

# 卒業論文

題名

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

学籍番号

12602003

氏名

足助 直紀

指導教員名

石川 真一 教官

平成 28 年 1 月 20 日 提出

## 概要

これまでの40年にわたる国際共同研究と、IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 気候変動に関する政府間パネル) の5次にわたる研究成果報告によって、地球規模で地球温暖化の危機の重大さが認識され、現在の地球全体にわたる急激な気候変化の原因の大部分が人間活動の結果であることが明らかになった。IPCC 第5次報告書第1作業部会報告書概要(2013)によると、京都議定書で削減対象に指定された温室効果ガスの大気負荷が2005年から2011年にかけて増加し、累積CO<sub>2</sub>排出量の約半分は過去40年間に排出されていることが明らかになった。また、大気中の二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)の存在量は1750年よりも40%増加し、2011年には390.5(390.3~390.7) ppmとなった。それに伴い世界の気温は、2100年時点において、温室効果ガス濃度が最も低いシナリオであるRCP2.6では気温上昇幅は1.5~1.7°C、温室効果ガス濃度が最も高いシナリオであるRCP8.5では気温上昇幅は4.1~4.8°Cと予測され、今後100年以内に地球平均で1~3°Cの温暖化は避けられないという悲惨な予測がなされている。

こうした地球温暖化の進行にともない、平均気温が上昇することで、冬が短くなることが予想され、植物の発芽・生長に影響を与えられ考えられる。多くの植物は野外で冬を経験することによって発芽する。また、多くの植物は春が発芽・生長の開始時期であり、生育期間が長いほど、一年でより大きなサイズになる。このため、温暖化による冬季の短縮と生育期の気温上昇は、多くの植物の発芽・生長にプラスまたはマイナスの影響を及ぼし、ひいては植物種の存続に変化を引き起こす可能性がある。その結果として、在来植物種が衰退し外来植物種が繁茂したり、在来植物種の分布域が変化するという仮説が考えられる。

こうした仮説を検証するため、本研究では、以前より外来種の繁茂が指摘される群馬大学荒牧キャンパス構内、県内危険外来種ナヨクサフジが生育している群馬県前橋市関根町、県内絶滅危惧Ⅱ類に指定されているオミナエシの自生する県立榛名公園、近縁種であるオトコエシが自生する西榛名地域の計4つの地域において、それぞれの植物の分布調査を行った。また、温暖化により冬季の短縮と生育期の気温上昇が起こるというシナリオをもとに、植物の発芽と生長がどのような直接影響を受けるかについて、数種類の生物学的に近縁な植物をモデル植物として発芽実験・生長解析を行った。生物学的に近縁で生態特性の異なる種間で温暖化に対する反応を比較することで、前述の仮説の検証が可能となる。そこで、平地性のアブラナ科2種(ナズナ:在来種、ショカツサイ:県内危険外来種)キク科2種(タウコギ:在来種、コセンダングサ:外来種)、マメ科2種(カラスノエンドウ:在来種、ナヨクサフジ:県内危険外来種)、および平地から中山間地に生育するオミナエシ科在来植物2種(オミナエシ:群馬県絶滅危惧Ⅱ類、オトコエシ:在来種)を研究対象とした。

群馬大学荒牧キャンパス構内の植物相調査ではナズナ167地点、ホトケノザ417地点、カラスノエンドウ124地点、ショカツサイ266地点で生育が確認された。ショカツサイが純群落を形成すると早春に開花を始める春植物の生長を大きく妨げる可能性がある。ナズナとホトケノザの生育地点では、ショカツサイが同所的に繁茂している地点が多く、キャンパス内における植物種の生物多様性の低下が起こっているのではないかと推察される。またカラスノエンドウの生育地点は、上記在来種2種ともショカツサイとも重なっていないものがほとんどであった。これは本種が被陰に弱く、すでに他種との競争によって多くの地点から排除されている可能性を示唆していると考えられる。

前橋市関根町郵便局付近の調査では、31地点でナヨクサフジの生育が確認された。本種は2005年頃から群馬県内で増加し始めており、在来種を駆逐すると考えられる。今後、その生態をより詳しく解明するために引き続き調査を行う必要がある。

県立榛名公園で生育が確認されたオミナエシは、日当たりの良い立地で良く見られた。一方、西榛名地域に自生するオトコエシは、他の植物に被陰された暗地で確認され、オミナエシ科2種に生育特性の違いが見られた。今後も榛名公園のオミナエシ、西榛名地域のオトコエシの動態とともに、気温など生育環境要因も長期的にモニタリングする必要がある。

また、同科の植物同士でも発芽・初期生長過程は異なり、各植物種に対して温暖化はプラスまたはマイナスの影響を及ぼすことが明らかになった。

アブラナ科2種では、冷湿処理により発芽率が著しく低下し、冷湿処理を施さない種子の最終発芽率は25/13℃～30/15℃区で高くなるという結果が得られた(荒木 2011)。また、異なる温度条件下での栽培実験では、ショカツサイは高温区よりも低温区で最も良く生長し、ナズナは高温区ほど良く生長した(荒木 2011)。このことから、冬季の短縮と生育期の気温上昇は、ショカツサイには生長抑制効果が、ナズナには生長促進効果があると考えられる。しかし、最終発芽率・発芽速度はいずれの区においてもショカツサイの方が高く、温暖化の進行により、ショカツサイの発芽が促進されることで、ナズナの絶滅の危機は相対的に高まると考えられる。

キク科在来種であるタウコギは、冷湿処理の有無で最終発芽率自体に有意な差はなかったが、2ヶ月の冷湿処理を施した種子の方が最終発芽率に達するまでの日数が短かったことから、冷湿処理により発芽速度が促進されたと考えられる。また、高温下での生長が抑制されることから、温暖化による冬季の短縮や生育期の気温上昇に弱い種であることが明らかになった。一方、コセンダングサは高温下でも最終発芽率は高く、生長も可能であった。以上のことから、キク科2種では温暖化によりコセンダングサが恩恵を受け、タウコギを駆逐する可能性が高いと考えられる。

マメ科在来種であるカラスノエンドウは、冷湿処理を施さない種子では低温区ほど高い発芽率となった。本種は光依存性が高く、高温に弱いことから、他の植物が少ない時期、

すなわち秋～冬季に発芽・生長を始めると考えられる。一方、ナヨクサフジは一年中発芽可能・高温下で生育可能であり、さらにカラスノエンドウと比べより厳しい光条件下での生育が可能である。したがって温暖化が進行した場合、マメ科 2 種ではナヨクサフジが優位にあると考えられる。

オミナエシ科は2種共に高温下での生育が可能であった。オミナエシは冷湿処理により発芽が促進されるが、その効果は限定的または不定であると考えられる。また、25/13℃区以上の高温条件で良く発芽しており、主に夏に発芽すると考えられる。異なる光条件下における栽培実験では、光条件の良好な環境ほど良く生長した。一方、オトコエシは冷湿処理による発芽の促進効果は見られず、低温区ほど高い最終発芽率となり、被陰区である相対光量子密度13%区において最も良く生長するという生育特性の違いが明らかになった。

今後、温暖化の進行により、これまでオトコエシに日陰を提供していた植物種の衰退、オミナエシを被陰するような外来植物種の侵入・繁茂など、気温上昇による植物相の変化が起こる可能性もある。さらに、本研究の設定温度を上回る環境に晒される可能性も高いため、今後は別の温度条件下での栽培実験を行い、さらに広範囲の温度条件に対する生長反応を解明する必要がある。

以上、本研究により、各調査地の外来種・在来種の分布状況が明らかになった。また、温暖化による冬季短縮や生育期の気温上昇は植物の発芽や生長、もしくはその両方に影響を与えることも明らかになった。しかし、マイナスの影響を受けるのは主に在来種であり、競争力・繁殖力に優れた外来種は結果的に増加し、植物種の多様性を低下させる恐れがある。今後、個別の研究を積み重ねることで生物多様性・生態系の崩壊の防止に努めることが求められる。

## 目次

はじめに	2
地球温暖化の現状と原因	2
温暖化の対策	3
温暖化が植物に与える影響	3
外来植物の侵入	4
群馬県における外来植物の概況	5
外来種の法的規制と取り組み	6
植物の種子と休眠	7
植物の生育戦略	8
群落の光環境	9
生物多様性と生態系サービス	10
生物多様性の危機	11
生長解析	12
先行研究の例	13
研究の目的	14
調査値概要	17
材料及び方法	20
材料植物	21
対象植物の分布状況	22
種子発芽の冷湿処理・培養温度依存性	23
異なる環境下における栽培実験	24
生長解析	25
県立榛名公園および群馬大学荒牧キャンパスの気温測定	27
結果および考察	28
植物分布調査	28
種子発芽の冷湿処理・温度依存性	30
異なる温度・光条件における植物の生長解析	34
謝辞	45
引用文献・引用 web ページ	48
写真・表・図	52

## 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社会問題となっている。地球環境の変化・変動を引き起こした要因としては、気候システムの変動や海流循環の攪乱などによる「自然的な要因」と、化石エネルギーの使用やフロンガスの排出などによる「人為的な要因」に分けられる。人類が科学技術力と化石エネルギーを駆使して、地球と生態系に働きかける 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（内嶋 2005）。

しかし、現在の地球全体にわたる急激な気候変化の原因の大部分が、人間活動の結果であることが、複数の証拠を通じて既に示されている。地球温暖化を引き起こすとされている、二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）、メタン（CH<sub>4</sub>）、一酸化二窒素（N<sub>2</sub>O）などの重要な温室効果ガスの大気中濃度が過去数世紀にわたって増加してきたことも明らかになっている（IPCC 第 5 次報告書第 1 作業部会報告書概要 2013）。

IPCC 第 5 次報告書第 1 作業部会報告書概要（2013）によると、京都議定書で削減対象に指定された温室効果ガスの大気負荷が 2005 年から 2011 年にかけて増加したことは確実である。特に最近 10 年間に大幅に増加しており、累積 CO<sub>2</sub> 排出量の約半分は過去 40 年間に排出されている（IPCC 第 5 次報告書第 3 作業部会報告書概要（2013））。大気中の二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）の存在量は 2011 年には 390.5（390.3～390.7）ppm だった。この数値は 1750 年よりも 40% 増加している。大気中の一酸化二窒素（N<sub>2</sub>O）は 2011 年に 324.2（324.0～324.4）ppb で、1750 年以降 20% 増加している。また、大気中のメタン（CH<sub>4</sub>）の量は、2011 年には 1803.2（1801.2～1805.2）ppb であり、1750 年以前よりも 150% 増加していた。

これに伴い、陸域と海域を合わせた世界平均地上気温は、1880～2012 年の期間に 0.85 [0.65～1.06] °C 昇温しており、1951～2012 年の期間に約 0.72 [0.49～0.89] °C 昇温している。また、IPCC 第 5 次評価報告書概要第 3 作業部会報告書（2013）におけるシナリオによれば、2100 年時点において、温室効果ガス濃度が最も低いシナリオである RCP2.6 では同年の気温上昇幅は 1.5～1.7°C、温室効果ガス濃度が最も高いシナリオである RCP8.5 では同年の気温上昇幅は 4.1～4.8°C と予測されている。さらに、現行水準以上の緩和努力が 2030 年までに行われなければ、産業革命以前からの気温上昇を 2°C 未満に抑えるための選択肢の幅を狭めるとしている。

現在の地球温暖化の速度は過去の地質時代の 100 倍で進行している（川道ら 2001）。地球温暖化によって引き起こされる悪影響としては、気候変化に伴う局地的な大雨や干ばつ、極端な猛暑や寒波の発生、さらに食料生産の低下や生態系の破壊などがあげられる。特に動植物はそれぞれに適した気温の地域に生息する必要があるが、温暖化が進行すると高緯度・標高の高い地域への移動を強いられる。そして、移動速度の遅い植物は、新しい地域

に生息範囲を広げることが難しく、絶滅の危機に瀕する可能性がある（莊村 2000）。こうした環境の破壊が生態系・生物多様性の崩壊を引き起こし、人間生活や社会経済にも大きな影響を与え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かれた地球サミットでは、「生物多様性条約」と「気候変動枠組条約」の2つの重要な条約が採択された（川道ら 2001）。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（鷺谷 1999）。1997年12月、地球温暖化防止京都会議（COP3）において、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年から2012年の温室効果ガスを、1990年を基準年として、EUなどには8%、日本には6%の削減が義務づけられた。

日本は、2008年度から2012年度の京都議定書第一約束期間中の5カ年平均の総排出量は、12億7,800万トンであり、基準年度比で1.4%の増加となったが、これに森林等吸収源及び京都メカニズムクレジットを加味すると、5カ年平均で基準年比8.4%減となり、京都議定書の目標（基準年比6%減）を達成することとなった（環境省 HP）。また、第18回気候変動枠組条約締約国会議（COP18）において、京都議定書の第2約束期間については、2013年から2020年までの8年間に決まり、参加国に対する削減目標は1990年比で18%減となった。しかし、主要な先進国の合意は得られず、地球温暖化に対する国際的な協力は未だに不十分な状況である。

IPCC第5次報告書第3作業部会報告書概要（2013）におけるシナリオによれば、2100年時点において、世界地上平均気温は1.5℃から4.8℃の範囲で進行すると予想されている。ある程度の温暖化はむしろ避けられない事実と理解し、この気温上昇によって、今後どのような影響が起り得るのか、また、実際にどう対応していくのかを研究を通し解明していく必要がある。

## 温暖化が植物に与える影響

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（川道ら 2001）。予想される気温の上昇に植物が対応するには、植生移動の必要量は極方向に年間1.5～5.5キロメートルであるのに、植物の自然状態の移動距離は年間400～500メートルに過ぎない（西田 1997）。さらに、人間の活動により、生息地は分断化・孤立化しており、気候変動に応じた生物の移動は困難になってきている。また、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こともある(川道ら 2001)。

また温暖化によって、平均気温の上昇や気候の不安定化などの気候変動も引き起こされる。特に冬の気温は夏の気温よりも大きく上昇すると予想される(吉田 1998)。すなわち、冬季が短くなり、寒冷地が減少するということである。多くの植物は、野外で冬を経験することによって発芽し、春に発芽・生長を開始する。そのため地球温暖化から引き起こされる冬季の短縮や生育期の気温上昇は多くの植物種の存続に影響を与えると予想される。

## 外来植物の侵入

在来種 (native species) とは、もともと本来の生息地にある生物種のことを指し(川道ら 2001)、「(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)」をいう(村上ら 2002)。一方、外来種 (alien species) とは、過去あるいは現在の自然分布域外に導入(人為によって直接的・間接的に自然分布域外に移動させること)された種、亜種あるいはそれ以下の分類群を指し、生存し繁殖することができるあらゆる器官、配偶子、種子、卵、無性的繁殖を含むものをいう(村上ら 2002)。中でも、起源が国外で、日本の生態系への影響が大きいものを「国外侵略外来種」と呼ぶ。外来植物のほとんどが明治時代以降に人間によって導入されており、今日の研究や駆除の対象になっているのはこれらの種である(石川ら 2009)。また、「人力によって、意識的にせよ、無意識的にせよ、一つの植物が本来の生育地から、そのものが自生していない新しい地域にもたらされて、野生化して繁栄し、その植物の過去を知らなければその土地本来の自生種と一見区別がつかないようになっている状態」のものを帰化植物 (naturalized plants) という(小倉 1968)。

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もって、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こまれる場合である(石川ら 2009)。

第二次世界大戦後から高度経済成長時代を経て、日本に侵入した帰化植物の種数はそれ以前の時期に比べると著しく増加した。第二次世界大戦後には、平均すると1年間に約19種もの外来植物が新たに記録され(村中 2008)、種数はこれからも増加すると予想される。高度経済成長期には輸入物資に混入して港湾、工場などの周辺および人間の往来の激しい都市で定着・増加し、そこから帰化・雑草化する植物が増加した。それに加えて、1990年



代以降には、輸入園芸資材や鑑賞魚用水草からの帰化が増加しており、帰化植物の侵入経路はさらに多様化している（根本 2006）。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100種程度に過ぎなかったが、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』（日本生態学会・編 2002）には800種（石川ら 2009）、清水（2003）では1200種以上、村中（2008）では2237種としている。農地、市街地、人為的に改変された沿岸域など、在来の生物がすめない環境に適応している外来生物は、競争相手がなく、侵入・定着に成功しやすいと考えられる（鷲谷 2010）。

植物の生長に必要な資源は光や栄養塩類など共通する。したがって生育形が類似して同じような生態的地位（ニッチ）を占める外来植物が侵入すると空間、栄養塩類などの資源をめぐる競争で在来植物との競争が起こる。また、植生を覆い尽くすような植物も光環境をめぐる競争で在来植物の生育を阻害する（村中・石濱 2010）。たとえ在来の競争相手が存在しても、外来の生物は、「生態的に解放」されているため、在来種よりも有利である。つまり、病害生物や天敵などの影響を受けにくく、その分、在来の生物よりも生き残りやすい。そのため同じような環境の要求性をもつ在来種との競争に強い。また、資源の利用能力が在来種よりも高ければ、競争にはいっそう有利であり、在来種と置き換わる（鷲谷 2010）。このように、温暖化は外来種に有利に働き、結果として在来種を駆逐する可能性が高いと考えられる。

## 群馬県における外来植物の概況

### ・特定外来種

2008年に発行された「群馬県外来生物調査報告書（群馬県自然環境課発行）」によると、特定外来生物に指定された12種の植物のうち、ミズヒマワリ、アレチウリ、オオフサモ、オオカワヂシャ、オオハンゴウソウ、オオキンケイギク、ボタンウキクサの7種が群馬県内に自生していることが確認された。また、アメリカ大陸原産の浮遊生のシダ、アゾラ・クリスタータと思われるアカウキクサ（アゾラ）類の生育が確認された。これらの種は在来種の生長・生育を妨げる可能性がある（石川ら 2009）。

### ・要注意外来種

環境省が指定する要注意外来種のうち52種が、群馬県内に定着し、多くの種が蔓延と言わざるを得ない状況である。その中には、シナダレスズメガヤ、ハリエンジュ、コカナダモ、オオブタクサなど、在来植物や生態系に対する被害事例が多数報告され、特定外来種と同等の高い生態リスクを持つ種も含まれている（石川ら 2009）。

## ・ 県内危険外来種

群馬県では前記の指定外来種以外に、県内において生態系等に被害を及ぼす危険性の高い11種の植物を「県内危険外来種」として注意を喚起した。セリバヒエンソウ、ナガミヒナゲシ、外来アブラナ科、ショカツサイ、ニワウルシ、タカサゴユリは栽培個体群を起源として野外で分布を拡大している。ナヨクサフジは、緑肥として導入され河川敷などに密生個体群を形成している。また、ショカツサイは春に咲く美しい花が目的で播種されることが多く、しばしば大規模な密生個体群を形成している（石川ら 2009）。この2種については、本研究で対象としている。

## 外来種の法的規制と取り組み

1種の生物は生態系の中で多様な生物と関わり合う。したがって、1種の外来種が定着しただけで多岐に渡る影響がもたらされることも少なくない。

日本では、人の健康被害に関わる種や経済的産業的被害が大きい種について、早くから対策法の整備が行われてきた。農業に有害な動植物種の輸入を禁止する「植物防疫法」、家畜への伝染病の発生予防および蔓延の阻止を目的とする「家畜伝染病防止法」などがある。しかし、これらの法制度は一部の外来種だけしか規制しておらず、生物多様性の保全とは無関係に規制が行われている（村上ら 2002）。

外来種のもたらす生物多様性への影響と対策については、1992年に採択された生物多様性条約第8条において、「生態系、生息地も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」とその基本的な方向性が組み込まれている。これを受け、2002年4月の第6回生物多様性条約締約国会議では、外来種対策として15の原則がまとめられた。指針原則には、外来種の侵入の予防が、侵入後の対策と比較して効果的であり優先すべきとしている。指針原則は法的拘束力のあるものではないが、各国がその指針に沿った取り組みを行うことを求めている（村上ら 2002）。

2005年6月、外来生物の侵入による生態系等への被害を防止することを目的とした「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」（略称：外来生物法）が施行され、生態系等に著しい被害をもたらすもの、もしくはその可能性の高いものを「特定外来生物」に指定し、輸入や利用を規制することが定められた。

この法律では、「特定外来生物」「要注意外来生物」「未判定外来生物」「種類名証明書の添付が必要な生物」といった区分が導入されている。また、この法律に指定される種は、生態系にとってより危険な海外起源の外来種である。

「特定外来生物」は生態系や人の身体・生命、農林水産業に被害を及ぼす、または及ぼす恐れがある可能性がある外来生物である。「要注意外来生物」は外来生物法による禁止や罰則規定の対象にならないが、取り扱いに注意が必要とされる外来生物のことである。

「未判定外来生物」は被害を及ぼす可能性を有した、もしくは実態が不明である外来生物のことである。「種類名証明書の添付が必要な生物」は海外からの持ち込みなどで種類名証明書が必要な、特定外来生物に似ている種である。

特定外来生物に指定された外来生物は輸入、国内での飼養、栽培、保管、運搬、譲渡などが禁止され、防除の対象となる。要注意外来生物、未判定外来生物に指定されたものは特に禁止規定や罰則はなく、特定外来生物の予備軍としての扱いである（池田 2006）。

また、日本生態学会（2002）では日本国内における外来生物の侵入や被害実態を整理するとともに、すでに侵入が確認されている外来生物リストを作成した。以来、国内における外来生物問題に関する認識が高まり、さまざまな方面での取り組みが進められている（村中 2010）。

## 植物の種子と休眠

種子のサイズは種の定着に大きな関わりがある。大きな種子は、多くの栄養分を蓄えているため、多種との競争に強く長期間にわたる苛酷な状況下で生存できる。また、大きな種子からの芽生えは、乾燥、庇蔭、同時に発生してくる相対的に小さな種子からの芽生えに抵抗して成長することが可能である。しかし、種子を生産するために、より多くの資源やエネルギーを必要とし、また発見するのがたやすいので、被食されやすいというデメリットもある（根本 2014）。

一方、小さな種子は、通例、大きな種子をつける個体よりも多くの種子を生産し、また、小さい種子は少ないエネルギーでつくることができる。小さな芽生えは大きくなる前に多くが死亡するが、雑草特有の途方もない数によってその損失を埋め合わせることができる（根本 2014）。

こうした植物の種子は、発芽に好適な環境条件に遭遇しても、全てがすぐに発芽するわけではない。種子がこのような生理状態にあることを休眠（seed dormancy）という。種子の休眠状態は、「一次休眠（内生休眠）」と「二次休眠（誘導休眠）」に区別される。一次休眠は、種子が成熟し、親個体から離れた時点ですでに休眠状態にある場合をいう（根本 2006）。シロザ・メヒシバ・ツユクサなどの落下直後の種子は一次休眠に入っていて晩秋に発芽することはないが、冬季の低温と湿潤条件に一定期間さらされると、休眠は覚醒され発芽する（根本 2014）。二次休眠は、いったん休眠状態から覚醒した種子が、発芽に好適な条件に遭遇しなかった場合に再び休眠状態に入ることをいう。また、本来の休眠ではないが、親個体から離れた種子が、単に発芽に好適な温度や水分などの条件に遭遇せず発芽できずにいる状態のことを「環境休眠」という（根本 2006）。種子は必ずしも発芽に適した条件を備えた場所に着陸するとは限らない。そこで、発芽もせず、かといって死ぬわけでもなく、時が流れるうちに休眠状態のまま地面に潜っていくという選択をする場合があ

る。このように、眠りながら地表面の下で待機している種子の集団のことを「土壌シードバンク」という（鷲谷 1996）。

また、種子が分散された季節から発芽に適した季節までの期間だけ、土壌中にシードバンクができる場合はそれを「季節的シードバンク」と言う。種子が生産されて分散する季節と種子が発芽して実生を出現させる季節は普通はずれているので、季節的な土壌シードバンクをつくらぬ植物は多くない。しかし、発芽に適した時期を過ぎても種子が土壌シードバンクに残っていることがあり、それを「永続的シードバンク」という。永続的なシードバンクを土壌中に維持するためには、種子は特別な休眠機構を持つだけでなく、長い寿命を持つ必要がある（鷲谷 1996）。

種子の休眠の程度は、種によって違うが、種子を休眠覚醒させる要因としては、高温湿潤や低温湿潤のほか、小粒あるいは微粒種子の場合は変温と光がある。人の目で見れば均質な土壌でも、微小な種子の目で見れば、そこは極めて不均質な環境であり、休眠覚醒のための最適温度や湿度、あるいは光条件にすべての埋土種子が同時に遭遇することはない（根本 2014）。また、土壌シードバンクで待機する種子があることで、地上の個体群が壊滅的な打撃を受けたとしても永続的なシードバンクがあれば、種子の形で多くの個体が生き残るので絶滅を免れることができる（鷲谷 2006）。このようにして、発芽後生育して種子生産ができない時期に発芽することを防ぎ、個体群が絶滅することを回避している。

## 植物の生育戦略

根本正之氏とミッチェリーは雑草生育型の機能に注目し、生育型戦略を以下の4つのタイプに分類している（根本 2010、2014）。

### ・陣地強化型戦術 (*position fortifying tactics*)

特定の土地に立体的に葉層を展開して、その土地を占拠し、他の植物が侵入してくるのを防いでいる。しかし、光に対する他の植物との競争に負け、種子を散布する前に枯死すれば、次世代の再生産が困難となる。ススキ、エゾノギシギシなどはいったん定着した場で草丈を高め、同時に葉面積を増大させて確実に定着し、他の植物を排除するこの戦術をとる。

### ・陣地拡大型戦術 (*position extending tactics*)

葉層を平面的に分散させてさまざまな立地条件の土地に進出し、行き当たった好適条件の土地での光合成によって生存している。はじめに定着した場所の葉層が枯死しても、他の地点に広がった茎から不定根が発生していれば、そこを中心に再度周辺に広がることも可能である。シバ・ヘビイチゴ・オオジシバリなどは匍匐茎によって占有空間を拡大するこの戦術をとる。

・使い分け戦術 (*unconstrained tactics*)

周辺の環境条件に呼応して陣地強化と陣地拡大の2つの戦術を使い分けるもの。周囲を他の植物に取り囲まれたときには陣地強化的な生育型を示し、きわめて小さい個体でしばしば生殖生長期にフェーズが転換し、花芽の分化がみられる。一方何もない裸地では多くの不定根を発生させ、著しく大きなジェネット（一对の配偶子から有性生殖によってつくられた個体）を形成する。メヒシバ・ツユクサなどがこの戦術をとる。

・陣地強化-拡大型戦術 (*position forify-extending tactics*)

