

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

希少植物の自生地復元に向けた問題解決と基盤整備
(4-1702)

平成 29 年度～令和元年度

**Problem Solving and Establishment of a Base for Restoring Natural Habitat of Rare
Japanese Plant Species**

〈研究代表機関〉

国立大学法人 京都大学

〈研究分担機関〉

国立大学法人 東京大学

国立大学法人 千葉大学

〈研究協力機関〉

京都府立植物園

東京大学大学院理学系研究科附属植物園

令和 2 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. 研究開発の方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた主な成果	
6. 研究成果の主な発表状況	
7. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	
II-1 遺伝的多様性解析と至適空間配置を考慮した域外保全集団形成法の開発	16
(京都大学)	
要旨	
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた成果	
6. 国際共同研究等の状況	
7. 研究成果の発表状況	
8. 引用文献	
II-2 マイクロ生育環境のリモートモニタリングシステム開発と生育適地解析	29
(東京大学)	
要旨	
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた成果	
6. 国際共同研究等の状況	
7. 研究成果の発表状況	
8. 引用文献	
II-3 希少植物の自生地復元のための土壌・共生生物相の解析	48
(千葉大学)	
要旨	
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	

- 4. 結果及び考察
- 5. 本研究により得られた成果
- 6. 国際共同研究等の状況
- 7. 研究成果の発表状況
- 8. 引用文献

II-4 希少植物の保全活動における社会的・倫理的課題解決のための科学技術論的検討・・・ 67
(千葉大学)

要旨

- 1. はじめに
- 2. 研究開発目的
- 3. 研究開発方法
- 4. 結果及び考察
- 5. 本研究により得られた成果
- 6. 国際共同研究等の状況
- 7. 研究成果の発表状況
- 8. 引用文献

III. 英文 Abstract

・・・・・・ 84

I. 成果の概要

課題名 4-1702 希少植物の自生地復元に向けた問題解決と基盤整備

課題代表者名 瀬戸口 浩彰 (国立大学法人京都大学 大学院地球環境学堂 教授)

研究実施期間 平成 29～令和元年度

研究経費 (累計額) 125,865 千円
(平成 29 年度 : 42,666 千円、平成 30 年度 : 40,533 千円、令和元年度 : 42,666 千円)

本研究のキーワード 希少植物、野生復帰、環境モニタリング、生育環境、生息域外保全

研究体制

- (1) 遺伝的多様性解析と至適空間配置を考慮した域外保全集団形成法の開発 (国立大学法人京都大学)
- (2) マイクロ生育環境のリモートモニタリングシステム開発と生育適地解析 (国立大学法人東京大学)
- (3) 希少植物の自生地復元のための土壌・共生生物相の解析 (国立大学法人千葉大学)
- (4) 希少植物の保全活動における社会的・倫理的課題解決のための科学技術論的検討 (国立大学法人千葉大学)

研究協力機関 京都府立植物園、東京大学大学院理学系研究科附属植物園

1. はじめに (研究背景等)

気候変動や開発に伴う環境の悪化、外来種の移入など、様々な原因により希少種の絶滅が懸念されている。COP10 で合意された愛知ターゲットにおいても、絶滅危惧種の絶滅及び減少の防止、保全状況の維持や改善が目標となっている。日本の絶滅危惧種や国内希少野生動植物種の半数以上は維管束植物である。しかし、本邦における絶滅回避や保護増殖に向けられる予算・労力・関心の多くは鳥や哺乳類などに向けられており、植物の保全施策を効果的に進めることが必要な現状にある。

保全施策では、生息「域外」保全と生息「域内」保全が、両輪のように機能することが大切である。研究代表者らはこれまで希少植物の持続的な域外保全を行うための、生息「域外」保全における遺伝的多様性の確保と、各地の植物園で栽培される保全株のデータベース構築、ネットワーク化を進めてきた。しかし、希少植物種のこの次の段階として野生絶滅や自力で繁殖不可能となった野生集団の復元を考える必要があると考えるに至った。

これまで自生地における保全活動や、域外保全栽培、野生復帰の地道な努力が環境省などによって続けられてきた。しかし野生復帰した個体がすべて枯死して、個体数の増加に結びつかず、保全の試みが行き詰まってしまっている例も多い。例えばムニンノボタンで代表される小笠原諸島の絶滅危惧植物も、野生復帰株の多くが枯死しており、現在は補強を停止している。タイヨウフウトウカズラは域内保全されていた最後の野生個体が 2019 年に枯死してしまった。多くの希少種は長年の保全の努力にもかかわらず、未だに希少種のままである。

「希少植物はなぜ希少なまま」なのだろうか？その原因には、①個体数減少による集団の遺伝的劣化により、種が絶滅へと向かうスパイラルに陥っていくことがまず挙げられる。しかし、植え戻しや野生復帰が成功しない現実、他の要因：すなわち②生育適地の減少や現在の環境が、実生や若い個体にと

って最適であるとは限らないこと、が考えられる。このような生育適地の変化には、光や水分・温度などの無機的环境要因と、共生生物の絶滅・減少・変動が原因である可能性が高い。本研究では、これまで不明であった希少植物の至適生育環境を明らかにして生育環境を改善すること、生育適地での補強や播種を行うこと、さらに個体別遺伝子型判別を基にした交配によって、効率よく希少植物の増殖、個体数増加をおこなう方策を明らかにした。そして極限まで個体数が減少した絶滅危惧種の個体数増加、絶滅危惧種からの離脱を目指した。また、保全事業において重要である、市民と行政、研究者との良好なコミュニケーション形成のために、地域住民における希少種保全への意識調査をはじめとする研究を行った。

2. 研究開発目的

希少植物種の生息域内保全を順調に進めるために必要な情報を取得する方法、その情報をどのように扱って保全に資するかという解析方法を開発してルーチンとして提案すると共に、生育場所を取り巻く地域社会の特徴を把握する重要性を検証することを目的とする。生息域内保全において必要な情報には、①遺伝情報、②無機的环境情報、③有機的环境情報の3種類がある。①遺伝情報においては、対象とする希少植物の性状や入手できるサンプルによってDNAの解析方法をマイクロサテライト解析、あるいは次世代DNAシーケンサーによるSNPs（一塩基多型）解析（MIG-seq）の間で使い分ける。そして集団遺伝構造や系統関係を求めるためにSTRUCTURE解析や系統解析を行って「管理単位」を決める方法、個体別遺伝子型判別法と域外保全集団の作成に応用する方法を開発する。②の無機的环境要因には光量、気温、土壤水分含有量、pH、C/N比などを測定項目にして、植物個体別に測定するマイクロ環境モニタリングシステムを行う方法を開発した。これによって、個体別に生育状況の善し悪しを環境データと対比させることを可能にした。また、各希少種の光合成に適切な光量（光合成有効放射量）を解析して、生息域外・域内保全地の光量を管理に活用する方法を開発する。③土壤の有機的环境要因には、近年に重要視されている土壤中に棲息して植物の成長に不可欠な真菌の種類を種あるいは属レベルで明らかにする方法を開発した。生育地の土壤と根のサンプルからDNAを抽出して、次世代型DNAシーケンサーを用いた分析方法とDNAデータベース：BLASTを参照した同定方法を確立する。希少種の生息域内保全を持続させるためには、地域住民の理解や協力が不可欠である。しかし地域によっては歴史的背景などによって、保全に対して独特の感情や意識を持つ場合がある。本研究ではその事例として、特に奄美大島にて地域社会や住民の意識や特徴を把握する手法を開発した。以上の様々な研究を展開することによって、希少植物種の生息域内保全を持続的にすることに資することを目的とした。

3. 研究開発の方法

（1）遺伝的多様性解析と至適空間配置を考慮した域外保全集団形成法の開発



図 3.0.1. サブテーマ 1 における研究対象種

遺伝解析の研究対象には、小笠原諸島のタイヨウフウトウカズラ、ムニンノボタン、アサヒエビネの3種、ならびに奄美群島のウケユリ、アマミアセビ、アマミデンダの3種、合計6種とした。これらの多くは環境省の希少種保護増殖事業の対象であるために、必要な許可を申請しつつ、20年～8年ほど前に環境省の事業などで採集された余剰試料も用いながら研究を進めた。解析にはマイクロサテライトマ

ーカーの解析、ならびに次世代型 DNA シーケンサー（図 3.0.2）を用いた MIG-seq で一塩基多型 (SNPs) 情報を得た。これらの解析手法は、用いる DNA サンプルの質や植物の染色体数の倍数性によって使い分けた。即ち、DNA 抽出用サンプルの質が良く、かつ二倍体の植物ではマイクロサテライト解析を行い、サンプルが古くて劣化が進んでいる場合や高次倍数体の植物では MIG-seq を用いた。また、既に解析がされていたアサヒエビネについては、未解析の葉緑体 DNA を解析した。結果については、集団遺伝学の常法である遺伝子型の推定、遺伝的多様性、近交係数の推定、集団間系統樹や地理構造の解析などを行った。これにより、補強や再導入における「管理単位」を決定するとともに、保全集団の近交係数をゼロ付近に保ちながら（＝近親交配を防ぐ）、遺伝的多様性を高く維持するルーチンを確立した。

植物は光合成を行う独立栄養生物であるために、適切な光合成をしているか否かが生死に大きく影響する。本研究における至適空間配置の測定項目は、とくに小笠原諸島における絶滅危惧種の保護増殖事業で域内保全をされている集団の光環境を、植物が光合成に用いることが出来る波長帯の光エネルギー（光合成有効放射: PAR*）を Light Photometer で測定することによって行った。また、各植物がストレス無く光合成を行うことが出来る光条件を測定する条件を PAM 蛍光法**（図 3.0.2）で分析した。これにより、生息域外・域内保全に適した光環境を作出するルーチンを策定した。これには小笠原諸島の前述 3 種を対象にした。

*光合成有効放射：Photosynthetically active radiation: PAR

緑色植物の葉緑体が光合成に用いることが出来る波長帯の光。本報告では、単位は光量子密度（ $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ）で記載している。なお、私たちの生活環境を測定するうえで頻用されるルクス (Lux) は、ヒトの目の吸収波長帯をベースにしており、植物が光合成に最も利用しづらい緑色光にピークがある。

**PAM 蛍光法：Pulse Amplitude modulated fluorometry: PAM

光合成における光受容体＝クロロフィル a が光を吸収する際に同時に発する蛍光（クロロフィル蛍光）を検出して、電子が電子伝達系を通過する速度の大きさ（ETR）を算出することができる。この数値は、ストレス条件下での光化学系の阻害の見積りに使用される。具体的には、至適光量を超過して光が強すぎて葉に損傷が起きている時、光を強くしても（PAR を上昇させても）ETR は低下の一途を辿る。



図 3.0.2 遺伝的多様性解析に用いた次世代シーケンサー（左）；PAM 蛍光法測定装置（全体のモジュール：中）；PAM でムニンノボタンの葉に励起光を照射している様子（右）。

（2）マイクロ生育環境のリモートモニタリングシステム開発と生育適地解析

1) 微環境のモニタリング

現在考えられる最も細かいスケールでの微環境のモニタリングを目的に、安価な園芸用のデータロガーを使用して多地点での一年を通じたモニタリングを行った。データロガーは Xiami 社製の Mi Flora Monitor を用いた（図 3.0.3）。対象植物は、環境省の希少種保護増殖事業の対象となっているムニンノボタンとした。ロガーを設置し、年間を通じた各地点の植物の成長、定着状況との関連を見た。

2) 生物間相互作用の観察

種子散布に関連する生物間相互作用の観察をムニンノボタンで行った。観察は目視に加えてモニタリング用カメラによる自動観察の両者を用いた。比較的大型の散布者が想定されたので、赤外線センサーと動態感知センサーを有するトレールカメラ（図 3.0.4）を用いた。



図 3.0.3 本研究で使用したデータロガー



図 3.0.4 本研究で使用した自動撮影カメラ

3) 生育状況調査

現在把握されているムニンノボタンの全個体を対象にして、樹高や樹冠、根本直径などを調査した。ムニンノボタンの各個体には管理番号のタグが付いており、個体毎に東京大学の小石川植物園が保護増殖事業の一環で長期にわたる同様の項目のデータが存在する。これらのデータも併用して、長期間に渡るムニンノボタンの個体サイズの推移を調査した。

(3) 希少植物の自生地復元のための土壌・共生生物相の解析（国立大学法人千葉大学）

植物の生育には土壌中の化学的成分だけでなく共生生物の存在が大きく影響することが知られているが、これまで微生物叢の詳細な把握は困難であった。なかでも、リンや窒素などの栄養循環の中核を担っている真菌は 80-510 万種存在するといわれている。被子植物の 90%以上の種が根に真菌を共生させており、植物の生育に直接的・間接的に影響を与えている。近年では真菌は農業作物へ肥料的に利用されていること、絶滅危惧植物の苗に接種することで生長促進に成功した報告があること、ムニンノツツジの挿し木は自生地地域の土壌を使うことにより成功していることなどから、土壌真菌叢の把握は希少植物種の保全に欠かせない情報となる。現在は次世代型 DNA シーケンサー（NGS）により環境微生物叢の種構成や動態を解析することが可能となっている。真菌は、リボソーマル RNA 遺伝子の ITS 配列が DNA バーコードとして確立されていて菌種の同定は比較的容易であり、バクテリアよりも機能既知の種類が多く、土壌真菌叢と希少植物種の生育の関係を調べる土台ができています。本研究では、NGS により 1 土壌サンプルあたり数 100 種類の真菌 ITS 配列を得て種同定解析を行い、土壌間で菌叢比較することで、植物の生育が良い・悪い土壌に特徴的な真菌を特定し、機能を考察することで生育に関与するものを推定した。さらに、根においても同じ解析を行い土壌と比較することで直接的な共生・間接的な共存関係にある真菌を明らかにした。また、経時的に行うことで植物の生育段階や季節変動との関係を調べ、短期的・長期的な影響力の大小も考慮した。これらの調査・解析を小笠原諸島の 3 種（アサヒエビネ、タイヨウフウトウカズラ、ムニンノボタン）において実施し、土壌成分と真菌叢のデータを蓄積した。そこから生育に影響を与える可能性の高い真菌のリストを作成し、サブテーマ 1・2 の結果と合わせ、植物ごとの最適生育条件を明らかにする。小笠原諸島の真菌叢リスト作成までの方法を確立させることで、他の希少植物種におけるの保全にも貢献する。

(4) 希少植物の保全活動における社会的・倫理的課題解決のための科学技術論的検討

本サブテーマでは、保全の現場において、社会的・倫理的な観点から具体的に何が問題となり、またアクター間の相互理解を図る上で何が必要となるか、主として科学技術社会論的な観点から調査研究を行うことを目的とする。

まず先行研究等の調査を行った。先行研究の検討においては、まずは植物に限らず広く「再導入」に関する倫理的、社会的議論を中心に調査を進めた。文献的な調査が主体であったが、日本生態学会にも参加し、関連分野の研究について情報収集を行った。引き続き、全国アンケート調査の実施を行い、現地のステークホルダーに対するインタビュー調査等の前に、日本における基本的な市民の意識について把握しておくことが必要であった。そこで、環境意識調査などに関する先行研究(本調査に関しては、質問項目の設計などにおいて、今井他「市民の生態系サービスへの認知が保全行動意図に及ぼす影響：全国アンケートを用いた社会心理学的分析」『保全生態学研究』19(1), 15-26, 2014.を参照している。)を踏まえつつ、新たにアンケート項目を構築し、実際にアンケート調査を行った。そして、世界自然遺産登録を目指しつつも希少植物の保護増殖を行う拠点がなく、園芸目的の盗掘が続いており、保全施策に難を来している奄美大島を対象にして、希少植物の保全活動に対する意識調査などを行って分析した。

4. 結果及び考察

(1) 遺伝的多様性解析と至適空間配置を考慮した域外保全集団形成法の開発

マイクロサテライト解析を用いた事例として、小笠原諸島におけるタイヨウフウトウカズラ(絶滅危惧 IA, (CR)、国内希少野生動植物種、保護増殖事業保全事業対象種)を最初に記述する。

タイヨウフウトウカズラはではマイクロサテライト解析を行った。小笠原諸島の母島と東京大学小石川植物園、環境省新宿御苑事務所、京都大学に生育・栽培されている47個体を対象にして、マイクロサテライトマーカー29遺伝子座で解析した。その結果、28遺伝子型の個体があることが判明した。環境省が母島島内で生息域内保全として再導入した集団では、一遺伝子型だけが解析されたため、匍状更新で単一遺伝子型の個体で占有されたと考えられた。本種の生育範囲は母島北部の狭い範囲であることから管理単位は1ユニットとした。続いて28遺伝子型の関係を系統樹作成で解析した(図4.0.1)。

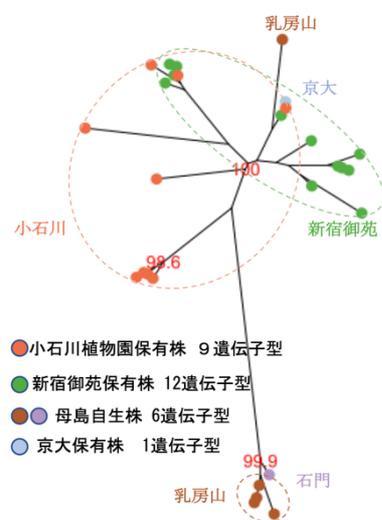


図 4.0.1 タイヨウフウトウカズラ 28 遺伝子型の NJ 系統樹。系統樹上の数値は 1000 回のブーツストラップ値を示す。

将来における生息域外保全の個体選抜においては、系統樹で示された28種類の遺伝子型の関係に基づき、疎遠な個体を組み合わせることによって、遺伝的多様性を最大化するとともに、次世代更新において近親交配を回避することが期待される。

タイヨウフウトウカズラの管理単位を1としたときの28遺伝子型の遺伝的多様性は、ヘテロ接合度(H_e)で0.322、近交係数(F_{IS})は-0.506でヘテロ過剰であった。

MIG-seqで解析した事例として奄美群島のウケユリ(絶滅危惧 IA 類(CR))をまとめた(図4.0.2)。このサンプルは2000年より前に、鹿児島大学の宮本句子教授らに採集されて、未解析のままシリカゲル乾燥された葉であったため、DNAの断片化が進んでおり、短いDNA断片をPCRで増幅するMIG-seqに適していた。263,846bpの塩基配列から345SNPsが得られ、これに基づいて任意交配状態にある遺伝的クラスターをSTRUCTURE解析によってバイズ推定した。その結果、4つの奄美群島の比較的広い範囲に分布するウケユリは、まず奄美大島と徳之島に分かれ(分集団数 $K=2$)、さらに細かく分集団を推定した結果、6つの分集団が認められた。ウケユリは生育地毎に遺伝的な単位を持っており、管理単位は6とするのが適切であると判断された。遺伝的多様性はどの産地もほぼ同じ程度を保持しており($H_e=1.7$ 前後)、奄美市の集団だけが有意に多様性が低かった。これは分布の端であることに拠ると考えられる。

同様のMIG-seqを用いた解析は、小笠原諸島父島固有種のムニンノボタン(絶滅危惧 IA 類(CR)、国内希少野生動植物種、保護増殖事業保全事業対象種)でも行った。この場合には明瞭な保全単位がな

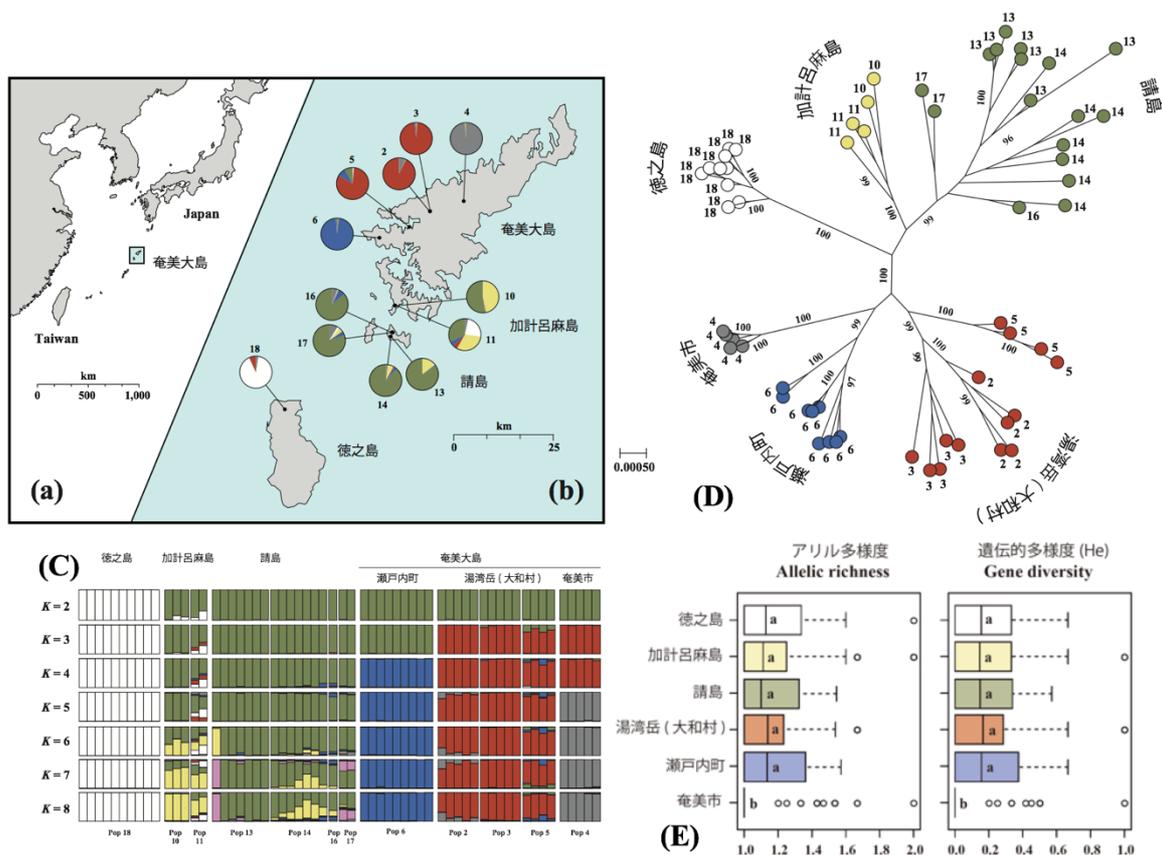


図 4.0.2 奄美群島固有種ウケユリの MIG-seq による保全単位の推定と遺伝的多様性の解析結果。(a, b) 集団の位置と STRUCTURE 解析によるクラスターの構成、(c) STRUCTURE 解析による分集団の推定結果、(d) 最尤法による個体間系統樹、(e) 各管理単位の遺伝的多様性。

く、全体を一つの管理単位とするべきであると判断された。遺伝的多様性も大変に低く、唯一の野生集団である東海岸の集団でもヘテロ接合度 (H_e) が 0.1 程度であり、その他の補強された集団は 0.010 ~ 0.083 と極めて低い数値であった。

小笠原諸島の父島と兄島に分布するアサヒエビネ (絶滅危惧 IA 類 (CR)、国内希少野生動物種、保護増殖事業保全事業対象種) では、かつて環境省委託事業でマイクロサテライト解析が行われて遺伝的多様性がほとんど無いと報告されていたため、念のために葉緑体 DNA の塩基配列に基づくハプロタイプ (遺伝子型) 解析を行った。その結果、予想に反して 4 種類のハプロタイプが同定された。一般に葉緑体 DNA はマイクロサテライト解析に比べて変異に劣るために、この結果は意外なものであり、マイクロサテライト解析を再検証する必要がある。

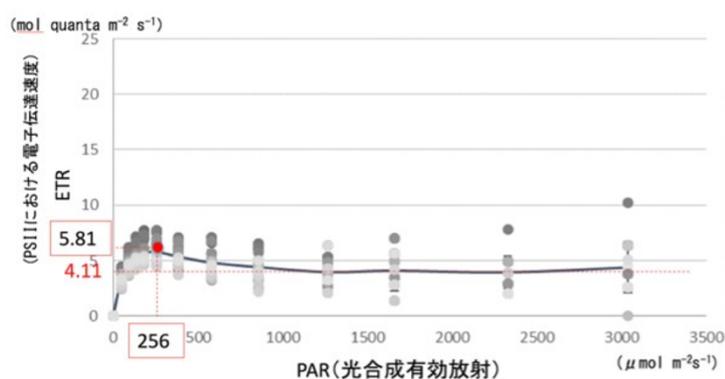
奄美大島のアマミデンダ (絶滅危惧 IA 類 (CR)、特定一種国内希少野生動物種) では、ダム建設と過去における園芸目的採取によって自生地の生育範囲と個体数が極めて限られていた。本研究では、かつて環境省委託事業で使われた葉: 35 サンプルと、国内の複数の山野草愛好団体、日本シダの会のご協力で集めた 23 サンプル、合計 58 サンプルを対象にして、マイクロサテライト 8 座を用いて解析を行った。その結果、本種では種内の遺伝的多様性を語る事が出来ないほど低レベルの多様性: 4 遺伝子型しか検出できなかった。このうち野生集団にも現存するのはでは 3 遺伝子型であり、残りの 1 遺伝子型は趣味家が栽培する個体であった。かつて採取された遺伝子型が自生地から消失したと考えられる。

奄美大島のアマミアセビ (=リュウキュウアセビ、絶滅危惧 IA 類 (CR)、特定一種国内希少野生動物種) では、マイクロサテライト 8 遺伝子座を用いて、栽培株を中心としたコレクションから 58 系統を判別した。STRUCTURE 解析や主成分分析からは管理単位は 1 とされ、本種の自生地が湯湾岳から慈和岳に至る稜線沿いの非常に狭い分布をしていたことと一致した。58 遺伝子型の遺伝的多様性は、へ

テロ接合度 (H_E) で 0.736 と高く、近交係数 (F_{IS}) は 0.164 でゼロに近く、優れた域外保全コレクションが用意できていることがわかった。

引き続き、PAM 蛍光法を用いて、タイヨウフウトウカズラの葉において適切な光条件を分析した。タイヨウフウトウカズラは光合成有効放射 (PAR: 緑色植物の葉緑体が光合成に用いることが出来る波長帯の光) が $256 \sim 500 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ のときに最も効率良く光合成で光エネルギーを利用できていることがわかった (図 4.0.3)。ところが石門の再導入地における光合成有効放射量は大柵で平均 $40.75 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、別の植栽地で $5.91 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、堺ヶ岳で $2.76 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ であった。

このように、タイヨウフウトウカズラの植栽株は明らかに暗すぎる環境に配置されており、光合成を十分に出来ていない状態、人間に例えると満足な食事が出来ていない飢餓状態にあることがわかった。人間の眼は植物が光合成に用いることが出来ない緑色の波長帯の光を良く感受するため、人間の視覚で植栽地の選定をすると不適切な植栽配置をしてしまう恐れがある。光合成有効放射を基準にして生育地



の選定をするべきである。タイヨウフウトウカズラでは、集団を構成する個体の遺伝的多様性を高めるとともに、光合成有効放射が $256 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ で付近になるように環境を調節することによって、良好な保護増殖を可能にすることを提案する。同様の解析はムニンノボタンとアサヒエビネでも行い、前者では多くの自生地が明る過ぎ、後者ではちょうど適正值の光条件であることがわかった。

図 4.0.3 PAM 蛍光法によるタイヨウフウトウカズラの葉における適切な光条件の分析結果

(2) マイクロ生育環境のリモートモニタリングシステム開発と生育適地解析

マイクロ環境モニタリングシステムとリアルタイム環境モニタリングシステムの構築と実証を行った。マイクロ環境モニタリングシステムは多数の園芸用センサーを利用する事により、 1m^2 の精度でデータを取得することが可能である事を実証した。植物の生育環境を把握するには、生育地域の気象データだけでは不十分で、各植物個体の近傍のマイクロ環境の情報が必要である。特に日照や土壌水分は数メートル離れると大きく変化することが予想される。本研究で開発されたマイクロ環境モニタリングシステムは、従来の高価なデータロガーシステムでは困難であった、このような個々の生育環境情報を、多数の個体について継続的に得ることが可能にするものである。リアルタイム環境モニタリングシステムは太陽発電器とバッテリーで駆動する Raspberry Pi と携帯電話網を使用して、定期的なアクセスが困難な場所における詳細な環境データの取得をインターネット経由でモニタリング可能であることを示した。

開発したマイクロ環境モニタリングシステムを使用して、ムニンノボタン、タイヨウフウトウカズラ、アサヒエビネについて、気温、日照量、土壌水分に関するマイクロ環境データを取得した。また、この環境データと詳細な生育状況観察データについての関連性を解析した。その結果、3種のうちムニンノボタンについて結果の蓄積と考察を得ることが出来た。

ムニンノボタンの生育と有意に相関のある環境条件を特定することはできず、以下の2項目が挙げられる：

① 直射光が長時間射すような環境において、ムニンノボタンの個体サイズは大きくなる (生長しない)。このことはサブテーマ1で、ムニンノボタンでは直射光のもとでは強光障害を起こすことを指摘していることと関連していると考えられる。

② 土壌水分量の違いについても、個体サイズとは関係が無い。

サブテーマ3においては、ムニンノボタンの生育に C/N 比などのデータロガーでは計測できない要素が生長量に関わっていることが指摘されており、土壌真菌叢や根茎の真菌叢も場所によって多様である

こともわかっている。このように植物の成長には様々な要素が相互作用として関わっており、光量や土壌水分量などの単一の要素だけで成長との関連を把握することの困難さを示唆しているのかも知れない。

また、現地での継続観察と小石川植物園の保護増殖事業における個体別成長記録との照合から、実生は大量に発生しても大半が早い段階（5年未満）で枯死すること、ならびに枯死は4-5年目の比較的若い樹齢に多いことがわかった。

自動撮影カメラを用いた果実採食者の調査では、ムニンノボタンの果実がメジロおよびクマネズミによって採食されていることが分かった。ノボタン科の植物は、攪乱された土地に初期に侵入するパイオニア植物的特徴があり、ムニンノボタンにおいても同様であると予想される。メジロのような小笠原諸島における本来の種子散布者が特定できたことは、この種子が広く散布されている可能性を示唆している。

（3）希少植物の自生地復元のための土壌・共生生物相の解析（国立大学法人千葉大学）

本研究において、各希少植物の生育に適した土壌環境が明らかとなった。タイヨウフウトウカズラの良好な生育には、根とその周辺土壌中に *Mortierella* 属と *Dactylonectria* 属の存在が欠かせないと考えられる。また、土壌の性質は pH7.5 付近の中性土壌を好む傾向にあったが、それ以上に湿気が多く明るい場所を好む可能性が高いと思われた。生育が良好な生育地の C/N 比は 15~20 の範囲に収まっていた。ムニンノボタンの良好な生育には、根に *Ceratobasidium* 属と *Oidiodendron* 属の菌根菌、土壌中に *Hypocreaceae* 科の腐生菌と *Dactylonectria* 属と *Penicillium* 属が必要であると思われる。C/N 比にはばらつきが多い傾向がみられた。また、土壌の性質は通気性・水捌けの良い土壌で pH6.5 付近の中性~微酸性を好む傾向があった。アサヒエビネの良好な生育には、根に *Russula* 属、*Dactylonectria* 属、*Geminibasidium* 属、*Penicillium* 属、土壌中に *Oidiodendron* 属が必要であると思われる。その一方で、ラン科植物であるにも関わらず、ラン菌が土壌からも根からも検出できなかった。この理由については不明である。また、生育は pH6.1-7.4 の微酸性~微アルカリ性の幅広い性質の土壌に適応しており、土壌化学特性以外の影響を受けやすいと思われた。C/N 比は 15~20 の範囲に収まっていることが多かった。

各希少植物の生育には、予想以上に多種多様な機能を持つ真菌が検出されたことから、このような多様性に富んだ真菌叢を保つことが土壌化学特性と同等もしくはそれ以上に重要であることが示唆された。そしてこれらの希少植物種と真菌叢の共生ネットワークを維持するためには *Russula* 属や *Dactylonectria* 属、*Chaetosphaeria* 属の存在が必要だと考えられる。

本研究における土壌中の真菌叢解析は、世界の海洋島土壌での初の大規模な真菌メタバーコーディング解析となった。15 門 45 綱 111 目 227 科 405 属 1077 種類の存在が確認でき、父島、母島、兄島の各島に特異的な真菌叢の存在が、それぞれ 2670 種類、4481 種類、1078 種類存在した。このような小笠原諸島（あるいは海洋島）に固有な真菌叢が多くあることは、島嶼固有種の生育に関係があると考えられる。また、モクマオウやアカギ、ギンネムなどの外来種の侵入を受けた場所の菌類叢の変化を調べることが今後必要である。

（4）希少植物の保全活動における社会的・倫理的課題解決のための科学技術論的検討

「再導入」を含む保全の現場において、社会的・倫理的な観点から具体的に何が問題となっているか、奄美大島の希少植物を中心的な検討対象として、文献調査、アンケート調査、ならびにインタビュー調査をもとに、科学技術社会論的観点から総合的に検討することを進めた。その結果、1) 生態学研究に伴う社会的側面に関する研究の現状、2) 希少種の再導入や再生研究に対する、動物種・植物種の違いなどに応じた、人々の意識構造、3) 再導入に対する、奄美大島におけるステークホルダーと本土の研究者の意識ギャップや、そのようなギャップを招いた多様な要因などが明らかになった。

奄美大島では自然保護に対する地元行政の体制は弱く、実質的には全島で 20 名程度である。しかし、連絡会議は存在し、一定のコミュニケーションははかられている。特徴的なのは、複数の保護団体

があり、メンバーは重なりながらも連携していることである。たとえば、「奄美野鳥の会」「奄美の自然を考える会」「シダの研究会」「海洋生物研究会」などが存在する。保護の対象によって関わっているメンバーが替わり、様々な職業や立場にある。しかし奄美の自然保護の全体をカバーする団体は存在しない。そのため、統一性が弱い面がある。

エコツーリズム推進法をふまえ、エコガイドの研修も推進されている。奄美大島では自然に関する知識のみならず、文化や歴史もつなげて総体として理解することを目指しており、認定ガイドは現在、70名ほどいる。「世界遺産」のインパクトは大きく、自然保護やエコツアーにおいて、さまざまな点に影響を与えている。ただし、奄美の現地の人々は、自分たちも含め、実は絶滅の「恐れ」をあまり感じていない。その大きな理由として、奄美の自然の強い復元力がある。これは日々の生活のなかで実感されているものである。また、歴史的にも例えば、現在に国立公園の特別保護地域に指定されている湯灣岳などは、終戦直後まで広い範囲が耕作地になっていた。ただし、復元された森林は二次林であり、オキナワジイなどの巨木があるような森ではない。

<違法採取対策>

地元において、自然保護に関する問題の重要性の順位は、圧倒的に「違法採集問題」であり、その次が「外来種問題」、そして最後が「開発と保護のバランス」であると言える。したがって、喫緊の課題は違法採集に対してどう対応するのだが、保護監視員の人員体制が弱い。そのため、愛好家などのボランティアに頼るところが大きくなるが、その「実働部隊」の高齢化も進んでおり、先行きが不安であるのが現状である。

また近年の盗掘の増加は、ネットオークションの台頭の影響が大きい。これにより、全国から、場合によっては国外も含めて、高値で取引されるようなマーケットが出来ている。このように、違法採集が起こる社会的な条件がそろっているうえ、監視体制の強化は難しいことから、地元のボランティアたちは、植物の群落等に関する統一的なマップを作らないことで、防衛しようとしている。愛好家やボランティアはおおむね、島のなかで希少種の群落がどこにあるかを知っているが、各々の頭の中だけにとどめている。実際、旧知のボランティア同士であっても、具体的な位置に関する情報を交換することは少ない。しかしその結果、奄美の希少植物の実態が分からないという問題が生じている。どの程度、危機に瀕しているのかが分からないため、客観的・合理的な自然保護の対応をとるための、大きな障害になっている。

<域外保全と再導入>

奄美大島では「手つかずの自然」を指向する傾向があり、希少種の再導入に抵抗感を示す島民が多い。再導入に反対するのは、そのサイトの地権者とは限らず、むしろ、この問題についての重要なステークホルダーで、実質的に保全活動を現場で行っている、ボランティアや愛好家の人たちであった。

以上のような奄美大島における希少種保全に対する考え方の傾向は、本土や南西諸島の他島とも異なっており、独特である要素が多い。多くの希少植物種が生育する奄美大島において、保全施策を進めるためには、こうした独自性とその背景を理解することが大切であることが示唆された。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

これまでに維持が困難であった絶滅危惧植物の生息域内・域外保全集団の生育状態を改善するための手法を策定した。「DNA多型解析による遺伝的特性分析による管理単位の決定と集団作成方法を策定する目標」については、6種の希少種を対象にしてマイクロサテライト解析やMIG-seq及び葉緑体DNA解析によって達成する事ができて、環境政策に応用する道筋を作った。「無機的環境要因の測定技術の向上や、希少種毎に光合成機能を最適化する技術の開発目標」についても小型観測機器やPAM蛍光法を使う事によって達成する事が出来て、環境政策にも応用する事が出来た。しかし前者についてはサブテーマ2担当者の急病により、論文化や学会発表がやや遅れ気味である。「土壌成分や土壌中の共生微生物叢の解析技術と応用方法の策定をする目標」については、小笠原諸島の希少植物種における土壌特性や生

育を利する共生菌を同定するという形で達成した。海洋島における土壤中真菌叢解析は、科学的にも世界で初めてである。また、本邦において生物多様性保全に重要な奄美大島を事例にした地域社会の特性を分析した結果、島民全体にも、重要なステークホルダーとなる有識者や保全関係者にも独自の特性や価値観が見出された。このように生息域内保全や域外保全を進めるにあたっては、当該地域の特性を予め分析することが重要であることを見出したという形で達成した。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

1. 環境省の関東地方環境事務所が進めている、小笠原希少植物第2次中期実施計画における令和元年度検討会において、本研究成果を提示し、希少種3種の保護増殖事業の施策に貢献した。例えばアサヒエビネの葉緑体DNAに4型を見出したことに基づき（本報告書の20ページ）、次期開花シーズンにおける人工授粉の組み合わせ選定に貢献することになった。また、希少種の生息域内保全が成功していない一因として、光量管理が出来ていない指摘にもとづいて（本報告書の21ページ）、小笠原自然保護官事務所と保護増殖事業を請け負うコンサルタント会社では、簡易型光合成有効放射量測定器を購入して、生育環境管理を行うようになった（人間の眼は、植物が光合成に利用出来ない緑色光をよく感受するので、人間の感覚で光量管理をすることは光合成を抑制するリスクがある）。また、タイヨウフウトウカズラの生息域内保全候補地の選定のために、環境測定センサーと記録ロガーの設置も検討することになった（本報告書のサブテーマ2の項目）。

2. 環境省の関東地方環境事務所、小笠原自然保護官事務所が令和元年に東京都と共同で行った北硫黄島調査で採集されたシマホザキラン（IA, 国内希少野生動植物種, 保護増殖事業保全事業対象種）のDNA解析を父島のシマホザキラン、母島のハハジマホザキランとともに本研究解析して、管理単位を提示した（小笠原自然保護官事務所からの委託事業）（管理単位の判別方法開発は、本報告書の17ページに記載）。

3. 環境省の東北地方環境事務所が進めている、秋田県男鹿半島のチョウセンキバナアツモリソウ保護増殖事業において、平成30年度にPAMを用いた光合成特性の解析（本報告書の21ページ）を行った。また、令和元年度において環境測定データロガーによる長期環境モニタリングを行うとともに、生息域内保全地の光量調節を行うようになった。

<行政が活用することが見込まれる成果>

環境省は国内希少野生動植物種の保護増殖事業を抱えているが、本研究で対象にしたタイヨウフウトウカズラやムニンノボタンのように生息域内保全が芳しくない事例が多い（例えば東北地方環境事務所所管の秋田におけるチョウセンキバナアツモリソウ保護増殖事業、関東地方環境事務所所管の小笠原諸島におけるホシツルランなど）。本研究課題の成果と研究手法は、こうした困難に面した希少種の生息域内保全に活用されることが見込まれる。生息域内保全では、適用できる施策に制限があることから、管理単位を維持しつつ欠けている遺伝子型の個体を「補強」し、自生地の光環境や湿度を樹木の枝の間引きや植樹などによって適正值に維持すること、共生微生物叢を整えることなどに活用できる。特に多くの絶滅危惧種を抱えるラン科植物では共生菌と土壌環境の影響が大きいことから、共生菌類叢を対象種毎に整えることは重要である。また、生息域外保全を維持するためには地域社会の理解と協力が重要であるので、地域社会の特性を分析して理解するプロセスを経ることが、とくに地元との接触が多い自然保護官事務所では必要になると思われるために、本研究における社会学的な分析も活用できると見込まれる。

