

# 絶滅危惧植物チチブイワザクラ保全研究 10 年史

倉田薫子<sup>1</sup>・山本将也<sup>2</sup>・宮本佳奈<sup>3</sup>・矢部重樹<sup>4</sup>・藤巻弘樹<sup>5</sup>・吉田涼香<sup>1</sup>・瀬戸口浩彰<sup>6</sup>

## 10-year history of conservation research on the endangered plant

### *Primula reinii* var. *rhodotricha*

Kaoruko KURATA, Masaya YAMAMOTO, Kana MIYAMOTO, Shigeki YABE,

Hiroki FUJIMAKI, Ryoka YOSHIDA, Hiroaki SETOGUCHI

## 概要

チチブイワザクラ (*Primula reinii* var. *rhodotricha*) は、サクラソウ科サクラソウ属の多年生草本で、絶滅危惧植物 IA 類 (CR: ごく近い将来における野生での絶滅の危険性が極めて高いもの。環境省, 2020) に指定されている。本種はフォッサマグナ要素とされる広義コイワザクラ (*Primula reinii* var. *reinii*) の種内分類群で、秩父地方の武甲山にのみ分布する固有変種である。

武甲山は秩父地方にとって古くから信仰、文化、産業、経済など多大な価値を生み出してきた。特に高品質な石灰岩が産出することから、1917 年より鉱業的に石灰岩の採掘が開始され、現在の東京の街を作ってきた重要な拠点となっている。一方で、採掘に伴い山の斜面の植生は失われ、環境保全との狭間で象徴的な山としても知られることとなった。

本論文では、著者らが始めた絶滅危惧植物チチブイワザクラの保全研究 10 年を迎えたことを機に、これまでの採掘企業の努力と我々の研究成果についてまとめると同時に、地球規模で進んでいる生物多様性の減少、人間と生物圏の共生について再考する。

## 石灰岩地特殊植物群落とチチブイワザクラ

武甲山 (1,304m) は埼玉県秩父地方にある独立峰で、知知夫国の祖神であった知知夫彦命の霊を奉祀して以来今日まで、神奈備山 (神様のこもる山) として人々に崇められてきた。無形文化遺産にもなっている秩父夜祭も武甲山と強いかわりがあるとされており、その伝統や文化から秩父地方の発展は支えられてきた。また動物や植物、地質など、自然科学的観点からも貴重な山として知られている。特に重要なのは、関東近辺で最大規模を誇る石灰岩を持つことであり、



図 1. チチブイワザクラの域外保全個体。

1917 年から始まった武甲山の石灰岩の採掘は、関東大震災や太平洋戦争後の東京の再開発や高層ビ

---

<sup>1</sup> 横浜国立大学教育学部, <sup>2</sup> 兵庫教育大学, <sup>3</sup> 頌栄女子学院中学・高等学校, <sup>4</sup> 横浜市立横浜サイエンスフロンティア高等学校附属中学校, <sup>5</sup> 一般企業, <sup>6</sup> 京都大学大学院人間・環境学研究科. Contact address: kurata-kaoruko-tv@ynu.ac.jp

ル建設、新幹線や高速道路などのインフラ整備のためのセメントとして、東京の街の復興と発展に貢献してきた。それと共に、地域を潤す地場産業として多くの雇用や経済的効果を今も生み出し続けている。

一方で、山の景観が極端に変化したり、自然を改変したりという側面もたびたび取り上げられ、環境保護運動の象徴としても武甲山は有名になった。中でも表層の植生は、鉱業的採掘の影響を直接受ける。石灰岩土壌に生育する植物は、高カルシウムイオンまたは高 pH を要求するものか、あるいは他の植物が生育できるような場所では競争に負けるために、あえて貧栄養な石灰岩土壌へ進出した（高 Ca や高 pH へ耐性を持つ）ものであり、石灰岩という特殊な環境に適応して種分化したと考えられる希少種が多い。そのため武甲山において石灰岩土壌に特異的にみられるチチブイワザクラ（絶滅危惧カテゴリ CR, 図 1）やミヤマスカシユリ（同 EN）、クリヤマハハコ（同 VU）、チチブミネバリ（同 EN）、ブコウマメザクラ（同 EN）などから構成される植物群落は、「武甲山石灰岩地特殊植物群落」として 1951 年に国の天然記念物の指定を受けている（守屋, 1987）。

これらの植物を採掘による表層の攪乱から隔離して保護する取り組みは、採掘企業により既に 50 年以上前から行われてきた。例えば秩父市の秩父太平洋セメント(株)では、採掘現場から掘り出した希少種を、採掘に影響のない別の場所で鉢植えにして栽培・種子繁殖を行ったり、希少種を集めて植物園を設け、管理したりしている。また首都圏にある太平洋セメント(株)の研究所では、域外保全集団に万が一事故あったときに備えて人工環境内で系統維持を行っている（神谷, 2011）。特にチチブイワザクラは武甲山に象徴的な植物で、重点的な保護活動の取り組みがなされてきた。もう 1 つの採掘企業 R 社/横瀬町においても、域外保全が行われている。この他にも採掘後の壁面には緑化が施され、山体の形状は変わってもできる限りのリハビリテーション（植生回復）が続けられ、環境との調和に配慮がなされている。一方で石灰岩は風化が著しく、自然状態でも小規模な崩落は避けられない。地元住民によると、チチブイワザクラの花期には北側斜面の一部が遠景にもピンク色に見えていたが、2000 年頃以降確認できなくなったという。我々が 2012 年に最初にチチブイワザクラと出会ったのは、秩父太平洋セメント(株)の生育域外で鉢植えになった株だった。

### チチブイワザクラ保全研究のプランニング

チチブイワザクラは、武甲山の標高約 1,000 m 以上の北側斜面の石灰岩地に自生していたと記録されている（守屋, 1987）。現在では採掘が進み、自生地はほぼ残されていない。秩父太平洋セメント(株)では 50 年ほど前に多くの自生個体を生育域外にて鉢植えにし、一部を坑道の岩壁に試験的に植えたりしながら保護を行ってきた。

我々が秩父太平洋セメント(株)において研究を開始したのは、当時学部 4 年生だった藤巻がチチブイワザクラの研究をやってみたいと言い出したことからである。太平洋セメント(株)に伝手のあった方から紹介していただき、2012 年、ちょうどチチブイワザクラの開花期が終った 5 月に初めて武甲山の鉱業所へ入れていただいた。当時、秩父太平洋セメント(株)の植物栽培担当者は、チチブイワザクラの栽培や種子の結実方法について歴代伝承されてきた経験知に基づいて行っていた。しかし種子の結実率も実生の発芽率も低く、クローンによる個体増殖で集団が維持されているような状態であった。そ

