

卒業論文

題名	群馬県内のビオトープに生育する植物に対する 地球温暖化の諸影響に関する生態学的研究
----	--

学籍番号	14602027
------	----------

氏名	鈴木 統子
----	-------

指導教員名	石川 真一 教官
-------	----------

平成 30 年 1 月 17 日 提出

概要

いまや世界規模で地球温暖化の危機の重大さが認識され、CO₂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、今後100年以内に、ある程度（地球平均で1~3℃）の温暖化は避けがたいという悲惨な予測もなされている。この直接影響及び気候変化により生物の最大70%が100年以内に絶滅すると予測されており、これを回避・緩和するためにも、今後は自然再生のような積極的な生物多様性保全活動が不可欠である。

自然再生を目的として造成され育成管理されている大型ビオトープの植物種多様性は、一定の定常状態に達している。しかし近年急速に進行している地球温暖化の直接および間接影響により、その植物種多様性が近いうち損なわれる危険性が想定される。そこで、2010年10月に竣工したチノー・ビオトープ（群馬県藤岡市森）、男井戸川調整池・ビオトープ（群馬県伊勢崎市豊城町）の各ビオトープ内に現在生育している代表的植物が、温暖化によりどのような影響を受けるかを、現地調査と実験をもとに予測し、これに対応した持続的な育成管理法を開発する。

冬の短縮による発芽低下、生育時の高温と生育期間の伸張による発芽後の生長促進、これらの可能性を発芽実験、生長解析を行うことにより究明した。さらに、チノー・ビオトープの植栽コナラの毎木調査を行い、CO₂吸収量を推定した。

チノー・ビオトープでは在来種85種、外来種40種の計125種の生育が確認された。本ビオトープでは2011年度から継続して150種前後を確認している。生育が確認できた種の中には竣工直後から確認されている絶滅危惧Ⅱ類のコギシギシ、2011年度から確認されている準絶滅危惧種のカワヂシャとミゾコウジュの生育が確認できた。園芸種は2011年度で17種（松田 2012）と目立っていたが、今年度の調査では3種と減っている。

男井戸川遊水池で在来種72種、外来種31種の計103種の生育が確認された。2012年の調整池完成前の2010年の調査では19種確認できたのみであり、多様な植物が生育できる環境の形成が進んでいる。今年度は初めて絶滅危惧Ⅱ類のキタミソウの生育が確認された。また、2012年より継続した絶滅危惧Ⅱ類のコギシギシと準絶滅危惧種のカワヂシャを確認した。加えて準絶滅危惧種のみゾコウジュも確認することができ、その他の希少種も含めて今後定着することを期待したい。

外来植物である、アメリカセンダングサ、オオブタクサ、ナガバギシギシを異なる温度条件下で栽培し、生長解析を行った結果、1.6℃の気温上昇で生長の促進が見られる種はなかった。また、ビオトープ内で見られる在来種および里地・里山（標高700m以内）に生育する在来種については、ほとんどの種が1.6℃の気温上昇では生長が阻害されなかった。

以上のことから、温暖化による気温上昇の影響を受けにくいとされる外来植物も影響を

受けやすいとされる在来植物も 1.6°Cの気温上昇であれば、両者とも生長の促進あるいは阻害が起こるほどの影響は受けないといえる。しかし、さらなる気温上昇が起こると外来植物が有意であり、在来植物に悪影響を及ぼしかねない。こうした競合性の強い外来植物から希少種を保護するためには、人に手による生育環境の維持・管理が必要不可欠なものとなる。

チノー・ビオトープにおいて行った毎木調査の結果から、本ビオトープの年間炭素固定量は 2.4tonC yr⁻¹であることが明らかになった。したがって森林全体としては、CO₂を蓄積している可能性が非常に高いことを示唆するものであり、今後の地球温暖化防止対策策定において、必ず参照すべき重要なものであるといえる。しかし、単に植林を行うことにより森林生態系の CO₂ 吸収量が増大し、地球温暖化対策になりうるという考え方は安易であるといえる。すなわち CO₂ 吸収機能を高めることだけが先行して、森林生態系のそれ以外の重要な機能（水源涵養や土壌流失防止、生物多様性保全など）を犠牲にしないように注意する必要がある。

本研究により、ビオトープなどの自然再生を図る試みは、「絶滅危惧種などの生物多様性の保全機能」と、「炭素固定などの環境安定化機能」を再生することができる可能性が高いことが明らかになった。これらを実現し、機能を拡大するためには、地域特有の自然や立地環境の復元を目指した育成管理、さらには人の手による継続的な管理が必要不可欠である。また、森林生態系における CO₂ 固定量をより拡大するためには、森林を破壊・劣化させることなく、森林の質を向上させていくことが地球温暖化対策として重要である。

目次

はじめに.....	3
生物多様性.....	3
生態系.....	3
生態系サービス.....	4
生物多様性と生態系.....	5
生物多様性の危機.....	5
生物多様性保全条約.....	6
生物多様性保全条約ができるまで.....	6
生物多様性基本法.....	7
生物多様性国家戦略.....	8
レッドリスト.....	8
自然再生法と自然再生事業.....	8
自然再生推進法の概要.....	9
ビオトープの必要性.....	10
温暖化の現状.....	10
温暖化の影響.....	11
温暖化対策 緩和と適応.....	12
温暖化と森林.....	12
地球温暖化の国際交渉.....	13
地球温暖化対策推進法.....	14
地球温暖化対策計画.....	14
大型ビオトープの実例.....	14
ビオトープで検証された温暖化.....	15
研究目的.....	16
野外調査地概要.....	18
材料および方法.....	20
植物相調査.....	20
材料植物.....	20
趣旨発芽の冷湿処理・温度依存性実験.....	22
異なる環境条件下における栽培実験.....	23
生長解析.....	24

毎木調査.....	26
樹木現存量・炭素固定量・純生産速度の推定.....	26
統計解析.....	28
植物データベースの構築.....	28
結果および考察.....	29
チノー・ビオトープ.....	29
男井戸川調整池ビオトープ.....	31
植物データベースの構築.....	32
発芽の温度依存性実験.....	32
コギシギシ.....	33
ミゾコウジュ.....	33
イヌトウバナ.....	34
オトコエシ.....	35
キツネアザミ.....	35
チカラシバ.....	36
ナズナ.....	36
ハルノノゲシ.....	37
ナガバギシギシ.....	37
異なる光条件下で栽培した植物の生長解析.....	38
チカラシバ.....	38
異なる温度条件下で栽培した植物の生長解析.....	39
外来植物.....	39
ビオトープに生育する在来植物.....	40
里地・里山に生育する在来植物.....	41
毎木調査.....	42
樹木の現存量と炭素固定量の推定.....	43
結 論.....	45
謝辞.....	48
引用文献.....	49
写真・表・図.....	52

はじめに

生物多様性

日本の中でもようやく市民権を得つつある「生物多様性」は、たんなる生物学用語ではない。それは、私たち人間と自然との間の本来は豊かな、そしてダイナミックで複雑な関係の現状を見直し、将来のよりよい関係を築くために欠かすことのできない社会的なキーワードであり（鷲谷、鬼頭 2007）、今では自然環境の保全に関する社会的な目標を指し示すのになくってはならない概念になっている（鷲谷 1999）。

生物の豊かさや多様性に対して現在よく使われている専門用語は生物多様性（biodiversity）である。これは生物学的多様性（biological diversity）を単に短くしたもので、そこで厳格な科学的な違いはない。しかしながら、生物多様性という用語は科学的、また政治的な分野で、生物の世界を評価する尺度として広く使われるようになってきたため、私たちはこの用語の意味を理解し、また理解しようと努める必要がある。研究論文において生物多様性は存在する異なる集団や種の数、それらの中で生じる複雑な相互関係の両方に適用される。そしてそのため、普通、生物多様性は三つの異なる段階で考えられる。

- 1 種内（種に内在する）段階での多様性：通常は個体または集団間の遺伝的変異の表現（用語）によって評価される。
- 2 種（種間の）段階での生物多様性：種の個数と豊富さの均等性の組み合わせとして評価される。
- 3 群集または生態系段階での生物多様性：異なる種の集団の個数として評価される。

生物多様性は個数と相異の両方を表現するため、複雑さの尺度として見ることのできる（Gaston&Spicer 1998）。

生態系

「生態系」は、同じ場所で生活する多様な生物とその物理的な環境からなるシステムである。すなわち生態系という言葉は、生物空間を共有する生物の集合である生物群集に、それらの生物の活動影響をおよぼす非生物的な環境要素を加えたシステム全体を指す専門用語である（鷲谷ら 2005）。

一方で「生態系」という言葉は、日常的にも頻繁に使われている。その場合、生態系は、ひとまとまりの森林、草原、湿原、サンゴ礁、洞穴、湖、河川など、「生息・生育場所」すなわち「ハビタット」程度の空間的な広がりを持ち、見た目にも同じような植生が認められる空間の範囲を指していることが多い。

しかし、生態系において、どの程度の規模の空間スケールを取り上げるかは任意である。小さな水たまりや一枚の落ち葉に見られる生態系、あるいはフラスコやシャーレの中に生

生態学者が意図してつくりだした少数の種からなる生態系などは、空間スケールが小さく、時間的な持続性の短い、小規模な生態系の例である。それに対し、流域の生態系や里山の生態系などは、相互に作用し合う複数の異なるタイプの人間生活が営まれる生息・生育場所を含む地域規模のシステムである（鷺谷ら 2005）。

例にあげたいいろいろな生態系は、規模には大きな違いがあるが、システムとしては共通する特性をもっている。それはいずれもが、要素として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、生物の活動が日生物学的な環境を作り出すという性格をもっていることである（鷺谷 1999）。

生態系を構成する種の多様性が増すにつれて、関係の多様性は何倍にも増し、複雑な網目状の構造をとる。そのようなシステムである生態系の種類の多様性が「生態系の多様性」である。日本の里地・里山のように、樹林と草原と池沼など、異なる性質の生態系が多く組み合わされているほど、生態系の多様性は高い（鷺谷 2010）。

生態系サービス

生態系サービスには、生態系がその機能を通じて提供する物質的、経済的、社会的、精神的なあらゆるサービスが含まれる。それら多様な生態系サービスの充足によってそれぞれの地域での人々の豊かな生活がなりたつ。それは、私たちが生態系の変質や生物多様性の低下、喪失に無関心であるわけにはいかず、生態系と生物多様性の保全を重視しなければならない第1の理由である。重要なサービスでも、それらが過不足なく提供されているときには気づかず、失われてからそのありがたさに気づくことになる。喪失・枯渇が起こる前に総点検をし、それらのサービスが持続するように生態系の管理・再生をすることが必要である（鷺谷、鬼頭 2007）。

人間が生態系から受ける恩恵である生態系サービスは、食料、水、材木、繊維、遺伝子資源などの「資源供給サービス」、気候、洪水、水質あるいは病気の制御といった「調整的サービス」、レクリエーション、美的な楽しみ、精神的な充足などの「文化的サービス」、そしてそれら全体を支える基盤的な機能ともいえる土壌形成、受粉、水循環、栄養循環などの「維持的サービス」に分けることができる。生物多様性はこれら生態系サービスを生み出す生態系機能の担い手であり、多様なサービス全般とかがかわる健全性の指標でもある（鷺谷、鬼頭 2007）。

生物多様性は、これらの恩恵、すなわち人間社会が生態系から受けるあらゆる利益を意味する「生態系サービス」の源泉でもある（鷺谷 2010）。

生物多様性と生態系

生物多様性と生態系サービスの関係については、単一種の作物から食料を効率的に得ることができる場合もあるように、供給サービスなどは必ずしも生物の多様性と直接的な結びつきがないように考えられる場合もある。しかし、生物多様性が豊かであるほど生態系サービスが向上するという場合も多くみられ、将来にわたって生態系サービスを受け続けていくためには、その源となる生物多様性を保全していくことが重要である（環境省 HP）。

生物多様性と生態系は、一方が他方をたがいに含んだ「包み合う関係」にある。（鷲谷ら 2005）。

多様な生態系サービスを持続的に供給しうる生態系は、そのなかに、はたらき方（機能）の異なる多様な種群（機能群）を含む。それらは、それぞれの機能を通じて異なるサービスをうみだす。さらに、同じ機能群に属す種が複数存在すれば、何らかの理由で種の絶滅が起こっても、同じ機能群のほかの種が、代わってその役割をになえる。また、生態系の多様性も、生態系サービスと深いかかわりがある。異なる生態系では、そこに含まれる機能群が異なるので、それぞれに異なる生態系サービスのセットを提供できるためである（鷲谷 2010）。

生物多様性は生物自身の生き残りのために必要なだけでなく、人間のためにも様々な役に立っている。例えば、植物は光合成を通じて二酸化炭素を吸収し、酸素を供給する。豊かな森林は洪水などの災害の発生を未然に防止し、清浄な淡水を供給するという機能もっている。食料や木材などの人間に必要な物質を提供したり、医薬品の原料となったり、さらには新しい技術のヒントを提供してくれることもある。このように、私たちの暮らしと経済は、生物多様性と切っても切り離せないものである（企業が取り組む生物多様性研究会 2010）。

生物多様性や生態系それ自体の価値を尊重することは、一見遠回りに見えても、長期的にみれば、社会に多くの利益をもたらすのぞましい自然資源の管理の手法となる（鷲谷 2010）。

生物多様性の危機

日本の生物多様性は4つの危機にさらされている。人間活動による影響が主な要因で、地球上の種の絶滅スピードは自然状態の約100～1000倍にも達し、たくさんの生きものたちが危機に瀕している。

- ・第1の危機 開発や乱獲による種の減少・絶滅、生息・生育地の減少

観賞や商業利用のための乱獲・過剰な採取や埋め立てなどの開発によって生息環境を悪化・破壊するなど、人間活動が自然に与える影響は多大である。

- ・第2の危機 里地里山などの手入れの不足による自然の質の低下

二次林や採草地が利用されなくなったことで生態系のバランスが崩れ、里地里山の動植物が絶滅の危機にさらされている。また、シカやイノシシなどの個体数の増加も地域の生態系に大きな影響を与えている。

・第3の危機 外来種などの持ち込みによる生態系のかく乱

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

・第4の危機 地球環境の変化による危機

地球温暖化は国境を越えた大きな課題である。平均気温が1.5～2.5℃上がると、氷が溶け出す時期が早まったり、高山帯が縮小されたり、海面温度が上昇したりすることによって、動植物の20～30%は絶滅のリスクが高まるといわれている（環境省 自然環境局）。

生物多様性保全条約

人間は、生態系の一員として多くの生物と共存するとともに、食品・医薬品など、生物を幅広く利用し、その恩恵を享受してきた。その一方、近年、生態系の破壊等により、生物種の大幅な減少に対する懸念が深刻化してきている。

このため、生物多様性を包括的に保全するとともに、生物資源を持続可能な形で利用していくため、国際的な枠組を規定すべきとの議論が活発化し、1992年に開催された「リオ地球サミット」にて、「生物多様性条約」が採択された。

生物多様性条約は、次の3点を目的としている。

- ①生物の多様性の保全
- ②生物資源の持続可能な利用
- ③遺伝資源の利用から生ずる利益の公正かつ衡平な配分（経済産業省 HP）

生物多様性保全条約ができるまで

1960年代後半、野生生物の種の絶滅が進行し、その原因となっている生物の生息環境の悪化や、生態系の破壊に対する懸念が深刻なものとなってきた。

そこで、1972年の国連人間環境会議において「特定の種の野生動植物の輸出、輸入および輸送に関する条約案を作成し、採択するために、政府または政府組織の主権による会議をできるだけ速やかに招集する」ことが勧告された。これを受けて、米国政府と国連自然保護連合（ICUN）が中心となって野生動植物の国際取引の規制のための条約を作成する作業を進めた結果、1973年3月3日にアメリカのワシントンで「絶滅のおそれのある野生動植物の種の国際取引に関する条約（ワシントン条約）」が採択された。

また、湿原、沼沢地、干潟などの湿地は、多様な生物を育み、特に水鳥の生息地として

非常に重要になっている。しかし、湿地は干拓や埋め立てなどの開発の対象になりやすく、その破壊をくい止める必要性が認識されるようになった。湿地には国境をまたぐものもあり、また、水鳥の多くは国境に関係なく渡りをすることから、国際的な取組が求められた。そこで、特に水鳥の生息地として国際的に重要な湿地およびそこに生息・生育する動植物の保全を促し、湿地の賢明な利用を進めることを目的として、1971年2月2日、イランのラムサールで開催された「湿地及び水鳥の保全のための国際会議」において「特に水鳥の生息地として国際的に重要な湿地に関する条約（ラムサール条約）」が採択された。

しかしながら、野生生物の種の絶滅は、止まることはなく、生物の生息環境も悪化をたどり、生態系の荒廃が過去にない速度で進み深刻なものとなってきた。

このような現状を背景に、希少種の取引規制や特定地域の生物種の保護を目的とする既存の国際条約（ワシントン条約、ラムサール条約、ボン条約（移動性野生動物種の保全に関する条約））を補完し、生物の多様性を包括的に保全し、生物資源の持続可能な利用を行うための国際的な枠組みを設ける必要性が国連において議論されるようになった。

1992年6月3日から14日までリオデジャネイロにおいて開催された国連環境開発会議（UNCED）における主要な成果として「気候変動に関する国際連合枠組条約」とともに生物多様性条約が会議中に署名のため解放され、6月13日、日本も署名した（草刈 2010）。

生物多様性基本法

日本は、1993年に生物多様性条約を批准している。一般的に、条約で決めたことを実行し約束を担保するためには、国内の法律（国内法）を整備する必要がある（草刈 2010）。2008年6月6日に、議員立法により生物多様性基本法が成立し施行され、新たな国内法となった（草刈 2010）。

生物多様性基本法の目的は、

- a. 生物の多様性の保全および持続可能な利用について、基本原則を定めて、
 - b. 国や地方公共団体、事業者、国民および民間の団体の責務を明らかにするとともに、
 - c. 生物多様性国家戦略の策定、
 - d. その他の生物の多様性保全および持続可能な利用に関する施策の基本となる事項を定めることにより、
- ①生物多様性の保全及び持続可能な利用に関する施策を総合的かつ計画的に推進し、
 - ②もって豊かな生物の多様性を保全し、
 - ③その恵沢を将来にわたって享受できる自然と共生する社会の実現を図り、
 - ④あわせて地球環境の保全に寄与すること
- を目的としている（草刈 2010）。

生物多様性国家戦略

生物多様性条約の第 6 条に従い加盟国は、生物多様性国家戦略または行動計画を策定している。日本では 5 年毎に改訂する方針で、1996 年に、生物多様性国家戦略を策定し、2002 年に、新・生物多様性国家戦略として改訂した。過去 2 回の改訂は「地球環境保全に関する関係閣僚会議」によって決定されている。2007 年に改訂された、第 3 次生物多様性国家戦略は、「閣議決定」によるものである。また、2008 年 6 月 6 日に施行された、生物多様性基本法に基づき法定計画として、「生物多様性国家戦略 2010」が 2010 年 3 月に閣議決定された。これまで 4 度も改訂をしてきている条約加盟国は、日本だけなのである（草刈 2010）。

レッドリスト

レッドリストとは、世界の絶滅のおそれの種（絶滅危惧種）の現状や原因を ICUN（国際自然保護連合）がまとめたもので、絶滅危惧種を守る法律や対策を作るために活用されている。レッドリストは、ICUN に加盟する科学者グループ（ICUN 種の保存委員会）や専門家・自然保護団体の調査・研究をもとに作られており、1966 年に初めて作られ、2000 年からはインターネットを使って、誰でも調べることができるようになっている（ICUN 日本委員会 2010）。

レッドリストは、野生生物を追いつめる大きな 11 の要因の一つに、「気候変動」つまり、地球温暖化を挙げている。この気候変動による影響を受けていると考えられている絶滅危惧種は、2000 年時点で 15 種とされたが、2004 年には 182 種に増加した。さらに、2008 年には 632 種、2010 年には 1000 種を超えた。2015 年には 2000 種を数えるまでになり、2017 年には 2835 種となった（WWF 2017）。

自然再生と自然再生事業

生態系修復の実践や事業は、日本の自然環境政策においては、「自然再生」とよばれる。世界に目を向けると、多様な自然再生のプロジェクトが行われている。アメリカ合衆国ではフロリダ州で広大なエバーグレイズ湿原を再生するプロジェクトなど、流域全体の大規模な自然再生が進められている（鷲谷 2010）。日本でも、自然再生事業の理念や手順等を定めた「自然再生推進法」が 2003 年から施行されている。同法では、自然再生を「過去に損なわれた生態系その他の自然環境を取り戻すことを目的とする事業」と定義している（鷲谷 2010）。

ここ数年における自然再生の流れの背景には、このように、私たち日本人の生存と生活の基盤である自然生態系が衰弱しつつあることに対する危機感があるといえよう。そして、現在残された自然を保護するだけでなく、過去に失われた生態系その他の自然環境を積

極的に再生・修復していくことが、我が国の重要課題として認識されるようになったのである（谷津、田端 2004）。

過去に損なわれた生態系その他の自然環境を取り戻すことを目的とした自然再生推進法が、平成 15 年 1 月 1 日より施行されている。この法律は、我が国の生物多様性の保全にとって重要な役割を担うものであり、地域の多様な主体の参加により、河川、湿原、干潟、藻場、里地、里山、森林、サンゴ礁などの自然環境を保全、再生、創出、又は維持管理することを求めている（環境省ホームページ）。

自然再生推進法の概要

[定義]

自然再生：過去に損なわれた自然環境を取り戻すため、関係行政機関、関係地方公共団体、地域住民、NPO、専門家等の地域の多様な主体が参加して、自然環境の保全、再生、創出を行うこと。

[基本理念]

- ・地域における自然環境の特性、自然の復元力及び生態系に微妙な均衡を踏まえて、科学的知見に基づいて実施。
- ・事業の着手後においても自然再生の状況を監視し、その結果に科学的な評価を加え、これを事業に反映（環境省 HP）。

自然再生事業とは、自然再生を目的として実施される事業をいうものである（谷津、田端 2004）。生物多様性国家戦略においては、「自然再生事業は、人為的改変により損なわれる環境と同種のもをその近くに創出する代償措置としてではなく、過去に失われた自然を積極的に取り戻すことを通じて生態系の健全性を回復することを直接の目的として行う事業」とされている。

自然再生事業は、欧米諸国を中心に先進的な取組があるが、わが国でも、釧路湿原において、直線化された河川の再蛇行化等により、乾燥化が進む湿原の再生を目指す事業、埼玉県・くぬぎ山地区において、産業廃棄物処理施設の集積等により失われた武蔵野雑木林の再生を図る事業、霞ヶ浦において、護岸工事が行われた岸边にアサザやヨシなどの湖岸植生を復元する事業などが始まっている。干潟についても、大阪南港野鳥園や東京港野鳥公園のように、かつての埋立地を渡り鳥が飛来する湿地に再生した例がある（谷津、田端 2004）。環境省によると、平成 28 年度末までに、25 の自然再生協議会が設立され、24 の自然再生全体構想及び 40 の自然再生事業実施計画が作成されている。また、国土交通省では、都市公園・緑地事業、河川事業、港湾事業等の所管事業を通じて、湿地の再生、蛇行河川の復元、干潟・藻場の保全・再生、樹林地や里山の保全・再生など様々な自然再生に

関する取組を地域の多様な主体の参画を得て進めている（国土交通省 HP）。農林水産省では、農業農村整備における生物多様性の保全技術の確立など、環境との調和に配慮した事業の推進のための調査を実施している。環境保全調査の結果の活用により、農業農村整備事業の実施にあたって、効率的な農業を実現しつつ、環境への負荷や影響の回避・低減により生物多様性や農村景観に配慮し、持続可能な社会の実現に寄与する。

人類がその持続可能性のための 21 世紀の早い時期に成し遂げなければならないことは、危険な方向に菅家用を変化させるおそれのある人間活動を自然と調和的なものに変えていくとともに、20 世紀に大きく損なわれた環境を修復することである（谷津、田端 2004）。

ビオトープの必要性

ビオトープとは、景観生態学、地域生態学から生まれた学術用語であり（近自然研究会 2004）、ギリシャ語の「生命：bio」と「場所：topos」の合成語で生物の生息空間を意味する。広義には森林や海洋などの自然、これらを含む地球もビオトープである。生物の多様性の維持や生態系の保護・再生のため、新たに造られる生物の生息空間もビオトープと呼んでいる。ビオトープには、原生林などのように「人の手を排除した自然のままの空間」という考え方と、人が自然と関わりあうことによって多様な生きものが生息できる環境をつくり維持するという考え方がある（養父 2006）。

ビオトープのタイプが異なれば、そこに棲んだり利用したりする生きものの種類が違ってくる。また、地理的に南北に長く、海岸に近いゼロメートル地帯から数千メートル級の高い山まであるわが国では、同じように見える川は川、山は山でも、地方によって様子が微妙に異なる。言い換えるならば、全く同じビオトープはふたつと無いのであって、それらビオトープに根付く自然のしくみ「自然生態系」は、ほとんど取り替えがきかない。生物多様性の保全には、すなわちさまざまな種類の生きものが生きていく必要があり、それぞれの地域がもともと持っている多種多様なビオトープが必要である。

ところがこれまでは、世界中のどこの国でも現代の世代の都合だけで国づくりやまちづくりが行われ、ビオトープが次々に壊されてきた。環境の時代とも言われる 21 世紀においては、残されている健全なビオトープを可能な限り守り、失われたビオトープを積極的に回復させていくことが必要である。また、ビオトープをポツポツと島のように残すのではなく、互いにネットワークさせて、生きものたちが自分で移動できることが大切である（日本生態系協会 HP）。

温暖化の現状

気候システムの温暖化には疑う余地はなく、また 1950 年代以降、観測された変化の多くは数十年から数千年にわたり前例のないものである。大気と海洋は温暖化し、雪氷の量は

減少し、海面水位は上昇し、温室効果ガス濃度は増加している（IPCC 2013）。地球の表面では、最近 30 年の各 10 年間はいずれも、1850 年以降の各々に先立つどの 10 年間よりも高温でありつづけた。北半球では、1983～2012 年は過去 1400 年において最も高温の 30 年間であった可能性が高い（中程度の確信度）（IPCC2013）。

気候変動監視レポート 2016 年において日本の天候異常気象についてはこのように発表している。北日本の秋を除き、全国的に高温傾向が続いた。年平均気温は東・西日本、沖縄・奄美でかなり高く、北日本で高かった。東日本では、平年差+1.0℃と 1946 年の統計開始以降で 2004 年と並び、最も高かった。北日本では、8 月に台風第 7 号、第 11 号、第 9 号、第 10 号が相次いで上陸し、大雨や暴風となった。秋は、低気圧や前線、台風の影響を受けやすく、西日本を中心に全国的に日照時間が少なく、西日本では降水量もかなり多かった。

気候変動に関して、2016 年の世界の年平均気温は、1891 年以降で最も高い値になった。また、日本の年平均気温は 1898 年以降で最も高い値になった。世界の年平均気温は、100 年あたり 0.72℃の割合で上昇している。また、日本の年平均気温は、100 年あたり 1.19℃の割合で上昇している。日本の月平均気温における異常高温は増加しており、異常低温は現象している。冬日の日数は減少し、熱帯夜の日数は増加している。また、真夏日の日数は増加傾向が現れており、猛暑日の日数は増加している。

さらに日本におけるサクラの開花日は早くなり、かえでの紅葉日は遅くなっている。台風の発生数については明瞭な長期変化は見られないとしている。2014 年に発生したエルニーニョ現象は、2015 年の 11～12 月に最盛期となり、2016 年に終息した。（気候変動監視レポート 2016 一部改変）

温暖化の影響

農作物においては、気温や降水量の変化により一部の地域では耕作適期が伸という予測もある。しかし、小麦やトウモロコシの重要な産地である中国やインドでは大幅な生産量の低下が見込まれているなど、マイナスの影響が大きいと予測されている。また日本の稲には高温に適応できる品種が少ないため、生産が難しくなる可能性もある（気候ネットワーク 2000）。

地球温暖化による洪水や干ばつなどの影響で、これまで生活していた地域に住めなくなり新しい土地への移住を強いられる人が増大すると予測されている（気候ネットワーク 2000）。世界銀行は 2015 年、地球温暖化に速やかに対応しないと、世界の貧構想は 2030 年までに 1 億人増加する可能性があるとの報告書を公表した。さらに、温暖化による熱波や洪水、干ばつや気候変動に伴う病気が世界の低所得者層の生活を直撃し、貧困層に転落させる可能性があるとも予測した。

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、地球温暖化が進むと高緯度または標高の高い地域への移動を強いられる。100年に2℃の温度上昇をもたらす規模とスピードは、平面で150～550km、垂直距離では150～550mの移動に匹敵する。成長の遅い植物は、このようなスピードで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。日本に生息する樹木も気温の変化のスピードについていけず、枯れたり、生息できなくなると予測されている。また、森林にすみかやエサを依存している動植物が激減したり、病害虫が大発生するという間接的な影響も起こる。特に日本の場合には都市化などで生態系が点在化し、移動が自由にできないという問題もある（気候ネットワーク、2000）。また、地球温暖化が進むと、鳥類の35%、両生類の52%、サンゴの71%に悪影響が出るといわれている（ICUN日本委員会）。

気温上昇は当然地温・水温の上昇をもたらすから、土中での微生物活動および化学反応が活発になり、土中の有機物・ヒューマスの分解が促進されると予想されている。気候暖化の有機物分解への影響に関連して生ずるもう一つの重要な問題は、北方林（タイガー）の土壌内に蓄えられている多量の有機物の分解促進によるCO₂やCH₄（メタン）の放出の加速である。気候暖化によって北方森林帯やツンドラ帯の有機物分解が促進されると、大気を中心とした炭素のバランスが乱れ、CO₂濃度上昇は化石燃料の使用によるよりも、著しく大きくなる心配がある（内嶋 1990）。

温暖化対策 緩和と適応

地球温暖化の対策には、その原因物質である温室効果ガスの排出量を削減する（または植林などによって吸収量を増加させる）「緩和策（mitigation）」と、気候変化に対して自然生態系や社会・経済システムを調整することにより温暖化の悪影響を軽減する（または温暖化の好影響を増長させる）「適応策（adaptation）」とに大別できる（国立環境研究所HP）。

なお、最大限の排出削減努力（緩和策）を行っても、過去に排出した温室効果ガスの大気中への蓄積があり、ある程度の気候変化は避けられない。それによる影響に対して取り得る対策は、変化した気候のもとで悪影響を最小限に抑える「適応策」に限られる。しかし適応策だけですべての気候変化の影響を和らげることも不可能であり、緩和策も同時に進める必要がある。適応策は温暖化対策とし全体の中では緩和策を補完するものとして位置づけられているが、双方とも温暖化対策として不可欠である（国立環境研究所HP）。

温暖化と森林

1988年に設置された「気候変動に関する政府間パネル（IPCC）」は、1990年に第1次報告書を作成した。この報告書を契機として、各国間の気候変動への対応に関する議論が進

み、1992年5月に気候変動枠組条約が採択された。その後、同年の6月のリオデジャネイロにおける地球サミットを経て、1994年3月に発行した。気候変動枠組条約において、森林・バイオマス（木材等）は、「温室効果ガスの吸収源及び貯蔵庫」として位置づけられ、「全ての締約国は、森林・バイオマスの持続的な管理の促進及びその保全、保護及びそれらの強化を図るべきであり、また先進国等は、それらの保護・改善を通じて気候変動を緩和する政策措置を行うべきである」とされた。

以上の経緯をもって、二酸化炭素問題は国政政治の舞台に登場し、国際間の取り決めによって解決されるべき問題となった。そして、森林、バイオマスの取扱いもまた、その関連から国際的な合意を必要とする事項になった（ゴルファーの緑化促進協力会 2000）。

地球温暖化は、大気中に存在する二酸化炭素などの温室効果ガスの濃度が上昇することが原因だと考えられている。地球温暖化を防ぐためには、大気中への二酸化炭素放出を減らし、さらに、大気中から二酸化炭素を取り除くことに取り組む必要がある。植物には、半永久的に利用可能な太陽からの光エネルギーを利用して、滝中の二酸化炭素を有機物として固定するという重要なはたらきがあり、特に樹木は幹や枝などの形で大量の炭素を蓄えている（林野庁 HP）。

陸上生態系の炭素貯留量は大気中の炭素の3倍であり、陸上生態系の炭素貯留量の約6割は森林生態系によって占められている。森林を消失または劣化させればその分、大気中の二酸化炭素濃度を増やすことになり、失われた森林を再生させ、森林の質を向上させれば、その分大気中の二酸化炭素を森林が吸収し、固定することになる（ゴルファーの緑化促進協力会 2000）。

地球温暖化の国際交渉

1992年に世界は、国連の下、大気中の温室効果ガスの濃度を安定化させることを究極の目標とする「気候変動枠組条約(United Nations Framework Convention on Climate Change)

(以下「国連気候変動枠組条約」とする。)を採択し、地球温暖化対策に世界全体で取り組んでいくことに合意した。同条約に基づき、1995年から毎年、気候変動枠組条約締約国会議(COP)が開催されている。また、1997年に京都で開催された気候変動枠組条約第3回締約国会議(COP3)では、我が国のリーダーシップの下、先進国の拘束力のある削減目標(2008年～2012年の5年間で1990年に比べて日本－6%、米国－7%、EU－8%等)を明確に規定した「京都議定書」(Kyoto Protocol)に合意することに成功し、世界全体での温室効果ガス排出削減の大きな一歩を踏み出した(環境省 HP)。

京都議定書は、排出削減に関する各国の具体的な義務を定めたという点で画期的であるが、同議定書には、世界全体の排出量の約2割を占める米国が参加せず、同じく約2割を占める中国が排出削減義務を負っていない等、排出削減義務を負う国の排出量は世界全体

の約 3 割に過ぎないという点で不十分である。世界全体での温室効果ガスの排出削減を実現するためには、すべての国が排出削減に取り組む必要があり、先進国が大幅な排出量の削減を達成することによって世界全体の取組を主導する必要があるが、同時に、途上国、特に排出量の大きい主要途上国は、その責任と能力に応じて、排出削減のための行動をとる必要がある（外務省 HP）。

更に今般、2015 年にフランス・パリで開催された気候変動枠組条約第 21 回締約国会議（COP21）において、気候変動に関する 2020 年以降の新たな国際枠組である「パリ協定」（Paris Agreement）が採択された。（環境省 HP）

地球温暖化対策推進法（平成 10 年成立、平成 28 年改正）

平成 9 年、京都で開催された気候変動枠組条約第 3 回締約国会議（COP3）での京都議定書の採択を受け、我が国の地球温暖化対策の第一歩として、国、地方公共団体、事業者、国民が一体となって地球温暖化対策に取り組むための枠組を定めた（環境省 HP）。

地球温暖化対策計画

COP21 でパリ協定が採択されたことを受け、地球温暖化対策の推進に関する法律に基づき、約束草案の達成に向けた取組を含む総合的かつ計画的な温暖化対策の推進のため、「地球温暖化対策計画」が閣議決定された（平成 28 年 5 月 13 日）。

温室効果ガスの排出抑制及び吸収の量に関する目標、事業者、国民等が講ずべき措置に関する基本的事項、目標達成のために国・地方公共団体が講ずべき施策等について記載されている（経済産業省 HP）。

同計画では、2030 年度に 2013 年度比で 26%削減するとの中期目標について、各主体が取り組むべき対策や国の施策を明らかにし、削減目標達成への道筋を付けるとともに、長期的目標として 2050 年までに 80%の温室効果ガスの排出削減を目指すことを位置づけており、我が国が地球温暖化対策を進めていく上での礎となるものである（環境省 HP）

大型ビオトープの実例

アドバンテスト・ビオトープ

群馬県邑楽群明和町、株式会社アドバンテスト群馬 R&D センター 2 号館敷地内に 2001 年 4 月に竣工したもので、面積が 17,000m²と民間企業所有としては国内最大級のビオトープである。本ビオトープの育成管理について、竣工時から群馬大学社会情報学部環境科学研究室の石川真一教授が、生態学的学術調査に基づいたアドバイスを行っている。ビオトープの趣旨にそぐわない外来植物が確認された場合は、その除去・時期を検討しアドバンテスト社に提案してきた。アドバンテスト社はこれを基にしてビオトープの管理を行ってい

る。

チノー・ビオトープ

群馬県藤岡市森、株式会社チノー藤岡事業所敷地内に造成された大型ビオトープである。本ビオトープは、記録計、調整計、温度センサー、データロガー、放射温度計など各種試験装置の製品とサービスを提供するチノー社が、環境への取り組みの一環として自然環境との共生を目的に、2009年9月に新プロジェクトとして計画し、2010年10月に竣工したものである。本ビオトープの面積は約10,119m²である。本ビオトープの育成管理について、設計段階から群馬大学社会情報学部環境科学研究所の石川真一教授が、生態学的学術調査に基づいたアドバイスを行っている。

男井戸川調節池（通称やたっぼり）

群馬県伊勢崎市により、たびたび起こる男井戸川の洪水に備えるため、利根川の支流である男井戸川に造成された調整池である。計画段階において、男井戸川は市街地を流れているので川幅を広げることが難しく、早急な対策を行うためには遊水池をつくることが有効であると考えられたため、治水だけでなく水質改善、生物の成育・生息環境の確保などの点において同時に整備することが基本方針に盛り込まれた。2001年から住民と県との懇談会が開かれ、調整池の管理に対する住民参加を促進している。この段階から、本ビオトープの育成管理について群馬大学社会情報学部環境科学研究所の石川真一教授が、生態学的学術調査に基づいたアドバイスを行っている。また、2008年11月から住民参加型の検討委員会が開かれており、利活用計画を検討してきた。2009年に県（河川管理者）としての技術的・行政的な検討を加えた最終的な利活用計画が確定した。これにより、本調整池の一部を水生ビオトープとして整備することとなった。2012年3月に竣工したばかりである（都丸 2013）。

ビオトープで検証された温暖化

関（2016）はアドバンテスト・ビオトープ（群馬県明和町）において過去12年間にわたって計測してきた気温のデータを分析することによって、これまでにすでに起こっているであろう、地球環境変化の影響を明らかにした。これによると、ビオトープ内では植生が豊かになり、これによる気温の緩和作用が働き気温の上昇を抑制しているはずにも関わらず、12年間で特に4月の気温が2.2℃～4.6℃上昇していた。このことから、当地では温暖

化の影響がすでに出ている可能性がある」と推察された。

本研究の目的

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、いまや世界規模で地球温暖化の危機の重大さが認識され、CO₂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、こうした対策の実施はある程度「手遅れ」であり、今後100年以内に、ある程度（地球平均で1~3℃）の温暖化は避けがたいという悲惨な予測もなされている。この直接影響及びゲリラ降雨、猛暑などの自然災害の増加のような気候変化により生物の最大70%が100年以内に絶滅すると予測されており、これを回避・緩和するためにも、今後は自然再生のような積極的な生物多様性保全活動が不可欠である。

大型ビオトープは、失われたかつての地域生態系を、人の適切な補助によって再生しようという、自然再生事業の一つである。地域環境と管理母体の状況に応じて、水辺、雑木林などの再生目標と面積や地形といった規模を決定し、「順応的管理」「育成管理」という、長期継続的で自然生態系のしくみに準じた管理を行っている。特に重要な施策は、外来種の除去、鳥類などとの生物間相互作用の創出、多様な育成環境の維持、在来生物の保全と自然な増殖の推進、およびこれらを長期継続的に調査・報告するモニタリングである。また再生目標となる近隣地域の里地・里山の環境・生物相を把握することも不可欠である。

このようにして自然再生を目的として造成され育成管理されている大型ビオトープの植物種多様性は、一定の定常状態に達している。しかし近年急速に進行している地球温暖化の直接および気候変化のような間接影響により、その植物種多様性が近いうち損なわれる危険性が想定される。また、チノー・ビオトープ、男井戸川調整池は標高の低い水郷地帯にあるので、温暖化による気温上昇、ゲリラ降雨の増加による冠水流亡、外来種の繁茂などの影響を強く受ける可能性が高い。そこで、チノー・ビオトープ、男井戸川調整池の各ビオトープ内に現在生育している代表的植物が、温暖化によりどのような影響を受けるかを、現地調査と実験をもとに予測し、これに対応した持続的な育成管理法を開発する。

地球温暖化により将来、冬が短くなることが予測されている。しかし、多くの植物は野外で冬を経験することにより発芽するため、冬の短縮は発芽低下を引き起こすかもしれない。他方、春が早く到来することによって、生育時の高温と生育期間の伸張が起り、発芽後の生長が促進されるかもしれない。これらの可能性を、イヌビエ、イヌトウバナ、ミゾコウジュ、コギシギシ、オトコエシ、チカラシバ、ハルノノゲシ、キツネアザミ、ナガバギシギシ、ナズナを用いて実験的に栽培して、発芽実験、生長解析を行うことにより究明する。

さらに、チノー・ビオトープの植栽コナラの毎木調査を行い、CO₂吸収量を推定する。阿部（2013）がCO₂吸収量の推定のために毎木調査を行ったが、6年経過したため、再度測定することでより正確なCO₂吸収量の推定が可能になる。

調査地概要

本研究で調査地とした大型ビオトープは2つで、いずれも群馬県内の平野部の、従来の農耕地が都市化または工業団地化された場所に位置している（図1）。またいずれのビオトープも設計または竣工段階から、群馬大学社会情報学部環境科学研究室の石川真一教授が、生態学的学術調査（モニタリング調査）に基づいたアドバイスをを行い、育成管理を続けている。