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表

<査読付き論文>

- 1) M. YAMAMOTO, H. SETOGUCHI and K. KURATA: Conservation Genetics, 18, 1141-1150 (2017) (DOI: 10.1007/s10592-017-0966-2) Conservation genetics of an ex situ population of *Primula reinii* var. *rhodotricha*, an endangered primrose endemic to Japan on a limestone mountain.
- 2) H. IKEDA and H. SETOGUCHI: Biological Journal of the Linnean Society, 122, 249-257 (2017) (DOI: org/10.1093/biolinnean/blx071) Importance of Beringia for the divergence of two northern Pacific alpine plants, *Phyllodoce aleutica* and *Phyllodoce glanduliflora* (Ericaceae).
- 3) S. SAKAGUCHI, S. UENO, Y. TSUMURA, H. SETOGUCHI, M. ITO, C. HATTORI, S. NOZOE, D. TAKAHASHI, R. NAKAMASU, T. SAKAGAMI, G. LANNUZEL, B. FOGLIANI, A. WULFF, L. HUILLIER and Y. ISAGI: Applications in Plant Sciences, 5(5), 1700002 (2017) (DOI:10.3732/apps.1700002) Application of a simplified method of chloroplast enrichment to small amounts of tissue for chloroplast genome sequencing.
- 4) K. SUGAHARA, Y. KANEKO, S. SAKAGUCHI, K. YAMANAKA, S. ITO, H. SAKIO, K. HOSHIZAKI, W. SUZUKI, N. YAMANAKA, Y. ISAGI, A. MOMOHARA and H. SETOGUCHI: Journal of Forest Research, 22, 282-293 (2017) (DOI: 10.1080/13416979.2017.1351837) Quaternary range-shift history of Japanese wingnut (*Pterocarya rhodylla*) in the Japanese archipelago evidenced from chloroplast DNA and ecological niche modeling.
- 5) M. YAMAMOTO, M. OHTANI, K. KURATA and H. SETOGUCHI: Annals of Botany, 120, 943-954 (2017) (DOI: 10.1093/aob/mcx108) Contrasting evolutionary processes during Quaternary climatic changes and historical orogenies: a case study of the Japanese endemic primroses *Primula* sect. *Reinii*.
- 6) D. TAKAHASHI, T. TERAMINE, S. SAKAGUCHI and H. SETOGUCHI: Annals of Botany (2018) (DOI: 10.1093/aob/mcx122) Relative contributions of neutral and non-neutral processes to clinal variation in calyx lobe length in the series *Sakawanum Asarum* (Aristolochiaceae). (in press)
- 7) M. YAMAMOTO, H. HANDA and H. SETOGUCHI: Plant Species Biology, 33, 77-80 (2018) (DOI: 10.1111/1442-1984.12192) Development and characterization of 24 microsatellite markers in *Primula tosaensis*, an endangered primrose, using MiSeq.
- 8) D. TAKAHASHI and H. SETOGUCHI: Plant Species Biology, 33, 28-41 (2018) (DOI: 10.1111/1442-1984.12189) Molecular phylogeny and taxonomic implications of *Asarum* (Aristolochiaceae) based on ITS and matK sequences.
- 9) H. IKEDA, P.B. EIDENSEN, V. YAKUBOV, V. BARKALOV, C. BROCHMANN and H. SETOGUCHI: Molecular Ecology, 26, 5773-5783 (2017) (DOI: 10.1111/mec.14325) Late Pleistocene origin of the entire range of the arctic-alpine plant *Kalmia procumbens*.
- 10) Y. MITSUI, J. NAGAWASA, Y. MAEDA and H. SETOGUCHI: Plant Species Biology, 33, 72-76 (2018) (DOI: 10.1111/1442-1984.12193) Characterization of new microsatellite loci in *Pieris amomioshimensis* (Ericaceae), a species nearly extinct in the wild.
- 11) M. YAMAMOTO, H. HANDA and H. SETOGUCHI: Plant Diversity 33, 77-80(2018) (DOI: 10.1016/j.pid.2017.09.003) Development and characterization of 43 microsatellite markers for the critically endangered primrose *Primula reinii* using MiSeq sequencing.
- 12) S. SAKAGUCHI, D. TAKAHASHI, H. SETOGUCHI and Y. ISAGI: Plant Species Biology 33, 81-89. (2018) (DOI: 10.1111/1442-1984.12196) Genetic structure of the clonal herb

- Tanakaea radicans* (Saxifragaceae) at multiple spatial scales, revealed by nuclear and mitochondrial microsatellite markers.
- 1 3) H. IKEDA, V. YAKUBOV, V. BARKALOV and H. SETOGUCHI: Journal of Biogeography 45, 1260–1274 (2018) (DOI: 10.1111/jbi.13230) Postglacial East Asian origin of the alpine shrub *Phyllodoce aleutica* in Beringia.
- 1 4) K. MAGOTA, S. SAKAGUCHI, K. AKAI, Y. ISAGI and H. SETOGUCHI: Bulletin of the National Science Museum of Nature and Science, Series B 44, 85–96 (2018) Development of chloroplast and nuclear microsatellite markers in *Saxifraga acerifolia* and cross-amplification in *S. fortunei*.
- 1 5) M. YAMAMOTO, D. TAKAHASHI, K. HORITA, Y. MURAI and H. SETOGUCHI: Bulletin of the National Science Museum of Nature and Science, Series B 44, 97–103 (2018) Insect visitors and potential pollinators of serpentine endemic primrose *Primula hidakana* and *Primula takedana* in Hokkaido, Japan.
- 1 6) S. KURATA, S. SAKAGUCHI and M. ITO: Conserv. Genet. 20, 431–445 (2019) Genetic diversity and population demography of *Geranium soboliferum* Kom var. *kiusianum*: A glacial relict plant in the wetlands of Japan.
- 1 7) M. BAMBA, S. AOKI, T. KAJITA, H. SETOGUCHI, Y. WATANO, S. SATO, T. TSUCHIMATSU: Mol. Plant Microbe Interact. 32, 1110–1120 (2019) (DOI: 10.1094/MPMI-02-19-0039-R) Exploring genetic diversity and signatures of horizontal gene transfer in *Lotus japonicus*-Associated nodule bacteria in natural environments.
- 1 8) K. MAGOTA, D. TAKAHASHI, H. SETOGUCHI: Appl. Plant Sci. 7 (2019) (DOI: 10.1002/aps3.11275) Development and characterization of EST-SSR markers for *Saxifraga fortunei* var. *incislobata* (Saxifragaceae).
- 1 9) D. TAKAHASHI, T. TERAMINE, S. SAKAGUCHI, H. SETOGUCHI: Mol. Phylogenet. Evol., 137, 146–155 (2019) (DOI: 10.1016/j.ympev.2019.05.003) Genetic data reveals a complex history of multiple admixture events in presently allopatric wild gingers *Asarum* spp. (Aristolochiaceae) showing intertaxonomical clinal variation in calyx lobe length.
- 2 0) M. YAMAMOTO, D. TAKAHASHI, K. HORITA, H. SETOGUCHI: Heredity, 124, 93–107 (2019) (DOI: 10.1038/s41437-019-0245-8) Speciation and subsequent secondary contact in two edaphic endemic primroses driven by Pleistocene climatic oscillations.
- 2 1) R. NAKAMASU, S. SAKAGUCHI, H. SETOGUCHI: Acta Phytotax. Geobot. 71, 73–76 (2020) (DOI: 10.18942/apg.201911) Development and characterization of EST-SSR markers for *Tricyrtis* sect. *Tricyrtis* (Liliaceae).
- 2 2) T. SAKAGAMI, S. SAKAGUCHI, Y. ISAGI, H. SETOGUCHI: J. Forest Res., 25, 120–123 (2020) (DOI: 10.1080/13416979.2020.1744232) Development and characterization of nuclear microsatellite markers in *Aphananthe aspera* (Thunb.) Planch. (Cannabaceae).
- 2 3) K. MASUDA, H. SETOGUCHI, K. NAGASAWA, M. ISHIHARA, S. SAKAGUCHI: Acta Phytotax. Geobot. (in press) Development and characterization of EST-SSR markers for Amur daylily, *Hemerocallis middendorffii* Trautv. et C.A.Mey. (Xanthorrhoeaceae).
- 2 4) R. NAKAMASU, Y. INOUE, S. SAKAGUCHI, H. SETOGUCHI: Acta Phytotax. Geobot. (in press) A new bulbil-producing variety, *Tricyrtis macropoda* var. *bulgifera* (Liliaceae) from Northwestern Kyushu Island, Japan.

(2) 主な口頭発表 (学会等)

- 1) 若林智美、Stig U. Andersen、佐藤修正、川口正代司、瀬戸口浩彰：日本植物分類学会第 17 回大会 (2018) Genome-wide association study for differences of flowering time variation under two conditions in *Lotus japonicus* in Japan
- 2) 長澤耕樹、阪口翔太、牧雅之、福島慶太郎、井鷲裕司、陶山佳久、綱本良啓、瀬戸口浩彰：日本植物分類学会第 17 回大会 (2018) 硫気孔原植物ヤマタヌキランの起源と遺伝的特性
- 3) 後藤隼、長澤耕樹、阪口翔太、木村拓真、山田孝幸、藤井伸二、牧雅之：日本植物分類学会第 17 回大会 (2018) 伊豆諸島における山地性固有植物の起源と遺伝的分化
- 4) 亀岡慎一郎、崎尾均、阿部晴恵、阪口翔太、瀬戸口浩彰：日本植物分類学会第 17 回大会 (2018) ミスミソウの繁殖成功は集団内における花色頻度の影響を受けるのか？
- 5) 高橋大樹、前田賢次、長澤耕樹、山本将也、阪口翔太、瀬戸口浩彰：日本植物分類学会第 17 回大会 (2018) 開花期多型をもつヒメカンアオイ群の種分化過程の解明
- 6) 孫田佳奈、山本将也、阪口翔太、赤井賢成、瀬戸口浩彰：日本植物分類学会第 17 回大会 (2018) ユキノシタ属ユキノシタ節 (Sect. *Irregulaes*) の系統分類と生育特性の多様化
- 7) 上原歩、富澤蒼、森脇夕貴、村井良徳、瀬戸口浩彰、岩科司：日本植物分類学会第 17 回大会 (2018) 塩生植物ハマツナの塩ストレスに対するフラボノイド応答
- 8) 山本将也、堀田清、高橋大樹、瀬戸口浩彰：日本植物分類学会第 17 回大会 (2018) サクラソウ属近縁 2 種における花形態と訪花昆虫相の著しい分化
- 9) 瀬戸口浩彰：日本植物分類学会第 17 回大会 (2018) 小笠原諸島のムニンノボタンとタイヨウフウトウカズラの状況 2018 年
- 1 0) 阪口翔太、高橋大樹、瀬戸口浩彰、綱本良啓、陶山佳久、Yingxiong Qiu、Pan Li、Ruisen Lu、井鷲裕司：日本植物分類学会第 17 回大会 (2018) 日華区系におけるイワユキノシタ属の隔離分布形成史と繁殖システムの進化
- 1 1) 池田啓、Pernille Bronken Eidesen、Viachenslav Barkalov、Valentin Yakubov、Christian Brochmann、瀬戸口浩彰：日本植物分類学会第 17 回大会 (2018) 周北極-高山植物コケモモ (*Vaccinium vitis-idaea*) の系統地理
- 1 2) 芝林真友、栗田和紀、横田昌嗣、阿部篤志、國府方吾郎、長澤淳一、志内利明、市河三英、橋本季正、遊川知久、阪口翔太、寺峰孜、井鷲裕司：日本植物分類学会第 17 回大会 (2018) 海外に多個体が生育する国内希少野生動植物種の保全ゲノミクス
- 1 3) 亀岡慎一郎、阿部晴恵、崎尾均、瀬戸口浩彰. 第 65 回日本生態学会大会 (2018) ミスミソウの花色は何故多様なのか
- 1 4) 瀬戸口浩彰. 日本植物学会第 82 回大会 (2018) シンポジウム「小笠原諸島返還から 50 周年、絶滅危惧植物の現状と対策研究」オーガナイザー：瀬戸口浩彰・伊藤元己
はじめに：いま、なぜ、小笠原諸島なのか
- 1 5) 若林智美、Stig U. Andersen、佐藤修正、川口正代司、瀬戸口浩彰、日本植物学会第 83 回大会 (2019) 複数地点におけるミヤコグサの開花時期多型の比較と全ゲノム関連解析
- 1 6) 番場大、青木誠志郎、梶田忠、瀬戸口浩彰、綿野泰行、佐藤修正、土松隆志、日本植物学会第 83 回大会 (2019) ミヤコグサ野生系統の生育と共生根粒菌ゲノムの関連
- 1 7) 長澤耕樹、瀬戸口浩彰、牧雅之、沢和浩、堀江健二、永野惇、陶山佳久、松尾歩、綱本良啓、阪口翔太、日本植物分類学会第 19 回大会 (2020) 日本におけるスゲ属 2 節の種多様性形成過程の解明
- 1 8) 孫田佳奈、山本将也、高橋大樹、永野惇、瀬戸口浩彰、日本植物分類学会第 19 回大会 (2020) 日本列島において多様化した広義ダイモンジソウの系統進化
- 1 9) 増田和俊、瀬戸口浩彰、長澤耕樹、沢和浩、丹後亜興、坪井勇人、福本繁、堀江健二、石原正恵、阪口翔太、日本植物分類学会第 19 回大会 (2020) 後氷期の気候温暖化がゼンテイカ群の末端集団動態の決定的要因である

- 20) 川喜多遥菜、阪口翔太、瀬戸口浩彰、日本植物分類学会第19回大会(2020) 生態的多様化を遂げた小笠原諸島固有トベラ属4種の単系統性の検証
- 21) 高橋大樹、寺峰孜、阪口翔太、瀬戸口浩彰、日本植物分類学会第19回大会(2020) 萼裂片長の異なるカンアオイ属の近縁種2種の繁殖生態の比較
- 22) 阪口翔太、堀江健二、石川直子、重信秀治、山口勝司、長谷部光泰、永野惇、瀬戸口浩彰、久保田涉誠、倉島治、牧雅之、木村拓真、喜屋武隆太、伊藤元己、日本植物分類学会第19回大会(2020) アキノキリンソウの平行的な土壌適応に関わる隔離遺伝子群の進化
- 23) 倉田正観、阪口翔太、廣田峻、陶山佳久、西田佐知子、伊藤元己、日本植物分類学会第19回大会(2020) 中部山岳における広義エゾフウロの *refugia within refugia* は複数回移入によって形成された
- 24) 中村隆太、小牧義輝、瀬戸口浩彰、伊藤元己、日本生態学会第67回全国大会(2020) 小笠原諸島固有希少植物ムニンノボタンの保全に向けた生育適地の環境要因の調査
- 25) 阪口翔太、永野惇、石川直子、堀江健二、瀬戸口浩彰、伊藤元己、日本生態学会第67回全国大会(2020) 多様な開花期を示すアキノキリンソウ生態系の時系列トランスクリプトーム解析
- 26) 孫田佳奈、後藤栄治、高橋大樹、池田啓、阪口翔太、瀬戸口浩彰、日本生態学会第67回全国大会(2020) 異なる光環境下に生育するダイモンジソウ集団間の遺伝構造と光合成特性の分化
- 27) 井上(高橋)みずき、飛田空、佐藤光彦、松尾歩、陶山佳久、瀬戸口浩彰、日本生態学会第67回全国大会(2020) 倍数性植物ドクダミの遺伝的多様性と個体群構造
- 28) 長澤耕樹、瀬戸口浩彰、福本繁、石原正恵、沢和浩、堀江健二、増田和俊、阪口翔太、日本生態学会第67回全国大会(2020) 多雪環境の歴史変化が植物の集団動態に与える影響

7. 研究者略歴

1) 瀬戸口浩彰

東京大学大学院理学系研究科植物学専攻博士課程修了・博士(理学)、東京都立大学理学部助手、京都大学総合人間学部准教授、京都大学大学院人間・環境学研究科教授などを経て、現在、京都大学大学院地球環境学堂教授

2) 阪口翔太

京都大学大学院農学研究科森林科学専攻博士課程修了・博士(農学)、日本学術振興会特別研究員(東京大学大学院総合文化研究科)、京都大学大学院人間・環境学研究科助教を経て、現在、京都大学大学院地球環境学堂助教

3) 伊藤元己

京都大学大学院理学研究科植物学専攻博士課程修了・理学博士、東京都立大学理学部助手、千葉大学大学院理学研究科准教授、東京大学大学院総合文化研究科准教授を経て、現在、東京大学大学院総合文化研究科教授

4) 久保田涉誠

北海道大学大学院環境科学院生物圏科学専攻博士課程修了・博士(環境科学)、東京大学大学院総合文化研究科博士研究員を経て、現在、東京大学大学院総合文化研究科助教

5) 上原浩一

東京農業大学農学研究科博士課程修了・博士(農学)、千葉大学教養学部助手、千葉大学大学院園芸学研究科准教授、同教授を経て、現在、千葉大学国際教養学部教授

6) 神里 達博

東京大学大学院総合文化研究科広域科学系相関基礎科学専攻博士課程単位取得満期退学、三菱化学生命科学研究所社会生命科学研究室、科学技術振興機構、東京大学、大阪大学などを経て、現在、千葉大学国際教養学部教授

II. 成果の詳細

II-1 遺伝的多様性解析と至適空間配置を考慮した域外保全集団形成法の開発

国立大学法人京都大学大学院地球環境学堂 瀬戸口 浩彰
阪口 翔太

平成30～令和元年度研究経費（累計額）：44,876千円（研究経費は間接経費を含む）
（平成29年度：15,212千円、平成30年度：14,452千円、令和元年度：15,212千円）

[要旨]

希少種の生息域外保全や域内保全を確実に成功させるために必要である、DNA 遺伝情報を基にした管理単位の策定と管理単位毎の遺伝的多様性を最大化する方法、ならびに光合成のパフォーマンスを最適化するための研究開発を行った。遺伝的特性の研究対象には小笠原諸島の3種の希少植物：タイヨウフウトウカズラ、ムニンノボタン、アサヒエビネ、ならびに奄美大島の希少種3種：ウケユリ、アマミデンダ、アマミアセビの6種について、マイクロサテライト解析ならびにMIG-seqによるSNPs（一塩基多型）の解析を行い、STRUCTURE解析や系統樹作成、主成分分析などの手法によって管理単位を決めて、遺伝的多様性などの数値を評価することを検証した。タイヨウフウトウカズラやムニンノボタン、アマミデンダでは生息域内集団の多様性が著しく貧弱であり、管理単位を崩さない範囲で域外保全集団からの補強が適切であると考察した。アサヒエビネやウケユリ、アマミアセビには生息域内保全集団あるいは域外保全集団に十分な遺伝的多様性があり、管理単位の中で遺伝的に疎遠な個体間での交配などが望まれる。光合成特性の把握は小笠原諸島の3種を対象にして行った。その結果、タイヨウフウトウカズラの野生復帰（補強）場所の光合成有効放射量が顕著に少なく、飢餓状態にあるために枯死や生育不良が続いていると考察された。ムニンノボタンでは逆に明るすぎて強光障害が見られる再導入地が多くあった。アサヒエビネについては適正な光量下にあることがわかった。以上の知見から、希少種毎の光合成特性を把握したうえで、生育地の光量管理をすることが重要であることが示唆された。

[キーワード]

遺伝的多様性、管理単位、個体判別、生息域外保全、光合成、光合成有効放射量

1. はじめに

希少植物種の生息域外保全や域内保全は、突発的な自然災害や動物による食害、盗掘、長期的な気候変動から絶滅を回避させるために重要な手法である。植物は発芽した場所から動くことが出来ない生物であるために、地域的な局所適応と種内分化を起こしていることがあり、「管理単位」を明確にして保全をすることが必要である。また、限られた個体数から構成される保全手法であるために、ファウンダーの遺伝的多様性や近交係数を適切な数値に維持することが重要である。さらに、光合成をすることが必須である生物であるために、植物種毎に光合成に最適な光強度がある。しかしながら、従来の生息域外保全や域内保全においては、このような植物の特徴の認識に欠けることがあり、長年に渡る保全の努力が上手くいかずに補強を中止してモニタリングに専念している事例が多々起きている。本研究では、希少植物種の生息域外保全や域内保全を推進するうえで欠かせない項目を遺伝的解析手法と生理学的手法を併用して解決することを目指した。

2. 研究開発目的

生息域外保全、域内保全において必要な情報に遺伝情報がある。個体毎の遺伝子型を判別して、管理単位を決定し、管理単位毎の遺伝的多様性を最大化することが保全施策上で重要である。遺伝情報の取

得においては、対処とする希少植物の性状や入手できるサンプルによって DNA の解析方法をマイクロサテライト解析、あるいは次世代 DNA シーケンサーによる SNPs 解析 (MIG-seq) の間で使い分ける。そして集団遺伝構造や系統関係を求めるために STRUCTURE 解析や系統解析を行って「管理単位」を決める方法、個体別遺伝子型判別法と域外保全集団の作成に応用する方法を開発する。

また、独立栄養生物である植物にとって、光合成能力を最大に発揮させることは生育管理のうえで極めて重要である。本研究では各希少種の光合成に適切な光量 (光合成有効放射量) を解析して、生息域外保全地、ならびに域内保全地の光量管理に活用する方法を開発する。

3. 研究開発方法

遺伝解析の研究対象には、小笠原諸島のタイヨウフウトウカズラ、ムニンノボタン、アサヒエビネの3種、ならびに奄美群島のウケユリ、アマミアセビ、アマミデンダの3種、合計6種とした。これらの多くは環境省の希少種保護増殖事業の対象であるために、必要な許可を申請しつつ、20年~8年ほど前に環境省の事業などで採集された余剰試料も用いながら研究を進めた。解析にはマイクロサテライトマーカーの解析、ならびに次世代型 DNA シーケンサー (図 3.0.1) を用いた MIG-seq で一塩基多型 (SNPs) 情報を得た。これらの解析手法は、用いる DNA サンプルの質や植物の染色体数の倍数性によって使い分けた。即ち、DNA 抽出用サンプルの質が良く、かつ二倍体の植物ではマイクロサテライト解析を行い、サンプルが古くて劣化が進んでいる場合や高次倍数体の植物では MIG-seq を用いた。また、既に解析がされていたアサヒエビネについては、未解析の葉緑体 DNA を解析した。結果については、集団遺伝学の常法である遺伝子型の推定、遺伝的多様性、近交係数の推定、集団間系統樹や地理構造の解析などを行った。これにより、補強や再導入における「管理単位」を決定するとともに、保全集団の近交係数をゼロ付近に保ちながら (=近親交配を防ぐ)、遺伝的多様性を高く維持するルーチンを確立した。

植物は光合成を行う独立栄養生物であるために、適切な光合成をしているか否かが生死に大きく影響する。本研究における至適空間配置の測定項目は、とくに小笠原諸島における絶滅危惧種の保護増殖事業で域内保全をされている集団の光環境を、植物が光合成に用いることが出来る波長帯の光エネルギー (光合成有効放射: PAR*) を Light Photometer で測定することによって行った。また、各植物がストレス無く光合成を行うことが出来る光条件を測定する条件を PAM 蛍光法** (図 3.0.2) で分析した。これにより、生息域内保全に適した光環境を作出するルーチンを策定した。これには小笠原諸島の前述3種を対象にした。

*光合成有効放射: Photosynthetically active radiation: PAR

緑色植物の葉緑体が光合成に用いることが出来る波長帯の光。本報告では、単位は光量子密度 ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) で記載している。なお、私たちの生活環境を測定するうえで頻用されるルクス (Lux) は、ヒトの目の吸収波長帯をベースにしており、植物が光合成に最も利用しづらい緑色光にピークがある。

**PAM 蛍光法: Pulse Amplitude modulated fluorometry: PAM

光合成における光受容体=クロロフィル a が光を吸収する際に同時に発する蛍光 (クロロフィル蛍光) を検出して、電子が電子伝達系を通過する速度の大きさ (ETR) を算出することができる。この数値は、ストレス条件下での光化学系の阻害の見積もりに使用される。具体的には、至適光量を超過して光が強すぎて葉に損傷が起きている時、光を強くしても (PAR を上昇させても) ETR は低下の一途を辿る。

4. 結果及び考察

本研究では、DNA データの解析手法としてマイクロサテライト解析、あるいは MIG-seq による SNPs の解析を用いた。マイクロサテライト解析を用いた事例として、小笠原諸島におけるタイヨウフウトウカズラ (絶滅危惧 IA, (CR)、国内希少野生動植物種、保護増殖事業保全事業対象種) を最初に記述する。

タイヨウフウトウカズラでは小笠原諸島の母島と東京大学小石川植物園、環境省新宿御苑事務所、京都大学に生育・栽培されている 47 個体を対象にして、マイクロサテライトマーカー29 遺伝子座で解析した。その結果、28 遺伝子型の個体があることが判明した。環境省が母島島内で生息域内保全として再導入した集団では、一遺伝子型だけが解析されたため、匍状更新で単一遺伝子型の個体で占有されたと考えられた。本種の生育範囲は母島北部の狭い範囲であることから管理単位は 1 ユニットとした。続いて 28 遺伝子型の関係を系統樹作成で解析した (図 4.1.1)。

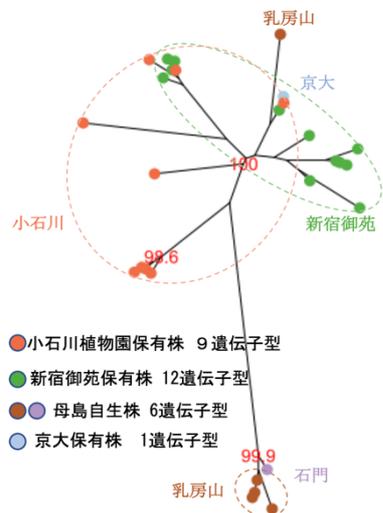


図 4.1.1 タイヨウフウトウカズラ 28 遺伝子型の NJ 系統樹。系統樹上の数値は 1000 回のブーツストラップ値を示す。

将来における生息域内保全の個体選抜においては、系統樹で示された 28 種類の遺伝子型の関係に基づき、疎遠な個体を組み合わせることによって、遺伝的多様性を最大化するとともに、次世代更新において近親交配を回避することが期待される。

タイヨウフウトウカズラの管理単位を 1 としたときの 28 遺伝子型の遺伝的多様性は、ヘテロ接合度 (H_e) で 0.322、近交係数 (F_{IS}) は -0.506 でヘテロ過剰であった。

奄美群島のウケユリ (絶滅危惧 IA 類 (CR)) は MIG-seq で解析した。このサンプルは 2000 年より前に、鹿児島大学の宮本句子教授らに採集されて、未解析のまま長期間に渡ってシリカゲル乾燥された葉であったために DNA の断片化が進んでおり、短い DNA 断片を PCR で増幅する MIG-seq に適していた。

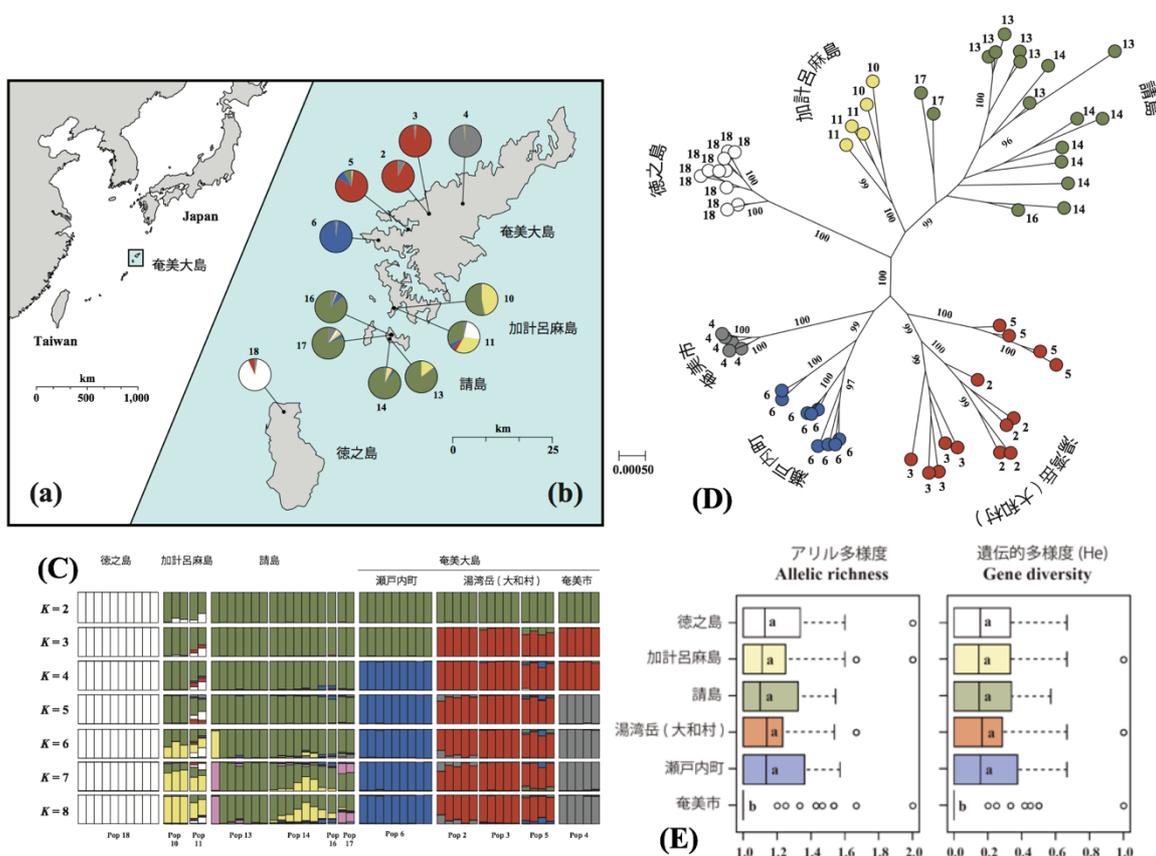


図 4.1.2 奄美群島固有種ウケユリの MIG-seq による保全単位の推定と遺伝的多様性の解析結果。(a, b) 集団の位置と STRUCTURE 解析によるクラスターの構成、(c) STRUCTURE 解析による分集団の推定結果、(d) 最尤法による個体間系統樹、(e) 各管理単位の遺伝的多様性。

263,846bp の塩基配列から 345 SNPs が得られ、これに基づいて任意交配状態にある遺伝的クラスターを STRUCTURE 解析によってベイズ推定した。その結果、4つの奄美群島の比較的広い範囲に分布するウケユリは、まず奄美大島と徳之島に分かれ（分集団数 $K=2$ ）、さらに細かく分集団を推定した結果、6つの分集団が認められた（図 4.1.2）。ウケユリは生育地毎に遺伝的な単位を持っており、管理単位は 6 とするのが適切であると判断された。遺伝的多様性はどの産地もほぼ同じ程度を保持しており（ $H_e=1.7$ 前後）、奄美市の集団だけが有意に多様性が低かった。これは分布の端であることに拠ると考えられる。

このようにウケユリにおける解析では、管理単位が地理的な空間配置に応じて明瞭に分けられて提示されており、遺伝的多様性の評価もヘテロ接合度やアレル多様度で綺麗に提示することが出来た。

「MIG-seq → STRUCTURE 解析/個体間系統解析 → 遺伝的多様性の評価」という解析の流れで、マイクロサテライト解析と同様に、保全施策に応用が出来ることが明瞭に示された。

同様の MIG-seq を用いた解析は、小笠原諸島父島固有種のムニンノボタン（絶滅危惧 IA 類 (CR)、国内希少野生動植物種、保護増殖事業保全事業対象種）でも行った。なお、解析にあたっては、母島のハハジマノボタンも加えて比較した。

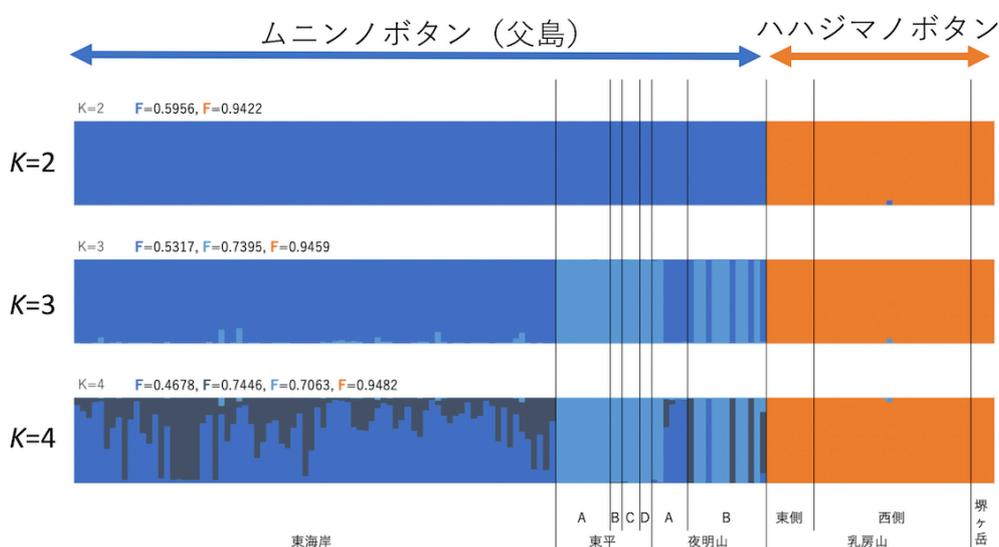
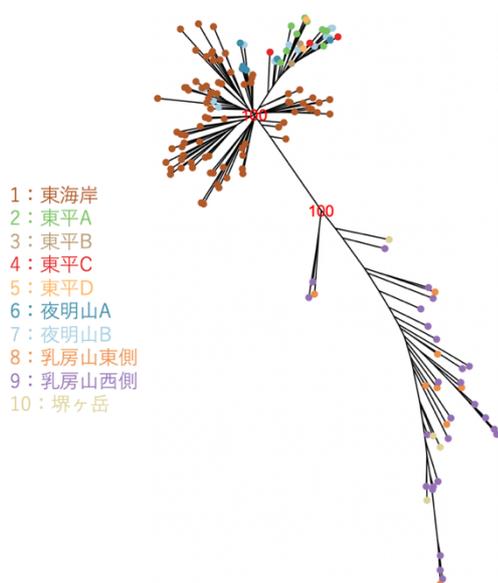


図 4.1.3 小笠原諸島父島固有種のムニンノボタン（青色）とハハジマ固有種のハハジマノボタン（オレンジ色）における MIG-seq SNPs データに基づく STRUCTURE 解析の結果。



- 1: 東海岸
- 2: 東平A
- 3: 東平B
- 4: 東平C
- 5: 東平D
- 6: 夜明山A
- 7: 夜明山B
- 8: 乳房山東側
- 9: 乳房山西側
- 10: 塚ヶ岳

図 4.1.4 ムニンノボタンの個体間 NJ 系統樹。

それぞれの丸は個体を、色は凡例にある由来産地を示す。

遺伝的多様性も大変に低く、唯一の野生集団である東海岸の集団でもヘテロ接合度 (H_e) が 0.1 程度であり、その他の補強された集団は 0.010~0.083 と極めて低い数値であった。ムニンノボタンで野生由来の集団は東海岸のみであり、あとは少数の親個体の実生苗を東平や夜明山などの場所に再導入された集団である。STRUCTURE 解析の結果は、ムニンノボタンの中に明瞭な管理単位がなく、全体を一つの管理単位とするべきであることを示唆している。同様の結果は、ムニンノボタンの個体間系統樹でも支持された。

小笠原諸島の父島と兄島に分布するアサヒエビネ（絶滅危惧 IA 類(CR)、国内希少野生動植物種、保護増殖事業保全事業対象種）は、個体数は多くて開花の頻度も高いが、結実が起こらずに実生更新が途絶えている問題が生じている。かつて行われた環境省委託事業におけるマイクロサテライト解析では、遺伝的多様性がほとんど無いと報告されていたため、近親交配によって結実しないものと考えられてきた。

本研究では、兄島から 22 個体、父島から 63 個体、合計を 85 個体から DNA 抽出を行い、葉緑体 DNA の psbA-trnH と trnL-trnF の二領域をシーケンスして、塩基配列に基づくハプロタイプ（遺伝子型）解析を行った。その結果、予想に反して 4 種類のハプロタイプが同定された（表 4.1.1）。

葉緑体DNA ハプロタイプ	psbA-trnH 塩基配列多型	trnL-trnF 塩基配列多型				
		1	ACGT	T	T	A
2	CCGT	C	C	C	GTATC	AAAAA
3	AATG	T	T	A	-----	CTCTG
4	AATG	C	C	C	GTATC	AAAAA
	35/39/59/61	20	22	28	105-109	322-327

表 4.1.1 父島と兄島におけるアサヒエビネ 85 個体の解析で検出された 4 種類の葉緑体 DNA ハプロタイプ。下の数字は、各領域の塩基配列における 5' からの位置を示す。

タイプ1は、兄島と父島の全域にわたって分布し、もっとも個体数が多かった（77個体）。タイプ2は兄島の限局された沢筋にだけ分布し、4個体であった。タイプ3は、父島南端の千尋岩付近に1個体だけが見出された。タイプ4も、父島南端の千尋岩付近に3個体だけが見出された。このように、多数はタイプ1に固定されているが、異なる母系間で人工交配を試みて結実を期待する価値があると考えられる。

一般に葉緑体 DNA はマイクロサテライト解析に比べて変異に劣るために、この結果は意外なものであり、マイクロサテライト解析を再検証する必要もある。

奄美大島のアマミデンダ（絶滅危惧 IA 類(CR)、特定一種国内希少野生動植物種）では、ダム建設と過去における園芸目的採取によって自生地の生育範囲と個体数が極めて限られていた。本研究では、かつて環境省委託事業で採集された葉：35 サンプルと、国内の複数の山野草愛好団体、日本シダの会の協力で集めた 23 サンプル、合計 58 サンプルを対象にして、マイクロサテライト 8 座を用いて解析を行った。その結果、本種では種内の遺伝的多様性を語る事が出来ないほど低レベルの多様性：4 遺伝子型しか検出できなかった。このうち野生集団にも現存するのは 3 遺伝子型であり、残りの 1 遺伝子型は趣味家が栽培する個体であった。かつて採取された遺伝子型が自生地から消失したと考えられる。

このようにアマミデンダはマイクロサテライト解析でもわずかに 4 遺伝子型が判別されただけであった。本種はダム建設による自生地の消失と、園芸目的の採取が原因で希少種になった経緯がある。今後には、植物園や趣味家の間で維持されている個体の解析を更に進めて、かつて自生地に存在していた未認識の遺伝子型を見出していくことが必要である。

また、本研究では寄贈を受けた個体を基にして増殖を行い、4 遺伝子型 850 個体を作成して維持管理している（図 4.1.5）。各個体には QR コードタグを付けて、環境省と日本植物園協会の連携事業で進めている域外保全データベースに記録した由来と遺伝子型などの情報に紐付けするようにしている。今後には域外保全等に用いる計画である。

奄美大島のアマミアセビ（＝リュウキュウアセビ、絶滅危惧 IA 類(CR)、国内希少野生動植物種）では、マイクロサテライト 9 遺伝子座を用いて、栽培株を中心としたコレクションから 98 系統を判別し

た。STRUCTURE 解析や主成分分析からは管理単位は 1 とされ、本種の自生地が湯湾岳から慈和岳に至る稜線沿いの非常に狭い分布をしていたことと一致した。98 遺伝子型の遺伝的多様性は、ヘテロ接合度 (H_E) で 0.736 と高く、近交係数 (F_{IS}) は 0.164 でゼロに近くて近親交配の可能性が排除できている、良質な域外保全コレクションであることがわかった。



図 1.5 本研究成果に基づいて作出したアマミデンダの生息域外保全用の苗。4 遺伝子型 850 個体を維持している。

引き続き、小笠原諸島の 3 種を対象にして、光合成効率が最も良い至適光量（光合成有効放射量）を PAM 蛍光法によって推定するとともに、小笠原諸島内の生息域内保全地における光合成有効放射量を測定して比較した。

タイヨウフウトウカズラ

東京大学小石川植物園と環境省新宿御苑事務所で栽培されている個体の葉、および自生地である母島の石門大柵の再導入地、ならびに乳房山裏の自生地の個体の葉を用いて PAM 蛍光法で計測した。その結果、光合成有効放射が約 $256 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ~ $500 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ のときに最も効率良く光合成で光エネルギーを利用できていることがわかった（図 4.1.6）。

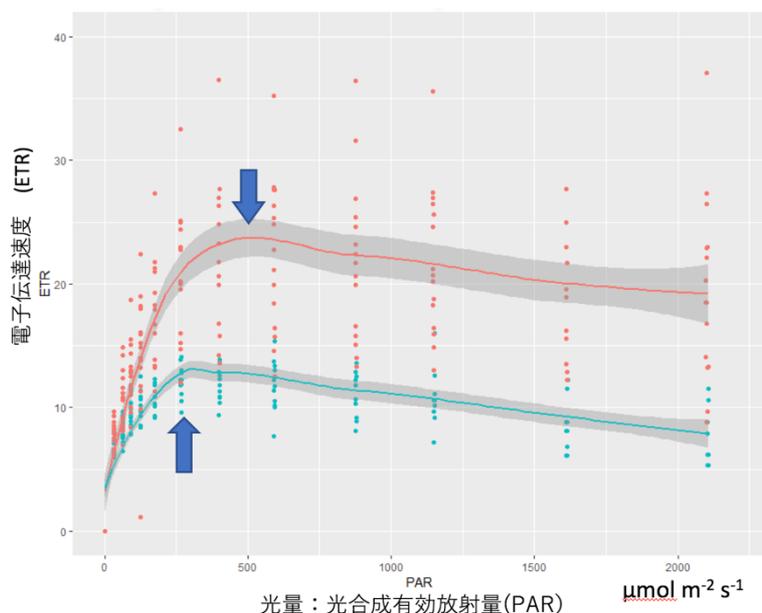


図 4.1.6 PAM 蛍光法によるタイヨウフウトウカズラの葉における適切な光条件の分析結果。

下の青色の曲線が栽培株で測定した結果を、上の赤色の曲線が自生地の株で測定した結果の近似曲線を示す。

矢印は、それぞれの測定における最適な光合成有効放射量を示す。

その一方で、石門の再導入地における光合成有効放射量は大柵で平均 $40.75 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、別の植栽地で $5.91 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、堺ヶ岳で $2.76 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ であった。自生地の乳房山裏では平均で $280.13 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ であった。このように、タイヨウフウトウカズラの生息域内保全地は明らかに暗すぎる環境にあり、光合成を十分に出来ていない状態、人間に例えると十分な食事が出来ていない飢餓状態にあることがわかった。人間の眼は植物が光合成に用いることが出来ない緑色の波長帯の光を良く感受するため、

