

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

課題番号 2-2001

課題名

気候変動に対応した持続的な流域生態系管理に関する研究
(JPMEERF20202001)

令和2年度～令和4年度

英文課題名

Study on Sustainable Ecosystem Management of River
Watersheds toward Climate-Change Adaptation

<研究代表機関>

国立研究開発法人国立環境研究所

<研究分担機関>

東邦大学
千葉県環境研究センター
リバーフロント研究所
土木研究所
山梨大学
農業・食品産業技術総合研究機構

○図表番号の付番方法について

「Ⅰ. 成果の概要」の図表番号は「0. 通し番号」としております。なお、「Ⅱ. 成果の詳細」にて使用した図表を転用する場合には、転用元と同じ番号を付番しております。

「Ⅱ. 成果の詳細」の図表番号は「サブテーマ番号. 通し番号」としております。なお、異なるサブテーマから図表を転用する場合は、転用元と同じ図表番号としております。

令和5年5月

目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究開発目的	
3. 研究目標	
4. 研究開発内容	
5. 研究成果	
5-1. 成果の概要	
5-2. 環境政策等への貢献	
5-3. 研究目標の達成状況	
6. 研究成果の発表状況	
6-1. 査読付き論文	
6-2. 知的財産権	
6-3. その他発表件数	
7. 国際共同研究等の状況	
8. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	
II-1 適応力評価軸の検討・定量化手法の開発 (国立環境研究所)	18
要旨	
1. 研究開発目的	
2. 研究目標	
3. 研究開発内容	
4. 結果及び考察	
5. 研究目標の達成状況	
6. 引用文献	
II-2 流域生態系の適応力向上策の検討と実践 (国立環境研究所、東邦大学、千葉県環境研究センター)	31
要旨	
1. 研究開発目的	
2. 研究目標	
3. 研究開発内容	
4. 結果及び考察	
5. 研究目標の達成状況	
6. 引用文献	
II-3 河川・流域管理による治水へのコベネフィット評価 (リバーフロント研究所、土木研究所、山梨大学)	43

要旨

1. 研究開発目的
2. 研究目標
3. 研究開発内容
4. 結果及び考察
5. 研究目標の達成状況
6. 引用文献

II-4 農地の機能へのコベネフィット評価 (農業・食品産業技術総合研究機構)	55
--	-------	----

要旨

1. 研究開発目的
2. 研究目標
3. 研究開発内容
4. 結果及び考察
5. 研究目標の達成状況
6. 引用文献

III. 研究成果の発表状況の詳細	63
-------------------	-------	----

IV. 英文Abstract	73
----------------	-------	----

I. 成果の概要

課題名 2-2001 気候変動に対応した持続的な流域生態系管理に関する研究

課題代表者名 西廣 淳 (国立研究開発法人国立環境研究所気候変動適応センター
気候変動影響観測研究室室長)

重点課題 主：【重点課題⑧】気候変動への適応に係る研究・技術開発

副：【重点課題⑭】生態系サービスの持続的な利用やシステム解明に関する研究・技術
開発

行政要請研究テーマ（行政ニーズ） (2-4) 地域特性に応じた気候変動影響及び適応策に関する
研究

研究実施期間 令和2年度～令和4年度

研究経費

100,536千円（合計額）

（各年度の内訳：令和2（2020）年度：35,906千円、令和3（2021）年度：32,315千円、
令和4（2022）年度：32,315千円）

研究体制

サブテーマ1：適応力評価軸の検討・定量化手法の開発

国立環境研究所

サブテーマ2：流域生態系の適応力向上策の検討と実践

国立環境研究所

サブテーマ3：河川・流域管理による治水へのコベネフィット評価

リバーフロント研究所

サブテーマ4：農地の機能へのコベネフィット評価

農業・食品産業技術総合研究機構

研究協力機関

研究協力機関はない。

本研究のキーワード 気候変動適応策，生態系を活用した気候変動適応（EbA），
生態系を活用した防災減災（EcoDRR），自然を活用した解決策（NbS），
保護地域以外で生物多様性保全に資する地域（OECM），
グリーンインフラ，流域管理，湿地，自然再生

1. はじめに（研究背景等）

持続可能な社会の構築における気候変動適応の重要性への認識が高まる中、生態系を活用した適応（Ecosystem based Adaptation: EbA）は、気候変動枠組み条約のSBSTAの提言（FCCC/SBSTA(2013)/2）や生物多様性条約の決議文（CBD/COP/14/2:2018）においても取り上げられ注目されている。EbAは、国際的には開発途上国における有効性が強調されることが多いが、自然環境分野における適応では標準的なアプローチになることに加え、防災や食糧生産など社会の様々な側面へのコベネフィットが期待できることから、開発途上国以外でも効果が期待できる。特に既存の防災インフラの想定を超える災害の増加が懸念される日本では、地域の自然環境の特性を活かしたEbAはますます重要になるものと考えられる。2021年5月に開催されたG7気候・大臣会合においても、気候変動に

対する緩和と適応の両面で、自然を活用した解決（NbS）の重要性が強調された（EbAは気候変動適応を特に重視したNbSである）。このように国内外で重要性が高まっているにもかかわらず、EbAの導入は必ずしも進んでいるとはいえない。その主要な理由として、生態系を活用する適応策の特徴を評価する軸が定まっておらず、機能の定量的評価が十分ではないことが挙げられる。

EbAの効果的な導入・普及のためには、その意義・効果を適切に評価する理論的枠組みや評価軸が不可欠である。これまで気候変動適応策は、将来の状態をなるべく正確に予測し、その状態に最適化するように社会システムや生態系を見直していくアプローチが主流であった。しかし将来の予測には不確実性が必ず付きまとう。また気象条件の変動性は今後さらに増加することも予想されている。これら不確実性や変動性を前提とした適応策として、過去の様々な環境変動を経験してきた生態系を活用するEbAは有効であることが期待される。しかし不確実性や変動性を前提とした適応策の理論や、その評価軸・評価手法は明らかにされていない。

2. 研究開発目的

本研究では、河川流域スケールでのEbAのあり方とその長所や課題を示し、社会実装への道筋を示すことを目的とする。この目的のため、理論研究・数理モデル解析により、予測不確実性や変動性を前提とした気候変動適応策の評価軸・評価手法を明らかにする。同時に、モデル流域（千葉県・印旛沼流域）において、自然生態系分野での気候変動適応に資するEbAの方策を提案し、その機能を定量的に評価する。さらに、EbAによるコベネフィットを、水害リスク軽減、水質管理、農業害虫・益虫の観点から明らかにする。

3. 研究目標

全体目標	地域の特性を活かした気候変動適応計画の立案手法と有効性を明らかにするため、以下の目標を達成する。①気候変動適応における新しいアプローチとなる「適応力向上型アプローチ」の理論とその定量的評価手法を提示する。②環境DNA、河川／農業環境情報、ハビタットモデル、気候変動シナリオを活用した、自然生態系における気候変動適応計画の立案手法を確立する。③気候変動適応がもたらすコベネフィットを明らかにし、コベネフィットが生じやすい条件を明らかにする。
サブテーマ1	適応力評価軸の検討・定量化手法の開発
サブテーマリーダー／所属機関	角谷 拓／国立研究開発法人国立環境研究所
目標	「適応力」の概念を明確にするとともに、適応力が高いシステムの特徴を明らかにし、それを定量的に評価する手法を提案する。サブテーマ2～4の現場への適用とフィードバックにより、実用性の高い手法を示すとともに、実装への道筋を示す。
サブテーマ2	流域生態系の適応力向上策の検討と実践
サブテーマリーダー／所属機関	西廣 淳／国立研究開発法人国立環境研究所
目標	関東平野のモデル地域において、生物多様性・生態系機能の維持の観点からの適応計画を地方公共団体・地方研究機関との協力のもとに立案する。また適応策が水質浄化などの機能にもたらすベネフィットを評価する。適応計画の立案では、サブテーマ1の成果を活用し、適応力の向上を重視した計画を検討するとともに、サブテーマ3・4のメンバーと協力し、農地・水路・河川を包括する計画とする。

サブテーマ3	河川・流域管理による治水へのコベネフィット評価
サブテーマリーダー/所属機関	中村 圭吾/リバーフロント研究所
目標	水田・水路・河川の連携活用や、耕作放棄水田等での貯留による氾濫抑制効果を評価する手法を確立する。それを活用し、サブテーマ2と連携しながら、流域生態系の気候変動適応策が治水を中心とする河川管理にもたらすベネフィットを明らかにし、自然環境における適応と河川管理とのコベネフィットが生じやすい条件を示す。
サブテーマ4	農地の機能へのコベネフィット評価
サブテーマリーダー/所属機関	馬場 友希/農業・食品産業技術総合研究機構
目標	湿地化した耕作放棄水田や環境配慮型農地がもつ益虫供給機能を評価し、それらの供給源の配置が農業にもたらすベネフィットを評価する。サブテーマ2の成果を活用し、流域生態系の気候変動適応策が農業にもたらすベネフィットを明らかにし、自然生態系における適応と農業とのコベネフィットが生じやすい条件を示す。

4. 研究開発内容

湖沼流域の湿地を活用した気候変動適応策の有効性と、効果的な計画手法を明らかにするための研究を実施した。プロジェクトの構成を図-0.1に示す。サブテーマ1では、生態系分野を念頭においた適応力概念を整理し、従来の最適化型アプローチだけでなく、適応力向上アプローチにもとづいた適応策の重要性を示した。また、適応力向上アプローチの理念の下で実際の系で測定可能な適応力の指標をInfo-Gap理論にもとづいて、システムが受容可能な不確実性の大きさとして定義し、生態系への適用・検証を行った。さらに、複数の適応分野間で適切な適応策を検討するためのフレームワークである適応力ダッシュボードを構築し、流域における適応策実装の道筋を示した。

サブテーマ2では、印旛沼流域内に多数存在する「谷津」（小規模な谷地形）に着目し、谷津に特異的に分布する湧水選好種を対象として印旛沼流域内の分布に影響する要因を分析するとともに、生息ポテンシャルマップを作成した。その上で、気候変動が生息ポテンシャルに及ぼす影響を定量化するとともに、生息適地を維持する上で効果的な適応策を検討し、谷津の集水域における雨水浸透面の確保の重要性を明らかにした。また谷津の耕作放棄水田がもつ水質浄化能力に影響する要因を解析するとともに、耕作放棄水田の湿地化による水質浄化能力の向上を検証した。

サブテーマ3では、サブテーマ2の対象地としている印旛沼流域内から選定した小河川（高崎川）を対象とし、流量観測の結果に基づき流域氾濫モデル（RRIモデル）を構築し、氾濫解析モデルを用いて対象流域内における湿地再生シナリオに基づく治水効果の評価を行った。さらにその結果に基づき、治水の観点から見た対策優先順位の設定方法を検討した。その上で、サブテーマ2で得られた生物多様性保全の観点から見た対策優先順位と照合し、治水と生物多様性保全の両立の可能性を検討した。

サブテーマ4では、農業が重要な産業になっている地域において湿地の保全や活用を進める際に問題になる「害虫の発生」に着目した評価を実施した。関東平野の広域を対象とした野外調査から、耕作放棄水田に成立する植生と、イネ害虫および害虫の天敵（主にクモ類）の発生との関係を分析した。さらに、サブテーマ2と共通する印旛沼流域における湿地化した耕作放棄水田を対象として、耕作放棄水田内およびその周辺の水田においてイネ害虫（イネ吸汁性カメムシ類など）と天敵（クモ類）の密度調査を行い、耕作放棄水田の湿地化が、周辺の農地に害虫や天敵の供給源になる可能性を検討した。

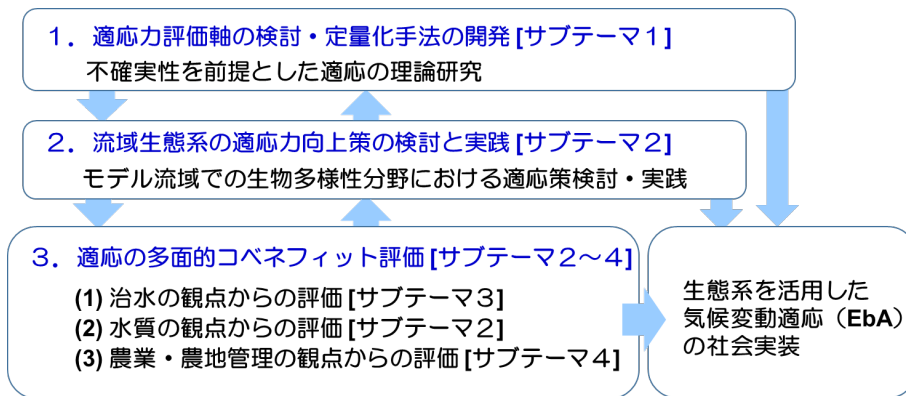


図-0.1. プロジェクトの構成の模式図

5. 研究成果

5-1. 成果の概要

【サブテーマ1】

適応力、すなわち環境の変化に対応する能力は、「変化力」「対応力」「回復力」の3つの要素から構成される概念として整理された（図-0.2）。またこれらから構成される適応力を向上させる方策についてレビューした結果、「構成要素の多様性・冗長性」、「環境の不均質性」、「システムの自立・分散性、連結性」、「生物学的遺産」が重要であることが考えられた。

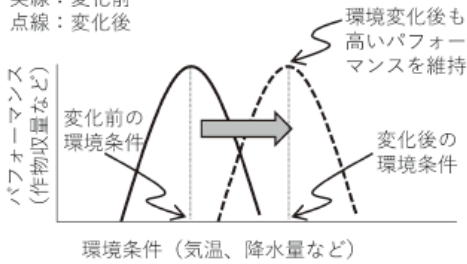
適応力の概念を実際に測定可能な指標に落とし込む手法として、Info-gap理論に基づく検討を行った結果、適応力を「目標を充足する上で需要可能な不確実性の値の大きさ」と定義することで定量化が可能であることがわかった（図-0.3）。この方法論を森林生態系に当てはめ、森林のタイプによる適応力の相違を評価することができた。

さらに開発した適応力指標を、治水分野における水害リスクカーブの理念と統合し、気候変動の不確実性の大きさを共通の軸と誌、共通の適応策の効果を、異なる適応分野において定量化し、相互に比較可能にする「適応力ダッシュボード」の概念を構築した。このフレームワークに、サブテーマ2-4の成果を当てはめ、印旛沼流域における旱魃／豪雨が、湧水選好種の生息環境好適性の減少と水害リスクに及ぼす影響を評価し、適応力ダッシュボードの適用に必要なモデル化の準備を整えることができた。

a) 変化力

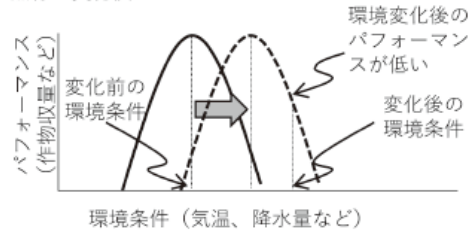
変化力が高いシステム

実線：変化前
点線：変化後



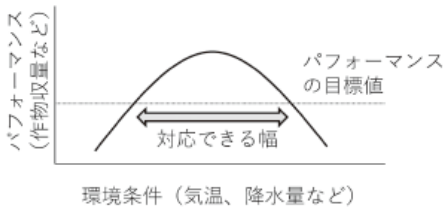
変化力が低いシステム

実線：変化前
点線：変化後

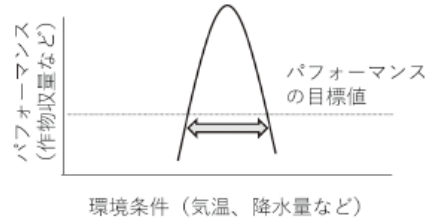


b) 対応力

対応力が高いシステム

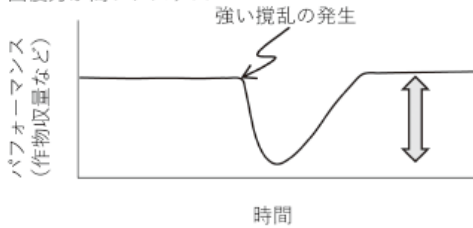


対応力が低いシステム



c) 回復力

回復力が高いシステム



回復力が低いシステム

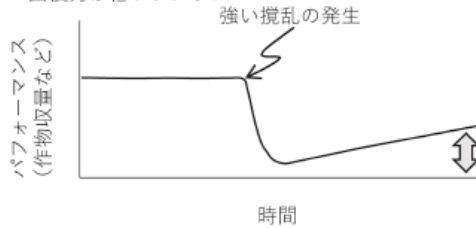


図-0.2 適応力の3要素を示す概念図。a) 変化力：環境の変化に対応してシステムの特長（最適環境条件など）を変化させられる能力。b) 対応力：幅広い環境条件下で一定以上のパフォーマンスを維持できる能力。c) 回復力：強い攪乱により低下したパフォーマンスを回復させる能力。

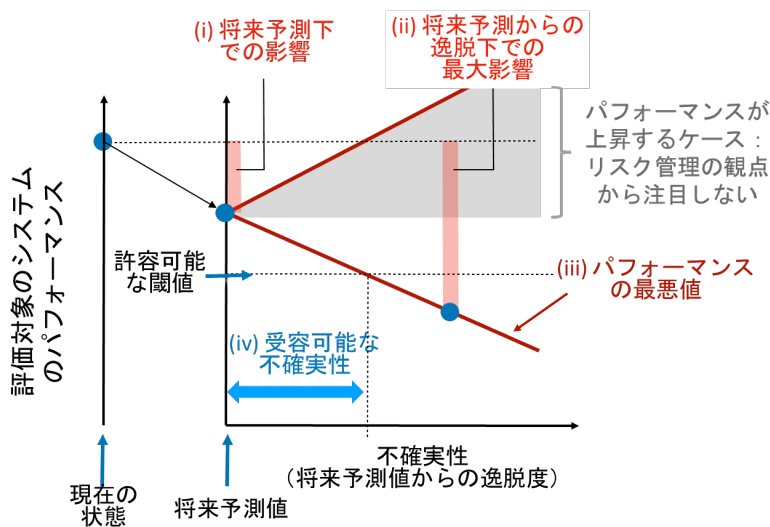


図-0.3 候変動適応における適応力指標の定義の概念図。気候変動に対するシステムのパフォーマンスを予測するモデルを構築することで、将来気候値の下での影響 (i) を評価できる。将来気候値に不確実性がある場合、不確実性が大きくなるほどシステムのパフォーマンスのとりうる範囲が大きくなり、そのためパフォーマンスのとりうる最悪値が低下し (ii), (iii)、やがて受容可能な閾値 (社会的に合意された保全目標等) をパフォーマンスが下回るようになる。この時の不確実性の大きさが、受容可能な不確実性 (iv) の大きさとして、システムの気候変動予測の不確実性に対する頑健性=適応力の指標となる。

【サブテーマ2】

気候変動に対して敏感で、かつ治水を含む水循環の課題と深くかかわる生物として「湧水選好種」を対象とした解析を実施した。まず印旛沼流域の谷津に生息する湧水選好種であるサワガニ、オニヤンマ幼虫、ホトケドジョウを対象に、分布に影響する要因を解析した。現地での捕獲調査および環境DNAを活用した分布調査を実施し、環境要因との関係を分析した結果、谷津の集水域において雨水浸透面（森林、草地、農地など）が占める割合が高い谷津において生息確率が高いことが分かった。これをもとに、これらの種の分布ポテンシャルマップを作成した（図-0.4）。またこれらの種の分布を説明する最大エントロピーモデル（MaxEnt）では、夏季の気温の効果も示され、相対的に気温が低い地域において生息確率が高いことが示唆された。

夏季の気温の高さが生息に負の影響を示したことから、将来の気温上昇は湧水選好種の生息場所の減少をもたらすことが予測される。将来気候シナリオ（RCP2.6, RCP8.5）を用いて2040年および2100年における500mメッシュでの生息確率を予測したところ、どちらのシナリオにおいても、土地利用が現状のままでは流域全体で生息確率の低下が予測された。しかしホトケドジョウについては、雨水浸透面の割合を高めることにより、将来気候条件下での生息確率を高めることが可能であることが確認され、都市域における雨水浸透促進措置が自然環境分野での適応策になり得ることが示唆された。

水質に関しては18の谷津での湧水および谷津の湿地を経由した流出水の水質を分析した結果、湧水量が豊富で、かつ湿地内で十分な水深が確保されている谷津において、窒素の除去率が高いことが示された。この知見に基づき、耕作放棄水田が乾燥化し外来植物セイタイカアワダチソウが優占していた谷津において、湧水を耕作放棄水田に導入するとともに田面を掘り下げる湿地再生を行ったところ、水質浄化能力の向上と絶滅危惧植物を含む水生植物の再生が確認された（図-0.5）。この湿地において、降雨時の栄養塩流出を測定したところ、降水量が多くなるとリンの流出が生じることが認められたものの、窒素除去機能は降水量に関わらず認められた。

以上の結果ならびに他サブテーマの成果を総合し、谷津の耕作放棄水田は、集水域の雨水浸透面を保全することで生物多様性の保全に役立ち、場所を適切に選択して湿地化することで水質浄化や水害リスク軽減に役立ち、湿地植生を維持することで農業害虫の発生抑制にも役立つという知見を整理し、行政機関との情報共有を進めた。千葉県河川環境課および水質保全課ならびにこれらの期間の関係者と情報共有を進めた結果、水循環基本法に基づく「印旛沼流域水循環健全化計画（第3期行動計画）」および湖沼水質保全特別措置法に基づく「印旛沼に係る湖沼水質保全計画（第8期）」において、谷津をグリーンインフラとして活用し、治水や水質浄化に役立てる主旨の内容が明記された。また印旛沼流域の基礎自治体である佐倉市と情報交換を行い、佐倉市では地域気候変動適応センターの設立準備室が設置された。

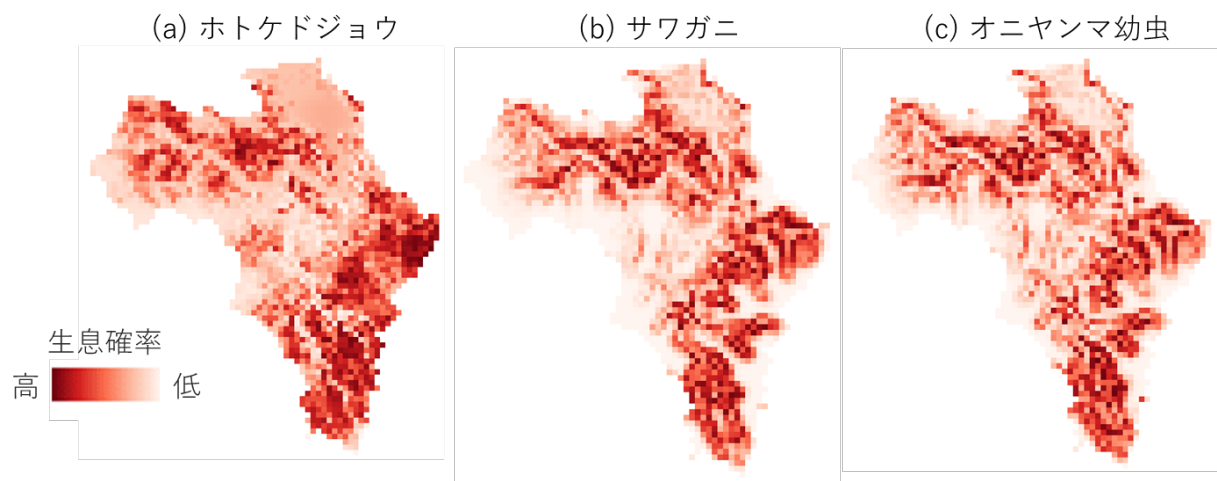


図-0.4. MaxEntで推定したホトケドジョウ(a)、サワガニ(b)、オニヤンマ幼虫(c)の印旛沼流域における生息ポテンシャル。ポテンシャルマップは赤色であるほど生息確率が高いことを示す。

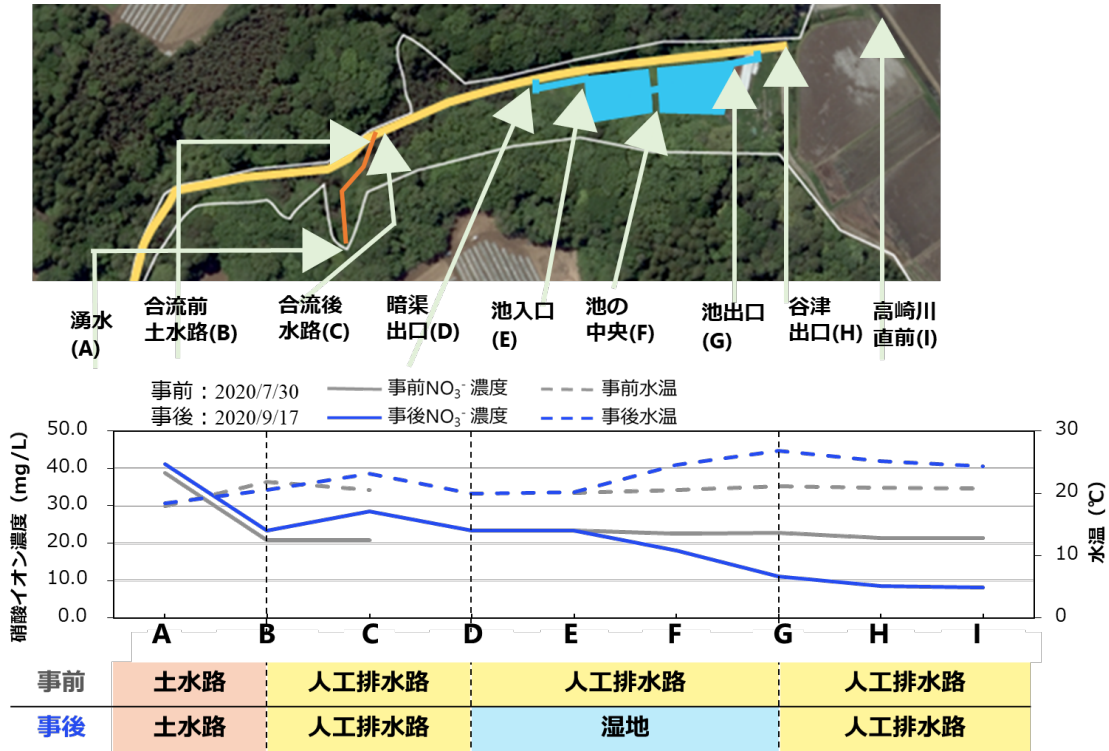


図-0.5. 人工排水路から排水されていた湧水起源の水を、湿地面に引き込む生態系管理の効果。事前（灰色）と事後（青色）の、各地点の硝酸イオン濃度（実践）と水温（点線）を示す。

【サブテーマ3】

印旛沼の流入河川の一つである高崎川を対象に、洪水氾濫モデルを構築し、湿地を活用したEco-DRRの方策の有効性を検討した。モデル構築のため印旛沼流域内の多数の水路において川幅・推進等の諸元を取得するとともに水路のタイプ毎の分布を把握し、RRIモデルを構築した。また研究期間中に発生した洪水の機会にまたモデルの再現性を検証した。構築したモデルを活用し、湿地再生の効果を定量化するとともに、対策適地を検討した。さらに治水の観点からの対策適地と、生物多様性保全の観点からの対策適地の関係を分析した。

①水路の諸元と分布

河川（便宜的に幅6m以上）に流入する水路のほとんどが柵渠化（直壁矩形断面）され狭く深い断面へと置換されており、柵渠化水路は、同一幅の土水路に対し平均的に1m深かった。自然河川での流量～川幅、水深関係（レジーム則）を5年に1度の生起確率の雨量（以下、「1/5相当の雨量」と表現）を想定して当てはめたものと比較した結果、他のレジーム則と比較し川幅は過小、水深（水路高）は過大となっていることが明らかとなった。

航空写真の整理より水路の延伸を評価した結果、戦後から1970年代にかけて圃場整備により水路の総延長は1947年の2倍に達していた。放棄された谷津に着目すると、圃場整備によって柵渠化されたものとそうでないものがあるが、柵渠化されている水路は長年の放棄によっても水路が閉塞している様子がほとんど見られなかった。一方、柵渠化されていない場合には、水路が埋没するなどして水深の浅い自然河川に近い状態で流れる様子が確認できた。

②モデルの再現性

水位流量観測開始後、2021年7月に洪水が生じた。この観測結果に基づいて、モデルパラメータを調

整した結果、モデルにフィッティングした鉛直浸透パラメータは、Clay loamでの例示パラメータとなり、対象地の土壌と対応した。解析結果に対するNash-Sutcliffe係数は流域下流端での観測所で0.82となり一定の再現性が担保された。

③過去の水路分布での再現計算

航空写真の整理より水路の延伸を評価した結果、戦後から1970年代にかけて圃場整備により水路の総延長は1947年の2倍に達していた。放棄谷津に着目すると、圃場整備によって柵渠化されたものともそうでないものがあるが、柵渠化されている水路は長年の放棄によっても水路が閉塞している様子がほとんど見られなかったが、柵渠化されていない場合には、水路が埋没するなどして水深の浅い自然河川に近い状態で流れる様子が確認できた。

過去の水路分布を条件とした流域下流端のピーク流量の計算結果(図-0.6)を見ると、流路延長が短いほど(すなわち過去の水路分布)ピーク流量は小さく、現状(Case-2019)との比較では、Case-1947の方がピーク流量が40%以上小さくなったことから、排水未整備による貯留効果が大きいことが明らかとなった。また、規模の大きい降雨ほどピーク流量が減少する割合が小さくなった。

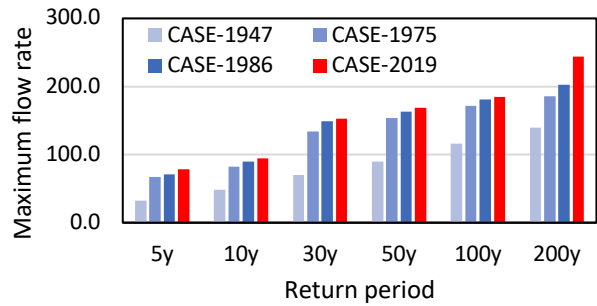


図-0.6. 過去の水路分布を条件とした流域下流端のピーク流量

④対策適地の選定

放棄水田の湿地化は排水機能を無効化した氾濫計算結果に基づき推定被害差額を算出した結果さらに確率規模で重み付けして平均することで、1年ごとの被害差額の期待値を算出し指標値とした。算出結果を図-0.7に示している、半数ほどの小流域では被害差額が正(すなわち被害増)となり慎重な適地選定が必要であることや、より細分化した土地利用情報が必要となることが明らかとなった。

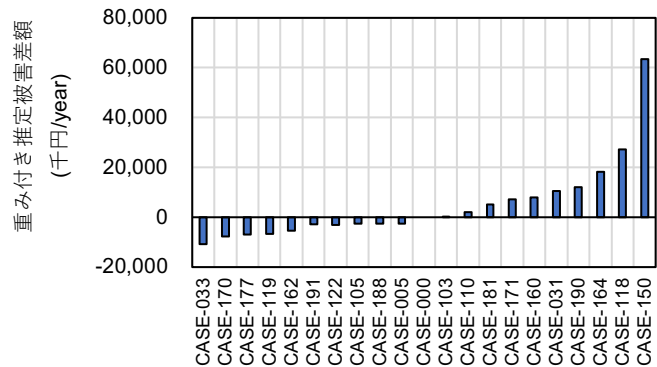


図-0.7. 重み付き推定被害差額の分布

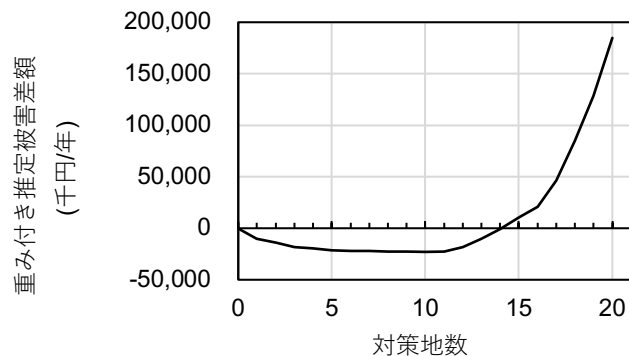


図-0.8. 重み付き推定被害差額と対策地数の関係

複数の対策地を加味した最適組み合わせについての算出結果を図-0.8に示す。これより、20のうち10の小流域を選定した段階で指標値が最も小さく（被害が小さく）なったこと、得られた最小値に対し優先度の高い4箇所を対策することで効果のおよそ80%が得られることが明らかとなり、本対象地に関しては、対策地が少なくとも期待される効果を得ることが可能であることが分かった。その内訳（図-0.9）を見ると、1/5相当の降雨に対しては、値が常に正で、対策により被害が大きくなること、1/10～1/200相当の降雨では値が概ね負（被害減少）で、一定数まで被害額が減少していくこと、特に、1/30相当の降雨に対する効果が大きいことが分かった。

5) 治水以外の選定項目との関係性

治水効果を見込むことができ、かつ保全対象種の分布確率が0.5以下となった環境再生が勧められると考えられる小流域の位置関係を示したものが図-0.10となる。抽出された流域の多くは源頭部を持つ小流域だった。水質については窒素濃度および湧水量を指標として評価したところ、各々の上位5流域は治水による適地と一致しない結果となったことから、対象流域ではそれぞれの目的による対策が重要であることが明らかとなった。

