

陸域・陸水域生態系における気候変動影響モニタリング

Climate change impact monitoring in terrestrial and freshwater ecosystems

西廣 淳*・辻本 翔平
Jun NISHIHIRO* and Shohei TSUJIMOTO

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
Center for Climate Change Adaptation, National Institute for Environmental Studies

摘 要

気候変動は社会・経済だけでなく、自然生態系にも影響を及ぼしている。生態系を構成する生物種の分布、個体数、季節性に対する気候変動の影響を明らかにするためには、広域・多点における長期的なモニタリングによって得られたデータが有用である。本稿では、陸域生態系、陸水域生態系、湿地生態系を対象に、気候変動による影響の解析・検出に活用できるデータの状況と、今後のモニタリングにおける課題について解説する。自然生態系が成立している空間は、土地の所有や管理形態、管轄する行政機関が多様であり、データを取得・管理している主体も多岐にわたる。整理の結果、草原や湿地などいくつかの生態系において、体系的なモニタリングが不足していることがわかった。今後は、体系的なモニタリングの充実だけでなく、個別の論文や報告書等の情報の統合も重要である。

キーワード：オープンデータ、気候変動適応、生物季節観測、生物多様性、データベース

Key words : open data, climate change adaptation, phenology monitoring, biodiversity, database

1. はじめに

気候変動に対する効果的な適応策を策定するためには、将来の気候の予測とともに、すでに生じている気候変動による影響の正確な把握が重要である。現在、日本では気候変動に伴うリスクの発生・増加が予測される分野を、農林水産業、水環境・水資源、自然生態系、自然災害・沿岸域、暑熱・健康、産業・経済、国民生活の7つに分け、それぞれにおいて気候変動影響の把握と将来予測が進められている(環境省, 2018)。これらのうち、自然生態系分野における気候変動影響、すなわち動植物の分布域への影響、個体数の変化、季節性への影響といった事項は、他分野と異なり、人間の社会や生活に対する影響が間接的である。そのため気候変動影響のモニタリングの必要性が他分野と比べて理解しにくい。しかし、例えば世界の作物生産量のおよそ35%は何らかの形で訪花昆虫による送粉サービスに依存している事実(Garibaldi *et al.*, 2013)や、森林植生の状態が生態系の防災・減災機能に影響する事実(Mizuno *et al.*, 2021)を考えると、気候変動によって人間社会が受けるリスクを把握するためには、自然生態系の状態把握の重要性は明白である。また近年では、沿

岸防災におけるマングローブ林の活用や、治水における氾濫原湿地の活用など、気候変動適応の目的で生態系の機能を積極的に活用する取組(生態系を活かした適応: Ecosystem-based Adaptation, EbA)の重要性が指摘され、具体的な取組も進められている(Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2019)。生態系や生物多様性の状態の把握は、気候変動適応策を検討する上で不可欠である。

気候変動は、すでに生物多様性や生態系の状態に影響している。日本の生物多様性の現状とそれに影響する要因をまとめた気候変動影響評価報告書(環境省, 2020)では、1970年代からの高山植物群落の減少、直近30年間における外来種のタケ類(モウソウチク、マダケ)の分布の北上(Takano *et al.*, 2017)、南方系チョウ類の分布の北上や個体数増加(今井, 2013)といった現象について、温暖化の影響が指摘されている。また、沖縄県などにおけるサンゴの白化は、海面水温の上昇も一因となっていることが指摘されている(川越, 2017)。

自然生態系が成立している陸上、陸水、沿岸域、海洋といった空間は、土地の所有や管理形態、管轄する行政機関が多様である。そのため気候変動による影響の把握で有用な情報を取得・管理している主

受付: 2021年11月8日, 受理: 2021年12月22日

* 〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2, E-mail: nishihiro.jun@nies.go.jp

体も多岐にわたる。自然生態系分野における気候変動影響モニタリングでは、これらの情報の統合が必要であるとともに、調査や公開が不足している項目の解明と対策が求められる。

2017年3月に、中央環境審議会は「気候変動適応策を推進するための科学的知見と気候リスク情報に関する取組の方針」の中間とりまとめを行った。その中では、関係府省庁や研究機関が連携・協力し、気候変動とその影響のモニタリングについて体系的に整理し、戦略的に取組を進めるための検討が必要であることが指摘された。それを受け、「気候変動の影響観測・監視の推進に向けた検討チーム」が設置され、気候変動への適応が求められる各分野の専門家により、「観測・監視(モニタリング)の現状の整理」と「観測・監視についての課題のとりまとめ及び対応策案」が議論され、2018年度末には「戦略的な気候変動の影響観測・監視のための方向性」の報告書が、2020年度末には内容を更新した同・第2版が公表された(気候変動の影響観測・監視の推進に向けた検討チーム, 2020)。本稿は「戦略的な気候変動の影響観測・監視のための方向性(第2版)」に収録された情報を踏まえ、新たな知見を追加し、自然生態系の中でも陸域生態系、陸水域生態系、湿地生態系について、気候変動による影響の解析・検出に活用できるデータの状況と、今後のモニタリングにおける課題について解説する。

2. 自然生態系を対象としたモニタリングの現状と課題

2.1 陸域生態系のモニタリング

2.1.1 モニタリングの現状

陸域生態系を含め、日本の自然生態系・自然生態系の状態を把握する上で特に重要な役割を担っている事業の1つに、環境省による「自然環境保全基礎調査」が挙げられる(表1)。「緑の国勢調査」ともいわれるこの調査は、自然環境保全法に基づき、「全国的な観点から我が国における自然環境の現況及び改変状況を把握し、自然環境保全の施策を推進するための基礎資料を整備する」という目的のもと、1973年から実施されている。陸域生態系については、植物、動物、地形地質に関して17の調査が行われている(環境省生物多様性センター, 2016)。原則として5年に一度の頻度で実施されている自然環境保全基礎調査は、気候変動による生態系への影響を検討する上できわめて重要なものである。ただし、毎回の調査において必ずしもすべての調査項目が実施されているわけではなく、また同じ項目でも調査方法や空間解像度が調査の回によって異なる場合があるため、経年的データとして解析に活用する際には、上述の生物多様性センターのウェブページやそこからリンクしている個別の報告書で述べられ