立体的に葉層を展開していく一方、地下茎によって周囲に広がっていく戦術で、生態系に及ぼすインパクトは非常に大きい。セイダカアワダチソウ、ヨシなどがこの戦術をとる。

上記のような優占種の生育型と刈り取り、火入れなどの攪乱の頻度が微妙に影響し合って多様性は決まってくる（根本 2010）。

## 群落の光環境

野外では多くの場合、草地に見られるように植物は集団で生活しており、群落を形成している。植物の成長や生存は、葉での光合成 (photosynthesis) による物質 (有機物) 生産 (光合成ともよぶ) に強く依存する。光合成は光 (太陽光) をエネルギーとし、二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) と水から炭水化物と酸素を生じる化学反応である。日本のように概して湿潤な気候では、植物の光合成生産を最も強く制限する環境条件は光である (根本 2006)。

草本群落の中では光環境に勾配があり、一般に群落上層のほうが明るく、群落下層では暗くなる。そのため、ススキやギシギシ、セイタカアワダチソウなど背の高い植物は大きな地上部をつくり、できるだけ多くの葉をつけて光を獲得し、光合成生産を行おうとする。一方、シバやクローバーなどは大きな地上部をつくれないので光競争には弱い、背の低い植物では少しでも明るい場所に葉を配置するように葉柄や茎の長さや方向の調整が行われている (根本 2006)。

植物の場合には、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・繁栄を大きく支配する。そのため、競争力の大きい種が侵入すると、資源の独占による他種の排除が起こりやすい (村上ら 2002)。

例えば、明るい立地に見られるセイタカアワダチソウは、成長が速く、地下茎を伸ばして空間を占有する能力が極めて大きい。セイタカアワダチソウが群生する場からは絶滅危惧種のフジバカマなど、在来種がその姿を消している (村上ら 2002)。また、ショカツサイに覆われて日陰になると、相対光強度が春先の数ヶ月にわたって30%程度に低下し、在来

の春植物種の発芽と生育に悪影響を及ぼすおそれがある。ナヨクサフジのようなつる性の植物は、他の植物によじ登るため、在来種を日陰にしてその発芽・生育に悪影響を及ぼす可能性がある（石川ら 2009）。

## 生物多様性と生態系サービス

地球の全生態系が人間の活動により深刻な悪影響を受けている問題は、広く認識されるようになった。中でも生物多様性の喪失は、最も危急な問題の一つである。生物多様性は、私たちが古来より「自然の恵み」として甘受し、現在「生態系サービス」とも呼ばれている、さまざまな環境浄化、資源・食料生産、気候緩和などの生態系の諸機能の根源である（石川ら 2009）。

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）。

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。また、里地里山のように二次林、人工林、農地、ため池、草原などといったさまざまな生態系から構成されるモザイク状の景観をまとまりとしてとらえる必要がある（環境省 生物多様性国家戦略2012-2020）。

種の多様性とは、いろいろな動物・植物や菌類、細菌などが生息・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。加えて、わが国の生物相は他の地域には見られない固有種の比率が高いことが特徴だが、わが国の生物相の保全を考えていく際には、種数や個体数だけに着目するのではなく、種の固有性を保全していくことが重要といえる。

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。例えば、サクラソウのように地域によって遺伝子集団が異なるものも知られているが、これは遺伝子の多様性によるものである（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である。（環境省 生物多様性国家戦略2012-2020）。つまり、生物多様性の保全は、生態系の多様性、種の多様性、遺伝子の多様性の3つの異なるレベルでの保全が必要である（川道ら 2001）。

「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。生物種は、様々な無生物的な環境要素の影響を受ける一方で、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かかわり合う。生物間相互作用は生態系の中を網の目のように絡まり合いながら広がる。また、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、生物間の関係においては、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全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）。

生物多様性はそれ自体も価値を有しているが、多様な生物に支えられた生態系は人類に多大な利益をもたらしている。このことを「生態系サービス」という。ミレニアム生態系評価報告書は、生態系サービスを、食糧、木材、水などの資源を供給する「供給サービス」、気候緩和や自浄作用など環境を制御する「調整サービス」、精神的充足やレクリエーションの機会を与える「文化的サービス」、土壌形成や栄養循環、水循環など以上の3つのサービスを支える「基盤サービス」の4つに分類している。

地球温暖化を始めとする近年の人間活動の増大による環境問題は、こうした地球上の物質循環やエネルギーの流れのバランスを崩している（環境省 HP 2007）。

## 生物多様性の危機

地球は約46億年前に誕生し、長い時間をかけて数え切れない生命と、そのつながりによって地球の環境を形成してきた。その中で、さまざまな環境の変化が起こり、適応できなかった種は絶滅する一方、新たな環境に適応して多くの種が生まれ、現在の多様な生物とそのつながりをつくりあげてきた。その中で、現代は「第6の大量絶滅時代」と言われている。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雑滅速度が速く、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。

「生物多様性国家戦略2012-2020」によれば、日本の生物多様性が直面している問題として4つの危機をあげている。

第一の危機は、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である。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、河川の直線化・固定化やダムなど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。

第二の危機は、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である。里山里地の里山林、採草地などの二次草原は、以前は人の手が加えられることで、その環境に特有の多様な生物を育んできた。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ともない、里山里地では自然に対する働きかけが縮小し、生物多様性の危機が継続・拡大している。

第三の危機は、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こまれたものによる危機である。特に外来種は、野生生物の本来の移動能力を超えて、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、大きな脅威になっている。

第四の危機は、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等による地球規模の変化は、生物多様性に深刻な影響を与える可能性があり、その影響は完全には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にも大きな影響を及ぼすことが予測されている。

## 生長解析

植物は葉でつくった光合成産物を利用して、葉や茎、根を大きくし、また増やし、さらに光合成をして成長する。この過程を「物質再生産過程」と呼ぶ(黒岩 1990)。また、植物がどのくらいの資源を使ってどれくらいの葉や茎、根をつくり、どれくらい新たに光合成によって成長したかというように、植物がもつ炭素を通貨とした経済で表そうとする考え方を「炭素経済」とよぶ。例えば、葉をつくるために光合成産物を使うことは「投資(コスト)」であり、それによって得られる新たな光合成産物は「利益(ベネフィット)」である(根本 2006)。

このように植物の光合成(葉)を中心として考え、植物の成長量を解析する手法を「生長解析(growth analysis)」とよぶ。単位時間あたりの植物の成長量である「成長速度(growth rate)」は、個体バイオマス(植物のもつ有機物量のこと、乾燥重量で表す)あたりの葉面積(葉面積比 leaf area ratio:LAR)と全葉面積あたりのバイオマス増加量(=純光合成量、純同化率 net assimilation rate:NAR)の積として表される。この生長解析によって、植物の成長過程と環境条件との関係を知ることができる。また、同様な環境条件の下で生育した複数の植物種を対象に生長解析を行えば、生長過程の種間差を比較す



ることができる。このような実験方法は、日本の在来植物と帰化植物の成長力と分布拡大可能性の検討に有効である（根本 2006）。

## 先行研究の例

### ・ ショカツサイ

石川・今枝・中島（2007）は冬季一年生外来植物であるショカツサイの分布と光環境の関係をモデルケースとして研究している。調査時期は4～5月で、2002年、2003年の2年間行い、旧・前橋市内の生育地を探索した。その結果、2002年には56地点、2003年には50地点の生育を確認している。

いずれの年においても、光環境の測定を行った地点のうち半数以上の地点で相対光強度が60%以上であり、相対光強度が10%以下の地点はわずかに1～3地点しかなかった。これらのショカツサイの生育地点における相対光強度の最低値は6.3%であり、3%以下の地点はなかった。すなわち、ショカツサイは非常に明るい立地に多く分布し、相対光強度が10%以下の暗い立地にはあまり分布しないことが確認された。

また、相対光量子密度が100%、30%、9%、3%である4つの被陰区を設け、2ヶ月の人工被陰実験を行った結果、各被陰区におけるショカツサイの最終枯死率は3%区で最大（74.3%）となり、残りの3区では枯死率が45-54%と大きな差はなかった。つまり、3%という相対光量子密度がショカツサイの実生の枯死を引き起こす主要因の一つであることが強く示された。このことは、野外でのショカツサイの分布地のほとんどが相対光強度10%以上の光環境にあったことと整合する。つまり、ショカツサイは比較的明るい光環境条件下では多くの実生が生残するが、相対光強度が10%を下回る地点では、光不足により、実生の枯死率が高められる一つの重要な原因となって、分布が制限されるとしている。

柴宮（2008）、荒木（2011）の研究によると、ショカツサイは冷湿処理を施すとほとんど発芽しなくなる。すなわち、ショカツサイは種子が成熟した後には主に秋に発芽し、未発芽の種子は冬の低温にさらされると二次休眠が誘導されて、永続的シードバンクを形成するようになると考えられる。

荒木（2011）、桑原（2015）の研究によると、設定温度範囲（30/15℃、25/13℃、22/10℃、17/8℃、10/6℃）において、温度区が高いほど本種の最終発芽率は高くなり、30/15℃では約80%になった。また、気温に対する生長反応について、本種の相対生長速度（RGR,  $gg^{-1}day^{-1}$ ）は、10/8℃区で約0.04、15/13℃区で約0.07、25/23℃で約0.09と、高温区ほど高くなった（荒木 2011）。

ショカツサイは、県内危険外来種に指定されている状況であるため、本稿でも研究対象としている。

- ・ コセンダングサ

狩谷 (2004) の研究によると、設定温度範囲 (30/15°C、25/13°C、22/10°C、17/8°C、10/6°C) において、本種の最終発芽率は10/6°C以外の区間では70%以上となっている。温度が高ければ高いほど最終発芽率が高くなり、10/6°Cでは他の温度区と比べて最終発芽率が非常に低いことから、主に春に地温が17°C以上になってから発芽するとしている。また、冷湿処理期間中にも約99%が発芽したことから冷湿処理の必要がないとしている。

- ・ オミナエシ

バヤンサン (2013) の研究によると、本種は25/13°Cが最適な発芽温度であり、冷湿処理を施さない場合には最終発芽率が約40%、冷湿処理を施す場合には90%以上となった。福島 (2015) によると、冷湿処理を施さない場合、最終発芽率は30/15°C区では78%、25/13°C区では74.7%、22/10°C区では66%、17/8°C区では27.3%、10.6°C区では2%であった。冷湿処理を施すと最終発芽率が促進されたことから、本種は冬を経験することで発芽が促進され、主に夏に発芽すると考えられる。

また、異なる光条件下においてオミナエシの相対生長速度は、相対光量密度3%区では約0.014、9%区では約0.032、13%区では約0.046、100%区では約0.048と明るい区ほど高くなり、特に3%区では著しく低下した。すなわち、本種は裸地的な明るい場所ではよく生長するが、他の植物に被圧されたり林床のような場所では極端に生長が悪くなると考えられる。

- ・ タウコギ

赤上 (2011) の研究によると、1ヶ月の冷湿処理を施した種子においては、最終発芽率は、17/8°C~30/15°Cの広い温度区で約90%以上となり、10/6°C区では約15%で、気温の高い区ほど高い最終発芽率となった。

2ヶ月の冷湿処理を施した種子についても、最終発芽率は、17/8°C~30/15°C区の広い範囲で約93%以上になり、10/6°Cでは約8%で、気温の高い区域ほど最終発芽率も高くなった。したがって、冷湿処理1ヶ月と2ヶ月の処理の間に有意な差はないといえる。

また、異なる光条件下において本種の相対生長速度は、相対光量子密度3%区では約0.008、9%区では約0.059、13%区では約0.086、100%区では約0.118と明るい区ほど高くなった。すなわち、本種は裸地的な非常に明るい場所でよく生長するが、他の植物に被陰されると生長が悪くなり、林床のような暗い環境下では生長が著しく悪くなると考えられる。

## 研究の目的

これまでの40年にわたる国際共同研究と、IPCCの5次にわたる研究成果報告によって、世界規模の地球温暖化の危機の重大さが認識され、CO<sub>2</sub>放出量の削減による地球温暖化対策が

端緒について。しかし、IPCC第5次報告書第3作業部会報告書概要（2013）におけるシナリオによれば、2100年時点において、世界地上平均気温は1.5°Cから4.8°Cの範囲で進行すると予想されており、ある程度の温暖化は避けられないと考えられる。

温暖化が進行する中で、種は生存に適した場所へと移動を余儀なくされるが、植物が分布を広げるスピードははるかに遅い。そのため、気温上昇や気候の不安定化などの気候変動に対応できず、急速な生態系の破壊を引き起こしている。こうした自然環境の崩壊は、これまで人類が享受してきた自然の恵みである「生態系サービス」を損なうこととなり、人間生活や社会経済にも大きな影響を及ぼすことが予測されている。温暖化から引き起こされる悪影響を緩和するためには、野生植物種が温暖化から受ける諸影響とメカニズムを解明し知見を増やしていくことが必要である。

また、生物多様性の低下を防ぐには、温暖化による各々の種への直接影響や、資源の競合相手となる外来植物の発芽・生長を解明する必要がある。外来植物の多くは、資源をめぐる消費型競争によって在来植物を排除、生育を阻害する（村中ら 2010）。これまでに、日本に定着した外来植物はキク科が最も多く、次にイネ科、マメ科、アブラナ科で、これら4種で全外来植物の50%以上を占めている。外来植物の生活型別種構成は一、二年草が多く、全体の6割以上を占めている（宮脇 1994）。したがって、これらの属性を持つ外来植物種をモデル植物として研究を進めることは、非常に効率的であるといえる。

地球温暖化の進行にともない平均気温が上昇することで、冬が短くなることが予想され、植物の発芽・生長に影響を与えると考えられる。多くの植物は野外で冬を経験することによって発芽する。また、多くの植物は春が発芽・生長の開始時期であり、生育期間が長いほど、一年でより大きなサイズになる。このため、温暖化による冬季の短縮と生育期の気温上昇は、多くの植物の発芽・生長にプラスまたはマイナスの影響を及ぼし、ひいては植物種の存続に変化を引き起こす可能性がある。その結果として、在来植物種が衰退し外来植物種が繁茂したり、在来植物種の分布域が変化するという仮説が考えられる。

こうした仮説を検証するため、本研究では、以前より外来種の繁茂が指摘される群馬大学荒牧キャンパス構内、県内危険外来種ナヨクサフジが生育している群馬県前橋市関根町、県内絶滅危惧Ⅱ類に指定されているオミナエシの自生する県立榛名公園、近縁種であるオトコエシが自生する西榛名地域の計4つの地域においてそれぞれの植物の分布調査を行った。また、温暖化により冬季の短縮と生育期の気温上昇が起こるというシナリオをもとに、植物の発芽と生長がどのような直接影響を受けるかについて、数種類の生物学的に近縁な植物をモデル植物として発芽実験・生長解析を行った。生物学的に近縁で生態特性の異なる種間で温暖化に対する反応を比較することで、前述の仮説の検証が可能となる。そこで、平地性のアブラナ科2種（ナズナ：在来種、ショカツサイ：県内危険外来種）、キク科植物2種（タウコギ：在来種、コセンダングサ：外来種）、マメ科2種（カラスノエンドウ：

在来種、ナヨクサフジ：県内危険外来種）、および平地から中山間地に生育するオミナエシ科在来植物 2 種（オミナエシ：群馬県絶滅危惧Ⅱ類、オトコエシ：在来種）を研究対象とした。

なお、県立榛名公園および西榛名地域での植物の分布調査は、嶋方里佳氏、田村一志氏との共同研究である。また、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。

## 調査地概要

### 1. 群馬大学荒牧キャンパス

群馬県前橋市荒牧町に位置する面積約0.26km<sup>2</sup>のキャンパスである。本キャンパスは様々な環境立地があり、ハリエンジュ林、アカマツ林、クヌギ・コナラ・シラカシの混合林、耕地、耕作放棄地、日当たりのよい立地・悪い立地、草刈り頻度の高い・低い草原、踏みつけ圧の高い未舗装駐車場などが存在している。

本キャンパス内は、中央部のハリエンジュ林、早春に咲き乱れるショカツサイなど外来種の繁茂が著しいと指摘されている。中でも外来種であるショカツサイはキャンパス内の至るところで見受けられ、在来の春植物の生育に悪影響を与えていると思われる。

本研究では当キャンパスにおいて、在来種で春植物（冬季一年生植物）であるナズナ、ホトケノザ、カラスノエンドウ、およびこれらの植物種と競合している外来種ショカツサイの分布調査を行った。

### 2. 群馬県前橋市関根町郵便局付近

関根町は群馬県前橋市西部に位置しており、中心部を広瀬川が流れている。本研究で調査対象とした地域はこの広瀬川沿いの舗装された遊歩道両側に続く、幅の狭い緑地帯である。この緑地帯にはハナミズキがおよそ10mおきに植栽され、またほとんどの部分にサツキなどの低木が植栽されている。したがって他の植物種が生育できるスペースは限られているが、日当たりの良い立地が多く、一般に道端雑草と呼ばれるような草本植物種が散見される。

2000年以降群馬県内で生育が確認され、年々急増しているナヨクサフジが、2014年からこの緑地帯でも見られるようになったことから、本研究で分布調査を行うこととした。

### 3. 県立榛名公園

榛名山の外輪山で囲まれた山頂部一帯を占める自然公園で、指定面積は403ヘクタールである。榛名湖を中心に榛名富士、掃部ヶ岳、烏帽子ヶ岳、天目山などの諸峰を配した自然景観に恵まれ、四季を通して観光客で賑わっている（栗原 2009）。

榛名公園内には、榛名湖が埋め立てられてできた沼ノ原がある。沼ノ原は東に向かって緩い上り傾斜になっているため、榛名湖に近い西側の低地部分は湿原となり、東側のヤセオネ峠に近づくにつれ乾燥度が増して樹林が多くなっている。また、沼ノ原には「ユウスゲの道」と名付けられた散策道があり、5～10月まで、数多くの花を觀賞することができる（栗原 2009）。

この沼ノ原は、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、カントウマユミなどが侵入しカシワの中には高木にまで生長するものが見られた。しかし、2001年から2002年にかけての冬、榛名湖畔からヤセオネ峠までの沼ノ原の中央を通る道路の左右において、草原に生える木の大規模な伐採が行われた。これは県立公園の管理事業として、県の環境生活部自然環境課によって実施されたものである。内容は、レンゲツツジや中木から高木となったカシワなどの一部の木本を除いた木を切り倒す本格的なもので、前述の低木が大量に切り払われた。この伐採により、遷移が押し戻され、衰退傾向にあった沼ノ原の草原は再び広がることとなった（松澤ら 2003）。

沼ノ原のススキ草原のように二次的に成立した草原は、里山と同様に人為的な圧力がかからないと生存が困難である。そこで、この貴重な草原を維持するという観点から、この伐採は大きな意義を持つといえる（松澤ら 2003）。

福島（2015）は沼ノ原を中心とした植物相調査を行い、在来種67種の生育を確認した。ここでは、コウリンカ、オミナエシ、スズサイコ、キキョウ、ユウスゲ、ママコナ、ワレモコウなど多くの絶滅危惧種・希少種および里山の植物も確認され、植物種多様性の高い地域であることが明らかになった。大伐採がなされて以後、里山的管理が維持されていることから、遷移途中の植物種多様性が高い環境が成立していると考えられる（福島 2015）。

そこで本研究では、当地においてオミナエシの分布調査を行い、また、オミナエシの生育期間における気温の測定を行った。

#### 4. 西榛名地域

群馬県の榛名山麗西面と浅間隠山から東に延びる山稜の末端に位置し、南部は東吾妻町荻生と高崎市倉渕町権田の一部、北部は東吾妻町大戸に至る地域である。調査地域の海拔は450～800mで、ここに分布する森林の大部分は、コナラやアカマツなどの二次林かスギやカラマツの植林地である。土地利用様式は、ミョウガなどの野菜類の農耕地および薪炭林や農耕林として利用されてきた二次林が主で、これらが集落後背地に隣接して分布し、典型的な里山景観をなしている。2005～2006年の群馬県自然調査研究会の合同調査により、特に植物の種の多様性が非常に高いことが明らかにされている。植物相では、シダ植物と種子植物が計113科768種、雑種・変種以上の分類を含めると計813種類生息していることが確認された。この中には、国または県指定の絶滅危惧種（環境庁自然保護局野生生物課2000, 群馬県2001）および県レッドデータブック公表後に発見された希少種が30種含まれている（大森ら 2009）。これらの希少種の中には、当時の農耕特性に適応して繁殖していると推察されるものも数種ある。すなわち、ミョウガ畑に保温のために周辺の二次林・草地から

リターまたは植物体を集めて被せる、という農耕方法によって中規模攪乱が定期的に生じ、これにより数種の貴重種の繁栄が促進されている可能性がある（石川ら 2009）。

大林（2014）は、西榛名地域の植物相調査を行っており、在来種162種、うち17種の絶滅危惧種・希少種の生育が確認された。地域別に見ると、棚田や溜め池、休耕地が混在するCN・大谷の植物種多様性が最も高く、ナガミノツルキケマン・コマツカサススキなどの絶滅危惧種・希少種9種や、タウコギ・オトコエシなど外来種65種の生育を確認した。しかし、一方で外来植物の繁茂も多数見られ、今後、豊かな植物種多様性を維持するために外来植物種の防除・駆除が求められる（大林 2014）。

そこで本研究では、当地においてオトコエシの分布調査を行った。

## 材料及び方法

本研究では、温暖化による冬季の短縮と生育期の気温上昇は、多くの植物の発芽・生長にプラスまたはマイナスの影響を及ぼし、その結果として、在来植物種が衰退し外来植物種が繁茂したり、在来植物種の分布域が変化するという仮説を検証するため、生物学的に近縁で生態特性の異なる種間で温暖化に対する反応を比較することとした。そこで、平地性のアブラナ科2種（ナズナ：在来種、ショカツサイ：県内危険外来種）、キク科植物2種（タウコギ：在来種、コセンダングサ：外来種）、マメ科2種（カラスノエンドウ：在来種、ナヨクサフジ：県内危険外来種）、および平地から中山間地に生育するオミナエシ科在来植物2種（オミナエシ：群馬県絶滅危惧Ⅱ類、オトコエシ：在来種）を研究対象とした。

### 材料植物

#### アブラナ科

- ・ナズナ（アブラナ科冬季一年生草本、*Capsella bursa-pastoris*）：在来種

北半球の温帯に広く分布しており、日本へは古い時代に渡来した「史前帰化植物」と考えられている。日本全土の畑や田んぼなど人々の生活域にのみ生育し、大自然の中では見あたらない。冬の間ゆっくりと生長し、春になるといち早く花茎を伸ばすのが特徴である（菅原 1990）。

本研究では、群馬大学荒牧キャンパス内において分布調査のみを行った。

- ・ショカツサイ（アブラナ科冬季一年生草本、*Orychophragmus violaceus*）：県内危険外来種

中国原産で、シキンソウ・ハナダイコンなどの別名があり、日本では江戸時代より園芸用として栽培されている。各地での逸出が目につくようになったのは第二次世界大戦後のことで、これは1939年に南京紫金山から持ち込んだ種子を増やして頒布したことに端を発するとされている（長田 1976）。

本研究では、2014年6月14日に群馬大学荒牧キャンパス内で採取し冷蔵（4℃）で保存した種子を材料として用いた。

#### キク科

- 2. タウコギ（キク科一年生草本、*Bidens tripartite* L.）：在来種

温帯から熱帯に生育し、日本全土のほか、広くアジア・ヨーロッパ・北アフリカ・オーストラリアにも分布する。日本では全国に分布し、水田の畦や湿地に見られる。昔は水田



雑草としていたるところでみられたが、外来種との競合や除草剤などの影響で生育場所が著しく減少している（緑の国政調査 1996）。

本研究では、2008年10月23日に西榛名休耕地で採取し冷蔵（4℃）で保存後2013年からは-80℃で冷凍保存した種子を材料として用いた。

・コセンダングサ（キク科一年生草本、*Bidens pilosa* L.）：要注意外来種

熱帯アメリカ原産で世界的に暖帯から熱帯に分布する農耕地雑草である（清水ら 2001）。日本では宮城県・山形県以南、九州、沖縄に分布。道ばたや山野に生えるキク科の一年草で、戦前から知られている帰化植物である。本州では、分布に偏りがあり、太平洋側に多く日本海側にはほとんど見られない。分布地ではきわめて密度が高く、分布域は今まで知られていたよりも北方に広がっていることも明らかになった（緑の国勢調査 1996）。

本研究では、2012年11月29日に群馬大学キャンパス内で採取し冷蔵（4℃）で保存した種子を材料として用いた。

マメ科

・カラスノエンドウ（マメ科多年生草本、*Vicia angustifolia* L.）：在来種

本種は日本の在来種であり、各地の日当たりのよい所に生える越年草である（牧野 2000）。

本研究では、2015年5月12日に群馬大学荒牧キャンパス構内において採取された種子を材料として用いた。

・ナヨクサフジ（マメ科一年生草本、*Vicia dasycarpa* Tenore）：県内危険外来種

ヨーロッパ原産で飼料や緑肥として栽培され野生化した。日本には、1943年に天草島での帰化が報告され、現在では本州から沖縄にかけて道端や河川敷にみられる（清水ら 2001）。

群馬県内では2000年ごろから生育が確認され始め、2005年以降確認件数が急増している。開花時期は5～6月で、開花の最盛期には他の植物を一面に覆って、全面が紫色になるほど多くの花を咲かせる巨大個体群に生長することもある。つる性で他の植物によじ登るため、日本に昔から分布している在来植物を日陰にして、その発芽と生育に悪影響を与えるおそれがある（石川ら 2009）。

本研究では、2014年6月11日に群馬県前橋市関根町で採取し冷蔵（4℃）で保存した種子を材料として用いた。

オミナエシ科

・オミナエシ（オミナエシ科多年生草本、*Patrinia scabiosaefolia*）在来種、県内絶滅危惧Ⅱ類

日本（北海道から九州）・朝鮮・中国・シベリア東部に分布する多年生草本。万葉時代から秋の七草の1つとして有名である（佐竹ら 1981）。

本研究では、2010年10月24日に榛名公園沼の原で採取し冷蔵（4℃）で保存後2013年からは-80℃で冷凍保存した種子を材料として用いた。

・オトコエシ（オミナエシ科多年生草本、*Patrinia villosa*）：在来種

日本（北海道から奄美）・朝鮮・中国に分布する多年生草本。匂いが腐った豆醬に似ているので中国では敗醬の名がある（佐竹ら 1981）。同じ科で県内絶滅危惧Ⅱ類であるオミナエシとの生態学的違いを明らかにするために用いた。

本研究では、2012年11月15日に西榛名地域で採取された種子を材料として用いた。

## シソ科

・ホトケノザ（シソ科一～二年生草本、*Lamium amplexicaule*）：在来種

アジア、ヨーロッパ、北アフリカに広く分布し、畑のあぜや道ばたに普通に見られる1～2年生の小形の草である。開花時期は4～5月頃で上部の葉のわきに紅紫色の小さい唇形花を数個密に輪生する（牧野 2000）。

