

卒 業 論 文

題

名

群馬県内の里地地域に生育する植物種に対する
地球温暖化の直接影響に関する生態学的研究

学籍番号

14602035

氏 名

長倉 優希

指導教員名

石川 真一 教官

平成 30 年 1 月 17 日 提出

概要

里地・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。里地・里山地域は古くから自然と人とが共生する地域であり、生物多様性に富んだ地域である。しかし、高度経済成長期以降、農業の衰退や少子高齢化により、里地・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るなど、かつての生物多様性に富んだ状態は失われつつある。このような生物多様性の喪失をくい止め、自然と人が共生し、将来にわたって恵みを得ることのできる持続可能な社会をつくっていくことが現代社会の大きな課題となっている。

本研究では、生物多様性の保全をする上で重要な里地・里山地域における植物種多様性がどのように形成されるのかを、生育環境の多様性と植物の分布及び種子生産・発芽・生長特性の多様性の関係を解明することによって考察する。そしてこれらの多様性が、地球温暖化の直接影響によってどのような影響を受けるのか、現地調査と栽培実験により解明する。具体的には、長期間里地として利用・管理されている地域である東毛地域（太田、邑楽、館林、板倉など）において、植物相調査、環境調査を行って現状を解明した。また、この地域にわずかに自生する代表的な絶滅危惧種・希少種（
、
、
など）について種子生産・発芽・生長特性の解明を行った。さらに、東毛地域はヒメモロコシ、オオブタクサなど大型の外来植物の繁茂が著しいので、これらも材料植物として温暖化の直接影響の解明を試みた。

植物相調査を行った板倉ウェットランド地域では、
や
など 12 種の絶滅危惧種を含む在来種 22 種の生育が確認された。また、館林地区では、
や
など 6 種の絶滅危惧種を含む在来種 8 種の生育が確認された。これらの地域は要注意外来生物であるオオブタクサなどが繁茂している様子も確認できた。伊勢崎地区では、絶滅危惧種である
の繁茂・開花がこの地域では初めて確認された。太田地区では、3 種の絶滅危惧種を含む在来種 5 種の生育が確認された。アドバンテスト・ビオトープでは、今年度も含め 2006 年以降、絶滅危惧種であるフジバカマの生育・開花が継続して確認されているため、生育環境が良好な状態で維持されていると考えられる。才川では、渡良瀬川合流点付近において希少種である
の生育・開花が確認された。

このように、調査地において絶滅危惧種・希少種を含む多くの植物種が確認された。今後、継続的なモニタリング調査及び外来種の駆除など絶滅危惧種・希少種の生長を阻害することのない、適度な植生管理をして、里地・里山地域における植物種多様性を保全する必要がある。

発芽実験の結果、オオブタクサ・
・
は冷湿処理による発芽促進効果が確認されたため、種子が冬を経験することで、発芽が促進されと考えら

れる。また、これらの種は冬を経験することが必要であるため、温暖化によって発芽が阻害されると推察できる。しかし、オオブタクサのような一年生草本は一世代の時間が短いため、適応進化のスピードが相対的に速いと考えられ、オオブタクサが温暖化に呼応して、迅速に発芽特性を進化させる可能性は大いにあり得る。ヒメモロコシは冷湿処理による発芽促進効果が確認されなかったが、先行研究（狩谷 2004 など）より、本種は冬を経験することで発芽が促進される特性を有すると考えられるため、本種の発芽特性が変化している可能性があるということが推察できる。本種における発芽特性の解明や種子の寿命について、今後追試験が必要である。カラスノエンドウは広範な環境条件下で発芽することが可能であると考えられる。また、本種は種皮が厚く、そのままでは吸水しなかったため、種子生産年のうちに発芽するとは考えにくく、土壌シードバンクを形成する可能性が高いと推察できる。さらに、高温区で種子が腐敗し、発芽率が低下するため、温暖化によって発芽が阻害されるということが示された。も広範な環境条件下で発芽することが可能であると考えられる。また、高い温度区の方が発芽に要する日数が短くなる傾向があることが示されたため、本種は温暖化に伴い発芽が促進されると考えられる。カワラノギク及びサクラオグルマは最終発芽率 0%と全く発芽しなかった。

植物に対する光条件を変化させた栽培実験における生長解析では、実験結果より、オオブタクサ・
・
は、日の当たる明るい地域を生育環境として好み、多少の被陰のある地域でも生長できるが、著しく被陰される地域では生長できないことが明らかになった。また、
・トチカガミは、日の当たる裸地を生育環境として好み、被陰のある地域では生長が非常に悪化することが明らかになった。特にトチカガミは 13%以上の明るい環境という裸地的で水深の浅い地域でしか生長することができないことがわかった。

植物に対する温度条件を変化させた栽培実験における生長解析では、実験結果より、カラスノエンドウはどの温度区でも生長することが可能だが、高い温度区の方がより良く生長するということが明らかになった。そのため、本種は温暖化によって平均気温が上昇した場合、生長が促進される可能性があると考えられる。

本研究によって、里地・里山地域の保全の重要性と地域に生育する様々な絶滅危惧種・希少種及び外来種などの植物種の生態が明らかになった。里地・里山地域は、これまで伝統的な農業が行われ、古くから自然と人とが共生する環境が維持されてきた地域であり、様々なタイプの生態系が存在する生物多様性に富んだ地域である。このような里地・里山地域の貴重な生態系を維持し、生物多様性及び持続可能な社会を守るためにも、地域住民や専門家、行政組織など社会全体が一丸となって保全活動が続けていく必要がある。

目次

はじめに	3
地球温暖化の現状と原因	3
温暖化の対策	3
温暖化が植物に与える影響	4
生物多様性	5
生態系と生態系サービス	6
生物多様性の危機	7
生物多様性の保全	9
里地・里山とは	11
里地・里山の生物多様性	12
水辺の生物多様性	13
外来種とは	15
外来種がもたらす影響	16
外来種への対策	17
レッドリスト・レッドデータブック	18
本研究の目的	20
調査地概要	21
板倉ウェットランド地域（谷田川、矢場川、渡良瀬遊水池、朝日野池、行人沼） ..	21
館林地区（多々良沼、中野沼）	21
伊勢崎地区	22
太田地区（太田 IC 周辺、八重笠沼）	22
アドバンテスト・ビオトープ	22
才川	23
材料及び方法	24
材料植物	24
在来種	24
外来種	25
植物相・分布調査	26
種子発芽の冷湿処理・培養温度依存性実験	26
冷湿処理（低温湿層処理）	27
硫酸処理	27

異なる光環境・温度環境条件下における栽培実験.....	27
実験用植物の育苗とサンプリング方法.....	27
光強度を調節した栽培実験.....	28
気温を調節した栽培実験.....	28
生長解析.....	29
.....	30
.....	31
群馬大学荒牧キャンパスの気温測定.....	31
統計解析.....	31
結果及び考察.....	32
植物相・分布調査.....	32
板倉ウェットランド地域.....	32
館林地区（多々良沼、中野沼）.....	34
伊勢崎地区.....	35
太田地区（太田 IC 周辺、八重笠沼）.....	35
アドバンテスト・ビオトープ.....	35
才川.....	36
種子発芽の冷湿処理・培養温度依存性実験.....	36
在来種.....	36
外来種.....	41
異なる光条件下で栽培した植物の生長解析.....	44
在来種.....	44
外来種.....	49
異なる温度条件下で栽培した植物の生長解析.....	52
.....	54
.....	55
結論.....	56
謝辞.....	60
引用文献・引用 web ページ.....	61
写真・表・図.....	65

はじめに

地球温暖化の現状と原因

近年、地球温暖化が大きな問題となっている。現在の地球は過去 1400 年で最も暖かくなっており、この地球規模で気温や海水温が上昇し氷河や氷床が縮小する現象、すなわち地球温暖化は、平均的な気温の上昇のみならず、異常高温（熱波）や大雨・干ばつの増加などのさまざまな気候の変化をともなっている。その影響は、早い春の訪れなどによる生物活動の変化や、水資源や農作物への影響など、自然生態系や人間社会にすでに現れている。将来、地球の気温はさらに上昇すると予想され、水、生態系、食糧、沿岸域、健康などでより深刻な影響が生じると考えられている（気象庁 HP）。

かつて地球環境の変化・変動を引き起こした要因は、地球の軌道要素の変動や世界海洋内の熱塩海流循環の攪乱、地球気候システムの変動などによる「自然的な要因」と、地球表面の大規模改変や化石太陽エネルギーの大量使用、フロン類ガスの排出などによる「人為的な要因」とに大きく分けられた。人類が科学技術力と化石エネルギーを駆使して、地球と生態系に強く働きかける以前（少なくとも 1000 年以前）は、地球気候は自然的な要因のみによって大小の変化・変動を繰り返してきたのである（内嶋 2005）。

しかし、近年問題となっている地球温暖化の支配的な原因は、人間活動による温室効果ガスの増加である可能性が極めて高いと考えられている。大気中に含まれる二酸化炭素などの温室効果ガスには、海や陸などの地球の表面から地球の外に向かう熱を大気に蓄積し、再び地球の表面に戻す性質（温室効果）がある。18 世紀半ばの産業革命の開始以降、人間活動による化石燃料の使用や森林の減少などにより、大気中の温室効果ガスの濃度は急激に増加した。この急激に増加した温室効果ガスにより、大気の温室効果が強まったことが、地球温暖化の原因と考えられている（気象庁 HP）。

IPCC（Intergovernmental Panel on Climate Change、気候変動に関する政府間パネル）第 5 次評価報告書第 1 作業部会報告書（自然科学的根拠）の概要（2015）でも、複合的な証拠から、人為的影響が地球の気候システムを温暖化していることはほぼ確実であるとされている。1750 年以降、人間活動により温室効果ガスである二酸化炭素（CO₂）、メタン（CH₄）、一酸化二窒素（N₂O）の大気中濃度が全て増加している。また、このような温室効果ガスの増加に比例するように、陸域と海上を合わせた世界平均地上気温も上昇している。今後、温室効果ガス排出量が衰えることなく続いた場合、世界平均地上気温は 21 世紀を通じて上昇し続けると予測されている。

温暖化の対策

1992 年にブラジルのリオデジャネイロで開催された国連環境開発会議（地球サミット）において、大気中の温室効果ガスの濃度を安定化させることを目標とする「気候変動に関する国際連合枠組条約」（気候変動枠組条約）と、生物多様性の保全とその構成要素

の持続可能な利用を目的とする「生物の多様性に関する条約」（生物多様性条約）が採択された。地球の環境、地域の環境が大きく変質しつつある今日、「生物多様性」と「健全な生態系」を損なわない人間活動のあり方を見いだすことは、「持続可能な社会」の実現のために最も優先しなければならない人類の課題である（鷲谷 1999）。そこで、気候変動枠組条約に実効性を持たせ、地球温暖化に歯止めをかけるため、1997 年 12 月、京都で気候変動枠組条約第 3 回締約国会議（COP3）が開催され、京都議定書が採択された。京都議定書では、締約国に対して 2008～2012 年の間に、1990 年を基準として、先進国全体で 5.2%、国ごとでは、日本が 6%、EU が 8%、温室効果ガスを削減することなどが義務づけられた。また、2012 年にカタール・ドーハで開催された気候変動枠組条約第 18 回締約国会議（COP18）において、2013～2020 年が京都議定書の第 2 約束期間として成立した。しかし、日本やロシアなどの主要な先進国が不参加となっているため、現状として世界の CO2 排出量の約 15%しかカバーできておらず、地球温暖化防止に対する国際的な協力は未だに不十分である。

今日、CO2 排出量削減対策として、燃料転換の推進や自然エネルギーの利用拡大などによる化石エネルギーの使用量削減、開発してきた省エネルギー技術を総動員しながら、さらに改良して新技術と新システムを開発するという省エネルギー技術の開発・普及が進められている（内嶋 2005）。このように、温暖化について様々な対策が考えられているが、IPCC 第 5 次評価報告書によれば、2081～2100 年の世界平均地上気温は 1986～2005 年の平均よりも最も温暖化を抑えた場合で 0.3～1.7℃、最も温暖化が進む場合で 2.6～4.8℃上昇すると予測されている。つまり、今後ある程度の温暖化が起こることはほぼ避けられない事実として理解するべきであり、この気温上昇によって今後どのような影響が起こりうるのか、またその影響に対してどのように対応していくのかを継続的な調査や研究を通して検討していく必要がある。

温暖化が植物に与える影響

一次生産者である植物は、どのような場所の生物間相互作用においても受動的であり、地球に降り注ぐ太陽エネルギーをせっせと有機物のエネルギーの形に変えて、あらゆる動物とさまざまな微生物の生活を支えている（鷲谷 1996）。しかし、植物は種類ごとに餌が異なる動物と異なり生活に必要な資源の共通性が高く、しかも固着性であるため、光などの資源を巡る競争は生き死にや成長・繁殖を大きく支配する（村上・鷲谷 2002）。

温暖化にともない、種は生存に適した場所へと移動を余儀なくされる。多くの動物種は歩く、飛ぶ、泳ぐといった方法で移動できるが、植物が分布を広げるスピードははるかに遅い。予想される温暖化のスピードに植物が対応しきれないということは、植物に依存して生活する動物種に大きな影響があるということを意味する。また、すでに人間の活動により、生息地は分断化・孤立化しており、気候変動に対応した生物の移動は困難になっている。加えて、温暖化はそれまで気温が低くて定着できなかった外来種に、

好適な温度環境を用意する（川道ら 2001）。つまり、温暖化によって本来生息していた多くの在来種は競争力の強い外来種に負け、種の多様性が低下することになるのである。もしも温暖化が外来種の成長・繁殖を促進するのならば、その競争力はさらに強くなり、生物多様性に大きな影響を与えると予想される。

また、温暖化によって日本の平均気温は 1898 年（明治 31 年）以降、100 年あたりおよそ 1.1℃の割合で上昇している。特に、1990 年代以降、高温となる年が頻繁にあらわれており、気温の上昇にともなって、熱帯夜（夜間の最低気温が 25℃以上の夜）や猛暑日（1 日の最高気温が 35℃以上の日）が増え、冬日（1 日の最低気温が 0℃未満の日）が少なくなっている（気象庁 HP）。多くの植物種は冬を経験することで発芽し、成長をする。そのため、温暖化によって引き起こされるこのような冬季の短縮や気温上昇は、多くの植物種の成長・繁殖に影響を与えると予想される。

生物多様性

地球上には、様々な生態系が存在し、これらの生態系に支えられた多様な生物が存在している。全世界の既知の総種数は約 175 万種で、このうち、哺乳類は約 6,000 種、鳥類は約 9,000 種、昆虫は約 95 万種、維管束植物は約 27 万種となっている。まだ知られていない生物も含めた地球上の総種数は大体 500 万～3,000 万種の間と推定されている（環境省 HP）。

生物多様性条約では、「生物多様性」をすべての生物の間に違いがあることと定義し、「生態系の多様性」、「種間（種）の多様性」、「種内（遺伝子）の多様性」という 3 つのレベルでの多様性があるとしている（環境省 生物多様性国家戦略 2012-2020）。

まず 1 つ目の「生態系の多様性」とは、干潟、サンゴ礁、森林、湿原、河川など、いろいろなタイプの生態系がそれぞれの地域に形成されていることである。地球上には、熱帯から極地、沿岸・海洋域から山岳地域までさまざまな環境があり、生態系はそれぞれの地域の環境に応じて歴史的に形成されてきたものである。一般的に生態系のタイプは、自然環境のまとまりや見た目の違いから区別されることが多いといえるが、必ずしも境界がはっきりしているものではなく、生物や物質循環を通じて相互に関係している場合も多いといえる（環境省 生物多様性国家戦略 2012-2020）。

2 つ目の「種の多様性」とは、いろいろな動物・植物や菌類、バクテリアなどが生息・生育しているということである。世界では既知のものだけで約 175 万種が知られており、まだ知られていない生物も含めると地球上には 3,000 万種とも言われる生物が存在すると推定されている。また、日本は南北に長く複雑な地形を持ち、湿潤で豊富な降水量と四季の変化もあることから、既知のものだけで 9 万種以上、まだ知られていないものまで含めると 30 万種を超える生物が存在すると推定されている（環境省 生物多様性国家戦略 2012-2020）。

3 つ目の「遺伝子の多様性」とは、同じ種であっても、個体や個体群の間に遺伝子レ

ベルでは違いがあることである。同じ種であっても、個体ごとや地域ごとで遺伝子の違いにより形や色など様々な差異が生まれるのである（環境省 生物多様性国家戦略 2012-2020）。

このように自然界のいろいろなレベルにおいて、それぞれに違いがあること、そして何より、それが長い進化の歴史において受け継がれた結果として、現在の生物多様性が維持されている。生物多様性の保全にあたっては、それぞれの地域で固有の生態系や生物相の違いを保全していくことが重要となる（環境省 生物多様性国家戦略 2012-2020）。つまり、「生態系の多様性」、「種の多様性」、「遺伝子の多様性」という3つの異なるレベルの多様性を理解し、それぞれのレベルにおいて保全を行っていくことが生物多様性の保全につながるのである。

生態系と生態系サービス

「生態系」とは、ある空間（地域）に生きるすべての生物とそれらにとっての環境の要素からなる複雑なシステムである。一般的には、ひとまとまりの森林、草原、湿原、サンゴ礁、湖、河川など、「生息・生育場所」程度の空間的な広がりを経済生態系の範囲とすることが多い。生態系の空間的範囲をどのようにとるにせよ、そこで生活する生物の種は、様々な無生物的な環境要素の影響を複合的に受ける一方で、食べる-食べられるの関係をはじめ、寄生、共生、競争など、様々な生物間相互作用によって係わり合う。生物間相互作用は、生態系の中に網の目のように絡まりあいながら広がる。つまり、生態系は、要素として複数の生物種の個体群などの生物学的要素を含み、その間には様々な種間関係が結ばれ、その全体が非生物学的な環境の影響を強く受ける一方で、生物の活動が非生物学的な環境を作り出すというシステム的な特性を持っているのである。また、エネルギーの流れや物質の循環などの機能面で捉える生態系は、生産者としての植物、消費者としての動物および分解者である微生物を主要な要素とするシステムである。しかし、エネルギーと物質の動きを重視した見方において生産者と呼ばれる植物は、生物間関係においては、エネルギーの生態系への取り込みや有機物の合成を通じてすべての生物の生命を支えるだけでなく、棲み場所、隠れ場所、繁殖の場などを提供することによって動物の生活の基盤をつくり、また、菌類・細菌など分解者の生活を成り立たせる（鷲谷 1999）。このように、生態系は生物の生息・生育場所を提供するだけでなく、生物多様性を維持する上で重要な多くの機能を持っており、この機能を損なわないように保全していくことが大切である。

生物多様性に富み、多くの生物が係わり合う生態系から得ることのできる恵みによって、私たちの暮らしは支えられている。この恵みのことを「生態系サービス（ecosystem service）」と呼ぶ。国連の主導で行われたミレニアム生態系評価（2005）では、生態系サービスを、食料や水、木材、繊維、医薬品の開発等の資源を提供する「供給サービス」、水質浄化や気候の調節、自然災害の防止や被害の軽減、天敵の存在による病害虫の抑制

などの「調整サービス」、精神的・宗教的な価値や自然景観などの審美的な価値、レクリエーションの場の提供などの「文化的サービス」、栄養塩の循環、土壌形成、光合成による酸素の供給などの「基盤サービス」の 4 つに分類している（環境省 生物多様性国家戦略 2012-2020）。

生物多様性と生態系サービスとの関係については、生態系サービスが必ずしも生物の多様性と直接的な結びつきがないように考えられる場合もある。しかし、生物多様性が維持されていることによって、私たちは生態系サービスを得ることが可能となる。つまり、私たちが将来の世代にもわたってさまざまな生態系サービスを得ていくことを可能としていくためには、その源となる生物多様性を維持・回復していくことが重要となる。また、複数の生態系サービス間の関係については、ある生態系サービスの向上を追求した場合、複数の生態系サービスが正の相乗効果によって向上する場合と、ある生態系サービスは向上するものの、他の生態系サービスは低下するといったトレードオフ（二律背反）の関係にある場合がある。生態系サービスを通じて生物多様性の保全と持続可能な利用を考えていく際には、このような生態系サービス間の関係性についても考えていくことが必要となる（環境省 生物多様性国家戦略 2012-2020）。

生物多様性の危機

現代は、「第 6 の大量絶滅時代」とも言われる。生命が地球に誕生して以来、これまでに生物が大量に絶滅する、いわゆる大絶滅が 5 回あったと言われているが、現代の大絶滅は、過去の大絶滅と比べて種の絶滅速度が速く、その主な原因は人間活動による影響であると考えられている。また、人間活動により地球環境の変化が起こり、それが生態系の攪乱や種の絶滅など生物多様性に対して深刻な影響を与えることが危惧されている（環境省 生物多様性国家戦略 2012-2020）。

「生物多様性」という用語は、私たち人間と自然との間の本来は豊かな、そしてダイナミックで複雑な関係の現状を見直し、将来のよりよい関係を築くために欠かすことのできない社会的なキーワードであり（鷲谷・鬼頭 2007）、現代の高い絶滅リスクを意識してつくられた用語である。人間活動の急激な拡大によって、地域に固有な生物の生息・生育場所はつぎつぎと失われ、それとともに多くの種が絶滅の危機にさらされている。絶滅に至らないまでも残された個体群はかぎられ、種内の遺伝的変異が失われつつある種も少なくない。生物多様性の危機とは、このような地球規模で引き起こされている「生命の危機」である（鷲谷ら 2005）。

この地球規模で引き起こされている生命の危機に対し、日本では 1993 年に発効した「生物の多様性に関する条約」（生物多様性条約）第 6 条及び 2008 年に施行された「生物多様性基本法」に基づく国家戦略である「生物多様性国家戦略 2010」を 2010 年に閣議決定した。また、自然共生社会の実現に向けた具体的な戦略として、「生物多様性国家戦略 2012-2020」が策定された。この「生物多様性国家戦略 2012-2020」によれば、現在、

日本の生物多様性は4つの危機に直面しているという。

まず、第1の危機とは、開発や攪乱など人が引き起こす負の影響要因による生物多様性への影響のことである。沿岸域の埋立などの開発や森林の他用途への転用などの土地利用の変化は多くの生物にとって生息・生育環境の破壊と悪化をもたらし、鑑賞用や商業的利用による個体の乱獲、盗掘、過剰な採取など直接的な生物の採取は個体数の減少をもたらした。中でも、干潟や湿地などはその多くが開発によって失われた。また、河川の直線化・固定化やダム・堰などの整備、経済性や効率性を優先した農地や水路の整備は、野生動植物の生息・生育環境を劣化させ、生物多様性に大きな影響を与えた。この第1の危機の背景には、戦後の高度経済成長期を含む50年間に見られた急速な経済の変化にともなった急激な開発が存在する。現在における開発は、過去と比較して緩やかになったものの、未だ続いており、こうした開発によって失われた生物多様性は容易に取り戻すことはできない。

次に、第2の危機とは、第1の危機とは逆に、自然に対する人間の働きかけが縮小撤退することによる影響のことである。里地里山の薪炭林や農用林などの里山林、採草地などの二次草原は、以前は経済活動に必要なものとして維持されてきた。こうした人の手が加えられた地域は、その環境に特有の多様な生物を育んできた。また、氾濫原など自然の攪乱を受けてきた地域が減り、人の手が加えられた地域はその代わりとなる生息・生育地としての位置づけもあったと考えられる。しかし、産業構造や資源利用の変化と、人口減少や高齢化による活力の低下に伴い、里地里山では、自然に対する働きかけが縮小することによる危機が継続・拡大している。この第2の危機の背景の1つには産業構造の変化が存在する。明治維新から戦後1960年頃までは、人口は増加したものの農業人口には大きな変動は起こらず低いままであった。このことを考慮に入れると、1960年以降の農業の就業人口の減少と高齢化の進展は急速かつ大きなものであった。また、特に戦後から1970年代にかけて、エネルギー源が石油などの化石燃料にシフトし、薪炭が利用されなくなるとともに、化学肥料の生産量が急激に増加するなど、農村地域における薪やたい肥などの生物由来の資源の利用が低下し、里山林や野草地との関わりが希薄になっていった状況がうかがわれる。その結果、萌芽更新や火入れなど人為的な管理により維持されてきた里山林や野草地の放棄が急激に進んだのである。

次に、第3の危機とは、外来種や化学物質など人間が近代的な生活を送るようになったことにより持ち込まれたものによる危機である。まず、外来種については、野生生物の本来の移動能力を越えて、人為によって意図的・非意図的に国外や国内の他の地域から導入された生物が、地域固有の生物相や生態系を改変し、大きな脅威となっている。また、家畜やペットが野外に定着して生態系に影響を与えている例もある。特に、他の地域と隔てられ、固有種が多く生息・生育する島嶼の生態系などでは、こうした外来種による影響を強く受ける。外来種問題については、「特定外来生物による生態系等に係る被害の防止に関する法律（外来生物法）」に基づき特定外来生物等の輸入・飼養等が規

制されているが、既に国内に定着した外来種の防除には多大な時間と労力が必要となる。また、国外から輸入される資材や他の生物に付着して意図せずに導入される生物や国内の他地域から保全上重要な地域や島嶼へ導入される生物などは、外来生物法による規制が難しく、こうした生物も大きな脅威となっている。化学物質については、20 世紀に入って急速に開発・普及が進み、現在、生態系が多くの化学物質に長期間ばく露されるという状況が生じている。化学物質の利用は人間生活に大きな利便性をもたらしてきた一方で、中には生物への有害性を有するとともに環境中に広く存在するものがあり、そのような化学物質の生態系への影響が指摘されている。化学物質による生態系への影響については多くのものがいまだ明らかではないが、私たちの気付かないうちに生態系に影響を与えているおそれがある。

最後に、第 4 の危機とは、地球温暖化など地球環境の変化による生物多様性への影響のことである。地球温暖化のほか、強い台風の頻度が増すことや降水量の変化などの気候変動、海洋の一次生産の減少及び酸性化などの地球環境の変化は、生物多様性に深刻な影響を与える可能性があり、その影響は完全に避けることはできないと考えられている。さらに、地球環境の変化に伴う生物多様性の変化は、人間生活や社会経済へも大きな影響を及ぼすことが予測されている。IPCC の第 4 次評価報告書では、20 世紀半ば以降に観測された世界平均気温の上昇のほとんどは、人間活動に伴う温室効果ガス濃度の増加によってもたらされた可能性が非常に高いとしている。こうした点は、第 1 の危機の 1 つの類型としてとらえることもできるが、生物多様性への影響の直接的な原因者を特定するのが困難なこと、影響がグローバルな広がりを持つことで第 1 の危機とは異なる。加えて、必ずしも人間活動の影響とは断定できない地球環境の変化による影響の可能性もあり、その場合は危機として捉えることが適当ではないが、それとは切り離せない複合的な要因であることなどの特殊性を踏まえ、第 4 の危機として整理する（環境省 生物多様性国家戦略 2012-2020）。

このような 4 つの危機が原因となり、地球の至るところで種の絶滅や生態系の崩壊が進行し、生物多様性は危機にさらされているのである。また、生物多様性が危機にさらされることにより、私たちの生活や生産活動を支える生態系のサービスを惜しみなく与えてくれる「健全な生態系」の存続が危うくなり、他方で、途絶えることなくつづいてきた自然と文化の相互作用の歴史の断絶が生じようとしているのが現代である（鷲谷・草刈 2003）。

生物多様性の保全

今この地球は、生物の歴史始まって以来の「喪失の時代」を迎えている。その喪失を少しでも小さくする人間活動や社会の在り方を見いだすためのキーワードが「生物多様性」と「健全な生態系」である。「生物多様の保全」および「健全な生態系の持続」という相互に深く係わるこの 2 つの社会的な目標は、後の世代が現世代と同じように自然の

恵みを享受しながら人間らしい生活を営む権利を保障するためにはなくてはならないものである（鷲谷 1999）。

生物多様性の急激な減少にたいする危機意識の高まりから、1992年の地球サミットでは、気候変動枠組条約とともに、「生物多様性条約」が採択された。それは、生物の絶滅と生き物豊かな森林やウェットランドなどの喪失を防ぎ、自然の恵みを持続的に利用できるようにするための条約である。現在では190近い国がこの条約に加わり、それぞれが自国の生物多様性の保全、つまりそれぞれの国に固有な自然を大切にする義務を負っている。条約はその第6条で、それぞれの国が生物多様性の保全と持続可能な利用を目的とした「国家戦略」つまり、国をあげて取り組むための方針と計画をつくることを求めている（鷲谷・草刈 2003）。

生物多様性の保全と持続可能な利用を図っていくためには、自然生態系が攪乱と回復を繰り返したり、人為的な環境変化に対して損失、劣化または適応、回復したりするのに要する時間を踏まえ、少なくとも100年という長期的視野で考えることも重要である。このため、生物多様性の保全と持続可能な利用に携わる多様な主体が長期的視点に立って取組を進められるよう、自然共生社会における国土のグランドデザインを、100年先を見通した共通のビジョンとして示す。ただし、生態系や場所によって、回復等に要する時間スケールが異なることに留意しながら取組を進めることが必要となる（環境省生物多様性国家戦略2012-2020）。

生物多様性の喪失は一般的には不可逆的な変化であり、それを喪失前の状態に戻すことはむずかしい。自然再生の取り組みによって、生態系の機能の一部またはその大部分を回復させることができたとしても、いったん絶滅した種や個体群は戻ってこない。また、その喪失は、種間関係を伝わる連鎖によって重大な生態系の機能不全を招く可能性がある。すなわち、帰結としてなにもたらされるか予測がむずかしく、ときに重大な帰結がもたらされる可能性もある。生物多様性の保全においては、取り返しのつかないことを回避するという意味で「予防的アプローチ」を重視しなければならない。また、生物多様性の保全を地域において追求する際にもっとも重要なことは、「固有性」、すなわち地域に固有な多様性を重視することである。それぞれの地域における生物多様性の保全とは、ローカルな固有性の尊重、つまり、それぞれの地域に独特な生態系や生息・生育場所、動植物の種などの喪失を防ぐことであり、それによって、その地域において伝統的に維持されてきた人々の生活や生産に必要な生態系のサービスが途切れることなく提供されることになる。生物多様性国家戦略において定められている「生物多様性の保全と持続可能な利用」とは、軟らかく表現すれば「自然との共生」ということなのである（鷲谷・鬼頭 2007）。