人間の視覚で植栽地の選定をすると不適切な植栽配置をしてしまう恐れがある。光合成有効放射を基準にして生育地の選定と光量管理をするべきである。

前述の遺伝的多様性解析の結果と総合すると、タイヨウフウトウカズラでは集団を構成する個体の遺伝的多様性を高めるとともに、光合成有効放射が $256 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1} \sim 500 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ の範囲に収まるように光量管理をすることによって、良好な保護増殖が可能になると考察される。

ムニンノボタン

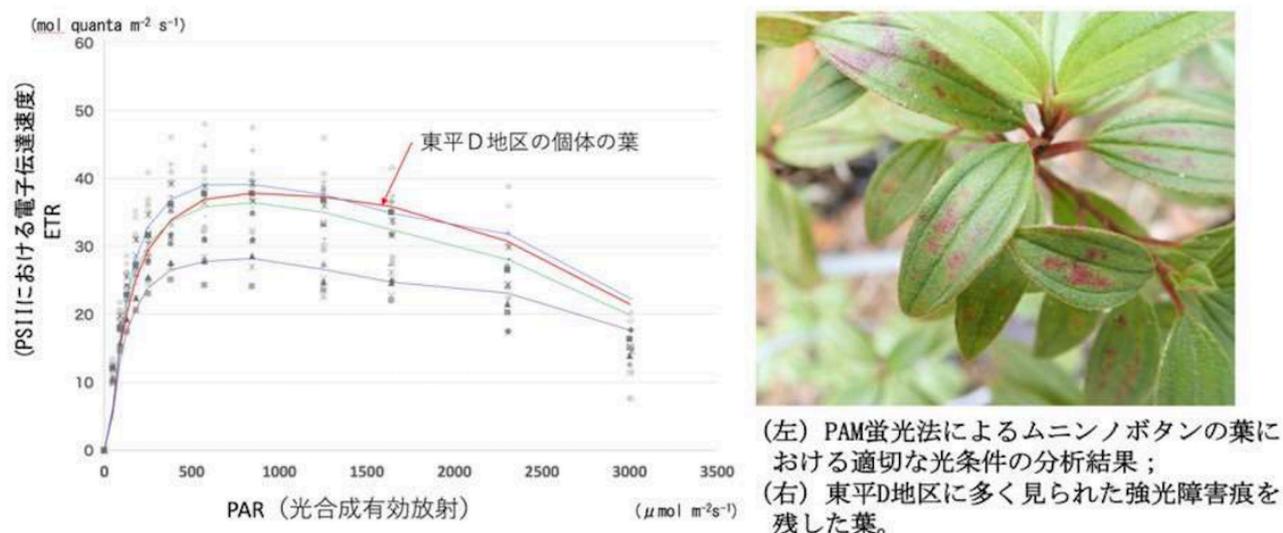


図 4.1.7 (左) PAM 蛍光法による 4 地点のムニンノボタンの葉における適切な光条件の分析結果；
(右) 東平 D 地区に多く見られた強光障害痕を残した葉。

PAM 蛍光法によって自生地の個体でムニンノボタンの葉では、 $1300 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 未満における光合成有効放射で光合成にストレスを受けないことがわかった (図 4.1.7)。これは明るい日陰、あるいは曇天の南中時の光量に該当する。しかし父島の東平植栽地ではこれよりも明るい場所が多くあり、直射日光を受けるような場所に個体が配置している事も多かった。例えば東平 D 地区では枯死個体が著しく多く、生き残った株のサイズも移植後 20 年を経過しているとは思われないほどに小さく、葉には強光障害を受けた跡が見られた。このような場所では実生の生育も確認できなかった。これらの知見は、遺伝的多様性よりもむしろ、生育に適切な光条件下に個体を適正に配置することの重要性を示唆している。また、本推進費の課題 2 におけるデータロガー測定で、光量とムニンノボタンの生長量が関係しない知見とも矛盾しない：強光障害によって成長が抑制されていたと考えられる。

東平 D 地区は、かつて再導入された際には被陰する樹木が配置されていた。現在は日陰を作る樹木がないことから、光環境の変化が生育不良の一因となっている可能性がある。

アサヒエビネ

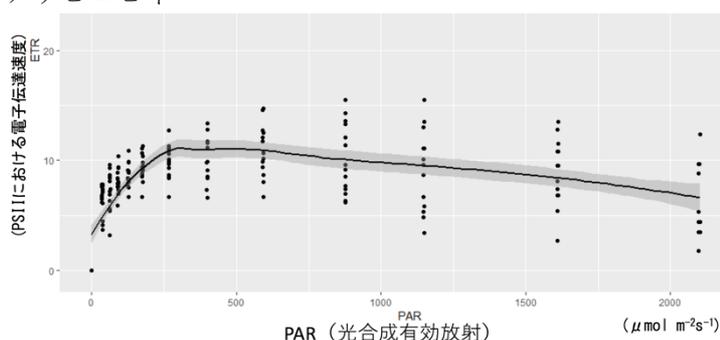


図 4.1.8 PAM 蛍光法によるアサヒエビネの葉における適切な光条件の分析結果。
自生地 (父島千尋岩) の 15 株で測定した結果の近似曲線を示す。

最適な光合成有効放射量は約 $250 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ であった（図 4.1.8）。この数値は環境省新宿御苑事務所の栽培株を用いて計測した結果とほぼ一致していた。自生地環境における光合成有効放射量は約 $52 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ であり、やや暗い環境であると言える。

以上のように、小笠原の 3 種の希少種は、長い期間にわたり保護増殖事業の対象として補強や再導入、クマネズミやアフリカマイマイなどの外来種対策、人工授粉、柵による保護などが行われてきたが、前述のように生育状況はむしろ悪化しており、枯死や次世代更新の欠如が続いている。植物は独立栄養生物であり、光合成を糧としていることを重視して、各種の適切な光環境を整えて光合成が良い効率で行える環境を作ることが重要であると考察される。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

希少植物種の生息域外保全や域内保全を持続させて効果的な絶滅回避をするには、単に個体数を増やして育成をするのではなく、DNA 解析を行って管理単位を確定した後に、その管理単位の遺伝的多様性を最大化し、かつ近交係数がゼロに近くなるように最適化することが肝要である。本研究では、マイクロサテライト解析や MIG-seq 法による DNA 多型解析の結果を用いて、STRUCTURE 解析や個体間系統解析などの手法を用いて管理単位を策定し、個体別遺伝子型情報を用いて管理単位の近交係数や遺伝的多様度を最適化するプロセスを作った。また、これまでに生息域内保全が行き詰まって補強を中断することが小笠原諸島などで頻繁に起きている原因として、植物種ごとに光合成機能を最大にするのに適切な光合成有効放射量を把握しておらず、自生地における光環境整備が軽視されていることに注目した。PAM 蛍光法を用いて最適な光合成有効放射量を把握するとともに、自生地の光環境をその数値に近づけるように管理し続けることによって、希少植物の持続的な保全を可能にする道を開いた。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

1. 環境省の関東地方環境事務所が進めている、小笠原希少植物第 2 次中期実施計画における令和元年度検討会において、本研究成果を提示し、希少種 3 種の保護増殖事業の施策に貢献した。例えばアサヒエビネの葉緑体 DNA に 4 型を見出したことに基づき、次期開花シーズンにおける人工授粉の組み合わせ選定に貢献することになった。
2. 小笠原諸島ので希少種の生息域内保全が成功していない一因として、光量管理が出来ていない指摘にもとづいて、小笠原自然保護官事務所と保護増殖事業を請け負うコンサルタント会社では、簡易型光合成有効放射量測定器を購入して、生育環境管理を行うようになった（人間の目の光感受物質であるロドプシンは、植物が光合成に利用出来ない緑色光をよく感受するので、人間の目の感覚で光量管理をすることは植物の光合成を抑制して飢餓状態を招くリスクがある）。
3. 林野庁小笠原総合事務所国有林課によるフィールド提供により、母島の桑ノ木山にてタイヨウフウトウカズラの生息域外保全を令和 2 年 3 月に始めた。これにあたり、本研究で判別された全ての遺伝子型の苗木を母島島内で繁殖させたうえで桑ノ木山のフィールドに定植を始めた。これらの個体は、将来に環境省がタイヨウフウトウカズラを再導入する際に用いることになっている。
4. 環境省の関東地方環境事務所、小笠原自然保護官事務所が令和元年に東京都と共同で行った北硫黄島調査で採集されたシマホザキラン（IA, 国内希少野生動物植物種, 保護増殖事業保全事業対象種）の DNA 解析を父島のシマホザキラン、母島のハハジマホザキランとともに本研究解析して、管理単位を提示した（小笠原自然保護官事務所からの委託事業）。

5. 環境省の東北地方環境事務所が進めている、秋田県男鹿半島のチョウセンキバナアツモリソウ保護増殖事業において、平成30年度にPAMを用いた光合成特性の解析を行った。また、令和元年度において環境測定データロガーによる長期環境モニタリングを行った。

<行政が活用することが見込まれる成果>

環境省は国内希少野生動植物種の保護増殖事業を行っているが、本研究で対象にしたタイヨウフウトウカズラやムニンノボタンのように生息域内保全が芳しくない事例が多い。本研究課題の成果と研究手法は、こうした困難に面した希少種の生息域内保全に活用されることが見込まれる。生息域内保全では、適用できる施策に制限があることから、管理単位を維持しつつ欠けている遺伝子型の個体を「補強」して遺伝的多様性を高めて近交弱性を防ぐことに活用できる。光合成の能力を十分に発揮して、良好な生育を促すためには、対象種の光合成特性をPAM蛍光法などで把握して、光合成有効放射量を目安にしながら、自生地の光環境を樹木の枝の間引きや植樹、寒冷紗の利用などによって適正值に維持することに活用することが見込まれる。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) M. YAMAMOTO, H. SETOGUCHI and K. KURATA: Conservation Genetics, 18, 1141-1150 (2017) (DOI: 10.1007/s10592-017-0966-2) Conservation genetics of an ex situ population of *Primula reinii* var. *rhodotricha*, an endangered primrose endemic to Japan on a limestone mountain.
- 2) H. IKEDA and H. SETOGUCHI: Biological Journal of the Linnean Society, 122, 249-257 (2017) (DOI: org/10.1093/biolinnean/blx071) Importance of Beringia for the divergence of two northern Pacific alpine plants, *Phyllodoce aleutica* and *Phyllodoce glanduliflora* (Ericaceae).
- 3) S. SAKAGUCHI, S. UENO, Y. TSUMURA, H. SETOGUCHI, M. ITO, C. HATTORI, S. NOZOE, D. TAKAHASHI, R. NAKAMASU, T. SAKAGAMI, G. LANNUZEL, B. FOGLIANI, A. WULFF, L. HUILLIER and Y. ISAGI: Applications in Plant Sciences, 5(5),1700002 (2017) (DOI:10.3732/apps.1700002) Application of a simplified method of chloroplast enrichment to small amounts of tissue for chloroplast genome sequencing.
- 4) K. SUGAHARA, Y. KANEKO, S. SAKAGUCHI, K. YAMANAKA, S. ITO, H. SAKIO, K. HOSHIZAKI, W. SUZUKI, N. YAMANAKA, Y. ISAGI, A. MOMOHARA and H. SETOGUCHI: Journal of Forest Research, 22, 282-293 (2017) (DOI: 10.1080/13416979.2017.1351837) Quaternary range-shift history of Japanese wingnut (*Pterocarya rhodylla*) in the Japanese archipelago evidenced from chloroplast DNA and ecological niche modeling.
- 5) M. YAMAMOTO, M. OHTANI, K. KURATA and H. SETOGUCHI: Annals of Botany, 120, 943-954 (2017) (DOI: 10.1093/aob/mcx108) Contrasting evolutionary processes during Quaternary climatic changes and historical orogenies: a case study of the Japanese endemic primroses *Primula* sect. *Reinii*.

- 6) D. TAKAHASHI, T. TERAMINE, S. SAKAGUCHI and H. SETOGUCHI: *Annals of Botany* (2018) (DOI: 10.1093/aob/mcx122) Relative contributions of neutral and non-neutral processes to clinal variation in calyx lobe length in the series *Sakawanum Asarum* (Aristolochiaceae). (in press)
- 7) M. YAMAMOTO, H. HANDA and H. SETOGUCHI: *Plant Species Biology*, 33, 77-80 (2018) (DOI: 10.1111/1442-1984.12192) Development and characterization of 24 microsatellite markers in *Primula tosaensis*, an endangered primrose, using MiSeq.
- 8) D. TAKAHASHI and H. SETOGUCHI: *Plant Species Biology*, 33, 28-41 (2018) (DOI: 10.1111/1442-1984.12189) Molecular phylogeny and taxonomic implications of *Asarum* (Aristolochiaceae) based on ITS and matK sequences.
- 9) H. IKEDA, P.B. EIDENSEN, V. YAKUBOV, V. BARKALOV, C. BROCHMANN and H. SETOGUCHI: *Molecular Ecology*, 26, 5773-5783 (2017) (DOI: 10.1111/mec.14325) Late Pleistocene origin of the entire range of the arctic-alpine plant *Kalmia procumbens*.
- 1 0) Y. MITSUI, J. NAGAWASA, Y. MAEDA and H. SETOGUCHI: *Plant Species Biology*, 33, 72-76 (2018) (DOI: 10.1111/1442-1984.12193) Characterization of new microsatellite loci in *Pieris amomioshimensis* (Ericaceae), a species nearly extinct in the wild.
- 1 1) M. YAMAMOTO, H. HANDA and H. SETOGUCHI: *Plant Diversity* 33, 77-80(2018) (DOI: 10.1016/j.pid.2017.09.003) Development and characterization of 43 microsatellite markers for the critically endangered primrose *Primula reinii* using MiSeq sequencing.
- 1 2) S. SAKAGUCHI, D. TAKAHASHI, H. SETOGUCHI and Y. ISAGI: *Plant Species Biology* 33, 81-89. (2018) (DOI: 10.1111/1442-1984.12196) Genetic structure of the clonal herb *Tanakaea radicans* (Saxifragaceae) at multiple spatial scales, revealed by nuclear and mitochondrial microsatellite markers.
- 1 3) H. IKEDA, V. YAKUBOV, V. BARKALOV and H. SETOGUCHI: *Journal of Biogeography* 45, 1260-1274 (2018) (DOI: 10.1111/jbi.13230) Postglacial East Asian origin of the alpine shrub *Phyllodoce aleutica* in Beringia.
- 1 4) K. MAGOTA, S. SAKAGUCHI, K. AKAI, Y. ISAGI and H. SETOGUCHI: *Bulletin of the National Science Museum of Nature and Science, Series B* 44, 85-96 (2018) Development of chloroplast and nuclear microsatellite markers in *Saxifraga acerifolia* and cross-amplification in *S. fortunei*.
- 1 5) M. YAMAMOTO, D. TAKAHASHI, K. HORITA, Y. MURAI and H. SETOGUCHI: *Bulletin of the National Science Museum of Nature and Science, Series B* 44, 97-103 (2018) Insect visitors and potential pollinators of serpentine endemic primrose *Primula hidakana* and *Primula takedana* in Hokkaido, Japan.
- 1 6) S. KURATA, S. SAKAGUCHI and M. ITO : *Conserv. Genet.* 20, 431-445 (2019) Genetic diversity and population demography of *Geranium soboliferum* Kom var. *kiusianum*: A glacial relict plant in the wetlands of Japan.
- 1 7) M. BAMBA, S. AOKI, T. KAJITA, H. SETOGUCHI, Y. WATANO, S. SATO, T. TSUCHIMATSU: *Mol. Plant Microbe Interact.* 32, 1110-1120 (2019) (DOI: 10.1094/MPMI-02-19-0039-R) Exploring genetic diversity and signatures of horizontal gene transfer in *Lotus japonicus*-Associated nodule bacteria in natural environments.
- 1 8) K. MAGOTA, D. TAKAHASHI, H. SETOGUCHI : *Appl. Plant Sci.* 7 (2019) (DOI: 10.1002/aps3.11275) Development and characterization of EST-SSR markers for *Saxifraga fortunei* var. *incisolobata* (Saxifragaceae).

- 1 9) D. TAKAHASHI, T. TERAMINE, S. SAKAGUCHI, H. SETOGUCHI : Mol. Phylogenet. Evol., 137, 146-155 (2019) (DOI: 10.1016/j.ympev.2019.05.003) Genetic data reveals a complex history of multiple admixture events in presently allopatric wild gingers *Asarum* spp. (Aristolochiaceae) showing intertaxonomical clinal variation in calyx lobe length.
- 2 0) M. YAMAMOTO, D. TAKAHASHI, K. HORITA, H. SETOGUCHI : Heredity, 124, 93-107 (2019) (DOI: 10.1038/s41437-019-0245-8) Speciation and subsequent secondary contact in two edaphic endemic primroses driven by Pleistocene climatic oscillations.
- 2 1) R. NAKAMASU, S. SAKAGUCHI, H. SETOGUCHI : Acta Phytotax. Geobot. 71, 73-76 (2020) (DOI: 10.18942/apg.201911) Development and characterization of EST-SSR markers for *Tricyrtis* sect. *Tricyrtis* (Liliaceae).
- 2 2) T. SAKAGAMI, S. SAKAGUCHI, Y. ISAGI, H. SETOGUCHI : J. Forest Res., 25, 120-123 (2020) (DOI: 10.1080/13416979.2020.1744232) Development and characterization of nuclear microsatellite markers in *Aphananthe aspera* (Thunb.) Planch. (Cannabaceae).
- 2 3) K. MASUDA, H. SETOGUCHI, K. NAGASAWA, M. ISHIHARA, S. SAKAGUCHI : Acta Phytotax. Geobot. (in press) Development and characterization of EST-SSR markers for Amur daylily, *Hemerocallis middendorffii* Trautv. et C.A.Mey. (Xanthorrhoeaceae).
- 2 4) R. NAKAMASU, Y. INOUE, S. SAKAGUCHI, H. SETOGUCHI : Acta Phytotax. Geobot. (in press) A new bulbil-producing variety, *Tricyrtis macropoda* var. *bulgifera* (Liliaceae) from Northwestern Kyushu Island, Japan.

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表(査読なし)>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) 若林智美、Stig U.Andersen、佐藤修正、川口正代司、瀬戸口浩彰 : 日本植物分類学会第 17 回大会 (2018) Genome-wide association study for differences of flowering time variation under two conditions in *Lotus japonicus* in Japan
- 2) 長澤耕樹、阪口翔太、牧雅之、福島慶太郎、井鷲裕司、陶山佳久、綱本良啓、瀬戸口浩彰 : 日本植物分類学会第 17 回大会 (2018) 硫気孔原植物ヤマタヌキランの起源と遺伝的特性
- 3) 後藤隼、長澤耕樹、阪口翔太、木村拓真、山田孝幸、藤井伸二、牧雅之 : 日本植物分類学会第 17 回大会 (2018) 伊豆諸島における山地性固有植物の起源と遺伝的分化
- 4) 亀岡慎一郎、崎尾均、阿部晴恵、阪口翔太、瀬戸口浩彰 : 日本植物分類学会第 17 回大会 (2018) ミスミソウの繁殖成功は集団内における花色頻度の影響を受けるのか?
- 5) 高橋大樹、前田賢次、長澤耕樹、山本将也、阪口翔太、瀬戸口浩彰 : 日本植物分類学会第 17 回大会 (2018) 開花期多型をもつヒメカンアオイ群の種分化過程の解明
- 6) 孫田佳奈、山本将也、阪口翔太、赤井賢成、瀬戸口浩彰 : 日本植物分類学会第 17 回大会 (2018) ユキノシタ属ユキノシタ節 (Sect. *Irregulaes*) の系統分類と生育特性の多様化
- 7) 上原歩、富澤蒼、森脇夕貴、村井良徳、瀬戸口浩彰、岩科司 : 日本植物分類学会第 17 回大会 (2018) 塩生植物ハマツナノ塩ストレスに対するフラボノイド応答
- 8) 山本将也、堀田清、高橋大樹、瀬戸口浩彰 : 日本植物分類学会第 17 回大会 (2018) サクラソウ属近縁 2 種における花形態と訪花昆虫相の著しい分化

- 9) 瀬戸口浩彰：日本植物分類学会第 17 回大会（2018）小笠原諸島のムニンノボタンとタイヨウフウトウカズラの状況 2018 年
- 1 0) 阪口翔太、高橋大樹、瀬戸口浩彰、綱本良啓、陶山佳久、Yingxiong Qiu、Pan Li、Ruisen Lu、井鷲裕司：日本植物分類学会第 17 回大会（2018）日華区系におけるイワユキノシタ属の隔離分布形成史と繁殖システムの進化
- 1 1) 池田啓、Pernille Bronken Eidesen、Viachenslav Barkalov、Valentin Yakubov、Christian Brochmann、瀬戸口浩彰：日本植物分類学会第 17 回大会（2018）周北極-高山植物コケモモ (*Vaccinium vitis-idaea*) の系統地理
- 1 2) 芝林真友、栗田和紀、横田昌嗣、阿部篤志、國府方吾郎、長澤淳一、志内利明、市河三英、橋本季正、遊川知久、阪口翔太、寺峰孜、井鷲裕司：日本植物分類学会第 17 回大会（2018）海外に多個体が生育する国内希少野生動植物種の保全ゲノミクス
- 1 3) 亀岡慎一郎、阿部晴恵、崎尾均、瀬戸口浩彰. 第 65 回日本生態学会大会（2018）ミスミソウの花色は何故多様なのか
- 1 4) 瀬戸口浩彰. 日本植物学会第 82 回大会（2018）シンポジウム「小笠原諸島返還から 50 周年、絶滅危惧植物の現状と対策研究」オーガナイザー：瀬戸口浩彰・伊藤元己
はじめに：いま、なぜ、小笠原諸島なのか
- 1 5) 若林智美、Stig U. Andersen、佐藤修正、川口正代司、瀬戸口浩彰、日本植物学会第 83 回大会（2019）複数地点におけるミヤコグサの開花時期多型の比較と全ゲノム関連解析
- 1 6) 番場大、青木誠志郎、梶田忠、瀬戸口浩彰、綿野泰行、佐藤修正、土松隆志、日本植物学会第 83 回大会（2019）ミヤコグサ野生系統の生育と共生根粒菌ゲノムの関連
- 1 7) 長澤耕樹、瀬戸口浩彰、牧雅之、沢和浩、堀江健二、永野惇、陶山佳久、松尾歩、綱本良啓、阪口翔太、日本植物分類学会第 19 回大会（2020）日本におけるスゲ属 2 節の種多様性形成過程の解明
- 1 8) 孫田佳奈、山本将也、高橋大樹、永野惇、瀬戸口浩彰、日本植物分類学会第 19 回大会（2020）日本列島において多様化した広義ダイモンジソウの系統進化
- 1 9) 増田和俊、瀬戸口浩彰、長澤耕樹、沢和浩、丹後亜興、坪井勇人、福本繁、堀江健二、石原正恵、阪口翔太、日本植物分類学会第 19 回大会（2020）後氷期の気候温暖化がゼンテイカ群の末端集団動態の決定的要因である
- 2 0) 川喜多遥菜、阪口翔太、瀬戸口浩彰、日本植物分類学会第 19 回大会（2020）生態的多様化を遂げた小笠原諸島固有トベラ属 4 種の単系統性の検証
- 2 1) 高橋大樹、寺峰孜、阪口翔太、瀬戸口浩彰、日本植物分類学会第 19 回大会（2020）萼裂片長の異なるカンアオイ属の近縁種 2 種の繁殖生態の比較
- 2 2) 阪口翔太、堀江健二、石川直子、重信秀治、山口勝司、長谷部光泰、永野惇、瀬戸口浩彰、久保田涉誠、倉島治、牧雅之、木村拓真、喜屋武隆太、伊藤元己、日本植物分類学会第 19 回大会（2020）アキノキリンソウの平行的な土壌適応に関わる隔離遺伝子群の進化
- 2 3) 倉田正観、阪口翔太、廣田峻、陶山佳久、西田佐知子、伊藤元己、日本植物分類学会第 19 回大会（2020）中部山岳における広義エゾフウロの refugia within refugia は複数回移入によって形成された
- 2 4) 中村隆太、小牧義輝、瀬戸口浩彰、伊藤元己、日本生態学会第 67 回全国大会（2020）小笠原諸島固有希少植物ムニンノボタンの保全に向けた生育適地の環境要因の調査
- 2 5) 阪口翔太、永野惇、石川直子、堀江健二、瀬戸口浩彰、伊藤元己、日本生態学会第 67 回全国大会（2020）多様な開花期を示すアキノキリンソウ生態系の時系列トランスクリプトーム解析
- 2 6) 孫田佳奈、後藤栄治、高橋大樹、池田啓、阪口翔太、瀬戸口浩彰、日本生態学会第 67 回全国大会（2020）異なる光環境下に生育するダイモンジソウ集団間の遺伝構造と光合成特性の分化
- 2 7) 井上（高橋）みずき、飛田空、佐藤光彦、松尾歩、陶山佳久、瀬戸口浩彰、日本生態学会第 67 回全国大会（2020）倍数性植物ドクダミの遺伝的多様性と個体群構造

- 28) 長澤耕樹、瀬戸口浩彰、福本繁、石原正恵、沢和浩、堀江健二、増田和俊、阪口翔太、日本生態学会第67回全国大会(2020)多雪環境の歴史変化が植物の集団動態に与える影響

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 瀬戸口浩彰、小笠原母島村民会館、令和元年7月22日、「母島に生きる固有植物をみんなで守る方法を考えませんか？」
- 2) 湯本貴和、池田泰子、坂本秀房、瀬戸口浩彰、西原正次郎、山極寿一、京都府立京都学・歴史館、令和元年9月8日「いのちをつなぎいのちが輝く動物園・植物園になるために」

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 朝日新聞(2019年(令和元年)5月3日[金曜日]全国版、朝刊2面「盗掘 消えゆく緑の宝」
- 2) 佐賀新聞(2019年(令和元年)10月22日[火曜日]地域面、「ムカゴホトトギス進化の変種 だった：京大の遺伝子解析で判明」
- 3) 京都新聞(2020年(令和元年)1月12日[日曜日]朝刊26面、「絶滅危惧植物キブネダイオウ 雲ヶ畑で確認、保全動き出す」

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

特に記載すべき事項はない。

II-2 マイクロ生育環境のリモートモニタリングシステム開発と生育適地解析

国立大学法人東京大学大学院総合文化研究科 伊藤 元己
久保田 渉誠

平成30～令和元年度研究経費（累計額）：35,400千円（研究経費は間接経費を含む）
（平成29年度：12,000千円、平成30年度：11,400千円、令和元年度：12,000千円）

【要旨】

マイクロ環境モニタリングシステムとリアルタイム環境モニタリングシステムの構築と実証を行った。マイクロ環境モニタリングシステムは多数の園芸用センサーを利用する事により、1m²の精度でデータを取得することが可能である事を実証した。リアルタイム環境モニタリングシステムは太陽発電器とバッテリーで駆動するRaspBerry Piと携帯電話網を使用して、インターネット経由でモニタリング可能である事を示した。開発したマイクロ環境モニタリングシステムを使用して、ムニンノボタンの株について、気温、日照量、土壌水分に関するマイクロ環境データを取得した。また、この環境データと詳細な生育状況観察データについての関連性を解析した。その結果、今回はムニンノボタンの生育と有意に相関のある条件を特定することはできなかった。

【キーワード】

マイクロ環境モニタリング、リアルタイム環境モニタリング、ムニンノボタン、アサヒエビネ、タイヨウフウトウカズラ

1. はじめに

これまでの希少植物の個体群再生のための播種や植え戻しは、同じ環境と考えられる自生地付近に行われてきた。しかし、それにもかかわらず、ほとんど定着していない。その原因は、想像以上に生育場所のわずかな空間的なズレや、時間的経過により環境が異なっていることを示すと考えられる。実際に植物集団の調査を行っているところ、ある場所では成長し一定の年齢の株ばかりが生育し、若い個体や実生がほとんど見られないのに、別の場所には大量の幼植物や芽生えが集中している。それらの異なる生育環境が小さいパッチ状に混在していることに気付かされた経験がある。これまでの生育環境の調査、解析は少数の高価な検出器やデータロガーにより行われ、細かくとも数十メートルに1カ所程度の規模でデータ取得が行われてきた。この検出スケールを、最新の技術、機器を使用することで、現在考えられる最も細かいスケールで、リアルタイムモニタリングすることで、植物の生育、特に発芽や幼植物期の生育に関わる至適環境を明らかにし、周辺地域における場所ごとの微小な違いを検出することによって、播種や植栽の至適環境の解析情報を得ることを目指した。

1. モニタリングシステム開発

1) マイクロ環境モニタリング

1m以下の精度でのマイクロ環境を多数の地点でモニタリングする目的で、マイクロ環境モニタリングシステムの構築と実証を試みた。

方法

各地点の環境データを取得するためのデータロガーは、市売の安価な園芸用センサーを用いる。当初はParrot社製のFlower Powerを用いる予定であったが生産中止となったため、Xiaomi社製のFlower Care Smart Monitorを用いることとした。

結果と考察

園芸用センサーにより、気温、湿度、日照、土壌水分のデータを取得することが可能になった。これらの情報はセンサー内に蓄積され、Bluetooth接続によりスマートフォンに転送される（図4.2.1、図4.2.2）。ただし気象センサーをXiaomi社製に変更したため、データ保持が1ヶ月分になった。実際に野外でのデータ取得では、毎月アクセス可能な場所のモニタリングなら問題ないが、離島内の遠隔地などのアクセスが困難な場所ではデータ保持期間の長いセンサーが望まれる。

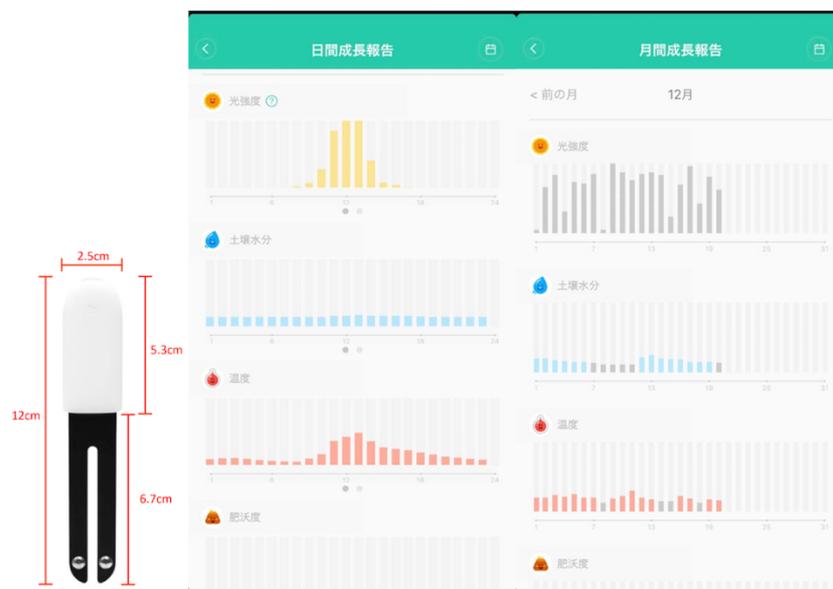


図 4.2.1 Xiaomi 社製センサー（左）と環境データ取得例（右）。

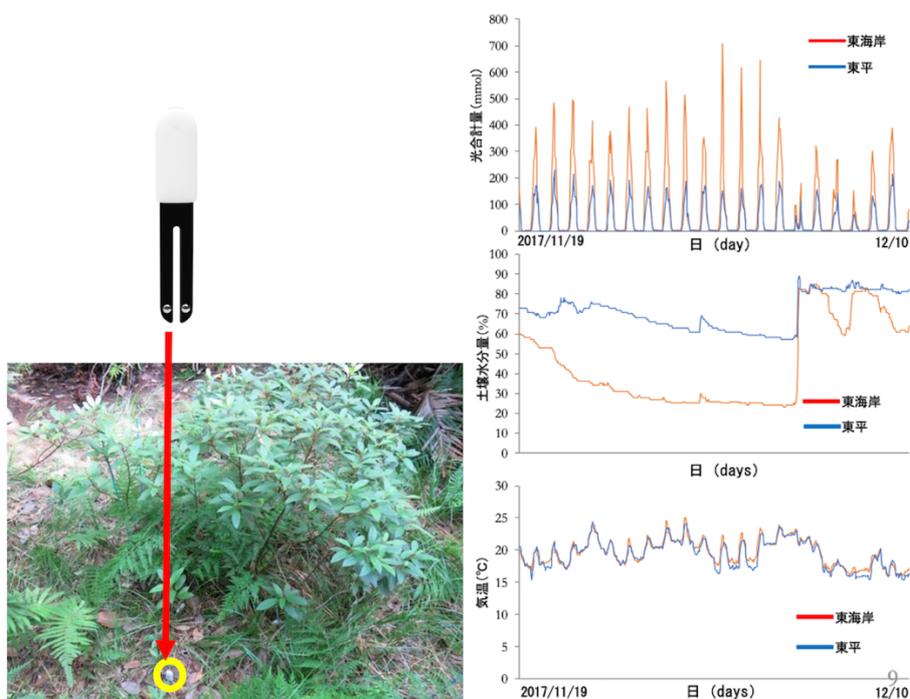


図 4.2.2 環境センサーの設置（左）と取得データ（右）。ムニンノボタンの株に設置。

2) リアルタイム環境モニタリングシステムの構築

アクセスが困難な遠隔地において、マイクロ環境データを定期的に取得する目的で、リアルタイム

でデータを発信するシステムの開発を行った。システムの概要は、データ送信のためのインターネット接続は携帯電話回線を利用し、大容量バッテリーと太陽電池を併用することにより電源を確保した。

データ取得のセンサー類はRaspBerry Piを利用したコンピュータシステムに有線で接続し、OSとしてRaspbian (Linux)、センサー制御用のプログラムはPythonで記述を行った。インターネット接続はUSBでRaspBerry Pi に接続可能なSoracom Air for セルラーを利用してDOCOMOの携帯電話電波へのアクセスが可能になった。

太陽光発電・携帯電話網を利用することにより、長期間のリアルタイムモニタリングが遠隔地でも可能になった。必要な太陽光発電パネルサイズは50Wで十分であることがわかった。今回は試みしていないが、カメラユニットを接続することによりリアルタイムでの現状確認も可能となる。試作システムではセンサーを有線接続したため、4カ所ならまかなえるが、さらに多地点には無線接続が必要である。



図4.2.3 左：Soracom Air for セルラーを接続したRaspBerry Piコンピュータシステム。右：RaspBerry Piに接続するセンサー類。



図4.2.4 大容量バッテリーと太陽電池パネル、コンピュータシステム。

3) モニタリングの実施

a. 個体データ計測

ムニンノボタン

2018年度および2019年度の11月下旬に調査を、全生育地（東海岸・東平・夜明山）で実施した。計測項目は清水（1997）の調査に準拠し、「樹高・枝張り（樹冠面積）・幹本数・地際円周（地際直径）・果実の有無（果実数）」を測定した。また、2019年8月下旬に開花数のカウントを行った。樹冠開空度の計測用に360度カメラで撮影（2018年12月下旬・2019年9月上旬・2019年11月下旬）。

表 4.2.1 父島に生育するムニンノボタンの個体数、花数および果実数

	2018年11月		2019年8月		2019年11月	
	個体数	果実数	個体数	花の数	個体数	果実数
東海岸	88	934	80	655個	72	520
東平A	16	4	14	0	14	0
東平B	2	0	2	0	2	0
東平C	17	134	15	9	15	4
東平D	25	393	20	34	18	24
夜明山A	30	未計測	28	644個	28	150
夜明山B	16	未計測	16	76	15	158

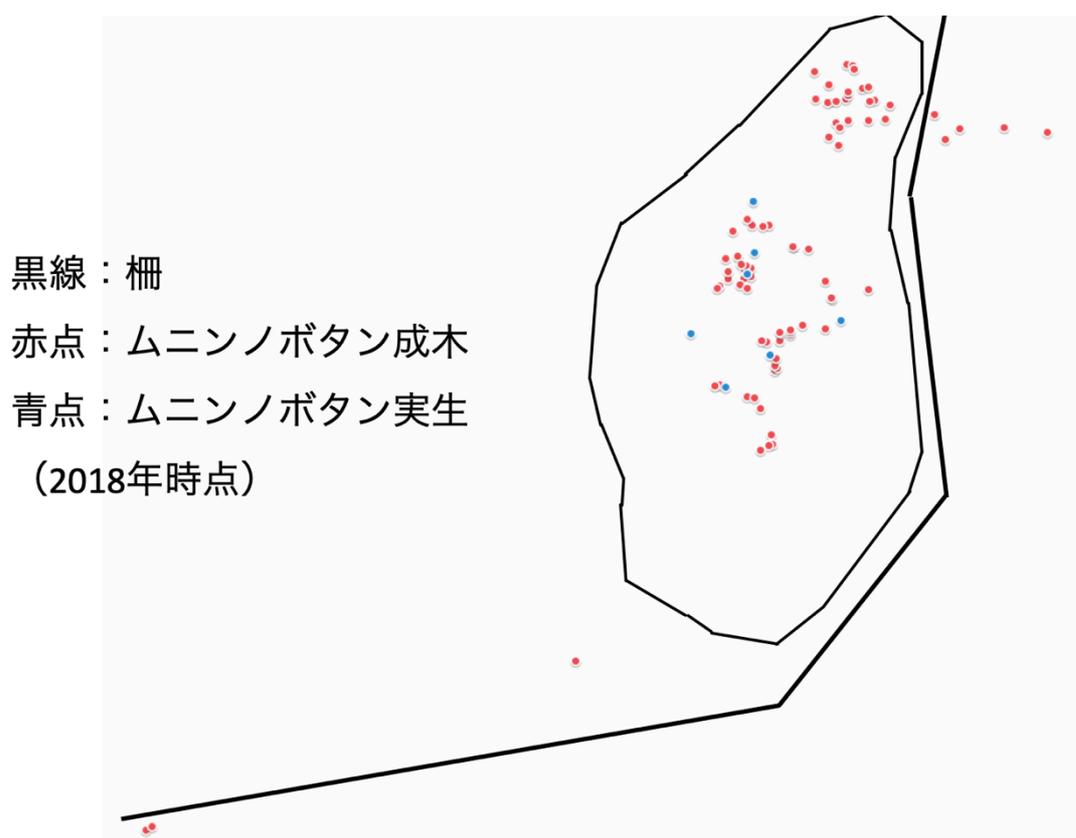


図 4.2.5 東海岸のムニンノボタン野生集団における成木と実生の位置図。

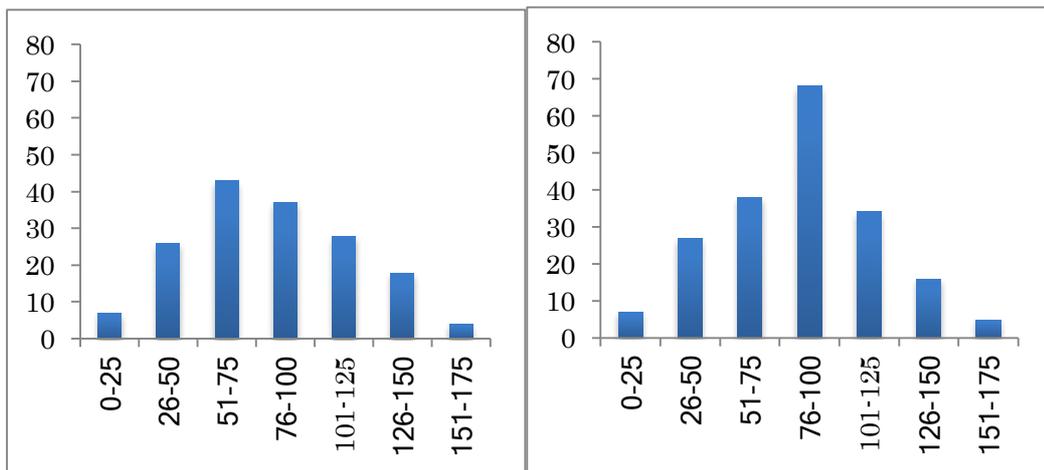


図4.2.6 父島に生育するムニンノボタン全個体の樹高別個体数.

