

「冬季湛水田の生物多様性と生態系機能・サービスの多面的評価」

奥田昇（神戸大学・内海域環境教育研究センター）

吉岡裕生（神戸大学・理学部）・浅野悟史（京都大学・地球環境学堂）

要旨

琵琶湖流域の中山間地農村集落において冬季湛水田が生物多様性・生態系機能・生態系サービスに及ぼす影響を評価した。冬季湛水は、在来水生動物群集の多様性や個体数の増加に寄与したが、半水生動物群集に対して有意な効果を示さなかった。2017年の先行調査と比較すると、在来底生動物群集の多様性が有意に低下する一方、外来種のアメリカザリガニは増加した。半水生底生動物群集に負の影響を及ぼす本種は、天水灌漑を通じてため池から侵入し、湛水環境が維持された水田内水路で増殖する可能性が示唆された。他方、冬季湛水田には、栄養取込・循環・運搬機能を促進する効果があり、農村集落や流域社会に質の高い生態系サービスを提供しうる。

1. 研究の背景

地球規模で急速に拡大する社会・経済活動を背景として、栄養循環の攪乱と生物多様性の消失は「地球の限界」を脅かす深刻な環境問題とみなされる(Rockstrom et al. 2009)。これらの問題は流域スケールで顕在化し、健全で文化的な暮らしの基盤を支える生態系サービスの損失を招くと危惧される。先進国社会においては、生活排水や産業廃水に起因する富栄養化を解消するために、リン・窒素の排出抑制を目的とした法律や下水道インフラの整備が行われてきた。このような制度的・技術的アプローチは、河川や湖沼の水質改善に一定の効果を発揮してきたが、生産効率を重視した農業の近代化に起因する栄養負荷の問題は依然として解消されていない(Allan 2004)。農業負荷を削減することは、世界中のインフラ型流域社会の共通課題と認識されている。

行政や専門家が主導する従来の流域管理では、流域の環境問題を解決する手段として環境保全型農業を促す制度的・経済的アプローチが試みられてきたが、このような保全活動は長続きしにくいことが指摘されている。活動の担い手が楽しみややりがいを実感し、しあわせ(Well-being)を向上することで、環境保全が地域住民により主体的に続けられることが環境自治の望ましい姿といえよう。研究代表者らは、先行する超学際プロジェクトにより、住民自らが地域の課題に向き合い、その解決の糸口を身近な自然との関係に見出し、保全する活動に寄り添う社会・文化的アプローチを提案し、その有効性を実証した(脇田ほか 2020)。

本研究課題で調査対象とする琵琶湖最大の流入河川・野洲川では、流域下水道が整備され

たことにより、生活・産業系負荷が劇的に削減されたものの、流域生態系の健全性は未だ回復途上にある。研究代表者らは、安定同位体分析技術を用いて、本河川に負荷される主要なリンが農業活動に由来することを特定するとともに(Ishida et al. 2019)、灌漑期に水田から排出される懸濁態リンが河川の生物多様性を低下させる駆動因となることを流域スケールの大規模調査により明らかにした(Ko et al. 2021)。

また、研究代表者らは、流域の環境問題と地域の社会的課題をともに解決する流域ガバナンスの一環として、本研究で対象とする中山間地農村集落の甲賀市・小佐治地区において、地域協働型アクションリサーチを実践してきた(奥田ほか 2020)。生活や生業に密接に関わる身近な自然を「地域の環境ものさし」と捉え、それを保全・継承する活動を促すことにより、当地の谷津田の伝統的農法を復活させることに貢献した(浅野ほか 2018; 浅野 2022)。古琵琶湖層の粘土質土壌からなる当地の谷津田では、古来、中干時の排水機能を向上するために「水田内水路(ひよせ)」が設けられ、乾燥による田面のひび割れや漏水を防止するために冬場も圃場に水を張る「冬季湛水田(冬水田んぼ)」が営まれてきた。このような谷津田の伝統的管理は、湿地生物に代替的な産卵・生息場所を提供することによって、里山の生物多様性保全に寄与してきたと考えられる。ところが、生産効率の向上を目的とした圃場整備と機械化の普及に伴って、当地の谷津田のほとんどが乾田化された。

研究代表者らは、この乾田化した谷津田を冬季湛水田に戻すことにより、雪解け後の水辺で産卵するニホンアカガエルやヤマトサンショウウオなどの代替繁殖地として水田が機能し、これらの湿地生物の産卵数が増加することを明らかにした(浅野 2022)。さらに、冬季湛水田には、代かき時の田面からリンの流出を削減する効果があることを農業従事者との共同実験により実証した(Ishida et al. 2020)。このような保全活動の輪が集落内外に広がれば、流域スケールで水質や生物多様性が回復すると期待される(奥田ほか 2017)。しかし、その一方で地域の保全活動がどのように冬季湛水田の生態系機能を向上し、農村集落へ恩恵をもたらすのか、その科学的メカニズムはよくわかっていない。

そこで、本研究は、冬季湛水田が生物多様性・生態系機能・生態系サービスに及ぼす影響を多面的に評価するために、地域と協働して野外調査を実施した。さらに、実証調査から得られた科学知と地域の伝統知を学びあうワークショップを通じて、冬季湛水田がもたらす恩恵(生態系サービス)を流域社会の多様な関係主体と共有し、農村集落が主体的・持続的に取り組む保全活動をエンパワーメントすることを最終目標とする。

この研究目的を遂行するために、以下の作業仮説に基づき、冬季湛水田が生物多様性・生態系機能に及ぼす影響に関する予測を立てる。

作業仮説：冬季湛水田によって増加した生物多様性が生態系機能を向上し、「流域の健全性」や「地域のしあわせ」に資する生態系サービスを生み出す。

この作業仮説に基づいて、冬季湛水田を維持・管理する保全活動が生物多様性を増加させ

る効果や生態系機能を向上する効果に関する以下の2つの予測を提示する。

1-1) 生物多様性に関する予測

冬季湛水田は周年に亘って湿地生物に生息場所を提供するため、冬場に乾田化する慣行水田に比べて、灌漑初期から在来湿地生物の定着数が多く、種数・個体群密度・多様度指数が高く維持されると予測される。特に、冬季湛水の効果は、生活史の一部を水中で暮らす(merolimnic)水生昆虫や両生類などの半水生底生動物に比べて、生活史の全てを水中で暮らす(hololimnic)魚類や貝類・甲殻類などの水生底生動物において顕著になると予測される。

1-2) 生態系機能に関する予測

冬季湛水田が湿地生物の多様性や個体群密度を増加する効果によって、栄養循環に関わる3つの生態系機能、すなわち、1)微生物による栄養取込機能、2)生物間の捕食・被食関係によって栄養塩類が高次消費者に転送される栄養転送機能、そして、3)水田と隣接する後背林や河川・ため池に生物が移動分散することによる栄養運搬機能が促進されると予測される。

最後に、上記の生態系機能および研究代表者らの先行研究の科学的知見を統合して、冬季湛水田・水田内水路・天水灌漑などの伝統的農法・灌漑様式が調査集落または流域社会に対して、どのような生態系サービスを提供しうるか考察する。

2. 方法

琵琶湖・野洲川流域の中山間地に位置する滋賀県甲賀市小佐治地区を調査対象とする(図1)。冬季湛水田が生物多様性・栄養循環機能・生態系サービスに及ぼす影響を評価するために、2021年の灌漑期である4-6月に同地区の1つの谷筋(中川敷)において冬季湛水田と慣行水田(比較対象区)を各1筆ずつ調査区として設定し、予備調査を実施した。その予備調査結果を踏まえて、2022年の灌漑期に同地区の5つの谷筋において冬季湛水田と慣行水田(比較対象区)の各1筆、計10筆を調査区として設定し(図1)、以下の項目について調査した。

