

長野県林業総合センター

研 究 報 告

第 3 8 号

Bulletin of the Nagano Prefecture
Forestry Research Center

No. 38

2 0 2 4

令和 6 年 3 月

長野県林業総合センター

はじめに

日頃から、長野県林業総合センターの業務運営につきまして、多くのご支援、ご協力を賜り、厚く御礼申し上げます。

センターでは、2021年（令和3年）3月に長野県林業総合センター基本計画を策定し、「健全な森林づくり」、「豊かな地域づくり」、「信州カラマツ等の県産材利活用」「新たな時代の森林・林業を切り拓く」「林業に関わる人材の育成指導」の5つの課題を解決するために10年先に向けた44の目標を立て、研究や人材育成に取り組んでいるところです。

研究報告では、当センターで取組む課題の内、研究が終了したものや研究開始から5年程度が経過し中間報告を行うものについて取りまとめています。

今回は、44の目標のうち、林業生産技術の向上について2課題、育苗技術の高度化について1課題、シイタケについて1課題、山菜の新たな栽培技術の開発について1課題、無垢構造材の製材・乾燥技術の開発とその性能評価について1課題、合計6課題について掲載しています。課題の中には、（一社）日本森林技術協会の森林技術賞や森林利用学会の森林利用学会賞を受賞した研究に係るものもあります。これらの課題の研究を実施するに当たり、多大なご協力を頂いた皆様方に、感謝と御礼を申し上げます。

今回報告させていただいた研究成果を、実際の現場で林業経営をされている方々や、林業・木材産業に関わっている方々、さらには行政や普及関係の皆様方の技術改善の一助として広くご活用いただき、本県の森林・林業・木材産業の発展に貢献できればと思っております。

今後とも、現場で必要とされる調査研究、技術開発などに、県林務行政と一体となって取り組んで参りますので、関係する皆様の一層のご支援とご協力をお願いいたします。

令和6年3月

長野県林業総合センター
所長 向山 繁幸

目 次

はじめに

成長に優れた苗木を活用した施業モデルの開発 ー最適な植栽密度・下刈り回数の提示ー（研究期間 H30～R4）	・ ・ ・ ・ ・ 1
カラマツ人工林の低コスト更新技術に関する研究（研究期間 H26～R4）	・ ・ ・ ・ ・ 9
成長に優れた苗木を活用した施業モデルの開発（研究期間 H30～R4） ー成長に優れた苗木の育苗技術の高度化ー	・ ・ ・ ・ ・ 61
シイタケ産業活性化のための省力栽培技術の開発（研究期間 H30～R4）	・ ・ ・ ・ ・ 71
タラノキ単年栽培法に関する試験（研究期間 H30～R4）	・ ・ ・ ・ ・ 95
長野県産カラマツ大径材から製材された心去り平角材の乾燥特性及び強度 性能の解明（研究期間 H30～R4）	・ ・ ・ ・ ・ 107

成長に優れた苗木を活用した施業モデルの開発

—最適な植栽密度・下刈り回数の提示—

大矢信次郎・二本松裕太・田中裕二郎^{*}・小山泰弘

大苗による下刈り年数短縮効果の検証及び植栽密度による樹冠閉鎖年数の違いを明らかにするため、カラマツの植栽密度・大苗植栽試験地を佐久市と南牧村に設定した。初期樹高はコンテナ中苗<裸中苗<コンテナ大苗<裸大苗の順であったが、裸中苗の平均樹高は2成長期目にコンテナ大苗を超えた。3成長期後における裸大苗及び裸中苗の平均樹高は南牧で200cm、佐久で150cmを超え、現状ではコンテナ苗に比べて裸苗の方が大苗・中苗とも下刈り省力化に寄与すると考えられた。競合植生との競合状態から下刈りスケジュールを決定し初期保育コストを試算した結果、地拵えをグラップルで行い、競合植生がササであった南牧では、裸中苗と裸大苗で下刈りが不要となり、従来に比べて7割程度のコスト削減が見込まれた。また樹冠幅は、3成長期を経てもコンテナ苗は裸苗より有意に小さく、このことが樹高成長量にも影響を及ぼしている可能性が示唆された。

キーワード：カラマツ大苗、下刈り省力化、形状比、競合状態、機械地拵え、再造林コスト

1 はじめに

戦後の拡大造林期に造成された人工林の多くは現在 11~12 齢級に達しており、収穫可能な時期を迎えている（長野県林務部 2023）。人工林の木材資源を有効に活用し今後も循環させていくためには、再造林を着実に進めていくことが必要である。しかし、我が国の造林コストは諸外国と比較して突出して高く（島本 1998）、林業の収益性を低下させていることから、造林コストの削減が求められている。

そのため、筆者らは伐採と造林の一貫作業システムを導入し伐出機械を造林作業の一部に利用することを検討し、地拵えや苗木運搬等の経費が削減可能であることを示した（大矢ら 2016a, 大矢ら 2018）。また、機械地拵えによる A₀ 層の除去と棚積みは、埋土種子や雑灌木の根系の排除によって競合植生を抑制する効果があり、下刈り回数減少によるコスト削減が可能であることを明らかにしてきた（大矢ら 2021）。これらに加えて、従来に比べてサイズの大きい苗木（以下、大苗）を使用することによって競合植生との競争を緩和し、下刈り回数を減らすことも期待されている（大矢ら 2016b, 大矢・清水 2017, 小倉ら 2014, 林野庁 2022 など）。

一方、近年植栽コストの削減を目的として低密度植栽が検討されている（林野庁 2021）。苗木代や植栽の必要人工の削減だけでなく、保育間伐を不要にすることも目的としているが、樹冠閉鎖に至るまでに従来に比べて年数を要することが想定

され、除伐やつる切り等の必要性が高まることも懸念されている。

そこで本研究では、機械地拵えによる競合植生抑制効果に加えて、大苗の植栽による初期樹高の確保と競合状態の改善を組み合わせることによって、さらなる下刈り回数削減が可能か検証することを目的とする。また、カラマツの低密度~高密度植栽を行い、樹冠閉鎖年数を推定するため、カラマツ植栽木の樹冠サイズを経年調査した。

なお、本研究は戦略的プロジェクト研究推進事業「成長に優れた苗木を活用した施業モデルの開発」（平成 30~令和 4 年度、代表研究機関：森林総研）により、森林総研等と共同で実施した。また、本研究の成果の一部は日本森林学会大会（大矢ら 2022, 大矢ら 2023）において発表した。

2 調査方法

2.1 カラマツ大苗植栽による下刈り回数削減効果の検証

大苗による下刈り回数削減効果を明らかにするため、佐久市の大曲国有林（以下、佐久と略記）及び南牧村の団体有林（以下、南牧と略記）に大苗植栽試験地を設定した。佐久では、2019 年夏季~秋季に皆伐及び人力地拵えを行い、晩秋（11 月上旬）にカラマツのコンテナ中苗、裸中苗、コンテナ大苗、裸大苗の 4 種類の苗木を 300 本ずつ植栽した（植栽密度は 2.2 に記載）。南牧では、2019 年秋季~2020 年冬季に皆伐及びグラップルによる機械地拵えを行い、2020 年 4 月に佐久市と同様

^{*}元 林業総合センター育林部

の4種類の苗木を320本ずつ植栽した。いずれも使用した苗木は東筑摩郡山形村産の2年生苗であり、平均苗高はコンテナ中苗が約40cm、裸中苗が約50cm、コンテナ大苗が約60cm、裸大苗が約90cm（佐久）及び70cm（南牧）であった。これらのうち、コンテナ中苗はJFA150 マルチキャビティコンテナ（根鉢容量150cc、40穴/コンテナ、育苗密度296本/m²）、コンテナ大苗はJFA300 マルチキャビティコンテナ（同300cc、24穴/コンテナ、178本/m²）で育苗されたものを植栽した。

両試験地において植栽直後に樹高と根元直径を測定し、以後は各成長期後（11月）に樹高及び根元直径を測定した。なお、樹高は山側地際から梢端までの高さをスライドスケールによりcm単位で計測し、根元径は地際から高さ5cmの幹径を防水デジタルノギスにより0.01mm単位で計測した。

また、各試験地における下刈りの要否を評価するため、両試験地とも各試験区を下刈りあり・なしに区分して管理し、各試験区の下刈りなしエリアにおいて各成長期の7月下旬～8月上旬に各植栽木の競合植生との競合状態を調査し、下刈りの要否を判断した。競合状態は、山川ら（2016）の競合状態の指標（図-1）を使用した。下刈りを必要とする判断基準は、C3及びC4と判断された植栽木の本数割合が合わせて20%を超えた場合とした。ただし、下刈りなしエリアでは競合状態の推移を把握するため、下刈り要否判断にかかわらず下刈りは行わなかった。

これらの結果を踏まえ、地拵え方法、競合植生タイプ、使用する苗木の種類ごとに下刈りスケジュールを決定し、地拵え～植栽～下刈りのコストを積算し比較した。

2.2 カラマツ植栽木の樹冠幅成長量の評価

植栽密度による林冠閉鎖年数の違いを明らか

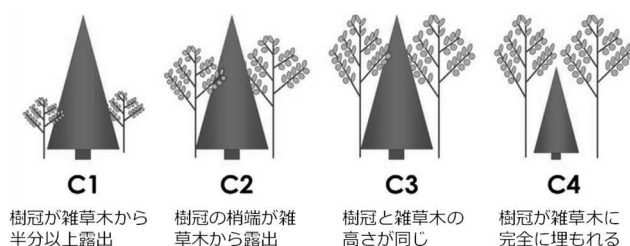


図-1 競合状態指標の模式図（原図：山川ら 2016）

にするため、2.1の佐久及び南牧で試験地を設定する際に低密度及び高密度植栽試験を兼ねて植栽を行った。佐久は低密度植栽試験地として、2019年11月にカラマツの裸中苗、裸大苗、コンテナ中苗、コンテナ大苗を1,000本/ha（極めて疎）、1,500本/ha（疎）、2,300本/ha（標準）の3密度で96～104本ずつ植栽した。南牧は高密度植栽試験地として、2020年4月に2,300本/ha（標準）、5,000本/ha（密）、10,000本/ha（極めて密）の3密度で105～120本ずつ植栽した。

両試験地において植栽直後に樹高と根元直径を測定し、以後は各成長期後（11月）に樹高、根元直径、樹冠幅を測定した。樹高と根元径は2.1と共通データとし、樹冠幅はスライドスケールを使用して最大傾斜方向及び等高線方向の2方向の枝張りの最大値を水平にcm単位で測定した。

3 結果および考察

3.1 カラマツ大苗植栽による下刈り回数削減効果の検証

3.1.1 樹高成長の推移

植栽時の初期樹高は、佐久、南牧ともコンテナ中苗<裸中苗<コンテナ大苗<裸大苗の順であった（図-2）。1成長期目は、コンテナ中苗とコンテナ大苗の樹高成長量がいずれも有意に小さく、裸中苗の成長量が有意に大きかった（Tukey-Kramerの多重比較検定、 $p<0.05$ ）。1成長期目において、裸中苗の樹高はコンテナ大苗の樹高に佐久では並び、南牧では超えた。

2成長期目もこれらの傾向は大きく変わらず、裸中苗の樹高成長量が有意に大きかったが、佐久の裸大苗の樹高成長量がやや小さくなった。佐久、南牧とも裸中苗はコンテナ大苗より有意に樹高が高くなり、裸大苗との差も縮小した。

3成長期目になっても、コンテナ苗の樹高成長量が裸苗より小さい傾向は継続していたが、佐久ではコンテナ中苗の成長量と裸中苗・大苗の成長量の有意差がなくなった。3成長期後の裸大苗及び裸中苗の平均樹高は南牧で200cmを超え、佐久では150cmを超えており、南牧では既に平均的な競合植生高を上回った。

今回の2カ所の試験地における3成長期までの経過からは、裸苗の方が大苗・中苗とも樹高成

長に優れていた。後述するが、コンテナ苗の初期形状比の改善が初期の樹高成長の向上につながると考えられ、育苗技術の進展が望まれる。

3.1.2 根元直径成長の推移

植栽時の初期根元直径は、佐久、南牧ともコンテナ中苗<コンテナ大苗<裸中苗<裸大苗の順であった(図-3)。初期樹高とは異なり、コンテナ大苗は裸中苗より根元直径が細かった。1成長期目の根元直径成長量は、佐久ではコンテナ中苗が他に比べて有意に小さく、南牧ではコンテナ大苗が他に比べて有意に小さかった。2成長期目になると、佐久では4者の直径成長量に有意差はなくなったが、南牧ではコンテナ中苗のみ有意に小さかった。3成長期目も佐久では直径成長量に4者の差は認められなかったが、南牧では両裸苗に対

以上の結果から、コンテナ苗は裸苗に比べて低い根元直径成長を示したものの、その差は樹高成長に比べて小さく、特に佐久では2年目以降、裸苗との有意差がなかった。このことから、コンテナ苗は初期成長において樹高成長より直径成長を優先しているものと推察される。

3.1.3 形状比の推移

植栽時、コンテナ苗は裸苗に比べて根元径が細かったため、形状比が高かった(図-4)。コンテナ苗の形状比の平均値は、佐久では中苗 97, 大苗 114, 南牧では中苗 87, 大苗 97 でどちらも特に大苗の形状比が裸中苗・裸大苗より有意に高かった(Tukey-Kramer の多重比較検定, $p<0.05$)。一方、裸苗の形状比は初期から中苗、大苗とも低く抑えられており、平均値で佐久では中苗 61, 大苗 85,

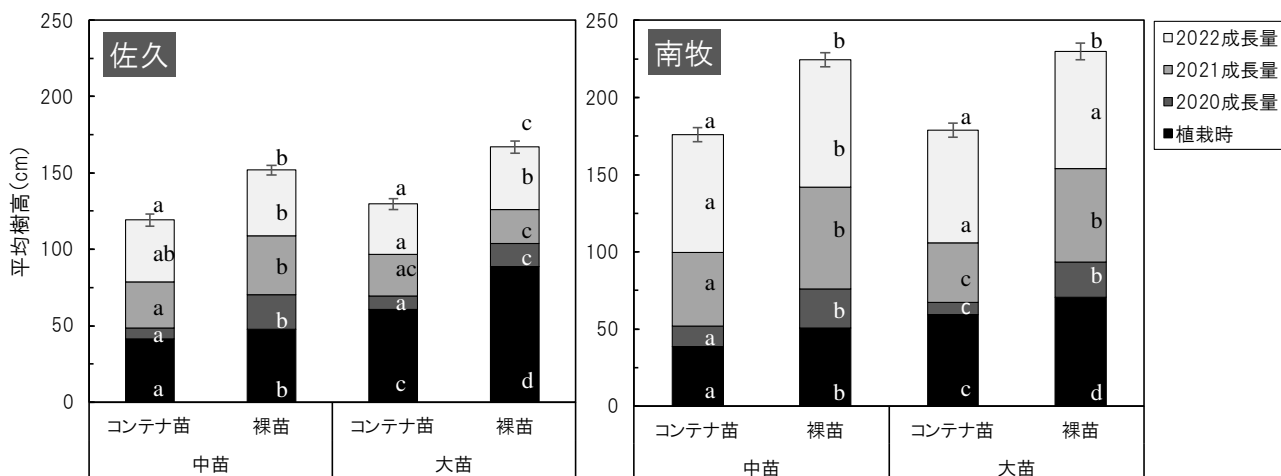


図-2 植栽木の樹高成長の推移

※初期値、各年成長量、2022 年期末の樹高において、同一アルファベットを含まない苗種間に有意差あり(Tukey-Kramer の多重比較検定, $p<0.05$)
 ※エラーバーは標準誤差
 ※下列りありエリアにおける成長量のみを対象とした

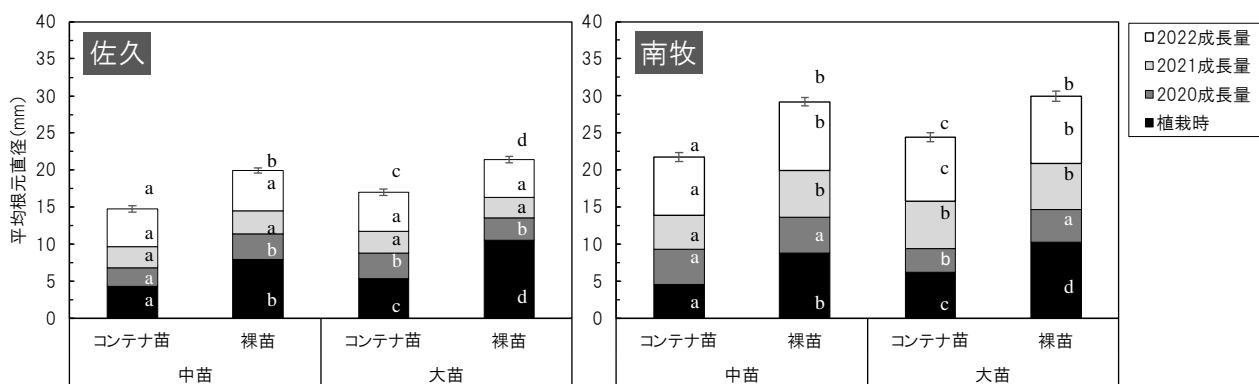


図-3 植栽木の根元直径成長の推移

※初期値、各年成長量、2022 年期末の樹高において、同一アルファベットを含まない苗種間に有意差あり(Tukey-Kramer の多重比較検定, $p<0.05$)
 ※エラーバーは標準誤差
 ※下列りありエリアにおける成長量のみを対象とした

して両コンテナ苗の成長量は有意に小さく、特にコンテナ中苗の成長量が小さかった。

南牧では中苗 59, 大苗 70 であった。

1成長期目は、コンテナ苗は中苗・大苗とも樹

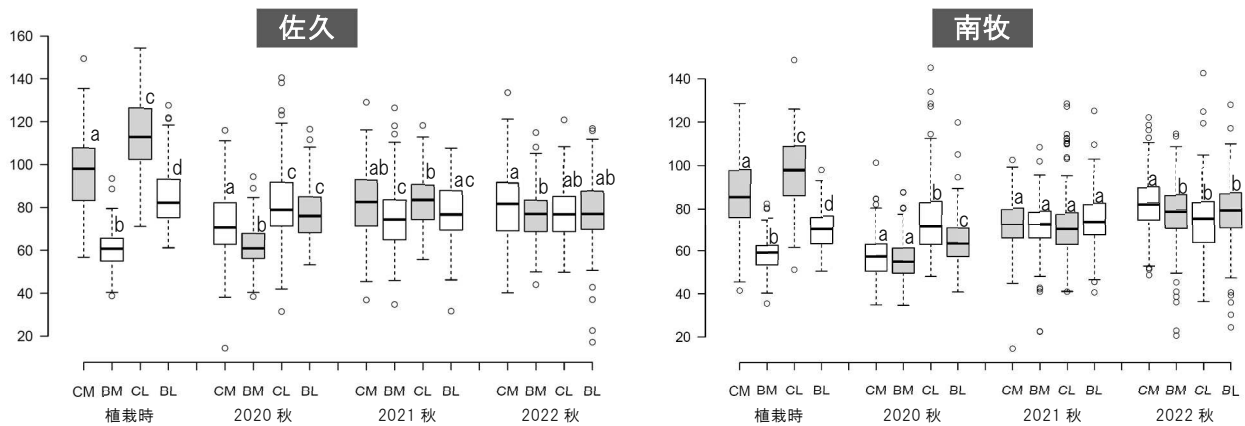


図-4 植栽木の形状比の推移

※CM:コンテナ中苗, BM:裸中苗, CL:コンテナ大苗, BL:裸大苗

※同一年の形状比において、各苗種間の同一アルファベットを含まない苗種間に有意差あり(Tukey-Kramerの多重比較検定, $p < 0.05$)

※下刈りありエリアの植栽木のみを対象とした

高成長より直径成長が促進され、2020年秋の形状比が佐久では中苗 73、大苗 81 に低下し、南牧では中苗 57、大苗 74 に低下した。一方、裸大苗・裸中苗は形状比に大きな変化はなく、苗種間の較差は縮小した。しかし、コンテナ苗の形状比は佐久、南牧とも依然として裸苗より有意に高かった ($p < 0.05$)。

2成長期後の2021年秋には、苗木の種類にかかわらず形状比は比較的安定した状態になり、佐久で80程度、南牧で70程度に収束した。3成長期後は形状比に大きな変化は認められなかったが、南牧の形状比はやや上がってどの苗種でも80程度となり、佐久と同程度になった。南牧では樹高成長量が大きかったため、形状比が上がったものと考えられる。

このようなコンテナ苗の形状比の変化は、植栽から1～2年程度は樹体の直立性を安定させるために樹高成長より直径成長に重点を置いた養分配分になる(八木橋ら2016)としたこれまでの報告と一致している。そのため、植栽後速やかに樹高成長させるためには、植栽の時点でコンテナ苗も裸苗並みの低い形状比であることが求められる。そのためには、現在のコンテナ苗育苗における極めて密な育苗条件を緩和し、下枝の枯れ上りを防ぎ着葉量を増加させることや、施肥によるコントロール等を行い、直径成長を促すことが必要と考えられる。

3.1.4 植栽木と競合植生の競合状態

植栽から1夏目(2020年8月)～3夏目(2022

年8月)におけるカラマツ植栽木と競合植生との関係を図-5に示した。競合状態C3+C4が20%を超えた場合に下刈りが必要、という判断基準にした結果、佐久では1夏目の裸大苗では下刈り不要と判断された。しかし、他の苗種では1～3夏目すべてにおいて下刈りが必要とされ、裸大苗でも2～3夏目は下刈りが必要と判断された。一方、南牧では1夏目と2夏目のコンテナ中苗では下刈りが必要と判断されたが、それ以外の苗種では1～3夏目すべてにおいて下刈りは不要と判断された。

佐久と南牧では競合植生の発達に大きな差が生じており、その主たる原因は2つと考えられる。一つは、地拵えの方法である。佐久では傾斜が急であり、作業道上からも機械が届かない場所であったため、人力地拵えにせざるを得なかった。そのため、機械によるA₀層の除去や土壌表層の攪乱は全く生じなかったため、競合植生の回復が極めて早く進行したと考えられる。一方、南牧は緩傾斜地であり機械の林内走行が可能であったため、グラップルによる機械地拵えが行われた。機械走行による地表攪乱とグラップルによる枝条の移動に伴うA₀層の部分的な除去が行われたと推察され、これらによって競合植生の回復が抑制されたものと考えられる。

また、2つ目の原因として、両試験地の植生タイプの相違が挙げられる。佐久、南牧とも主伐前の主林木はカラマツであったが、林床植生は大きく異なっていた。佐久では主伐前の林床に落葉広

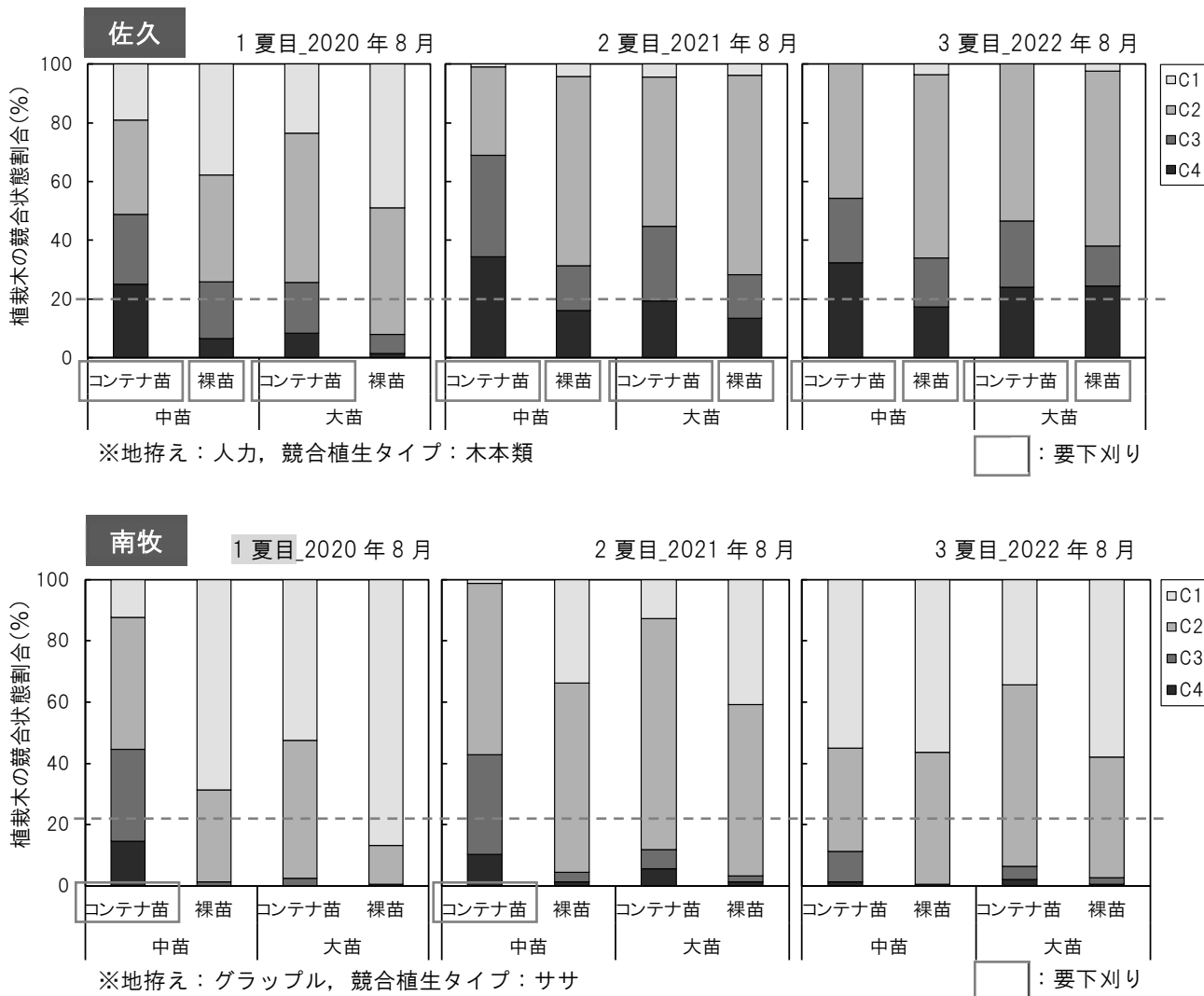


図-5 植栽木と競合植生の競合状態の推移と下刈り要否判断

葉樹の低木～中高木が密生していたのに対して、南牧では高さ1～1.5m程のクマイザサが密生していた。そのため、佐久では主伐後にこれら広葉樹の伐根から一斉に萌芽が生じるとともに、その隙間を埋めるように草本類が発生した。一方、南牧では主伐及び地拵えの作業時にクマイザサの地上部はほぼ失われていた。残った地下茎から速やかに再生し地表を覆ったものの、1～2夏目は稈高が50cm程度に抑えられていた。一部、水分条件の良い箇所ではタケネグサが優占する部分もあったが、元々ササが密生していたため他の木本類、草本類の伐根や種子が少なく、発生してきても密生するササに阻まれ成長が抑制されたものと推察される。その間に植栽したカラマツが成長し、競合状態が良好に保たれ、結果として南牧ではコン

テナ中苗植栽地以外では無下刈りのまま下刈り期を脱することができた。

以上のように、伐採地の履歴は様々であるが、佐久のように機械地拵えが困難かつ林床植生に木本類が多い林分では、下刈りを計画的に行うことをあらかじめ想定しておく必要がある。一方、南牧のように機械地拵えとササの組み合わせによって競合植生を抑制できる可能性のある林分では、主伐前からそのことを意識し、下刈りを省力化することを想定した地拵えを行うことが重要と考えられる。

3.1.5 カラマツ大苗等を利用した場合の初期保育モデルとコスト試算

以上の結果をふまえ、佐久および南牧の2試験地における3成長期の樹高成長と競合状態から初

期保育モデルを設定した。競合植生タイプと地拵え方法、植栽木の樹高によって下刈りのスケジュールを決定した(表-1)。佐久では、競合状態から判断すると3年目までほとんどの場合下刈りが必要である。ただし4年目には裸中苗と裸大苗は平均樹高が2mを超えると予想されるため下刈り不要とした。一方南牧では、競合状態が佐久ほど厳しくなく、コンテナ中苗でも3年目には競合植生のクマイザサの高さ(約1.2m)を超えたため、下刈りは2回のみとした。この結果、裸大苗を使用した場合は下刈り回数を従来の半分程度に

することが期待でき、さらに機械地拵えを行い、植生タイプがササなどで条件が良ければ下刈りを行う必要がない可能性も想定される。

次に、この初期保育モデルによる下刈りまでの造林コストを試算した(図-6)。機械地拵えを行い無下刈りが実現できた場合には、再造林費用は従来作業の1/3程度に低減できる可能性がある。機械地拵えが実施できず人力地拵えであったとしても、裸大苗であれば従来のコストの2/3程度にできる可能性があった。コンテナ大苗は植栽時の樹高は大きいですが、形状比が高く樹高成長が遅れ

表-1 各試験地における植栽苗の種類ごとの下刈りスケジュール

	-1年目		0年目		1年目		2年目		3年目		4年目		5年目	
	秋	冬	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬
従来作業	中苗	裸苗	伐出		人力地拵え	植栽	下刈		下刈		下刈		下刈	
一貫作業(佐久)	中苗	コンテナ苗		伐出	人力地拵え	植栽	下刈		下刈		下刈		下刈	
		裸苗		伐出	人力地拵え	植栽	下刈		下刈		下刈		下刈	
	大苗	コンテナ苗		伐出	人力地拵え	植栽	下刈		下刈		下刈		下刈	
		裸苗		伐出	人力地拵え	植栽	下刈		下刈		下刈		下刈	
一貫作業(南牧)	中苗	コンテナ苗		伐出	グラブ	フル地拵え	植栽	下刈		下刈				
		裸苗		伐出	グラブ	フル地拵え	植栽	下刈						
	大苗	コンテナ苗		伐出	グラブ	フル地拵え	植栽	下刈						
		裸苗		伐出	グラブ	フル地拵え	植栽	下刈						

※競合状態C4+C3が20%以上で下刈りを実施し、平均樹高2m以上に達すると予想されるまで下刈りを継続

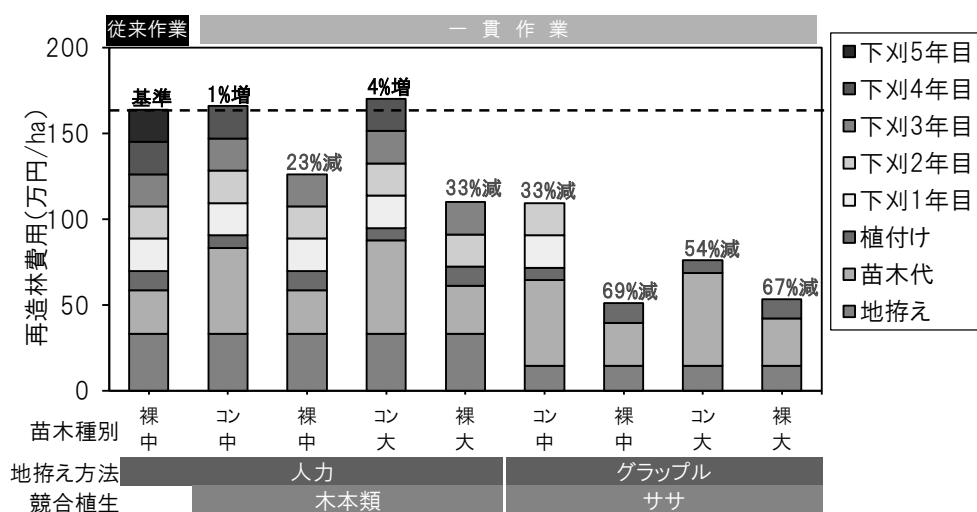


図-6 地拵え及びカラマツ苗木種別ごとの初期保育コスト比較

る傾向が認められたため、育苗時の形状比を改善するなど「植えたらすぐに伸びる」条件を整えることが課題である。

3.2 カラマツ植栽木の樹冠幅成長量の評価

今回の試験期間内である3成長期では、最も高密度に植栽した南牧の10,000本/ha植栽でも林冠閉鎖には至らなかった。そのため、ここでは各試験地における植栽密度の区分は除外し、苗種ごとの樹冠幅の成長量について述べる。

各苗種における樹冠幅の初期値（1成長期後）は、佐久、南牧ともコンテナ中苗及び大苗が裸苗に比べて有意に小さかった（図-7）。この原因は、裸苗は苗畑で育苗し、1年生の春に床替えを行う（一度掘り上げ、間隔を開けて植え直す）のに対して、コンテナ苗は密植状態で期間を通じて同じコンテナの中で育苗するため、成長に伴う枝の伸長が抑制されるとともに、下枝が被陰され徐々に枯れ上がるためと考えられる。

次に、樹冠幅の成長量については、佐久の裸大苗のみ2成長期目の成長量が有意に低かったが、それ以外は苗種間に有意差は認められなかった。2成長期末時点では佐久、南牧とも裸中苗と裸大苗の樹冠幅に有意差がなくなり、枝の成長に関しては十分な空間があればコンテナ苗と裸苗、また中苗と大苗の成長量の差は生じにくい可能性が示唆された。

裸苗とコンテナ苗の樹冠幅の差は、植栽時のものが3成長期を経てもほぼそのまま存在している。樹冠幅は枝の長さであり、葉の量と比例するため、樹高成長量や直径成長量にも影響を及ぼしている

と考えられる。そのため、コンテナ苗の育苗にあたっては初期の樹高成長を確実に確保するために、形状比を下げるだけでなく樹冠幅も裸苗に近づけることが求められる。

4 まとめ

大苗による下刈り年数短縮効果の検証及び植栽密度による林冠閉鎖年数の違いを明らかにするため、カラマツの大苗植栽、植栽密度試験を実施した。初期樹高はコンテナ中苗<裸中苗<コンテナ大苗<裸大苗の順であったが、裸中苗の平均樹高は2成長期目にコンテナ大苗を超えた。3成長期後における裸大苗及び裸中苗の平均樹高は南牧で200cm、佐久で150cmを超え、それぞれの競合植生より高くなった。現状ではコンテナ苗に比べて裸苗の方が大苗・中苗とも下刈り省力化に寄与すると考えられた。コンテナ苗の生産量は今後も増加することが見込まれるが、形状比が低く植栽後すぐに順調な樹高成長が見込める苗木にするよう、育苗技術の改良が望まれる。

競合植生との競合状態から下刈りスケジュールを決定し初期保育コストを試算した結果、地拵えをグラップルで行い、競合植生がササであった南牧では、裸中苗と裸大苗で下刈りが不要となり、従来に比べて7割程度のコスト削減が見込まれた。このように条件によっては無下刈りが可能となる一方で、競合植生の制御が困難な人力地拵え地では適切な下刈りを行う必要があり、伐採前から下刈り作業の人工の確保を検討しておく必要がある。

また、林冠閉鎖につながる樹冠幅の成長量は、

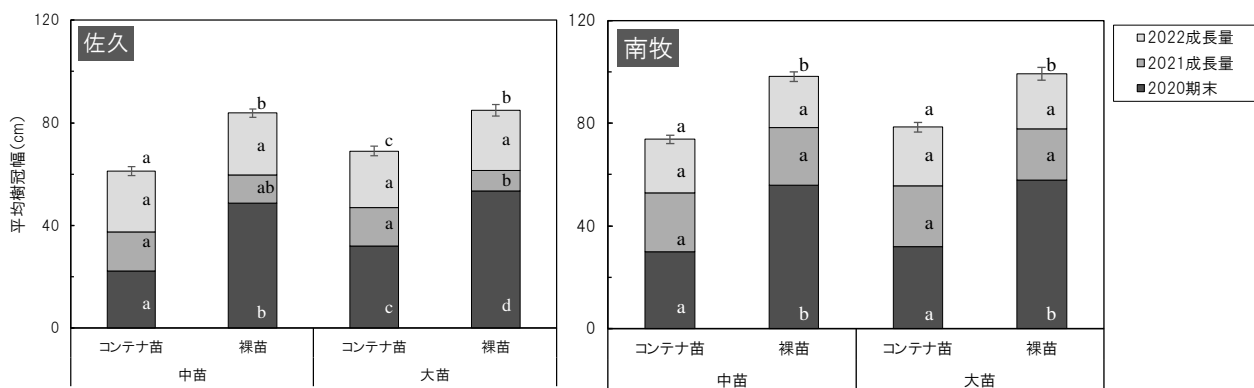


図-7 佐久市大曲国有林（左）、南牧村団体有林（右）におけるカラマツ植栽木の樹冠幅

※同一年において同一アルファベットを含まない試験区間に有意差あり（Tukey-Kramerの多重比較検定、 $p < 0.05$ ）

※エラーバーは標準誤差

※下刈りありエリアにおける成長量のみを対象とした

3成長期を経てもコンテナ苗は裸苗より有意に小さかった。林冠閉鎖が遅れることにより、除伐やつる切り作業の増加が懸念される。植栽本数を減らすことは、初期の活着率、生存率が少し下がるだけでも成立本数の大幅な減少を招きかねないため、今まで以上によりきめ細かな保育作業が必要となる。

再造林の低コスト化は林業採算性の改善に極めて重要であるが、収穫量が減少したり成林が危ぶまれたりしては本末転倒である。下刈りの省力化に関しても、植栽木と競合植生の競合状態を見極め、下刈りの要否を判断しなければならない。低コスト化とともに確実な成林を担保する技術の構築が今後も求められる。

謝辞

本研究の実施にあたっては、中部森林管理局、同東森林管理署、南佐久北部森林組合、双葉林業合資会社、長野県佐久地域振興局林務課、長野県林務部信州の木活用課の皆様にご多大なるご協力をいただきました。ここに感謝申し上げます。なお本研究は、農林水産省委託プロジェクト「成長に優れた苗木を活用した施業モデルの開発」の支援を受けて行いました。

引用文献

長野県林務部(2023)長野県民有林の現況. 195pp, オンライン, (<https://www.pref.nagano.lg.jp/rinsei/sangyo/ringyo/toukei/minyurin/documents/r5zenketugou.pdf>) 2024年1月31日参照.

小倉晃・小谷二郎・千木容(2014) グラップルを使用したスギ大苗の植栽事例ー石川県石動山県有林ー. 石川県林試研報 46:7-9.

大矢信次郎・斎藤仁志・城田徹央・大塚大・宮崎隆幸・柳澤信行・小林直樹(2016a) 長野県の緩傾斜地における車両系伐出作業システムによる伐採・造林一貫作業の生産性. 日林誌 98:233-240.

大矢信次郎・清水香代・小林直樹(2016b) カラマツの各種苗木における植栽後3年間の成長量とそれに及ぼす下刈り手法の影響. 中森研 64:19-20.

大矢信次郎・清水香代(2017) カラマツのコンテナ苗と裸苗の活着に及ぼす植栽時期の影響: 秋季植栽の検討. 中森研 65:9-10.

大矢信次郎・中澤昌彦・猪俣雄太・陣川雅樹・宮崎隆幸・高野毅・戸田堅一郎・柳澤賢一・西岡泰久(2018) 緩傾斜地から中傾斜地における機械地拵え作業の生産性とコスト. 森林学誌 33:15-24.

大矢信次郎・倉本恵生・小山泰弘・中澤昌彦・瀧誠志郎・宇都木玄(2021) 機械地拵えによる競合植生抑制効果と下刈り回数の削減. 森林学誌 36:99-110.

大矢信次郎・二本松裕太・田中裕二郎(2022) カラマツ大苗植栽による下刈り回数削減の可能性. 日本森林学会大会発表データベース 133:140, オンライン, (<https://cir.nii.ac.jp/crid/1390292472549874560?lang=ja>) 2023年1月31日参照.

大矢信次郎・二本松裕太・小山泰弘(2023) カラマツ植栽木の初期サイズが下刈り回数に及ぼす影響. 日本森林学会大会発表データベース 134:341, オンライン, (<https://cir.nii.ac.jp/crid/1390859215928586624?lang=ja>) 2023年1月31日参照.

林野庁(2020) 令和元年度低密度植栽技術の導入に向けた調査委託事業報告書. 323pp, オンライン, (https://www.rinya.maff.go.jp/j/seibi/sinrin_seibi/attach/pdf/R01mitudo-26.pdf) 2024年1月31日参照.

林野庁(2022) コンテナ苗の大苗化の手引き～残苗の活用と付加価値向上を目指して～. 11pp, オンライン, (<https://www.rinya.maff.go.jp/j/kanbatu/houkokusho/attach/pdf/syubyou-2.pdf>) 2024年1月31日参照.

島本美保子(1998) 世界の造林・育林費. 林業経済 51(4):1-10.

八木橋勉・中谷友樹・中原健一・那須野俊・櫃間岳・野口麻穂子・八木貴信・齋藤智之・松本和馬・山田健・落合幸仁(2016) 日林誌 98:139-145.

山川博美・重永英年・荒木眞岳・野宮治人(2016) スギ植栽木の樹高成長に及ぼす期首サイズと周辺雑草の影響. 日林誌 98:241-246.