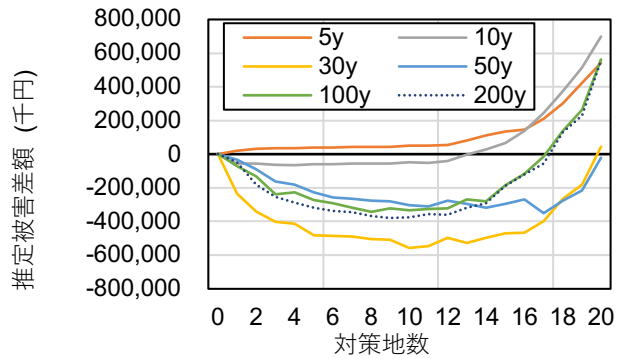


図-0.9. 降雨確率規模別の対策地数に対する推定被害差額：「〇y」は〇年に一度の生起確率の降雨を意味する。

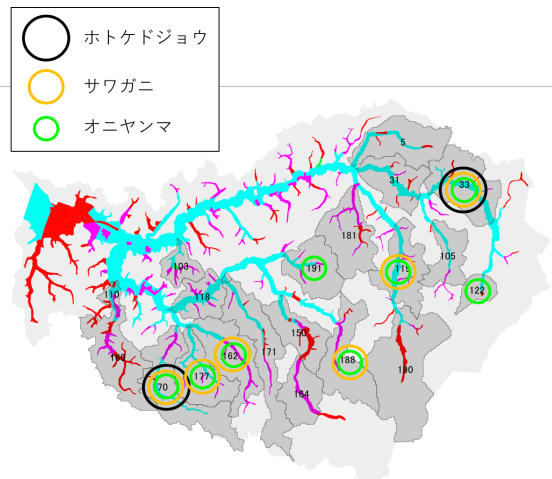


図-0.10. 治水効果と水生生物の分布確率から見る適地抽出結果

【サブテーマ4】

流域生態系の気候変動適応策の一つとして遊休農地の湿地としての活用が考えられる。湿地化は、生物多様性保全や治水に役立つだけでなく、天敵生物の生息地機能や周辺農地への天敵供給機能を通じて農業にも恩恵を与える可能性がある。一方、遊休農地は土壌の状態や、放棄されてからの年数によってその環境は大きく変化するため、それに応じて天敵の供給機能も変化すると考えられる。また状態によっては害虫が多発生するリスクも存在する。このように湿地化が農業にもたらす正味の影響はよく分かっていないため、本サブテーマでは湿地が農業にもたらす潜在的なコスト・ベネフィットを評価することを目的とする。まず耕作放棄地の植生状態によって天敵・害虫相がどのように変化するかを明らかにし、耕作放棄地の（農業にとって）望ましい状態を特定した。次に湿地が天敵の生息地として機能する場合、周囲の農地の天敵を増加させるかどうか、その供給効果を明らかにした。最後に実際に天敵が害虫を捕食しているかどうかを分子生態学的手法を用いて明らかにした。天敵生物として、水田生態系に普遍的な捕食者であるクモ類に注目した。

① 放棄地タイプごとのクモ・害虫相の把握

茨城県の耕作放棄地における節足動物類の調査データを利用して、耕作放棄地の植生の違いがクモ・イネ害虫の個体数や種数に与える影響を明らかにした。調査が実施されたのは2014年の茨城県、阿見町・つくば市の2地域で、植生遷移段階と土壤水分条件が異なる耕作放棄地を対象に捕虫網の掬い取り法によって節足動物の調査が行われた。植生遷移段階は植生のタイプ分けから3段階（初期・中期・後期）に、土壤水分条件は土壤表層における水の有無を基に2タイプに分類し、この2つの組み合わせから6タイプに分類された。これらのタイプの異なる耕作放棄地でクモとイネ害虫の個体数や種数を比較することにより、どのタイプの耕作放棄地がクモの生息地として

（あるいは害虫の発生源）として重要であるかを明らかにした。解析の結果、クモについては植生遷移とともに個体数が徐々に減少していくが、土壤水分条件（乾燥・湿潤）に関してはほとんど影響しないことが分かった（図-0.11）。種数に関しては植生遷移段階・土壤水分ともに影響しなかった。また種構成の比較から、水田に代表的な種は湿潤な遷移初期の耕作放棄地に多いことが分かった。イネ害虫については14種が含まれており、その内訳として斑点米カメムシ類が優占していた。イネ害虫の個体数は遷移初期の耕作放棄地で多く、特に乾燥した土壤条件で顕著に多かった（図-0.12）。これらの害虫個体数に影響する植生の特徴を解析したところ、害虫の総個体数とカメムシ類の食草であるイネ科草本被度との間に正の関係がみられた。つまり、乾いた遷移初期の放棄地ではカメムシの餌資源も多いため、個体数も多いと考えられた。

以上の結果をまとめると、湿潤な遷移初期の耕作放棄地は天敵となるクモの生息密度が高く、一方で、イネ害虫の発生は比較的少ないことが示された。また乾燥した遷移初期の耕作放棄地はイネ害虫が多発生するリスクが大きいことも示された。そのため、耕作放棄地を湿地化し初期の遷移段階に維持することは天敵温存と害虫の発生リスク低減の両面において重要であることが示された。

②湿地再生地の周囲農地へクモ・イネ害虫の供給効果の検証

遊休農地の湿地化が、周囲の水田のクモやイネ害虫の増加をもたらすかどうかを野外調査によって検証した。千葉県富里市中沢（おしどりの里）・立沢と印西市の3地域で、湿地として再生した水田跡地とその周辺の複数の水田を対象に、トラップ調査により、クモとイネ害虫の個体数を調べた。トラップには粘着板トラップと水上トラップの2種類を用い、それぞれで捕獲されたクモとイネ害虫を同定し個体数のデータを得た。クモ・害虫の個体数と湿地から対象トラップまでの距離との関係を解析した結果、まず地表徘徊性コモリグモ類の個体数については湿地からの距離から影響は受けておらず、また湿地と水田間においても個体数の違いは見られなかった。一方、造網性のアシナガグモ属に関しては、湿地では水田よりも個体数が多い傾向が見られたが、湿地に近い水田ほどクモの個体数が多くなる傾向は

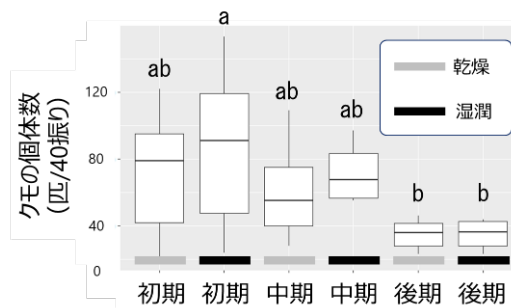


図-0.11. 耕作放棄地タイプごとのクモの個体数。植生遷移が進むにつれ個体数が減少する傾向が見られる。同じアルファベットは事後比較で有意な違い ($p < 0.05$) が無いことを意味する。

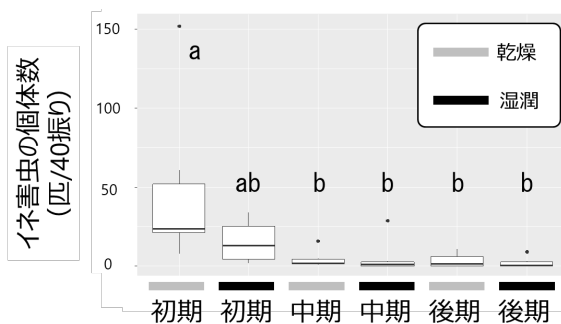


図-0.12. 耕作放棄地タイプごとのイネ害虫の個体数。植生遷移が進むにつれ個体数が減少する。また、乾燥した遷移初期の放棄地で特に多い。

見られなかった。イネ害虫に関しては、2021年の調査でツマグロヨコバイ、ヒメトビウンカと斑点米カメムシが多く採集されたが、2022年はツマグロヨコバイ以外の害虫が極めて少なかった。ツマグロヨコバイ・ヒメトビウンカ、斑点米カメムシを対象にクモと同様の解析を行った結果、ヒメトビウンカ、斑点米カメムシ類、ツマグロヨコバイのいずれについても湿地と水田では個体数の違いは見られず、また周辺の水田においても湿地からの距離に伴い個体数が変化する傾向は見られなかった。

以上の結果から、湿地再生地はクモの生息地として機能するものの、周辺農地への供給効果は不明瞭であった。これはイネ害虫に関しても同様であり、負の影響をもたらすものでもなかった。そのため、気候変動適応策の一つである遊休農地の湿地化は農業活動との間に軋轢を生まないことが示唆された。

③DNA メタバーコーディングを用いたクモの食性解析

調査対象地において、実際にクモがイネ害虫を捕食しているかどうかを明らかにするため、DNAメタバーコーディング技術を用いてクモの食性を調べた。調査対象として、ウンカやヨコバイ類の天敵であるコモリグモ類に注目し、主要な種であるキクヅキコモリグモとイナダハリゲコモリグモの胃内内容を調べた。千葉県富里市のおしどりの里と立沢の水田合計4枚でサンプリングを実施し、計39個体のクモを対象にDNA抽出とハイスループトシーケンサーを用いたメタバーコーディング解析により、クモの体内から餌生物を検出した。その結果、キクヅキコモリグモとイナダハリゲコモリグモから多くの昆虫のDNAが検出されたが、そこにイネ害虫は含まれなかった。イネ害虫の参照塩基配列は登録されていることから、多くの採集個体はイネ害虫を捕食していなかった可能性が考えられた。興味深い点として、イナダハリゲコモリグモとキクヅキコモリグモの餌組成が異なる点が挙げられる。すなわち、イナダハリゲコモリグモはトビムシ目が多く検出されているのに対し、キクヅキコモリグモではトビムシ目は検出されず、アリが多く検出されていた。イナダハリゲコモリグモとキクヅキコモリグモでは微生物環境が異なり、前者は畔などやや乾いた環境に生息するため、食性の違いは微生物環境の違いを反映している可能性がある。クモによる害虫捕食を明らかにするにはより多くのサンプルと調査回数が必要であるが、今回用いた分子的手法はそれを明らかにする上で有効だと考えられた。

以上の結果を要約すると、耕作放棄水田には様々な植生が成立するが、天敵の温存および害虫の多発防止の観点からは、遷移初期の湿潤な状態に保つことが重要だと考えられた。特に乾燥した耕作放棄地はイネ科の食草が繁茂することによってイネ害虫が多発するリスクが高まるため、多様な植物種が生育する湿地状態に維持することが肝要だと考えられた。一方、湿地化された遊休農地が周辺農地に及ぼす天敵の供給効果ははっきりしなかった。同時にイネ害虫についても供給効果ははっきりしなかった。そのため、気候変動適応策としての湿地再生は必ずしも農業に対して強いベネフィットをもたらすわけではないが、同様に強い負の影響ももたらさないことが示された。本研究は気候変動適応策の一つである湿地の創出と農業活動との間で軋轢が生じないことを示した点で意義深い成果と考えられる。

5-2. 環境政策等への貢献

<行政等が既に活用した成果>

1. 環境省自然環境局「自然生態系を基盤とする防災・減災の推進に関する検討会」に情報提供を行った。この検討会の成果物資料である「Eco-DRR 持続可能な地域づくりのための生態系を活用した防災・減災の手引き」(<https://www.env.go.jp/content/000124434.pdf>) において本研究の成果を踏まえ、印旛沼流域の事例が紹介された。
2. 環境省自然環境局「生態系を活用した気候変動適応策(EbA)計画と実施の手引き」(<https://www.biodic.go.jp/biodiversity/about/library/files/EbA.pdf>) において、本研究の成果を踏まえ、印旛沼流域における取組みの事例が紹介された。

3. 印旛沼流域水循環健全化会議「印旛沼流域水循環健全化計画第3期行動計画」 (<https://inbanuma.com/kaigi/kenzenka/dai3kikoudoukeikaku/>) において、本研究の結果として示された谷津の治水・水質浄化・生物多様性保全機能の活用の推進が取り込まれた。
4. 千葉県「印旛沼に係る湖沼水質保全計画（第8期）」 (<https://www.env.go.jp/content/900542221.pdf>) において、本研究の成果を踏まえ、グリーンインフラの活用による気候変動に適応した水質浄化対策として、谷津の湿地の機能を活用する方針が明記された。

<行政等が活用することが見込まれる成果>

印旛沼流域の複数の基礎自治体や流域で活用するNPOにおいて、「自然共生サイト」への登録に向けた準備が進行しており、生物多様性、生態系サービスにおける根拠として本研究の成果が活用されることが見込まれる。

5-3. 研究目標の達成状況

全体目標	目標の達成状況
<p>地域の特性を活かした気候変動適応計画の立案手法と有効性を明らかにするため、以下の目標を達成する。①気候変動適応における新しいアプローチとなる「適応力向上型アプローチ」の理論とその定量的評価手法を提示する。②環境DNA、河川／農業環境情報、ハビタットモデル、気候変動シナリオを活用した、自然生態系における気候変動適応計画の立案手法を確立する。③気候変動適応がもたらすコベネフィットを明らかにし、コベネフィットが生じやすい条件を明らかにする。</p>	<p><u>目標を上回る成果をあげた。</u></p> <p>①適応力の概念を整理するとともに、Info-gap理論に基づく適応力の定量化手法を開発し、実際の生態系に適用し、非評価手法を提示できた。②印旛沼流域を対象に、水循環の健全性の指標種である湧水選好種を対象としたハビタットモデルと分布ポテンシャルマップを構築するとともに、気温上昇に対する適応策として、集水域の雨水浸透面の増加の重要性を示した。③湧水選好種の保全および治水における気候変動適応策として「谷津の集水域の保全と谷底の耕作放棄水田の湿地化」の有効性を示すとともに、この選択肢が、水質浄化や農業害虫の抑制・益虫の維持にコベネフィットをもたらすことを示した。</p> <p>当初は、適応策の検討は自然環境分野（生物多様性保全分野）の課題についてのみ実施する計画であったが、治水についても適応策の検討が実施できた。さらに、地方公共団体との協力のもと、適応に資する計画を検討する所までを当初目標としていたが、実際に複数の計画に研究成果を反映させることができた。これらの成果は環境省発行の2つの手引書にも反映された。またプロジェクトの運営においては、合同の勉強会を複数回開催するなど、サブテーマ間の連携強化に努めた。こ</p>

	これらの点について、「目標を上回る成果」と判断した。
--	----------------------------

サブテーマ1 目標	目標の達成状況
「適応力」の概念を明確にするとともに、適応力が高いシステムの特徴を明らかにし、それを定量的に評価する手法を提案する。サブテーマ2～4の現場への適用とフィードバックにより、実用性の高い手法を示すとともに、実装への道筋を示す。	<u>目標どおりの成果をあげた。</u> 生態系分野を念頭においた適応力概念の整理、およびInfo-gap理論にもとづいた適応力の定量化手法の開発と実際の生態系への適用によって、「適応力」の概念を明確にするとともに、適応力が高いシステムの特徴を明らかにし、それを定量的に評価する手法を提案するという目標を達成した。さらに、生態系以外の適応分野との統合・シナジーの定量化のためのフレームワーク構築において適応力ダッシュボードの概念を確立することで、サブテーマ2～4の現場への適用とフィードバックにより、実用性の高い手法を示すとともに、実装への道筋を示すという目標を達成した。

サブテーマ2 目標	目標の達成状況
関東平野のモデル地域において、生物多様性・生態系機能の維持の観点からの適応計画を地方公共団体・地方研究機関との協力のもとに立案する。また適応策が水質浄化などの機能にもたらすベネフィットを評価する。 適応計画の立案では、サブテーマ1の成果を活用し、適応力の向上を重視した計画を検討するとともに、サブテーマ3・4のメンバーと協力し、農地・水路・河川を包括する計画とする。	<u>目標を上回る成果をあげた。</u> 湧水選好種の生息地の維持における気候変動適応策として、集水域の雨水浸透の促進の重要性を示すとともに、気候変動に伴うリスク上昇が指摘されている水害と水質悪化の問題に対し、谷津の湿地の活用という選択肢を示し、県および基礎自治体と共有した。その結果、印旛沼流域水循環健全化計画第3期行動計画および印旛沼に係る湖沼水質保全計画（第8期）に「谷津をグリーンインフラとして活用する」選択肢が明記された。同時に、市民団体や企業との連携のもと、生物多様性保全と水害リスク軽減や栄養塩負荷軽減の点で気候変動適応にも貢献する「谷津の耕作放棄水田の湿地化」の取組みが進行し、その効果の科学的検証も実現した。 このように、計画していた「科学研究および計画立案への貢献」という範囲を超え、実践と検証まで実施できたため、「目標を上回る成果」と判断した。

サブテーマ3 目標	目標の達成状況
水田・水路・河川の連携活用や、耕作放棄水田等での貯留による氾濫抑制効果を評価する手法を確	<u>目標を上回る成果をあげた。</u> 水路の効果を的確に評価可能なRRIモデルを導入

<p>立する。それを活用し、サブテーマ2と連携しながら、流域生態系の気候変動適応策が治水を中心とする河川管理にもたらすベネフィットを明らかにし、自然環境における適応と河川管理とのコベネフィットが生じやすい条件を示す。</p>	<p>し、放棄地の活用から得られる治水効果を量的に表現した。治水効果から得られる優先順位と、環境上の項目（水質、水生生物）との空間的配置を検討し、戦略的な保全再生手法を提案できるメソッドを確立した。</p> <p>目標としていた上記の成果に加え、戦後の農地排水路や河川の改修が、河川流域の水害リスクの分布にもたらした影響の定量化にも成功した。さらに流域内の湿地がもつ治水への効果を（自然環境分野でのEbAのコベネフィットという枠を超えて）、空間明示的な気候変動適応策として具体的に示すことができた。この成果を踏まえ、地域計画に湿地を活用した治水の概念が明記された。これらの成果は当初の目標を超えるものである。</p>
--	--

サブテーマ4目標	目標の達成状況
<p>湿地化した耕作放棄水田や環境配慮型農地がもつ益虫供給機能を評価し、それらの供給源の配置が農業にもたらすベネフィットを評価する。サブテーマ2の成果を活用し、流域生態系の気候変動適応策が農業にもたらすベネフィットを明らかにし、自然生態系における適応と農業とのコベネフィットが生じやすい条件を示す。</p>	<p><u>目標どおりの成果をあげた。</u></p> <p>当初予定に掲げた耕作放棄水田がもたらす益虫供給効果に加え、負の生態系サービスである害虫供給効果も明らかにし、正味のベネフィットの評価を行うことができた。流域生態系の気候変動適応策としての遊休農地の湿地化は天敵の生息地として機能すること、さらに害虫の多発生も生じにくいことから、適応策と農業との間に矛盾や軋轢が生じないことが示された。</p>

6. 研究成果の発表状況

6-1. 査読付き論文

<件数>

14件

<主な査読付き論文>

- 1) Yoshikawa T, Koide D, Yokomizo H, Kim JY, Kadoya T.: Scientific Reports 13:5932 (2023) Assessing ecosystem vulnerability under severe uncertainty of global climate change. (Impact Factor: 5.516)
- 2) Fukaya K, Kondo N, Matsuzaki SS, Kadoya T.: Methods in Ecology and Evolution. 13:183-193 (2022) Multispecies site occupancy modeling and study design for spatially replicated environmental DNA metabarcoding. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13732>. (Impact Factor: 8.335)
- 3) Matsushima N, Hasegawa M, Nishihiro J.: Wetlands 42(8):106. (2022) Effects of landscape heterogeneity at multiple spatial scales on paddy field-breeding frogs in a large alluvial plain. <https://doi.org/10.1007/s13157-022-01607-w>. (Impact Factor: 2.074)
- 4) Hirano Y, Kobayashi M, Hashimoto Y, Kato H, Nishihiro J.: Ecological Research, 38:146-153. (2023).

- Effect of local- and landscape-scale factors on the distribution of the spring-dependent species *Geothelphusa dehaani* and larval *Anotogaster sieboldii*. <https://doi.org/10.1111/1440-1703.12352>. (Impact Factor: 2.056)
- 5) Kohzu A, Matsuzaki SS, Komuro S, Komatsu K, Takamura N, Nakagawa M, Imai A, Fukushima T: Science of the Total Environment 881:163097 (2023) Identifying the true drivers of abrupt changes in ecosystem state with a focus on time lags: extreme precipitation can determine water quality in shallow lakes. (Impact Factor: 10.754)
 - 6) Ohtsuki K, Nishihiro J, Kato H, Nakamura K: 14th International Symposium on Ecohydraulics, Nanjing, China, (with referee) (2022) Evaluation of the Impact of Drainage Channel on Flood Flow in the Urban-Rural Landscape, Proc. <https://www.iahr.org/library/infor?pid=22009>
 - 7) Katayama N, Mashiko M, Koshida C, Yamaura Y.: Agr Ecosyst Environ 319:107539 (2021) Effects of rice-field abandonment rates on bird communities in mixed farmland–woodland landscapes in Japan. (Impact Factor: 6.576)
 - 8) Baba YG, Osawa T, Kusumoto Y, Tanaka K.: Wetlands 43:17. (2023) Multi-spatial-scale factors determining the abundance of frogs in Japanese rice paddy fields and their potential as biological control agents. <https://doi.org/10.1007/s13157-023-01661-y>. (Impact Factor: 2.074)
 - 9) 西廣淳、角谷拓、横溝裕行、小出大：保全生態学研究, 27(2): 315-322 (2022) 気候変動適応策としての「適応力向上型アプローチ」. <https://doi.org/10.18960/hozen.2201>
 - 10) 西廣淳、大槻順朗、高津文人、加藤大輝、小笠原奨悟、佐竹康孝、東海林太郎、長谷川雅美、近藤昭彦：応用生態工学 22: 175-185 (2020) 「里山グリーンインフラ」による気候変動適応：印旛沼 流域における谷津の耕作放棄田多面的活用の可能性。

6-2. 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

6-3. その他発表件数

査読付き論文に準ずる成果発表	0件
その他誌上発表（査読なし）	31件
口頭発表（学会等）	75件
「国民との科学・技術対話」の実施	35件
マスコミ等への公表・報道等	4件
本研究費の研究成果による受賞	0件
その他の成果発表	1件

7. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

8. 研究者略歴

研究代表者

西廣 淳

筑波大学大学院生物科学研究科修了、建設省土木研究所研究員、国土交通省国土技術政策総合研究所研究員、東京大学大学院農学生命科学研究科助教、東邦大学理学部准教授、2023年3月現在、国立環境研究所気候変動適応センター気候変動影響観測研究室長

研究分担者

- 1) 角谷 拓
東京大学農学部卒業、東京大学農学生命科学研究科特任助教、2023年3月現在、国立環境研究所生物多様性領域 生物多様性評価・予測研究室室長
- 2) 横溝 裕行
九州大学理学部卒業、日本学術振興会特別研究員、オーストラリア連邦科学産業研究機構ポスドク研究員、2023年3月現在、国立環境研究所環境リスク・健康研究領域主任研究員
- 3) 小出 大
横浜国立大学大学院環境情報学府修了、森林総合研究所非常勤職員、2023年3月現在、国立環境研究所気候変動適応センター研究員
- 4) 高津 文人
京都大学大学院理学研究科生物科学専攻博士課程修了、JSPS特別研究員、2023年3月現在、国立環境研究所地域環境研究センター湖沼環境研究室長
- 5) 今藤 夏子
東京大学大学院総合文化研究科博士課程修了、2023年3月現在、国立環境研究所生物多様性領域主任研究員
- 6) 松崎 慎一郎
東京大学大学院農学生命科学研究科博士過程修了、2023年3月現在、国立環境研究所生物多様性領域主任研究員
- 7) 長谷川 雅美
東京都立大学大学院理学研究科博士課程修了、千葉県立博物館上席研究員、2023年3月現在、東邦大学理学部教授
- 8) 杉島 野枝
東北大学大学院生命科学研究科博士課程後期終了、東邦大学理学部訪問研究員、2023年3月現在、東邦大学理学部博士研究員
- 9) 横山 智子
新潟大学大学院自然科学研究科修士課程修了、オルガノ株式会社にて計画設計業務、千葉県環境生活部水質保全課技師、2023年3月現在、千葉県環境研究センター水質環境研究室上席研究員
- 10) 星野 武司
東京工業大学大学院理工学研究科博士課程修了、公益財団法人高輝度光科学研究センター博士研究員、千葉県環境生活部水質保全課技師、千葉県印旛地域振興事務所副主査、2023年3月現在、千葉県環境研究センター水質環境研究室研究員
- 11) 中村 圭吾
大阪大学工学部卒業、国土交通省福井河川国道事務所長等を経て、土木研究所水環境研究グループ河川生態チーム上席研究員、2023年3月現在、公益財団法人リバーフロント研究所主席研究員
- 12) 村岡 敬子
徳山工業高等専門学校土木建築工学科卒業、2023年3月現在、土木研究所水環境研究グループ河川生態チーム総括主任研究員
- 13) 大槻 順朗

九州大学大学院工学府都市環境システム工学専攻博士課程修了、国立研究開発法人土木研究所自然共生研究センター専門研究員、2023年3月現在、山梨大学大学院総合研究部工学域土木環境工学系助教

14) 田和 康太

滋賀県立大学大学院環境科学研究科博士後期課程修了、兵庫県立大学大学院 地域資源マネジメント研究科 特任助教、土木研究所水環境研究グループ河川生態チーム専門研究員、2023年3月現在、国立環境研究所気候変動適応センター特別研究員

15) 馬場 友希

東京大学大学院 農学生命科学研究科博士課程修了 2023年3月現在、農業・食品産業技術総合研究機構 上級研究員

16) 片山 直樹

東京大学大学院 農学生命科学研究科博士課程修了 2023年3月現在、農業・食品産業技術総合研究機構 主任研究員

17) 大久保 悟

東京大学大学院 農学生命科学研究科博士課程修了 2023年3月現在、農業・食品産業技術総合研究機構 グループ長補佐

II. 成果の詳細

II-1 適応力評価軸の検討・定量化手法の開発

国立研究開発法人国立環境研究所

生物多様性領域（生物多様性評価・予測研究室）	角谷 拓
環境リスク・健康領域（リスク管理戦略研究室）	横溝 裕行
気候変動適応センター（気候変動影響観測研究室）	小出 大

[要旨]

生態系分野を念頭においた適応力概念の整理し従来の最適化型アプローチだけでなく、適応力向上アプローチにもとづいた適応策の重要性を示した。また、適応力向上アプローチの理念の下で実際の系で測定可能な適応力の指標を、Info-Gap理論にもとづいて、システムが受容可能な不確実性の大きさとして定義し、生態系への適用・検証を行った。さらに、複数の適応分野間で適切な適応策を検討するためのフレームワークである適応力ダッシュボードを構築し、流域における適応策実装の道筋を示した。

1. 研究開発目的

自然生態系分野の気候変動適応は、生態系という複雑なシステムを対象とすることから、適応策のターゲットとしてのシステムの適応力を概念的に明確化すること、およびその定量的な測定・評価手法の確立が欠かせない。そこで本サブテーマでは、課題全体で対象とする流域生態系を念頭におきつつ、広く生態系分野において活用可能な適応力評価のためのフレーム枠の開発を目的とした。

2. 研究目標

「適応力」の概念を明確にするとともに、適応力が高いシステムの特徴を明らかにし、それを定量的に評価する手法を提案する。サブテーマ2～4の現場への適用とフィードバックにより、実用性の高い手法を示すとともに、実装への道筋を示す。

3. 研究開発内容

研究目標を達成するため、①生態系分野を念頭においた適応力概念の整理、②適応力の定量化手法の開発と実際の生態系への適用、③生態系以外の適応分野との統合・シナジーの定量化のためのフレームワーク構築の3つのステップで研究を実施した。

① 適応力概念の整理

気候変動適応はこれまで、高精度に予測した将来気候を用いて生じうるリスクを予測し、そのリスクを最小化させる最適な施策を検討することが主要な課題・アプローチとして認識されてきた。しかし将来気候の予測値やそれに対する生態系等のシステムの応答には不確実性があり、予測どおりの気候値や応答が将来必ず生じるわけではない。したがって、こうした不確実性を十分に考慮せずに最適化した適応策は当初の予想とは異なる気候の下では新たなリスクを生じる可能性がある。こうした不確実性への配慮は、気温などの比較的予測しやすい気候値に影響される系よりも、降水量などの比較的予測しにくい気候値に影響される系において重要性がより増すと考えられる。また自然生態系など、系を構成する要素（生物種など）が複雑でその応答が環境条件によって変化するいわゆる複雑系においても、こうした不確実性への配慮が重要である。そこで、本課題では既存の気候変動適応である「最適化型アプローチ」に対して、不確実性を考慮した「適応力向上型アプローチ」の重要性を整理するとともに、適応力の高いシステム、またその適応力に寄与するプロセス、さらに、適応力を向上するための方策について整理を行った。

② 適応力の定量化手法の開発と適用

②-1 手法開発

適応策を効果的に進めるためには、適応策の目的関数である対象とするシステムの「適応力」を定量化し、適応策の効果を測定できる実用的な手法が必要となる。さらに、①で整理した「適応力向上型アプローチ」の考え方にもとづいた適応策を特定するためには、将来予測やシステムの応答に含まれる不確実性を適切に考慮することのできる指標値が必要となる。そこで、システムの脆弱性評価分野で使われるフレームワークや指標をレビューし、特に不確実性を明示的に扱うことのできる評価フレームとして、Info-gap理論にもとづく指標の開発を目指すこととした。Info-gap理論は、想定される不確実性の大きさについて十分な知見がない状況下で、複数のオプションの中から優れた対策を選択するための意思決定理論である。気候変動適応の文脈で述べるならば、Info-gap理論を活用すると、将来の気候変動やシステムの応答に内在される不確実性に対して十分に知見がない状況で、社会的に合意された達成すべき目標の下で適した適応策の選択や、異なるシステム間を比較した場合にどちらのシステムの適応力が高いかといった比較が可能になる。

②-2 生態系への適用

上記で開発したInfo-gap理論にもとづく適応力評価フレームを実際の生態系に適用し有効性の検証をおこなった。具体的には、環境省のモニタリングサイト1000プロジェクト

(<https://www.biodic.go.jp/moni1000/>)によって収集された日本列島の森林データから、42プロット(各1ヘクタール；**図-1.1**)の樹木群集の適応力評価を行なった。各プロットの2011～2015年の間に得られた毎木データから、胸高直径10cm以上の個体を選抜したものを、現在の森林群集とした。対象プロットのうちで150年以上の間大きな攪乱を受けていないものを成熟林、150年以内に大きな攪乱を経たものを二次林と分類した。このデータにより、現在の各森林プロットの種数(種の豊かさ)および森林機能タイプを評価した。あるプロットの機能タイプは、そこで最優占する樹木機能タイプとした。具体的には、出現した樹種を4つの機能タイプ(北方針葉樹・落葉広葉樹・温帯針葉樹・常緑広葉樹)に分類し、これらのうちで最も胸高断面積合計が大きいタイプをそのプロットの機能タイプとした。

2031～2050年の気候シナリオに基づいた森林群集の将来予測を行い、各プロットの種数および森林機能タイプがどのように変化するかをシミュレートした。このシミュレーションにあたっては、それぞれの樹種は固有の温度ニッチを持ち、その温度ニッチは種の分布域の年平均気温(Mean Annual Temperature; MAT)のレンジに相当すると仮定した。種の分布範囲としては環境省による第6・7回の自然環境保全基礎調査における分布地点を用い、気候値としてはIshizaki et al. (2020)による現在気温を用い、両者を重ね合わせることで温度ニッチを推定した。ある種が生育するプロットのMATが一度この温度ニッチのレンジを外れると、その種は局所絶滅すると仮定した。なお樹木個体のプロット内外での移出移入や外部からの新規樹種の移入はないものとしている。

将来の気候シナリオとしては、Ishizaki et al. (2020)による2031～2050年の1kmグリッドでの将来気候予測値を用いた。このデータには4つの気候モデル(MIROC5, GFDL-CM3, HadGEM2-ES, and MRI-CGCM3)および2つのRCP(代表濃度経路)(RCP 2.6 and RCP 8.5)の結果が含まれており、これらを組み

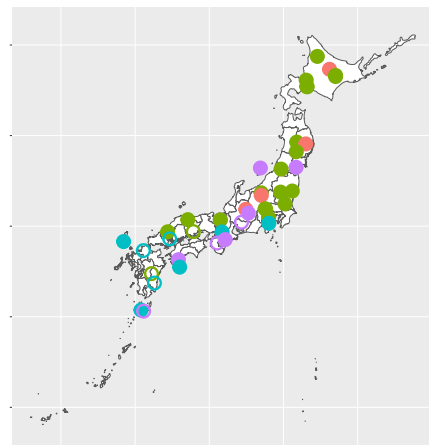


図-1.1. 日本列島全体の対象42の森林プロットの分布。ポイントの色と形は、それぞれ森林タイプと林齢に対応する。赤：北方針葉樹林。緑：落葉広葉樹林。青：温帯針葉樹林。紫：常緑広葉樹林。塗られたポイントは老齢林、白抜きのポイントは二次林。

(Yoshikawa et al 2023を改変)

合わせることで8つのシナリオが導出される。それぞれのプロットについて、これら8つ全てのシナリオの平均値を2031~2050年のトレンド平均 TM_{MAT} とし、これを気候値のbest-guess estimateとした。このbest-guess estimateの元におけるプロットの残存樹種数および森林機能タイプのあり方を評価した上で、best-guess estimateからの逸脱の度合いが上がった場合での最悪シナリオにおける種数の減少および森林機能タイプの転換の有無をシミュレートすることができる。

達成すべき保全目標としては、種数については現在の種数の90%、75%、50%を保全することを、森林機能タイプについては現状のタイプを維持することを設定する。このような目標下で、適応力評価手法を適用し、各森林生態系の適応力を評価・比較した。さらに、適応策の効果検証の例として、森林管理・森林施業のあり方に着目し、特に成木に達する前の稚樹群集のポテンシャルを高める適応策の効果を検討した。すなわち、各プロットにおけるDBH5cm以上・10cm未満の幹を稚樹群集とみなし、これらすべてが進級して成木層に加入する/しないシナリオを考えた。このような仮定を行う適応策の有無により、気候変動による種数の減少や機能タイプに関して適応力がどの程度改善するかを評価した。

③ 適応分野を統合した適応力評価のフレームワーク構築

③-1 フレームワーク開発

適応策の効果は、複数の分野に及ぶことを念頭に置く必要がある。例えば、流域における適応策を考える場合、生態系分野において有効な適応策が必ずしも治水などの自然災害分野の適応策として有効であるとは限らない。あるいは、適切な評価を行うことができれば、このような異なる分野における適応のシナジーを生み出すような適応策の特定も可能になる場合があると考えられる。治水分野では、自然災害という不確実性の大きな事象に対して有効な対策を実施する必要性という観点から、①で整理した「適応力向上型アプローチ」の考え方、さらに②で開発したInfo-gap理論にもとづいた適応力評価フレームと親和性の高い理念がすでに存在している。すなわち、水害リスクカーブにもとづく治水技術の理念である。水害リスクカーブにおいては、集中豪雨など今後より激甚化する自然災害を念頭に、これまで洪水の想定被害ゼロ以外に設定されていなかった管理目標値をより多次元化し、大きな降雨規模の下で洪水が発生した場合において、その被害をより小さくするという目標・評価も持ち込むことに特徴がある。本課題で開発したinfo-gap理論にもとづく評価フレームと水害リスクカーブの理念を統合し、治水、保全、農業といったことなる分野における適応力と適応策の評価を、相互に比較可能なフレームワークとして適応力ダッシュボードの考え方を構築した。

