

チカラシバとススキの発芽促進による
地産地消型緑化の低コスト化

令和 6 年 9 月

和歌山大学大学院システム工学研究科

濱田 碧

Promotion of germination of
Pennisetum alopecuroides (L.) Spreng. and
Miscanthus sinensis Andersson for low-cost
locally produced and consumed revegetation

September 2024

Graduate School of Systems Engineering
Wakayama University

Aoi Hamada

概要

近年、景観保全や生物多様性保全の観点から、緑化には施工地周辺に生息する在来植物の種子や苗（地域性種苗）の利用が求められている。地域性種苗の利用は種子を地域内で生産・消費する「みどりの地産地消」という地産地消型の緑化になるため、地域の自立的な経済システムの構築にも関わり、地域活性化への貢献も期待できる。しかし、地域性種苗は外来種に比べて単価が高く、普及に至っていない。そこで本研究では、地域性種苗を用いた緑化の低コスト化を目的に、種子生産や施工時における技術的な課題の解決に取り組んだ。具体的に、チカラシバ(*Pennisetum alopecuroides* (L.) Spreng.) とススキ (*Miscanthus sinensis* Andersson) を対象に採取の機械化や種子栽培の可能性、播種量の削減、種子の選別、発芽の促進、種子の耐塩性について検討した。

第2章では、地域性種苗の播種量削減と緑化植物としてどのような植物が有用であるかを検討した。その結果、実験区内ではチカラシバとススキがシカに食べられず優占し、少量の播種なら3年目、中量以上の播種なら2年目に70%以上の植生率が確認できた。このことから、チカラシバやススキのようなシカ不嗜好性植物がシカ被害対策に有用であると考えられた。第3章では、採種の機械化を検討したところ、種子が傷ついてしまうことがあったため、チカラシバを対象に傷ついた種子の発芽能力を確認した。その結果、種子は傷つくと吸水しやすくなり発芽が早くなることがわかった。第4章では、採取効率の向上のため、チカラシバの種子栽培の可能性を検討した。その結果、チカラシバはイネよりも1/8倍の作業時間で栽培できることがわかった。第5章～第7章では、チカラシバとススキを対象に発芽率の高い種子の選別方法や発芽促進の方法について検討した。その結果、採種時期によっては軽くて未熟な種子が多くなるが、エタノール選により軽い種子を除去することで高い発芽率の種子を選別できることがわかった。また、採種後すぐに播種すると発芽が不揃いであり、チカラシバでは2ヶ月以上、ススキでは1ヶ月以上保存期間を経験させることで発芽の斉一性を高められる可能性が考えられた。さらに、チカラシバでは5℃の低温で湿層処理を行うことにより、また、チカラシバとススキでは総苞毛や基毛といった毛や包穎を除去することによって発芽が促進された。また、冬季から夏季を想定した10～30℃の温度で播種すると、10℃では他の播種温度よりも発芽が遅く2～3ヶ月かかり、冬季における播種では発芽が遅くなる可能性が考えられた。第8章では、チカラシバとススキの耐塩性について津波等の自然災害による一時的な塩分汚染を想定した実験を行った。ススキの種子は15日間塩分に汚染されてもその後水で洗えば発芽したが、チカラシバは5日以上塩水に汚染されると発芽しなくなった。このことから、チカラシバよりもススキの方が耐塩性は高いと判断された。

本研究の最終的な目標は「みどりの地産地消」という地産地消型の緑化を確立させることにある。種子生産や施工時の技術コストの削減だけでなく種子流通のコスト削減も重要な課題であり、それを実現するには地域との協働を展開し、種子生産や流通をビジネスモデル化させることが必要である。豊かな景観や生態系、歴史や文化を後世に継承するためには、今後も社会全体で技術を革新し、人間社会と自然界との関係性の再生を行っていく必要があると考える。

Abstract

In recent years, the use of locally-certified seeds is required for revegetation of landscape and biodiversity conservation. The use of the seeds is a form of “locally produced and consumed revegetation,” and is expected to contribute to establishing a self-sustaining local economic system and to regional revitalization. However, the use of local seeds is a higher cost than alien species, and the seeds have not become widely available. In order to reduce the costs, this study addressed technical issues in revegetation works. Specifically, for *Pennisetum alopecuroides* (L.) Spreng. and *Miscanthus sinensis* Andersson, which were shown to be useful for revegetation, mechanization of gathering seeds, cultivation, reduction of seeding amount, how to improve germination rate and accelerate germination, and salt tolerance were examined.

In Chapter 2, reducing the amount of local seeding and effective plants for revegetation were examined. As a result, it was confirmed that the plant coverage was over 70% in the third year for a small amount of seeding and in the second year for a medium or larger amount of seeding, suggesting that the sowing of deer-resistant *P. alopecuroides* and *M. sinensis* was useful for deer damage control. In Chapter 3, mechanization of gathering seeds was examined, and it was found that the seeds were sometimes damaged. Then, the germination ability of damaged seeds was checked using *P. alopecuroides*. The results showed that damaged seeds absorb water more easily and germinate faster. In Chapter 4, the possibility of seed cultivation was examined. As a result, it was found that *P. alopecuroides* can be cultivated in 1/8 of the work time than rice. In Chapters 5 to 7, the selection method of seeds with high germination rate and the method of accelerating germination were examined. As a result, it was found that ethanol-based sorting could sort seeds with high germination rate by removing light seeds. Germination was inconsistent when the seeds were sown immediately after gathering. Germination uniformity could be improved by a storage period of at least two months in the case of *P. alopecuroides* and one month in the case of *M. sinensis*, and germination of *P. alopecuroides* was accelerated by pretreated with wet condition at 5°C. In addition, caryopses germinated earlier than spikelets. In Chapter 8, seeds of *M. sinensis* germinated after being contaminated with salt for 15 days if washed with water afterward, but seeds of *P. alopecuroides* did not germinate after being contaminated for more than 5 days. This suggested that *M. sinensis* was more salt-tolerant than *P. alopecuroides*.

To realize the ultimate goal of establishing “locally produced and consumed revegetation,” it is necessary to collaborate with local communities and develop a business model for seed production and distribution. In order to pass on rich landscapes, ecosystems, history, and culture to future generations, society as a whole must continue to innovate technology and regenerate the relationship between the human society and the natural world.

目次

1. 緒論	4
1.1. 景観保全と生物多様性保全における地域視点の重要性.....	4
1.2. 地域性種苗を用いた地産地消型の緑化	6
1.2.1. 外来種を用いた緑化と地域性種苗を用いた緑化.....	6
1.2.2. ニホンジカの被害に対する地域性種苗緑化の優位性	8
1.2.3. 気候変動に対する地域性種苗の活用	8
1.2.4. 「みどりの地産地消」で地域の「雑草」を新たな経済資源に.....	9
1.3. 地域性種苗を用いた緑化における技術的な課題.....	10
1.4. 研究目的と本論文の構成	13
2. シカ被害対策における地域性種苗の緑化効果と播種量削減の可能性	14
2.1. はじめに	14
2.2. 材料および方法.....	14
2.2.1. 調査対象地の概要	14
2.2.2. 播種する地域性種苗の選定.....	16
2.2.3. 調査区の設置と播種量.....	17
2.2.4. 調査項目	19
2.3. 結果	20
2.3.1. 植被率の経過.....	20
2.3.2. 出現種の生育状況	20
2.3.3. 法面におけるシカの痕跡	23
2.4. 考察	24
2.4.1. 植被率の経過と出現種の生育状況.....	24
2.4.2. シカ不嗜好性植物に関する考察	24
2.4.3. チカラシバとススキの有用性	24
2.5. まとめ.....	26
3. 採種機の開発と損傷を受けた種子の発芽率の検証	27
3.1. はじめに	27
3.1.1. 採種機の開発.....	27
3.1.2. チカラシバの種子に対する損傷が発芽に及ぼす影響	28
3.2. 材料および方法	29
3.2.1. 保存温度および傷付け処理が発芽に及ぼす影響.....	29
3.2.2. 種皮に対する損傷が種子の吸水に及ぼす影響	31
3.3. 結果	32

3.3.1. 保存温度および傷付け処理が発芽に及ぼす影響.....	32
3.3.2. 種皮に対する損傷が種子の吸水に及ぼす影響	33
3.4. 考察.....	35
3.4.1. 保存温度および傷付け処理が発芽に及ぼす影響.....	35
3.4.2. 種皮に対する損傷が種子の吸水に及ぼす影響	35
3.5. まとめ.....	36
4. チカラシバの種子の栽培	37
5. チカラシバとススキにおける優良な種子の選別：採種時期と種子重量と発芽の関 係.....	39
5.1. はじめに.....	39
5.2. 材料および方法.....	39
5.2.1. 種子重量が発芽に及ぼす影響.....	39
5.2.2. 採種時期の違いが発芽に及ぼす影響.....	42
5.3. 結果.....	43
5.3.1. 種子重量が発芽に及ぼす影響.....	43
5.3.2. 採種時期の違いが発芽に及ぼす影響.....	46
5.4. 考察.....	49
5.4.1. 種子重量と発芽の関係.....	49
5.4.2. 採取時期と発芽の関係.....	49
5.5. まとめ.....	50
6. 低温湿層処理と毛・包穎の除去によるチカラシバとススキの発芽促進	51
6.1. はじめに.....	51
6.2. 材料および方法.....	52
6.2.1. 予措条件の違いが発芽に及ぼす影響.....	52
6.2.2. 低温処理および毛・包穎の除去が発芽に及ぼす影響	53
6.3. 結果.....	54
6.3.1. 予措条件の違いが発芽に及ぼす影響.....	54
6.3.2. 低温処理および毛・包穎の除去が発芽に及ぼす影響	57
6.4. 考察.....	58
6.5. まとめ.....	59
7. 播種温度の違いに対するチカラシバとススキの発芽特性	60
7.1. はじめに.....	60
7.2. 調査方法.....	60

7.3. 結果	61
7.4. 考察	62
7.5. まとめ.....	62
8. 一時的な塩分汚染がチカラシバとススキの発芽に及ぼす影響.....	63
8.1. はじめに	63
8.2. 材料および方法.....	64
8.2.1. 塩水に浸漬された穎果における塩分の有無	64
8.2.2. 供給される水の塩分濃度の違いが発芽に及ぼす影響	65
8.2.3. 塩水への浸漬期間の違いが発芽に及ぼす影響	66
8.3. 結果	67
8.3.1. 塩水に浸漬された穎果における塩分の有無	67
8.3.2. 水の塩分濃度の違いが発芽に及ぼす影響.....	67
8.3.3. 塩水への浸漬期間の違いが発芽に及ぼす影響	68
8.4. 考察	69
8.5. まとめ.....	69
9. 総合考察.....	70
9.1. 本研究の成果.....	70
9.2. 今後の展望	72
10. 引用文献.....	73
11. 謝辞	78
12. 研究業績.....	79

1. 緒論

1.1. 景観保全と生物多様性保全における地域視点の重要性

日本は地域ごとの気候や風土が多様で、各地で風土に合った歴史や文化が展開されており、地域独自の街並みや建造物が残されている⁴³⁾。一方で、近代以降の日本では、経済性や効率性、機能性を重視した結果、特に都市や郊外で無個性・画一的な景観がみられるようになった。こういった現状にある日本において、後世に残る地域の豊かな景観とはどのようなものであろうか。また、豊かな景観が後世まで引き継がれるための技術は、どこまで地域の経済的活動や文化的活動に根ざしているのだろうか。

地域を構成する要素は、自然由来の自然的基盤と人間が作り出した社会的基盤に分類することができる³²⁾。自然的基盤には、気候や地理、動物や植物、大気、水があり、社会的基盤には、人間が作り出した交通や上下水道、廃棄物処理施設、教育・文化施設、さらには伝統や風土、歴史がある。そして、地域社会は、地域の自然的基盤、社会的基盤の上で、個人、家庭、自治会、学校、企業、地方公共団体、NPO等多様な主体が経済的な活動を営むことによって構成されている。この地域社会における経済的な活動が自然を省みた行為でない場合、自然的基盤が汚染され、景観の劣化や生物多様性の損失が引き起こされてしまう可能性がある。

生物多様性とは「生き物たちの豊かな個性とつながり」のことで、1993年に発効された「生物の多様性に関する条約（生物多様性条約）」では、「生態系・種・遺伝子」の3つのレベルで多様であることが重要とされている^{27, 31)}。

生物多様性がもたらす恵みは「生態系サービス」と呼ばれており、生態系サービスは「供給サービス」、「調整サービス」、「文化的サービス」、「基盤サービス」の4つに分類される。「供給サービス」とは、農作物や水産物などの食料、水、木材、燃料や薬品等、人々の暮らしに重要な資源を供給する機能のことであり、「調整サービス」とは、森林の存在による気候の緩和や水の浄化、災害の抑制、二酸化炭素の吸収など環境を制御する機能のことである。また、「文化的サービス」は、美的な楽しみや宗教・社会制度の基盤、レクリエーションの機械等、文化や精神の面で人々の暮らしに豊かさをもたらす機能のことであり、「基盤サービス」は、光合成による酸素の生成、植物と菌類による土壌形成、生物間や物理環境による栄養循環、地形・海流による水循環などの機能のことで、他3つのサービスの供給を支える機能を持つ。人々の暮らしをより豊かに保つためには、生態系サービスを提供している自然環境を「自然資本」として捉え、それを劣化させることなく適切に保全することが重要である。特に、地域固有の生物多様性は地域固有の自然的基盤を作り出すだけでなく、食文化や工芸など地域固有の文化にも大きな影響を与えている。

しかし、現在、過剰な開発や乱獲、反対に自然に対する人間の働きかけの不足、外来種や化学物質の影響、気候変動による地球環境の変化によって、生物多様性は世界規模で危機にさらされている³³⁾。特に、人間の営みによって逸出が著しくなった侵略的な外来種は在来種の生育地を消失させるおそれがあり、また、近縁となる在来種と交雑して地域性系統の遺伝的攪乱（種内交雑）を引き起こす可能性が懸念されている⁵⁷⁾。

これらの環境問題は国際的にも将来の地球全体に多大なる悪影響をもたらすとされており、近年では「持続可能な開発目標（SDGs : Sustainable Development Goals）¹¹⁾」や「30 by 30³⁴⁾」といった自然環境の保全に取り組む目標が掲げられ、各国で早急な対策が求められている。

2004年に制定された「景観法⁶⁶⁾」は、日本で初めての景観に関する総合的な法律で、都市や農山漁村等における良好な景観の形成を促進するために設けられた。ここでの良好な景観とは「地域の自然、歴史、文化等と人々の生活、経済活動等との調和により形成されるもの」で、かつ、「地域の固有の特性と密接に関連するもの」とされている。また、2008年に制定された「生物多様性基本法³⁵⁾」では、基本原則として生物多様性の保全は「多様な自然環境が地域の自然的社会的条件に応じて保全されることを旨として行われなければならない」としている。このように、景観とは極めて地域的なもので、景観と生物多様性の保全や形成は、原則として当該の地域に委ねられるべきであり、さらに、景観の劣化や生物多様性の損失については地域ごとに対策を講じる必要があるといえる。

1.2. 地域性種苗を用いた地産地消型の緑化

1.2.1. 外来種を用いた緑化と地域性種苗を用いた緑化

環境や景観を改善する際には、木や草といった植物を導入し、自然の緑を増やす「緑化」が行われる。治山工事や砂防工事において、1949年までは地域に自生分布する「郷土植物」による緑化が主流だった^{46,57)}。郷土植物は、周辺の自然景観にとけこみ、群落の維持や保存にも適しているため、緑化植物としては第一に郷土植物が選択されることが望ましい。しかし、郷土植物が施工当初から現場の環境に適合しているかどうかは断言できないため、そこに現存するからという理由だけで郷土植物を最初から導入することには不安があるとされていた⁴⁶⁾。

それに対し、第二次世界大戦によって生じた荒廃地が日本の各地で多くみられた時期からは、外来草本類（牧草種）⁵⁸⁾が郷土植物よりも早期かつ確実に緑化を実現できるとして重宝された。第二次世界大戦の終戦から間もない1949年にアメリカからイネ科草本類の導入による土地保全技術が紹介され、同年11月には「奇蹟の草（ミラクルグラス）」と称されたK31F（ケンタッキー31・フェスク、*Festuca elatior* var. *arundinacea*）¹⁰⁾、1951年にはWLG（ウィーピング・ラブグラス、*Eragrostis curvula* Nees）¹⁹⁾、1952年にはCRF（クリーピング・レッドフェスク、*Festuca rubra* L.）が同国より輸入されることになり⁴⁶⁾、倉田益二郎らの指導によって各地の施工現場で外来種が盛んに利用されるようになった。

そして、現在でも外来種は安価に利用できるとして、多くの緑化施工地で利用されている。しかし、生物多様性条約の制定以来、生物多様性の保全への配慮はさらに具体性を帯びた問題として提示され、2005年に環境省から施行された「特定外来生物による生態系等に係る被害の防止に関する法律（外来生物法）」では、これまで用いられてきた主体種子18種の内、イネ科草本類のトールフェスク⁸⁴⁾（オニウシノケグサ、*Lolium arundinaceum* (Schreb.) Darbysh.）等の侵略性の高い7種が適切な管理が必要な外来種として「要注意外来生物リスト²⁸⁾」（2015年に「生態系被害防止外来種リスト²⁹⁾」として改訂）の対象になった。

環境や景観の保全が緑化工事の上で重要視された経緯は、近年の外来種問題によって始まったわけではなく、緑化の方法として「緑化工」という言葉が作られた当初から主張されていたことだった。

『緑化工技術⁴⁶⁾』によると、「緑化工」という言葉は、1951年12月に倉田益二郎が兵庫県のはげ山復旧工事で使ったのが最初だった。倉田は、緑化工を「木と草によって早期・確実に、面的・立体的な緑化を行い、環境・土地および景観の保全を図る工法」とし、また、土木の開発と関連させて「開発に伴う環境（に対する）影響の事前調査の資料を作成・検討し、そして事後手当てとして環境保全・自然保護のため施工をする緑化技術」と定義している。さらに、「緑化工の思想の根本には自然の尊重があり、土木開発を行うとしても自然生態系の枠内で行わなければならない」とし、その場合、緑化工技術は「実施される開発と自然保護との調和を図る役割を持つもの」としている。そして、緑化工の「その他の役割」には「国土保全、災害防止的な紅葉である表面浸食の防止、防霧、水質・水量の保全に役立つ」ことが挙げられている。つまり、緑化工とは本

来，国土の環境保全や景観保全の役割を持つことが主張されており，土木工事に付属されるものではなかったといえる。近年では，緑化植物として多用されてきた外来種が施工地から逸出してしまい，生態系の攪乱を招いていると指摘を受けることすらある緑化工だが，その本質は当初，全く別のものであった⁵⁴⁾。

そうして，近年の法面緑化では，その緑化対策の工法が使用する緑化植物によって大きく二区分される(図-1.1)⁷⁷⁾。ほとんどの緑化工事では，より安価な外来種や外国産在来種を使用する「市場単価方式による緑化」が採用されており，実際，2007年の4省庁共同の調査では，在来種に分類される種子の利用があっても，その98.9%の種子は外国から輸入された「外国産在来種」だったことが判明している³⁶⁾。しかし一方で，2015年からは環境省が発行した「自然公園における法面緑化指針³¹⁾」に則って，自然公園等の一部の地域では外来種や外国産在来種の利用を制限されることになり，生物多様性保全に配慮した緑化では「森林表土利用工」，「地域性種苗利用工」，「自然侵入促進工」が植生工の基本となった。

「地域性種苗利用工」について⁴⁴⁾，地域性種苗とは従来の「郷土植物⁵⁷⁾」の種苗に相当し，自生種のうち，対象地域の在来集団に共通する遺伝子型を持つ植物(地域性系統の植物)から，採取，生産された種子および苗のことである^{58,59)}。遺伝型とともに形態や生理的特性等の表現型や生態的地位にも類似性・同一性が認められる集団であれば「地域性系統」とすることができる⁵⁷⁾。

以上のように，法面緑化では，外来種や外国産在来種の種子を用いることが主流になっている一方で，自然公園等の生物多様性への配慮が特に必要な地域では，生物進化のプロセスを尊重し，遺伝的多様性を損じることのない緑化が求められている。しかし，本来の「緑化工」の意味や日本緑化工学会の提言⁶⁴⁾の意図を踏まえると，生物多様性への配慮が特に必要とされていない地域でも，可能な限り地域性系統の植物を用いて緑化が行われることが望ましいといえる。

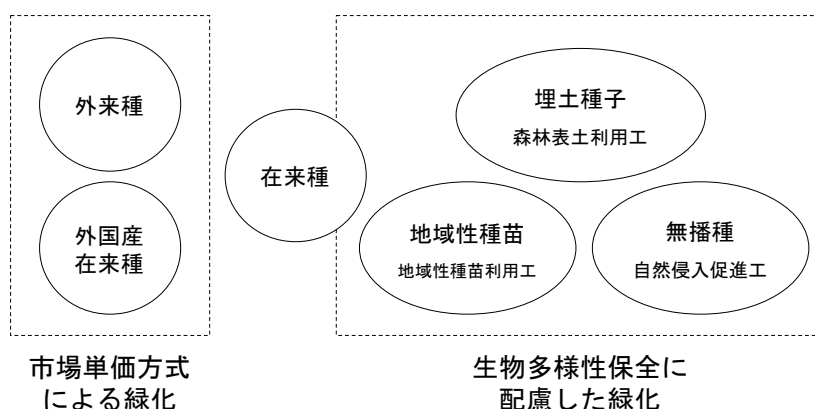


図-1.1 緑化植物の種類と緑化対策の関係⁷⁷⁾(一部改変)

1.2.2. ニホンジカの被害に対する地域性種苗緑化の優位性

現在、全国的なニホンジカ (*Cervus nippon* Temminck, 以下, シカとする) の個体数の増加や生息分布域の拡大に伴い、農林業への被害や生態系への影響、交通事故等各所で問題が生じている³⁰⁾。一方で、ダムや道路、治山・砂防事業で緑化工を実施した緑化斜面においてもシカによる被害が顕在化している⁷⁸⁾。

シカは餌を求めて林道法面に集まることが度々指摘されており^{9, 24, 75)}、市場単価方式による緑化で用いられてきたトールフェスク等の外来草本類(牧草種)がシカに食べられてしまう事例が確認されている^{65, 78)}。シカの被食や踏み荒らしによって法面の裸地化や侵食が進行して本来求められる法面保護機能が十分に発揮できなくなり⁶⁴⁾、地形や地質によっては落石を引き起こす場合もある⁷⁸⁾。また、道路に近接する法面に牧草種を繁茂させることでシカが誘引され、シカが山から人里に降りやすくなり、交通事故を引き起こすこともある^{39, 83)}。

そのようなシカ被害への対策として、シカが嫌う植物(シカ不嗜好性植物)を緑化工に用いることが提案されている³¹⁾。実際に、シカのフンや採食痕、足跡等フィールドサインが確認された場所でも、シカ不嗜好性植物は食べ残されるという事例が多数確認されている^{69, 78)}。

中島は、既往文献にみられるシカ被害やシカを取り巻く社会情勢、歴史に関して情報を再整理し、地域性系統の植物はシカに食べ残され、自生しているという見解から、草地造成によるシカ被害への対策として、「シカ不嗜好性の性質を持つタイプの地域性種苗」を活用した緑化工法を提案している⁵³⁾。

以上のことから、シカ被害の軽減と生物多様性の保全に配慮した緑化を目指すには、シカ不嗜好性がある地域性種苗の活用が適切であると考えられた⁷⁸⁾。

1.2.3. 気候変動に対する地域性種苗の活用

近年、気候変動の問題が国際的に指摘されるようになった。緑化工においても、温暖化や豪雨といった脅威には、技術面から対策が必要である。実際に、外国から輸入されている外来種の種子は、気候変動によって頻出することになった山火事の影響で、現地での種子生産に大打撃が与えられ、価格の高騰がみられている⁵⁵⁾。それに対し、地域性種苗の活用は、緑化資材を自給する意味も含んでおり、また、地域性種苗は、「在来植物もしくは史前帰化植物」で構成され、長い歴史のなかで起こった環境変動に対しても遺伝子群として順応して生き残ってきたという実績があるため、地域性種苗の活用自体が「気候変動に対する適応技術」として位置づけできる可能性がある。

1.2.4. 「みどりの地産地消」で地域の「雑草」を新たな経済資源に

地域性種苗は本来、身近な環境に生えている植物で、特に草本の場合、時に邪魔なものやゴミとして扱われる「雑草」として位置づけられることが多い。本研究では、この「雑草」と呼ばれてきた植物を「地域性種苗」という地域の経済資源として新たな価値を見出し、活用することに着目した。

2013年、和歌山県において、地域性種苗の活用に対する様々な課題に取り組むために「わかやま地域性植物緑化研究会」が発足した²⁶⁾。当研究会では、地域の研究者、施工会社、コンサルタント、資材メーカー、種苗メーカーが共同で地域性種苗を用いた法面緑化を研究しており⁷⁷⁾、活動を通して地域生態系の保全と生物多様性の保全に寄与することを目的としている。

さらに、当研究会では、「みどりの地産地消⁸⁶⁾」という地域のビジネスモデルの実現も目指している。「みどりの地産地消」とは、種子と緑化の地産地消のことで、地産地消とは地域で産出した資源を地域で活用し、地域の中に仕事もお金も自立的な活気も生み出す社会のあり様のことをいう。つまり、「みどりの地産地消」は、地域に生えている植物の種子を、地域で採取（生産）し、地域の業者が、地域の緑化工事を実施する、その流れを指し（図-1.2）、これは、地域内でお金が回るという観点から地域の自立的な経済システムの構築にも関わり、地域再生・地域活性化への貢献も期待できる。

また、地域の景観づくりは、観光業において日本や地域の風景を視覚的、かつ印象的に伝える役割を担う。2007年に成立した「観光立国推進基本法⁶⁷⁾」では、観光は「地域経済の活性化、雇用の機会の増大、健康の増進、豊かな生活環境の創造、国際相互理解の推進」に寄与し、「我が国固有の文化、歴史等に関する理解を深めるものとしてその意義を一層高めるとともに、豊かな国民生活の実現と国際社会における名誉ある地位の確立に極めて重要な役割を担っていく」ものとして位置付けられている。景観づくりにも地産地消の考えを取り入れることで、地域独自の景観が創造され、地域の文化形成や経済圏の確立、国内の観光客やインバウンドに向けた地域の魅力の発信、さらには持続可能な地域社会の確立にも貢献できる可能性がある。

地域の種子を 地域で生産（採取）



地域の業者が 地域の緑化工事を実施



図-1.2 みどりの地産地消

1.3. 地域性種苗を用いた緑化における技術的な課題

行政や学会で生物多様性保全に関する議論が進み、緑化における指針やガイドライン等が整備されてきてはいるものの、緑化現場ではそれを具体的に実現するための環境整備や技術開発が十分に行われているとは言い難く⁶⁴⁾、そもそも、地域性種苗は施工業者や行政担当官にあまり認知されていない実態がある⁵⁵⁾。

外来種と地域性種苗の実用性を表-1.1に整理した。仮に地域性種苗の認知が高まったとしても、実際、外来種と地域性種苗の実用性を比較すると、発芽や生育技術の不安定さから地域性種苗は利用されづらい現状にある。地域性種苗は多量を生産できるものではなく、採取における手間が多く人件費が高いこともあり、外来種よりも種苗単価が高くなっている。また、地域性種苗では種子を確保するまでの労力が見積もりにくく、予算を立てにくいといった課題もある⁷¹⁾。地域性種苗の利用を安定させる技術は一部小規模で検討されているものの⁵⁵⁾、業界全体においては発展途上にあり、この状況は地域性種苗が郷土植物と呼ばれていた1979年から2024年の現在に至るまで約45年間ほとんど変わっていない⁴⁶⁾。