カラマツ人工林の低コスト更新技術に関する研究

大矢信次郎

カラマツ (*Larix kaempferi*) は、高冷・寒冷地に適した樹種として長野県では古くから造林が奨励され、現在人工林面積の半分を占めるに至っている。近年は資源の成熟と旺盛な需要が重なり、カラマツ林業は活況を呈し始めた。しかし、長野県における4齢級までのカラマツ若齢林はカラマツ人工林面積のわずか0.3%に過ぎない。長野県が将来に渡ってカラマツ材を供給し続けていくためには、計画的に皆伐を行い、カラマツを再造林していくことが必要である。ところが、我が国の造林コストは世界の中で突出して高く、森林所有者の再造林に対する意欲を下げる要因となっている。現状では、主伐後の木材収入から伐出経費等を差し引くと、再造林を行うための資金は残らないため、再造林率は3~4割にとどまっている。造林コストが高い主な理由としては、造林は機械化による効率化が進んでいないことと、下刈り作業に多大なコストがかかっていることの2点が挙げられる。そのため本研究では、長野県を代表する造林樹種であるカラマツの再造林を推進するため、造林コストを削減するための技術を確認することを目的とした。伐採と造林の一貫作業システムによる造林の機械化を検証するとともに、造林の中で特に労働強度が高い地拵えの機械化による生産性の向上とコスト削減効果を評価した。さらに、機械地拵えが及ぼす土壌攪乱によって競合植生の抑制がどの程度期待でき、下刈り回数をどの程度削減可能であるのか明らかにした。これらにより、地拵え、植栽、下刈りに至るまでの人工林の造林コストをトータルで削減する低コスト更新作業モデルを構築することを目指した。その内容は以下のとおりである。

- (1) 長野県内の緩傾斜から中傾斜の林分において造林の機械化を図るため、車両系林業機械による伐採と造林の一貫作業システムの検証を行い、収穫技術（伐倒、木寄せ、造材、集材）と更新技術（地拵え、苗木運搬、植栽）の各工程における生産性を調査した。その結果、収穫技術におけるシステム全体の労働生産性は14.8~24.0 m³/人日となり、20m³/人日程度の生産性が期待できることが判明した。また更新技術においては、機械地拵えの生産性は人力地拵えを大きく上回り、コストは従来の25~75%に低減され、フォワーダにより苗木運搬コストは約73%に低減された。コンテナ苗の植付け生産性は裸苗のそれより有意に高かったが、植栽コスト全体では苗木価格の差により裸苗の方が低かった。
- (2) 長野県の皆伐地4か所の緩傾斜地から中傾斜地において、バケットおよびグラップルによる機械地拵えを行い、その生産性とコストを人力地拵えと比較した。両機械による地拵えの労働生産性は、同試験地・同傾斜の人力作業と比較して約2~12倍に向上し、コストは14~90%に低下した。また、伐採前の林況から皆伐後の枝条量を推定し、バケット及びグラップル地拵えの生産性とコストを予測することにより、林況に合わせた地拵え方法を選択することが可能となった。
- (3) 機械地拵えによって競合植生を抑制し、下刈り回数を削減することが可能か検証するため、バケット及びグラップルによる機械地拵えと人力地拵え、無地拵えの4つの試験区を3か所設定し、地拵えの違いが競合植生と植栽木の成長に与える影響を調査した。植栽木周辺における競合植生の被度と最大植生高、被圧された植栽木の割合は、いずれもバケット地拵えで最も低くなり、グラップル地拵えがそれに続いた。植栽木の生存率は、バケット及びグラップル地拵えでは植栽3年目においても高い状態を維持し、無地拵えと人力地拵えでは低下する傾向がみられた。
- (4) 以上の結果を総合的に判断すると、以下の個別技術の採用がカラマツ人工林の低コスト更新作業モデルとして妥当と考えられた。①皆伐後、速やかにバケットまたはグラップルによる地拵えを行う。②直近の適期（晩秋または春）に裸大苗を植栽する。③下刈りは競合状態を見極め2~3回程度に削減する。これらの方法によって、地拵えから下刈りまでの再造林コストは、従来と比較してバケット地拵えでは約1/2に、グラップル地拵えでは約2/3に抑制されると試算された。また、これにより作業人工は約5割~6割減となり、それらの労働力を他の造林地に振り替えることで再造林を一層推進することが期待できる。
- (5) 今後の課題として、本研究の低コスト更新作業モデルを適用可能な地域、樹種等を拡大し、長野県以外でも適用可能な技術に発展させることが望まれる。

キーワード：伐採・造林一貫作業、機械地拵え、生産性、コスト、下刈り回数削減

本論文は信州大学博士学位論文である。

目次

緒言

- 研究の背景と目的
- 研究の方法と流れ
- 研究小史
- 研究の意義

第1章 更新コストの理論的検討

- 1.1 既往のカラマツ人工造林における更新コスト
 - 1.1.1 地拵え
 - 1.1.2 植栽
 - 1.1.3 下刈り
- 1.2 造林の機械化の意義
 - 1.2.1 地拵え
 - 1.2.2 植栽
 - 1.2.3 下刈り
- 1.3 高コスト要因の抽出と低コスト化のための方策
 - 1.3.1 地拵え
 - 1.3.2 植栽
 - 1.3.3 下刈り
- 1.4 本研究における低コスト更新技術の適用条件

第2章 伐採・造林一貫作業による伐出及び造林コストの低減

- 2.1 伐出作業の生産性
 - 2.1.1 調査地
 - 2.1.2 生産性の評価方法
 - 2.1.3 伐出作業の各工程における生産性
- 2.2 再造林作業の生産性
 - 2.2.1 生産性の評価方法
 - 2.2.2 再造林作業の各工程における生産性
- 2.3 伐採・造林一貫作業のトータルコスト
- 2.4 小括

第3章 地拵え作業の機械化による地拵えコストの低減

- 3.1 地拵えの労働生産性
 - 3.1.1 地拵え試験地の設定
 - 3.1.2 枝条量の算定
 - 3.1.3 バケット地拵えの生産性
 - 3.1.4 グラップル地拵えの生産性
 - 3.1.5 人力地拵えの生産性
- 3.2 地拵えのコスト
- 3.3 伐採前林況による地拵えコストの推定
- 3.4 小括

第4章 機械地拵えによる競合植生抑制と下刈りコストの低減

- 4.1 地拵え方法と競合植生の関係
 - 4.1.1 試験地の設定
 - 4.1.2 被度及び最大植生高の推移
 - 4.1.3 競合状態の推移
- 4.2 地拵え方法と植栽木の生存率及び成長の関係
 - 4.2.1 生存率
 - 4.2.2 樹高
- 4.3 一般化線型モデルによる競合植生と植栽木の関係解析
 - 4.3.1 樹高成長率
 - 4.3.2 競合状態 C4 の割合
- 4.4 小括

第5章 総合考察

- 5.1 伐出
- 5.2 地拵え
- 5.3 植栽
- 5.4 下刈り

結言

謝辞

引用文献

緒言

研究の背景と目的

カラマツ (*Larix kaempferi*) は、長野県を中心とする本州中部から北関東、東北南部の高標高域に天然分布する、日本の主要造林樹種のひとつである。長野県では、高冷地、寒冷地に適した樹種として古くから重用され、寛永年間 (1624~1644 年) には現在の南佐久郡川上村において幕府の天領として数百町歩に及ぶ大面積造林が山引き苗によって行われている (長野県内務部 1929)。天保年間 (1830~1843 年) には、現在の松本市今井において日本で初めてカラマツ実生苗の養苗技術が確立し (今井 1978a)、明治期以降は北佐久、南佐久地域等でもカラマツ苗の生産が始まった (大井 1978)。以後、長野県ではカラマツの造林が奨励され、東信、中信地域を中心としてカラマツ人工林の造成が進んだ。さらには、長野県産のカラマツ苗木や種子が北海道や東北、関東、中部等の国内各地はもとより、朝鮮、樺太、満州、欧米等の海外にまで出荷されてきた (今井 1978b) ことから、長野県は「カラマツのふるさと」と言っても過言ではない。

戦中の乱伐期を経て、戦後は造林未済地の解消や拡大造林によってさらにカラマツ人工林の造成が進み、現在は長野県の民有林人工林面積の半分を占めるに至っている (長野県林務部 2021a)。そして現在、その蓄積は有史以来の最大値を毎年更新し、2021 年 9 月現在の長野県民有林におけるカラマツの蓄積は 5000 万 m^3 を超えた (長野県林務部 2021a)。また、長野県のカラマツ人工林の林齢構成は、12 齢級以上が面積割合で約 8 割に達しており、木材として十分利用可能な径級に成長している。近年は、2000 年代から始まったロシアのカラマツ丸太輸出関税引き上げの影響を受け、針葉樹合板の国産材化の動きが急拡大し (秋山 2013)、カラマツ材はスギ等と比較して強度が高い (中井・山井 1982) ことから合板用材としての需要が急速に高まった。2020 年のカラマツ中丸太の年平均価格はヒノキやスギを上回る 14,300 円/ m^3 となっており (長野県林務部 2022)、現在の長野県のカラマツ林業は資源の成熟と旺盛な需要が重なり、活況を呈している。そのため長野県では、今後もカ

ラマツの主要産地として安定的にカラマツ材を供給していくことが求められている。

しかし、近年の長野県における新規のカラマツ人工林の造成は滞っている。4 齢級までのカラマツ若齢林の面積割合は 2021 年現在で 0.3% (長野県林務部 2021) に過ぎず、次世代の若いカラマツ林の育成が進んでいない。カラマツは根株心腐病に罹病しやすく、スギやヒノキほど長寿命ではないことから、長伐期施業を行うことにはリスクを伴う樹種である (奥村 1988)。そのため、長野県が将来に渡ってカラマツ材を供給し続けていくためには、計画的に皆伐を行い、カラマツを再造林していくことが必要である。

ところが、カラマツの再造林を進める上で支障となっているのが、日本の高い造林コストである。我が国の造林・育林コストは 1ha 当たり 200 万円以上であるのに対して、開発途上諸国では 10 万円以下、欧州や北米など先進諸国においても 50 万円以下であり、日本の造林コストが諸外国と比較して突出して高いことが指摘されている (島本 1998)。高い造林コストは、林業の収益性を圧迫し、森林所有者の所得を下げる要因となっている。林野庁の試算 (2021a) によると、50 年生スギ人工林を主伐した場合、木材販売による 1ha 当たりの収益約 318 万円から伐出・運材・流通等の経費を差し引くと、森林所有者に残る利益は約 91 万円である。それに対して、地拵えから下刈りまでの造林初期費用の総額は約 2 倍の 184 万円に及んでいる。これでは明らかに林業経営は成り立たないため、多くの森林所有者は所有林への投資意欲を失うであろう。結果として、全国の主伐後の再造林率は 3~4 割程度にとどまり、再造林放棄地が増加している (林野庁 2021a)。国や都道府県、市町村の補助金を活用することによって、実質的な造林費用は 3 割以下に圧縮されるが、それにもかかわらず再造林率が低迷しているということは、森林所有者の林業に対する期待が減退しているためと考えられる。また、林業を産業として成立させるためには、補助金がなくとも利益が出る構造にしていかなければならず、特に膨大な費用がかかっている造林コストを極力減らすことが重要である。

では何故、日本の造林コストは高いのであろうか。その理由として第一に挙げられることは、機

械化による効率化が進んでいないことである。造林は取り扱う対象物が比較的小さく人力で対応可能な作業が多いことによるが、地拵えに関しては末木枝条や端材等の重量物を集積する重労働であるにも関わらず、機械化は進んでいない。また、地拵え以降の植栽、下刈り、除伐、つる切り等の初期保育作業に関しても機械化等による効率化が遅れており、他国と比較して高コストであることが指摘されている（寺岡 2009）。

高い造林コストの第二の理由として、造林コストのうち下刈り作業が 4～5 割程度を占め（山田 1999, 林野庁 2021a）、多大な費用がかけられていることが挙げられる。日本の国土の多くが夏季に高温多雨となる温暖湿潤気候下にあり、植栽木と競合する植生が旺盛に繁茂するため、我が国において人工林を成林に導くために下刈りは極めて重要な作業である。しかしながら、林業に従事する労働者は減少傾向にあり、特に育林従事者の減少が著しい（林野庁 2019）うえ、特に下刈りは夏季に集中して行われるため作業適期が短く、殊更作業人員の確保が困難である。また、高温多湿の中の重労働であり労働強度が非常に高いこと、熱中症や怪我、蜂刺され等の労働災害リスクも高いことなど、労働条件も厳しい。今後増加する再造林地において、これまでと同様、各造林地において植栽後合計 5 回程度の下刈りを行う体制を維持することは、実務的にも困難な状況にある。

このような高コスト林業の現状を改善するため、近年、皆伐と再造林を一連の作業として再構築した一貫作業システム（以下、「一貫作業」という）が九州や四国、北海道などで試行されている（今富 2011, 森林総研 2012, 森林総研 2013, 森林総研 2015a, 佐々木 2014）。一貫作業は、主伐と造林を連続的に行い、これまで機械化が遅れていた造林に伐出機械を投入することで効率化を狙ったものである。例えば、作業道開設や土場造成等に使用した油圧ショベル（以下、「バケット」という）や、伐出やはい積み等に使用した木材グラップル（以下、「グラップル」という）を地拵え作業に利用し、集材に使用したフォワーダを苗木や獣害防除資材等の運搬に利用することなどが提案されている。これらによって、これまで人力によることが多かった造林の各種工程が機械化され、効率化、

省力化が進むことが期待されている（林野庁 2017a）。しかし、一貫作業の各工程の生産性やコストを調査した事例は少なく、皆伐・再造林に要する費用がどの程度削減されるのか、明らかになっていない。特に、地拵えの機械化はコスト削減効果が比較的大きいとされている（佐々木ら 2013）が、機械地拵えの生産性については研究例が極めて少ない。

また、下刈り作業削減の観点から考えると、機械による地拵え作業は天然更新を誘導するために行われてきた地表処理作業に類似した面を持ち、競合植生を抑制できる可能性がある。このことは、下刈りの回数を減少させられる可能性があることを示しているが、機械地拵えによって植栽木や競合植生の成長がどのような影響を受け、下刈り回数をどの程度減らすことができるのかについては、検討例がほとんどない。

以上より、本研究の目的は、長野県を代表する造林樹種であるカラマツに着目し、今後の再造林を推進するため、皆伐作業法における造林コストの削減を実現する低コスト更新作業モデルを提案することにある。

研究の方法と流れ

本研究では、次世代のカラマツ人工林を低コストで育成するための技術的確立を目指していることから、既往の造林技術体系におけるコストを整理するとともに、伐出から地拵え、植栽、下刈りまでの一連の更新作業を最適化するべく調査を行った。

1. 更新コストの理論的検討

これまでのカラマツ人工林における施業体系において、どの程度の更新コストがかかっていたのか整理し、造林を機械化することの意義、高コスト要因の抽出と低コスト化のための方策について述べる。また、本研究における低コスト更新技術の適用条件について定義する。

2. 伐採・造林一貫作業による伐出及び造林コストの低減

造林の機械化を図ることを目的として、一貫作業システムによる主伐・再造林の生産性とコストを明らかにするため、試験地を複数か所設定する。伐倒、木寄せ、造材、集材、地拵え、苗木運搬、

植栽の各工程をビデオ撮影により時間観測し、各工程で処理した材積、面積、本数から生産性を算出するとともに生産コストを算定し、従来型の更新作業と比較、考察する。

3. 地拵え作業の機械化による地拵えコストの低減

これまで機械化の調査事例が少なかった地拵え作業について標準的な生産性とコストを明らかにするため、長野県内各地に試験地を設定し、バケット、グラップル、人力の3区分においてビデオ撮影による工期調査を行う。また、伐採前の林況から地拵えコストを予測するため、バケット地拵え及びグラップル地拵えの生産性と傾斜、枝条層積との関係について多変量解析を行う。

4. 機械地拵えによる競合植生抑制と下刈りコストの低減

機械地拵えの副次的な効果として期待される競合植生の抑制について明らかにするとともに、機械地拵えが植栽木の成長に及ぼす影響を解明するため、バケット、グラップル、人力、無地拵えの各地拵え区分において、植栽から2年目、3年目の競合植生の最大高、被度、競合状態と植栽木の成長量を調査する。また、地拵え区分ごとの植栽木の成長量と競合植生の状態の関係を明らかにするため、一般化線型モデルを用いた解析を行う。

5. 機械地拵えを軸とした低コスト施業モデルの提案

以上の研究結果を総合的に考察するとともに、従来の更新作業に対して一貫作業と機械地拵えを軸とした更新作業を比較・検討する。

研究小史

ここでは、研究の背景にある既往の研究成果の概要と現在の課題をとりまとめる。まず、一貫作業システム的前提となる高性能林業機械を使用した皆伐の生産性に関する研究を取り上げる。次に造林の機械化に関する研究に関して、地拵え作業の機械化と植生への影響について取り上げ、植栽から下刈りまでの機械化の事例、そして造林コスト及び低コスト更新モデルに関する研究例について述べる。

1 皆伐作業における高性能林業機械による車両系作業システムの生産性とコストに関する研究

現在、かつて行われてきた「拡大造林」のよう

に天然林を伐採したり原野などを切りひらいたりして造林を行うことはほとんどない。大半は人工林を伐採して改めて造林を行う「再造林」である。再造林を行うにあたっては、まず主伐を行う必要があるが、近年は間伐を行うことが重視され、主伐を行うことが非常に少なかった。そのため、高性能林業機械が導入されて以降の主伐、殊に皆伐作業の生産性の把握は進んでいない。本節では、車両系林業機械による一貫作業システムを正しく理解するために、造林の機械化を論ずる前段階としての伐出の機械化と低コスト化について概論を述べる。

高性能林業機械は、「従来のチェーンソーや刈払機等の機械に比べて、作業の効率化、身体への負担の軽減等、性能が著しく高い林業機械」と定義され（林野庁 2021b）、1980年代後半から北海道を中心に導入され始めた。拡大造林期に植栽された林分における間伐が本格化した1990年代以降に普及が進むにつれて各種高性能林業機械を使用した間伐作業の工期調査が全国各地で進められ、標準的な生産性がとりまとめられた（全国林業改良普及協会 2001）。

一方、高性能林業機械が導入され始めた頃には既に主伐が急速に減少しており（林野庁 1994）、これらの機械を使用した皆伐の生産性については調査例が少ない。谷山ら（2008）は、ハーベスタを利用した小面積皆伐では従来型作業システムに比べて生産性が1.4~1.6倍向上したと報告している。秋田県農林水産部（2008）の調査によると、高性能林業機械の車両系作業システムによる皆伐作業の労働生産性は9~10 m³/人日であり、旧作業システム（集材機+チェーンソー造材）の3 m³/人日を3倍程度上回り、コストは約4割削減された事例を紹介している。兵庫県の調査（2008）では、皆伐作業の労働生産性は従来型の架線集材（集材機集材+プロセッサ造材）で2.6 m³/人日であったのに対して、車両系作業システム（グラップル集材+プロセッサ造材）では19.1 m³/人日であり、生産性に7倍もの差があった。このように、傾斜の違いはあるにしても高性能林業機械、殊に車両系作業システムは、高密路網と組み合わせることにより近年急速に生産性を向上させていることが皆伐においても明らかになりつつある。しかし、

舟木・杉原（2012）の調査では、車両系作業システムによる皆伐作業のシステム全体の労働生産性は3.6 m³/人日であり、条件によっては皆伐であっても生産性が上がりにくいことが示唆されている。

また、システム全体ではなく個々の作業工程で考えると、皆伐において間伐より生産性が向上する工程は伐倒と木寄せと考えられる。伐倒は、皆伐であれば開放空間に伐倒方向を定めることが可能な場合が多いため、掛り木が生じにくいという利点がある。また、木寄せに関しても、皆伐地では寄せる際に障害物となる立木がないことから、グラップルが比較的自由に走行でき、ウインチで引く際にも立木を避ける必要がないため効率的と考えられる。これらの特徴は、列状間伐の作業工程と類似していることから、列状間伐の生産性を調査した事例をみると、木幡（2001）は列状間伐を1伐2残、2伐2残等の伐採列パターンごとにフェラーバンチャによる伐倒、グラップルスキッドによる木寄せ等の生産性を調査し、伐採列が広い方が伐倒、木寄せとも生産性は向上することを示した。水田ら（2008）も同様に2列伐倒の方が1列伐倒より生産性が高いことを報告している。これらのように列状間伐の伐倒生産性については、伐採幅が広い方が伐倒生産性は高いことから、皆伐においてもこの傾向がより支持されるものと考えられる。

以上のように、高性能林業機械による皆伐作業の労働生産性に関する研究は途上段階にあり、作業工程ごとのデータの蓄積が必要である。皆伐におけるプロセッサによる造材やフォワーダによる集材作業については、間伐と比較して出材量こそ異なるものの現場の条件は類似しているため、生産性はほぼ同等と考えられるが、皆伐では伐倒時の掛り木が生じにくいこと、木寄せ時の残存木損傷回避の必要性が大きく軽減されることなどが推察される。これらについては特に重点的に調査事例を積み重ね、各種条件に応じた生産性を明らかにすることが必要である。

2 造林の機械化に関する研究

2-1 地拵え作業の機械化と植生への影響

地拵え作業は、植栽や下刈りに時に支障となる林床に散乱した末木枝条や造材端材の収集と集積、植生の状況によっては刈払いも含めた作業であり、

重量物の運搬を伴う。人力による地拵えは、末木枝条等を持ち運べるサイズにチェーンソー等で切断しながら、等高線方向に棚状に集積し、中～急傾斜地では斜面下方への地拵え棚の落下を防ぐために現地発生材による杭打ちを行うなど、労働強度の高い作業である。それゆえ地拵えの機械化に関する研究は1960年代から進められてきた。

Yamawaki et al. (1966) は、北海道においてクローラ式トラクタに装着したロータリカッタにより地拵え及び下刈りを走行刈払いにより行った結果、刈払い機と比較して数倍から10倍の作業能力があることを示した。山口ら（1992）もエクスカベータに装着したロータリー方式のブラッシュカッターにより不成績造林地の地拵えを行い、地拵えの生産性が人力に比べ7.5倍向上し、コストは約4割減少したと報告している。北海道名寄林務署の調査報告（1984）では、ブルドーザによるレーキ地拵えを行い、その後レーキをリッパーに換装し耕耘を加えることで植栽木（トドマツ・アカエゾマツ）の成長が促進されたとしている。山田（1996）は、地拵えの機械として「地表植生や堆積物を除去するもの」としてロータリーカッタやフレイルモア、マルチャなど、「地表を耕耘するもの」としてスカリファイア、トラクタに装着したレーキ、マウンダなど北欧の事例も交えながら紹介している。

以上はいずれも北海道の緩傾斜地において林内走行が可能な機械であるとともに、林床にチシマザサ等の稈の高いササが密生する北海道特有の植生に対応するものであるため、国内では北海道以外に用いられる例は少ない。また、これらの地拵えは皆伐後数年が経過した林地を対象にしている場合が多く、著しく回復した植生の除去に重点が置かれ、刈払い作業を伴うことが大半である。一方、一貫作業における地拵えは、伐出作業直後であるため植生が回復していない状態で行うことから、枝条整理に特化した作業となる。こうした地拵えの形態はこれまでの日本林業にはなく、功程を明らかにした研究事例は極めて少ない。

また、国内各地で作業道開設や伐出作業時に稼働するバケットやグラップルなどの広く普及した汎用性の高い機械による地拵え例もほとんど例がない。近年試行が始まった一貫作業システムの中

では、グラップルによる地拵えで1~3人日/ha、人力地拵えで14人日/haと報告されている(森林総研2013)が、調査事例が少なく標準的な生産性は明らかになっていない。今後、傾斜や枝条の量等に応じた生産性の解明が必要である。

また、地拵え方法が林地の植生に与える影響については、日本においてこれまで研究例がない。類似した事例としては、天然更新誘導のための地表処理(地表かき起こし、地かき、地がきなどと同義)があり、A₀層~A層土壌、場合によってはB層まで土壌を剥ぎ取る、処理強度が強いものである。斎藤・斎藤(1983)は、北海道の亜高山帯における天然更新を目的としてブルドーザにレーキを装着しチシマザサの根系を表土とともに剥ぎ取った施業地で1~9年後の更新状況を調査し、ダケカンバ等が良好に更新していることを報告している。この地表処理はレーキによるチシマザサの根系除去が主な目的であり、ササの再生を抑制する効果があったとしており、ブナでも同様の事例(小山ら2000、長坂・今2002)がある。これらはいずれも天然更新誘導のために地表処理が行われ、競合植生であるササ類を除去するための技術として実施されている。

一方、海外の研究例では、カナダのオンタリオ州北西部において、機械地拵えによる腐植層の除去と鈳質土壌の露出、またそれらを混合して耕耘するなど様々な攪乱状態の各マイクロサイトにおける植生タイプごとの増減を類型化し、植栽あるいは天然更新による樹種ごとの更新手法を整理した報告があり、腐植層が除かれた場所ではシードバンク由来の木本類や腐植層に根を張る草本類、低木類の個体数が減少する、としている(Sutherland and Foreman 1995)。また、Löf et al. (2011)は、スウェーデンにおいて機械地拵えは多くの場合植栽木の生存と成長の改善につながるとし、土壌攪乱の多い集中的な方法を使用しないと競合植生を制御するには効果的ではないと述べている。Smith et al. (2021)は、オーストラリア南部において数種の地拵え試験を行った結果、表土の除去(表層50mm)が競合植生を減らす最も効果的な方法であり、同時に植物が利用可能な養分も減少したことを示している。これらの報告はいずれも日本より競合植生が少ない地域における

結果ではあるが、少なくとも腐植層あるいは表土を除去することが競合植生を減少させることが示されていることから、日本においても同様の手法により下刈り回数を削減できる可能性はあると考えられる。

以上のように、我が国において機械や人力による各種の地拵えが競合植生の再生及び植栽木の成長にどのような影響を及ぼすのか調査、研究した事例はこれまでにない。そのため本研究では、これらの地表処理の技術を長野県の人工植栽予定地に適用し、伐出機械による地拵えを下刈り軽減の目的で意図的に行うことによって、ササに限定することなく様々な競合植生がどの程度抑制され、下刈りをどの程度削減できるのか否かという観点で調査を行った。

2-2 植栽、下刈り作業の機械化

造林過程の中では植栽以降、取り扱う対象物が苗木や競合植生といった比較的小型で軽量なものであり、確実に活着を図ることや誤伐等を防ぐことに重点が置かれるため繊細な判断と動作を要する。そのため、造林は人力に頼ることが必然的に多かった。造林用機械の研究は多くないものの、以下の例がある。

植栽時の植え穴を掘る機械については、昭和30年代から検討されてきた経緯がある。当初は、海外から輸入された2人で運搬、操作するものが主流であったが、山脇ら(1962)は刈払い機のエンジンを流用した1人用の可搬式植え穴掘り機を開発した。瀧本ら(1983)は、自走式の小型植穴掘機の諸性能を評価した結果、緩傾斜地における植穴掘り作業に適し、最大75本/人時の生産性であったことを示した。近年、コンテナ苗の登場により植え穴は苗の根鉢サイズ程度で済むようになってきており、ディブルやスピードといった手動の専用器具が普及し始めている。石礫が多いなど硬度の高い土壌で、人力では掘削が困難な林地では、機械による植え穴掘りが今後も必要と考えられ、更なる小型、軽量化が求められる。また、山田ら(2008)は小型のエクスカベータをベースマシンとしたコンテナ苗自動耕耘植え付け機を開発し、緩傾斜地において植え穴掘り、耕耘、コンテナ苗の自動供給、植え付け、転圧の一連の作業を機械化した。今後は、中傾斜~急傾斜地への適用拡大

が期待される。

続いて下刈り用の機械について、中村ら(1963)は下刈り作業において従来使用されていた手鎌による作業と当時導入され始めた刈払い機の労働量及び身体的負担を調査した。その結果、付帯作業を含めた作業能率は機械作業の生産性が手鎌の約1.4倍であったが、生理的機能や血液状態、体温上昇、体重変動等の面から身体的負担が大きいと判断された。この原因としては、14.5kgもの原動機を背負っての作業であったこと、機械の発動に手数を要するため中断休止が容易でなかったことなどを挙げている。沼田(1971)は、下刈りにおける刈払い機の振動や騒音を抑制するため電動ロータリー刈払機を使用し、効率よく作業できる電流及び電圧を検討している。また、山本ら(1989)は、下刈り作業において鎌と刈払い機について作業者の生理負担を調査した結果、作業工程は機械作業の方が良かったが、単位時間あたりの心拍数、エネルギー代謝率は両者に差がなく、強労働から激労働の範囲にあるとした。これらの下刈り用の刈払い機は、林業だけでなく農業や家庭用など用途が広いため、用途に応じた様々な出力の製品、刈刃が開発され、さらに小型軽量化、低騒音低振動化、低燃費化等が進み性能が飛躍的に向上するとともに低価格化したことにより、現在では広く普及するに至っている。

急傾斜・不整地に対応した新たな造林機械の開発では、村山・酒井(1991)はベースマシンとして4脚走行機を理論的に検討し、佐々木ら(1997)はクローラ型台車3台を三芒星形状に連結したTri-Track Moverを開発し、優れた走行性を確認した。またIwaoka et al.(2001)は、造林に有効と考えられる小型の半脚式機械を開発するため、歩行脚機構を駆動トルクと消費エネルギーの観点から検討している。鈴木(1990)は、それまでの造林用機械の変遷を述べるとともに、試作段階にある機械として、根株小径木等を粉碎可能な地拵え用機械である林内用根株小径木処理機や、運転席を水平に保ちながら走行し、植穴掘り、刈払い等の作業がアタッチメントの取り付けにより可能な林内走行車、下刈りや地拵え等の林内刈払い作業を無線操縦により行う簡易トラクタ型刈払機、緩・中傾斜地で植付け作業が1人で可能な自動植

付け機などを紹介している。

これらの既往研究により、様々な造林用機械が検討、試作され、市販されるに至った製品もあったが、2010年代半ば時点において一般に普及している機械はチェーンソーと刈払い機以外にはほとんどないのが現状である。このことから、主に軽量物を扱う造林では、人力作業の簡便さや細やかさ以上の価値を見出す機械の開発は非常に難易度が高いことが伺える。また、結果として普及には至らなかった機械であっても、近年林野庁の補助事業として開発が進められている根株切削機能や下刈り機能を有する多目的造林機械(渡辺2020)などには既往研究の設計思想が引き継がれている。今後は、新たな造林機械を導入するための諸条件を整理し、地拵え方法や植栽密度、植栽間隔などの最適化を図る必要がある。

3 造林コスト及び更新モデルに関する研究

世界の中で日本の造林・育林コストが突出して高いことは島本(1998)により指摘されているが、それ以外に造林コストそのものに言及している研究例は極めて少ない。また、造林コストを最適化するための更新モデルを提示した研究例も少ないが、近年少しずつ散見され始めた。鹿又(2013)は、九州南部における一貫作業システムの実証研究に基づくシミュレーションにより、一貫作業による造林の機械化、初期成長が良好な苗木を使用し下刈りを3回程度に抑えられれば現状の地拵え～下刈りまでの造林コストは現状の50%程度に抑えられるとしている。また鹿又・天野(2016)は、東北地域における低コスト造林の実証研究において、低密度植栽や下刈り回数の削減により従来に比べて4割以上コスト削減が可能と試算している。これらの研究により、日本の人工造林における低コスト更新作業モデルは一定の成果を上げつつあるが、地拵えの機械化に伴う競合植生の抑制を利用した下刈り回数の削減はモデルに組み込まれておらず、最新の研究成果を取り込んでいく必要がある。

研究の意義

本研究は、背景で述べた造林コストが高い要因である「造林の機械化の遅れ」及び「下刈りコストの割合が高い」ことに着目し、造林における各

作業工程の機械化を検討する。そのためには、造林の機械化の前提条件となる一貫作業システムの生産性評価を行うとともに、伐出機械が造林の各工程に使用することが可能であるのか検証する必要がある。また、造林の各工程の中で最も重量物を扱う地拵えについては、特に機械化による効率化・軽労化が求められているため重点的に調査を行い、地拵え方法ごとの生産性とコストを評価しなければならない。また、地拵えの機械化がもたらす競合植生の抑制についてはこれまでに研究例がなく、どの程度植栽木の被圧が回避され、下刈り回数を削減することが可能であるのか、明らかにする必要がある。

以上により、本研究では一貫作業システムで使用する機械のうち造林の各工程、特に地拵えに適した機械は何であるのか、それらによって下刈りはどの程度削減することが可能になるのかを検討し、総合的に評価することにより、トータルとして造林コストの削減を実現する低コスト更新作業モデルを提案する。本研究の成果により、カラマツ人工林の造林コストがどこまで削減できるのかを明示することが可能となり、カラマツ再造林の更なる推進に寄与することが期待できるであろう。

第 1 章 更新コストの理論的検討

1.1 既往のカラマツ人工造林における更新コスト

これまで、わが国では森林の更新に際して人工造林、殊に針葉樹人工林の造成が進められ、地拵え、植栽、下刈り、つる切り、除伐、枝打ち、保育間伐といった造林の流れに沿って施業が行われてきた。長野県では、寒冷、高冷地に適した樹種としてカラマツの造林が奨励され、最も古くは寛永年間（1624～1644）に川上村で幕府の天領として数百町歩にわたる植林が行われている（長野県内務部 1929）。カラマツ人工林施業に関しては、長野県民有林 カラマツ・スギ 林分材積表・収穫予想表（長野県林務部 1983）、カラマツ間伐の手引き（長野県林務部 1986）、複層林造成の手引き（長野県林務部 1989）、長野県民有林カラマツ人工林長伐期施業の手引き（長野県林務部 1991）等が作成され、施業体系が形成されている。しかしこれらは間伐期以後の施業体系であり、本論文で取り扱う地拵えから植栽、下刈りまでの初期保育作業に関しては、スギやヒノキの造林技術に準じて行われてきた。本節では、これまで行われてきた地拵え、植栽、下刈りの各工程についてその目的と一般的な作業方法を整理するとともに、長野県のカラマツ造林における標準的なコストを定義する。

1.1.1 地拵え

更新作業は伐出跡地において散乱した末木、枝条、造材端材等を整理し植栽を可能な状態にするための地拵えから始まる。皆伐等の伐出作業は秋季から冬季にかけて行われ、直近の春に植栽するために地拵えを行うことは時間的な制約や積雪等のため困難であり、翌年の春の植栽に備えて秋に地拵えを行うことが通常の流れであった。伐採から一夏経過しているため、既に植生が一定程度回復していることから、刈払いを行いながら枝条整理を行わざるを得ない。また従来の地拵え作業では、機械を使用する場合でも手持ち機械に限られ、再生してきた植生を整理するための刈払い機や、伐出作業の後に長尺のまま放置された末木枝条、造材端材等を人力で運べるサイズに切断するためのチェーンソーを使用することはあっても、造林

地に大型の重機を搬入することは少なく、専ら人力に頼るものであった。集めた枝条等は等高線に平行になるよう筋状に集積し、傾斜地においては落下しないよう現場発生材を用いて杭打ちを行っている。

このように、従来の地拵え作業は、植栽や下刈り等の作業の利便性を重視する一方、伐出作業後に植生が回復する前に地拵え、そして植栽を行うことで下刈り作業自体を削減するという考え方はなかった。地拵えの機械化に関しても、路網整備の遅れや林内走行への抵抗感などから、緩傾斜地であっても人力で行ってきた経緯がある。一貫作業システムは伐出作業後直ちに伐出機械を用いて地拵えを行うことを実現する作業システムであり、地拵え作業の機械化による生産性の向上と低コスト化の実証が望まれる。

以上により、標準的に行われている人力による地拵え作業のコストは、長野県林務部（2018）により特殊作業員と普通作業員を1ha当たり各8.5人で刈払いと枝条整理を行うよう設定されており（表1-1）、占有植生に応じた補正による増減はあるものの標準的には約370千円/haの person 費が計上されている。労務単価は長野県林務部（2021b）を適用した。なお、本論文で述べるコストは直接費であり、間接費は含んでいない。

表 1-1 標準的なカラマツ造林コスト

作業種等	人工数等・単位	単価	諸雑費率	計 (千円/ha)	備考
地拵え	刈払い:8.5 人/ha 整理:8.5 人/ha	22,900円/人日 ^{※1} 19,800円/人日 ^{※2}	2%	370	
植付け	植付け:0.4 人/100本	19,800円/人日 ^{※2}		187	
苗木代	2,300 本/ha	86円/本 ^{※3}		198	
下刈	刈払い機:6.8 人/ha 下刈用鎌:0.8 人/ha	22,900円/人日 ^{※1} 19,800円/人日 ^{※2}	2%	175 (×5回)	1回/年 × 5年

※1 特殊作業員
※2 普通作業員
※3 長野県苗組(2020)のカラマツ裸苗、中規格の単価
(計 1,630)

1.1.2 植栽

長野県におけるカラマツ造林は、天保年間(1830～1844)に松本市今井でカラマツ種子からの育苗技術が確立されて以降、明治期には佐久地域でもカラマツ種苗生産が定着し、大規模な造林が始まった。植栽密度については、明治20年代から大正初期にかけては平均3000本/haを超えていた(長野県1978)が、その後徐々に減少傾向となり、昭

和40年代に入ると労働力の不足や小径材の売れ行き不振などの要因により2200本～2500本/haの密度が目標とされ(長野県1978)、現在でも長野県民有林における地域森林計画では2300本/haが標準の植栽密度とされている(例えば、長野県2022)。このことは、植栽密度を下げることによって苗木代や植栽費用を削減することにも貢献することになり、現代の低密度植栽を推奨する議論にも通じている。今後も保育間伐の省略等を見据えた低密度植栽技術の確立が待たれるところである。また、苗木の植栽にかかる人工に関しては単位時間当たりの植栽本数によるところが大きいが、近年は植栽効率に優れたコンテナ苗の生産が普及しつつある。コンテナ苗は縦長に形成された根鉢を持ち、いわゆる丁寧植えではなく一鍬植えであっても十分活着が期待できることから、1日に植栽できる本数が裸苗に比べて多いとされ、植付け時のコスト削減が期待されており、生産性、労働負荷等を従来の裸苗と比較し評価する必要がある。

植栽作業のコストは、植付け費用と苗木代に大別される。植付けの歩掛りは長野県林務部(2018)によると普通作業員0.4人/100本と設定されている。苗木は、一般的に用いられているカラマツ裸苗の中規格(苗高35～45cm)とし、標準価格は長野県山林種苗協同組合(2020)により86円/本と定められている。植栽本数は、長野県の各地域森林計画区でカラマツの標準的な植栽本数として提示している2300本とした。これらを合計すると、標準的な植栽費用は385千円/haとなる。

1.1.3 下刈り

下刈りは、植栽木が競合植生に被圧されることによって枯死したり成長阻害を生じたりしないよう、植栽木周辺の競合植生を刈り払う作業である。通常、競合植生の勢いが最も旺盛となる7月中旬から8月上旬にかけて行われることが多い(竹内1998)。下刈りの年数は、北海道での調査事例ではあるが、カラマツでは最頻値が5年(中川2015)であり、長野県でもほぼ同様と考えられる。現在の下刈り作業は、植栽木以外を刈払い機によってすべて刈払う全刈りが主流である。省力化のために、植栽列に沿って帯状に刈り払う筋刈りや、植栽木の周囲1m四方程度を方形または円形に刈り

払う坪刈りなどの作業種もあるが、刈払い面積の割合によって請負金額が減少する反面、全刈りに比べて作業時間が大きく変わらないことや、坪刈りをするつもりでも作業者が刈りながら進むため結局は筋刈りになってしまうことなど、発注者側と受注者側の利害が一致しないことから、普及には課題がある。そのため現状では刈払い機による全刈りが主流であり、植栽当年から 5 年程度連続して行うことが通例である。

下刈りの歩掛りは長野県林務部（2018）により刈払い機による刈払い作業が特殊作業員 6.8 人/ha、平行して下刈り鎌による刈払い作業が普通作業員 0.8 人/ha と設定され、費用は 1 回当たり約 175 千円、植栽年から年 1 回ずつ 5 年行くと 875 千円/ha となる。

以上により、地拵えから下刈りまでのコストは約 1630 円/ha と試算される。下刈り 5 回分のコストは全体の約 54% に相当することから、下刈りコストの削減、あるいは下刈り回数の削減が造林コストの抜本的低減につながると考えられる。

1.2 造林の機械化の意義

わが国における林業の機械化は、明治期の森林鉄道、大正期の集材機、昭和初期のトラック運材等、集運材作業を中心に展開されてきた。その後も、林業の機械化は素材生産や運材を中心として、丸太という重量物を扱う作業において発展を遂げ、現在の高性能林業機械へとつながっている。一方、皆伐後の現場からスタートする造林では、人間の力で動かせない物を扱うことは少ない。そのため、造林の各種作業に適応した様々な機械の試作は行われてきたが、機械化の需要は伐出作業に比べると小さく、抜本的な技術的進展はチェーンソーや刈払い機などの手持ち機械に限られてきた。また、造林作業は「投資」であり、直接収益を生まないことも機械化の障壁になっていたと考えられる。しかしながら、造林の機械化は労働強度の軽減のみならず、安全性の向上、人員不足の解消、そして生産性の向上と低コスト化につながるものであり、前進させることが必要である。そこで本項では、造林の各工程を機械化することの意義について述べる。

1.2.1 地拵え

造林の中でも、最も労働負荷が大きい作業は地拵え作業である。皆伐後に残された末木枝条は長尺物も多く、チェーンソーや手ノコを用いて切断することが必要な場面が多々ある。これらを数メートル程度の短距離を運搬する範囲であれば人力で何とか対応可能であり、現在でも人力で地拵えを行うことは通例となっている。しかしながら、林床を整える地拵え作業は、植栽や下刈り等の効率を高めるだけでなく作業の安全性を向上させる上でも重要である。さらに皆伐から年月が経ち、雑草木に覆われた後に地拵えを行う場合は刈払い作業から行う必要が生じ、より困難が伴う。林業労働力が不足している現在、このような重労働かつ危険を伴う作業は、機械化によって労働環境を改善する必要がある。

1.2.2 植栽

裸苗を植栽する場合、根を大きく広げて植付けることが活着率の向上に寄与するとともに、植栽木が風、雨、雪などで倒れないよう支持するためにも重要である。そのためには植え穴を大きく掘る必要があり、土壌硬度が高い林分であるほど人力掘削作業は重労働となる。特に、表土が浸食された崩壊跡地や痩せ尾根等の受蝕土、作業道跡地など機械が繰り返し走行し転圧された土壌などでは、植え穴掘りは困難を極める。そのため、これまでエンジン式の植え穴掘削機が考案されてきた（山脇ら 1962, 千木・川崎 2018 など）。土壌が硬い林地においては、新たな手持ち機械として植え穴掘り機を定着させることも必要と考えられる。一方、植え穴掘り機を使用する場合、1 人で機械と苗木を持ち歩いて植栽を行うことはかえって重労働になるため、必然的に 2 人一組の作業となる。また、我が国で一般的な褐色森林土や黒色土等の腐植に富み孔隙の多い土壌であれば、植え穴を掘る作業は植物の根が強固に張り巡らされていない限り、唐鍬による掘削で十分な場合も多い。また、近年普及し始めたコンテナ苗であれば大きな植え穴は必要とせず、スペードやディブルといった専用手工具で容易に植栽でき、あるいは唐鍬による一鍬植えでも十分活着が期待できる。植え穴掘り機の活用は、植栽地の土壌の状態や植栽する苗木

の種類等を見極めながら、現場に合せて行うことが望ましいと考えられる。また、小型の油圧ショベルをベースマシンとしたコンテナ苗の自動耕耘植え付け機も開発されており（山田ら 2008）、今後の発展が期待される。

次に、苗木の運搬についても身体的な負担が大きい作業のひとつである。特に、近年は裸苗に比べて重量があり根鉢の嵩もあるコンテナ苗が普及し始めたことから、機械による苗木運搬の必要性が増している。ただし現在はかつての拡大造林期とは異なり、奥地林での皆伐、再造林は少なく、多くの再造林地は林道に面しているか、林道から作業道を開設してアクセスしている。そのため、植栽地には一般車両やフォワーダが入ることが可能な場合が多く、苗木運搬の利便性は高まっていると言える。このことは、一貫作業システムにより伐出時に使用したフォワーダ等を苗木運搬に使用することが容易であることを示しており、条件が整っている林分であれば苗木運搬に現場にある機械を活用すべきである。また、苗木だけでなく獣害防除のための防護柵資材や単木保護資材等もタイミングを合わせて運搬することも可能である。こうした運搬に関連した機械化は、新たな機械を導入する必要もなく、段取り次第で大きく低コスト化できる余地があるため是非取り入れたいものである。

1.2.3 下刈り

下刈り作業は、重労働であることに加えて、夏季の梅雨明け前後の最も暑い時期に行うことが多いため、特に身体的負担が大きい。そのため、下刈り作業への機械の導入は比較的早くから始まった。昭和の中頃までは下刈り鎌（大鎌）を使用することが一般的であったが、昭和 30 年代から刈払い機が実用化され（鈴木 1990）、小型・軽量化されるとともに急速に普及が進んだ。とはいえ、刈払い機は手持ち式機械であるため身体的負担は完全に解消されたわけではない。そのため、労働強度をより小さくするために自走式の下刈り機も開発が進められてきたが、急傾斜地はもとより緩傾斜地においても、造林地には伐根等の障害物が多く、機械が走行することが困難であり、試作機以外ほとんど開発されなかった経緯がある（鈴木 1990）。

そして近年になって、改めて伐根切削機能を備えた下刈り機が開発されている（渡辺 2020）。この機械を走行させるためには、植栽間隔を少なくとも 2m 以上にする必要があり、植栽前に下刈り走行ルートを決めておき、ルート上の伐根をあらかじめ処理しておくことが必要である。また別途、より小さいサイズで軽快に走行できリモコン操作可能な自走式下刈り機が開発され、さらに将来的には植栽木や障害物の位置を GNSS やカメラ等により認識し、自動走行可能な下刈り機を目指して開発が進められている。下刈り作業は蜂に刺さるリスクも高く、蜂毒に対してアレルギー体質を持つ人にとっては命がけの作業になるため、自動下刈り機の開発を望む声は大きい。林地の地形は複雑で機械が走行すること自体が困難であることや、誤伐しないために植栽木と雑草木を確実に識別することなど、克服が必要な課題は多く、実現にはまだ時間がかかることが予想される。

1.3 高コスト要因の抽出と低コスト化のための方策

本節では、更新作業の各工程において高コストとなっている要因を抽出するとともに、どのようにすれば低コスト化実現ができて、そのために何を明らかにする必要があるのか、研究の方向性を検討する。

1.3.1 地拵え

これまで、地拵えが一般的に人力で行われてきたことは前節で述べたとおりであるが、では何故機械の導入が遅れてきたのであろうか。その理由は、

- (1) 植栽予定地の地形が機械走行可能な条件ではない（急傾斜である、転石が多い、作業道の法高が高い、など）
 - (2) 搬出間伐が行われるようになってからもハーベスタによる伐倒は普及していないように、林内での機械走行に抵抗感がある
 - (3) 地拵えのためだけに機械を搬入することに抵抗がある
 - (4) 機械による地拵えの生産性が不明
- などが挙げられるだろう。端的に言えば、(1) は本質的な理由、(2) は林地保全への懸念、(3) はシス

テムの問題, (4)は経済的損失を避けたいという経営的判断, である。これらを解決するためには, 機械が林内走行可能な条件を明確にし, 林地保全対策を取りながら, 一貫作業によって機械搬入の手間と費用をなくした上で, 標準的な機械地拵えの生産性を明らかにする, ことなどが必要である。

ではまず, (1)の機械が林内走行可能な条件であるが, 各林業機械メーカーのカタログ値では登坂能力 30° ~35° としている。長野県の民有林における林班単位の傾斜区分の面積割合は, 0~15° 未満が 27.6%, 15~30° 未満が 51.6%, 30~35° 未満が 12.8%, 35° 以上が 8.0%を占めており, 30° 未満が 79.2%となっている(長野県林内路網整備指針検討委員会 2012) ことから, 林業機械が走行可能な傾斜区分の森林は約 80%に及ぶことがわかる。ただし, 実質的に作業が可能な傾斜は安全をみて 25° 程度と慣例的に言われているため, 実際に林内走行で作業可能な森林の割合は 6 割程度と考えられる。それでも県内の民有林の半数以上は機械による地拵えができるとすれば, 検討する価値は十分あると考えられる。

また, (2)の林地保全に関しては, 機械走行を行う部分を最小化し, 走行路上に枝条を集積していき地拵え棚にするといった措置をすれば, 土壌が締め固められることによる植栽木への影響はほとんど生じないであろう。(3)は一貫作業を行うことで, 新たな機械回送料は生じないので, 解決可能である。

(4)に関しては, 地拵えに既存の機械であるバケットやグラップル, トラクタ等の重機を用いることは北海道を中心として実施例が報告されている(渡辺 2018) ことから十分可能であるが, 生産性の調査例は少ない。これらの機械による生産性やコストが不明瞭な状態では, 林業事業者が地拵えの機械化に踏み切る判断基準は希薄となる。では仮に, 敢えて条件を厳しくして, 地拵えのためだけに現場への重機の回送料として片道約 5 万円,

往復約 10 万円を投入した上で機械地拵えを行うことを想定した場合, どの程度の生産性が要求されるのだろうか。前節で述べたように, 人力地拵えに係る費用は約 37 万円/ha である。バケットとグラップルにかかる人件費と諸雑費から 1 日あたりの直接費を算出し, 重機の回送料を含めた費用を人力地拵えの 37 万円と同額に設定した場合, 1ha 当たりに費やす日数を試算すると, バケットでは 8.53 日, グラップルでは 5.99 日となる(表 1-2)。つまり, 1ha の再造林地であれば, バケットでは人力と同等以上の生産性を上げること, グラップルでは人力の約 1.4 倍以上の生産性を上げることが, コスト的に優位に立つ条件となる。人力地拵えでは 2 人作業ではあるが 8.5 日/ha であるから 1 日あたりの生産性は 1176 m²/日である。バケット地拵えでは 8.53 日/ha 以上, すなわち 1172 m²/日以上の上昇を上げれば人力地拵えより低コストとなる。同じく, グラップル地拵えでは 5.99 日/ha 以上, すなわち 1669 m²/日以上の上昇を上げればよい。なお, 一貫作業システムによりバケットやグラップルが既に現場に配備されている状況であれば, 回送料を考慮する必要がなくなるため生産性の最低ラインは大きく下がり, バケットでは 856 m²/日, グラップルでは 1219 m²/日となり, より経営的に有利となる。本研究では, 伐出機械による地拵えの生産性を調査し, 人力地拵えに比べてどの程度コスト的な優位性があるのか明らかにすることを目的のひとつとしており, 上記の生産性の数値を踏まえて検討を行う。

1.3.2 植栽

植栽作業に関しては, 苗木代, 苗木の運搬費用, 植付け費用が主な費用となる。まず苗木に関しては, カラマツに限らずコンテナ苗の方が裸苗に比べて単価が高い。苗木運搬についても, コンテナ苗は裸苗より重量があり根鉢部分がかさばるので不利である。しかし, コンテナ苗は植付ける際の

表 1-2 人力地拵えと同等の費用となるバケット及びグラップル地拵えにかけられる所要作業日数の試算

地拵え種	機械種	人件費 (円/日)	諸経費 (円/日)	直接費 (円/日)	所要日数 (日/ha)	重機回送料 (円/1往復)	計	処理面積 (m ² /日)
人力	-	42,700	854	43,554	8.50	-	370,209	1,176
バケット地拵え	バックホウ	22,000	9,678	31,678	[8.53]	100,000	[370,209]	[1,172]
グラップル地拵え	グラップル中(ウィンチ付)	22,000	23,143	45,143	[5.99]	100,000	[370,209]	[1,671]

※1 人力地拵えでは特殊作業員 1 名 + 普通作業員 1 名に諸雑費率 2% を加算(長野県林務部 2018)し, バケット及びグラップル地拵えでは運転手(特殊)に各機械の固定費と変動費(全林協 2001)を諸経費として加算し直接費とした

※2 所要日数の()内の数値は, バケット地拵え, グラップル地拵えの 1ha 当たりの費用が人力地拵えと同額になる場合の仮の所要日数である

植え穴が小さくて済み、根を広げる必要もなく、植え穴に根鉢を挿入し根元を軽く踏み固めるだけでよい。裸苗の丁寧植えに比べるとはるかに簡便である。しかし、その植え付けの生産性は調査事例がまだ少ない。また、コンテナ苗の植栽器具として近年使用され始めたディブルやスピードについても、唐鍬に比べて植え付けの生産性が優れているのか、活着に問題がないのか等、検証を行う必要がある。

コンテナ苗の価格と苗木運搬の人工掛かり増しに対して、植え付けの生産性の高さによってどの程度埋め合わせできるのか、検証を行う必要がある。仮に、コンテナ苗を植栽することによるコストが、裸苗を植栽するコストを大きく上回る場合には、植栽時期を従来の春植え、または秋植えに限定せざるを得ないだろう。あるいは、コンテナ苗の単価を引き下げるための育苗技術の改良を行うことや、裸苗にはない成長の速さなどの付加価値を付け、下刈り費用を削減できるといったトータルでのコストダウンが求められる。本研究では、コンテナ苗の利用について真の低コスト化につながるのか否かという視点で、利点と欠点を総合的に検証することとする。

1.3.3 下刈り

我が国における下刈りのコストが造林コストに占める割合が極めて高いことは、ここまでに繰り返し述べてきた、しかしその一方で、気候や植生の違いはあるものの、諸外国では下刈りの回数が少ない国や、実施していない国も少なくない。島本(1998)は、下刈りにかける費用は南アフリカで約89US\$/ha、ケニアで約32US\$/ha(1回当たり)、ニュージーランドで約103US\$/ha(2年目のみ)、イスラエルで約130US\$/haと報告している。調査を行った当時(1993年)の年平均為替レートは約111円/US\$であり、気候や経済状況が日本に近いニュージーランドでさえ下刈りに1万円余りしかコストをかけていない。本章第1節で定義した日本の下刈り費用である87.5万円とは比較するまでもない。また島本(1998)は、フィンランドやスウェーデンは下刈りを行っておらず、地拵えとは別に掻き起しや火入れを行っていると述べている。日本では競合植生が植栽木を覆うほど繁茂するこ

とが常識であるが、諸外国ではそこまでの状況にはなっていないと考えることができる。反対に、我が国でもそのような競合植生の状況に近づけることができれば、下刈りの回数を減らすことが可能であるとも言える。日本でも天然更新補助作業として行われている掻き起しが、フィンランドとスウェーデンでは人工造林地において競合植生抑制のために行われているとすれば、そこに下刈り回数削減の可能性があると考えられる。下刈りの回数自体を少なくすることができれば、低コスト化だけでなく重労働そのものを減らすことが可能である。