・チノー・ビオトープ（群馬県藤岡市森）

群馬県藤岡市森、株式会社チノー藤岡事業所敷地内に造成された大型ビオトープである（図3、写真3）。2009年9月に新プロジェクトとして計画し、2010年10月に竣工したものである。本ビオトープの面積は約10119㎡である。当地にはかつての水田が埋まっており、この土地を掘り起こし、ビオトープ内に小規模な水域を造成して、土を撒きだして「水田ビオトープ」が創出されている。本ビオトープの周辺にはJR高崎線、国道17号が走り、敷地内600m北側には烏川が、約1km西側には鐺川が流れている（石田 2015）。

2015年の調査で在来植物107種、うち6種の絶滅危惧種の生育が確認されたので、今後出現植物の調査と管理方法の検討を行う必要がある（関 2016）。

2012年に阿部が本ビオトープ内のコナラ高木163本（観音山から移植された）について毎木調査を実施した。コナラの個体現存量は最大180kg程度で、多くが100kg以下の階級にあった。またこれらの総和である樹木現存量は7.64ton、森林面積当たりの樹木現存量は約22.7ton ha⁻¹となった。さらに単位面積当たりの樹木現存量の値22.7ton ha⁻¹に、炭素換算係数の0.5を乗じると、炭素固定量は11.35tonC ha⁻¹となり、これに調査面積を乗じた3.82tonCが本ビオトープ内に樹木として現在蓄積されている炭素量とした。

この2012年の毎木調査から5年が経過して、ビオトープ造成当初に観音山から移植されたコナラの一部は枯死したものの、大部分は大きく生長し、またコナラ以外の植栽木も大きくなった。しかし、この毎木調査時に設置した樹木番号札の多くが脱落・遺失し、当時はGPSでの位置記録も行わなかったため、ほとんどのコナラの位置と番号・現況が不明となってしまった。

そこで本年は、あらためてチノー・ビオトープ内の樹木（桜および外来樹木を除く）のうち、樹高が2m以上ある成木すべてを対象に毎木調査をやり直すこととした

男井戸川調整池ビオトープ（通称・やたっぼり）（群馬県伊勢崎市豊城町）

群馬県伊勢崎市により、たびたび起こる男井戸川の洪水に備えるため、利根川の支流である男井戸川に造成された調整池である（図4、写真4）。計画段階において、男井戸川は市街地を流れているので川幅を広げることが難しく、早急な対策を行うためには遊水池を

つくることが有効であると考えられたため、治水だけでなく水質改善、生物の成育・生息環境の確保などの点において同時に整備することが基本方針に盛り込まれた。2001年から住民と県との懇談会が開かれ、調整池の管理に対する住民参加を促進している。また、2008年11月から住民参加型の検討委員会が開かれており、利活用計画を検討してきた。2009年に県（河川管理者）としての技術的・行政的な検討を加えた最終的な利活用計画が確定した。これにより、本調整池の一部を水生ビオトープとして整備することとなった。2012年3月に竣工したばかりである（都丸 2013）。

造成開始前の2008年度に行われた現地調査により、調整池予定地の一部に水を引いてつくられた湿地において、水田・湿地生在来種23種、畑地雑草14種、外来種18種が確認された。この中には直近の自生地（天野沼）から2000年代中頃に移植されたアサザをはじめ、オモダカ、カワジシャ、シャクジモの計4種の絶滅危惧種が含まれている（高橋 2009）。こうした保護の重要性が高い植物相を水生ビオトープ内に再生するため、群馬県中部県民局・伊勢崎土木事務所によって、当地の表土の一部を別所に温存して調整池整備後に再配置し、土壌シードバンクから植生ビオトープ内に再生する計画が実施されている（関 2016）。当調整池は竣工直後より、群馬県伊勢崎土木事務所および地域団体である「殖蓮地区自然環境を守る会」が共同して草刈りなどの管理を行っている。

2015年の植物相調査においては、58種の在来種が確認され、2010年に初めて行われた当調整池での植物相調査以降、最多の種数となった。うち絶滅危惧種はコギシギシやカワジシャなど6種が確認されているため、今後も出現植物の調査と管理方法の検討を行う必要がある。

材料および方法

植物相調査

植物相調査一般的に用いられるコドラート法による植生調査は、限られた面積内の植物相について解明する手法である。そのため、植物種多様性の低い地域以外では見落とす種が多くなる。そこで、本調査では広範囲にわたる生育植物種をリストアップする植物調査を行った。各調査地域を踏査し、開花・結実している植物を中心として、目視、デジタルカメラによる撮影または採集を行い、その後植物図鑑を用いて種の同定を行った。なお、この調査方法では、踏査により目視可能な種が対象となるために、比較的量の多い植物種をピックアップすることになる。

また、確認植物については、ポータブル GPS (GPSmap62SCJ, GARMIN) を用いた写真撮影により、生育位置情報を自動記録した。その後これらの情報を Garmin Base Camp に取り込み、チノー・ビオトープ、男井戸川調整池における植物の分布マップを作成した。

調査日はチノー調査が 2017 年 4 月 21 日、5 月 23 日、6 月 26 日、9 月 27 日 (計 4 回)、男井戸川調査が 2017 年 4 月 20 日、5 月 16 日、9 月 27 日 (計 3 回) である (表 1)。

材料植物

2 つの調査対象ビオトープに定着している以下の植物を、モデル植物として用いた。また地球温暖化の直接影響を解明するために行った気温を調節した栽培実験においては、諏訪間 (2018)・岡村 (2018)・長倉 (2018) が行った榛名山および群馬県内の里地に生育する植物を用いた実験結果、外来植物を用いた実験結果も含めて、総合的な考察を行った。

コギシギシ (タデ科、多年草、*Rumex nipponicus*)

本州、四国、九州に分布するタデ科の多年草で、河原や、田んぼのあぜなど低湿地に生育する。国のレッドリスト (2012) では絶滅危惧Ⅱ類に指定されている。群馬県レッドデータブック (2012) では、準絶滅危惧種に指定されている。チノー・ビオトープおよび男井戸川調整池ビオトープに自生する (須永 2017)。

ミゾコウジュ (シソ科、越年草、*Salvia plebeia*)

本州、四国、九州、沖縄に分布するシソ科の越年草で、水辺の裸地的な立地に生育する。河川工事や除草剤散布などにより減少傾向にあることから、国のレッドリスト (2012) では準絶滅危惧種に指定され、群馬県のレッドデータブック (2012) でも準絶滅危惧種に指定されている。チノー・ビオトープ、男井戸川調整池ビオトープおよびアドバンテスト・ビオトープに自生する (須永 2017)。

イヌトウバナ (シソ科、多年草、*Clinopodium micranthum*)

北海道、本州、四国、九州の山地の林内や道ばたなどに生育し、朝鮮半島に分布するシソ科の多年草で、8月～10月にかけてわずかに淡紫色をおびた白色の花を咲かせる。アドバンテスト・ビオトープに自生する (須永 2017)。

イヌビエ (イネ科、一年草、*Echinochloa crus-galli*)

原野の廃地、路傍、溝辺に生育するイネ科の一年草本。水田雑草の一種。チノー・ビオトープ、男井戸川調整池ビオトープおよびアドバンテスト・ビオトープに自生する (須永 2017)。

オトコエシ (オミナエシ科、多年草、*Patrinia villosa*)

北海道から琉球列島および朝鮮半島、中国に渡って分布するオミナエシ科の多年草で、日当たりのよい山野によくみられる。チノー・ビオトープに自生する (須永 2017)。

キツネアザミ (キク科、越年草、*Hemistepta carthamoides*)

本州、四国、九州、朝鮮から南の東南アジア、オーストラリアに広く分布するキク科の越年草で、道ばたや田のへりなどに生育する。チノー・ビオトープ、男井戸川調整池ビオトープおよびアドバンテスト・ビオトープに自生する (須永 2017)。

チカラシバ (イネ科、多年草、*Pennisetum alopecuroides*)

原野、路傍、土堤等の日当たりのよい草地に多く生えるイネ科の多年草で、非常に強いひげ根を地中に下し、抜くのが難しいほど丈夫な株となる。

ナズナ (アブラナ科、越年生草本、*Capsella bursa-pastoris*)

郊外の道端、田圃あるいは庭の隅等にはえるごく普通の越年生草本。別名ペンペン草。チノー・ビオトープ、男井戸川調整池ビオトープおよびアドバンテスト・ビオトープに自生する (須永 2017)。

ハルノノゲシ (キク科、越年生草本、*Sonchus oleraceus*)

日本各地、いたるところの路傍、荒地などに普通にみられる。ヨーロッパ原産であると考えられ、史前帰化植物の一つである。チノー・ビオトープ、男井戸川調整池ビオトープおよびアドバンテスト・ビオトープに自生する (須永 2017)。

ナガバギシギシ (タデ科、多年草、*Rumex crispus*)

ヨーロッパ、西アジア原産で日本に帰化し、雑草として各地に見られる多年草。茎は直立して高さ1~1.5mにもなる。移入種(外来種)リストに掲載されている(国立環境研究所侵入生物データベース HP)。チノー・ビオトープ、男井戸川調整池ビオトープおよびアドバンテスト・ビオトープに自生する(須永 2017)。

種子発芽の冷湿処理・温度依存性実験

2016年5月24日にチノー・ビオトープで採取したコギシギシ種子、2016年5月23日に男井戸川で採取したコギシギシ種子、2016年にチノー・ビオトープで採取したミゾコウジュ種子、2014年9月17日にアドバンテスト・ビオトープで採取したイヌトウバナ種子、2016年10月20日に藤岡市で採取したイヌビエ種子、2015年11月4日に西榛名で採取したオトコエシ種子、2015年5月25日にチノー・ビオトープで採取したキツネアザミ種子、2016年10月20日に前橋市で採取したチカラシバ種子、2009年5月4日に前橋市で採取したナズナ種子、2015年5月25日にチノー・ビオトープで採取したハルノノゲシ種子、2008年6月19日にアドバンテスト・ビオトープで採取したナガバギシギシ種子の11種の植物の種子について実験を行った。各種の種子の採取日時・場所、前処理(冷湿処理)、実験のスケジュールを表2に示す。

コギシギシ、ミゾコウジュ、イヌトウバナ、イヌビエ、オトコエシ、キツネアザミ、チカラシバ、ハルノノゲシの種子の種子は採取後にシリカゲルを用いて十分に乾燥させた後、 -80°C のディープフリーザー(MDF-U384, Panasonic)内で冷凍保存されている。ナズナの種子は採取後にシリカゲルを用いて十分に乾燥させた後冷蔵庫で保存されていたが2013年11月より -80°C のディープフリーザー(MFD-U384, Panasonic)内で冷凍保存されている。ナガバギシギシの種子は冷蔵庫保存されているものを用いた。ここから、健全なものだけを峻別し、実験に用いた。

石英砂を敷いた直径9cmのプラスチック製シャーレに種子を50個ずつ入れ、各々のシャーレに蒸留水を約20cc注入した。このシャーレを各植物各処理区にあたり3つずつ用意した。その後温度勾配型恒温器(TG-100-ADCT, NKsystem)内で培養した。設定温度は $30/15^{\circ}\text{C}$ 、 $25/13^{\circ}\text{C}$ 、 $22/10^{\circ}\text{C}$ 、 $17/8^{\circ}\text{C}$ 、 $10/6^{\circ}\text{C}$ (昼14hr、夜10hr、昼間の光量子密度は約 $30\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$)の5段階とし、2ヶ月間培養した。実験開始後の1ヶ月は毎日、その後は1~3日おきに観察し、肉眼で幼根が確認できたものを発芽種子とみなして数を記録し、取り除いた。また観察日ごとにシャーレに蒸留水を注ぎ足し、シャーレ内部が常時湿った状態を保った。こうして得られた積算発芽率を、最終発芽率とした。チノー産のコギシギシの種子については5段階の温度区で1ヶ月培養し、男井戸川産のコギシギシの種子は $25/13^{\circ}\text{C}$ 区で1ヶ月培養した。

イヌビエの種子、チカラシバの種子については、上記と同様に種子を調整し、冷湿処理を施した後に上記の 5 段階の温度区で培養する実験、および冷湿処理を施さずに 25/13℃ 区で培養する実験を行った。前処理である冷湿処理は、一般に冬を経験させることによって種子の休眠を解除し発芽促進させる処理であり、多くの野生植物の種子でその促進効果が確認されている（荒木ら 2003）。本研究では、上記の蒸留水を加えたシャーレに入れたイヌビエの種子とチカラシバの種子を、4℃の薬用保冷庫（サンヨー、MEDICOOOL MPR-504(H)）で保管することによって、2 ヶ月間冷湿処理を施した。冷湿処理終了後、上記と同様の方法で培養と観察を行った。

異なる環境条件下における栽培実験

前栽培と初期サンプリング

栽培スケジュールを表 3 に示す。コギシギシ（チノー産）、ミゾコウジュ、イヌビエ、オトコエシ、キツネアザミ、チカラシバ、ハルノノゲシ、ナガバギシギシについて、前述の発芽実験で発芽した実生をジフィーシート板に移植し、1~2 ヶ月植物育成棚で栽培した。いずれの材料植物も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ポット（95mL 容量）に 1 個体ずつ移植し、群馬大学荒牧キャンパス内の圃場で栽培した。栽培中は、1 日に 1 度水道水をポットから水が流れ出るまで十分灌水した。

初期サンプリングに際しては、前述のプラスチックポットに植栽した苗の見かけが大きい順に並べ、これを順番に 6 区に配分して、区分ごとにサイズ分布と個体数がおおむね同等になるようにした。このうち 1 区分を初期サンプルとして採取し、残りの区分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・茎・葉に分けて紙袋に入れ、送風定温乾燥機（DRS620DA, ADVANTEC）に入れて 80℃で 1 週間ほど乾燥させた後、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 206312 ドットとした。

異なる環境条件下における栽培実験

光強度を調節した栽培実験

寒冷紗を用いて光量子密度を 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圃場に設けた。初期サンプリングを行った日から、これらの処理区に苗ポットを配置して、各材料植物の苗をそれぞれ 2 週間から 1 ヶ月栽培した。栽培中は、前栽培と同様 1 日に 1 度水道水をポットから水が流れ出るまで十分灌水した。肥料は与えていない。

気温を調整した栽培実験

群馬大学荒牧キャンパス内にガラス温室（サイズはおよそ 500×200×250cm）を設置し、換気調節を行うことによって、外気温と比べて平均気温が約 1.6℃上昇するように調節した区（+1.6℃区）および+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% 区内に苗ポットを配置して、各材料植物の苗をそれぞれ約 2 週間から 1 ヶ月栽培した。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。肥料は与えていない。

以上の栽培実験を行った後、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。ただしチカラシバについては、葉面積をすべての個体計測せずに各処理区ごと 1 個体ずつ計測し、乾燥重量あたりの葉面積を求め、各個体の葉面積を計算によって出した。

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。

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

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。

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

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）

LA1：T1 における個体の葉面積（m²）

LA2：T2 における個体の葉面積（m²）

T1：初期サンプリング日

T2：最終サンプリング日

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

ある。

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

TW1：初期サンプリングにおける個体総乾燥重量 (g)

TW2：最終サンプリングにおける個体総乾燥重量 (g)

LA1：T1における個体の葉面積 (m²)

LA2：T2における個体の葉面積 (m²)

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

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

LA：最終サンプリングにおける個体の葉面積 (m²)

TW：最終サンプリングにおける個体の総乾燥重量 (g)

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

- ・ 葉重比 (LWR：Leaf Weight Ratio)

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

LW：最終サンプリングにおける個体の葉乾燥重量 (g)

TW：最終サンプリングにおける個体の総乾燥重量 (g)

- ・ 茎重比 (SWR：Stem Weight Ratio)

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

SW：最終サンプリング個体の茎乾燥重量 (g)

TW：最終サンプリングにおける個体の総乾燥重量 (g)

- ・ 根重比 (RWR：Root Weight Ratio)

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

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の総乾燥重量 (g)

それぞれのパラメータ間には、以下のような関係がある。

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

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

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

毎木調査

チノー・ビオトープ内の樹林において、樹高 2m 以上の成木の種名と、位置、胸高直径 (DBH, Diameter at Breast Height)、樹高を測定した (図 2)。樹高 15m 以下の樹木については、測竿を用いて、樹高 15m 以下の樹木はレーザー樹高計 (TruPulse 200, Laser Technology Inc.) を用いて樹高を測定し、またいずれの場合も巻尺を用いて DBH を測定し、巻尺を用いて DBH を測定した。測定した成木は計 459 本であった。

毎木調査を行った樹木には、通し番号を打ち込んだアルミニウムプレート (チノー藤岡工場製作) を樹木用ガンタッカーで打ち付け、これをポータブル GPS (GPSmap62SCJ, GARMIN) を用いた写真撮影により、生育位置情報を自動記録した。その後これらの情報を Garmin Base Camp に取り込み、チノー・ビオトープ、成木の分布マップを作成した。

測定日は 2017 年 6 月 26 日、7 月 24 日、9 月 4 日、9 月 9 日、9 月 26 日、11 月 6 日 (計 6 回) である (表 1)。

樹木現存量、炭素固定量、純生産速度の推定

チノー・ビオトープに生育する成木について、今回の毎木調査の結果と過去の研究結果 (後述) およびそこから求めた回帰式を適用することにより、樹木の現存量、炭素固定量、純生産速度を推定した。

現存量の推定

DBH と樹高から地上部および根の現存量の算出を行う際には、以下の 6 つの論文に記載されているデータをもとに作成した以下の回帰式を用いて行った。

- ・大北 (1985) 「クヌギ林の施業試験」 広葉樹研究 3 号
- ・甲斐 (2006) 「コナラ人工育成試験-25 年間の成績-」 九州森林研究 59 号
- ・後藤・小南・深山・玉井・金澤 (2003) 「京都府南部地方における広葉樹二次の地上部現存量及び純生産量」 森林総合研究所研究報告 2 号
- ・長野県の森林 CO2 吸収評価認証委員会 (2008) 「第二回委員会 資料 2」
- ・橋詰 (1985) 「落葉広葉樹二次林の改良施業に関する研究 (II) クヌギ二次林の生長に対する整理伐と施肥の効果」 鳥取大学農学部研究報告 38 号
- ・宮本・都築・吉田 (1985) 「クヌギ林のほだ木用原木生産量の予測」 林業試験場研究報告 333 号

クヌギの現存量 (kg) = クヌギの個体重量 (kg) + クヌギの葉の重量 (kg)

$$\begin{aligned}
\text{クヌギの個体重量(kg)} &= \text{クヌギの地上部重量(kg)} + \text{クヌギの地下部重量(kg)} \\
\text{クヌギの地上部重量(kg)} &= 0.668 \times 1.36 \times \text{クヌギの幹材積(m}^3) \times 1000 \\
\text{クヌギの幹材積(m}^3) &= 0.00009 \times (\text{DBH(cm)})^{(1.86343)} \times ((\text{樹高(m)})^{(0.85008)}) \\
\text{クヌギの地下部重量(kg)} &= \text{クヌギの地上部重量(kg)} \times 0.25 \\
\text{クヌギの葉の重量(kg)} &= \text{クヌギの地上部重量(kg)} \times (1.2091 + 0.010993 \times \text{クヌギの地上部重量(kg)}) / 100 \\
\text{コナラの現存量(kg)} &= \text{コナラの個体重量(kg)} + \text{コナラの葉の重量(kg)} \\
\text{コナラの個体重量(kg)} &= \text{コナラの地上部重量(kg)} + \text{コナラの地下部重量(kg)} \\
\text{コナラの地上部重量(kg)} &= 0.668 \times 1.36 \times \text{コナラの幹材積(m}^3) \times 1000 \\
\text{コナラの幹材積(m}^3) &= 0.00009 \times (\text{DBH(cm)})^{(1.81163)} \times ((\text{樹高(m)})^{(0.90953)}) \\
\text{コナラの地下部重量(kg)} &= \text{コナラの地上部重量(kg)} \times 0.25 \\
\text{コナラの葉の重量(kg)} &= \text{コナラの地上部重量(kg)} \times (3.9588 + 0.0082769 \times \text{コナラの地上部重量(kg)}) / 100
\end{aligned}$$

相対生長速度 (RGR) の算出

相対生長速度 (RGR) の算出には阿部 (2013) の式を用いた。

$$\begin{aligned}
\text{クヌギの RGR (Kg Kg}^{-1} \text{ yr}^{-1}) &= 1 / (1.8448 + 0.065756 \times \text{個体重量} - 8.4205 \times 10^{-5} \\
&\quad \times \text{個体重量}^2 + 1.3504 \times 10^{-7} \times \text{個体重量}^3) \\
\text{コナラの RGR (Kg Kg}^{-1} \text{ yr}^{-1}) &= 1 / (1.5938 + 0.086277 \times \text{個体重量} - 0.00015608 \\
&\quad \times \text{個体重量}^2 + 0.00000031392 \times \text{個体重量}^3) \\
\text{シラカシの RGR (Kg Kg}^{-1} \text{ yr}^{-1}) &= 0.082172 - 0.00819 \times \ln(\text{個体重量}) \quad (\ln \text{ は自然対数})
\end{aligned}$$

純生産速度の推定

純生産速度の推定には阿部 (2013) の式を用いた。

<クヌギおよびコナラ>

$$(\text{個体現存量, ton ha}^{-1}) = (\text{個体重量, ton ha}^{-1}) + (\text{個体葉重量の和, ton ha}^{-1})$$

$$(\text{個体純生産速度, ton ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}) = (\text{個体現存量の増分, ton ha}^{-1} \text{ yr}^{-1})$$

+ (個体葉重量の和, ton ha⁻¹ yr⁻¹) ※

※クヌギおよびコナラは落葉樹であるので、毎年すべての葉が改めて生産されるため。

<シラカシ>

$$(\text{個体現存量, ton ha}^{-1}) = (\text{個体重量, ton ha}^{-1}) + (\text{個体葉重量, ton ha}^{-1})$$

$$(\text{個体純生産速度, ton ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}) = (\text{個体現存量の増分, ton ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}) ※$$

※シラカシは常緑樹であるので、個体葉重量は加算されない。

コナラ、クヌギ、シラカシ以外の樹木についてはコナラの式を適用した。RGR および純生産速度においては、コナラ、クヌギ、シラカシ以外の樹木はコナラの式を適用した。これはデータ不足起因の不可避的なものであった。

チノー・ビオトープにおいては 2012 年 5 月～9 月の間に、2010 年に植栽されたコナラの成木 163 本について、巻き尺を用いて DBH を測定し、測竿を用いて樹高を測定した（阿部 2013）。今回の調査で同一であると判断がすることができた成木について、以下の式により単木の生長速度を算出した。

$$\text{生長速度 (kg/year)} = (\text{2012 年の現存量 (kg)} - \text{2017 年の現存量 (kg)}) / 5$$

統計解析

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

植物データベースの構築

各ビオトープで生育が確認された植物の分類学的情報、確認日時、写真、位置図、生態学的特性情報を、サーバ経由で閲覧・検索可能な植物データベースの構築を行った。データベースの構築には FileMaker Pro12 (ファイルメーカー社) を用いた。

なおこの植物データベースは、スマートフォン・タブレット用の無料アプリである FileMaker GO (ファイルメーカー社) でも利用可能である。

結果および考察

植物相調査

チノー・ビオトープ

チノー・ビオトープでは、2017年度（4-9月）の計4回の調査により在来種85種、外来種40種の計125種が確認された（表4）。2012年度の調査では在来種100種、外来種47種の計147種が確認され（都丸 2013）、2013年の調査では在来種99種、外来種55種の計154種が確認され（春原 2014）、2014年の調査では在来種87種、外来種37種の計124種が確認され（石田 2015）、2015年度の調査では在来種107種、外来種42種の計149種が確認され（関 2016）、昨年度の調査では在来種92種、外来種44種の計136種が確認された（須永 2017）。

2012年以降、出現数に大きな変化はないといえるが、チノー・ビオトープ竣工直後（在来種43種、外来種22種の計74種；青木 2011）に比べると約2倍の種数が継続して確認されていることになる。

チノー・ビオトープ内で生育が確認されている絶滅危惧種は絶滅危惧Ⅱ類のコギシギシ、準絶滅危惧種のカワヂシャ、ミゾコウジュである。竣工直後から確認されているコギシギシ、2012年から引き続き確認されているカワヂシャとミゾコウジュの3種については今年も生育が確認された。

2017年度のチノー・ビオトープの帰化率は約32%であった。2011年度は約42.6%（松田 2012）、2012年度は約31%（都丸）、2013年度は約37.1%（春原 2014）、2014年度は約29.8%（石田 2015）、2015年度は約28.2%、昨年度は約32.4%であり、例年30%ほどで平衡状態が続いている。また、2011年で17種（松田 2012）、2012年で10種と園芸種の生育が目についた本ビオトープであったが、2013年、2014年（春原 2014；石田 2015）は5種、2015年度（関 2016）は6種、昨年度（須永 2017）は5種であり、今年度は3種であった。2012年以前と比べると園芸種数は減っており、引き抜き除去の効果が出ているといえる。なお継続して確認された園芸種はユウゲショウである。今年度は確認されなかったが特に群馬県危険外来種のナガミヒナゲシについては今後も引き抜き管理を要する。またガマは在来種であるが、栄養繁殖によって繁茂する速度が速いので、適宜引き抜いて抑制する必要がある。

2012年に、緊急避難対策として、矢場川から採取した挿し穂から作出したフジバカマ苗を、本ビオトープのせせらぎ横に移植した。2013年には開花するまでに生長し（春原 2014）、2014年も開花が確認できた（石田 2015）。しかし、その後生育不良で、2015年度は生存個体を確認することができなかった。そのため、2015年5月25日に、本研究室で栽培していたフジバカマ（矢場川産）を、本ビオトープ内のせせらぎ横およびトンボの池南側に

移植した。今年は開花が見られたので順調に生育しているといえる。

2012年7月30日に前述のアサザを本ビオトープ内のトンボの池（写真1下）に移植した（都丸 2013）。そして本年度は、池一面をアサザが覆い、5月の調査の際板倉町小保呂沼から避難させ当研究室で栽培していたトチカガミ（国・準絶滅危惧種、県・絶滅危惧 IA 類）を、2013年に本ビオトープ内のトンボの池に移植したが、生育が不良であった。そこで2015年5月25日に、同種をトンボの池内に再移植した。2015年9月の調査の際には、個体が増殖していることが確認された（関 2016）。本種は群馬県内でわずか2カ所に生育しているのみで、絶滅を回避するために、今後も生育状況をモニタリングし保護育成に取り組んでいかなければならない。本年は開花を確認することはできなかったが、来年度以降は定着し多くの開花を確認できるよう期待したい。

板倉町小保呂沼から避難させ当研究室で栽培していたトチカガミ（国・準絶滅危惧種、県・絶滅危惧 IA 類）を、2013年に本ビオトープ内のトンボの池に移植したが、生育が不良であった。そこで2015年5月25日に、同種をトンボの池内に再移植した。2015年9月の調査の際には、個体が増殖していることが確認された（関 2016）。本種は群馬県内でわずか2カ所に生育しているのみで、絶滅を回避するために、今後も生育状況をモニタリングし保護育成に取り組んでいかなければならない。また、2017年5月23日にトチカガミを再移植した。しかし、アサザにより被陰されたことが原因による水温の低下により、生長がよくなかった。

今回確認された在来植物種の中には、オトコエシ、ヤマハギなど、榛名山西部の里山にも生育している（高橋 2009；赤上 2011；荒川 2012）種が見られた。また、本年度の調査ではスマレ、ヤグルマソウが本ビオトープ内で初めて確認された。これら里山で確認されている在来植物種数（塚越 2013）に比べると、本ビオトープ内で生育している種数は少ないものの、着実に地域の植物相、ひいては地域の生態系の再生という目的に向かって育成が進んでいると言える。

2015年10月22日、本ビオトープに、水生絶滅危惧植物種ササバモ（ヒルムシロ科、群馬県絶滅危惧 IB 写真14上）を緊急避難的に移植した。本種は藤岡市内の数地点の河川・用水路において生育が確認されていた（群馬県自然史博物館・大森武宏氏 私信）が、そのうちの1カ所、岡之郷用水路が群馬県により改修されることとなったためである。岡之郷用水路は、同じく絶滅危惧種で藤岡市の天然記念物に指定されているヤリタナゴの生育地でもあるため、群馬県と関係農家および魚類専門家が協議会を組織して対策を検討していたが、工事着工1ヶ月前に至っても、この協議会はササバモの保全に関して一切の具体的な協議を行わなかった（群馬県自然環境課 私信）。これは所管する自治体として無策も甚だしい所作であるが、本研究室の提案により、着工まで1ヶ月を切ってから取り得る対策として、チノー・ビオトープ、および工事を行わない岡之郷用水路上流部への移植、お

よび群馬大学荒牧キャンパスへの緊急避難が決定した。

これをうけて昨年度、チノー・ビオトープのトンボの池およびせせらぎの計 3 カ所に、麻紐で素焼き鉢にくくりつけたササバモを沈めた。またくくりつけられなかった短いササバモは、直接せせらぎの川床に植え込んだ。

本年度、これらのササバモの確認をしたところ、素焼き鉢に、ササバモは付着しておらず、確認することができなかった。これら緊急避難させたササバモについては、今後より確かな管理方法を検討する必要がある。

男井戸川調整池ビオトープ

男井戸川調整池ビオトープでは、2017 年度（4 月、5 月、9 月）の計 3 回の調査により在来種 72 種、外来種 31 種の計 103 種が確認された（表 5）。2010 年の当調整池工事中の植物相調査で生育が確認されたのは在来種 13 種、外来種 6 種の計 19 種（青木 2011）、2012 年では在来種 37 種、外来種 27 種の計 64 種（浦野 2013）、2013 年では在来種 45 種、外来種 33 種の計 75 種（春原 2014）、2014 年では在来種 41 種、外来種 25 種の計 66 種（石田 2015）、2015 年度では在来種 59 種、外来種 39 種の計 98 種（関 2016）、昨年度では在来種 69 種、外来種 34 種の計 103 種（須永 2017）であったことから、植物の多様性が着実に増加しているといえる。当調整池が完成した 2012 年 3 月以降、着実に多様な植物が生育できる環境の形成が進んでいるといえる。2014 年度の調査において出現種数が少なくなっているのは、調査回数が 4 月、5 月の計 2 回であったためとみられる。

今年度の調査では、2012 年度以降の調査において毎年確認されている絶滅危惧種Ⅱ類のコギシギシは川辺で確認することができた。2013 年の調査でコギシギシを確認した土手では、2014 年に開花前に草刈をされてしまったため、2014 年度は確認することができなかった（石田 2015）。そこで 2015 年 4 月 17 日に、本研究室で 2014 年にから栽培していた当地産コギシギシを、本調整池の土手に移植した。2015 年 5 月の調査においては、この植栽個体および自生個体の結実を確認し種子を採取した（関 2016）。本年度も植栽個体、自生個体の結実を確認することができた。今後は草刈を、コギシギシの開花・結実後に行うように、管理計画を見直す必要がある。

本年度の調査では、カワヂシャ、ミゾコウジュをはじめとした準絶滅危惧種、絶滅危惧Ⅱ類の植物計 6 種を確認することができた。国指定で絶滅危惧Ⅱ類、県の指定で絶滅危惧ⅠB 類のキタミソウの生育が、今年度初めて確認された。キタミソウは男井戸川の川沿いに広く分布し、4 月 20 日と 5 月 16 日の 2 日間で 41 個体群の生育を確認することができた。川辺と開けた場所においてはカワヂシャの生育を確認した。カワヂシャは調整池の造成前の 2008 年、造成中の 2010 年、造成後の 2012 年、2013 年、2014 年、2015 年、2016 年の調査でも生育が確認されており（高橋 2009；青木 2011；浦野 2013；春原 2014；石田

2015；関 2016；須永 2017)、継続的に生育しているものと考えられる。また、2015年度の調査(関 2016)では2012年の調査(浦野 2013)を最後に確認できていなかったミゾウジュを住宅側の平地で確認することができた。2016年度の調査でも確認することができた(須永 2017)。本年度の調査でも確認することができた。

また、2012年9月に浦野ら(2013)が本調整池に移植したアサザは、開花が確認された。

調整池内の湿地では、ミコシガヤの生育を確認することができた。ミコシガヤは、2013年、2014年、2015年、2016年の調査でも生育が確認されており(浦野 2013；春原 2014；石田 2015；関 2016；須永 2017)、継続的に生育しているものと考えられる。

このように当地は多くの絶滅危惧種・在来種が生育しており、生物保護上の重要性が高い地域であるといえる。

一方で、オランダガラシ、キシユスズメノヒエ、セイタカアワダチソウなど今回の調査で確認された要注意外来生物は8種、特定外来生物は3種、県が指定する危険外来種は2種であった。また、園芸種については昨年の調査で7種が確認されたが(須永 2017)、今年の調査では1種が確認された。一方で、チョウジタデ、ニワゼキショウなど、これまでの調査では見られなかった新たな在来種も確認された。在来種の新規参入は生態系の再生として望ましいことであるが、外来種の新たな侵入は、生態系の破壊へとつながりかねない、危険な状況である。アドバンテスト・ビオトープ、チノー・ビオトープでは、継続的に外来種および園芸種の引き抜きまたは刈り取り除去を行って、一定の効果が出ている。当調整池においても、継続的に引き抜きまたは刈り取りを行っていくのが有効な管理方法であると考えられる。

以上の結果より、当調整池では絶滅危惧種をはじめとする在来種が生育しやすい環境が整備されつつある一方で、生態系に悪影響を与えるような外来種の侵入を防ぐことや繁茂を抑えることがこれまでの課題であったが、今後の課題でもある。当調整池は竣工直後より、群馬県伊勢崎市土木事務所および地域団体である「殖蓮地区自然環境を守る会」が共同して草刈などの管理を行っている。今後もこれらの組織と共同でモニタリング調査およびこれを基にした管理計画の提案を行っていく必要がある。

植物データベースの構築

各ビオトープで生育が確認された植物の分類学的情報、確認日時、写真、位置図、生態学的特性情報を、サーバ経由で閲覧・検索可能な植物データベースの構築を行った(図6、7)。

発芽の温度依存性実験

絶滅危惧種

コギシギシ

冷湿処理を施さず1ヶ月培養したチノー・ビオトープ産の種子の最終発芽率は10/6℃区で0%、17/8℃区で8%、22/10℃区で89.3%、25/13℃区で92.7%、30/15℃区で92%と22/10℃区以上の高い温度区で発芽率が高くなった。冷湿処理を施さず1ヶ月培養した男井戸川産の種子の最終発芽率は25/13℃区で69.3%となった(表6、図8、9)。2012年のチノー・ビオトープ産の種子を用いた実験では、冷湿処理後に培養したところ、最終発芽率は25/13℃、30/15℃の温度区で84.0%~84.7%となり、すべての温度区において約64~84%の範囲であった(都丸 2013)。また、冷湿処理を施さず、最適温度である25/13℃の温度区で培養したところ、最終発芽率は82.7%となったことから、本種の最終発芽率は培養温度と冷湿処理の有無に関して有意な差がみられなかったといえる(都丸 2013)。また、2014年のチノー・ビオトープ産、男井戸川産の種子を用いた実験では、冷湿処理を施さず、最適温度である25/13℃の温度区で培養したところ、最終発芽率はそれぞれ96.0%、83.3%といずれも高い値となった(石田 2015)。2012年の先行研究の結果は、冷凍保存前の種子を用いた実験結果である。その後コギシギシの種子を-80℃のディープフリーザーで保存し2014年の実験に用いている。一方2016年の実験(須永 2017)では冷湿処理を施さずに培養した男井戸川産の種子の最終発芽率は10/6℃区~30/15℃区全ての温度区で0.7%~22.0%と低い発芽率となった。

今回の結果から本種は高温でよく発芽し、低温では発芽しない、すなわち散布後速やかに発芽を開始し、冬には発芽しないものと考えられる。また、男井戸川産の種子は発芽率の低いものが多く、これは男井戸川に生育するコギシギシの個体数が少ないことが原因で近親交雑が起こっているためだと考えられる。そのため、男井戸川ではコギシギシの個体数を増やすことが必要となる。

また、コギシギシの種子は、-80℃のディープフリーザーで保存後も高い発芽率を維持していることが明らかになったといえる。このため本種の種子を人工的に保存して、個体群の維持を保障することも効果的と考えられる。

ミゾコウジュ

チノー・ビオトープ内で採取された種子を、冷湿処理を施さずに培養した種子の最終発芽率は10/6℃区で0%、17/8℃区で0%、22/10℃区で86.0%、25/13℃区で94.0%、30/15℃区で82.0%となった(表6、図10)。ミゾコウジュの種子を用いた発芽実験は、依田(2006)、高橋(2009)、青木(2011)、松田(2012)、浦野(2013)、関(2016)、須永(2017)が行っている。これらの先行研究のうちアドバンテスト・ビオトープ産またはチノー・ビオトープ産の種子を用いた実験では、高い温度区(22/10℃~30/15℃)で発芽率が高く(42.0%~94.6%)、10/6℃区での発芽率はいずれも7.3%以下であった。2016年の実験(須永 2017)

では板倉ニュータウン内の調整池（通称・朝日乃池）で採取された種子を用いたが、25/13℃区以上の高い温度区で発芽率が高く（42.0%～55.3%）、10/6℃区では0.0%であった。また、2014年の実験（石田 2015）では、チノー・ビオトープ産のミゾコウジュの種子を-80℃のディープフリーザーで保存し、発芽実験に用いたところ、最終発芽率は、25/13℃区で78.7%と高い値であった。

以上の結果から、本種の種子は生産・散布された翌年の夏までに大部分が発芽し、土壌シードバンクを形成しないものと推察される。高温での発芽率が高かったことから本種の発芽は地球温暖化の影響を受けないものと考えられる。しかし本種は生育中の個体群が何らかの破壊的な影響を受けると、土壌シードバンクからの再生は望めないことになる。そのため本種の野外での発芽適地の確保や、野外成育中の個体群の生長・生存を可能にするための、断続的な草刈管理などが不可欠といえる。ただし、本種は中規模な攪乱後によく見られるが、それは種子が光発芽特性を有していて、土壌中に埋まると発芽しないためという説もあるため、今後実験的な検証が必要である。

また、ミゾコウジュの種子は-80℃のディープフリーザーで保存後も高い発芽率を維持していることが明らかになった。このため本種の種子を人工的に冷凍保存して、個体群の維持を保障することも効果的と考えられる。

生育場所や周辺環境が最終発芽率や発芽に必要な最低温度に影響するのか、今後も実験を継続し、解明していく必要がある。

在来普通種

イヌトウバナ

冷湿処理を施さずに培養した種子の最終発芽率は10/6℃区で5.3%、17/8℃区で28.7%、22/10℃区で62.7%、25/13℃区で50.0%、30/15℃区で53.3%となった（表6、図11）。

イヌトウバナの種子を用いた発芽実験は、石田（2015）、関（2016）、須永（2017）が行っており、冷湿処理の有無にかかわらず22/10℃区以上で40%以上の発芽率となっている。

関（2016）の先行研究においては、2ヶ月間の冷湿処理を施して各温度区で培養した場合の最終発芽率が、30/15℃で67.3%、25/13℃で72.7%、22/10℃で72.7%、17/8℃で66.7%、10/6℃で60.0%になっており、低温度区で顕著な最終発芽率の促進がみられた。

以上の結果から、本種は野外においては、秋の種子散布後に冬を経験した後、春から夏にかけて発芽すると推察される。また本種の種子発芽に冷湿処理、すなわち冬を経験することは必須ではないが、低温でもよく発芽するようになるため、早春の発芽を促進する効果があると推察される。いずれにしても本種は永続的な土壌シードバンクを形成しないと考えられるため、保全のためには個体の生長を促進する管理を行うことが不可欠である。

本種は西榛名などにも生育する里山植物であるが、温暖化によって冬季が短縮されて

冷湿処理がかかりにくくなると、低温度域での発芽の促進がかかりにくくなって発芽時期が遅れてしまい、他の植物に被陰されて生長が阻害されることがありうると推察される。

イヌビエ

2ヶ月間の冷湿処理を施した後に培養した種子の最終発芽率は10/6℃区で6.0%、17/8℃区で82.0%、22/10℃区で91.3%、25/13℃区で79.3%、30/15℃区で88%となった。また、冷湿処理を施さず、25/13℃区で培養した種子の最終発芽率は46.0%であった（表6、図12、13）。冷湿処理を施すと10日ほどでほとんど発芽したが、冷湿処理を施さないと培養開始10日後から徐々に発芽していった。

狩谷（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、17/8℃区以上の温度区で2週間以内にほぼ100%が発芽するという結果を得ている。また、昨年の藤岡産の種子を用いた実験では、冷湿処理を施さずに培養した種子の最終発芽率は10/6℃区で0%、17/8℃区で0%、22/10℃区で0%、25/13℃区で1.3%、30/15℃区で0.7%（須永 2017）といずれも低い値であった。

以上の結果から、本種の種子における発芽の最適温度は17/8℃区以上であるが、30℃までの比較的幅広い温度条件下で発芽が可能と考えられる。ビオトープにおいて、本種は初夏から秋までの長期にわたって開花個体が見られるが、これは本種の発芽が比較的長期間にわたってさまざまな温度条件下で連続して起こっているためと推察される。

また、冷湿処理によって本種の種子発芽が促進されることから、野外において本種は冬を経験した後に発芽すると考えられる。温暖化によって冬季が短縮されて冷湿処理がかかりにくくなると、本種は発芽が著しく阻害されることがありうると推察される。