本研究では、群馬大学荒牧キャンパス内において分布調査のみを行った。

## 対象植物の分布調査

調査者が徒歩で対象地域内を調査し、目視で生育を確認した場合、ポータブルGPS（GARMIN GPSmap62SCJ）または、スマートフォン（iPhone5s）のGPS機能を用いて内蔵カメラで撮影することにより生育位置を記録した。群馬大学荒牧キャンパス構内、関根町郵便局付近および西榛名地域ではiPhone5sを、県立榛名公園ではポータブルGPSとiPhone5sの両方を使用した。

iPhone5sを用いた写真撮影の際には、写り込む範囲の誤差を少なくするために、対象から約1m離れた場所から撮影をした。撮影した写真をGarmin Base Campに取り込むことによってジオタグ情報を読み込み、これらを用いて各植物の分布図を作成した。各調査のスケジュールを表1に示す。

### 1. 群馬大学荒牧キャンパス構内

外来植物の繁茂が指摘される群馬大学荒牧キャンパス内において、植物相調査を行った。調査対象とした植物は開花中のナズナ、ホトケノザ、カラスノエンドウ、ショカツサイの4種とした。開花時期は植物種によって異なることや、その数の多さから、調査日は2015年3月24日、26日、31日、4月12日の4日に分けて行った。

## 2. 群馬県前橋市関根町郵便局付近

県内危険外来種であるナヨクサフジが生育している前橋市関根町郵便局付近において、植物相調査を行った。調査日は2015年5月13日で、開花した個体を対象とし撮影した。

## 3. 県立榛名公園

県内絶滅危惧Ⅱ類に指定されているオミナエシが自生している県立榛名公園において植物相調査を行った。調査日は2015年7月31日、8月20日、9月28日で開花した個体を対象として撮影した。

## 4. 西榛名地域

オトコエシが自生する西榛名地域において植物相調査を行った。西榛名地域の調査日は2015年9月5日で、開花した個体を対象とし撮影した。

### 種子発芽の冷湿処理・培養温度依存性

シヨカツサイ、コセンダングサ、タウコギ、ナヨクサフジ、カラスノエンドウ、オミナエシ、オトコエシの種子を用いた。各種の種子の採取日時・場所、前処理（冷湿処理）条件、実験スケジュール、培養日数を表2に示す。

前処理である冷湿処理は、一般に種子に冬を経験させることで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認められている。本研究では、オトコエシとタウコギの種子について、4°Cの薬用保冷庫（MEDICOOL MPR-504（H），SANYO）に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。

本研究で用いたカラスノエンドウの種子は、当初の発芽実験開始後2週間が経過しても発芽しなかった。種子は皮が厚く不透水性であるために発芽が抑制されたと考えられたため、種子に硫酸処理を施して種皮を溶かした。ビーカーの中にカラスノエンドウの種子約750個と硫酸を入れ、60分間室温で放置した。その後、硫酸を除いてから1時間ほど水道水で洗浄し、さらに蒸留水で種子を洗浄した後に発芽実験に用いた。また、実験開始時にはカビ防止のため防カビ剤（ベンレート水和剤 住友化学園芸）を数滴注いだ。

石英砂を敷いた直径9mm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、温度勾配型恒温器（TG-100-ADCT, NK system）にシャーレを入れて培養した。温度勾配型恒温器内の温度は、30/15°C、25/13°C、22/10°C、17/8°C、10/6°C（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（オミナエシは6シャーレ）を培養した。

実験開始後一ヶ月は毎日、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。新たな発芽が3日以上にわたって見られなくなるまで培養を続けた。そして、最終的な積算発芽数を最終発芽率とした。

## 異なる環境下における栽培実験

### 実験用植物の育苗とサンプリング方法

ショカツサイ、タウコギ、コセンダングサ、カラスノエンドウ、ナヨクサフジ、オミナエシ、オトコエシを用いた。コセンダングサとショカツサイ以外の5種は発芽実験で発芽した実生を用いて実験した。コセンダングサとショカツサイは発芽実験由来の実生がうまく育たなかったため、黒土を入れた鉢に約100〜150個の種子を直播きして発芽させ、実生を得た。

カラスノエンドウとオトコエシは発芽実験で発芽した実生を、ゴールドンピートバン（サカタのタネ）に移植し栽培した。ナヨクサフジは発芽実験で発芽した実生を、ピートモスを入れた分画ポット（1分画がおよそ30mL）に植え替え栽培した。タウコギ、オミナエシは発芽した種子をまず寒天培地（1.5%寒天+ハイポネックス1000倍溶液をプラスチックシャーレに入れたもの）に移植し、3〜5週間生長させてからゴールドンピートバンに移植した。各種をグロースキャビネット（MLR-350T, SANYO, LED球を用いて14L/10Dの日長で昼の相対光量密度を約380〜400  $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ とし、室温25/20°Cに調節した）内で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、黒土を入れたプラスチック製苗ポット（約95mL容量）に1個体ずつ移植した。ショカツサイについては植えかえに弱いため、根に負担をかけないよう、1個体ずつではなく複数の個体をまとめてプラスチック製苗ポットに移植した。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。

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148cm<sup>2</sup>あたり2063162ドットとした。

### 1. 気温を調節した栽培実験

ショカツサイ、コセンダングサ、タウコギ、ナヨクサフジ、カラスノエンドウ、オミナエシ、オトコエシについて行った。ショカツサイ以外の植物は、群馬大学荒牧キャンパス内にガラス温室（サイズはおよそ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2℃上昇するように調節した区（+2℃区）および+0℃区としては、次項に記す光強度を調節した栽培実験の際の100%区内にポット植え苗を入れて栽培した。ショカツサイについては、グロースキャビネット（MLR-350T, SANYO、内部にLED白熱電球を増設して昼間の相対光量子密度を約380-400  $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ に調節した）の温度条件を30/15℃、25/20℃および15/10℃（昼/夜）に設定し、これらの中で栽培した。栽培期間中は1～2日おきに水道水を与えた。

## 2. 光強度を調節した栽培実験

コセンダングサ、タウコギ、ナヨクサフジ、カラスノエンドウ、オミナエシ、オトコエシについて行った。寒冷紗を用いて相対光量子密度を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ポット植え苗を入れて栽培した。栽培期間中は1～2日おきに水道水を与えた。

以上の栽培実験を2～4週間行った後、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3に示す。

## 生長解析

生長解析の各パラメーターは、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（ $\text{m}^2$ ）

LA2 : T2 における個体の葉面積 (m<sup>2</sup>)

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。

$$\text{LAR} = (\text{LA1}/\text{TW1} + \text{LA2}/\text{TW2}) / 2$$

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 (m<sup>2</sup>)

LA2 : T2 における個体の葉面積 (m<sup>2</sup>)

- 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 (m<sup>2</sup>)

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総乾燥重量 (g)

- 茎重比 : (SWR : Stem Weight Ratio)

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

LW : 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)

$$\text{RWR} = \text{RW}/\text{TW}$$

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総乾燥重量 (g)

それぞれのパラメーターには、以下のような関係がある。

$$RGR=NAR \cdot LAR$$

$$LAR=SLA \cdot LWR$$

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

### 県立榛名公園および群馬大学荒牧キャンパスの気温測定

オミナエシの自生地である県立榛名公園・沼ノ原、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、対象植物の生育期間における気温を測定した。温度データロガー（沼ノ原は Center340, CENTER、大学構内は 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。測定期間は、榛名公園が 2015 年 6 月 29 日から 10 月 14 日、大学構内は 5 月 23 日から 9 月 30 日であった。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。

## 結果および考察

### 植物分布調査

#### 1. 群馬大学荒牧キャンパス内における春植物の分布

2015年3月24日から2015年4月12日の間にナズナ、ホトケノザ、カラスノエンドウ、ショカツサイの分布調査を行った。その結果生育が確認された地点数は、ナズナ167地点、ホトケノザ417地点、カラスノエンドウ124地点、ショカツサイ266地点であった(図1、図2、図3、図4)。桑原(2015)は群馬大学荒牧キャンパス構内のショカツサイについて同様の植物相調査を行っており、その際の生育確認地点数は207地点であった。

これらの植物の生育が確認できたのは、主に日当たりのよい草原や、落葉樹の下部など冬から春にかけては日当たりのよい立地であった。また、ナズナとホトケノザは混在していた地点が多く、ショカツサイは純群落を形成しているものがほとんどだった(写真1、写真2、写真3、写真4)。この在来種2種の生育地点では、ショカツサイが同所的に繁茂していることが多数あり、ショカツサイの繁茂によってこれらの在来種が被圧され衰退し、キャンパス内における植物種の生物多様性の低下が起こっているのではないかと推察される。またカラスノエンドウの生育地点は、上記在来種2種ともショカツサイとも重なっていないものがほとんどであった。これは本種が被陰に弱く、すでに他種との競争によって多くの地点から排除されている可能性を示唆していると考えられる。

大学構内では頻繁に草刈りが行われているが、それにもかかわらず県内危険外来種であるショカツサイが繁茂している。これは、ショカツサイの種子が土壌シードバンクを形成し、地上部を刈り取られたとしても、翌年以降、土壌シードバンクから発芽を開始し群落を形成するためと考えられる。

本種は重力散布型で種子が親の直下に撒かれるため、高密度個体群を形成しやすい。ショカツサイが群落を形成している状況下では、春先の数ヶ月にわたり相対光強度が約30%に低下し(石川2009)、ショカツサイと同様の早春に開花を始める春植物の生長を大きく妨げる可能性がある。現在、在来種であるナズナ、ホトケノザ、カラスノエンドウはそれぞれ167地点、417地点、124地点確認されているが、ショカツサイの生育範囲がさらに拡大することにより、在来種の生長を阻害し、駆逐する危険性がある。キャンパス内の生物多様性の低下を防ぐためにも、今後も植物相調査を継続する必要がある。

#### 2. 群馬県前橋市関根町郵便局付近におけるナヨクサフジの分布

2015年5月13日に行った調査では、ナヨクサフジの生育が確認できた地点数は、31地点であった。iPhone5sで記録した位置情報を基に作成した分布マップを図5に示す。確認され



た個体の多くは、他の植物や地面を覆うようにして繁茂していた（写真5、6）。関根町郵便局付近は日当たりのよい立地が多く、また歩道や道路などで植物の生育できる土壤環境が植樹帯に限られていることから、ナヨクサフジが繁茂すれば、在来植物種を駆逐する可能性は高くなると考えられる。ナヨクサフジは2005年ごろから群馬県内で増え始めた比較的新しい種であり、生態をより詳しく解明するために引き続き調査を行う必要がある。

### 3. 県立榛名公園におけるオミナエシの分布

2015年7月31日、8月21日、9月28日に行った調査でオミナエシの生育が確認できた地点数は、計259地点であった。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を図6、iPhone5sによる分布マップを図7に示す。iPhone5s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。

本種の生育がみられた場所の多くは、日当たりのよい立地であり、他の植物によって日陰となっているところではあまり見られなかった（写真7）。

オミナエシの最適発芽温度が25/13℃（バヤンサン 2013）であることから、比較的気温の高い場所が生育適地だと考えられるが、実際は榛名山（県立榛名公園）のように、比較的低温な環境に生育している場合もある。これは、もともと本種は標高の低い場所から高い場所まで、非常に広い範囲に分布していたが、標高が低く気温の比較的高い場所、すなわち生育適地から順に、伐採などの人間活動によって数が減少してしまったため、現在の状態になったと考えられる。つまり、現在、榛名公園に生育している個体は生育適地ではなく、偶然生き残った個体であると考えられる。本種は高温でも生長が可能であり、温暖化によって榛名公園内の気温が上昇すれば、オミナエシにとっては生育適地となる可能性もある。しかし、気温上昇によって他の植物の発芽や生長がより強く促進されるとしたら、これらの植物に被陰されることで、本種の生長が妨げられる可能性もある。今後も、榛名公園のオミナエシの動態とともに、気温など生育環境要因も長期的にモニタリングする必要がある。

### 4. 西榛名地域におけるオトコエシの分布

2015年9月5日で行った調査の結果、オトコエシの生育が確認された地点数は47地点であった（図8）。また、そのほとんどの個体が他の植物によって日陰となっている場所であった（写真8）。

県立榛名公園ではオミナエシの生育は日当たりのよい立地に見られたのに対し、オトコエシは日陰となる立地で見られるという、近縁種である2種の生態的差異が明らかになった。

当地において、道路に近い生育地では人為的に草木が伐採されている部分もあり、これが進められると個体数の減少や、光環境の変化によって生育に悪影響が出る恐れがある。

また、温暖化の進行に伴い、それまでオトコエシに日陰を提供し、生育適地をつくっていた植物種が高温により十分に生育できなくなると、本種が直接日にさらされることになり、生長に影響を及ぼす可能性がある。今後も、西榛名地域のオトコエシの動態とともに、気温など生育環境要因も長期的にモニタリングする必要がある。

## 種子発芽の冷湿処理・温度依存性

### アブラナ科

#### 1. ショカツサイ

冷湿処理を施さない種子では、最終発芽率は温度の高い区ほど高くなった。最終発芽率は、30/15℃で約90%、25/13℃で約84.7%、22/10℃で約58%、17/8℃で約16%、10/6℃で約4%が発芽した（表4、図9）。

桑原（2015）はショカツサイの発芽実験を行い、冷湿処理を行わない種子について、温度の高い区ほど最終発芽率が高くなるという同様の結果を示している。これは、温暖化が進行すると外来種であるショカツサイの発芽が促進され、在来植物の発芽・生長に影響を与えることを示している。

荒木（2011）は、ショカツサイについて冷湿処理が発芽に与える影響についての実験を行っており、ショカツサイの種子が冷湿処理によって著しく発芽率が低くなることを示している。これは、種子が吸水した後に一定期間の低温にあうと、2次休眠が誘導されるためと考えられている。

群馬大学荒牧キャンパス内においても、多くの地点でショカツサイが繁茂していることが確認された。大学内では頻りに草刈りが行われているにもかかわらず本種が繁茂しているのは、種子の一部が、吸水後に発芽せず低温にさらされることによって、土壌シードバンクを形成するためと考えられる。

以上の結果より、ショカツサイは温暖化により気温が上昇すると発芽が促進され、また未発芽のまま低温にさらされる機会が減ることから、さらに多くの種子が生産当年に発芽するようになることが示唆される。また生産当年に発芽する種子が増えれば、逆に土壌シードバンクは形成しにくくなることも推察される。

また、在来植物への影響について、本種と同所的に分布・生育する春植物ナズナの発芽実験結果は、荒木（2011）を参照されたい。荒木（2011）の行ったナズナの発芽実験では、冷湿処理を施さない種子の最終発芽率は、10/6℃区と17/8℃区で0%、22/10℃区では約16%、これより高い温度区では約35～39%であった。また、1ヶ月の冷湿処理を施すと発芽率が著しく低下し、30/15℃区での最終発芽率は約9.3%であった。このことから、ナズナはショカツサイと同様、主に夏季に発芽すると考えられる。

発芽速度では、25/13℃～30/15℃区において、ナズナは10日で発芽率40%未満であった。一方、ショカツサイでは同じ日数で発芽率80%に達している。このことから、ナズナと競合するショカツサイは、より速い時期に発芽・純群落を形成し、ナズナの発芽を妨げると推察される。つまり、温暖化の進行により、ショカツサイの発芽が促進されることで、ナズナの絶滅の危機は相対的に高まると考えられる。

## キク科

### 2. タウコギ

2ヶ月の冷湿処理を施した種子は、17/8℃以上の4つの温度区で最終発芽率が90%を越え、10/6℃区でも約75%の最終発芽率となった(表5, 図10)。冷湿処理を施さない種子(25/13℃)でも最終発芽率は約93%となった(表5, 図11)。

冷湿処理の有無で最終発芽率自体には有意な差異は見られなかったが、そこに達するまでの日数に違いが見られた。すなわち、25/13℃区において、冷湿処理を施さない種子は発芽率90%に達するまでに約50日を要しているのに対して、冷湿処理を施した種子は約10日で発芽率90%に達した。

赤上(2011)は、本種の種子を、2ヶ月間と1ヶ月間の冷湿処理を施して発芽実験を行っている。2ヶ月間の冷湿処理を施した実験については、17/8℃区以上の温度区において、最終発芽率は90%を越えており、今回の実験と同様の結果となった。また、1ヶ月間の冷湿処理を施した種子においても、17/8℃区以上の4つの温度区において最終発芽率は90%を越えており、冷湿処理期間の違いに有意な差は見られなかった。つまり、発芽促進には1ヶ月以上の冷湿処理が必要と考えられる。

以上のことから、タウコギは1ヶ月以上の冬季を経験することでその発芽率・発芽速度が促進されるといえる。これによって本種は種子成熟直後の秋に発芽することを回避し、冬を越えた後に発芽することによって、実生の生存率をより高めていると考えられる。

本種は毎年耕起される水田とその周辺に生育するため、水田耕起によって明るく高温になる場所が形成されることにより、その発芽が促されると推察される。また、稲などの農作物の生長によって光環境が奪われる前に、水田が水に満たされたら一斉に発芽し生長を開始する戦略をとっていると考えられる。

冬を経験して早春に発芽・生長することから、温暖化により冬季の短縮や生育期の気温上昇が発生すると、タウコギは発芽を阻害され種の存続に大きな悪影響が及ぼされる可能性があるといえる。

### 4. コセンダングサ

群馬大学荒牧キャンパス内において、2014年11月29日に採取した種子を用いて実験を行った。本種は、狩谷（2004）より、冷湿処理期間中にも約99%が発芽し、冷湿処理の必要がないことが示されているため、冷湿処理を施さない種子を用いて実験を行った。

冷湿処理を施さない種子は、22/10℃以上の3つの温度区において最終発芽率が90%を越えたが、17/8℃では12.7%、10/6℃では2.7%と低温区では最終発芽率が著しく低下した（表5, 図12）。このことから、本種は野外では外気温が20℃を越える5～6月ごろに発芽を開始すると考えられる。

狩谷（2004）はアドバンテストビオトープ（群馬県明和町）で採取されたコセンダングサの種子を用いて発芽実験を行い、同様の結果を得ている。ただし、最終発芽率は17/8℃区でも94%、10/6℃区では約45%と低温区でも最終発芽率は比較的高かった。種子を採取した場所が異なることから、本研究結果との差異は、遺伝的な違いにより生じたものと推察される。

以上の結果から、本種は温暖化によって気温が上昇すると、その発芽が促進されることが示された。

## マメ科

### 4. カラスノエンドウ

本種の実験発芽率は、30/15℃区で78.7%、25/13℃区で99.3%、22/10℃、17/8℃、10/6℃の3区間で100%となり、温度の低い区間ほど高い最終発芽率となった（表6、図13）。

高い温度区で最終発芽率が低くなったのは、種子の腐敗によるものと考えられる。また、低温で高い発芽率を達成する性質は、野外では気温の低い冬季にも発芽できることを示し、他の植物が少ない時期にたくさんの光を受けてより早く生長できる、生存に有利な特徴であると考えられる。

今回用いた群馬大学荒牧キャンパス構内で採取された本種の種子は、種皮が厚く、そのままでは吸水しなかったことから、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。厚い種皮を持つ種子は、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いて吸水・発芽可能な状態になると考えられる。こうした性質は、生育地を拡大有利な特徴であると考えられる。ただし、コセンダングサのように地域的な差がある可能性があるため、他産地の種子とも比較する必要がある。

以上のことから、カラスノエンドウの種子は高温に弱く、温暖化によって気温が上昇すると、発芽が阻害されることが示された。

### 5. ナヨクサフジ

冷湿処理を施さないで発芽実験を行ったところ、すべての温度区において最終発芽率は約65%程度であった（表6、図14）。すなわち本種は、水分があれば一年中いつでも発芽可能であるといえる。

本種の最終発芽率自体は在来種であるカラスノエンドウよりも低かったが、一年中発芽可能であることから、その生育地をさらに拡大する可能性は十分に考えられる。また、すべての温度区において、10～20日という短い日数で最終発芽率に達していることから、本が他の植物に先立って発芽して、他の植物を被陰して発芽・生育を阻害する可能性があると考えられる。実際大森（2009）によれば、本種は開花最盛期には他の植物を一面に覆って、全面が紫色になるほど多くの花を咲かせる巨大個体群へと生長することもある。

以上より、本種は高温下でも発芽可能であったことから、温暖化による気温上昇による発芽への影響は少ないと考えられる。

## オミナエシ科

### 6. オミナエシ

バヤンサン（2013）や小関（2013）、福島（2015）の研究で、本種の発芽最適温度は25/13℃以上の高温であり、冷湿処理によってある程度発芽が促進されるとの結果がすでに得られている。しかし本研究で冷湿処理を行わずに最適発芽温度で発芽実験を行ったところ、最終発芽率は83.7%と高かった（表7、図15）。

小関（2013）の研究では、本種の冷湿処理を施していない種子の最終発芽率は約65%であり、冷湿処理を施した種子の最終発芽率は約88%と、本研究で冷湿処理を行わずに得られた値と同等であった。

以上の結果より、本種は冷湿処理によって発芽率が促進されるが、その効果は限定的または不定であるといえる。いずれにしても本種は25/13℃以上の高温条件でよく発芽しており、主に夏に発芽すると考えられる。

以上のことから、温暖化によって冬季の短縮が起こると、冷湿処理がかかりにくくなりことから本種の発芽が抑制される可能性はあるが、その影響は限定的または不定であり、春から夏に気温上昇が起これば、発芽は促進されることが示唆された。

### 7. オトコエシ

冷湿処理を施した種子の最終発芽率は、気温の低い温度区ほど高くなり、30/15℃区で35.3%、25/13℃区で38.7%、22/10℃で69.3%、17/8℃で81.3%、10/6℃で82.7%となった（図16）。また、冷湿処理を施していない種子の最終発芽率は、25/13℃区で56%となり、近縁種のオミナエシの値（83.7%）と比べて低い発芽率となった（表7、図17）。

冷湿処理の有無で最終発芽率を比べると冷湿処理を施さない種子のほうが高い発芽率(56.0%)となっており、冷湿処理により発芽が促進されるとは考えにくい。

オトコエシは西榛名地域のような標高の高い低温の地に生育していることが多く、また、他の植物の日陰となる場所で生育している。低温区での発芽率が高いことから、本種は秋季～冬季にかけて発芽することで、長い生育期間を確保することができ、より大きな個体サイズになることで生存率を高めていると推察できる。

以上より、温暖化による冬季の短縮と冷湿処理の本種の発芽過程への影響は少ないと推察される。

### 異なる温度・光条件における植物の生長解析

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圃場および温室内の気温を図18に示す。

#### アブラナ科

##### 1. ショカツサイ

##### 気温上昇に対する生長反応

本種の個体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0.011g(30/25℃区)～約0.034g(15/10℃区)となり、初期サンプリングよりも大きくなったのは最も低温である15/10℃区のみであった(表8)。

異なる温度条件下において、ショカツサイの相対生長速度(RGR,  $g g^{-1} day^{-1}$ )は、30/25℃区で約-0.026、25/20℃区で約-0.005、15/10℃区で0.014であり、温度が低い区ほど高くなった(表9、図19)。特に30/25℃区と25/20℃区の2区間では生長が著しく悪くなった。また、最も低温の条件であった15/10℃は他の区と比べると生長は良かったが、桑原(2015)の先行研究の結果(10-11月におけるRGRの平均は0.021)と比べると極めて低い値となった。

光合成活性を表す純同化率(NAR,  $g m^{-2} day^{-1}$ )は、30/25℃区で約-1.745、25/20℃区で約-0.343、15/10℃区で約1.048であり、温度条件の低い区ほど高い値となった。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区とも0.015で有意な差がなかった。

以上の結果からRGRが温度の低い区ほど高くなった原因は、NAR、すなわち光合成活性の増加であると考えられる。すなわち、本種は高温が続くことで呼吸量が増加し、結果的に生長が低下すると考えられる。

各個体の葉の厚みを葉面積/重量ベースで表すSLA ( $\text{m}^2\text{g}^{-1}$ ) は高温区ほど高くなった。器官別重量比のうち、葉の重量比は低温の区ほどやや高くなったので、結果として、LARは区間で有意な差がなかったものと考えられる。一方、根の重量比は高温の区ほど高くなった。これは、ショカツサイは温度が高くなると、根への光合成生産物の投資を大きくして、地中からの資源（水・栄養塩類）の獲得力を高めていると考えられる。

桑原（2015）は、ショカツサイの栽培実験を月別に行っているが、10～11月の低温の期間に栽培した個体が最も良い生長となった。このことから、ショカツサイは気温が $15^{\circ}\text{C}$ 以下になる秋季から冬季にかけて生長する典型的な春植物であると言える。

本種は暑さに弱く、夏の高温によって発芽が促進されたとしても、秋季・冬季と高温が続くことにより生長が阻害されることから、温暖化に弱い植物であると考えられる。つまり、冬季の短縮や生育期の気温上昇はショカツサイにとって生長抑制効果があると言える。

また、本種は種子が吸水した後に一定期間の低温に遭うと2次休眠が誘導され、土壌シードバンクが形成されると考えられる。すなわち、地上部を結実前に刈り取っても、翌年以降に、土壌シードバンクから個体が再生され、種子が生産されると推察される。また、温暖化の進行により、冬季の短縮や生育期の気温上昇によって種子が低温にさらされる期間が短くなることで土壌シードバンクを形成しないようになると推察される（桑原 2015）。

本種の日本国内の分布状況は津村（2001）によれば、26県で確認されており、関東から九州まで広い範囲に見られるが、積雪のある地域にはあまり見られない。しかし、温暖化によって降雪が減少すると、今までは積雪のために定着できなかった地域にも新たに分布域を広げ、在来植物種に悪影響を及ぼす可能性もある。今後は、 $15/10^{\circ}\text{C}$ よりも低温で冬季の栽培実験を行い、本種の生態的特徴を明らかにする必要がある。

## キク科

### 2. タウコギ

#### 気温上昇に対する生長反応

本種の栽培期間中（7月4日～7月18日）における昼間の外気温と温室（ $+2^{\circ}\text{C}$ 区）の気温差は約 $1.65^{\circ}\text{C}$ であった（昼間：外気温 約 $27^{\circ}\text{C}$ 、温室：約 $29^{\circ}\text{C}$ ）。

本種の個体乾燥重量は初期サンプリング時に約 $0.087\text{g}$ であったが、2週間後の最終サンプリングの際には、 $+0^{\circ}\text{C}$ 区（相対光量子密度100%区）で約 $0.188\text{g}$ となったのに対し、 $+2^{\circ}\text{C}$ 区のほうが約 $0.146\text{g}$ と低くなった（表10）。

相対生長速度（RGR,  $\text{gg}^{-1}\text{day}^{-1}$ ）は、 $+0^{\circ}\text{C}$ 区で約 $0.056$ であったが、 $+2^{\circ}\text{C}$ 区で約 $0.040$ と低くなった（表11、図20）。

光合成活性を表す純同化率 (NAR,  $\text{gm}^{-2}\text{day}^{-1}$ ) は、 $+0^{\circ}\text{C}$ 区で約5.224であったが、 $+2^{\circ}\text{C}$ 区で約2.144と低くなった。各個体の乾燥重量と葉面積の比率を表す葉面積比 (LAR,  $\text{m}^2\text{g}^{-1}$ ) は、 $+0^{\circ}\text{C}$ 区で約0.011であったが、 $+2^{\circ}\text{C}$ 区で約0.019と高くなった。