里地・里山とは

「里山」の語の最古の史料は 1661 年にさかのぼる。1661 年佐賀藩『山方ニ付テ申渡条々』によるもので、田畠、里山方、山方という土地を示す語のなかで、「里山方」という言葉が用いられている。「里山」が単独で用いられたのは、1759（宝暦 9）年木曾材木奉行補佐格の寺町兵右衛門が筆記した『木曾山雑林』に「村里家居近き山をさして里山と申し候」と記されているのが最初といわれている。ここで、山と人間社会との連関が明記された。ただし、ここでの里山の定義には、今日使われているように里山のなかに人間社会は含まれていない。その後、1970 年代に森林生態学者の四手井綱英により、寺町によって記された自然と人間の相互作用を表す里山の概念が復活させられ、村里に近いヤマ（農用林）を指す言葉として提案された。つまり、里山とは当初は農用林や薪炭林として利用されていた林野を意味していた。しかし、過去 50 年間で身近な農村景観の減少に伴ってそうした自然保全への意識が高まるようになると、この言葉がもともとの意味を超えて農村社会だけでなく一般市民を含めてより広い意味で使われるようになった。また、学術的にも農用林、草地、農地、集落などの農村景観要素の相互関係の重要性が認識されるようになり、農用林だけでなくこれらの景観要素をセットで、つまりランドスケープとして理解していくことがより重視されるようになった。このような農村景観をまとめて「里地」と呼び、林としての「里山」と区別するという提案もある。また、狭義の里山を「里山林」とし、多様な農村景観要素のセットとしての広義の里山を「里やま」と区別している文献もある（国際連合大学高等研究所/日本の里山・里海評価委員会 2012）。

「里地」は、里山ほど市民になじみのある言葉ではない。しかし、これもまた二次的自然（人間の手によって管理された自然）の重要性を訴えるための言葉として、里山とともに近年使われてきたものである。里地の概念を広めたのは、1994 年 12 月に策定された環境基本計画である。この計画では、「自然と人間との共生の確保」が長期的な目標のひとつとされた。また、それを実現するための施策として「国土空間における自然的社会的特性に応じた自然と人間の共生」が提唱され、自然地域ごとの施策の展開が求められた。環境基本計画において、里地地域とは二次的な自然が多く存在し、野生動物と人間が共存してきた地域であり、農林業活動などさまざまな人間の関与によって環境が形成され、人々がふるさとの風景として思い浮かべてきた地域であるとされている（武内ら 2001）。

裸地は放置すれば草原となり、草原はやがて森林になる。このように時間の経過とともに植生などが一定の方向に変化する現象を「遷移」とよぶ。里やまにおける遷移は、溶岩流のあとなどからはじまる「一次乾性遷移」とは異なり、二次的なものである。里やまにおいては、また、池沼や湿地が水生植物の繁茂によりしだいに埋まり、湿性草地から森林に至る「湿性遷移」もみられる。遷移は長い時間を経て「極相（クライマックス）」に到達し停止する。極相がどのような植生になるかは、その場所の気候や土壌など

の条件により異なる。火山の噴火をはじめ河川の洪水や山崩れ、暴風による樹木の倒壊、落雷による山火事などの自然のイベントにより遷移は逆行する。遷移を後戻りさせる自然への働きかけは「攪乱」とよばれる。里やまにおける樹木の伐採や草刈り、野焼きや山焼きといった自然に対する人の行為も、人為的な攪乱とすることができる。農民は草の生えた地面を耕して畑地をつくり、茅場はススキなどの草を牛馬のかい葉や屋根ぶきの資材などとして利用するために、定期的に刈りとりながら維持されてきた。里山林は間伐や下刈り、落ち葉かきをすることで薪や炭、肥料を得、結果的に遷移の進行を止めてきた。ため池や水路、そして水田も、それらの機能を維持するために、草を刈り、泥を上げ、補修を行ってきた。このように、里やまには人が利用するためにさまざまな遷移段階の自然（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、里やまの自然は、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（石井ら 2006）。

こうした人の手が入ることによって高度の生物多様性を維持してきた里山的自然を守るための里山管理には、伝統的な技術があり、また、入会林野の伝統的なルールを中心としたさまざまな作法（規範）があった。「人の手が入った自然」としての里山的自然を「文化としての自然」として特徴づけることは重要である。これは、自然と無関係に成立する文化は存在しないこと、人間の生活と文化の形によって規整される自然が存在すること、人間の積極的な働きかけが自然の在り方を規定するということを意味する。よって、身近な自然としての里山環境の保全は、たとえ都市近郊の場合であっても、何らかの形で日常的な生活と関わらせる必要がある（丸山・宮浦 2009）。

「里山を守る」というと、現在残っている里山に線引きして手をつけないようにする「天然記念物的発想」か、「造園的手法」で自然公園を造成・維持することをイメージしやすい。しかし、大切なのは「里山の多様性に富んだ自然を守る」という視点である。自然は天然記念物指定のし放しで守れるような容易な対象ではなく、里山のような遷移の途上にある生態系は、ひんぱんに手を加えて維持しなければならない。しかし、だからといって、林床の下草をきれいに刈り、倒木や朽木を除去し、落葉を必要以上に掃き取ってしまうのは問題である。どんな物にも必ずそれに依存する生物がいるくらいに考えたほうがよい。いうは易く行うは難しであるが、一口にいて、生態学的な配慮のもとに「適度に管理する」という姿勢が大切なのではないだろうか（石井ら 2000）。

里地・里山の生物多様性

日本列島の豊かな自然と生物の多様性は、多様なタイプの自然の攪乱によってもたらされたものである。とくに、さまざまなタイプの自然の攪乱に適応した生物群が存在していたことは、農耕生活がはじまり、ヒトの干渉が大きく作用するようになると、ヒトの生活域に豊かな自然を維持するうえで重要な意味をもつようになった。少なくともヒ

トの足跡が明らかなこの数千年のあいだ、列島で暮らす人々は、野山を焼いて畑をつくり、水を治めて田をひろげ、木や草をとって肥料・燃料・建材とし、川や湖で魚をとることによって、その暮らしを営んできた。その営みの中で、若干の生物種は絶滅を、またある種の動植物は生活空間の縮小を余儀なくされた。しかしその一方で、生活の場をひろげた動植物も少なくなかった。それは、火山の噴火による泥流や野火の発生、地震による地滑り、河川の氾濫など、日本列島の自然に特有な「攪乱」に適応することで、伐る、刈る、焼くなどのヒトの干渉にあらかじめ適応していた生き物たちである。ヒトが利用し管理する草原や雑木林や水辺は、多様な動植物の暮らしの場となったのである（鷲谷 2001）。

里やまには、里山林や鎮守の森（神社を囲むようにして存在する森）、屋敷林（防風や防火のために屋敷の周囲に植えられた樹林）といった森林生態系、茅場や畦畔草地のような草地生態系などさまざまなタイプの陸上生態系ばかりでなく、水田やため池、水路からなる稲作水系のような水界生態系もある。個々の生態系は里やまの広がりの中に大小さまざまなパッチとして存在し、全体として里やまの景観を構成している。各々の生態系はその内部に異質な環境を含むばかりでなく、隣接する異なる生態系の境界は「移行帯（エコトーン）」とよばれる両者の性質をあわせもつ独特の環境が存在する。里やまの自然は、空間的には多様な生態系とそれらの移行帯が織り成すモザイクといえることができるが、季節的な移ろいをみせ、短期的・長期的なサイクルをもった人為的な攪乱にさらされる時間的な変動環境でもある。このように、里やまは実に多様な環境を含み、多くの生物に生活場所を提供してきた。また、里山林は人為的攪乱により維持されてきた半自然林ではあるが、成林は自然林のように階層構造をなしており、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（石井ら 2006）。

生物多様性と里やまの有り様は、われわれ人間の生き様を問うている。そのキーワードは「持続可能な社会」である。古来より人々は自然と向き合い、営みを持続させるために人と自然が共生する知恵を長い歴史の中で作りあげてきた。日本の里山は気候、地形や地質、風や水の流れが異なり、どれ 1 つとして同じ里山はない。これら多様な里山の自然を恵みに変える人々の知恵もまた多様なのである（中村・嘉田 2010）。このような多様性に富んだ里山と人とのつながりを損なうことのないようにすることが、持続可能な社会や里地・里山の生物多様性を守っていくことになる。

水辺の生物多様性

地形が変化に富み、初夏から秋にかけて雨量の多い日本列島では、水はけのよい場所には森林が発達する一方で、水はけの悪い場所は池沼や湿地になる。そのため、人間による土地利用がなされる前には、山地、低地を問わず水辺と樹林が組み合わされた環境がみられ、それに適応した生き物の生息場所となった。もともと湿地の植物であるイネ

を半人工の湿地ともいふべき水田で育てることで、このような生物の生息の条件は、むしろ拡大されたと考えられる。水田が湿地としての性格を残したことに加え、農業や生活のための植物資源や水資源を確保するために、樹林、草原、ため池、水路などが水田のまわりに配された環境モザイクともいえる複合生態系がつくられると、生物にとって多様な生息場所が提供された（鷺谷 2007）。

わが国の異古名の「秋津島」とは赤トンボの島、という意味であり、同じく「豊葦原瑞穂国」とはアシ原と稲穂が広がる国、という意味である。トンボは幼虫期のヤゴが湿地や水田の水中で暮らす生物であることから、これらの国名は日本が「湿地と水田の国」であることを示している。アジアの水田稲作は、田んぼという湿地環境で多くの水辺の生物を育みつつ、同時に稲の茂みや畦、周辺の土手などで草索性の生物をも育むという「多種多様な生命を育む場」となった。自然界の力だけでは生まれようもないほど広大かつ多様な湿地環境が、全国の津々浦々に展開され、近年、水田が「奇跡的な生物多様性との共生システム」と評価されるようになったのである（中村・嘉田 2010）。

湿原は、地域の景観の中では、特殊でかけがえのない役割を果たしていることが多い。水文学的な過程、水の浄化などである。さらに、生物多様性の面から見ても水と結びついた、他の生態系には見られない特殊な生物相、すなわち、水と陸の移行帯（エコトーン）に適応した多様な生物群からなる生物相をもつことも重要である。このような湿原の機能がある程度残した、伝統的な技術にのっとり稲作が行われる水田は生物多様性が大きい。水田としての土地利用は、水文地形条件まで変化させて牧場や小麦畑をつくることに比べれば、もとの立地をそのまま生かすことが多かったからである。アジアなどのもともと温暖で湿潤な地域の水田は、生物多様性の高い複雑な生態系であり、イネの害虫の天敵となりうる多様な動物の生態系ネットワークもよく発達する。そのような生物相豊かな水田は、湿地としての生態系の機能を十分に残した水田であるといえる（鷺谷 1999）。

ところが、40 年ほど前から、事情が一変した。明治維新にはじまったであろう自然からの人々の営みの乖離は決定的なものとなり、おいうちをかけるように高度経済成長期やバブル経済期のさまざまなタイプの開発が、ふるさとの風景と動植物の生きる場を奪った。その結果、かつて生活域にふつうにみられた動植物が絶滅危惧種となった。とくに水辺の開発がもたらした変化はいちじるしい。絶滅は、水草の主な生活の場である、水と陸をゆるやかな勾配でつなぐ水辺の移行帯の植生が、垂直な人工護岸の築造によって大幅に失われたことと無関係ではない（鷺谷 2001）。近年の水田そのものを消失させる開発、耕作の放棄による植生遷移の進行、ほ場整備による乾田化、用水路のパイプライン化と排水路のコンクリート三面張り化、農薬の多投入など、農業の近代化と関連した環境変化によって、長い間人と共存してきた多様な生き物の生息のための条件が、短期間のうちに失われたのである（鷺谷 2007）。加えて、ゴルフ場や団地の造成、道路整備などの大規模開発によっても、水辺の生物多様性は脅かされているのである。

このように、水田生態系が多様な生物のすみかとなること、また近年の農村や農業の変化により生物の多様性がおびやかされていることが多くの人に認識され、生物の保全が必要だと考えられるようになってきた。しかし実際に保全をしようとすると、どのようにしたらよいかわからないことだらけで、お金や人手をかけて苦勞をした結果が思いどおりの保全とはならなかったケースも多いのではないだろうか。理論的には「生物多様性」は重要な概念であると理解できても、人それぞれで思い描くものが異なったり、保全手法が未だ明らかでなかったりと、「水田の多様な生物の保全」はまだまだ試行錯誤の段階であるように見える（下田 2005）。水辺の生物多様性を保全するためには、自然と共生するための伝統的技術を活かし、試行錯誤を繰り返しながら長期にわたる保全政策を行っていく必要がある。

外来種とは

（過去または現在の）自然分布域と分散能力域の範囲内に存在する種、亜種、またはそれ以下の分類群のこと、すなわち自然に占有している生息域内に存在するもの、あるいは人間による直接的、間接的な導入、あるいは世話なしに存在できるであろうもののことを「在来種（Native species）」や「土着の種（indigenous species）」という。一方、種、亜種、またはそれ以下の分類群で、その（過去または現在の）自然分布域と分散能力域の範囲外に生息・生育するもの、すなわち、自然に占有している生息域以外に存在するもの、あるいは人間による直接的、間接的な導入、あるいは世話無しには存在できないであろうもののことを「外来種（Alien species）」や「非土着の種（non-native species）」という。また、外来種は生息・生育した結果として再生産された種の生殖体または胚芽といったすべての部分も含む（村上・鷲谷 2002）。さらに、外来種という概念は、もともと人間の定めた国境によって内と外に区別されるのではなくて、本来の生息域外から何らかの人為によって運びこまれたものを指す。島国の日本では「外来」とは外国から来たものを指すことが多い（川道ら 2001）が、これは国外外来種であり、国内の他地域に導入された在来種については国内外来種（日本農学会 2008）と呼ぶ。加えて、外来種でも起源が国外で、日本の生態系への影響が大きいものを「国外侵略的外来種」と呼ぶ（石川ら 2009）。

外来植物の導入経路は、意図的導入と非意図的導入の2つに大別される。前者は明確な利用目的を持って、自然分布域外に意図的に移動および放逐する場合で、例として園芸・観賞や植林、家畜の飼料・牧草として導入することが挙げられる。後者は利用の意図がない場合で、例えば輸入された穀物類や苗に混入しているものや、飛行機や船、電車、コンテナなどの輸送手段に紛れ込んで持ち込まれる場合である。こうした経路で日本に導入されて定着した、すなわち野外に自生するに至った外来植物の種数は、明治時代には約100種程度にすぎなかったが、近年では『日本帰化植物写真図鑑』（清水ら 2001）に約600種『外来種ハンドブック』（村上・鷲谷 2002）には800種を超えて掲載される

という状態に至った。このように意図的・非意図的に導入されて定着した外来植物には、①繁殖力が旺盛である、②種子散布能力が高い、③工事などによって荒らされた「攪乱地」に主として生育する-といった生態特性があることが明らかになりつつある（石川ら 2009）。

外来種がもたらす影響

生物は本来、限られた移動・分散能力、山や川や海などの地理的な障壁によって自由な分布の拡大を制限されている。そのため、競争力の強い種による弱い種の排除、捕食者による被食者の捕食、寄生者による病害など、一方の種が不利益を蒙るような「生物間相互作用」は空間的に限定されたものとなる。それにより、強力な捕食者や寄生者の影響で無制限に種が絶滅することが抑制されている。また、地球上のすべての生物は、40 億年近く前に生まれたたった 1 つの原始生命体の子孫である。それが増殖と進化によって時とともに多様化し、時には絶滅を伴いながらも、現在地球上にみられるような夥しく多様な種へと分化した。一般に、1 つの種から別の種が生まれるにあたっては、一部の個体が親集団から空間的に隔離されることが必須であると考えられている。親集団との遺伝的交流が断たれて初めて、独自の進化の途を辿ることができるからである。すなわち、生物の移動に制約が課せられていることは、一方では生物間相互作用を介した種の絶滅を抑制し、他方では新しい生物種の誕生を促すという意味で、地球における生物多様性の発達と維持において重要な意味を持っている（村上・鷲谷 2002）。

しかし、物資と人の長距離輸送が日常化した今日、地理的な障壁も生物の移動・分散能力における制約も、有効な隔離をもたらずに十分ではなくなってきた。今では多くの生物が本来の分散力や移動能力とはかわりなくいともたやすく分布を広げるチャンスをヒトによって与えられている。そのため、都市や農地の広がる景観では攪乱地の環境条件に適応した種がコスモポリタン（地球規模で広域に分布する種、汎生種）となって蔓延する一方で、侵入生物がもたらす新たな生物間相互作用が、地域に固有の種の絶滅の危険を高めている。多くの地域において、生育場所の喪失や分断・孤立化、乱獲・過剰利用とともに、生物学的侵入（本来その地域に生息していなかった生物が何らかの人為によってもたらされて野生化すること）は、生物多様性を脅かす主要な要因となっている（鷲谷 1999）。そのため、外来種問題の解決は、国際的にも生物多様性保全上の最も重要な課題の 1 つとして認識されている。2016 年 12 月現在、日本を含む 194 か国、欧州連合 (EU) 及びパレスチナが締結 (外務省 HP) している生物多様性条約においても、その第 8 条 (h) には、「生態系、生息地若しくは種を脅かす外来種の導入を防止し又はそのような外来種を制御し若しくは撲滅すること」という締約国の義務が記されている（村上・鷲谷 2002）。

外来種がもたらす影響は、以下のように分類整理される。

(1) 生態系への影響

- ①生物間相互作用を通じて在来種を脅かす。
- ②在来種と交雑して雑種をつくることにより在来種の純系を失わせる（遺伝的攪乱）。
- ③生態系の物理的な基盤を変化させる。

(2) 人の生命・身体への影響

- ①伝染病を持ち込む。
- ②花粉症などアレルギー症を引き起こす。
- ③毒を持ったものなどが人に直接の危害を加える。

(3) 産業への影響

- ①外来害虫や外来雑草などによる農業への影響。
- ②マツノザイセンチュウによる松枯れなどの林業への影響。
- ③外来種による漁業対象種の捕食や魚病などの漁業への影響。
- ④外来種が利水施設の取水管や導水管の内壁に付着・増殖することによる利水障害（環境省 HP/村上・鷲谷 2002）。

従来、外来種の中でも、産業や人の健康・生命にすら影響を及ぼすものに関しては古くからその影響が調べられ、一部対策なども実施されている。しかし、生態系や生物多様性に対する影響が認識され始めたのは最近であり、それに関しては情報も充分ではなく、対策も遅れている。それでも世界中の多数の事例について、外来種のうち生態系に何らかの影響を及ぼした種の割合を調べた結果からは、外来種の 5～20%、すなわちほぼ 10 種に 1 種が無視できない影響を及ぼしているという結論が得られている（村上・鷲谷 2002）。外来種の侵入による日本列島の生物多様性の侵食はますます激化しており、一日も早く有効な対策をたてて実践することが必要である（鷲谷 1999）。

外来種への対策

生物多様性条約第 8 条（h）は、外来種について規定しており、締約国に対し、可能かつ適切な場合に、「生態系、生息地若しくは種を脅かす外来種の導入を防止し又はそのような外来種を制御し若しくは撲滅すること」を求めている。生物多様性条約締約国会議等は、この規定を具体化するための検討を行い、2002 年 4 月に開催された第 6 回締約国会議において、「生態系、生息地及び種を脅かす外来種の影響の予防、導入、影響緩和のための指針原則」（生物多様性条約における外来種の指針原則）を採択した。これは、各国政府が、侵略的外来種の拡散と影響を最小化するための効果的な戦略を策定するための手引きであり、15 の原則からなっている（国立国会図書館 HP）。

日本では、環境省が、2000 年から検討を開始していた野生生物保護対策検討会移入種問題分科会（移入種検討会）において 2002 年 8 月に「移入種（外来種）への対応方針」をまとめ、外来種の現状、対策の方向性を示した。その後、中央環境審議会での制度的

対応の検討を経て、「特定外来生物による生態系等に係る被害の防止に関する法律」（外来生物法）が 2004 年に制定され、2005 年 6 月から施行された（日本農学会 2008）。

外来生物法は、日本の外来生物を防除することを目的に制定されたものだが、定着した生物すべての防除が狙いではない。外来生物はトータルで 2000 種以上もいるため、そのすべてに対応することは不可能であり、また、なかには生態系にあまり影響を与えず、人間に対して無害なものもいるので、そういった種は排除のターゲットにはなっていない。重要視するのは、海外起源の外来生物のなかで、生態系や人体、農林水産業などに大きな被害を及ぼす、あるいは及ぼす恐れのあるものたちである。こうした生物たちを「特定外来生物」として指定し、重点的に制限を加えていく。また、生態系などに被害を及ぼす恐れがあるけれども、まだ実態がよくわかっていないグレーゾーンの生物たちは「未判定外来生物」に指定され、特定外来生物などと外見がよく似ていて判別が困難な生物は、「種類名証明書の添付が必要な生物」として定められている。さらに、外来生物法の規制対象ではないが、扱う個人や業者に理解と協力を求めるため、「要注意外来生物」というカテゴリーも公表されている（池田 2007）。

侵入してしまった外来生物の対策には、時間と労力、そして費用がかかる。そのため、外来生物の侵入を予防する体制を整えることが対策の大前提となり、その点で外来生物法の施行には、大きな効果が期待される。すでに侵入してしまった外来生物に対する対策としては、早い段階で生態系から根絶することが最も望ましい。根絶が不可能あるいは不適切な場合には、分布域をこれ以上増やさないための封じ込め、あるいは低密度で生息をコントロールする長期的な防除措置が考えられる。外来生物対策としては、こうした「予防」「早期発見・早期対応」「定着したものの防除（影響緩和）」という 3 段階のアプローチが重要である（池田 2007）。また、特定外来生物として指定されていないものは影響を及ぼすおそれがない、ということではないし、特定外来生物として指定されたものが日本中どこでも同じような被害を与えるのかといえ、これも事実ではない。外来種への対応は、「種」に対する対応という面もあるが、その地域で生じている影響の内容によって対応を個別に検討することが必要な場合が多い。外来種を、影響を与える種、与えない種と区別してそれぞれ一律の対応をすることで方向を誤ることのないよう注意すべきである（日本農学会 2008）。

レッドリスト・レッドデータブック

生育・生息地の分断化や消失、環境汚染、外来生物の侵入、さらには地球温暖化など、人間活動に起因する環境変化にともない、野生生物にはかつてなかった規模と速度で絶滅がもたらされている。その危機の認識の高まりとともに、現在では生物多様性の保全は人類が持続的な社会を維持するための最重要課題の 1 つとして認識されるまでになっている。種の大量絶滅を回避するためには、種ごとに絶滅リスク（その種が絶滅する確率）を科学的に評価し、優先的に対策を立てるべき種を特定して、効果的・効率的な対

策を立案・実施する必要がある。そのような目的で、国際的な基準にもとづく生物の絶滅リスクの評価と「レッドリスト（絶滅危惧動植物のランク付け）」の作成が行われている（福山・安田 2009）。この世界の絶滅のおそれのある動物をリストアップした「レッドリスト（正式名称：絶滅のおそれのある種のレッドリスト）」は、スイスのグランに本部を置く、IUCN（国際自然保護連合）により発表されている。現在、日本の環境省も日本独自のレッドデータブックおよびレッドリストを作成しているが、これらも、この IUCN が作成したレッドリストの評価基準に基づいて作成されている（WWF ジャパン HP）。

IUCN では、それぞれの専門分野の研究者グループが、野生生物を調査した結果に基づき、野生生物 1 種ごとの絶滅危機の度合いを査定している（WWF ジャパン HP）。レッドリストにおける危機のランクは、Extinct（EX：絶滅）、Extinct in the Wild（EW：野生絶滅）、Critically Endangered（CR：絶滅危惧ⅠA類）、Endangered（EN：絶滅危惧ⅠB類）、Vulnerable（VU：絶滅危惧Ⅱ類）、Near Threatened（NT：準絶滅危惧種）とわけられており、ランクは再評価のたびに变化し、個体数や生息域の減少が確認された種は、より危機の高いランクに移され、逆に回復が認められた種については、危機ランクが下がるか、リストから外されることになる（WWF ジャパン HP）。このランクの中で一般的に「絶滅のおそれのある野生生物」とされているのは、絶滅危惧ⅠA類（CR：ごく近い将来における野生での絶滅の危険性が極めて高い種）、絶滅危惧ⅠB類（EN：ⅠA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種）、絶滅危惧Ⅱ類（VU：絶滅の危険が増大している種）の特に絶滅の危機が高いとされる 3 つのカテゴリーにランクされている野生生物である。また、現時点での絶滅危険性は少ないが、生息条件の変化によっては上位ランクに移行する要素を持った種は準絶滅危惧種（NT）とされる（福山・安田 2009）。

「レッドデータブック」とは、レッドリストに加え、形態、繁殖などの生態、生息環境、絶滅の要因とその保全対策などの関連するデータをまとめた本のことである。レッドリストやレッドデータブックは保全策の指針書にもなっており、IUCN では、数年おきに世界中の絶滅危惧種をまとめたレッドデータブックを発行している（日本生態学会 2012）。日本には、シダ植物と種子植物をあわせると、約 7000 種類（種・亜種・変種）の植物が自生している。その 4 割に相当する約 2900 種類は、世界でも日本だけに自生する固有植物である。しかし、残念なことに、日本の野生植物の多くに、絶滅の危機が迫っている。環境省が 2000 年に発表した植物レッドデータブックには、25 種類が「絶滅」、1665 種類が「絶滅危惧」としてリストされた。これらをあわせると、日本の野生植物の約 24 パーセントに達する（矢原 2003）。

レッドリストやレッドデータブックに該当するものは、IUCN だけが作成しているわけではなく、各国には各国の、さらに地域や管轄省庁によって異なるものが作成されている。世界中の種を対象にした IUCN のレッドリストには当然、日本産の種も多く含まれているが、その IUCN の危機評価が必ずしも環境省のレッドリストの評価と一致しているわ

けではない。また、分類についても、世界と日本で一致していない例が少なからずある。このような差は、いかなる国や地域の場合においても起こり得るものであり、どのレッドリストの評価が正しい、というわけではない。しかし、掲載基準や危機の評価については、まだ課題が残されていることも確かである（WWF ジャパン HP）。

本研究の目的

里地・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。里地・里山地域は古くから自然と人とが共生する地域であり、森林生態系や草地生態系などさまざまなタイプの陸上生態系と稲作水系のような水界生態系が存在する生物多様性に富んだ地域である。しかし、高度経済成長期以降の開発、産業構造の変化による農業の衰退や少子高齢化により、里地・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るなど、かつての生物多様性に富んだ状態は失われつつある。このような生物多様性の喪失をくい止め、自然と人が共生し、将来にわたって恵みを得ることのできる持続可能な社会をつくっていくことが現代社会の大きな課題となっている。本研究では、生物多様性の保全をする上で重要な地域となる里地・里山地域における植物種多様性がどのように形成されるのかを、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明することによって考察する。

そしてこれらの多様性が、地球温暖化の直接影響によってどのような影響を受けるのか、現地調査と栽培実験により解明する。生物多様性国家戦略 2012-2020 でも述べられていたように、地球温暖化などの環境変化が生物多様性に与える影響は大きいと考えられる。温暖化により在来種の生息・生育場所は限られ、絶滅の危機にさらされている一方、競争力の強い外来種はその生息・生育場所を拡大している。地球温暖化が里地・里山地域に生息・生育する在来種や外来種にそれぞれどのような影響を与え、在来種を保全し、外来種を駆除するためにはどのような対策を行うべきかを検討する必要がある。

具体的には、長期間里地として利用・管理されている地域である東毛地域（太田、邑楽、館林、板倉など）において、植物相調査、環境調査を行って現状を解明した。また、この地域にわずかに自生する代表的な絶滅危惧植物・希少種（
、
、
など）について種子生産・発芽・生長特性の解明を行った。

さらに、東毛地域はヒメモロコシ、オオブタクサなど大型の外来植物の繁茂が著しいので、これらも材料植物として温暖化の直接影響の解明を試みた。

調査地概要

板倉ウェットランド地域（谷田川、矢場川、渡良瀬遊水池、朝日野池、行人沼）

群馬県南東部に位置し、渡良瀬川、渡良瀬遊水池、利根川、谷田川、矢場川及びその周辺に位置する池沼群があり、河川蛇行域の氾濫原が発達した地域で、自然堤防にはさまれた後背湿地や河跡湖がみられる。本地域は、群馬の水郷地帯とも呼ばれ、県内で最も低い標高 10m から 20m の低地帯であり、沖積低地、あるいは洪積台地の浸食谷に出来たウェットランドが集中する県内唯一の地域である。ウェットランドは、生物相の豊かさ、高い生産力、そして健全な地球環境維持のための重要な生態的役割を有し、森林や海洋とならぶ重要な環境の 1 つであるといわれている（群馬県自然環境課 2009）。また、本地域では、数多くの湿地性植物が見られ、その豊庫となっており、絶滅危惧種にランクされる貴重種も少なくない（板倉町教育委員会 2006）。このように、板倉ウェットランド地域は低湿地帯として良好な自然が残されていたが、近年、工場や大学の進出、ニュータウンの造成などによってめまぐるしく自然環境が変貌し続けている。そのため、希少な野生植物が次々と姿を消す一方で、これまで分布の限られていたものや知られていなかったものなどが相次いで見出されている（群馬県自然環境課 2009）。今後、板倉ウェットランド地域の良好な環境を維持・保全していくためには、継続的なモニタリング調査が必要である。

さらに、行人沼は県自然環境保全地域に指定されており、ここは水生絶滅危惧植物種であるトチカガミの県内唯一の自生地となっている。

館林地区（多々良沼、中野沼）

館林市は関東平野の北部、群馬県の東南部に位置し、北を渡良瀬川、南を谷田川、西を多々良沼などではさまれた標高 20m 程度の洪積台地を中心に、その周りに広がる侵食谷及び沖積低地よりなる。群馬県内でも海拔の最も低いという特殊な環境にあって、低地の湿地帯、池沼の多いことにより、湿地を好む湿地性の植物、水中植物の多い植生である（館林市教育委員会 1995）。

本研究の調査該当地である多々良沼は東毛地方を代表する大きな沼で、日本固有の植物が発見されるなど、日本でも有数の湿地性、あるいは水生植物の宝庫として古くから

世に知られており（館林市教育委員会 1995）、絶滅危惧種も多く自生している。また、中野沼も多々良沼同様、数多くの湿地性植物や水生植物が自生しており、水生絶滅危惧植物種の宝庫となっている。