ている詳細な調査手法を確認する必要がある。

自然生態系に対する気候変動の影響を明らかにするためには、同じ場所で同じ方法で調査されたデータが特に有用である(Shoo *et al.*, 2006)。この点で、「全国に1,000か所以上の調査サイトを設置し、100年以上モニタリングを継続する」という目標を掲げた、環境省による「モニタリングサイト1000」事業(正式名称は「重要生態系監視地域モニタリング推進事業」)は、今後、気候変動影響の観測としても重要性を増すものと考えられる。2003年に開始されたこの事業は、高山帯・森林・里地などの陸上生態系、湖沼や湿原などの淡水生態系、磯・干潟・サンゴ礁・藻場などの沿岸生態系など、幅広い対象について実施されている(表1)。この調査の結果からは、すでに森林の鳥類(植田ほか, 2014)や里地のチョウ類(環境省自然環境局生物多様性センター, 2019)における個体数変化など、生態系・生物多様性の重要な変化が示唆されている。また森林を対象とした「モニタリングサイト1000」調査からは、より温暖な気候に生育する樹種タイプの個体数が増加するなど、気候変動影響と解釈できる変化が認められている(環境省自然環境局生物多様性センター, 2020a)。今後、長期的なデータが蓄積することにより、生物相や分布に対する気候変動の影響がより詳細に解明されることが期待される。

JaLTER(Japan Long-Term Ecological Research Network: 日本長期生態学研究ネットワーク(<http://www.jalter.org/>))は、生態系の長期観測を実施している調査地・調査主体の連携のために2006年に設立されたネットワークであり、ILTER(International Long-Term Ecological Research Network: 国際長期生態学研究ネットワーク)の日本のブランチとして位置付けられている。JaLTERには21箇所のコアサイトと、38箇所の準サイトがある(2021年10月末現在)。これら合計59のサイトの内の過半数(34箇所)は森林のサイトであり、ここには「モニタリングサイト1000」の調査地を兼ねているサイトも含まれる。ILTER, JaLTERは、様々な目的で活用できる生態学の基礎的知見の取得・共有を目的としたネットワークである。地球規模で進行する気候変動の影響を明らかにする目的においても、国際連携を重視しているJaLTERの取組は極めて重要なものといえるだろう。

気候変動による生態系への影響を把握する上では、気温や降水量の変化に対して特に脆弱な生態系に着目することが有意義である。その点で、高山帯・亜高山帯の生態系のモニタリングは特に重要である(La Sorte and Jetz, 2010: 図1)。高山帯・亜高山帯では、気温の上昇による生物への直接的な影響に加え、積雪パターンの変化や狩猟圧の低下などの人間活動の変化により、ニホンジカやイノシシの分布が高標高域に拡大することが懸念されている(尾

表1 行政機関等による生物多様性に関する継続的なモニタリング。本文中で紹介したものについて整理した。

調査名称(実施主体)		生態系のタイプ					
		森林	草原	河川	湖沼	高層湿原	低層湿原
自然環境保全 基礎調査 (環境省) https://www.biodic.go.jp/kiso/fnd_list_h.html	植生調査	全国を対象とした植生図の作成					
	特定植物群落調査	様々な生態系タイプを含むように選択された場所での植生調査※1					
	種の多様性調査	調査回・地域に応じて異なる生態系を対象とした生物分布調査※2					
	動物分布調査	様々な生態系タイプを含むように設定された動物調査※3					
	河川調査	-	-	物理・化学環境と魚類等の調査※4	-	-	-
	湖沼調査	-	-	-	物理・化学環境と魚類・水生植物等の調査※4	-	-
モニタリングサイト 1000 (環境省) http://www.biodic.go.jp/moni1000/	高山帯調査	6 サイト (植生・昆虫等)		-	-	-	-
	森林・草原調査	48 サイト (植生・鳥類等)		-	-	-	-
	里地調査	約 200 サイト (植物相, 指標動物等)		-	-	-	一部サイトが該当
	湖沼・湿原	-	-	-	15 サイト(魚類, 水生植物相)	10 サイト (植生ほか)	-
	ガンカモ類	-	-	-	-	-	81 サイトでの 個体カウント
JaLTER サイト (JaLTER 事務局) http://www.jalter.org/	コアサイト	14 サイト ※5	1 サイト(森林と兼ねたサイト)	-	-	-	-
	準サイト	21 サイト	5 サイト	-	3 サイト	-	-
森林生態系多様性 基礎調査(林野庁) https://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/tayouseichousa/		約 14,000 か所での 毎木調査 等	-	-	-	-	-
河川水辺の国勢調査 (国土交通省) http://www.nilim.go.jp/lab/fbg/ksnkankyo/	生物調査	-	-	一級河川 109 水系※6	-	-	河川区域内の湿地は調査対象
	河川基図調査	-	-	一級河川 109 水系※7	-	-	河川区域内の湿地は調査対象

※1 第5回調査(1993年~1999年)までしか実施されていない。
 ※2 調査回ごと・地域ごとに調査対象が異なる。
 ※3 哺乳類, 鳥類, 両生類・爬虫類, 昆虫類の分布調査がある。ただし第5回調査(1993年~1999年)以降は種の多様性調査に統合された。
 ※4 第2~第5回(1978年~1999年)のみ。
 ※5 モニタリングサイト1000調査と兼ねた場所が多い。
 ※6 魚類, 底生動物, 植物, 鳥類, 両生類, 爬虫類, 哺乳類, 陸上昆虫類の調査が含まれる。
 ※7 植生図を作成する調査が含まれる。

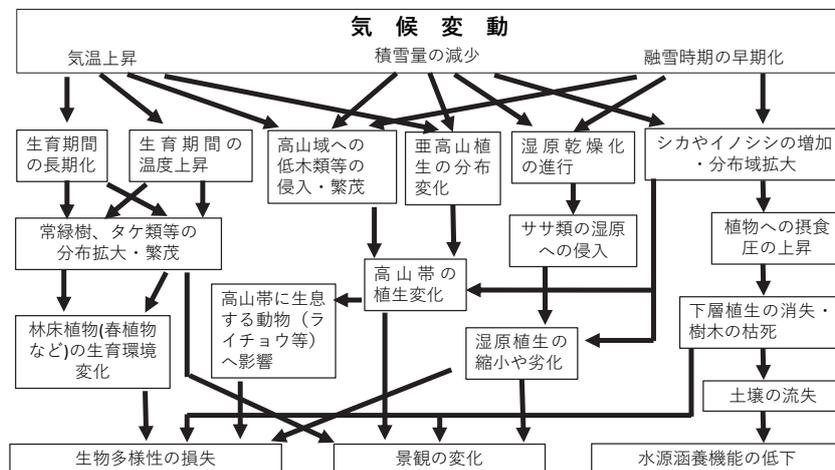


図1 陸域生態系における気候変動影響の代表的な経路。

「戦略的な気候変動の影響観測・監視のための方向性(第2版)」(気候変動の影響観測・監視の推進に向けた検討チーム, 2020)より改図。

関・堀田, 2017)。しかし現状では、環境省「モニタリングサイト 1000」(http://www.biodic.go.jp/moni1000/seitaikei_1.html)の調査では7箇所しか対象にされておらず、調査の充実が望まれる。