以上の結果から、本種のRGRが気温の高い区ほど低くなった原因は、光合成活性 (NAR) の低下であると考えられる。すなわち、高温によって本種の呼吸量呼吸量が増加したり光合成系が阻害されて光合成活性が低下し、結果的に生長速度が抑制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SLA ( $\text{m}^2\text{g}^{-1}$ ) は $+0^{\circ}\text{C}$ 区で約0.045であったが、 $+2^{\circ}\text{C}$ 区で約0.078と高くなった。器官別重量比のうち葉の重量は、 $+0^{\circ}\text{C}$ 区と比べて $+2^{\circ}\text{C}$ 区がやや高くなっているため、結果的にLARは $+2^{\circ}\text{C}$ 区で高くなったと考えられる。

以上より、本種は高温に弱く温暖化が進行し生育期間における気温上昇が起これば、生長阻害を受けると推察される。また前述のように、冬季の短縮は本種の発芽抑制も引き起こすため、温暖化の進行により絶滅のリスクは上がると考えられる。実際、タウコギが生育しているのは、日本では関東から東北であり、低温で降雪のある地域である (緑の国勢調査 1996)。温暖化が進行し、前述のような地域が減少するとタウコギの生育適地が失われる可能性がある。

#### 異なる光環境に対する生長反応

本種の個体乾燥重量は、初期サンプリング時に約0.087gであったが、2週間後の最終サンプリングの際には、約0.087g (3%区) ~約0.188g (100%区) となった (表10)。

相対成長速度 (RGR,  $\text{gg}^{-1}\text{day}^{-1}$ ) は、3%区では約0.002、9%区では約0.002、13%区では約0.009、100%区で約0.056となった (表11、図21)。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成長が悪くなると考えられる。これは、本種は主に水田に生育しているが、イネによって日陰となる水田の内部ではなく、日当たりのよい水田の縁の部分でよく見られることの理由の一つであると考えられる。

光合成活性を表す純同化率 (NAR,  $\text{gm}^{-2}\text{day}^{-1}$ ) は3%区では約0.064、9%区では約0.079、13%区では約0.429、100%区で約5.224となり、相対光量子密度が高くなるほど高くなり、特に100%区では著しく高くなった。

各個体の乾燥重量と葉面積の比率を表す葉面積比 (LAR,  $\text{m}^2\text{g}^{-1}$ ) は13%区以下の暗い条件では約0.019~0.023と有意な差はなかったが、100%区では0.011とこれより低くなった。

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、光合成活性 (NAR) の増加であると考えられる。

各個体の乾燥重量と葉面積の比率を表す葉面積比 (LAR,  $\text{m}^2\text{g}^{-1}$ ) は、13%区以下の暗い条件下では約0.082~0.094であったが、100%区では約0.045に下がった。器官別重量比のうち葉



の重量が100%区でやや下がっていることから、タウコギは少ない葉面積で高い光合成活性が可能であると考えられる。

以上より、タウコギは日当たりのよい立地ではよく生長するが、他の植物によって被陰されると、その生長が著しく悪くなると考えられる。そのため温暖化によって、タウコギよりも生長の早い植物が現われ本種が被陰される場合、生育を阻害される可能性が高くなるといえる。

### 3. コセンダングサ

#### 気温上昇に対する生長反応

本種の栽培期間中（2015年7月11日～8月21日）における昼間の外気温と温室（+2℃区）の気温差は約2.2℃であった（昼間：外気温 約30℃、温室 約32℃）。

本種の個体乾燥重量は初期サンプリング時に約0.016gであったが、約4週間後の最終サンプリングの際には、+0℃区では約0.087g、+2℃区で約0.069gであった（表10）。

相対生長速度（RGR,  $\text{gg}^{-1}\text{day}^{-1}$ ）は、+0℃区（相対光量子密度100%区）で約0.050、+2℃区で約0.055であり、有意な差はなかった（表11、図22）。

光合成活性を表す純同化率（NAR,  $\text{gm}^{-2}\text{day}^{-1}$ ）は、+0℃区で約4.010であったが、+2℃区では約3.379と低くなった。各個体の乾燥重量と葉面積の比率を表す葉面積比（LAR,  $\text{m}^2\text{g}^{-1}$ ）は+0℃区で約0.014であったが、+2℃区では約0.018と高くなった。

以上の結果から、本種は温暖化によって気温が高くなると、光合成活性（NAR）の減少を、LARを増加させることで補い、結果的にRGRの値は変化せず、生長にあまり影響は出ないと考えられる。

各個体の葉の厚みを葉面積/重量ベースで表すSLA ( $\text{m}^2\text{g}^{-1}$ ) は+0℃区で約0.028であったが、+2℃区では約0.043と高くなった。器官別重量比のうち葉の重量は+2℃区でやや増加していることから、結果的に+2℃区ではLARが高くなったと考えられる。このことから、本種は気温が高くなると光合成生産物を葉に投資して、より光資源の獲得力を大きくすると考えられる。

以上より本種は高温に強く、温暖化が進行しても生長速度にはほとんど影響はないと考えられる。また、日本では40都道府県に生育が確認されているが、太平洋側に集中しており、降雪のある東北地方や日本海側には生育が少ない、若しくは生育していないという特徴もある（緑の国勢調査1996）。つまり、温暖化により気候変動が伴い、冬季の短縮、低温・降雪地域の減少が起きた場合、本種は北へと生育地を広げる可能性が高い。同科のタウコギが温暖化に弱いことから、コセンダングサの生育範囲が拡大することにより、在来種であるタウコギを駆逐する可能性は高いといえる。

### 異なる光環境に対する生長反応

本種の個体乾燥重量は、初期サンプリング時に約0.016gであったが、約4週間後の最終サンプリングの際には、約0.020g (3%区) ~0.069g (100%区) となった (表10)。

相対成長速度 (RGR,  $\text{gg}^{-1}\text{day}^{-1}$ ) は、3%区では約0.002、9%区では約0.046、13%区では約0.053、100%区では約0.050となった (表11、図23)。すなわち本種は、相対光量子密度が9%以上の区であれば、生長が可能であると考えられる。

光合成活性を表す純同化率 (NAR,  $\text{gm}^{-2}\text{day}^{-1}$ ) は3%区では約0.226、9%区では約1.500、13%区では1.707、100%区では4.010で、相対光量子密度が高いほど高くなった。

各個体の乾燥重量と葉面積の比率を表す葉面積比 (LAR,  $\text{m}^2\text{g}^{-1}$ ) は13%区以下の暗い条件下では約0.024~0.031であったが、100%区では、約0.014と他の区よりも低い値となった。

以上の結果より、RGRが相対光量子密度9%以上の区で高くなったのは、NARとLARの増加が原因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SLA ( $\text{m}^2\text{g}^{-1}$ ) は、相対光量子密度の高い区ほど低い値となり、特に100%では著しく低くなった。器官別重量比の葉の重量をみると、9%、13%区では他の区に比べ葉の量が多くなっていることから、暗い環境下でも光合成生産物を葉に多く投資することで、競争力を高めていると考えられる。また、タウコギと同様に少ない葉面積で高い光合成活性が可能であると考えられる。

以上より、コセンダングサはある程度の耐陰性があり、相対光量子密度9%程度までの比較的暗い環境でも生育が可能であると考えられる。植物は光合成生産物を多く茎へ投資すると高くなり、投資が少ないと低くなる。コセンダングサは1~2mの高さとなるが、器官別重量比をみてみると、茎の比率は30%前後と少ない。これは茎の内部に空洞あり、少ない投資で背を高くする生存戦略であるからである。同科のタウコギも似たような生存戦略をとるが、その高さは0.5~1m程度であり、同条件下においてコセンダングサとの光競争はタウコギにとって不利に働くと考えられる。つまり、コセンダングサが繁茂することによって、タウコギはその生育を阻害されると考えられる。

本種は河川敷や水田といった湿った環境下を中心に、すでに広範囲に生育している。桑原 (2015) の行った群馬大学荒牧キャンパス構内 (利根川の河川敷である) の植物相調査 (秋調査) では、256地点で生育が確認されており、生育が確認された計105種のうち、最も多い生育地点数を持つ種であった。本種の種子は衣服や毛などに付着することで広範囲に分布を広げることができる。また、高い発芽能力から新たな地にも定着しやすく、繁殖力の高い植物であると言える。

前述のように、本種と同じ科で湿った環境に生育する在来種のタウコギは、温暖化によって発芽が阻害される。逆にコセンダングサは温暖化によって、タウコギを駆逐する可能性があると考えられる。また、低温下でも発芽が可能であった場合、一年中土壤に水分が

十分にあればいつでも発芽して生長を開始できるので、さらに外来種であるコセンダングサの生育拡大が懸念される。

マメ科

#### 4. カラスノエンドウ

##### 気温上昇に対する生長反応

本種の栽培期間中（2015年7月25日～8月21日）における昼間の外気温と温室（+2°C区）の気温差は約2.3°Cであった（昼間：外気温 約29°C、温室 約31°C）。

本種の個体乾燥重量は、初期サンプリング時に約0.030gであったが、約4週間後の最終サンプリングの際には、+0°C区で約0.052g、+2°C区で約0.046gであった（表10）。

相対生長速度（RGR,  $\text{gg}^{-1}\text{day}^{-1}$ ）は、+0°C区（相対光量子密度100%区）で約0.020であったが、+2°C区で約0.015と低くなった（表11、図24）。

光合成活性を表す純同化率（NAR,  $\text{gm}^{-2}\text{day}^{-1}$ ）は、+0°C区で約1.651であったが、+2°C区では約0.883と低くなった。各個体の乾燥重量と葉面積の比率を表す葉面積比（LAR,  $\text{m}^2\text{g}^{-1}$ ）は+0°C区で約0.016、+2°C区では約0.019と有意な差はなかった。

以上の結果より、本種のRGRが+2°C区で低下したのは、NAR、すなわち光合成活性の低下であると考えられる。すなわち、本種は高温によって本種の呼吸量呼吸量が増加したり光合成系が阻害されて光合成活性が低下し、結果的に生長速度が抑制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SLA ( $\text{m}^2\text{g}^{-1}$ ) は+0°C区で約0.036であったが、+2°C区で約0.062と高くなった。器官別重量比とみると、葉の重量比は有意な差がないことから、結果としてLARは+2°C区で高くなったものと考えられる。

以上より、本種は高温に弱く温暖化が進行し生育期間における気温上昇が起これば、生長阻害を受けると推察される。また前述のように、冬季の短縮は本種の発芽抑制も引き起こすため、温暖化の進行により絶滅のリスクは上がると考えられる。

##### 異なる光環境に対する生長反応

異なる光条件下において、カラスノエンドウは3%区、9%区、13%区の3つの区間において、栽培期間中にそのほとんどの個体が生育不良または枯死してしまった。相対生長速度（RGR,  $\text{gg}^{-1}\text{day}^{-1}$ ）は100%区においては0.020であった。

以上の結果から、本種は光依存性の非常に高い植物で、被陰されてしまうと生長が著しく悪くなる植物だと考えられる。実際、群馬大学荒牧キャンパス構内では、カラスノエンドウの生育地点は、ナズナ・ホトケノザともショカツサイとも重なっていないものがほとんどであった（図1、2、3、4）。本実験結果は、本種が被陰に弱く、すでに他種との競争によって多くの地点から排除されている可能性を強く支持するものと考えられる。

本種は秋から冬にかけて発芽・生長を開始するが、この時期には他の植物は枯れたり葉を落とすため、日当たりの良い立地が増えることになる。そこでは本種は十分に光を受けることができ、迅速に生長すると考えられる。前述のように、温暖化によって冬季から始まる本種の生育期間の気温が上昇することで、本種の生長は阻害されると考えられるため、外来種などの他の植物の生育期間が延びて生長が良くなるのであれば、それによって本種が被陰されて生育を阻害される危険性が高まる可能性があると考えられる。

## 5. ナヨクサフジ

### 気温上昇に対する生長反応

本種の栽培期間中（2015年5月29日～6月12日）における昼間の外気温と温室（+2℃区）の気温差は約2.5℃であった（昼間：外気温 約22℃、温室 約25℃）。

本種の個体乾燥重量は、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、+0℃区で約0.124g、+2℃区で約0.139gであった（表10）。

相対生長速度（RGR,  $\text{gg}^{-1}\text{day}^{-1}$ ）は、+0℃区（相対光量子密度100%区）で約0.043、+2℃区で約0.047となり、気温が上昇しても、RGRに有意な変化はみられなかった（表11、図25）。

光合成活性を表す純同化率（NAR,  $\text{gm}^{-2}\text{day}^{-1}$ ）は、+0℃区（相対光量子密度100%区）で約5.759、+2℃区では4.480であった。各個体の乾燥重量と葉面積の比率を表す葉面積比（LAR,  $\text{m}^2\text{g}^{-1}$ ）は+0℃区で0.009、+2℃区で0.011であった。

以上の結果より、RGR、NAR、LARに有意な変化が見られなかったことから、ナヨクサフジは温暖化が進行しても生長はあまり影響を受けないと考えられる。

各個体の葉の厚みを葉面積/重量ベースで表すSLA（ $\text{m}^2\text{g}^{-1}$ ）は+0℃区で約0.050、+2℃区で約0.076であった。器官別重量比のうち、葉の重量比は+2℃区でやや高くなっていることから、結果としてLARも有意ではないがやや高くなったと考えられる。なお、+0℃区において1個体開花したが、花重量は茎に加算した。

以上の結果より、ナヨクサフジは気温が上昇しても、生長にはあまり影響がないと推察される。同科在来種のカラスノエンドウが温暖化で生育が悪くなることから、温暖化進行下では外来種のナヨクサフジが優位に立つ可能性が高い。

### 異なる光環境に対する生長反応

本種の個体乾燥重量は、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0.058（3%区）～約0.124g（100%）であった（表10）。

相対成長速度（RGR,  $\text{gg}^{-1}\text{day}^{-1}$ ）は、3%区と9%区では共に生育不良となりRGRは0またはマイナスとなったが、13%区では約0.021、100%区では約0.043となった（表11、図26）。

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-1.330、9%区では約0.087、13%区では約2.055、100%区で約5.759と、明るい区間ほど値が高くなった。各個体の乾燥重量と葉面積の比率を表す葉面積比 (LAR,  $\text{m}^2\text{g}^{-1}$ ) は3%区~100%区の間で0.009~0.013で有意な差はなかった。

以上より、RGRが相対光量子密度9%以下の区で0以下となったのは、NARが低下したためと考えられる。すなわち本種は、相対光量子密度9%以下の光環境に置いては光合成を行うことができずに、生長不良となり枯死にも至ると考えられる。

各個体の葉の厚みを葉面積/重量ベースで表すSLA ( $\text{m}^2\text{g}^{-1}$ ) は100%区では約0.028であったが、3%区~13%区で約0.082~0.087と著しく高くなった。暗い光環境下でSLAが増大するのは陸上植物では一般的に見られる適応的現象であるが、本種はそれでも9%以下の極端に暗い光環境下では生育が困難になった。

以上の結果から、本種も光依存性が高く、相対光量子密度9%以下の環境では生育は困難であると言える。しかし、在来種であるカラスノエンドウが13%区で生育できていないのに対し、ナヨクサフジは生育可能であることから、カラスノエンドウよりも光をめぐる競争に長けた植物であると考えられる。

在来種であるナヨクサフジは+2°C区 (本研究では25°C) でも生育ができ、在来種であるカラスノエンドウよりも暗い光環境下での生育が可能であることが示された。またナヨクサフジはつる性で他の植物によじ登って生長するため、他の植物を被陰することが多い。カラスノエンドウとナヨクサフジの生育地は共通している場合が多く、発芽・生長の時期が重なった場合にはナヨクサフジがいち早くつるを伸ばし、カラスノエンドウを被陰すると思われる。そのため、温暖化の進行下でこのマメ科2種が競合した場合、ナヨクサフジが優位に立つと考えられる。今後は、25°C以外の温度条件でも両種の栽培実験を行い、さらに広範囲の温度条件下での競争関係を解明する必要がある。

## オミナエシ科

### 6. オミナエシ

#### 気温上昇に対する生長反応

本種の栽培期間中 (2015年8月18日~9月11日) における昼間の外気温と温室 (+2°C区) の気温差は約1.7°Cであった (昼間: 外気温 約24°C、温室 約26°C)。

本種の個体乾燥重量は、初期サンプリング時に約0.080gであったが、3週間後の最終サンプリングの際には、+0°C区では約0.107g、+2°C区で約0.135gであった (表10)。

相対生長速度 (RGR,  $\text{gg}^{-1}\text{day}^{-1}$ ) は、+0°C区 (相対光量子密度100%区) で約0.023、+2°C区で約0.027となり、有意な差はなかった (表11、図27)。

光合成活性を表す純同化率 (NAR,  $\text{gm}^{-2}\text{day}^{-1}$ ) は、 $+0^{\circ}\text{C}$ 区 (相対光量子密度100%区) で約1.303、 $+2^{\circ}\text{C}$ 区では1.236となり、有意な差はなかった。各個体の乾燥重量と葉面積の比率を表す葉面積比 (LAR,  $\text{m}^2\text{g}^{-1}$ ) は $+0^{\circ}\text{C}$ 区で0.019、 $+2^{\circ}\text{C}$ 区で0.022となり、有意な差はなかった。

以上の結果より、本種は $+2^{\circ}\text{C}$ の気温上昇下でもNAR (光合成活性) とLARは変化せず、結果的にRGRも変化しなかったと考えられる。

各個体の葉の厚みを葉面積/重量ベースで表すSLA ( $\text{m}^2\text{g}^{-1}$ ) は $+0^{\circ}\text{C}$ 区で約0.026、 $+2^{\circ}\text{C}$ 区で約0.032となり、有意な差はなかった。器官別重量比のうち、葉の重量比も処理区間で有意な差はなかった。

以上より、里山植物であるオミナエシは $+2^{\circ}\text{C}$  ( $26^{\circ}\text{C}$ ) 温暖化の範囲であれば、生長には有意な影響はなく、良好な生育が可能であると考えられる。バヤンサン (2013) は、 $15/10^{\circ}\text{C}$ と $25/13^{\circ}\text{C}$ の条件下で本種の栽培実験を行い、気温の高い区のほうが生長速度が高かった。

本研究では、栽培実験期間中の温室の気温が $30^{\circ}\text{C}$ を越える日が数日あり、温室の昼間の平均気温は約 $26^{\circ}\text{C}$ 、夜間でも約 $22^{\circ}\text{C}$ あったが、バヤンサンの実験よりもさらに高い温度条件下での栽培となった。

以上の結果から、オミナエシの生長に対する温暖化による気温上昇の影響は少ないと考えられるが、今後の温暖化により本研究の設定温度よりもさらに高温になる可能性もあるため、今後はより高温での実験も行うことが必要である。

#### 異なる光環境に対する生長反応

本種の個体乾燥重量は初期サンプリング時に約0.080gであったが、3週間後の最終サンプリングの際には、約0.062g (3%区) ~約0.107g (100%区) となった (表10)。

相対成長速度 (RGR,  $\text{gg}^{-1}\text{day}^{-1}$ ) は、3%区では約-0.006、9%区では約0.016、13%区では約0.021、100%区では約0.023で、相対光量子密度が高いほどRGRは高くなった (表11、図28)。

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-0.271、9%区では約0.656、13%区では約0.906、100%区では約1.303で、相対光量子密度が高いほど高くなった。各個体の乾燥重量と葉面積の比率を表す葉面積比 (LAR,  $\text{m}^2\text{g}^{-1}$ ) は3%~100%区で約0.019~0.025であり有意な差はなかった。

以上の結果より、RGRが相対光量子密度の高い区ほど高くなったのはNARの上昇によるものと考えられる。

各個体の葉の厚みを葉面積/重量ベースで表すSLA ( $\text{m}^2\text{g}^{-1}$ ) は3%~9%区では0.038~0.042であり、100%区では0.026であった。器官別重量比のうち葉の重量比は100%区でやや低くなっているため、結果としてLARの値も低くなったと考えられる。暗い光環境下でSLAが増大するのは陸上植物では一般的に見られる適応的現象であるが、本種も相対光量子密度が低

くなると、光合成生産物の投資を葉に増やすことによって生長を維持しようとしていると推察される。

オミナエシの生育適地は日当たりの良い立地であり、実際、県立榛名公園で生育していた個体の多くは他の植物に被陰されていない、日当たりの良い場所がほとんどであった。そのため、温暖化で気温上昇が起き、これまで生育していなかった外来植物等がオミナエシ自生地に着・繁茂して本種が被陰されてしまうことがあれば、本種の衰退が引き起こされる可能性があると考えられる。

## 7. オトコエシ

### 気温上昇に対する生長反応

本種の栽培期間中（2015年7月19日～8月21日）における昼間の外気温と温室（+2℃区）の気温差は約2.3℃であった（昼間：外気温 約30℃、温室 約32℃）。

本種の個体乾燥重量は初期サンプリング時に約0.029gであったが、4週間後の最終サンプリングの際には、+0℃区では約0.063g、+2℃区で約0.075gであった（表10）。

異なる温度条件下においてオトコエシの相対生長速度（RGR,  $\text{g g}^{-1}\text{day}^{-1}$ ）は、+0℃区（相対光量子密度100%区）で約0.021であったが、+2℃区で約0.030と高くなった（表11、図29）。

光合成活性を表す純同化率（NAR,  $\text{g m}^{-2}\text{day}^{-1}$ ）は、+0℃区（相対光量子密度100%区）で約1.335であったが、+2℃区では約1.657と高くなった。各個体の乾燥重量と葉面積の比率を表す葉面積比（LAR,  $\text{m}^2\text{g}^{-1}$ ）は+0℃区で約0.019、+2℃区で約0.020と、有意な差はなかった。

以上より、気温上昇区でRGRが高くなったのは、光合成活性（NAR）が高くなったため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SLA（ $\text{m}^2\text{g}^{-1}$ ）は+0℃区で約0.027、+2℃区で約0.033と、有意な差はなかった。器官別重量比のうち葉の重量比も処理区間で有意な差はなかったため、結果的にLARも有意な差はなかったと考えられる。

以上より、オトコエシは気温が+2℃（本研究では32℃）の範囲でも生育が可能であり、温暖化により本種の生長が抑制されるとは考えにくい。しかし、発芽実験では高温下での発芽率が低下することから、本種が温暖化の影響を全く受けないわけではないため、種の存続に影響がでる危険性は十分にある。

### 異なる光環境に対する生長反応

本種の個体乾燥重量は、初期サンプリング時に約0.029gであったが、4週間後の最終サンプリングの際には、約0.029（3%区）～約0.132g（13%区）となり、100%区よりも9%区、13%区の個体の方が大きくなった（表10）。

異なる光条件下において、オトコエシの相対成長速度 (RGR,  $\text{g g}^{-1}\text{day}^{-1}$ ) は、3%区では約-0.003、9%区では約0.036、13%区では約0.044、100%区では約0.021となり、9%区、13%区が最も高い値となった (表11、図30)。

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-0.113、9%区では約1.202、13%区では約1.588、100%区では約1.335であった。各個体の乾燥重量と葉面積の比率を表す葉面積比 (LAR,  $\text{m}^2\text{g}^{-1}$ ) は3%区では、約0.031、9%区では約0.030、13%区では約0.028、100%区では約0.019であった。

以上より、RGRが9%区と13%区で高くなり、3%区と100%区で低くなったのは、LARとNARの変化によるものと考えられる。

各個体の葉の厚みを葉面積/重量ベースで表すSLA ( $\text{m}^2\text{g}^{-1}$ ) は3%区で0.077、9~13%区で約0.059~0.064、100%区では著しく低下し約0.027であった。器官別重量比のうち葉の重量は、9%区、13%区で多くなっており、100%区ではやや少なくなっていることから、結果的にLARが9%区、13%区で大きくなったと考えられる。

以上の結果より、オトコエシは日当たりの良い裸地よりも、他の植物などによって被陰される環境で良く生長すると考えられる。西榛名地域においてもそのほとんどが他の植物の陰になる立地に生育していた。これは前述の日当たりの良い立地を好むオミナエシとは全く異なる生育特性であるといえる。

オミナエシ、オトコエシは両種とも高温下でもRGRが低下しなかった。したがってこの2種については、温暖化による気温上昇で生長阻害を受ける可能性は低いといえる。しかし、温暖化の進行により、これまでオトコエシに日陰を提供していた植物種の衰退、オミナエシを被陰するような外来植物種の侵入・繁茂など、気温上昇による植物相の変化が起こる可能性もあり、影響が全くないというわけではない。さらに、本研究の設定温度を上回る環境に晒される可能性も高いため、今後は別の温度条件下での栽培実験を行い、さらに広範囲の温度条件に対する生長反応を解明する必要がある。



## 結論

本研究の植物相調査によって、群馬大学荒牧キャンパス構内の春植物 4 種（ナズナ・ホトケノザ・カラスノエンドウ・ショカツサイ）、前橋市関根町郵便局付近のナヨクサフジ、県立榛名公園のオミナエシ、西榛名地域のオトコエシの分布状況が明らかになった。

群馬大学荒牧キャンパス構内の植物相調査では、在来種：ナズナ167地点、ホトケノザ417地点、カラスノエンドウ124地点、外来種：ショカツサイ266地点の生育が確認された。ナズナとホトケノザは混在していた地点が多く、この在来種2種の生育地点では、ショカツサイが同所的に繁茂していることが多数あった。ショカツサイの繁茂は、早春に開花を始める在来種の生育を大きく妨げると考えられており（石川 2009）、キャンパス内における植物種の多様性の低下が起こっているのではないかと推察される。またカラスノエンドウの生育地点は、上記在来種2種ともショカツサイとも重なっていないものがほとんどであった。これは本種が被陰に弱く、すでに他種との競争によって多くの地点から排除されている可能性を示唆していると考えられる。群馬大学荒牧キャンパス構内の植物種における多様性の低下を防ぐためにも、今後も植物相調査を継続する必要がある。

前橋市関根町郵便局付近の調査では、31 地点でナヨクサフジの生育が確認された。植物の生育できる土壤環境のほとんどが道路沿いの植樹帯に限られているため、本種が繁茂すると在来種を駆逐してしまう可能性が高いと推察される。ナヨクサフジは、2005 年ごろから群馬県内で増え始めた比較的新しい種であるため、今後も生態をより詳しく解明するために引き続き調査を行う必要がある。

県立榛名公園の調査で生育が確認されたオミナエシは、日当たりの良い立地で良く見られた。一方、西榛名地域に自生し、オミナエシと近縁種であるオトコエシは、そのほとんどが他の植物に被陰された暗地で生育するというオミナエシ科2種に明らかな生育特性の違いが確認された。今後も、榛名公園のオミナエシ、西榛名地域のオトコエシの動態とともに、気温など生育環境要因も長期的にモニタリングする必要がある。