伊勢崎地区

太田地区（太田 IC 周辺、八重笠沼）

群馬県東毛地域に当たる太田市の IC 付近の水田地帯と太田市内にある八重笠沼の植物相調査を行った。八重笠沼は太田市の東部にあり、3 つに区画化された沼（北沼・中沼・南沼）と周辺の水田地帯に、国や県で絶滅危惧種に指定されている種や希少種など多くの水生植物が確認されている（滅びゆく八重笠沼の植物 HP）。また、太田 IC 周辺の水田地帯でも絶滅危惧種が生育している。

このように、太田 IC 周辺の水田地帯や八重笠沼は絶滅危惧種や希少種など多くの水生植物の生育場所であり、農業の近代化により失われつつある水田や湿地の面影を残す貴重な場所となっている。

アドバンテスト・ビオトープ

群馬県邑楽郡明和町、株式会社アドバンテスト群馬 R&D センター2 号館敷地内に 2001 年 4 月に竣工した大型ビオトープである。本ビオトープは「多様な生き物の生育空間の創出とネットワーク」、「失われつつある昔ながらの風景の再現」、「従業員の安らぎの場の創出」を目標として造成された。「多様な生き物の生育空間の創出とネットワーク」とは、地域の多様な生物種が生息できるよう、生態学的な知見に基づいた生育空間を創出し、R&D センター北側に谷田川をはじめとする、周辺環境との連続性とネットワークを形成しようというものである。「失われつつある昔ながらの風景の再現」とは、ひと昔前には関東平野北部のどこにでも広がっていた広大な氾濫原、失われてしまった水辺、湿性環境、雑木林と空き地の草原などの風景の再生をめざし、周辺環境の保全を行うというものである。「従業員の安らぎの場の創出」とは、工場内で働く従業員の人々に対して、自然と触れ合える安らぎの場を創出するものである。このように、本ビオトープは単純に緑地を創出しようというのではなく、本来の定義に沿ったビオトープの創出を目指している。

本ビオトープの設計にあたっては、関東平野の昔ながらの田園風景の復元を目指して、高低差 3m 程度の微地形と、大きく分けて水辺、樹林、草地からなる多様な環境が配置さ

れている。これにより、エコトーンと呼ばれる性質の異なった 2 つの環境が接する推移帯が形成され、より自然に近い環境を創出し、多様な生物種が生息できる空間が確保されている。また、ビオトープ内には、ビオトープ装置（石積ビオトープ：2 地点、伐採木ビオトープ：4 地点、伐採竹ビオトープ：3 地点、砂礫ビオトープ：1 地点）が配置されており、多様な小動物種の生育を可能としている（須永 2017）。

本研究では、アドバンテスト・ビオトープに生育するフジバカマの分布調査を行った。

才川

栃木県佐野市内の人丸神社横の湧水池である新堰を源流とする河川である。佐野市内を流れ、下流において群馬県との県境を形成し、渡良瀬大橋直下で渡良瀬川と合流する。

材料及び方法

材料植物

調査対象地域に生育している主要な植物のうち、モデル植物として以下の植物を用いた。

在来種

- ・カラスノエンドウ（マメ科一年生草本、*Vicia angustifolia* L. var. *angustifolia*）
至る所の田野、山麓の日当りのよい所に生え、多少地上に横に伏し、長さは 60～90cm 位になる。本州、四国、九州、沖縄に分布する。別名ヤハズノエンドウ。

- ・カワラノギク（キク科多年生草本、*Aster kantoensis*）
大きな河川の中流～下流域の河原の砂礫地に群生する美しい野菊で、高さは 50～80cm となる。本州（関東地方、静岡県東部）に分布する。国のレッドデータブックで絶滅危惧Ⅱ類に指定されている。本種の県内生育の可能性はあるが、まだ発見されていない。そこで本研究では栃木県で採取された種子を用いて発芽実験を行った。

- ・サクラオグルマ（キク科多年生草本、*Inula x yosezatoana* Makino）
路傍多湿の地に生え、高さは 50cm 内外になる。本州（関東地方）に分布する。オグルマとホソバオグルマの雑種とされ、母種いずれもが群馬県内で生育が確認されているため、本種の県内生育は可能性が示唆されているが、まだ発見されていない。そこで本研究では栃木県で採取された種子を用いて発芽実験を行った。

・

・

- ・トチカガミ（トチカガミ科多年生草本、*Hydrocharis dubia*）

池や溝の浅い水中に生える。本州、四国、九州、沖縄に分布する。国のレッドデータブックでは準絶滅危惧種、群馬県では絶滅危惧ⅠＡ類に指定されている。本種は2001年刊行の群馬県レッドデータブック・植物編において県内で絶滅とされ、その後板倉町内の行人沼で復活が確認された。2001～2003年に行われた群馬県絶滅危惧動植物保全対策調査、および群馬県の「良好な自然環境を有する地域学術調査」においても、2008年に行人沼で本種の生育を確認している。これらの調査・確認を受けて、最新の2012年度版群馬県レッドデータブック・植物編において本種は絶滅危惧ⅠＡ類に指定された。群馬県内でわずか3ヶ所でのみ生育している。

・

外来種

- ・オオブタクサ（キク科一年生草本、*Ambrosia trifida*）

肥えた泥のたまった河原や造成地、都会地の荒れ地や裸地などに大群生し、高さは50cm～3mになる。北アメリカ原産の帰化植物で、沖縄を含むほぼ全国に分布する。日本の侵略的外来種ワースト100に入っており、外来生物法で要注意外来生物に指定されている。

- ・ヒメモロコシ（イネ科多年生草本、*Sorghum halepense* f. *muticum*）

荒れ地や道端などの強光環境下に生え、高さは2mになる。南アフリカ原産の帰化植物で、ほぼ全国に分布する。群馬県では県内危険外来種に指定されている。

植物相・分布調査

一般的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ため、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挙げられる。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、希少種・絶滅危惧種を中心として、デジタルカメラで撮影し、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。

さらに、いくつかの希少種・絶滅危惧種については、調査地を踏査して生育あるいは開花を確認した場合、カメラ付きポータブル GPS (GPSmap62SCJ, GARMIN) を用いて撮影することにより生育位置を記録した。撮影の際には、生育位置の誤差を少なくするために、対象の中心（真上）となる場所から撮影をした。撮影した写真は Garmin Base Camp に取り込んだ後、ジオタグ情報を読み込み、その情報を基に各植物の分布図を作成した。調査日程を表 1 にまとめた。

種子発芽の冷湿処理・培養温度依存性実験

オオブタクサ、カラスノエンドウ、カワラノギク、サクラオグルマ、
、ヒメモロコシ、の計 8 種類の植物の種子を用いた。それぞれの材料植物種子の産地・産年の一覧及び冷蔵・冷凍保存期間一覧を表 2、表 3 に示す。

オオブタクサは標高の異なる 3 地点（前橋・標高約 150m、西榛名・標高約 700m、菅平・標高約 1,000m）で採取した種子を用いて、生育温度環境と発芽特性の関係を解明することとした。

実験手法は以下の通りである。石英砂を敷いた直径 9cm のプラスチック製のシャーレに成熟した種子を 50 個ずつ入れ、各々のシャーレに蒸留水を注ぎ、それらを温度勾配型恒温器 (TG-180-5T (L), NK system) に入れて培養した。温度勾配型恒温器内の温度は、30/15℃、25/13℃、22/10℃、17/8℃、10/6℃（昼 14hr、夜 10hr、昼間の相対光量子密度は約 $30 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ）の 5 段階とし、各温度区で 1 植物あたり 3 シャーレを培養した。

実験開始後 1 ヶ月は毎日、その後は 1～3 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見なして数を記録し、取り除いた。また、観察日ごとに蒸留水をつぎ足し、常時湿った状態を保った。そして、約 2 ヶ月間培養を続けた。最終的な積算発芽率を最終発芽率とする。これら一連の実験スケジュールを表 4 に示す。

また、オオブタクサ、カワラノギク、サクラオグルマ、
、ヒメモロコシは前処理として冷湿処理、カラスノエンドウは前処理として硫酸処理を施

した。カワラノギクは先行研究（井上 1994）より最適温度区が 25/13℃であることがわかっているため、25/13℃でのみ培養した。

冷湿処理（低温湿層処理）

植物種子の中には冬を経験しないと発芽せずに、休眠状態のままになっているものが多い。その為、擬似的な冬を経験させ、この休眠状態を解除する処理が冷湿処理である。今回は先行研究で冷湿処理の有効性が示されているオオブタクサ、カワラノギク、サクラオグルマ、
、
、ヒメモロコシの種子を、4℃の薬用保冷庫（MEDICOO LMPR-504（H）, SANYO）に約1～2ヶ月間保管することで、冷湿処理の発芽に対する効果の検証を行った。

硫酸処理

植物種子の中には、外皮が固く不透水性になっており、土壌中の微生物等によって外皮が分解される、或いは風などによって長距離を転がって移動し、その過程で種皮に傷がつくことではじめて吸水が可能になる個体がある。それらを用いて発芽実験を行うのは困難であるため、種子を硫酸につけて人為的に外皮を溶かし吸水できるようにする処理がこの硫酸処理である。本研究では、カラスノエンドウに対して行っている。カラスノエンドウは、800粒ほどの種子を約60分間硫酸に漬け、その後水道水で約60分洗浄した。

異なる光環境・温度環境条件下における栽培実験

植物を様々な環境下で一定期間栽培し、栽培前の個体と栽培後の個体の乾燥重量・葉面積を比較することで植物の環境応答パターンを解明する実験である。今回は前述の発芽実験の際に得られた、オオブタクサ（前橋産、西榛名産、菅平産）、
、
、フジバカマ（アドバンテスト産、
）、カラスノエンドウの発芽種子を用いた。加えて、群馬大学荒牧キャンパス構内で栽培されているトチカガミの成体も用いて実験を行った。

また、カワラノギク、サクラオグルマ、ヒメモロコシに関しては種子の発芽率が悪く、
に関しては発芽後の生育が悪かったため、栽培実験は行わなかった。

実験用植物の育苗とサンプリング方法

発芽実験で発芽した実生を、ゴールドエンピートバン（サカタのタネ）に移植し、グロースキャビネット（MLR-350T, SANYO、LED球を用いて14L/10Dの日長で昼間の相対光量密度を約240～540 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ とし、室温25/20℃に調節した）内で約2週間～1ヶ月間栽培した。

実生が複数の本葉を有するようになった時点で、各植物のサイズにあったプラスチック製苗ポット（直径約4～8cm）に黒土を入れ、1個体ずつ移植した。用土は黒土を用いて、これらの苗を1週間、群馬大学荒牧キャンパス構内の裸地で栽培した。

トチカガミは水草で種子をほとんどつくり、殖芽で越冬・繁殖する。このため本研究では、群馬大学で保護している県内産のトチカガミの殖芽を栽培して実験に用いた。殖芽を直径約30cm、深さ約13cmのプラスチックたらいに黒土を約3cm厚で入れ、水道水を水深約10cmとなるように入れた。このたらい1つあたりに殖芽を5～6本植えて群馬大学荒牧キャンパス構内の裸地で栽培した。

カラスノエンドウの苗は、温度勾配型恒温器（TG-100-ADCT, NK system、昼14hr、夜10hr、昼間の相対光量子密度は約140～350 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ）内の17/8℃区および10/6℃区で栽培した。

それぞれの苗が本葉を5～6枚つけるまで、約1週間～1ヶ月間（植物により異なる）前栽培した後に初期サンプリングを行い、同時に栽培実験を開始した。

初期サンプリングに際しては、苗の見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（本研究では6）に配分して、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、残りの区をそれぞれの処理区に供した。

サンプリングした苗は、個体ごとに根・葉・茎に切り分けて紙袋に入れ、送風低温乾燥機（DRS620DA, ADVANTEC）に入れて1週間80℃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、ImageJ1.44o（NIH）を用いてドット数を計測した。今回は148cm²あたり2073949ドットとした。

光強度を調節した栽培実験

寒冷紗を用いて相対光量密度を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。これらの光条件区内に前述の操作で得た苗を入れて約2週間栽培した。栽培期間中は1日1回水道水を与えた。

気温を調節した栽培実験

群馬大学荒牧キャンパス内にガラス温室（サイズはおおよそ500×200×250cm）を設置し、換気調節を行うことによって、外気温と比べて平均気温が約1.6℃上昇するように調節した区（+1.6℃区）を設けた。また+0℃区としては、前述の光強度を調節した栽培実験の際の100%区を用いた。これらの調節区に苗を入れて約2週間栽培した。栽培期間中は1日1回水道水を与えた。

また、カラスノエンドウのみ光強度を調節した実験を行わず、温度勾配型恒温器（TG-100-ADCT, NK system）に入れて気温を調節した実験を行った。温度勾配型恒温器内の温度は、30/15℃、25/13℃、22/10℃、17/8℃、10/6℃（昼14hr、夜10hr、昼間の相対

光量子密度は約 $140\sim 350\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ の5段階とし、これらの調節区に苗を入れて約2週間栽培した。栽培期間中は1日1回水道水を与えた。

以上の栽培実験を植物ごとに行い、すべての個体をサンプリングした（最終サンプリング）。サンプリングした個体は、前述の初期サンプルと同様に処理し、各器官別乾燥重量および葉面積を測定した。栽培実験スケジュールを表5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。

$$\text{RGR} = (\ln(\text{TW2}) - \ln(\text{TW1})) / (\text{T2} - \text{T1}) \quad (\text{gg}^{-1}\text{day}^{-1})$$

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。

$$\text{NAR} = (\text{TW2} - \text{TW1}) (\ln(\text{LA2}) - \ln(\text{LA1})) / (\text{LA2} - \text{LA1}) / (\text{T2} - \text{T1}) \quad (\text{gm}^{-2}\text{day}^{-1})$$

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（ m^2 ）

LA2：T2における個体の葉面積（ m^2 ）

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。

$$\text{LAR} = (\text{LA1}/\text{TW1} + \text{LA2}/\text{TW2}) / 2 \quad (\text{m}^2\text{g}^{-1})$$

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（ m^2 ）

LA2：T2における個体の葉面積（ m^2 ）

- ・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。

$$SLA=LA/TW \quad (m^2g^{-1})$$

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葉乾燥重量（g）

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

- ・葉重比（LWR：Leaf Weight Ratio）

$$LWR=LW/TW \quad (gg^{-1})$$

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総乾燥重量（g）

- ・茎重比（SWR：Stem Weight Ratio）

$$SWR=SW/TW \quad (gg^{-1})$$

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総乾燥重量（g）

- ・根重比（RWR：Root Weight Ratio）

$$RWR=RW/TW \quad (gg^{-1})$$

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。

$$RGR \cong NAR \cdot LAR$$

$$LAR=SLA \cdot LWR$$

これらの式によって、処理区間で相対生長速度（RGR）または葉面積比（LAR）の差異があった場合、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キャンパス内に設置した温暖化実験用ガラス温室内において、対象植物の栽培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 30 分おきに連続測定した。なお、センサ先端部分をアルミニウムカバーで覆い、直射日光が当たるのを避けた。

統計解析

生長解析結果については、JMP9.0（SAS Institute Inc.）を用いて分散分析および多重比較（Turkey-Kramer の HSD 検定）を行った。

結果及び考察

植物相・分布調査

板倉ウェットランド地域

・谷田川、矢場川

谷田川では、2017 年度（4 月～10 月）の計 4 回の調査によって、在来種 8 種（うち絶滅危惧種 5 種）、外来種 5 種の計 13 種の生育が確認された（図 2～8、表 1・6）。

・渡良瀬遊水池

・朝日野池

・行人沼

行人沼では、2017 年 10 月 30 日の調査で在来種 2 種が確認された（表 1・6）。行人沼はトチカガミ（国：準絶滅危惧（NT）、群馬県：絶滅危惧ⅠA 類）の県内唯一の自生地となっているが、今回の調査では確認されなかった。この原因として、台風 21 号の影響により行人沼の水位が上がってしまったこと、沼のほとりが木々やスイレンに覆われていてトチカガミが生育するために必要な光・温度環境が十分確保されていないとみられる。

トチカガミは埼玉県など近県では生育地が多いが、その多くは小規模用水路などで、陽当たりが極めて良く水位が低いため、水温がかなり高くなると思われる。一方、行人沼は水深が約 7m もあり、トチカガミの殖芽が発芽する時期も沼底の水温が低く、また、水深が深いため発芽に必要な光が沼底まで届きづらい。よって、行人沼のように湧き水で水温が低くなりがちな水系（群馬県自然環境課 2009）で、かつ他の植物に被陰される状況下においては、良好な生育が望めないかもしれないため、育成管理の行き届いたビオトープなどで保護する必要があると思われる。群馬大学社会情報学部環境科学研究室では、2013 年よりチノー・ビオトープ内の池に県内産のトチカガミを移植しているが、水位が高すぎたことや水温が低すぎたことが原因で生育は不良で、毎年追加移植を行っている（関 2016；須永 2017）。

館林地区（多々良沼、中野沼）

多々良沼及び中野沼では、2017 年度（6 月～9 月）の計 3 回の調査によって、在来種 8 種（うち絶滅危惧種 6 種）、外来種 1 種の計 9 種の生育が確認された（図 18～24、表 1・6）。

伊勢崎地区

太田地区（太田 IC 周辺、八重笠沼）

太田 IC 周辺及び八重笠沼では、2017 年 9 月 1 日の調査で、在来種 5 種（うち絶滅危惧種 3 種）の生育が確認された（図 26～29、表 1・6）。太田 IC 周辺の水田には様々な生物が生息しているため、減農薬水田耕作が行われていると考えられ、そのため多様な水田植物が生育していると推察できる。また、2012 年に塚越（2013）が調査を行った時同様、八重笠沼ではオニビンが優占種として繁茂していた。太田地区は絶滅危惧種や希少種など多くの水生植物の生育場所であり、農業の近代化により失われつつある水田や湿地の面影を残す貴重な場所であるため、今後継続的にモニタリング調査を行い、絶滅危惧種の喪失を防ぐ必要がある。

アドバンテスト・ビオトープ

アドバンテスト・ビオトープでは、2017 年 9 月 25 日の調査で、フジバカマ（国：準絶滅危惧（NT）、群馬県：絶滅危惧 I B 類）の生育・開花が確認された（図 30、表 1・6）。アドバンテスト・ビオトープのフジバカマは継続的な移植や草刈りによる光環境の改善などにより、初めて自生が確認された 2006 年以降、継続して生育・開花が確認されている。また、アドバンテスト・ビオトープ内の池に移植したアサザ（国：準絶滅危惧（NT）、群馬県：絶滅危惧 I A 類）も 2016 年に須永が調査を行った時同様、広い範囲にわたり生育しているのが確認できた。今後もこれらの絶滅危惧種の生育状況をモニタリング調査

し、適切な管理を行うことでより良い生育環境を整えていくことが重要であると考えられる。

才川

種子発芽の冷湿処理・培養温度依存性実験

在来種

・カラスノエンドウ（マメ科一年生草本、*Vicia angustifolia* L. var. *angustifolia*）

本種の種子の最終発芽率は 30/15℃・25/13℃で 97.3%、22/10℃で 98.7%、17/8℃・10/6℃で 100.0%と 5 温度区全てで非常に高い値となった（表 9、図 32）。また、30/15℃と 25/13℃では一部の種子が腐敗した。

足助（2016）が本実験と同じ産地・産年の種子を用いた同様の実験では、30/15℃で 78.7%、25/13℃で 99.3%、22/10℃・17/8℃・10/6℃で 100%となり、佐藤（2017）が行った同様の実験でも、30/15℃で 54.7%、25/13℃・22/10℃で 84.7%、17/8℃で 83.3%、10/6℃で 60.7%と、本実験結果とほぼ同様の結果が得られている。またどちらの実験においても、高い温度区では種子が腐敗している。

これらの結果より、本種の種子の発芽の最適温度は 10/6℃～22/10℃であると考えられる。本種は野外において、他の植物種が少ない気温の低い季節に発芽し、明るい生育環境と長い生育期間を得ることで他の植物種よりも早く大きく生長するという生存に有利な性質を持っていると考えられる。

また、本種は種皮が厚く、そのままでは吸水しなかったことから、種子生産年のうちに発芽するとは考えにくく、永続的土壌シードバンクを形成する可能性が高いと考えられる。外皮が厚く不透水性になっている種子は、土壌中の微生物等によって外皮が分解される、或いは風などによって長距離を転がって移動し、その過程で種皮に傷がつくことではじめて吸水・発芽が可能になる性質を持っており、この性質は生育地を拡大するのに有利なものであると考えられる。さらに、高温下で種子が腐敗してしまい、発芽率が低下するという結果より、本種は温暖化によって気温が上昇すると、発芽が阻害されると推察される。

・カワラノギク（キク科多年生草本、*Aster kantoensis*）

本研究では、先行研究（井上 1994）より 25/13℃が最適温度区であるとわかっているため、25/13℃でのみ培養を行った（表 4）。2 ヶ月間の冷湿処理を施した種子の最終発芽率も、冷湿処理を施していない種子の最終発芽率も 0.0%と、全く発芽しなかった（表 9、図 33）。

この結果は、実験を行う際に未熟な種子を選別してしまったか、約 4 年間の冷凍保存期間のうちに種子が著しく劣化したことが原因であると考えられる。倉本（2016）は本種の特性として、結実率の悪い花の種子は発芽率が低いことを明らかにした。本研究に用いた種子も結実率の悪い花から採取してしまったことが原因で、発芽率が悪くなった可能性も考えられる。

・サクラオグルマ（キク科多年生草本、*Inula x yosezatoana* Makino）

2 ヶ月間の冷湿処理を施した種子の最終発芽率は、30/15℃・25/13℃・22/10℃・17/8℃・10/6℃の 5 温度区全てで 0.0%となり、冷湿処理を施していない種子の最終発芽率も同じく 0.0%（25/13℃）と、全く発芽しなかった（表 9、図 34・35）。

本種はオグルマとホソバオグルマの自然交雑種と考えられており、発芽をしないとされている（大森 私信）。よって、本研究の発芽率 0%という結果は、この説を裏付けるものであると考えられる。

・

2 ヶ月間の冷湿処理を施した種子の最終発芽率は、30/15℃・25/13℃で 100.0%、22/10℃で 76.7%、17/8℃で 12.0%、10/6℃で 0.0%と、22/10℃以上の温度区で 60%以上、特に高温区では 100%という高い発芽率となった。一方、冷湿処理を施していない種子の最終発芽率は 2.0%（25/13℃）であり、冷湿処理を施したもの（25/13℃で 100.0%）より非常に低い結果となった（表 9、図 36・37）。

本実験と同じ産地・産年の種子を用いて同様の温度区で行われた山里（2017）の実験では、2 ヶ月間の冷湿処理を施した種子の最終発芽率は 30/15℃で 99.3%、25/13℃で 100.0%、22/10℃で 96.0%、17/8℃で 60.0%、10/6℃で 0.0%と、本実験結果とほぼ同様の結果が得られている。一方、冷湿処理を施していない種子の最終発芽率は 36.0%（25/13℃）と、本実験結果よりも高い値となっている。

これらの結果より、本種の種子の発芽の最適温度は 22/10℃～30/15℃と比較的高いと考えられる。本種は冷湿処理による発芽促進効果が認められるため、秋の種子散布後に冬季の低温によって休眠が解除され、続く夏の高温に反応して発芽すると推察される。

以上の結果から、温暖化が本種の発芽に及ぼす影響については、平均気温が上昇するという点のみを考慮した場合、本種の発芽は促進されと考えられる。しかし、温暖化によって冬が短くなるという点も考慮すると、冷湿処理の効果が大きい本種は温暖化に

よって発芽が阻害されると考えられる。

・

2 ヶ月間の冷湿処理を施した種子の最終発芽率は、22/10℃で 34.0%と最大となり、30/15℃で 14.7%、25/13℃で 8.7%、17/8℃で 23.3%と、不定な偏差は大きいが低くなり、10/6℃では 1.3%と最低となった（表 9、図 38・39）。また、冷湿処理を施していない種子を 25/13℃で培養した結果は 0.0%と全く発芽しなかった。

山里（2017）が行った先行研究では、2 ヶ月間の冷湿処理を施した種子の最終発芽率は、22/10℃～25/13℃で約 27%～29%で、30/15℃および 17/8℃で約 11%～12%、10/6℃で 0.7%であった。また冷湿処理を施していない種子の最終発芽率は 25/13℃で 0.0%と全く発芽しなかった。

廣田（1996）は野生株由来種子に 7 週間の冷湿処理を施した後に培養したところ、最終発芽率は 20℃で約 10%、20/5℃で約 80%、30/10℃で約 30%となった。一方、冷湿処理を施していない種子は 10/30℃の交代温度条件下でのみ $11.0 \pm 4.0\%$ の発芽率となっている。

これらの結果と、本研究の結果を集約すると、本種の種子の発芽最適温度は 22/10℃程度であると推察される。また、本種は種子の状態で冷湿処理、すなわち冬を経験することが発芽するために必要な条件であると考えられる。

このように本種は発芽最適温度が比較的低く、かつ、冬の低温を一定期間受けないと発芽しないため、温暖化に伴って冬季が短くなり春季以降の気温が上昇すると、発芽が阻害されると推察される。また、本種は群馬県内の自生地が限られているため、今後はビオトープ内に移植、栽培していく必要があり、最適な栽培環境を特定するため継続的な実験を行う必要があると考えられる。さらに、本年、群馬県における本種の唯一の自生地において種子を採取することができた。今後は当面、緊急保全として自生株由来の種子を栽培する必要がある。

・

外来種

- ・ オオブタクサ (キク科一年生草本、*Ambrosia trifida*)

本研究では標高の異なる地点(前橋・標高約150m、西榛名・標高約700m、菅平・標高約1,000m)で採取したオオブタクサの種子を用いた。

約1ヶ月間(23日間)の冷湿処理を施した前橋産オオブタクサ種子の最終発芽率は30/15℃で39.2%、25/13℃で37.1%、22/10℃で59.1%、17/8℃で63.2%、10/6℃で66.2%となった。一方、冷湿処理を施していない種子の最終発芽率は39.3%(25/13℃)となった(表9、図44・45)。冷湿処理中に合計22個の種子が発芽し、この発芽した種子を除いたものを100%としてグラフを作成した。

本実験と同じ産地・産年の種子を用いて同様の温度区で2013年に行われた鍛冶川(2014)の実験では、本種の前橋産種子の最終発芽率は30/15℃で20.0%、25/13℃で28.7%、22/10℃で53.3%、17/8℃で57.3%、10/6℃で54.7%であった。また、同様に2016年に行われた佐藤(2017)の実験では、30/15℃で28.7%、25/13℃で45.3%、22/10℃で62.0%、17/8℃で61.3%、10/6℃で70.0%と、本実験結果とほぼ同様の結果が得られている。

これらの結果より、前橋産オオブタクサの種子の発芽の最適温度は10/6℃～22/10℃であると考えられる。

また鍛冶川(2014)の実験では約1ヶ月の冷湿処理中に本種の前橋産種子が発芽をすることはなかったが、佐藤(2017)の実験では約1ヶ月の冷湿処理中に一部の種子が発芽している。年々冷湿処理期間中に発芽する種子数が増加していることから、約6年間という長期間の冷蔵・冷凍保存により種子が発芽しやすくなったと推察され、冷蔵・冷凍保存による種子の劣化はないと考えられる。

約1ヶ月間(23日間)の冷湿処理を施した西榛名産オオブタクサ種子の最終発芽率は30/15℃で36.7%、25/13℃で59.3%、22/10℃で72.0%、17/8℃で66.0%、10/6℃で62.7%となった。一方、冷湿処理を施していない種子の最終発芽率は24.0%(25/13℃)となった(表9、図46・47)。

西榛名産(2008年産)の種子を用いて同様の温度区で2011年に行われた遠山(2012)の実験では、最終発芽率は30/15℃で10.0%、25/13℃で20.0%、22/10℃で48.7%、17/8℃・10/6℃で51.3%となっている。

これらの結果より、西榛名産の種子の発芽の最適温度は、前橋産と同様に10/6℃～22/10℃であると考えられる。

ただし、25/13℃区での最終発芽率は、2008年産で20.0%にすぎなかったが、2016年産では59.3%となっている。一般にオオブタクサのような一年生草本は一世代の時間が短いため、適応進化のスピードが相対的に速いと考えられ、オオブタクサが温暖化に呼応して、迅速に発芽特性を進化させる可能性は否定できないといえる(遠山 2012)。こ

これらのことから、西榛名産オオブタクサの種子が温暖化に呼応し、発芽最適温度をより高い温度でも発芽できるように広げた可能性があると考えられる。今後、温暖化に伴う発芽特性の変化を解明するために継続的な実験を行う必要があるといえる。

遠山 (2012) の実験で用いた種子と同じ産地・産年のオオブタクサの種子を用いて 2013 年に行われた鍛冶川 (2014) の結果では、同じ産地・産年の 5 温度区全てで 1.3%~4.7% と極めて低い発芽率となり、2016 年にはほとんど発芽しなくなったため、佐藤は実験に用いることができなかった。これは種子が劣化したことが原因であると考えられている。西榛名 2008 年産の本種の種子は 2008 年から 2013 年までは 4℃で冷蔵保存され、2013 年からは -80℃で冷凍保存されたことから、長期的な保存は冷蔵ではできないと考えられる。これを受けて本実験では、あらためて 2016 年に西榛名で採取し冷凍保存した種子を用いた。

約 1 ヶ月間 (23 日間) の冷湿処理を施した菅平産オオブタクサ種子の最終発芽率は 30/15℃で 27.6%、25/13℃で 27.3%、22/10℃で 43.8%、17/8℃で 39.5%、10/6℃で 39.6%となった。一方、冷湿処理を施していない種子の最終発芽率は 23.3% (25/13℃) となった (表 9、図 48・49)。冷湿処理中に合計 42 個の種子が発芽したため、この発芽した種子を除いたものを 100%としてグラフを作成した。

本実験と同じ産地・産年の種子を用いて同様の温度区で 2013 年に行われた鍛冶川 (2014) の実験では、30/15℃で 15.0%、25/13℃で 19.2%、22/10℃で 19.3%、17/8℃で 35.8%、10/6℃で 33.1%であった。また、2016 年に行われた佐藤 (2017) の実験では、30/15℃で 33.3%、25/13℃で 32.7%、22/10℃で 54.0%、17/8℃で 66.7%、10/6℃で 47.3%と、本実験結果とほぼ同様の結果が得られている。

これらの結果より、菅平産種子の発芽の最適温度は 10/6℃~22/10℃であると考えられるが、いずれの結果も、前橋産・西榛名産種子の値よりも低く、また、年を追うごとに低くなっている。