生物の分類群の中で、鳥類は世界的にも歴史的にもモニタリングデータが充実している分類群である(Bert, 2005)。認定NPO法人バードリサーチ(<https://www.bird-research.jp/index.html>)は、鳥類の個体数、分布、飛来日などのモニタリングを継続的に実施している。2021年には、鳥の分布を1970年代・1990年代と比較した貴重な報告を公表した(鳥類繁殖分布調査会, 2021)。また個体識別可能な足環を鳥につけて放し、その後の回収により鳥の移動や寿命についての情報を得る調査である「鳥類標識調査(バンディング)」は、日本においても1924年以来の長い歴史をもつ(山階鳥類研究所, 2021)。日本の鳥類標識調査は環境省からの委託事業として山階鳥類研究所が実施し、そのデータも管理されている。今後、気候変動影響の研究での活用が期待される。

環境省による調査以外にも、気候変動の影響の解析に有用なデータは多数存在する。例えば林野庁による森林生態系多様性基礎調査は、1999年から5年間の周期で約14,000箇所の地点で実施されている。この調査では、樹種、胸高直径、樹高など毎木調査の結果から下層植生の種組成を含め、多くの項目が記録されている。データはウェブ公開こそされていないものの、利用申請の窓口が設けられている(表1)。

2.1.2 モニタリングの課題

森林とは異なり、草原生態系については行政機関による系統的なモニタリングはほとんど行われていない。JaLTERでも草原のサイト・準サイトは5箇所に過ぎない。そのような中、下田らにより全国28箇所の草原における経年的な植生調査データを整理したデータペーパーが出版された意義は大きい(Shimoda *et al.*, 2020)。このデータは、農林水産省の草地試験場と5つの地域農業試験場が共同して実施している草地の動態に関する調査の結果をまとめたものであり、日本語のウェブページ(<http://www.naro.affrc.go.jp/archive/nilgs/vegetation/>)でも公表されている(表1)。しかし、ここに収録された草原でさえ数が限られる上、これらデータペーパー・データベースのもととなった調査は2020年度で終了したことが報告されている(井出ほか, 2021)。日本の草原の多くは、草刈り・放牧・火入れなどの人為攪乱を加えないと、樹林に遷移してしまい、維持できない場合が多い(Ushimaru *et al.*, 2018)。また一般に、樹林への遷移のしやすさは気温や降水量に依存し、温暖化が進むと草原の維持がこれまで以上に困難になる可能性が指摘されている(Boone *et al.*, 2017; Zarei *et al.*, 2020)。したがって、草原は気候変動に対して脆弱な生態系といえる。多数の草原で体

系的なモニタリングを実施することが望まれる。また、それが実現できなくとも、研究者・機関や行政によって個別に公表された論文や報告書に掲載された情報を統合したデータベースの構築は、気候変動を含む多様な要因が草原生態系に与える影響を明らかにする上で重要である。

上述した高山帯に限らず、ニホンジカやイノシシは全国で増加している。その原因としては、保護政策、生息地の改変、オオカミの絶滅、狩猟者の減少、中山間地における人口減少と耕作放棄地の増加と並び、暖冬の継続の影響が指摘されている(鷲谷ほか, 2021)。ニホンジカの増加は植物種の消失や群落構造の変化、そこに生息する動物相など、生物多様性に大きな影響を与える(環境省, 2019)。さらに高密度状態が長期化すると、植生の消失により土砂流出のリスクが高まる。イノシシについては、生物多様性への影響に加え、農業被害や獣畜共通感染症である豚熱(CSF)の拡散の問題もある。またニホンジカとイノシシに共通し、SFTS ウィルスや日本紅斑熱など、人の健康や生命に影響するダニ媒介性の疾病の拡散にも影響している(岡部ほか, 2019)。これら自然生態系だけでなく産業や健康にも強く影響する哺乳動物のモニタリングと、気候変動による影響の解明は急務である。ニホンジカ及びイノシシの全国的な生息分布については、環境省により1978年から2014年までの間に4回実施されている。また2020年には、これまでの調査では分布情報が得られていなかった地域を含め、都道府県へのヒアリングや捕獲情報の集約を行い、5 km メッシュ単位での全国的な生息分布図が作成され、分布拡大の実態が明確になってきた(環境省, 2021; 表1)。今後、分布変化や個体群変動の原因のより詳しい解析が進むことが望まれる。

2.2 陸水域生態系

2.2.1 モニタリングの現状

河川や湖沼に代表される陸水生態系において、気候変動は、集中豪雨による攪乱パターンの変化や流域からの栄養塩の負荷の増大、水温上昇に伴う植物プランクトンの増加と貧酸素水塊の拡大・長期化などを通じて、生物多様性や生態系に大きな影響を及ぼすことが考えられる(図2)。

河川における生物調査としては、統一的な手法で全国の河川で実施されているという点で、国土交通省による河川水辺の国勢調査は秀でたモニタリングである。河川水辺の国勢調査は、「河川環境の整備と保全を適切に推進するため、河川の自然環境に関する基礎情報の定期的、継続的、統一的な整備を図るもの」として、1990年から全国の一級河川109水系において実施されてきた。生物調査として「魚類調査」、「底生動物調査」、「植物調査」、「鳥類調査」、「両生類・爬虫類・哺乳類調査」「陸上昆虫類等調査」の6項目が実施されている(表1)。なお植生図の作