③-2 フレームワーク適用に向けた流域の生物モデルの開発

③-1のフレームワークの適用には、様々な適応オプションに対するシステムの応答を各分野で予測するためのモデル構築が必要となる。流域においては、サブテーマ3における治水モデル構築が先行しているため、流域における生態系分野の応答予測モデルの構築を行った。流域の指標生物種について環境かく乱の規模と絶滅リスクの定量的な関係を記述することを可能にするため、サブテーマ2で対象とする、千葉県高崎川流域(図-1.2)におけるサワガニ個体群を事例としてモデルの構築・検証を行った。

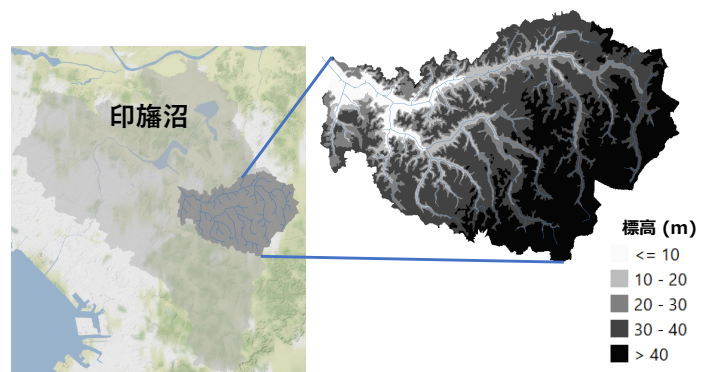


図-1.2. 高崎川流域

サワガニの個体群動態のモデル化は、Spatially and Temporally Explicit Population Simulations (STEPS) モデル (Visintin et al. 2020) を基本モデルとして用いた。STEPSを用いることによって、気候、かく乱、景観の変化、種の生態学的・生理学的要因など、分布や生息に影響を与える駆動因に対する生物集団の空間的変化をモデル化することができる。STEPSでは、個体群行列を用いてサワガニの個体群動態を計算する(表-1.1)。先行研究(Zhang et al. 2019)で得られたサワガニの個体群行列を用いた。単位面積あたりに生息できる個体数である環境収容力は、その場所の土地利用によって決まると仮定した。さらに、干ばつが生息環境の好適度に影響があると仮定し、干ばつの日数によって環境収容力が一定の割合(drought weight)で減少するプロセスを組み込んだ。干ばつの日数は、干ばつ状態の指標であるKeetch-Byram drought index (KBDI, Keetch & Byram 1968)を用いて求めた。KBDIは、降雨量、気温、その他の気象学的要因に基づいて算出され、一般的には山火事の発生確率や深刻度を予測する目的で使用されている(Keetch & Byram 1968)。

表-1.1. サワガニの個体群行列。

	幼体	成体(中)	成体(大)
幼体	0	11.5	18.5
成体(中)	0.111	0	0
成体(大)	0	0.344	0.382

4. 結果及び考察

① 適応力概念の整理

最適型アプローチと適応力向上型アプローチの特性を整理・比較した結果、最適化型アプローチの長所は、現状把握と予測が正確であれば、高いパフォーマンスが得られやすく、効果も短期的に現れるので社会的に受け入れやすい点(Weise et al. 2020)などが挙げられた(表-1.2)。一方で短所としては予測通りの条件にならなかった場合にパフォーマンスが大幅に低下する可能性がある。一方で「適応力向上型アプローチ」では、気候値が予測から外れても損失が比較的少ない点が長所として挙げられるが、予測が正確であれば最適化型アプローチのパフォーマンスに劣る点や、意思決定に向けた合意形成が不明瞭な点が短所と考えられた。

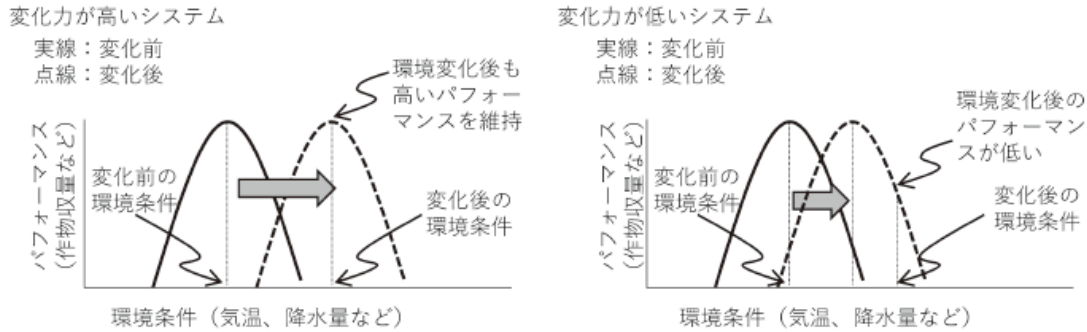
表-1.2. 気候変動適応の2つのアプローチとそれぞれの特徴(西廣ほか 2022を改変)

	最適化型アプローチ	適応力向上型アプローチ
概要	現在生じている問題に対処する方策や、予測される将来の環境条件の下でのパフォーマンスを高める適応アプローチ。	一定以上のパフォーマンスを維持する上で許容可能な環境変動の幅を、拡張する方策を採用する適応アプローチ。
方法	現状把握と将来予測をなるべく正確に実施し、問題の発生原因の除去や、影響の緩和を進めることにより実現する。	環境変化に対応した変化を迅速に遂げる能力を高めること、システムが許容可能な環境の幅を広げること、ダメージから回復する能力を高めることにより実現する。
長所	現状把握と予測が正確であれば、高いパフォーマンスが得られる。効果が短期的に表れやすく、社会的に受け入れられやすい。	予測から外れても損失が少ない。パルスの変動により一時的にパフォーマンスが低下しても、回復しやすい。
短所	予測通りの条件にならなかった場合、パフォーマンスが大幅に低下し、コストが無駄になる。	将来の状態が正確に予測できる場合にはパフォーマンスが最適化型アプローチに比べて低くなる。気候変動と対策の対応関係が不明瞭で、意思決定に向けた合意形成がしにくい場合がある。

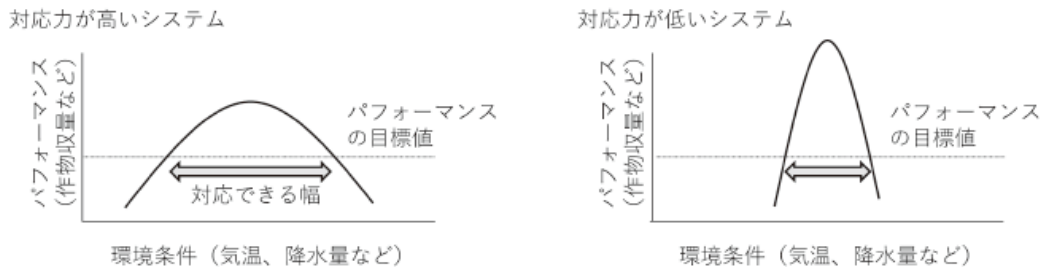
「適応力向上型アプローチ」の目的でもある「適応力」とは、大まかに言えば環境の変化に対応する能力であり、さらに3つの要素に分解することができる整理した。1つ目は、環境変化に応じてシステムの構成を最適なものに変化させる「変化力」である。変化力は、自然生態系の中で言えば生物の進化が主な要素となってくる。遺伝的な多様性が高い個体群や、空間的な交雑範囲が広い分類群においては、新たな環境が形成された際にそれに適応的な遺伝型が素早く個体群に浸透していくため、変化力が高いと考えられる。2つ目は、環境変化が起きる前のシステム構成として対処できる変化の幅を拡張する「対応力」である。対応力は、環境変動に左右されない頑健な優占種がいれば事足りるが、多くの場

合、環境応答は異なるが同じ機能を果たす種が多くいる（冗長性）ことによって、系全体としてのパフォーマンスが維持される力が発揮されていると考えられる。3つ目は、何らかの攪乱を受けてダメージを負った後に元のパフォーマンスへ回復させる「回復力」である（図-0.2）。回復力は、ダメージを受けた場所の周辺部からの移入・供給が大きなソースとなると考えられるため、サイト間の連結性が高いと回復力が高いと考えられる。

a) 変化力



b) 対応力



c) 回復力

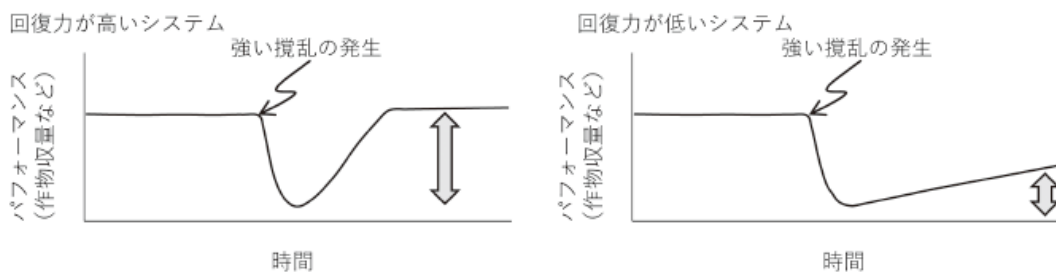


図-0.2. 適応力の3要素を示す概念図。a) 変化力：環境の変化に対応してシステムの特長（最適環境条件など）を変化させられる能力。気温などの環境条件の変化によりシステムの最適値（システムが最大のパフォーマンスを発揮できる環境条件）が変化した場合、それに追従してシステムの特長値を変化させられるシステムは変化力が高く、追従した変化が十分にできないシステムは変化力が弱い。b) 対応力：幅広い環境条件下で一定以上のパフォーマンスを維持できる能力。幅広い環境条件のもとでも一定以上のパフォーマンスを維持できるシステムは、対応力が高い。c) 回復力：強い攪乱により低下したパフォーマンスを回復させる能力。攪乱を受けても、パフォーマンスを攪乱以前のレベルまで回復できるシステムや、回復に要する時間が短いシステムは、回復力が高い。（西廣ほか 2022を改変）

上記の3要素から構成される適応力を向上させる方策について、既存研究や事例のレビューを行った結果、「構成要素の多様性・冗長性」、「環境の不均質性」、「システムの自立・分散性、連結性」、「生物学的遺産」の4つを向上・重視することによって、適応力向上のための方策が得られると考えられた（図-1.3）。「構成要素の多様性・冗長性」の向上は、新たな環境条件に適応的な種を内包させて将来そうした環境になった際に優占種としてパフォーマンスを維持するなど、変化力の源泉になる（Chapin et al. 2010）とともに、同じ機能を有するが環境応答が異なる複数の種（冗長性）を内包

することによって対応力の向上にも資すると考えられる (Biggs et al. 2012)。また回復力にも、初期の回復過程で活躍するパイオニア種の内包などを通して寄与するだろう。「環境の不均質性」は、様々な微気象の環境を含むことによって、将来的に不適な環境が広がってしまう種などの逃げ場を提供することにより、対応力や回復力を向上させると考えられる (Thompson et al. 2014)。「システムの自立・分散性、連結性」は、自立したノード間でパフォーマンスの高い種などを共有することを通して、変化力や回復力を向上させると考えられる (Biggs et al. 2012)。「生物学的遺産」では、埋土種子や倒木上更新、山火事更新など、攪乱以前からの遺産や攪乱によって形成された遺産が貴重な資源として回復力に資する点を指摘した (Seidl et al. 2014)。

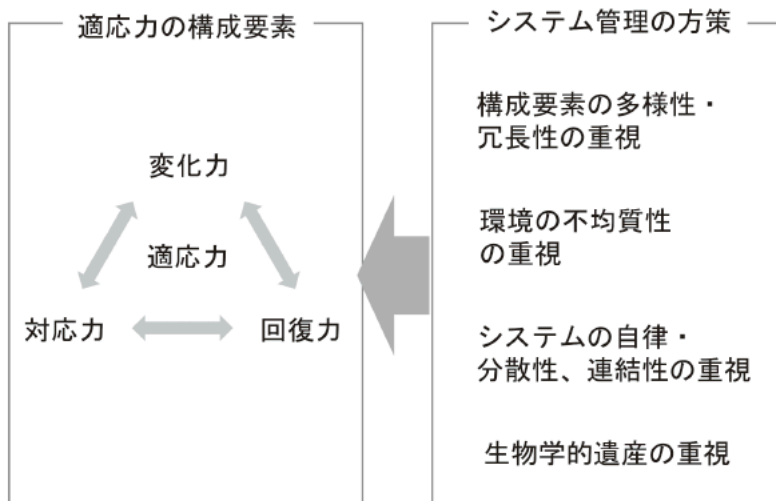


図-1.3. 適応力の3つの構成要素と、それを向上させる主要な方策（西廣ほか 2022を改変）

システムの適応力の想定や、それを向上する方策の検討時には、生態学的な視点が多く含まれ、上記の説明でも生物種での例示が多く含まれている。しかしこの概念は、農業や治水など人間社会分野にも適用可能なものであり、これらの分野における適応力向上においても、例示された方策は有用なものといえる。例えば農業の場合、多様性・冗長性は作物（米、麦、大豆など）や品種（コシヒカリ、ササニシキなど）の多様性や冗長性、環境の不均質性は圃場の面積や周辺環境の違い、自立・分散性は圃場間や農業政策の区画間などで捉えられ、遺産は伝統野菜や農法などが考えられる。また連結性は適応的な試みの成功事例の情報共有など、情報空間上の連結性としても捉えられる。治水分野としても、水資源を確保する技術の多様性（用水路整備、ダム、ため池、水浄化、地下水）や、環境や地域に応じた違い・特色（不均質性）、地域による体制の違いやその情報供給（自律・分散性、連結性）、伝統的な水利用の知恵（遺産）などがあり、これらが自然生態系分野と同様に各分野における変化力・対応力・回復力に寄与していると考えられる。そのためこうした概念をそれぞれの分野に当てはめつつ適応力を向上する方策を検討・実行・検証していくことが、「適応力向上型アプローチ」の普及とそれによる不確実性を織り込んだ気候変動適応を進めていくために必要だろう。

② 適応力の定量化手法の開発と適用

②-1 手法開発

①において整理した適応力向上型アプローチにおける適応力概念を実際に測定可能な指標に落とし込むための開発を実施した。すなわち、Info-gap理論にもとづいて、保全目標に対する受容可能な不確実性(acceptable uncertainty)の大きさをシステムの持つ適応力として定義した(図-0.3、図-1.4)。この許容可能な不確実性の値(=適応力)が大きいほど、システム、あるいは他と比較した場合の適応策は不確実性に対して頑健であるといえることができる。

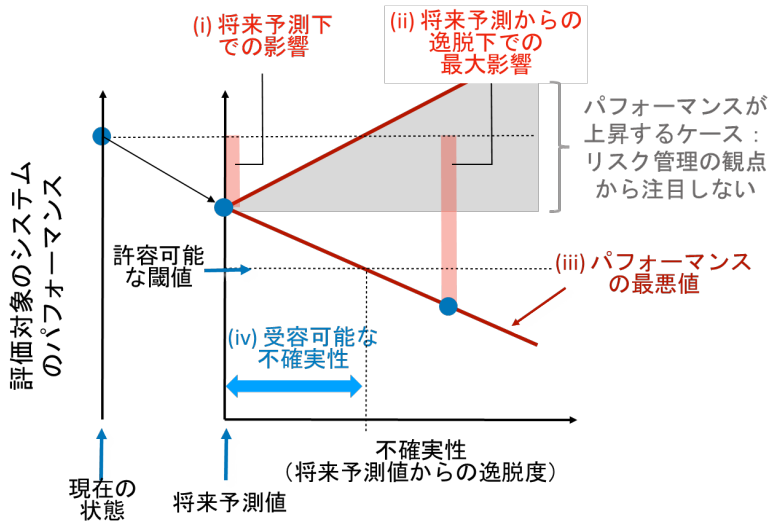


図-0.3. 気候変動適応における適応力指標の定義の概念図。システムが受容可能な不確実性を適応力として測定・評価する。気候変動に対するシステムのパフォーマンスを予測するモデルを構築することで、将来気候値の下での影響 (i) を評価できる。将来気候値に不確実性がある場合、不確実性が大きくなるほどシステムのパフォーマンスのとりうる範囲が大きくなり、そのためパフォーマンスのとりうる最悪値が低下し (ii)、(iii)、やがて受容可能な閾値 (社会的に合意された保全目標等) をパフォーマンスが下回るようになる。この時の不確実性の大きさが、受容可能な不確実性 (iv) の大きさとして、システムの気候変動予測の不確実性に対する頑健性 = 適応力の指標となる。

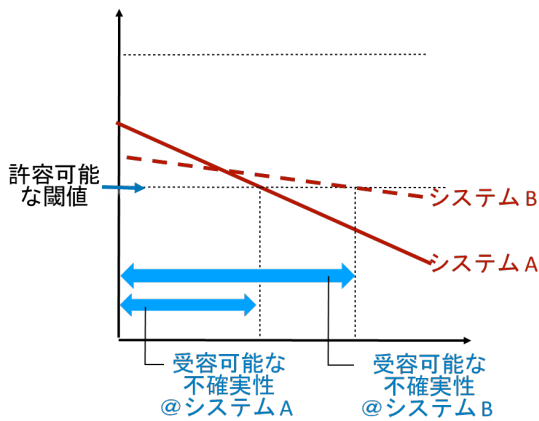


図-1.4は、ことなるシステム間での比較の例。システムAはシステムBに比して、不確実性0の場合はパフォーマンスが大きい一方で、受容可能な不確実性は小さい。適応力向上型アプローチにもとづけば、システムBの方が適応力が高いシステムとしてとらえられる。同様の分析を、同じシステムにおける異なる適応策間の比較にも用いることができる (Yoshikawa et al 2023 を改変)。

②-2 生態系への適用

不確実性を仮定しない場合の種数である2031-2050年の TM_{MAT} において、各プロットで消失すると予測された種の比率は、 0.13 ± 0.16 (平均±標準偏差; レンジ0.00~0.56) だった。この比率は森林の機能タイプ ($p < 0.001$) や林齢 ($p = 0.011$) によって異なり、常緑落葉樹林でもっとも高く、北方針葉樹林でもっとも低かった。またその比率は、二次林で成熟林よりも高かった。一方、2031-2050年の TM_{MAT} にお

る森林の機能タイプの転換が予測されたのは、落葉広葉樹林の2プロットのみであった(図-1.5)。1プロットは温帯針葉樹林に、もう1プロットは常緑広葉樹林に転換した。他のタイプの森林では転換はみられなかった。

森林の適応力は、プロットによって異なった。不確実性を仮定しない予測(Best-guess condition)からの逸脱が大きくなった時、最悪シナリオにおける種数の減少は大きくなった(図-1.6)。この減少パターンには、森林プロット間において違いがみられた。この違いはプロットの森林タイプや林齢では十分に説明されなかった(図-1.7)。また不確実性を仮定しない予測からの逸脱が大きくなった時に、機能タイプの転換は頻繁に生じた。

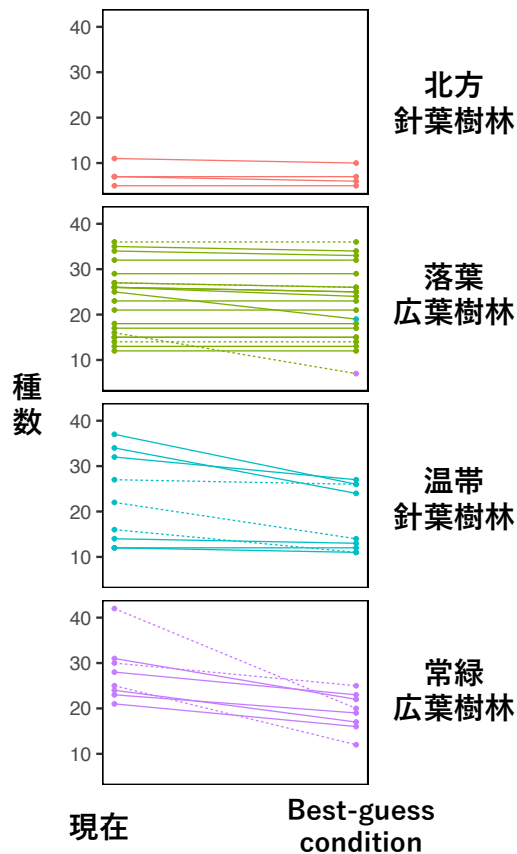


図-1.5. 現状から不確実性を仮定しない予測(Best-guess condition)の下での種数および森林タイプの変化。Y軸はプロット内の種数。左端が現状での種数、右端がbest-guess condition(2031-2050年の TM_{MAT})における種数。ポイントの色は、各プロットの森林タイプに対応する。赤：北方針葉樹林。緑：落葉広葉樹林。青：温帯針葉樹林。紫：常緑広葉樹林。実線は老齢林、点線は二次林を示す。落葉広葉樹林の2プロットでのみ、森林タイプの転換が予想された。(Yoshikawa et al 2023を改変)

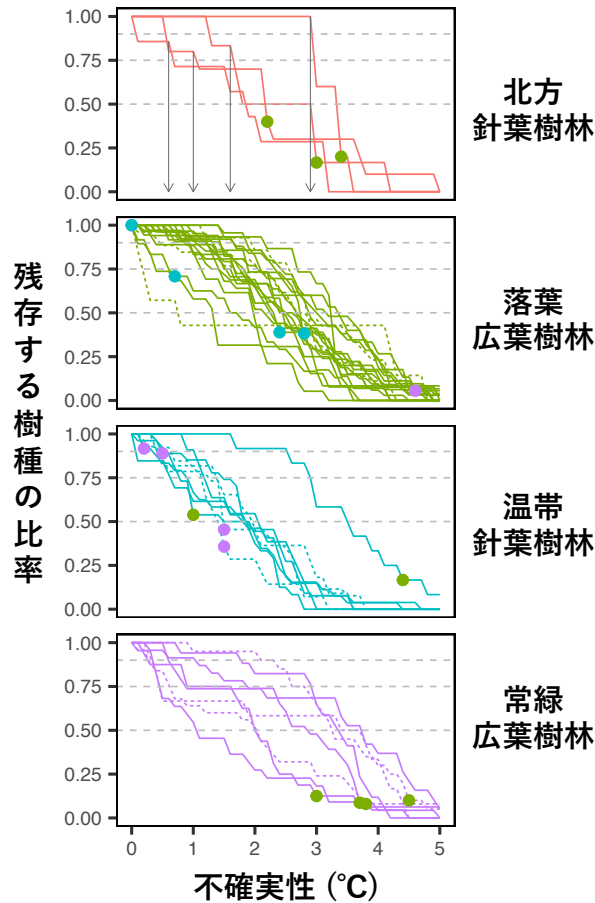


図-1.6. T_{MAT} の不確実性が高まる時の最悪シナリオにおける42プロットの種数の変化。破線の水平線は、 T_{MAT} で維持される初期種数の90%、75%、および50%を示す。線上の点は初期の森林タイプからの変化を示し、色はシフトした森林タイプを示す。4つの北方針葉樹林プロットを示す上のパネルでは、矢印は、75%の種数の維持に対する最大許容不確実性(0.1° C間隔)を示す。赤：北方針葉樹林。緑：落葉広葉樹林。青：温帯針葉樹林。紫：常緑広葉樹林。実線は老齢林、点線は二次林を示す。(Yoshikawa et al 2023 を改変)

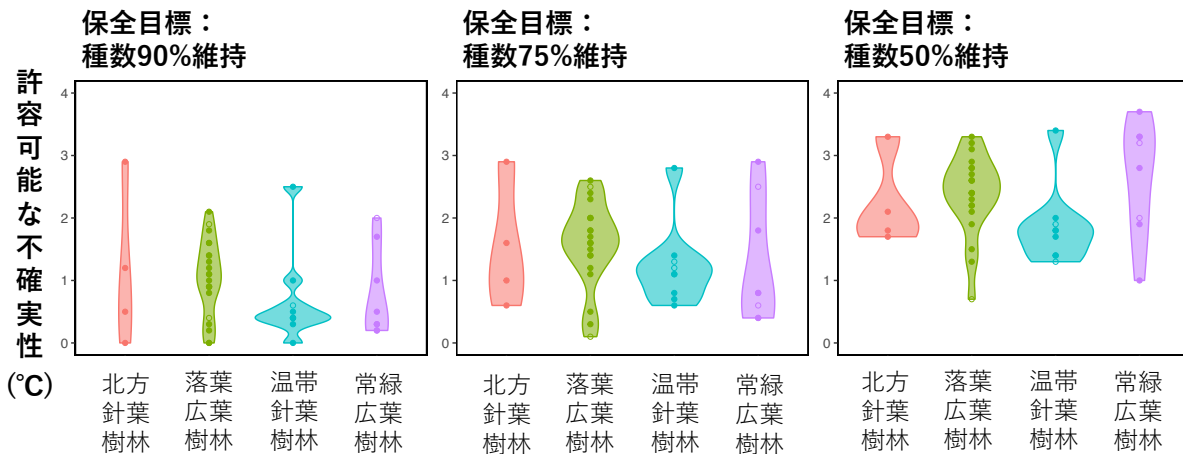


図-1.7. さまざまな保全目標を持つさまざまな森林タイプの種数の維持に関する T_{MAT} の受容可能な不確実性。塗られたポイントは老齢林、白抜きのポイントは二次林。(Yoshikawa et al 2023 を改変)

すべての稚樹個体(DBH5cm以上、10cm未満)が成木層(DBH10cm以上)へ加入できたと仮定したとき、これは種数の維持についての適応力(受容可能な不確実性)を増加させた(図-1.8)。受容可能な不確実性の増加量は、保全目標90%では $0.34 \pm 0.33^{\circ}C$ 、75%では $0.33 \pm 0.36^{\circ}C$ 、50%では $0.18 \pm 0.42^{\circ}C$ であり、いずれもゼロと有意に異なっていた。受容可能な不確実性の増加量は、森林タイプ間では異なっていなかった。増加量に林齢による違いは見られた(二次林の方が大きい)が、外れ値のプロットを除外すると有意差は消失した。

一方で、すべての稚樹個体の加入が成功したと仮定したときでも、森林機能タイプの維持についての受容可能な不確実性を増加させはしなかった（図-1.9）。

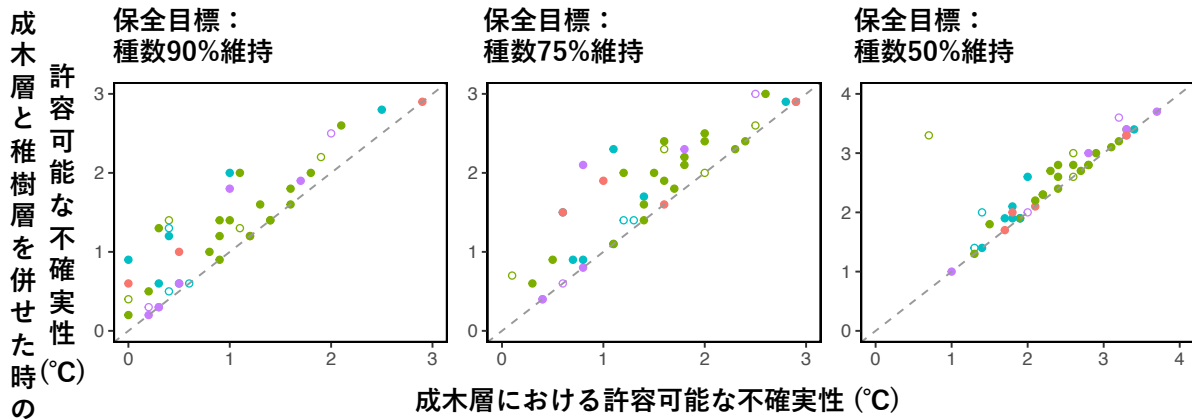


図-1.8. 稚樹（DBH5～10 cm）の保全が、種数維持についての TM_{MAT} の許容可能な不確実性に及ぼす影響。X軸は、DBHが10 cm以上の成木群集での受容可能な不確実性を示し、Y軸は、成木と稚樹の両方を含む群集での受容可能な不確実性を示す。ポイントの色と形は森林タイプと林齢に対応する（図-1.5参照）。（Yoshikawa et al 2023 を改変）

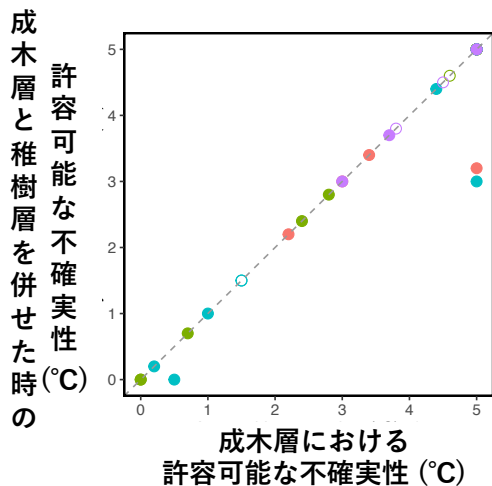


図-1.9. 稚樹（DBH5～10 cm）の保全が、森林タイプの維持についての TM_{MAT} の許容可能な不確実性に及ぼす影響。X軸は、DBHが10cm以上の成木群集で許容される不確実性を示し、Y軸は、成木と稚樹を併せた樹木群集で許容される不確実性を示す。ポイントの色と形状は、現段階での成木層の機能タイプと林齢を示す。（Yoshikawa et al 2023 を改変）

本研究の分析により、日本の森林群集は不確実性に対する頑健性において大きく異なっていることがわかった。またこの違いは、best-guess conditionにおける種数の減少度合いの森林群集間の違いを大きく超えていることがわかった。このように我々のアプローチにより、これまで見過ごされてきた森林群集の新たな脆弱性が明らかになった。受容可能な不確実性の値は、森林タイプや林齢では説明されない部分が大きかった。許容可能な不確実性に影響する要因としては、おそらくは構成樹種間での温度ニッチにおける冗長性(redundancy)が重要と考えられる。今後の研究では、許容可能な不確実性が森林群集の形質とどのような関係にあるのかを明らかにすることが重要である。

また稚樹群集の保全は、種数に関する許容可能な不確実性を増加させることが示された。稚樹群集の成木層への加入は、森林の更新に不可欠なプロセスであるが、近年はニホンジカによる食害などにより、そのプロセスが損なわれている懸念がある。日本列島の各所で稚樹群集が衰退している森林群集が見られる。こうした群集において稚樹群集を保全することは、気候変動に対する頑健性を高める上でも重要であると考えられる。稚樹層と成木層の組成の差は、稚樹の更新成功による許容可能な不確実性の増加量と関連している可能性がある。

ただし本研究のシミュレーションは、気候変動に対する樹木群集の応答について非常に単純な仮定に基づいたものであり、その結果の解釈には注意が必要である。本研究では樹種の温度ニッチと年平均気温の関係のみにより樹種の生存が決まるという単純な仮定をおいているが、実際には樹種の生存は最高気温や最低気温、降水量・積雪量などの様々な要因の影響を受けるものと考えられるため、より複雑なモデリングを用いることが望ましい。しかし本研究は、不確実性に対する頑健性/脆弱性という概念と、ここで提案した定量的な適応力の評価の枠組みが、さまざまな分野のモデルやシステムに適用されることを示している。

③適応分野を統合した適応力評価のフレームワーク構築

③-1 フレームワーク開発

②で開発した適応力指標を治水分野の水害リスクカーブの理念と統合することで、気候変動の不確実性の大きさを共通の軸とし、共通の適応策の効果を各適応分野において定量化し相互に比較可能にする、適応力ダッシュボードの概念を構築した（図-1.10）。

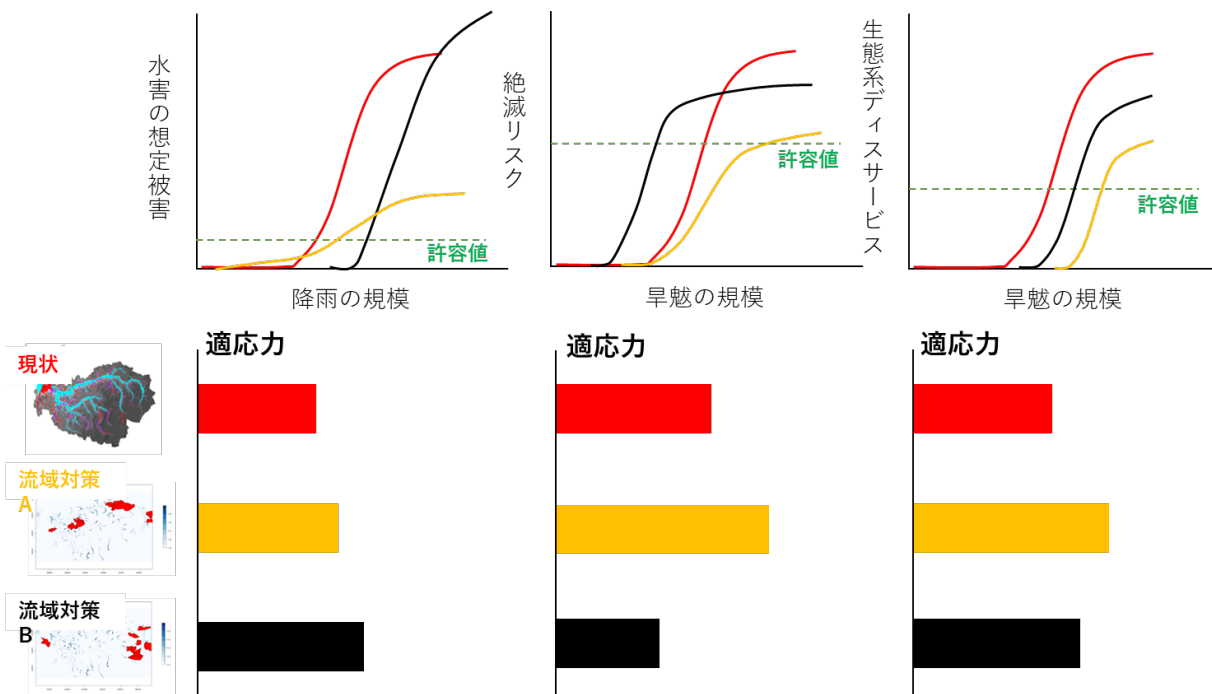


図-1.10. 適応力ダッシュボードのイメージ。流域において湿地環境の維持・再生を適応策とした場合の異なる分野、自然災害（水害）、生態系（保全）、農業（害虫発生）を念頭においた例となっている。上図では、集中豪雨と干ばつの頻度が将来同時に上昇することを踏まえて、これらの不確実性が大きくなる、すなわち最悪ケースをもたらす降雨・干ばつイベントの規模が大きくなる場合の各分野でのパフォーマンスの応答の概念図を描いている。赤は、現状、黄色は湿地環境再生策の1つ、黒は別の湿地環境再生策をとった場合を示す。また、緑の破線は、各分野において設定された気候変動下で許容可能な閾値を示している。上図の情報をもとに、下図ではシナリオ（適応策タイプ）ごとの適応力を示している。これらの値は、不確実性の大きさを単位とするものであり異なる分野間でも比較可能な値である。

