

卒業論文

題名

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

学籍番号

13602023

氏名

佐藤颯哉

指導教員名

石川真一教官

平成 29 年 1 月 18 日 提出

概要

我々人類は生態系というシステムの中で、様々な生物と相互に関係し合いながら生活を行っている。しかし、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。いわゆる生物多様性の危機である。しかし、多くの種が失われる一方で増加するものがある。それは、外来生物である。外来生物は、生物間相互作用を通じて在来種を脅かす、在来種と交雑して雑種をつくり在来種の純系を失わせる、生態系の物理的な基盤を変化させるなどの深刻な問題を引き起こすため、早急な対処が求められる。

外来植物は在来生物や生態系などに様々な影響を与えるとされ、積極的な防除が望まれている。しかしその生態的特徴と野外における生育条件といった、駆除対策の策定の基本となる情報が解明されていない種がほとんどであるため、いったん侵入・定着した外来植物を根絶するのは困難を極めている。そこで本研究では、外来植物の侵入状況と、それらの生態的特徴の解明を目的として、現地調査と発芽実験・栽培実験・生長解析等の実験を行った。現地調査は、前橋市関根町郵便局付近・渡良瀬遊水池・八ツ場ダム周辺における外来植物の分布調査と群馬県内の谷田川での植生調査を行った。そして実験では、アメリカセンダングサ・オオブタクサ・シナダレスズメガヤ・ハリエンジュ・ヒメモロコシ・ナヨクサフジをモデル植物とした。また、カラスノエンドウもモデルとして用い、ナヨクサフジとの競争関係を考察した。

調査・実験の結果、以下に示す事柄が確認された。まず、外来植物の侵入状況についてである。第1に関根町郵便局付近においては、大量のナヨクサフジの生育が確認できた。その地点数は、2015年度に31地点であったものが233地点と激増している。また、昨年では見られなかった群馬大学荒牧キャンパス内においても15地点の場所でナヨクサフジが確認され、今後生息域が徐々に拡大していくことが懸念される。第2に渡良瀬遊水池ではオオブタクサの繁茂した集団が複数みられ、約926.96㎡のオオブタクサ群落が確認された。この群落ではおよそ6540630個の種子が作られると予想され、生息域拡大に拍車をかけるものといえる。このままオオブタクサが繁茂すれば在来の植物の生育を阻害する可能性がある。第3に八ツ場ダム周辺においては69地点でハリエンジュの繁茂が確認された。最上流部にあたる長野原駅付近において、巨大なハリエンジュ群落（500本以上）が確認され、この場所を放置すればハリエンジュ群落がさらに拡大すると思われる。そして、谷田川においても、ナヨクサフジやオオブタクサ、ヒメモロコシといった外来植物が11種確認されている。

次に、外来植物の生態的特徴についてである。アメリカセンダングサは本研究を通して冷湿処理の必要性和、広い温度域で発芽するという特性が確認でき、様々な環境条件に適応できるものと推察できる。オオブタクサは今回の研究を通じて冷湿処理の必要性和、比較的低い温度帯が発芽最適温度域であるという事が確認できた。また5~6年の冷凍保存の下でも種子が劣化しないことから、本種は土壌シードバンクを形成するものとも考察できる。ハリエンジュは発芽実験を通じて、広範な気候条件の下で発芽する事が可能であると推察された。そして、8年の冷凍保存を経た後もおよそ6割の発芽率を示しており、土壌シードバンクが形成される事が示唆される。ナヨクサフジにおいては発芽実験から、広範な環境条件の下で発芽が可能であるということが明らかになった。また、本種の種子は種皮が厚くそのままでは吸水しないため、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される。シナダレスズメガヤは、本研究の結果、種子は長くとも3年で劣化することが示された。そのため本種は土壌シードバンクを作らないと考えられる。また、発芽には冷湿処理を必要とするように形質が変化した可能性が示唆された。ヒメモロコシについては本研究から冷湿処理の必要性が再確認された。

また生長解析より、オオブタクサ・ハリエンジュ・ナヨクサフジは光依存性が高く、林床のような暗い環境下では著しく成長が悪くなるという推論が得られた。一方アメリカセンダングサは前述の3種に比べると、林床のような暗い環境下においてもある程度の耐性があることが推察される。

このように外来植物は種ごとの違いがあるものの、いずれも生存競争を勝ち抜くような特性を持ち、定着能力が高い事が明らかとなった。つまり他種に先駆けて発芽し、早い段階で生長し他の植物の生育を阻害しているといえる。事実、在来植物であるカラスノエンドウは本研究からナヨクサフジとの競合関係が見受けられ、両者を比較すると、ナヨクサフジがカラスノエンドウの生育を阻害する可能性があるという結論が得られた。

以上の様に外来植物の侵入状況は深刻といえる。外来植物の繁茂の影には在来植物との競争が存在しており、放置しておけば在来植物が絶滅の危機へと瀕する。従って、迅速な防除等の対応が求められる。今回の研究内容を踏まえればオオブタクサ・ハリエンジュ・ナヨクサフジは土壌シードバンクを形成する可能性が高く徹底的な除去作業が必要であり、シナダレスズメガヤに関しては単純な引き抜き作業のみで良いという事になる。この様な、外来植物の生態的特徴に沿った駆除を行うことで合理的な対策を策定する事ができる。その為にも、外来植物の環境適応様式等の様々なデータを蓄積し、各外来植物の生態的特性を解明する必要がある。そして、除去作業だけでなく長期的なモニタリングを行い外来植物の侵入そのものを防ぐ必要もある。この様に、外来植物への対策として今後研究をつづけより多くの多様なデータを蓄積し、かつ継続的なモニタリングを行っていく必要がある。

目次

緒言	5
私たちの住む生態系	5
地球環境の危機	5
ヒトによる環境改変	5
生態系サービス (ecosystem goods and services)	6
生物多様性 (biodiversity)	6
日本の自然環境と多様性	7
生物多様性の危機	7
第1の危機：人間活動と開発	8
第2の危機：自然に対する働きかけの縮小	8
第3の危機：外来生物と新規化学物質	8
第4の危機：地球環境の変化	9
外来種 (alien species) と外来生物	9
国内外来生物と国外外来生物	9
外来生物問題	10
外来生物の侵入経路	11
外来生物の増加原因	11
外来生物の戦略	12
外来生物の相乗効果	12
外来生物への対策	13
外来生物法	13
外来植物の特徴	14
河原の生態系	14
種子休眠と埋土種子	15

外来植物の移入経路	15
外来植物の侵入段階	16
日本における外来植物	16
外来植物の定着	17
外来植物の進化	18
群馬県における外来植物の概況	18
外来植物の具体例	18
本研究の目的	21
調査地概要	22
群馬県前橋市関根町郵便局付近	22
渡良瀬遊水池	22
八ツ場ダム	23
谷田川	23
材料および調査・実験方法	24
材料植物	24
植生調査	24
分布調査	25
種子発芽の冷湿処理ならびに温度依存性実験	25
冷湿処理（低温湿層処理）	26
硫酸処理	26
異なる環境下における栽培実験	26
実験用植物の育苗とサンプリング方法	26
光強度を調節した栽培実験	27
気温を調節した栽培実験	27
生長解析	27
統計解析	29

群馬大学荒牧キャンパスの気温測定.....	29
結果・考察	30
モデル外来植物の分布	30
ナヨクサフジ (群馬県前橋市関根町郵便局付近)	30
オオブタクサ (渡良瀬遊水池)	30
ハリエンジュ (ハッ場ダム周辺)	30
谷田川右岸の植生調査	31
種子発芽の冷湿処理ならびに温度依存性実験	32
アメリカセンダングサ.....	32
オオブタクサ (菅平産と前橋産)	32
ハリエンジュ.....	33
ナヨクサフジ.....	33
カラスノエンドウ.....	34
シナダレスズメガヤ (2013年産と2016年産)	34
ヒメモロコシ.....	35
異なる光条件下で栽培した外来植物の生長解析	36
アメリカセンダングサ.....	36
オオブタクサ(菅平産).....	36
オオブタクサ(前橋産).....	37
ハリエンジュ.....	38
ナヨクサフジ.....	38
カラスノエンドウ.....	39
異なる温度条件下で栽培した外来植物の生長解析	40
結 論	41

謝 辞.....	44
引用文献・引用 web ページ.....	45
図表・写真.....	47

緒言

私たちの住む生態系

我々は今現在どのような場所で生きているだろうか。多様な状況があるだろうが、至極単純に考えてみると、我々は地球という惑星の上で生きているといえる。その中には人間だけでなく様々な生き物が活動をしている。つまり、我々ヒトは生態系の中で暮らしを営む生物の一種だといえる。

生態系とは生態学の視点からいえば「ある空間で生活するすべての生物とその非生物的環境を含むシステム」、と定義される。例えば、樹木だけでなく、そこで生活する植物、昆虫、脊椎動物、土壌生物など、あらゆる生物、さらには、土壌、空気、水などの無機的要素を含む複雑な相互作用のシステムである。また小さな水たまりの狭い空間の中にも、そこで生活する多数の微生物とそれらにとっての無生物的な環境とからなる入り組んだシステムが存在する。すなわち大小を問わず生態系というシステムは、複数の生物種の個体群などの生物的要素を含み、その間にはさまざまな種間の関係が結ばれ、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性格を持っている。また、エネルギーの流れや物質の循環などの機能面では、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（鷲谷 1999）。

このように我々人類も生態系というシステムの中で、様々な生物と相互に関係し合いながら生活を行っている。しかし、今この生態系は危機に瀕している。すなわち環境問題の進行である。

地球環境の危機

世界中で多くの原始的自然が失われ、1960年代に入ると公害をはじめとする環境問題が社会問題化したことによって、大気・水環境の保全の必要性が認識されるようになった。これに伴い、汚染物質や有機汚濁物質に対する各種法規制が整備された。さらに、20世紀後半以降、地球温暖化や酸性雨といった新たな地球環境問題の顕在化により、生態系の果たす役割が再認識され、自然資源の持続的な利用の為にこそ生物多様性の保護が必要であると考えられるようになった。そして、1992年に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、地球環境問題の解決の為に生物多様性条約と気候変動枠組条約とが加盟国によって批准された。そして、2010年10月に名古屋で開かれたCOP10（生物多様性条約第10回締約国会議）は約180カ国・組織が参加して、国を超えての生物多様性と生態系保全のネットワークを構築しつつある（日本生態学会 2012）。

ヒトによる環境改変

人間活動による生態系への影響が顕著となったのは、約1万年前に人類が農業を開始し、定住するようになってからである。しかし、18世紀後半～19世紀にかけての先進国での産業革命、さらには20世紀に勃発した2度の世界大戦を契機とする鉄鋼や石油コンビナートなどの重工業化によって生じた大規模な公害は、生態系への人為的影響としては、その規模においても質においても、それ以前とは格段に異なる様相を呈している。人為による生態系の劣化と、環境問題に

については、大まかに以下の5つにまとめられる。

- 1) 都市化に伴う人口集中を支えてきた食糧増産のための農地開発・宅地開発による自然生態系の消失
- 2) 重工業化による産業構造の変化がもたらした大気汚染や水質汚染などの公害や酸性雨
- 3) 化石燃料の燃焼などによる地球温暖化などの気候変動にかかわる問題
- 4) 過放牧による砂漠化や森林破壊による土壌流出といった土壌と水資源に関する問題
- 5) 人類の広域移動による生物種の移動拡散と外来種問題、感染症の世界的蔓延の問題
(日本生態学会 2012)

この様に現状の環境問題は我々の生活を着実に蝕みつつある。これらの問題はつきつめれば生態系の不安定化につながる。生態系の安定性は、地球環境の持続可能性を保障する生態系の健全性につながる重要な要素であり、ヒトの活動がもたらす強力な急激な環境変化は、様々な生態系に、復帰困難な相転移であるカタストロフィックシフトをもたらし始める(鷲谷ら 2005)。

それにより、本来であれば、生態系が安定化することで我々が得られる生態系サービスを楽しむことができなくなってしまっている。

生態系サービス (ecosystem goods and services)

生態系サービスとは、生態系が健全に機能することによって、人を含むすべての生物とそれを支える環境の存続が保障される恩恵のことである。Millennium Ecosystem Assessment (2005)によれば、大まかに分けるとすべてのサービスの基盤となる基盤サービス、それを基に成り立つ供給サービス、調整サービス、文化的サービスという4つのサービスに分類される。まず、1つ目の基盤サービスは、植物が光合成によって呼吸に必要な酸素を生産することや、すべての生物体の存在を可能にする一次生産、そしてそれを支える栄養塩や水の循環という生態系が成り立つための基礎的な機能である。2つ目の供給サービスは、食料や医薬品、衣服の基となる繊維や皮革、燃料、木材などの人間が毎日の暮らしで利用しているものを供給するサービス、3つ目の調整サービスは森林による気候の温和化や洪水の調整、訪花昆虫による花の受粉の媒介、微生物による環境の浄化などといった機能を含む概念である。そして4つ目の文化的サービスは文化形成や観光資源などの人間の精神に恩恵を与える概念といえる(日本生態学会 2015)。

この様に、生態系からは多くの恩恵を受ける事ができる。ならば、この恩恵を持続的に得るためにはどうすればよいのだろうか。それに対する一つの答えとして生物多様性を守る必要がある、といえる。

生物多様性 (biodiversity)

生物多様性は生物学的多様性 (biological diversity) を短縮した用語として誕生した。その意味するところは3つのレベル、すなわち遺伝子、種、生態系の多様性である。遺伝子の多様性とは集団内や集団間に見られる遺伝的違いのことで、生物多様性の文脈の中ではもっぱら同種内の多様性が論じられる。そして、種の多様性とは多様な生物種の存在、つまり種組成の多様性を示し、生態系の多様性は、森林や草原などの「場」の多様性を示す。

また、これら3つの多様性は、それぞれ相互に関連しあっている。遺伝子の多様性は、生物進化の原動力である。自然選択か遺伝的浮動かにかかわらず、元々集団に遺伝的変異が存在しなければ進化や種分化は起こらない。遺伝子多様性は種の多様性の源泉であることは疑いない。もう一つ重要なのは、個体群や種の存続に遺伝的多様性が重要である点である。近親交配が引き起こす近交弱勢は、個体群を絶滅の危機に導く要因となる。種の多様性の創出、維持の双方にとって遺伝的多様性は重要といえる。一方、生態系の多様性は、種の多様性を支える場の多様性と言い換えることができる。生態系そのものが生物と環境との相互作用で形成された実体であることも、生態系を生物多様性の一階層としてあげることのできる正当な理由の一つであろう。

さらに、各レベルの多様性は、生態系機能と密接に関係している。最近の研究により、遺伝子や種の多様性は、生態系機能の向上や安定性に少なからず貢献していること、また生態系の多様性は、個々の生態系や複合生態系の安定性や持続性に大きな役割を果たしていることが明らかになっている。そして、遺伝子、種、生態系の多様性が生態系機能の向上に役立っているとすれば、それは生物進化などを通じて生物多様性にフィードバックされると考えてよいだろう。

つまり、生物多様性は、健全な生態系が生み出す自然の恵みの源泉であるとともに、生態系の不健全化を監視し、防止するための指標として捉える事ができる(鷲谷ら 2005;宮下ら 2012)。

これらの3つの多様性が維持されることで、安定的な生態系サービスの恩恵を得る事ができる。

日本の自然環境と多様性

この多様性というものを日本という国の観点から見てみる。日本列島は、湿潤地帯としては世界有数の生物多様性を誇る。その多様性の屋台骨ともいえるのが、自生の維管束植物六千種以上からなる植物相の豊かさである。加えて、日本列島は、面積が狭くとも南北に長く、標高の高い脊梁山脈をもつことから、気候の多様性に富んでいる。また、地史的にも、アジア大陸との間で幾度となく連続と分離を繰り返したこと、氷河期に氷河の影響をそれ程受けなかったことから、氷河期の遺存生物など、多様な生物の生存を可能なものとしてきた。さらに言えば、日本列島はまた、火山や地震の多い環太平洋火山帯に位置し、火山活動などが生態系に攪乱をもたらし、台風や積雪といったメリハリのきいた気象も生態系に攪乱の機会を与えてきた(鷲谷ら 2005)。

この様に日本では多様性が保たれてきた。しかし、近年では日本に限らず、この生物多様性が失われ、生態系サービスの喪失、すなわち生態系の不安定化を招いている。このことは生物多様性の危機と呼ばれている。

生物多様性の危機

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)。

絶滅の恐れのある野生生物の種のリストをレッドリスト (Red List)、それらの種の生育・生息状況や減少の要因などをとりまとめて本の形にしたものをレッドデータブック (Red Data Book)と呼んでいる。日本におけるデータを見てみると、2013年度までに国内で絶滅または野生絶滅、

すなわち野生状態では絶滅したが、飼育・栽培化で生存している種は動物では 48 種、植物では 40 種、菌類では 25 種となっている。また絶滅の恐れのある種として 3536 種が載っている（日本生態学会 2015）。

では何が原因で、この様な種の絶滅の危険性が高まってきたのだろうか。日本政府は生物多様性条約の締結を機に「生物多様性国家戦略」を策定している。その中で絶滅の危険性の要因を以下の 4 つに整理している（日本生態学会 2015）。

第 1 の危機：人間活動と開発

人間活動の拡大や開発による生育・生息場所の破壊、分断化、環境悪化（劣化）は、生物多様性の低下をもたらしてきた大きな原因である。日本では高度経済成長とともにさまざまな開発事業が進められてきた。これらの事業によって消滅した森林や湿地の面積は膨大であり、そこに生息・生育していた動植物は姿を消した。日本の河川の大半はダムや堰の建設によって縦断方向の連続性が失われ、遡上性魚類やオオサンショウウオなど川を遡る生活史をもつ多くの動物の移動が困難になった。護岸工事によって水域から陸域に及ぶ水陸移行帯が消滅し、横断方向の環境の連続性も失われた。物理的な構造の改変だけでなく、ダムの建設による水位の安定化は、氾濫という自然攪乱を消失あるいは減少させ、攪乱に依存する生物を消失に追い込んでいる。さらに流域における人間活動にともなう産業廃水や生活廃水の流入で湖沼や河川の水質汚濁と富栄養化が進んだことも多くの動植物の消滅要因となった。また動植物の密漁・乱獲や盗掘という人間の行為も含まれる（日本生態学会 2015）。

第 2 の危機：自然に対する働きかけの縮小

自然に対する人間の働きかけの縮小・撤退も生物多様性の危機をもたらしてきた。人間の暮らしを支えてきた燃料は、長い間、薪や炭など、森の恵みであった。燃料を得るために人間は周辺の山で木を伐り、炭を焼き、農地の肥料として落ち葉を集めた。その結果、里山特有の明るい林床が維持されてきた。しかし、1960 年代から石油やガスが燃料として広く使われるようになる。この燃料革命以降は里山が利用されなくなり、植生遷移が進行して林床が暗くなり、明るい林に適応していた昆虫や植物は減少の一途をたどった。半自然草地や水田の畦畔のような草地環境も、人間が火入れや草刈りをすることで維持されてきた。しかし、近年は大半の草地が利用も管理もされずに放置され、人の営みに依存して存在してきた多くの生物種が絶滅危惧種となっている（日本生態学会 2015）。

第 3 の危機：外来生物と新規化学物質

第 3 の危機は「人間により持ち込まれたものによる危機」である。代表的なものは外来生物と農薬などの新規化学物質である。外来生物とは、簡潔にまとめると意図的であるか、非意図的であるかを問わず本来の分布領域に導入もしくは侵入した生物の事を指す。詳細は後述する。新規化学物質については、生物多様性に与えるリスクという観点からの実証的研究は少ないため今後の研究が期待される（日本生態学会 2015）。

第4の危機：地球環境の変化

生物多様性を脅かす4つ目の要因は地球温暖化である。温暖化の進行によって温度環境の変化に適応できずに絶滅する種が少なくないと考えられている。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第4次報告書（2007）では、将来の平均気温の上昇が1.5~2.5℃を超えると動植物の約20~30%の絶滅リスクが高まると予測している（日本生態学会 2015）。

以上の様に現在、生物多様性は危機にさらされ様々なものが失われようとしている。しかし、多くの種が失われる一方で増加するものがある。それは、先の第3の危機でも挙がっていた外来種である。それでは、この外来種とはどのようなものなのだろうか。

外来種（alien species）と外来生物

第6回生物多様性締約国会議によれば、外来種とは、過去あるいは現在の自然分布領域外に導入された種、亜種、変種などの分類群を指し、生存して繁殖する事のできるあらゆる器官、配偶子、種子、卵、無性的繁殖子を含む。尚、多くの外来種は移送先の環境になじめず、定着できない。しかし一部に新天地の環境に適応し、本来の生息地よりも繁栄して、在来の生物相や生態系に悪影響を及ぼす種がいる。つまり、外来種のうち、その導入もしくは拡散が生物多様性を脅かすものを侵略的外来種（invasive alien species）という。また「外来種」との似た用語として「外来生物」というものがあるが、前者は分類群の対象が原則として「種」の単位である一方、後者では種に加えてより小さな分類群、あるいは遺伝子、地域個体群などを含む広い概念として認識される。以下、本稿では「外来生物」に関して言及していくこととする。（日本生態学会 2002；日本生態学会 2015；種生物学会 2010）

外来生物の本来の意味は外国から移入された生物全体を指すものであり、渡来年代に関わらずこの定義が当てはまる。しかし、外来生物問題において取り扱う範囲は同じではない。有史以前に渡来したと推測される種において野生状態で見出すことのできるもの、例えばチョウジタデ *Ludwigia epilobioides* Maxim やヒデリコ *Fimbristylis miliacea* (L.) Vahl などの水田雑草種はすでに日本の自然の主要な構成要素となっている。野生状態で見出すことのできない栽培植物や家畜などはそもそも生態系などに被害を及ぼし得ない。これらの種のふるまいについては外来生物問題という事は適切ではない。つまり、人間によって意図的もしくは非意図的に移入された外来生物が生態系、生物多様性などに被害をもたらす問題を外来生物問題と呼んでいる。従って、外来生物の全てが問題視されるのではない（種生物学会 2010；日本生態学会 2002）。

国内外来生物と国外外来生物

外来生物といえば、往々にして国外からやってきたものという認識をしやすいが、実際のところ国内の環境の異なる他の地域から移入されたものも外来生物となりうる。それが国内外来生物である。それらは、種としては外来生物に含まれない場合もあるが、外来生物の扱う分類群を遺伝子レベルまで考慮すれば、これらも外来生物と認識できる。以上のことを考慮すると外来生物とは以下の4つに分類できる。

(1) 国外外来生物：人間によって本来の生息・生育域外から持ち込まれた生物。侵入経路、渡来年代、逸出・野生状態で見いだされるか否かについては考慮しない。後述の(3)・(4)を含む

概念といえる。

(2) 国内外来生物：国外外来生物ではないが、国内の他の地域から意図的・非意図的に導入された生物。なお、その地域における在来種であるが、国外・国内の他の地域からもたらされた系統、遺伝子、地域個体群の導入も、この概念の中に含まれる。

(3) 外来生物問題における外来生物：(1) のうちある時代以降に持ち込まれたことが確実な外来生物。ただし、野生状態で見出されるものに限られる。

(4) 侵略的外来生物：(1) ， (2) のうち分布拡大の著しい生物。

故に、史前帰化植物や近世以降に渡来した外来生物であっても、逸出事例のほとんどいない有用な外来生物を含めないような配慮が必要となる。問題視されるのは (3) と (4)、そして特に早急な対策が必要となるのが (4) である（種生物学会 2010；日本生態学会 2002）。

外来生物問題

外来生物が引き起こす問題は以下の5つに分類できる。

- 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り、在来種の純系を失わせる
- ③生態系の物理的な基盤を変化させる
- ④人に病気や危害を加える
- ⑤産業への影響

それぞれについて確認していこう。①はさらに3つに分けられる。1つ目は被食・捕食の関係を通じた影響である。外来の植物食の動物は、時として甚だしい食害によって植物の絶滅をもたらす。特にそれまでに捕食者が生息していなかった島嶼などでは、大量絶滅がもたらされる危険がある。2つ目は競争による在来種の抑圧である。「競争」は生態学では資源の奪い合いを意味する。植物は、種類ごとに餌が異なる動物と違い、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、光などの資源をめぐる競争は生き死にや成長・繁殖を大きく支配する。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。オオブタクサなどがその代表で、その競争力によって絶滅危惧種を含む群落の種の多様性を低下させる。3つ目に寄生生物を持ち込んで在来生物を脅かす点が挙げられる。ある生物にとっては慢性病をもたらすぐらいで命にかかわる影響を及ぼすことのない病害生物でも、それまでにその寄生生物と接触したことのない寄種に対しては、重い病気を引き起こして死亡率を増大させるのである。

続いて、②であるが、外来種が在来種と交雑する事は生物多様性保全上重大な問題を引き起こす。それこそが遺伝子の多様性の破壊である。例えば動物園で飼われていたタイワンザルが遺棄されて野生化し、ニホンザルと交雑する事でニホンザルの純系の集団が失われることが危惧されている。

③はシナダレスズメガヤやハリエンジュ等で見られる現象で、それぞれ生態的特性から前者は河原を砂質化、後者は土壌を富栄養化する。この様に物理的な条件の変化が起こると、それまでそこに生育していた植物の生活が成り立たなくなる一方で、別の生態的特性を持つ植物の生活に適した条件となり、生態系全体が大きく変化する。

④は文字通りヒトへの直接的被害を意味している。具体的には伝染病の持ち込み、花粉症の誘因、有毒であったり攻撃的であったりする動物からの直接的被害である。

⑤としては農業、林業、漁業がその代表として挙げられる。農業でいえば①と少し似ているが競争などによる作物への被害、林業においてはマツノザイセンチュウという外来生物が原因の一つとされる松枯れによる被害、漁業ではブラックバスやブルーギルによる在来魚の被食が代表的な問題とされている（日本生態学会 2002）。

外来生物の侵入経路

産業活動の拡大と輸送手段の発達によって、外来生物はより積極的に各地に運ばれるようになり、他種に混入したりして知らないうちに分布をひろげる種類も増加した。いま、その結果として、日本をはじめとする世界各地で数多くの外来生物が定着・野生化し、在来生物相に大きな打撃を与え、人々の暮らしを脅かしているのである（財団法人自然環境研究センター 2008）。

そしてまた、外来生物が、本来の生息地から異なる生息地に侵入を果たすプロセスは大きく2つに大別できる。1つはヒトが、自分たちの目的の為に意図的に外来生物を導入する場合である意図的導入であり、もう1つは、人間の意図とはかかわらず、人間の移動や物資の移送に伴って導入される場合である非意図的導入といえる。また細かく見ると意図的に導入されたが逸出してしまった逸出導入というパターンも考えられる（日本生態学会 2002；川道ら 2001）。

外来生物の増加原因

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、寄生者による疫病など、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事が抑制されている。ところが現在では、人による多様な外来種の利用のための大量導入と人と物資の頻繁な移動に伴う非意図的な導入が日常化し、地理的な障壁が生物移動の障壁として役に立たなくなった。そのため、多くの野生生物が本来の生息地の外に持ち込まれ、そのうちの一部の種が野生化し、定着した結果、外来生物として生態系や人間活動に何らかの影響を及ぼすことが多くなってきた。一方で、農耕地、植林地、市街地など、人為的干渉の大きな場所が陸地面積に占める割合が急激に増大し、自然界には本来存在しない新しいタイプの環境が地球全体に広がった。それに乗じて、攪乱地や荒れ地に適応していた一部の生物種が、それら人為的干渉の大きい生息・生育場所に分布を拡大した。その結果、少数の種がコスモポリタン（地球規模で広域に分布する種、汎生種ともいう）となって世界中で目立つようになり、地球の生物相の均質化が急速に進みつつある。コスモポリタンに限らず、多くの外来生物が人為的な干渉の大きい新しいタイプの生息・生育場所で野生化し、定着している。そのため、外来生物が地域の生物相に占める割合は、当該地域における生態系への人為的干渉の強さと外来種の人為的移動の機会の両方を反映する。したがって、それは地域生物相への人為的な影響の大きさを示す指標の一つともなる（日本生態学会 2002）。

また、外来生物の拡大には、伝播機会の増大のほかにもう一つの要因が存在する。自然環境の

変化あるいは劣化がそれで、人口稠密で産業活動が活発な島国日本では特に顕著である。動植物の生活の場は、しばしば劣化環境に強い外来生物がわが物顔で入り込んで、在来生物の衰退に拍車をかける結果となるのである（財団法人自然環境研究センター 2008）。

外来生物の戦略

外来生物は、競争、捕食、病害を通じて、あるいは生態系の物理的基盤（環境）の改変を通じて、侵入先での在来種の絶滅の危機を増大させる。一方が犠牲を強いられるような生物間相互作用であっても、いずれも在来生物で進化の歴史を共有していれば、被害を受ける側が防御機構を適応進化させているなど何らかの生態的な対抗手段や絶滅抑止の機構が存在する。そうでなければ、すでに絶滅がおこったはずだからである。共存の事実は、すでに起こった適応進化による「調整」を意味するのである。ところが、外来生物と在来生物との間には、歴史的に未だその様な調整が働いていない。そのため、防御の術を持たない在来生物が食べつくされたり、重篤な疫病にかかったりして、絶滅に追いやられる可能性がある。つまり、外来生物の侵入は一方的に在来種が犠牲になるような生物間相互作用をもたらしやすい。一方で、地理的隔離によって独自の進化の道を歩んできた近縁種が人為的に導入されることによって、本来その地域にいた在来生物との間に雑種をつくり、在来生物の純系を失わせることも、在来生物の絶滅や遺伝的な多様性の喪失という生物多様性保全上の大きな脅威となる。外来生物がもたらす影響は不可逆的なもので、外来生物および交雑の結果生じた子孫をすべて駆除しない限り、元に戻すことはできない。この意味で外来生物は、近年では長期的にみれば生育場所の喪失や分断・孤立化、乱獲・過剰利用などより、生物多様性に最も深刻な影響を与える要因として認識されている（日本生態学会 2002）。

外来生物の相乗効果

ある外来生物の侵入が、別の外来生物の侵入や分布拡大を促進し、在来生態系に大きなインパクトを与える事が知られている。この現象は、Simberloff & Von Holle (1999) によって侵入溶融 (invasional meltdown) と名づけられた。これは外来生物間での正の相互作用が外来種のインパクトを増幅させ、ひいては在来生態系に取り返しのつかない状況をもたらすことをイメージした用語である。侵入溶融の前提となる外来生物間での正の関係は、どの程度普遍的にみられるのだろうか。Simberloff & Von Holle は、外来生物間の相互作用を研究した多数の文献を創設した結果、共生関係にある種が少なくないことを明らかにした。これは、侵入溶融がまれでないことを示唆している。現在では侵入溶融と考えられる例は多数知られており、動物による種子散布や送粉、および動植物による生息場所の改変がその代表的なプロセスである。種子散布による外来植物の分布拡大には、ハワイにおける Smith (1991) の研究で、90 種の外来植物のうち 37% が主に外来の果実食鳥類によって種子散布が行われたことが示されたように、外来鳥類が大きな役割を果たすようである（宮下ら 2003）。