さらに、前橋産種子と同様に、鍛冶川 (2014) の実験では約 1 ヶ月の冷湿処理中に本種の菅平産種子が発芽をすることはなかったが、佐藤 (2017) の実験では約 1 ヶ月の冷湿処理中に一部の種子が発芽している。年々冷湿処理期間中に発芽する種子数が増加していることから、約 6 年間という長期間の冷蔵・冷凍保存により種子が発芽しやすくなったと推察され、冷蔵・冷凍保存による種子の劣化はないと考えられる。

菅平 2011 年産の本種の種子は 2011 年から 2013 年までは 4℃で冷蔵保存され、2013 年からは -80℃で冷凍保存されたことから、長期的な保存は冷蔵ではできないと考えられる。

以上の結果をまとめると、本種は産地の標高の違い (前橋約 150m、西榛名約 700m、菅平約 1,000m) にかかわらず、10℃~22℃程度の比較的低い温度区が発芽最適温度域であると考えられる。このため、本種は早春などの他の植物種よりも早い段階で発芽し、明

るい生育環境と長い生育期間を得ることで巨大な草体に生長すると考えられる。また、発芽に冷湿処理が必要、すなわち冬を経験することで発芽が促されることから、本種は永続的土壌シードバンクを形成すると考えられる。このように、本種は発芽最適温度が比較的低温、また冬の低温を一定期間受けないと発芽しないため、温暖化に伴って冬季が短くなり春季以降の気温が上昇すると、発芽が阻害されると推察される。一方で、本研究の西榛名産種子の結果で示されたように、一年草である本種が温暖化に迅速に呼応し、発芽特性を進化させる可能性は大いにあり得る。

・ヒメモロコシ（イネ科多年生草本、*Sorghum halepense* f. *muticum*）

2 ヶ月間の冷湿処理を施した種子の最終発芽率は、30/15℃で 18.7%、25/13℃・22/10℃・17/8℃・10/6℃の 4 温度区で 0.0%となった。一方、冷湿処理を施していない種子の最終発芽率は 4.0%（25/13℃）となった（表 9、図 50・51）。

狩谷（2004）及び佐藤（2005）の実験では、109 日間冷湿処理を施した後、本実験と同様の温度条件で培養し、30/15℃・25/13℃・22/10℃・17/8℃の 4 温度区で 100%、10/6℃で 71%の種子が発芽するという結果になっている。

ところが河毛（2011）の実験では、1 ヶ月間の冷湿処理を施した種子の最終発芽率は 5 温度区全てで 0%～7%、2 ヶ月間の冷湿処理を施した種子は 17/8℃・10/6℃の低温度区では発芽せず、高温度区でも 30/15℃の 16%が最大発芽率だった。河毛の用いた種子は、採取時から 2 年間 4℃で冷蔵保存した種子であったため、この結果は種子の劣化によると考察された（河毛 2011）。また、本研究と同じ産地・産年の種子を用いて行われた佐藤（2017）の実験では、冷湿処理を施さずに培養した種子の最終発芽率は 30/15℃で 0.7%、25/13℃・22/10℃・17/8℃・10/6℃の 4 温度区で 0.0%という結果になっている。

本研究で用いたヒメモロコシの種子は採取後 1 年も経っておらず、また、河毛（2011）とほぼ同様に 30/15℃で 18.7%は発芽しているため、2010 年以降継続してここまで発芽率が低くなった根本的な原因が、種子の劣化であるとは考えにくい。

以上の結果を集約すると、本種の種子は長期間冷湿処理を施さなければ発芽しない、あるいは冷湿処理では解除できない、別の休眠機構を、2000 年代から 2010 年にかけて獲得したと推察される。本種の種子に 10 分間の硫酸処理を施すと発芽するという予備実験結果が得られている（石川 私信）ため、種皮が硬くなって吸水しなくなる（硬皮休眠）ような進化を遂げたと推察される。本種はもともと牧草として品種改良されたため、このような休眠性を失ったが、種子が野外に逸出して道路を転がって拡大していく途上で、種皮が薄くて路上で発芽したものは死滅したため、種皮が堅いものが生き残り進化したと推察される。今後、この仮説を検証するための追試験が必要である。

異なる光条件下で栽培した植物の生長解析

各個体の初期サンプリングおよび最終サンプリングにおける乾燥重量の一覧は表 10 に示す。また、栽培期間中の圃場の気温を図 52 に示す。植物の栽培時の気温は、おおむね 10℃～35℃の範囲内にあった。

在来種

・

本種の個体当たりの乾燥重量平均値は、初期サンプリング時には 0.065g であったが、最終サンプリング時には約 0.066g (3%区) ～約 0.150g (100%区) であった (表 10)。相対生長速度 (RGR、 $\text{g g}^{-1}\text{day}^{-1}$) は、3%区では約 0.001、9%区では約 0.005、13%区では 0.016、100%区では 0.065 となり、100%区以外の相対光量子密度の低い処理区で有意に低い値となった ($P < 0.0001$) (表 11、図 53)。本種は相対光量子密度 13%以上の明るさの環境で良く生長し、あまり日の当たらない暗い環境では生長が悪くなると考えられる。この特性は、本種が主に湖水の水辺砂質の湿地という、裸地的で明るい環境ではあるが、ヨシなどの草丈の高い水生植物によってある程度被陰されることも多い環境下で生育していることの理由の 1 つであると推察できる。

光合成活性を表す純同化率 (NAR、 $\text{g m}^{-2}\text{day}^{-1}$) は、3%区では約 0.024、9%区では約 0.150、13%区では約 0.540、100%区では約 2.747 と、100%区以外の相対光量子密度の低い処理区で有意に低い値となった ($P < 0.0001$) (表 11、図 53)。

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、3%区では約 0.027、9%区・13%区では 0.029、100%区では 0.024 と、100%区および 3%区で有意に低い値となった ($P < 0.0001$) (表 11、図 53)。

以上の結果から、本種の相対生長速度 (RGR) が光条件の暗い処理区ほど低い値となった主な要因は、光条件の暗い処理区における光合成活性 (NAR) の低下であると考えられる。また本種は 3%程度の極端に暗い環境下においては、LAR の低下、すなわち葉面積の生産も阻害されると考えられる。

各個体の葉の厚みを葉面積/重量ベースで表す比葉面積 (SLA、 m^2g^{-1}) は、100%区で 0.05 とやや低い値となり、3%区～13%区では約 0.06 程度となった (表 11、図 53)。

器官別重量比 (WR) のうち葉の比率である LWR は約 47%～約 54%、茎の重量比である SWR は約 15%～約 18%、根の重量比である RWR は約 29%～約 36%となった (図 53)。

山里 (2017) は 2016 年に本種について同様の栽培実験を行った。この結果と本研究の結果を比べると、本研究での 9%区および 13%区の相対生長速度 (RGR) および光合成活性 (NAR) の値は山里 (2017) の結果の値の 1/2 以下であった。また本研究での 3%区における葉面積比 (LAR)、比葉面積 (SLA) および葉の比率 (LWR) の値も著しく低くなっている。本研究を行った際に日照不足が続いたことで、被陰区での生長阻害が促進されたためであると考えられる。

本種の個体当たりの乾燥重量平均値は、初期サンプリング時には 0.089g であったが、最終サンプリング時には約 0.048g (9%区) ～約 0.201g (100%区) であった (表 10)。

相対成長速度 (RGR、 $\text{g g}^{-1}\text{day}^{-1}$) は、3%区では約 0.001、9%区では約-0.008、13%区では約 0.021、100%区で約 0.051 と、100%区以外の相対光量子密度の低い処理区で有意に低い値となった ($P < 0.0001$) (表 11、図 54)。ただし 9%区では栽培中に虫に葉の一部が食べられてしまったため、健全個体をもとに補正を行ったが、乾燥重量、相対生長速度 (RGR) とともにやや低い結果となった。本種は相対光量子密度 100%、すなわち裸地で良く生長し、林縁や草原の光環境である 13%程度でも生長が著しく低下し、林床の光環境である 9%以下の暗い場所では生長しないと考えられる。

光合成活性を表す純同化率 (NAR、 $\text{g m}^{-2}\text{day}^{-1}$) は、3%区では約-0.031、9%区では約-0.458、13%区では約 1.171、100%区では約 2.612 と、100%区以外の相対光量子密度の低い処理区で有意に低い値となった ($P < 0.0001$) (表 11、図 54)。

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、3%区では約 0.027、9%区では約 0.019、13%区では約 0.022、100%区では約 0.020 と、3%区で有意に高い値となった ($P < 0.0008$) (表 11、図 54)。ここでも 9%区で虫による食失によって光合成活性 (NAR)、葉面積比 (LAR) が低下していると考えられる。以上の結果から、本種の相対生長速度 (RGR) が光条件の暗い処理区ほど低くなった主な要因は、光合成活性 (NAR) の低下であると考えられる。

各個体の葉の厚みを葉面積/重量ベースで表す比葉面積 (SLA、 m^2g^{-1}) は、3%区では約 0.058、9%区では約 0.041、13%区では約 0.049、100%区では約 0.033 となった (表 11、図 54)。

器官別重量比のうち葉の重量比である LWR は、3%区で約 51.5%、9%区で約 32.7%、13%区で約 38.2%、100%区で約 45.7%となった。茎の重量比である SWR は、3%区で約 23.6%、9%区で約 31.4%、13%区で約 22.9%、100%区で約 20.4%となった。根の重量比である RWR は、3%区で約 25%、9%区で約 35.9%、13%区で約 39%、100%区で約 34%となった (図 54)。

これらの葉面積比 (LAR)、比葉面積 (SLA) の処理区による違いは、光が不足して光合成活性 (NAR) が低下した場合に、葉の厚さを薄くして、同じ資源量でもより広い面積の葉を生産することで、光合成生産量を確保しようという、多くの植物種に現れる特性と同様のものである。しかし、13%以下の被陰環境下では葉面積比 (LAR) の増加が光合成活性 (NAR) の低下を補えずに、結果として相対生長速度 (RGR) の低下を引き起こすと考えられる。

山里 (2017) は本種の販売苗由来種子を用い、同様の実験を行ったが、相対生長速度 (RGR) が、3%区では約 0.005、9%区では約 0.032、13%区では約 0.050、100%区では約 0.058 と今回の実験結果のほぼ 2 倍であり、本種は相対光量子密度 9%～100%という

比較的広範囲の明るさの所で良く生長するとされた。この2年間の差異は、栽培時の気象条件の違いがもたらした光合成活性 (NAR) の差によるものと考えられる。山里 (2017) の結果では本種の光合成活性 (NAR) は3%区では約 0.172、9%区では約 1.111、13%区では約 1.924、100%区では約 2.863 と、100%区以外では今回の実験結果のほぼ2倍となっている。2016年夏は晴天に恵まれていたが、2017年夏は雨が多く日照時間が極端に短かったため、本種のような光要求性の強い種は十分な光合成が行えず、結果として2016年栽培時よりも光合成活性 (NAR) が低くなったことで、13%以下の被陰下で生長が著しく低下したものと推察される。気候は年々変動し、特に今後は温暖化による気温上昇も顕著になってくる危険性もあるため、今後も野外での検証実験を繰り返すことで、結果の確度を高める必要がある。

群馬県における本種の唯一の自生地は、ヤナギの高木やオオブタクサなどの草丈の高い外来種によって被陰されている。本研究で明らかになったように、本種の生長のためには裸地的な光環境が最適であり、自生地の現況下では、本種の生長は著しく阻害されていると危惧される。今後は、自生地が乾燥化しない程度に高木の伐採および外来種の駆除を行い、光環境を改善する必要がある。

・トチカガミ (トチカガミ科多年生草本、*Hydrocharis dubia*)

本種の個体当たりの乾燥重量平均値は、初期サンプリング時には 0.169g であったが、最終サンプリング時には約 0.116g (13%区) ~ 約 0.267g (100%区) であった (表 10)。相対生長速度 (RGR、 $\text{gg}^{-1}\text{day}^{-1}$) は、3%区では約-0.035、9%区では約-0.014、13%区では約-0.025、100%区では約 0.033 と、100%区以外の相対光量子密度の低い処理区で有意に低いマイナスの値となった ($P < 0.0001$) (表 11、図 55)。この結果から、本種は光条件が13%以下の環境では生長しないと考えられる。

光合成活性を表す純同化率 (NAR、 $\text{gm}^{-2}\text{day}^{-1}$) は、3%区では約-1.893、9%区では約-1.049、13%区では約-1.700、100%区では約 2.634 と、100%区以外の相対光量子密度の低い処理区で有意に低いマイナスの値となった ($P < 0.0001$) (表 11、図 55)。

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、3%区では約 0.021、9%区では約 0.016、13%区では約 0.016、100%区では約 0.014 と、3%区以外の相対光量子密度の高い処理区で有意に低い値となった ($P < 0.0364$) (表 11、図 55)。

以上の結果から、本種の相対生長速度 (RGR) が13%以下の光条件の暗い処理区で低い値となった主な要因は、13%以下の光条件の暗い処理区における光合成活性 (NAR) が

マイナスになったことであると考えられる。光合成活性 (NAR) がマイナスということは、光合成生産ができないということであり、生長はできない。

各個体の葉の厚みを葉面積/重量ベースで表す比葉面積 (SLA、 m^2g^{-1}) は、3%区では約 0.052、9%区では約 0.037、13%区では約 0.036、100%区では約 0.028 となり、相対光量子密度が高い処理区ほど低い値となった (表 11、図 55)。この結果より、相対光量子密度が高いほど葉を厚くしているといえる。

器官別重量比 (WR) を見てみると、葉の比率 (LWR) が約 40~50%、茎の比率 (SWR) が約 34~45%、根の比率 (RWR) が約 16~17%と、陸上植物と同じくらい葉に投資している (図 55)。

これらの結果より、本種の安定的な生長・増殖には水深が深すぎず、かつ、13%以上という裸地的な明るい光環境が必要であると推察できる。本種が現在自生している沼のほとりは木や草によって被陰されており、また、オニビシやスイレンが繁茂し、トチカガミが生育するために必要な光・温度環境が十分確保されていないとみられる。本研究で明らかになったように、本種は 13%以下の光環境では生長することができず、裸地的な光環境は生長するために必要不可欠なものとなっている。本種の県内での数少ない自生地を失わないようにするためにも、自生地である沼のほとりの樹木の伐採・草刈りやスイレン・オニビシの駆除を行うなどして、光環境を改善することが重要であると考えられる。

・フジバカマ (アドバンテスト・ビオトープ産)

本種の個体当たりの乾燥重量平均値は、初期サンプリング時には 0.076g であったが、最終サンプリング時には 0.075g (3%区) ~0.238g (100%区) となった (表 10)。

本種実生の相対生長速度 (RGR、 $\text{g g}^{-1}\text{day}^{-1}$) は、相対光量子密度 3%区では約 0.007、9%区では約 0.070、13%区では約 0.086、100%区では約 0.065 (表 11、図 56) と、9%区以上の相対光量子密度の高い処理区で有意に高い値となった ($P < 0.0001$)。本種は相対光量子密度 9%~100%という比較的広範囲の明るさの場所で良く生長し、極端に暗い場所では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、 $\text{g g}^{-1}\text{day}^{-1}$) は、3%区では約 0.066、9%区では約 1.870、13%区では約 2.433、100%区では約 3.848 (表 11、図 56) と、9%区以上の相対光量子密度の高い処理区で有意に高い値となり、特に 100%区で高い値となった ($P < 0.0001$)。

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 3%区で約 0.042 と最大となり、100%区で約 0.021 と、13%区以下の相対光量子密度の低い処理区で有意に高い値となった ($P < 0.0005$)。また、各個体の葉の厚みを葉面積/重量ベースで表す比葉面積 (SLA、 m^2g^{-1}) も 3%区で約 0.092 と最大となり、100%区で約 0.038 と最小となった。葉面積比 (LAR)、比葉面積 (SLA) の値は、ともに相対光量子密度が低い処理区の方が大きくなる傾向が見られた (表 11、図 56)。

以上の結果から、本種の RGR が光条件の暗い処理区ほど低くなった主な要因は、光合成活性 (NAR) の低下であると考えられる。

器官別重量比のうち葉の重量比である LWR は 3%区で約 52.1%と最大となり、100%区で約 27.5%と最小となり、光条件が悪い条件区ほど LWR の増加がみられた。茎の重量比である SWR は 3%区で約 28.6%、9%区で約 30.2%、13%区で約 32.3%、100%区で約 30.5%となった。根の重量比である RWR は 3%区で約 19.3%と最小となり、100%区で約 41.9%と最大となり、光条件が良い条件区ほど RWR の増加が見られた (図 56)。

比葉面積 (SLA)、葉面積比 (LAR) のこれらの反応は、光が不足して光合成活性 (NAR) が低下した際に、より多くの光合成産物を葉に投資し、また、より薄い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、多くの植物にみられる特性である (浦野 2013)。しかし本種においては、3%区のような暗い環境下では光合成活性 (NAR) の低下を補うことができずに、相対生長速度 (RGR) の著しい低下を起こしてしまったと考えられる。

.

本種の個体当たりの乾燥重量平均値は、初期サンプリング時には 0.125g であったが、最終サンプリング時には 0.125g (3%区) ~0.507g (100%区) となった (表 10)。

相対生長速度 (RGR, $\text{g g}^{-1}\text{day}^{-1}$) は、相対光量子密度 3%区では約 0.003、9%区では約 0.065、13%区では約 0.069、100%区では約 0.111 と、相対光量子密度が高くなるほど有意に高い値となり ($P < 0.0001$)、3%区では生長が著しく悪くなった (表 11、図 57)。すなわち、本種は明るいところで良く生長し、暗い環境下では著しく生長が悪くなると考えられる。春原 (2014) の行った実験 (3%区では約 -0.007、100%区では約 0.043)、関 (2016) の行った実験 (3%区では約 0.015、100%区では約 0.061) においても、同様の結果が得られた。

光合成活性を表す純同化率 (NAR, $\text{g g}^{-1}\text{day}^{-1}$) は、3%区では約 0.068、9%区では約 2.947、13%区では約 3.606、100%区では約 7.992 と、相対光量子密度が高くなるほど有意に高い値となり ($P < 0.0001$)、3%区では著しく低い値となった (表 11、図 57)。

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、3%区では約 0.034、9%区では約 0.024、13%区では約 0.021、100%区では約 0.017 と、3%区で有意に高い値となった ($P < 0.0001$) (表 11、図 57)。

各個体の葉の厚みを葉面積/重量ベースで表す比葉面積 (SLA, m^2g^{-1}) も、3%区では約 0.076、9%区では約 0.054、13%区では約 0.049、100%区では約 0.023 と、光条件が悪いほど大きい値となった (表 11、図 57)。

以上の結果から、本種の相対生長速度 (RGR) が光条件の暗い処理区ほど低くなった主な要因は、光合成活性 (NAR) の低下であると考えられる。

器官別重量比のうち葉の重量比である LWR は 3%区で約 56.7%と最大となり、9%区で

約 40.3%、13%区で約 31.9%と最小、100%で約 41.8%となり、光条件が悪い条件区のほうが LWR の増加がみられた。茎の重量比である SWR は 3%区で約 24.5%、9%区で約 32.2%、13%区で約 40.7%、100%区で約 26.8%となった。根の重量比である RWR は 3%区で約 18.8%と最小となり、100%区で約 31.4%と最大となり、光条件が良い条件区の方が RWR の増加が見られた（図 57）。

比葉面積（SLA）、葉面積比（LAR）のこれらの反応は、光が不足して光合成活性（NAR）が低下した際に、より多くの光合成産物を葉に投資し、またより薄い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である（浦野 2013）。しかし本種においては、3%区のような暗い環境下では光合成活性（NAR）の低下を補うことができずに、相対生長速度（RGR）の著しい低下を起こしてしまったと考えられる。

以上の結果から、本種は周辺に背丈の高い植物が繁茂し、光環境が劣悪である場合、十分な生育は困難であることが考えられる。周辺に植物が生育していても、陽当たりがある程度あり、土壤中に十分な水分があれば一定の生育が可能であり、陽当たりが十分な裸地であれば十分な生育が可能であることが考えられる。

外来種

・オオブタクサ（前橋産）

本種の個体当たりの乾燥重量平均値は、初期サンプリング時には 0.091g であったが、最終サンプリング時には約 0.104g（3%区）～約 0.306g（100%区）であった（表 10）。

相対生長速度（RGR、 $\text{g g}^{-1}\text{day}^{-1}$ ）は、3%区では約 0.000、9%区では約 0.050、13%区では約 0.051、100%区では約 0.092 と、相対光量子密度が高くなるほど有意に高い値となった（ $P < 0.0001$ ）（表 11、図 58）。この結果より、本種は明るい環境下では良く生長するが、光のあまり当たらない暗い環境下では生長が著しく悪くなるということが考えられる。本種が主に河原や荒地などの明るい環境に多く分布している理由は、このような特性を持つためであると推察できる。

光合成活性を表す純同化率(NAR, $\text{g m}^{-2}\text{day}^{-1}$)は3%区では約-0.002とマイナスになり、9%区では約2.265、13%区では約2.657、100%区では約7.565となり、相対光量子密度が高くなるほど有意に高い値となり ($P < 0.0001$)、特に100%区では著しく高くなった(表11、図58)。

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3%区では約0.024、9%区では約0.022、13%区では約0.020、100%区では約0.013と、相対光量子密度が13%以下の処理区で有意に高い値となった ($P < 0.0001$) (表11、図58)。

以上の結果から、本種の相対生長速度(RGR)が光条件の明るい処理区ほど高い値となった主な要因は、光合成活性(NAR)が光条件の明るい処理区ほど高い値となったことであると考えられる。

各個体の葉の厚みを葉面積/重量ベースで表す比葉面積(SLA, m^2g^{-1})は、3%区では約0.074、9%区では約0.063、13%区では約0.056、100%区では約0.031となり、相対光量子密度が高くなるほど低い値となった(表11、図58)。この結果より、相対光量子密度が低いほど葉を薄くしているといえる。

器官別重量比(WR)のうち葉の比率であるLWRは約33%～約44%、茎の重量比であるSWRは約26%～約32%、根の重量比であるRWRは約26%～約35%となった(図58)。光条件の明るい処理区ほど葉の比率(LWR)が低下しており、その結果として葉面積比(LAR)の値が光条件の明るい処理区ほど低下したのだと考えられる。

・オオブタクサ(西榛名)

本種の個体当たりの乾燥重量平均値は、初期サンプリング時には0.168gであったが、最終サンプリング時には約0.156g(3%区)～約0.514g(100%区)であった(表10)。

相対生長速度(RGR, $\text{g g}^{-1}\text{day}^{-1}$)は、3%区では約-0.012、9%区では約0.037、13%区では約0.039、100%区では約0.074と、相対光量子密度が高くなるほど有意に高い値となった ($P < 0.0001$) (表11、図59)。この結果より、本種は前橋産オオブタクサと同様、明るい環境下では良く生長するが、光のあまり当たらない暗い環境下では生長が著しく悪くなるという特性を持っていると考えられる。

光合成活性を表す純同化率(NAR, $\text{g m}^{-2}\text{day}^{-1}$)は3%区では約-0.526とマイナスになり、9%区では約1.497、13%区では約1.631、100%区では約5.609と、相対光量子密度が高くなるほど有意に高い値となり ($P < 0.0001$)、特に100%区では著しく高くなった(表11、図59)。

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3%区では約0.025、9%区・13%区では約0.024、100%区では約0.016と、相対光量子密度が13%以下の処理区で有意に高い値となった ($P < 0.0001$) (表11、図59)。

以上の結果から、本種の相対生長速度(RGR)が光条件の明るい処理区ほど高い値となった主な要因は、光合成活性(NAR)が光条件の明るい処理区ほど高い値となったことで

あると考えられる。

各個体の葉の厚みを葉面積/重量ベースで表す比葉面積 ($SLA, m^2 g^{-1}$) は、3%区では約 0.075、9%区では約 0.071、13%区では約 0.070、100%区では約 0.036 となり、相対光量子密度が高くなるほど低い値となった (表 11、図 59)。この結果より、相対光量子密度が低いほど葉を薄くしているといえる。

器官別重量比 (WR) のうち葉の比率である LWR は約 25%～約 36%、茎の重量比である SWR は約 38%～約 46%、根の重量比である RWR は約 25%～約 29%となった (図 59)。葉の比率 (LWR) を見てみると、9%区及び 13%区は同様の値となっているが、全体的には、光条件の明るい処理区ほど葉の比率 (LWR) が低下しており、その結果として葉面積比 (LAR) の値が前述したように光条件の明るい処理区ほど低下したのだと考えられる。

・オオブタクサ (菅平産)

本種の個体当たりの乾燥重量平均値は、初期サンプリング時には 0.051g であったが、最終サンプリング時には約 0.049g (3%区) ～約 0.226g (100%区) であった (表 10)。

相対生長速度 (RGR、 $g g^{-1} day^{-1}$) は、3%区では約 -0.024、9%区では約 0.057、13%区では約 0.061、100%区では約 0.094 と、相対光量子密度が高くなるほど有意に高い値となった ($P < 0.0001$) (表 11、図 60)。この結果より、本種は前橋産オオブタクサや西榛名産オオブタクサと同様の生長特性を持っていると考えられる。

光合成活性を表す純同化率 (NAR、 $g m^{-2} day^{-1}$) は 3%区では約 -1.259 とマイナスになり、9%区では約 2.915、13%区では約 3.277、100%区では約 8.095 と、相対光量子密度が高くなるほど有意に高い値となり ($P < 0.0001$)、特に 100%区では著しく高くなった (表 11、図 60)。

各個体の乾燥重量と葉面積の比率を表す葉面積比 ($LAR, m^2 g^{-1}$) は 3%区では約 0.020、9%区では約 0.021、13%区では約 0.019、100%区では約 0.013 と、相対光量子密度が 13%以下の処理区で有意に高い値となった ($P < 0.0011$) (表 11、図 60)。

以上の結果から、本種の相対生長速度 (RGR) が光条件の明るい処理区ほど高い値となった主な要因は、光合成活性 (NAR) が光条件の明るい処理区ほど高い値となったことであると考えられる。

各個体の葉の厚みを葉面積/重量ベースで表す比葉面積 ($SLA, m^2 g^{-1}$) は、3%区では約 0.064、9%区では約 0.056、13%区では約 0.053、100%区では約 0.031 となり、相対光量子密度が高くなるほど低い値となった (表 11、図 60)。この結果より、相対光量子密度が低いほど葉を薄くしているといえる。

器官別重量比 (WR) のうち葉の比率である LWR は約 32%～約 46%、茎の重量比である SWR は約 23%～約 30%、根の重量比である RWR は約 28%～約 39%となった (図 60)。3%区を除いた他の処理区は光条件の明るい処理区ほど葉の比率 (LWR) が低下しており、その結果として葉面積比 (LAR) の値が前述のように光条件の明るい処理区ほど低下したの

だと考えられる。加えて、3%区は9%区よりも葉の比率（LWR）が低くなっているため、葉面積比（LAR）が9%区よりも低くなったと考えられる。また、器官別重量比（WR）の結果を先行研究（鍛冶川 2014；佐藤 2017）の結果と比較してみると、本研究の結果のみ3%区の葉の比率（LWR）が低くなっている。これは本研究を行った際に悪天候が続いたことによる生育不良が原因であると考えられる。

以上の結果から、本種は前橋（標高約 150m）、西榛名（約 700m）、菅平（約 1,000m）という異なる標高の産地いずれにおいても、光環境条件に対してはほぼ同様の生長反応をするといえる。また、温度環境に対しては、後述する本研究結果および佐藤（2017）、須永（2017）の結果によれば、異なる標高の産地いずれにおいても、気温上昇に対してほぼ同様の生長反応をし、+2℃程度の気温上昇で光合成活性（NAR）が低下するが、葉面積比（LAR）が増加してこれを補完し、相対生長速度（RGR）は低下しない。

本種の日本国内における分布拡大は、人間による土木工事でいたるところに裸地が形成されることが主要因であるとされている（石川 2009）。温暖化による気温上昇は、直接的には本種の生長を阻害はしないと考えられるため、温暖化に対応して洪水対策目的などで土木工事がさらに増加して裸地が増えれば、本種はさらに分布を拡大すると危惧される。

異なる温度条件下で栽培した植物の生長解析

異なる温度条件下での栽培実験における乾燥重量を表 10 に示す。また、栽培期間中のガラス温室内の気温を図 52 に示す。植物の栽培時の気温は、おおむね 15℃～40℃の範囲内にあり、平均で約 1.6℃、外気温よりも高かった。

生長解析結果は、表11及び、図61～68に示す。

相対生長速度（RGR）がコントロール区に比べて1.6℃上昇区で有意に高くなった種はフジバカマ（アドバンテスト産）であり（ $P < 0.01$ ）、においては
逆に有意に低下した（ $P < 0.01$ ）。オオブタクサ（菅平産・西榛名産・前橋産）、
、においては
、トチカガミでは相対生長速度（RGR）に処理区間で有意な差は認められなかった。

トチカガミは、埼玉県など近県では、小規模用水路など陽当たりが極めて良く水位が低いため、水温がかなり高くなると思われる場所に生育している。また、行人沼のように湧き水で水温が低くなりがちな水系では、良好に生育しているとは思えない状況であった。

以上の結果から、トチカガミは陽当たりが極めて良く水位が低いため、水温が高くなる水系で良く生育し、当面、地球温暖化の直接影響は受けないと推察される。

フジバカマ（アドバンテスト産）の光合成活性（NAR）が、コントロール区に比べて1.6℃上昇区で有意に高くなった（ $P < 0.01$ ）ことから、光合成活性（NAR）の増加が相対生長速度（RGR）増加の主要因であると考えられる。

においては、光合成活性（NAR）がコントロール区に比べて 1.6℃上昇区で有意に低くなった（ $P < 0.01$ ）ことから、光合成活性（NAR）の低下が相対生長速度（RGR）低下の主要因であると考えられる。

春原（2013）が+3℃の気温上昇下で行った同様の実験では、は
温度上昇によって光合成活性（NAR）が低下するが、葉面積比（LAR）が増加することにより補完され、相対生長速度（RGR）の低下はわずかであるという結果であった。また、須永（2017）が+2.4℃の気温上昇下で行った同様の実験では、は
温度上昇によって全く影響を受けないという結果であった。ガラス温室の気温は気候変化の影響を受けやすく、それぞれの実験において設定された気温上昇幅が異なるため、今後は気温を厳密に制御して再度実験を行う必要がある。