表-1.1 外来種と地域性種苗の実用性（文献をもとに作成^{46, 55)}）

項目	外来種	地域性種苗（郷土植物）
供給	純良種子が安価に、多量に入手でき、計画・実行上の不安が少ない	ほとんど手作業で採取されるため、種子は高価になり、入手も困難
発芽・育苗技術	性状が詳しく調査されていて、安心して使用できる	発芽・育苗技術、その他性状がよく調べられていない
発芽・生長	初期の生長が早く、よく繁茂する	初期の発芽・生長が遅い
播種適期	春播き、秋播きの種が多く、施工期間の幅が広い	春播き、夏播きが多く、秋播きが少ない（施工期間の幅が短い） 播種適期は不明な種が多い

地域性種苗を用いた緑化を普及させるには、なによりも地域性種苗のコスト削減を図る必要がある。地域性種苗のコストを削減するには、種子の生産から利用における技術開発や流通における効率化が求められる。そのうち、本研究では地域性種苗の生産（採取）と施工時（播種）の技術面における低コスト化に取り組むこととした。技術的な課題について、日本緑化工学会による提言⁶⁴⁾やガイドライン⁵⁸⁾、その他文献⁵⁵⁾を参考に、以下に整理した。

1) 取り扱える植物種を増やす

法面緑化に有用とされる植物は根が強く、造成地や荒廃地、開発地での土地保全に役立つことが求められる。加えて、地域性種苗は、対象地域の在来集団に共通する遺伝子型を持つ植物から採取・生産された種苗を指すため⁵⁸⁾、同じ種であっても遺伝子型の異なる種同士を用いることはできない。これには各地域における遺伝子型の解明が必要になる。一方で、近年では、津田ら⁷²⁾によって地域性植物の遺伝子研究が進み、地域性種苗の流域内使用の原則³¹⁾を緩和しても問題が小さいことが明らかになりつつある。

2) 採取効率の高精度化（種子生産コストの削減）

現在、地域性種苗のほとんどは手作業で採取されている。この手作業による採取が地域性種苗のコストを上げる要因になっており、種苗単価を安くするには多くの種子を早く大量に採取できるように機械化することが望ましい。しかし、採取の機械化に対する事例はほとんどなく、技術は確立されていない。

3) 供給源となる採取地の確保（種子生産コストの削減）

近年の地域性植物の遺伝子研究の進展により⁷²⁾、地域性種苗の流域内使用を緩和する議論がされつつあるが、本来、地域性種苗は遺伝子の攪乱防止のため、緑化施工地周辺からの確保が前提となる種苗で、採取可能な場所が特定の地域内に限定される³¹⁾。そのため、植物の種類によっては採取地を確保すること自体が難しい状況にある。さらに、計画に必要な種子量が供給できる場所を見つけなければならないという困難さもある。また、自生種が生えているところは平坦でなく、でこぼこした地形や斜面地などが多い。そういった場所での採取は時間や労力が多くかかり、作業効率が悪く、危険を伴う場合も考えられる。

4) 優良な種子の獲得（施工コストの削減）

種子の成熟度が十分でない場合、発芽しないことがある。一方で、採種時期が遅すぎても種子が植物本体から脱落してしまう恐れがある。このため、優良な種子を獲得するには、発芽が安定する採取適期を植物種ごとに検討する必要がある。

5) 発芽や生育の安定化（施工コストの削減）

播種量は式 1.1 によって決定され、発芽率を向上させることができれば播種量を減らすことができる。そのためには発芽や生育を安定化させる技術が求められるが、地域性種苗は発芽や休眠³⁸⁾に関して未解明なものが多く、発芽率を向上させる方法や発芽促進処理方法が不明で、結果「地域性種苗は発芽率が低い」とされる現状にある。

6) 播種量の削減（施工コストの削減）

式 1.1 から、発生期待本数が少なくても問題なく緑化が達成できれば播種量を減らすことができる。外来草本類を用いた場合、一般に発生期待本数は 2,000 本/m² 等多量に設定されることがあるが、これは種苗単価が安いことが前提となる。また、発生期待本数を多量に設定しても、実際に残存する群落の密度は発生期待本数よりも少なくなることが多い⁵⁵⁾。これを考慮すると発生期待本数を少なく見積もっても緑化が達成できる可能性があるが、少量播種でも十分に緑地が造成されるという成功事例は少なく、根拠が不足している。

7) 追加播種や種子付枝条播き工法等簡易工法の開発（施工コストの削減）

緑化の施工はスケジュールの都合上、春季や夏季といった播種適期ではなく植物の生育が旺盛ではない冬季に行われる場合がある。その際、播種前に種子に発芽促進処理を施しておく方法以外には、冬季で自然侵入促進工を実施し、維持管理の中で春季以降に追加播種する方法が考えられる。しかし、道路の法面を対象とした場面では片側の通行止めを行える場合とそうでない場合がある。片側の通行止めを行える場合は、機械を持ち込んで再度種子を吹付けることができるが、路肩だけの制限や車線制限ができない際には基本的に手作業で播種するしかなくなる。その追加播種を、簡易的な機械を用いて道路を封鎖することなく実施できれば、苗立ちの悪い冬季に大量に種子を播種することがなくなり、施工コストの削減につながると考えられる。

一方で、種子生産のコストを下げながら施工時におけるコスト削減を図る方法について、例えば、結実した自生植物を茎葉ごと切り取ってきて養生した造成地に敷き並べる工法がある。これは種子付枝条播き工法⁴⁶⁾として古くから知られている方法であるが、現在の緑化工事では普及に至っていない。しかし、種子の選別が不要なため、非常に安価で実施できると考えられる。こういった過去の工法を再評価し、普及できなかった理由を解決することでコスト削減につながる可能性がある。

8) 自然災害等による塩害地の自然再生に対する地域性種苗利用の検討

近年、台風や津波、高潮といった自然災害の激甚化により、通常、塩ストレスの影響を受けない潮上帯を越える範囲にまで塩分が飛来し、植生の衰退が危惧されるようになった⁸¹⁾。また、津波の来襲が陸域に塩害を与えることも 2011 年の東日本大震災や 2024 年の能登半島地震の際に目の当たりにした。そのような塩害を受けた土地の自然再生においても日常の旺盛な生育が期待できる地域性種苗を利用できることが望ましい⁷⁰⁾。それには、塩分に汚染された環境下でも地域性種苗の発芽や生育が可能となる技術や知見が求められる。

$$W = \frac{G}{S \cdot \left(\frac{P}{100}\right) \cdot \left(\frac{B}{100}\right)} \quad (1.1)$$

W : 播種量 (g/m²), G : 発生期待本数 (本/m²)

S : 単位粒数 (粒/g), P : 純度 (%), B : 発芽率 (%)

1.4. 研究目的と本論文の構成

今までも地域性種苗を求める主張はあったが、科学的手法による技術開発はほとんどされてこなかった。地域性種苗が普及しない要因は、種子の採取や品質の問題、なにより単価が外来種や外国産在来種の種苗に比べて高いことが挙げられる。そこで、本研究では、「みどりの地産地消」という社会システムの中で行われる緑化を、特に「地産地消型緑化」と定義し、地域性種苗を用いた地産地消型緑化の低コスト化を図るため、播種量の削減や採取効率の向上、種子の発芽率向上や発芽促進の課題に対して実験を行った（表-1.2）。

第2章では、地域性種苗の播種量を削減できるか、また、和歌山県内のシカ生息地において緑化植物として有用な植物種は何かを野外実験で検討した。第3章では、種子採取の機械化を検討したところ、採取した種子が割れてしまうことがあったため、傷ついた種子が発芽するかを検証した。第4章では、採種地の確保が難しい地域性種苗を安定的に供給できるように、チカラシバを例に、種子栽培の可能性を検討した。第5章～第7章では、第2章で有用であると考えられたイネ科植物のチカラシバ (*Pennisetum alopecuroides* (L.) Spreng.) とススキ (*Miscanthus sinensis* Andersson) に対して、優良な種子の選別方法や発芽率の向上、発芽促進処理方法について検討した。第8章では、自然災害等によって引き起こされる塩分汚染を想定し、塩分がチカラシバとススキの発芽に及ぼす影響を確認した。最後に、第9章では、本研究の成果と今後の展望を整理した。

表-1.2 地域性種苗を用いた緑化の技術的な課題に対する本研究の位置付け

工程	技術的な課題	本研究で取り組んだこと
	1) 取り扱える植物種を増やす	有用な植物の検討（第2章）
採取	2) 採取効率の高精度化	採取の機械化（第3章）
採取	3) 供給源となる採取地の確保	種子の栽培（第4章）
精選	4) 優良な種子の獲得	優良な種子の選別（第5章）
保存	5) 発芽や生育の安定化	発芽促進処理方法の検討（第6章）
播種		播種温度の検討（第7章）
播種	6) 播種量の削減	播種量の削減（第2章）
播種	7) 追加播種や種子付枝条播き工法等簡易工法の開発	（本研究では取り組まず）
播種	8) 自然災害等による塩害地の自然再生に対する地域性種苗利用の検討	一時的な塩分汚染に対する発芽特性の解明（第8章）

2. シカ被害対策における地域性種苗の緑化効果と播種量削減の可能性

2.1. はじめに

和歌山県の緑化施工地におけるシカの採食被害対策として、緑化に有用なシカの不嗜好性植物の種子を選定、採取し、法面緑化施工地における生育性を確認することを目的に野外実験を行った。また、単価の高い地域性種苗のコストを下げるために、地域性種苗の播種量削減を目的として、播種量がどの程度であれば群落が成立するのかを検証した。

2.2. 材料および方法

2.2.1. 調査対象地の概要

調査区を設置した和歌山県高野町は、弘法大師・空海によって開かれた日本を代表する日本仏教の聖地である。高野山では 2004 年 7 月に「紀伊山地の霊場と参詣道」が世界遺産として登録され⁷⁶⁾、2015 年には『開創 1200 年記念大法会』が開催された。そのため、2009 年に国道の交通渋滞緩和や災害時の輸送能力の強化、周辺観光資源へのアクセス向上などを目的に、和歌山県が中心となって「高野山道路」の開発が行われた⁴⁵⁾。

本研究では、その開発に伴って国道 480 号に生じた法面を対象とした(図-2.1)。対象法面が位置する地域は高野龍神国定公園という自然公園に位置し、地域生態系の保全の必要性を検討する際の保全レベルは自然公園に区分される。そのため、地域生態系の保全に配慮した緑化工事が必要であった。また、和歌山県ではシカの生息密度が県全体で増加傾向にあるが、高野町は県内の中でも比較的高い生息密度であると推定されており(図-2.2)⁷³⁾、シカによる農林作物や植林地の苗木への食害といった被害も確認されている。

法面掘削前の緑化条件に関する調査結果をもとに、法面の概要を表-2.1 に整理した。

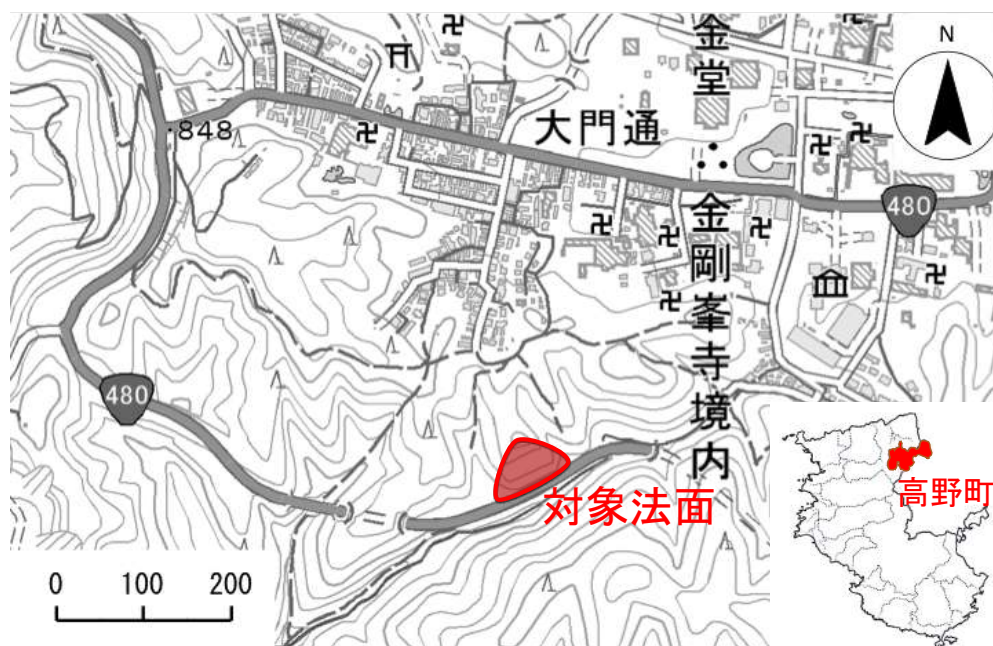


図-2.1 対象法面の位置 (国土地理院地図を一部改変)

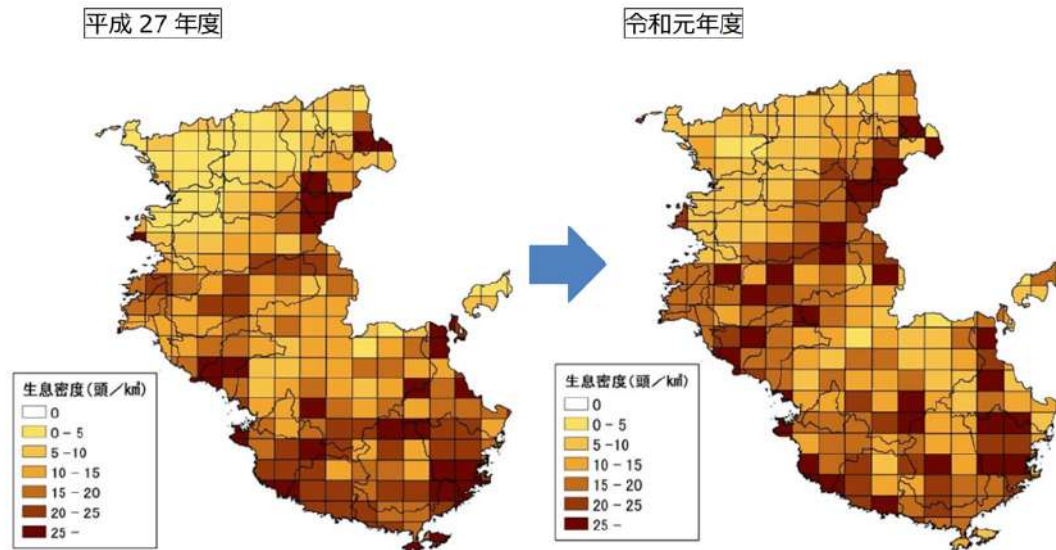


図-2.2 和歌山県のシカの推定生息密度（和歌山県より 73）

表-2.1 対象法面の概要

項目	内容	備考
地域特性	位置 和歌山県伊都郡高野町細川 国道 480 号 緯度 34 度 12 分 33.53 秒 経度 135 度 34 分 38.12 秒	—
地形・標高	山地（尾根，中腹） 803.0 m～832.5 m	和歌山県内では標高が高い
平均傾斜	1:0.8（51.3 度）	—
土地利用	自然公園 （高野龍神国定公園）	地域生態系保全レベルは自然公園に区分
気象条件	降水量 年降水量は 1,851 mm ⁴⁰⁾	特に乾燥の危惧なし（日本の平均降水量 1,600 mm～1,750 mm ⁴¹⁾ ）
	気温 年平均気温 10.9℃ ⁴⁰⁾	平地（暖温帯）に比べて寒冷
緑化材料	周辺植生 スギ，ヒノキ，サワラの植林（スギ優占）	二次林が少なく，自然侵入促進工では種子の飛来が少ないと予想
	森林表土 スギ林の表土（層厚薄く，表土の採取量は限りあり）	自然侵入促進工もしくは地域性種苗利用工が適用候補
	地域性種苗 草地，既成道路法面，二次林で採取可能	—

2.2.2. 播種する地域性種苗の選定

施工地周辺では、ノコンギク (*Aster microcephalus* Franch. et Sav.), イタドリ (*Fallopia japonica* (Houtt.) Ronse Decr.), チカラシバ, ススキ, ノリウツギ (*Hydrangea paniculata* Sieb.), ウツギ (*Deutzia crenata* Sieb. et Zucc.) が確認できた。2013年10月から12月にかけて、調査地付近で6種を手作業で採種した。表-2.2に種子の採取地、採種時期、20~30℃下で28日間の発芽実験における発芽率を整理し、種子の採取地の詳細を図-2.3に示した。採取した種子のうち、イタドリ、ススキ、ノリウツギ、ウツギの発芽率は文献上の発芽率よりも高いため、採取した種子は比較的良好と考えられた。

表-2.2 種子の採種地、採種時期および性状

植物名	採取地	採種時期 (2013年)	採取した種子の性状*			文献上の 発芽率 (%)
			発芽率 (%)	純度 (%)	粒数 (粒/g)	
ノコンギク	図-2.3の②	11月~12月	35	92.8	4200	—**
イタドリ	図-2.3の②	12月	88	97.8	630	40 ⁵⁶⁾
チカラシバ	図-2.3の②	10月~11月	77	99.2	340	—**
ススキ	図-2.3の②	10月~11月	95	98.7	1500	20 ⁵⁶⁾
ノリウツギ	図-2.3の①④	12月	83	9.11	15400	35 ⁷⁾
ウツギ	図-2.3の③	12月	90	91.0	9700	13 ⁷⁾

*紅大貿易株式会社が種子の性状を調査

**ノコンギク、チカラシバはデータ不明のため掲載無し

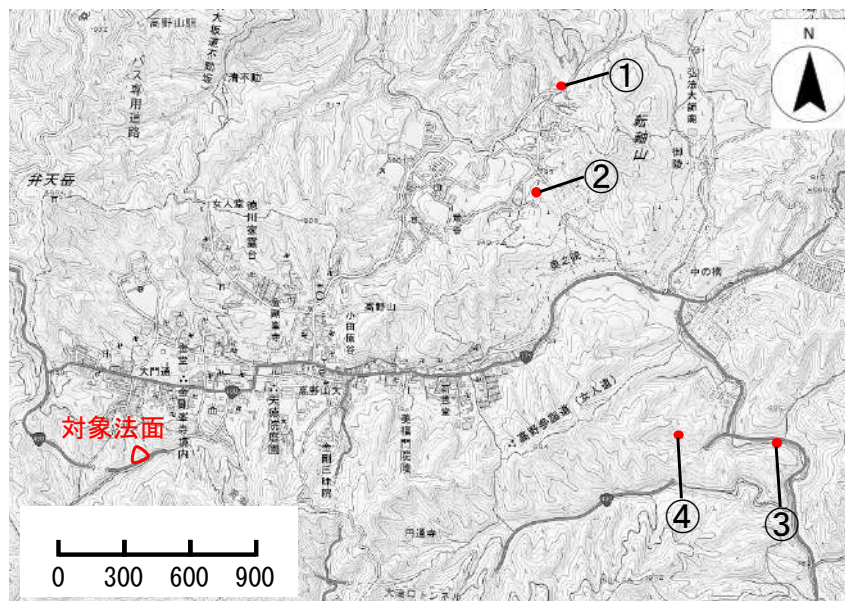


図-2.3 種子の採種地 (国土地理院地図を一部改変)

2.2.3. 調査区の設置と播種量

法面は5段のテラス構造からなり、最上部から3.5 m 下の上から2段目を調査地とした(図-2.4)。幅が均等になるように調査地を4分割し、そのうち1つを自然侵入促進工のみで施工する区とし、残り3つを自然侵入促進工で施工した後に種子を表面へ播種する区とした。西側から無播種区、少量播種区(以下、少量区とする)、中量播種区(以下、中量区とする)、多量播種区(以下、多量区とする)という4つの調査区を配置し、それぞれの面積を順に57 m²、68 m²、68 m²、58 m²とした。

各調査区における植物種の発生期待本数を表-2.3 に整理した。中量区における各植物種の発生期待本数の目安は日本道路協会による『道路土工切土工・斜面安定工指針』⁵⁶⁾を参考に設定した。指針には、イタドリ、ススキ、ノリウツギ、ウツギの発生期待本数の目安が100 本/m²以下と記載されていたため、その値を少量区に当てはめた。ノコンギクとチカラシバは指針に記載されておらず、ノコンギクは採取できた量が少なかったため、発生期待本数をチカラシバの発生期待本数の目安はイタドリ、ススキと同様に100 本/m²以下とした。ノコンギクは中量区における発生期待本数の値から1/2 倍の値を少量区に、3 倍の値を多量区に当てはめた。そして、それぞれの発生期待本数と種子の性状に応じて播種量を算出した(式-2.1, 表-2.4)。

$$W = \frac{G}{S \cdot \left(\frac{P}{100}\right) \cdot \left(\frac{B}{100}\right)} \quad (2.1)$$

W : 播種量 (g/m²), G : 発生期待本数 (本/m²)

S : 単位粒数 (粒/g), P : 純度 (%), B : 発芽率 (%)

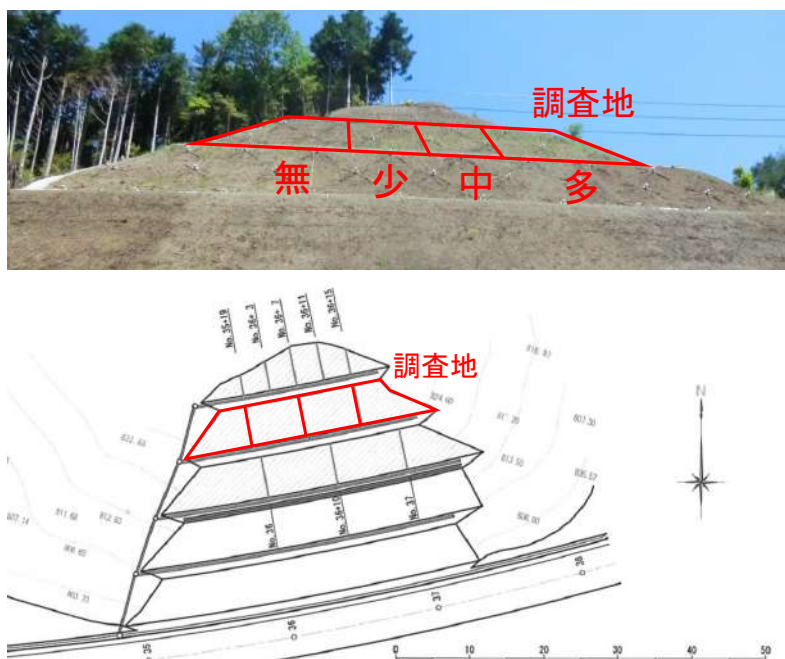


図-2.4 調査地の位置 (2015/5/20 撮影)

施工に使用した材料を表-2.5 に示す。各調査区に自然侵入促進工を施した後、表-2.4 に記載の地域性種苗を現地付近で発生した森林表土（木材チップ）と混合し、播種した。

表-2.3 各調査区における植物種の発生期待本数

	無播種区 (本/m ²)	少量区 (本/m ²)	中量区 (本/m ²)	多量区 (本/m ²)
ノコンギク	0	10	20	30
イタドリ	0	50	100	300
チカラシバ	0	50	100	300
ススキ	0	50	100	300
ノリウツギ	0	50	100	300
ウツギ	0	50	100	300

表 2.4 各調査区における植物種の播種量

	無播種区 (g/m ²)	少量区 (g/m ²)	中量区 (g/m ²)	多量区 (g/m ²)
ノコンギク	0.00	0.59	2.93	5.00
イタドリ	0.00	3.69	7.37	18.87
チカラシバ	0.00	7.70	15.40	39.40
ススキ	0.00	2.84	5.69	14.55
ノリウツギ	0.00	0.34	0.69	1.76
ウツギ	0.00	0.50	1.01	2.58
合計	0.00	15.66	33.08	82.15

表-2.5 施工に使用した材料

名称	規格	数量
破砕材	1.0~1.5 in (一次, 二次破砕) スクリーン通過物	1,500 L
肥料	緩効性肥料 (グリーンマップなど)	3.0 kg
接合剤	侵食防止剤, 高分子系樹脂	4.0 kg
添加剤	微生物活性酵素「はえるちゃん」	50.0 kg
種子	地域性種苗	表-2.4 参照
その他	森林表土	省略

2.2.4. 調査項目

調査の工程および方法を表-2.6 に、モニタリングの様子を写真-2.1 に示す。1 m×1 m の大きさのコドラートを1 調査区あたり 3 つ設置した。生育状況の調査項目は、出現種の被度、成立密度(本/m²)、草丈(cm)とした。なお、植被率の有意差は Tukey-Kramer 法によって検定を行った。

表-2.6 調査の工程および方法

調査回数	調査日	経過日数	調査項目
施工	2014年5月	0日	-
第1回調査	2014年7月	2ヶ月後	植被率
第2回調査	2014年10月	5ヶ月後	植被率
第3回調査	2015年10月	1年5ヶ月後	植被率, 生育状況, シカの痕跡
第4回調査	2015年7月	1年2ヶ月後	植被率
第5回調査	2016年10月	2年5ヶ月後	植被率, 生育状況, シカの痕跡
第6回調査	2017年9月	3年4ヶ月後	植被率
第7回調査	2018年10月	4年5ヶ月後	植被率, 生育状況, シカの痕跡



写真-2.1 モニタリングの様子

2.3. 結果

2.3.1. 植被率の経過

各区コードラート内における平均植被率の経過を図-2.5 に整理した。これによると、全ての調査区で植被率は継続的に増加していき、基本的には播種量が多いほど植被率が早期に増加する傾向にあった。播種区では5ヶ月目で植被が確認できたが、無播種区ではその2年後である2年5ヶ月目までほとんど植被が確認できなかった。年月が経つごとに播種量の多少による植被率の差は縮小していき、2018年10月の調査（播種後4年5ヶ月目）では、全ての調査区で植被率は90～100%になり、有意な差が認められない状態となっていた ($p > 0.05$)。

2.3.2. 出現種の生育状況

2015年10月（播種後1年5ヶ月目）、2016年10月（播種後2年5ヶ月目）、2018年10月（播種後4年5ヶ月目）における出現種の被度を表-2.7、成立密度を表-2.8、平均草丈または平均樹高を表-2.9 に整理した。

導入種についてみると、播種区（少量区、中量区、多量区）において、播種後1年5ヶ月目では、チカラシバの被度が「2」もしくは「3」で一番高かった。2年5ヶ月目では、チカラシバに加えてススキの被度も「2」もしくは「3」になり、4年5ヶ月目にはチカラシバの被度が「1」と下がった一方で、ススキの被度は「3」もしくは「4」となり、一番高くなった。このように、播種区では初めはチカラシバが繁茂していたが、その後ススキが優占する結果となった。また、チカラシバとススキは他の種に比べて草丈が高く、特にススキは2年5ヶ月目における成立密度が他の種よりも多かった。