外来生物への対策

単純に外来生物を駆除するだけでは問題は解決しない。なぜならば、ある外来生物が別の外来生物による影響を緩和している為に、外来生物を駆除した場合、在来生物に悪影響が起こりうる場合がある。その状況を一般化すると以下のように分類できる。

- ①外来食植者により外来植物が捕食圧から解放される場合
- ②外来生物の駆除に起因する環境（植生など）の変化が、別の外来生物の生息に好適な住み場所を作り出す場合
- ③外来生物が別の外来生物との競争から解放される場合
- ④外来の被食者の駆除によって外来捕食者の餌の変化が起こる場合
- ⑤外来の中位捕食者が外来の上位捕食者の駆除により捕食圧から解放される場合（中間捕食者の解放と呼ばれる）
- ⑥外来生物が在来生物に生活空間を提供したり共生関係を結んだりすることによって、他の外来生物の影響から免れている場合
（西川ら 2011）。

ゆえに、外来生物の影響を未然に防ぐ、或いは既に影響を与えている外来生物の問題を解決するには、科学的な理解と予測にもとづく積極的な対策が必要である。その場合、前述のように個別の種のみを目を向けた対策は、他の外来生物の蔓延を招くなど深刻な副次的効果をもたらす可能性があるため得策ではない。侵略的な外来生物の制御が目的であっても、生態系全体に目を向け、生態系管理・自然再生として実施する事が必要である。くり返し人為的導入がなされる場合は、新たな遺伝的特性を持つ個体がふんだんに補填されることから、自然選択による侵入先の環境への適応が起こりやすい。適応が起こると個体群指数関数的に増加し、侵略的な振る舞いが目立つようになる。多くの場合、その段階になり顕著な被害が生じてから対策がたてられるが、すでに制御が難しい状況になっているだろう。そのため、外来生物一般を警戒し、大量の人為的導入を避けること、また、予防のための監視を怠らないようにすることが肝要である。すでに顕著な影響をあらわしはじめた侵略的外来生物については、生態系から排除するための積極的で総合的な対策が必要である。放置して問題が解決する事は期待できず、汚染や環境の単純化などの他の要因とも相互に作用しながら生態系の不可逆的な変質をいっそう加速させる可能性が大きいからである。対策は、生態系の中での外来生物のふるまいを科学的にしっかりと把握、すなわち生活史及び個体群・メタ個体群の動態を十分に理解して対策に臨むことはもちろんのこと、生物間相互作用を介した群衆への影響にも配慮したうえで実地し、絶えず科学的な評価を加えながら順応的に実施する必要がある（鷲谷ら 2010）。

外来生物法

このような状況を受けて、環境省は、侵略的外来生物から日本の生態系を守る目的で、「特定外来生物による生態系などにかかる被害の防止に関する法律（外来生物法）」を2005年に施行した。この法律では、重大な生態影響をもたらす外来生物を「特定外来生物」に指定して、国内の持ち込みや飼育、放逐に対して規制を設けている。特定外来生物への指定は、環境省に設置された専門家会合において、科学的知見を基に行われている。具体的には以下の生物学的要件のい

れかに該当する外来生物が指定を受ける。

- 1) 在来種を捕食する
- 2) 在来種と餌や生息場所等を巡り、競合する
- 3) 在来種と交雑して、その繁殖や遺伝的構造を攪乱する
- 4) 外来の寄生生物を持ち込んで在来種に病害をもたらす
- 5) 空間を占有し、生態系基盤を改変する

これらの要件に一つも引っかからない、つまり影響がゼロという外来生物の方が、むしろ稀と考えられ、生態学的知見から、この法律の下ではほとんどの外来生物が規制対象になってしかるべきだといえよう。しかし、すでに侵入が確認されている外来生物のうち、特定外来生物に指定されているのは、2014年までに112種類のみで2000を超える種のほとんどは法律の蚊帳の外にあるという事になる。そうした未指定の侵入生物の中には、明らかに侵入してからの年数も分布面積も影響も大きく、火急に対策を取るべき、と考えられる種も多数含まれている（日本生態学会 2015）。

外来植物の特徴

ここからは外来植物に目を転じてみる。攪乱環境に適応して生育している種の事を「攪乱依存種」という。攪乱依存種は、東低の分類群に限定される事はなく、栄養成長期間が短く、種子の時間的・空間的散布能力が大きい生育特性を持つような種のことを指している（鷲谷ら 1996）。

特にこのような特性は、種子を短期間にたくさん生産する一年生草本植物に多い。多くの攪乱依存種は、河川のような攪乱頻度の高い生息環境に適応し、個体群を維持している。河川環境に侵入しやすい外来植物もまた攪乱依存種が多く、攪乱依存的な特性が顕著な外来植物ほど蔓延力も高いと考えられる。また、本来なら越冬できないはずの外来雑草が、工場から温排水が出てくる場所で越冬していたという興味深い報告もされている。これは、人間によって変えられた河川環境に外来植物が適応していることを示しており、河川の利用方法によっては外来植物の侵入をさらに助長する事態を招くことを示唆している（種生物学会 2010）。

河原の生態系

河川は攪乱のホットスポットである。増水すると川の様子は一変し、広い河川敷もたちまち茶色の濁流に呑み込まれてしまう。また、河川工事という小規模の攪乱も局地的に生じている。堤防斜面や橋の周辺では河川管理のための定期的な除草も、物理的に植物体の地上部を破壊する事から攪乱の1つであるといえるだろう。このように、様々な種類の攪乱による破壊と更新を繰り返しながら平衡状態を保っているのが、河川生態系の特徴である。（種生物学会 2010）

また、河川における攪乱は、河川生態系にとって特別な意味をもつ。原生的な河川では、常に洪水が発生し、流路を含む河川内の微地形は大きく変動する。こうした変動が、裸地から始まる一次遷移をもたらす、その結果として河川特有のモザイク状あるいは帯状に異質な生態系パッチが形成される。多くの場合、そこには河川の流路から、低水敷・高水敷を経て、自然堤防・後背湿地に至るまで、自然的攪乱の頻度と強度が異なる微地形が連続的に配置される典型的なエコトーンが認められる。ところが、ダムや堤防のような人工構造物が河川に建設され、洪水や氾濫の

発生が抑制されると、遷移段階は常に進むようになる。その結果、繰り返される洪水や氾濫が維持してきた遷移の初期段階の生態系パッチが消失し、河辺の生態系は、水域そのものと、樹林など発達してきた陸域の生態系に二極化していく。それにともない多様な生態系パッチによって育まれていた生物多様性が大きく損なわれる。それはまた、洪水や氾濫に適応して生息・生育していた在来生物の絶滅や外来生物の繁殖にもつながる（鷲谷ら 2005）。

種子休眠と埋土種子

外来植物は、人間活動によって攪乱された土地に在来の植物より早く侵入して定着できる特徴をもっている。外来植物の生態的特性には、世間一般でいう雑草の生物学的特性が当てはまる事が多い。多くの雑草の種子は、作物の種子と比較してその寿命が長い。これは、雑草の種子が休眠性を持っているためであるかもしれない。（根本ら 2006）

植物は生育に好ましくない乾燥や低温にさらされる季節になると休眠する。休眠した植物は落葉し、乾燥耐性を獲得した冬芽を形成する。植物の休眠の中で、種子休眠はその休眠を長く保つ一つの生態的手段である。種子休眠は、大きく一次休眠（primary dormancy）と二次休眠（secondary dormancy）に大別される。一次休眠は自発休眠（innate dormancy）とも呼ばれ、種子が成熟したときに既に休眠状態にある場合を指す。一方、二次休眠は誘導休眠（induced dormancy）とも呼ばれ、休眠性の無い種子や、一度休眠覚醒した種子が発芽に適さない環境下で休眠を獲得した場合を指す。また環境休眠（強制休眠）という用語が使用される場合がある。環境休眠は、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で、本来の休眠ではない。発芽に好適な条件が整いさえすれば、すぐに発芽する状態である。この状態は、一次休眠から発芽、あるいは一次休眠から二次休眠へ移行する間に必ず介在している。雑草の種子が散布された場では、一次休眠あるいは二次休眠から覚醒した種子のうち、発芽しなかった種子が再び二次休眠に入る季節的なサイクルが毎年繰り返されている。そして、休眠状態で発芽能力を保ったまま、文字通り土中に埋まったまま存在している種子を埋土種子（buried seed）と言う（大原 2015；根本ら 2006）。

このため、農耕地など雑草の生育地では雑草の種子が土壌中に次々と蓄積され、大きな埋土種子集団（seed bank）が形成されている。この埋土種子集団が、雑草の不斉一な発声と翌シーズン以降の発生源となる。雑草の種子は空間的に散布されるだけでなく、休眠性をもっていることにより時間的にも散布される。こうして雑草は、個体群が絶滅する事を回避している。一般に、夏生雑草の休眠種子は冬季の低温に遭遇することによって、冬生雑草の休眠種子は夏季の高温によって、休眠から覚醒する。休眠種子は、季節変化を感知して発芽のタイミングを決定している。休眠がある程度覚醒している種子の発芽には変温もまた有効である（根本ら 2006）。

外来植物の移入経路

外来植物の移入経路は、意図的導入と非意図的導入に大別される。意図的導入の代表例が緑化である。小橋（1992）によれば、緑化とは人間の開発行為や自然現象によって失われた緑を、人間の働き掛けで「再生する」、あるいはもっと積極的にいえば「創造する」行為であるとされてきた。緑化植物には次のような特性が必要だという。それは①早く成長・繁茂する、②適応力が

大きい、③更新が容易である、④常緑多年生である、⑤養苗が易しく多量生産できる、⑥耐陰性が強い、⑦播種。植栽時期の幅が広いという7つの特徴である。これらの特徴をすべて併せ持つ植物はいないので、目的に合わせて植物が選ばれるが、これらの特性から緑化植物は侵略的外来生物になりやすく、また雑種を形成することも多いのである。

実際のところ、治山工事やダム事業、道路工事などにおいて、シナダレスズメガヤやオニウシノケグサ交配品種などの外来牧草、イタチハギやハリエンジュなどの外来マメ科植物が緑化材料として大量に導入されてきた。その結果、河川の上流域などいたるところにこれら外来植物の大きなシードソース（種子供給源）が常に存在し、水による分散などを介して下流側に絶えず種子が供給される状況が作られている。そのような大量の種子供給は、河原の生態系にきわめて大きな変化をもたらす。また工事とは関係なく緑化植物、特に樹木が里山などの都市近郊林へ侵入する場合もある。草本性の緑化植物が在来の植物群落内に侵入しているのはよく知られているが、外国産樹木が植栽された場所より、鳥による種子散布によって在来の森林群落内に侵入するのである（種生物学会 2010；日本生態学会 2002）。

外来植物の非意図的導入の窓口としては、港や空港など輸入物資が多量に扱われる場所が挙げられよう。種子などが、外国から搬入された諸物資に混入したり、付着したりして進入したものやこれらを収容してきた外装の容器に、泥砂などと一緒に付着して持ち込まれることも多いようだ。また、家畜の飼料用として外国産の穀物を輸入している際にその飼料の中に紛れ込んでいる場合もある。そのため、牧場や養鶏所、動物園も非意図的導入の窓口といえよう。そのほかに輸入品を扱う精米所や毛織工場、ゴルフ場も窓口となりうる。また日本では多くの外国起源の牧草を牧草地で栽培しており、これらが牧草地から逸出して野生化することもある（浅井 1993）。

外来植物の侵入段階

外来植物の侵入段階を、Simberloff & Gibbons (2004) は①輸送②導入③定着④拡散の4段階としている。各段階には次の段階に移る為に克服すべき障壁があり、この障壁を超えられなかった種は、どの段階においても侵入に失敗したことになる。①の輸送手段においては、海や険しい山など地理的な障壁を越えなければならないが、交通手段の発達した現代ではこの障壁の重要性は依然と比較して格段に低くなった。②の導入段階では、目的があって持ち込まれる（意図的導入）植物については栽培管理という障壁を超える必要があるが、輸入品への混入などで意図せずに持ち込まれる（非意図的導入）植物については、野外に直接放出される。③の定着段階では、個体が野外で生存するために必要な条件と、個体が繁殖する条件の2つが揃わなければ次の拡散段階には移ることは出来ない。また、④の段階に移った外来植物の中には、爆発的に分布域を拡大させた後、自然に消滅するものがあったことも知られている（根本ら 2014）。

日本における外来植物

日本における外来植物の数は、1868年には約20種、1910年には45種、1931年には133種になり、1956年には300種、1977年には716種、1995年には1196種、そして2013年には1547種と戦後急激に増加した（根本ら 2014）。

鎖国が解かれて西欧との物資や人の交流が盛んになった頃から、ヨーロッパや北アメリカと

いった世界各地の植物が日本列島にもたらされて野生化するようになった。それに伴い、市街地、農耕地、空地など、人為的な干渉の大きい場所の植物相の中では、外来種が占める割合が次第に増した。その象徴ともいえるのが、在来タンポポの外来種タンポポによる置き換わりである。

さらに、昭和30年代にはじまる「列島改造」の土木工事に伴う緑化工事とアメリカ合衆国からの大量の穀物輸入が、シナダレスズメガヤなどの外来牧草、ハリエンジュなどの緑化樹、オオブタクサなどの攪乱された土地を好む一年草をはじめとする厄介な侵略的外来植物の蔓延をもたらした。それらは広域的に分布して河原や造成地などに群生し、在来種との競争や生育場所の物理的な条件の変更を通じて、生態系や生物多様性に大きな影響を及ぼしている。

また、風媒花として大量の花粉を生産するイネ科牧草やブタクサ類は、花粉症の原因植物として人の健康をも害する。現在では、至るところに、それらを含めた多様な外来種の大きな種子供給源（シードソース）が維持されており、また、土壌シードバンク中にも多量の種子が蓄積している。このため、植生遷移の初期相、すなわち、土地が造成されて裸地ができたときなどにその場で優占するのは、必ずといってよいほど外来植物である。さらに、砂礫質河原にシナダレスズメガヤなどの外来牧草が大量に侵入して、カワラノギクなど河原固有の絶滅危惧種を絶滅に追い込むなど、外来種が在来種の局所的な絶滅をもたらす深刻な事態が進行している。一方で郷土種と銘打って、在来種の海外系統の種子が大量に緑化材料として利用されることに伴い、キク科植物などで系統間の雑種が形成されるという問題が生じている。これらいずれもが生物多様性保全にとって誠に由々しき事態であるといえる（種生物学会 2002）。

外来植物の定着

とはいえ、実際のところ日本に侵入した外来植物のうち、分布を拡大して侵略的になる種は一部である。なぜある種は定着に成功し、他の種は定着できないのであろうか。あるいは定着はできても、そこからどんどんと繁茂する種とおとなしくとどまる種があるのであろうか。気候条件や土壌条件が合わない為に日本では野生化できないという例もあろう。あるいは在来の植物群集の中に割り込む事ができるだけの優位な競争力を持っていない為に、人為的な攪乱地でのみ生きていける外来植物もある。また、原産地では比較的目立たない存在であったのが、新しい侵入地で旺盛に繁茂して話題になる植物も存在する。日本における外来植物であるオオカナダモやコカナダモ、或いは日本から外国へと渡ったクズやオオイトドリがその代表例である。このように原産地と侵入地で異なった生育状況を示す理由として、「天敵解放仮説 Enemy Release Hypothesis (ERH)」という仮説がある。どのような植物でも原産地では植物体を食害する捕食する捕食者、寄生菌類、病原菌などの天敵の存在によって成長が抑制されていると考えられる。ところが新しい地域に侵入すると、これらの天敵から解放されるために、原産地以上に旺盛に成長し、分布の拡大にもブレーキがかからなくなるという説である。もっとも、この仮説を支持する結果が報告される一方で疑問を呈する結果も出されている。（種生物学会 2010）

以上の事柄をまとめると、外来植物の侵入には、その植物の散布体圧と個体群の生物学的特性、侵入先の群落の生物学的特性、および土壌や気温などの日生物学的特性が相互に関連しながら、影響を及ぼしている事が分かる（根本ら 2014）。

外来植物の進化

Blossey & Notzold (1995) は「競争力強化仮説 Evolution of Increased Competitive Ability (EICA)」と呼ばれる、外来植物が侵入した後に進化するのではないかという仮説を提唱している。すべての植物は、原産地では昆虫による捕食を受け、また土壌微生物などの寄生にさらされ成長が制限される。このような種間関係のなかでは通常、捕食などに対する防御に一定の資源を費やしている。しかし、新たに侵入した土地では捕食昆虫や寄生虫から解放される。防御の為に資源を使う必要がなくなり、その分を成長や繁殖に回す事ができるのである。このトレードオフによって、その種の競争力を強化する事になる（種生物学会 2010）。

群馬県における外来植物の概況

それでは、実際のところ外来植物がどのようになっているかを確認してみる。2008年時点で群馬県には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・オオハンゴンソウ・オオキンケイキク・ボタンウキクサの7種が自生していることが確認された。また要注意外来生物の植物のうち52種が、群馬県内に定着し、多くの種が蔓延している。その中にはシナダレスズメガヤやハリエンジュ、オオブタクサといった在来植物や生態系に対する被害事例が多数報告され、特定外来生物と同等の高い生態リスクを持つ種も含まれている。さらに、群馬県では前記の指定外来種以外にも県内において生態系など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ている。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・タカサゴユリらが特に分布を拡大させており、局地的ではあるがウキアゼナ・イケノミズハコベ・ヒゲナガスズメノチャヒキ・ヒメモロコシらも指定されている（石川ら 2009）。

外来植物の具体例

以下に代表的な外来植物を挙げる。

アメリカセンダングサ キク科 *Bidens frondosa*

高さ1～1.5mの一年生草本。北アメリカ原産であり、日本では1920年頃に琵琶湖畔、1940年代以降に奄美大島、徳之島、沖縄島で確認された。現在は全国に定着している。茎は暗紫色を帯び、断面は四角形、よく枝分かれし、葉は3～5の小葉からなる複葉で、対生する。瘦果に2本の棘があり、人や動物に付着して運ばれる。種子の生産量が多く、生存期間も長い。代表的な水田雑草の一つであり、温帯の水田、水路、休耕田、畑地、樹園地、牧草地、芝地、道端、荒地、河原、林内、湿地などに生育するが、水辺や湿地を好む。その為、タウコギやセンダングサなど、河原や水辺の在来植物と競争し駆逐する恐れがある（財団法人自然環境研究センター、2008）。

オオブタクサ キク科 *Ambrosia trifida*

高さ 1~6m の一年生草本。北アメリカ原産であり、日本では 1952 年に静岡県清水港と千葉県で確認され、現在全国各地に定着している。戦後のアメリカからの穀物や糖類の輸入量が増大するにあたって、本種の種子が輸入大豆や飼料用の穀物に混ざって日本国内に持ち込まれ、異物として捨てられることによって河原や造成地などに広がったものと考えられている。温帯の畑地、樹園地、牧草地、河原、道端、荒地、堤防など肥沃で湿った環境を好み、河原などでは密集してしばしばアレチウリと共存する。全体に毛が多く、葉はクワの葉に似ており長い柄があって対生する。多数の種子をつけ、その一部は土壤中で生存する。花粉症の原因植物でもある。生長が早く大型になるので、全国の河原などで固有種を含む在来植物と競争し、駆逐している（財団法人自然環境研究センター 2008；日本生態学会 2002）。

種子が大きく、動物や風などによる分散の仕組みを持たないため、水で運ばれるか、工事などで土が動かされる時にだけ分散や分布拡大が可能である。そのため、この植物がよくみられるのは河原や造成地などに限られる。元々氾濫原で進化したと考えられるこの植物にとって、富栄養化した河原は、特に好適な生息場所のようである。オオブタクサは、しばしば生産性が高く植物間の競争の激しい生育場所に優占するにふさわしい生態的な特性を持つ。一年生で永続的な土壌シードバンクをつくり、種子が大きく、他種に先駆けて春早く発芽するといった特性である。土壌シードバンクをつくることで、定期的な攪乱にも予測不能な攪乱にも耐える事ができる。大きな種子から大きな芽生えが生育気の早い時期に生じ、しかも成長も早いため、一年生にもかかわらず、多年草との競争にも太刀打ちできる。そのため、オオブタクサは、ときどき増水によって攪乱を受けるようなオギ原にも侵入することができる（日本生態学会 2002）。

群馬県内においては利根川流域の各地で巨大群落を形成している。主として河川敷で旺盛に繁茂しており、県北嬭恋村、東吾妻町の山間地でも道路脇に頻出している、その一方県南部の平地の市街地にはあまり見られない。県内の利根川流域をはじめとする河川敷各所の工事跡地に侵入・定着していることから、工事車両による土砂の移送の際の残土やタイヤの溝にはまりこむことが分布拡大の要因と考えられる（石川ら 2009）。

シナダレスズメガヤ イネ科 *Eragrostis curvula*

高さ 0.6m~1.2m の多年生草本。南アフリカ原産で、日本では 1959 年四国農業試験場に導入後、緑化用に各地に導入され、現在は全国に定着している。温帯~熱帯の牧草地、路傍、荒地、河原等に生育する。日当たりが良い砂質土壌を好むが、排水が良ければ土壌の種類を選ばない。河川上流の生育地から種子が下流に拡がり、河原などで砂を堆積させる。棹は束生して大きな株になる。種子生産量は多く、根茎で繁殖する（財団法人自然環境研究センター 2008）。

この植物が河原に侵入すると、冠水時に砂を堆積して河原の微地形を改変するといわれている。また洪水に対する大きな耐性を持っており、洪水後には本種の実生が河原一体に見られた。河川の上流域に本種が生育すると、そこが種子の供給源となって、周囲、特に下流側に種子が供給されるためだと考えられる。それ故、いったん優先すると日陰や基盤環境を変化させることで河原固有種の衰退をもたらしている可能性がある（日本生態学会 2002）。

ナヨクサフジ (英名ヘアリーベッチ) マメ科 *Vicia villosa* subsp. *Varia*

ヨーロッパ原産のつる性一年生草本。日当たりがよく肥沃な土地で、工事などで荒らされた攪乱地を好む。花期は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へと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及ぼすおそれがある。特にカワラヨモギ、メドハギなどの河畔植物に対する悪影響が大きいと考えられる。また生きた種子を長期間土壌中に蓄積する「永続的土壌シードバンク」を形成する可能性があるため、除去作業を年間継続して行う必要がある。

群馬県では、県南部の平野部・丘陵地に分布し特に高崎市、藤岡市、富岡市などの河川敷や農地周辺に多い。2005年以降確認件数が急増している。緑肥として導入されたものから種子が野外に逸出し、増殖した可能性が高いと考えられる。また県内危険外来種に指定されている(石川ら2009)。

ハリエンジュ (別名ニセアカシア) *Robinia pseudoacacia*

高さ25mに至る落葉広葉樹。北アメリカ原産で、日本へは1873年に、庭木、街路樹、砂防林、肥料木、蜜減植物、薪炭材として導入され、現在は全国に定着している(財団法人自然環境研究センター2008)。

ハリエンジュの種子には土壌シードバンクに貢献する休眠種子と散布後すぐに発芽出来る非休眠種子がある。種子の休眠性は母樹ごとに大きく異なっており、低温化で越冬する事によって休眠性を獲得する場合もある。緑化のため上流域に植栽されたハリエンジュから散布された種子は水散布で河川を通じて中流、下流域に運ばれ、洪水を機会として河川の砂礫地で発芽し定着している可能性が高い。またハリエンジュは広く張り巡らさせた水平根から根萌芽を発芽させて分布を拡大している。そして、伐採や損傷による外的要因だけでなく、内的要因によっても個体を拡大している。そのため、いったん侵入するとかなり高い速度で増殖し群落を形成する。これらの早い増殖や成長速度は高い光合成能力に依存している。さらに、ハリエンジュが在来生物に影響を与える要因として、アレロパシーや窒素固定植物としての大量の窒素供給が指摘されている(崎尾2009)。

群馬県内においては、桐生市内の渡良瀬川河川敷で最大の樹林を形成している。上流の日光市足尾町においては、荒れた山地の緑化のためにかつて本種を植林していた時期があった。足尾町から桐生市に至る渡良瀬川河川敷一帯および草木湖周辺に、多数のハリエンジュの生育が見られるがその種子源は足尾町の植林と考えられる(石川ら2009)。

ヒメモロコシ イネ科 *Sorghum halepense* f. *muticum*

南アメリカ原産の多年生草本で、道端など強光環境下で生育する。草丈は2mに達し、分株と地下茎からの出芽でよく増えて超高密度個体群を形成する。そのため、強光環境下において在来植物を日陰にして、その発芽と生育に悪影響を及ぼすおそれがある。また、渡瀬遊水池周辺で大群落を形成しており、上武国道沿いで列をなして繁茂している。輸入飼料がこぼれたり、車による巻き上げで種子が道路に沿って移動したりしたことが、主な拡大経路と考えられる(石川ら

2009)。

本研究の目的

以上のように、外来植物は在来生物や生態系、人間活動などに様々な影響を与えるとされ、積極的な防除が望まれている。しかしその生態的特徴と野外における生育条件といった、駆除対策の策定の基本となる情報が解明されていない種がほとんどであるため、いったん侵入・定着した外来植物を根絶するのは困難を極めている。

そこで本研究では、特に外来植物が侵入しやすい河原において、数種の外来植物の侵入状況の解明と、それらの生態的特徴の解明を目的として、現地調査と圃場・実験室内における操作実験を行った。アメリカセンダングサ、オオブタクサ、シナダレスズメガヤ、ハリエンジュ、ヒメモロコシ、ナヨクサフジをモデル植物として用いた。現地調査は群馬県内の河原数地点とし、谷田川でオオブタクサ・ヒメモロコシ・ナヨクサフジ等を多く含む群落の植生調査を行い、また渡良瀬遊水池でオオブタクサ、八ツ場ダム周辺でハリエンジュ、前橋市関根町郵便局付近でナヨクサフジの生育状況を調査した。圃場・実験室内における操作実験は、温度条件・光条件を操作した発芽実験・栽培実験を行い、生長解析を行った。またナヨクサフジと生育地が酷似するカラスノエンドウについても発芽実験及びに栽培実験を行い、ナヨクサフジとの競争関係について考察した。

調査地概要

群馬県前橋市関根町郵便局付近

関根町は群馬県前橋市の南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 *Cornus florida* L. 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ツツジ *Rhododendron indicum* 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、日当たりのよい立地が多く、一般に道端雑草と呼ばれるような草本植物が観察される（足助 2016）。

足助（2016）によれば、2014 年度より、ナヨクサフジがこの緑地帯でも見られるようになったという。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く、在来種の生息域を脅かす可能性が推察される。それゆえ、ナヨクサフジの生育状況をモニタリングする必要がある。従って、2015 年度の調査に引き続き本研究では 2016 年 5 月 3 日にナヨクサフジの分布調査を行った。

渡良瀬遊水池

渡良瀬遊水池は栃木県の南端に位置し、栃木・群馬・埼玉・茨城の 4 県にまたがる面積 33km²、総貯水容量 2 億 m³ の我が国最大の遊水地である。渡良瀬遊水池へ流入する渡良瀬川は、群馬・栃木の県境にある皇海山（2143m）に源を発し、いくつもの溪流を合わせながら、大間々地先で山峡の地を離れ、以後桐生市、足利市の中心から南東に流下し栃木市を通り、茨城県古河市地先で利根川本流へと注いでいる。流域面積 2602km²、流路延長 107.6km の利根川水系最大の支川である。（渡良瀬遊水池ホームページ）

渡良瀬遊水池の自然環境は緑豊かな広大なヨシ原が特徴で、遊水池全体の面積の内、2500ha が植生におおわれており、植生の約半分がヨシ原となっている。これほどの環境を持つヨシ原は稀で、全国でも最大級の規模を誇り、本来の低地の自然環境が保全されているところとして、貴重な存在である。その広大なヨシ原には、多数の動植物が生息・生育しており、2009 年時点において植物が 約 1000 種、鳥類約 260 種、昆虫類（陸上、水中）約 1700 種、魚類約 50 種が確認されている。これは、遊水池としての機能を保持するために、広大なヨシ原や沼をごく自然にしてきた結果によるものといわれている。（渡良瀬遊水池ホームページ）

その一方で外来植物の侵入も確認されている。本研究では、この渡良瀬遊水池の群馬県側の地域で 2016 年 5 月 21 日にオオブタクサの分布調査を行った。

ハツ場ダム

ハツ場ダムは、群馬県吾妻郡長野原町（利根川水系吾妻川）において建設中の洪水調節、流水の正常な機能の維持、水道及び工業用水の新たな確保並びに発電を目的とする多目的ダムである。吾妻川は、その源を群馬・長野県境の鳥居峠に発し、浅間山・草津白根山の間を東流して、万座川・熊川・白砂川等の支川を合わせ、途中、吾妻峡と称される美観をつくりながら、さらに温川・四万川・名久田川等の支川を合わせ、渋川市付近で利根川と合流する一級河川であり、流域面積は約 1356km² となり、幹線流路延長は約 76km におよぶ、利根川水系の代表的な支川の一つといえる。（国土交通省関東地方整備局 ハツ場ダム工事事務所ホームページ）

工事現場の周辺では大規模な攪乱が起こる事から、外来植物の侵入が起こる。ハツ場ダム周辺も例外ではなく、すでにハリエンジュの生育が確認されている。本研究では 2016 年 5 月 25 日にハリエンジュの分布調査を行った。

谷田川

谷田川は上流の邑楽町から板倉町に至る邑楽大地に刻まれた多数の支谷を連結・集合した川である。谷田川の支谷はすべて左岸側の台地面に形成されている。つまり、邑楽台地の分水嶺以南の排水路として生まれた河川と考えられる。谷田川の周辺には広大な水田を伴う田園風景が広がっている。また谷田川右岸には肘曲り池、天神池の池沼が見られ、ここには多様性に富む植生が見られる。（板倉町教育委員会 2005）

谷田川の河原および土手には絶滅危惧植物種を含んだ多様な在来植物が見られる一方、オオブタクサ等の外来植物も多数見受けられる。本研究では 2016 年 6 月 16 日に、特に外来植物種と絶滅危惧種の多い群落について、コドラート法による植生調査を行った。