れでも、1970年代から希少種を保護しなければならぬと考え、採掘効率、企業利益だけでない企業運営を行っていた秩父太平洋セメント(株)には、頭が下がる思いである。なんとか絶滅危惧種を絶滅させない方法を見出し、将来の野生復帰を目指そうと考えた。研究デザインは図2の通りである。

まず我々が行ったのは、チチブイワザクラの生活史の把握である。他のサクラソウ属植物においては、同じく絶滅危惧植物であるサクラソウに関する知見は多いが(鷲谷, 2006 他), チチブイワザクラとは節も生育環境も異なっていたため、年間を通じた詳細な観察が必要であった。これは、山本の2年にわたる観察によって、まとめられた(山本, 2013, 図3)。

次に、チチブイワザクラの系統学的位置づけと、分類単位の確定が必要である。チチブイワザクラが属するサクラソウ属コイワザクラ節には、7つの分類群が含まれる。広義コイワザクラには、コイワザクラ (var. *reinii*) を基準変種としてクモイコザクラ (var. *kitadakensis*), チチブイワザクラ (var. *rhodotricha*), ミヨウギイワザクラ (var. *myogiensis*) の4変種が認識されている。また姉妹群として、イワザクラ (*P. tosaensis*), テシオコザクラ (*P. takedana*), ヒダカイワザクラ (*P. hidakana*) の3種が含まれる。葉緑体DNA解析から広義コイワザクラの系統推定を行なった山本(2020)によれば、チチブイワザクラが系統的にも分類学的単位として完全に独立したもの

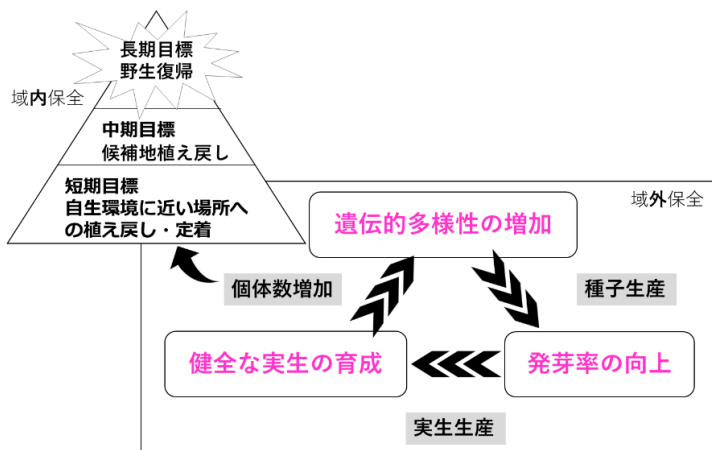


図2. チチブイワザクラ研究のデザイン

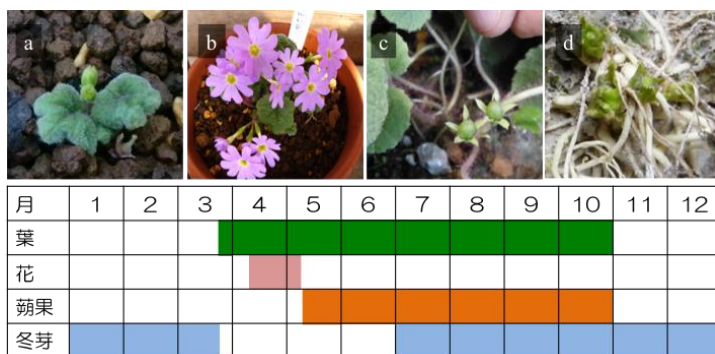


図3. チチブイワザクラのライフサイクル。a; 展開したばかりの葉と花芽(2013年3月21日撮影), b; 開花ラメット(2013年4月18日撮影), c; 蒴果(2013年7月25日撮影), d; 越冬芽(2013年11月28日撮影)。山本(2013)を改変。

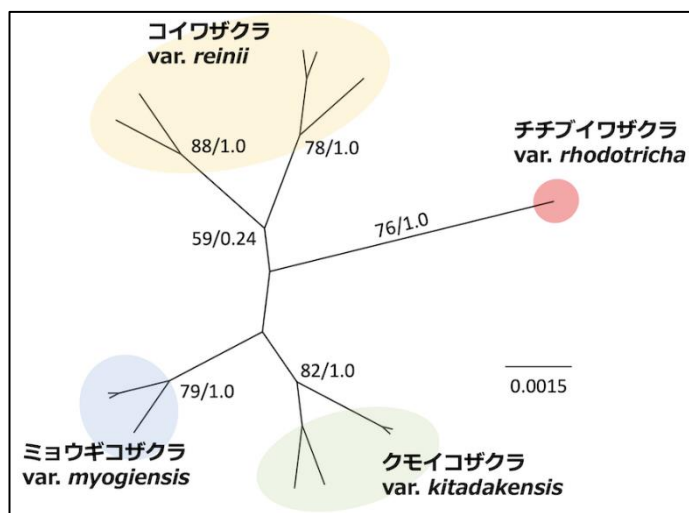


図4. 葉緑体DNAを用いた広義コイワザクラの系統樹。チチブイワザクラは他の種内分類群と系統的にも独立していることが示された。系統樹上の数値は最尤法におけるブートストラップ値(左)およびベイズ法における事後確率(右)をそれぞれ示す。山本(2020)を改変。

であることが示され (図 4), 「チチブイワザクラは武甲山に固有の絶滅危惧植物で, 現存個体は 2 つの域外保全集団合計約 400 個体 (2015 年当時)」であることが裏付けられた。

### 花が咲いて実がなるのは“普通”ではない～昆虫と植物の関係

サクラソウ属の約 90%は二型花柱性 (distyly) という受粉様式を持っている (Richards, 2003). 二型花柱性植物の集団内には, 長花柱型と短花柱型と呼ばれる 2 種類の花型があり, それぞれ雄蕊と雌蕊の配置が異なっている (図 5). そして, 多くの二型花柱性植物は自家受粉と同型受粉では種子を作ることができない. つまり, 種子を作るためには, 必ず自らとは異なる花型の花粉が必要になる. したがって花型比が 1 : 1 から偏ると, 繁殖機会は劇的に低下してしまう (例えば, Yamamoto *et al.*, 2020).

