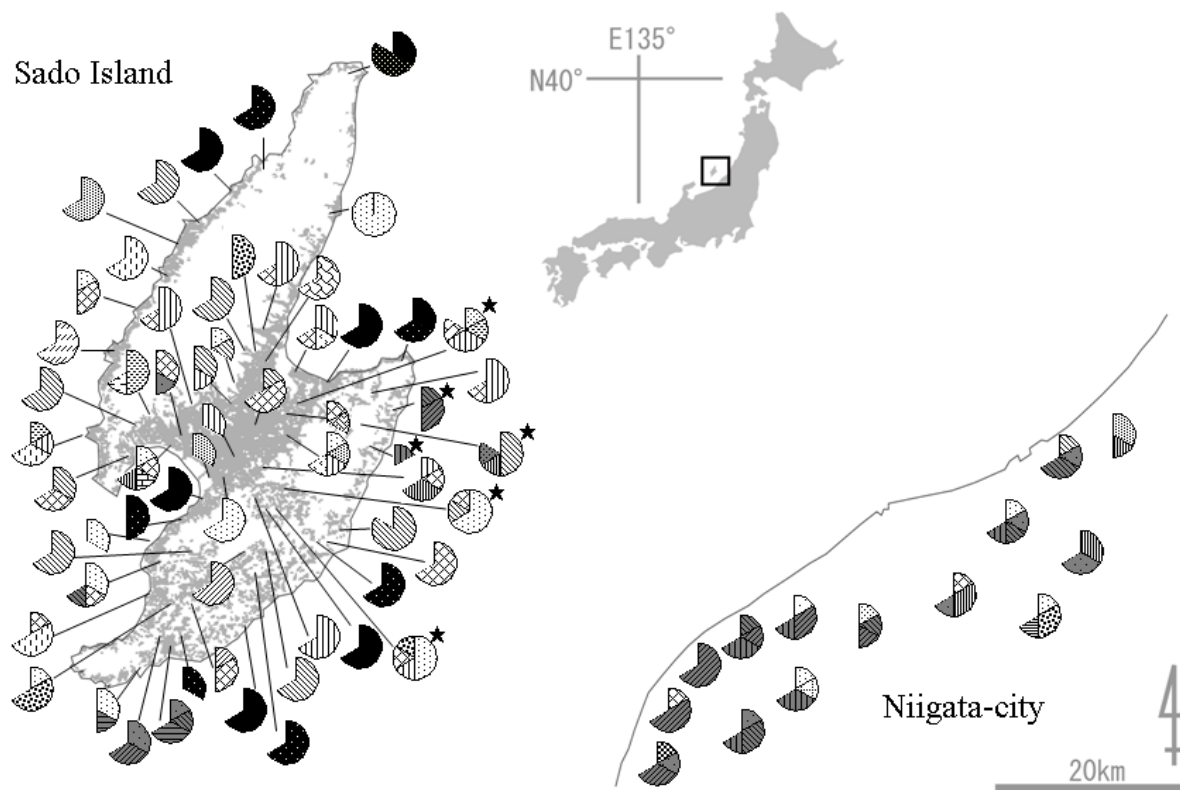


図15. 佐渡島と新潟市周辺におけるドジョウの遺伝子地図．60度の扇型で1個体を示す．全円で6個体．各ハプロタイプの塗りつぶしのパターンは図8と一致する．★は養殖ドジョウの大量放流のあった地点．放流地点では明らかにハプロタイプ多様度が高い．

一方、佐渡島の地史的な起源については諸説あるが、詳細な記述をしている高野¹³⁾によれば、佐渡島は前期更新世の末期（約180万年前）に日本海に隆起し、何度か海水面の変動の影響を受けながら、そのまま現在にいたるとされる。氷河期においても本土や大陸と陸続きにはならなかった¹⁴⁾ため、飛翔能力や海中を移動できる生物以外は、佐渡島へはほとんど侵入できなかったと思われる。以上のことを総合的に考慮すると、佐渡島のドジョウは元来人為的な移入によるものである可能性が高い。ただしその歴史は古く、ドジョウに関する最古の記録は西暦1200年（鎌倉時代）までさかのぼることができる¹⁵⁾。

図17は、放流の影響を受けたと思われる個体群の、全体における遺伝的な位置を示したものである。島外からの移入の影響を受けた個体群（☆）は明らかに異質な系統に位置し、遺伝的攪乱を受けていることが示唆される。また、ハプロタイプの多様性についても、移入個体群は有意に高く、これも遺伝的攪乱が起きていることを示唆している。

以上、本研究では佐渡島のドジョウの起源をある程度さかのぼることができた。また、ドジョウの放流により、少なからず遺伝的攪乱が起きていることも示唆された。養殖ドジョウの放流については、今後はこの情報をもとに、科学のみならず多角的な視点から見た判断¹⁶⁾が必要であろう。

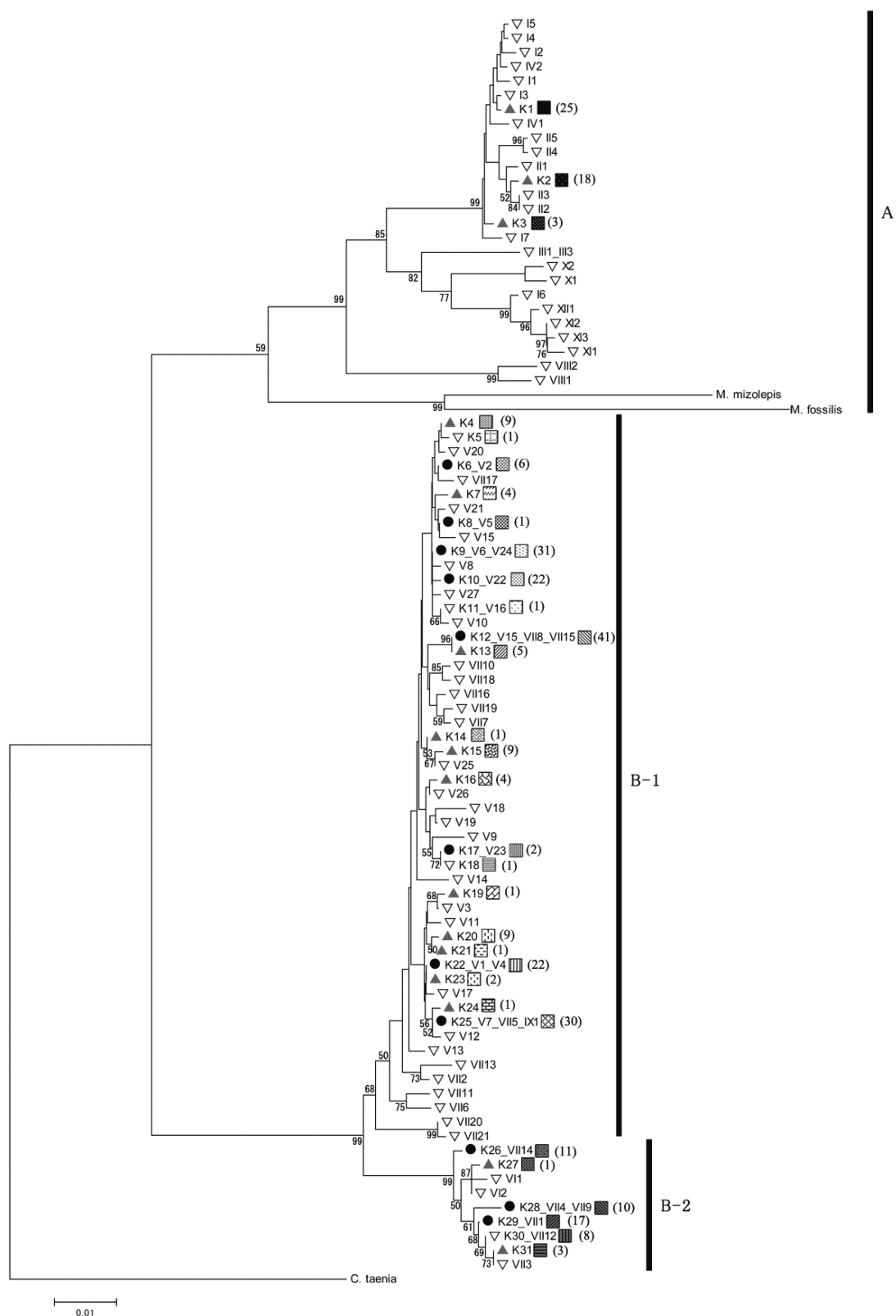


図16. 近隣結合法により得られた系統樹（ブートストラップ2000回）. ▲：佐渡島でのみ見つかったハプロタイプ；●：佐渡島と本土で見つかったハプロタイプ；▽：本土でのみ見つかったハプロタイプ. Kで始まるハプロタイプ名は本研究で見つかったもの. ギリシャ数字で始まるハプロタイプはMorishima (2008)で報告されたもの. 重複はアンダーバーで繋いだ. 各ハプロタイプの塗りつぶしパターンは図15と一致する.

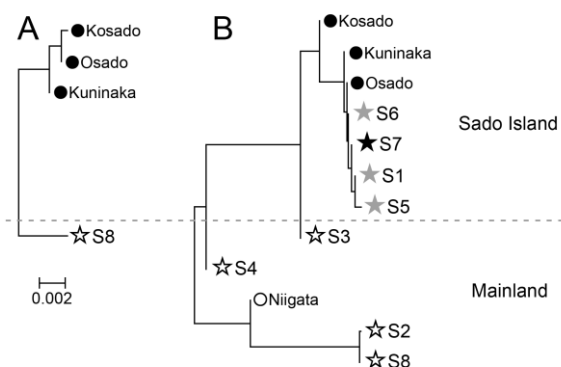


図17. ドジョウ放流個体群の遺伝的特性. ☆が島外の個体が移入された個体群. ★は島内移入個体群. ★は移入元不明.

あるが¹⁹⁾、灌漑域においての魚類の移動条件については、未だ多くのことは明らかではない。独自に里山景観の発達した本邦においては、水生生物は、河川内だけではなく里山全体の水域ネットワークを自由に往来できることが望ましい。本研究ではこれらの点において、積極的に里山水域ネットワークの改善と健全な生物多様性の保全を目指すものであり、先駆的な科学研究となっている。

淡水魚類の現存量に関する既存の研究は、サケ科魚類を対象としたものが多く、局地的かつ現場に即した要因と現存量との関係を調べたものであった²⁰⁾²¹⁾²²⁾。しかし本研究では、これまで注目されることのなかったドジョウについて、GISを用いて多様なスケールの要因を考慮しており、科学的意義がある。

佐渡島のドジョウの遺伝的な特性についてはこれまでに報告がなく、本研究で初めて明らかにされた。また本結果は佐渡島や日本海の地史を解明する上でも、重要な生物地理的な情報となる。さらに遺伝的攪乱についても明らかにすることができ、数少ない事例と思われる。

(2) 地球環境政策への貢献

水辺生態系は近年になって、世界的に大きく変容した。特に河川や水路においては、コンクリート化や分断化によって、水生生物の生息場所が失われたり、自由な移動が阻害されたりして、大きく生物多様性が損なわれた。そのような中、本研究では水辺生態系について積極的に生息環境の改善をはかり、その事後評価を行った。トキの放鳥という科学的にも社会的にも注目の高いイベントの中で行われている本研究の成果は、今後大きなモデルとなるだろう。本研究結果は、サブテーマ(8)「トキの生息環境を支える地域社会での社会的合意形成の設計(東京工業大学大学院社会理工学研究科)」と共同して「談義」やシンポジウムを通して地域住民を対象に幾度となく公表してきた。その中で、本研究結果は住民の反応も良く、十分な手応えを得ている(たとえば添付書類1など)。今後も、佐渡島の自然再生に関するシンポジウムをいくつか開き、その中で本研究結果を公表するとともに、自然再生に対する理解や普及に努めたい。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

魚類や水生生物の移動を妨げる河川の横断構造物については、分断を軽減もしくは除去することで、水生生物の生息域が再生されると考えられている¹⁷⁾¹⁸⁾。しかし本邦においては、これまでのところ横断構造物を対象とした分断の除去や水田魚道の設置に対して、修復域上下流の魚類や水生生物の応答を定量的に調査するという手法での検証事例は事実上無く、修復効果の知見はほとんど蓄積されていなかった。また、効果的な水系ネットワークを構築するには、魚類が移動を促される物理環境条件を解明することが重要で

6. 引用文献

- 1) 佐藤春雄 (1960) 朱鷺の食性と留鳥説について. *野鳥* XXV-1:11-23.
- 2) 王 中裕・李曉華・鄭 曉斌 (1985). 朱鷺採食地的生態觀察(中国語). *生態学雑誌* 4:10-12.
- 3) 史東・曹永 (2001) 中国朱鷺. 北京. 中国林並出版社.
- 4) 丁長 (2007) トキの研究 (蘇雲山・市田則孝 [訳]・山岸哲 [監]). 東京: 新樹社.
- 5) 近辻 宏 (2002) トキ, 永遠なる飛翔. 東京: ニュートンプレス.
- 6) 斉藤憲次・片野 修・小泉顕雄 (1988) 淡水魚の水田周辺における一時的水域への侵入と産卵. *日本生態学会誌* 38: 35-47.
- 7) Naruse M & Oishi T (1996) Annual and daily activity rhythms of loaches in an irrigation creek and ditches around paddy fields. *Environmental Biology of Fishes* 47: 93-99.
- 8) Helfman G S (2007) Dams, impoundments, and other hydrological alternation. In: Fish conservation: A guide to understanding and restoring global aquatic biodiversity and fishery resources. Island press, Washington, DC.
- 9) Grant P R (1998) Speciation. In Evolution in islands (Grant, P. R., ed.). pp 83-101, Oxford University Press.
- 10) Morishima K, Nakamura-Shiokawa Y, Bando E, Li Y J, Boron A, Khan M. M.R & Arai K (2008) Cryptic clonal lineages and genetic diversity in the loach *Misgurnus anguillicaudatus* (Teleostei: Cobitidae) inferred from nuclear and mitochondrial DNA analyses. *Genetica* 132: 159-171.
- 11) 財団法人リバーフロント整備センター (1998) 落差工等により支障をきたす魚類などのランク付け結果. (財)リバーフロント整備センター編著. 「魚から見た落差工への配慮事項」 pp59-78. 財団法人 リバーフロント整備センター, 東京.
- 12) Avise J C (2000) Phylogeography: the history and formation of species Cambridge: Harvard University Press.
- 13) 高野武男 (1987) 佐渡島の高位海成段丘. 佐渡博物館研究報告. 9: 15-29.
- 14) 大嶋和雄 (1991) 第四期後期における日本列島周辺の海水準変動. *地学雑誌*. 100:967-975.
- 15) 尾崎紅葉 (1904) 煙霞療養. 春陽堂, 東京.
- 16) Oksanen M (2004) Biodiversity considered philosophically: an introduction Cambridge Cambridge university press.
- 17) Stanley E H, Catalano M J, Mercado-silva N & Orr C H (2007) Effects of dam removal on brook trout in a Wisconsin stream. *River research and applications* 23: 792-798.
- 18) Maloney K O, Dodd H R, Butler S E, Wahl D H (2008) Changes in macroinvertebrate and fish assemblages in a medium-size river following a breach of low-head dam. *Freshwater Biology* 53: 1055-1068.
- 19) Jensen A J, Hvidsten N A, Johnsen B O (1998) Effects of temperature and flow on the upstream migration of adult Atlantic salmon in two Norwegian Rivers. *Fish Migration and Fish Bypass* pp. 45-53.

- 20) Inoue M, Nakano S & Nakakura F (1999) Habitat structure along channel-unit sequences for juvenile salmon: a submit-based analysis of in-stream landscape. *Canadian Freshwater Biology* 42: 597-608.
- 21) Cote D (2007) Measurements of salmonid population performance in relation to habitat in eastern Newfoundland stream. *Journal of Fish Biology* 70: 1134-1147.
- 22) Dolinsek I J, Grant J W & Biron P M (2007) The effect of habitat heterogeneity on the population density of juvenile Atlantic salmon *salmo salar* L. *Journal of Fish Biology* 70: 206-214.

7. 国際共同研究等の状況

なし

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) Y. Kano, Y. Kawaguchi, T. Yamashita, and Y. Shimatani. Distribution of the oriental weatherloach, *Misgurnus anguillicaudatus*, in paddy fields and its implications for conservation in Sado Island, Japan. *Ichthyological Research*. 57:180-188 (2010)
- 2) 山下奉海, 河口洋一, 谷口義則, 鹿野雄一, 石間妙子, 大石麻美, 田中亘, 斉藤慶, 関島恒夫, 島谷幸宏. 佐渡島の小河川における魚類を対象とした農業用取水堰改良効果の検証. *応用生態工学会誌* (印刷中)

<査読付論文に準ずる成果発表>

- 1) 河口洋一, 山下奉海, 石間妙子, 林博徳, 高野瀬洋一郎, 関島恒夫 (2009) 水系ネットワークの再生による氾濫原環境の修復. *水利科学* 53 : 34-52

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 河口洋一, 島谷幸宏, 山下奉海, 関島恒夫 (2009) トキ野生復帰に向けた水環境再生の試み. *土木技術資料* 51 : 34-37

(2) 口頭発表(学会)

- 1) 田中亘, 鹿野雄一, 山下奉海, 斉藤慶, 島谷幸宏, 河口洋一 (2008) トキの採餌環境としての河川の評価. ELR2008 (応用生態工学会, 景観生態学会, 緑化工学会3学会合同) 大会.
- 2) 山下奉海, 河口洋一, 谷口義則, 鹿野雄一, 田中亘, 島谷幸宏, 斉藤慶, 石間妙子, 大石麻美, 関島恒夫 (2008) 農業用取水堰の改良が河川性魚類の移動や分布に及ぼす影響. ELR2008 (応用生態工学会, 景観生態学会, 緑化工学会3学会合同) 大会.
- 3) 山下奉海, 河口洋一, 谷口義則, 鹿野雄一, 田中亘, 斉藤慶, 石間妙子, 大石麻美, 関島恒夫, 島谷幸宏 (2009) 佐渡島における水系ネットワークの修復. 日本生態学会第56回大会.

- 4) 山下奉海, 河口洋一, 谷口義則, 鹿野雄一, 田中亘, 島谷幸宏, 斉藤慶, 石間妙子, 大石麻美, 関島恒夫 (2009) 佐渡島の小河川における農業用取水堰改良の効果—魚類からみた効果の検証—. 東京大学・九州大学合同セミナー.
- 5) 鹿野雄一, 山下奉海, 島谷幸宏 (2010) 堰の高さと直下水深が回遊魚各種の遡上に与える影響. 第57回日本生態学会.
- 6) 河口洋一 (2010) 河川と農地の再生手法. 企画シンポジウム「トキ野生復帰の最前線」. 第57回日本生態学会.

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム, セミナーの開催 (主催のもの)

- 1) トキの島自然再生と地域づくりのための研究事例発表会 (2010年3月22日, トキの村元気館、聴衆約50名)

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 新潟日報 (2010年3月3日)

(6) その他

なし



F-072 トキの野生復帰のための持続可能な自然再生計画の立案とその社会的手続き

(2) 採餌環境としての水田・草地生態系の評価

東京大学大学院農学生命科学研究科

宮下直

<研究協力者>

東京大学大学院農学生命科学研究科

吉尾政信(平成19～20年度)

加藤倫之(平成19～20年度)

小林頼太(平成21年度)

平成19～21年度合計予算額 15,303千円
(うち、平成21年度予算額 5,181千円)

※予算額には、間接経費を含む。

[要旨] 本サブテーマでは、水田生態系におけるトキの主要な餌生物であるカエル類とバッタ類の分布や個体数の制限要因を複数の空間スケールから明らかにすることで、費用対効果の高い再生候補地の抽出と具体的な再生手法を提言することを目的とした。小佐渡地区の水田・休耕田を対象に、ヤマアカガエルとモリアオガエルは卵塊数、およびコバネイナゴは個体数を調査するとともに、局所要因(水田サイズ、耕作状況、水深、水路サイズ、畦周辺の草丈)を記録した。これらの野外データとGISを用いて様々な空間スケールで抽出した景観データ(森林被覆、水田被覆、林縁長)をもとに、これら3種の個体数制限要因について一般化線形モデルを用いて推定した。また、第一次放鳥後の冬にトキが餌として利用した佐渡固有のツチガエルの一種(未記載)については、繁殖期の密度に関わる局所要因(水田サイズ、水路数、水深、隣接カエル密度)の解析を行った。その結果、ヤマアカガエルでは半径300mの範囲に森林が6割程度存在する環境で、モリアオガエルは半径1,000mの範囲で森林被覆が大きい環境ほど卵塊数が多いことが明らかになった。局所要因では水田の水深や水路サイズといった局所要因が個体数決定に強く関与していた。最良モデルを用いて佐渡島全域における2種の個体数分布を予測した結果、ヤマアカガエルは生息適地が広範囲に分布していたが、小佐渡中部の猿八周辺、小佐渡南部の羽茂周辺は両種の生息に好適であることが明らかになった。コバネイナゴは国仲平野で多産した。また、ツチガエルは年間を通して水田の水深が重要であり、相対的には冬の水深が重要な事が明らかとなった。これらより、早春から初夏の餌として重要なヤマアカガエルやモリアオガエルでは猿八や羽茂周辺の水田地帯、晩夏から秋に増加するコバネイナゴでは国仲平野、冬の餌として利用可能なツチガエルでは両津や新穂等の水田が、それぞれ費用対効果の高い再生地域であり、冬期湛水や畦の草丈管理、水田と森林との連結性の復元等の実施により各種生物の大幅な増加が見込めることが明らかとなった。

[キーワード]水田生態系、採餌環境、景観生態学、両生類、昆虫類

1. はじめに

人為による土地利用形態の変化は生物多様性減少の主要因と考えられている。両生類やバッタ目昆虫にとって好適な生息地であった水田や半自然草原などの二次的環境は、農法の転換や宅地化によって急速に減少し、残存している場合でも孤立化や均質化が進行している。生物多様性保全の必要性が認識されつつある昨今では、土地利用形態を見直すことで地域生態系の維持、復元、管理に向けた取り組みが盛んに行われており、絶滅危惧種の個体群の回復や絶滅種の復活を目指した再導入の試みも行われつつある。

新潟県佐渡市（佐渡島）では、2008年9月にトキの第一次試験的放鳥が実施され、2015年頃までに60羽を定着させるための再導入計画がすすめられている。放鳥後のトキ個体群が長期的に存続するためには、採餌環境の確保や整備が必要不可欠である。過去の記録から水田環境はトキの重要な採餌場所と考えられ、水田生態系を餌生物の分布や現存量の観点から評価することが緊急課題となっている。水田生態系の生物群集や生物量は、個々の水田レベルの局所要因と水田を取り巻く広域の景観要因といった異なる空間スケールの要因の影響を受けていると考えられる¹⁾²⁾。そのため、トキの採餌環境を整備する際には、餌生物の個体数を制限する要因を局所と景観の双方のレベルで明らかにし、自然再生計画を立案することが重要である。対象とする餌生物にとって好適な環境と予測される地域を景観要因を用いて抽出し、対象水田で局所管理を実施すれば費用対効果の高い自然再生が可能になると考えられる。

2. 研究目的

本サブテーマの目的は、佐渡島の小佐渡地域における水田と休耕田について、両生類（主にカエル類）と昆虫類（主にバッタ類）の個体数の決定要因を推定することでトキの採餌環境としての評価を行うとともに、トキ個体群の存続を目的とした生態系復元計画の立案に資する情報を提供することにある。水田生態系におけるトキの餌としては、過去の利用記録³⁾⁴⁾と環境中の生物量から、カエル類ではヤマアカガエル（以下、ヤマアカ）、モリアオガエル（モリアオ）、バッタ類ではコバネイナゴ（イナゴ）が餌生物になると考えられた。そこで、これら3種の個体数を推定する統計モデルを作成し、GIS情報とあわせることで佐渡島全域における個体数を推定し、自然再生を実施する際に候補となる地域を抽出する。また、2008年9月の第一次試験放鳥後、冬期の水田においてトキがツチガエルの一種を摂食するのが確認された。このツチガエルは、既知のツチガエルと比較して形態や鳴声が異なること、遺伝的情報や交配実験などの証拠から未記載の新種であると考えられる（三浦・関谷 学会発表済）。佐渡島内の平野部を中心に分布が確認されているため、今回は局所的な密度に関わる制限要因を探索した。本研究はこれらの情報をもとに、餌生物ごとの費用対効果の高い自然再生適地を選び、餌生物の維持や増加を目的とした水田管理方法を提言することを目的とした。

3. 研究方法

（1）調査地と野外調査方法

新潟県佐渡市において、ヤマアカとモリアオは小佐渡地区の58ヶ所の水田（図1）とイナゴは小佐渡地域と国仲平野を含んだ77ヶ所の水田と休耕田（図2）、ツチガエルは国仲平野の北西に位置する5地域128ヶ所の水田（図3）を対象に野外調査を実施した。ヤマアカ、モリアオ、イナゴにつ

いては平野部から山間部まで様々な環境に位置する水田を対象に、ツチガエルについては予備調査により生息が明らかになった水田を調査地とした。ヤマアカとモリアオについては、それぞれ産卵期が終盤を迎えた2008年3月下旬と5月中旬に卵塊数を目視で記録した。各調査水田において、水深、水田に近接する水路の数、水路の幅と深さ、水路付近の環境、畦の周長を記録した。水深はそれぞれの調査時期に各水田6箇所から測定し、平均値を記録した。イナゴは9月中旬に畦周辺でスweepingと目視を行い、個体数を記録した。1調査地点あたりのスweepingを行った箇所（以下、プロットとする）は6プロットとし、各プロットでのスweepingでは網を5回振るとともに、半径1mの範囲内で目視を行った。各調査水田において、畦の周長、草丈、耕作状況（休耕田か耕作田か）を記録した。ツチガエルについては、発見効率が高いと考えられた、中干し前の2009年5～6月の日中に水田の畔を歩くラインセンサス法によって相対密度を評価した。ツチガエルはヤマアカやモリアオと異なり、非繁殖も水際からほとんど離れず⁵⁾、分布も平野部が主であることがわかっているため、景観要因は考慮せず、局所要因として周囲の水路数と水深を測定した。ツチガエルの幼生は孵化後、変態して上陸するまで約1年を要する。そこで、水深は夏（8月）、秋（10月）、冬（12月）の3期間に行った。

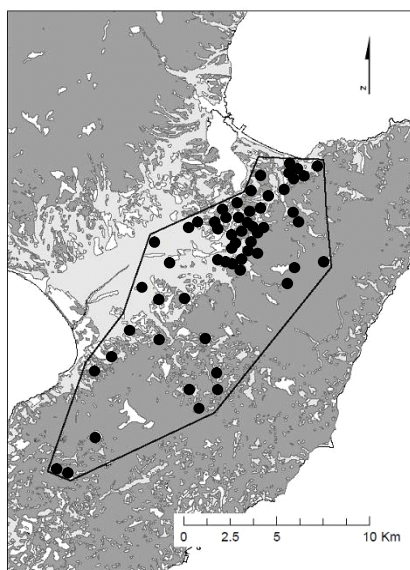


図1 ヤマアカとモリアオの卵塊数調査地点

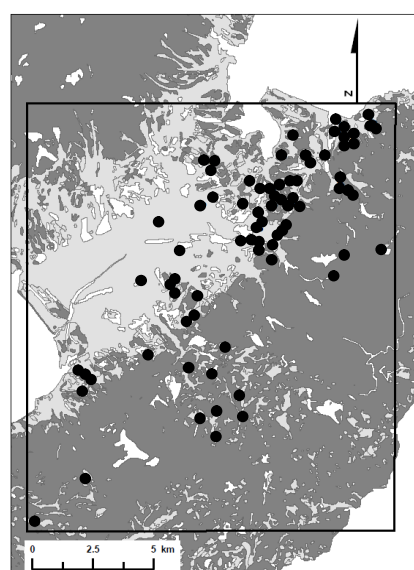


図2 イナゴの個体数調査地点

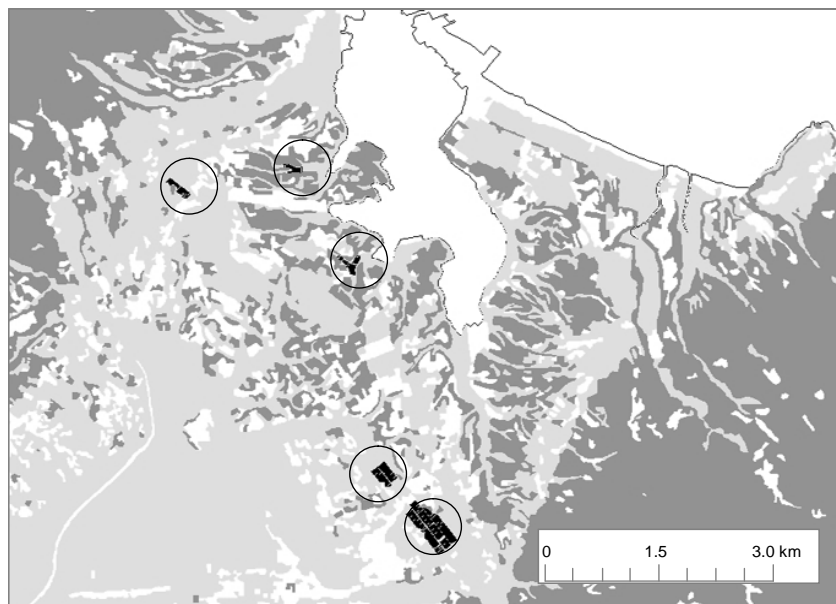


図3 ツチガエル(佐渡固有型)の個体数調査地点

ツチガエルについては、発見効率が高いと考えられた、中干し前の2009年5～6月の日中に水田の畔を歩くラインセンサス法によって相対密度を評価した。ツチガエルはヤマアカやモリアオと異なり、非繁殖も水際からほとんど離れず⁵⁾、分布も平野部が主であることがわかっているため、景観要因は考慮せず、局所要因として周囲の水路数と水深を測定した。ツチガエルの幼生は孵化後、変態して上陸するまで約1年を要する。そこで、水深は夏（8月）、秋（10月）、冬（12月）の3期間に行った。

(2) GIS による作業

景観要因の抽出と調査水田の面積の測定には、GIS（地理情報システム）を用いた。景観要因については森林面積の割合（森林被覆）、水田面積の割合（水田被覆）、林縁の総延長（m）に着目した。景観要因が影響する適切な空間スケールを特定するため、調査水田の中心から半径50m～1500mの円形バッファを発生させて景観要因を抽出した。GIS解析にあたっては、環境省の生物多

様性情報システム (J-IBIS <http://www.biodic.go.jp/J-IBIS.html>) よりダウンロードした植生図のデジタルマップの情報を用い、景観要因の抽出はArcGIS 9.2 (ESRI ジャパン株式会社) で実行した。

(3) 統計解析

ヤマアカ、モリアオの卵塊数とイナゴの個体数に影響する要因の分析は、負の二項分布を誤差分布とした一般化線形モデル、ツチガエルについては、ポアソン分布を誤差分布、地域の違いをランダム要因とした一般化線形混合モデルを用いて行った。モデルに使用した説明変数はヤマアカ、モリアオは表1、イナゴは表2、ツチガエルは表3に示した。なお、ヤマアカ、モリアオの解析に用いた水路サイズは林に隣接する水路の幅と深さをういて主成分分析を行い、その第一主成分の値を用いた。第一主成分は $pc1 = 0.95 \times (\text{水路幅}) + 0.95 \times (\text{水路の深さ})$ で表され、寄与率は90.6%であった。ツチガエルの解析に用いた各季節の水深については、変数間に共線性がみられなかったため、独立の変数

として扱った。目的変数を最もよく説明するモデルは、変数総当りでモデルを構築し、AIC (赤池情報量基準) によるモデル選択で特定した。景観要因の影響する適切な空間スケールは、各スケールでの最良モデルのAICを比較して特定した。解析には統計ソフトウェア $R^6)$ を用いた。

(4) 佐渡全域における餌生物の個体数分布図

最良モデルから得られた回帰式とGISから得られた景観情報をもとに佐渡全域におけるヤマアカ、モリアオの卵塊数とイナゴの個体数分布図を作成した。国交省のサイト「国土数値情報ダウ

表1 カエル類の卵塊数を説明するモデルに用いた説明変数の一覧

説明変数	変数の概要
局所要因	
水路サイズ	林に隣接する水路の深さと幅を主成分分析した第一主成分
隣接水路数	水田に隣接する水路の数
水田サイズ	ヤマアカ: 水田面積 (m ²) モリアオ: 畦の長さ (m)
水深	ヤマアカ: 3月の水深 (cm) モリアオ: 5月の水深 (cm)
水深 ²	水深の2乗項
景観要因	
森林被覆	調査水田から発生させた円形バッファ内に占める森林面積の割合
森林被覆 ²	森林被覆の2乗項

表2 イナゴの個体数を説明するモデルに用いた説明変数の一覧

説明変数	説明変数の概要
局所要因	
水田サイズ	畦の長さ (m)
耕作状況	耕作田か休耕田か
草丈	畦の草丈 (cm)
草丈 ²	草丈の2乗項
景観要因	
水田被覆	調査水田から発生させた円形バッファ内に占める水田面積の割合
林縁長	調査水田から発生させた円形バッファ内に占める林縁の総延長 (m)
水田被覆と林縁長の交互作用	水田被覆と林縁長の交互作用
空間的自己相関	
緯度	調査水田の緯度
緯度 ²	緯度の二乗項
経度	調査水田の経度
経度 ²	経度の二乗項
緯度と経度の交互作用	緯度と経度の交互作用

表3 ツチガエルの個体数を説明するモデルに用いた説明変数の一覧

説明変数	説明変数の概要
局所要因	
水田サイズ	水田面積 (m ²)
隣接水路数	水田に隣接する水路の数
水深 (8月)	夏: 中干し後、間断間水時期の水深 (cm)
水深 (10月)	秋: 稲刈り後の水深 (cm)
水深 (12月)	冬: 雨水、湧水、冬期湛水の水深 (cm)
隣接水田のカエル密度	コンクリート水路や道路で隔たりのない近接2水田のカエル密度

ンロードサービス (<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>) からダウンロードした土地利用メッシュデータを第三次地域区画メッシュへと変換し、さらに1/10細分して佐渡全域の100mメッシュ図を作成した。次に水田が含まれるメッシュについて景観要素（森林被覆、水田被覆）を算出した。景観要素は各メッシュの中心座標からバッファを発生させ、ヤマアカ、モリアオ、イナゴの最良モデルが得られた300m、1000m、600mのスケールで抽出した。最良モデルの回帰式に含まれる説明変数のうち、景観要因については各メッシュの値を、それ以外の説明変数にはモデル作成に用いたデータの平均値を代入して目的変数を求め、佐渡島全域におけるヤマアカとモリアオの卵塊数およびイナゴの個体数分布をArcGIS 9.2で視覚化した。

(5) 予測モデルの外挿評価

かつてトキが餌として利用していたヤマアカ⁴⁾については、2009年3月下旬に小佐渡地域22ヶ所、大佐渡地域10ヶ所の水田で卵塊数調査を実施し、景観情報を用いて予測した統計モデルの結果と比較を行った。

4. 結果・考察

(1) ヤマアカガエル、モリアオガエルの分布を説明するモデル

各バッファサイズで選
 択された最良モデルのAIC
 を図4に示した。ヤマアカ
 については、バッファサイ
 ズによって最良モデルの
 AICは異なり、最適なスケ
 ールは300mであった（図
 4a）。ヤマアカの卵塊数を
 説明する最良モデルの説
 明変数には、局所要因とし
 て水深、水深の二乗項、水

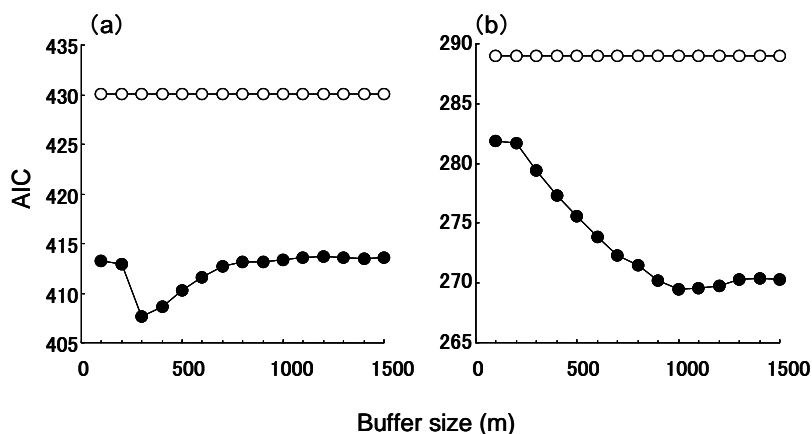


図4 ヤマアカ(a)とモリアオ(b)の各バッファサイズにおける帰無モデルと最良モデルの AIC

路サイズの3つの要因と、景観要因として森林被覆、森林被覆の二乗項の合計5つの要因が選択された（表4）。変数間の相対的な重要性の評価として、変数の係数をSEで割った値を比較したところ、水深と水深の二乗項、森林被覆と森林の二乗項の4つの要因の影響が特に大きかった（表4）。最適モデルにより推定される卵塊数は、水深については7cm程度で最大になる一山型を示し（図5a）、森林被覆については6割程度で最大になる一山型を示した（図6a）。水路サイズは推定卵塊数に負の影響を示した（表4）。

表4 カエル類の卵塊数を説明する最良モデルの各変数の係数と標準誤差(SE)

	局所要因											景観要因						
	水田サイズ			水深			(水深) ²			水路サイズ			森林被覆		(森林被覆) ²			
	係数	SE	係数/SE	係数	SE	係数/SE	係数	SE	係数/SE	係数	SE	係数/SE	係数	SE	係数/SE	係数	SE	係数/SE
ヤマアカ	-	-	-	0.79	0.18	4.29	-0.05	0.02	-3.54	-0.47	0.22	-2.19	10.18	2.59	3.94	-8.97	2.89	-3.10
モリアオ	0.01	0.00	1.48	0.90	0.26	3.46	-0.05	0.02	-2.92	-	-	-	4.21	0.99	4.24	-	-	-

モリアオについては、ヤマアカ同様にスケールによって最良モデルのAICは異なり、最適スケールは1000mであった(図4b)。モリアオの卵塊数を説明する最適モデルの説明変数には、局所要因として水田サイズ、水田の水深、水深の二乗項の3つの要因と、森林被覆の合計4つの要因が選択された(表4)。特に影響が大きく推定された要因は、水深、水深の二乗項、森林被覆であった(表4)。最適モデルにより推定される卵塊数は、水深については9cm程度で最大になる一山型を示し(図5b)、森林被覆にもなって増加する傾向を示した(図6b)。水田サイズは推定卵塊数に正の影響を示したが、変数としての影響は小さいと推定された(表4)。

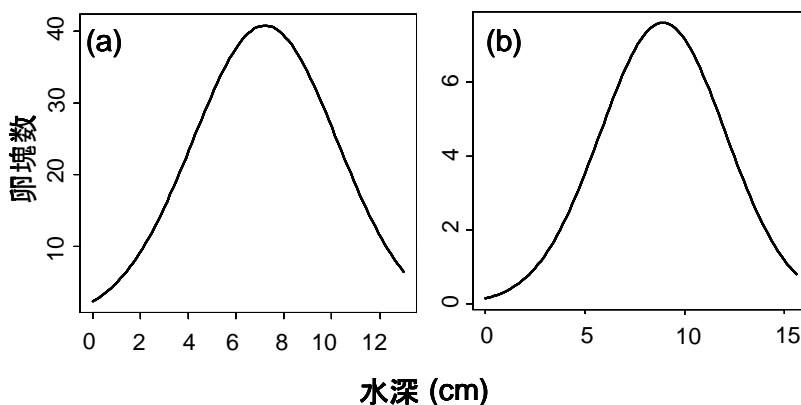


図5 最適スケールの最良モデルによって推定された水深と卵塊数の関係。(a):ヤマアカ (b):モリアオ

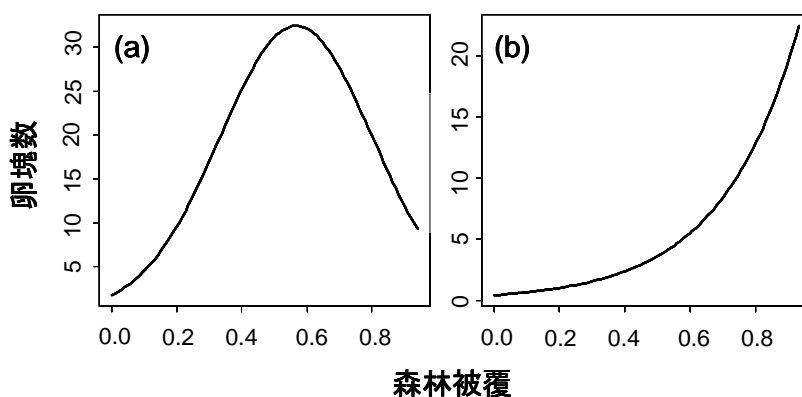


図6 最適スケールの最良モデルによって推定された森林被覆と卵塊数の関係。(a):ヤマアカ、(b):モリアオ

本研究によって、水田を利用するカエル類の卵塊数には水田レベルの要因とともに景観レベルの要因が影響することが明らかになった。森林被覆については、ヤマアカでは6割程度で、モリアオでは9割以上で卵塊数が最大になると推定された。この結果は、ヤマアカで

は森林とそれ以外の環境が混在する景観が、モリアオでは森林が優占する景観が、それぞれ好適な景観構造であると解釈できる。成体の生息環境として、ヤマアカは森林以外も利用するが、樹上性のモリアオはほぼ森林のみを利用する⁷⁾。したがって、森林被覆の影響は生息地の選好性を反映したものと考えられる。適切な空間スケールについてはヤマアカの方がモリアオよりも小さかった。産卵場所から成体が生息する場所までの移動距離は、ヤマアカで500m程度⁸⁾、モリアオで80m程度⁹⁾と推定されている。適切な空間スケールとこれらの距離を比べると、ヤマアカではほぼ一致するが、モリアオでははるかに大きい。他の両生類を対象にした研究でも、既知の移動距

離と森林被覆が影響する空間スケールが一致する例¹⁰⁾と、既知の移動距離よりも大きい空間スケールで森林被覆が影響する例¹¹⁾が報告されている。産卵場所周辺の景観要因は、個体の行動レベルでのプロセスとメタ個体群レベルでのプロセスの双方で影響することが指摘されている¹²⁾。これらのことからヤマアカでは個体の行動レベルでのプロセスで森林被覆が個体数に影響し、モリアオでは個体の行動よりも時空間スケールの大きいプロセスで森林被覆が影響することを反映したと推察される。モリアオについては森林内の池や小さな水溜りなども産卵場所として利用するため⁷⁾、森林内の複数の産卵パッチ間の移動分散を通じたメタ個体群レベルのプロセスが生じることが考えられる。以上の結果は、景観要因が有効な時空間スケールは種ごとに異なることと、空間スケールの大小は種の短絡的な移動距離だけでは説明できないことを示唆する。

局所要因では、水深について両種とも水深7～8cmで卵塊数が最大になると推定された。ヤマアカについては、水深の比較的浅い止水に好んで産卵するとされている⁷⁾。そのため、本種について推定された水深の影響は、産卵に適した水深を反映していると考えられる。一方、モリアオについては水深が中程度で最適と推定された理由は不明である。水路サイズについてはヤマアカでのみ負の影響が認められた。このことから、吸盤のないヤマアカにとって、林に接する水路が水田への移動を妨げる要因になっていることが推測される。

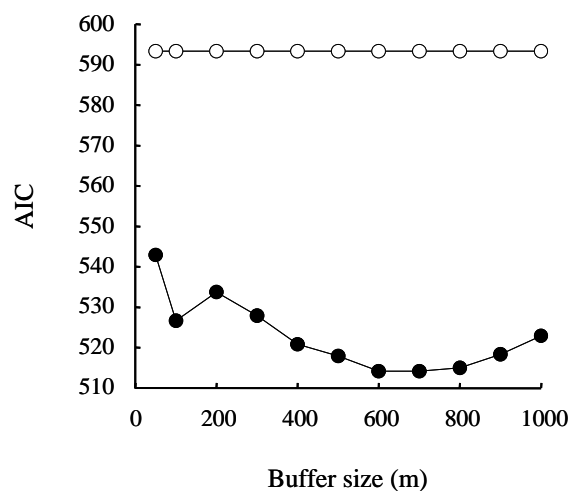


図7 各バッファサイズにおけるイナゴの個体数を説明するモデルのAIC。○:帰無モデル、●:局所・景観要因および空間的自己相関を含むモデル

(2) イナゴの分布を説明するモデル

それぞれのバッファサイズにおいてイナゴの個体数をもっとも効率よく説明したモデルのAICを図6に示し、最良モデルに含まれる説明変数の一覧を表4に示した。AICはバッファサイズによって大きく異なり、600mバッファで景観要因を抽出したモデルがもっともAICが小さく、切片のみの帰無モデルのAICとの差は80近かった(図7)。最良モデルには局所要因

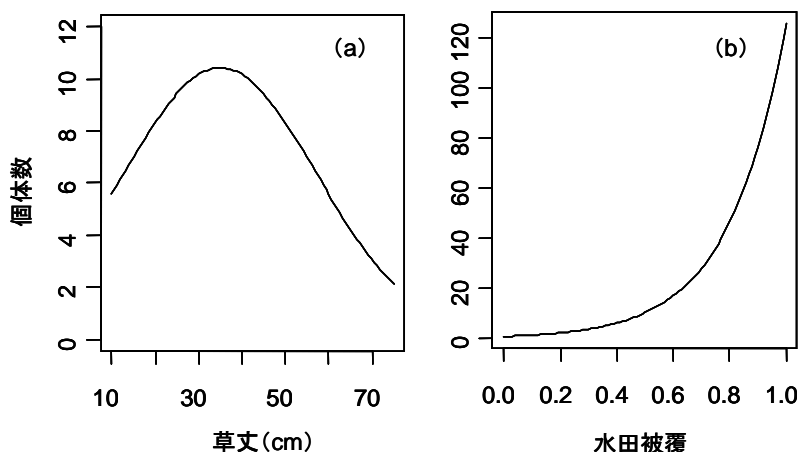


図8 最適スケールの最良モデルによって推定された草丈(a)と水田被覆(b)がイナゴの個体数に与える影響

として草丈の7乗項と2乗項、景観要因では水田被覆が選択された(表5)。これらの環境要因がコバネイナゴの個体数に与える影響を視覚化した結果、畦の草丈については35cm程度で個体数が最大となる一山型を示した(図8)。水田被覆は正の効果を示し(表5)、水田被覆が0.8以上で個体数の増加が著しいことが明らかになった(図8b)。緯度と経度の交互作用項についても、水田地