2-1) 生物多様性

各調査水田において、代掻きの3週間後と6週間後(中干前)に底生動物群集の定量採集を実施した。調査に先立って、各水田の生息地ネットワークを評価するために、灌漑様式をダム灌漑、ため池灌漑、河川灌漑、沢水灌漑に分類した。ダム灌漑は、上流域の甲賀市甲賀町に建設された大原ダムからパイプラインを用いて灌漑用水を長距離輸送するため、底生動物の供給路とはなり得ない。ため池灌漑は、谷津田の最上流部に設置されたため池の水を用いる天水灌漑である。河川灌漑は、小佐治地区の低地を流れる佐治川の水を携行型電動ポンプで揚水する灌漑様式、沢水灌漑は、水田周辺を流れる沢水を直接引き込む灌漑様式であ

図 1 小佐治地区の農地管理図。調査水田として、5つの谷筋（赤字）から冬季湛水田と慣行水田を1筆ずつ、計10筆を選定。



る。ダム灌漑以外の灌漑様式は水の供給量が限られるため、ダム灌漑を含む幾つかの灌漑様式が併用されている。また、水田内水路（ひよせ）の有無を記録し、水田内水路が存在する場合は、水路の幅と深さを採集地点ごとに計測した。さらに、底生動物の生息環境を評価するために、次段落で述べる生物採集地点の底泥直上の水温と酸化還元電位（ORP）をORP計（EUTECH pH6+、Thermo Fisher SCIENTIFIC）で計測した。

続いて、各調査水田の水田内水路（水路が存在しない水田では、畦際の田面）に5つの1m ライトランセクトを設置し、口径34 cm幅のたも網2本をランセクトの両端から内側に向かって水平移動させ、表在性の底生動物を定量採集した。採集した生物は、一部の分類群（ヒル類、シジミ科、カワゲラ科、双翅目、毛翅目）を除いて、種または属まで同定し、個体数を計数した。各分類群につき複数個体を冷凍し、炭素・窒素安定同位体分析に供試予定である（分析が完了しなかった理由は後述）。

さらに、上記5つのランセクトの3地点において、ハンド型サーバーネット（口径34 cm幅・475 μ m メッシュ）を底泥に5 cm沈め、30 cm水平移動することによって、長さ30 cm×幅43 cm×高さ5 cmの泥塊を採集した。この泥塊をサーバーネット内で漉した後、埋在性の底生動物を選別した。1地点の生物標本は、種または属まで同定し、個体数を計数した。残り2地点の生物標本は、一部の分類群（ミミズ類、双翅目）を除いて種または属ごとに複数個体を冷凍し、炭素・窒素安定同位体分析に供試予定である（分析が完了しなかった理由は後述）。

各調査水田で採集した5地点の表在性底生動物群集および1地点の埋在性底生動物群集それぞれについて、種数、個体群密度、シャノン-ウィナーの多様度指数（ H' ）を算出した。

2-2) 栄養循環機能

水田生態系の栄養循環機能の指標として、1) 底泥中の微生物による栄養取込機能、2) 生

物間の捕食・被食関係によって栄養塩類が有機物として底生動物群集に転送される栄養転送機能、そして、3) 水田生態系の高次捕食者である鳥獣類が水田生物を捕食することで栄養塩類が有機物として水田から持ち出される栄養運搬機能を水田ごとに評価した。

2-2-1) 栄養取込機能

代掻き時に底泥から溶出する栄養塩類は、底泥表面や間隙中に生息する底生微細藻類によって同化される。この微生物による栄養取込機能を評価するために、底生微細藻類の培養実験を実施した。円周面積 72.35 cm^2 のポリ塩化ビニル製円筒底面にメッシュサイズ $\Phi 20 \mu\text{m}$ のネットを張り、粒子径 $0.500\text{--}0.710 \mu\text{m}$ のガラスビーズ 100ml を人工的な土壌基質として充填した微細藻類培養装置を代掻き直後の各調査水田の田面に設置した(写真1)。なお、培養装置内に半水生底生動物が侵入して微細藻類を摂食することを防ぐために、培養装置上面に 1mm メッシュのネットを被せた。



写真1 代掻き直後の田面に設置された微細藻類培養装置。

培養実験開始から3日後、5日後、7日後、14日後に培養装置を回収した。ガラスビーズ間隙中の微細藻類の現存量を評価するために、90%アセトンでクロロフィルを抽出し、紫外可視分光光度計(UV-1280、Shimadzu)を用いて、ユネスコ法でクロロフィル濃度を測定した。

さらに、微細藻類培養実験時の栄養環境を評価するために、培養実験開始の3日後、5日後、7日後、14日後に田面水を採水し、 0.7 mm メッシュのガラス繊維ろ紙(GF/F、Whatman)でろ過した後、イオンクロマトグラフ(DIONEX Aquion、Thermo Fisher SCIENTIFIC)を用いて、オルトリン酸および硝酸の濃度を測定した。

2-2-2) 栄養転送機能

底生微細藻類が底生動物に捕食されることで水田の栄養塩類は有機物として上位の栄養段階に転送される。この栄養転送機能を2つの指標を用いて評価した。1つは、底生動物群集全体の生物量を用いた評価、もう1つは研究代表者らが提唱した統合的栄養位置(iTP : (Ishikawa et al. 2017))を用いた評価である。前者は、各分類群の乾燥個体重量を計測し、その個体群密度を乗算することで生物量(mg/m^2)を求め、全ての分類群の生物量を加算することで群集総生物量とした。

後者の iTP は食物網の高次構造を評価する指標であり、生物群集全体の炭素・窒素安定同位体分析を行うことで算出することができる。生物多様性の調査で採集した底生動物標本に加えて、それらの餌源となる底生微細藻類、大型糸状緑藻、懸濁態有機物(POM)を分析に供試した。動物試料は、メタノール:クロロホルム=1:2の混合溶液で脱脂した後、

乾燥した。これら動物とその餌源の乾燥試料を粉末状に粉碎し、錫カプセルに包埋して炭素・窒素安定同位体質量分析計（ConFlo III, delta plus XP, Thermo Fisher SCIENTIFIC）を用いて炭素（ $\delta^{13}\text{C}$ ）・窒素（ $\delta^{15}\text{N}$ ）安定同位体分析試料とした。ただし、本研究期間中に勃発したロシアによるウクライナ侵攻の影響で安定同位体分析のキャリアガスとして必要なヘリウムガスが世界的に供給不足に陥ったため、分析を完了することができなかった（ヘリウムの供給が再開次第、分析を再開予定）。そこで、2021年に実施した予備調査の試料を用いた炭素・窒素安定同位体分析の結果のみ提示し、冬季湛水田と慣行水田の食物網の構造的な違いを概観することとした。

2-2-3) 栄養運搬機能

底生動物による水田から陸上への移動分散または陸上の鳥獣類による底生動物の捕食によって、底生動物に蓄積された栄養塩類が陸上に運搬される潜在的なフローを冬季湛水田と慣行水田で比較するために、2つの方法を用いた。1つは、灌漑期に変態して水田から陸上に移動分散する生活史を有する半水生底生動物（両生類や水棲昆虫など）の生物量に基づく比較、もう1つは、鳥獣類による水田訪問頻度を水田生物摂餌頻度の指標として用いた比較である。後者は、赤外線動態検知機能を有するトレイルカメラを調査水田10筆に一定期間設置し、水田を利用する鳥獣類の種類と訪問数を記録した。