そこで本研究では、下刈りに関して新たな機械を導入してコスト削減を図る重要性は認識しつつも、一貫作業システムにおいて伐出機械を用いた地拵えを行うことによって起こる表土の攪乱が、競合植生の抑制にどの程度効果があるのか、そして下刈り回数をどの程度減らすことが可能であるのか、検証を行うこととする。

1.4 本研究における低コスト更新技術の適用条件

ここまで、地拵え、植栽、下刈りの現状と機械化の意義、そして研究の方向性について述べてきた。今後、長野県内のカラマツ造林地において、本研究で検討するすべての技術が適用されることが望ましいが、森林はそれぞれ顔が異なり、一つとして同じものはない。そこで、本研究における結果が適用される林分の条件について、ここで定義しておきたい。

- (1) 樹種：カラマツ
- (2) 地形：地山勾配 25° 未満
- (3) 標高域：700～1600m (山地帯下部～山地帯上部)
- (4) 地位級：1～3(一定程度の林分材積が確保可能)
- (5) 路網：林道または作業道に隣接、あるいは今後路網開設が可能な林分

これらはカラマツの生育適地であり、さらにはカラマツ林を経済林として成林させるための好適な条件を備えた林分、ということができる。今後、長野県内のすべての森林を経済林として扱うことは困難であり、環境保全林として防災や水源かん養等の公益的機能を重視する森林や、人々が集い安らぐための森林など、目的は様々であるが、林

野庁は市町村が主体となって森林をゾーニングすることを推奨している（林野庁 2022）。現在、また今後も、上記条件を満たすような好適条件の林分から主伐・再造林が行われることは必然的な流れであり、経済的合理性を伴うものである。森林は少なくとも数十年の年月をかけて育むものであり、低コストで造林を行い収益性が高い森林を造成していくことは、未来を生きる人々のために、現代を生きる我々の果たす義務である。こうして造成された森林は、次の世代においても再造林され、持続的な森林経営が定着していくであろう。また、経済林として条件が優れているにもかかわらず、主伐後に再造林されなかったり、太陽光発電用地に転換されたりといった事態になることは、我が国の林業の将来に禍根を残すことになりかねない。そうならないためにも、再造林を低コストで行うための技術開発が急がれており、本研究はその実現のために実施するものである。

第 2 章 伐採・造林一貫作業による 伐出及び造林コストの低減

日本の林業の生産性向上のためには、施業の集約化と並んで低コストで効率的な作業システムの普及が必要とされている（林野庁 2015a）。現在、戦後に植栽された人工林の多くが全国的に 11 齢級前後に達し（林野庁 2015b）伐期を迎えつつあり、間伐のみならず皆伐も視野に入れた計画的な森林経営が必要とされるようになってきた。しかし、林業の採算性の悪化等を理由として、近年は皆伐が積極的には行われておらず、2013 年における民有林の皆伐面積は間伐面積の 1/6 以下に過ぎない（林野庁 2015b）。このため、高性能林業機械が本格的に普及し始めた 1990 年代以降、皆伐作業の生産性の把握は十分にはなされていない。

一方、皆伐と再造林を一連の作業としてとらえた伐採・造林一貫作業システム（以下、一貫作業）が九州や四国、北海道などを中心に実践され始めている（今富 2011, 森林総研 2012, 森林総研 2013, 森林総研 2015a, 佐々木 2014）。一貫作業は、再造林を皆伐の延長線上に位置づけ、伐出時に使用したグラップルやフォワーダ等の機械を地拵えや苗木運搬等に利用することによって効率化し、再造林コストの低減をねらったものである。さらに、一貫作業では伐出後速やかに植栽を行うため、通年で植栽することが可能とされるマルチキャビティコンテナ苗（山川ら 2013, 以下、コンテナ苗）を植栽する事例が国有林を中心に広がっている（林野庁 2015a）。しかし、一貫作業の生産性やコストを調査した事例はまだ少なく、皆伐・再造林に必要とされる費用が曖昧であることから、地域の林業の特性に合わせた皆伐・再造林のコストを明らかにする必要がある。

一貫作業を行うにあたり、車両系林業機械が林内走行することが可能な平坦～緩傾斜地においては、中～急傾斜地に比べて地拵えから植栽までの労働投入量が 2/3 程度になることが示されている（森林総研 2013）。長野県は県境に標高 2,000～3,000m 級の山々が連なるなど急峻で複雑な地形を有しているが、火山活動によって形成された緩やかに裾野が広がる地形も多い。県内においても戦後に植栽されたカラマツが用材として利用可能な

径級に成長してきたことを受けて、作業道を開設し車両系の高性能林業機械を用いて効率よく間伐材を搬出する作業システムが普及してきている一方、国有林を中心に一貫作業による皆伐・再造林がモデル的に進められていることから、一貫作業を行う環境は整いつつある。

こうした背景を踏まえ、本研究では長野県の緩傾斜地における車両系伐出作業システムによる皆伐から植栽までの一貫作業の各工程における生産性とコストを明らかにすることを目的とした。

2.1 伐出作業の生産性

2.1.1 調査地

調査地は、長野県内のカラマツ人工林で一貫作業が計画されている林分のうち、平均傾斜が比較的緩やか(約20°以下)で機械走行が可能な3地域の5試験地を対象とした(図2-1)。いずれも伐採当年中に皆伐から植栽までを完了する一貫作業

を車両系伐出作業システムを使用して行い、カラマツを再造林する施業地である。

浅間山国有林の調査地は、長野県東部の北佐久郡御代田町の浅間山南西麓のカラマツ人工林である。2014年9月～10月に2030林班へ小班の69年生林分2.32ha(以下、試験地A1)、2015年8月～10月に2028林班ろ小班の62年生林分3.95ha(以下、試験地A2)において一貫作業を行った(表2-1)。試験地A1では2014年10月に、試験地A2では2015年9月に同一事業体により一貫作業が行われた。

南牧県有林の調査地は、長野県東部の八ヶ岳連峰主峰の赤岳の東麓のカラマツ人工林である。2014年9月～11月に68林班に小班の77年生カラマツ林(以下、試験地M)において、幅10～40mの帯状皆伐が行われた。また、試験地Mの字拵えはバックホウのバケットによる地表かき起こしにより行われた。

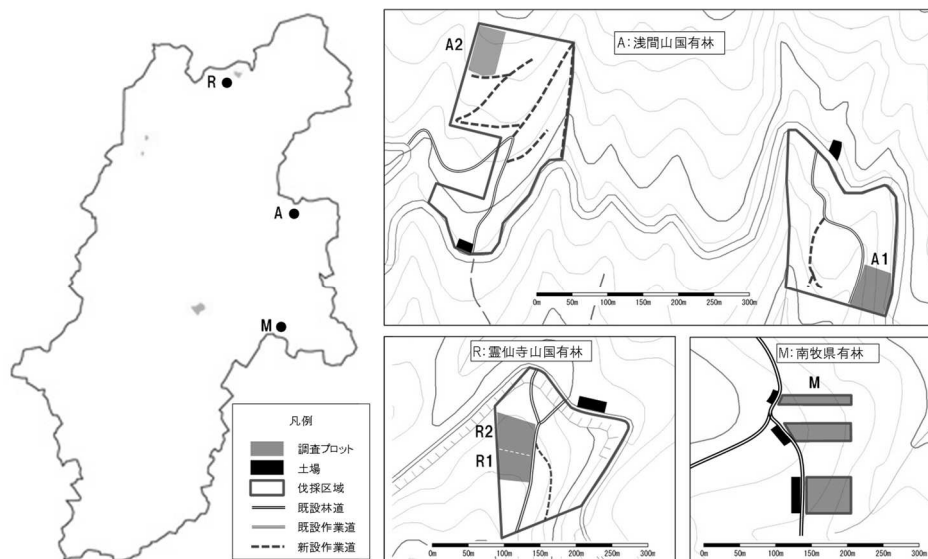


図2-1 試験地の位置図及び平面図

表2-1 各試験地の概要

試験地名	A1	A2	M	R1	R2
所在地	浅間山国有林 (北佐久郡御代田町)		南牧県有林 (南佐久郡南牧村)		豊仙寺山国有林 (上水内郡信濃町)
樹種	カラマツ	カラマツ	カラマツ	カラマツ	カラマツ
林齢	69	62	77	66	66
標高(m)	1230	1270	1580	920	920
伐採面積(ha)	2.32	3.95	0.42	0.42	2.68
試験区域面積(ha)	0.40	0.23	0.42	0.20	0.21
平均集材距離(m) ^{※1}	290	420	-	170	170
平均傾斜(°)	21.4	13.5	11.4	10.0	10.0
路網密度(m/ha)	156	236	169	224	224
立木密度(本/ha)	325	208	173	293	293
林分材積(m ³ /ha)	263	156	143	262	262
単木材積(m ³ /本)	1.13	0.75	0.82	0.89	0.89
平均樹高(m)	26.2	21.6	20.1	24.1	24.1
平均胸高直径(cm)	31.8	28.7	32.4	29.9	29.9
植栽樹種	カラマツ	カラマツ	カラマツ	カラマツ	カラマツ
伐採年月 ^{※2}	2014年10月	2015年9月	2014年9月	2015年6月	2015年6月
植栽年月 ^{※2}	2014年10月	2015年10月	2014年11月	2015年10月	2015年10月

※1 試験地Mは林道に接しているためフォワード作業はないが、ウィンチによる木寄せを要した(平均木寄せ距離:25m)
 ※2 伐採、植栽年月は、試験区域内の作業時期

霊仙寺山国有林の調査地(1036 林班ち小班)は、長野県北部の上水内郡信濃町の霊仙寺山北東麓のカラマツ人工林である。2015 年 6 月～10 月に 1036 林班ち小班の 66 年生林分 2.68ha において一貫作業を行った。ここでは、2015 年 6 月にクローラ式の高性能林業機械による作業システムを採用した試験地 R1 と、先進的林業機械として導入された北欧製のホイール式ハーベスタ及びフォワーダによる作業システムを採用した試験地 R2 を設定した。

2.1.2 生産性の評価方法

伐採・造林一貫作業の前半部分に相当する皆伐作業では、伐倒、木寄せ、造材、集材の各工程に区分して調査した。試験地 A1, A2, M, R1 の各試験地の作業システムは、チェーンソーによる伐倒、グラップルローダ（以下グラップル、試験地 M 以外はウインチ付）またはトラクタ（試験地 M）による木寄せ、プロセッサによる造材、クローラ式フォワーダによる集材で、現在長野県内の緩～中傾斜林分で一般的に使用されている車両系高性能林業機械による伐出作業システムである（表 2-2）。また、試験地 R2 の作業システムは、先進的林業機械として導入されたフィンランド SAMPO ROSENLEW 社製のホイール式ハーベスタ 1046Pro, スウェーデン VIMEK 社製のホイール式フォワーダ 608 を使用し、CTL 作業（Cut to Length：ハーベスタ、フォワーダの林内走行による短幹集材）を行った。

調査に先立ち、各試験地において 0.2～0.4ha の調査区域（図 2-1, 表 2-1）を設定し、伐倒対象木のナンバリングを行い、胸高直径と樹高の毎木調査により立木幹材積を求めた。この調査区域内における一連の伐出作業内容をビデオ観測して作業時間分析を行い、各工程の作業時間と処理材積、作業人員数(本調査ではいずれの工程も 1 人作業)

から工程ごとの労働生産性(m³/人時)を算出した。各工程の処理材積は、伐倒、木寄せでは立木幹材積、造材、集材は作業後の検知による素材材積とした。なお、システム全体の労働生産性は完全直列作業として評価し、次の(2-1)式(全林協 2001)により求めた。

$$P = \frac{1}{\frac{1}{P_a} + \frac{1}{P_b} + \frac{1}{P_c} + \frac{1}{P_d}} \quad (2-1)$$

ここで、Pはシステム生産性、P_aは伐倒生産性、P_bは木寄せ生産性、P_cは造材生産性、P_dは集材生産性を表す(単位はいずれも m³/人時)。また、1 日当りの労働生産性(m³/人日)は、実労働時間を 6 時間として算出した。

伐出コスト算定のための評価値は、既往の文献(全林協 2001, 日林協 2010, 長野県林務部 2015)から表 2-3 のとおりに設定した。また、先進的林業機械については、導入時の価格及び文献(Spinelli et al. 2004, Austria Federal Research and Training Centre for Forests, Natural Hazards and Landscape 2015)を参考に評価値を設定した。伐出コストは次の(2-2)式により求めた。

$$C = \frac{C_a}{6P_a} + \frac{C_b}{6P_b} + \frac{C_c}{6P_c} + \frac{C_d}{6P_d} \quad (2-2)$$

ここで、Cは伐出コスト(円/m³)であり、C_aは伐倒コスト、C_bは木寄せコスト、C_cは造材コスト、C_dは集材コストを表す(単位はいずれも円/日)。なお、本報で示す生産コストの値は全て直接費(機械費、作業員人件費)であり、事業者によって差違が生じる間接費(機械運搬費、人員輸送費等)は含めていない。

2.1.3 伐出作業の各工程における生産性

(1) 伐倒工程

伐倒工程の生産性は、チェーンソーで 8.9～20.9 (平均 15.3) m³/人時となり、現場ごとの差が大きかった(表 2-4)。試験地 R1 の伐倒生産性は 20.9 m³/人時でチェーンソー伐倒の中で最も高かったが、伐倒(受け口及び追い口切り)及び伐倒準備(伐倒木周辺の林床整理等)の各要素作業時間が比較

表 2-2 各試験地の作業システム

試験地名	A1	A2	M	R1	R2
所在地	浅間山国有林 (北佐久郡御代田町)		南牧県有林 (南佐久郡南牧村)	霊仙寺山国有林 (上水内郡信濃町)	
伐倒	[チェーンソー]				
木寄	[グラップルローダ] ユマ13P-US (イワシグラップル GS-50LJ) (イワシウインチ TW-2S)	[グラップルローダ] CAT311B (イワシグラップル GS-50LJ) [トラクタ] 三菱BS3F	[グラップルローダ] CAT312C (南星グラップル BHS10KM-4)	[ホイール式ハーベスタ] SAMPO1046Pro (KET0100)	
造材	[プロセッサ] CAT314D-CR (KET0150P)	[プロセッサ] CAT312 (KET0150P)	[プロセッサ] CAT314D-CR (KET0150P)		
集材	[フォワーダ] イワシU4-BG	-	[フォワーダ] 諸岡MST-800VDL	[ホイール式フォワーダ] VIMEK608	

※()内はアタッチメント

的短かったことに起因していた（図 2-2）。試験地 M では、伐倒生産性が最も低く 8.9 m³/人時にとどまった。伐倒方向が重心と逆の山側であったことから、伐倒補助（ウインチによる伐倒方向誘導）を多く要したためと考えられる。長野県の列状間伐におけるチェーンソー伐倒の生産性は 2.0～18.5（平均 7.0）m³/人時と報告されている（宮崎ら 2011）が、今回の皆伐作業ではこれを上回る生産性を示していた。かかり木処理が皆伐作業ではほとんど発生しなかったことや、単木材積が全試験地平均で約 0.9 m³と大きいことなどにより生産性が向上したものと考えられた。

一方、ホイール式ハーベスタを採用した試験地 R2 の伐倒生産性は 55.8 m³/人時となり、今回のチェーンソー伐倒における最高値の 2.7 倍という極めて高い生産性を示した（表 2-4）。同機による列状間伐における伐倒生産性は 45 m³/人時相当であることが報告されている（中澤ら 2013）が、皆伐では間伐に比べて伐倒方向の障害物が減少することや、移動時間が少ないため、さらに高い生産性を示したものと考えられる。

(2) 木寄せ工程

木寄せ工程の生産性は、高性能林業機械を使用した試験地の作業システムでは 10.0～60.6 m³/人時となり、差が大きかった（表 2-4）。試験地 M では平均木寄せ距離が約 25m であり、トラクタのウインチとグラブを併用していたため作業時間を要し、ウインチ作業が木寄せ工程の約 40% を占めていたのに対して、他の試験地ではプロセッサやグラブによる作業道からの直取りが可能であり、木寄せの平均サイクルタイムは試験地 M の 40% 未満であった。なお、先進的林業機械を使用した試験地 R2 のハーベスタ作業は、伐倒後に直ちに造材を行う CTL 作業であるため、木寄せ工程は発生しなかった。

(3) 造材工程

皆伐作業における造材工程の生産性は、プロセ

ッサ・ハーベスタで 5.2～15.4（平均 11.3）m³/人時であり（表 2-4）、既往のプロセッサ造材の調査結果の 10 m³/人時（全林協 2001）、18.0 m³/人時（宮崎ら 2011）等と比較してほぼ同等であった。皆伐では一箇所での造材量が多いが造材スピードは間伐と同等と考えられた。造材の生産性が比較的低下した試験地 M（5.2 m³/人時）と R1（9.0 m³/人時）では、大径材の枝払い・造材にチェーンソーを併用しており、これらのチェーンソー作業時間が造材工程に占める割合は試験地 M で 36%、R1 で 20% であり、試験地 R2 と A2 の 0%、A1 の 2% に比べて高かったことが、生産性を低下させた主な原因と考えられる（図 2-2）。

(4) 集材工程

フォワーダによる集材工程の生産性は、6.0～10.9 m³/人時で他工程より幅は小さかった（表 2-4）。試験地 M では運材トラックが通行可能な林道沿いに木寄せし造材を行ったため、集材工程はなかった。フォワーダによる集材は、間伐時における標準的な生産性とされる 4 m³/人時（全林協 2001）や長野県における調査事例の 3.1～8.7 m³/人時（宮崎ら 2011）に比べると同等かやや高い生産性を上げていた（表 2-4）。この理由は、造材木が間伐に比べてまとまっているため、効率的な集材ができたことによるものと考えられる。また、平均単木材積が大きい試験地の方が、集材生産性は高い傾向がみられた。

(5) 伐出作業システム全体の生産性とコスト

各試験地における伐出作業のシステム全体の労働生産性を 1 日当り（m³/人日）で評価すると、高性能林業機械で 14.8～24.0 m³/人日、先進的林業機械で 24.0 m³/人日であった（表 2-4）。試験地 A1、A2、M、R1 の高性能林業機械による作業システムの労働生産性は平均単木材積が大きいほど高い傾向が認められた（図 2-3）。試験地 R2 の先進的林業機械では平均単木材積が比較的小さいにもかかわらず高性能林業機械と比較して同等以上の生産性

表 2-3 伐出等コストの諸評価値

機械種	機械価格 (千円)	耐用年数 (年)	稼働日数 (日/年)	固定費 (円/日)	変動費 (円/日)	人件費 (円/日)	計 (円/日)	備考
チェーンソー	202	3.0	150	415	2,254	20,200	22,869	伐倒
グラブ中ウインチ付	13,500	7.3	180	15,048	8,095	19,200	42,243	木寄せ、地寄せ
グラブ中	9,500	6.0	200	11,573	4,487	19,200	35,260	木寄せ
スキッド	9,200	6.0	140	12,630	10,434	19,200	42,264	造材
プロセッサ中	19,000	6.0	180	25,046	13,313	19,200	57,559	造材
フォワーダ中	17,600	6.0	180	32,719	12,201	19,200	64,120	集材
バックホウ	8,250	6.0	200	11,244	4,452	19,200	34,896	地寄せ、木寄せ
ホイール式ハーベスタ (SAMPO)	32,000	9.0	200	36,000	16,926	19,200	72,132	伐倒、木寄せ、造材
ホイール式フォワーダ (VMEK)	20,500	6.0	233	22,212	13,446	19,200	54,858	集材
積載作業	-	-	-	-	-	17,400	17,400	積載 (普通作業員)

※人件費は、チェーンソー作業：特殊作業員、重機運転：特殊運転手、積載作業：普通作業員として長野県の林業土木事業設計事務所を適用した

表 2-4 各試験地における工程ごとの労働生産

試験地	労働生産性 (m ³ /人時)				システム全体の労働生産性	
	伐倒	木寄せ	造材	集材	(m ³ /人時)	(m ³ /人日)
A1	14.8	45.5	14.6	10.9	4.0	24.0
A2	16.4	26.7	15.4	6.0	3.0	18.1
M	8.9	10.0	5.2	-	2.5	14.8
R1	20.9	60.6	9.0	7.6	3.2	19.5
R2	55.8	-	12.4	6.6	4.0	24.0

を示した。一方、各試験地の伐出作業におけるコストを比較すると、約 2,000～2,900 円/m³の範囲にあった(図 2-4)。

直近の調査報告(林野庁企画課 2015)では、車両系伐出作業システムによるカラマツの皆伐作業の労働生産性として、全国 43 件の平均値で 11.1 m³/人日という値が示されている。作業条件が異なるため単純には比較できないが、今回の調査結果はそれを上回るものであった。本研究における高性能林業機械とほぼ同様の作業システムによる皆伐の労働生産性の調査事例としては、10 齢級スギで 12.8 m³/人日(秋田県農林水産部 2008)、10～11 齢級スギで 19.6～21.9 m³/人日(舟木・杉原 2012)、10 齢級ヒノキで 19.1 m³/人日(兵庫県農林技セ森林技セ 2008)等があり、10 齢級以上の皆伐作業であれば 20 m³/人日前後の生産性を上げて

いる。したがって、緩傾斜地における車両系伐出作業システムによる皆伐作業では、約 20 m³/人日の労働生産性がひとつの目安になると考えられ、今回の現場から平均的なコスト(直接費)を試算すると、2,700 円/m³程度となることが期待できる。また、先進的林業機械を導入することも生産性を向上させる上で有効な手段であるが、作業システムに適合した事業地を確保し、高い稼働率を維持することが必要である。

2.2 再造林作業の生産性

2.2.1 生産性の評価方法

霊仙寺山国有林(試験地 R)の皆伐地において、グラップルによる地拵え工程をビデオ観測し、地拵え面積と時間分析によって機械地拵えの生産性(m²/人時)を算出した。地拵え面積は、グラップ

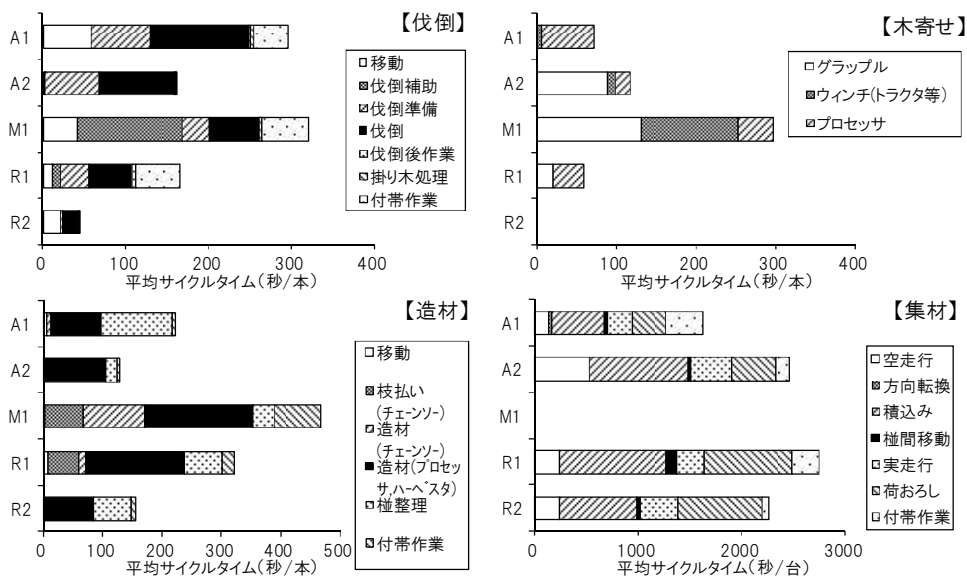


図 2-2 皆伐作業の各工程における要素作業別平均サイクルタイム

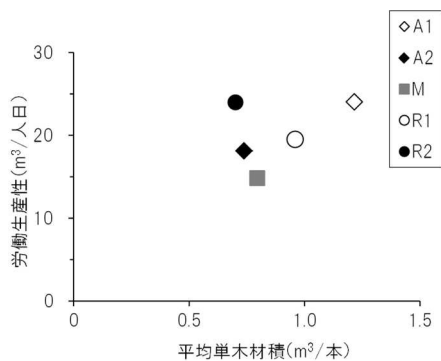


図 2-3 システム全体の労働生産性と単木材積の関係
※A1, A2, M, R1 は高性能林業機械, R2 は先進的林業機械の作業システムを使用

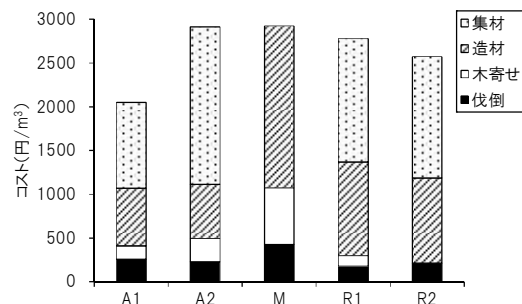


図 2-4 各試験地における生産コスト

ルに取り付けたハンディ GPS 受信機の軌跡を地図ビューソフトウェア (カシミール 3D) により PC に取り込み、軌跡で囲まれた内部の面積をソフトウェア上で計算することにより求めた。また、試験地 M ではカラマツ天然更新誘導作業として行った油圧ショベル (以下、バケット) による地表かき起こしを地拵えと類似した作業とみなして調査を行った。地表かき起こしでは、伐採帯の林床に散在する枝条や林床に生育するササ類の稈と地下茎、及び A₀~A 層土壌 (厚さ約 20cm) をバケットにより残存帯との林縁に集積した。

次に、機械によるコンテナ苗の苗木運搬の生産性を明らかにするため、浅間山国有林において調査を行った。試験地 A2 の中央に、林道及び作業道を走行してコンテナ苗を運搬し、フォワーダに取り付けた GPS 受信機に記録された走行軌跡と、フォワーダと作業員のビデオ観測により、走行距離、運搬した苗木の本数、積みおろしに要する時間等を分析した。人力運搬は、GPS を携行した調査者がビデオ撮影を並行して行いながら苗木運搬作業者に同行し、歩行時間と歩行距離を測定し、単位時間あたりの運搬本数を評価した。なお、コンテナ苗等の運搬作業時間は次の(2-3)式により求めた。

$$T = \frac{N}{N'} \left(\frac{2L}{V} + \frac{T_L N'}{3600} \right) \quad (2-3)$$

ここで、 T : 運搬時間 (時間)、 L : 片道平均運搬距離 (km)、 V : 走行 (歩行) 速度 (km/時)、 N : 苗木運搬本数 (本)、 N' : 運搬 1 回あたりの苗木本数 (本/回)、 T_L : 苗木のフォワーダへの積みおろし時間 (秒/本)、である。なお、 N' の値は、人力運搬では現場で植栽時に使用する背負い式の苗木袋の容量に合わせて、裸苗で 200×2 袋=400 本/回、コンテナ苗で 100×2 袋=200 本/回とし、フォワーダによる運搬ではコンテナ苗が梱包された黒ビニル袋 (50 本入) ×44 袋=2,200 本/回とした。

コンテナ苗等の植栽作業は、試験地 A 及び R においては 40m×40m のプロットを同等の地形である各調査地の任意の位置に 3 箇所ずつ設定した。各プロットを下部から最大傾斜方向に向かって縦に 2 等分し、左側半分はコンテナ苗、右側半分は裸苗を配置し、約 2200 本/ha の本数密度となるよ

う、上下左右とも約 2.1m 間隔で植栽した。試験地 M では、林道を起点として各伐採帯を奥行方向に 3 等分し、最奥部をコンテナ苗植栽区、中間部を裸苗植栽区、最前部をカラマツ天然更新区とした。コンテナ苗は専用の植栽器具であるスぺードとディブル (横山・佐々木 2013) 及び唐鋤を用いて植栽し、裸苗は唐鋤を用いて丁寧植え (全林協 1998) によって植栽した。ビデオ分析により、苗種と植栽器具別に時間あたりの植栽本数 (本/人時) を求め、植栽工程の生産性とした。

2.2.2 再造林の各工程における生産性

(1) 地拵え工程

試験地 R で行ったグラップルによる地拵えの生産性は 704 m²/人時、試験地 M で行ったバケットによる地表かき起こしの生産性は 238 m²/人時であった (図 2-5)。一方、比較対照とした人力地拵えの生産性は 77 m²/人時であった。これらの結果から、人力地拵えに対する機械地拵えの生産性は、グラップルが約 9 倍、バケットが約 3 倍に相当した。また、これらのコスト (直接費) を比較すると、人力地拵えが 39.5 万円/ha であったのに対して、グラップルが 10.0 万円/ha、バケットが 29.6 万円/ha であったことから、一貫作業を行うことで伐出機械が利用できたことにより、地拵えコストを 25~75% に低減できることが示唆された。

(2) 苗木運搬工程

走行 (歩行) 距離、運搬した苗木の本数、積みおろしに要する時間等の観測値から得られた苗木運搬距離と運搬時間の関係を図 2-6 に示した。コンテナ苗のフォワーダ運搬では、運搬距離が増大しても運搬時間の大きな変化はないが、人力は歩行速度が低いうえ運搬 1 回あたりの本数が少ない

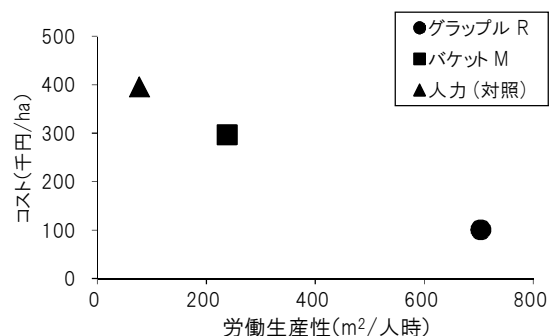


図 2-5 地拵えの労働生産性とコストの関係

ため、距離が伸びると急激に運搬時間が長くなる傾向がみられた。

試験地 A2 における苗木運搬距離の実測値は、フォワーダは林道及び作業道を平均 810m 走行し、人力ではほぼ直線的に 290m 歩行していた。これらの値を適用して 1ha 分の皆伐地に植栽する 2,200 本のコンテナ苗の運搬時間を試算すると、フォワーダは 0.66 時間/ha であったのに対して、人力は 4.28 時間/ha であり、人力はフォワーダの 6.6 倍の時間を要していた (図 2-6)。一方、裸苗の人力運搬では、運搬時間はコンテナ苗の半分の 2.13 時間/ha と試算された。次に、1ha あたりの苗木運搬コストを試算すると、人力によるコンテナ苗運搬は約 12,400 円/ha であったのに対して、フォワーダは約 9,000 円/ha であり、人力の 73% 程度であった (図 2-6)。また、裸苗の人力運搬コストは約 6,200 円/ha と試算され、コンテナ苗のフォワーダ運搬より低かった。フォワーダによる苗木運搬によるコスト削減は、運搬距離が長いほど効果を発

揮すると考えられる。

(3) 植栽工程

各試験地におけるコンテナ苗及び裸苗の植栽工程の生産性を比較した。裸苗とコンテナ苗の植栽生産性は試験地や作業員ごとに異なるものの、裸苗の生産性は 46~105 本/時であったのに対して、コンテナ苗は 63~141 本/時であり、すべての試験地においてコンテナ苗の植栽生産性は裸苗より有意に高いか同等であった (図 2-7)。特に、試験地 A1 のカラマツコンテナ苗の植栽では、単位時間あたりの植栽本数が同試験地の裸苗の 1.6~2.3 倍となった。試験地 A1 でコンテナ苗の植栽を行った 2 人の作業員の 1 人は唐鍬とディブル、もう 1 人はスペードの生産性が高い傾向があったが、植栽器具間に有意差は認められなかった。A2, M, R の各試験地においても、個人差はあるものの、植栽工程の生産性はコンテナ苗が裸苗より高いか同等であった。

試験地 A1 における植栽コストを算出したとこ

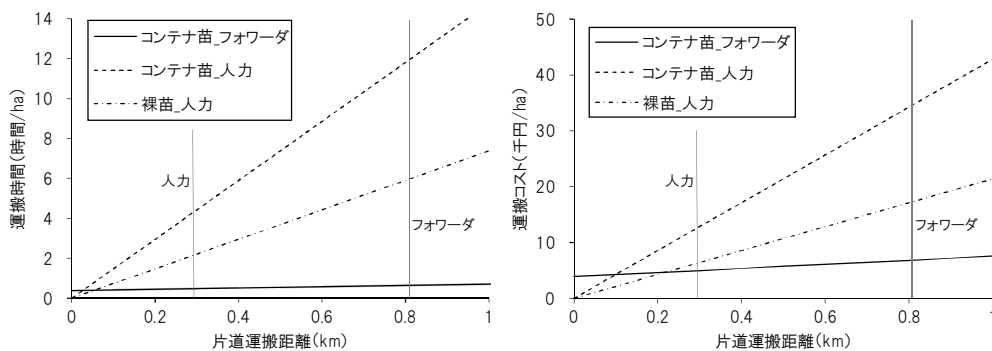


図 2-6 苗木運搬の距離と運搬時間 (左), 運搬コスト (右) の関係

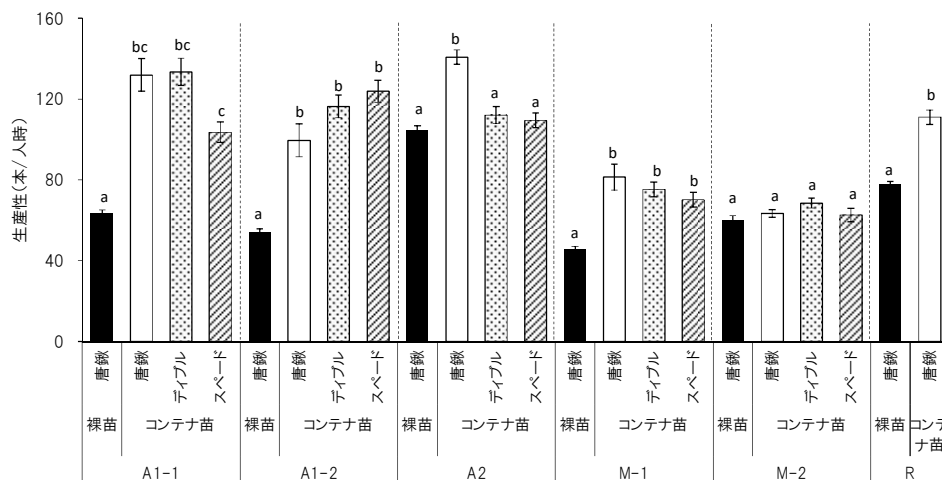


図 2-7 植栽作業の生産性

※異なるアルファベットを含む場合は有意差があることを示し (Tukey-Kramer の多重比較検定, $P < 0.05$), エラーバーは標準誤差を示す
 ※試験地 A1, M では 2 人の作業員によって植栽を行った
 ※統計解析は試験地・作業員ごとに行った

ろ、コンテナ苗植栽では44万円/ha、裸苗植栽では25万円/haとなり(図2-8)、現状ではコンテナ苗による植栽は裸苗に比べて2倍近いコストがかかっている。これは、2014年の長野県におけるカラマツ苗木の単価が、コンテナ苗180円/本、裸苗66円/本であり、コンテナ苗単価が裸苗の2.7倍であることに起因する。一方、コンテナ苗を使用して現状の裸苗と同等の植栽コストにするためには、コンテナ苗の価格を現状の1/2の90円程度にまで下げる必要がある(図2-8)。

2.3 伐採・造林一貫作業のトータルコスト

以上をふまえ、各試験地における一貫作業全体のトータルコストを算出し、従来行われてきた皆伐作業と再造林が独立した作業(以下、独立作業)のトータルコストを算定した。伐出コストは、一貫作業、独立作業とも各試験地における作業システムの生産性から求めた。地拵え及び苗木運搬工程は一貫作業では機械使用(A・R:グラブプル, M:バケット)としたが、独立作業では従来型の人力とした。また、植栽する苗木は、一貫作業では植栽時期が比較的自由であることからコンテナ苗使用としたが、独立作業では裸苗の春植えとし、各試験地における各苗木の植栽生産性を適用して試算した。その結果、一貫作業のコストは独立作業と比較して試験地A1で-1%、A2で+2%、Mで+11%、R1とR2で-5%となり、金額では約-2~+12万円/haの範囲にあり(図2-9)、必ずしもコストは削減されていない。ただし、伐出・地拵え・苗木運搬までのコストを比較すると、一貫作業は独立作業に比べて-12~-27%(-10~-29万円/ha)

のコスト削減が図られており、地拵え等の機械化によるコスト削減効果は大きいと言える。しかし、その後の植栽コストを加えると、一貫作業のコスト削減効果はコンテナ苗の苗木代によるコスト増加で相殺されている。再造林の低コスト化を図るためには、コンテナ苗の低価格化のために育苗技術等を改良することが必要と考えられる。

2.4 小括

伐採・造林一貫作業は、別々の事業体や人員が取り組んでいた伐出と造林の融合を図ることで、造林の一部に伐出機械が利用できるのみならず、造林の効率化を意識した施業が期待できる。本研究では、伐採・造林一貫作業における各工程の生産性とコストを明らかにするとともに、一貫作業によって伐出機械を利用した地拵え及び苗木運搬を行うことによるコスト削減効果について検討した。一貫作業による生産コストの削減効果は、コンテナ苗の苗木代コストの増加により相殺され、トータルコストとして-2万円/haから+12万円/haとなり、コンテナ苗の価格が低コスト化を阻む実態が明らかとなった。しかし、一貫作業による地拵え及び苗木運搬までのコスト削減効果は明らかで、当面は植栽時期を選び、裸苗植栽との組み合わせによる低コストの皆伐・再造林を目指すべきであろう。伐出作業時期に合わせた再造林を行うためには、植栽可能時期の自由度が高いコンテナ苗の利用は欠かせなくなりつつあり、コンテナ苗の低価格化を実現するための技術開発が急がれる。

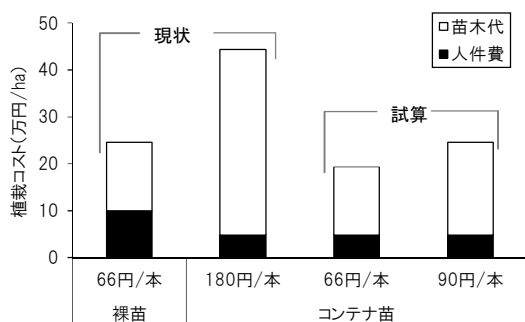


図2-8 試験地A1における植栽コスト試算

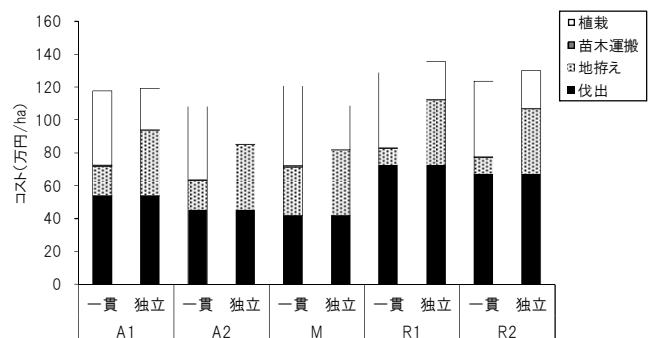


図2-9 一貫作業と独立作業のコスト比較

第 3 章 地拵え作業の機械化による 地拵えコストの低減

第 2 章において、グラップル及びバケットによる機械地拵えは、従来の人力地拵えと比較して造林コストの低減に有効であることが示された。他の先行事例としては、南九州における一貫作業システムの導入に伴うグラップル等の機械地拵えに関する報告において、人力地拵えで 14 人日/ha であった労働投入量が平坦～緩傾斜地で 1～2 人日/ha に、中～急傾斜地でも 2～3 人日/ha に減少したとしている（佐々木ら 2013）。また、機械による地拵え作業が 1970 年代以前から先進的に進められてきた北海道では、丈が高く密生したササを造林時に除去することが地拵えの主たる目的とされ、機械による地拵えも様々である。ブルドーザの排土板による「全剥ぎ型」、ベースマシンの油圧ショベルにレーキ爪を装着した「レーキ型」、シュレッダ、マルチャーなどの「刈払い型」に大別され（渡辺 2017）、保有する機械や現場に合せた方法が採用されている。近年の調査では、単位面積あたりの機械地拵えの作業時間が、人力地拵えと比較して、バケットでは約 33%（補正刈り含む）、クラッシュャでは約 20%程度に低減されることが報告されている（森林総合研究所北海道支所 2016）。

一方、長野県の人工林においては、ササの丈や密度が高い林床植生は北海道ほど多くなく、特にカラマツ林では林床が比較的明るいため低層・中層に広葉樹が侵入している場合が多い（小山・山内 2011）。皆伐時に伐倒されるこれらの広葉樹は、用材やパルプ材等として利用されるものを除けば林地に放置されるため、地拵え作業ではササなど前生の林床植生を刈り払う作業よりこれらの広葉樹残材やカラマツ等主林木の末木枝条、端材などの処理が大半を占めている。そのため、皆伐時に使用した木材グラップル（以下、グラップル）や、作業道開設等に使用したバケットエクスカベータ（以下、バケット）を機械地拵えに使用する事例が多くを占めている（大矢ら 2016）。

以上のように、機械による地拵え作業の生産性やコストは徐々に明らかになってきているが、機械地拵えの方法や生産性に関する研究事例は少なく、技術が体系化されるには至っていない。また、

地拵え作業の生産性に与える要素については、傾斜や、枝条・端材等の林地残材量が考えられるが、これらについて詳細に検討された研究事例は見当たらない。そのため長野県の再造林の現場では、機械地拵えを行うにあたって、機械の選択、作業の手順、枝条集積の方法等について、それぞれの現場状況に合わせた手法によって実施されている。

そこで本章では、現在長野県で行われている緩傾斜地から中傾斜地における機械地拵え作業の生産性とコストを明らかにすることを目的とした。また、それらを伐採前の林況から予測することを試みた。

3.1 地拵えの労働生産性

3.1.1 地拵え試験地の設定

地拵え調査は、長野県北部・信濃町の霊仙寺山国有林（以下、霊仙寺）、長野県東部・御代田町の浅間山国有林（以下、浅間）と長和町の大門山国有林（以下、大門）、長野県中部・諏訪市の民有林（以下、諏訪）の 4 か所の皆伐地において行った。地拵え試験の実施日は、霊仙寺が 2016 年 6 月 22 日、大門が 2016 年 7 月 8 日、浅間が 2016 年 8 月 26 日、諏訪が 2017 年 7 月 3 日である。

以上の試験地では、地拵えに先立ち車両系作業システムによる皆伐作業が行われた。皆伐前の造林木は、霊仙寺はスギ、その他 3 か所はいずれもカラマツであった。各試験地ともバケットを使用して作業道が開設され、伐倒はチェーンソー、作業道への木寄せ・造材はグラップルとプロセッサ、林道沿いに設けられた土場への集材はフォワーダが使用された。なお、浅間、大門、諏訪では傾斜にかかわらず作業道以外の林内においても機械が走行したが、霊仙寺では林内走行は行われず、作業道から伐倒木を直接機械がつかむことができない場合はグラップルまたはプロセッサに搭載された単胴ウインチを使用した木寄せ作業が行われた。

試験地ごとの地拵えの方法、傾斜を表 3-1 に示した。なお、本稿では緩傾斜地を 0～15°、中傾斜地を 15～30°として定義する（林野庁 2017b）。

霊仙寺と浅間では、緩傾斜地と中傾斜地において、バケット及びグラップルによる機械地拵えと、人力地拵えを行った。霊仙寺では、機械が斜面上方から後退しながら、機体前方左右の枝条を機体

前方に等高線と直交する方向に集積し（図 3-1）、列を変えながら伐採面の全面において作業を行った。浅間及び大門では機械が伐採地を自由に走行し、斜面下方の作業道脇に等高線と平行に枝条を集積する（図 3-2）という作業手順とした。諏訪では、緩傾斜地においてグラップルによる地拵えを行った。棚積みは、斜面を傾斜方向に移動（下りまたは上り）しながら、機体側方の傾斜方向に枝条を順次集積した（図 3-3）。人力地拵えでは、作業員 2 人が斜面上部から下部に向かって枝条を寄せ、下刈り鎌及びチェーンソーを使用しながら適宜棚積みを行う作業方法とした。

なお、各試験地のバケット及びグラップルは、原則としてバケット容量 0.45 m³クラス(旧 JIS 表示)の中型ベースマシンを使用し、諏訪のみ同 0.20 m³クラスの小型のベースマシンを使用した(表 3-2)。

各地拵え作業はビデオカメラにより記録し、作業時間と処理面積（電子コンパスによる測量、面積には地拵え棚を含む）から地拵えの労働生産性（m²/人時）を求めた。

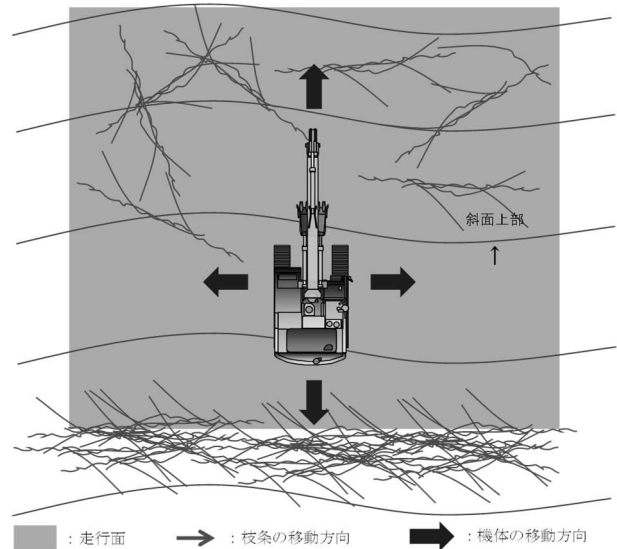
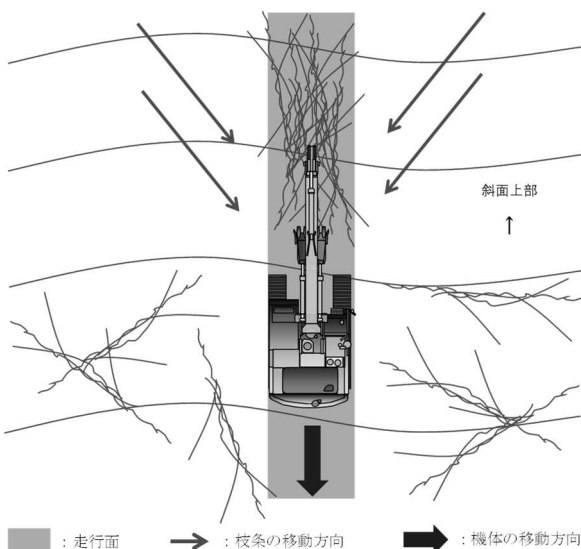
3.1.2 枝条量の算定

地拵えを行う際、伐採地に存在する末木枝条、端材等の量の多少によって作業量は増減し、地拵えの生産性に影響すると考えられる。したがって各調査地では、地拵えによって生じた枝条等の集積量を把握するため、試験区ごとに地拵え棚の層積を測定した。

層積の測定は、棚の幅と最大高を起点から終点まで延長方向 1 m ごとに行い、その垂直断面を半楕円形として近似することにより求めた(図 3-4)。延長方向 n (m)における棚断面から楕円面積 A_n (m²)を式(3-1)、楕円錐台の体積 V_n (m³)を式(3-2)によ

表 3-1 各試験地の林分状況及び地拵え区分ごとの平均傾斜と作業面積

試験地	所在地	標高(m)	伐採前の林況			地拵え区分ごとの平均傾斜(°)と[作業面積(m ²)]					
			主林木の樹種と林齢	立木密度(本/ha)	林分材積(m ³ /ha)	バケット		グラップル		人力	
						緩傾斜	中傾斜	緩傾斜	中傾斜	緩傾斜	中傾斜
霊仙寺山国有林	信濃町	820	スギ	648	486	9.6	24.5	9.3	22.3	9.3	21.5
			60年生			[747.4]	[250.5]	[659.3]	[152.6]	[354.3]	[185.5]
浅間山国有林	御代田町	1,330	カラマツ	648	321	5.7	25.6	5.8	26.3	7.6	22.0
			64年生			[646.8]	[511.1]	[635.2]	[580.2]	[392.5]	[372.3]
大門山国有林	長和町	1,340	カラマツ	416	366	2.0	—	—	—	—	—
			100年生			[878.9]	—	—	—	—	—
諏訪市団体育林	諏訪市	1,230	カラマツ	269	311	3.2	—	6.1	—	—	—
			60年生			[651.3]	—	[2495.6]	—	—	—
						[1109.7]					