オトコエシ

冷湿処理を施さずに培養した種子の最終発芽率は10/6℃区で97.3%、17/8℃区で99.3%、22/10℃区で98.7%、25/13℃区で90.7%、30/15℃区で71.3%といずれの温度区でも高い値となった（表6、図14）。

須永（2017）の行った同様の実験においても、いずれの温度区も発芽率も高い値となっている。また、足助（2016）は25/13℃区での本種の最終発芽率が冷湿処理を施した種子では39%、施さない種子では56%と、冷湿処理を施すと発芽率が低下したことから、冷湿処理による本種の種子の発芽促進効果がないことを明らかにした。さらに冷湿処理、すなわち冬を経験すると、次のシーズンには25/13℃以上の高温条件により二次休眠が誘導される可能性があると考えられる。本種の成熟期は晩秋であり、野外で散布後の冬季～春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。または発芽せずに高温期を迎えると、一部

の種子の二次休眠が誘導されて、土壌シードバンクを形成する可能性があると思われる(須永 2017)。

以上の結果から本種は標高の高い草地が主な生育地であるが、高温条件においても発芽率の低下は引き起こされないことが明らかになった。また本種はシードバンクを形成せずに幅広い温度域でよく発芽するため、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。しかし、温暖化によって引き起こされる冬季の短縮は、二次休眠の誘導を阻害し、土壌シードバンクを形成しにくくするかもしれない。

キツネアザミ

冷湿処理を施さずに培養した種子の最終発芽率は10/6℃区で2.0%、17/8℃区で5.3%、22/10℃区で18.7%、25/13℃区で94.7%、30/15℃区で94.7%と25/13℃区以上の高温区で高い値となった(表6、図15)。

須永(2017)が2016年に本種の種子を2ヶ月間冷湿処理した後に同様の実験を行ったところ、22/10℃区以上の温度区で最終発芽率が約86~94%となった。25/13℃区以上では冷湿処理を施した種子と施さない種子とで発芽率に差は見られなかった。

以上の結果から本種には冷湿処理による発芽促進効果は認められない。本種は25/13℃以上の高温でよく発芽し、低温では発芽しないことから、散布直後の春から速やかに発芽を開始し、夏までにほとんどの種子が発芽して、土壌シードバンクは形成しないと考えられる。本種のように夏季までに発芽するのは春植物の典型でもある。温暖化による気温上昇、冬季の短縮は発芽季節を早め生長を促進する可能性がある。

チカラシバ

2ヶ月間の冷湿処理期間中に発芽した種子を除き、冷湿処理期間に発芽しなかった種子のみで培養実験を行った。2ヶ月間の冷湿処理を施した後に培養した種子の最終発芽率は10/6℃区で79.1%、17/8℃区で87.2%、22/10℃区で82.2%、25/13℃区で94.6%、30/15℃区で86.3%と、いずれの温度区においても高い値となった。17/8℃区以上の温度区では10日ほどでほとんどの種子が発芽したが、10/6℃区では培養開始から約20日過ぎてから発芽率が急激に上昇した。また冷湿処理を施さず、25/16℃区で培養した種子は培養開始から2週間ほど経ってから徐々に発芽し、最終発芽率は84.7%となった(表6、図16、17)。

狩谷(2004)はチカラシバ種子に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、17/8℃区以上の温度区で2週間以内にほぼ100%が発芽するという結果を得ている。また2016年の同種子を用いた実験では、10/6℃区で0%、17/8℃区で0.7%、22/10℃区で0%、25/13℃区で1.3%、30/15℃区で27.3%といずれの処理区でも発芽率はよくなかった。しかし実験終了後に23℃の実験室にシャーレを放置したところ、残りの種子がほ

ば全て発芽したため、本種が発芽するまでに2ヶ月以上かかるものであると須永（2017）は考察している。

今回の実験結果から、本種の種子において冷湿処理は最終発芽率には影響しないが、発芽速度が速くなる効果があると考えられる。また2016年産の種子を用いた2016年の実験では発芽率が低かったが、同じ種子を用いた今年の実験においては発芽率が高くなったことから、採取してすぐの種子は未熟なため発芽せず、発芽には後熟が必要な種であるといえる。成熟した種子は地温の低い冬季にも発芽する。また、冷湿処理によって本種の種子発芽速度が促進されることから、野外において本種は冬を経験した後に速やかに発芽すると考えられる。温暖化によって冬季が短縮されて冷湿処理がかかりにくくなると、本種は発芽速度が著しく低下し、その結果生育可能期間が短くなったり他の植物に被陰されて、生長が阻害されることがありうると推察される。

ナズナ

冷湿処理を施さずに培養した種子の最終発芽率は10/6℃区で5.3%、17/8℃区で2.0%、22/10℃区で59.3%、25/13℃区で82.0%、30/15℃区で46.7%となった（表6、図18）。

荒木(2011)は同様な実験を行っているが、最終発芽率は17/8℃区以下の温度区で0%、22/10℃区で約16%、それ以上の高い温度区では約35~39%となり、また冷湿処理を施すと発芽率が著しく低下することを明らかにしている。また、荒木(2011)は本種が高い温度区ほど発芽速度が速くなったことから、温暖化が進行した場合、一斉に発芽して発芽期間が短くなると推察している。

これらの結果から、本種は種子が成熟し散布された後、主に秋に発芽するが、発芽が遅れた種子は冬には発芽せずに二次休眠が誘導され、土壌シードバンクを形成すると考えられる。温暖化により発芽低下は引き起こされないが、温暖化が進行して一斉に発芽したときに攪乱のような土地を一掃する環境変化が生じた場合には実生が全滅し、土壌シードバンクも消滅してしまうことが懸念される。

ハルノノゲシ

冷湿処理を施さずに培養した種子の最終発芽率は10/6℃区で86.7%、17/8℃区で86.0%、22/10℃区で83.3%、25/13℃区で84.7%、30/15℃区で79.3%といずれの温度区の発芽率も高い値になった（表6、図19）。

本種の種子について冷湿処理を2ヶ月間施した実験（須永 2017）、冷湿処理を34日間施した実験（佐藤 2005）、いずれにおいても全ての温度区で高い発芽率を記録している。また、どちらの実験についても冷湿処理を施した場合と施さない場合の間に、種子の最終発芽率の有意な差はみられなかった。

以上の結果より本種の発芽に冷湿処理には必要ではなく、広い温度域で発芽するとみられる。したがって本種の種子は野外において、土壤中に十分な水分さえあれば冬季を含む年中発芽し、土壌シードバンクは形成しないと考えられる。本種は花期が3~10月と長く、ビオトープにおいても春だけでなく秋の植物相調査でも開花が確認されたように、長期にわたって開花個体が見られるが、これは本種の発芽が比較的長期間にわたってさまざまな温度条件下で連続して起こっているためと推察される。

外来種

ナガバギシギシ

本実験で用いた種子は、2008年にアドバンテスト・ビオトープで採取後、2008~2017年の間4°Cで冷蔵保存されていたものである。冷湿処理を施さずに培養した種子の最終発芽率は10/6°C区で98.7%、17/8°C区で97.3%、22/10°C区で99.3%、25/13°C区で97.3%、30/15°C区で99.3%とすべての温度区で高い値となった(表6、図20)。三輪(2017)の同一の種を用いた実験においても全ての温度区において96%以上の発芽率となっている。また柴宮(2009)は9年前に同一の種子を用いて同様な実験を行っているが、最終発芽率はほぼ100%と、今回の結果と同様である。

これらの結果から、9年間4°Cで冷蔵保存した本種の種子において、劣化はほとんどみられないといえる。また、本種は土壤中に十分な水分さえあれば地温の低い冬季にも発芽し、生長を開始するものと考えら、永続的土壌シードバンクを形成する可能性は非常に少ないと推察される。すなわち、種子を生産する前に刈り取りや引き抜くことにより、除去することが効果的であると考えられる。一方、永続的な土壌シードバンクを形成しないとはいえ、もしも野外で種子が乾燥状態でおかれるなら、9年以上にわたって発芽可能な状態であることができるとも考えられる。

異なる光条件化で栽培した植物の生長解析

生長解析結果は表 および図22~29に示す。チカラシバ以外の種は岡村氏との共同研究であるため、これらの結果の詳細な考察は、岡村(2018)に委ねる。

在来普通種

チカラシバ

チカラシバ実生の個体乾燥重量は、初回サンプリング時に0.160gであったものが、21日後の最終サンプリング時には0.165g(3%区)~0.414g(100%区)となった(表7)。

相対生長速度(RGR、 $gg^{-1}day^{-1}$)は、相対光量子密度3%区で-0.007、9%区で0.012、13%区で0.018、100%区で0.045(表8、図27)と光条件が良いほど有意に大きい値($p < 0.0001$)

となり、3%区では生長しなかった。すなわち、本種は明るいところで良く生長し、暗い環境下では著しく生長が悪くなると考えられる。

光合成活性を表す純同化率 (NAR, $\text{gg}^{-1}\text{day}^{-1}$) は3%区では-0.364、9%区では0.787、13%区では1.184、100%区では3.975 (表8、図27) と光条件が良いほど有意に大きい値 ($p < 0.0001$) となった。チカラシバはC4植物であるがNARの値は全体的に小さくなった。

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、各区間で有意な差は見られなかった。各個体の葉の厚みを葉面積/重量ベースで表す比葉面積 (SLA, m^2g^{-1}) は3%区で0.056と最大となり、その他の区では約0.040となった。以上の結果から本種のRGRが光条件の暗い区ほど低くなった要因はNARの低下であると考えられる。

器官別重量比のうち葉の重量比であるLWRは、3%~13%区で約40%となり、100%区で約25%となった。茎の重量比であるSWRは処理区間で有意さはなく約20%となった。根の重量比であるRWRは3%区~13%区で約40%、100%区で約53%となった。

SLA、LAR、LWRのこれらの反応は、光が不足して光合成活性が低下した際に、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特性である。しかし本種においては3%区においてLAR、LWRの値が十分ではなく、NARの低下を補うことができず、RGRの低下を引き起こしてしまったと考えられる。

以上の結果から、本種は裸地的な明るいところで良く生長するが、他の植物が繁茂し、光条件が劣悪な環境下では生長が悪くなると考えられる。そのため、本種の十分な生育のためには周辺の植物の刈り取りを行って、陽当たりのよい環境を作り出すことも重要であるといえる。

異なる温度条件下で栽培した植物の生長解析

栽培時のガラス温室内の気温を図19に示す。植物の栽培時の気温はおおむね20°C~40°Cの範囲内にあり、平均で約1.6°C、外気温より高かった。統計解析の結果は表11に示す。

外来植物

外来植物種の生長解析結果は、表8および図30~34に示す。アメリカセンダングサは岡村氏の実験によるものであり、オオブタクサは長倉氏の実験によるものである。

相対生長速度 (RGR) がコントロール区に比べて1.6°C上昇区で有意に低くなった種はナガバギシギシのみだった ($P < 0.01$)。アメリカセンダングサおよび菅平産、西榛名産、前橋産いずれのオオブタクサについてはコントロール区と1.6°C上昇区の間には有意な差は見られなかった。

しかし、いずれの外来種においても純同化率 (NAR) はコントロール区に比べて1.6°C上

昇区で有意に低くなり ($P < 0.01$)、これを葉面積比 (LAR) の増加が補って ($P < 0.01$)、結果的に RGR が低下しなかったものと考えられる。ナガバギシギシは葉面積比 (LAR) が増加せず NAR の低下を補うことができなかつたため、RGR が低下したものと考えられる。須永 (2017) が+2.4°Cの気温上昇下で行った同様の実験では、ナガバギシギシは NAR の増加により RGR が促進され、オオブタクサ (前橋産)、アメリカセンダングサは NAR の低下により RGR が低下するという結果になっている。温暖化のスケールが+1.6°Cであるか+2.4°Cであるかで、種によってその影響が全く異なるといえる。

ビオトープに生育する在来植物

ビオトープに生育する在来植物の生長解析結果は表 8 および図 35~42 に示す。フジバカマ (アドバンテスト産) については岡村氏、長倉氏、馬氏の共同実験によるものである。

相対生長速度 (RGR) がコントロール区に比べて 1.6°C 上昇区で有意に高くなった種は、フジバカマ (アドバンテスト産) であった ($P < 0.01$)。一方で RGR がコントロール区に比べて 1.6°C 上昇区で有意に低くなった種はイヌビエであった ($P < 0.01$)。コギシギシ、ミゾコウジュ、オトコエシ、キツネアザミ、チカラシバ、ハルノノゲシいずれにおいても RGR はコントロール区と 1.6°C 上昇区の間には有意な差はなかつた。

イヌビエの純同化率 (NAR) はコントロール区に比べて 1.6°C 上昇区で有意に低下しており ($P < 0.01$)、葉面積比 (LAR) はコントロール区に比べて 1.6°C 上昇区で増加していた ($P < 0.01$)。このことから葉面積は増加したものの光合成活性の低下を補うことができず、イヌビエの RGR は低下したと考えられる。

須永 (2017) が+2.4°Cの気温上昇下で行った同様の実験ではオトコエシ、ミゾコウジュは今回の実験同様に気温上昇の影響を受けないという結果であった。この 2 種については+1.6°C~+2.4°Cの上昇であれば気温上昇の影響を受けないといえる。

関 (2016) が+2.4°Cの気温上昇下で行った同様の実験では、コギシギシは RGR の値がコントロール区で 0.112、2°C 上昇区で 0.094 となり、NAR はコントロール区で 6.802、2°C 上昇区で 3.769 といずれも 2°C 上昇区の値がコントロール区の値よりも低く、温度上昇による NAR の低下により RGR が低下するという結果であった。今回の 1.6°C 上昇実験では、光合成活性 (NAR) の値はコントロール区に比べて 1.6°C 上昇区で有意に低下したが ($P < 0.01$)、葉面積比 (LAR) がこれを補い ($P < 0.01$)、結果的に RGR は低下しなかったと考えられる。温暖化のスケールが+1.6°Cであるか+2.4°Cであるかで、コギシギシへの影響が全く異なるといえる。

イヌビエは C_4 植物であるが、水生植物のため気温が高いと水分欠乏に陥り易く、このため生長が阻害されると推察される。同じ C_4 植物であるチカラシバは、乾燥しやすい草原の植物であるため+1.6°Cの気温上昇の影響を受けない推察される。

須永（2017）が+2.4℃の気温上昇下で行った同様の実験では、キツネアザミおよびハルノゲシは温度上昇による NAR の低下により RGR が低下するという結果であった。今回の +1.6℃の気温上昇下での実験では、キツネアザミ、ハルノゲシいずれも光合成活性 (NAR) は低下せず、RGR も低下しないという結果であった。温暖化のスケールが+1.6℃であるか+2.4℃であるかで、この2種への影響が全く異なるといえる。

アドバンテスト産のフジバカマは今回初めて温暖化実験に用いたが、須永（2017）が+2.4℃の気温上昇下で、アドバンテストに近い矢場川産のフジバカマについて同様の実験を行ったところ、気温上昇による生長促進効果はみられないという結果であった。温暖化のスケールが+1.6℃であるか+2.4℃であるかで、フジバカマへの影響が全く異なるといえる。

里地・里山（標高 700m 以下）に生育する在来植物

標高が 700m 以下の里地・里山に生育する在来植物の生長解析結果は表 8 および図 43～49 に示す。キバナアキギリ、は諏訪間氏の実験、トチカガミは長倉氏の実験、は岡村氏、長倉氏、管氏の共同実験、は岡村氏と長倉氏の共同実験によるものである。

相対生長速度 (RGR) がコントロール区に比べて 1.6℃上昇区で有意に低くなった種はであった ($P < 0.01$)。の純同化率 (NAR) の値はコントロール区に比べて+1.6℃区で有意に低下しており ($P < 0.01$)、光合成活性 (NAR) の低下が RGR の低下の原因と考えられる。

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

キバナアキギリ、トチカガミでは RGR に処理区間の有意な差は認められなかった。いずれの植物についても純同化率 (NAR) の値はコントロール区と+1.6℃上昇区との間に有意差はなかった。

須永（2017）が+2.4℃の気温上昇下で行った同様の実験では、は温度上昇による NAR の低下により RGR が低下するという結果であった。本種は水生植物のため気温が高いと水分欠乏に陥り易く、このため生長が阻害されると予測されたが、温暖化のスケールが+1.6℃であるか+2.4℃であるかで、本種への影響が全く異なるといえる。また須永（2017）の実験では、については本研究結果と同様の結果が得られている。

植物の生長に対する地球温暖化の直接影響は種ごとに異なるが、おおまかには植物の起源と生育場所によって影響が整理できると考えられる(須永 2017)。

すなわち標高が 700m 以下の里地・里山およびビオトープに生育する在来種の多くは、1.6°C の気温上昇により NAR が影響を受けず、生長の低下を引き起こすことはない。イヌビエおよびチカラシバは高温乾燥に強いと言われるイネ科の C₄ 植物であり、チカラシバは気温上昇の影響を受けないという結果になった。一方イヌビエは気温上昇の影響を受けるという結果になり、特性の違いが明らかになった。これはイヌビエが湿地性の植物であるため、気温が上昇するすなわち乾燥しやすい環境では生長が阻害されるものと考えられる。

も湿地性植物であり、先行研究の結果では 2.4°C 程度の気温上昇では生長低下を引き起したが、1.6°C の上昇では光合成系は阻害されず、生長低下も引き起こされなかった。すなわち湿性環境に生育する植物でも種によって 1.6°C の気温上昇で生長が低下するものとそうでないものとに分かれる結果になった。

トチカガミはチノー・ビオトープ内のトンボの池で育成されているが、アサザに被陰され池の水温が低くなり、生育不良となっている。1.6°C 温度上昇により、生長が悪くなっていることから、むしろ温度が低い環境のほうが生長低下を引き起こす可能性も考えられる。

湿性環境に多く生育するオオブタクサ(西榛名産、前橋産)は 1.6°C 気温上昇により NAR は阻害されたが、LAR など葉の増加により RGR の低下は引き起こされなかった。同様に湿性環境に多く生育するアメリカセンダングサ、オオブタクサ(菅平産)については 1.6°C の気温上昇でも NAR は阻害されなかった。湿性環境に生育する外来植物は 1.6°C の気温上昇では RGR の低下が起こらなかったものの、1.6°C の気温上昇で NAR が低下するものと低下しないものとで分かれる結果となった。

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

毎木調査

チノー・ビオトープ内において、コナラ 253 本、クヌギ 91 本、その他の樹木 135 本、合計 459 本の成木の DBH と樹高を計測した。2017 年の毎木調査の結果、これらの樹木の樹高分布は最大で 12.7m、最小で 2.94m で、5~10m の階級にある個体が最も多かった(図 51)。DBH 分布は最大で 28.4cm、最小で 3.1cm で、10cm~15cm の階級にある個体が最も多かった(図 52)。

チノー・ビオトープ内における立木密度は、本ビオトープの総面積が 1.0119ha であるの

で、1haあたり約456.3本と算出された。

樹木の現存量と炭素固定量の推定

チノー・ビオトープにおけるコナラの個体現存量は最大369kgで、50kg以下の階級が最も多かった(図53)。クヌギの個体現存量は最大168.5kgで、50kg以下の階級が最も多かった(図53)。シラカシやアラカシなどを含むその他の樹木の個体現存量は最大162.3kgで、50kg以下の階級が最も多かった(図53)。ビオトープ全体の樹木総現存量は24.4tonとなった。

単位面積あたりの樹木現存量はコナラ17.07ton ha⁻¹、クヌギ3.76ton ha⁻¹、その他3.28ton ha⁻¹で、これらの総和である単位面積あたりの樹木総現存量は24.12ton ha⁻¹となった(表9)。

単位面積あたりの樹木総現存量の値24.12ton ha⁻¹に、炭素係数0.5を乗じると、炭素固定量は12.06tonC ha⁻¹となり、これに本ビオトープの面積を乗じた12.2tonCが本ビオトープ内に樹木として現在蓄積されている炭素量ということになる。

2012年の毎木調査(阿部 2013)をもとに算出されたチノー・ビオトープにおけるコナラの単位面積あたりの樹木現存量の値は22.7ton ha⁻¹であり、5年経過した2017年の単位面積あたりの樹木現存量は約1.4ton ha⁻¹増加したことになり、炭素量に直すと単位面積あたり約0.7tonC ha⁻¹が増加したことになる。これは、樹木が生長したあるいは樹木の増減があったためとみられる。また、2012年の樹木総現存量は7.64ton、2017年の樹木総現存量は24.4tonであり、16.76ton増加している。総現存量が大幅に増えた要因として森林面積が約3倍に増えたこと、樹木が生長したこと、追加で植栽した樹木があったことが挙げられる。2012年から2017年までの5年間で、コナラ単木は平均で39.21kg生長したことになる。これを1年あたりに直すとコナラ単木の生長速度は平均で約7.84kg yr⁻¹となる。2012年から2017年までの5年間の、単木の生長速度と2017年時点での樹高・DBHとの関係は、曲線的な関係になった(図55)。

阿部式(2013)を用いて推定した2017-2018年における年間純生産速度は、コナラが3.13ton ha⁻¹ yr⁻¹で、クヌギが0.99ton ha⁻¹ yr⁻¹で、その他が0.63ton ha⁻¹ yr⁻¹となり、合計4.75ton ha⁻¹ yr⁻¹となった。阿部式(2013)コナラの人工栽培の結果に基づいて策定されているため、この年間純生産速度の推定値は、生育状態のよい場合の潜在的最大値と考えた方がよいと思われる。

これまでに計測されている森林の純生産速度は、日本の自然林では15~22ton ha⁻¹ yr⁻¹程度、熱帯多雨林で28.6ton ha⁻¹ yr⁻¹の範囲にある(依田 1971)ことから、本ビオトープの林地の推定最大純生産速度はこの約1/4~1/5に相当すると考えられる。さらに、推定最大純生産速度の値4.75ton ha⁻¹ yr⁻¹に、炭素換算係数の0.5を乗じると、推定最大年間

炭素固定速度は $2.38 \text{ ton ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ となり、これに調査面積を乗じた 2.4 tonC yr^{-1} が、チノー・ビオトープ内で行われている推定最大年間炭素固定速度ということになる（表 10）。

一方、阿部（2013）が 2012 年に実測した値と本研究結果との差分から算定した純生産速度の実測値は $0.28 \text{ ton ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 、年間炭素固定速度は $0.14 \text{ ton ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ となり、これに調査面積を乗じた $0.14 \text{ tonC yr}^{-1}$ が、チノー・ビオトープでこの 5 年間に実際に行われていた年間炭素固定速度ということになる（表 10）。

これらの結果から、この 5 年間、本ビオトープの森林全体としては活発な生長を続け、プラスの純生産をあげていると考えられる。しかしその生産速度は、樹木のサイズから推定される最大値と比べると極めて低い。これは樹木植栽直後の生育不良によるか、あるいは阿部式自体が過大評価であるためと推察する。今後 5 年、10 年単位で調査を行い、より正確な炭素固定量の推定を行うことで、森林による CO_2 吸収が地球温暖化対策にどの程度役立っているのか、より精緻に算定することが可能になる。

結 論

本研究により、大型ビオトープは適正に管理育成することによって絶滅危惧種の保護や生物多様性の保全という機能を発揮できる可能性が高いことが明らかになった。本来その地に根付くべき地域生態系としての機能を大型ビオトープが有するようになるまでは、できるだけ人為的な在来生物の導入を行わず、自然に移入・定着できるようになるまで管理することが望ましい。そのようにして導入した生物が本来構築されるべき生態系を改変してしまう恐れがあるからだ。生物の自然移入や定着を促すためには、外来種の駆除及び物理化学的環境条件の多様化などを行う必要がある。そして、地球の絶滅危惧種の系統維持や生物多様性の保全を実現するために、移植などを行うことが想定される。その際には対象種の生態学的特性、すなわち結実、発芽、生長特性を解明し、自生地とビオトープの生育条件とを比較して移植後の健全な育成が実現するようにしなければならない。重要なことは周囲の自然から独立させず、調和できるようにすることである。特定の種を特別扱いしすぎると全体の多様性が失われてしまう。ビオトープは、人為的な生物種の導入ではなく、在来種が自然に移入・定着するような管理と、外来種の積極的駆除といった二つの育成管理を同時に両立させていくことにより、生物多様性と地域特性を持つ自然を守ることが可能になる。

チノー・ビオトープでは在来種 85 種、外来種 40 種の計 125 種の生育が確認された。本ビオトープでは 2011 年度から継続して 150 種前後を確認している。

生育が確認できた種の中には竣工直後から確認されている絶滅危惧Ⅱ類のコギシギシ、2011 年度から確認されている準絶滅危惧種のカワヂシャとミゾコウジュの生育が確認できた。園芸種は 2011 年度で 17 種(松田 2012)と目立っていたが、2013 年度の調査では 5 種、2014 年度の調査では 3 種、今年度は 3 種と減っている。引き抜き除去を継続した成果であり、今後も継続する必要がある。特に群馬県危険外来種のナガミヒナゲシについては注視しなければならない。

男井戸川遊水池で在来種 72 種、外来種 31 種の計 103 種の生育が確認された。2012 年の調整池完成前の 2010 年の調査では 19 種確認できたのみであり、多様な植物が生育できる環境の形成が進んでいる。今年度は初めて絶滅危惧Ⅱ類のキタミソウの生育が確認された。また、2012 年より継続した絶滅危惧Ⅱ類のコギシギシと準絶滅危惧種のカワヂシャを確認した。加えて準絶滅危惧種のミゾコウジュも確認することができ、その他の希少種も含めて今後定着することを期待したい。

ビオトープに生育するコギシギシ、ミゾコウジュ、イヌビエ、オトコエシ、キツネアザミ、チカラシバ、ハルノノゲシを異なる光環境下で栽培し生長解析を行ったところ、光環境が良好であれば良く生長することが明らかになり、他の植物に被陰されないよう継続的

な周辺管理が不可欠である。

外来植物である、アメリカセンダングサ、オオブタクサ、ナガバギシギシを異なる温度条件下で栽培し、生長解析を行った結果、1.6°Cの気温上昇で生長の促進が見られる種はなかった。また、ビオトープ内で見られる在来種および里地・里山（標高 700m 以内）に生育する在来種については、ほとんどの種が 1.6°Cの気温上昇では生長が阻害されなかったが、湿地性植物のイヌビエとフジバカマの 2 種のみ 1.6°Cの気温上昇で生長の阻害が確認された。

以上のことから、温暖化による気温上昇の影響を受けにくいとされる外来植物も影響を受けやすいとされる在来植物も 1.6°Cの気温上昇であれば、両者とも生長の促進あるいは阻害が起こるほどの影響は受けないといえる。しかし、さらなる気温上昇が起こり、温暖化による気温上昇の影響を受けにくい外来植物と、影響を受けやすい植物の多い在来種が競合する際は、外来植物が有意であり、在来植物に悪影響を及ぼしかねない。こうした競合性の強い外来植物から希少種を保護するためには、人に手による生育環境の維持・管理が必要不可欠なものとなる。

チノー・ビオトープにおいて行った毎木調査の結果から、本ビオトープの年間炭素固定量は 2.4tonC yr⁻¹であることが明らかになった。したがって森林全体としては、CO₂を蓄積している可能性が非常に高いことを示唆するものであり、今後の地球温暖化防止対策策定において、必ず参照すべき重要なものであるといえる。しかし、単に植林を行うことにより森林生態系の CO₂ 吸収量が増大し、地球温暖化対策になりうるという考え方は安易であるといえる。なぜなら、森林生態系が全体として CO₂ 吸収をしているか否かは、林床におけるリター分解と土壌からの CO₂ 放出に大きく依存しているからである。もしも、温暖化や不適切な森林管理によって林床の地温も上昇するならば、リター分解と土壌 CO₂ 放出が加速されて、森林生態系の CO₂ 収支がマイナスに傾く危険性があるからである。また、CO₂ 吸収源として算定されるのは、今のところ「植林」および「管理された森林」であるが、これを重んじるばかりに、手をつけない方がよい天然林に手を加えるようなことは避けるべきである（藤森 2004）。すなわち CO₂ 吸収機能を高めることだけが先行して、森林生態系のそれ以外の重要な機能（水源涵養や土壌流失防止、生物多様性保全など）を犠牲にしないように注意する必要がある。

生物相が変化し、生物多様性がすでに失われた自然を復元することは容易なことではない。しかし本研究により、ビオトープなどの自然再生を図る試みは、「絶滅危惧種などの生物多様性の保全機能」と、「炭素固定などの環境安定化機能」を再生することができる可能性が高いことが明らかになった。これらを実現し、機能を拡大するためには、地域特有の自然や立地環境の復元を目指した育成管理、さらには人の手による継続的な管理が必要不可欠である。また、森林生態系における CO₂ 固定量をより拡大するためには、森林を破壊・

劣化させることなく、森林の質を向上させていくことが地球温暖化対策として重要である。

ビオトープの育成管理は、地域の自然の自己回復力に人間が手を添えるという創造作業の一局面である。持続的な自然再生を実現するためには、見た目の奇抜さや公園利用価値のある庭園や緑地帯を目指して作るべきではない。多様なタイプのビオトープが作られることは望ましいが、そこに生物の持続できる空間が確保されていなければ、ただの人間の自己満足で終わってしまう。地域特有の自然や立地環境の復元を目指してビオトープを育成管理し、持続的にモニタリングすることが不可欠である。同時に、ビオトープ利用者や地域住民への情報提供を行えば、ビオトープに対する理解や関心を深め、今後更なる成長を共に見守っていくことにつながり、ひいては一人一人の環境問題への意識が高まっていくことが期待される。

また今後 100 年以内に、ある程度（地球平均で 1~3℃）の温暖化は避けがたいという悲惨な予測もなされている。したがって、防止対策に加えて、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り、そのためには野生植物種それぞれが温暖化から受ける諸影響とそのメカニズムを研究し、知見を増やしていくことが必要不可欠である。さらに、今後は植生を構成している種間の相互関係が温暖化によってどのように変化するのかを解明することで、植物種多様性の低下を防止し生態系の崩壊を食い止め、温暖化対策を真に実効的なものにすることができると考えられる。

謝辞

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

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

チノー・ビオトープの調査におきましては、株式会社チノー機器事業環境開発課・高橋哲夫氏、小林考旨氏にご協力頂きました。

男井戸川調整池の調査におきましては、群馬県議会議員・環境カウンセラー・臂泰雄氏、殖蓮地区自然環境を守る会・会長・膳福一氏、赤城自然塾・副代表・下條茂夫氏をはじめ、多くの会員の方々、地域の皆様にご指導・ご協力頂きました。

また、同時期に卒業論文に取り組んだ、諏訪間氏、岡村氏、櫻井氏、長倉氏をはじめとする、研究室の学生の皆様のご指導・ご協力なしには決して完成しえ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

- Andrew S. Pullin (2004) 「保全生物学 生物多様性のための科学と実践」丸善株式会社 4-5
- 足助直樹 (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情報社会学科卒業論文
- 阿部大輔 (2012) 「平地雑木林の有する CO2 固定能力の将来シミュレーションに関する基礎研究」群馬大学社会情報学部情報社会学科卒業論文
- 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情報社会学科卒業論文
- 内嶋善兵衛 (1990) 「ゆらぐ地球環境」合同出版株式会社 194-195
- 企業が取り組む生物多様性研究会 (2010) 「国内先進企業 11 社と NPO、自治体、大学が語る 企業が取り組む「生物多様性」入門」日本能率協会マネジメントセンター 17-18
- 気候ネットワーク (2000) 『よくわかる地球温暖化問題』中央法規出版株式会社 18-19 21-22
- 近自然研究会 (2004) 『環境復元と自然再生を成功させる 101 ガイド ビオトープ』誠文堂新光社 15
- 草刈秀紀 (2010) 『知らなきヤバイ！生物多様性の基礎知識-いきものと人が暮らす生態系を守ろう』日刊工業新聞社 109-110 114-115 133-135
- ゴルファーの緑化促進協力会 (2000) 「陸上生態系による温暖化防止戦略」博友社 11 43
- 左巻健男、平山明彦、九里徳泰 (2005) 『地球環境の教科書 10 講』東京書籍株式会社 176
- 杉山恵一、重松敏則 (2002) 『ビオトープの管理・活用 -続 自然環境復元の技術-』朝倉書店 5
- 鈴木由希 (2010) 「大型ビオトープの有する生態系機能に関する基礎研究」群馬大学社会情報学部情報社会学科卒業論文
- 須永勇樹 (2017) 「群馬県内のビオトープに生育する植物に対する地球温暖化の諸影響に関する生態学的研究」群馬大学社会情報学部情報社会学科卒業論文
- 鷺谷いづみ (1999) 『新・生態学への招待 生物保全の生態学』共立出版株式会社 22 23-25 61
- 鷺谷いづみ (2001) 『生態系を蘇らせる』日本放送出版協会 130-131 133
- 鷺谷いづみ (2010) 『〈生物多様性〉入門』岩波書店 13 21-22 29 34-37 44-45 58
- 鷺谷いづみ、鬼頭秀一 (2007) 『自然再生のための生物多様性モニタリング』東京大学出版

会 4 15

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 28-29 39-40

谷津義男、田端正広 (2004) 『自然再生推進法と自然再生事業』ぎょうせい 2 15-16 112

養父志乃夫 (2006) 『ビオトープ再生技術入門 ビオトープ管理士へのいざない』農村漁村文化協会 19

気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第 5 次評価報告書第 1 作業部会報告書

世界銀行 (2015) Immediate Push on Climate-Smart Development Can Keep More than 100 Million People Out of Poverty

引用ウェブサイト

気象庁気候変動監視レポート 2016

http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/monitor/2016/pdf/ccmr2016_all.pdf

ICUN ホームページ

<http://www.iucnredlist.org>

ICUN 日本委員会ホームページ

<http://www.iucn.jp/images/stories/protection/pdf/redlist2010all.pdf>

林野庁ホームページ

http://www.rinya.maff.go.jp/j/sin_riyou/ondanka/

外務省ホームページ

<http://www.mofa.go.jp/mofaj/files/000197312.pdf>

http://www.mofa.go.jp/mofaj/ic/ch/pagelw_000117.html

<http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/kankyo/kiko/torikumi.html>

資源エネルギー庁ホームページ

<http://www.enecho.meti.go.jp/about/special/tokushu/ondankashoene/pariskyotei.html>

環境省ホームページ

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

<http://www.env.go.jp/nature/saisei/law-saisei/gaiyo.html>

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

<http://www.biodic.go.jp/biodiversity/activity/policy/valuation/service.html>

http://www.biodic.go.jp/biodiversity/about/biodiv_crisis.html

国立環境研究所ホームページ

<http://www.cger.nies.go.jp/cgernews/201406/283002.html>

国立環境研究所 侵入生物データベース

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

国土交通省ホームページ

http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_fr_000104.html

農林水産省ホームページ

http://www.maff.go.jp/j/nousin/kankyo/kankyo_hozen/

日本生態系協会ホームページ

<http://www.ecosys.or.jp/aboutus/explanation/>

経済産業省ホームページ

http://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/pdf/ontaikeikaku/honbun1.pdf

http://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ontaikeikaku/ontaikeikaku.html

http://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/mono/bio/Seibutsukanri/

全国地球温暖化防止活動推進センター (JCCA)

http://www.jcca.org/trend_world/unfccc/unfccc01.html

WWF ジャパンホームページ

<https://www.wwf.or.jp/activities/2017/09/1382606.html>

写真・表・図



写真1. チノー・ビオトープの風景

(上) 2017年4月21日撮影

(下) 2017年5月23日撮影



写真 2. 男井戸川調整池ビオトープの風景

(上) 2017年5月16日撮影。

(下) 2017年9月27日撮影。



写真3. チノー・ビオトープの絶滅危惧植物

(上) ビオトープ内に生育するコギシギシ。2017年5月23日撮影

(下) ビオトープ内に生育するミゾコウジュ。2017年5月23日撮影



写真 4. 男井戸川調整池ビオトープの絶滅危惧種

(上) ビオトープ内に生育するカワヂシャ。2017年5月16日撮影

(下) ビオトープ内に生育するキタミソウ。2017年5月16日撮影

表 1. 各調査地の調査日一覧

植物相調査

チノー・ビオトープ (計 4 回)	2017 年 4 月 21 日、5 月 23 日、6 月 26 日、9 月 27 日
男井戸川調整池 (計 3 回)	2017 年 4 月 20 日、5 月 16 日、9 月 27 日

毎木調査

チノー・ビオトープ (計 6 回)	2017 年 6 月 26 日、7 月 24 日、9 月 4 日、9 月 9 日、9 月 26 日、11 月 6 日
----------------------	--

表 2. 発芽の温度依存性実験スケジュール表

科名	和名	学名	生活型	採取日時	採取場所	発芽処理	実験開始日～終了日	実験期間	備考
アザミ科	オオアザミ	<i>Ciguad hancei-juridensis</i>	多年草	2009年5月4日	群馬大学荒牧学生センター内	6%	5月13日～7月9日 20/18℃±5 月16日～7月9日	28日間(25日 間)	10/8℃、17/8℃、 22/3℃、25/13℃、 26/15℃(水筒で発酵)
オウゴン科	オウゴン	<i>Psidium ciliatum</i>	多年草	2015年11月4日	青森県				
オウゴン科	オウゴン	<i>Hamamelis laurifolia</i>	落葉草	2015年4月25日	千葉県・千葉県				
オウゴン科	オウゴン	<i>Rhus nipponica</i>	多年草	2008年3月24日	千葉県・千葉県				
オウゴン科	オウゴン	<i>Sida rubra</i>	落葉草	2008年4月19日	千葉県・千葉県				
オウゴン科	オウゴン	<i>Sambucus edamensis</i>	落葉草	2015年4月25日	千葉県・千葉県				
オウゴン科	オウゴン	<i>Chrysothamnus alternifolius</i>	多年草	2014年10月18日	千葉県・千葉県・千葉県				
オウゴン科	オウゴン	<i>Rhus ciliata</i>	多年草	2008年4月19日	千葉県・千葉県・千葉県				
オウゴン科	オウゴン	<i>Psidium ciliatum</i>	多年草	2014年10月20日	青森県				
オウゴン科	オウゴン	<i>Prunella adspersoides</i>	多年草	2014年10月20日	群馬大学荒牧学生センター内				
オウゴン科	オウゴン	<i>Rhus nipponica</i>	多年草	2008年3月25日	千葉県・千葉県	5月24日～12月28日	28日間	25/13℃(水筒)で発酵	

冷温処理あり

科名	和名	学名	生活型	採取日時	採取場所	発芽処理	実験開始日～終了日	実験期間	備考
オウゴン科	オウゴン	<i>Psidium ciliatum</i>	多年草	2014年10月20日	群馬大学荒牧学生センター内	6/2ヶ月間	7月11日～9月11日	63日間	10/8℃、17/8℃、 22/3℃、25/13℃、 26/15℃(水筒)で発酵

表 3. 栽培実験スケジュール表

科名	和名	学名	生活型	採取日時	採取場所	植え替え日	栽培開始日	サンプリング日	備考
イネ科	イヌビエ	<i>Echinochloa crus-galli</i>	一年草	2016年10月20日	藤岡市	2017年7月4日	2017年7月21日	2017年8月4日	異なる4つの光条件下、1つの温度条件下で栽培
イネ科	チカラシバ	<i>Pennisetum alopecuroides</i>	多年草	2016年10月20日	荒牧	2017年7月28日	2017年8月10日	2017年8月31日	
オミチエシ科	オトコエシ	<i>Patrinia villosa</i>	多年草	2015年11月4日	西條名	2017年6月20日	2017年6月27日	2017年7月18日	
キク科	キツネアザミ	<i>Hemistepta lyrata</i>	越年草	2015年5月25日	チノー・ビオトーブ	2017年6月27日	2017年7月4日	2017年7月21日	
キク科	ハルノアザミ	<i>Sonchus oleraceus</i>	一～二年草	2015年5月25日	チノー・ビオトーブ	2017年6月27日	2017年7月4日	2017年7月21日	
シソ科	ミゾコウジュ	<i>Salvia plebeia</i>	越年草	2016年6月19日	チノー・ビオトーブ	2017年7月7日	2017年7月21日	2017年8月4日	
タデ科	コギシギシ	<i>Rumex nipponicus</i>	多年草	2016年5月24日	チノー・ビオトーブ	2017年6月19日	2017年6月19日	2017年7月11日	
タデ科	チガハギシギシ	<i>Rumex crispus</i>	多年草	2008年6月19日	チノー・ビオトーブ	2017年6月19日	2017年6月19日	2017年7月11日	

表 3 (続) . 栽培実験スケジュール表
 諏訪間氏が行った栽培実験スケジュール一覧

科名	種名	植え替え日	実験開始日	サンプリング日	実施光条件(および温度条件)区				
					100%	13%	9%	3%	温室(+1.6℃)
		2017年7月4日	2017年7月4日	2017年8月3日 2017年8月30日	○	○	○	○	○
シソ科	キバナアキギリ	2017年8月30日	2017年8月30日	2017年9月6日 2017年9月27日	○	○	○	○	○
		2017年9月8日	2017年9月8日	2017年9月20日 2017年10月11日	○	○	○	○	○