2-3) 統計解析

冬季湛水田が在来湿地生物の種数や多様性に及ぼす効果を評価するために、種数・個体群密度・生物量・多様性指数を目的変数、農法（冬季湛水田・慣行水田）と季節（代掻き3週間後・6週間後）を説明変数とした二元配置分散分析を実施した。藻類現存量および栄養塩類濃度の季節動態を冬季湛水田と慣行水田で比較するために、両指標を目的変数、農法を固定因子、時系列変化を変量因子とした一般化線形混合モデル（GLMM）を実施した。さらに、研究代表者らが同調査地で2017年に実施した生物多様性調査の結果を今回の調査結果と比較するためにt検定を実施した。また、在来湿地生物への負の生態影響が取りざたされているアメリカザリガニに着目し、回帰分析を用いて湿地生物に対する生態影響を評価した。続いて、アメリカザリガニの個体群密度に及ぼす生息地特性を明らかにするために、生息地の環境特性と灌漑様式を説明変数とした重回帰分析を行った。

2-4) 生態系サービスに関するワークショップ

本研究の申請段階では、水田生物の多様性と生態系機能に裏打ちされた生態系サービスに焦点を当て、本調査地区の様々な年齢層・立場の住民を対象とした「水田の恵み」に関するワークショップを開催することを計画していた。特に、小学生などの低年齢層の参加を想定して、2022年の野外調査実施後の夏休み期間中にワークショップを開催する方向で現地協力者と準備を進めていたが、同時期に新型コロナウイルス・オミクロン株の感染が拡大したため、高齢者への感染リスクを考慮して開催を断念した。代わりに、同地区の小学校およ

び小佐治保全部会と連携し、小学 4 年生を対象とした課外授業の一環として「いきもの観察会」を開催した。

調査対象集落におけるアクションリサーチを通して、関係者の言動の観察や聞き取りなどから得られた社会学的データ、本研究により実施された生態系機能に関する生態学的データ、および、研究代表者らによる先行研究の文献資料に基づいて、冬季湛水田などの伝統的農法・灌漑様式が調査対象集落または流域社会全体に対して、どのような生態系サービスを提供しうるか総合的に考察した。

3. 結果と考察

3-1) 冬季湛水が在来の生物多様性に及ぼす効果

5 谷筋 10 筆の水田における 2022 年灌漑期の 2 回に亘る表在性・埋在性底生動物群集の定量調査により、総計 62 分類群が観察された。外来種のアメリカザリガニとサカマキガイを除けば、在来生物は 60 分類群となる。冬季湛水が在来の表在性底生動物群集に及ぼす影響を評価した結果、種数・個体群密度・多様度指数いずれも有意な正の効果は検出されなかった。しかし、水生底生動物に限定すると、冬季湛水田で種数が増加する有意な効果（図 2）、あるいは、多様度指数が増加する緩やかな傾向（図 3）が検出された。また、冬季湛水は、表在性と埋在性の水生底生動物それぞれについて個体群密度を増加する有意な正の効果を発揮した（図 4-5）。

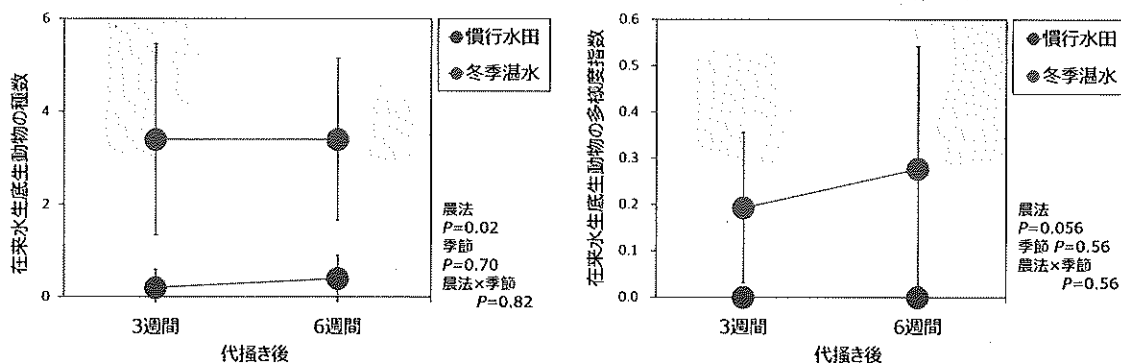


図 2 & 3 冬季湛水田と慣行水田における在来表在性の水生底生動物の種数（図 2：上図）と多様度指数（図 3：下図）の比較。

一方、2017 年に実施した先行調査に基づく予測に反して、今回の調査では、冬季湛水が半水生底生動物の多様性を増加する有意な効果は検出されなかった。水生底生動物が生活史を完結するには周年湛水した環境が必要であるのに対して、半水生底生動物の中には、両生類や水生昆虫のように一時的に湛水した水辺で産卵を行い、湛水期間のみ幼生が水中生活を営む種も多い。代掻き後に半水生底生動物が慣行水田へ移入・産卵することによって、冬季湛水田の効果が相対的に減少したためと考えられる。

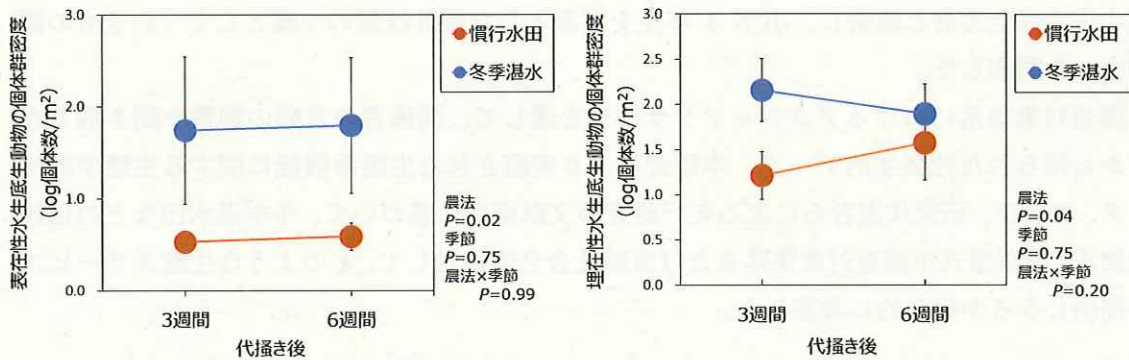


図 4 & 5 冬季湛水田と慣行水田における在来表在性 (図 4: 左図) と在来埋在性 (図 5: 右図) の水生底生動物の個体群密度の比較。

冬季湛水田で半水生底生動物の多様性が増加しなかったもう 1 つの理由として、外来種侵入の生態影響が考えられる。2017 年に小佐治地区の谷津田で実施した生物調査の結果と比較すると、2022 年は在来底生動物の多様度指数が有意に減少していた (図 6)。逆に、外来種であるアメリカザリガニの個体群密度は 2017 年に比べて有意に増加していた (図 7)。2022 年の傾向として、アメリカザリガニの個体群密度が高い水田ほど、在来の半水生底生動物の種数・個体群密度・多様度指数のいずれも有意に減少した (図 8-10)。

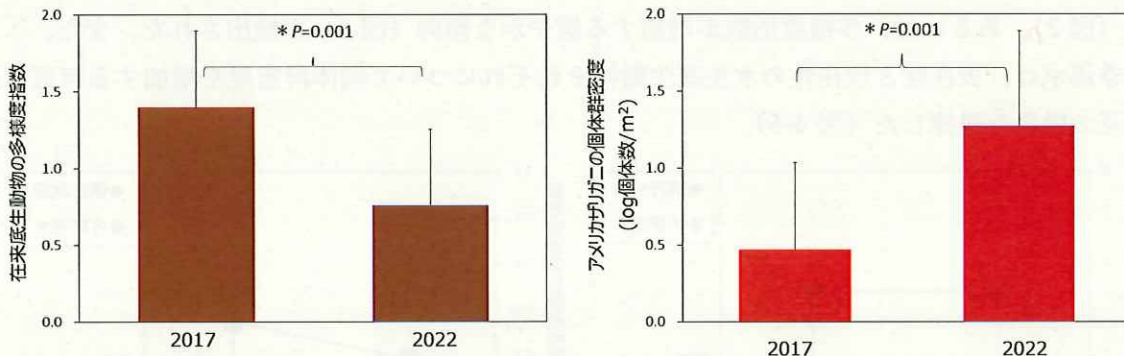


図 6 & 7 2017 年と 2022 年の在来生物の多様度指数 (図 6: 左図) とアメリカザリガニの個体群密度 (図 7: 右図) の年変化。

生態系エンジニアであるアメリカザリガニは、湿地生態系において在来生物の生息地を改変したり (Gherardi and Acquistapace 2007)、在来生物を捕食したりすることによって底生動物群集、特に、半水生昆虫群集に対して負の生態影響を及ぼすことが報告されている (Usio et al. 2009; Watanabe and Ohba 2022)。全国各地の淡水生態系に侵入し、在来水生生物の多様性低下を引き起こしていることから、本種は、「日本の侵略的外来種ワースト 100」にも選定されている (日本生態学会編 2002)。