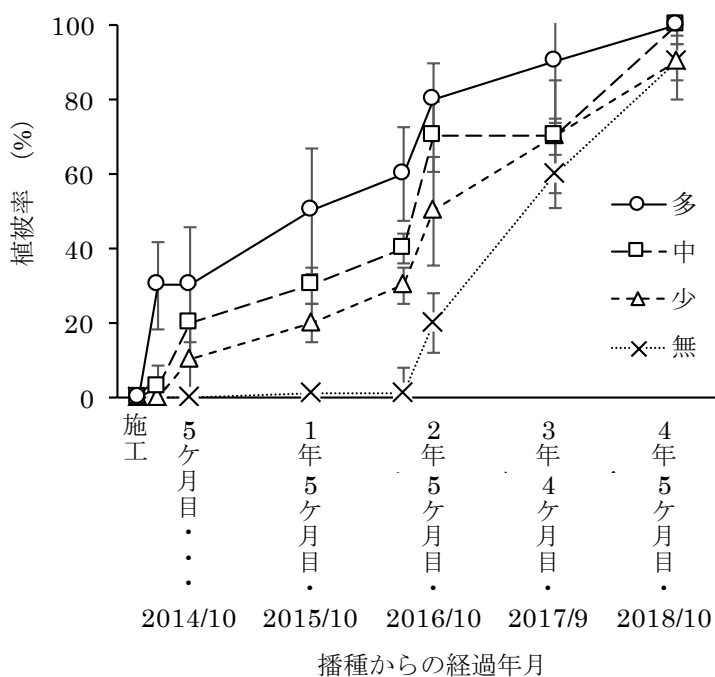


図-2.5 植被率の経過（エラーバーは標準偏差を表す）

表-2.7 出現種の被度

	1年5ヶ月目 (2015/10)				2年5ヶ月目 (2016/10)				4年5ヶ月目 (2018/10)			
	無	少	中	多	無	少	中	多	無	少	中	多
ノコンギク				+		+	1	+		1	2	2
イタドリ		+	+	+		1	+	+		1	1	+
チカラシバ		2	2	3		2	2	3	2	1	1	1
ススキ	+	1	2	1	2	2	3	2	4	3	4	3
外来草本					2	+	+	+	1	+	+	+
在来草本	+	+	+	+	+		1	+	1	+	+	1
木本	+			+	+			+	+		1	1
不明			+									+
区内植被率	1	30	40	60	20	50	70	80	90	90	100	100

ブラウン・ブランケ法により測定
区内植被率 (%) は目視によるもの

表-2.8 出現種の成立密度

	1年5ヶ月目 (2015/10)				2年5ヶ月目 (2016/10)				4年5ヶ月目 (2018/10) *			
	無	少	中	多	無	少	中	多	無	少	中	多
ノコンギク				4		2	5	9		-	-	-
イタドリ		3	2	2		3	1	2		-	-	-
チカラシバ		4	5	12		3	8	7		-	-	-
ススキ	1	1	4	1	17	15	10	9		-	-	-
外来草本					44		10	1		-	-	-
在来草本	1	1	1	1	2		3	1		-	-	-
木本	5			2	2			2		-	-	-
不明			2	1								-
合計	7	9	13	22	65	23	37	30		-	-	-

単位は (本/m²) とする

*2018年度の調査ではチカラシバとススキが株立ち・密集しており
個体ごとの判別が難しかったため測定しなかった

表-2.9 出現種の平均草丈または平均樹高

	2015年10月				2016年10月				2018年10月			
	無	少	中	多	無	少	中	多	無	少	中	多
ノコンギク				1.8		1.3	13.5	14.8		16.7	20.3	19.3
イタドリ		11.3	2.7	8.8		9.8	5.5	14.8		27.5	26.0	55.0
チカラシバ		30.0	39.3	36.6		60.9	63.2	62.0	62.9	55.0	36.6	44.8
ススキ	5.0	25.0	31.8	35.0	20.1	56.8	125.4	47.5	110.2	104.9	106.8	95.0
外来草本					51.9	3.0	3.8	10.0	12.8	10.0	3.5	34.1
在来草本	3.3	4.0	3.0	11.0	9.5		11.8	28.0	13.1	5.5	43.2	24.6
木本	2.0			1.3	5.3			3.0	16.0		17.8	17.6
不明			1.3	2.0								20.5

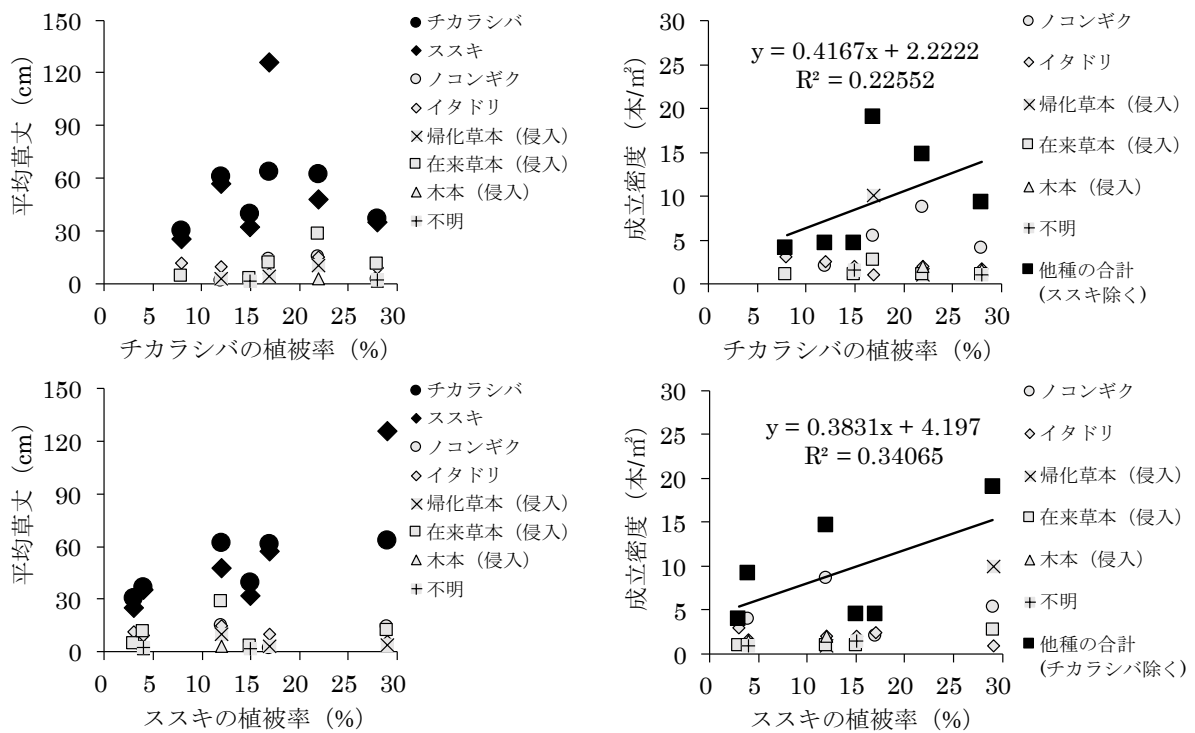
単位は (cm) とする

ノコンギクは 2015 年では多量区のみで確認されたただけだったが、2016 年と 2018 年では少量区、中量区でも確認され、被度は「+」もしくは「1」から「1」もしくは「2」になり、分布が拡大していた。イタドリはいずれの年でも少量区、中量区、多量区で確認されたが、被度は「+」もしくは「1」で小さかった。ノリウツギ、ウツギは 2018 年に初めて中量区と多量区で確認された（木本として分類）。

一方、無播種区では、1 年 5 ヶ月目から 2 年 5 ヶ月目にかけてススキと外来植物が優占していたが、4 年 5 ヶ月目にはチカラシバが出現し、ススキの次に優占する結果となった。

侵入種についてみると、1 年 5 ヶ月目では播種区と無播種区のいずれにおいても外来草本は確認されなかった。2 年 5 ヶ月目と 4 年 5 ヶ月目では播種区でも確認されたが、被度は「+」で小さかった。一方、無播種区では 2 年 5 ヶ月目には成立本数が 44 本と他の種よりも多く、被度も「2」と大きかった。しかし、4 年 5 ヶ月目では被度が「1」と小さくなっていった。在来草本では 1 年 5 ヶ月目から 4 年 5 ヶ月目にかけて、播種区、無播種区のどちらにおいても「+」もしくは「1」の被度で確認された。

表-2.7～表-2.9 をもとに、2016 年 10 月で播種区において優占種であったチカラシバ、ススキと他種の成立の関係について、図-2.6 に整理した。これによると、チカラシバと他種の関係について、チカラシバとススキは植被率の大小に関わらず、他種よりも平均草丈が大きかった。さらに、チカラシバとススキの植被率が大きいほど他種の合計も多くなる傾向にあった。



※図中の直線は他種の合計 (■) に対する回帰直線を示す

図-2.6 優占種の植被率と他種の平均草丈または成立本数の関係

2.3.3. 法面におけるシカの痕跡

調査区にはフンや踏み荒らしといった野生動物の痕跡、植物に対する草食動物の食痕がみられた(写真-2.2)。2015年7月(播種後1年2ヶ月目)の調査の際、1頭のシカの来訪を確認し、踏み跡の多さからも食痕は主にシカによるものであると考えられた。

食痕が確認された種はノコンギク、アレチノギク (*Conyza bonariensis* (L.) Cronquist)、ヤハズソウ (*Kummrowia striata* (Thunb.) Schindl.)、メドハギ (*Lespedeza cuneata* G. Don.)、スズメノエンドウ (*Vicia hirsuta* (L.) Gray)、イタドリ、メヒシバ (*Digitaria ciliaris* (Retz.) Koel.)、ススキ、ウツギであった。食痕は発芽間もない個体で多発し、それらの個体が少ない位置ではススキでもみられたが僅少だった。チカラシバでは発芽間もない個体でも食痕が確認されず、20 cm以上のチカラシバがみられる地点では踏み荒らしはみられなかった。

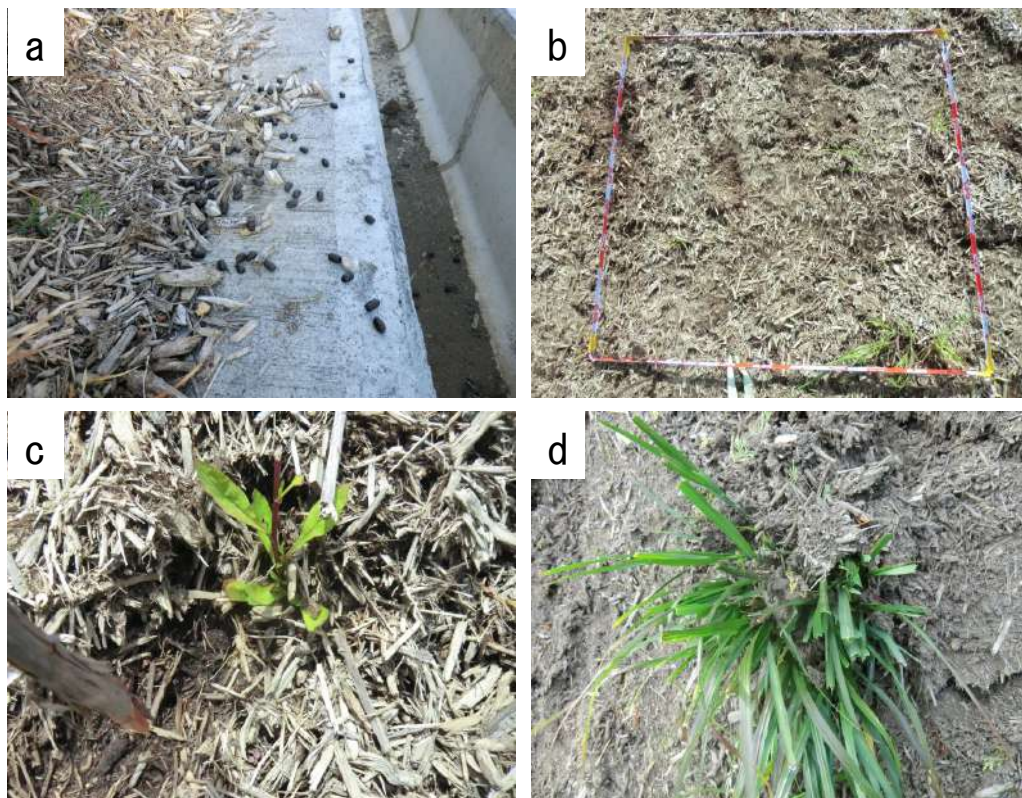


写真-2.2 シカの痕跡

a) シカのフン b) 法面での踏み荒らし c, d) シカの食痕

2.4. 考察

2.4.1. 植被率の経過と出現種の生育状況

図-2.5 の植被率の結果から、無播種による自然侵入促進工のみの施工では播種後 3 年目まで植被があまりみられないが、少量でも播種することにより、無播種よりも植物の定着を早め、植被率を高める効果が期待できると考えられた。さらに、少量程度なら施工後 3 年目以降で、中量以上なら施工後 2 年目以降で 70%程度の比較的高い植被率を期待できると考えられた。

表-2.7～2.9 の播種区における出現種の結果から、導入種であるチカラシバが先に定着して群落を形成し、次いでススキの群落が形成され、播種から 4 年目以降ではチカラシバは減退してススキが優占すると考えられた。また、無播種区で、ススキが先に調査区内に侵入し、次いでチカラシバが繁殖していた。これはススキが風散布で、チカラシバが動物付着散布という種子の散布方法の違いによるものだと考えられた。

植被や草丈が大きいチカラシバ、ススキの個体の下に草丈の低い植物が多く生育した。これには何らかの看護作用あるいは定着補助作用が関係したと考えられたが、本研究の範囲では要因を特定できなかった。また、草丈の高いチカラシバ、ススキの存在が帰化草本の侵入や生育を阻害する可能性もあり、草丈が高くなる地域性種苗の導入は在来種で構成された草地の再生に効果的であると考えられた。

2.4.2. シカ不嗜好性植物に関する考察

イネ科の在来植物には他の植物に比べてケイ酸が多く含まれ、葉身表皮が硬くなることが報告されている^{1, 48, 79)}。そのために、チカラシバ、ススキはシカの食害をあまり受けず、播種区において優占する結果になった可能性が考えられた。また、チカラシバ、ススキにシカ不嗜好性があることを踏まえて図-2.6 の結果を考察すると、シカの標的にならなかった草丈の高いチカラシバ、ススキが草丈の低い植物をシカから見つけにくくし、生育を補助した可能性が考えられた。

2.4.3. チカラシバとススキの有用性

チカラシバ(写真-2.3)はイネ科の多年草で、草丈が1～2mになる⁵⁰⁾。チカラシバのシカ不嗜好性に関する報告は多数確認されており^{13, 20)}、本実験での緑化施工地でもチカラシバはシカに食べられずに残存していたことも踏まえると、チカラシバはシカに採食されにくく、法面緑化におけるシカ被害に対抗できる可能性が考えられた。

また、チカラシバはその根の強さから、法面における表層保護効果が期待でき¹⁸⁾、チカラシバは原始・古代から法面の表層固定・侵食防止に用いられてきたと推測されている²²⁾。

チカラシバは日本全土の平地から山地まで広く分布しているが⁵⁰⁾、地域ごとの遺伝的差異は小さいと報告されている⁷²⁾。そのため、遺伝的攪乱の懸念は少なく、全国からの種子採取、供給が可能とみられる。チカラシバの種子は室温貯蔵でも長期間にわたって発芽率が維持されるという報告もあり⁵¹⁾、保存にかかるコストを低くして種子を利用できる可能性がある。

一方、ススキは草丈が1~2 mになるイネ科の多年草であり⁵⁰⁾、古代から人の集落周辺に生育していたと推測され、茅葺、茶草、馬草、農業資材など人の生活に古くから利用されてきた¹⁸⁾。和歌山県内のススキ群落が広がる生石高原は⁷⁴⁾、豊かな生物多様性が評価される一方で、その景観の美しさから観光地にもなっている。

ススキは日本全土の平地から山地まで広く分布しており⁵⁰⁾、収穫や調整、保存が比較的容易とされていることから⁵²⁾、今後国内において利用の拡大や供給体制の確保が期待できる。また、ススキの根は土壌緊縛力が強く、瘦地や乾燥地、強酸性地でも生育できるとされている⁵⁶⁾。

一方、シカによるススキの採食被害について、シカの密度が高い地域やエサ資源が乏しい地域では成長が阻害されるレベルの採食を受ける可能性が報告されている^{13,21)}。このことから、シカ被害対策としてススキを用いるには現地の状況を踏まえての判断が必要だと考えられた。

日本の在来であるススキは中国から安価な外国産在来種の種子として輸入されていたが、近年、各地域における遺伝構造が解明され、ススキの遺伝的変異の地理的分布は東日本、中日本、西日本、もしくは、日本アルプスや津波海峡、九州地域で異なることが明らかになっている^{6,15)}。このように地域によって遺伝的な差異はあるが、供給場所の遺伝的変異を考慮することで、全国におけるススキの採取、供給は可能と考えられた。



写真-2.3 左：チカラシバ (*Pennisetum alopecuroides* (L.) Spreng.) (撮影：川中一博)
右：ススキ (*Miscanthus sinensis* Andersson)

2.5. まとめ

本研究の結果から、いずれの調査区でも発生期待本数にはおよばない成立密度に止まったが、中量程度の播種量で2年目、少量程度なら3年目以降で70%程度の植被率を得られると判断された。また、播種後2年5ヶ月目において、播種区ではチカラシバとススキが優占種となり、その要因はシカの不嗜好性と関係する可能性が考えられた。しかし、シカが飢餓状態ではチカラシバ、ススキはエサ資源になる可能性もあり、地域や状況によってはシカの嗜好性は一定ではないとみられる。この解明には今後の継続観察が必要である。

一方で、チカラシバとススキのどちらも土壌緊縛力が強く表層保護効果が期待され、遺伝的地域性を考慮することで全国的に供給できる点において、地域性種苗として有用である可能性が考えられた。

3. 採種機の開発と損傷を受けた種子の発芽率の検証

3.1. はじめに

3.1.1. 採種機の開発

現在、地域性種苗の採取はほとんど手作業で行われている。しかし、種苗単価を安くするには、多くの種子を早く大量に採取できるように機械化することが望ましい。そこで、わかやま地域性種苗緑化研究会ではチカラシバとススキを対象にした採種機が開発された²⁶⁾。

充電式ブロワーのモーターを逆回転させて吸引できるようにし、試行錯誤を重ねた。その結果、吸引口部分で穂を挟み、挟んだ状態で穂を引っ張って種子を脱落させ、その脱落した種子を回収するという方法をとった。試作した採種機は背負うかたちをとり、軽量で女性でも高齢者でも簡単に操作できるものになった（写真-3.1）。

また、採種機の吸引力を調整し、採取時に種子（小穂）のノギや基毛、包穎が除去された穎果を回収することが可能になった（写真-3.2）。しかし、採取機の吸引力を強くしすぎると種子が割れたり、傷ついてしまい、種子の発芽に影響がでる可能性があった。



写真-3.1 採種機を用いた種子採取



写真-3.2 採取機により選別されたススキの穎果や包穎

3.1.2. チカラシバの種子に対する損傷が発芽に及ぼす影響

試作段階の採取機の吸引力を強くしすぎると種子が割れたり、傷ついてしまい、種子の発芽に影響がでる可能性があった。一方で、マメ科の植物等では播種前に種皮に傷を付けることで発芽が促進されることが知られている^{46,55)}。そこで、本研究では、種子への損傷が発芽に影響するかを検証するために発芽実験を行った。

チカラシバの花期は8~10月の夏期から秋期であり⁵⁰⁾、チカラシバが休眠するタイプの種子かは不明だったが、保存温度を低温の5℃条件と非低温の25℃条件の2種類設定して、種子の休眠の程度を確認することとした。また、予備実験において、10℃~30℃条件下でチカラシバの種子（小穂，S区）から包穎を除去して穎果（C区）の状態で播種したところ（図-3.1）、15℃以上の温度下では穎果は7日前後で、小穂は15日前後で発芽が確認され、それ以降は小穂よりも穎果の方が早く高い発芽率に到達する傾向にあった。しかし、10℃10℃条件下では小穂および穎果のどちらも2ヶ月間発芽が確認されず、90%近い発芽率に到達するには3ヶ月以上かかった。これを踏まえて、10℃と15℃では発芽傾向に違いがある可能性を考慮し、傷つけた種子を10℃または15℃条件下で播種し、発芽の経過を観察した。また、穎果の方が小穂よりも発芽が早くなるのは吸水が関係しているのではないかと考え、穎果の種皮を傷付けることで発芽が促進されるかという検証も行った。

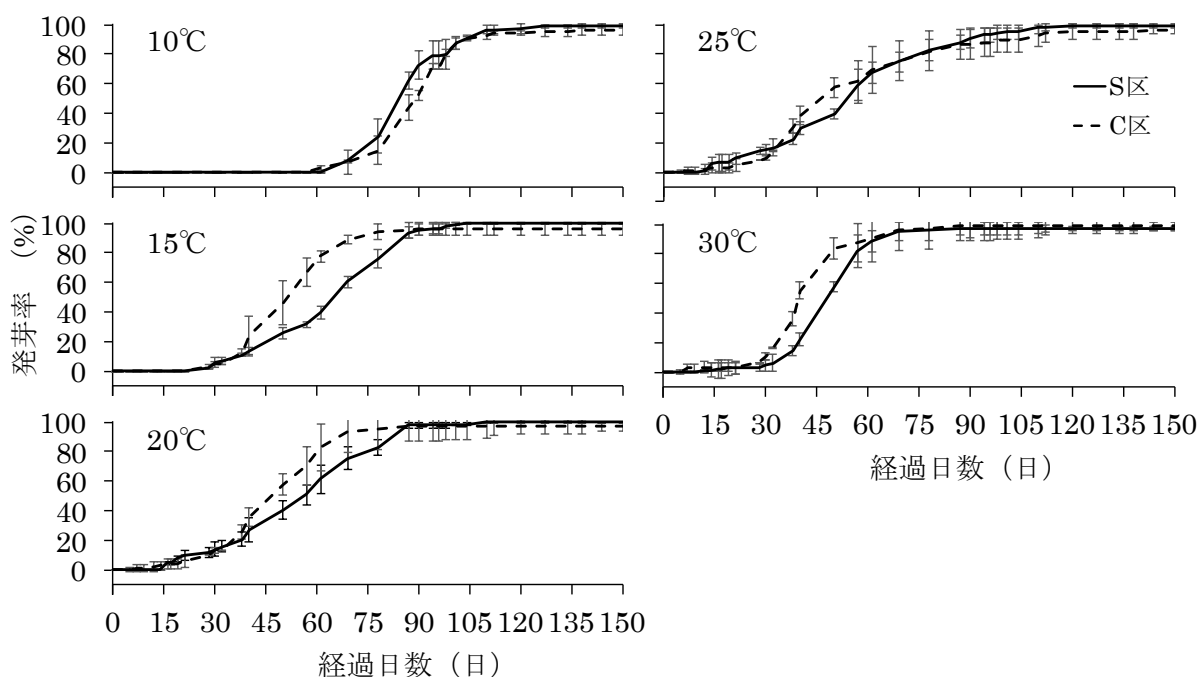


図-3.1 各播種温度における採取直後の小穂と穎果の積算発芽率の推移
(エラーバーは標準偏差を表す)

3.2. 材料および方法

3.2.1. 保存温度および傷付け処理が発芽に及ぼす影響

2021年10月に和歌山県海南市上谷の黒沢牧場内でチカラシバの種子を無作為に採取し、3日間室内で風乾させた。風乾後、種子群を2つの袋に分け、ひとつを低温の5°C・暗条件に設定したチャンバー（日立低温インキュベータCR-32, 日立製作所）に、もうひとつを非低温の15°C・暗条件に設定したチャンバー（クールインキュベーターKMH-050, アズワン株式会社）に入れ、乾燥条件下で3ヶ月間保存した。保存時の乾燥条件はシリカゲルとともに種子を袋へ入れて密封する方法を採った。

種子（小穂）にある総苞毛や包穎が種子の発芽を阻害しているかを確認するため、総苞毛や包穎を除去せず小穂のまま播種したS区、総苞毛のみを除去したS-毛無区、小穂の内部にある穎果のみを播種したC区という3種類の処理区を設定した（写真-3.3）。さらに、チカラシバの種皮に傷を付けて発芽にどのような影響があるかを検討するため、C区をさらに、無傷の穎果を播種したC-無傷区、種皮を軽く傷付けた穎果を播種したC-浅傷区、C-浅傷区よりも深く種皮に傷付けた穎果を播種したC-深傷区、半分に割った穎果を播種したC-割れ区の4種類に分けた。S-毛無区およびC区における総苞毛や包穎の除去は手作業で行われ、種皮に傷を付けないように注意した。C-浅傷区やC-深傷区で種皮を傷付ける際には、穎果をすり鉢に入れてゴムボールで擦る方法を使った。C-浅傷区では50回、C-深傷区では200回擦り、C-浅傷区の種子群は光沢が出る程度だったが、C-深傷区の種子群は胚が露出していた。C-割れ区では、穎果を彫刻刀で半分に切断し、胚が含まれている断片を実験に用いた。

それぞれの種子を1処理区につき25粒ずつ3反復でシャーレへ播種し、播種後シャーレへ注水した。15°C・12時間の明条件（クールインキュベーターKMH-050, アズワン株式会社, 光条件は6,000~8,000 Lux, 100~130 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ）に設定したチャンバー内へシャーレを静置させ、ろ紙が乾燥しないように適宜給水を行い、60日間経過を観察した。

各処理区において、1~4日ごとに発芽数を記録し、発芽した種子を取り除いた。発芽の定義は幼根もしくは幼芽が出現した状態とした。発芽数の結果から、播種後N日目の積算発芽率（%、以下、発芽率）を算定した（式3.1）。統計ソフトウェアR（R 4.3.1, <https://cran.r-project.org/>）を用いて一般化線形モデル（GLM）を構築し、結果を解析した。発芽数を応答変数、種子に対する処理や温度の条件を説明変数、誤差構造を二項分布、リンク関数をロジットとし、逸脱度分析によって各処理区の有意差の検証を行った²³⁾。

$$N \text{ 日目の積算発芽率 } (\%) = \frac{N \text{ 日目までの発芽数}}{\text{播種した種子数 } (n)} \times 100 \quad (3.1)$$



写真-3.3 各処理区における小穂や穎果

3.2.2. 種皮に対する損傷が種子の吸水に及ぼす影響

5°C・暗条件下で1年4ヶ月保存していた種子群をチャンバーから取り出し、6種類の処理区（S区、S-毛無区、C-無傷区、C-浅傷区、C-深傷区、C-割れ区）を新たに設けた。1処理区につき200粒の種子を5反復でろ紙を1枚敷いたシャーレ（φ90×15mm）に播種し、シャーレへ15mlの水を注水した。注水後、25°C・12時間明条件（6,000～8,000 Lux, 100～130 μmol/m²/s, NHシステム LH200, 日本医化器械製作所）に設定したチャンバー内で経過を観察した。

小穂や穎果、傷付け処理を施された穎果における吸水と発芽の関係を確認するため、注水後3日目の時点で各処理区における発芽数に違いが確認された時点で観察を打ち切り、3日目の時点における種子群の含水率および発芽率を測定した。発芽率の算出には3.2.1と同様の方法を採用した。