岡村氏が行った栽培実験スケジュール一覧

科名	種名	学名	生活型	採取日時	採取場所	植え替え日	栽培開始日	サンプリング日	備考
イヌ科	イヌビエ	<i>Echinochloa crus-galli</i>	一年草	2016/10/20	陸奥市内	2017/7/4	2017/7/21	2017/8/4	異なる4つの 光条件下、1 つの温度条件 下で栽培
オミナエシ科	オミナエシ	<i>Pipturus villosus</i>	多年草	2015/11/4	西條名地域	2017/6/20	2017/6/27	2017/7/18	
キウ科	アザミカセンダングサ	<i>Rudris frondosa</i>	一年草	2015/11/4	西條名地域	2017/9/5	2017/10/5	2017/11/2	
キウ科	キツネアザミ	<i>Hemiteles cynthanoxia</i>	越年草	2015/5/25	チノービオトーブ	2017/8/27	2017/7/4	2017/7/21	
キウ科	ハルノボク	<i>Sonchus oleraceus</i>	越年草	2015/5/25	チノービオトーブ	2017/8/27	2017/7/4	2017/7/21	
				2016/10/31	チノービオトーブ	2017/7/14	2017/7/19	2017/8/3	
				2016/11/17		2017/8/27	2017/7/4	2017/7/18	
				2016/9/27	群馬大学農学センター	2017/8/31	2017/8/31	2017/8/19	
シソ科	ヒソコウジ	<i>Salvia pubesca</i>	越年草	2016/6/21	チノービオトーブ	2017/7/7	2017/7/21	2017/8/4	
クズ科	コギンギン	<i>Rumex crispus</i>	多年草	2016/5/24	チノービオトーブ	2017/6/19	2017/6/19	2017/7/11	
クズ科	チガハギンギン	<i>Rumex crispus</i>	多年草	2008/6/19	チノービオトーブ	2017/6/19	2017/6/19	2017/7/11	

表 3 (続) . 栽培実験スケジュール表
長倉氏が行った栽培実験スケジュール一覧

植物名	播入日	実験開始日	サンプリング日	観測日数	実験条件(および温度条件)区				
					2%	5%	12%	100%	温度(+2℃)
オオアケサ(當年)	2017年6月20日	2017年6月27日	2017年6月27日 2017年7月11日	14日	○	○	○	○	○
オオアケサ(選播系)	2017年7月14日	2017年7月21日	2017年7月21日 2017年8月4日	14日	○	○	○	○	○
オオアケサ(前播)	2017年6月20日	2017年6月27日	2017年6月27日 2017年7月11日	14日	○	○	○	○	○
	2017年9月5日	2017年9月13日	2017年9月14日 2017年9月27日	14日	○	○	○	○	○
	2017年8月18日	2017年8月31日	2017年8月31日 2017年9月19日	19日	○	○	○	○	○
トチカガミ	2017年9月19日	2017年9月27日	2017年9月27日 2017年10月11日	14日	○	○	○	○	○
ツリ(60cm(75cm(中心スル))	2017年7月14日	2017年7月19日	2017年7月19日 2017年6月3日	15日	○	○	○	○	○
	2017年6月27日	2017年7月4日	2017年7月4日 2017年7月18日	14日	○	○	○	○	○

表 4 (続) . チノー・ピオトープラにおいて開花・生育が確認された植物と生態的特性
 2017年4月21日～9月27日までに行った調査で生育が確認できた植物種のリスト。
 科名の前にある*は、その種が外来種であることを示す。

科名	植物名(和名)	植物名(学名)	生活型	花期	主な生育地	分布	備考	確認日
マメ科	カラスノエンドウ	<i>Vicia sepium</i>	一年草	3～6月	野原	本州, 四国, 九州, 沖縄		4月21日
マメ科	クワナム	<i>Aeschynomene indica</i>	一年草	8～10月	湿地	日本全土		5月27日
* マメ科	シロツメクサ	<i>Trifolium repens</i>	多年草	5～10月	道ばた, 河川地	欧州, 北アメリカ(外来帰化植物)		4月21日, 9月27日
マメ科	スズメノエンドウ	<i>Vicia cracca</i>	二年草	4～6月	道ばた, 畑	本州, 四国, 九州, 沖縄		4月21日
マメ科	スズメノハナ	<i>Desmodium podocarpum subsp. arifolium</i>	多年草	7～9月	山野	日本全土		9月27日
マメ科	アトハ	<i>Lathyrus japonicus</i>	多年草	8～10月	河川地, 草原	日本全土		9月27日
マメ科	ヤブツバアズキ	<i>Vigna angustata var. japonensis</i>	一年草	8～10月	野原	本州, 四国, 九州		9月27日
マメ科	ヤブハ	<i>Lathyrus holosericeus</i>	多年草	7～9月	林縁, 草地	北海道, 本州, 四国, 九州		9月27日
マメ科	アサギ(雑草)	<i>Nymphoides peltata</i>	多年草	6～8月	池沼	本州, 四国, 九州	国・県指定鳥獣, 県・市指定鳥獣1A種	5月27日
ムラサキ科	キユウリウサ	<i>Trigonotis peduncularis</i>	多年草	3～5月	畑, 道ばた	日本全土		4月21日, 5月27日
マメ科	ヤブアズキ	<i>Desmodium japonicus</i>	多年草	7～9月	山地	本州, 四国, 九州, 沖縄		9月27日
マメ科	シムツクサ	<i>Oxybaphus japonicus</i>	多年草	3～4月	山野, 林縁	北海道, 本州, 四国, 九州		4月21日, 5月27日
マメ科	シクン	<i>Borista stricta</i>	多年草	4～5月	山地	本州(関東以西), 四国, 九州, 沖縄	国・県指定鳥獣, 県・(野鳥)指定	5月27日
マメ科	アトハ	<i>Alcea frax</i>	多年草	5～8月	道ばた	北海道～四国		5月27日

表 6. 各植物の発芽実験における最終発芽率一覧

冷湿処理を施していないイヌビエ、チカラシバ、コギシギシ（男井戸川産）の種子は25/13℃（昼 14hr、夜 10hr）に設定した温度勾配型恒温器内で培養した。

イヌビエ、チカラシバについては2ヶ月間の冷湿処理を施した後、30/15℃、25/13℃、22/10℃、17/8℃、10/6℃（昼 14hr、夜 10hr）に設定した温度勾配型恒温器内で培養した。

冷湿なし

和名	採取場所	温度	最終発芽率(%)	SD
コギシギシ	チノー・ピオトープ	30/15℃	92.0	4.0
		25/13℃	92.7	6.1
		22/10℃	89.3	3.0
		17/8℃	8.0	2.0
		10/6℃	0.0	0.0

和名	採取場所	温度	最終発芽率(%)	SD
ミゾコウジュ	チノー・ピオトープ	30/15℃	82.0	4.0
		25/13℃	94.0	2.0
		22/10℃	86.0	7.2
		17/8℃	0.0	0.0
		10/6℃	0.0	0.0

和名	採取場所	温度	最終発芽率(%)	SD
イヌトウバナ	アドバンテスト・ピオトープ	30/15℃	53.3	14.5
		25/13℃	50.0	11.1
		22/10℃	62.7	1.2
		17/8℃	28.7	14.5
		10/6℃	5.3	1.2

和名	採取場所	温度	最終発芽率(%)	SD
オトコエシ	西様名	30/15℃	71.3	4.6
		25/13℃	90.7	8.3
		22/10℃	98.7	1.2
		17/8℃	99.3	1.2
		10/6℃	97.3	1.2

和名	採取場所	温度	最終発芽率(%)	SD
キツネアザミ	チノー・ピオトープ	30/15℃	94.7	5.0
		25/13℃	94.7	3.1
		22/10℃	18.7	9.5
		17/8℃	5.3	6.1
		10/6℃	2.0	2.0

表6 (続) . 各植物の発芽実験における最終発芽率一覧

冷湿なし

和名	採取場所	温度	最終発芽率(%)	SD
ナズナ	群馬大学荒牧キャンパス構内	30/15°C	46.7	4.6
		25/13°C	82.0	2.0
		22/10°C	59.3	9.0
		17/8°C	2.0	0.0
		10/6°C	5.3	5.0

和名	採取場所	温度	最終発芽率(%)	SD
ハルノゲシ	チノー・ピオトープ	30/15°C	79.3	10.1
		25/13°C	84.7	6.1
		22/10°C	83.3	5.0
		17/8°C	86.0	5.3
		10/6°C	86.7	6.4

和名	採取場所	温度	最終発芽率(%)	SD
ナガバギシギシ	アドバンテスト・ピオトープ	30/15°C	99.3	1.2
		25/13°C	97.3	3.1
		22/10°C	99.3	1.2
		17/8°C	97.3	2.3
		10/6°C	98.7	1.2

和名	採取場所	温度	最終発芽率(%)	SD
イヌビエ	藤岡	25/13°C	46.0	10.4
チカラシバ	群馬大学荒牧キャンパス構内		84.7	4.6
コギシギシ	男井戸川		69.3	8.3

表 6 (続) . 各植物の発芽実験における最終発芽率一覧

冷湿あり

和名	採取場所	温度	最終発芽率(%)	SD
イヌビエ	藤岡	30/15°C	88.0	9.2
		25/13°C	79.3	12.7
		22/10°C	91.3	6.1
		17/8°C	82.0	7.2
		10/6°C	6.2	2.0

和名	採取場所	温度	最終発芽率(%)	SD
チカラシバ	群馬大学荒牧キャンパス構内	30/15°C	79.1	15.6
		25/13°C	87.2	7.4
		22/10°C	82.2	11.6
		17/8°C	94.6	1.2
		10/6°C	86.3	6.4

表 7. 栽培実験における各植物の個体あたり乾燥重量

コキウギン(マノー)	個体乾燥重量											
	初期サンプル	+2℃区	3%	9%	13%	100%	初期サンプル	+2℃区	3%	9%	13%	100%
2017年6月19日	0.034	0.406	0.024	0.119	0.179	0.528	0.009	0.243	0.006	0.056	0.044	0.179
ミノコウジキ	個体乾燥重量											
	初期サンプル	+2℃区	3%	9%	13%	100%	初期サンプル	+2℃区	3%	9%	13%	100%
2017年7月21日	0.117	0.367	0.097	0.153	0.207	0.406	0.063	0.216	0.061	0.103	0.146	0.196
イヌヒメ	個体乾燥重量											
	初期サンプル	+2℃区	3%	9%	13%	100%	初期サンプル	+2℃区	3%	9%	13%	100%
2017年7月21日	0.267	0.417	0.296	0.469	0.425	0.693	0.060	0.163	0.072	0.190	0.163	0.162
オトコエシ	個体乾燥重量											
	初期サンプル	+2℃区	3%	9%	13%	100%	初期サンプル	+2℃区	3%	9%	13%	100%
2017年6月27日	0.047	0.123	0.051	0.099	0.134	0.125	0.016	0.056	0.015	0.055	0.054	0.059
キツネアザミ	個体乾燥重量											
	初期サンプル	+2℃区	3%	9%	13%	100%	初期サンプル	+2℃区	3%	9%	13%	100%
2017年7月4日	0.063	0.266	0.127	0.277	0.326	0.243	0.020	0.135	0.029	0.079	0.147	0.107
オカザシバ	個体乾燥重量											
	初期サンプル	+2℃区	3%	9%	13%	100%	初期サンプル	+2℃区	3%	9%	13%	100%
2017年6月10日	0.160	0.391	0.165	0.219	0.246	0.414	0.056	0.136	0.069	0.064	0.060	0.150
ハルノナツシ	個体乾燥重量											
	初期サンプル	+2℃区	3%	9%	13%	100%	初期サンプル	+2℃区	3%	9%	13%	100%
2017年7月4日	0.206	0.756	0.364	0.525	0.709	0.284	0.120	0.512	0.219	0.203	0.216	0.462
オガバ(オキギン)	個体乾燥重量											
	初期サンプル	+2℃区	3%	9%	13%	100%	初期サンプル	+2℃区	3%	9%	13%	100%
2017年6月19日	0.119	0.306	0.077	0.192	0.266	0.477	0.026	0.136	0.029	0.056	0.029	0.219

表 7 (続) . 栽培実験における各植物の個体あたり乾燥重量一覧
 諏訪間氏が行った栽培実験の各植物あたりの乾燥重量一覧

	平均個体乾燥重量 (g)		標準偏差 (SD)			
	初期	100%区	1.6°C区	初期	100%区	1.6°C区
	0.0554	0.27307	0.26614	0.040719638	0.190564868	0.144753839
キバナアキギリ	0.03742	0.0947	0.051166667	0.021048919	0.121233824	0.046439452
	0.020933333	0.042425	0.0613	0.00780534	0.010367377	0.004592385

岡村氏が行った栽培実験の各植物あたりの乾燥重量一覧

植物名	乾燥重量平均値・標準偏差	初期サンプリング	最終サンプリング				
			3%	9%	13%	100%	+2°C
アメリカセンダングサ	平均値 標準偏差	0.020 0.006	0.022 0.013	0.033 0.013	0.081 0.074	0.108 0.066	0.100 0.059
ツバキマ (アトハシチスト)	平均値 標準偏差	0.076 0.069	0.075 0.042	0.146 0.099	0.196 0.090	0.238 0.097	0.248 0.129
	平均値 標準偏差	0.125 0.102	0.125 0.096	0.277 0.154	0.286 0.165	0.507 0.304	0.363 0.283

表 7 (続) . 栽培実験における各植物の個体あたり乾燥重量一覧
 長倉氏が行った栽培実験の各植物あたりの乾燥重量一覧

植物名	質量平均値・標初期サンプリング	最終サンプリング					+2°C
		3%	9%	13%	100%		
オオツタクサ(菅平)	平均値	0.051	0.049	0.127	0.124	0.226	0.234
	標準偏差	0.026	0.013	0.067	0.043	0.111	0.074
オオツタクサ(西條名)	平均値	0.168	0.156	0.266	0.278	0.514	0.473
	標準偏差	0.084	0.056	0.095	0.104	0.166	0.141
オオツタクサ(前橋)	平均値	0.091	0.104	0.185	0.184	0.306	0.363
	標準偏差	0.046	0.049	0.085	0.086	0.142	0.168
	平均値	0.065	0.066	0.068	0.075	0.150	0.155
	標準偏差	0.023	0.028	0.032	0.030	0.059	0.067
	平均値	0.089	0.083	0.048	0.135	0.201	0.173
	標準偏差	0.069	0.038	0.056	0.117	0.078	0.068
トチカガミ	平均値	0.169	0.132	0.148	0.116	0.267	0.288
	標準偏差	0.065	0.092	0.043	0.035	0.096	0.099
ツジバ(カマ(アト)バ(チスト))	平均値	0.076	0.075	0.146	0.196	0.238	0.248
	標準偏差	0.069	0.042	0.099	0.090	0.097	0.129
	平均値	0.125	0.277	0.125	0.286	0.507	0.363
	標準偏差	0.102	0.154	0.096	0.165	0.304	0.283

表 8. 栽培実験における各植物の生長解析結果一覧

コギンギン(チノヘ)

相対光量子密度	平均				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)
3%	-0.018	0.036	-0.523	0.116	0.003	0.005	0.142	0.017
9%	0.056	0.041	1.370	0.082	0.011	0.003	0.260	0.007
13%	0.070	0.037	1.969	0.072	0.011	0.002	0.377	0.004
100%	0.124	0.026	7.105	0.032	0.006	0.003	0.953	0.003
2℃上昇区	0.120	0.030	4.960	0.051	0.010	0.003	0.776	0.006

ミゾコウジュ

相対光量子密度	平均				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)
3%	-0.062	0.039	-1.787	0.091	0.041	0.003	1.151	0.016
9%	0.021	0.040	0.528	0.086	0.014	0.006	0.346	0.016
13%	0.043	0.037	1.166	0.072	0.011	0.005	0.233	0.010
100%	0.099	0.022	4.667	0.030	0.025	0.005	0.943	0.005
2℃上昇区	0.094	0.027	3.554	0.043	0.026	0.005	0.876	0.010

イヌビエ

相対光量子密度	平均				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)
3%	-0.019	0.019	-1.012	0.061	0.007	0.001	0.368	0.004
9%	0.038	0.015	2.550	0.048	0.014	0.001	1.068	0.002
13%	0.031	0.016	1.968	0.048	0.011	0.001	0.676	0.006
100%	0.072	0.011	7.139	0.036	0.008	0.001	1.130	0.004
2℃上昇区	0.039	0.014	2.882	0.046	0.015	0.001	1.216	0.006

オトコエシ

相対光量子密度	平均				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)
3%	0.005	0.030	0.161	0.073	0.005	0.003	0.178	0.008
9%	0.034	0.025	1.452	0.051	0.011	0.003	0.530	0.006
13%	0.049	0.023	2.203	0.046	0.005	0.003	0.362	0.006
100%	0.043	0.019	2.656	0.029	0.007	0.002	0.606	0.003
2℃上昇区	0.041	0.019	2.526	0.030	0.009	0.004	0.718	0.006

キツネアザミ

相対光量子密度	平均				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)
3%	0.025	0.046	0.549	0.070	0.002	0.002	0.070	0.007
9%	0.070	0.036	2.049	0.050	0.007	0.001	0.189	0.003
13%	0.078	0.037	2.313	0.050	0.015	0.002	0.665	0.006
100%	0.060	0.028	2.825	0.030	0.016	0.002	0.906	0.002
2℃上昇区	0.073	0.031	2.770	0.040	0.017	0.001	0.772	0.004

チカラシバ

相対光量子密度	平均				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)
3%	-0.007	0.018	-0.384	0.056	0.017	0.002	0.911	0.000
9%	0.012	0.016	0.787	0.043	0.005	0.002	0.296	0.000
13%	0.018	0.015	1.184	0.039	0.006	0.001	0.427	0.000
100%	0.045	0.012	3.975	0.040	0.008	0.001	0.726	0.000
2℃上昇区	0.043	0.012	3.633	0.035	0.008	0.001	0.690	0.000

表 8 (続) . 栽培実験における各植物の生長解析結果一覧

ハルノゲシ

相対光子密度	平均				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)
3%	0.009	0.045	0.263	0.072	0.028	0.006	0.702	0.012
9%	0.067	0.036	2.143	0.051	0.007	0.010	0.693	0.009
13%	0.049	0.034	1.558	0.049	0.015	0.005	0.398	0.006
100%	0.074	0.031	3.170	0.034	0.029	0.008	1.716	0.008
2℃上昇区	0.092	0.031	3.728	0.039	0.031	0.006	1.511	0.007

ナガバギンギシ

相対光子密度	平均				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)
3%	-0.008	0.036	-0.244	0.098	0.008	0.006	0.218	0.011
9%	0.032	0.037	0.882	0.086	0.010	0.004	0.275	0.007
13%	0.046	0.030	1.816	0.068	0.007	0.004	0.262	0.006
100%	0.074	0.024	4.456	0.044	0.009	0.005	1.741	0.054
2℃上昇区	0.065	0.025	3.133	0.073	0.005	0.003	0.574	0.104

諏訪間氏が行った栽培実験における各植物の生長解析結果一覧

	RGR		LAR		NAR		SLA		WR		
	avg	sd	avg	sd	avg	sd	avg	sd	LWR	SWR	RWR
コントロール	0.056875376	0.008924598	0.022793155	0.004056496	3.565151743	0.945205333	0.023081933	0.00234098	0.439689609	0.141568378	0.418745013
+2℃	0.063532122	0.012958376	0.025267264	0.003972558	3.01524325	0.474015037	0.029633026	0.003422976	0.512813642	0.135602281	0.351582077

キバナアネギリ

	RGR		LAR		NAR		SLA		WR		
	avg	sd	avg	sd	avg	sd	avg	sd	LWR	SWR	RWR
コントロール	0.024829168	0.029108536	0.021609042	0.004113712	1.438709655	1.844026617	0.03033899	0.005337575	0.432469896	0.190070249	0.377459855
+2℃	0.023142945	0.019112632	0.025688905	0.003100913	0.958417142	0.768671743	0.03497898	0.004932381	0.556483652	0.221263444	0.222252904

	RGR		LAR		NAR		SLA		WR		
	avg	sd	avg	sd	avg	sd	avg	sd	LWR	SWR	RWR
コントロール	0.024829168	0.029108536	0.021609042	0.004113712	1.438709655	1.844026617	0.03033899	0.005337575	0.432469896	0.190070249	0.377459855
+2℃	0.023142945	0.019112632	0.025688905	0.003100913	0.958417142	0.768671743	0.03497898	0.004932381	0.556483652	0.221263444	0.222252904

岡村氏が行った栽培実験における各植物の生長解析結果一覧

アメリカセンダングサ

相対光子密度	平均				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)
3%	0.002	0.018	0.066	0.052	0.009	0.003	0.432	0.012
9%	0.018	0.020	0.913	0.066	0.004	0.003	0.128	0.006
13%	0.043	0.019	2.437	0.057	0.018	0.003	1.252	0.009
100%	0.058	0.013	5.188	0.028	0.010	0.001	0.985	0.003
2℃上昇区	0.055	0.016	3.561	0.042	0.013	0.002	1.139	0.002

表 8 (続) . 栽培実験における各植物の生長解析結果一覧

長倉氏が行った栽培実験における各植物の生長解析結果一覧

植物名	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)
オオバタクサ(菅平)	3%	-0.024	0.020	-1.259	0.064	0.007	0.003	0.427	0.007
	9%	0.057	0.021	2.915	0.056	0.014	0.003	1.098	0.007
	13%	0.061	0.019	3.277	0.053	0.011	0.004	1.088	0.007
	100%	0.094	0.013	8.095	0.031	0.018	0.003	2.747	0.005
	+2℃	0.104	0.017	6.368	0.044	0.022	0.004	1.202	0.003
オオバタクサ(西穂名)	3%	-0.012	0.025	-0.526	0.075	0.009	0.004	0.416	0.007
	9%	0.037	0.024	1.497	0.071	0.014	0.004	0.376	0.009
	13%	0.039	0.024	1.631	0.070	0.016	0.005	0.646	0.008
	100%	0.074	0.016	5.809	0.036	0.008	0.003	1.013	0.005
	+2℃	0.079	0.019	4.347	0.058	0.016	0.003	0.728	0.006
オオバタクサ(前橋)	3%	0.000	0.024	-0.002	0.074	0.015	0.004	0.723	0.002
	9%	0.050	0.022	2.265	0.063	0.025	0.003	1.073	0.005
	13%	0.051	0.020	2.657	0.056	0.016	0.003	0.871	0.005
	100%	0.092	0.013	7.565	0.031	0.015	0.003	1.514	0.003
	+2℃	0.096	0.017	5.729	0.047	0.010	0.003	0.871	0.004
	3%	0.001	0.027	0.024	0.062	0.012	0.002	0.468	0.005
	9%	0.005	0.029	0.150	0.065	0.015	0.003	0.518	0.007
	13%	0.016	0.029	0.540	0.065	0.018	0.003	0.597	0.006
	100%	0.065	0.024	2.747	0.051	0.017	0.002	0.639	0.005
	+2℃	0.066	0.027	2.412	0.058	0.012	0.002	0.514	0.005
	3%	0.001	0.027	-0.031	0.058	0.013	0.005	0.723	0.011
	9%	-0.011	0.019	-0.661	0.041	0.010	0.004	0.566	0.003
	13%	0.018	0.022	1.015	0.049	0.008	0.006	0.929	0.005
	100%	0.048	0.020	2.476	0.033	0.018	0.004	0.691	0.002
	+2℃	0.039	0.022	1.813	0.064	0.017	0.005	0.604	0.092
トチカガミ	3%	-0.035	0.021	-1.893	0.052	0.034	0.005	2.236	0.008
	9%	-0.014	0.016	-1.049	0.037	0.017	0.003	1.290	0.002
	13%	-0.025	0.016	-1.700	0.036	0.007	0.003	0.728	0.007
	100%	0.032	0.014	2.634	0.028	0.015	0.003	1.217	0.003
	+2℃	0.039	0.014	2.985	0.024	0.006	0.002	0.250	0.003
フジバカマ(アドバンテスト)	3%	0.007	0.042	0.066	0.092	0.028	0.009	0.695	0.015
	9%	0.070	0.037	1.870	0.078	0.037	0.009	0.855	0.012
	13%	0.086	0.034	2.433	0.073	0.039	0.010	0.557	0.016
	100%	0.065	0.021	3.848	0.038	0.024	0.007	1.343	0.008
	+2℃	0.100	0.028	4.029	0.057	0.036	0.007	1.303	0.010
	3%	0.065	0.043	2.532	0.108	0.026	0.036	1.610	0.161
	9%	0.003	0.075	0.068	0.181	0.007	0.099	0.220	0.326
	13%	0.069	0.036	3.297	0.093	0.023	0.046	1.571	0.129
	100%	0.111	0.031	6.790	0.046	0.027	0.027	3.443	0.066
	+2℃	0.078	0.041	4.292	0.085	0.026	0.046	2.884	0.134

表 9. チノー・ビオトープの林地における、各樹種の 2017 年の現存量と炭素固定量
 2017 年 6 月 26 日～11 月 6 日の間に行った毎木調査に基づき、阿部（2013）の方法で計
 算した結果を示す。

	現存量 (ton)	現存量 (ton/ ha)	炭素固定量 (ton)	炭素固定量 (ton/ha)
コナラ	17.28	17.08	8.64	8.54
クヌギ	3.80	3.76	1.90	1.88
その他	3.32	3.28	1.66	1.64
合計	24.40	24.12	12.20	12.06

表 10. チノー・ビオトープにおける、各樹種の 2012 年～2017 年までの純生産速度と年間炭素固定速度の実測結果と 2018 年の純生産速度と年間炭素固定速度の推定結果

2017 年 6 月 26 日～11 月 6 日の間に行った毎木調査に基づき、阿部（2013）の方法で計算した結果

純生産速度(2017-2012実測)	0.28
炭素固定速度(2017-2012実測)	0.14
炭素固定速度(2017-2012実測)	0.14

	純生産速度 (ton/year)	純生産速度 (ton/ ha/year)	炭素固定速度 (ton/year)	炭素固定量 (ton/ha/year)
コナラ	17.28	17.08	8.64	8.54
クヌギ	3.80	3.76	1.90	1.88
その他	3.32	3.28	1.66	1.64
合計	24.40	24.12	12.20	12.06

表 11. 各植物の RGR, LAR, NAR についての分散分析結果

<外来種>	コントロール区と比べて1.6℃区の値が			備考
	RGR	LAR	NAR	
アメリカセンダングサ	ns	+	ns	
ナガバギンギシ	-	ns	-	
オオブタクサ(菅平)	ns	ns	ns	
オオブタクサ(西橋名)	ns	+	-	
オオブタクサ(前橋)	ns	+	-	
<ビオトープ 在来種>	RGR	LAR	NAR	
コギンギシ	ns	+	-	
ミゾコウジュ	ns	ns	ns	
イヌビエ	-	+	-	
オトコエシ	ns	ns	ns	
キツネアザミ	ns	+	ns	
チカラシバ	ns	ns	ns	
ハルノゲシ	ns	ns	ns	
フジバカマ(アドバンテスト)	+	ns	ns	
<里地・里山 在来種>	RGR	LAR	NAR	
キバナアキギリ	ns	+	ns	
	ns	ns	ns	
	ns	+	ns	
	ns	ns	ns	
トチカガミ	ns	ns	ns	
	ns	ns	ns	
	-	ns	-	



図1. 各調査地一覧



図2. チノー・ビオトープ見取り図



図 3. 男井戸川調整池見取り図

2015年時点では、地下水の浸出により活用ゾーン1の全面および活用ゾーンおおよそ半分が湿地化している

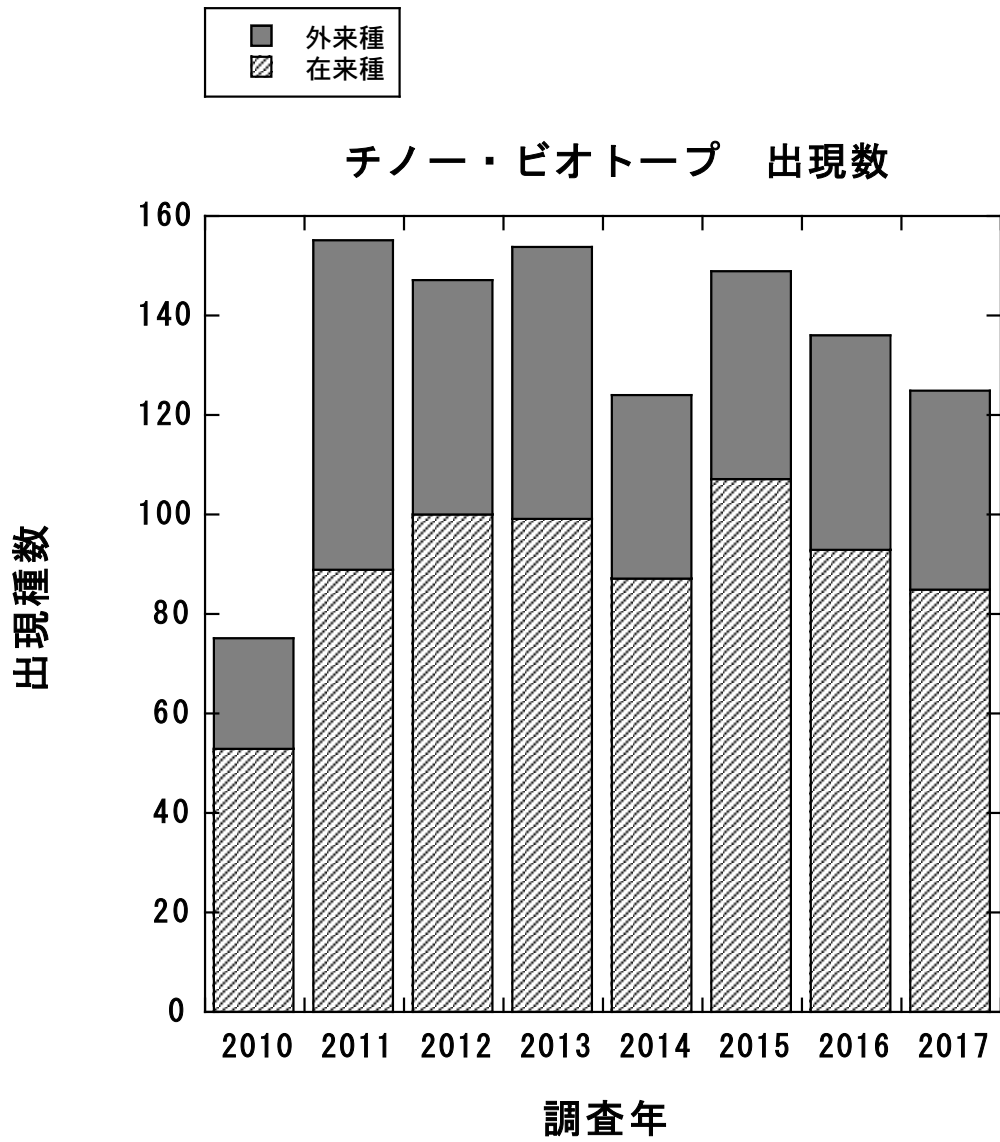


図4. チノー・ビオトープにおいて生育が確認された在来種と外来種の種数の経年変化

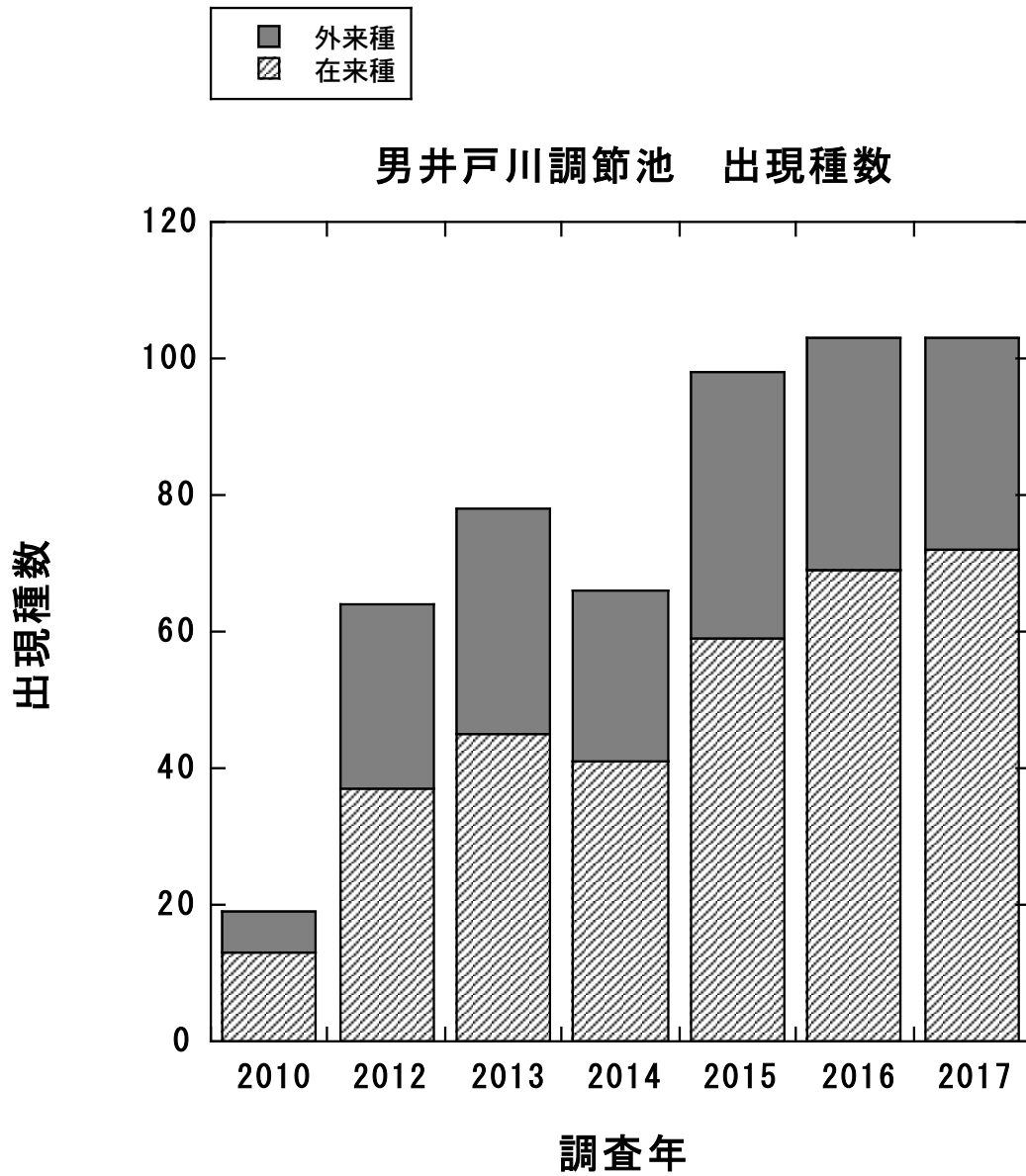


図5. 男井戸川調整池ビオトープにおいて生育が確認された在来植物と外来植物の種数の経年変化

新規レコード作成

写真


科名	シソ科
種名	ミゾコウジュ
学名	<i>Salvia plebeia</i>
撮影年	2018 05.24
撮影場所	チノー
種別	在来絶滅危惧種
掲載	掲載する
備考	

生育位置



図6. チノー・ビオトープに生育する植物の写真と生育位置図の例
FileMakerPro12 を用いてデータベース化した。

写真



科名 ゴマノハグサ科

種名 カタミソウ

学名 *Limnosa aquatica*

撮影年

撮影場所

撮影者

掲載

備考

生育位置



図7. 男井戸川調整池ビオトープに生育する植物の写真と生育位置図の例
FileMakerPro12 を用いてデータベース化した。

写真



科名 ゴマノハグサ科

種名 カタミソウ

学名 *Limnolia aquatica*

撮影年 2017 04.20

撮影場所 男井戸川調整池

種別 在来種減点植物

掲載

備考

生育位置



図7. 男井戸川調整池ビオトープに生育する植物の写真と生育位置図の例
FileMakerPro12 を用いてデータベース化した。

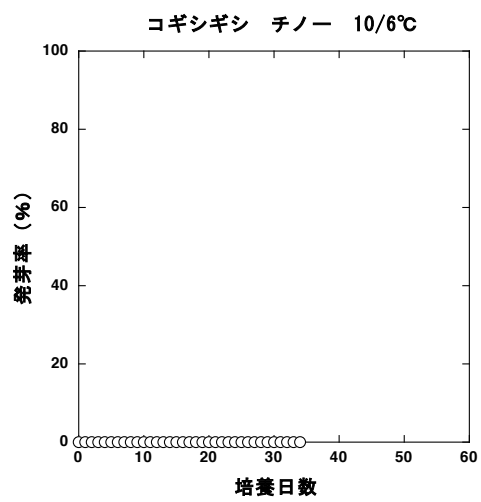
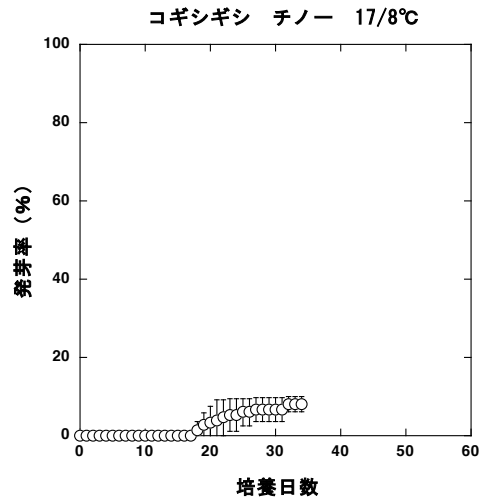
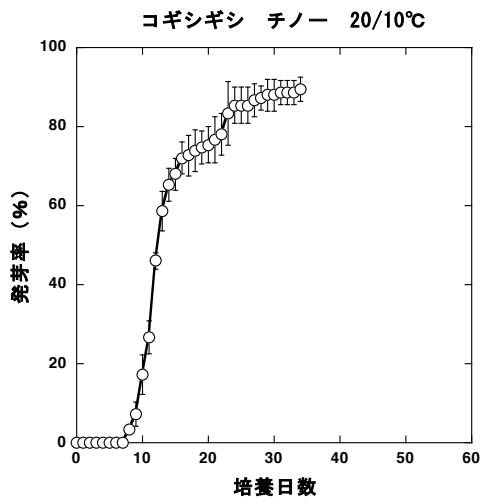
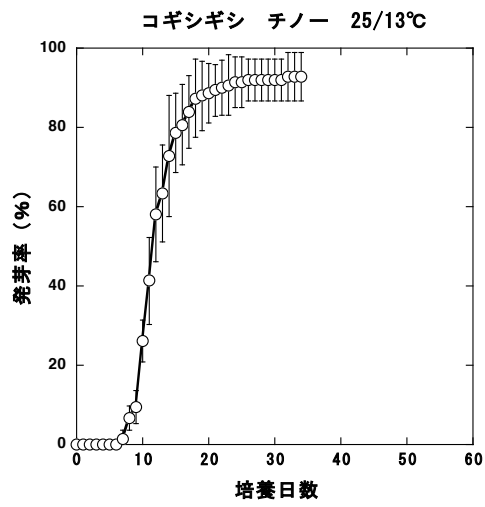
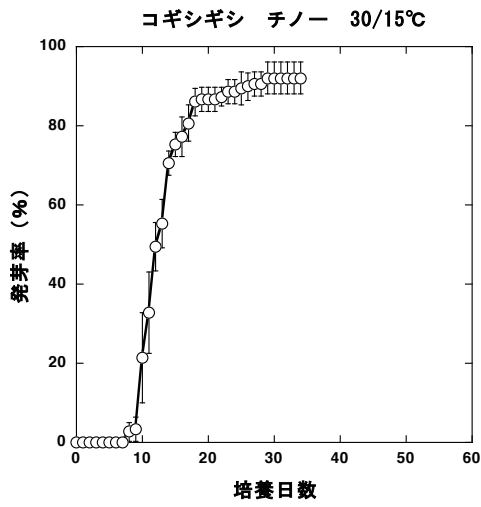


図8. 冷湿処理を施していないコギシギシ (チノー産) の種子発芽率の経時変化

種子を 30/15°C、25/13°C、22/10°C、17/8°C、10/6°C に設定した温度勾配型恒温器内で 34 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。

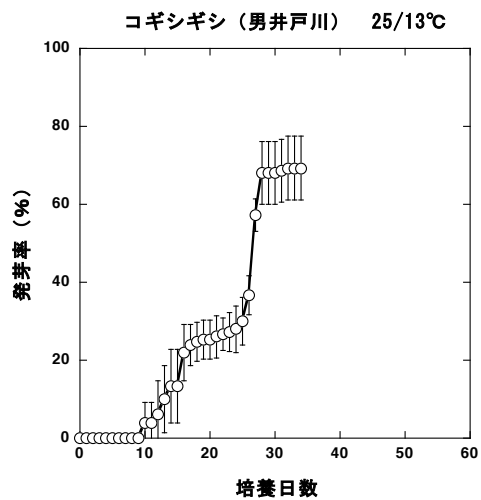


図9. 冷湿処理を施していないコギシギシ (男井戸川産) の種子発芽率の経時変化
 種子を25/13°Cに設定した温度勾配型恒温器内で34日間培養した。
 縦軸は積算発芽率を、横軸は培養開始時から起算した日数を表す。縦棒は標準偏差。n=3。