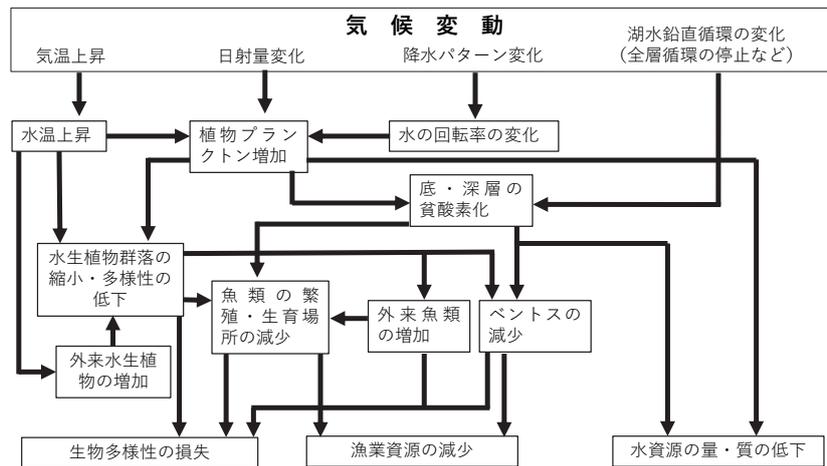


図2 湖沼生態系における気候変動影響の代表的な経路。

「戦略的な気候変動の影響観測・監視のための方向性(第2版)」(気候変動の影響観測・監視の推進に向けた検討チーム, 2020)より改図。

成は、生物調査とは別の「河川環境基図作成調査」の一環として実施されている。これらの調査は原則として5年に一度(一部の項目は2006年から10年に一度に変更)の頻度で実施されている。また一級河川の主に中流・下流部で実施される「河川版」と、ダム湖と周辺河川で実施される「ダム湖版」があり、それぞれ異なるマニュアル(<http://www.nilim.go.jp/lab/fbg/ksnkankyo/kijunrui.html>)に基づいて実施されている。河川水辺の国勢調査で得られた地方ごとの確認種の一覧(ただし絶滅危惧種等は除く)等の概要データはウェブページ(<http://www.nilim.go.jp/lab/fbg/ksnkankyo/#>)からダウンロードできる。ただし詳細なデータは一般公開されておらず、活用の検討では国土交通省への相談が必要である。河川水辺の国勢調査のデータを用いた解析では、魚類や底生動物について水温に対する依存性が検出された例もある(天野・望月, 2011)。

河川水辺の国勢調査は気候変動影響の把握や予測に有用である。しかし、国土交通省が直轄管理する一級河川しか対象にしていなかったため、都道府県が管理する二級河川、市町村が管理する準用河川は対象ではないことに注意が必要である。これらの河川においても生物調査が行われる場合はあり、統一した手法で調査することでデータの有効活用につながるものと考えられる。

湖沼については、小川原湖(青森県)や霞ヶ浦(茨城県)のように一級河川として管理されている場合は河川水辺の国勢調査が実施されているものの、その他の多くの湖沼については系統的な調査は行われていない。また「モニタリングサイト1000」で調査されている湖沼も、水生植物については9湖沼、淡水魚類については7湖沼と、地点数が限られている(環境省自然環境局生物多様性センター, 2020b, 表1)。霞ヶ浦のように水質や一次生産量のデータとともに、魚類等の生物の種と個体数・重量などの生物データが蓄積・公表されている湖沼もあるが(国

立環境研究所「霞ヶ浦データベース」, <https://db.cger.nies.go.jp/gem/inter/GEMS/database/kasumi/index.html>), このような例は稀である。そのため、全国の多数の湖沼の状況を把握するためには、地域の研究機関や研究者による成果を含む論文や報告書に掲載されたデータを統合することが重要である。

筆者らは日本の湖沼の水生植物の分布を過去の文献資料から収集してデータベース化し、公表している(Nishihiro *et al.*, 2014; 表1)。このデータベースを活用した解析からは、過去から現在への水生植物相の変化に対して、湖沼の地形学的特徴や周辺の都市化とともに、気候条件による有意な効果が検出された(Kim and Nishihiro, 2020)。また松崎らは日本国内の23の湖沼について、内水面漁業の漁獲量データを活用し、年間従事日数や漁獲効率を考慮した状態空間を構築し、漁獲資源量の長期的な動態を検出した(Matsuzaki and Kadoya, 2015)。このように、湖沼の生物多様性・生態系の状態把握では、陸上生態系における草原やシカ・イノシシと同様に、離散している資料や、生物多様性・生態系の状態把握以外の目的で取得されたデータの集約が有効である。

2.2.2 モニタリングの課題

「ため池」は主に農業用水を確保する目的で人工的に作られた水域である。利水を第一の目的として造成・維持されてきた施設であるものの、河川の氾濫原や湖沼沿岸域などの湿地環境が農地開発や宅地開発によって損なわれる中、日本の淡水域の生物多様性保全上、重要な場となっている(Takamura, 2012)。世界的にもため池のような小規模な止水域は、単位面積当たりの生物種数が圧倒的に多いことが知られている(Williams *et al.*, 2004)。日本には約20万のため池があるとも推定されているが(高村, 2007)、生物多様性の状態把握が行われている地域は限られている。ため池における水生植物の調査結果については、環境省による「重要湿地500」の選定の際に調査された全国15地域、合計399のため

池の情報があり(調査年は2003年)、整理されたデータがダウンロードできるようになっている(志賀ほか, 2021, 表1)。ただしこの調査でも対象にできていない地域は多数存在するし、また公開されているデータは時間的な変化を把握できるものではない。

現在、日本各地でため池の堤防の強化などの防災工事や、廃止(埋め立てや堤防の開削により水を溜めない構造にすること)の工事が進行している。これらの多くは、2018年7月豪雨の際に決壊したため池による人命被害が発生したことを踏まえて制定された、「防災重点農業用ため池に係る防災工事等の推進に関する特別措置法」(https://www.maff.go.jp/j/nousin/bousai/bousai_saigai/b_tameike/koujitoku_sohou.html)に基づくものである。農業用に利用されなくなったため池では、この措置に基づき廃止される場合も多い。ため池が担う生物多様性保全機能を考慮し、改廃の是非や改修の方法を検討できるよう、動植物の分布状況の把握と情報共有が進むことが望まれる。

河川・湖沼など陸水域生態系では、近年、魚類をはじめとする水生生物相の把握において環境DNAの情報を活用する技術が急速に進展してきた。特に魚類については、環境DNAメタバーコーディング(複数種のDNAを同時に検出する手法)により、その水域内の魚類相を把握する調査が普及してきている(Miya *et al.*, 2015)。環境DNAによる種組成調査と河川水辺の国勢調査の結果を比較した研究では、少なくとも遊泳性の魚類では、環境DNAの方が種の存在情報をより確実に得ることができると示唆されている(赤松ほか, 2018)。調査・分析手法の改良も進んでおり(環境DNA学会, 2020)、今後、従来通りの捕獲や観察による調査と並ぶ標準的な生物調査手法となるだろう。特に、環境DNA情報の活用は、多地点・高頻度な観測において従来の手法より有利である(Ushio *et al.*, 2018)。気候変動影響の観測・検出にも適した情報が多くもたらされることが期待できる。