帯である国仲平野の位置を反映したものと解釈できる。

表5 イナゴの個体数を説明する最良モデルの各変数と標準誤差(SE)

	局所要因									景観要因			空間的自己相関		
	耕作状況			草丈			(草丈) ²			水田被覆			緯度と経度の交互作用		
	係数	SE	係数/SE	係数	SE	係数/SE	係数	SE	係数/SE	係数	SE	係数/SE	係数	SE	係数/SE
イナゴ	0.48	0.28	1.71	0.070	0.03	2.33	-9.61E-04	4.18E-04	-2.30	5.01	0.47	10.66	-234.87	72.6	-3.24

(3) ツチガエルの個体数を決定する要因

ツチガエルの個体数を説明する最適なモデルとしては、すべての局所要因の変数を含んだモデル（フルモデル）が採択され、すべての季節の水深変数がプラスに作用していた。次に各変数間の相対的重要度を評価するため、推定値をSEで割った値を比較したところ、最も値が高かったのは冬の水深であり、次いで面積、隣接密度の順であった（表6）。冬の水深は、係数がプラスであったことから、水深が増加するほど個体数が多い関係性を表わす。冬期の水田の水は浅いと凍結することがあるため、水深が深いことは水田で越冬するツチガエル幼生にとって、生存率を上げる要因となったと考えられた。

表6 ツチガエル個体数を説明する最良モデルの各変数と標準誤差(SE)

AIC	水路数			水深(夏)			水深(秋)			水深(冬)			面積			隣接密度			
	係数	SE	係数/SE	係数	SE	係数/SE	係数	SE	係数/SE	係数	SE	係数/SE	係数	SE	係数/SE	係数	SE	係数/SE	
ツチガエル	810	-0.44	0.14	-3.10	0.09	0.02	3.98	0.05	0.02	2.37	0.19	0.03	7.17	7.27	1.14	6.38	0.02	0.00	5.56
掃無モデル	1024	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

(4) 予測モデルの外挿評価

モデルの外挿可能性を検証するため、2009年3月に小佐渡南西部（以下小佐渡地域）と大佐渡地域について、卵塊数調査を行い、上記モデルをもとに作成した分布図を比較した、その結果、小佐渡地域と大佐渡地域では異なる傾向が見られた（図9）。小佐渡地域では、ばらつきは大きいものの概ね予測卵塊数に対応して観測卵塊数が増加していたが、大佐渡については、予測卵塊数に対して観測卵塊数は少なく、卵塊数の上限が40前後となる頭打ち状態であった。この違いが生じた理由のひとつとしては、カエルにとっ

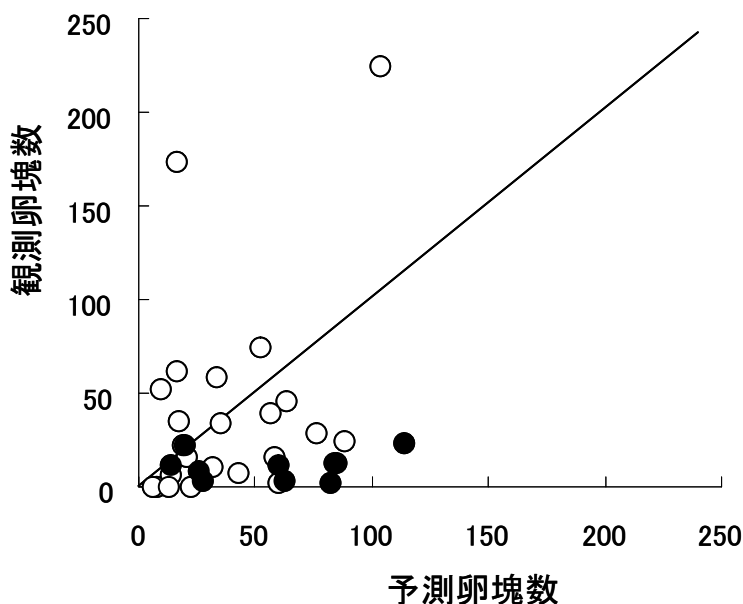


図9 モデルによって予測されたヤマアカカ卵塊数と観測卵塊数の比較
○は小佐渡南西部、●は大佐渡地域から得られたデータを表す。

での最適な産卵場所の集中度が考えられる。小佐渡地区はゆるやかな地形であり水がたまりやすいこと、また、冬期湛水などの環境保全型農業の普及が進むなど、ヤマアカの産卵時期に最適な水辺環境がまとまって創出、存在しており、個体群サイズ地域スケールで底上げされた状況が考えられる。大佐渡でも今後、環境保全型農法の普及がすすみ、産卵に適した局所環境が創出され、拡大していくことで、モデルで予測された潜在的な個体数近づいていくことが予想される。

(5) 餌生物の増加を目的とした水田管理・再生への提言

佐渡島全域におけるヤマアカ、モリアオ、イナゴの分布を推定した結果を図10に示す。カエル類は大佐渡よりも小佐渡に多く、イナゴは国仲平野に多産する傾向が見て取れる。次に佐渡の北半分（主に大佐渡）と南半分（主に小佐渡）について、300mバッファにおける森林被覆の頻度分布（図11）とヤマアカの卵塊数の頻度分布（図12）を算出した。ヤマアカの生息に最適な森林被覆率（50～70%）をもつメッシュの割合は佐渡北半分よりも南半分が大きく、ヤマアカの推定卵塊数の多いメッシュの割合も南半分で明らかに大きいことがわかった。これは小佐渡地域が全体に傾斜が緩やかであり、河川の枝分かれにより複雑な地形を形成していることが原因と考えられる。したがって、小佐渡地域が自然再生の対象地域として重要であることを示している。ヤマアカは加茂湖周辺の平野部や、小佐渡中部の猿八地区周辺、そして小佐渡南部では羽茂地区周辺に最適な生息地が集中していた（図10a）。猿八や羽茂には、谷津田のような環境が広がっており、トキの餌場整備や創出を目的とした自然再生を行う際には、これらの地域を候補地として選定すると高い効果が期待できる。モリアオもヤマアカと同様に猿八・羽茂周辺で卵塊数が多いと予測された（図10b）。このことはヤマアカの生息適地を積極的に保全し、必要に応じて自然再生事業を実施すれば、モリアオの個体数も維持できることを示唆している。

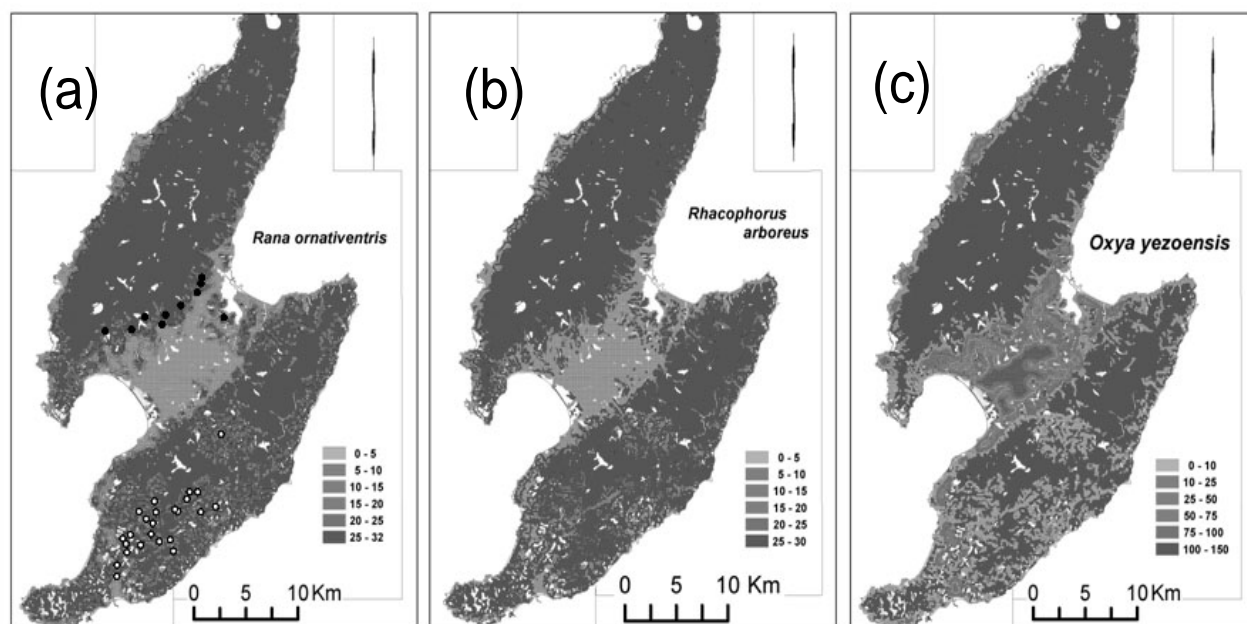


図10 最適スケールのモデルによって推定されたヤマアカ(a)、モリアオ(b)、イナゴ(c)の個体数

(a)の○、●は小佐渡地域、大佐渡地域において、2009年3月に検証用の野外調査を行った調査地点を示す。

佐渡市は2008年度より、野生復帰したトキの水田での餌場の確保と、農業の共生を目指して「朱鷺と暮らす郷づくり認証米制度（以下認証米制度）」をはじめた。この制度では、「佐渡市での栽培」、「栽培者のエコファーマー認定」、「農薬と化学肥料を慣行農法より5割以上減」、「生き物を育む農法」の4つを要件とする。「生き物を育む農法」とは具体的に「水田、水路での江の設置」、「冬期湛水の実施」「魚道等水路の設置」「ビオトープの設置」のいずれかを実施することである。佐渡市ではエコファーマーの認定者数が平成18年の56人から平成20年には1,998人と急増しており、認証米制度の参加により「生き物を育む農法」も増加が見込まれる。そこで、本研究で得られた知見をもとに、カエル類の増加を目的にした水田管理・再生と、これら農法との関連性について考察する。

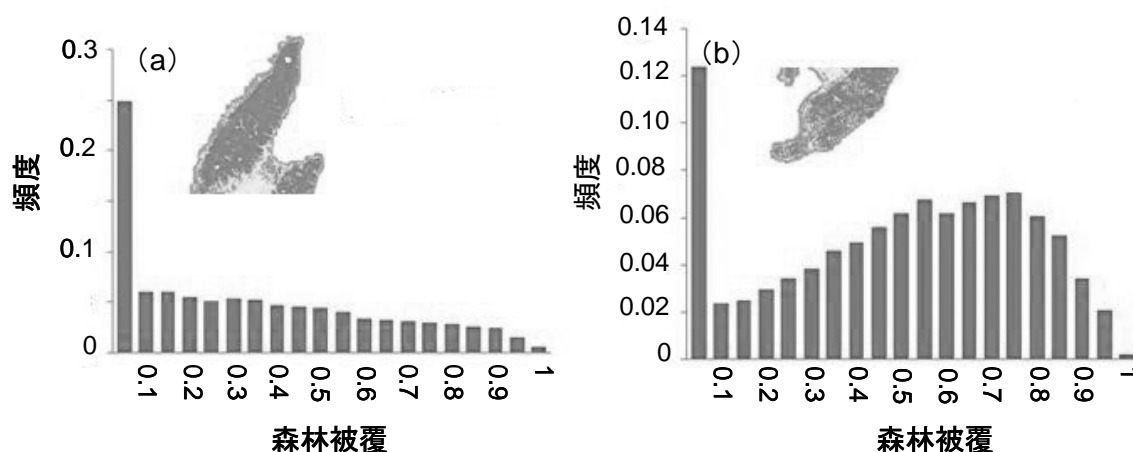


図11 佐渡島の北半分(a)と南半分(b)における森林被覆(300mバッファ)の頻度分布。

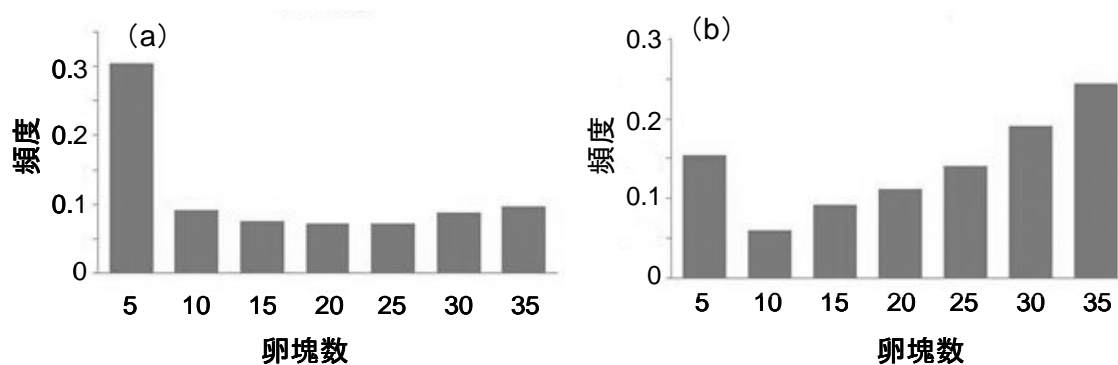


図12 佐渡島の北半分(a)と南半分(b)におけるヤマアカの推定卵塊数の頻度分布。

「生き物を育む農法」による効果はカエル類の種類、農法の種類によって、大きく異なると予測される。「冬期湛水」や「ビオトープの設置」は産卵期を2～3月に迎えるヤマアカにとって、産卵環境を確保するために効果的な農法といえる。一方で「江の設置」は江の水深が20cm程度（佐渡市の規定による）あるため、卵塊数が6～10cm程度の水深で多いヤマアカやモリアオ（図5）にとって、卵塊数増加を目的とした場合には効果が低い可能性がある。しかしながら、「江」の創出は、カエル類の生存率向上に効果が見込める。中干し時期に変態が完了しなかったカエル類（ヤマアカ、モリアオ、ツチガエル）幼生の退避場所、越冬期にはツチガエルの成体・幼生にとって凍結からの回避場所となるためである。常時湛水の効果がある「ビオトープの設置」は水深を管

理することによって、冬期湛水や江と同様の効果が期待できるが、設置・維持管理コストが高く、普及には課題がある。カエル類は種によって生息場所の傾向が異なっており、平野部の水田であれば、ツチガエルの維持・増加を目的に「江の創出」を、森林被覆が密度に関わるヤマアカにとっては、山際や山間部の水田において、「冬期湛水の実施」など、場所に応じて採用する農法を選択することで、餌生物の維持・増加を効果的にすすめることができると考えられる。また、中間的な場所では、複数の農法が混在することで、カエル類の多様性を高められるだろう。現在の認証米制度導入に際し、農業従事者が「生き物を育む農法」のうち、どの農法を選ぶかは、個人の判断に委ねられているが、地域に応じて農法の傾向をもたせる方針をつくることで、より効果的な餌場創出効果が期待できると考えられる。

また、表4の結果から、ヤマアカの最良モデルでは、水路サイズに対して、マイナスの傾向がみられた。その理由として、指に吸盤を持たないヤマアカは、森林との往来時に大型のコンクリート製の水路に落下すると、脱出は困難であり、生存率に大きく関わることが挙げられる。そのため、水路への落下を防止策は有効な手段といえる。例えば、近縁のニホンアカガエルでは、水路に蓋を設置後に産卵数が増加した例¹³⁾が知られており、ヤマアカでも同様の効果が期待される。落下した場合に水路から脱出できるような構造物の設置も考えられるが、高コストのうえに過去に設置した事例では脱出率は低く、また、脱出しても落下した個体の望む方向ではなく、構造物の位置に誘導されることから、蓋の設置が望ましい¹³⁾という。水路についてはツチガエルでも、その数に対してマイナスの傾向がみられた(表6)。過去の研究により、ツチガエルは、土水路で越冬する例が知られるが、調査地水田の水路はすべて三面コンクリートであり、越冬場所として利用できなかったことが挙げられる。三面コンクリート水路の土水路化は、以上のような問題を解決するうえで有効な手段であるが、実現には課題が多く、蓋の設置などの低コストで実現性の高い対策から始め、その効果を検証しながら進めていくことが現実的といえる。こうした水田や水路と森林の連結性の確保は、カエル類だけでなく、過去にトキが餌^{3) 4)}として利用し、現在は個体数が減少しているイモリ(変態後の一時期は森林性)やサワガニの増加にとっても効果的と考えられる。

晩夏から秋にかけて個体数が増加するイナゴは国仲平野に多産し(図10c)、畦の草丈が中程度の環境で個体数は多いことが明らかとなった。害虫・雑草管理との兼ね合いを考慮する必要があるが、特に夏以降は、草刈りの際は強く刈り込まない、あるいは草刈り頻度を抑えることでイナゴの個体数の維持が見込まれる。

以上の結果から、トキの餌生物の増加を考える際には、早春から初夏の餌資源として重要なヤマアカやモリアオは猿八や羽茂周辺の水田地帯を、晩夏から秋にはコバネイナゴが増加する国仲平野を、冬の餌として利用可能なツチガエルは両津や新穂など分布が明らかな地域周辺の水田を再生候補地として選び、前述した局所管理を実施することが効果的であろう。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

近年、景観生態学的な観点から両生類を対象に同様の手法を用いて生息地評価などを行う研究は行われているが、それらの多くは池沼などの定常的な水域での個体数を評価したものにとどまっている¹⁰⁾¹⁴⁾¹⁵⁾。本研究ではカエル類の生活史全体を考慮し、一時的な水域である水田と変態後

の幼体・成体が利用する陸域環境について、局所要因と景観要因の両方を解析に組み入れている点でオリジナリティーが高い。また、農地生態系の生物多様性を保全するためには、景観を考慮する必要性が広く認識されており¹⁾¹⁶⁾、保全対象を特定し、注目すべき景観構造とその有効な空間スケールを把握することが重要とされている¹⁷⁾。本研究では、カエル類の生息地として好適な景観構造だけでなく、景観要因が影響する空間スケールも種ごとに異なることを明らかにした。これは水田生態系におけるカエル類以外の生物の保全を考慮する上でも重要な知見であり、保全生態学上の意義も大きい。

(2) 地球環境政策への貢献

本サブテーマの目的は、放鳥後のトキ個体群の長期的な存続を可能にするために水田生態系をトキの採餌環境として評価し、自然再生計画を立案するために必要な情報を提供することである。本研究によって、早春から初夏にかけてのトキの重要な餌であるカエル類の生息には、産卵期における水田の水位、森林と水田との移動を妨げる水路のサイズなどの水田レベルでの局所要因と、水田の周囲に存在する森林などの景観レベルでの要因が大きく関わっていることが明らかになった。また、晩夏から秋にかけて個体数が増加するイナゴでは、畦の草丈や水田から600m程度の範囲での水田被覆が個体数の決定に強く関与していたことも示された。これらの結果から、トキの餌生物の増加を目指すには、対象地の選定に際して広域スケールでの立地環境を考慮することの重要性が明示された。さらに佐渡全域での個体数推定図を作成したことにより、自然再生事業では従来あまり重視されてこなかった「有効な再生場所の選定」を科学的手続きに基づいて抽出し、その有効性について検証を行った。このことは自然再生事業を行う場合に費用対効果の高い地域を具体的に抽出できた点で重要である。さらに、野生復帰個体群を長期的に持続させるためには、地域社会との恒久的に共存を可能にするための社会的な仕組みを作る必要がある。本研究では、行政が提案する農法について、本研究から得られた科学的な知見に基づいて、季節性や立地条件などを考慮した餌生物の効果的な再生手法を提案した。こうした提案は、人の生活と深く関わりをもつ里山における絶滅危惧種の保全や絶滅種の再導入のモデルケースとなるに違いない。

6. 引用文献

- 1) Tschardtke T., Klein, A.M., Kruess A., Steffan-Dewenter I. & Thies C. (2005) Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity-ecosystem service management. *Ecology Letters* 8: 857-874.
- 2) Lindenmayer D., Hobbs R.J., Montague-Drake R., et al. (2008) A check list for ecological management of landscapes for conservation. *Ecology Letters* 11: 78-91.
- 3) 佐藤春雄 (1978) はばたけ朱鷺. 研成社.
- 4) 宮下 直 (2010) 里山の生物多様性を支えるもの モザイクのような生息地を守るための知恵. In: 日本生態学会 (編) なぜ地球の生きものを守るのか. 文一総合出版.
- 5) 長谷川雅美 (1998) 水田耕作に依存するカエル類群集. In: 江崎保男・田中哲夫 (編) 水辺環境の保全. 朝倉書店

- 6) R Development Core Team (2008) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.
- 7) 前田憲男・松井 正文 (1999) 改訂版 日本産カエル類図鑑 文一総合出版.
- 8) Osawa S. & Katsuno T. (2001) Dispersal of brown frogs *Rana japonica* and *R. ornativentris* in the forests of Tama Hills. *Current Herpetology* 20: 1-10.
- 9) Kusano T. (1998) A radio-tracking of post-breeding dispersal of treefrog, *Rhacophorus arboreus* (Amphibia: Rhacophoridae). *Japanese Journal of Herpetology* 17: 98-106.
- 10) Houlahan J.E. & Findlay C.S. (2003) The effects of adjacent land use on wetland amphibian species richness and community composition. *Canadian Journal of Fish and Aquatic Sciences* 60: 1078-1094.
- 11) Herrman H.L., Babbitt K.J., Baber M.J. & Congalton R.G. (2005) Effects of landscape characteristics on amphibian distribution in a forest-dominated landscape. *Biological Conservation* 123: 139-149.
- 12) Van Buskirk J. (2005) Local and landscape influence on amphibian occurrence and abundance. *Ecology* 86: 1936-1947.
- 13) 林光武・高橋伸拓 (2007) カエル類の水路への落下対策とその効果. In: 水谷正一 (編) 水田生態工学入門. 農山漁村文化協会.
- 14) Gange S.A. & Fahrig L. (2007) Effect of landscape context on anuran communities in breeding ponds in the National Capital Region, *Canada*. *Landscape Ecology* 22: 205-215.
- 15) Prorej D., Micacchion M. & Hetherington T.E. (2004) Core terrestrial habitat for conservation of local populations of salamanders and wood frogs in agricultural landscapes. *Biological Conservation* 120: 399-409.
- 16) Benton T.G., Vickery J.A. & Wilson J.D. (2003) Farmland biodiversity: is habitat heterogeneity the key? *Trends in Ecology and Evolution* 18: 182-188.
- 17) Verhoeven J.T.A., Soons M.B., Janssen R. & Omtzigt N. (2008) An operational landscape unit approach for identifying key landscape connections in wetland restoration. *Journal of Applied Ecology* 45: 1496-1503.

7. 国際共同研究等の状況

なし

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文 (査読あり)>

- 1) 吉尾政信, 加藤倫之, 宮下直 (2009) 水田環境におけるバッタ目昆虫の分布と個体数を決定する環境要因～佐渡島におけるトキの採餌環境の管理にむけて. *応用生態工学* 12: 99-107.

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 宮下直(2010)里山の生物多様性を支えるもの モザイクのような生息地を守るための知恵.
In:日本生態学会（編）なぜ地球の生きものを守るのか. 文一総合出版

(2) 口頭発表（学会）

- 1) 加藤倫之, 吉尾政信, 宮下直（2008）水田環境と周辺景観構造が両生類の卵・幼生・幼体に与える影響. 日本生態学会第55回大会
- 2) 吉尾政信, 加藤倫之, 田中亘, 森田弘樹, 齋藤亮司, 宮山尚也, 生玉修一, 三谷泰浩, 河口洋一, 宮下直（2009）水田におけるトキの餌生物の量を定める局所要因と景観要因. 日本生態学会第56回大会
- 3) 小林頼太, 吉尾政信, 加藤倫之, 宮下直（2010）トキの餌環境としての水田の評価：佐渡島の水田におけるカエル類の密度決定要因. 日本生態学会第57回大会

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

- 1) 「トキの島再生研究プロジェクト 学術研究発表会」（2008年11月23日、新潟県佐渡市トキ交流会館）
- 2) 「トキの野生復帰を実現する自然再生シナリオをつくる」（2010年3月19日、東京大学、日本生態学会大会）
- 3) 「野生復帰セミナー 招待講演：Doug Armstrong (IUCN/Massey Univ.)」（2010年3月21日、新潟県佐渡市トキ交流会館）

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし

(6) その他

- 1) 日本生態学会ポスター賞・優秀賞：加藤倫之・吉尾政信・宮下直（2008）水田環境と周辺景観構造が両生類の卵・幼生・幼体に与える影響. 日本生態学会第55回大会
- 2) 加藤倫之（2009）水田環境とその周辺景観がカエル類の個体数に与える影響. 東京大学大学院 農学生命科学研究科 修士論文.

F-072 トキの野生復帰のための持続可能な自然再生計画の立案とその社会的手続き

(3) エサ場創出維持技術の確立

新潟大学大学院 自然科学研究科 准教授 関島 恒夫

<研究協力者>

新潟大学大学院 自然科学研究科 博士研究員 大石 麻美
博士研究員 武山 智博

平成19～21年度 合計予算額 35,982千円
(うち、平成21年度予算額 13,500千円)

※予算額は、間接経費を含む。

[要旨] トキの主な採餌場所は水田や河川等の湿性環境であるが、新潟県佐渡島に見られる湿性環境のうち、その約8割は水田が占める。そのため、圃場整備や耕作放棄等が原因で、水生生物の生息数や生物多様性が低下した水田をいかに再生させるかが、トキの生息環境再生のポイントとなる。本サブテーマの目的は、水田の生物現存量や生物多様性を高め、かつトキの好適な採餌環境として再生・維持するため、生態学的評価に基づく水田の管理手法を確立し、具体的な自然再生計画を立案することである。平成19年度は、水田生態系に対する通年湛水の効果に着目し、水田を対象とする場合には「江」の新規創出が、休耕田を対象とする場合には「湛水」という処理が採餌環境整備において有効であると位置づけ、それらを創出した際の水田におけるトキの主要な餌生物を含む生物の現存量および種多様性の観点から、通年湛水の効果を立地環境とともに評価した。平成20年度は、これらの経年的な評価に加え、新規に水田生態系における生物多様性の規定要因を明らかにするため、食物網構造の評価について安定同位体比分析を実施した。その結果、トキの餌生物を含めた水生生物群集の生物現存量および種多様性に対する通年湛水環境の効果は、創出の初年と同様に2年目でも認められ、持続的な効果が示された。「江」は、小面積でありながら湛水休耕田と同様の生物現存量増加の効果をもつことから、採餌環境の創出としてより有効な方法であると結論づけられた。水田の食物網は、水中の懸濁態有機物（植物プランクトンを含む）と表泥上に堆積した有機物が一次生産者であり、魚類が最高次の消費者であるという構造であった。この食物網の構造は立地環境に依存せず、江と湛水休耕田の両方の湛水方法で共通して見られた。一方、一部の水生昆虫類は、上述の一次生産者と基点とする水田内の食物網に属していなかった。これらの結果から、水田の水生生物群集の多様性は、水田内の食物網に属する生物と、水田外の食物網から水田内へ移動してきた生物の両方で構成することが示唆された。

[キーワード] 水田生態系、生物種多様性、生物現存量、安定同位体比分析、通年湛水

1. はじめに

近年の土地利用の人為的な改変による生物多様性の消失は、生態系サービスの供給の減少を引き起こしている^{1) 2)}。農地生態系は、生物多様性保全のホットスポットの一つとして、また食料生産のみならず様々な生態系サービスを提供する生態系の一つとして、重要性が指摘されている³⁾。しかしながら、機械化された近代的な集約農業の導入によって、単一作物の栽培が大面積で行われるようになり、農地環境が均一化し、生物多様性が減少したといわれる⁵⁾。さらに、殺虫剤や除草剤などが広域的に農地に散布されるようになったことも追い打ちとなって、農地を生息環境とする生物は大きな打撃を受け、生息数や種多様性は低下の一途をたどってきている^{6) 7)}。わが国では特に、里地や里山における農業や林業を中心とした人為的な土地利用が、水田、畑地、草地、林、水路、およびため池などがモザイク状に存在する複雑な環境を作り出し、様々なハビタットを利用する生物の生息地を提供してきた^{8) 9)}。このような状況の中、里地・里山を再び多種多様な生物の生息地として再生するため、農地を中心としたこれらの二次的自然の復元に関する取り組みが各地で進められている。

トキ *Nipponia nippon* は、かつて日本列島を含む東アジアに広く分布していたが、今世紀に入ってから、人間活動による生息環境の悪化などが原因で生息数が減少し、国内では野生個体群は絶滅に至った。現在では、トキは中国のごく一部の地域にのみ生息する絶滅危惧種となっている¹⁰⁾。環境省は1999年以降、中国から提供を受けたトキの飼育下での増殖と、新潟県佐渡島への再導入計画を進めており¹¹⁾、2008年秋に10羽の試験的放鳥を、さらに2009年秋にも20羽の放鳥を実施し、2015年頃を目標に60羽の定着を目指している。

希少種や絶滅種の野生生物の再導入にあたっては、導入種的生活史などの基礎的な生態情報の収集、個体数の減少や絶滅原因に関する分析、必要数の再導入個体の確保、導入個体群の遺伝的多様性の管理、導入予定地の生息環境の評価、生息環境の創出・再整備と持続可能な管理、自己再生産が可能な個体群樹立のための個体数変動予測とモニタリング、採餌や繁殖などの行動観察、在来生態系へのインパクト予測と事後評価、天敵の制御といった、複合的なアプローチが必要となる^{12) 13) 14)}。特に採餌環境の再生・復元・維持は、個体群定着の成否の鍵となる重要な要因である¹⁴⁾。中国での観察例によると、トキは採餌環境として水深の浅い水辺や草丈の低い草地を利用し、魚類（ドジョウ、タウナギ）、両生類（カエル、オタマジャクシ）、は虫類（ヘビ）、巻き貝、カニや昆虫を含む節足動物など、幅広い動物をエサとして利用している¹⁵⁾。佐渡島で放鳥されたトキは、水田内や水田周辺の草地（畦）を主要な採餌場所として利用し、ドジョウ、カエル、ミミズなどを捕食していることが報告されている（2008年度地球環境総合研究推進費報告書 F-72）。従って、水田やその周辺環境を重点的に再生・維持して行くことが、トキの好適な採餌環境の整備にとって重要だと考えられる。しかしながら、現在の佐渡における水田やそれを取り巻く環境は、圃場整備事業や河川改修事業などが原因で、トキのエサとなり得る生物の現存量が著しく減少しているのが実情である。

2. 研究目的

佐渡島でのトキの放鳥に先立ち、新潟県と佐渡市は、トキの採餌環境復元を目指して営農水田の一部に通年湛水となる深み（以後、「江（え）」とする）の創出、および放棄水田の通年湛水化（以後、湛水休耕田とする）を実施してきた。しかし、その規模は局所的であり、創出環境が

トキにとって好適な採餌環境となり得るのか、また生物多様性の高い水田生態系が復元できるのか、といった生態学的視点に基づく有効性の検証は従来行われてこなかった。本サブテーマでは、生物多様性や生物現存量が低下した水田を、トキの好適な採餌環境として再生・維持するための管理手法を生態学的な評価に基づいて確立し、自然再生計画の立案に資することを目的とする。これまで、われわれのグループが佐渡島で実施してきた水田の生物多様性および生物現存量に与える水田管理手法の影響評価によれば、江は年間を通じて、水田よりも多くの生物（魚類、水生昆虫、貝類など）を産生することが明らかとなっており、これは江が通年湛水された状態にあることに起因すると考えられた。そこで、本研究では通年湛水の効果に着目し、水田を対象とした場合には「江」の新規創出が、休耕田を対象とした場合には湛水という処理が採餌環境整備の上でそれぞれ有効であると考え、それらを新たに創出したときの水田生態系に与える影響を処理水田と未処理水田の生物現存量と種数を比較することにより定量的に評価した。さらに、出現した水生生物群集における種間相互作用の一つである捕食-被食関係、あるいは一次生産者から高次消費者までのエネルギーフローを示す食物網構造に着目し、安定同位体比分析により食物網構造を評価した。最後に、安定同位体比分析により明らかとなった水田の食物網構造から、水田生態系を構成する種多様性および生物量の動態を明らかにする。

3. 研究方法

(1) 調査地

本サブテーマの調査は、佐渡島の小佐渡東部に位置する新穂地区の水田と休耕田において実施された。なお、本調査地は、2008年および2009年の9月に、トキの試験放鳥が行われた地域に該当する。調査対象とした水田の選定に先立ち、景観スケールとしての水田の立地環境の違いを考慮するために、水田の重心から半径100m以内の森林面積割合と水田から森林までの距離に基づいて、里山（面積：>30%、水田は森林と接する）および平場（面積：<10%、水田は森林と接しない）の2つの立地環境を区分した。その上で、江を創出した水田とその対照水田（江のない水田）が隣接する調査地を、それぞれの立地環境で3ヶ所ずつ設置した。休耕田に関しても同様に、常時湛水処理した休耕田と無処理の（湛水されない）休耕田が隣接するように、里山に4ヶ所、平場に3ヶ所ずつ調査地を設けた。

(2) 調査期間

各水田と江における生物現存量と出現種数の定量的調査は、2007年8月～2008年2月に毎月実施した。2008年の調査は、生物現存量および種数の調査と安定同位体分析用のサンプリングを同時並行して実施したため、サンプリング頻度を減らし、水田環境が著しく変化する農事暦に対応させて、4月（田植え前）、6月（田植え後）、9月（稲刈り直前）、および12月（稲刈り後）に行った。

(3) 生物量と種数の定量調査

各水田と江における水生生物の生物量と種数の定量調査には、コドラート法を用いた。一枚の水田または一つの江あたりに3ヶ所のコドラート（90cm×90cm）を設け、金魚網（目合い約1mm）を用いてコドラート内に出現した全ての魚類、両生類、昆虫類（水生・陸生）、貝類等の生物を

採集した。また、土中の動物量を評価するため、コドラート（20cm×30cm）を併設し、深さ5cmまでの土中に含まれる動物をソーティングして捕獲した。現地で同定可能な動物（魚類、両生類、大型の昆虫類など）については、種名、全長(mm)、および湿重量(0.1g)を記録した後、捕獲場所において放逐した。同定可能な動物の一部は冷凍して研究室に持ち帰り、60℃で24時間以上乾燥した後に乾燥重量(mg)を測定し、湿重量と乾重量の関係式を求めた。現地での同定が困難な動物は、70%エタノールで固定後、研究室に持ち帰り同定し、種名、全長(mm)、および湿重量(0.1g)を記録した。それらの一部は、60℃で24時間以上乾燥した後に乾燥重量(mg)を測定し、湿重量と乾重量の関係式を求めた。上述した動物量は、いずれも1m²あたりの乾燥重量に換算して評価した。動物プランクトンは、一枚の水田または一つの江あたり3ヶ所を任意に選び、10Lの水をプランクトンネット（目合い0.10mm）でろ過して採集した。動物プランクトンは、2~3%のホルマリンで固定した後、研究室に持ち帰って検鏡し、目レベル（ケンミジンコ目、ミジンコ目、プライマ目）まで同定した上で、1Lあたりの個体数を算出した。植物プランクトン量は、クロロフィルa量を定量して評価した。クロロフィルa量を測定するため、動物プランクトン採集のためにろ過した水のうち、250mLをサンプルビンに移して持ち帰り、GF/Cガラス繊維濾紙（Whatman, 25mm）上に吸引ろ過した。ろ過したガラス濾紙は、冷凍して研究室に持ち帰り、ハサミで細片にした後で10mLの90%アセトン溶液を加え、暗冷室（4℃）で12時間静沈してクロロフィルを抽出した。その後、遠心分離（3000rpm, 15分）して上澄み液を抽出し、吸光度計を用いて、630nm、645nm、663nm、および750nmで吸光度を測定し、1Lあたりのクロロフィルa量を算出した。

（4）環境変数の測定

水田や江における生物現存量と出現種数に影響する環境要因を検討するため、局所環境要因として、生物量と種数の定量調査と併せて、一枚の水田または一つの江あたり3ヶ所において、水位、水温、表泥温、溶存酸素量(DO)、水素イオン濃度(pH)、電気伝導度、および底質の酸化還元電位(ORP)を測定した。また、設置したコドラート（90cm×90cm）内の植物被度(%)と草丈(5ヶ所)、および、植物量とリター量（いずれも20cm×30cm内）を測定した。水中の栄養分である全窒素量と全リン量を計測するために、動物プランクトン採集のためにろ過した水のうち、250mLをサンプルビンに移して持ち帰り、全窒素量と全リン量(mg/L)をそれぞれ、アルカリペルオキシニトロ硫酸カリウム分解法と、ペルオキシニトロ硫酸カリウム法（モリブデン青還元法）を用いて、吸光度計による吸光度の測定により算出した。水田の周辺の景観環境要因は、航空写真から森林面積割合（対象水田の重心より半径100m内）、水田が森林と接する長さ(m)、および水田から溜め池までの最短距離(m)を、水田ごとに地理情報システム（GIS、ArcInfo9.3）を用いて算出した。

（5）安定同位体比分析による食物網構造の解析

水田生態系の生物多様性を規定している要因を明らかにするため、生物現存量と種数の調査水田を対象に、水生生物群集の食物網構造を解析した。従来、食物網構造の分析には、消化管内の餌生物を同定する方法が多く用いられてきたが、本研究では食物網構造の解析に、炭素および窒素の安定同位体比分析を用いた。この方法によって、一次生産者から高次消費者までをつなぐ食物網構造をC-Nマップ上で検討できる（図1）。安定同位体比分析用の試料は、生物現存量および種数調査で得られたサンプルの一部を用いた。加えて、一次生産者の候補として、水中の植物プ

ランクトンを含む懸濁態有機物 (particulate organic matter: POMと略す)、表泥上に堆積した有機物、泥中の底生生物 (イトミミズ類・ユスリカ類)、藻類、リター、優占している草本を、定量調査の際に別途採集した。POMは、プランクトンネット (目合い0.10mm) でろ過した水を、GF/Fガラス繊維濾紙 (Whatman, 47mm) 上に吸引ろ過した。ろ過の際には炭酸塩除去のため、0.5規定の塩酸で処理した。ろ過後のガラス濾紙は冷凍し、分析まで保管した。底生生物は、アクリルパイプ (内径80mm) を泥中に差し込むことで、表面から深さ50mm までの泥を円柱形に採集した後、実験室でソーティングしてイトミミズ類・ユスリカ類を拾い出した。安定同位体比分析用の試料は、60°Cで24時間以上乾燥後に粉碎し、動物についてはメタノールとクロロホルム (1:2) 混合溶液による脱脂処理を、藻類、草本およびリターについては、0.5規定の塩酸水溶液による炭酸塩除去処理を施した後、再び乾燥させたものを用いた。分析に先立ち、動物では1mg程度、植物では2mg程度を秤量し、スズ製のコンテナに包んだ。POMは、60°Cで24時間以上乾燥した後、ろ過物をガラス濾紙ごと薄くはぎ取って、全量をスズ製コンテナに包んだ。安定同位体比分析には、元素分析計 (EA1108, Fisons, Italy) を接続した質量分析計 (Conflo II, delta S, Finnigan MAT, Germany) を用いた。炭素および窒素の安定同位体比は δ 値 (‰) として以下の式で求めた。

$$\delta X = [(R_{\text{サンプル}} / R_{\text{標準物質}}) - 1] \times 1000$$

ここで、Xは ^{13}C もしくは ^{15}N 、Rは $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ もしくは $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ を表し、炭素および窒素の標準物質はそれぞれ、Peedee Belemnite limestone (PDB)と大気中の窒素とした。水生生物および一次生産物の候補それぞれの炭素および窒素安定同位体比の値を2軸上にプロットし、各水田 (江) における食物網構造を検討した。安定同位体比分析は、2008・2009年度の京大大学生態学研究センターの共同利用・共同研究事業 (安定同位体分析システム) の支援を受けて実施した。

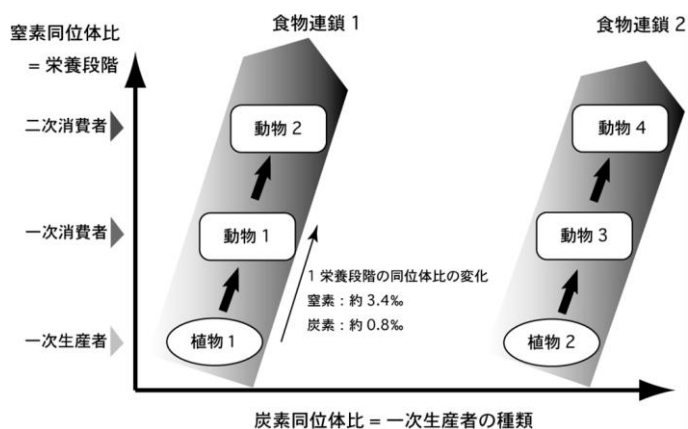


図1. 炭素および窒素安定同位体比分析による食物網構造のC-Nマップ概念図.

(6) 統計解析

立地環境と湛水処理の違いによる各分類群の生物現存量と種数の比較には、一般線形混合モデル (GLMM, JMP ver. 8.0, SAS) を適用した。生物現存量には、実測もしくは湿重量と乾重量の関係式から換算した乾燥重量を用いた。また、主要な水田生物種の環境選好性は、正準対応分析 (CANOCO 4.5¹⁶⁾) を用いて解析した。なお、正準対応分析に用いた環境要因は、水田周辺の景観因子として、森林面積割合、水田が森林と接する長さ、および水田から溜め池までの最短距離の3変数を、水田内の局所因子として、水位、水温、表泥温、溶存酸素量 (DO)、水素イオン濃度 (pH)、電気伝導度、底質の酸化還元電位 (ORP)、水田の湛水割合 (5段階評価)、植物被度 (5

段階評価)、植物の高さ (cm)、植物量(乾重量 g/0.06m²)、リター量(乾重量 g/0.06m²)、全窒素量および全リン量 (mg/L)、植物プランクトン量 (Chl. a mg/L)、および動物プランクトン量 (個体数/L)、捕食者としての魚類量 (湿重量/m²) の16変数を用いた。

4. 結果・考察

はじめに、立地環境が異なる水田における通年湛水の処理が、水田の生物現存量に与える効果について検討し、トキの採餌環境の創出と維持にとって有効な管理方法を述べる。次に、水田生態系の生物多様性に対する通年湛水の有効性と立地環境の特性について、比較的多くの出現種が認められた水生昆虫類を指標に検討する。続いて、安定同位体比分析による食物網構造の評価から、水田生態系の構造および、水田生態系を構成する生物群集の多様性の決定機構について検討する。最後に、安定同位体比分析により明らかとなった水田の食物網構造に基づき、水田生態系を構成する水生生物の種多様性および生物量の季節的動態を明らかにする。

(1) 水田生態系の生物現存量および種数に対する通年湛水環境創出の効果

里山と平場における江、湛水休耕田、および水田の生物現存量の推移を図2に示した。湛水環境の創出により、江および湛水休耕田における魚類、両生類、カメムシ目、コウチュウ目、トンボ目、およびトビケラ目幼虫などの水生生物の現存量は、江のない水田や休耕田に比べ、創出1年目より多い傾向がみられ、それは調査を実施した2年間にわたり継続した。また、江を創出した水田の水生生物現存量は、江のない対照水田との間に差が認められず、水田が湛水される6月にのみ僅かに増加が見られた。里山と平場における生物量の反応は分類群ごとに異なっており、コウチュウ目では里山と平場の両環境において増加した一方 (図2D)、トンボ目幼虫においては里山でのみ増加が見られた (図2E)。これらの結果より、江や湛水休耕田といった通年湛水環境の創出は、立地環境の影響を受けるものの、水生生物の現存量を増加させる効果があると考えられた。一方、陸生昆虫 (バッタ目) と土壌動物 (ミミズ) の現存量は、通年湛水休耕田よりも、その対照区である非湛水休耕田で多かった (GLMM, e. g., 図2G, 休耕田・平場 6, 9月; $P < 0.001$) (図2G, 図2H)。休耕田を草地として管理することによって、陸生生物の現存量増加が見込まれることを示唆している。

次に、江および湛水休耕田の創出が出現種数に与える効果について、他の分類群に比べて出現種数が多い水生昆虫綱 (カメムシ目、コウチュウ目、トンボ目幼虫) に対象を絞って検討した (図3)。通年湛水環境である江における水生の昆虫綱の種数は、対照水田および江創出水田に比べて年間を通じて多い傾向が示されたが、水田が湛水環境となる春～夏においては、水田における出現種数も増加し、差が見られなかった。同様に通年湛水環境である湛水休耕田における水生の昆虫綱の種数は、休耕田に比べて年間を通じて多い傾向が示された。また、それぞれの立地環境における出現種数は分類群ごとに異なっており、コウチュウ目は平場の休耕田で多かった一方、トンボ目幼虫は里山の水田と休耕田で多かった (GLMM, $P < 0.05$) (図4)。これら2つの目において、立地環境ごとの出現の違いをもたらす要因を明らかにするために、出現数がピークであった2008年6月について、環境要因傾度と種の分布との対応関係を正準対応分析により検討した (図5)。その結果、コウチュウ目のほとんどの種が、立地環境よりも水中の栄養分や動物プランクトンといった水田内の局所的な要因に依存する一方、トンボ目幼虫では、環境要因に影響をほとんど受

けない種と、森林に関する景観要因への依存性が高い種の2グループに分けられることが判明した。これは、トンボ目成虫による水田内もしくは水田周辺環境に対する環境選択性の種間差に起因すると考えられた。里山においてトンボ目幼虫の現存量が多かった理由は、水田周辺環境への依存度が比較的低い種に加え、林縁の水辺を好む種の両方が出現したことによると考えられた。

以上のように、水田の立地環境の違いを考慮に入れた通年湛水環境の創出実験から、通年湛水は水生生物の生息場所を確保する有効な方法であることが実証されたとともに、水田生態系の生物量と種多様性を高めるには、水田内の湛水の管理とともに水田周辺の景観要因を視野に入れて管理する必要があることが示された。

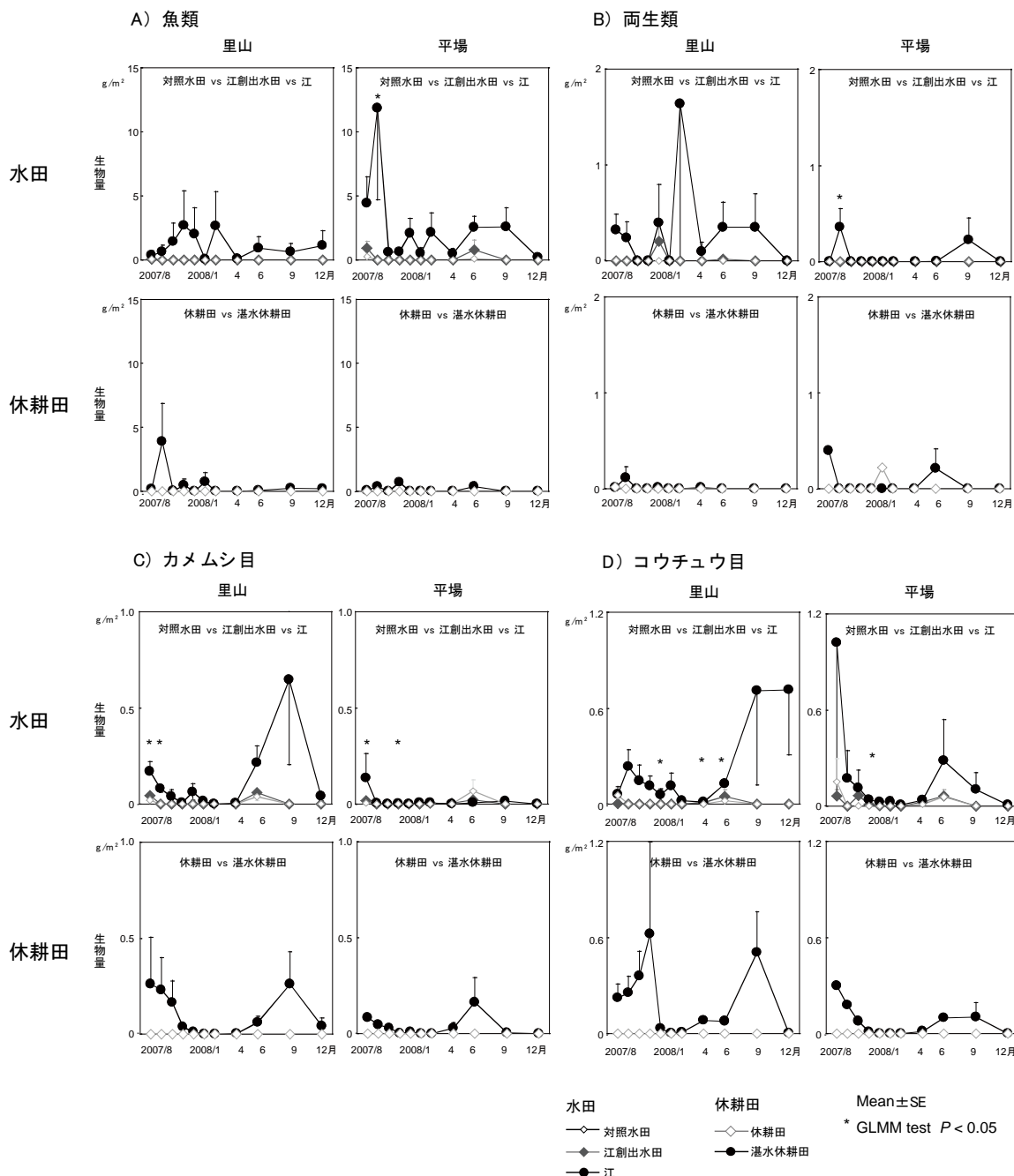


図2. 通年湛水環境の創出方法と立地環境の違いによる生物現存量の比較. 各値は平均値 (乾重量 g/m²), 誤差棒は標準誤差を示す.

