

【話 題】

高発芽率を実現する樹木種子の選別技術

松田 修^{*1}・原 真司²・飛田 博順³・宇都木 玄³

はじめに

平成21年に公表され、同23年に法制化された、農林水産省による森林・林業再生プランでは、10年以内に輸入材に打ち勝つ林業経営の基盤を整備し、わが国の木材自給率を50%以上にまで向上させるとの目標が掲げられている(農林水産省2009)。しかし、平成26年時点における用材ベースの自給率は29.6%^{*1}と、プランの公表以後4年間の増加幅はわずか1.8%にとどまっている(林野庁2010, 2015a)。掲げられた目標値を過大と見るか否かについては、賛否両論があるだろう。しかし、真に重要なことは、蓄積した森林資源をいかに有効に活用し、また、約4割の面積比率を占める人工林を今後どのように運用するかについて、地に足のついたランドデザインを描き出すことである。

例えば、長きにわたり問題視されてきた、一山型の年齢構造を平準化するには、毎年10万haの再造林が必要になると試算されている(宇都木2015)。これは、平成24年実績の約5倍の規模に相当し(林野庁2015b)、本数に換算して年間2億本あまりの苗木を植栽するに等しい。この規模の再造林は、30年前の昭和60年より以前には普通に行われていた(林野庁2014b)。しかし、当時と現在とを比較して明らかに異なるのは、林業の担い手の減少と高齢化が進行し、とりわけ苗木生産者においてその傾向が顕著なことである(林野庁2013)。平成24年における山行苗木の生産本数は5,800万本であったが(林野庁2015b)、潜在的な需要は満たせておらず、苗木の調達が困難な状況は常態的に発生している(一例として、宮崎日日新聞社(2014)など)。林業経営の基盤である苗木の供給力の拙さは、いかなる林業の未来図を描くにせよ、その実現を阻むリスクであることに違いない。また、苗木の生産者数と生産量とが高い

相関を保ちながら減少している事実(林野庁2015c)は、苗木生産における技術的革新が、長らく生み出されていないことの証であるとも読み取れる。

本稿では、わが国に林業が興って以来、苗木(実生苗)の生産性を律速してきた、スギ、ヒノキ、カラマツなど、主要造林樹種における種子の発芽率を、安定的かつ飛躍的に向上させるための選別技術について紹介する(原著としてMatsuda et al. (2015)を参照)。加えて、同技術がいかにして林業の省力化や低コスト化に貢献し、林産体制を変容させ得るかについて議論する。本稿が林業に携わる読者にとって、異分野技術に目を向け、それらを適切に取り入れることにより、非効率に安住することなく、将来性のある魅力的な施業を志す契機となることを願いたい。

主要造林樹種における不稔種子の形成

樹木の種子を播いたとき、すべてが揃って発芽することは珍しい。収穫した種子が必ずしも発芽に至らない理由には、大きく分けて2つ存在する。1つは正常に形成された充実種子(図-1)が、休眠や保管にともなう劣化により、一時的あるいは永久的に発芽能を失うためである。ゆえに、種子の発芽率向上を目指すには、劣化を防ぐための適切な保管方法とともに、休眠を解き、発芽を誘導するための事前処理の方法を、樹種ごとに見出す必要がある。もう1つは、種子の形成過程に“異常”^{*2}が生じることにより、発芽に必要な構造や成分を備えるに至らなかった不稔種子が混在するためである。不稔種子には、子実の全部あるいは一部を欠いたシイナ(糶)や半シイナとよばれる未熟粒のほか、スギやヒノキなどの樹種では、褐色の固形物を蓄積する渋粒ない