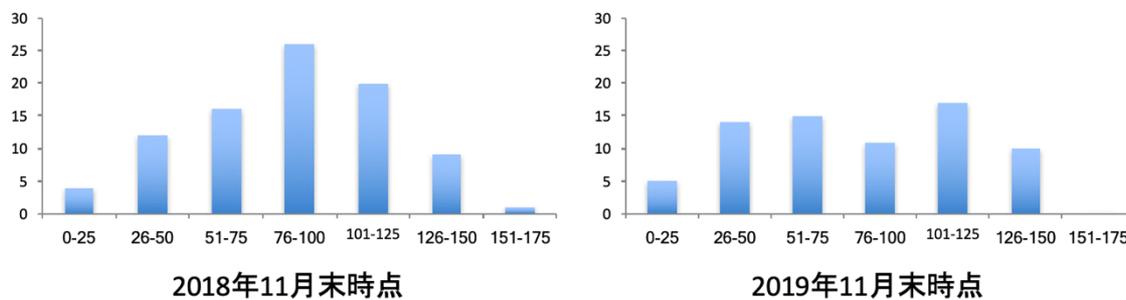


図 4.2.7 東海岸集団の樹高別個体数. 左 : 2018 年、右 : 2019 年

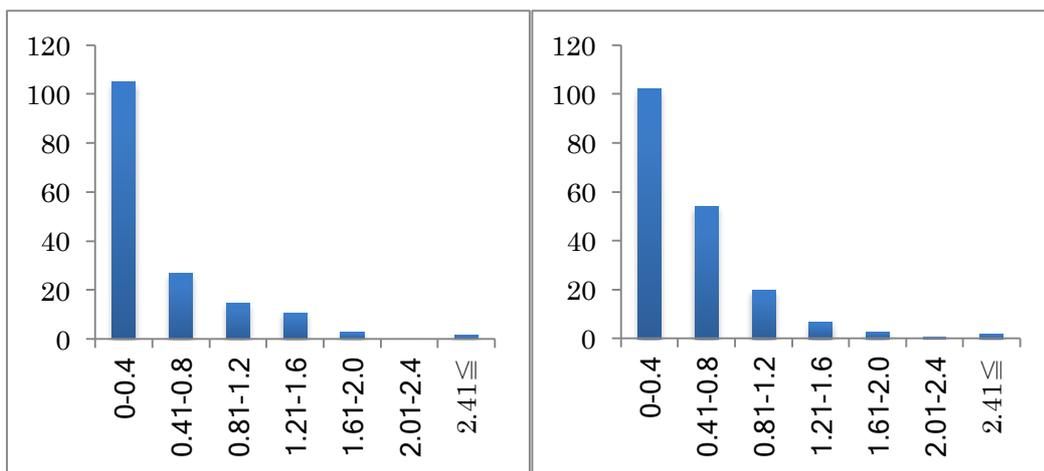


図 4.2.8 父島に生育するムニンノボタン全個体の樹冠面積別個体数.

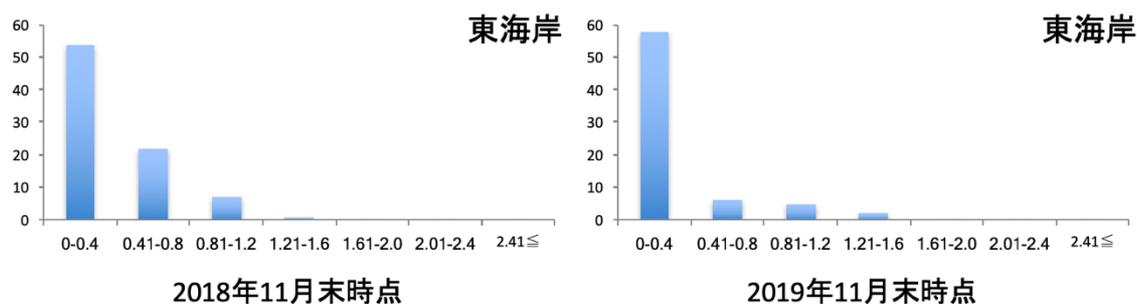


図 4.2.9 東海岸に生育するムニンノボタンの樹冠面積別個体数（東海岸）．左：2018 年、右：2019 年

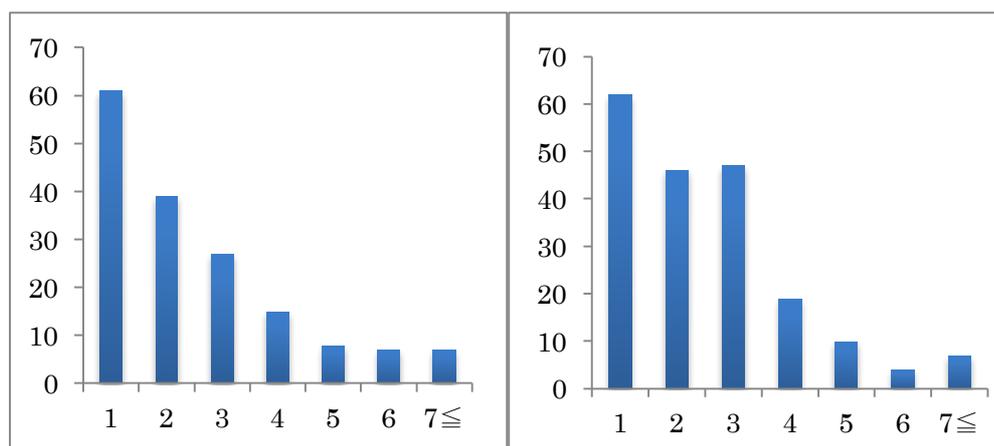


図 4.2.10 父島に生育するムニンノボタン全個体の幹本数別個体数．左：2018 年、右：2019 年

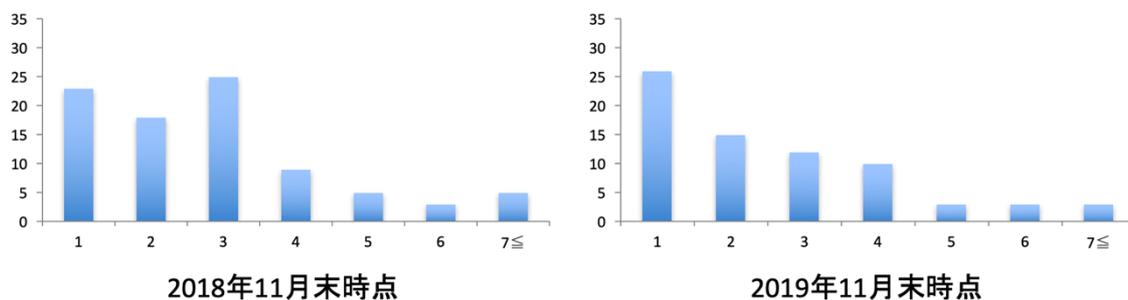


図 4.2.11 東海岸に生育するムニンノボタンの幹本数別個体数．左：2018 年、右：2019 年

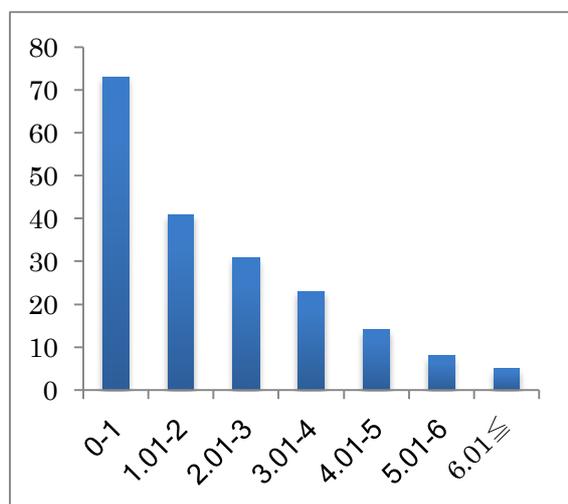


図 4.2.12 父島に生育するムニンノボタン全個体の地際直径．

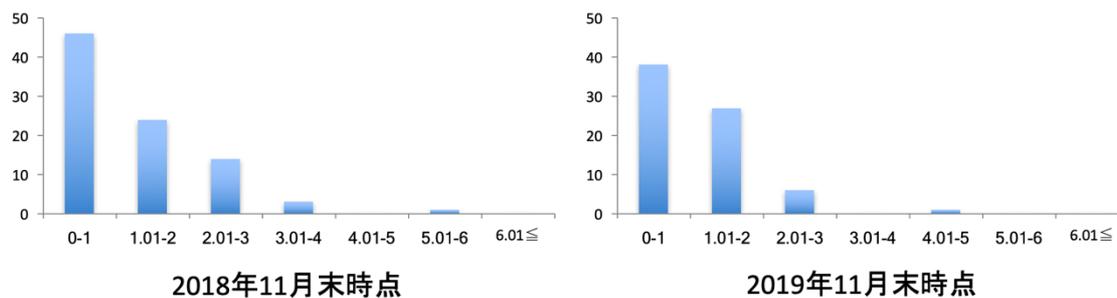


図 4.2.13 東海岸に生育するムニンノボタンの地際直径別個体数. 左：2018 年、右：2019 年

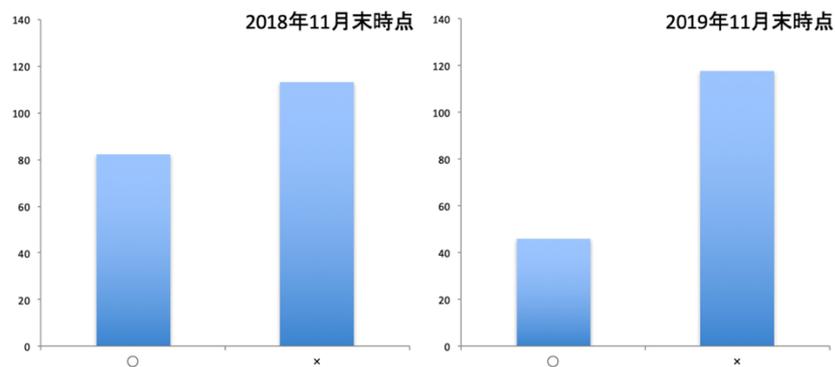


図 4.2.14 父島に生育するムニンノボタン全個体の結実個体 (○) と未結実個体 (×) の個体数.

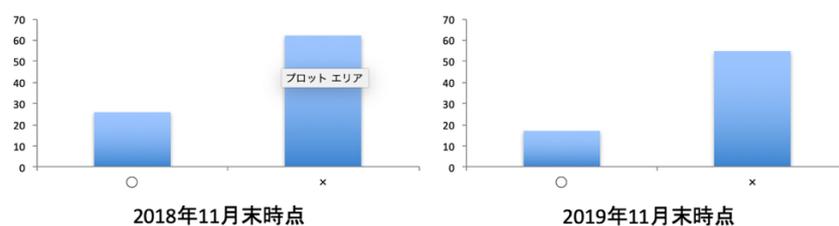


図 4.2.15 東海岸に生育するムニンノボタン全個体の結実個体 (○) と未結実個体 (×) の個体数.
左：2018 年、右：2019 年

ハハジマノボタンのモニタリング

- 2018 年度調査個体データ計測 (乳房山東側・乳房山西側・塚ヶ岳)
- 2019 年度調査個体データ計測 (乳房山西側・塚ヶ岳)

乳房山西側は 12 個体、塚ヶ岳は 2 個体生存。台風で多くが枯死。11 月の調査で確認された実生も 2 個体のみであった。

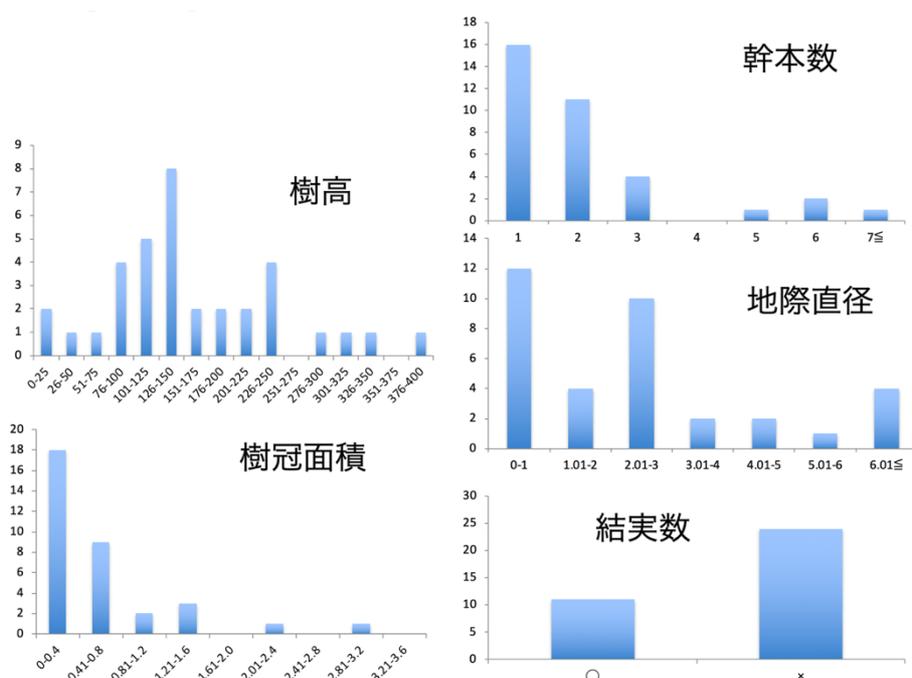


図 4.2.16 ハハジマノボタンにおける各生育状況項目の個体数分布. 結実数における○は結実個体を、×は結実していない個体を示す.

実生調査

ムニンノボタンの各生育場所で、実生数のカウントを行った。ただし、成木と異なり、実生の個体ごとの追跡は行っていない。

表 4.2.3 父島におけるムニンノボタンの生育地毎の個体数と結実個体数.

左：2018年11月末、右：2019年11月末時点

	全個体	内自生個体	実生		全個体	内自生個体	実生
東海岸	88	79	30~40	東海岸	72	62	52
東平A	16	9	0	東平A	14	9	0
東平B	2	1	0	東平B	2	1	0
東平C	17	0	7	東平C	15	0	8
東平D	25	0	1	東平D	18	0	1
夜明山A	30	2	21	夜明山A	28	3	48
夜明山B	16	3	17	夜明山B	15	3	14
計	194	94	76~86	計	164	78	123

b. 環境データ計測

ムニンノボタン

2017年度・2018年度・2019年度に実施した。2017年度・2019年度は生育個体または播種地点に設置。2018年度は個体を意識せず設置（地点によっては個体と対応できる）。測定項目は日照量（光合計量）・土壌水分量（体積含水率）・気温である。

データロガーを用いた環境データ計測（ムニンノボタン）

2017年度

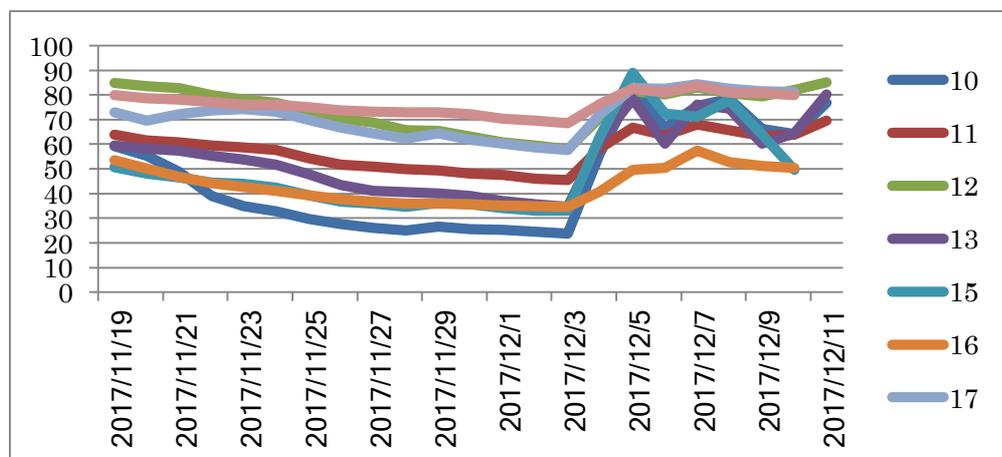


図 4.2.17 ムニンノボタン自生地（#10~19）における土壌水分量の変化.

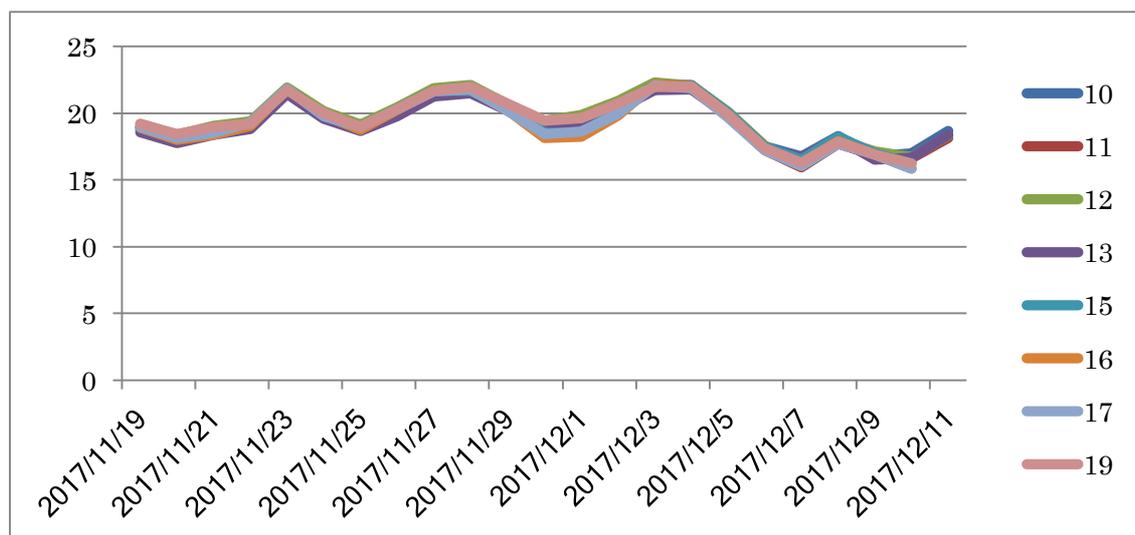


図 4.2.18 ムニンノボタン自生地（#10~19）における気温の変化.

2018年度

東海岸：柵内をある程度網羅できるように設置。

東平：植栽地は成木に1つ、他地点に1つ設置。

12月末から1月中旬の期間は実生地点を重点的に設置。

- 40地点を基本に設置。12月末から1月中旬の期間のみ約80地点に設置。
- 土壌水分量に変な結果を出していたため、ほぼ同所地点に2つ設置。

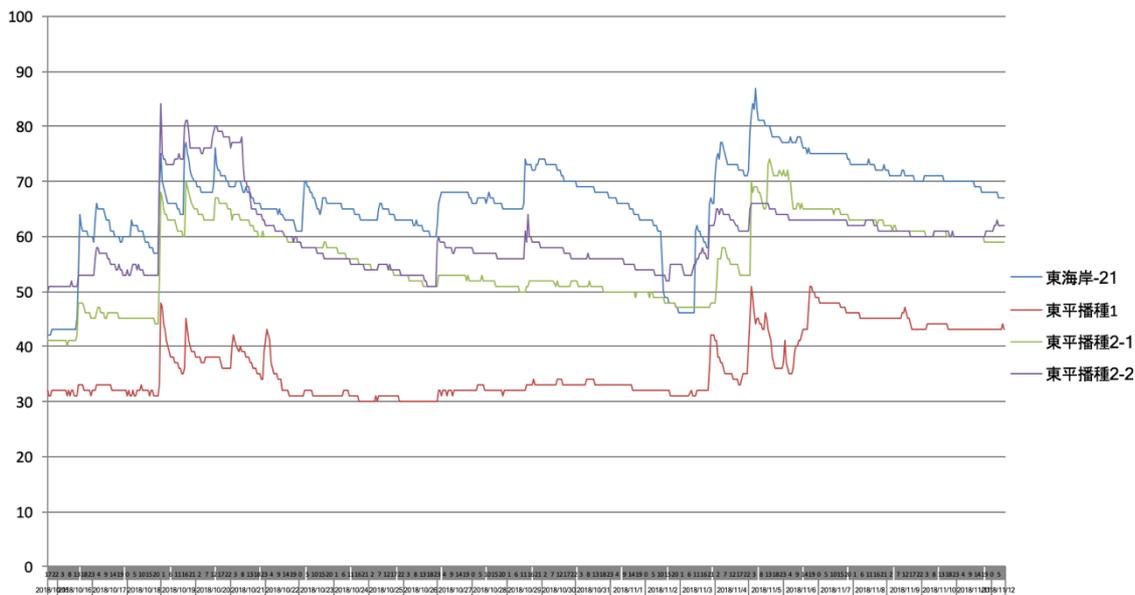


図 4.2.19 ムニンノボタン自生地 4 箇所における土壌水分量の変化。縦軸は%。

アサヒエビネ

2017 年度に実施した。

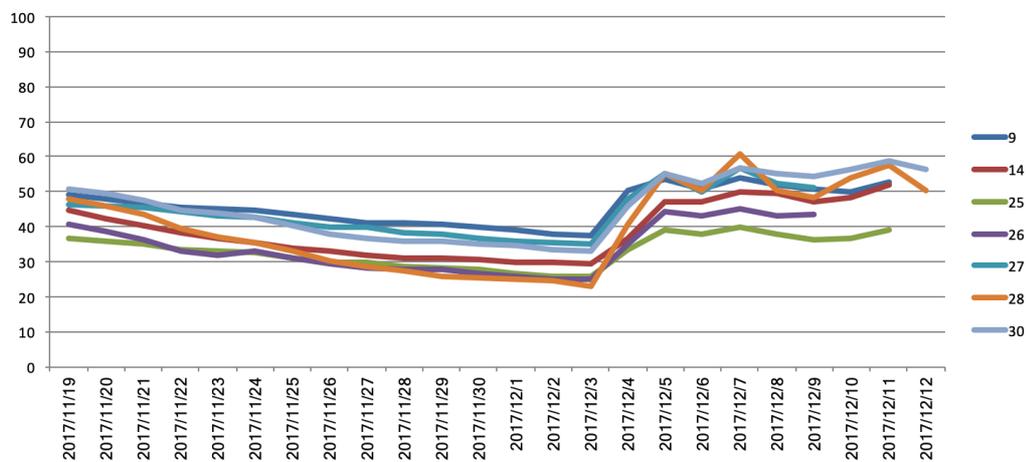


図 4.2.20 父島のアサヒエビネ自生地 7 地点（個体識別番号 9, 14, 25, 26, 27, 28, 30 の根際）における土壌水分量

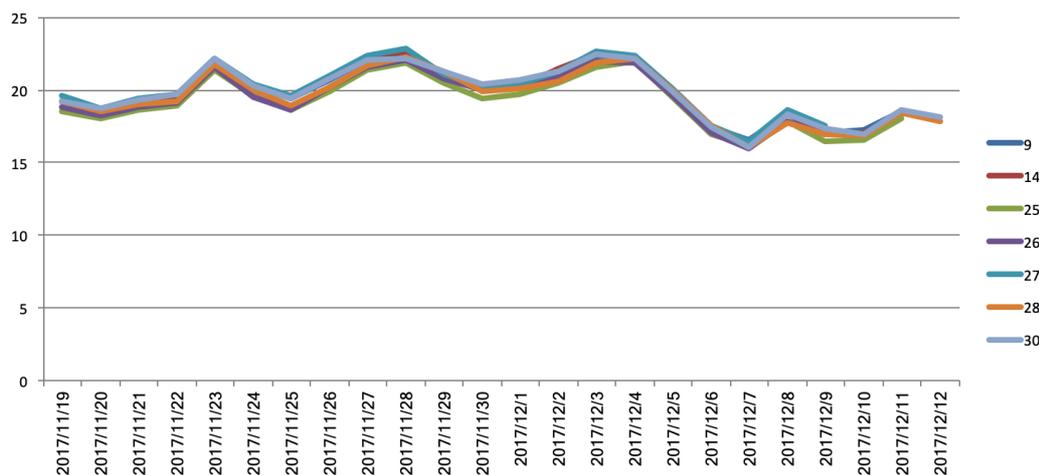


図 4.2.21 父島のアサヒエビネ自生地 7 地点（個体識別番号 9, 14, 25, 26, 27, 28, 30 の根際）における気温変動.

タイヨウフウトウカズラ

2017 年度に実施した。4 と 5、6 と 7 と 8 はほぼ同位置である。

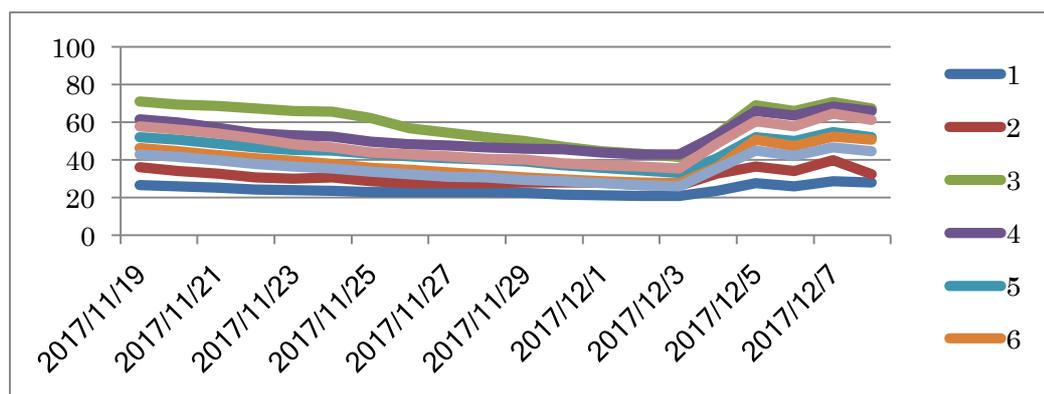


図 4.2.22 母島のタイヨウフウトウカズラ自生地 8 地点（個体識別番号 1-8 の根際）における土壌水分量変動.

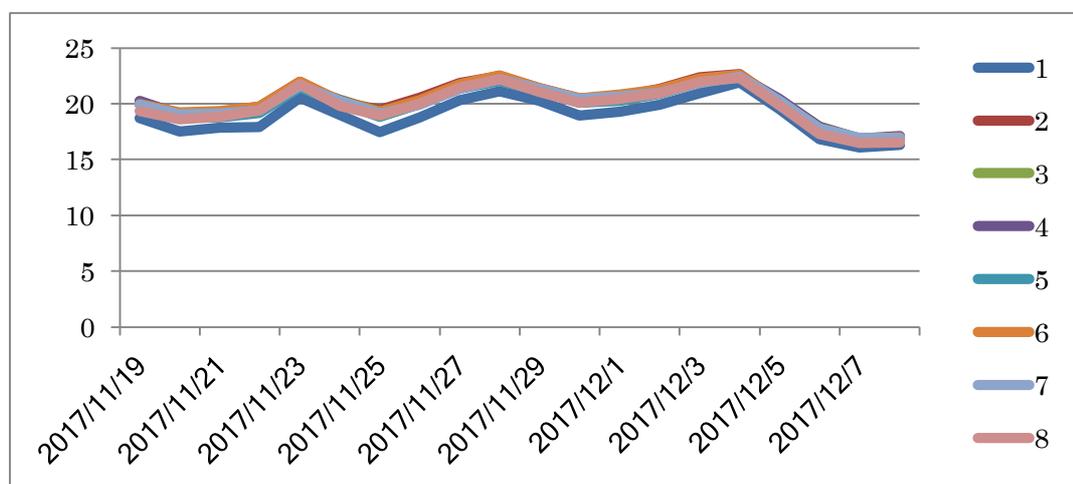


図 4.2.23 母島のタイヨウフウトウカズラ自生地 8 地点（個体識別番号 1-8 の根際）における気温変動.

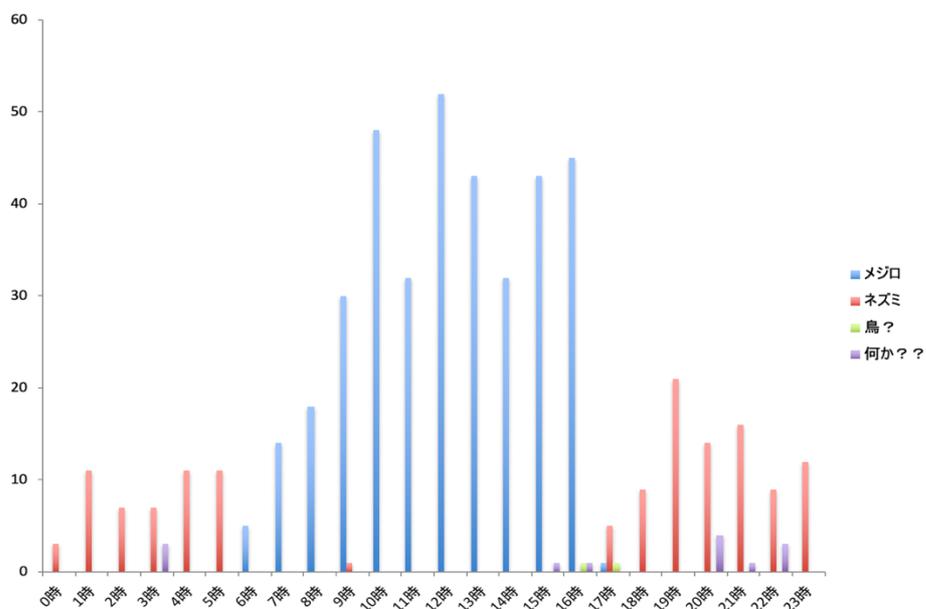


図 4.2.25 ムニンノボタン時間別の訪果実頻度. 11 地点における観察結果を総合した.

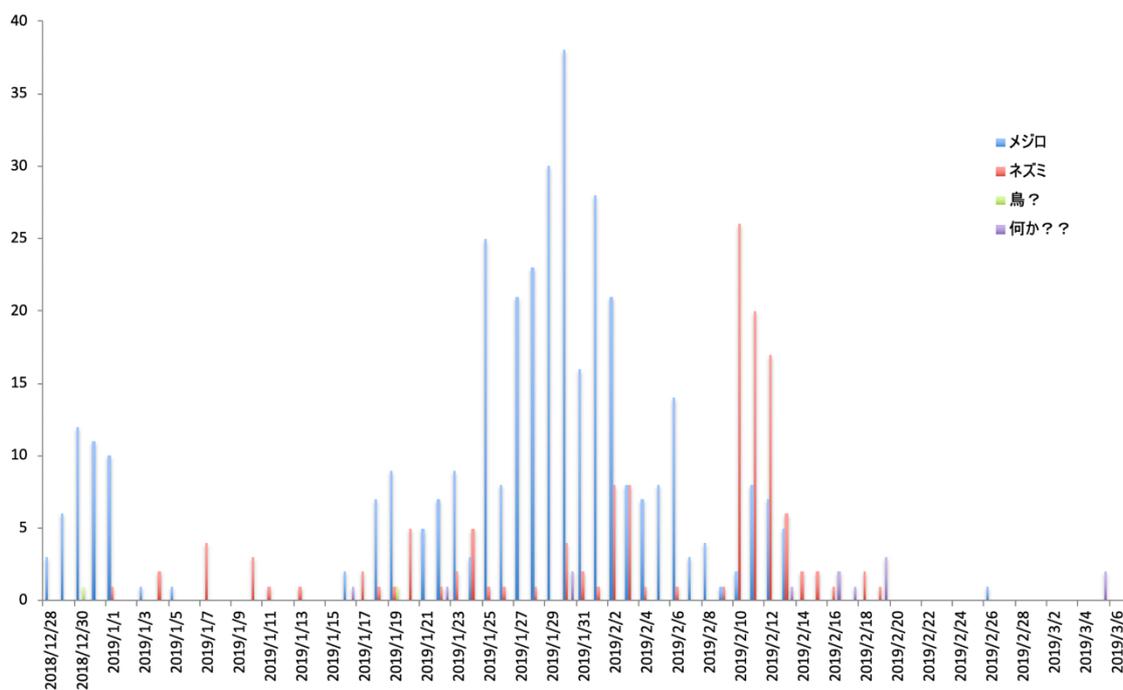


図 4.2.26 ムニンノボタンの結実期における日付別の訪果実頻度.
11 地点における記録回数を積算した.

ムニンノボタンの播種地点定点調査

保護増殖事業で行なった播種区画で発芽した個体に対し、防水カメラを設置し、インターバル撮影を行い、枯れるまで観察を継続した。

4) モニタリング結果の解析

2018年度の東平 A,C,D の日照量について、各日にちの最大値を折れ線グラフで示した（図 2-27）。東平 A は東平 C,D に比べて低め（＝暗い）。東平 D-1 も暗めであるが、これは林縁に生育する大きい個体の下に挿していたためと考えられる。

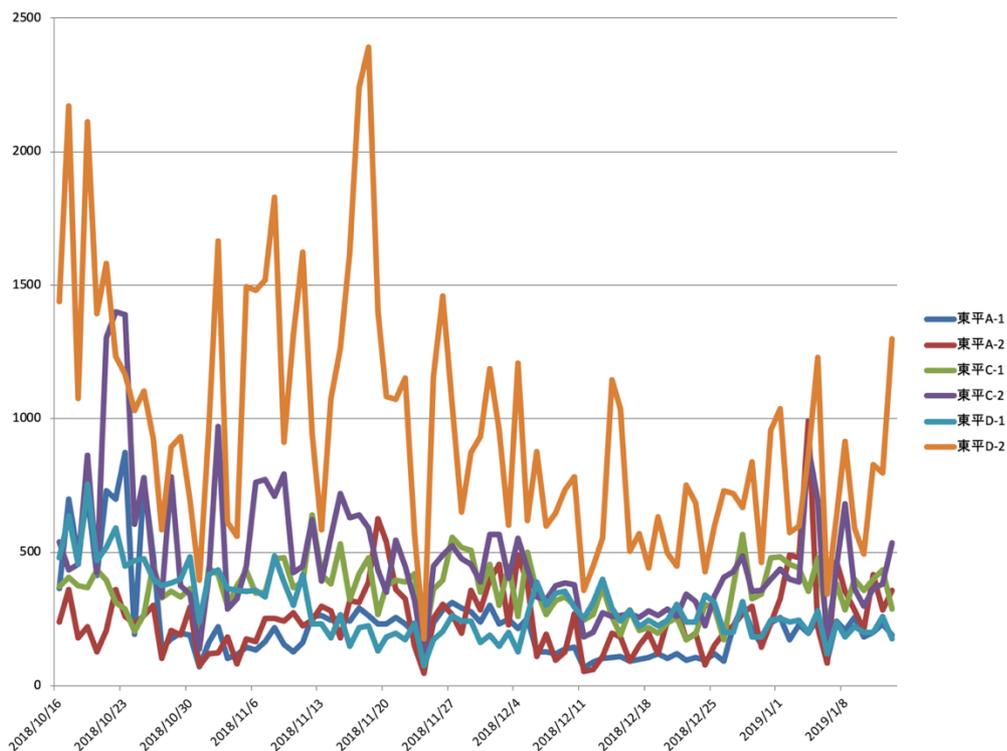


図 4.2.27 2018 年度におけるムニンノボタンの東平 3 生育地：A,C,D における最大日照量の変化。
縦軸の単位は $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$

2019 年度は、気温がほぼ全ての地点で近い値を出している（2017 年の結果も同様）。唯一、地点 3（東海岸）が高い値を出した、設置位置が日向であること、加えて近くに小石川植物園が設置した白いラジエーションシールドが設置してあることが原因と思われる。

日照量は各日にちの最大値、または合計値（アプリでは計測しているのは光合計量であるため）をもとに検討した。2019 年 11 月に行った計測結果と相関を調べたが、特に見つけられなかった（図 2-3 2）。土壌水分量は各日にちで平均を計算した。2019 年 11 月に行った計測結果と相関を調べたが、特に相関はみられなかった（図 2.3 2）。

2018 年と 2019 年の比較

- 2018 年は湯水が酷く、2019 年は雨量が比較的多かった。各年で同地点にロガーを設置した結果を比較したところ、どの地点においても 2019 年の土壌水分量のほうが大きかった。

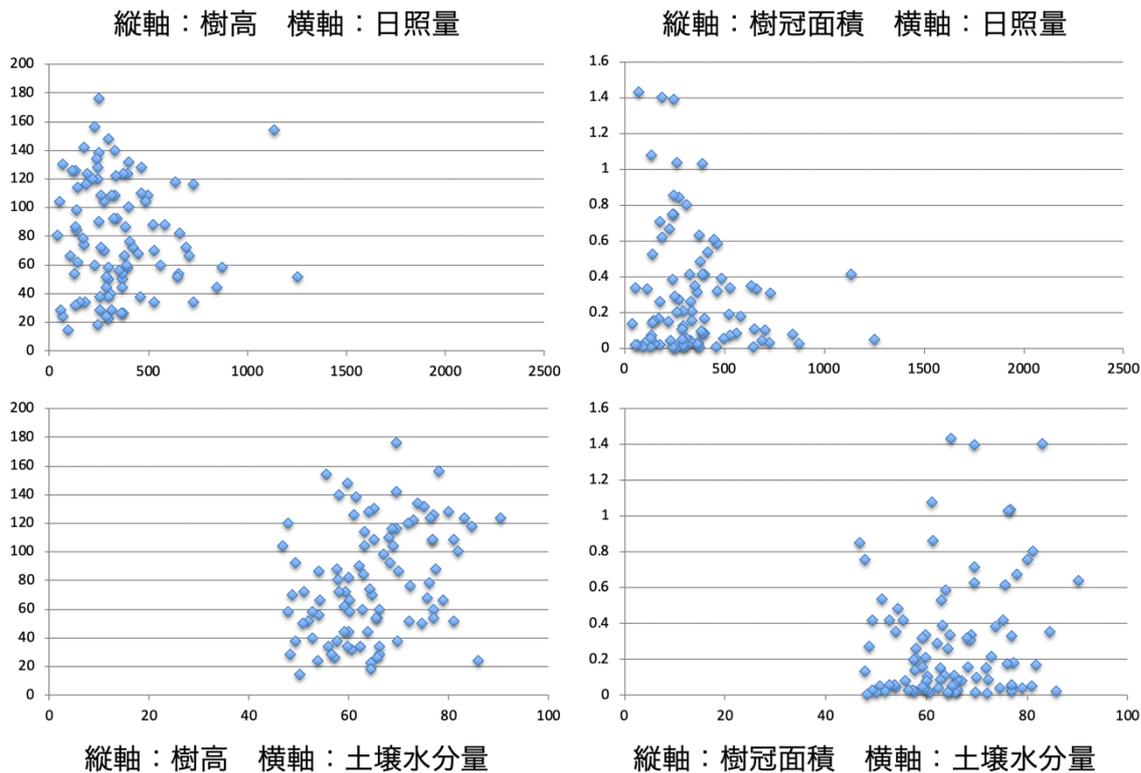


図 4.2.28 ムニンノボタンの生育状況と微小環境。左：2018年、右：2019年。

4. 保護増殖事業による過去の情報の解析

ムニンノボタン・アサヒエビネ・タイヨウフウトウカズラについて、保護増殖事業報告書（1986年度～2015年度）に記載されたデータの解析とともに、ムニンノボタンについてはその生育地の微小環境の環境要因（日照量・土壌水分量・気温）について、データロガーを用いてモニタリングをして、ムニンノボタンの各個体の生育状況との関係を解析した。

結果と考察

- 実生は大量に発生しても大半が早い段階（～5年目）で枯死する。
- 日照量が充分ある場合、ムニンノボタンはあまり個体サイズを大きくしない。
- 日照量・土壌水分量は微小環境間で、小さくない違いがある（おそらくムニンノボタン自体や周りの植生、土壌の性質などによる）。一方、気温はほぼ同じである。
- 今回の計測結果では、日照量・土壌水分量とムニンノボタンのサイズに相関は見られなかった。
- 開花・結実も記録があるが、樹齢はあまり影響していなかった。
- 東平 A などでは樹高・枝張りの数値に変動が大きい。これは主幹が枯死して、計測対象が側枝や小さいひこばえの幹になることで、数値が小さくなったことが関与したと思われる。
- 枯死は 4～5 年目の比較的若い時期が多い。これは東海岸の自然発芽個体がこの時期に大量枯死した事に因る。