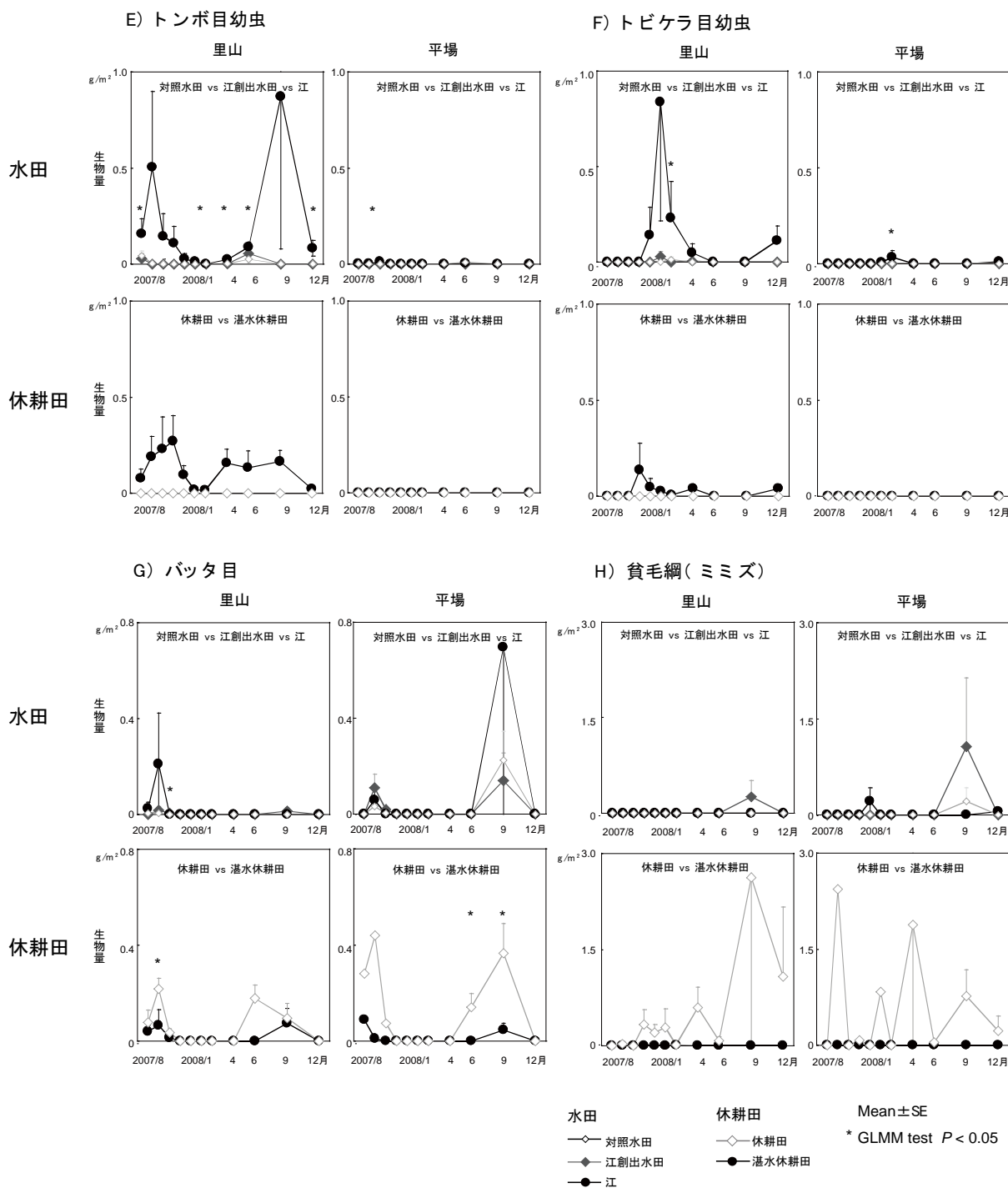


図2 (つづき) . 通年湛水環境の創出方法と立地環境の違いによる生物現存量の比較. 各値は平均値 (乾重量g/m²) , 誤差棒は標準誤差を示す.

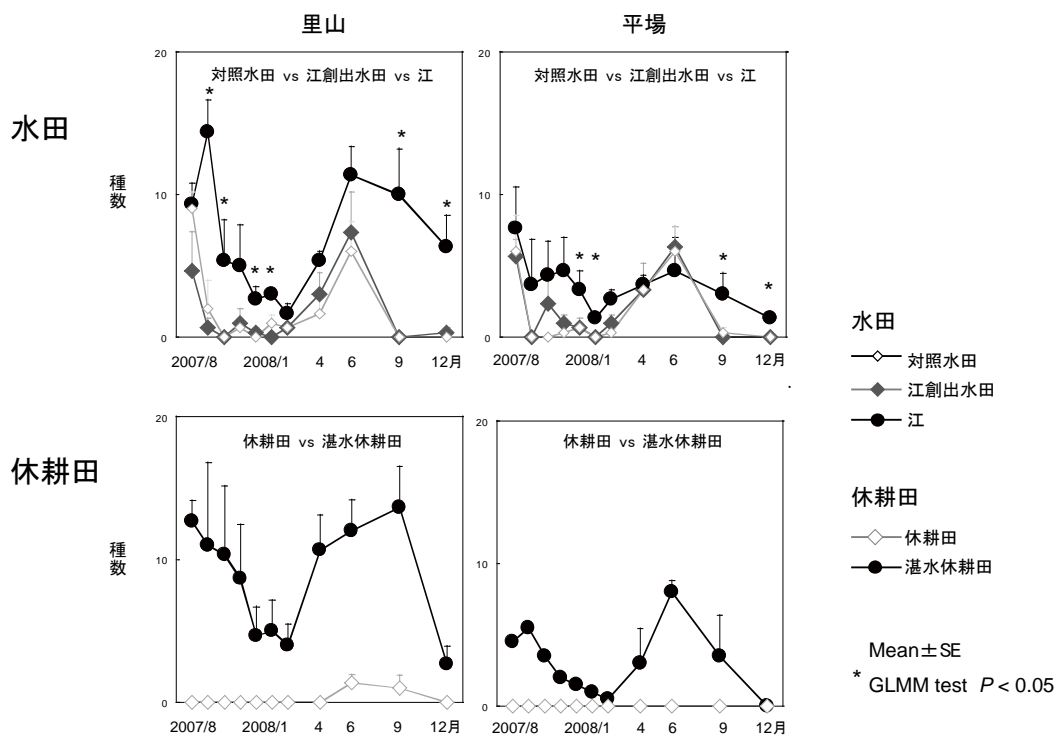


図3. 通年湛水環境の創出方法と立地環境の違いによる水生の昆虫綱(カメムシ目, コウチュウ目, トンボ目幼虫)における出現種数の比較. 各値は平均値(種数), 誤差棒は標準誤差を示す.

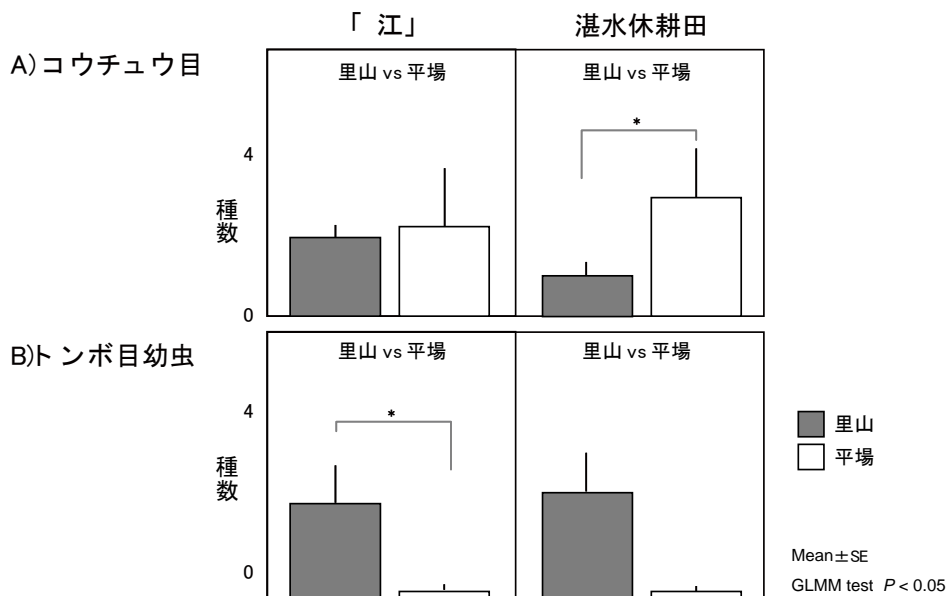


図4. 通年湛水環境の創出方法と立地環境の違いによる出現種数の比較(2008年6月). 各値は平均値, 誤差棒は標準誤差を示す.

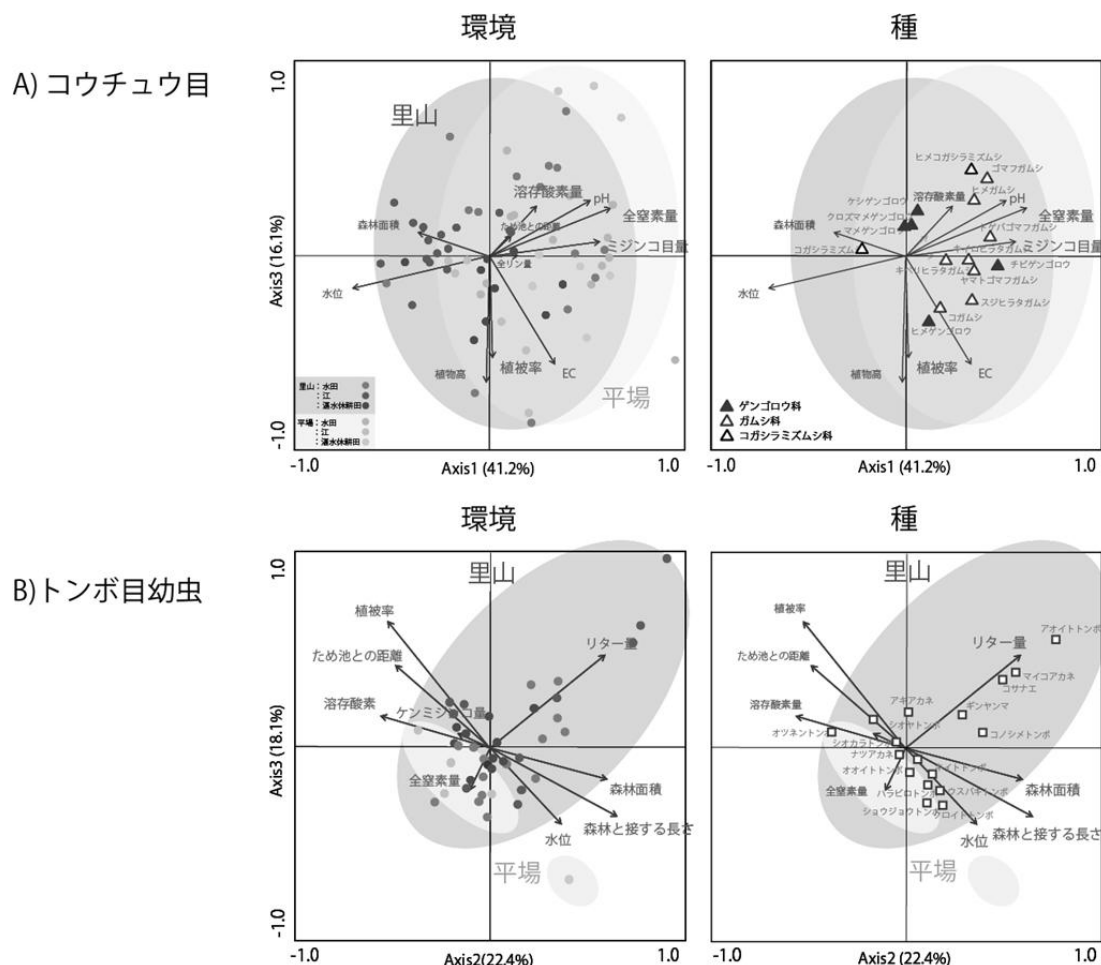


図5. 正準対応分析で得られた環境変数と調査水田環境および種との関係（2008年6月）.

(2) 水田生態系の食物網構造

里山および平場環境における水田、江、および湛水休耕田それぞれの水田生態系の構造が、農事暦および季節的变化に伴いどのような動態を示したかを評価するために、2008年に実施した4回の調査から安定同位体比分析に基づく食物網構造を検討した。

はじめに、里山の水田の食物網構造の季節的推移を図6に示した。里山水田の3月と6月の食物網構造は、POMと表泥に堆積した有機物が一次生産者（物）であり、ドジョウが最高次の消費者という構造であった。イネやその他の草本の葉は、水生生物群集の一次生産者に該当しないと考えられた。3月のヒメゲンゴロウの窒素同位体比はドジョウと同程度に高く、高次消費者であると推測された。また、3月では、コガシラミズムシやヤマトゴマフガムシのような一部のコウチュウ目は、水田内のPOMや堆積物でない一次生産物を基点とする食物網に属していると考えられた。一次生産者と最高次消費者の間の窒素同位体比値の差、すなわち食物連鎖長の値は、3月は4.85、6月は5.55であった。春から夏にかけての水田では、窒素同位体比の値が比較的低い（一次生産者の値に近い）、すなわち栄養段階の低い生物種群であるコウチュウ目やカメムシ目が増加することにより、種多様性が増加していることが明らかになった。稲刈り作業のため、水田から水が抜かれた後の9月と12月には水生生物は採集されず、3月や6月のようなPOMと表泥に堆積した有機物を基点とする食物網は形成されなかった。

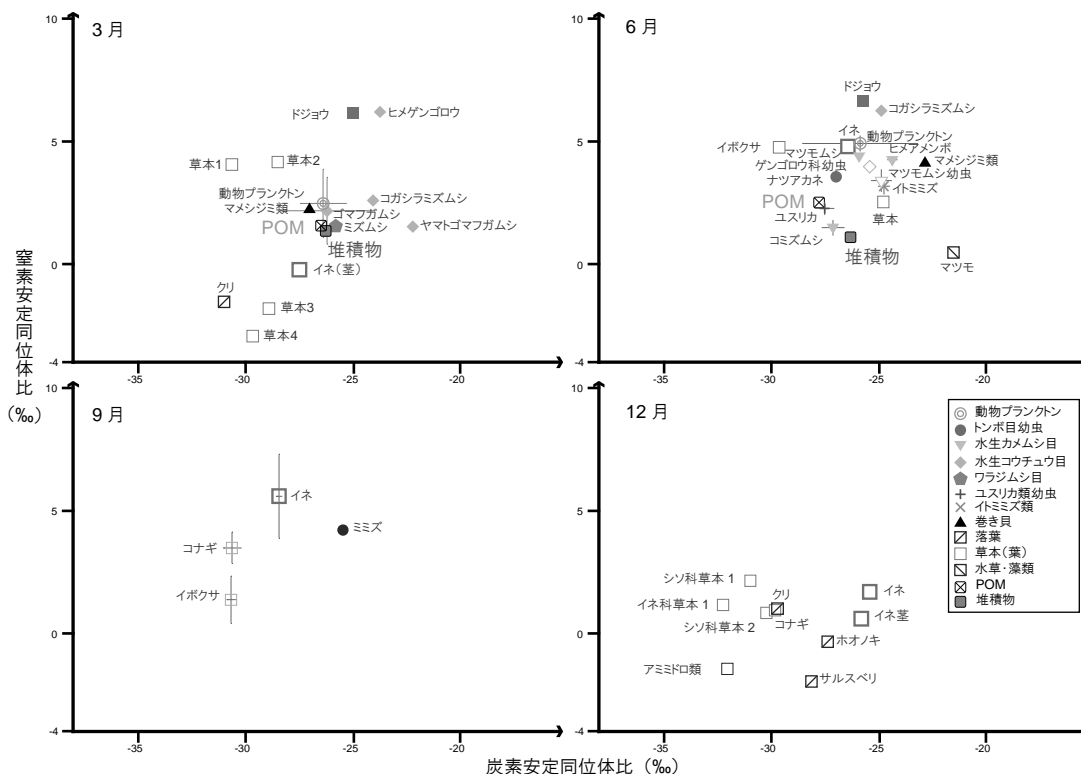


図6. 安定同位体比分析による里山の水田の食物網構造. POMは水中の懸濁態有機物（植物プランクトンを含む）. 各値は平均値（‰），誤差棒は標準偏差を示す.

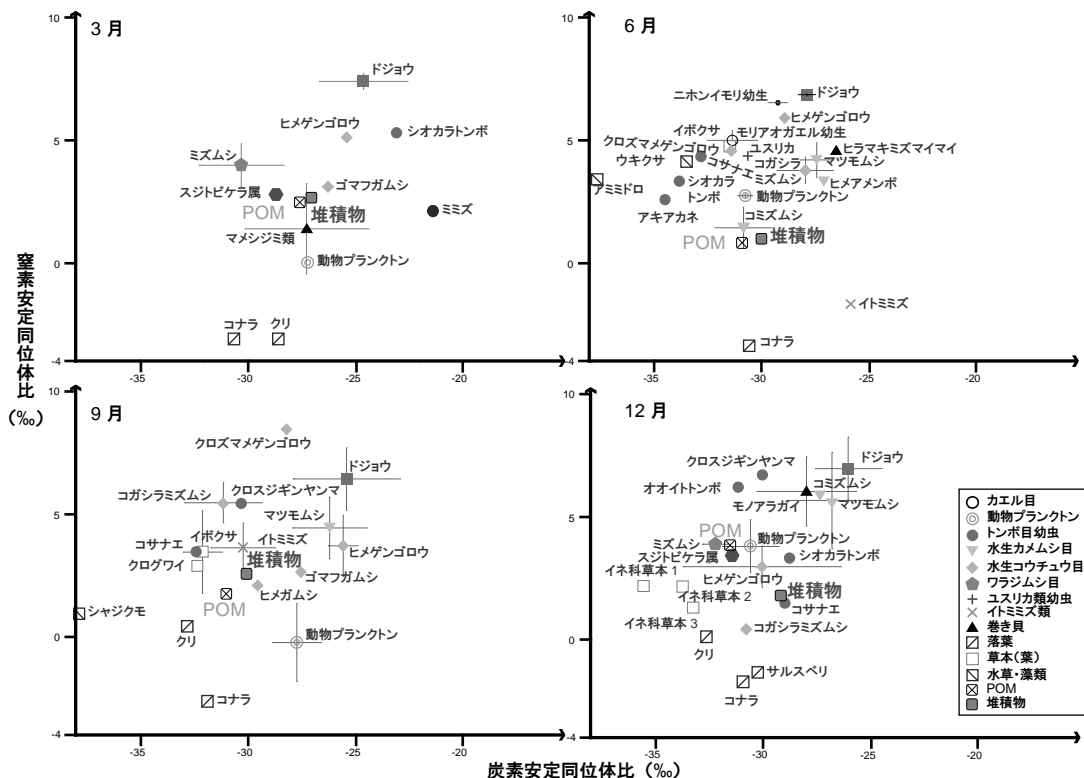


図7. 安定同位体比分析による里山の江の食物網構造. POMは水中の懸濁態有機物（植物プランクトンを含む）. 各値は平均値（‰），誤差棒は標準偏差を示す.

次に、里山の江の食物網構造の季節的推移を図7に示した。里山の江の基本的な食物網構造は、水田と同様、POMと表泥に堆積した有機物が一次生産者（物）であり、ドジョウが最も高次の消費者であった。水田とは異なり、継続的な湛水状態にある江では、同様の食物網構造が通年維持されていた。里山の江の食物連鎖長は、3月が5.13、6月が5.90、9月が6.64、12月が5.13であり、年間を通じて比較的長い傾向が見られた。一部のトンボ幼虫（ヤゴ）やコウチュウ目では、POMや堆積物を基点とする水田内の食物網に比較して、炭素同位体比の値が低く、これは水田内とは異なる一次生産者を基点とする食物網に属していたものが、水田内に移入してきたか、もしくは、POMまたは堆積物ではない一次生産者を基点とする食物網に属している可能性がある。すると考えられた。江の種多様性は、さまざまな栄養段階の生物種群が増加することだけでなく、水田外の食物網に属する生物が増加する事によって決定されることが示唆された。

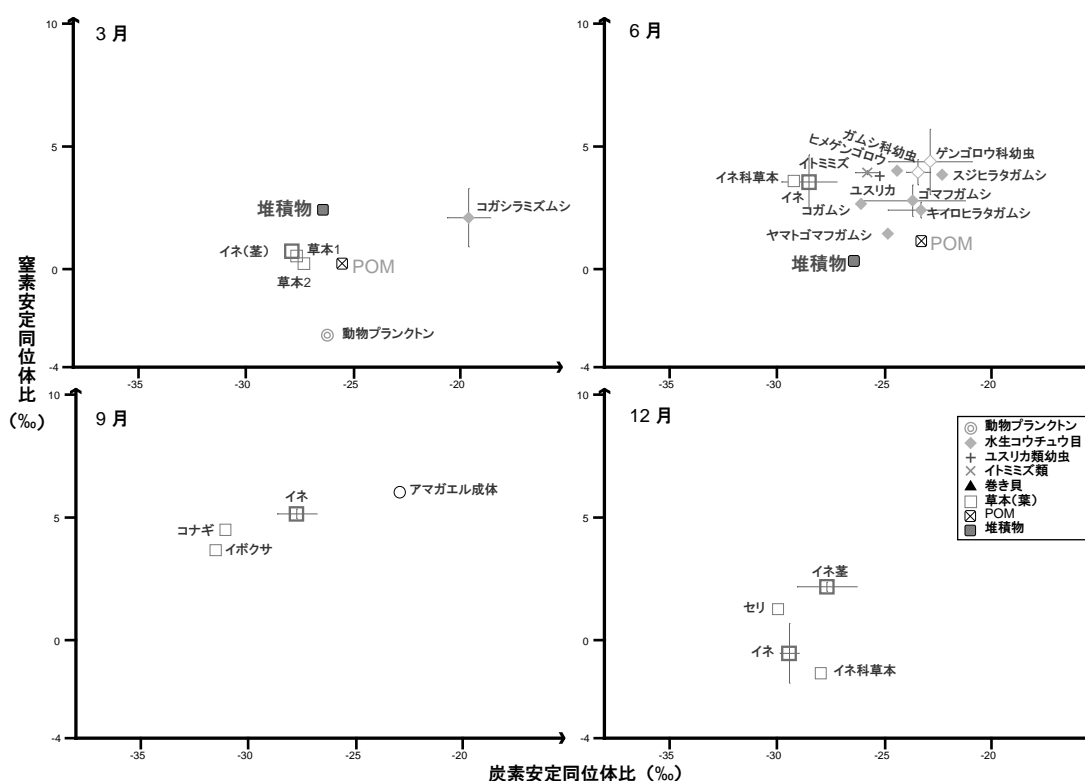


図8. 安定同位体比分析による平場の水田の食物網構造. POMは水中の懸濁態有機物（植物プランクトンを含む）. 各値は平均値（‰）, 誤差棒は標準偏差を示す.

次に、平場の水田の食物網構造の季節的推移を図8に示した。基本的な食物網構造は、里山の水田もしくは江と同様に、POMと表泥上の堆積有機物が一次生産者であったが、水生生物群集が形成されたのは6月のみであった。ここでもイネやその他の草本の葉は、水生生物群集の一次生産者ではないと考えられた。平場の水田では魚類（ドジョウ）が捕獲されず、最高次の消費者は肉食性のコウチュウ目幼虫であった。里山の水田もしくは江に比べると食物連鎖長は4.04と短かった。

続いて、平場の江の食物網構造の季節的推移を図9に示した。3月と6月の江の食物網構造は、平場の水田の6月と同様に、POMと表泥上の堆積有機物が一次生産者であった。3月と6月の江の最高次の消費者はそれぞれ、マルタニシとドジョウであった。6月の江ではドジョウが採集されたため、

食物連鎖長は6.97と3月に比べ長かった。3月と6月の江では、さまざまな栄養段階の生物種群が増加することによって、種多様性が高まった。一方、用水の供給が十分でなかったため、9月には水生生物は採集されず、3月や6月にみられたようなPOMと堆積有機物を基点とする食物網は形成されなかった。12月の調査時には湛水状態に戻ったが、POMや堆積物を基点とする食物網に対し、ドジョウの炭素同位体比は大きい傾向があった。これは9月に水位が低下して水生生物群集が消滅した後、再湛水によって群集が再構成されたことが関係している可能性を示す。

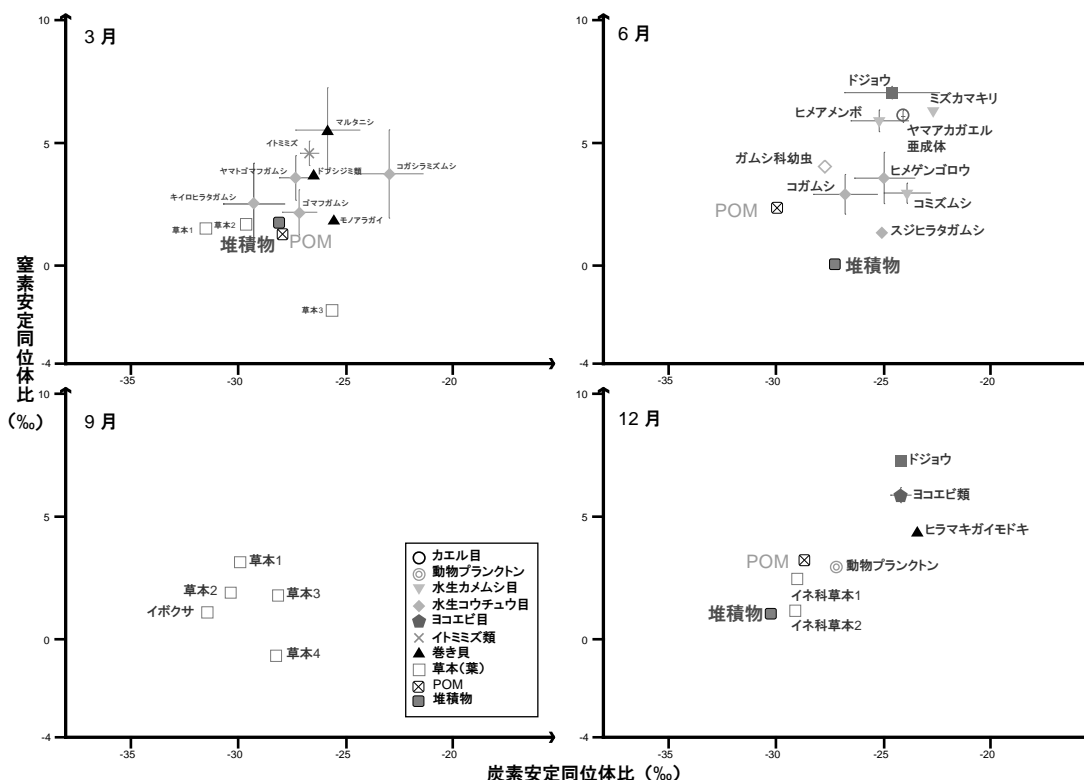


図9. 安定同位体比分析による平場の江の食物網構造. POMは水中の懸濁態有機物（植物プランクトンを含む）. 各値は平均値（‰）, 誤差棒は標準偏差を示す.

次に、年間を通じて湛水処理を行った休耕田のうち、里山の湛水休耕田の食物網構造の季節的推移を図10に示した。これらの食物網構造は、水田もしくは江と同様に、POMと表泥上の堆積有機物が一次生産者であり、最も高次の消費者はマツモムシとドジョウであった。3月、6月、9月、12月の食物連鎖長はそれぞれ、4.63、4.14、4.59、3.97であり、ドジョウが出現した9月が必ずしも最長とはならなかった。里山の湛水休耕田の水生生物群集では、低次から中程度の栄養段階の生物が年間を通じて出現しており、このことが高い種多様性を維持していると考えられた。一部のトンボ目幼虫（ヤゴ）やコウチュウ目では、POMや堆積物を基点とする水田内の食物網に比較して炭素同位体比の値が低かった。一方、コウチュウ目の一部には、POMや堆積物よりも高い炭素同位体比をもつ種が出現していた。これらのトンボ目幼虫やコウチュウ目は、水田系外の食物網に属していたものが、水田内に移入してきたか、あるいはPOMまたは堆積物とは異なる水田内の一次生産者を基点とする食物網に属している可能性が考えられた。

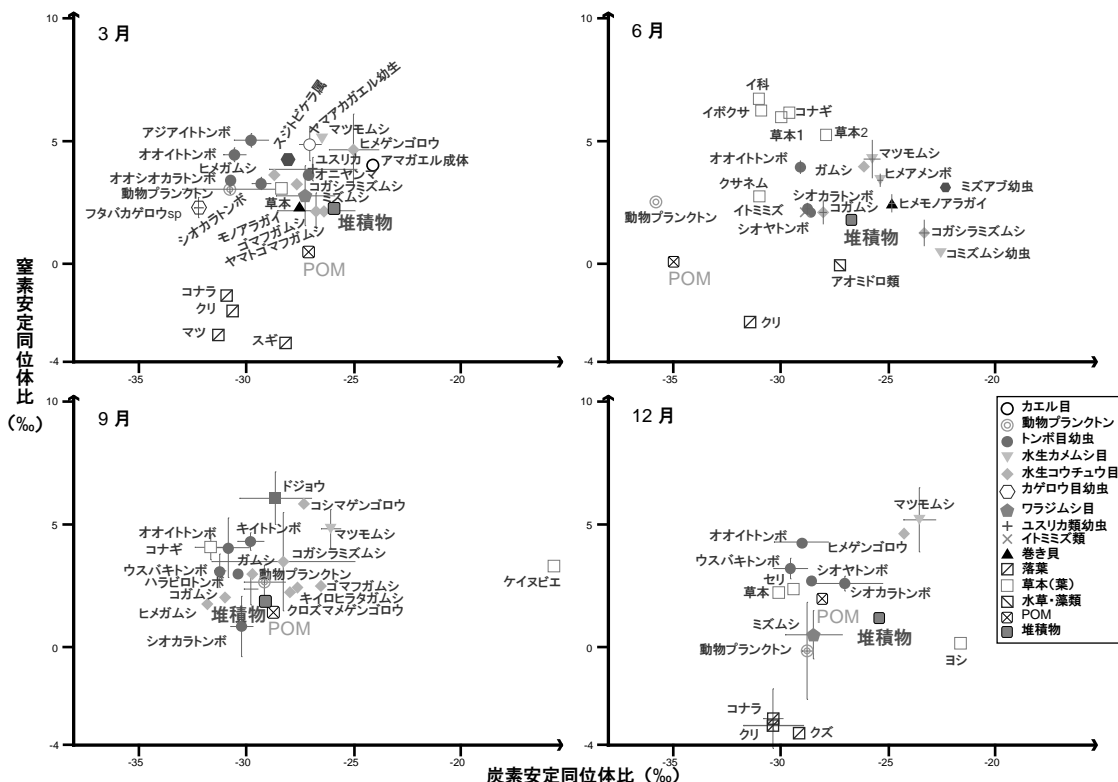


図10. 安定同位体比分析による里山の湛水休耕田の食物網構造. POMは水中の懸濁態有機物(植物プランクトンを含む). 各値は平均値(‰), 誤差棒は標準偏差を示す.

最後に、平場の湛水休耕田の食物網構造の季節的推移を図11に示した。平場の湛水休耕田の食物網構造は、水田や江と同じく、POMと表泥上の堆積有機物が一次生産者であった。しかし、最高次の消費者が水生カメムシ目（ミズカマキリ、3月）とツチガエル（6月）であった点が、他の水田や江と異なっていた。3月と6月の食物連鎖長はそれぞれ10.09と8.33であり、他の水田や江に比べると長かったものの、種多様性がそれほど高い傾向は見られなかった。6月と9月のコウチュウ目や水生カメムシ目の多くが、POMや堆積物の炭素同位体比よりも高い値を示していた。これらの種群は水田系外の食物網に属していたものが、水田内に移入してきたか、もしくは、POMまたは堆積物とは異なる水田内の一次生産者を基点とする食物網に属していると考えられた。

以上の結果より、水田の食物網構造は、POMと堆積物の二つを基点とし、最上位の消費者が魚類であることが明らかになった。また、実験的に創出した江および湛水休耕田でも、水田と同様の構造が形成されていることが分かった。水生のコウチュウ類（主に小型ガムシ科）とカメムシ類の一部は、水田や江とは異なる生態系から飛来した可能性が示唆された。安定同位体比分析を用いた食物網構造の解析によって、水田生態系を構成する水生生物は、水田系内と水田系外の両方の生態系に由来する生物によって成り立っていることが示唆された。従って、水田の水生生物群集の多様性を増加させるためには、水田系内の食物網に属する生物のみならず、水田系外の食物網と水田系内の食物網を行き来するような生物も含めた保全対策を立てることが重要だと考えられた。

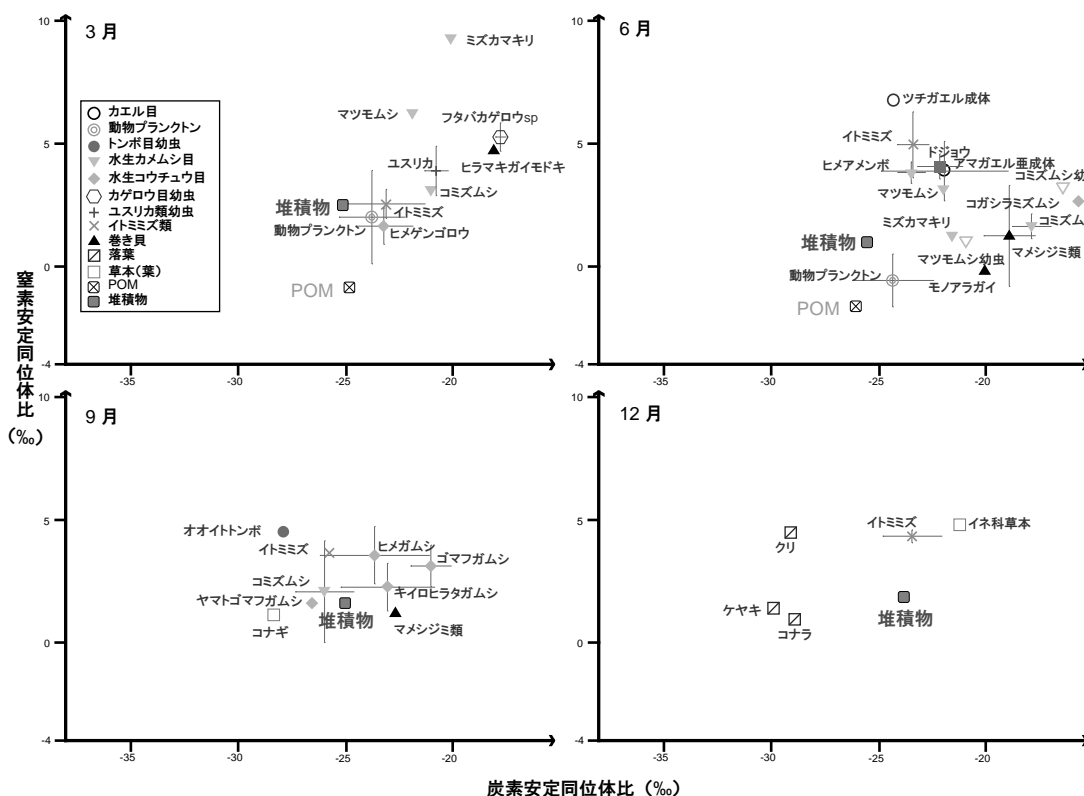


図11. 安定同位体比分析による平場の湛水休耕田の食物網構造. POMは水中の懸濁態有機物(植物プランクトンを含む). 各値は平均値(‰), 誤差棒は標準偏差を示す.

(3) 安定同位体比分析による食物網に基づいた水田生物群集の評価

水田生態系における生物群集の種多様性および生物現存量が、農事暦や季節的变化に伴い、どのような食物網によって構成されるのかについて、安定同位体比分析に基づいた食物網の分類から評価を行った。水田における食物網構造は、安定同位体比分析の結果から以下の3つのタイプに分類された。すなわち、1) POMと堆積物を基点とする「水田内系」食物網、2) POMと堆積物を基点とする系およびそれ以外を基点とする系の両方を含む「水田内系/水田外系」食物網、および3) POMと堆積物以外を基点とする「水田外系」食物網である。2007～2008年における調査で確認された水生生物6目20科47属70種のうち十分な個体数が得られた38種について類型化を試みたところ、「水田内系」に8種、「水田内系/水田外系」に17種、および「水田外系」に13種が該当し、水田内系の食物網のみに依存した種は少ないことが明らかとなった。調査水田に出現した水生生物のうち、魚類、貝類、および昆虫綱について、食物網タイプ別の出現種数の割合を図12に示した。食物網タイプの種数の割合は、対象水田のほとんど全てにおいて「水田内系/水田外系」と「水田外系」の生物種が多くを占めた。また、「水田内系/水田外系」および「水田外系」食物網における出現種数と総出現種数には正の相関関係が認められ、「水田内系/水田外系」および「水田外系」食物網の出現種数が多い水田ほど、総出現種数は多かった (Spearman's rank correlation coefficient, $r_s=0.891$; $P<0.001$, $N=31$)。水田においては湛水される春から夏にかけて、また湛水環境を創出した江および湛水休耕田においては一年を通して、ヒメゲンゴロウやキイロヒラタガムシ等の「水田内系/水田外系」の種群とコガシラミズムシ等の「水田外系」の種群が加わ

ることで、水田の生物多様性に加え、現存量が増加することが明らかとなった。

以上の結果から、水田の水生生物群集は、水田内の食物網に属する生物群と、水田系外の食物網から水田内へ移動してきた生物群の両方から構成されることが示唆され、水田に生息する水生生物の種多様性を増加させ、トキの餌生物量を増産するためには、水田系外の生物をより誘導できるような水田の立地環境を考慮した上で、それらの種が生息できるような通年湛水処理を施すことが重要であると結論づけられた。

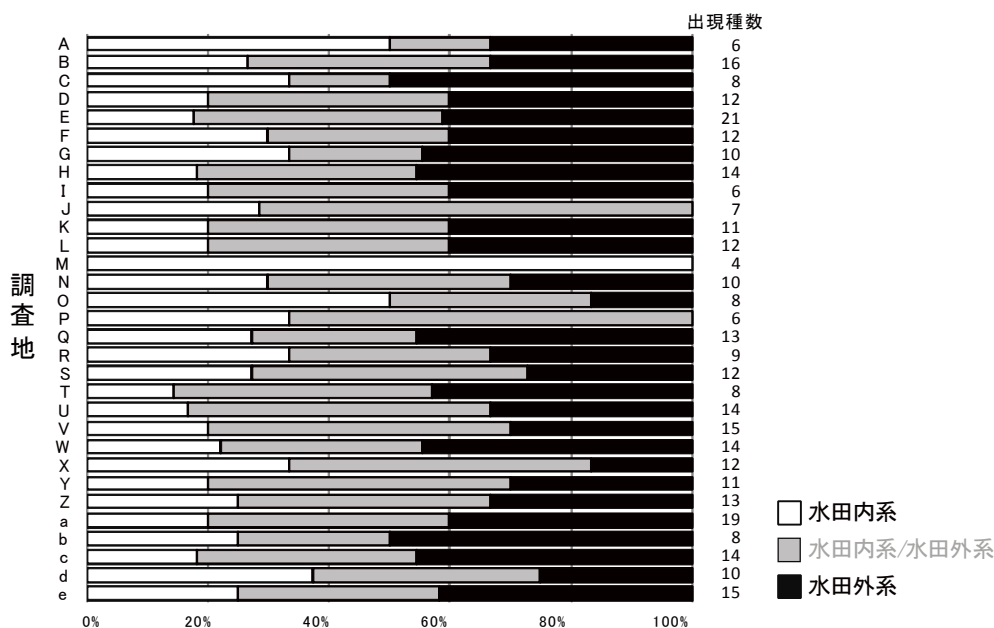


図12. 各調査地における水生生物（魚類，貝類，昆虫綱）の食物網タイプ別出現種数の割合（%）（2008年6月，N=31）。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

水田における生物多様性の再生手法に関する研究では、従来、農薬や化学肥料の使用量を減少させるといった生物多様性に対する環境保全型農業の影響評価に焦点があてられてきており¹⁷⁾、本サブテーマで実施したように、「通年湛水」に着目し、水田の生物現存量や種多様性への効果を野外操作実験により検証した研究はほとんどない。本研究の結果から、湛水処理が即効的かつ継続的に、水生生物の現存量や種数を増加させる効果が認められた。このことから、トキの餌生物のみならず、水生生物群集の現存量や種多様性の通年的な増加に対して、通年湛水が有効な方法であることが強く支持された。また、従来は生物現存量や種数のみで検討されてきた生態系評価に対して、生態系を食物網構造としてとらえる安定同位体比分析を導入することにより、水田生態系の基本的構造を明らかにするとともに、創出された江や湛水休耕田も、耕作水田とほぼ同様の構造であることを示した。また、水田に形成される生物群集が、水田内の食物網に含まれる生物種群と、水田外系の食物網に由来する生物種群の両方で構成されていることを示すとともに、水田の生物多様性が水田外系の食物網に由来する生物種群の影響を強く受けていることを明らかにした。これらの結果から、生物現存量が多く、生物多様性が高い水田生態系を再生するには、水田管理といった局所的対応だけでなく、水田周辺の生態系を考慮に入れた再生手続きを実

施していくことの重要性を指摘したことは科学的に意義があるといえる。

(2) 地球環境政策への貢献

近年、様々な生態系における生物の減少は、生物多様性の消失とともに、生態系サービスの低下につながるものが危惧されている。これまで、生物多様性が高いとされてきた「ホットスポット」にあたる地域での保全が重要視されてきたが、農作物や牧畜のために人為的改変が行われてきた歴史をもつ農地における生物多様性の保全にも注目が集まっている。農地生態系は、継続的に資源を利用するために定期的に行われる人為的攪乱によって、例えば遷移を抑制したり湿地を維持したりすることで、結果として二次的な自然環境が維持され、それによって様々な生息環境を提供してきた。我が国では、里地や里山とよばれる、水田や雑木林を中心とした農地生態系がそれにあたるであろう。しかし、近年、農地の整備や里山林の利用低下などに伴って、里地や里山生態系の生物多様性は悪化の一途をたどっており、対策が急がれている。本サブテーマでは、里地の生態系を形作る主要な環境である水田において、水生生物現存量や生物多様性を再生する方法として、江や湛水休耕田という年間を通じた湛水環境の創出が有効であることを、野外における実験的手法を用いた生態学的評価によって実証した。さらに、水田の食物網構造の評価から、水田生態系の水生生物群集の種多様性は、水田内の食物網に属する生物群だけでなく、周辺の水田外の食物網から水田内に移入した生物群の両方から成り立つことを示した。従って、里地環境の生物多様性の保全を進める上で、通年の水田の湛水化ならびに、水田を取り巻く周辺の生態系の再生の重要性を指摘したことは、農業政策などの農地管理に対して、生態学的結果に基づく具体的な再生手法を提案したことから、今後の地球環境政策に大きく寄与できるものと考えられる。

6. 引用文献

- 1) Benton, T. G., Juliet A. Vickery, J. A. & Wilson, J. D. (2003) Farmland biodiversity: is habitat heterogeneity the key? *Trends in Ecology and Evolution* 18: 182-188.
- 2) Mattison, E. H. A. & Norris, K. (2005) Bringing the gaps between agricultural policy, land-use and biodiversity. *Trends in Ecology and Evolution* 20: 610-616.
- 3) Pimentel, D., Stachow, U., Takacs, D. A., Brubaker, H. W., Dumas, A. R., Meaney, J. J., O'Neil, J. A. S., Onsi, D. E. & Corzilius, D. B. (1992) Conserving biological diversity in agricultural/Forestry systems. *BioScience* 42: 354-362.
- 4) Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R. & Polasky, S. (2002) Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* 418: 671-677.
- 5) Altieri, M. (1999) The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 74: 19-31.
- 6) Fujioka, M. & Lane, S. J. (1997) The impact of changing irrigation practices in rice fields on frog populations of the Kanto Plain, central Japan. *Ecological Research* 12: 101-108.