材料および調査・実験方法

材料植物

モデル植物として以下の外来植物を用いた。

アメリカセンダングサ キク科 *Bidens frondosa*

高さ1~1.5mの一年生草本。北アメリカ原産。

オオブタクサ キク科 *Ambrosia trifida*

高さ1~6mの一年生草本。北アメリカ原産。

シナダレスズメガヤ イネ科 *Eragrostis curvula*

で高さ0.6m~1.2mの多年生草本。南アフリカ原産。

ヒメモロコシ イネ科 *Sorghum halepense* f. *muticum*

南アメリカ原産の多年生草本。

ハリエンジュ (別名ニセアカシア) マメ科 *Robinia pseudoacacia*

高さ25mに至る落葉広葉樹。北アメリカ原産。

ナヨクサフジ (英名ヘアリーベッチ) マメ科 *Vicia villosa* subsp. *Varia*

ヨーロッパ原産のつる性一年生草本。群馬県では県内危険外来種に指定されている。

また、ナヨクサフジと生育地が酷似するカラスノエンドウも発芽実験及び栽培実験に用いた。

カラスノエンドウ (別名ヤハズエンドウ) マメ科 *Vicia angustifolia* L. var. *angustifolia*

日本全国の田野、山麓の陽当たりのよいところに生える越年生草本。葉は互生し、3~7対の小葉からなる羽状複葉。花期は3~6月で紅紫色の花を咲かす。また豆果が熟すと黒く変色し、その後弾けて種子が散らばる。日本の在来植物である。

植生調査

谷田川の人間樋橋から下流の右岸において、コドラート法による植生調査を行った。特に外来植物種と絶滅危惧種の多い群落について、4m²~100m²のコドラートを設置し、主要な植物の被度を測定した。各コドラートの位置はカメラ付きポータブルGPS (GPSmap62SCJ, GARMIN) を用いて記録した (図4)。

分布調査

調査者が徒歩または自家用車で対象地域内を踏査し、目視で生育を確認した場合、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、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。

本研究では群馬県前橋市関根町郵便局付近でナヨクサフジと、渡良瀬遊水池でオオブタクサ、八ツ場ダム周辺でハリエンジュの分布調査を行った。

種子発芽の冷湿処理ならびに温度依存性実験

アメリカセンダングサ、オオブタクサ、ハリエンジュ、ナヨクサフジ、シナダレスズメガヤ、ヒメモロコシ、カラスノエンドウの7種類の植物を用いた。それぞれの材料植物種子の産地・産年の一覧を表1に示す。

オオブタクサ、ハリエンジュ、アメリカセンダングサの種子は採取後 -80°C で冷凍保存されており、シナダレスズメガヤは 4°C で冷蔵保存されていたものを当初用いた。ナヨクサフジおよびカラスノエンドウは2016年5月に採取したものを1ヶ月ほど冷凍保存した後実験に使用した。ヒメモロコシは2016年11月に採取した種子をそのまま実験に用いた。

オオブタクサは標高の異なる2地点(前橋・標高約150m、菅平・標高約1000m)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。

シナダレスズメガヤは2013年に前橋市川原町で採取しその後 4°C で冷蔵保存されていた種子を用いたところ、発芽率が極めて低かったため(後述)、2016年10月に藤岡市内で種子を採取して再度発芽実験を行った。これにより、シナダレスズメガヤの種子の寿命が推定できる。

実験手法は以下の通りである。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、 $30/15^{\circ}\text{C}$ 、 $25/13^{\circ}\text{C}$ 、 $22/10^{\circ}\text{C}$ 、 $17/8^{\circ}\text{C}$ 、 $10/6^{\circ}\text{C}$ (昼14hr、夜10hr、昼間の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、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。最終的な積算発芽数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2に示す。

また、オオブタクサとアメリカセンダングサは前処理として冷湿処理、ハリエンジュとナヨクサフジ、カラスノエンドウは前処理として硫酸処理を施した。

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ある。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とアメリカセンダングサの種子を、4℃の薬用保冷庫（MEDICOOL MPR-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、ナヨクサフジ、カラスノエンドウ、ハリエンジュ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。また、ナヨクサフジに関しては800粒ほどの種子を約10分間硫酸に漬け、その後30分水道水で洗浄した。

ハリエンジュについては、2008年にカラスノエンドウと同様の方法で処理を行い、その後-80℃で冷凍保存されていた種子を用いた。

異なる環境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、アメリカセンダングサ、オオブタクサ、ハリエンジュ、ナヨクサフジ、カラスノエンドウの発芽種子を用いた。

また、シナダレスズメガヤとヒメモロコシに関しては種子の発芽率が悪かったため、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、ゴールドデンピートバン（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の日長で昼の相対光量密度を約380~400 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ とし、室温25/20℃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。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（本研究では6）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℃で乾燥させた後、電子式上皿天秤 (BJ210S, Sartorius) で乾燥重量を測定した。葉面積はカラスキャナー (GT-S640, EPSON) を用いて解像度300dpi、16bit グレーでスキャンした後、ImageJ1.41o (NIH) を用いてドット数を計測した。今回は148cm²あたり2087162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3週間栽培した。栽培期間中は1~2日おきに水道水を与えた。

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2.4℃上昇するように調節した区 (+2.4℃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3週間栽培した。栽培中は、ポットの下から5分の1程度の高さまで水を張った受け皿にポットを置き、毎日確認して水量が減った場合は随時水を足した。栽培期間中は1日1回水道水を与えた。肥料は与えていない。

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3に示す。

生長解析

生長解析の各パラメータは、以下の式を用いて算出した。

・相対生長速度 (RGR : Relative Growth Rate) : 各個体の乾燥重量ベースの生長速度を表す指標である。(gg⁻¹day⁻¹)

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

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。 ($\text{gm}^{-2}\text{day}^{-1}$)

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

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 (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である。

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

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である。

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

LA : 最終サンプリングにおける個体の葉面積 (m^2)

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)

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

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)

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

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)

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

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には、以下のような関係がある。

$$\text{RGR}=\text{NAR} \cdot \text{LAR}$$

$$\text{LAR}=\text{SLA} \cdot \text{LWR}$$

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の差異によって引き起こされた確認することができる。

統計解析

生長解析結果については、JMP9.0 (SAS Institute Inc.) を用いて分散分析を行った。

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。

結果・考察

モデル外来植物の分布

ナヨクサフジ (群馬県前橋市関根町郵便局付近)

2016年5月3日に行った調査でナヨクサフジの生育が確認できた地点数は、233地点であった。ポータブルGPSで記録した位置情報を基に作成した分布マップを図1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1)。足助(2016)によれば2015年度は関根町郵便局付近では31地点で観察されており、大幅にその生息域を広げていると推察される。また、群馬大学荒牧キャンパス内においても15地点でナヨクサフジの生育が確認された(図1)。今後、生息域が徐々に拡大していくことが懸念される。

このままナヨクサフジの生育域が拡大すると、他の植物を覆う事から在来植物種を駆逐する可能性は高くなると考えられる。さらに、関根町郵便局付近は日当たりのよい立地が多く、歩道や道路などで植物の生育できる土壌環境が植樹帯に限られていることから、その被害の拡大化が危惧される。今後は在来植物種も考慮に入れ、どのような被害が生じるのかの具体的なデータを収集する必要があるだろう。

また2016年12月8日に再調査を行ったところ、関根町郵便局付近でいくつかのナヨクサフジの実生個体が見られた(写真2)。また、近辺にはカラスノエンドウも見受けられ、このまま放置すればカラスノエンドウが駆逐される危険性がある。よって、防除を行うのであれば11~12月頃から開始する必要があるといえる。今後とも継続的なモニタリングが必要である。

オオブタクサ (渡良瀬遊水池)

2016年5月21日に実施した調査の結果、オオブタクサの繁茂が複数の地点でみられ、分布面積約926.96㎡の大型群落を確認された(図2、写真3)。

高橋(2001)によれば、オオブタクサの種子は総種子数=群落高×総個体数×草丈1m辺りの種子数という式で求められる。また、総個体数=個体数密度×群落サイズという式が成立する。渡良瀬遊水池のオオブタクサ群落の群落高を2m、個体数密度を28本/㎡、草丈1m辺りの種子数を126個と仮定する(西山1989)と、この群落では

$$2 \times (28 \times 926.96) \times 126 = 6540629.76 \approx 6540630 \text{ 個}$$

の種子が作られている事となる。オオブタクサは土壌シードバンクを形成するため、これだけの種子が土壌中に散布されると推察でき、その被害は甚大だといえる。

当調査地では、多数の絶滅危惧種の生育が確認されている。このままオオブタクサが繁茂すればこれらの植物の生育を阻害する可能性がある。早急な駆除などの対応が必要である。

ハリエンジュ (ハッ場ダム周辺)

2016年5月25日で調査を行ったところ、69地点でハリエンジュの繁茂が確認された(図3、写真4)。各地点の推定生育本数は表4に示した通りであり、その総計数は3578本以上に及ぶと予測される。このうち最上流部にあたる長野原駅付近において、最大のハリエンジュ群落(500本以上)が確認され、この場所が最大の種子供給起源になっているのではないかと推察される。

またここを起点とし付け替え道路沿いに下流に向かって拡大するように、多くのハリエンジュ群落が生息していることから、ダム工事および周辺の代替地・付け替え道路整備などの土木工事によって、ハリエンジュの生育適地である攪乱された裸地が多数作出され、ここに工事車両と土砂の移動によって種子が持ち込まれて発芽・定着していると推察される。

群馬県内においては、ハリエンジュは桐生市内の渡良瀬川河川敷で最大の樹林を形成している。これは上流の日光市足尾町におけるハリエンジュ植林と草木ダム建設の結果と考えられている（石川ら 2009）。八ツ場ダム周辺でも同様の現象が起これ、急速に拡大していると考えられる。

早急にハリエンジュを伐倒駆除することと、駆除後も継続的なモニタリングにより、萌芽再生を早期に発見して継続的に刈り取ることが不可欠である。

谷田川右岸の植生調査

2016年6月16日における調査の結果、計38種の植物が確認された。その中には絶滅危惧種が7種、ナヨクサフジやオオブタクサ、ヒメモロコシといった外来植物が11種確認されている（表5・6、図4）。特にナヨクサフジ（写真5）、ヒメモロコシ（写真6）、オオブタクサ（写真7）の繁茂が著しい。

河原の生態系では本来、時折発生する自然洪水による中規模攪乱で在来種植生が維持されていたが、日本では高度成長期以来、治水のための流水調節により洪水が激減し、また度重なる堤防改修や河道掘削など人為的な強度攪乱が頻発するようになった。これによって全国の河川生態系において外来植物が繁茂するようになったと考えられる（崎尾2009）。

当地域でも近年、右岸堤防上の道路整備、八間樋橋の改修工事や国道354号バイパスの設置が群馬県館林土木工事事務所によって次々に行われているが、これらに際して環境影響評価は全くといっていいほど行われていない。さらに館林土木工事事務所は2015年からは八間樋橋下流一帯の谷田川右岸の堤防増強工事を計画・着手したが、環境影響評価は全く行われていない。当研究室ではこれらの所行を、河川法第一条（利水・治水および河川環境の整備と保全がされるように管理することを目的とする）を踏みにじる重大な違法行為と認識し、群馬県会議員、群馬県河川課と協議し、館林土木工事事務所に工事を一時中断し、絶滅危惧種など環境を保全するための検討会を設置するよう勧告した。群馬県会議員および群馬県河川課の説得の効果があつてか、館林土木工事事務所は2016年10月に「一級河川谷田川の建設工事に係る絶滅危惧植物種保全対策検討会」を発足させた。表5の結果は、今後当地において絶滅危惧種を保全し外来種駆除する対策を策定し実施するための、重要な根拠資料となる。具体的には、一年草であるオオブタクサ、ナヨクサフジは実生の段階での引き抜きが最も有効であると思われ、多年草であるヒメモロコシは雨後に容易に引き抜くことができるので、同様に引き抜きが最も有効であると思われる。しかしいずれの種についても、引き抜き後に土壌シードバンクや根茎が残存する可能性が高く、駆除は複数年にわたって行う必要がある。またこれまで堤防の全面草刈りは、絶滅危惧種の開花結実を阻害する時期（5月）に実施されてきた。これを12月に実施することにより、絶滅危惧種の保全にも効果があると考えられる。

種子発芽の冷湿処理ならびに温度依存性実験

アメリカセンダングサ

アメリカセンダングサは実験開始前に冷湿処理を2ヶ月行っている。これは先行研究により冷湿処理の有用性が分かっているからである(河毛2010)。また、この冷湿処理の必要性を再確認するために一部の種子は冷湿処理を施さずに25/13℃区で同様の実験を行った(表2)。

アメリカセンダングサ種子の最終発芽率は30/15℃区で約76.7%、25/13℃区で約50.7%、22/10℃区で約26.7%、17/8℃区で約72.7%、10/6℃区で約78.0%が発芽した。また冷湿処理を施さない種子の最終発芽率は0.7%となった(表7、図5・6)。ここからアメリカセンダングサには冷湿処理が必要であることが再確認された。また、30/15℃区で1シャーレの発芽率が不良であったため標準偏差が大きく、また22/10℃区で発芽率が著しく低くなっているが、これらは実験の準備の際に、未熟な種子を多く入れてしまったためと推察される。

同じ産地のアメリカセンダングサ種子を用い、同様の温度条件下で行われた河毛(2010)の実験によれば、2ヶ月の冷湿処理を施したアメリカセンダングサの最終発芽率は30/15℃区で約93.3%、25/13℃区で約91.3%、22/10℃区で約81.3%、17/8℃区で約94.0%、10/6℃区で約96.0%という結果となった。本実験よりも高い発芽率であるが、これは種子の個体差によるものと考えられる。

以上の結果を踏まえるとアメリカセンダングサは2ヶ月冬を経験し、その後およそ1ヶ月の時間を経て発芽するものと考えられる。また、広い温度域で発芽する為、様々な環境条件に適応できるものと推察される。今後はアメリカセンダングサの種子の寿命を推定するため、継続的な実験が必要となろう。

オオブタクサ(菅平産と前橋産)

本研究では標高の異なる地点(菅平・約1000m、前橋・約150m)で採取したオオブタクサの種子を用いた。また、実験開始前に約1ヶ月の冷湿処理を行っている(表2)。これは先行研究によりオオブタクサの種子休眠解除の為に約1ヶ月の冷湿処理が必要である事が分かっているからである(荒木2011)。また、この冷湿処理の必要性の再検証のために一部の種子に対して冷湿処理をせずに25/13℃区で同様の実験を行っている。

冷湿処理を施した菅平産のオオブタクサ種子の最終発芽率は30/15℃区で約33.3%、25/13℃区で約32.7%、22/10℃区で約54.0%、17/8℃区で約66.7%、10/6℃区で約47.3%であった。また冷湿処理を施さない種子の最終発芽率は12%となった(表7、図7・8)。この結果から、菅平産のオオブタクサ種子の発芽には冷湿処理が必要で、10/6℃~17/8℃程度、高くても22/10℃までが発芽の最適温度であると考えられる。

同じ種子を用い同様の温度区で行われた鍛冶川(2014)の実験結果では30/15℃区で約15.0%、25/13℃区で約19.2%、22/10℃区で約19.3%、17/8℃区で約35.8%、10/6℃区で約33.1%が発芽した。本研究と比べると全体的に発芽率が低いことから、当時の実験の際に未熟な種子を選別してしまったか、もしくは3年間の冷凍保存を通じて種子がより発芽しやすい状況に変化したと推察される。いずれにしても3年間の冷凍保存では劣化しないどころか、採取日から換算して6年間の冷凍保存においても種子の劣化はないと考えられる。

冷湿処理を施した前橋産のオオブタクサ種子の最終発芽率は30/15°Cで約28.7%、25/13°Cで約45.3%、22/10°Cで約62.0%、17/8°Cで約61.3%、10/6°Cで約70.0%であった。また冷湿処理を施さない種子の最終発芽率は12.0%となった（表7、図9・10）。

この結果より菅平産の種子と同様に、前橋産のオオブタクサ種子の発芽には冷湿処理が必要で、10/6°C～17/8°C程度、高くても22/10°Cまでが発芽の最適温度であると考えられる。

また、同じ種子を用い同様の温度区で行われた鍛冶川（2014）の実験結果では30/15°C区で約20.0%、25/13°C区で約28.7%、22/10°C区で約53.3%、17/8°C区で約57.3%、10/6°C区で約54.7%が発芽した。菅平産の種子ほどではないが、こちらにおいても本年度の実験結果よりも発芽率が低くなっており、当時の実験の際に未熟な種子を選別、或いは冷蔵保存により種子が発芽しやすくなったかという事が推察され、5年間の冷凍保存による種子の劣化も見られない。また、菅平産の結果と比較すると似たような傾向を示している。

以上を考慮すると、オオブタクサは比較的低い温度帯が発芽最適温度域であると推察される。また高温帯になると二次休眠に入るのではないかと推察される。その為、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事で巨大な草体に生長すると考えられる。さらに冷湿処理が必要、すなわち冬を経験する事で発芽が促されることと、5～6年間の冷凍保存でも種子が劣化しないことから、本種は土壌シードバンクを形成するものと考察できる。また生育した標高、すなわち気候条件の違いは、種子発芽の温度依存特性に影響を及ぼさないと推察される。

ハリエンジュ

ハリエンジュ種子の最終発芽率は30/15°C区で約63.3%、25/13°C区で約71.3%、22/10°C区で約63.3%、17/8°C区で約61.3%、10/6°C区で約43.3%が発芽した（表7、図11）。また30/15°C区と25/13°C区において一部の種子が腐食した。

河毛（2010）が同様のハリエンジュの種子を用いて同様の発芽実験を行い、最終発芽率は30/15°C区で約91.3%、25/13°C区で約94.0%、22/10°C区で約94.0%、17/8°C区で約88.0%、10/6°C区で約79.3%という結果となっている。本研究に比べると発芽率が高くなっているが、これは採取した種子の個体差、或いは8年間の冷凍保存で種子が劣化したものと考えられる。いずれにしても発芽率の経年劣化はそれほど大きくはないので、本種は土壌シードバンクを形成するものと推察される。ハリエンジュは10/6°Cという低温以外では発芽率が良好であるため、広範な気候条件の下で発芽することが可能であると推察される。

ナヨクサフジ

ナヨクサフジの最終発芽率は30/15°C区で約62.0%、25/13°C区で約64.0%、22/10°C区で約78.0%、17/8°C区で約88.0%、10/6°C区で約92.0%が発芽した（表7、図12）。また、30/15°C区と25/13°C区という高温下では種子が一部腐敗してしまい、その為に発芽率が低下したと考えられる。

足助 (2016) も同じ産地の種子を用いて同様の発芽実験を行い、30/15°C区で約66.0%、25/13°C区で約64.0%、22/10°C区で約69.3%、17/8°C区で約68.0%、10/6°C区で約59.3%が発芽し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。この差は種子の個体差によるものと考えられる。

これらの結果を踏まえると本種は、広範な環境条件の下で発芽が可能であり中でも低温度帯で一番多く発芽した。すなわち本種は野外において、他の植物種よりも早い季節に発芽し、明るい生育環境と長い生育期間を得ることで大きく生長して他の植物種を被圧する可能性が考えられる。また、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推察される。今後は種子の寿命を推定する為に、継続的な実験が必要といえる

カラスノエンドウ

カラスノエンドウの最終発芽率は30/15°C区で約54.7%、25/13°C区で約84.7%、22/10°C区で約84.7%、17/8°C区で約83.3%、10/6°C区で約60.7%が発芽した(表7、図13)。また30/15°C区と25/13°C区では一部の種子が腐敗した。

足助 (2016) も同じ産地の種子を用いて同様の発芽実験を行い、30/15°C区で78.7%、25/13°C区で99.3%、22/10°C、17/8°C、10/6°Cの3区間で100%であった。

これらの結果から、本種は高温下では最終発芽率が低下し、低温下で高い発芽率となるといえる。すなわち本種は野外において、他の植物種よりも早い季節に発芽し、明るい生育環境と長い生育期間を得ることで大きく生長すると考えられる。しかし、同じマメ科であるナヨクサフジが同様な性質を持って同所的に生育し始めているため、野外でナヨクサフジが本種よりも早く発芽しより大きく生長する場合、本種が被圧され衰退することが危惧される。また本種も種皮が厚く、そのままでは吸水しなかったことから、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。

シナダレスズメガヤ (2013年産と2016年産)

シナダレスズメガヤは2013年度に採取し、その後4°Cで冷蔵保存していた種子を用いて発芽実験を行った。

2013年産の最終発芽率は30/15°C区で約28.7%、25/13°C区で約30.0%、22/10°C区で約23.3%、17/8°C区で約14.7%、10/6°C区で0%の種子が発芽した(表7、図14)。同じ種子を用い同様の温度区で行われた鍛冶川 (2014) の発芽実験では、最終発芽率が30/15°C区で約71.3%、25/13°C区で約72.7%、22/10°C区で約63.3%、17/8°C区で約35.8%、10/6°C区で6.0%という結果となった。両者を比較すると本年度の実験結果は2014年度の実験結果に比べて著しく低い。ここから、本種の種子は寿命が短く、3年間の冷蔵保存期間のうちに著しく劣化したものと考えられる。それゆえ、本種の種子は土壌シードバンクを形成する可能性は低いと推察できる。

このように非常に低い発芽率となったため、本実験では改めて2016年に種子を採取し再度同様の実験を行った。この2016年産の最終発芽率は30/15°C区で約43.3%、25/13°C区で約13.3%、22/10°C区で約1.3%、17/8°C区と10/6°C区では0%の種子が発芽した(表7、図15)。この結果は2013年度産の結果や鍛冶川(2014)の結果と比べても著しく低い。これより、シナダレスズメガヤは冷湿処理などの事前処理を行わなければ発芽率が低くなるようにその性質が変化した可能性が考えられる。事実、シナダレスズメガヤは本来温帯～熱帯という暖かい地域に生育する植物である。そのため、本来の自生地より寒い群馬県で自生するために適応したと推察される。もっとも、単純に2016年度産の種子が未熟であった、という場合も考えられる。いずれにせよ今後は、冷湿処理を施した発芽実験や異なる年度の種子を用いた発芽実験を行い、実験データを蓄積する必要がある。

ヒメモロコシ

冷湿処理を施さずに培養した種子の最終発芽率は30/15°C区で約0.67%、25/13°C区・22/10°C区17/8°C区・10/6°C区では0%という結果となった(表7、図16)。

狩谷(2004)及び佐藤(2004)は本種の種子に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°C区・25/13°C区・22/10°C区・17/8°C区で100%、10/6°C区では71%の種子が発芽するという結果を得ている。一方で河毛(2010)の実験によると1ヶ月或いは2ヶ月の冷湿処理を施したヒメモロコシの種子を用いた同等の実験では最高でも16%程度の発芽率だったという。もっとも河毛の用いた種子は当時の採取時から2年経過した種子であったため、この結果は種子の劣化と考えられる(河毛 2010)。

以上の結果から、ヒメモロコシは冷湿処理を施さなければ発芽しない、すなわち冬を経る事で初めて発芽する特性を有すると考えられる。本種におけるこうした冷湿処理と発芽速度・発芽率の関係や種子の寿命について、今後追試験が必要である。

異なる光条件下で栽培した外来植物の生長解析

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 8 に示した。また、栽培時の圃場の気温を図 17 に示す。ナヨクサフジおよびカラスのエンドウの栽培は、苗の作出がうまくいかなかったことから 11 月に開始となったため、10°C 以下の気温にさらされることも多くあった。それ以外の植物の栽培時の気温は、おおむね 15°C~30°C の範囲内にあった。

アメリカセンダングサ

相対成長速度 (RGR, $\text{g g}^{-1}\text{day}^{-1}$) は、3%区では生育不良となり 0、9%区では約 0.067、13%区では約 0.072、100%区で約 0.108 となった (表 10、図 18)。

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 0.111、9%区では約 1.516、13%区では約 1.790、100%区で約 5.842 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, m^2g^{-1}) は 3%区では約 0.049、9%区では約 0.044、13%区では約 0.042、100%区で約 0.008 となった。本種は相対光量子密度の低下による NAR の低下を LAR の増加で補っているものの、相対光量子密度が 3%区以下になると補いきれなくなり生長不良となると推察される。

また、各個体の葉の厚みを葉面積/重量ベースで表す SLA (m^2g^{-1}) は、3%区では約 0.191、9%区では約 0.109、13%区では約 0.103、100%区で約 0.046 となった。相対光量子密度が低いほど葉を薄くし、限られた光合成生産量を有効に葉面積の生産につなげる、という多くの植物と同様の特性を持つと考えられる。

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主な要因は、光合成活性 (NAR) の増加であると考えられる。すなわち、本種は明るいところでよく生長し、林床のような暗い環境下ではある程度の耐性があるものの、相対光量子密度が 3%を下回るような場所では著しく生長が悪くなると考えられる。また、9%区と 13%区であまり RGR が下がっていないのは暗くなるほど NAR が低下するのを LAR が補っているためと推察できる。これらの結果は、本種が主に河川敷といった明るい環境や、山間地の谷津田のような半日陰で生育していることの一つであると考えられる。

オオブタクサ(菅平産)

相対成長速度 (RGR, $\text{g g}^{-1}\text{day}^{-1}$) は、3%区では約 0.010、9%区では約 0.47、13%区では約 0.049、100%区で約 0.077 となった (表 11、図 19)。

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 0.369、9%区では約 2.194、13%区では約 2.661、100%区で約 7.719 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, m^2g^{-1}) は 3%区では約 0.021、9%区でも約 0.021、13%区では約 0.019、100%区で約 0.013 となり、処理区間で有意な差はなかった。

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主な要因は、光合成活性(NAR)の増加であると考えられる。すなわち、本種は明るいところでよく生長し、耐陰性が低いため林床のような暗い環境下では著しく生長が悪くなると考えられる。これは、本種が主に道路沿いや河川敷といった明るい環境下で生育していることの一理由の一つであると考えられる。

また、各個体の葉の厚みを葉面積/重量ベースで表すSLA (m^2g^{-1}) は、相対光量子密度の高い区ほど低い傾向になるのだが、3%区から9%区にかけては数値が上昇している。これは相対光量子密度が低いほど薄い葉を生産しようとするが、3%以下では葉の生産もうまくいかない状況となっていると思われる。

器官別重量比(WR)を見てみると、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LARの値が光条件の強い処理区ほど低下したのだと考察できる。

オオブタクサ(前橋産)

相対成長速度(RGR, $\text{g g}^{-1}\text{day}^{-1}$)は、3%区では生育不良となり約-0.013、9%区では約0.026、13%区では約0.039、100%区で約0.063となった(表12、図20)。

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-0.67、9%区では約1.19、13%区では約2.05、100%区で約5.82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, m^2g^{-1})は3%区では約0.021、9%区では約0.021、13%区では約0.019、100%区で約0.013となり、処理区間で有意な差はなかった。

これらの結果から、本種のRGRが光条件の明るい区ほど高くなった主な要因は、光合成活性(NAR)の増加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 (m^2g^{-1})は、3%区では約0.021、9%区では約0.021、13%区では約0.019、100%区で約0.013となった。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)を見てみると、菅平産と同様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LARの値が光条件の強い処理区ほど低下したのだと考察できる。

以上を踏まえて、菅平産と前橋産のオオブタクサの生長解析結果を比較するとRGRは菅平産の方が高く、その原因はNARが高いことであった。標高の高い場所に生育する個体は、生育期間が短いため、光合成活性を高めることによって生長速度を高め、種子生産を担保していると推察される。

ハリエンジュ

相対成長速度 (RGR, $\text{g g}^{-1}\text{day}^{-1}$) は、3%区では生育不良となり約-0.008、9%区では約0.019、13%区では約0.041、100%区で約0.049となった (表13、図21)。

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-0.43、9%区では約0.74、13%区では約1.43、100%区で約2.51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, m^2g^{-1}) は3%区では約0.023、9%区では約0.029、13%区では約0.029、100%区で約0.021となり、処理区間で有意な差はなかった。

各個体の葉の厚みを葉面積/重量ベースで表すSLA (m^2g^{-1}) は、3%区では約0.061、9%区では約0.079、13%区では約0.072、100%区で約0.039となった。基本的に相対光量子密度が低いほど葉を薄くしているが、3%区では葉の薄さを調節できないほど生長が阻害されているのだと考えられる。

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主な要因は、光合成活性(NAR)の増加であると考えられる。すなわち、本種は明るいところでよく生長し、耐陰性が低いため林床のような暗い環境下では著しく生長が悪くなると考えられる。これは、本種が主に道路沿いや河川敷といった明るい環境下で生育していることの一理由の一つであると考えられる。またこの特徴は本種が陽樹であることを示す。陽樹とは、日光の良く当たる明るい場所で育つが、暗い場所では生育できない樹木である。つまりハリエンジュは、光条件にその生長が大きく左右されるのだと推察される。

ナヨクサフジ

相対成長速度 (RGR, $\text{g g}^{-1}\text{day}^{-1}$) は、3%区では約-0.007、9%区では約0.013、13%区では約0.007、100%区で約0.041となった (表14、図22)。

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-0.792、9%区では約1.299、13%区では約1.061、100%区で約5.103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, m^2g^{-1}) は3%区では約0.010、9%区では約0.011、13%区では約0.008、100%区においても約0.008となり、処理区間で有意な差はなかった。

各個体の葉の厚みを葉面積/重量ベースで表すSLA (m^2g^{-1}) は、3%区では約0.066、9%区では約0.071、13%区では約0.046、100%区で約0.051となった。相対光量子密度が低いほど葉を薄くし、限られた光合成生産量を有効に葉面積の生産につなげる、という多くの植物と同様の特性を持つと考えられる。

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主な要因は、光合成活性(NAR)の増加であると考えられる。すなわち、本種は明るいところでよく生長し、耐陰性が低いため林床のような暗い環境下では著しく生長が悪くなると考えられる。これは、本種が主に道路沿いや河川敷といった明るい環境下で生育していることの一理由の一つであると考えられる。

カラスノエンドウ

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0.012、13%区では約0.013、100%区で約0.033となった (表15、図23)。

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-0.227、9%区では約1.072、13%区では約1.227、100%区で約3.825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, m^2g^{-1}) は3%区では約0.013、9%区では約0.012、13%区では約0.011、100%区では約0.009となり、処理区間で有意な差はなかった。

また、各個体の葉の厚みを葉面積/重量ベースで表すSLA (m^2g^{-1}) は、3%区では約0.064、9%区では約0.053、13%区では約0.043、100%区で約0.034となった。相対光量子密度が低いほど葉を薄くし、限られた光合成生産量を有効に葉面積の生産につなげる、という多くの植物と同様の特性を持つと考えられる。

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主な要因は、光合成活性(NAR)の増加であると考えられる。すなわち、本種は明るいところでよく生長し、耐陰性が低いため林床のような暗い環境下では著しく生長が悪くなると考えられる。これは、本種が主に道路沿いや裸地といった明るい環境下で生育していることの一理由の一つであると考えられる。