* E-mail: matsuda.osamu.084@m.kyushu-u.ac.jp

1 まつだおさむ 九州大学大学院理学研究院

2 はらまさし 住友林業株式会社筑波研究所

3 とびたひろゆき、うつぎはじめ 森林総合研究所

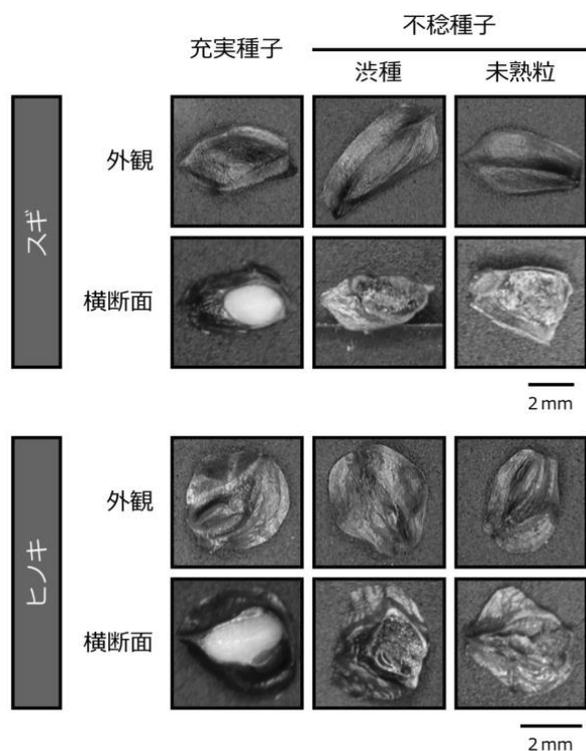


図-1 スギ・ヒノキにおける充実および不稔種子の外観と内部様態。Matsuda et al. (2015) を改変。

し渋種とよばれる種子が含まれる (図-1) (松田・宮島 1979 ; 丹原 1990)。これらはいかなる処理を行おうとも、発芽能を獲得することはない。

主要造林樹種では、不稔種子の形成頻度が概して高い上、採種地や採種年による変動も大きい。図-2は森林総合研究所に保管されていた、異なる母樹に由来するスギおよびヒノキの各10ロットの種子について、採種後の最初期(劣化の程度が最も軽微な時期)に記録された発芽率と、解剖により明らかにした充実率との関係を示したものである。発芽率と充実率は、共に5~80%の範囲を幅広く変動しており、両者の間には傾きが1に近い、高い正の相関が認められる。このことは、少なくとも採種直後において、種子の充実率が発芽率の主な決定要因であることを示している。高確度で選別された充実種子を用いることは、苗木の生産性を高める目的のみならず、種子の保管や発芽促進の方法を探る上でも重要であることは明白であろう*3。

