

卒業論文

題名 榛名山北部の里山地域に生育する希少植物種の
保全方法に関する生態学的研究

学籍番号 12602040

氏名 田村 一志

指導教員名 石川 真一 教官

平成 28 年 1 月 20 日 提出

概要

里山では長期間にわたって定期的な人為的攪乱によって半自然が維持されてきた。その結果植物の多様性の高い生態系が保たれてきた。しかし、1960年代以降の高度経済成長とともに、土地開発や高齢化、人口流出等により里山地域の環境は大きく変化した。これにより生育する動植物のなかには絶滅の危機にさらされる種も多くなった。現在は多くの地域で持続可能な利用形態が失われ、地域の生物多様性に悪影響が生じている。

急速に進む生物多様性の損失を止めるためには、保護地域などによって原生的な自然を保護するだけでなく、世界各地の二次的自然地域において、自然資源の持続可能な利用を実現する必要があることから生物多様性条約第10回締約国会議（COP10）でSATOYAMA イニシアティブと呼ばれる政策が提案された。この政策の実現のために、里山地域の種多様性がいかにして形成され、維持されているかの解明が急がれる。

本研究では、里山の植物種多様性がどのように形成されるのかを、長期間里山として維持管理されている地域（榛名山北面、県立榛名公園）において、植物相調査、環境調査を行って解明する。また代表的な絶滅危惧植物・希少種（絶滅危惧種 A、カセンソウ、コウリンカなど）について、現地調査、発芽実験や生長解析などをおこない、発芽・生長特性の解明を行った。これらの結果をもとに、里山植物の科学的な保護・保全方法を考察する。

本研究により、県立榛名公園ではコウリンカ、キキョウ、エゾカワラナデシコといった絶滅危惧種・希少種 6 種を含む計 74 種の生育が確認された。

前年の調査区域を拡大して行った今回の調査では、確認された多くの絶滅危惧種・希少種において新たな個体が数多く確認された。しかし、ビッチュウミヤコザサの繁茂する地域に生育する種や外来種の生育も確認されていることから駆除およびモニタリングを続けていくことが不可欠である。

発芽実験の結果から、県立榛名公園に生育するキオンは、最終発芽率が10/6℃で最もよい値を示したことから低温が発芽適温であると考えられる。また、同地域で生育するエゾカワラナデシコ・ハンゴンソウ・クサレダマについて冷湿処理による明らかな発芽促進効果が確認されたことから、これらの種は冬の経験によって種子の休眠が解除され、発芽が促進されるものと考えられる。将来的に地球の温暖化が進行することで、種子の休眠解除が阻害され発芽しにくくなるなどの危険性が高まると考えられる。

光条件を変えた生長解析では、エゾカワラナデシコ、クサレダマ、キオンの3種に共通する生長特性として、相対光量子密度が100%の条件で最も生長が良く、3%では著しく成長が阻害されることが明らかになった。これら3種の生育する県立榛名公園では、ビッチュウミヤコザサが繁茂している地域があり、今後これらの拡大によって被圧された場合、生長阻害を受けると推察される。

本研究で確認された良好な環境を有する地域も含め、私たちの生活する地球では、現在進行形で生物多様性が危機的な状況へ追い込まれている。それらは過剰な開発によるオーバーユース、人口流出などによる里山地域の管理放棄であるアンダーユース、外来種の侵入、温暖化問題といった人間活動によるものが原因である。絶滅危惧種や・希少種の保護は単なる生物の保護という枠組みを超えて、生態系サービスという私たちが生きていくために必要不可欠な自然からの恩恵を守ることである。社会全体でこの問題に取り組んでいくことが重要である。

目次

はじめに.....	3
里山とは.....	3
里山と多様性.....	3
里山林と水田.....	5
SATOYAMA イニシアティブ.....	6
里山の衰退.....	7
生物多様性.....	9
3つの多様性.....	10
生態系サービス.....	11
生物多様性の危機.....	12
第六の大量絶滅時代.....	13
絶滅の危機の指標となるレッドデータブック・レッドリスト.....	14
生物多様性ホットスポットの日本.....	15
生息地の孤立・分断化問題.....	15
.....	16
フィールド科学の有効性.....	20
研究の目的.....	21
調査地概要.....	22
材料及び方法.....	23
植物相・絶滅危惧種個体数調査.....	23
発芽率の冷湿処理・温度依存性実験.....	23
異なる環境条件下における栽培実験.....	25
光強度を調整した栽培実験.....	26
生長解析.....	26

結果及び考察.....	29
植物相・絶滅危惧種個体数調査.....	29
発芽の冷湿処理・温度依存性.....	30
異なる相対光量子密度下で栽培した植物の生長解析.....	34
結論.....	37
謝辞.....	39
引用文献・引用 WEB ページ.....	40
写真・表・図.....	44

はじめに

里山とは

里山というのは、学術用語というよりは慣習的用語である。所三男著の『近世林業史の研究』によれば、江戸時代の1739（宝暦九）年に、寺町兵右衛門が著した『木曾山雑話』の中に「村里家屋近き山を指して里山と申し候」と書いてあるのが紹介されている。さらに、1905（明治三八）年に農商務省山林局が発行した『單寧材料及樹樹林』の中に、「深山」に對置させて「里山」が使用されている。地方によってさまざまな呼び方が存在し、里山のほかには四壁林、地続山、里林などが知られており、いずれも集落に近い農用林野をさしている（犬井 2002）。

生態学者の田端英雄氏は『里山の自然』の中で、トンボ類やカエル類の産卵場所や生活場所を調査した結果、「林やそれに隣接する水田や畑と畦、ため池や水路などがセットになった自然を里山と呼ぶ」としている。すなわち、本来の農用林野という狭義の里山だけではなく、それと隣接し深い関係を持つ耕地や水路や屋敷地も含めた農村環境を指している。それは里山の生物にかぎらず、人間の生活や農業、民話や童話の舞台になっているのも、このいわば「里山地域」である（犬井 2002）。

以上のように、一口に「里山」といっても、人によってその範囲が異なることがある（恒川 2001）。

里山と多様性

自然生態系では、攪乱はもっぱら火山の爆発や巨大地震などの地殻変動、洪水や極端な乾燥、湿潤といった気候変動など、自然の力によってもたらされる。こうした攪乱は人為生態系である里にも加わる。だが里に加わる攪乱の力の最たるものは人の活動である。人は、哺乳動物としては体つきも大きくなく、裸では生態系のトップの座を占めることはできない。ところが人は自然現象を利用して、あるいはそれをヒントにして、自らの手で生態系に攪乱を加えて里を作り出した（佐藤 2005）。

生物多様性の保全については、我が国における保護上重要な植物種及び群落に関する研究委員会種分科会（1989）によって植物のレッドデータブックが刊行され、里山に生育する植物のなかにも絶滅危惧種が多いことが明らかになったことから、里山が生物多様性の保全に対して大きな役割を果たしていることが認識されるようになった（亀山ほか、1994）（倉本 2001）。

里やまの景観は、地形や水系の制約のうえに農作業の利便を考慮して定められた植生配置であり、もちろん野生生物の保全を意図したものではない。しかし、鎮守の森などの老齡

林を核とし、その周辺に若い二次林を配置して外部からの周縁効果を軽減しながら、さらにそこから耕作地に樹林帯を伸ばすなど、野生生物にとっても好都合な植生配置がみられる。鎮守の森の神秘性あるいは水源涵養機能を維持しようとする知恵が、結果として地域の生物多様性を守ってきた（石井 2005）。

里山には人が利用するために様々な遷移段階の自然（遷移系列）が存在し、それらは人が恒常的に働きかけを行うことにより維持されてきた。すなわち、里山の自然は、人為的な攪乱と自然の回復力のバランスという人と自然の相互作用により成立してきた半自然であり、二次的な自然である（石井 2005）。

採集や火入れによる適度な攪乱は、光をめぐる競争に強く、放っておくと大型になる植物を取り除き、地表面まで明るい環境を広げる。そのため、絶滅危惧種 A のような草丈の小さい植物や、それらと共生関係にある生物など、多様な生物がそこで生きていくことができるようになる。また、採集や火入れは、植物体や落ち葉などの植物遺体を取り除くことによって、土壌から窒素やリンなどの栄養塩を減らし、貧栄養で清潔な状態を維持する効果をもたらす（鷲谷 2011）。

Whittaker (1960) によると、特定の空間における種の多様性の要素は、 α 多様性、 β 多様性、 γ 多様性の 3 つの概念で整理することができる。 α 多様性は生育場所内の多様性、 β 多様性は生育場所間の多様性、 γ 多様性は地域間の多様性を意味する。 α 多様性は、コナラ林、ススキ草原、溜池など、里地・里山を構成するモザイク的な土地利用を構成している二次的自然の均質なパッチ、すなわち、比較的均質な生育場所の内部にみられる多様性、 β 多様性は、異質なパッチでは異なる種が生育することによる多様性、 γ 多様性は、同じような森林や草原でも、地方が異なれば地史的、生物地理的に生物相が異なるという意味での多様性を意味する。

里地・里山における植物の種の多様性をもたらす要因として第一にあげなければならないのは、植物資源の採取がもたらす攪乱（植物体を破壊する作用）とストレス（光合成・有機物生産を抑制する作用）による効果、すなわち、植物の α 多様性を高める効果である。一般に、比較的均質な生息・生育場所の内部においては、生物間の競争（生態学では競争を共通の資源の奪い合いと定義する）の結果として競争力の大きい種が資源を独占して優先するため、それ以外の種が排除されて多様性が低下する。しかし、もし、適度な攪乱やストレスが作用すれば、すなわち里山では人間が刈り取ったり落葉をもちだしたりすることで競争力の大きい種の生育が多少とも抑制されれば、競争による排除が起らずに多様な植物が共存できる。それは餌や営巣場所などの多様性を高めることで動物の多様性を高めることにもなる（鷲谷 2001）。

里山林と水田

里山の生物多様性を構成する要素として重要な役割を担っているのが里山林と水田である。里山には、薪炭材や落葉落枝の有機物肥料を採取するための薪炭林や農用林が広がっていた。里山林と言われるのはこのような林またはその痕跡を持つ林である(藤森 2003)。里山林は人間が手を加えることで形成される二次林であり、おもに落葉樹林やマツ林で構成される。クヌギやコナラの二次林は、陽樹林の段階で、人間が手を加えつづけることによって植生遷移を中断させる「偏向遷移」によって歴史的に維持されてきたものである(犬井 2002)。クヌギやコナラは伐採した切り株から萌芽が出てきて、数年で低木林に生長する。大きな根が生き残っているので、ドングリなどの実が発芽して(実生という)生長するのに比べれば、格段に早く森林へと回復する。こうした森林への更新方法を萌芽更新といっている。里山のクヌギやコナラの林は薪炭生産等のために、萌芽更新によって15~20年周期で伐採されてきた(犬井 2002)。

里山に暮らす人々は、里山林に入り、林床の落葉などは採取して農業用の堆肥に、粗朶などは燃料として用いていた。また、キノコなどの食料も得ることができ、里山林は農家の生活を支える重要な役割を果たしていた。つまり、里山に暮らす人々は里山林に依存しており里山林の管理がしっかりと行われていた。

里山林では、各階層に多くの植物種が含まれ、全体として植物の生物多様性の高い生態系を構成している。これは森林生態系の特徴のひとつである立体的な植生の構造により、光や温度、湿度、土壤水分含量などの環境因子の勾配が系内に存在するからである。たとえば、光は林冠で強く、下層ほど弱いという勾配が存在する。逆に、湿度は林床付近で高く、林冠で低い(石井 2005)。

また、集落の周りには伐採されたばかりの林地や、生育の段階の途中にある林地などがモザイク状に存在していたので、さまざまな種の動植物たちが生育することが可能なので、「種の多様性」がたくましくして保持されていた(犬井 2002)。

水田の管理も規則正しく繰り返されてきた。まず「田起こし」により水田の表面は掘り返され、春になると水が導入される。「代掻き」により、それまで地表に生えていた雑草などは土中にすき込まれ、その後、「田植え」が行われる。イネは「分けつ」をしながら育つ。農家によってはここでいったん水田を乾かす「中干し」を行うこともある。収穫前には水田からすべての水を落とし、翌年まで水は導入されない。これを「落水」という。このように湛水期と非湛水期を繰り返し、水の条件が大きく変化するため、水田では陸上と水辺の多くの生物が見られることになる(内山 2005)。

宮脇(1960)は1954~58年の夏に、北海道から琉球諸島にかけての水田雑草群落を調査している。宮脇が示した群落構成種には、デンジソウ、ナンゴクデンジソウ、サンショウモ、アカウキクサ、ミズキカシグサ、オオアブノメ、カワヂシャ、アギナシ、スブタ、マ

ルミスブタ、ミズアオイ、トリゲモといった絶滅危惧植物が確認された。これらの資料から、農業の近代化が始まる以前の水田では、現在の絶滅危惧種もごく普通の水田雑草として生育しており、またイネが生育する期間の水田が多様な水生・湿生植物の生育地であったことがわかる（下田 2003）。

水田は農村の中に独立して存在しているわけではない。水田に水を引くために、河川やため池から水田まで、網の目のような水路がつくられている。水田の周りには畦や土手がある。山間部であれば、水田の背後に山林があり、また農家が屋根をススキで葺き、牛馬を飼っていた時代には、水田と山林の境界には採草地もあった。このようなさまざまな環境も、水田とともに、農家が長い間、大切に管理してきたものである（下田 2003）。

水田の生物は、このような周辺環境をも同時に利用したり、あるいは一生の間の時期により、水田と周囲をいったりきたりして過ごしているものも多い。

このように水路にはさまざまなものがあり、多様な水生生物のすみかとなっている場合も多い。動物にとっては、水田地帯の水路は生息場所、繁殖場所、餌場であり、水田、河川、ため池などさまざまな水域を結ぶ移動経路である。灌漑だけ水が流れて水域になる小さな溝も、動物の生息場所や繁殖場所に利用され、恒久的な水路の動物相の維持にかかわっていることがわかっている（片野 1998）。

植物にとっても、水路は生育場所であるとともに、種子や孢子や植物体が運ばれる場所でもある（下田 2003）。

SAToyAMA イニシアティブ

日本の里地里山のように農林水産業などの人間の営みにより長い年月にわたって維持されてきた二次的自然地域は世界中に見られる。しかし、現在はその多くの地域で持続可能な利用形態が失われ、地域の生物多様性に悪影響が生じている。急速に進む生物多様性の損失を止めるためには、保護地域などによって原生的な自然を保護するだけでなく、このような世界各地の二次的自然地域において、自然資源の持続可能な利用を実現する必要がある（環境省 HP）。

SAToyAMA イニシアティブは、「生物多様性の保全」と「持続可能な利用」という二つの目的を同時に達成するための土地や自然資源の利用・管理のあり方を考え、世界各地での実践を推進していくことを目指している（渡辺 2010）。SAToyAMA イニシアティブでは、自然と虚勢的な社会のモデルとして、日本の里地里山における伝統的な自然-人間関係に注目している。ただし、このイニシアティブは日本の里山ランドスケープを他の地域に押し付けるものではなく、各地域の特徴を尊重しながら、国内外の自然共生の知恵や事例、課題を調査、収集、共有し、それらをふまえて持続可能な自然資源の利用・管理を実現する

ための長期目標 (Vision)、行動指針 (Approach)、視点 (Perspective)、そして、各地域の実情に応じて効果的に適用するための手順や方法を、多くの国々や多様なセクターの参加のもとに検討し、世界各地域での実践を推進していくものである (渡辺 2010)。

SATOYAMA イニシアティブの長期目標は、生物多様性を適切に保全することにより、自然の恵みを将来にわたって安定的に享受できるような、自然のプロセスに沿った社会経済活動 (農林水産業を含む) の維持発展を通じた「自然共生社会」の実現である。

また、「自然共生社会の実現」という長期目標にむけた道程として、次の3つの行動指針を掲げている。

- 多様な生態系サービスの安定的な享受のための知恵の結集
- 伝統的知識と近代科学の融合
- 新たなコモンズ (共同管理のしくみ) の構築

さらに、上記の行動指針に沿って、それぞれの地域において、持続可能な利用と管理を実践していく際には以下の5つの視点が重要と考えられる。

- 環境容量・自然復元力の範囲内での利用
- 自然資源の循環利用
- 地域の伝統・文化の評価
- 多様な主体の参加と協働
- 地域社会・経済への貢献

(環境省パンフレット SATOYAMA イニシアティブ自然共生社会の実現を目指して)

こうした取り組みをさらに国際的な協力のもとで進めるため、2010年10月に愛知県名古屋で開催された生物多様性条約第10回締約国会議 (COP10) において、世界中から、政府、NGO、コミュニティ団体、学術研究機関、国際研究機関、国際機関等多岐にわたる51団体 (現・126団体) が集い、SATOYAMA イニシアティブ国際パートナーシップ (IPSI) を創設した。IPSIは、情報共有や意見交換など多種多様な活動の場を提供するもので、お互いの活動の足りない部分を補うなど、効果的に取り組みを進めることが期待できる (SATOYAMA イニシアティブ国際パートナーシップ HP)。

里山の衰退

人々が適度に管理をすることによって生物多様性を高く保ってきた里山地域であるが、今やその多様性は大きく失われつつある。やはりこれにも里山林や水田の与える影響が大きい。

まず考えられるのは、クヌギ・コナラといった典型的な里山林の人工造林による針葉樹林への転換である。日本の森林は、第二次大戦による天然林の乱伐、戦後1950年代から始

まった人工造林化、さらに奥地林伐採と拡大造林によって、全森林面積のおよそ40%に相当する1,000万haの森林がスギ、ヒノキ、カラマツなどの針葉樹林に転換された(石井2005)。落葉広葉樹は低質広葉樹と決めつけられ「前生樹処理」のために伐採され、経済性の高いヒノキやスギなどの針葉樹が植林されていった。国や県、公団・公社、町などと分収林契約を結び、拡大造林がすすめられた。このような拡大造林は、共有の里山だけでなく、かつての山藪の飼育林として使われていた集落に近い私有の平地林の里山も、同様の傾向が見られる(犬井2002)。

このような針葉樹人工林では、野生哺乳類のほとんどが生息できなくなってしまった。ブナ、ミズナラなどの堅果類や漿果類を主要な餌とするクマにとって餌不足と越冬場所の不足のため個体数減少や行動に変化を与え、またサルも餌不足のために農地に侵入し農作物被害発生につながっている(三浦,1999;室山,2003)。さらに、近年ではこのような森林で間伐などの手入れが実施されず放置されたままとり、森林はより鬱閉化し、下層にはほとんど植生が生育しない状態となり、動物の利用できる環境ではなくなってきている(石井2005)。

次に挙げられるのが第二次世界大戦後の燃料革命等によるそれまでの里山地域での生活様式の変化によるものである。第二次世界大戦後、薪や炭が石油やガスに代わったり、落ち葉堆肥が化学肥料に代わったりして里山の農用林としての価値は急速に失われた。(犬井2002)。

里山を代表する植生である雑木林では、近年、面積の減少、分断化、孤立化、管理の変容にともなう質的な変化が起きている。関東地方の5地域で雑木林の面積と分断化を空中写真により検討した中静・飯田(1996)の結果によれば、大都市に近い地域では面積が大きく減少し、大都市から遠い地域では面積がやや増加している地域はあるものの、ひとまとまりの樹林1カ所あたりの面積(林分面積)は一様に減少していた(武内ら2001)。

雑木林が放置されると関西ではネザサ、関東ではアズマネザサが繁茂し、林床は暗くなる。中静・飯田(1996)によれば、アズマネザサの高さと単位面積あたりの林床植物の種数との間には負の相関があり、アズマネザサの量が多くなるほど単位面積あたりの林床植物の種数は減少する。

服部ほか(1995)は、里山の目標とすべき植生タイプとして、高木林(現在、高木林となった雑木林の植生景観を維持)を提唱している。それに対応してアカマツやコナラなどの高木優占種を残し、低木層を伐採すると、種数の顕著な増加がみられる(山崎ほか2000)。増加する種は、里山の主要構成樹種である落葉樹林の種が中心である(武内ら2001)。

米の生産を抑制する生産調整(減反)は、稲作農家に大きな打撃を与えたと同時に、里山の生物多様性にも大きく影響している。生産調整とは、米の過剰生産を防ぐためにイネの栽培面積を抑制する施策で、1970年代に始まった。生産調整を言うと聞こえはいいが、

末端ではそれは強制力を伴って米作りを抑止する、いわゆる「減反」となった(佐藤 2005)。

生産調整の浸透とともに「休耕田」があちこちに見られるようになった。生産調整の代償として、イネ以外の作物の栽培、つまり転作が推奨されたが、それにもかかわらず何も植えない休耕田は増え続けた。米と稲作が支えた日本の農村の構造は、この時から変わり始めたともいえる。稲作をめぐる社会の情勢はその後もこころろ変化した。米の値段が下がるというそれまでには考えられなかったことさえ起こるようになった。米だけを作ることで生計を立てるということが、実質的にはできなくなった。また、米の消費の落ち込みはますます進み、消費の落ち込みに引っ張られる形で、休耕田はその後も増え続けている(佐藤 2005)。