足助 (2016) は2015年6月～8月にナヨクサフジとカラスノエンドウについて同様の栽培実験を行ったが、カラスノエンドウはほとんどが死滅し、ナヨクサフジは3%区および9%区ではほとんど生長しなかった。この結果は夏季の高温の影響を受けていると考えられたため、本研究では両種の本래の発芽・生長開始時期である11月に栽培実験を開始した。その結果は、両種ともに生長特性がほとんど同じであるといえるものであった。発芽実験の結果も併せてみると、両種は野外において強い競合関係にあり、ナヨクサフジがカラスノエンドウを駆逐する危険性があると思われる。

異なる温度条件下で栽培した外来植物の生長解析

気温が異なる条件下での栽培実験における乾燥重量を表9に示す。また、栽培時のガラス温室内の気温を図24に示す。ナヨクサフジおよびカラスのエンドウの栽培は、苗の作出がうまくいかなかったことから11月に開始となったため、15°C以下の気温にさらされることも多くあった。それ以外の植物の栽培時の気温は、おおむね25°C~40°Cの範囲内にあり、平均で約2.4°C、外気温よりも高かった。

生長解析結果は、表10~15および、図25~30に示す。相対生長速度 (RGR) がコントロール区に比べて2.4°C上昇区で有意に高くなった種はナヨクサフジとカラスノエンドウであり ($p<0.01$)、オオブタクサ (前橋産)、ハリエンジュ、アメリカセンダングサにおいては逆に有意に低下した ($p<0.01$)。菅平産のオオブタクサではRGRには処理区間で有意差が検出できなかったが、NARおよびLARの反応は前橋産のものと同じ結果であったので、サンプル数に比べて生長にばらつきが大きいこと起因する統計学的過誤であると思われる。

ナヨクサフジとカラスノエンドウの純同化率 (NAR) は処理区間で有意な差は認められず、葉面積比 (LAR) がコントロール区に比べて2.4°C上昇区で有意に高くなった ($p<0.01$) ことから、葉の増加がRGR増加の主要因であると考えられる。

オオブタクサ (前橋産)、ハリエンジュ、アメリカセンダングサのNARがコントロール区に比べて2.4°C上昇区で有意に低くなった ($p<0.01$) ことから、光合成活性の低下がRGR低下の主要因であると考えられる。

これらの結果の詳細な考察は、須永 (2017) に委ねる。

結 論

本研究の目的は群馬県内における外来植物の侵入状況の解明とそれら外来植物の生態的特徴の解明であった。調査・実験の結果ある程度の解明ができたとなった。

まず外来植物の侵入状況についてである。今回は群馬県前橋市関根町郵便局付近と、渡瀬遊水池周辺、八ツ場ダム周辺、谷田川周辺で調査をしたがその結果は以下の通りとなる。

第1にナヨクサフジであるが、群馬県前橋市関根町郵便局付近において、ナヨクサフジの生育が確認できた地点数は、2015年度に31地点であったものが233地点と激増している。また、昨年では見られなかった群馬大学荒牧キャンパス内においても15地点の場所でナヨクサフジが確認され、今後生息域が徐々に拡大していくことが懸念される。また2016年12月8日に再調査を行ったところ、いくつかのナヨクサフジの個体が見られており、冬の間に発芽・生長するという特性が確認できるものとなった。このままナヨクサフジの生育域が拡大すると、在来植物種を駆逐する可能性は高くなると考えられる。早急な対応が必要であろう。

第2に渡瀬遊水池のオオブタクサであるが、繁茂した集団が複数みられ、約 926.96 m²のオオブタクサ群落を確認された。この群落ではおよそ 6540630 個の種子が作られると予想され、生息域拡大に拍車をかけるものといえる。当調査地では、多数の絶滅危惧種の生育が確認されている。このままオオブタクサが繁茂すればこれらの植物の生育を阻害する可能性がある。早急な駆除などの対応が必要である。

第3に八ツ場ダム周辺において 69 地点でハリエンジュの繁茂が確認された。最上流部にあたる長野原駅付近において、巨大なハリエンジュ群落（500 本以上）が確認され、この場所が最大の種子供給起源になっているのではないかと推察される。従ってこの場所を放置すれば、ここを起点にハリエンジュ群落がさらに拡大すると思われる。早急にハリエンジュを伐倒駆除することと、駆除後も継続的なモニタリングにより、萌芽再生を早期に発見して継続的に刈り取ることが不可欠である。

そして、谷田川においては多くの外来植物が確認された。この場所は本来刈り取りが行われているのだが、ナヨクサフジやオオブタクサ、ヒメモロコシといった外来植物が 11 種確認されている。全国の河川生態系において外来植物が繁茂する事は知られており、当地域も例外ではない。問題であるのは、当地域において全くと言っていいほど土木工事の際の環境影響評価が行われていない事である。早急に外来植物を排除し、絶滅危惧種を含む在来植物を保全する必要がある。

次に、外来植物の生態的特徴についてである。本研究によりアメリカセンダングサ・オオブタクサ・ハリエンジュ・ナヨクサフジは種ごとの違いがあるもののいずれも生存競争を勝ち抜くような特性を持ち、定着能力が高い事が明らかとなった。シナダレスズメガヤ・ヒメモロコシに関してはデータ数が少ないため、今後の追加実験が望まれる。

アメリカセンダングサは本研究を通して発芽には冷湿処理が少なくとも2ヶ月必要であることが再確認できた。そして、広い温度域で発芽する為、様々な環境条件に適応できるものと推察できる。加えて、アメリカセンダングサは1ヶ月ほど経過した後に急激に発芽率が上昇しており、本種は冬を経験し、その後およそ1ヶ月の時間を経て発芽するものと考えられる。また、生長解析から本種は明るいとこでよく生長し、林床のような暗い環境下ではある程度の耐性があるも

の、相対光量子密度が3%を下回るような場所では著しく生長が悪くなると考えられる。これは、本種が主に河川敷といった明るい環境や、山間地の谷津田のような半日陰に分布し生息していることの原因の一つであるといえよう。

オオブタクサは今回の研究を通じて発芽の際には約1ヶ月の冷湿処理が必要で、高温度帯ではあまり発芽せず、比較的低い温度帯が発芽最適温度域であると推察された。その為、本種は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事で巨大な草体に生長すると考えられる。さらに冷湿処理が必要、すなわち冬を経験する事で発芽が促されることと、5~6年間の冷凍保存の下でも種子が劣化しないことから、本種は土壌シードバンクを形成するものとも考察できる。そのため、除去作業を行うには継続して長期間行う必要がある。また生長解析より、本種は明るいところでよく生長し、林床のような暗い環境下では著しく成長が悪くなるという推論が得られた。これは、本種が主に道路沿いや河川敷といった明るい環境下で生息していることの原因の一つであると考えられよう。また菅平と前橋という、生育した標高、すなわち気候条件の違いによる生態的特性の違いについては、種子発芽の温度依存特性に関しては影響を及ぼさないと推察される。一方で生長解析からは、RGRは菅平産の方が高く、その原因はNARが高いことが分かった。つまり標高の高い場所に生育する個体は、生育期間が短いため、光合成活性を高めることによって生長速度を高め、種子生産を担保していると推察される。この様にオオブタクサについては気候条件の違いで生長の仕方に変化はあるものの、発芽の特性に大きな変化は無いものと考察できる。

ハリエンジュは発芽実験を通じて低温度帯である10/6°C区以外で発芽率が良好であり、広範な気候条件の下で発芽する事が可能であると推察される。そして、8年の冷凍保存を経た後もおよそ6割の発芽率を示していることから、一度土中に種がまかれると少なくとも8年間の間であれば比較的高確率で発芽すると考えられる。このような特徴がハリエンジュの繁茂する原因と捉えられる。除去作業を行うにはオオブタクサと同様、継続して長期間行う必要がある。また生長解析より本種は、明るいところでよく生長し、林床のような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、本種が主に道路沿いや河川敷といった明るい環境下で生息していることの原因の一つであると考えられる。ハリエンジュが陽樹であることの証明ともいえよう。

ナヨクサフジにおいては発芽実験から、広範な環境条件の下で発芽が可能であるということが明らかになった。その為本種は、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事で他の植物種の生息遺範囲を奪う可能性が考えられる。また、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推察される。その種子が何年間発芽可能の状態であるかはデータが少ないため不明だが、除去作業には長期間の継続が必要となる可能性が高い。さらに生長解析より、本種は光依存性が高くし、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、本種が河川敷や道路脇といった日当たりのよい部分でよく見られることの原因の一つであると考えられよう。

シナダレスズメガヤは2013年度産の種子と2016年度産の種子で実験を行ったが、本研究の結果種子は長くとも3年で劣化することが示された。そのため本種は土壌シードバンクを作らない、つまり防除にはただ引き抜きを行えばよいと推察される。また、発芽には冷湿処理が必要となっ

た可能性が示唆された。ただし、データ数が少ないため、今後冷湿処理を行った実験や生長解析を含めた栽培実験などの追加実験が望まれる。

ヒメモロコシについては本研究から冷湿処理の必要性が再確認された。しかし、採取した日時が遅く実験内容が少なかったため、今後は冷湿処理を用いた実験や種子の寿命を確認する実験、生長解析を含めた栽培実験といった多種のデータを蓄積する必要がある。

このように外来植物はいずれも他種に先駆けて発芽し、早い段階で生長し他の植物の生育を阻害しているといえる。もっともこの特性は外来植物に限ったことではない。在来植物であり、ナヨクサフジと競合すると考えられるカラスノエンドウは高い温度区で最終発芽率が低くなるものの低温度帯では高い発芽率を示している。このような、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、また本種においても、そのままでは吸水しないため、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。生長解析からも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。この特性はナヨクサフジと酷似しており両者を比較すると、ナヨクサフジがカラスノエンドウの生育を阻害する危険性がある。

以上の様に外来植物の侵入状況は深刻といえる。外来植物の繁茂の影には在来植物との競争が存在しており、放っておけば在来植物が絶滅の危機に貧する状態に陥りかねない。従って、迅速な防除等の対応が求められる。具体的には外来植物の引き抜きが最も有効であるといえよう。しかし、種によっては、引き抜き後も土壌シードバンクや根茎が残存する可能性があり、駆除は複数年にわたる場合もありうる。つまり、外来植物の生態的特徴に沿った駆除を行う必要がある。今回の研究内容であればオオブタクサ・ハリエンジュ・ナヨクサフジは土壌シードバンクを含めた徹底的な除去作業が必要であり、シナダレスズメガヤに関しては単純な引き抜き作業のみで良いという事になる。この様に一口に外来植物といってもその生態的特性は多様である。そのため、外来植物の環境適応様式等の多様なデータを得て、各外来植物の生態的特性を解明する必要がある。また、競合する在来植物の生態的特性も考慮する事で、より効率的な対策が取れるといえよう。そして、除去作業だけでなく長期的なモニタリングを行い外来植物の侵入そのものを防ぐ必要もある。この様に外来植物への対策としては、研究をつづけ様々な基礎データを蓄積し外来植物の生態学的特性をより詳細に解明すること、かつ継続的なモニタリングを行い外来植物の侵入を阻止することが重要である。

謝 辞

本研究は、群馬大学社会情報学部・情報社会科学科・石川真一教授のご指導のもと、環境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。

渡良瀬遊水池での調査におきましては、群馬県自然環境調査研究会・大平満氏にご協力いただきました。

谷田川における植生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・小林芳人氏および毛利修二氏にご協力・ご指導頂きました。

また、同時期に卒業論文に取り組んだ篠原大勇氏、須永勇樹氏、三輪晏史氏、山里純氏をはじめとする、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、厚くお礼申し上げさせていただきます。

引用文献・引用 web ページ

- 浅井康宏 (1993) 緑の侵入者たち 帰化植物のはなし 朝日選書. 23-34
- 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.
- 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・清水義彦・大森威宏・増田和明・柴宮朋和著 (2009) ブックレット 群馬大学⑤ 外来植物の脅威 上毛新聞社. 4-5 27-31 34-38 57-58 66-67
- 板倉町教育委員会編 (2005) 渡良瀬遊水池と谷田川下流域の自然環境 板倉町教育委員会.
- 大原雅 (2015) 植物生態学 海游舎 184
- 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.
- 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・定着に関する生態学的研究 群馬大学社会情報学部卒業論文.
- 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.
- 川道美枝子・岩槻邦男・堂本暁子 (2001) 移入・外来・侵入種 生物多様性を脅かすもの 築地書館. 21
- 財団法人自然環境センター編著 多紀保彦監修 (2008) 決定版 日本の外来生物 平凡社. 281-283 336-337 346-347 408-409
- 崎尾均編 (2009) ニセアカシアの生態学 外来樹の歴史・利用・生態とその管理 文一総合出版. 328
- 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.
- 種生物学会 (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. 18-19 32-33 77-78
- 高橋和夫 (2001) 帰化植物オオブタクサによる利根川中流域のアメニティ破壊 群馬大学社会情報学部卒業論文.
- 西山理行 (1989) 田島ヶ原サクラソウ自生地における帰化植物の侵入に関する基礎研究-オオブタクサの侵入とその生長・発芽特性 筑波大学修士課程環境科学研究科修士論文.
- 日本生態学会編 村上興正・鷺谷いづみ監修 (2002) 外来種ハンドブック 地人書館. 3-9 191 197 199
- 日本生態学会編 (2015) シリーズ現代の生態学 3 人間活動と生態系 共立出版. 29-33 38-39 206-207
- 日本生態学会編 (2012) 生態学入門 第2版 東京化学同人. 227-228
- 西川潮・宮下直編著 (2011) 外来生物 生物多様性と人間社会への影響 裳華房. 86-87
- 根本正之・富永達編著 (2014) 身近な雑草の生物学 朝倉書店. 135-136

根本正之編著 村岡裕由・富永達・高柳繁・森田弘彦 (2006) 雑草生態学 朝倉書店 50-52 141
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.
牧野富太郎 (2000) 牧野新日本植物図鑑 北隆館.
宮下直・井鷲裕司・千葉聡 (2012) 生物多様性と生態学 遺伝子・種・生態系 朝倉書店. 4-5
宮下直・野田隆史 (2003) 群衆生態学 東京大学出版会. 149-150
鷺谷いづみ (1999) 新・生物学への招待 生物保全の生態学 共立出版株式会社. 60
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. 46 92 125 187
鷺谷いづみ・椿宣高・夏原由博・松田裕之 (2010) 現代生物化学入門6 地球環境と保全生物学
岩波書店. 155
鷺谷いづみ・矢原徹一 (1996) 保全生態学入門-遺伝子から景観まで- 文一総合出版

気象庁:過去の気象データの検索より <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
国土交通省関東地方整備局 八ツ場ダム工事事務所ホームページ
http://www.ktr.mlit.go.jp/yanba/yanba_index013.html
侵入生物データベース <http://www.nies.go.jp/biodiversity/invasive/index.html>
日本のレッドデータ検索システム <http://www.jpnrdb.com/>
三河の植物観察 <http://mikawanoyasou.org/index.htm>
渡良瀬遊水地ホームページ <http://watarase.or.jp/>

図表・写真
写真



写真1 群馬県前橋市関根町郵便局付近のナヨクサフジの繁茂 2016年5月3日撮影



写真2 群馬県前橋市関根町郵便局付近のナヨクサフジの実生 2016年12月8日撮影



写真3 渡良瀬遊水池のオオブタクサの繁茂 2016年5月21日撮影

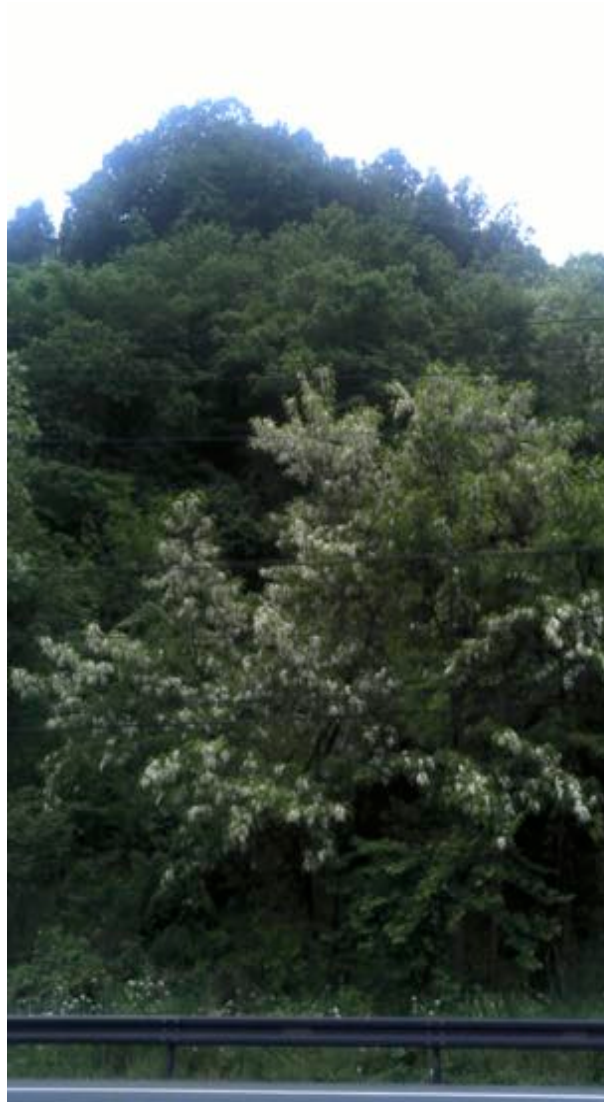


写真4 八ツ場ダムのハリエンジュ 2016年5月25日撮影



写真5 谷田川周辺のナヨクサフジ 2016年6月16日撮影



写真6 谷田川堤防（板倉町）のヒメモロコシの繁茂 2016年6月16日撮影



写真7 谷田川堤防（板倉町）のオオブタクサ繁茂 2016年6月16日撮影

表

表1 材料植物一覧

科名	和名	学名	生活型	採取日時	採取場所
キク科	アメリカセンダングサ	<i>Bidens frondosa</i>	一年生草本	2015年11月4日	西榛名
	オオブタクサ	<i>Ambrosia trifida</i>	一年生草本	2010年10月1日	長野県真田町菅平
			一年生草本	2011年11月1日	前橋市関根町利根川河川敷
マメ科	ハリエンジュ	<i>Robinia pseudoacacia</i>	落葉高木	2008年	前橋市
	ナヨクサフジ	<i>Vicia villosa</i> subsp. <i>Varia</i>	一年生草本	2016年5月27日	前橋市関根町郵便局付近
	カラスノエンドウ	<i>Vicia angustifolia</i> L. var. <i>angustifolia</i>	一年生草本	2016年5月18日	群馬大学荒牧キャンパス
イネ科	シナダレスズメガヤ	<i>Eragrostis curvula</i>	一年生草本	2013年4月11日	前橋市田口緑地
			一年生草本	2016年10月20日	群馬県藤岡市
	ヒメモロコシ	<i>Sorghum halepense</i> f. <i>muticum</i>	多年生草本	2016年11月6日	群馬県前橋市江木町

表 2 発芽実験スケジュール

植物名	冷湿処理	実験開始日～終了日	実験期間	備考
アメリカセンダングサ	約2ヶ月(4月28日～6月30日)	2016年7月1日～9月1日	61日	
オオブタクサ(菅平産)	約1ヶ月(4月28日～6月3日)	2016年6月3日～8月2日	61日	
オオブタクサ(前橋産)	約1ヶ月(4月28日～6月3日)	2016年6月3日～8月3日	61日	
ハリエンジュ	なし	2016年6月3日～8月7日	62日	硫酸処理あり
ナヨクサフジ	なし	2016年6月3日～8月8日	62日	硫酸処理あり
カラスノエンドウ	なし	2016年6月3日～8月9日	62日	硫酸処理あり
シナダレスズメガヤ(2013)	なし	2016年5月19日～7月18日	59日	
シナダレスズメガヤ(2016)	なし	2016年10月23日～12月23日	63日	
ヒメモロコシ	なし	2016年11月8日～2017年1月7日	63日	

表3 栽培実験スケジュール

植物名	植え替え日	栽培開始日	初期サンプリング数	栽培終了日	最終サンプリング数	栽培日数
アメリカセンダングサ	2016年8月19日	2016年8月26日	15個体	2016年9月16日	15個体	21日
オオバタクサ(菅平産)	2016年6月15日	2016年6月22日	15個体	2016年7月15日	15個体	23日
オオバタクサ(前橋産)	2016年6月15日	2016年6月22日	15個体	2016年7月15日	15個体	23日
ハリエンジュ	2016年7月26日	2016年8月2日	11個体	2016年8月23日	11個体	21日
ナヨクサフジ	2016年10月31日	2016年11月5日	15個体	2016年11月20日	15個体	15日
カラスノエンドウ	2016年11月2日	2016年11月9日	15個体	2016年12月1日	15個体	22日

表4 ハツ場ダム周辺におけるハリエンジュ開花木の地点別本数

地点番号	本数
70	10
71	20
72	2
73	1
74	5
75	5
76	1
77	5
78	15
79	100
80	5
81	10
82	5
83	50
84	5
85	5
86	100
87	200
88	100
89	200
90	100
91	200
92	100
93	100
94	50
95	20
96	10
98	300
99	10
100	500
101	50
102	50
103	200
104	10
105	5

地点番号	本数
106	50
107	20
108	5
109	5
110	20
111	1
112	20
113	1
114	1
115	30
116	100
117	5
118	30
119	20
120	10
121	100
122	20
123	100
124	50
125	60
126	10
127	1
128	30
129	50
130	5
131	20
132	20
133	100
134	20
135	50
136	5
137	30
138	30
139	10

総計 3578本以上

表6 谷田川右岸（八間樋橋下流、板倉町）における植生調査結果
 数字は被度（%）を示す。

地点番号		148	149	150	151	152	153
	コドラート番号、備考	コドラート1	コドラート2	コドラート3	コドラート4	コドラート5	コドラート6
種別	コドラート面積	60m×10m	50m×20m	7m×5m	2m×1m	50m×5m	5m×6m
外来	イヌムギ						
外来	オオオナモミ						
外来	オオブタクサ	5	20	100	70	70	60
外来	カラスムギ						
外来	シロザ						
外来	ナガバギシギシ	10	5				
外来	ナヨクサフジ	20	10		30		10
外来	ネズミムギ						
外来	ヒメモロコシ	30	10				
外来	ヒレアザミ						
外来	ホオズキ			30			
	アゼナルコ						
	イシミカワ						
	イタドリ						
	オオイヌタデ						
	オギ						
	オヤブジラミ						
	カナムグラ						
	カモジグサ						30
	クサギ	10	5				30
	ササ						
	シロネ						
	セリ	70	5	5	5		
	ドクダミ						
	ネコヤナギ						
	ノイバラ						
	ノコンギク						
	ヒナタイノコヅチ						
	フキ						
	ヤブカンゾウ			5			
	ユウガギク						
	ヨシ	20		5		30	1

表6 (続き) 谷田川右岸(八間樋橋下流、板倉町)における植生調査結果
 数字は被度(%)を示す。

	地点番号	154	155	156	158	159	160
	コドラート番号、備考	コドラート7 枠外にオオブ タクサが多数 繁茂	コドラート8	コドラート9	コドラート10	コドラート11	コドラート12
種別	コドラート面積	15m×7m	20m×7m	30m×2m	30m×10m	15m×1.5m	10m×10m
外来	イヌムギ						
外来	オオオナモミ						1
外来	オオブタクサ	20	50	50	50	80	50
外来	カラスムギ						
外来	シロザ						
外来	ナガバギシギシ		1			1	
外来	ナヨクサフジ	20	50			1	
外来	ネズミムギ						
外来	ヒメモロコシ				20		
外来	ヒレアザミ						
外来	ホオズキ						
	アゼナルコ						
	イシミカワ						
	イタドリ				1		
	オオイヌタデ						
	オギ			10			
	オヤブジラミ						
	カナムグラ						
	カモジグサ		20	50			
	クサギ	10					
	ササ						
	シロネ						
	セリ						
	ドクダミ					5	
	ネコヤナギ						
	ノイバラ						
	ノコンギク						
	ヒナタイノコヅチ						
	フキ	1					
	ヤブカンゾウ	20	10				
	ユウガギク					10	
	ヨシ			1		10	50

表6 (続き) 谷田川右岸 (八間樋橋下流、板倉町) における植生調査結果
 数字は被度 (%) を示す。

	地点番号	161	162	164	165	166	167
	コドラート番号、備考	コドラート13	コドラート14 (27年度造成、表土なし)	コドラート15	コドラート16	コドラート17	コドラート18
種別	コドラート面積	2m×2m	4m×2m	15m×2m	10m×2m	10m×2m	10m×2m
外来	イヌムギ						10
外来	オオオナモミ						
外来	オオブタクサ	50	70	100	20	20	5
外来	カラスムギ						1
外来	シロザ						50
外来	ナガバギシギシ				10	1	5
外来	ナヨクサフジ						10
外来	ネズミムギ						
外来	ヒメモロコシ		1			1	20
外来	ヒレアザミ						1
外来	ホオズキ						
	アゼナルコ						
	イシミカワ						
	イタドリ						
	オオイヌタデ						10
	オギ	100	50		100	50	
	オヤブジラミ		5				
	カナムグラ						
	カモジグサ						
	クサギ						
	ササ						
	シロネ						
	セリ	30					
	ドクダミ						
	ネコヤナギ						
	ノイバラ						
	ノコンギク	10					
	ヒナタイノコヅチ		20				
	フキ						
	ヤブカンゾウ						
	ユウガギク		5				
	ヨシ			10			

表 6 (続き) 谷田川右岸 (八間樋橋下流、板倉町) における植生調査結果
 数字は被度 (%) を示す。

地点番号	170	172	173	178	179	180
コドラート番号、備考	コドラート19	コドラート20	コドラート21	コドラート22	コドラート23	コドラート24
コドラート面積	4m × 2m	65m × 2m	30m × 30m	3m × 1m	30m × 3m	1.5m × 2m
イヌムギ						
オオオナモミ					1	
オオブタクサ	50	20				
カラスムギ						1
シロザ						
ナガバギシギシ						
ナヨクサフジ		10				
ネズミムギ			5			
ヒメモロコシ						
ヒレアザミ						
ホオズキ						
アゼナルコ				20	5	
イシミカワ			1			
イタドリ		50				
オオイヌタデ						
オギ		20	50			
オヤブジラミ						
カナムグラ			10			
カモジグサ		20	5			5
クサギ						
ササ						
シロネ						
セリ	20		5	1		
ドクダミ						
ネコヤナギ					10	10
ノイバラ			10			
ノコンギク						
ヒナタイノコヅチ	20	5	1	10	10	70
フキ						
ヤブカンソウ						
ユウガギク						
ヨシ	50	20	20	100	100	

表6 (続き) 谷田川右岸(八間樋橋下流、板倉町)における植生調査結果
 数字は被度(%)を示す

	地点番号	181	182	183	184	185	186
	コドラート番号、備考	コドラート25	コドラート26	コドラート27	コドラート28	コドラート29	コドラート30
種別	コドラート面積	6m×5m	0.5m×4m	1m×3m	1.5m×0.5m	1.5m×1.5m	2m×2m
外来	イヌムギ						
外来	オオオナモミ						
外来	オオブタクサ					1	
外来	カラスムギ						
外来	シロザ						
外来	ナガバギシギシ			1			
外来	ナヨクサフジ					10	10
外来	ネズミムギ						
外来	ヒメモロコシ					40	
外来	ヒレアザミ						
外来	ホオズキ						
	アゼナルコ	20					
	イシミカワ						
	イタドリ		1	1			
	オオイヌタデ						
	オギ						
	オヤブジラミ						
	カナムグラ						
	カモジグサ					50	100
	クサギ						
	ササ					5	
	シロネ	1					
	セリ			50			
	ドクダミ						
	ネコヤナギ						
	ノイバラ						
	ノコンギク						
	ヒナタイノコヅチ	10		10			10
	フキ					30	
	ヤブカンゾウ						
	ユウガギク						
	ヨシ	100	100	100	100		

表6 (続き) 谷田川右岸 (八間樋橋下流、板倉町) における植生調査結果
 数字は被度 (%) を示す。

地点番号	187	188	189
コドラート番号、備考	コドラート 31	コドラート 32	コドラート 33
コドラート面積	6m × 2m	30m × 4m	5m × 5m
イヌムギ			
オオオナモミ			
オオブタクサ		5	
カラスムギ			
シロザ			
ナガバギシギシ			
ナヨクサフジ			
ネズミムギ			
ヒメモロコシ	50		20
ヒレアザミ			
ホオズキ			
アゼナルコ			
イシミカワ			
イタドリ			
オオイヌタデ			
オギ		100	
オヤブジラミ			
カナムグラ			
カモジグサ			
クサギ			
ササ			
シロネ			
セリ	20		
ドクダミ			
ネコヤナギ			
ノイバラ	30		
ノコンギク			
ヒナタイノコヅチ	40	50	30
フキ			
ヤブカンゾウ			
ユウガギク			
ヨシ	5		

表7 最終発芽率一覧

植物名		30/15°C	25/13°C	22/10°C	17/8°C	10/6°C	25/13°C(冷湿なし)
アメリカセンダングサ	最終発芽率(%)	76.67	50.67	26.67	72.67	78.00	0.67
	標準偏差	19.22	15.01	21.20	6.11	12.17	1.15
オオブタクサ(菅平産)	最終発芽率(%)	33.33	32.67	54.00	66.67	47.33	12.00
	標準偏差	9.02	7.02	7.21	13.32	16.65	4.00
オオブタクサ(前橋産)	最終発芽率(%)	28.67	45.33	62.00	62.00	70.00	12.00
	標準偏差	9.45	1.15	14.00	4.00	2.00	4.00
ハリエンジュ	最終発芽率(%)	63.33	71.33	63.33	61.33	43.33	なし
	標準偏差	21.39	4.16	5.77	1.15	7.57	なし
ナヨクサフジ	最終発芽率(%)	62.00	64.00	78.00	88.00	92.00	なし
	標準偏差	16.37	2.00	13.86	3.46	5.29	なし
カラスノエンドウ	最終発芽率(%)	54.67	84.67	84.67	83.33	60.67	なし
	標準偏差	14.19	6.11	7.57	7.02	7.57	なし
シナダレスズメガヤ(2013)	最終発芽率(%)	28.67	30.00	23.33	14.67	0.00	なし
	標準偏差	3.06	11.14	5.03	4.62	0.00	なし
シナダレスズメガヤ(2016)	最終発芽率(%)	43.33	13.33	1.33	0.00	0.00	なし
	標準偏差	6.43	7.57	2.31	0.00	0.00	なし
ヒメモロコシ	最終発芽率(%)	0.67	0.00	0.00	0.00	0.00	なし
	標準偏差	1.15	0.00	0.00	0.00	0.00	なし