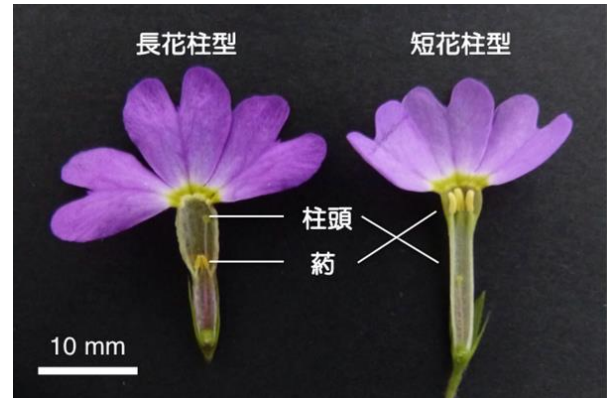


図 5. チチブイワザクラの二型花柱性. 山本 (2013) を改変.

チチブイワザクラの開花率や花型比, 花形質の変異に関する報告はほとんどなかったが, ここ 10 年の研究によって多くの情報が蓄積されてきた. まず, 開花率については, かなりの年変動があることがわかってきた. 多年生植物であるため, 繁殖におけるトレードオフ (個体のもつ資源を栄養成長へ投資するか, 開花結実へ投資するか) や環境条件が影響しているものと思われるが, 年によって約 30~80%の変動があった (山本, 2014; 宮本, 2022). 開花率にはかなりの年変動がある一方で, 花型比は過去の調査で一度も偏ったことはない. このことから, 繁殖に関わるトレードオフというよりも, 環境条件 (気温や日照時間, 土壤水分量等) が開花率に影響を及ぼしているものと考えられる (宮本, 2022). 定期的に行われてきた花形態の調査からは, 10 年前と比較してチチブイワザクラの花冠が大きくなっていることが明らかになっているが (宮本, 2022), これも栽培環境が改善されたことに関連があるように思われる. 継続的に開花を促進していくためには, 開花率の高かった場合の気温や照度, 管理方法をより詳細に検証していくことが重要だろう.

二型花柱性植物の特殊な受粉様式は送粉昆虫を介した花型間の効率的な送粉を淘汰圧として進化したものであり (鷲谷, 2006), 花冠のかたちはパートナーとなる特定の送粉昆虫の口器に対応していることが多い (例えば, Washitani *et al.*, 1995). 実際, 近縁種のヒダカイワザクラでは, ビロードツリアブが主要な訪花者であることがわかっており (Yamamoto *et al.*, 2018), その口吻と花筒の形はよく対応している. チチブイワザクラは日本のサクラソウ類で最も大きな花をつけるが, そのパートナーが何であるかはわかっていない. 山本 (2014) はチチブイワザクラの保全集団と自生地へ植え戻された集団のポリネーター調査を実施したが, 4 日間の調査で観察された訪花昆虫はオオマルハナバチ *Bombus hypocrite* が僅か 1 匹だけであった. この結果は結実した花の割合にも反映されており, その年の域外保全集団における結果率は 5%に満たなかった (山本ら, 2013). 箱根山に自生する狭義コイワザクラの野生集団で結果率が 30%を超えていることを鑑みれば (Yamamoto *et al.*, 2020), 送粉昆

虫に乏しい域外保全集団の環境では、人工授粉によって実生更新を維持することが必須である。

チチブイワザクラを取り巻く生物間相互作用は、花粉を運ぶ昆虫だけとは限らない。チチブイワザクラは種子の成熟に長い時間を要するが、大きく成長する果実を狙う昆虫も存在することがわかってきた。2013年の調査によれば、結実した蒴果の約10%が食害の被害を受けていることが明らかになった（山本，2013）。6~7月の間、穴があけられ中身が空となった蒴果を見かけるようになる。蒴果を食べていた青虫はニホントリバ *Amblyptilia japonica*（トリバガ科）と呼ばれる蛾の幼虫であり、春にはその成虫が開花した株の葉裏に産卵している様子も観察された。ニホントリバによる食害の被害はサクラソウでもしばしば報告されており、サクラソウ類の果実を好んで食べるものと考えられる。これに加えて、種子の成熟に重要な8~9月はコウスチャヤガ *Diarsia deparca*（ヤガ科）による葉の食害が増え、個体によっては枯死するほど深刻なダメージを受けていた。コイワザクラやイワザクラの自生地で穴が空いた蒴果や食害を受けた葉を見かけることはほとんどないため、栽培のために低地へ移したことが関係しているのかもしれない。これに対しては、定期的に害虫駆除を行うよりほかにいだろう。

### 絶滅回避の要～遺伝的多様性を回復せよ！

域外保全によって維持されてきた生物集団では、まず遺伝的多様性を把握することが重要であり、その上で、それらを維持する（回復させる）方法を検討していかなければならない。なぜなら、集団の遺伝的多様性が低い場合、保護増殖によって短期的に個体数を回復させることができたとしても、長期的には近交弱勢の影響で集団が絶滅するリスクが増大してしまうからである（Frankham *et al.*, 2010）。実際、国内希少野生動植物に指定されている小笠原諸島の固有種：オガサワラシジミ *Celastrina ogasawaraensis* では、多摩動物公園で飼育されて個体数復元に成功し、新宿御苑にも分譲して野生復帰の機会を窺うまでに生息域外保全が成功していた。しかし2020年に、多摩と新宿の両施設で同時期に一斉に全個体が死亡し、繁殖が途絶えてしまった。その原因として近交弱勢が強く疑われている（環境省，2021）。このように、潜在的に近親交配のリスクが高い域外保全集団では、遺伝的多様性を把握し、それを維持することが必要不可欠である。また、すでに遺伝的多様性が低下した状態の集団であったとしても、近交弱勢を防ぐために他集団から個体を移植する「遺伝的救助（genetic rescue）」によって絶滅を回避することは可能である（Pimm *et al.*, 2006; Whiteley *et al.*, 2015）。しかし、この時に遺伝的に異なる集団を用いることは遺伝的攪乱の問題を生む可能性があり（例えば、Dufresnes *et al.*, 2016）、これを防ぐためにはあらかじめ遺伝構造から管理単位を設定しておかなければならない。チチブイワザクラの保全について考える時、上述した遺伝学的知見は今後の保全計画の骨格を形づくる情報となる。ここからはチチブイワザクラの遺伝的多様性に関する研究結果について紹介する。

遺伝的多様性を調べるためには、ゲノム上の特定のDNA領域を増幅し、その中の変異（＝多様性）を検出するための遺伝マーカーが必要である。マイクロサテライトマーカーは解像度が高く、遺伝的多様性を評価するための優れた遺伝マーカーとして多くの保全遺伝学的研究で使用されてきた。一般には対象とする種ごとに専用のマーカーを開発する必要があるが、近縁な種であれば転用するこ