水生底生動物であるアメリカザリガニは、周年湛水した生息環境を必要とするため、水田内水路が設置されていない慣行水田では生活史を全うすることができない。また、水田内水路の設置された慣行水田でも、水路の水深が浅いと、冬季の乾田期に水路が完全に干出することがあるため本種の生息地として適さない。また、侵入先の生息環境だけでなく、供給地からの侵入経路も考慮する必要がある。以上のアメリカザリガニの侵入・定着条件を考慮の

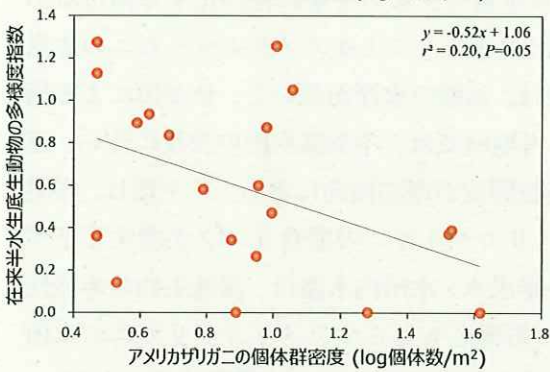
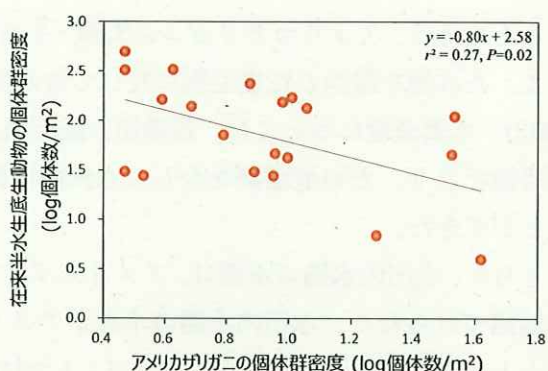
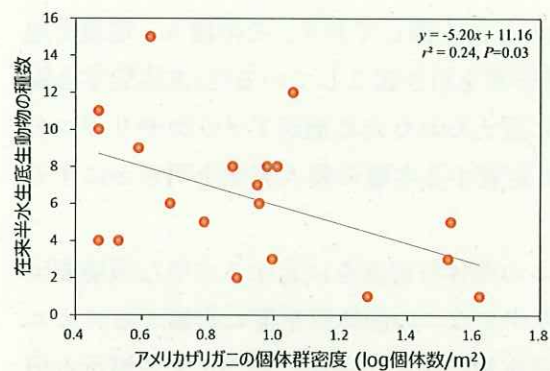


図 8-10 アメリカザリガニの個体群密度が在来半水生底生動物の種数 (図 8 : 左上図)、個体群密度 (図 9 : 右上図)、多様度指数 (図 10 : 左下図) に及ぼす影響。

上、水田内の生息環境や生息地のつながりの指標となる灌漑様式が本種の個体群密度に及ぼす影響を評価するために、重回帰分析を試みた。モデル選択の結果、ため池灌漑を行い、水田内水路の水深が深い水田でアメリカザリガニの個体群密度が増加する有意な効果が検出された (図 11-12)。

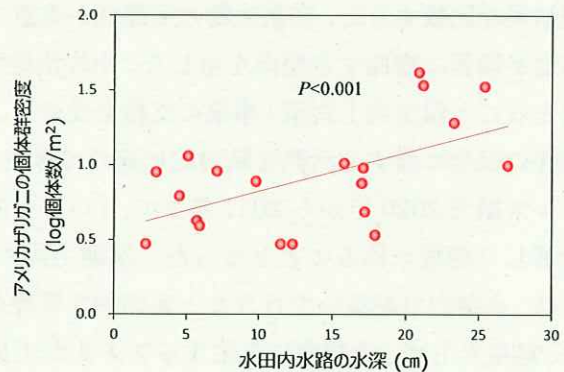
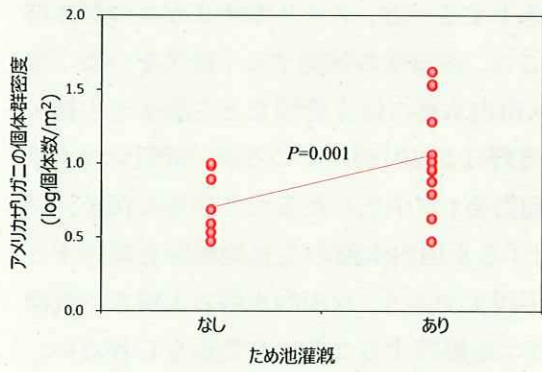


図 11-12 ため池灌漑 (図 11 : 左図) と水田内水路の水深 (図 12 : 右図) がアメリカザリガニの個体群密度に及ぼす影響。

調査地域は丘陵地帯であるため、低地の河川から直接に引水することが困難である。そのため、当地では、伝統的に谷津田の最上流部にため池を設え、天水灌漑を営んできた。しかし、圃場整備の一環として、1962年に建立された大原ダムから灌漑用水が安定的・効率的に供給されるようになると、多大な維持・管理コストを伴うため池灌漑は次第に廃れ、昭和初期に数百を数えた小佐治地区のため池の多くが消滅することとなった。ため池は、隣接する河川や谷津田、後背林などと生息地ネットワークを形成することによって、複数の生息地を利用する湿地生物を保全する上で重要な役割を担う。ところが、安定した止水環境を創出

するため池は、アメリカザリガニの繁殖・生育地としても適しており、その侵入・定着を通して、ため池や湿地の在来生物に対して負の生態影響を引き起こしている(日本生態学会編 2002)。本調査地においては、谷津田の最上流部に設えられたため池がアメリカザリガニの供給源となり、ため池灌漑を介して水田内水路に定着する本種の侵入実態を明らかにすることができた。

さらに、水田内水路の水深は、アメリカザリガニの個体群密度を決定する主要な環境要因と結論づけられた。水田内水路の水深がアメリカザリガニの個体群密度に影響するメカニズムとして2つの可能性が挙げられる。1つは、降水量の少ない冬季に乾田化する慣行水田において、水田内水路の水深が浅いと、水路が干出することによりアメリカザリガニの生息地が縮小または消失する可能性である。もう1つは、水路の水深が深いと、サギ類による捕食を回避できる可能性である。後述するように、当地域では、冬季湛水田の普及に伴い、近年、サギ類など水田生物を餌とする鳥獣類の水田訪問数が増加傾向にある。サギ類は、視覚によって獲物を捕らえるため、浅い水路ほどアメリカザリガニの捕食リスクが増すと予想される。当地の伝統的農法であるため池灌漑や冬季湛水・水田内水路は、湿地生物の多様性保全に有効である一方、湿地生物の多様性に負の影響をもたらすアメリカザリガニの水田への侵入や個体群増殖を促す恐れがあり、諸刃の剣となりうることを本研究は示した。