注水後3日目の各処理区における種子群の含水率を確認するため、処理区内の種子群を全てスピナー（サラダスピナーC-750, パール金属株式会社）に入れ、スピナーを30回回して種子の表面に付着した水を取り除いて種子群の重量を測定した（METTLER TOLEDO AB204-S, メトラー・トレド株式会社）。そして、注水後の重量を測定した種子群を80°Cに設定した定温乾燥機（Windy Oven WFO-60ND, 東京理化器械株式会社）で3日間乾燥させ、種子群の乾燥重量を測定した。そして、注水後の重量と乾燥重量から注水後の種子群の含水率を算出した（式3.2）。また、S区やS-毛無区では小穂の中にある穎果まで水が浸透したかを確認するため、総苞毛や包穎を除去して穎果を取り出し、注水後の穎果の重量と穎果の乾燥重量も測定した。各処理区の含水率の比較には一元配置の分散分析を行い、有意な効果が認められた場合に事後検定としてTukey-Kramer法を用いて多重検定を行った。また、発芽率の比較には3.2.1と同様の方法で解析を行った。含水率と発芽率の関係を明らかにするため、統計ソフトウェアRでピアソンの積率相関係数を求めてその有意性の検定を行った（それぞれ有意水準は0.05）。

$$\text{含水率 (\%)} = \frac{\text{注水後の種子重量} - \text{種子の乾燥重量}}{\text{注水後の種子重量}} \times 100 \quad (3.2)$$

3.3. 結果

3.3.1. 保存温度および傷付け処理が発芽に及ぼす影響

5℃または15℃条件下で保存した後の各処理区における積算発芽率の推移を図-3.2に示した。これによると、5℃下で保存し、10℃下で播種した種子群において、S区、S-毛無区では播種開始から40日目に初めて発芽が確認された。一方、C-無傷区、C-浅傷区、C-深傷区、C-割れ区ではS区、S-毛無区よりも早く30日目前後で発芽が確認された。特にC-深傷区、C-割れ区では、45日目で80%前後の発芽率に到達し、他の処理区に比べてより早く高い発芽率になった ($p < 0.05$)。75日目にはいずれの処理区でも80%以上の発芽率が確認された。

一方、15℃下で保存し、10℃下で播種した種子群において、C-無傷区、C-浅傷区、C-深傷区、C-割れ区では20日前後で初めて発芽が確認され、S区やS-毛無区よりも早く発芽が確認できた。いずれの処理区も40日前後で50%前後の発芽率に到達し、45日目には80%前後の発芽率に到達した。

5℃下で保存し、15℃下で播種した種子群において、S区、S-毛無区、C-無傷区のいずれでも15日目で初めて発芽が確認された。一方、C-浅傷区、C-深傷区、C-割れ区では10日目には発芽が確認され、15日目までS区、S-毛無区、C-無傷区に比べて急激に発芽率が上昇した。15日目にはC-浅傷区、C-深傷区では70%以上、C-割れ区では90%以上の発芽率が確認され、C-割れ区の発芽率は他の処理区に比べてより早く高い発芽率に到達した ($p < 0.05$)。

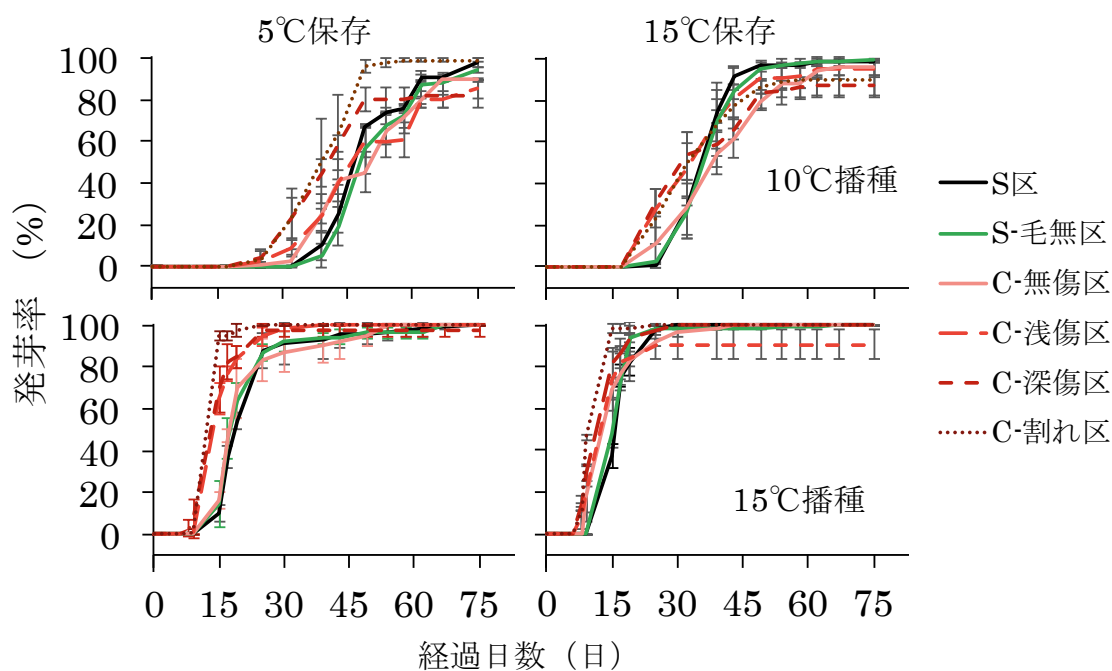


図-3.2 5℃または15℃条件下で保存した後の各処理区における積算発芽率の推移
(エラーバーは標準偏差を表す)

一方、15°C下で保存し、15°C下で播種した種子群において、S区、S-毛無区では10日目以降に、C-無傷区、C-浅傷区、C-深傷区、C-割れ区では7日目前後に初めて発芽が確認された。特に、C-割れ区では、7日目ですでに他の処理区の発芽率よりも有意に高い40%以上の発芽率が確認され ($p < 0.05$)、15日目には90%以上の発芽率に到達した。15日目でS区とS-毛無区の発芽率は40%前後になった一方で、C-無傷区、C-浅傷区、C-深傷区では70%以上の発芽率になり、S区とS-毛無区よりも有意に高くなった ($p < 0.05$) いずれの処理区でも20日目前後には80%以上の発芽率に到達した。

3.3.2. 種皮に対する損傷が種子の吸水に及ぼす影響

播種後3日目における各処理区の小穂や穎果の含水率および発芽率を図-3.3に整理した。穎果の含水率を比べると、C-割れ区以外の処理区では40%前後だったが、C-割れ区では60%前後で他の処理区よりも高かった ($p < 0.05$)。一方で、S区、S-毛無区で総苞毛と包穎を除去して取り出した穎果の含水率は20%程度で、穎果を播種したC-無傷区、C-浅傷区、C-深傷区よりも低かった ($p < 0.05$)。発芽率に関して、S区、S-毛無区では注水後3日目の含水率を測定した時点では発芽が確認できなかった。一方で、C-割れ区では90%以上の発芽率が確認され、C-無傷区、C-浅傷区、C-深傷区でも20%前後の発芽率が確認された。

図-3.3で整理した各処理区の穎果に対する含水率と発芽率の関係を図-3.4に表した。これによると、穎果中の含水率が高ければ発芽率も高くなり、穎果中の含水率と発芽率の間には正の相関が確認された ($r=0.84$, $p < 0.05$)。

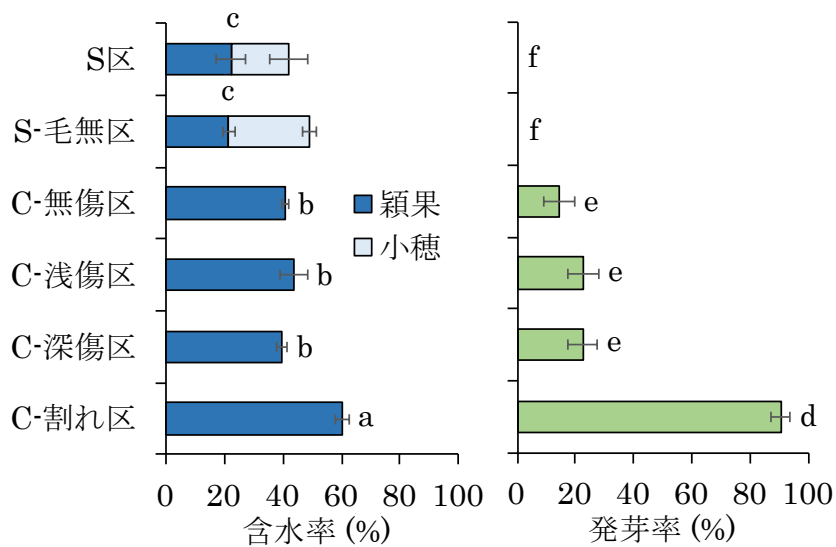


図-3.3 各処理区における小穂や穎果の含水率および発芽率

(「小穂」は総苞毛や包穎を含めた小穂の含水率を表す。エラーバーは標準偏差を表す。

異なるアルファベットは各処理区の有意差を表す (有意水準は 0.05)

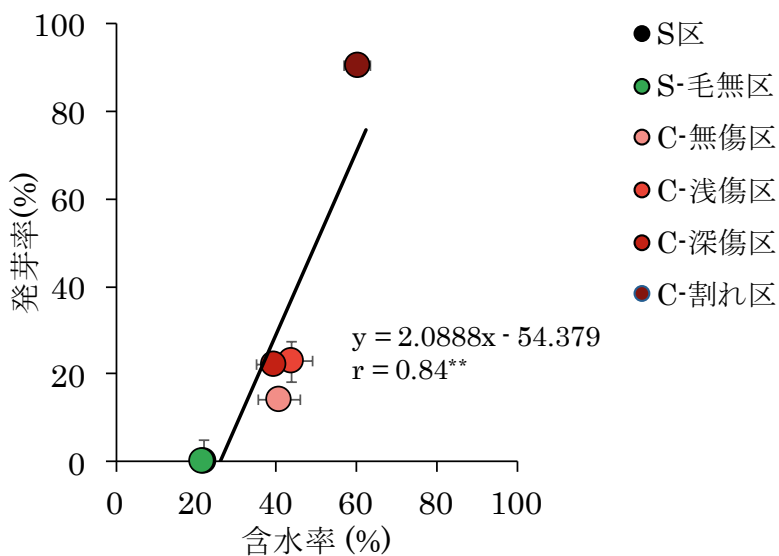


図-3.4 各処理区における穎果の含水率と発芽率の関係

(エラーバーは標準偏差を表す。**は 0.05 水準で有意であることを表す)

3.4. 考察

3.4.1. 保存温度および傷付け処理が発芽に及ぼす影響

図-3.1 と図-3.2 より、播種温度が 10℃の場合、小穂や穎果を保存せずに播種すると 80%以上の発芽率に到達するのに 90 日以上かかったが、5℃下で保存した後では 60 日、15℃下で保存した後では 40 日前後と短くなった。また、播種温度が 15℃の場合、保存せずに播種した小穂や穎果では 80%以上の発芽率に到達するのに 60 日以上かかったが、5℃下で保存した後では 20 日、15℃下で保存した後では 15 日前後と短くなった。このように、5℃、15℃下で一定期間種子を保存することで 10℃や 15℃下での播種でも 1 ヶ月以上早く高い発芽率が確認できる可能性が考えられた。

小穂や無傷の穎果において、播種温度に関わらず、5℃下で保存した種子群は 15℃下で保存した種子群よりも遅く発芽が確認され、最終発芽率に到達するまでの日数も長かった。このことから、夏季の発芽を想定した予備実験や先行研究と同様に²⁵⁾、本研究の範囲でもチカラシバの種子が低温で休眠が解除される冬休眠であることは肯定できなかった。

3.4.2. 種皮に対する損傷が種子の吸水に及ぼす影響

図-3.2 より、播種温度に関わらず、種皮に傷を付けた穎果、割られた穎果は総苞毛を除去していない小穂や総苞毛を除去した小穂よりも発芽が早く、早期に発芽率が高くなる傾向にあった。このことから、包穎を除去し、穎果の種皮に傷を入れることで発芽が促進される可能性が考えられた。

図-3.3 と図-3.4 より、S 区や S-毛無区では穎果中の含水率が他の処理区よりも低く、各処理区における穎果中の含水率と発芽率には正の相関が確認できた。このことから、総苞毛や包穎が穎果の吸水を阻害し、発芽を遅延させている可能性が考えられた。このことにより、傷付け処理を施された穎果はより多く吸水することができ、より早期に高い発芽率が確認できる可能性が考えられた。

3.5. まとめ

予備実験では 10℃～30℃条件下でチカラシバの種子(小穂)と小穂内の穎果を播種したところ、特に、春季～夏季に相当する 15℃～30℃条件下では穎果の状態で播種するとより早く高い発芽率が確認できた。5℃や 15℃下で種子を 3 ヶ月間保存したところ、10℃や 15℃条件下での発芽が早まり、さらに、総苞毛や包穎を除去して穎果の種皮を傷付けることでより早く高い発芽率に到達した。穎果は小穂よりも吸水や発芽が早かったことから、総苞毛や包穎は種子の吸水を阻害している可能性があり、総苞毛や包穎を除去して、さらに、穎果の種皮に損傷を与えることで発芽が促進される可能性が考えられた。これらのことから、採取を機械化することで種子が割れたり、傷ついてしまっても、種子の発芽能力は衰えない可能性が考えられた。しかし、種子にカビが生えやすくなり、カビが原因で発芽能力が下がることも考えられるため、損傷を受けた種子の実用化には更なる検討が必要である。

4. チカラシバの種子の栽培

自生種が生えているところは平坦でなく、斜面地など種子を採取するには困難で、作業効率が悪く、危険を伴う場合も考えられる。そういった場所では大型な採種機を導入することが難しく、時間や労力が多くかかる可能性もある。また、植物の種類によっては採取地の確保自体も難しい⁵⁵⁾。それに対し、本研究では採取効率をあげるために、種子栽培の可能性を検討した。圃場を確立することで、緑化事業に対して持続的かつ安定的に種子を供給することができるようになり、地域性種苗緑化の実用性を向上させることが期待できる。そこで、実際に種子の栽培にはどのくらいの時間や労力がかかるのか、採取が容易で、風によって飛ばされない種子であるチカラシバを対象に栽培実験を実施した。

2017年4月に、和歌山県海草郡紀美野町樋下（北緯 34.146584 度，東経 135.362539 度）に 35 m² の圃場を設けた。圃場には防草シートを敷き、シートに等間隔で穴を開け、そこにあらかじめ育てた苗を植えた（写真-4.1）。

実験の結果、圃場にはチカラシバが繁茂し、種子の採取も可能になった（写真-4.2）。チカラシバと同じ科であるイネの栽培（米作り）では1反につき年間 810 時間の作業が必要であること

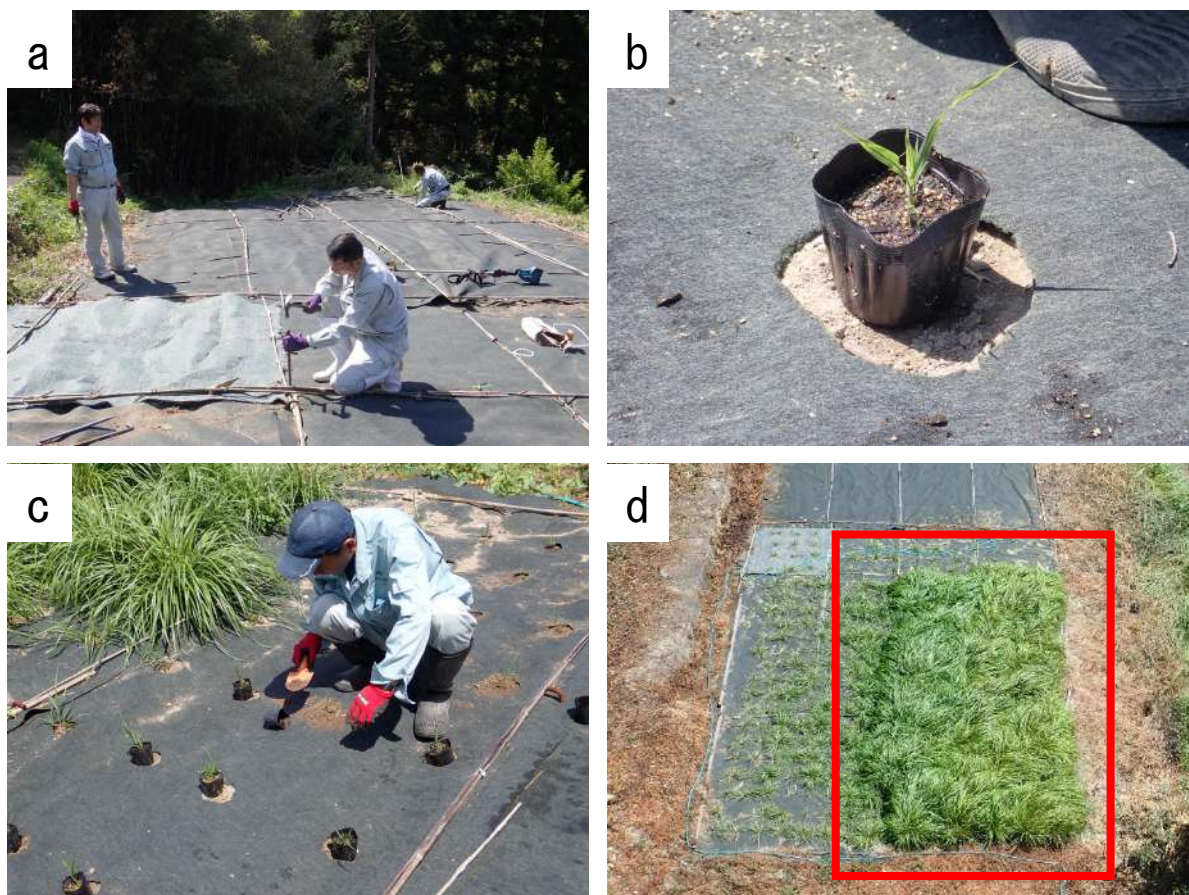


写真-4.1 圃場の設定（撮影：川中一博）

(a：圃場の整備，b：チカラシバの苗，c：苗の植え付け，d：2017年7月の圃場の様子)

に対し¹²⁾、チカラシバの栽培では 100 時間と短時間の作業で種子が採取できることがわかった（表-4.1）。また、チカラシバの種子を販売すると仮定して、1 反における収入をイネと同等の 112,000 円と設定した場合、チカラシバの販売価格は 1,120 円/kg と計算された。チカラシバは動物散布型の種子であるため、圃場の外へ逸出することが少ない。さらに、チカラシバは多年生であるため、2 年目以降はより少ない作業時間で種子を収穫できる可能性がある。これらのことから、チカラシバの栽培コストは 2 年目以降、1 年目よりもさらに安くなる可能性が考えられた。

以上のように、チカラシバの栽培では、イネの栽培よりも作業の手間がかからないことから、高齢の農業従事者でも栽培が容易であると考えられる。さらに、人の手が届いていない遊休農地や耕作放棄地に圃場を拡大することで、農業における課題が解決できる可能性もある。しかし、緑化植物の種子は農作物の規定からは外れてしまい、現状、緑化植物を農地で栽培することは法律上できない自治体も存在する⁵⁵⁾。実際に栽培地を拡大させるには、このような社会的な課題の他、施肥の有無や収穫しやすい植え方、圃場の環境条件の検討が必要である。



写真-4.2 2017 年 10 月における圃場の様子（撮影：川中一博）

表-4.1 チカラシバ栽培とイネ栽培¹²⁾における収益の比較
（チカラシバの販売単価を 1,120 円/kg と仮定した場合）

	チカラシバ栽培	イネ栽培
反収 (kg)	100	517
販売単価 (円/kg)	1,120	2,000
収入 (円/反)	112,000	112,000
変動費* (円/反)	3,000	60,000
限界利益 (円/反)	109,000	52,000
年間労働時間 (時間/反)	100	810

* 人件費を除く

5. チカラシバとススキにおける優良な種子の選別：採種時期と種子重量と発芽の関係

5.1. はじめに

チカラシバやススキの発芽率が低い一因として、最適な採種時期が不明であることが挙げられる。一般的にも、採種時期が早すぎると種子が未熟で発芽しない場合があり、実際、チカラシバの種子では登熟度合が低いと発芽能力は低くなることが報告されている¹⁶⁾。

チカラシバやススキと同じ科であるイネでは、優良な種子を得るために塩水選を行い、重く充実した籾を選んで播種する方法を採る⁶²⁾。一方で、Aso は²⁾、ススキに関して、完全に熟した種子では重量が必ずしも発芽率に影響するわけではないと報告している。そこでは、より重い種子群 (0.85~1.00 mm×2.30~2.70 mm, 70.6~137.6 mg/100 粒) の方が軽い種子群 (0.75 mm×1.90 mm, 51.5 mg/100 粒) よりも発芽は早かった一方で、最終発芽率はどちらも 90% 近くまで上昇した。しかし、Aso の実験では、8 月~10 月が花期であるススキに対し⁵⁰⁾、越冬後の 3 月に採取された、十分に成熟していたと考えられる種子を供試しており、3 月以前の、より未熟な種子では同様の結果になるかは不明だった。また、Aso は「軽い」、「重い」の判別を種子の粒径の結果から行っており、どの程度軽ければ発芽率が低いといった観点で実験を行ったわけではなかった。

これらのことを背景に、本研究では、チカラシバとススキの種子の採種時期を段階的に設定し、重量と発芽の関係、また、採種時期と発芽の関係を明らかにするために実験を行った。

5.2. 材料および方法

5.2.1. 種子重量が発芽に及ぼす影響

和歌山県海南市上谷の黒沢牧場内 (北緯 34.128494 度, 東経 135.292169 度) でチカラシバの種子を 2022 年 11 月に、和歌山県高野町高野山森林公園内のスキー場 (北緯 34.219674 度, 東経 135.598108 度) 全体に群生していたススキの種子を 2020 年 12 月に無作為に採取した (写真-5.1)。採取した種子は室内で 2 日間風乾させた後、3 ヶ月間 5℃ 設定のチャンバー内 (日立低温インキュベータ CR-32, 日立製作所) で保存した。なお、保存する際には種子をシリカゲルとともに袋に入れ、乾燥状態が保たれるようにした。



写真-5.1 チカラシバ (左) とススキ (右) の採種

採種した種子群の中から夾雑物であるしいな⁸⁵⁾を除去し、発芽実験には穎果の入っている小穂を用いた。イネの塩水選にならって、チカラシバとススキの種子をそれぞれ比重で大 (Heavy)、中 (Medium)、小 (Light) の3段階の比重区に分けた。なお、緑化の施工現場では種子は小穂の状態のまま利用されると考え、本研究ではあえて種子の毛や穎を除去せずに選別を行った。

選別方法について、チカラシバとススキは塩水や水よりも比重が軽く、塩水選や水選ではほとんどの種子が沈まずに浮上してしまった。そこで、水より比重の軽い99.9%のエタノールで選別を検討したが、逆に種子が全て沈んでしまった。そのため、本研究では99.9%のエタノールを純水で希釈して、1,000粒の種子群が見かけ上で3等分されたエタノール水を用いて選別を行った(エタノール選)。

チカラシバではまず、50.0%のエタノールへ種子を投入して攪拌させ、そこで沈下した種子を Heavy 区に分類した。次に、50.0%のエタノールで浮上した種子を取り上げ(写真-5.2)、軽く拭いた後、さらに80.0%のエタノールへ投入して攪拌させ、そこで沈下した種子を Medium 区に、浮上した種子を Light 区に分類した。一方、ススキでは66.0%と88.0%のエタノール水を用い、66.0%のエタノール水に沈下した種子を Heavy 区、88.0%のエタノール水に沈下した種子を Medium 区、88.0%のエタノール水に浮上した種子を Light 区に分類した。分類後、種子をすぐに水へ浸水させて、種子に付着したエタノール水を洗い流した。分類した種子群から各処理区につき50粒を選出してシャーレ(滅菌オートシャーレ・SCL, 90φ×15mm)へ播種し、それを3反復実施した。各処理区の種子の比重や重量については表-5.1に整理した。

1処理区につき50粒のチカラシバまたはススキの種子をシャーレ(滅菌オートシャーレ・SCL, 90φ×15mm)へ播種し、それを3反復実施した。播種したシャーレに注水し、それを25℃・12時間明条件(6,000~8,000Lux, 100~130μmol/m²/s)のチャンバー内(NHシステムLH200, 日本医化器械製作所)に入れて90日間観察した。観察期間中、適宜シャーレへ給水を行い、シャーレに注ぐ水の量はろ紙が乾かない程度とした。



写真-5.2 エタノール選の様子

また、緑化工事の現場では通常、種子の選別が行われないことを想定して、重量を勘案せずに無作為で選出した種子群（Random）に対しても発芽実験を行った。Random 区の種子がどの比重区に分布しているか確認するため、上記と同様のエタノール選を行った。その結果、Random 区における種子群の比重別の割合は、チカラシバでは Heavy 区が 62.0%、Medium 区が 18.0%、Light 区が 20.0%で、ススキでは Heavy 区が 18.0%、Medium 区が 8.0%、Light 区が 74.0%だった。

各処理区において、1～4 日ごとに発芽数を記録し、発芽した種子を取り除いた。発芽の定義は幼根もしくは幼芽が出現した状態とした。発芽数の結果から、播種後 N 日目の積算発芽率（%、以下、発芽率）を算定した（式 5.1）。統計ソフトウェア R（R 4.3.1, <https://cran.r-project.org/>）を用いて一般化線形モデル（GLM）を構築し、結果を解析した。発芽数を応答変数、種子に対する処理や温度の条件を説明変数、誤差構造を二項分布、リンク関数をロジットとし、逸脱度分析によって各処理区の有意差の検証を行った²³⁾。

$$N \text{ 日目の積算発芽率 } (\%) = \frac{N \text{ 日目までの発芽数}}{\text{播種した種子数 } (n)} \times 100 \quad (5.1)$$

表-5.1 比重で分けたチカラシバとススキの種子性状

区分	チカラシバ		ススキ	
	比重*	乾燥重量** (mg/100 粒)	比重*	乾燥重量** (g/100 粒)
Heavy 区	0.935 以上	729.1	0.900 以上	95.5
	1.000 未満		1.000 未満	
Medium 区	0.864 以上	659.7	0.841 以上	68.1
	0.935 未満		0.900 未満	
Light 区	0.794 以上	456.5	0.794 以上	51.1
	0.864 未満		0.840 未満	

*比重：国際法定計量機関(OIML)の「国際アルコール表⁶¹⁾」の 15℃における密度に基づいた値。

**乾燥重量：100 粒の種子を 10 反復で、80℃設定の定温乾燥機（Windy Oven WFO-60ND, 東京理化学器械株式会社）で 3 日間乾燥させた後に測定した値。

5.2.2. 採種時期の違いが発芽に及ぼす影響

チカラシバとススキの花期は8月～10月とされており⁵⁰⁾、結実はそれ以降だと考えて、チカラシバの採取日を2017年10月26日と11月25日に、ススキの採取日を2018年11月1日、12月5日、2019年1月8日に設定した。チカラシバの種子は和歌山県高野町高野山森林公園内のスキー場内に自生していた群落から無作為に採取された。ススキの種子は和歌山県和歌山市栄谷の和歌山大学構内の斜面地（北緯34.264121度、東経135.152331度）に自生していた群落から無作為に採取された。なお、チカラシバでは12月、ススキでは2月にほとんどの種子が穂から脱落しており、収量が十分に獲得できなかつたため、採取を打ち切った。採取された種子を室内で3日間風乾させた。採種直後の発芽率を確認するために風乾後すぐの種子を一部用いて発芽実験を行い、残りの種子は5℃設定のチャンバー内（日立低温インキュベータCR-32、日立製作所）で保存した。また、5.2.1と同様の保存条件である5℃条件下に3ヶ月間保存した種子の発芽率を確認するため、採取から3ヶ月後の種子を用いた発芽実験も実施した。