とが可能な場合もある。当然ながら、チチブイワザクラ専用のマーカーは開発されていなかったため（現在は専用のマーカーが開発されている，Yamamoto *et al.*, 2018），近縁なサクラソウで開発された76のマーカーからチチブイワザクラに転用可能なものをスクリーニングした（藤巻，2012；Yamamoto *et al.*, 2017a）。スクリーニングの結果，11のマイクロサテライトマーカーがチチブイワザクラで使用できることが明らかになり，同じマーカーを用いて近縁野生種と遺伝的多様性を比較することが可能となった。Yamamoto *et al.* (2017a) が行ったDNA分析の結果，チチブイワザクラ域外保全集団に残された遺伝的多様性は野生集団の半分程度の水準であることが明らかになり（図6），潜在的に近親交配のリスクが高いことが示唆された。その一方で，出現頻度の低い対立遺伝子（レアアリル）が一定数存在することも確認され，遺伝的多様性を回復させる望みがまだ残っていることもわかった。おそらく，半世紀に及ぶ栽培努力の結果，一定の多様性が集団内に保存されてきたのだろう。

チチブイワザクラの遺伝的多様性はなぜ低いのだろうか。遺伝情報を利用した集団動態解析の結果，域外保全集団はかつて遺伝的ボトルネックを経験していたことが示唆された(Yamamoto *et al.*, 2017a)。つまり，集団サイズの急激な減少によって遺伝的多様性が失われた可能性が高いのである。集団サイズの急激な減少の大部分は，開発による自生地の喪失に起因するだろうが，域外保全集団の場合，いくつかの強い遺伝的浮動を経験しやすい。例えば，域外保全集団を設立する際には，残存する野生

個体の全てを移植（栽培）することは難しいので，母集団の遺伝的多様性をそのまま保全集団に反映させることはできない。集団の設立時には人為的な個体の選別があり，それによって遺伝的多様性は低下してしまう（＝創始者効果）。おそらくチチブイワザクラの保全集団も創始者効果を受け，遺伝的多様性が低下したのだろう。また，そもそも野生のチチブイワザクラの遺伝的多様性が低い可能性もある。チチブイワザクラは周辺に生育するコイワザクラやクモイコザクラと系統的にかなり離れていることがわかっているが（Yamamoto *et al.*, 2017b），これは本種が数十万年の間，周囲から孤立してきたことを示唆している。他集団からの新たな対立遺伝子の流入がなかったチチブイワザクラは，石灰岩採掘に関係なく遺伝的多様性が低かったかもしれないが，今となっては検証することができない。

一般に遺伝的多様性が低下した域外保全集団では，野生集団から個体を導入すること（遺伝的救助）で，遺伝的多様性を回復させることが期待される。すでに野生集団の大部分が失われたチチブイワザクラにおいては，秩父太平洋セメント(株)およびR社/横瀬町の2つの域外保全集団の間で株のやり

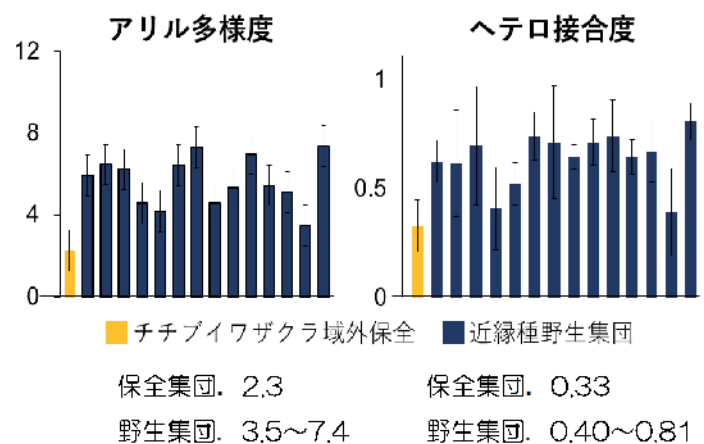


図6. マイクロサテライト解析に基づくチチブイワザクラと近縁種野生集団の遺伝的多様性。Yamamoto *et al.* (2017a)のデータを使用。

とりをすることが遺伝的多様性を維持・回復するための有効な手段になるだろう。2つの域外保全集団を対象とした遺伝構造解析の結果からは、集団間に遺伝構造が存在しないことが示唆され

(pairwise  $F_{ST} = 0.023$ , 山本, 2014), それぞれの集団をまとめて1つの保全単位として扱う妥当性が示された。したがって、集団間で定期的な株の交換を行うことは集団サイズの増加をもたらすだけでなく、近親交配を防ぐ役割を果たすだろう。こうした観点からも、保全されている全ての個体をジェノタイピングし、遺伝情報や栽培記録のトレーサビリティを担保することは、チチブイワザクラの保全において重要である。

一連の遺伝分析の結果から、域外保全集団の遺伝的多様性は低く、近親交配のリスクが高いことが示唆された。野生集団からの遺伝的救助が期待できない以上、長期的な存続可能性を高めるためには、現存する遺伝的多様性を維持することに注力しなければならない。「遺伝的多様性を維持する」というのは「今ある全ての遺伝的多様性を次世代に引き継ぐ」と同義である。つまり、遺伝的に類似した個体同士を交配させることは極力避けなければならない。ま



図7. 血縁度に基づいた人工授粉の様子。

た、いくつかのサクラソウ属種では、二親性近交弱勢 (biparental inbreeding depression) の存在も示唆されており (例えば van Rossum *et al.*, 2006), 異型花間の交配が起きたとしても種子生産が抑制されることが知られている。したがって、遺伝的多様性を維持し続けるためには遺伝情報に基づいて交配相手を選別する必要がある。

個体間の遺伝的類似度を表す指標として血縁度はよく知られるところだが、もちろん、これまでの遺伝分析で得た情報から個体間の血縁度も算出することができる。2013年と2021年には、個体間の血縁度を考慮した上で人工交配実験を実施した (図7)。実験的に血縁度と結実に関するかを評価するために、あえて血縁度の高い個体の組み合わせも交配させたところ、もっとも血縁度が高い組み合わせの処理区画 (結果率 12.3%) と、最も低い処理区画 (結果率 31.3%) の間には結果率に約3倍もの差がついた。この結果は、遺伝的多様性を維持するために個体間の血縁度を配慮することが重要であることを強く示唆している。また、興味深いこととして、長花柱型が明らかに花粉親の血縁度が低いほど結果率が上昇するのに対して、短花柱型では花粉親の血縁度が結果率にそれほど影響を与えないことがわかった。花粉親の血縁度と種子生産量の関係に花型特異的な応答が存在することは *Primula vulgaris* からも示唆されているが (Barmantlo *et al.*, 2018), その要因についてはよくわかっていない。推測の域は出ないが、花型間における花柱の長さや花粉の受け取りやすさの違いがこれらと関係しているのではないかと考えている。