表8 異なる光条件下で栽培した各材料植物の個体乾燥重量一覧

植物名	平均個体乾燥重量(g)					標準偏差(SD)				
	初期	100%区	13%区	9%区	3%区	初期	100%区	13%区	9%区	3%区
アメリカセンダングサ	0.019	0.176	0.093	0.081	0.025	0.013	0.108	0.061	0.052	0.017
オオバクサ(菅平産)	0.085	0.487	0.257	0.278	0.113	0.031	0.133	0.075	0.199	0.051
オオバクサ(前橋産)	0.124	0.508	0.292	0.227	0.094	0.052	0.107	0.060	0.080	0.032
ハリエンジュ	0.056	0.145	0.135	0.092	0.048	0.027	0.044	0.067	0.048	0.019
ナヨクサフジ	0.042	0.078	0.049	0.051	0.038	0.011	0.017	0.012	0.011	0.008
カラスノエンドウ	0.015	0.032	0.020	0.020	0.014	0.003	0.009	0.006	0.006	0.004

表9 異なる温度光条件下で栽培した外来植物の乾燥重量一覧

植物名	平均個体乾燥重量(g)			標準偏差(SD)		
	初期	100%区	2.4°C区	初期	100%区	2.4°C区
アメリカセンダングサ	0.019	0.176	0.152	0.013	0.108	0.096
オオブタクサ(菅平産)	0.085	0.487	0.450	0.031	0.133	0.110
オオブタクサ(前橋産)	0.124	0.508	0.407	0.052	0.107	0.111
ハリエンジュ	0.056	0.145	0.159	0.027	0.044	0.098
ナヨクサフジ	0.042	0.078	0.093	0.011	0.017	0.022
カラスノエンドウ	0.015	0.032	0.037	0.003	0.009	0.009

表 10 アメリカセンダングサ生長解析結果

相対光子密度	平均値				標準偏差(SD)			
	RGR(g/g/day)	LAR(m ² /g)	NAR(g/m ² /day)	SLA(m ² /g)	RGR(g/g/day)	LAR(m ² /g)	NAR(g/m ² /day)	SLA(m ² /g)
100%区	0.108	0.026	5.842	0.046	0.005	0.006	1.044	0.004
13%区	0.072	0.042	1.790	0.103	0.011	0.006	0.428	0.011
9%区	0.067	0.044	1.516	0.109	0.014	0.007	0.299	0.019
3%区	0.000	0.049	-0.111	0.191	0.021	0.017	0.620	0.285
2.4°C区	0.099	0.029	4.311	0.056	0.011	0.006	0.955	0.004

表 11 オオブタクサ (菅平) 生長解析結果

相対光量子密度	平均値				標準偏差(SD)			
	RGR(g/g/day)	LAR(m ² /g)	NAR(g/m ² /day)	SLA(m ² /g)	RGR(g/g/day)	LAR(m ² /g)	NAR(g/m ² /day)	SLA(m ² /g)
100%区	0.077	0.013	7.719	0.025	0.006	0.002	0.926	0.003
13%区	0.049	0.019	2.661	0.058	0.007	0.003	0.591	0.006
9%区	0.047	0.021	2.194	0.067	0.005	0.003	0.249	0.007
3%区	0.010	0.021	0.369	0.059	0.011	0.005	0.592	0.026
2.4℃区	0.074	0.015	5.699	0.041	0.007	0.002	0.816	0.003

表 12 オオブタクサ（前橋）生長解析結果

相対光量子密度	平均値				標準偏差(SD)			
	RGR(g/g/day)	LAR(m ² /g)	NAR(g/m ² /day)	SLA(m ² /g)	RGR(g/g/day)	LAR(m ² /g)	NAR(g/m ² /day)	SLA(m ² /g)
100%区	0.063	0.014	5.821	0.027	0.008	0.002	0.905	0.003
13%区	0.039	0.019	2.045	0.056	0.008	0.003	0.338	0.006
9%区	0.026	0.023	1.189	0.066	0.009	0.003	0.446	0.006
3%区	-0.013	0.022	-0.666	0.063	0.007	0.004	0.511	0.019
2.4°C区	0.053	0.016	3.786	0.041	0.006	0.002	0.430	0.005

表 13 ハリエンジュ生長解析結果

相対光量子密度	平均値				標準偏差(SD)			
	RGR(g/g/day)	LAR(m ² /g)	NAR(g/m ² /day)	SLA(m ² /g)	RGR(g/g/day)	LAR(m ² /g)	NAR(g/m ² /day)	SLA(m ² /g)
100%区	0.049	0.021	2.505	0.039	0.012	0.001	0.613	0.005
13%区	0.041	0.029	1.430	0.073	0.007	0.003	0.254	0.012
9%区	0.019	0.029	0.745	0.079	0.008	0.007	0.382	0.014
3%区	-0.008	0.023	-0.434	0.061	0.006	0.005	0.363	0.011
2.4°C区	0.046	0.024	1.961	0.052	0.010	0.002	0.519	0.006

表 14 ナヨクサフジ生長解析結果

相対光量子密度	平均値				標準偏差(SD)			
	RGR(g/g/day)	LAR(m ² /g)	NAR(g/m ² /day)	SLA(m ² /g)	RGR(g/g/day)	LAR(m ² /g)	NAR(g/m ² /day)	SLA(m ² /g)
100%区	0.041	0.008	5.103	0.051	0.011	0.001	1.354	0.003
13%区	0.007	0.008	1.061	0.046	0.005	0.003	1.359	0.017
9%区	0.013	0.011	1.299	0.071	0.006	0.002	0.685	0.013
3%区	-0.007	0.010	-0.792	0.066	0.004	0.001	0.499	0.008
2.4℃区	0.053	0.010	5.536	0.053	0.004	0.001	0.923	0.004

表 15 カラスノエンドウ生長解析結果

相対光量子密度	平均値				標準偏差(SD)			
	RGR(g/g/day)	LAR(m ² /g)	NAR(g/m ² /day)	SLA(m ² /g)	RGR(g/g/day)	LAR(m ² /g)	NAR(g/m ² /day)	SLA(m ² /g)
100%区	0.033	0.009	3.825	0.034	0.007	0.001	0.962	0.002
13%区	0.013	0.011	1.227	0.043	0.007	0.001	0.697	0.004
9%区	0.012	0.012	1.072	0.053	0.005	0.002	0.542	0.007
3%区	-0.003	0.013	-0.227	0.064	0.005	0.002	0.421	0.008
2.4℃区	0.041	0.011	3.642	0.043	0.005	0.002	0.624	0.005

図



図1 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開花株の分布

2016年5月3日に広瀬川沿いの遊歩道を踏査し、目視により生育を確認し、カメラ付きポータブルGPSで写真撮影することで位置情報を記録した。灰色の線は踏査経路。ナヨクサフジの生育が

確認できた地点数は、計 248 地点であった。



図2 渡良瀬遊水池の群馬県域におけるオオブタクサの群落位置

2016年5月21日に渡良瀬遊水池の群馬県域内を踏査し目視により生育を確認し、カメラ付きポータブルGPSで写真撮影することで位置情報を記録した。左下の●で囲まれた範囲内では全域にわたり、その他の●の位置では10個体以下の生育が見られた。灰色の線は踏査経路。

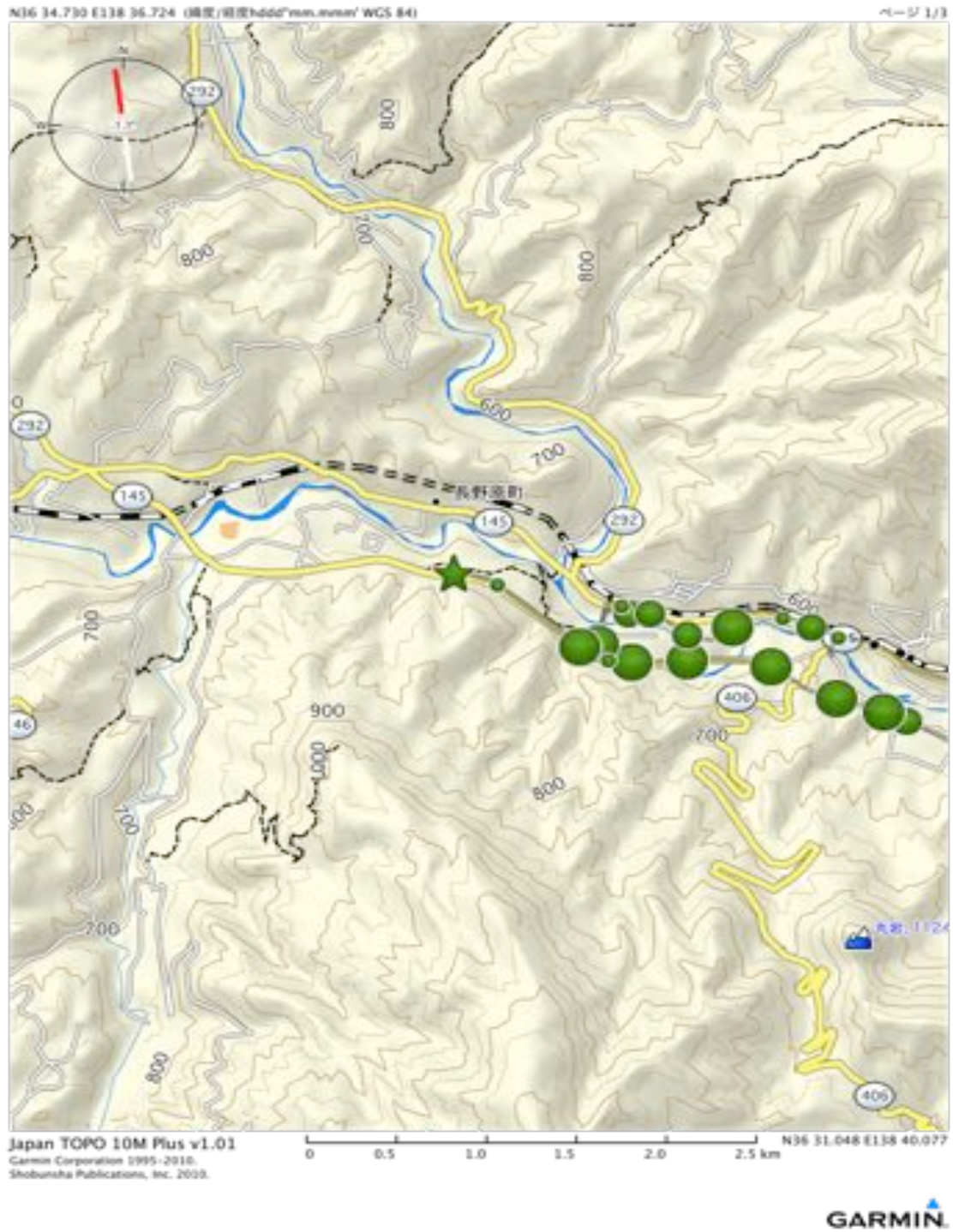


図3 八ツ場ダム周辺におけるハリエンジュ開花木の分布

2016年5月25日に自動車で行きカメラ付きポータブルGPSで写真撮影することで位置情報を記録した。丸の大きさは群落サイズ（個体数●1～9本、●10～49本、●50～99本、●100本以上）を示している。また★は最大の群落（個体数約500本）を示している。

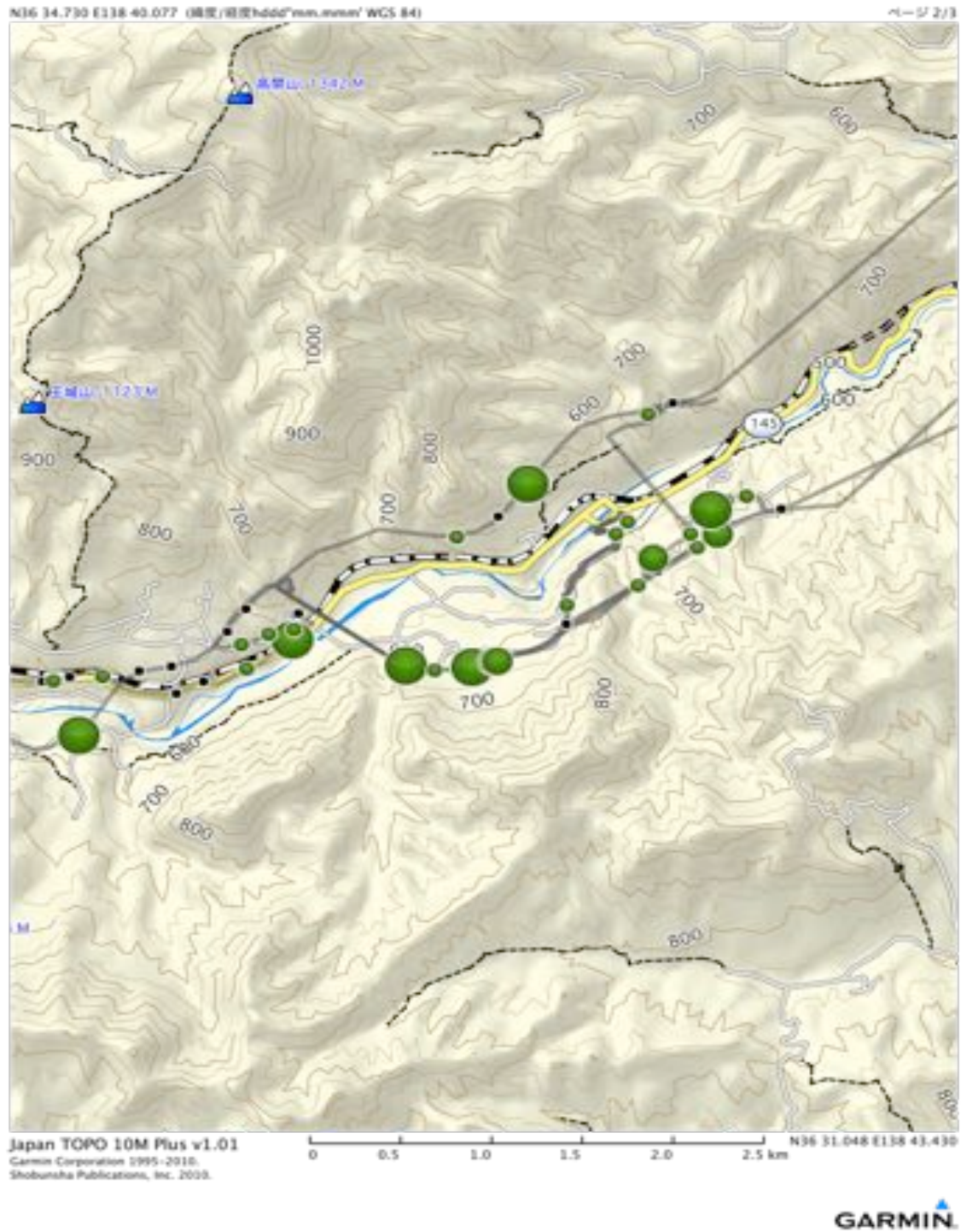


図3 (続) ハツ場ダム周辺におけるハリエンジュ開花木の分布
 丸の大きさは群落サイズ (個体数●1~9本、●10~49本、●50~99本、●100本以上) を示している。

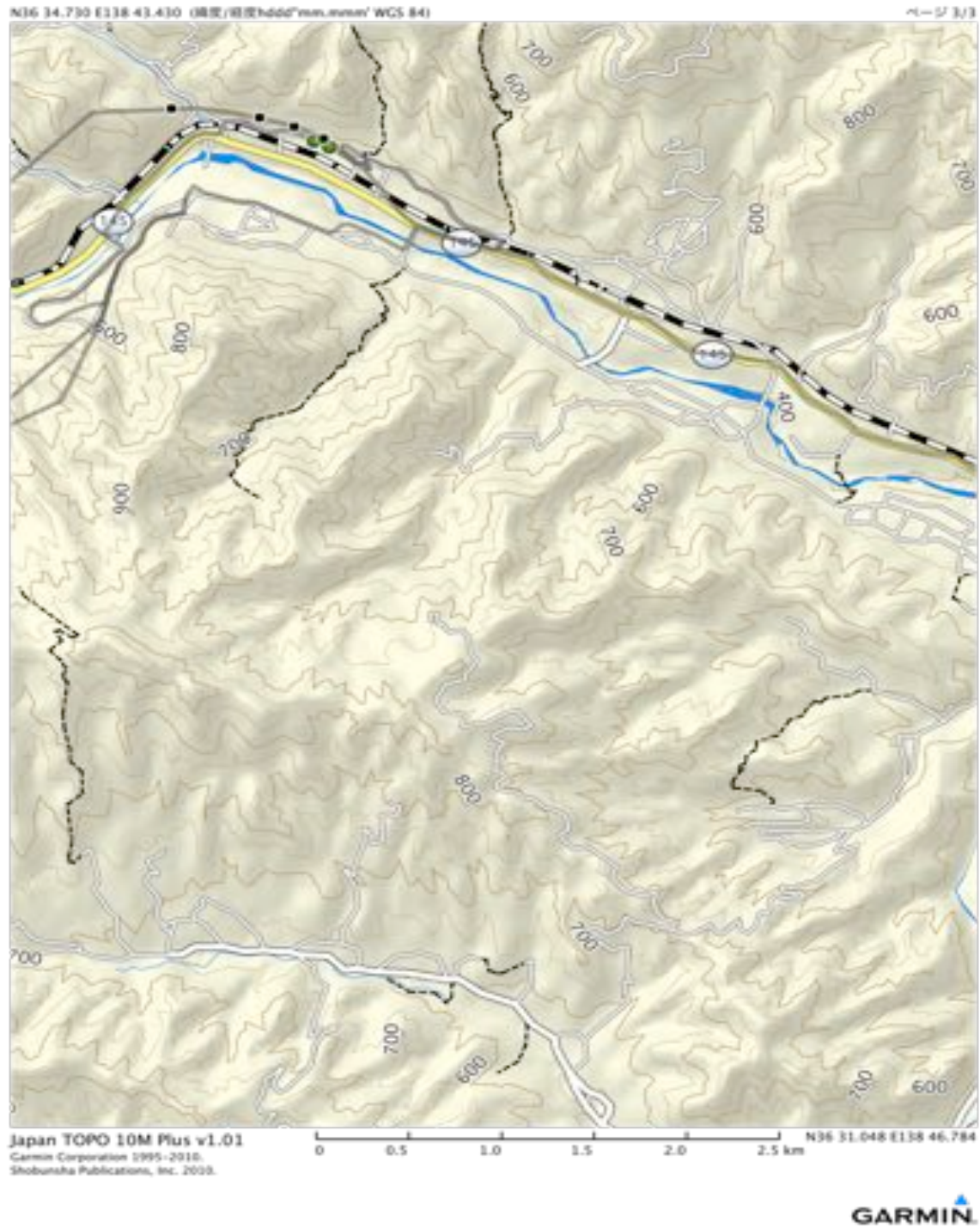


図3（続々） 八ツ場ダム周辺におけるハリエンジュ開花木の分布
 丸の大きさは群落サイズ（個体数●1～9本、●10～49本、●50～99本、●100本以上）を示している。

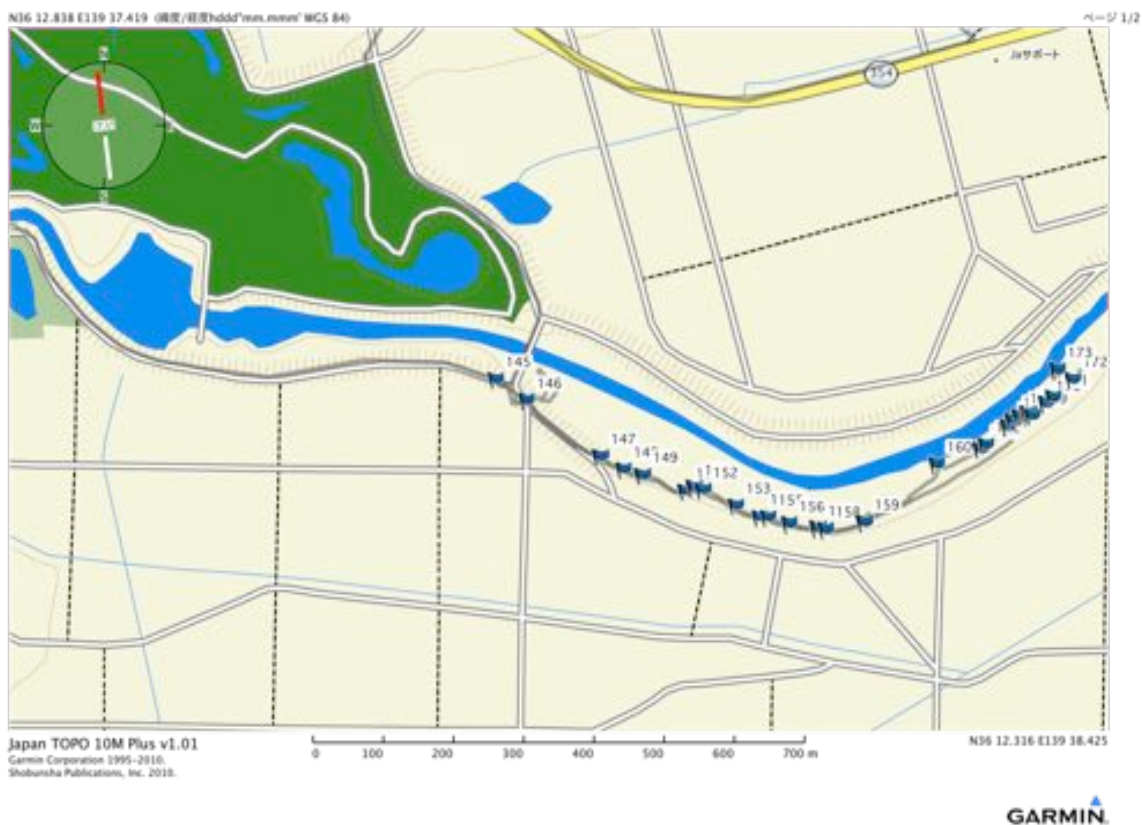


図4 谷田川における植生調査時に設定したコードラートの位置

2016年6月16日に調査を行った。カメラ付きポータブルGPSで写真撮影することで位置情報を記録した。番号は地点番号（表6参照）である。



図4 (続) 谷田川における植生調査時に設定したコードラートの位置
2016年6月16日に調査を行った。カメラ付きポータブルGPSで写真撮影することで位置情報を記録した。番号は地点番号(表6参照)である。

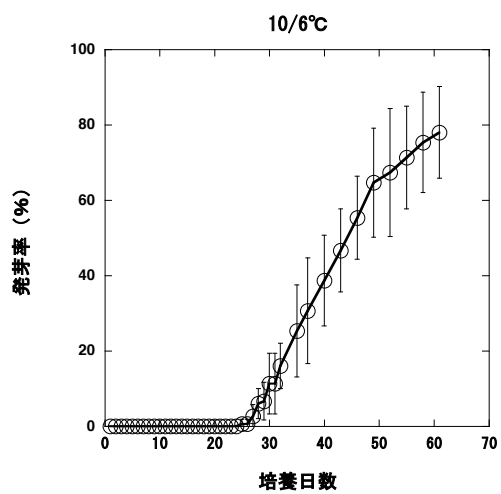
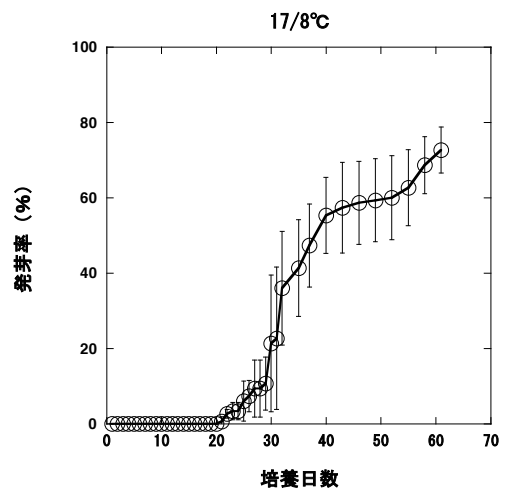
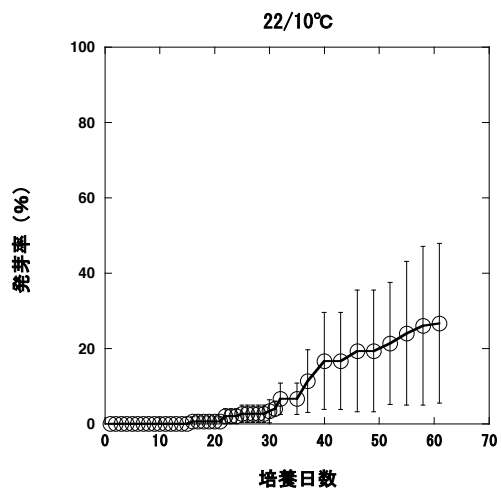
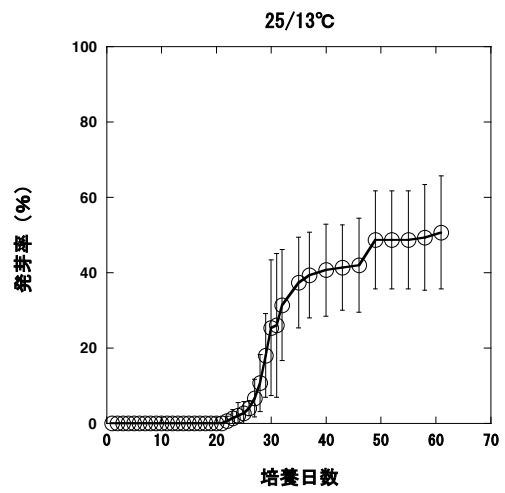
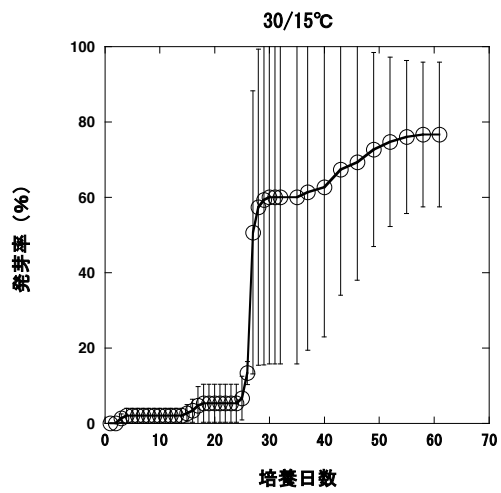


図5 冷湿処理を施したアメリカセンダングサの発芽率の経時変化
 温度を 30/15°C・25/13°C・22/10°C・17/8°C・10/6°C (昼 14h・夜 10h) に設定した温度勾配型恒温器で 61 日間培養。縦軸は積算発芽率、横軸は培養開始時から起算した日数、縦棒は標準偏差である。n=3。

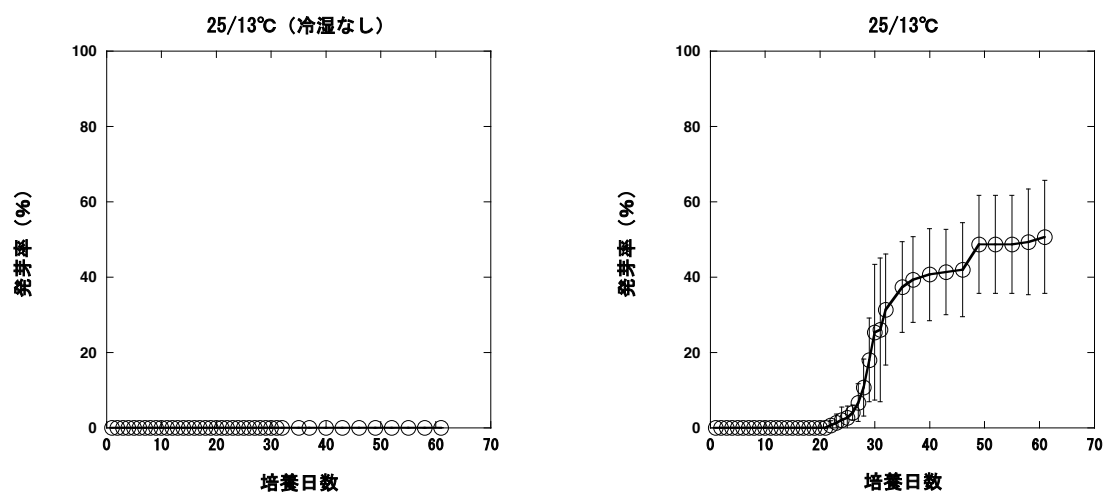


図6 冷湿処理を施さない場合（左図）および施した場合（右図）のアメリカセンダングサの発芽率の経時変化
 温度を25/13°C（昼14h・夜10h）に設定した温度勾配型恒温器で59日間培養。縦軸は積算発芽率、横軸は培養開始時から起算した日数、縦棒は標準偏差である。n=3。