チカラシバについて、10月に採取した種子を10月区、11月に採取した種子を11月区として2通りの処理区を設けた。一方、ススキでは、11月に採取した種子を11月区、12月に採取した種子を12月区、1月に採取した種子を1月区として3通りの処理区を設けた。チカラシバとススキのどちらにおいても、しいな等の夾雑物を手作業で選別し、実験には穎果が入っている小穂を用いた。

発芽の確認方法について、ろ紙を1枚敷いたシャーレに50粒の種子を置床し、これを1処理区につき3反復実施した。置床後は25℃・12時間明条件（6,000～8,000 Lux, NH システムLH200, 日本医化器械製作所）に設定したチャンバー内でろ紙が乾燥しないように適宜シャーレへ給水し、90日間経過を観察した。

また、各処理区における種子の性状を確認するため、1処理区につき100粒の種子を対象に10反復で新鮮重量と乾燥重量、含水率の平均値を求めた。風乾した後すぐに電子天秤（METTLER TOLEDO AB204-S, メトラー・トレド株式会社）を用いて種子群の新鮮重量を測定し、さらに、その種子群を80℃設定の乾燥機（Windy Oven WFO-60ND, 東京理化器械株式会社）で3日間乾燥させた後の乾燥重量を測定した。また、含水率は（新鮮重量 - 乾燥重量）÷新鮮重量×100によって算出した（式・5.2）。各処理区の新鮮重量と乾燥重量、含水率の比較には一元配置の分散分析を行い、有意な効果が認められた場合に事後検定としてTukey-Kramer法を用いて多重検定を行った（有意水準は0.05）。

$$\text{含水率 (\%)} = \frac{\text{新鮮重量} - \text{乾燥重量}}{\text{乾燥重量}} \times 100 \quad (5.2)$$

5.3. 結果

5.3.1. 種子重量が発芽に及ぼす影響

比重別に分けたチカラシバとススキの発芽率の推移を図-5.1 に示した。これをみると、チカラシバでは、いずれの処理区においても6日目に初めて発芽が確認でき、その後発芽率は経時的に上昇していった。Heavy 区の発芽率は15日目で75%を超え、24日目で80%以上になった。Medium 区の発芽率は15日目で65%まで上昇し、それ以降ほとんど発芽しなかった。一方、Light 区の発芽率は15日目の時点で20%以上になり、それ以降も徐々に上昇したが、最終発芽率は35%程度に止まった。いずれの処理区間においても最終発芽率は有意な差が認められた ($p < 0.05$)。

一方、ススキについて、いずれの処理区においても7日目に初めて発芽が確認でき、その後発芽率は経時的に上昇していった。Heavy 区の発芽率は10日目には70%以上になり、14日目以降は80%以上になった。Medium 区の発芽率は10日目で50%、20日目で70%にまで上昇した。一方、Light 区の発芽率は10日目には20%程度になったが、それ以降、発芽はほとんど確認できず、他の処理区に比べて最終発芽率は有意に低かった ($p < 0.05$)。

ここで、図-5.1 のチカラシバとススキの Heavy 区、Medium 区、Light 区の発芽率と 5.2.1 に記載した Random 区における種子の比重別の割合を元に、Random 区における積算発芽率の推定値 (Estimated value) を算出した。推定値の算出には統計学の期待値の計算手法を用いた¹⁴⁾。推定値を、実際に発芽経過を観察して算出した Random 区の積算発芽率 (実測値) と比較した (図-5.2)。その結果、チカラシバとススキのいずれでも、Random 区における積算発芽率の実測値と推定値の推移は近似していた。

図-5.1 の Heavy 区、Medium 区、Light 区の最終発芽率と図-5.2 で示した Random 区における種子の比重別の割合を元に、Random 区の種子をどの重量クラスで選別するとどれだけの最終発芽率が推定されるかについて、表-5.2 に示した。

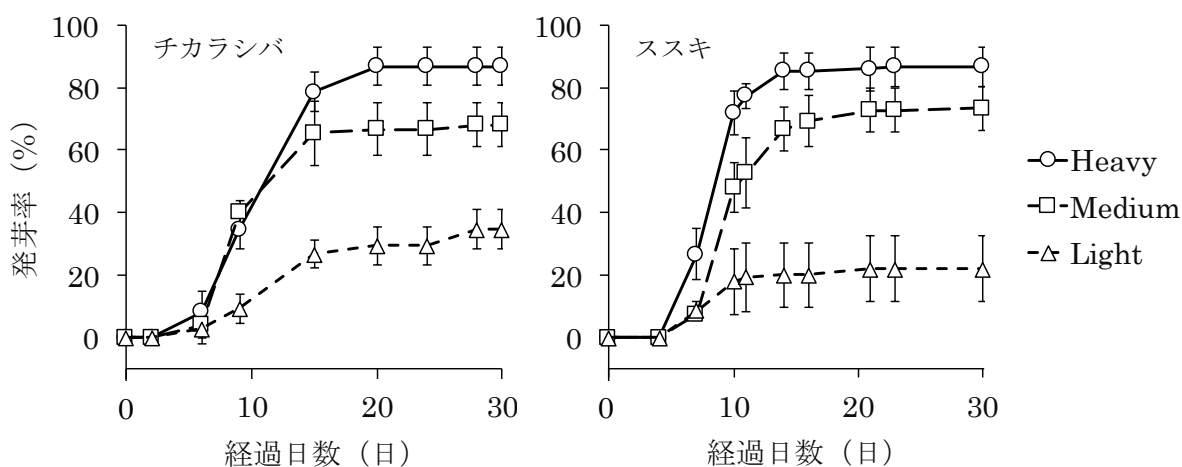


図-5.1 比重別に分けたチカラシバとススキの発芽率の推移
(エラーバーは標準偏差を表す)

チカラシバについてみると、Light 区に相当する種子群を含まない場合（Heavy 区と Medium 区のみ）では全体の最終発芽率が 83%以上になると推定された。Light 区に相当する種子群が含まれた場合では最終発芽率は 72%になると推定された。一方で、ススキについてみると、Light 区に相当する種子群を含まない場合は全体の最終発芽率が 73%以上になると推定された。一方で、Light 区に相当する種子群を含む場合の最終発芽率は 37%以下になると推定された。

以上の結果から、チカラシバでは Light 区に相当する種子群を含まない場合は Light 区を含む場合に比べて 10%以上、ススキでは 30%以上最終発芽率が高くなると推定された。

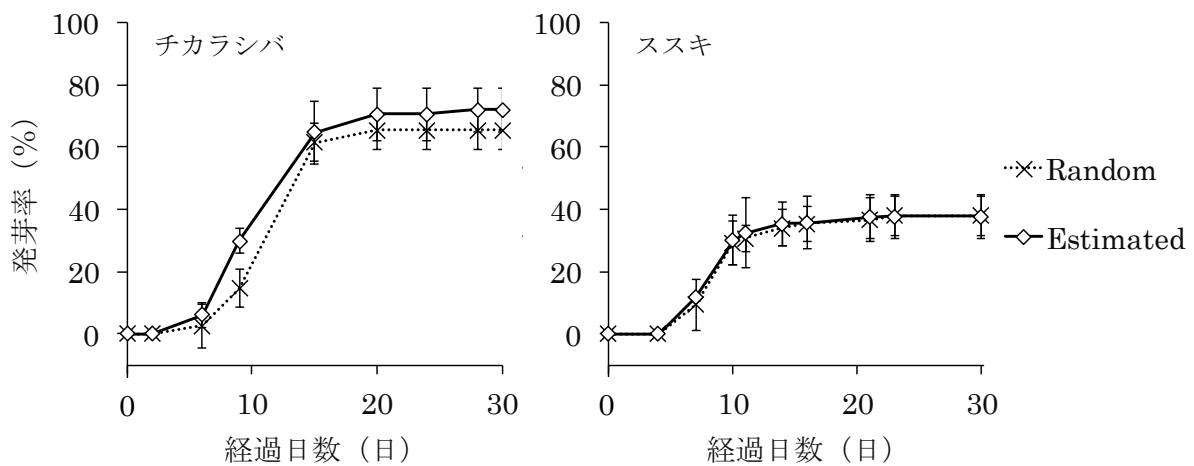


図-5.2 無作為に選出されたチカラシバとススキの発芽率の実測値と推定値の推移
(エラーバーは標準偏差を表す)

表-5.2 Random 区の種子群を比重で選別した場合に推定される最終発芽率

	種子の割合 (%)			推定される 最終発芽率* (%)
	Heavy	Medium	Light	
チカラシバ	100	—	—	87
	79	21	—	83
	—	100	—	68
	61	16	23	72**
	—	41	59	49
	—	—	100	35
ススキ	100	—	—	82
	69	31	—	79
	—	100	—	73
	18	8	74	37**
	—	10	90	27
	—	—	100	22

*推定される最終発芽率

= (図-5.1のHeavy区 of 最終発芽率 × Heavy区 of 種子の割合)
+ (図-5.1のMedium区 of 最終発芽率 × Medium区 of 種子の割合)
+ (図-5.1のLight区 of 最終発芽率 × Light区 of 種子の割合)

**Random区 of 種子の割合

実際に、Heavy 区、Medium 区、Light 区に選別したチカラシバとススキの種子の形状を目視で比較した（写真-5.3）。チカラシバとススキのどちらにおいても、外見上、小穂の状態では比重区間における違いを正確に判断することはできなかった。さらに、小穂から穎果を取り出して確認したところ、Light 区で確認された小粒の種子が Heavy 区と Medium 区でも混在していた。このように、チカラシバとススキは穎果の状態でも、外見上で重さの違いを正確に判断することは難しかった。



写真-5.3 比重で分類したチカラシバ（左）とススキ（右）の小穂と穎果

5.3.2. 採種時期の違いが発芽に及ぼす影響

採種時期別のチカラシバとススキについて、採種直後の発芽率の推移を図-5.3 に整理した。チカラシバについてこれをみると、10月区と11月区の発芽率は経時的に上昇していき、20日目の時点ではどちらも20%前後の発芽率だった ($p > 0.05$)。しかし、20日目以降は11月区の方が10月区よりも発芽率が高くなった。10月区と11月区のどちらも90日目までは発芽が確認され、最終発芽率は11月区が75%、10月区が50%で11月区の方が高くなった ($p < 0.05$)。

ススキについて、11月区では観察終了まで発芽がほとんど確認できなかった。12月区と1月区区の発芽率は経時的に上昇していったが、12月区では30日目で20%程度の発芽率しか達しなかった。一方で、1月区では10日目で50%以上の発芽率が確認でき、30日目には70%まで発芽率が上昇し、最終発芽率は他の処理区に比べて一番高かった ($p < 0.05$)。

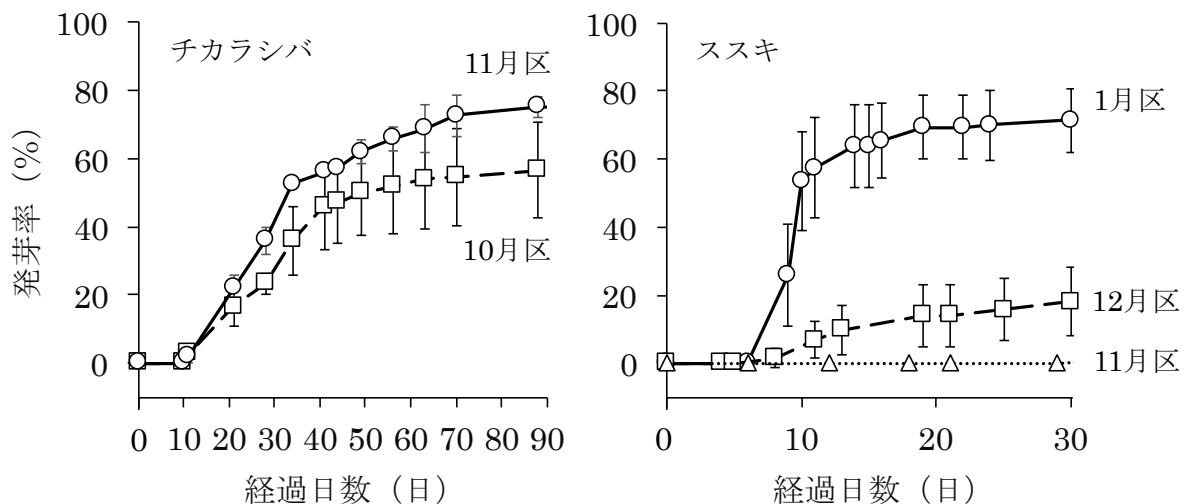


図-5.3 採種直後のチカラシバとススキの発芽率の推移

(エラーバーは標準偏差を表す)

5℃条件下で3ヶ月間保存したチカラシバとススキの発芽率について図-5.4に整理した。チカラシバについてこれを見ると、15日目において10月区では30%以上の発芽率が確認され、11月区の発芽率は20%程度で10月区の方が高くなったが ($p < 0.05$)、20日目には10月区と11月区の発芽率どちらも40%程度になり、それ以降、有意な差は確認されなかった ($p > 0.05$)。両区ともに40日目には発芽が止まり、最終発芽率は10月区と11月区のどちらも60%程度になった ($p > 0.05$)。

ススキについてみると、11月区では観察終了まで発芽がほとんど確認できなかった。一方、12月区と1月区では、どちらも7日目から14日目にかけて発芽率が60%まで急激に上昇し、20日目には70%以上になった ($p > 0.05$)。

以上のように、採種直後のチカラシバとススキは採種時期が遅いほど、最終発芽率は高くなったが、5℃条件下で保存した後はチカラシバの10月区と11月区間、ススキの12月区と1月区間では最終発芽率が同程度に高くなった。また、ススキの11月区は保存した後も発芽はほとんど確認できなかった。

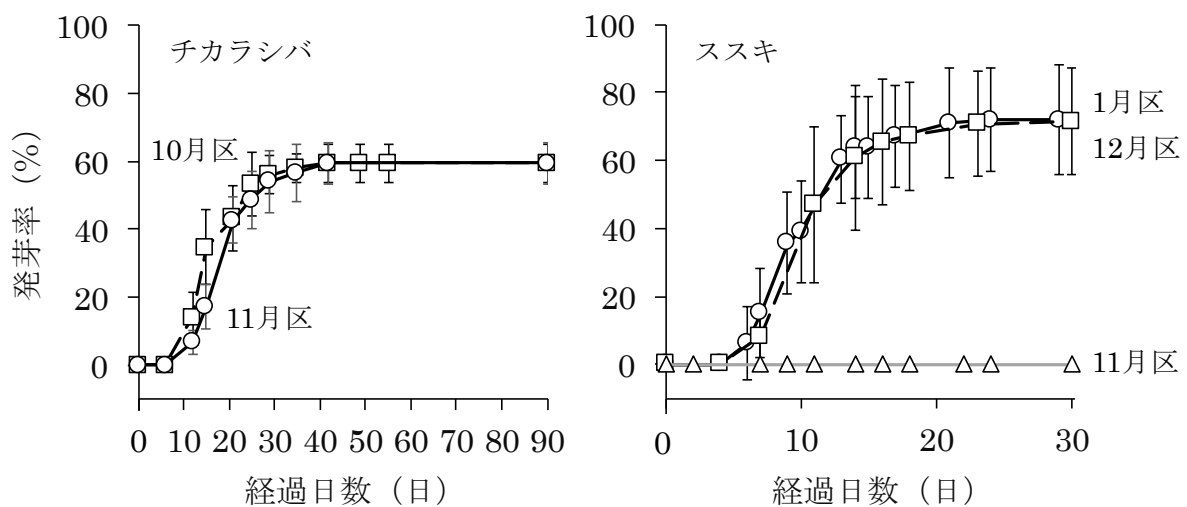


図-5.4 5℃条件下で3ヶ月間保存したチカラシバとススキの発芽率の推移
(エラーバーは標準偏差を表す)

採種時期ごとにチカラシバとススキの種子 1000 粒を 3 反復で比重別に分けた (図-5.5)。その結果、チカラシバについて、10 月区では Light 区が 18.1%，Medium 区が 25.6%，Heavy 区が 56.3% で、11 月区では Light 区が 17.2%，Medium 区が 22.6%，Heavy 区が 60.2% であり、10 月区と 11 月区では同じ比重区間に有意な差が認められなかった ($p > 0.05$)。一方、ススキでは、11 月区の Light 区が 95.6%，Medium 区が 1.7%，Heavy 区が 2.7% でほとんどの種子が軽かった。一方、12 月区の Light 区では 38.0%，Medium 区では 16.7%，Heavy 区では 45.3%，1 月区の Light 区では 26.0%，Medium 区が 10.9%，Heavy 区が 63.1% であり、12 月区と 1 月区では同じ比重区間に有意な差は認められなかった ($p > 0.05$)

また、新鮮重量、乾燥重量、含水率を表-5.3 に整理した。チカラシバについてみると、新鮮重量は 10 月区では 643.5 mg、11 月区では 734.5 mg で、乾燥重量は 10 月区では 564.6 mg、11 月区では 658.5 mg であり、10 月区より 11 月区の方が重かった ($p < 0.05$)。一方、含水率は 10 月区では 14.1%，11 月区では 11.5% であり、有意な差は認められなかった ($p > 0.05$)。ススキについて、新鮮重量は 11 月区では 80.6 mg、12 月区では 76.5 mg、1 月区では 108.2 mg で、1 月区、11 月区、12 月区の順で重かった ($p < 0.05$)。一方、乾燥重量は 11 月区では 49.8 mg、12 月区では 70.0 mg、1 月区では 101.7 mg であり、含水率は 11 月区では 38.2%，12 月区では 8.5%，1 月区では 6.0% で、11 月区は他の処理区と比べて含水率が著しく高かった ($p < 0.05$)。

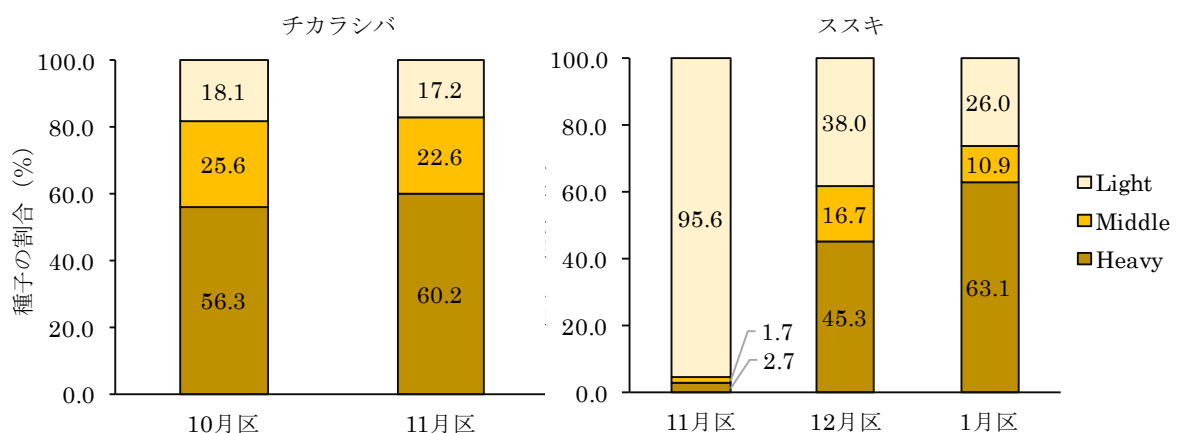


図-5.5 採種時期別の種子 1000 粒あたりの比重別割合

表-5.3 採種時期別のチカラシバとススキの種子における性状

チカラシバ				ススキ			
区分	新鮮重量 (mg/100 粒)	乾燥重量 (mg/100 粒)	含水率 (%)	区分	新鮮重量 (mg/100 粒)	乾燥重量 (mg/100 粒)	含水率 (%)
10 月	643.5	564.6	14.1	11 月	80.6	49.8	38.2
11 月	734.5	658.5	11.5	12 月	76.5	70.0	8.5
				1 月	108.2	101.7	6.0

5.4. 考察

5.4.1. 種子重量と発芽の関係

図-5.2 では、Random 区の積算発芽率の実測値と比重区の種子の割合から算出した推定値の推移はチカラシバとススキのどちらにおいても近似していた。このことから、本研究で供試したチカラシバとススキの発芽には重量が関係している可能性が高いと考えられた。また、表-5.2 の結果から、無作為に選出した種子群から Light 区に相当する種子を除去することで、チカラシバの最終発芽率は 10%以上、ススキでは 30%以上高くなることが推定された。

ススキについて、12 月に採取した種子を供試した本研究では、Light 区の発芽が Heavy 区や Medium 区よりも遅く、最終発芽率は低かった。一方で、3 月に採取した種子を供試した Aso は²⁾、軽い種子群でも最終発芽率は重い種子群と同程度に高かったと報告している。このように、採種時期が遅いと軽い種子群でも発芽率は高くなる可能性が考えられたが、採種時期が遅すぎると種子は穂から脱落し、採取量は少なくなる可能性がある⁸⁵⁾。そこで、仮に、採種時期を 3 月から 12 月まで早めた場合、発芽率の高い種子群を獲得するには重量による選別が有効であると考えられた。

5.4.2. 採取時期と発芽の関係

Christian は種子重量と含水率の関係からススキの種子の生理的成熟は開花後 30 日目に達成されると論じている⁴⁾。そこでは、開花から 30 日目までは胚の発達に伴って種子の乾燥重量は増加した一方で、含水率は 75%から 33%まで減少した。開花から 30 日以降では乾燥重量は変化しなくなりましたが、含水率はその後も減少していき、開花から 50 日目では 8%まで減少した。本研究で供試したススキの 11 月区の含水率は 38.2%、12 月区は 8.5%、1 月区は 6.0%だった (表-5.3)。これを Christian の報告と照合すると、11 月区の種子は含水率が高く、胚はまだ発達段階にあった可能性が考えられた。

気象庁では季節の変化を監視するために生物季節観測を行っており (<https://www.data.jma.go.jp/sakura/data/index.html>)、その中でも「秋の訪れ」を把握するために「すすきの開花日」が記録されている⁴²⁾。すすきの開花日とは葉鞘から抜き出した穂の数が、穂が出ると予想される全体の約 20%に達したと推定される最初の日をいう。2018 年の和歌山県和歌山市におけるススキの開花日を確認したところ、2018 年 10 月 19 日で、11 月区の種子は開花日から 13 日後、12 月区の種子は 47 日後、1 月区の種子は 81 日後に採種されたことがわかった。

以上のことから、11 月区の種子が採種直後であっても保存した後であってもほとんど発芽しなかった (図-5.3, 図-5.4) 要因は、開花から採種までの日が浅く、胚が未発達な段階で採種したことで、結果、発芽率の低い Light 区に相当する軽い種子が多くなった (図-5.5) ためだと考えられた。一方で、12 月区や 1 月区では種子の多くが成熟期を迎えており発芽機能を持っていたために、発芽が多く確認できたと考えられた。

さらに、ススキでは5℃条件下で保存した後の12月区と1月区の発芽率の推移が近似していた(図-5.4)。これは、12月区と1月区のLight区に相当する種子の割合が有意な差がなく30%程度で(図-5.5)、発芽可能な種子が同程度含まれていたことが一因する可能性が考えられた。これらのことから、12月区の乾燥重量は1月区よりも軽かったが、12月の採種でも発芽率が高い種子を獲得できる可能性が考えられた。

チカラシバでは、5℃条件下で保存した後の10月区と11月区の発芽率の推移が近似しており(図-5.4)、10月区の乾燥重量は11月区よりも軽かったが、Light区に相当する種子の割合は同程度だった。このことから、チカラシバでは10月の採種でも発芽率が高い種子が獲得できる可能性が考えられた。

5.5. まとめ

本研究において、10月下旬に採取されたチカラシバの種子と11月下旬に採取された種子のどちらでも5℃条件下で3ヶ月間保存することによって60%以上の発芽率が確認できた。このことから、チカラシバの採種時期は10月下旬以降なら高い発芽率が確認できる可能性が考えられた。また、ススキの種子の採種時期に関しては、11月に採取された種子ではいずれの温度処理においてもほとんど発芽しなかったのに対し、12月に採取された種子では温度処理を行わずに播種すると最終発芽率が20%程度と低かったが5℃条件下で3ヶ月間保存することによって60%以上の最終発芽率を示した。また、1月に採取された種子では温度処理の有無や温度処理の期間に関わらず60%以上の最終発芽率を示した。

種子の比重別の発芽率については、チカラシバとススキのどちらでも軽い種子で著しく最終発芽率が低かった。各採種時期の軽い種子の割合を確認したところ、チカラシバでは10月と11月に採種した種子群のどちらでも15%程度を軽い種子が占めており、ススキでは11月に採種した種子では90%以上、また12月および1月に採種された種子でもそれぞれ30%程度が軽い種子だった。

さらに、これらの種子において比重の軽い種子を取り除くことで更に発芽率を向上できる可能性が考えられた。ただし、比重の違いによる発芽率の差異について、本研究ではチカラシバでは11月採取、ススキでは12月採取の種子のみでしか検証できていないことから、今後、他の時期に採取した種子でも検証することにより、より適切な情報の提供ができるものも考えられる。

また、本研究では比重分けが容易なエタノール選を採用したが、エタノール選や種子選別の作業自体が緑化施工の現場で実用的かは今後再検討を要する。種子の発芽率や発芽速度は採種場所が変わると変動する可能性もあり⁸⁾、さらに、採種時期が遅すぎると熟した穎果は小穂から脱落して⁸⁵⁾、採種量が少なくなる可能性がある。そのため、採種時期の最適化には今後採種場所の環境条件、採種量の検討が必要である。

6. 低温湿層処理と毛・包穎の除去によるチカラシバとススキの発芽促進

6.1. はじめに

自生種の地域性種苗を緑化に用いることの難点として、初期の発芽や生長が遅いということが挙げられる^{46,55)}。一般に、種子の発芽には温度、水、空気（酸素）が必要だといわれている一方で、発芽に適した環境条件だったとしても植物の生理的な問題で発芽しない場合がある⁴⁹⁾。この状態を休眠といい、播種に際して発芽率が高い種子を利用するには、植物種の休眠性を明らかにする必要があり、それには植物種ごとに発芽に関して調査する必要がある。

休眠を解除させるために、低温期間（例えば約 5℃下での数日間ないし数週間）を経験させることがある^{49, 63, 68)}。チカラシバとススキの花期は 8~10 月の夏期から秋期である⁵⁰⁾。チカラシバが休眠するタイプの種子かは不明だったが、チカラシバは日当たりの良い路傍や土手、耕地の周辺など湿っているが水はけの良い土壌で生育することから⁵⁰⁾、予め湿らせておく処理は発芽に効果的である可能性が考えられた。一方、ススキについて、Christian は⁴⁾、低温湿層処理を行うことにより休眠を解除できることを示唆している。しかし、Christian の実験では低温湿層処理を行った種子の発芽率は 41%で、無処理に比べて 5%程度しか上昇していなかった。このことから、ススキの休眠については再検討が必要だと考えられた。