そして、里山が衰退する様々な原因に複合的に関連しているのが過疎化の問題である。過疎化は山間の集落では深刻な事態をもたらしている。人口の減少がある一定の程度に達すると、バスをはじめ交通機関が撤収してしまう。生活の基盤を支えてきた店もどんどん減ってゆく。医療機関や学校なども撤収してしまう。すると生活はさらに不便となり、人々はやむなく都会へと出てゆく。こうした悪循環が加速され、地域全体が社会としての体をなさなくなってしまう(佐藤 2005)。一度都市部への人口流出が始まるとなかなかその逆は起こらない。そのため山間部などの地域に住む人々の数は減り続け、なおかつ平均年齢も高齢になっていく一方である。そこに住む人々が高齢になれば、たとえ伝統的な農業をしてもいつかはできなくなってしまう。また、それを継承し、担っていく次世代の人々も期待できないため、ますます里山地域の衰退に拍車がかかってしまっている。

生物多様性

私たちの生活において、生物多様性はなくてはならない存在である。食料の材料の多くは生物多様性の恵みであり、イネ、ムギ、トウモロコシの3種類の植物が、人が利用しているエネルギーの3分の2以上を供給しているという計算もある。食糧として人が獲得するエネルギー源は、この他にも多様な動植物が含まれるし、必要最低限のエネルギーだけでなく、食をグルメで表現すれば、さらに多様な動植物が参画してくる。衣や住についても、生物多様性に起源する材料なしには成り立たない。化学繊維の衣料にしても、数億年前の地球上に生きていた生き物たちの死骸から蓄積された化石エネルギーを活用したものである。生活に使う各種機材、心を癒す愛玩動植物、趣味に用いる諸々の材料等々生物多様性は人の生活に不可欠な要素として大きな部分を占める(岩槻 2010)。

生物多様性とは、どれだけ多くの生物種がある空間の中に共存するかを示す概念で、1992年に採択された「生物多様性条約」以来、好んで使われるようになった(佐藤 2005)。

1992年にブラジルのリオデジャネイロで開催された「環境と開発に関する国連会議」(い

わゆる地球サミット)では、気候変動枠組み条約と並んで、生物多様性条約 (United Nations Convention Biological Diversity) が採択された。

気候変動枠組み条約は、生態学的な支出超過の帰結ともいえる地球温暖化に対処するためのものである。二酸化炭素濃度という明瞭な指標を用いて目標を表現することができるため、社会に対して比較的明確な行動規範を提示することができる。

それに対して、生物多様性条約は、人間活動の影響を生物多様性の維持可能な範囲内にとどめ、生態系要素の不可逆的な喪失の防止を目指そうとするものである (鷲谷ら 2005)。

生物多様性条約では、生態系をつぎのように定義している。すなわち「生態系」とは、「植物、動物および微生物の群集とこれらを取り巻く非生物的環境とが相互に作用して一つの機能的な単位をなす動的な複合体」である。条約で採用された生態系の定義は、生態学における定義そのものである。「植物・動物および微生物の群集」とは、「ある空間においてそこに生きているすべての生き物の集合」であり、それを取り巻く無生物的環境をも含むシステムが生態系ということになる (鷲谷ら 2005)。

3つの多様性

生物多様性条約では、生態系の多様性・種の多様性・遺伝子の多様性という3つのレベルの多様性があるとしている (生物多様性センターHP)。

生態系の多様性とは、地球上の様々な循環によって、多様な環境が作られていることを指す。例えば、降雨が地面にしみ込み、草木から蒸散し雲となりまた雨が降るという水の循環。食物連鎖によって消費者を巡った有機物が、最後は分解者によって無機物に戻り、再び生産者が有機物を作り出すという物質の循環。地球上の生物活動によって排出された二酸化炭素を森林が吸収し、酸素を生み出すという大気の循環といった様々な循環が存在している。それらの循環は特定の池や林という小さい単位から大陸といった大きな単位まで切れ目なくつながって生態系を形成し、全く同じ生態系は存在しない。

種の多様性とは地球上の様々な環境に合わせて生物が進化した結果、未知のものを含めると約3000万種ともいわれる生物が存在することを指す。生態系が作り出す様々な物理環境が存在すること、生物との物理環境との関係や生物同士の関係の相互作用によって種の自然な淘汰や、進化を引き起こす遺伝的な差異によって種の多様性は生まれているといえる。

遺伝子の多様性とは、生物が個体として生命を維持したり、繁殖により次の世代を残したりするなど、存続しようとすることを念頭に考える必要がある。生物の個体間の遺伝的な差異が存在し、その差が生存や繁殖に影響し、少しでも生き残りやすい性質が次の世代として広がっていく。すなわち生物 (個体) の間に存在する遺伝的な多様性 (差異) は生

物の進化の源であり、生物多様性は、遺伝的な多様性があるからこそ生まれたものといえる（環境省 2010）。

生態系サービス

私たちの生活は生物多様性から受ける恩恵によって成り立っている。これらの恩恵や利益は生態系サービスと呼ばれている。

2007年に、独ハイリゲンダムにおいて、はじめてG8サミット（先進8ヵ国首脳会議）の場で生物多様性問題が議題にあげられ、「必須な生態系サービスの提供及び世界経済への自然資源の長期的な供給の必要不可欠な基礎として、生物多様性の保全と持続可能な利用の決定的な重要性を強調する」ことが首脳声明に明記された（外務省 2007）。

国連ミレニアム生態系評価（MA）によると、生態系サービスとは、大気の浄化、水源の涵養、土壌保持、自然災害の緩和、病害虫・疫癘の抑制、CO₂の吸収・固定、気候の安定、農水産物を含めた生態系の保持、さらには農林水産業・食品・工業製品の原材料やエコツアーリズムの資源、そして景観的・神秘的価値や宗教的・倫理的価値観など、人間が自然界から享受しているさまざまな財やサービスのことをいう。

「自然の恵み」あるいは「生命の恵み」と言い換えることもでき、供給サービス、調整サービス、文化サービス、そしてそれらの元となる基盤サービスの4つに整理される（MA2005）。生態系が機能し、これらのサービスが持続的に提供されるには、「生物多様性」が必要不可欠になる（日比・千葉 2010）。人類社会は、これらのサービスに依存せずには成り立たない（鷲谷 2010）。

ミレニアム生態系評価（MA）は2001年から2005年まで実施され、すべての生態系サービスの人間による利用は、急速に増加しており、調査された生態系サービスのうち、約60%（24のサービスのうち15）は、悪化しているか、または持続不可能な状態で利用されていることを明らかにした（MEA 2007）。

人類がどれほど生物資源に依存しているかを表す指標としてエコロジカル・フットプリントという考え方がある。この指標は、人々が生活に必要な主要な生物資源を得るために、およそどれくらいの地球の面積が必要なのかを表す。全人類について計算すれば、地球の表面積という明瞭な限界値と対比して、人間活動の大きさを測ることができるという利点がある（鷲谷 2011）。

鷲谷（2011）によれば、人類全体のエコロジカル・フットプリントは、1980年代に地球の全表面積を超え、2000年頃には20%ほど超過している。化石燃料の使用によって放出された二酸化炭素が大気中に急速に蓄積しつつあるのは、地表の限界を超えた消費分によると考えることができる。この「大幅赤字」の現状に責任があるのは、私たち先進国の人々

の大量消費型・資源浪費型の生活である。一人あたりのエコロジカル・フットプリントを国別に計算してみると、アメリカ合衆国では10ヘクタール、日本やヨーロッパの国々は5ヘクタール程度となる。それに対して、発展途上国のなかには、その値が0.5ヘクタールに満たない国もある。

こうした人間活動による影響でこれらの生態系サービスやそれらを提供する地球生態系は急速に失われつつある。地球生態系における現在のヒトは、個体数が多いこと、一個体あたりの生態系への影響が大きいことの両面において、超越的な優占種である。その活動は、地球生態系の組成や状態を大きく左右する。ヒトは、現代の生態系に圧倒的な影響力をもつキーストーン種であるが、現代になってヒトによって作りかえられた生態系の多くは持続的とはいえないものである。

それは、生物一般の進化のスピードに比べ、人間活動がもたらす生態系の変化があまりにも急だからである。また、急激な変化が種個体群の分断や孤立をもたらし、結果として急速な生態系の単純化を引き起こすからである（鷲谷ら 2005）。

生物多様性の危機

先の生物多様性条約を受けて、日本では生物多様性国家戦略を策定し、これまでに4度の改正を行ってきた。平成24年に閣議決定された生物多様性国家戦略2012-2020では、生物多様性の4つの危機が示されている。

第1の危機は、開発や乱獲による種の減少・絶滅、生息・生育地の減少（オーバーユース）である。鑑賞や商業利用のための乱獲・過剰な採取や埋め立てなどの開発によって生息環境を悪化・破壊するなど、人間活動が自然に与える影響は多大である（生物多様性センターHP）。

生態系の状況をみると、熱帯地方を中心に毎年約1300万haの森林が失われ（FAO 2005）、世界の主要な造礁サンゴは4分の1が著しい破壊の危機にある（Callum M. Roberts 2002）。

第2の危機は、里地里山などの手入れ不足による自然の質の低下（アンダーユース）である。二次林や採草地が利用されなくなったことで生態系のバランスが崩れ、里地里山の動植物が絶滅の危機にさらされている。また、シカやイノシシなどの個体数増加も地域の生態系に大きな影響を与えている（生物多様性センターHP）。

これには里山地域の小規模化や生活様式の変化が大きく関わっている。里山を例に挙げると、山でのさまざまな生産活動が生態系に対する一定の攪乱として働き、そのことが里や里山という環境を維持する役割を果たしてきた。集落が小規模化し、さらに集落そのものがなくなるとなれば、こうした生態系に対する人の攪乱は消滅する。攪乱が加わらなくなった生態系は遷移をすすめ、森はどんどん原始の森へと回帰していく（佐藤 2005）。と

いう現象が起きている。

第3の危機は、外来種（外来生物）などの持ち込みによる生態系の攪乱である。「外来生物」と「外来種」の2つの用語はしばしば同義で使用されるようである。「外来生物」では、種に加えてより小さな分類群、あるいは遺伝子、地域個体群なども含む広い概念として認識した方が妥当である（中村 2010）。

外来生物とは、本来の分布域ではない地域に、意図的に導入されたか、若しくは付着や混入などによって非意図的に導入された生物である。人の移動や経済活動が大きくなるにつれ外来生物は増加し、動物や植物にかぎらず広範な生物群が分布を拡大している。その結果、農業被害や人の生命・健康被害だけでなく、生物多様性や生態系機能にも深刻な影響が及ぶことが世界的に懸念されるようになった（角野 2010）。

外来種が在来種を捕食したり、生息場所を奪ったり、交雑して遺伝的な攪乱をもたらしたりしている。また、化学物質の中には動植物への毒性をもつものがあり、それらが生態系に影響を与えている（生物多様性センターHP）。

そして、第4の危機が地球環境の変化による危機である。地球温暖化は国境を越えた大きな課題であり、平均気温が1.5～2.5度上がると、氷が溶け出す時期が早まったり、高山帯が縮小されたり、海面温度が上昇したりすることによって、動植物の20～30%は絶滅のリスクが高まるといわれている（生物多様性センターHP）。服部・栃本（2008）によると、小規模な都市山ながら極めて多様な生物相を誇る六甲山（兵庫県南部）では、今後温暖化が進み、現在よりも気温が1.1℃上昇すると、ブナだけではなく夏緑林などの多くの植物が消滅あるいは衰退し、植物の交流とも言うべき多様な分布群によって構成されている六甲山の植物相の特徴は、一掃されることも考えられるという。

こうした危機は、人間生活から離れた原生的な自然や、逆に人間の力が支配的な都市よりも、人間と自然が長い時間をかけて共存してきた農村ランドスケープ（rural landscape）で、より深刻なものとなっている。とくに二つ目の危機は、日本において現在の農村が抱えている社会的な問題とも符合する。これらをふまえると、農村ランドスケープ再生こそが、じつは生態系再生のカギを握っているともいえる（鷲谷ら 2005）。

第六の大量絶滅時代

既に知られている地球上の生物種の数約174万種に達すると報告されており、これに未知の生物種を含めるとその数は数千万種またはそれ以上に達すると推測されている。このように非常に多くの生物が地球上で生活をしているが、これらの生物種が急激な勢いで絶滅しているといわれている。

地球誕生以来、現代は「第6回目の大量絶滅時代」だといわれている。過去の大量絶滅

期では、例えば、歴史上最大の大量絶滅が発生したとされる約 2 億 5000 万年前の古生代後期のペルム紀末には、9 割以上の生物種が絶滅したといわれている。また、6500 万年前の白亜期末には、恐竜が突如として絶滅したといわれている。

これらの大量絶滅の原因は、隕石や彗星などの天体の衝突説、超大陸の形成や分裂に伴う火山活動などによる環境の急激な変化などと考えられている。しかし、現代の第 6 の大量絶滅期は、絶滅速度が速く、人類の経済・社会活動が根本の原因とされていることが過去 5 回の大量絶滅期とは基本的に異なる点であるといえる。現代における種の絶滅速度は、年間 4 万種、1 日 50 種など様々な説があるが、過去における絶滅が数万年から数十万年という長い時間スケールで進行していたことと比べると、非常に絶滅速度が速いという特徴がある。

例えば、北アメリカに生息していたリョウコバトは 19 世紀初頭には 50 億羽いたとされているが、乱獲により 20 世紀初頭に絶滅した（林 2010）。

絶滅の危機の指標となるレッドデータブック・レッドリスト

先述の危機によって現在多くの野生生物が絶滅の危機に瀕している。それらの危機を示す手がかりとして有効なのが国際自然保護連合（IUCN）や各国・地域の管轄省庁によって公表されているレッドリストやそれらを基にしたレッドデータブックである。

絶滅のおそれのある野生生物をリストアップしたものがレッドリストであり、レッドリストに掲載された生物の分類や生態学的特徴など関連するデータをまとめたのがレッドデータブックである（矢原 2003）。

日本初のレッドデータブックは、1989 年に日本自然保護協会と世界野生生物保護基金日本支部によって作成された。現在、国レベルの作成は環境省が行っている（星山 2011）。

レッドリストでは、生物多様性を保全するため、絶滅の危機に瀕している植物や動物の種を分析し、保護の優先度を識別するなどするために種を分類している。

分類では、すでに絶滅したと考えられる種を「絶滅（EX: Extinct）」、飼育・栽培化であるいは過去の分布域以外に、個体（個体群）が帰化して生息している状態のみ生存している種を「野生絶滅（EW: Extinct in Wild）」、ごく近い将来における野生での絶滅の危険性が極めて高いものを「絶滅危惧 I A 類（CR: Critically Endangered）」、I A 類ほどではないが、近い将来における野生での絶滅の危険性が高いものを「絶滅危惧 I B 類（EN: Endangered）」、絶滅の危険が増大している種。現在の状態をもたらした圧迫要因が引き続いて作用する場合、近い将来「絶滅危惧 I 類」のランクに移行することが確実と考えられるものを「絶滅危惧 II 類（VU: Vulnerable）」、存続基盤が脆弱な種。現時点での絶滅危険度は小さいが、生息条件の変化によっては「絶滅危惧」として上位ランクに移行する要素

を有するものを「準絶滅危惧 (NT: Near Threatened)」、基準に照らし、上記のいずれにも該当しない種を「軽度懸念 (LC: Least Concern)」、評価するだけの情報が不足している種を「情報不足 (DD: Data Deficient)」としている (IUCN 日本委員会 HP)。

平成 26 年に環境省から公表された第 4 次レッドリストでは、対象となった維管束植物約 7000 種のうち、絶滅が 32 種、野生絶滅が 10 種、絶滅危惧 I A 類が 519 種、絶滅危惧 I B 類 519 種、絶滅危惧 II 類が 741 種、準絶滅危惧種が 297 種、情報不足が 37 種の計 2155 種となっている (環境省 HP)。

生物多様性ホットスポットの日本

生物多様性ホットスポットとは、「地球規模で生物多様性が高いにもかかわらず、破壊の危機に瀕している地域」のことであり、1500 種以上の固有植物種を有するがその 70%以上が本来の生息地を喪失している地域を指す。ホットスポットは 1988 年にイギリスの生物学者ノーマン・マイヤーズ博士が世界中で優先的に保全すべき地域を特定するための概念として提唱したものであり、CI はマイヤーズ博士と協働して 2000 年に 25 カ所をホットスポットとして特定し、それ以来地球規模での生物多様性保全戦略の軸としてきた。2004 年には世界中から約 400 名の専門家の協力を得てホットスポットとしての再評価を行い、計 34 カ所に改めた。この際、日本列島もホットスポットの一つとなった。この 34 地域の総面積は地球上の陸地面積のわずか 2.3%だが、ここに全世界の 50%の維管束植物種と 42%の陸上脊椎動物種が生存している (A. Mittermeier et al. 2004) (日比・千葉 2010)。

日本列島は、湿潤温帯としては世界有数の生物多様性を誇る。その多様性の屋台骨ともいえるのが、自生の維管束植物 6000 種以上からなる植物相の豊かさである。

日本列島は、面積は狭くとも南北に長く、標高の高い脊梁山脈をもつことから、気候の多様性に富んでいる。また、地史的にも、アジア大陸との間で幾度となく連続と分離を繰り返したこと、氷河期に氷河の影響をそれほど受けなかったことから、氷河期の依存生物など、多様な生物の生存を可能なものとしてきた (鷲谷ら 2005)。

生息地の孤立・分断化問題

生物多様性を減少させている要因のうち、直接的に種の絶滅の危険を高める要因を「圧力」と呼ぶ (鷲谷 2011)。地球規模生物多様性概況第 3 版 (GB03) では、そのような圧力として、「生息地の損失と劣化」、「気候変動」、「過剰な栄養素の蓄積等による汚染」、「過剰利用と非持続可能な利用」、「侵略的外来種」の 5 つが示されている (生物多様性条約事務局地球規模生物多様性概況第 3 版)。

このうち、特に「生息地の損失と劣化」について、現在注目されているのは、食料やバイオ燃料の生産を目的とした農地開発によって、湿地や熱帯林で、生き物の生息・生育場所が消失したり、生息・生息場所同士のつながりが分断されて孤立してしまったりしていることである。日本列島では、多くの生き物を育む湿地や干潟の面積は、埋め立てや干拓などにより、ここ数十年の間に大きく減少し、生息・生育地の分断・孤立化が起こった。淡水生態系や沿岸域の生物多様性がきわめて危うい状態になっているのは、そのような開発がもたらした事態であるともいえる。

分断・孤立化によって起こる問題の一つ目は、ひとつひとつの場所の集団が小さくなることである。生物の個体群（集団）は、個体数がある限界を超えて減少すると、病気や偶然のできごとで絶滅してしまう可能性が高まったり、繁殖に必要な遺伝的に相性のよい配偶者が得られなくなったり、近親交配の結果、子孫の生存力や繁殖力が失われたり（近交弱勢）、個体数の少なさに応じて死亡率が高まるなど、個体数が多いときには問題にならないようないくつもの原因が、集団を絶滅に追いやる（鷲谷 2011）。

個体群が豊富な遺伝的な変異をもっていれば、環境の変動にも対処しやすい。そのような種個体群が集まった群集では、局所的な種の絶滅が起こる可能性は小さいため、群集の種組成も比較的安定したものとして維持される。また、群集を構成する種の適応進化は、一方で、生態系の性質に大きな影響を与えられ考えられる。

ところが、遺伝的な多様性が小さければ、局所的な種の絶滅によって群集の組成が単純化し、生態系は不安定なものとなる。同一の種の、しかも遺伝的に同一なクローン樹木ばかりが生育する植林地などが、天然林と比べて病虫害の被害を受けやすいのは、遺伝的な多様性や「個体の質」の幅が乏しいためである（鷲谷ら 2005）。

分断・孤立化によって起こる問題の二つ目は、複数の生育場所を必要とする生物たちが、その間を移動できなくなることである。海と川の上流域、川の流路と氾濫原湿地の止水域、水辺と樹林というように、一生のうちいくつかの異なる生息場所を利用する魚や両生類などは、ダムや堤防、市街地化などにより、それらの生息場所の間での移動ができなくなると、一生を全うできなくなり、個体群の存続は重大な影響を受けることになる（鷲谷 2011）。

フィールド科学の有効性

生物多様性の減少を含む地球環境問題の深刻化は、問題解決のための従来型の科学的アプローチに再考を迫るものである。すなわち、現象の客観的解明を待って、問題の解決に乗り出す段階的アプローチから、現象解明と問題解決を同時に追求する同時的アプローチへの変更が求められる（鷲谷ら 2005）。

生態系の機能的関係を、普遍性と特異性の両面から理解するためには、生態系に関するさまざまな解析の前提となるフィールド研究が欠かせない。現実の生態現象をフィールド調査によって克明に記録し、研究者自らが生態研究を熟知することが、「関係性」を理解するうえでの「科学的勘」を養い、軽量化の可能性と限界をわきまえながら、解析に臨むことを可能にするからである。もちろんフィールド研究においても調査結果の普遍化へ向けて努力を怠るべきでないことはいうまでもない。フィールド調査によって得られるデータを解析し、いくつかの指標要素の組み合わせにより生態現象がある程度まで説明できれば、それらの指標要素の広域的広がりをとらえることで、調査結果を広域に拡大して行くことができる。逆に、広域的に捉えることが可能な、気候分布、地形分布、土壌分布、植生分布などは、既に地図情報として整備されており、それらを用いて生態系をマクロに分類し、分類された地域でフィールド調査を行うことによって、フィールド自体の普遍的特性を十分理解しつつ、調査を行うことが可能となる。近年発達の著しいGPS（全球座標システム）、GIS（地理情報システム）、リモートセンシングなどの遠隔計測技術は、フィールド調査結果の普遍化を図るために有効な手段である（鷲谷ら 2005）。