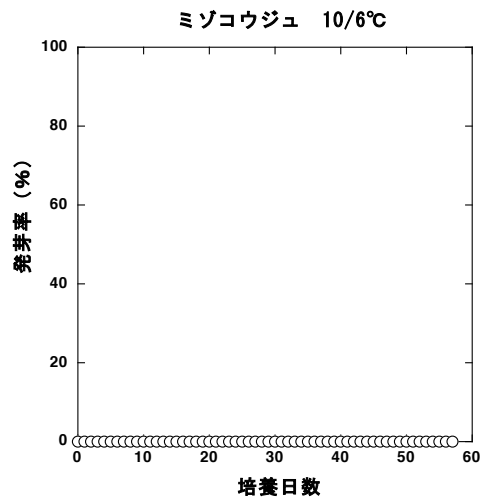
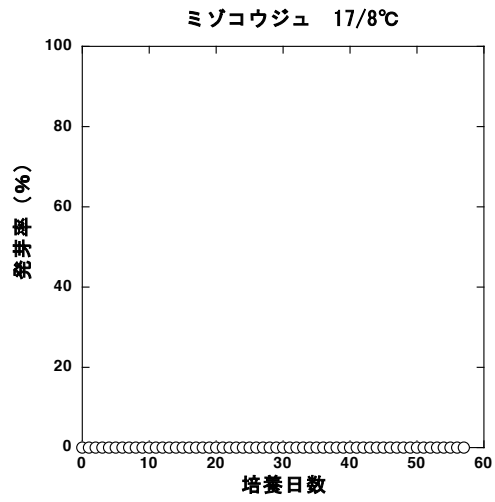
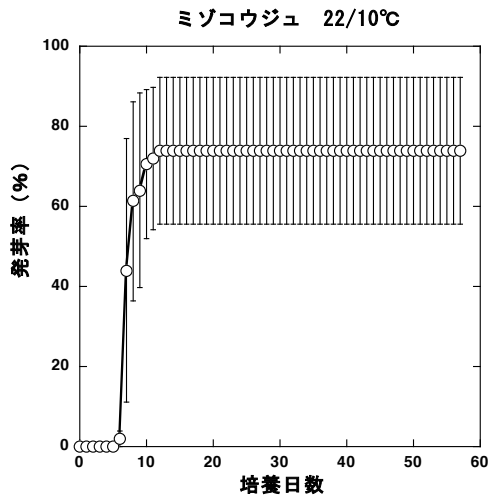
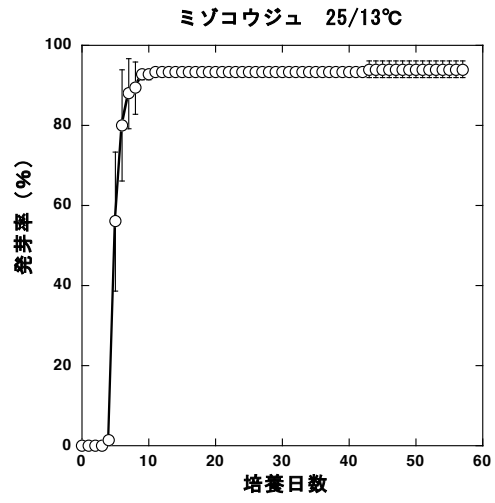
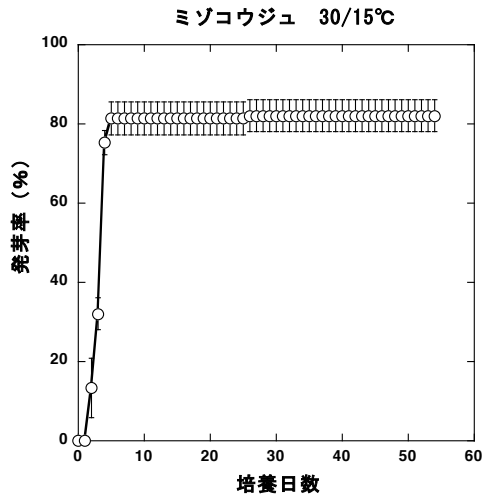


図 10. 冷湿処理を施していないミゾコウジュ（チノー産）の種子発芽率の経時変化

種子を 30/15°C、25/13°C、22/10°C、17/8°C、10/6°C に設定した温度勾配型恒温器内で 58 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。

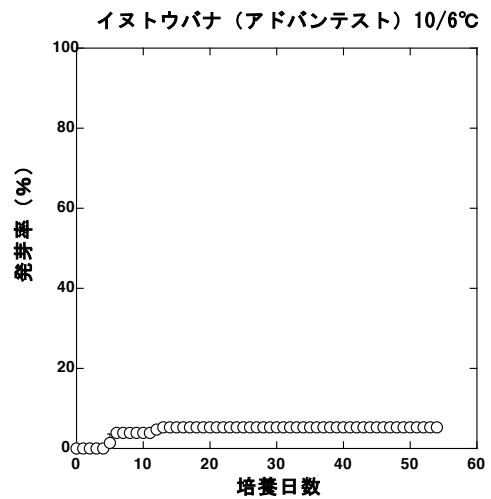
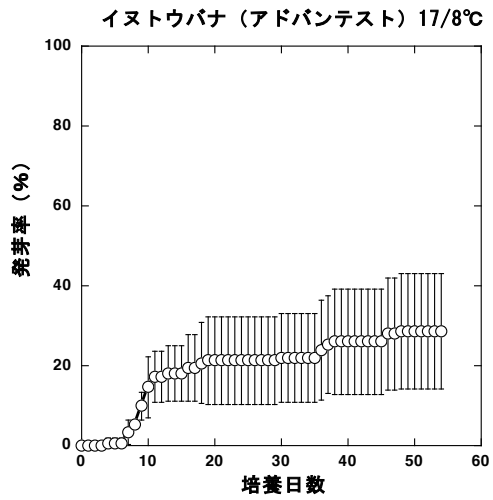
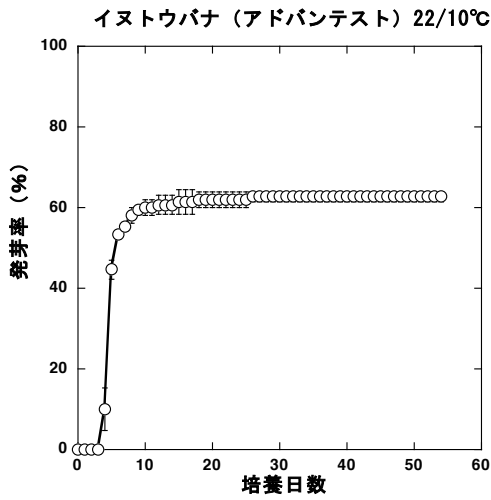
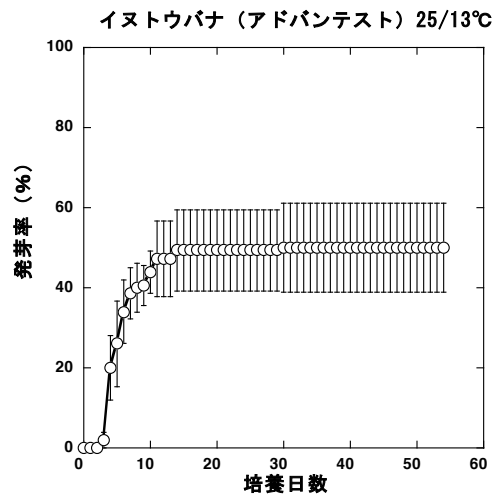
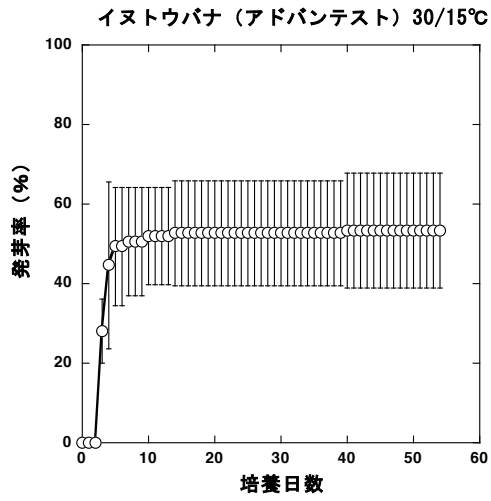


図 11. 冷湿処理を施していないイヌトウバナ (アドバンテスト産) の種子発芽率の経時変化

種子を 30/15°C、25/13°C、22/10°C、17/8°C、10/6°C に設定した温度勾配型恒温器内で 58 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。

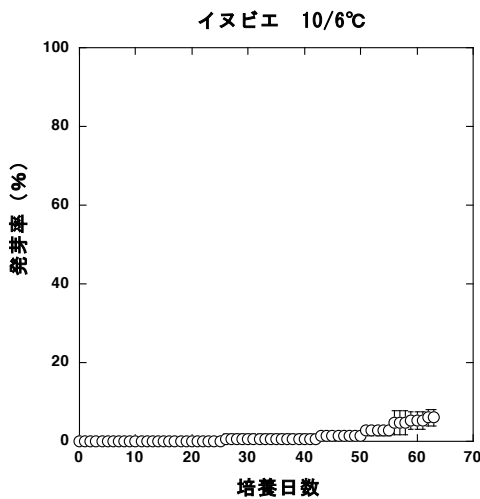
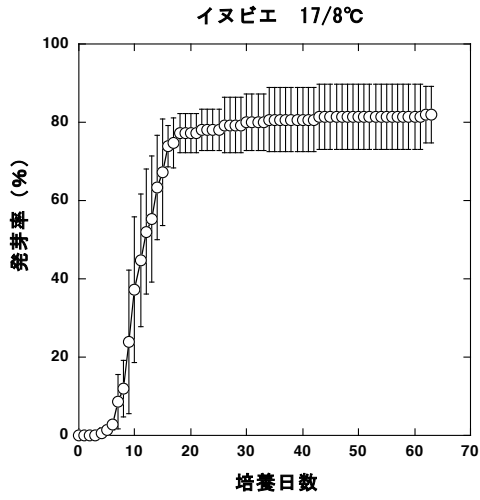
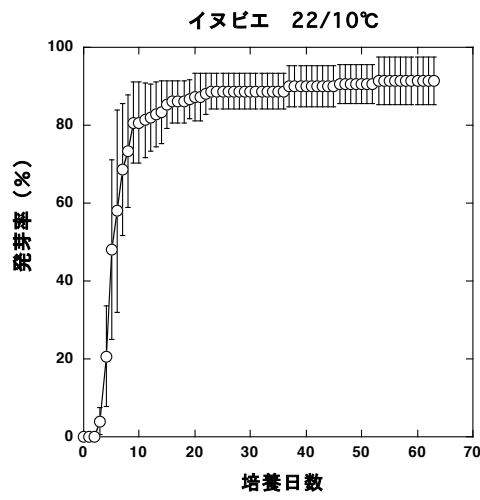
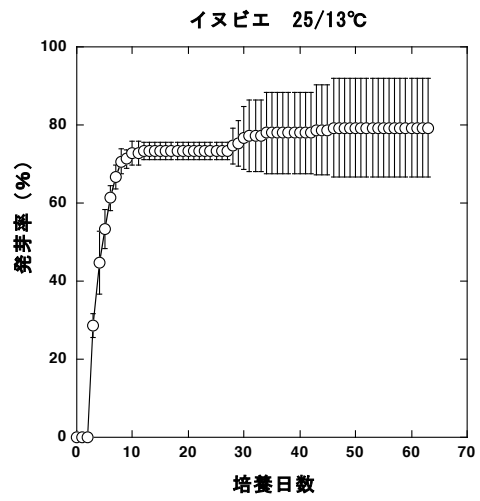
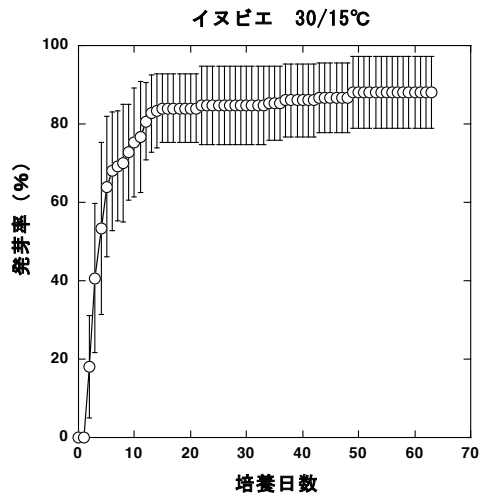


図 12. 冷湿処理を施したイヌビエ(藤岡産)の種子発芽率の経時変化

種子を 30/15°C、25/13°C、22/10°C、17/8°C、10/6°C に設定した温度勾配型恒温器内で 63 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。

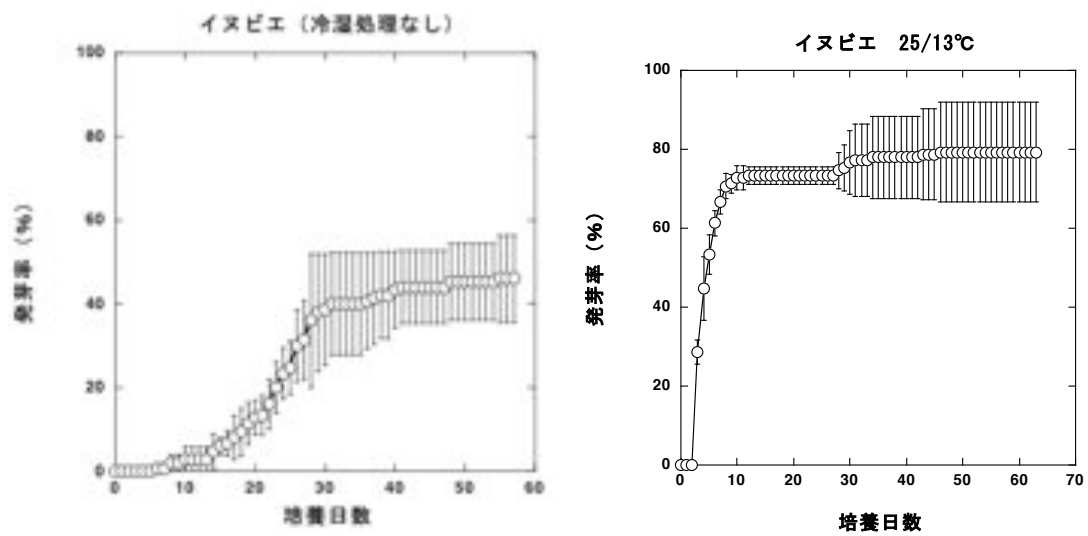


図 13. 冷湿処理を施していないイヌビエ（藤岡産）の種子発芽率の経時変化（左図）と冷湿処理を施した種子の発芽率の経時変化（右図）。

種子を 25/13℃に設定した温度勾配型恒温器内で 58 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。

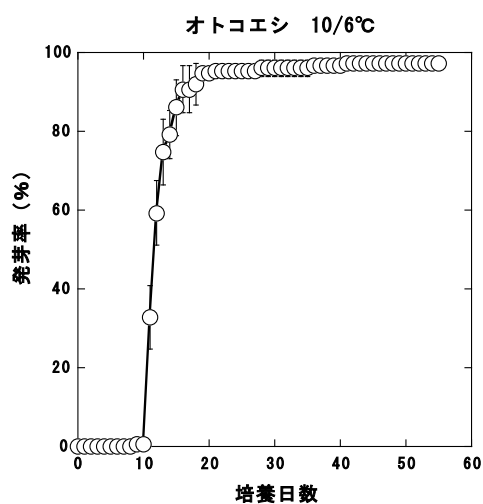
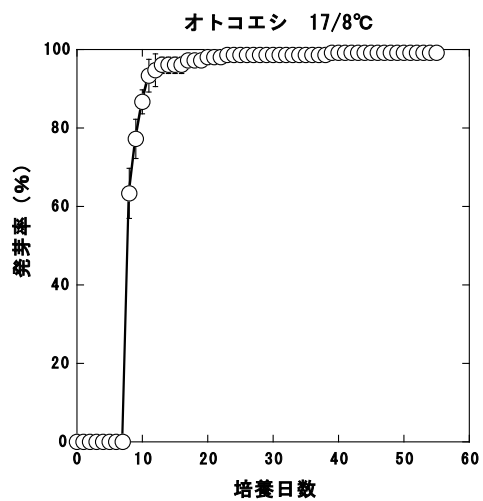
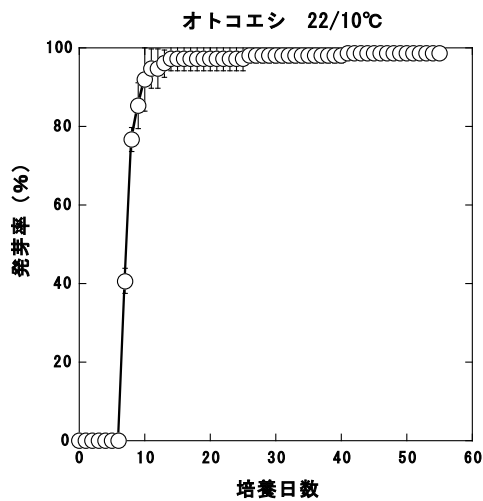
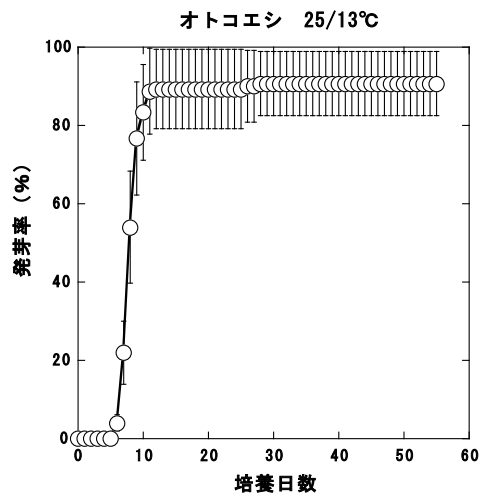
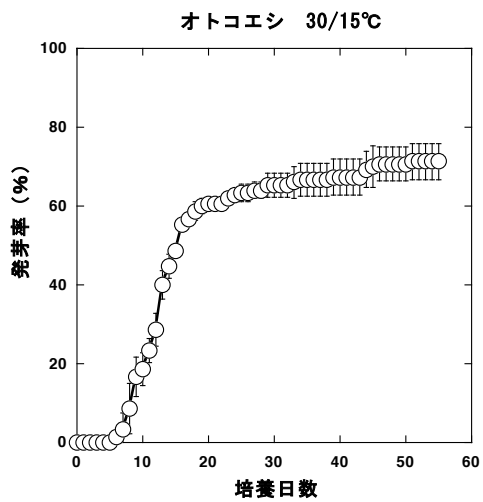


図 14. 冷湿処理を施していないオトコエシ（西榛名産）の種子発芽率の経時変化

種子を 30/15°C、25/13°C、22/10°C、17/8°C、10/6°C に設定した温度勾配型恒温器内で 58 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。

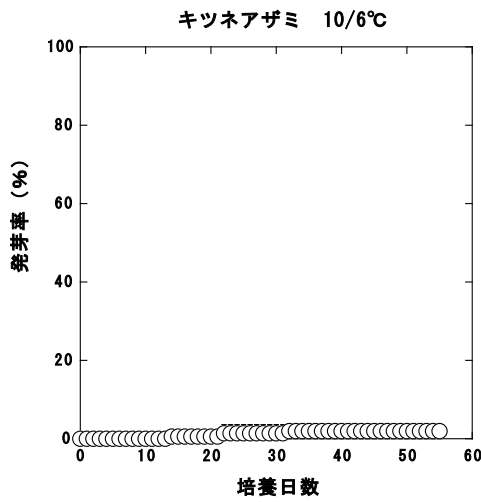
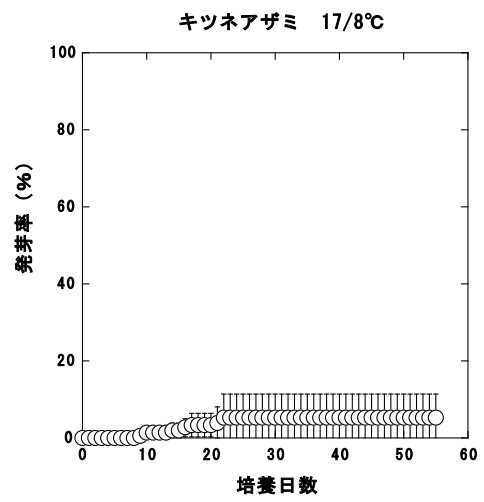
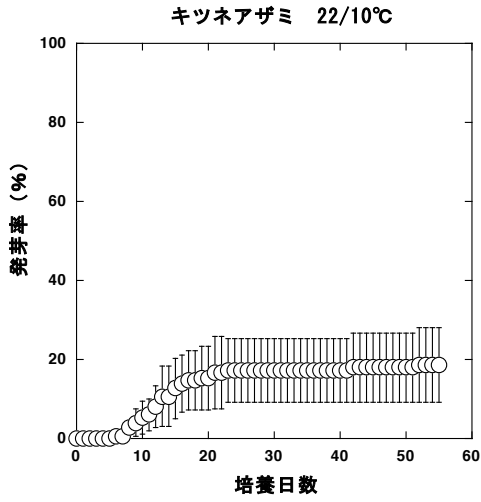
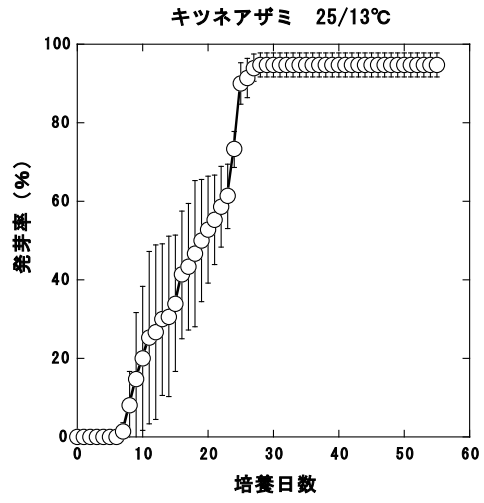
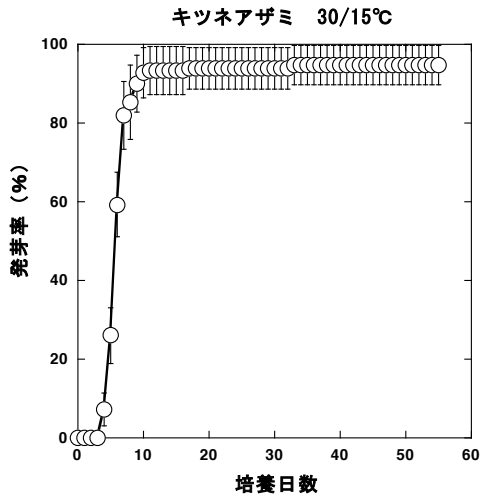


図 15. 冷湿処理を施していないキツネアザミ (チノー産) の種子発芽率の経時変化

種子を 30/15°C、25/13°C、22/10°C、17/8°C、10/6°C に設定した温度勾配型恒温器内で 58 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。

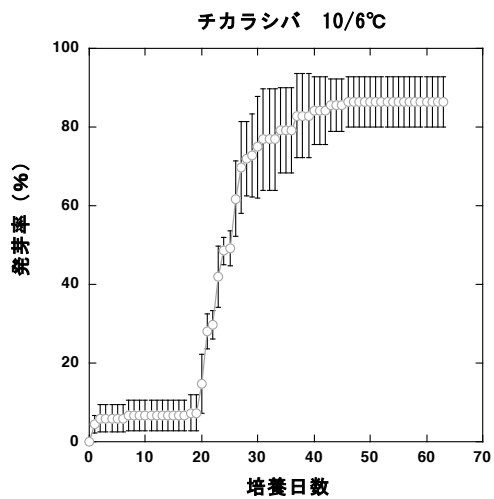
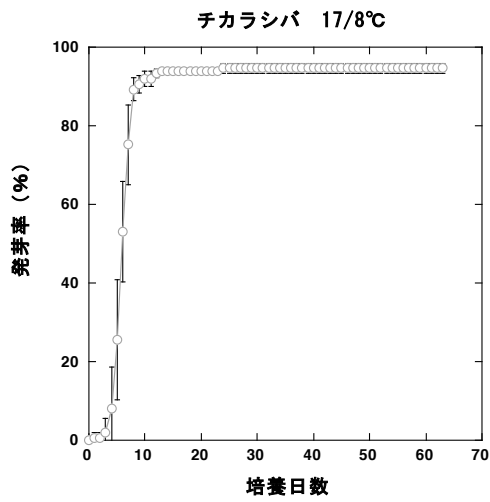
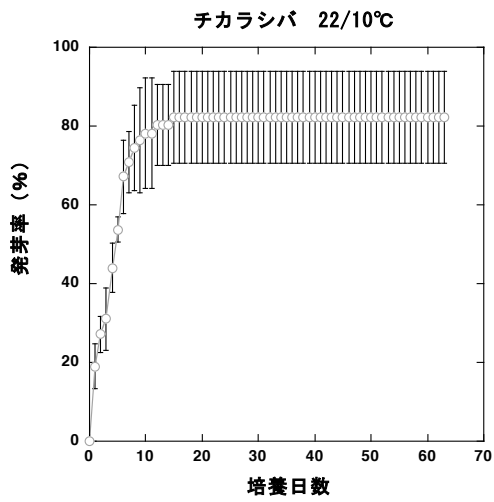
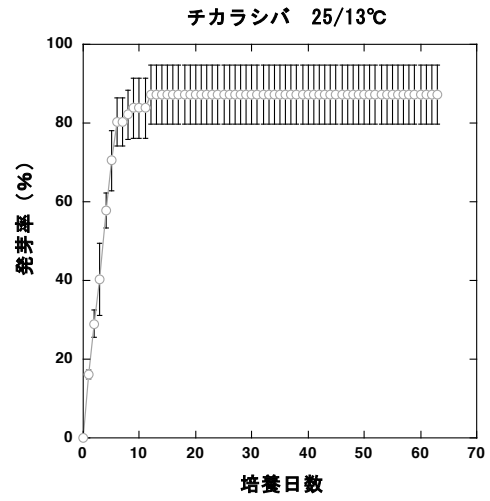
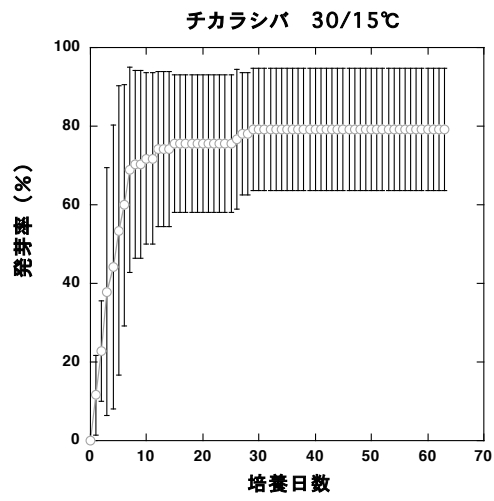


図 16. 冷湿処理を施したチカラシバ（荒牧産）の種子発芽率の経時変化

種子を 30/15°C、25/13°C、22/10°C、17/8°C、10/6°C に設定した温度勾配型恒温器内で 63 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。

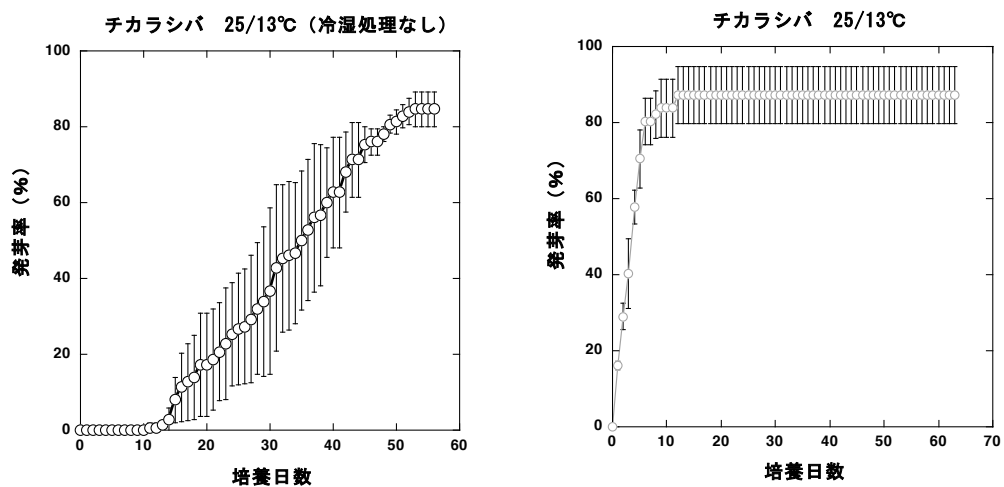


図 17. 冷湿処理を施していないチカラシバ（荒牧産）の種子発芽率の経時変化（左図）と冷湿処理を施した種子の発芽率の経時変化（右図）。

種子を 25/13°C に設定した温度勾配型恒温器内で 55 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。

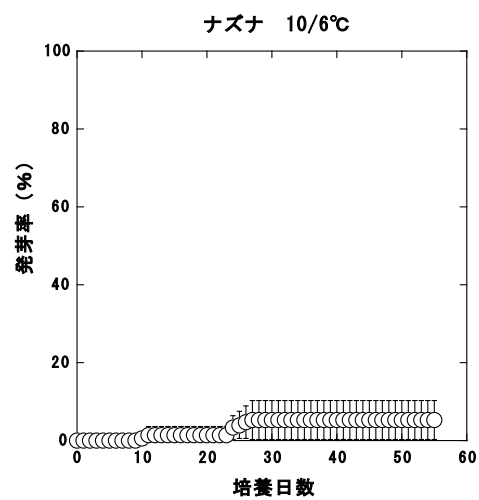
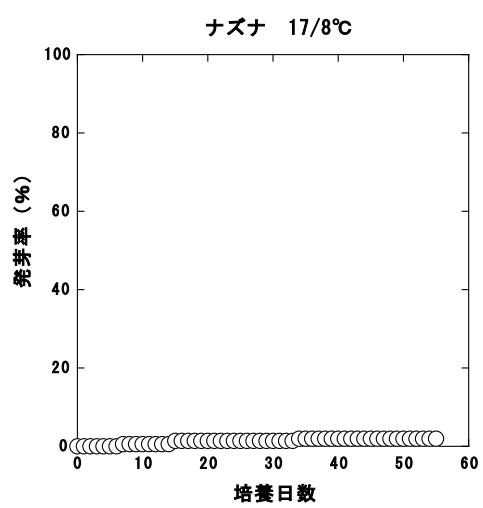
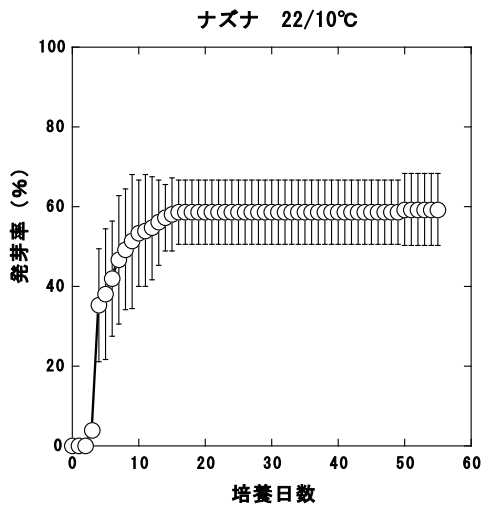
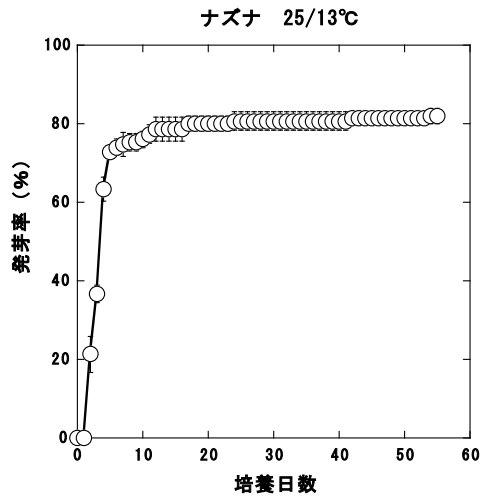
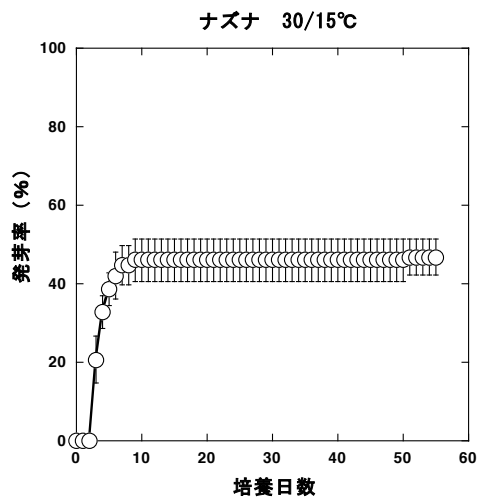


図 18. 冷湿処理を施していないナズナ（荒牧産）の種子発芽率の経時変化

種子を 30/15°C、25/13°C、22/10°C、17/8°C、10/6°C に設定した温度勾配型恒温器内で 58 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。

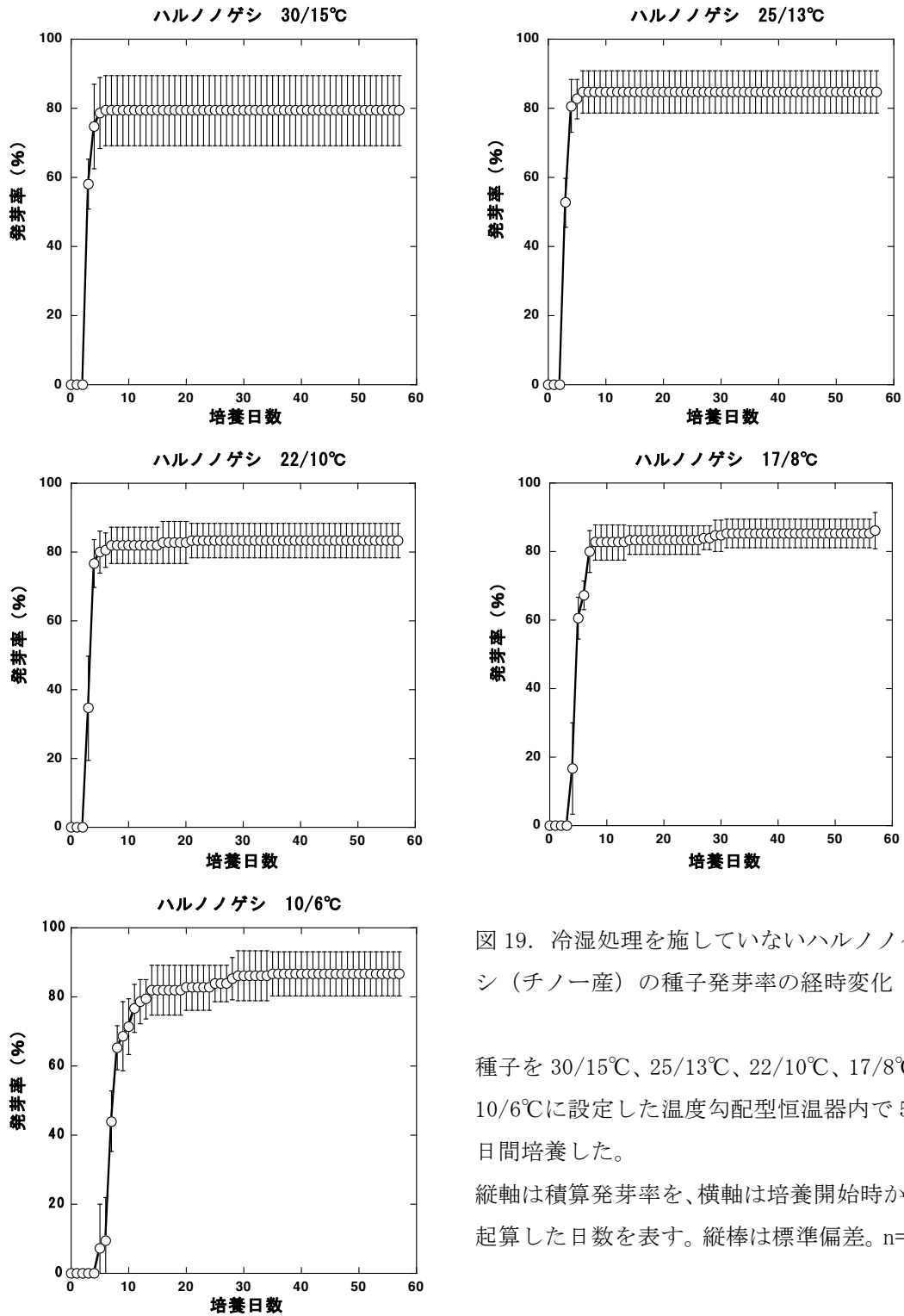


図 19. 冷湿処理を施していないハルノノゲシ (チノー産) の種子発芽率の経時変化

種子を 30/15°C、25/13°C、22/10°C、17/8°C、10/6°C に設定した温度勾配型恒温器内で 58 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。

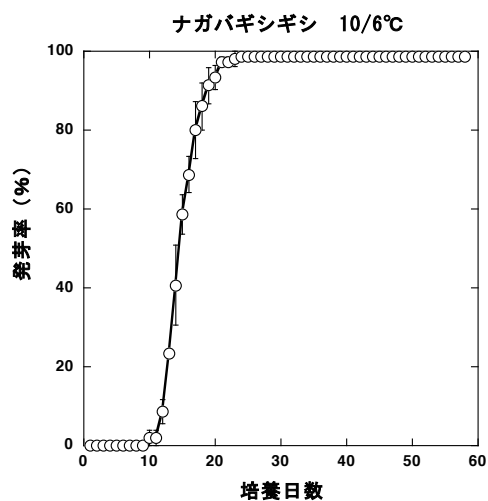
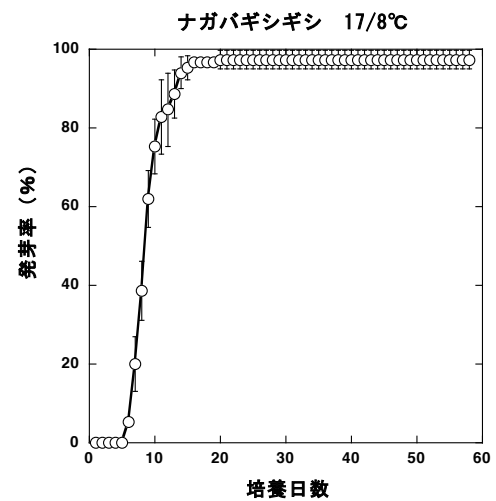
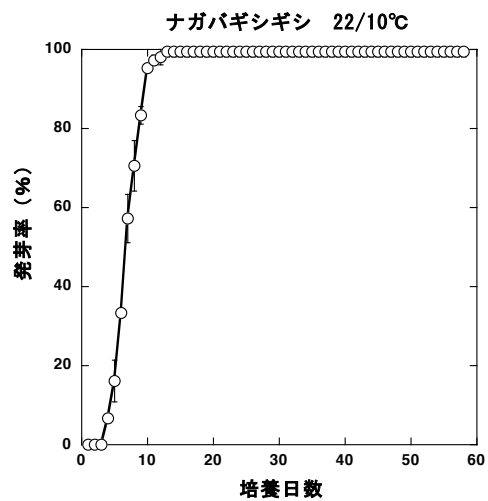
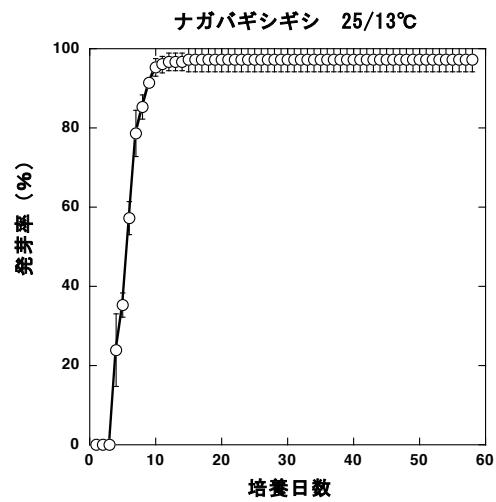
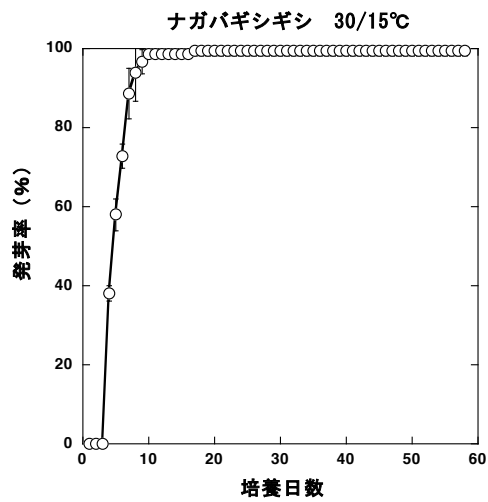


図 20. 冷湿処理を施していないナガバギシギシの種子発芽率の経時変化

種子を 30/15°C、25/13°C、22/10°C、17/8°C、10/6°C に設定した温度勾配型恒温器内で 58 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。