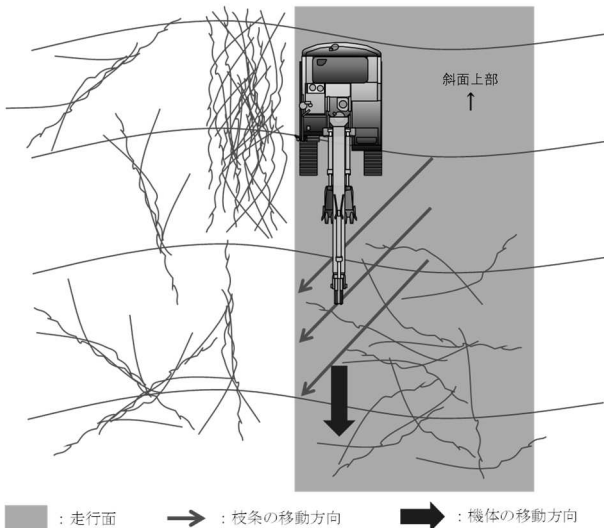


図 3-3 諏訪における機械地拵え作業手順（グラップル）

表 3-2 各試験地における使用機械の機種名および基本的な仕様

試験地	バケット		グラップル		
	機種名	最大作業範囲 (mm)	機種名 (ベースマシン/アタッチメント)	最大作業範囲 (mm)	最大開き幅 (mm)
霊仙寺山国有林	コマツ PC138US	8,300	コベルコ SK135SR-2F/ 南星 BHS10KR-4	8,190	1,970
浅間山国有林	コマツ PC138US	8,300	CAT314C/ イワフジ GS-90LJ	8,300	1,960
大門山国有林	コベルコ SK125SR	8,190	-	-	-
諏訪市団体育林	-	-	日立 ZX50U/ イワフジ GS-50LJ	5,750	1,295

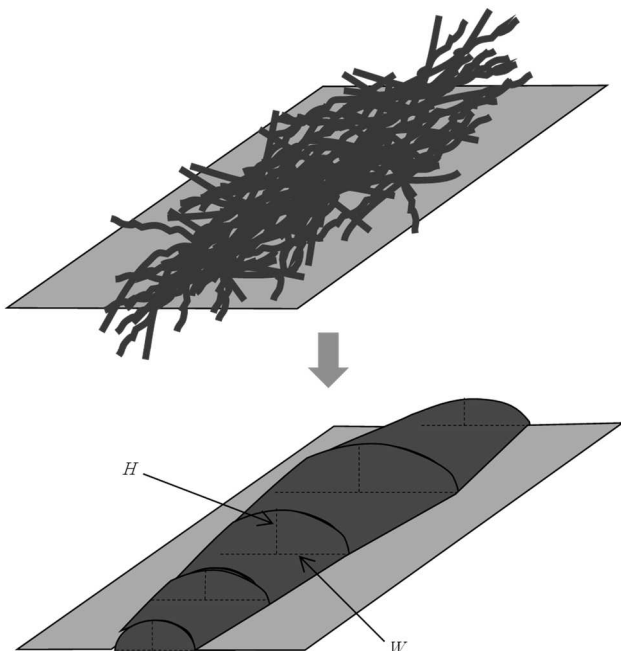


図 3-4 枝条層積の求積模式図

り求め、式(3-3)により枝条の層積 V_s (m³) を算出した。

$$A_n = \pi H_n \frac{W_n}{2} \quad (3-1)$$

$$V_n = \frac{A_n + A_{n+1} + \sqrt{A_n \cdot A_{n+1}}}{3} \quad (3-2)$$

$$V_s = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^n V_i \quad (3-3)$$

ここで、 A_n (m²) は柵断面積の 2 倍に相当する楕円面積、 H_n (m) は延長方向 n (m) における柵の高さ、 W_n (m) は柵の幅、 V_n (m³) は延長方向 n (m) から $n+1$ (m) における長さ 1m の楕円錐台の体積である。これらの算定結果から得られた各試験区の枝条層積量 (m³) を試験区面積 (m²) で除し、単位面積当たりの枝条層積量 (m³/m²) を算出し、機械種ごとの労働生産性との関係を分析した。

3.1.3 バケット地拵えの生産性

まず、バケットによる地拵えの労働生産性は、最大値が浅間の緩傾斜地で約 1,150 m²/人時、最小値が霊仙寺の中傾斜地で 400 m²/人時であった (図 3-5)。霊仙寺、浅間とも中傾斜地より緩傾斜地の方が生産性は高く、傾斜と生産性の間には負の相関関係がみられた (R=0.727) もの、単回帰分析の結果、回帰式は生産性の予測に有効とは言えなかった ($p > 0.05$)。中傾斜地ではブームの旋回とともにキャビンの傾斜方向が変わり、オペレータの姿勢や機体のバランスが不安定になることから旋回範囲が制限される (オペレータからの聞き取り) ため、緩傾斜に比べて生産性は低下する傾向にあるが、この一要因のみでは説明がつかなかった。なお、既往の研究では、霊仙寺における過去の機械地拵え結果 (大矢ら 2016) では、平均傾斜 11° の伐採地におけるバケット地拵えの生産

性が 238 m²/人時であったと報告しているが、これはササを剥ぎ取る地表かき起こし作業を兼ねていたため、本研究の結果より生産性が低かったと考えられる。

次に、単位面積あたりの枝条量と生産性の関係については、類似した傾斜同士で比較すると霊仙寺より枝条量が少ない浅間の方が生産性は高かった(図 3-5)。バケット地拵えの生産性は、単位面積あたりの枝条量が多いほど低下する傾向があり、

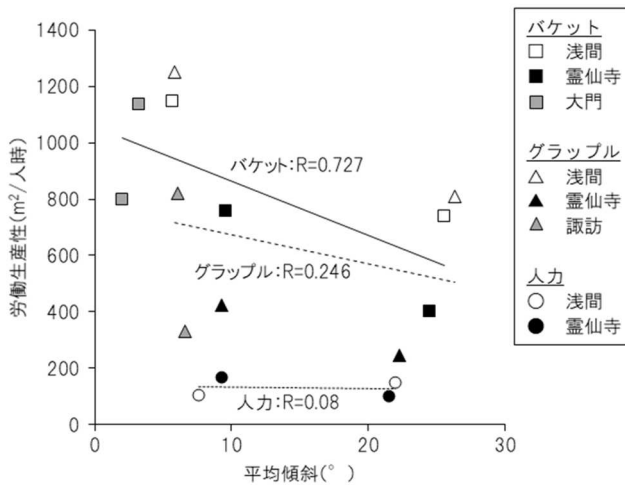


図 3-5 地拵えの労働生産性と傾斜の関係

表 3-3 各試験地における単位面積当たりの枝条層積量

試験地	地拵え区分と単位面積当たりの枝条層積量 (m ³ /m ²)					
	バケット		グラップル		人力	
	緩傾斜	中傾斜	緩傾斜	中傾斜	緩傾斜	中傾斜
霊仙寺山国有林	0.136	0.218	0.167	0.246	0.175	0.287
浅間山国有林	0.067	0.094	0.087	0.084	0.117	0.079
大門山国有林	0.154	—	—	—	—	—
諏訪市団体育林	—	—	0.196	—	—	—
			0.067			

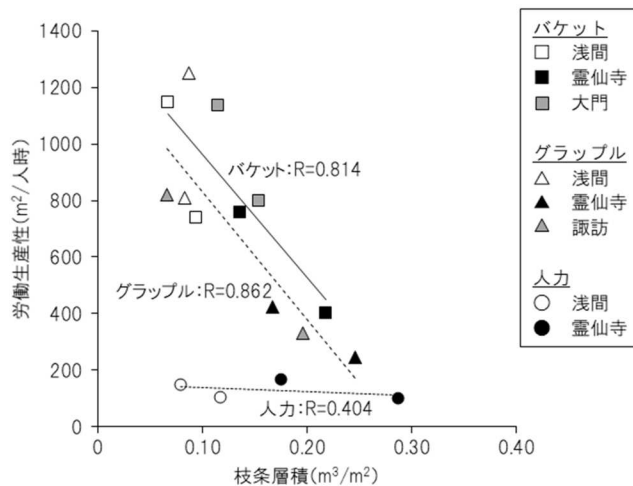


図 3-6 地拵えの労働生産性と単位面積当たりの枝条層積の関係

両者には強い負の相関関係が認められ(R=0.814), 単回帰分析の結果, 回帰式は生産性の予測に役立つと判定された (p<0.05)。両試験地の単位面積あたりの枝条量を比較すると、霊仙寺は浅間の2.0~2.3倍の枝条量があった(表 3-3, 図 3-6)。また、各試験地におけるバケット地拵えの単位面積あたりの要素作業を比較すると、霊仙寺は「枝条等移動・棚積み(アーム・旋回)」の作業時間が浅間や大門に比べて長かった(図 3-7)。これらのことから、霊仙寺では枝条量が多く、その移動と集積に時間を要したため、生産性が低下したと考えられる。

以上の結果から、バケット地拵えの生産性に影響を及ぼす因子は枝条量であり、傾斜も副次的な要因であることが示唆された。

3.1.4 グラップル地拵えの生産性

グラップルによる地拵えの労働生産性は、最大値が浅間の緩傾斜地で1,250 m²/人時, 最小値が霊仙寺の中傾斜地で250 m²/人時であり(図 3-5), 傾斜が大きい方が生産性は低下する傾向がみられた。緩傾斜地・中傾斜地とも浅間は霊仙寺の約 3

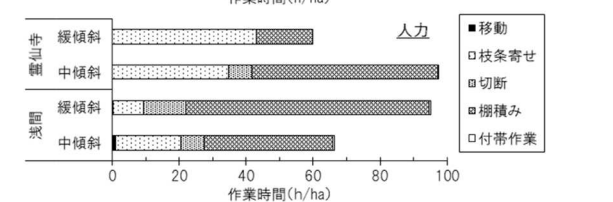
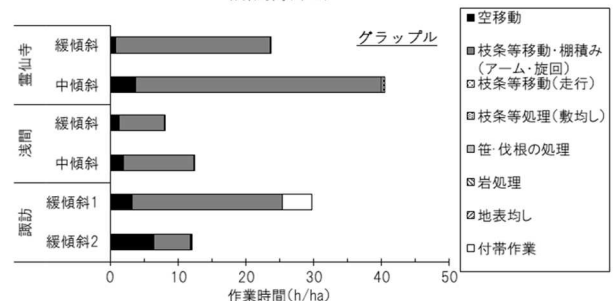
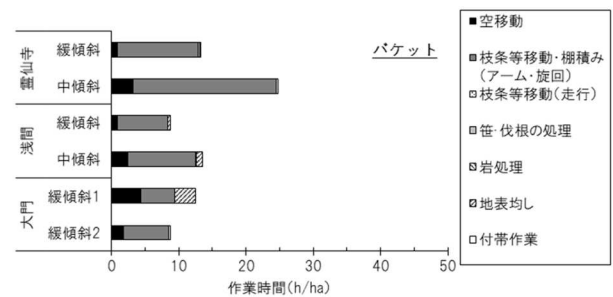


図 3-7 各地拵え方法における単位面積当たりの要素作業時間

倍の生産性を上げ、類似した傾斜における試験地間の生産性の差が大きかったため、グラップルの生産性と傾斜との間の相関関係は弱く(図 3-5, $R=0.246$)、単回帰分析においても生産性の予測に有効ではなかった($p>0.05$)。これらのことから、生産性に対する傾斜の影響はバケットに比べて小さい可能性が示唆された。

一方、グラップル地拵えの生産性もバケットと同様、面積あたりの枝条量が多いほど低下する傾向があり、両者には強い負の相関関係が認められ($R=0.862$, 図 3-6)、生産性の予測に役立つと判定された(単回帰分析, $p<0.05$)。各試験地のグラップル地拵え地における枝条量を比較すると、霊仙寺は浅間の 1.9~2.9 倍、諏訪は浅間の 0.8~2.3 倍あった(表 3-4)。また、3 試験地のグラップル地拵えの要素作業の時間を比較すると、バケットと同様、霊仙寺では「枝条等移動・棚積み(アーム・旋回)」が長かった(図 3-7)。これらのことから、枝条量が多い場合、その集積に要する時間が長くなり、生産性が低下すると考えられた。なお、平坦~緩傾斜地におけるグラップルロードまたはグラップル付バケットによる地拵えの所要人工は、1~2 人日/ha であったことが報告されている(佐々木ら 2013)。これは約 830~1,670 m^2 /人時の生産性に相当し、本研究の結果はそれより低かった。その際に処理した枝条の量は不明であるが、枝条量が生産性に影響している可能性が考えられる。

以上の結果から、グラップル地拵えの生産性に影響を与える因子は主に枝条量であり、傾斜との相関関係は弱いことが示唆されたが、今後サンプル数を増やして再検討する必要がある。なお、グラップルの生産性をバケットと比較すると、バケットの方がやや高い傾向がみられる(図 3-6)。しかし、枝条量が少なかった浅間ではグラップルの生産性がバケットとほぼ同等であり、枝条量が少ない場合はグラップルとの生産性の差は小さくなることが示唆された。

3.1.5 人力地拵えの生産性

人力地拵えの労働生産性は、最大値が霊仙寺の緩傾斜地で約 170 m^2 /人時、最小値が霊仙寺の中傾斜地で約 100 m^2 /人時であり、機械地拵えに比べて

低かった(図 3-5)。類似した傾斜における試験地間の生産性の差は小さく、傾斜と生産性の間には相関関係は認められなかった($R=0.080$)。また、面積あたりの枝条量と生産性の間には負の相関関係が認められた(図 3-6, $R=0.404$)ものの、回帰直線の傾きは小さく、生産性はほぼ一定であった。

同一試験地の同一傾斜区分内で生産性を比較すると、人力地拵えの生産性に対して、バケットは浅間で中傾斜 4.9 倍~緩傾斜 10.9 倍、霊仙寺で中傾斜 3.9 倍~緩傾斜 4.5 倍の生産性を上げ、グラップルでは浅間で中傾斜 5.3 倍~緩傾斜 11.9 倍、霊仙寺では中傾斜 2.4 倍~緩傾斜 2.5 倍の生産性を上げている(図 3-5)。

なお、人力地拵えにおける単位面積当たりの要素作業時間のうち、「枝条寄せ」と「棚積み」がいずれの試験区でも合わせて 8 割以上を占めていた(図 3-7)。北海道におけるササの刈払い(渡辺 2017)に類する作業が生じなかったことは、林床植生の違いによるものと考えられた。また、地拵えの時期が、浅間では伐出作業直後の 8 月、霊仙寺では冬季の伐採から 5 ヶ月後の 6 月であり、植生が回復する前であったことも刈払いが生じなかった要因と考えられる。

以上の結果から、緩傾斜~中傾斜地における地拵えの生産性は、機械を使用することによって従来型的人力作業と比較して最大 12 倍程度向上することが確認できた。

3.2 地拵えのコスト

地拵えコスト算定のための評価値は、既往の文献(全国林業改良普及協会 2001; 日本森林技術協会 2010; 長野県林務部 2017)から表 3-4 のとおり設定した。なお、本稿で示す地拵えコストの値は全て直接費(機械費、作業員人件費)であり、事業体によって差が生じる間接費(機械運搬費、人員輸送費等)は含めていない。

地拵えのコストと平均傾斜、及びコストと単位面積あたりの枝条量の関係を図 3-8、図 3-9 に示した。地拵えコストはバケットが最も低く 43~122 千円/ha、次いでグラップルが 57~291 千円/ha、人力が最も高く 198~322 千円/ha であった。

地拵えコストと傾斜の関係をみると、バケットでは緩傾斜より中傾斜の方がコストは高くなる傾

表 3-4 地拵えコストの諸評価値

機械種	機械価格 (千円)	耐用年数 (年)	稼働日数 (日/年)	固定費 (円/日)	変動費 (円/日)	人件費 (円/日)	計 (円/日)	備考
バックホウ	8,250	6	200	7,774	1,904	19,900	29,578	バケット地拵え(浅間, 霊仙寺, 大門)
グラップル中(ウインチ付)	13,500	6	180	15,048	8,095	19,900	43,043	グラップル地拵え(浅間, 霊仙寺)
グラップル小(ウインチ付)	10,500	6	180	12,062	5,927	19,900	37,889	グラップル地拵え(諏訪)
人力(チェーンソー小)	150	3	180	332	2,380	20,900	23,612	人力地拵え(浅間, 霊仙寺)
人力	-	-	-	-	-	18,000	18,000	人力地拵え(浅間, 霊仙寺)

注) 人件費は、バケット及びグラップル地拵えでは「運転手(特殊)」, 人力地拵えでは長野県森林整備歩掛(長野県林務部森林保全課2000)により特殊作業員1名(チェーンソー作業員)+普通作業員2名の割合で設定した。なお, 1日の実作業時間は6時間とした。

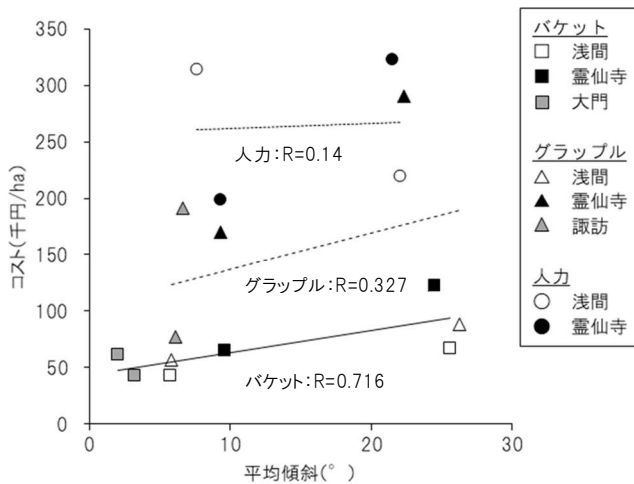


図 3-8 地拵えのコストと傾斜の関係

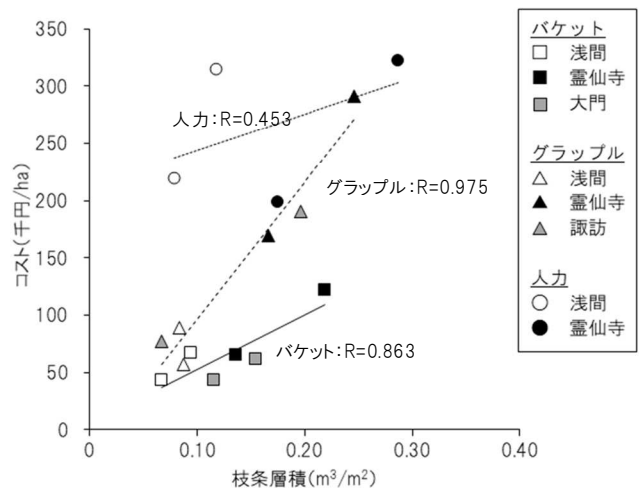


図 3-9 地拵えのコストと単位面積当たりの枝条層積の関係

向がみられ、傾斜とコストの間には強い正の相関関係が認められた ($R=0.716$)。一方、グラップルでは弱い相関関係にすぎなかった ($R=0.327$)。人力では傾斜とコストの間に相関関係は認められなかった ($R=0.040$)。緩傾斜地においては機械地拵えのコストが人力を上回ることはなかったが、中傾斜地では試験地は異なるものの、グラップルのコストが人力を上回る場合もあった。これは、生産性の項で述べたように、傾斜による機械の作業姿勢に加えて、枝条量の影響を受けたことによるものと考えられた。なお、北海道では、平坦地 (10° 以下)における機械地拵えの標準単価として 178~236 千円/ha (全刈り, 手刈補正無, 共通架設費 7.5%含む)と定めている(北海道水産林務部 2017)。これは本研究の緩傾斜地におけるバケット及びグラップルの地拵えコストの値より高いが、丈の高いササを処理するための掛かり増し経費と考えられた。

一方、地拵えコストと枝条量の間をみると、バケット及びグラップル地拵えのコストと枝条量

の間には、生産性と同様、強い正の相関関係があり(図 3-9)、特にグラップルはバケットに比べて枝条量の増加がコストに大きく影響していた(バケット: $R=0.863$, グラップル: $R=0.975$)。グラップルはアタッチメントの価格がバケットに比べて高く機械の評価値が高いため、枝条量が増加するほどコストの差が拡大した。

以上の結果から、地拵えコストはバケット<グラップル<人力の順に高くなることが確認され、同一試験地・同一傾斜におけるコストは、バケットでは人力に比べて 0.14~0.38 倍、グラップルでは 0.18~0.90 倍となった。枝条量が少ない場合は両機械ともコスト削減効果が高い一方、枝条の量が多い場合は特にグラップルでは低コストになるにくいことが示され、機械地拵えのコストには枝条量が大きく影響していることが判明した。

3.3 伐採前林況による地拵えコストの推定

これまでに述べたように、地拵えの生産性とコストには、機械の種類、枝条量、傾斜が影響を及ぼ

すことが明らかになった。したがって、機械ごとに現場の傾斜と枝条量等から生産性の推定式を導き出すことによって、コストも概算できる可能性がある。そこで、本研究で得られたデータをもとに、バケット、グラップルの両機械において、目的変数を労働生産性とし、説明変数を①単位面積当たりの枝条層積 (m^3/m^2)、②傾斜 ($^\circ$)、③棚積み方法(縦・横, ダミー変数)、④ベースマシンのバケット容量 (m^3)、の 4 項目として、重回帰分析を行った。なお、説明変数は各試験地における作業条件の違いから想定しうる項目を極力多く取り入れた。重回帰分析には統計解析用 Excel アドインソフトの Statcel3 を使用し、変数選択-重回帰分析(変数増加法)を行った。説明変数の選択基準は、F 値が 2 以上の場合に有効とした。

その結果、バケットでは説明変数として①単位面積当たりの枝条層積 ($F=12.2$)、②傾斜 ($F=7.9$) の 2 項目が選択され(重相関係数 $R=0.9524$)、バケット地拵えの生産性 P_B ($\text{m}^3/\text{人時}$) の推定式として次式が得られた。

$$P_B = 1441.87 - 3447.40 V_s - 13.71 SI \quad (3-4)$$

ここで、 V_s : 単位面積当たりの枝条層積 (m^3/m^2)、 SI : 傾斜 ($^\circ$) である。この重回帰式の有効性の検定(残差の分散分析)を行った結果、予測に役立つと判定された ($p=0.037$)。この予測式を使用して各バケット地拵え試験区の層積と傾斜から生産性を算出した結果、工期調査結果との誤差は $-12\sim+11\%$ ($-136\sim+86 \text{ m}^3/\text{人時}$) の範囲内であり、比較的正確な生産性が予測できると考えられた(図 3-10 左)。ただし、今回の解析ではサンプル数が少なかったことが影響し、③棚積み方法及び④バケット容量の各変数が選択されなかったことが考えられることから、今後データを蓄積した後に改めて推定式を求める必要がある。

次にグラップルでは、説明変数として選択されたのは①単位面積当たりの枝条層積 ($F=11.6$) のみであり(重相関係数 $R=0.8620$)、グラップル地拵えの生産性 P_G ($\text{m}^3/\text{人時}$) の推定式として次式が得られた。

$$P_G = 1285.31 - 4524.47 V_s \quad (3-5)$$

この重回帰式の有効性の検定を行った結果、予測に役立つと判定された ($p=0.029$)。この予測式を使用して各グラップル地拵え試験区の層積から生産性を算出した結果、工期調査結果との誤差は $-50\sim+37\%$ ($-123\sim+124 \text{ m}^3/\text{人時}$) の範囲にあり、誤差範囲はバケットより大きかった(図 3-11 左)。グラップルでは、選択された説明変数が枝条層積のみであり、傾斜やベースマシンのバケット容量など本来生産性に影響を及ぼすと想定される変数が組み込まれなかったため、今後はデータを蓄積して推定式の精度を高める必要があると考えられた。

ここまで述べた生産性の予測は、伐採後に地拵え後の棚の測定によって明らかになる枝条層積の量をもとにしている。伐採前に地拵えの生産性を予測するためには、伐採前の林況から枝条量を推計することが必要になる。そのため、各地拵え現場で伐採前に行われた林分調査(主林木以外の侵入した広葉樹及びアカマツも含む)による樹種ごとの単位面積当たりの幹材積と立木密度等のデータを基に、家原ら(2008)の方法を用いて、 ha あたりの林分材積 V (m^3/ha) とバイオマス拡大係数 BEF (スギ 1.23, カラマツ 1.15, アカマツ 1.23, 広葉樹は樹種により 1.17 または 1.26)、利用率 R_v から、次式により樹種ごとの推定林地残材量 V' (m^3/ha) を算定した。

$$V' = V(1 - R_v) + (BEF - 1) \quad (3-6)$$

利用率 R_v は、各試験地における伐採前の林分調査結果に基づき、樹種ごとの単木材積から森林保険の標準利用率(森林保険センター2017)を適用した ($0.65\sim0.88$)。その結果、各試験地全体の利用率は、浅間:0.83、霊仙寺:0.86、大門:0.86、諏訪:0.88 となった。

次に、 V' (m^3/ha) は丸太換算材積であるため、空隙を含んだ枝条層積に変換する必要がある。空隙率は、単位面積当たりの枝条層積実測値 (m^3/m^2) と推定林地残材量 (m^3/m^2) の差を枝条層積実測値

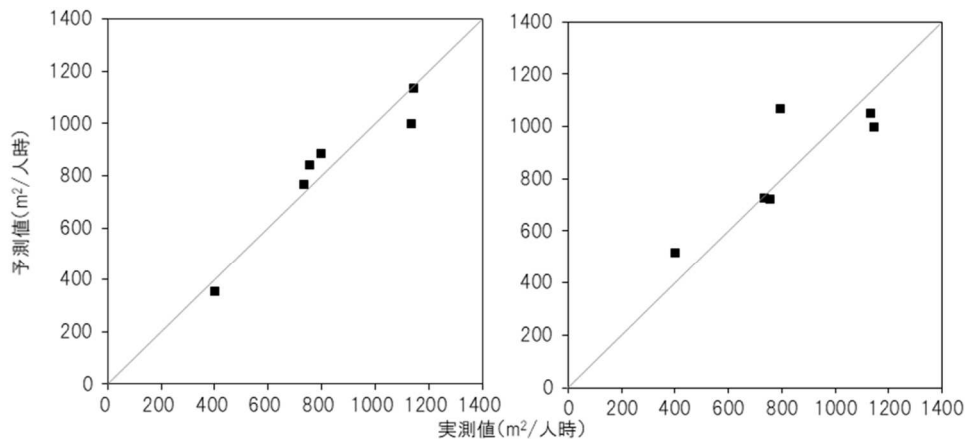


図 3-10 バケット地拵えの生産性実測値と生産性予測値の関係

(左：枝条層積実測値と傾斜実測値に基づく生産性予測値，右：枝条層積予測値と傾斜実測値に基づく生産性予測値)

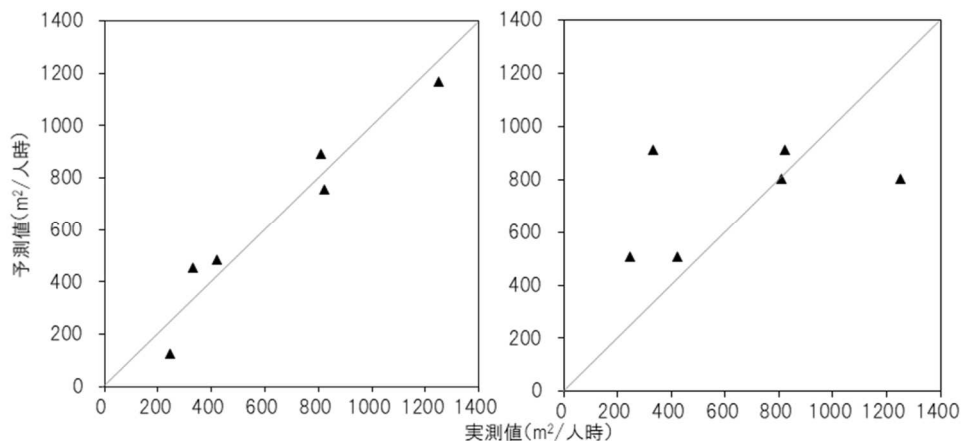


図 3-11 グラップル地拵えの生産性実測値と生産性予測値の関係

(左：枝条層積実測値に基づく生産性予測値，右：枝条層積予測値に基づく生産性予測値)

(m^3/m^2)で除することによって求めた。その結果、各試験地の地拵え区における枝条層積の平均空隙率は0.893(標準偏差 ± 0.033)であったため、推定枝条層積 V_s' (m^3/m^2)は次式により推定される。

$$V_s' = V / (10000 (1 - 0.893)) \quad (3-7)$$

これらの式から林分調査結果を基に単位面積当たりの枝条層積を予測し、さらに生産性を(4)式及び(5)式により予測したところ、予測値は功程調査による実測値に対して、バケットでは $-13\% \sim +34\%$ ($-148 \sim +268 \text{ m}^2/\text{人時}$)に拡大したものの、伐採前の林地残材予測によって生産性の予測が可能であることが示唆された(図3-10右)。一方、グラップルでは誤差範囲が $-33\% \sim +172\%$ (-446

$\sim +579 \text{ m}^2/\text{人時}$)となり、バケットに比べて誤差が大きく拡大し、予測精度に課題が残った(図3-11右)。

林分調査による枝条量の予測値は、林分平均の枝条量であるため、伐出作業により枝条の分布に偏りが生じる林地においては誤差が大きくなると考えられた。生産性の予測式の精度を向上させるためには、今後のデータ蓄積が必要である。また、枝条量を推計するためには林分調査の精度を高める必要があり、標準地の数や面積を増やすなどのほか、地上レーザースキャナ等により面的な資源量を把握するなど新しい手法の活用が期待される。

3.4 小括

緩傾斜地～中傾斜地における機械地拵えを行う場合、処理する枝条の量、及び傾斜によって生産

性とコストは変動することが明らかとなった。現在、長野県で機械地拵えに使用されている機械は、グラップルとバケットが拮抗しているが、本研究の結果からは、事前の林分調査により林床植生が比較的多く、広葉樹等も含めた枝条が大量に発生すると想定される場合は、バケットを選択した方がコストは抑制されることが示された。

なお、機械地拵えの跡地では地表面の攪乱が少なからず発生する。特にバケットでは地表面を掃くように枝条を寄せる、または押すため、先駆種の草本類や木本類の種子を含んだ A₀ 層も枝条とともに集積されることから、更新面内の競合植生の発生が遅れる可能性がある。このことは、その後の下刈りの省力化にも寄与することが予想されるため、今後は機械地拵え施業地における下刈り回数の削減も含めた再造林コストの低減を検討したい。

第 4 章 機械地拵えによる競合植生抑制と下刈りコストの低減

これまで行ってきた機械地拵えの調査は、地拵えの生産性向上及び低コスト化を図ることを主な目的としてきた。しかし機械地拵えは作業の性質上、表土の攪乱を伴うものであり、その作業は天然更新を誘導する際に行う「地表かき起こし」「地がき」と称される地表処理作業に類似している。つまり、A₀ 層や A 層を攪乱もしくは除去する行為が、植物の根系や埋土種子を排除し、植栽木と競合する植生を抑制することが期待でき、ひいては下刈り作業の回数を削減する可能性がある。

これまでに行われてきた天然更新誘導のための地表処理の研究事例としては、カラマツでは五十嵐ら (1987)、中川ら (2012) などがあり、ブナでは小山ら (2000) などがある。これらはササ等の根系除去と鉦質土壌の露出によって目的樹種に対する競合植生の抑制を図ることを主目的としており、機械地拵えより処理強度が強い。一方、機械地拵えは、大矢らの既報 (2016, 2018) のほか、北海道において様々な機械で行われてきた経緯がある (渡辺 2017) が、その処理面における植生の抑制と回復の過程は明らかになっていない。

本章では、造林初期費用の 4~5 割を占めるとされる下刈り作業の回数を削減することを目的として、機械地拵えによって競合植生がどの程度抑制されるのかを明らかにするために、4 種類の地拵え区分 (バケット地拵え、グラップル地拵え、人力地拵え、無地拵え) が競合植生と植栽木の成長に与える影響を評価した。

4.1 地拵え方法と競合植生の関係

4.1.1 試験地の設定

試験地は、一貫作業が行われた長野県上水内郡信濃町の霊仙寺山国有林に 2 か所、北佐久郡御代田町の浅間山国有林に 1 か所、いずれも平均傾斜 15° 以下の緩傾斜地に設定した (表 4-1)。各地拵え試験地は、霊仙寺山国有林では試験地 R1 を 2016 年 6 月中旬に、試験地 R2 を 2017 年 8 月下旬に設定し、浅間山国有林では試験地 A を 2017 年 8 月下旬に設定した。各試験地の面積は、R1 : 784 m²、R2 : 2,142 m²、A : 837 m²である。地拵えの区分は、

①油圧ショベルのバケットによるもの（以下、バケット地拵え、図表ではB）、②木材グラップルによるもの（以下、グラップル地拵え、図表ではG）、③作業員が下刈り鎌やチェーンソーを使用して行うもの（以下、人力地拵え、図表ではJ）、④枝条が残置されたもの（以下、無地拵え、図表ではM）の4種類とした。各地拵え作業の特徴は表4-2のとおりである。試験地 R1 では地拵えを6月に行い、夏季（7月）の植栽であるため植栽可能期間が長いスギコンテナ苗を使用した。試験地 R2 では8月の地拵えであったが、スギコンテナ苗の確保が困難であったため、晩秋（11月）になってからスギ裸苗を植栽した。試験地 A も8月の地拵えであり、一貫作業の流れでは地拵え後直ちに植栽することが理想的ではあるが、カラマツは梢端が木質化していない初秋（10月中旬）までの植栽ではコンテナ苗であっても成長停滞が起きる事例が報告されている（大矢・加藤2018）ことから、晩秋（11月）まで植栽時期を遅らせてコンテナ苗を植栽した。

競合植生調査は、各試験地の各地拵え区分において、試験区内の全植栽木を対象として実施した。試験区面積、植栽密度及び植栽木の本数は表4-1のとおりである。各植栽木を中心として1m×1mの方形コードラートを設定し、競合植生について被度（%）、最大植生高（m）とその植生タイプ（高木、低木、高茎草本、つる、ササ、シダ、低い草

本、裸地）、山川ら（2016）の競合状態の指標（図4-1）を目視判定した。植生調査の実施時期は7月中旬～8月中旬とした。被度は全階層・全種をまとめて目視判定した。最大植生及び植栽木の高さは測竿により測定した。

なお、各試験地では夏季に地拵えを実施し当年秋までに植栽を行ったため、植栽1年目の競合植生の発生はいずれの試験区でもわずかであった。そのため植生調査は、植栽1年目は対象とせず2年目及び3年目に行った。なお、試験区内における継続的な植生の回復状況を把握するため、下刈りは期間を通じて実施していない。各地拵え区分間における各調査項目値の差の検定は、Steel-Dwass 法により多重比較を行った。競合状態については地拵え区分ごとの全体的な傾向を評価するため、C1～C4の指標を4段階に順位化（C1=1, …C4=4）し、平均順位を多重比較した。

4.1.2 被度及び最大植生高の推移

植栽木周辺に生育する競合植生の被度は、試験地 R1 の植栽2年目においては、バケット地拵えが他の地拵え区分に比べて有意に低く、競合植生を抑制していることが認められ（図4-2, $p < 0.01$ ）、その他の地拵え区分間に有意差は認められなかった。植栽3年目になると、有意差はバケット地拵えと無地拵え間のみ（ $p < 0.05$ ）となり、被度の差が縮小していた。試験地 R2 では、植栽2年目の被

表4-1 試験地の概要

試験地名(略称)	所在地	標高(m)	平均傾斜(°)	伐採前の樹種	植栽樹種	植栽苗	植栽密度(本/ha)	作業年月		各地拵え試験区の面積と植栽木本数 [※]				
								伐出	地拵え	植栽	バケット地拵え(B)	グラップル地拵え(G)	人力地拵え(J)	無地拵え(M)
霊仙寺山国有林1(R1)	信濃町	830	9.3-9.6	スギ	スギ	コンテナ苗	約1400	2015/12	2016/6	2016/7	266m ²	217m ²	156m ²	145m ²
											32本	29本	19本	24本
霊仙寺山国有林2(R2)	信濃町	900	11.7-14.4	カラマツ	スギ	裸苗	約1900	2017/7	2017/8	2017/11	1014m ²	649m ²	154m ²	325m ²
											180本	114本	33本	44本
浅間山国有林(A)	御代田町	1220	5.7-7.6	カラマツ	カラマツ	コンテナ苗	約2400	2017/7	2017/8	2017/11	304m ²	316m ²	115m ²	102m ²
											69本	58本	31本	27本

※地拵え柵を含む場合があるため面積当たりの植栽本数は均一ではないが、各試験地における植栽間隔はおおむね均一である。

表4-2 各地拵え区分における地拵え作業の特徴

地拵え区分(略称)	地拵えの動作	A ₀ 層土壌の攪乱, 灌木等の伐根抜き取り
バケット地拵え (B)	引き寄せ, 押し寄せによる棚積み	面的
グラップル地拵え (G)	つかみによる棚積み	部分的
人力地拵え (J)	チェーンソーで枝条切断, 鎌で刈払い, 棚積み	なし
無地拵え (M)	なし	なし

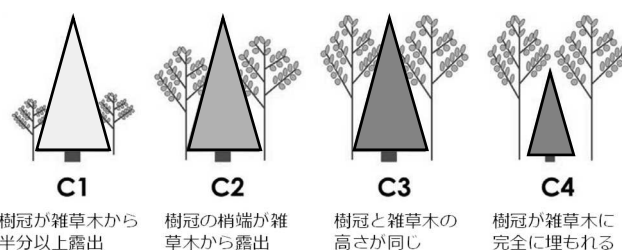


図4-1 競合状態の指標

(原図は山川ら(2016)による)

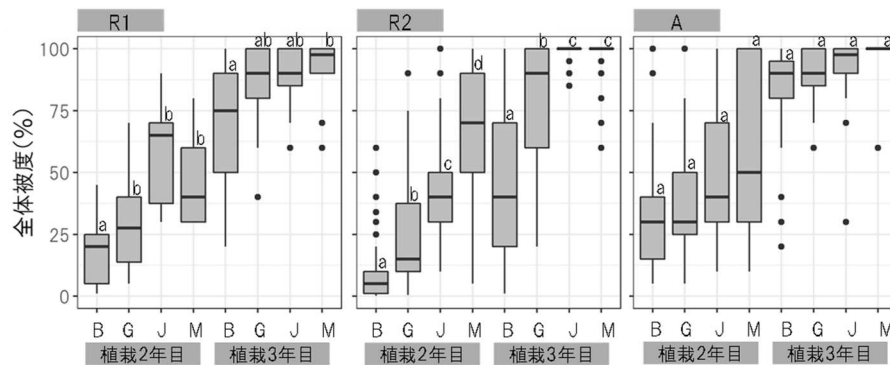


図 4-2 地拵え区分ごとの全体被度の分布

※箱の右肩の添字は、各試験地の各年次において同一アルファベットを含まない組み合わせの間に有意差があることを表す。

度はすべての組み合わせにおいて有意差が認められ ($p < 0.01$)、バケット < グラップル < 人力 < 無地拵えの順に有意に高くなった。植栽 3 年目には人力地拵え - 無地拵え間のみ有意差がなくなったものの、その他の地拵え区分間では依然として有意差が認められた ($p < 0.01$)。これらに対して試験地 A では植栽 2 年目、3 年目とも各地拵え区分間の被度に有意差は認められなかった ($p > 0.05$)。

植栽 2 年目の植栽木周辺における最大植生高は、試験地 R1 ではバケット地拵えが人力地拵え、無地拵えに対して有意に低かった (図 4-3, 順に $p < 0.01$, $p < 0.05$)。また、試験地 R2 の最大植生高は、すべての地拵え区分間で有意差が認められ、バケット < グラップル < 人力 < 無地拵えとなった ($p < 0.01$, 人力 - 無地拵え間のみ $p < 0.05$)。しかし、被度と同様、試験地 A ではすべての組み合わせで有意差が認められなかった。植栽 3 年目の最大植生高は、いずれの試験地においても 2 年目に比べて高くなったものの、バケット地拵えでは人力及び無地拵えに対してすべての試験地において有意に低かった (試験地 R1, A では $p < 0.05$, 試験地 R2 では $p < 0.01$)。

植栽 2 年目において最大高を占める競合植生タイプのうち木本類 (高木および低木) の割合は、人力地拵えでは 60~75%, 無地拵えでは 50~63% であったのに対して、バケット地拵えでは 15~50%, グラップル地拵えでは 29~56% であり、両機械地拵えとも木本類の割合が少なかった (図 4-4)。一方、高草及び低草・裸地は、バケット地拵え、グラップル地拵えの方が人力地拵え、無地拵えより出現割合が高かった。植栽 3 年目には、バケット、

グラップル地拵えにおいて低草・裸地が減少し、木本類及び高草が増加する傾向がみられ、各地拵え間の植生タイプの違いは 2 年目より小さくなる傾向がみられた。

以上のように、被度及び最大植生高は、各試験地においてバケット地拵えが最も低く、グラップル地拵えがそれに続いた。試験地 A では、バケット及びグラップル地拵えにおける競合植生の抑制が他の試験地に比べてやや弱く、攪乱強度が低いことが推察された。攪乱強度が高いほど、鉦質土壌が露出するため植生タイプに占める裸地及び低い草本類の割合が増加するが、試験地 A ではバケット地拵え、グラップル地拵えともこれらがゼロであった一方、試験地 R1 と R2 ではバケットで 24~65%, グラップルで 5~25% であった (図 4-4)。このことから、試験地 A では攪乱強度が他の試験地より低いいため、競合植生の抑制効果が限定的であったことが推察された。また、最大植生高は GLM 解析の結果、試験地 R2, A において樹高成長率に正の相関を示していることが確認された。この結果は、植栽木の成長量が高いところでは水分条件等が良く、競合植生も良く育つことを表していると考えられる。植生タイプは、試験地 R1 ではクロヅル、ヤマブドウ、サルナシ等が随所に見られ、植栽木の梢端まで絡みついており、試験地 R2 では無地拵え試験区においてササによる植栽木の被圧がみられた。これらの植生が多い再生林地においては、特に留意して下刈り作業を行う必要があると考えられた。また、バケット及びグラップル地拵えでは植栽 2 年目は裸地および低い草本が多く木本類が少ない傾向がみられたものの、植栽 3 年

目になると各地拵え区分の植生タイプの差は小さくなった。この要因は、裸地に実生由来のクマイチゴやタラノキ等の低木類、タケニグサ等の高茎草本が新たに進入したことによるものと推察された。

4.1.3 競合状態の推移

各試験地の植栽2年目における競合状態の平均順位は、バケット地拵えではいずれの試験地においてもグラッフル、人力及び無地拵えに対して有意に低かった(図4-5, $p < 0.01$)。また、グラッフル地拵えは無地拵えに対してはR2とA、人力に対

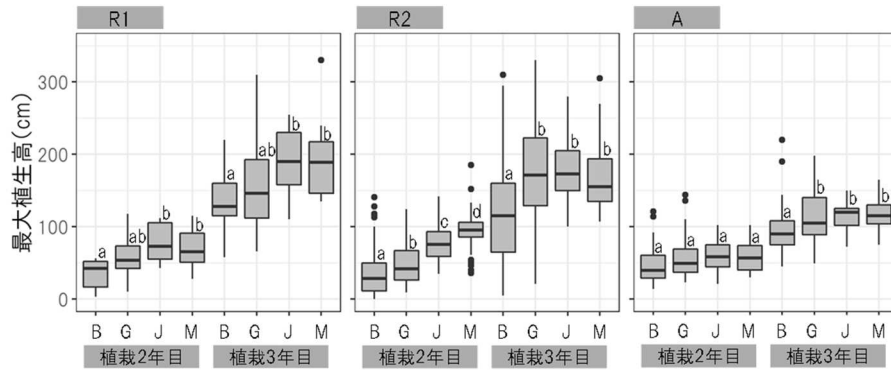


図4-3 地拵え区分ごとの最大植生高の分布

※箱の右肩の添字は、各試験地の各年次において同一アルファベットを含まない組み合わせの間に有意差があることを表す。

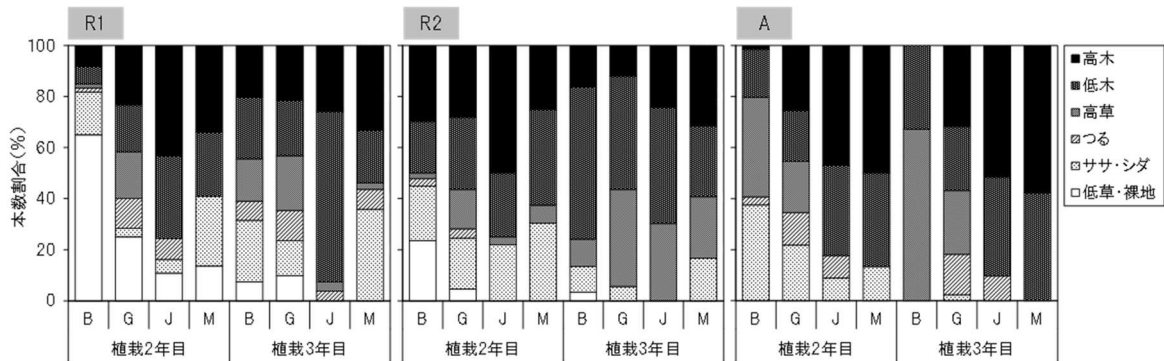


図4-4 地拵え区分ごとの各植栽木周辺の最大植生タイプ

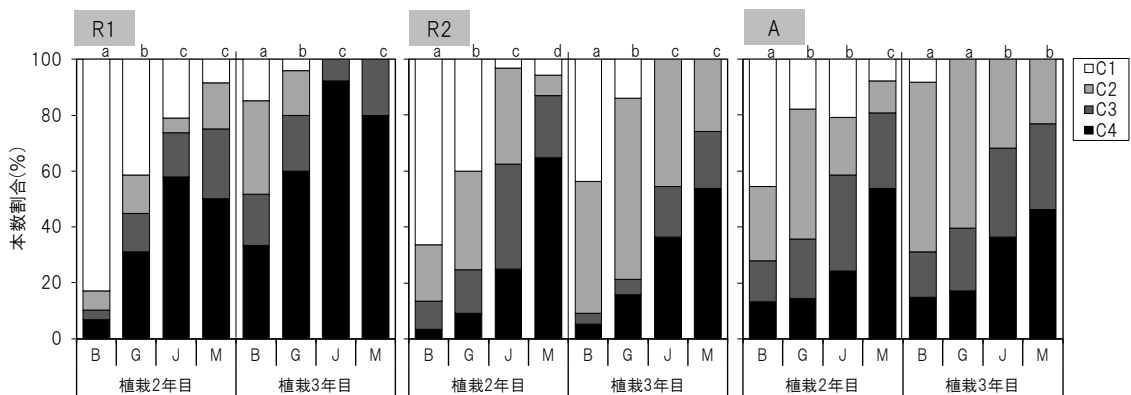


図4-5 地拵え区分ごとの植栽木と競合植生の競合状態

- C1: 植栽木の樹冠が周辺の雑草木から半分以上露出
- C2: 植栽木の梢端が周辺の雑草木から露出
- C3: 植栽木と雑草木の梢端が同位置
- C4: 植栽木が雑草木に完全に覆われている

※バー上の添字は、各試験地の各年次において同一アルファベットを含まない組み合わせ間で、競合状態の平均順位に有意差があることを表す ($p < 0.01$)。

しては R1 と R2 で有意に平均順位が低かった ($p < 0.01$)。植栽 3 年目における競合状態の平均順位は、バケット地拵えは人力及び無地拵えに対していずれの試験地でも有意に低かった ($p < 0.01$)。グラップルは人力及び無地拵えに対して試験地 R2, A において有意に低かった ($p < 0.01$)。