2.3 湿地生態系のモニタリング

湿潤な土壌・基盤の存在で特徴づけられる湿地生態系は、2.1で述べた森林・草原のような陸域生態系や、2.2で述べた河川・湖沼・ため池のような陸水域生態系と比べると、水の条件においてその中間的な位置にあたるものであり、陸上及び水域の生態系とは異なる特徴を有する。湿地生態系は、世界的に生物多様性の損失の進行が特に深刻である(van Diggelen *et al.*, 2006; Littlewood *et al.*, 2010)。その原因としては、農地や都市の開発と並び気候変動の重要性も指摘されている(例えば、Dieleman *et al.*, 2015)。

湿地は、もっぱら雨水・降雪によって涵養され、厚く発達する泥炭土壌の存在で特徴づけられる高層湿原、河川や湖沼と表層水で連続し、鉍物質の土壌

で特徴づけられる低層湿原、これらの中間的な特徴をもつ中間湿原に分けられる。日本では高層湿原は高緯度あるいは高標高な場所、低層湿原は河川の氾濫原や湖沼の沿岸などの場所に主に発達する。

高層湿原については、「モニタリングサイト1000」では10の湿原において植生と環境の調査が行われている(環境省生物自然環境局多様性センター2020b; 表1)。これは日本全体の高層湿原からみると、ごくわずかである。また低層湿原については、一級河川の河川区域(堤防と堤防の間の空間)については河川水辺の国勢調査の対象になっているものの、湖沼沿岸の湿地や水田地帯に残存する湿地などについては系統的な調査が行われていない。日本の湿地生態系の状況を長期・広域的に把握するためには、個別の論文や報告書として公表されたデータの統合が重要である。富士田らは、高層湿原・低層湿原の両方を対象に、文献資料に基づく「全国湿地データベース」の公表を進めている(富士田ほか, 2020)。全国湿地データベースを構築する「文献データベース」「湿地データベース」「湿地植物データベース」のうち、現状では「湿地データベース」しか公表されていないが、今後、すべてのデータベースが公表されれば、様々な解析に活用できるものと考えられる。

3. フェノロジー観測

ここまでは、「いつどこに・どの種の生物がどれぐらいたか」という生物の分布情報の取得・収集状況と課題について述べてきた。しかし、気候変動が野生の動植物に与える影響は分布だけではない。温暖化によって冬や秋の気温が上昇することで、春の植物の開花の早期化や、秋の紅葉の遅延などの生物の季節性(フェノロジー)にも強く影響する(IPCC, 2007; Doi and Takahashi, 2008; Demarée, 2011)。また、特定の種のフェノロジーの変化は、その種と関係をもつ種の個体群動態にまで波及する可能性があることが指摘されている(Kudo and Cooper, 2019; Fisogni *et al.*, 2020)。植物の開花時期と送粉昆虫の活動時期のずれは植物の結実率の低下を招くとともに、送粉昆虫の個体群存続性に影響することが予測されている(Kudo and Cooper, 2019)。さらには、このような季節性の変化は、社会や産業への影響も報告されており、農作物の作付け時期の変化や、花粉などアレルギー原因物質の飛散時期の予測、観光地への人の流入時期の予測など、我々の生活の様々な側面とも関わっている(Frei and Gassner 2008; Santos *et al.*, 2011; Buckley and Foushee 2012)。したがって、生物の季節性を長期的に観測しその経年変化を把握する事は、気候変動が生物の活動時期を介して、自然生態系や社会、産業にどう影響するのかを理解する上で極めて重要である(Donnelly and Yu, 2017)。

日本の生物のフェノロジー観測の1つに、1953年

から気象庁が実施している生物季節観測がある。これは植物の開花や紅葉、昆虫や鳥類の初鳴き日や初見日など106の事項について、全国102箇所の気象台や測候所で観測するものである(すべての項目をすべての箇所で観測するわけではない)。この観測によって得られた記録は、季節の進みや遅れが気候変動によってどう進んでいるのかを理解するだけでなく、桜の開花情報やモミジの紅葉情報など市民が季節を知るための生活情報としても利用されてきた。しかし、2020年10月、気象庁は都市化や気候変動によって観測所の近傍で観測対象の生物の発見が困難となったため、6種類の植物のみに観測を縮小することを決定した(気象庁, 2019)。これを踏まえ、国立環境研究所・気象庁・環境省の関係者が議論し、これまでの観測記録を生かせる新たな調査手法の試行を2021年から開始した。

国立環境研究所気候変動適応センターは、気象庁・環境省との協力のもと、全国から調査員を募集する市民科学の体制構築を進めている。市民科学によるフェノロジー調査は、アメリカやドイツなどでは一般的な手法である(van Vliet *et al.*, 2003; Schwartz *et al.*, 2012)。気象庁が観測していた項目のうち過去の記録が特に充実しているものを推奨項目として示

表2 国立環境研究所気候変動適応センターが気象庁・環境省と連携して2021年から実施している市民参加型の生物季節観測において、特に観測の実施を呼びかけている項目。

原則として気象庁による過去の記録件数が多い項目を選択した。過去の記録件数及び観測地点数も併せて示す。

調査項目	調査開始年	記録件数	観測地点数 (1953-2020)	
			(平均値)	(最大値)
モンシロチョウの初見日	1953	5341	78.5	91
ツバメの初見日	1953	5048	74.2	86
ウグイスの初鳴日	1953	4808	70.7	89
アブラゼミの初鳴日	1953	4615	67.9	80
ツバキの開花日	1953	4379	64.4	83
ヤマハギの開花日	1953	4015	59.0	72
サルスベリの開花日	1953	3808	56.0	79
ヒバリの初鳴日	1953	3764	55.4	70
キアゲハの初見日	1953	3587	52.8	70
シオカラトンボの初見日	1953	3505	51.5	63
モズの高鳴日	1953	3368	49.5	62
ニイニゼミの初鳴日	1953	3200	47.1	70
ホタルの初見日	1953	3177	46.7	68
ヒグラシの初鳴日	1953	3134	46.1	58
ツクツクボウシの初鳴日	1953	2799	41.2	56
エンマコオロギの初鳴日	1953	2297	33.8	53
アキアカネの初見日	1953	2105	31.0	51
ミンミンゼミの初鳴日	1953	1986	29.2	53
カキの開花日	1953	1599	22.5	31
ヒガンバナの開花日	1953	1500	22.1	37
クワの落葉日	1953	1417	20.8	42
キキョウの開花日	1953	1232	17.1	35