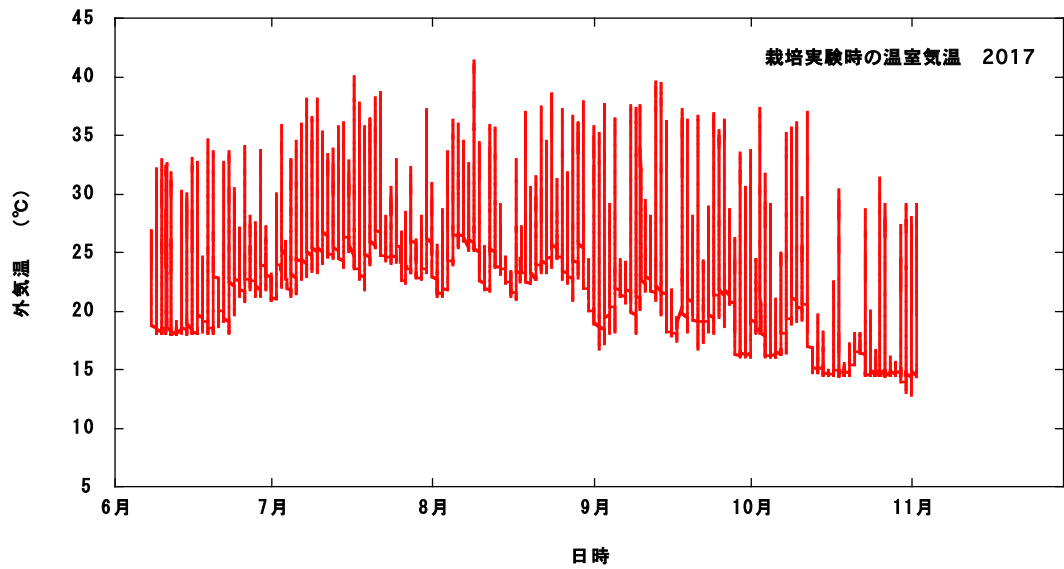
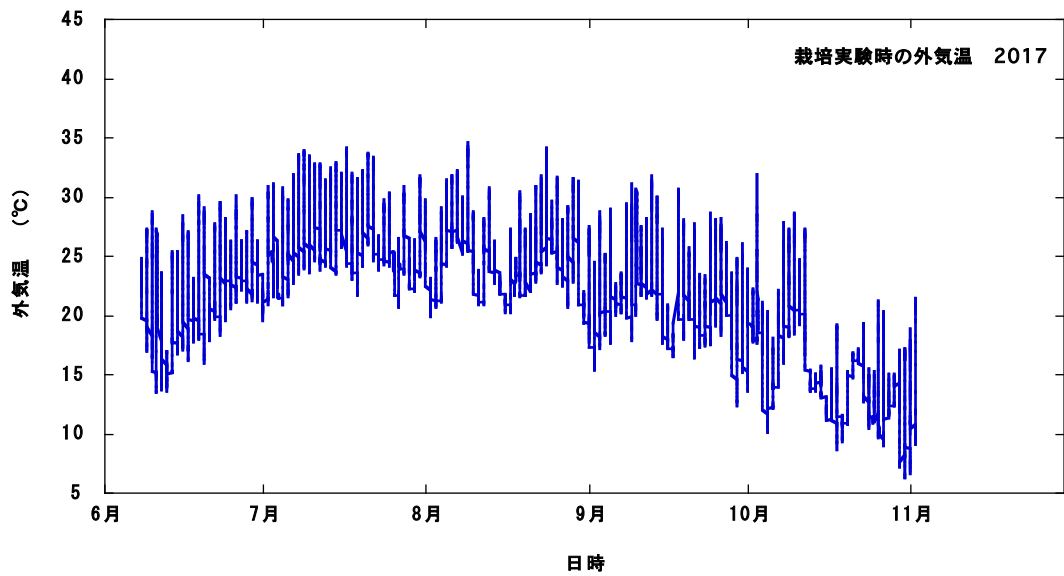


図. 21 群馬大学荒牧キャンパス構内の栽培実験期間中の圃場および温室内の気温
 2017年7月から11月までの間、群馬大学荒牧キャンパス構内の圃場と温室内で気温を温度データロガー（TR52, T&D corporation）をそれぞれ高さ 1.5m 付近に設置し、30分おきに連続測定した。上図は圃場の気温、下図は温室内気温を示す。温室と圃場の平均温度差は 1.6°Cであった。

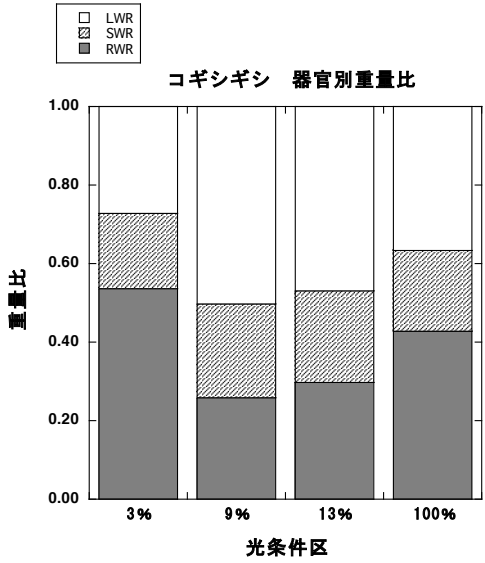
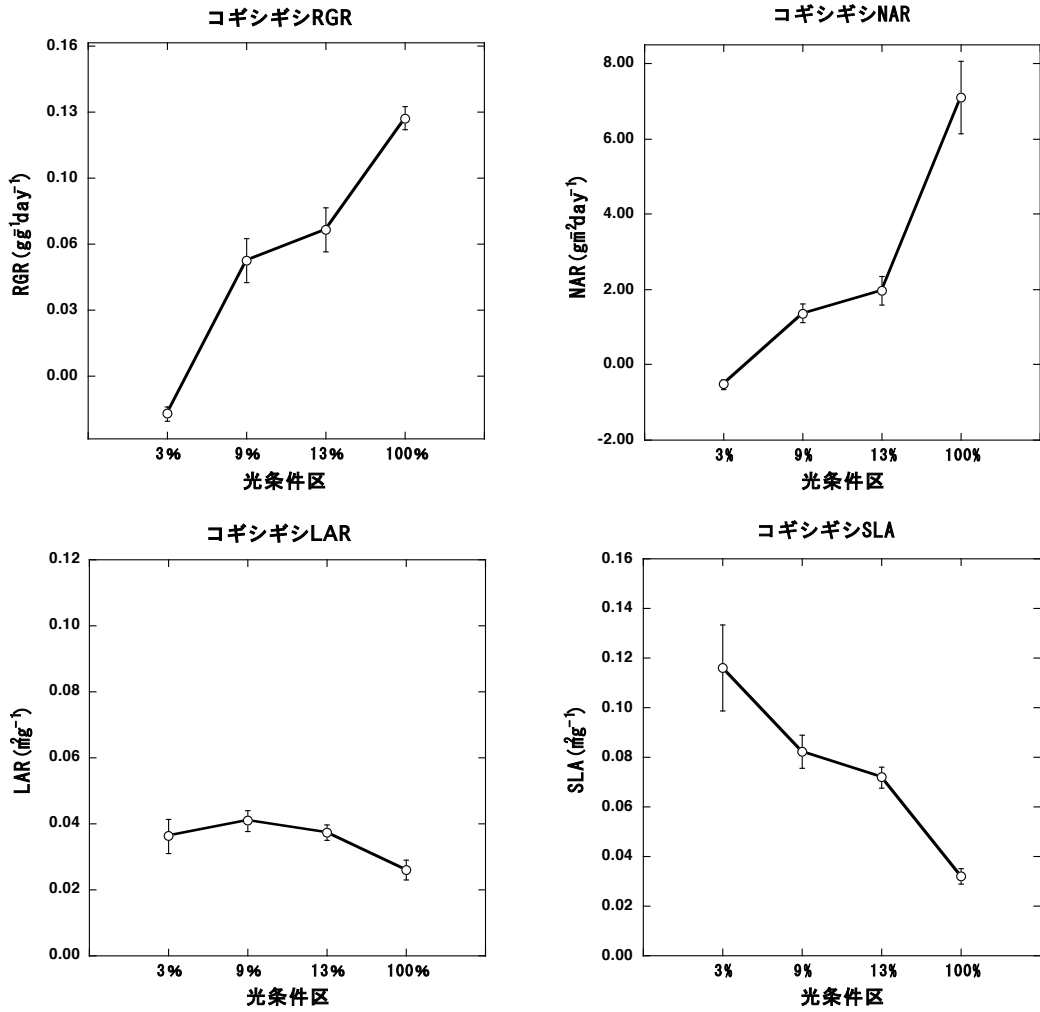


図 22. 異なる光条件下で栽培したコギシギシ（チノー産）の生長解析

群馬大学荒牧キャンパス構内に設置した異なる光条件区（相対光量子密度 3%、9%、13%、100%）内で、ポット植えした苗を 2017 年 6 月 19 日から 22 日間栽培した。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=8-14。

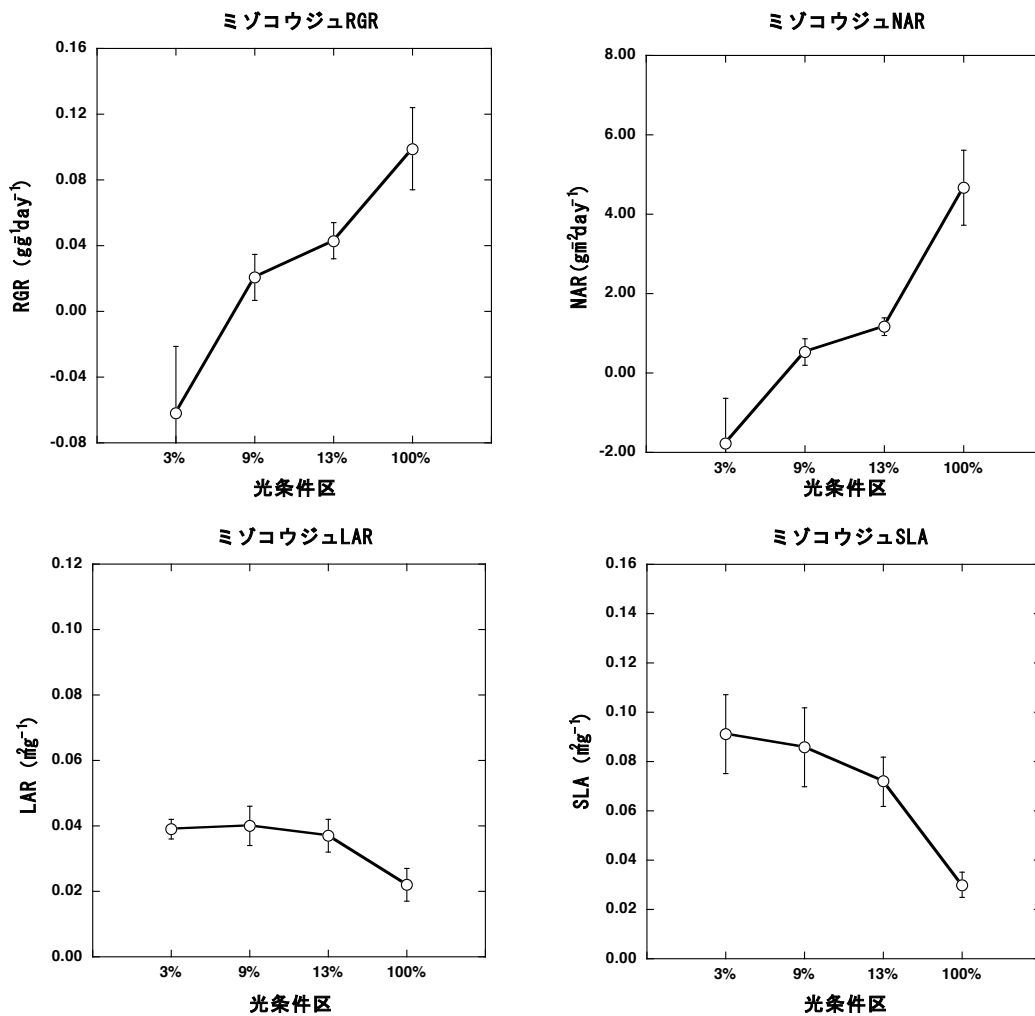
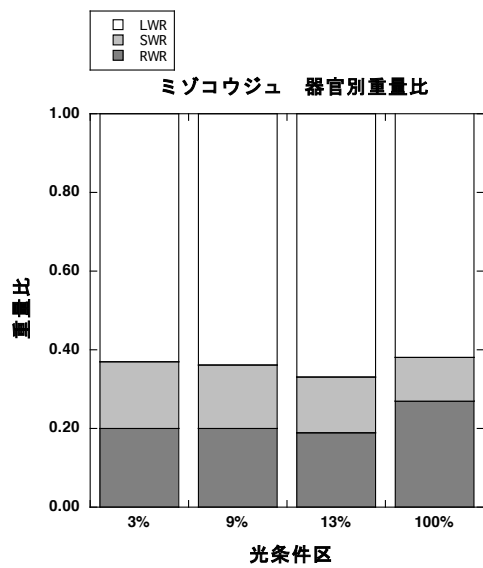


図 23. 異なる光条件下で栽培したミゾコウジュ（チノー産）の生長解析結果



群馬大学荒牧キャンパス構内に設置した異なる光条件区（相対光量子密度 3%、9%、13%、100%）内で、ポット植えた苗を 2017 年 7 月 21 日から 14 日間栽培した。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=3-5。

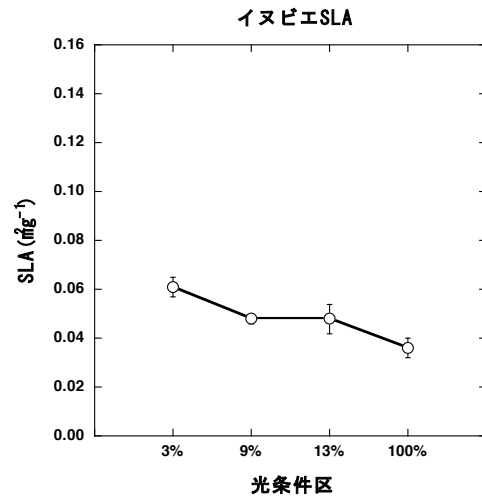
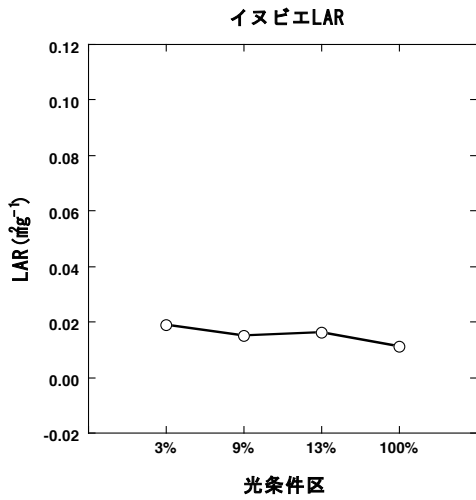
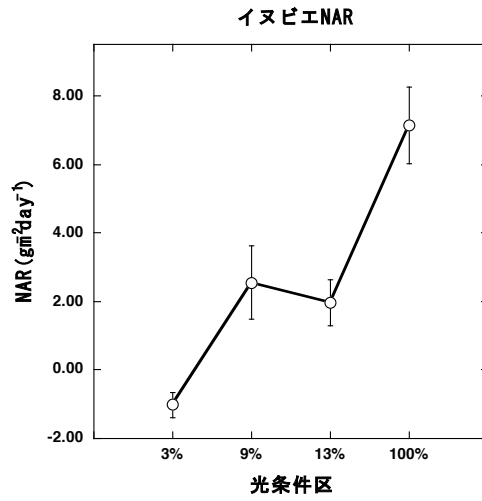
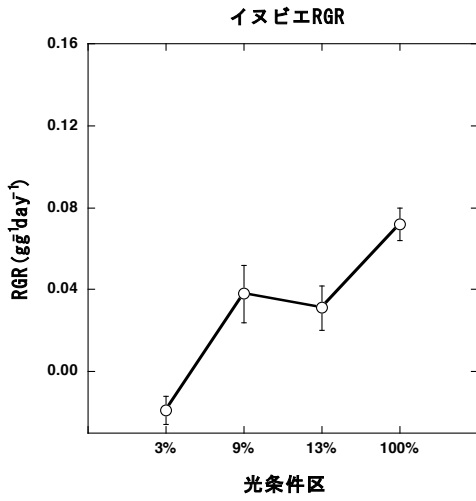
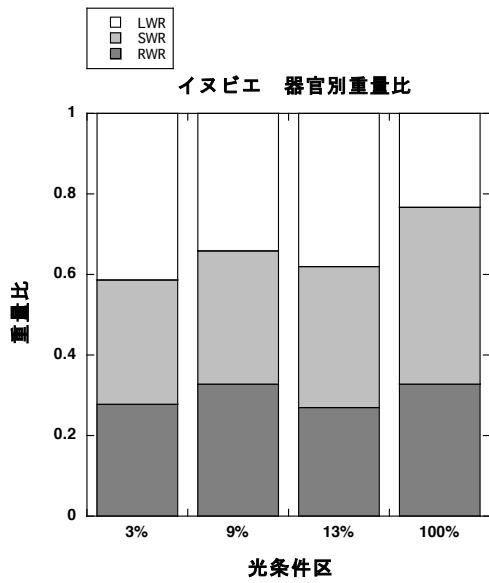


図 24. 異なる光条件下で栽培したイヌビエ（藤岡産）の生長解析結果



群馬大学荒牧キャンパス構内に設置した異なる光条件区（相対光量子密度 3%、9%、13%、100%）内で、ポット植えた苗を 2017 年 7 月 21 日から 14 日間栽培した。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=6-7。

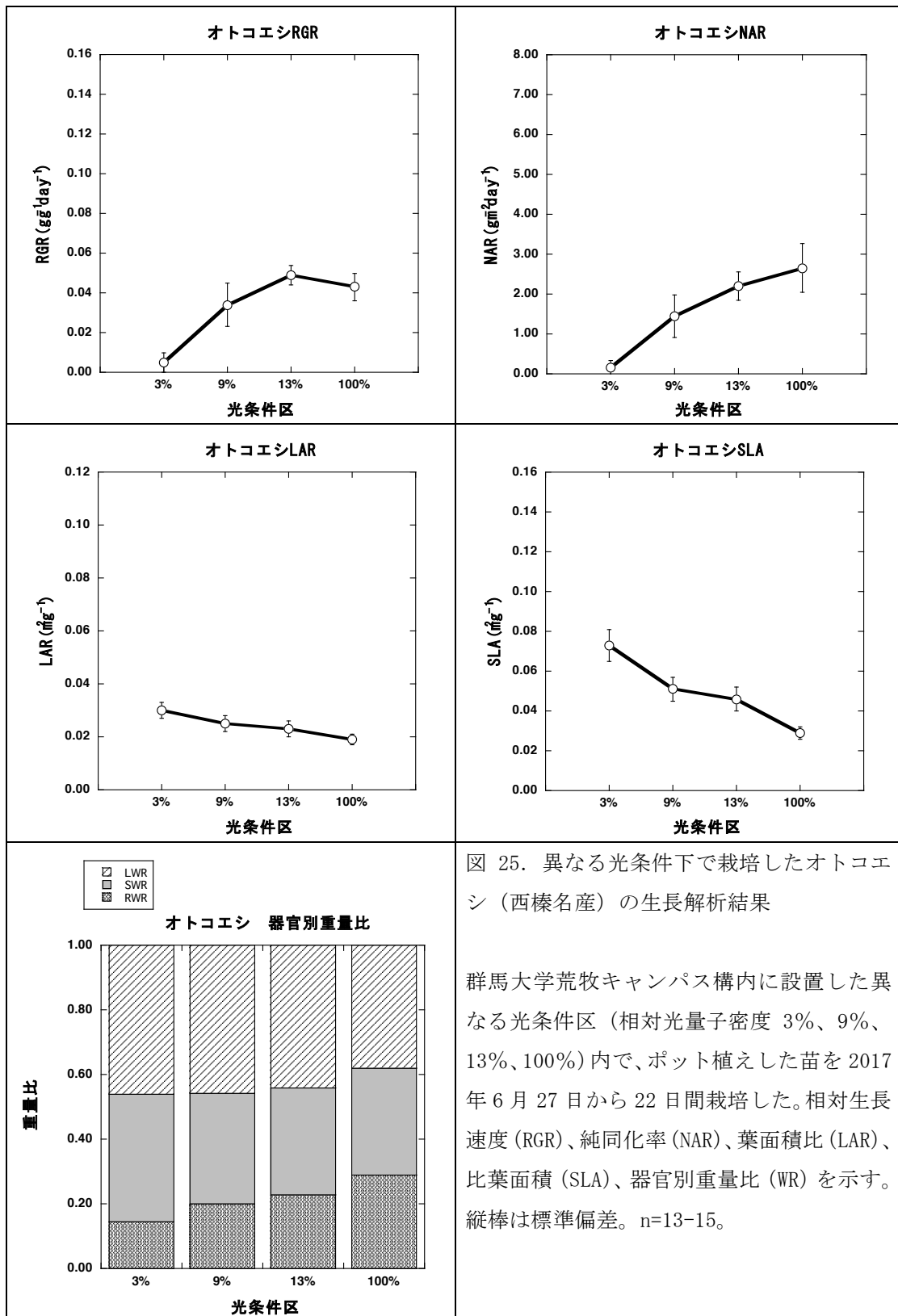


図 25. 異なる光条件下で栽培したオトコエシ（西榛名産）の生長解析結果

群馬大学荒牧キャンパス構内に設置した異なる光条件区（相対光量子密度 3%、9%、13%、100%）内で、ポット植えした苗を 2017 年 6 月 27 日から 22 日間栽培した。相対生長速度 (RGR)、純同化率 (NAR)、葉面積比 (LAR)、比葉面積 (SLA)、器官別重量比 (WR) を示す。縦棒は標準偏差。n=13-15。

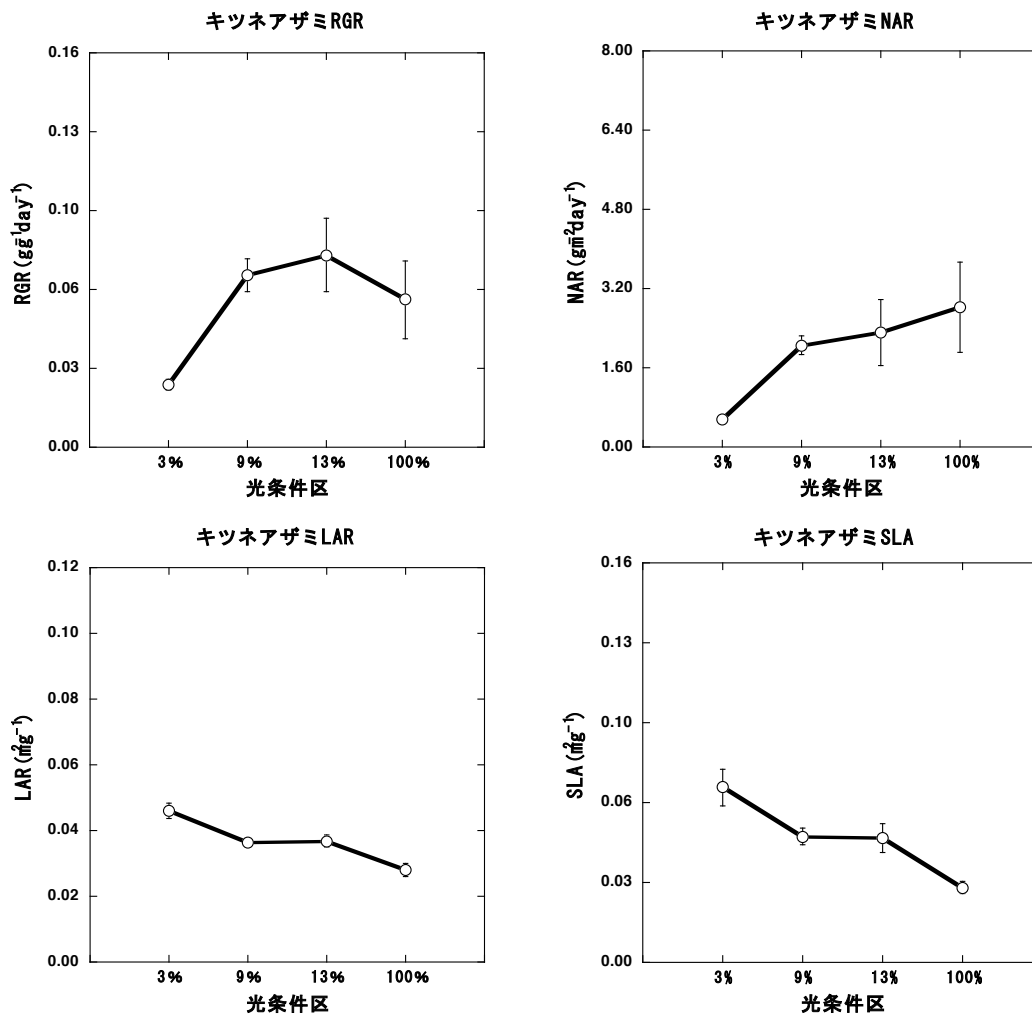
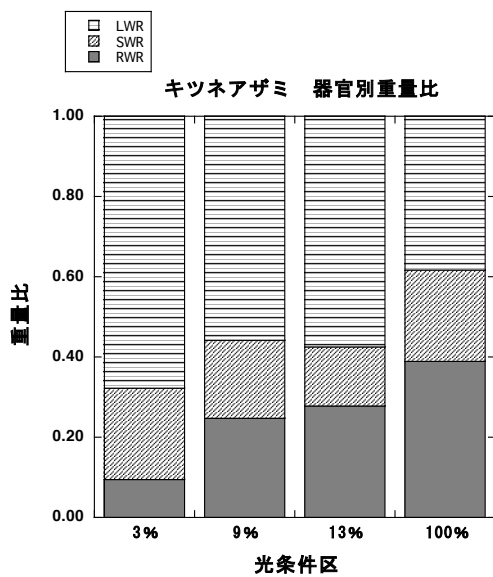


図 26. 異なる光条件下で栽培したキットネアザミ（チノー産）の生長解析結果



群馬大学荒牧キャンパス構内に設置した異なる光条件区（相対光量子密度 3%、9%、13%、100%）内で、ポット植えた苗を 2017 年 7 月 4 日から 17 日間栽培した。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。

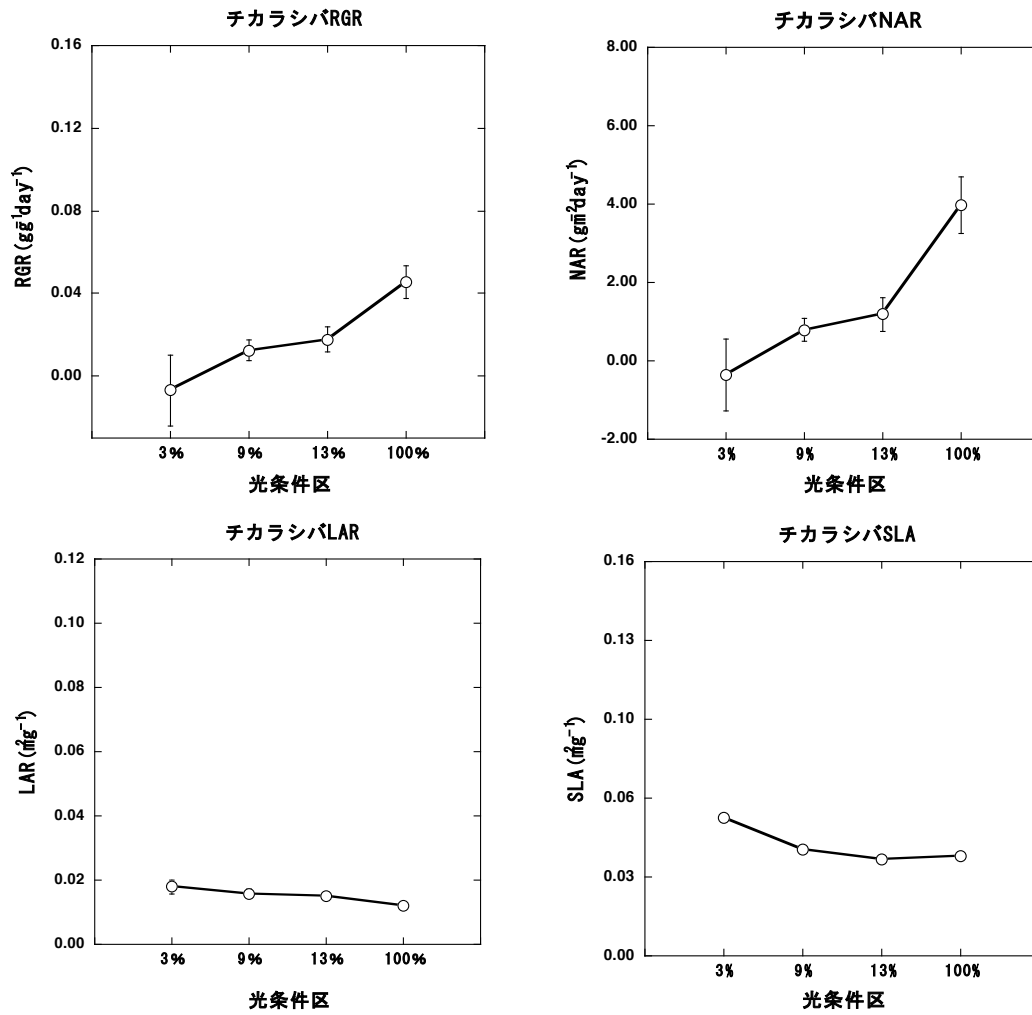
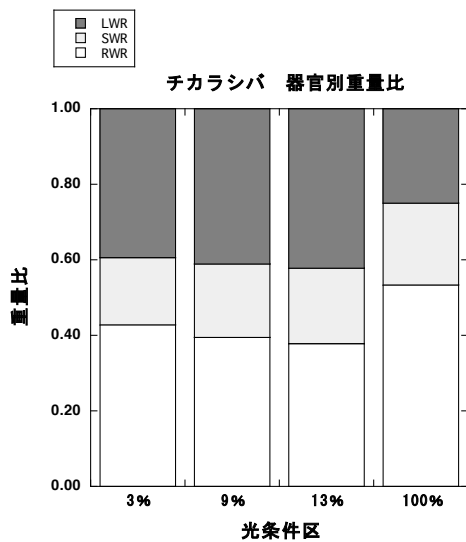


図 27. 異なる光条件下で栽培したチカラシバ（荒牧産）の生長解析結果



群馬大学荒牧キャンパス構内に設置した異なる光条件区（相対光量子密度 3%、9%、13%、100%）内で、ポット植えした苗を 2017 年 8 月 10 日から 21 日間栽培した。相対生長速度 (RGR)、純同化率 (NAR)、葉面積比 (LAR)、比葉面積 (SLA)、器官別重量比 (WR) を示す。縦棒は標準偏差。n=13-14。

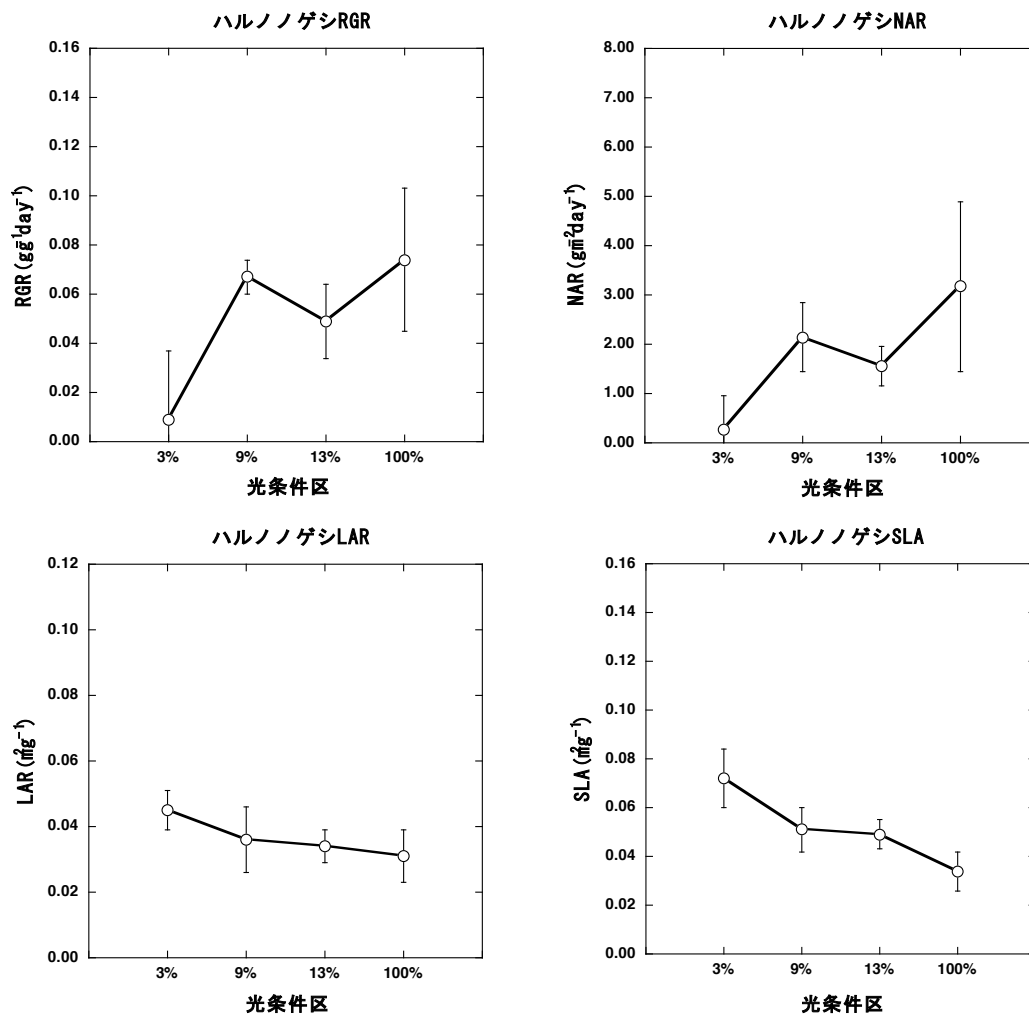
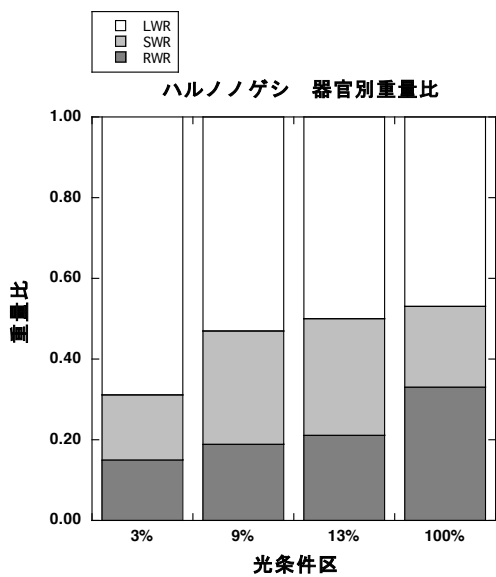


図 28. 異なる光条件下で栽培したハルノノゲシ（チノー産）の生長解析結果



群馬大学荒牧キャンパス構内に設置した異なる光条件区（相対光量子密度 3%、9%、13%、100%）内で、ポット植えた苗を 2017 年 7 月 4 日から 17 日間栽培した。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=3-5。

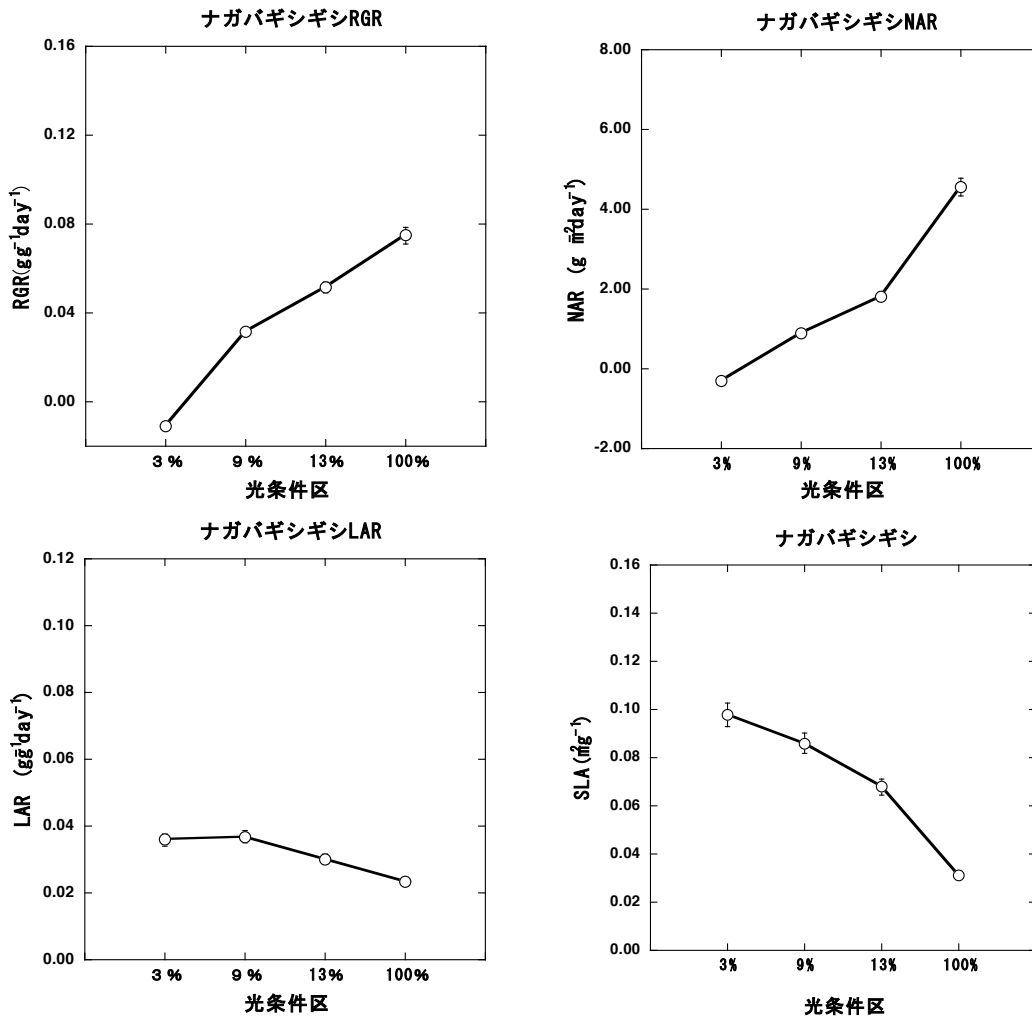
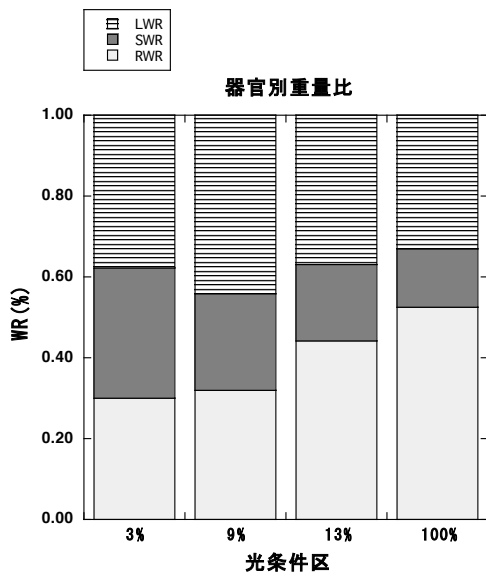


図 29. 異なる光条件下で栽培したナガバギシグシ (アドバンテスト産) の生長解析結果



群馬大学荒牧キャンパス構内に設置した異なる光条件区 (相対光量子密度 3%、9%、13%、100%) 内で、ポット植えした苗を 2017 年 6 月 19 日から 22 日間栽培した。相対生長速度 (RGR)、純同化率 (NAR)、葉面積比 (LAR)、比葉面積 (SLA)、器官別重量比 (WR) を示す。縦棒は標準偏差。n=15-17。