植栽木と周囲の植生の競合状態に関しては、バケット地拵えでは競合状態が低く、C4 の植栽木の割合が植栽 2 年目で 3~13%, 3 年目でも 5~33% という低いレベルにあったため、少なくとも 2 年目の下刈りは省略することが可能と考えられた。また、グラップル地拵えにおける C4 の植栽木は植栽 2 年目で 9~31%, 3 年目で 16~60% であり、状況に応じて 2 年目の下刈りを省略することも可能と考えられる。

バケット地拵えによる競合植生の抑制効果がグラップル地拵えより高かった要因としては、地表攪乱の程度の違いが考えられる。バケット地拵えでは枝条を爪で引っ掛けて A₀ 層土壌とともに地拵え棚に寄せるのに対して、グラップル地拵えでは枝条をつかみ取り、空中移動により棚積みを行う。いずれの方法でも、意図せずともシダ類や木本類の根株の除去が行われるため、これらの萌芽更新が減少する傾向がある。さらに、バケットでは面的に、グラップルでは点状に根株除去が行われることから、萌芽枝の発生を減少させる働きはバケット地拵えの方が大きいと考えられた。

4.2 地拵え方法と植栽木の生存率及び成長の関係

次に、地拵え方法が植栽木の生存率、樹高成長、及び直径成長に与える影響を明らかにするため、R1, R2, A の 3 カ所の試験地内の全植栽木について、植栽時及び成長期末ごとに植栽木の生死、樹高 (cm) 及び根元直径 (mm) を調査した。植栽木の樹高は測竿、根元直径は地際から 5cm 上を防水デジタルノギスにより測定した。植栽木のサイズ測定は成長停止期に行った。

4.2.1 生存率

試験地 R1 におけるスギの生存率は、バケット及びグラップル地拵えでは植栽 3 年目でも 90% 以上、無地拵えでは約 88% であった (図 4-6)。一方、人

力地拵えでは植栽 2 年目の夏に生存率が約 74% に低下していたが、それ以降、低下傾向は認められなかった。試験地 R2 のスギは植栽 3 年目までの生存率に地拵え方法による差はなく、いずれの地拵え区分でも 90% 以上の生存率を維持していた。これらに対して、試験地 A のカラマツは、バケットとグラップル地拵えでは植栽 3 年目の生存率が 88% であった一方、人力地拵えでは約 65%, 無地拵えでは約 46% にまで低下した。

植栽木の生存率は、試験地 R1 のスギでは人力地拵えで 2 年目の夏までに生存率の低下が見られたが、それ以後は他の地拵え区分と同様に平衡状態を保っていた。このことから、人力地拵えの生存率低下は被圧による枯死ではなく活着不良によるものと推察され、試験地 R1 における地拵え区分間の生存率の差はないと考えられる。また、試験地 R2 のスギも、競合植生の状態が様々であるいずれの地拵え区分においても高い生存率を維持しており、スギは一定程度の耐陰性があるため被圧を受けても生存率が低下しにくいと考えられた。一方、試験地 A のカラマツは、競合状態 C4 の割合が高い地拵え区分ほど生存率は低下し、無地拵えでは 3 年目に 50% を下回ったことから、耐陰性が比較的低いカラマツにおいては、被圧による枯死が発生しやすいと考えられ、樹種特性を考慮する必要がある。

4.2.2 樹高

植栽木の平均樹高は、試験地 R1 のスギは植栽 3 年目秋の時点でバケット地拵えにおいて最も高く、グラップル地拵えがそれに続いた。無地拵えと人力地拵えにおいてはバケット地拵えに比べ平均樹高が有意に低かった (図 4-7, $p < 0.01$)。一方、試験地 R2 のスギと試験地 A のカラマツでは、グラップル地拵えでの樹高が有意に高かった ($p < 0.05$)。一方で、バケット地拵えでの樹高は人力および無地拵えでの樹高と有意差がない (試験地 A, $p > 0.05$) か、人力より有意に低かった (試験地 R2, $p < 0.05$)。

4.3 一般化線型モデルによる競合植生と植栽木の関係解析

各試験地の各期における植栽木の成長量と地拵え区分及び競合植生の状態の関係を一般化線型モ

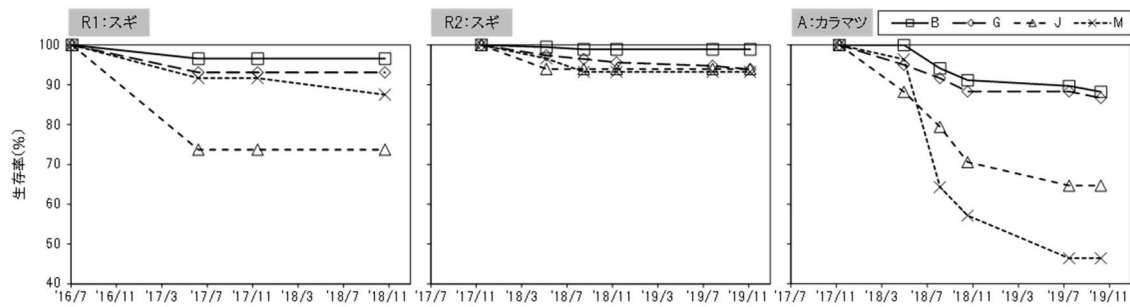


図 4-6 地拵え区分ごとの植栽木の生存率の推移

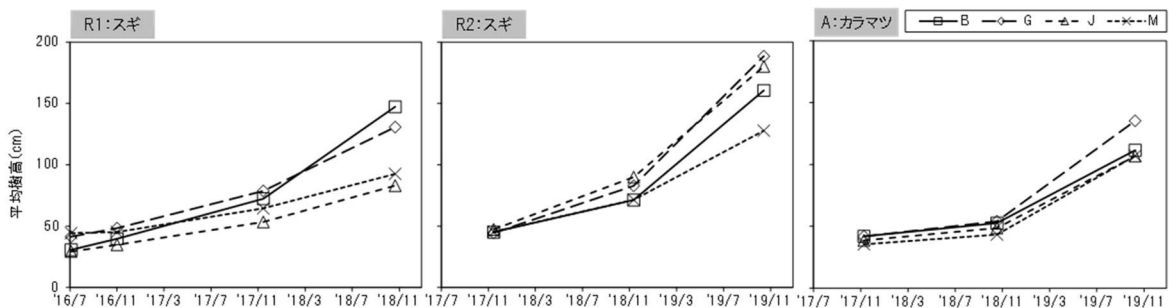


図 4-7 地拵え区分ごとの平均樹高の推移

デル (GLM) により解析した。なお、成長量は相対樹高成長率により評価し、下記 (4-1) 式により算出した。

$$HG_n = \ln(H_n) - \ln(H_{n-1}) \quad (4-1)$$

ここで、 HG_n は植栽 n 年目の相対樹高成長率、 H_n は植栽 n 年目期末の樹高、 H_{n-1} は植栽 n 年目期首 ($n-1$ 年目期末) の樹高を表す。解析には統計パッケージ R 3.6.3 を使用し、リンク関数は対数、確率分布は γ 分布として glm 関数を用いた。応答変数は植栽 2 年目期末及び 3 年目期末における各 1 年間の相対樹高成長率とし、説明変数は地拵え区分、各期の被度、最大植生高、競合状態指標、最大植生タイプ及び各期首における植栽木の形状比とした。定性データである地拵え区分、競合状態指標、植生タイプはダミー変数に変換し、標準として地拵え区分は人力地拵え、競合状態は C2、植生タイプは低木を設定し、同一カテゴリの変数と対比し解析した。全ての説明変数を投入したフルモデルによる解析を行った後、ステップワイズ法による変数選択を実施し最適モデルを作成した。

また、下刈りの必要性の判断材料となる競合状

態 C4 の割合についても GLM 解析を行った。応答変数は各期の各地拵え試験区における競合状態 C4 の割合とし、説明変数は各期の各試験地における地拵え区分、平均被度、平均最大植生高、最大植生タイプの割合、各期首における植栽木の樹高とした。

4.3.1 樹高成長率

植栽木の相対樹高成長率に影響を及ぼす説明変数として最も多く選択されたのは期首形状比であり、形状比に反比例して樹高成長率は低下していた (表 4-3)。

地拵え区分が樹高成長率に及ぼす影響については、バケット地拵えでは試験地 R1, R2 の 3 年目において人力地拵えに対して樹高成長率が有意に高かった一方、試験地 R2 の 2 年目においては有意に低かった (図 4-8)。試験地 A のカラマツでは 2 年目、3 年目とも有意差が認められなかった。また、グラップル地拵えにおける樹高成長率は、いずれの試験地においても人力地拵えに対して有意差は認められず、無地拵えは試験地 R2 の 2 年目において人力地拵えに対して有意に低かった。

競合植生の状態を表す説明変数については、被

度は試験地 R1 の 2 年目, R2 の 3 年目において樹高成長率を有意に低下させていたが, 試験地 A においては影響が認められなかった。最大植生高は, 試験地 R2 の 2, 3 年目, 試験地 A の 3 年目において樹高成長率に正の相関を示していた。競合状態については, 植栽木が被圧状態にあった C4 において, 基準とした C2 と比較して樹高成長率が有意に

低かったのは, 2 年目は試験地 R2 のみであったものの, 3 年目はすべての試験地において有意に低かった (図 4-9)。植栽木と競合植生の高さが同レベルである C3 でも, 植栽 3 年目のすべての試験地において C2 より樹高成長率が有意に低かった。しかし, 試験地 R2 の 2 年目においては, 被圧されていない C1 でも樹高成長率が有意に低かった。植生

表 4-3 一般化線型モデルによる植栽木の相対樹高成長率と地拵え区分及び競合植生の関係

応答変数	説明変数	試験地R1(霊仙寺山国有林1_スギ)				試験地R2(霊仙寺山国有林2_スギ)				試験地A(浅間山国有林_カラマツ)			
		植栽2年目		植栽3年目		植栽2年目		植栽3年目		植栽2年目		植栽3年目	
相対樹高成長率	切片	1.0111	0.1130 ***	0.8469	0.1199 ***	1.0645	0.0659 ***	1.2567	0.0441 ***	0.5586	0.0689 ***	1.3297	0.0953 ***
	期首形状比	-0.0074	0.0017 ***	-0.0025	0.0014	-0.0082	0.0010 ***	-0.0075	0.0008 ***	-0.0030	0.0007 ***	-0.0094	0.0010 ***
	地拵え区分	0.0917	0.0465 *	0.1068	0.0530 *	-0.1336	0.0242 ***	-0.0587	0.0195 **				
	バケツ グループ												
	無地拵え					-0.1682	0.0384 ***	-0.0517	0.0266 *			0.1140	0.0592 *
	全体被度	-0.0022	0.0009 *					-0.0008	0.0004 *				
	最大植生高	-	-			0.0020	0.0006 ***	0.0004	0.0002 **			0.0016	0.0006 *
	競合状態指標					-0.0834	0.0315 **						
	C1												
	C3			-0.1417	0.0701 **	-0.0653	0.0378 *	-0.1165	0.0298 ***			-0.1125	0.0434 *
	C4			-0.2512	0.0607 ***	-0.1828	0.0511 ***	-0.2271	0.0243 ***			-0.1562	0.0500 **
	植生タイプ												
	高木												
	高草												
	つる	-0.2982	0.0913 **										
	ササ・シダ							-0.0799	0.0279 **				
	低草・裸地												

※ダム変数とした地拵え区分・競合状態指標・植生タイプでは, それぞれ人力・C2・低木を標準として, 同一カテゴリの変数と対比し解析した
 ※***: p<0.001, **: p<0.01, *: p<0.05, : p<0.10

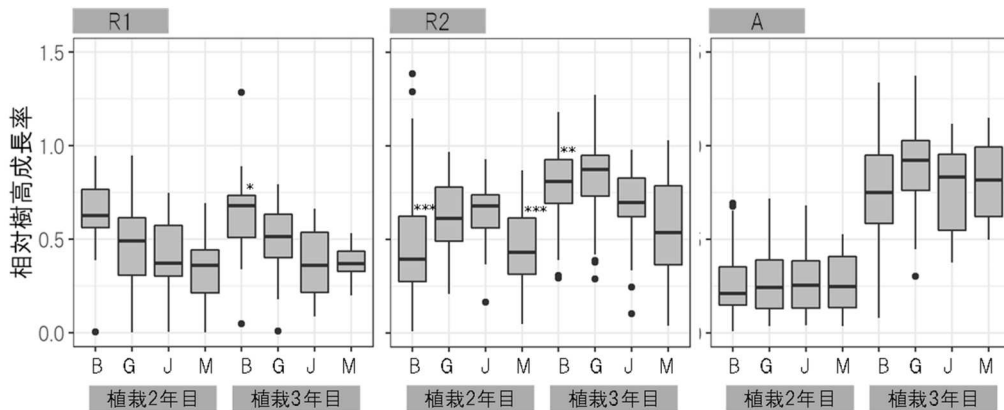


図 4-8 地拵え区分と相対樹高成長率の関係

※箱上の*は同一試験地・年次において人力地拵え (J) に対する有意差を示している (***: p<0.001, **: p<0.01, *: p<0.05)。

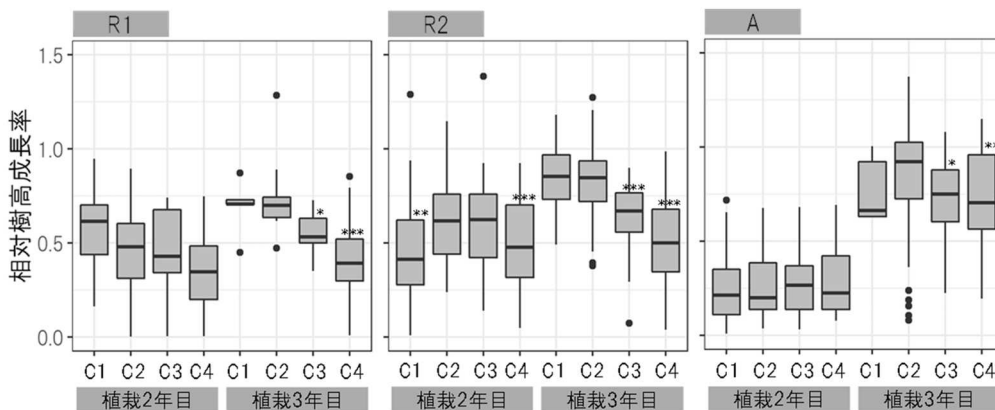


図 4-9 競合状態と相対樹高成長率の関係

※箱上の*は同一試験地・年次において競合状態 C2 に対する有意差を示している (***: p<0.001, **: p<0.01, *: p<0.05)。

タイプでは、試験地 R1 の 2 年目ではつる、試験地 R2 の 3 年目ではササ・シダが樹高成長率に有意に負の影響を及ぼしていた。

地拵え区分と植栽木の樹高成長の関係及び GLM による植栽木の樹高成長率解析の結果 (表 4-3) から、試験地 R1 ではバケット地拵えで植栽木の成長が有意に高かったことが示された。このことは、競合植生が抑制されたことによって植栽木が十分な光を受けることができたためと理解される。しかし、試験地 R2 のスギ及び試験地 A のカラマツでは、グラップル地拵えでの樹高が最も高くなり、バケット地拵えでの樹高は人力及び無地拵えと有意差がない (試験地 A) か、人力よりやや低かった (試験地 R2)。枝条を植栽面から排除することはグラップル地拵えも同様であるが、バケット地拵えではさらに表層土壌 (A₀ 層) の剥ぎ取りが加わる。北海道で実施されている樹木の更新誘導のための地がき処理では表層土壌の除去が更新木の成長に影響することが報告されており (Aoyama et al. 2009, 中川ら 2012), 今回のバケット地拵えにおける表層土壌除去も植栽木の成長に影響を及ぼすことが推察された。また、枝条のみの除去事例として、皆伐地に植栽したアカエゾマツの活着及び成長が枝条を残置した方が除去した場合より良好であったこと (真田ら 1977), 45 年生のスギ林間伐時の全木集材による枝条収穫が残存木の成長を低下させた可能性が示唆されたこと (山田ら 2016) などが報告されている。本研究においては、GLM による相対樹高成長率の解析結果からも、バケット地拵えでは試験地によって樹高成長が促進される場合と抑制される場合が示された。これらは相反する結果ではあるものの、光環境の改善と土壤化学性の低下がトレードオフの関係にあり、両効果が拮抗していることが推察される。

4.3.2 競合状態 C4 の割合

GLM 解析により C4 割合を有意に低下させる要因として選択された説明変数は、地拵え区分のうちバケット地拵え及びグラップル地拵えであった (表 4-4)。C4 割合を有意に高める要因としては被度が選択され、最大植生高、各植生タイプの割合、及び期首樹高の影響は認められなかった。

GLM による競合状態 C4 割合の解析では、バケッ

ト地拵えが有意に C4 割合を低下させていることが示された。競合状態の緩和は植栽木の生存率向上に寄与していることから、やや成長が停滞する可能性があるとしても、バケット地拵えの優位性は高いと考えられる。また、グラップル地拵えはバケット地拵えより C4 割合はやや高いものの、植栽木の成長停滞は認められず、生存率もバケット地拵えと同等であったことから、競合状態を見極めつつ下刈りを省略できる可能性があると考えられた。

表 4-4 一般化線型モデルによる各試験区の競合状態 C4 の割合と地拵え区分及び植生の関係

応答変数	説明変数	推定値	標準誤差	p 値
C4割合	切片	4.2309	0.6901	***
	平均期首樹高			
	地拵え区分			
	バケット	-1.5088	0.4416	**
	グラップル	-0.7911	0.3498	*
	無地拵え			
平均被度		0.0175	0.0055	**
平均最大植生高				
植生タイプ	高木の割合	-0.0245	0.0132	
	低木の割合			
	高草			
	つる			
	ササ・シダ			
	低草・裸地			

※ダミー変数とした地拵え区分は、人力地拵えを標準として同一カテゴリの変数と対比し解析した。

※***:p<0.001, **:p<0.01, *:p<0.05, .:p<0.10

4.4 小括

以上のことから、現段階において植栽木の健全な生育を図りつつ造林費用を最も効果的に低減できる施業方法としては、①皆伐後速やかにバケット地拵えを実施、②当年秋 (または翌春) に裸苗を植栽、③2 年目は下刈りを省略、④3 年目と 4 年目は適期に下刈りを行う、という流れが妥当と考えられる。なお、4 年目の下刈りは、植栽木の成長が競合植生を超えていれば省略することも可能であり、逆に 5 年目でも競合植生を超えていなければ下刈りを継続する必要があり、状況に応じた判断が必要である。

本研究において、機械地拵え、特にバケット地拵えが競合植生を効果的に抑制することが明らかになった。また、バケット地拵えの地表処理によって競合植生との競争を回避できた結果、植栽木の成長が促進されることもあれば、逆に抑制される場合もあり、枝条や A₀ 層土壌が植栽面から排除されることによる林地保全上の課題も懸念さ

れた。それでもなお、バケット地拵えによる競合植生の抑制は植栽木の生存率を向上させていることや下刈り回数削減への寄与、高い生産性による地拵えコストの低減を考慮すると、実用上支障のない程度の成長停滞は許容範囲内と考えられる。残された課題として、A₀層土壌の剥ぎ取りによる林地の養分欠乏や乾燥化、バイオマス発電等を目的とした末木枝条の過度な搬出による林地荒廃の程度を定量的に明らかにすることが求められる。

第 5 章 総合考察

第 1 章第 1 節で述べたように、従来の人工造林は主伐から植栽までの作業が足かけ 3 年、あるいはそれ以上の期間をかけて行われることが通例であった。従来作業では伐出から 1 成長期以上経過した秋頃に地拵えを行うため、その時点で競合植生が一定程度回復しており、地拵え時には枝条整理を行うより前に刈払い作業を余儀なくされることが多い。また、従来の地拵えは人力作業であるため表土の攪乱はほとんど発生しない。そのため速やかな植生回復が図られ、林地保全上は望ましいものの、下刈りの削減という観点からは極めて不利な条件となり、植栽当年の夏から下刈りが必要となる。そして従来の下刈りは、植栽木のうち樹高成長が劣る個体を基準として実施され、それらが競合植生高を超えるまで続けられる。場合によっては、枯損木や誤伐木の発生を理由として補植が行われるため、これら成長の遅れた個体の被圧回避のために延々と造林地全域で下刈りが続けられ、当初の植栽年から 10 年近く下刈りが継続的に行われることも珍しくない。

このように従来行われてきた更新作業は、一見、丁寧できめ細かな作業として認識されるが、本来の目的に立ち返ってみれば不要と考えられる作業も含まれている。また、伐出、地拵え、植栽の各間に競合植生が回復する時間を与え、下刈りの作業量が増える原因を自ら生み出している面もある。

本研究では、一貫作業システムの導入によってもたらされる機械地拵えが、地拵えコストのみならず下刈りコストの低減に寄与することを示してきた。本章では、既往の人工林更新技術を再構築することを目的として、機械地拵えを軸としながら人工林の更新コストの低減策を総合的に考察する。

5.1 伐出

主伐時における伐倒、木寄せ、造材、集材等の一連の伐出作業にあたっては、伐出終了後、植栽までの期間の長短がその後の造林地における競合植生の回復に大きく影響を及ぼすことに留意する

必要がある。競合植生の多寡は地拵えのみならず下刈りの難度や必要性に大きく影響するためである。従来行われてきた伐出と造林を分離した作業方法では、伐出から地拵え、植栽までに1年以上を要し、造林木と競合する植生が月日の経過とともに回復してくるため、地拵えや下刈り作業の困難度が増すことは必然であった。このような施業が行われてきた背景には、公共事業においては年度をまたいだ作業の発注が予算執行上困難であることが挙げられる。また、林業事業者においては、伐出は素材生産業者、造林は森林組合が担うといった役割分担が存在している。仮に同一事業者が両方の作業を担っている場合でも、林産班と造林班に分かれていることが多く、相互の利便性を把握できずに作業の分断が生じていたことが考えられる。

このような不都合な事態を解決する手法として考案された一貫作業システムは、伐出作業と併行して、あるいは伐出作業完了後直ちに造林を行う作業システムである。地拵えや苗木運搬等に伐出作業に使用していた機械を兼用することによって造林の機械化が図られるとともに、作業期間の短縮が図られ競合植生の回復前に植栽まで完了することが可能となる。加えて、これまで分離していた個別技術を一連の流れとして認識することにより、地拵えや植栽、下刈りなどの造林に対して、伐出時に支障となるような要因を排除する意識が働くことが相乗効果として期待できる。伐出と造林を必ずしも同一業者が行う必要はないが、伐出はその後に続く造林を強く意識して行うことが求められる。一貫作業システムは伐出作業そのものを効率化するものではないものの、それに続く造林を効率化するためには、今後標準化されるべき作業システムと言えよう。

なお、伐出機械を地拵えや苗木運搬等の造林に使用することが、伐出作業の生産性を低下させることがないよう留意することが必要である。伐出作業がすべて終了し、次の現場に移動できる段階になってから地拵え等を始めるとなると、次の現場の伐出作業に支障をきたす場合もある。バケットは作業道開設や土場の造成など土工に使用する機械であり、次の現場にいち早く入る必要があるため、伐出作業と地拵え作業はできる限り並列で

行うことが望ましい。一方、グラップルは伐出現場では木寄せや土場でのはい積み、仕分け、材の整理に使用するため、次の現場の伐倒作業が始まり木寄せ作業にとりかかるまで多少の時間的余裕があるが、やはりグラップルによる地拵えは並列作業で行うことが望ましい。フォワーダによる獣害防護柵等の資材運搬は伐出作業の合間を見ながら行う。苗木の運搬は現場を引き上げる直前に行い、植栽作業までのタイムラグをできる限り短くすることに留意が必要である。伐出作業中のどの時点で地拵えや運搬を位置づけるか、作業全体の流れを事前に組み立てておき、適宜調整することが求められる。

5.2 地拵え

従来の地拵え作業は、伐出作業から一定期間（1成長期以上）経過した後に行うことが多く、競合植生を刈り払う作業を伴っていた。また、地拵えのためだけに現場に機械を搬入することはコスト面から困難を伴うため、緩傾斜地であっても人力で地拵えを行うことが一般的であった。しかし一貫作業システムであれば、刈払い作業も機械の回送も不要となる。伐出作業に先立ち作業道開設などの土工を伴う作業を行った場合、現場にはバケットが配備されている。また、木寄せ作業や土場でのはい積みなどにはグラップルが用いられることが多い。一方、プロセッサやハーベスタには木材をつかむ機能があるが、構造が複雑で油圧ホースが数多く装着されているため、不定形の枝条を扱うことはホース破損等の故障のリスクを高めることとなり地拵え作業には向かない。そのため、地拵えに使用する機械としてはバケットまたはグラップルが最も汎用性が高いと考えられる。

まず、バケットを地拵えに使用する場合、一貫作業システムにおける標準的な工程は、

- ①バケットで作業道を開設
- ②作業道が開設された部分から併行して伐出作業を開始
- ③作業道開設が全域で完了後、伐出作業が終わった部分から順次バケット地拵えを実施

という流れになる。以上の作業手順では、「作業道開設と伐出」、「伐出と地拵え」がそれぞれ並列作業として成立するため、作業期間を短縮すること

が可能となる。また、現場に配置できる作業員数が不足している場合には、作業道開設を先行して完了させ、その後同一オペレータが伐出作業に取りかかり、伐出が伐区全域で完了してから地拵えを行うことも想定される。この場合はバケットの稼働率が低下するため、可能であれば伐出と地拵えを並列で進めることが望ましい。

次に、グラップルを地拵えに使用する場合には、伐出作業とのバランスを取ることに留意が必要である。伐出作業時にグラップルが主に木寄せ作業に従事する場合、作業道で囲まれるような一定のまとまったエリアで木寄せを完了させ小面積単位で直ちに地拵えを行うか、あるいは伐区全域で木寄せ作業を完了させてから全域の地拵えを行うか、土場でのはい積みや選別におけるグラップルの必要性も考慮しつつ、現場に合わせた工程管理が求められる。

なお、バケット、グラップルとも共通のこととして、地拵え作業にあたっては機械走行による土壌の締め固めの回避に留意しなければならない。締め固めによって土壌が硬くなることは、植物の根の発達を阻害する (Kozłowski 1999) ためである。締め固めの影響を生じない機械地拵えの方法としては、第 3 章で述べた図 3-1 によるものが有効である。すなわち、①機械が最大傾斜方向の斜面上方に上っていき、②その走行路を後退しながら機体前方左右の枝条を機体前方に等高線と直交する方向に集積し、③列を変えながら伐採面の全面において作業を行う、というものである。この方法であれば、地拵えの際にむやみに林地を走行しないうえ、走行路はたとえ締め固められたとしてもその上に枝条が集積され地拵え棚になっていくため、植栽木の成長に影響を及ぼすことがない。ただし、地拵え棚が斜面に対して縦方向になるため、植生が回復するまでの間は、豪雨の際に雨滴や表面流による表土の浸食が発生することが想定される。そのため、長大な表面流が生じないよう要所要所に横方向の地拵え棚も設置し表面流を分散させる等の工夫を検討する必要がある。

本研究の結果から、生産性が最も高くコストが最も低い地拵え方法はバケット地拵えであった。さらに、バケット地拵えは競合植生の抑制についても効果が高く、下刈り回数の削減に大きく貢献

する。これらのことから、現時点でバケット地拵えは低コスト造林を行ううえでグラップルより優れた地拵え方法として評価することができる。各現場におけるバケットとグラップルの役割を考慮しながら、バケット地拵えを基本としつつ、それが不都合な場合はグラップル地拵えに切り替えることも必要である。また、作業道開設を必要としない現場では、最初からバケットが配備されていないこともあるため、そうした場合はグラップルで地拵えを行うか、あるいはバケットのアタッチメントを現場に用意しておくなどの工夫が必要となる。グラップルとバケットの両地拵えが混在する場合は、植生の回復状況によって以後の下刈りスケジュールが異なってくるため、梅雨明け直後の競合状態に応じて下刈り作業を柔軟に行うことが求められる。

なお、本研究の中では検討に至らなかったが、地拵えの機械化に関しては、根株や枝条を粉碎して林地に散布するタイプの機械がいくつか開発されており、バケットやグラップルと同様エクスカベータをベースマシンとしたクラッシャー (山田ら 2018) や、自走式草刈り機を改良し破碎用のアタッチメントを装着した機械 (渡辺 2020) などがある。これらの機械は枝条を破碎するのみではなく根株も破碎することによって後の下刈り用機械 (自走式草刈り機など) の林地内走行も可能とする。また破碎した根株や枝条等から産出されるチップが地表に堆積し競合植生の発生を抑制する効果も報告されており (原山ら 2018)、下刈り回数の削減を図ることも可能としている。一方、これらの地拵え用機械は伐出作業には使用されないため、新規に購入するかレンタルする必要がある、地拵えを行うために各現場に搬入するための機械回送料も別途生じる。一貫作業を行うことができず、伐出から地拵えまでに長期間かかってしまった場合には、これらの地拵え用機械を導入することも有効と考えられる。今後の課題として導入経費や回送料等のコストとともに、散布されたチップの堆積による植生抑制可能期間や植栽木の生育への影響等に対する評価が求められる。

5.3 植栽

地拵えを行った後には、競合植生が繁茂する前

に苗木を植栽し、速やかに活着、成長を促すことが望ましい。そのために、植栽時期の自由度が比較的高いコンテナ苗を使用する事例が増えてきている。植栽作業の熟練度があまり必要ないことや、1本あたりの植付け作業時間が裸苗のおよそ半分である（大矢ら 2016）ことなど、裸苗に比べて有利な点があるためである。ただし、現状ではコンテナ苗の価格（中：198 円/本）が裸苗（中：100 円/本）の約 2 倍である（長野県苗組 2021）ことから、植付け作業時間が半分になったとしても裸苗に比べてコンテナ苗が高コストとなることは第 2 章で既に述べたとおりで、民有林において本格的に普及するには至っていない。また、コンテナ苗は植栽時期の自由度が比較的高いとされるが、活着しても植栽適期でなければやや成長停滞が見られる例（大矢ら 2017）もあり、原因の究明と対策が必要である。

一方、競合植生との競争を回避し下刈りを極力少なくすることを目的として、大苗を植栽することの有効性が示されている（大矢ら 2018a）。価格に関しては、等級が中（35cm 上）で 100 円/本であるのに対して特（60cm 上）で 110 円/本であり、中より 10% 高いがコンテナ苗より 44% 安い（長野県苗組 2021）。植栽工程上も中苗と大苗では植栽作業時間に有意差はなかった（大矢ら 2018a）。

これらのことから、一貫作業を行った場合であっても植栽時期が春または秋の植栽適期であるならば、現状では裸苗を選択することが低コスト化の観点からは望ましい。むしろ植栽適期を待っても裸苗を植える方が経営上有利である。さらに、下刈り回数削減の観点からは大苗を活用することが有効である。

ただし、成長停止期に植栽することが作業スケジュール上困難であったり、作業者が植栽に不慣れた状況（一般の人が植える植樹祭など）であったり、工程管理の都合で植栽作業期間を短縮したいときなど、裸苗では対応しきれない場合にはコンテナ苗を選択すべきである。また、苗木生産者の立場からも、コンテナ苗は育苗資材や灌水施設等に費用がかかるものの、除草や床替えの手間が省けるなど省力的であり、生産の主体はコンテナ苗に移行しつつあることから、コンテナ苗の利用も進めていく必要がある。今後はコンテナ苗の

低価格化を目指すとともに、植栽後の速やかな成長などの性能を確実に発揮するための育苗技術の改善が求められる。

また、一貫作業によりフォワーダ等で苗木や資材の運搬が可能であれば、積極的に活用すべきである。第 2 章で述べたように、これらの運搬作業の機械化はコスト面での貢献度は比較的小さいものの、人力作業を軽減し労働強度を大幅に低下させる効果がある。小運搬は人力に頼る部分が残るにしても、機械による運搬で作業道脇等の要所要所に苗木や資材を配置することにより、人肩運搬距離を最小化することが望ましい。特にコンテナ苗は、根鉢があり裸苗より嵩が大きく重量も増すため、植栽作業者が一度に持ち歩ける本数が少なくなることから、機械で運搬し配置するポイントを多く設定する必要がある。また、機械による運搬は苗木だけでなく、獣害防除のための防護柵や単木保護資材の運搬にも同様に適用できるため、各現場の需要に応じて積極的に運用することが有効である。

なお、伐出、地拵えの後、植栽適期まで植栽作業を繰り延べることも現実的には想定される。作業道は、現場の条件が許せば経トラック等が走行可能な縦断勾配や曲線半径で作設しておくことが苗木等の資材運搬上望ましく、その後の森林管理上も有効である。

5.4 下刈り

第 4 章では、植栽後の経過年数に応じた下刈りの必要性は地拵え方法に依存することを示した。そのため、下刈りスケジュールを決定するには地拵え方法ごとに整理する必要がある。第 4 章で述べたように、下刈り回数を最も少なくできる可能性がある地拵え方法はバケット地拵えであり、秋植え時を植栽 1 年目とすると 2 年目の下刈りは省略可能で、3 年目と 4 年目の 2 回下刈りを行えば、植栽木は競合植生の最大高を超えると考えられた。つまり、従来 5 回行っていた下刈りが 2 回に減少し、下刈りコストが 6 割削減されることになる。さらに、第 3 章の結果から、バケット地拵えでは 3 年目においても 3 か所中 2 か所の試験地では競合状態 C4 の割合が低かったことから、更なる下刈り省略の可能性も高く、将来的には無下刈りを目

指すことも可能性として考えられる。

グラップル地拵えでは、下刈りを要するのは 2～4 年目の 3 回であり、下刈りコストは従来の 4 割が削減される。また、第 3 章においてグラップル地拵えでは 2 年目、3 年目とも 3 か所中 2 か所の試験地では競合状態 C4 の割合が低かったことから、下刈り省略が可能な場合も多いことが想定される。

人力地拵え、無地拵えでは、第 3 章の競合状態の結果から下刈り回数はいずれも 2～4 年目の 3 回でグラップルと同列の評価としたが、特にカラマツでは植栽木の生存率低下を伴うため、下刈り省略は慎重に検討するべきであろう。

本章の冒頭でも述べたように、従来行われてきた下刈り作業は、植栽年から 5 年目まで夏季に 1 回（または 2 回）ずつ行うことが通例であった。さらに活着不良や誤伐による枯損木が生じた場合は補植が行われ、当初植栽され成長した個体に比べてサイズの小さい個体が追加されるため、5 年で下刈りが終了しないことも少なくない。今後は、確実な活着のために品質の良い苗木を適期に植栽することで活着率を高めつつ、植栽木のマーキングを行うなど誤伐対策を徹底し生存率を極力高めなければならない。また、地拵え方法ごとに画一的に下刈り年数を定めるのではなく、毎年の競合状態を適切に判断しながら必要に応じて下刈りを行うことが求められる。

なお、下刈り作業の生産性向上や労働強度の低下を図るため、近年、自走式下刈り機の開発が進みつつある。機械導入の前提条件として、下刈り機の走行の支障となる伐根の切削処理や、機械の作業幅が十分確保できる間隔での植栽など、植栽前に整えておくべきことに留意する必要がある。また、伐根切削処理と下刈りを兼ねて行う場合、従来の刈払い機による下刈り作業と生産性は同等であることや、植栽木に近い部分は刈ることが困難であること、下刈りコストが刈払い機を下回るのは根株切削を伴わない場合でも下刈り面積が約 25ha/年以上の場合であること、等の課題も残されている（渡辺 2020）。以上のことから、下刈りを機械化するためには、低密度植栽を前提とした植栽密度、植栽間隔を事前に検討しておくことや、下刈り機械が走行可能な幅を確保するために必要な

伐根処理を行うことが必要である。そして将来的には、植栽木の位置を GNNS 等で記録し、下刈り機械を自動走行させることを視野に入れ、新しい再造林の作業システムを構築していくことが必要になるだろう。

結言

本研究の緒言では、日本の造林コストが高い原因として、機械化による効率化が進んでいないことと、下刈り作業に多大な費用がかけられていることの2点を挙げた。これらを解決し、造林コストを抜本的に削減することができれば、わが国において林業が持続可能な産業として成立する可能性は高まる。そのため本研究では、一貫作業システムによって造林を機械化することを検討し、特に地拵えの機械化がコスト削減に効果的であること、そして地拵えの機械化は下刈り回数の削減にも貢献することを明らかにした。結言では、これらの個別技術を有機的に組み合わせることによって更新作業を最適化し、低コスト更新作業モデルを提案するとともに、今後の課題について述べる。

・機械地拵えを軸とした低コスト更新作業モデルの提案

これまでに述べた研究の結果から、長野県の緩傾斜～中傾斜地のカラマツ人工林造成において最も低コストかつ確実に考えられる施業モデルを提案する。まず、従来の造林施業と、一貫作業システムを導入し各種地拵えを行う場合の作業スケジュールを表5-1に整理した。一貫作業システムで

いずれも共通している点は、伐出作業を1年目の夏～秋季に行うことである。競合植生の繁茂が最も旺盛な時期に伐出を行い、土壌表層を攪乱（除去）することで競合植生を抑制する。続いて、秋季に地拵えを行い、晩秋にカラマツ苗を植栽する。苗木は、競合植生に被圧されない高さを常時確保するためと价格的優位性から裸苗の大苗（長野県においては「特」規格、苗高60cm以上、110円/本）を採用する。下刈りは、従来作業では植栽1年目から5年目まで計5回とした。一貫作業では大苗を採用するため5年目の下刈りは行わないこととし、人力地拵え、無地拵え、グラップル地拵えは2年目から4年目までの計3回、バケット地拵えは3年目から4年目までの計2回とした。

これらの各作業スケジュールにおける地拵えから下刈り終了時までのコストを積算し、比較した（図5-1）。従来作業のトータルコストが163万円/haであるのに対して、一貫作業の人力地拵えでは129万円/ha（従来比-21%）、無地拵えでは95万円/ha（同-42%）、グラップル地拵えでは109万円/ha（同-33%）、バケット地拵えでは85万円/ha（同-48%）と試算された。いずれも従来作業に比べて低コストであるが、特にバケット地拵えではトータルコストが従来作業のおよそ半分になる。

表5-1 各種地拵え区分ごとの作業スケジュール

伐出	苗種	地拵え区分	-1年目		0年目		1年目		2年目	3年目	4年目	5年目	
			秋	冬	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬	夏
従来作業	裸中苗	人力	伐出		人力地拵え		植栽	下刈					
一貫作業	裸大苗	人力						伐出	人力地拵え	下刈	下刈	下刈	
		無地拵え						伐出	(無地拵え)	植栽	下刈	下刈	下刈
		グラップル						伐出	グラップル地拵え	植栽	下刈	下刈	下刈
		バケット						伐出	バケット地拵え	植栽		下刈	下刈

※植栽密度は2300本/haとして試算

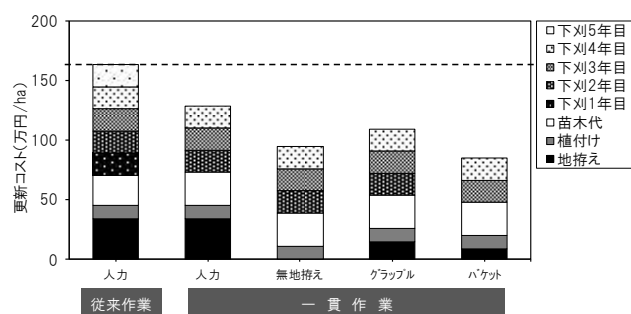


図5-1 各種地拵え区分ごとの施業スケジュールによるコスト比較

それでも他国の造林・育林コストの低さには及ばないが、かなり近づけることが可能であることが分かる。バケット地拵えでは、地表処理の強度を調整することで、埋土種子や根系をより多く除去することができれば、3年目と4年目の下刈りを省略し無下刈りを実現することも可能と考えられる。実際のところ、第4章で各種地拵えの検討を行った試験地においては、その後も無下刈りの状態で植栽5年目まで競合状態を評価してきたが、カラマツまたはスギの3試験地いずれにおいてもバケット地拵えとグラップル地拵えでは生存率の著しい低下を招くことなく下刈り期を終えることができています。

2番目に低コストと評価された無地拵えでは、造林コストが約4割削減されると試算された。ただし、無地拵えでは林床に枝条が残置されていることから、植栽作業時には穴掘り前に枝条を手作業で除ける必要があり、植栽効率が落ちることが考えられる。また、下刈り時には残置枝条がスムーズな刈払いの妨げとなるばかりか、キックバックを誘発し作業者に危険を及ぼすことも予想される。これらの懸案事項は、今後検証を進め危険性を極力排除しつつ低コスト化を進めるべきである。

グラップル地拵えでは、コスト削減割合は1/3程であり、バケットに比べるとコスト低減効果は小さいと判断された。しかし伐出作業の現場では、グラップルは汎用性の高い機械として、バケットより現場に配置されることが多い。また、枝条や造材端材をつかんで集積する細かい作業が可能であり、実際の現場では地拵えにグラップルを使用している事業者が多いのが実態である。そのため、地拵えにグラップルを使用する場合、効果的に埋土種子や根系を除去する方法を考案することも今後の課題として考えられる。既に、北海道ではグラップルにつかませて使用する自作レーキ（渡辺2017）が使われていることや、始めからグラップルがレーキ爪になっているグラップルレーキが機械メーカーで開発、販売されているなどの事例があることから、グラップルは工夫次第で様々な使い方の可能性がある。

なお、一貫作業であれば、人力地拵えであったとしても従来作業に比べて造林コストは-21%となる。急傾斜地であるなど地拵えの機械化が困難な

林分であっても伐採から間を空けずに地拵え、植栽を行うことにより、競合植生が大きく回復する前に植栽木をいち早く成長させることが可能となり、下刈り回数を3回程度にとどめることが期待できる。今後は、「伐ってすぐ植える」一貫作業システムは標準化すべき作業と言えるだろう。

また、更新作業に要する作業人員の人工数に着目すると、表5-1で設定した各作業スケジュールに基づき作業人工数を試算したところ、最も低コストであったバケット地拵えを採用した作業スケジュールでは、人工数が従来の-60%相当となる23.1人日/haであった（図5-2）。同様に、作業人工は一貫作業であれば人力地拵えでも-26%、グラップル地拵えでは-47%、無地拵えでは-51%と試算され、従来作業に比べると大幅な労働力の削減が可能となる。

つまり、不要となった労働力を他の現場の作業に回せることになり、より多くの造林現場において作業することができ、再造林面積を増やすことが可能となる。また、面積あたりのコストの減少率より必要人工の減少率の方が高いということは、機械化によって作業がより効率化することを示している。

以上のように、一貫作業を行うこと、地拵えを機械化すること、大苗を植えることによって従来5回行っていた下刈りが2回～3回で済むこととなり、地拵え～下刈りまでのコストは従来の半分～2/3程度に抑制されることが期待できた。競合植生の状態によっては、下刈りを全く行わない完全無下刈りを実現できる可能性もある。ただし、このように下刈りを省略する施業モデルを実行する際には、5年目以降も含め毎年夏季に植栽地を踏査し、必要な施業を臨機応変に行う体制を整えることが必要である。植栽木へのつる植物の巻き付きが顕著に見られる場合はつる切りを適宜行い、競合植生に高木性の木本類を含む場合には除伐を早い段階で行う必要性が想定される。機械地拵えによる下刈り回数の削減を行った際のつる切りや除伐の必要性の評価、実施する回数、時期については未だ検討例がないため、今後の更なる研究が必要である。

・今後の課題

本研究の適用範囲は第1章第4節において定義

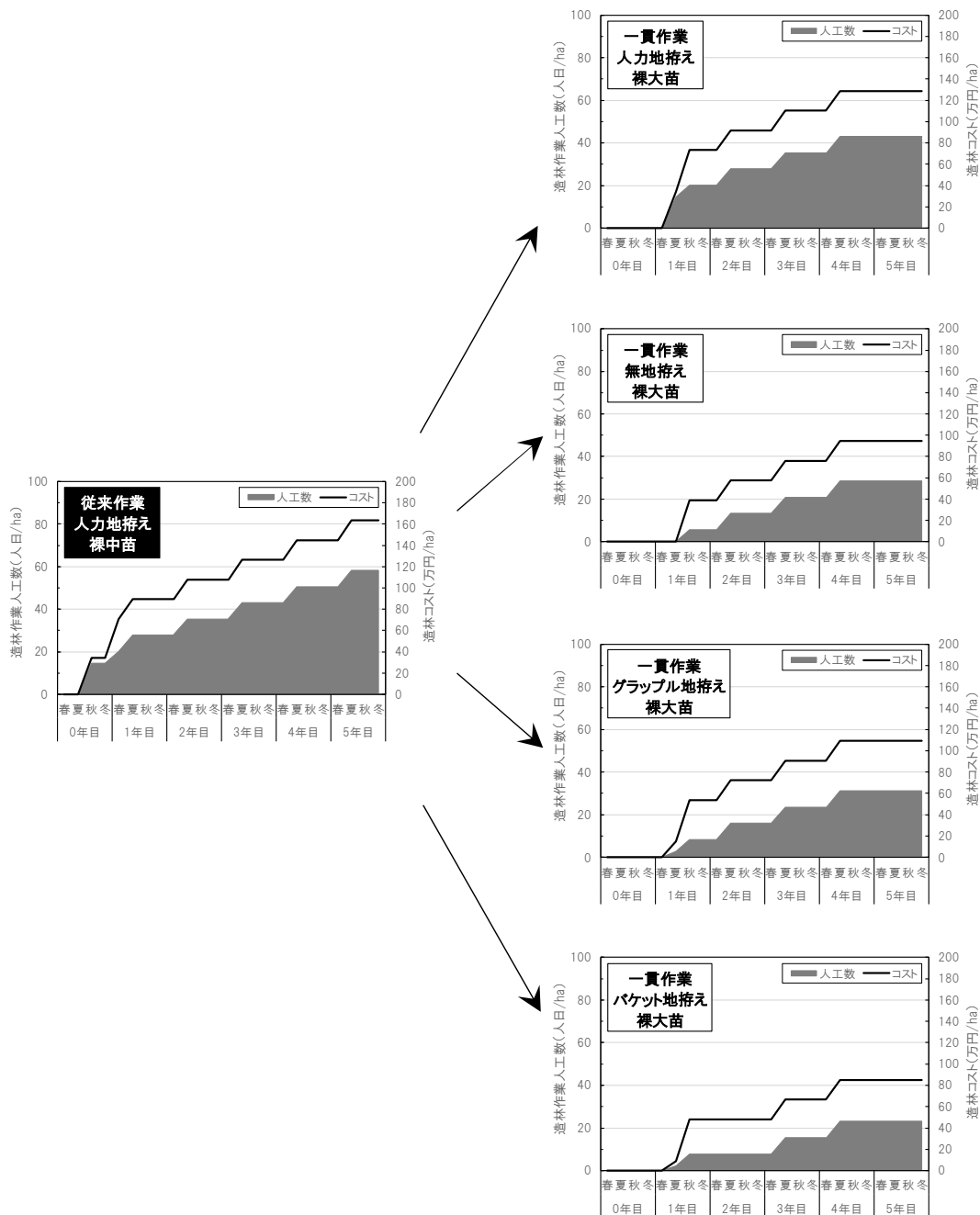


図 5-2 従来作業及び一貫作業の造林における人工数及びコストの比較

した地形、標高域、地位、地利等の範囲内で行った試験によるものである。すなわち、一貫作業システムを導入し車両系林業機械によって伐出作業を行い、その際に使用したバケツやグラブplerを用いて地拵えを行うとともに、カラマツ植栽木が競合植生に被圧されにくい状態とするための必要条件を満たす林分ということになる。適用条件を再掲すると以下のとおりである。