また、同科の植物種同士でも発芽・初期生長過程の特性に種ごとに明らかな違いが見られた。

アブラナ科 2 種では冷湿処理により発芽率が著しく低下し、冷湿処理を施さない種子の最終発芽率は、高温区ほど高くなり、25/13℃～30/15℃区でより高くなった（荒木 2011）。また、異なる温度条件下での栽培実験の生長解析では、ショカツサイが高温下よりも低温下で最も良く生長したのに対し、ナズナは高温区ほど良く生長した（荒木 2011）。このことから、冬季の短縮と生育期の気温上昇は、ショカツサイには生長抑制効果が、ナズナには生長促進効果があると考えられる。しかし、最終発芽率・発芽速度はいずれの区におい

てもショカツサイの方が高く、温暖化の進行により、ショカツサイの発芽が促進されることで、ナズナの絶滅の危機は相対的に高まると考えられる。

キク科在来種のタウコギの発芽は、冷湿処理の有無で最終発芽率自体に有意な差は見られなかったが、2ヶ月の冷湿処理を施した種子の方が最終発芽率に達するまでの日数が短かったことから、冷湿処理により発芽速度が促進されたと考えられる。また、異なる温度条件下での栽培実験の生長解析では、高温下では生長が悪くなり、温暖化に弱い種であることが示された。一方、コセンダングサは高温下でも発芽・生長可能であり、温暖化の影響を受けにくい種だと言える。以上のことから、キク科2種の場合、温暖化による冬季の短縮や生育期の気温上昇はタウコギに不利に働き、コセンダングサがタウコギを駆逐する可能性が高いと推察される。

マメ科在来種のカラスノエンドウの最終発芽率は低温区ほど高くなった。また、本種は高温に弱く、光依存性の高い植物であることから、他の植物が少ない秋～冬季に発芽・生長する生存戦略をとると考えられる。そのため、冬季の短縮はカラスノエンドウの生長抑制効果があるといえる。一方、ナヨクサフジは全ての温度区で約65%の最終発芽率を達成しており、一年中いつでも発芽可能である。また、高温でも生育でき、カラスノエンドウよりも厳しい光条件下で生育が可能であることから、マメ科2種の場合、温暖化による冬季の短縮や生育期の気温上昇はナヨクサフジに有利に働くと考えられる。

オミナエシ科2種について、オミナエシでは25/13℃区以上の高温条件で良く発芽することから夏に発芽すると考えられる。また、冷湿処理によって発芽の促進効果が見られたがその効果は限定的または不定であると推察される。異なる環境下での栽培実験の生長解析では、本種は高温でも生育が可能で、光環境が良好であるほど良く生長した。

一方、近縁種であるオトコエシの最終発芽率は25/13℃区において、冷湿処理を施した種子が約38.7%、冷湿処理を施していない種子が約56%となり、冷湿処理による発芽の促進は見られず、低温区ほど最終発芽率が高くなった。このことから、オトコエシは冬季の短縮と冷湿処理の本種の発芽過程への影響は少ないと推察される。また、本種は高温下でも生育可能であるが、相対光量子密度13%の被陰区の方が良く生長するという、オミナエシと異なる生育特性が示された。温暖化の進行により、本研究の設定温度を上回る環境に晒される可能性も高いため、今後は別の温度条件下での栽培実験を行い、さらに広範囲の温度条件に対する生長反応を解明する必要がある。

これまでの40年にわたる国際共同研究とIPCCの5次にわたる研究成果報告によって、今や世界規模で地球温暖化の危機の重大さが認識され、CO<sub>2</sub>放出量の削減による温暖化防止対策が端緒についた。しかし、こうした地球温暖化への対策の実施はある程度「手遅れ」であり、今後100年以内に地球平均で1~3℃の温暖化は避けられないとの予測もされている。したがって、温暖化対策に加えて、実際に温暖化した場合にその悪影響を緩和するた

めの対策を考える必要がある、そのためには野生植物種が受ける諸影響とメカニズムを研究し、知見を増やす必要がある。温暖化による気候変動・気温上昇は夏季よりも冬季、低緯度地域よりも高緯度地域の方が大きいとされており、それに伴う植生の変化を解明し、個別の研究を積み重ねることで、生物多様性の低下・生態系の崩壊の防止に繋がると言える。

## 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。

本研究を進めるにあたり多くの方にお世話になりました。石川真一教授には、最後まで大変熱心にご指導・ご助言していただきました。

また、同時期に卒業論文に取り組んだ嶋方里佳氏、関拓也氏、田村一志氏をはじめとする、研究室の学生の皆様からも温かい励まし・ご協力をいただきました。

本研究はこれらの皆様のご指導、ご協力無しには決して達成し得なかったものであります。心から感謝し、厚くお礼申し上げます。

## 引用文献・引用 WEB ページ

- IPCC (2013)「気候変動に関する政府間パネル第5次評価報告書概要 第1作業部会報告書」
- IPCC (2013)「気候変動に関する政府間パネル第5次評価報告書概要 第3作業部会報告書」
- 赤上祐章 (2011)「里山における希少植物種の生育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
- 荒木結衣 (2011)「地球温暖化が植物多様性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
- 石川真一・今枝美香・中島淳 (2007)「冬季一年生外来植物シヨカツサイ (*Orychophragmus violaceus*) の分布と光関係-アブラナ科外来植物の生態研究をモデルケースとして-」群馬野外生物学会 35-41
- 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-群馬県における分布・生態・諸影響と防除方法-」上毛新聞社 1-5、55-58
- 石川真一、増田和明、大森威宏 (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 269
- 池田清彦 (2006)「外来生物辞典」東京書籍
- 内嶋善平衛 (2005)「<新>地球温暖化とその影響」裳華房 44-46、50、53、199-200
- 大林理沙 (2014)「里山地域に生育する希少植物種の種子生産と発芽の規定要因に関する研究」群馬大学社会情報学部卒業論文
- 小倉謙 (1968)「植物の事典」東京堂出版 96
- 長田武正 (1976)「原色日本帰化植物図鑑」保育社 259
- 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、34
- 栗原久 (2009)「榛名学」上毛新聞社 89-93
- 桑原新 (2015)「群馬県内各地における外来植物の侵入・定着状況と在来植物への影響に関する野外調査研究」群馬大学社会情報学部卒業論文
- 群馬県環境森林部自然環境課 (2001)  
「群馬県の絶滅のおそれのある野生生物 植物編(群馬県レッドデータブック)」 p99
- 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・生長に関する生態学的モニタリング研究」
- 佐竹義輔・大井次三郎・北村四郎 (1982)「新装版 日本の野草植物Ⅲ」147
- 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

- 柴宮朋和 (2005) 「外来植物が生態系に及ぼすリスクの生態学的解析」  
群馬大学社会情報学部卒業論文
- 清水建美 (2003) 「日本の帰化植物」 平凡社
- 清水矩弘・森田宏彦・廣田伸七・編著 (2001) 「日本帰化植物写真図鑑」 全国農村教育協会
- 荘村多加志 (2000) 「よくわかる地球温暖化問題」 中央法規 18-19
- 菅原久夫 (1990) 「日本の野草「春」」 小学館 p126
- 高橋勝雄 (2002) 「野草の名前 春」 山と溪谷社 p90-91
- 津村拓美 (2002) 「外来植物の危険性の評価実験」 群馬大学社会情報学部卒業論文
- 西田治文 (1997) 「総論 地球温暖化と生物多様性 温暖化に追われる生き物たち-生物多様性からの視点」 築地書館 40-53
- 根本正之 (2006) 「雑草生態学」 朝倉書店 12、13-14、35-36、41-42、49-50、137-138
- 根本正之 (2010) 「身近な自然の保全生態学-生物の多様性を知る-」 培風館 41-43
- 根本正之 (2014) 「雑草社会がつくる日本らしい自然」 築地書館 68-69、76-79、111-113
- バヤンサン・プルフドルゴル (2013) 「群馬県の亜高山帯における自然観光資源としての植物の保全のための環境科学的研究」 群馬大学社会情報学部卒業論文
- 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
- 牧野富太郎 (2000) 「新訂牧野新日本植物図鑑」 北隆館 p644
- 松澤篤郎、小暮市郎、青木雅夫、大森威宏、増田和明 (2003) 「良好な自然環境を有する地域学術調査報告書 XXIX」 群馬県自然環境課 132
- 宮脇成生 (1994) 「侵入植物の生態学的特性とその管理に関する研究」 筑波大学大学院修士課程環境科学研究科修士論文
- 村上興正・鷺谷いづみ (2002) 「外来種ハンドブック」 地人書館 3、6-7、14、283
- 村中孝司 (2008) 「外来植物の侵入年代・原産地とその用途との関連性」 保全生態学研究
- 村中孝司・石濱史子 (2010) 「外来生物の生態学-進化する脅威とその対策」 文一総合出版  
14-15, 25, 39
- 吉田尚弘 (1998) 「地球温暖化の未来をさぐる-水・物質サイクルの変動と変化」 丸善 58
- 鷺谷いづみ (1996) 「オオブタクサ、闘う 競争と適応の生態学」 平凡社 24-27
- 鷺谷いづみ (1999) 「生物保全の生態学」 共立出版 2、18-19、60-61
- 鷺谷いづみ (2010) 「<生物多様性>入門」 岩波書店 37-39
- 環境省 HP 「生物多様性国家戦略 2012-2020」
- 環境省 HP (2007) 「第2章 地球温暖化と生物多様性」

<https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/zu/h19/html/vk0701020100.html>

環境省 HP 「気候変動枠組条約・京都議定書」

<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/column.html>

環境庁「第5回 緑の国勢調査 ‘96 身近な生きもの調査」

<http://www.biodic.go.jp/reports/5-3/o001.html>

群馬県 HP <https://www.pref.gunma.jp/01/e2310244.html>



## 写真



写真1 群馬大学荒牧キャンパス構内に生育するナズナ  
2015年3月24日撮影。





写真2 群馬大学荒牧キャンパス構内に生育するホトケノザ  
2015年3月24日撮影。





写真3 群馬大学荒牧キャンパス構内に生育するカラスノエンドウ  
2015年3月31日撮影。





写真4 群馬大学荒牧キャンパス構内に生育するショカツサイ  
2015年3月31日撮影。





写真 5 群馬県前橋市関根町郵便局前に生育するナヨクサフジ（写真中央の紫色の花を咲かせている植物）。2015年5月13日撮影。

上：他の植物を覆うように繁茂するナヨクサフジ。

下：低木下で地面を覆おうように繁茂するナヨクサフジ。





写真6 県立榛名公園に生育するオミナエシ  
2015年7月31日撮影。





写真7 西榛名地域に生育するオトコエシ  
2015年9月5日撮影。

## 表

表 1 各調査日と調査地、調査内容一覧

調査地	調査日	調査内容
群馬大学荒牧キャンパス構内	2015年3月24日、26日、31日、4月12日	ナズナ、ホトケノザ、カラスノエンドウ、ショカツサイの植物相調査
群馬県前橋市関根町郵便局付近	2015年5月13日	ナヨクサフジの植物相調査
西榛名地域	2015年9月5日	オトコエシの植物相調査
県立榛名公園	2015年7月31日、8月21日、9月28日	オミナエシの植物相調査

表2 発芽実験に用いた植物と培養日程一覧

種名	科名	種子の採取日	種子の採取場所	前処理条件	培養開始日	培養終了日	培養日数
ショカツサイ	アブラナ科	2014年6月14日	群馬大学荒牧キャンパス	冷湿処理なし	2015年4月10日	2015年6月9日	60日間
タウコギ	キク科	2008年10月23日	西榛名休耕地	冷湿処理なし	2015年4月10日	2015年6月9日	60日間
				冷湿処理2ヶ月	2015年6月10日	2015年8月9日	60日間
コセンダングサ	キク科	2012年11月29日	群馬大学荒牧キャンパス	冷湿処理なし	2015年4月10日	2015年6月9日	60日間
カラスノエンドウ	マメ科	2015年5月12日	群馬大学荒牧キャンパス	冷湿処理なし	2015年6月29日	2015年8月28日	60日間
ナヨクサフジ	マメ科	2014年6月11日	群馬県前橋市関根町	冷湿処理なし	2015年4月10日	2015年6月9日	60日間
オトコエシ	オミナエシ科	2012年11月15日	西榛名地域	冷湿処理なし	2015年4月10日	2015年6月9日	60日間
				冷湿処理2ヶ月	2015年6月10日	2015年8月9日	60日間
オミナエシ	オミナエシ科	2010年10月24日	榛名公園沼ノ原	冷湿処理なし	2015年4月10日	2015年6月9日	60日間



表3 栽培実験スケジュール一覧

温度条件・光強度を調節した栽培実験

種名	苗ポット植栽日	初期サンプリング日	初期サンプリング個体数	最終サンプリング日	最終サンプリング個体数				
					3%	9%	13%	100%	2℃上昇区
タウコギ	2015年6月15日	2015年7月4日	14個体	2015年7月18日	14個体	14個体	14個体	14個体	14個体
コセندگانサ	2015年6月21日	2015年7月11日	16個体	2015年8月7日	15個体	16個体	15個体	16個体	16個体
カラスノエンドウ	2015年7月11日	2015年7月25日	15個体	2015年8月21日	枯死	枯死	枯死	15個体	15個体
ナヨクサフジ	2015年5月10日	2015年5月29日	16個体	2015年6月12日	16個体	15個体	15個体	16個体	16個体
オトコエシ	2015年7月8日	2015年7月19日	13個体	2015年8月21日	12個体	12個体	12個体	12個体	12個体
オミナエシ	2015年7月22日	2015年8月18日	9個体	2015年9月11日	9個体	9個体	9個体	9個体	9個体

温度条件を調節した栽培実験

種名	苗ポット植栽日	初期サンプリング日	初期サンプリング個体数	最終サンプリング日	最終サンプリング個体数		
					30/25℃	25/20℃	15/10℃
シヨカツサイ	2015年10月14日	2015年10月23日	10個体	2015年11月6日	5個体	4個体	6個体

表4 発芽実験におけるショカツサイの種子の最終発芽率と標準偏差一覧

ショカツサイの種子に冷湿処理を施さず、温度条件を 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 60 日間培養した。n = 3。

種名	温度	最終発芽率(%)	標準偏差
ショカツサイ	30/15°C	90.0	4.0
	25/13°C	84.7	3.1
	22/10°C	58.0	10.6
	17/8°C	16.0	13.1
	10/6°C	4.0	4.0

表 5 発芽実験におけるキク科 2 種の種子の最終発芽率と標準偏差一覧

冷湿処理を施さないタウコギの種子を 25/13°C に設定した温度勾配型恒温器内で、また 2 ヶ月の冷湿処理を施したタウコギの種子および冷湿処理を施さないコセンダングサの種子を、温度条件 30/15°C、25/13°C、22/10°C、17/8°C、10/6°C（昼/夜）でそれぞれ 60 日間培養した。n = 3。

種名	温度	最終発芽率(%)	標準偏差
タウコギ	25/13°C	93.3	2.3
タウコギ(冷湿処理)	30/15°C	100.0	0.0
	25/13°C	100.0	0.0
	22/10°C	98.7	2.3
	17/8°C	96.7	3.1
	10/6°C	75.3	23.4
コセンダングサ	30/15°C	98.0	2.0
	25/13°C	92.0	4.0
	22/10°C	97.3	16.2
	17/8°C	12.7	9.0
	10/6°C	2.7	4.6

表6 発芽実験におけるマメ科2種の最終発芽率と標準偏差一覧

カラスノエンドウ、ナヨクサフジの種子に冷湿処理を施さず、温度条件を 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 60 日間培養した。n=3。カラスノエンドウの種子は、当初実験では吸水しなかったため、1 時間硫酸処理を行って不透水性を除去した。

種名	温度	最終発芽率(%)	標準偏差
カラスノエンドウ	30/15°C	78.7	3.1
	25/13°C	99.3	1.2
	22/10°C	100.0	0.0
	17/8°C	100.0	0.0
	10/6°C	100.0	0.0
ナヨクサフジ	30/15°C	66.0	9.2
	25/13°C	64.0	5.3
	22/10°C	69.3	7.0
	17/8°C	68.0	5.3
	10/6°C	59.3	17.0

表7 発芽実験におけるオミナエシ科2種の最終発芽率と標準偏差一覧

冷湿処理を施さないオトコエシの種子を 25/13°Cに設定した温度勾配型恒温器内で、また2ヶ月の冷湿処理を施したオトコエシの種子および冷湿処理を施さないオミナエシの種子を、温度条件 30/15°C、25/13°C、22/10°C、17/8°C、10/6°C（昼/夜）でそれぞれ60日間培養した。n=3-6。

種名	温度	最終発芽率(%)	標準偏差
オミナエシ	25/13°C	83.7	1.5
オトコエシ	25/13°C	56.0	14.0
オトコエシ(冷湿処理)	30/15°C	35.3	7.6
	25/13°C	38.7	1.2
	22/10°C	69.3	14.2
	17/8°C	81.3	8.1
	10/6°C	82.7	2.3

表 8 温度上昇実験におけるシヨカツサイの個体あたりの乾燥重量一覧

種名	個体別乾燥重量(g)					SD		
	初期	15/10°C	25/20°C	30/25°C	初期	15/10°C	25/20°C	30/25°C
シヨカツサイ	0.022	0.034	0.021	0.011	0.004	0.019	0.005	0.002

表9 温度上昇実験におけるシヨカツサイの生長解析結果一覧

種名	条件区	平均						SD		
		RGR(g/g/day)	LAR(m <sup>2</sup> /g)	NAR(g/m <sup>2</sup> /day)	SLA(m <sup>2</sup> /g)	RGR(g/g/day)	LAR(m <sup>2</sup> /g)	NAR(g/m <sup>2</sup> /day)	SLA(m <sup>2</sup> /g)	
シヨカツサイ	15/10°C	0.014	0.015	1.048	0.018	0.012	0.001	0.974	0.018	
	25/20°C	-0.005	0.015	-0.343	-0.019	0.005	0.000	0.312	0.005	
	30/25°C	-0.026	0.015	-1.745	0.025	0.002	0.002	0.307	0.004	

表 10 温度上昇・異なる光環境実験に用いた 6 種の個体あたりの乾燥重量一覧

種名	個体別乾燥重量(g)						SD					
	初期	3%	9%	13%	100%	2°C上昇区	初期	3%	9%	13%	100%	2°C上昇区
タウコギ	0.087	0.087	0.088	0.099	0.188	0.146	0.043	0.031	0.032	0.042	0.073	0.049
コセンダングサ	0.016	0.020	0.062	0.069	0.069	0.087	0.004	0.014	0.033	0.033	0.041	0.075
カラスノエンドウ	0.030	枯死	枯死	枯死	0.052	0.046	0.008	枯死	枯死	枯死	0.020	0.015
ナヨクサフジ	0.069	0.058	0.069	0.096	0.124	0.139	0.021	0.021	0.038	0.029	0.055	0.046
オミナエシ	0.080	0.062	0.080	0.103	0.107	0.135	0.019	0.014	0.014	0.035	0.031	0.032
オトコエシ	0.029	0.029	0.093	0.132	0.063	0.074	0.019	0.020	0.054	0.082	0.040	0.047



表 11 温度上昇・異なる光環境実験における6種の生長解析結果一覧

種名	条件区	平均			SD				
		RGR(g/day)	LAR(m <sup>2</sup> /g)	NAR(g/m <sup>2</sup> /day)	SLA(m <sup>2</sup> /g)	RGR(g/day)	LAR(m <sup>2</sup> /g)	NAR(g/m <sup>2</sup> /day)	SLA(m <sup>2</sup> /g)
タウコギ	3%	0.002	0.019	0.064	0.082	0.010	0.003	0.629	0.009
	9%	0.002	0.022	0.079	0.087	0.012	0.006	0.665	0.014
	13%	0.009	0.023	0.429	0.094	0.013	0.004	0.600	0.038
	100%	0.056	0.011	5.224	0.045	0.100	0.002	1.229	0.006
	2°C上昇区	0.040	0.019	2.144	0.078	0.013	0.004	0.649	0.010
コセンダングサ	3%	0.002	0.024	0.226	0.087	0.011	0.006	0.748	0.015
	9%	0.046	0.031	1.500	0.004	0.010	0.006	0.370	0.021
	13%	0.053	0.031	1.707	0.032	0.006	0.003	0.329	0.010
	100%	0.050	0.014	4.010	0.028	0.009	0.002	0.867	0.002
	2°C上昇区	0.055	0.018	3.379	0.043	0.014	0.003	1.041	0.010
カラスノエンドウ	3%	枯死						枯死	
	9%	枯死						枯死	
	13%	枯死						枯死	
	100%	0.020	0.016	1.651	0.036	0.006	0.002	0.832	0.010
	2°C上昇区	0.015	0.019	0.883	0.062	0.003	0.002	0.222	0.012
ナヨクサアジ	3%	-0.010	0.009	-1.330	0.076	0.007	0.003	0.858	0.026
	9%	0.000	0.010	0.087	0.071	0.013	0.004	1.673	0.026
	13%	0.021	0.013	2.055	0.075	0.004	0.003	1.753	0.016
	100%	0.043	0.009	5.759	0.050	0.014	0.002	2.610	0.012
	2°C上昇区	0.047	0.011	4.480	0.076	0.005	0.002	1.398	0.012
オシロイソウ	3%	-0.008	0.024	-0.271	0.038	0.003	0.007	0.165	0.012
	9%	0.016	0.025	0.656	0.042	0.013	0.004	0.568	0.009
	13%	0.021	0.024	0.906	0.038	0.008	0.004	0.046	0.007
	100%	0.023	0.019	1.303	0.026	0.008	0.001	0.324	0.002
	2°C上昇区	0.027	0.022	1.236	0.032	0.004	0.002	0.209	0.003
オトコエシ	3%	-0.003	0.031	-0.113	0.077	0.010	0.005	0.400	0.008
	9%	0.026	0.030	1.202	0.064	0.008	0.004	0.325	0.009
	13%	0.044	0.028	1.588	0.059	0.007	0.005	0.364	0.009
	100%	0.021	0.019	1.335	0.027	0.007	0.003	0.564	0.005
	2°C上昇区	0.003	0.020	1.657	0.033	0.004	0.002	0.277	0.005

図



図1 群馬大学荒牧キャンパス構内における分布調査で確認された在来種ナズナの分布  
2015年3月24日～4月12日に、赤線で囲まれた範囲において徒歩により調査を行った。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。生育が確認されたのは167地点であった。



図 2 群馬大学荒牧キャンパス構内における分布調査で確認された在来種ホトケノザの分布

2015年3月24日～4月12日に、赤線で囲まれた範囲において徒歩により調査を行った。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。生育が確認されたのは417地点であった。





図 3 群馬大学荒牧キャンパス構内における分布調査で確認された在来種カラスノエンドウの分布

2015年3月24日～4月12日に、赤線で囲まれた範囲において徒歩により調査を行った。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。生育が確認されたのは124地点であった。



図4 群馬大学荒牧キャンパス構内における分布調査で確認された外来種ショカツサイの分布

2015年3月24日～4月12日に、赤線で囲まれた範囲において徒歩により調査を行った。

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。生育が確認されたのは266地点であった。

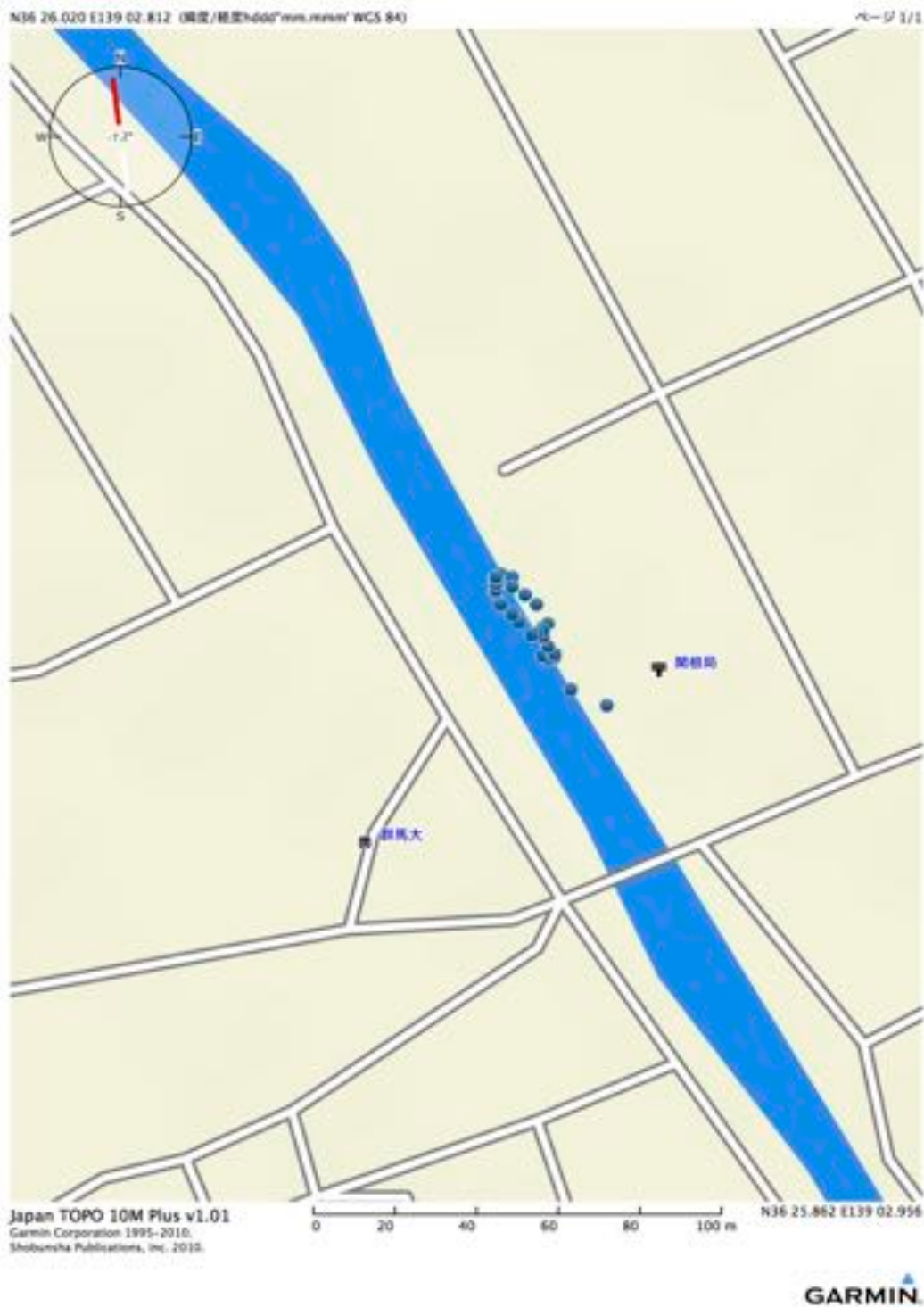


図 5 群馬県前橋市関根町郵便局付近における分布調査で確認された外来種ナヨクサフジの分布

2015年5月13日に広瀬川横の遊歩道を踏査し、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置情報を記録した。生育が確認された地点数は31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オミナエシの分布