従来の種子選別法

不稔種子は植物の育成を基礎とする産業において、生産性を低下させる共通のリスクであり、とりわけ農業

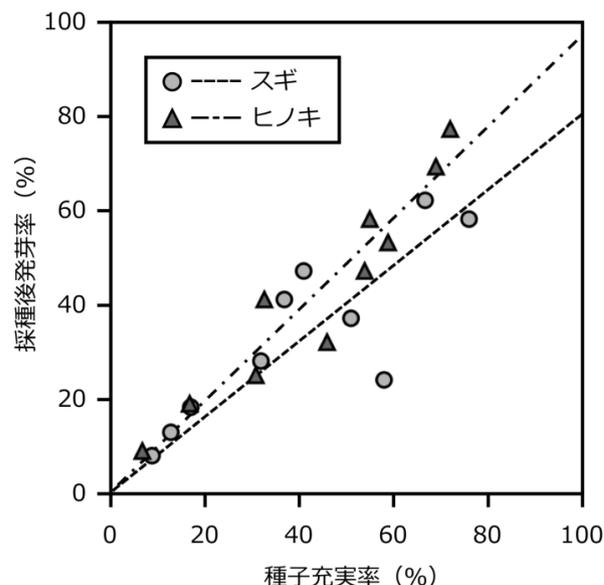


図-2 採種直後のスギ・ヒノキ種子における発芽率と充実率の関係。Matsuda et al. (2015) を改変。

では、粒径や重量、比重などの形質における充実種子との差異に基づき、両者を効果的に選別する手法(篩選、風選、塩水選など、以下「従来法」とよぶ)が工夫されてきた。しかし、上記の形質が取り得る値の範囲が近接あるいは幅広く重複する場合、従来法による種子選別は著しく困難となる。図-1に見られる通り、スギやヒノキの不稔種子は、その内部様態が充実種子とは大きく異なるものの、種皮に覆われた外観からは見分けることができない。渋種は外観以外の物理的性状においても、充実種子と酷似している。このため、夾雑物や明らかな未熟粒を取り除くより高度な選別は、樹木種子においては長らく断念されてきた。後述するが、このことが造林に用いる苗木の生産方式に、特筆すべき革新が生まれなかった一因であろうと推察される。一方、農業においても、従来法を補う新たな選種技術の登場は乏しく、発芽率の改善が未だ課題となっている作物種も少なくない。次節に述べる種子の選別法は、林業発の技術として、農業のほか多様な産業における品質評価のニーズに向けて展開し得るものである。

近赤外光の反射特性に基づく充実種子の選別法

先述の通り、種子を解剖すれば、それぞれが充実種子であるか否かを容易に見分けることができる(図-1)。しかし、当然ながら、一度解剖した種子は二度と生き返ることはない。種子の選別法は非破壊的でなくてはな

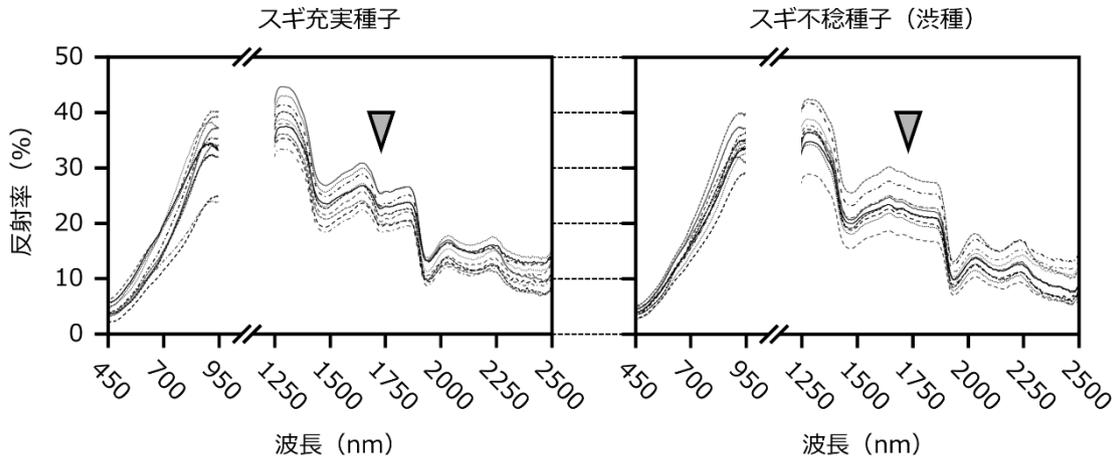


図-3 スギにおける充実および不稔種子 (渋種) の反射スペクトル (領域平均)。Matsuda et al. (2015) を改変。

らない。ところで、内部様態が異なることは、化学組成が異なることを示唆する。実際に、樹木の充実種子は、発芽に必要なエネルギー源となる貯蔵脂質を多量に蓄積しているが、不稔種子では顕著な蓄積は見られない。こうした化学組成の差異を検出するための手段として、食品等の品質評価に広く用いられているのが近赤外分光法である。充実種子と不稔種子における光学特性の差異が、近赤外域に見られるであろうと予測することは、分光学の使い手には至極自然な着想である。過度の専門分化が、分野をまたいだニーズとシーズの適合を阻んでいる状況は、早晩に是正されねばならない。