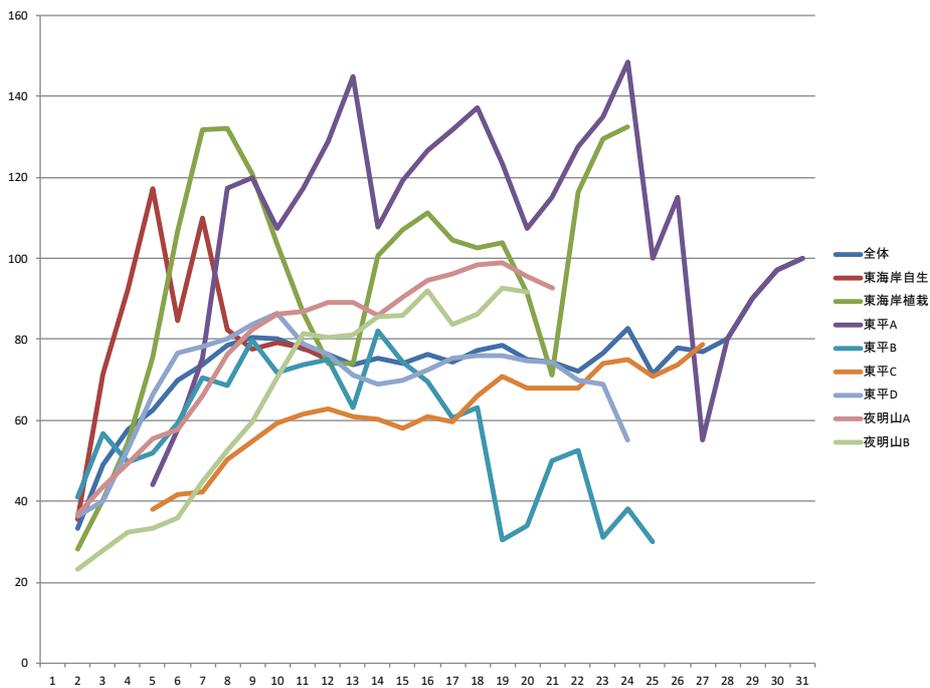


図 4.2.29 樹齢が既知であるムニンノボタンの個体の樹高の平均値。
縦軸は樹高 (cm)、横軸は樹齢。

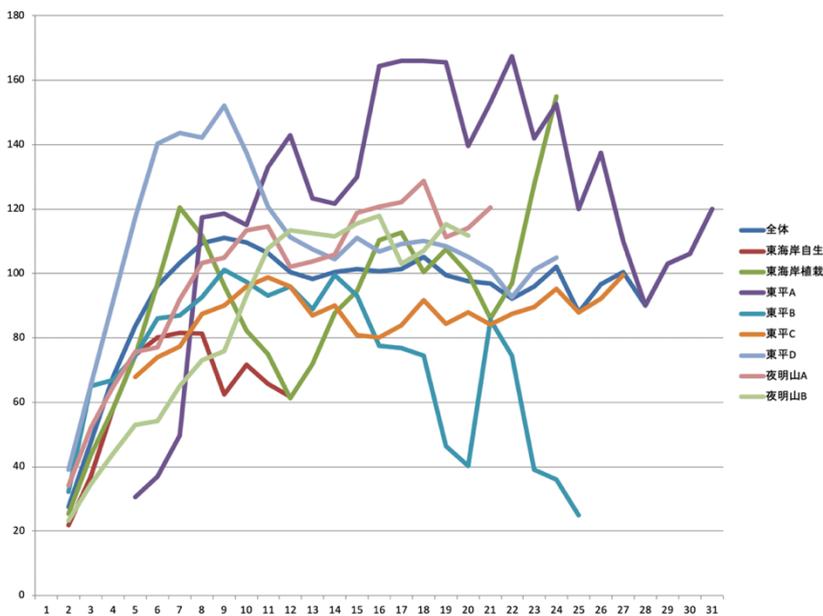


図 4.2.30 樹齢が既知であるムニンノボタンの個体の枝張りの平均値。
縦軸は枝張り (cm)、横軸は樹齢を示す。

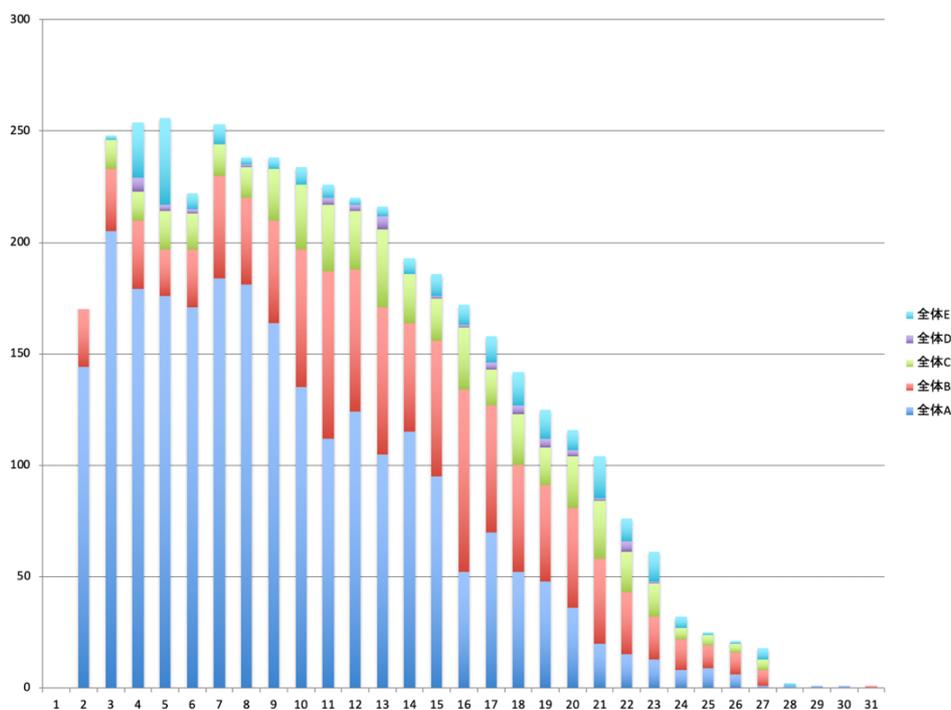


図 4.2.31 樹齢が既知であるムニンノボタンの個体数の変動。縦軸は個体数、横軸は樹齢を示す。

小石川植物園が保護増殖事業で31年間記録した東平 A~E 地点の個体計測データに基づく。地点 A で生育が最も良い。

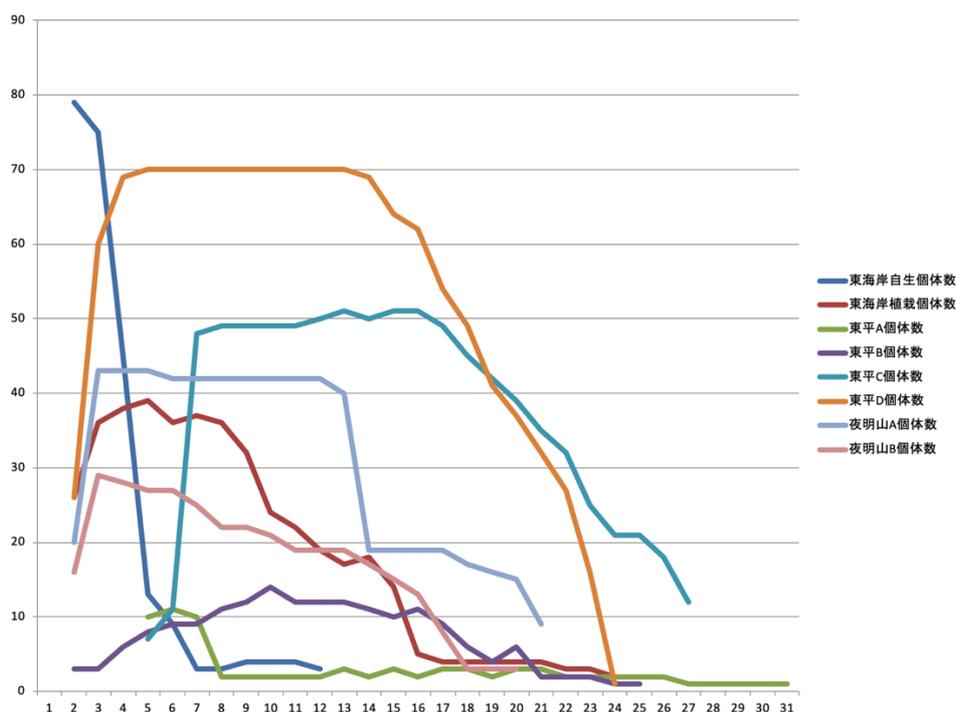


図 4.2.32 ムニンノボタンの各生育地において年齢が分かる個体数の変動。縦軸は個体数、横軸は年齢。自生個体は5年目までに大半が枯死していた。東平 D など個体数が途中増加しているのは、一部の植栽株で若い頃は計測を行わず、後から計測を始めたからである。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

植物の生育環境を把握するには、生育地域の気象データだけでは不十分で、各植物個体の近傍のマイクロ環境の情報が必要である。特に日照や土壌水分は数メートル離れると大きく変化することが予想さ

れる。本研究で開発されたマイクロ環境モニタリングシステムは、従来の高価なデータロガーシステムでは困難であった、このような個々の生育環境情報を、多数の個体について継続的に得ることが可能にするものである。各植物種は、どのような環境が最も適しているかについて、種特有の生育好適条件が異なっている。特に最も死亡率の高い発芽・実生時の環境はクリティカルであると考えられる。本研究で開発した方法により、実験室ではなく野生状況での対象種における生育好適条件の把握が可能になる。さらに、同時に開発したリアルタイム環境モニタリングシステムを用いることにより、定常的なアクセスが困難な場所における詳細な環境データの取得をインターネット経由で取得する道が開かれた。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

環境省からの委託で、東京大学大学院理学系研究科附属植物園が実施している小笠原希少植物の保護増殖事業において、ムニンノボタンの種子散布実験にマイクロ環境モニタリングシステムを提供している。

<行政が活用することが見込まれる成果>

本研究で開発されたマイクロ環境モニタリングシステムによって、日本各地において好適生育環境が把握できていない希少植物についての条件を検討することができ、その保護・増殖事業に貢献することができる。また、リアルタイム環境モニタリングシステムを用いることにより、定常的なアクセスが困難な地域の希少植物生育地の環境を常時監視することが可能となり、保護活動に役立てることが可能となる。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

特に記載すべき事項はない。

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表(査読なし)>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表(学会等)

1. 中村隆太、小笠原諸島における絶滅危惧植物保全に関わる活動のこれまで。日本植物学会第82回大会、2019/9/16、広島
2. 中村隆太、小牧義輝、瀬戸口浩彰、伊藤元己、小笠原諸島固有希少植物ムニンノボタンの保全に向けた生育適地の環境要因の調査。第67回日本生態学会大会、2020/3/7、名古屋

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない（研究代表者による対話実績のなかで成果を紹介した）。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

特に記載すべき事項はない。

II-3 希少植物の自生地復元のための土壌・共生生物相の解析

国立大学法人千葉大学 国際教養学部 上原 浩一

平成30～令和元年度研究経費（累計額）：39,689千円（研究経費は間接経費を含む）
（平成29年度：13,454千円、平成30年度：12,781千円、令和元年度：13,454千円）

【要旨】

植物の生育には土壌中の化学的成分だけでなく微生物、特に真菌の存在が大きく影響することが知られている。真菌は、リンや窒素などの栄養循環の中樞を担っており、植物の生育に直接的・間接的に影響を与えている。希少植物の生育に関わる有用真菌と有害真菌を特定することと、その有用真菌が安定的に存在し働く土壌環境を明らかにすることは、希少植物の安定的な生存と維持に重要な情報となる。このサブテーマでは、小笠原諸島における3種類の希少植物：タイヨウフウトウカズラ、ムニンノボタン、アサヒエビネを対象にして、1：土壌化学分析、2：次世代シーケンサーを用いた土壌真菌叢解析と3：植物-真菌共生ネットワーク解析を行い、希少植物の生育に最適な土壌環境を明らかにすることを目的とした。

土壌化学分析では、土壌を評価する重要な指標となるpH、EC、C/N比の測定を行った。とくにpHについては、タイヨウフウトウカズラ、ムニンノボタン、アサヒエビネにおいて、それぞれの生育適地はpH7.5付近、pH6.5付近、pH6.1-7.4と推定した。

土壌中の真菌叢解析は、世界の海洋島土壌での初の大規模な真菌メタバーコーディング解析となった。15門45綱111目227科405属1077種類の存在が確認でき、父島、母島、兄島の各島に特異的な真菌叢の存在が、それぞれ2670種類、4481種類、1078種類存在した。有用真菌と有害真菌の候補は未同定・未分類の真菌において見いだされたために、多くのサンプルでは種までの特定には至らなかったが、タイヨウフウトウカズラの良好な生育には、根とその周辺土壌中に *Mortierella* 属と *Dactylonectria* 属の存在が欠かせないと考えられた。ムニンノボタンの良好な生育には、根に *Ceratobasidium* 属と *Oidiodendron* 属の菌根菌、土壌中に *Hypocreaceae* 科の腐生菌と *Dactylonectria* 属と *Penicillium* 属が必要であると判断された。アサヒエビネの良好な生育には、根に *Russula* 属、*Dactylonectria* 属、*Geminibasidium* 属、*Penicillium* 属、土壌中に *Oidiodendron* 属が必要であると判断された。

このように土壌の化学特性を理解すると共に、土壌真菌叢解析と植物-真菌共生ネットワーク解析を行ったことで、希少植物の生育において土壌化学特性やいくつかの有用真菌を安定的に保つ必要性が見いだされた。

【キーワード】

植物-真菌相互作用、真菌叢解析、共生ネットワーク解析、土壌化学特性、有用真菌

1. はじめに

植物の生育には土壌中の化学的成分だけでなく共生生物の存在が大きく影響することが知られているが、これまで微生物叢の詳細な把握は困難であった。土壌微生物のなかでも、リンや窒素などの栄養循環の中樞を担っている真菌は80-510万種存在するといわれている（Blackwell 2011¹⁾）。被子植物の90%以上の種が根に真菌を共生させており、植物の生育に直接的・間接的に影響を与えている

（Brundrett 2009²⁾）。近年では真菌は農業作物へ肥料的に利用されていること、絶滅危惧植物の苗に接種することで生長促進に成功した報告があること、ムニンノツツジの挿し木は自生地域の土壌を使うことにより成功していることなどから、土壌真菌叢の詳細な把握は希少植物種の保全やその良好な育成に欠かせない情報となると考えられる。真菌は、リボソームRNA遺伝子のITS配列がDNAバーコ

ードとして確立されており種の同定は比較的容易であり、バクテリアよりも機能既知の種類が多く、土壌真菌叢と希少植物種の生育の関係を調べる土台ができています。現在では次世代型 DNA シーケンサー (NGS) によりこれまで困難であった環境微生物叢の種構成や動態を詳細に解析することが可能となり、植物種や群落により特異的に存在する真菌種と共通に存在する真菌種、さらに中心核となる真菌種がいることが分かり (Toju et al., 2013³⁾, 2014⁴⁾, 2017⁵⁾; Tedersoo et al., 2014⁶⁾)、地上の植物と土壌真菌叢の間には関連があることが明らかになってきている。一部の真菌は植物に菌根を形成し、その菌根は以下の 6 つのタイプに大別される。1: 多様な菌類が形成する外生菌根はブナ科やマツ科といった木本類に見られ、根の窒素やリン吸収を促進する。2: 外生菌根と同様にハルティヒ・ネットや菌鞘を形成するが、同時にコイル状の構造をした菌糸が皮層細胞壁内に侵入するものを内外生菌根といい、マツ属の実生などに形成される。3: Glomeromycota 門によって形成されるアーバスキュラー菌根菌 (AM 菌) は、被子植物の 70% の植物に形成され、栄養状態を改善したり病原性をもつ菌から植物を保護する働きをもつ (Toju et al., 2016⁷⁾)。他にも 4: ラン科植物に特異的であり、発芽時に植物が従属栄養となるラン菌根、5: ツツジ目によく見られ Ascomycota 門によって形成されるエリコイド菌根、6: 腐生植物に見られる種特異性の高いモノトロポイド菌根が存在する。このように、根における植物と真菌類 (土壌真菌の中でも植物の根に存在する真菌) との共生 (寄生) 関係は直接的に植物の生育に大きく関わる。地球上の生物は様々な他の生物と捕食や被食、共生や寄生などの関係の中で生きている。これを生物間相互作用と呼び、生態系は多くの生物の様々な生物間相互作用の上に成り立っている。生物の共生 (寄生) 関係には、ある生物種が幅広く複数の生物種と共生する場合 (generalist) と、単一の生物種と共生する場合 (specialist) がある。さらにその相互作用の構造は大きく 2 つの構造に分けられ、1 つは入れ子構造 (共生相手の幅が狭い specialist の共生相手は、共生相手の幅が広い generalist の共生相手の一部である構造)、もう 1 つはモジュール構造 (各種が特定の共生相手と共生し、関連しない種間の関係が希薄である、高度に組織化された構造) である。長年にわたって、相互作用の構造と生態系の安定性の関与が議論され続けているが (Toju et al., 2016⁷⁾)、近年、入れ子構造が構造安定性を高め、種間競争を最小限にできると主張する研究 (Rohr et al., 2014⁸⁾) や、生物多様性保全や絶滅危惧種の保全に相互作用の維持が重要である可能性を示唆する研究 (Maugi et al., 2012⁹⁾) が発表された。生物間相互作用構造についての研究は植物-動物間で多く行われてきたが、植物-真菌の共生関係についても、共生ネットワークの中心核として機能する真菌も存在し潜在的に植物に影響を与えている可能性が報告されている (Toju et al., 2016⁷⁾)。このように植物と土壌真菌の間接的・直接的共生関係は、近郊弱勢や無機的環境要因と並んで希少植物の生育に大きく関わる可能性があり、さらに、希少植物生育地の生態系全体における植物-真菌の共生関係の構造を明らかにすることで、土壌真菌叢の詳細な把握が希少植物種の保全に貢献できると期待できる。

2. 研究開発目的

本研究では、小笠原諸島における希少植物種の生育に有効と考えられる土壌の無機的 (環境) 要因と共生生物相、特に土壌真菌類を調査・解析し希少種の保全に貢献することを目的とし、1: 土壌化学分析、2: 次世代シーケンサーを用いた土壌真菌叢解析、3: 植物-真菌共生ネットワーク解析を行った。1: 土壌化学分析では、肥料成分の欠乏症や過剰症など生育不良の原因が推定できる。また、微生物の作用とも関係しており、土を評価することで土壌化学特性を明らかにする。2: 真菌叢解析では、大洋島土壌での初の大規模な真菌叢データを得ることで生育に関わる真菌を推定する。3: 共生ネットワーク解析では、希少植物とその周辺植物の根内在性の真菌叢解析を行い植物-真菌の共生関係を明らかにし、共生ネットワーク構造を構築することで希少植物の生育に影響する真菌を推定する。これらの解析により対象植物の最適な生育土壌環境を明らかにすることを目的とした。

3. 研究開発方法

対象種として小笠原諸島の希少植物 3 種: タイヨウフウトウカズラ、ムニンノボタン、アサヒエビネ、対照種として固有種のハハジマノボタン、対象種以外の広域分布種において実施し、下の 1~3 の

方法で土壌化学特性と真菌叢のデータを蓄積した。得られたデータから希少植物の生育に影響を与える可能性の高い土質と真菌の候補を挙げ、最適生育土壌条件を推定した。さらに、土壌解析においては経時的に行い、植物の生育段階や季節変動など、短期的・長期的な影響力の大小も考慮できるようにした。

- 1, 無機的環境要因の推定のための土壌化学分析は、pH、電気伝導度 (EC:electrical conductivity)、炭素/窒素 (C/N) 比の測定を実施した。好適pHは種により様々であるが、pHの変動は肥料成分の欠乏症や過剰症を引き起こす要因となる。ECは土壌中の水溶性塩類の総量を示し、硝酸態窒素含量と正の相関関係がみられることから硝酸態窒素 (肥料成分) 含量の推定に有効であり、pHとECから生育不良の原因が推定できる。C/N比は微生物の作用 (分解速度、無機態窒素の放出、堆肥腐熟度など) と関係しており、土の評価に重要な指標である。これらの分析結果を統合し、対象種の土壌化学特性を推定した。
- 2, 土壌真菌叢解析に用いた土壌サンプルのDNA抽出には Extrap Soil DNA Kit Plus ver.2 (日鉄住金環境株式会社) を用いた。NGS解析は株式会社生物技研に依頼し、次世代型DNAシーケンサー (MiSeq, Illumina) により得られた配列をパイプラインPIPITS (Gweon HS et al., 2015¹⁰) を用いてITS1領域において種同定解析し、FUNGuild検索 (<http://www.stbates.org/guilds/app.php>) により真菌の機能推定を行った。サンプル間の総リード数のばらつきを統一させる為にデータの希薄化を行い、各リード数を比較することで生育に影響する真菌を推定した。
- 3, 植物-真菌共生ネットワーク解析は、生物間相互作用の構造を明らかにし、ネットワークの中心核となる生物を推定できる。根のサンプリングは、植栽個体を小笠原諸島母島及び父島、栽培個体を東京大学小石川植物園で行った。タイヨウフウトウカズラ、ムニンノボタン、アサヒエビネの植栽個体生育地において5m×5mのプロットを設置した。ハハジマノボタンの植栽個体生育地はプロットの設置が困難だったため、栽培個体は鉢で栽培されていたためプロットを設置しなかった。これらの4種及び周辺に生育する植物と栽培個体において根端2cmを採取しDNA抽出した。PCR及びシーケンス解析は京大生態学研究センターの東樹宏和准教授に依頼し、真菌同定のためのITS1領域のデータを取得した。データ解析には、PIPITSに含まれているスクリプト、UNITEfungal ITS reference data set、RDP Classifier (Wang et al., 2007¹¹) を用いて生物同定を行い、東樹 (2016¹²) の解析手法を参考にネットワーク構造、ネットワーク内のどの点が重要であるかを示す中心性、種特異性 d_i を算出し検定を行った。

4. 結果及び考察

土壌化学分析

小笠原諸島において2017年9月から合計50地点 (タイヨウフウトウカズラ:7、ムニンノボタン:14、アサヒエビネ:12、ハハジマノボタン:7、対象種以外:10) 208サンプル、東京大学小石川植物園において2019年7月に14サンプル (タイヨウフウトウカズラ:5、ムニンノボタン:4、アサヒエビネ:2、ハハジマノボタン:1、栽培前土壌:2) の土壌を採取し、2018年1月~2019年9月分の土壌化学分析を行った。pHとEC測定の結果、タイヨウフウトウカズラの生育土壌は自生地ではpH6.9-7.5、秘匿地ではpH7.25-7.4、植栽地ではpH6.70-7.90、小石川植物園の栽培鉢ではpH6.45-7.50であった (図4.3.1)。地点1.堺ヶ岳自生の株は2019年から生育状態が悪くなり2020年に枯死し、その時期のpHはpH7前後へと下がっていた。また、植栽地の株は地点4,5.石門植栽以外は生育状態が不良であり、特に地点2.石門植栽は2019年に枯死し、地点6,7,8.石門植栽は2017年よりも悪化してきており、pHも低下傾向を示した。生育が良好な地点4,5.石門植栽と秘匿地117と118のpH値から、タイヨウフウトウカズラの生育適地はpH7.5付近の可能性が高い。pH7-7.5の微アルカリ性よりも僅かに酸性やアルカリ性に傾くことが生育不良の原因になる可能性が考えられるが、小石川植物園の栽培株ではpHにバラツキがありpHの影響よりも光や水など他の要因が大きいかもしれない。

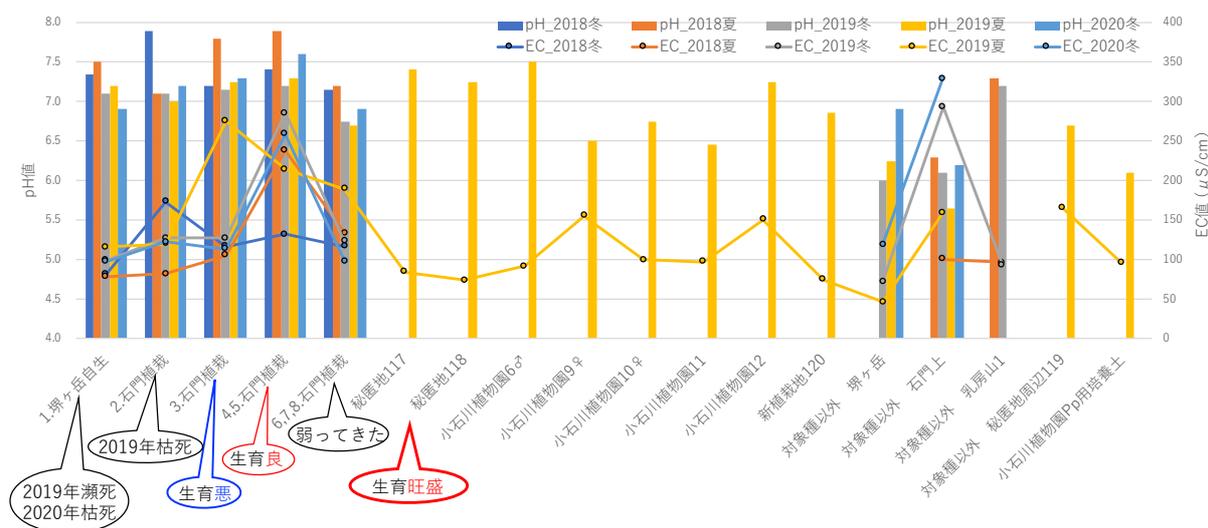


図 4.3.1 タイヨウフトウカズラ生育土壌の pH と EC の比較

ムニンノボタンにおいては、自生地と植栽地で pH5.65-7.10 という中酸性～微アルカリ性に生育しているが、同地点の pH 変動がタイヨウフトウカズラやアサヒエビネよりも大きかった（図 4.3.2）。

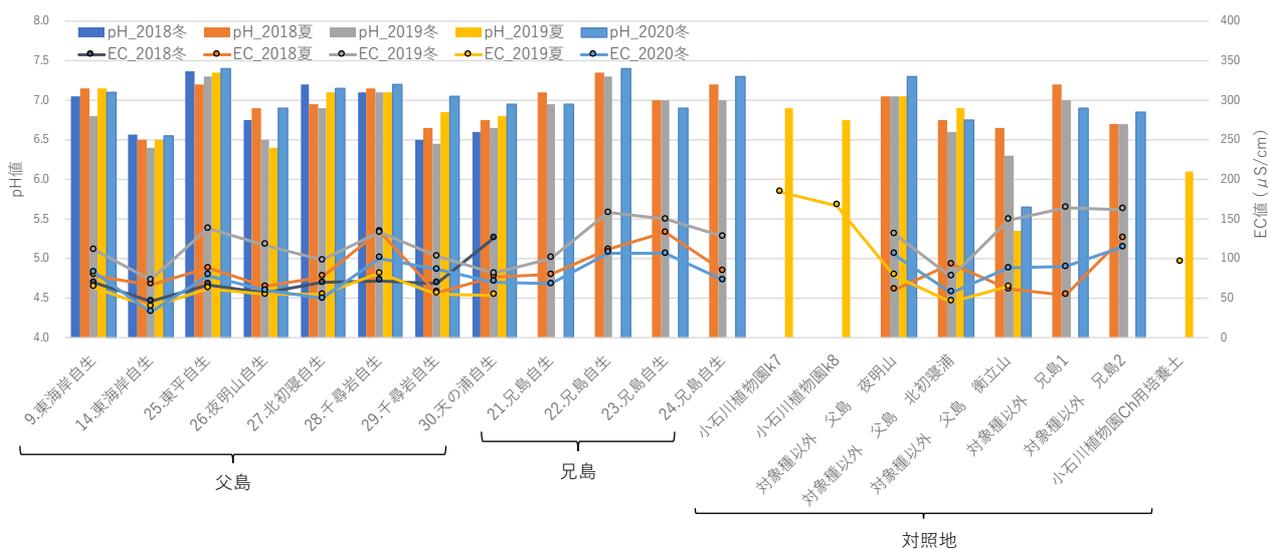


図 4.3.2 ムニンノボタン生育土壌の pH と EC の比較

小石川植物園の土壌は pH6.2-6.7 でありムニンノボタンの生育適地は pH6.5 前後と推定できた。東平の旧植栽地は pH が低い傾向にあり、世代更新の阻害や枯死の原因となった可能性がある。自生地の東海岸よりも植栽地の東平の pH は低い傾向がみられた。一般的に、酸性化の進行は N、P、K、Ca、Mg、B、Mo の欠乏症や Fe、Mn、Zn の過剰症を引き起こす要因となり、逆にアルカリ化になると Mn、Fe、Zn 等の欠乏症の要因となる。ムニンノボタンは世代更新が成功しておらず株が減少しているが、一般的に発芽や実生時は肥料成分を摂取しやすい弱酸性が適しているといわれており、土壌の中性化や更なる酸性化はムニンノボタンの実生の生育を阻害している可能性がある。また、同地点においても pH の変動が大きく、土壌環境が不安定であることも生存には厳しい。さらに、EC 値は小石川植物園の土壌と比較してやや低いことが分かった。低 EC は肥料成分が少なく生育不良となる。今回の結果から、肥料成分を摂取しにくい環境であることが明らかとなった。今後は植栽地の pH 管理が必要であると考えられた。

アサヒエビネは pH6.40-7.40 という微酸性～微アルカリ性に生育していた（図 4.3.3）。各地点における pH の変動は僅かであり土壤環境が比較的安定した生育地と考えられた。対照地は衡立山を除けば pH7 前後でアサヒエビネ生育土壤と同じであった。EC 値は小石川植物園の土壤よりもやや低いものの生育に差は見られなかった。以上の結果から、アサヒエビネの生育適地には化学特性以外の影響が強いと考えられた。また、2004 年の生育環境調査報告（今井、2004¹³⁾）では pH6.1-6.3 の弱酸性に多く分布

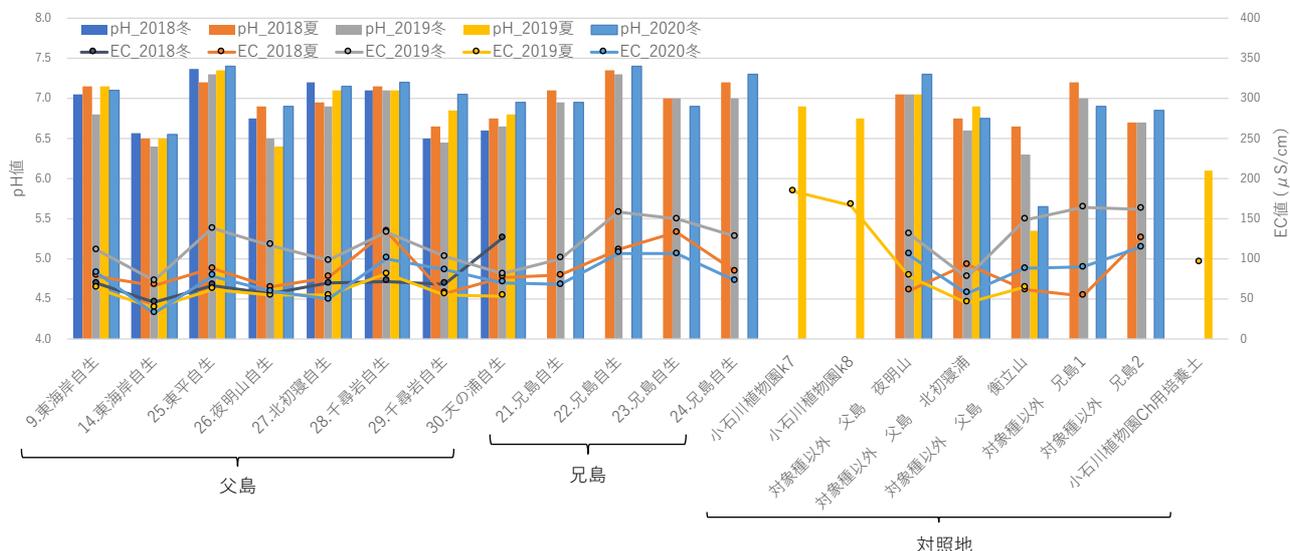


図 4.3.3 アサヒエビネ生育土壤の pH と EC の比較

していたことから、アサヒエビネは pH6.1-7.4 の幅広い環境に適応できることがわかった。2004 年の調査地点と同じ地点であるかは不明だが今回の調査地では pH 6.1-6.3 の土壤は存在しなかった。一般的には植物の生育は pH5.5-6.5 が適正域と言われており、小石川植物園の栽培株はタイヨウフウトウカズラもムニンノボタンもアサヒエビネもこの範囲内である。もしも小笠原諸島全体で土壤がアルカリ化に推移しているのなら、これ以上のアルカリ化は希少植物の生育に悪影響を及ぼすと考えられる。

C/N 比は、ムニンノボタンの地点 19:東平播種地以外は正常値といえる（図 4.3.4, 4.3.5, 4.3.6）。一般的に土壤腐植の C/N 比は 10-15 であり、20-30 の範囲を外れると微生物作用の影響が出やすいと考えられている。タイヨウフウトウカズラの自生地と秘匿地と生育の良い地点（4, 5. 石門植栽）、ムニンノボタンの自生地、アサヒエビネの自生地において、C/N 比が 20 を越えた土壤は無

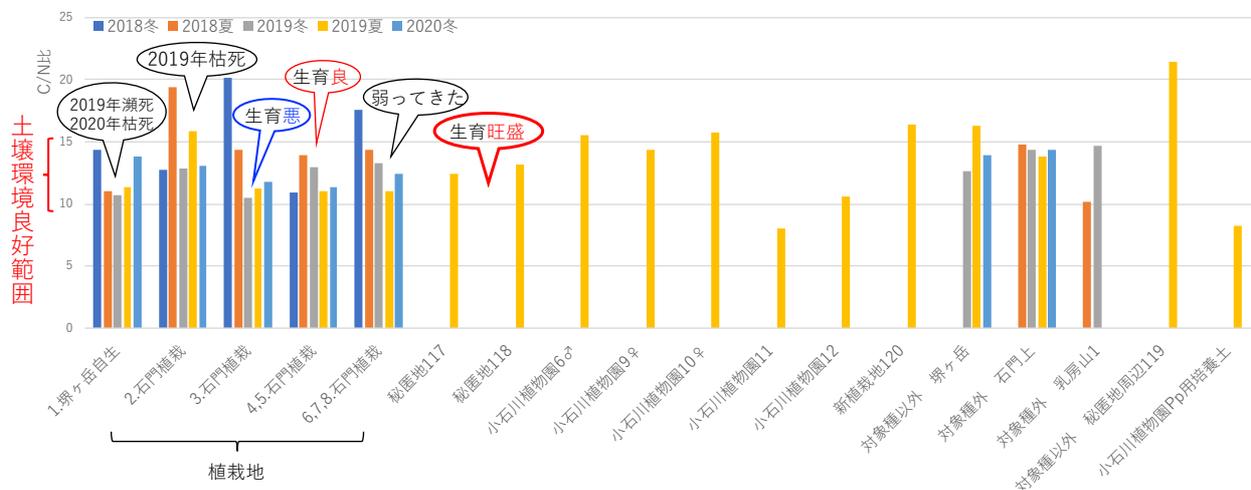


図 4.3.4 タイヨウフウトウカズラ生育土壤の C/N 比較

く、殆どが 10-15 程度で良好な値であった。一方、植栽地の殆どが C/N 比 15 を越えた時期があり、20 程度まで高くなったことがあることも分かった。微生物の作用は C/N 比の高低により支配されており、C/N 比 20-30 以上というのは有機物の分解が遅く、無機態窒素の微生物への取り込みが高く、窒素飢餓が発生し、植物に悪い影響を与えている状態である。ムニンノボタンの植栽地は自生地と比べ僅かに C/N 比が高い傾向がみられることから (図 4.3.5)、窒素飢餓が起き始めている可能性が考えられた。地点 19. 東平播種地と地点 20. 東平播種地において、発芽や実生の生育に差は見つからず両者とも自生地の発芽や実生と比較して不良であると考察される。

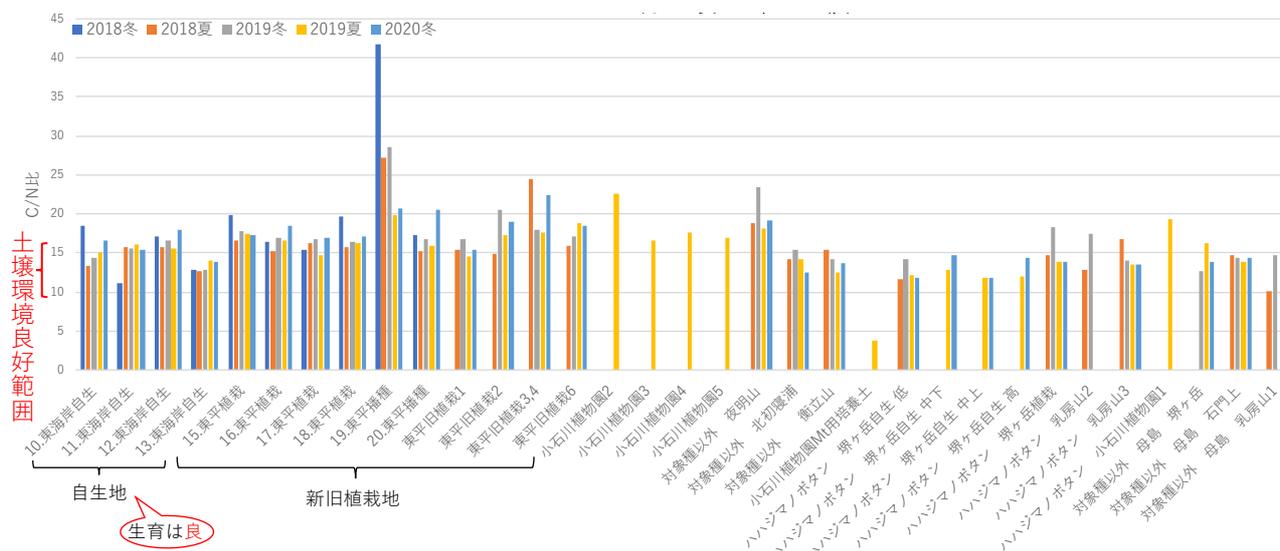


図 4.3.5 ムニンノボタン生育土壌の C/N 比較

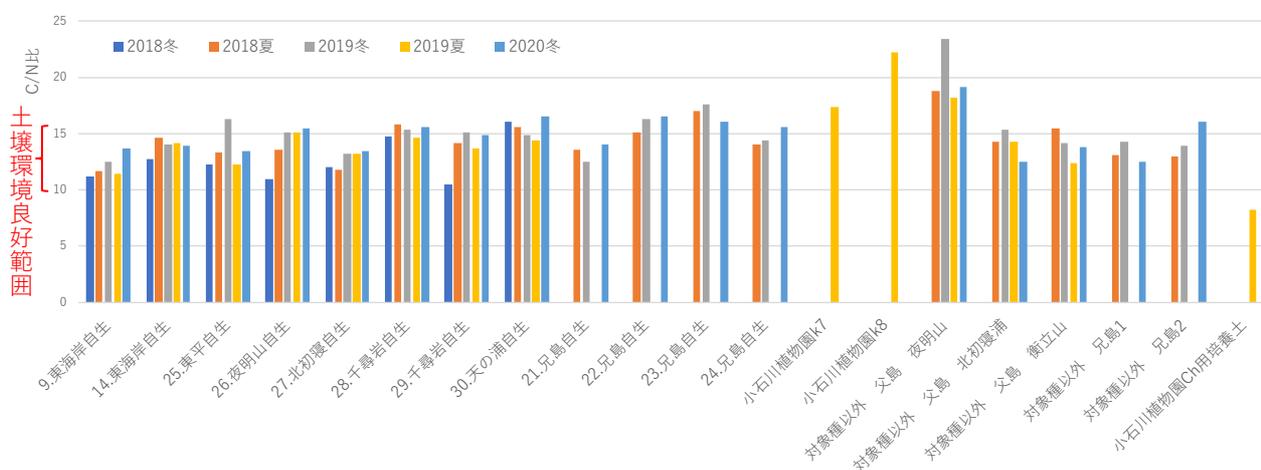


図 4.3.6 アサヒエビネ生育土壌の C/N 比較

以上のように、土壌化学分析の結果から、域外保全において土壌の pH と窒素量の管理が重要であることが示された。また、地域により土壌環境が酸性～アルカリ性と大きく異なったことから、域外適地の選出の際には pH の調査を実施すべきである。

土壌真菌叢解析

2018 年 1 月から 2019 年 9 月の父島、母島、兄島、小石川植物園の合計 29 地点 58 土壌由来の 64 DNA サンプルについて真菌叢解析を行った。解析パイプライン PIPITS を用いて種の同定を行った結果、総リード数 6,546,904 リードと 10,006 OTU が得られた (表 4.3.1)。真菌 10,006 種類を検出し、16

門 47 綱 116 目 234 科 433 属 1145 種類の存在を確認した。小笠原の土壌においては 4,985,781 リードと 9166 OUT から 9166 種類の真菌が同定され、15 門 45 綱 111 目 227 科 405 属 1077 種類の存在を確認した。同定に用いたデータベース UNITE において真菌は 19 門 94 綱に分類されていることから、小笠原諸島に幅広い種類の真菌が存在することが明らかとなった。父島、母島、兄島の各島特異的に 2670 種類、4481 種類、1078 種類が検出され、島ごとに特異的な真菌叢の存在も示唆された。一度も大陸と陸続きになったことのない大洋島である小笠原諸島においても多様な分類群の存在が初めて明らかとなり、大陸の植物と同様に真菌が生育に大きく関与している可能性が示された。