2015年7月31日、8月21日、9月28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機能を用いて位置情報を記録した。灰色の線は調査経路を表す。生育が確認されたのは259地点であった。

図7 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オミナエシの分布

2015年7月31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116地点であった。



図 8 西榛名地域における分布調査で確認されたオトコエシの分布

2015年9月5日に農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機能を用いて位置情報を記録した。灰色の線は調査経路を表す。生育が確認されたのは47地点であった。

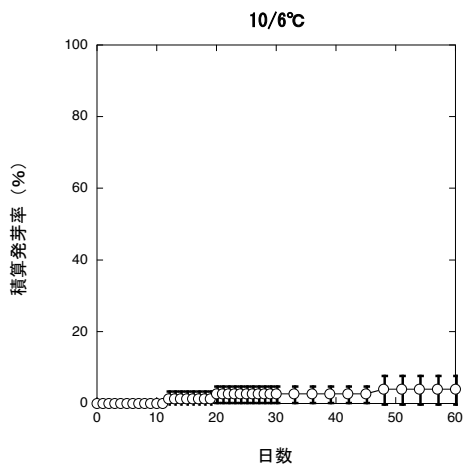
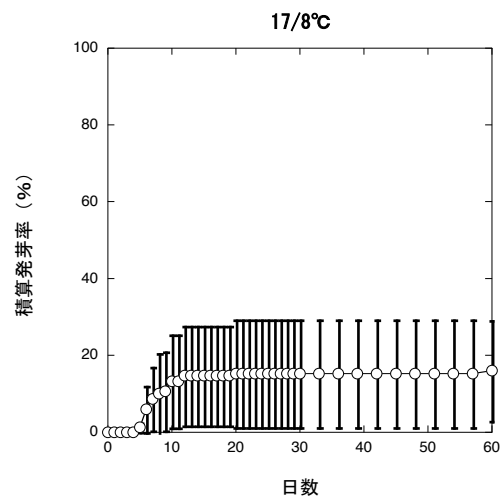
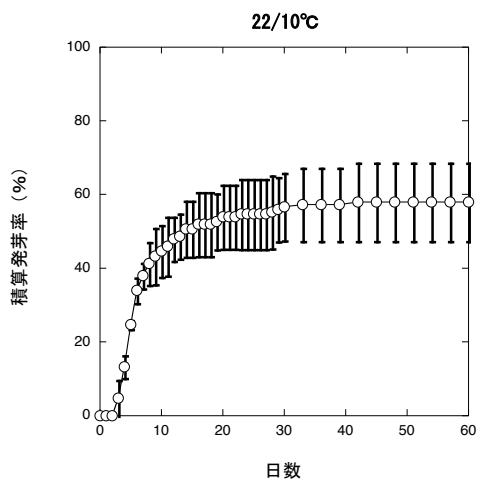
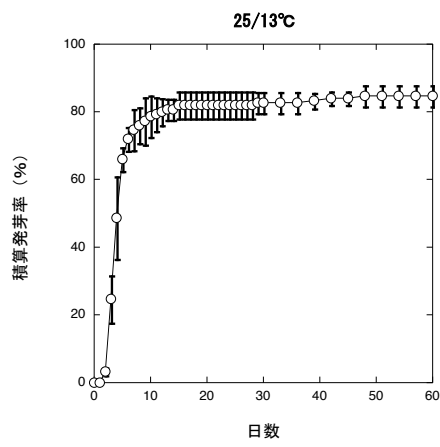
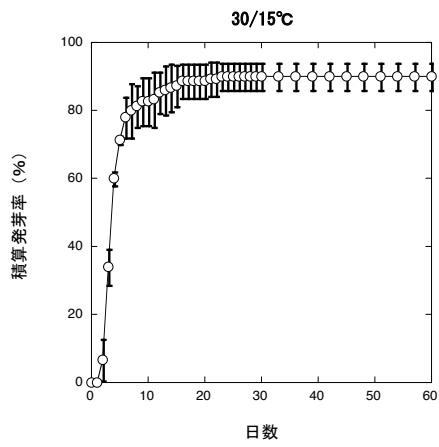


図 9 冷湿処理を施さないショカツサイ種子の発芽率の経時変化

温度条件を 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 60 日間培養した。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。

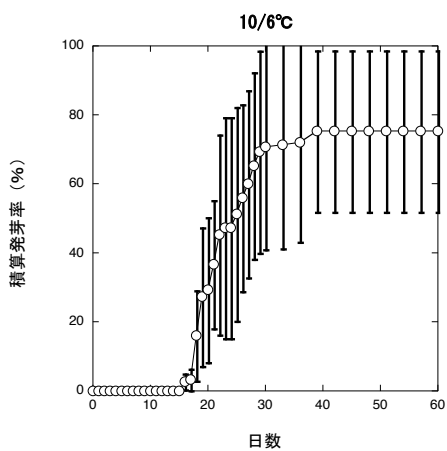
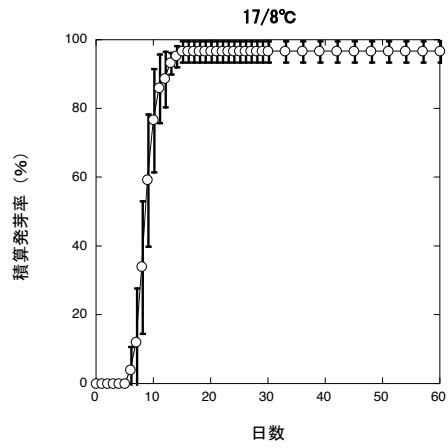
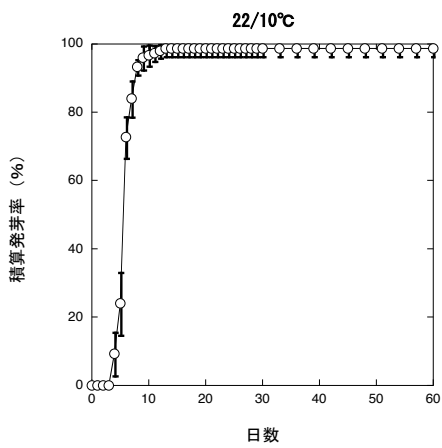
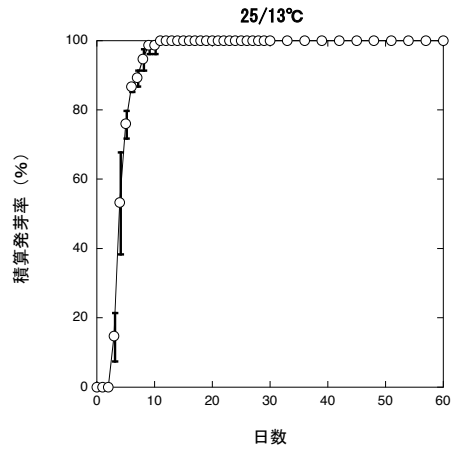
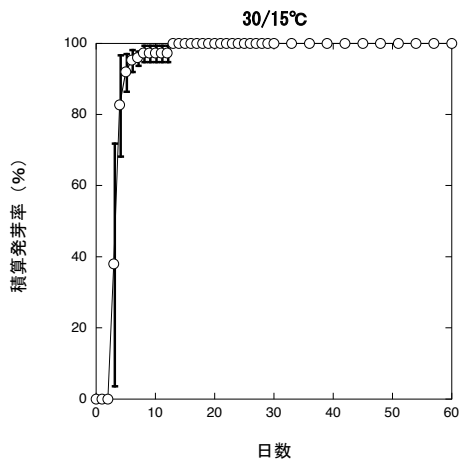


図 10 2ヶ月冷湿処理を施したタウコギ種子の発芽率経時変化

種子に2ヶ月間冷湿処理を施した後、温度条件を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60日間培養した。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。

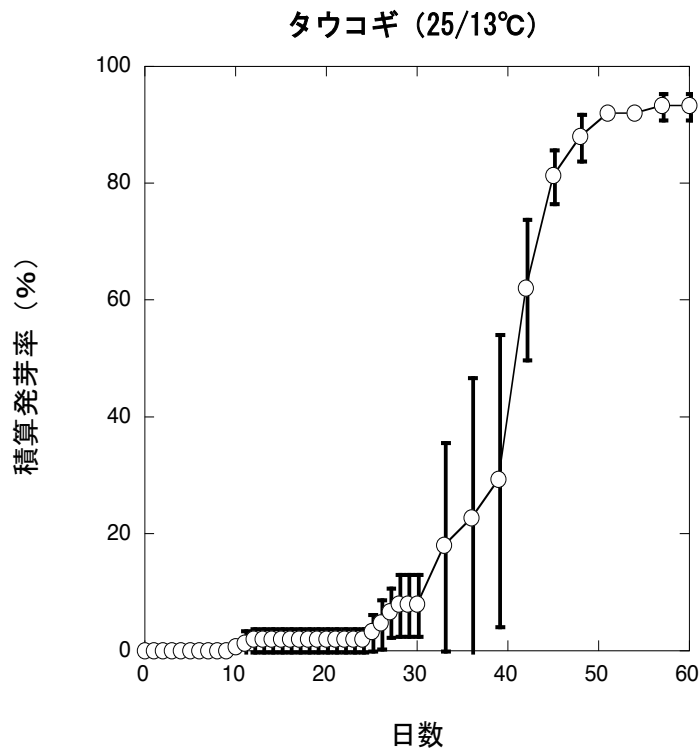


図 11 冷湿処理を施さないタウコギ種子の発芽率の経時変化

温度条件を 25/13℃（昼/夜）に設定した温度勾配型恒温器内で 60 日間培養した。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。

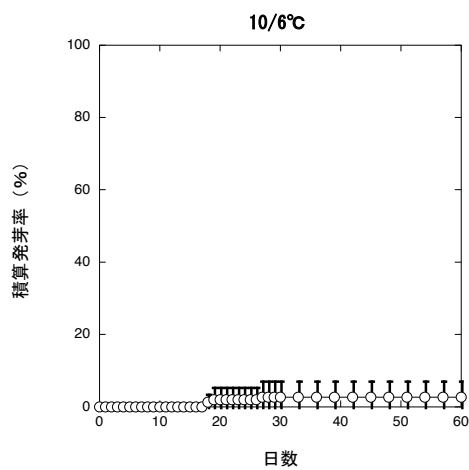
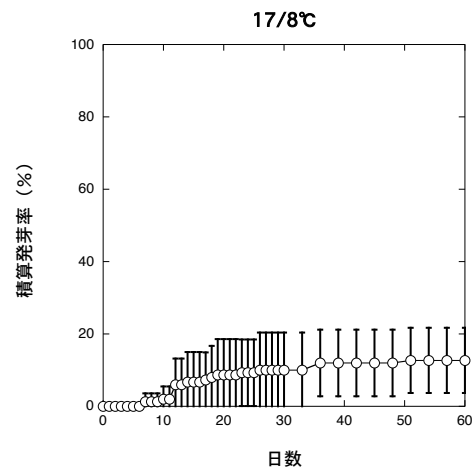
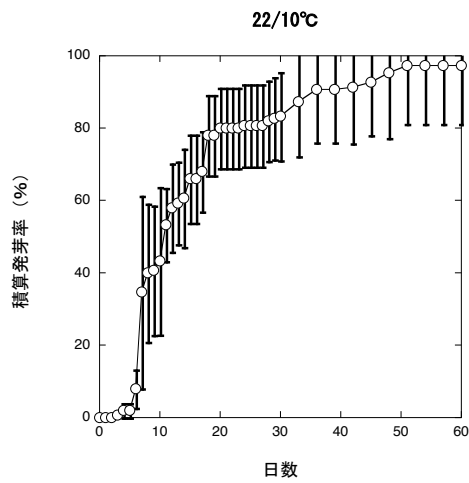
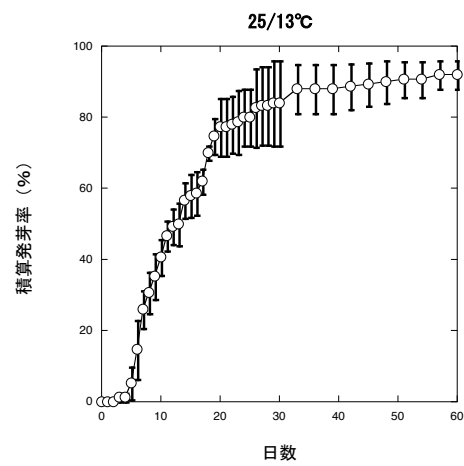
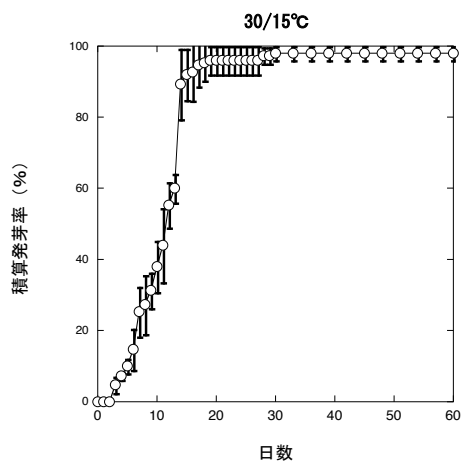


図 12 冷湿処理を施さないコセンダングサ種子の発芽率の経時変化

温度条件を 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 60 日間培養した。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。

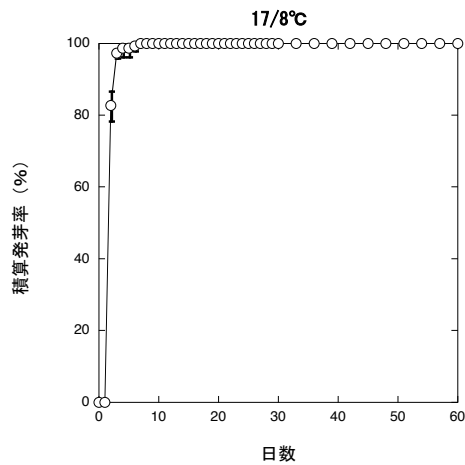
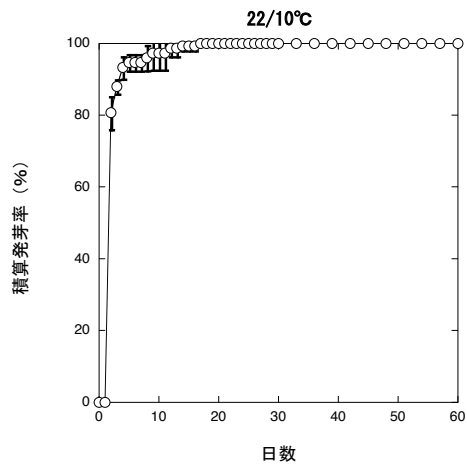
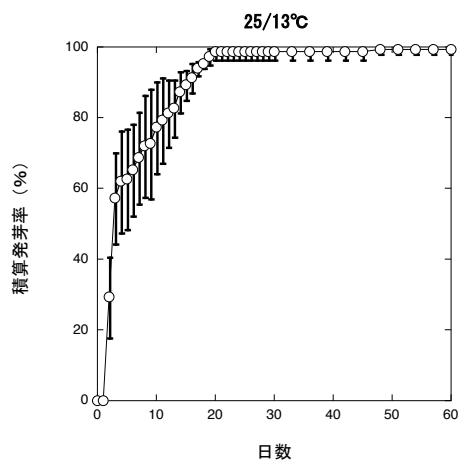
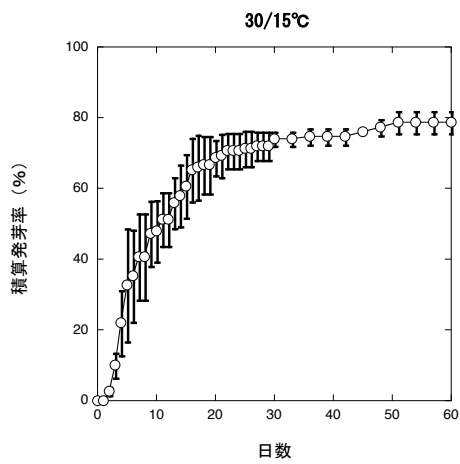
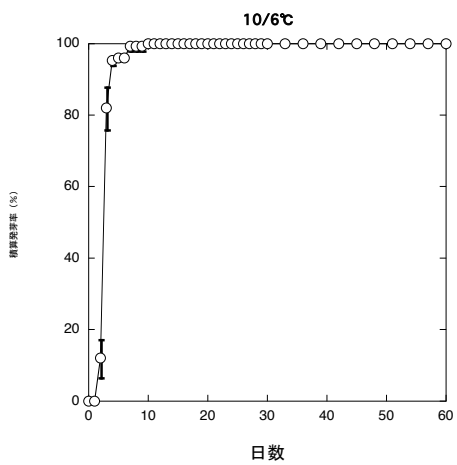


図 13 冷湿処理を施さないカラスノエンドウ種子の発芽率の経時変化



温度条件を 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 60 日間培養した。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。

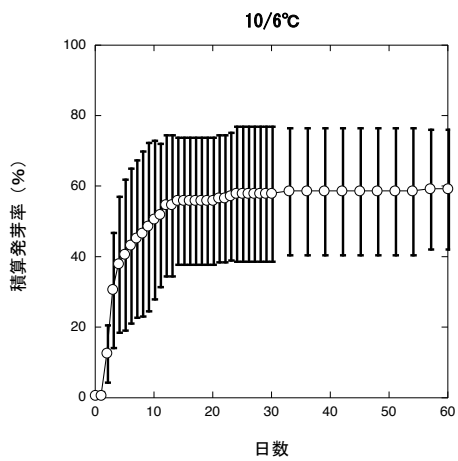
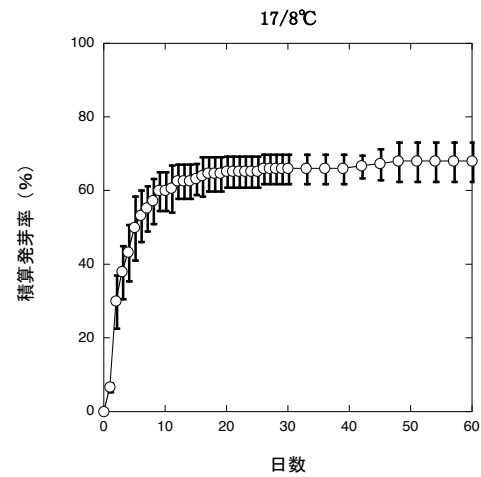
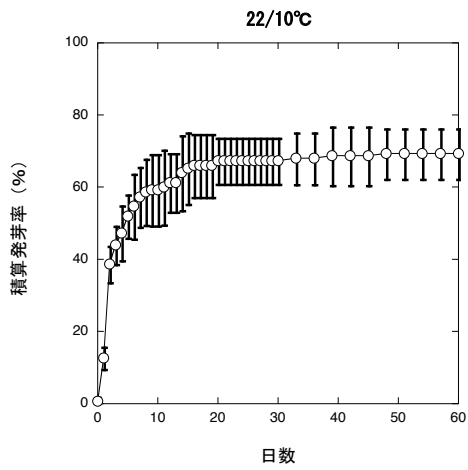
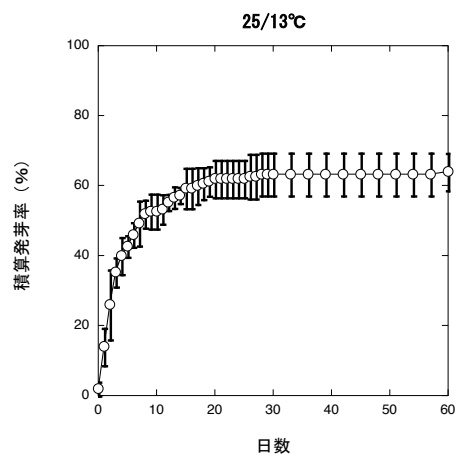
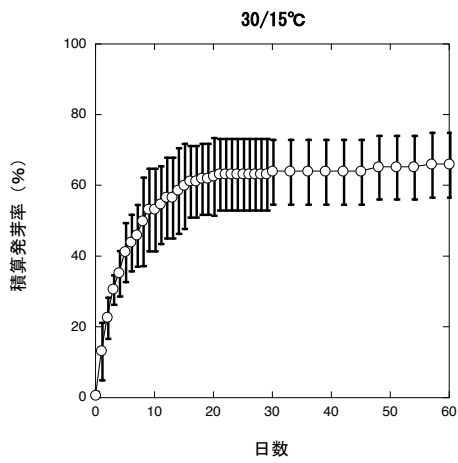


図 14 冷湿処理を施さないナヨクサフジ種子の発芽率の経時変化

温度条件を 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 60 日間培養した。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。

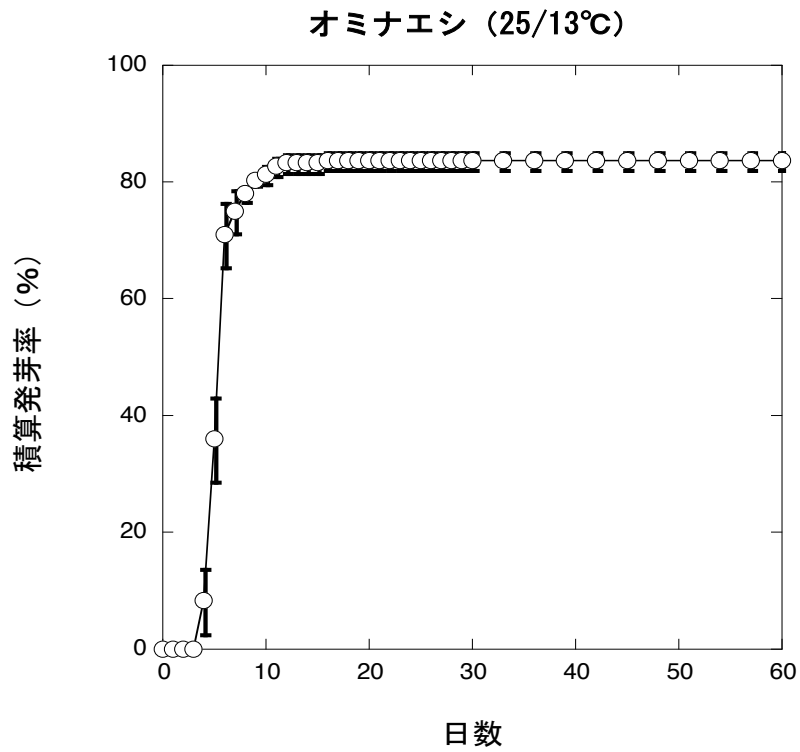


図 15 冷湿処理を施さないオミナエシ種子の発芽率の経時変化

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 60 日間培養した。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 = 6。



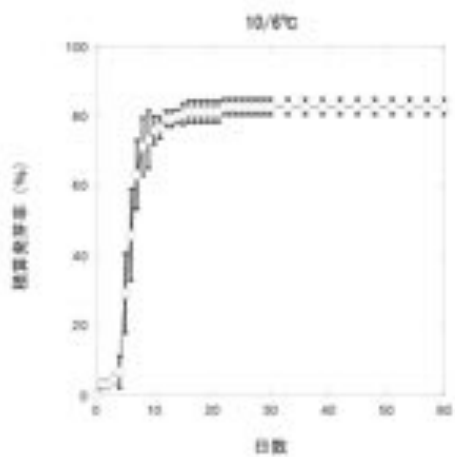
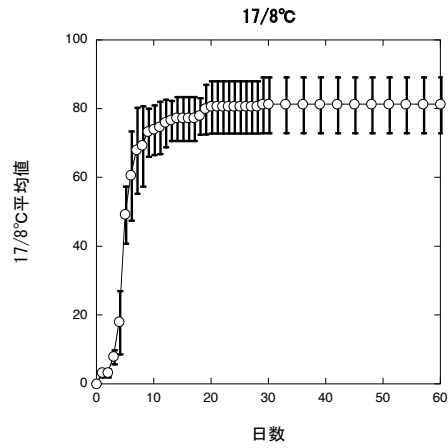
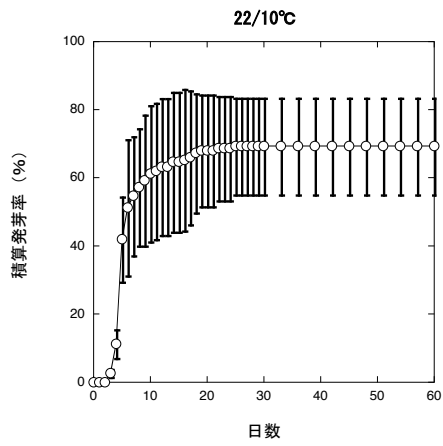
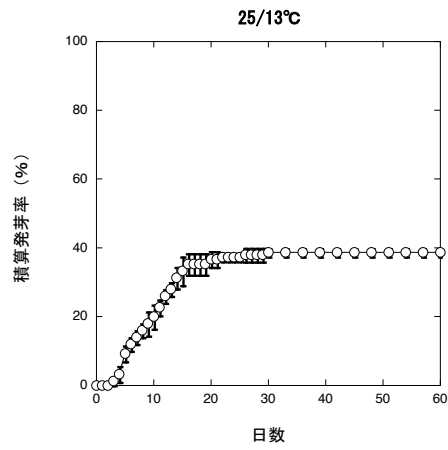
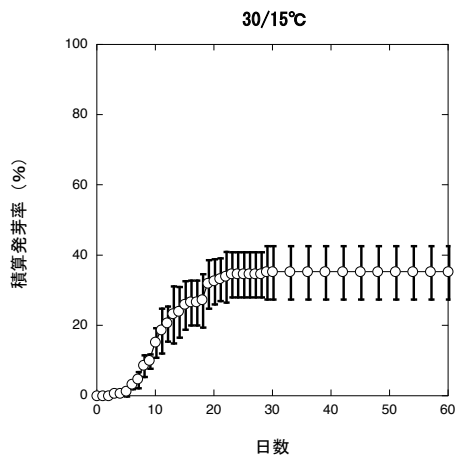


図16 2ヶ月冷湿処理を施したオトコエシ種子の発芽率の経時変化

種子に2ヶ月間冷湿処理を施した後、温度条件を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60日間培養した。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。