また、フィールド調査の例としてモニタリングが挙げられる。絶滅危惧種の保全には、継続的なモニタリングを行い、問題が深刻化した場合に時機を逃さず緊急対策を実施することが必須である。環境省のレッドリスト掲載種をみても、その多くは、生態的な現状が十分には把握されているとはいえない。すべての種について、客観的で科学的な現状のモニタリングを実施し、回復計画を策定する必要がある（鷲谷ら 2005）。

研究の目的

里山地域には絶滅危惧種・希少種を含む多様な在来植物が生育することが明らかになりつつあるが、本研究では、この植物種多様性がどうやって形成されるのかを、生育環境の多様性と植物の分布および種子生産・発芽・生長特性の多様性の関係を解析することによって考察する。

里山地域は伝統的な農業により、長期間にわたって人と自然の共生関係が維持されてきた。おそらくこのことが原因で、里山地域は植物種多様性が非常に高く、また多くの絶滅危惧種・希少種が生育していることが報告されている。しかし、高度成長期以降の産業構造の変化、とりわけ農業の衰退と少子高齢化により、里山地域の環境は衰退の一途をたどり、植物種多様性が低下し、絶滅危惧種・希少種の衰退が起こっている。特に、個体数の減少と生育地の分断化・縮小が、遺伝的多様性を減少させ、自家不和合性によって種子繁殖を困難にしている可能性が高い。この政策実現のためには、里山における生物多様性の現状の解明が必須であり、特に里山の生物多様性が高い理由の学術的解明、および絶滅危惧種・希少種の増殖方法の確立が急がれる。

そこで、長期間里山として維持管理されている地域（榛名山北面、県立榛名公園）において、植物相調査、環境調査を行って里山の現状を解明する。また代表的な絶滅危惧植物・希少種（絶滅危惧種 A、カセンソウ、コウリンカなど）について、現地調査、発芽実験や生長解析などをおこない、開花・結実状況の解明、発芽・生長特性の解明を行った。

これらの結果をもとに、里山植物の科学的な保護・保全方法を考察する。

なお、保護上の理由により、本稿の一部を非公開とし、白紙としている。また、盗掘防止の観点から、調査地の詳細な呼称の公表を控え、調査に用いているコードネーム（CN）を使用し、正確な位置が特定されないように配慮した。

本研究の一部（榛名山北面の絶滅危惧種 A 分布調査）は、嶋方里佳氏との共同研究である。このため、本稿に記載された結果に北榛名の絶滅危惧種 A 調査に関するものがあるが、併せて嶋方氏の卒業論文を参照されたい。

調査地概要

県立榛名公園

県立榛名公園は、昭和天皇皇后両陛下のご成婚を記念し、御料地の払い下げを受けて設置された県立公園である（写真1）。公園区域は、榛名山頂の榛名湖を含む395ヘクタールで、おおむね榛名山外輪山の内側となっている（国有林である榛名富士、榛名湖西側一帯及び商店街部分の私有地を除く）（群馬県 HP）。

榛名山のカルデラ内部の東半分は、沼ノ原（写真1）と呼ばれ、海拔1100～1200mの高原に草地在り、キスゲ（ユウスゲ）の群生地として知られている（大森 2003）。

沼ノ原は、第二次世界大戦後に開拓を受けたが、その後放置されたために二次草原から陽樹林への遷移の途上にある。そのため、草原に低木状のカシワやズミ、カントウマユミ等が侵入し、カシワの中には高木にまで生長したものがある（松澤ら 2003）。

沼ノ原に広がるススキ草原は、県内の山地における草原の中でも大規模のものである。また、多くの絶滅危惧種もみられることから、非常に貴重なものである。2002年度の調査では、キキョウ、オミナエシ、スズサイコ、コウリンカといった絶滅危惧種を含む43科154種5変種の維管束植物が確認されている（松澤ら 2003）。

一方で、ビッチュウミヤコザサが繁茂して地表を覆い尽くし、ササよりも草丈の高い植物を除いて他の植物が生育できなくなっている場所も確認されている。

2014年夏、既設の沼ノ原遊歩道が高崎市観光協会（未確認）によって大幅に延長され、東西方向にも南北方向にも約2倍の範囲で散策・踏査が可能となった。これは主としてビッチュウミヤコザサ群落を、重機とブッシュカッターを用いて切り開き、道幅約2mの遊歩道を網目状に築いたものである。この施行については、本公園を所管する群馬県自然環境課は関知していない（群馬県自然環境課私信）という驚くべき状況であり、公園内に生育する植物への影響が懸念される。

北榛名地域

群馬県の榛名山麓北面、群馬県吾妻郡東吾妻町大字岩井に位置する、寺沢川流域の調査地である（写真2）。海拔は700～800mで、農耕地とスギ植林の間に集落が点在している。

本地域では継続的に調査を行っているが、以前からモニタリング調査をしている場所以外にも絶滅危惧種Aの個体群が生育していると推察されており、全容は解明されていない。

材料及び方法

植物相・絶滅危惧種個体数調査

一般に用いられるコドラート法による植生調査は、限られた面積内の植物相について解明する手段であるので、県立榛名公園のように、植物種多様性の高い地域では見落とす種が多いことが問題としてあげられる。そこで今回は、広範囲にわたる生育植物種をリストアップする植物相調査を行った。調査地を踏査し、開花している植物を中心として、デジタルカメラで撮影し、植物種の一部を採取し、その後植物図鑑を用いて植物種の同定を行った。なお、この調査方法では、踏査により視認可能な種が対象となるため、比較的量の多い植物種をピックアップすることになる。調査日は、県立榛名公園が2015年7月31日、8月20日、9月28日で、北榛名地域が2015年5月17日、7月4日である(表1)。

さらに、希少植物種、絶滅危惧種(県立榛名公園:キキョウ、エゾカワラナデシコ、スズサイコ、カセンソウ、コウリンカ 北榛名地域:絶滅危惧種A)については、調査地内を踏査して、生育あるいは開花している個体数または株数を数えるとともに、ポータブルGPS(GPSmap62SCJ, GARMIN)とスマートフォン(iPhone, XPERIA)を用いて生育位置を記録し、マップを作成した。

絶滅危惧種Aは1地点(CN・寺沢川右岸)において、開花株ごとに上記と同様の方法で生育位置を記録し、また通し番号つきの目印(竹竿または竹箸)をつけ、後日結実率調査のための種子採取ができるように備えた。これらの目印には麻紐(500m巻)を結びつけ、紐をたどると開花個体に到達できるようにした。

発芽率の冷湿処理・温度依存性実験

県立榛名公園で採取されたカセンソウ(キク科)、キオン(キク科)、コウリンカ(キク科)、ハンゴンソウ(キク科)、オカトラノオ(サクラソウ科)、クサレダマ(サクラソウ科)、エゾカワラナデシコ(ナデシコ科)の種子を用いた。いずれの種子も採取後にシリカゲルを用いて十分に乾燥させた後、-80℃のディープフリーザー(Panasonic MDF-U384)内で冷凍保存されている。絶滅危惧種Aの種子(CN・寺沢川右岸、CN・十二が原墓場)は西榛名および北榛名で採取された種子を用いて発芽実験を行ったが、結果の全容については共同研究者である嶋方氏の卒業論文を参照されたい。

各材料植物の生態学的特徴の概略は、以下のとおりである。

カセンソウ(キク科多年草、*Inulasalicina* var. *asiatica*)

北海道から本州の山野に生育する多年草である。国のレッドデータには指定されていないものの、石川県や愛知県などで絶滅危惧I類に指定されている希少種である(日本のレッドデータ検索システム2014)。

今回の実験では、2012年8月29日に榛名公園で採取し冷蔵庫で保存され、2013年より-80℃のデ

ィープフリーザー (MDF-U384, Panasonic) 内で冷凍保存されている種子を用いた。

キオン (キク科多年草、*Senecio nemorensis*)

北海道から九州の山地～高山の草地に生育する多年草である。国のレッドデータには指定されていないが、茨城県や佐賀県などでは絶滅危惧Ⅰ類に指定されている種である。

今回の実験では、2014年9月17日に榛名公園沼ノ原で採取され、-80℃のディープフリーザー (MDF-U384, Panasonic) 内で冷凍保存されている種子を用いた。

コウリンカ (キク科多年草、*Senecio flammeus* subsp. *glabrifolius*)

コウリンカは本州の山地や草原に生育する草本で、国および群馬県では絶滅危惧Ⅱ類に指定されている絶滅危惧種である (日本のレッドデータ検索システム 2014)。

今回の実験では、2013年9月13日に榛名公園沼ノ原で採取され、-80℃のディープフリーザー (MDF-U384, Panasonic) 内で冷凍保存されている種子を用いた。

ハンゴンソウ (キク科多年草、*Senecio cannabifolius* Less)

北海道から本州 (中部以北) の低地～山地にみられる多年草である。広島県では絶滅危惧Ⅱ類、茨城県などでは準絶滅危惧種に指定されている種である。

今回の実験では、2014年9月17日に榛名湖畔で採取され、-80℃のディープフリーザー (MDF-U384, Panasonic) 内で冷凍保存されている種子を用いた。

オカトラノオ (サクラソウ科多年草、*Lysimachia clethroides*)

日本各地の湿地や山道沿いに生育する多年草である。

今回の実験では、2014年9月17日に榛名公園沼ノ原で採取され、-80℃のディープフリーザー (MDF-U384, Panasonic) 内で冷凍保存されている種子を用いた。

クサレダマ (サクラソウ科多年草、*Lysimachia vulgaris* var. *davurica*)

北海道から九州の湿原の周辺、沼沢地に生育する多年草である。国のレッドデータの指定はないが、埼玉県や富山県などでは絶滅危惧Ⅰ類に指定されている種である。

今回の実験では、2014年9月17日に榛名公園で採取され、-80℃のディープフリーザー (MDF-U384, Panasonic) 内で冷凍保存されている種子を用いた。

エゾカワラナデシコ (ナデシコ科多年草、*Dianthus superbus*)

エゾカワラナデシコは、北海道、本州の低地や山地でみられる植物である。国のレッドデータには指定されていないものの、新潟県や鳥取県では絶滅危惧Ⅱ類に指定されている希少種である (日

本のレッドデータ検索システム2014)。

今回の実験では、2013年9月1日に榛名公園沼ノ原で採取され、 -80°C のディープフリーザー (MDF-U384, Panasonic) 内で冷凍保存されている種子を用いた。

表 2 に材料植物種子の産地・採取年を記す。

種子はいずれも前処理として、 4°C の保冷庫で湿らせたまま 2 か月間保存する冷湿処理を施すことで種子に冬を経験させる種子と、冷湿処理を施さない種子を用意した。前処理である冷湿処理は、一般に冬を経験させることによって種子の休眠を解除し、発芽を促進させる処理であり、多くの野生植物の種子でその促進効果が確認されている (荒木ほか 2003)。これらの植物について、石英砂を敷いた直径 9cm のプラスチック製シャーレに種子を 50 個ずつ入れ、蒸留水を約 20cc 注入した。冷湿処理は、 4°C の薬用保冷庫 (サンヨー, MEDICOOLMPR-504 (H)) で 2 ヶ月保管することにより施した。前処理の終了後、温度勾配恒温器 (TG-100-ADCT, NKsystem) にシャーレを入れて培養した。器内の温度は $30/15^{\circ}\text{C}$ 、 $25/13^{\circ}\text{C}$ 、 $22/10^{\circ}\text{C}$ 、 $17/8^{\circ}\text{C}$ 、 $10/6^{\circ}\text{C}$ (昼 14hr、夜 10hr、昼間の光量子密度は約 $30 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$) の 5 段階とし、各温度区・各処理区で 1 植物あたり 3 シャーレを培養した。冷湿処理を施さない種子は、 $25/13^{\circ}\text{C}$ 温区にて培養した。実験開始後は、約 1 か月間は毎日、その後は 3~7 日おきに種子を観察し、肉眼で幼根が確認できたものを発芽種子とみなして数を記録し、取り除いた。また、必要に応じて蒸留水をつぎ足し、常時湿った状態を保った。新たな発芽が 3 日以上にわたってみられなくなるまで、約 2 か月間培養を続けた。詳しい実験スケジュールを表 2 に示す。絶滅危惧種 A については嶋方氏との共同研究であるので、嶋方氏の卒業論文を参照されたい。

異なる環境条件下における栽培実験

前栽培

発芽実験で発芽したエゾカワラナデシコ・キオン・クサレダマの実生を寒天培地 (1. 5%寒天、

ハイポネックス 1000 倍溶液) に移植し、本葉が出始めた段階でジフィーピートバン(サカタのタネ) に移植し、グロースキャビネット (LED 球を用いて 14L/10D の日長で昼の相対光強度を約 380~400 $\mu\text{mol}^{-2}\text{s}^{-1}$ とし、室温 25/13°C に調節した) 内で約 1~2 ヶ月栽培した。実生が複数の本葉を有するようになった時点で、一本ずつプラスチック製苗ポット (約 95ml 容量) に植栽した。用土は黒土を用いた。これらの苗を約 2 週間群馬大学荒牧キャンパス内の裸地で栽培した。栽培中は 2-3 日に 1 度水道水を与えて栽培した。

初期サンプリングに際しては、苗のみかけのサイズが大きい順に並べ、これを順番に処理区数+1 で等区分して、区分ごとにサイズ分布と個体数がおおむね同等になるようにした。このうち 1 区分を初期サンプルとして採取し、残りの区分をそれぞれの処理区分に供した。

サンプリングした苗は個体ごとに根・茎・葉に分けて紙袋に入れ、送風低温乾燥機 (DRS620DA, ADVANTEC) に入れて 1 週間 80°C で乾燥させた後、電子式上皿天秤 (BJ210S, Sartorius) で乾燥重量を測定した。葉面積はカラスキャナー (GT-S640, EPSON) を用いて解像度 300dpi、16bit グレーでスキャンした後、ImageJ1. 41o (NIH) を用いてドット数を計測した。今回は 148cm²あたり 2098075 ドットとした。

光強度を調整した栽培実験

エゾカワラナデシコ・キオン・クサレダマの実生を用いて、ビッチュウミヤコザサなどによる被陰の生長に対する影響を検証するため、寒冷紗を用いて相対光強度を 3%、9%、13%、100% (裸地) に調節した 4 つの光条件区を群馬大学荒牧キャンパス内の裸地に設けた。これらの条件区に苗ポットを配置して日間栽培し、栽培期間の最終日にすべての個体をサンプリングした。栽培実験の詳細なスケジュールを表 3 に示す。

生長解析

生長解析の各パラメータは、以下の式を用いて算出した。

- ・ 相対生長速度 (RGR : Relative Growth Rate) : 各個体の乾燥重量ベースの生長速度を表す指標である。

$$\text{RGR} = (\ln(\text{TW2}) - \ln(\text{TW1})) / (\text{T2} - \text{T1})$$

TW1 : 初期サンプリングにおける個体総乾燥重量 (g)

TW2 : 最終サンプリングにおける個体総乾燥重量 (g)

T1 : 初期サンプリング日

T2 : 最終サンプリング日

- ・ 純同化率 (NAR : Net Assimilation Rate) : 各個体の光合成活性を表す指標である。

$$\text{NAR} = (\text{TW2} - \text{TW1}) (\ln(\text{LA2}) - \ln(\text{LA1})) / (\text{LA2} - \text{LA1}) / (\text{T2} - \text{T1})$$

TW1 : 初期サンプリングにおける個体総乾燥重量 (g)

TW2 : 最終サンプリングにおける個体総乾燥重量 (g)

LA1 : T1 における個体の葉面積 (m²)

LA2 : T2 における個体の葉面積 (m²)

T1 : 初期サンプリング日

T2 : 最終サンプリング日

- ・ 葉面積比 (LAR : Leaf Area Ratio) : 各個体の乾燥重量と葉面積の比率を表す指標である。

$$\text{LAR} = (\text{LA}/\text{TW1} + \text{LA2}/\text{TW2}) / 2$$

TW1 : 初期サンプリングにおける個体総乾燥重量 (g)

TW2 : 最終サンプリングにおける個体総乾燥重量 (g)

LA1 : T1 における個体の葉面積 (m²) s

LA2 : T2 における個体の葉面積 (m²)

- ・ 比葉面積 (SLA : Specific Leaf Area) : 各個体の葉の厚みを葉面積/重量ベースで表す指標である。

$$\text{SLA} = \text{LA}/\text{TW}$$

LA : 最終サンプリングにおける個体の葉面積 (m²)

TW : 最終サンプリングにおける個体の総乾燥重量 (g)

- ・ 器官別重量比 : 光合成産物をそれぞれの器官にどのくらい配分したかを示す指標である。

- ・ 葉重比 (LWR : Leaf Weight Ratio)

$$\text{LWR} = \text{LW}/\text{TW}$$

LW : 最終サンプリングにおける個体の葉乾燥重量 (g)

TW : 最終サンプリングにおける個体の総乾燥重量 (g)

- ・ 茎重比 (SWR : Stem Weight Ratio)

$$\text{SWR} = \text{SW}/\text{TW}$$

SW : 最終サンプリングにおける個体の茎乾燥重量 (g)

TW：最終サンプリングにおける個体の総乾燥重量 (g)

- ・ 根重比 (RWR：Root Weight Ratio)

$$RWR = RW / TW$$

RW：最終サンプリングにおける個体の根乾燥重量 (g)

TW：最終サンプリングにおける個体の総乾燥重量 (g)

それぞれのパラメータ間には、以下のような関係がある。

$$RGR \approx NAR \cdot LAR$$

$$LAR \approx SLA \cdot LWR$$

これらの式によって、処理区間で RGR または LAR の変化があった場合、それがどのパラメータの差異によって引き起こされたかを確認することができる。

群馬大学荒牧キャンパスの気温測定

群馬大学荒牧キャンパスおよびにおいて、対象植物の生育期間における気温を測定した。温度データロガー (TR52, T&D Corporation) をそれぞれ高さ 1.5m 付近に設置し、気温を 2015 年 6 月 29 日から 10 月 14 日まで、30 分おきに連続測定した。

結果及び考察

植物相・絶滅危惧種個体数調査

県立榛名公園

踏査による植物相調査によって、計74種、うち6種の絶滅危惧種・希少種の生育が確認された（表4）。

2014年秋、既設の沼ノ原遊歩道が高崎市観光協会（未確認）によって大幅に延長され、東西方向にも南北方向にも約2倍の範囲で散策・踏査が可能となった。そこで本年の調査では、前年の調査区域を拡大して調査を行った。その結果コウリンカ、オミナエシ、キキョウ、エゾカワラナデシコ、カセンソウ、スズサイコなど多くの絶滅危惧種・希少種および里山の植物が確認された。特に、コウリンカ、オミナエシ、キキョウ、エゾカワラナデシコについては未調査区域において新たな個体が数多く確認され、エゾカワラナデシコの大きな個体群も発見された。

2015年7月31日、8月21日に行った調査でコウリンカの生育が確認できた地点数は、計99地点であった。小関（2014）が行った2013年7月27日、8月20日の調査では計40地点、福島（2015）の行った2014年8月17日の調査では24地点であった。調査地域の拡大に伴って、コウリンカの生育が確認できる地点数は増加している。

また2015年7月31日、8月21日に行った調査では、さらに4種の絶滅危惧種・希少種の生育地点を記録した。キキョウの生育が確認できた地点数は、計78地点であった。エゾカワラナデシコの生育が確認できた地点数は、計57地点であった。カセンソウの生育が確認できた地点数は、計109地点であった。調査でスズサイコの生育が確認できた地点数は、計13地点であった。

以上のように、今回調査対象とした多くの絶滅危惧種・希少種において、調査地域の拡大によって新たな生育地点が確認され、当調査地は植物の多様性が極めて高く、良好な自然環境が継続していることが明らかになった。今回の調査でも全ての調査可能区域を踏査できたわけではないため、今後更に調査区域を拡大し、全容解明に努めていく必要がある。一方、新たに切り開かれた遊歩道の周囲の植物がどのように変化していくか、観光客や野生動物の動向も踏まえながら長期的にモニタリング調査を行う必要があるといえる。

絶滅危惧種・希少種であるコウリンカ、オミナエシ、キキョウ、エゾカワラナデシコ、カセンソウ、スズサイコについて、ポータブルGPSで記録した各個体の位置情報を基に作成した分布マップおよびiPhoneによる分布マップを図1～7に示す。iPhoneとポータブルGPSにより記録された位置情報の間には、大きな差異はみられなかった。すなわち、スマートフォン（iPhone）を用いて計測した植物の位置情報は、概ねポータブルGPSと同程度の精度であるとえる。逆にXPERIAは、計測結果が最大2km以上もずれていたため、分布マップを作成しなかった。こうしたスマートフォン間の位置情報精度の違いが、OSによるものであるのか、ハードウェア、キャリアによるものであるかは、不明である。

発芽の冷湿処理・温度依存性

カセンソウ

本種の最終発芽率は、30/15℃区で7.3%、25/13℃区で8.7%、22/10℃区で8.7%、17/8℃区で5.3%、10/6℃区で1.3%と、いずれの処理区でも低い値であった（表5、図10）。

また、冷湿処理を施さなかった種子の最終発芽率は7.3%（25/13℃）であった（表5、図11）。

本実験では、いずれの処理区でも最終発芽率が10%を下回る結果となった。小関（2014）が2013年に行った本種の発芽実験では、最終発芽率は10/6℃区で最大（30%）となり、高い温度区ではこの1/2程度となったが、いずれも本実験の結果よりも高かった。したがって本実験では、実験準備の際の種子選別作業で未熟な種子を選んでしまったことで、全体に発芽率が低かったと推察される。本種の種子は非常に小さいので、成熟した種子のみを峻別することは易しくはないが、実体顕微鏡を用いて峻別を行い、再度実験を行う必要がある。