保全型農業にみられるこのような二律背反(在来種の多様性保全と外来種の侵入・増殖促進)は、2020年以降に深刻化した新型コロナウイルスの感染拡大に伴う行動制限とも密接に関係するかもしれない。研究代表者らが2017年に実施した当地での生物調査と今回の調査結果を比較すると、在来生物の多様性が有意に低下する一方、アメリカザリガニの個体群密度が顕著に増加する傾向を示した。小佐治地区では、滋賀県の推進する「世代をつなぐ農村まるごと保全向上対策」事業の支援を受けて、水田内水路の保守管理など生態系や生物多様性の保全に資する活動を精力的に進めてきた(浅野ほか 2018)。ところが、新型コロナウイルス禍で2020年から2021年まで、「いきもの観察会」が中止になるなど当地の保全活動は著しく制限されることとなった。湿地生物に対する水田内水路の生息地機能を維持するには、水路内の泥浚いを行うなど定期的な管理が不可欠である。水田内水路の水抜きや浚渫は、結果として、水路内に自生するアメリカザリガニを駆除することに有効かもしれない。今後、地域の関係主体と協働して、アメリカザリガニの侵入や個体群増殖を抑制し、在来生物の多様性を増加する保全対策を講ずることが求められる。

3-2) 冬季湛水が栄養取込機能に及ぼす効果

灌漑期の水田泥中に生息する底生微細藻類の培養実験を行ったところ、慣行水田に比べて冬季湛水田では、代掻き後、速やかに底生微細藻類が増殖し、藻類現存量が有意に増加した(図13)。冬季に乾田化する慣行水田では、灌漑後に泥中の藻類休眠胞子が増殖を開始するまで一定期間を要するのに対して、冬季湛水田では、湛水期を通して泥中に底生藻類個体群が維持されているため、代掻きによる物理的かく乱後、速やかに増殖することが可能であ

る。

Ishida et al. (2020)は、当地域の冬季湛水田と慣行水田の泥塊を用いた栄養塩類の溶出実験を企画した。人工的に代掻きを再現し、その後に田面水に溶出するリン濃度を測定したところ、冬季湛水田で全リンの溶出フラックスが有意に低減されることを実証した。しかし、Ishida et al. (2020)は、代掻き後のリン溶出低下のメカニズムを解明することができなかった。本培養実験は、代掻き後、速やかに増殖する微細藻類が栄養塩類を取り込むことでリンの溶出を抑制している可能性を示唆した。

しかしながら、田面水のオルトリン酸と硝酸濃度を冬季湛水田と慣行水田で比較したところ、代掻き後の栄養塩溶出特性に有意な差はみられなかった (図 14-15)。Ishida et al. (2020)が報告した水田泥塊からのリン溶出実験の結果は、オルトリン酸ではなく全リン・全溶存態リンまたは反応性リンの濃度測定に基づく。代掻き直後の田面水に存在するリンの大半を占めるのは、土壌粒子に由来する懸濁態リンである。底生微細藻類が利用可能なオルトリン酸の濃度が冬季湛水田と慣行水田で異なるという結果は、上述の栄養塩溶出抑制メカニズムとしての微細藻類による栄養塩取込と矛盾するように聞こえるかもしれない。しかし、Ishida et al. (2020)が考察するように、生物が利用可能なオルトリン酸の濃度は、田面水および底泥境界層の微視的な酸化還元プロファイルに依存しながら、懸濁物からのリン吸着・脱着反応の影響を受けて複雑に変動する。したがって、図 14 で検出されたオルトリン酸の濃度に基づいて、生物的なプロセスの寄与を推定するのは困難である。

最近、奥田 (2015)は、環境水中に含まれる溶存無機態リン酸の酸素安定同位体を分析することによって、生物代謝によるリン循環プロセスを推定する安定同位体モデルを提案した。さらに、(Ishida et al. 2022a; Ishida et al. 2022b)は、ジルコニウム担持カラムを用いて

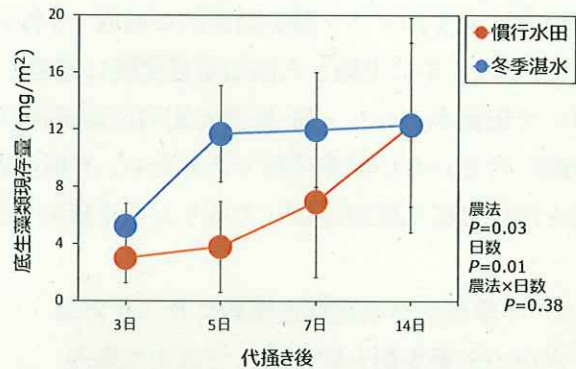


図 13 代掻き直後に冬季湛水田と慣行水田の田面に設置された培養装置内の底生微細藻類の現存量の時系列変化。

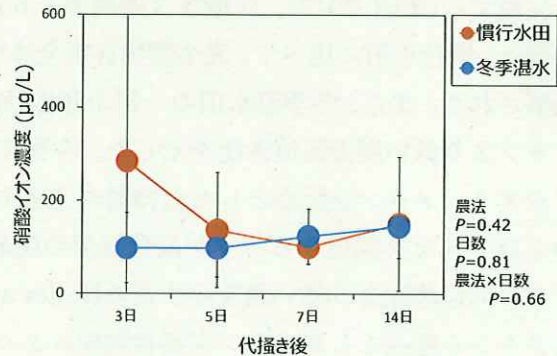
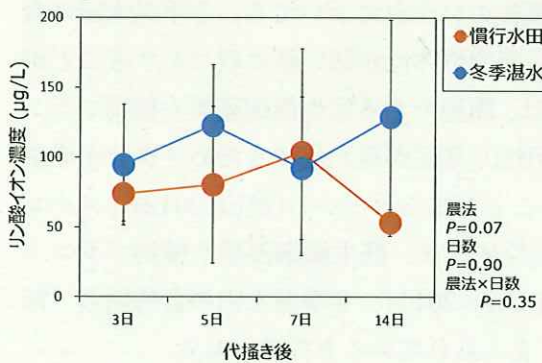


図 14-15 代掻き後の藻類培養日数に対応したオルトリン酸濃度 (図 14 : 左図) と硝酸濃度 (図 15 : 右図) の時系列変化。

環境水に含まれるリン酸を効率的に回収・分析する安定同位体手法を開発した。研究代表者らは、2022年に実施した藻類培養実験に連動させる形で、Ishida et al. (2022a)の手法に基づいて田面水からリン酸-酸素安定同位体試料の採集を試みた。この同位体分析は、本研究計画に含まれない調査項目であるため、本報告書では説明を割愛するが、今後、本同位体手法を用いて底生微細藻類によるリン取込機能の評価を試みる予定である。

3-3) 冬季湛水が栄養転送機能に及ぼす効果

水田の栄養塩類を取り込んだ底生微細藻類が、さらに、底生動物に捕食されることによって食物網内で有機物として転送される栄養フローを評価するために2つの解析アプローチを試みた。まずは、冬季湛水田と慣行水田の底生動物群集の生物量を栄養転送の指標として比較したところ、埋在性の水生底生動物群集の生物量が冬季湛水田において増加する傾向を示した(図16)。

炭素・窒素安定同位体分析を用いた食物網解析に基づいて上位栄養段階への栄養転送指標となる統合的栄養位置(*ITP*)を推定するサブテーマは、安定同位体分析に必要なキャリアガスであるヘリウムの世界的な供給不足によって、現在まで解析が進められない状態が続いている。そのため、2021年の灌漑期に実施した予備調査の採集試料を用いた食物網解析の概要のみ報告する。代掻き3週間後と6週間後における冬季湛水田と慣行水田それぞれ1筆の食物網を描いた炭素・窒素安定同位体マップを図17-20に示す。