表 4.3.1 NGS 解析サンプルと総リード数

サンプル名	生育する植物名	採土時期	採土地点	環境	番号	備考	リード数
Pp18w-1	タイウフウトウカズラ	2018年1月	母島・塚ヶ岳	自生地	1		43319
Pp18s-1	タイウフウトウカズラ	2018年9月	母島・塚ヶ岳	自生地	1		111721
Pp19w-1	タイウフウトウカズラ	2019年1月	母島・塚ヶ岳	自生地	1	生育悪	104740
Pp19s-1	タイウフウトウカズラ	2019年9月	母島・塚ヶ岳	自生地	1	2020年枯死	93325
Pp18w-2	タイウフウトウカズラ	2018年1月	母島・塚ヶ岳	植栽地	2	生育悪	74394
Pp18s-2	タイウフウトウカズラ	2018年9月	母島・塚ヶ岳	植栽地	2	2019年枯死	104887
Pp18w-3	タイウフウトウカズラ	2018年1月	母島・塚ヶ岳	植栽地	3	生育不良	81537
Pp18s-3	タイウフウトウカズラ	2018年9月	母島・塚ヶ岳	植栽地	3	生育不良	107580
Pp19w-3	タイウフウトウカズラ	2019年1月	母島・塚ヶ岳	植栽地	3	生育不良	92613
Pp19s-3	タイウフウトウカズラ	2019年9月	母島・塚ヶ岳	植栽地	3	生育不良	117346
Pp18w-4-a1	タイウフウトウカズラ	2018年1月	母島・塚ヶ岳	植栽地	4	生育良	49478
Pp18w-4-a2	タイウフウトウカズラ	2018年1月	母島・塚ヶ岳	植栽地	4	生育良	58872
Pp18w-4-b1	タイウフウトウカズラ	2018年1月	母島・塚ヶ岳	植栽地	4	生育良	145082
Pp18w-4-b2	タイウフウトウカズラ	2018年1月	母島・塚ヶ岳	植栽地	4	生育良	124583
Pp18s-4	タイウフウトウカズラ	2018年9月	母島・塚ヶ岳	植栽地	4	生育良	69915
Pp19w-4	タイウフウトウカズラ	2019年1月	母島・塚ヶ岳	植栽地	4	生育良	109541
Pp19s-4	タイウフウトウカズラ	2019年9月	母島・塚ヶ岳	植栽地	4	台風被害	93978
Pp18w-6	タイウフウトウカズラ	2018年1月	母島・塚ヶ岳	植栽地	6	生育やや悪い	59946
Pp19s-117	タイウフウトウカズラ	2019年8月	母島	自生地	117	生育旺盛	82288
Pp19s-118	タイウフウトウカズラ	2019年8月	母島	自生地	118	生育旺盛	66203
Pp19s-k6	タイウフウトウカズラ	2019年7月	小石川植物園	鉢栽培	6	小さい	69935
Pp19s-k9	タイウフウトウカズラ	2019年7月	小石川植物園	鉢栽培	9	小さい	90805
Sa19w-o1	対象種以外	2019年1月	母島・塚ヶ岳		1		106966
Sa19s-o1	対象種以外	2019年9月	母島・塚ヶ岳		1		80981
Se18s-o2	対象種以外	2018年9月	母島・石門		2		126358
Se19w-o2	対象種以外	2019年1月	母島・石門		2		113274
Pp19s-119	対象種以外	2019年8月	母島		119		69575
Mp18s-099	ハハジマノボタン	2018年9月	母島・塚ヶ岳	自生地	099		120957
Mp19w-099	ハハジマノボタン	2019年1月	母島・塚ヶ岳	自生地	099		71312
Mp18s-ch3	ハハジマノボタン	2018年9月	母島・乳房山	自生地	3		114528
Mp19w-ch3	ハハジマノボタン	2019年1月	母島・乳房山	自生地	3		112945
Mp19s-k1	ハハジマノボタン	2019年7月	小石川植物園	鉢栽培	1		127403
Chi18s-o1	対象種以外	2018年9月	母島・乳房山		1		127553
Chi19w-o1	対象種以外	2019年1月	母島・乳房山		1		106945
Mt18w-10-t1	ムニンノボタン	2018年1月	父島・東海岸	自生地	10	同DNA解析1	118268
Mt18w-10-t2	ムニンノボタン	2018年1月	父島・東海岸	自生地	10	同DNA解析2	74077
Mt18s-10	ムニンノボタン	2018年10月	父島・東海岸	自生地	10		101946
Mt18w-12	ムニンノボタン	2018年1月	父島・東海岸	自生地	12		102625
Mt18s-12	ムニンノボタン	2018年10月	父島・東海岸	自生地	12		103991
Mt19w-12	ムニンノボタン	2019年1月	父島・東海岸	自生地	12		102397
Mt19s-12	ムニンノボタン	2019年9月	父島・東海岸	自生地	12		81516
Mt18w-15	ムニンノボタン	2018年1月	父島・東平	植栽地	15		143805
Mt18s-15	ムニンノボタン	2018年10月	父島・東平	植栽地	15		90308
Mt18w-18	ムニンノボタン	2018年1月	父島・東平	植栽地	18		89087
Mt18s-18	ムニンノボタン	2018年10月	父島・東平	植栽地	18		95423
Mt19w-18	ムニンノボタン	2019年1月	父島・東平	植栽地	18		132915
Mt19s-18	ムニンノボタン	2019年9月	父島・東平	植栽地	18		135374
Mt18s-a2	ムニンノボタン	2018年10月	父島・東平	植栽地	a2	枯死旧植栽地	92571
Mt19w-a2	ムニンノボタン	2019年1月	父島・東平	植栽地	a2	枯死旧植栽地	99051
Mt19s-k5	ムニンノボタン	2019年7月	小石川植物園	鉢栽培	k5		375291
Ch18w-9	アサヒエビネ	2018年1月	父島・東海岸	自生地	9		124019
Ch18s-9	アサヒエビネ	2018年10月	父島・東海岸	自生地	9		65555
Ch18w-25	アサヒエビネ	2018年1月	父島・東平	自生地	25		161936
Ch18s-25	アサヒエビネ	2018年10月	父島・東平	自生地	25		115155
Ch18w-28-1	アサヒエビネ	2018年1月	父島・千尋岩	自生地	28	同DNA解析1	112612
Ch18w-28-2	アサヒエビネ	2018年1月	父島・千尋岩	自生地	28	同DNA解析2	125987
Ch18s-28	アサヒエビネ	2018年10月	父島・千尋岩	自生地	28		85784
Ch19s-k7	アサヒエビネ	2019年1月	小石川植物園	自生地	k7		59832
Ch18s-ani21	アサヒエビネ	2018年10月	兄島	自生地	21		61780
Ch19w-ani21	アサヒエビネ	2019年1月	兄島	自生地	21		94129
Ch18s-ani23	アサヒエビネ	2018年10月	兄島	自生地	23		101789
Ch19w-ani23	アサヒエビネ	2019年1月	兄島	自生地	23		91590
An18s-o1	対象種以外	2018年10月	兄島		o1		68598
An19w-o1	対象種以外	2019年1月	兄島		o1		108608
総リード数							6546904

解析に用いたサンプル間の真菌の存在率を比較するために 40000 リードを設定値として希薄化処理し、生育に影響を与える真菌を検索した。門レベルにおける真菌 ITS1 配列の出現頻度を比較した結

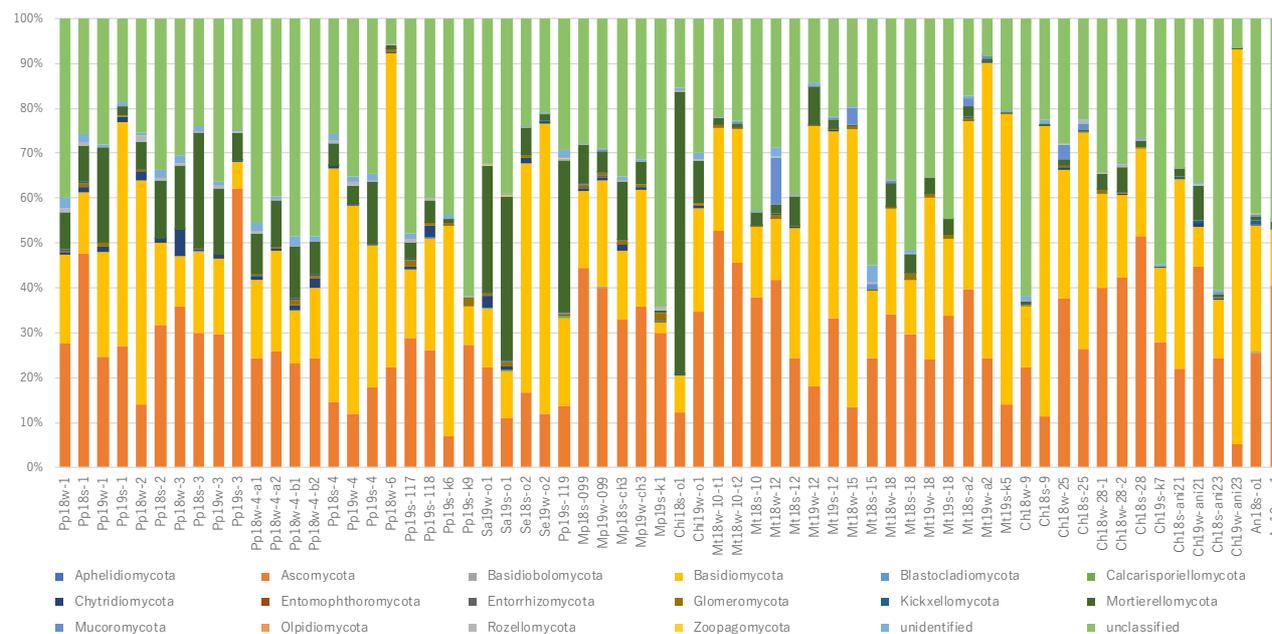


図 4.3.7 門レベルの真菌 ITS1 配列の出現比較

果、多くのサンプルで Ascomycota または Basidiomycota が最も優占した。母島の一部では Mortierellomycota が最も優占するサンプルが存在し (Sa19w-o1、Sa19s-o1、Pp19s-119、Chi18s-o1)、Mortierellomycota は母島において特に多く存在することも示唆された (図 4.3.7)。

綱レベルにおいて (図 4.3.8)、多くのサンプルで Agaricomycetes または Mortierellomycetes または Sordariomycetes が優占することが示された。Mortierellomycetes は特に母島のタイヨウフウトウカズラ生育土壌において多く検出されたが、自生地において枯死直前の土壌 Pp19s-1 は Mortierellomycetes の

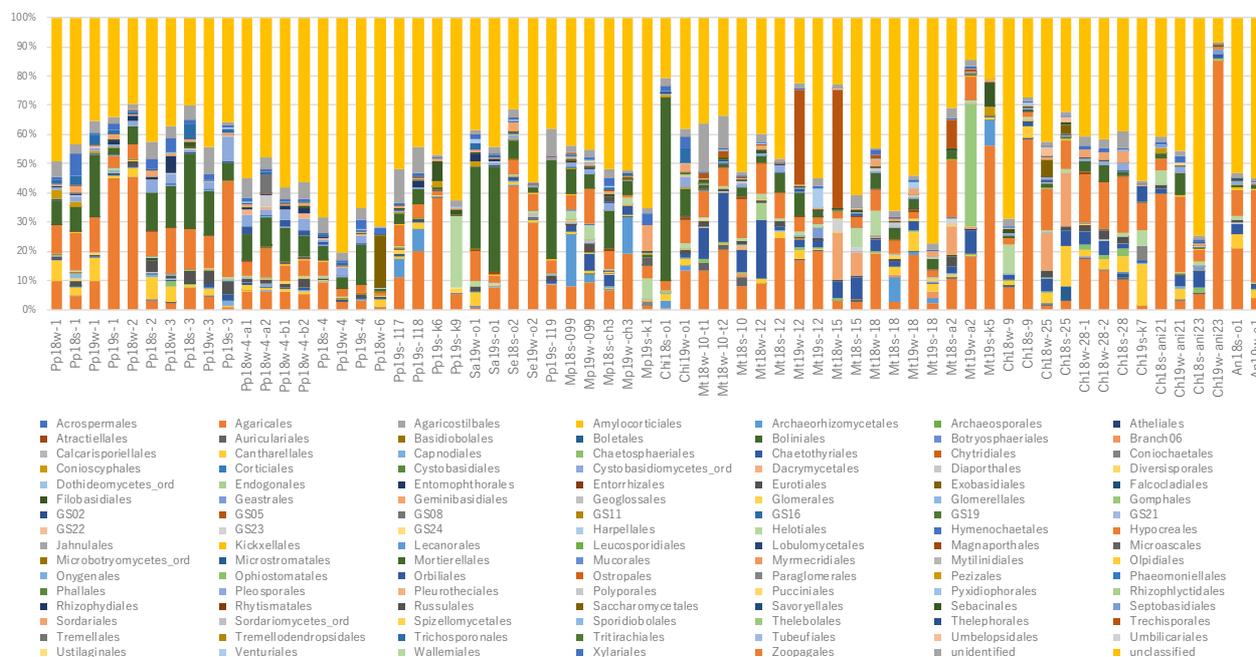


図 4.3.8 綱レベルの真菌 ITS1 配列の出現比較

割合が前シーズン Pp19w-1 の 21.38% から 0.36% へ減少し、Agaricomycetes の割合が 19.56% から 47.66% へ増加した。また、生育状態の悪い Pp18w-2 においても Agaricomycetes は 48.89% と最も優占して検出された。ただし、瀕死の状態であった時期の土壌 Pp18s-2 では他のタイヨウフウトウカズラ生育土壌の菌叢と違いは検出されなかった。真菌叢の変化は生育悪化の指標になるのかもしれない。

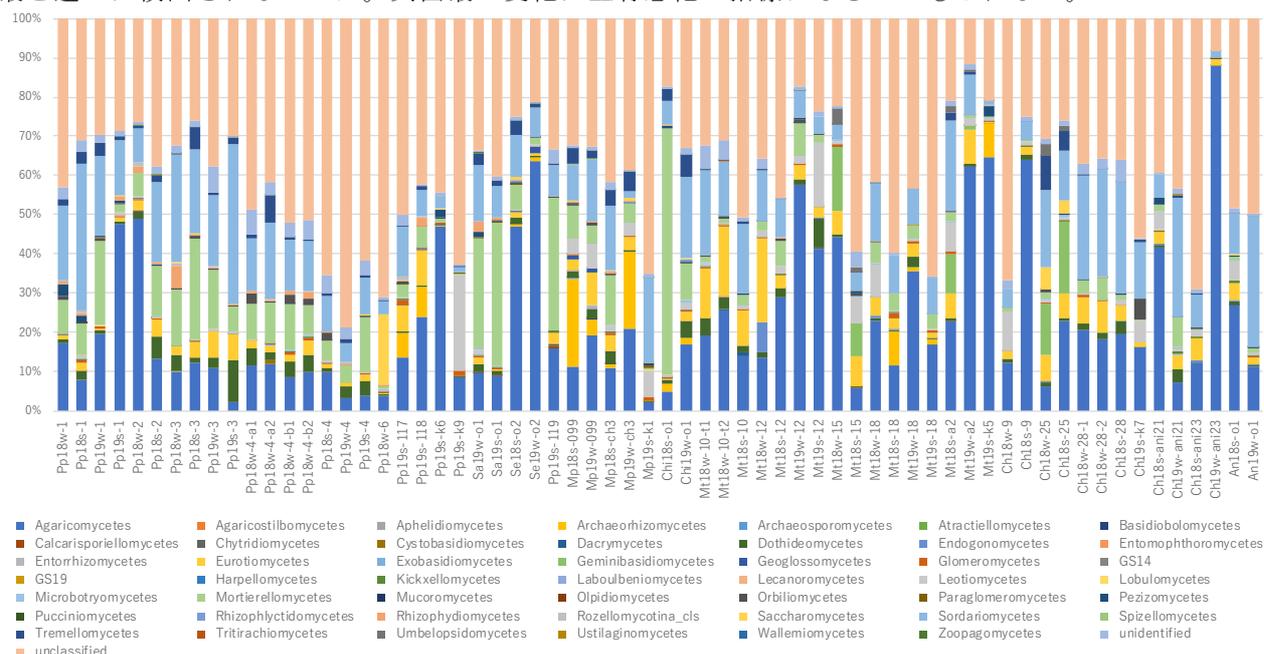
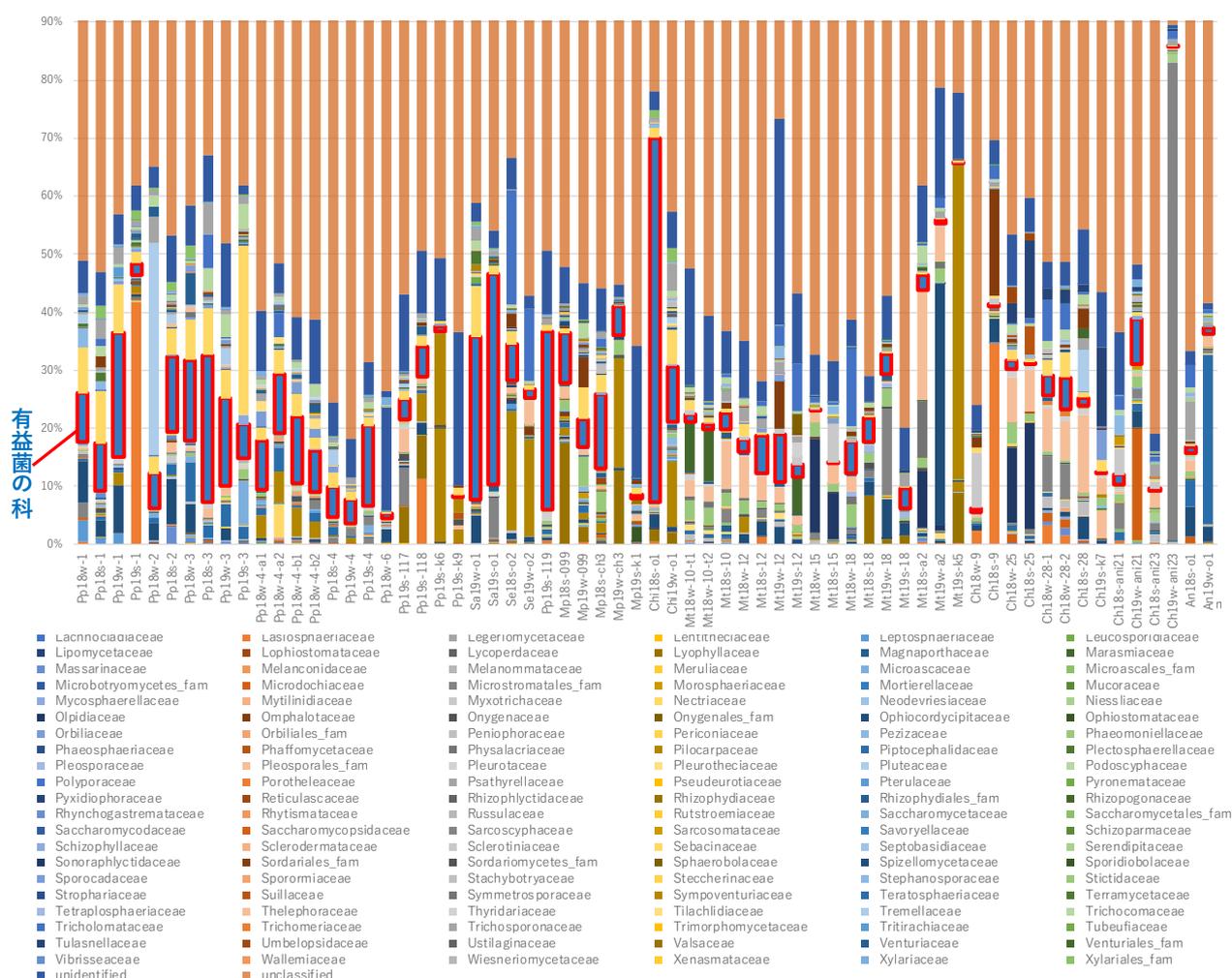


図 4.3.9 目レベルの真菌 ITS1 配列の出現比較

目レベルにおいて、各サンプルで優占する真菌目は様々となった（図 4.3.9）。真菌叢の経時変化を比較した結果、タイヨウフウトウカズラにおいては他の地点と比べて変動が少なく安定した真菌叢であった。タイヨウフウトウカズラにおいて、真菌叢に大きな変化が見られた土壌 Pp19s-1 と Pp18s-2 はいずれも後に株が枯死した土壌である。その他の地点においては、多くの地点で真菌叢の季節変動が見られ土壌真菌叢が不安定であることが示された。これらのことから、タイヨウフウトウカズラの生育において土壌真菌が重要な役割を果たしている可能性が考えられた。

科レベルで比較した結果、真菌叢の季節変動と安定性が顕著に現れた（図 4.3.10）。目レベルでは比較的安定的な真菌叢であったタイヨウフウトウカズラの生育土壌においても、生育が不良な株（地点 3. 石門植栽）や枯死した株（地点 1. 堺ヶ岳自生、地点 2. 石門植栽）の土壌では真菌叢が不安定であった。生育の良い株（地点 4. 石門植栽）の土壌では科レベルにおいても安定的であった。その他の地点では、殆ど全ての地点で季節変動が顕著に見られた。母島において多く検出された *Mortierellaceae* は、タイヨウフウトウカズラ生育土壌において比較的優占的に存在することが示された（図 4.3.10、赤枠が付いた青色のバー）。*Mortierellaceae* は、水・無機物の吸収、病害抵抗性の獲得など植物に有益な真菌として有名なアーバスキュラー菌根菌（AM 菌）に近縁であり感染状態も類似しており、*Mortierellaceae* が安定的に存在することがタイヨウフウトウカズラの生育には重要である可能性が考えられた。*Hypocreaceae* は父島において多く検出された（図 4.3.10、薄桃色のバー）。なかでもムニンノボタンにおいては特に自生地が多く検出されたが植栽地では安定的な検出はされなかった。*Hypocreaceae* は腐生菌を多く含む科であり、直接的に植物へ影響を及ぼす科ではないが良質な土壌を保つには安定的に存在していることは有益である。

図 4.3.10 科レベルの真菌 ITS1 配列の出現比較



タイヨウフウトウカズラにおいて、真菌叢は比較的安定的であったが、pH と C/N 比は大きく変動していた。反対に、真菌叢が不安定であったアサヒエビネ生育土壌の pH と C/N 比は安定的であった。ムニンノボタンについては真菌叢も pH もどちらも不安定であった。土壌化学特性の変化と真菌叢の変化は一致しないが、真菌叢の変化と植物の生育状態の変化には関連がみられたことから、真菌叢は土壌化学特性と同等もしくはそれ以上に植物の生育に大きな影響を与えている可能性がある。

分類階層が下位になるほど、未同定と未分類の割合が多くなる (Gdanetz et al., 2017¹⁴)。今回、属レベルと種レベルにおいてもサンプル間の真菌の存在率を比較することで生育に影響を与える真菌を検索し、タイヨウフウトウカズラの生育に有益となり得る真菌と害となり得る真菌がいくつか得られたが、どれも真菌であること以外の情報は得られなかった。このように、未同定・未分類の中に重要な真菌が含まれている可能性が高い。得られた OTU の配列情報を元にして DNA 配列情報を増やすことは可能であり、真菌種を特定できる可能性がある。土壌真菌叢解析を行うことは植物の生育に影響を与える有用真菌を検索する有効な手法であることが明らかとなった。今回の解析では植物の生育に影響を与える真菌の同定と特定には至らなかったが、真菌叢の安定がタイヨウフウトウカズラの生育に重要であることが示唆された。特定の真菌のみが植物の生育に直接的・間接的に影響するだけではなく、生態系全体における真菌の役割を考慮する必要があることから、次に報告する植物-真菌共生ネットワーク解析は希少種の保全にとっても有効な解析であると考えられる。

植物-真菌共生ネットワーク解析

本ネットワーク解析では、希少植物並びに希少植物の生育地に生育する対照植物の根内部の真菌叢解析を行った。生態系全体の中における希少植物と真菌との共生関係の構造を捉え、生育へ影響を及ぼす真菌を推定した。サンプルは、タイヨウフウトウカズラ 17 個体とその周辺植物 6 種 8 個体、ハハジマノボタン 7 個体とその周辺植物 5 種 6 個体、ムニンノボタン 16 個体とその周辺植物 7 種 9 個体、アサヒエビネ 18 個体とその周辺植物 8 種 10 個体、合計 91 サンプル (表 4.3.2) の根端由来の DNA を解析した。

表 4.3.2 植物-真菌共生ネットワーク解析に使用したサンプル情報

sample	Host Plant	和名	木本/草本	固有/外来	栄養状態	採取地
Pp_750_5_1	Piper.postelsianum	タイヨウフウトウカズラ	草本	固有	成体	タイヨウフウトウカズラ生育地
Pp_770_2_1	Piper.postelsianum	タイヨウフウトウカズラ	草本	固有	成体	タイヨウフウトウカズラ生育地
Pp_747_1_1	Piper.postelsianum	タイヨウフウトウカズラ	草本	固有	成体	タイヨウフウトウカズラ生育地
Pp_762	Piper.postelsianum	タイヨウフウトウカズラ	草本	固有	成体	タイヨウフウトウカズラ生育地
Pp_768	Piper.postelsianum	タイヨウフウトウカズラ	草本	固有	成体	タイヨウフウトウカズラ生育地
Pp_760_6_1	Piper.postelsianum	タイヨウフウトウカズラ	草本	固有	成体	タイヨウフウトウカズラ生育地
Pp_768_1	Piper.postelsianum	タイヨウフウトウカズラ	草本	固有	成体	タイヨウフウトウカズラ生育地
Pp_771	Piper.postelsianum	タイヨウフウトウカズラ	草本	固有	成体	タイヨウフウトウカズラ生育地
Pp_760_2_2	Piper.postelsianum	タイヨウフウトウカズラ	草本	固有	成体	タイヨウフウトウカズラ生育地
Pp_B_jvanea_1	Bischofia.javanica	アカセ	木本	外来	成体	タイヨウフウトウカズラ生育地
Pp_Q_quadriaurita_1	Pteris.quadriaurita_H.Obha	オオサザフナホテジョウダン	草本	固有	成体	タイヨウフウトウカズラ生育地
Pp_O_compositus_1	Oplismenus.compositus	エタダチヂミザサ	草本	広域分布	成体	タイヨウフウトウカズラ生育地
Pp_A_sieboldii_Miq_1	Ardisia.sieboldii_Miq.	モクダチバナ	木本	外来	成体	タイヨウフウトウカズラ生育地
Pp_A_sieboldii_Miq_2	Ardisia.sieboldii_Miq.	モクダチバナ	木本	外来	成体	タイヨウフウトウカズラ生育地
Pp_T_parasitica_1	Thelypteris.parasitica	ケネシダ	草本	広域分布	成体	タイヨウフウトウカズラ生育地
Pp_unknown_1	unknown	不明	不明	不明	実生	タイヨウフウトウカズラ生育地
Pp_unknown_2	unknown	不明	不明	実生	タイヨウフウトウカズラ生育地	
k_Pp_1_8	Piper.postelsianum	タイヨウフウトウカズラ	草本	固有	成体	栽培個体
k_Pp_91_0274_1	Piper.postelsianum	タイヨウフウトウカズラ	草本	固有	成体	栽培個体
k_Pp_91_0274_2	Piper.postelsianum	タイヨウフウトウカズラ	草本	固有	成体	栽培個体
k_Pp_f	Piper.postelsianum	タイヨウフウトウカズラ	草本	固有	成体	栽培個体
k_Pp_s1_2006_198_1	Piper.postelsianum	タイヨウフウトウカズラ	草本	固有	成体	栽培個体
k_Pp_k1_2006_199	Piper.postelsianum	タイヨウフウトウカズラ	草本	固有	成体	栽培個体
Mp_1	Melastoma.tetramerum_var.	ハハジマノボタン	木本	固有	成体	ハハジマノボタン生育地
Mp_2	Melastoma.tetramerum_var.	ハハジマノボタン	木本	固有	成体	ハハジマノボタン生育地
Mp_3	Melastoma.tetramerum_var.	ハハジマノボタン	木本	固有	成体	ハハジマノボタン生育地
Mp_4	Melastoma.tetramerum_var.	ハハジマノボタン	木本	固有	成体	ハハジマノボタン生育地
Mp_5	Melastoma.tetramerum_var.	ハハジマノボタン	木本	固有	成体	ハハジマノボタン生育地
Mp_6	Melastoma.tetramerum_var.	ハハジマノボタン	木本	固有	成体	ハハジマノボタン生育地
Mp_7	Melastoma.tetramerum_var.	ハハジマノボタン	木本	固有	成体	ハハジマノボタン生育地
Mp_T_parasitica_1	Thelypteris.parasitica	ケネシダ	草本	広域分布	成体	ハハジマノボタン生育地
Mp_T_parasitica_2	Thelypteris.parasitica	ケネシダ	草本	広域分布	成体	ハハジマノボタン生育地
Mp_T_tanakaana_1	Freycinetia.tanakaana	ツルギクダ	草本	固有	成体	ハハジマノボタン生育地
Mp_C_lepigera_1	Clethra.lepigera	キンモクワイノデ	草本	固有	成体	ハハジマノボタン生育地
Mp_N_cordifolia_1	Neprolepis.cordifolia	タマシダ	草本	広域分布	成体	ハハジマノボタン生育地
Mp_L_sp_1	Loganiaceae.sp.	マンネヒソ	不明	不明	実生	ハハジマノボタン生育地
Mt_1	Melastoma.tetramerum	ムニンノボタン	木本	固有	成体	ムニンノボタン生育地
Mt_2	Melastoma.tetramerum	ムニンノボタン	木本	固有	成体	ムニンノボタン生育地
Mt_3	Melastoma.tetramerum	ムニンノボタン	木本	固有	成体	ムニンノボタン生育地
Mt_5	Melastoma.tetramerum	ムニンノボタン	木本	固有	成体	ムニンノボタン生育地
Mt_6	Melastoma.tetramerum	ムニンノボタン	木本	固有	成体	ムニンノボタン生育地
Mt_7	Melastoma.tetramerum	ムニンノボタン	木本	固有	成体	ムニンノボタン生育地
Mt_8	Melastoma.tetramerum	ムニンノボタン	木本	固有	成体	ムニンノボタン生育地
Mt_9	Melastoma.tetramerum	ムニンノボタン	木本	固有	成体	ムニンノボタン生育地
Mt_10	Melastoma.tetramerum	ムニンノボタン	木本	固有	成体	ムニンノボタン生育地
Mt_G_boninensis_1	Goodyera.boninensis	ムニンシュスラン	草本	固有	成体	ムニンノボタン生育地
Mt_S_mertensiana_1	Scibma.mertensiana	ムニンヒメツバキ	木本	固有	成体	ムニンノボタン生育地
Mt_S_chinensis_1	Subomeris.chinensis	ハマホシツバ	草本	広域分布	成体	ムニンノボタン生育地
k_Mt_2005_0080	Melastoma.tetramerum	ムニンノボタン	木本	固有	成体	栽培個体
k_Mt_6	Melastoma.tetramerum	ムニンノボタン	木本	固有	成体	栽培個体
k_Mt_2005_0089	Melastoma.tetramerum	ムニンノボタン	木本	固有	成体	栽培個体
k_Mt_2006_0163	Melastoma.tetramerum	ムニンノボタン	木本	固有	成体	栽培個体
k_Mt_2006_0162_1	Melastoma.tetramerum	ムニンノボタン	木本	固有	成体	栽培個体
k_Mt_2006_0162_2	Melastoma.tetramerum	ムニンノボタン	木本	固有	成体	栽培個体
k_Mt_2006_0090	Melastoma.tetramerum	ムニンノボタン	木本	固有	成体	栽培個体
Mt_C_hattoriana_1	Carex.hattoriana	ムニンナキリスダ	草本	固有	成体	ムニンノボタン生育地
Mt_C_hattoriana_2	Carex.hattoriana	ムニンナキリスダ	草本	固有	成体	ムニンノボタン生育地
Mt_P_boninensis_1	Pandanus.boninensis	タコノキ	木本	固有	成体	ムニンノボタン生育地
Mt_P_asiaticum_2	Tracholopperm.asiaticum	チイカズラ	木本	広域分布	成体	ムニンノボタン生育地
Mt_T_parasitica_1	Thelypteris.parasitica	ケネシダ	草本	広域分布	成体	ムニンノボタン生育地
Mt_P_littorale_1	Psidium.littorale	キバナジロウ	木本	外来	成体	ムニンノボタン生育地
Ch_1	Calanthe.hattori	アサヒエビネ	草本	固有	成体	アサヒエビネ生育地
Ch_2	Calanthe.hattori	アサヒエビネ	草本	固有	成体	アサヒエビネ生育地
Ch_3	Calanthe.hattori	アサヒエビネ	草本	固有	成体	アサヒエビネ生育地
Ch_4	Calanthe.hattori	アサヒエビネ	草本	固有	成体	アサヒエビネ生育地
Ch_5	Calanthe.hattori	アサヒエビネ	草本	固有	成体	アサヒエビネ生育地
Ch_6	Calanthe.hattori	アサヒエビネ	草本	固有	成体	アサヒエビネ生育地
Ch_7	Calanthe.hattori	アサヒエビネ	草本	固有	成体	アサヒエビネ生育地
Ch_8	Calanthe.hattori	アサヒエビネ	草本	固有	成体	アサヒエビネ生育地
Ch_9	Calanthe.hattori	アサヒエビネ	草本	固有	成体	アサヒエビネ生育地
Ch_10	Calanthe.hattori	アサヒエビネ	草本	固有	成体	アサヒエビネ生育地
Ch_D_lepidotum_1	Disyllum.lepidotum	シマイスノキ	木本	固有	成体	アサヒエビネ生育地
Ch_D_lepidotum_2	Disyllum.lepidotum	シマイスノキ	木本	固有	成体	アサヒエビネ生育地
Ch_C_hattoriana_1	Carex.hattoriana	ムニンナキリスダ	草本	固有	成体	アサヒエビネ生育地
Ch_C_hattoriana_2	Carex.hattoriana	ムニンナキリスダ	草本	固有	成体	アサヒエビネ生育地
Ch_I_mitanoana_1	Ilex.mitanoana	ムニンエツツグ	木本	固有	成体	アサヒエビネ生育地
Ch_S_mertensiana_1	Scibma.mertensiana	ムニンヒメツバキ	木本	固有	実生	アサヒエビネ生育地
Ch_H_glaber_1	HBiscus.glaber	チリハマボウ	木本	固有	成体	アサヒエビネ生育地
Ch_T_asiaticum_1	Tracholopperm.asiaticum	チイカズラ	木本	広域分布	成体	アサヒエビネ生育地
Ch_P_luchueensis_Mayer_1	Pinus.luchueensis_Mayer	リュウキョウマツ	木本	稀化	成体	アサヒエビネ生育地
Ch_P_boninensis_1	Pandanus.boninensis	タコノキ	木本	固有	成体	アサヒエビネ生育地
k_Ch_H866_01	Calanthe.hattori	アサヒエビネ	草本	固有	成体	栽培個体
k_Ch_H866_D1	Calanthe.hattori	アサヒエビネ	草本	固有	成体	栽培個体
k_Ch_No4_1	Calanthe.hattori	アサヒエビネ	草本	固有	成体	栽培個体
k_Ch_No4_2	Calanthe.hattori	アサヒエビネ	草本	固有	成体	栽培個体
k_Ch_No3_2_2_1	Calanthe.hattori	アサヒエビネ	草本	固有	成体	栽培個体
k_Ch_H866_D1_2	Calanthe.hattori	アサヒエビネ	草本	固有	成体	栽培個体
k_Ch_No3_2_1_1	Calanthe.hattori	アサヒエビネ	草本	固有	成体	栽培個体
k_Ch_No3_2_2_2	Calanthe.hattori	アサヒエビネ	草本	固有	成体	栽培個体
k_Ch_No3_2_1_2	Calanthe.hattori	アサヒエビネ	草本	固有	成体	栽培個体
k_Pp_f_B_2	Piper.postelsianum	タイヨウフウトウカズラ	草本	固有	成体	栽培個体
k_Pp_s1_2006_198_2	Piper.postelsianum	タイヨウフウトウカズラ	草本	固有	成体	栽培個体

全体で 24166 リードを得て、そのうち 100 リードに満たなかった 19 サンプルを除く計 72 サンプルをその後の解析に用いた。これらのサンプルはほぼ全て 100 リードの希薄化処理で希薄化曲線が平行に近

く、OTU 数が十分確保されていることが確認できた (図 4.3.11)。NMDS 解析では採取地による真菌叢の偏りは認められなかった (図 4.3.12)。

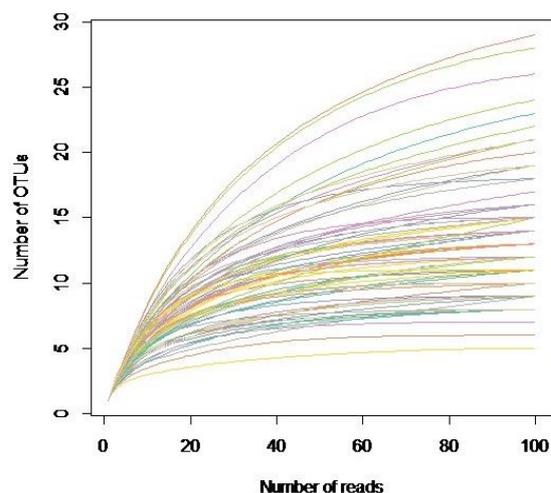


図4-3-11. 希薄化曲線
一本の線が1つのサンプルのリード数とOTU数の関係を示している。

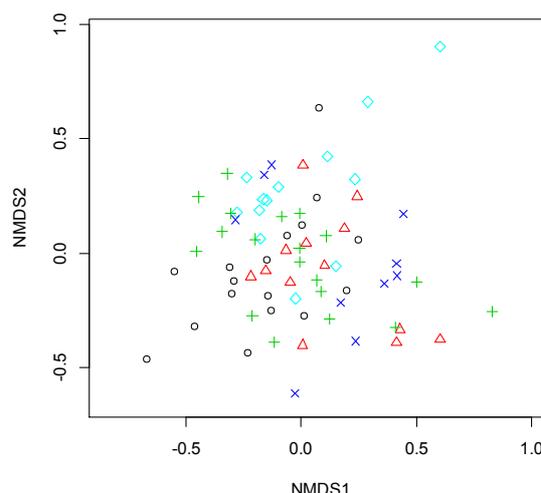


図4-3-12. NMDS解析
同一のアイコンは同じ採取地のサンプルであることを示す。

門レベルにおける OTU 組成はほぼ全てのサンプルで Ascomycota が最も優占していたが、一部 Basidiomycota が最も優占および Ascomycota と同等に優占するサンプル(k_Pp_k1_2006_199, Mt_C_hattoriana_2, Mt_T_parasitica_1, Ch_7, Ch_I_matanoana_1, Ch_H_glaber_1, Ch_P_luchuensis_Mayer_1, Ch_P_boninensis_1, Pp_1809_4)と Glomeromycota が最も優占するサンプル(k_Ch_No3_2_2_2)が存在した (図 3.13)。

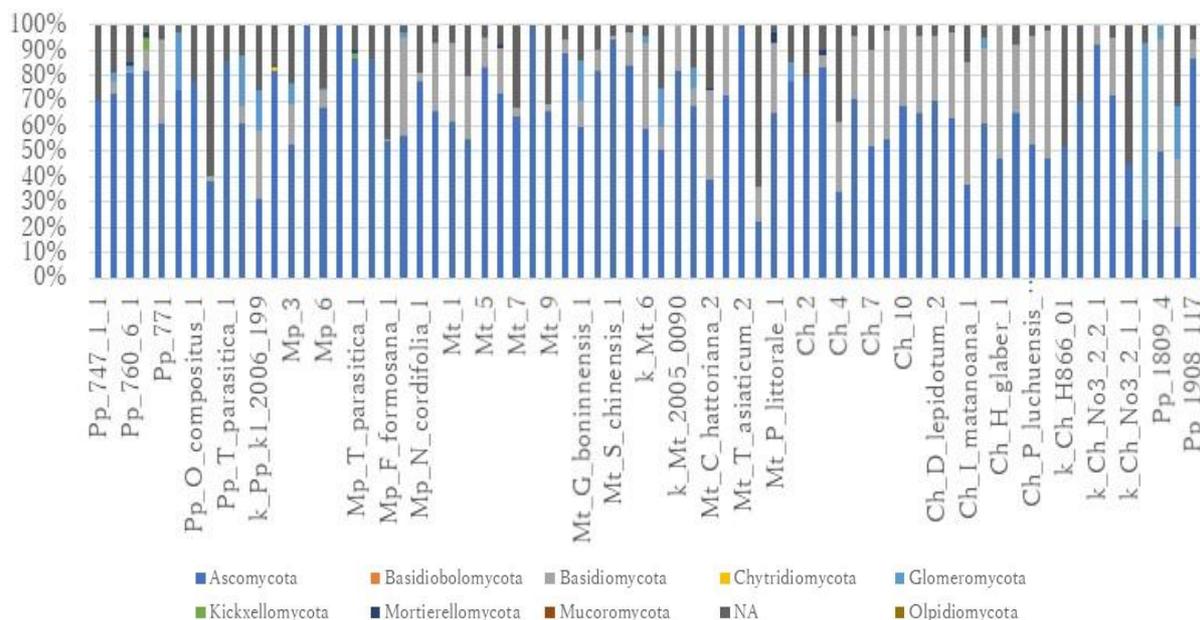


図 3.13. 門レベルの OTU 組成

目レベルにおいて、72 サンプルのうち 50 サンプルにおいて Hypocreales が検出された(図 4-3-14)。タイヨウフウトウカズラの生育地において Hypocreales がかなり優占しているサンプルが目立った

(Pp_750_6_1, Pp_747_1_1, Pp_768, Pp_768_1, Pp_P_quadriaurita_1, Pp_O_compositus_1,

Pp_A_sieboldii_Miq_2, Pp_T_parasitica_1, Pp_1908_117)。ハハジマノボタンのサンプルにおいても Hypocreales がかなり優占するサンプルは複数存在したが (Mp_1, Mp_3, Mp_5)、他 4 個体とハハジマノボタン周辺植物において Hypocreales は、ケホシダ *T. parasitica* (Mp_T_parasitica_2) において全体の

3%検出された以外は、一切検出されなかった。一方、ハハジマノボタンの近縁種であるムニンノボタンにおいては、Hypocreales が大きく優占しているサンプルはないものの、ムニンノボタン周辺に生育していたテイカカズラ *T. asiaticum* (Mt_T_asiaticum_2)、タコノキ *P. boninensis*

(Mt_P_boninensis_1)、キバンジロウ *P. littorale* (Mt_P_littorale_1)において各々全 OUT 数の 79%、22%、25%を占め、その他のムニンノボタン生育地の木本においても優占率は3%以下と低いものの検出された。アサヒエビネ生育地で採取したサンプルおよびアサヒエビネ栽培個体においてはほぼすべてのサンプルで Hypocreales が検出されたが、その優占度はサンプルによって1~13%と違いが大きかった。他のサンプルと比較し、アサヒエビネ生育地で採取したサンプルでは Russulales が優占するサンプルが多かった。アサヒエビネ生育地において採取した26サンプルのうち14サンプルにおいて Russulales が検出された。一方、アサヒエビネの栽培個体には Russulales は全く検出されず、そのほかタイヨウフウトウカズラ栽培個体に微量、ムニンノボタン生育地のタコノキとナキリスゲ *C. hattoriana* (Mt_P_boninensis_1, Mt_C_hattoriana_2) にそれぞれ28%および30%検出された。