- 7) Washitani, I. (2001) Traditional sustainable ecosystem ‘Satoyama’ and diversity crisis in Japan: conservation ecological perspective. *Global Environmental Research* 5: 119-133.
- 8) Fujioka, M. & Yoshida, H. (2001) The potential and problems of agricultural ecosystems for birds in Japan. *Global Environmental Research* 5: 151-161.
- 9) Kato, M. (2001) ‘Satoyama’ and biodiversity conservation: ‘Satoyama’ is important insect habitats. *Global Environmental Research* 5: 135-149.
- 10) IUCN (2010) The IUCN red list of threatened species.
<http://www.iucnredlist.org/apps/redlist/details/144752/0>.
- 11) 環境省・農林水産省・国土交通省, (2004) トキ保護増殖事業計画. 告示第1号.
- 12) Sarrazin, F. & Barbault, R. (1996) Reintroduction: challenges and lessons for basic ecology. *Trends of Ecology and Evolution* 11: 474-478.
- 13) Armstrong, D. P & Seddon, P. (2008) Directions in reintroduction biology. *Trends in Ecology and Evolution* 23: 20-25.
- 14) Seddon, P., Armstrong, D. P. & Maloney, R. F. (2007) Developing the Science of Reintroduction Biology. *Conservation Biology* 21: 303-312.
- 15) Li, X., D. Li, Y. Li, Z. Ma, & T. Zhai. (2002) Habitat evaluation for crested ibis: a GIS-based approach. *Ecological Research* 17: 565-573.
- 16) ter Braak, C. J. E (1988) CANOCO - a FORTRAN program for canonical community ordination by [partial] [detrended] [canonical] correspondence analysis, principal components analysis and redundancy analysis (version 2.1). Report LWA-88-02. Agricultural Mathematics Group, Wageningen
- 17) Wilson, A.L., Watts, R.J., & Stevens M.M. (2008) Effects of different management regimes on aquatic macroinvertebrate diversity in Australian rice fields. *Ecological Research* 23: 565-572.

7. 国際共同研究等の状況

トキの野生個体群が分布する中国陝西省洋県と野生復帰が進む新潟県佐渡島との間で、トキの生息環境条件を比較するため、中国林業アカデミー・国際鳥類標識センターのLiu Dongping博士およびLu Jun博士と本研究プロジェクトの間で、国際共同研究プロジェクトの発足手続きを推進し、平成20年度に上記センターと本研究プロジェクトとの間で研究協定が締結された。これを受けて、平成21年度には、7、10、および1月の3回、中国陝西省洋県でのトキ放鳥地域における、水田と河川の餌生物現存量調査が実施された。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) 川本思心, 浅羽雅晴, 大石麻美, 武山智博, 関島恒夫, 島谷幸宏, 西條美紀 (2009) トキ野生復帰に関するサイエンスカフェの企画・準備・実施の記録と分析—理系研究者による

対話活動を支援するための手法の検討—科学技術コミュニケーション 5 : 19-40.

- 2) 関島恒夫 (2009) 種の保存とランドスケープ-21世紀における自然と人との共生のあり方を考える—トキの野生復帰を目指した自然再生シナリオの立案. *ランドスケープ研究* 72 : 385-389.

〈その他誌上発表 (査読なし)〉

- 1) 関島恒夫, 三谷泰浩 (2008) トキの野生復帰を実現するための自然再生シナリオの構築. *緑の読本* 79, 55-62.
- 2) 関島恒夫 (分担執筆) (2008) トキの野生復帰はどのように行われるのか. *佐渡市環境大全*, pp238, 教育出版.
- 3) 関島恒夫, 河口洋一 (2009) トキの野生復帰に向けた自然再生計画とそれを実現する体制づくり. *環境研究* 155 : 130-138.

(2) 口頭発表 (学会)

- 1) 大石麻美, 石間妙子, 関島恒夫 (2008) トキの採餌環境整備を目的とした承水路の新規創出効果. 日本生態学会第55回大会
- 2) 大石麻美, 武山智博, 関島恒夫 (2009) トキの採餌環境創出を目的とした水田生態系の実験的評価 I. 湛水管理方法と生物多様性・生物現存量との関係. 日本生態学会第56回大会
- 3) 武山智博, 大石麻美, 関島恒夫 (2009) トキの採餌環境創出を目的とした水田生態系の実験的評価 II. 安定同位体分析を用いた食物網構造の解明. 日本生態学会第56回大会
- 4) 大石麻美, 武山智博, 関島恒夫 (2010) トキ野生復帰における自然再生: 生物現存量と種多様性を高める水田管理と環境要因. 日本生態学会第57回大会
- 5) 武山智博 (2010) 水田の生物多様性はどのように決まる?, シンポジウム「トキの野生復帰を実現するシナリオを作る」. 日本生態学会第57回大会
- 6) 関島恒夫 (2010) 自然再生を実現する体制をつくる, シンポジウム「トキの野生復帰を実現するシナリオを作る」. 日本生態学会第57回大会

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催 (主催のもの)

- 1) 野生動物再導入計画の現状と課題 (2008年3月17日、日本生態学会福岡大会、参加者約130名)
- 2) トキ野生復帰の最前線 (2009年3月19日、日本生態学会盛岡大会、参加者約60名)
- 3) 大型水鳥を支える里地生態系の構造、機能、再生技術 (2009年3月20日、日本生態学会盛岡大会、参加者約60名)
- 4) トキの野生復帰を実現する自然再生シナリオをつくる (2010年3月19日、日本生態学会東京大会、参加者約100名)

- (5) マスコミ等への公表・報道等
 - 1) 読売新聞 (2008年11月30日、新潟版)
 - 2) 新潟日報 (2008年12月4日)
 - 3) 新潟日報 (2010年3月3日、佐渡地区版)

- 1)
- 2)



- 3)



「サイエンスカフェ」増やす取り組みを絶えず。環境を調べている同大には高齢化が進む農業学大学院生研究員の父の負担を減らすことも重石麻美さんや武山智博さんらに託す。博士さんらが講師を務める。約二十人が耳を傾けた。

新潟市中央区の無職青年野智仁さん(31)は「農家学肥料栽培や一年中水がなくても育つトキについて知る良い機会になった」と話した。

F-072 トキの野生復帰のための持続可能な自然再生計画の立案とその社会的手続き

(4) 営巣環境としての森林生態系の評価

新潟大学大学院自然科学研究科

紙谷智彦

〃 農学部

箕口秀夫

平成19～21年度 合計予算額 6,906千円

(うち、平成21年度予算額 2,190千円)

※予算額は、間接経費を含む。

[要旨] 佐渡島における営巣、ねぐらおよび休息環境としての森林の評価と再生システムの構築のため樹林区分図を作成した。放鳥が行われた新穂地区のおよそ半分の面積が落葉広葉樹二次林(56.6%)であり、次いでスギ林(21.0%)およびアカマツ林(6.4%)の順であった。各林相がモザイク状に分布しており、山際から山間地まで広く分布している落葉広葉樹高木林をトキ営巣環境の整備に有効に利用すべきであると考えられた。放鳥後トキの定着が確認されている羽茂地区も、新穂地区同様、およそ半分の面積が落葉広葉樹林(50.8%)であったが、耕作地・休耕地・果樹園が24.5%を占めているのが特徴的であった。小佐渡地域の森林はトキの休息・ねぐら林としての利用が可能であること、密度管理によりさらに好適な森林を創出できることが検証・確認された。トキの休息・ねぐら環境創出の対象として重要であると考えた水田・湿地に面した山際に生育する林分において施業モデル林としての林相改良を実施した。

林冠ギャップでは、サイズが大きいほど林床は明るくなり、種組成は大きく変化した。年経過とともに林冠が閉鎖し、低木も成長して、ギャップ内の光環境が悪化すると、林床の種組成はギャップ創出前の林床環境に戻り、種組成も創出前に近づいた。かつての薪炭林には、ナラ林等の比較的単純な構造の広葉樹林として維持されてきた林が多い。近年のナラ枯れは、そのような林の構造と組成を劇的に変えつつある。設定後15年を経た人工ギャップの更新状況からは、ナラ枯れパッチの大きさによってその後の更新状況と林床植生の組成が異なることが示唆された。

ナラ枯れ発生からの経過年数と中型食肉目哺乳類の出現頻度との関係は種類ごとに異なっており、一定の傾向はみられなかった。すなわち、タヌキとテンで逆の傾向があり、ナラ枯れ発生からの年数がたっているほど出現頻度が、タヌキでは高くなったのに対し、テンでは低くなった。なお、イタチではもともと出現頻度も低く、変化はみられなかった。

[キーワード] 落葉広葉樹林、とまり木、林相改良、林冠ギャップ、中型食肉目

1. はじめに

トキの放鳥について、これまで水田、河川・湿地等の採餌環境の整備を中心に検討が進められてきた。しかし、放鳥されたトキの定着には採餌場所の周辺部で休息場所、ねぐらとして機能する森林の存在が必要不可欠である。また、採餌場所の周辺部に限定されないが、営巣、繁殖のための森林も必要である。しかし、放鳥が予定されている小佐渡地域の森林では、ねぐら、営巣環境として過去に利用されていたアカマツ林が、マツノザイセンチュウ病被害(以下、マツ枯れ)

により壊滅的な状況にある。さらにアカマツ林の代替森林と考えられている落葉広葉樹高木林では、カシノナガキクイムシが関与するブナ科樹木の萎凋枯死被害(以下、ナラ枯れ)により優占種であるミズナラの枯損が顕著になってきている^{1) 2)}。ナラ枯れは1998年に小佐渡で初めて60本の枯損被害が認められ、2007年現在では全島に被害が拡がり、被害本数も18,521本と急増している^{3) 4)}。このように、佐渡の森林生態系が担うべきトキの営巣および休息を含むねぐら環境が非常に劣化している。さらに、佐渡島では外来種であるテンをはじめとする森林性の中型食肉目哺乳類によるトキの卵やヒナの捕食、さらには餌資源をめぐる競争関係が危惧される状況にある。

2. 研究目的

営巣・ねぐら環境としての森林を再生するシステムの技術的な課題を抽出する。そのため、最初に営巣・ねぐら環境としての森林の好適性を面的に評価し、林相区分毎に、トキの利用可能性に着目し、その林分構造の特徴を明らかにする。その結果から小佐渡東部地域に広く分布する落葉高樹林を対象に、林相改良による休息、ねぐら環境創出の可能性を探る。また、ナラ枯れにより衰退した森林に対しては、稚樹バンクや後生樹を活用した天然更新の可能性を検討する。さらに、そのナラ枯れがタヌキ、テンおよびイタチの森林性の中型食肉目哺乳類の分布、行動に与える影響を明らかにする。

(1) 佐渡島における営巣、ねぐら環境としての森林の評価と再生システムの構築

1) 新穂(放鳥)地区・羽茂(飛来)地区における樹林区分と林相区分図の作成

小佐渡地域の放鳥地区と飛来地区における、営巣・ねぐら環境として森林の好適性を面的に評価するため、航空写真を用いて当該地区の樹林区分を行い、林相区分図を作成する。林相区分図は情報の統合、管理、流通および提供に資するためGIS化を行う。

2) 小佐渡東部地域の林相別林分構造調査およびトキの利用可能性の検討

小佐渡地域の放鳥地区において、林相区分毎に林分構造を明らかにするとともに、トキの利用可能性を検討する。トキの利用可能性はトキが止まることができる形態の枝の有無、およびその枝周辺の空間の有無から判断する。また、国仲平野側の孤立林、屋敷林においても、同様に営巣、ねぐら環境としての森林構造の評価を行う。

3) 林相改良手法検討のための林分構造調査とモデル林の造成

トキの休息、ねぐら環境創出の対象となる、餌場である水田や湿地ビオトープに面する山際に位置する落葉広葉樹林について、林縁環境改良モデルを検討する。そのため、林縁に位置する森林の毎木調査を実施し、施業モデル林を設定する。

(2) ナラ枯れ発生林分における更新特性の把握

主な被害地である広葉樹二次林において、大径木の集団枯損により数多くの林冠ギャップが形成されてきている。そのため、二次林においても、天然林同様に、ギャップ更新が促進されると考えられる。また、これらの広葉樹二次林はトキ以外の野生動物にも里山におけるすみかや餌場として機能してきた。そのため、人工的に創出されたサイズの異なる林冠ギャップにおける更新、再生過程を調査し、ナラ枯れの発生により広葉樹二次林の更新がどのように進んでいくのかを、

限られた調査期間内で明らかにする。

(3) 森林におけるトキの天敵である中型食肉目の行動特性把握

佐渡島では外来種であるテンをはじめとする森林性中型食肉目哺乳類によるトキの卵やヒナの捕食、さらには餌資源をめぐる競争関係が危惧される状況にある。そこで、カメラトラップを用いてテン、タヌキおよびイタチの中型食肉目の行動・生息状況にナラ枯れによる林分構造の変化が及ぼす影響を明らかにする。

3. 研究方法

(1) 佐渡島における営巣、ねぐら環境としての森林の評価と再生システムの構築

1) 新穂地区（放鳥地区）・羽茂地区（飛来地区）における樹林区分と区分図の作成

小佐渡東部の新穂地区と西部の羽茂地区において、新穂地区ではトキ野生復帰ステーションを中心とした半径約5kmの範囲で、羽茂地区では約5km×7kmの範囲の山林を対象として、それぞれ空中写真判読により樹林区分を行い、林相区分図を作成した。樹林区分は、密着焼き写真をポケット実体鏡で判読することによって行った。

樹林の判読区分基準は、表1のとおりである。樹林の種類をアカマツ林、落葉広葉樹林およびスギ・ヒバ植林に区分し、それらはさらに樹高要素によりさらに区分した。ただし、樹高要素の判読は、実体視した写真上で林冠が平滑にみえる成林した林分を標準とし、低木林状にみえるものを「低木林」、大径の樹冠を持つ高木が混在し突出してみえるような林分を「高木林」として区分した。樹林以外では「竹林」、「草原・草地」、崩壊地や河床裸地などの「自然裸地」、「耕作地・休耕地・果樹園」、道路や住宅、人工改変地など「人工地」、ダム湖など「開放水面」を区分した。

表1 樹林の判読区分基準

区 分	摘 要	凡例
アカマツ林（高木林）	突出木のある林分、特に樹高の高い林分	ph
アカマツ林		p
アカマツ低木林		ps
落葉広葉樹林（高木林）	突出木のある林分、特に樹高の高い林分	dh
落葉広葉樹林	コナラ、カエデ類、ホオノキ等	d
低木林	急斜面の低木林	s
スギ・ヒバ人工林（高木林）	突出木のある林分、特に樹高の高い林分	ch
スギ・ヒバ人工林		c
スギ・ヒバ新植地	植林低木地	cs
竹林		b
草原・草地	伐採跡地・放牧地・ササ草原	g
自然裸地	崩壊地・砂礫地	o
開放水面	ダム湖・池沼・幅のある河川	w
耕作地・休耕地・果樹園	カキ畑	f
人工地・改変地	構造物・ダム湖周辺、幅のある道路	a

2) 小佐渡東部地域の林相別林分構造調査およびトキの利用可能性の検討

新穂地区の野生復帰ステーションを中心とした半径約5kmの範囲の森林を調査対象に設定した。この範囲について、航空写真の判読に基づく林相区分図に1km四方の任意のメッシュを被せ、メッシュごとに最も大きな面積を占める区分の森林を抽出し、円形プロットを設置して毎木調査を行った。調査は落葉広葉樹林（判読区分D）25プロット、突出木のみられた落葉広葉樹林（DH）2プロット、スギ林（C）5プロット、およびアカマツ林（P）1プロットの計33プロットで行われた。

毎木調査は、調査プロットの標高、傾斜角を記録した後、一般的な調査項目である樹種、樹高、胸高周囲長、生枝下高、および3m未満木本の植被率をそれぞれ計測、記録した。さらに、トキのとまることのできる枝の有無を記録した。トキのとまれる枝は、1. 水平であること、2. 太さが直径3cm以上であること、および3. 周囲が空いていてトキの進入が可能であることを目測して判定した。条件を全て満たした木をP木、3.のみ適さなかった木をP'木として記録した。

3) 林相改良手法検討のための林分構造調査とモデル林の造成

トキの餌場として重要な水田や湿地ビオトープに面する山際に位置する、当該地域で標準的な落葉広葉樹林の林縁に沿って、長さ40m、林内に向かって幅10mの調査ベルトを2本設定した。ベルト内に出現した胸高直径5cm以上のすべての幹を対象に樹種、樹高、生枝下高、位置およびトキがとまれる枝（以下、とまり木）の有無を測定、記録した。とまり木は、枝の根元直径と幹からの伸長角度の2要因から判断した。また、タケ群落については桿密度と群落高を測定、記録した。その結果を受け、調査ベルトにモデル林を設定した。

(2) ナラ枯れ発生林分における更新特性の把握

調査地は新潟県東蒲原郡阿賀町上川の広葉樹二次林である。この林分は1930年代まで、薪炭林として利用されていたが、現在では放棄され、成長を続けている。人工ギャップは1993～1996年の3年間に作られた。ギャップサイズはブナ天然林におけるギャップ面積0～400m²、平均92m²を参考に⁵⁾、50m²未満を小（S）、50m²以上150m²未満を中（M）、150m²以上400m²未満を大（L）とした。なお、1996年には全てのギャップで林床の一斉刈払いを行った。調査はギャップ内とその周辺の閉鎖林冠下に16～24個の1m×1mのコドラートを設置して行った。光環境を評価するため、1997年と2008年に、各コドラートの中央、0.5mの高さで全天空写真を撮影した。撮影には魚眼コンバータ付きのデジタルカメラ（Nikon Coolpix）を使用した。画像は、専用解析ソフト（WINPHOTO）により光合成有効光量子束密度（ $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$ 、以下PPFD）を算出した。得られたPPFDを裸地のPPFDとの相対値（rPPFD）に換算して解析に使用した。なお、解析には林冠樹種が展葉し落葉するまでの4月から9月の値を使用した。

植生調査では1997年、2003年および2008年のほぼ5年間隔のデータを使い、出現した全植物種名、高木の本数、2003年、2008年にはそれに加えて各コドラートで高さが最大の植物種名とその高さ、並びに、高木種全個体の高さを記録した。

(3) 森林におけるトキの天敵である中型食肉目の行動特性把握

新潟県におけるナラ枯れ被害の移動・拡大方向に沿って、ナラ枯れ発生からの経過年の異なる3地域を、さらにナラ枯れの未発生である1地域を加え、計4地域に調査地を設定した。1996年より

ナラ枯れの発生した新潟県三条市下田大谷ダム周辺、2001年より発生した阿賀町三川温泉スキー場周辺、2004年より発生した関川村大石ダム周辺およびナラ枯れ未発生の山形県小国町温身平周辺の4地域である。

各調査地の野生動物相を把握するために、自動撮影装置が他の調査法よりも対象動物への影響が小さいことからカメラトラップ法を用いた。赤外線センサーカメラは、対象動物が発する体温（赤外線）を集電型赤外線センサーで検知し、その信号をカメラのシャッター駆動に伝えることによって写真を撮影する装置である⁶⁾。カメラをミズナラの樹冠下に設置し、動物を誘引するために餌としてマテバシイ、リンゴおよび魚肉ソーセージを用いた。遺伝子攪乱を防ぐためにマテバシイは茹でて発芽能力を失わせてから、リンゴは種を除去してからそれぞれ設置した。調査スケジュールは次の通りである。1調査地につき、センサーカメラ（Fieldnote II、麻里府商事）を4台設置した。5日間隔で3回の回収を行なった後、餌の誘引効果が強くなり過ぎることを考慮し、4台とも異なるミズナラ下に設置場所を変えて、同様に調査を行なった。小国では1回の設置変えを行って計8カ所、三条、阿賀および関川では、2回の設置変えを行って計12カ所で撮影を行なった。

4. 結果・考察

(1) 佐渡島における営巣、ねぐら環境としての森林の評価と再生システムの構築

1) 新穂地区（放鳥地区）・羽茂地区（飛来地区）における樹林区分と区分図の作成

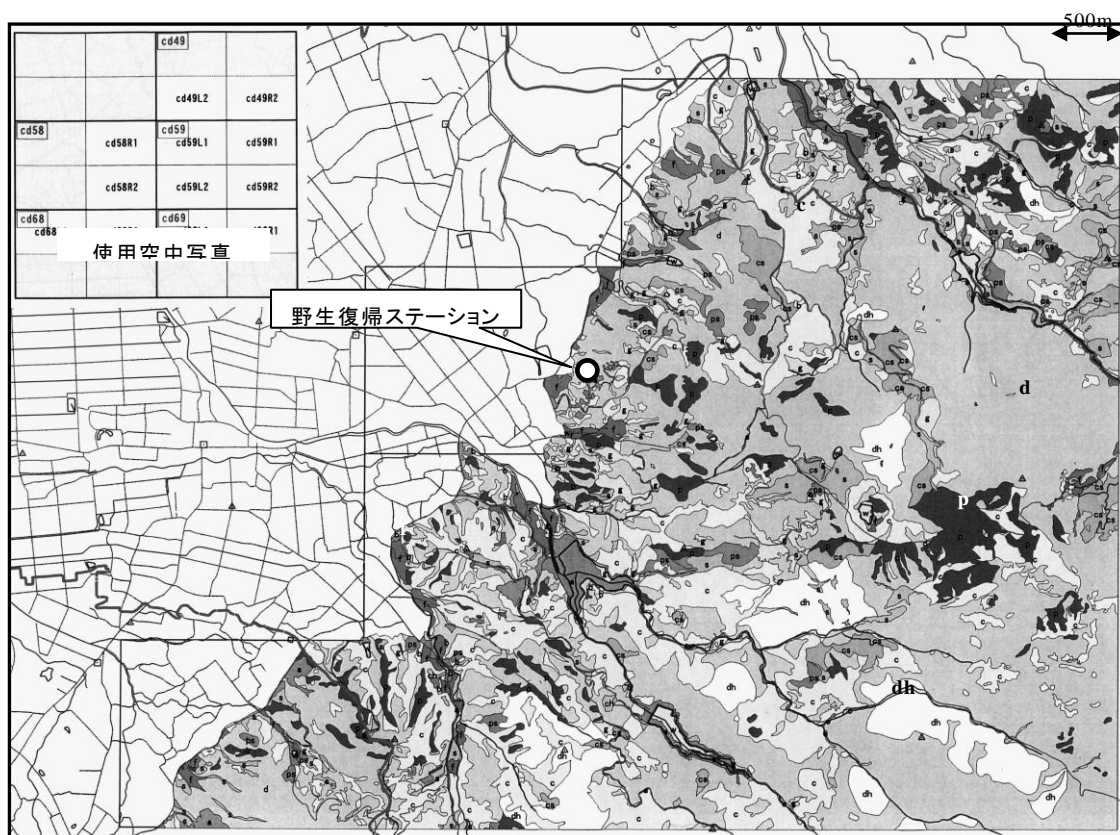


図1 野生復帰ステーション周辺の林相区分図

(凡例は表-1を参照)

図1に、野生復帰ステーションを中心とした半径約5kmの範囲の山林について、空中写真判読によ

り作成した樹林区分図を示した。対象地域には表1に示したアカマツ林、落葉広葉樹林およびスギ・ヒバ植林がモザイク状に分布していた。調査地域のおよそ半分の面積が落葉広葉樹二次林（以後D、50.3%）であり、次いでスギ林（以後C、21.0%）、アカマツ林（以後P、6.4%）、突出木のみられた落葉広葉樹林（以後DH、6.3%）の順に面積が大きかった。落葉広葉樹林が山際から山間地まで広く分布しているのに対し、まとまった面積のアカマツ林は山間地だけに分布していた。トキの営巣環境として好適と考えられる林冠突出木が存在するアカマツ高木林は、今回の調査範囲では分布が認められなかった。一方、落葉広葉樹林には林冠突出木が存在する高木林が山間部を中心にまとまった面積で分布していた。したがって、これらの落葉広葉樹高木林をトキ営巣環境の整備に有効に利用すべきであると考えられる。

放鳥後トキの定着が確認されている羽茂地区も、新穂地区同様、およそ半分の面積が落葉広葉樹林（50.8%）であったが、耕作地・休耕地・果樹園が24.5%を占めているのが特徴的であった。

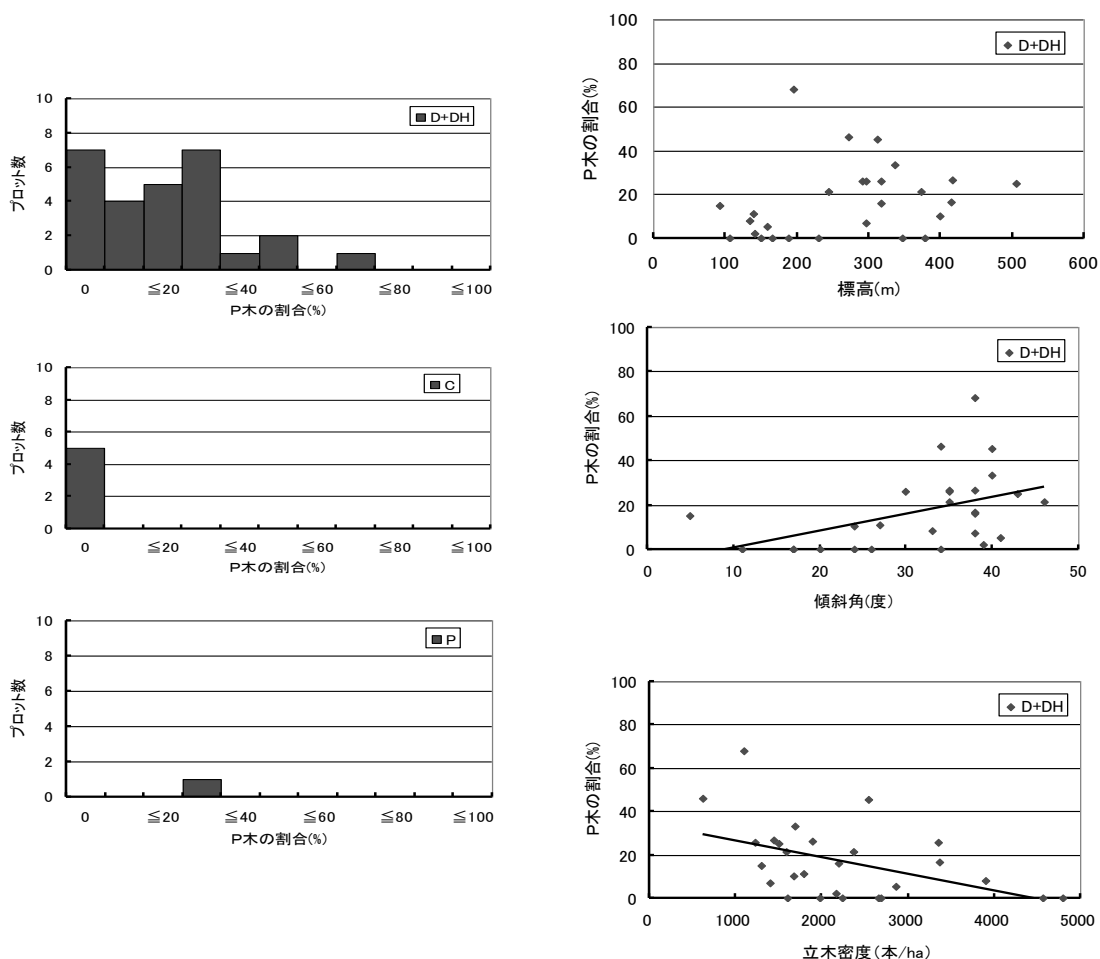


図2 林相区分別のP木の割合

図3 P木の割合と標高、傾斜角、立木密度の相関

2) 小佐渡東部地域の林相別林分構造調査およびトキの利用可能性の検討

図2より、DにおいてP木が0%から30%の割合で分布するプロットが多く、Pのプロットでは25.3%の割合でみられたが、Cには存在しなかった。これは、スギ林における人工林施業が、スギの枝ぶりを管理しているからだと考えられる。

Dにおいて、階層構造の発達段階毎のP木の割合に有意差は認められなかった（Kruskal-Wallis検定、 $P>0.05$ ）。また、Dにおいて、P木の割合と標高、傾斜角、立木密度のそれぞれについて回帰分析を行ったところ、傾斜角と立木密度についてそれぞれ有意な相関が認められた（図3）。これは、傾斜角が急、あるいは立木密度が小さければ、枝の周囲に空間が生じやすくなるため、P木が増加する傾向にあることを示していると考えられる。

Dの林冠層を構成する主な樹種別の、林冠層におけるP木の出現率から樹種間でP木の出現率に差異が生じていると考えられた。これは、樹種ごとの樹形と、更新時からの成長の特性によるものと考えられる。また、同じ樹種について作成したDBH階別のP木の出現率から、ほとんどの樹種でDBH10cmまたは20cmよりP木の出現率が増加していた。これらの結果は、トキのとまり木を確保するために除間伐施業を実施する際に指針となり得ると考えられる。

P木およびP木+P'木の全立木に対する割合の度数分布を比較すると、P木+P'木の割合が増加している。そのため、混み具合が改善されればトキのとまり木がより確保されることが考えられる。P'木の本数/P木+P'木の本数、すなわち混み具合によるとまり木の損失の割合と、標高、傾斜角、立木密度のそれぞれについて回帰分析を行ったが、有意な相関は得られなかった。枝周囲の空間の有無には、林冠における凹凸や樹冠の広がりなどより微小なスケールでの空間構造が関係していると考えられる。

表2 国中平野側平地林、屋敷林の林分構造

プロット No.	標高 (m)	傾斜 (度)	林冠高 (m)	立木密度 (No./ha)	トキ利用可能木 本数率(%)		優占種	トキ利用可能樹種
					(a)	(a)+(b)		
1D	55	1	16	1650	8	8	コナラ	コナラ
2C	59	17	18	740	0	0	スギ	
3C	67	39	14	3072	0	0	スギ	
4C+D	50	4	14	1729	0	0	スギ・コナラ	
5C	50	23	20	1836	0	0	スギ	
6C	43	21	22	971	0	0	スギ	
7D	41	20	16	1296	15	21	コナラ	コナラ
8P+D	10	38	8	2829	0	0	アカマツ	
9C+D	40	2	12	1592	0	0	スギ・コナラ	
10D	34	38	14	3142	7	7	サクラ属	コナラ、サクラ属

林相 D:落葉高樹林、C: スギ人工林

(a) : ほぼ水平に出ている太さ 5cm 以上の枝で、周囲にトキが飛翔可能な空間がある枝

(b) : ほぼ水平に出ている太さ 5cm 以上あるが周囲がうっ閉している枝

以上より、小佐渡東部地域の森林はトキの休息・ねぐら林として利用が可能であること、密度管理によりさらに好適な条件が創出される可能性があることが示唆された。

中国陝西省において、2008年5月に休息、ねぐら、および営巣木の現地踏査を行った。陝西省では、山地林だけでなく平地林、さらには畑地、市街地に単木で生育する樹木をねぐら、営巣木として利用していた。そこで、これまで注目していた山間部に加え、野生復帰センター周辺の国中平野側に成立している孤立林、屋敷林の林分構造を明らかにした（表2）。その結果、落葉広葉樹林はトキが利用可能であるとともに、林相改良によりさらに好適な環境を創出することの可能性

が示された。しかし、スギ人工林、およびスギと広葉樹が混交した林分はトキが休息場所、ねぐらとしては利用しにくい環境であることが明らかになった。

3) 林相改良手法検討のための林分構造調査とモデル林の造成

図4に、トキのねぐら、休息環境創出の対象として重要であると考えられる山際に分布する落葉広葉樹林における林縁環境改良モデル検討林の毎木調査結果を示した。

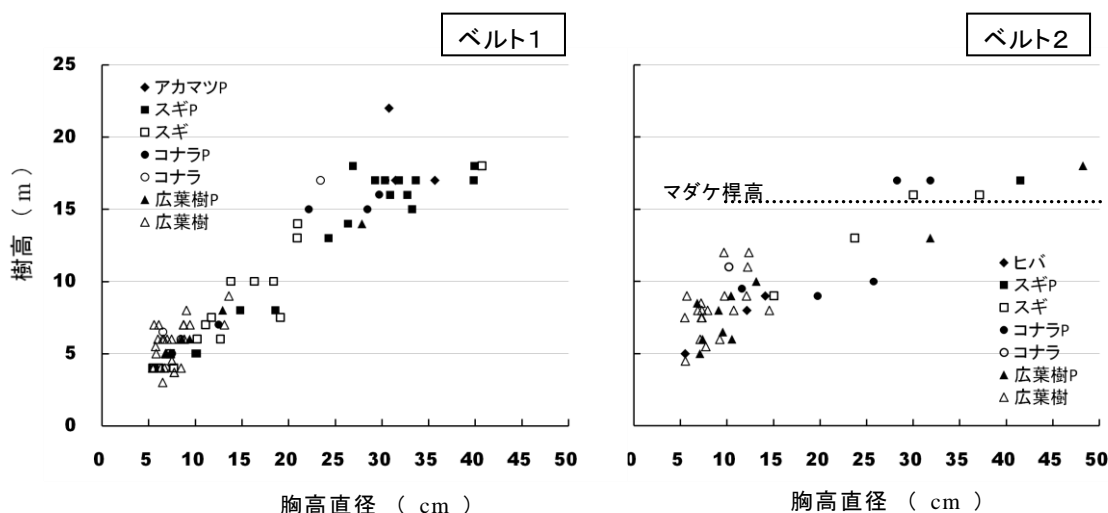


図4 林縁環境改良モデル検討林分の林分構造（胸高直径－樹高）

（樹種凡例のPは、トキが止まれる枝が出ていることを示す）

出現した樹種はベルト1で18種、ベルト2で13種であり、コナラなどの落葉広葉樹にスギ、アカマツおよびヒバの針葉樹が混交した針広混交林を形成していた。このうち、トキが休息可能な止まり木がある樹種は、針葉樹ではスギ、アカマツの2樹種、広葉樹ではコナラ、ホオノキ、カスミザクラ、ウワミズザクラ、エゴノキおよびネムノキの6樹種であった。このうち、エゴノキとネムノキは小径木でも止まり木を有していたが、林縁開放面に生育している幹に限定されていた。一方、スギ、アカマツの針葉樹と広葉樹コナラの大径高木のほとんどが止まり木を有するとともに、林縁だけでなく林内に生育する幹にも止まり木があった。また、小佐渡には放置されたマダケ林が広く分布し、ベルト2のように森林内に侵入している。このようなマダケが混交した林分では、マダケが上層林冠を占め、樹木の生育、特に枝を伸長させ樹幹を拡大することを阻害していた。

以上のことから、トキのねぐら、休息環境を創出するためには大径のスギ、アカマツ、及びコナラを保全し、有効に利用するとともに、それら樹木へのアクセスを阻害する要因を取り除く必要があると考えられた。特に、マダケは桿高、密度が高いため、その積極的な管理が必要となる。

(1)の結果から、落葉広葉樹林においては林相改良により好適なトキの休息、ねぐら環境を創出できることが明らかになった。そこで、トキの休息・ねぐら環境創出の対象として重要であると考えた水田・湿地に面した山際に生育する林分において、図5のとおり、施業モデル林としての林相改良を実施し、当該地域における標準的な除間伐手法、基準を得た。

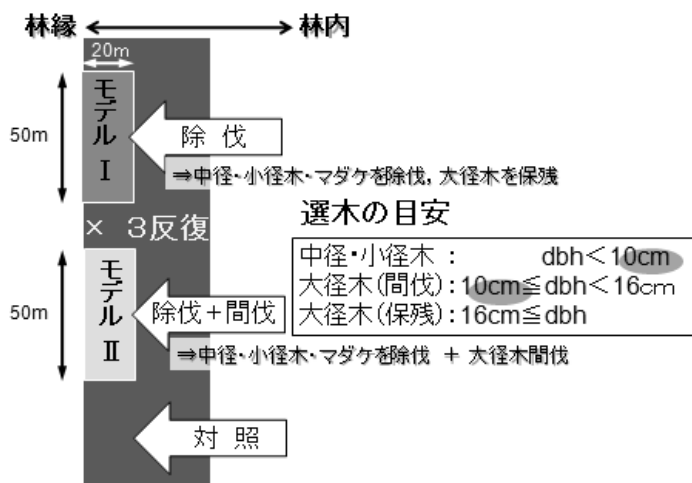


図5 林縁広葉樹林・スギ林で造成された施業モデル林の概要

具体的には、下層木～亜高木を除伐し、上層林冠木を保残する除伐区と、上層林冠木についても一定の胸高直径以下の幹を間伐する除間伐区の2パターンを造成した。なお、何れの林分においてもマダケが混交している場合はマダケが上層林冠を占め、樹木の生育、特に枝の伸長、樹幹の拡大を阻害しているため、マダケをすべて伐採した。

(2) ナラ枯れ発生林分における更新特性の把握

創出されたギャップでは、サイズが大きいほど林床は明るくなり(図6)、種組成は大きく変化した。年経過とともに林冠が閉鎖し、低木も成長して、ギャップ内の光環境が悪化すると、林床の種組成はギャップ創出前の林床環境に戻り、種組成も創出前に近づいた。コドラート当りの出現種数の変化では、S・M・Lの全てで創出前～1997年に高木種、低木種、草本種いずれかのタイプについて種数の増加が見られた(図7)。高木種はS・Lサイズで、低木種はM・Lサイズで、草本種はLサイズのみで増加していた。したがって大きなギャップは様々な植物種にとって更新に好適な

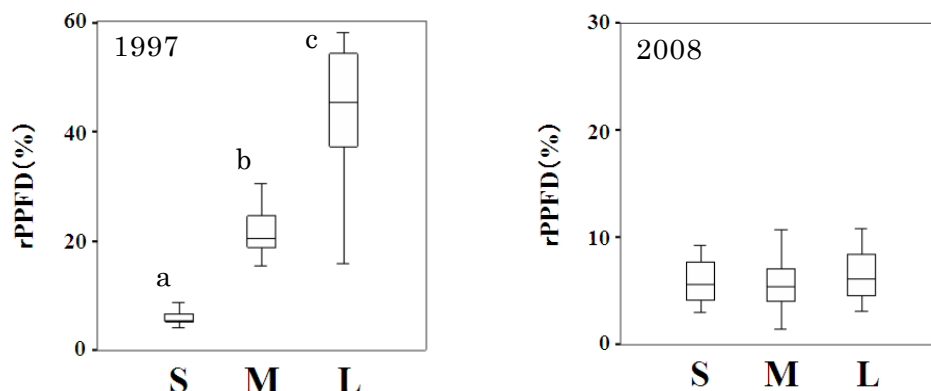


図6 ギャップサイズによる林床の光環境の違い

アルファベットの違いは有意差があったことを示す。Steel-Dwass test ($P < 0.05$)

場であることが示唆された。これは、S・Mサイズに比べ、Lサイズではより多くの種が高頻度で出現したことからも裏付けられた。大きなギャップは植物が成長する上で必要不可欠な光と水が十分供給され、それが種数の増加に寄与したと考えられる。また、1997年のM・Lサイズに偏って出現した種について、Mサイズでは創出前（1997年の閉鎖林冠下）にも出現した種が多かったのに対し、Lサイズでは創出前には出現しなかった種が多くなっていった。つまり、Lサイズでは、ギャップ創出前の環境では生育できなかつた種が生育可能になったと予想される。

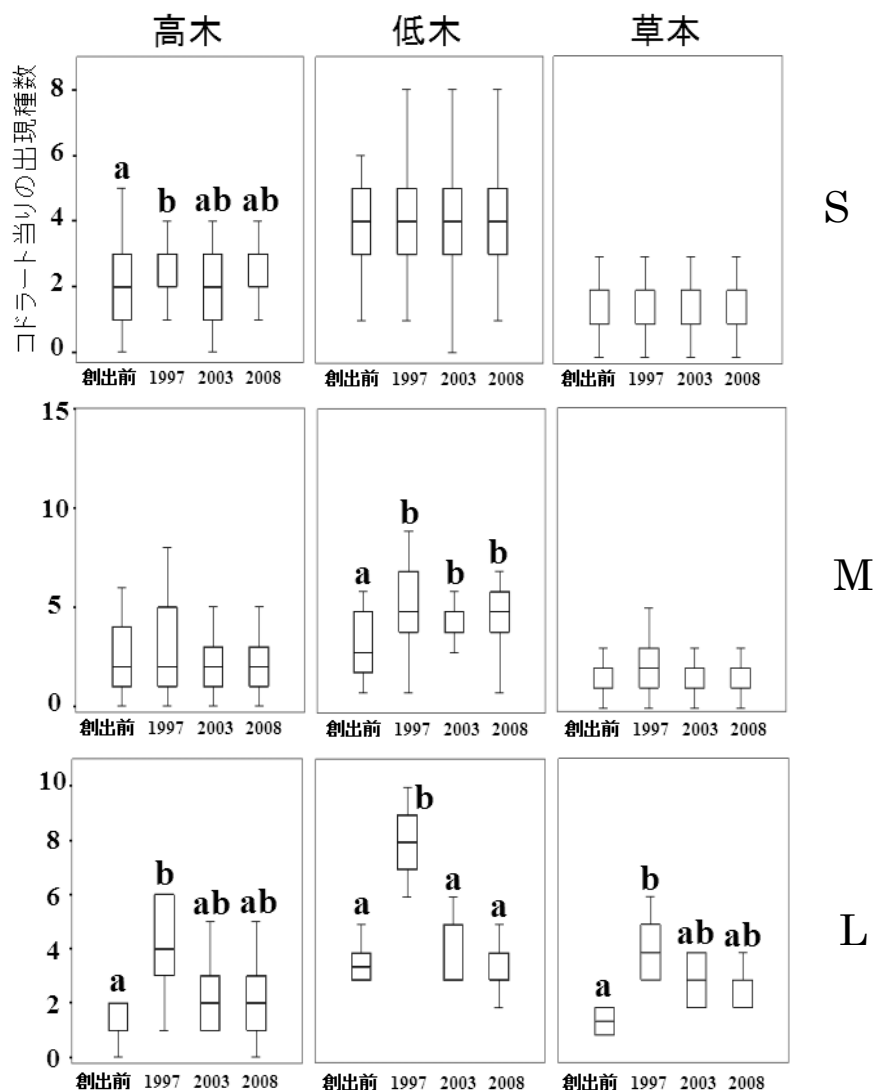


図7 コドラート当りの出現種数の変化

アルファベットの違いは有意差があったことを示す。

Steel-Dwass test ($P < 0.05$)

ギャップ創出後、S・Lサイズでは高木の総種数が増加したことから、ギャップは高木種の更新に有効（特にギャップ創出直後において）だと言えるだろう。特にLは創出後に種数が2倍以上にな

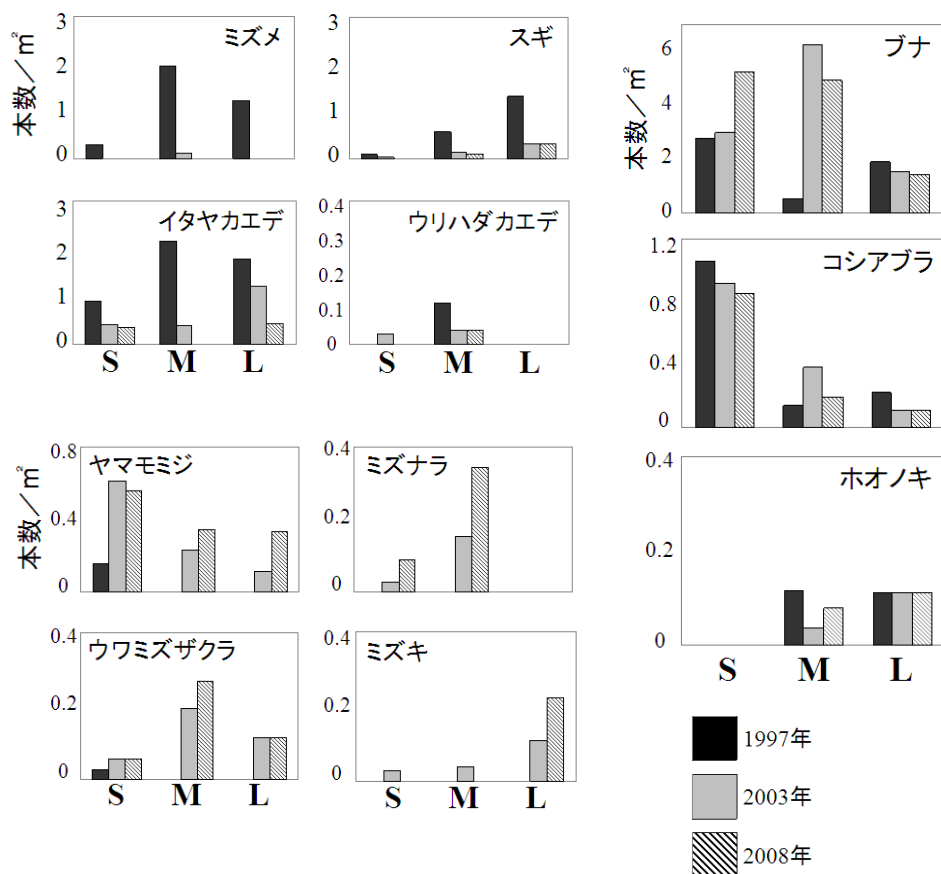


図8 樹種別個体数の変化

った。樹種の個体数変化では、S・M・Lサイズ間で共通する傾向がある種が見られた（図8）。

ミズメ、スギ、イタヤカエデ、ウリハダカエデの4種は、1997年から2008年にかけて減少・消失する傾向にあった。これらは全て風散布樹種で、攪乱跡地などにいち早く侵入することが可能である。風散布種子のように小さくて軽い種子は、種子自体が持つ養分が少ないため、発芽後に順調に光合成が行えるかどうか、実生の生残に大きく関わってくる⁷⁾。したがって、光環境が良い大きいギャップほど生育しやすいと予想される。この予想を裏付ける結果として、1997年時点のミズメの個体数（本数/m²）は、SサイズよりLサイズで有意に多かった。また、スギでは1997年・2003年・2008年全てにおいて、SサイズよりLサイズの個体数が多かった。一方、ヤマモミジ、ミズナラ、ウワミズザクラ、ミズキは1997年から2008年にかけて出現・増加する傾向にあった。ヤマモミジは風散布、ミズナラは重力・貯食散布、ウワミズザクラ、ミズキは鳥散布樹種である。ここで、風散布樹種の子ヤマモミジがこのような傾向を示したことから、同じ散布様式の樹種でもギャップに対する反応は異なることが予想される⁸⁾。ギャップでの高木種の更新は、樹種の耐陰性が関わることから、ヤマモミジと前述の4種では、耐陰性が異なる可能性がある。これら2つの傾向のほかに、サイズ間で共通する傾向は見られなかった種にブナ、コシアブラ、ホオノキがあった。調査林分内で、最も頻繁に見られた高木種はブナであった。ブナは林冠構成樹種であると共に、林床に実生バンクを形成する特性を持っていることから⁸⁾⁹⁾、最も多かったと考えられる。ブナ・コシアブラが常にどのサイズのギャップにも出現したのに対し、ホオノキはM・Lサイズのみ

に出現したことから、ホオノキの大きいギャップサイズへの選好性が示唆された。

かつての薪炭林には、ナラ林等の比較的単純な構造の広葉樹林として長期にわたって維持されてきた林が多い。近年のカシノナガキクイムシによるナラ枯れは、そのような林の構造と組成を劇的に変えつつある。本研究の調査地は、主にミズナラとブナが混交する二次林にナラ枯れが発生する前に設定された。15年を経た本研究の人工ギャップの更新状況からは、ナラ枯れパッチの大きさによってその後の更新状況と林床植生の組成が異なることが示唆された。特に大サイズの人工ギャップには多様な高木種と植生が更新し、その後、徐々にギャップ創出以前の構成に戻りつつあることも明らかになった。

(3) 森林におけるトキの天敵である中型食肉目の行動特性把握

カメラの撮影待機時間を考慮し、2分間隔での撮影枚数を累計した(図9)。撮影種数は、関川で最も多く、哺乳類13種、鳥類1種が撮影され、ナラ枯れ発生からの経過に伴い、撮影種数は減少した。また、動物別の撮影枚数では、アナグマ、ハクビシン、およびウサギにおいて調査地間の差(Kruskal-Wallis検定、 $P < 0.1$)がみられた。しかし、ナラ枯れ発生からの経過年数との関係は、動物の種類毎に異なっており、一定の傾向はみられなかった。中型食肉目の出現頻度は、タヌキとテンで逆の傾向があり、ナラ枯れ発生からの年数がたっているほど出現頻度が、タヌキでは高くなったのに対し、テンでは低くなった。なお、イタチではもともと出現頻度も低く、変化はみられなかった。

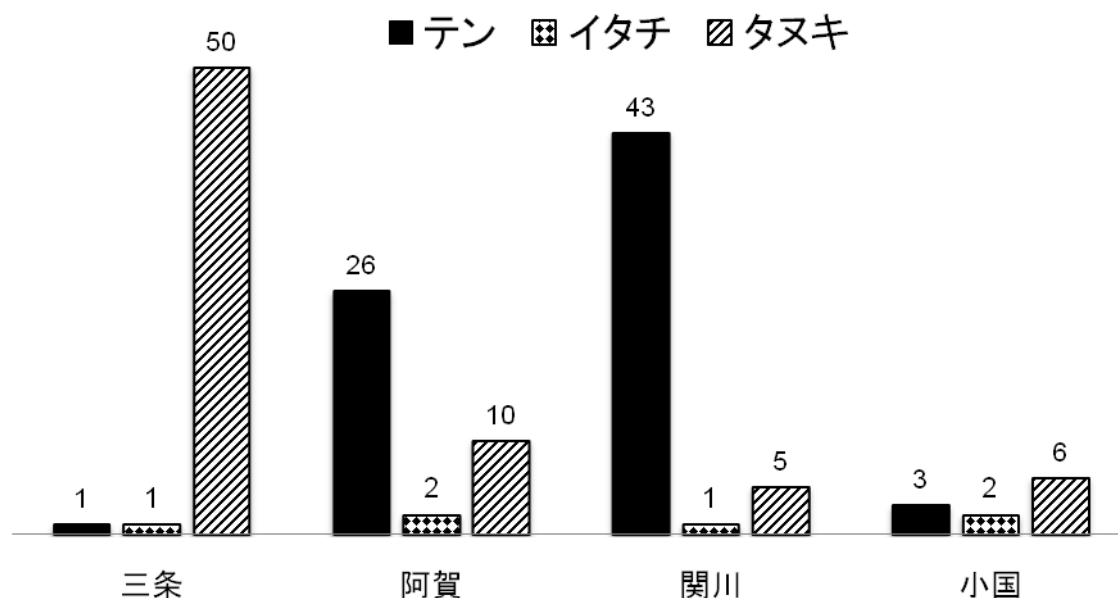


図9 調査地別の中型食肉目撮影枚数

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

今後、区分された林相毎の具体的な林分構造のデータと放鳥されたトキが実際に林相区分されたどの林分を利用したかデータを重ね合わせることにより、野生生物の生息環境復元、創出における森林施業の有効性を検証することが可能になる。

(2) 地球環境政策への貢献

マツノザイセンチュウ病やブナ科樹木の萎凋枯死被害（ナラ類の集団枯損）などにより消失、劣化が進んでいるトキの営巣，ねぐら環境として重要なアカマツ林，落葉広葉樹林の保全について基礎的な知見を得ることができる。

6. 引用文献

- 1) 福田健二 (2008) ブナ科樹木の移凋枯死被害(ナラ枯れ)の研究と防除の最前線. *森林技術* 790: 36-37.
- 2) 小林正秀, 上田明良 (2005) カシノナガキクイムシとその共生菌が関与するブナ科樹木の萎凋枯死—被害発生要因の解明を目指して—. *日林誌* 87: 435-450.
- 3) 布川耕市 (2001) 新潟県におけるナラ類集団枯損被害の地域分布および標高分布. *新潟県森林研報* 43: 33-49.
- 4) 布川耕市 (2007) 新潟県におけるナラ類集団枯損被害の地域分布と拡大経過. *新潟県森林研報* 48: 21-32.
- 5) Yamamoto, S (1989) Gap dynamics in climax *Fagus crenata* forests. *Bot. Mag. Tokyo* 102: 93-118.
- 6) 小金澤正昭 (2004) 赤外線センサーカメラを用いた中型哺乳類の個体数推定. *哺乳類科学* 44: 107-111.
- 7) 清和研二, 菊沢喜八郎 (1989) 落葉広葉樹の種子重と当年生稚苗の季節的伸長様式. *日本生態学会誌* 39: 52-54.
- 8) Nakashizuka, T. & Matsumoto, Y. (2002) Diversity and interaction in a temperate forest community. *Ecological Studies* 158: 319pp, Springer
- 9) Abe, M., Izaki, J. Miguchi, H. Masaki, T. Makita, A. & Nakashizuka, T. (2002) The effects of Sasa and canopy gap formation on tree regeneration in an old beech forest. *J. of Vegetation Science* 13: 565-574.

7. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

特に記載すべき事項はない

(2) 口頭発表 (学会)

- 1) 齋藤時子・大山拓郎・紙谷智彦 (2009) サイズの異なる人工ギャップ創出後15年目の植生と更新—ナラ枯れの影響. 日本生態学会第56回大会

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない

(4) シンポジウム、セミナーの開催 (主催のもの)

特に記載すべき事項はない

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない

F-072 トキの野生復帰のための持続可能な自然再生計画の立案とその社会的手続き
(5) GISによる水田・河川・森林環境情報の一元的管理システムの確立

埼玉大学大学院理工学研究科

大沢 裕

<研究協力者> J-POWER 電源開発(株)
九州大学大学院工学研究院

小野山紀一郎
三谷泰浩

平成19～21年度 合計予算額 5,844千円

(うち、平成21年度予算額 0千円)

※予算額は、間接経費を含む。

本サブテーマは、初年度に研究課題であるGISによる水田・河川・森林環境情報の一元的管理システムの確立ができたため、平成19年度に研究は終了した。

[要旨] 本サブテーマでは、水田、河川、森林環境情報の時間情報と空間情報をひとつのシステム内で扱うことができるGISを用いた一元管理システムを提案し、具体的なシステムの構築を行った。その結果、トキの生息に必要な水田、河川、森林といった環境情報をGIS上で一元的に管理する体制を整えることができ、(1)～(4)のサブテーマから得られた採餌環境および営巣環境情報と併せ、佐渡におけるトキの生息地管理計画を立案するプラットフォームを構築するためのシステムを確立することができた。

[キーワード] GIS (地理情報システム)、時空間情報、水田情報、河川情報、森林情報

1. はじめに

平成15年の日本産トキ絶滅後、トキ再生に向けた様々な取り組みが環境省を中心として実施されている。トキ試験放鳥を進める佐渡において、トキ再生に向けた機運が高まる一方、農耕法の変更に対する不安や、トキによって水田が荒らされる心配は根強く存在する。そのため、トキ生息環境の営巣環境と採餌環境の側面、住民と連携して地域社会にトキを定着させるための社会的環境の側面から調査・研究を行うことが必要となる。本サブテーマでは、これらの調査・研究によって得られた水田、河川、森林環境情報の時間情報と空間情報を1つのシステム内で扱うことができるGISを用いた一元管理システムを提案し、具体的なシステムの構築を行う。

2. 研究目的

トキ再生プロジェクトは多方面にわたる研究機関が参画しており、また、トキ再生に向けた取り組みは他にも多数進行しているため、各研究に用いる情報をいかに統合し研究者間で共有するかが大きな課題となっている。特に、トキ生息環境の営巣環境と採餌環境の側面から得られる水田、河川、森林環境情報と住民と連携して地域社会にトキを定着させるための社会的環境情報を

適切に統合し、自然的・社会的環境に適合した持続的な自然再生計画を立案することが必要となる。

これを解決する手段として、各種情報を地理空間情報として管理することは、情報の円滑な流通と共有を図るため、トキの生息環境を抽出するために非常に有効である。そこで本研究は、トキ野生復帰のための自然再生計画を支援することを目的として、様々な情報（水田、河川、森林環境情報）を地理空間情報として整理しGIS（地理情報システム）を中心にした情報基盤の構築を行う。

3. 研究方法

(1) GIS情報基盤の検討

トキ再生プロジェクトは、九州大学を始めとして、8つの研究グループと、他の複数の研究機関、民間組織から構成される。これらの中で情報を流通するには、各組織が遠隔に所在することから、各々が有する情報システムをネットワークを介して接続する必要がある。しかし、各情報システムをネットワークを介して接続するだけでは、セキュリティ対策、データの管理権限、互いのデータの互換性が保たれないという問題点が生じる。そのため、各々が有する情報システムがネットワークを介して結合され、1つの新たな情報システムとして機能することが必要となる。

それぞれの情報システムは、ハードウェア、データベース、管理形態によって構成、運用される。さらに、それら情報システムを1つの情報流通システムとして機能させるためには、サーバにより一元的に管理する、ある情報システムを基準として他のシステムを運用する、全てのシステムが独立して機能するなど、様々な形態が考えられる。ここでは、情報システムは、ハードウェア、データベース、管理形式により構成されているとし、システムと管理形式により分類することで各形態について検討し、トキ再生プロジェクトの実態に合った情報基盤を提案する。

1) システムによる分類

トキ再生プロジェクトにおける各組織の分散の度合い、各組織が有するシステム（ハードウェアとデータベースから構成）により以下の4つの形式に分類する（図1）。

a. 集中型

集中型は、1つのハードウェアとデータベースから構成される形式である。1つのハードウェアを利用することでデータベースに格納されるすべての情報が扱えるため、情報の管理が非常に容易となるが、データ量、クライアント数が増加するとデータベースへ大きな負担がかかるという短所を有する。

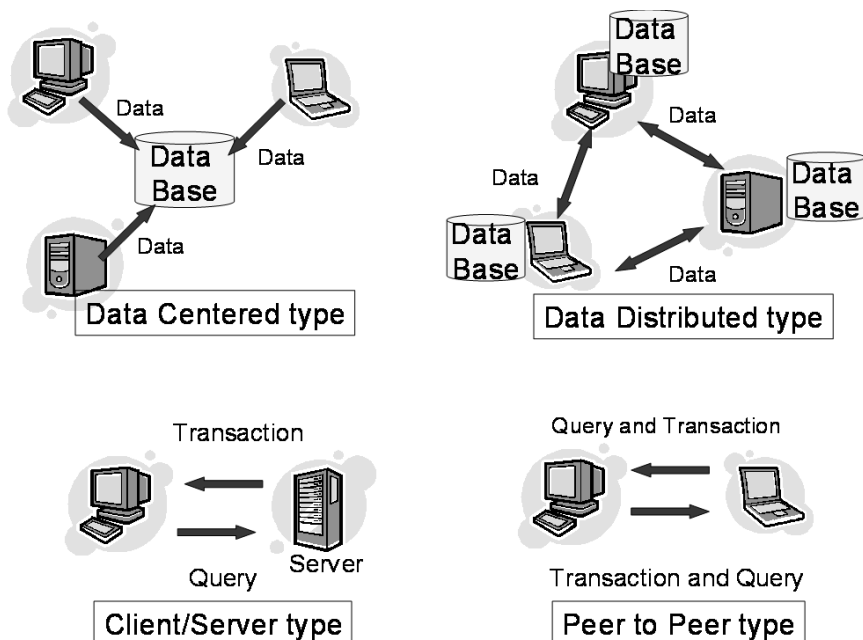


図1 情報システムによる分類。

b. 分散型

分散型は、複数のハードウェアおよび複数のデータベースから構成される形式である。ハードウェアとデータベースを分散させることにより、データベースに加わる負担を軽減することができ、個々の独立性によりシステム全体の機能を損なうことなくハードウェア・データベースを変更、データを入れ替えることができる。一方、システムを分散させることにより管理者の数を増大させ必要が生じ、データの管理が煩雑になるという短所を有する。

c. クライアント/サーバ型

クライアント/サーバ型は、分散する複数のハードウェアをサーバがネットワークを介して管理する形式である。クライアントがアプリケーション等のインターフェイスで操作している一方で、サーバはデータを処理して提供することができる。近年、最も利用されている形式であり、サーバを管理するだけで複数のハードウェアおよびデータベースを管理することができる。

d. ピアツーピア形式

ピアツーピア形は、各コンピュータが分散しており、サーバやクライアントといった区別が無い形式である。全てのコンピュータがデータベース管理システムの機能を持ち、ネットワークを介して他のコンピュータと互いにデータ処理を行うことができる。最も効率的な情報処理が可能であるが、各コンピュータにデータベース管理システムを整備するには非常に大きなコストと労力が必要となる。

2) 管理形式による分類

データベースの分散の度合いと、データベースを管理する管理者の形態により以下に挙げる3つに分類することができる(図2)。

a. 完全統合型

多数のシステムが統合し、1人の管理者が管理する形式である。あるデータベースのもとに全ての情報が管理されており、仮想的にシステムが1つに統合されている。全ての情報が一律に管理されるため情報を一意的に利用できるが、管理者に大きな負担がかかるという短所を有する。

b. 半自律型

半自律型は、ネットワークを介して接続されているデータベースに管理者が存在し、各々の管理者が独立して情報の管理を行う形式である。さらに、他のデータベースとネットワークを介して情報を得ることができる。各管理者は、情報の利用を容易にするような環境を構築しており、また、互いに情報を共有するための管理方式を採用しているため、完全な自律型ではない。

c. 完全自律型

各データベースにおけるシステムがスタンドアロンな状態で構築・管理されている方式である。

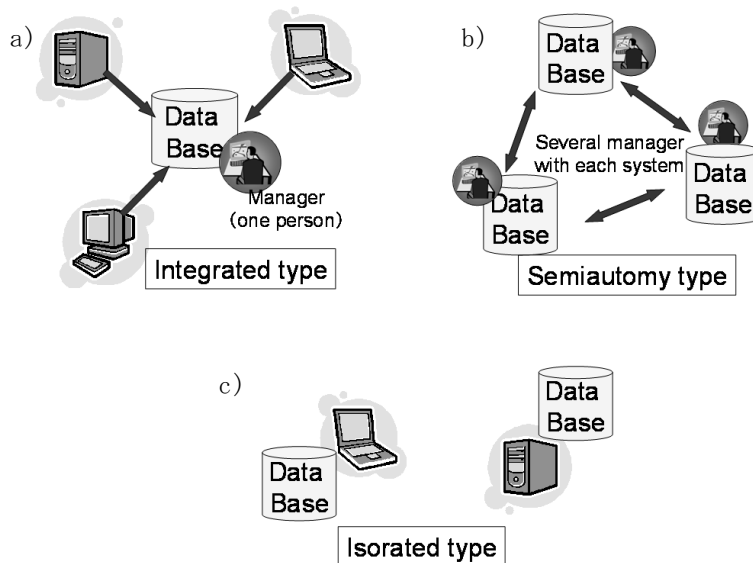


図2. 管理形式による分類. a) 完全統合型, b) 半自律型, c) 完全自律型

他のデータベースシステムの存在、他のデータベースとの接続が考慮されておらず、新たにデータベースをネットワークを介して接続することが非常に難しい。

3) システムの異質性

システムが分散されている形態の場合、情報は組織ごとに管理されているため、データ形式に違いが生じる可能性がある。例えばデータモデルや、クエリ言語、プロトコルが一致しない場合である。また、アプリケーションソフトについても同様で、形式を変換する手間がかかり、データを使用できない場合も考えられる。

4) トキ再生プロジェクトの現状

トキ再生プロジェクトを構成する各組織は、各々が管理するデータベースに研究・調査情報を格納している。各組織が有するデータベースは互いに接続されているわけではなく、また、異種ソフトウェアを利用している。この現状は、上述した分類によると「分散型」、「完全自立型」でありシステムの異質性があるといえる。この現状と、トキ再生プロジェクトが目的とする情報の流通を踏まえて、最適な情報流通ネットワークを構築するためのシステムを検討する。

トキ再生プロジェクトにおいて、情報の共有は研究者間および一般市民という性質の異なる者の間で行わなければならない。特に、一般市民への情報提供は不特定多数へ情報を公開するためセキュリティが非常に重要となる。そのため、サーバを介して必要な情報だけをサービスとして配信する方式が最も望ましく、特定の組織間でのみ、データベースを公開することで情報を共有する方式を利用する。システムの分類によれば「サーバ/クライアント型」となる。

また、利用する情報は多岐にわたり、特に、多くの情報は地理空間情報として利用するため、各種情報を用途に合わせて加工・種別する必要がある。一般の情報とは構成が異なる地理空間情報の適切な管理が求められるため、情報の管理者はGISの取り扱いに習熟する必要がある。このことから、情報はGISの取り扱いに精通している管理者のもとで集約することが望ましい。管理形式による分類によれば「完全統合型」となる。一方、トキ再生プロジェクトを構成する組織、研究者の数は多く、それに伴う情報量は莫大なものとなるだけでなく、研究は日々継続して行われており、情報は常に最新のものとなっている。さらに、研究情報には公開できるものと公開できないものが存在する。このことは、情報は各組織が各々で管理し、ネットワークを介して互いに互換がある形式で情報を共有する「半自律型」を利用することが望ましいことを示している。

(2) GIS情報基盤の提案

前述した現状を踏まえ、トキ再生プロジェクトにおける情報基盤として、基本構造として「サーバ/クライ

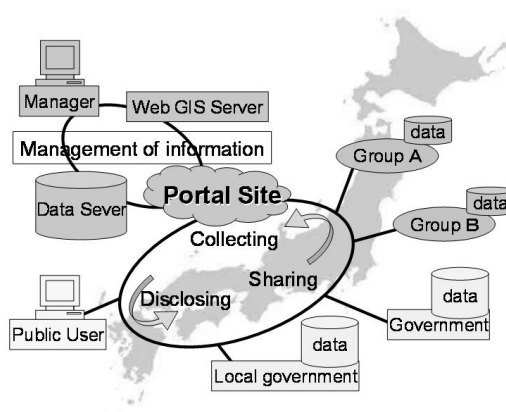


図3 共有情報の基盤

アント型」を採用する。さらに、管理形式としては「半自律型」が望ましいが現状としては確立
が難しいため、「完全統合型」としての情報基盤を構築し、段階的に「半自律型」の
要素を取り入れる。そのために、グループウェアであるWikiシステムを利用して情報基盤を確立する。Wikiシステムについては後述する。

この形式の情報基盤を構築するために、情報を収集・管理・配信する機能と各種サーバへアクセスするためのポータルサイト、データを保存・蓄積するためのデータサーバ、地理空間情報を配信するための

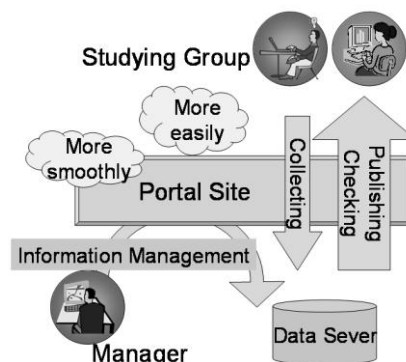


図4 ポータルサイトのイメージ

Web GISサーバがWebを介して利用できるような仕組みを構築する（図3）。この情報基盤を利用して、全体で共有すべき情報を1つのデータサーバへと集約させ、集約された情報に対して管理者が必要に応じて地理空間情報へ変換、配信を行い、全てのユーザがポータルサイトを介して情報を利用できる仕組みとする。以下に、ポータルサイト、データサーバ、Web GISサーバの役割と構築について述べる。

（3）ポータルサイト

データを集約するためにポータルサイトは2つの機能面から重要である。1つ目は、データを保存しているデータサーバ、地理空間情報を配信するWeb GISサーバへ容易にアクセスできる機能である。各サーバへの入り口としての機能に加えて、円滑に情報を収集できる機能、多様な情報を合理的かつ分かりやすく管理できる機能、Web GISサーバへ容易にアクセスでき視覚的に分かりやすく地理空間情報を配信できる機能が求められる。2つ目は、地理空間情報をデータファイルとして共有するためのWebサイトとしての機能である。地理空間情報をデータファイルとして共有するために、データサーバへ直接リンクさせることで、データをファイルとして共有する。地理空間情報は一般の情報と異なり、複数のデータファイルから構成されている場合が多いが、アーカイブにより1つのデータファイルとして共有できる。図4にポータルサイトの役割を示す。

このように、ポータルサイトは情報を統合するための情報基盤において中心的な役割を果たす。また、ポータルサイトの役割はプロジェクトの進行に伴い、

情報の収集から管理、発信へと多様化していくため、必要に応じて更新が可能な柔軟性に富んだ構成でなくてはならない。トキ再生プロジェクトの初期段階ではデータ収集を主目的としたデータアップロード機能の充実を図り、多くの情報が収集されてくるプロジェクトの中期段階以降は、情報の管理機能を強化し、地理空間情報を研究者間で共有し、一般市民へ情報提供するための機能を充実する。

情報基盤の中核となるポータルサイトを構築するために、Webサイト構築ソフトウェアを利用する。Wikiシステムとはグループウェアの一種であり、特別な言語を必要とせずWebサイトを構築することができる。文書を構造的に整理することができ、グループ内のメンバーであればパスワード管理の下、誰でも編集を行うことができる。また、ファイルを共有することができるため、

地理空間情報を特定のフォーマットの下グループ間での共有ができる。図5に今回Wikiシステムを利用して作成したポータルサイト「トキGIS」の画面を示す。



図5 トキGIS

(4) データサーバ

地理空間情報を流通するためのGIS情報基盤を構築するには、情報を地理空間情報として蓄積・管理するためのデータベースを構築するサーバが必要となる。このデータサーバは、ポータルサイトからWebを介して接続するためにネットワーク上に存在する必要がある。

データサーバの構築に当たり、ポータルサイトとの連携を容易にするためにWikiシステムを利用する。Wikiを利用したデータサーバは、デジタルファイルであれば全ての形式でアップロードすることができ、アップロードしたデータはアクセス権限があるものならば誰でもダウンロードできる。

(5) Web GISサーバ

トキ再生プロジェクトにおいて情報の配信は研究者間の共有および一般市民への提供という形で行われなければならない。研究者間の共有においては多くの組織がGISを利用できる環境にあるため地理空間情報をデータファイルとして共有することは問題ない。一方、一般市民はGISを利用できない場合が多く、地理空間情報を提供するためにはWeb GISやGoogle Earthを利用することが

必要となる。Web GISはWebブラウザによりGISを利用するため、GISを利用したことがない者、利用はしたことがあるが常時GISソフトウェアが身近にない者へ地理空間情報を配信するために有効な手段となる。また、マップドキュメントにおいて作成者が特定の意図を持って表示した描画はデータ自体には反映されないため、表現した視覚効果をユーザに強く与えることができるWeb GISを利用することは非常に効果的である。これは、GISが利用できる環境にあるユーザに対しても有効な手法である。

Web GISを構築するために、トキ再生プロジェクトで最も多く使われているArc GISを利用する。また、ArcGIS Serverの補完的役割を担うために、Google Earthを利用する。Google Earthを利用して地理空間情報を配信するために、地理空間情報をkml形式で保存し、ポータルサイト上で共有する。kml形式のデータファイルをGoogle Earth上で開くことにより視覚的に情報を確認することができる仕組みとする。

(6) サーバシステムの構築

ポータルサイトを構築するためのWikiシステム、データサーバ、Web GISサーバはそれぞれ異なるサーバとして構築する。データサーバを構築するために、データベースソフトウェアであるOracle Database、及びArc SDEを利用し、Web GISサーバを構築するためにArcGIS Serverを利用する。表1に各サーバのシステム、OS、使用ソフトウェアについて整理する。

表1 WebGISサーバとデータサーバのシステム環境

Name	Wiki Server	Database Server	Web GIS Server
System	CPU:PentiumIV3.0GHz	CPU:PentiumIV3.0GHz	CPU:PentiumIV3.0GHz
	Memory 1.5 Gbyte	Memory 1.5 Gbyte	Memory 2.0 Gbyte
	HDD 80 GB	HDD 80 GB	HDD 80 GB
OS	Free BSD 6.2	Windows 2003 Server	Windows 2003 Server
Software	Puki Wiki	Oracle Database 10g	Arc GIS Sever

(7) 情報の収集手法

前述した情報基盤を利用して情報を収集するに当たり、1つの情報管理グループが全ての組織が有する情報を包括的に、正確に収集・管理することは非常に困難である。そこで、複雑に絡み合う情報を、視覚的に分かりやすく整理し、互いの関係を的確に表現するために情報マトリックスを利用する。情報マトリックスとは、情報を供給と利用の2方向から表示し、情報の活用状況を視覚的に分かりやすく表現したものである。情報マトリックスを利用することで、複雑に絡み合う情報の関係を単純化することができる。例えば、ある列に関する情報を考えた時、複数の情報と関連が認められれば、その情報は必要性が高いということが視覚的に判断できる。また、収集すべき情報の優先順位を決定する場合は、より複数の情報と関連付けられている情報を選択すればよい。

1) 情報収集のための情報マトリックス

情報を収集するために情報マトリックスの作成は、ある情報とその情報を整備するために必要となる情報をそれぞれ縦軸と横軸に配置することで可能となる。情報収集において、互いに利用

できるかを情報マトリックスとして表すことは、不必要な情報の収集を省くことによる情報収集効率の向上、情報の整備状況の視覚的認識の改善という点において非常に有効な方法である。本研究が作成する情報マトリックスは、各研究グループが行っている調査・研究情報と、それに対応する基盤地図情報をそれぞれ横軸、縦軸で示す。互いに利用できる場合には○印を描き、特定の条件が必要な場合には注として欄外に補足説明を行う。表2に今回作成した情報マトリックスを示す。情報マトリックスは収集状況を明示できることからポータルサイト上に載せることで情報管理の手段ともなる。

2) 情報の構成分析

情報マトリックスによる情報収集だけでなく、GISを利用して新たな基盤地図情報を作成できるという点に着目し、それまでに収集できていない基盤地図情報を「作成」することにより整備することとした。そのために、必要とされている情報を複数の情報へと分割し、収集できる段階へまで細分化する。そして、GISの重ね併せなどの空間解析機能を利用して最終的に必要とされている情報を作成する。

この情報の構成分析の過程で非常に重要となるのが、データモデルの検討である。GISはポイント、ライン、ポリゴンを利用して正確な形状を表現するベクトル型データモデルと、メッシュを利用して表現するラスタ型データモデルの2通りの表現方法がある。両者を互いに変換することはできるが、保有する精度以上のデータへ変換することはできない。最終的なモデル化が明確になっていない現状では、できるだけ高精度の情報が整備されていることが望ましく、情報の構成分析はベクトル型データモデルもしくは高精度なラスタ型データモデルの地図情報作成を目指して行う必要がある。

以上の方法により作成した、必要とされる情報、作成すべき基盤地図情報、作成単位、作成レイヤ、作成すべき属性情報および調査により入力すべき属性情報の対応表を表3に示す。この表を利用することで収集すべき情報、必要とされる基盤地図情報を作成する方法、変数パラメータと関連付ける方法を総覧でき視覚的に理解できる。

このように、情報を収集するためには情報を集めるだけでなく、GISが有する空間特性を活かして収集可能な情報から必要とする地図情報を作成することが非常に重要となる。

4. 結果・考察

Wikiを利用したポータルサイトを情報基盤に備えることで、従来の一方向からの情報提供・流通ではなく双方向の情報流通が実現された。また、作成した情報マトリックスをデータの収集に伴い随時更新して研究グループ間での情報の収集・共有状況を明確にすることにより情報の収集・共有の効率が格段に向上し、理想的な情報流通を行うことができた。今後は、情報量とGISの利用者の増加に伴い、段階的に自律型の情報システムへ移管し情報基盤を発展させる。また、収集した情報を用いてトキ生息環境のモデル化に寄与する。

表2 情報マトリックス

グループ	トキ作産量産地モリ山作産地群(☆)										工草産地産地(☆)										その他									
	森林		農地		道路		(湖沼)		河川		水田		江		水陸		水陸界		たの池		社会環境		その他							
タイプ	種別	種別	種別	種別	種別	種別	種別	種別	種別	種別	種別	種別	種別	種別	種別	種別	種別	種別	種別	種別	種別	種別	種別							
グループ	タイプ	バウ		ス		ラ		ク		タ		チ		ツ		テ		ト		タ		チ		ツ						
		バウ		ス		ラ		ク		タ		チ		ツ		テ		ト		タ		チ		ツ		テ				
森林計画	種別	産地産地(バウ)		産地産地(ス)		産地産地(ラ)		産地産地(ク)		産地産地(タ)		産地産地(チ)		産地産地(ツ)		産地産地(テ)		産地産地(ト)		産地産地(タ)		産地産地(チ)		産地産地(ツ)						
		産地産地(バウ)		産地産地(ス)		産地産地(ラ)		産地産地(ク)		産地産地(タ)		産地産地(チ)		産地産地(ツ)		産地産地(テ)		産地産地(ト)		産地産地(タ)		産地産地(チ)		産地産地(ツ)						
Zmap Town II (ゼンリン)	種別	列川・水産(ラ)		列川・水産(ス)		列川・水産(ラ)		列川・水産(ク)		列川・水産(タ)		列川・水産(チ)		列川・水産(ツ)		列川・水産(テ)		列川・水産(ト)		列川・水産(タ)		列川・水産(チ)		列川・水産(ツ)						
		列川・水産(ラ)		列川・水産(ス)		列川・水産(ラ)		列川・水産(ク)		列川・水産(タ)		列川・水産(チ)		列川・水産(ツ)		列川・水産(テ)		列川・水産(ト)		列川・水産(タ)		列川・水産(チ)		列川・水産(ツ)						
林野事業 (H17年)	種別	町目・水産(ラ)		町目・水産(ス)		町目・水産(ラ)		町目・水産(ク)		町目・水産(タ)		町目・水産(チ)		町目・水産(ツ)		町目・水産(テ)		町目・水産(ト)		町目・水産(タ)		町目・水産(チ)		町目・水産(ツ)						
		町目・水産(ラ)		町目・水産(ス)		町目・水産(ラ)		町目・水産(ク)		町目・水産(タ)		町目・水産(チ)		町目・水産(ツ)		町目・水産(テ)		町目・水産(ト)		町目・水産(タ)		町目・水産(チ)		町目・水産(ツ)						
数値地図2500 ※1	種別	町目・水産(ラ)		町目・水産(ス)		町目・水産(ラ)		町目・水産(ク)		町目・水産(タ)		町目・水産(チ)		町目・水産(ツ)		町目・水産(テ)		町目・水産(ト)		町目・水産(タ)		町目・水産(チ)		町目・水産(ツ)						
		町目・水産(ラ)		町目・水産(ス)		町目・水産(ラ)		町目・水産(ク)		町目・水産(タ)		町目・水産(チ)		町目・水産(ツ)		町目・水産(テ)		町目・水産(ト)		町目・水産(タ)		町目・水産(チ)		町目・水産(ツ)						
数値地図2500	種別	町目・水産(ラ)		町目・水産(ス)		町目・水産(ラ)		町目・水産(ク)		町目・水産(タ)		町目・水産(チ)		町目・水産(ツ)		町目・水産(テ)		町目・水産(ト)		町目・水産(タ)		町目・水産(チ)		町目・水産(ツ)						
		町目・水産(ラ)		町目・水産(ス)		町目・水産(ラ)		町目・水産(ク)		町目・水産(タ)		町目・水産(チ)		町目・水産(ツ)		町目・水産(テ)		町目・水産(ト)		町目・水産(タ)		町目・水産(チ)		町目・水産(ツ)						
調査	種別	町目・水産(ラ)		町目・水産(ス)		町目・水産(ラ)		町目・水産(ク)		町目・水産(タ)		町目・水産(チ)		町目・水産(ツ)		町目・水産(テ)		町目・水産(ト)		町目・水産(タ)		町目・水産(チ)		町目・水産(ツ)						
		町目・水産(ラ)		町目・水産(ス)		町目・水産(ラ)		町目・水産(ク)		町目・水産(タ)		町目・水産(チ)		町目・水産(ツ)		町目・水産(テ)		町目・水産(ト)		町目・水産(タ)		町目・水産(チ)		町目・水産(ツ)						
1/10万分図(国土地院)	種別	町目・水産(ラ)		町目・水産(ス)		町目・水産(ラ)		町目・水産(ク)		町目・水産(タ)		町目・水産(チ)		町目・水産(ツ)		町目・水産(テ)		町目・水産(ト)		町目・水産(タ)		町目・水産(チ)		町目・水産(ツ)						
		町目・水産(ラ)		町目・水産(ス)		町目・水産(ラ)		町目・水産(ク)		町目・水産(タ)		町目・水産(チ)		町目・水産(ツ)		町目・水産(テ)		町目・水産(ト)		町目・水産(タ)		町目・水産(チ)		町目・水産(ツ)						
調査	種別	町目・水産(ラ)		町目・水産(ス)		町目・水産(ラ)		町目・水産(ク)		町目・水産(タ)		町目・水産(チ)		町目・水産(ツ)		町目・水産(テ)		町目・水産(ト)		町目・水産(タ)		町目・水産(チ)		町目・水産(ツ)						
		町目・水産(ラ)		町目・水産(ス)		町目・水産(ラ)		町目・水産(ク)		町目・水産(タ)		町目・水産(チ)		町目・水産(ツ)		町目・水産(テ)		町目・水産(ト)		町目・水産(タ)		町目・水産(チ)		町目・水産(ツ)						
8000分の1	種別	町目・水産(ラ)		町目・水産(ス)		町目・水産(ラ)		町目・水産(ク)		町目・水産(タ)		町目・水産(チ)		町目・水産(ツ)		町目・水産(テ)		町目・水産(ト)		町目・水産(タ)		町目・水産(チ)		町目・水産(ツ)						
		町目・水産(ラ)		町目・水産(ス)		町目・水産(ラ)		町目・水産(ク)		町目・水産(タ)		町目・水産(チ)		町目・水産(ツ)		町目・水産(テ)		町目・水産(ト)		町目・水産(タ)		町目・水産(チ)		町目・水産(ツ)						
地形図	種別	町目・水産(ラ)		町目・水産(ス)		町目・水産(ラ)		町目・水産(ク)		町目・水産(タ)		町目・水産(チ)		町目・水産(ツ)		町目・水産(テ)		町目・水産(ト)		町目・水産(タ)		町目・水産(チ)		町目・水産(ツ)						
		町目・水産(ラ)		町目・水産(ス)		町目・水産(ラ)		町目・水産(ク)		町目・水産(タ)		町目・水産(チ)		町目・水産(ツ)		町目・水産(テ)		町目・水産(ト)		町目・水産(タ)		町目・水産(チ)		町目・水産(ツ)						

※1 全国中野のデータ収集地図2500であるため、小段集積のデータが重複して注2 区画は併置、小段、集積集積に付かれて注3 河川上流および中河川は「ライン」、河川下流および大河川は「ボウ」
 ※2 河川上流および中河川は「ライン」、河川下流および大河川は「ボウ」
 ※3 「トキ」の研究による集積「トキ」

表3 収集された地図データとパラメータの関係

環境タイプ	必要な地図データの種類	作成される空間データ	作成単位	作成レイヤ	作成状況	コメント	作成可能な属性データ	調査から入力する属性データ	最終作成データ(主キー/パラメータ)
森林	航空写真	森林区域の外形	ポリゴン	森林レイヤ	森林計画図を用いて小佐渡部から作成中、最小単位は地籍基本書とする。現在、小佐渡部に対して作成済み。	林道、小径、施業本番、施業林番により区分が分断されており、施業林番ごとに附帯する。現在、小佐渡部に対して作成済み。	樹種タイプ別林分面積、林縁距離、樹種タイプ、湿地、主谷間、民家からの距離	樹高、立木数、樹冠、樹冠	樹種タイプ別林分面積、立木数、樹冠距離、林縁距離、平均傾度、平均方位、採石場からの距離、湿地からの距離、主谷間からの距離、民家からの距離、樹種距離(赤字)、「トキの研究」より
	航空写真	傾斜角、傾斜方向分布	100mメッシュ	傾斜レイヤ	左遷全領に対して整備済み	100mメッシュとして整備済み	湿地、主谷間、民家からの距離	—	傾斜距離(赤字)、「トキの研究」より
	Zmap Town(ゼンリン)	水田区域の外形	ポリゴン	水田レイヤ	航空写真とZmap Townを重ね合わせて、小佐渡部から作成中。	航空写真とZmap Townを互いに補完しながら利用し、水田区分をポリゴンとして作成	水田・畑からの距離	ピオトーブの水田の位置、冬期凍結水田の位置、休耕田の位置	ピオトーブ面積、冬期凍結水田面積、畑面積、水田からの距離、水田面積
	土地利用細分	水田分布図	ライン	畑レイヤ	整備済み	100mメッシュとして整備済み	—	—	—
	数値地図2500	河川区画図(主に国庫)	ポリゴン	河川レイヤ	佐渡全領に対して、ポリゴンで整備されている区間に対して河川レイヤを作成済み。ラインで整備されている区間に対しては河川と水田が重なっているため、水田を優先して作成済み。	河川レイヤをポリゴンとして作成	河川レイヤをポリゴンとして作成	河川レイヤをポリゴンとして作成	河川レイヤをポリゴンとして作成
	Zmap Town(ゼンリン)	河川区画図	ライン	河川レイヤ	佐渡全領に対して、ポリゴンで整備されている区間に対して河川レイヤを作成済み。ラインで整備されている区間に対しては河川と水田が重なっているため、水田を優先して作成済み。	河川レイヤをポリゴンとして作成	河川レイヤをポリゴンとして作成	河川レイヤをポリゴンとして作成	河川レイヤをポリゴンとして作成
	航空写真	河川区画図	ポリゴン	河川レイヤ	未整備	航空写真による判定	河川レイヤをポリゴンとして作成	河川レイヤをポリゴンとして作成	河川レイヤをポリゴンとして作成
	Zmap Town(ゼンリン)	建物位置図	ポリゴン	建物レイヤ	佐渡全領に対してZmap Townと国勢調査を併せて文字列レイヤを作成済み。国勢の区画が異なるため、重畳性の確認が必要。	整備済み	河川レイヤをポリゴンとして作成	河川レイヤをポリゴンとして作成	河川レイヤをポリゴンとして作成
	国勢調査H17	大字境界	ポリゴン	大字境界レイヤ	整備済み	整備済み	河川レイヤをポリゴンとして作成	河川レイヤをポリゴンとして作成	河川レイヤをポリゴンとして作成
	数値地図2500	道路位置(主に国庫)	ライン	道路レイヤ	佐渡全領に対して数値地図2500とZmap Townを用いて全ての道路を抽出し、ラインで整備済み。	整備済み	河川レイヤをポリゴンとして作成	河川レイヤをポリゴンとして作成	河川レイヤをポリゴンとして作成
Zmap Town(ゼンリン)	道路位置	ライン	道路レイヤ	整備済み	整備済み	河川レイヤをポリゴンとして作成	河川レイヤをポリゴンとして作成	河川レイヤをポリゴンとして作成	
数値地図2500	湖沼位置図	ポリゴン	湖沼レイヤ	佐渡全領に対してZmap Townを用いて湖沼ポイントを作成済み。さらに、数値地図2500を用いて精査中。	整備済み	河川レイヤをポリゴンとして作成	河川レイヤをポリゴンとして作成	河川レイヤをポリゴンとして作成	
数値地図2500	湖沼位置	ポリゴン	湖沼レイヤ	整備済み	整備済み	河川レイヤをポリゴンとして作成	河川レイヤをポリゴンとして作成	河川レイヤをポリゴンとして作成	
Zmap Town(ゼンリン)	ダム位置図	ポイント	ダムレイヤ	整備済み	整備済み	河川レイヤをポリゴンとして作成	河川レイヤをポリゴンとして作成	河川レイヤをポリゴンとして作成	
国土地理院(ゼンリン)	江の位置	ポイントorポリゴン	江レイヤ	整備済み	整備済み	河川レイヤをポリゴンとして作成	河川レイヤをポリゴンとして作成	河川レイヤをポリゴンとして作成	
水田	Zmap Town(ゼンリン)	水路位置	ライン	水路レイヤ	河川と水路が混在している中からどのように水路のみを取り出すかを検討中。	河川レイヤの一部として水路が含まれている。	※傾斜データと併せて断面図記	傾斜、幅、用排水区分、優先区分、下流落差	傾斜、幅、用排水区分、優先区分、下流落差
水路	?	水路樹位置	ポイントorポリゴン	水路樹レイヤ	水路レイヤを元に、水路樹の位置へポイントをつけていくことで作成可能。	水路レイヤを元に、水路樹の位置へポイントをつけていくことで作成可能。	※傾斜データと併せて断面図記	傾斜、幅、用排水区分、優先区分、下流落差	傾斜、幅、用排水区分、優先区分、下流落差
ため池	数値地図2500	ため池位置(主に国庫)	ポリゴン	ため池レイヤ	未整備	未整備	傾斜、幅、用排水区分、優先区分、下流落差	傾斜、幅、用排水区分、優先区分、下流落差	傾斜、幅、用排水区分、優先区分、下流落差
Zmap Town(ゼンリン)	ため池位置	ため池位置	ため池レイヤ	ため池レイヤ	未整備	未整備	傾斜、幅、用排水区分、優先区分、下流落差	傾斜、幅、用排水区分、優先区分、下流落差	傾斜、幅、用排水区分、優先区分、下流落差
河川	?	江の位置	ポイントorポリゴン	江レイヤ	整備済み	整備済み	傾斜、幅、用排水区分、優先区分、下流落差	傾斜、幅、用排水区分、優先区分、下流落差	傾斜、幅、用排水区分、優先区分、下流落差
社会環境	Zmap Town(ゼンリン)	建物位置図	ポリゴン	住宅レイヤ	佐渡全領に対して、地籍的区画を作成済みである。住宅のみを抽出することを検討中。	住宅レイヤをポリゴンとして作成	住宅レイヤをポリゴンとして作成	住宅レイヤをポリゴンとして作成	住宅レイヤをポリゴンとして作成
その他	国勢調査	大字区画、人口データ	ポリゴン	大字区画、人口データ	H17年度データ	H17年度データ	人口	人口	集落平均年齢、集落人口
	国土数値情報(気象)	土地利用細分	100mメッシュ	土地利用レイヤ	整備済み	100mメッシュとして整備済み	土地利用区分	土地利用区分	集落平均年齢、集落人口
	国土数値情報(気象)	気象レイヤ	気象レイヤ	気象レイヤ	整備済み	整備済み	傾斜角、傾斜方向	傾斜角、傾斜方向	集落平均年齢、集落人口
地形	数値地図2500(メッシュ等高)	傾斜角、傾斜方向分布	50mメッシュ	傾斜レイヤ	佐渡全領に対して作成済み。	50mメッシュとして整備済み	傾斜角、傾斜方向	傾斜角、傾斜方向	集落平均年齢、集落人口

※トキ好適生息地モデル、農地と同じ

※トキ好適生息地モデル、河川と同じ

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

トキ生息環境の営巣環境と採餌環境の側面から得られる水田、河川、森林環境情報と住民と連携して地域社会にトキを定着させるための社会的環境情報を適切に統合し、自然的・社会的環境に適合した持続的な自然再生計画を立案するための意思決定支援システムとしての情報基盤を構築することができた。

(2) 地球環境政策への貢献

本研究の成果は、世界の生物多様性保全戦略に貢献しうる有効なモデルに成り得ると考える。

6. 引用文献

特になし

7. 国際共同研究等の状況

特になし

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

特になし

(2) 口頭発表（学会）

- 1) 鷲見皓大、江崎哲郎、三谷泰浩、池見洋明：平成19年度土木学会西部支部研究発表会（2007）
「GISによるトキ野生復帰の自然再生計画の支援のための情報基盤の構築」

(3) 出願特許

特になし

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

特になし

(5) マスコミ等への公表・報道等

特になし

(6) その他

特になし

F-072 トキの野生復帰のための持続可能な自然再生計画の立案とその社会的手続き

(6) 中国におけるトキの生態情報の収集

財団法人 山階鳥類研究所	所長	山岸 哲
	保全研究室長	尾崎清明
	客員研究員	蘇 雲山

〈研究協力者〉

環境省関東地方環境事務所佐渡自然保護官事務所	越田智恵子
新潟大学大学院自然科学研究科環境共生科学専攻	関島恒夫

平成19～21年度 合計予算額 22,853千円
(うち、平成21年度予算額 8,190千円)

※予算額には、間接経費を含む。

[要旨] トキの野生個体群が存在する中国陝西省において、トキが要求する生息環境を把握し、その結果を佐渡におけるトキ個体群の生息地管理計画立案に資することを目的とした。

まず、中国のトキ営巣位置と巣立ち雛数の情報を用い、営巣適地を予測する統計モデルを構築したところ、起伏、林縁形状、広葉樹林・針葉樹林・住宅地の割合の5変数で構成されるモデルが最適となり、各変数のモデル係数のうち起伏のみが負でその他は正に寄与していた。営巣適地モデルを佐渡全域に外挿し営巣適地と評価された地域は、大佐渡南西部と小佐渡東部・南西部にかけて遍在していた。生息適地に関する情報は、生息地再生など保全計画の立案に有効となろう。