安定同位体食物網マップは、炭素・窒素同位体比の二平面上における餌源から消費者までの相対的位置に基づいて食物網内の栄養位置を推定する手法である。消費者の炭素同位体比は餌源の炭素同位体比を反映し、消費者と餌源の窒素同位体比の差分は栄養位置の高さを反映する(奥田 2012)。代掻き3週間後と6週間後のいずれにおいても、冬季湛水田の食物網は、慣行水田に比べて、底生動物群集全体で炭素同位体比が低い値に収れんすることが観察された。また、冬季湛水田の一部の底生動物は、餌源である底生微細藻類や植物プランクトンより低い炭素同位体比を示した。冬季湛水田は、底泥が還元化するためメタンが発生しやすく、メタンを起点とした食物網が発達することが知られている(奥田 2012)。メタンおよびメタンを同化するメタン酸化細菌の炭素同位体比は、底生微細藻類や植物プランクトンの同位体比より低い値を示すため(Jones and Grey 2011)、冬季湛水田の食物網の一部はメタンを起点としたメタン栄養食物網によって支えられていると推察される。

窒素同位体比を分類群間で比較すると、メダカやドジョウなどの水田魚類の窒素同位体

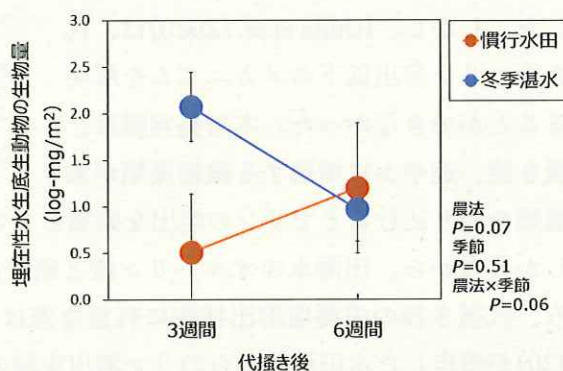


図16 冬季湛水田と慣行水田における埋在性水生底生動物の生物量の比較。

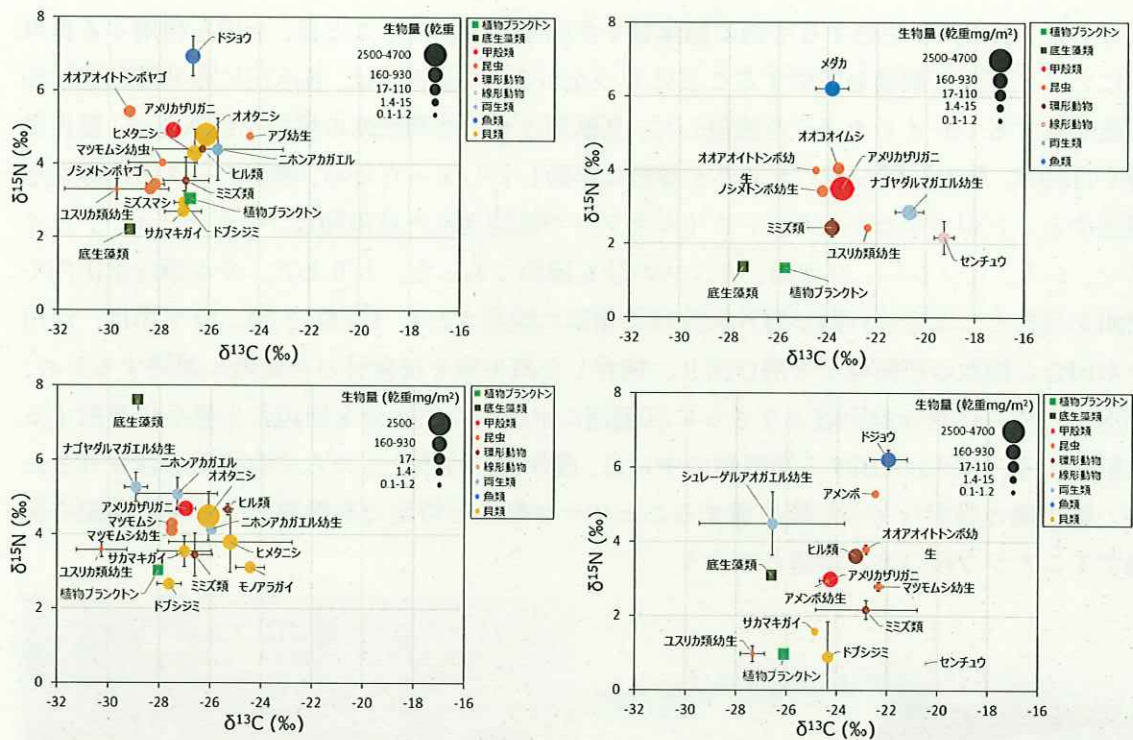


図 17-20 水田食物網の炭素・窒素安定同位体マップ。代掻き 3 週間後の冬季湛水田 (図 17 : 左上図) と慣行水田 (図 18 : 右上図)、および、代掻き 6 週間後の冬季湛水田 (図 19 : 左下図) と慣行水田 (図 20 : 右下図)。

比が他の底生無脊椎動物より 2-3‰程度高いことが判る。消費者が餌を同化することで窒素同位体比は 2-3‰程度上昇するため、この結果は、魚類の栄養位置が底生動物より 1 段階ほど高いことを意味する。冬季湛水によって魚などの水生生物が周年生息できる環境を創出すると、水田食物網内の捕食・被食相互作用によって、より上位の栄養段階まで有機物を転送することが可能になる。残念ながら、今回の研究期間内に $\delta^{15}\text{N}$ を用いて、冬季湛水田と慣行水田の栄養転送機能を比較することができなかったが、ヘリウムガスが安定供給され次第、食物網解析を再開する予定である。

3-4) 冬季湛水が栄養運搬機能に及ぼす効果

半水生の底生動物は、変態後に水田生活から陸上生活にシフトする。このことは、水田内の基礎生産物を起点として底生動物に栄養転送された有機物が水田から隣接する草地や後背林に運搬されることを意味する。今回の比較調査の結果、半水生生物の多様性や個体群密度は冬季湛水田と慣行水田の間で有意に異ならなかったが、これはアメリカザリガニが半水生生物に負の生態影響を及ぼすことが一因と考えられる。実際、浅野 (2022) は、新型コロナウイルス感染拡大前に実施した野外調査により、ニホンアカガエルの産卵数が冬季湛水田で増加することを報告した。今後、水田内水路の保守・管理やアメリカザリガニの駆除が実施されれば、半水生生物の水田から陸上への移動分散を通じて、栄養運搬機能が促進されると期待される。

さらに、水田内に生息する生物の個体数や生物量が増加することは、水田を利用する鳥獣類にとって好適な餌場を提供することにもつながる。本調査では、各水田に赤外線動態検知機能を有するトレイルカメラを設置して、鳥獣類の水田訪問頻度の解析を試みたが、農作業や自動車、草木の揺らぎでカメラが頻繁に作動してしまったため、撮影データの定量性を確認することができなかった。トレイルカメラで確認された鳥獣類は、ニホンザル、アライグマ、シカ、イノシシ、サギ類、カラスの計6種類であった。とりわけ、サギ類は水田内で摂餌を目的とした定位行動が野外調査時に頻繁に観察された（写真 2-3）。サギ類は、河川や水田など複数の摂餌場所を飛び回り、捕食した餌生物を後背林の営巣地に運搬するため、半水生生物の移動分散距離よりさらに広範囲に水田内の栄養分を周辺の生態系に運搬する役割を担う。水田を利用する鳥獣類の中には、農作物の食害をもたらす有害獣も含まれるため、獣害柵の設置などの対策を講ずることでサギ類など特定の鳥獣類による栄養運搬を促進することが今後の検討課題となろう。