③-2 フレームワーク適用に向けた流域の生物モデルの開発

構築した指標種個体群の動態予測モデルの挙動を実際の評価に用いる条件に近い状況で検証するために、将来の干ばつの予測値を、気候シナリオの一つである MRI-CGCM3 RCP8.5 daily scenario(データセット <https://www.nies.go.jp/doi/10.17595/20200415.001.html>)を用いて定量化した。干ばつ指数は、MRI-CGCM3 RCP8.5 daily scenarioに基づく将来の気候に関するシミュレーション結果から、図-

1.11のように算出された。次に、干ばつの頻度、干ばつに伴う生息環境好適性の減少パラメータに対するモデルの感度の検証を行った。Greedyアルゴリズムを用いて、湿地環境の再生効果の高い空間ユニットの選択を行ったところ、平均個体数・生息適地数ともに、対策を行うユニット数の増加にともない数が増加することが確認され（図-1.12、1.13）、モデルのアウトプットは期待通りの反応を示すことが示され。干ばつによる環境収容力の低下が大きい場合（15%）では、対策を行っても生息適地がゼロになる場合もあることが示された（図-1.13）。さらに、干ばつのシナリオを変えることで効果的な管理対象とする空間ユニットの組み合わせが異なることを示された。これらの結果から、適応力ダッシュボードの適用に必要な生態系分野のモデル化の準備が整ったといえる。

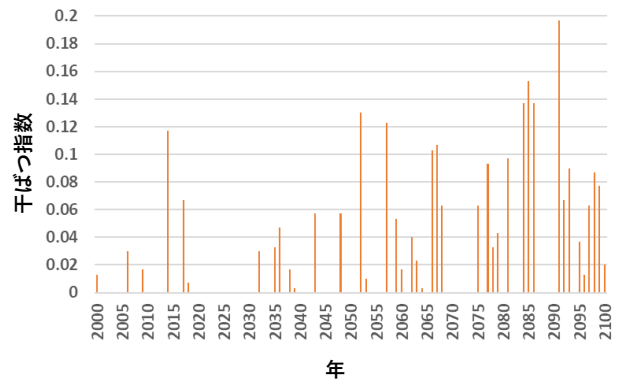


図-1.11. 2000-2100年における干ばつ指数の予測

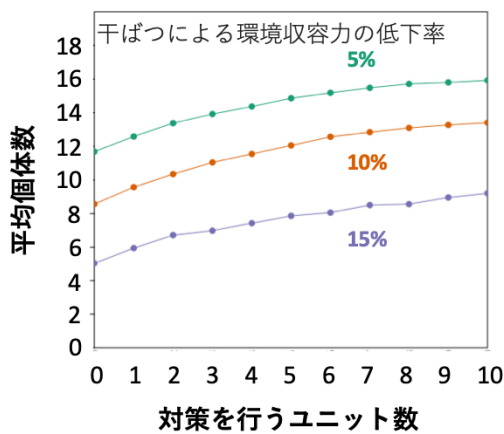


図-1.12. 対策を行うユニット数と平均個体数. 線の違いは干ばつによる環境収容力の低下率の違いを意味する。

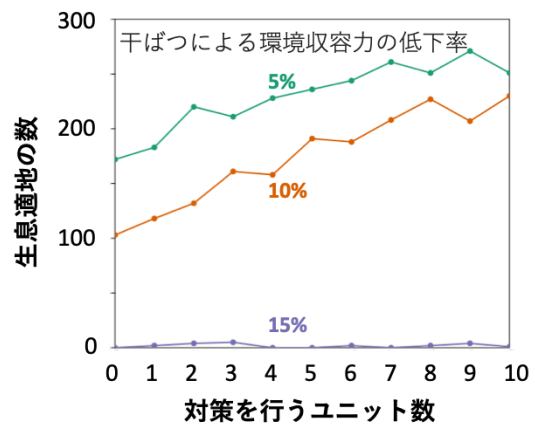


図-1.13. 対策を行うユニット数と生息適地の数. 線の違いは干ばつによる環境収容力の低下率の違いを意味する。

5. 研究目標の達成状況

生態系分野を念頭においた適応力概念の整理、およびInfo-gap理論にもとづいた適応力の定量化手法の開発と実際の生態系への適用によって、「適応力」の概念を明確にするとともに、適応力が高いシステムの特徴を明らかにし、それを定量的に評価する手法を提案するという目標を達成した。さらに、生態系以外の適応分野との統合・シナジーの定量化のためのフレームワーク構築において適応力ダッシュボードの概念を確立することで、サブテーマ2～4の現場への適用とフィードバックにより、実用性の高い手法を示すとともに、実装への道筋を示すという目標を達成した。

6. 引用文献

- Biggs R, Schlüter M, Biggs D, Bohensky EL, BurnSilver S, Cundill G, Dakos V, Daw RM, Evans LS, Kotschy K, Leitch AM, Meek C, Quinlan A, Raudsepp-Hearne C, Robards MD, Schoon ML, Schultz L, West PC (2012) Toward principles for enhancing the resilience of ecosystem services. Annual Review of Environment and Resources, 37:421-448. <https://doi.org/10.1146/annurevenviron-051211-123836>

- 2) Chapin III FS, Carpenter SR, Kofinas GP, Folke C, Abel N, Clark WC, Olsson P, Smith DMS, Walker B, Young OR, Berkes F, Biggs R, Grove JM, Naylor RL, Pinkerton E, Steffen W, Swanson FJ (2010) Ecosystem stewardship: Sustainability strategies for a rapidly changing planet. *Trends in Ecology and Evolution*, 25:241-249. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.10.008>
- 3) 西廣淳、角谷拓、横溝裕行、小出大 (2022) 気候変動適応策としての「適応力向上型アプローチ」. *保全生態学研究*, 27(2): 315-322. <https://doi.org/10.18960/hozen.2201>
- 4) Seidl R, Rammer W, Spies TA (2014) Disturbance legacies increase the resilience of forest ecosystem structure, composition, and functioning. *Ecological Applications*, 24:2063-2077. <https://doi.org/10.1890/14-0255.1>
- 5) Thompson ID, Okabe K, Parotta JA, Brockerhoff E, Jactel H, Forrester DI, Taki H (2014) Biodiversity and ecosystem services: Lessons from nature to improve management of planted forests for REDD-plus. *Biodiversity and Conservation*, 23:2613-2635. <https://doi.org/10.1007/s10531-014-0736-0>
- 6) Weise H, Auge H, Baessler C, Bärlund I, Bennett EM, Berger U, Bohn F, Bonn A, Borchardt D, Brand F, Chatzinotas A, Corstanje R, De Laender F, Dietrich P, Dunker S, Durka W, Fazey I, Groeneveld J, Guilbaud CSE, Harms H, Harpole D, Harris J, Jax K, Jeltsch F, Johst K, Joshi J, Klotz S, Kühn I, Kuhlicke C, Müller B, Radchuk V, Reuter H, Rinke K, Schmitt-Jansen M, Seppelt R, Singer A, Standish RJ, Thulke HH, Tietjen B, Weitere M, Wirth C, Wolf C, Grimm V (2020) Resilience trinity: Safeguarding ecosystem functioning and services across three different time horizons and decision contexts. *Oikos*, 129:445-456. <https://doi.org/10.1111/oik.07213>
- 7) Ishizaki NN, Nishimori M, Iizumi T, Shiogama H, Hanasaki N, Takahashi K (2020) Evaluation of two bias-correction methods for gridded climate scenarios over Japan. *Sola*, 16, 80-85. <https://doi.org/10.2151/sola.2020-014>
- 8) Keetch JJ, Byram GM (1968) "A Drought Index for Forest Fire Control". Res. Pap. Se-38. Asheville, Nc: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station. 35 P. USDA Forest Service Southern Research Station. 038. Retrieved August 11, 2016. "(Date: 1968) Res. Paper SE-38. 32 pp. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service"
- 9) Visintin C, Briscoe NJ, Tingley R, Wintle BA, Woolley SNC, Golding N (2020) steps: Software for spatially and temporally explicit population simulations. *Methods Ecol Evol*.11:596–603
- 10) Zhang Z, Yokota M, Strüssmann CA (2019) A periodic matrix population model to predict growth potential of the invasive Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis* (H. Milne Edwards, 1853) (Decapoda: Brachyura: Varunidae). *Journal of Crustacean Biology*, Volume 39:28–35.

II-2 流域生態系の適応力向上策の検討と実践

国立研究開発法人国立環境研究所

気候変動適応センター	西廣 淳
地域環境研究センター	高津 文人
生物多様性領域	今藤 夏子
生物多様性領域	松崎 慎一郎
気候変動適応センター	田和 康太 (2022年度)

東邦大学理学部

長谷川 雅美

東邦大学理学部

杉島 野枝

千葉県環境研究センター水質環境研究室

横山 智子

千葉県環境研究センター水質環境研究室

星野 武司

<研究協力者>

東邦大学大学院理学研究科

平野 佑奈

[要旨]

自然環境分野における気候変動適応策を提示し、他のサブテーマとともにそのコベネフィットを明らかにすることを目的として、印旛沼流域に多い谷津（小規模な谷）に着目した解析を行った。谷津を主要な生息場所とする湧水選好種（ホトケドジョウ、サワガニ、オニヤンマ幼虫）の個体数密度に影響する要因を解析し、生息ポテンシャルマップを作成するとともに、将来気候が生息ポテンシャルに及ぼす影響を解析した。その結果、谷津の集水域における雨水浸透面の確保の重要性が示された。またホトケドジョウについて気温上昇による生息ポテンシャルの低下が示唆され、これに対する適応策として、集水域における浸透面の増加の有効性が示唆された。谷津の水質浄化機能を評価したところ、谷底面に浅く冠水した湿地を確保することで、窒素とリンの除去の効果を発揮することが確認された。

以上の結果ならびに他のサブテーマの結果を総合し、谷津を湿地として維持することは、生物多様性保全（適応策含む）、水質浄化、水害リスク軽減に貢献しうることが示された。この結果を印旛沼およびその流域の管理に関する行政と共有し、印旛沼流域水循環健全化計画における行動計画および湖沼水質保全計画に、今後進めるべき対策として谷津の生態系の活用が位置付けられた。

1. 研究開発目的

モデル流域（千葉県・印旛沼流域）において、生物多様性保全に貢献するEbAの方策を明らかにし、その機能を定量的に示す。あわせて水質管理におけるコベネフィットを明らかにする。これらの結果と他のサブテーマの結果を踏まえ、気候変動適応に資する地域計画に反映させるための提案を行政に対して行う。

2. 研究目標

関東平野のモデル地域において、生物多様性・生態系機能の維持の観点からの適応計画を地方公共団体・地方研究機関との協力のもとに立案する。また適応策が水質浄化などの機能にもたらすベネフィットを評価する。適応計画の立案では、サブテーマ1の成果を活用し、適応力の向上を重視した計画を検討するとともに、サブテーマ3・4のメンバーと協力し、農地・水路・河川を包含する計画とする。

3. 研究開発内容

3.1. 生物多様性

3.1.1. 生物の分布に影響する要因の解明とポテンシャルマップの作成

印旛沼流域の37地点の谷津（台地の辺縁に形成される小規模な谷地形）を対象に、サワガニおよびオニヤンマ幼虫のCPUE(密度)に影響する局所的要因、景観的要因と、これらの要因の相互関係を明らかにした。局所的要因としては、夏季水温、流速、底質に占める砂礫の割合、アメリカザリガニ密度を考慮した。景観的要因としては、各谷津の集水域に占める雨水浸透面の割合を考慮した。集水域は、ArcGIS 10.7のArc Hydro Toolsを用いて、国土地理院が提供する5 mメッシュの標高データに基づき算出した。推定された集水域は、2万5千分の1地形図（2015年）に基づいて、浸透面（森林、水田、畑、公園）と不浸透面（宅地、市街地、道路、調整池）に分類し、各調査地の集水域に占める浸透面の割合を算出した。解析には共分散構造分析の一種であるパス解析を適用し、各種の密度に影響を与える局所要因、局所要因に影響を与える景観要因の相互関係を分析した。

土地利用、気候、地形の変数を用いてハビタットモデルを構築し、印旛沼流域における湧水環境の指標種であるホトケドジョウ、サワガニ、オニヤンマ幼虫の生息ポテンシャルを明らかにした。ハビタットモデルには、生物の在データのみを用いるMaxEnt (Phillips et al. 2006) と、在不在データを用いるロジスティック回帰モデルの二つを用いた。MaxEntでは、500 mメッシュでの生息確率を推定した。ロジスティック回帰モデルでは、谷津の源頭部（ポイント）での生息確率を推定した。ハビタットモデルに用いる分布情報は、現地調査（38地点）と環境DNA（81地点）により取得した。環境DNAによる調査は、種特異的プライマーを用いる方法と、ユニバーサルプライマーで対象種を検出する方法の2通りで行った。予備調査で各種の検出精度を確認したところ、ホトケドジョウのみ検出精度が良好であったため、環境DNAの結果はホトケドジョウのハビタットモデルにのみ用いることとした。

3.1.2. 気候変動影響と適応策の評価

湧水環境の指標種であるホトケドジョウ、サワガニ、オニヤンマ幼虫を対象に、適応策を講じることで、気候変動による絶滅リスクの増加に対する緩和がみられるかを検討した。絶滅リスクを低減させる適応策として土地利用の変化の効果に注目した。適応策の評価は生息ポテンシャルの変化として分析した。ハビタットモデルによるポテンシャルマップの作成と同じ手法を用い、各種の分布情報と気候、土地利用、地形の環境要因をもとに500mメッシュでの生息確率をMaxEntモデルによって推定した。将来気候として、2つの気候シナリオ（RCP2.6、RCP8.5）を採用した。これらの気候シナリオの下で、現在、2040年、2100年の500mメッシュでの生息確率を推定した。まず、閾値以上の生息確率を持つメッシュを生息適地とみなし、現在及び2つの将来気候の下での生息適地面積を比較した。次に、土地利用の変化による絶滅リスク低減の適応策を「浸透面面積の変化」とし、適応策として浸透面面積を現在より10%増加させた場合、50%増加させた場合、現在よりも浸透面面積が多かった1976年頃の水準とした場合の3つの条件で推定した。

現在の土地利用は、「国土数値情報の土地利用細分メッシュデータ（国土交通省）」の平成28年度のデータから計算した。浸透面面積を10%または50%増加させる場合には、500mメッシュ内の非浸透面面積を求め、非浸透面面積の10%または50%の面積を現在の浸透面面積に合計するという方法で増加させた。1976年頃の浸透面面積は「国土数値情報の土地利用細分メッシュデータ（国土交通省）」の昭和51年度のデータを用いた。各種に対して、各気候シナリオと適応策（土地利用変化）の組み合わせごとにMaxEntモデルを10回試行し、生息確率及び生息適地面積を求めた。

3.2. 谷津の水質浄化機能、湿地化による機能向上の評価

湿地化され管理、維持されている谷津において、湿地へ流入する水（湿地を経由しなければそのまま河川等へ流出する水）と、湿地を経由して湿地から流出する水を採水して水質を調べることで水質浄化機能の評価を試みた。

印旛沼流域において、湿地植生のタイプが異なる18の谷津を対象に、湧水および湿地からの排水の水質、湿地の植生、それらに影響する要因としての水温、水深などの環境条件を調査し、相互関係を多変量解析により検討した。その結果を踏まえて有効性が示唆された生態系管理の方策として、谷津の谷底

部の耕作放棄地において、人工排水路を流れている水を塞ぎ上げ、谷底面の広範囲を湿潤化させる取り組み（「耕作放棄地の湿地化」）を千葉県富里市内の調査地で実施し、その事前・事後における動植物相と水質を比較した。

谷津へ流れ込む水は平水時は富栄養の湧水が中心であるが、降雨時には表流水を含む濁水が流れ込むため、降水時を含めた調査を行った。既存研究で平水時に脱窒効果による硝酸イオン濃度の低下が認められているが、今回は水質調査項目として窒素だけでなく、有機物の指標の一つである化学的酸素要求量（COD）、リン、SS（懸濁物質質量）及びVSS（懸濁物質中の有機物の含有量の目安）についても行い、あわせて流量を測定することで負荷量としてどのくらいの削減効果があるか検討した。採水は、湿地化した谷津の流入水と流出水において、一定時間ごとに自動サンプリングできる採水器を用いて行い、サンプリングした水を分析することで各水質項目の濃度を測定した。流量は直角三角堰と水位計を設置し、流入流量と流出流量を算出した。得られた濃度と流量の結果から負荷量を算出した。

3.3. 流域スケールでのEbAの検討と行政計画への反映

本サブテーマで明らかになった谷津が有する生物多様性保全および水質管理における機能に関する結果、および他サブテーマの結果を踏まえ、行政機関と情報共有を進め、気候変動適応に資する行政計画（主に流域水循環健全化計画および湖沼水質保全計画）の立案と、地域気候変動適応センターの設立準備に貢献した。

4. 結果及び考察

4.1. 生物多様性

4.1.1. 生物の分布に影響する要因の解明とポテンシャルマップの作成

サワガニとオニヤンマ幼虫は同所的に見られる傾向にあったものの、アメリカザリガニが分布する地点の多くでは、これら2種が少ない傾向であった（図-2.1）。しかしパス解析の結果では、サワガニとオニヤンマ幼虫のCPUEに与えるアメリカザリガニの直接的な影響は比較的小さいことが分かった（パス係数はそれぞれ0.017と-0.239、いずれも $P > 0.05$ ；図-2.2）。サワガニの密度が高い場所は、底質に占める砂礫の割合が高い場所であり、砂礫割合の高い場所は、流速の速い場所であった。流速の速い場所は、集水域に占める浸透面の割合が高い場所であった。一方でオニヤンマ幼虫の密度が高い場所は、夏季水温が低い場所であり、夏季水温が低い場所は、集水域に占める浸透面の割合が高い場所であった（図-2.2）。このように、同じ湧水湿地周辺に生息する種間でも、密度に影響する要因の作用メカニズムが異なることが分かった。同時に、集水域に雨水浸透面を多く維持することが、両種の生息に正の効果であることが分かった。

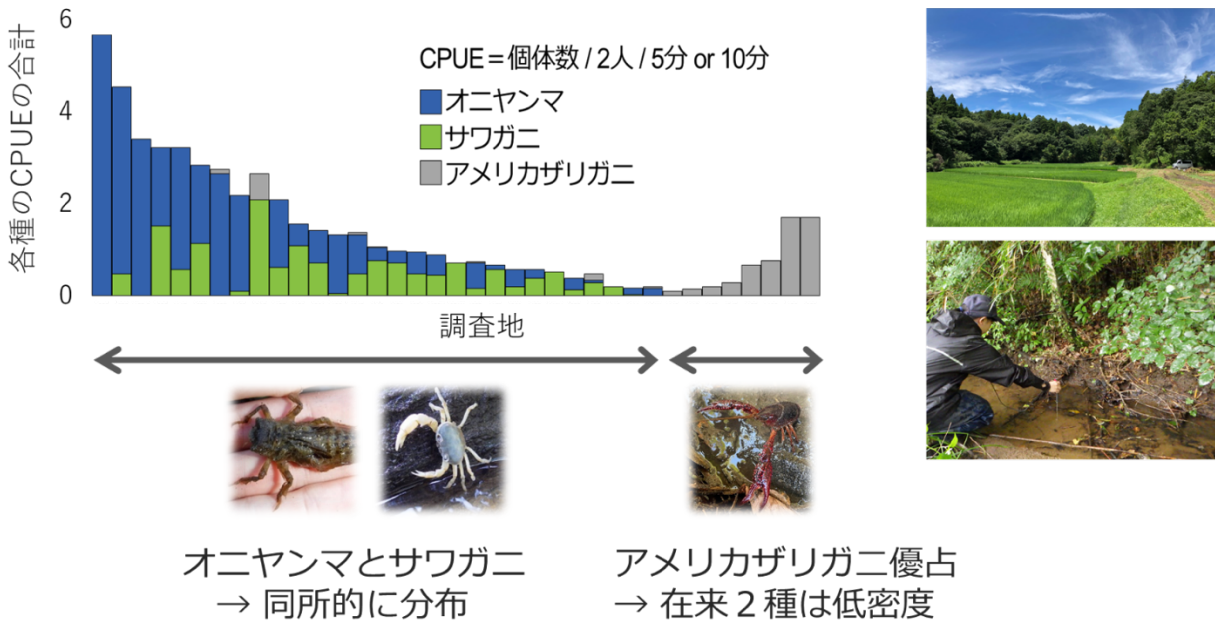


図-2.1. 各調査地点 (n = 37) におけるサワガニ、オニヤンマ幼虫、アメリカザリガニの単位努力あたりの捕獲量 (CPUE) の傾向。CPUEは1人で1分間に捕獲された個体数として算出した。調査地点は、左からサワガニとオニヤンマ幼虫の合計CPUEが多い順、次いでアメリカザリガニのCPUEの少ない順で示した (アメリカザリガニがサワガニまたはオニヤンマ幼虫と同所的に発見された場合を除く)。

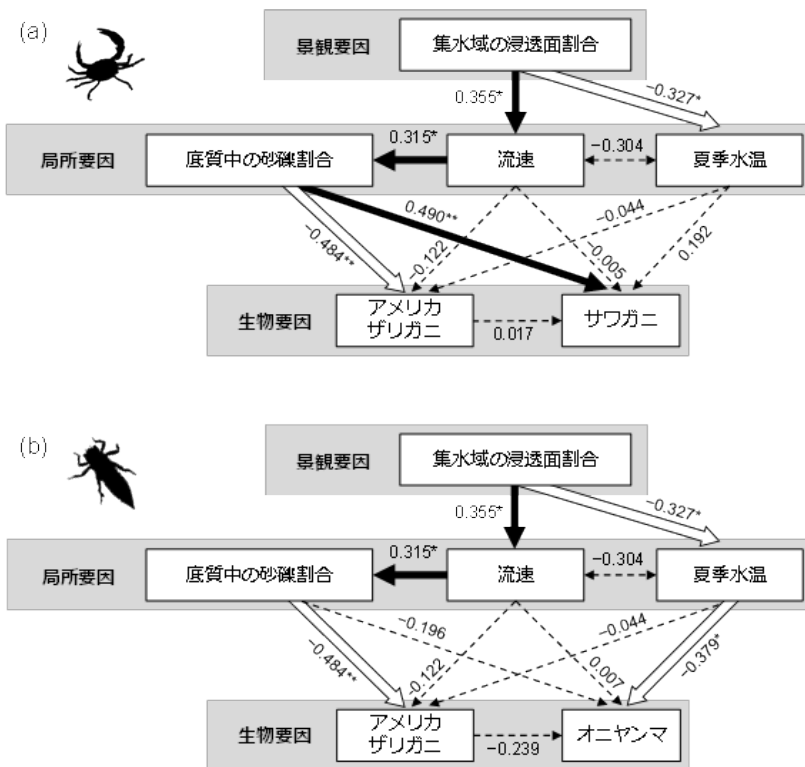


図-2.2. パス解析によるサワガニ(a)とオニヤンマ幼虫(b)の密度に影響を与える要因の推定。数字はパス係数 (標準化偏回帰係数)、アスタリスクは効果の有意性を示す (**P < 0.01; *P < 0.05)。実線矢印、枠線矢印、破線矢印は、それぞれ正、負、有意でない効果を示す。“生物要因”は、各種の密度を示す。

土地利用の変数である「浸透面割合」を含めたモデルでホトケドジョウ、サワガニ、オニヤンマ幼虫を解析した結果、浸透面が高いほど生息確率が高い推定となった(図-2.3)。気候の変数もモデルに寄与しており、夏季の気温が低いほど生息確率が高い推定となった。また、傾斜といった地形に関する変数もモデルに寄与していた。これらのモデルを用いて、各種の印旛沼流域での生息ポテンシャルをマップ化することができた(図-0.4)。また、生息ポテンシャルの傾向は、流入河川ごとに異なる傾向であることも分かった。このようなマップは、保全地の検討に活用することが期待される。

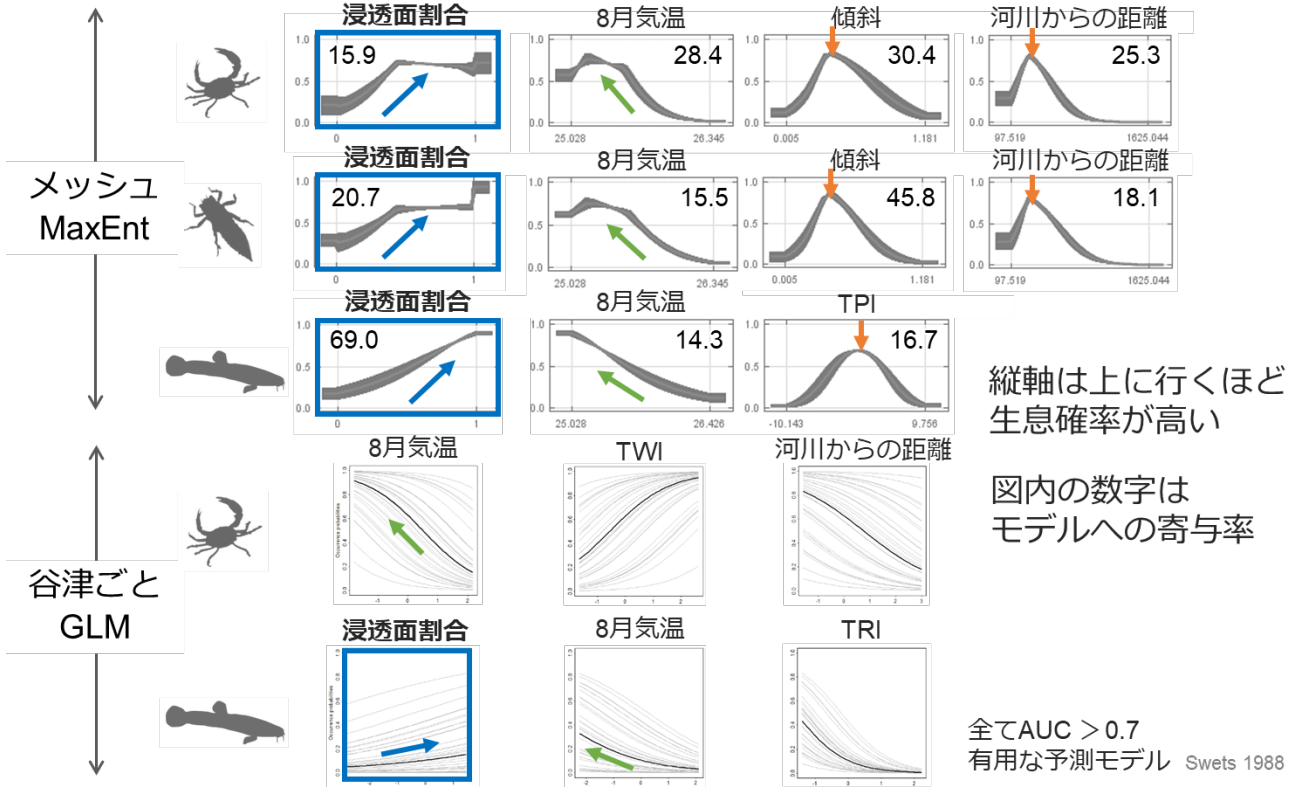


図-2.3. MaxEntのハビタットモデルにおけるホトケドジョウ(a)、サワガニ(b)、オニヤンマ幼虫(c)の各変数の応答曲線。対象とする変数のみを使用して作成されたモデルでの応答を示すもの。横軸は各変数の値の大小、縦軸は生息確率を示す。各図内の数字はモデルへの寄与率を示す。

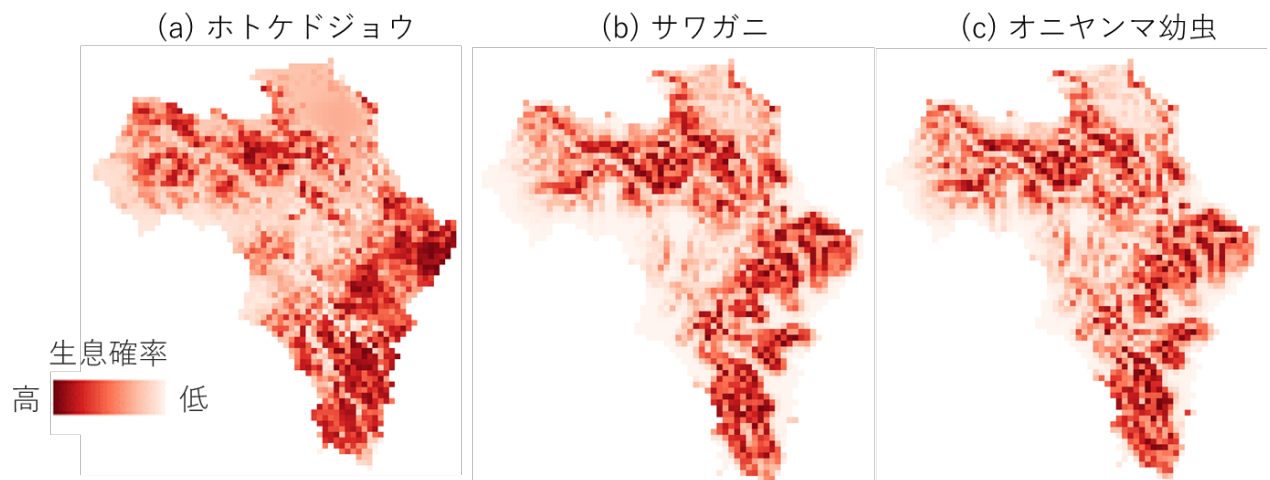


図-0.4. MaxEntで推定したホトケドジョウ(a)、サワガニ(b)、オニヤンマ幼虫(c)の印旛沼流域における生息ポテンシャル。ポテンシャルマップは赤色であるほど生息確率が高いことを示す。メッシュサイズは500 m。

4.1.2. 気候変動影響と適応策の評価

サワガニとオニヤンマ幼虫、ホトケドジョウのすべての種において、土地利用が現状のままの場合では、どの気候シナリオの下でも流域全体の生息確率の低下が見られた。浸透面を増加させたどの条件の場合でも、サワガニとオニヤンマ幼虫では将来気候の顕著な気温上昇では流域全体での生息確率が減少し、生息適地面積が著しく減少した（図-2.4）。これら2種では気温上昇の影響が強く、土地利用変化による適応策は難しいと考えられる。一方、ホトケドジョウでは、浸透面を増加させた場合には将来気候の下で流域全体の生息確率を維持できたり、生息適地面積を現状よりも増加させたりする場合がみられた（図-2.5）。つまり、ホトケドジョウでは浸透面の増加による気候変動による絶滅リスクの軽減が可能であると考えられる。ただし、どの種においても気候シナリオRCP8.5の下での2100年の予測結果では、どの適応策でも現在の生息適地面積よりも減少し、適応策による絶滅リスクの軽減は非常に難しい。

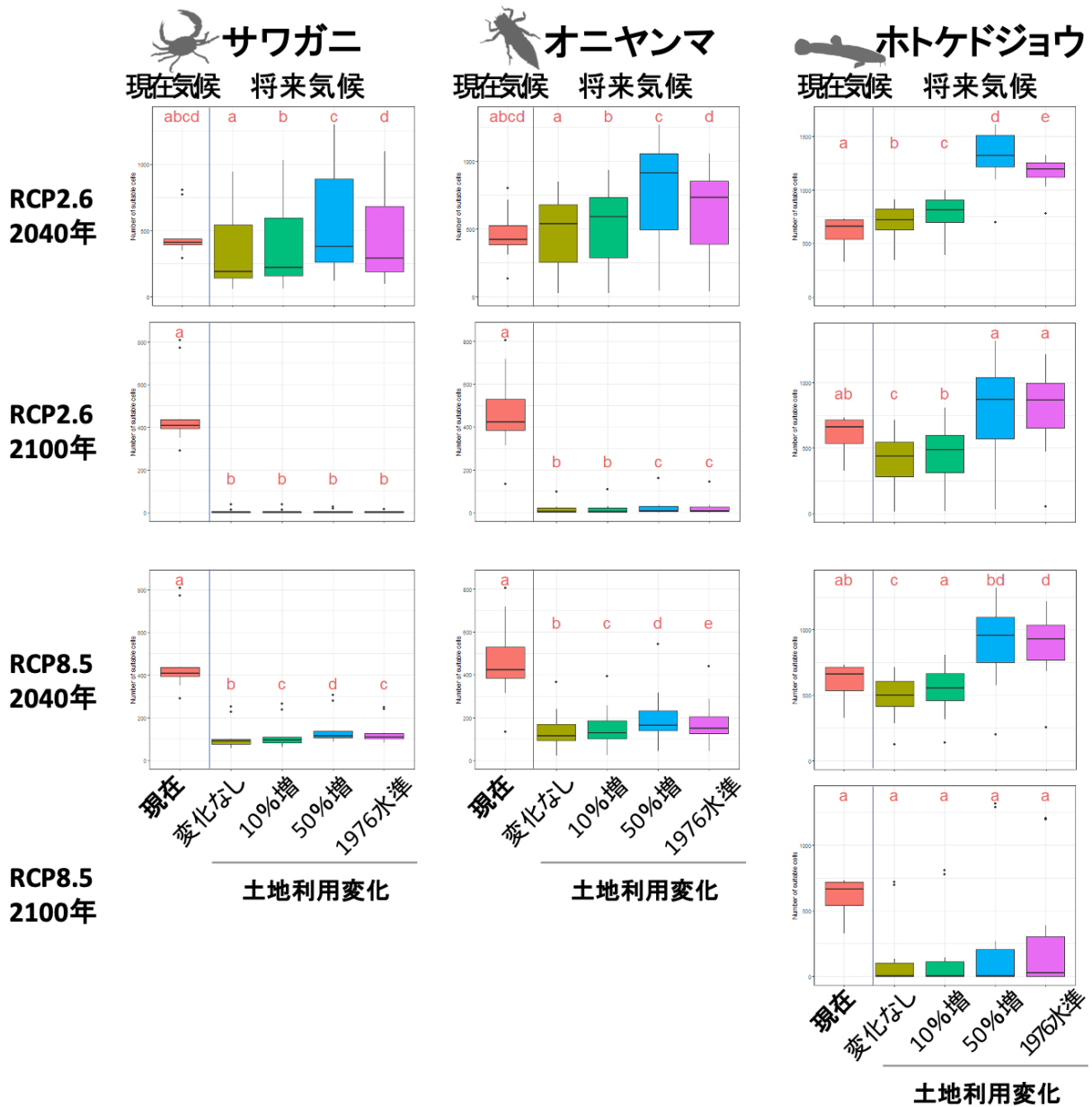


図-2.4. サワガニ、オニヤンマ幼虫、ホトケドジョウの生息適地面積の変化。気候シナリオ（RCP2.6、RCP8.5での2040年、2100年の予測）と適応策（土地利用変化）の組み合わせごとにMaxEntモデルを10回試行した時の結果を示す。バーの上にあるアルファベットが同じもの間では生息適地面積に有意な違いはないことを示す。