つぎに、トキの餌環境を評価するため、中国の野生個体と佐渡の放鳥個体を対象に、餌場環境ごとの採餌行動とその季節変化を比較した。餌環境は、冬期をのぞけば日本の方が恵まれており、これは比較的エネルギー量の多いドジョウが豊富に存在するためと考えられた。しかし日本では、冬期にドジョウやミズズの減少の影響でエネルギー獲得効率が著しく低下していた。一方、中国における餌環境は採餌効率やエネルギー獲得効率は日本より低い、特定の餌生物にかたよらず、季節変動も日本より少なかった。中国では、河川は採餌経験の乏しい幼鳥に重要なエネルギー供給源となっている可能性があり、今後の餌環境の管理・改善に、これらの点は検討に値する。

1981～2009年の29年間における中国の野生トキ個体群の消長から、個体群回復の原因を明らかにした。最近10年間はトキ繁殖期の降雨量の変化が繁殖成功率に影響があると考えられた。また、洋県と寧陝県で実施したトキ放鳥実験個体の繁殖状況を、野生トキ29年間の繁殖実績と比較した結果、放鳥個体は野生個体より繁殖能力が低いことが明らかになった。現在、地域住民の協力を得てトキの個体数は順調に増えているが、餌場環境に悪化の兆しがあり懸念される。トキ生息地の自然環境と社会環境の変化に注目し、適切な措置が求められる。

[キーワード] トキ、鳥類生態、生息環境、中国、自然再生

1. はじめに

中国産トキの調査研究を通じて、中国との連携を強化し、国際的なトキの個体群管理法の確立を目指している。本研究で追求する課題は、生物多様性国家戦略の基本的視点と合致し、そこで得られる成果は、生物の多様性に関わる条約の目指す一つの問題解決事例となるであろう。

佐渡におけるトキの定着に向けた効果的かつ効率的な自然再生を実施するためには、生息に不可欠な情報である餌と営巣・ねぐらの視点から佐渡の現状を評価し、その結果を踏まえて再生重点地域を選出していくことが望ましい。国内産トキの餌生物に関する情報は、トキが佐渡に生残していた1980年以前にその生態調査を実施していた記録に詳しく⁹⁾、本プロジェクトのサブテーマ1と2では、その情報に基づいて佐渡島内における餌生物の潜在的分布を予測した。

2. 研究目的

本サブテーマでは、トキの野生個体群が存在する中国陝西省洋県において、繁殖期から非繁殖期を通じてトキが要求する採餌・営巣など生息環境を把握し、その結果を佐渡におけるトキ個体群の長期的な存続を可能にする生息地管理計画の立案に資することを目的とした。

営巣環境については、国内で報告されている営巣事例数が極めて少ないことに加え、いずれも営巣木の特徴（樹種や高さなど）に言及した記載が多いため、営巣地周辺の景観的特性といった営巣環境特性の抽出が困難な状況にあった。そこで本研究では、野生個体群が現存し、すでに多くの営巣事例が確認されている中国産トキの営巣位置情報を用いることで、トキの営巣適地モデルを作成し、それを佐渡に外挿することで、佐渡における潜在的な営巣適地候補地を抽出することを目的とした。

また、日本におけるトキの定着を成功させるには、彼らが一年を通して暮らしてゆく餌環境の十分な整備が不可欠である。そのため、日本の放鳥個体がおかれている餌環境について今後どのような管理・改善が必要であるかを明らかにすることを目的とした。

さらに、日本における野生復帰を効果的に進めていくために、中国ですすでに行われている野生復帰実験に関する既存の研究成果を収集整理するとともに、トキ保護事業の現状と問題点及びトキ生息域の社会環境の実情を把握することを目的とした。

3. 研究方法

(1) 営巣環境解析

1) トキの営巣位置情報

本研究を行うにあたり、解析に使用したトキの営巣位置情報は、中国森林科学アカデミー・国際標識センター（Chinese Academy of Forestry, National Bird Banding Center）が、2004年から2006年にかけて中国陝西省洋県において集積した100地点の情報を用いた。また、巣立ち雛数の解析については、上記100地点の営巣情報の中で、巣立ち雛数を確認することができた営巣位置情報を用いた。なお、上記情報は、本サブテーマを担当する山階鳥類研究所と中国森林科学アカデミー間で交わされた日中研究協定に基づいて借与されたものである。

2) 営巣適地と巣立ち雛数の予測モデル

トキ生息地の土地被覆状況を把握するため、衛星データを用いて画像分類を行った。分類に使

用した衛星データは、LANDSAT/ETM+（2002/08/29と2003/02/05）である。分類には、2つの時期の画像から作成されたNDVI（Normalized Difference Vegetation Index¹⁾）合成画像に対し、オブジェクトベース画像分類を適用した。解析にあたり、はじめにNDVI合成画像を均質な領域に分割した後、生成するオブジェクトの形状や大きさに関するパラメータを設定した³⁾。ここで、Scale parameterは6、Shape factorは0.3、Compactnessは0.4とした。次に、生成されたオブジェクトを用いて分類を行った。分類クラスを、広葉樹、針葉樹、裸地、畑地、水田、水域、および住宅地の7クラスとした。各オブジェクトにおける輝度値の平均値と標準偏差を用いて、Nearest Neighbor 法を適用し分類を行った。

植生図の分類精度検証には、1:1,000,000中国植生図とLANDSAT/ETM+パンシャープン画像（2002/08/29より作成）を用いた。まず、植生図の各クラスの面積を算出した後、クラスごと面積の比率に合わせてランダムにポイントを発生させた。分類結果と検証データから、判定効率表とKappa係数を算出した。Kappa係数はCohenの一致係数ともよばれ、無作為な割り当てをどれだけ回避しているかを表す指標である。この値が高いほど、分類精度が高いことを意味する。

既往の研究をもとに、トキの営巣と関係する環境因子を選択した（表1）。地形由来の因子として、標高（T1）、起伏（T2）、林縁形状（T3）、河川長（T4）を選択した。植生由来の因子として、広葉樹林の割合（V1）、針葉樹林の割合（V2）、水田の割合（V3）を選択した。人為的影響の因子として、住宅地の割合（H1）を選択した。標高と起伏には、ASTER-GDEM（標高データ）を用いた。その他の変数は、衛星データから作成した分類図を用いて集計した。変数の集計範囲はバッファ解析により決定し、解析で設定したバッファサイズは500m、1000m、1500m、2000m、および3000mとした。変数ごとに全てのバッファサイズでモデルを構築し、AIC（Akaike Information Criterion）から各変数における最適なバッファサイズを選択した。

本研究では、中国におけるトキ営巣適地および巣立ち雛数を推定するために、ともに一般化線形混合モデルを用いた。営巣適地モデルでは、応答変数を（1、0）の二項分布と仮定した。ここで、在データにはトキ営巣木の位置データを使用した。また、不在データ（トキが営巣しない位置）に関しては、トキ営巣木の位置データから行動範囲を推定し、この行動圏内に営巣木の位置データ（N=100）と同数のポイントをランダムに発生させた。巣立ち雛数の予測モデルでは、応答変数をポアソン分布と仮定した。また、空間自己相関を考慮するために、各ポイントから3000mバッファ以内の在/不在データの数をランダム効果として用いた。

モデルの適合度はAICを用いて評価した。本研究では、変数選択の代わりに、全モデルからAIC差を算出し、Weighted AICを用いて、最適モデルを構築した²⁾。モデルの係数および標準誤差はモデル平均から求めた。また、変数間の多重共線性を調べるため、Variance Inflation Factor（VIF）を用いた。VIF > 10の場合は、変数間に多重共線性が存在すると考えられる。

分類図の作成とモデルの構築には、eCognition 4.0 Professional（DEFINIENS IMAGING社）、ArcGIS 9.3（ESRI社）、R Ver 2.8.1（R Development Core Team 2008）を使用した。

3) 2つの予測モデルを用いた佐渡への外挿

佐渡におけるトキの営巣適地と巣立ち雛数を予測するため、構築したモデルを佐渡に外挿した。この際、佐渡の土地被覆分類には、2007/06/03に取得されたSPOT/HRVを使用した。両モデルにおいて、重要な変数が地形情報、森林の情報、および住宅地の割合であったことから、佐渡全域の

分類図は作成せず、森林域のみを分類した。地形データには国土地理院発行の数値地図25,000(空間データ基盤)を使用した。また、トキGIS(サブテーマ5において開発)で集積された建物データを、住宅地の情報として扱った。

(2) 餌環境の日中比較

中国洋県と寧陝県の野生集団において、足環がつけられた識別個体22個体と、足環がつけられていない個体(2個体以上)を対象に、2009年3月に2日、7月に7日、10月に6日、および1月に5日の合計20日にわたって行動調査を実施した。各調査日には、個体ごとに3分間の餌捕獲数のカウントを繰り返し、採餌効率(=3分間当たりの摂食回数)を算出した。さらにこれに、文献⁴⁾⁸⁾¹²⁾から集めた代表的な餌種の1匹あたりに含まれる熱量を用いて、エネルギー獲得効率、つまり3分間当たりの獲得エネルギー量に換算した(合計=1,335分)。また、捕えた餌のタイプ(ドジョウ、ミミズ、タウナギ、サワガニ、モノアラガイ、その他の魚類、不明大、不明小)を記録した。得られた採餌効率、エネルギー獲得効率、および捕えた餌のタイプの内訳を、3種類の餌場(水田・草地・河川)ごと、季節(春=3月、夏=7月、秋=10月、冬=1月)ごとに分けてまとめた。比較に用いた佐渡の放鳥個体のデータも、上と同様の方法で2008年から2009年にかけて3、7、10、および1月に集められた。

また、成鳥と幼鳥の識別は、足環から得られる年齢や繁殖の情報、あるいは顔の色や繁殖羽にもとづいておこない、餌場環境ごとの採餌行動とその季節変化を比較した。

(3) 中国トキをめぐる社会環境

中国陝西省洋県および寧陝県におけるトキの野生復帰実験と、近年のトキ生息および飼育状況に関する既存の研究資料を整理し、現状と問題点を把握した上、現地調査を通じて最新の情報と必要としたデータを収集しながら、整理分析を行った。対象地域の調査は、トキ保護行政及び中国農村の末端組織である村民委員会と村民小組の協力を得ながら、トキ保護の第一線で活躍している人々やトキ生息する山村の農家と直接対面して聞き取りを実施し、トキ保護事業の現状と問題点及びトキ生息域の社会環境の実情を把握した。

4. 結果・考察

(1) 営巣環境解析

1) 予測モデル

トキ生息地の土地被覆分類精度について、Kappa係数は0.73を示し、比較的精度の高い分類結果となった。営巣適地モデルの結果を表2および表3に示す。営巣適地モデルは、起伏(500mバッファ)、林縁形状(3000mバッファ)、広葉樹林の割合(500mバッファ)、針葉樹林の割合(500mバッファ)、住宅地の割合(500mバッファ)の5変数から構成されるモデルが最適となった。また、各変数のモデル係数から、起伏のみが負に寄与し、その他の変数は正に寄与していることがわかった。モデルを対象地全域に外挿した結果を図1に示す。ここでは、営巣適地を8クラスに分割した。高い適地であるエリアは、起伏のゆるやかな、林縁の形状が複雑な場所であった。巣立ち雛数の予測モデルの結果を表4および表5に示す。巣立ち雛数の予測モデルは、標高(500mバッファ)、林縁形状(3000mバッファ)、住宅地の割合(500mバッファ)の3変数から構成されるモデルが最

適となった。また、各変数のモデル係数から、すべての変数が正に寄与していることが明らかとなった。モデルを対象地全域に外挿した結果を図2に示す。ここでは、高い営巣適地(クラス6~8)における予測値を示している。高い営巣適地として推定されたエリア内の中で、より標高の高い場所において巣立ち雛数が多くなることが明らかとなった。VIFの最大値は、営巣適地モデルで5.90、巣立ち雛数の予測モデルで2.39となり、両モデルともに多重共線性は発生していなかった。

2) 佐渡への外挿

営巣適地モデルの外挿結果を図3に示す。ここでは、営巣適地を10段階で表現した。小佐渡地域において高い営巣適地を示す場所が多かった。特に羽茂地区では、その傾向が顕著であった。巣立ち雛数の予測モデルの外挿結果を図4に示す。ここでは、佐渡において高い営巣適地を示す地域(クラス6~10)における予測値を示している。営巣適地モデルの外挿結果と同様に、小佐渡地域の羽茂地区において巣立ち雛数が多くなることが明らかとなった。

3) 考察

中国陝西省洋県に生息するトキ野生個体群の営巣環境特性を理解し、その特性を備えた環境が佐渡を含めたトキの新たな再導入地域に存在しているのか否かを評価する試みは、繁殖個体群を速やかに樹立するために、また生息地整備を効率的に進めるために不可欠な取り組みの一つといえる。中国でも再導入計画の改善に資することを目的に、Li⁶⁾により、トキの営巣環境に関する解析が実施されてきた。Li⁶⁾は1984年から1999年にかけて上記地域で営巣した25つがい35巢(不在データとして45地点を無作為に選定)の営巣位置情報を用いて、湿性環境、植生、人為的干渉、標高の4変量を説明変数として多変量ロジスティック解析を行い、バッファスケールが2haのときの湿性環境、植生、標高からなるモデルがAICによりベストモデルとして選定されたことを報告した。そこで、本研究のモデル作出に先行して、Li⁶⁾のモデルを佐渡に外挿し、トキの営巣適地評価を行ったところ、国仲平野全域と大佐渡の高標高地域の一部を除き、ほぼ全ての森林帯がトキの好適営巣環境として推定されることが明らかとなった。Li⁶⁾のモデルでは、湿性環境と植生が正に、標高が負にそれぞれ寄与しており、低標高に加え、水田や湖沼・河川などの水域がより多く、被覆率の高い森林帯に営巣する確率が高いことを示している。モデルを構築した中国陝西省洋県周辺では、過去の過剰なまでの人為的土地改変により、森林被覆は貧弱で、営巣可能な立木の存在がトキの営巣場所選択に不可欠な要素となっている。モデルを外挿した結果、佐渡の多くの森林帯がトキの営巣適地と判断された理由として、Li⁶⁾のモデルが、上述した中国の特異的な環境条件を反映したモデルであること、さらにハビタット変数として湿性環境や植生を考慮しているものの、いずれも面積のみであり、ハビタット形状やモザイク性に関わる変数を組み込んでいないことなどから、営巣適地の視点から佐渡を評価した際に過大評価した可能性が高いと推察された。

この結果を踏まえ、本研究では、中国陝西省洋県100地点の営巣位置情報を用い、地形、植生、人為的攪乱の視点から8変数を説明変数として組み込み、より実態に適合した営巣適地モデルを構築した。営巣適地モデルは、起伏、林縁形状、広葉樹林の割合、針葉樹林の割合、住宅地の割合の5変数から構成されるモデルが最適となった。また、各変数のモデル係数から、起伏のみが負に寄与し、その他の変数は正に寄与していることが明らかとなった。構築されたモデルを佐渡全域

に外挿したところ、Li⁶⁾のモデルを佐渡に外挿した結果とは大きく異なり、営巣適地として高く評価された地域は、起伏のゆるやかな、林縁形状が複雑な場所であり、それは大佐渡南西部に加え、小佐渡東部国仲平野側から小佐渡中西部にかけて遍在していることが明らかとなった。一方、巣立ち雛数の予測モデルは、標高、林縁形状、住宅地の割合の3変数から構成されるモデルが最適となった。また、各変数のモデル係数から、すべての変数が正に寄与していることが明らかとなった。巣立ち雛数の予測モデルを佐渡に外挿したところ、営巣適地モデルと同様、大佐渡南西部および小佐渡中西部に巣立ち雛数が多くなる地域が存在したが、営巣適地モデルに比べ、より地域が限定される傾向にあった。

本研究により推定されたトキの営巣適地は、放鳥後のトキが利用している地域と合致する点が多いだけでなく、ヤマアカガエルなどトキの主要な餌生物の潜在的分布とも合致していた。餌生物と捕食者としてのトキの潜在的生息分布の合致は生物学的にも興味深い。加えて、その合致は、餌環境と営巣・ねぐら環境の両視点を考慮した自然再生候補地の選出に有効となろう。今後、トキの営巣事例が増えることでモデルの適合性を検証していくことは不可欠であるが、本研究で構築したモデルと佐渡への外挿結果は、今後の放鳥計画や自然再生に大きく貢献できると思われる。

表1. 変数のリスト

Topography	
T1	Elevation (m)
T2	Relief (Standard deviance of elevation)
T3	Shape index of forest edge
T4	Length of river (km)
Vegetation	
V1	Ratio of broadleaves
V2	Ratio of conifers
V3	Ratio of paddy area
Human disturbance	
H1	Ratio of urban land

Each variable were measured from buffers of presence/absence point.
The buffer size was 500, 1000, 1500, 2000 and 3000m

表3. 営巣適地モデルの係数

Factor	Coefficients	Standard error	p-value	VIF
Intercept	0.374	4.103	0.536	-
T2 Relief	-0.033	0.009	0.000	3.27
T3 Shape index	0.306	0.118	0.009	1.89
V1 Ratio of broadleaves	2.064	2.363	0.088	5.90
V2 Ratio of conifers	3.018	2.378	0.089	5.08
H1 Ratio of urban land	4.123	2.519	0.094	1.61

表5. 巣立ち雛数推定モデルの結果

Factor	Coefficients	Standard error	p-value	VIF
Intercept	-2.358	0.912	0.041	-
T1 Elevation	0.001	0.000	0.009	2.39
T3 Shape index	0.021	0.026	0.007	1.62
H1 Ratio of urban land	1.679	1.079	0.097	1.91

表2. 営巣適地モデルの結果(上位8モデル)

Candidate models GLMM	AIC	Weighted AIC
<i>Null Model</i>		
Intercept only	203.9	0.000
<i>Topographic+Vegetation+Human impact</i>		
T2+T3+V2+V3+H1	156.1	0.037
T2+T3+T4+V1+V2+V3+H1	155.7	0.045
T2+T3+V1+V2	155.6	0.046
T1+T2+T3+V1+V2+H1	155.6	0.046
T2+T3+T4+V1+V2+H1	155.2	0.055
T2+T3+V3+H1	154.6	0.077
T2+T3+V1+V2+V3+H1	154.2	0.093
T2+T3+V1+V2+H1	153.6	0.128

表4. 巣立ち雛数推定モデルの結果(上位8モデル)

Candidate models GLMM	AIC	Weighted AIC
<i>Null Model</i>		
Intercept only	213.5	0.003
<i>Topographic+Vegetation+Human impact</i>		
T1+T3+V3	211.1	0.018
T1+T3+V2+H1	210.9	0.019
T1+V3+H1	210.9	0.021
T1+T3+V1+V3+H1	210.6	0.024
H1	210.5	0.025
T1+H1	210.3	0.026
T1+T3+V3+H1	210.1	0.030
T1+T3+H1	209.9	0.034

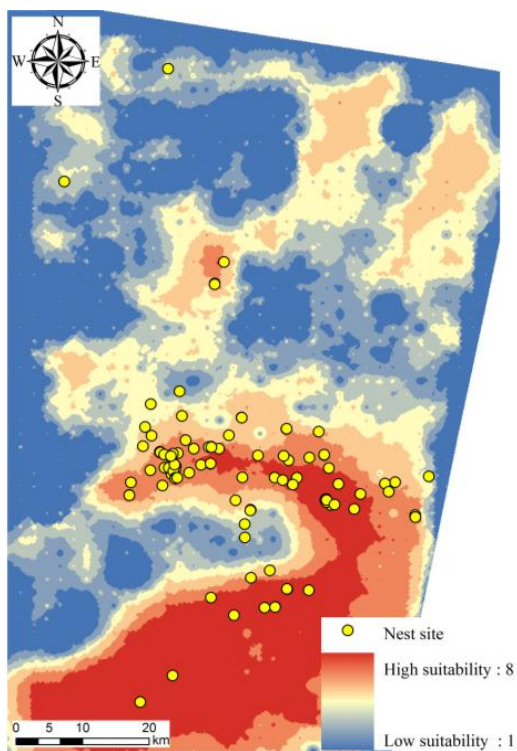


図 1. 営巣適地マップ

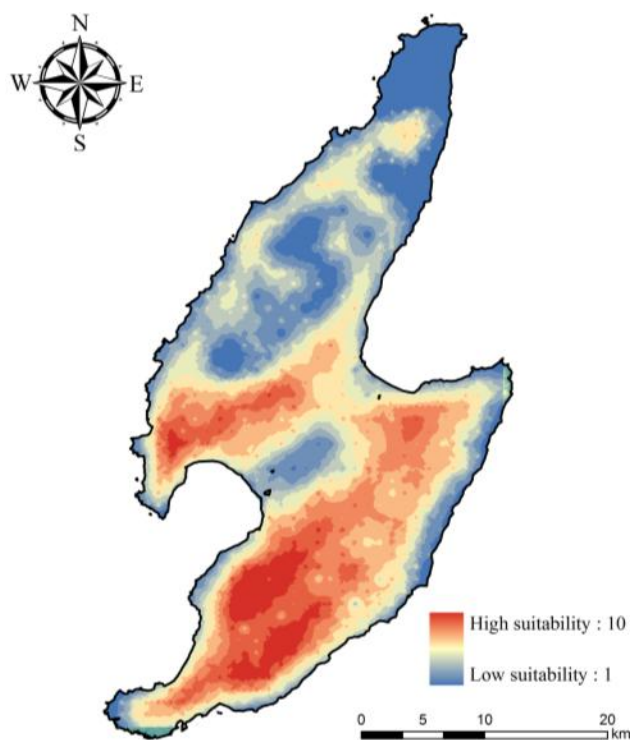


図3. 営巣適地モデル（佐渡への外挿結果）

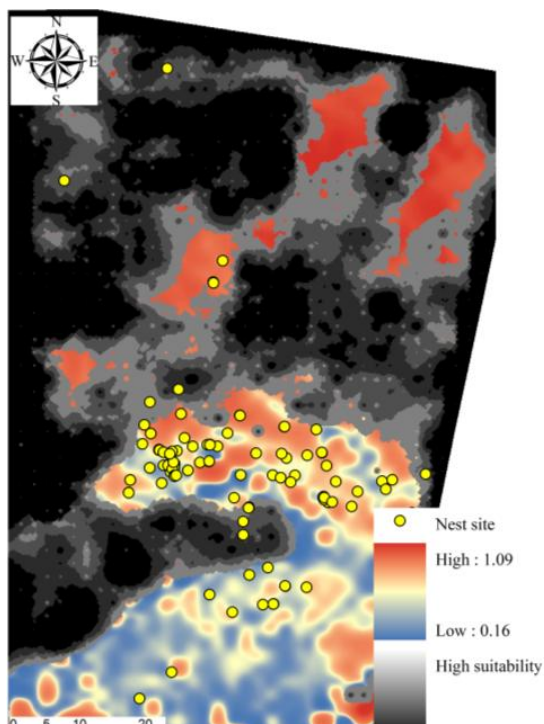


図 2. 巣立ち雛数の推定マップ
高い営巣適地 (Suitability index = 6~8)
のエリアから抽出

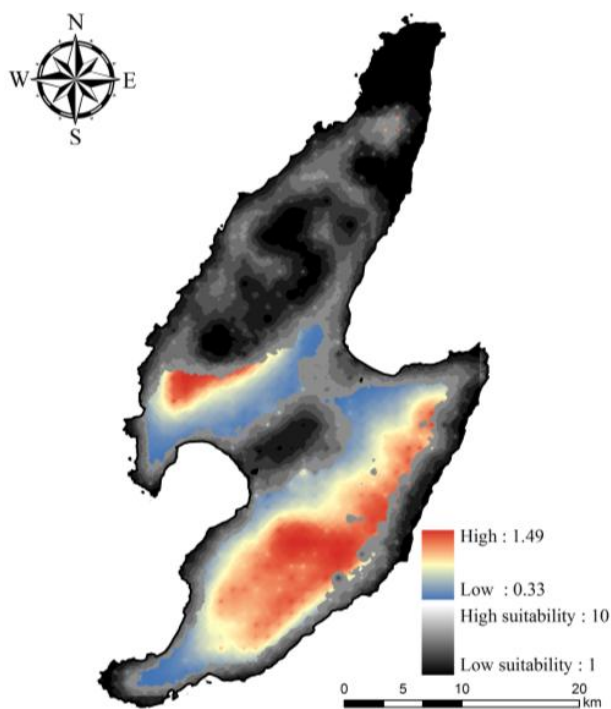


図 4. 巣立ち雛数推定モデル（佐渡への外挿結果）
高い営巣適地 (Suitability index = 6
~10) のエリアから抽出

(2) 餌環境の日中比較

1) 日本と中国における採餌の比較

餌場全体をプールした採餌効率（図5の左端列）は、日本の方が有意に高かったものの、その差はごくわずかだった（日本：平均±SE = 2.87 ± 0.11 , $n = 549$ ；中国： 2.48 ± 0.23 , $n = 375$ ； $S = 150250$, $P < 0.0001$ ；Wilcoxon検定）。季節変化パターンについては、夏に最も高く秋に最も低くなるという定性的には同様の傾向を示したものの、季節間の変動は日本よりも中国で大きかった。一方、餌場ごとに分けた場合（図5の右3列）には、日本と中国の間で採餌効率やその季節変化パターンにいくつかの差が見られた。まず、中国では春から冬へと季節を追うごとに水田と草地の採餌効率が減少した。一方、日本ではどの餌場でも、春から冬にかけて採餌効率の目立った低下は確認できなかった。また、中国の河川は、他の餌場（水田および草地）に比べて採餌効率が高かった（河川と水田の平均値の差 = 2.73 [回/3分]、河川と草地の平均値の差 = 1.43 [回/3分]）でいずれも $P < 0.05$ 、他の比較はすべて $P > 0.05$ ；Tukey-Kramer検定）。一方、日本では草地が他の餌場に比べて採餌効率が高かった（草地と水路の平均値の差 = 1.68 [回/3分]、草地と水田の平均値の差 = 0.83 [回/3分]）でいずれも $P < 0.05$ 、他の比較はすべて $P > 0.05$ ；Tukey-Kramer検定）。

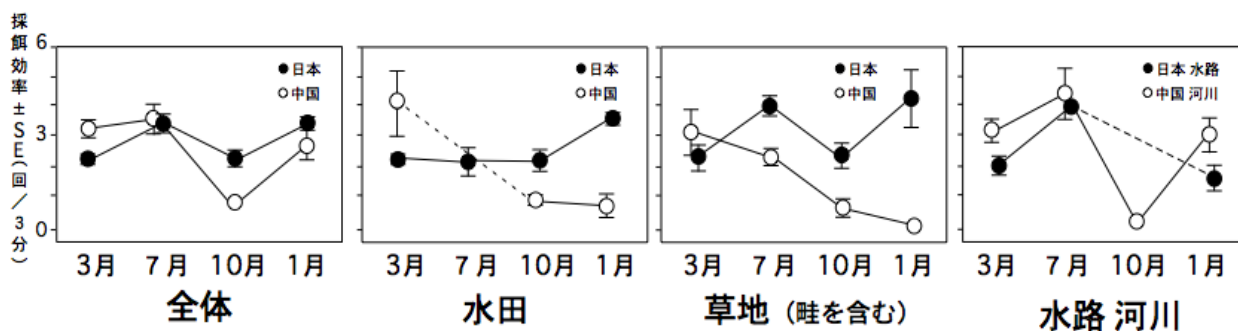


図5. 日本と中国における採餌効率の比較

また、3分間あたりのエネルギー獲得効率に換算して同様の比較をおこなったところ、餌場全体をプールした場合（図6の左端列）は日本の方が有意に高く、採餌効率で見たときよりも差は大きくなった（日本：平均±SE = 4.35 ± 0.10 , $n = 850$ ；中国： 1.54 ± 0.16 , $n = 374$ ； $S = 139535$, $P < 0.0001$ ；Wilcoxon検定）。季節変化パターンについては、中国では採餌効率で見たときと定性的にはほぼ同じだが、秋のエネルギー獲得効率の低下がさほど大きくないため、年変動は少なかった。日本では冬の採餌効率の高さにもかかわらず、エネルギー獲得率は他の季節を下回り、中国よりわずかに低いレベルだった。さらに餌場ごとに分けた場合（図6の右3列）には、日本と中国いずれも春から冬へと季節を追うごとに水田のエネルギー獲得効率が減少した。また、日本と中国いずれも草地のエネルギー獲得効率が夏に最も高く、秋から冬にかけて大きく減少した。つまり、日本の水田や草地では冬の採餌効率が高いにもかかわらず、エネルギー獲得量は大きく低下していた。一方、水路や河川におけるエネルギー獲得効率の変化は、採餌効率のそれと定性的にはほぼ同じだった。これらの結果は、日本では水田や草地における餌生物の内訳が季節ごとに变化する可能性を示唆している。なお、タウナギを食べるトキは中国でたった1回だけ観測したが、タウナギは他の餌生物より桁違いに大きく熱量も高いため、外れ値として今回の計算には含

めなかった（割合が低すぎるため、餌生物の内訳からも除外している）。

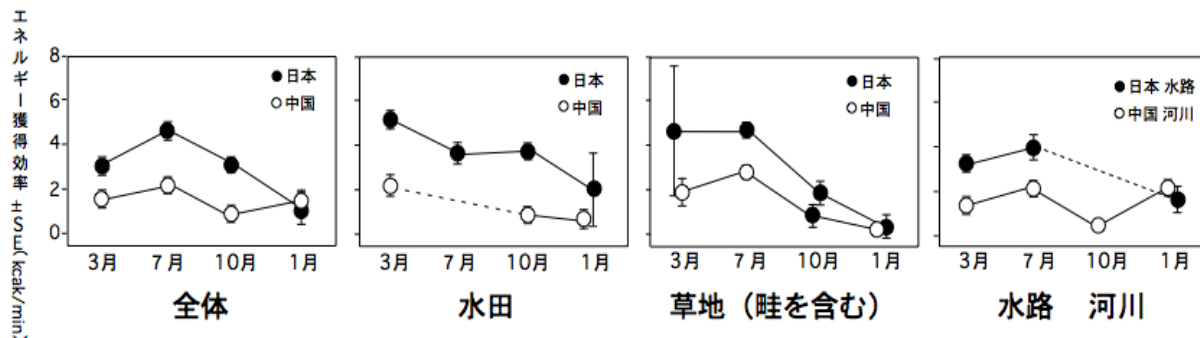


図6. 日本と中国におけるエネルギー獲得効率の比較

さらに、日本と中国においてトキが獲得した全エネルギー量に占める餌生物の内訳を季節ごとに調べたところ（図7）、いずれにおいても夏にミミズのエネルギー獲得量の占める割合が最も高くなっていた。また、日本では春から秋にはエネルギーの半分近くをドジョウとミミズに依存しているが、冬はこれらの餌から得るエネルギーの割合が大きく減少したのにたいし、中国では夏から冬には餌の2-3割をドジョウに依存しているものの、春にはドジョウはほとんど食べず他の魚類（ドジョウやタウナギ以外の魚類）やサワガニへの依存度が高くなる傾向が見られた。全体的には、日本ではドジョウへの依存度が高いのに比べ、中国では秋以外の時期にはモノアラガイへの依存度もかなり高いことが特徴的であった。なお、モノアラガイの採餌は日本では未だ確認されていない。

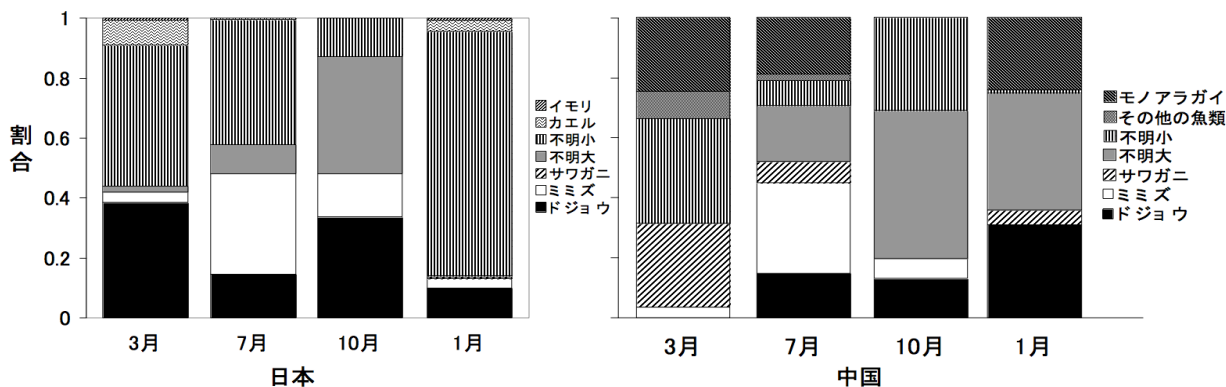


図7. 日本と中国における餌生物から得たエネルギーの内訳

2) 成鳥と幼鳥における採餌の比較

成鳥はどの餌場においても、1~3（回/3分）程度の採餌効率を維持していた（図8）。幼鳥は、水田や草地では採餌効率が成鳥の半分程度しかない一方、河川では非常に高い採餌効率を示した（図8の左側）。これらの採餌効率をエネルギー獲得効率に換算してやると（図8の右側）、成鳥は草地（畦を含む）でエネルギー獲得効率が最も高く、幼鳥は河川で最も高かった。このような餌場間の差は、各場所で得られる餌生物の違いを反映しているのかもしれない。実際、図9に示すように、幼鳥が河川で食べていたのは専らモノアラガイであった。また、中国の河川は緩やかな

湿地帯や浅瀬を含んでおり、河川のような場所は幼鳥にとって餌の発見と捕獲がしやすいといった要因も、この結果に影響しているかもしれない。

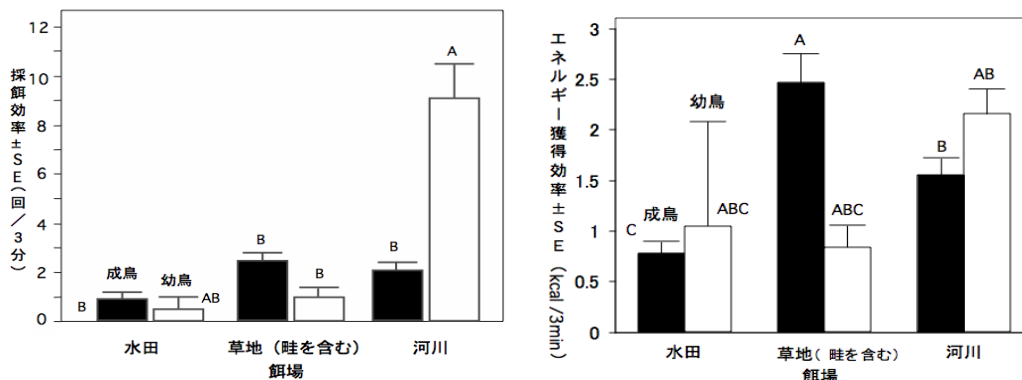


図8. 各餌場における成鳥と幼鳥の採餌効率とエネルギー獲得量

異なる記号のついたグループ間に有意差が検出された(有意水準5%, Tukey-Kramer検定)

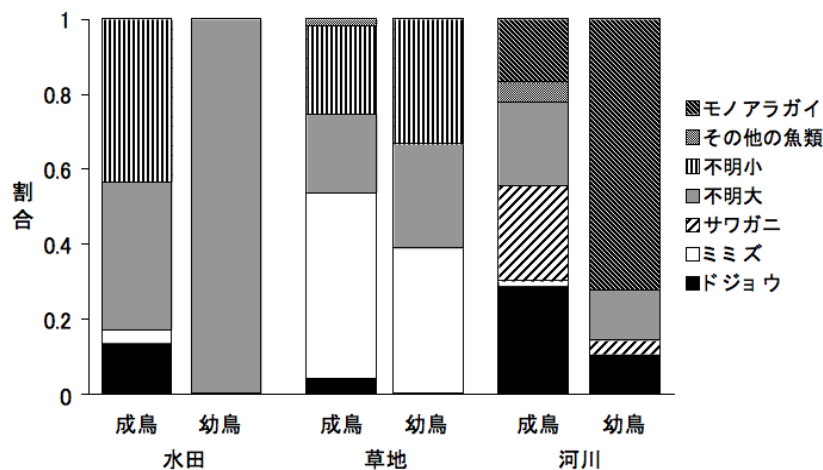


図9. 各餌場における成鳥と幼鳥のエネルギー獲得量の餌内容

3) 考察

餌環境は、冬期をのぞけば日本の方が恵まれているようだ。これは主に、比較的エネルギー量の多いドジョウが豊富に存在するためだろう。しかし日本では、冬期にドジョウやミミズの減少の影響を強く受け、エネルギー獲得効率が著しく低下してしまう。一方、中国における餌環境は採餌効率やエネルギー獲得効率で見れば日本ほど良好ではないが、モノアラガイ、サワガニ、ドジョウ以外の魚類など、餌生物の多様性が豊かな印象を受ける。中国で季節をつうじてエネルギー獲得効率がほとんど変化しないことは、このような餌の多様性に起因するのかもしれない。さらに、中国で河川における採餌が頻繁に見られたことは、水路での採餌しか見られない日本との比較上興味深い。注目すべきは、河川では幼鳥が重さあたりのエネルギー量は少ないが捕獲(おそらく)しやすいモノアラガイを専ら利用し、高い採餌効率を示していることである。このことは、採餌経験の乏しい幼鳥にとって、河川が重要な餌場として機能している可能性を示唆する。

佐渡では、トキ放鳥個体が河川で採餌する姿は一度も観察されていない。これは、トキが採餌

できるような緩やかな流れや浅瀬のある河川が佐渡には存在しないためと考えられる。このように、佐渡では年間をとおして水田や草地（畦を含む）への依存度が高く、これらの餌場の餌量における安定的した餌の供給を維持することが重要と考えられる。あるいは、河川の流れや構造を制御し、トキが利用できる餌場を新しく確保することも今後検討に値する。

以上の結果から、将来の個体数増加に耐えうる餌環境を整えるには、水田や草地における餌生物量（とくにドジョウやミミズ）の季節変動を低く保つことが重要と考えられる。さらに、河川の流れや構造を制御し、トキ（とくに幼鳥）が餌場として利用できる環境を新たに設ける必要があるかもしれない。今後の餌環境の管理・改善にあたり、これらの点は検討に値する。

（3）中国のトキをめぐる社会環境

1）調査対象地域の概要

調査対象地域は陝西省洋県と寧陝県を設定した。洋県は野生トキ最後の生息域としてよく知られ、いわゆる生息域内保全の典型的な事例である。それに対して寧陝県は生息域外保全の典型的な事例といってもよい。この2つの地域におけるトキをめぐる社会環境の実態を把握するため、いちばん末端の山村に入り聞き取り調査を実施した。調査は12村を選んで実施した。具体的に洋県では6村、寧陝県では6村、トキの営巣地、ねぐら、餌場に関係する村を選んだ。村長、書記及び村民に直接聞き取り、生情報を収集することができた。

2）中国トキ保護経緯と現状

中国のトキ保護事業は、生息域内保全(in situ conservation)と生息域外保全(ex situ conservation)という二つの手段を同時に運用し、自然環境整備と社会環境整備という二つの側面からトキ保護事業を支えてきた。その結果として野生トキの生息個体数が1981年当初の7羽から2009年末現在の760羽に回復し、人工飼育の個体数が530羽に伸びてきた。又、トキを人工飼育している地域は洋県から中国国内だけではなく、日本や韓国までに広がっている⁵⁾⁷⁾¹⁰⁾¹¹⁾。

3）トキの野生復帰実験

中国は2004年から4回の放鳥を実施した。陝西省洋県華陽鎮で2回、陝西省寧陝県で2回行った。華陽鎮は野生トキの生息域で、野生トキの営巣地でもある。放鳥は2004年と2005年2回にわたって行われ、いずれもソフトリリースの方法を採用した。寧陝県はトキのかつての生息地であり、再導入の目的で放鳥された。放鳥は2回にわたって行われたが、ハードリリースとソフトリリースの両方法を採用した。

a. 洋県華陽鎮放鳥実験

放鳥場所は、陝西省洋県華陽鎮の小華陽村にある小さい集落（32戸100余人）である。華陽鎮は洋県の北端に位置し、標高1,150m、森林率は約90%に達し、水田や冬期湛水水田が多く、溪流などの水資源も豊富に存在しているのでトキの生息環境に適し、90年代からここでトキが営巣している場所になっている。自然の地形を利用し谷間に架線を張り、ゴルフネットを固定して簡易ケージとした。ケージの形は六角形で、その面積は約1,800平方メートル、高さ15メートルである。ケージ内に水田、水溜り、沼沢、灌木林、草地などからなっており、自然環境を最大限に利用し

て設置した訓練用ケージである。ここで野生復帰のため3ヶ月ほど訓練を行った。この場所で2004年10月に12羽放鳥（5羽に発信器装着、電池寿命2年間）。2005年10月に11羽放鳥（6羽に発信器装着）。上記放鳥個体中、2羽の死亡が確認され、行方不明の個体を含めると現在生存個体は約半数と推測されている。

放鳥当初の放鳥個体は集団で行動したが、次第に野生鳥と一緒に行動するようになった。2004年10月放鳥した個体（成鳥）は、2005年に野生個体とペアリング、最初は小華陽村4組堰塘湾の松に営巣して1羽の幼鳥が巣立った。これは放鳥個体で野生復帰後初めての記録である。また、2006年に3ペア（その内1羽は野生個体、5羽は放鳥個体）が繁殖し、その後も毎年繁殖ペアが増え、巣立ち数も増えてきた（表6参照）。1981～2009年の洋県野生トキ繁殖実績によれば、29年間の巣当たりの平均巣立ち数が1.87羽となっており、最近5年間の平均巣立ち数（表7参照）と比較してみると、放鳥個体の平均巣立ち数が2008年を除いてすべて少なかった。

b. 寧陝県寨溝村放鳥実験

寧陝県では過去にトキの生息域であったが、絶滅の時期については特に記録がない。2005年から陝西省野生動物保護協会を中心に企画した。そして放鳥の候補地として選定し放鳥施設が設置された。

放鳥場所は陝西省寧陝県寨溝村に設置されるトキ野生復帰センターである。寨溝村は標高1,050mの地域に位置し、住民320戸、1,070人が住んでいる。水田面積701畝（1畝約6.6アール）、畑220畝がある。寧陝県は森林率が85%に及び、林業が主な産業である。2006年に日本大使館の援助を受けて寨溝村で野生復帰センターを建設し一部の道路も舗装した。野生復帰センターの敷地で訓練用の大型ケージをつくった。ケージの中に水田150平方メートル、水溜りにドジョウを投入しトキの餌とした。

2007年5月31日、26羽放鳥し、その内訳はオス、メス各13羽であった。放鳥直後、6羽（オス・メス各3羽）を回収し、再びケージに入れて訓練を行い、そして翌年9月25日に放鳥した。また、2009年8月19日に2回目の放鳥を実施した。今回は10羽（オス4羽、メス6羽、年齢は2～8才）をソフトリリースとハードリリースという二つの方法で実施し、比較することもその目的である。

こうして放鳥した結果、2008年繁殖期の時点で野外2巣において、3卵孵化して2羽巣立った。しかし、1羽が蛇による被害を受け死亡した。さらに2009年の繁殖期に5巣営巣、産卵14個、10卵孵化して8羽巣立った。表8では2年間の営巣、繁殖の実績を纏めたが、巣当たり平均して産卵数2.7個、孵化数2.0羽、巣立ち数1.57羽となった。華陽鎮放鳥個体の繁殖実績とほぼ同じレベルにあり、いずれも洋県野生トキ29年間の繁殖実績の平均値（巣当たり平均巣立ち数1.87羽、平均産卵数3.14個）より低かった。

現在、野外に放鳥された個体の行動圏は、城関鎮、湯平鎮、筒車湾鎮、皇冠鎮、梅子鎮等の地域にあり、面積は大よそ1,500平方キロメートルに及ぶ。主に2つの群れに分かれて行動している。一つの個体群は11羽で、主に城関鎮寨溝村付近に行動し、主に野生復帰センターの付近にねぐらをする。もう一つの個体群が10羽で、主に城関鎮朱家嘴付近に行動し、小堰溝付近をねぐらとする。2010年4月現在、7巣が営巣中、最も早いものが4月末に雛が生まれる見通しである。

4) トキの生息と飼育状況

a. 野生トキ個体群

近年の野生トキ個体群の動向を営巣数と巣立ち数の推移で見ると、比較的順調に増加していることがわかる（図10参照）。野生トキの繁殖は大いに天候に左右され、特に毎年3～5月の降水量がトキの繁殖に大きな影響を与えていると推定される。2006年はトキの分布域が旱魃に見舞われ、トキの餌になる水生小動物の数量が激減し、餌不足となったと考えられる。その結果、営巣数は前年と同様であったが巣立ち数は前年より20羽減少した。同様に2006年の平均巣立ち数（巣立ち数／成功巣数）は1.68羽で、2005年と2009年の1.97羽や2007年の1.86羽よりかなり低かった。また、2009年は前年の2008年より営巣総数が少し増えたが失敗巣数が前年の倍以上に増え、巣立ち数が前年度より減少した。しかし、平均巣立ち数が前年度の1.83よりやや増え1.86になった。新築巣の失敗が多かったということで、新たに繁殖に参加した個体の経験不足や新築巣付近のエサ不足が原因ではないかと推測される。

b. 野生トキの分散

野生トキの分布域は拡大し、洋県に隣接する県にも営巣を始めている。2009年繁殖期には132ヶ所で営巣し、うち108ヶ所で繁殖成功して195羽の巣立ちが確認された。この108ヶ所の営巣地はそれぞれ洋県内に105ヶ所、洋県に隣接する城固県に2ヶ所、洋県に隣接する西郷県に1ヶ所である。野生トキ個体群は非繁殖期に群れをつくって行動することが多い。特に大群でねぐらをすることが珍しくない。近年野生トキの個体群の増大に伴い、営巣地の分布域の拡大は加速の傾向にある。さらに、非繁殖期におけるトキの行動圏もほぼ漢中市管轄する各県に及んでいる。そのため、保護活動に新たな課題を与えられている。

c. 人工飼育下のトキの繁殖状況

【陝西トキ繁殖救護センター（洋県）】

2009年末現在153羽飼育しており、2009年は12ペアが繁殖に関わる。最も早いものは3月18日産卵、全てをケージ内での自然繁殖とし、人工繁殖は行っていない。

【陝西省周至県楼観台トキ繁殖センター】

2009年末現在244羽飼育している。2009年の繁殖期に40ペアの成鳥が繁殖に加わり、40個産卵したものの、結局11羽しか増えていなかった。ケージ不足により繁殖鳥とほかの鳥が同じケージで飼育されているため、繁殖への影響が大きかった。すべて自然繁殖に任せており、人工孵化は行っていない。