図-3はスギを例として、各10粒の充実種子と不稔種子*4から取得した、可視(380~750nm)および近赤外域(750~2,500nm)を含む波長領域における反射スペクトルを示したものである。波形の差異は、脂質による光吸収極大と一致する、1,730nmを中心とする狭帯域において顕著に認められる。脂質が多く蓄積すると、この帯域における光吸収が増し、反射率が低下する。このため、充実種子が「M」字に似た反射スペクトルを描いているのに対し、不稔種子では中央部分に顕著な「窪み」は見られない。この「窪み」の鋭さを定量化したパラメーターは、「充実種子らしさ」の指標として用いることができる(方法の具体例はMatsuda et al. (2015)に記載)。あるいは、図-3に示している、種子の表面全体から得た反射スペクトルの平均にのみ着目するのではなく、空間的な均質性を評価に加えることにより、さらに精度の高い選別基準を見出すことも可能である。

図-4は、図-1に外観を示したスギおよびヒノキの種子について、「充実種子らしさ」をヒートマップおよび立体図により表したものである。ヒノキにおいては

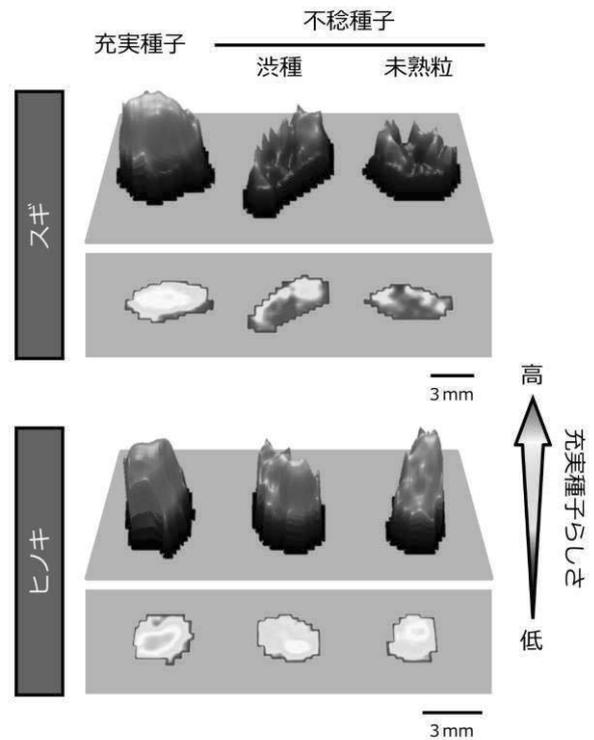


図-4 近赤外域の反射特性に基づく充実種子らしさの可視化。Matsuda et al. (2015) を改変。

識別が困難そうにも見えるが、次節に示す通り、これらにカラマツを加えた主要造林樹種では、それぞれに最適な「充実種子らしさ」の範囲を定めることにより、95%を上回る判別成功率が安定的に得られている。