湿性環境に多く生育するオオブタクサ（西榛名産、前橋産）は 1.6℃気温上昇により光合成活性（NAR）は阻害されたが、葉面積比（LAR）など葉の増加により相対生長速度（RGR）の低下は引き起こされなかった。また、オオブタクサ（菅平産）については、1.6℃の気温上昇でも光合成活性（NAR）は阻害されなかった。湿性環境に生育する外来植物は 1.6℃の気温上昇では相対生長速度（RGR）の低下が起こらなかったものの、1.6℃の気温上昇で光合成活性（NAR）が低下するものと低下しないものとで分かれる結果となった。

温暖化による気温上昇の影響を受けにくいとされる外来植物も影響を受けやすいとされる在来植物も 1.6℃の気温上昇であれば、両者とも生長の促進あるいは阻害が起こるほどの影響は受けないものが多いといえる。

・カラスノエンドウ

本種の個体当たりの乾燥重量平均値は、初期サンプリング時には 0.008g であったが、最終サンプリング時には約 0.023g（10/6℃区）～約 0.045g（25/13℃区）であった（表 10）。

相対生長速度（RGR、 $\text{g g}^{-1}\text{day}^{-1}$ ）は、10/6℃区では約 0.067、17/8℃区では約 0.076、22/10℃区では約 0.108、25/13℃区では約 0.114、30/15℃区では約 0.108 と、22/10℃区以上の温度で有意に高い値となった（ $P < 0.0001$ ）（表 11、図 69）。すなわち本種は、低温でも十分生長するが、温度が高い方がより良く生長すると考えられる。

光合成活性を表す純同化率（NAR、 $\text{g m}^{-2}\text{day}^{-1}$ ）は、10/6℃区では約 9.275、17/8℃区では約 9.904、22/10℃区では約 15.171、25/13℃区では約 13.936、30/15℃区では約 15.244 と、22/10℃区以上の温度で有意に高い値となった（ $P < 0.0001$ ）（表 11、図 69）。また、この光合成活性の値は、本実験に用いた他の植物種と比較すると、極めて高いものとなっている。

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、温度区間で有意な差はなく、約 0.007～約 0.009 となった（表 11、図 69）。

各個体の葉の厚みを葉面積/重量ベースで表す比葉面積（SLA、 m^2g^{-1} ）は、10/6℃区で

は約 0.025、17/8℃区では約 0.027、22/10℃区では約 0.022、25/13℃区では約 0.029、30/15℃区では約 0.023 となった（表 11、図 69）。

器官別重量比（WR）のうち葉の比率である LWR は約 29%～約 38%、茎の重量比である SWR は約 26%～約 32%、根の重量比である RWR は約 35%～約 42%となった（図 69）。

佐藤（2017、+2.4℃）および足助（2016、+2.0℃）が圃場のガラス温室を用いて行った異なる温度条件下でのカラスノエンドウの栽培実験においても、コントロール区に比べて温度上昇区の方が、有意に生長速度が高くなった。以上の結果から、本種は温暖化によって平均気温が上昇した場合、生長が促進される可能性があるかと推察される。

結論

本研究により、群馬県内には、をはじめとする多くの絶滅危惧種・希少種が生育できる良好な里地・里山環境が現存していることがわかった。また、板倉ウェットランド地域や太田地区など県内の様々な里地地域において、水田、ため池、用水路、湿地など多様な立地条件が形成されており、それぞれの立地ごとに異なる種からなる構成で、多くの在来植物種が生育していることが明らかになった。今後は、当該地に関わる地域の住民や学識者、そして行政に携わる者も含め、全てが一体となって里地・里山地域の保全活動に参加し協力することが自然再生や環境の維持に向けた最も重要な要因であると考えられる。

本研究の現地調査によって板倉ウェットランド地域では、やなど 12 種の絶滅危惧種を含む在来種 22 種の生育が確認され、植物種多様性の高い地域であることが判明した。一方で、環境省が設定した要注意外来生物種であるオオブタクサやセイタカアワダチソウ、コセンダングサなどの外来種の繁茂も確認されており、これら外来種が生育範囲を拡大し、板倉ウェットランド地域に生育する在来植物の生育地を脅かす可能性が考えられる。特にの自生地である谷田川及び矢場川はオオブタクサなどの外来種が大群落を形成しており、などの絶滅危惧種の生育環境が損なわれつつある。そのため、継続的なモニタリング調査を行うとともに、これらの外来植物の刈り取りなどの駆除や移入防止対策を早急に行う必要がある。また、来年度よりは群馬県指定絶滅危惧ⅠA類に分類される予定であるため、現在の自生地を保全することは極めて重要なことである。

よ

って、今後この地域を保全していくことは、絶滅危惧種を保全すること及び現代社会において失われつつある生物多様性を保全することに繋がると考えられる。

渡良瀬遊水池におけるの分布調査では、昨年同様多くの個体が確認され、この地域における生育環境に問題が無く、良好な状態で維持し続けていることが確認できた。今年、群馬県側にある 1 番大きな群落を今後の調査対象区とし、コドラートを作成した。また、種子採集も行ったため、採取した種子を用いての発芽特性や生長特性の解明を今後行っていく。さらに、2017 年 10 月 8 日に石川が行った調査において、渡良瀬遊水池でもが自生していることがわかった。

館林地区では、やなど 6 種の絶滅危惧種を含む在来種 8 種の生育が確認され、水生絶滅危惧植物種の宝庫となっていることが判明した。一方、板倉ウェットランド地域同様、要注意外来生物であるオオブタクサが繁茂している様子も

確認できた。今後、水生絶滅危惧植物種の宝庫となっているこの地域の環境を損なわないようにするためにも、継続的なモニタリング調査及び絶滅危惧種の生長を阻害することのない、適度な植生管理をする必要がある。

伊勢崎地区では、絶滅危惧種である *オオバタクサ* の繁茂・開花がこの地域では初めて確認された。

今後、継続的なモニタリング調査を行うことが必要であると考えられる。

太田地区では、3種の絶滅危惧種を含む在来種5種の生育が確認され、水田や用水路、減農薬水田耕作が行われているなど、この地域は農業の近代化により失われつつある水田や湿地の面影を残した貴重な場所であることがわかった。今後、継続的にモニタリング調査を行い、この貴重な生育環境及び絶滅危惧種の喪失を防ぐ必要がある。

アドバンテスト・ビオトープでは、絶滅危惧種であるフジバカマの生育・開花が確認された。初めて自生が確認された2006年以降、継続して生育・開花が確認されているため、生育環境が良好な状態で維持されていると考えられる。

才川では、渡良瀬川合流点付近において希少種である *ヒメモロコシ* の生育・開花が確認された。*ヒメモロコシ* は、群馬県では絶滅危惧種に指定されていないが、隣県の栃木県では絶滅危惧種Ⅰ類に指定されているため、今後も継続してモニタリング調査を行い、保全していく必要がある。

発芽実験の結果、里地・里山地域に生育する在来植物種の多様な発芽特性が確認できた。*オオバタクサ* ・ *ヒメモロコシ* は冷湿処理による発芽促進効果が確認されたため、種子が冬を経験することで、発芽が促進されることが考えられる。また、これらの種は冬を経験することが必要であるため、温暖化によって平均気温が上がり、冬が短くなった場合、発芽が阻害されると推察できる。しかし、*オオバタクサ* のような一年生草本は一世代の時間が短いため、適応進化のスピードが相対的に速いと考えられ、*オオバタクサ* が温暖化に呼応して、迅速に発芽特性を進化させる可能性は大いにあり得る。

ヒメモロコシ は冷湿処理による発芽促進効果が確認されなかったが、先行研究（狩谷 2004；佐藤 2005；河毛 2011；佐藤 2017）の結果より、本種は冬を経験することで発芽が促進される特性を有すると考えられる。よって、本種の発芽特性が変化している可能性があるということが推察できる。また、本種に硫酸処理を施すと発芽するという実験結果が得られているため、本種は種皮が厚くなるように進化したと考えられる。本種における発芽特性の解明や種子の寿命について、今後追試験が必要である。

カラスノエンドウ は5温度区全てで非常に高い発芽率となったため、本種は野外において、他の植物種が少ない気温の低い季節でも発芽できるという生存に有利な性質を持っていると考えられる。この結果は先行研究（足助 2016；佐藤 2017）と同様の結果

となっているため、本研究の結果は再現性のあるものであるといえる。また、本種は種皮が厚く、そのままでは吸水しなかったことから、種子生産年のうちに発芽するとは考えにくく、土壌シードバンクを形成する可能性が高いと考えられる。さらに、高温区で種子が腐敗してしまい、発芽率が低下するという結果より、本種は温暖化によって気温が上昇すると、発芽が阻害されるということが示された。

は5温度区全てで一定の発芽率が得られたため、温度条件に関係なく発芽することが可能であると考えられる。また、高い温度区の方が発芽に要する日数が短くなる傾向があることが示された。よって、本種は温暖化に伴い平均気温が上昇した場合、発芽が促進されることが考えられる。

カワラノギクは、先行研究（井上 1994）より 25/13℃が最適温度区であるとわかっているため、25/13℃でのみ培養を行ったが、最終発芽率は 0%であった。この結果は、実験を行う際に未熟な種子を選別してしまったか、約 4 年間の冷凍保存期間のうちに種子が著しく劣化したことが原因であると考えられる。また、倉本（2016）の研究より、結実率の悪い花の種子は発芽率が低いことが明らかにされているため、本研究に用いた種子も結実率の悪い花から採取してしまったことが原因で発芽率が悪くなった可能性も考えられる。

サクラオグルマもカワラノギク同様、最終発芽率 0%と全く発芽しなかった。サクラオグルマはオグルマとホソバオグルマの自然交雑種と考えられており、発芽をしないとされている（大森 私信）。よって、本研究の発芽率 0%という結果は、この説を裏付ける、再現性のあるものであると考えられる。

植物に対する光条件を変化させた栽培実験における生長解析では、実験結果より、オブタクサ・
・
は、日の当たる明るい地域を生育環境として好み、多少の被陰のある地域でも生長できるが、著しく被陰される地域では生長できないことが明らかになった。また、
・トチカガミは、日の当たる裸地を生育環境として好み、被陰のある地域では生長が非常に悪化することが明らかになった。特にトチカガミは 13%以下の明るさの地域では生長できず、13%以上の明るい環境という裸地的で水深の浅い地域でしか生長することができないことがわかった。

植物に対する温度条件を変化させた栽培実験における生長解析では、実験結果より、カラスノエンドウはどの温度区でも生長することが可能だが、高い温度区の方がより良く生長するということが明らかになった。そのため、本種は温暖化によって平均気温が上昇した場合、生長が促進される可能性があると考えられる。

このように、様々な在来植物種が多様な環境で生育しているが、いずれにおいても、里地・里山に人の手が入り、草刈りなどの植生管理が行われることで植物種の生育に良好な環境が整えられ、逆に里山の管理が放棄された場合、日当たりの良いところを好む植物種の生育が悪化し、最悪の場合は生存できなくなると推察される。また、里地・里

山地域に生育する多くの絶滅危惧種が、温暖化の影響によって生育が阻害され、生存が困難になるということが考えられる。

里地・里山地域は、これまで伝統的な農業が行われ、古くから自然と人との共生する環境が維持されてきた地域であり、適度に人の手が入ることによって、森林生態系や草地生態系などさまざまなタイプの陸上生態系と稲作水系のような水界生態系が存在する生物多様性に富んだ地域となっていた。しかし、1960年代の高度経済成長期以降の開発、産業構造の変化による農業の衰退や少子高齢化により、人の手が入らなくなった里地・里山地域の自然環境は衰退の一途をたどり、山林や草原、田畑、湿地などあらゆる地域が荒れ果て、植物種多様性が低下し、絶滅危惧種・希少種の衰退が起こるなど、かつての生物多様性に富んだ状態は失われつつある。

このような生物多様性の喪失をくい止め、自然と人との共生し、将来にわたって恵みを得ることのできる持続可能な社会をつくっていくことが現代社会の大きな課題となっている。そのため、環境問題における地域住民の地域に対する意識改革、行政機関による法律や条例、指針の整備及び保全のための支援、学術的知見を持つ専門家らによる継続的な調査やモニタリング、そして適切な管理方法の指導などを一体化させ、相互に連携した状態で保全活動をする必要がある。人と里地・里山地域のような自然環境はいつの時代においても密接した関係にある存在であり、この社会は、多様な里地・里山地域の自然とその多様な自然を恵みに変える人々の知恵とのつながりから成り立ってきたものである。里地・里山地域における希少種や絶滅危惧種の増加及び生物多様性の低下は、その人と自然とのつながりが損なわれたことにより引き起こされたものである。今後、人と自然とのつながりを見直し、里地・里山地域の生態系を守ることは、結果的に持続可能な社会を成立させることにつながる。そのため、里地・里山地域の貴重な生態系を維持し、生物多様性及び持続可能な社会を守るためにも、地域住民や専門家、行政組織が連携して保全活動を続けていく必要がある。

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下、環境科学研究室内において行われた研究であります。

本研究を進めるにあ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。

板倉ウェットランド地域における調査におきましては、群馬県館林土木事務所工務第二係長・遠坂大氏及び毛利修二氏、いであ株式会社自然環境保全部・鈴木敏弘氏、国土交通省関東地方整備局渡良瀬河川事務所調査課長・大須栄一氏及び係長・萩原一徳氏、青木雅夫氏らにご協力・ご指導頂きました。

アドバンテスト・ビオトープのフジバカマ調査におきましては、株式会社アドバンテスト・グリーン・代表取締役社長・中込哲也氏、砂川祐司氏、早野圭一氏にご指導頂きました。

また、同時期に卒業論文に取り組んだ岡村亮吾氏、櫻井翠氏、鈴木統子氏、諏訪間侑樹氏、及び共同で調査や実験を行った管雪氏、馬圓氏などの研究室の学生の皆様のご協力なしには完成し得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

- 青木良輔（2011）「大型ビオトープの“育成”に関する環境科学的研究」
群馬大学社会情報学部卒業論文
- 足助直紀（2016）「地球温暖化が植物の発芽・生長に及ぼす直接影響に関する実験生態学的研究」群馬大学社会情報学部卒業論文
- 池田透（2007）「外来生物が日本を襲う！」青春出版社 178-180, 183-184
- 石井実・（財）日本自然保護協会（2006）「生態学からみた里やまの自然と保護」
講談社 1-3, 8-9, 25-26
- 石井実・植田邦彦・重松敏則（2000）「里山の自然をまもる」築地書館 19-22
- 石川真一・清水義彦・大森威宏・増田和明・柴宮朋和（2009）「外来植物の脅威」
上毛新聞社 1-2, 34-38
- 石田新太（2015）「大形ビオトープによる植物相の保全に関する環境科学的研究」
群馬大学社会情報学部卒業論文
- 板倉町教育委員会（2006）「渡良瀬遊水地と谷田川下流域の自然環境 2005」 33
- いであ株式会社（2014）「H25 渡良瀬川河道樹林対策等調査業務 矢場川植物調査結果報告」国土交通省渡良瀬河川事務所 2
- 井上健（1994）「多摩川河川敷の固有植物群落構成種の生活史と存続に関する研究」
とうきゅう環境財団研究助成報告書
- 内嶋善兵衛（2005）「〈新〉地球温暖化とその影響」裳華房 44-45, 196, 203
- 浦野茜詩（2013）「大型ビオトープとその目標となる植物相に関する生態学的研究-東毛の2つのビオトープを中心とした解析-」群馬大学社会情報学部卒業論文
- 鍛冶川和也（2014）「群馬県内の水辺の在来植物相と外来植物の侵入・定着状況に関する生態学的研究」群馬大学社会情報学部卒業論文
- 狩谷文恵（2004）「大型ビオトープにおける植物相の育成管理に関する基礎的研究」
群馬大学社会情報学部卒業論文
- 川道美枝子・岩槻邦男・堂本暁子（2001）「移入・外来・侵入種」築地書館 3-4, 16
- 倉本宣（2016）「河川環境の特性を活かしたカワラノギクと礫河原生態系の再生手法の開発」とうきゅう環境財団研究助成報告書
- 群馬県自然環境課（2009）「良好な自然環境を有する地域学術調査報告書（XXXV）」
群馬県自然環境課 1, 9, 47-50
- 河毛直也（2011）「発芽・初期生長過程における外来植物の定着能力の実験的評価」
群馬大学社会情報学部卒業論文

- 国際連合大学高等研究所/日本の里山・里海評価委員会（2012）「里山・里海-自然の恵みと人々の暮らし」朝倉書店 13-14
- 佐藤裕美（2005）「大型ビオトープにおける多様な植物相の創出に関する基礎研究」
群馬大学社会情報学部卒業論文
- 佐藤颯哉（2017）「群馬県内の里地・里山地域における外来植物の侵入状況と植生影響に関する環境科学的研究」群馬大学社会情報学部卒業論文
- 清水矩宏・森田弘彦・廣田伸七（2001）「日本帰化植物写真図鑑」全国農村教育協会
- 下田路子（2005）「水田の生物をよみがえらせる」岩波書店 169
- 鈴木由希（2010）「大型ビオトープの有する生態系機能に関する基礎研究」
群馬大学社会情報学部卒業論文
- 須永勇樹（2017）「群馬県内のビオトープに生育する植物に対する地球温暖化の諸影響に関する生態学的研究」群馬大学社会情報学部卒業論文
- 関拓也（2016）「地球環境変化下における持続的な自然再生方法に関する保全生態学的研究」群馬大学社会情報学部卒業論文
- 高岩顕記（2008）「大型ビオトープのめざすべき植物多様性に関する基礎研究」
群馬大学社会情報学部卒業論文
- 高橋美絵（2009）「里山の植物多様性の形成メカニズムに関する環境科学的基礎研究」
群馬大学社会情報学部卒業論文
- 武内和彦・鷲谷いづみ・恒川篤史（2001）「里山の環境学」東京大学出版会 3-4
- 館林市教育委員会(1995)「館林市の植物」 1, 8, 28
- 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
- 遠山里希（2012）「地球温暖化が数種の外来草本植物とブナ科大本植物に及ぼす直接影響に関する実験研究」群馬大学社会情報学部卒業論文
- 都丸希美（2013）「大型ビオトープとその目標となる植物相に関する生態学的研究-チノー・ビオトープを中心とした解析-」群馬大学社会情報学部卒業論文
-
- 中村浩二・嘉田良平（2010）「里山復権～能登からの発信～」創森社 26, 87-88
- 日本生態学会（2012）「生態学入門（第2版）」東京化学同人 240
- 日本農学会（2008）「外来生物のリスク管理と有効利用」養賢堂 2, 4, 17-18
- 林弥栄(2009)「増補改訂新版 山溪カラー名鑑 日本の野草」山と溪谷社
- 春原悠樹（2014）「大型ビオトープとその周辺にある里地の植物相の保全生態学的研究」
群馬大学社会情報学部卒業論文
-
- 福山研二・安田喜憲（2009）「森林環境 2009 生物多様性の日本」朝日新聞出版 93

- 牧野富太郎(2000)「新訂 牧野新日本植物図鑑」北隆館
- 松田紗依(2012)「大型ビオトープにおける植物種多様性と絶滅危惧植物種の“育成”方法に関する環境科学的研究」群馬大学社会情報学部卒業論文
- 丸山徳次・宮浦富保(2009)「里山学のまなざしー〈森のある大学〉から」昭和堂 21-26
- 村上興正・鷺谷いづみ(2002)「外来種ハンドブック」地人書館 4-9, 282-283
- 矢原徹一(2003)「ヤマケイ情報箱 レッドデータプランツ」山と溪谷社 2, 100
- 山里純(2017)「群馬県内の里地・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
- 鷺谷いづみ・鬼頭秀一(2007)「自然再生のための生物多様性モニタリング」東京大学出版会 4-6
- 鷺谷いづみ・草刈秀紀(2003)「自然再生事業-生物多様性の回復をめざして」築地書館 8, 15-16
- 鷺谷いづみ・武内和彦・西田睦(2005)「生態系へのまなざし」東京大学出版会 45-46
- 鷺谷いづみ(1996)「オオブタクサ、闘う」平凡社 17
- 鷺谷いづみ(1999)「生物保全の生態学」共立出版 2, 11-12, 18, 45-49, 57, 60-61
- 鷺谷いづみ(2001)「生態系を蘇らせる」日本放送出版協会 212-213, 215
- 鷺谷いづみ(2007)「地域と環境が蘇る 水田再生」家の光協会 11-13

引用 web サイト

外務省 HP「生物多様性条約」

<http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/kankyo/jyoyaku/bio.html#01>

環境省 HP「平成 20 年版 環境/循環型社会白書」

<https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/h20/html/hj08020601.html>

環境省 HP「生物多様性国家戦略 2012-2020」

<http://www.env.go.jp/press/files/jp/20763.pdf>

環境省 HP「侵略的な外来種」

<https://www.env.go.jp/nature/intro/2outline/invasive.html>

環境省 HP「環境省レッドリスト 2017」

<http://www.env.go.jp/press/files/jp/105449.pdf>

気象庁 HP「地球温暖化問題とは」

http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/chishiki_ondanka/p01.html

気象庁 HP「地球温暖化の原因」

http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/chishiki_ondanka/p02.html

気象庁 (2015) 「IPCC 第 5 次評価報告書 第 1 作業部会報告書 概要」

http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/ipcc_ar5_wg1_es_jpn.pdf

気象庁 HP 「日本の気候の変化」

http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/chishiki_ondanka/p08.html

群馬県 HP 「群馬県の絶滅のおそれのある野生生物 植物編 (2012 年改訂版)」

<http://www.pref.gunma.jp/contents/000187557.pdf>

国立環境研究所 HP 「侵入生物データベース」

<https://www.nies.go.jp/biodiversity/invasive/>

国立国会図書館 HP 「外来種問題をめぐる動き」

<http://www.ndl.go.jp/jp/diet/publication/issue/0442.pdf>

WWF ジャパン HP 「レッドリストについて」

<https://www.wwf.or.jp/activities/wildlife/cat1014/cat1085/>

滅びゆく八重笠沼の植物 HP 「滅びゆく八重笠沼の植物」

<http://www.geocities.jp/fusechan1963/>

写真・表・図

写真 1

写真 2

写真 3

写真 4

写真 5



写真 6 太田地区

田園風景（撮影日：2017 年 9 月 1 日）



写真7 アドバンテスト・ビオトープに生育するフジバカマ(撮影日:2017年9月25日)

写真 8

表 1 野外調査の日程・調査場所・調査内容一覧

調査日(2017年)	調査場所	調査概要
4月6日	谷田川	分布・サイズ調査
4月27日	伊勢崎	分布調査
5月27日	渡良瀬遊水池	分布調査
	朝日野池	植物相調査
6月1日	谷田川	植物相調査
6月15日	上矢場川	植物相調査
	中野沼	
	朝日野池	
9月1日	多々良沼	植物相調査
	中野沼	
	八重笠沼	
	太田IC横休耕田	
	才川	
9月21日	中野沼	植物相調査
	矢場川	開花個体分布調査
9月25日	アドバンテスト・ビオトープ	開花個体分布調査
	谷田川	開花個体分布調査
10月30日	アドバンテスト・ビオトープ	種子採集
	矢場川	種子採集
	谷田川	種子採集
	行人沼	植物相調査

表 2 材料植物一覽

表 3 材料植物種子の冷蔵・冷凍保存期間一覧

表 4 発芽実験日程一覧

表 5 栽培実験日程一覧

表 7 調査地で確認した希少種及び絶滅危惧種

表 8

表 9 発芽実験を行った植物種の最終発芽率一覧

表 9（続き） 発芽実験を行った植物種の最終発芽率一覧

植物名	処理条件	温度区	最終発芽率(%)	標準偏差
オオブタクサ(前橋)	冷湿処理23日	30/15℃	39.2	11.5
	冷湿処理23日	25/13℃	37.1	6.1
	冷湿処理23日	22/10℃	59.1	7.9
	冷湿処理23日	17/8℃	63.2	9.7
	冷湿処理23日	10/6℃	66.2	2.1
	なし	25/13℃	39.3	1.2
オオブタクサ(西榛名)	冷湿処理23日	30/15℃	36.7	9.9
	冷湿処理23日	25/13℃	59.3	9.0
	冷湿処理23日	22/10℃	72.0	12.5
	冷湿処理23日	17/8℃	66.0	7.2
	冷湿処理23日	10/6℃	62.7	5.0
	なし	25/13℃	24.0	2.0
オオブタクサ(菅平)	冷湿処理23日	30/15℃	27.6	2.4
	冷湿処理23日	25/13℃	27.3	6.3
	冷湿処理23日	22/10℃	43.8	10.0
	冷湿処理23日	17/8℃	39.5	4.0
	冷湿処理23日	10/6℃	39.6	9.0
	なし	25/13℃	23.3	9.0
ヒメモロコシ	冷湿処理2ヶ月	30/15℃	18.7	3.1
	冷湿処理2ヶ月	25/13℃	0.0	0.0
	冷湿処理2ヶ月	22/10℃	0.0	0.0
	冷湿処理2ヶ月	17/8℃	0.0	0.0
	冷湿処理2ヶ月	10/6℃	0.0	0.0
	なし	25/13℃	4.0	4.0

表 10 栽培実験における各植物種の乾燥重量平均値・標準偏差一覧

表 11 栽培実験における各植物種の生長解析の結果一覧



図 1 各調査地一覧

☒ 2

☒ 3

图 4

☒ 5

☒ 6

☒ 7

☒ 8

☒ 9

☒ 10

☒ 11

☒ 12

☒ 13

☒ 14

☒ 15

☒ 16

☒ 17

☒ 18

☒ 19

☒ 20

☒ 21

☒ 22

☒ 23

☒ 24

☒ 25

☒ 26

☒ 27

☒ 28

☒ 29

☒ 30

☒ 31

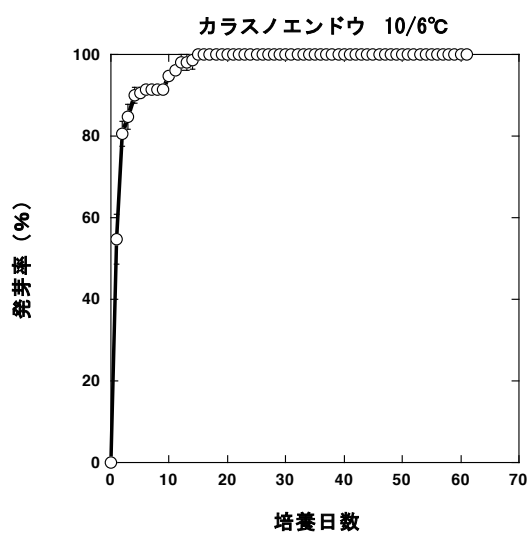
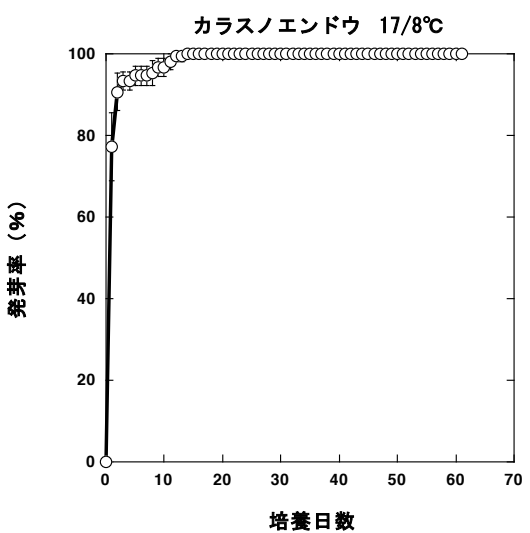
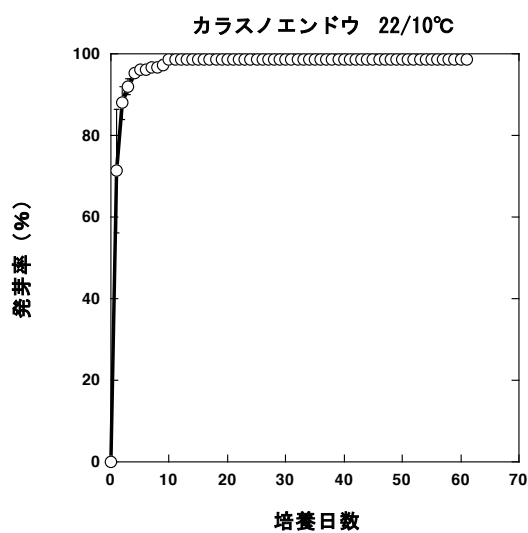
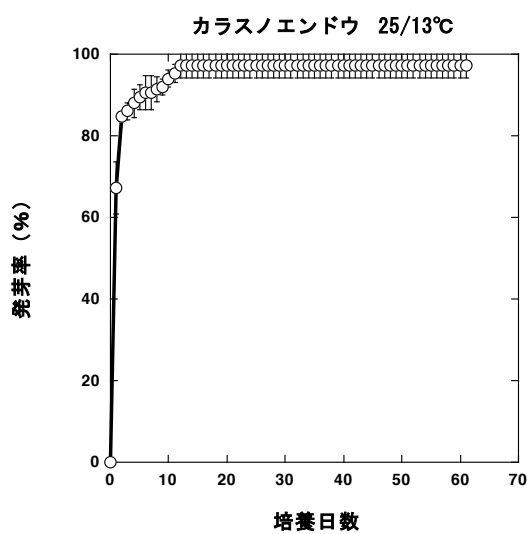
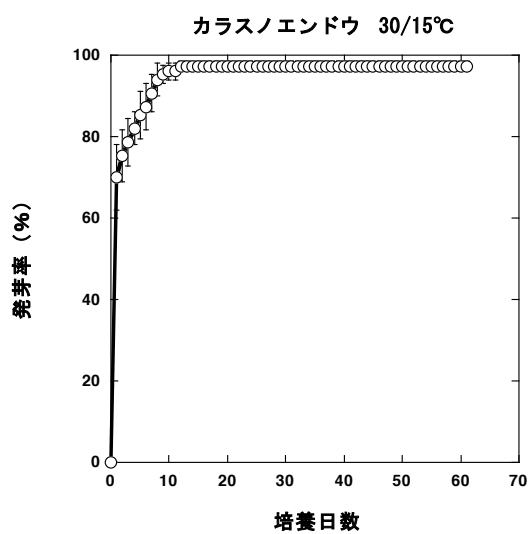