遺伝分析から明らかになったチチブイワザクラの状態をまとめると以下のようなになる。

- (1) 遺伝的多様性は低く、近縁種の半分程度の水準
- (2) 遺伝的多様性の低下に伴い近親交配のリスクが増大している

(3) 2つの域外保全集団の間に遺伝構造はない

(4) 血縁度の低い個体間で交配を行えば結果率が高まる

尚、遺伝的多様性解析の結果明らかになった遺伝型などの個体情報については、「絶滅危惧植物保全データベース（公益財団法人日本植物園協会 [http://www.syokubutsuen-kyokai.jp/hozen\\_db/view/index.php](http://www.syokubutsuen-kyokai.jp/hozen_db/view/index.php)）」へ登録が完了しており、域外保全集団の人工交配の組合せについて現場で利用できるようになっている。

### 種子はできて芽が出ない!～種子発芽の条件探索

植物の種子の休眠・発芽特性は種によって異なることが知られている。種子植物の保全において発芽特性を正確に把握することは、絶滅の回避や個体数の増加、将来の植え戻しのために極めて重要である。健全な種子を生産し、実生を生育させることで遺伝的多様性を確保する必要があるからである。生育域外保全の場では、発芽を促進させるためにジベレリン処理が施される場合もあるが、その後の実生の健全な生育を考慮すると、植物ホルモンを使用せずに発芽率を向上させることが重要となる。野外から採集した種子の中には、外観が同じように見えても発芽能力を失った種子が含まれている。さらに健全な種子ではあるが休眠状態にあり、そのままでは発芽しない種子が含まれているのが普通である。発芽能力のある種子すべてを発芽させるためには、①休眠解除し、②発芽に最適な環境（あるいはそれに出来るだけ近い条件）のもとにおき、③発芽に必要なとされるだけの時間を経過させる（鷲谷ら、2010）といった操作が必要である。

サクラソウは、春に花を咲かせ、初夏から夏にかけて、休眠状態の種子を散布する。種子は湿った状態で比較的長期間の低温を経験すると一部が休眠から目覚める。さらに、低温を経験した種子が十分に休眠から目覚めるためには春先の地表面温度の日較差のような「変温」にさらされることが必要である（Washitani & Kabaya, 1988）。鷲谷（2006）はサクラソウにおいて、1度の冷湿処理では休眠が解除されず、2度目の冷湿処理を経験することで発芽可能になる種子があることを報告している。またカッコソウについては、大谷ら（2009）によって変温条件法+段階温度法（上昇系）の2段階の温度処理によって発芽することが明らかにされている。このように、同じサクラソウ属であっても種によって発芽条件が異なるため、チチブイワザクラにおいても同じことが言えると予測された。しかし、コイワザクラ節で発芽特性を研究した事例は一つもなかった。

チチブイワザクラは、現在2つの域外保全集団を管理している企業によってそれぞれ採種・育種が行われている。C社における結果率は25.3%（血縁度に基づく人工交配を行った場合、人工交配を行わないと4.7%）で、できた種子にジベレリン処理を施して発芽させている。しかし発芽率は10%前後と低い。またジベレリン処理によって本来であれば発芽しない種子まで発芽してしまう影響か、徒長したり



図8. 発芽の様子。



枯死したりしてしまう実生も多く、健全な実生での世代更新がほとんどできていないのが現状である。チチブイワザクラの発芽特性を解明することは、実生による世代更新、遺伝的多様性の向上に対して急務であると言える。

そこで2015年～2020年にかけて、結実が悪かった2017年を除く5か年にわたり、様々な条件下で発芽特性の解明を試みた(表1)。しかしながら、そもそも結実が悪く、採掘企業が現場で播種するものの一部を提供してもらっているため、成熟度合や稔性に偏りがある可能性は排除できない。

2015年には、冷湿処理では発芽せず、その後ジベレリンを用いたことで26.1%の種子が発芽した(図8)。ジベレリン処理は2020年にも行っており、こちらも様々な処理を行っても発芽率0%だった種子が、ジベレリン処理により40%近くまで発芽率が上昇している。ジベレリン処理が発芽に有効であることは一般に証明されているため、現場でジベレリン処理を積極的に用いる理由は理解できる。しかし、ジベレリン処理後の実生の生育については、2か月生存率が50%、14か月ですべての個体が枯死した(予備的データ, 2015)ことから、植物ホルモンによって強制的に発芽させたものの生存率は高くないと思われる。2016年には、冷湿処理では1.7%しか発芽しなかったものの、その後長期の冷湿条件(31W)に置いたことが影響したのか、30.2%が発芽した。しかしながら、10蒴果の内3蒴果は発芽率0%で、蒴果ごとの発芽率には大きなばらつきが見られた(0-82.6%)。このことは、発芽条件の問題以外に、仮に種子が形成されたようにみえたとしても、近交弱勢等の影響により発芽能力を持たない種子が多く形成されている可能性も考えられる。2015年のジベレリン処理においても、蒴果ごとに9.1-34.1%と、3倍以上発芽率に違いが見られている。

表1. 発芽実験の条件と発芽率。

年	発芽条件設定	蒴果数 (個)	種子数 (粒)	全体の 発芽率 (%)	蒴果ごと の発芽率 (%)
2015年	冷湿8w→交代温度 →ジベレリン	2	46	0 26.1	0 9.1 - 34.1
2016年	冷湿18w→段階温度 →冷湿31w→氷冷8w→段階交代温度	10	361	1.7 30.2	0 - 21.1 0 - 82.6
	コイワザクラ(冷湿18w→段階温度)	7	386	66.6	29.8 - 85.4
2017年	実施できず	-	-	-	-
2018年	冷湿処理(4°C/24w→段階交代温度)	-	-	0	-
	氷冷処理(4°C/8w→0°C/8w→4°C/8w→段階交代温度)	-	241	0	-
	→2巡目の処理	-	-	0	-
2019年	冷湿処理(4°C/24w→改良*段階交代温度)	-	-	0	-
	氷冷処理(4°C/8w→0°C/8w→4°C/8w→改良*段階交代温度)	-	630	0	-
	→2巡目の処理	-	-	0	-
	→ジベレリン処理+3巡目	-	-	0	-
2020年	冷湿処理(4°C/24w→改良*段階交代温度)	-	-	0	-
	氷冷処理(4°C/8w→0°C/8w→4°C/8w→改良*段階交代温度)	3	118	0	-
	→4°C/24w→ジベレリン処理→2巡目	-	-	39.8	15.2 - 73.2