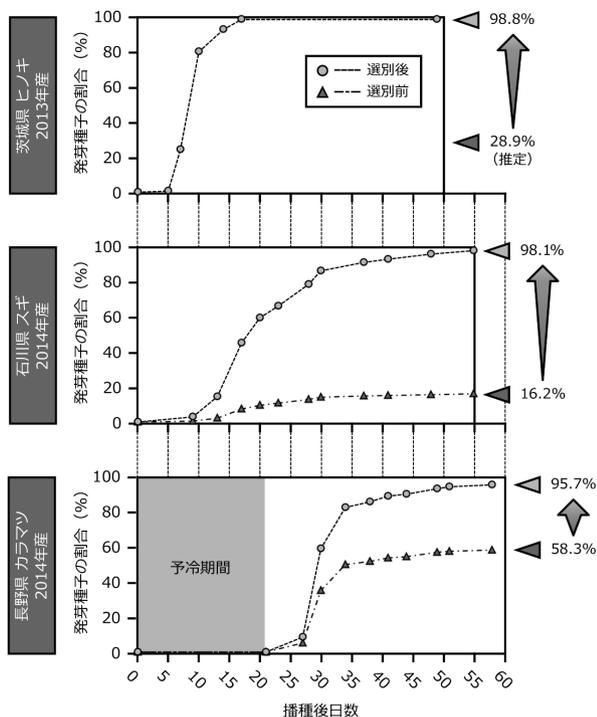


図-5 近赤外域の反射特性に基づく選別前後における種子の発芽曲線。松田 (2015) を改変。ヒノキ種子の発芽曲線は選別後についてのみ示している。

提案手法の性能評価

図-5は、選別前後の種子における発芽曲線を示している。いずれの樹種においても、選別後に到達する発芽率は、選別前の発芽率に依存せず、高水準を示している*5。カラマツのデータにおいて初期に示している予冷処理は、種子の休眠を解き、発芽を同期化させる効果をもつ。スギやヒノキにおいては、これに相当する定まった方法はなく、長期間の保管を経た種子ほど、発芽が遅延する（一定期間内の発芽率が低下する）傾向を示す。このため現時点では、均質な実生苗の生産においてはカラマツが最も有利である。スギやヒノキの種子に対する発芽誘導の方法は、筆者らも研究開発を進めており、少なくともスギにおいて、1つの方法の効用が実証されつつある。

一方、選別の処理速度とコストの問題であるが、現時点では筆者らのもとで手作業により行うほかはない。しかし、作業手順は、1) 種子の整列、2) 分光画像の撮影と充実種子の特定、3) 充実種子の回収という、単純な3工程に分解することができ、機械による代替は比較的容易であろうと推察される。手作業では、1人1日8時間の労働により、3,000粒の種子を処理するのが限度で

ある。単位時間あたりに得られる充実種子数と1粒の充実種子にかかる選別コストは、選別の厳しさ*6と用いる種子ロットの充実率に依存する。後者が33%のロットを用いた場合、最大で1,000粒/日の充実種子が得られることになる。選別コストは10円/粒といったところであろう。機械化により、堅実に見積もって100倍の処理速度が実現すれば、1日に得られる充実種子数は10万粒となり、選別コストは0.1円/粒まで抑えられる。加えて、次節に述べる、高発芽率を前提とした育苗方式を併用すれば、苗木生産にかかる労力とコストを飛躍的に低減することが可能となるはずである。

高発芽率種子が可能とする効率的な育苗システム

再生林の省力化と低コスト化を実現するための切り札として、コンテナ苗がにわかに注目を集めている。普通苗に対する利点や欠点について、多くの言説が示されているが（森林総合研究所東北支所2014）、コンテナ苗が真価を発揮するのは、その規格化された形状が生かされる場面においてである。コンテナ（マルチキャビティコンテナ）は、機械との親和性を考慮して開発された育苗資材であり、わが国では普及に向けた試験段階にあるとはいえ、露地や発芽床などのコンテナ外で初期生長を済ませた幼苗を手作業により移植する方法は、コンテナ苗の利点の多くを犠牲にしているに等しい。1980年代以降の北欧におけるコンテナ苗の急速な普及は、慢性的な労働力不足から来る効率化への切迫感と、当地における主要造林樹種（トウヒ、アカマツ、シラカンパなど）の高い種子発芽率（70～80%）に支えられてきた。当地において一般化している、一粒播種による実生苗の生産は、コンテナの利点に最も適合した使用法の1つである。

先述の通り、わが国の主要造林樹種では、種子の発芽率が概ね低く、一粒播種を行った場合には得苗率が、厚播きした場合には間引きにかかる労力が問題となる。しかし、本稿に示した方法により、充実率が95%を超える種子を調製することは可能となっている。また、採種から播種までの期間を短縮することにより、発芽誘導を施していないスギやヒノキの充実種子でも、大半が発芽に至ることが確認されている（図-2、図-5）。より現実的に、締め切り期間を培養開始から1か月に定めた場合でも、発芽種子の割合は80%を超えており（図-5）、一粒播種による育苗が十分に視野に入る水準にある。

苗木生産、そして木材の利用法においては、北欧などの林業先進国に比肩するに足る、独自の要素技術が出揃った状態にあると言えるだろう。これらの新技術の熟成と普及を積極的にサポートし、現状の人工林面積を保ちつつ、競争力のある林業の再興を目指すのか、あるいは低い木材自給率を許容し、それに見合う規模への人工林の縮小(半自然林化)を優先課題とするのか。その中庸を採るにせよ、施業者および行政には、異分野から提示されている林業の新たな可能性を正しく理解し、これらを適切に利用する眼識が求められている。わが国の林業の未来を決するのは、要素技術の開発者ではなく、山野に働く施業者の情熱と林野行政のリーダーシップにおいて他にないのである。