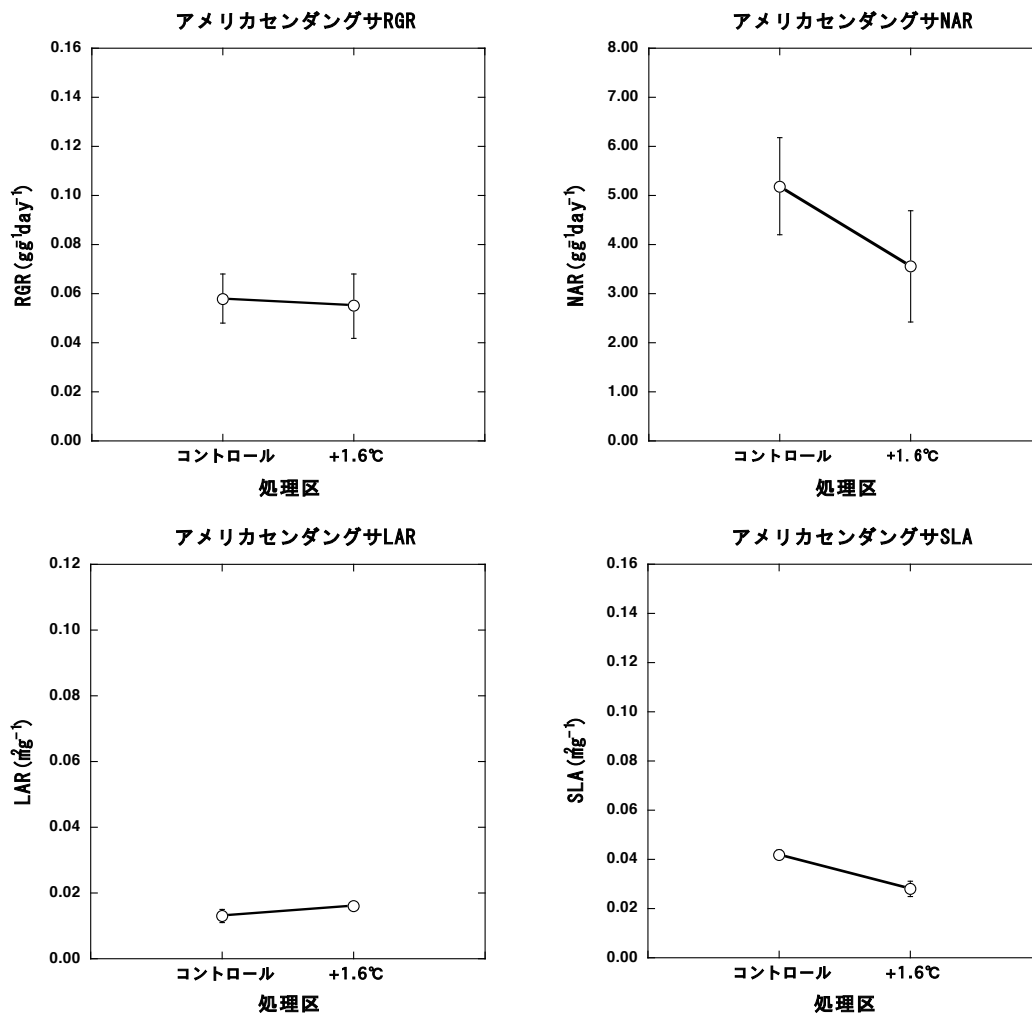
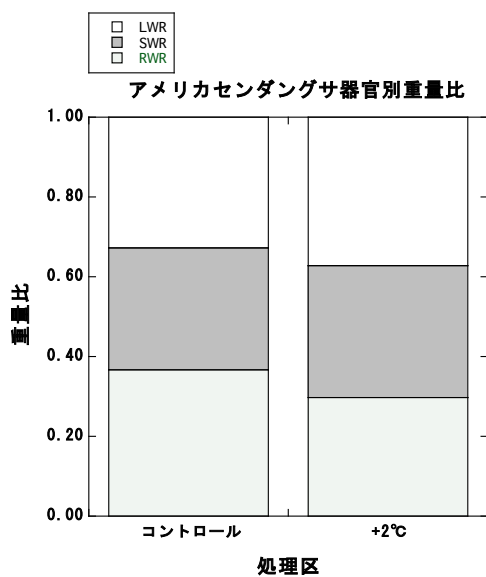


図 30. 異なる温度条件下で栽培したアメリカセンダングサ（西榛名産）の生長解析結果



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上昇させた 1.6°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 2017 年 10 月 5 日から 28 日間栽培した。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。

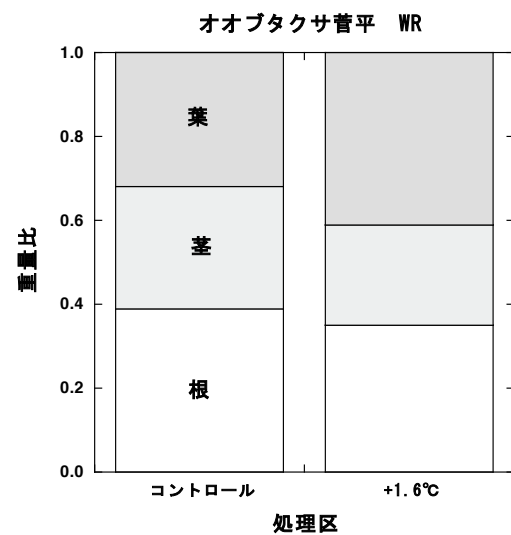
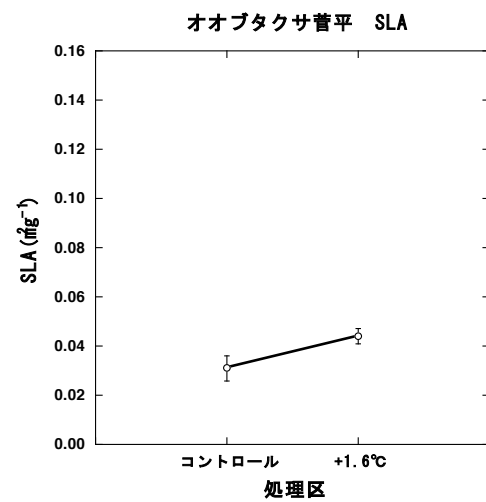
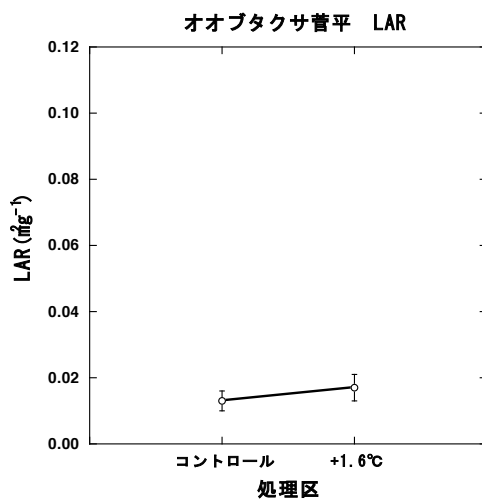
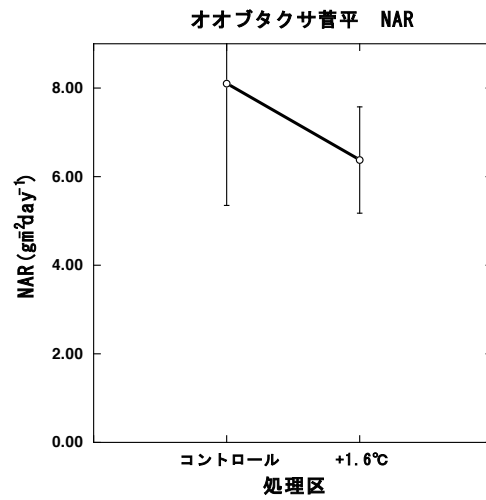
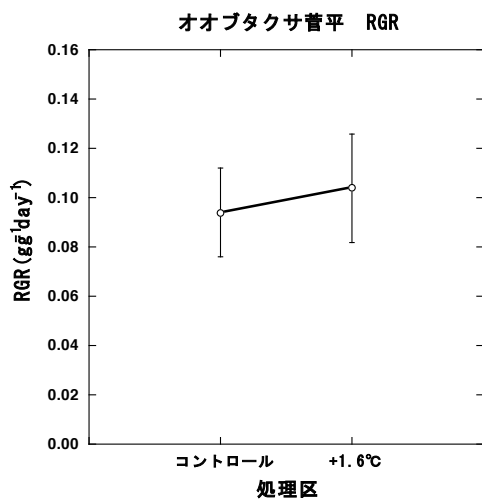


図 31. 異なる温度条件下で栽培したオオブタクサ（菅平産）の生長解析結果

群馬大学荒牧キャンパス構内の裸地（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上昇させた 1.6°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 2017 年 6 月 27 日から 14 日間栽培した。相対生長速度（RGR）、純同化率（NAR）、葉面積比（LAR）、比葉面積（SLA）、器官別重量比（WR）を示す。縦棒は標準偏差。n=9。

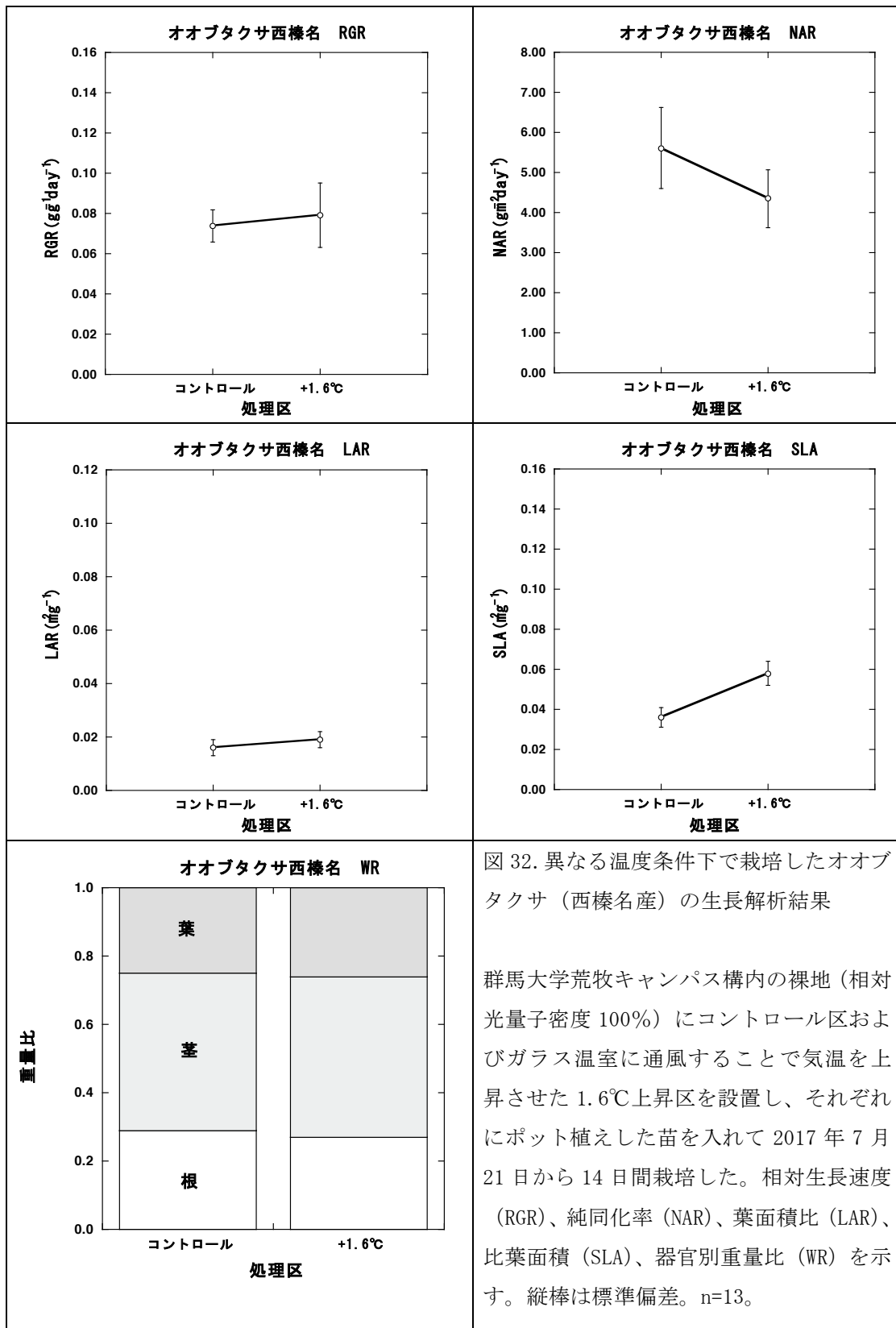


図 32. 異なる温度条件下で栽培したオオブタクサ（西榛名産）の生長解析結果

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上昇させた 1.6°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 2017 年 7 月 21 日から 14 日間栽培した。相対生長速度（RGR）、純同化率（NAR）、葉面積比（LAR）、比葉面積（SLA）、器官別重量比（WR）を示す。縦棒は標準偏差。n=13。

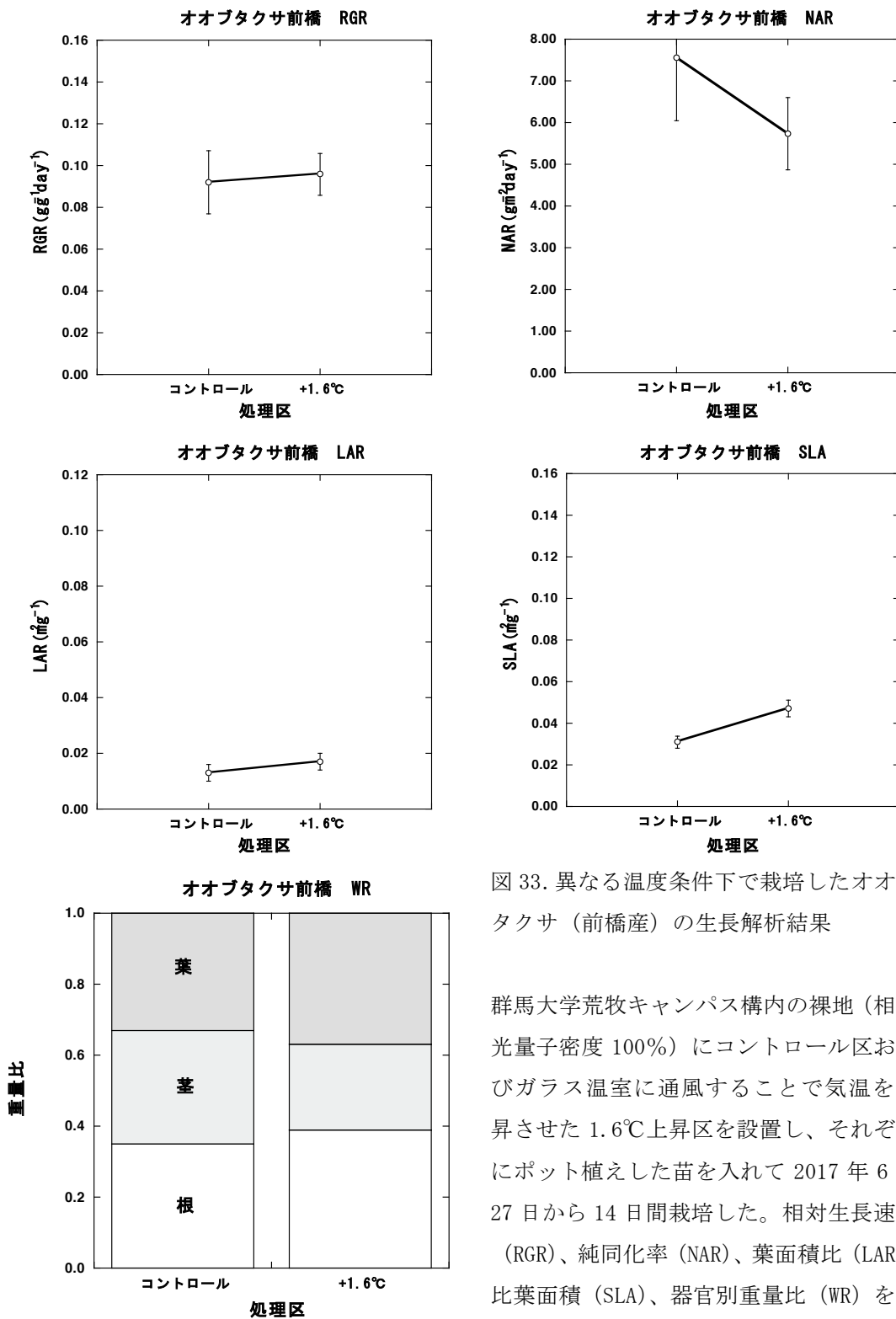


図 33. 異なる温度条件下で栽培したオオブタクサ（前橋産）の生長解析結果

群馬大学荒牧キャンパス構内の裸地（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上昇させた 1.6°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 2017 年 6 月 27 日から 14 日間栽培した。相対生長速度（RGR）、純同化率（NAR）、葉面積比（LAR）、比葉面積（SLA）、器官別重量比（WR）を示す。縦棒は標準偏差。n=9-10。

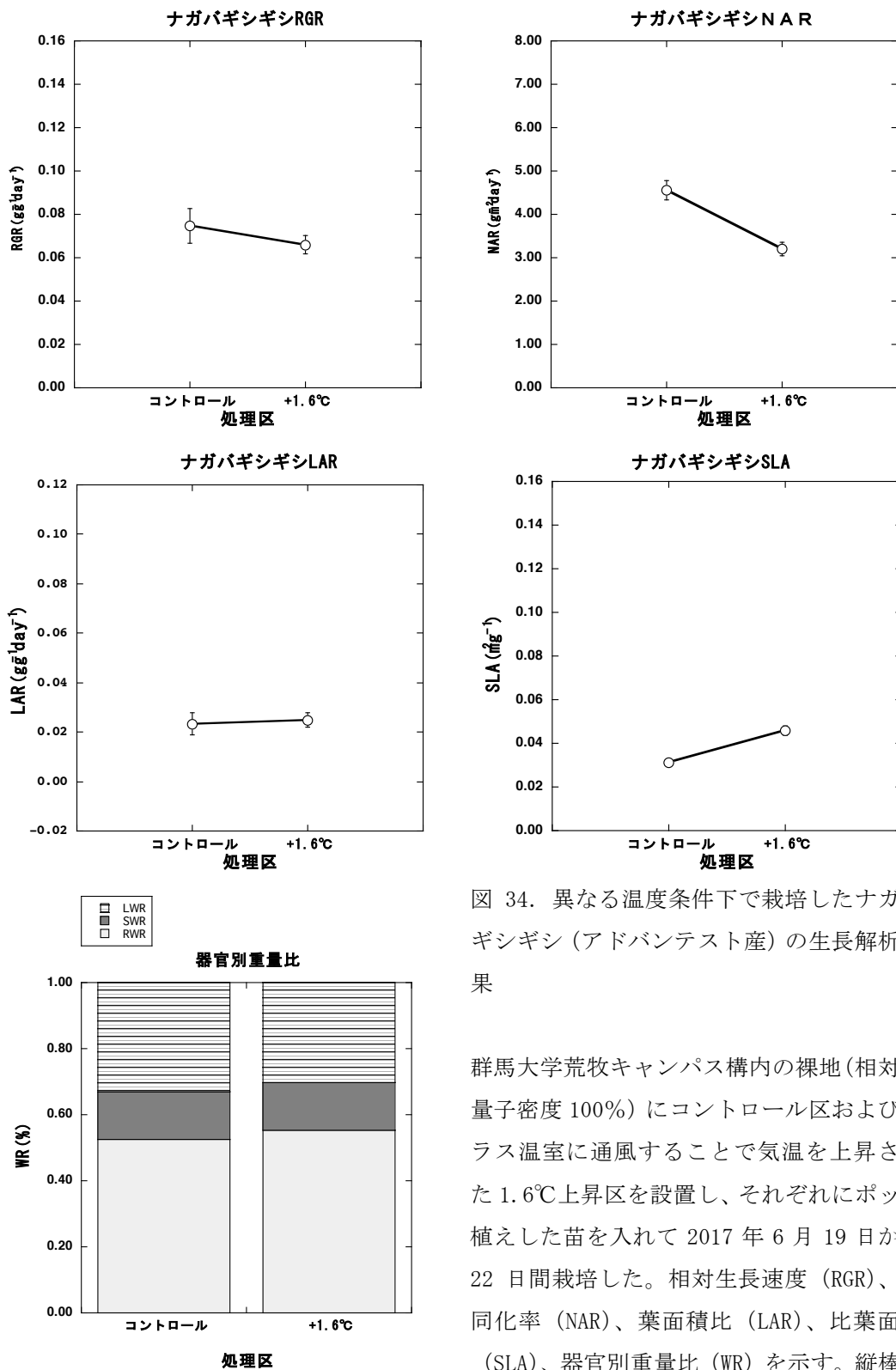


図 34. 異なる温度条件下で栽培したナガバギシギシ (アドバンテスト産) の生長解析結果

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上昇させた 1.6°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 2017 年 6 月 19 日から 22 日間栽培した。相対生長速度 (RGR)、純同化率 (NAR)、葉面積比 (LAR)、比葉面積 (SLA)、器官別重量比 (WR) を示す。縦棒は標準偏差。n=15-17。

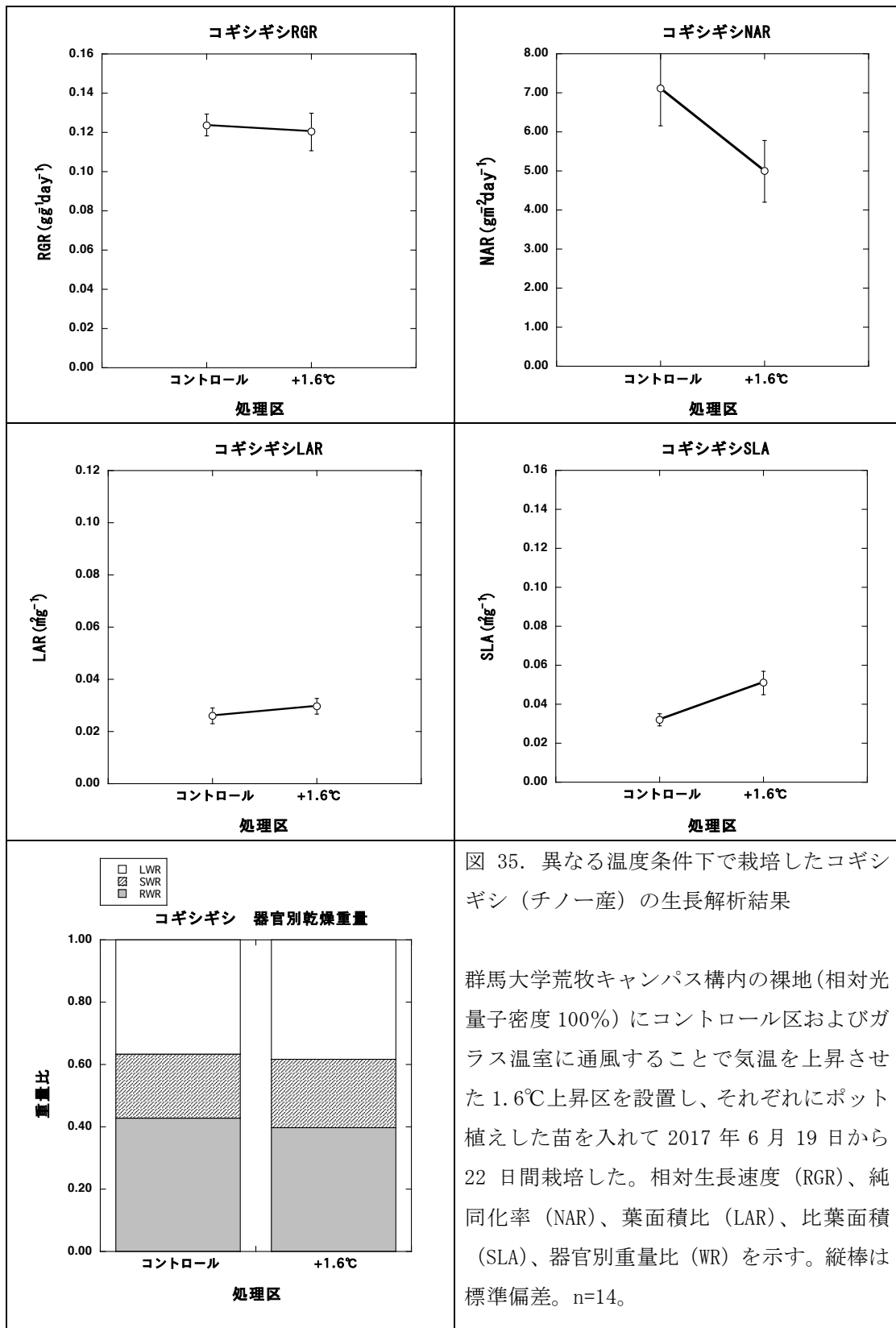


図 35. 異なる温度条件下で栽培したコギシギシ（チノー産）の生長解析結果

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上昇させた 1.6°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 2017 年 6 月 19 日から 22 日間栽培した。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=14。

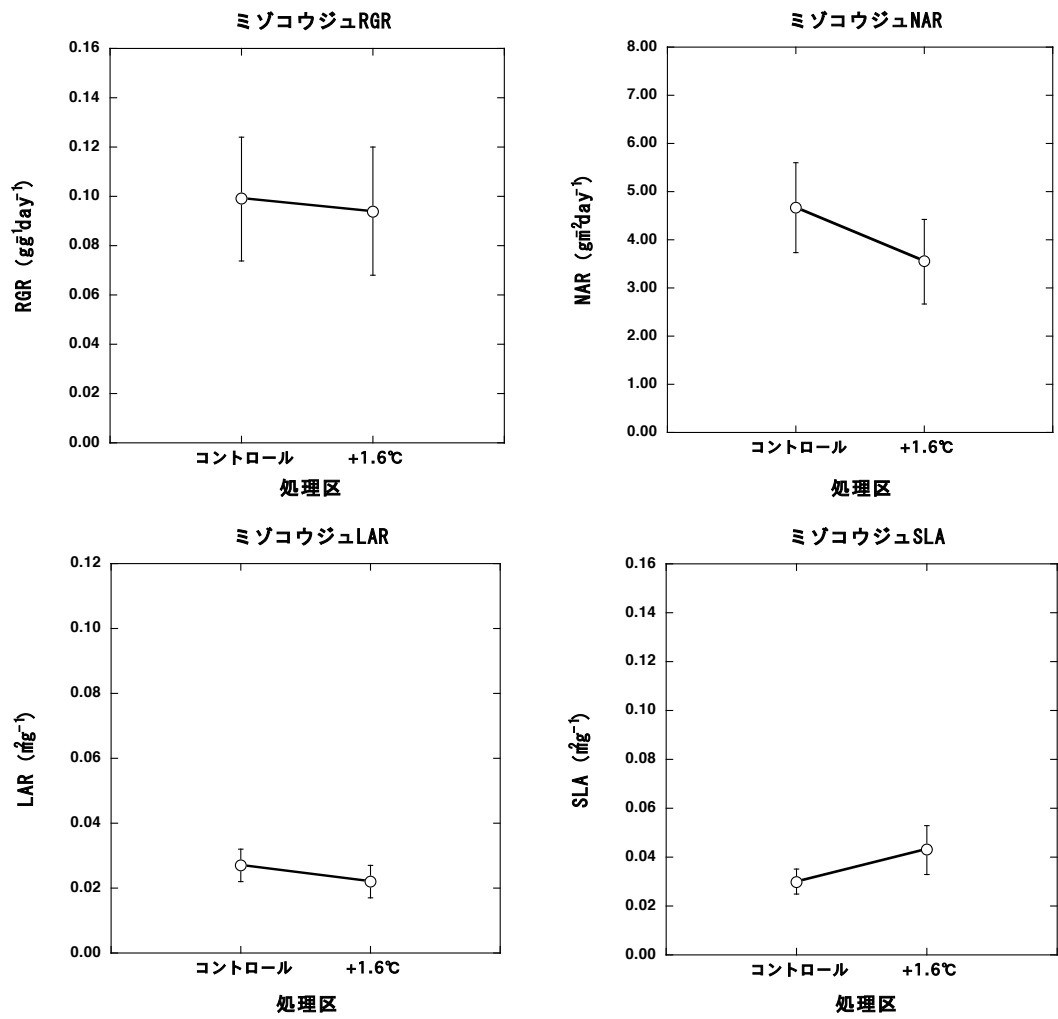
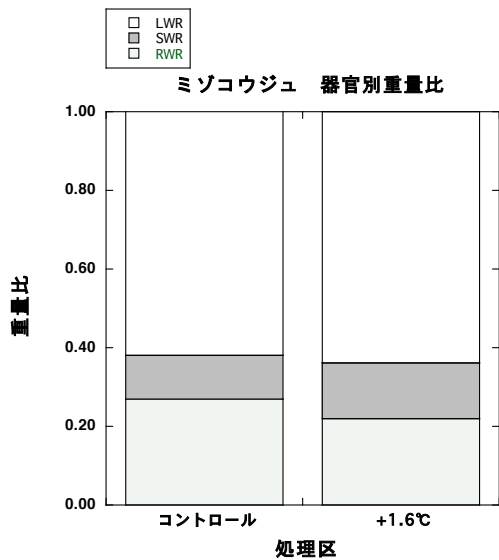


図 36. 異なる温度条件下で栽培したミゾコウジュ（チノー産）の生長解析結果



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上昇させた 1.6°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 2017 年 7 月 21 日から 14 日間栽培した。相対生長速度 (RGR)、純同化率 (NAR)、葉面積比 (LAR)、比葉面積 (SLA)、器官別重量比 (WR) を示す。縦棒は標準偏差。n=5。

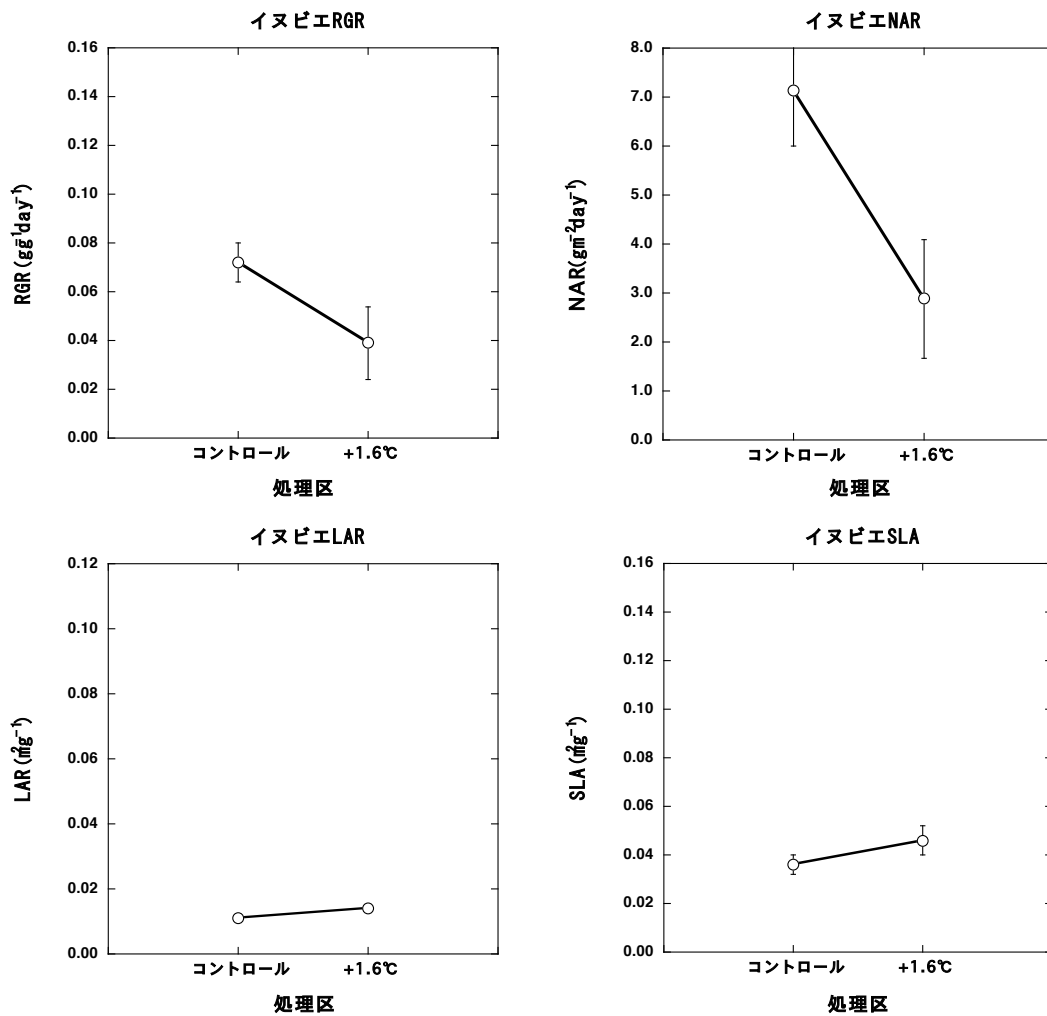
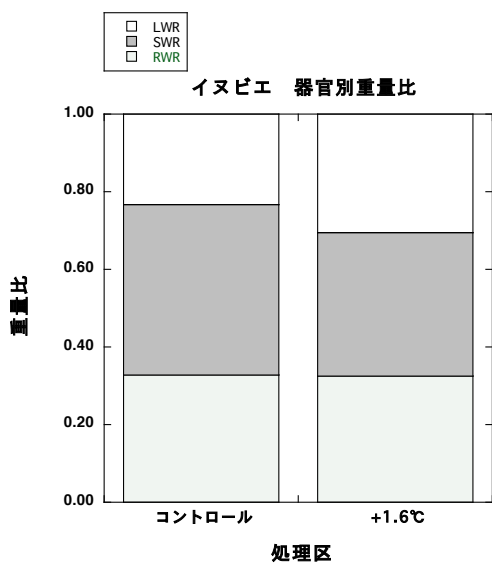


図 37. 異なる温度条件下で栽培したイヌビエ（藤岡産）の生長解析結果



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上昇させた 1.6°C 上昇区を設置し、それぞれにポット植えた苗を入れて 2017 年 7 月 21 日から 14 日間栽培した。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=6。

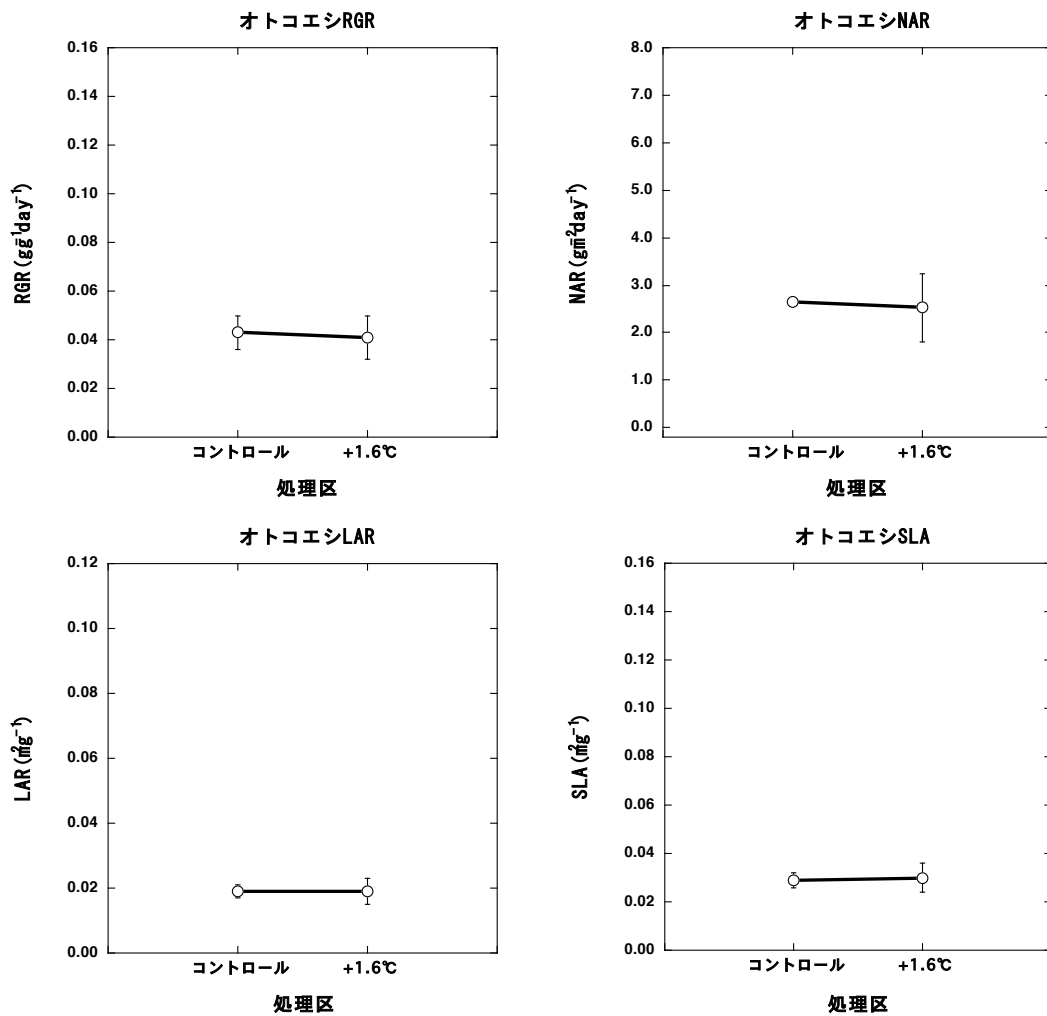
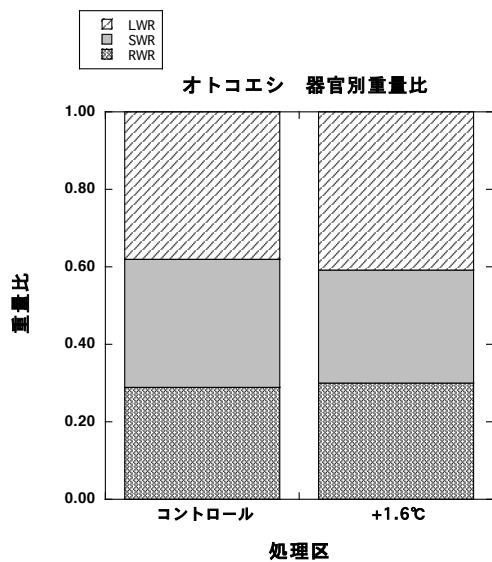


図 38. 異なる温度条件下で栽培したオトコエシ（西榛名産）の生長解析結果



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上昇させた 1.6℃上昇区を設置し、それぞれにポット植えた苗を入れて 2017 年 6 月 27 日から 22 日間栽培した。相対生長速度 (RGR)、純同化率 (NAR)、葉面積比 (LAR)、比葉面積 (SLA)、器官別重量比 (WR) を示す。縦棒は標準偏差。n=13。

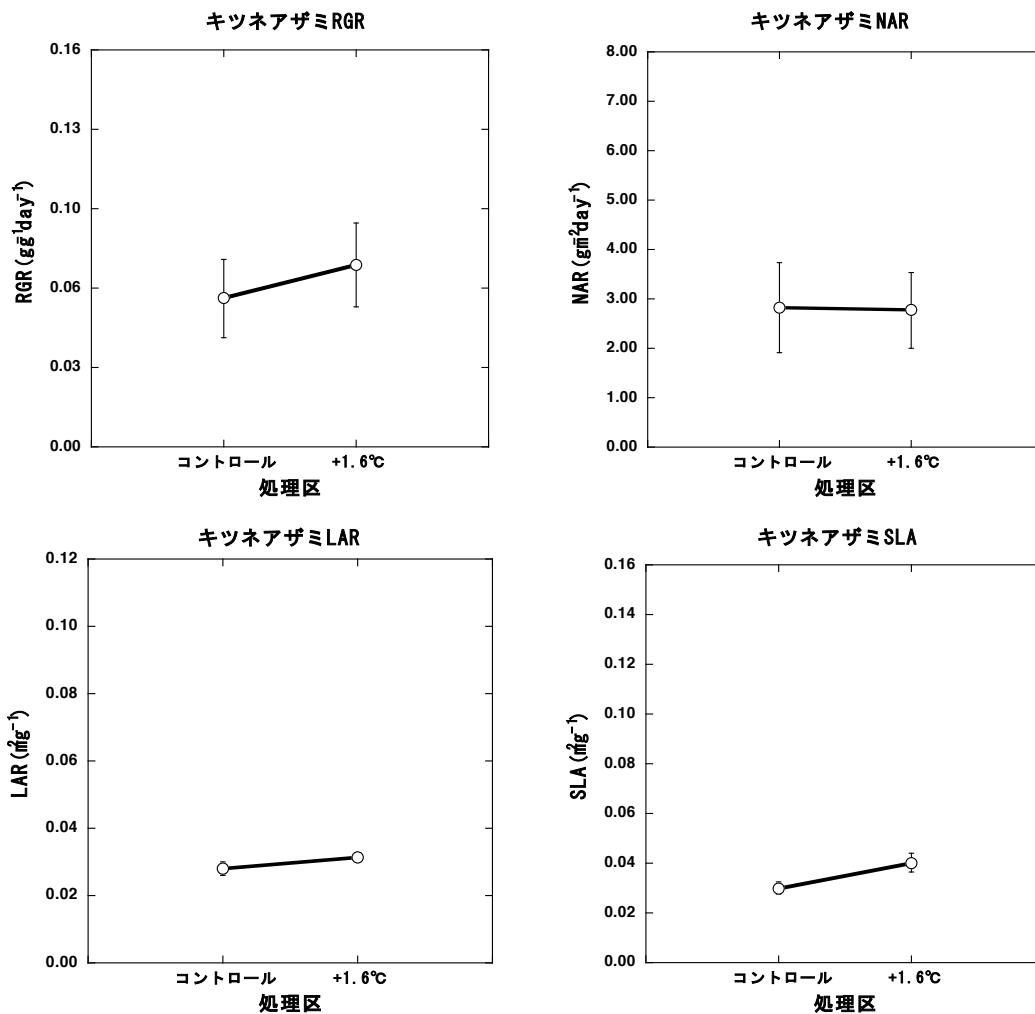
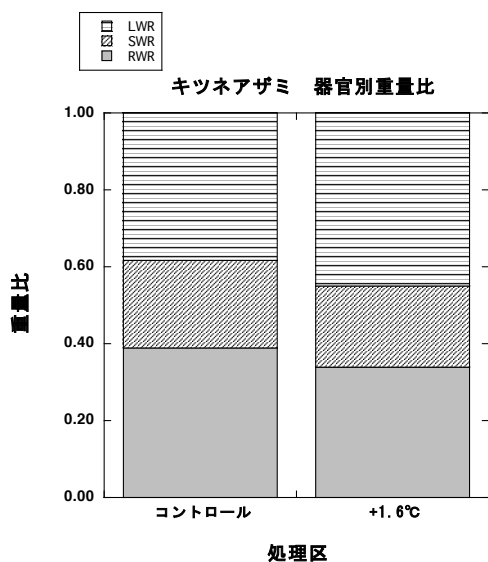