冷湿処理は4°C, 氷冷処理は0°C

\*改良: 武甲山の気象データから考慮して設定

一方で、コイワザクラの発芽実験（2016年）では、チチブイワザクラでは1.7%しか発芽しなかった冷湿処理条件において最大85.4%もの高い発芽率を示した。また1巡目で発芽しなかった種子を2巡目の春化処理にかけてみても発芽率は0%だったことから、コイワザクラでは1回の春化処理で発芽能力のある種子はすべて発芽していることが示された。この比較実験により、チチブイワザクラはコイワザクラとも異なる発芽条件を持つことが明らかになった。この発芽条件の違いが、分類群の特性によるものであるのか、それともチチブイワザクラの遺伝的な要因（近交弱勢の影響）であるのかは、定かではない。

以上のことから明らかになったチチブイワザクラの発芽特性をまとめると以下のようになる。

- (1) チチブイワザクラは2回目の春化処理でより発芽する特性がある
- (2) 冷湿処理と氷冷処理の発芽率に有意差はない
- (3) 長期の冷湿処理について、より詳細な条件の検討が必要
- (4) 蒴果によって発芽率が大きく異なるのは、近親交配の影響かもしれない

### 手の届かない「町の花」～地域住民へのはたらきかけ

チチブイワザクラは武甲山の標高1,000 m以上の石灰岩地に自生する植物であり、自生地の全域が採掘現場であることから、地域住民が自生個体を見ることは個体群が縮小する以前から不可能であった。横瀬町はチチブイワザクラを町の花に指定しているものの、地元住民にとって身近な植物とは言いがたい。現在では、花期に武甲山資料館や横瀬町役場、横瀬町立歴史民俗資料館などで展示が行われている。

武甲山で見られるように、社会活動と自然保護の両立は世界的な課題の1つでもある。特に絶滅危惧植物の保全は、長期的な視点から考えると専門家や管理者だけで行うことは難しく、地域住民の、幅広い年齢層の理解が必要である。実際にアマミアセビやオオキンレイカといった絶滅危惧植物は、地域住民や小・中学校の子どもたちの協力によって個体数が回復し野生復帰が実現した（瀬戸口ら、2014；瀬戸口、2016）。今後武甲山の植物の保全をすすめるうえでも、地域住民の自然への関心・理解は必要不可欠である。

そこで、武甲山の自然環境について地域住民が自分事として関心を持ち、理解を深めることを目的として、横瀬町立歴史民俗資料館における企画展「武甲山の自然」、その関連イベントであるミュージアムトーク、および横瀬町立横瀬中学校におけるオンライン授業を実施した（横瀬町教育委員会からの要請による）。企画展は、武甲山の成り立ちやその特殊性、武甲山にお

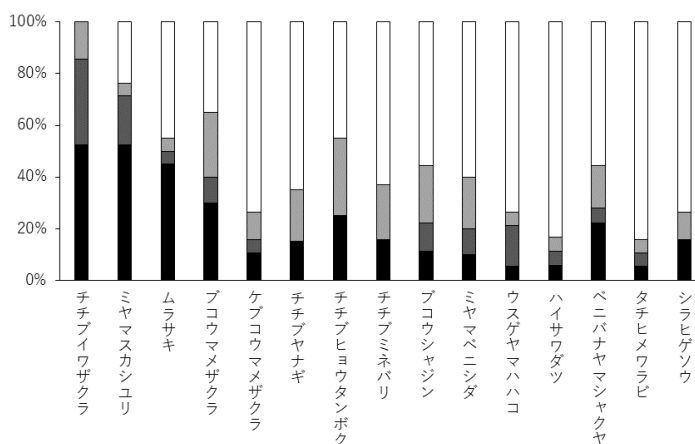


図9. 武甲山に見られる希少植物の地域住民の認知度 (N=21). 宮本 (2022) を改変。

ける固有種形成を紹介することで、武甲山の自然の魅力と地元の貴重な自然への興味を喚起する構成にした。パネルでの展示を主とし、一部花器にはチチブイワザクラやミヤマスカシユリの実物展示もできるようにした（Covid-19 感染拡大のため、実現しなかった）。また幼児～小学生向けには、武甲山の自然をモチーフとした塗り絵やパズルができるコーナーの設置も行った。ミュージアムトークは一般向けとし、企画展の内容を2時間分×2回にまとめて実施した。講演後には企画展会場へ案内し、来館者からの質疑応答も行った。中学校へのオンライン授業では、ミュージアムトークを中学生向けに組み直し、自分たちの郷土が、いかに希少な唯一の場所であるのかを理解し、それをどのように維持していくのかを考えさせる内容とした。

ミュージアムトーク終了後のアンケートによれば、武甲山で見られる植物の中でも、地域住民の認知度は種によって大きく分かれることが明らかになった。50%以上の人々が「見たことがある」、「名前を知っており姿までイメージできる」と回答した種は15種中3種（チチブイワザクラ、ミヤマスカシユリ、ムラサキ）であり、特にチチブイワザクラでは全体の85.6%と、高い認知度を示した（図9）。一方で、50%以上の人々が「名前を知らない」と回答した種は15種中10種もあった。この結果は、花がきれいで親しみやすいものが、保全の象徴となることを物語っている。

ミュージアムトークへ参加動機を整理すると、地元住民の武甲山に対する興味関心が極めて高いことが示された（「武甲山そのものに興味がある（34.8%）」、「武甲山の植物に興味がある（30.4%）」）。一方で「石灰岩採掘後の自然復興に興味がある」と回答した人も全体の約20%を占めた。質疑応答の時間の中で、「採掘が進んでいる中で、武甲山の自然の現状がどうなっているのか、一般人が情報にアクセスできない。そういう状況で知りたくても知る機会がなかった」という声があった。このような意見は、公害教育に関するヒアリングでも聞かれることがあり（林，2015），