した上で(表2)、公募で参加を表明した市民が自身で選択した項目を観測してもらう形で進めている。今後、参加者との情報交換や気象庁による過去の観測結果との比較解析を通して、手法を改善していく予定である。

4. オープンデータ化とデータの統合・活用

行政の主導による系統的な調査でなくとも、生物の分布情報は様々な研究で取得されている。また近年では、生物の分布を調査するスマートフォンなどモバイル端末を用いた市民参加による生物多様性モニタリング技術も発達してきている(藤木・龍野, 2021)。また環境省自然環境局生物多様性センターが運用する「いきものログ」(<https://ikilog.biodic.go.jp/>)のように、一般市民を含め多様な主体が生物の分布確認記録を登録できる仕組みも存在する。環境DNAのように新しい手法による調査でも、市民参加による多点調査が実施されるようになった(近藤ほか, 2021)。今後、これまで以上に様々な情報源を活用し、自然生態系に対する気候変動の影響の理解が進むことが期待される。

多様な主体が多様な手法で取得したデータを気候変動影響評価などの特定の目的で効果的に活用できるようにする上では、「オープンデータ化」と「データ統合」が重要である。オープンデータ化とは、データ利用に関する制限を取り払い、再配布、再利用が可能な状態にすることを指す(大澤, 2017)。これを実現するためには、生物分布情報を取得した主体が、クリエイティブ・コモンズ・ライセンス(著作権を保持した上で情報を活用するためのルール)を適用し、インターネット上で公表することがもっとも効果的である(例えば、Open Knowledge Foundation)。

モニタリングデータを多数の要因を考慮した統計学的な解析により気候変動影響の検討に活用するためには、取得した主体や目的が異なるデータを1つにまとめたデータセットを作成するか、あるいはフォーマットを統一したデータベースを相互にリンクするなどの「統合」が重要である。多様な主体が取得したデータの統合のためには、個別のデータセットの項目の構成(データフォーマット)の統一が重要である。生物の分布データを蓄積する標準的なデータフォーマットとして、ダーウィンコア(Darwin Core; <https://www.gbif.org/ja/darwin-core>)がある。世界最大規模の生物種分布情報データベースであるGBIF(Global Biodiversity Information Facility; <https://www.gbif.org/>)は2021年10月現在で19億件近い生物分布レコードを統合してウェブで共有しているが、様々な情報源の種分布情報を統合・提供できているのは、ダーウィンコアという統一のフォーマットがあるからである。

ダーウィンコアは190近い項目から構成され、観察データや標本データから化石のデータまで、様々な生物分布のデータを登録することができるように設計されている。ダーウィンコアを構成する項目の日本語での解説は、GBIFの日本ノードである日本生物多様性イニシアチブ(JBIF)のウェブページ(https://www.gbif.jp/v2/datause/data_format/index.html)に掲載されている。ダーウィンコアの項目数は多いため、目的に応じて選択して活用する。

生物多様性条約では、愛知目標に次ぐ新たな国際目標が議論されており、加盟国である日本でもそれに対応した国家戦略の見直しの議論が進んでいる。新しい生物多様性国家戦略では、生物多様性と生態系の健全性の回復や、自然を活用した解決策(Nature-based Solutions)の積極的な活用に加え、ビジネスと生物多様性の好循環とライフスタイルの反映という課題に、特に重点的に取り組む方向性が示されている(次期生物多様性国家戦略研究会, 2021)。企業の活動における自然と生物多様性への影響や依存の程度を評価、管理、報告するための枠組みを検討する自然関連財務開示タスクフォース(Task Force for Nature-related Financial Disclosures; TNFD)の議論も開始された。生物多様性・生態系の状態についてのオープンデータ化と統合は、生物多様性の評価のベースとして、今後更に重要になるものと考えられる。

謝 辞

本稿は「気候変動の影響観測・監視の推進に向けた検討チーム」での議論やその報告書を参考に執筆した。座長・委員及び事務局各位にお礼を申し上げます。また本稿の内容の一部は、(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費(JPMEERF20202001)の成果である。

引用文献

赤松良久・都築隆禎・横山良太・舟橋弥生・太田宗宏・畔上雅樹・内藤太輔・乾隆帝(2018)河川水辺の国勢調査による魚類相調査と環境DNAメタバーコーディング解析の比較検討. 土木学会論文集 B1(水工学), 74, I, 415-420.

天野邦彦・望月貴文(2011)河川水辺の国勢調査結果を利用した魚類および底生動物の水質・水質への依存性評価. 河川技術論文集, 17, 513-518.

Bert, J. (2005) Monitoring the abundance of bird populations. *The Auk*, 122, 15-25.

Boone, R. B., Conant, R. T., Sircely, J., Thornton, P. K. and Herrero, M. (2017) Climate change impacts on selected global rangeland ecosystem services. *Global Change Biology*, 24, 1382-1393.

Buckley, L. and Foushe, M. (2012) Footprints of climate change in US national park visitation. *International Journal of Biometeorology*, 56, 1173-1177.

鳥類繁殖分布調査会(2021)全国鳥類繁殖分布調査報告 日本の鳥の今を描こう 2016-2021. <https://bird-atlas.jp/news/bbs2016-21.pdf>(2021年12月15日確認)

Demarée, G. R. and Rutishauser, T. (2009) Origins of the word phenology. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 90(34)

Dieleman, C. M., Branfireun, B. A., McLaughlin, J. W. and Lindo, Z. (2015) Climate change drives a shift in peatland ecosystem plant community: implications for ecosystem function and stability. *Global Change Biology*, 21, 388-395.

van Diggelen, R., Middleton, B., Bakker, J., Grootjans, A. and Wassen, M. (2006) Fens and floodplains of the temperate zone: present status, threats, conservation and restoration. *Applied Vegetation Science*, 9, 157-162.

Doi, H. and Takahashi, M. (2008) Latitudinal patterns in the phenological responses of leaf coloring and leaf fall to climate change in Japan. *Global Ecology and Biogeography*, 17, 556-561.