- (1) 樹 種：カラマツ
- (2) 地 形：地山勾配 25° 未満

- (3) 標高域：700～1600m（山地帯下部～山地帯上部）
 - (4) 地位級：1～3（一定程度の林分材積が確保可能）
 - (5) 路 網：林道または作業道に隣接、あるいは今後路網開設が可能な林分
- では、これらの適用条件を、他の樹種や地域に拡大することはどの程度可能であろうか。

(1)の樹種に関しては、本県においてカラマツと同様に初期成長が良好で、競合植生との競争から

早期に抜け出すことが可能な樹種であれば、適用拡大は可能であろう。本研究においても一部スギの植栽地が含まれており、カラマツ同様良好な成長を示していることから、適地であればスギにおいても適用可能と考えられる。一方、初期成長がカラマツやスギと比較して緩やかであるヒノキに関しては、競合植生との関係を見極めたうえで適用を検討する必要があるだろう。また、近年早生樹として注目されているコウヨウザン(近藤ら 2018)等についても、長野県内各地における適応性が確認されれば、適用拡大の対象樹種になることも期待できる。

(2)の地形は、バケットやグラップル等の重機が安全に走行し作業可能な傾斜であり、これらの機械を使用するために必要な条件である。今後、現在検討が進められているケーブルアシスト技術(佐々木 2016)によって車両系林業機械の急傾斜地対応が進む可能性もあり、適用可能な傾斜が拡大することも期待できる。また、作業道から現地発生材を利用して作成したグラップル用の熊手(高野ら 2021)を使用した地拵えも急傾斜地対応として期待できる。さらに、架線系作業システムにおいても、架線を活用した地拵え作業が考案され実用化されれば、適用できる地形は飛躍的に拡大されるであろう。なお、これらの適用拡大された技術を用いる場合、それぞれの地拵え方法が競合植生の抑制に効果的に働くのか否かは、改めて検証が必要である。

(3)の標高域については、長野県におけるカラマツの生育適地として設定したものであり、適用可能な地域と同義である。長野県以外のカラマツ造林地域、例えば山梨県、群馬県等の近隣県や、北海道、東北各県等においても、本県のカラマツ造林適地の標高域と同様の気候であれば、本研究の技術が適用できる可能性はあると考えられる。また、適用樹種を拡大した場合、その樹種の適地における競合植生との競争を検討しなければならない。

(4)の地位に関しては、経済林として成立させるための重要な条件であるが、森林簿に記載されている地位が必ずしも現状を反映していない場合もある。主伐の計画を立てる際には、現実林分の樹高と林齢から地位を判定する必要がある。

(5)は、ハード面における基盤整備の進行状況の指標である。林道、作業道等が整備されておらずアクセスが悪い林分においては、地形や地質等の条件により路網開設の難度が極めて高い場合には、経済林としての林地活用を断念せざるを得ない場合も考えられる。また、架線系作業システムで対応が可能なのか、その経営的合理性も含めた判断が求められる。

以上、(1)から(4)に関しては樹種や地形、地位、生育適地といった自然条件によって決定されるものであり、人間がコントロールすることは難しい。これらは、更なる研究の進展の末、適合する条件の地域を抽出するにより GIS 上で図化することも可能である。(5)に関しては、人間が行う条件整備次第で適合するか否かが変わってくる。現在条件を満たしていなくても、行政的な働きかけで適用可能範囲が拡大する可能性があるため、本研究の意義が正しく行政や業界に伝わるよう、普及啓発に努める必要がある。

以上、本研究では一貫作業システムの導入に伴う造林の機械化、特に地拵えの機械化を通じて下刈りまでの低コスト化を目指して検討を進めた。バケット地拵えによって、無下刈りでも問題なく植栽木が成長した試験地がある一方で、植生抑制効果が弱い場合も見受けられた。バケット等による機械地拵えがもたらす利点を最大限に活かしつつ、欠点部分を最小化するための研究の継続が今後も必要である。本研究は、長野県のカラマツ林業における造林コストの削減を目的として実施してきたものであるが、それが林業経営の改善、林業に関連した地域産業の振興、そして地域の健全な森林の維持と持続的な活用につながることを期待したい。今後も、長野県の豊かな自然を人々の生活と密着した形で受け継いでいくために、林業技術を発展させていくことが求められる。

謝辞

そして支えてくれた家族に、こころから感謝いたします。

本論文をまとめるにあたり、信州大学大学院総合医理工学研究科の植木達人教授に多大なるご支援、ご指導を賜りました。厚く御礼申し上げます。さらに信州大学大学院総合医理工学研究科の加藤正人教授、岡野哲郎教授、平松晋也教授、東京農工大学大学院農学研究院の岩岡正博准教授の各先生からご指導をいただきました。ここに謹んで感謝の意を表します。

研究の推進にあたり、国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所の元東北支所長の梶本卓也博士(現 新潟大学佐渡自然共生科学センター教授)、研究コーディネーターの陣川雅樹博士、研究ディレクターの宇都木玄博士、森林植生研究領域植生管理研究室長の倉本恵生博士、林業工学研究領域収穫システム研究室長の中澤昌彦博士をはじめとする多くの皆様に適切なお助言とご指導をいただきました。また、全国各地の公設林業試験研究機関の研究者各位並びに大学の先生方には、研究へのご協力や応援、励ましのお言葉をいただきました。皆様に厚く御礼申し上げます。

試験地の設定と調査にあたっては、試験地となるフィールドをご提供いただきました林野庁中部森林管理局と各地の森林管理署の皆様、長野県林務部と各地の地域振興局林務課の皆様、現場での作業にご協力いただきました各地の林業事業体の皆様に、多大なるご支援とご協力をいただきました。ここに改めて感謝申し上げます。

職場である長野県林業総合センターでは、育林部長の小山泰弘博士をはじめ、元育林部長の近藤道治博士、田中裕二郎氏、秋山巖氏、西岡泰久氏、小林直樹氏、育林部員の柳澤賢一氏、二本松裕太氏、元育林部員の岡田充弘氏、戸田堅一郎氏、清水香代氏、所長の今井信氏、元所長の橋爪丈夫博士、武井富喜雄博士、片倉正行氏、春日嘉広氏、宮宣敏氏、市村敏文氏、吉田孝久氏、菅谷行博氏に日頃から多大なご指導、ご支援をいただきました。さらに塩原由佳氏、滝沢愛氏、市川万有美氏、折橋睦子氏には、データや資料整理のお手伝いをいただきました。皆様に厚く御礼申し上げます。

最後になりましたが、様々な形で私の研究に対してご指導、ご協力を賜りましたすべての皆様、

引用文献

- 秋田県農林水産部 (2008) 高性能林業機械の低コスト生産システム. 46pp, 秋田県. 秋田.
- 秋山孝臣 (2013) 日本の木材需給と森林・林業再生の課題. 農林金融 66 : 34-50.
- Aoyama K., Yoshida T., Kamitani T. (2009) An alternative of soil scarification treatment for forest restoration: effects of soil replacement. J For Res 16: 58-62.
- Austria Federal Research and Training Centre for Forests, Natural Hazards and Landscape (2015) BFW Machine database. オンライン. (<http://bfw.ac.at/fmdb/MASCHINEN.WEB>). 2015年12月3日参照.
- 舟木徹・杉原雅彦 (2012) スギ人工林で行われた主伐の作業システムと生産性. 島根中山間セ研報 8 : 129-132.
- 原山尚徳・上村章・津山幾太郎・佐々木尚三・山田健・渡辺一郎・宇都木玄 (2018) クラッシュ地拵による破碎物の量が下草繁茂に及ぼす影響. 北森研 66 : 73-76.
- 北海道名寄林務署 (1984) リッパ地拵と植栽木の生長. 北方林業 1984-7 : 176-179.
- 北海道水産林務部 (2017) 平成 29 年度造林事業標準単価. オンライン, (https://www.pref.hokkaido.lg.jp/fs/6/4/8/5/5/1/4/_/H29hyoujyuntanka-zourin.pdf) 2017年8月18日参照.
- 兵庫県立農林水産技術総合センター森林林業技術センター (2008) 兵庫県における低コスト木材搬出システム構築に向けて. 42pp, 兵庫県, 宍粟.
- 家原敏郎・藤原健・松本光朗 (2008) 京都議定書に向けたバイオマス拡大係数, Root-Shoot 比及び容積密度の推定. 日本森林学会大会発表データベース 119 : 462.
- 五十嵐恒夫・矢島崇・松田彊・夏目俊二・滝川貞夫 (1987) カラマツ人工林の天然下種更新. 北大農演報 44(3) : 1019-1040.
- 今井元政 (1978a) カラマツ造林の創始. (信州からまつ造林百年の歩み. 657pp, 長野県, 松本) 19-32.
- 今井元政 (1978b) 諸外国におけるカラマツ造林. (信州からまつ造林百年の歩み. 657pp, 長野県, 松本) 361-374.
- 今富裕樹 (2011) スギ再造林の低コスト化を目指した技術開発(1)－伐採・地拵え・植栽の一貫作業による低コスト化－. 現代林業 542 : 52-55.
- Iwaoka M., Minematsu H., Aruga K., Kobayashi H. (2001) Comparing leg structures for semi-legged machine in driving torque and consumed energy. Journal of The Japan Forest Engineering Society 16 : 15-24.
- 鹿又秀聡 (2011) スギ再造林の低コスト化を目指した技術開発(3)－再造林コストはどこまで下げられるのか?－. 現代林業 544 : 50-53.
- 鹿又秀聡・天野智将 (2016) 再造林コストのシミュレーション. (ここまでやれる再造林の低コスト化－東北地域の挑戦－. 森林総研東北支所, 27pp, 森林総研東北支所, 盛岡) 24-25.
- 木幡靖夫 (2001) 高性能林業機械による列状間伐作業の生産性と残存木の成長. 光珠内季報 124 : 10-13.
- 小山浩正・八坂通泰・寺澤和彦・今博計 (2000) かき起こしのタイミングがブナ天然更新の成否に与える影響－豊凶予測手法の導入の有効性－. 日林誌 82(1) : 39-43.
- 小山泰弘・山内仁人 (2011) 針広混交林造成に向けた更新技術の開発. 長野県林総セ研報 25 : 29-44.
- Kozłowski T. T. (1999) Soil Compaction and Growth of Woody Plants. Scandinavian Journal of Forest Research 14 : 596-619.
- Löf M., Dey D. C., Navarro R. M., Jacobs D. F. (2012) Mechanical site preparation for forest restoration. New Forests 43:825-848.
- 宮崎隆幸・今井信・白石立 (2011) 高性能林業機械による作業システムの開発－作業工程別労働生産性の調査－. 長野県林総セ研報 25 : 1-7.
- 水田展洋・水戸辺栄三郎・梅田久男 (2008) 列状間伐の伐採幅と労働生産性及び列状間伐後の残存木の状況. 宮城県林試成報 17 : 31-38.
- 村山茂明・酒井秀夫 (1991) 林内歩行機の開発に関する基礎的研究. 宇大農演報 27 : 27-33.
- 長野県(1978)信州からまつ造林百年の歩み. 657pp,

- 長野県, 松本.
- 長野県 (2022) 第 14 期木曾谷地域森林計画書 (木曾谷森林計画区). 104pp, 長野県, 長野. オンライン (<https://www.pref.nagano.lg.jp/rinsei/sangyo/ringyo/shisaku/documents/r4kisodani1127sasikae.pdf>) 2022 年 10 月 14 日参照.
- 長野県内務部 (1929) 信州に於ける落葉松. 68pp, 長野県, 長野.
- 長野県林務部 (1983) 長野県民有林 カラマツ・スギ 林分材積表・収穫予想表. 78pp, 長野県, 長野.
- 長野県林務部 (1986) カラマツ間伐の手引き. 190pp, 長野県, 長野.
- 長野県林務部 (1989) 複層林造成の手引き. 88pp, 長野県, 長野.
- 長野県林務部 (1991) 長野県民有林カラマツ人工林長伐期施業の手引き. 115pp, 長野県, 長野.
- 長野県林務部 (2015) 平成 27 年度林業土木事業設計単価表. 270pp, 長野県, 長野.
- 長野県林務部 (2017) 平成 29 年度林業土木事業設計単価表. 275pp, 長野県, 長野.
- 長野県林務部 (2018) 治山事業 (森林整備) 設計標準歩掛. 37pp, オンライン, (<https://www.pref.nagano.lg.jp/rinsei/kensei/nyusatsu/sekisankijun/documents/sinrinbukakari301201.pdf>). 2020 年 10 月 12 日参照.
- 長野県林務部 (2020) 令和 2 年度林業土木事業設計単価表. 295pp, 長野県, 長野.
- 長野県林務部 (2021a) 長野県民有林の現況. 195pp, オンライン, (<https://www.pref.nagano.lg.jp/rinsei/sangyo/ringyo/toukei/minyurin/documents/r3genkyou.pdf>) 2022 年 10 月 14 日参照.
- 長野県林務部 (2021b) 令和 3 年度林業土木事業設計単価表. 283pp, 長野県, 長野.
- 長野県林務部 (2022) 令和 3 年度長野県木材統計. 79pp, オンライン, (<https://www.pref.nagano.lg.jp/mokuzai/sangyo/ringyo/kensanzai/shikyō/documents/r3mokuzaitoukei.pdf>) 2022 年 10 月 14 日参照.
- 長野県林内路網整備指針検討委員会 (2012) 長野県林内路網整備指針. 128pp, 長野県林務部, 長野.
- 長野県山林種苗協同組合 (2020) 令和元年度産県内造林用苗木生産者標準価格表. 4pp, 長野県山林種苗協同組合, 長野.
- 長野県山林種苗協同組合 (2021) 令和 2 年度産県内造林用苗木生産者標準価格表. 4pp, 長野県山林種苗協同組合, 長野.
- 長坂友・今博計 (2002) 地表処理の違いがブナ稚樹発生に及ぼす影響—かき起こし、刈払い地における播種試験—. 日林北支論 50 : 29-31.
- 中川昌彦・蓮井聡・石濱宣夫・滝谷美香・大野泰之・八坂通泰 (2012) カラマツの天然更新施業のための表土除去が樹木の成長に与える影響. 北森研 60 : 117-119.
- 中川昌彦 (2015) カラマツ・トドマツ造林地における下刈り年数の詳細な統計情報. 北海道林試研報 52 : 24-25.
- 中井孝・山井良三郎 (1982) 日本産主要樹種の性質 日本産主要 35 樹種の強度的性質. 林試研報 319 : 13-46.
- 中村正・臼谷三郎・石田良栄・荻野幸男・岩淵香児 (1963) 林業造林作業の生体負担について 機械化にまつわる問題点. 産業医学 5(10) : 643-655.
- 中澤昌彦・吉田智佳史・佐々木達也・上村巧・鈴木秀典・陣川 雅樹・近藤 道治・大矢 信次郎・戸田 堅一郎・高野 毅 (2013) ホイール式小型ハーベスタとフォワーダを用いた間伐作業システムの開発—点状間伐と列状間伐の生産性—. 森利誌 28 : 187-192.
- 日本森林技術協会 (2010) 路網と高性能林業機械を組み合わせた低コスト作業システム導入マニュアル. 246pp, 日本森林技術協会, 東京.
- 沼田邦彦 (1971) 電動ロータリー刈払機による下刈作業について 電動刈払機の配置について. 京大農演報 42 : 190-204.
- 大井隆男 (1978) カラマツ造林史漫歩. (信州からまつ造林百年の歩み. 657pp, 長野県, 松本) 473-480.
- 奥村俊介 (1988) 長野県におけるカラマツ腐心病の発生状況とその対策. 森林防疫 37 : 212-216.
- 大矢信次郎・近藤道治・清水香代・小山泰弘・小林直樹・西岡泰久 (2018) 針葉樹人工林の低コ

- スト更新技術の開発. 長野県林総セ研報 32:17-28.
- 大矢信次郎・加藤健一 (2018) 小面積皆伐地における低コスト・高収益更新モデルの構築. 平成 29 年度長野県林総セ業報: 50-51.
- 大矢信次郎・中澤昌彦・猪俣雄太・陣川雅樹・宮崎隆幸・高野毅・戸田堅一郎・柳澤賢一・西岡泰久 (2018) 緩傾斜地から中傾斜地における機械地拵え作業の生産性とコスト. 森利誌 33(1): 15-24.
- 大矢信次郎・斎藤仁志・城田徹央・大塚大・宮崎隆幸・柳澤信行・小林直樹 (2016) 長野県の緩傾斜地における車両系伐出作業システムによる伐採・造林一貫作業の生産性. 日林誌 98: 233-240.
- 林野庁 (1994) 林業統計要覧. 191pp, 林野庁, 東京.
- 林野庁 (2015a) 平成 26 年度森林及び林業の動向. 林野庁, 東京. オンライン (<http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/26hakusyo/zenbun.html>). 2015 年 12 月 1 日参照.
- 林野庁 (2015b) 森林・林業統計要覧 2015, 林野庁. 東京. オンライン (http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/toukei/youran_mokuzi.html). 2015 年 12 月 1 日参照.
- 林野庁 (2017a) 平成 28 年度森林・林業白書. オンライン, (<http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/28hakusyo/zenbun.html>) 2017 年 8 月 19 日参照.
- 林野庁 (2017b) 森林総合監理士 (フォレスター) 基本テキスト. オンライン, (http://www.rinya.maff.go.jp/j/ken_sidou/forester/) 2017. 8. 19.
- 林野庁 (2019) 平成 30 年度森林・林業白書. オンライン, (<https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/30hakusyo/zenbun.html>) 2022 年 10 月 14 日参照.
- 林野庁 (2021a) 令和 2 年度森林及び林業の動向 令和 3 年度森林及び林業施策. オンライン, (<https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/R2hakusyo/attach/pdf/zenbun-64.pdf>) 2022 年 10 月 14 日参照.
- 林野庁 (2021b) 高性能林業機械とは. オンライン, (<https://www.rinya.maff.go.jp/j/kaihatu/kikai/index.html>) 2022 年 10 月 4 日参照.
- 林野庁 (2021c) 林業統計要覧 2021. オンライン, (https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/toukei/youran_mokuzi2021.html) 2022 年 9 月 30 日参照.
- 林野庁 (2022) 森林総合監理士 (フォレスター) 基本テキスト. 306pp, 林野庁, 東京.
- 林野庁企画課 (2015) 平成 25 年次素材生産費等調査報告書. 171pp, 林野庁, 東京.
- 斎藤新一郎・斎藤満 (1983) 亜高山帯における機械地拵えによる天然更新. 技術北海道林業試験場報告 21: 59-73.
- 真田勝・山本肇・大友玲子・真田悦子 (1977) 未熟土地域における全木集材が地力維持に及ぼす影響. 林試研報 290: 1-13.
- 佐々木尚三・山田健・佐々木達也・ほか 1 名 (1997) 傾斜・不整地に適した林業用ベースマシンの開発. 農林水産技術研究ジャーナル 20(3): 21-24.
- 佐々木尚三 (2014) 北海道下川町における一貫作業システムー主伐・再生林の低コスト化を目指した研究プロジェクトについてー. 機械化林業 727: 1-5.
- 佐々木尚三 (2016) わが国の CTL システムの現状. 森利誌 31: 5-11.
- 佐々木達也・中澤昌彦・岡勝・今富裕樹 (2013) 一貫作業システムとは? (低コスト再生林の実用化に向けた研究成果選集, 森林総研, 46pp, 森林総研, つくば) 6-7.
- 千木容・川崎萌子 (2018) クロマツコンテナ苗の植栽における苗木植栽機の利用について. 石川県林試研報 49: 28-30.
- 島本美保子 (1998) 世界の造林・育林費. 林業経済 51(4): 1-10.
- 森林保険センター (2017) 森林保険の損害填補事務に関する規程. オンライン (<https://www.ffpri.affrc.go.jp/fic/documents/5-1songaitenpo.pdf>) 2017 年 11 月 21 日参照.
- 森林総合研究所 (2012) 森林・林業の再生: 再生林コストの削減に向けてー低コスト化のための 5 つのポイント. 8pp, 森林総研九州支所, 熊本.
- 森林総合研究所 (2013) 低コスト再生林の実用化に向けた研究成果集. 46pp, 森林総研九州支所, 熊本.

- 森林総合研究所 (2015a) 近畿・中国四国の省力造林事例集. 46pp, 森林総研四国支所, 高知.
- Smith M. E., Cavagnaro T. R., Christmas M. J., Pound L. M., Facelli J. M. (2021) Site preparation impacts on soil biotic and abiotic properties, weed control, and native grass establishment. *Restoration Ecology* 29 : 1-11.
- Spinelli R., Magagnotti N., Fulvio F., Bergström D., Danelon M., Alberti G. (2014) Comparison of Cost Efficiency of Mechanized Fuel Wood Thinning Systems for Hardwood Plantations on Farmland. *Croat J For Eng* 35 : 111-123.
- Sutherland B. J., Foreman F. F. (1995) Guide to the use of mechanical site preparation equipment in northwestern Ontario. 186 pp, Natural Resources Canada, Great Lakes Forestry Centre, Sault Ste. Marie.
- 鈴木皓史 (1990) 林業の機械化 A 造林用機械. *農機学誌* 52 (5) : 106-112.
- 竹内郁雄 (1998) 初期保育. 林業技術ハンドブック, 1969pp, 全国林業改良普及協会, 東京.
- 瀧本義彦・藤井禧雄・藤田伸一・赤井龍男 (1983) 自走式小型植穴掘機の諸性能について. *京大農演報* 55 : 242-256.
- 谷山徹・木村光男・豊田信行 (2008) 持続可能な森林施業に適した伐出方法に関する研究. *愛媛県林技セ研報* 26 : 27-35.
- 寺岡行雄 (2009) 造林コストはどこまで下げうるか. 持続可能な森林経営研究会第7回セミナー議事概要, オンライン (https://www.jafta.or.jp/14_jizoku_hp/web/semminer/sfm_seminar07.pdf) 2022年10月14日参照.
- 宇都木玄・原山尚徳・上村章 (2017) 再造林に向けた低コスト林業への挑戦. *森林科学* 80 : 2-7.
- 渡辺一郎 (2017) 北海道における育林作業機械化の現状と展望. *森林科学* 80 : 6-7.
- 渡辺一郎 (2020) 新たに開発された造林作業機械によるカラマツ根株切削性能と下刈り作業コスト. *森利誌* 35 (4) : 197-202.
- 山田毅・高橋幸男・西園朋広・小谷英司・天野智将・平井敬三 (2016) 枝条収穫の違いがスギ林土壌の理化学特性と林分成長に及ぼす影響. *森林立地* 58 (2) : 61-68.
- 山田健 (1996) 地拵え, 植付け等の機械化の現状と展望. *機械化林業* 511 (6) : 12-17.
- 山田健・遠藤利明・佐々木尚三 (2008) コンテナ苗自動耕耘植付機の開発. *森利誌* 22 (4) : 225-228.
- 山田健・佐々木尚三・倉本恵生・上村章・原山尚徳・宇都木玄・斎藤丈寛 (2018) 地拵え用クラッシュの作業性能と造林作業にもたらす効果. *森利誌* 33 : 67-71.
- 山田容三 (1999) 下刈り作業の現状について. *林業と薬剤* 150 : 12-18.
- 山口信幸・霜鳥茂・坂本武・工藤隆 (1992) ブラッシュカッター導入による更新作業の改革. *日林北支論* 40 : 125-127.
- 山川博美・重永英年・久保幸治・中村松三 (2013) 植栽時期の違いがスギコンテナ苗の植栽後1年目の活着と成長に及ぼす影響. *日林誌* 95 : 214-219.
- 山川博美・重永英年・荒木眞岳・野宮治人 (2016) スギ植栽木の樹高成長に及ぼす期首サイズと周辺雑草木の影響. *日林誌* 98 (5) : 241-246.
- 山本俊明・瀧本義彦・石川知明 (1989) 林業機械作業における作業者の生理負担に関する研究(3) 下刈り作業について. *京大農演報* 61 : 228-235.
- Yamawaki S., Mimura K., Hiramatsu O., Shishiuchi M. (1966) Brush-Cutting Performance of Crawler Tractor with Rotary Cutter on inclined Forest-Land. *Journal of Forest Research* 48 : 280-292.
- 山脇三平・富永貢・三村和男・平松修 (1962) 造林機械に関する研究 (I) 植穴掘機. *林業試験場研究報告* 139 : 83-123.
- 横山誠二・佐々木尚三 (2013) コンテナ苗移植試験について～北海道でのコンテナ苗生長状況～. *北森研* 61 : 101-104.
- 全国林業改良普及協会 (1998) 林業技術ハンドブック. 1969pp, 全国林業改良普及協会, 東京.
- 全国林業改良普及協会 (2001) 機械化のマネジメント. 239pp, 全国林業改良普及協会, 東京.

成長に優れた苗木を活用した施業モデルの開発

—成長に優れた苗木の育苗技術の高度化—

二本松裕太・小山泰弘・清水香代*

優れた樹高成長が期待できる形状比の低いカラマツコンテナ苗を1年で生産することを目指し、コンテナ容器、元肥量、育苗密度について検討した。県内に最も普及している150ccコンテナ容器でも、育苗密度を1コンテナあたり24個体に調整し、元肥量を抑えることで、形状比100未満の得苗率は92%、80未満の得苗率は71%となり、形状比の低い1年生コンテナ苗の生産は可能と判断した。植栽後の樹高成長は形状比100未満の苗であれば良好であったが、形状比80以上で枯死率が高くなる場合があり、目指すべきカラマツコンテナ苗の条件としては形状比80を1つの目安とするのが妥当と考えられた。

キーワード：カラマツ、1年生コンテナ苗、育苗密度、形状比

1 緒言

近年、長野県は主伐再造林を推進しており、それに伴い、特にカラマツの苗木需要が増加している。再造林にあたっては、マルチキャビティコンテナにより育苗された苗木（以下、コンテナ苗）を利用する造林地が国有林を中心に急増しており、令和4年度時点で、カラマツの植栽本数の半数以上がコンテナ苗へと転換している（2022 長野県林務部）。

コンテナ苗は植栽適期が広く、植栽の作業効率も良いメリットがある一方、現状では価格が裸苗の2倍程度のため、造林コストは裸苗よりも高い（大矢ら 2016）。長野県内では多くの生産現場で露地の苗畑で苗木を育成し、翌春にその幼苗をコンテナ容器に移植する方法を採用しているため、カラマツコンテナ苗の生産に2成長期を要している。一方、カラマツは施肥量や育苗密度を調整することで、成長のコントロールが容易な樹種であり、播種1年で植栽可能な大きさにすることができるとする研究事例もある（来田ら 2020）。本県においても出荷までにかかる期間を1年に短縮できれば、育苗コストを抑えられる（島根県 2018）とともに需給調整も容易になる。

また、コンテナ苗は裸苗より形状比（苗高/根元径）が高い事例が多く、形状比が高い苗は、植栽後は伸長成長より直径成長を優先させ（八木橋ら 2016）、カラマツでは形状比が100を超えると生存率が下がるといわれている（北海道立総合研究機構 2019）。長野県内のカラマツ裸苗の出荷規格は形状比83を上限としていたことから、それ以上に形状比の高いコンテナ苗は植栽後の成長性など品質に不安が残る。

そこで、本研究では植栽後に優れた樹高成長が期待できる形状比の低いカラマツコンテナ苗を1

年で生産する技術の開発を目指した。形状比の目安としては80または100を暫定的に設定し、コンテナ容器、元肥量、育苗密度を調整して、苗木形状の比較検証を行った。また、苗木の成長を促進すると言われている酸化型グルタチオン（以下、GSSG）の効果的な施用方法についても検討した。さらに得られた苗木の一部は植栽試験に供し、植栽後に優れた成長を示す苗木の条件を確認した。

本研究は、戦略的プロジェクト研究推進事業「成長に優れた苗木を活用した施業モデルの開発（平成30～令和4年度）」として実施した。なお、本研究の一部は日本森林学会大会（二本松 2021ら、二本松 2022, 二本松ら 2023a）において発表するとともに、中部森林研究（二本松ら 2023b）へ公表した。

2 1年生コンテナ苗の生産技術

2.1 育苗環境とスケジュール

コンテナ容器と育苗密度に関する比較試験を2019年に、元肥量と育苗密度に関する比較試験を2021年～2022年に、グルタチオンの施用効果に関する試験を2020年～2022年に実施した。育苗は長野県林業総合センター（塩尻市片丘）構内にある育苗施設で実施した。

各年とも低温湿層処理を行ったカラマツ種子を4月上旬に播種しており、2019年の育苗では培土を充填したコンテナに3粒/孔を直接播種し、赤玉細粒で覆土した。その後複数発芽した孔については、1本/孔となるよう間引きを行った。2020年から2022年の育苗では固化培土付きセルトレイ（みのる産業㈱）に1粒ずつ播種し、鹿沼土細粒で覆土し、約1か月後に発芽した2cm程度の毛苗を培土を充填したコンテナに移植した。播種後は25℃以上で自動的に換気扇が作動するよう

設定したビニールハウス内で過度に高温にならないよう育苗した。その後、6月上旬～中旬に高さ約60cmの空中根切り用の露地棚にコンテナを移動した。このとき、2019年と2020年はコンテナを同列の棚上では隙間なく設置したが一部で病害が発生したことから、2021年と2022年は縦横ともに数cm程度の間隔をあけ、風通しを改善した。ビニールハウス内及び露地棚では、自動灌水設備により散水を行った。成長停止後の秋期に苗高及び根元径を計測した。

2.2 試験設計

2.2.1 コンテナ容器と育苗密度の比較検証

本試験は2019年度に、県内生産者が広く利用しているコンテナ、培地、肥料を用いて行った。コンテナは容量と形状が異なる4種類を使用した(表-1)。育苗密度の違いを確認するため、150ccのコンテナ2種(MT-150及びJFA-150)では40孔のうち千鳥配置の20孔で育苗する試験区を設けた。培地はヤシ殻を主体に有機肥料(とくとく有機、みのり化学株)を10%混合したものと、緩効性肥料オスモコートエクザクトスタンダード3～4ヶ月(N-P-K:16-9-12、株ハイポネックスジャパン)を6g/L配合した。培地や元肥の配合は生産現場の実態を参考として決定した。

表-1 コンテナの容量及び形状と育苗密度

試験区名	容量(cc)	スリット	リブ	育苗配置	育苗密度(本/m ²)
MT-150* ¹	150	有	無	全孔	292
JFA-150* ²	150	無	有	全孔	296
JFA-300* ²	300	無	有	全孔	178
200cc* ³	200	有	無	独立	112
ちどりMT-150* ¹	150	有	無	ちどり状	146
ちどりJFA-150* ²	150	無	有	ちどり状	148

*1: 株東北タチバナ *2: 全国山林種苗協同組合 *3: 北海道山林種苗協同組合

2.2.2 元肥量と育苗密度の比較試験

2021年度は溶出タイプの異なる緩効性肥料(ハイコントロール、ジェイカムアグリ株)を使用し、元肥量に関する検証では表-2の配合でヤシ殻培土に混和した。コンテナ容器は2019年度の結果を参考に150ccのコンテナを使用し、1コンテナ当たり24本とした(図-1)。育苗密度に関する検証では、施肥量を「中」として、24本区、30本区、40本区の3処理を設定した(表-3、図-1)。

2022年度は、2021年度の結果を参考として、元肥を前年度の「少」よりも窒素溶出量が控えめの

条件で統一し(表-2)、育苗密度のみを調整した。スリット入りの150cc容器を使用し、1コンテナ当たりの育苗本数として6本区、12本区、24本区、40本区を設定した(図-1)。

表-2 元肥量の比較検証における元肥の配合

年	施肥量	溶出タイプ		
		700* ¹	100E* ¹	360* ²
2021年	少	10g/L	5g/L	
	中	10g/L	10g/L	
	多	10g/L	20g/L	
2022年	少	10g/L		10g/L

*1: ハイコントロール650 *2: ハイコントロール085

表-3 育苗密度の比較検証における密度設定

年-施肥量	使用コンテナ	1コンテナあたり本数	育苗密度(本/m ²)
2021-中	MT-150* ¹	24本	175
		30本	219
		40本	292
2022-少	TT-150* ²	6本	44
		12本	89
		24本	178
		40本	296

*1: 株東北タチバナ *2: 立花容器株

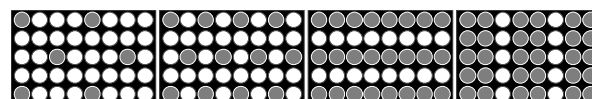


図-1 コンテナ内の育苗密度の調整

左から150cc容器の6本区、12本区、24本区、30本区。白丸は空き孔。

2.2.3 酸化型グルタチオン(GSSG)の施用試験

2020年度から2022年度にかけて、カラマツのコンテナ苗に対するGSSGの施用効果を検証した。GSSG有区ではカネカペプチドW2(株カネカ)を、GSSG無区ではハイポネックスプロフェッショナル(株ハイポネックスジャパン)を、窒素量が同量になるように希釈し、追肥として1回あたり15ml/個体施用した。施肥は降水のない日に、朝の灌水から数時間あけて実施した。追肥の施用回数やその他の育苗条件は表-4のとおりとした。

2.3 結果と考察

2.3.1 コンテナ容器と育苗密度の比較検証

成長停止後に各試験区の苗高を比較したとこ

表-4 GSSG の施用試験における育苗条件

年度	2020	2021	2022
コンテナ	300 ccスリット		
培土	ヤシガラのみ		
元肥	ハイコントロール650-700日タイプ 20g/L		
追肥の種類(N-P-K)と希釈率	GSSG有区：カネカペプチドW2 (10-10-10) を250倍希釈 GSSG無区：ハイポネックスプロフェッショナル (20-20-20) を500倍希釈		
追肥の時期と頻度	週1回×9週 7/6～9/1	週2回×5週 6/17～7/19	週2回×5週 6/22～7/28

る、今回の施肥設計では 200cc の苗高が低い傾向であったが、他の処理区では明確な優劣はつかなかった (図-2)。また、各区の平均形状比を比較したところ、MT-150 区が 95.5、JFA150 区が 91.3 で、育苗密度の低い他の区と比べて形状比が高い傾向があった (図-3)。JFA150 区と JFA300 区を比較すると JFA300 の方が苗高はわずかに大きく、形状比は有意に小さくなった。150cc 容器で育苗密度を半分にしたちどり MT-150 区とちどり JFA150 区では形状比 100 以上の苗はなく、平均形状比は 70.2、69.9 と低かった。育苗密度が高い場合、容器の内側に位置する個体が光合成のために上方から当たる光を求め伸長成長を優先させた結果、苗高が高い苗が増加したためと考えられた。

県内で最も普及している 150cc のコンテナ容器で、1 成長期で苗高 25cm 以上の得苗を目指す場合、40 孔すべてで苗を育成すると形状比が過大となった。カラマツにおけるコンテナ容器と形状比の関係については、既往の研究で JFA150 よりも JFA300 の方が苗長と根元径が有意に大きく、形状比が有意に低くなったとの報告がある (来田ら 2020)。しかし、150cc 容器を使った育苗でも、あえて空き孔を入れて育苗密度を調整することで形状比は改善できた。根鉢が大きいほど、育苗資材の量は増え、現場での運搬がしにくくなることを

考えると、300cc のコンテナを必ずしも使う必要はないと判断した。

2.3.2 元肥量と育苗密度の比較試験

2021 年度の試験結果について、施肥量別の苗高の分布を図-4 に、苗高 25cm 以上かつ形状比 100 未満あるいは 80 未満を基準とした形状比の頻度割合を図-5 に示した。苗高は、施肥量が多いほど有意に高くなった。形状比は、施肥量が多いほど高くなる傾向があり、その平均値は施肥量が少ない方から順に 71.3、84.8、87.0 となった。形状比 80 未満の得苗率は、施肥量を「少」とした処理区では 62.5% となったが、それ以外は 30% を下回った。

次に、密度別の苗高の分布を図-6 に、各区の形状比の頻度割合については図-7 に示した。苗高は 24 本区が低く、30 本区と 40 本区では差がなかった。形状比についても 24 本区が低く、その平均値は 24 本区が 84.8 だったが、30 本区は 102.4、40 本区は 102.0 と高かった。

元肥量を減らした 2022 年度の試験の成長停止後の苗高を図-8 に示した。6 本区、12 本区では苗高 25cm に満たない規格外の苗が発生した。この元肥量では、密度を 12 本以下まで疎にすることは不適と判断した。次に、各処理区の形状比の頻度割合を図-9 に示した。最も成績の良かった 24 本区

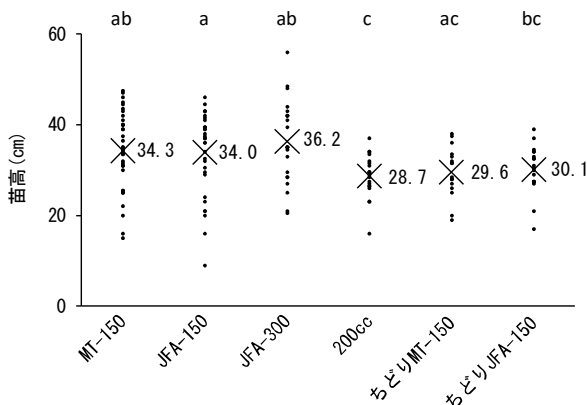


図-2 育苗容器別の平均苗高の比較 (2019 年)
異なる符号間に有意差 (Steel-Dwass の多重比較検定, $p < 0.05$)

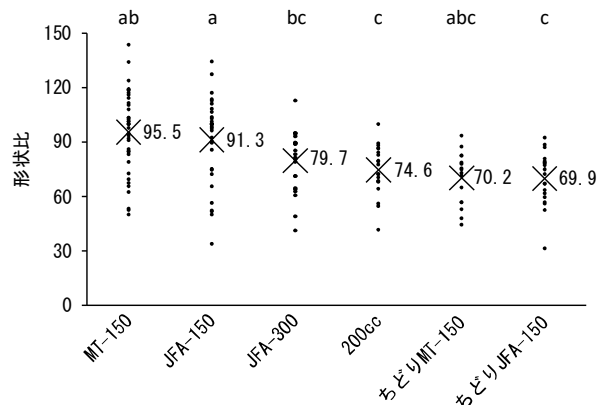


図-3 育苗容器別の平均形状比の比較 (2019 年)
異なる符号間に有意差 (Steel-Dwass の多重比較検定, $p < 0.05$)

では平均形状比が 72.9 であり、苗高 25cm 以上かつ形状比 100 未満の得苗率は 92%，形状比を 80 未満としても 71%と高かった。一方、40 本区では苗高、形状比ともに苗木形質にばらつきが大きく、苗高 25cm 以上かつ形状比 100 未満の得苗率は 73%，形状比 80 未満では 30%だった。

これらの試験結果から、元肥量を抑えつつ密度を 24 本に下げること、1 年で形状比の低い苗を生産することは可能と考えられた。小面積で生産効率を高める必要のあるコンテナ苗だが、1 コンテナ当たり 40 本 (292 本/m²) で形質のそろった良苗を作るとは元肥量の調整だけでは困難であった。24 本区は密度が 175 本/m²で、一般的に 50 本/m²程度とされる裸苗よりも密であるものの、根鉢が制限されている中で形状比を抑えつつ 25cm 以上の苗高を確保するには、この程度の密度が良いと考えられた。

2.3.3 酸化型グルタチオン (GSSG) の施用試験

GSSG 有区では、いずれの年も苗長、根元直径、

形状比が、GSSG 無区に比べ有意に大きくなった (図-10)。しかし、2021 年と同じ施肥条件で実施した 2022 年の試験では GSSG の有無にかかわらず苗長が小さくなり、得苗率が低下した。一孔あたりの養分の溶出量としては、表-2 の「少」と「中」の中間程度であり、元肥量が過少だったとは考えにくかった。北海道でグイマツとカラマツの雑種を対象に同様の育苗試験を実施した事例があり、GSSG が苗木サイズを大きくする結果が得られているが、年度間の差が大きく得苗率が極めて低い年もあった (北海道立総合研究機構 2023)。これは日照等の気象条件に加え、元肥として混和した緩効性肥料は温度や水分条件によって溶出量が増減するため、それが影響したと考えられた。

今回の結果から GSSG が苗の成長促進に寄与する可能性は認められたが、得苗率を確実に安定させるためには GSSG の施用方法だけでなく、育苗環境に応じた基本的な施肥設計や育苗管理の検討がより重要であると考えられた。

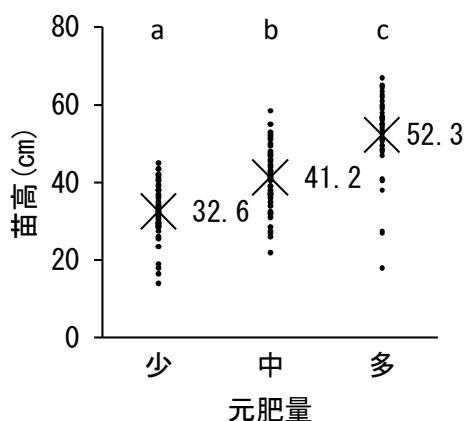


図-4 施肥量別の苗高の分布 (2021 年)

異なる符号間に有意差 (Steel-Dwass の多重比較検定, $p < 0.05$)

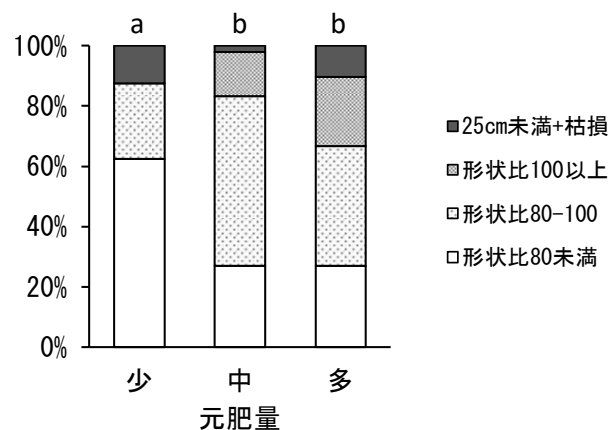


図-5 施肥量別の形状比の頻度割合 (2021 年)

異なる符号間に有意差 (Steel-Dwass の多重比較検定, $p < 0.05$)

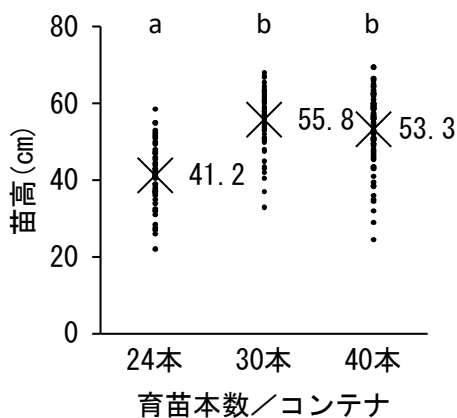


図-6 育苗密度別の苗高の分布 (2021 年)

異なる符号間に有意差 (Steel-Dwass の多重比較検定, $p < 0.05$)

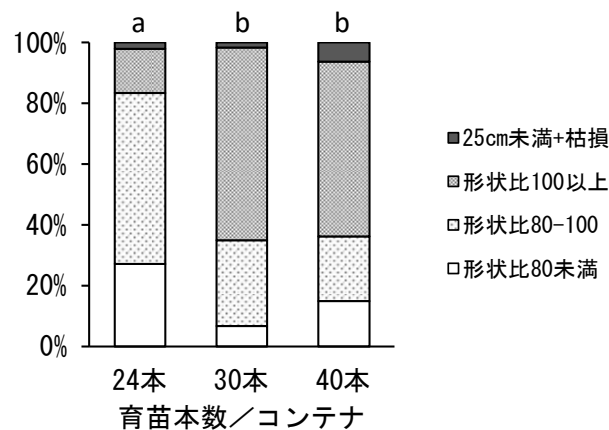


図-7 育苗密度別の形状比の頻度割合 (2021 年)

異なる符号間に有意差 (Steel-Dwass の多重比較検定, $p < 0.05$)

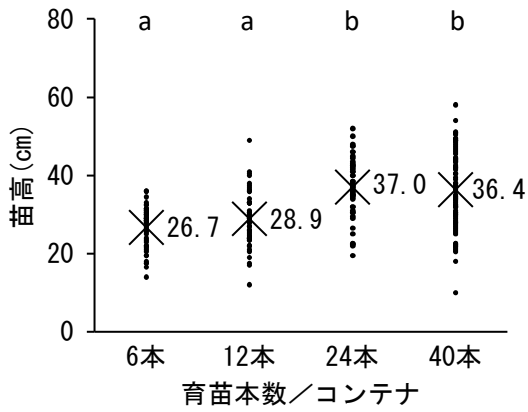


図-8 育苗密度・コンテナ別の苗高の分布 (2022 年)
異なる符号間に有意差 (Steel-Dwass の多重比較検定, $p < 0.05$)

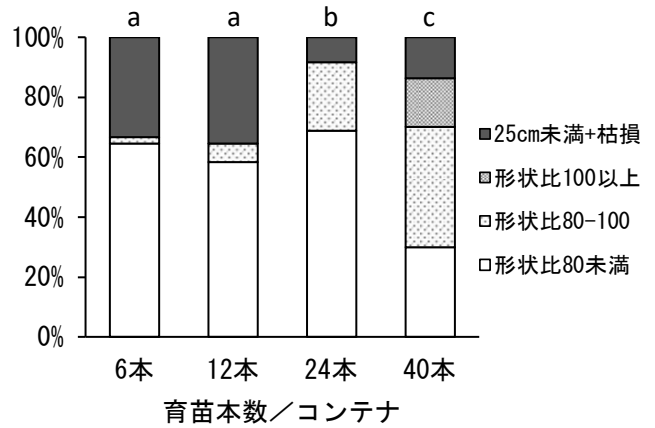


図-9 苗高と形状比を基準とした得苗率(2022 年)
異なる符号間に有意差 (Steel-Dwass の多重比較検定, $p < 0.05$)

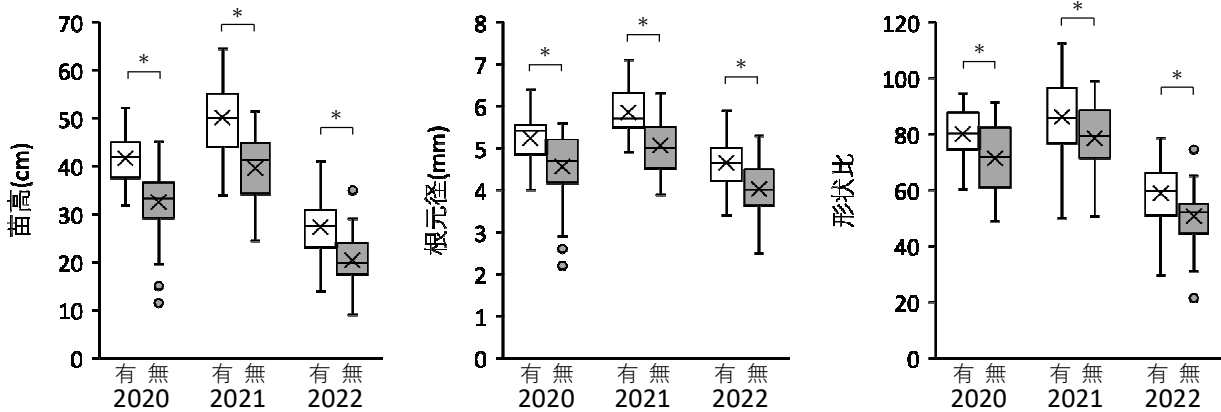


図-10 苗長, 根元直径, 形状比に対する GSSG の施用効果
*:有意差 (t 検定, $p < 0.05$)

2.4 まとめ

形状比の低いカラマツのコンテナ苗を1年で作成することを目指し、コンテナ容器、育苗密度、元肥の量、GSSGの施用について検討した。

コンテナ容器については150ccから300ccのものを使用したが、今回の育苗条件では苗高に有意差はなく、育苗密度が小さい方が形状比が低くなった。すなわち、生産コストや植栽効率の面でデメリットのある300cc容器を必ずしも使う必要はなく、150ccで密度調整をすれば形状比を下げることは可能と判断した。