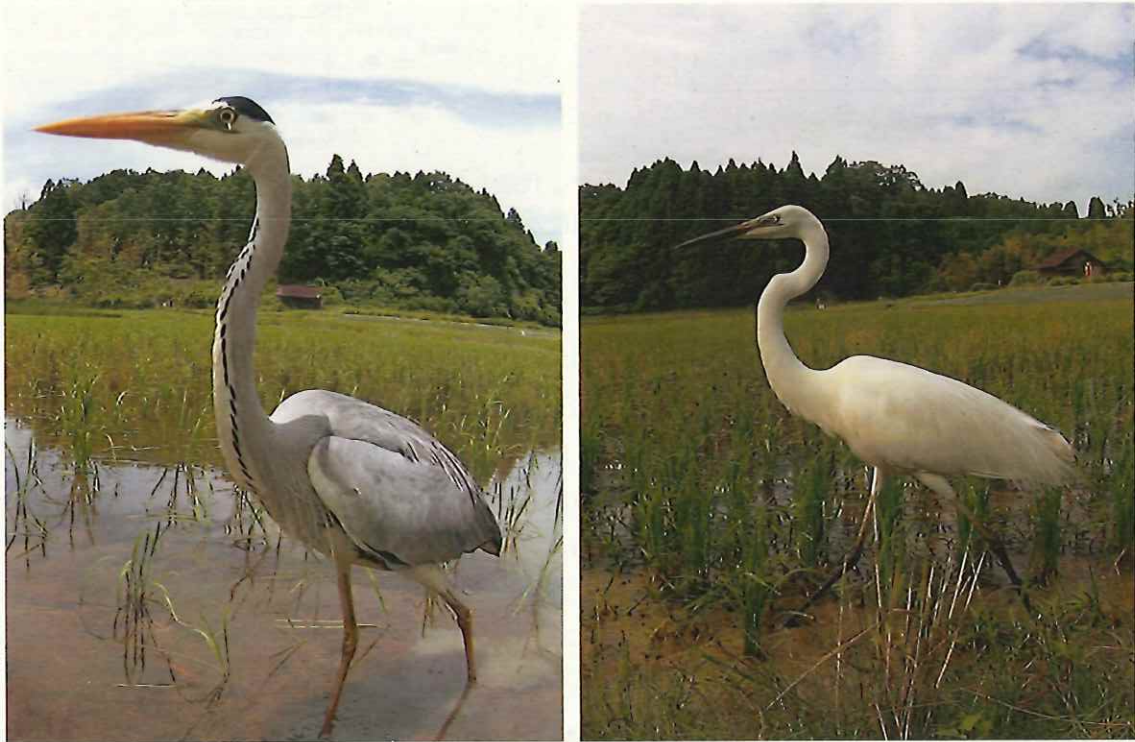


写真 2-3 トレイルカメラによって撮影された水田内を訪問する鳥獣類の事例。アオサギ（写真 2：左）とダイサギ（写真 3：右）。

3-5) 冬季湛水が創出する生態系サービス

冬季湛水田と慣行水田の野外比較調査により、冬季湛水には在来湿地生物の多様性や個体数を増加させる効果があることを実証できた。また、冬季湛水には、底生微細藻類の現存量を増加する効果も認められた。微細藻類が水田内の栄養塩類を取り込みながら周年増殖することにより、水田内の底生動物に絶えず餌資源を供給することが可能となる。実際、冬季湛水田に生息する埋在性底生動物の生物量は慣行水田より有意に増加した。このことは、

水田内に残存する栄養塩類が、微細藻類による同化と微細藻類-底生動物間の捕食・被食相互作用を介して、食物網の中で有機物として栄養転送されることを意味する。さらに、半水生の底生動物が水田外の生息地に移動分散したり、大型の底生動物や魚類が鳥獣類に捕食されたりすることによって、栄養分はより広範囲に運搬されることとなる。

栄養塩類の移流や生物の移動分散によって隣接する生態系の生産性や群集の生物量を増加させる現象を資源補給 (Resource subsidy) とよぶ(Polis et al. 1997)。慣行水田の土壌に残存する栄養塩類は、代掻き時に流出して下流域の富栄養化を引き起こす原因物質となるとともに (Ishida et al. 2019; Osaka et al. 2022)、河川や湖沼の生物多様性を低下させる要因ともなる(Okano et al. 2018; Ko et al. 2021)。対照的に、冬季湛水田は、代掻き時の栄養塩流出を抑制するとともに(Ishida et al. 2020)、資源補給を通じて里山生態系に生きものにぎわいをもたらす。冬季湛水田が生み出すこのような生態系サービスに関する科学知を流域社会の多様な主体と共有することは、里山保全への関心を高め、活動への参加や関与を促すことにつながると期待される(奥田ほか 2017)。今後の課題として、保全活動の科学的成果を社会に発信するとともに、集落外、特に、下流域に暮らす都市住民が保全活動に参加・関与するための新たな仕組みづくりとその支援体制について、小佐治地区の関係者や行政と協働しながら議論を深めてゆきたい。

また、冬季湛水田によって湿地生物や鳥獣類の多様性や個体数が増加することは、地域に根差した遊びや食文化、アグロエコツーリズムなどの文化サービスを豊富化することにも寄与すると考えられる。幾つかの冬季湛水田では、水田食物網の高次捕食者と位置づけられるメダカやドジョウなどの水田魚類が観察された。昨今のメダカ飼育ブームによって、メダカに対する社会の関心が高まっている。今後は、地域の子供たちの遊びの対象としての「メダカすくい」だけでなく、都市住民の自然志向ニーズを満たす「メダカの観察会」や「メダカの里親制度」など無農薬農作物の販売と連動させたアグロエコツーリズムなど地域経済の活性化に資する取り組みを展開することが期待される。

当地では、夜間に松明を焚いて水田に生息するドジョウを採集し、豆腐と一緒に炊く「ドジョウたたき」とよばれる食文化が近年まで伝承されていた。圃場整備以降の乾田化による水田魚類の減少、営農に伴う水田との関わり方の減少、食生活の変化などによって、「水田のおかず採り」の文化は全国的に衰退の一途をたどっている。研究代表者らは、新型コロナウイルス禍における「水田の恵み」に関するワークショップの開催中止に伴い、小佐治地区の小学4年生を対象とした「いきもの観察会」に参加・協力する計画変更を行った(写真4)。田んぼの生きものを採って、見て、触れて、楽しむことを通して、身近な自然や地域への愛着を醸成することを目的とした課外授業の一環として、小佐治保全部会が毎年、開講している取り組みである。この活動は参加者にも大変好評で、田んぼの生きものと嬉々として戯れる子供たちの姿が印象的である。他方、農村集落に在住するにも関わらず、参加児童の大半が水田での生きもの採りを経験したことがないという事実に驚嘆する。農業の生産効率向上を目的とした機械化や兼業農家の営農組合化を背景として、農村集落児童の水田へ



写真4 甲賀市立佐山小学校の4年生を対象とした「生きもの観察会」の様子。

の関りは極めて希薄化しているのが現状である。にもかかわらず、参加児童の多くが水田生物に対して高い関心を示したことから、水田の生物多様性には身近な自然の文化的価値を世代間で共有する潜在力が残っていると示唆される。

主催者である小佐治保全部会のメンバーにとって、保全活動の原動力の1つは、地域の自然を守り、次世代に継承したいという強い思いである(奥田 2021)。水田の生きもの採りに楽しみを実感した児童が地域への愛着や農業への関心を抱くきっかけとなるならば、一連の活動は農村集落の持続可能性への第一歩となるであろう。冬季湛水田によって育まれる生物多様性には、本研究によって評価された物質的な価値では測れない社会・文化的な価値がある。身近な自然の価値を集落内で共有し、次世代へ継承する活動を通して地域の絆は深まると期待される。