Chaetothyriales は、タイヨウフウトウカズラ生育地およびハハジマノボタン生育地で採取した38サンプル中11サンプル、ムニンノボタン生育地で採取した25サンプル中10サンプルに検出され、ムニン

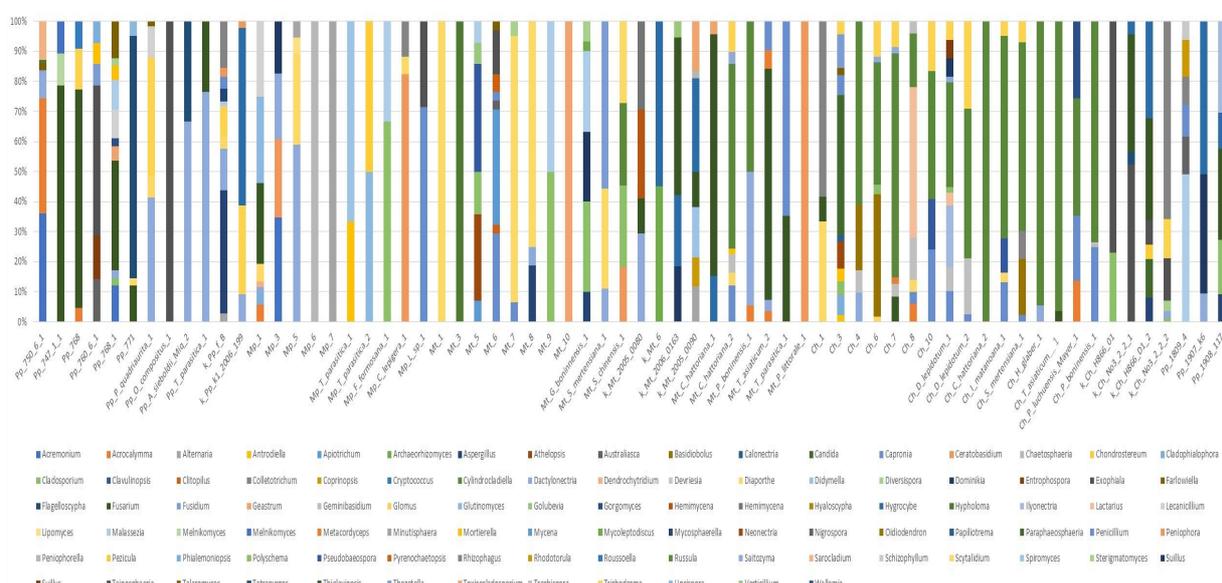


図 4.3.14 目レベルの OTU 組成

ノボタン栽培個体には比較的多く検出された。アサヒエビネ生育地では28サンプル中11サンプルに検出され、アサヒエビネ栽培個体においても18サンプル中4サンプルに検出された。

次に土壤中の真菌叢解析の結果について、属レベルで OTU 組成を比較した(図 4.3.15)。属レベルではかなりの割合が未同定となった。以下に希少植物ごとに共生する真菌をまとめる。

- ・タイヨウフウトウカズラ：*Acremonium* が全ての生育地で共生菌として認められ、土壤中真菌なかでも大きな割合を占めた。

- ・アサヒエビネ：*Russula* が生育地の多くのサンプルで検出され、優占度も大きかった。また、*Geminibasidium* もアサヒエビネ生育地で多く検出された。興味深いことに、この *Geminibasidium* は、アサヒエビネの自然植生地でのみ検出され、栽培個体やその他の植物の生育土壌では一切検出されなかった。また、これら真菌との共生が判ったものの、不思議なことにラン菌の検出が出来なかった。

- ・ムニンノボタン：真菌の種類は安定しておらずに様々であった。この傾向は自生個体や栽培個体を通して共通していた。*Russula*、*Oidiodendron* などが検出された。

根端内在真菌叢解析においては、タイヨウフウトウカズラだけでなく、ムニンノボタン、ハハジマノボタン、アサヒエビネにおいても種毎に共通する真菌は見出されなかった。また、AM 菌は多様な植物と共生関係を持ち、植物の栄養吸収を助けることが知られているが、今回の結果では限られたサンプルのみに検出され、OTU 数も少なかった。これらのことは、種の希少性や生育不良と関係があるのかも知れない。タイヨウフウトウカズラで比較的多く検出された *Helotiales* 目は、多様な分類群の植物との共

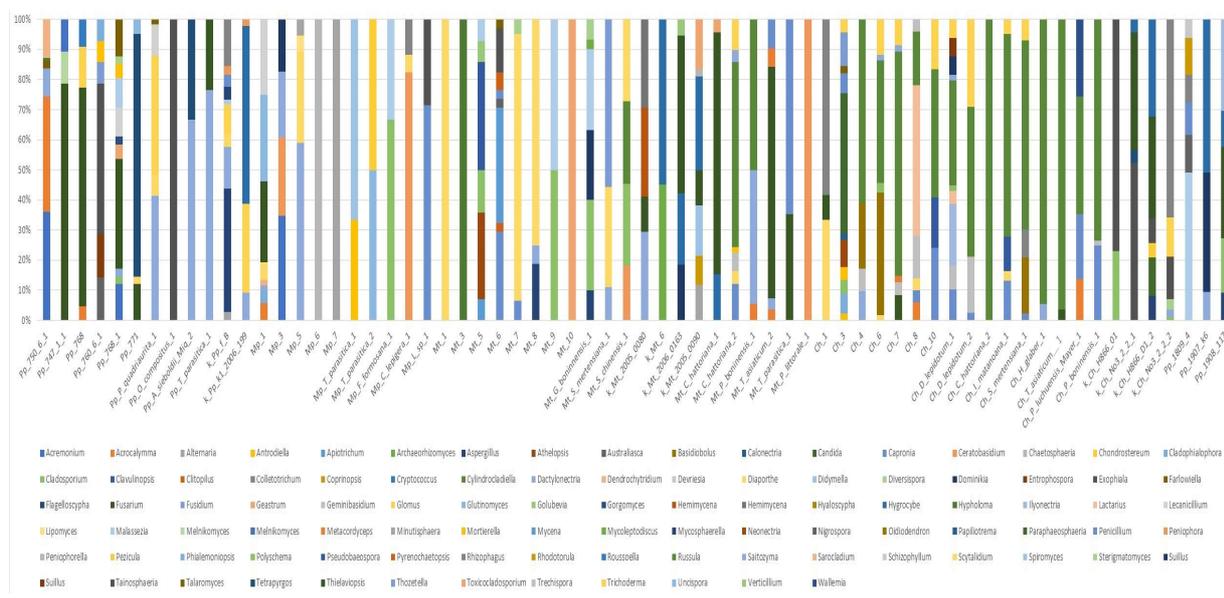


図 4.3.15 属レベルの OTU 組成

生関係および宿主植物の重金属ストレス耐性を高めることが報告されており (Yamaji et al., 2016¹⁵), Toju and Sato, 2018¹⁶)、環境耐性に影響を与えている可能性がある。アサヒエビネと周辺植物において優占度が高い *Russula* 属は、菌根菌であることからアサヒエビネの良好な生育に重要であると考えられる。ラン科であるアサヒエビネは、ラン菌根菌との共生関係が知られている。Jacquemyn et al. (2014)¹⁷ が DNA バーコーディングを用いて多様なラン科植物から検出した共生菌のほとんどはラン菌根を形成する真菌であったが、本研究におけるアサヒエビネの根からは菌根菌だけではなく多様な真菌が検出されラン菌根菌は微量であった。また、ラン菌根菌である *Ceratobasidium* は特にハハジマノボタ

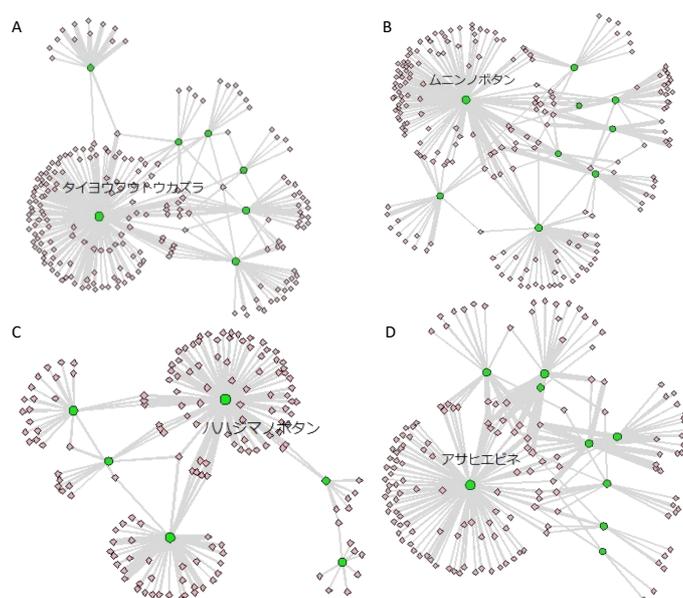


図 4.3.16 各希少種生育地に生育する植物と真菌間の共生関係を示すネットワーク

ン生育地のサンプルで検出され、アサヒエビネのサンプルからはほとんど検出されなかった。ラン菌根菌の検出が微量であること、アサヒエビネに共通する特定のラン菌根菌が検出されなかったことは土壤真菌叢解析の結果と一致する。これらのことから、アサヒエビネは多くのラン科植物に見られるようなラン菌根菌との特異的な共生関係は重要ではなく、真菌と独自の共生関係を進化させてきたと考えられる。更には、小笠原諸島のラン菌根菌においても独自の進化があるのかもしれない。

得られた OTU の関係から、植物と真菌のネットワーク図を作成し(図 4.3.16)、ネットワーク指標を計算し(表 4.3.3)、希少植物の生育地全体の共生関係の構造を明らかにした。入れ子構造の度合いを示す指標である wNODF とモジュール度と結合度を算出した結果、全ての希少植物生育地において共生ネットワーク構造はモジュール構造であることが明らかとなった(表 4.3.3)。また、それぞれのモジュール

	結合度	モジュール度	P 値	wNODF	P 値
タイヨウフウトウカズラ生育地	0.171853	0.539415	<0.0001	4.3695101	0.10
ハハジマノボタン生育地	1.00E-05	0.61936	<0.0001	1.54E+00	0.13
ムニンノボタン生育地	0.142857	0.572838	<0.0001	4.38095987	0.42
アサヒエビネ生育地	0.156733	0.512646	<0.0001	9.25766768	0.45

表 4.3.3 ネットワーク指標一覧

ルにおいてどの点が重要であるかを示す中心性を算出した結果、タイヨウフウトウカズラ生育地は 6 属 18 OTU、ハハジマノボタン生育地は 4 属 13 OTU、ムニンノボタン生育地は 8 属 17 OTU、アサヒエビネ生育地は 8 属 20 OTU において中心性が平均より高く、植物-真菌の相互作用の要として機能していることがわかった(図 4.3.17)。中でも有用真菌が多く知られている *Russula*、*Dactylonectria*、

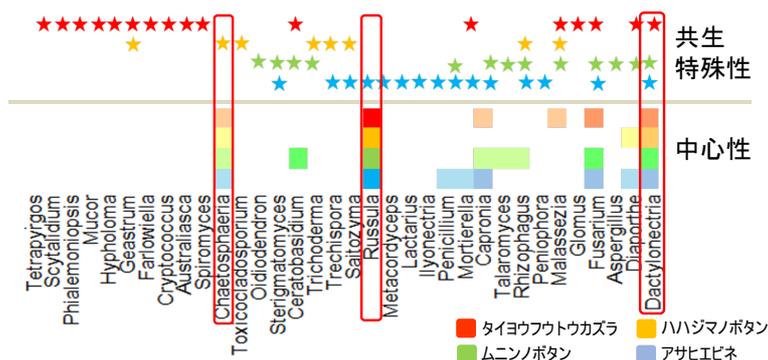


図 4.3.17 真菌属の中心性と共生特殊性

Chaetosphaeria は全生育地において中心性が高かった。このうち種同定までできた真菌は、*Russula sanguine*、*Dactylonectria anthuriicola* である。また、*Russula* はアサヒエビネの、*Dactylonectria* はタイヨウフウトウカズラとムニンノボタンとアサヒエビネの、*Chaetosphaeria* はハハジマノボタンの生育地

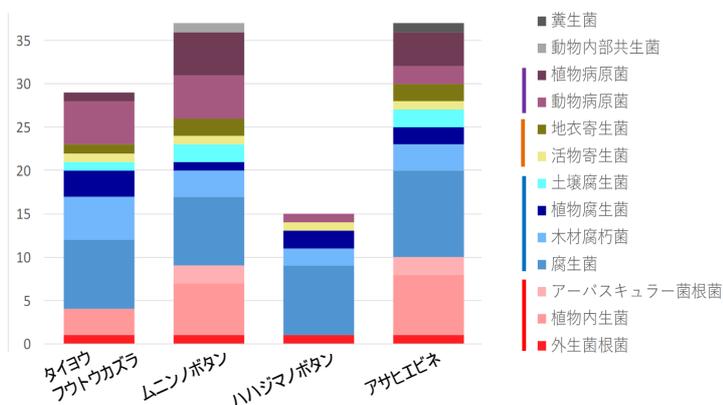


図 4.3.18 各保全区域における中心性の高い真菌の機能

において共生特殊性が示され、これら3つの真菌属は生態系維持においても各希少植物の生育においても重要な役割を担う可能性が高い。さらに中心性の高い真菌のもつ機能を比較した結果(図4.3.18)、植物との共生がよく知られた真菌(グラフ内の赤色系統)以外にも多様な機能を持つ真菌が共生ネットワークで重要な役割を果たしていることが明らかとなった。このことは、植物の生育に直接的に影響を与える共生真菌だけでなく、根内と土壌の真菌叢の多様性維持が希少植物の生育やその生態系維持に大切であることを示している。

各植物種と各真菌属の種特異性 d_i を算出した。タイヨウフウトウカズラの生育地から検出された真菌のうち、20属に統計的に有意な種特異性が認められた(図4.3.22A)。タイヨウフウトウカズラの栽培個体を含めて解析すると、新たに10属に種特異性が認められた(*Apiotrichum*, *Ceratobasidium*, *Colletotrichum*, *Fusarium*, *Lecanicillium*, *Mycosphaerella*, *Olpidium*, *Peniophora*, *Purpureocillium*, *Rhizophagus*)。ムニンノボタン生育地では19属に種特異性が認められ(図4.3.22B)、ムニンノボタンの栽培個体を含めて解析すると新たに9属に種特異性が認められたが(*Antrodiella*, *Coprinopsis*, *Flagelloscypha*, *Mortierella*, *Mycocleptodiscus*, *Paraphaeosphaeria*, *Pyrenochaetopsis*, *Tainosphaeria*, *Trichoderma*)、5属に種特異性が認められなくなった(*Capronia*, *Devriesia*, *Malassezia*, *Rousoella*, *Talaromyces*)。ハハジマノボタン生育地では、11属に種特異性が認められた(図4.3.22C)。アサヒエビネ生育地においては、18属に種特異性が認められ(図4.3.22D)、アサヒエビネの栽培個体を含めて解析すると新たに5属に種特異性が認められたが(*Alternaria*, *Clavulinopsis*, *Suillus*, *Talaromyces*, *Umbelopsis*)、7属に種特異性が認められなくなった(*Dactylonectria*, *Ilyonectria*, *Metacordyceps*, *Oidiodendron*, *Penicillium*, *Rhizophagus*, *Saitozyma*)。植物側では、希少種4種のうちタイヨウフウトウカズラを除く3種において共生真菌に対する種特異性が認められた(図4.3.22)。これらの結果により、共生関係性が密なのか希薄なのかを示され、希少植物に直接的に影響を及ぼす可能性の高い真菌やその関係性を維持するために必要な生態系の関係性が明らかとなった。このように、希少植物-根内在真菌の種間相互作用において、多様な分類・機能を持つ真菌との間に濃い共生関係性が認められた。特に、*Mortierella*はタイヨウフウトウカズラに密な共生関係を示した。*Mortierella*は様々な土壌および根系から検出され(Watanabe, 2010¹⁸)、植物病原体を抑制することで潜在的に植物の成長促進に寄与す

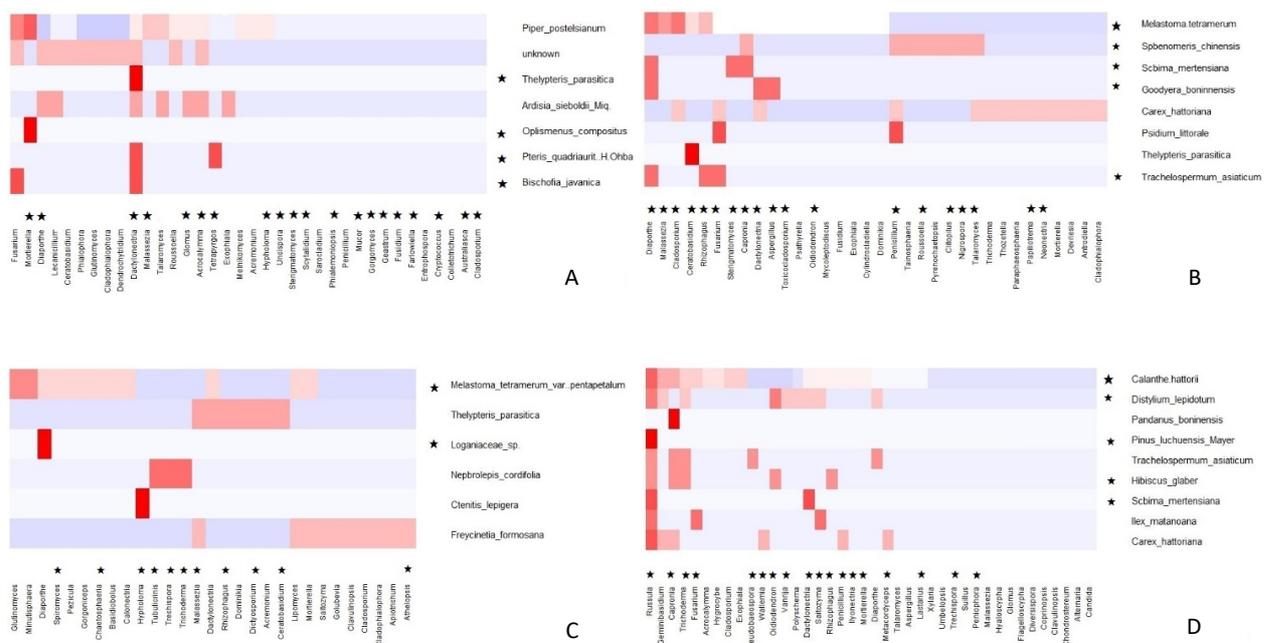


図4.3.22 生育地における植物-菌属の共生関係および種特異性

A:タイヨウフウトウカズラ生育地、B:ムニンノボタン生育地、C:ハハジマノボタン生育地、D:アサヒエビネ生育地。赤が濃いほど共生関係が密であり、青が濃いほど共生関係は希薄である。真菌属および植物種名に★が付くものは共生相手との種特異性が統計的に認められたものである。

る可能性が示唆されており (Eroshin and Dedyukhina, 2002¹⁹); ALShammari et al., 2013²⁰)、タイヨウフウトウカズラの生育に大変有益な真菌と考えられる。Russula は、アサヒエビネ生育地においてアサヒエビネだけでなく多くの植物と密な共生関係を示した。さらに、全希少植物の生育地において中心性が高い。Russula は菌根菌であり、腐生植物とモノトロポイド菌根を形成し植物に養分を与える役目を果たしている。その特性から植物の生育に影響を及ぼす可能性があり、アサヒエビネだけでなく小笠原諸島の生態系においても植物の良好な生育に重要であると考えられる。Geminibasidium もアサヒエビネと密な共生関係を示した。Geminibasidium は植物の成長を促進させることが知られており、アサヒエビネにおいても有益に働いている可能性が高い。また、希少植物を保全するには特定の植物や真菌だけでなく生育地の生態系全体を維持する必要性が示された。例えば、ムニンノボタン生育地とアサヒエビネ生育地において種特異性が確認された Penicillium は、いくつかの植物と蜜な共生関係を示したが、ムニンノボタンとの共生関係は希薄であった。しかし、Penicillium は一般に腐生土壤真菌と考えられており (Watanabe, 2010¹⁸)、ムニンノボタンが生育する良質な土壤環境には重要である。また、一連の抗生物質を産生する種が存在することから、Penicillium によって生成された抗生物質が植物病原体の成長を阻害し、植物が植物病にかかりにくくする働きがある可能性もある。つまり、Penicillium と密な共生関係を示した周辺植物の存在は大きい。また、腐生土壤真菌と考えられている Penicillium はアサヒエビネと密な共生関係を示した。Penicillium は多様な植物種の見かけ上生育状況の良い植物の根からも繰り返し検出されており (Cao et al., 2002²¹); Toju et al., 2016⁷)、小麦の根圏もしくは根内部においてリンを可溶化する種がいることから (Wakelin et al., 2004²²)、アサヒエビネや周辺植物の生育に直接的にも良い影響を与えている可能性が高い。他にも、密な共生関係が示されなかったものの種特異性が認められたことで、例えばムニンノボタンにおいて、菌根を形成する能力を有する Oidiodendron のように生育に良い影響を及ぼす真菌を探すことができた。共生関係が希薄であることが生育不良に繋がるのかもしれない。一方、AM 菌やラン菌根菌との特異的共生関係を持つであろうと考えられたムニンノボタン、ハハジマノボタン、アサヒエビネにおいて、種特異性や中心性が高い AM 菌やラン菌根菌はそれぞれに見出されなかった。しかし、ラン菌根菌である Ceratobasidium が、ムニンノボタンにおいて存在率が低いにも関わらず密な共生関係を示した。大洋島である小笠原諸島においては、様々な菌根菌や AM 菌やラン菌根菌と共生できることが生存には有利に働くのかもしれない。ムニンノボタンやアサヒエビネの保全において、AM 菌やラン菌根菌以外にも注目し、今回同定できなかった真菌や真菌叢のバランス、土壤化学特性や周辺環境の維持に注意を払うべきであると分かった。

今回の植物-根内在真菌の共生ネットワーク解析において、希少植物 4 種は予想以上に多様な分類群の真菌と共生していることが明らかとなった。また、すべての希少植物生育地のネットワークは generalist が少なく不安定性の高いモジュール構造であることが明らかとなった。さらに、共生ネットワークの要を担う真菌は実に多様な分類群・機能を有する真菌であることも分かり、希少植物の保全には直接的な影響を及ぼす真菌以外の存在も重要であることが示された。真菌の中には植物との関連が知られていないものが多くあるが、それらの真菌も潜在的に生態系を支えている可能性が高い。希少植物の保全には、共生ネットワークの要として機能する真菌と種特異性が認められた真菌と植物との共生関係を維持することが重要である。

本研究において、各希少植物の生育に適した土壤環境が明らかとなった。タイヨウフウトウカズラの良好な生育には、根とその周辺土壤中に Mortierella 属と Dactylonectria 属の存在が欠かせないと考えられる。また、土壤の性質は pH7.5 付近の中性土壤を好む傾向にあったが、それ以上に湿気が多く明るい場所を好む可能性が高いと思われた。ムニンノボタンの良好な生育には、根に Ceratobasidium 属と Oidiodendron 属の菌根菌、土壤中に Hypocreaceae 科の腐生菌と Dactylonectria 属と Penicillium 属が必要であると思われる。また、土壤の性質は通気性・水捌けの良い土壤で pH6.5 付近の中性～微酸性を好む傾向があった。アサヒエビネの良好な生育には、根に Russula 属、Dactylonectria 属、Geminibasidium 属、Penicillium 属、土壤中に Oidiodendron 属が必要であると思われる。また、生育は pH6.1-7.4 の微酸性～微アルカリ性の幅広い性質の土壤に適応しており、土壤化学特性以外の影響を受けやすいと思われ

た。さらに、各希少植物の生育には、予想以上に多種多様な機能を持つ真菌が重要であり、この真菌叢を保つことが土壌化学特性と同等もしくはそれ以上に重要であることが明らかとなった。この共生ネットワークを維持するために *Russula* 属、*Dactylonectria* 属、*Chaetosphaeria* 属が必要である。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本研究は大洋島において土壌とそこに生育する植物における初の大規模な真菌メタバーコーディング解析の報告である。これまで一度も大陸と陸続きにならなかったことのない島ということから、詳細な真菌叢解析は島や植生の成り立ち、生物の多様性・進化の解明にも貢献するなど、学術的な意義は大きい。また、土壌真菌叢解析と植物-真菌共生ネットワーク解析を行うことは植物の生育に影響を与える有用真菌を検索する有効な手法であることが明らかとなった。そのうえで、土壌真菌叢と根内在真菌叢を理解することが希少植物の保護増殖、維持管理に貢献しうることがわかった。今後の希少植物の保全活動の基盤情報が得られたと考えられる。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

林野庁小笠原総合事務所国有林課によるフィールド提供により、母島の桑ノ木山にてタイヨウフウトウカズラの生息域外保全が令和2年3月に始まった。この育成において、本知見で得られた土壌 pH などの環境条件を整えることに応用した。なお、この域外保全個体は今後環境省が母島島内で生育適地を判定後に「再導入」するためのリソースとして利用されることになっている。

<行政が活用することが見込まれる成果>

希少植物の生息域内保全や生息域外保全、保護増殖事業などにおいて、共生菌や土壌環境の適性を図るうえで有益な検証事例となる。特に多くの絶滅危惧種を抱えるラン科植物では共生菌と土壌環境の影響が大きいことが以前から指摘されていたものの、これを検証したことはなかった。環境省や農林水産省は、国内希少野生動植物種の保護増殖事業を抱えているが、生息域内保全が芳しくない事例が多い（例えば東北地方環境事務所所管の秋田におけるチョウセンキバナアツモリソウ保護増殖事業、関東地方環境事務所所管の小笠原諸島におけるホシツルランなど）。本研究課題の成果と研究手法は、こうした困難に面した希少種の生息域内保全に活用されることが見込まれる。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

特に記載すべき事項はない。

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表 (学会等)

特に記載すべき事項はない。

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない (研究代表者による対話実績のなかで成果を紹介した)。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) Blackwell, M., (2011). The Fungi: 1, 2, 3 ... 5.1 million species? *American Journal of Botany*. 98:426-438.
- 2) Brundrett, C.M., (2009). Mycorrhizal associations and other means of nutrition of vascular plants: understanding the global diversity of host plants by resolving conflicting information and developing reliable means of diagnosis. *Plant and Soil* 320:37-77.
- 3) Toju, H., Yamamoto, S., Sato, H., Tanabe, SA., Gilbert, SG., Kadowaki, K., (2013). Community composition of root-associated fungi in a quercus-dominated temperate forests: "codominance" of mycorrhizal and root-endophytic fungi. *Ecology and Evolution* 3:1281-1293.
- 4) Toju, H., Yamamoto, S., Sato, H., Tanabe, SA., (2014). Diversity and Spatial Structure of Belowground Plant-Fungal Symbiosis in a Mixed Subtropical Forest of Ectomycorrhizal and Arbuscular Mycorrhizal Plants. *PLoS ONE* Vol19 e86566
- 5) Toju, H., Yamamichi, M., Guimaraes, RP. Jr, Olesen, MJ., Mougi, A., Yoshida, T., Thompson, NJ., (2017). Species-rich networks and eco-evolutionary synthesis at the metacommunity level. *Nature Ecology and Evolution* 1, 0024.
- 6) Tedersoo, L., et. al., (2014). Global diversity and geography of soil fungi. *Science* 346(6213).
- 7) Toju, H., Yamamoto, S., Sato, H., Tanabe, SA., Hayakawa, T., Ishii, SH., (2016). Network modules and hubs in plant-root fungal biomes. *Journal of the royal society interface* 13:20151097
- 8) Rohr, RP., Saavedra, S., Bascompte, J., (2014). On the structural stability of mutualistic systems. *Science* 345:1253497.
- 9) Maugi, A., Kondoh, M., (2012). Diversity of interaction types and ecological community stability. *Science* 337:349-351

- 10) Gweon, SH., Oliver, A., Booth, T., Gibbs, M., Read, SD., Griffiths, IR., Schonrogge, K., (2015). PIPITS: an automated pipeline for analyses of fungal internal transcribed spacer sequences from the Illumina sequencing platform. *Methods in Ecology and Evolution* 6:973-980.
- 11) Wang, Q., Garrity, GM., Tiedje, JM., Cole, JR., (2007). Naive Bayesian classifier for rapid assignment of rRNA sequences into the new bacterial taxonomy. *Applied and Environmental Microbiology* 73:5261-5267.
- 12) 東樹宏和 (2016) 「DNA 情報で生態系を読み解く:環境 DNA・網羅的群集調査・生態ネットワーク」 『共立出版』
- 13) 今井紀博 (2004) 「がんばれ生物クラブ(12)中央学院高等学校--絶滅危惧種アサヒエビネの無菌培養と自生地復元への試み」 『遺伝』 58:88-92.
- 14) Gdanetz, K., Benucci, GMN., Vande, Pol. N., Bonito, G., (2007). CONSTAX: a tool for improved taxonomic resolution of environmental fungal ITS sequences. *BMC Bioinformatics* 18:538.
- 15) Yamaji, K., Watanabe, Y., Masuya, H., Shigeto, A., Yui, H., Haruma, T., (2016). Root fungal endophytes enhance heavy metal stress tolerance of *Clethra barbinervis* growing naturally at mining sites via growth enhancement, promotion of nutrient uptake and decrease of heavy-metal concentration. *PLoS One* 11:e0169089.
- 16) Toju, H., Sato, H., (2018). Root-associated fungi shared between arbuscular mycorrhizal and ectomycorrhizal conifers in a temperate forest. *Front Microbiol.* 9:433.
- 17) Jacquemyn, H., Brys, R., Merckx, VSFT., Waud, M., Lievens, B., Wiegand, T., (2014). Co-existing orchid species have distinct mycorrhizal communities and display strong spatial segregation. *New Phytologist* 202:616-627.
- 18) Watanabe, S., (2010). Asymptotic equivalence of Bayes crossvalidation and widely applicable information criterion in singular learning theory. *Journal of Machine Learning Research* 11:3571-3594.
- 19) Eroshin, VK., Dedyukhina, EG., (2002). Effect of lipids from *Mortierella hygrophila* on plant resistance to phytopathogens. *World J Microbiol Biotechnol.* 18:165-167.
- 20) AL-Shammari, TA., Bahkali, AH., Elgorban, AM., El-Kahky, MT., Al-Sum, BA., (2013). The use of *Trichoderma longibrachiatum* and *Mortierella alpina* against root-knot nematode, *Meloidogyne javanica* on tomato. *Journal of Pure and Applied Microbiology* 7:199-207.
- 21) Cao, Y., Larsen, DP., Hughes, RM., Angermeier, PL., Patton, TM., (2002). Sampling effort affects multivariate comparisons of stream assemblages. *Journal of the North American Benthological Society* 21 4:701-714
- 22) Wakelin, AM., Lorraine-Colwill, DF., Preston, C., (2004). Glyphosate resistance in four different populations of *Lolium rigidum* associated with reduced translocation of glyphosate to meristematic zones. *Weed Research* 44:453-459.

II-4 希少植物の保全活動における社会的・倫理的課題解決のための科学技術社会論的検討

千葉大学国際教養学部 神里 達博

平成30～令和元年度研究経費（累計額）：5,900千円（研究経費は間接経費を含む）
（平成29年度：2,000千円、平成30年度：1,900千円、令和元年度：2,000千円）

【要旨】

「再導入」を含む保全の現場において、社会的・倫理的な観点から具体的に何が問題となっているか、奄美大島の希少植物を主な検討対象として、文献調査、アンケート調査、ならびにインタビュー調査をもとに、科学技術社会論的観点から総合的に検討することを進めた。その結果、1)生態学研究に伴う社会的側面に関する研究の現状、2)希少種の再導入や再生研究に対する、動物種・植物種の違いなどに応じた、人々の意識構造、3)再導入に対する、奄美大島におけるステークホルダーと本土の研究者の意識ギャップや、そのようなギャップを招いた多様な要因、などが明らかになった。これらを踏まえ、今後、再導入を含めた自然保護活動を進めていく上で、研究者や行政が行うことが望ましいと考えられる対策を、複数、提案した。

【キーワード】

奄美大島 保全 再導入 研究倫理 科学技術社会論

1. はじめに

保全的移植とは、ある地域から別の地域へ生物を意図的に移動させ放出することである。とりわけ、希少生物の保全は、世界的に喫緊の課題となっている。しかしながら、移植は、人の利害に影響を与えるのみならず、人の利害によっても影響を受ける。したがって、移植の実現可能性および計画を検討する際には、生態学的な要素のみならず、社会的、経済的および政治的要素を考慮することが不可欠である(IUCN 2013)。この種の検討については、日本国内に関しては、ツシマヤマネコの保護に対する住民意識の調査(本田 2010)、コウノトリの野生復帰に関する社会的影響についての検討(内藤・菊地・池田 2011)、トキの野生復帰に関する住民意識等の調査(長田 2013, 本田 2015)、などがある。また、北米のオオカミの再導入における社会的側面に関する研究は、多数の研究報告がある(Bruskotter et al, 2010 など)。

しかしながら、いずれも動物の再導入に関する社会的側面の研究であり、植物の再導入における社会的影響についての検討は、世界的にもまれであり、少なくとも国内に関するものは見当たらない。

そこで本研究では、植物の再導入(あるいは補強)において生じうる社会的な問題点を、文献調査、アンケート調査、そしてインタビュー調査を通じて、特に奄美大島をケースとして、明らかにしていくことを試みた。この際、科学技術社会論における、専門知と社会の関係についての知見を活用し、当該の問題に関するアクターの役割を明らかにしながら、問題の構造を示すことを目指すこととした。奄美大島は希少植物種が多くあり、園芸目的の採集圧も高い一方で、世界自然遺産登録を国と地域行政が推進している。しかし保全に対する住民意識が、南西諸島や本州とかなり異なることに特徴があるため、今後の保全活動や保護増殖事業に貢献する調査研究をめざした。

2. 研究開発目的

「再導入」を含む保全の現場において、社会的・倫理的な観点から具体的に何が問題となっているか、奄美大島の希少植物を中心的な検討対象として、主として科学技術社会論的な観点から、文献調査、アンケート調査、ならびにインタビュー調査によって明らかにすることを目的とする。

3. 研究開発方法

1) 研究方法の概要

「先行研究のサーベイ」、「全国アンケート調査の実施」ならびに「ステークホルダー・インタビュー」の三つのアプローチにより、順に検討を進めた。

・先行研究等のサーベイ

先行研究の検討においては、まずは植物に限らず、広く、「再導入」に関する倫理的、社会的議論を中心に、調査を進めた。文献的な調査が主体であったが、日本生態学会にもはじめて参加し、関連分野の研究について情報収集を行った。

・全国アンケート調査の実施

先行研究のサーベイを進めた結果、現地のステイホルダーに対するインタビュー調査等の前に、その前提として、日本における基本的な市民の意識について把握しておくことが必要であるとの認識に至った。そこで、環境意識調査などに関する先行研究¹を踏まえつつ、新たにアンケート項目を構築し、実際にアンケート調査を2回にわたって行った。

また、ステークホルダー・インタビューの結果、さらに追加的な調査を行うことが適切と判断されたため、3回目の調査を補完した。

・ステークホルダー・インタビュー

中心的な調査対象である奄美大島における環境保全について、基本的な論点を洗い出すために、ステークホルダーと考えられる有識者を訪問し、半構造化インタビューを行った。

2) 先行研究のサーベイ

文献調査、ならびに、日本生態学会(2018年3月)に参加し、該当する発表をすべて視聴するとともに、発表者に直接、インタビューを行った。

3) 全国アンケート調査

(1) 調査の方法

一般市民の絶滅危惧種等に対する現在の考え方を確認するため、以下の要領で、3回のアンケート調査を行った。調査票の内容はいずれも、ほぼ同一であるが、2019年度からは、自由記述の質問を一つ加えている。

・2018年

調査対象：調査会社²を通じて得られた全国の一般市民モニター2011名（15歳以上99歳以下が対象）

地域：北海道、東日本、東京、中部、西日本、九州、沖縄、奄美大島の8地域（それぞれ約280名、但し奄美大島のみ60名）

調査時期：2018年3月2日～3月15日

・2019年

調査対象：調査会社を通じて得られた全国の一般市民モニター1300名（15歳以上99歳以下が対象）

¹ 本調査に関しては、質問項目の設計などにおいて、今井他 2014 を一部、参考にした。

² アンケート調査については、いずれも株式会社サーベイリサーチセンターMR部（116-8581 東京都荒川区西日暮里2-40-10）が実施した。

地域：北海道、東日本、東京、中部、西日本、南日本、沖縄の7地域について、それぞれ、都市規模で3段階（人口15万人以上の市、人口15万人以下の市、町村）に分け（21区分）、さらに、佐渡、奄美大島、石垣、壱岐・対馬、屋久島・種子島の5つの島を加えた、計26区分を対象に、それぞれ50名について調査を行った（ただし、屋久島・種子島のみ、最終的に48名となったため、合計1298名となった）

調査時期：2019年3月1日～3月11日

・2020年

調査対象：調査会社を通じて得られた全国の一般市民モニター1200名（15歳以上99歳以下が対象）

地域：北海道、東日本、東京、中部、西日本、南日本、沖縄の7地域について、それぞれ、都市規模で3段階（人口15万人以上の市、人口15万人以下の市）に分け（14区分）、さらに、佐渡、奄美、石垣、壱岐対馬、屋久島・種子島、宮古島、五島列島、徳之島・沖永良部島、伊豆諸島、小豆島の10島嶼部を加えた24区分を対象として、それぞれ50名について調査を行った（ただし、徳島・沖永良部島のみ、43名となったため、合計1193名となった）。

調査時期：2020年2月28日～3月9日

(2)調査項目

Q1. 自然と関わる活動

自然との関わる活動に対する考え方について、いくつか質問をし、「やりたくない」から「やりたい」までの5件で回答してもらった。質問としては、「地域や学校で、生き物の分布を調べる活動に参加する。」や「外来生物を見つけたら通報したり、外来植物を見つけたら抜く。」「自然環境をよくする街づくりミーティング（会議）に参加する。」など、いずれも自然環境との積極的な関わり合いを示す8項目。

Q2. 地域への愛着、社会規範、コスト感、絶滅危惧種問題への関心など

次に、「今住んでいる地域に強い結びつきを感じることもある。」（地域への愛着）、「住んでいる地域の自然環境を保全する活動に知り合いが参加したら、自分も行った方が良いと思う。」（社会規範への適合性）、「自然環境にやさしい商品を購入しようとするのとよけいな手間やお金がかかる。」（環境保全へのコスト意識）などをそれぞれ3項目ずつ計9項目と、「生物の種が絶滅することは、なんとしても防ぐべきだ。」（絶滅危惧種問題への関心）の10項目。

Q3. 生物の種類別の、各セクターへの期待

自分の住む地域で、仮に、次に示す生き物が絶滅するおそれがあることが分かった場合、四つのセクター（a）市町村の行政、b）都道府県や国の行政、c）その地域に暮らす一般の人々、d）大学や研究機関などの専門家）は、それぞれどういう役割を果たすべきかを5件（「対策を講じる必要はない」から「対策を講じる必要がある」）で問うた。

生物の種類は、以下の10通り、それぞれについて問うた。

ある珍しい菌類（キノコなど）
ある珍しい植物（草）
ある珍しい植物（樹木）
ある珍しい昆虫
ある珍しい魚類
ある珍しい両生類（カエルなど）
ある珍しいは虫類（ヘビやカメなど）
ある珍しい鳥類
ある珍しい小型のほ乳類（ウサギやネズミなど）
ある珍しい大型のほ乳類（ゾウやオオカミなど）

表 3.4.1 アンケートで尋ねた絶滅危惧の生物リスト1

Q4.1 絶滅時期の違いによる、再生への期待度

自分が住む地域の自然環境において、「かつて、ある植物（草）」がはえていたが、過去のある時期に、その植物は絶滅してしまった」と仮定する。その上で、今、市町村の行政担当者と専門家が検討した結果、他の場所から同じ植物「A」を持ち込んで、あなたの住む地域で再生させようという計画が持ち上がったとするならば、その計画についてどう考えるかを、その植物「A」が絶滅した時期に応じて、5件（「推進して欲しくない」から「推進して欲しい」）で問うた。絶滅の時期は以下の7通りについて聞いた。

最近5年以内に絶滅した動物を再生させること
約30年前 平成が始まった頃)に絶滅した動物を再生させること
約50年前 昭和の高度成長期)に絶滅した動物を再生させること
約150年前 明治維新の頃)に絶滅した動物を再生させること
約300年前 江戸時代)に絶滅した動物を再生させること
約2000年前 弥生時代)に絶滅した動物を再生させること
約1万年前 農耕文明のはじまりに絶滅した動物を再生させること

表 3.4.2 アンケートで尋ねた絶滅危惧種の絶滅の時期

Q4.2 Q4.1と同じ質問だが、「ある動物（大型ほ乳類）」に関してQ4.1と同じ質問をした。

Q5.1 DNAからの再生プロジェクトへの推進期待

仮に、すでに絶滅してしまった生物の遺伝子（DNA）を、化石の中から取りだし、その生物を復活させるための研究が開始されようとしていると仮定した時、その研究を推進すべきだと思うかを、図表(4)-3に示す生物の種類に応じて、5件で聞いた。