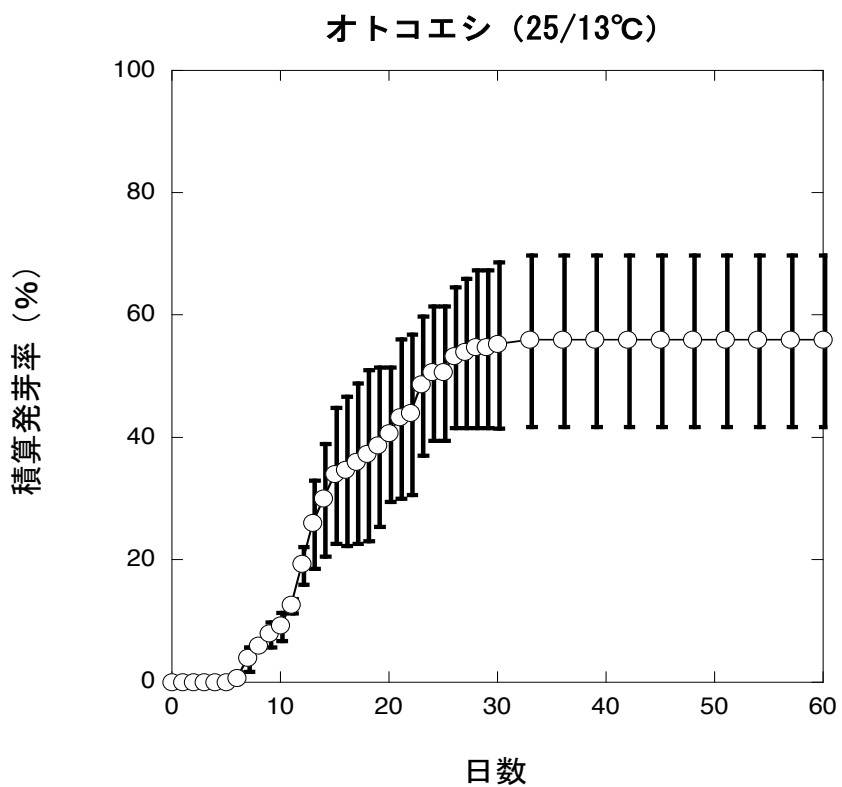


図 17 冷湿処理を施さないオトコエシ種子の発芽率の経時変化

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 60 日間培養した。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。

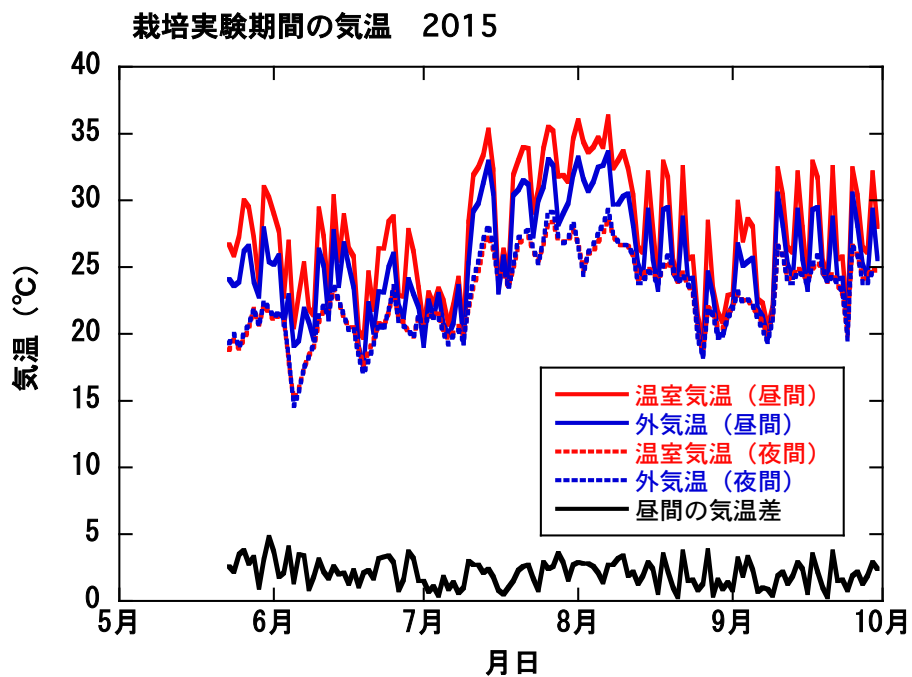


図 18 群馬大学荒牧キャンパス内における栽培実験期間中の気温

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。

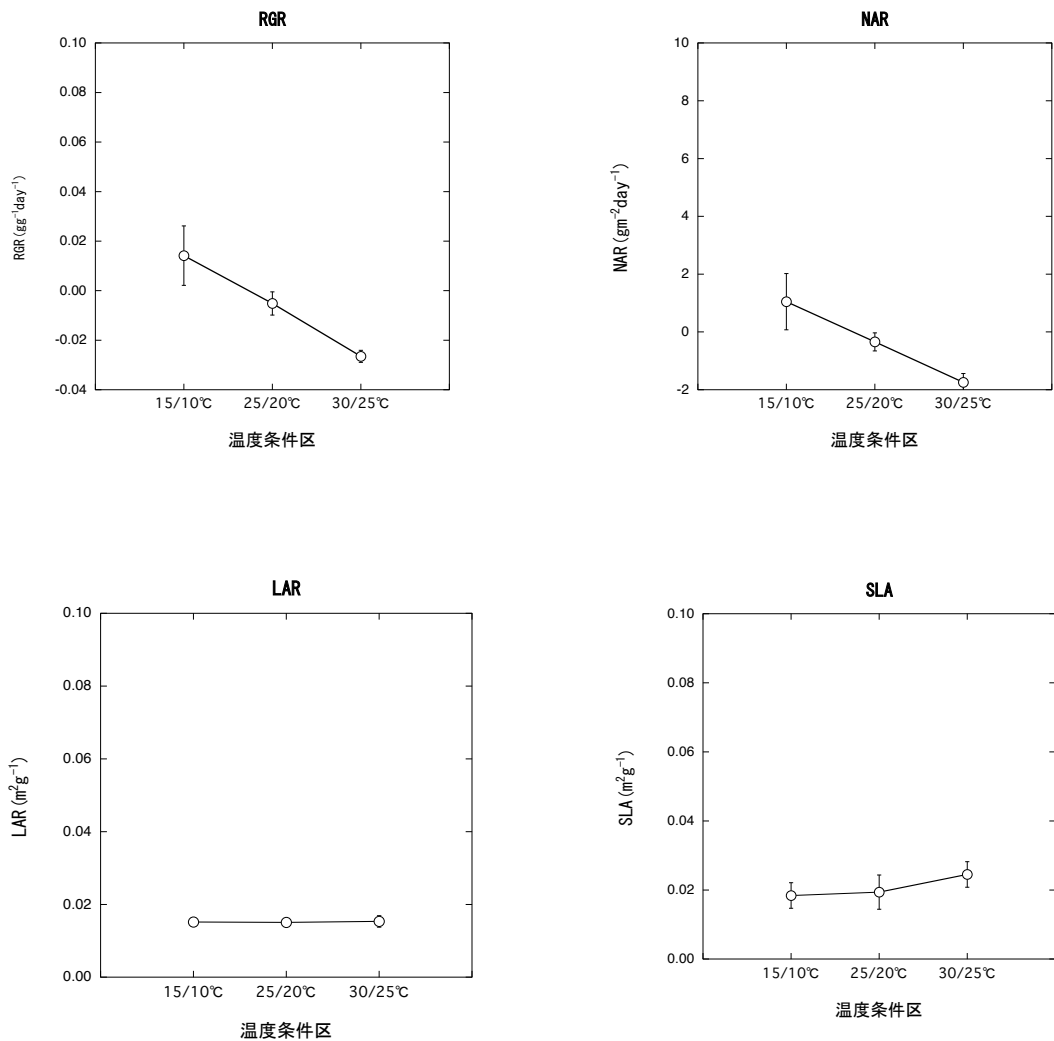
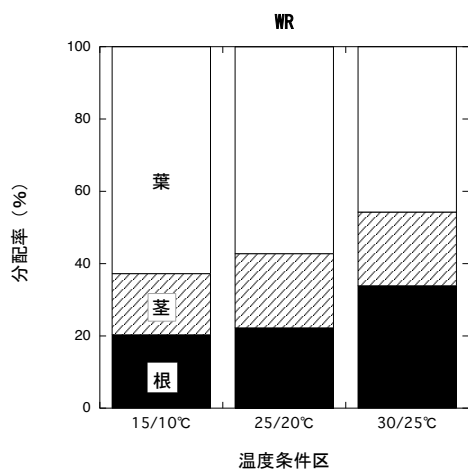


図 19 異なる温度条件下で栽培したショカツサイの生長解析結果



グロースキャビネット(内部にLED電球を増設して昼間の相対光量子密度を約  $380\text{--}400 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  に調節した) 3 台にそれぞれ  $15/10^\circ\text{C}$ 、 $25/20^\circ\text{C}$ 、 $30/25^\circ\text{C}$  (昼 14hr、夜 10hr) の 3 段階の温度設定を行い、中に苗ポットを配置して 4 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 = 4-6。

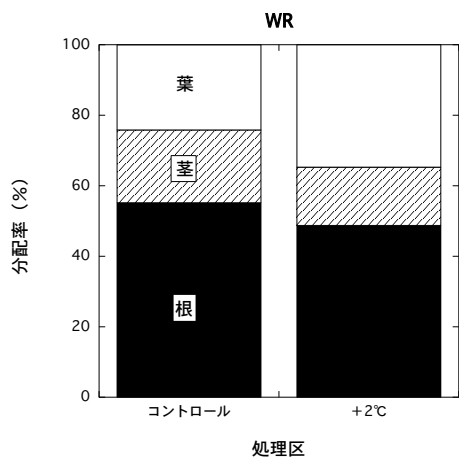
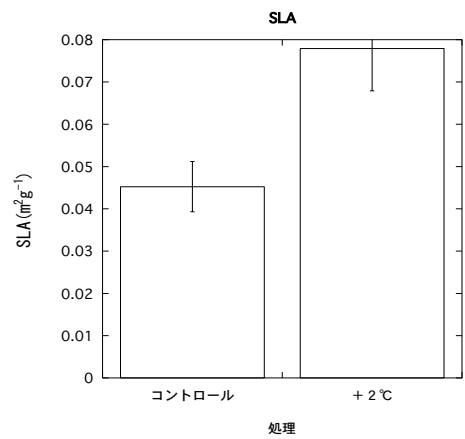
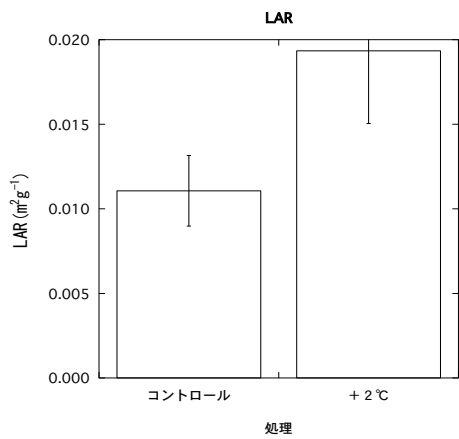
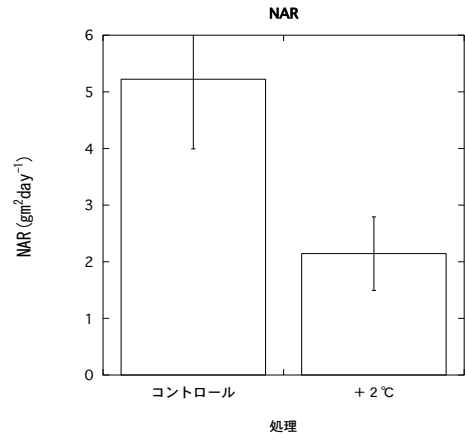
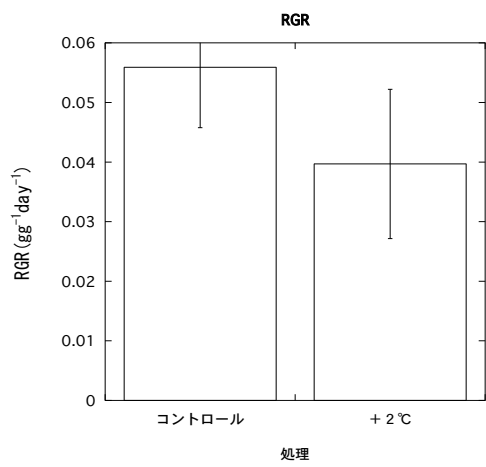


図 20 異なる温度条件下で栽培したタウコギの生長解析結果

群馬大学荒牧キャンパス構内の裸地(相対光量密度 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上昇させた 2°C 上昇区を設置し、それぞれにポット植えした苗を入れて 14 日間栽培した。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 = 14。

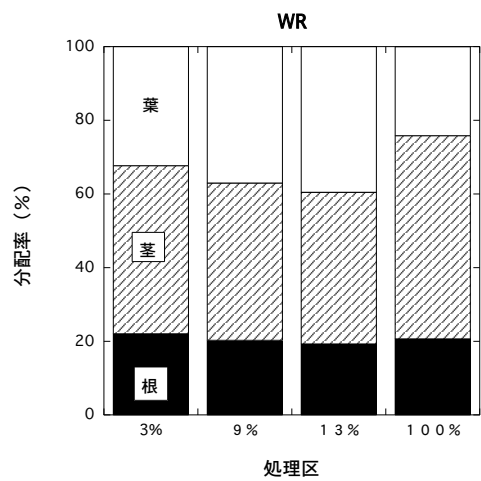
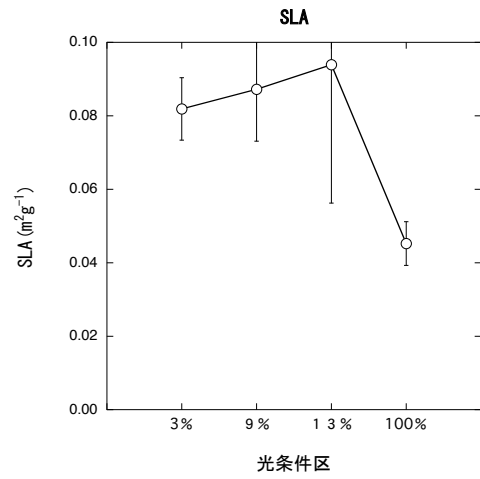
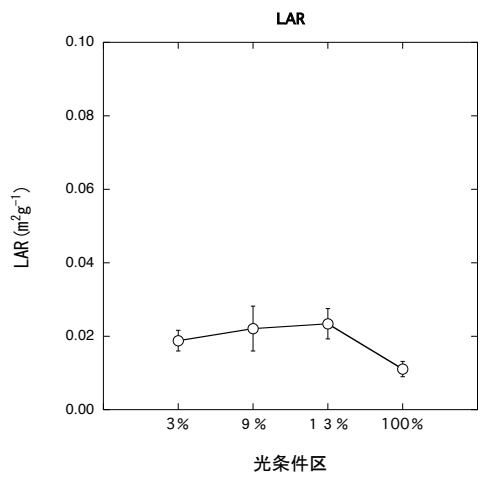
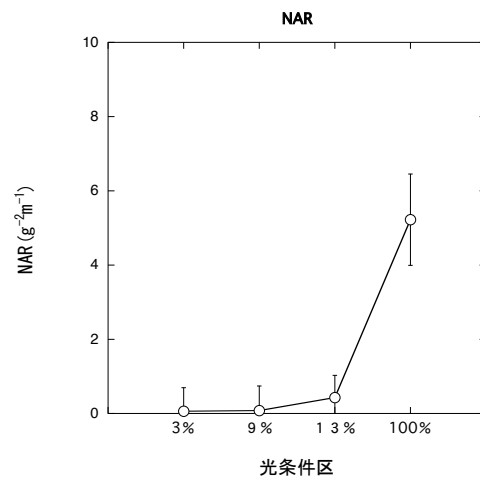
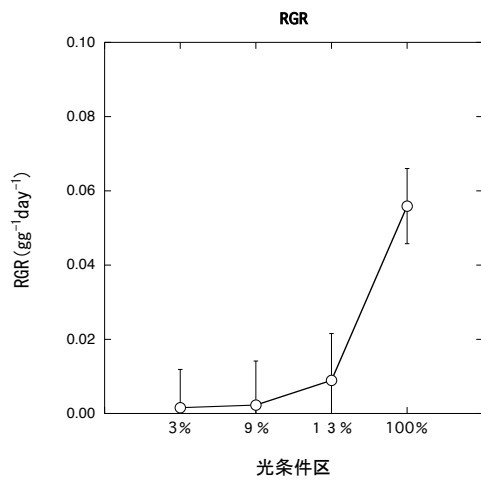


図 21 異なる光条件下で栽培したタウコギの生長解析結果

群馬大学荒牧キャンパス構内の裸地に設置した異なる光条件区（相対光量密度 3%、9%、13%、100%）内で、ポット植えした苗を 14 日間栽培した。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 = 14。

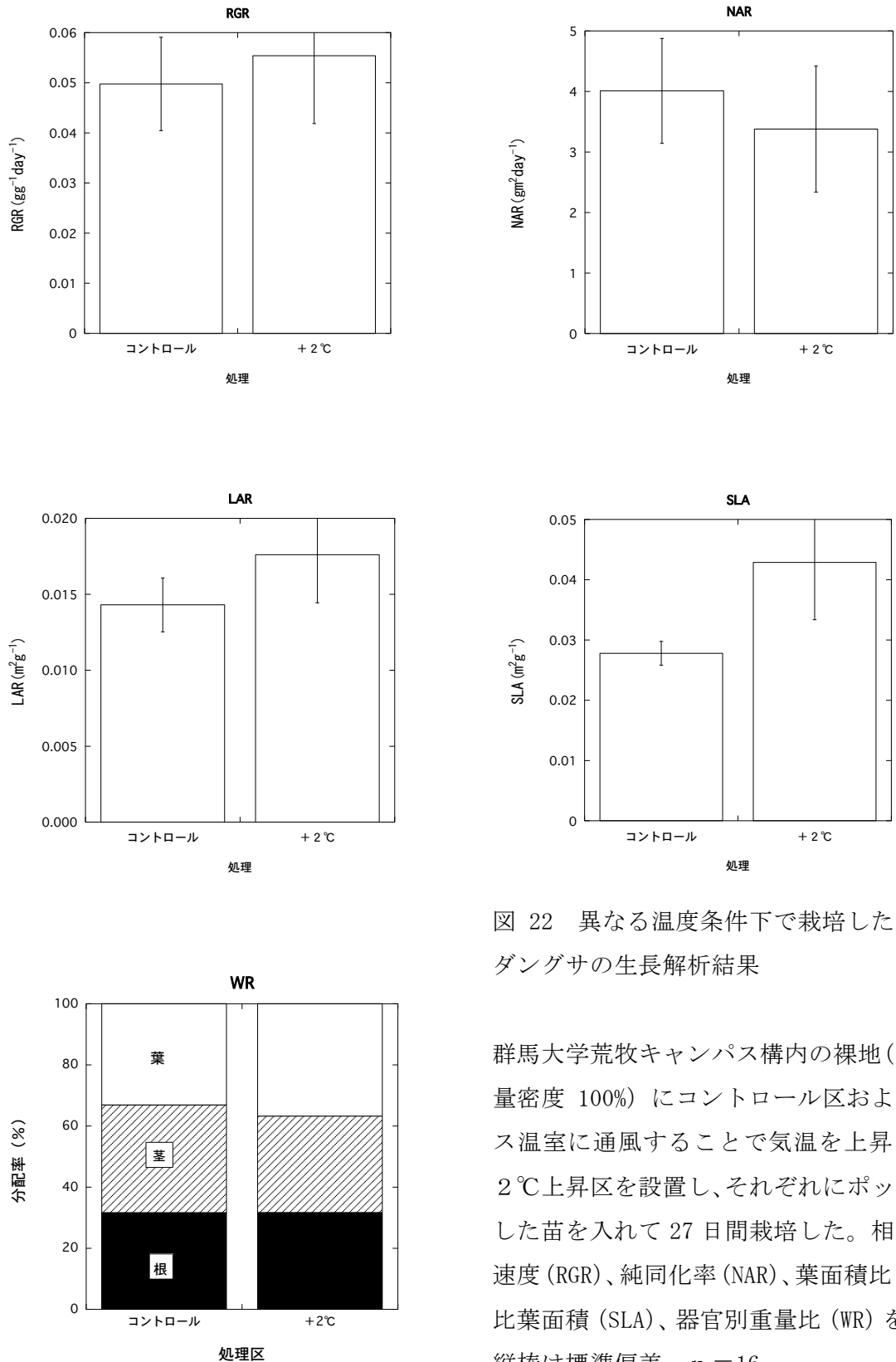


図 22 異なる温度条件下で栽培したコセンダングサの生長解析結果

群馬大学荒牧キャンパス構内の裸地(相対光量密度 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上昇させた 2°C 上昇区を設置し、それぞれにポット植えた苗を入れて 27 日間栽培した。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 = 16。

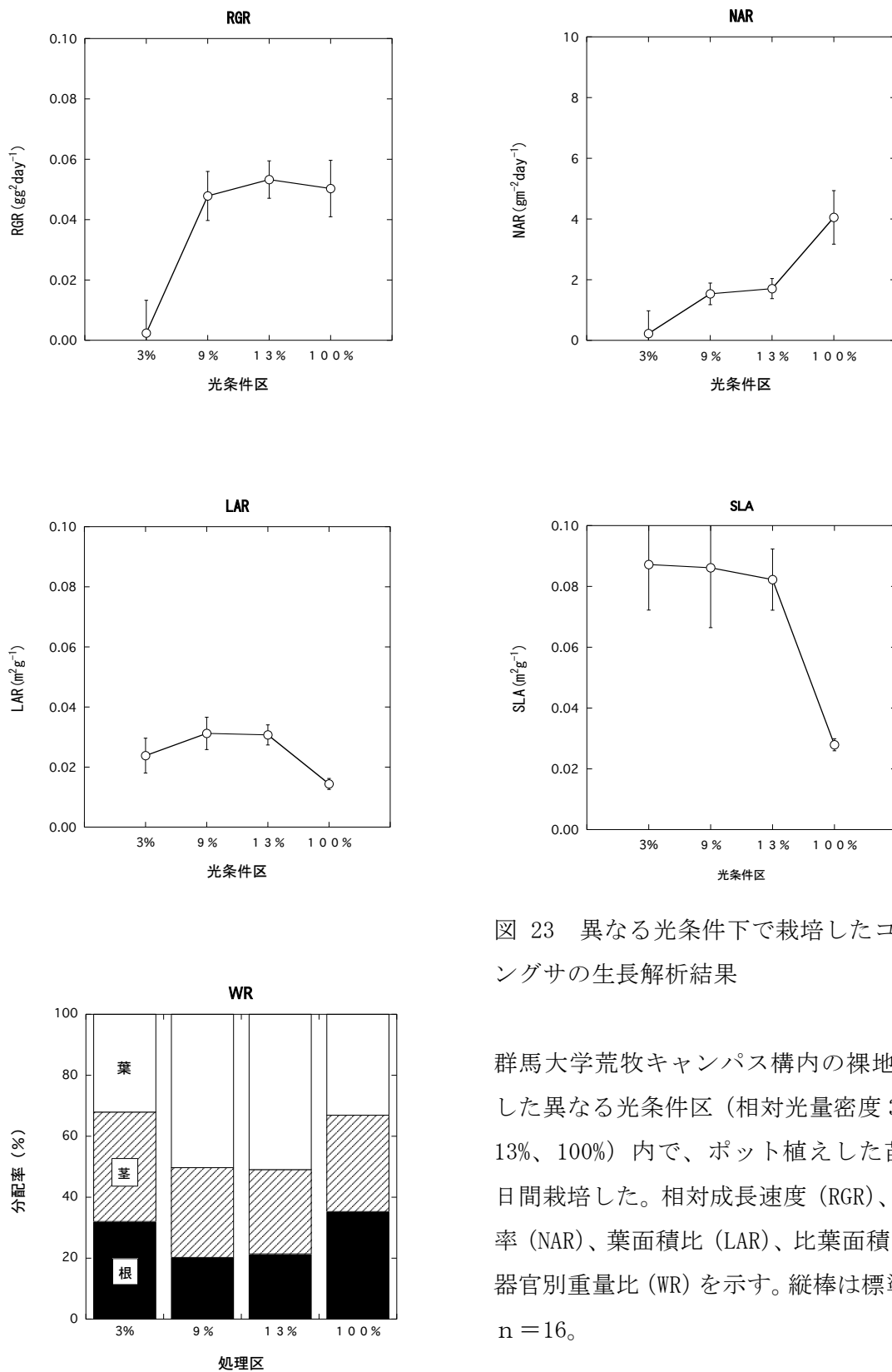


図 23 異なる光条件下で栽培したコセンダングサの生長解析結果

群馬大学荒牧キャンパス構内の裸地に設置した異なる光条件区（相対光量密度 3%、9%、13%、100%）内で、ポット植えした苗を 27 日間栽培した。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 = 16。



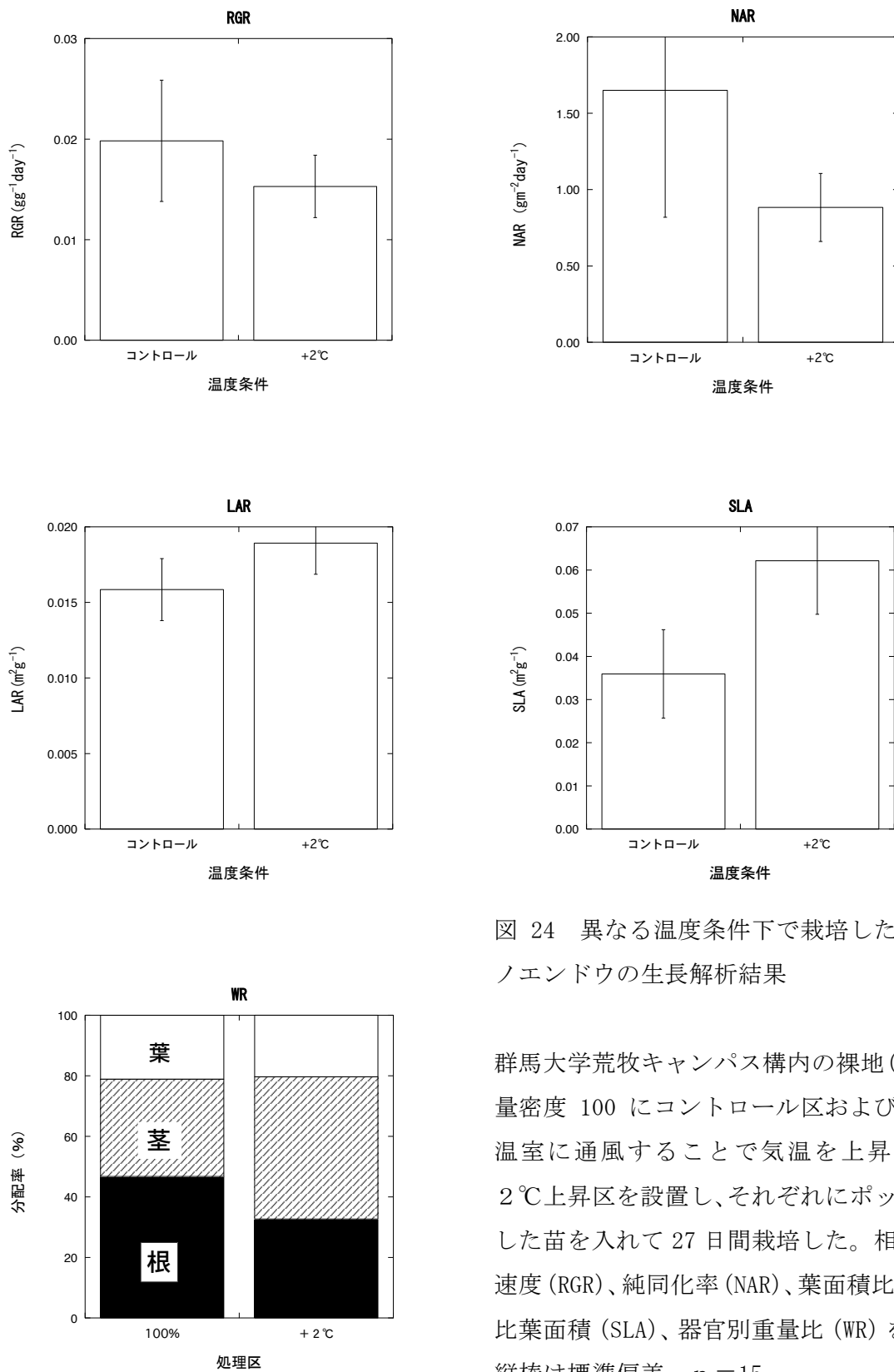


図 24 異なる温度条件下で栽培したカラスノエンドウの生長解析結果

群馬大学荒牧キャンパス構内の裸地(相対光量密度 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上昇させた 2°C 上昇区を設置し、それぞれにポット植えた苗を入れて 27 日間栽培した。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 = 15。