図 32 カラスノエンドウの種子の発芽率の経時変化

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。

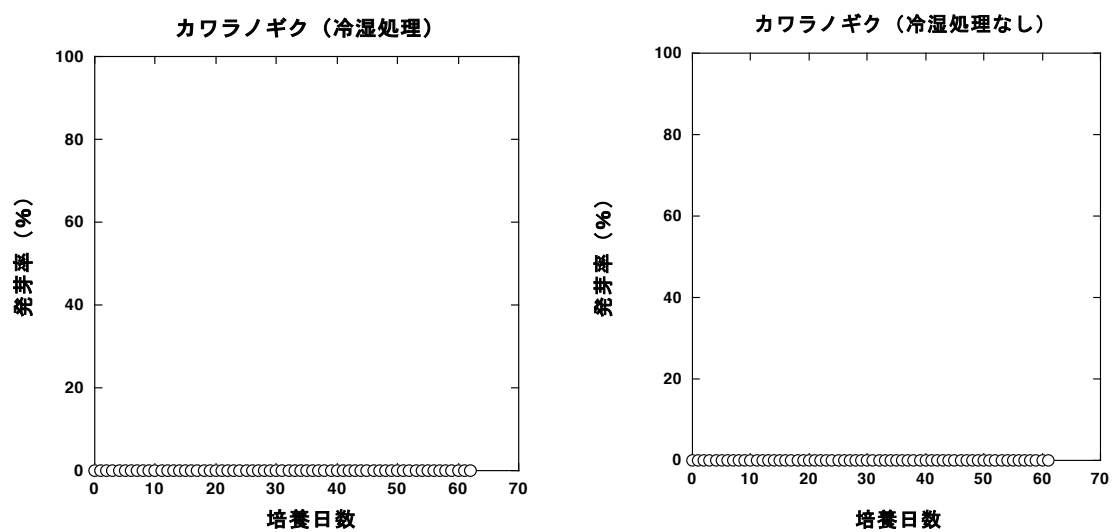


図 33 冷湿処理を施したカワラノギクの種子（左）と冷湿処理を施さなかったカワラノギクの種子（右）の発芽率の経時変化

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。

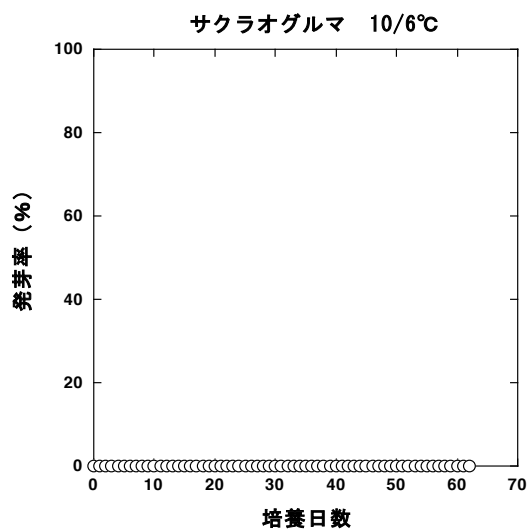
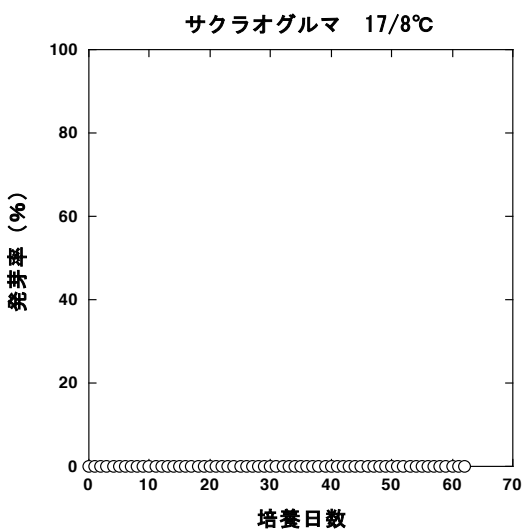
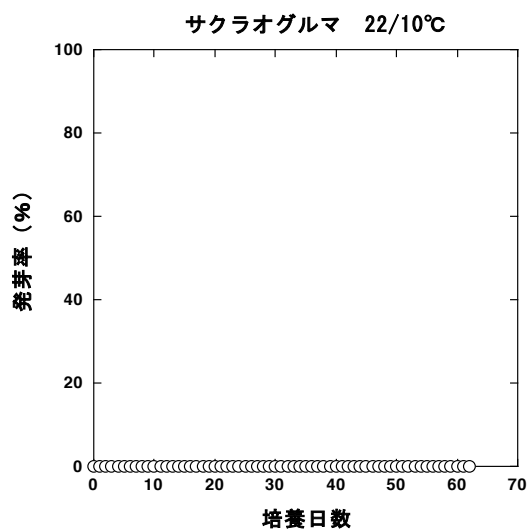
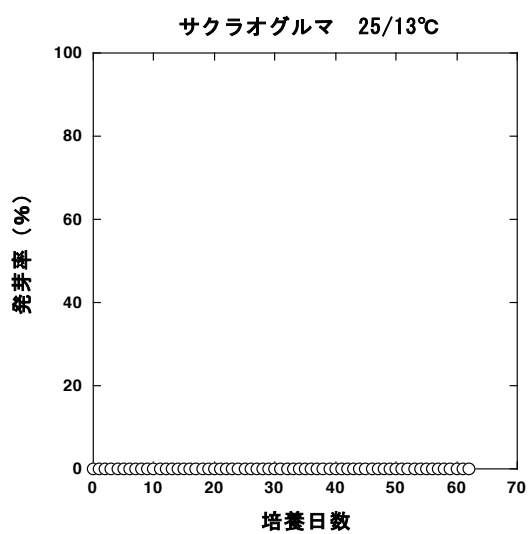
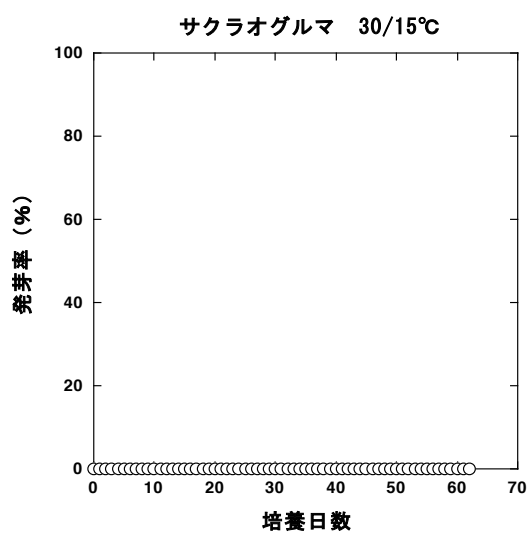


図 34 冷湿処理を施したサクラオグルマの種子の発芽率の経時変化

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。

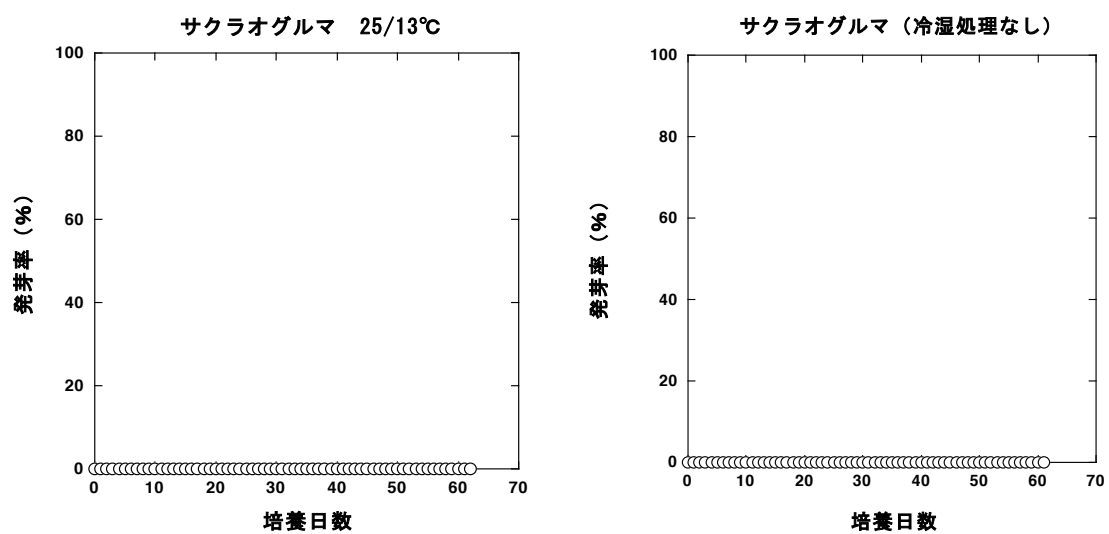


図 35 冷湿処理を施したサクラオグルマの種子（左）と冷湿処理を施さなかったサクラオグルマの種子（右）の発芽率の経時変化

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 36 冷湿処理を施した の
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 37 冷湿処理を施した の種子（左）と冷湿処理を施さなかった
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 38 冷湿処理を施した の種
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 39 冷湿処理を施した の種子（左）と冷湿処理を施さなかった
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。

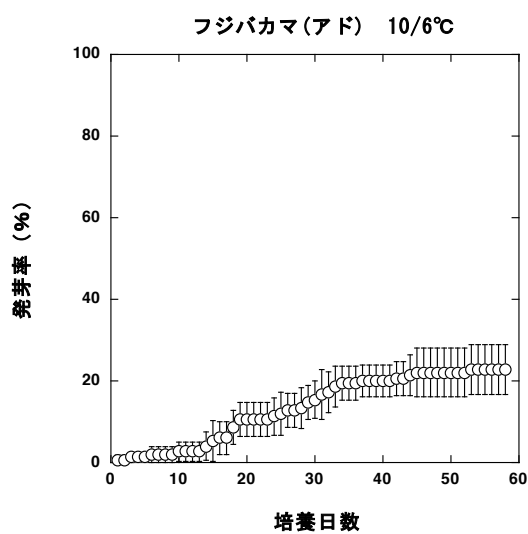
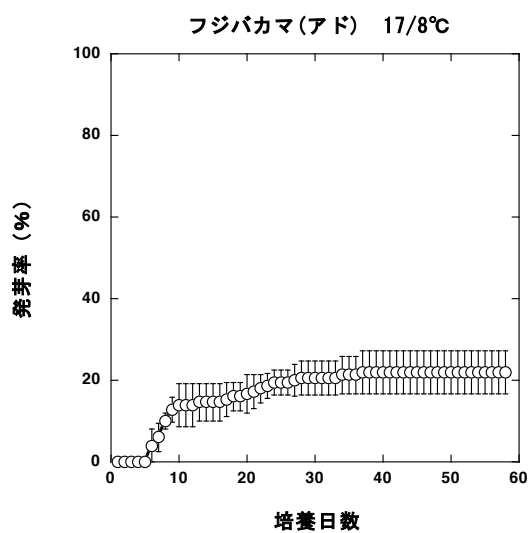
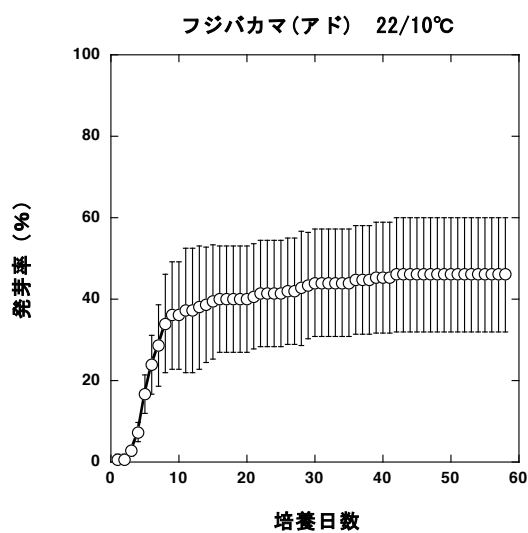
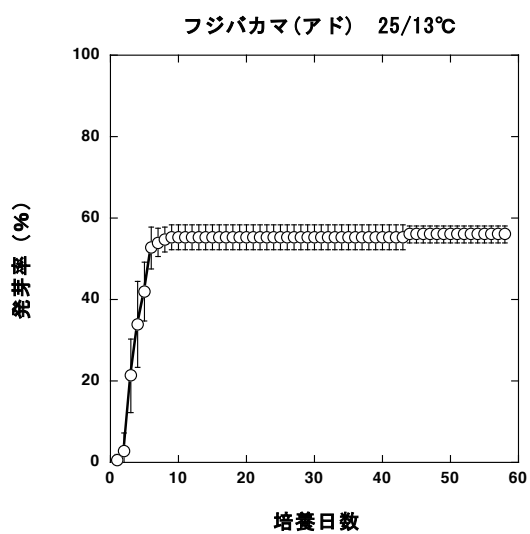
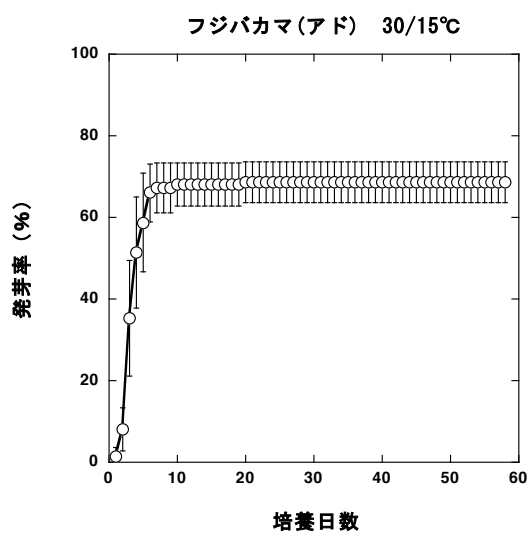


図 40 アドバンテスト産フジバカマの種子の発芽率の経時変化

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 41 の種子の発芽率
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 42 の種子の発芽率
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 43 の種子の発芽率
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。

$$n=3_0$$

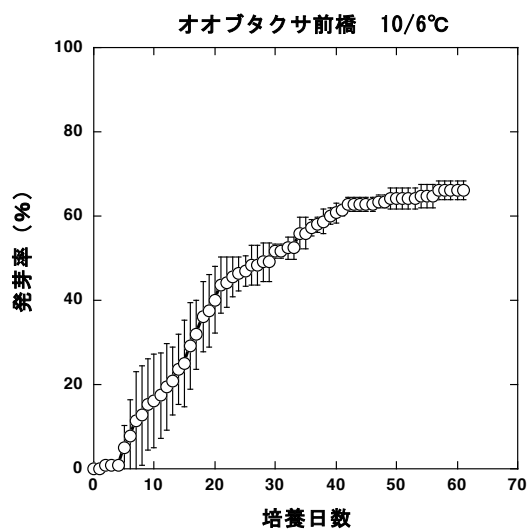
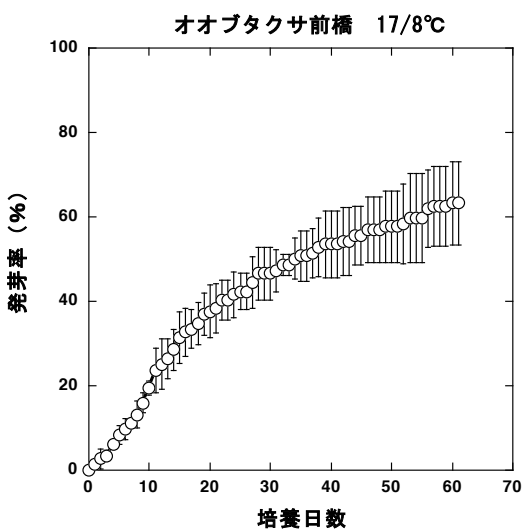
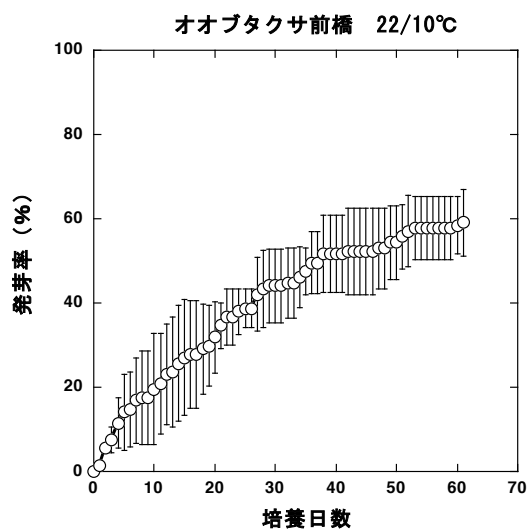
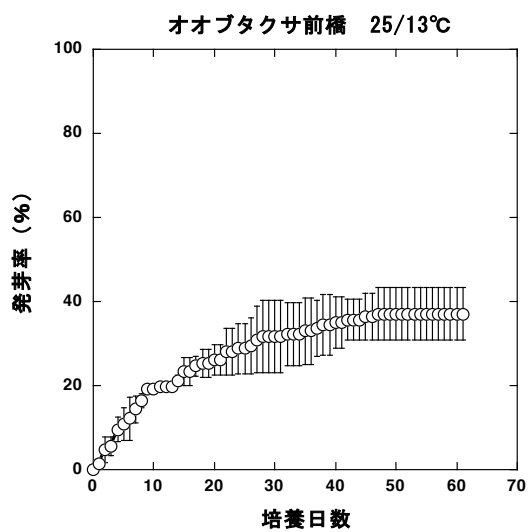
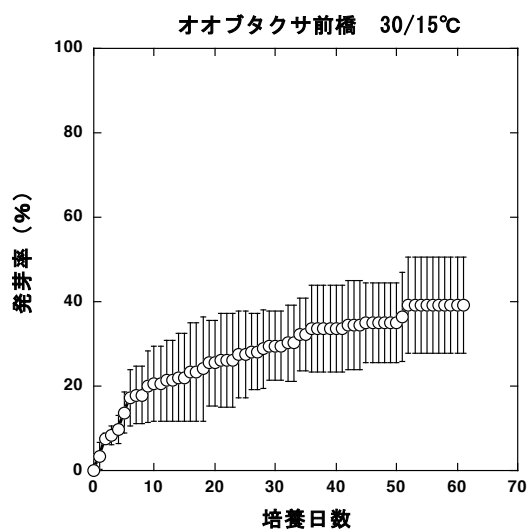


図 44 冷湿処理を施した前橋産オオブタクサの種子の発芽率の経時変化

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。

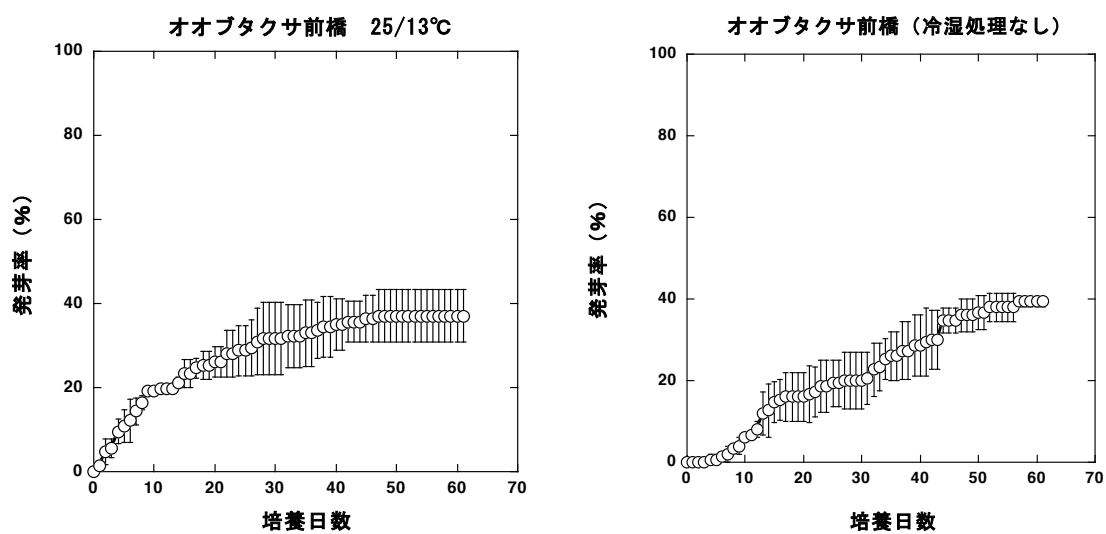


図 45 冷湿処理を施した前橋産オオブタクサの種子（左）と冷湿処理を施さなかった前橋産オオブタクサの種子（右）の発芽率の経時変化

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。

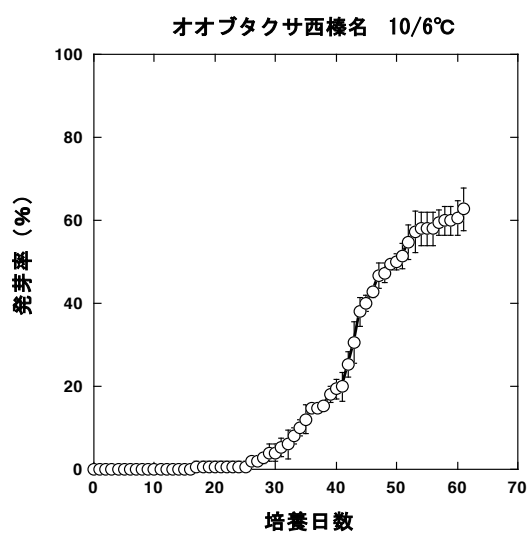
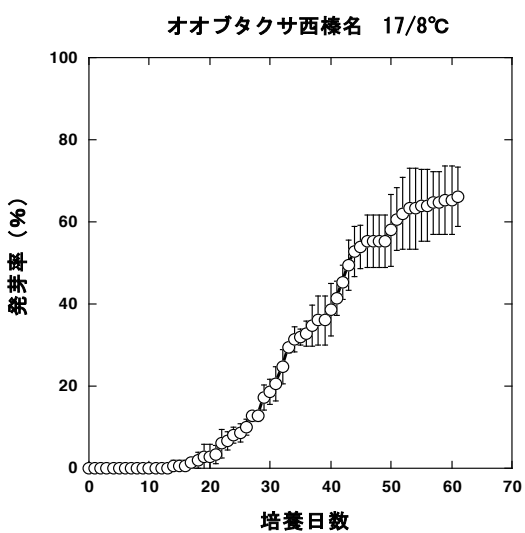
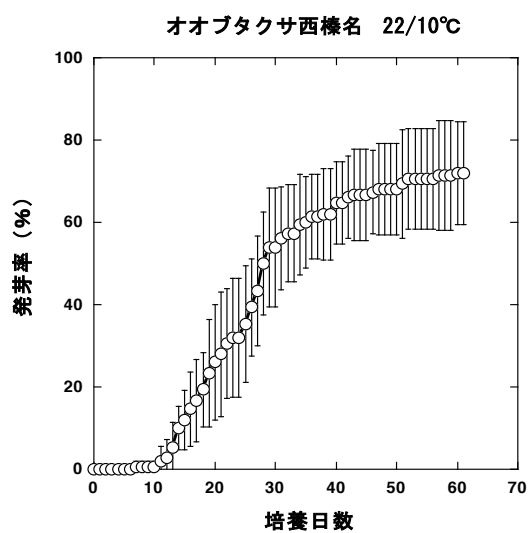
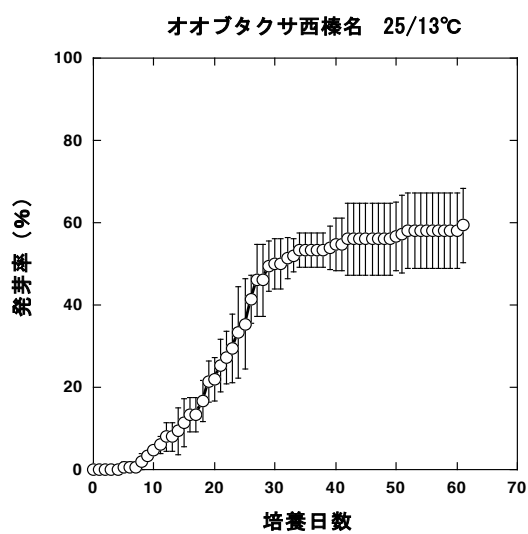
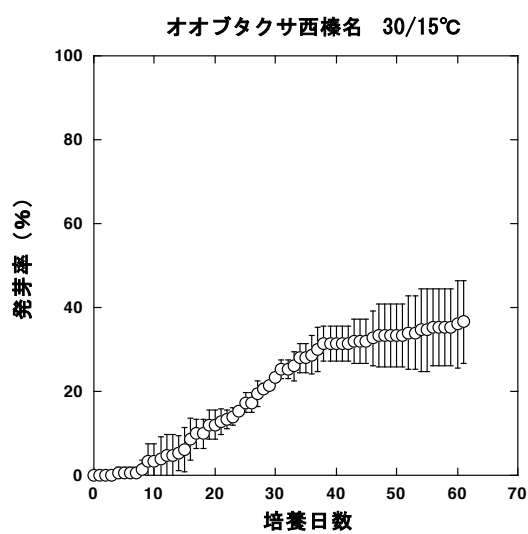


図 46 冷湿処理を施した西様名産オオブタクサの種子の発芽率の経時変化

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。

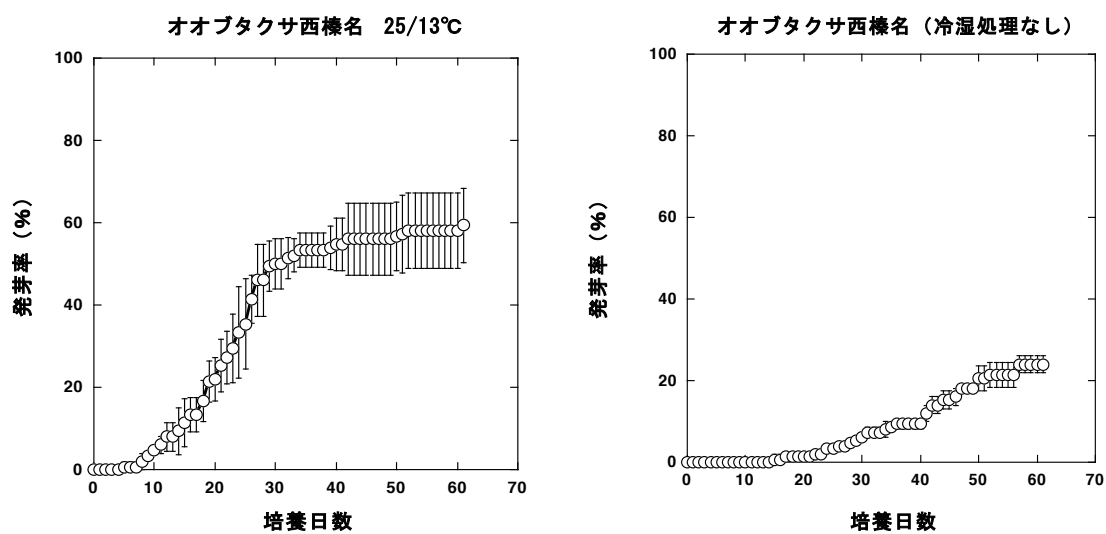


図 47 冷湿処理を施した西榛名産オオブタクサの種子（左）と冷湿処理を施さなかった西榛名産オオブタクサの種子（右）の発芽率の経時変化

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。

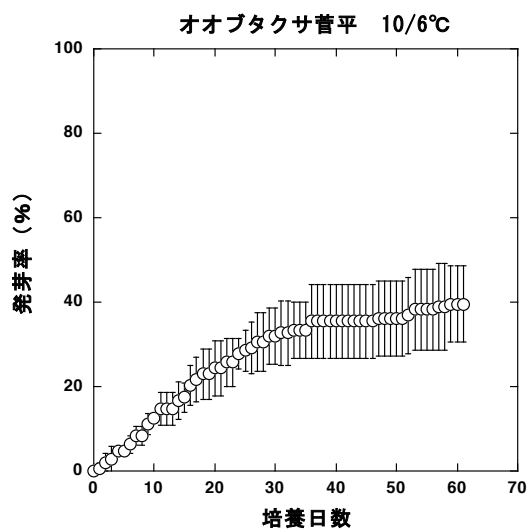
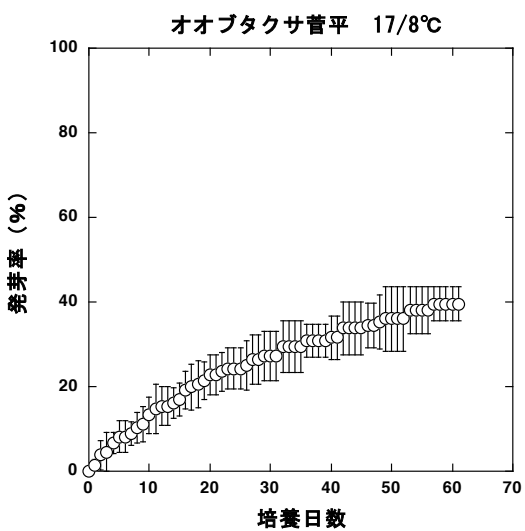
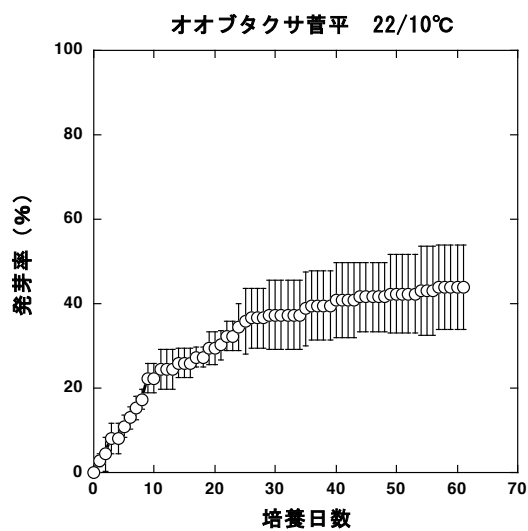
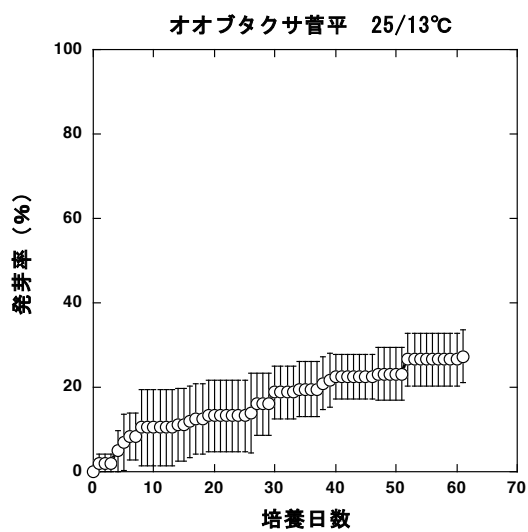
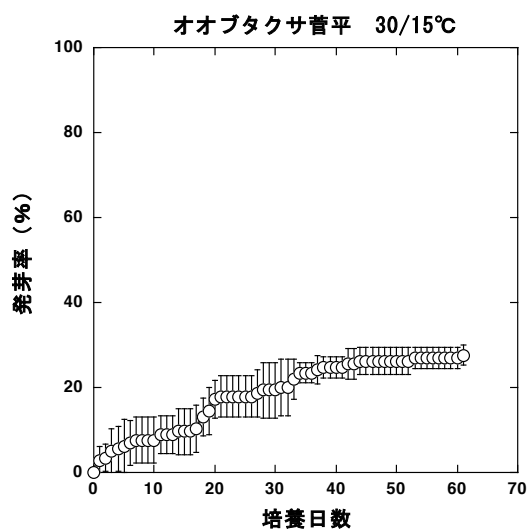