また、ススキの発芽について、小穂の状態では播種すると 8 日目の発芽率が 20%だったことに対し、小穂から毛（基毛）や包穎⁵⁰⁾を除去した穎果の状態では播種すると 70%以上の発芽率が確認された事例がある⁸⁵⁾。チカラシバの小穂にも毛（総苞毛）や包穎は存在している。しかし、チカラシバでも小穂から穎果を取り出して播種することで発芽が促進されるかは不明だった。

以上のことを背景に、本研究では播種前における種子の選別や保存といった処理を「予措」と定義し、保存温度を低温の 5℃条件と非低温の 25℃条件の 2 種類設定して、種子の休眠の程度を確認することとした。さらに、低温処理や毛や包穎の除去が発芽の促進や斉一性の向上に効果的であるかを検証した。

6.2. 材料および方法

6.2.1. 予措条件の違いが発芽に及ぼす影響

実験には、2017年11月に和歌山県高野町高野山森林公園内のスキー場で無作為に採取されたチカラシバとススキの種子を用いた。採取した種子をそれぞれ2日間室内で風乾させてから種子に対して処理（予措）を行った。なお、実験には夾雑物であるしいなを除去した種子群を用い、保存温度に違いを設けて予措を行った。なお、緑化工事の現場では種子の選別が行われない場面が多いことを想定して、ここでは重量を勘案せず無作為に種子を選出した。

低温に対する発芽の温度反応性を確認するため、5℃・暗条件に設定したチャンバー（日立低温インキュベータ CR-32，日立製作所）内に種子を乾燥条件下で保存した。一方で、低温に晒さなかった場合での種子の発芽を確認するため、25℃・暗条件下（NH システム LH200，日本医化器械製作所）でも予措を行った。処理温度の影響を段階的に確認するため、処理期間を1ヶ月間（1M）、2ヶ月間（2M）、3ヶ月間（3M）の3通りに設定した。保存時の乾燥条件はシリカゲルとともに1処理につき150粒の種子を袋へ入れて密封し、乾燥状態を保つ方法をとった。

風乾後すぐのチカラシバとススキの種子群を採り播き区とし、採り播き区と予措を行った種子群（1M-5℃区，1M-25℃区，2M-5℃区，2M-25℃区，3M-5℃区，3M-25℃区）に対して、合計7種類の処理区における発芽の経過を観察した。採り播き区は予措を行った種子群と比較して休眠の程度を確認するために設定した。1処理区につき、ろ紙を1枚敷いたシャーレに50粒の種子を置床し、これを3反復実施した。置床後は25℃・明条件のチャンバー（NH システム LH200，日本医化器械製作所，6,000～8,000 Lux，100～130 μmol/m²/s）内でろ紙が乾燥しないように適宜給水を行い、60日間経過を観察した。

各処理区において、1～4日ごとに発芽数を記録し、発芽した種子を取り除いた。発芽の定義は幼根もしくは幼芽が出現した状態とした。発芽数の結果から、播種後N日目の積算発芽率（％，以下、発芽率）を算定した（式6.1）。統計ソフトウェアR（R 4.3.1，<https://cran.r-project.org/>）を用いて一般化線形モデル（GLM）を構築し、結果を解析した。発芽数を応答変数，種子に対する処理や温度の条件を説明変数，誤差構造を二項分布，リンク関数をロジットとし，逸脱度分析によって各処理区の有意差の検証を行った²³⁾。

$$N \text{ 日目の積算発芽率 } (\%) = \frac{N \text{ 日目までの発芽数}}{\text{播種した種子数 } (n)} \times 100 \quad (6.1)$$

6.2.2. 低温処理および毛・包穎の除去が発芽に及ぼす影響

2022年11月に和歌山県海南市上谷の黒沢牧場内でチカラシバの種子を、和歌山県高野町高野山森林公園内のスキー場でススキの種子を無作為に採取した。採取した種子をそれぞれ2日間室内で風乾させて5°C条件下に設定したチャンバー内（5°C：日立低温インキュベータ CR-32，日立製作所）で保存した。保存時には密封性のある袋にシリカゲルとともに種子を入れて乾燥状態を保つようにした。種子を低温へ十分に晒すため、保存期間を1季節分の3ヶ月間とした。穎果が脱粒して包穎のみになった夾雑物であるしいなを分別し、実験にはしいなを除去した種子群を用いた。さらに、種子は軽すぎると発芽しない可能性があるため⁶²⁾、チカラシバでは50.0%のエタノール水、ススキでは66.0%のエタノール水に小穂状態の種子を入れ、水の底に沈んだ重量の大きい種子を実験に用いた。

チカラシバとススキの種子（小穂）の毛（チカラシバ：総苞毛，ススキ：基毛）や包穎が発芽に与える影響を調べるために、採取した小穂の毛と包穎を除去し、小穂（Spikelet, S区）と小穂から抜け落ちた穎果（Caryopsis, C区）に分別した（写真-6.1）。さらに、種子に対する播種前の処理（予措）として、5°C条件下で種子に水を与える処理（低温湿層処理，5°C-wet区）を行った。低温湿層処理では、シャーレ（90φ×15mm）に150粒の種子と水道水を入れ、2週間5°C・暗条件に設定したチャンバー内（日立低温インキュベータ CR-32，日立製作所）に静置させる方法を採った。また、低温湿層処理の対照実験として、水を与えなかった場合（便宜上、低温乾燥処理，5°C-dry区とする）の種子の発芽実験も行った。

4種類の処理区（S-wet区，S-dry区，C-wet区，C-dry区）に対して、1処理区につき、ろ紙を1枚敷いたシャーレに50粒の種子を置床し、これを3反復実施した。置床後は25°C・明条件のチャンバー（NHシステム LH200，日本医化器械製作所，6,000～8,000 Lux，100～130 μmol/m²/s）内でろ紙が乾燥しないように適宜給水を行い、30日間経過を観察した。発芽の定義および発芽率の比較は6.2.1と同様に行った。

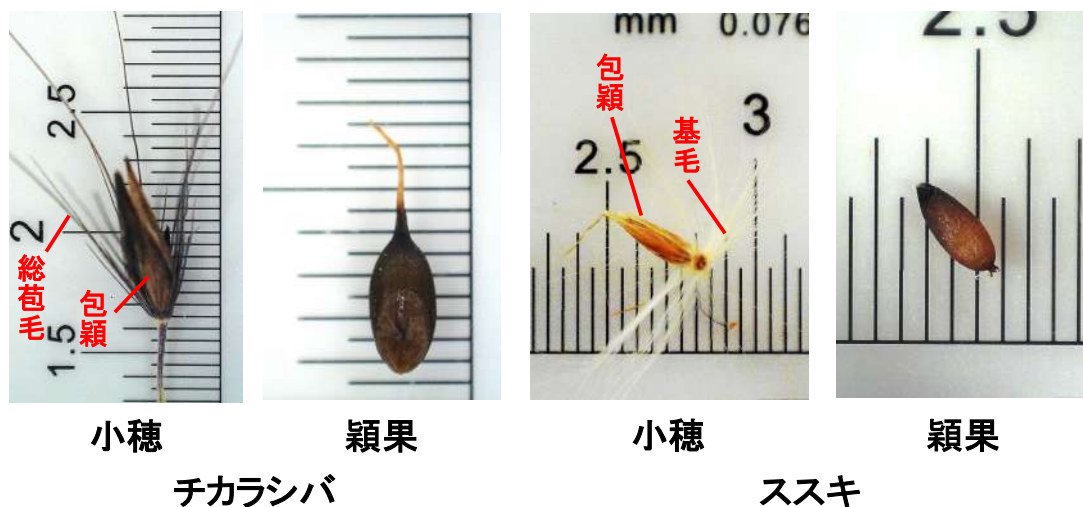


写真-6.1 チカラシバとススキの種子（1目盛り=1mm）

6.3. 結果

6.3.1. 予措条件の違いが発芽に及ぼす影響

採り播きと予措に対するチカラシバとススキの発芽率の推移を図-6.1 に示した。チカラシバについて、これをみると、採り播き区では10日目に発芽が確認され始め、その後、発芽率は35日目には50%、45日目には60%に到達した。

同じ処理期間で予措方法が異なる処理区を比較したところ、1ヶ月間予措を行った種子群(1M区)について、5°C-dry区では10日目、25°C-dry区と5°C-wet区では7日目に発芽が確認され始め、10日目においては5°C-dry区と25°C-dry区の発芽率は10%以下だったが、5°C-wet区は20%に達しており他の処理区や採り播き区の発芽率よりも有意に高かった($p < 0.05$)。10日目以降、どの処理区でも発芽率は経時的に上昇していき、5°C-dry区、25°C-dry区では30日目に50%に、35日目に60%の発芽率に達した。それに対して、5°C-wet区では20日目ですでに50%程度の発芽率に達しており、さらに30日目までには60%の発芽率になった。

2ヶ月間予措を行った種子群(2M区)について、5°C-dry区、25°C-dry区では7日目に発芽が確認され始め、10日目における5°C-dry区、25°C-dry区の発芽率は10%程度だったが、5°C-wet区では採り播き区よりも有意に高い20%の発芽率に達した($p < 0.05$)。その後、25日目には5°C-dry区では60%、25°C-dry区では50%程度の発芽率になった。一方、5°C-wet区では7日目の発芽率はすでに15%以上で、15日目には60%の発芽率に到達しており、他の処理区よりも早く高い発芽率になった($p < 0.05$)。

3ヶ月間予措を行った種子群(3M区)について、5°C-dry区では7日目に発芽が確認され始め、10日目の発芽率では10%未満だった。一方、25°C-dry区と5°C-wet区において、7日目の発芽

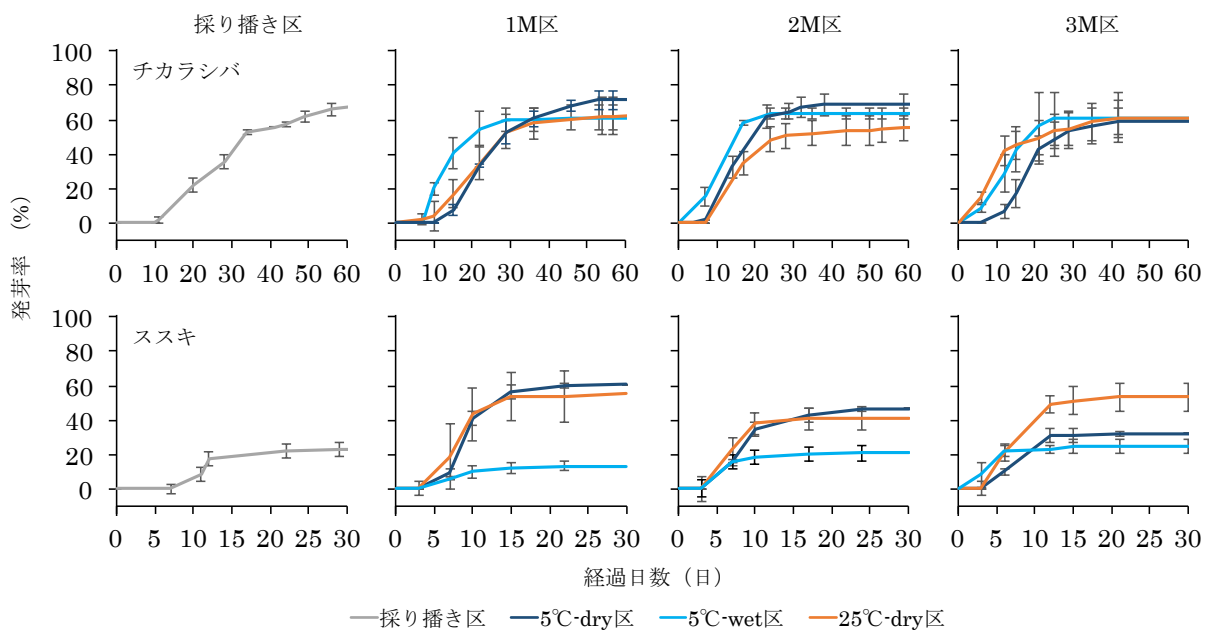


図-6.1 採り播きまたは5°C、25°C条件下で保存した小穂の発芽率の推移
(エラーバーは標準偏差を表す)

率はすでに 10%以上で、10 日目においては 5°C-dry 区では 40%程度、5°C-wet 区では 20%程度の発芽率になった。その後、5°C-dry 区と 25°C-dry 区では 35 日目に 60%の発芽率になったが、5°C-wet 区では 20 日目にすでに 60%の発芽率に達しており、5°C-dry 区と 25°C-dry 区よりも早く高い発芽率になった ($p < 0.05$)。

以上のように、チカラシバでは、予措を行った場合、10 日目には採り播きよりも高い発芽率になった。一方で、最終発芽率は予措を行った場合でも 60%前後で、採り播きと同程度になった。特に、5°C条件下で湿層処理を行った種子群の発芽率は、処理期間に関わらず早い段階で他の処理区や採り播きよりも高い発芽率に到達し、2~3 週間以内には 60%程度の発芽率になった。

ススキについて、採り播き区では、7 日目に発芽が確認され始め、発芽率は 10 日目で 10%、13 日目に 20%程度まで上昇したが、それ以降ほとんど上昇せず、30 日目の最終発芽率は 20%程度に止まった。

次に、予措を行った処理区についてみると、1M 区の 5°C-dry 区と 25°C-dry 区では 3 日目に発芽が確認され始め、10 日目には 5°C-dry 区と 25°C-dry 区のどちらも発芽率は 40%まで上昇した。その後、15 日目には 60%近くになり、それ以降発芽はほとんど確認されず、最終発芽率は 60%前後に止まった。一方、5°C-wet 区では、5°C-dry 区と 25°C-dry 区と同様に 3 日目に発芽が確認され始めたが、10 日目でも発芽率は 10%程度しか上昇せず、それ以降もほとんど発芽しなかった。

2M 区の 5°C-dry 区と 25°C-dry 区では、3 日目に発芽が確認され始め、10 日目には 5°C-dry 区と 25°C-dry 区のどちらも発芽率は 40%程度まで上昇した。しかし、それ以降発芽はほとんど確認されず、最終発芽率は 40%前後だった。観察開始から終了まで、1M 区や 2M 区における 5°C-dry 区と 25°C-dry 区の間では発芽率に有意な差は認められなかった ($p > 0.05$)。一方、5°C-wet 区では 3 日目に発芽が確認され始め、7 日目までは 5°C-dry 区と 25°C-dry 区と同様に発芽率は 20%程度まで上昇したが、10 日目以降はほとんど発芽が確認できず、最終発芽率はそのまま 20%程度に止まった。

3M 区では、5°C-dry 区と 25°C-dry 区の 3 日目に発芽が確認され始めたが、5°C-dry 区の方が 25°C-dry 区よりも発芽率の上昇は緩やかで、13 日目には 5°C-dry 区が 30%、25°C-dry 区が 50%になり、それ以降はどちらの区でもほとんど発芽が確認されなくなった。3M 区の 5°C-dry 区と 25°C-dry 区では、3 日目以降、5°C-dry 区よりも 25°C-dry 区における発芽率の方が有意に高い結果になった ($p < 0.05$)。一方、5°C-wet 区では 3 日目に発芽が確認され始め、7 日目には発芽率は 20%程度まで上昇したが、それ以降発芽はほとんど確認されず、最終発芽率はそのまま 20%程度に止まった。

採り播き区と予措を行った処理区を比べると、1M~3M 区における 5°C-dry 区と 25°C-dry 区では採り播き区よりも早くに発芽が確認でき、最終発芽率は有意に高い結果になった ($p < 0.05$)。一方で、1M~3M 区における 5°C-wet 区では採り播き区よりも早くに発芽が確認できたが、最終発芽率については 1M 区の 5°C-wet 区の方が採り播き区よりも有意に低く ($p < 0.05$)、また、2M

区と 3M 区の 5°C-wet 区と採り播き区では有意な差が認められず ($p > 0.05$), いずれも 5°C-dry 区と 25°C-dry 区より低かった ($p < 0.05$)。

以上のように、ススキでは、予措を行った場合、採り播きよりも早く 3 日目には発芽が開始された。特に、1~2 ヶ月間 5°C または 25°C 条件下で保存した種子群では 2 週間で 40%~60% になり、採り播きよりも高くなった。一方で、5°C 条件下で湿層処理を行った種子群の最終発芽率は採り播き区と同程度もしくは低く、20%程度に止まった。

6.3.2. 低温処理および毛・包穎の除去が発芽に及ぼす影響

5°C条件下で処理を行ったチカラシバとススキの発芽率の推移を図-6.2に示した。チカラシバについて、これをみると、小穂（S区）の5°C-dry区では、4日目に発芽が確認され始めて、6日目には70%、12日目には100%の発芽率になった。小穂（S区）の5°C-wet区では、6日目に発芽が確認され始めて、6日目には20%、12日目には100%の発芽率になった。一方、穎果（C区）の5°C-dry区、5°C-wet区はどちらも4日目には90%以上の発芽率が確認され、6日目にはすでに100%の発芽率になった。

ススキについて、S区の5°C-dry区では、5日目に発芽が確認され始め、5日目の時点では10%の発芽率だった。その後、発芽率は徐々に上昇し、10日目に40%、24日目に60%、30日目には65%程度の発芽率に到達した。小穂（S区）の5°C-wet区においても、5日目に発芽が確認され始めたが、5日目の時点で40%以上の発芽率で5°C-dry区よりも有意に高かった（ $p < 0.05$ ）。その後も発芽率は上昇し、10日目に50%、24日目には70%の発芽率に到達した。一方で、C区の5°C-dry区、5°C-wet区はどちらも5日目には40%以上の発芽率が確認され、7日目にはすでに80%の発芽率になった。統計上、S区の5°C-wet区とC区の5°C-dry区と5°C-wet区の最終発芽率の間にも有意な差が認められなかったが（ $p > 0.05$ ）、S区の5°C-dry区は他の処理区よりも有意に低いと判断された（ $p < 0.05$ ）。

以上のように、チカラシバとススキのいずれも、小穂の状態で播種した場合、湿層処理を行った小穂の方が湿層処理を行っていない小穂よりも早く高い発芽率になった。一方で、穎果の状態では播種した場合は、湿層処理を行った穎果と湿層処理を行っていない穎果に発芽率の推移に有意な差は認められなかった。また、穎果は湿層処理の有無に関わらず小穂よりも早く高い発芽率に達した。また、チカラシバの湿層処理の有無に関わらず小穂と穎果の最終発芽率は100%で、全ての小穂と穎果で発芽が確認された。

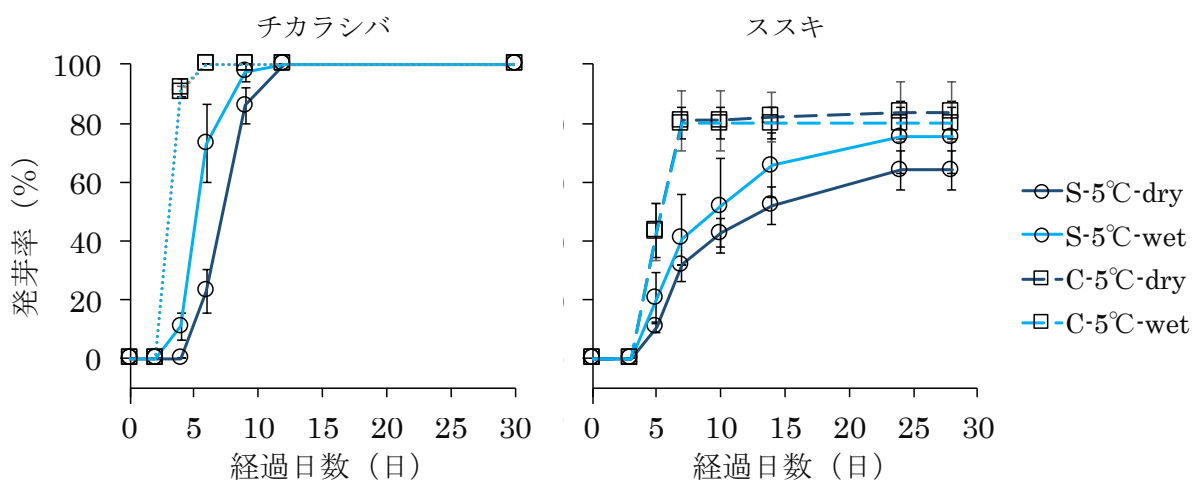


図-6.2 5°C条件下で処理を行った小穂または穎果の発芽率の推移
(エラーバーは標準偏差を表す, S: 小穂, C: 穎果)

6.4. 考察

チカラシバについて、図-6.1の結果から、1ヶ月以上5℃条件下で湿層処理を行うことで2~3週間以内には60%程度の発芽率が確認でき、また、図-6.2の結果では、重く成熟した種子において、3ヶ月間5℃条件下で保存した後に2週間の湿層処理を行った小穂では、湿層処理を行っていない小穂に比べて3日程度早く発芽率が100%に達した。これらのことから、少なくとも2週間以上5℃で湿層処理を行うことで、採り播きや湿層処理を行わなかった種子群に比べて早く高い発芽率に到達できると考えられた。

ススキについて、図-6.1の結果から、1~2ヶ月間5℃または25℃条件下で保存した種子群では2週間で40%~60%になり、採り播きよりも早く高い発芽率になった。一方で、5℃条件下で湿層処理を行った種子群の最終発芽率は採り播き区と同程度もしくは低く、20%程度に止まった。一方で、図-6.2の結果では、重く成熟した種子において、3ヶ月間5℃条件下で保存した後に2週間の湿層処理を行った小穂が湿層処理を行っていない小穂よりも早く2週間で60%、1ヶ月では70%以上の高い発芽率になった。一般的に、採取直後の種子は水分含有量が高く、そういった種子の発芽率は低くなるといわれている¹⁷⁾。その場合、採取から一定期間に乾燥条件下に置くことで発芽率が上昇するという報告があり^{17,68)}、これを後熟と捉える場合がある³⁸⁾。特に、イネの場合、高橋は⁶⁸⁾、イネの発芽適温である30℃下においても乾燥を伴わなければ発芽が促進されないと報告している。ススキがイネと同様の発芽特性を持つと仮定すると、図-6.1の実験で、採取後における3日間の風乾だけでは種子は十分に乾燥されておらず、風乾後すぐ湿層処理を行った種子群では最終発芽率が低くなり、5℃もしくは25℃で1ヶ月以上十分に乾燥された種子群では最終発芽率が高くなった可能性が考えられた。一方で、図-5.2の実験で湿層処理を行った種子群の最終発芽率が高くなったことは採取から3ヶ月間十分に乾燥されたことが一因となる可能性が考えられた。

チカラシバやススキにおいて、図-6.1の結果で、25℃の非低温下で保存していた種子群が5℃の低温下で保存していた種子群と同程度の最終発芽率だったことから、チカラシバやススキの種子が低温に晒されることで休眠を解除する冬休眠タイプの種子である可能性は肯定できなかった。

また、チカラシバやススキの重く成熟した穎果では湿層処理の有無に関わらず小穂よりも早く高い発芽率に到達した(図-6.2)。高橋はチカラシバやススキと同じ科であるイネの包穎内の発芽阻害物質が存在すると報告している既往研究を整理している⁶⁸⁾。その中でも、包被組織の全部または部分的除去によって休眠が解除されると指摘しており、それは包被組織が胚の活動に要求される酸素の取り込みを阻害していることが一因である可能性を言及している。チカラシバやススキの包穎内にも発芽阻害物質が存在するかは不明であったが、少なくとも本研究の結果から、穎果の状態で播種することで湿層処理を行わなくても早く高い発芽率に到達できる可能性が考えられた。

6.5. まとめ

本研究の結果から、チカラシバの種子を緑化施工に利用する際には、5°Cのような低温下での湿層処理によって、1~3週間程度で苗立ちの揃った状態を実現できる可能性があった。一方、ススキの種子を緑化施工に利用する際には、1ヶ月以上の乾燥期間を経ることで湿層処理を行わなくても2週間程度で苗立ちの揃った状態を実現できる可能性があった。さらに、チカラシバとススキのどちらにおいても、春先の播種を想定して5°C条件下で保存した種子を用いる場合、より重く成熟した種子を選別することで湿層処理を行わなくてもより早期な1~2週間程度で高い発芽率になる可能性が考えられ、また、穎果の状態で播種することでより早期な1週間以内で苗立ちの揃った状態を実現できる可能性が考えられた。

7. 播種温度の違いに対するチカラシバとススキの発芽特性

7.1. はじめに

緑化の施工はスケジュールの都合上、植物の生育が旺盛ではない冬季に行われる場合もあり⁵⁵⁾、発芽が可能な最低温度を把握することも重要であるといえる。そこで、本研究では、冬季～夏季の播種を想定して10℃～30℃条件下でチカラシバとススキに対して発芽実験を行い、各播種温度において穎果の状態で播種することによってどの程度発芽が促進されるのか、かつ、播種温度によって発芽の傾向は異なるのかを検討した。

7.2. 調査方法

2021年10月に和歌山県海南市上谷の黒沢牧場内でチカラシバの種子を、2022年12月に和歌山県高野町高野山森林公園内のスキー場でススキの種子を無作為に採取した。採取した種子をそれぞれ2日間室内で風乾させ、風乾後5℃で1ヶ月間保存した種子群の中から、穎果が脱粒して包穎のみになった夾雑物であるしいなを手作業で分別して穎果の入っている種子（小穂）を選出した。さらに、種子は軽すぎると発芽しない可能性があるため⁶²⁾、チカラシバでは50.0%のエタノール水、ススキでは66.0%のエタノール水に小穂状態の種子を入れ、水の底に沈んだ重量の大きい種子を用いて実験を行った。1処理区につき25粒の小穂または穎果を3反復でシャーレ（90φ×15mm）へ播種し、播種後すぐにシャーレへ注水した。

春夏秋冬のいずれの時期でも種子が緑化に利用されることを想定し、10℃、15℃、20℃、25℃、30℃条件に設定したチャンバー内（10℃、15℃、20℃：クールインキュベーターKMH-050、アズワン株式会社、25℃：NHシステムLH200、日本医化器械製作所、30℃：プログラム低温恒温器IN601、ヤマト科学株式会社）で150日間経過を観察した。観察期間中、適宜シャーレへ給水を行い、シャーレに注ぐ水の量はろ紙が乾かない程度とした。それぞれのチャンバーでは12時間の明条件（6,000～8,000 Lux、100～130 μmol/m²/s）を設けた。

各処理区（10℃区、15℃区、20℃区、25℃区、30℃区）において、1～4日ごとに発芽数を記録し、発芽した種子を取り除いた。発芽の定義は幼根もしくは幼芽が出現した状態とした。発芽数の結果から、播種後N日目の積算発芽率（%、以下、発芽率）を算定した（式7.1）。統計ソフトウェアR（R 4.3.1, <https://cran.r-project.org/>）を用いて一般化線形モデル（GLM）を構築し、結果を解析した。発芽数を応答変数、種子に対する処理や温度の条件を説明変数、誤差構造を二項分布、リンク関数をロジットとし、逸脱度分析によって各処理区の有意差の検証を行った²³⁾。

$$N \text{ 日目の積算発芽率 } (\%) = \frac{N \text{ 日目までの発芽数}}{\text{播種した種子数 } (n)} \times 100 \quad (7.1)$$