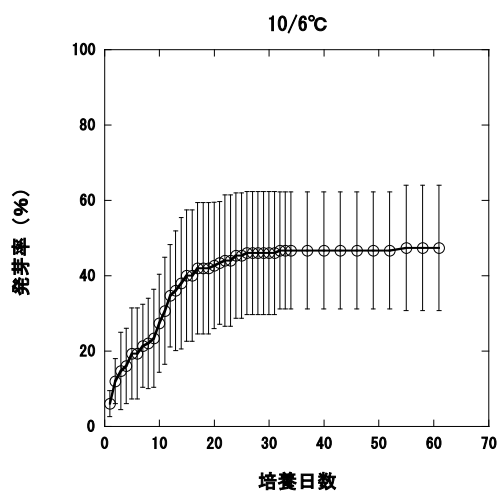
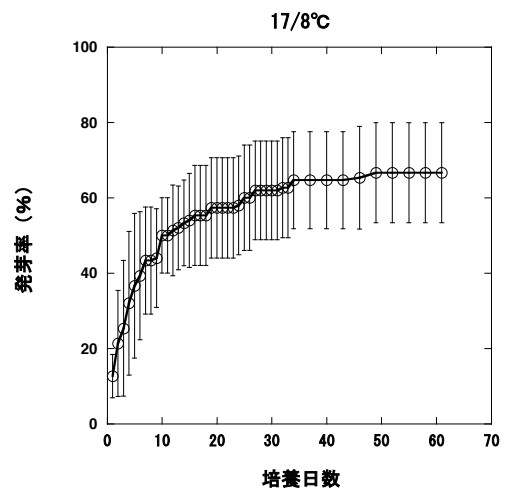
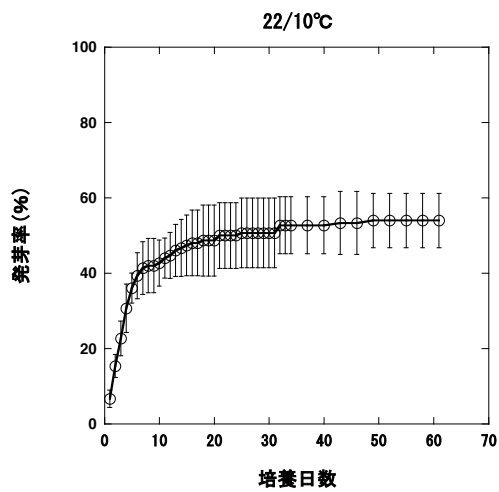
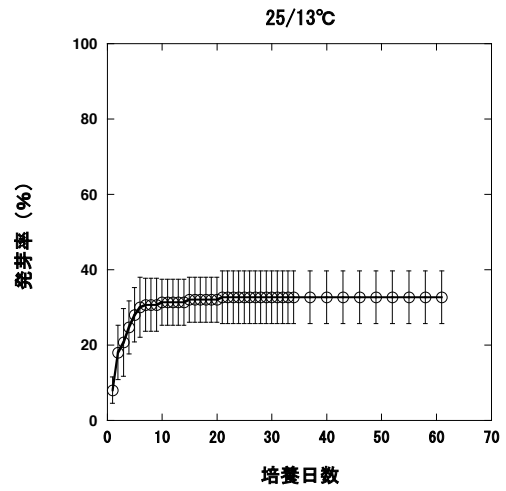
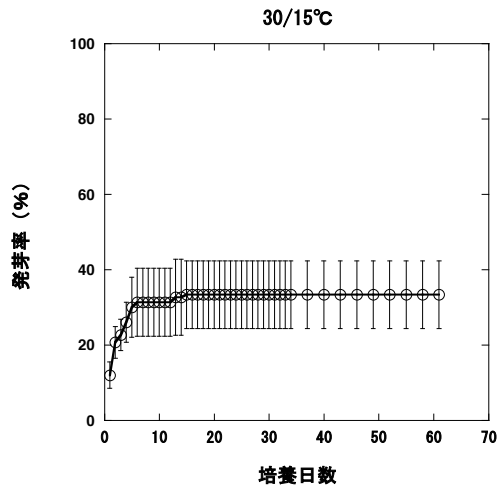


図7 冷湿処理を施したオオブタクサ（菅平産・標高約1000m）の発芽率の経時変化
 温度を30/15°C・25/13°C・22/10°C・17/8°C・10/6°C（昼14h・夜10h）に設定した温度勾配型恒温器で61日間培養。縦軸は積算発芽率、横軸は培養開始時から起算した日数、縦棒は標準偏差である。n（標本数）=3

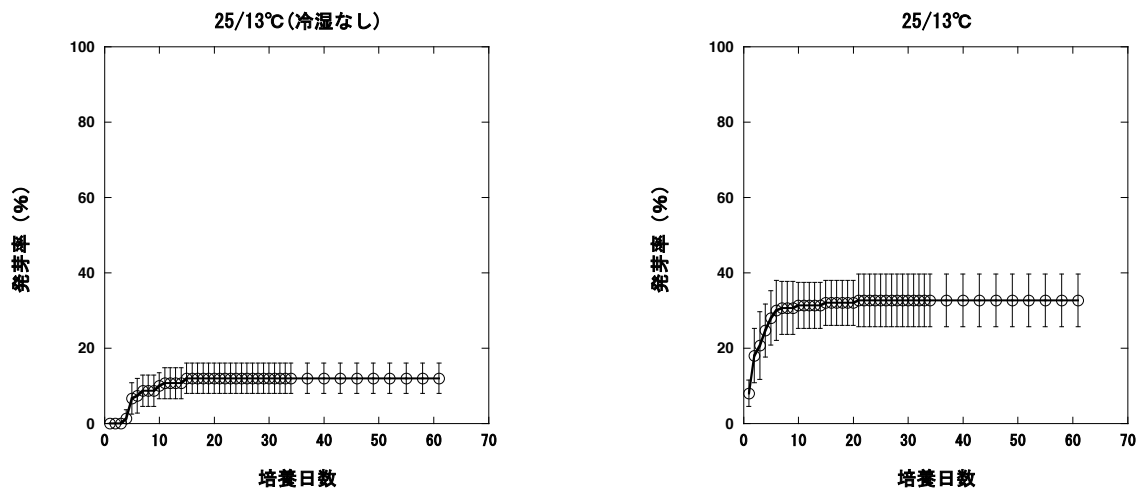


図8 冷湿処理を施さない場合（左図）および施した場合（右図）のオオブタクサ（菅平産・標高約1000m）の発芽率の経時変化
 温度を25/13°C（昼14h・夜10h）に設定した温度勾配型恒温器で61日間培養。縦軸は積算発芽率、横軸は培養開始時から起算した日数、縦棒は標準偏差である。n=3。

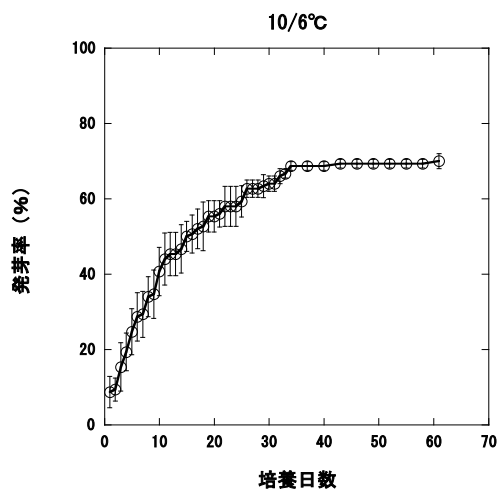
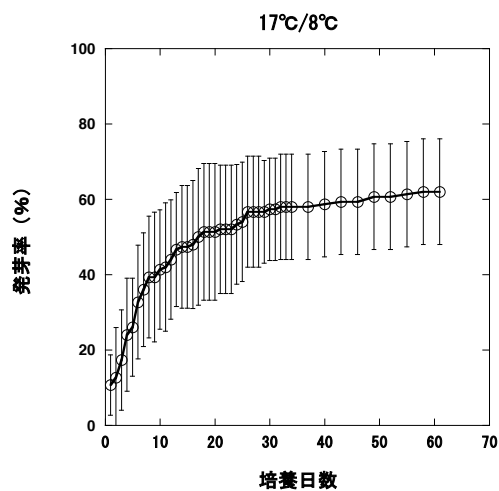
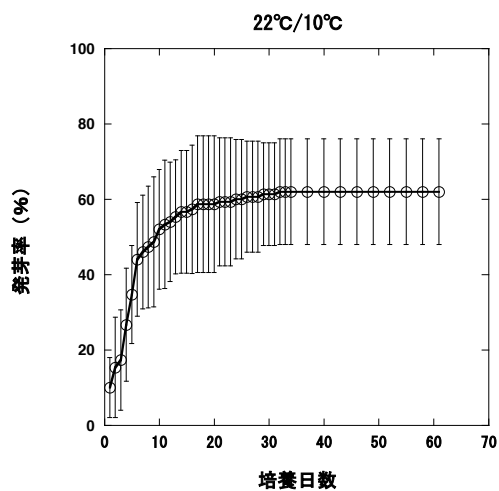
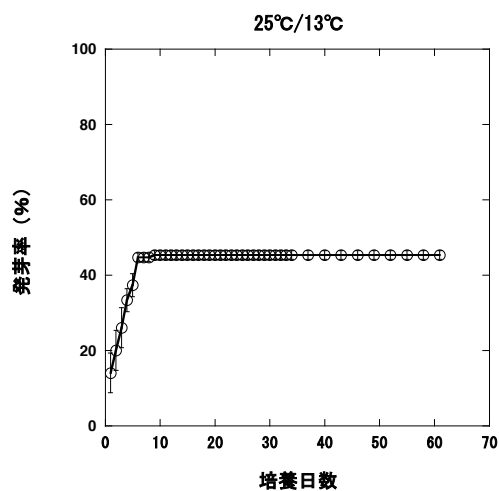
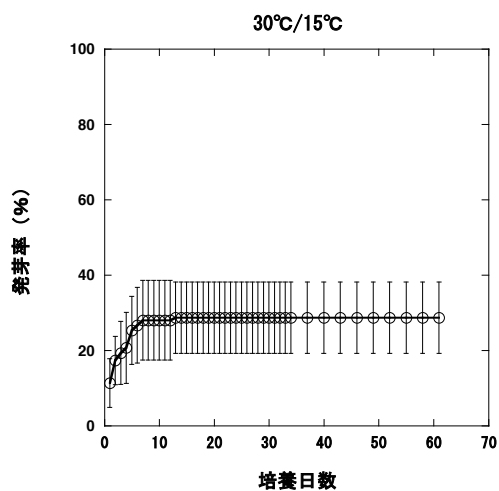


図9 冷湿処理を施したオオブタクサ（前橋産・標高約150m）の発芽率の経時変化
 温度を 30/15°C・25/13°C・22/10°C・17/8°C・10/6°C（昼14h・夜10h）に設定した温度勾配型恒温器で61日間培養。縦軸は積算発芽率、横軸は培養開始時から起算した日数、縦棒は標準偏差である。n=3。

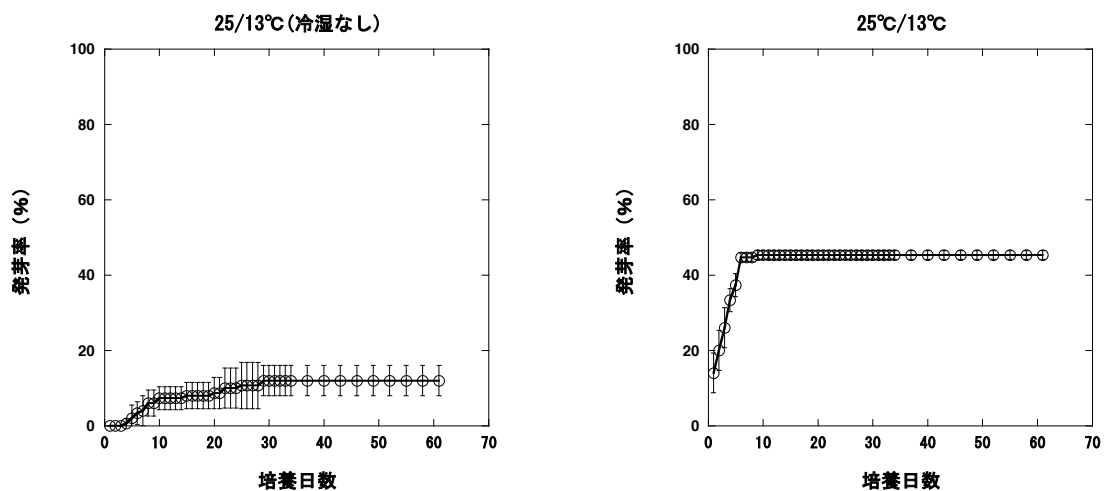


図 10 冷湿処理を施さない場合（左図）および施した場合（右図）のオオブタクサ（前橋産・標高約 150m）の発芽率の経時変化
 温度を 25/13°C（昼 14h・夜 10h）に設定した温度勾配型恒温器で 61 日間培養。縦軸は積算発芽率、横軸は培養開始時から起算した日数、縦棒は標準偏差である。n=3。

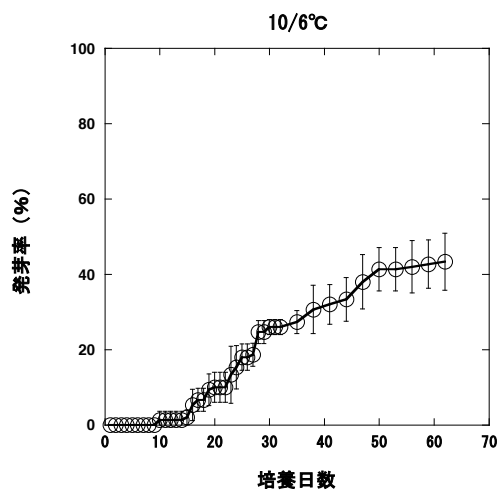
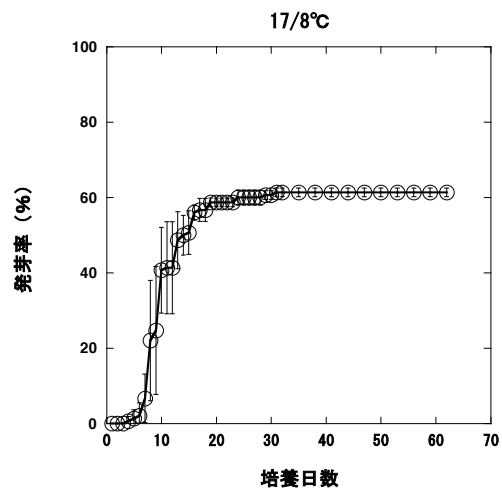
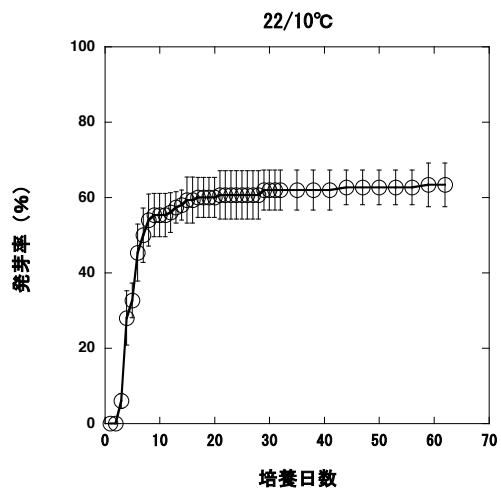
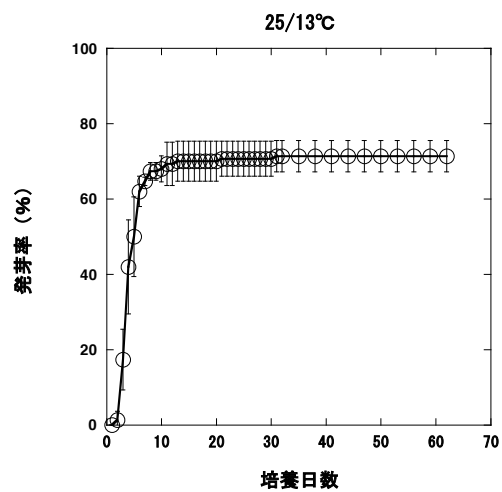
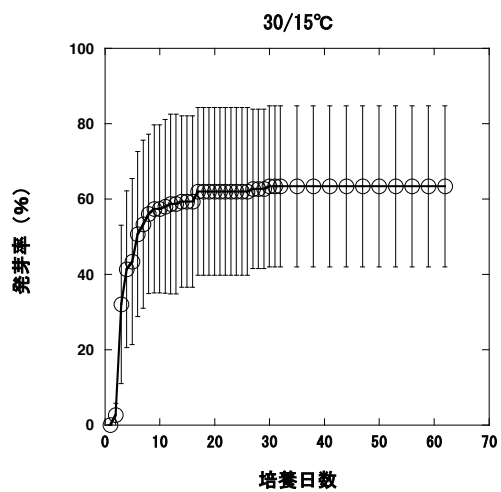


図 11 ハリエンジュの発芽率の経時変化
 温度を 30/15°C・25/13°C・22/10°C・17/8°C・
 10/6°C (昼 14h・夜 10h) に設定した温度勾配
 型恒温器で 62 日間培養。縦軸は積算発芽率、
 横軸は培養開始時から起算した日数、縦棒は標
 準偏差である。n=3。

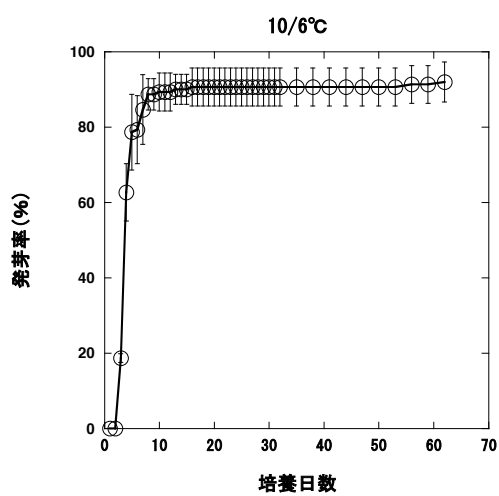
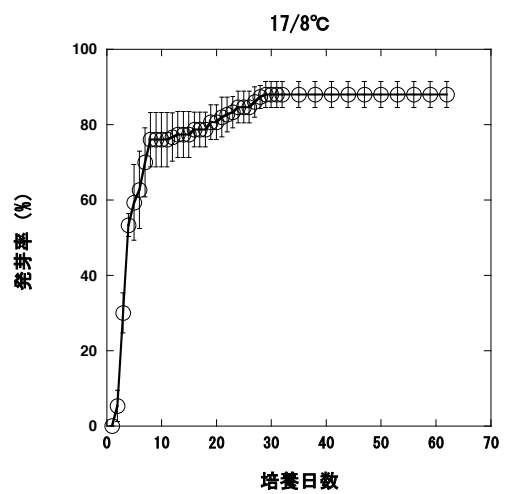
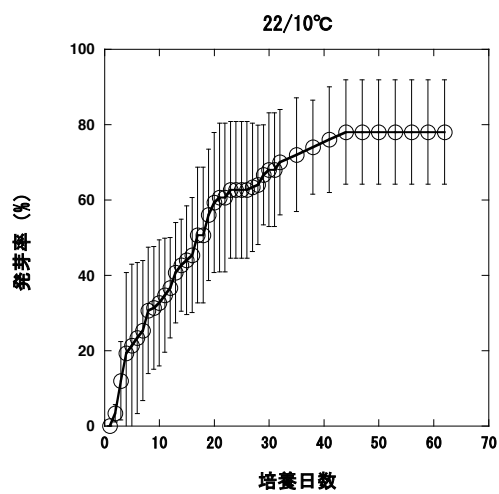
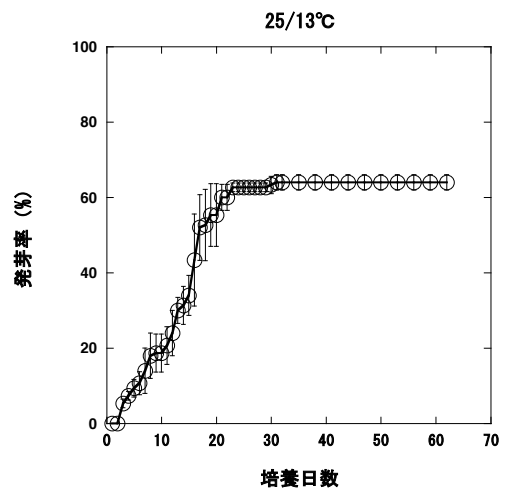
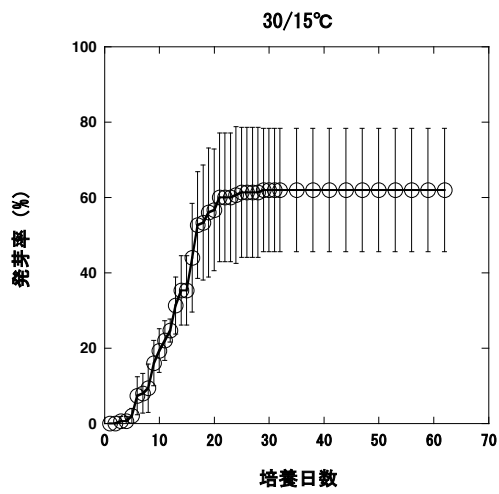


図 12 ナヨクサフジの発芽率の経時変化
 温度を 30/15°C・25/13°C・22/10°C・17/8°C・
 10/6°C (昼 14h・夜 10h) に設定した温度勾配
 型恒温器で 62 日間培養。縦軸は積算発芽率、
 横軸は培養開始時から起算した日数、縦棒は標
 準偏差である。n=3。

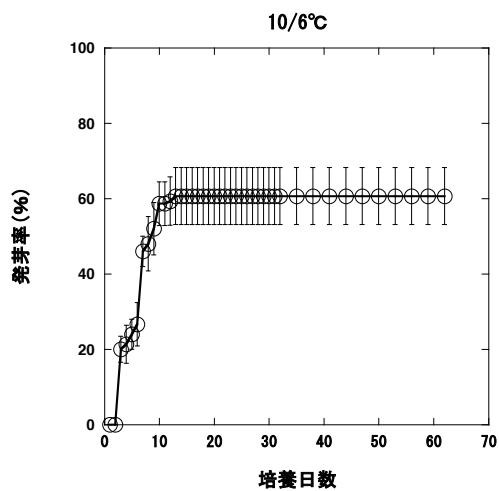
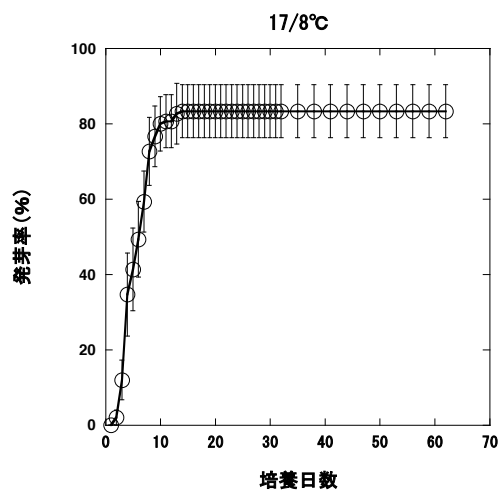
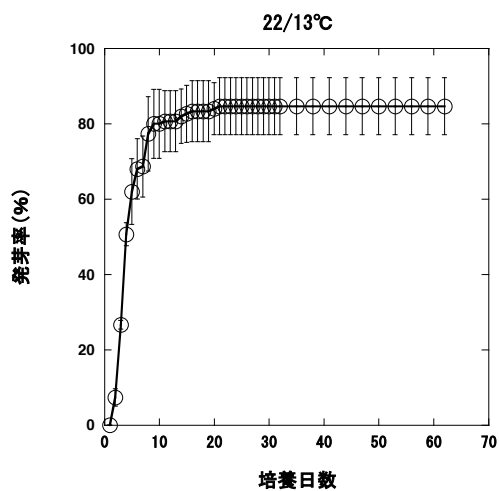
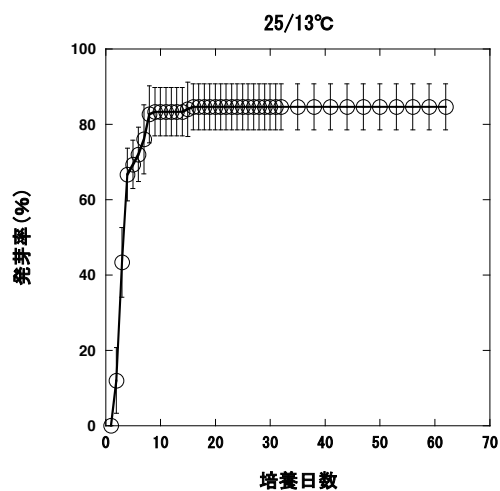
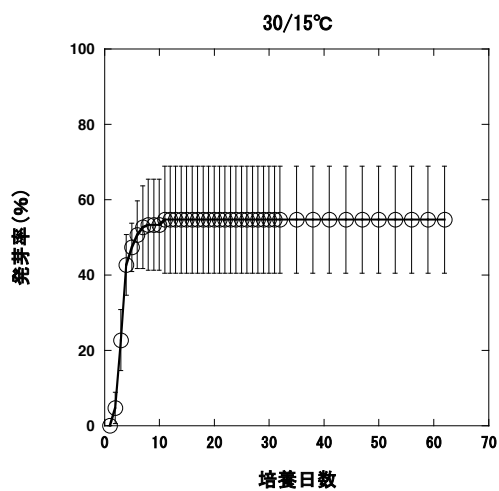


図 13 カラスノエンドウの発芽率の経時変化
 温度を 30/15°C・25/13°C・22/10°C・17/8°C・
 10/6°C (昼 14h・夜 10h) に設定した温度勾配
 型恒温器で 62 日間培養。縦軸は積算発芽率、
 横軸は培養開始時から起算した日数、縦棒は標
 準偏差である。n=3。

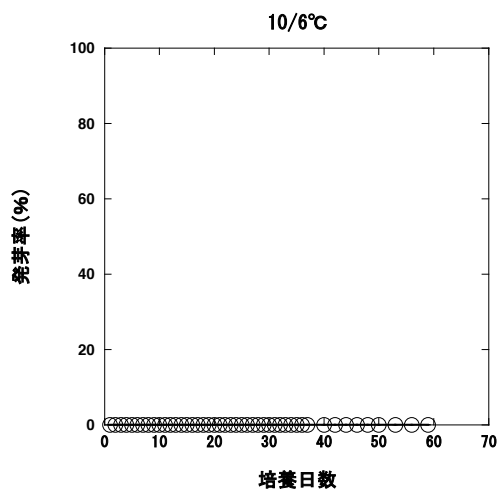
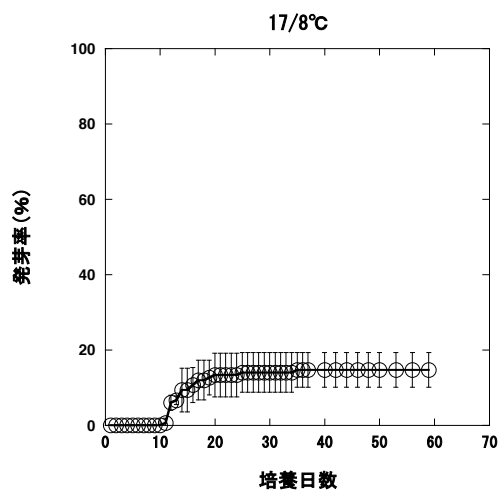
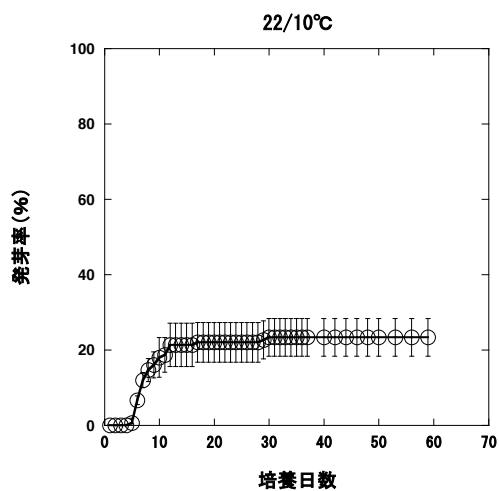
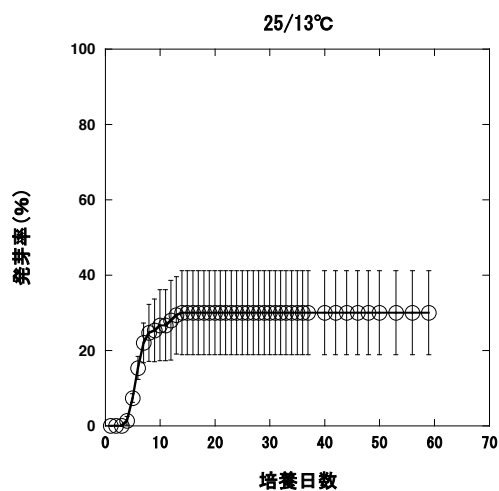
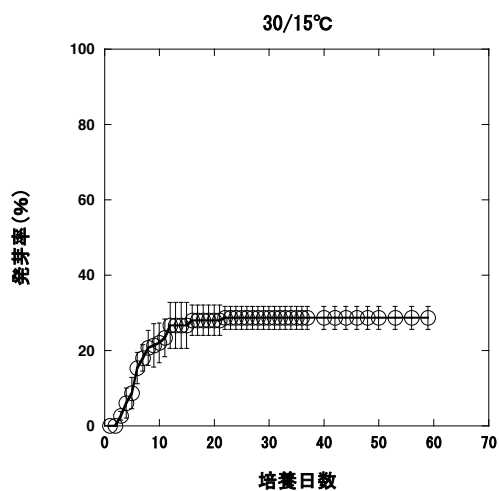


図14 シナダレスズメガヤ (2013) の発芽率の経時変化
 温度を 30/15°C・25/13°C・22/10°C・17/8°C・10/6°C (昼 14h・夜 10h) に設定した温度勾配型恒温器で 59 日間培養。縦軸は積算発芽率、横軸は培養開始時から起算した日数、縦棒は標準偏差である。n=3。

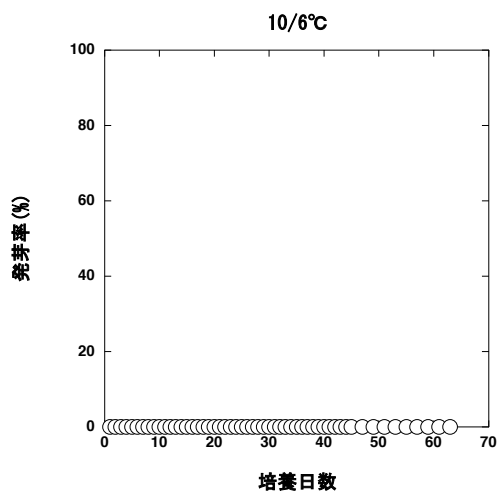
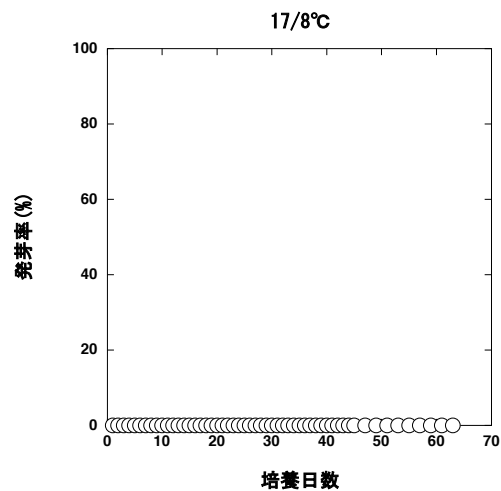
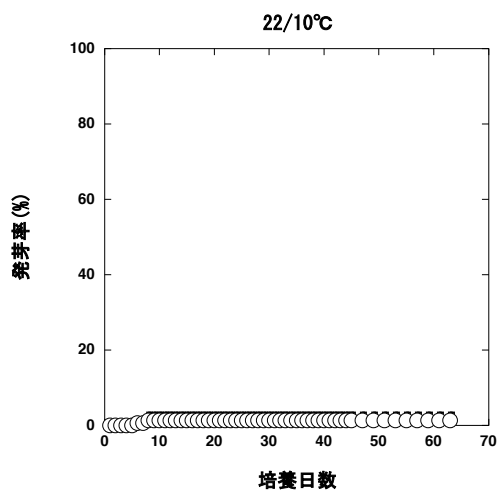
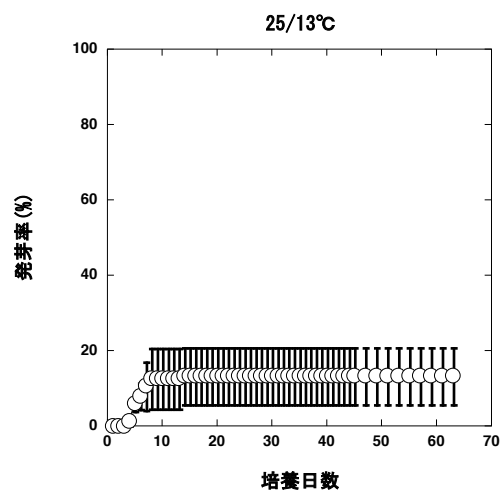
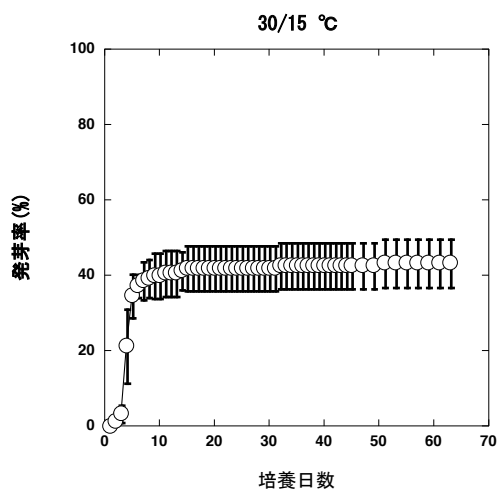