図 39. 異なる温度条件下で栽培したキツネアザミ（チノー産）の生長解析結果



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上昇させた 1.6°C 上昇区を設置し、それぞれにポット植えた苗を入れて 2017 年 7 月 4 日から 17 日間栽培した。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。

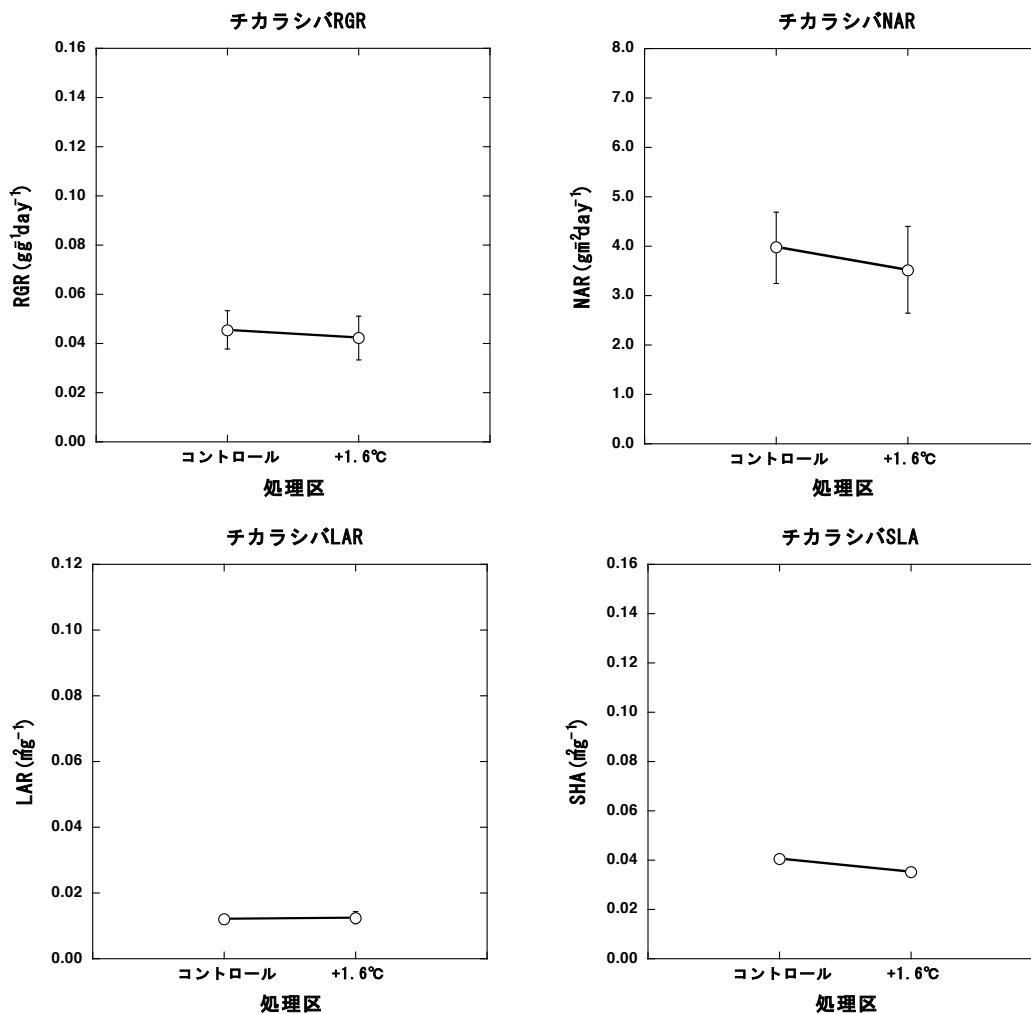
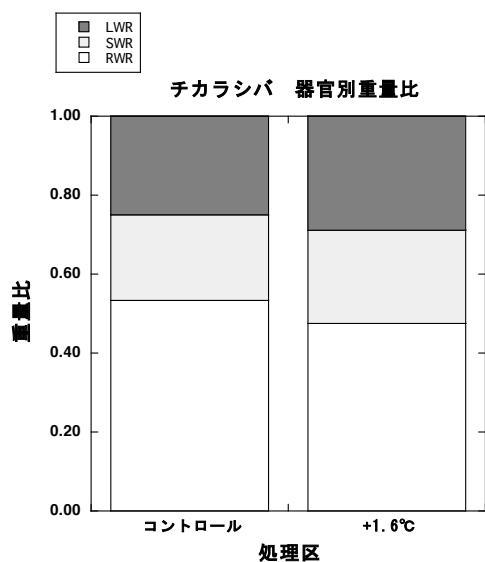


図 40. 異なる温度条件下で栽培したチカラシバ（荒牧産）の生長解析結果



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上昇させた 1.6°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 2017 年 8 月 10 日から 21 日間栽培した。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=14。

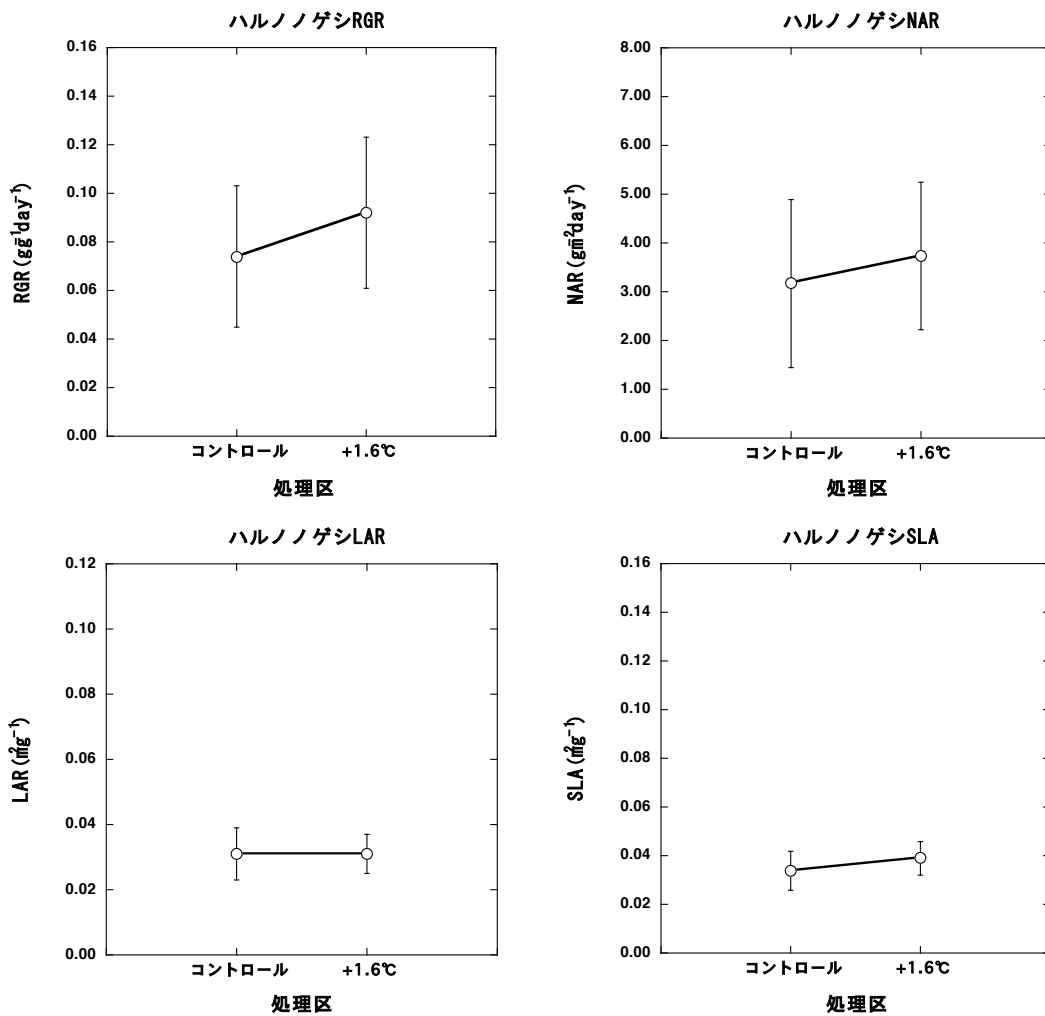
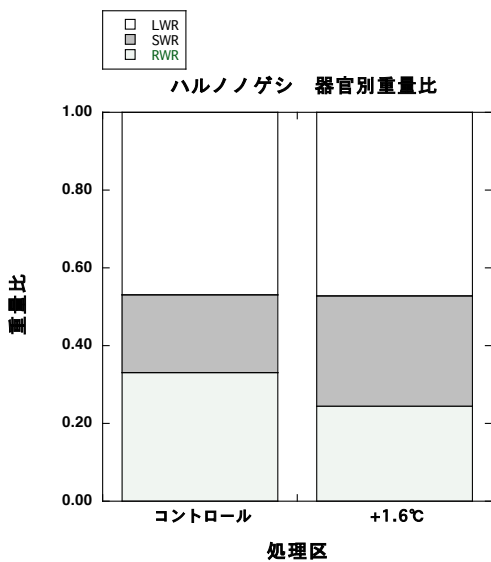


図 41. 異なる温度条件下で栽培したハルノノゲシ（チノー産）の生長解析結果



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上昇させた 1.6°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 2017 年 7 月 4 日から 14 日間栽培した。相対生長速度 (RGR)、純同化率 (NAR)、葉面積比 (LAR)、比葉面積 (SLA)、器官別重量比 (WR) を示す。縦棒は標準偏差。n=5。

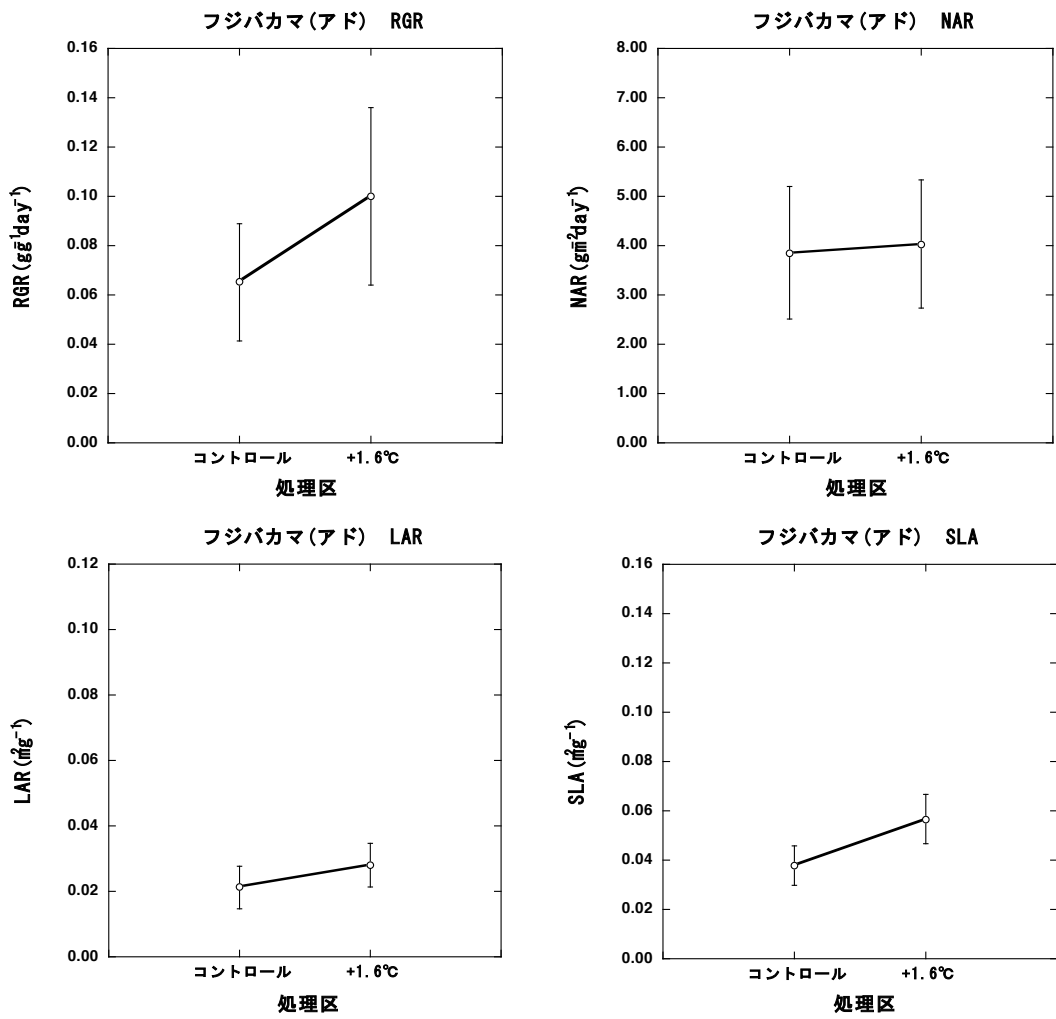
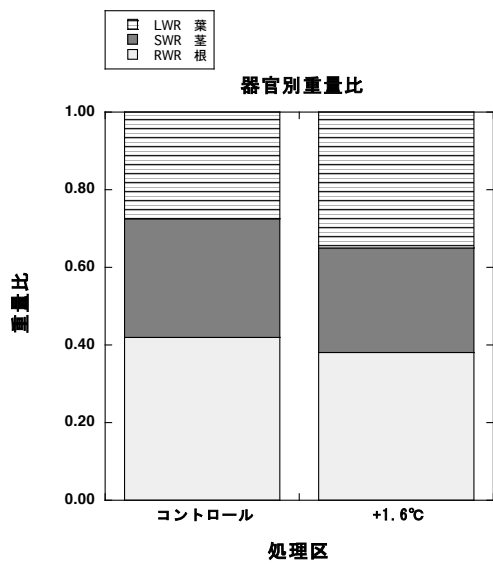


図 42. 異なる温度条件下で栽培したフジバカマ (アドバンテスト産) の生長解析結果



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上昇させた 1.6°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 2017 年 7 月 19 日から 15 日間栽培した。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=10。

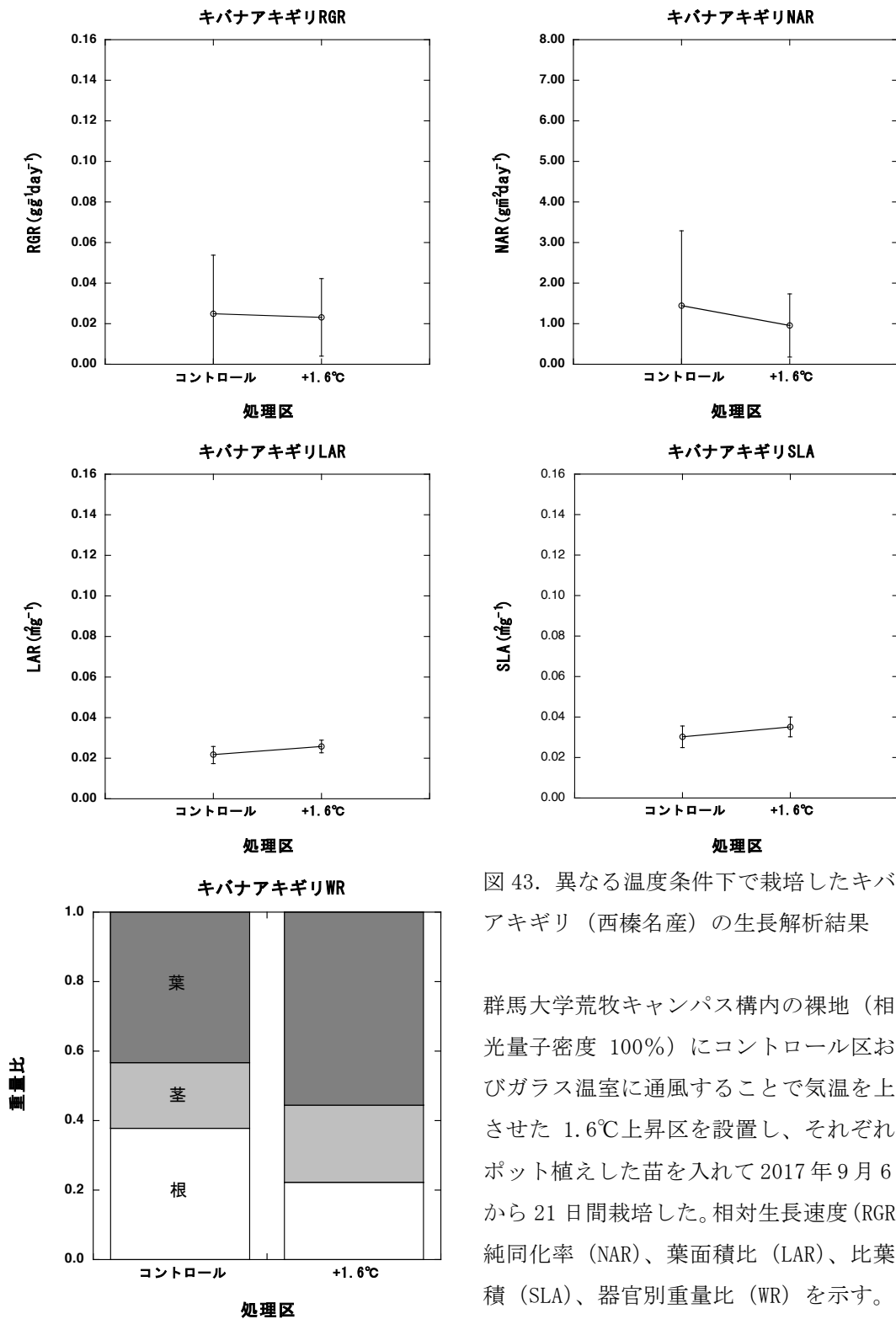


図 43. 異なる温度条件下で栽培したキバナアキギリ（西榛名産）の生長解析結果

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上昇させた 1.6°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 2017 年 9 月 6 日から 21 日間栽培した。相対生長速度（RGR）、純同化率（NAR）、葉面積比（LAR）、比葉面積（SLA）、器官別重量比（WR）を示す。縦棒は標準偏差。n=5-6。

図 44. 異なる温度条件下で栽培した
の生長解析結果

群馬大学荒牧キャンパス構内の裸地(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上昇させた 1.6℃上昇区を設置し、それぞれにポット植えた苗を入れて 2017 年 8 月 3 日から 27 日間栽培した。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=10。

図 45. 異なる温度条件下で栽培した
の生長解析結果

群馬大学荒牧キャンパス構内の裸地(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上昇させた 1.6℃上昇区を設置し、それぞれにポット植えた苗を入れて 2017 年 9 月 13 日から 14 日間栽培した。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=16。

図 46. 異なる温度条件下で栽培した
の生長解析結果

群馬大学荒牧キャンパス構内の裸地(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上昇させた 1.6℃上昇区を設置し、それぞれにポット植えた苗を入れて 2017 年 8 月 31 日から 19 日間栽培した。相対生長速度 (RGR)、純同化率 (NAR)、葉面積比 (LAR)、比葉面積 (SLA)、器官別重量比 (WR) を示す。縦棒は標準偏差。n=12。

図 47. 異なる温度条件下で栽培した
の生長解析結果

群馬大学荒牧キャンパス構内の裸地(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上昇させた 1.6℃ 上昇区を設置し、それぞれにポット植えした苗を入れて 2017 年 9 月 8 日から 21 日間栽培した。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=3-4。

図 48. 異なる温度条件下で栽培した
の生長解析結果

群馬大学荒牧キャンパス構内の裸地(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上昇させた 1.6℃上昇区を設置し、それぞれにポット植えした苗を入れて 2017 年 7 月 4 日から 14 日間栽培した。相対生長速度 (RGR)、純同化率 (NAR)、葉面積比 (LAR)、比葉面積 (SLA)、器官別重量比 (WR) を示す。縦棒は標準偏差。n=9。

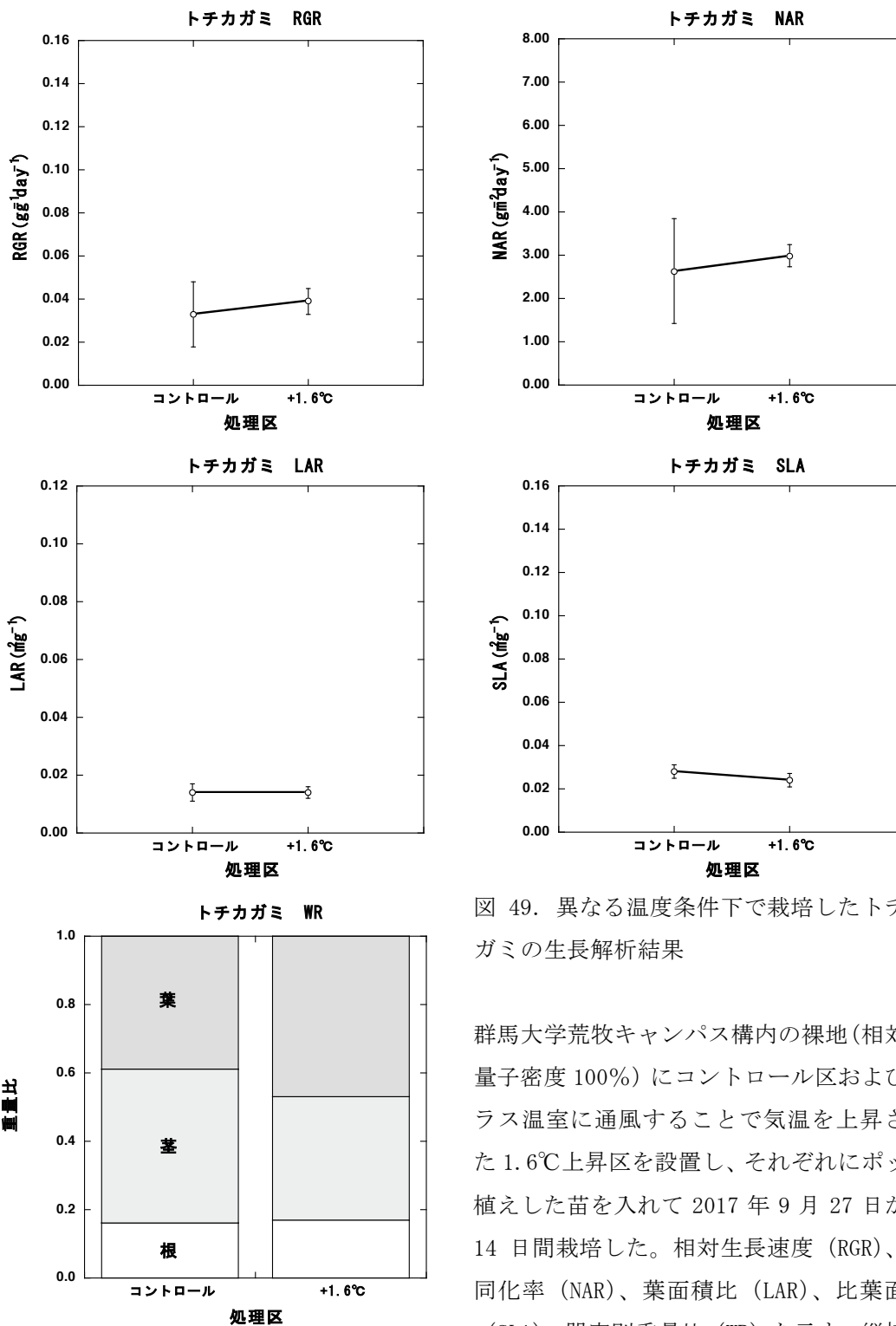


図 49. 異なる温度条件下で栽培したトチカガミの生長解析結果

群馬大学荒牧キャンパス構内の裸地(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上昇させた 1.6°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 2017 年 9 月 27 日から 14 日間栽培した。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=6。

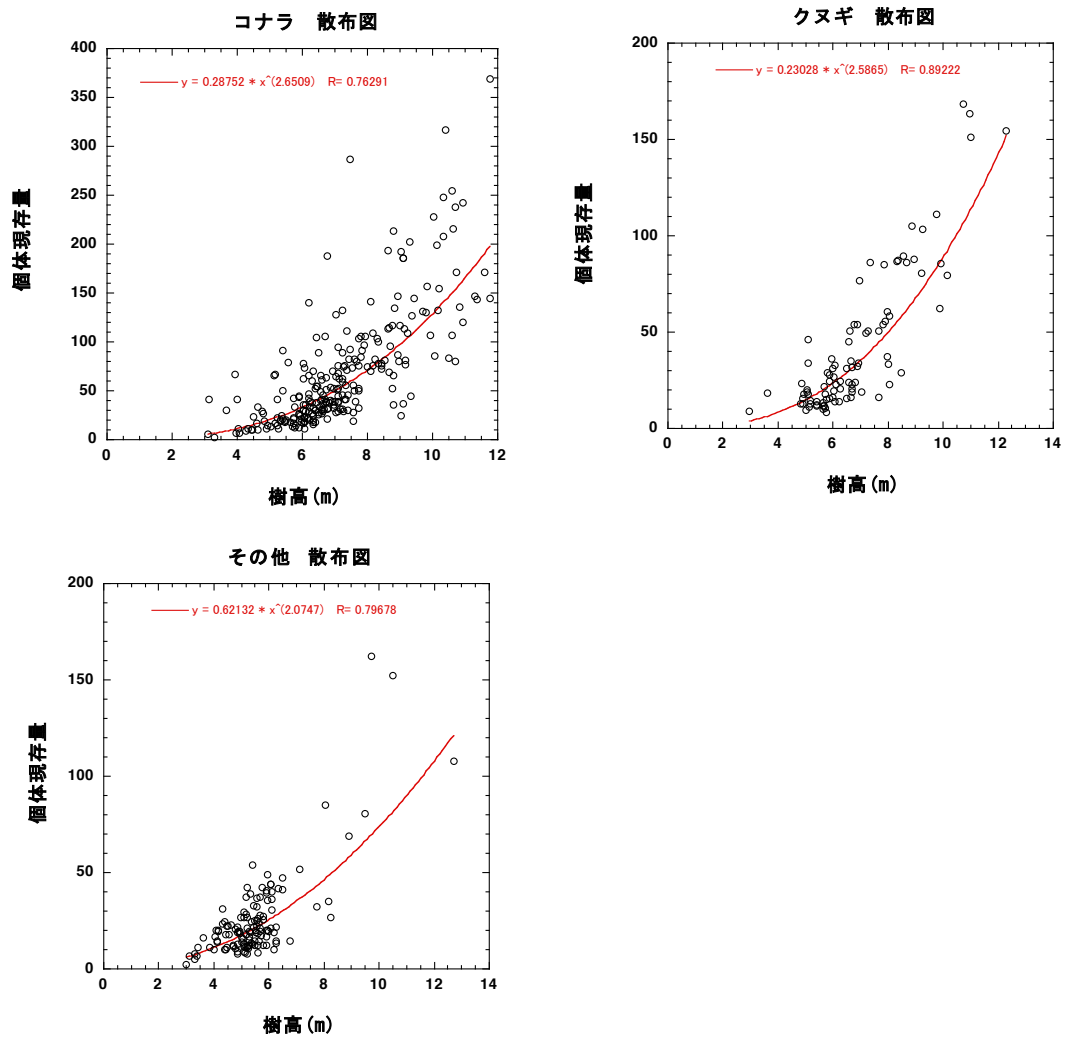


図 50. 樹高と個体現存量の関係の推定結果

チノー・ビオトープの林で測定されたコナラ、クヌギ、その他の樹木の樹高と個体現存量の関係

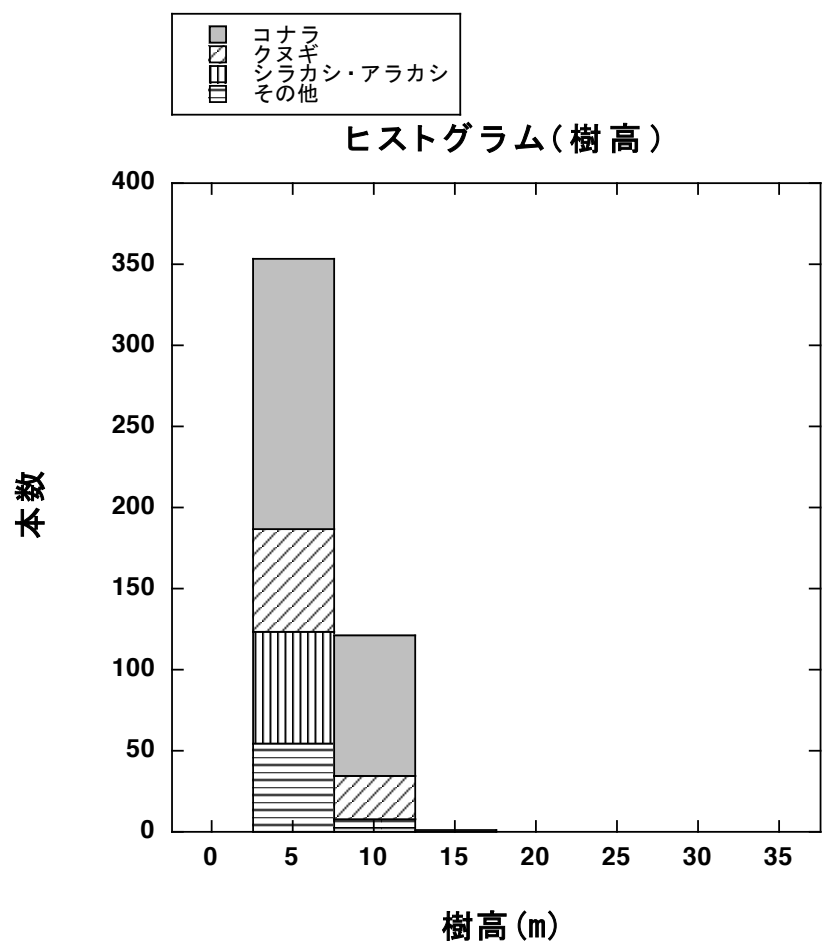


図 51. チノー・ビオトープの林地における樹種別樹高の度数分布
 2017年6月26日から11月6日に行った毎木調査で測定した樹高を樹種ごとに示した。

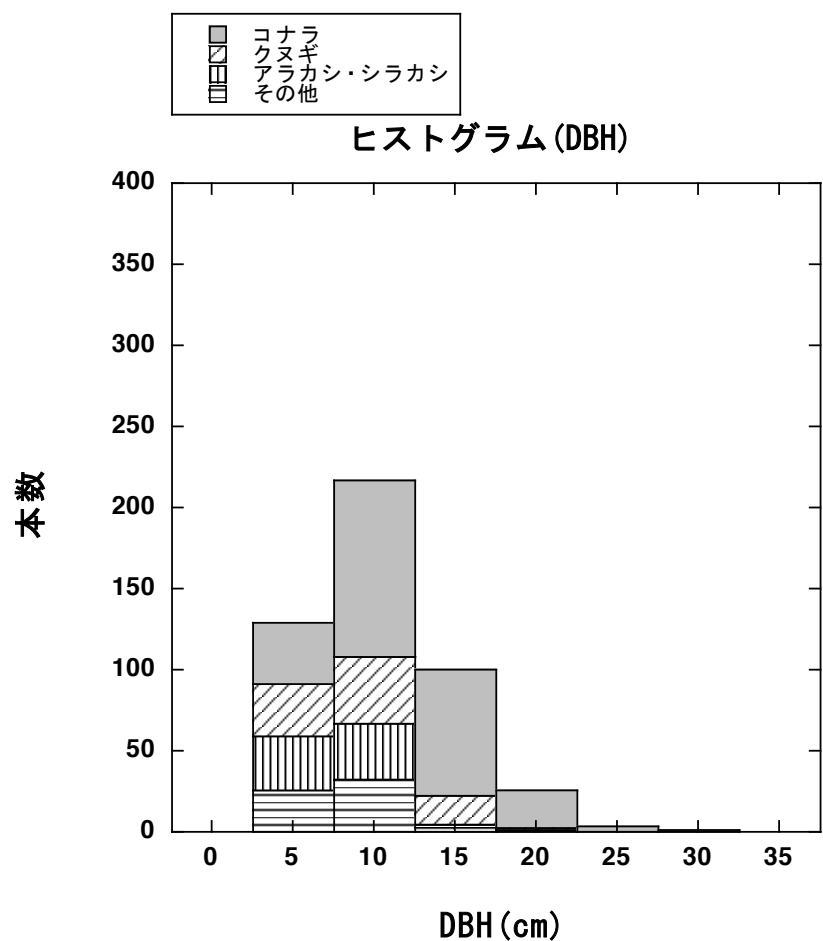


図 52. チノー・ビオトープの林地における樹種別 DBH の度数分布
 2017 年 6 月 26 日から 11 月 6 日に行った毎木調査で測定した樹高を樹種ごとに示した。

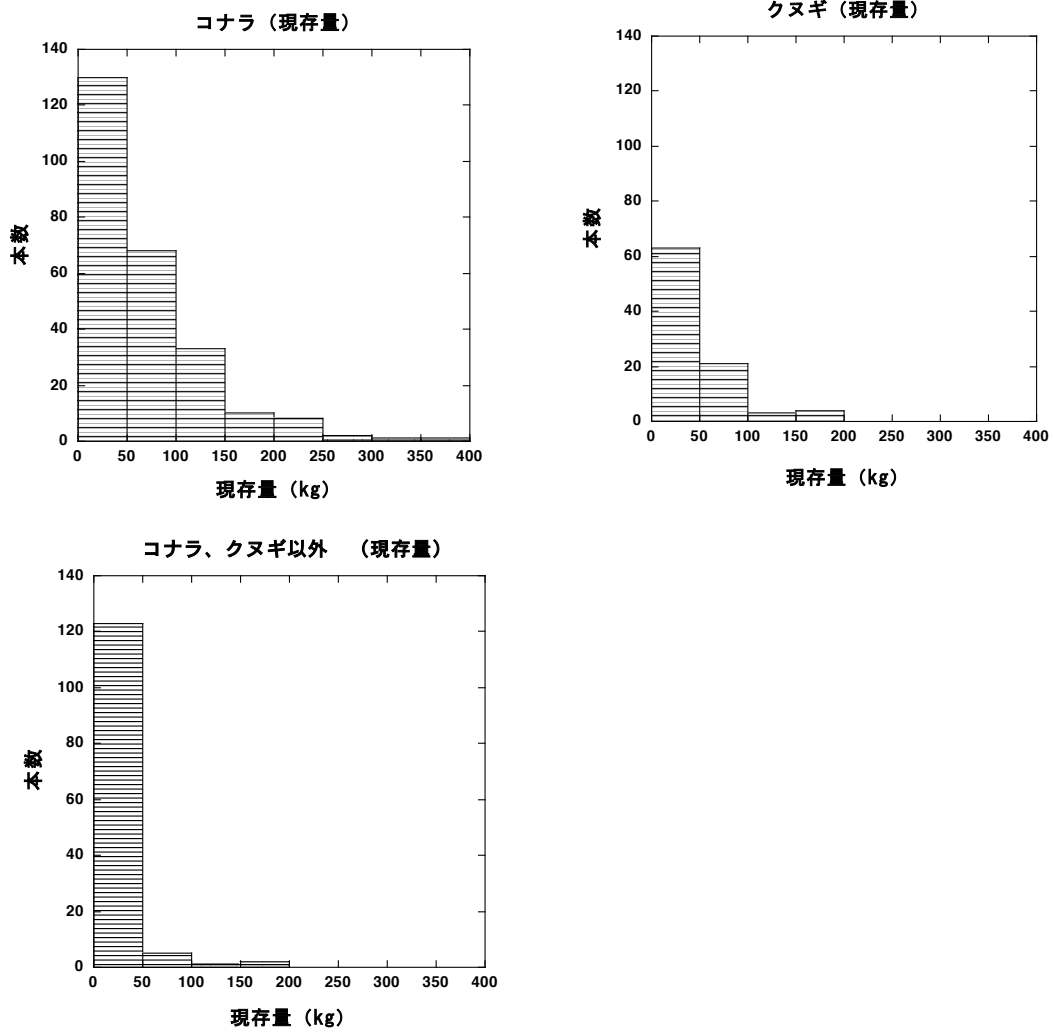


図 53. チノー・ビオトープで測定した樹種別現存量の度数分布
2017年6月26日から11月6日に行った毎木調査で測定した。

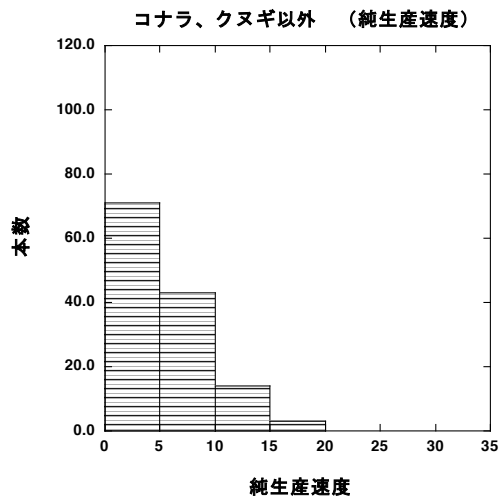
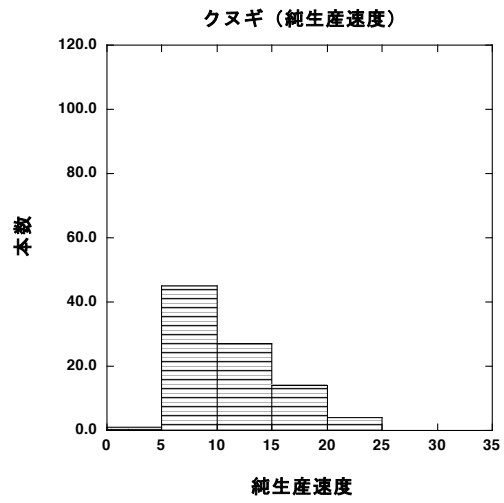
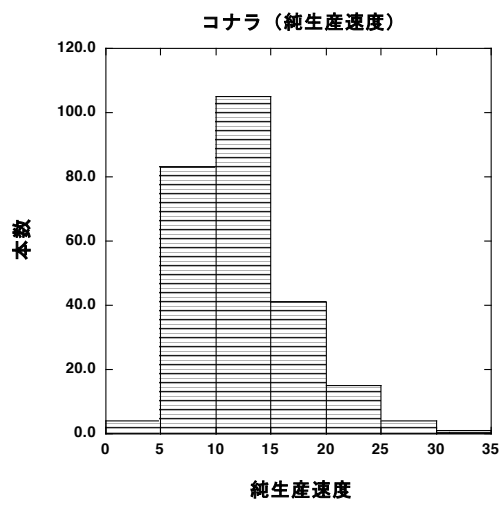


図 54. チノー・ビオトープにおける樹木の樹種別純生産速度の度数分布
2017年6月26日から11月6日に行った毎木調査で測定した結果を基に計算した。

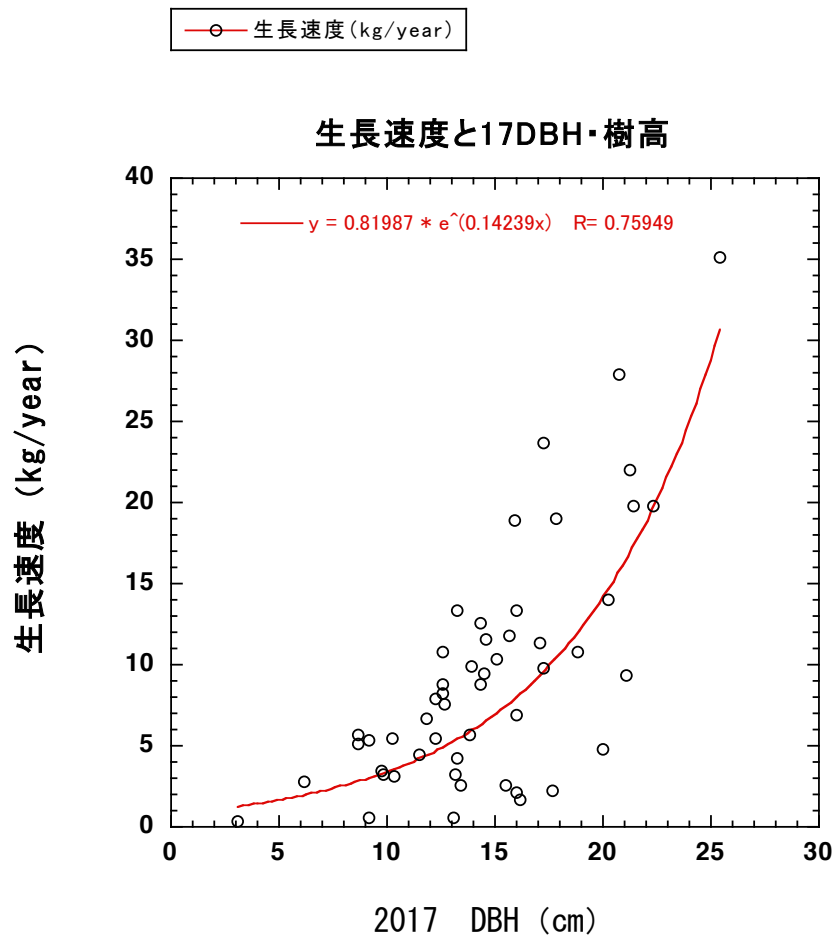


図 55 チノー・ビオトープ林における生長速度と DBH の関係
2012 年から 2017 年までの年間成長速度と 2017 年の DBH を示す。