植物 草)
植物 樹木)
は虫類 へビやカメなど)
鳥類
小型のほ乳類 ウサギやネズミなど)
大型のほ乳類 じゅうやオオカミなど)

表 3.4.3 アンケートで尋ねた絶滅危惧の生物リスト2

Q5.2 DNAから再生した生物を自然界に戻す事業への賛否

仮に、すでに絶滅してしまった生物の遺伝子（DNA）を、化石の中から取りだし、その生物を復活させる技術がついに開発されたとして、再生させた生物を実際に自然界に戻す事業についての意見を、図表(4)-3の生物について、5件（「推進して欲しくない」から「推進して欲しい」）で問うた。

Q6. 責任の主体

絶滅の恐れがある動物や植物への対策に関して、最も責任をもって対応すべき主体と、その次に責任をもって対応すべき主体について、以下の「行政（市町村）」、「行政（都道府県・国）」、「大学や研究所などの専門家」、「その地域で暮らす人々」、「国民全体」、「その他」のなかから、それぞれ選択させた。

4) ステークホルダー・インタビュー

(1) 調査方法

あらかじめ、奄美大島における植物の保全に関して、キー・パーソンとなる人物のリストを、関係者から聞き取るなどして作成した。その上で、リストの人物に対し、順にインタビューを依頼し、都合が合った方に質問事項を送付した。そのうえで、現地に調査員（サブグループリーダーの神里1名）が入り、半構造化インタビューを行った。

(2) 調査日と実際にインタビューを受けていただいた方

3月11日：環境省奄美自然保護官事務所 自然保護官 千葉康人氏

3月12日：東京大学医科学研究所 奄美病害動物研究施設 服部正策氏

3月13日：エコツアーガイド連絡協議会会長 喜島浩介氏

それぞれ、指定された場所に伺い、1時間から2時間程度、インタビューを行った。



図 3.4.1 環境省奄美自然保護官事務所



図 3.4.2 東大医研・奄美病害動物研究施設

(3) 事前に送付した質問項目

図 3.4.3 奄美大島の住民を対象にした調査で事前に送付した質問項目。

- 予定しております質問内容はおおよそ以下の通りです。
- ・奄美大島における希少植物の保全活動に関して、現在、あなたが問題であると感じていることはなんですか？
 - ・あなたはどのようにして、それが問題であると認識しましたか？
 - ・その問題に関係すると思われる人々、事物、自然的あるいは社会的条件などについて、自由に述べてください。
 - ・その問題は、どうなることで「解決した」と見なせると感じますか？
 - ・その問題を解決する上で関係してくると考えられる、人的、物的、あるいは社会的条件等について、自由に述べてください。
 - ・その問題を解決する上で、障害となることは何だと考えられますか？自由に述べてください。
 - ・複数の問題がある場合、あなたが解決すべきだと思う優先順位を教えてください。また同様に、あなたが解決しやすいと思う優先順位を教えてください。

4. 結果及び考察

1) 先行研究等のサーベイ

まず文献的な先行研究を進めた結果、「保全」と「保存」の思想的整理をした上で、再導入の意味を考えることが重要であるとの視点を得た。また、植物における社会的側面の調査が少ないこと、動物に関しても必ずしも研究が十全であるとはいえないことが分かった。

さらに、世界的にはIUCNの”Guidelines for Reintroductions and Other Conservation Translocations”があるが、このガイドラインを各国のそれぞれのサイトに適用するには、ある種のローカライゼーションが必要であろうということが明らかになった。そのため、日本においてこれをどこまで適用可能か(できないとすればどのような点が抵触するか)検討することの意義について、確認するに至った。

また、日本生態学会の年次大会に参加し、関連する分野に関わる研究者の動向を調査した。その結果、「「コウノトリ」は里山保全を促進するか：市民意識調査からの検討」のポスターセッションを行っていた、水谷瑞希氏(信州大・教・志賀施設、保全生態学)ならびに菊地直樹氏(金沢大・地域政策研セ、環境社会学)、および、「多様な主体の参画と協働を促す交流イベントの生物多様性の主流化への効果ー普及啓発イベント「生物多様性協働フォーラム」の実践とその効果の検証」のポスターセッションを行っていた、橋本佳延氏(兵庫県博、保全生態学・科学コミュニケーション)に対して、インタビューを行うことができた。

各氏からはさまざまな有益な情報を得ることができたが、要約するならば、以下の通りである。

- i) 生態学分野で自然科学的な手法によって研究を進めている研究者の中には、科学技術社会論、科学コミュニケーション、環境社会学、環境倫理学等に関連する問題に関心がある者も存在するが、数は多くはない。博物館などに勤務する研究者によって検討が進められているケースがいくつか見られる。
- ii) 逆に、環境社会学等の、いわゆる文系的な研究者では、絶滅危惧の動植物の管理の問題や、再導入における社会的・倫理的観点での検討といったテーマの研究を進めている者も、数は多くない。なぜなら、環境社会学は伝統的に公害問題などを主に扱ってきた経緯があり、生態学的な問題に深入りすることはまれであるからである(なお、本サブグループのリーダー神里は科学技術社会論を専門とするが、当分野でも生態学的な問題について検討している研究者の数は多くない。また、絶滅危惧種や再導入の問題を本格的に検討している研究者は国内で皆無である)。
- iii) 自然科学的な生態学と、人文社会科学的な科学技術社会論・環境社会学などとの境界領域は、外来種の拡大や絶滅危惧種の問題など、多くの現実の社会的な問題が山積し、専門家による検討が期待されているものの、現状では人材や研究者の層は薄い。

2) 全国アンケート調査の結果概要

以下、概略的に結果を示す。

Q1. 自然と関わる活動

自然と関わる活動への参加の意志を問うたところ、島嶼部以外は、「どちらともいえない」(28.8%)の次におおむね「やりたくない」(26.8%)が最も多く、その次が「あまりやりたくない」(22.0%)が続き、「やややりたい」(17.7%)、「やりたい」(4.7%)に比べて顕著に低かった。従って一般に、自然と関わる活動への積極性は高いとはいえない³。8項目のなかでは「外来生物への対処」に対する積極性

³ この数値は、2020年調査のもので、地域の人口の違いでウェイトをかけている。3年間の調査において顕著な違いはなかったが、東京と中部地方の自然保護への意識が低下傾向にある。

が最も高かった。地域別の比較では、意識が高い順に、東日本>九州>西日本>北海道>東京>中部となった。

また、島嶼部は、おおむね島嶼部以外に比べて意識が高い。最も意識が高かったのは石垣島であり、順に奄美、屋久島・種子島、沖縄県全体、小豆島、と続く。特に、「やりたい」の全国平均が4.7%、東京に至っては2%に過ぎないなかで、石垣島と奄美大島だけが10%を超えた。

Q2. 地域への愛着、社会規範、コスト感、絶滅危惧種問題への関心など

「地域への愛着」、「社会規範への適合性」、「環境保全へのコスト意識」については、他の変数との関係を見るために測定したもので、それ自体は本研究の目的ではないのでここでは説明を省略する。また、絶滅危惧種の問題への関心を問う、「生物の種が絶滅することは、なんとしても防ぐべきだ。」は、「そう思う」(19.7%)と「ややそう思う」(31.4%)が、「あまりそう思わない」(9.4%)や「そう思わない」(4.6%)に比べてかなり多く、Q1の結果と併せて、絶滅の恐れがある生き物への対策の必要性は、広く認識されていることが分かった⁴。

Q3. 生物の種類別の、各セクターへの期待

自分の住む地域での、さまざまな絶滅の恐れのある生物に対する対策について、各セクターへの期待度を比較したものが表4.4ならびに図4.4である⁵。

まず、対策の期待の度合いの順番としては、いずれの地域でも、基本的に大学や研究機関>都道府県・国の行政>市町村行政>一般市民の順となっている。また生物の種類としては、全体としては、大型哺乳類(ゾウやオオカミなど)~鳥類~小型哺乳類(ウサギやネズミなど)~魚類 > 植物(樹木) > 昆虫 > 爬虫類(ヘビやカメなど)~両生類(カエルなど)~植物(草) > 菌類(キノコなど)の順となった。

動物については、鳥類や哺乳類などが上位に、また、昆虫、は虫類、両性類などが下位に来ていることから、当該生物への「親しみ」の感情が影響している可能性もあるかもしれない。また草や菌類への関心はかなり低かった。

また市町村への期待の度合いは、生物の種類によってかなり異なるが、専門家への期待度は、生物種の違いによる差が小さかった⁶。

市町村の行政への期待		都道府県や国の行政への期待		その地域に暮らす一般の人々への期待		大学や研究機関などの専門家への期待	
10.ある珍しい大型のほ乳類(ゾウやオオカミなど)	3.736	10.ある珍しい大型のほ乳類(ゾウやオオカミなど)	3.78143	9.ある珍しい小型のほ乳類(ウサギやネズミなど)	3.41854	5.ある珍しい魚類	3.98148
8.ある珍しい鳥類	3.71	8.ある珍しい鳥類	3.78125	3.ある珍しい植物(樹木)	3.40557	10.ある珍しい大型のほ乳類(ゾウやオオカミなど)	3.97952
9.ある珍しい小型のほ乳類(ウサギやネズミなど)	3.709	9.ある珍しい小型のほ乳類(ウサギやネズミなど)	3.76104	8.ある珍しい鳥類	3.40085	9.ある珍しい小型のほ乳類(ウサギやネズミなど)	3.96122
5.ある珍しい魚類	3.704	5.ある珍しい魚類	3.75486	10.ある珍しい大型のほ乳類(ゾウやオオカミなど)	3.37906	8.ある珍しい鳥類	3.96021
3.ある珍しい植物(樹木)	3.646	3.ある珍しい植物(樹木)	3.7104	5.ある珍しい魚類	3.37134	3.ある珍しい植物(樹木)	3.95873
4.ある珍しい昆虫	3.603	4.ある珍しい昆虫	3.65453	2.ある珍しい植物(草)	3.33477	4.ある珍しい昆虫	3.95709
6.ある珍しい両生類(カエルなど)	3.551	7.ある珍しいは虫類(ヘビやカメなど)	3.64525	7.ある珍しいは虫類(ヘビやカメなど)	3.3222	7.ある珍しいは虫類(ヘビやカメなど)	3.93587
7.ある珍しいは虫類(ヘビやカメなど)	3.543	6.ある珍しい両生類(カエルなど)	3.63832	4.ある珍しい昆虫	3.29771	1.ある珍しい菌類(キノコなど)	3.93491
2.ある珍しい植物(草)	3.522	2.ある珍しい植物(草)	3.62681	6.ある珍しい両生類(カエルなど)	3.29367	6.ある珍しい両生類(カエルなど)	3.93442
1.ある珍しい菌類(キノコなど)	3.419	1.ある珍しい菌類(キノコなど)	3.59432	1.ある珍しい菌類(キノコなど)	3.27363	2.ある珍しい植物(草)	3.93185

表4.4.4 生物の種類別の、各セクターへの期待度の値の一覧と回答(全国:2020年)

⁴ この数値は2020年調査のもので、地域の人口の違いでウェイトをかけている。3年間での変化は小さい。

⁵ 数値は2018年調査。3年間での変化は小さい。

⁶ なお、この数値は、順位尺度を仮に間隔尺度に読み替えて平均値を求めたものであり、より正確な議論を行うためには別の検討方法を用いる必要がある。また数字が「大きい」方が対策を講じる必要が「高い」ことを意味し、中間の「どちらでもない」の値が3となるように決めた1~5の五段階評価である。

絶滅の時期	植物(草)	大型ほ乳類
1.最近5年以内に絶滅した生物を再生させること	3.56	3.44
2.約30年前(平成が始まった頃)に絶滅した生物を再生させること	3.43	3.32
3.約50年前(昭和の高度成長期)に絶滅した生物を再生させること	3.37	3.23
4.約150年前(明治維新の頃)に絶滅した生物を再生させること	3.23	3.05
5.約300年前(江戸時代)に絶滅した生物を再生させること	3.17	2.98
6.約2000年前(弥生時代)に絶滅した生物を再生させること	3.10	2.89
7.約1万年前(農耕文明のはじまり)に絶滅した生物を再生させること	3.06	2.86

表 4.4.5 アンケートで質問した絶滅の時期の項目と回答(全国：数字は2018年のもの)

Q5. DNAからの再生・再導入プロジェクトへの推進期待

絶滅生物の遺伝子からの再生研究や、環境への再導入に対する意見は、表 4.6 に示したように、生物の種類によってかなり顕著な差が見られた。

まず、再生研究の是非も、引き続く環境への再導入の是非も、推進を支持する意見が顕著に多かったのは植物であった。これは3年間のいずれの調査でも安定した結果である。動物に関しては、再生は研究は認めるものの、再導入は反対が上回ることが多かった。なかでも小型ほ乳類、鳥類がやや容認される場合があるのに対して、大型ほ乳類とは虫類の再導入についてはすべての調査で反対が賛成を上回った。

また「絶滅を防ぐべき」との意見が植物よりも鳥類や哺乳類で高いのだが、再生・再導入については植物に比べるとはっきりと低かった。

このような結果の理由としては、以下のように説明できるのではないか。まず、動物は動き回るため、再生や再導入によって市民になんらかの影響が出る可能性を否定できない。逆に植物の場合は動かないため、影響を受けにくいと感じられたのではないか。

また再導入については、島嶼部では意見の隔たりが大きいように見える。若干安定性がないため、はっきりとした結論を出すには至っていないが、少なくとも、石垣島については動物についても植物についても、再導入に反対する声は顕著に強く、しかし沖縄全体としては明らかに積極性が高い。また奄美大島については、2018年と19年の調査では、植物については比較的積極的で、動物については否定的であったが、2020年にはいずれも積極的に変わっている。しかし、そもそも島嶼部はサンプルの母集団のサイズがあまり大きくないため、バイアスがかかりやすく、さらなる検討が必要であると考えられる。

生物の種類	再生の研究の是非	環境への再導入の是非
2.植物(樹木)	3.28	3.13
1.植物(草)	3.25	3.09
5.小型のほ乳類(ウサギやネズミなど)	3.11	2.92
4.鳥類	3.10	2.94
6.大型のほ乳類(ゾウやオオカミなど)	3.06	2.89
3.は虫類(ヘビやカメなど)	3.04	2.87

表 4.4.6 アンケートで質問した生物の種類別の再生・再導入への是非についての項目と回答(全国・2020年)

Q6. 責任の主体

最後に、絶滅の恐れがある生物の対策において、最も責任をもって対応すべき主体を問うたところ、国等の行政が圧倒的に多く、次に国民全体、大学等と続き、市町村行政や地域住民は顕著に少なかった(表 4.7)。このことから、この種の問題は国家全体か、少なくとも県のレベルで責任をもって取り組むべき課題であり、ローカルな問題ではない、と考える人が多いといえるだろう。

またこの傾向は3年間でほとんど変わらないものの、若干、「国」や「国民全体」が減少傾向にあり、その分、「地域」の割合が増しているようにも見える。また「大学などの専門家」への期待もやや高まっていると言えるかもしれない。

セクター	2018	2019	2020
行政（都道府県・国）	45.0	44.6	41.2
国民全体	21.2	20.3	18.4
大学や研究所などの専門家	14.4	14.9	17.8
行政（市町村）	9.1	9.3	9.6
その地域で暮らす人々	7.7	7.2	9.4
その他	2.7	3.6	3.7

表 4.4.7 アンケートで質問した責任の主体の項目と回答（単位は%）

3) ステークホルダー・インタビュー

(1) インタビューの結果

インタビューの結果について、項目ごとに整理・総合したものを、以下に順に示す。

<全般的な状況>

・自然保護に対する地元行政の体制は弱く、実質的には全島で20名程度である。しかし、連絡会議は存在し、一定のコミュニケーションははかられている。人員、予算、また意識の点でも弱い面があると言えるだろう。

・複数の保護団体があり、メンバーは重なりながらも連携している。たとえば、「奄美野鳥の会」「奄美の自然を考える会」「シダの研究会」「海洋生物研究会」などが存在する。保護の対象によって関わっているメンバーが替わり、それはサーファーであったり、研究者であったり、漁民であったりする。しかし奄美の自然保護の全体をカバーする団体は存在しない。そのため、統一性が弱い面がある。

・エコツーリズム推進法をふまえ、エコガイドの研修により、質の向上を図っているところである。ここでは、自然に関する知識のみならず、文化や歴史もカバーするガイドの養成を目指している。なぜなら、奄美には科学的な意味での自然があるわけではなく、文化や歴史と複雑につながった「一つの奄美」が存在しており、それを総体として理解し、体験することが、あるべきエコツアーであるという考えからである。また認定ガイドは現在、70名ほどいる。

・「世界遺産」のインパクトは大きく、自然保護やエコツアーにおいて、さまざまな点に影響を与えている。ただし、奄美の現地の人々は、自分たちも含め、実は絶滅の「恐れ」をあまり感じていない。その大きな理由として、奄美の自然の強い復元力がある。これは日々の生活のなかで実感されているものであるし、また、歴史的にも明らかである。たとえば、終戦直後の奄美の山は、食料の生産のためにほとんどが畑になっていたが、現在では自然が全てもとに戻っている。

・ただし、外の人に対しては、自然が残っているということは、あまりアピールしたくない。それはひとえに、「盗掘」が多いからである。あるとすれば、外から盗みに来るので、「ある」と言わない。

<違法採取対策>

・地元において、自然保護に関する問題の重要性の順位は、圧倒的に「違法採集問題」であり、その次が「外来種問題」、そして最後が「開発と保護のバランス」であると言える。したがって、喫緊の課題は違法採に対してどう対応するのだが、いかんせん体制が弱い。

・まず、法的な裏付けとしては「種の保存法」、「文化財保護法」、そして条例等を活用することになるが、市町村の行政も、ほとんどのスタッフは自然保護に対する意識が高いとはいえない。実質的なパトロールの業務を担っているのは、島内の五市町村から4名が二組で平日の巡回を担当、また環境省は2名一組で土日を担当している。しかし、これらの行政側のパトロールだけでは、大きな奄美を網羅するには全く人員が足りない。そのため、愛好家などのボランティアに頼るところが大きくなるが、その「実働部隊」の高齢化も進んでおり、先行きが不安である。

・また近年の盗掘の増加は、ネットオークションの台頭の影響が大きい。これにより、全国から、場合によっては外国の客も含め、高値で取引されるようになってきている。すなわち、盗掘が儲かるという悪い環境ができているわけだが、残念ながら、島民の違法採集に対する罪悪感があまりないと考えられ、「気軽な小遣い稼ぎ」としてオークションで売るという住民もいるようだ。現行犯でなければ捕まえることはできず、警察もあまり違法採集に対する意識は高くない。そのため関係者が、警察に対する啓蒙活動も行っている。

・さらに、生物学・生態学等の本土の研究者のモラルも、必ずしも高くない。本土からの研究目的で来た研究者が、実際に不正に希少種を採集した例もある。そのため、地元のボランティアの中には、本土の研究者に対して不信感を抱く者もいる。是非、研究者のモラルを高めてほしい。

・すでに述べたように、違法採集が起こる社会経済的な条件がそろっているうえ、監視体制の強化は難しいことから、地元のボランティアたちは、植物の群落等に関する統一的なマップを作らないことで、防衛しようとしている。愛好者やボランティアはおおむね、島のなかで希少種の群落がどこにあるか、知っているが、各々の頭の中だけにとどめている。実際、旧知のボランティア同士であっても、具体的な位置に関する情報を交換することは少ない。しかしその結果、奄美の希少植物の実態が分からないという問題が生じている。どの程度、危機に瀕しているのかが分からないため、客観的・合理的な自然保護の対応をとるための、大きな障害になっている。

<外来種問題・開発と保護の緊張>

・結論から言えば、少なくとも植物については、外来種問題は現場ではあまり深刻に受け止められてはいない。というのも、外来植物は、あまり森に入っていないように見えるからである。おそらく、森の生態系に外来種がなじめないのではないかと。一方で、外来動物については、むしろ森に入ってくるように見える。実態が見えにくくなるので、危ういと考えられる。

・いずれにせよ、行政でできることが限られているので、民間団体の力に頼る必要があるだろう。ただし、処分の仕方が下手だと、かえって種を広げてしまうこともあるので、詳しい人との連携体制を作ることが重要だ。

・外来植物の駆除や希少種の保護については、実働の多くの部分を建設会社が担っている。しかし、実際、県が発注した草刈において、希少種がまるごと刈り取られてしまった例もある。県も環境配慮指針を作っているが、まだまだ浸透していない。そのため、建設会社のスタッフに対する啓蒙活動も始めている。理想的には、建設会社に生態学的な知識を持った職員が、人数は少なくとも良いので、雇われることが望ましいと思う。

・全国の国立公園と比較すると、奄美は比較的开发圧が強い地域と思われる。しかし、自然の復元力も強く、基本的に開発圧による希少種の消失といった問題については、あまり深刻さは感じない。

<域外保全と再導入>

・そもそも奄美全体の希少植物の実態調査がなされておらず、マップも存在しない。したがって、どの程度、問題が深刻であるか、実証的なデータがない。個人的な感想だが、広く知られていなくても、「あるところにはある」ので、あまり深刻な状況にはないという印象である。

・従って、「再導入」を早急に進めるべき時期とは思えない。研究者は問題ないというが、病原菌が入ったり、遺伝子汚染のリスクはないのか。また、そういった問題が仮にクリアされているとしても、やはり「手つかずの自然」でなくなるという面はあり、そのことに抵抗感を示す島民は多い。

・また、再導入に反対するのは、そのサイトの地権者とは限らない。むしろ、この問題についての重要なステークホルダーは、実質的に保全活動を現場で行っている、ボランティアや愛好家の人たちである。

・いずれにせよ、「域内保全あつての域外保全」である。やはり域外保全は「緊急避難」が主であるべきではないかと思う。

- ・とはいえ、現状、何もしなくて良いとは思わない。盗掘との関係で難しい面もあるが、ある程度のマップは作って行政が管理する時期ではないか。
- ・また、希少種保護をするにも、植物園がないのは問題ではないか。作るべきではないか。

(2) インタビューに関する科学技術社会論的分析

インタビューの結果、いくつか重要な論点が浮かび上がった。これらに関して、科学技術社会論の知見を踏まえ、議論してみたい。

a) 二つのギャップ

まず、島に暮らす人々と、本土の人々では、考え方や認識のギャップが大きいことが分かった。これは主として、二つの意味での「ギャップ」から成る。一つは、言うまでもなく地域と密接にかかわりながら暮らす人々の感覚と、奄美大島を遠くの一地域と捉えている本土の人の、認識の違いである。「地域との関わり方」の違いによって、価値の重点がおのずと変わってくるのは、自明のことだろう。

より重要なのは、そのような対象とのコミットメントの違いが、自然認識に対しても影響を与えているという点である。

本土の専門家は、自らのいわば「専門性のフィルター」を通して、奄美の自然の中から、関心のある対象を拾い出して検討する傾向があるが、現場で活動する人々にとっては、奄美の自然はそれ自体が一体的な存在であり、さらには、単なる自然のみならず、歴史的な意義や、社会的な意味、あるいは広い意味での政治性と結びついている。従って、その一部だけを取り出して分析・検討する態度は、科学的な検討としては当然の手続きであるものの、ともすると「奄美のことが分かっていない」と捉えられてしまう一因になる場合があると考えられる。いったん、このようにステークホルダーから見なされてしまうと、なかなか信頼関係を構築するのは難しいかもさいれない。

b) ローカルナレッジとしての奄美の希少種保護

科学技術社会論においては、このような地域における自然認識と、科学的な検討のギャップについての報告が、多数なされている。これは典型的に、「ローカルナレッジ」をめぐる問題と呼ばれるものであろう。それはすなわち、人々がそれぞれの生活や仕事、その他日常的実践や身の回りの環境について持っている知識のことであり、「生活知」ないし「現場知」とも訳されている。この種の知識は、普遍的な科学的知識の枠組みと、時には対立するものであるが、決して非合理的なものではない。むしろ、特定の地域や実践の現場の文脈に固有の、人類の歴史においてはよりありふれたタイプの知識であると考えなければならない。

これを本研究の事例に当てはめて考えてみたい。たとえば、ある種の希少な植物の群落が、どのような時期に、どこの岩場に花を咲かせるか、そして、その事実をどのような範囲の人々が共有するのが、この希少種を保護する上で合理的か、といった知識は、一般的な科学的知識とは異なる性格と様式を持っている。このような知識は、奄美大島では、たとえば「盗掘防止への努力」「ボランティアとしての士気と誇り」「希少種を保護してきた人々の歴史的経緯」といったものと深くかかわっており、それらの文脈を無視しては、意味をなさない。

このように、ローカルナレッジは、文脈を超えた一般性を持たず、また文脈を共有しない外部の者には通常は知られることのないタイプの知識であるが、元々は文化人類学者が発見した概念である(Geertz, 1983)。これを科学技術社会論においてはさらに議論を進め、一般的な生活知のみならず、「科学知識」も一種のローカルナレッジと見なし、人々の生活知と同じ資格で捉えることにより、現象を適切に記述できるとされている。

このように、ローカルナレッジとしての特定地域の自然に関する知識と、普遍的な生態学の知識は、必ずしも整合的であるとは限らない⁷。再導入をめぐる認識のギャップは、このような背景もあって、生じたと考えられるのではないか。

c) 研究者への不信

今回のインタビュー調査で明らかになったことの一つとして、大きな「専門家不信」がある。その背景には、実際に、モラルが低い研究者が存在したという点があるが、やはりこの問題は重い意味を持っていると考えられる。

なぜなら、このような行為は、一般的な意味で「研究倫理に反していること」以上の、深い不信感をステークホルダーに対して与えてしまった可能性があるからだ。

一つは、研究者の盗掘が、奄美の自然、という一体的な存在を、「研究上のエゴイスティックな関心」という側面だけで、文字通り「切り取る」行為であり、奄美という全体的な文脈を壊す、非常に「失礼な行為」であったという点がある。さらに言えば、島民の多くが普段から感じている、本土と奄美の間の社会経済的・政治的なギャップを、その収奪行為に重ねて見てしまった可能性もあるかもしれない⁸。

現実には、そのような非倫理的な研究者は少数であるのかもしれないが、それでも、一度失われた信頼を取り戻すのは容易ではないだろう。原子力発電の問題などでもわかる通り、先端的な技術と地域の人々が強く対立する他の事例でも、同様のことが観察されているからである。

従って、この点に対処するためには、何か新たな方策をとることも必要かもしれない。

d) 人々にとっての「奄美」の多様性

もう一点、興味深いこととして、奄美大島の自然保護活動が、かなり分散的に行われてきたという点を指摘できる。奄美大島は決して小さい島ではないものの、本土の人間からは、一つの一体的な自然に見えるのではないか。ところが実態としては、自然保護活動は動物や植物の種類によって細かく分かれており、全体を統一的にまとめている保護団体は存在しない。植物であっても、シダが好きな人と、ランが好きな人は別であったりする。これは、一見すると先ほどの「奄美の一体的な理解」という話と矛盾するように見えるかもしれないが、そうではなく、それぞれのアクターにとっての「自然・社会・歴史の複合体としての奄美」が、多元的に並立していると考えられるべきであろう。

従って、同じ奄美の自然保護団体といえども、その目標や理念において、必ずしも共通理解があるわけではない。当然、重視する生物種も異なるため、時には自然保護活動において互いに利害対立が起こることもあるらしい。これは、本研究の沖縄本島や屋久島など南西諸島の他の島嶼部との比較研究が必要かもしれないが、奄美大島の地理的条件や歴史的経緯と関係している可能性もあるかもしれない。これ自身、興味深いテーマではあるが、本研究の趣旨からは離れるので、ここでは指摘するにとどめたい。

いずれにせよ、奄美大島の人々の自然保護に対する考え方は、一枚岩ではなく、多様な考え方や価値観が多層的に重なった、複雑な存在であるということを、忘れるべきではないだろう。

⁷ むろん、自然科学の中でも、生態学はもともと、フィールドと結びついて発展してきた学問であり、その意味では、たとえば物理学や化学などと比べると、ローカルナレッジと親和的であるといえるだろう。しかしそれでも、生態学が普遍的なサイエンスを目指す以上、ローカルな文脈を脱色していくことは不可避であり、それゆえに、「ローカルなもの」との緊張は、生じうるものだと覚悟しておく必要があるだろう。

⁸ 奄美大島は古くは琉球王国に支配され、後に島津藩に支配される。そのような長い被支配の歴史は、島に住む人々の感性や社会観に、さまざまな影響を与えていると考えられる（「奄美学」刊行委員会編 2005）。

e) 信頼の再構築に向けて

以上、主としてインタビュー調査に基づき、科学技術社会論的な視点も含め、考察を行ってきたが、それでは今後、本土の研究者と現場のステークホルダーの間で信頼を再構築する上で、どのような対応をするのが適切か、いくつか提案を行ってみたい。

まず、先に述べたように、現地のステークホルダーは、奄美の一部の自然を切り取って科学的に分析するという態度を嫌う。それは、奄美大島の自然は一体的なものであるという日常的な感覚に反するからである。さらには、自然はそれだけで存在するものではなく、人間社会との相互作用によって、自然として立ち現れるともいえる。従って、社会的・歴史的な文脈と、自然的な文脈を切り離して考えることは、現地の感覚からは乖離してしまうことになるだろう。

そこでまず考えられるのは、本土の研究者も、奄美の自然や歴史についての「物語」を積極的に共有することである。これは何も難しく考える必要はなく、まずは現地の人々の話を聞く、ということが大きな意味を持つ。もちろん「聞いているふり」では駄目であって、実際に、奄美の自然・歴史・社会の関係性について、関心をもち、理解を深めるということが大切であろう（「奄美学」刊行委員会編 2005などを参照のこと）。

たとえば、自然保護活動を行っているアクターに加え、奄美の歴史に詳しい現地の郷土史研究者や教育者などを招き、何か特定の生物をテーマに多角的に議論するようなシンポジウムを開く、といったことは有益かもしれない。この会合を主催するのは、本土の生態学研究者ではないほうが良いだろう。理想的には、奄美大島（少なくとも鹿児島県内）に通常の活動の基盤を置く組織や個人とすべきである。行政機関であっても良いが、そうでなくても良い。生態学者も、その会合に一人のパネリストとして参加させてもらう、ということが望ましいだろう。

また、現地にとって重要な問題に寄り添うということも大切である。すでに述べた通り、現地で最大の問題は「盗掘」であるから、これを解決するための、何か科学的・技術的なサポートができないか、という視点から、関係性を作っていくということは適切だろう。

また逆に、奄美全体の自然保護活動の統一性・連携性が低いという点については、場合によっては、本土の研究者など、外部のアクターからの働きかけが有効かもしれない。多様な視点から活動を進めていくことはもちろん推奨されるべきだが、横の連携があったほうが、さまざまな意味で活動の価値を高める可能性があり、検討に値する課題といえるだろう。

その意味でも、希少種マップを行政、特に環境省が主導して作成することは有益であると考えられる。その場合、最も重要なのは、具体的な希少種のスポットが、不用意に漏洩しないような仕組みを必ず確保することである。これは地元のボランティアやステークホルダーの協力を得る上で、不可欠の条件となる。このような技術は、ITやモバイル・システムなどを活用することで実現可能とも考えられるだろう。

また、希少種を守るうえで、奄美大島に公的な「植物園」がないことが問題である、という指摘もあった⁹。予算の問題などもあるので、奄美自然保護官事務所など、既存の施設に追加的に付設することが現実的かもしれないが、ともかく、そのような場を構築することによって、生物種の保護に寄与するのみならず、自然保護活動に携わっているステークホルダーの人たちのコミュニケーションに関する「ハブ」としての役割も、期待できるかもしれない。これは、比較的横のつながりが薄いとされる奄美大島の自然保護活動においては、有益であると考えられる。

いずれにせよ、現地のステークホルダーと、何らかの価値を一緒に作り出していく「協働の関係」を重視することが大切である。

⁹ 本来、法的に自宅栽培が許されていない希少種を、知ってか知らずか、趣味で勝手に栽培・繁殖させている一般市民が、実は意外に多いという。そのようなケースが見つかった場合、勝手に野に戻すわけにもいかないが、回収して育てるための適切な場所もないため、困る、との指摘もあった。場合によっては法的な例外規定を要する問題かもしれないが、そのようなバッファとして植物園は、やはり必要ではないだろうか。

しかし最も重要なのは、ここまで述べてきたさまざまな活動を、決して単なる「研究推進のための手段」と考えてはならない、という点である。シンポジウムや研究会を開いても、結局、「再導入ありき」ならば、現場の人たちは心を開くことはないだろう。それは極端なことを言えば、「また本土の人間がこの島を支配しようとしている」という姿にうつるからだ。それが誤解だとしても、巧妙に意図を隠蔽して活動をしているように見えてしまったならば、信頼関係をさらに毀損する可能性すらある¹⁰。今は再導入の必要がないと言っている現場の人たちの意見や考え方をよく聞き、「少なくとも現状では必要ないのかもしれない」という可能性を否定することなく、できるだけ多くのステークホルダーと、まずはオープンなコミュニケーションを重ねていくことが大切であろう。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

絶滅の恐れのある生物に対する、日本社会における考え方についての詳細なアンケート調査は、管見の限りほぼ例がない。その基礎データが集まったことは社会科学的にも有意義である。

特に、「再生研究」および「環境への再導入」は、いずれも、一般に「植物に関して推進」すべきとの意見が強いこと、また動物においては、特に大型哺乳類や爬虫類については、環境への再導入は反対が強いことが明らかになった。

また、都市部は基本的な自然観や再導入に関する考え方に関して、おおむね共通する傾向にあるが、島嶼部はそれらの隔たりがむしろ大きいことが明らかになった。例えば石垣島が再導入に対して、全体的に否定的であるのに対して、奄美大島は植物については肯定的だが比較的動物については否定的であるといった、違いも明らかになった。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

奄美大島におけるステークホルダー・インタビューを通じた成果：

奄美大島の有識者や保全関係者は横の連携が弱く、かつ研究者に対して懐疑的であり、手つかずの自然を維持する指向が強い

奄美大島におけるステークホルダー・インタビューを通じて、奄美大島の自然保護活動、とりわけ「再導入」を進めようとした場合に問題となる、いくつかの重要な課題が明らかになった。

まず、現地の人々は、少なくとも植物については希少種について危機的状況にはないと認識が共有されていた。そのため「域外保全・再導入」などの保護施策の必要性を感じておらず、むしろ圧倒的に「盗掘問題」を問題視していることが分かった。

再導入はむしろ遺伝子汚染などのリスクや、「手つかずの自然」が壊れることへの警戒感が高いといえる。またその背景には、これまでの一部の非倫理的な研究者による不正行為に起因する信頼の毀損、また本土の研究者らが、奄美の自然を一体的なものとしてとらえていないことへの不満があることが分かった。

従って、仮に再導入を進めていくとすれば、現地声を踏まえ、同時に盗掘問題に対する対応を強めることや、盗掘問題対策について本土の研究者が寄与することは有効であると考えられる。また奄美の自然や文化の一体的な理解を進めることが求められることから、自然のみならず文化や社会などの側

¹⁰ この種の「ボタンの掛け違い」は、いわゆる迷惑施設の立地に関する地元とのコミュニケーションでもしばしば生じてきたことである。

面からのパネラーを含めた、特定のアイコン生物などをテーマとするシンポジウムを開くことが有益であると考えられる。さらに、希少植物保護の拠点としての公的な「植物園」をなんらかの形で設置することができたならば、横の連携が弱い奄美大島における民間の自然保護活動をつなぐ「ハブ」の役割を果たしうることが、示唆された。

また、地域の人々の、研究者に対する信頼を高めるためにも、フィールドを対象とする研究者に対する、基本的なモラルの徹底も、求められることかもしれない。

一方で、盗掘を恐れるあまり、基本的な「希少種マップ」すらも存在しないことは由々しきことであろう。これは科学的な合意形成を行う基盤が欠如していることを意味するため、今後は行政が音頭をとり、ITなどを駆使する形で、十分に秘密が守られる形での「希少種マップ」を作るためのプロジェクトを開始すべきであることが示唆された。

主として全国アンケート調査等による成果

まず、専門家へのインタビューなどにより、本分野に関する社会科学的・人文科学的研究が手薄であることが、改めて確認された。本分野は、学問分野と学問分野の境界領域にあたるため、参画する研究者の層が薄くなりやすいと考えられる。従って、このような境界的な問題について学際的研究を推進する意義が明らかになった。

また、全国アンケート調査により、絶滅が危惧される生物への対策についての、国民の意識が可視化されたといえる。これにより、いかなるタイプの再生や再導入のプロジェクトが支持されやすいかが、明らかになった。たとえば、絶滅が危惧される生物では、鳥類やほ乳類などの対策が支持されやすい。しかし一旦絶滅した後の、再生・再導入の研究やプロジェクトに対しては、基本的には動物よりも植物に対して、市民の支持が大きい。さらに、おおむね過去 50 年程度の範囲で絶滅した種については、再生・再導入の研究やプロジェクトが、市民によって比較的 support されやすいことも分かった。

加えて、生物種に対して市民が元々抱いている「イメージ」も、再生や再導入の是非についての判断に影響していると考えられる。

これらの結果は、再生や再導入に関する研究やプロジェクトを進める上での、リスクコミュニケーションや、合意形成において寄与するものと思われる。

また、これらの問題に主体的に責任をもって取り組むべきセクターは、国や都道府県であると考えられる人が多いことも分かった。実際には、市町村や地域の協力が不可欠であると考えられるのだが、そうは考えていない人が多い。従って、ローカルなレベルで希少種の問題に取り組むことの理解増進活動の必要性が、改めて浮き彫りになったといえるだろう。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表（学会等）

特に記載すべき事項はない。

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 神里達博『朝日新聞』 「(月刊安心新聞) ヒアリ対策 リスクの全体像、捉えよう」
(2017年7月21日)

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) IUCN: (2013). *Guidelines for Reintroductions and Other Conservation Translocations*.
- 2) 本田裕子: (2010). 「ツシマヤマネコ保護に関する住民意識 : 対馬市全域住民を対象にしたアンケート調査から」, 東京大学農学部演習林報告 (122), 41-64.
- 3) 内藤和明・菊地直樹・池田啓: (2011). 「コウノトリの再導入 : IUCN ガイドラインに基づく放鳥の準備と環境修復」, 保全生態学研究, 16(2), 181-193.
- 4) 本田裕子: (2016). 「国内で実施・計画されている野生復帰事業に対する住民の意識の特徴」, 環境情報科学論文集 ceis30(0), 285-290.
- 5) 長田啓: (2013). 「トキ野生復帰のこれまでと今後 : 持続可能な農村地域の構築に向けて」, ワイルドライフ・フォーラム, vol.17, iss.2, 5-7.
- 6) 本田裕子: (2015). 「トキの野生復帰事業の展開に伴う住民意識の変容」, 農村計画学会誌, 34(Special_Issue), 297-302.
- 7) Jeremy T. Bruskotter, Eric Toman, Sherry A. Enzler, Robert H. Schmidt; (2010). “Are Gray Wolves Endangered in the Northern Rocky Mountains? A Role for Social Science in Listing Determinations” , BioScience, Vol.60, Iss.11, 941-948.
- 8) 今井葉子, 角谷拓, 上市秀雄, 高村典子: (2014). 「市民の生態系サービスへの認知が保全行動意図に及ぼす影響 : 全国アンケートを用いた社会心理学的分析」 『保全生態学研究』19(1), 15-26.
- 9) Clifford Geertz : (1983). *Local Knowledge: Further Essays in Interpretive Anthropology*, Basic Books.
- 10) 「奄美学」刊行委員会編: (2005). 『奄美学—その地平と彼方』南方新社.

III. 英文 Abstract

Problem Solving and Establishment of a Base for Restoring Natural Habitat of Rare Japanese Plant Species

More than 2,000 endangered species of plant are found in Japan, comprising more than half of the country's total of 3,676 endangered species. Government attempts at *in-situ* conservation have been made for several plant species; however, in most cases these efforts were hampered by challenges with re-introduction, the growth of healthy individuals and/or the reproductive propagation of successive generations. Here, we examined four topics to contribute to successful *in situ* conservation, mainly focusing on the Ogasawara Islands and/or Amamioshima Island in Japan: 1. Individual-level genetic identification contributed to the selection of appropriate individuals to be used to configure *in situ* conservation populations with high genetic diversity, as well as to determine management units within a species. For this objective, microsatellite analyses and/or Single Nucleotide Polymorphisms (SNPs) data using MIG-seq were subjected to STRUCTURE analyses, Principle Coordinate Analyses and phylogenetic analyses as well as estimations of the genetic signature analyses of populations; 2. Individual-level measurements of abiotic environments in growth habitats were conducted using small data loggers, and were successful in the long-term monitoring of environmental factors such as light quantity, soil moisture content, and temperature. Measurements of the quality and quantity of light that can be used for photosynthesis were also conducted in each natural habitat, suggesting inappropriate light conditions (too dark or too much light), which would be a critical factor for the survival of each endangered plant; 3. Analyses of the Eumycetes (true fungi) flora of habitat soil and plant root systems were conducted for three species in the islands of Ogasawara. We succeeded in identifying symbiotic fungi that would prompt plant growth in two endangered species. This finding and its application to other endangered species would contribute to the regulation of soil quality and plant growth in *in situ* and *ex situ* conservation; 4. The social framework for protecting endangered plant species was surveyed among general and local citizens of Japan and Amamioshima Island, respectively. Citizens of Amamioshima generally preferred untouched nature over protection management (including the re-habitation of propagated endangered plant species) and tended to distrust researchers from outside the island. In addition, experts who participated in nature protection were inclined to form close groups, and information sharing between groups was rare, posing a possible hurdle for nature protection management.