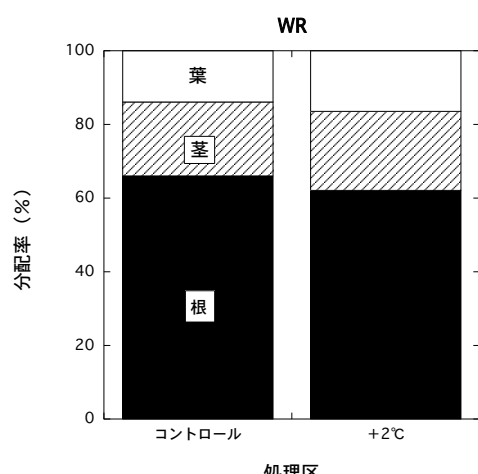
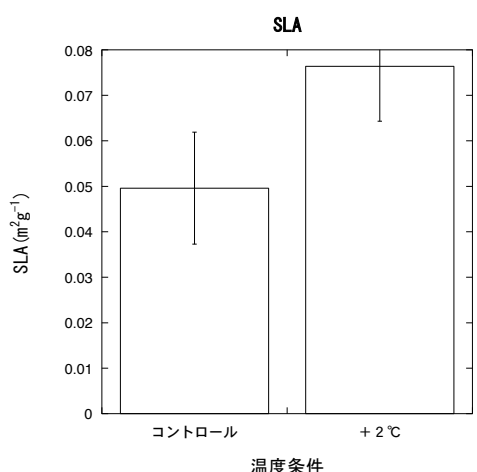
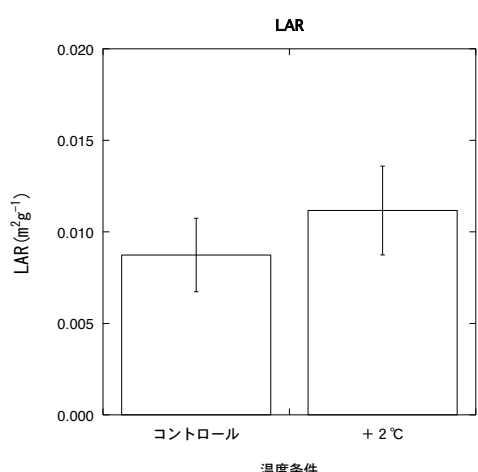
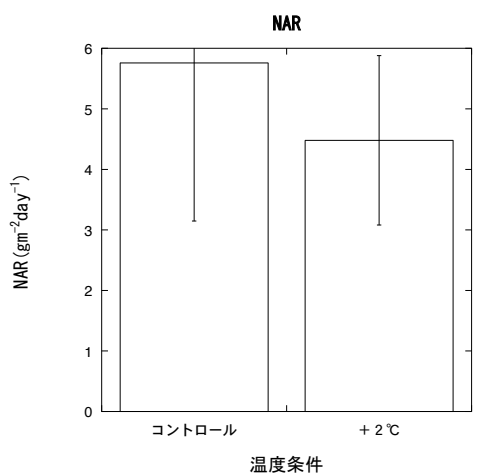
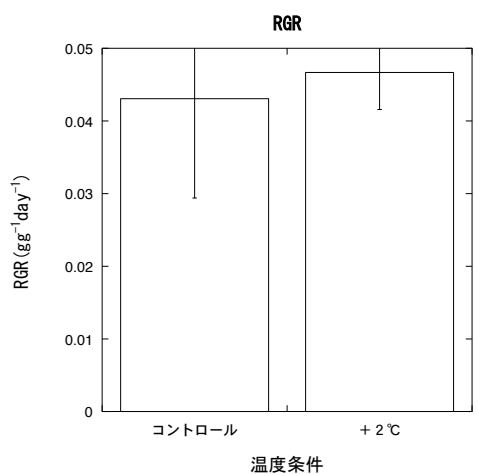


図 25 異なる温度条件下で栽培したナヨクサフジの生長解析結果

群馬大学荒牧キャンパス構内の裸地(相対光量密度 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上昇させた 2°C 上昇区を設置し、それぞれにポット植えした苗を入れて 14 日間栽培した。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 = 14-16。

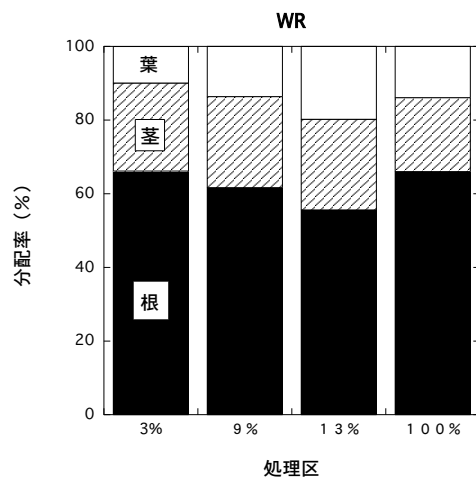
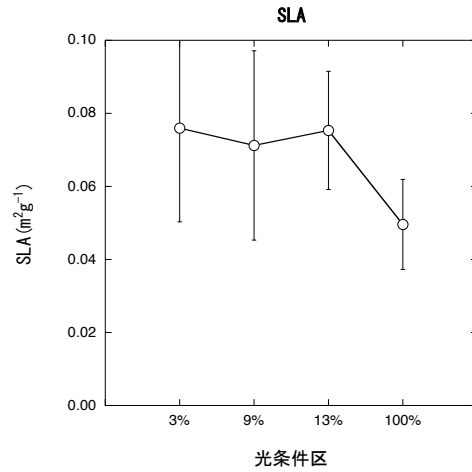
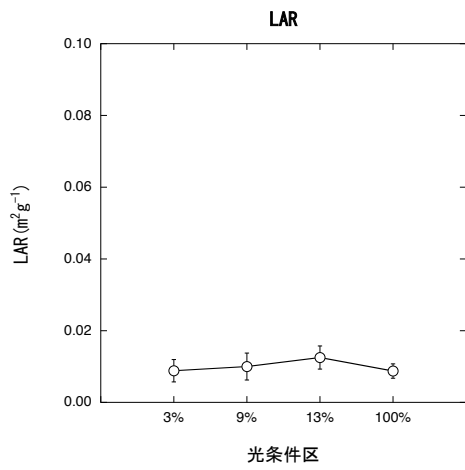
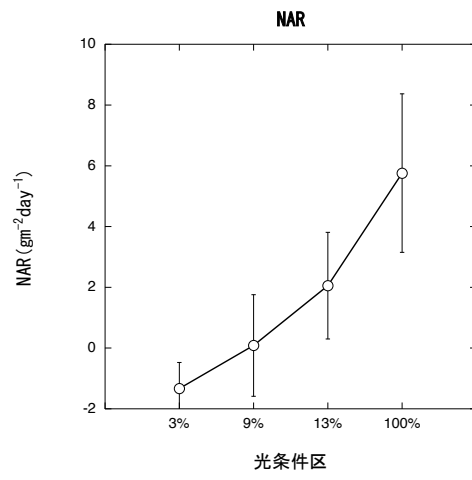
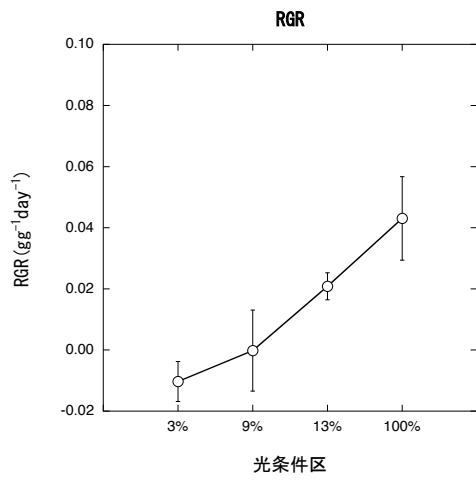


図 26 異なる光条件下で栽培したナヨクサフジの生長解析結果

群馬大学荒牧キャンパス構内の裸地に設置した異なる光条件区（相対光量密度 3%、9%、13%、100%）内で、ポット植えした苗を 14 日間栽培した。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 = 14-16。

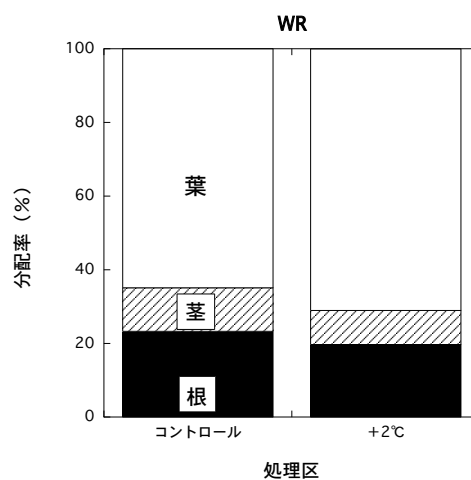
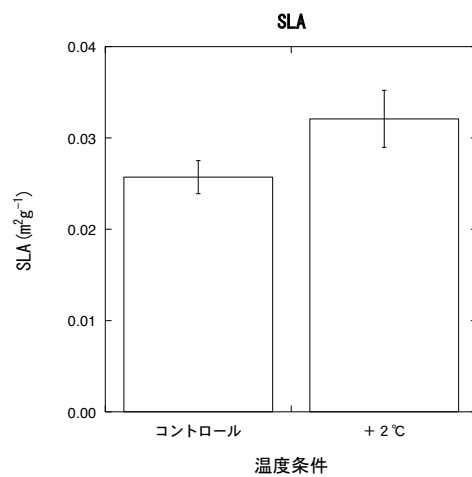
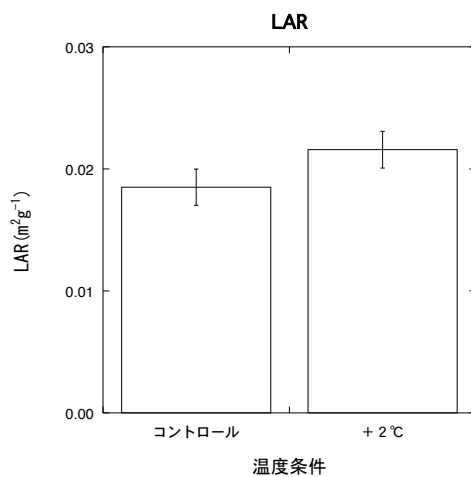
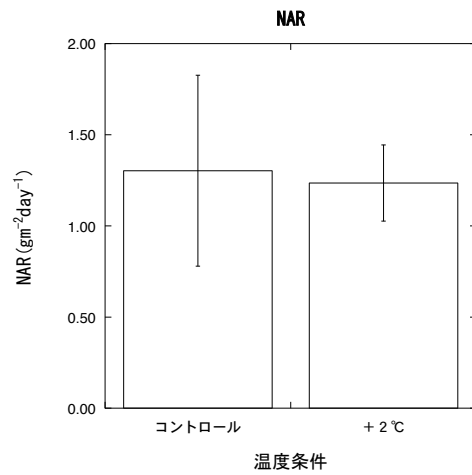
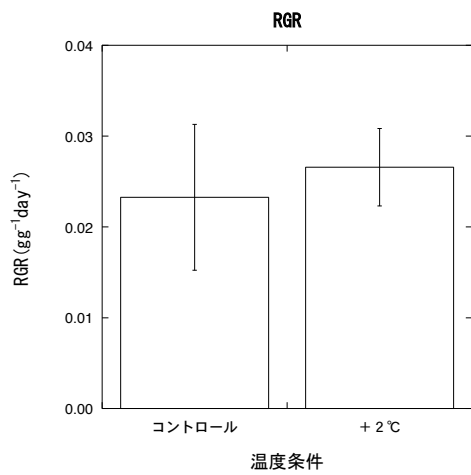


図 27 異なる温度条件下で栽培したオミナエシの生長解析結果

群馬大学荒牧キャンパス構内の裸地(相対光量密度 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上昇させた 2°C 上昇区を設置し、それぞれにポット植えした苗を入れて 24 日間栽培した。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。

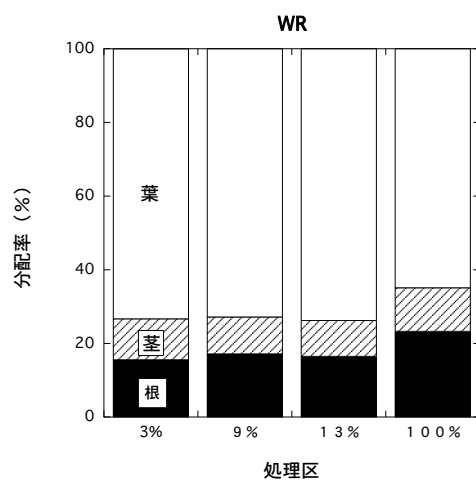
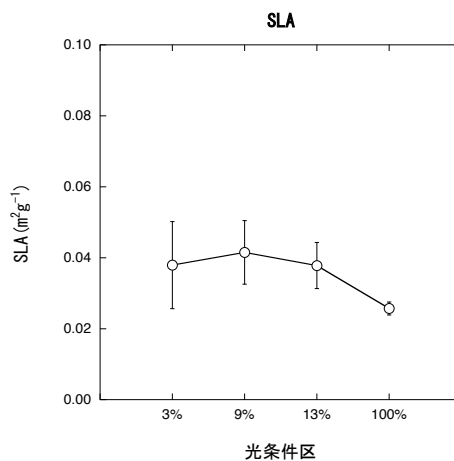
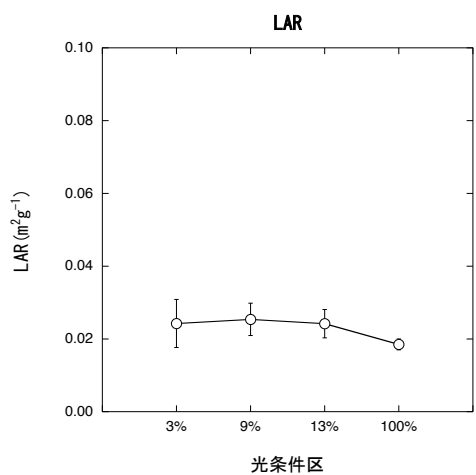
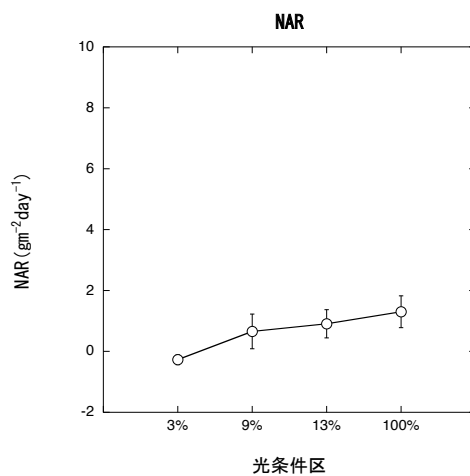
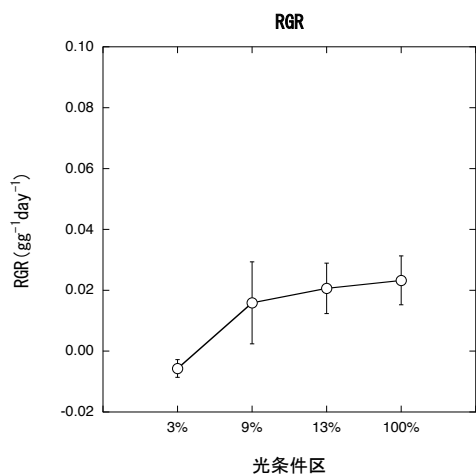


図 28 異なる光条件下で栽培したオミナエシの生長解析結果

群馬大学荒牧キャンパス構内の裸地に設置した異なる光条件区（相対光量密度 3%、9%、13%、100%）内で、ポット植えした苗を 24 日間栽培した。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。 $n = 6$ 。

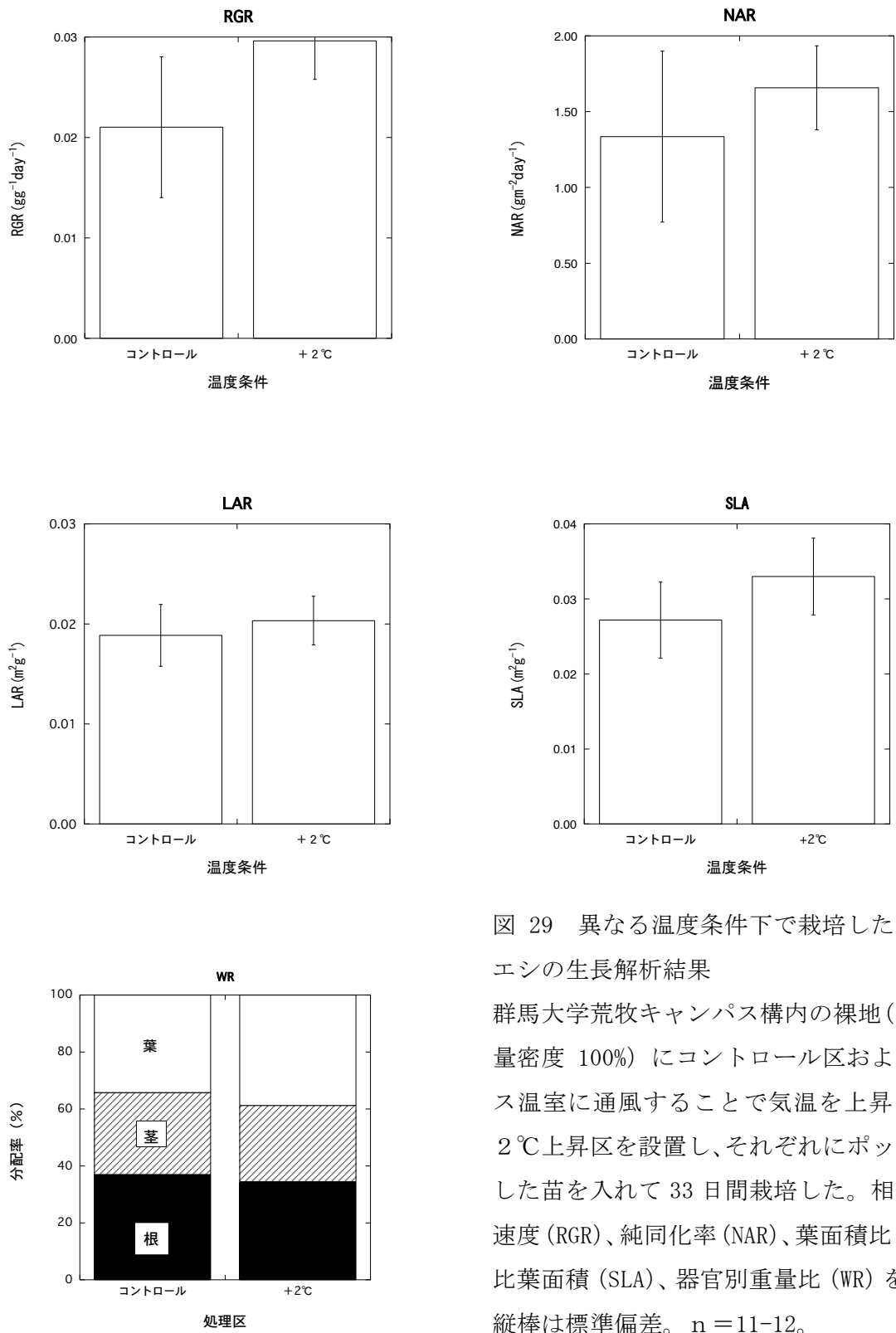


図 29 異なる温度条件下で栽培したオトコエシの生長解析結果

群馬大学荒牧キャンパス構内の裸地(相対光量密度 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上昇させた 2°C 上昇区を設置し、それぞれにポット植えした苗を入れて 33 日間栽培した。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 = 11-12。

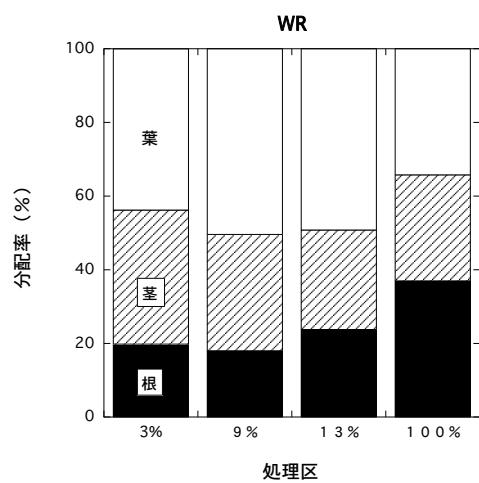
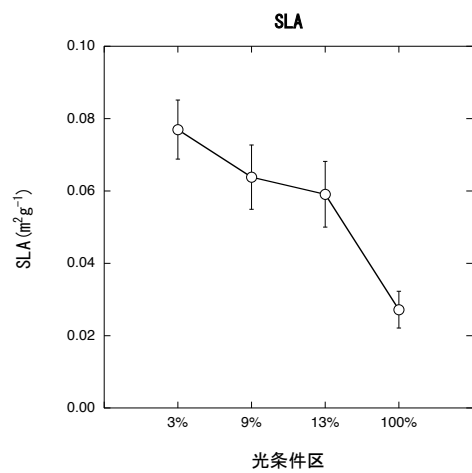
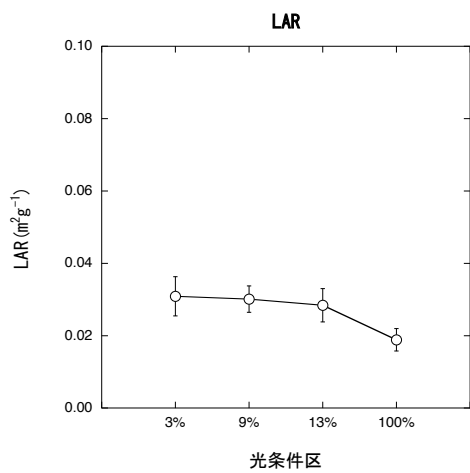
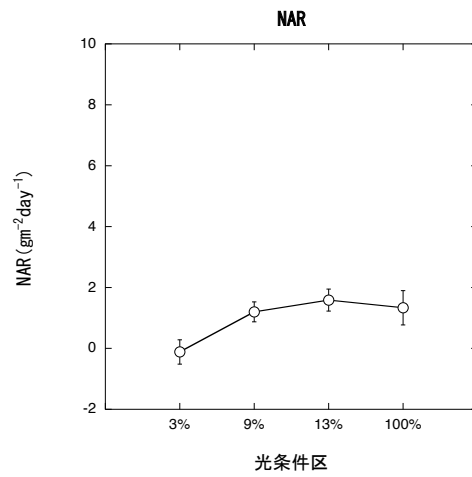
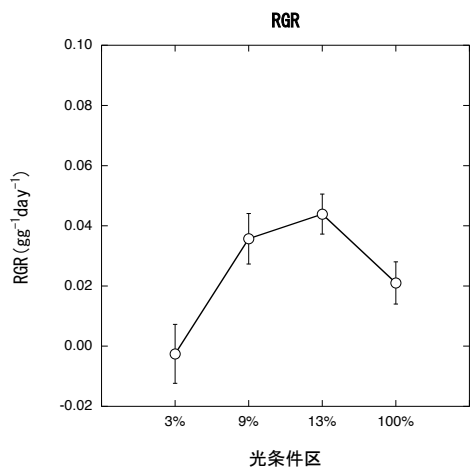


図 30 異なる光条件下で栽培したオトコエシの生長解析結果

群馬大学荒牧キャンパス構内の裸地に設置した異なる光条件区（相対光量密度 3%、9%、13%、100%）内で、ポット植えした苗を 33 日間栽培した。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 = 11-12。

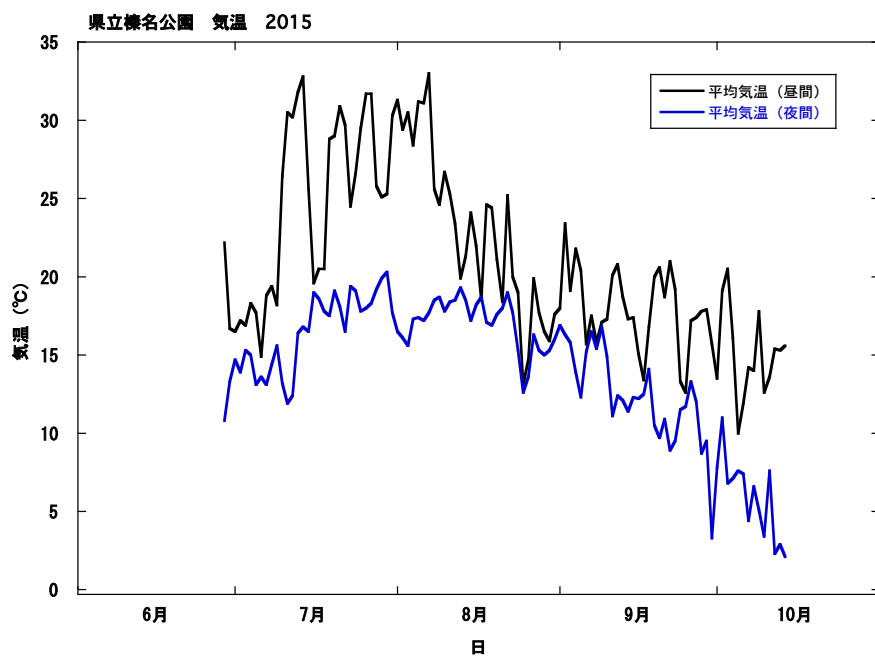


図 31 県立榛名公園の昼夜の日平均気温の季節変化

2015年5月23日から9月30日までの間、沼ノ原で気温を測定した。昼間の日平均気温（黒線）、夜間の日平均気温（青線）を示す。