キオン

本種は冷湿処理期間中にすべてのシャーレで発芽が確認されたため、冷湿処理終了時に発芽していた種子の数をそれぞれ数えた後取り除き残った種子を母数として培養実験を行うこととした。

冷湿処理を施した処理区での最終発芽率は、培養温度にかかわらず、約20%程度となった。冷湿処理を施さない種子の最終発芽率は24.0%（25/13℃）であった（表5、図13）。

以上の結果より、本種は10/6℃という低温から30/15℃という高温まで、広い温度域において発芽可能であるといえる。また、冷湿処理の有無により最終発芽率に有意な差が認められなかったため、本種の種子は野外において水分条件が整えば、早春から発芽可能であり（種子散布は初冬）、また冬を経験しないと解除されないような休眠状態にはないと考えられる。

本種は主に標高1000m前後程度の中山間地の、やや湿った立地に生育する。こうした発芽特性を有することで、早春に気温が上昇し始めた後、あるいは降雨などで土壤水分が利用可能になった後に、本種は他の種に先駆けて発芽し生長を開始できるものと推察される。また永続的な土壤シードバンクを形成するとは考えにくい。

コウリンカ

冷湿処理を施した種子の最終発芽率は、30/15℃区で10.7%、25/13℃区で25.3%、22/10℃区で16%、17/8℃区で4%、10/6℃区で0%であった（表5、図14）ことから、最適発芽温度は25/13℃であると思われる。福島（2015）が2014年に行った本種の発芽実験では、最終発芽率は30/15℃区で最大（25.3%）となり、25/13℃区で25.3%となった。

また、冷湿処理を施さない種子の最終発芽率は40.7%（25/13℃）であり（表5、図15）。冷湿処理を施さない種子の方が冷湿処理を施した種子よりも最終発芽率が有意に高いという特殊な結果を得た。これは福島（2015）が2014年に行った本種の発芽実験と同じ結果である。

いずれの処理区でも最終発芽率が50%を下回っていることも含めて、これらの結果は、本種子が非常に小さいことから実験準備段階の種子選別作業の際に、未熟な種子を多く選んでしまったことに起因する可能性がある。本種の種子は非常に小さいので、成熟した種子のみを峻別することは易しくはないが、実態顕微鏡を用いて峻別を行い、再度実験を行う必要がある。

ハンゴンソウ

冷湿処理を施した処理区での最終発芽率は、30/15℃区で30%、25/13℃区で58.7%、22/10℃区で51.3%、17/8℃区で38%、10/6℃区で8%となった（表5、図16）。このことから本種の最適発芽温度は25/13℃であると考えられる。

また冷湿処理を施さない種子の最終発芽率は30.7%（25/13℃）であった（表5、図17）。冷湿処理を施した同温度区の種子と比較すると、最終発芽率、発芽速度どちらも冷湿処理を施した処理区で高い値を示している。このことから本種は冬を経験することによって種子の休眠が解除され、発芽が促進されるものと考えられる。

本種の種子散布期は晩秋であり、上記の実験結果のように低温・高温いずれの温度条件下でも種子発芽率が低下すること、冬を経験しないと休眠解除されない種子が一定割合含まれることから、野外においては永続的な土壤シードバンクを形成すると推察される。

オカトラノオ

冷湿処理を施した処理区の最終発芽率は、30/15℃区で37.3%、25/13℃区で22%、22/10℃区で20%、17/8℃区で6.7%、10/6℃区で0%となった（表5、図18）。いずれの処理区も50%を下回る結果となったが、高い温度の区ほど発芽率が高い結果となっていることから本種の最適発芽温度は30/15℃であると考えられる。

冷湿処理を施さなかった種子の最終発芽率は58.7%（25/13℃）で、冷湿処理を施した同温度区よりも有意に高い値となった（表5、図19）。本種の種子散布期は初秋であり、上記の実験結果のように低温の温度条件下で種子発芽率が低下すること、冬を経験すると発芽率が低下することから、野外においては永続的な土壌シードバンクを形成せず、気温の高いうちに発芽するものと推察される。今後も実験を繰り返し、さらに検証を深めていく必要がある。

クサレダマ

冷湿処理を施した処理区の最終発芽率は、30/15℃区で60%、25/13℃区で37.3%、22/10℃区で24.7%、17/8℃区で1.3%、10/6℃区で0%であった（表5、図20）。高い温度の区ほど発芽率が高い結果となっていることから本種の最適発芽温度は30/15℃であると考えられる。

冷湿処理を施さない種子の最終発芽率は12%（25/13℃）（表5、図21）となり、冷湿処理を施した同温度区の種子の最終発芽率のほうが高いことから、本種は冬を経験することによって種子の休眠が解除され、発芽が促進されるものと考えられる。

本種の種子散布期は秋であり、上記の実験結果のように低温の温度条件下で種子発芽率が低下すること、冬を経験しないと休眠解除されない種子が一定割合含まれることから、野外においては永続的な土壌シードバンクを形成し、種子散布の翌年以降の気温が高い季節に主として発芽すると推察される。

エゾカラナデシコ

冷湿処理を施した種子の最終発芽率は、30/15℃区で54%、25/13℃区で72%、22/10℃区で54.7%、17/8℃区で29.3%、10/6℃区で1.3%となった（表5、図22）。このことから本種の最適発芽温度は25/13℃であると考えられる。これは福島（2015）が2014年に行った本種の発芽実験とほぼ同じ結果である。

冷湿処理を施していない本種子の発芽率は36.9%（25/13℃）で、冷湿処理を施した種子の値（72%）よりも有意に低くなった（表5、図23）。これも福島（2015）が2014年に行った本種の発芽実験と同じ結果である。

本種の種子散布期は初秋であり、上記の実験結果のように低温・高温いずれの温度条件下でも種子発芽率が低下すること、冬を経験しないと休眠解除されない種子が一定割合含まれることから、野外においては永続的な土壌シードバンクを形成すると推察される。

異なる相対光量子密度下で栽培した植物の生長解析

栽培実験期間中の群馬大学荒牧キャンパス構内の裸地における気温の季節変化をみると、ほとんどの日時において約20℃～35℃の範囲であったが、35℃を越える猛暑日が数日あり、植物の生長に何らかの影響を及ぼした可能性は否めない。群馬大学荒牧キャンパス構内の気温を図26に示す。

キオン

本種の個体あたり乾燥重量は、初期サンプリング時に約0.069gであったが、2週間後の最終サンプリングの際には、約0.053g (3%区)～約0.245g (100%区)となった (表8)。

相対生長速度 (RGR, $\text{gg}^{-1}\text{day}^{-1}$) は、100%区で約0.051、13%区で約0.038、9%区で約0.023、3%区で約-0.013と、相対光量子密度の高い区ほど高くなり、3%区では著しく低下した (表9、図27)。すなわち、本種は明るいところでよく生長し、暗い環境下では著しく生長が悪くなると考えられる。

光合成活性を表す純同化率 (NAR, $\text{gm}^{-2}\text{day}^{-1}$) は、100%区で約4.007、13%区で約1.98、9%区で約1.205、3%区で約-0.452と相対光量子密度が高い区ほど高くなり、3%区では極端に低くなった (表9、図27)。

各個体の乾燥重量と葉面積の比率を表す葉面積比 (LAR, m^2g^{-1}) は、100%区で約0.015と低くなったが、3%区～13%区では約0.02程度と、有意な差はなかった (表9、図27)。

各個体の葉の厚みを葉面積/重量ベースで表す比葉面積 ($\text{SLAm}^{-2}\text{g}^{-1}$) は、100%区で約0.026と低くなったが、それ以外の区では約0.051～0.061の範囲にあった。器官別重量比のうち葉重量比は処理区間で明らかな差はなかったため、結果としてLARが100%区で低くなったと考えられる。

SLAのこのような反応は、光が不足して光合成活性が低下した際に、より多くの葉を生産することによって、限られた光合成生産量を有効に葉面積の生産につなげるという、多くの植物にみられる特性と同様のものである。しかし、暗い環境下でもLARはさほど増加せず、結果としてNARの低下を補うことができずに、RGRの低下を引き起こしてしまうと考えられる。

以上の結果から、本種は明るい環境を生育適地とし、ある程度の被陰であれば生長速度は低下するが生育は可能であると推察される。ただし、極端な被陰下では生長できないため、本種は生存できないと考えられる。本種は野外において、林内などの極端に暗い場所では生育を確認できないことから、明るい環境を好んで生育するものと考えられる。

クサレダマ

本種の個体あたり乾燥重量は、初期サンプリング時に約0.036gであったが、2週間後の最終サンプリングの際には、約0.02g (3%区) ~ 約0.233g (100%区) となった (表8)。

相対生長速度 (RGR, $gg^{-1}day^{-1}$) は、100%区で約0.078、13%区で約0.03、9%区で約0.026、3%区で約0.003と、相対光量子密度100%区では高いが、13%以下の区では著しく低下した (表9、図28)

光合成活性を表す純同化率 (NAR, $gm^{-2}day^{-1}$) は、100%区で約4.517、13%区で約0.983、9%区で約0.853、3%区で約0.126と、相対光量子密度100%区では高いが、13%以下の区では著しく低下した (表9、図28)。

各個体の乾燥重量と葉面積の比率を表す葉面積比 (LAR, m^2g^{-1}) は、100%区で約0.024と最も低くなり、13%区~3%区では約0.04程度となった (表9、図28)。

以上の結果から、本種のRGRが光条件の明るい区ほど高くなった原因は、NARの低下、すなわち光合成活性の変化であり、LARは100%区で低くなったが、NARの高さが補完したと考えられる。

各個体の葉の厚みを葉面積/重量ベースで表す比葉面積 ($SLAm^2g^{-1}$) は、100%区で約0.038と低くなったが、それ以外の区では約0.083~0.108の範囲にあった。器官別重量比のうち葉重量比は処理区間で有意な差はなかったので、結果としてLARが100%区で低くなったと考えられる。

SLAのこのような反応は、光が不足して光合成活性が低下した際に、より多くの葉を生産することによって、限られた光合成生産量を有効に葉面積の生産につなげるという、多くの植物にみられる特性と同様のものである。しかし、暗い環境下でもLARはさほど増加せず、結果としてNARの低下を補うことができずに、RGRの低下を引き起こしてしまうと考えられる。

以上の結果から、本種は裸地のような非常に明るい場所で良く生長し、他の植物に少しでも被陰されると生長が悪くなり、林床などの極端に暗い場所では生長できないと考えられる。本種は野外において、榛名湖畔や沼ノ原のヨシ原といった被陰する植物のいない非常に明るい場所でしか生育を確認できないことから、非常に明るい環境を好んで生育するものと考えられる。

エゾカワラナデシコ

本種の個体あたり乾燥重量は、初期サンプリング時に約0.022gであったが、2週間後の最終サンプリングの際には、約0.022g (3%区) ~ 約0.097g (100%区) となった (表8)。

相対生長速度 (RGR, $gg^{-1}day^{-1}$) は、相対光量子密度100%区で約0.047、13%区で約0.032、9%区で約0.031、3%区で約-0.003と、最も暗い3%区でマイナスにまで低下した (表9、図29)。すな

わち、エゾカワラナデシコは相対光量子密度が高いほど良く生長し、相対光量子密度9%程度までは100%区の6割程度の生長速度を維持できるが、3%という極端に暗い条件では生長できないと考えられる。

光合成活性を表す純同化率（NAR、 $\text{gm}^{-2}\text{day}^{-1}$ ）は、100%区で約2.887、13%区で約1.16、9%区で約1.147、3%区で約-0.066と相対光量子密度が高い処理区ほど値も高くなり、3%区では著しく低い値となった（表9、図29）。

各個体の乾燥重量と葉面積の比率を表す葉面積比（LAR、 m^2g^{-1} ）は、100%区で約0.02、13%区で約0.028、9%区で約0.028、3%区で約0.035と相対光量子密度の低い区ほど高くなった（表9、図29）。

以上の結果から、本種のRGRが相対光量子密度の高い区ほど高くなった原因は、NARの増加、すなわち光合成活性の増加であり、LARは100%区で低くなったが、NARの高さが補完したと考えられる。逆に相対光量子密度が低い環境では、本種のNARは低下するが、LARが増加してこれをある程度補完すると考えられる。

各個体の葉の厚みを葉面積/重量ベースで表す比葉面積（ $\text{SLAm}^2\text{g}^{-1}$ ）は、100%区で約0.02と低くなったが、それ以外の区では約0.044~0.066の範囲にあった。器官別重量比のうち葉重量比は100%区で若干低くなっているがその他の区間では差がなく、結果としてLARが100%区で低くなったと考えられる。

SLAのこのような反応は、光が不足して光合成活性が低下した際に、より多くの葉を生産することによって、限られた光合成生産量を有効に葉面積の生産につなげるといふ、多くの植物にみられる特性と同様のものである。しかし、3%という極端に暗い条件ではNARがマイナスになる、すなわち光合成生産が不可能になるため、生長できないと考えられる。

以上から、本種は極端な被陰によって生長が著しく悪くなるが、ある程度他の植物に被陰されても、生長可能であると考えられる。実際、本年の野外調査で確認された本種の大きな個体群のひとつは、山裾の林縁に生育しており、ここは山体とミズナラ林により被陰されやや暗い状態であった。

沼ノ原ではビッチュウミヤコザサが大繁茂し優占している部分が広くあり、今後さらにササが拡大すると、本種の生育に大きく影響を及ぼす可能性がある。当地は時折ササ刈りが行われているようであり、本種はこうした刈り取り管理の比較的高い場所でしばしば生育が確認された。したがって、今後もある程度の頻度でササ刈り管理が継続して行われることが、本種の保護保全には重要であると考えられる。

結論

本研究により、県立榛名公園では、コウリンカ、オミナエシ、キキョウ、エゾカワラナデシコ、カセンソウ、スズサイコなど多くの絶滅危惧種・希少種および里山の植物が確認され、計74種の生育植物を確認することができた。調査地域の拡大によって、コウリンカやキキョウ、エゾカワラナデシコなど絶滅危惧種や希少種の未確認個体の発見が相次いであり、県立榛名公園が多くの希少植物種を有する貴重な場所であるということが再確認された。また、北榛名地域における絶滅危惧種A 個体数調査においてもこれまで確認されていた株の他に、新たな株が多数確認されたためこの地域でも絶滅危惧種の生育できる良好な環境が現存していることが明らかになった。同時に、県立榛名公園ではメマツヨイグサやオオハンゴンソウといった外来種も確認されたことから、今後もこれら絶滅危惧種・希少種を保護保全していくために外来種の駆除や継続的なモニタリングが必要である。

発芽実験結果から、県立榛名公園に生育するキオンは、最終発芽率が10/6℃で最もよい値を示したことから低温が発芽適温であると考えられる。また、同地域で生育するエゾカワラナデシコ・ハンゴンソウ・クサレダマについて冷湿処理による明らかな発芽促進効果が確認されたことから、これらの種は冬の経験によって種子の休眠が解除され、発芽が促進されるものと考えられる。将来的に地球の温暖化が進行することで、種子の休眠解除が阻害され発芽しにくくなるなどの危険性が高まると考えられる。

光条件を変えた生長解析では、エゾカワラナデシコ、クサレダマ、キオンの3種に共通する生長特性として、相対光量子密度が100%の条件で最も生長が良く、3%では著しく成長が阻害されることが明らかになった。これら3種の生育する県立榛名公園では、ビッチュウミヤコザサが繁茂している地域があり、今後これらの拡大によって被圧された場合、生長阻害を受けると推察される。管理団体によるササ狩りや樹木伐採などの管理が行われていることはこれら3種の植物の生長にはプラスの効果となっていると考えられる。

本研究で確認された良好な環境を有する地域も含め、私たちの生活する地球では、現在進行形で生物多様性が危機的な状況へ追い込まれている。それらは過剰な開発によるオーバークース、人口流出などによる里山地域の管理放棄であるアンダーユース、外来種の侵入、温暖化問題といった人間活動によるものが原因である。絶滅危惧種や・希少種の保護は単なる生物の保護という枠組みを超えて、生態系サービスという私たちが生きていくために必要不可欠な自然からの恩恵を守ることである。これらの恩恵をいつまでも享受するためには、多様な生態系を保護していくことが重要である。地球上に生活する全ての人間が関わっている大きな問題であるため、一部の人間だけではなく、社会全体でこの問題に取り組んでいくことが重要である。

謝辞

本研究は、群馬大学社会情報学部・情報社会科学科・石川真一教授のご指導のもと、環境科学研究室において行われた研究であります。

本研究を進めるに当たり多くの方々にお世話になりました。石川真一教授には、最後まで熱心なご指導・ご助言を賜りました。

北榛名地域での調査におきましては、群馬県自然環境調査研究会・大平満氏にご協力いただきました。

また、同時期に卒業論文に取り組んだ嶋方里佳氏、足助直紀氏、関拓也氏をはじめとする、研究室の学生の皆様のご協力なしには完成しえなかったものであります。心から感謝し、厚く御礼申し上げます。

引用文献・引用 WEB ページ

- 荒木結衣（2012）里山地域における希少植物種の繁殖に関する生態学的基礎研究
群馬大学社会情報学部卒業論文
- 石井実（2005）『生態学からみた里山の自然と保護』（財）日本自然保護協会編
株式会社講談社 3, 9, 120, 149
- 犬井正（2002）『里山と人の履歴』（株）新思索社 12, 15, 17, 19, 21, 171
- 岩槻邦夫（2010）生物多様性を生きる-生物多様性を護るとはどういうことか-
生物多様性保全の意義 『森林環境 2010 生物多様性 COP10 へ』森林環境研究会編
森林文化協会 9
- 内山りゅう（2005）『田んぼの生きもの図鑑』株式会社山と溪谷社 5
- 大森威宏（2003）1. 地域の概要榛名山, 良好な自然環境を有する地域学術調査報告書
(X X IX). 127
- 片野修（1998）水田・農業水路の魚類群集『水辺環境の保全』江崎保男・田中哲夫編
朝倉書店 67-79
- 角野康郎（2010）外来植物研究への期待-種生物学の課題, 『外来生物の生態学進化する
脅威とその対策』種生物学会編株式会社文一総合出版 11
- 亀山章・勝野武彦・養父志乃夫・倉本宣編（1994）：生きもの技術としての造園
-その6 生きもの技術と環境倫理. 造園雑誌, 57 (3), 279-286
- 環境省（2010）『環境白書循環型社会白書／生物多様性白書地球を守る私たちの責任と
約束-チャレンジ 25-』日経印刷株式会社 66
- 倉本宣（2001）1. 3 市民運動からみた里山保全, (4) 里山を市民が保全する目的
竹内和彦・鷺谷いづみ・恒川篤史編『里山の環境学』財団法人東京大学出版会 23
- 倉本宣・園田陽一（2001）里山における生物多様性の維持, 竹内和彦・鷺谷いづみ・恒川
篤史編『里山の環境学』財団法人東京大学出版会 85
- 小関よう子（2014）里山地域に生育する希少植物種の分布と発芽・生長特性に関する
生態学的モニタリング研究 群馬大学社会情報学部卒業論文
- 佐藤洋一郎（2005）『里と森の危機暮らし多様化への提言』朝日新聞社 11, 41, 87, 94
- 下田路子（2003）『水田の生物をよみがえらせる農村のにぎわいはどこへ』
株式会社岩波書店 41, 51, 61
- 恒川篤史（2001）2. 1 日本における里山の変遷（2）日本における里山面積の推定
竹内和彦・鷺谷いづみ・恒川篤史編『里山の環境学』財団法人東京大学出版会 42
- 塚越みのり（2013）里地・里山地域における希少植物種の分布と繁殖の規定要因に関する
生態学的基礎研究 群馬大学社会情報学部卒業論文

- 中静透・飯田磁生（1996）雑木林の種多様性. 亀山章編『雑木林の植生管理』
ソフトサイエンス社, p. 17-24
- 中村孝司（2010）外来生物とは？, 『外来生物の生態学進化する脅威とその対策』
種生物学会編株式会社文一総合出版 26
- 服部保・赤松弘治・武田義明・小館誓治・上甫木昭春・山崎寛（1995）里山の現状と
里山管理. 人と自然, 6, 1-32
- 服部保・栃本大介（2008）六甲山におけるブナの衰退 岩槻邦夫・堂本暁子編
『温暖化と生物多様性』築地書館株式会社 196
- 林希一郎（2010）『はじめて学ぶ生物多様性と暮らし・経済』中央法規出版株式会社 20
- 日比保史・千葉知世（2010）生物多様性条約 COP10 への期待国際 NGO の視点
『森林環境 2010 生物多様性 COP10 へ』森林環境研究会編森林文化協会 26, 27, 28
- 福島彩（2015）里山地域に生育する希少植物種の保全方法に関する生態学的研究
群馬大学社会情報学部卒業論文
- 藤森隆郎（2003）『新たな森林管理持続可能な社会に向けて』社団法人全国林業改良普及協
会 337
- 星山耕一（2011）『信州の希少植物と森林づくり』社団法人長野県林業コンサルタント協会
編 オフィスエム 9
- 松澤篤郎・木暮市郎・青木雅夫・大森威宏・増田和明（2003）(2) 植生. 2. 草地・
草原地域. 榛名山. 良好な自然環境を有する地域学術調査報告書 (X X I X). 132
- 三浦慎悟（1999）『野生動物の生態と農林業被害』全国林業改良普及協会
- 室山泰之（2003）『里のサルとつきあうには』京都大学出版会
- 矢原徹一（2003）『レッドデータプラント』株式会社山と溪谷社 3
- 山崎寛・青木京子・服部保・武田義明（2000）里山の植生管理による種多様性の増加.
ランドスケープ研究, 63, 481-484
- 鷺谷いづみ（2001）1. 2 保全生態学からみた里山自然, (5) 里地・里山における種の
多様性をもたらす要因『里山の環境学』財団法人東京大学出版会 16
- 鷺谷いづみ・武内和彦・西田睦（2005）『生態系へのまなざし』財団法人東京大学出版 5,
29, 35, 37, 39, 59, 70, 187, 291
- 鷺谷いづみ（2010）『生物多様性入門』20