Fukushima et al. (2018)は、野洲川流域に在住する市民を対象とした大規模アンケート調査により、地域の絆が個人の主観的幸福度を向上させる反面、集落レベルの主観的幸福度を低下させる「しがらみ」ともなりうることを指摘した。さらに、Fukushima et al. (2018)は、集落レベルの主観的幸福度を向上する手段として、集落外の住民との交流を促進することの有効性を強調した。活動の参加者の楽しみや主催者のやりがいを駆動力として、「地域のしあわせ (Well-being)」が向上し、さらに、活動の輪が集落外に広がっていくことにより、流域全体で生物多様性や栄養循環を向上することが流域社会-生態システムの望ましい姿と

いえよう(脇田ほか 2020)。本研究の成果発信を通じて、農山村集落の幸福度を指標とした地域活性化のロールモデルを提示することにより、生物多様性・環境保全と農村集落の幸福度が両立しうる新たな政策を流域社会の多様な主体と共創していくことが今後の展望である(Takahashi et al. 2021)。

4. 謝辞

本研究は、公益信託エスベック地球環境研究・技術基金による支援の下で実施された。水田調査の機会と場所を提供するとともに、野外調査に協力して下さった小佐治環境保全部会および小佐治営農組合の皆さま、居住スペースおよび室内作業場を提供して下さった増山義博氏ならびに有限会社・甲賀もち工房、野外調査・室内作業を補助して下さった家木壮一・小澤優介・工藤葵・清水捷生・高根有斗・西沢柊・丹羽陵人・廣瀬奈々美・宮崎大侑・柳原諒太郎・山本直氏、底生動物の同定を請け負って下さった汀屋の向山創一朗氏に心よりお礼申し上げます。また、水田生態系の食物網解析に必要な炭素・窒素安定同位体質量分析は京都大学生態学研究センターの共同利用施設を用いて実施した。

5. 参考文献

- Allan, J.D. (2004) Landscapes and riverscapes: The influence of land use on stream ecosystems. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*, 35:257-284.
- 浅野悟史 (2022) 地域の<環境ものさし>生物多様性保全の新しいツール. 昭和堂.
- 浅野悟史, 脇田健一, 西前出, 石田卓也, 奥田昇 (2018) 「地域の環境ものさし」による生物多様性保全活動の推進. *農村計画学会誌*, 37:150-156.
- Fukushima, S., Takemura, K., Uchida, Y., Asano, S. and Okuda, N. (2018) Trust within a Community Is a Double-Edged Sword: Trust Has a Positive Individual-Level Effect and a Negative Contextual Effect on Subjective Well-Being. *Psychologia*, 61:113-123.
- Gherardi, F. and Acquistapace, P. (2007) Invasive crayfish in Europe: the impact of *Procambarus clarkii* on the littoral community of a Mediterranean lake. *Freshwater Biology*, 52:1249-1259.
- Ishida, T., Kamiya, H., Uehara, Y., Kato, T., Sugahara, S., Onodera, S.I., Ban, S., Paytan, A., Tayasu, I. and Okuda, N. (2022a) A new method for phosphate purification for oxygen isotope ratio analysis in freshwater and soil extracts using solid-phase extraction with zirconium-loaded resin. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 36.
- Ishida, T., Tayasu, I., Onodera, S., Ban, S. and Okuda, N. (2022b) A new sampling method with zirconium-loaded resin for phosphate oxygen isotope analysis in oligotrophic freshwater systems. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 36.
- Ishida, T., Uehara, Y., Ikeya, T., Haraguchi, T.F., Asano, S., Ogino, Y. and Okuda, N. (2020) Effects of winter flooding on phosphorus dynamics in rice fields. *Limnology*, 21:403-413.
- Ishida, T., Uehara, Y., Iwata, T., Cid-Andres, A.P., Asano, S., Ikeya, T., Osaka, K., Ide, J., Privaldos,

- O.L.A., De Jesus, I.B.B., Peralta, E.M., Trino, E.M.C., Ko, C.Y., Paytan, A., Tayasu, I. and Okuda, N. (2019) Identification of Phosphorus Sources in a Watershed Using a Phosphate Oxygen Isoscape Approach. *Environmental Science & Technology*, 53:4707-4716.
- Ishikawa, N.F., Chikaraishi, Y., Ohkouchi, N., Murakami, A.R., Tayasu, I., Togashi, H., Okano, J., Sakai, Y., Iwata, T., Kondoh, M. and Okuda, N. (2017) Integrated trophic position decreases in more diverse communities of stream food webs. *Scientific Reports*, 7:2130.
- Jones, R.I. and Grey, J. (2011) Biogenic methane in freshwater food webs. *Freshwater Biology*, 56:213-229.
- Ko, C.Y., Asano, S., Lin, M.J., Ikeya, T., Peralta, E.M., Trino, E.M.C., Uehara, Y., Ishida, T., Iwata, T., Tayasu, I. and Okuda, N. (2021) Rice paddy irrigation seasonally impacts stream benthic macroinvertebrate diversity at the catchment level. *Ecosphere*, 12:e03468.
- Okano, J., Shibata, J., Sakai, Y., Yamaguchi, M., Ohishi, M., Goda, Y., Nakano, S. and Okuda, N. (2018) The effect of human activities on benthic macroinvertebrate diversity in tributary lagoons surrounding Lake Biwa. *Limnology*, 19:199-207.
- 奥田昇 (2012) 安定同位体を用いた水田生態系の構造と機能の評価手法. *日本生体学会誌*, 62:207-2015.
- 奥田昇 (2015) リン酸-酸素安定同位体分析が拓くリン循環研究の黎明. *地球環境*, 20:103-110.
- 奥田昇 (2021) 地域と流域の超学際研究をゼロから始める. In 近藤康久, 大西秀幸 (編), 環境問題を解く：ひらかれた協働研究のすすめ, pp.139-151. かもがわ出版.
- 奥田昇, 浅野悟史, 池谷透, 石田卓也, 石橋弘之, 小林邦彦, 三村豊 (2020) 地域の声に寄りそった研究の軌跡 地域から流域へ、そして地球へ. *地球研ニュース*, 81:3-7.
- 奥田昇, 浅野悟史, 脇田健一 (2017) 超学際科学に基づく順応的流域ガバナンス：生物多様性が駆動する栄養循環と人間のしあわせ. *地理*, 62:32-39.
- 日本生態学会編 (2002) 外来種ハンドブック. 地人書館.
- Osaka K., S. Chishiro, Y. Matsumoto, T. Iwata & N. Okuda (2022) Hydrological control of the chemical characteristics of suspended particulate phosphorus in the Yasu River watershed, Japan: Implications for its source and bioavailability. *Hydrological Processes* 36:e14734
- Polis, G.A., Anderson, W.B. and Holt, R.D. (1997) Toward an integration of landscape and food web ecology: The dynamics of spatially subsidized food webs. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 28:289-316.
- Rockstrom, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, A., Chapin, F.S., Lambin, E.F., Lenton, T.M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H.J., Nykvist, B., de Wit, C.A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sorlin, S., Snyder, P.K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R.W., Fabry, V.J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P. and Foley, J.A. (2009) A safe operating space for humanity. *Nature*, 461:472-475.

- Takahashi, T., Uchida, Y., Ishibashi, H. and Okuda, N. (2021) Subjective Well-Being as a Potential Policy Indicator in the Context of Urbanization and Forest Restoration. *Sustainability*, 13.
- Usio, N., Kamiyama, R., Saji, A. and Takamura, N. (2009) Size-dependent impacts of invasive alien crayfish on a littoral marsh community. *Biological Conservation*, 142:1480-1490.
- Watanabe, R. and Ohba, S.Y. (2022) Comparison of the community composition of aquatic insects between wetlands with and without the presence of *Procambarus clarkii*: a case study from Japanese wetlands. *Biological Invasions*, 24:1033-1047.
- 脇田健一, 谷内茂雄, 奥田昇 (2020) 流域ガバナンス:地域の「しあわせ」と流域の「健全性」. 京都大学学位術出版会.