7.3. 結果

播種温度に対するチカラシバとススキの発芽率の推移を図-7.1に示した。チカラシバについて、これをみると、10℃区では、播種開始から60日経過しないと発芽が確認されなかった。その後75日目から急に発芽率の上昇がみられ、105日目に90%以上の発芽率に到達した。15℃区では、播種開始から30日前後で発芽が確認され、45日目までは20%程度の発芽率だったが、それ以降発芽率は緩やかに上昇し、60日目で40%、90日目で90%に到達した。20℃区および25℃区では、15日目前後で発芽が確認され始め、30日目の発芽率は20%程度で、それ以降発芽率は緩やかに上昇していき、60日目で70%、90日目で90%の発芽率に到達した。30℃区では播種開始から15日前後で発芽が確認され、30日目までは10%程度の発芽率だったが、30日目以降は急激に上昇し、60日前後で90%に到達した。

以上のように、チカラシバでは10℃～30℃のいずれの温度条件下で播種しても発芽が確認できたが、10℃下で播種すると2ヶ月間発芽が確認されず、90%近い発芽率に到達するには3ヶ月以上かかった。15℃下で播種した場合は発芽開始まで1ヶ月以上かかり、20℃や25℃下で播種した場合は半月程度で発芽が開始されたが、15℃、20℃、25℃のいずれの播種温度でも90%近い発芽率に到達するには3ヶ月以上かかった。30℃下で播種した場合は半月程度で発芽が開始され、それ以降は2ヶ月程度で90%に到達した。

ススキについて、10℃区では、30日以上経過しないと発芽が確認されなかった。その後75日目前まで発芽率の上昇がみられ、60%程度に到達するとそれ以降は発芽が止まった。15℃区で

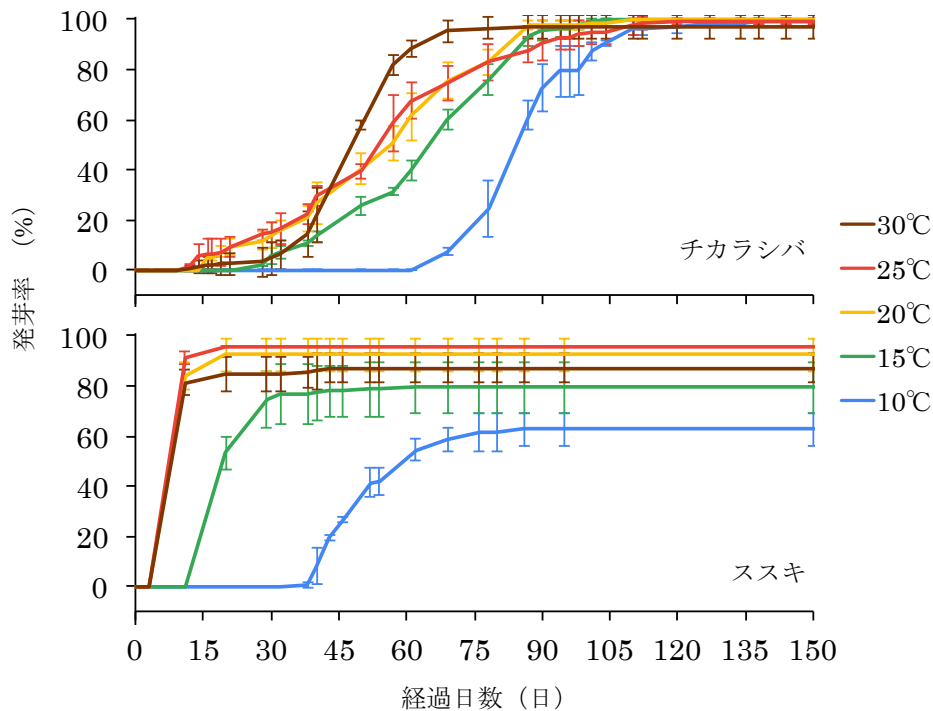


図-7.1 播種温度に対するチカラシバとススキの発芽率の推移
(エラーバーは標準偏差を表す)

は、15日目前後で発芽が確認され始め、30日目前後で80%程度に到達すると発芽が止まった。一方、20℃区、25℃区および30℃区では、7日目前後ですでに80%以上の発芽率まで上昇し、それ以降ほとんど発芽が確認されなくなった。

以上のように、ススキの種子は10℃～30℃のいずれの温度条件下で播種しても発芽が確認でき、20℃以上で播種すると他の処理区よりも早く15日目前後で高い発芽率を確認することができる。一方で、15℃で播種すると高い発芽率に達するのに1ヶ月、10℃で播種すると3ヶ月以上かかることがわかった。

7.4. 考察

図-7.1の結果から、チカラシバでは10℃下で播種すると2ヶ月間発芽が確認されず、90%近い発芽率に到達するには3ヶ月以上かかった。このことから、緑化の施工において10℃の冬季に相当する温度で播種すると苗立ちには少なくとも3ヶ月以上かかる可能性が考えられた。また、15℃～25℃下で播種すると1ヶ月以内で発芽が確認され始めたが、2ヶ月目の時点では15℃で40%、20℃もしくは25℃では60%の発芽率しか確認できなかった。このことから、15℃～25℃の早春～初夏に相当する温度で播種すると苗立ちには少なくとも2～3ヶ月かかる可能性が考えられた。一方、30℃下の温度で播種すると半月程度で発芽が開始され、2ヶ月目では90%の発芽率が確認された。このことから、30℃の夏季に相当する温度で播種することで、2ヶ月以内に苗立ちできる可能性が考えられた。

ススキでは、10℃で播種すると60%の発芽率に達するのに3ヶ月以上かかり、15℃で播種すると70%の発芽率に達するのに1ヶ月かかったが、20℃以上で播種すると15日目前後で80%以上の発芽率を確認できた。このことから、10℃や15℃のような冬季～早春の温度下でススキの種子を播種すると高い発芽率を確認するのに1ヶ月以上かかるが、20℃以上の夏季に相当する温度で播種すると半月以内に高い発芽率を確認できる可能性が考えられた。

チカラシバとススキはどちらも10℃～30℃の範囲で発芽できることが確認でき、これが北海道から沖縄まで広範な分布域を持つチカラシバとススキの発芽特性であると考えられた⁵⁰。また、チカラシバとススキは10℃という冬季に相当する温度下での播種では3ヶ月以上経ないと発芽しなかったことから、冬季に播種しても発芽せず、季節が春季に移った後に発芽してくる可能性が考えられた。

7.5. まとめ

温度の違いを設けて播種したところ、チカラシバとススキの種子はどちらも10～30℃の温度下で発芽が確認でき、さらにより高い温度下で播種することで早く高い発芽率に到達した。一方で、10℃のような冬季の温度で播種しても2～3ヶ月発芽しない可能性が考えられた。

8. 一時的な塩分汚染がチカラシバとススキの発芽に及ぼす影響

8.1. はじめに

植物の耐塩性は生育の全期間を通じて一定ではない⁶⁰⁾。そのなかでも、一般的に発芽期が最も塩ストレスの影響を受けやすいとされており³⁷⁾、種子の発芽はその後の植物の生育にも影響を及ぼすため重要な段階といえる³⁾。一般的な植物と同じように、チカラシバやススキでは供給される水の塩分濃度が高いほど発芽率が低下することが報告されている^{5, 82)}。一方で、ススキの種子は他のイネ科の植物よりは耐塩性を示したという記述もあったが⁴⁷⁾、どのような状況下で発芽するといった詳細は明記されおらず、事前に塩ストレスを受けた種子がどのように発芽するかという記述は確認できなかった。

そこで、本研究では、チカラシバおよびススキの種子の耐塩性を明らかにするため、種子（小穂）を塩水に浸漬すると種子の中にある穎果にまで塩分が浸透するのを確認した。そして、チカラシバおよびススキの発芽に対して供給される水の塩分濃度の影響を再確認し、さらに、一時的な塩分汚染が発芽に及ぼす影響を明らかにするため、津波や台風等による塩分汚染を想定して塩水への浸漬期間に違いを設けて発芽実験を行った。

8.2. 材料および方法

8.2.1. 塩水に浸漬された穎果における塩分の有無

2021年10月に和歌山県海南市上谷の黒沢牧場内でチカラシバの種子を、2021年12月に和歌山県高野町の高野山スキー場内でススキの種子を無作為に採取した。採取した後、室内で種子を3日間風乾し、風乾後5℃に設定したチャンバー（日立低温インキュベータCR-32，日立製作所）内に乾燥条件下で3ヶ月間保存した。保存時の乾燥条件はシリカゲルとともに種子を袋へ入れて密封する方法を採った。

実際に種子（小穂）の中に穎果が含まれているかどうかは外見のみでは正確に判断しきれない¹²⁾。そこで、種子を1粒ずつ手で触って確認し、穎果が入っている種子を対象に、チカラシバまたはススキの種子1000粒を選出し、これを3反復実施した。塩水に浸漬する前に種子重量を測定し（METTLER TOLEDO AB204-S，メトラー・トレド株式会社），測定後，ポリボトルの中に種子と海水の塩分濃度に相当する3.5%の塩水⁸⁰⁾を入れ，15日間浸漬させた。浸漬開始から15日後，種子を軽く水洗いしてスピナー（サラダスピナーC-750，パール金属株式会社）に入れ，スピナーを30回回して表面に付着した水を取り除き，種子重量を測定した。そして，浸漬前の種子重量と浸漬後の種子重量から浸漬後の種子の吸水率を算出した（式8.1）。

さらに，種子の中にある穎果にまで塩分が浸透しているかを確認するため，80℃に設定した定温乾燥機（Windy Oven WFO-60ND，東京理化器械株式会社）で浸漬後の種子を3日間乾燥させた。乾燥後，種子（小穂）から穎果を取り出し，ミルミキサー（ミルミキサーBP-101，イオン株式会社）で穎果を粉砕した。粉砕した穎果を，チカラシバでは20倍，ススキでは50倍の水で希釈し（写真-8.1），希釈後の溶液の塩分濃度を測定した（デジタル塩分濃度計YK-31SA，株式会社FUSO）。

$$\text{吸水率 (\%)} = \frac{\text{浸漬後の種子重量} - \text{浸漬前の種子重量}}{\text{浸漬後の種子重量}} \times 100 \quad (8.1)$$



写真-8.1 塩水浸漬後に粉砕したチカラシバの穎果を水で希釈した

8.2.2. 供給される水の塩分濃度の違いが発芽に及ぼす影響

供給される水の塩分濃度がどの程度まで低ければ種子が発芽できるかを確認するため、種子に与える水の塩分濃度を 0.0%（純水）から 3.5%の間で 8 段階に分けた処理区（0.0%区, 0.25%区, 0.5%区, 0.75%区, 1.0%区, 1.5%区, 2.0%区, 3.5%区）を設定した。10.2.1 と同様の種子群から供試種子を選出し、1 処理区につき、ろ紙を 1 枚敷いたシャーレ（φ90×15mm）にチカラシバの種子を 25 粒、またはススキの種子を 50 粒置床し、これを 3 反復実施した。なお、ススキの種子は軽すぎると発芽しない可能性があるため⁶²⁾、無差別に搦んだ種子群を 66.0%のエタノール水に入れ、水の底に沈んだ重量の大きい種子を実験に用いた。種子をシャーレへ置床した後、それぞれの処理区に設定した塩分濃度の水を注水した。

処理が終わった後、25℃・12 時間明条件（6,000～8,000 Lux, NH システム LH200, 日本医化器械製作所）に設定したチャンバー内で 28 日間経過を観察した。時間が経過するにつれてシャーレに注いだ水が蒸発し、それに伴って水の塩分濃度が変化してしまう可能性があった。そのため、2, 3 日に 1 回ろ紙とシャーレを新しいものに交換して種子を置床し直し、そこへ再び塩分濃度を調整した水を注水した。

各処理区（10℃区, 15℃区, 20℃区, 25℃区, 30℃区）において、1～4 日ごとに発芽数を記録し、発芽した種子を取り除いた。発芽の定義は幼根もしくは幼芽が出現した状態とした。発芽数の結果から、播種後 N 日目の積算発芽率（%, 以下、発芽率）を算定した（式 8.2）。統計ソフトウェア R（R 4.3.1, <https://cran.r-project.org/>）を用いて一般化線形モデル（GLM）を構築し、結果を解析した。発芽数を応答変数、種子に対する処理や温度の条件を説明変数、誤差構造を二項分布、リンク関数をロジットとし、逸脱度分析によって各処理区の有意差の検証を行った²³⁾。

$$N \text{ 日目の積算発芽率 } (\%) = \frac{N \text{ 日目までの発芽数}}{\text{播種した種子数 } (n)} \times 100 \quad (8.2)$$

8.2.3. 塩水への浸漬期間の違いが発芽に及ぼす影響

塩水に浸漬される期間がどの程度までなら種子は発芽できるのかを確認するため、塩水へ種子を浸漬させる期間を1日から15日間までで4段階に分けた処理区（1日間浸漬区、5日間浸漬区、10日間浸漬区、15日間浸漬区）を設定した。また、対照実験として塩水に浸漬していない種子をシャーレへ置床した「無浸漬区」を設定した。10.2.1と同様の種子群から供試種子を選出し、1処理区につき、チカラシバの種子を25粒またはススキの種子を50粒3反復でシャーレへ置床し、それぞれの処理区へ塩分濃度3.5%の塩水を40ml注水した。浸漬期間中は25℃・12時間明条件（6,000～8,000 Lux, NH システム LH200, 日本医化器械製作所）に設定したチャンバー内でシャーレを静置させた。水の塩分濃度が変化してしまうことを考慮して、2, 3日に1回ろ紙とシャーレを新しいものに交換して種子を置床し直し、そこへ再び塩分濃度を調整した水を注水した。浸漬期間が終了した後、種子を純水で軽く洗い、ろ紙1枚を敷いた新しいシャーレに置床した。

処理が終わった後、25℃・12時間明条件に設定したチャンバー内で28日間経過を観察した。観察期間中、適宜シャーレへ給水を行い、シャーレに注ぐ水の量はろ紙が乾かない程度とした。発芽率の比較には8.2.2と同様の方法を採用した。

8.3. 結果

8.3.1. 塩水に浸漬された穎果における塩分の有無

チカラシバの種子では、塩水に浸漬したことで平均 42.4%の吸水率が確認され、ススキの種子では、塩水に浸漬したことで平均 43.4%の吸水率が確認された。穎果を粉碎して水で希釈した溶液の塩分濃度を測定したところ、チカラシバでは塩分濃度計を溶液に付けた瞬間に数値が 2.5%程度まで上がったが、その後溶液を攪拌させると 0.0%に落ち着いた。一方、ススキでは塩分濃度計を付けた瞬間の塩分濃度は 0.0%で、攪拌させた後も変わらなかった。

8.3.2. 水の塩分濃度の違いが発芽に及ぼす影響

水の塩分濃度に対するチカラシバおよびススキの積算発芽率の推移を図-8.1 に示した。これを見ると、チカラシバでは、0.0%区において実験開始から 7 日目に初めて発芽が確認され、10 日目まで他の処理区に比べて急激に発芽率が上昇し、10 日目には 70%以上の発芽率に到達した。一方、0.25%区や 0.5%区では実験開始から 10 日目に、0.75%区では 17 日目にはじめて発芽が確認されたが、その後の発芽率の上昇は 0%区に比べて緩やかだった。実験終了時の発芽率（以下、最終発芽率）は 0.0%区では 80%と高かったが、0.25%区では 20%、0.5%区では 10%、0.75%区では 5%程度だった。

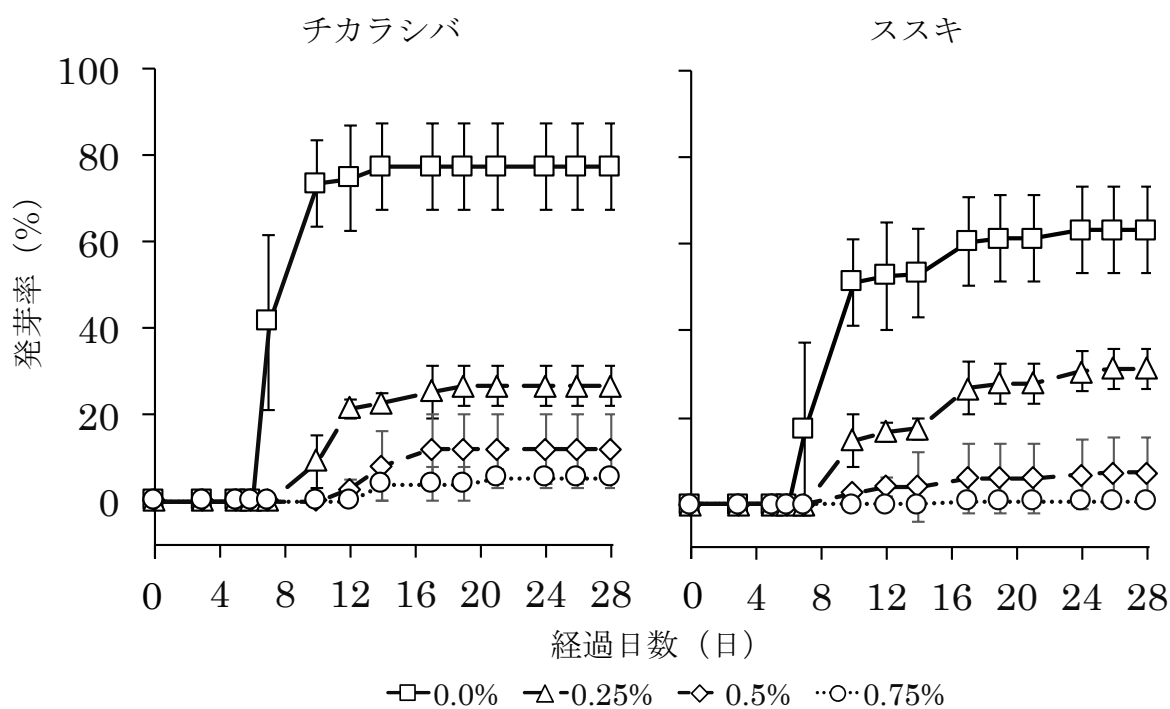


図-8.1 水の塩分濃度に対するチカラシバおよびススキの積算発芽率の推移
(エラーバーは標準偏差を表す。)

ススキにおいて、0.0%区では実験開始から7日目にはじめて発芽が確認され、10日目まで他の処理区に比べて急激に発芽率が上昇し、10日目には50%に到達した。一方、0.25%区や0.5%区では10日目に、0.75%区では17日目に初めて発芽が確認され、その後の発芽率の上昇は0.0%区に比べて緩やかであった。最終発芽率は0.0%区では60%以上になり、0.25%区では30%、0.5%区では5%程度、0.75%区では1%未満になった。また、チカラシバとススキのどちらも、種子に供給された水の塩分濃度が1.0%以上の処理区では発芽が確認できなかった。

8.3.3. 塩水への浸漬期間の違いが発芽に及ぼす影響

塩水浸漬期間に違いを設けた処理区におけるチカラシバおよびススキの積算発芽率の推移を図8.2に示した。これによると、チカラシバにおいて、無浸漬区、1日間浸漬区では、実験開始から7日目に初めて発芽が確認でき、10日目まで他の処理区よりも急激に発芽率が上昇した。最終発芽率は無浸漬区と1日間浸漬区のどちらも90%近くになり、有意な差は認められなかった ($p > 0.05$)。5日間浸漬区、10日間浸漬区、15日間浸漬区でも発芽は確認されたが、最終発芽率は5%以下であり、無浸漬区と1日間浸漬区に比べて極めて低かった ($p < 0.05$)。

一方、ススキでは、全ての処理区において実験開始から7日目で初めて発芽が確認された。その後、全ての処理区で発芽率は緩やかに上昇していき、最終発芽率は1日間浸漬区では70%以上、無浸漬区、5日間浸漬区、10日間浸漬区、15日間浸漬区では50%以上になり、全ての処理区で有意な差が認められなかった ($p > 0.05$)。

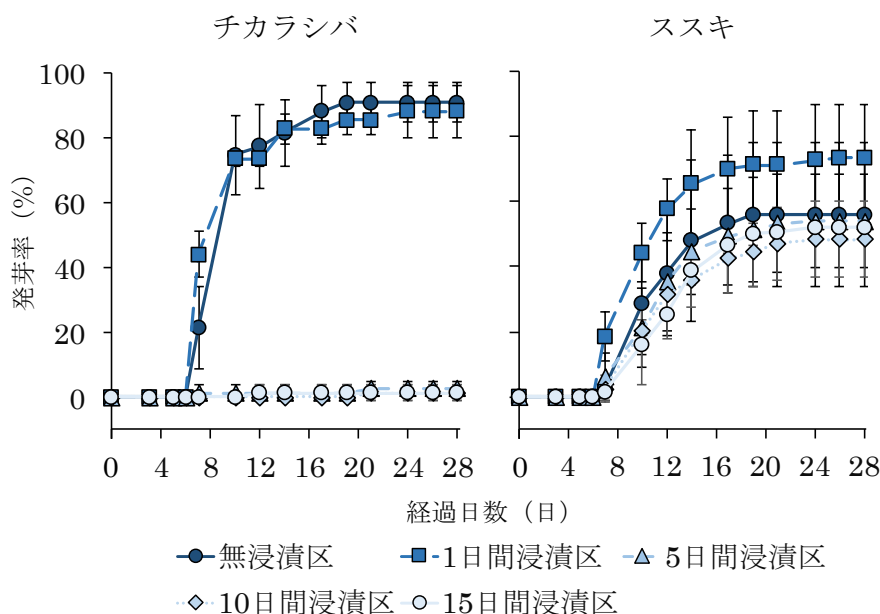


図-8.2 塩水浸漬期間に違いを設けた処理区におけるチカラシバおよびススキの発芽率の推移
(エラーバーは標準偏差を表す。)

8.4. 考察

図-8.1の結果から、チカラシバおよびススキはどちらも既往研究と同様に^{5, 82)}、水中の塩分濃度が高いほど最終発芽率は低くなり、水中の塩分が種子の発芽を阻害した可能性が考えられた。

図-8.2から、チカラシバの種子が1日だけ塩水に浸漬された後にすぐに水洗いされると最終発芽率は高いままだったが、5日以上浸漬された後にすぐに水洗いされてもほとんど発芽しなかった。一方、ススキの種子は5日間塩水に浸漬されてもすぐに水洗いされると、発芽率が低下していなかった。このことから、例えば津波によりチカラシバの種子が塩分に汚染された場合、1日以内に雨が降って除塩されると種子は発芽できる可能性が考えられ、ススキでは、種子が塩分に15日間汚染されても、その後すぐに雨が降って除塩されると発芽できる可能性が考えられた。

塩水に浸漬された種子が塩分を吸収するのを確認したところ、チカラシバの穎果には微量な塩分が取り込まれた可能性がある一方で、ススキの穎果には塩分の吸収が確認できなかった。このことから、図-8.2でススキが15日間塩水に浸漬されても発芽できたのは穎果中に塩分が吸収されなかった可能性があった。これらのことから、チカラシバよりもススキの方が耐塩性は高いと判断された。

8.5. まとめ

チカラシバの種子を塩水に播種すると、水中の塩分濃度が高いほど最終発芽率が低くなった。また、チカラシバの種子は1日だけなら3.5%の塩水に浸漬されても穎果内には塩分が吸収されずに発芽することがわかった。これらのことから、例えば津波等によってチカラシバの種子が3.5%の塩水に浸漬されても、1日以内に雨が降ることで塩分が穎果内に入らずに発芽できる可能性が考えられた。

ススキの種子を塩水に播種すると、水中の塩分濃度が高いほど最終発芽率が低くなった。また、ススキの種子は15日間3.5%の塩水に浸漬されても穎果内には塩分が吸収されずに発芽することがわかった。このことから、例えば津波等によってススキの種子が塩水に浸漬されても、15日以内に雨が降って塩分が除去されると発芽できる可能性が考えられた。

9. 総合考察

9.1. 本研究の成果

本研究では、地域性種苗を用いた緑化の低コスト化を図るため、播種量の削減や採取効率の向上、種子の発芽に関して実験を行った（図-9.1）。

第2章で、緑化工事において地域性種苗6種の播種量を削減できるか検討したところ、少量の播種なら3年目以降に、中量以上の播種なら2年目以降に70%以上の植被率が確認できた。発生期待本数を50本/m²とした少量播種では3年目に、100~300本/m²とした中量以上の播種では2年目に70%の植被率に到達した。調査地全体でシカの踏み荒らしや食痕が多数確認されたが、地域性種苗を播種した調査区ではシカに食べられた形跡のないチカラシバや食べ残されたススキが優占していた。このことから、シカ不嗜好性のある地域性種苗を播種することで群落を形成できる可能性が考えられた。

第3章では、開発された採取機の吸引力を強くしすぎると割れたり、傷ついてしまう種子が生

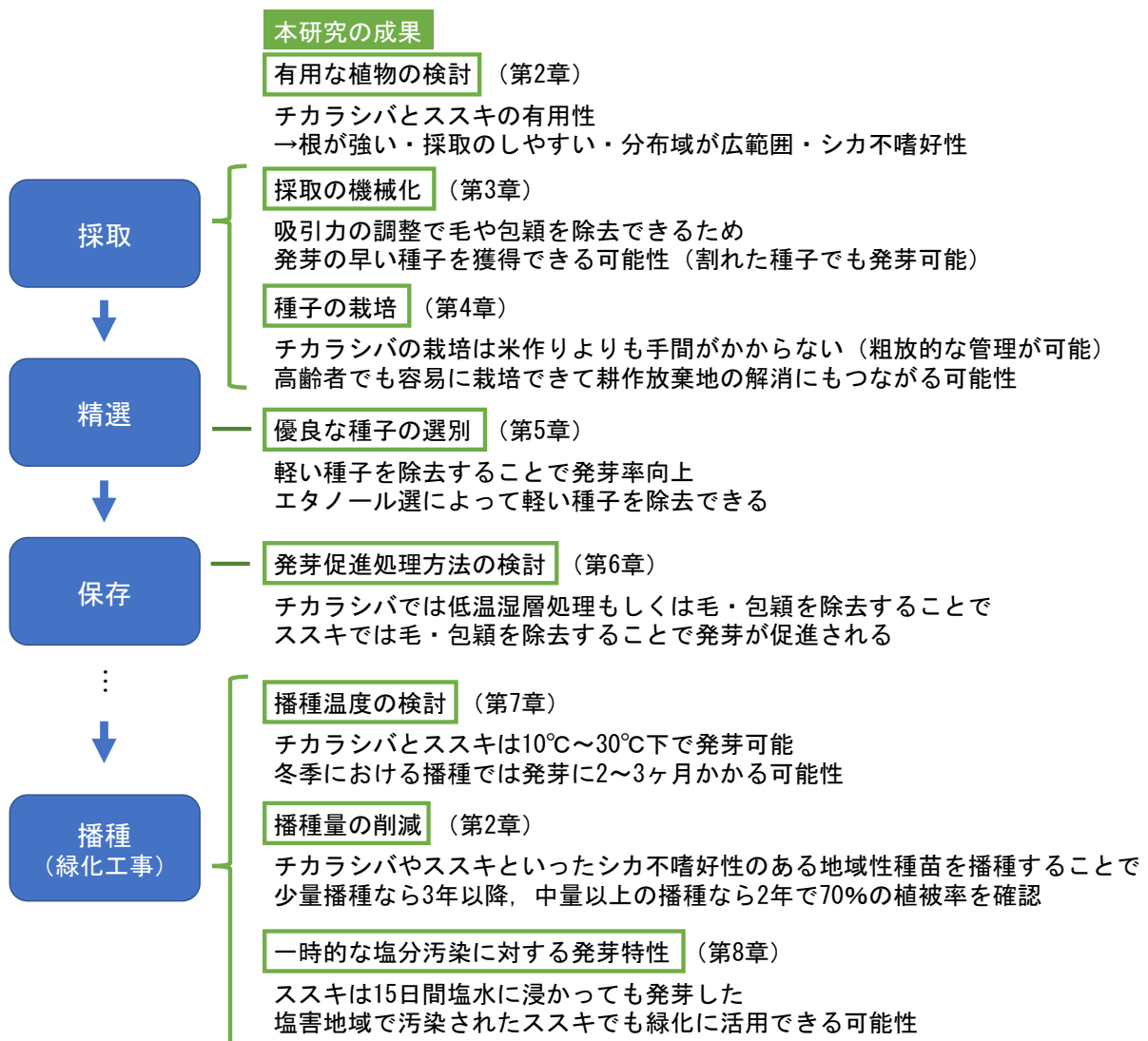


図-9.1 地域性種苗を用いた緑化に対する本研究の成果

じることがあったため、割れた種子の発芽能力を確認した。その結果、割れた種子でも発芽することができることがわかり、さらに、割れたり、包穎が除去されることで発芽が早くなる可能性があった。このことから、採取機の吸引力を調整することで発芽の早い種子が獲得できる可能性も考えられた。