図 15 シナダレスズメガヤ (2016) の発芽率の経時変化
 温度を 30/15°C・25/13°C・22/10°C・17/8°C・10/6°C (昼 14h・夜 10h) に設定した温度勾配型恒温器で 63 日間培養。縦軸は積算発芽率、横軸は培養開始時から起算した日数、縦棒は標準偏差である。n=3。

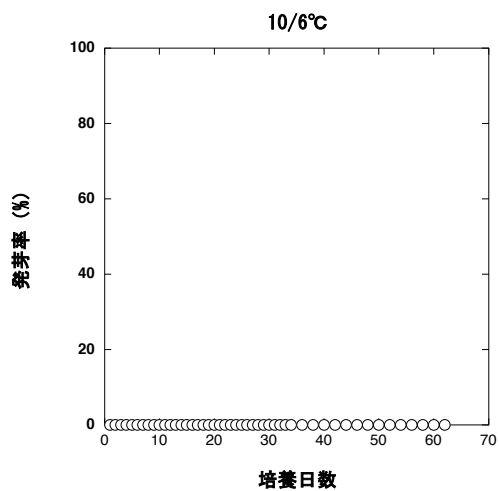
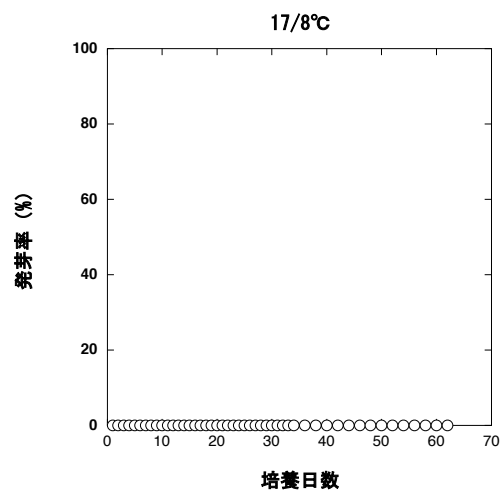
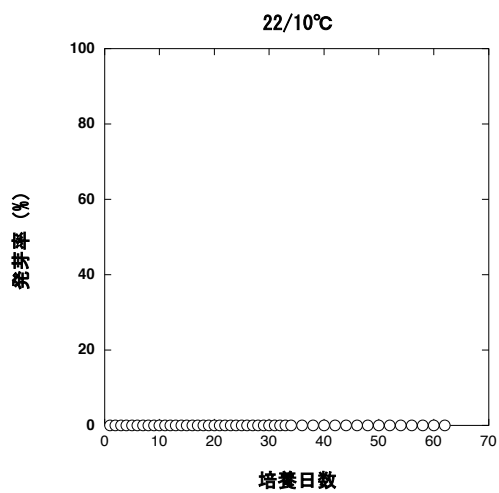
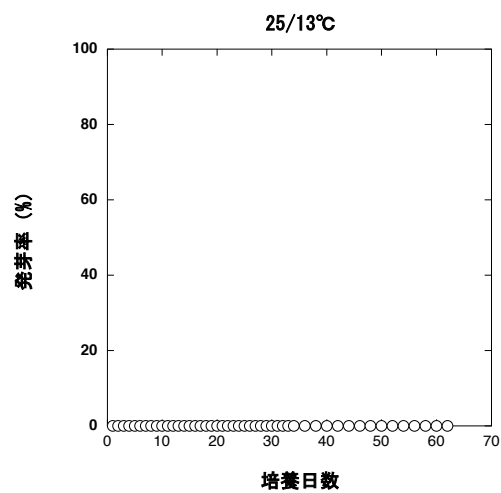
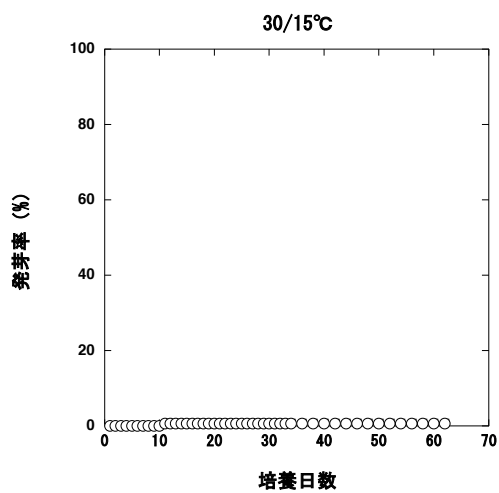


図16 ヒメモロコシの発芽率の経時変化
 温度を 30/15°C・25/13°C・22/10°C・17/8°C・
 10/6°C (昼 14h・夜 10h) に設定した温度勾配
 型恒温器で 63 日間培養。縦軸は積算発芽率、
 横軸は培養開始時から起算した日数、縦棒は標
 準偏差である。n=3。

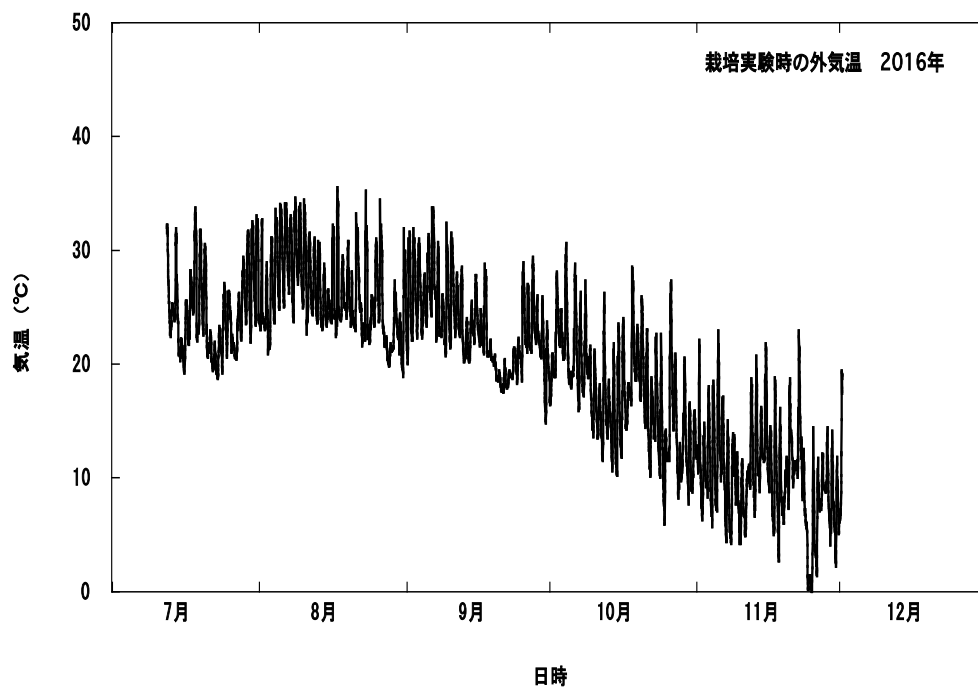


図 17 群馬大学荒牧キャンパス構内の栽培実験期間中の圃場の気温
 2016年7月から11月までの間、群馬大学荒牧キャンパス構内の圃場で気温を温度データロガー（TR52, T&D corporation）をそれぞれ高さ1.5m付近に設置し、30分おきに連続測定した。

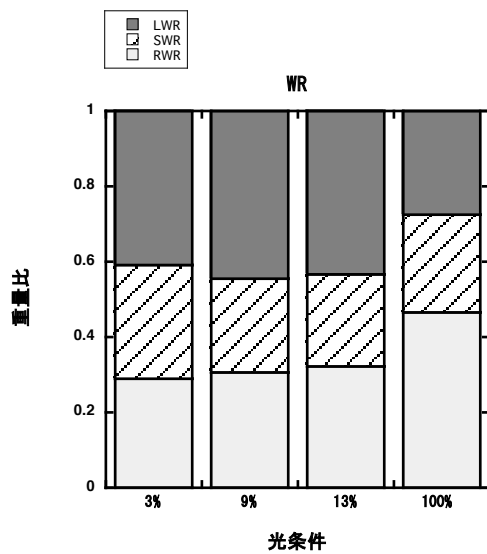
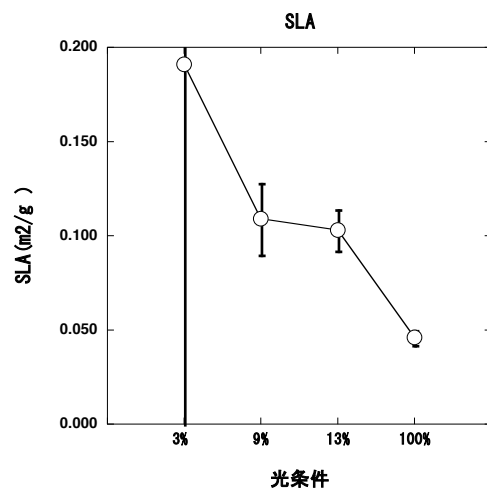
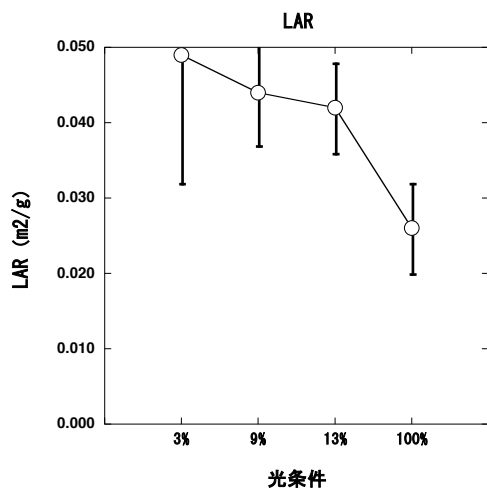
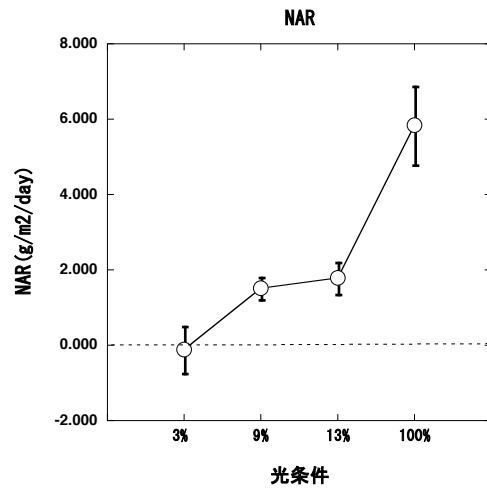
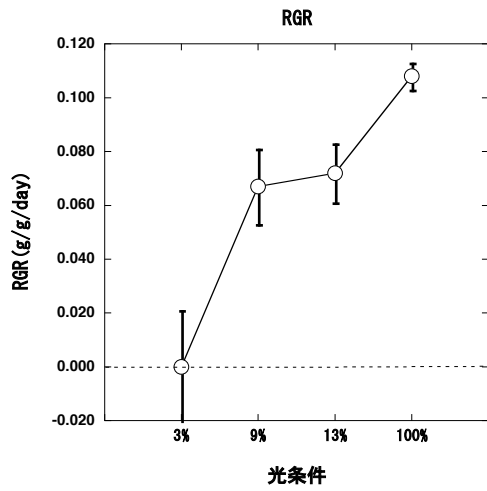


図 18 異なる光条件下で栽培したアメリカセンダングサの生長解析結果

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、ポット植え替えした苗を 21 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。縦棒は標準偏差を示す。n=15。

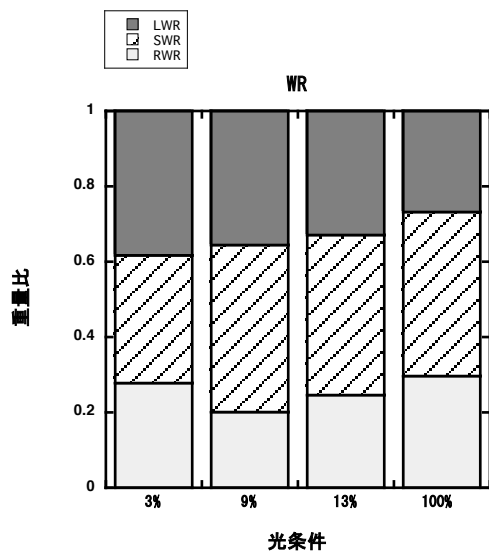
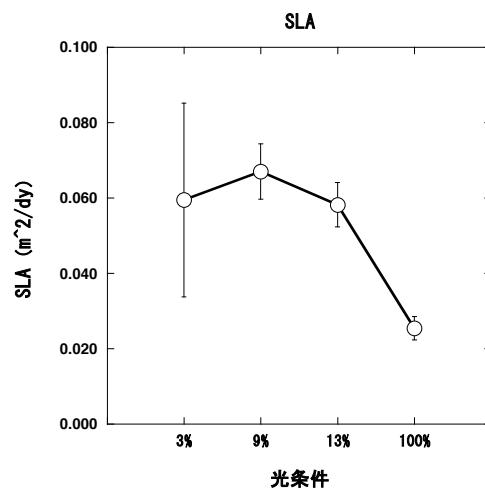
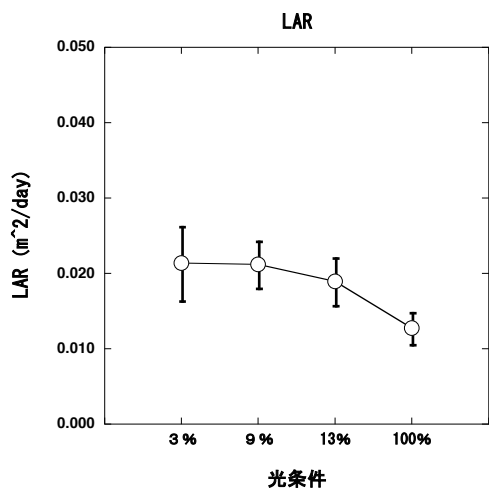
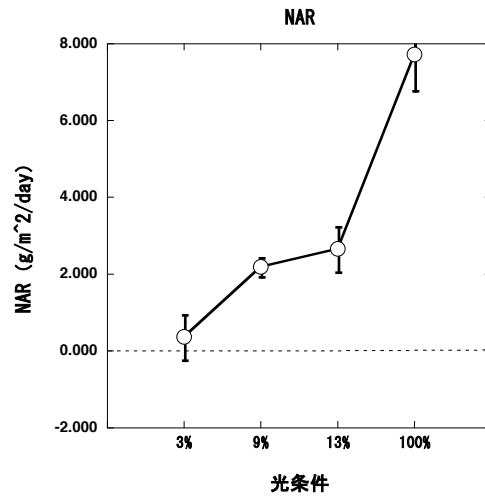
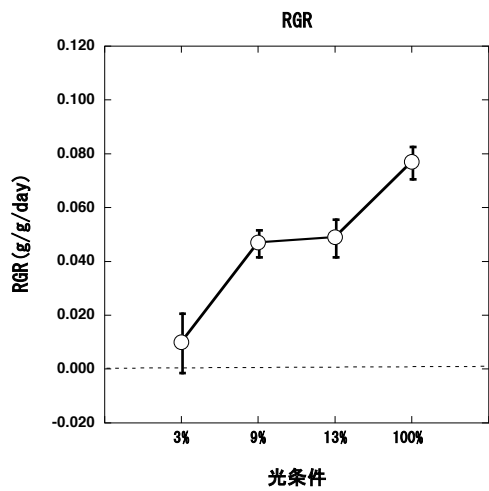


図 19 異なる光条件下で栽培したオオブタクサ（菅平産）の生長解析結果

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、ポット植え替えした苗を 23 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。

縦棒は標準偏差を示す。n（標本数）=15。

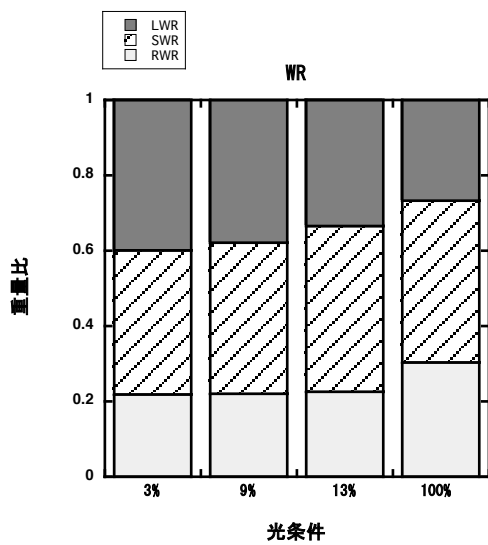
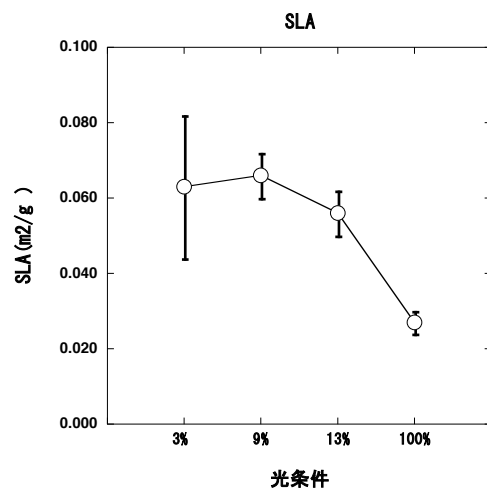
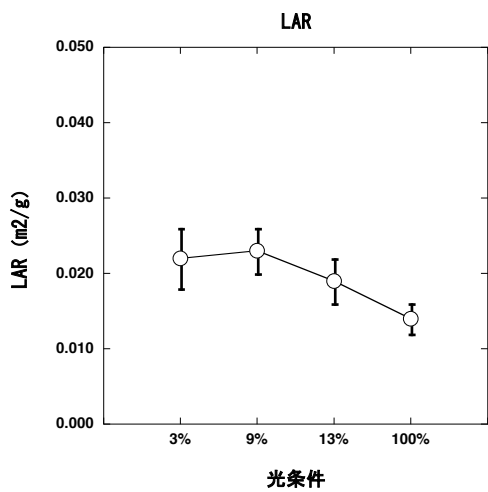
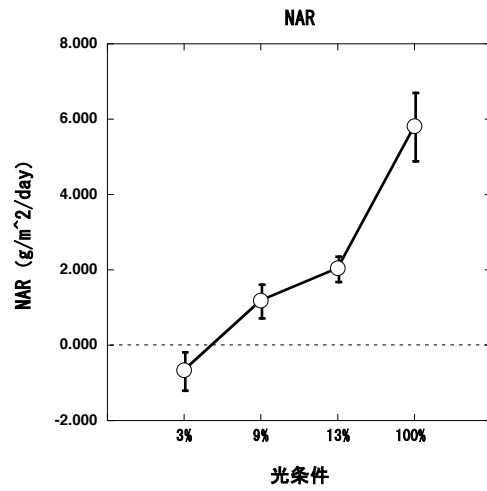
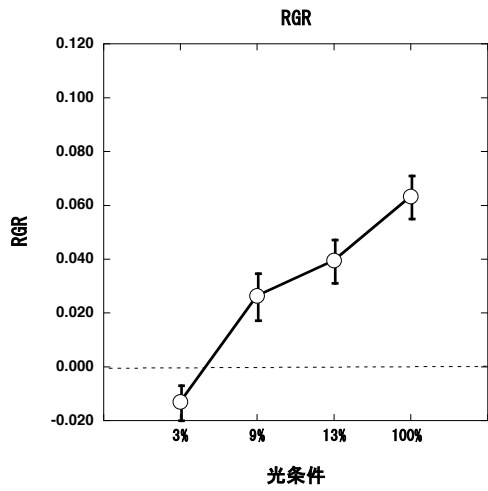


図 20 異なる光条件下で栽培したオオブタクサ（前橋産）の生長解析結果

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、ポット植え替えした苗を 23 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。縦棒は標準偏差を示す。n=15。

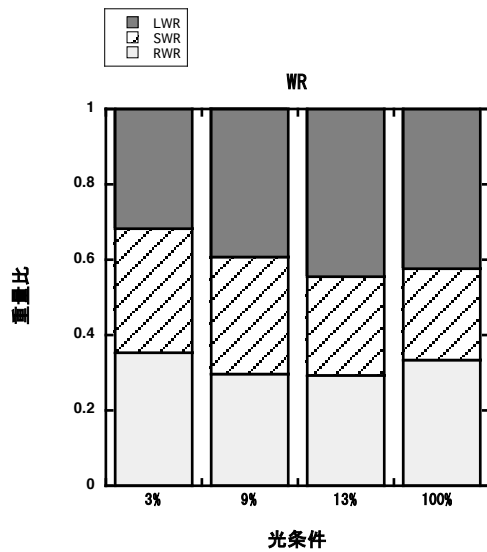
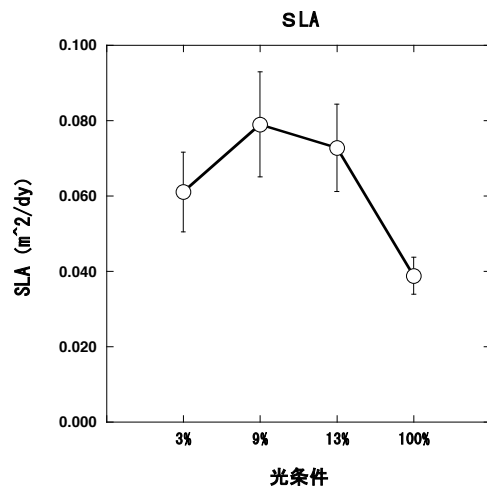
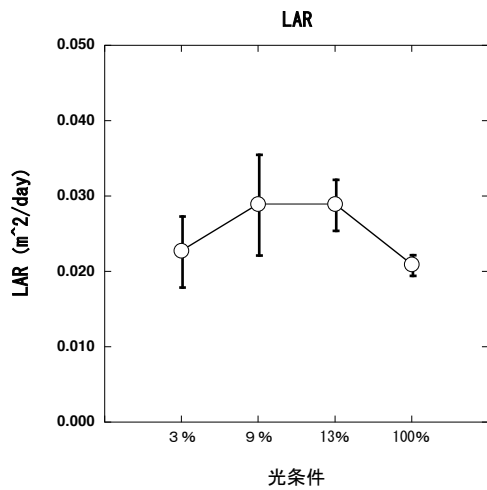
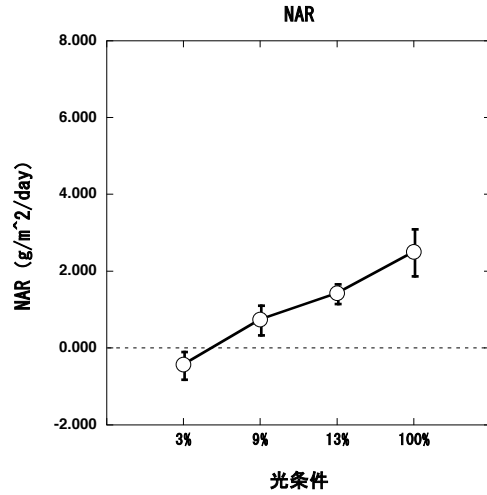
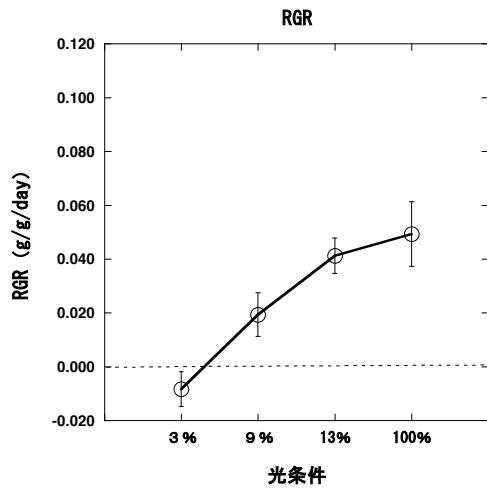


図 21 異なる光条件下で栽培したハリエンジュの生長解析結果

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、ポット植え替えした苗を約 21 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。縦棒は標準偏差を示す。n=11。

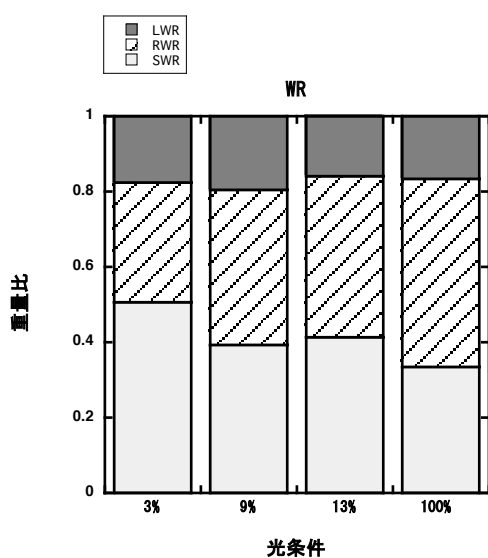
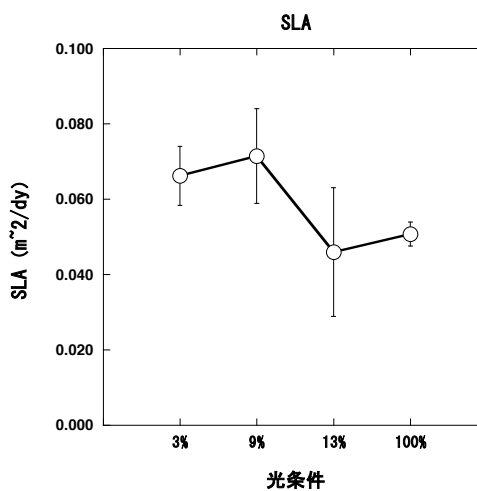
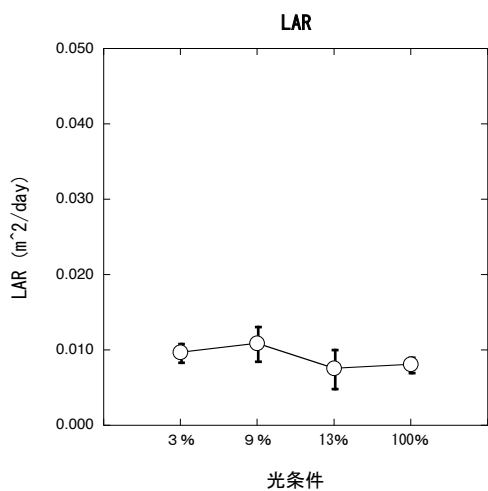
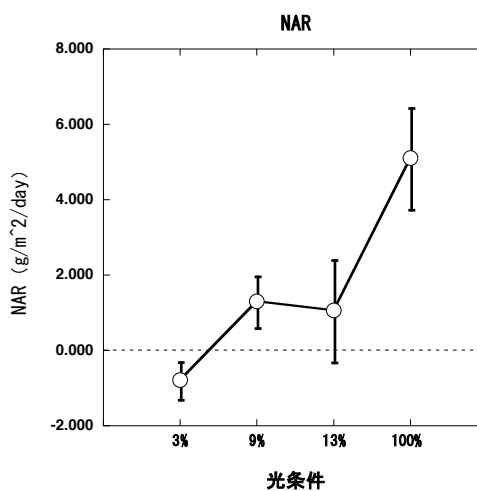
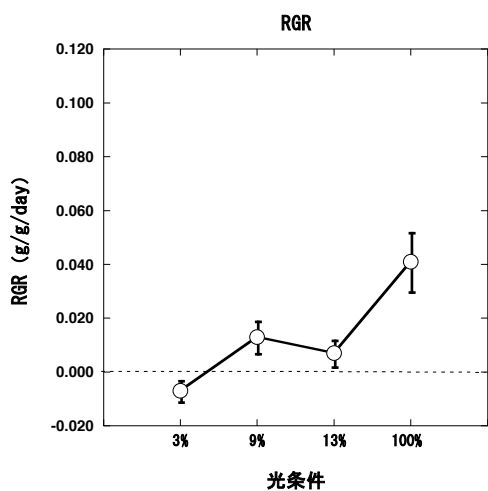


図 22 異なる光条件下で栽培したナヨクサフジの生長解析結果

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、ポット植え替えした苗を約 15 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。縦棒は標準偏差を示す。n=15。