この結果を受け、150cc容器を使用して施肥量と育苗密度を調整した試験では、1コンテナ当たり24本まで密度を下げ、施肥量を「少」程度に抑えた場合に最も成績が良く、苗高25cm以上、形状比100未満の得苗率は9割を超えた。根鉢容量と生育空間に制限のあるコンテナ苗で、裸苗と同水

準の形状比83を上限とするのはやや厳しいが、形状比100未満の1年生苗を生産することは十分可能であると結論づけた。

生産性を上げるためには育苗密度をあげつつ形状比の低い苗の得苗率を上げることが課題となるが、150ccコンテナ40本の密度ではいずれの施肥条件でも平均形状比が90を超え、苗木形質にばらつきが発生した(図-6~9)。本試験より少ない施肥で育苗した既往の試験(来田ら2020)でも、平均形状比が90超であったことから、施肥の調整だけでは形状比を抑えることは困難といえる。形質の均質化については、生育期間中の並べ替えによる密度調整(山中2022)や、接触や風による刺激(阿部2023)、傾斜育成(三樹2019)等による伸長成長の抑制も適用できる可能性があり、今後検証していく必要がある。

3 1年生コンテナ苗の植栽試験

3.1 方法

植栽後の初期成長が早い苗木の条件を調べるため、2章で検証したものを含む様々な条件で作成した初期形状に幅のある1年生コンテナ苗を林業総合センター構内（塩尻市）に植栽した。供試した1年生苗は2019年及び2020年に林業総合センターで作成したもので、それぞれ2020年5月8日、2021年4月9日に植栽した。供試苗の育苗条件は表-5のとおりとした。また、2020年の植栽の

際には、植栽時のGSSG施用が苗木の初期成長に影響するかを調べるため、一部の苗に対し植栽直前にGSSGを含有する液剤（W2）または粒剤（R1）タイプの施肥を実施した。W2の施用にあたっては250倍希釈液に根鉢を1分程度浸漬処理し、R1の施用にあたっては植穴の底に16gの粒剤を投入し、そのままコンテナ苗を植栽した。

計測は植栽1か月後、1成長期後、2成長期後の3回行った。植栽1か月後の計測では、前年の冬芽の位置を植栽直後の樹高とした。

表-5 植栽試験に供試した1年生コンテナ苗の育苗条件と植栽本数

2020年植栽（上）、2021年植栽（下）。期間中に誤伐されたものは除外した。

処理区名	コンテナ	元肥の種類 ^{*1} と量	育苗時GSSG	植栽時GSSG	本数
a-1				-	30
a-1-W			有	W2	29
a-1-R	150スリット	OS34 ^{*2} +有機肥料10% 6g/L		R1	29
a-2				-	15
a-2-W			無	W2	15
a-2-R				R1	15
b-2	150リブ				15
c-2	150スリットちどり	OS34 ^{*2} +有機肥料10% 6g/L	無	-	10
d-2	H200独立				10
合計					168

*1：OS34はオスモコートエグザクトスタンダード3～4か月を示す。

*2：オスモコートエグザクトスタンダード5～6か月、ハイコントロール650-100Eで育成した苗も混在するが、いずれも残効がないものと判断し区別していない。

処理区名	コンテナ	肥効期間	元肥の種類 ^{*1} と量	育苗時GSSG	本数
A-1				9回	19
A-2		短期	HC650-180 20g/L	6回	19
A-3				無	20
B-1				9回	20
B-2	300ccスリット	混合	HC650-100+HC650-700 10g/L+10g/L	6回	20
B-3				無	20
C-1				9回	19
C-2		長期	HC650-700 20g/L	6回	20
C-3				無	20
D-1	150ccスリットちどり			9回	20
D-2				6回	19
E-1	230ccスリット	長期	HC650-700 20g/L	9回	19
E-2				6回	20
F-1	200ccスリット独立			9回	20
G-1	150ccスリット			9回	20
合計					295

*1：HCはハイコントロールを示す。

3.2 結果と考察

3.2.1 1年生コンテナ苗の初期形質と成長

育苗条件別に植栽直後、1 成長期後、2 成長期後の樹高と根元径の推移を図-11 に示した。2020 年と 2021 年に植栽した 1 年生コンテナ苗は初期の平均形状比がそれぞれ 63~89, 56~82 だったが、その形状比をほぼ維持したまま成長し、2 成長期後には平均樹高がそれぞれ 193cm, 216cm となった。一部の日当たりの悪かった処理区では樹高の伸びが悪く 60cm ほどの差が生じたものの、いずれの試験地でも植栽 3 年目以降は周辺の競合植生の背丈を超えており下刈りが不要となった。

植栽時点の各苗の形状比と 2 成長期後の樹高の関係を図-12 に示した。今回供試した苗の初期樹高は 23.0~68.0cm, 初期根元径は 3.3~8.4mm, 初期形状比は 42.8~107.3 であったが、いずれの年もこれらの数値と 2 成長期後の樹高の間にはほとんど相関関係がなかった。つまり、今回用いた苗木の初期形質は 2 成長期後に樹高に影響するものではなく、植栽後の成長性という観点ではこの範囲内で差別化する必要はないと考えられた。

2020 年に植栽した 168 本の苗木のうち 3 本が、2021 年に植栽した 295 本の苗木のうち 17 本が 2 成長期の間に枯死した。2021 年植栽の苗について、初期形状比別の枯死率を見ると、GSSG を施用しなかった苗では形状比が 80 以上になると枯死率が高くなっていった (図-13)。また、2021 年に植栽した苗のうち形状比が 100 を超えていた 2 個体は植栽直後からたわみ始め、1 年以内に枯死した。

3.2.2 コンテナ容器と初期成長

容器以外の育苗条件をそろえた苗木について、樹高の推移を比較した (図-14)。2020 年に植栽した苗は育苗時に GSSG は使っていないもの (a-2, b-2, c-2, d-2), 2021 年に植栽した苗は GSSG を施用したもの (C-1, D-1, E-1, F-1, G-1) で条件を揃えた。初期樹高は 23.0~52.0cm, 初期根元径は 3.8~6.9mm, 初期形状比は 46.0~100.0 であり、いずれの年度とも 2 成長期後の樹高に差が生じなかった。一方、上村ら (2021) は北海道において容量の異なるコンテナで育てたカラマツの 1 年生コンテナ苗を植栽した結果、300cc コンテナで作った苗の方が植栽 2 成長期後の樹高が大きくなったことを報告した。この事例では平均苗高が 150cc, 300cc とともに平均 60cm 程度の大きい苗を用いていたが、300cc の苗は 150cc の苗と比べて形状比が低く、地上部乾重と地下部乾重が大きか

ったとしている。苗高の大きいコンテナ苗では根鉢の容量の違いで植栽後の成長に差が出る事例があるものの、本研究で今回供試した範囲のサイズであれば根鉢の大きいコンテナ苗の優位性はないと考えられた。

3.2.3 元肥の肥効期間と初期成長

2021 年に植栽した苗木のうち元肥と追肥の種類以外の育苗条件を揃えたものについて、使用した緩効性肥料の肥効期間に応じて、短期区 (A-1~A-3), 混合区 (B-1~B-3), 長期区 (C-1~C-3) の 3 区に分け、樹高の推移を図-15 に示した。初期樹高は育苗期間中の養分の溶出が少ない長期区の苗が有意に小さく、その傾向は 2 成長期の間継続したが、時間の経過とともに樹高のばらつきが大きくなり、2 成長期後には有意な差はなくなった。長期区または混合区における植栽後の養分溶出が樹高成長を促進する可能性は否定できず、今回のように元肥の総量が同じ条件では、植栽時の 10cm 程度の樹高差は 2 成長期後の樹高には影響しないことが示唆された。

残る課題として、育苗期間中の養分溶出量を統一した条件で、植栽後の肥料の残効が樹高成長に与える影響を調べる必要がある。

3.2.4 グルタチオンの施用と初期成長

育苗中及び植栽時に GSSG を施用した 1 年生コンテナ苗の樹高の推移を図-16 に示した。いずれの施用方法でも、無施用の苗と比較して 2 成長期後の樹高に有意差は認められなかった。また、2021 年に植栽した試験地では 295 本の苗木のうち 17 本が枯死し、形状比が 80 以上で枯死率が高くなったが、この内訳をみると GSSG を施用している区では無施用区に比べて枯死率が低かった (図-13)。

GSSG の施用効果については、カラマツでは育苗時に施用することで植栽後の生存率が向上する事例が報告されており (北海道立総合研究機構 2023, 清水 2019), 今回の結果と一致した。また、植栽時に通常の肥料とあわせて GSSG を施用すると無施用に比べて 3 年目の樹高がわずかに高くなった事例がある (北海道立総合研究機構 2023)。同様にスギで植栽時に GSSG を施用した事例では、植栽時の施用では成長促進の効果は認められなかったものの、単独施用よりも緩効性肥料と併用することで効果が改善される可能性が示されている (飛田ら 2023)。GSSG は通常の施肥と併用することで効果が表れやすくなると考えられ、適切な施用方法についてはさらなる検討が必要である。

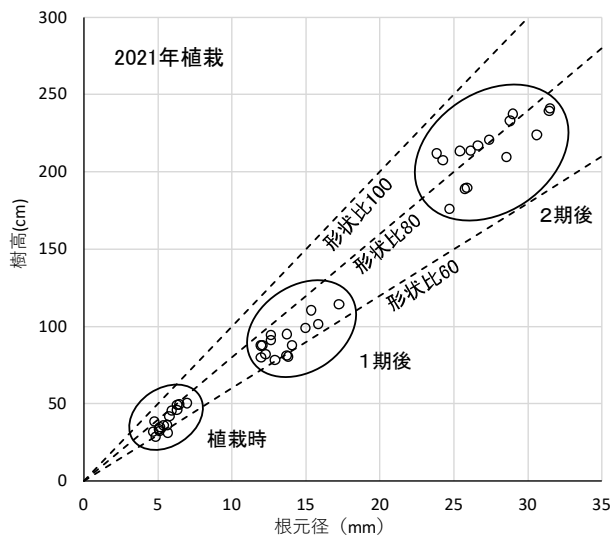
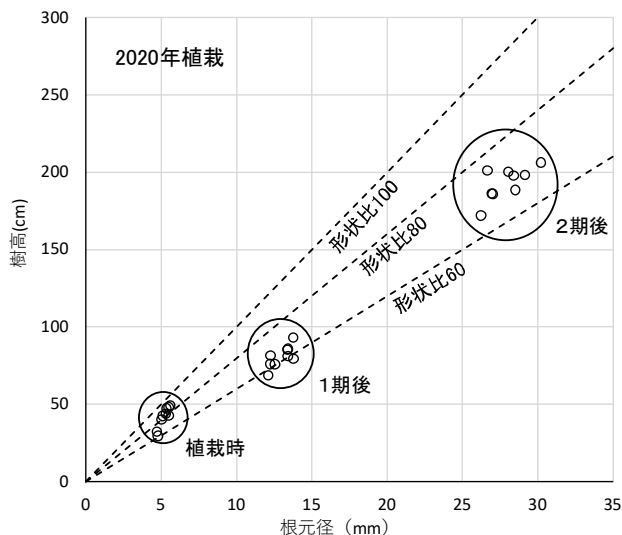


図-11 各処理区の植栽後の平均樹高と平均根元径の関係

2020年植栽（左）と2021年植栽（右）。2成長期のうちに枯死した個体は除外して作図した。

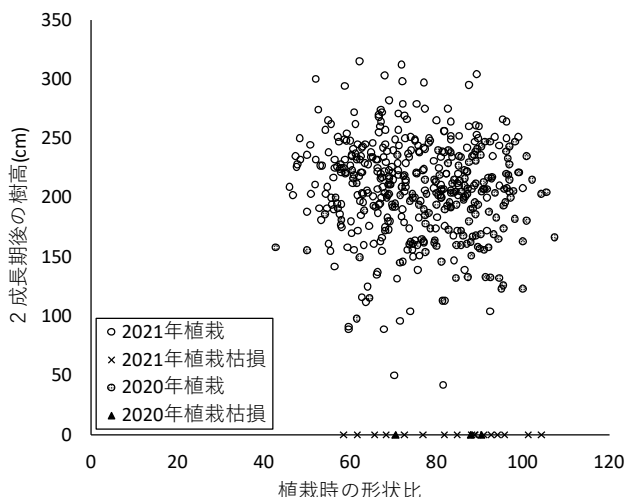


図-12 各苗の初期形状比と2成長期後の樹高
横軸上の点は枯損個体。

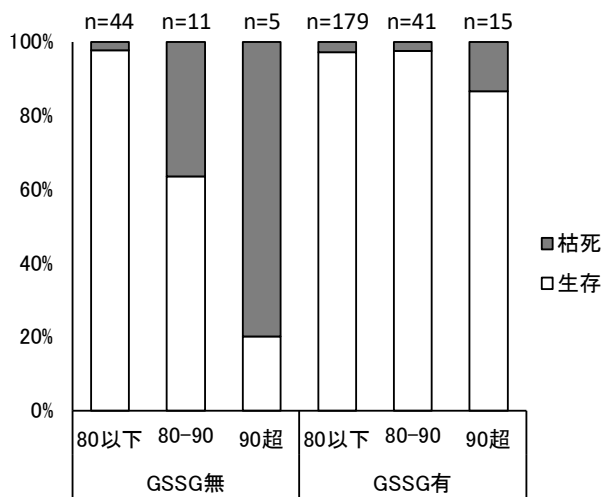


図-13 植栽時形状比と育苗時GSSG処理別の2成長期後の枯死率

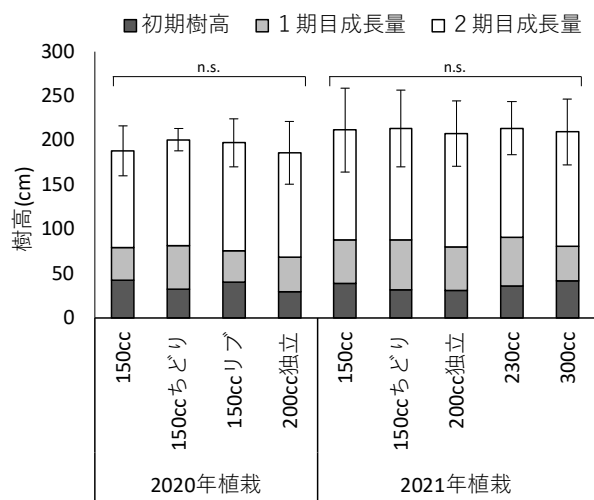


図-14 コンテナ容器別の樹高成長の推移
有意差なし（一元配置分散分析法）

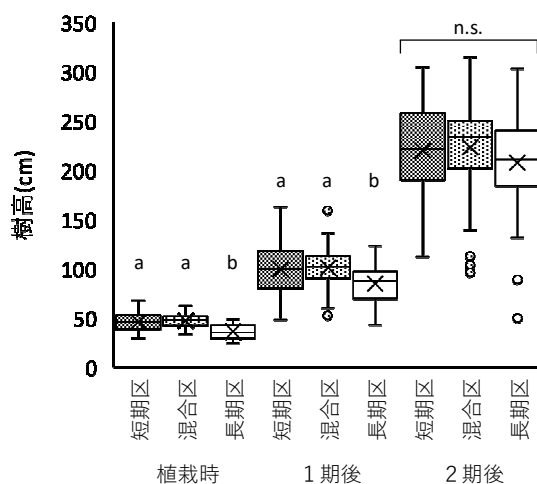


図-15 元肥の肥効期間別の樹高成長の推移
異なる符号間に有意差（Tukey-Kramerの多重比較検定, $p < 0.05$ ）

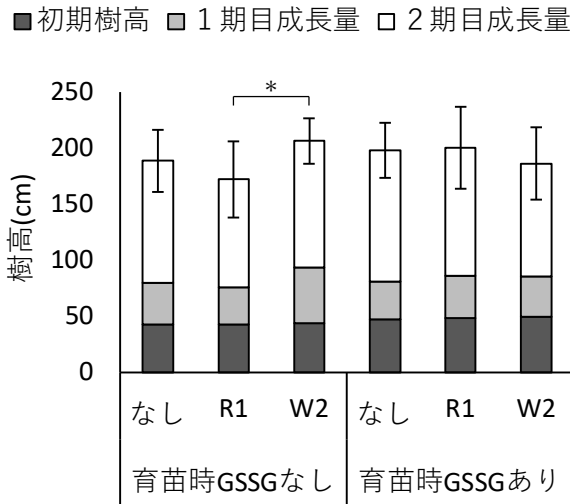


図-16 育苗時及び植栽時に GSSG を施用した苗の植栽後の樹高成長の推移

*: 有意差 (Tukey-Kramer の多重比較検定, $p < 0.05$)

3.3 まとめ

様々な育苗条件で育成した1年生コンテナ苗を植栽し、2成長期の間、成長の推移を調査した。2020年と2021年に植栽した2箇所ではいずれも良好な樹高成長を示し、3年目以降の下刈りは不要となった。本研究では、植栽時の苗木の形状、コンテナ容器の種類、元肥の肥効期間、GSSGの施用有無について比較検証したが、下刈り回数の増減にかかわるほどの成長量の違いは見いだせなかった。

今回供試した苗の範囲では、初期成長との相関はほとんどなかったものの、形状比80を超えると枯死率が上がるケースが確認された。東信地域で実施したカラマツ裸苗とカラマツコンテナ苗の植栽試験では、平均形状比が100程度と裸苗より極端に高いコンテナ苗は植栽1年目の樹高成長が悪かったこと、植栽時点で苗種によって形状比に差があったものの、植栽2年後には形状比が70~80程度に収斂することが示されている(大矢ら2023)。このことから植栽後の活着と樹高成長が良好なカラマツコンテナ苗の条件としては、形状比80を1つの目安とするのが妥当であろうと考えられる。

苗木の初期形質と植栽後の樹高成長の関係は、カラマツとグイマツの雑種であるクリーンラーチでも調査されている。北海道で実施された植栽試験では、初期形質としては苗高や根元径よりも形

状比が重要であり、形状比110以上の場合は3成長期後の樹高が低くなる傾向があることが指摘されている(北海道立総合研究機構2023)。本研究の調査では形状比110以上のデータがないため、規格として設定すべき上限を明確に言及することはできないが、同様の調査事例を増やすことで出荷すべきではない限界値を線引きする必要がある。

4 結言

本研究では、品質の良いカラマツコンテナ苗を1年で生産することを目指し、様々な育苗条件を検討した。その結果、県内に最も普及している150ccコンテナ容器では、育苗密度を1コンテナあたり24個体に調整し、元肥量は抑えることで、形状比100未満または80未満の得苗率が向上することが明らかとなった。元肥が少ない場合は12個体以下まで密度を下げることはむしろ得苗率の低下をまねき、24個体程度が適切だろうと判断した。

1年生コンテナ苗の植栽試験からは、今回供試した苗の形質の範囲内では2成長期後の樹高と明確に関連がある要素は見いだせず、形状比100未満の苗であれば初期成長に問題はないと考えられた。しかしながら、形状比80以上で枯死率が高くなる場合があり、既往の研究でも形状比が初期の樹高成長や枯死率に影響する事例が示されていることから、目指すべきカラマツコンテナ苗の条件としては形状比が重要であり、形状比80を1つの目安とするのが妥当であろうと考えられた。本研究で実施した育苗試験では、1コンテナ当たり24個体での得苗率は、合格ラインを形状比100未満とすると92%、80未満では71%であり、生育環境に制限の多いコンテナ苗であっても実現できない数字ではない。今後、適切な出荷規格を設定するためには、さらに調査事例を増やすことで苗木形質の上限あるいは下限を設定する必要がある。

育苗試験の結果、育苗密度を下げることで形状比の低い苗が得られたが、生産効率を上げるためには、より育苗密度を上げつつ、形状比80未満の得苗数を増やすことが今後の課題となる。育苗密度、コンテナ容量あるいは元肥量の調整だけで改善することは困難と思われ、別の樹種で取り組まれている育苗中の並べ替えや苗木に対する物理刺激といった別のアプローチによる形質の均質化を検討する必要があると考えられた。

謝辞

本研究を行うにあたっては、戦略的プロジェクト研究推進事業に参画された森林総合研究所及び各道県試験場の担当者の皆様に様々なご助言、ご指導を頂きました。この場を借りて感謝申し上げます。

引用文献

- 阿部森也 (2023) スギコンテナ苗に対する接触刺激および風刺激の徒長抑制効果, 関東森林研究 74 巻, 57-60
- 北海道立総合研究機構森林研究本部林業試験場 (2023) クリーンラーチ・カラマツ類の優れた成長を活かす育苗と育林, 施業モデル
- 北海道立総合研究機構森林研究本部林業試験場・林産試験場 (2019) カラマツ播種コンテナ苗の育苗方法とコンテナ苗運搬・植栽システム
- 来田和人・今博計 (2020) 施肥とコンテナのセル容量がカラマツ播種コンテナ苗の成長に与える影響, 北海道林業試験場研究報告 57, 1-11
- 三樹陽一郎 (2019) 宮崎県におけるコンテナ苗の現状と研究事例, 森林遺伝育種 8 巻 4 号, 178-182
- 長野県林務部 (2022) 令和 4 年度長野県山林種苗需給調整協議会資料
- 二本松裕太 (2022) カラマツコンテナ苗の育苗における施肥内容の検討, 第 133 回日本森林学会大会学術講演要旨集 133, P-122
- 二本松裕太・小山泰弘 (2023a) 植栽後の成長から見たカラマツコンテナ苗の条件, 第 134 回日本森林学会大会学術講演要旨集 134, P-121
- 二本松裕太・小山泰弘 (2023b) 施肥量と育苗密度がカラマツコンテナ苗の形状に与える影響, 中部森林研究 71 巻, 7-8
- 二本松裕太・清水香代 (2021) 1 年生カラマツコンテナ苗の植栽後の成長, 第 132 回日本森林学会大会学術講演要旨集 132, P-095
- 大矢信次郎・二本松裕太・田中裕二郎・小山泰弘 (2024) 成長に優れた苗木を活用した施業モデルの開発—最適な植栽密度・下刈り回数の提示—, 長野県林業総合センター研究報告 38, 1-8
- 大矢信次郎・斎藤仁志・城田徹央・大塚大・宮崎隆幸・柳澤信行・小林直樹 (2016) 長野県の緩傾斜地における車両系伐出作業システムによる伐採・造林一貫作業の生産性, 日本森林学会誌 98 巻 5 号, 233-240
- 島根県中山間地域研究センター (2018) スギ・ヒ

ノキのコンテナ苗生産の手引き (改訂版)

- 清水香代 (2019) 成長に優れた苗木を活用した施用モデルの開発—グルタチオン施用技術の開発—, 長野県林業総合センター平成 30 年度業務報告, 46-47
- 飛田博順・奥田史郎・原山尚徳・上村章・小川健一 (2023) スギコンテナ苗の成長に及ぼす植栽時のグルタチオン施用の影響, 関東森林研究 74 巻, 53-56
- 上村章・原山尚徳・鈴木真一 (2021) 異なるコンテナで育てたカラマツ苗の林地植栽後の成長, 北方森林研究 69 巻, 29-30
- 山中豪 (2022) 選苗と密度調整がスギ実生コンテナ苗の形態的性質に与える影響, 日本森林学会誌 104 巻 5 号, 243-253
- 八木橋勉・中谷友樹・中原健一・那須野俊・櫃間岳・野口麻穂子・八木貴信・齋藤智之・松本和馬・山田健・落合幸仁 (2016) スギコンテナ苗と裸苗の成長と形状比の関係, 日本森林学会誌 98 巻 4 号, 139-145

シイタケ産業活性化のための省力栽培技術の開発

片桐一弘・加藤健一・増野和彦

シイタケ産業の活性化に資するため、原木シイタケ栽培の効率化及び省力化に関する試験、菌床シイタケビン栽培技術の開発に関する試験等を行った。その結果の概要は、以下のとおりである。

【原木栽培】オガ菌を植菌する際の封口作業を省略しても、封口した場合と同等の子実体発生量が、植菌当年から得られ、総発生量においても封口の有無による差が見られない品種が確認され、これらの品種は封口省略栽培の適性が高いと考えられた。植菌作業の省力化や大径木の有効活用が可能な、わりばし種菌を用いた栽培試験では、一原木当りのわりばし種菌の接種量を従来の 1 列から 2 列に増やすと、子実体発生量が増加し、一般的な種駒菌を用いた栽培方法と同程度の収量が得られることが明らかになった。生シイタケ生産を行う場合、ほだ木の浸水発生後に必要となる休養の省力化試験では、休養期間中の積極的な加温や加湿処理（蒸し込み）により、通常の休養管理よりも、休養期間が短縮されることが分かった。また、その後の浸水発生による子実体発生量の増加が期待できることから、浸水発生の回数を減らすことが可能と考えられた。

【菌床栽培】①培地材料に、おがチップを混合する栽培試験を行った結果、品種間差は見られたものの、子実体発生量が増加することが確認された。②ビン栽培に適性のある市販品種を新たに 1 品種確認した。③ビン内に子実体が発生するのを防ぐ目的で行う、ビンの遮光の適切な時期を検討した結果、多くの品種で遮光時期による子実体発生量への影響は無いことが確認された。④ビン容器の通気性について検討した結果、通気性の高い蓋を使用したビンで、高収量を得られる品種が確認された。⑤浸水や打床といった、刺激（発生刺激）をビンに与えた結果、子実体の発生促進効果が確認された。⑥ビン栽培においては、袋栽培と同等の収量を得るには、発生期間が長期化してしまう。そこで、高収量かつ短期間での栽培技術の開発試験を行った結果、ビン栽培において、栽培期間を短縮し、回転率を上げることにより、全体の収量を高めることが出来る可能性が示唆された。⑦既存の菌床シイタケ生産者施設において、ビン栽培により子実体が発生することは確認できたが、その発生量には、栽培環境の違いが大きく影響していると考えられた。⑧ビン栽培と袋栽培の生産性を比較検討した結果、ビン栽培の生産性を上げるためには、一ビン当たりの子実体発生量の増加や、栽培期間の短縮化による回転数を増やす必要があると考えられた。それにより、袋栽培と同等以上の「生産量」を得ることが、菌床シイタケビン栽培技術の確立には重要と考えられた。

キーワード：シイタケ、原木栽培、菌床栽培、省力栽培、ビン栽培

目次

1 緒言

2 原木シイタケの省力栽培

2.1 封口省略栽培

2.2 わりばし種菌による省力栽培

2.3 休養の省力化（蒸し込み）栽培

3 菌床シイタケビン栽培技術の開発試験

3.1 培地材料・品種に関する試験

3.1.1 ビン栽培に適した培地材料の検討

3.1.2 ビン栽培適性のある品種の探索

3.2 栽培容器に関する試験

3.2.1 光線の遮断時期の検討

3.2.2 容器の通気性に関する試験

3.3 発生管理に関する試験

3.3.1 発生刺激の増収効果に関する栽培試験

3.3.2 高収量・短期栽培を目指した栽培試験

3.4 ビン栽培技術の普及に関する検討

3.4.1 菌床シイタケ生産者施設における現地栽培試験

3.4.2 菌床シイタケビン栽培における生産性の試算

4 総合考察

5 結言

6 謝辞

7 引用文献

1 緒言

シイタケ栽培には、原木栽培と菌床栽培の二つの方法がある。

江戸時代に始まったとされる原木栽培は、戦後になって開発された純粋培養種駒の普及を契機に、飛躍的に拡大した。本県においても、昭和 35 年頃から 50 年代にかけて生産が拡大し、春先の貴重な収入源として山村の重要な産物となった¹⁾。

一方、菌床栽培の歴史は浅く、昭和45年頃に袋栽培による空調栽培法が開発され、その後本格的に普及が始まったのは昭和60年頃からである。種菌メーカー等が新しい栽培法を示すことによって生産が拡大していった。本県では、他のきのこの複合栽培や、新たに開始する新規栽培などのパターンで導入が進んできた¹⁾。

今日では、これら二つの栽培方法によるシイタケ産業は、山村の地域経済を担う重要な産業となっている。また、どちらの栽培方法も、里山に豊富にあるコナラ等の広葉樹を原木やおが粉として使用することから、地域資源を活用した持続可能な産業としても、注目されている。長野県林業総合センター（以下「当所」）では、これまで二つの栽培方法の基礎的な研究や、本県の栽培環境に適した様々な栽培技術等の試験研究を行ってきた。

現在、シイタケ産業を取り巻く状況は大変厳しい。原木栽培では、重い原木を扱うことによる重労働や、後継者不足による生産者の高齢化、また近年では、原木価格の高騰も大きな問題となっている。菌床栽培では、世界情勢の変化等による物価上昇の影響を強く受けている。空調施設に使用する燃油及び資材全般の価格の高騰、培地基材であるおが粉がバイオマス発電事業の需要が増加したことにより、入手しづらくなっていることなどがある。

また、現行の菌床シイタケ栽培は、栽培方式が他の栽培きのこの類の多くで用いられるビンではなく、袋栽培であることが大きな特徴となっている。袋栽培は、培養後、袋を破き発生棚に並べ、子実体を発生させ収穫を行うが、一連の作業は手作業が多く、身体的な負担が大きい。ビン栽培は、機械化・省力化が可能で、作業性がよく²⁾、生産コストの削減が期待できる。過去には、菌床シイタケ栽培の専用ビンの開発が検討された^{3, 4)}が、培養中に原基形成されることや、培地全面から子実体が発生する菌床シイタケの特徴のために、培養後はビンを分解し、菌床を取り出す必要があり、ビンによる省力化のメリットが培養段階までに留まっていた。そのため、菌床シイタケの本格的なビン栽培化には至らなかった。

本県は、エノキタケやナメコなどのビン栽培きのこの生産が全国トップクラスであり、ビン栽培に慣れた中小規模生産者が多い。きのこの価格の低迷が続く中で、経営が厳しいこれらの生産者が、既存のビン栽培施設を使って、比較的単価が高いシイタケを生産することによる経営改善が期待され

ている。

以上の諸課題を受け、本研究では、原木、菌床シイタケ栽培それぞれの既存栽培技術を見直し、効率的な栽培技術の開発による労働負荷軽減や大径木を活用した省力栽培技術、また菌床シイタケのビン栽培技術の開発を目指すことで、本県のシイタケ産業の活性化を図ることを目的とした。

なお、本研究は県単課題「里山資源をいかしたシイタケ産業活性化のための省力栽培技術の開発」（2018～2022年度）として実施した。

2 原木シイタケの省力栽培

2.1 封ロウ省略栽培

2.1.1 目的

シイタケの原木栽培で用いられる種菌には種駒菌、おが屑種菌（以下「オガ菌」）、成型（形成）菌の3種類がある。一般的に生シイタケ生産を目的とした場合は、活着・初期伸長が早く年内発生が見込めるオガ菌あるいは、オガ菌を加工（成型）し上部に専用のフタ材を付けて弾丸状に固めた成型菌が用いられる。

オガ菌は、植菌後に種菌の乾燥防止や害菌対策のため、種菌表面にロウを塗布（以下「封ロウ」）する必要がある。封ロウは、ロウや塗布する道具（タンポ）の作製、塗布にかかる労務費など生産者の負担が大きい。封ロウを省略できれば、労働負荷軽減やコストダウンに繋がると考えられるが、これまでに封ロウを省略した栽培方法について検討された例はほとんど無い。そこで筆者は、封ロウ省略栽培技術を確立するために、植菌後の乾燥の影響及び栽培適性のある市販品種の探索を行ってきた⁵⁾。

本試験では、これまで検討していなかった、植菌した年内（当年）から子実体発生を行う栽培方法における封ロウ省略栽培の適性について検討した。併せて、成型菌との比較栽培試験を行った。

2.1.2 試験方法

(1) 栽培概要

植菌は2019、2020、2021年の3回行い、それぞれ1月下旬から2月下旬に実施した。原木は、長野県産コナラを使用し、長さは90cm、末口の平均直径は、2019年は8.9cm、2020年は8.5cm、2021年はやや細く7.7cmであった。種菌は、市販の9品種を使用し、種類及び植菌年は表2-1-1に示した。なお、以降の品種名の表記は、略称を用いることとし、本研究における他の試験も同様とする。

表 2-1-1 封ロウ省略栽培試験使用品種一覧

品種 ^{*1}	発生型 ^{*2}	種類 ^{*3}	植菌年
菌興702 (702)	高中温	オガ 成型	2019・2020 2020
菌興706 (706)	高中温	オガ 成型	2019・2020 2020
富士F309 (F309)	高中温	オガ 成型	2019・2020 2020
富士F720 (F720)	高中温	オガ	2019
秋山A950 (A950)	中温	オガ	2020・2021
秋山A511 (A511)	中高温	オガ	2021
森KV-92 (KV92)	高温	オガ	2021
森XR1号 (XR1)	中高温	オガ	2021
森与一丸 (与一丸)	中高温	オガ	2021

*1 括弧内は略称。*2 発生型はメーカー表示を引用。*3 オガ：オガ菌，成型：成型菌（※発砲スチロールの蓋付き）

植菌方法等の概要は以下のとおり。[穴あけ] 椎茸ドリル（10,000回転/分，東芝製）で一原木当たり平均46箇所（※2021年は原木が細かったので36箇所）設置。[ドリルの刃の直径] オガ菌：12.5mm，成型菌：12.7mm [接種器具] 手動式オガ植菌機（商品名：楽太郎，秋山種菌研究所製）[封ロウ] ホットプレートで溶かしたロウを自作のタンポ（図2-1-1）を使用し塗布（封有区）。その際，封ロウを行わない区（封無区）も設定。[ほだ木の管理] 加温装置付きのビニールハウスで仮伏せ後，人工ほだ場で本伏せ。[浸水発生] 人工ほだ場から運搬したほだ木を，12～24時間浸水槽に浸漬後，加温設備のない発生室内に置き，子実体を発生。初回は，植菌当年の9月下旬頃行い，2回目からは翌年以降



図 2-1-1 封ロウ作業状況

の2年間に実施し，総回数は，植菌年別に2019年は7回，2020，2021年は6回。[収穫調査] 菌傘が8～9分開きとなったものを基準として行ない，試験区毎に発生個数と生重量を測定。なお，ほだ場内で自然発生した子実体も発生量に含めた。また，植菌当年の浸水発生では，子実体の全く発生しないほだ木が見られたことから，試験区毎に全供試数に対する子実体の発生したほだ木の割合を子実体発生ほだ木割合とした。

各試験区の供試数は結果に示す。

(2) 植菌に係る作業時間調査及び費用の試算

植菌等の作業時間の計測は2020年に実施した。作業は，穴あけ，接種，封ロウの3項目とし，オガ菌，成型菌それぞれ原木10本について計測し，一本当たりの平均作業時間を算出した。作業は全て筆者一人で行い，補助者がストップウォッチにて計測した。なお，オガ菌をビンからかき出す時間や，ロウを溶かす時間など，作業の準備に係る時間は除外した。

材料の使用量は，実際の使用量を基に算出した。種菌代は「きのこ種菌一覧（2024年版）」⁶⁾によった。ロウ代は，2023年の当所の購入価格を基にした。作業に係る労務費として，作業時間に雇用賃金（単価）を乗じた金額を計上した。

2.1.3 結果と考察

品種別子実体発生量等調査結果を図2-1-2～10に示す。なお，2年植菌した702，706，F309とA950の4品種は，各年の調査結果が概ね類似していたことから1年分のみ示す。植菌に係る作業時間調査結果を表2-1-2に，植菌に係る費用の試算結果を表2-1-3に示す。

以下に(1)封有区と封無区間の子実体発生量及び(2)発生ほだ木割合の比較検討と，(3)封有区及び封無区と成型区との比較検討，そして(4)植菌に係る作業時間，費用について比較検討を行い，最後に(5)全体のとりまとめを行った。

(1) 封有区と封無区間の子実体発生量の比較

702と与一丸は，当年に発生した生重量（以下「当年生重量」）と個数（以下「当年個数」）及び全期間に発生した総生重量と総個数（以下「総発生量」）で，封有区と封無区間に有意差は見られなかった。F720は当年個数で封無区のほうが封有区より有意に多く，総発生量では両者の間に有意差は見られなかった。706とA511及びKV92の3品種は，当年生重量と当年個数若しくはそのどちらか一方で封有区のほうが封無区より有意に多かったが，総発

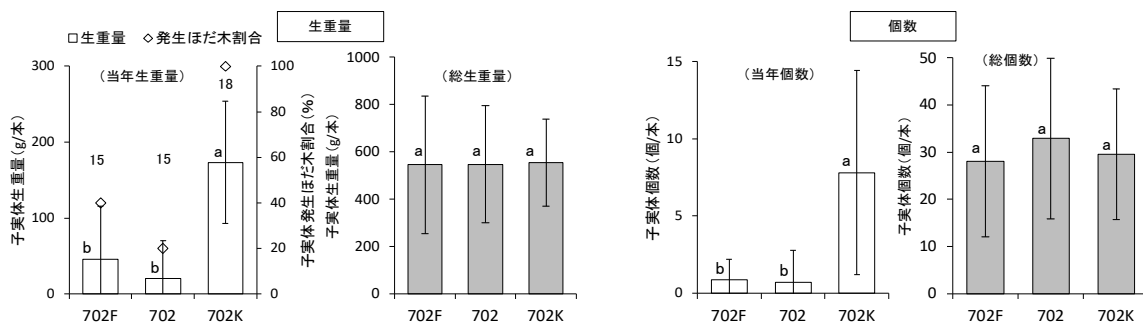


図2-1-2 菌興702子実体発生量等調査結果

(左側図：生重量・子実体発生ほだ木割合，右側図：個数)

注) 品種名の後のF：封有区，品種名のみ：封無区，K：成型区。生重量の当年生重量の棒グラフ上部の数字は供試数。異なるアルファベットは有意差があることを示す (Tukey-Kramer法, $p < 0.01$)。垂線は標準偏差。
 ※以降，図2-1-3～10の注) は，本内容と同じ場合は省略し，異なる内容のみ記載する。

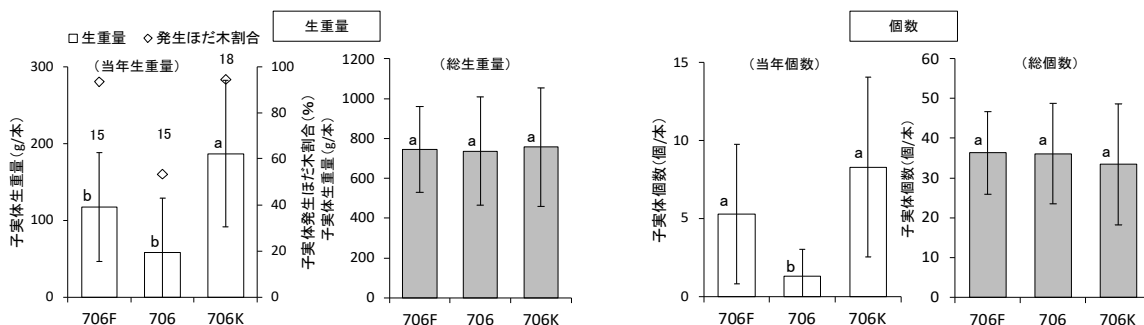


図2-1-3 菌興706子実体発生量等調査結果

(左側図：生重量・子実体発生ほだ木割合，右側図：個数)

注) 異なるアルファベットは有意差があることを示す (Tukey-Kramer法, 706と706Kの間は $p < 0.01$, それ以外は全て $p < 0.05$)。

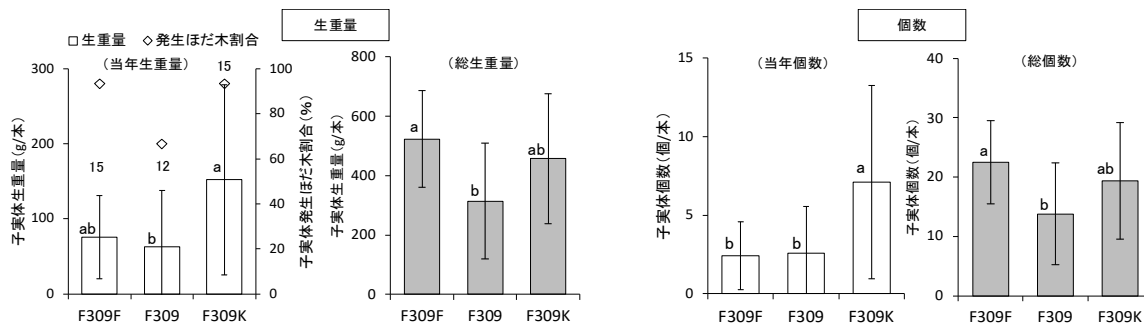


図2-1-4 富士F309子実体発生量等調査結果

(左側図：生重量・子実体発生ほだ木割合，右側図：個数)

注) 異なるアルファベットは有意差があることを示す (Tukey-Kramer法, $p < 0.05$)。

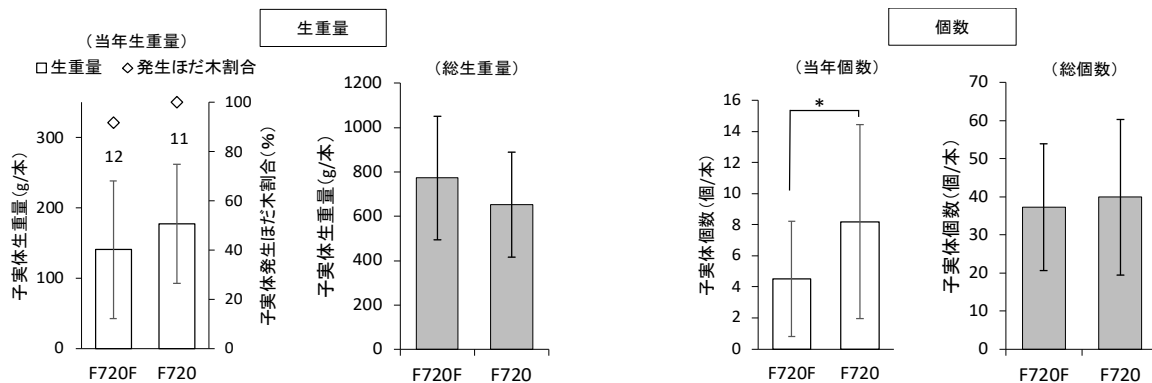


図2-1-5 富士F720子実体発生量等調査結果

(左側図：生重量・子実体発生ほだ木割合，右側図：個数)

注) 「*」は有意差があることを示す (t検定, $p < 0.05$)。

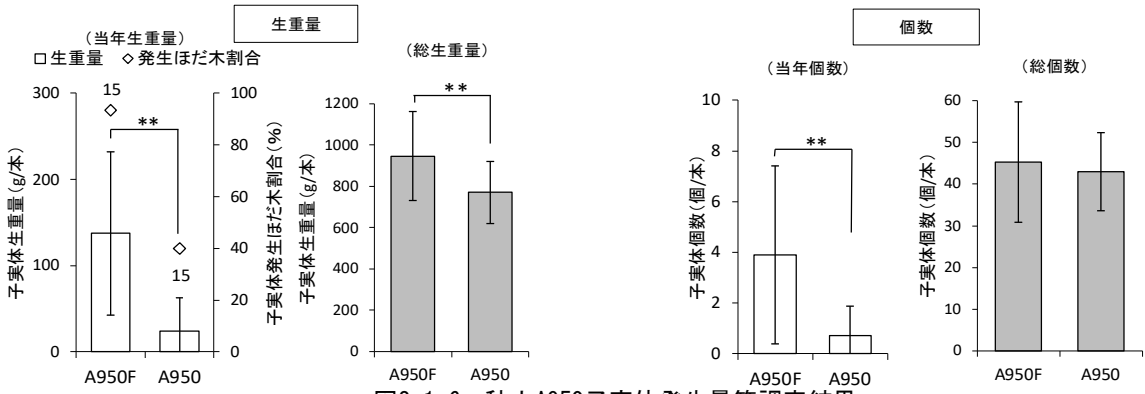


図2-1-6 秋山A950子実体発生量等調査結果

(左側図：生重量・子実体発生ほだ木割合，右側図：個数)

注) 「**」は有意差があることを示す (t 検定, $p < 0.01$)。

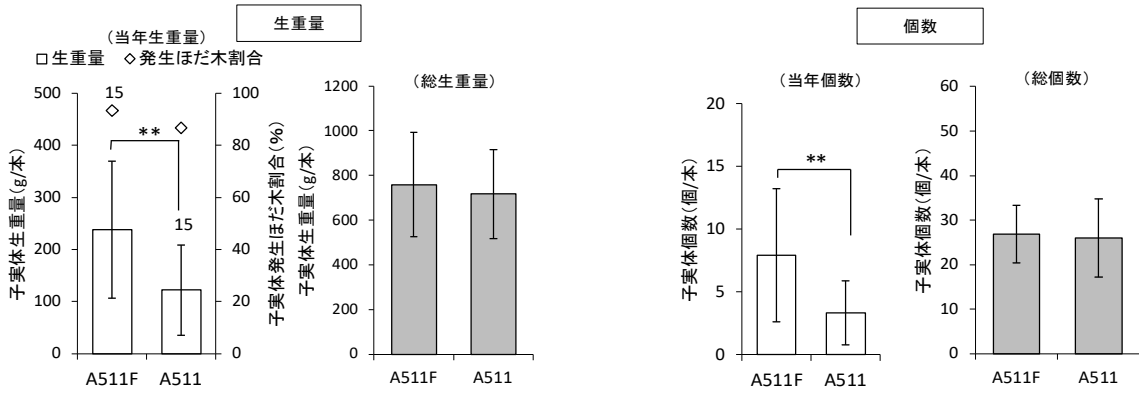


図2-1-7 秋山A511子実体発生量等調査結果

(左側図：生重量・子実体発生ほだ木割合，右側図：個数)

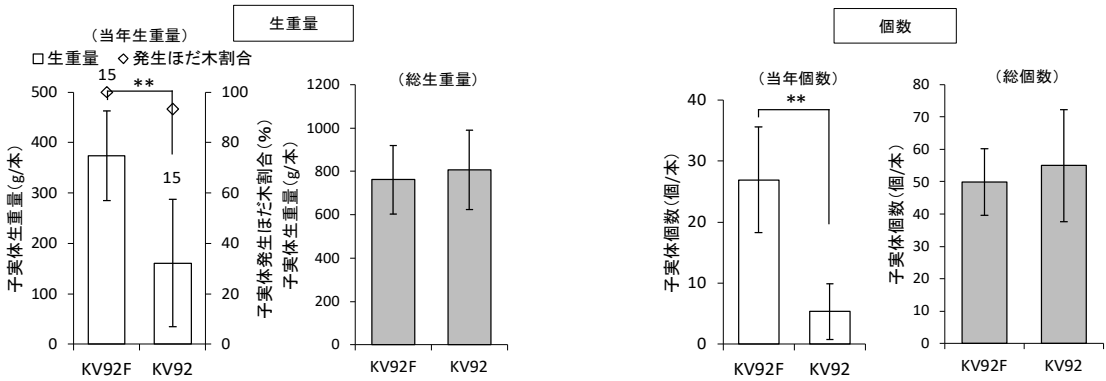


図2-1-8 森KV92子実体発生量等調査結果

(左側図：生重量・子実体発生ほだ木割合，右側図：個数)

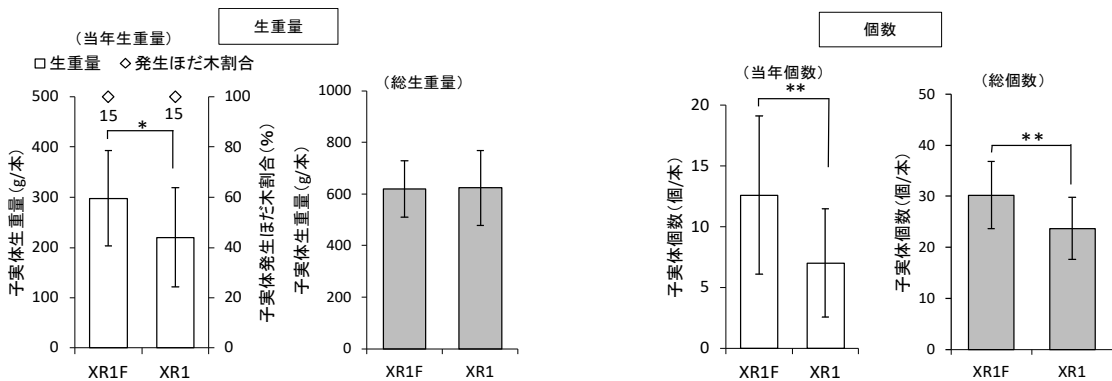


図2-1-9 森XR1子実体発生量等調査結果

(左側図：生重量・子実体発生ほだ木割合，右側図：個数)