図 48 冷湿処理を施した菅平産オオブタクサの種子の発芽率の経時変化

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。

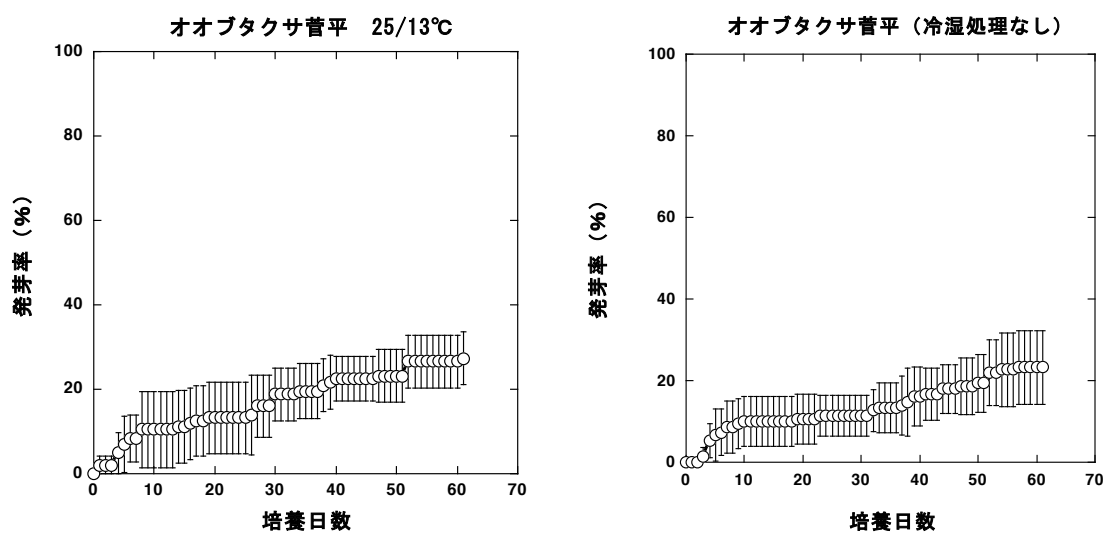


図 49 冷湿処理を施した菅平産オオブタクサの種子（左）と冷湿処理を施さなかった菅平産オオブタクサの種子（右）の発芽率の経時変化

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。

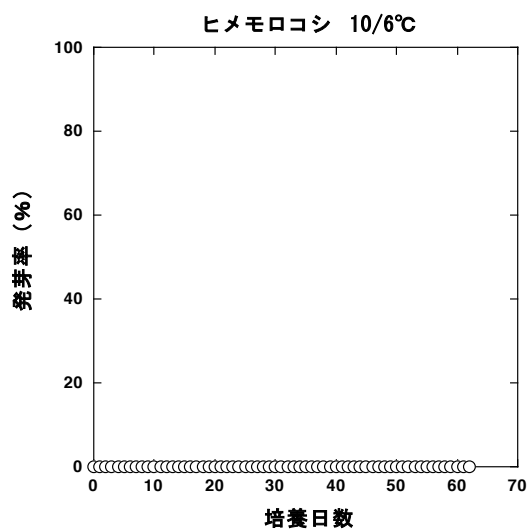
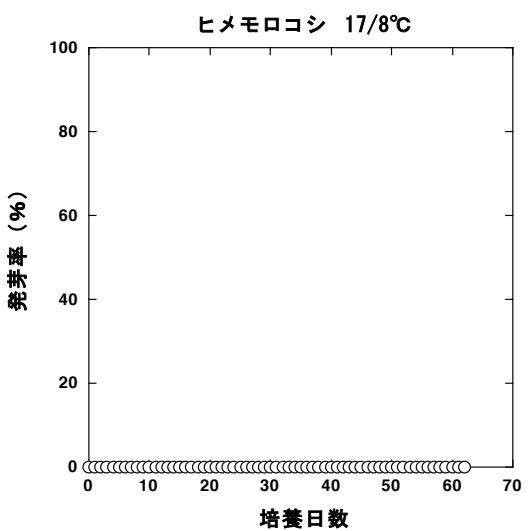
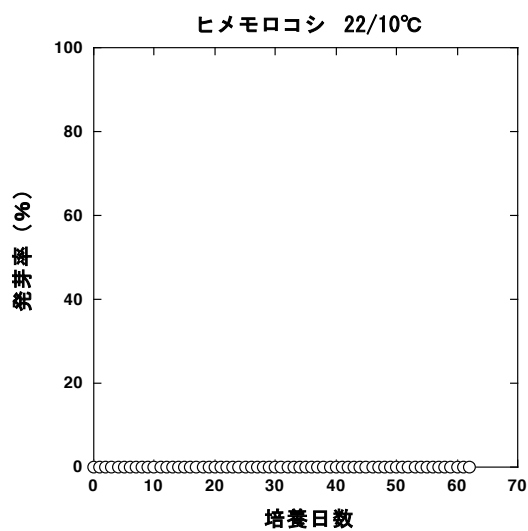
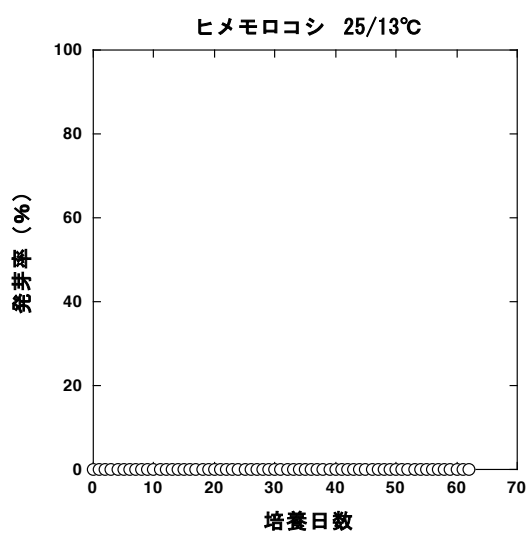
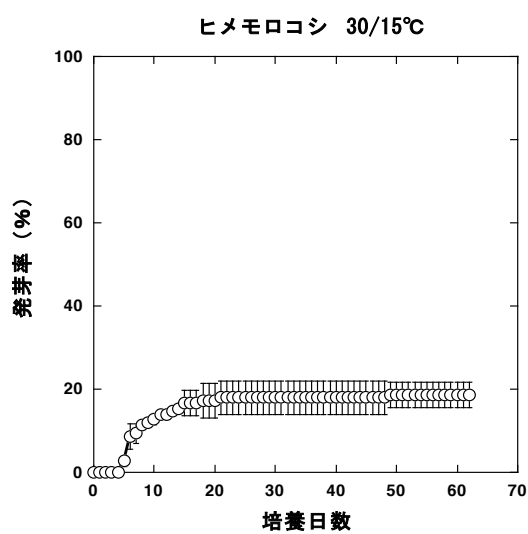


図 50 冷湿処理を施したヒメモロコシの種子の発芽率の経時変化

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。

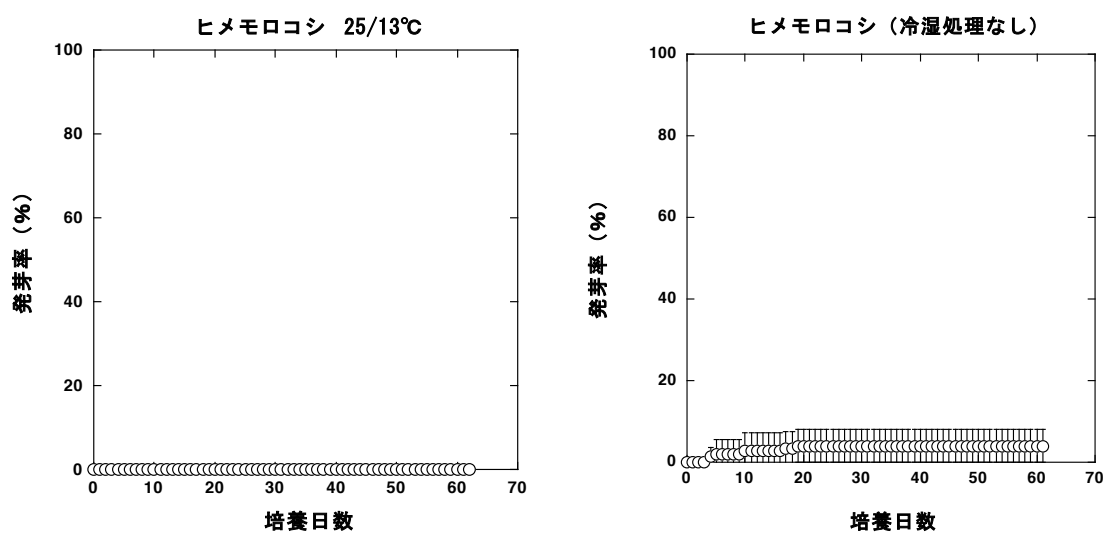


図 51 冷湿処理を施したヒメモロコシの種子（左）と冷湿処理を施さなかったヒメモロコシの種子（右）の発芽率の経時変化

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。

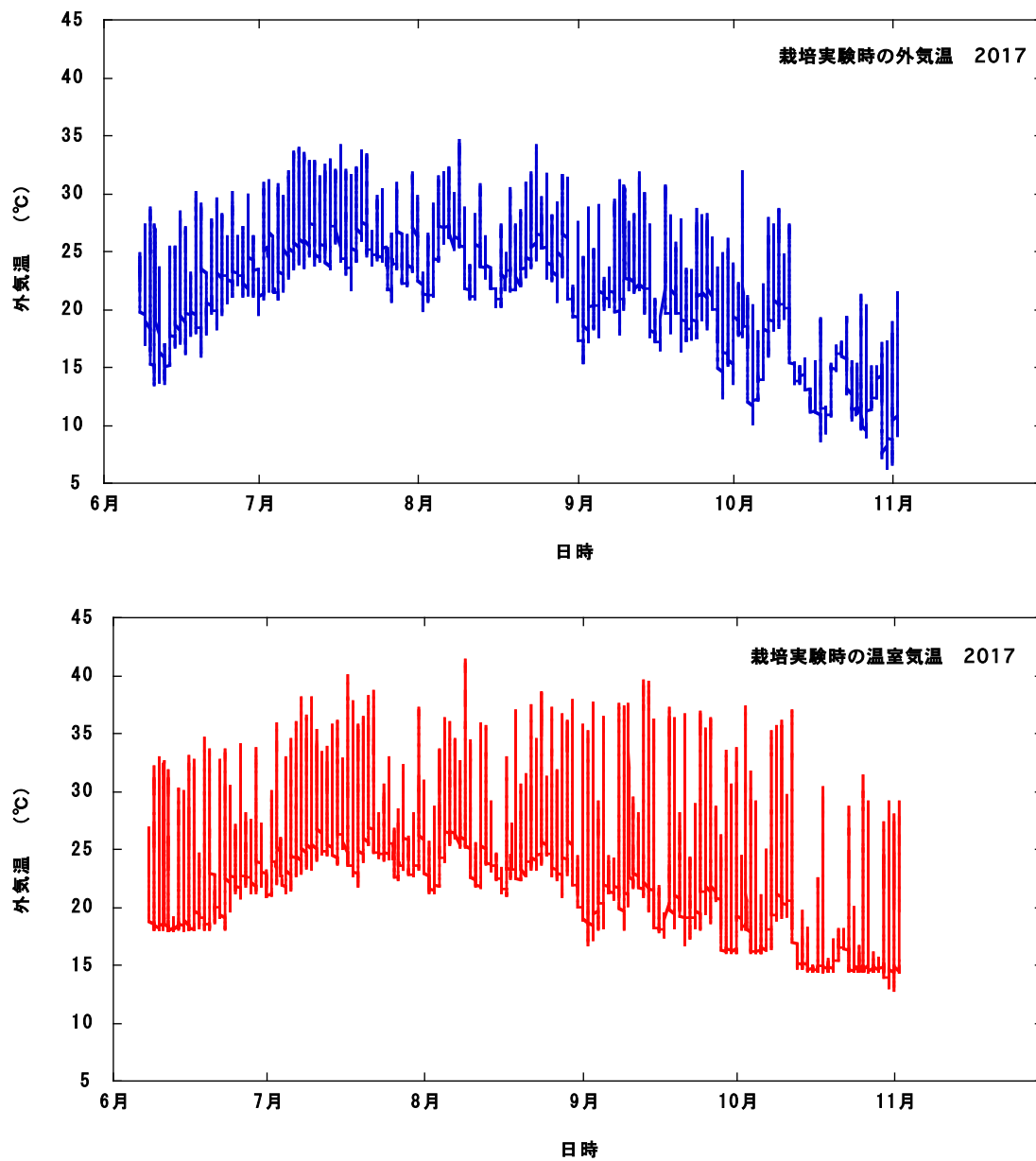


図 52 群馬大学荒牧キャンパス内における栽培実験期間中の圃場及び温室内の気温

2017 年 6 月から 11 月までの間、群馬大学荒牧キャンパス構内の圃場と温室内で気温を測定した。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 30 分おきに連続測定した。上図は圃場の気温、下図は温室内の気温を示す。温室と圃場の平均温度差は約 1.6°C であった。

図 53 異なる相対光量子密度下で栽培した
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%）内でポット植えした苗を約 2 週間栽培した。相対生長速度（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=15～16。

図 54 異なる相対光量子密度下で栽培した
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%）内でポット植えした苗を約 2 週間栽培した。相対生長速度（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=12。

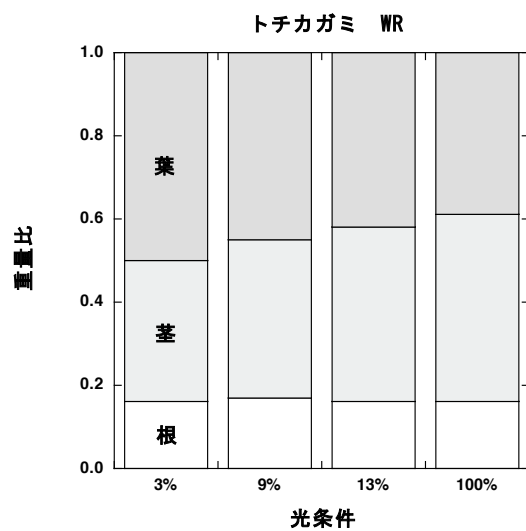
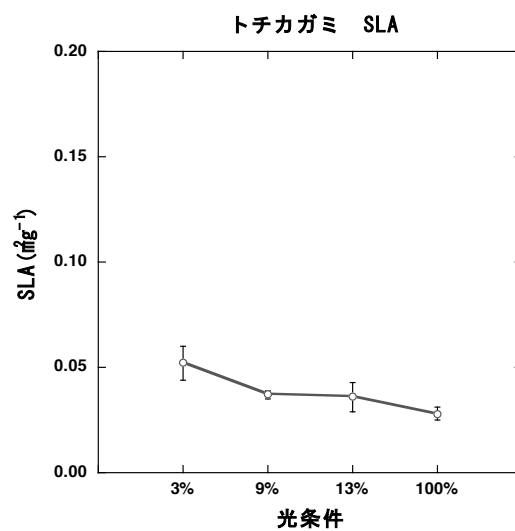
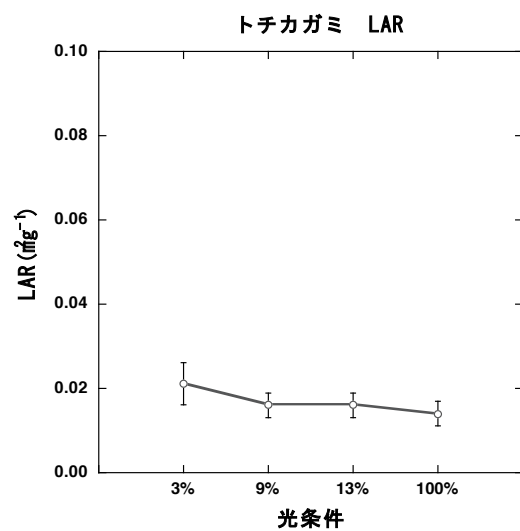
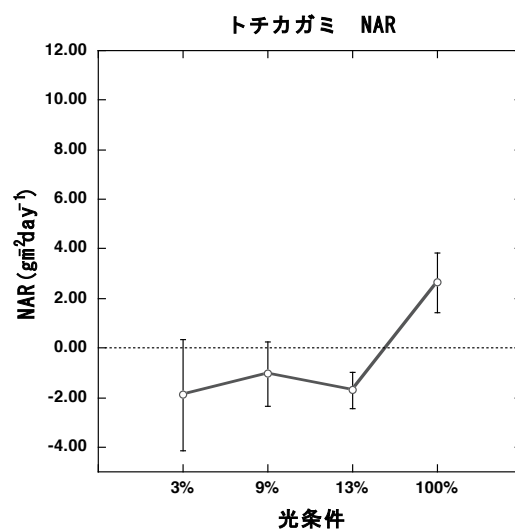
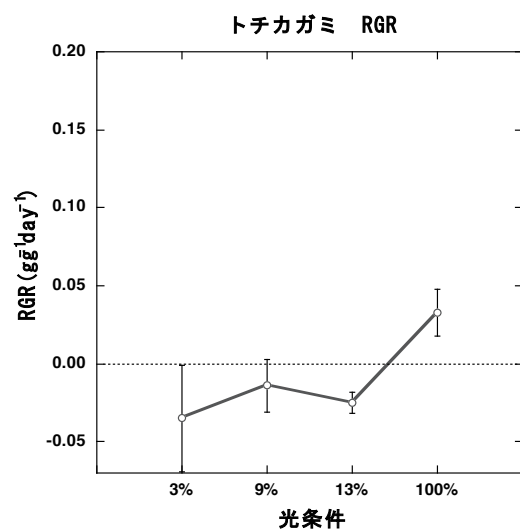


図 55 異なる相対光量子密度下で栽培したトチカガミの生長解析結果

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%）内でポット植えした苗を約 2 週間栽培した。相対生長速度（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。

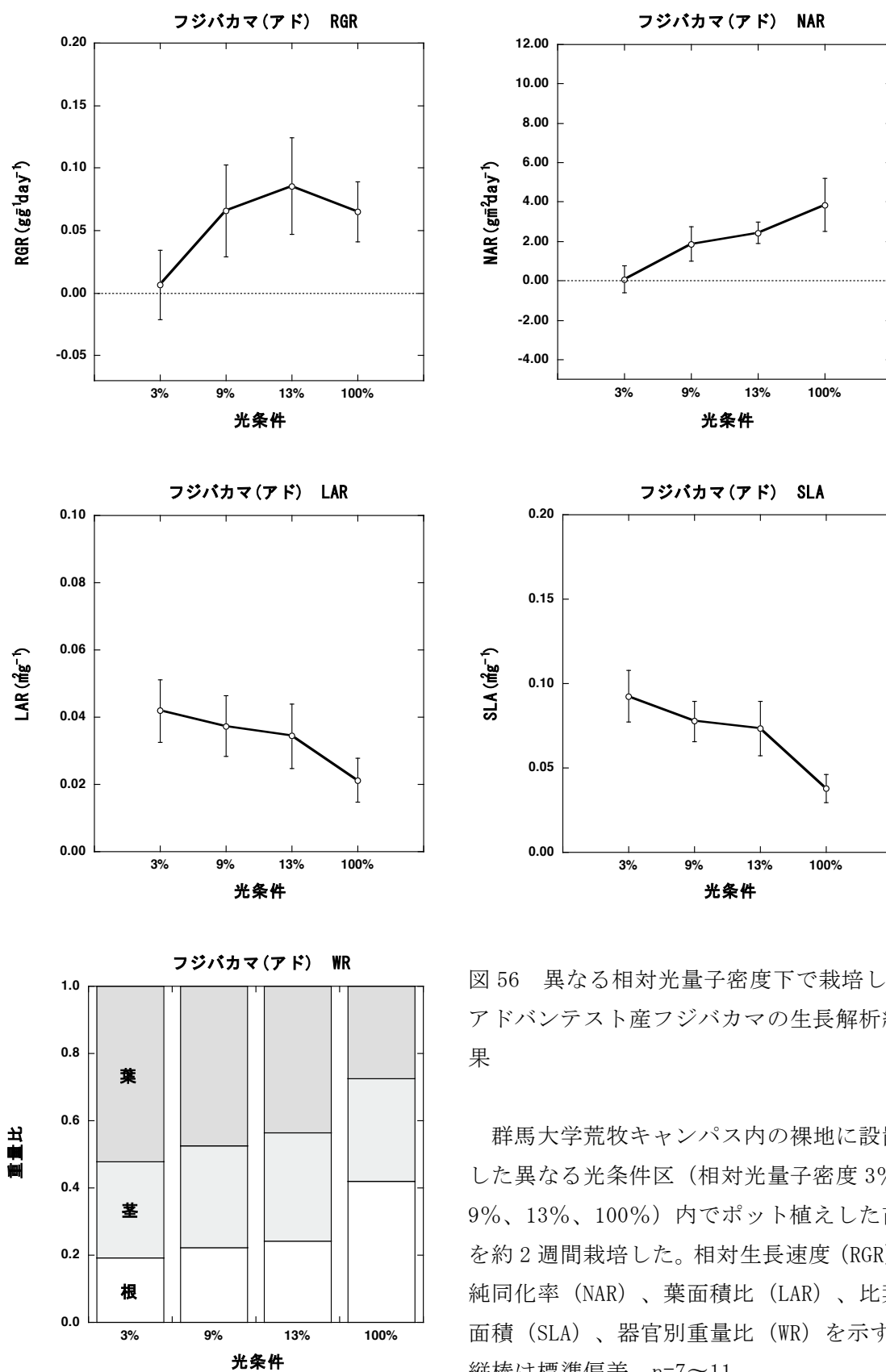


図 56 異なる相対光量子密度下で栽培したアドバンテスト産フジバカマの生長解析結果

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%）内でポット植えした苗を約 2 週間栽培した。相対生長速度（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=7~11。

図 57 異なる相対光量子密度下で栽培した
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%）内でポット植えした苗を約 2 週間栽培した。相対生長速度（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=9。

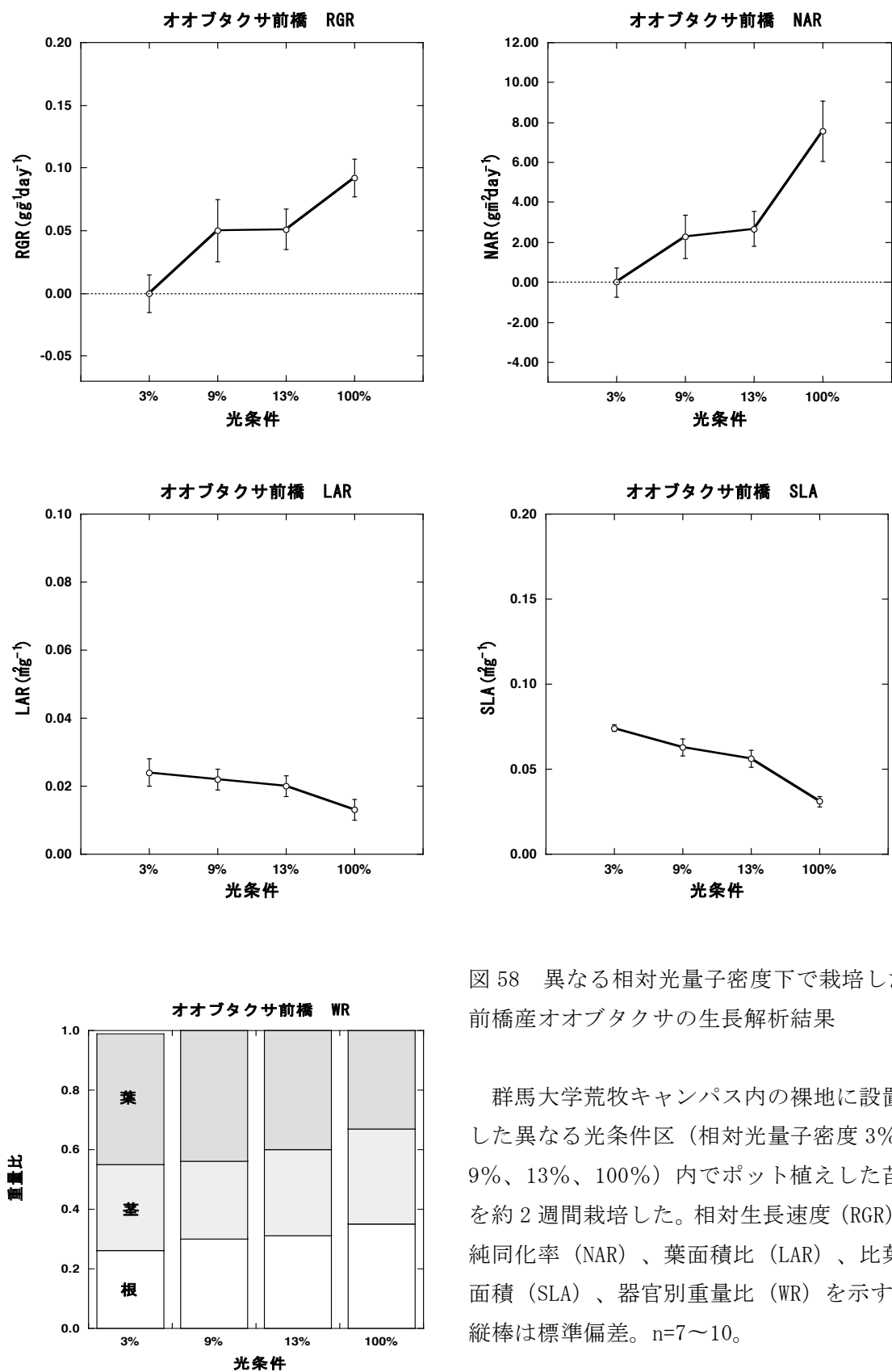


図 58 異なる相対光量子密度下で栽培した前橋産オオブタクサの生長解析結果

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%）内でポット植えした苗を約 2 週間栽培した。相対生長速度（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=7~10。

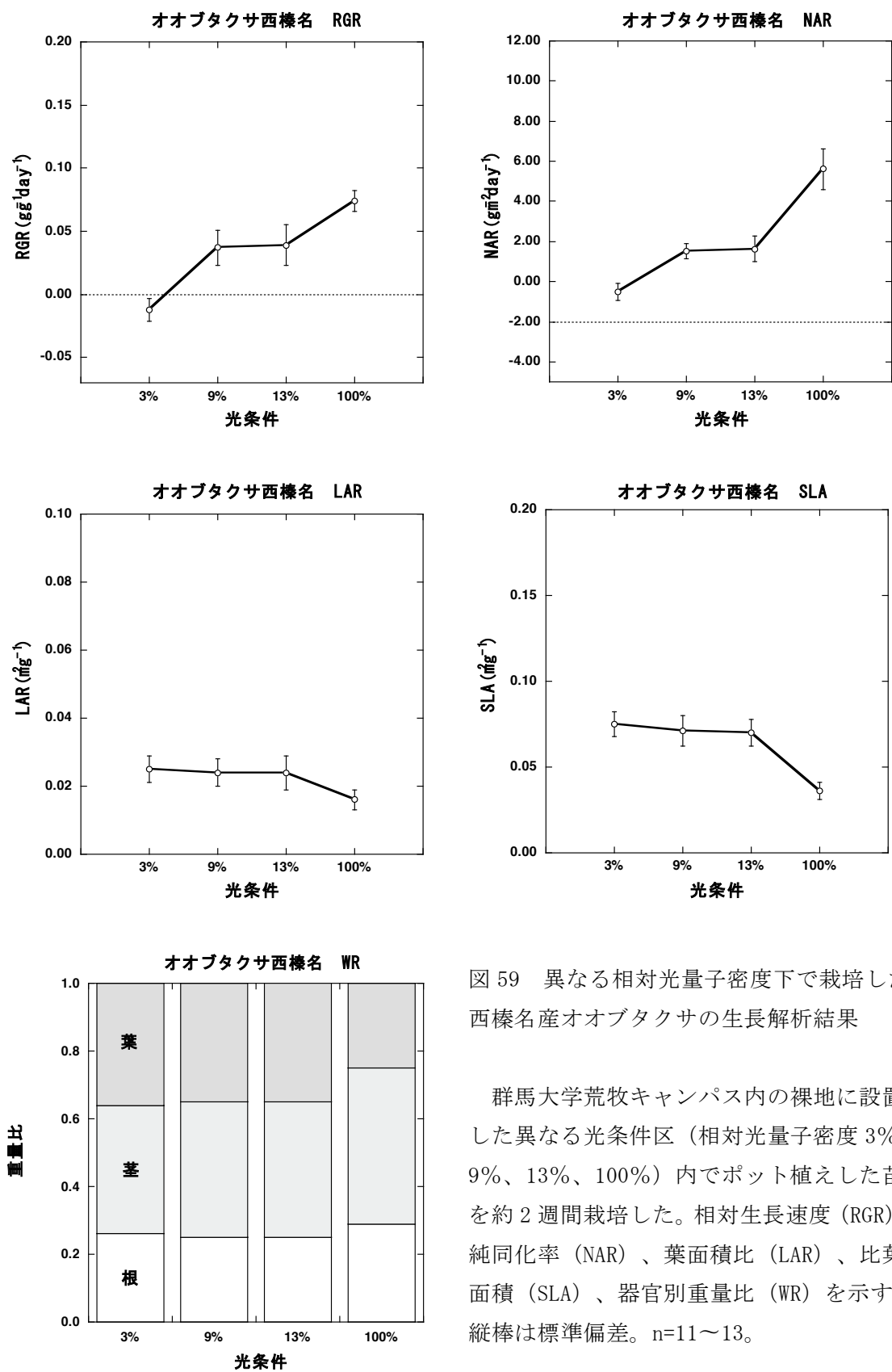


図 59 異なる相対光量子密度下で栽培した西様名産オオブタクサの生長解析結果

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%）内でポット植えした苗を約 2 週間栽培した。相対生長速度（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=11~13。