Donnelly, A. and Yu, R. (2017) The rise of phenology with climate change: an evaluation of IJB publications. *International Journal of Biometeorology*, 61, 29-50.

Fisogni, A., Hautekèete, N., Piquot, Y., Brun, M., Vanappelghem, C., Michez, D. and Massol, F. (2020) Urbanization drives an early spring for plants but not for pollinators. *Oikos*, 129, 1681-1691.

Frei, T. and Gassner, E. (2008) Climate change and its impact on birch pollen quantities and the start of the pollen season an example from Switzerland for the period 1969-2006. *International Journal of Biometeorology*, 52, 667-74.

藤木庄五郎・龍野瑞甫(2021)モバイル端末を用いた生物多様性モニタリング手法開発に向けた市民科学の実践. 日本生態学会誌, 71, 85-90.

富士田裕子・李娥英・孫仲益・倉博子・首藤光太郎・小林春毅(2020)全国湿地データベース. <http://wetlands.info/tools/wetlandsdb/wetlandsdb/>(2021年10月31日確認)

Garibaldi, L. A., Steffan-Dewenter, I., Winfree, R. A. et al. (2013) Wild pollinators enhance fruit set of crops regardless of honey bee abundance. *Science*, 339, 1608-1611.

井出保行・下田勝久・東山雅一・堀道生・中神弘詞(2021)草地の動態に関する研究(最終報告). 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構畜産研究部門草地利用研究領域草地機能ユニット

- 令 2-1. https://www.naro.go.jp/publicity_report/publication/files/nilgs_souchidoutai-report.pdf (2021 年 12 月 14 日確認)
- 今井健介(2013)里山景観の長期的変化がチョウ類相に及ぼす影響の研究. 環動昆, 24, 21-25.
- IPCC (2007) Climate Change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Parry, M. L., Canziani, O. F., Palutikof, J. P., van der Linden, P. J. and Hanson. C. E. (eds), Cambridge University Press, Cambridge, p976.
- 次期生物多様性国家戦略研究会(2021)次期生物多様性国家戦略研究会報告書. http://www.biodic.go.jp/biodiversity/about/initiatives5/files/100_hokokusho.pdf(2021 年 10 月 31 日確認)
- 環境省(2018)平成 30 年度閣議決定「気候変動適応計画」. <http://www.env.go.jp/earth/tekiou/tekioukeikaku.pdf>(2021 年 10 月 30 日確認)
- 環境省(2020)気候変動影響評価報告書. <https://www.env.go.jp/115261.pdf>(2021 年 10 月 30 日確認)
- 環境省(2021)全国のエホシジカ及びイノシシの個体数推定及び生息分布調査の結果について(令和 2 年度). <https://www.env.go.jp/press/109239.html> (2021 年 10 月 31 日確認)
- 環境 DNA 学会(2020)環境 DNA 調査・実験マニュアル ver. 2.2. https://ednasociety.org/wp/wp-content/uploads/2020/09/eDNA_manual_ver2_2_1.pdf (2021 年 10 月 31 日確認)
- 環境省自然環境局(2019)エホシジカに係る生態系維持回復事業計画策定ガイドライン ver. 1.0. <https://www.env.go.jp/press/files/jp/111204.pdf>(2021 年 10 月 31 日確認)
- 環境省自然環境局生物多様性センター(2016)自然環境保全基礎調査. https://www.biodic.go.jp/kiso/fnd_list_h.html(2021 年 10 月 30 日確認)
- 環境省自然環境局生物多様性センター(2019)モニタリングサイト 1000, 里地調査 2005-2017 年度とりまとめ報告書. http://www.biodic.go.jp/moni1000/findings/reports/pdf/third_term_satoyama.pdf(2021 年 10 月 31 日確認)
- 環境省自然環境局生物多様性センター(2020a)モニタリングサイト 1000, 森林・草原調査 2004-2017 年度とりまとめ報告書. http://www.biodic.go.jp/moni1000/findings/reports/pdf/2004-2017_forests_and_glasslands.pdf(2021 年 10 月 31 日確認)
- 環境省自然環境局生物多様性センター(2020b)モニタリングサイト 1000, 陸水域調査(湖沼・湿原) 2009-2017 年度とりまとめ報告書. http://www.biodic.go.jp/moni1000/findings/reports/pdf/FY2009-2017_Inland_Waters_Survey.pdf(2021 年 10 月 31 日確認)
- 川越久史(2017)モニタリングサイト 1000 からみた 2016 年のサンゴの大規模白化. 日本サンゴ礁学会誌, 19, 21-28.
- 気候変動の影響観測・監視の推進に向けた検討チーム(2020)戦略的な気候変動の影響観測・監視のための方向性(第 2 版). https://adaptation-platform.nies.go.jp/plan/institute/expert_review_team/pdf/03/02_report.pdf(2021 年 10 月 30 日確認)
- Kim, J. Y. and Nishihiro, J. (2020) Responses of lake macrophyte species and functional traits to climate and land use changes. *Science of the Total Environment*, 736, 139628.
- 気象庁(2019)生物季節観測の種目・現象の変更について. <https://www.jma.go.jp/jma/press/2011/10a/20201110oshirase.pdf>(2021 年 11 月 5 日確認)
- 近藤倫生・笠井亮秀・清野聡子・益田玲爾(2021)環境 DNA を用いた大規模生態系観測: 意義と展望. 一般社団法人環境 DNA 学会(企画), 土居秀幸・近藤倫生(編), 環境 DNA 生態系の真の姿を読み解く. 共立出版.
- Kudo, G. and Cooper, E. J. (2019) When spring ephemerals fail to meet pollinators: mechanism of phenological mismatch and its impact on plant reproduction. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 286, 20190573/
- Littlewood, N., Anderson, P., Artz, R., Bragg, O., Lunt, P. and Marrs, R. (2010) Peatland Biodiversity. IUCN UK Peatland Programme, Edinburgh.
- Matsuzaki, S. S. and Kadoya, T. (2015) Trends and stability of inland fishery resources in Japanese lakes: introduction of exotic piscivores as a driver. *Ecological Applications*, 25, 1420-1432.
- Miya, M., Sato, Y., Fukunaga, T., Sado, T., Poulsen, J. Y., et al. (2015) MiFish, a set of universal PCR primers for metabarcoding environmental DNA from fishes: detection of more than 230 subtropical marine species. *Royal Society Open Science*, 2, 150088.
- Mizuno, T., Kojima, N. and Asano, S. (2021) The risk reduction effect of sediment production rate by understory coverage rate in granite area mountain forest. *Scientific Reports*, 11, 14415.
- Nishihiro, J., Akasaka, M., Ogawa, M. and Takamura, N. (2014) Aquatic vascular plants in Japanese lakes. *Ecological Research (data paper)* 29, 369. <https://doi.org/10.1007/s11284-014-1139-0>
- 岡部貴美子・亘悠哉・矢野泰弘・前田健・五箇公一(2019)マダニが媒介する動物由来新興感染症対策のための野生動物管理. 保全生態学研究, 24, 109-124.
- 大澤剛士(2017)オープンデータがもつ「データ開放」の意味を再考する. 情報管理, 60, 11-19.
- 尾関雅章・堀田昌伸(2017)北アルプス北部爺ヶ岳棒