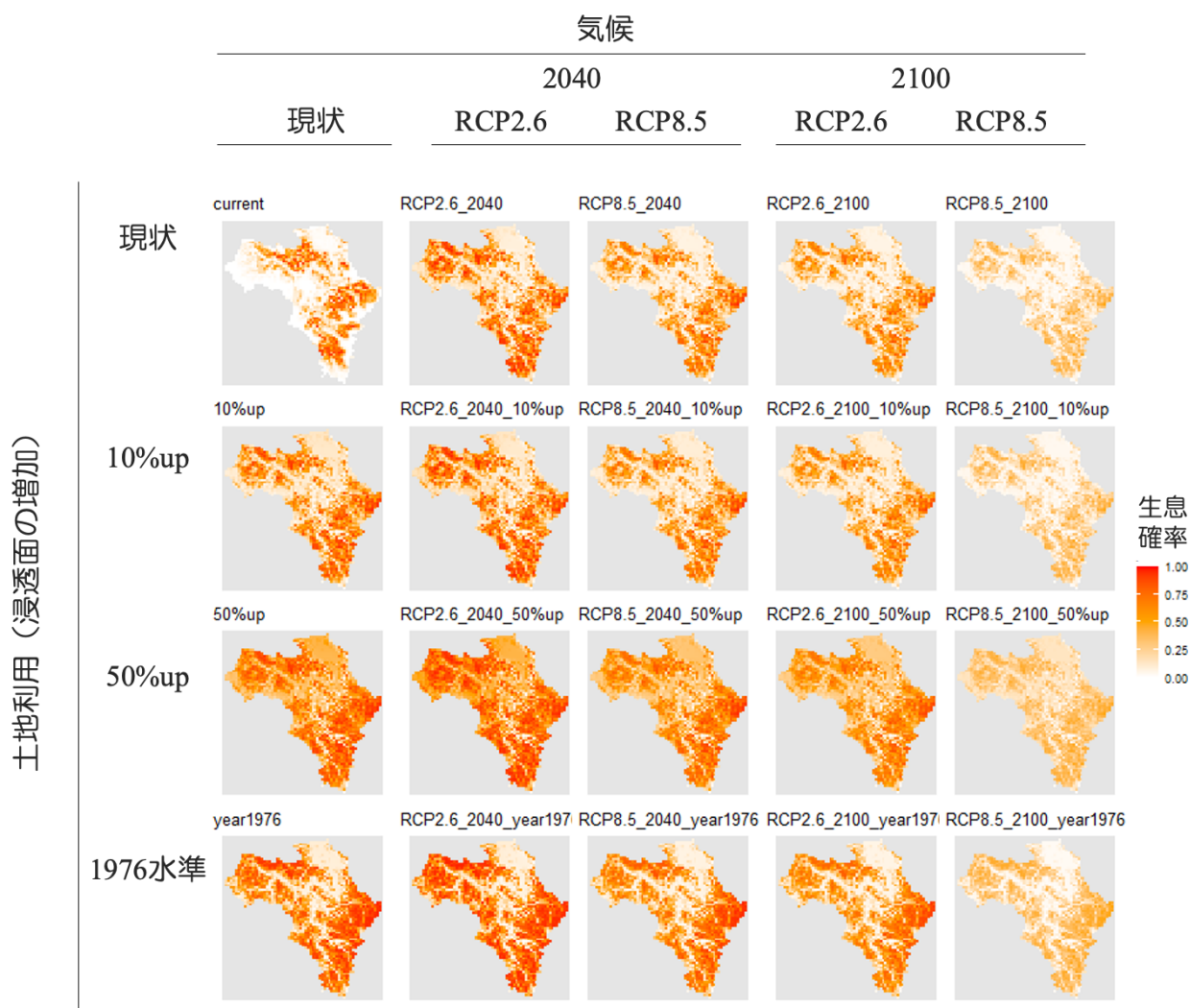


図-2.5. 将来気候及び適応策による印旛沼流域におけるホトケドジョウの生息確率の推定。メッシュサイズは500m。赤色であるほど生息確率が高いことを示す。

4.2. 谷津の水質浄化機能、湿地化による機能向上の評価

湧水と湿地の排水の両方の水質を分析した18地点中のうち、12地点で、湿地を経由することによる硝酸イオン濃度の低下が認められた。湿地の生物へのハビタット提供機能（湿生植物の優占度と種数で評価）と水質浄化機能について、環境要因との関係を主成分分析した結果、いずれも湧水量が豊富で、湿地内の水深が深い場所で機能が高いことが示唆された（図-2.6）。湿地内の水深は湧水量のみによって決まるのではなく、湧水が豊富でも、水が人工排水路に流出している場合には水深は浅くなることが示唆された。これにより、人工排水路を塞ぎ上げて湿地を冠水させることが、水質浄化や生物多様性保全につながる湿地生態系管理の選択肢になることが示唆された。

千葉県富里市内において、市民との連携により、人工排水路を土嚢で塞ぎ、水を耕作放棄地に引き込むとともに、耕作放棄地の畔を補修し、湿地化する作業（生態系管理）を実施した。湿地化した場所は、事業を実施する前は、乾燥地を好む侵略的外来植物であるセイタカアワダチソウが優占し、表層水は認められなかった。事業により、表面積約900m²、水深約3～56 cmの湿地が成立した。この湿地では、池の内部で水温の上昇と硝酸イオン濃度の低下が見られた（図-0.5）。また、湿地再生前に記録された種は24種だったが、事後には60種が記録された。また事後に新たに記録された種には、ミルフラスコモ、ニッポンフラスコモなど環境省レッドリストで絶滅危惧I類とされる種も含まれていた。また14科27分類群の水生昆虫も記録された。以上から、耕作放棄地を湿地化することにより、水質浄化、生物多様性保全に寄与することが検証された。

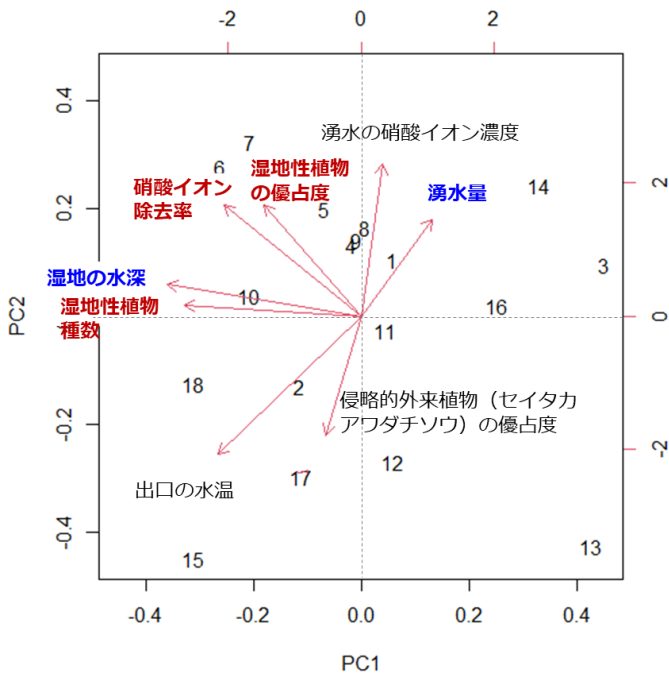


図-2.6. 谷津の湿地が有する生態系機能（水質浄化：硝酸イオン除去率、ハビタット提供機能：湿地性植物の優占度・湿地性植物種数）と環境要因の関係の主成分分析（PCA）

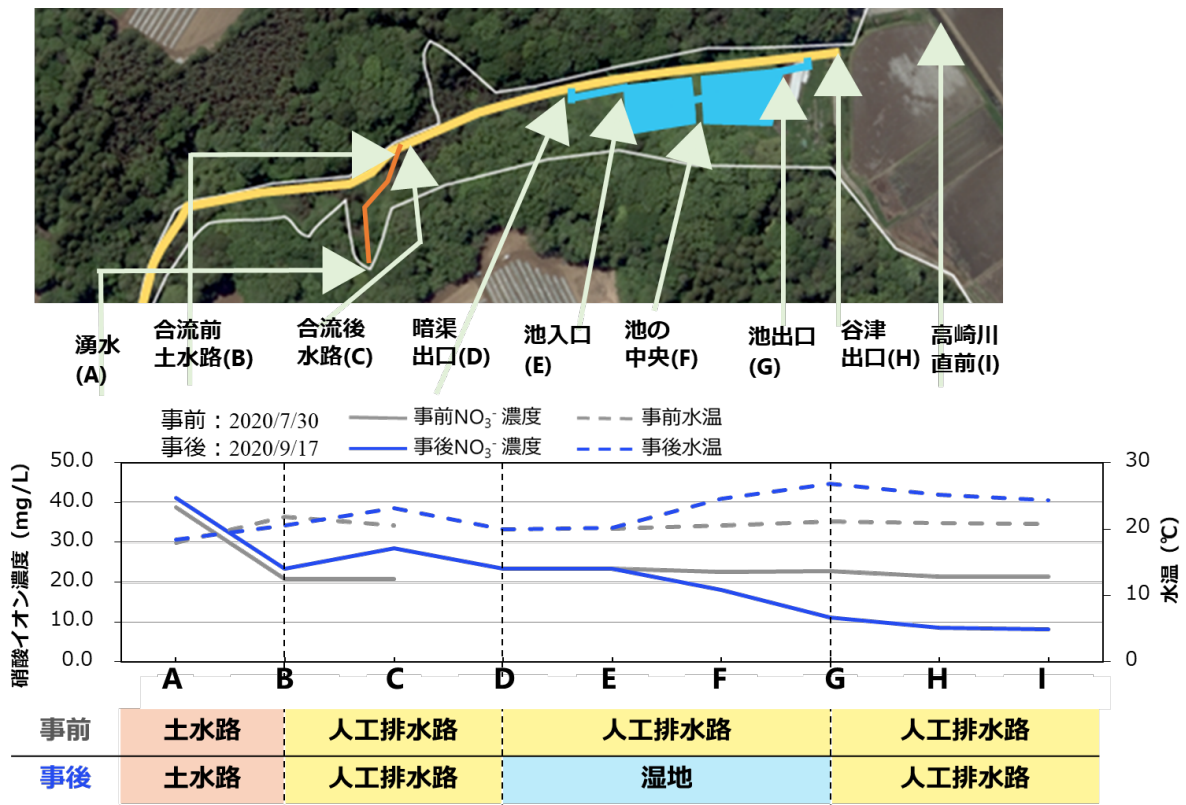


図-0.5. 人工排水路から排水されていた湧水起源の水を、湿地面に引き込む生態系管理の効果。事前（灰色）と事後（青色）の、各地点の硝酸イオン濃度（実践）と水温（点線）を示す。

短時間降雨（図-2.7）と少雨長雨（図-2.8）の調査事例では、いずれも降雨開始後、流入水の流量が増加し、遅れて流出水の流量が増加した。短時間降雨では、流入水が流量増加の鋭利なピークを示すのに対し、流出水の流量増加は緩やかであった。

濃度変化は水質項目によって異なっていた。COD及びSSの流入水濃度は、降雨直後に上昇し、雨が止

んだ後に再び降雨があると再度上昇した。一方、流出水濃度の変化は少なかった。全窒素（T-N）及び硝酸態窒素（NO₃-N）は、流入水、流出水ともに濃度変化は緩やかであったが、短時間降雨では降雨により平水時よりも濃度が低下した。COD、SS、T-N及びNO₃-Nは平水時、降雨時ともに湿地を通過することにより、流入水濃度よりも流出水濃度が低下していた。一方、全リン（T-P）及びリン酸態リン（PO₄-P）は、流入水濃度が上昇した後、遅れて流出水濃度にも上昇が見られた。また、流出水濃度が流入水濃度を上回ることがあり、その傾向は少雨長雨時よりも短時間降雨の場合に顕著であった。

また、COD、T-N、NO₃-N、T-Pの負荷量は、平水時、降雨時ともに流入よりも流出の方が少なく、湿地を通過することにより負荷量が削減されていた。一方、PO₄-Pは平水時や少雨長雨の場合には負荷量が削減されていたが、短時間降雨の場合には流出負荷量が流入負荷量を上回っていた。

湿地管理された谷津は、平水時及び降雨時の流出負荷量の抑制に活用できる可能性が示唆された。一方で、PO₄-Pのように降雨によっては負荷量が増加するケースもあることから、湿地管理等には注意を要することが明らかとなった。

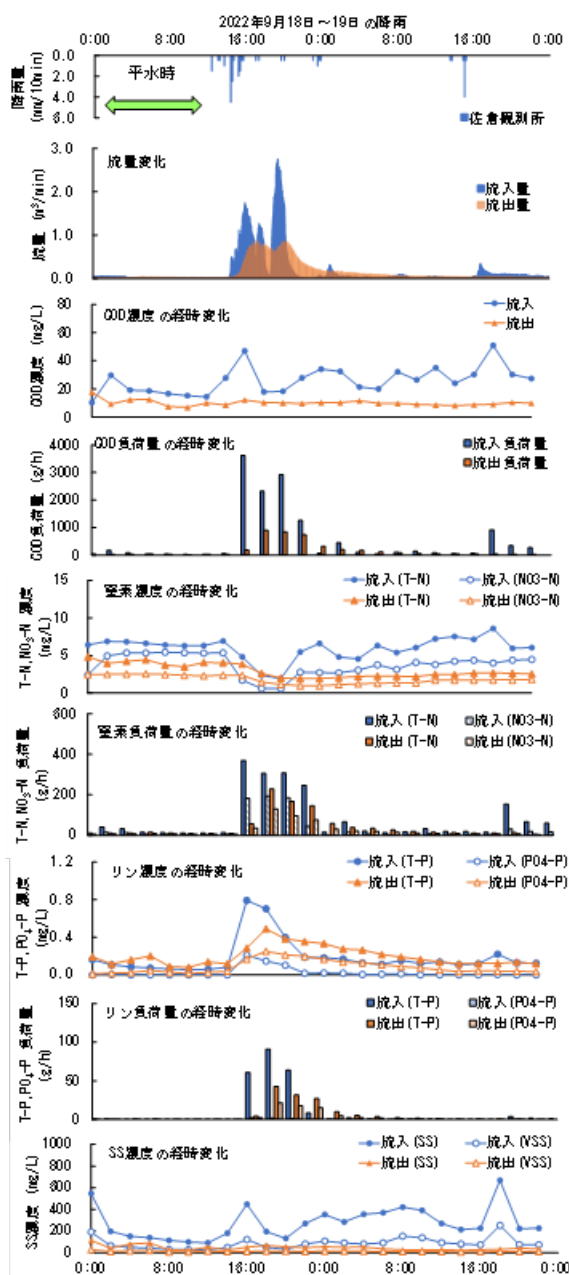


図-2.7. 短時間降雨の調査例

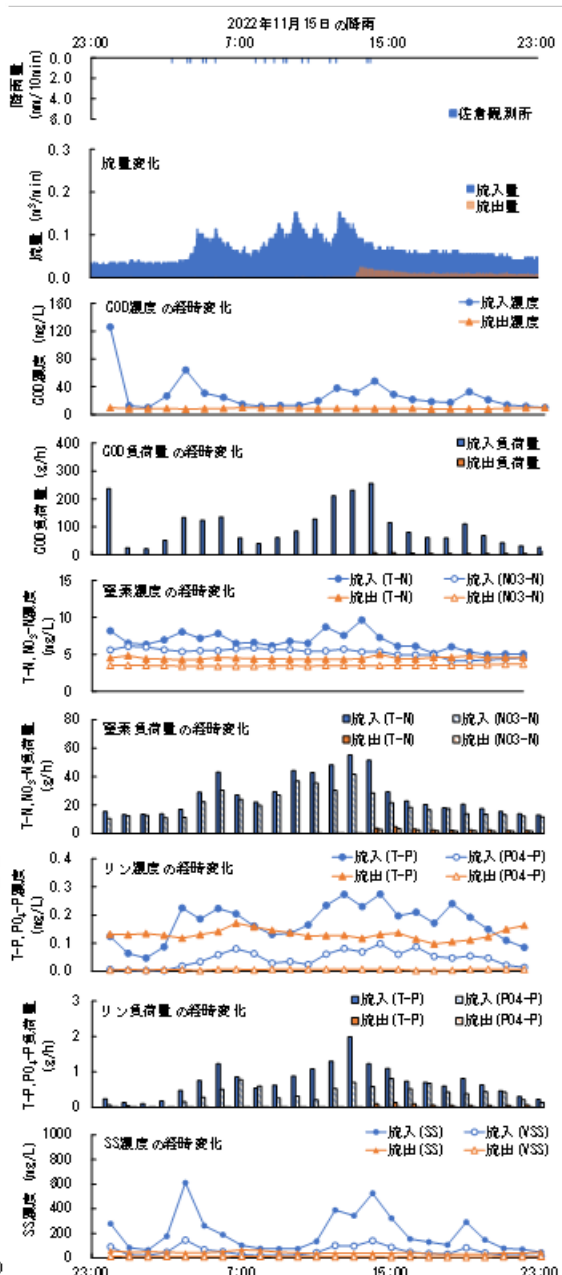


図-2.8. 少雨長雨の調査例

4.3. 流域スケールでのEbAの検討と行政計画への反映

本サブテーマおよび他サブテーマの成果を総合し、気候変動適応の考え方・アプローチ、谷津の湿地が有する生物多様性保全、治水、水質浄化の機能などについての情報を、以下の機会や個別の意見交換の機会を通して、千葉県庁ならびに印旛沼流域の基礎自治体との共有を進めた。

- ・印旛沼流域水循環健全化会議での話題提供
- ・「水辺環境の保全・活用・連携」（環境省Water Project 2021年度第4回 グッドプラクティス塾、2022年3月、オンライン）
- ・「自然をインフラとして活かす考え方と技術」（白井環境フォーラム、2022年3月、白井市役所）
- ・「水質管理におけるグリーンインフラの活用について」（印旛沼水質保全協議会 手賀沼水環境保全協議会勉強会、2021年3月、オンライン）
- ・「流域治水と環境印旛沼流域での検討と提案」、水資源機構環境学習会（独立行政法人水資源機構 千葉用水総合管理所主催、2022年1月、千葉県八千代市）

これらの結果、湖沼水質保全特別措置法に基づく印旛沼に係る湖沼水質保全計画（第8期）（図-2.9）および水循環基本法に基づく印旛沼流域水循環健全化計画・第3期行動計画（図-2.10）に、本プロジェクトの成果を踏まえ、谷津などの里山の自然をグリーンインフラとして活用する方針が明記された。

(イ) グリーンインフラの活用による気候変動に適応した水質浄化対策

今後予想される気候変動では、降水パターンの変化による流入汚濁負荷量の増加や水温上昇など、植物プランクトン増殖による水質悪化が懸念されることから、栄養塩類の除去や流出抑制など、多面的な機能を有する谷津をグリーンインフラ*として活用した水質浄化対策を検討します。

※ 米国で発案された社会資本整備手法で、自然環境が有する多様な機能をインフラ整備に活用するという考え方を基本としており、近年欧米を中心に取組が進められています。

図表 2-5 グリーンインフラ活用のイメージ



※出典：北総地域における里山グリーンインフラの手引き【谷津編】

図-2.9. 湖沼水質保全特別措置法に基づく印旛沼に係る湖沼水質保全計画（第8期）に反映された谷津・里山の活用に関する説明（同資料から転載）。

20. 谷津及び里山の保全・活用

推進対策

印旛沼および流域河川の上流に位置する谷津や里山は、多様な生物の貴重な生息・生育空間の場としてだけでなく、大雨時の流出軽減、汚濁負荷の流出抑制、印旛沼流域ならではの文化の継承や景観の保全、気象緩和、レクリエーションの場の提供など、多面的な役割を果たしています。

このような流域の貴重な谷津・里山を、あらゆる関係者の連携により保全・活用を図るための取組を推進します。

<主な取組>

● 自然地（谷津等）の保全・再生（グリーンインフラ機能の保全・向上）

谷津等の自然地を保全・再生することにより、流出抑制（治水）、水質浄化（環境保全）、湿地性生物の保全・再生（生物多様性保全）等の自然地が有する多様な機能を活用した「グリーンインフラ」の取組を推進します。

● 法的措置等による保全

「千葉県里山の保全、整備及び活用の促進に関する条例（千葉県里山条例）」や、市町の里山保全計画等に基づき、谷津・里山の保全を進めます。

● 間伐・枝打ち・下草刈り等森林の維持管理

森林整備事業等を活用し、間伐や枝打ち、下草刈りなどを実施していきます。

● 環境学習やレクリエーションの場としての活用

市民・市民団体や大学等が連携・協働し、谷津・里山を自然体験や農体験、環境学習、散歩等のレクリエーションの場として活用していくと同時に、里山の歴史や文化の継承に努めます。

● 担い手の育成

里山保全の担い手確保に向けて、里山に関する知識や技術を養う講座や、里山保全活動団体等の交流の場づくりに取り組みます。

<取組に関連する主体>

対策	市民・学校 市民団体	農業・漁業・観 光等沼利用者	企業	流城市町	千葉県	国・水資源機構	調査研究機関
自然地（谷津等）の保全・再生	●	●	●	●	●		●
法的措置等による保全				●	●		
間伐・枝打ち・下草刈り等 森林の維持管理	●	●	●	●	●		
環境学習やレクリエーションの場としての活用	●	●	●	●	●		●
担い手の育成	●			●	●		

図-2.10. 印旛沼流域水循環健全化計画第3期行動計画に反映された谷津・里山の活用に関する説明（同資料から転載）。

5. 研究目標の達成状況

目標を上回る成果をあげた。湧水選好種の生息地の維持における気候変動適応策として、集水域の雨水浸透の促進の重要性を示すとともに、気候変動に伴うリスク上昇が指摘されている水害と水質悪化の問題に対し、谷津の湿地の活用という選択肢を示し、県および基礎自治体と共有した。その結果、印旛沼流域水循環健全化計画第3期行動計画および印旛沼に係る湖沼水質保全計画（第8期）に「谷津をグリーンインフラとして活用する」選択肢が明記された。同時に、市民団体や企業との連携のもと、生物多様性保全と水害リスク軽減や栄養塩負荷軽減の点で気候変動適応にも貢献する「谷津の耕作放棄水田の湿地化」の取組みが進行し、その効果の科学的検証も実現した。

このように、計画していた「科学研究および計画立案への貢献」という範囲を超え、実践と検証まで

実施できたため、「目標を上回る成果」と判断した。

6. 引用文献

- 1) Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE (2006) Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190:231-259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>

II. 成果の詳細

II-3 河川・流域管理による治水へのコベネフィット評価

公益財団法人リバーフロント研究所

主席研究員

中村 圭吾

国立大学法人山梨大学

大学院総合研究部工学域土木環境工学専攻

大槻 順朗

国立研究開発法人土木研究所

流域水環境研究グループ流域生態チーム

村岡 敬子

田和 康太 (2020～2021年度)

[要旨]

耕作放棄地の自然再生による氾濫抑制効果を評価する手法を確立し、気候変動適応策とのコベネフィットを効果的に発揮する対象地の抽出方法を検討した。1次元的水路を明示的に扱う平面2次元洪水氾濫モデルを対象地（印旛沼流入河川である高崎川流域）に適用し、現地調査結果に基づいてモデルを調整し再現性を検証した。構築したモデルを用い、水路の無効化を湿地化に見立てて洪水氾濫計算を実施し、対策の有無による降雨確率規模ごとの浸水状況の差異を、被害関数を用いて推定被害額に換算し指標化した。指標値をもとに対策の最適組み合わせ手法を検討した。得られた治水効果からの対策優先地と水環境からの優先地を空間的に整理し、自然再生が効果的に機能する対策地を抽出し空間的な特性を検討した。

1. 研究開発目的

気候変動の進行に伴い大雨が増加し、災害の激甚化・頻発化が進行している。これに対し、河川区域だけの対策ではなく、流域の土地利用を含めて対応する流域治水の議論・対策が進んでいる。本サブテーマでは、湖沼・河川流域の湿地を自然環境分野での気候変動適応策に活用する状況を想定し、これら湿地の活用が水害リスク軽減にもたらす効果を定量的に明らかにすることを目的とする。

2. 研究目標

水田・水路・河川の連携活用や、耕作放棄水田等での貯留による氾濫抑制効果を評価する手法を確立する。それを活用し、サブテーマ2と連携しながら、流域生態系の気候変動適応策が治水を中心とする河川管理にもたらすベネフィットを明らかにし、自然環境における適応と河川管理とのコベネフィットが生じやすい条件を示す。

3. 研究開発内容

サブテーマ3では、水路を明示的に扱う流域氾濫モデルである（RRIモデル）を印旛沼への流入河川である高崎川の流域に適用し、水路および水文観測結果に基づいて調整し再現性を確認した。構築したモデルを用い、谷津レベルの小流域を単位とした湿地再生シナリオに基づく治水効果の評価を行い、単独および組み合わせでの対策適地の抽出方法を検討した。得られた結果とサブテーマ2で得られた水環境項目による順位付けを考慮した対策適地抽出の考え方を整理した。

3.1 洪水流を再現可能な洪水氾濫モデルの構築

高崎川流域では耕作放棄された谷津田においても圃場整備によって敷設された排水路が機能し流出を加速させていることが想定された。そのため、湿地再生等の生態系保全策がもたらす効果を適切に表現するため、平面2次元氾濫流モデルに1次元の水路流モデルが統合された洪水氾濫モデルを対象地に適用した。流域の水路および小河川の位置、寸法の現地調査、検証データとする水文観測を実施し、これ

をもとにモデルを調整し再現性を確認した。

3.1.1 対象流域の現状

湿地は洪水緩和や水質浄化など多目的機能を持つ代表的なグリーンインフラの一つとなっており¹⁾、特にモンスーン地域の湿地は人間によって水田に開発。重要な生産の場となるとともに、洪水緩和機能を有することが知られている²⁾。本研究で対象とする印旛沼流域は、「谷津」と呼ばれる細長の谷地形が発達し、元来湿地的環境であったことから早くから水田として開発されてきた。伝統的な水田はいわゆる湿田の形式であり、崖錐から得られる湧水を田面から田面へかけ流すスタイルの水利用であったため、排水路となる小川も小規模であった。しかし、1970年代頃から食料需要の増大や生産性向上を目的として谷津田においても圃場整備による乾田化が推し進められ、浅い小川は深い柵渠水路に置き換えられた。その後、食料輸入による生産調整と人口減少により、開発された農地の多くが耕作放棄されている³⁾。流域における水路の整備は、流域の流出速度を増大させることで、洪水のピーク流量の増加をもたらす⁴⁻⁵⁾が、耕作放棄地の水路は長年放置されているにもかかわらず、土砂や植生によって閉塞しておらず排水機能を喪失していない（図-3.1）。



図-3.1. 耕作放棄地に残存する水路

3.1.2 対象流域および現地調査

・対象流域

印旛沼に流入する河川の一つである高崎川（流域面積：85.71km²）を対象とする（図-3.2）。高崎川流域では谷津地形が多く見られ、台地面は畑地、谷底面是水田として利用されているが、谷底面の末端部は耕作放棄された水田も少なくない。流域の北西部は佐倉市、南部は八街市の中心市街地があり、住宅用地や事業用地として市街化されている箇所も多くある。特に北西部の佐倉市街地は流域の下流部（印旛沼への流入部）と重なるため、洪水が発生すると浸水被害が甚大となる恐れがある。もとより印旛沼流域では洪水被害が頻発しており、江戸時代から昭和にかけて掘割工事や開発事業を行ってきた。昭和期に入ると印旛沼開発事業が着手され、戦後の食糧難の解決を目的として、沼の干拓や灌漑事業がなされた。安定した食糧供給ができるようになると、治水対策に重点が置かれるようになり、排水機場や捷水路の建設が行われ、1968年に事業は完遂した。しかしながら、洪水被害は近年でも数度発生しており、高崎川流域では1996年9月の台風17号や2019年10月の房総豪雨で佐倉市街地が浸水被害に見舞われた。

・水路の位置および谷津底部の土地利用判読

国土地理院地図・空中写真閲覧サービスおよびGoogleMapから閲覧できる航空写真および衛星写真から、1947、1975、1986、1990年および2019年の5時期における高崎川流域の開削水路の分布を調査した。水路の有無は写真から判読した。合わせて、谷津底部における土地利用を判読し、市街地、伝統的水田、圃場整備水田、放棄地に分類した。

・水路の寸法

対象流域の合計136点（図-3.3）において河川・水路断面の調査を実施し、水路幅、水面幅、高さ（底面から地盤面）、水路の形式（柵渠、土水路）を記録した。調査データをもとに水路の幾何的特性を評価するため、調査地点ごとに水路幅および水路深さと流域面積との関係

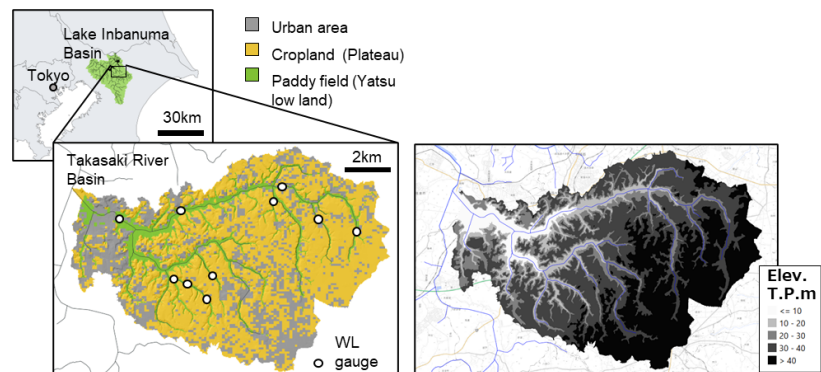


図-3.2. 河川・水路の幅の調査地点図

性を整理し、自然河川との特性の差異を評価した。

・水文観測

高崎川に加えて神崎川、桑納川でそれぞれ11、5、3地点において水位連続観測を実施した。観測地点は、上流域の放棄地や市街地の状態によって選定した。モデルの検証には流量データが必要となるが、中小河川ではほとんど把握されておらず多くが水位観測に留まるため、水位観測に加えてトレイルカメラによる流速観測を実施し洪水流量を算定した。水位と流量の回帰式である水位流量関係式（HQ式）を構築し、水位から流量を算出した。水路調査にあわせて平水流量の観測を実施した。

3.1.2 RRIモデルについて

・モデルの構成

本研究で用いるRainfall-Runoff-Inundation (RRI)モデル⁶⁾は、平面2次元のセルベースの水理モデルで、流域での降雨流出（2次元斜面流）、流域に存在する河道での1次元流れ、2次元氾濫流れを統合して解くことが可能である（図-3.4）。地形高、流向、流下累積セル値（ACC値）を入力値とし、流域面積に水路の幅、深さを対応させることで1次元の河道を表す。ソースが公開され無料で利用できる。国土交通省等でも活用が進みつつある。モデル上において、斜面グリッドで降雨を受け、鉛直浸透をGreen-Amptモデルで考慮し、流出分を拡散波近似の運動方程式のもと追跡する。氾濫流も同じ方程式で処理できるようになっている。河道部の流れは、1次元の開水路流れとして水位差を考慮する拡散波近似で解かれる。河川と斜面では水のやり取りが行われ、やり取りされるボリュームは水位と堤防高の関係性から求められる。

・基礎式

RRIモデルの基礎式は、以下の式(1-3)で示される水深平均された質量バランスと運動量式に基づいて緩やかに変化する非定常流に対して導出されている。

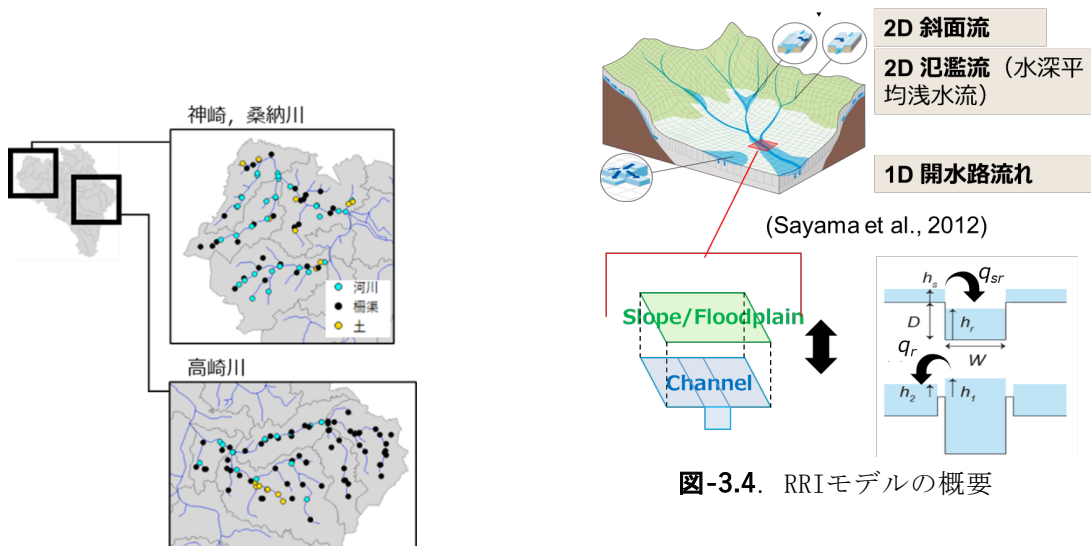


図-3.3. 河川・水路の幅の調査地点図

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = r - f \tag{1}$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial u q_x}{\partial x} + \frac{\partial v q_x}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho_w} \tag{2}$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial u q_y}{\partial x} + \frac{\partial v q_y}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho_w} \tag{3}$$