社会活動と自然保護の対立が顕著な地域にはよく見られる状況なのかもしれない。今回、「武甲山の自然を守るために私ができることはなにかありますか」といった質問や「今日学んだことを孫にも話します」といった声も聞かれ、開かれた情報の必要性を認識し、自分事として捉え、武甲山の自然を後世にも伝えていきたいという意識を地域住民にもってもらえた（図10）ことは、企画展の大いなる成果と言えるだろう。今後、当事者である身近な地域住民が、地域の文化や経済と同時に、自然への理解、持続可能な開発について正しい情報を得、開かれた議論をする機会が増えることが重要である。

### 山の斜面を再びピンク色に染めることはできるのか（まとめ）

武甲山に通うようになって10年、その間起きている気候の変化には驚くばかりである。例えば

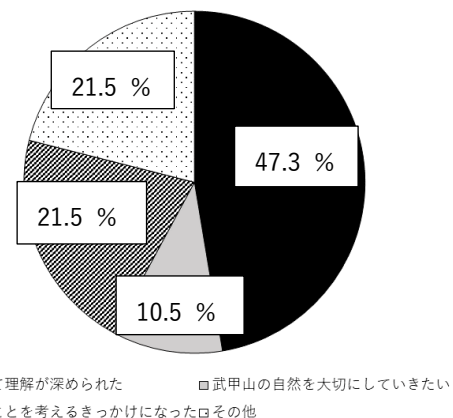


図10. ミュージアムトークの後に感じたこと(N=21). 宮本(2022)を改変.

2013年、夏の暑さで9月の初旬に多くの保全株の地上部が枯れてしまった。9月後半に気温が下がってくると、もう一度葉を出したものの、そこで貯蔵していたエネルギーを使い果たし、越冬芽を形成しないまま枯死してしまった個体が多く見られた。2018年7月、ちょうど武甲山を訪れていた日、熊谷では国内での観測史上最高の41.1度を記録した。2012年には4月終盤から5月の連休明けまで開花していたはずのチチブイワザクラは、今では咲き始めが4月上旬にまで早まってきている。大型台風の直撃も増え、降雨強度が著しく強い降雨が年に数回見られるようになった。本来石灰岩の亀裂に根を伸ばして生育するチチブイワザクラは、仮に植え戻しが行われたとしても、岩の割れ目からの出水で容易に流されてしまうことだろう。またチチブイワザクラが自生していた標高1,000m付近は、50年前から5度以上気温が上がっている計算になる（これらのデータは、武甲山での観測データを解析したものである）。このような状況において、野生復帰を目指すことはできるのか？50年努力を重ね、植生が回復した暁には再び春先にピンク色の斜面を見られること願って域外保全してきたが、果たしてチチブイワザクラを戻せる環境をこの先維持していけるのだろうか。

そのための対応として、現在、2つの取組みを推進している。1つは、これまで自生地に近い武甲山でのみ域外保全されてきたチチブイワザクラを、システム化された保全の専門機関に移譲して維持してもらうよう秩父太平洋セメント(株)と調整している。日本植物園協会と環境省は、全国の各植物園が気候・地域・専門分野等の特色を活かしながら連携して活動を行う「植物多様性保全拠点園ネットワーク」事業を展開している。この事業に参画している植物園へ一部の保全株を委譲することにより、武甲山での保全株に病気や災害、一斉枯死などの不都合が生じたりした際にも絶滅を回避できる。こうしたシステムを上手に使い、野生復帰まで遺伝的多様性を向上させながら維持していくことが、今できる最大限のリスク分散であると考えている。

もう1つの取組みとして、社会とのつながりをもつことが挙げられる。現在、持続可能な社会に向けた取り組みが世界的に大きな潮流となっている。人間が生活する上で多くの資源やエネルギーを消費し、自然から搾取し続ける状況は今後社会的に受け入れられなくなるだろう。人間の発展と同時に、生物圏の豊かさも維持していくために、これまで50年地道に保全が行われてきた事実、そのおかげで絶滅を回避できている事実を積極的に発信し、チチブイワザクラ以外の種の保全や社会の意識改革にも取り組むことが必要である。

武甲山のある秩父市は、2019年にユネスコの生物圏保存地域（BR：Biosphere Reserves、ユネスコエコパーク）の一部に認定された。エコパークは自然環境と人間活動の調和と発展を実現するためのモデル地域であり、1) 自然環境、生物多様性の保護・保全、2) 地域の持続可能な社会、経済の発展、3) 自然との共生を図るための学術調査・研究、教育・研修、人材育成、

表2. ユネスコエコパークにおける地域の定義。

地域	定義
核心地域	自然環境、生物多様性の保護・保全を目的に設定され、保護すべき優れた自然環境が対象となる。核心地域は緩衝地域で囲わなければならない。
緩衝地域	核心地域とほぼ同等の自然環境を有するが、移行地域の人間活動から核心地域を保護することを目的に設定される。調査研究、教育・研修の場として利用される。
移行地域	自然環境・生物多様性に配慮した産業活動や生活により、地域社会の産業や経済の発展を目指す地域。人間の生活圏が対象となる。

の3つの機能を持つように設定されている。そして、その機能に応じて「核心地域」、「緩衝地域」、「移行地域」の3つにエリアが分けられている（表2）。甲武信エコパークの核心地域は甲武信ヶ岳、金峰山、雲取山周辺であるが、秩父市はその最外縁部である移行地域として、人間の活動が生物圏の保存と調和した地域であることが求められる。武甲山を取り巻く経済活動、産業はまさに古くからの人間活動であり、また動植物や地質の貴重さは生物圏の営みである。人間の生活を発展させつつ自然を保全するという概念は、まさに秩父市、武甲山に合致している。これまで環境か経済か、その両立については困難を極めていたが、持続可能な社会を目指し、またその創り手を育成していくことが社会的にも重要な課題となっている今、武甲山の自然環境と文化の共進化を広く普及し、生物圏と人間との共存を目指すESD（Education for Sustainable Development）にこれまでの研究の成果が寄与することが、ここにかかわってきた我々の使命であると考えている。

チチブイワザクラは、人間の生活向上・発展のために自生地を追われ、そして今度は地球規模での人間活動によって消滅の危機にある。かつてコイワザクラから石灰岩の環境に適応し、十万年単位の長い時間かけて進化した固有変種は、地域の宝と言っても過言ではない。特異な環境で醸成されてきた生物多様性と、地域固有の文化の多様性は、表裏一体の関係にある。すなわち、過度な開発により生物多様性が減少すれば、地域文化の多様性も衰退する。今後、どのように共存を図っていくか、それぞれの地域における課題の一例として、この研究が貢献できることを望んでいる。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、チチブイワザクラの生育域外保全を行っている秩父太平洋セメント株式会社、太平洋セメント株式会社、菱光石灰株式会社、横瀬町教育委員会のみなさまには多大なるご協力をいただきました。秩父太平洋セメント株式会社との調整をしてくださった早稲田大学理工学術院の安井万奈博士、現場での実験作業に従事してくれた倉田研究室の学生たちに、深く感謝いたします。本研究の一部は、プロナチュラ助成金（岡本寛志氏，2013）、および環境研究総合推進費（4-1403, 4-2202）、科研費奨励研究(19H00513)、武田科学振興財団中学校高等学校理科教育振興助成（2020）によって行われました。