- 小屋乗越付近で発生したイノシシによる高山植物の掘り返し. 植生情報, 21, 44-46.
- Santos, J. A., Malheiro, A. C., Karremann, M. K. and Pinto, J. G. (2011) Statistical modelling of grapevine yield in the Port Wine region under present and future climate conditions. *International Journal of Biometeorology*, 55, 119-131.
- Schwartz, M., Betancourt, J. and Weltzin, J. (2012) From Caprio's lilacs to the USA national phenology network. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 10, 324-327.
- Secretariat of the Convention on Biological Diversity (2019) Voluntary guidelines for the design and implementation of ecosystem-based approaches climate change adaptation and disaster risk and supplementary information. *CBD Technical Series*, No.93. <https://www.cbd.int/doc/publications/cbdts-93-en.pdf> (2021年10月30日確認)
- 志賀 隆・加藤 将・横井謙一・角野康郎(編) (2021) 全国ため池調査(2003)水生植物データベース, 日本国際湿地保全連合, 東京. http://wetlands.info/tools/plantsdb/pond_macrophytedb/ (2021年10月31日確認)
- Shimoda, K., Tsutsumi, M., Higashiyama, M. and Nakagami, K. (2020) Fact database of grassland vegetation in Japan. *Ecological Research (data paper)* 35(6), 1057-1061. <https://doi.org/10.1111/1440-1703.12166>
- Shoo, L. P., Williams, S. E. and Hero, J. M. (2006) Detecting climate change induced range shifts: Where and how should we be looking? *Austral Ecology*, 31, 22-29.
- La Sorte, F. A. and Jetz, W. (2010) Projected range contractions of montane biodiversity under global warming. *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences*, 277, 3401-3410.
- 高村典子(2007)ため池の生物多様性評価. 自然再生のための生物多様性モニタリング, 鷺谷いづみ. 鬼頭秀一(編), 東京大学出版会, 49-69.
- Takamura, N. (2012) Status of biodiversity loss in lakes and ponds in Japan. In: Nakano, S., Yahara, T. and Nakashizuka, T. (eds) *The Biodiversity Observation Network in the Asia-Pacific Region*, 133-148. *Part of the Ecological Research Monographs book series*, Springer, Tokyo. https://doi.org/10.1007/978-4-431-54032-8_10
- Takano, K. T., Hibino, K., Numata, A., Oguro, M., Aiba, M., Shiogama, H., Takayabu, I. and Nakashizuka, T. (2017) Detecting latitudinal and altitudinal expansion of invasive bamboo *Phyllostachys edulis* and *P. bambusoides* (Poaceae) in Japan to project potential habitats under 1.5°C-4.0°C global warming. *Ecology and Evolution*, 7, 9848-9859.
- 植田陸之・岩本富雄・中村 豊・川崎慎二・今野 怜ほか(2014)全国規模の森林モニタリングが示す5年間の鳥類の変化. *Bird Research*, 10, F3-11.
- Ushimaru, A., Uchida, K. and Suka, T. (2018) Grassland biodiversity in Japan: threats, management and conservation In: Squires, V., Dengler, J., Feng, H. and Hua, L. (eds.), *Grassland Management: Problems and Prospects*, 211-232.
- Ushio, M., Murakami, H., Masuda, R., Sado, T., Miya, M., et al. (2018) Quantitative monitoring of multispecies fish environmental DNA using high-throughput sequencing. *Metabarcoding and Metagenomics*, 2, e23297.
- Van Vliet, A., De Groot, R., Bellens, Y., Braun, P., Bruegger, R., et al. (2003) The European phenological network. *International Journal of Biometeorology*, 47, 202-212.
- 鷺谷いづみ・梶 光一・横山真弓・鈴木正嗣(編) (2021) 実践野生動物管理学. 培風館.
- Williams P., Whitfield, M., Biggs, J., Bray, S., Fox, G., Nicolet, P. and Sear, D. (2004) Comparative biodiversity of rivers, streams, ditches and ponds in an agricultural landscape in Southern England. *Biological Conservation*, 115, 329-341.
- 山階鳥類研究所(2021) 渡り鳥と足環. http://www.yamashina.or.jp/hp/ashiwa/ashiwa_index.html (2021年12月更新)
- Zarei, A., Asadi, E., Ebrahimi, A., Jafari, M., Malekian, A., Nasrabadi, H. M. and Maskell, G. (2020) Prediction of future grassland vegetation cover fluctuation under climate change scenarios. *Ecological Indicators*, 119, 106858.



西廣 淳 / Jun NISHIHIRO

1999年筑波大学大学院修了。博士(理学)。建設省土木研究所, 国土交通省国土技術政策総合研究所, 東京大学農学生命科学研究科, 東邦大学理学部を経て, 2019年より国立環境研究所気候変動適応センター, 2020年より同・気候変動影響観測研究室長。専門は植物生態学・保全生態学。日本生態学会理事, 日本自然保護協会理事。朝著に「人と生態系のダイナミクス 河川の歴史と未来」(朝倉書店)。



辻本 翔平 / Shohei TSUJIMOTO

2018年富山大学大学院修了。博士(理学)。東邦大学理学部博士研究員を経て, 現在は国立環境研究所の特別研究員として, 生物季節観測に係るプログラムに携わっている。専門は送粉生態学・送粉昆虫の認知行動学。送粉昆虫がかかわっていれば, 個体の行動レベルから, 群集規模での景観生態学, へは内部寄生虫まで興味の対象は幅広い。現在のホットなテーマは都市景観における送粉生態学。