第4章では、採取地の獲得や採取量の把握、安定的な供給が難しい地域性種苗に対して、採取がしやすく圃場外へ逸出しにくいチカラシバの栽培を検討した。その結果、チカラシバはイネよりも1/8倍の作業時間で手間をかけずに栽培できることがわかった。このことから、チカラシバは高齢の農業事業者でも容易に栽培できる可能性があり、このことは遊休農地や耕作放棄地の解消にもつながると考えられた。自治体によっては地域性種苗を農作物として扱えない等法律上の問題はあがるが、地域性種苗の栽培は農業分野における課題解決にも寄与できる可能性があった。

第5章～第7章では、第2章において地域性種苗の緑化に有用であると考えられたチカラシバとススキの発芽率の向上や発芽の促進について検討した。

第5章の結果から、チカラシバでもススキでも、採種時期によっては軽くて未熟な種子が多くなるが、重い種子を選別して播種すること発芽率を高くできることがわかった。特に、チカラシバとススキのエタノール選で種子群から軽い種子を除去することによって発芽率を向上させることができた。

第6章の結果から、採種後すぐに播種すると発芽が不揃いであり、チカラシバでは2ヶ月以上、ススキでは1ヶ月以上保存期間を経験させることで発芽の斉一性を高められる可能性が考えられた。その際、保存の温度は低温の5℃や非低温の15℃、25℃のいずれであっても斉一性を高める効果は確認できた。さらに、5℃の低温で種子に水を与える湿層処理を行うもしくは総苞毛や基毛といった毛や包穎を除去することによって発芽の促進が期待できることもわかった。第3章の結果も合わせて考えると、総苞毛や包穎は穎果の吸水を阻害し、発芽を遅延させている可能性が考えられ、毛や包穎を除去したり、種皮に傷をつけることによって種子はより多く吸水することができ、より早期に高い発芽率が確認できる可能性が考えられた。

第7章では、チカラシバとススキは10～30℃の温度下で発芽が確認でき、さらにより高い温度下で播種することで早く高い発芽率に到達した。また、10℃という冬季に相当する温度下での播種では2～3ヶ月経ないと発芽しなかったことから、冬季に播種しても発芽せず、季節が春季に移った後に発芽してくる可能性が考えられた。

第8章では、潮上帯や隣接した低地の自然再生に対して、チカラシバやススキという地域性種苗を導入する技術の確立に貢献することを目指し、まずはそれぞれの発芽期に注目して実験を行った。その結果、例えば津波等によって種子が塩水に浸漬されても、チカラシバではチカラシバでは1日以内、ススキでは15日以内に雨が降って塩分が除去されると発芽できる可能性が考えられた。このことにより、チカラシバやススキの種子は塩分に汚染されていたとしてもその後の除塩のタイミングによっては発芽できる可能性が考えられ、特にススキの方がチカラシバよりも耐塩性は高いと判断された。

9.2. 今後の展望

本研究では地域性種苗を用いた緑化の低コスト化に取り組み、高野山での野外実験からチカラシバとススキの有用性を見出した。さらに、これら 2 種を緑化に用いるために発芽率の高い種子の選別方法や発芽の促進処理方法を実験室ベースで解明した。特に、ススキは茅葺き屋根等の日常の景観づくりの材料として使われてきた背景があることから、いわゆる「日本の原風景」の文化形成の一端に寄与できる可能性がある。今後は野外実験で検証を行い、技術をブラッシュアップさせる必要がある。

一方で、本研究の最終的な目標は「みどりの地産地消」を確立させることであり、そのためには多くの技術的な課題を地道に解決していくしかない。地域性種苗を用いた緑化の普及には、「地域の植物で緑化する」ことの認知を拡大することに加え、多くの成功事例を積み上げることが重要であり、その積み重ねが地域性種苗の緑化に対する社会的な信用を高めることにつながる。

さらに、これらと並行して、今後は種子流通のコスト削減も重要な課題であり、それを実現するためには、地域との協働を展開し、種子生産や流通をビジネスモデル化させることが必要である。本研究ではチカラシバの種子栽培にも取り組んだが、今後は農山村との連携が効果的であると考え。そのためにも、今後は緑化工学の分野だけでなく、農村社会学や地域経済学の研究と合わせた文理融合の研究が必要となってくる。

地域の景観と生物多様性の保全を行う際、「地域における土地と人々の営み」を考えないことには真の保全は達成されない。重要なのは、農林水産業を始めとした、自然由来の資源を活用した地域の産業が健全に維持されることである。そして、豊かな景観や生態系、歴史や文化を後世に継承するには、今後も社会全体で技術を革新し、人間社会と自然界との関係性の再生を行っていく必要があると考える。

10. 引用文献

- 1) 芦田 馨・杉野 守 (1984) イネ科雑草の葉身部表皮におけるシリカ細胞の分布. 雑草研究, 23(別): 111-112.
- 2) Aso, T. (1976) Studies on the Germination of Seeds of *Miscanthus sinensis* ANDERSS. Science reports of the Yokohama National University. Section II, Biological and geological sciences, 23: 27-37.
- 3) Bewley, J. D. (1997) Seed germination and dormancy, *Plant Cell*, 9(7): 1055-1066.
- 4) Christian, E. J. (2012) Seed development and germination of *Miscanthus sinensis*. Graduate Theses and Dissertations Iowa State University Capstones, Theses and Dissertations, pp. 22-75.
- 5) Ci, H., Tian, X., Zhang, C., Wang, P., Wang, Z and Zhang, Q (2013) Effects of salt stress on the seed germination and seedling growth of *Pennisetum alopecuroides* and *Spodiopogon sibiricus*. *Chinese Journal of Ecology*, 32(5): 1168-1174.
- 6) Clark, L.V., Stewart, J.R., Nishiwaki, A., Toma, Y., Kjeldsen, J.B., Jørgensen, U., Zhao, H., Peng, J., Yoo, J.H., Heo, K., Yu, C.Y., Yamada, T. and Sacks, E.J. (2015) Genetic structure of *Miscanthus sinensis* and *Miscanthus sacchariflorus* in Japan indicates a gradient of bidirectional but asymmetric introgression. *Journal of Experimental Botany*, 66(14): 4213-4225.
- 7) 道路緑化保全協会技術委員会 (1979) 郷土植物の導入に関する実験的研究. 社団法人道路緑化保全協会, 111pp.
- 8) Dwiyaniti, M. S., Stewart, J. R., Nishiwaki, A. and Yamada, T. (2014) Natural variation in *Miscanthus sinensis* seed germination under low temperatures. *Japanese Society of Grassland Science*, 60: 194-198.
- 9) 江口祐輔・上田弘則・堂山宗一郎・山端直人・加瀬ちひろ・古屋益明・安田 亮 (2013) 最新の動物行動学に基づいた動物による農作物被害の総合対策. pp. 84-85.
- 10) 福永健司 (2014) 緑化工で目指してきたもの, これから向かう先. *森林技術*, 873: 2-7.
- 11) 外務省. "SDGs とは?". <https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/oda/sdgs/about/index.html> (参照: 2023年12月28日).
- 12) 荻野隆史 (2011) 日本の稲作農業. フコク生命マンスリーエコノミックレポート 6月号.
- 13) 橋本佳延・藤木大介 (2014) 日本におけるニホンジカの採食植物・不嗜好性植物リスト. *人と自然*, 25: 133-160.
- 14) 橋本智雄 (1996) 入門統計学. 共立出版, 67 pp.
- 15) 早川宗志・下野嘉子・赤坂舞子・黒川俊二・西田智子・池田浩明・若松徹 (2014) 日本在来ススキの地理的遺伝構造と遺伝的多様性. *日本草地学会誌*, 60(2): 124-131.
- 16) 林 治雄・沢村 浩 (1988) チカラシバの登熟と発芽能力. *九州農業研究*, 50: 175.

- 17) 林 満・姫野正己 (1972) 稲種子の休眠性および発芽性に関する研究. 16(2): 115-120.
- 18) 東村 ユミ子 (2013) チカラシバ (*Pennisetum alopecuroides* (L.) Spreng.from.purpurascens (Thunb.)Ohwi). 日本緑化工学会誌, 38(4): 459.
- 19) 細木大輔 (2008) シナダレスズメガヤ (*Eragrostis curvula* Nees). 日本緑化工学会誌 33(4): 611-612.
- 20) 古林賢恒・丸山直樹 (1977) 丹沢山塊札掛におけるシカの食性. 哺乳動物学雑誌, 7(2): 55-62.
- 21) 藤木大介 (2017) 兵庫県におけるニホンジカの嗜好性植物・不嗜好性植物リスト. 兵庫 ワイルドライフモノグラフ, 9: 118-134.
- 22) 飯塚隼弘・近藤三雄 (2011) 原始・古代から近世にかけての広義ののり面緑化に使用されてきた芝草等の地被植生の種類について. 40(1): 47-51.
- 23) 今泉智通 (2010) R を用いた一般化線形モデル (仮説検定編) :割合データを例に. 雑草研究, 55(4):275-286.
- 24) 井上雅央・金森弘樹 (2006) 山と田畑をシカから守る おもしろ生態とかしこい防ぎ方. pp. 58-68.
- 25) Jung, Y. (2004) Study of habitat and germination characteristics of native Gramineae plants for revegetation. A master's thesis of Chungang University's Graduate School.
- 26) 亀井 碧 (2022) 地域性種苗を用いた「みどりの地産地消」緑化における和歌山型ビジネスモデル実現に向けた取り組み. 日本緑化工学会誌, 47(3): 365-366.
- 27) 環境省 (2023) 生物多様性国家戦略 2023-2030. 5 pp.
- 28) 環境省 " 要注意外来生物リスト ". 環境省ホームページ . <https://www.env.go.jp/nature/intro/2outline/list/caution.html> (参照: 2023年9月18日).
- 29) 環境省 " 生態系被害防止外来種リスト ". 環境省ホームページ . <https://www.env.go.jp/nature/intro/2outline/iaslist.html> (参照: 2023年9月18日).
- 30) 環境省 (2021) 第二種特定鳥獣管理計画作成のためのガイドライン (ニホンジカ編) . pp. 3-8, 32.
- 31) 環境省自然環境局 (2015) 自然公園における法面緑化指針解決編. pp. 1-24.
- 32) 環境省. "環境白書". <https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/h15/13453.html> (参照: 2023年12月28日).
- 33) 環境省 . " 生物多様性に迫る危機 ". https://www.biodic.go.jp/biodiversity/about/biodiv_crisis.html (参照: 2023年12月28日).
- 34) 環境省. "30 by 30". <https://policies.env.go.jp/nature/biodiversity/30by30alliance/> (参照: 2023年12月28日).
- 35) 環境省 . " 生物多様性基本法 ". <https://www.biodic.go.jp/biodiversity/about/kihonhou/index.html> (参照: 2023年12月28日).

- 36) 環境省自然環境局・農林水産省農村振興局・林野庁・国土交通省都市・地域整備局・国土交通省河川局・国土交通省道路局・国土交通省港湾局 (2007) 生態系保全のための植生管理方策及び評価指標検討調査報告書. 217 pp.
- 37) 加藤 茂 (1994) 塩生植生の生理生態. 日本海水学会誌, 48(5): 378-386.
- 38) 川上直人 (2005) 種子の休眠・発芽と温度—発芽調節メカニズムの解明をめざして—. 日本緑化工学会誌, 30(3): 514-517.
- 39) 川島正人・島貫雅俊・伊藤康幸・破正広・伊藤俊明 (2011) 北海道の高速道路におけるエゾシカ侵入防止対策の取り組みについて. 10: 23-30.
- 40) 気象庁. “過去の気象データ検索”. 気象庁ホームページ. <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> (参照: 2017年5月1日).
- 41) 気象庁. “日本の年平均降水量偏差”. 気象庁ホームページ. http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/list/an_jpn_r.html (参照: 2018年2月8日).
- 42) 気象庁 (2022) 生物季節観測指針. pp.1, 13, 18.
- 43) 国土交通省 (2003) 美しい国づくり政策大綱. pp. 2-4.
- 44) 国土交通省国土技術政策総合研究所緑化生態研究室 (2013) 地域生態系の保全に配慮したのり面緑化工の手引き. pp. 1-24
- 45) 高野山麓 橋本新聞. "高野山道路28日開通! ~開創1200年の渋滞緩和". <http://hashimoto-news.com/news/2015/02/28/26847/> (参照: 2017年12月15日).
- 46) 倉田益次郎 (1979) 緑化工技術, pp. 1-3, 6-13, 142-149, 180-197, 289.
- 47) Mathieu A.R. Grare (2010) Variability of salinity response in *Miscanthus sinensis*. pp.13-27.
- 48) 三宅靖人 (1989) 植物の特性とケイ酸. 日本農芸化学会誌, 63(8): 1386-1390.
- 49) Mohr, H. and Schopfer, P. (1999) 植物生理学. 網野真一・駒嶺穆監訳. シュプリンガー・フェアラーク東京, pp. 402-403.
- 50) 長田武生 (2002) 日本イネ科植物図譜. 平凡社, p.54, 759.
- 51) 中村華子・宇津木栄津子・橘 隆一・福永健司 (2009) 長期間乾燥貯蔵した在来草本種子の発芽率推移. 日本緑化工学会誌, 35(1): 95-98.
- 52) 中村華子・水間史晃・橘 隆一・福永健司 (2021) 緑化資材の違いが阿蘇産ススキ (*Miscanthus sinensis* Andersson) の発芽と初期生育に及ぼす影響について. 日本緑化工学会誌, 47(1): 203-206.
- 53) 中島敦司 (2019) 生態系保全とニホンジカによる食害への対応からみた地域性種苗緑化の優位性. 日本緑化工学会誌, 44(3): 482-486.
- 54) 中島敦司 (2013) 地域性種苗を取り巻く過去から現在までの社会動向. 日本緑化工学会誌, 39(4): 468-472.

- 55) 中島敦司・亀井 碧 (2022) 地域性種苗の抱えた課題 地域協働や文理融合の重要性. 日本緑化工学会誌, 47(3): 367-372.
- 56) 日本道路協会 (2009) 道路土工切土工・斜面安定工指針 (平成 21 年度版). pp. 242-244.
- 57) 日本緑化工学会 (2002) 生物多様性保全のための緑化植物の取り扱い方に関する提言. 日本緑化工学会誌, 27(3): 481-491.
- 58) 日本緑化工学会 (2023) 生物多様性に配慮した緑化植物の取り扱い方に関するガイドライン 日本緑化工学会誌, 48(4): 557-575.
- 59) 日本緑化工学会斜面緑化研究部会 (2004) のり面における自然回復緑化の基本的考え方とりまとめ. 日本緑化工学会誌, 29(4):509-520.
- 60) Nukaya, A., M. Masui and A. Ishida (1984) Salt tolerance of muskmelons as affected by diluted sea water applied at different growth stages in nutrient solution culture, J. Jpn. Soc. Hort. Sci., 53(2): 168-175.
- 61) OIML R 22 (1975) International alcoholometric tables.
- 62) 岡 光夫・飯沼二郎・堀尾尚志 (1990) 近代日本の技術と社会 1 稲作の技術と理論. 平凡社, 75pp.
- 63) 小沢準二郎 (1958) 林木のタネとその取扱い. 日本林業技術協会, 332pp.
- 64) 緑化植物問題検討委員会 (2019) 生物多様性保全のための緑化植物の取り扱い方に関する提言 2019. 日本緑化工学会誌, 44(4): 622-628.
- 65) 下園寿秋・長野十郎・内野英一郎 (2019) シカが生息する地域での森林土壌を吹付けた林道切土法面の緑化. 日本緑化工学会誌, 35(1): 138-141.
- 66) 衆 議 院 . " 景 観 法 ". https://www.shugiin.go.jp/internet/itdb_housei.nsf/html/housei/15920040618110.htm (参照: 2023 年 12 月 28 日).
- 67) 衆 議 院 . " 観 光 立 国 推 進 基 本 法 ". https://www.shugiin.go.jp/internet/itdb_housei.nsf/html/housei/16520061220117.htm (参照: 2024 年 3 月 31 日).
- 68) 高橋成人 (1967) イネ種子の休眠と発芽. 植物の化学調節, 2(2):84-92.
- 69) 田代慶彦・下園寿秋・中村克之 (2013) シカ不嗜好性植物を利用した林道切土法面の吹付緑化. 日本緑化工学会誌, 39(2): 256-259.
- 70) 富田基史・小林 聡・阿部聖哉・津田その子. (2018) 葉緑体 DNA の遺伝変異を用いた日本産海浜植物 6 種の地域差検討. 日本緑化工学会誌, 44(1): 45-50.
- 71) 津田その子 (2018) 地域性種苗の種子調達における課題と今後に向けた提案. 日本緑化工学会誌, 43(3): 451-453.

- 72) 津田その子・小林 聡・富田基史・阿部聖哉・松木吏弓・河津かおり・花井隆晃・鈴木素弘・守谷栄樹・藤井義晴 (2014) 葉緑体 DNA ハプロタイプ分析による在来草本植物 10 種の地域性評価. 日本緑化工学会誌, 40(1): 72-77.
- 73) 和歌山県 (2022) 第二種特定鳥獣管理計画 (ニホンジカ) 第 5 期 資料編. pp. 2-3, 19.
- 74) 和歌山県 (2023) 第 2 次生物多様性和歌山戦略. pp.1-2.
- 75) 法眼利幸・植田栄仁・山本浩之・栗生 剛 (2016) 和歌山県の有田地域と西牟婁地域で実施したニホンジカのライトセンサス. 和歌山県農林水産試験研究機関研究報告, 1: 101-114.
- 76) 和歌山県世界遺産センター. "世界遺産登録へのあゆみ". <http://www.sekaiisan-wakayama.jp/know/ayumi.html> (参照: 2017 年 12 月 3 日).
- 77) 山田 守 (2016) 生物多様性保全に配慮した緑化の考え方と先進事例の紹介. 日本緑化工学会誌, 41(4): pp.445-447.
- 78) 山田 守 (2019) 緑化斜面におけるシカ被害の現状と課題. 日本緑化工学会誌, 44(3): pp.470-474.
- 79) 山地直樹・馬 建鋒 (2006) イネのケイ酸吸収機構. 化学と生物, 44(7): pp. 453-458.
- 80) 山本晴彦 (2007) 農作物における塩害「潮風害」の特徴. 日本海水学会誌, 61(2): 110-117.
- 81) 山本晴彦・坂本京子・岩谷 潔・川元絵里佳・那須万理・渡邊祐香 (2019) 2018 年台風 24 号 (Trami) の気象的特徴と塩害の概要. 自然災害科学, 37 (4): 365-382.
- 82) Yang, J., Lee, J., Song, H., Park, S., Yoon, Y. and Ju, J (2019) Effect of Chloride-containing Deicing Salts Concentration on the Germination Characteristics of Six Species of Asteraceae and Poaceae Seeds. *Journal of Environmental Science International*, 28(11): 907-915.
- 83) 横山 純・石塚正仁・沢田孝之・成田伸理・佐藤圭一 (2011) エゾシカの交通事故発生状況とその要因—網走開発建設管内における事例—. 10: 5-12.
- 84) 吉田 寛 (2005) トールフェスク (*Festuca arundinacea* Scherb.) —K 31 F (*Festuca elatior* var. *arundinacea*) . 日本緑化工学会誌 31(2): 294.
- 85) 吉原敬嗣・入山義久 (2018) 阿蘇の草原再生への活用を目指したススキ種子現地採取の試み. 日本緑化工学会誌, 43(4): 614-619.
- 86) 湯崎真梨子 (2016) こんなんしてます。わだいのしごと 125 「つれもて とろら」。わかやま新報, 2016-12-06, 6 pp.

11. 謝辞

本研究を行うにあたり、和歌山大学システム工学部の中島敦司博士には、幅広い学術的視点から、実験計画、論文作成、結果の取りまとめに至る過程において、多大なる御協力、御指導を頂いた。さらに、和歌山大学システム工学部の宮川智子博士ならびに佐久間康富博士には、本論文をまとめるにあたり貴重な御助言、御指導を頂いた。また、SPTEC・YAMADAの山田守博士、株式会社タニガキ建工の川中一博様、株式会社ケイエフの井上裕介様、紅大貿易株式会社の吉原敬嗣様、和歌山大学食農総合研究教育センターの湯崎真梨子博士には、現地調査および本論文をまとめるにあたり貴重な御助言・御指導を頂戴した。

本学システム工学部 17 期生の上野山公基氏、18 期生の友田誠也氏には引き継ぎ研究として調査データの提供をいただいた。さらに、本学システム工学研究科 15 期生の水町泰貴氏には現地での調査補助、実験補助、実験結果の取りまとめ、論文作成における過程で多大な御助言を頂戴した。また、本学システム工学部 17 期生の池田航助氏、18 期生の清長孝成氏、白井史昌氏、野村太郎氏、19 期生の田所怜氏、中野慎二氏、堀内泰貴氏、20 期生の向井優也氏、21 期生の岸田苑佳氏、倉地花氏、増田拓海氏、22 期生の岡山智仁氏、小笠原一将氏、阪上優華氏、白江翔太氏、古川仁人氏、23 期生の小林拓真氏、中野雄太氏、真野丈瑠氏、24 期生の大西智貴氏、岸本大地氏には現地での調査補助、実験補助に御協力を頂戴した。その他、みどり研究室の学生の方々には、本研究に関して、広い視点での御意見を頂戴した。

また、本研究の一部は公益財団法人日本科学協会の笹川科学研究助成を受けた。

以上の皆様に深く感謝の意を記して、謝辞とさせていただきます。

12. 研究業績

- 本研究に関連した査読付き論文

1. 亀井 碧 (濱田 碧)・中島敦司・川中一博・山田 守 (2021) ススキ *Miscanthus sinensis* Andersson の種子重量および採取時期が発芽に及ぼす影響. 日本緑化工学会誌, 47(2), 292-297.
2. 濱田 碧・岸本大地・中島敦司 (2023) 温度条件および傷付け処理がチカラシバ (*Pennisetum alopecuroides* (L.) Spreng.) の発芽に及ぼす影響. 日本緑化工学会誌, 49(1): 39-44.

- その他の論文 (査読付き)

1. 有本 智・安藤早貴子・亀井 碧 (濱田 碧)・野村太郎・原 祐二・中島敦司 (2016) 和歌山県海南市孟子不動谷に生息するトンボ類の 1998 年から 2015 年の変化. 南紀生物, 58(1): 56-62.
2. Yasuki HORIUCHI, Atsushi NAKASHIMA, Aoi KAMEI (Aoi Hamada), Fumiaki SHIRAI, Satoshi TADOKORO, Guosheng ZHANG, Naoko H. MIKI, Ken YOSHIKAWA (2018) Structure of subterranean tree form buried sand on *Juniperus sabina* L. grown on the fixed sand dune at semiarid region in China. *Journal of Arid Land Studies*, 28(S): 105-108.

- その他の論文 (技術報告, 規定審査あり)

1. 亀井 碧 (濱田 碧)・友田誠也・上野山公基・川中一博・井上裕介・吉原敬嗣・湯崎真梨子・中島敦司・山田 守 (2017) 地域性種苗の播種量の違いが緑化草地における植被に及ぼす影響. 日本緑化工学会誌, 43(1): 195-198.
2. 堀内泰貴・亀井 碧 (濱田 碧)・田所 怜・須崎史也・張 国盛・三木直子・中島敦司・吉川賢 (2017) 中国半乾燥地固定砂丘上に生育する臭柏 (*Savina vulgaris* Ant.) の砂に埋没した地下樹形の構造. 日本緑化工学会誌, 43(1): 335-338.
3. 亀井 碧 (濱田 碧)・中島敦司・川中一博・井上裕介・吉原敬嗣・湯崎真梨子・山田 守 (2020) 採取時期および予措条件の違いがチカラシバ *Pennisetum alopecuroides* (L.) Spreng. の種子発芽に及ぼす影響. 日本緑化工学会誌, 46(1): 111-114.

● 対外発表

1. 亀井 碧 (濱田 碧)・友田誠也・上野山公基・川中一博・井上裕介・吉原敬嗣・湯崎真梨子・中島敦司・山田 守 (2017年9月23日) 地域性種苗の播種量の違いが緑化草地における植被に及ぼす影響. 日本緑化工学会大会発表, ポスター形式: 名古屋市
2. Aoi KAMEI (Aoi Hamada), Kazuhiro KAWANAKA, Yusuke INOUE, Takatsugu YOSHIHARA, Mariko YUZAKI, Atsushi NAKASHIMA, Mamoru YAMADA (11/26/2018) Effects of pretreatments to release dormancy on seed germination of *Miscanthus sinensis* Andersson. 2018 ICLEE 9th Conference, Poster: Chaoyang University of Technology
3. 亀井 碧 (濱田 碧)・中島敦司・川中一博・井上裕介・吉原敬嗣・湯崎真梨子・山田守 (2020年8月18日) 採取時期および予措条件の違いがチカラシバ *Pennisetum alopecuroides* (L.) Spreng. の種子発芽に及ぼす影響. 第51回日本緑化工学会大会岩手web大会, web 掲示板討議
4. Aoi Kamei (Aoi Hamada), Atsushi Nakashima, Kazuhiro Kawanaka and Mamoru Yamada (26/11/2021) Effect of salinity stress on germination of *Miscanthus sinensis* Andersson and *Pennisetum alopecuroides* (L.) Spreng. 2021 ICLEE CONFERENCE, Oral presentation: Online
5. 亀井 碧 (濱田 碧)・中島敦司 (2022年9月21日) 自然災害による一時的な塩分汚染がチカラシバおよびススキの発芽に及ぼす影響. 日本緑化工学会・日本景観生態学会・応用生態工学会 3学会合同大会 ELR2022 つくば. ポスター発表: 筑波市
6. 濱田 碧・岸本大地・中島敦司 (2023年9月21日) 温度条件および傷付け処理がチカラシバ (*Pennisetum alopecuroides* (L.) Spreng.) の発芽に及ぼす影響. 第52回日本緑化工学会大会. ポスター発表: 新潟市

● 本研究に関連した特集記事

1. 亀井 碧 (濱田 碧) (2022) 地域性種苗を用いた「みどりの地産地消」緑化における和歌山型ビジネスモデル実現に向けた取り組み. 日本緑化工学会誌, 47(3): 365-366.
2. 中島敦司・亀井 碧 (濱田 碧) (2022) 地域性種苗の抱えた課題 地域協働や文理融合の重要性, 日本緑化工学会誌, 47(3): 367-372.