【北京動物園】

中国最初にトキの人工繁殖を成功させたのは北京動物園である。同園では2009年末現在33羽を飼育している。北京オリンピックをきっかけに一部のトキを公開した。中国人工飼育の第1号としての華華（ホアホア）は、1981年最初に発見した7羽中の1羽で、今年29才となり、まだ元気である。1985年から3年間に中国から佐渡トキ保護センターへ貸し出してキンとペアリングしたが、残念なことに繁殖が出来なかった。帰国後も繁殖していない。

【河南省董寨自然保護区トキ繁殖センター】

董寨自然保護区は中国国家レベルの自然保護区の一つである。現在保護区に生息する鳥類の総

数は304種、その中国家重点保護種49種、日中渡り鳥協定の保護対象種は105種となっている。董寨自然保護区はトキ再導入の候補地として国家林業局に指定され、2007年3月に北京動物園から2ペア4羽のトキを分けられ人工飼育をはじめた。また同年11月に佐渡から13羽（♀5、♂8）の個体が移送された。そして2008年5羽、2009年17羽の繁殖に成功した。現在35羽が飼育されている。2009年に18ケージを新築し、最大で60羽収容できる。ここでの繁殖はほとんど人工繁殖を行っており、自然繁殖は2例のみであった。

董寨自然保護区での繁殖は放鳥の目的で行われている。野生復帰の具体的な計画がまだないが、最も早くても2011年以降になると推測される。

【浙江省徳清県下渚湖湿地】

史料によれば浙江省は中国トキの主な分布域であった。1956年に浙江省の寧波市でトキが確認され標本も採取した。2008年以降浙江大学研究グループの指導を受けてトキ野生復帰を目指して事業がスタートした。2008年陝西省楼観台から10羽のトキを分けられ繁殖しはじめた。同年2羽繁殖し、そして2009年5ペアから13羽の繁殖があった。さらに2009年11月に佐渡から10羽の移送を受け、現在35羽が飼育されている。将来の野生復帰を目的として事業が行われているが、具体的な計画はまだない。

5) 中国トキ生息域の社会・経済環境

先に述べたように洋県と寧陝県の社会調査を通じて両県の社会、経済環境に関する情報を大量に入手した。これらのデータを分析して次のような結論を得た。

トキの生息域では工業が非常に少なく、農業が主な産業である。秦嶺南側は温暖で古くから稲作が盛んである。洋県にはダムやため池の数が多く、1万立方メートル以上のものが58ヶ所、総面積は710ヘクタールにのぼる。水田面積は耕地総面積53%以上を占め、12,773ヘクタールに及ぶ。このような湿地資源がトキのために良好な環境を提供している。寧陝県は森林率が85%以上を占め、水田面積が洋県より少ない。しかし、放鳥地域では水田や河川などが豊富に存在し、トキの生息に適した環境がある。

トキ生息地の住民はトキ保護に対する認識を持っており協力的である。特に農薬や化学肥料の規制に対する理解があり、政府から補償金を出せば農民が協力してくれる。

数量的に把握することができていないが、現在水田の減少の兆しが見えている。その原因は次の2点にある。一つは輪作田の割合の増加により冬期湛水田面積が減少していること。もう一つは水田から乾田へ転じることである。その主な原因は、水田は乾田より手間がかかり、農村では若者の多くが都市部に出稼ぎに出かけて労働力が不足となっている。また、近年、コメ価格が低迷し、水田を乾田にした農家が増えている。また、異常気候により旱魃が頻発し、水田生態系と稲作農業に大きな打撃を与え、トキの餌場にも影響を与えた。トキ餌場の確保が今後の大きな課題となる。

トキ保護は社会環境との関わりが複雑な構造にあり、トキの生息に良好な生息環境を提供するためにまずその地域の社会環境の整備が重要である。

表6 華陽放鳥個体の繁殖実績

年度	営巣数	巣立ち数	平均巣立ち数
2005	1	1	1.0
2006	3	3	1.0
2007	3	5	1.67
2008	3	7	2.33
2009	5	8	1.60

表7 最近5年間における野生トキ営巣と巣立ち数の推移

年度	営巣総数	繁殖成功巣数	失敗巣数	成功率%	巣立ち数	毎巣平均巣立ち数
2005	95	64	31	67.4	126	1.97
2006	95	63	32	66.3	106	1.68
2007	112	81	21	79.4	151	1.86
2008	127	114	13	89.8	209	1.83
2009	132	105	27	79.5	195	1.86

表8 寧陝県における放鳥個体の野外繁殖実績

巣別名称	所在地	年度別	産卵数	孵化数	巣立ち数
双河口巣	塞溝村双河口	2008	1	1	1
		2009	4	4	3
小堰溝#Ⅰ巣	朱家嘴村小堰溝	2008	4	3	2
		2009	4	3	2
小堰溝#Ⅱ巣	朱家嘴村小堰溝	2009	2	2	2
塞溝組#Ⅰ巣	塞溝村塞溝組	2009	3	1	1
塞溝組#Ⅱ巣	塞溝村塞溝組	2009	1	0	0

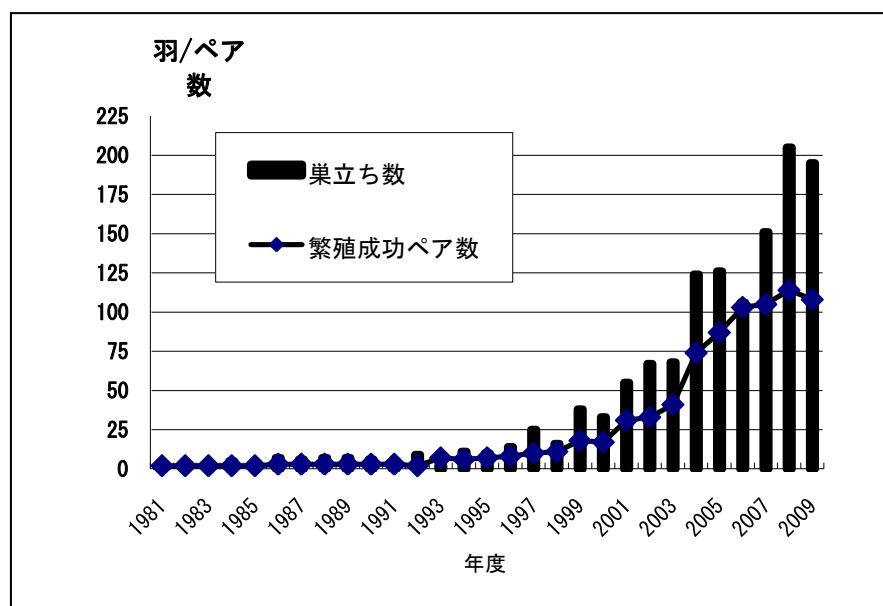


図10 洋県野生トキ繁殖数量の推移

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

佐渡におけるトキの定着に向けた効果的かつ効率的な自然再生を実施するためには、生息に不可欠な情報である餌や営巣環境の視点から佐渡の現状を評価し、その結果を踏まえて再生重点地域を選出していくことが望ましい。しかし、国内で報告されている営巣事例数が極めて少ないことから、日本産トキの営巣環境特性の抽出は困難な状況にあった。今回、中国産トキの営巣情報を用い、営巣適地および巣立ち雛数を予測するモデルを構築し、それを佐渡に外挿することにより潜在的な営巣適地を予測できたことは、今後の自然再生計画を効果的・効率的に展開する上で大きな進展になると期待される。

これまで明らかにされていなかったトキの野生個体群の採餌行動を調べ、日本の放鳥個体と比較し、その特性を詳細に調べた。特に成鳥と幼鳥における餌の内容や利用する餌場の違いを初めて明らかにした。

危惧種の保全特に再導入については成功した事例が少ない。絶滅の寸前7羽まで落ち込んだ中国のトキは29年間の努力により現在約1,500個体まで回復し、絶滅危機が少し緩和されている。また、中国が実施した野生復帰のための放鳥実験も順調に進められている。中国のトキ保全事例は、日本のトキ野生復帰にも参考になり、危惧種保全の上でも国際的普遍的意義がある。

(2) 地球環境政策への貢献

中国産トキの調査研究を通じて、中国との連携を強化し、国際的なトキの個体群管理法の確立を目指す本研究で追求する課題は、生物多様性国家戦略の基本的視点と合致し、そこで得られる成果は、生物の多様性に関わる条約の目指す一つの問題解決事例となるであろう。特に現在進められている環境省のトキ保護増殖計画に対して、重要な資料として提供することができる。

特に絶滅危惧種の再導入を進める上で、生息地再生の手続きは成否を左右する。本プロジェクトでは、トキの生息に不可欠な情報である餌と営巣環境の視点から再生重点地域を選出し、効果的かつ効率的に自然再生を進める手法の開発を目指した。本サブテーマでは、上記プロジェクト課題の解決に向け、中国産トキの営巣情報を用いることで、営巣適地および巣立ち雛数を予測する統計モデルを構築した。この予測モデルは、佐渡のみならず、今後トキの再導入が計画される国内外予定地の生息地評価や再生手法の策定に広く用いることができるため、生物多様性保全という視点から地球環境政策に大きく貢献できると考える。なおこれらの成果は今後、環境省を通じて広報・普及に努める。

6. 引用文献

- 1) Asrar, G., ed. (1989) Theory and Applications of Optical Remote Sensing. Wiley, New York.
- 2) Burnham, K. P. and Anderson, D. R. (2002) Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-Theoretical Approach. 2d ed. 496pp. Springer-Verlag, New York
- 3) Definiens Imaging (2004) Cognition USER GUIDE 4. 485pp. Definiens Imaging GmbH, Munchen, Germany

- 4) Jongbloed et al. (1994) A model for environmental risk-assessment and standard setting based on biomagnification. *Toppredators in Terrestrial Ecosystems*, RIVM Report No. 719101012. RIVM Bilthoven, The Netherlands.
- 5) 常秀雲ら (2008) 陝西省寧陝県におけるトキの野生復帰の適応性に関する研究. 中国西北大学学报 (自然科学インターネット版) Jul. 2008. Vol, No. 4
- 6) Li X., Li D., Ma Z., and Schneider D.C. (2006) Nest site use by crested ibis: dependence of a multifactor model on spatial scale. *Landscape Ecol.* 21: 1207-1216.
- 7) 劉冬平ら (2008) トキ放鳥のための人工飼育個体の野生化訓練について. *林業科学* 44: 88-93.
- 8) 農林水産省北陸農政局 (2009) 平成20年度生息環境向上技術検討業務.
- 9) 佐藤春夫 (1978) はばたけ朱鷺. 220pp, 研成社, 東京
- 10) Su, Yunshan (2008) Conservation and management of the Asian Crested Ibis in China. *J. Disaster Research* 3: 216-225.
- 11) 蘇雲山, 河合明宣 (2009) トキ再導入プロジェクトの日中韓比較—生物多様性保全と農業環境政策の課題—. *放送大学研究年報* 27: 75-91.
- 12) Tay et al. (2003) The swamp eel *Monopterus albus* reduces endogenous ammonia production and detoxifies ammonia to glutamine during 144 h of aerial exposure. *The Journal of Experimental Biology* 206: 2473-2486.

7. 国際共同研究等の状況

国際共同研究計画名：日中トキ保護に関する共同研究

カウンターパートの担当者氏名と機関：

- ・王維勝 中国国家林業局野生動物保護処長
- ・陸軍・劉冬平 中国国家林業局標識センター
- ・常秀雲 中国陝西省野生動植物保護協会 副秘書長

本研究は2003年に日本環境省と中国国家林業局の両国大臣間で署名された「日中共同トキ保護計画」に基づいている。また具体的な研究計画については、2008年10月に中国国家林業局野生動物保護処処長と日本国環境省野生生物課課長との間で合意された「日中トキ保護協力にかかる研究協力について」に拠っている。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文 (査読あり)>

- 1) Su, Yunshan (2008) Conservation and management of the Asian Crested Ibis in China. *J. Disaster Research* 3:216-225.
- 2) 蘇雲山, 河合明宣 (2009) トキ再導入プロジェクトの日中韓比較—生物多様性保全と農業環境政策の課題—. *放送大学研究年報* 27: 75-91.

〈その他誌上発表（査読なし）〉

- 1) 丁長青（編），蘇雲山・市田則孝（訳），山岸哲（監修）（2007）トキの研究 新樹社. pp. 406
- 2) 山岸哲（2009）絶滅種の復活とその妥当性—トキー．日本の希少鳥類を守る．山岸哲（編著）京都大学学術出版会. pp. 364
- 3) 蘇雲山（2009）トキの野生復帰をめざして．月刊「クリンネス」イカリ環境事業グループ発行．2009年2月号p. 4-8

（2）口頭発表（学会）

- 1) 山岸哲（2008）トキの再導入—中国の取り組みと日本の現状—シンポジウム：第55回日本生態学会
- 2) 蘇雲山（2010）「トキの野生復帰が実現できるのか」放送大学群馬学習センターにて（講演）
- 3) 蘇雲山（2010）「朱鷺の生息環境づくり」群馬県川場村にて（講演）

（3）出願特許

なし

（4）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

- 1) トキ野生復帰日中国際シンポジウム
開催日時：2007年11月25日
開催場所：朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター
シンポジウム実行委員長：山岸 哲
内容：中国やヨーロッパで進められているトキの野生復帰事業プロジェクトについて紹介するほか、国内から兵庫県豊岡市でのコウノトリ、新潟県佐渡島でのトキ、それぞれの野生復帰の取り組みの報告を行い、トキの野生復帰について様々な角度から理解を深める。
- 2) トキ野生復帰 日中国際ワークショップ
開催日時：2007年11月23日
開催場所：LMJ東京研修センター
ワークショップコーディネーター：山岸 哲・梶光一
内容：トキ野生復帰の関係者や専門家を中心となり実施し、日本におけるトキの野生復帰について専門家や関係者が発表する。次に、中国と英国からの専門家にトキ類の野生復帰についての発表と共に、日本でのトキ野生復帰について議論を深めることをねらいとする。
- 3) シンポジウム：野生動物再導入計画の現状と課題（2008年3月17日、福岡国際会議場 RoomB、参加者約100名）

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) NHK衛星第一放送 BS-1 アジアクロスロード 日中共同でトキ復活へ(2008年3月3日)
- 2) NHK スタジオパークからこんにちわ:「トキよはばたけ」(2008年2月22日)
- 3) 新潟日報(2009年4月19日「佐渡放鳥に熱い視線、日中の協力促進が必要」)

(6) その他

なし

F-072 トキの野生復帰のための持続可能な自然再生計画の立案とその社会的手続き
 (7) 国内放鳥トキの生態情報の収集

国立大学法人新潟大学

超域研究機構 朱鷺プロジェクト 永田尚志

〈研究協力者〉 環境省関東地方環境事務所 佐渡自然保護事務所 笹淵紘平
 財団法人自然環境研究センター 安齋友巳

平成19～21年度 合計予算 8,030千円
 (うち、平成21年度予算額 4,000千円)

※予算額は、間接経費を含む。

[要旨] 2008年9月25日に10羽(♂♀各5)のトキがハードリリース法で、2009年9月には20羽(♂8♀12)のトキが仮設放鳥ケージの入り口を開放するソフトリリース法で放鳥された。放鳥トキのうち、1次放鳥では6個体(♂5♀1)に、2次放鳥個体では9個体(♂1♀8)にGPSテレメリー発信器が装着されていて、日中3時間ごとの位置情報が蓄えられるようになっていた。装着した15個の発信器のうち、1次放鳥の5羽(♂4、♀1)と2次放鳥の5羽(♀5)に装着した10個が順調に稼働し、放鳥後の移動データを得ることができた。放鳥後1年半の期間に蓄積された7,689地点のGPSデータと17,248地点の観察地点情報のうち、観測精度の高い位置データのみをGISに取り込んで、1次放鳥個体と2次放鳥個体の移動パターンの比較解析、およびトキが選択した景観要素の解析を行った。また、フォーカルアニマルトラッキング法により行動調査を行い、観察可能なすべての個体から警戒行動と採餌行動に関するデータを収集した。この結果、餌種、および採餌ハビタットの季節的な変化を解析すると同時に、警戒頻度や採餌効率に影響を与える要因について解析を行った。放鳥トキは、ドジョウ、イモリ、カエル、ミミズ、サワガニ、昆虫類等を採食し、飲み込み回数ではミミズが一番多かったが、餌重量に換算すると約2～4割がドジョウであると推定できた。秋から春にかけては水田が利用できるため、水田を主に餌場として利用していた。しかし、夏期にはイネが育った水田に入れなくなるため、休耕田や水田の畔でミミズに依存した生活を行っていることが明らかになった。1次放鳥で1羽の雌が放鳥直後に島外に分散したことに対して、2次放鳥雄の多くが放鳥場所近くで群れを形成し、安定した行動圏を確立したのは、ソフトリリース法という放鳥方法によるところが大きいと考えられる。1次放鳥直後は人や車に対する警戒に費やす時間が多かったが、季節が進行するにしたがって減少していった。また、2次放鳥において順調な群れ形成が促進できたことによって、早期に行動圏が安定しただけでなく、人に対する急速な順化や冬期に十分な採餌時間をもたらしたと考えられる。

[キーワード] 再導入、放鳥方法、分散パターン、警戒行動、採餌行動

1. はじめに

野外で減少した野生生物を飼育下で増殖させて野生復帰させることで個体群を復活させる取り

組みは世界中で行われていて、これらの生息域外保全が生物多様性復活の施策のひとつとして注目を集めている。野生生物が過去に生息していて、いったん絶滅した地域に、絶滅した種を放して定着させようとするのを再導入、減少した個体群に個体を追加することを補強と呼んでいる。再導入には、絶滅した単一の動植物種の復元は世界中で頻繁に行われていて、個体群の復元が成功する例もいくつかある。いったん絶滅した種を復元する試みにおいて、国際自然保護連合は、単一生物種を復元するだけではなく、同時に生態系を復元し、地域住民の理解を得た後に野生動物の再導入計画を進めるように勧告している¹⁾。兵庫県豊岡市でコウノトリの自然復帰計画が先行して行われていて、トキの野生復帰はこれに次いで2例目となる。今後、シマフクロウ、ヤンバルクイナ、アカガシラカラスバト、ツシマヤマネコなどの希少種で個体群の再導入計画が予定されている。

トキは、江戸時代まで日本国内に広く分布していたが、明治以降の乱獲によって大正時代にはほとんどの地域で絶滅してしまった。1958年当時、能登半島と佐渡島に合計9羽が生息していただけであった。そのため、当時の環境庁は野外のトキを捕獲して飼育下で増殖させることを決定した。1981年に佐渡島に生息していた野生のトキ5羽を捕獲し、トキは日本では野生絶滅状態となった。トキ保護センターにおいて飼育下繁殖による増殖が試みられたが、性比が雌に偏っていたことと、老齢個体であったため、日本産のトキによる飼育下増殖計画は失敗に帰した。日本で野外絶滅した1981年に中国陝西省洋県において7羽のトキが再発見され、中国でも飼育下増殖が始まり飼育個体群を確立できた。このような状況下で1999年に2羽のトキが贈呈され、その後に貸与された個体を加えた3個体を始祖とする飼育下繁殖が始まった。飼育下増殖は順調に進み、環境省は飼育下個体群が58羽となった平成17年に佐渡島小佐渡東部地域でトキの再導入計画を進めることを発表した²⁾。29年前に絶滅したトキを再導入するためには、生息環境の整備によって餌動物まで含めた生態系の復元が必要となると同時に、今後の再導入計画の指針とするためには、佐渡島で行われているトキの再導入過程の詳細を科学的に記載しておく必要がある。

2. 研究目的

本サブテーマは、野外に再導入された個体の行動、ハビタットの利用様式を明らかにし、トキの生息地利用モデルを開発し、トキの再導入個体群を野外で存続させるための順応的管理法を確立することを目的としている。また、平成20年には小さい箱から強制的に放鳥する「ハードリリース法」が採用され、平成21年には、大きなケージの入り口を開放して自発的に放鳥する「ソフトリリース法」が採用され、2つの方法で放鳥された。放鳥されたトキを追跡し、行動圏の変化、採餌ハビタット、採餌効率の季節変化、人に対する警戒行動の季節変化に関する基礎的なデータを収集し、トキの生態に関する基礎的データを収集するとともに、放鳥方法の違いがトキの定着に与える影響を明らかにすることを目的とした。

3. 研究方法

2008年9月25日に雌雄各5羽、合計トキ10羽が木箱から追い出すハードリリース法で試験放鳥された。2次放鳥では、仮設放鳥ケージの入り口を開放するソフトリリース法で20羽（♂8羽、♀12羽）のトキが放鳥された。すべてのトキがケージから出て行くまで、2次放鳥には2009年9月29日～10月3日の5日間を要した。個体識別のために、各個体には右足に個体番号を刻印した緑のリン

グと左足に2~3個のカラーリングが装着され、翼にはカラーペインティングが施されていた。また、1次放鳥個体の雄5羽および雌1羽の6個体、および、2次放鳥個体の雄1羽、雌8羽の9個体には、人衛星を使って個体を追跡できるように、Microwave社製およびNorth Star社製のGPS/ARGOS システムの発信器(PTT :Platform Terminal Transmitter) が装着されていた。発信器は日中3時間ごとに位置データを収集するようにプログラムされていて、3~10日ごとに上空を通過する気象衛星NOAAで回収され、アルゴスシステムを通して配信される仕組みになっていた。装着した15個のGPSテレメトリー装置のうち、1次放鳥の5羽(♂4、♀1)と2次放鳥の5羽(♀5)が順調に稼働し、放鳥後の移動データを蓄積できた。GPS発信器が装着されていない個体および定位時間以外の位置情報については、モニタリングチームによる観察、および、一般からの目撃情報によって個体の位置データを蓄積した。2010年2月末までの1次放鳥から1年半の7,689地点のGPSデータと17,248地点の観察位置情報が蓄積している。これらの位置情報のうち、観測精度の高いデータのみをESRI社製GISソフトウェアArcGIS上に、1次放鳥個体と2次放鳥個体の移動パターンの比較解析、およびトキが選択した景観要素の解析を行った。GIS解析には、国土地理院の50m標高(DEM)、傾斜角、道路データ、気象庁の気象メッシュデータ、環境省の自然環境GIS植生図を景観データとして使った。

放鳥個体の日周行動パターン、および、採餌行動、警戒行動への時間配分を明らかにするため、早朝、埤から飛び立ち、夕方の埤に戻るまで、注目した個体の追跡する調査を毎月1~2回、1~2週間行った。毎月の調査では、観察可能なすべての個体を毎月の調査で少なくとも1日終日観察して、観察できている時間帯には3分毎の行動カテゴリーを記録し、日周行動パターンを追跡した。また、各個体の詳細な行動の時間配分を明らかにするために、イベントレコーダーソフト

(Macropod Software社製ODLog for MacOS X/Windows)を利用して10分間の連続行動観察を毎時1~2回行った。記録した行動カテゴリーは、採食、歩行、警戒、休息、羽繕い、飛翔の6カテゴリーであるが、採食と歩行を組み合わせることで探索行動を定義することも可能である。

トキは餌を飲み込む際に嘴で餌を挟んで喉の奥に放り込み、餌を飲み込むため、飲み込み回数を容易に記録できる。そこで、一定時間内の採食行動中の飲み込み回数を数えて、採餌効率を記録した。1時間あたり、できる限り多くの採餌効率データを収集し、かつ、飲み込み回数が0回に偏らないようにするユニット時間として、1回の観察時間を3分間に設定した。また、3分間の採餌効率の観察時に直接観察で判別可能な大型の餌種、採餌ハビタットの情報を同時に記録した。これらの情報はICレコーダーを使って記録し、観察対象個体の休息中、および、観察個体を見失ったときに野帳へ転記した。そのため、採餌効率の観察は、10分間の詳細な行動観察中の内外で毎時5~15回行った。1次放鳥からの17ヶ月間に892回の10分間観察データと3,874回の採餌効率データを収集した。

1次放鳥個体と一緒に行動していないにもかかわらず、2次放鳥個体がピンポイントで同じ棚田を利用していた。そこで、ArcGIS (ESRI社製)を使って、1次放鳥個体と2次放鳥個体が国仲平野北東部の範囲内で3ヶ月以内に利用した水田の景観的特徴を解析した。まず、1次放鳥個体と2次放鳥個体が利用した活動点のうち、GPSの精度を考慮して20m以内の点を重複ポイントとして178地点を抽出した。次に、同じ範囲にトキが利用していないランダムな地点を100地点発生させて、対照地点とした。さらに、この重複利用地点およびランダム地点のまわりに100m、200m、400m、800mのバッファーを発生させて周辺の景観要素を抽出した。景観要素として用いたGISデータは、環境省の作製した自然環境GISの5万分の1植生図をもとに、植生・土地利用18分類の18変数、および、

国土地理院の50m標高（DEM）データ、標高分散、50mDEMから作製した傾斜角度、傾斜方向メッシュの4変数の合計22変数であった。各地点で、各バッファーサイズに22変数の情報を属性として与えて分布パターン（利用する、しない）を説明する一般化線形モデルを構築し、赤池情報指数（AIC）を使って最適なモデル選択を行った。

4. 結果・考察

（1）放鳥後のトキの定着過程

1次放鳥個体10羽のうち8羽が、2次放鳥個体のうち15羽が佐渡島内で確認され、追跡可能であった。2次放鳥のうち1羽は放鳥直後に回収されて飼育ケージに戻されたため、2次放鳥された個体は19羽となる。放鳥個体のうち、実際に死亡を確認できたのは1次放鳥の雌1羽だけであるが、放鳥直後から消息のない1次放鳥の1羽、2次放鳥の4羽は死亡したものと考えられる。放鳥後半年の生存率は、1次放鳥が80%（ $n=10$ ）、2次放鳥が78.9%（ $n=19$ ）であり、放鳥方法による差はなかった（Fisherの正確確率検定，NS）。また、1次放鳥個体のうち、本土に渡った雌1羽は2008年3月以来、消息がなく死亡したと考えられるので、1次放鳥個体の18ヶ月後の生存率は70%となる。

1次放鳥

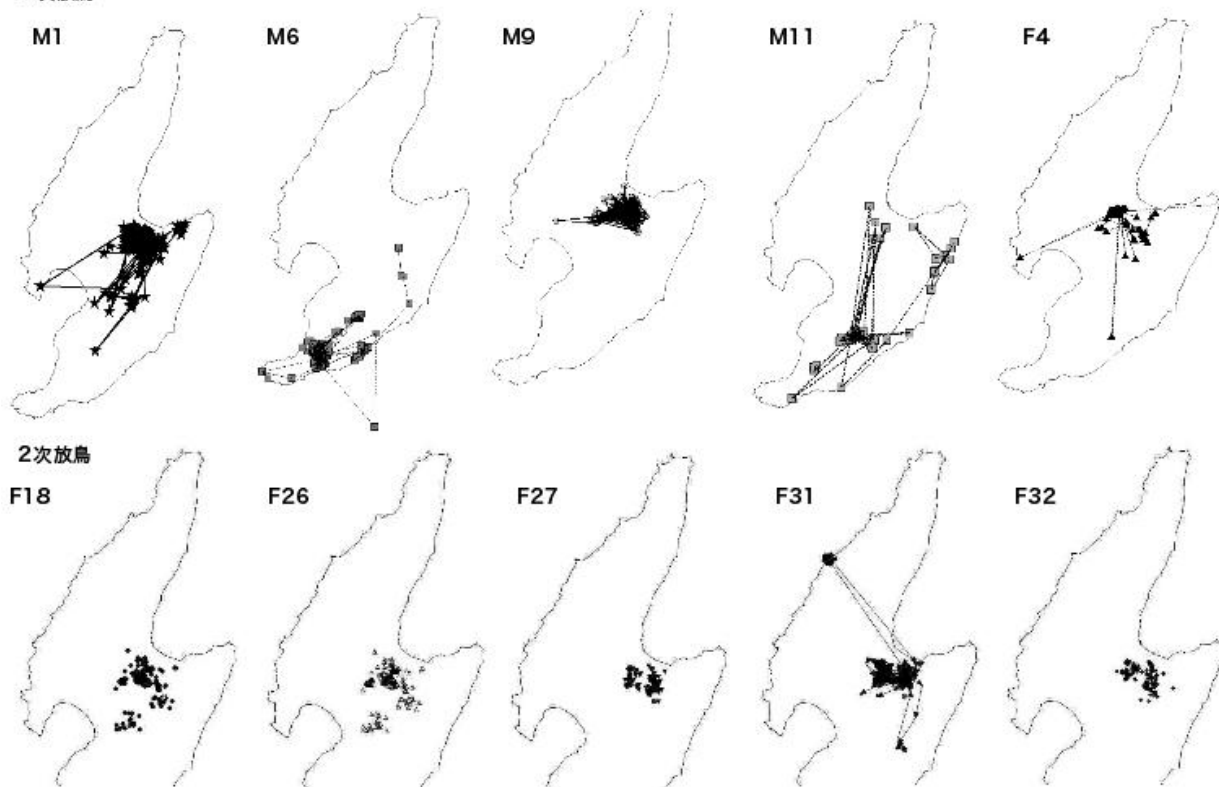


図1. GPS装着個体の放鳥後の佐渡島内の移動軌跡。上段が1次放鳥個体，下段が2次放鳥個体で，個体の先頭の文字が性別（M:♂、F:♀）を数字が個体番号を示している。

1次放鳥と2次放鳥において佐渡島内における放鳥直後の個体の分散パターンには差が認められた。1次放鳥個体は放鳥直後（1ヶ月以内）に国仲平野および小佐渡全域に分散した。放鳥後の各個体の移動軌跡を示したのが図1である。1次放鳥のM1、M6、M11の各個体が国仲平野および小佐渡地域を大きく移動していた（図1上）。そのため、1次放鳥では、放鳥後1ヶ月間、各個体の行動圏

が定まっていず、行動追跡すら容易にできなかった。それに対して、2次放鳥の多くの個体は放鳥場所の近くに留まり、すぐに群れを形成した。F31以外の2次放鳥の個体は放鳥場所近くの国仲平野の北東部に行動域が集中しているのわかる。

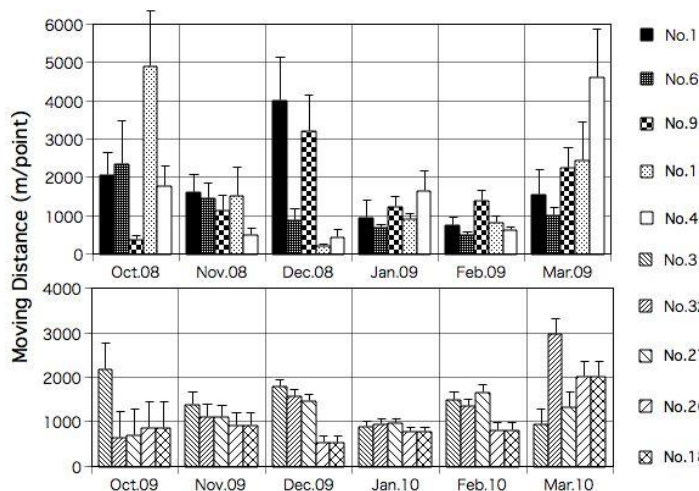


図2. 放鳥後半年間の記録されたGPS活動点間の平均移動距離. 上段が1次放鳥個体を, 下段が2次放鳥個体を示している. 棒の様子は個体を示し, 垂直線は標準誤差を示してある.

トキに装着したGPSは、日中、3時間ごとにトキの位置を定位するため、各個体の3時間ごとの平均移動距離を図2に示してある。放鳥後の半年間のGPS地点間の平均移動距離は、1次放鳥個体では $1595.7 \pm 136.1\text{m}$ (SE, N=1747) であり、2次放鳥個体では $1026.6 \pm 22.2\text{m}$ (SE, N=3766) より有意に大きい傾向が認められた。1次放鳥個体では、11~12月にかけて、移動距離が小さくなり行動地点が狭い地域に収束し、行動圏が定まってきたようにみえた。

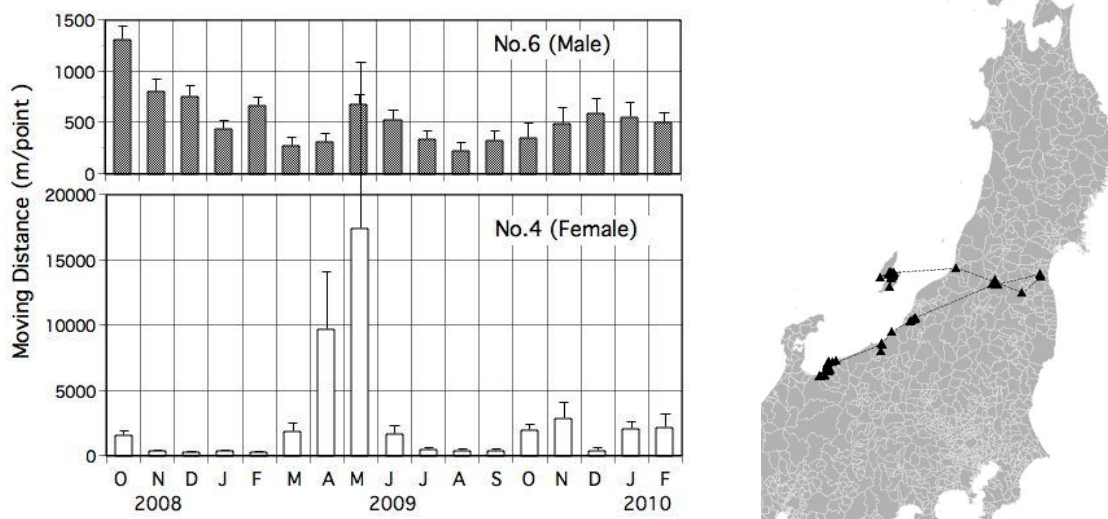


図3. 放鳥後の移動パターンの性差 (左) と佐渡島から分散したF4の移動経路 (右) . 1次放鳥でGPSが装着されているM6とF4を示した. 縦棒は標準誤差.

また、2次放鳥個体では、放鳥後1ヶ月を過ぎると2月まで移動距離が小さく行動圏も安定していた。1次放鳥のGPS装着個体の多くは雄であったため、2回の放鳥の分散パターンの差が性差に由来

する可能性も考えられるが、放鳥後半年間のGPS地点間の平均移動距離に雌雄差は認められなかった（雄：1183.9±64.1m，雌：1214.4±57.2m，Mann-Whitney's *U* test, NS）。また、2次放鳥雄の多くが放鳥場所近くの群れに加わっていたこと、1次放鳥で1羽の雌が放鳥直後に島外に分散したことの2点から判断すると、放鳥後の移動パターンの差は、ハードリリースか、ソフトリリースかという放鳥方法の違いによるところが大きいと考えられる。

3月になると、1次放鳥個体の佐渡島に残っていた雌（F4、F7、F13）が次々に本州へと分散していった。1次放鳥個体のうちGPSが装着されている雌雄個体の移動パターンを比較してみると雄は放鳥直後に大きく移動して行動圏を広げていたのに対して、雌は2月までは移動距離が小さく行動圏が安定しているが、3月から5月にかけて大きく移動していた（図3）。F4個体は、佐渡島から分散する直前2週間に国仲平野を何カ所か大きく移動する探索行動を示した後で、本州へと渡っていき、5月まで大きな移動と定着を繰り返していた（図1、図3）。前述したように、1次放鳥のすべての雌が島外に分散していったのに対して、2010年3月現在、2次放鳥個体では12個体中2個体が島外に分散したのみであった。また、1次放鳥、2次放鳥のいずれの雌も3月になると島内を放浪する傾向がみられ、繁殖場所になわばりを構えている雄を探索する行動と考えられる。一般的に、鳥類では雄に比べて雌が出生地からより遠くに分散することが知られているので、トキにおいてもつがい形成できなかった雌がつがい相手を求めて佐渡島から本州へと分散していった可能性が高い。2次放鳥で多くの雌が島外へ分散せずに島に残っている理由として、2次放鳥では順調に群れが形成されたため島内に雄が複数いることを認知していること、島の南部に縄張りを構えていた1次放鳥雄にトラップされて分散する必要がなかったことなどが考えられる。

（2）トキの日周行動パターン

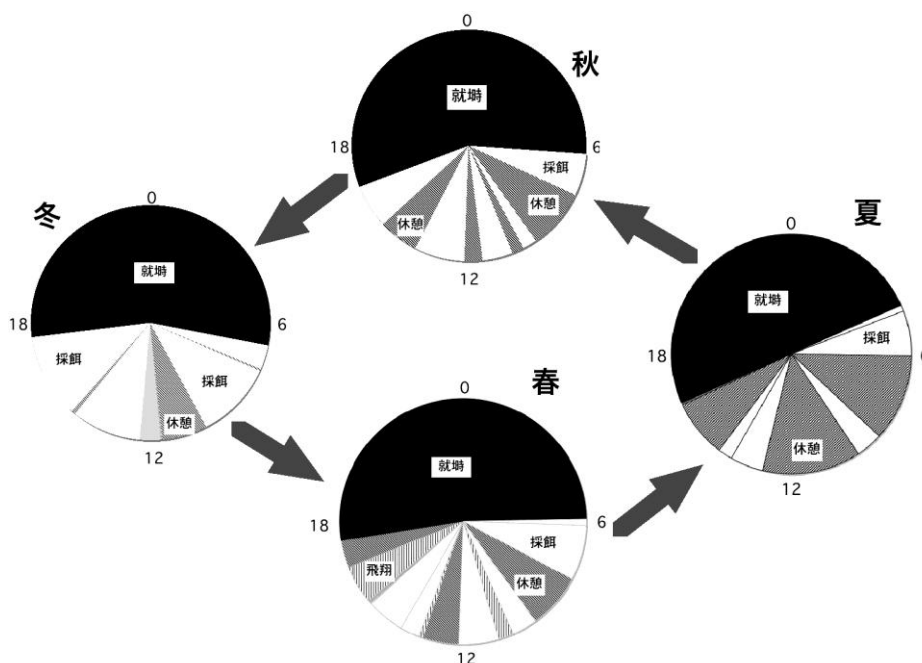


図4. トキの日周行動パターン（No. 11個体の例）。白抜きが採餌時間，黒塗りが就罫時間，グレーが休憩あるいは，消失時間を示している。

トキは、日の出とともに埒から飛び立ち、水田において採餌を始め、基本的な行動パターンは採餌と休息の繰り返しである。1回の休息ないし採餌行動バウトの継続時間は季節によって異なり、秋と春には人などによる行動の攪乱がない限り、1～2時間採餌を行うと、1～2時間、樹上または畦上で休息し、夕方の採餌を行うと日の入り前に埒に入るといった比較的規則的な行動を示していた（図4）。この行動パターンが、夏期には休息主体の活動パターンになり、埒出直後の早朝と午後に短い採餌を行うだけで、日中ほとんどの時間を樹上で休息に費やし、夕方休息している樹上から日没よりかなり前に埒に入ようになった（図4）。

一方、1～2月の厳冬期には、採餌、休息、採餌、休息、採餌という規則的な活動パターンは消失し、1日の大半を採餌に費やすようになった。また、休息を取る場合でも1時間未満の短い休息が多くなり、日没直前まで採餌を行い、日没後に埒入り観察されることも珍しくなかった。冬期には、餌密度の減少と日照時間の減少に伴って相対的な採餌時間が増加し、休息時間が減少したと考えられる。

（3）トキの餌と採餌効率の季節変化

直接観察で確認できた餌種は、ドジョウ、タモロコなどの魚類、ツチガエル、モリアオガエル、ヤマアカガエル、ウシガエル、イモリ等の両生類、トンボ成虫、トンボ幼虫などのトンボ目、甲虫目、バッタ、ケラ等の直翅目、およびミズアブの幼虫等の双翅目の昆虫類、サワガニ、アメリカザリガニ等の節足動物、ミミズなどの環形動物であった。小型の餌は直接観察で識別することは困難であったが、トキが採餌していた場所からダンゴムシ、オカトビムシ、クモ類をはじめとする多数の節足動物が確認されたことから、これらの節足動物も餌として利用されていた可能性が高いと考えられた。

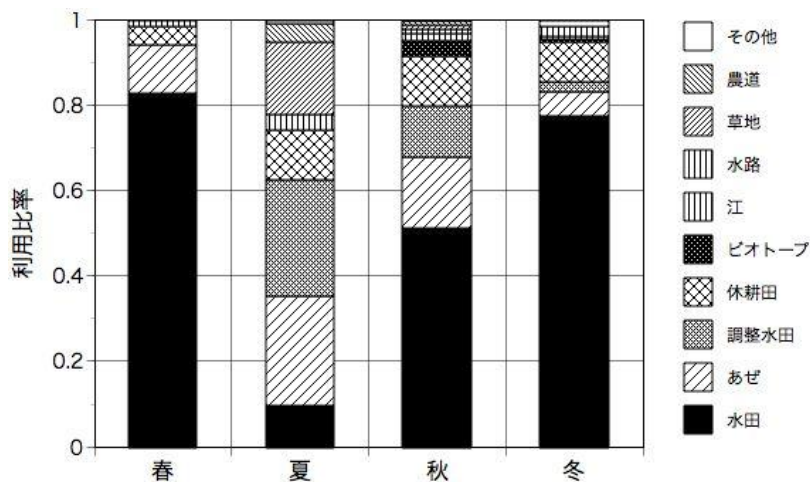


図5. トキの採餌マイクロハビタットの季節変化. 解析は、春188回、夏481回、秋1788回、冬1417回の合計3874回の3分間観察サンプルに基づいている。

トキは、秋から春にかけては水田およびそれに付随する畦や農道等のマイクロハビタットを主に餌場として利用していたが、夏には稲を栽培している水田を利用しなくなり畦や調整水田を利用していた（図5）。放鳥1年目の夏に草丈の定量測定はできていないが、定性的にはイネの草丈が肩より上まで延びるとトキは水田を餌場として利用しなくなる傾向があった。そのため、6月中

旬以降、イネ高くなると稲刈りまで水田を利用できないと考えられる。水田を利用できない夏期には、イネの栽培されていない調整水田や休耕田、および畦畔を餌場として利用していた。一方、ビオトープは1年を通してたった1.7%しか利用されていなかった。

トキは、3分間に平均3.52~3.93回の餌を飲み込んでいたため、3,874回の3分間観察中で合計12,238回の餌の飲み込みを観察できた。放鳥前の順化ケージの中では、主にドジョウが給餌されていたが、野外で飲み込み回数にドジョウの占める割合は11~16%に過ぎず、水田が利用できない夏期にはミミズが36%となり、冬期にも24%を占めていて、ミミズが重要な餌であることが明らかになった。また、冬期には水田や畦に越冬中のアマガエル、ツチガエルおよびイモリを掘り出して食べるため、両生類の占める割合が23%に達していた(図6上)また、夏から秋にかけては昆虫の占める割合が7%となり3番目重要な餌となっているが、小さくて識別できずに、その他としてカウントされている餌の多くは昆虫であると考えられるので、実際には昆虫が飲み込み数に占める割合が一番多いかもしれない。

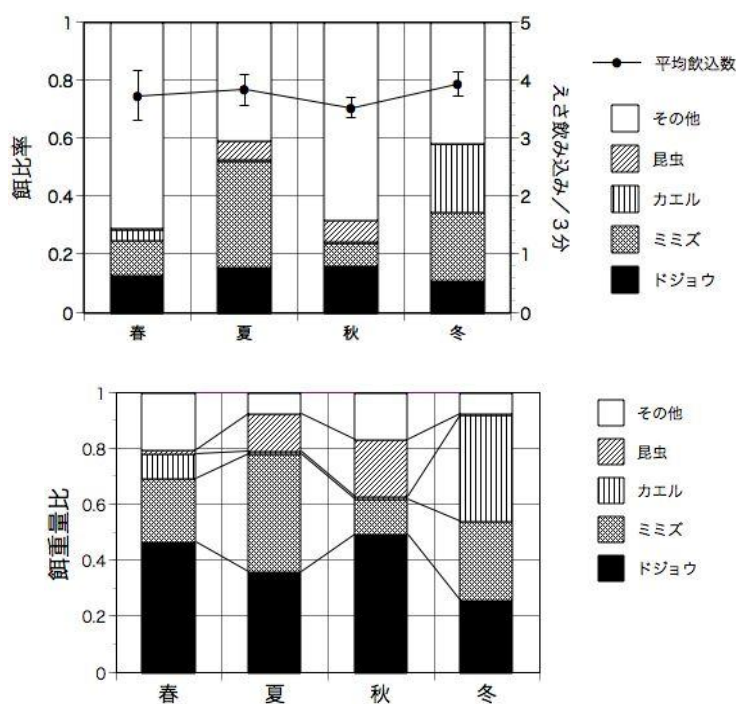


図6. 採餌効率の季節変化と餌メニュー比率の季節変化. 飲み込み回数の比率(上)と飲み込み回数を重量比率(下)に換算した図を示した. 縦棒は標準誤差を示す.