ここに、

h : 地表面から水の高さ f : 浸透率

u, v	: x, y 方向の流速	H	: 基準点からの水の高さ
q_x, q_y	: x, y 方向の単位幅流量	ρ_w	: 水の密度
r	: 降雨強度	g	: 重力加速度
		τ_x, τ_y	: x, y 方向のせん断力

式(2)、(3)の右辺2項の抵抗則はマンングの式を用いて計算する。

$$\frac{\tau_x}{\rho_w} = \frac{gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad \text{式(4)}$$

$$\frac{\tau_y}{\rho_w} = \frac{gn^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad \text{式(5)}$$

ここに、

n : マンングの粗度係数

拡散波近似では(2)、(3)の左項は慣性項を無視している。さらに、 x 方向と y 方向に分離((2)、(3)式の v, u 項を無視)することで、次式が導出される。

$$q_x = -\frac{1}{n} h^{5/3} \sqrt{\left| \frac{\partial H}{\partial x} \right|} \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) \quad \text{式(6)}$$

$$q_y = -\frac{1}{n} h^{5/3} \sqrt{\left| \frac{\partial H}{\partial y} \right|} \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right) \quad \text{式(7)}$$

* sgn = 符号関数

浸透能 f については、以下のGreen-ampt式(式(8))を用いる。

$$f = k_v \left[1 + \frac{(\phi - \theta_i) S_f}{F} \right] \quad \text{式(8)}$$

ここに、

k_v	: 飽和鉛直透水係数	S_f	: サクシオン
ϕ	: 土壌空隙率	F	: 地表面から浸潤前線面までの距離
θ_i	: 初期含水率		

また、氾濫原水位、河川水位、堤防高、地盤高の関係に応じて、時間ステップごとで氾濫原格子点と河川格子点との間の水交換量を計算している。条件ごとに異なる越流式を適用して氾濫原から河川への単位長流出量(q_{sr})または河川から氾濫原への単位長流出量(q_{rs})を算出し、これに各セルにおける河川の長さ乗じて総交換流量を算出している。

(a)河川の水位が氾濫原の水位より低い場合は、以下の式で q_{sr} を算出する。なお、堤防がある場合でも同様の式を用いて、氾濫原の水が河川に流れ込むようにする。

$$q_{sr} = \mu_1 h_s \sqrt{g h_s} \quad \text{式(9)}$$

ここに、

μ_1	: 定数係数(= $(2/3)^{3/2}$)
h_s	: 氾濫原セル上の水深

(b)河川の水位が氾濫原の水位より高く、河川と氾濫原の水位がともに堤防高より低い場合は氾濫原と河川の間で水のやり取りがないことを想定する。

(c)河川水位が堤防高と氾濫原水位より高い場合は、以下の式で河川から氾濫原への越流量 q_{rs} を算出する。

$$q_{rs} = \begin{cases} \mu_2 h_1 \sqrt{2g h_1} & (h_2/h_1 \leq 2/3) \\ \mu_3 h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} & (h_2/h_1 > 2/3) \end{cases} \quad \text{式(10)}$$

ここに、

μ_2, μ_3	: 定数係数(= 0.35, 0.91)
h_1	: 河川水位と堤防高の差

(d)斜面の水位が堤防高と河川の水位よりも高い場合は、式(10)と同じ式で氾濫原から河川への越流量 q_{sr} を算出する。この場合は h_1 は氾濫原と河川の水位差、 h_2 は河川水位と堤防高の差である。

ここに、

W	: 河川の幅	h_r	: 河川内の水深
-----	--------	-------	----------

D	: 河川の深さ	H_e	: 堤防の高さ
h_s	: 氾濫原セル上の水深	h_1, h_2	: 河川水位及び氾濫原水位と堤防高の差 ($h_1 > h_2$)

また、RRIモデル内では、河道は矩形で表現され、川幅・深さは次式(1)、式(12)で示される流域面積に対するべき乗則で設定することができるようになっている。

$$W = C_W A^{S_W} \tag{式(1)}$$

$$D = C_D A^{S_D} \tag{式(12)}$$

ここに、

C_W, S_W, C_D, S_D : 幾何学パラメータ
 A : 集水域面積 (km²)

3.1.3 パラメータの設定

モデルパラメータとして、地形高、河道粗度、河道ジオメトリ、浸透に関するパラメータである。地形高は、国土地理院がweb上で提供する10m解像度の数値標高データ (DEM) を用いこれをベースとして流域を30mに分割した。調査結果から、グリッドごとの流域面積に応じた水路の幅と深さを与えた。このモデルに対し、河道粗度と浸透に関するパラメータを観測洪水流量ハイドログラフにあうようにキャリブレーションしたフィッティングした。最終的に用いたモデルのパラメータは表-3.1のとおりである。モデルパラメータは後述の洪水流量にフィットするように調整したものが与えられた。その際、現地調査などでデータの得られるものを重視した。

表-3.1. 設定したパラメータ一覧 (* デフォルト値)

* デフォルト値	斜面グリッド(2D)				水路(1D)
	台地面		谷津底部		
	市街地	畑地	市街地	水田	
n: マニングの粗度係数	0.4 *	0.4 *	0.06	0.06	0.025
d_a : 土壌厚 m	1.00 *	1.00 *	1.00 *	1.00 *	
k_a : 飽和水平透水係数 m/s	0	0	0	0	
k_v : 飽和鉛直透水係数m/s	0 (不浸透)	5.56×10^{-7}	0 (不浸透)	5.56×10^{-7}	
S_f : サクシオン	-	0.2088	-	0.2088	
ϕ : 土壌空隙率	-	0.464	-	0.464	

・斜面モデル(2次元モデル)

斜面モデルの標高は10mDEMデータ(数値標高モデル)を空間補間して与えた。粗度パラメータはマンニング式より河道部で0.025、斜面部の台地面で0.4、斜面部の谷津底面で0.06とした。台地面での値は、RRIモデルで初期設定値となっているものである。その値を氾濫原の氾濫計算の粗度としては大きすぎるため、土地利用状況を勘案し0.06に設定している。RRIモデルでは、標高値として与えるデータは一つで、同じメッシュに斜面モデルと河道モデルがあれば、同じ値を共有する。その際、低平地部では標高差が小さく集水網と実際の河道位置がずれやすい。そのため、河道部分のDEMを意図的に掘り下げ、QGISでFill sink処理(落水線に沿って窪地を埋める処理)を行い、流向(DIR)と累積セル数(ACC)データを出力したのち、掘り下げた分だけ河道部のDEMを盛り上げる、という処理を行った。

・河道モデル(1次元モデル)

RRIモデルにおける河道のモデルは、河床高、および河道の位置と河道の寸法(幅、深さ、堤防高)を設定することが必要となる。河道形状は式(11-12)に対応して表-3.2のように与えた。河床高は、2Dモデルの標高値-河道の高さとなる。河道の位置と河道の寸法は一般に面的に調査することは困難であるため、RRIモデルにはそのセルの持つACC値(Accumulation value: DEMに照らしその上流側にあるセルの数。ACC*(セルサイズ)²が流域面積となる)に対応付けた関数を用いて与えられるようになっている。すなわ

ち河道の位置は、河道として設定したい範囲の閾値を設定することで設定し、河道の幅、深さ、堤防高は、ACC値を用いて流域面積に対する指数関数で与える。ACCはQGISなどのGISソフトウェアで自動的に計算することが可能である(QGIS r.watershedなど)。河道の分布については、河道や水路を判読し、その位置で河道が定義されるよう、DEMから計算したACCデータを抽出して与えた。

表-3.2. 河道寸法の設定パラメータ

	設定値	デフォルト値
C_w	2.04	2.5
S_w	0.49	0.4
C_D	1.72	0.1
S_D	0.1	0.4

・浸透に関するパラメータ

浸透パラメータは30m*30mのグリッドに対して、市街化されている場合は「市街地」、市街化されておらず、かつ谷津地形である場合は「水田」、市街化されておらず、かつ谷津地形でない場合は「畑地」として3通りの土地利用に区分したのち、市街地メッシュは不浸透、それ以外のメッシュは実測の流量観測値に基づいて調整した。後述のように最終的にはRRIモデルマニュアルに示される例示のうちClay loamの値となり、現地地盤と対応する結果となった。

3.1.4 モデルの検証

モデルは水文観測によって得られた流量ハイドログラフと推定値を比較することで行った。流量ハイドログラフの予測精度を表すNash-Sutcliffe係数は以下の式(13)で示される。Nash-Sutcliffe係数はハイドログラフの一致度を評価する指標値であり1に近いほど再現性が高く、目安として0.7以上であれば一定の再現性を認める場合が多い。

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \{q_0(i) - q_c(i)\}^2}{\sum_{i=1}^N \{q_0(i) - q_{av}\}^2} \tag{13}$$

ここに、

- N : 計算時間数
- $q_0(i)$: i時の実測流量
- $q_c(i)$: i時の計算流量
- q_{av} : 実測流量の平均値

3.2 放棄水田の活用に関する氾濫抑制効果の評価

3.2.1 水路の進展による氾濫流への影響

高崎川流域における排水路の空間分布の変化によってもたらされる洪水流出現象の変化を評価した。現地観測結果で調整されたモデルをベースとし、過去の航空写真から得た年代別の水路分布を用い、水路分布のみを変化させて計算を行った。入力値として、気象庁千葉観測所の降雨強度式に基づき、1/5～1/200の複数の確率規模の中央集中型降雨をモデルに与え、洪水ハイドログラフと浸水状況を比較した。

表-3.3に与えた入力降雨の諸元を示す。

表-3.3. 評価に用いた降雨

確率規模	時間雨量 (mm/h)	総雨量 (mm)
1/5	45.6	113.8
1/10	53.7	136.5
1/30	66.8	174.9
1/50	72.9	194
1/100	78.1	225.6
1/200	87	255.9

3.2.2 治水効果を表現する指標値の作成

得られた浸水深データを土地利用データに基づいて式(14)に基づいて被害額に換算することで比較した。換算には国土交通省治水経済調査マニュアルを簡略化したKazama et al⁷⁾の手法を用い、3次メッシュ(約100m)土地利用ごと浸水深ごとに集計して算出した。

$$COST_{j,k} = \sum_i \{C(L) * r(h, L)\} \tag{14}$$

ここに、

$COST$: 推定被害額	h	: 浸水深
C	: 被害面積単価	i	: グリッド番号
r	: 被害率	j	: 対象とする小流域番号 ($j=0$ は現況)
L	: 土地利用	k	: 降雨の確率規模ごとの番号

被害面積単価は、町田ら(2006)の研究手法を参考に設定した。市街地メッシュでは、本研究における家屋面積率を0.1と仮定したうえで、平成11年度の家屋評価額の全国平均値である159.2(千円/m²)を乗じ、159,200(千円/ha)とした。水田メッシュでは、単位面積当たりの水稻の平年収量の全国平均値である489(t/km²)に、平成11年度の米の単位評価額である285(千円/t)を乗じ、1,394(千円/ha)とした。畑地メッシュでは、単位面積当たりのトマトの平年収量の全国平均値である5,770(t/km²)に、平成10年度のトマトの単位評価額である264(千円/t)を乗じ、15,233(千円/ha)とした。被害率 r は土地利用ごと浸水深ごとに表-3.4に示すとおりである。

表-3.4. 各土地利用における浸水深ごとの被害率(%)

	市街地	水田	畑地
0.1m以上0.45m未満	5.8	21.0	27.0
0.45m以上0.5m未満	21.9	21.0	27.0
0.5m以上1.0m未満	30.1	24.0	35.0
1.0m以上2.0m未満	46.8	27.0	51.0
2.0m以上3.0m未満	65.7	27.0	51.0
3.0m以上	84.3	27.0	51.0

また、降雨の再起確率に異なる結果を、式(15)に従って統合した。式の定義から重み付け推定被害差額は、1年ごとの被害差額の期待値ととらえることができる。なお、ここでは1/200確率の降雨を除外し、1/5~1/100確率の降雨で計算した。

$$wdif_j = \sum_k \{p_k * (COST_{j,k} - COST_{0,k})\} \tag{式(15)}$$

ここに、

$wdif$: 重み付き推定被害差額
p	: 降雨の再起確率

3.3 放棄水田の活用適地の抽出

3.3.1 洪水氾濫モデル上での湿地化の表現

現況での放棄水田の湿地化がもたらす効果を評価した。放棄水田の湿地化は排水機能を無効化することに対応するため、モデル上では水路深を極端に浅く(本研究では1cm)することで表現した(図-3.5)。水路を無効化するとその上流では洪水流が氾濫し一時貯留されるため下流側での最大浸水深が減少し減災につながる。

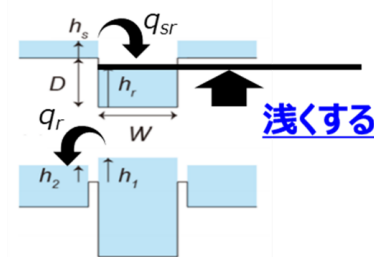


図-3.5. 湿地の再現方法

3.3.2 最適地の抽出手法の検討

対象流域(印旛沼流入河川高崎川)を対象として、湿地化をすべき適地の抽出を試みた。対象区域については、流域を小流域に分割したうえで、放棄地の割合など湿地化の可能性を勘案して20の流域

(図-3.6) を検討対象とした。この小流域ごとに区域内水路をそれぞれ無効化し、1/5~1/100の5段階の確率規模の降雨を与えて洪水氾濫計算を実施した。

この氾濫計算結果に対し、式(14)に示す推定被害額 (COST) のモデルに変化を加えない (現況再現) ケースでの差分値である推定被害差額を計算し、重み付き推定被害差額 (wdif) を最終的な指標として適地の選定を行った。

3.3.3 適地の最適組み合わせについての検討

治水効果の観点から適地を1箇所抽出する手

法は3.3.2の手順を1流域ずつ適用し、比較することで検討可能である (この選択手法を「ワンステップ法」とする)。しかし、複数の小流域を湿地化する場合、湿地化によって洪水流出のタイミングがずれ、河川水位や浸水深に変化を生じるため、対策地の増加に対し組み合わせの効果を生じる可能性がある。

ここでは、対策地の組み合わせ効果を加味した複数箇所の適地抽出の考え方を検討する。単純な全通りの検討は組み合わせ数が非常に多く ($\sum_{k=0}^{20} 20C_k \approx 104$ 万通り) 非現実的である。そこで最適組み合わせの推定アルゴリズムの一種である、グリーディ法(Greedy algorithm)を用いた。グリーディ法は、1回の試行に対して最適となるケースを逐次積み上げることで、計算負荷を低減しつつ疑似最適組み合わせを探索する手法である。一度選択したケースを再考することはないため厳密解が得られる保証はないが、計算量が大幅に低減する。本研究では、 $5 \times \sum_{k=0}^{20} (n-k) = 1050$ 回の計算が必要となる。大幅に計算回数は低減するが、計算に必要な時間はおよそ63000分となるため、必ずしも時間コストのよい手法ではない。仮に、組み合わせの効果が無視できれば、1回計算を実行し評価する方法で優先順位がつけられることになるため効率が良い。ここでは、グリーディ法による組み合わせ最適探索と3.3.2での検討(ワンステップ法)を比較した。

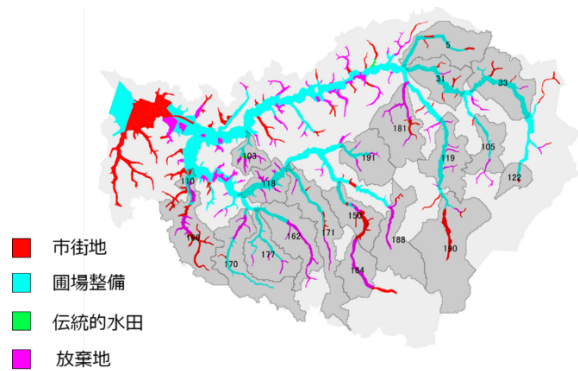


図-3.6. 小流域の分布と谷津地形の土地利用

3.4 水質・水生生物生態系との対策優先地の空間的關係性の検討

治水、環境 (水生生物、水質) の側面から便益を受けやすい対策地の抽出について検討した。サブテーマ2から得られる情報のうち、水生生物については対象種 (サワガニ、ホトケドジョウ、オニヤンマ) のMaxentによる推定分布確率、水質については窒素濃度および湧水量を分割小流域内で平均し指標値とした。これらの指標値と重み付き推定被害差額 (wdif) を散布図にプロットし、wdif < 0かつ推定分布確率が0.5以下の場合を対象種の再生が望まれる介入すべき優先地、0.5以上を保全優先地と位置付け、空間的な位置關係を検討した。

4. 結果及び考察

4.1 谷津における水路と土地利用の変化

4.1.1 水路の形状

河川 (便宜的に幅6m以上) に流入する水路のほとんどが柵渠化 (直壁矩形断面) され狭く深い断面へと置換されており、柵渠化水路は、同一幅の土水路に対し平均的に1m深かった。自然河川での流量~川幅、水深關係 (レジーム則) を1/5相当の雨量を想定して当

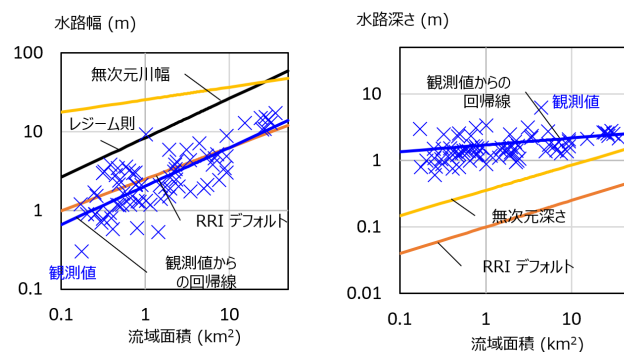


図-3.7. 水路幅および水路深さと流域面積との關係の調査結果

てはめたものと比較したものが図-3.7である。他のレジーム則と比較し川幅は過小、水深（水路高）は過大となっていることが明らかとなった。

4.1.2 水路の分布と谷底の土地利用の変遷

航空写真の整理より水路の延伸を評価した結果、戦後から1970年代にかけて圃場整備により水路の総延長は1947年の2倍に達していた（図-3.8）。放棄された谷津に着目すると、圃場整備によって柵渠化されたものとそうでないものがあるが、柵渠化されている水路は長年の放棄によっても水路が閉塞している様子がほとんど見られなかった。一方、柵渠化されていない場合には、水路が埋没するなどして水深の浅い自然河川に近い状態で流れる様子が確認できた。また、谷底の土地利用は、戦後～1970年代にかけて圃場整備と水路化が進展。1980年代では、谷津の谷頭部を中心に放棄が進んでいた（図-3.9）。

4.2 洪水氾濫モデルの構築

水位流量観測開始後、2021年7月に洪水が生じ、水位および流量観測を実施することができた。観測地から得た水位流量曲線の一例を図-3.10に示す。水路が柵渠化されている流域（T11）では水位上昇に対する流量増加が大きく、柵渠+放棄（T4）では中間的である傾向が見られた。解析結果と観測結果の比較の一例を図-3.11に示す。解析結果に対するNash-Sutcliffe係数は流域下流端での観測所で0.82となり再現性が確認された。

4.3 放棄水田の活用に関する氾濫抑制効果の評価

4.3.1 水路の進展による氾濫流への影響

過去の水路分布を条件とした流域下流端のピーク流量の計算結果（図-0.6）を見ると、流路延長が短いほど（すなわち過去の水路分布）ピーク流量は小さく、現状（Case-2019）との比較では、Case-1947の方がピーク流量が40%以上小さくなったことから、排水未整備による貯留効果が大きいことが明らかとなった。また、規模の大きい降雨ほどピーク流量が減少する割合が小さくなった。

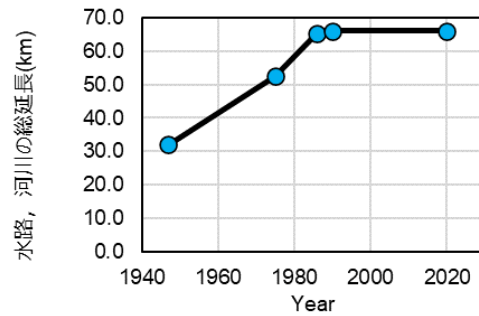


図-3.8. 河川・水路の総延長の経年変化

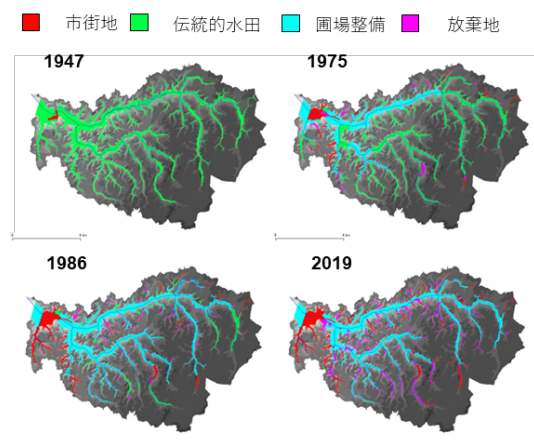


図-3.9. 高崎川流域の土地利用の変化

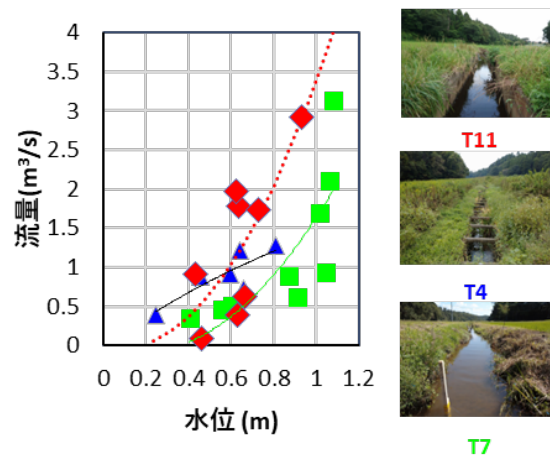


図-3.10. 水路のタイプによる水位流量曲線

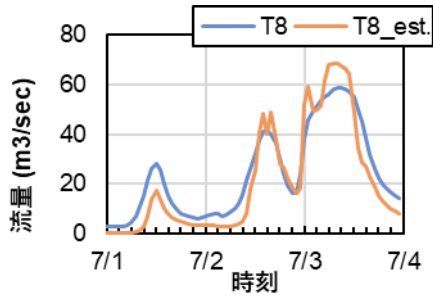


図-3.11. 流量変動の例

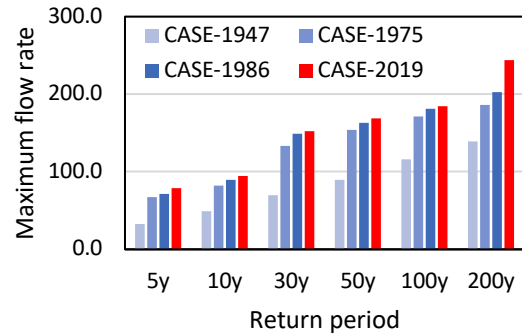


図-0.6. 過去の水路分布を条件とした流域下流端のピーク流量

4.4 対策適地の選定

4.4.1 推定被害差額による最適地の探査

放棄水田の湿地化は排水機能を無効化した氾濫計算結果に基づき推定被害差額を算出した結果さらに確率規模で重み付けして平均することで、1年ごとの被害差額の期待値を算出し指標値とした。算出結果を図-0.7に示している、半数ほどの小流域では被害差額が正（すなわち被害増）となり慎重な適地選定が必要であることや、より細分化した土地利用情報が必要となることが明らかとなった。

4.4.2 適地の最適組み合わせについての検討

複数の対策地を加味した、グリーディ法による最適組み合わせについての算出結果を図-0.8に示す。これより、10/20の小流域を選定した段階で指標値が最も小さく（被害が小さく）なったこと、得られた最小値に対し優先度の高い4箇所を対策することで効果のおよそ80%が得られることが明らかとなり、本対象地に関しては、対策地が少なくとも期待される効果を得ることが可能であることが分かった。その内訳（図-0.9）を見ると、1/5の洪水に対しては、値が常に正で、対策により被害が大きくなること、1/10～1/200の降雨では値が概ね負（被害減少）で、一定数まで被害額が減少していくこと、特に、1/30の降雨に対する効果が大きいことが分かった。

グリーディ法とワンステップ法で抽出された小流域は図-3.12に示すようにおおむね一致していた。これは、推定被害額に対する適地の組み合わせによる効果が小さく、小流域ごとの個別性が強く反映されることを示している。

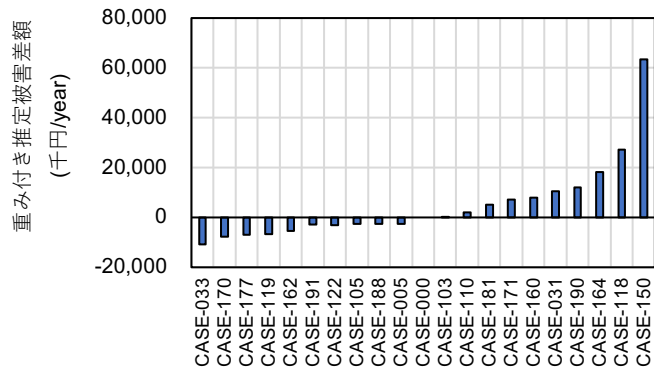


図-0.7. 重み付き推定被害差額の分布

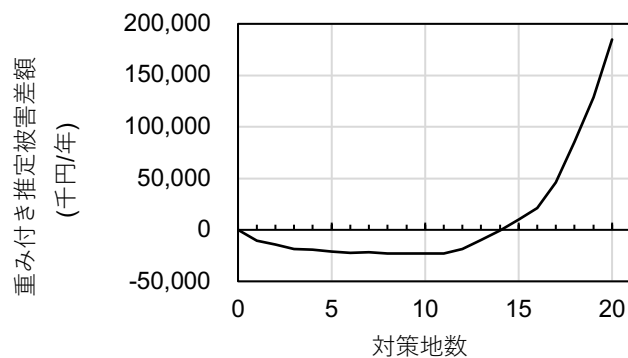


図-0.8. 重み付き推定被害差額と対策地数の関係

4.5 治水以外の選定項目との関係性

前述の内容から、本研究で構築した洪水氾濫モデルの出力結果を用いて推定被害額を評価軸として合

理的に適地抽出することが可能となった。次に、水環境・水生生物多様性の観点からの適地との空間的な対応関係を確認し、複数の項目に対する合理的な適地選択の考え方を示す。

図-3.13に、サブテーマ2で対象種となったホトケドジョウを例として、横軸に推定分布確率（Maxent法）を取り、縦軸に重み付け推定被害差額を取ったグラフを示す。プロットは調査地点ごとに示している。この図より、両者には強い相関は見られず、治水効果とホトケドジョウの保全効果は必ずしも一致せず、適地を選択することが重要であることが示唆される。この関係性から適地を選択するにあたって、重み付推定被害差額（*wdif*） < 0 でなければ対策による被害増となるので選択できない。*wdif* < 0 であり、推定分布確率が0.5以上である場合、治水効果を見込むことができる一方で、すでに貴重種の生息場となっている可能性があることから保全優先地（図中①）と位置付けられ対策には慎重さを必要とする。推定分布確率が0.5以下である場合、対象種の生息場の改善幅が大きいと判断することができる介入優先地（図中②）と位置付けることができる。この考え方から、治水効果を見込むことができ、対象種環境再生が可能と考えられる小流域の位置関係を示したものが図-0.10である。抽出された流域は一部中間流域も含まれるが主として源頭部を持つ小流域であった。

4.6 まとめ

本サブテーマでの研究成果を以下にまとめる。

谷津谷底部に残存する水路を改良することによる湿地化が治水にもたらす影響を評価することを目的とし、斜面・河道・氾濫流を統合解析可能なRRIモデル

を用いて印旛沼流域高崎川を対象に降雨流出氾濫モデルを構築した。現地調査による河川水路の分布と形状設定、水位・流量観測データによるモデルの妥当性の検証を行った。

モデルにおける1次元水路モデルの調整によって、水路改変による湿地化が流況に与える影響を表現した。確率規模別の浸水深解析結果と土地利用から得られる推定被害差額を指標とした対策地の優先順位について検討した。一定の合理性の上で対策優先度を決定することができる。複数箇所の組み合わせ効果を検討するためグリーディ法による適所選択を行ったが1ステップ法と差は顕著ではなかった。

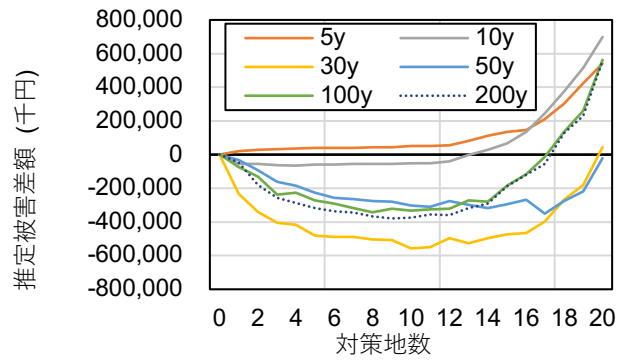


図-0.9. 降雨確率規模別の対策地数に対する推定被害差額：「〇y」は〇年に一度の生起確率の降雨を意味する。

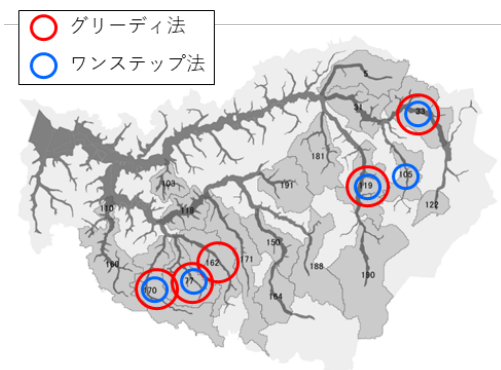


図-3.12. グリーディ法とワンステップ法での適地

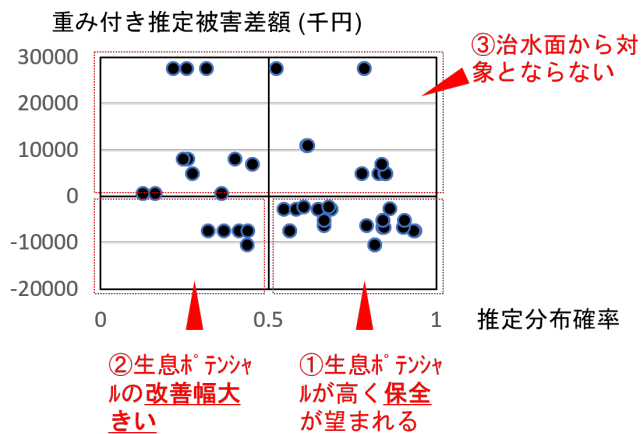


図-3.13. ホトケドジョウの推定分布確率と重み付き推定被害差額の分布

グリーンディ法によって算定された期待される効果の最大値の8割を対策個所が4箇所を得ることができる。

本検討によって自然環境における適応と河川管理とのコベネフィットが生じやすいスポットの合理的な抽出が可能となったが、一方で、実現象としては浸水を受けない市街地セルが浸水を受けたと判定されている可能性があり、詳細な土地利用や地盤高の情報を考慮する必要があること、耕作放棄地の評価額も水田と同じにしている点で優先度に差異が生ずる可能性があることが課題となった。

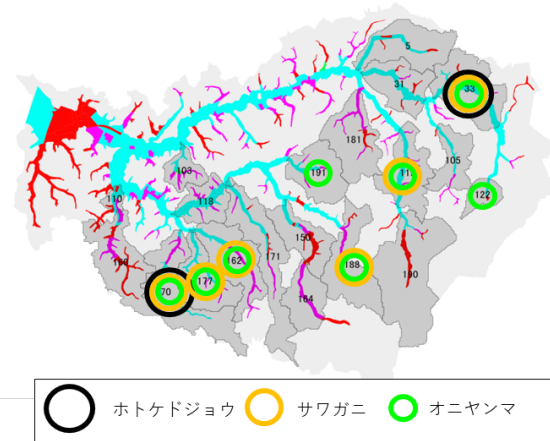


図-0.10. 治水効果と水生生物の分布確率から見る適地抽出結果

5. 研究目標の達成状況

目標を上回る成果をあげた。水路の効果を的確に評価可能なRRIモデルを導入し、放棄地の活用から得られる治水効果を量的に表現した。治水効果から得られる優先順位と、環境上の項目（水質、水生生物）との空間的配置を検討し、戦略的な保全再生手法を提案できるメソッドを確立した。

目標としていた上記の成果に加え、戦後の農地排水路や河川の改修が、河川流域の水害リスクの分布にもたらした影響の定量化にも成功した。この成果は、水害リスクが、市街地化が進行した下流域では上昇し、耕作放棄地が増加した上流域では低下したというものであり、谷津のような河川上流部において耕作放棄地をグリーンインフラとして活用することの根拠となる重要な知見である。

6. 引用文献

- 1) Stefanakis AI (2019) The role of constructed wetlands as green infrastructure for sustainable urban water management. *Sustainability*, 11(24), 6981.
- 2) Osawa T, Nishida T, Oka T (2021) Potential of mitigating floodwater damage to residential areas using paddy fields in water storage zones. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 62, 102410. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221242092100371X>
- 3) Osawa T, Kohyama K, Mitsuhashi H (2016) Multiple factors drive regional agricultural abandonment. *Science of the Total Environment*, 542, 478-483.
- 4) Juan A, Gori A, Sebastian A (2020) Comparing floodplain evolution in channelized and unchannelized urban watersheds in Houston, Texas. *Journal of Flood Risk Management*, 13(2), e12604.
- 5) Yoshikawa N, Nagao N, Misawa S (2010) Evaluation of the flood mitigation effect of a Paddy Field Dam project. *Agricultural Water Management*, 97(2), 259-270
- 6) Sayama T, Ozawa G, Kawakami T, Nabesaka S, Fukami K. (2012). Rainfall-runoff-inundation analysis of the 2010 Pakistan flood in the Kabul River basin. *Hydrological Sciences Journal*, 57(2), 298-312.
- 7) Kazama S, Sato A, Kawagoe S (2010) Evaluating the cost of flood damage based on changes in extreme rainfall in Japan. In *Adaptation and mitigation strategies for climate change* (pp. 3-17). Springer, Tokyo.