- 鷺谷いづみ (2011) 『さとやま生物多様性と生態系模様』株式会社岩波書店 9, 65, 100, 117, 119, 127
- 渡辺綱男 (2010) 生物多様性条約 COP10 と SATOYAMA イニシアティブ-持続可能な自然資源の利用・管理のために-『森林環境 2010 生物多様性 COP10 へ』森林環境研究会編 森林文化協会 40, 41
- A. Mittermeier et al. (2004) Hotspots Revisited: Earth's Biologically Richest and Most Endangered Terrestrial Ecoregions
- Callum M Roberts et. al. (2002) Marine biodiversity hotspots and conservation priorities for tropical reefs, Science, Vol. 295. no. 5558, pp. 1280 _ 1284
- FAO (2005) The Global Forest Resource Assessment 2005
- Millennium Ecosystem Assessment (2007) 『国連ミレニアムエコシステム評価生態系サービスと人類の将来』株式会社オーム社 68
- Whittaker, R. H. (1960): Vegetation of the Siskiyou Mountains. Oregon and California Ecological Monographs, 30, 279-338
- 外務省 (2009) 世界経済における成長と責任
http://www.mofa.go.jp/Mofaj/Gaiko/summit/heiligendamm07/pdfs/g8_s_ss.Pdf
- 環境省 HP 環境省第4次レッドリスト掲載種数表 <http://www.env.go.jp/press/files/jp/21434.pdf>
- 環境省 HP 里値里山の保全・活用
<http://www.env.go.jp/nature/satoyama/initiative.html>
- 環境省パンフレット SATOYAMA イニシアティブ自然共生社会の実現を目指して
http://www.env.go.jp/nature/satoyama/pamph/j_satoyama_initiative_pamph.pdf
- 群馬県 HP
<https://www.pref.gunma.jp/01/e2310244.html>
- 生物多様性センターHP 生物多様性とは
<http://www.biodic.go.jp/biodiversity/about/about.html>
- 生物多様性センターHP 生物多様性に迫る危機
http://www.biodic.go.jp/biodiversity/about/biodiv_crisis.html
- 生物多様性条約事務局地球規模生物多様性概況第3版
<https://www.cbd.int/doc/publications/gbo/gbo3-final-jp.pdf>

IUCN 日本委員会 HP レッドリストカテゴリー

<http://www.iucn.jp/species/redlistcategory.html>

SATOYAMA イニシアティブ国際パートナーシップ HP

<http://satoyama-initiative.org/ja/about/>

写真・表・図



写真1 県立榛名公園・沼ノ原の調査地
（上）ススキ草原。2015年9月28日撮影
（下）ミズナラ林。2015年9月28日撮影。



写真 2 北榛名地域の調査地

(上) スギ植林地。2015 年 5 月 17 日撮影。

(下) 絶滅危惧種 A 自生地。2015 年 5 月 17 日撮影。



写真3 県立榛名公園で確認された絶滅危惧種・希少種

(上左)カセンソウ。2015年7月31日撮影。

(上右)キキョウ。2015年7月31日撮影。

(中左)コウリンカ。2015年7月31日撮影。

(中右)フシグロセンノウ。2015年7月31日撮影。

(下左)エゾカワラナデシコ。2015年7月31日撮影。

写真 4 北榛名地域で確認された絶滅危惧種 A 2015 年 5 月 17 日撮影。

表 1 各調査地の調査日と調査内容一覧

表 2 材料植物の種子の産地・採取年および発芽実験スケジュール一覧

科名	和名	生活型	採取日時	採取場所	生活環境	実験開始日	実験終了日	播種回数	実験温度区分					シームレス
									15.6℃	17.8℃	22.10℃	25.13℃	20.15℃	
キク科	カキツバタ	多年草	2012.9.29	国立植物公園	20ヶ月	2015年6月9日	2015年6月6日	99回	○	○	○	○	○	○
キク科	キキョウ	多年草	2014.9.17	国立植物公園	20ヶ月	2015年6月9日	2015年6月6日	99回	○	○	○	○	○	○
キク科	ニガハジカ	多年草	2013.9.13	国立植物公園	20ヶ月	2015年6月9日	2015年6月6日	99回	○	○	○	○	○	○
キク科	ハシロコシク	多年草	2014.9.13	国立植物公園	20ヶ月	2015年6月9日	2015年6月6日	99回	○	○	○	○	○	○
キク科	オホバシク	多年草	2014.9.17	国立植物公園	20ヶ月	2015年6月9日	2015年6月6日	99回	○	○	○	○	○	○
キク科	オキナギク	多年草	2014.9.17	国立植物公園	20ヶ月	2015年6月9日	2015年6月6日	99回	○	○	○	○	○	○
キク科	エリカク	多年草	2013.9.7	国立植物公園	20ヶ月	2015年6月9日	2015年6月6日	99回	○	○	○	○	○	○

注：絶滅危惧種 A については嶋方氏の卒業論文を参照のこと。

表 3 材料植物の栽培実験スケジュール一覧

和名	生活型	植え替え日	実験開始日	サンプリング日	実施光条件区分			
					100%	13%	9%	3%
キオウ	多年草	2015/8/18	2015/8/18	初期 2015/8/31 最終 2015/9/24	○	○	○	○
クサレダマ	多年草	2015/8/18	2015/8/18	初期 2015/8/31 最終 2015/9/24	○	○	○	○
エゾカワラナデシコ	多年草	2015/7/13	2015/7/13	初期 2015/7/30 最終 2015/8/27	○	○	○	○

表 5 発芽実験における各植物の最終発芽率一覧

科名	植物名	最終発芽率・標準偏差	温度区						冷温なし25/13℃
			30/15℃	25/13℃	22/10℃	17/8℃	10/6℃		
キク科	カゼンソウ	最終発芽率(%)	7.3	8.7	8.7	5.3	1.3	7.3	
		標準偏差	3.1	5.0	5.0	4.2	1.2	4.2	
キク科	キオン	最終発芽率(%)	12.0	22.7	30.0	19.3	27.3	24.0	
		標準偏差	0.0	12.1	5.3	2.3	5.8	5.3	
キク科	コウリンカ	最終発芽率(%)	10.7	25.3	16.0	4.0	0.0	40.7	
		標準偏差	5.0	4.2	4.0	3.5	0.0	15.0	
キク科	ハンゴソウ	最終発芽率(%)	30.0	58.7	51.3	38.0	8.0	30.7	
		標準偏差	2.0	7.0	10.1	4.0	6.0	11.0	
サクラソウ科	オカトラノオ	最終発芽率(%)	37.3	22.0	20.0	6.7	0.0	58.7	
		標準偏差	12.9	10.4	6.7	3.1	0.0	5.8	
サクラソウ科	クサレダマ	最終発芽率(%)	60.0	37.3	24.7	1.3	0.0	12.0	
		標準偏差	2.0	9.9	5.0	2.3	0.0	10.6	
ナデシコ科	エゾカワラナデシコ	最終発芽率(%)	54.0	72.0	54.7	29.3	1.3	36.9	
		標準偏差	5.3	11.4	11.4	6.1	2.3	12.1	

表 6 絶滅危惧種 A の発芽実験（生存検定）における最終発芽率一覧

表 7 絶滅危惧種 A の発芽実験（冷湿処理）における最終発芽率一覧

表 8 栽培実験における各植物の乾燥重量平均一覧

植物名	生活型	乾燥重量平均・標準偏差	初期サンプリング時	最終サンプリング時			
				3%	9%	13%	100%
クサシダマ	多年草	乾燥重量平均 (g)	0.036	0.020	0.031	0.081	0.233
		標準偏差	0.016	0.019	0.023	0.056	0.113
キオン	多年草	乾燥重量平均 (g)	0.069	0.053	0.096	0.152	0.245
		標準偏差	0.049	0.033	0.038	0.072	0.096
エゾカワラナデシコ	多年草	乾燥重量平均 (g)	0.022	0.022	0.056	0.063	0.097
		標準偏差	0.005	0.011	0.021	0.048	0.055

表 9 栽培実験における各植物の生長解析の結果一覧

植物名	生活型	相対葉量子密度	平均					標準偏差				
			RCGR(g/day)	LA(g/m ² /g)	NA(g/m ² /g)	SLA(m ² /g)	SLA(m ² /g)	RCGR(g/day)	LA(g/m ² /g)	NA(g/m ² /g)	SLA(m ² /g)	SLA(m ² /g)
キヌンド	多年草	3%	-0.013	0.022	-0.432	0.061	0.018	0.006	0.966	0.025		
		9%	0.023	0.021	1.205	0.056	0.010	0.004	0.743	0.005		
		13%	0.026	0.018	1.880	0.051	0.012	0.003	0.964	0.004		
		100%	0.051	0.015	4.007	0.026	0.010	0.003	0.994	0.003		
カサシダマ	多年草	3%	0.005	0.042	0.128	0.106	0.018	0.009	0.457	0.026		
		9%	0.026	0.033	0.853	0.087	0.015	0.004	0.963	0.014		
		13%	0.030	0.034	0.943	0.082	0.022	0.009	0.727	0.014		
		100%	0.076	0.024	4.517	0.026	0.006	0.005	1.643	0.013		
エノカワラナデシコ	多年草	3%	-0.003	0.035	-0.047	0.066	0.012	0.006	0.332	0.014		
		9%	0.031	0.028	1.147	0.044	0.009	0.004	0.372	0.007		
		13%	0.030	0.028	1.180	0.046	0.018	0.003	0.836	0.006		
		100%	0.047	0.020	2.887	0.020	0.017	0.002	1.243	0.003		

図1 県立榛名公園における分布調査で確認されたキキョウの分布

2015年7月31日、8月20日に遊歩道を踏査して調査を行った。目視により植物を確認し、ポータブルGPS (GARMIN GPSmap62SCJ)を用いて生育位置を記録した。灰色の線は調査経路を表す。生育が確認されたのは78地点であった。

図 2 県立榛名公園における分布調査で iPhone5S により生育位置を記録したキキョウの分布
2015 年 7 月 31 日、8 月 20 日に遊歩道を踏査して調査を行った。目視により植物を確認し、iPhone5S
の GPS 機能を用いて写真撮影をすることにより位置情報を記録した。生育位置が記録されたのは
45 地点であった。

図3 県立榛名公園における分布調査で確認されたエゾカワラナデシコの分布

2015年7月31日、8月20日に遊歩道を踏査して調査を行った。目視により開花植物を確認し、ポータブルGPS（GARMIN GPSmap62SCJ）を用いて生育位置を記録した。灰色の線は調査経路を表す。生育が確認されたのは57地点であった。

図4 県立榛名公園における分布調査で iPhone5S により生育位置を記録したエゾカワラナデシコの分布

2015年7月31日、8月20日に遊歩道を踏査して調査を行った。目視により開花植物を確認し、iPhone5SのGPS機能を用いて写真撮影をすることにより位置情報を記録した。生育位置が記録されたのは34地点であった。

図 5 県立榛名公園における分布調査で確認されたスズサイコの分布

2015年7月31日、8月20日に遊歩道を踏査して調査を行った。目視により開花植物を確認し、ポータブルGPS（GARMIN GPSmap62SCJ）を用いて生育位置を記録した。灰色の線は調査経路を表す。生育が確認されたのは13地点であった。

図 6 県立榛名公園における分布調査で確認されたカセンソウの分布

2015年7月31日、8月20日に遊歩道を踏査して調査を行った。目視により開花植物を確認し、ポータブルGPS (GARMIN GPSmap62SCJ)を用いて生育位置を記録した。灰色の線は調査経路を表す。生育が確認されたのは109地点であった。

図7 県立榛名公園における分布調査で確認されたコウリンカの分布

2015年7月31日、8月20日に遊歩道を踏査して調査を行った(●)。目視により開花植物を確認し、ポータブルGPS(GARMIN GPSmap62SCJ)を用いて生育位置を記録した。太い曲線は2015年の調査経路を表し、過去の調査結果も併せて記した。生育が確認されたのは、2013年40地点(○)、2014年24地点(●)、2015年99地点(●)であった。

図 8 北榛名地域における分布調査で確認された絶滅危惧種 A の分布

2015 年 5 月 17 日に踏査して調査を行った。目視により開花植物を確認し、ポータブル GPS (GARMIN GPSmap62SCJ) を用いて生育位置を記録した。生育位置が記録されたのは 193 地点であった。

図 9 北榛名地域における分布調査で iPhone5S により生育位置を記録した絶滅危惧種 A の分布
2015 年 5 月 17 日に踏査して調査を行った。目視により開花植物を確認し、iPhone5S の GPS 機能
を用いて写真撮影をすることにより位置情報を記録した。生育位置が記録されたのは 199 地点であ
った。

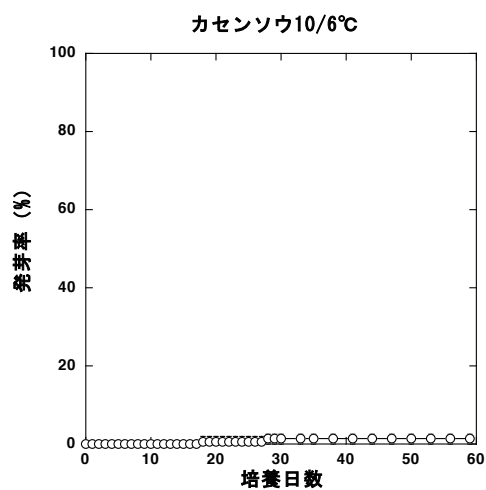
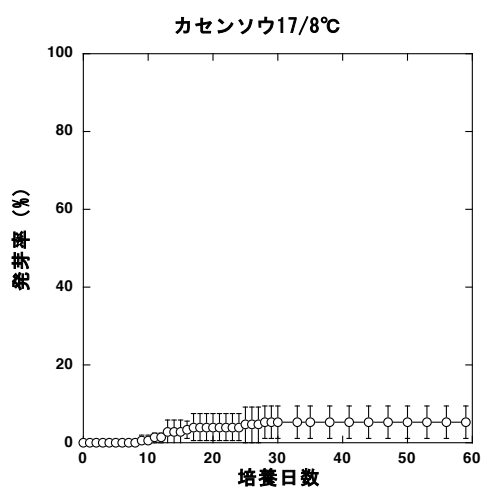
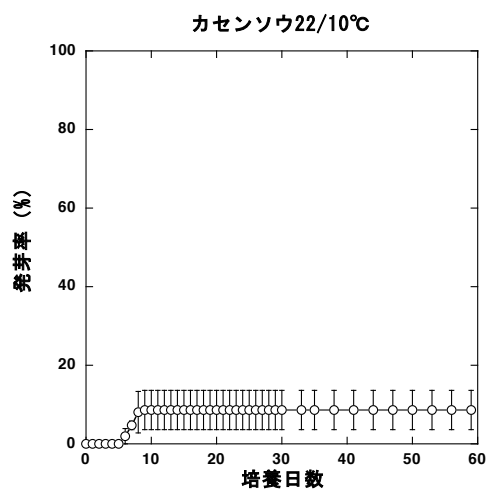
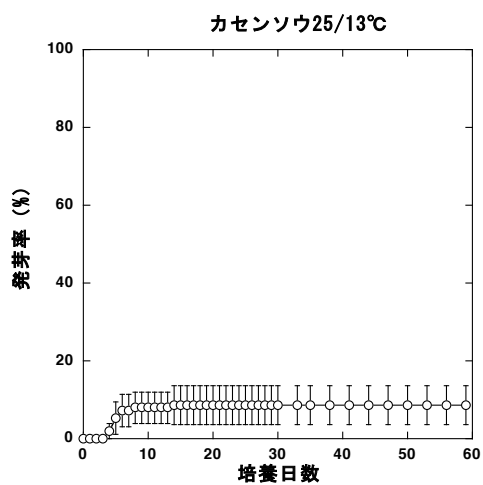
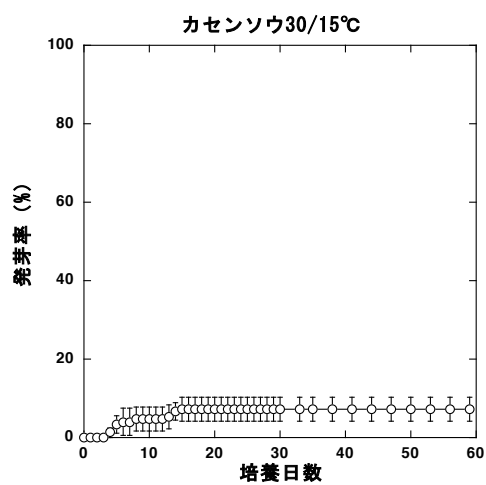


図 10 冷湿処理を施したカセンソウ種子の発芽率の経時変化

温度条件をそれぞれ 30/15℃、25/13℃、22/10℃、17/8℃、10/6℃（昼/夜）に設定した温度勾配型恒温器内で 2 ヶ月間培養した。縦軸は積算発芽率を、横軸は培養開始時から起算した日数を表す。縦棒は標準偏差。n = 3。

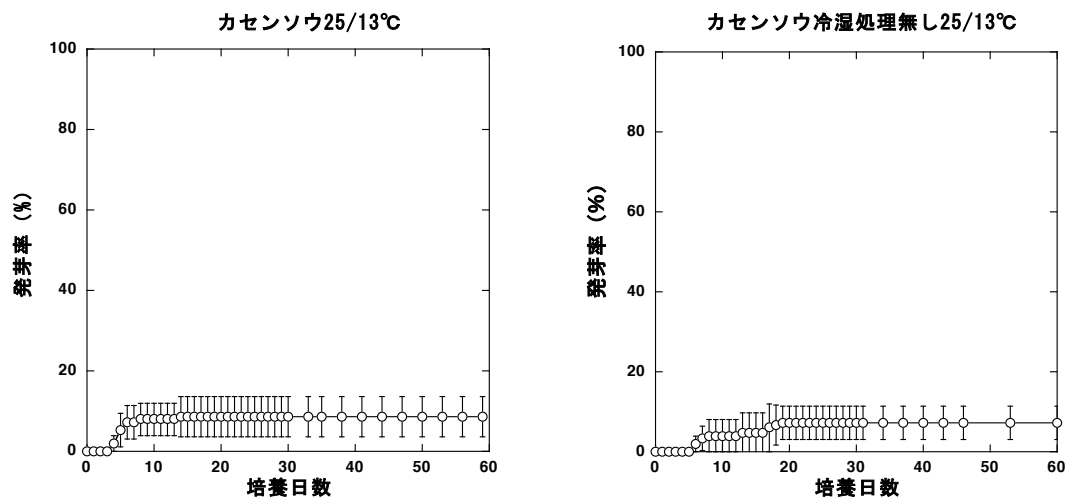


図 11 冷湿処理を施したカセンソウの種子 (左) と冷湿処理を施さなかったカセンソウの種子 (右) の発芽率の経時変化

温度条件を 25/13℃ (昼/夜) に設定した温度勾配型恒温器内で 2 ヶ月間培養した。縦軸は積算発芽率を、横軸は培養開始時から起算した日数を表す。縦棒は標準偏差。n = 3。

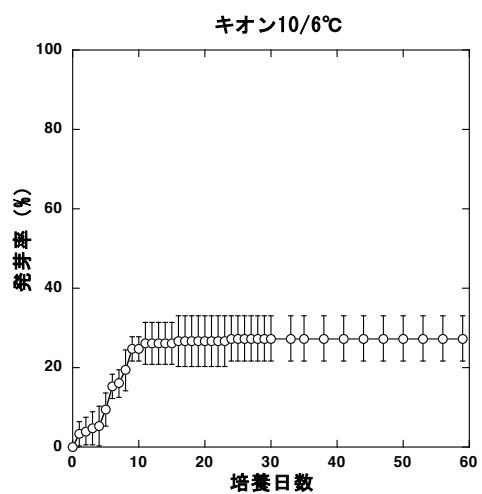
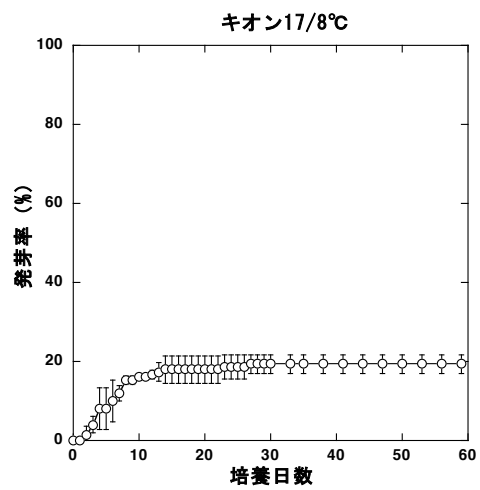
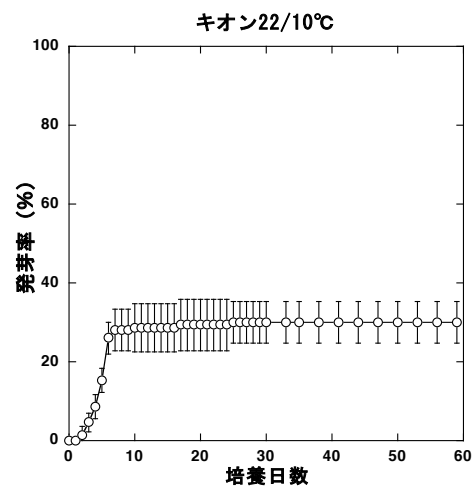
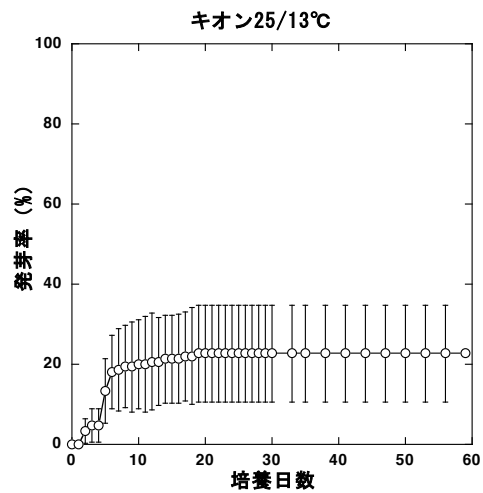
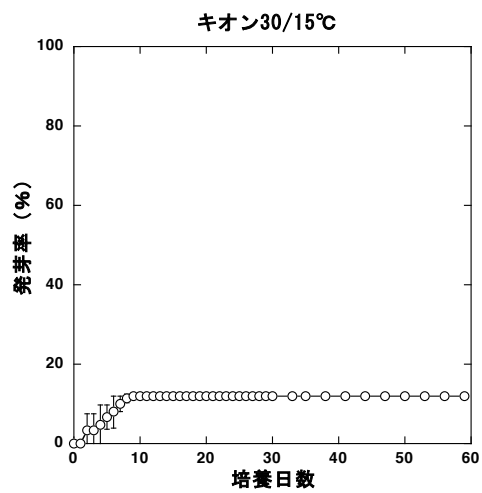