## 参考文献

- Barmantlo SH, Meirmans PG, Luijten SH, Triest L, Oostermeijer JGB (2018) Outbreeding depression and breeding system evolution in small, remnant populations of *Primula vulgaris*: consequences for genetic rescue. *Conservation Genetics* 19:545-554.
- Dufresnes C, Pellet J, Bettinelli-Riccardi S, Thiébaud J, Perrin N, Fumagalli L (2016) Massive genetic introgression in threatened northern crested newts (*Triturus cristatus*) by an invasive congener (*T. carnifex*) in Western Switzerland. *Conservation Genetics* 17:839-846.
- Frankham R, Briscoe DA, Ballou JD (2010) *Introduction to Conservation Genetics*, 2nd Edn. Cambridge University Press, Cambridge

- 藤巻弘樹 (2012) 絶滅危惧植物チチブイワザクラの遺伝的多様性の解析. 東京都市大学知識工学部自然科学科卒業論文.
- 林美帆 (2015) 公害を学ぶ今日的意義—公害資料館連携から見てきた公害教育—. 環境教育 25:70-81.
- 神谷隆 (2011) 鉱山開発における自生植物の保存と増殖. 太平洋セメント研究報告 160:51-58.
- 環境省 (2020) レッドリスト (<https://www.env.go.jp/press/107905.html>) 2022年9月24日閲覧.
- 環境省 (2021) オガサワラシジミ生息域外個体群の繁殖途絶に関する検証. (<https://www.env.go.jp/content/900491863.pdf>, ) 2022年9月6日閲覧.
- 宮本佳奈 (2022) 絶滅危惧植物チチブイワザクラの保全に向けた域外保全システムの確立. 横浜国立大学教育学研究科修士論文.
- 守屋忠之 (1987) 秩父武甲山 総合調査報告書 [分冊] 武甲山の植物. 武甲山総合調査会, 埼玉.
- 大谷雅人, 西廣淳, 寺内浩, 寺内優美子, 鷺谷いづみ (2009). 群馬県鳴神山における絶滅危惧植物カッコソウの個体群再生にむけた取り組み. *Japanese Journal of Conservation Ecology* 14: 91-99.
- Pimm SL, Dollar L, Bass OL Jr (2006) The genetic rescue of the Florida panther. *Animal Conservation* 9:115-122.
- Richards J (2003) *Primula*. Timber Press, USA.
- 瀬戸口浩彰, 伊藤元己, 上原浩一 (2014) 希少植物・絶滅危惧植物の持続可能な域外保全ネットワークの構築 (<http://www.ikigaihozen-network.jp/>). 環境研究総合推進費. 2022年9月26日閲覧.
- 瀬戸口浩彰 (2016) 希少植物・絶滅危惧植物の持続可能な域外保全ネットワーク. 森林遺伝育種 5: 95-100.
- van Rossum, F, De Sousa SC, Triest L (2006) Morph-specific differences in reproductive success in the distylous *Primula veris* in a context of habitat fragmentation. *Acta Oecologica* 30: 426-433.
- Washitani, I., & Kabaya, H. (1988). Germination responses to temperature responsible for the seedling emergence seasonality of *Primula sieboldii* E. Morren in its natural habitat. *Ecological Research*, 3(1), 9-20.
- Washitani I, Kato M, Nishihiro J & Suzuki K (1995) Importance of queen bumble bees as pollinators facilitating inter-morph crossing in *Primula sieboldii*. *Plant Species Biology* 9: 169–176.
- 鷺谷いづみ (2006) サクラソウの目—繁殖と保全の生態学. 地人書館, 東京.
- 鷺谷いづみ, 宮下直, 西廣淳, 角谷拓 (2010). 保全生態学の技法 調査・研究・実践マニュアル. 東京大学出版会, 東京.
- Whiteley AR, Fitzpatrick SW, Funk WC, Tallmon DA (2015) Genetic rescue to the rescue. *Trends in Ecology & Evolution* 30:42-49.
- 山本将也, 安井万奈, 瀬戸口浩彰, 倉田薫子 (2013) 絶滅危惧植物チチブイワザクラの保全: 繁殖生態学的側面から. 自然環境復元研究 6: 23-29.

- 山本将也 (2014) 絶滅危惧植物チチブイワザクラの繁殖特性と遺伝構造. 横浜国立大学大学院教育学研究科修士論文.
- Yamamoto M, Kurata K, Setoguchi H (2017a) Conservation genetics of an *ex situ* population of *Primula reinii* var. *rhodotricha*, an endangered primrose endemic to Japan on a limestone mountain. *Conservation Genetics* 18: 1141-1150.
- Yamamoto M, Ohtani M, Kurata K, Setoguchi H (2017b) Contrasting evolutionary processes during Quaternary climatic changes and historical orogenies: a case study of the Japanese endemic primroses *Primula* sect. *Reinii*. *Annals of Botany* 120: 943-954
- Yamamoto M, Handa Y, Aihara H, Setoguchi H (2018) Development and characterization of 43 microsatellite markers for the critically endangered primrose *Primula reinii* using MiSeq sequencing. *Plant Diversity* 40: 41-44.
- Yamamoto M, Horita K, Takahashi D, Murai Y & Setoguchi H (2018) Floral morphology and pollinator fauna of sister species *Primula takedana* and *P. hidakana* in Hokkaido Island, Japan. *Bulletin of the National Museum of Nature* 44: 97-103.
- Yamamoto M, Sugawara H, Fukushima K, Setoguchi H & Kurata K (2020) Genetic and reproductive characterization of distylous *Primula reinii* in the Hakone volcano, Japan: implications for conservation of the rare and endangered plant. *Journal of Threatened Taxa* 12: 17263-17275.
- 山本将也, 平誠 (2020) 遺伝子解析に基づくコイワザクラ両神山産コイワザクラ (サクラソウ科) の分類学的考察. 埼玉県立自然の博物館研究報告 14: 11-16.