注：

- *1 平成 26 年の木材自給率は 31.2% と発表されているが、1.6% 分は同年より新たに集計に加えられた燃料用チップによるものである。
- *2 不稔種子の形成に適応的な意義がないとは言い切れない。ゆえに、“異常”とは便宜的な表現であることに留意されたい。
- *3 例えば、充実率が 30% の種子ロット(母集団)から、サイズが 100 の標本を 2 セット抽出するとき、各標本における充実率が 30 ± 5% の範囲に収まる確率は約 77%、標本間の充実率の偏差が 5% に収まる確率は約 60% である。つまり、充実種子を選択的に使用しない限り、標本サイズや試験回数をよほど大きく設定しなければ、様々な処理が発芽におよぼす効果を統計的に論じることができない。
- *4 図-3 では、不稔種子として渋種の反射スペクトルを示しているが、未熟粒においても波形の特徴はほぼ同じである。
- *5 図-5 の試験では、収穫後 2 年未満の種子を使用している。
- *6 選別後にどの程度の不稔種子の混入を許容するかを意味する。厳しく選別すれば、選別後の充実率はより 100% に近づくが、棄却される充実種子の割合は増加する。

謝 辞

本稿の内容は、農研機構生研センターが実施する「攻めの農林水産業の実現に向けた革新的技術緊急展開事業(うち産学の英知を結集した革新的な技術体系の確

立)」による研究支援のもとに得られた成果である。

引用文献

松田 清・宮島 寛 (1978) スギにおける不稔種子の形成. 日本林学会誌 60: 1-9

松田 修 (2015) 樹木種子の発芽率を向上させる新しい選種技術の開発. 山林 1577: 28-35

Matsuda O, Hara M, Tobita H, Yazaki K, Nakagawa T, Shimizu K, Uemura A, Utsugi H (2015) Determination of seed soundness in conifers *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* using narrow-multiband spectral imaging in the short-wavelength infrared range. PLOS ONE: e0128358

宮崎 日日新聞社 (2014) スギ苗木が不足 伐採急増、生産追い付かず. http://www.the-miyanichi.co.jp/kennai/_10034.html (2015 年 11 月 17 日アクセス)

農林水産省 (2009) 森林・林業再生プラン. <http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/saisei/> (2015 年 11 月 17 日アクセス)

林野庁 (2010) 平成 21 年木材需給表(用材部門). <http://www.rinya.maff.go.jp/j/press/kikaku/100617.html> (2015 年 11 月 17 日アクセス)

林野庁 (2013) 平成 24 年度 森林・林業白書. <http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/24hakusyo/> (2015 年 11 月 17 日アクセス)

林野庁 (2014b) 平成 25 年度 森林・林業白書. <http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/25hakusyo/> (2015 年 11 月 17 日アクセス)

林野庁 (2015a) 平成 26 年木材需給表. <http://www.rinya.maff.go.jp/j/press/kikaku/150929.html> (2015 年 11 月 17 日アクセス)

林野庁 (2015b) 森林・林業統計要覧 2015. http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/toukei/youran_mokuzi.html (2015 年 11 月 17 日アクセス)

林野庁 (2015c) 林業種苗生産. <http://www.rinya.maff.go.jp/j/kanbatu/syubyou/syubyou.html> (2015 年 11 月 17 日アクセス)

森林総合研究所東北支所 (2014) コンテナ苗を使ってみませんか? <https://www.ffpri.affrc.go.jp/thk/research/publication/thk/others.html> (2015 年 11 月 17 日アクセス)

丹原哲夫 (1990) ヒノキ採種園における不稔種子の形成. 岡山県林業試験場研究報告 9: 12-23

宇都木玄 (2015) これからの森林施業の道筋を考える. 山林 1570: 20-29