図 12 冷湿処理を施したキオン種子の発芽率の経時変化

温度条件をそれぞれ 30/15°C、25/13°C、22/10°C、17/8°C、10/6°C（昼/夜）に設定した温度勾配型恒温器内で2ヶ月間培養した。縦軸は積算発芽率を、横軸は培養開始時から起算した日数を表す。縦棒は標準偏差。n=3。

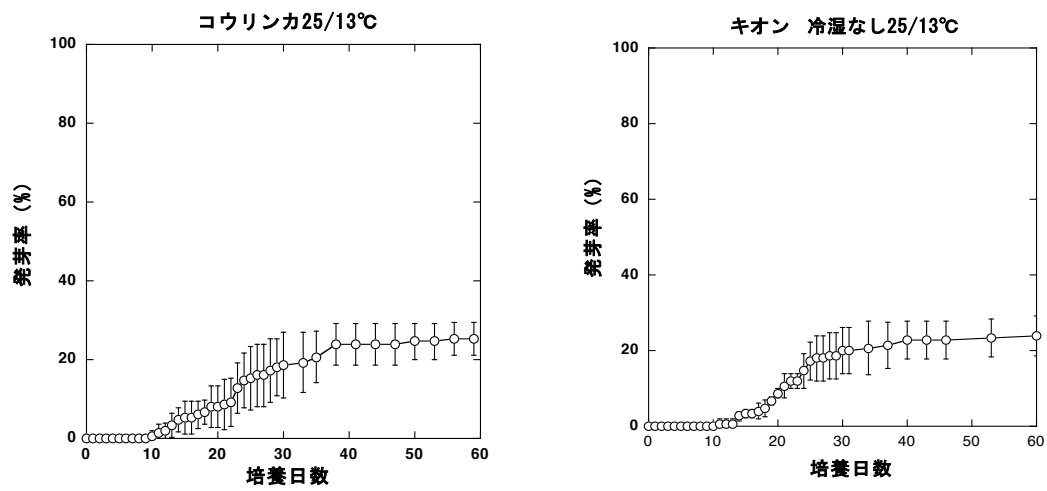


図13 冷湿処理を施したキオンの種子（左）と冷湿処理を施さなかったキオンの種子（右）の発芽率の経時変化

温度条件を 25/13℃（昼/夜）に設定した温度勾配型恒温器内で 2 ヶ月間培養した。縦軸は積算発芽率を、横軸は培養開始時から起算した日数を表す。縦棒は標準偏差。n =3。

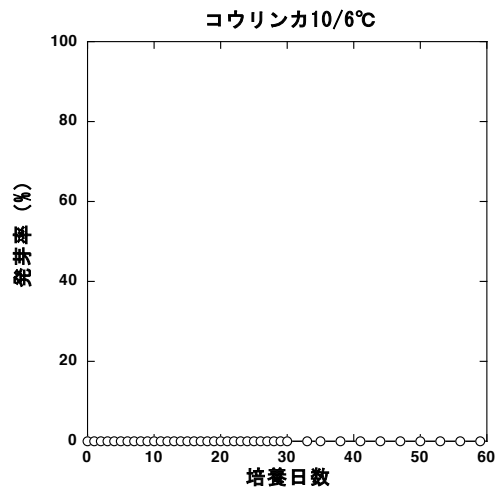
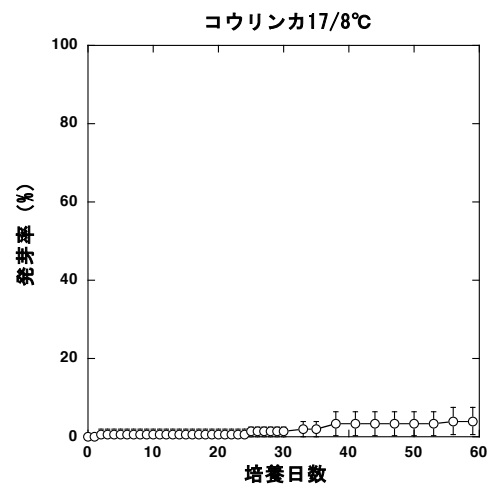
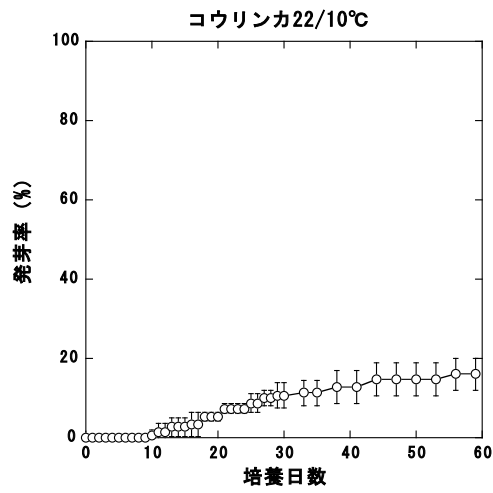
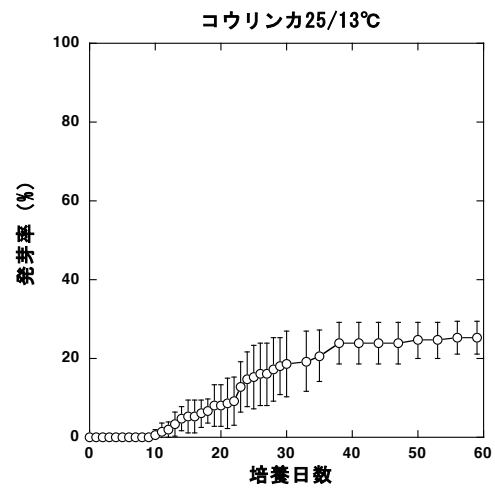
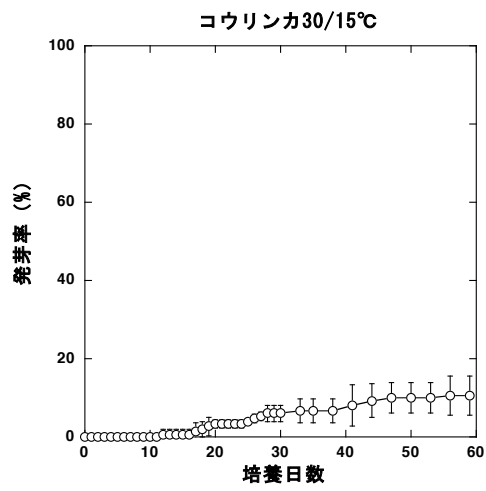


図 14 冷湿処理を施したコウリンカ種子の発芽率の経時変化

温度条件をそれぞれ 30/15°C、25/13°C、22/10°C、17/8°C、10/6°C（昼/夜）に設定した温度勾配型恒温器内で 2 ヶ月間培養した。縦軸は積算発芽率を、横軸は培養開始時から起算した日数を表す。縦棒は標準偏差。n = 3。

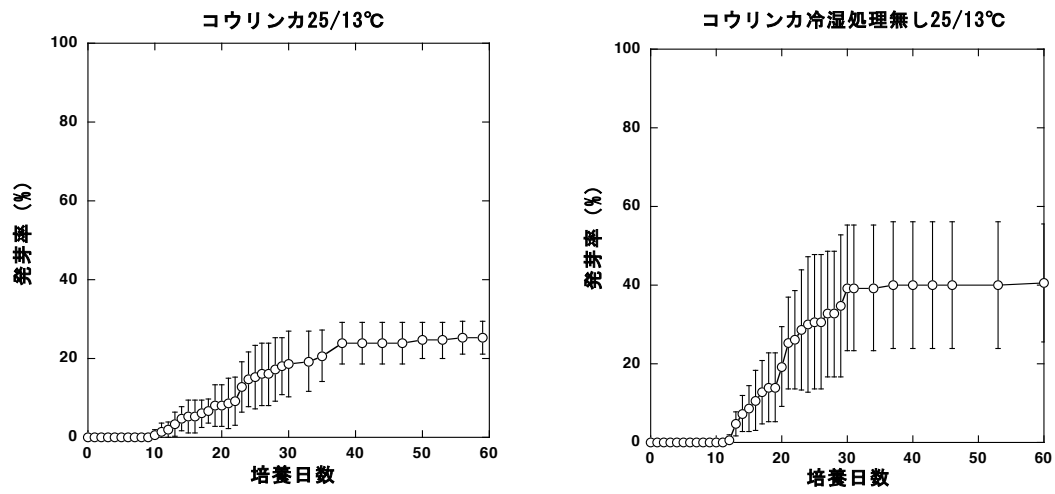


図 15 冷湿処理を施したコウリンカの種子 (左) と冷湿処理を施さなかったコウリンカの種子 (右) の発芽率の経時変化

温度条件を 25/13℃ (昼/夜) に設定した温度勾配型恒温器内で 2 ヶ月間培養した。縦軸は積算発芽率を、横軸は培養開始時から起算した日数を表す。縦棒は標準偏差。n = 3。

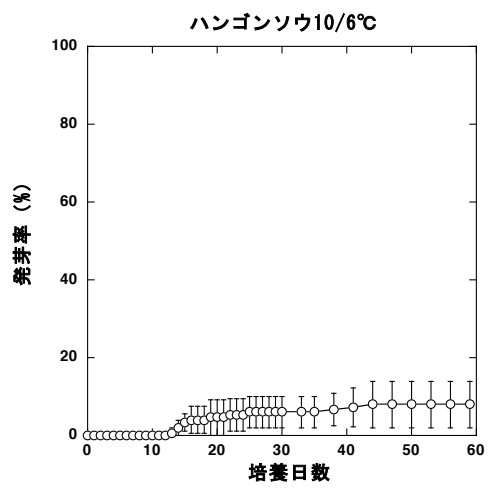
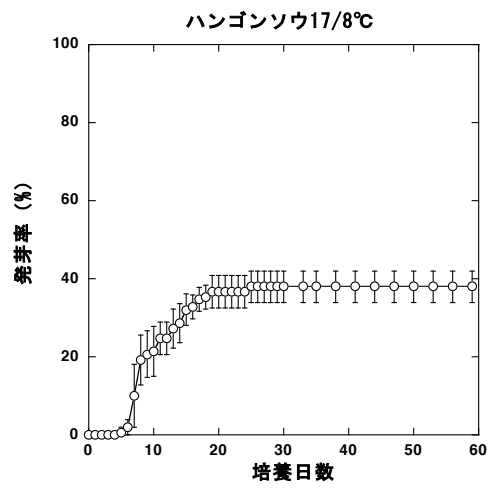
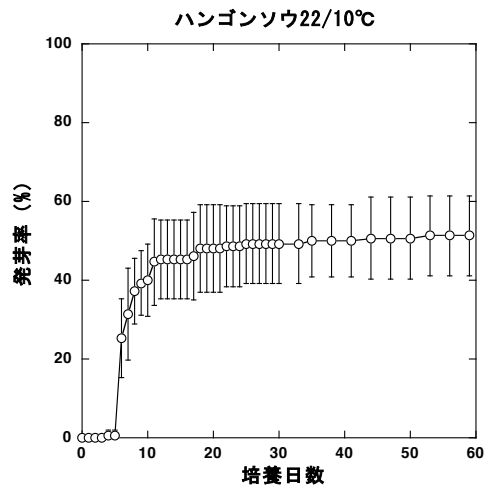
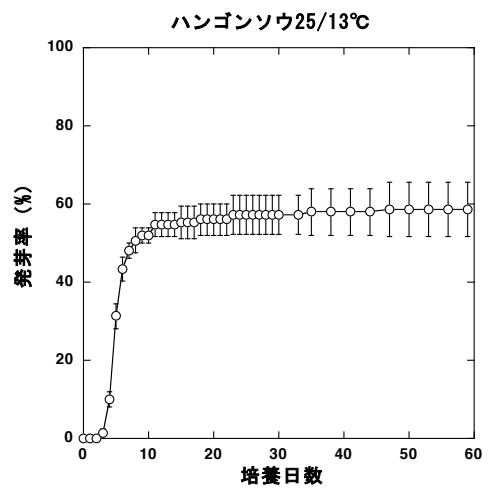
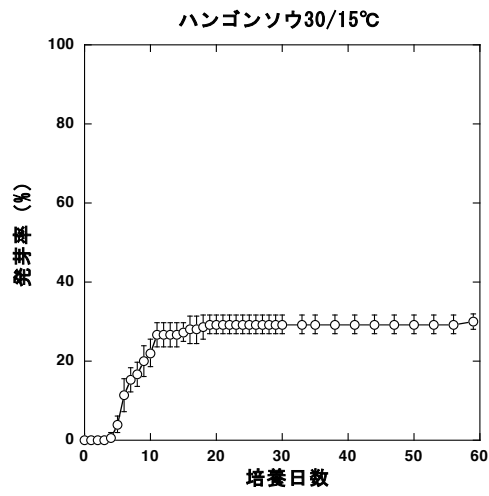


図 16 冷湿処理を施したハンゴンソウ種子の発芽率経時変化

温度条件をそれぞれ 30/15°C、25/13°C、22/10°C、17/8°C、10/6°C（昼/夜）に設定した温度勾配型恒温器内で 2 ヶ月間培養した。縦軸は積算発芽率を、横軸は培養開始時から起算した日数を表す。縦棒は標準偏差。n = 3。

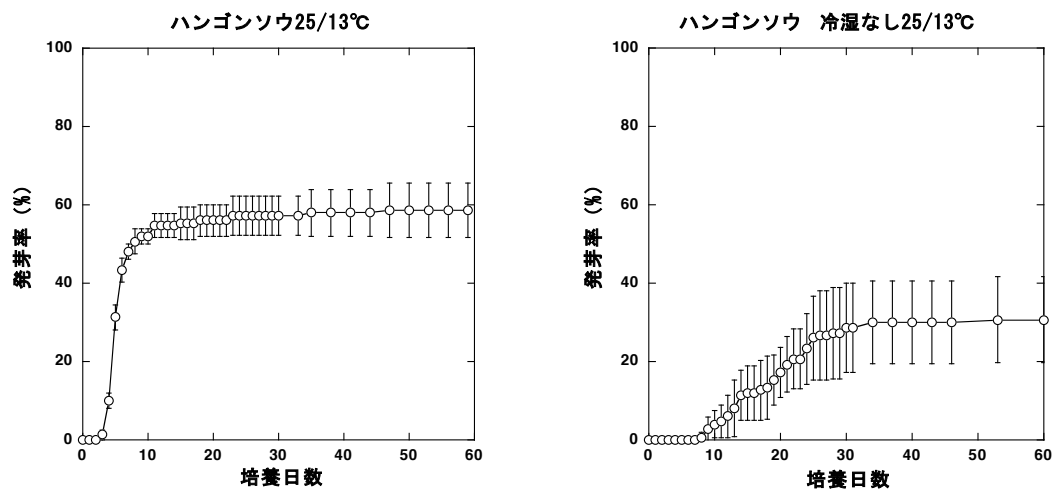


図 17 冷湿処理を施したハンゴンソウの種子（左）と冷湿処理を施さなかったハンゴンソウの種子（右）の発芽率の経時変化

温度条件を 25/13℃（昼/夜）に設定した温度勾配型恒温器内で 2 ヶ月間培養した。縦軸は積算発芽率を、横軸は培養開始時から起算した日数を表す。縦棒は標準偏差。n = 3。

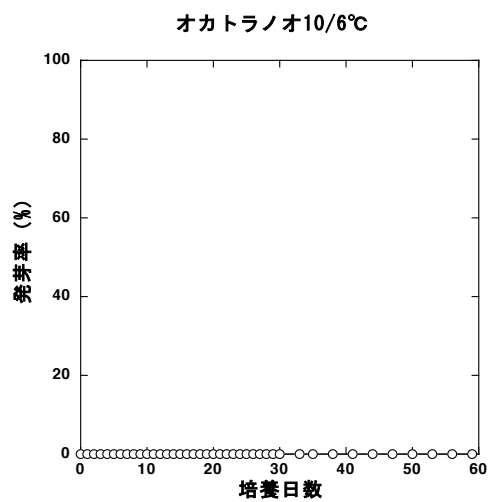
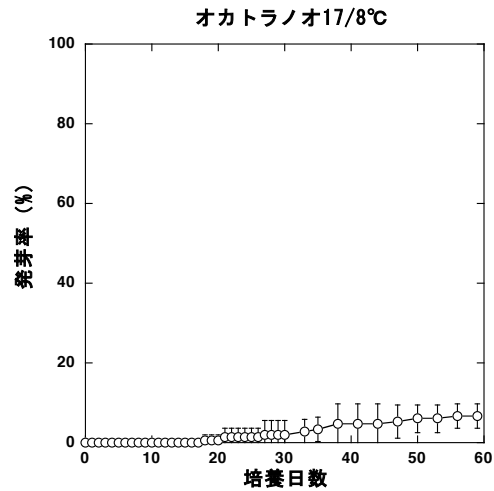
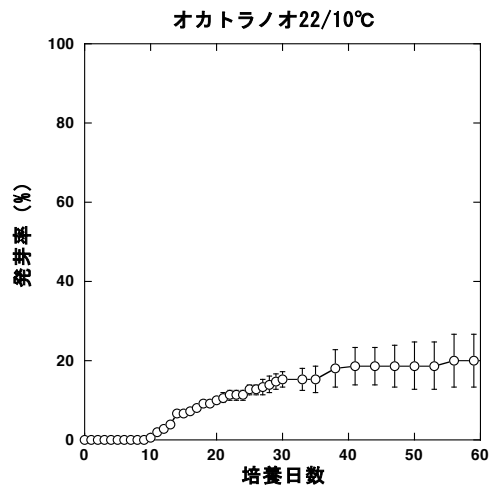
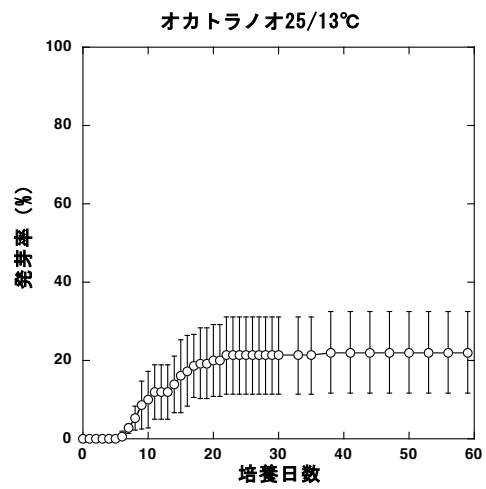
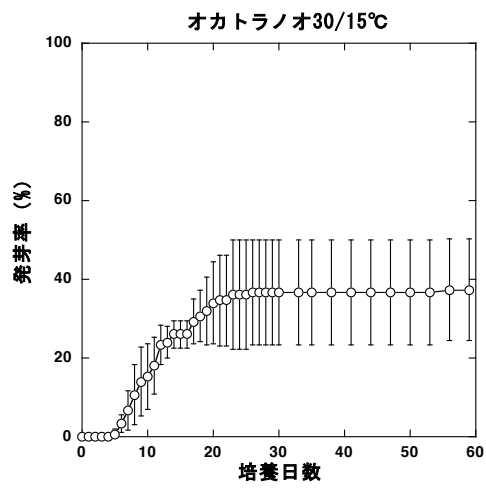


図 18 冷湿処理を施したオカトラノオ種子の発芽率の経時変化

温度条件をそれぞれ 30/15°C、25/13°C、22/10°C、17/8°C、10/6°C（昼/夜）に設定した温度勾配型恒温器内で 2 ヶ月間培養した。縦軸は積算発芽率を、横軸は培養開始時から起算した日数を表す。縦棒は標準偏差。n = 3。