II-4 農地の機能へのコベネフィット評価

国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構

農業環境研究部門 農業生態系管理研究領域 生物多様性保全・利用グループ

馬場 友希

片山 直樹

大久保 悟

[要旨]

耕作放棄地の湿地化は、生物多様性保全・治水などグリーンインフラとして多面的な機能を担うことが期待される。農業の観点からも、湿地が生物に提供する生息・生育地サービスを通じて、天敵生物の供給源となりうるため、プラスの効果が期待される。一方、湿地に成立する植生によっては農業害虫の発生源にもなるため、湿地が農業にもたらす正味の恩恵は分かっていない。そこで、本サブテーマでは湿地における天敵・イネ害虫相の特徴を明らかにし、周辺の農地への天敵・害虫の供給効果を明らかにすることを目的とする。まず耕作放棄地には植生遷移や土壌の水分条件によってさまざまな植生状態が生じるため、天敵の供給ポテンシャルが高く、さらに害虫の発生リスクの少ない環境状態を、茨城県における耕作放棄地の節足動物相の調査データを用いて明らかにした。その結果、天敵となるクモの個体数は湿潤な遷移初期の耕作放棄地で多いことが分かった。イネ害虫（主に斑点米カメムシ類）については、乾燥した遷移初期の耕作放棄地で個体数が多いが、一方で湿潤な耕作放棄地では個体数が少ないことが分かった。そのため、湿潤な遷移初期の耕作放棄地は天敵の個体数が多く、なおかつ害虫が多発生するリスクも低いことが示された。この遷移初期の湿地が周囲の農地に天敵を供給する効果を明らかにするため、耕作放棄地の湿地再生が実践されている千葉県印西市・富里市（中沢・立沢）3地域において、湿地再生地と周囲の水田を対象にトラップ調査を実施し、クモ・イネ害虫の空間パターンを明らかにした。その結果、湿地再生地では天敵であるアシナガグモ類の個体数が周囲の水田より多かったのに対し、コモリグモ類やイネ害虫（ヒメトビウンカ・ツマグロヨコバイ・斑点米カメムシ）の個体数は違いが見られなかった。また水田におけるクモとイネ害虫の個体数は、湿地からの距離に応じて変化する傾向も見られなかった。以上の結果から、湿地が周辺農地にもたらす天敵・害虫の供給効果は不明瞭であったが、少なくとも湿地では害虫の多発生は起きず、周囲の水田に負の影響を与えない事が示唆された。またクモによるイネ害虫の捕食率を明らかにするため、水田の主要なコモリグモ2種を対象にDNAメタバーコーディングを用いた食性分析を行ったが、害虫のDNAを検出できなかった。以上の結果より、流域生態系の気候変動適応策としての耕作放棄地の湿地化は天敵の生息地の増加に寄与しうること、さらに害虫の多発生のリスクも低いことから、農業活動との間に軋轢が生じないことが示された。

1. 研究開発目的

農業が重要な産業になっている地域において湿地生態系を活用した気候変動適応策を導入する際、多くの場合、湿地が害虫の発生源となるリスクが問題になる。本サブテーマでは耕作放棄水田に由来する湿地生態系に着目し、湿地生態系の状態と農業害虫および天敵（益虫）の供給機能を検討することで、害虫発生を抑制する生態系管理のアプローチを明らかにする。

2. 研究目標

湿地化した耕作放棄水田や環境配慮型農地がもつ益虫供給機能を評価し、それらの供給源の配置が農業にもたらすベネフィットを評価する。サブテーマ2の成果を活用し、流域生態系の気候変動適応策が農業にもたらすベネフィットを明らかにし、自然生態系における適応と農業とのコベネフィットが生じやすい条件を示す。

3. 研究開発内容

流域生態系の気候変動適応策の一つとして耕作放棄地の湿地としての活用が考えられる。この湿地再生が農業にもたらすベネフィットとして、農業害虫の天敵生物の生息地の提供ならびに周辺農地への天敵供給効果が想定される。一方、耕作放棄地あるいは湿地に成立する植生は土壌条件や植生遷移によって大きく変化するため、それに伴い天敵を含む生物相も大きく変化することが予想される。また植生の状態によっては、むしろ害虫が多発生するリスクも想定される。こうした背景から本サブテーマでは、まず土壌条件・放棄履歴の違いに基づく耕作放棄地の植生の違いが天敵および害虫相に及ぼす影響を明らかにし、農業にとって望ましい環境条件を特定する。次に湿地化された耕作放棄地が、実際周囲の農地の天敵を増加させるのか（あるいは害虫を増加させるリスクがあるか）その供給効果を明らかにする。最後に天敵が害虫防除に寄与しうるかをDNAメタバーコーディングに基づく食性分析法によって明らかにする。天敵としてイネ害虫の防除効果の有効性が確認されているクモ類（主にアシナガグモ属・コモリグモ類）に注目した。以下の3つの調査項目を設定した。

- 3.1 耕作放棄地タイプごとのクモ・害虫相の把握
- 3.2 湿地再生地によるクモ・イネ害虫の周辺農地への供給効果の検証
- 3.3 DNAメタバーコーディング技術を用いたクモの食性の解明

3.1 耕作放棄地タイプごとのクモ・害虫相の把握

3.1.1 調査方法

天敵の供給源または害虫の発生源として重要な生息地条件を特定するために、植生遷移段階・土壌水分条件の組み合わせが異なる耕作放棄地を対象に、クモ・イネ害虫相の比較を行った。当研究グループは茨城県つくば市と阿見町を対象とした節足動物の採集データを有するため(Baba et al. 2019)、それらのデータを活用した。調査時期は2014年で、阿見町・つくば市における植生遷移段階と土壌水分条件の組み合わせが異なる耕作放棄地を対象に捕虫網を用いた掬い取り法により植生上の節足動物を採集した。植生遷移段階は植生のタイプ分けから3段階（初期・中期・後期）に、土壌水分条件は土壌表層における水の有無を基に2タイプに分類し、この2つの組み合わせから6タイプに分類された。各タイプの耕作放棄地は2地域から6つの繰り返しを設け、その結果、植生遷移（3タイプ）×土壌水分条件（2タイプ）×反復6の計36カ所の調査地からサンプルを得た（図-4.1）。調査方法として、口径36cm、柄の長さが1mの捕虫網を用いて、半円状に網を20回、放棄地内の2カ所で掬い取りを行うことによって節足動物を採集した。得られた節足動物をソーティングし、種同定することによって耕作放棄地タイプごと

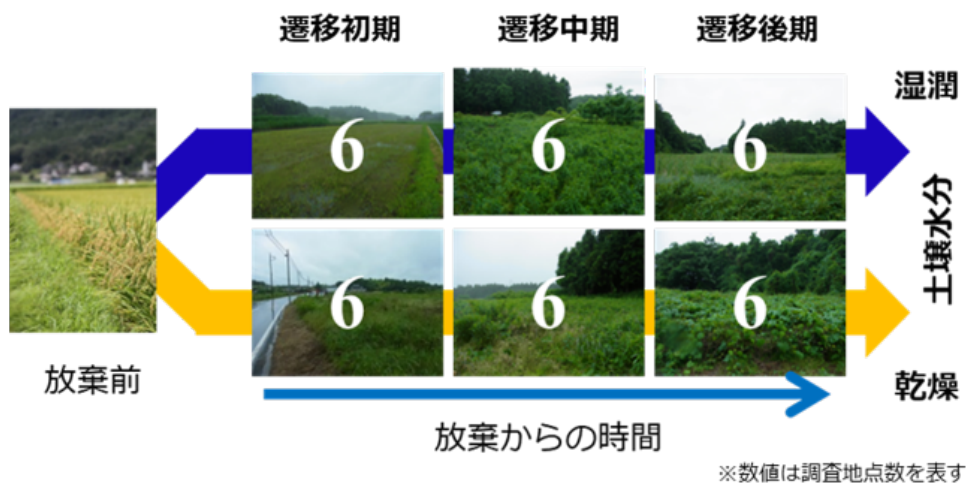


図-4.1. 調査デザイン。2014年7月・8月につくば市と阿見町の2地域で、植物遷移段階（初期・中期・後期）と土壌水分条件（乾燥・湿潤）が異なる組み合わせ（6パターン）の耕作放棄田を調査（×6反復=計36地点）

の節足動物のデータを得た。また植物に関しても、1圃場に3つのコドラート（1m×1m）を設け、その中に含まれる植物全種の被度、群落高等を記録した。これらのデータを基に、クモやイネ害虫の個体数を目的変数、遷移段階・土壌水分条件を説明変数、各調査地点をランダム変数とする一般化線形混合モデルを用いてどの耕作放棄地がクモの生息地、あるいは害虫の発生源として重要であるかを明らかにした。

3.2 湿地再生地によるクモ・イネ害虫の周辺農地への供給効果の検証

3.2.1 調査方法

千葉県富里市と印西市において、水田跡地に創出された湿地再生地とその周辺に位置する水田を対象にトラップを用いたクモとイネ害虫の個体数調査を実施した。調査はクモ・害虫の活動性が高い出穂前後の夏季（2021年7月・8月、2022年の7月）に実施した。2021年は、千葉県富里市中沢（おしどりの里）の湿地1枚とその周辺の慣行水田5枚を、印西市の湿地1枚、有機水田1枚と慣行水田3枚を調査した。2022年は上記2地域に加え、富里市立沢区の湿地1枚と慣行水田5枚でも調査を行った。仮に湿地がクモやイネ害虫の供給源として働くならば、湿地ではクモや害虫の個体数が多く、また湿地に近い水田ほどクモや害虫の個体数が増えるという空間パターンが予想される。そのため、調査対象とする水田は湿地から徐々に離れるように選定した。

クモとイネ害虫の捕獲には、粘着板トラップと水上トラップを用いた。粘着板トラップは造網性クモであるアシナガグモ属と飛翔性のイネ害虫の捕獲を目的とするトラップであり、園芸用ポールに30×24 cmの2枚の粘着板を背中合わせで固定し、イネの草丈より高い位置に設置した（図-4.2右）。このトラップは1枚の田んぼに2か所設置した。水上トラップは地表徘徊性のコモリグモ類捕獲用のトラップであり、家を模したプラスチック製の粘着性捕獲機の底に発泡スチロールを接着することによって、水面に浮くように設計されている（図-4.2左）。水上トラップは1枚の田んぼの畔際に4か所設置した。これらのトラップは設置後7日後に回収し、実験室に持ち帰った後-28度の冷凍庫に保管し、その後、クモとイネ害虫の種同定を行った。

湿地のクモとイネ害虫の供給効果を検証するために、各トラップに捕獲されたアシナガグモ属、コモリグモ属とイネ害虫の個体数を目的変数、地域（印西・富里おしどりの里・富里立沢）と湿地からトラップまでの距離（0～540

m）、調査年（2021年・2022年）を説明変数とする一般化線形混合モデル（以下、GLMM）を用いた。また各田んぼのIDをランダム変数に、トラップ設置期間をオフセット項とすることにより、各水田の環境の違いやトラップの設置期間の違いを考慮した。



図-4.2. クモとイネ害虫の捕獲に用いた水上トラップと粘着板トラップ

3.3 DNAメタバーコーディング技術を用いたクモの食性の解明

3.3.1 クモのサンプリング

3.2の調査地において、実際にクモがイネ害虫を捕食しているかどうかを明らかにするため、DNAメタバーコーディング技術を用いてクモの体内に含まれる餌生物のDNAを解析した。調査対象として、ウンカやヨコバイ類の天敵である地表徘徊性のコモリグモ類に注目し、水田に多いキクヅキコモリグモとイナダハリゲコモリグモの2種をサンプリングした。クモのサンプリングは2022年7月29日、千葉県富里市の

中沢と立沢の水田において、キクヅキコモリグモ19個体、イナダハリゲコモリグモ20個体を採集した。捕獲個体をクーラーボックスで実験室に持ち帰り-25度の冷凍庫で固定した後、DNA抽出を行った。体サイズが比較的大きな個体に対しては頭胸部を切り離し、腹部のみをDNA抽出に用いた。サイズの小さな個体については体全体をDNA抽出に用いた。凍結乾燥したサンプルをマルチビーズショッカーで粉碎した後、LabAid824s DNA Extraction kit ZEESANを用いて分取した溶液からDNAを精製した。DNA増幅には、コモリグモ類の食性分析に特化したプライマーセットであるNoSpi2とBR2を用い（Lafage et al. 2020）、解読された塩基配列をデータベースと照合することによって餌種を同定した。

4. 結果及び考察

4.1 耕作放棄地タイプごとのクモ・害虫相の把握

掘り取り調査で得られた計10,655個体の節足動物のうち、天敵であるクモは2,284個体含まれていた。クモの個体を解析したところ、クモの総個体数は植生遷移とともに徐々に減少していくことが分かった（図-0.11）。一方、土壤水分条件はほとんど個体数に影響しなかった。種数（個体数による補正はなし）に関しては、植生遷移段階・土壤水分による影響はみられなかった。水田に典型的な数種（トガリアシナガグモ、アシナガグモ属、ドヨウオニグモ）の個体数を解析したところ、これらの種は湿潤な遷移初期の耕作放棄地に多いことが分かった。つまり、湿潤な遷移初期の耕作放棄地は水田との共通種も多く、水田性のクモの生息地あるいは供給源として重要な役割を果たすと考えられた。

イネ害虫については14種（クモヘリカメムシ・ホソハリカメムシ・アカスジカスミカメ・トゲシラホシカメムシ・ツマグロヨコバイ・イネクビボソハムシなど）477個体が見出された。これらの害虫の内訳を見ると、斑点米*カメムシ類がイネ害虫全体の74%（353/477個体）を占めていた（*斑点米：カメムシの吸汁により米粒に茶褐色の斑点（カビ）が残った米のこと）。イネ害虫の総個体数を植生タイプ間で比較したところ、遷移初期の植生で個体数が多い傾向があり、特に乾いた耕作放棄地で個体数が顕著に多かった（図-0.12）。斑点米カメムシの生育にとって、ホストとなるイネ科植物（メヒシバ・エノコログサなど）の存在が重要であるため、植生データを基に各調査地のカメムシ類の食草被度を算出し、これと植生群落の特徴（植生高、植物の種多様度）を説明変数とする一般化線形混合モデルを基に解析をおこなった。その結果、イネ害虫の総個体数と食草被度との間に正の関係性がみられた（図-4.3）。乾燥した遷移初期の耕作放

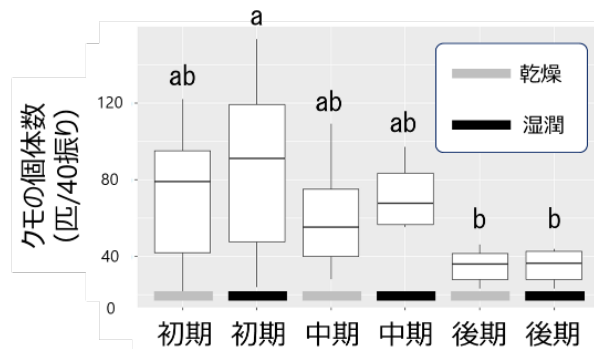


図-0.11. 耕作放棄地タイプごとのクモの個体数。植生遷移が進むにつれ個体数が減少する傾向が見られる。同じアルファベットは事後比較で有意な違い（ $p < 0.05$ ）が無いことを意味する。

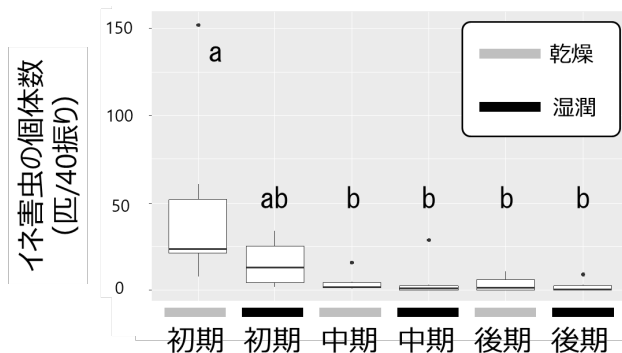


図-0.12. 耕作放棄地タイプごとのイネ害虫の個体数。植生遷移が進むにつれ個体数が減少する。また、乾燥した遷移初期の放棄地で特に多い。

棄地ではカメムシ類の食草となるメヒシバやエノコログサ等の被度が高いため、主要な構成要素である斑点米カメムシ類の個体数も多いと考えられた。加えて、優占する3種の斑点米カメムシ（クモヘリカメムシ・ホソハリカメムシ・アカスジカスミカメ）についても同様の解析を行ったところ、クモヘリカメムシとホソハリカメムシでは植生高との間に負の関係が、アカスジカスミカメでは食草被度との間に正の関係が見られるなど、種によって植生に対する反応が異なっていた。同じ遷移初期の植生でも湿潤な放棄地でイネ害虫が少ないのは、植物の多様性が高く、特定のイネ科草本が優占しないためだと考えられた。

以上の結果より、湿潤な遷移初期の耕作放棄地はクモの生息密度が高く、さらにイネ害虫の発生数も多くないことが分かった。一方、同じ遷移初期段階であっても、乾燥した耕作放棄地では、イネ害虫の個体数が顕著に多くなるため、遷移初期の段階に維持するだけでなく、湿潤な状態に保つことが、天敵温存並びに害虫の発生リスクの低減の観点から重要であると考えられた。この結果を踏まえ、次節4.2では植生遷移初期の湿地が周囲の農地に天敵を供給する効果（スピルオーバー効果）について検証を行った。

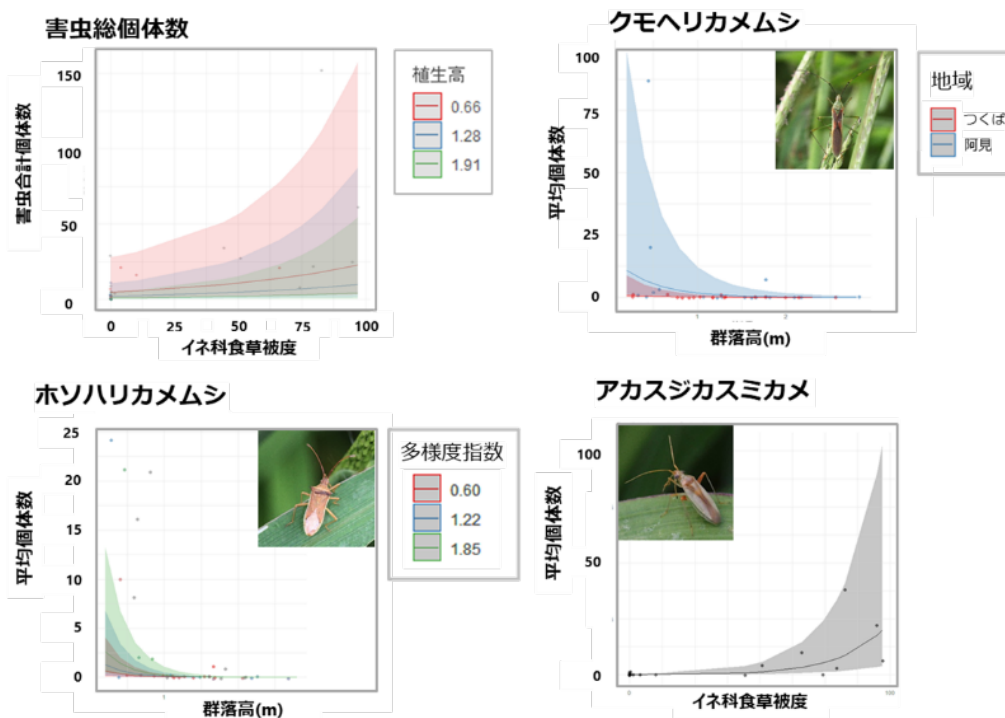


図-4.3. 個体数上位3種のイネ害虫（クモヘリカメムシ・ホソハリカメムシ・アカスジカスミカメ）の個体数と食草となるイネ科草本の平均被度との関係。食草被度が高い放棄地ほど個体数が多い傾向がみられる。

4.2 湿地再生地によるクモ・イネ害虫の周辺農地への供給効果の検証

計979個体のクモが採集され、そのうち地表徘徊性のコモリグモ類は7種697個体、造網性のアシナガグモ類は7種282個体が含まれていた。GLMMによる解析の結果、コモリグモ類においては湿地からの距離の影響はなく、湿地と水田間においても個体数の違いはみられなかった（図-4.4右）。一方、アシナガグモ属については、湿地から距離が離れるほど個体数が減少する傾向が見られた（図-4.4左）。一方、水田のクモの個体数のみを用いて解析したところ、湿地からの距離の影響は見られなかった。これは湿地では水田よりも個体数が多い傾向があるものの、水田におけるクモの個体数は湿地の影響を受けていないことを示唆している。

昆虫に関しては、29科75種2,538個体が捕獲された。2021年の調査でイネ害虫のツマグロヨコバイ、ヒメトビウンカと斑点米カメムシ（クモヘリカメムシ・ホソヘリカメムシ・ホソハリカメムシ等）が採集されたが、2022年はヒメトビウンカ・斑点米カメムシはほとんど採集されなかった。そのため、ツマグロヨコバイ以外の害虫については2021年のデータのみを解析に用いた。ツマグロヨコバイ・ヒメトビウンカ、斑点米カメムシを対象にクモと同様の解析を行った結果、これら3種のいずれについても、湿地からの距離の影響は見られなかった（図-4.5）。

以上の結果から、アシナガグモ属のみにおいて湿地で個体数が多い傾向が認められたが、湿地が周辺の農地にもたらす天敵供給効果は不明瞭であった。一方、害虫についても湿地が周辺農地にもたらす効果は見られなかった。そのため、湿地がもたらすベネフィットは示すことができなかったが、少なくとも湿地では害虫の多発生は生じず、周辺農地に負の影響を与えないことも示唆された。

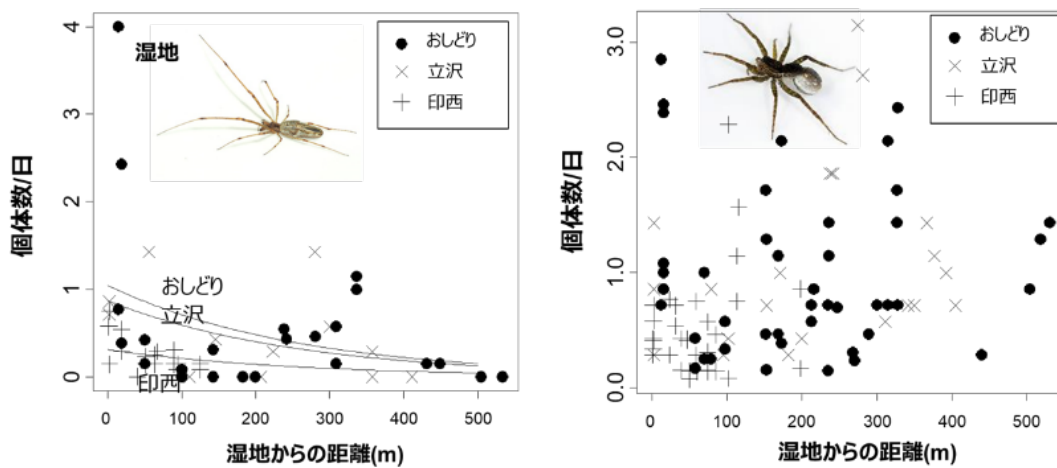


図-4.4. アシナガグモ属（左）とコモリグモ類（右）の湿地からの周囲の水田にかけての個体数の勾配。

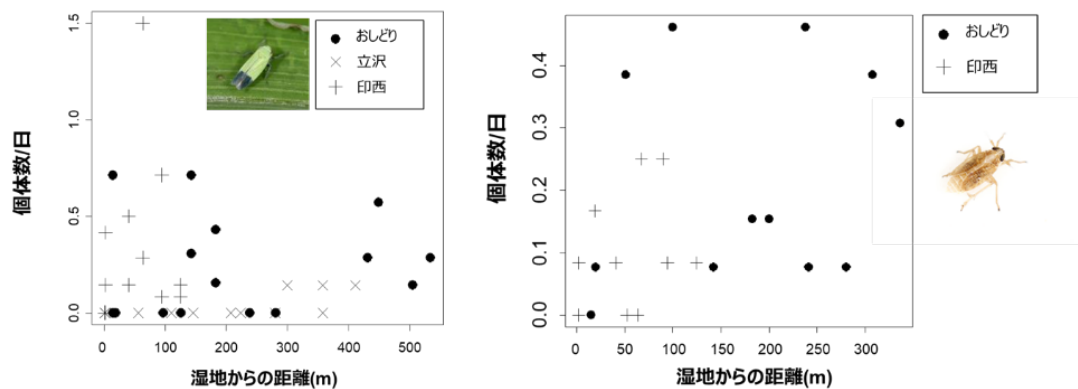


図-4.5. ツマグロヨコバイ（左）とヒメトビウンカ（右）の湿地から周囲の水田にかけての個体数の勾配。

4.3 DNAメタバーコーディング技術を用いたクモの食性の解明

同定された餌種は7目15科21種であった（図-4.6）。キクヅキコモリグモ19個体のうち8個体から10種の

餌生物が検出され（総Read数=153,422）、イナダハリゲコモリグモでは、20個体のうち10個体から13種の餌生物が検出された（総Read数=120,731）。これらの同定された餌種にイネ害虫が含まれるかどうかを照合したところ、イネ害虫は含まれていなかった。主要なイネ害虫の塩基配列はすでに参照塩基配列データベースに登録されていることから、少なくともサンプリングに用いた個体はイネ害虫を捕食していなかった可能性が高い。今回の調査はわずか一回のサンプリングであったため、害虫の捕食率を評価するためにはより多くのサンプルと調査回数が必要だと考えられた。

一方で、同じ水田からサンプリングされたにも関わらず、2種の餌組成が異なっていた点は興味深い。すなわち、イナダハリゲコモリグモではトビムシ目の検出率が高く（35%）、次にハチ目（主にアリ）が多かった（20%）のに対し、

キクヅキコモリグモではトビムシ目は検出されず、ハチ目（主にアリ）の検出率が高かった（26%）。イナダハリゲコモリグモとキクヅキコモリグモでは微生物環境が異なり、前者は畔などやや乾いた環境に生息するのに対して、後者は水面上に生息するため、食性の違いは種間の生息環境の違いを反映していると推測される。キクヅキコモリグモの食性や害虫防除機能に関してはいくつか先行研究が知られるが（Ishijima et al. 2006, Zhong et al. 2019）、それ以外の種の食性に関しては知見がほとんどないため、それらを明らかにする上で今回用いた分子生態学的手法は有効だと考えられる。

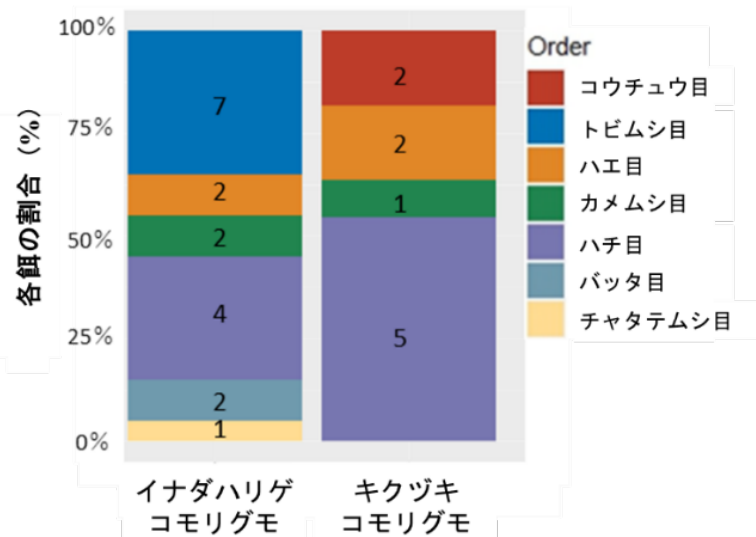


図-4.6. DNAメタバーコーディングによるイナダハリゲコモリグモとキクヅキコモリグモの食性分析結果。

4.4 まとめ

本研究の結果は以下のように要約される。①耕作放棄地には様々な環境状態が成立するが、天敵温存および害虫の多発生防止の観点からは、湿潤な遷移初期の植生が大事だと考えられた。また乾燥した耕作放棄地はカメムシの食草であるイネ科草本が繁茂することにより、イネ害虫が多発生するリスクが高いため、それを防ぐ上で特に湿潤な土壌条件を維持することが肝要だと考えられた。②湿地化された耕作放棄地（水田跡地）とその周辺の水田を対象としたクモとイネ害虫の調査では、湿地では水田以上あるいは同程度にアシナガグモ属やコモリグモ類などの天敵が見られたが、周辺農地への供給効果は不明瞭であった。一方、イネ害虫についても同様の傾向が見られ、必ずしも耕作放棄地の湿地化が害虫の多発生を招いたり、周辺農地に被害をもたらすわけではないことも示された。つまり、今回の研究では、湿地再生に伴う農業に対する強いコベネフィットは示されなかったものの、同様に強い負の影響（生態系ディスサービス）も示されなかった。本研究は、印旛沼周辺を対象としたケーススタディーであるため、今後他地域でも検証される必要があるが、気候変動適応策の一つである湿地の創出と農業活動との間で軋轢が生じないことを示した点で意義深い成果と考えられる。

5. 研究目標の達成状況

目標どおりの成果をあげた。当初予定に掲げた耕作放棄水田がもたらす益虫供給効果に加え、負の生態系サービスである害虫供給効果も明らかにし、正味のベネフィットの評価を行うことができた。流域生態系の気候変動適応策としての遊休農地の湿地化は天敵の生息地として機能すること、さらに害虫の多発生も生じにくいことから、適応策と農業との間に矛盾や軋轢が生じないことが示された。

6. 引用文献

- 1) Baba YG, Tanaka K, Kusumoto, Y. (2019) Changes in spider diversity and community structure along abandonment and vegetation succession in rice paddy ecosystems. *Ecological Engineering*, 127: 235-244.
- 2) Ishijima C, Taguchi A, Takagi M, Motobayashi T, Nakai M, Kunimi Y. (2006) Observational evidence that the diet of wolf spiders (Araneae: Lycosidae) in paddies temporarily depends on dipterous insects. *Applied Entomology and Zoology*, 41, 195-200.
- 3) Lafage D, Elbrecht V, Cuff JP, Steinke D, Hambäck PA, Erlandsson A (2020) A new primer for metabarcoding of spider gut contents. *Environmental DNA*, 2(2), 234243. <https://doi.org/10.1002/edn3.62>
- 4) Zhong W, Tan Z, Wang B, Yan H (2019) Next-generation sequencing analysis of *Pardosa pseudoannulata*'s diet composition in different habitats. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 26(1), 165-172.

Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

(1) 誌上発表

<査読付き論文>

【サブテーマ1】

- 1) 西廣淳、角谷拓、横溝裕行、小出大：保全生態学研究, 27(2): 315-322 (2022) 気候変動適応策としての「適応力向上型アプローチ」. <https://doi.org/10.18960/hozen.2201>
- 2) Yoshikawa T, Koide D, Yokomizo H, Kim JY, Kadoya T.: Scientific Reports 13:5932 (2023) Assessing ecosystem vulnerability under severe uncertainty of global climate change. (Impact Factor: 5.516)

【サブテーマ2】

- 1) 諏訪夢人、西廣淳：応用生態工学, 23, 85-97 (2020) 日本における遊水地の分布と立地特性. doi.org/10.3825/ece.23.85
- 2) 西廣淳、大槻順朗、高津文人、加藤大輝、小笠原奨悟、佐竹康孝、東海林太郎、長谷川雅美、近藤昭彦：応用生態工学 22: 175-185 (2020) 「里山グリーンインフラ」による気候変動適応：印旛沼 流域における谷津の耕作放棄田多面的活用の可能性.
- 3) Noda A, Yamanouchi T, Kobayashi K, Nishihiro J.: Applied Vegetation Science (2022) Temporal continuity and adjacent land use exert different effects on richness of grassland specialists and alien plants in semi-natural grassland. DOI: 10.1111/avsc.12682
- 4) Fukaya K, Kondo N, Matsuzaki SS, Kadoya T.: Methods in Ecology and Evolution. 13:183-193 (2022) Multispecies site occupancy modeling and study design for spatially replicated environmental DNA metabarcoding. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13732>_(Impact Factor: 8.335)
- 5) Nakanishi K, Yokomizo H, Fukaya K, Kadoya T, Matsuzaki SS, Nishihiro J, Kohzu A, Hayashi TI.: Science of The Total Environment 838:156088.(2022) Inferring causal impacts of extreme water-level drawdowns on lake water clarity using long-term monitoring data. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156088>_(Impact Factor: 10.754)
- 6) Matsushima N, Hasegawa M, Nishihiro J.: Wetlands 42(8):106. (2022) Effects of landscape heterogeneity at multiple spatial scales on paddy field-breeding frogs in a large alluvial plain. <https://doi.org/10.1007/s13157-022-01607-w>. (Impact Factor: 2.074)
- 7) Hirano Y, Kobayashi M, Hashimoto Y, Kato H, Nishihiro J.: Ecological Research, 38:146–153. (2023). Effect of local- and landscape-scale factors on the distribution of the spring-dependent species *Geothelphusa dehaani* and larval *Anotogaster sieboldii*. <https://doi.org/10.1111/1440-1703.12352>. (Impact Factor: 2.056)
- 8) Kohzu A, Matsuzaki SS, Komuro S, Komatsu K, Takamura N, Nakagawa M, Imai A, Fukushima T: Science of the Total Environment 881:163097 (2023) Identifying the true drivers of abrupt changes in ecosystem state with a focus on time lags: extreme precipitation can determine water quality in shallow lakes. (Impact Factor: 10.754)

【サブテーマ3】

- 1) Ohtsuki K, Nishihiro J, Kato H, Nakamura K. : 14th International Symposium on Ecohydraulics, Nanjing, China , (with referee) (2022) Evaluation of the Impact of Drainage Channel on Flood Flow in the Urban-Rural Landscape, Proc. <https://www.iahr.org/library/infor?pid=22009>

【サブテーマ4】

- 1) Katayama N, Mashiko M, Koshida C, Yamaura Y.: Agr Ecosyst Environ 319:107539 (2021) Effects of rice-field abandonment rates on bird communities in mixed farmland-woodland landscapes in Japan. (Impact Factor: 6.576)
- 2) 大久保 悟、島立理子：GIS-理論と応用 29:91-100. (2021) 小櫃川沖積低地における地籍図情報からみた1950年代の「島畑」分布と地形要因.
- 3) Baba YG, Osawa T, Kusumoto Y, Tanaka K.: Wetlands 43:17. (2023) Multi-spatial-scale factors determining the abundance of frogs in Japanese rice paddy fields and their potential as biological control agents. <https://doi.org/10.1007/s13157-023-01661-y>. (Impact Factor: 2.074)

<その他誌上発表(査読なし)>

【サブテーマ1】

「特に記載すべき事項はない。」

【サブテーマ2】

- 1) 西廣淳：用水と排水 72(7): 49-55 (2020) 「里山グリーンインフラ地形と水循環を活かした気候変動適応の試み」
- 2) 吉田丈人、桑江朝比呂、瀧健太郎、中村太士、西田貴明、西廣淳、福岡孝則：実践版！グリーンインフラ（グリーンインフラ研究会、三菱UFJリサーチ&コンサルティング、日経コンストラクション 編）、日経BP、16-24 (2020) 「グリーンインフラとは」
- 3) 西廣淳：実践版！グリーンインフラ（グリーンインフラ研究会、三菱UFJリサーチ&コンサルティング、日経コンストラクション 編）、日経BP、81-88 (2020) 「気候変動適応策としてのグリーンインフラの活用」
- 4) 西廣淳：実践版！グリーンインフラ（グリーンインフラ研究会、三菱UFJリサーチ&コンサルティング、日経コンストラクション 編）、日経BP、174-182 (2020) 「千葉県での「里山グリーンインフラ」の取り組み」
- 5) 西廣淳、吉田丈人、島谷幸宏、古田尚也：地域人 58: 18-27 (2020) 「ポストコロナの環境と防災を考える座談会」
- 6) 横山智子、星野武司、横山新紀：千葉県環境研究センター年報 (2020) 「降雨時における道路排水の負荷量調査」 <https://www.pref.chiba.lg.jp/wit/nenpou/index.html>
- 7) 品川知則、星野武司：千葉県環境研究センター年報 (2020) 「令和2年度印旛沼における水質の連続調査結果について」 <https://www.pref.chiba.lg.jp/wit/nenpou/index.html>
- 8) 星野武司、品川知則：千葉県環境研究センター年報 (2020) 「令和2年度印旛沼における水質分布調査結果について」 <https://www.pref.chiba.lg.jp/wit/nenpou/index.html>
- 9) 横山智子、星野武司、横山新紀：千葉県環境研究センター年報 (2021) 「印旛沼流域の耕作放棄地の湿地化による汚濁負荷の除去効果の検討」 <https://www.pref.chiba.lg.jp/wit/nenpou/index.html>
- 10) 西廣淳：都市計画 349: 100-101 (2021) 「自然保護から持続的利用へー里山グリーンインフラの取り組み」
- 11) 星野武司、勝見大介、横山智子：千葉県環境研究センター年報 (2021) 「2021(令和3)年度印旛沼における底質調査結果について」 <https://www.pref.chiba.lg.jp/wit/nenpou/index.html>
- 12) 星野武司、藤井稔彦、勝見大介、品川知則、横山智子：千葉県環境研究センター年報 (2021) 「印旛沼における栄養塩調査結果について」 <https://www.pref.chiba.lg.jp/wit/nenpou/index.html>
- 13) 星野武司、品川知則：千葉県環境研究センター年報 (2021) 「2021(令和3)年度印旛沼に

- おける植物プランクトン調査結果」 <https://www.pref.chiba.lg.jp/wit/nenpou/index.html>
- 14) Nishihiro J, Koike S, Ono A : Green Infrastructure: function, implementation and governance. Springer, 2021. “Biodiversity conservation through various citizen activities in a flood control basin.”
 - 15) Kamada M, Nishihiro J, Nakamura F : Green Infrastructure: function, implementation and governance. Springer, 2021. “Governance for realizing multifunctional floodplain; flood control, agriculture, and biodiversity in Yolo Bypass Wildlife Area, California, USA.”
 - 16) 西廣淳、瀧健太郎、原田守啓、宮崎佑介、河口洋一、宮下直：人と生態系のダイナミクス 5 河川の歴史と未来. 朝倉書店 (2021) .
 - 17) 西廣淳：国づくりと研修 146: 18-21 (2021) 「水循環健全化とグリーンインフラ推進のための体制：印旛沼流域を例に」
 - 18) 西廣淳：電気ガラス 62: 7-10 (2021) 「生物多様性～グリーンインフラ時代の資源～」
 - 19) 西廣淳：都市計画 349: 100-101 (2021) 「自然保護から持続的利用へー里山グリーンインフラの取り組み」
 - 20) 橋本純、定月歩今、渡部陽介、西廣淳、田和康太、平野佑奈、栢島野枝、加藤大輝、伊藤雪穂：アーバンインフラ・テクノロジー推進会議. 第34回技術研究発表会発表論文 (2022) 「八ツ堀のしみず谷津：産学官民連携での湿地グリーンインフラ共創」
https://www.uit.gr.jp/tech_research2022/presentation/file/E01.pdf
 - 21) 西廣淳：リバーフロント. 94: 18-21 (2022) 「氾濫原環境の利用と生物多様性保全」
 - 22) 西廣淳：森林環境2022: 105-113 (2022) 「気候変動時代のインフラとしての里山」
 - 23) 西廣淳：水環境学会誌 45: 114-118 (2022) 「自然を基盤とした解決策 (NbS) と水環境」
 - 24) 西廣淳、辻本翔平：地球環境 26: 69-78 (2022) 「陸域・陸水域生態系における気候変動影響モニタリング」.
 - 25) 西廣淳：日本湿地学会 (監修) 水辺を活かす一人のための湿地の活用. 朝倉書店 (2023) 「麻機遊水地における健康・福祉・教育を重視した湿地利用」 (分担執筆)
 - 26) 西廣淳、加藤大輝：日本湿地学会 (監修) 水辺を知る—湿地と地球・地域. 朝倉書店 (2023) 「耕作放棄水田を活用したNbS」 (共著分担執筆)
 - 27) Nishihiro J : Shimauchi R, Fukamachi K, Yoshida T(eds.) Eco-DRRR as Learned from Local Hestory: Traditional and local knowledge of Eco-DRR from different locations of Japan. Research Institute for Humanity and Nature e-book, 2023. “Traditional and local knowldge to enhance ecosystem services of retarding basins.” (分担執筆) <https://www.chikyu.ac.jp/rihn/publicity/detail/338/>
 - 28) 西廣淳：島内梨佐・深町加津枝・吉田丈人 (編) 地域の歴史から学ぶ災害対策 日本各地に伝わる伝統知・地域知. 総合地球環境学研究所 e-book (2023) 「遊水地から価値を引き出す伝統知・地域知」 (分担執筆) <https://www.chikyu.ac.jp/rihn/publicity/detail/338/>
 - 29) 西田貴明、岩崎雄一、大澤隆文、小笠原奨悟、鎌田磨人、佐々木章晴、高川晋一、高村典子、中村太士、中静透、西廣淳、古田尚也、松田裕之、吉田丈：保全生態学研究 (2023) 「自然の賢明な活用を目指して：グリーンインフラ・NbS の推進における生態学的視点」
<https://doi.org/10.18960/hozen.2211>

【サブテーマ 3】

「特に記載すべき事項はない。」

【サブテーマ 4】

- 1) Kiyon Sorgog, 馬場友希：Kishidaia 120:152-153 (2022) 「千葉県富里市「八ツ堀のしみず谷津」で採集されたクモ」
- 2) 片山直樹：リバーフロント特集号 Vol.94 (2022) 「氾濫原としての水田と鳥類の生態について」

(2) 口頭発表 (学会等)

【サブテーマ1】

- 1) Takeshita KM, Hayashi TI, Yokomizo H : 環境DNA学会第3回大会 第36回個体群生態学会大会 合同大会(2020) "Associations between neonicotinoid insecticides and functional-feeding-group abundances of benthic invertebrate communities in rivers in urban rice-paddy areas."
- 2) 吉川徹朗、竹内やよい、角谷拓 : 第68回日本生態学会大会 (2021) 「気候変動応答を捉えるための全国森林モニタリングのネットワーク化とデータマイニング」
- 3) Joung-Hun LEE、山口諒、横溝裕行、中丸麻由子 : 日本生態学会第68回全国大会 (2021) 「水田の耕作放棄を減らすための条件とは？進化ゲーム理論観点からの解析」
- 4) 中西康介、横溝裕行、林岳彦 : 日本生態学会第68回全国大会 (2021) 「個体群モデルを用いた近年のアキアカネ激滅に対する農薬等の因果的影響の分析」
- 5) Takeshita KM, Hayashi TI, Yokomizo H : 第68回日本生態学会大会 (2021) "A national-scale assessment of associations between benthic macroinvertebrate communities and nickel concentrations in Japan."
- 6) 横溝裕行、角谷拓 : 第37回個体群生態学会大会 (2021) 「水位操作による湖沼生態系管理効果の数理的解析」
- 7) 竹下和貴、林岳彦、横溝裕行 : 令和2年度 日本環境毒性学会 第1回オンライン研究発表会 (2021) 「統計的因果推論に基づいたニッケルが河川の水生昆虫群集に与える影響の評価」
- 8) Yokomizo H, Kadoya T : Joint International Symposium: To the New Stage of Collaboration (2021) "Inferring the potential of water-level operations for ecosystem management in lakes: a theoretical approach."
- 9) 角谷拓 : 第69回日本生態学会大会 (2022) 「長期観測の必要性：生物多様性の評価・予測の視点から」
- 10) 横溝裕行 : 化学物質の安全管理に関するシンポジウム-Society 5.0実現に向けた化学物質管理に係るデータ利活用の推進- (2022) 「統計的因果推論を用いた重金属の生態影響評価」
- 11) Yokomizo H, Tomimatsu H, Kamo M, Takada T : Evolutionary demography society 8th annual meeting (2023) "A novel ecological impact assessment by using life-table response experiment and interstage flow matrices: Effects of habitat fragmentation and temporal environmental variation on *Trillium camschatcense*."
- 12) 角谷拓 : 第70回日本生態学会大会 (2023) 「生物多様性トレンドの回復に向けた生態学の課題」
- 13) 横溝裕行、角谷拓 : 第70回日本生態学会大会 (2023) 「水位操作は湖沼生態系管理に有効か？：数理モデルによる解析」
- 14) 横溝裕行 : EESセミナー (2023) 「生命表反応解析(LTRE)と個体の流れ行列を用いた生態影響評価手法 : オオバナノエンレイソウの生息地の分断と時間的環境変動の影響」

【サブテーマ2】

- 1) 横山智子、星野武司、横山新紀 : 第47回環境保全・公害防止研究発表会 (2020) 「印旛沼流域の降雨時における道路排水の流出特性」
- 2) 星野武司、品川知則、勝見大介 : 第47回環境保全・公害防止研究発表会 (2020) 「印旛沼における水質詳細調査について」
- 3) 横山新紀、横山智子、星野武司 : 第47回環境保全・公害防止研究発表会 (2020) 「市街地排水中の硝酸イオンの濃度変動」
- 4) 西廣淳 : 令和2年度環境研究機関連絡会研究交流セミナー (2020) 「生態系を活かした適応による多面的ベネフィット～印旛沼流域での検討」

- 5) 西廣淳：造園学会2020年度全国大会．兵庫（ウェブ学会）（2020）「防災や地域活性化活動の結果としての生物多様性保全．ミニフォーラム「生物多様性の世界目標と地域をつなげる～次期生物多様性国家戦略の役割～」
- 6) 松島野枝、長谷川雅美、西廣淳：日本生態学会第68回全国大会（ウェブ学会）（2021）「千葉県印旛沼流域のカエル類において生息環境の選好性は変化したのか？」（ポスター発表）
- 7) 平野佑奈、西廣淳：日本生態学会第68回全国大会（ウェブ学会）（2021）「湧水が作り出すマイクロハビタットに対する生物の選好性：印旛沼流域の谷津での検討」（ポスター発表）
- 8) 伊東樹明、西廣淳、加藤将：日本生態学会大68回大会（ウェブ学会）（2021）「シャジクモ属2種における発芽特性の解明：温度・光条件の検討」
- 9) 西廣淳：応用生態工学会第24回全国大会（ウェブ学会）（2021）「2019年台風19号（令和元年東日本台風）災害を踏まえた治水・環境への提言～水源農地等からの流出抑制～」
- 10) 横山新紀：第36回全国環境研究所交流シンポジウム（2021）「降雨時における市街地排水中窒素成分の流出解析」
- 11) 横山智子、星野武司、横山新紀：第36回全国環境研究所交流シンポジウム（2021）「印旛沼流域における面源負荷量の検討」
- 12) 横山智子、星野武司、横山新紀：第55回日本水環境学会年会（2021）「印旛沼流域の降雨時における道路排水の水質特性と負荷量調査」（ポスター発表）
- 13) 横山新紀、横山智子、星野武司：第55回日本水環境学会年会（2021）「印旛沼における市街地排水中の硝酸イオン濃度の変動と大気影響」（ポスター発表）
- 14) 星野武、品川知則：第55回日本水環境学会年会（2021）「印旛沼水質データの時系列統計解析について」（ポスター発表）
- 15) 深谷肇一、今藤夏子、松崎慎一郎、角谷拓：環境DNA学会第4回大会（2021）「環境DNAメタバーコーディングにおける種検出誤差を考慮した階層モデリングとその実践」
- 16) 福森香代子、今藤夏子、萩原富司、渡邊未来、小松一弘、山口晴代、中川恵、松崎慎一郎：環境DNA学会第4回大会（2021）「定量PCR法による絶滅危惧種アカヒレタビラの生息域推定」（ポスター発表）
- 17) 今藤夏子：環境DNA学会第4回大会（2021）「自由集会（多様な分類群における環境DNA分析の現状と展望）環境DNAメタバーコーディングによる昆虫多様性検出とその課題」
- 18) Nishihiro J: PEDRR Cross-Regional Symposium, 15 September 2021 (online), 2021 “SATOYAMA Green Infrastructure” Citizen collaborating project for disaster risk reduction, water quality improvement, biodiversity conservation using rural landscape at Chiba prefecture, Japan.”
- 19) Ohtsuki K, Nishihiro J, Kato H, Nakamura K: PEDRR Cross-Regional Symposium, 15 September 2021 (online), 2021 “Evaluation of the impact of drainage channel improvement associated with agricultural land development on flood flow in the small valley wetland (Yatsu) landscape.”
- 20) Noda A., Nishihiro J: The 9th EAFES International Congress, 2021 “Plant traits and environmental factors affecting to disappearance in fragmented semi-natural grasslands over the past 14 years.”
- 21) 深谷肇一、今藤夏子、松崎慎一郎、角谷拓：科学研究費シンポジウム、予測モデリングの理論と応用（2021）「環境DNAによる生物多様性評価のための階層モデルとベイズ決定分析」
- 22) 今藤夏子、角谷拓、北野雅人、北村岳、山崎祐二、二橋亮：昆虫学会第81回大会小集会、日本産昆虫のDNAバーコードライブラリの現状（2021）「水生昆虫のDNAバーコード収集と公開、環境DNA解析への応用」
- 23) 西廣淳（2021）「グリーンインフラの価値を高める生態系管理」（応用生態工学会公開シンポジウム「公開シンポジウム：自然の「恵み」と「災い」という矛盾の解決～気候変動下におけるグリーンインフラの役割～」2021年9月21日、札幌市民交流会プラザ・オンラインイベント）にて講演
- 24) 高津文人、渡邊未来、松崎慎一郎：第56回日本水環境学会（2022）「谷津における自然栽培（無

施肥、無農薬) ハス田の栄養塩除去効果について」

- 25) 松崎慎一郎、渡邊未来、高津文人、中塚博子：第69回日本生態学会（2022）「無肥料栽培圃場と慣行農法圃場の土壌化学性の違い：流域管理の視点から」
- 26) 中西康介、横溝裕行、深谷肇一、角谷拓、松崎慎一郎、西廣淳、高津文人、林岳彦：第69回日本生態学会（2022）「琵琶湖の透明度上昇に対する大濁水の因果効果の推定」（ポスター発表）
- 27) 平野佑奈、杉島野枝、KIM JIYOON、西廣淳：日本生態学会第69回全国大会（2022）「湧水依存生物の分布に影響する景観、気候、地形地質要因：印旛沼流域の谷津での検討」（ポスター発表）
- 28) 西廣淳：日本生態学会第69回全国大会（2022）「「普通の自然」を未来に活かす「里山グリーンインフラ」の理念・研究・実践」
- 29) 森彩花、根本直彦、渡邊未来、松崎慎一郎、高津文人、石塚直樹、森下瑞貴、野口有里紗、中塚博子：2022年度日本土壌肥料学会関東支部会（2022）「埼玉県見沼区における泥炭埋没圃場の窒素施肥が土壌の窒素動態に与える影響」（ポスター発表）
- 30) 今藤夏子：第5回 山口大学・環境 DNA 研究センターシンポジウム～環境 DNA 研究の最前線と企業の取り組み～（2022）「環境 DNA による昆虫多様性検出とデータベースの重要性」
- 31) 西廣淳：水草研究会（2022）「水草の再生可能性を残すために：シードバンク保全の4つのポイント」
- 32) 西廣淳：日本陸水学会公開シンポジウム（2022）「生態系を活用した気候変動適応：印旛沼流域における里山グリーンインフラの取り組み」
- 33) 杉島野枝、長谷川雅美、西廣淳：日本緑化工学会・日本景観生態学会・応用生態工学会 3学会合同 ELRつくば大会（2022）「樹上性カエルの上陸個体数に影響する環境要因：水田景観と気候が異なる地域間の比較」（ポスター発表）
- 34) 田和康太、平野佑奈、杉島野枝、加藤大輝、橋本純、渡部陽介、西廣淳：日本緑化工学会・日本景観生態学会・応用生態工学会 3学会合同 ELRつくば大会（2022）「耕作放棄された谷津の湿地化は水生動物群集にどのような効果をもたらすか？」
- 35) 杉島野枝、長谷川雅美、西廣淳：日本爬虫両棲類学会第61回大会（2022）「樹上性カエルの生息数に影響する土地利用要因の景観・気候の違いによる比較」
- 36) 横山新紀：第63回大気環境学会年会（2022）「都市及び森林地域から流出するSO₄²⁻、NO₃⁻イオン濃度の低下傾向」
- 37) 横山新紀、横山智子、星野武司：第49回環境保全・公害防止研究発表会(2022)、降雨時における印旛沼流域の市街地排水中の硝酸イオン濃度の年々変動（ポスター発表）
- 38) 松崎慎一郎、高津文人、渡邊未来、今藤夏子：第70回日本生態学会（2023）「湧水を用いた無施肥レンコン栽培：レガシー窒素の浄化と生物多様性保全機能」
- 39) 平野佑奈・伊藤洋・今藤夏子・西廣淳：日本生態学会第70回大会（2023）「移動能力の異なる湧水選好動物3種の遺伝構造：流域スケールでの保全計画に向けて」
- 40) 片寄涼介、角谷拓、高津文人、松崎慎一郎、赤坂宗光：第70回日本生態学会（2023）「全循環の発生は植物プランクトン群集を規定するか；ダム湖長期観測データを用いた検証」（ポスター発表）
- 41) 平野佑奈、伊藤洋、今藤夏子、西廣淳：日本生態学会第70回大会（2023）自由集会「移動能力の異なる湧水選好動物3種の遺伝構造：流域スケールでの保全計画に向けて」
- 42) 今藤夏子：水生昆虫談話会、日本陸水学会共催シンポジウム —水生昆虫談話会 40周年例会— 水生昆虫における環境DNAのいま（2023）「DNAバーコーディング：環境DNA解析を支えるリファレンス整備」
- 43) 横山新紀：第38回全国環境研究所交流シンポジウム（2023）「降雨時の市街地・道路から流出する硝酸イオンの挙動」
- 44) 星野武司、品川知則：第38回全国環境研究所交流シンポジウム（2023）「印旛沼における植物プランクトンの増殖機構について」

- 45) 横山智子、星野武司、横山新紀：第57回日本水環境学会年会（2023）「印旛沼流域におけるノンポイントソースからの流出負荷量調査」
- 46) 星野武司、勝見大介、品川知則、横山智子：第57回日本水環境学会年会(2023)、印旛沼における底質からの栄養塩供給機構について」

【サブテーマ 3】

- 1) 大槻順朗：土木学会水工学委員会環境水理部会研究集会2020（2021）「谷津景観における湿地復元をベースとしたEco-DRRに関する研究」
- 2) 大槻順朗：環境研究総合推進費2-2002「気候変動に対応した持続的な流域生態系管理に関する研究」プロジェクト「谷津景観の保全活用と治水・環境，気候変動時代の自然環境保全と水防災」
- 3) Ohtsuki K, Nishihiro J, Kato H, Nakamura K. : The Partnership for Environment and Disaster Risk Reduction (PEDRR) Cross-Regional Symposium (2021) "Evaluation of the impact of drainage channel improvement associated with agricultural land development on flood flow in the small valley wetland (Yatsu) landscape."
- 4) 大槻順朗・巖島怜・西廣淳：応用生態工学会第24回全国大会（2021）「2019年台風19号（令和元年東日本台風）災害を踏まえた治水・環境への提言～水害防備林～」
- 5) 大槻順朗、西廣淳、加藤大輝：応用生態工学会第24回全国大会（2021）「谷津景観における農地整備に伴う排水路整備による洪水流への影響の評価」
- 6) 中村圭吾：日本造園学会全国大会研究推進委員会フォーラム日本都市計画学会グリーンインフラの計画的展開と社会実装研究会「流域治水とグリーンインフラ」（2022）「グリーンインフラと流域管理」
- 7) 中村圭吾：日本緑化工学会・日本景観生態学会・応用生態工学会 3学会合同 ELRつくば大会（2022）「Nature-positiveを実現させるにはー2030年にむけてー 第1部：Nature-positiveの実現に向けたグリーンインフラの評価と技術」
- 8) 大槻順朗：日本緑化工学会・日本景観生態学会・応用生態工学会 3学会合同 ELRつくば大会（2022）「Nature-positiveを実現させるにはー2030年にむけてー 第2部：パネルディスカッション「Nature-positiveを実現させるには」」
- 9) 大槻順朗、野尻雄介、西廣淳、加藤大輝：日本緑化工学会・日本景観生態学会・応用生態工学会 3学会合同 ELRつくば大会（2022）「谷津景観における放棄水田の湿地化による治水対策評価と対策優先順位の考え方についての検討」
- 10) Ohtsuki K, Nishihiro J, Kato H, Nakamura K.: 14th International Symposium on Ecohydraulics, Nanjing, China (2022) "Evaluation of the Impact of Drainage Channel on Flood Flow in the Urban-Rural Landscape"

【サブテーマ 4】

- 1) 馬場友希、Sorgog Kiyon、田中幸一：日本蜘蛛学会第53回大会（2021）「水田におけるクモとイネ害虫の農法に対する反応と地理的傾向」
- 2) 片山直樹：日本鳥学会2021年度大会（2021）「農業活動と鳥類多様性の関係を多様なアプローチで探る」（黒田賞受賞講演）
- 3) 片山直樹：第22回日本有機農業学会大会（2021）「エビデンスから考える有機農業と生物多様性の関係」
- 4) 片山直樹：日本生態学会第69回全国大会（2022）「農地における生物多様性保全のエビデンス」
- 5) Sorgog Kiyon、片山直樹、大久保悟、馬場友希：日本蜘蛛学会第54回大会（2022）「湿地再生地におけるクモ・イネ害虫相の特徴と周囲農地への供給効果の検証」

(3) 「国民との科学・技術対話」の実施

【サブテーマ1】

「特に記載すべき事項はない。」

【サブテーマ2】

- 1) ふるさと海辺フォーラム「二〇二〇ハマって里浜」（北の里浜花のかけはしネットワーク主催、2020年6月21日、ウェブイベント）にて、西廣淳「保全を「普通のこと」にするには」を講演。
- 2) グリーンインフラ官民連携プラットフォーム講習会「グリーンインフラと里山の自然」（主催：グリーンインフラ官民連携プラットフォーム、2020年9月28日、オンライン開催）にて西廣淳が講義
- 3) グリーンインフラネットワークジャパン全国大会（GIJ2020）セッション「流域水循環をまわす『里山グリーンインフラ』を語ろう」（主催：里山グリーンインフラネットワーク、2020年11月7日、オンライン開催）にて西廣淳が趣旨説明を兼ねた講演
- 4) グリーンインフラ・ネットワーク・ジャパン全国大会公募ミーティング（2020年11月8日、ウェブイベント）にて、西廣淳が「グリーンインフラとしての草原：未来の里山管理を考える」として主催・開催趣旨説明）
- 5) 第2回利根川下流自然再生シンポジウムin神栖（2020年11月11日、ウェブイベント）にて、西廣淳が「植物と環境の視点から」を講演。
- 6) 茨城県霞ヶ浦環境科学センター講座「気候変動時代における湿地の役割」（主催：茨城県霞ヶ浦環境科学センター、2020年11月28日、オンライン開催）にて西廣淳が講演
- 7) かわさき市民アカデミー「気候変動時代における湿地の保全と活用」（主催：NPO法人かわさき市民アカデミー、2020年12月17日、オンライン開催）にて西廣淳が講演
- 8) 気候変動時代の自然環境保全と水防災（主催：本プロジェクト、2021年1月20日、オンライン開催）にて西廣淳が主催者を代表した趣旨説明と討論のファシリテータ（視聴者数294名、閲覧回数404回）
- 9) おおさか気候変動適応センター成果発表「どうなんの？どうしたらエエの？気候変動適応」（主催：おおさか気候変動適応センター・大阪府、2021年1月15日、オンライン開催）にて西廣淳がコメンテーターとして参加
- 10) 独立研究開発法人国立環境研究所【春のオープンキャンパス2021②環境DNA】霞ヶ浦の魚を調べる～水中のDNAからのアプローチ～（主催：独立研究開発法人国立環境研究所、2021年4月17日に公開、Youtubeビデオ、<https://www.youtube.com/watch?v=-2P7PfZ314U>）にて、今藤夏子、松崎慎一郎が解説
- 11) 2050年の社会像：生態系と社会システムの共生体化を支える科学・技術・社会協働。JSTミレニア・プログラム「生態-社会システム共生体化チーム」公開シンポジウム（2021年6月22日、オンライン開催）にて西廣淳が「地域における人と自然の繋がり」を講演
- 12) ラムサール・ネットワーク日本ポスト2020水田の生物多様性向上のための学習会（2021年8月30日、オンライン講演）にて、西廣淳が「気候変動適応策における水田や耕作放棄水田の役割」を講演
- 13) 国立環境研究所公開シンポジウム2021「気候変動ってなににするの？かわりゆく気候にどう備えるか」（2021年8月17日動画放映型講演）にて、西廣淳が「自然環境への気候変動影響とその観測」を講演
- 14) 応用生態工学会公開シンポジウム：自然の「恵み」と「災い」という矛盾の解決～気候変動下におけるグリーンインフラの役割～（2021年9月21日、オンライン）にて、西廣淳、「グリーンインフラの価値を高める生態系管理」を講演
- 15) 2021年度筑波大学自然保護寄附講座オンライン・シンポジウム「自然の恵みと地域づくり：今、生物多様性地域戦略に求められているもの」（2021年10月9日、オンライン）にて、西廣淳が「自然を活用しつつ守る工夫」を講演

- 16) 日本学術会議シンポジウム「地球環境変動と人間活動（その2）—地球規模の環境変化にどう対応したらよいか—」．日本学術会議地球惑星科学委員会地球・人間圏分科会主催（2021年12月5日、日本学術会議講堂からのオンライン配信）にて、西廣淳が「生態系を活用した気候変動適応」を講演．
- 17) 田んぼの生物・文化多様性2030プロジェクトキックオフ集会（ラムサール・ネットワーク日本主催、2021年12月12日、小山市立中央公民館・オンライン併用）にて、西廣淳が「気候変動と『田んぼシステム』」を講演
- 18) 環境省Water Project 2021年度第4回 グッドプラクティス塾（2022年3月、オンライン）にて、西廣淳が「水辺環境の保全・活用・連携」を講演
- 19) 白井環境フォーラム（2022年3月、白井市役所）にて、西廣淳が「自然をインフラとして活かす考え方と技術」を講演
- 20) ふなばしエコカレッジ（2022年7月、8月）にて、西廣淳が「生物多様性に関する知識（台地の自然について）（低地の自然について）」を講演
- 21) 中池見湿地ラムサール条約登録10周年記念シンポジウム（2022年7月31日、敦賀市）にて、西廣淳が「気候変動と『新しい里山』」を講演
- 22) ふなばし市民大学校（2022年10月30日、船橋市）にて、西廣淳が「子どもたちの未来のために：生物多様性を資本として守る」を講演
- 23) 第6回 S-18セミナー（2022年11月14日、オンライン）にて、西廣淳が「気候変動適応に役立つ生態系管理—印旛沼流域での試み—」を講演
- 24) 国土交通省利根川下流河川事務所・香取市・銚子市・東庄町・神栖市共催．第4回利根川下流部自然再生シンポジウムin香取（2022年11月25日、香取市）にて、西廣淳が「ヨシ原をめぐる人と自然のかかわり」を講演
- 25) グリーンインフラ産業展（2023年2月2日）にて、西廣淳が「里山グリーンインフラの研究と実践」を講演
- 26) 千葉市科学館講座（2023年2月18日）にて、西廣淳が「里山の自然の力を借りた気候変動への対応」を講演
- 27) The World Bank Tokyo Technical Deep Dive “Nature based Solutions for Climate Resilience”（2023年2月23日、東京）にて、西廣淳が“NbS in collaboration with citizens: case studies from Japan.”を講演

【サブテーマ3】

- 1) GIPFオンラインセミナー グリーンインフラ評価の考え方とその評価 講演（2022年6月21日）
- 2) 令和4年度九州国土研究会 特別講演（2022年7月29日）
- 3) ものづくり日本会議シンポ「グリーンインフラビジネスの最新動向と今後の展望」講演（2022年9月8日）
- 4) グリーンインフラ官民連携プラットフォーム業界団体共催セミナー 講演（2022年11月2日）
- 5) シンポジウム：球磨川流域の復興にグリーンインフラを活用しよう！ 講演（2022年11月26日）
- 6) 建設コンサルタンツ協会関東支部 講演（2022年12月9日）
- 7) 淀川河川レンジャー勉強会 講演（2023年1月20日）
- 8) 世界銀行TDLC研修 NATURE BASED SOLUTIONS FOR CLIMATE RESILIENCE 講演（2023年2月21日）

【サブテーマ4】

「特に記載すべき事項はない。」

(4) マスコミ等への公表・報道等

【サブテーマ1】

「特に記載すべき事項はない。」

【サブテーマ2】

- 1) 朝日新聞2020年9月9日、全国版、「耕作放棄された水田再生の試み、「グリーンインフラ」に（谷津の耕作放棄水田の生態系機能評価の研究が進められていることが紹介された）
- 2) 毎日新聞（デジタル）2021年6月16日、「生態学者、田んぼを耕す「見放された土地」に見た「可能性」」（谷津の耕作放棄水田を活用する取り組みが紹介された）
- 3) 日本農業新聞（2022年11月25日、♪カエルの歌は5種類あるよ 関東平野の水田200カ所調査 東邦大・国立環境研）
- 4) 朝日新聞（2022年12月7日、千葉版、「カエルの歌」から生息探る 鳴き声を録音、誰でも参加できる生物学）」

【サブテーマ3】

「特に記載すべき事項はない。」

【サブテーマ4】

「特に記載すべき事項はない。」

(5) 本研究費の研究成果による受賞

「特に記載すべき事項はない。」

(6) その他の成果発表

- 1) **Sorgog K, Tanaka K, Baba YG** 2022. Geographical trends of insect pests and spiders responding to organic farming practices in Japanese rice paddy fields. Joint annual meeting of entomological society of America, Canada and British Columbia. (Nov.16, Canada) (Poster presentation)

IV. 英文Abstract

Study on Sustainable Ecosystem Management of River Watersheds toward Climate-Change Adaptation

Principal Investigator: Jun NISHIHIRO

Institution: National Institute of Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki, JAPAN

E-mail: nishihiro.jun@nies.go.jp

Cooperated by: Toho University, Chiba Prefectural Environmental Research Center, Public Works Research Institute, National Agriculture and Food Research Organization, Japan River Front research Center, University of Yamanashi

[Abstract]

Technological development of ecosystem-based climate change adaptation (EbA) measures was conducted in the Lake Inbauma watershed of Chiba Prefecture, Japan. It was suggested that conserving and restoring ecosystems in small valleys at the uppermost reaches of rivers flowing into the lake into wetlands can enhance ecosystem functions related to biodiversity conservation, water purification (nitrogen removal), and flood control. To achieve this, an increase in the rainwater infiltration surface on the plateau, which serves as the catchment area of the valley, was recommended. Increasing the infiltration surface of rainwater on the plateau is effective in ensuring that organisms inhabiting wetlands occurring in the valley bottom can adapt to future climate conditions with rising temperatures. Furthermore, wetlands in agricultural landscapes can reduce the risk of agricultural damage from pests by maintaining shallowly inundated conditions.

In the study on flood control, the effect of wetland restoration within river basins on reducing the amount of flood damage was examined. The results suggest that wetland restoration in areas with many abandoned rice paddies upstream can contribute to the reduction of flood damage. However, inappropriate site selection may increase the amount of flood damage. Therefore, site selection is crucial in planning flood control using wetlands.

A theoretical study on approaches to adaptation to climate change with uncertainty was conducted, utilizing Info-gap theory. A method was proposed to evaluate the adaptive capacity of a system based on the amount of uncertainty it can tolerate. The developed method was applied to ecosystem data to quantify adaptive capacity. Furthermore, the concept of an "adaptation dashboard" was proposed, which visualizes and compares the performance of multiple issues requiring climate change adaptation under the same environmental axis. The results of the above studies were incorporated into lake watershed management plans and water quality management plans of the local government.

Key Words: Climate change adaptation, Ecosystem-based adaptation (EbA), Ecosystem-based disaster risk reduction (Eco-DRR), Nature-based solutions (NbS), Other effective area-based conservation measures (OECM), Green infrastructure, Watershed management, Wetland, Nature restoration