カロリーメーターを使った餌のエネルギー量の測定はまだできていないが、重量比に換算して餌の重要性を評価した。佐渡の水田に生息するドジョウの平均湿重は0.5766g、ミミズは0.292g、カエルは1.15gであった(大石・武山私信)。2cm以上の昆虫を識別可能として、識別できた昆虫は環境中の2cm以上の昆虫の平均湿重の0.53gを、識別できない餌は2cm以下の無脊椎動物の平均湿重0.04gを飲み込み数に乗じて飲み込んだ餌の重量比を換算したところ、ドジョウの寄与率が16~47%と最も大きくなり、次がミミズの12~28%であった(図6下)。重量に換算するとドジョウが最も重要な餌であり、次にミミズ、昆虫と続き、冬期にはカエルが最も重要な餌となっていた。

佐渡島内でのトキの餌は上記の通りであるが、本州に渡ったトキではドジョウの他、アメリカザリガニを捕食しているのが目撃されていて、アメリカザリガニが重要な餌のひとつとなっている可能性がある。

採餌効率は採餌ハビタットおよび採餌地域で大きく異なっていた（図7）。餌候補生物の予備調査の結果、採餌効率と採餌ハビタットの生物の現存量には有意な相関関係がみられたことから（スピアマンの順位相関係数 $r_s=0.56$ ；池田・寺島，未発表）、採餌効率は採餌場所の好適度を示していると考えられる。

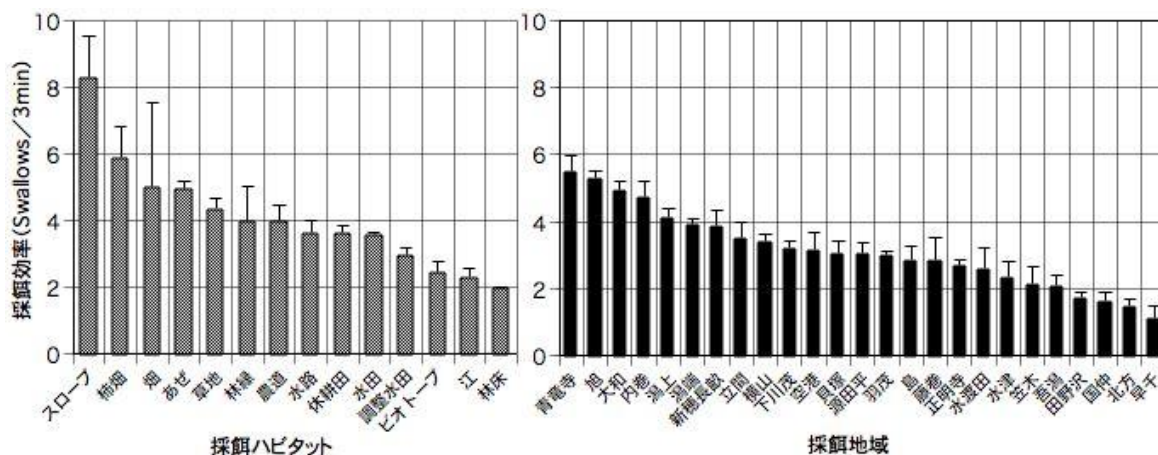


図7. 採餌ハビタット（左）および採餌地域（右）による採餌効率の違い

ドジョウやミミズの飲み込み回数の平均値には場所による差が認められ、立間や長畝では3分間にドジョウとミミズ等を 5.5 ± 0.4 回も採餌できたのに対して、最も少ない相川早千では 1.12 ± 0.35 匹しか採餌できなかった。一方、全体の採餌効率（飲み込み回数）は、ドジョウの飲み込み回数が全体の平均より多い立間、長畝、島、下川茂で少なく、ドジョウの飲み込みが少なくミミズが多い旭、羽茂、源田平で多くなる傾向が見られた（図7右）。採餌効率（単位時間あたりの飲み込み回数）は、地域、採餌ハビタットの他に餌中にドジョウとミミズの占める割合や飲み込み数にも影響を受けていて、ドジョウとミミズの飲み込み数が多くてドジョウの割合の少ない場所で多くなっていた（一般化線形モデル、 $P < 0.0001$ ）。大型の餌であるドジョウ等が少ない地域では、小型の餌を単位時間あたりたくさん採餌しているためと考えられる。

（4）放鳥後のトキの採餌行動と警戒行動の時間変化

10分間観察による各個体の行動時間配分比率を月毎に纏めてみると、1次放鳥では放鳥後季節が進むにしたがって採餌時間に割く時間が58%から82%へと4月までは増加し、警戒に費やす時間が14%から9%へと減少していた。しかし、春の繁殖期になると5~6月にかけて警戒時間が増加し、6月に14%とピークに達して10月に9%と減少していた。これにともなって採餌時間も6月には72%間で減少し10月に80%と増加していた（図8）。これは、冬期には新穂地区と羽茂地区にそれぞれ2羽ずつが合流して行動していた1次放鳥個体が単独行動を行うようになり、6~7月に再び合流するという動きを行ったためと考えられる。羽茂の2羽は2009年12月になると婚姻色に変わり間置きをはじめ、互いに相手の行動を牽制するようになった。

1次放鳥直後は、人に対する警戒が強く警戒行動に割く時間が多かったため、見学者がいるときには1分間あたり3.4回、 17.0 ± 3.5 秒と、見学者がいないときの値、1分間あたり平均2.5回、 7.3 ± 3.1 秒、に比べて、有意に多くの時間を警戒行動に費やしていた。しかし、月日を経るにしたがって人に対して馴れてきたため、警戒行動の時間配分の減少が起こったとも考えられる。

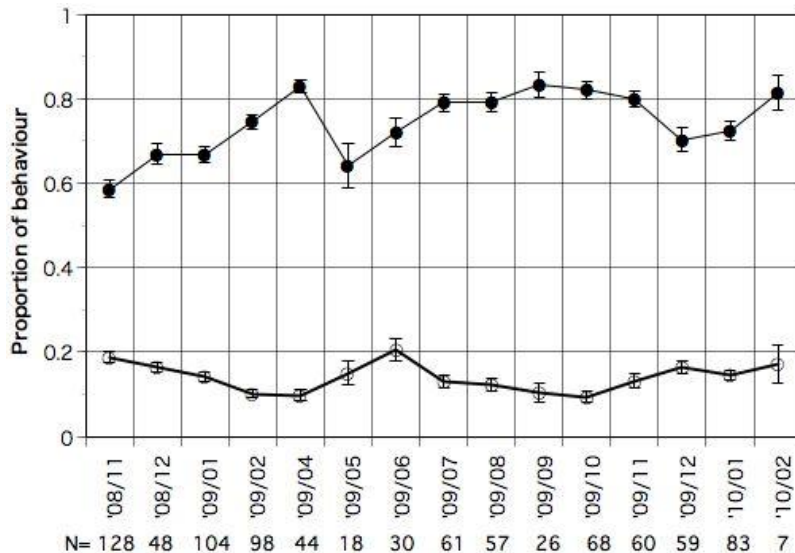


図8. 放鳥後、月日の進行にともなう各行動時間配分の変化。(●:採餌行動, ○:警戒行動, 垂直線は標準誤差SEを示す.)

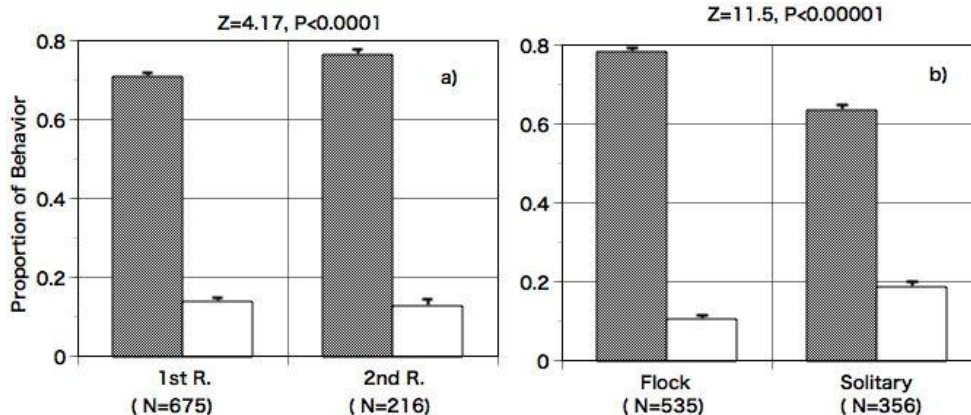


図9. a)1次放鳥と2次放鳥間, および b)群れと単独個体の警戒行動(白抜きバー), 採餌行動(灰色バー)への時間配分の比較. 垂直線は標準誤差SEを示す.

また、警戒行動への配分時間の差が、1次放鳥が14.2%であったのに対して、2次放鳥個体では13.0%と僅少差であるが、統計的には有意な差が認められた(Mann-Whitney's U test, $Z=2.20$, $P<0.05$)。採餌時間に割く配分時間も1次放鳥の46.7%に対して2次放鳥では50.0%と有意な差があった(Mann-Whitney's U test, $Z=4.17$, $P<0.0001$) (図9a)。しかし、2次放鳥個体は、2009年10月以降、すぐに群れを、形成したためはじめから警戒行動に割く時間が少なくてすんだ

と考えられる（図8）。実際、トキは、群れに加わることで警戒行動を単独時の18.9%から群れ中の10.7%に減少させ、採餌時間に割く時間を63%から78%へと増加させていた（図9b）。ソフトリリース法によって、2次放鳥において順調な群れ形成が促進できたことは、行動圏を安定させただけでなく、人に対する急速な順化や冬期に十分な採餌時間をもたらしたと考えられる。

（5）放鳥トキが選択した採餌場所の景観要素

1次放鳥個体と2次放鳥個体が放鳥後、採餌場所として利用した水田には大きな重複がみられた（図10）。1次放鳥個体と一緒に行動していないにもかかわらず、2次放鳥個体がピンポイントで同じ棚田を利用していた。放鳥トキは、何らかの景観要素に誘引されて全く同じ水田を利用すると考えられた。そこで、トキの分布パターンのうち、最終的に、両放鳥トキが利用した79地点と利用しなかった100地点を説明する統計モデルを一般化線形モデルで構築し、赤池情報指数（AIC）を使って最適なモデル選択を行った。

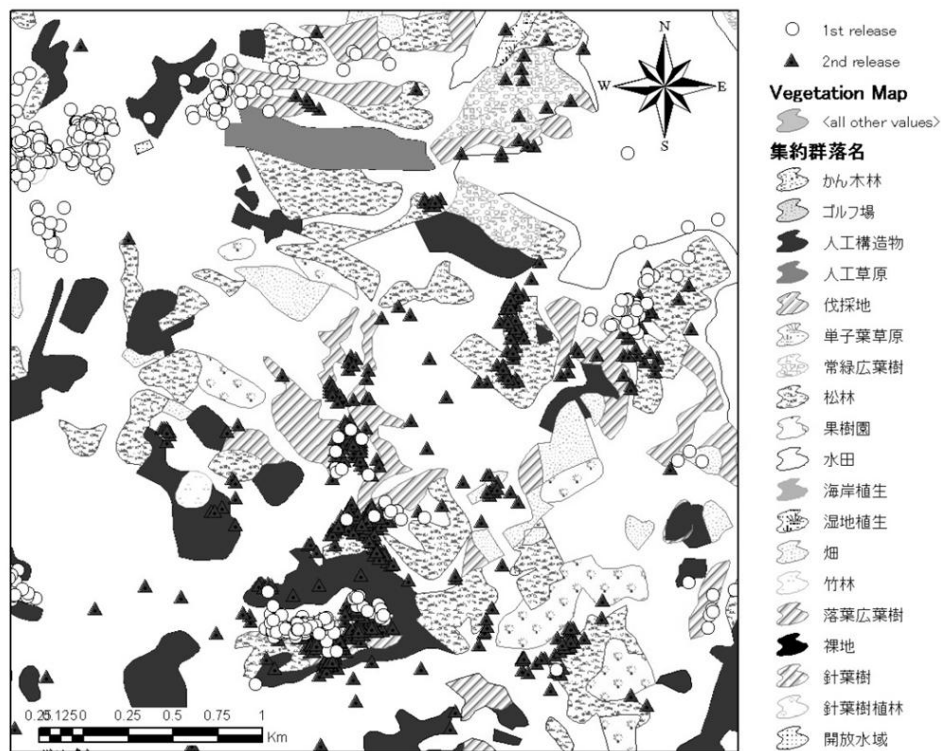


図7-10. 1次放鳥個体（○）と2次放鳥個体（▲）が放鳥直後に選んだ景観

バッファーサイズ800mとすると、利用した場所と利用しないランダムサイトの重複が大きくなってしまい有効な統計モデルは作製できなかった。作製できたいずれのモデルにおいても植生（土地利用）変数だけのモデルでは、AIC値が小さくならず、景観要素を加えることでモデルのあてはまりがよくなることがわかった。また、バッファーサイズを200mとした時に、AIC値が最小となった（図11）。その際に、モデルに取り込まれた変数は、植生要素として松林、ゾラ落葉広葉樹林、水田の面積、および、標高、標高の標準偏差、傾斜角の6変数であった。1次放鳥および2次放鳥トキが好んでいたのは、標高が低くて、起伏が少なく、緩い傾斜のある景観で、半径200mの範囲内に松林やコナラ等の雑木林があり、面積の狭い水田がある場所となる。つまり、松林や雑木林に

囲まれた低地の緩い谷戸地形を最初に好んで利用しているといえる。松林や雑木林は、水田を利用するトキが採餌の合間に休息地として利用するために必要となるのであろう。

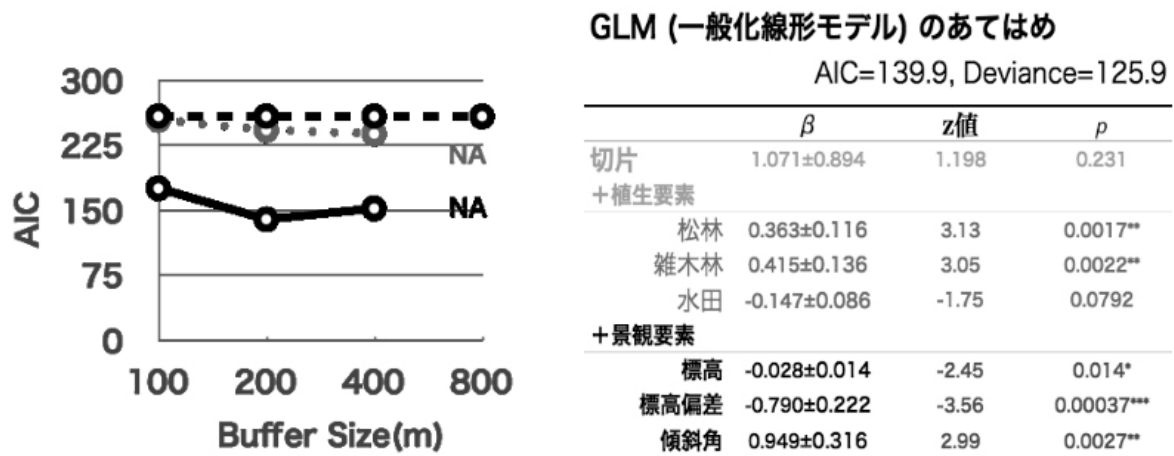


図11. 1次放鳥, および2次放鳥個体が選択した環境の統計モデル選択 (左) と統計モデルに取り込まれた変数 (右) .

さらに、水田面積には負の回帰係数がついていることは、トキは開けた場所ではなく狭い水田を安心して使用することを意味しているのだろう。

本研究課題の研究期間中に、ハードリリース法とソフトリリース法という放鳥方法の異なる2回の試験放鳥が行われた。1次放鳥で1羽の雌が放鳥直後に島外に分散したことに對して、2次放鳥雄の多くが放鳥場所近くの群れに加わり、安定した行動圏を持てたのは、ソフトリリース法という放鳥方法を採用したことによるところが大きいと考えられる。また、ソフトリリース法によって、2次放鳥において順調な群れ形成が促進できたことによって、早期に行動圏が安定しただけでなく、人に対する急速な順化や冬期に十分な採餌時間がもたらされたと考えられる。3月に入って雌の分散が始まると、佐渡南部に定着していた1次放鳥の雄2羽の縄張りに3~4羽の雌が訪問する機会が生じたため、雌の島外への分散を妨げると同時に順調な番い形成が起きた。本研究において、イネ丈が高くなる夏期には水田が利用できなくなり草地や畔で採餌しミミズに依存していることがわかってきた。そのため、佐渡島において夏期にトキが繁殖するのに十分な餌資源が存在するか、また、捕食者の繁殖への影響がどの程度あるのかといった、繁殖に関する情報は、まだ、全く蓄積していない。現在、佐渡島内において4組の番いが営巣を開始し、抱卵行動を継続中である。2010年に繁殖が成功するかどうかはわからないが、今後、繁殖に関する生態情報は蓄積していくと考えられる。また、数年が経過することで、十分な営巣場所に関するデータが蓄積し、営巣場所を予測するモデルも構築可能となるはずである。繁殖期の情報に加えて、餌の再生産に関するデータが蓄積することで、佐渡に何羽のトキが生息可能かも明らかになるだろう。いずれにせよ、トキの自立した野生個体群設立のためには更なる研究が必要である。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

野生動物の再導入手法を確立することは、応用科学分野の保全生物学の実践的發展に寄与する

と考えられる。これまで知られていなかった野外でのトキの生態が明らかになりつつある。

(2) 地球環境政策への貢献

本サブテーマの研究成果をトキ野生復帰専門家会合にフィードバックすることで、トキの野生復帰事業に役立てる体制を構築した。H20年度は、環境省関東環境事務所佐渡自然保護事務所が行っている放鳥後のトキモニタリングに本研究で行った手法を提案し、1日の必要代謝推定量と比較することで冬期の餌不足の監視する方法を確立した。H22年2～4月にかけて、トキの繁殖期のモニタリング体制・手法を確立し、佐渡自然事務所への協力・指導を行っている。

6. 引用文献

- 1) IUCN/SSC Reintroduction Specialist Group (1995) IUCN/SSC Guidelines for Re-introductions. IUCN, Gland, Switzerland.
- 2) 農林水産省・国土交通省・環境省 (2004) トキ保護増殖事業計画. 告示第1号. 東京.

7. 国際共同研究等の状況

陝西省野生動物保護協会および鳥類標識中心の研究者と連絡して、中国陝西省において冬期のトキの越冬生態調査を行った。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

- 1) 近辻宏焯・永田尚志 (2009) トキ、野生動物保護の事典、野生生物保護学会編、pp. 513-515、朝倉書店
- 2) Nagata, H. in press. Dispersal and foraging behavior of Crested Ibis, *Nipponia nippon*, after release in Japan. Proceeding of 25th International Congress for Ornithology, Sao Paulo.

(2) 口頭発表 (学会)

- 1) 永田尚志 (2009) 放鳥1年でトキの何がわかったか? 2009年度日本鳥学会大会
- 2) 遠藤千尋, 永田尚志 (2009) 放鳥されたトキの野外の採餌パターン. 日本行動学会第28回大会
- 3) 永田尚志 (2010) 佐渡において放鳥されたトキの餌メニューとハビタット選択. 日本生態学会第57回大会
- 4) 遠藤千尋, 永田尚志 (2010) トキの餌探索パターンとハビタット利用の季節変化. 日本生態学会第57回大会
- 5) Nagata, H. (2010) Dispersal and foraging behavior of Crested Ibis, *Nipponia nippon*, after release in Japan. International Congress for Ornithology

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

なし

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 2009年4月19日読売新聞山形版（村山・置賜）
- 2) 2009年5月18日新潟日報
- 3) 2009年5月19日新潟日報
- 4) 2009年9月22日新潟日報
- 5) 2009年9月24日新潟日報
- 6) 2010年1月31日エフエム新津「週刊ガイア通信」
- 7) 2010年2月22日新潟日報
- 8) 2010年4月16日産経新聞
- 9) 2010年4月25日NHK7時ニュース
- 10) 2010年4月29日読売新聞

(6) その他

- 1) 2009年6月4日新潟県廃棄物協会基調講演「トキとはどんな鳥か：放鳥後半年でわかったこと、わからないこと」
- 2) 2010年3月10日機会学会北信越大会基調講演「放鳥トキの現状：どこまでトキの生態はわかったのか」
- 3) 2010年5月29日（予定）2010年度日本海学講座「トキ野生復帰の現状～佐渡の現場から～」

F-072 トキの野生復帰のための持続可能な自然再生計画の立案とその社会的手続き
 (8) トキの生息環境を支える地域社会を構築するための社会的合意形成の設計

国立大学法人 東京工業大学

大学院社会理工学研究科 価値システム専攻 桑子敏雄

<研究協力者> 順天堂大学 吉武久美子
 昭和堂 鈴木了市
 東京工業大学大学院社会理工学研究科
 価値システム専攻 豊田光世

平成19～21年度合計予算額 17,487千円
 (うち、平成21年度予算額 6,143千円)

※予算額は、間接経費を含む。

[要旨] 本サブテーマでは、自然環境保護の問題にかかわる社会的合意形成の成果を基礎にして、トキの歴史的・文化的コンテクストの解明および野生復帰に関係するステークホルダーの特定を行い、野生復帰時に課題となる事項および地域づくりのシナリオを、現地のステークホルダーとのワークショップを重ねながら明らかにすることを目的に研究を進めてきた。また、放鳥前後のステークホルダーの意識変化を踏まえつつ、地域住民、行政関係者、研究者など、多様なステークホルダーを対象として、ワークショップ（「佐渡めぐりトキを語る移動談義所」）を開催し、トキ野生復帰にかかわる関心・懸念の把握を進めた。トキにかかわる対立・紛争を回避するための合意形成の実践を通して、トキの野生復帰に向けた自然再生計画に関して合意形成を効果的に進めるための基礎的条件を示した。ワークショップは3ヶ年の研究期間で合計43回、環境省が定めるトキの野生復帰の重点エリア（小佐渡東部地域）よりも広い範囲で開催した。社会的合意形成の特筆すべき成果として、(1)トキへの関心の低かった岩首集落で情報集積・交流促進に向けた拠点の整備（岩首談義所）、(2)トキ放鳥に対して消極的だった加茂湖漁業協同組合関係者との協働による環境保全事業の展開に向けた拠点の整備（佐渡島加茂湖水系再生研究所）、(3)トキを含む自然と地域のさまざまな恵みを合わせて再生していく「包括的再生」という自然再生の理念の構築などが挙げられる。最終年度は、研究成果を「佐渡めぐりトキを語る移動談義所の歩み」という冊子にまとめ、地域への成果の公表を行った。

[キーワード] トキ、野生復帰、自然再生、社会的合意形成、佐渡島

1. はじめに

トキの野生復帰を考えるうえで、地域住民との合意形成は重要な課題である。自然再生のシナリオは、単に生態学的な視点からだけではなく、地域の課題を踏まえた社会的視点を組み込みながら、持続可能なものへと発展させていかなければならない。トキの野生復帰に関わる行政関係者、地域住民、研究者らは、トキとの共生に向けてどのような取り組みが可能か継続的に議論し、考えることが必要となる。

このような状況を踏まえ、本サブテーマでは、自然環境保護の問題にかかわる社会的合意形成の成果を基礎にして、多様なステークホルダーを対象とするワークショップ「佐渡めぐりトキを語る移動談義所」を開催し、トキ野生復帰にかかわる関心・懸念（インタレスト）の把握を進めながら、ステークホルダーの特定を行った。また、現地のステークホルダーとの意見交換を重ねながら、トキ野生復帰において課題となる事項および地域づくりのシナリオを明らかにし、課題の改善・克服に向けて実現可能な取り組みを具体化するサポートを行った。

本サブテーマでは、トキにかかわる対立・紛争を回避するための合意形成の実践的研究を通して、トキの野生復帰に向けた自然再生計画に関して合意形成を効果的に進めるための基礎的条件を示した。

2. 研究目的

本サブテーマでは、自然環境保護の問題にかかわる社会的合意形成の成果を基礎に、次の課題を目的として研究を進めた。

- (1) トキの野生復帰におけるステークホルダー分析およびインタレスト分析
- (2) 上記分析にもとづく対立構造の明確化と対立克服のための戦略構築
- (3) 上記(1)、(2)を進めつつ、課題解決のための実践的活動の戦略構築と具体的展開
- (4) 多様な行政機関との連携、多様なステークホルダー間でのコミュニケーションの促進
- (5) トキの歴史的・文化的コンテキストの解明
- (6) トキの野生復帰に関わる具体的な課題の抽出
- (7) トキの野生復帰および関連する地域の課題にかかわる合意形成の推進
- (8) トキの野生復帰にかかわる合意形成を効果的に進めるための基礎的条件の明確化

3. 研究方法

研究目的として示した項目を統合的に明らかにするために、ワークショップの実践、ヒアリング調査、文献調査を主軸として研究を進めた。それぞれの具体的な方法を以下に示す。

(1) 社会的合意形成ワークショップの実践

「佐渡めぐりトキを語る地域づくり移動談義所（以下、「移動談義所」とする）」と名付けた意見交換ワークショップを企画・運営した。ワークショップのマネジメントは、以下のメンバーで構成する「トキと社会」研究チームを結成して進めた。

- 桑子敏雄（東京工業大学大学院教授、本サブテーマリーダー）
- 島谷幸宏（九州大学高額研究員教授、本プロジェクトリーダー）
- 岩浅有記（環境省佐渡自然保護官事務所自然保護官、2009年4月まで）

- 笹渕紘平（環境省佐渡自然保護官事務所自然保護官、2009年4月より）
- 深井真由美（環境省佐渡自然保護官事務所自然保護官補佐）
- 生玉修一（農林水産省北陸農政局環境保全官、2009年3月まで）
- 大石惣一郎（地域住民農家）
- 豊田光世（東京工業大学大学院桑子研究室博士課程）
- 山田潤史（東京工業大学大学院桑子研究室修士課程、2009年3月まで）
- 高田知紀（東京工業大学大学院桑子研究室修士課程、2008年4月より）

ワークショップは、地域住民の協力を得ながら企画し、多くの場合、環境省佐渡自然保護官事務所、ならびに佐渡市との共催とした。トキの野生復帰重点エリア（小佐渡東部地域）より広い地域で開催し、多様なインタレストの把握を目指した。また、KJ法を活用して、全ての参加者の意見を収集・記録することに努めた。ワークショップの課題は、上記研究チームが発案する場合と、地域住民の要望に応じて選定する場合とがあった。後に詳しく述べるが、フィールド調査を通してトキの野生復帰に対する人びとの関心があまり高くないことが明らかになったため、ワークショップではトキの野生復帰というテーマに限らず、幅広いテーマを設定した。ワークショップでの議論の内容を地域住民、行政関係者らと共有するために、新聞・ローカルテレビを中心としたメディアを活用したほか、談義開催履歴と成果を一覧できるチラシと、各談義所の議論を報告する「談義所通信」を発行した。

（2） ヒアリング調査

ワークショップで収集した意見を踏まえ、必要に応じてヒアリング調査を行った。トキの野生復帰に対して消極的な意見を示す人びとにインタビューを行い、思いや不安の詳細と来歴を明らかにした。インタビューの内容はICレコーダーで記録した。トキの歴史的・文化的コンテクストを明らかにするために、地域高齢者のヒアリング調査（トキ目撃情報調査）を実施した。この調査は、移動談義所の活動に関心を示した「潟上老人クラブ」のメンバーと協働で、2008年夏期に進めた。絶滅以前にトキが佐渡島のどのような地域で目撃されたかを調査し、情報をマップに集約した。インタビューの内容は、ICレコーダーで記録した。本調査は、高齢者の社会活動のモデルとしても位置づけた。また、研究の最終年度では、移動談義所の取り組みについて評価を行うため、活動に参加経験のある行政関係者、地域住民に対して、ヒアリングを行った。

（3） 文献調査

トキ保護、自然再生事業の推進、合意形成、市民参加、環境教育、倫理などに関する文献、環境保全事業・トキ野生復帰事業に関する自治体・行政関係文書、地域の歴史的な文書（市町村史、地域団体の活動文書など）を調査した。

4. 結果・考察

本サブテーマの結果について、研究目的別に以下に示し考察する。

（1） トキの野生復帰におけるステークホルダー分析およびインタレスト分析

上記研究方法（1）で示した通り、「移動談義所」ワークショップを開催し、ステークホルダー分析・インタレスト分析を行った。

ワークショップは、全43回開催した(図1)。かつてトキは農家にとって「害鳥」と知られていたため、農業従事者が重要な利害関係者であることは事前に予測できたが、潜在的なステークホルダーを見落とさないために、さまざまな年齢・立場の人びとを対象としたワークショップを開催した。また、同様の理由から、開催地区をトキの野生復帰重点エリア(小佐渡東部地域)に限定せず、さまざまな地域でのインタレストの把握につとめ、トキとのつながりを調査した。第1回移動談義所は、地域住民のヒアリングでトキに関して関心が低いと分かった「岩首」という集落で行った。初年度は小佐渡東部から離れた地域を中心に、その後、重点エリアでも積極的に移動談義所を開催した。

ワークショップ参加者の属性は、農業従事者、漁業従事者、地域づくり関係者、環境保全活動関係者、主婦、高齢者、小中学生、佐渡市職員、新潟県職員、環境省職員、大学研究者などである。

(写真1.2.3)参加人数は、延べ約1,300人である。参加者の属性別に行う場合と、多様な年齢・立場の人を招集する場合とがあった。

ワークショップでの意見交換や中国でのトキの生態にかかわる文献を踏まえると、放鳥後、広域なエリアでトキの飛来が考えられること、農業のほか観光産業も大きく変化する可能性があることが明らかになり、佐渡島で暮らすすべての人をトキの野生復帰事業のステークホルダーとして認識し、佐渡島の自然再生計画にかかわる合意形成を進めていくことが必要であることが示された。トキの野生復帰事業重点エリアとして、小佐渡東部に鳥獣保護区が設定されているが、実際の潜在的ステークホルダーは、指定エリアよりも広域に存在することが明らかになった。

また、ワークショップでは、地域の人びとのトキに対する関心があまり高くないことが確認された。多くのワークショップ参加者は、トキの野生復帰よりもむしろ、過疎化、少子高齢化に伴う福祉や教育の問題により高い関心を示していた。他地域と比べて、過去積極的なトキ保護の活動を進めてきた旧新穂村地区と旧両津市地区の一部では関心が高い人が多いが、同時に事業に反意を示す人も多い。このような状況を踏まえると、さまざまな主体が参加可能な合意形成の場を整備し、トキの野生復帰にかかわる自然再生計画について話し合う試みをはじめたととしても、実際に参加をする人は少ない可能性がある。トキの野生復帰の取り組みについての広報とともに、トキと地域の課題をつなげながら考え、自らの地域の問題として認識するきっかけづくりが重要である。



図1. 移動談義所開催場所



写真1. 農業従事者との談義



写真2. 佐渡市立畑野小学校での談義

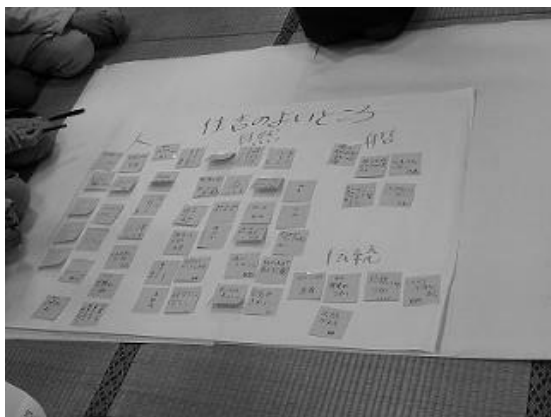


写真3. 参加者全員の意見を収集するために、付箋紙を用いてKJ法を工夫しながらワークショップを行った。付箋に書かれた意見をまとめて参加者全員で共有した。

(2) 上記分析にもとづく対立構造の明確化と対立克服のための戦略構築

移動談義所ワークショップでは、トキの野生復帰のメリットとデメリットというテーマで意見交換を行い、地域の人びとの関心と懸念を明らかにするとともに、潜在的な対立構造の把握に努めた。トキの野生復帰をめぐるのは、一部の農業従事者からの反発はあったものの、その他に具体的な対立が表面上現れていなかった。ただし、対立の可能性のある課題を抽出し可視化していくことで、対立を回避するための手だてを考えることができる。

例えば、談義のなかで、過疎化・少子化とともに進む学校の統廃合、加茂湖のカキ漁の不振、一人暮らし高齢者の福祉など、地域の深刻な課題を参加者が指摘した。参加者のなかには、これらの問題を蔑ろにしてトキの事業だけを支援することに対して、強い反感を示す人がいた。地域の課題をトキと関連づけて考えていくことで、トキの野生復帰事業ばかりが優先されるという地域の不満を和らげるとともに、対立構造をなくし、win-winの解決方法を探ることができる。

(3) 地域の課題解決のための実践的活動の戦略構築と具体的展開

具体的な展開の事例を以下に挙げる。

1) 岩首談義所

第1回移動談義所で、岩首集落の中心にある旧岩首小学校（2007年3月に閉校）の校舎の利活用が話題となり、トキの野生復帰にかかわる情報・研究拠点として、また地域の交流拠点として使用できないか検討した。地域のニーズをまとめて佐渡市に提出したところ、本研究プロジェクトが実施される3年の間試験的に使用を許可された。「岩首談義所」という名前で校舎を活用していくこととなった（写真4）。すぐに、岩首談義所の活用について検討する地域の有志の会が結成され、積極的な企画・運営を進めていった。本サブテーマでも、トキを中心とした地域づくりについて話し合う談義を開催し、積極的な活用を図った（写真5）。年間訪問者数は約四千人となり、佐渡市に活用状況が評価されたため、本研究プロジェクト終了後も施設の継続利用が許可された。宿泊施設として活用したいというニーズが高かったため、佐渡市が経費の援助を行い、2010年度に改修工事が決定している。

岩首談義所では、2010年2月に佐渡市との共催で「廃校舎再生サミット」が開催された。佐渡市の廃校舎活用のモデルとして位置づけられ、島内他地域で同様の課題を抱えている人びとの関心を集めている。また、岩首談義所という施設を中心として、集落背後の急斜面に連なる棚田、山中の滝、伝統的な暮らし、工芸品などの地域資源をつながりながら集落の活性化を図る動きが始まっている（写真6）。集落住民は、島内の専門学校で宮大工の技術を学ぶ学生の協力を得て、山の上に棚田展望台を建設し、新しい岩首集落の魅力を発信しようと試みている。岩首談義所が、集落住民の自主的な取り組みを進める拠点として機能しているといえる。



写真4. 旧岩首小学校校舎を活用した岩首談義所



写真5. 岩首談義所の多目的な活用



写真6. 岩首集落の背後の里山に広がる棚田は減反政策、後継者不足の影響による耕作放棄田の増加が課題となっている。

2) 天王川自然再生事業

移動談義所でのステークホルダー分析、インタレスト分析が評価され、新潟県佐渡地域振興局から、県が進める天王川自然再生事業での市民参加型座談会の進行役を依頼された（写真7）。この川は、トキの野生復帰事業の重点エリアである新穂正明寺地区、新穂潟上地区を通り、加茂湖に流れている。この事業は、トキが生息しやすい環境をつくるため、生き物豊かな川づくりを進めることを目的としている。

天王川座談会の進行役に参加したことで、加茂湖漁業者のトキに対するネガティブな考えが明らかとなった。これまでの河川改修で土砂流入などの被害を受けている漁業者たちは、トキのために生業が危険にさらされるということに危機感をもっていた。そのため、トキの野生復帰と加茂湖の再生をつなげていく談義を展開し、3)の市民研究所の設立へとつなげた。



写真7. 天王川座談会

3) 佐渡島加茂湖水系再生研究所

トキの野生復帰に反対していた加茂湖漁業者との談義の末、トキの放鳥をきっかけに加茂湖を豊かにする方策をみんなで考えるという合意を形成し、多様な立場の人びとが加茂湖の再生に向けて協働する地域活動団体「佐渡島加茂湖水系再生研究所」（図2）を立ち上げた。本研究所の設立によって、トキの野生復帰事業に対する懸念が緩和された。

放鳥前、加茂湖はトキの事業の重点エリアとして位置づけられていなかったが、放鳥後、トキの重要な生息地となっている。また、第1回試験放鳥のトキ一羽が行方不明になった時には、加茂湖漁業者が搜索の手伝いをしている。

トキが飛来している箇所付近には湖底の浚渫度を山積みにした残土があり、湖の水温上昇や景観悪化につながっているという地域の懸念がある。2010年1月には、

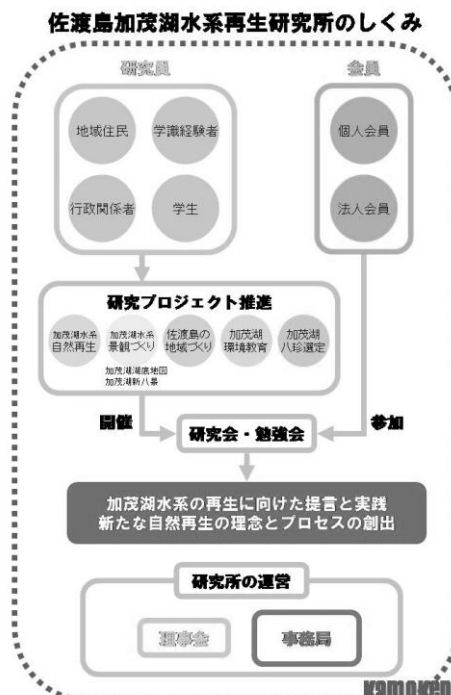


図2. 佐渡島加茂湖水系再生研究所の体制

「佐渡島加茂湖畔潟端地区浚渫度活用談義」を開催し、潟端地区住民、環境省職員、新潟県職員などとともに、建設残土を活用した「茨城県古賀総合公園の視察を行った。この談義は、加茂湖畔の浚渫残土を活用して野鳥公園などを構想するきっかけとなった。

(4) 多様な行政機関との連携、多様なステークホルダー間でのコミュニケーションの促進

移動談義所は、環境省佐渡自然保護官事務所と佐渡市の共催であり、適宜新潟県職員の参加を依頼し、積極的な協力を得た。ワークショップのこのような実施形態は、トキの野生復帰に関わる諸課題について、行政組織が横断的に情報交換を行い、同一地域、他地域の市民同士が考えを共有する貴重な場の創出につながった。このような取り組みは、行政関係者から高い評価を得た。

多様な立場の参加者を集めるために、多彩な行政機関との連携体制の構築に努めたことが、評価につながったようである。島内外を統合する連携システムを構築することで、さまざまな視点から地域を見ることが可能になり、地域の課題を多角的に抽出する体制が整う。

(5) トキの歴史的・文化的コンテクストの解明

潟上地区の老人クラブメンバーと協働で、この地区の80歳以上の高齢者を対象にトキ目撃情報調査を行ったところ、トキと人とのかかわりや以前の島の風土の特徴が明らかになった。具体的には、天王川中流部の温泉の湧く箇所でも冬場に多くのトキが採餌していたということ、加茂湖周辺を群れで飛ぶ姿がよく目撃されていたこと、トキは害鳥だという認識はあったものの空を飛ぶ美しい姿に人びとは感動したことなどである。かつてトキが佐渡島でどのように生息していたかを知ることは、自然再生の計画をつくる過程で重要な手がかりの一つとなる。今後、より広い地域で同様の調査を行うことは、トキとの共生に向けた取り組みを深めていくうえで参考となるだろう。

なお、この調査を展開した理由は、移動談義所の活動を耳にした老人クラブメンバーから、地域貢献のために何かできることはないかと相談を受けたことによる。ワークショップの推進は、実践的波及効果をもたらすことが明らかになった。

(6) トキの野生復帰に関わる具体的な課題の抽出

1) トキの野生復帰に対する人びとの関心の向上：さまざまな地域、職種の人びとがトキの飛来やトキの野生復帰にかかわる政策、産業形態の変化などによって事業の影響を受けうるということを考慮し、島内全体の関心を高める必要がある。そのためには、3)にある通り、人びとの日常的な関心とトキをつなげていく合意形成が必要である。

2) 地域的乖離の克服：トキの野生復帰事業推進のために放鳥以前に設定された重点エリア（小佐渡東部地域）だけに合意形成の対象地を限定せず、広い地域を視野に合意形成の実践を進めていく必要がある。（この課題については、放鳥以前から認識していたが、放鳥後さらに明確になった。）

3) 価値的乖離の克服：地域の人びとの多彩な関心とトキの野生復帰事業をつなげ、「価値（関心）」の乖離を緩和する合意形成の努力が必要である。

(7) トキの野生復帰および関連する地域の課題にかかわる合意形成の推進

(3) でも示した通り、岩首、天王川、加茂湖を中心に、地域の課題とトキの野生復帰をつなげながら、島内での合意形成を進めてきた。これらの具体的な成果の他、全ての移動談義所活動において、多彩な地域の関心・課題をトキの野生復帰事業とつなげて考える話し合いを進め、例えば、一人暮らしの高齢者の福祉の問題をトキとどのようにつなげるか、少子化とトキをどのようにつなげるかなど、トキの野生復帰事業を考える新たな視点を明らかにした。表面的にはトキと関係ないように思われることでも、何らかのつながりが見えてくることが明らかになった。トキが生息可能な環境づくりについて、「持続可能な地域の実現」という包括的な視点から取り組み、さまざまなレベルでの合意を形成していくことが重要である。

トキの野生復帰に向けた佐渡島の自然再生に必要な「包括的再生」という概念は、2008年3月に開催された第21回移動談義所「佐渡島みんなトキ色談義」での話し合いが基礎となって生まれた。この概念は、田んぼ、河川、森林等の自然環境の生態系を保全するだけでなく、地域の多様なめぐみとリスクを包括的に捉え、それらをつなげながら自然再生を考えていくことの重要性を示している。自然再生事業には、「生物多様性の保全」を進める環境省、「農業・農村の多面的機能」を検討する農林水産省、ならびに「多自然川づくり」という環境保全型河川整備事業を進める国土交通省が関与している。包括的再生を進めるには、これらの三省庁の取り組みをつなげていくことも重要である。本サブテーマでは、佐渡島での三省連携を象徴する旗印（写真7）を作成し、移動談義所で人びとのコミュニケーションツールとして活用しながら、この課題に関する地域の人びとの関心の向上に努めた。包括的再生の概念が誕生した背景には、このような啓発の取り組みがある。



写真7. 三た一さの旗印（三省の自然再生の理念に含まれる「多（た）」と佐渡の「さ」をシンボルとしたもので、佐渡を中心として三省連携の自然再生の方策を探るツールとして使用した）

(8) トキの野生復帰にかかわる合意形成を効果的に進めるための基礎的条件の明確化

(1) ～ (7) の結果・考察を踏まえ、トキの野生復帰に向けた自然再生計画に関する社会的合意形成の考慮点として、以下の5点を挙げる。

1. 柔軟なゾーニングの解釈
2. 地域のステークホルダーの関心を踏まえた自然再生事業の推進
3. 行政機関間、各行政機関内部の組織、NPO、市民グループ等の組織、団体間の連携推進
4. トキの歴史的コンテクスト発掘の試み
5. 世代をつなぐ活動の推進

また、このような点を考慮しながら合意形成を推進するには、次のような条件が必要である。

1. 島内外を都合する合意形成プロセスをプロジェクトとして構築する
2. 情報伝達・共有の活発化を図る
3. 地域の主体的な活動、地域間をつなぐ活動をサポートする体制を整備する。
4. 多様な行政主体、大学など研究機関間をつなぐマネジメント体制を整備する。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

社会的合意形成の技術確立への寄与

自然再生事業には多様な主体が関与することから、ステークホルダー間の軋轢が生じる可能性が高い。そのため、事業を円滑に進めるためには、多様な主体間の合意を形成する必要がある。このような多様な主体が関与する合意形成を社会的合意形成と呼ぶ。本サブテーマでは、トキの野生復帰事業を通じて、社会的合意形成に関わる技術の確立へ寄与できた。また、自然再生事業で重視されつつある民主的な意思決定を推進するための具体的方法を示した。

(2) 地球環境政策への貢献

生物種の導入に向けた自然再生事業において、新・生物多様性国家戦略などの国際的政策は重要な位置づけにある。この政策では、環境の科学的認識のほか、市民参加、知識の共有、省庁間連携が必要と明示されている。本サブテーマで進めている社会的合意形成プロセスの理論とモデル構築に関する研究は、政策のこれらの側面に貢献するものである。地域にとって持続可能で、かつ多様な生き物が生息可能な環境づくりに向けて、他地域でも実践可能な合意形成の枠組みを示した。

6. 引用文献

特になし

7. 国際共同研究等の状況

特になし

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) 豊田光世, 山田潤史, 桑子敏雄 (2008) 「佐渡めぐり移動談義所」によるトキとの共生に向けた社会環境整備の推進に関する研究. *自然環境復元研究* 4: 51-60
- 2)

<査読付論文に準ずる成果発表>

- 1) 山田潤史 (2009) 自然再生事業の社会的合意形成手法に関する研究、東京工業大学大学院 社会理工学研究科 (修士論文)

- 2) 豊田光世 (2009) A Study on the Theory and the Method of Inquiry-Based Education for Democratic Environmental Restoration, 東京工業大学大学院社会理工学研究科 (学位論文)
- 3) 高田知紀 (2010) 多自然川づくり事業における合意形成プロセスの評価枠組みに関する研究, 東京工業大学大学院社会理工学研究科 (修士論文)

〈その他誌上発表 (査読なし)〉

- 1) Riverfront, Vol. 62, 6-9 (2008)
「日本の風土と多自然川づくり (桑子敏雄)」
- 2) 大学授業がやってきた! 知の冒険, 桐光学園特別授業、水曜社, 86-96 (2008)
「トキをどう野にかえすか (桑子敏雄)」
- 3) 計画行政 Vol. 31, No. 2, 29-36 (2008)
「風土の視点からの河川計画 (桑子敏雄)」,
- 4) 水環境学会誌, Vol. 31, No. 7, 333 (2008)
「多自然川づくりと社会的合意形成 (桑子敏雄)」,
- 5) 生き物文化誌BIOSTORY, Vol. 10, 18-23 (2008)
- 6) 「トキを語る移動談義所の試みー風土の中の生き物 (桑子敏雄)」
- 7) 水資源・環境研究, Vol. 21, 74-78 (2009)
「トキと共に生きる島づくりと加茂湖・天王川再生 (豊田光世)」

(2) 口頭発表 (学会)

- 1) 山田潤史, 豊田光世, 桑子敏雄 (2007) 自然再生に向けた社会環境整備における協働創出ワークショップ『佐渡めぐり移動談義所』の試み. 第8回自然環境復元学会研究発表会
- 2) 豊田光世, 山田潤史, 桑子敏雄 (2008) 『佐渡めぐり移動談義所』で展開するトキ野生復帰の推進と地域活性化の融合. 日本感性工学会第4回春季大会
豊田光世 (2008) トキと暮らす感性を育むー子ども談義所が目指すことー. 日本感性工学会第9回完成哲学部会研究発表会
- 3) M. Toyoda (2008) Turning Ecological Crisis into Opportunity for Local Communities on Sado Island. The Uehiro The Uehiro Cross Currents Philosophy Conference: Crisis and Opportunity Philosophy Students' Association of the University of Hawai`i at Manoa, Honolulu, U. S. A.
M. Toyoda (2008) Applying Philosophy for Children to Workshop-Style Environmental Education. XXII World Congress of Philosophy
- 4) 桑子敏雄 (2008) 自然再生の社会的課題. ELR2008福岡公開シンポジウム
- 5) M. Toyoda (2009) Kansei-Based Activities for Democratic Environmental Restoration. International Conference on Kansei Engineering and Emotion Research 2009
高田知紀, 豊田光世, 桑子敏雄 (2009) トキの野生復帰に向けた天王川自然再生事業における合意形成プロセスの構築と実践. 土木学会第64回大会

(3) 出願特許

特になし

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

- 1) 佐渡めぐりトキを語る移動談義所（全43回、2007年5月～2010年2月、佐渡島各地、茨城県古河市古河総合公園）

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 新潟日報（2009年5月27日、14面、トキ舞う川へ再生を 新穂で水辺づくり座談会）
- 2) 読売新聞（2009年6月2日夕刊、2面、トキが舞う日6 環境整備へ大学の力）
- 3) 新潟日報（2009年6月19日、16面、新穂 トキ放鳥 住民と研究者懇談）
- 4) 新潟日報（2009年11月26日、26面、佐渡・新穂 トキ野生復帰目指し自然再生計画作ろう）

(6) その他

特になし