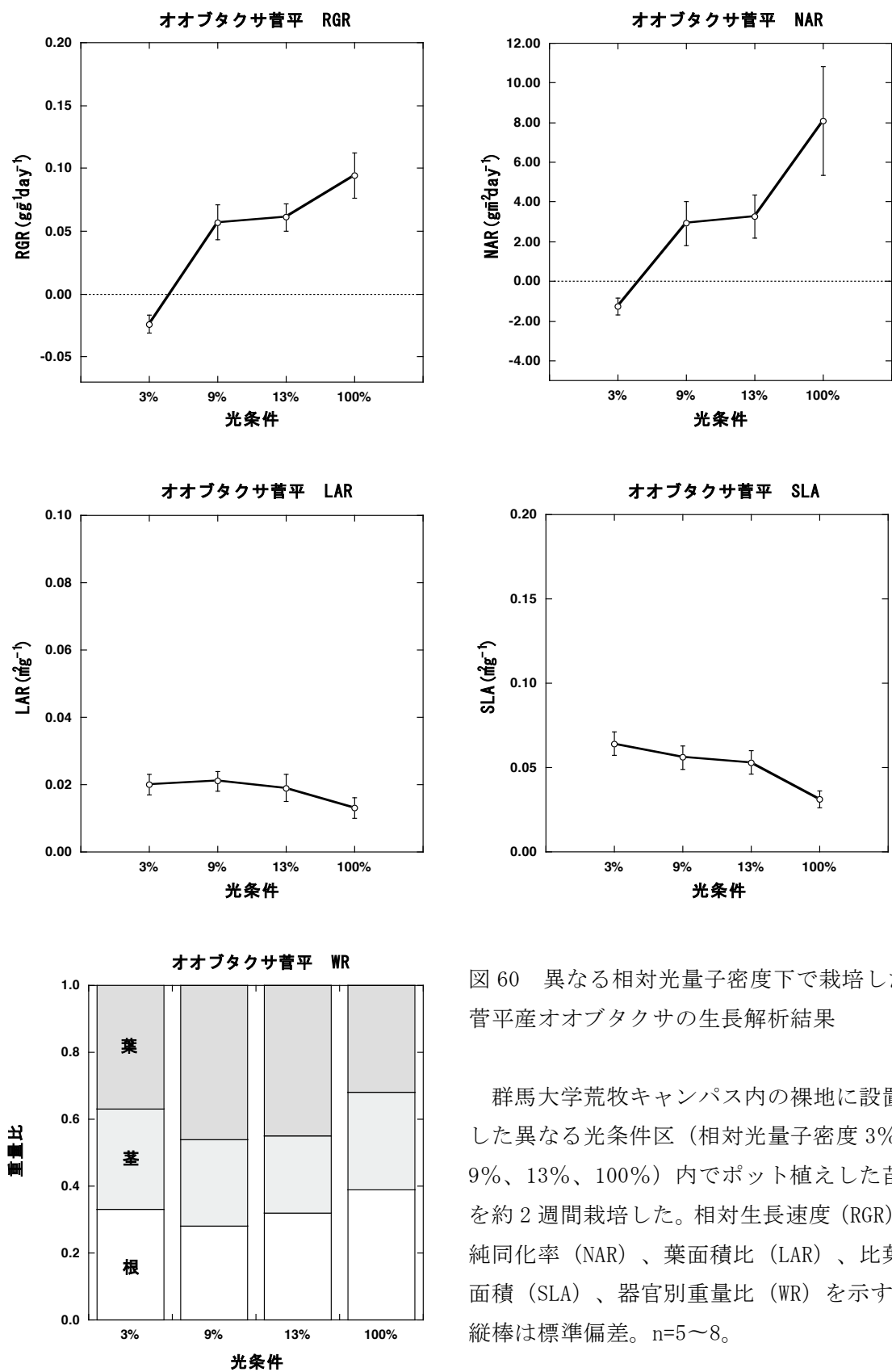


図 60 異なる相対光量子密度下で栽培した菅平産オオブタクサの生長解析結果

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%）内でポット植えした苗を約 2 週間栽培した。相対生長速度（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=5~8。

図 61 異なる温度条件下で栽培した
の生長解析結果

群馬大学荒牧キャンパス内の裸地（相対光量子密度 100%）にコントロール区およびガラス温室に通風することで気温を約 1.6℃上昇させた実験区（+1.6℃区）を設置し、それぞれにポット植えした苗を入れて約 2 週間栽培した。相対生長速度（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=15～16。

図 62 異なる温度条件下で栽培した
の生長解析結果

群馬大学荒牧キャンパス内の裸地（相対光量子密度 100%）にコントロール区およびガラス温室に通風することで気温を約 1.6℃上昇させた実験区（+1.6℃区）を設置し、それぞれにポット植えした苗を入れて約 2 週間栽培した。相対生長速度（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=12。

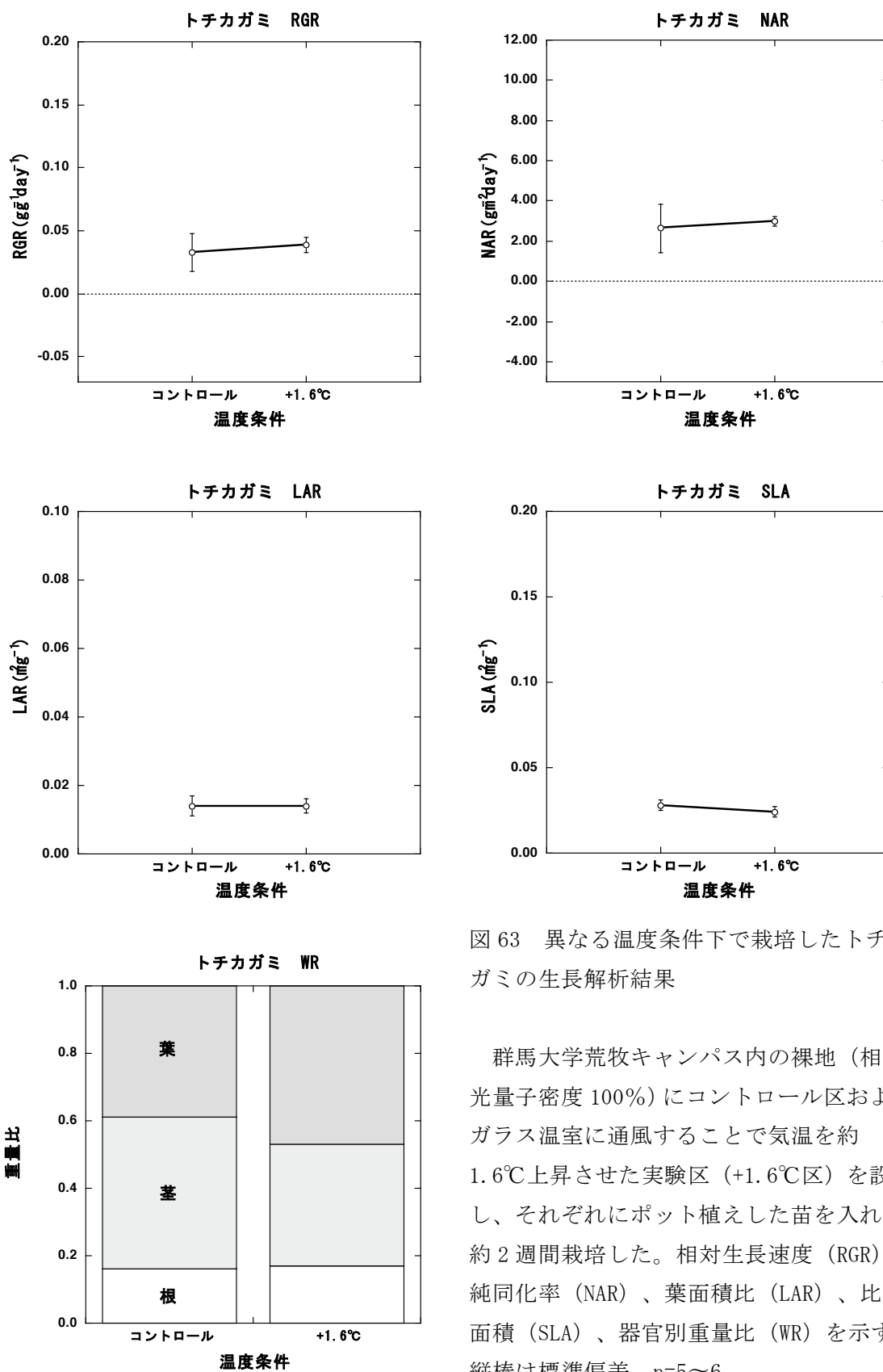


図 63 異なる温度条件下で栽培したトチカガミの生長解析結果

群馬大学荒牧キャンパス内の裸地（相対光量子密度 100%）にコントロール区およびガラス温室に通風することで気温を約 1.6°C 上昇させた実験区（+1.6°C 区）を設置し、それぞれにポット植えした苗を入れて約 2 週間栽培した。相対生長速度（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。

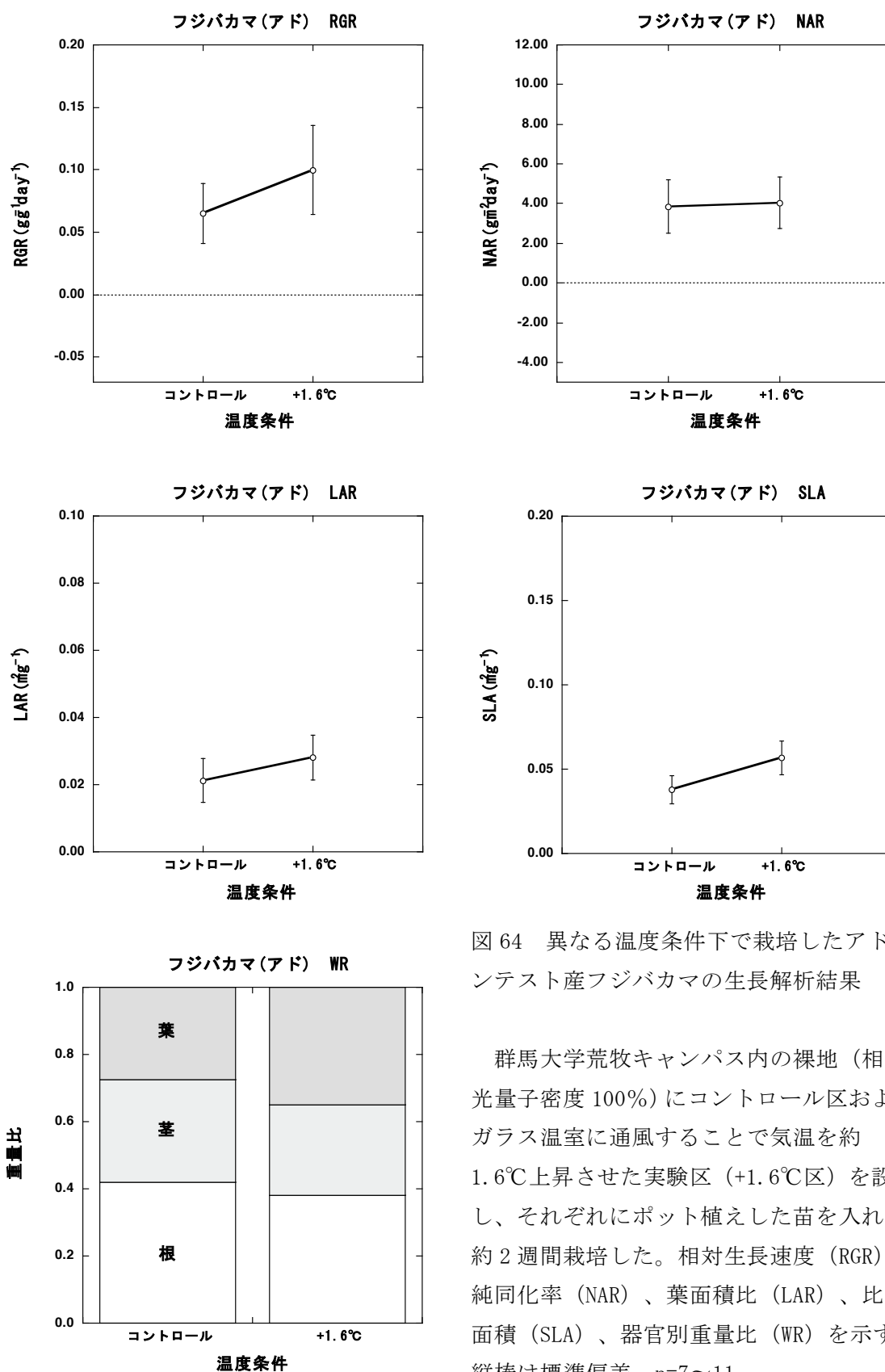


図 64 異なる温度条件下で栽培したアドバンテスト産フジバカマの生長解析結果

群馬大学荒牧キャンパス内の裸地（相対光量子密度 100%）にコントロール区およびガラス温室に通風することで気温を約 1.6°C 上昇させた実験区（+1.6°C 区）を設置し、それぞれにポット植えした苗を入れて約 2 週間栽培した。相対生長速度（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=7~11。

図 65 異なる温度条件下で栽培した
の生長解析結果

群馬大学荒牧キャンパス内の裸地（相対光量子密度 100%）にコントロール区およびガラス温室に通風することで気温を約 1.6℃上昇させた実験区（+1.6℃区）を設置し、それぞれにポット植えした苗を入れて約 2 週間栽培した。相対生長速度（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=9。

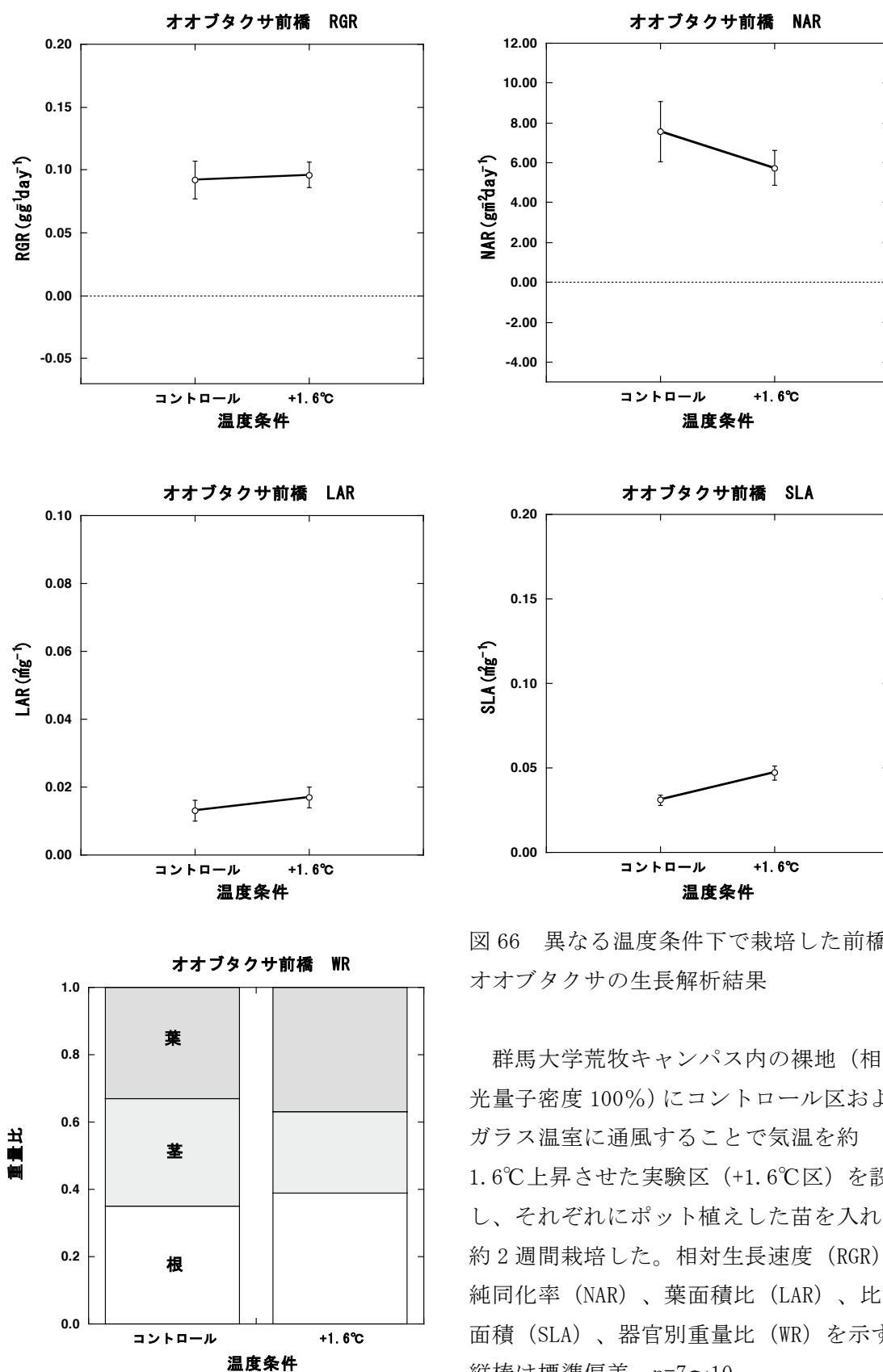


図 66 異なる温度条件下で栽培した前橋産オオブタクサの生長解析結果

群馬大学荒牧キャンパス内の裸地（相対光量子密度 100%）にコントロール区およびガラス温室に通風することで気温を約 1.6°C 上昇させた実験区（+1.6°C 区）を設置し、それぞれにポット植えした苗を入れて約 2 週間栽培した。相対生長速度（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=7~10。

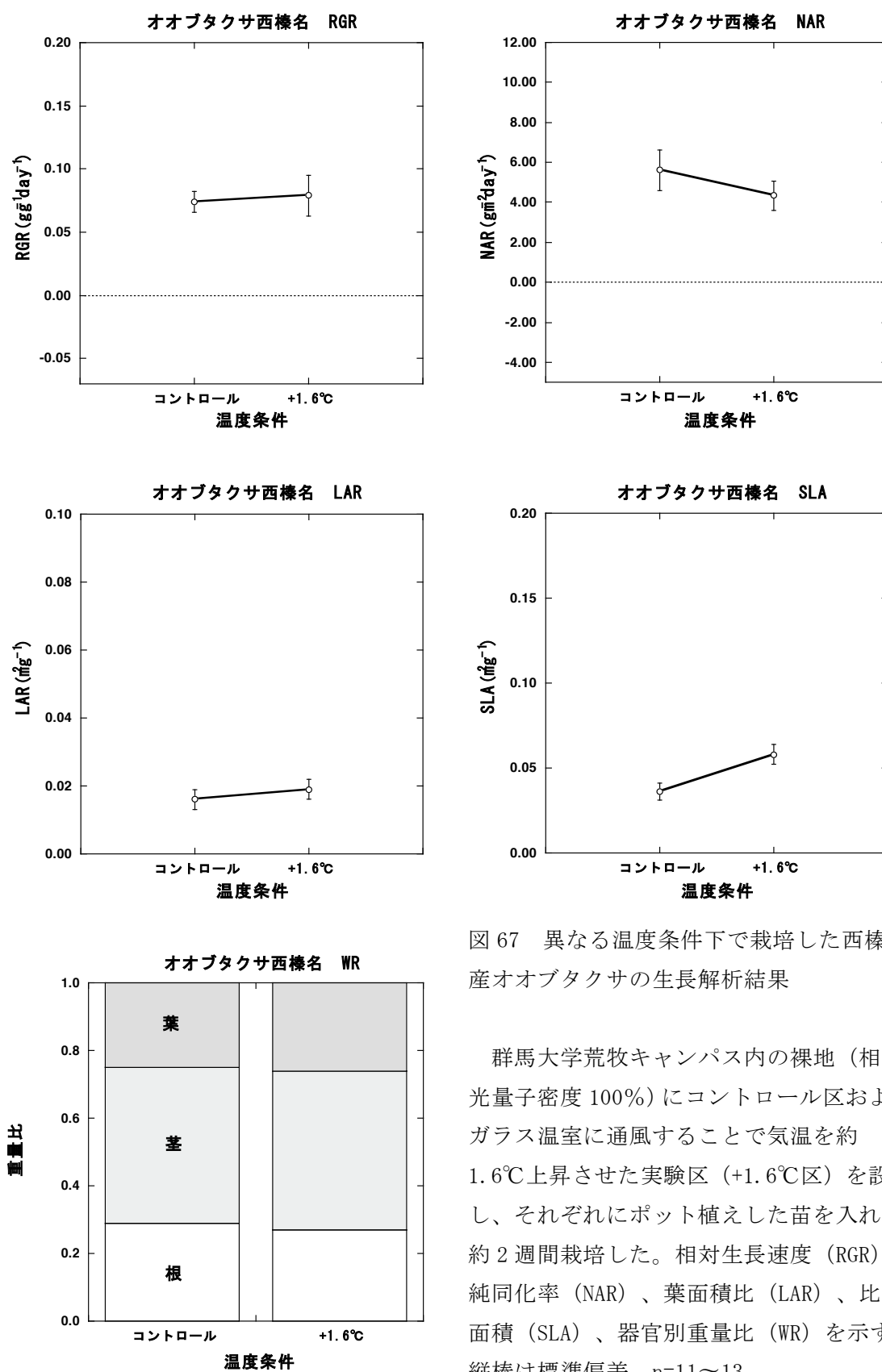


図 67 異なる温度条件下で栽培した西榛名産オオブタクサの生長解析結果

群馬大学荒牧キャンパス内の裸地（相対光量子密度 100%）にコントロール区およびガラス温室に通風することで気温を約 1.6°C 上昇させた実験区（+1.6°C 区）を設置し、それぞれにポット植えした苗を入れて約 2 週間栽培した。相対生長速度（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=11~13。

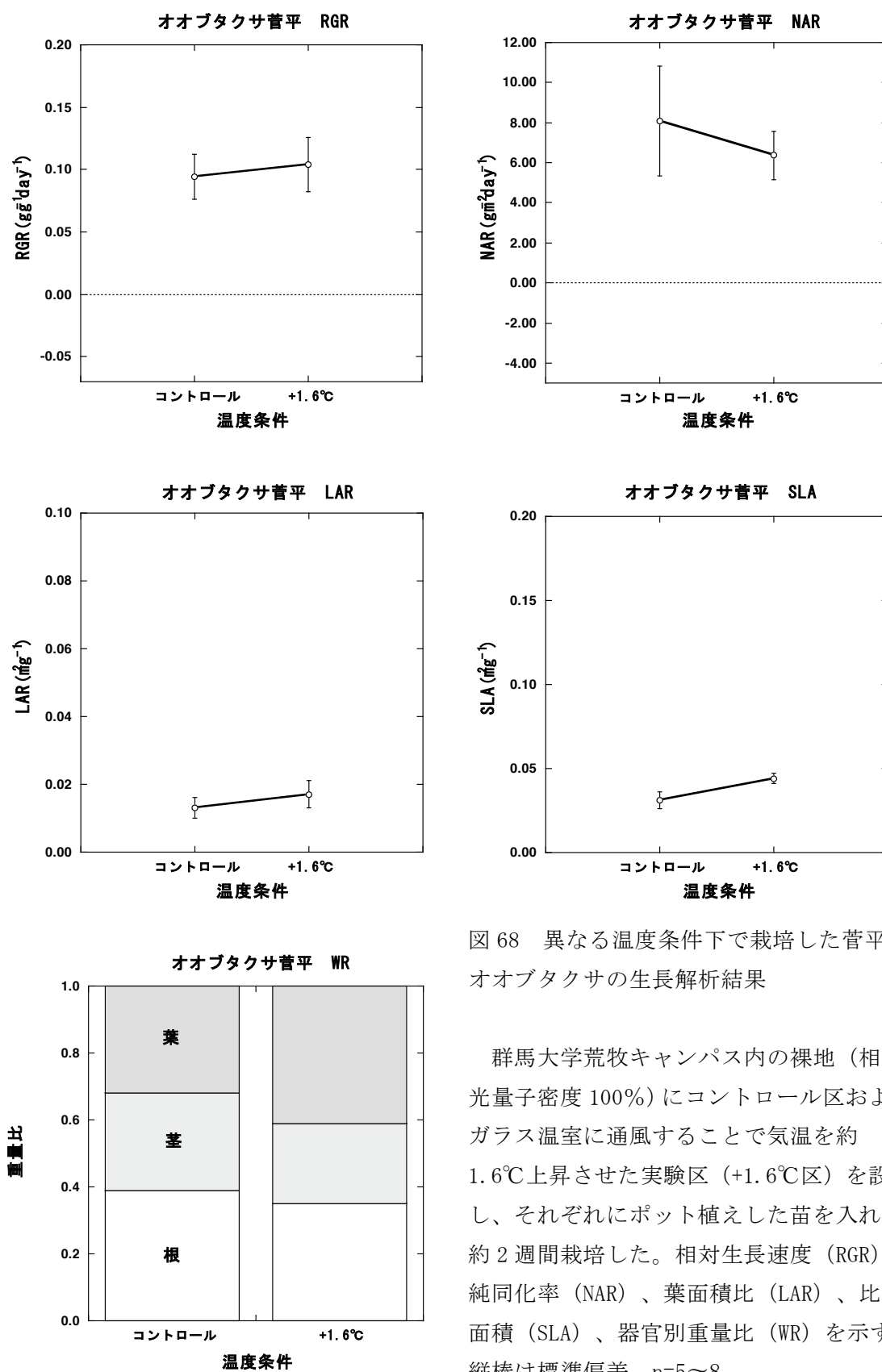


図 68 異なる温度条件下で栽培した菅平産オオブタクサの生長解析結果

群馬大学荒牧キャンパス内の裸地（相対光量子密度 100%）にコントロール区およびガラス温室に通風することで気温を約 1.6°C 上昇させた実験区（+1.6°C 区）を設置し、それぞれにポット植えした苗を入れて約 2 週間栽培した。相対生長速度（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=5~8。

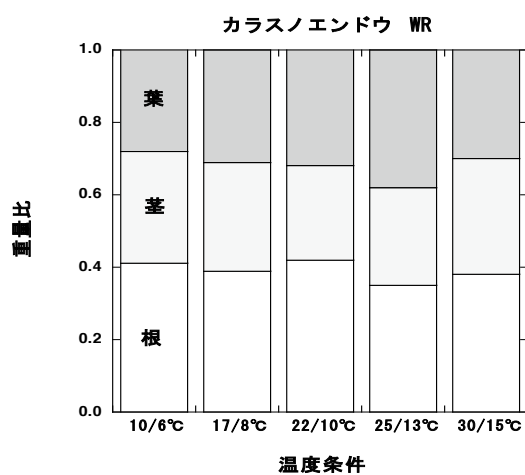
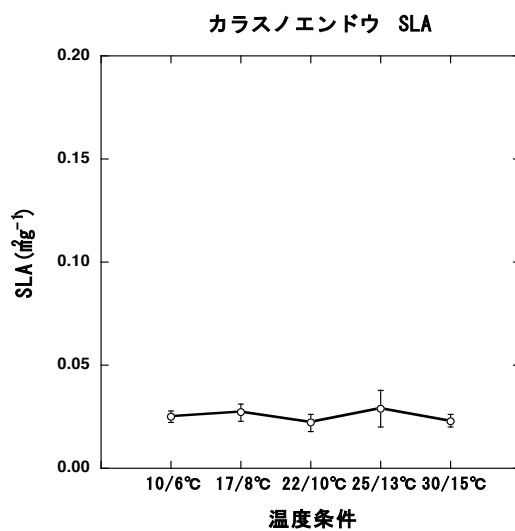
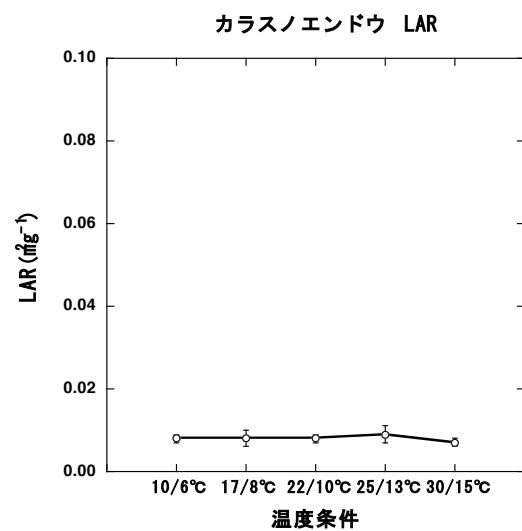
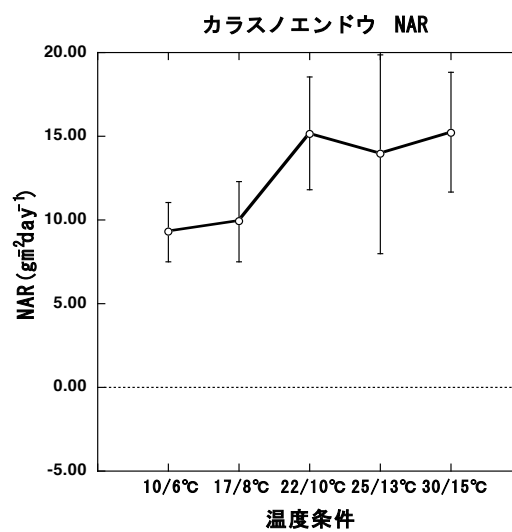
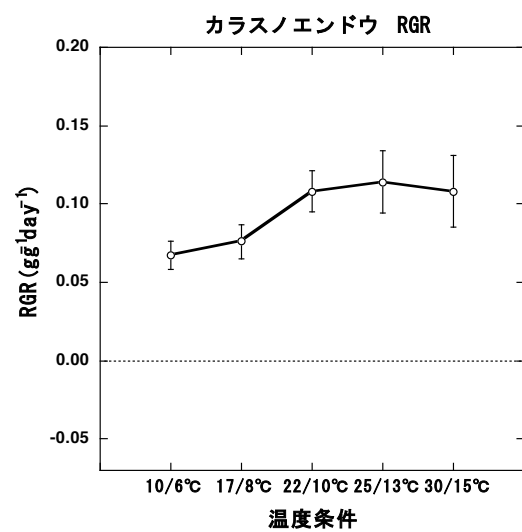


図 69 異なる温度条件下で栽培したカラスノエンドウの生長解析結果

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にポット植えした苗を入れて約 2 週間栽培した。相対生長速度 (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=13~15。

図 70