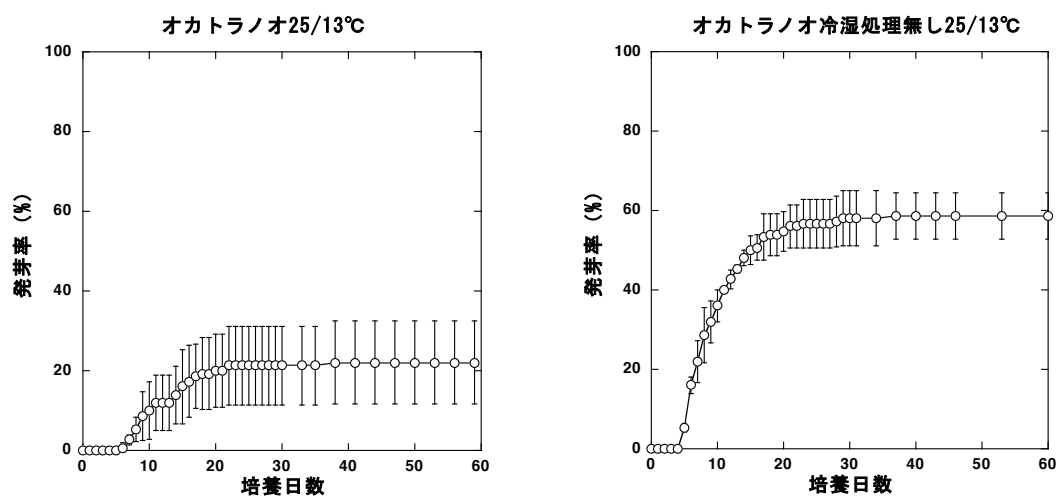


図 19 冷湿処理を施したオカトラノオの種子（左）と冷湿処理を施さなかったオカトラノオの種子（右）の発芽率の経時変化

温度条件を 25/13°C（昼/夜）に設定した温度勾配型恒温器内で 2 ヶ月間培養した。縦軸は積算発芽率を、横軸は培養開始時から起算した日数を表す。縦棒は標準偏差。n = 3。

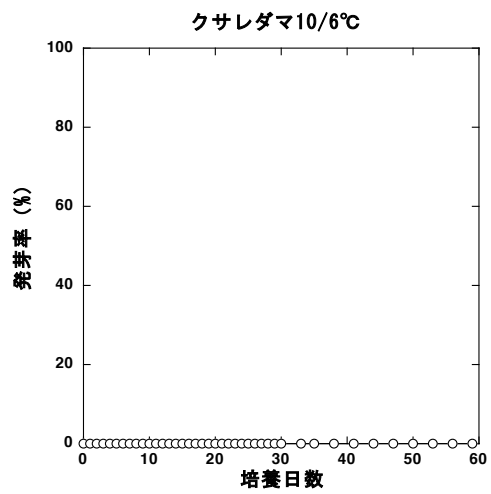
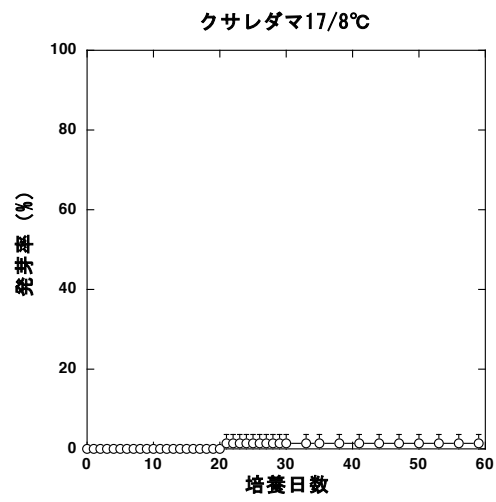
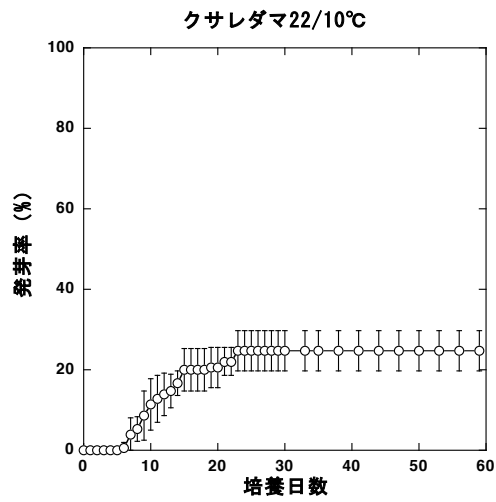
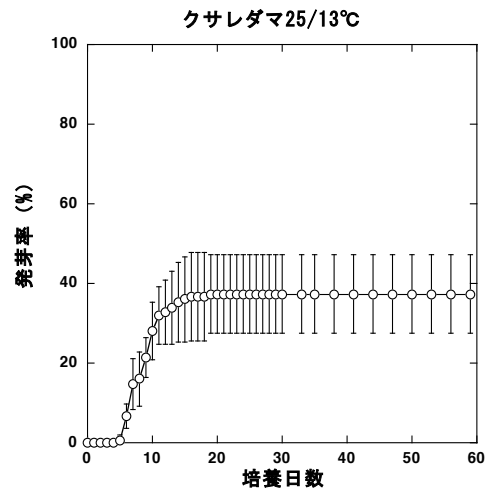
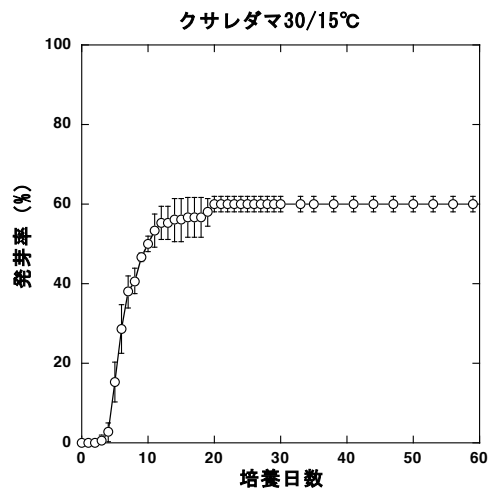


図 20 冷湿処理を施したクサレダマ種子の発芽率の経時変化

温度条件をそれぞれ 30/15°C、25/13°C、22/10°C、17/8°C、10/6°C（昼/夜）に設定した温度勾配型恒温器内で 2 ヶ月間培養した。縦軸は積算発芽率を、横軸は培養開始時から起算した日数を表す。縦棒は標準偏差。n=3。

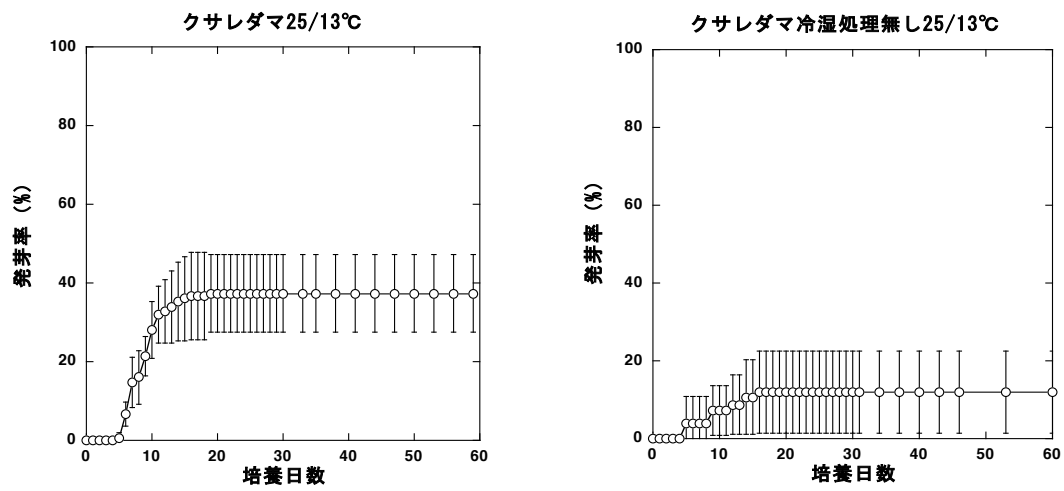


図 21 冷湿処理を施したクサレダマの種子 (左) と冷湿処理を施さなかったクサレダマの種子 (右) の発芽率の経時変化

温度条件を 25/13℃ (昼/夜) に設定した温度勾配型恒温器内で 2 ヶ月間培養した。縦軸は積算発芽率を、横軸は培養開始時から起算した日数を表す。縦棒は標準偏差。n=3。

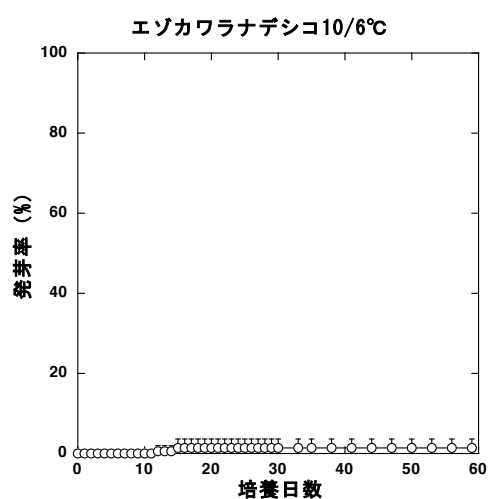
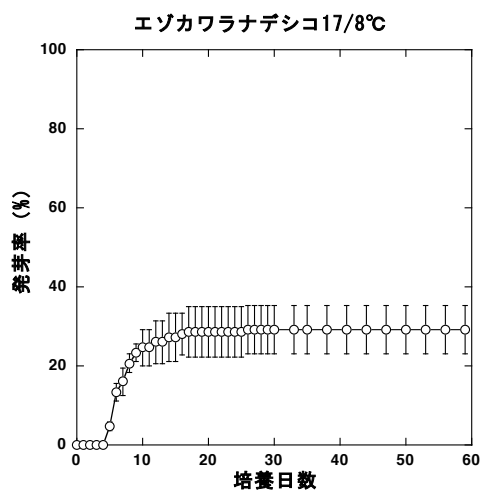
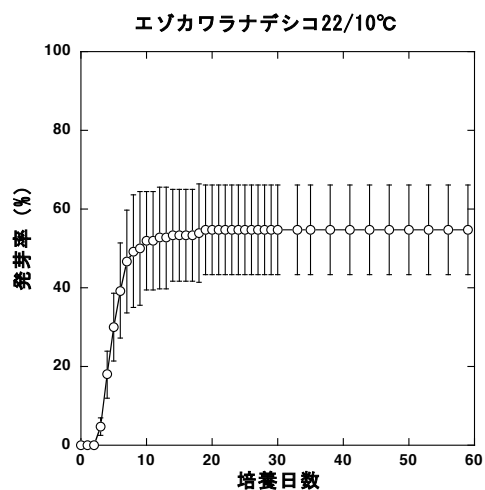
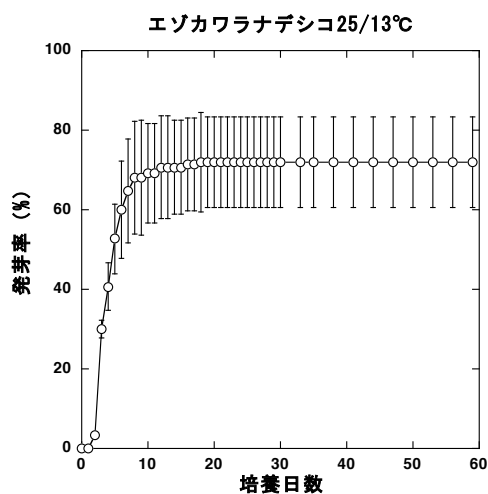
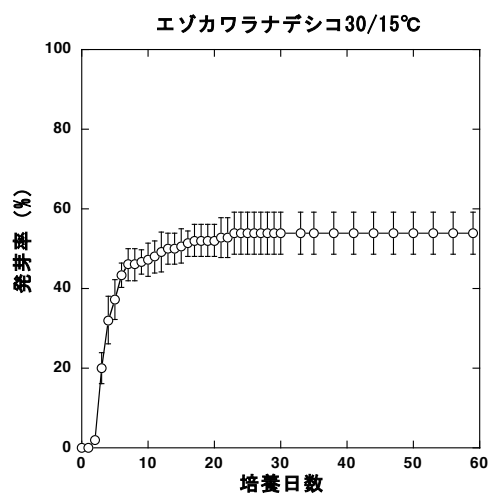


図 22 冷湿処理を施したエゾカワラナデシコ種子の発芽率の経時変化

温度条件をそれぞれ 30/15°C、25/13°C、22/10°C、17/8°C、10/6°C（昼/夜）に設定した温度勾配型恒温器内で 2 ヶ月間培養した。縦軸は積算発芽率を、横軸は培養開始時から起算した日数を表す。縦棒は標準偏差。n = 3。

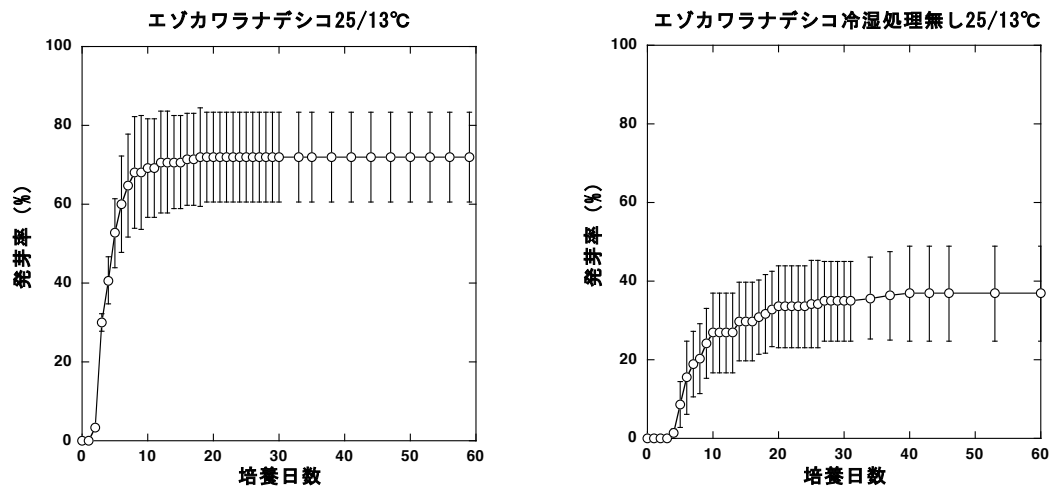


図 23 冷湿処理を施したエゾカワラナデシコの種子（左）と冷湿処理を施さなかったエゾカワラナデシコの種子（右）の発芽率の経時変化

温度条件を 25/13°C（昼/夜）に設定した温度勾配型恒温器内で 2 ヶ月間培養した。縦軸は積算発芽率を、横軸は培養開始時から起算した日数を表す。縦棒は標準偏差。n = 3。

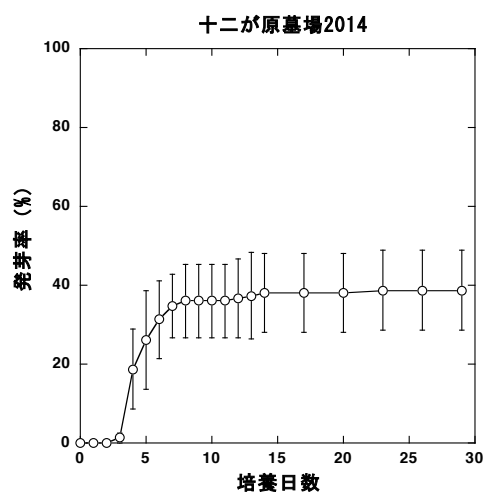
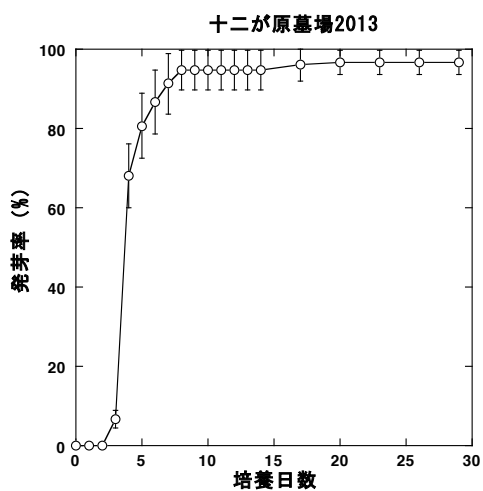
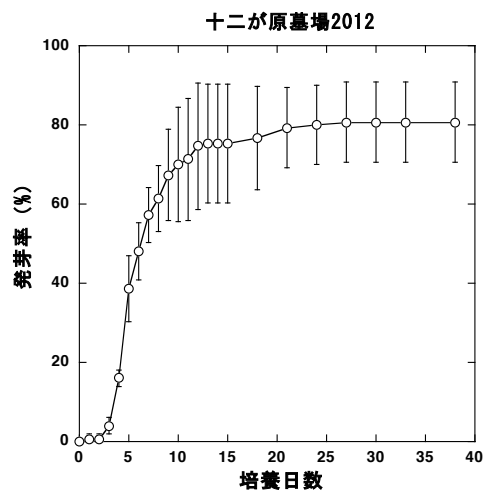
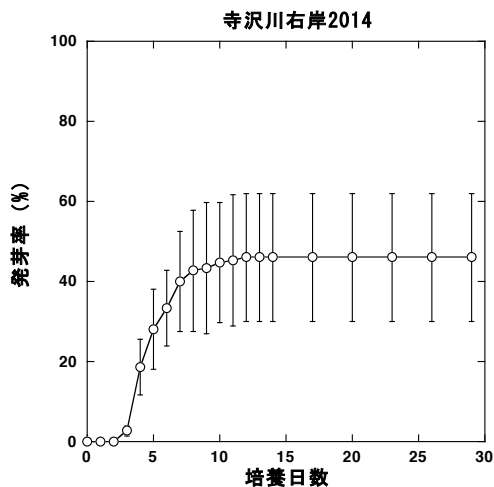
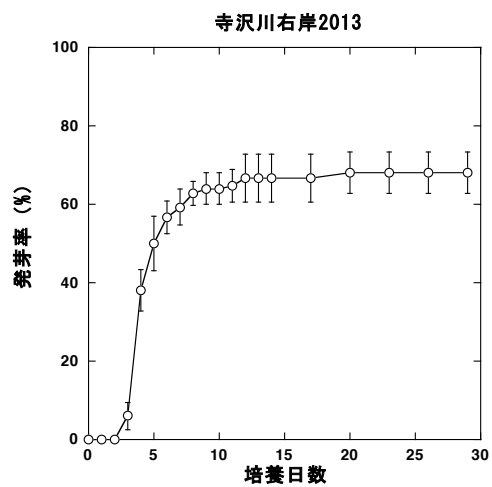


図24 絶滅危惧種Aの生存検定における発芽率の経時変化
 アルコール洗浄を2分間（十二が原基場2012のみ5分間）施した後、2日間のジベレリン処理を施してから温度条件を25/13℃（昼/夜）に設定した温度勾配型恒温器内で約1ヶ月間培養した。縦軸は積算発芽率を、横軸は培養開始時から起算した日数を表す。縦棒は標準偏差。n=3。

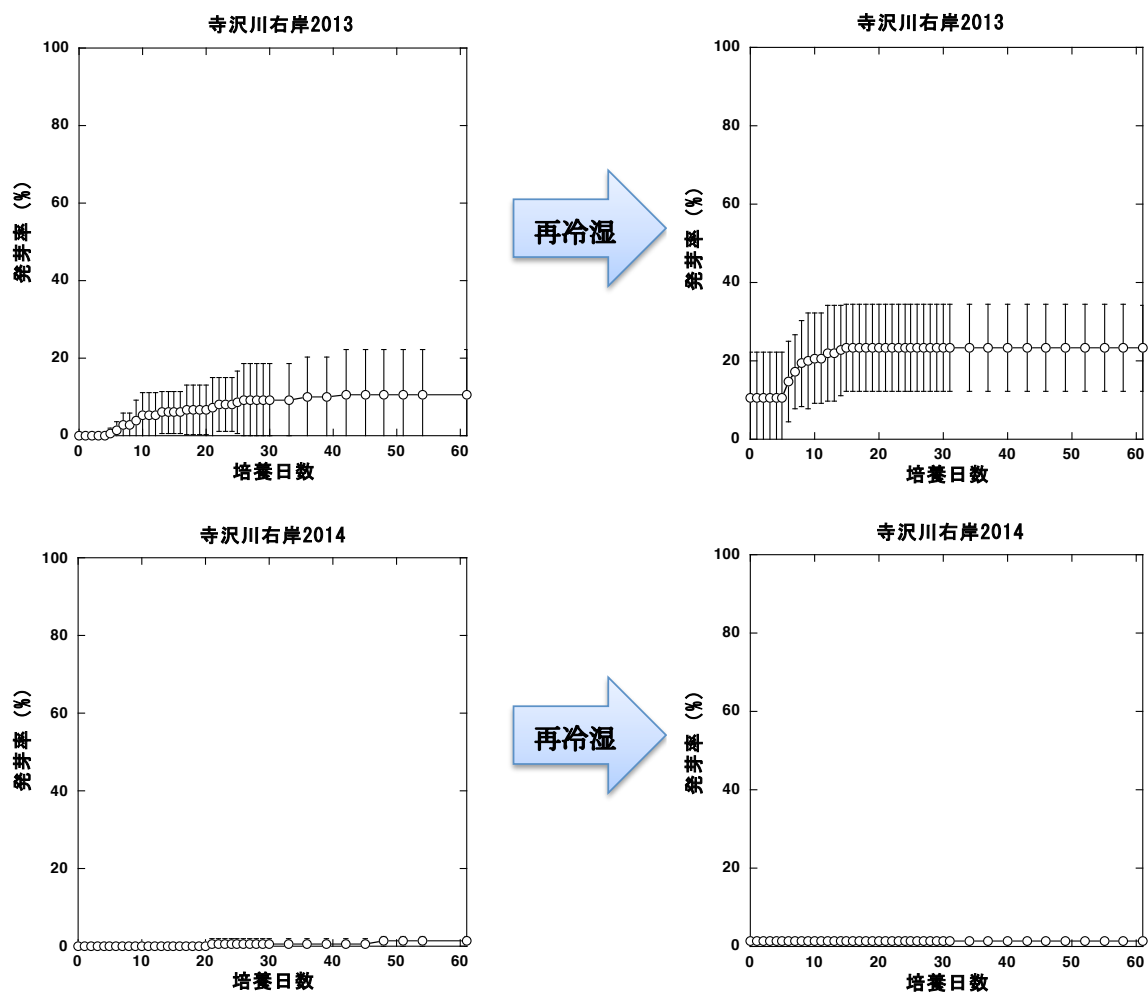


図 25 冷湿処理を施した北榛名産絶滅危惧種 A 種子の発芽率の経時変化

種子を 2 ヶ月間冷湿処理した後、25/13℃に設定した温度勾配恒温器内で 2 ヶ月間培養した。その後、未発芽の種子に再度 2 ヶ月間冷湿処理を施し同じ条件で約 2 ヶ月間培養した。縦軸は積算発芽率、横軸は培養開始から起算した日数を表す。縦棒は標準偏差。n=3