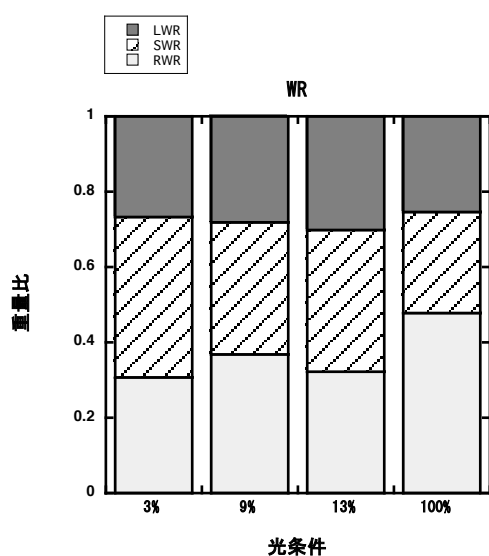
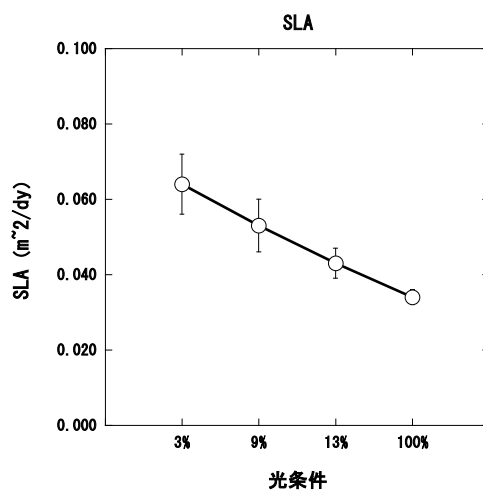
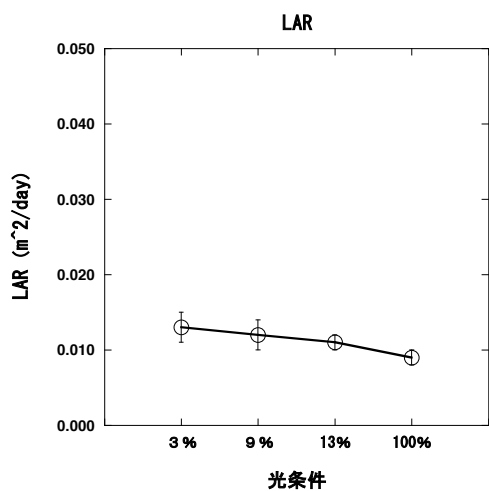
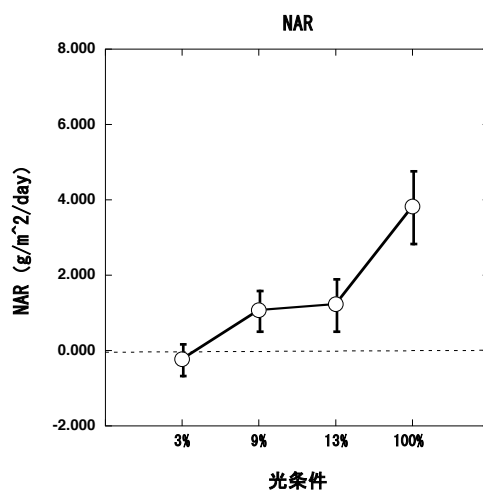
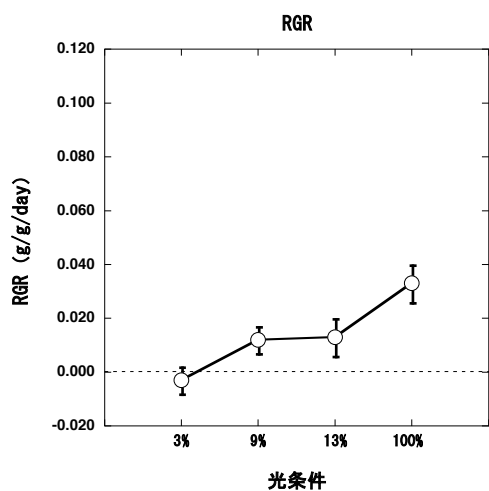


図 23 異なる光条件下で栽培したカラスノエンドウの生長解析結果

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、ポット植え替えした苗を 22 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。縦棒は標準偏差を示す。n=15。

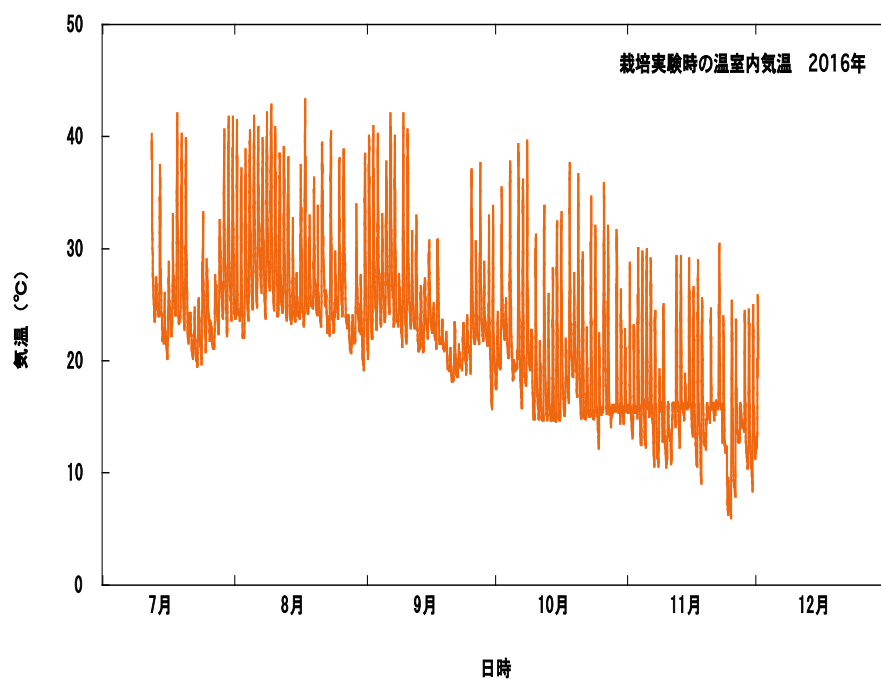


図 24 群馬大学荒牧キャンパス構内の栽培実験期間中の温室内の気温
 2016年7月から11月までの間、群馬大学荒牧キャンパス構内の温室内で気温を温度データロガー（TR52, T&D corporation）をそれぞれ高さ1.5m付近に設置し、30分おきに連続測定した。温室と圃場の平均温度差は2.4℃であった。

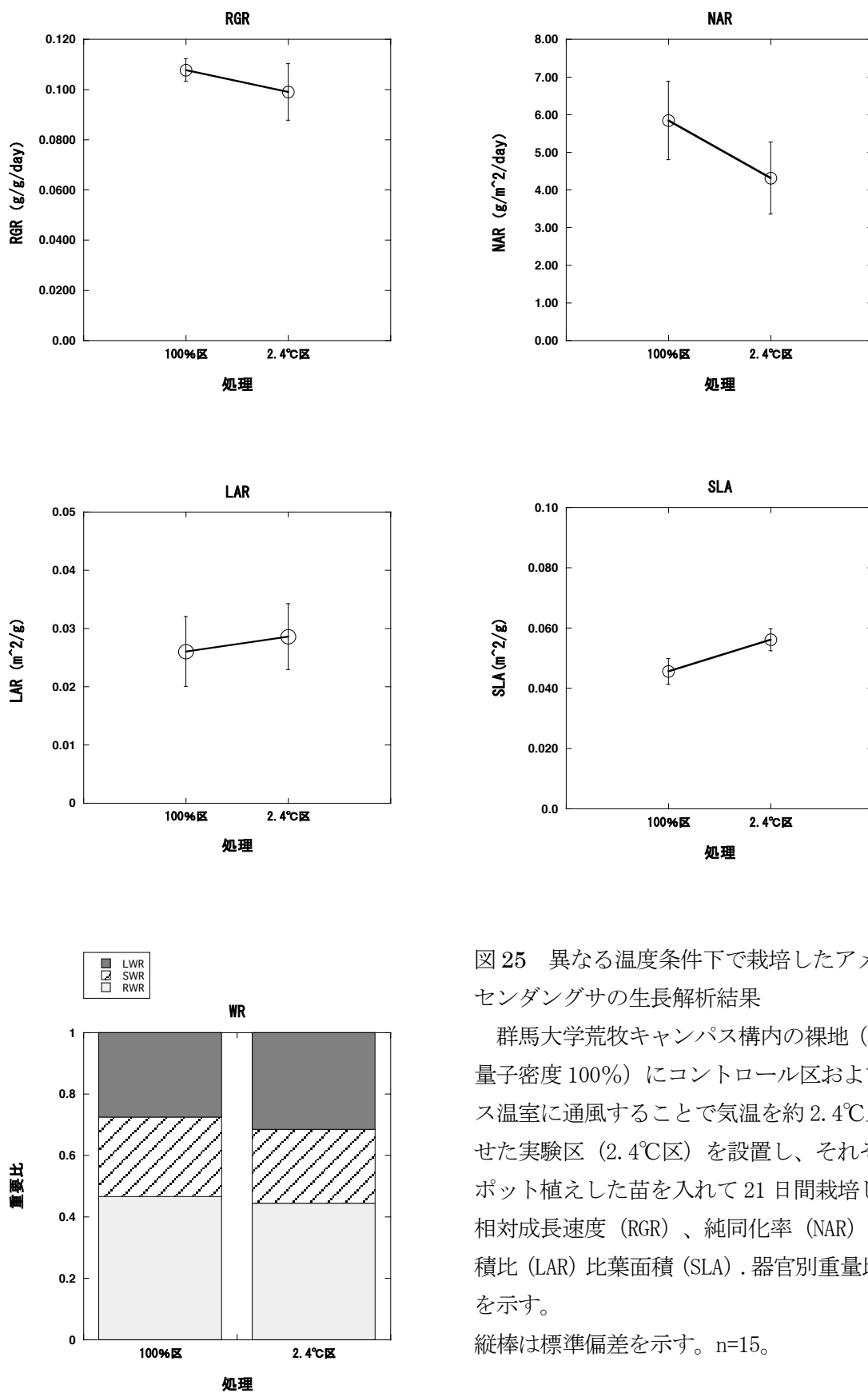


図 25 異なる温度条件下で栽培したアメリカセンダングサの生長解析結果

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 2.4℃上昇させた実験区（2.4℃区）を設置し、それぞれにポット植えた苗を入れて 21 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。

縦棒は標準偏差を示す。n=15。

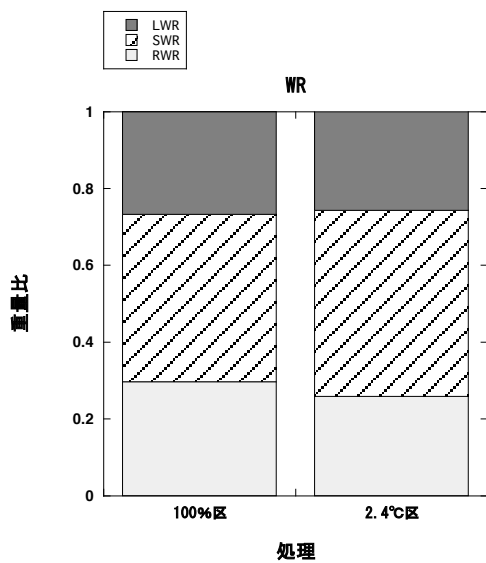
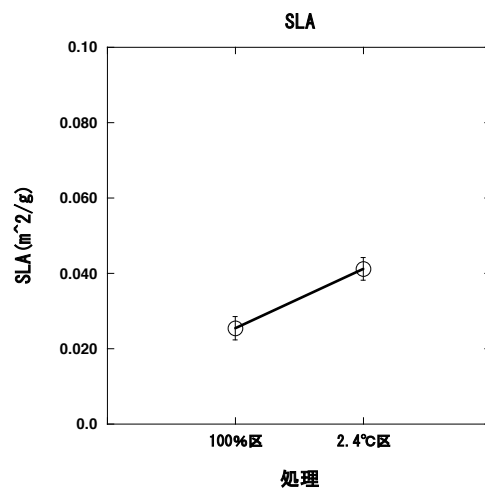
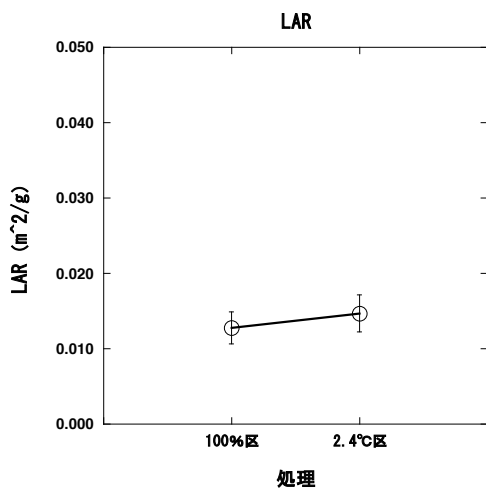
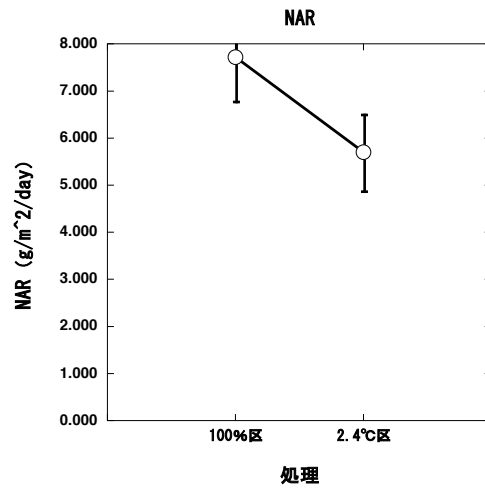
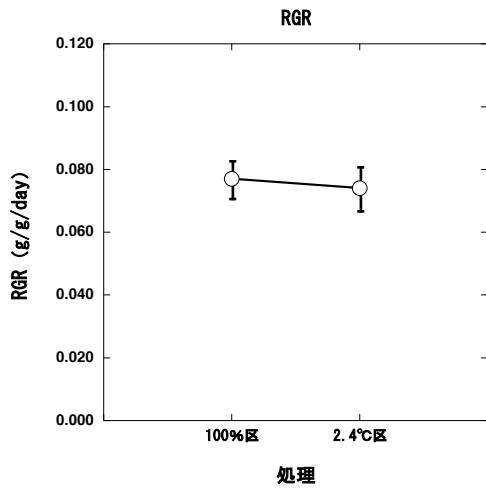


図 26 異なる温度条件下で栽培したオオブタクサ（菅平）の生長解析結果

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 2.4°C 上昇させた実験区（2.4°C 区）を設置し、それぞれにポット植えした苗を入れて 23 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。

縦棒は標準偏差を示す。n=15。

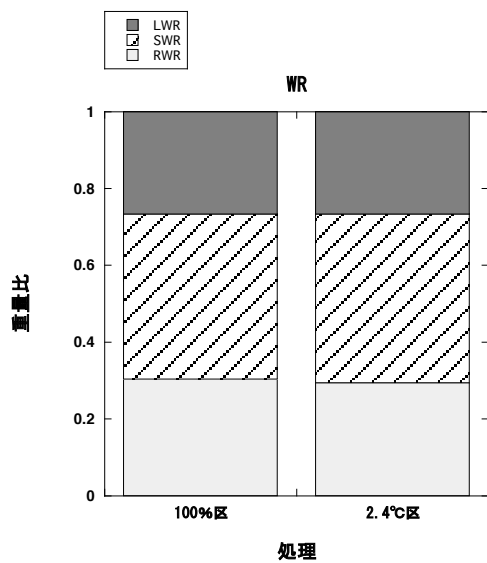
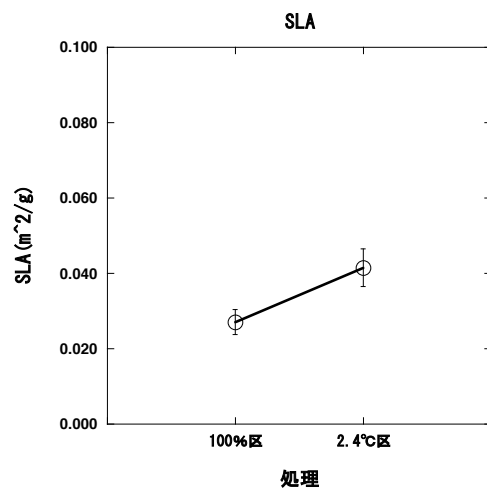
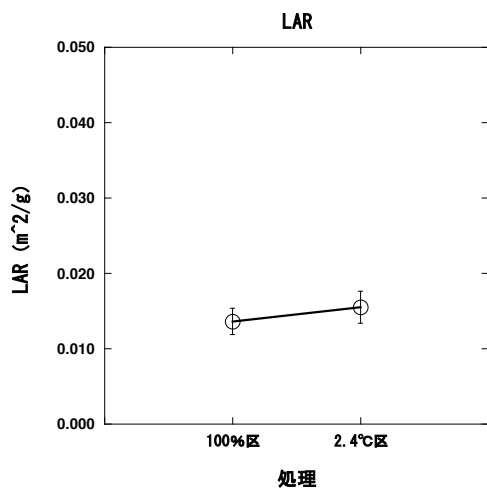
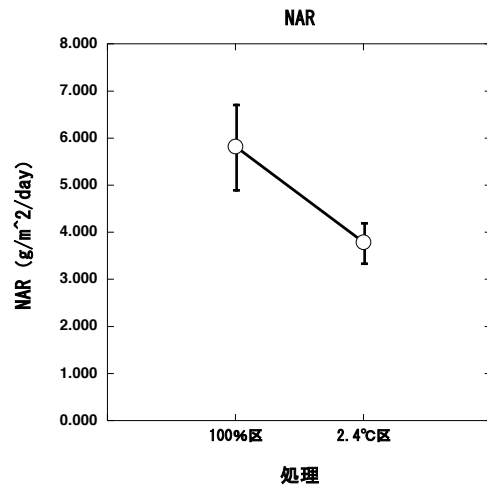
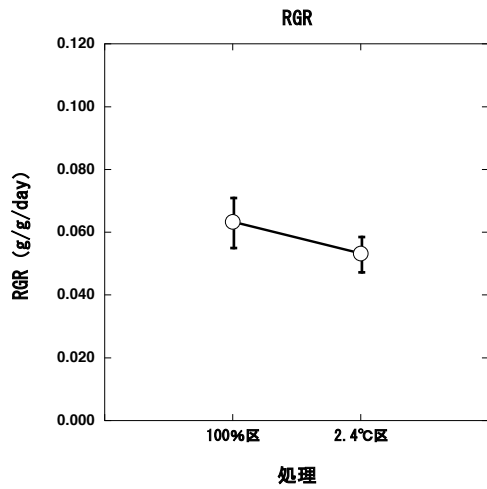


図 27 異なる温度条件下で栽培したオオブタクサ（前橋）の生長解析結果

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 2.4°C 上昇させた実験区（2.4°C 区）を設置し、それぞれにポット植えした苗を入れて 23 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。

縦棒は標準偏差を示す。n=15。

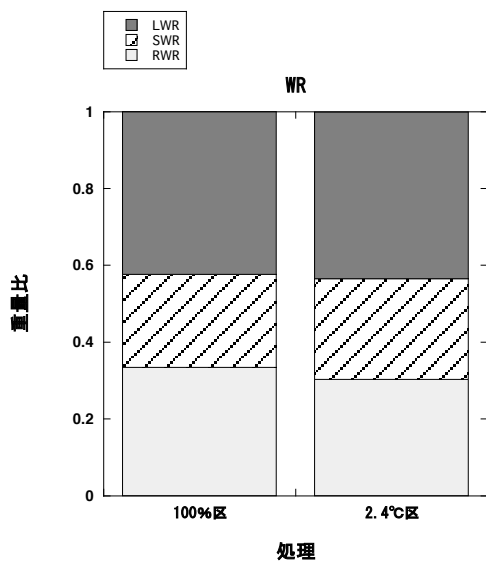
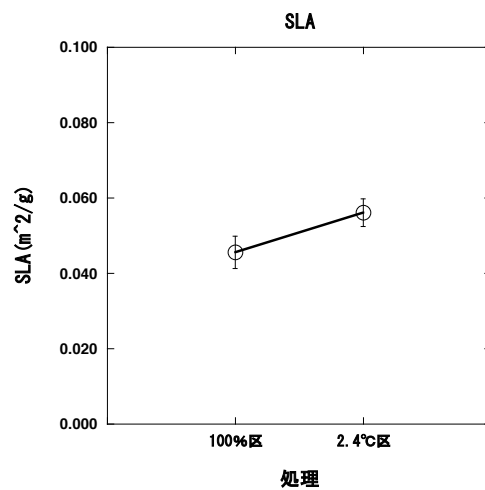
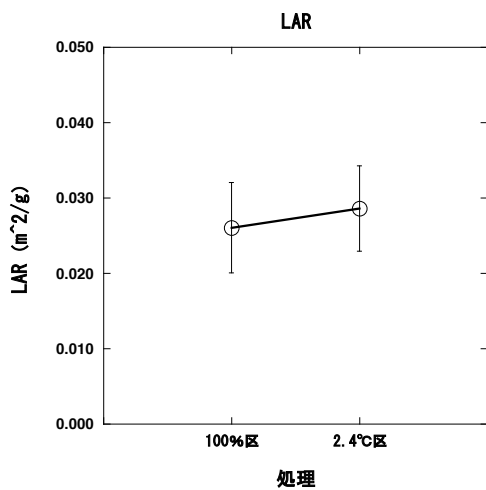
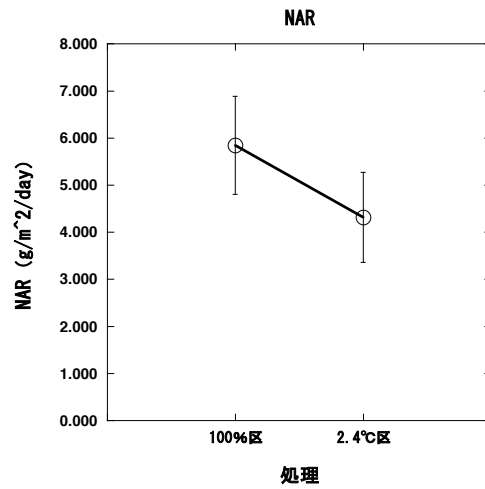
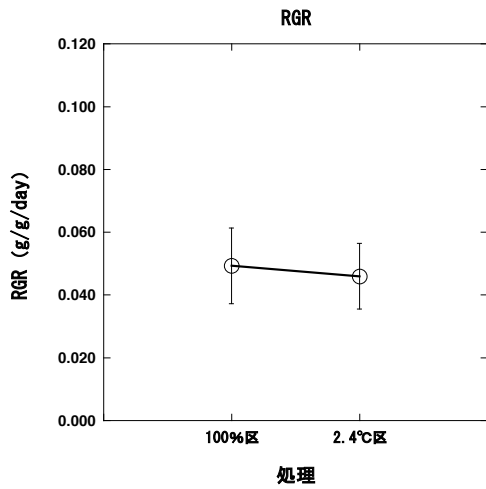


図 28 異なる温度条件下で栽培したハリエンジュの生長解析結果

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 2.4°C 上昇させた実験区（2.4°C 区）を設置し、それぞれにポット植えした苗を入れて 21 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。

縦棒は標準偏差を示す。n=11。

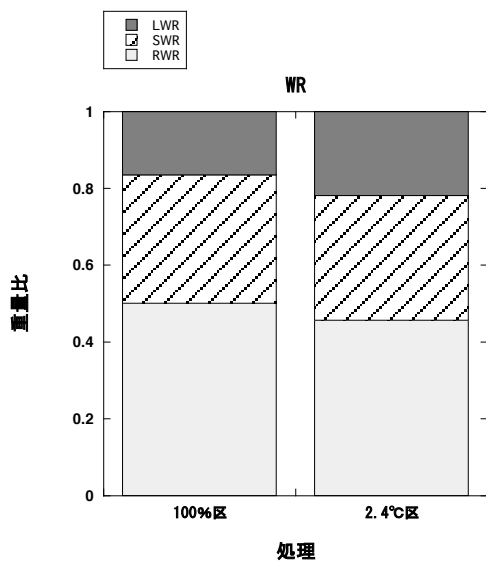
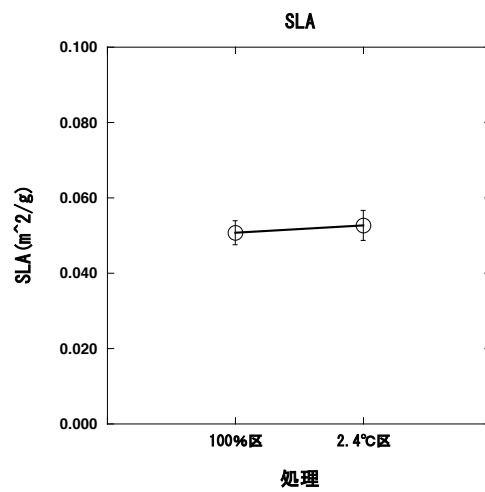
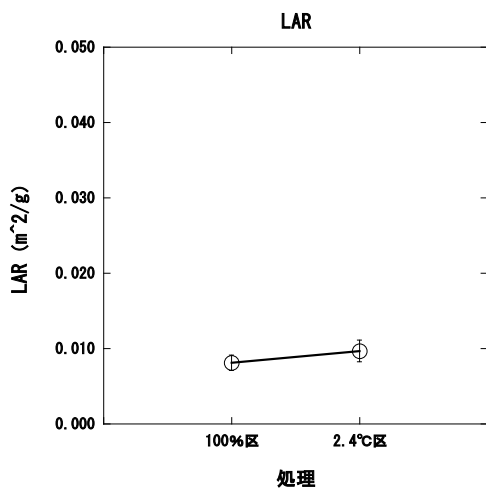
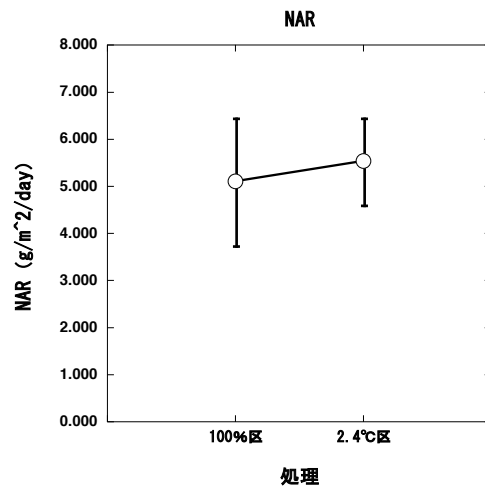
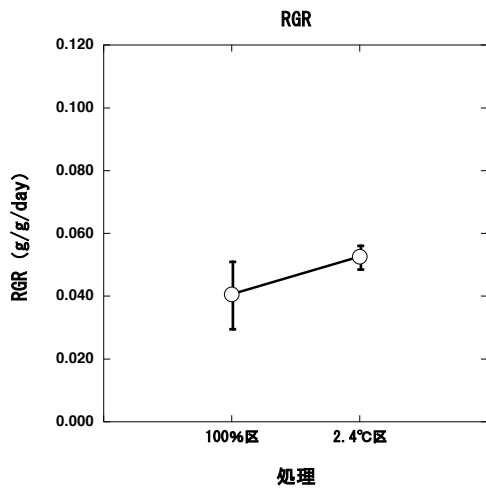


図 29 異なる温度条件下で栽培したナヨクサフジの生長解析結果

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 2.4°C 上昇させた実験区（2.4°C 区）を設置し、それぞれにポット植えした苗を入れて 15 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。縦棒は標準偏差を示す。n=15。

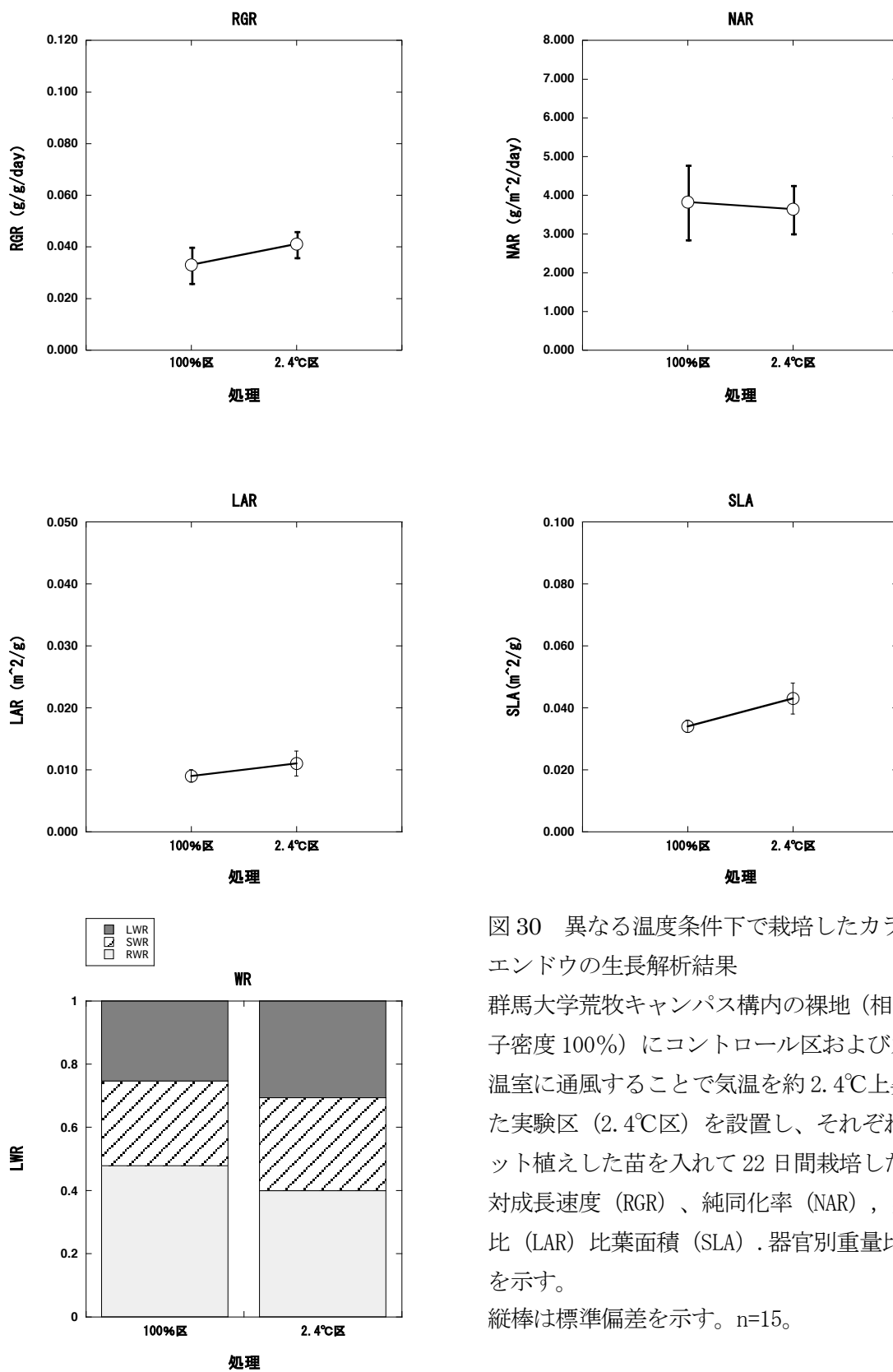


図30 異なる温度条件下で栽培したカラスノエンドウの生長解析結果

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 2.4℃上昇させた実験区（2.4℃区）を設置し、それぞれにポット植えした苗を入れて 22 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。

縦棒は標準偏差を示す。n=15。