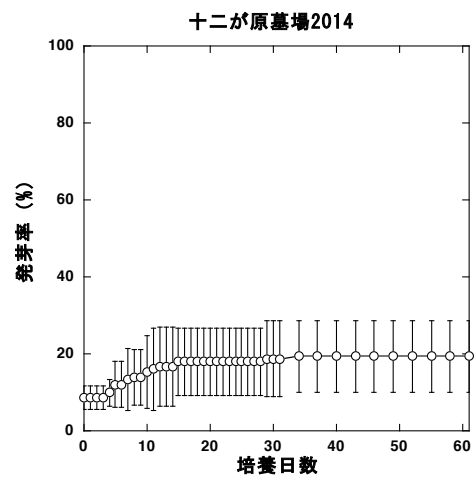
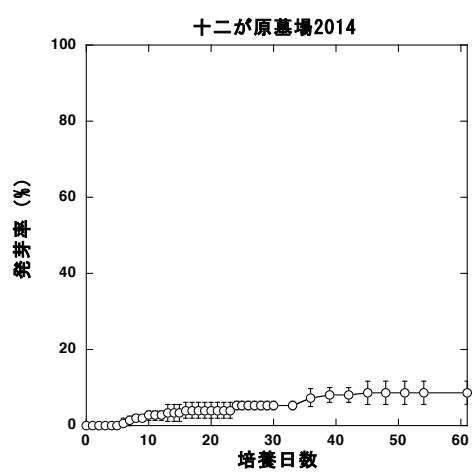
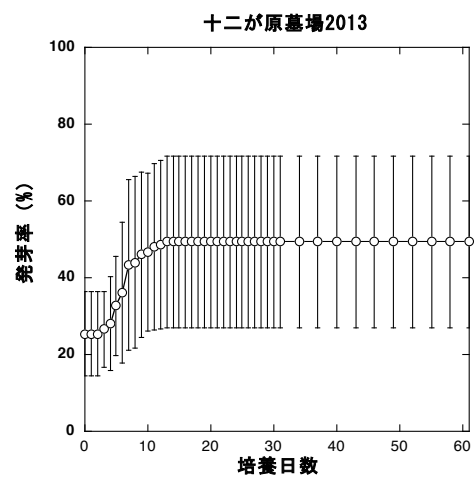
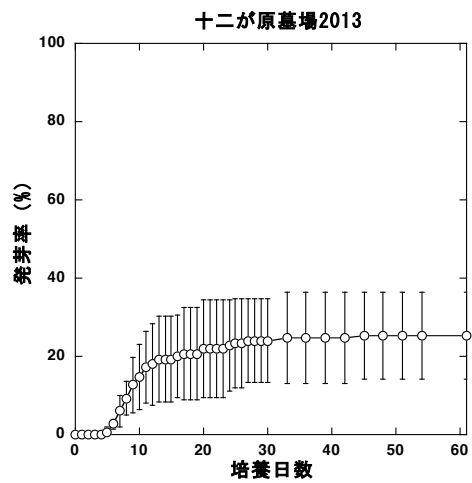
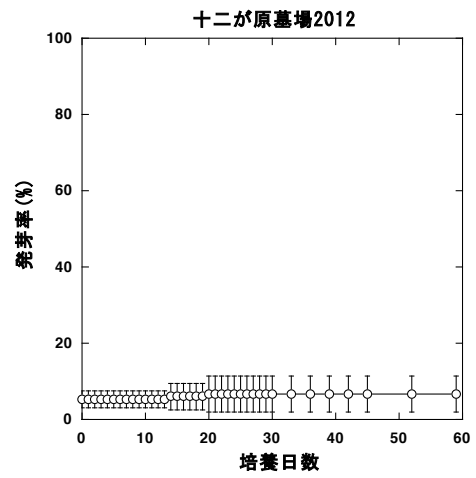
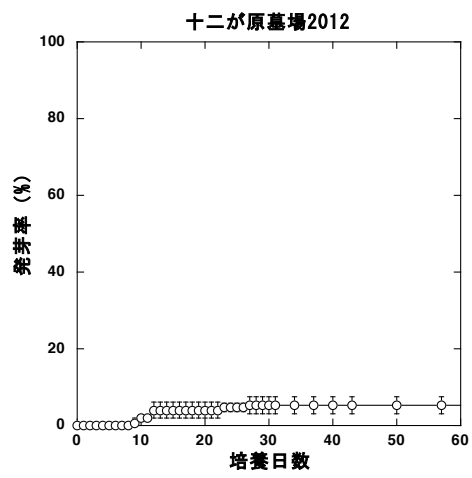


図 25 (続き) 冷湿処理を施した北榛名産絶滅危惧種 A 種子の発芽率の経時変化

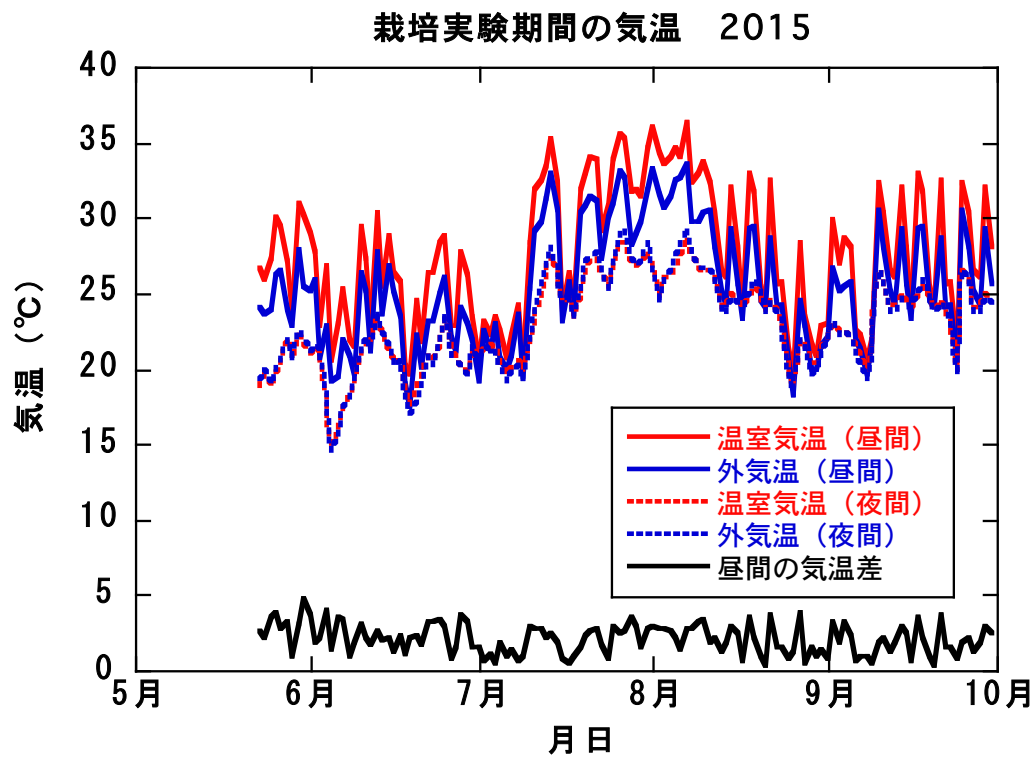


図 26 群馬大学荒牧キャンパス内における栽培実験期間中の気温
 2015年5月23日から9月30日までの間、群馬大学荒牧キャンパス内圃場および温室で気温を測定した。昼間の温室気温、昼間の外気温、夜間の温室気温、夜間の外気温、昼間の気温差を示す。

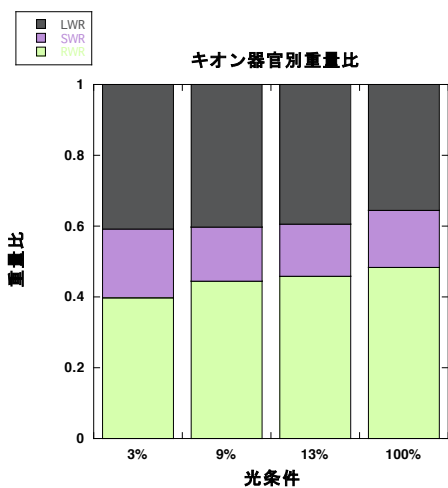
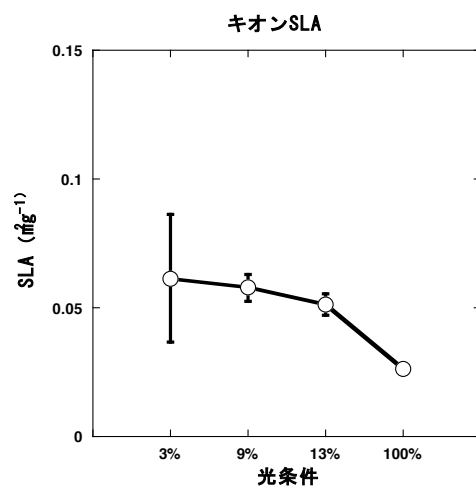
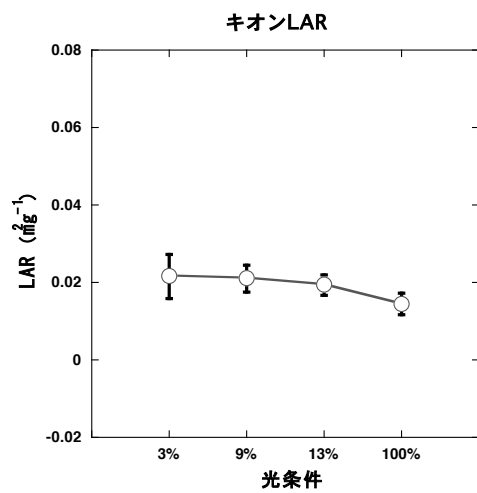
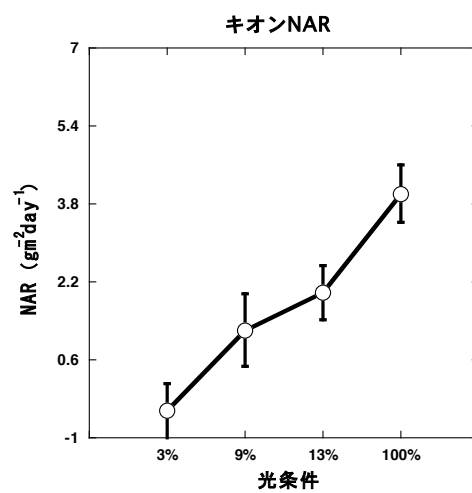
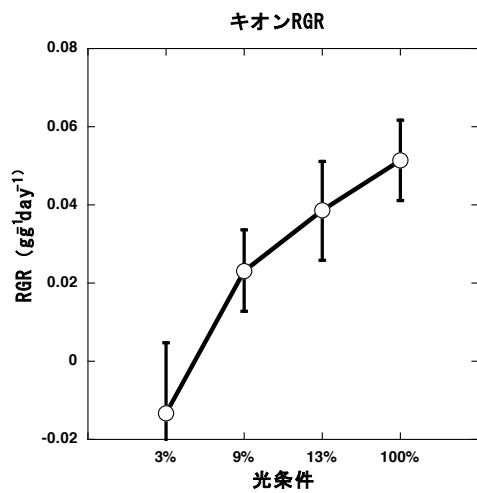


図 27 異なる相対光量子密度下で栽培したキオンの生長解析結果

群馬大学荒牧キャンパス内の裸地に設置した異なる光条件区（相対光量子密度 3%、9%、13%、100%）内で、ポット植えにした苗を約 1 ヶ月栽培した。相対成長速度(RGR)、純同化率(NAR)、葉面積比(LAR)、比葉面積(SLA)、器官別重量比(WR)を示す。縦棒は標準偏差。n=5~6。

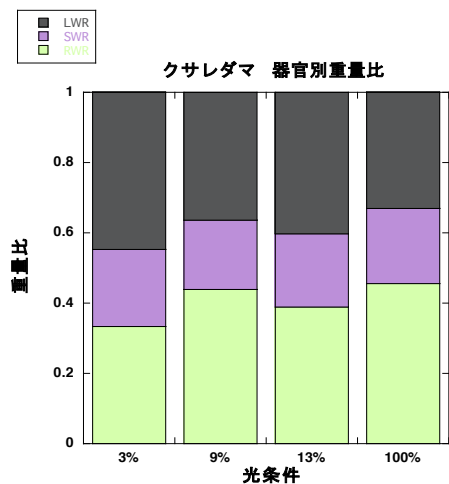
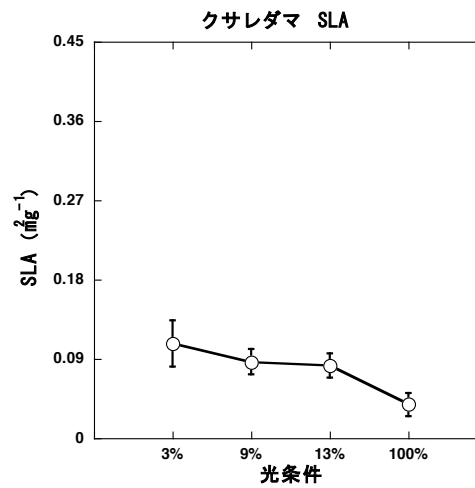
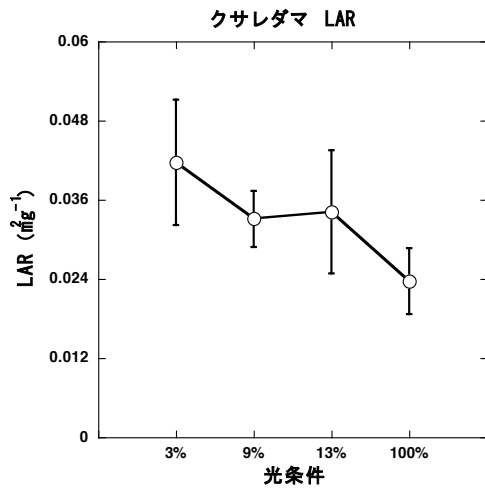
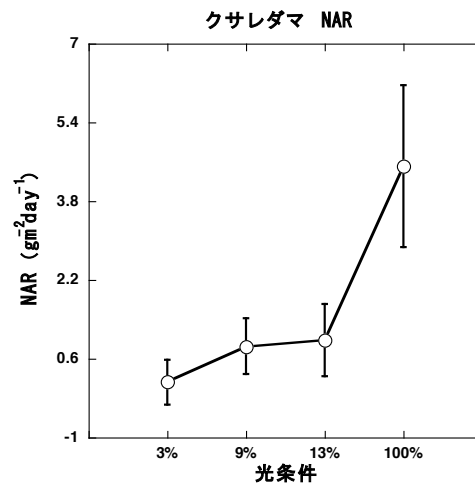
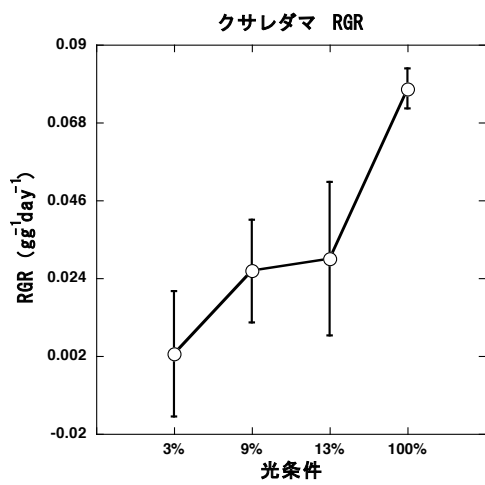


図 28 異なる相対光量子密度下で栽培したクサレダマの生長解析結果

群馬大学荒牧キャンパス内の裸地に設置した異なる光条件区（相対光量子密度 3%、9%、13%、100%）内で、ポット植えにした苗を約 1 ヶ月栽培した。相対成長速度(RGR)、純同化率(NAR)、葉面積比(LAR)、比葉面積(SLA)、器官別重量比(WR)を示す。縦棒は標準偏差。n=5。

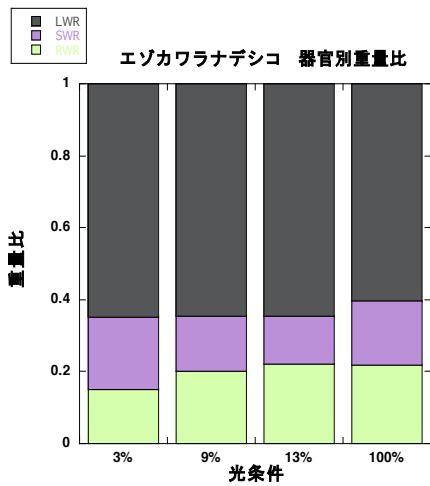
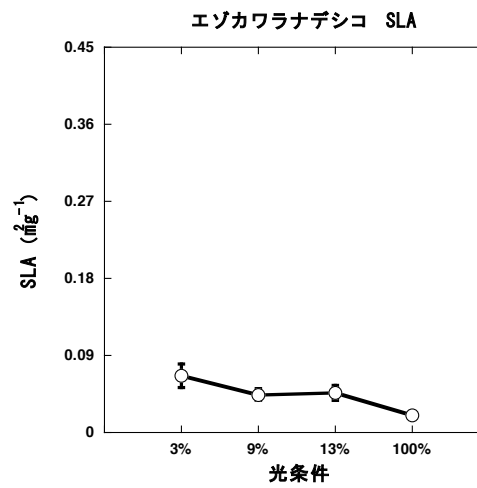
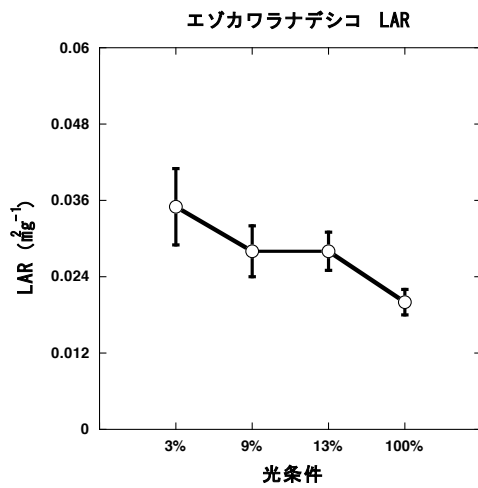
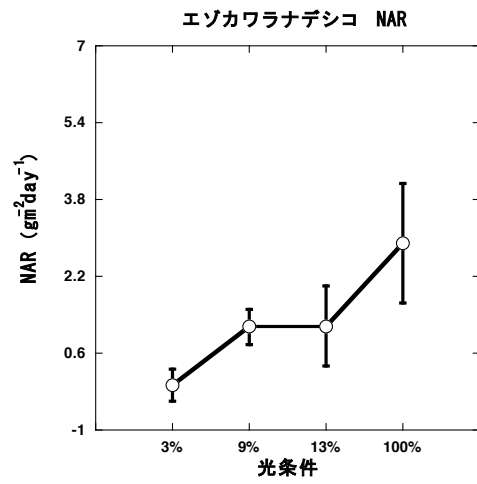
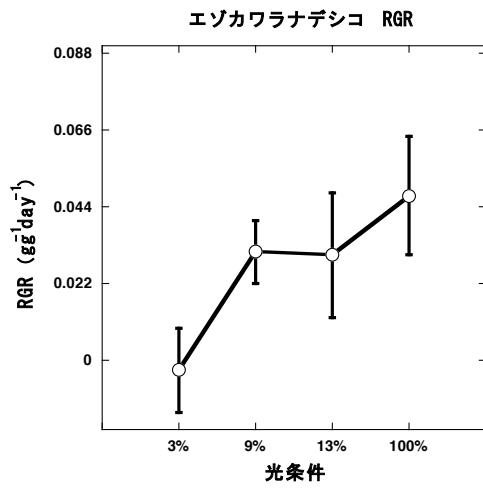


図 29 異なる相対光量子密度下で栽培したエゾカワラナデシコの生長解析結果

群馬大学荒牧キャンパス内の裸地に設置した異なる光条件区（相対光量子密度 3%、9%、13%、100%）内で、ポット植えにした苗を約 1 ヶ月栽培した。相対成長速度(RGR)、純同化率(NAR)、葉面積比(LAR)、比葉面積(SLA)、器官別重量比(WR)を示す。縦棒は標準偏差。n=6。