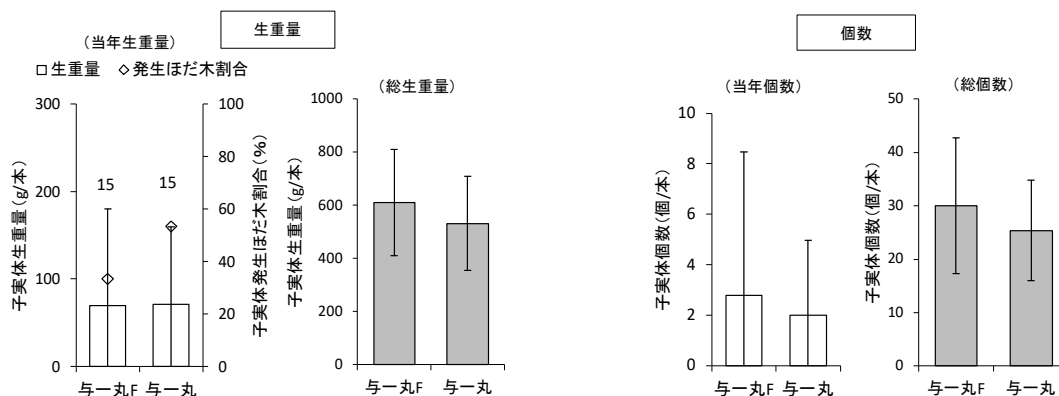


図2-1-10 森与一丸子実体発生量等調査結果
(左側図：生重量・子実体発生ほだ木割合，右側図：個数)

表 2-1-2 植菌に係る作業時間調査結果

試験区	作業時間 (秒/本)				作業時間 (1,000本当り)
	穴あけ	接種	封口ウ	計	
封有区	67	108	69	244	67時間52分
封無区	67	108	-	175	48時間40分
成型区	66	140	-	206	56時間58分

表 2-1-3 植菌に係る費用の試算結果 (円/1,000本当り)

項目	オガ菌		成型菌
	封口ウ有	封口ウ無	
材料費 (使用量)			
種菌代	239,200 (161,000cc) *1	239,200 (161,000cc) *1	193,200 (46,000個)
封口ウ	35,420 (25.76kg) *1	-	-
小計 (A)	274,620	239,200	193,200
労務費			
雇用賃金 (B) *2	67,861	48,667	56,972
合計 (A+B)	342,481	287,867	250,172

*1 1穴当たりのオガ菌の接種量は3.5cc，ロウの使用量は0.56gで計算。*2 時給1,000円で計算。

生量では有意差は無かった。F309 は当年生重量及び当年個数（以下「当年発生量」）では封有区と封無区間に有意差は無かったが，総発生量は封有区のほうが封無区より有意に多かった。A950 と XR1 は，当年発生量では封有区のほうが封無区より有意に多く，A950 は総生重量，XR1 は総個数でも封有区のほうが封無区より有意に多かった。

(2) 封有区と封無区間の発生ほだ木割合の比較

供試した9品種中，5品種で発生ほだ木割合に20%以上の比較的大きな差が見られた。このうち4品種が封有区に対して封無区が低く，706とA950は40%以上の大きな差が見られた。与一丸は封無区のほうが封有区より20%高かった。

(3) 封有区及び封無区と成型区の比較

成型菌を使用した3品種（702，706，F309）は，当年発生において封有及び封無区に対して成型区

の子実体発生量が多く、生重量と個数若しくはそのどちらか一方で有意差が確認された。一方、総発生量を見ると、3 品種ともに封有及び封無区と成型区間に有意差は確認されなかった。成型区の発生ほだ木割合は、3 品種の平均が 96%と高かった。

(4) 植菌に係る作業時間及び費用の比較

3 試験区で最も作業時間が短かったのは封無区で一原木当り 175 秒であった。封有区は封ロウに時間を要することから、最も作業時間が長かった。成型区は接種にやや時間がかかった(表 2-1-2)。

原木 1,000 本当たりの植菌作業に係る費用は、作業時間が最も長く、材料費にロウ代が必要な封有区が約 34 万円と 3 試験区で最も高かった。封無区は約 29 万円、成型区は約 25 万円であった(表 2-1-3)。

(5) 全体のまとめ

以上の検討結果より、封ロウを省略しても、封ロウした場合と同等の子実体生重量及び個数が、植菌当年に得られる品種があることが分かった。さらに、それらの品種のうち総発生量においても、封ロウの有無による差が見られなかった 702, F720, 与一丸の 3 品種は封ロウ省略栽培の適性が高いと考えられた。また、当年発生量は封有区より少ないものの、総発生量が封有区と同等となる 3 品種(706, A511, KV92)も封ロウ省略栽培に適性があると考えられた。

なおこれらの 6 品種を含め、封無区は封有区や成型区に比べ発生ほだ木割合が低い傾向が見られたことから、封ロウを行わないことが菌まわり(ほだ化)へ影響を及ぼしている可能性が示唆された。ただし、このことと封ロウ省略栽培への適性との関連性は不明であった。また、本試験では、発生型に関わらず多くの品種で封ロウ省略栽培への適性が見られたことから、植菌当年に発生させる場合には、発生型の影響を受けないことが示唆された。

成型菌は使用した 3 品種ともに、発生初期から旺盛な子実体発生が得られることが確認された。発生初期の子実体発生量には植穴からの子実体発生の有無が影響している⁵⁾ことから、成型区は封有区及び封無区に比べ、発生初期に植穴からの子実体発生量が多いことが示唆された。成型菌とオガ菌の使い分けは、作業性や費用面での検討は当然必要だが、「子実体発生量がピークとなる時期の設定」も重要な観点であると考えられた。

2.2 わりばし種菌による省力栽培

2.2.1 目的

クリタケ・ナメコの原木栽培で実践されている、わりばし種菌を用いた簡易接種法⁷⁾は、原木を伐採した現場でチェーンソーを使って植菌し、その場で管理できることから、植菌・仮伏せ作業の省力化や大径木の有効活用を図ることができる。シイタケのわりばし種菌を用いた栽培方法については、当所の先行研究により、ほだ木の乾燥を防ぐ植菌方法及び伏込み管理の確立が課題となっている⁵⁾。

そこで本試験では、これまでの研究成果を踏まえ、植菌方法の改良を行った上で、長期間に渡る収穫調査の結果について報告する。

2.2.2 試験方法

栽培概要は以下のとおり。[原木] 長野県産コナラ(長さ 90 cm)。比較的直径が太いもの(平均末口直径 11.7 cm)を使用。[わりばし種菌] 当所の常法⁵⁾により、シイタケ菌を接種し、2 か月以上培養したものをを用いた。種菌は、市販 2 品種(菌興 115(115), 森 290(290))。[植菌] 2018 年の 4~5 月に、当所の林内ほだ場(アカマツ・コナラ混交林、標高 880m)で行った。チェーンソーで長さ 25 cm 程度の切り込みを 1 列に 3 箇所入れ、わりばし種菌を 1 箇所につき 1 組ずつ挿し込んだ(図 2-2-1)。切り込み列数は、1 列区と 2 列区を設け、2 列目は 1 列目の反対側に設置。一原木当たりのわりばし種菌の使用数は、1 列区は 3 組、2 列区は 6 組。切



図 2-2-1 わりばし種菌の植菌状況
(上: 切り込み状況, 下: わりばし種菌接種状況)

り込みの溝の深さを普通（2 cm）と深い（4 cm）の2種類設定（表 2-2-1）。[ほだ木の管理] 植菌後、すみやかに林内に地伏せ。その際、ほだ木同士の隙間を空けずに、切り込み列を下側にして置いた。ほだ木の乾燥を防ぐために、上側にナラ類を主体とした落葉をかけた。なお、2列区は上側の列に乾燥防止の目的でガムテープを貼り付けた。[対照区] 種駒を植菌した対照区を設置。2018年2月に植菌（一原木当たり約30駒）し、加温装置付きのビニールハウスで仮伏せを行い、同年5月に林内ほだ場に本伏せ（よろい伏せ）した。[ほだ付き率調査] 2019年2月に、各試験区からほだ木1本を抽出し、当所常法⁵⁾により表面及び断面ほだ付き率を調査した。[収穫調査] 植菌後2夏が経過した2019年11月から、林内ほだ場で子実体の自然発生が始ま

った。菌傘が8～9分開きとなったものを基準として収穫し、試験区毎に発生個数と生重量を測定するとともに、乾燥重量を測定した。2023年までの5年間収穫調査を実施した。

各試験区の供試数は15としたが、290の2列区で溝が普通の試験区のみ17とした。

2.2.3 結果と考察

表面及び断面ほだ付き率調査結果を図2-2-2に、子実体発生量の調査結果を図2-2-3に示す。

わりばし種菌を接種した試験区で、表面ほだ付き率が最も高かったのは、290では2列区で溝が深い試験区（2列深溝区）の86%、115も同様に2列深溝区の100%であった。このように2品種ともに2列区のほうが1列区よりも高い傾向が見られた。また、2列区では溝が深いほうが普通の溝よりも

表 2-2-1 わりばし種菌による省力栽培の試験区分

品種	種菌種別	列数	溝 ^{*1}	供試数 (本)	直径 ^{*2} (cm)	試験区
290	わりばし	1	普通	15	11.3	290①
			深い	15	12.0	290①F
		2	普通	17	12.0	290②
			深い	15	12.3	290②F
	種駒	-	-	15	11.1	290C
115	わりばし	1	普通	15	11.6	115①
			深い	15	11.2	115①F
		2	普通	15	12.2	115②
			深い	15	11.9	115②F
	種駒	-	-	15	11.1	115C

*1 溝の深さ 普通：2cm、深い：4cm。 *2 末口直径の平均。

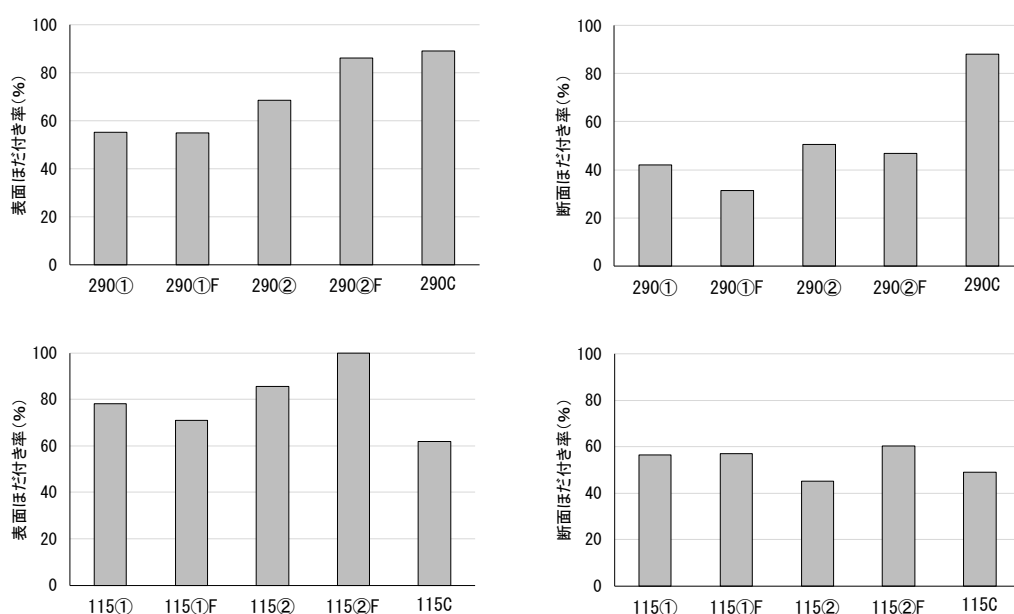


図 2-2-2 品種別表面及び断面ほだ付き率調査結果
(品種 上段：森 290, 下段：菌興 115)

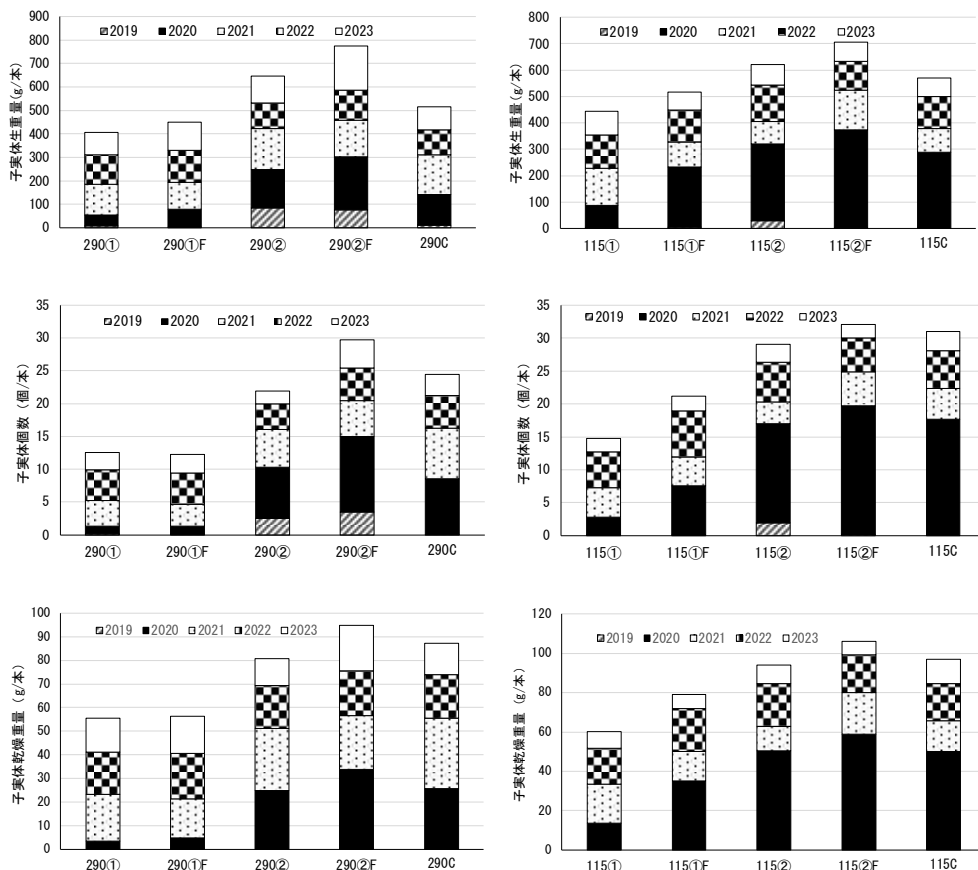


図 2-2-3 品種別子実体発生量調査結果

(品種 左：森 290, 右：菌興 115, 上：生重量, 中：個数, 下：乾燥重量)

注) 子実体生重量は一部雨子が含まれているため参考値。子実体乾燥重量は一部未乾燥があったため参考値。

高い傾向が確認された。断面ほだ付き率は、290 の対照区を除き、試験区間にほとんど差は見られなかった。

5 年間の子実体発生個数は、2 品種ともに 2 列区のほうが 1 列区よりも多く、また、2 列区では溝が深いほうが普通の溝よりも多かった。これは表面ほだ付き率の調査結果と同様の傾向を示していた。なお、115 の 1 列区も溝が深い区のほうが多い傾向が見られた。また、2 列区は 2 品種ともに対照区と同程度、若しくはそれ以上の発生量であったが、1 列区は対照区よりも少なかった。さらに、2 列区は 2 品種ともに最初の 2 年間の発生量が全体の概ね 5 割以上を占めていたのに対して、1 列区は 4 割に満たず、特に 290 では 1 割程度と少なかった。

以上より、わりばし種菌を用いたシイタケの原木栽培では、植菌列数を 2 列とし、一原木当たりのわりばし種菌の接種量を増やしたほうが、その後のほだ化が進みやすく、子実体発生量が増加することが分かった。その発生量は一般的な種駒菌を用いた栽培方法と同程度であることが確認された。

また、列数が同じ場合、切り込みの溝は深いほうが子実体発生量が増加する傾向が示唆された。

2.3 休養の省力化 (蒸し込み) 栽培

2.3.1 目的

原木栽培で生シイタケ生産を行う場合、浸水発生を繰り返し、子実体を収穫することが一般的である。収穫後のほだ木は、ほだ場に戻し 30~50 日位「休養」⁸⁾させる。休養とは、子実体発生によって養分や水分が消費されることにより、弱ったシイタケ菌の活力を回復させ⁹⁾、原基形成を促進するために行う作業である。休養後、再び浸水発生を行い、実際の生産現場では 10 数回これを繰り返し、養分が少なくなり発生量が減少したほだ木は処分される。本県生産者の中には、加湿装置を備えたビニールハウスの中で休養を行い、ほだ木の移動の省力化と、加温と加湿による休養期間の短縮化を図っている事例がある (図 2-3-1)。

本課題では、生産者が「蒸し込み」と呼ぶこの休養方法と、一般的な方法を比較する試験を行い、その有効性について検証した。



図 2-3-1 ビニールハウス内での休養（蒸し込み）状況

2.3.2 試験方法

栽培概要は以下のとおり。[原木] 長野県産コナラ（長さ 90 cm，平均末口直径 9.2 cm）[種菌] 市販 2 品種（菌興 702（702），森 もりの夏実（夏実））のオガ菌 [植菌方法] 2019 年 1 月に植菌し，封口。なお，その他は 2.1.2 (1) と同様とした。[ほだ木の管理] 加温装置付きのビニールハウスで仮伏せ後，人工ほだ場で本伏せ。[浸水発生] 植菌翌年の 2020 年から 2021 年にかけて計 6 回実施。[蒸し込み] 5 回目の浸水発生の子実体を収穫後に実施。なお，浸水発生 5 回目までの子実体発生量には，試験区間に有意差が無いことを予め確認した。高温・高湿度環境（蒸し込み）を再現するために，普

段菌床シイタケの発生室として使用している空調設備のある部屋を使用した。室内にブルーシートを敷き，その上にほだ木を井桁積みにし，ほだ木が常に濡れた状態となるよう，ほぼ毎日 5 分程度散水した。室温は 23℃に設定し，室内の照明（蛍光灯）は 24 時間連続で点灯した。[対照区] 当所常法により，人工ほだ場にてよるい伏せとした。[休養期間] 蒸し込みを実践している生産者同様に，有効積算温度（シイタケ菌の活動にとって有効とされる 5℃以上の日平均気温（平均気温-5℃）の累積値）が 300℃以上を目安とした。温度は，おんどとり（TR-52i，T & D 社製）をほだ木付近に設置して，気温を測定した。[収穫調査] 菌傘が 8～9 分開きとなったものを基準として行ない，試験区毎に発生個数と生重量を測定した。

供試数は，702 は 18，夏実は 17 とした。

また，蒸し込み前後のほだ木の腐朽度合を比較するために，ピロディン（エフティーエス株式会社製）を用いたピンの貫入値を調査した。調査時期は，蒸し込み前が浸水発生 5 回目の子実体収穫直後，蒸し込み後は 6 回目の浸水直前とした。供試したほだ木は，浸水発生 5 回分の発生量及び末口径が，試験区間で同程度のものを各 5 本とした。

2.3.3 結果と考察

蒸し込み試験を実施した浸水発生 6 回目分と，全 6 回分の子実体発生量調査結果を図 2-3-2 に示

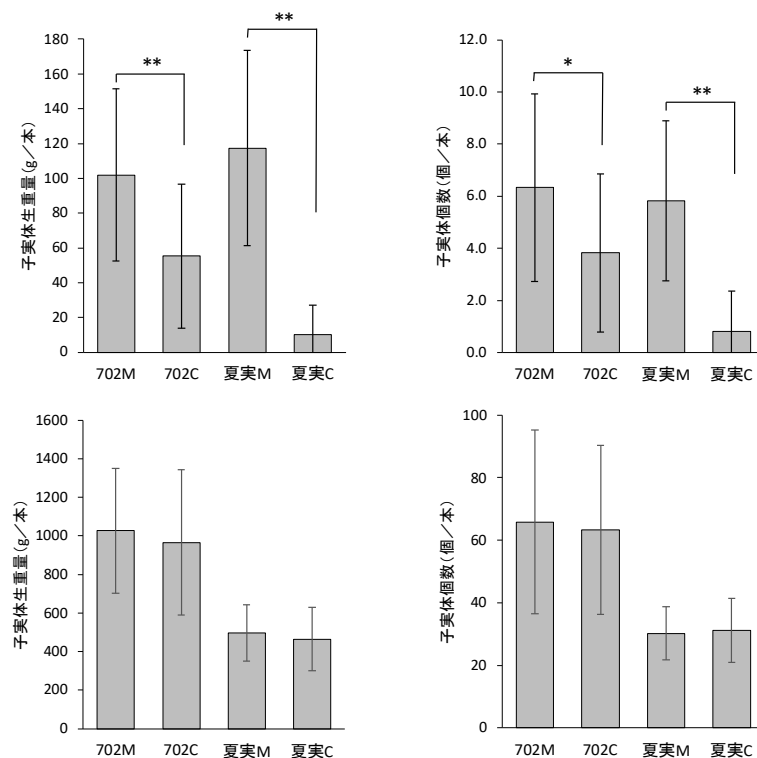


図 2-3-2 子実体発生量調査結果（上段：浸水発生 6 回目分，下段：全 6 回分）

注) 品種名の後の M：蒸し込み区，C：対照区。「*」は有意差があることを示す（t 検定，*： $p < 0.05$ **： $p < 0.01$ ）。

す。また、ピロディンの貫入値の測定結果を表 2-3-1 に示す。

表 2-3-1 休養（蒸し込み）の前後におけるほだ木腐朽度調査結果

試験区	前 (A)	後 (B)	差 (B-A)
702M	37.3	37.9	0.6
702C	36.3	37.7	1.4
夏実M	34.5	35.9	1.4
夏実C	37.7	38.3	0.6

注) 品種名の後の M: 蒸し込み区, C: 対照区。各試験区は、ほだ木 5 本の平均値。(各ほだ木の値は 3 箇所測定した平均。蒸し込みの前後で近接箇所を測定。)

蒸し込み試験を行った 6 回目分の 2 品種の子実体生重量及び個数は、蒸し込み区のほうが対照区より有意に多かった。一方、全 6 回分の 2 品種の生重量及び個数には試験区差は見られなかった。

ピロディンによる貫入値は、値が大きいほどビンが深く貫入したことを示し、腐朽（ほだ化）がより進んだことを表している。2 品種ともに蒸し込みの有無による明確な差は見られなかったものの、全ての試験区で休養後の貫入値が増加しており、ほだ木の腐朽が進んだことは確認できた。

休養期間、有効積算温度は、蒸し込み区が 20 日間で 338℃、対照区は 32 日間で 379℃となった。有効積算温度が 300℃に到達した日を逆算すると、蒸し込み区は対照区に比べ 7 日間早かった。

以上より、休養期間中の積極的な加温や加湿処理（蒸し込み）により、通常の休養管理よりも、休養期間が短縮されることが分かった。また、蒸し込み後の浸水発生において子実体発生量の増加が期待できることから、浸水発生の回数を減らすことによる省力化が可能と考えられた。なお、蒸し込みとほだ木の腐朽度との関連性を示すことは出来なかった。

3 菌床シイタケビン栽培技術の開発試験

3.1 培地材料・品種に関する試験

3.1.1 ビン栽培に適した培地材料の検討

(1) 目的

シイタケの菌床栽培の培地材料は、広葉樹のおが粉、栄養材（フスマ等）及び水である。袋栽培では、おが粉に粒度の粗い「おがチップ」（5×5～10×10 mm）を混ぜて使用することが一般的である。

そこで、ビン栽培においておがチップを混ぜた培地で栽培試験を行い、その発生特性を調査した。

(2) 試験方法

栽培概要は以下のとおり。[培地] 広葉樹のおが粉とおがチップの混合割合（容積比）が異なる 3 種類（表 3-1-1）。おがチップは、一昼夜吸水させたものを使用。水道水を加え、含水率を 61%程度に調整。[容器] ナメコビン（口径 77 mm, 800cc, ポリプロピレン製）[ビン詰め・殺菌] 一ビン当たり概ね 570g 充填し、中心に直径 17 mm の接種孔を 1 カ所開けた後、高温高圧殺菌（120℃, 60 分）。[接種] 冷却後、種菌を一ビン当り約 4 g 接種。[種菌] 北研 600 号（H600）と北研 607-S 号（H607）の 2 品種。[培養] 室温 18～20℃。シイタケ菌が培地全面に蔓延した、培養 20 日後にビン全体（フタを除く）をアルミ箔で被覆。作業時以外は暗黒培養。期間は 110 日間。[発生管理] 培養終了後、ビンの蓋を外し、菌床表面を水で軽く洗浄し、明所下（24 時間蛍光灯を点灯）、室温 15～20℃に設定した室内で、239 日間子実体発生量調査を実施。ビン口部の菌床面が乾き過ぎないように、一日 1 回程度軽く散水。子実体は傘が 7 分開きを基本に収穫し発生個数、生重量を計測。

供試数は結果に示す。

表 3-1-1 培地混合割合

試験区	培地混合割合（容積比）		
	おが粉	おがチップ	フスマ
チップ0	10	0	2
チップ2	8	2	2
チップ5	5	5	2

(3) 結果と考察

子実体発生量等の調査結果を図 3-1-1 に、子実体の発生経過を図 3-1-2 に示す。

H600 の子実体生重量は、最も多かったチップ 2 区が一ビン当たり 193g あった。これは、子実体発生重量率（生重量/一培地当たり培地重量×100）が 34% となり、袋栽培の標準値（33%）⁴⁾ と同程度であった。また、チップ 2 区は他区に対して有意に多かった。発生処理後最初の子実体が得られる所要日数（一番収穫所要日数）もチップ 2 区は他区より短い傾向が見られ、チップ 5 区との間には有意差（Tukey-Kramer 法, $p < 0.05$ ）が確認された。子実体発生経過を見ると、チップ 2 区は他区に比べ、発生初期からより多く子実体が発生し、その後も継続的に発生が続いていた。

一方、H607 の子実体生重量は、試験区間に有意差は見られなかった。一番収穫所要日数は、H600 同

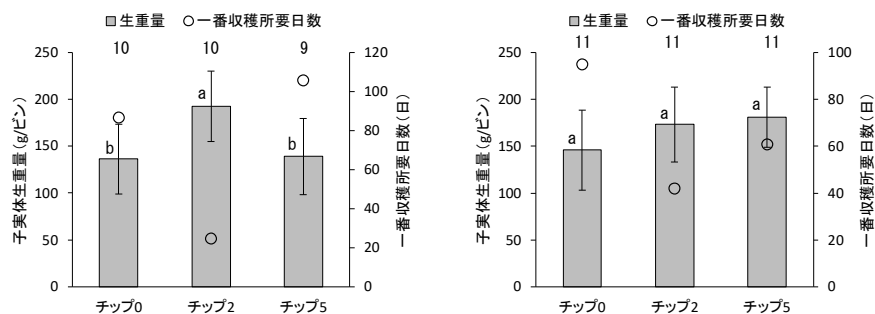


図 3-1-1 品種別子実体発生量等調査結果 (左: 北研 600 号, 右: 北研 607-S 号)

注) 棒グラフ上部の数字は供試数。異なるアルファベットは有意差があることを示す (Tukey-Kramer 法, H600 のチップ 0 と 2 間は $p < 0.01$, チップ 2 と 5 間は $p < 0.05$)。垂線は標準偏差。

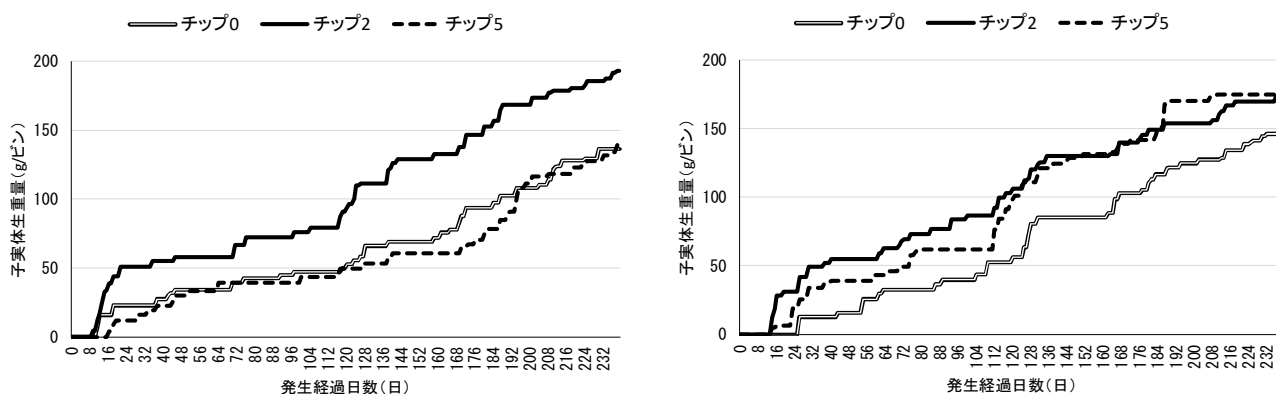


図 3-1-2 品種別子実体発生経過 (左: 北研 600 号, 右: 北研 607-S 号)

様にチップ 2 区が他区より早い傾向となり、チップ 0 区との間に有意差 (Tukey-Kramer 法, $p < 0.05$) が確認された。子実体発生経過を見ると、チップ 2 及び 5 区が 0 区に対して発生初期から多く発生していたが、発生 100 日目までを比較するとチップ 2 区が最も多かった。

以上より、シイタケのビン栽培において、おがチップを培地に混入すると子実体発生量が増加すると考えられた。ただし、その混入率や、子実体の増収効果には品種間差があることが示唆された。また、先行研究⁹⁾と同様に、一番収穫所要日数が短いほど、子実体発生量が多くなることが本試験においても確認された。

3.1.2 ビン栽培適性のある品種の探索試験

(1) 目的

先行研究¹⁰⁾においてビン栽培に適性のある品種の探索を行ったが、供試した品種数が少なかった。

そこで、ビン栽培に適性のある品種をさらに探索するために、未だビン栽培試験の実績がない市販品種等を用いた栽培試験を行った。

(2) 試験方法

栽培概要は以下のとおり。[種菌] 市販 10 品種。

このうち栽培実績のほとんどない新たな品種は、北研 715 号 (H715), 森 ds16 号 (ds16), 113 号 (113), かつらぎ産業 KS21 (KS21), KA-1001 (KA1001) の 5 品種。比較対照として、これまでに適性があることが確認されている 5 品種 (北研 600 号 (H600), 603 号 (H603), 607-S 号 (H607), 73 号 (H73), 森 XR1 号 (XR1)) についても併せて使用した。[培地] おが粉と一昼夜吸水させたおがチップ及びフスマを容積比で 8:2:2 に混合。含水率 63%。[ビン詰め・被覆] 一ビン当たり概ね 550g 充填した後、ビン全体をアルミ箔で被覆。[接種・培養] 種菌を接種後、20℃に設定した培養室にて 102 日間培養。[発生管理] 培養終了後、室温 16~20℃に設定した発生室内で、234 日間子実体発生量調査を実施。各品種の供試数は 12 とした。

なお、本項に特段記載のない内容は 3.1.1 (2) と同様とした。このことは、以降の試験についても同様とする。

(3) 結果と考察

子実体発生量等の調査結果を図 3-1-3 に、子実体生重量と一番収穫所要日数との関係を図 3-1-4 にそれぞれ示す。

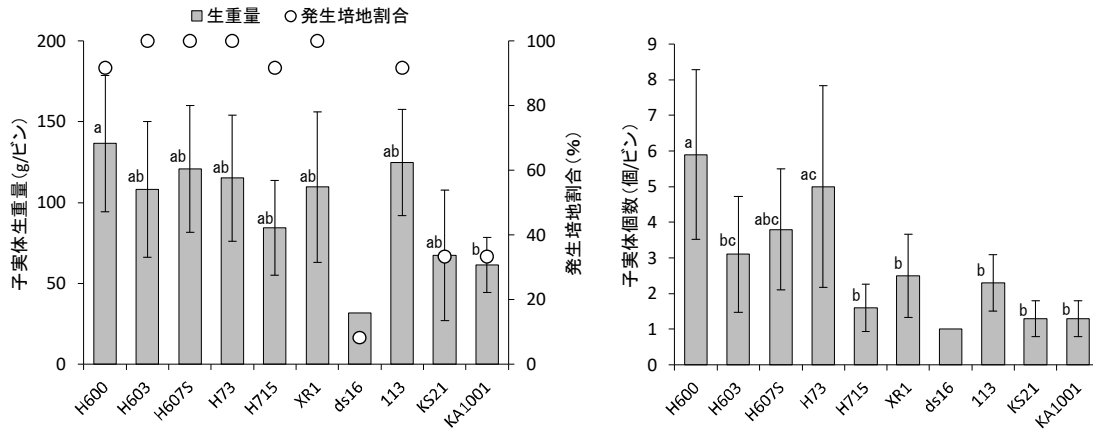


図 3-1-3 子実体発生量等調査結果 (左: 生重量, 発生培地割合, 右: 個数)

注) 異なるアルファベットは有意差があることを示す (Tukey-Kramer 法, $p < 0.01$). 生重量の H600 と KA1001 間と, 個数の H73 と XR1 間のみ $p < 0.05$). 垂線は標準偏差。

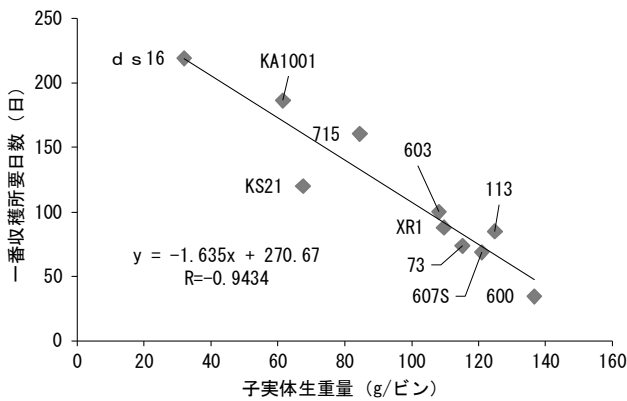


図 3-1-4 子実体生重量と一番収穫所要日数との関係

子実体生重量が一ビン当たり 100g を超えたのは, 多い順に H600 の 137g, 113 の 125g, H607 の 121g, H73 の 115g, XR1 の 110g, H603 の 108g の 6 品種であった。これらの子実体発生重量率は 20~25% であった。子実体発生が 1 ビンのみであった ds16 を除く 9 品種で有意差検定を行った結果, H600 と KA1001 間のみ有意差が見られた。

子実体個数は, 生重量の多かった上位 6 品種のみ一ビン当たり 2 個以上発生していた。個数の多かった上位 2 品種は, 個数の少なかった品種との間に有意差が見られた。

子実体生重量と一番収穫所要日数との間には, 強い負の相関関係が見られた。

以上より, ビン栽培に適性のある品種は, 子実体発生量, 個数が多く, 一番収穫所要日数が短い 6 品種と考えられた。このうち, 5 品種は既に適性があると考えられていた品種¹⁰⁾ であり, 今回新たにビン栽培の適性が確認されたのは 113 のみであった。

3.2 栽培容器に関する試験

3.2.1 光線の遮断時期の検討

(1) 目的

シイタケのビン栽培においては, 培養時にビン口部以外への光を遮断することにより, 子実体発生量を増加させる効果があることが分かっている¹⁰⁾。既存のきのこ栽培用のビンは半透明なポリプロピレン製であり, これらを活用してシイタケをビン栽培するには, ビンをアルミ箔で覆ったり, ビンを着色するなどの処理を行う必要がある。このうちアルミ箔でビンを覆う場合, その実施の適切なタイミングはよく分かっていない。これまでは, 培地をビンに詰めた後, 殺菌前に覆うことにしていたが, 作業に多くの時間を要した。これでは, 夏期の高温期など培地の変質防止のため早急に殺菌したい場合には不適切であった。

そこで, 光線を遮断する適切な時期を検討するための栽培試験を行った。

(2) 試験方法

ナメコビンを使用し, アルミ箔でビン口部以外を覆って遮光した。実施時期は, ①培地をビンに詰めた直後 (直後区), ②シイタケ菌を接種後, 菌糸体が培地全体に蔓延した後 (一次培養終了後, 一次区), ③培養後期 (後期区) の 3 区分とした。各試験区の供試数は 16 とした。

その他の栽培概要は以下のとおり。[種菌] 北研 600 号 (H600), 603 号 (H603), 73 号 (H73) 及び 森 113 号 (113) の 4 品種 [直後区被覆] 培地をビンに詰めた後, 直後区にはアルミ箔を被覆し, 殺菌。

[培養] 18~20℃に設定した室内で, 104 日間。[一次・後期区被覆] 培養 28 日目に一次蔓延が終了し

たところで一次区にアルミ箔を被覆。培養 61 日目に後期区をアルミ箔で被覆し、この日から日中(約 8 時間)は室内の蛍光灯を点灯した。[発生] 子実体発生量調査 197 日間。

(3) 結果と考察

子実体発生量等の調査結果を図 3-2-1 に、子実体の発生経過を図 3-2-2 に示す。

子実体生重量は、113 の直後区と一次区間に有意差が見られたが、他の 3 品種では試験区間に有意差は見られなかった。

一番収穫所要日数は、H600 の直後区と一次区間に有意差 (Tukey-Kramer 法, $p < 0.05$) が見られた他、H603 の直後区と後期区間にも有意差 (Tukey-Kramer 法, $p < 0.01$) が確認された。その他の品種

では試験区間に有意差は見られなかった。

子実体の発生経過を見ると、各品種とも概ね一番収穫所要日数が短い試験区が、発生初期から子実体発生量が多く、また試験区間差が大きい傾向が見られた。

以上より、本試験に供した多くの品種では、光線の遮断時期による子実体総発生量への影響は無いことが確認された。ただし、113 では、子実体総発生量について、直後区と一次区間で有意差が見られたため、品種によっては反応が異なることが示唆された。一方、子実体発生経過に対しては、光線の遮断時期の影響が大きいことが示唆された。

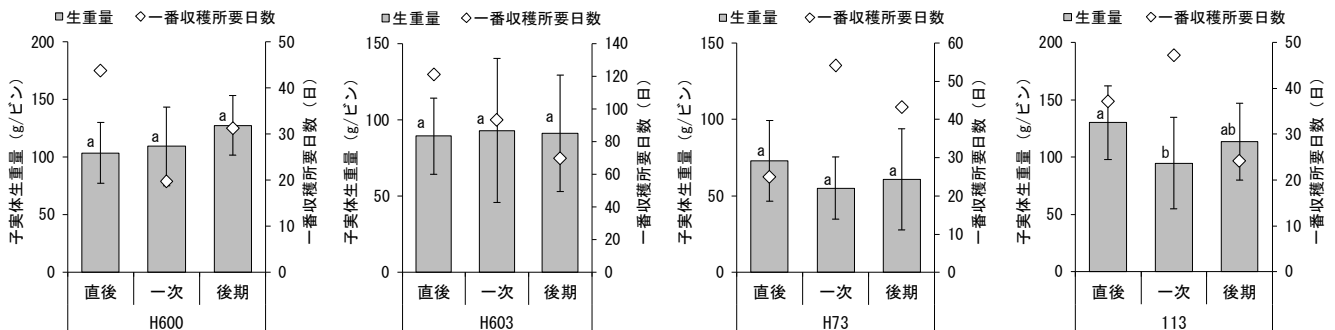


図 3-2-1 品種別子実体発生量等調査結果

注) 異なるアルファベットは有意差があることを示す (Tukey-Kramer 法, $p < 0.05$)。垂線は標準偏差。

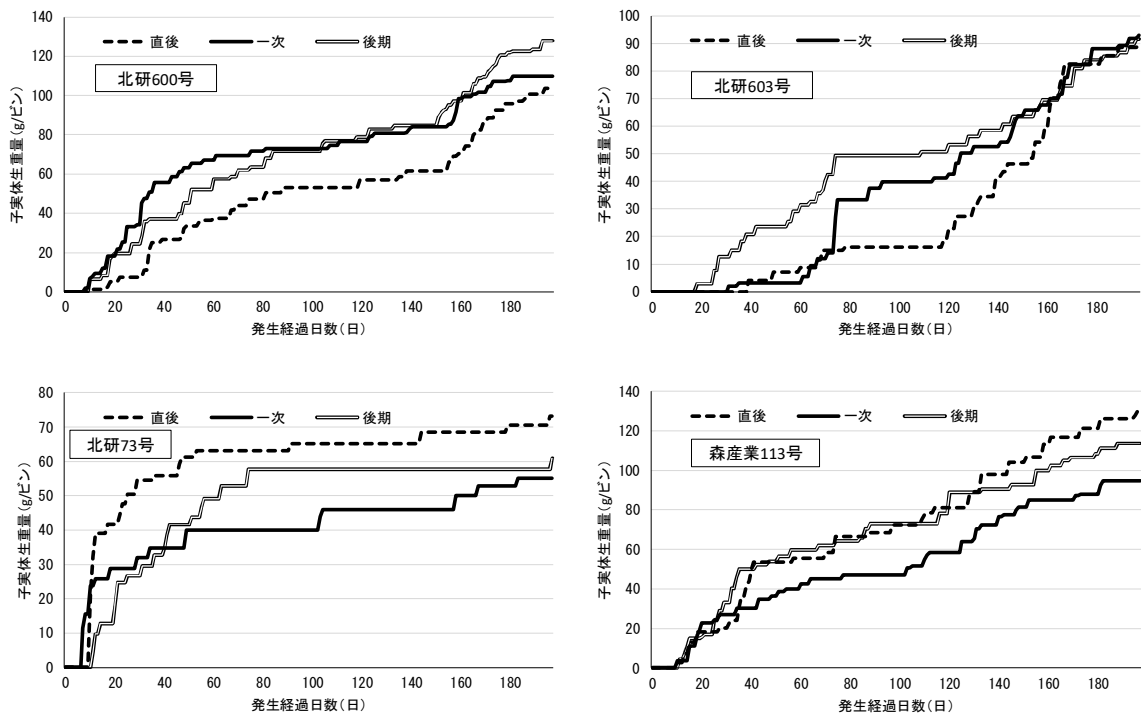


図 3-2-2 品種別子実体発生経過

3.2.2 容器の通気性に関する試験

(1) 目的

シイタケ菌はナメコやエノキタケに比べて呼吸量が多いことから、袋栽培では、培養室内や培養袋の十分な換気が重要とされている⁴⁾。また、培地重量減少率の大きい容器で子実体発生は増加する傾向があり、培養後に 5%以上培地重量が減少する状態が良い³⁾とされている。これらは、ビン栽培においても同様と推測されるが、実証した例は無い。

そこで、ビン栽培における容器の通気性が子実体発生に及ぼす影響について検討するために、ビン容器の蓋の通気性に関する栽培試験を行った。

(2) 試験方法

ア 試験に用いた蓋

ナメコビンを使用し、蓋は以下の 4 種類を用いた。

[2 穴区] 付属の蓋に電動ドリルで直径 5 mm の穴を 2 箇所開け、Milli Seal (ミリポア社製、外径 18 mm、内径 10 mm) を貼付 [大穴区] 電動ドリルで直径 15 mm の穴を 1 箇所開け、通気シール (商品名: のり付リングフィルター、アゼアス株式会社製、外径 33 mm、内径 22 mm) を貼付 [フィルター区] フィルター付きの蓋 (株式会社千曲化成製) [対照区] 付属の蓋をそのまま使用 (図 3-2-3)。

イ 栽培条件

[種菌] 北研 600 号 (H600)、森 XR1 (XR1)、千曲化成チクマッシュ CS202 (CS202) の 3 品種。CS202 は、株式会社 千曲化成と当所との技術協力による栽培試験の結果 (※未発表)、ビン栽培の適性があると判断された品種。[培地] おが粉とフスマを容積比 10:2 に混合。含水率 65%。[ビン詰め・被覆] 一ビン当たり概ね 520g 充填した後、ビン全体をアルミ箔で被覆 [培養] 接種後蓋をして、19~20℃に設定した培養室で 90 日間培養。培養 60 日目以降は、室内灯を 24 時間連続点灯。[発生] 培養終了

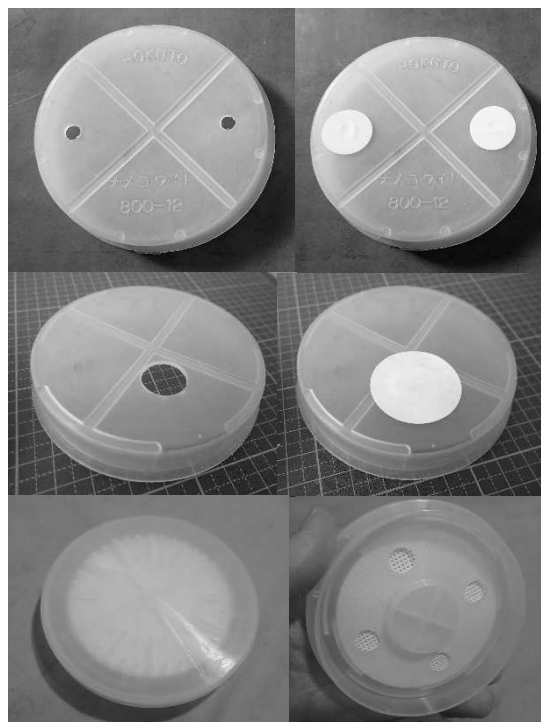


図 3-2-3 容器の通気性に関する試験に用いた蓋 (上: 2 穴区, 中: 大穴区, 下: フィルター区)

後、13~20℃に設定した発生室で、子実体発生量調査を 114 日間実施。各試験区の供試数は 6 とした。

ウ 通気性の調査

菌床シイタケの袋栽培において、培養袋の通気性は、培養袋内の培地重量減少率から判断できる¹¹⁾とされる。そこで、これを応用し、培養期間中の培地重量 (ビンの重さ) を測定し、容器 (蓋) の通気性を検討した。調査は、①種菌接種直後、②一次蔓延終了時 (培養 27 日目)、③培養中期 (45 日目)、④培養後期 (63 日目)、⑤培養終了時の全 5 回実施した。

(3) 結果と考察

培養中の培地の重量減少率の推移を図 3-2-4、培養全期間の培地重量減少率を図 3-2-5、子実体発生量調査結果を図 3-2-6 に示す。

培地の重量減少率の推移は 3 品種が同様の傾向

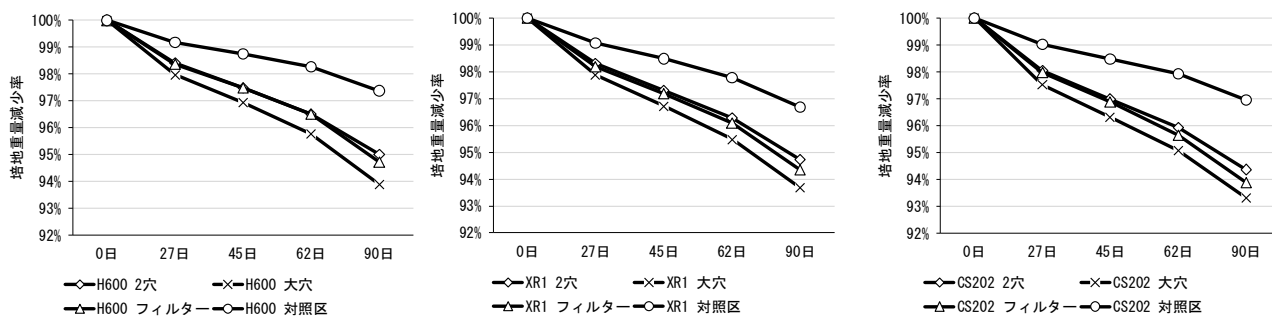


図 3-2-4 培養中の培地重量減少率の推移 (一ビン当たり)

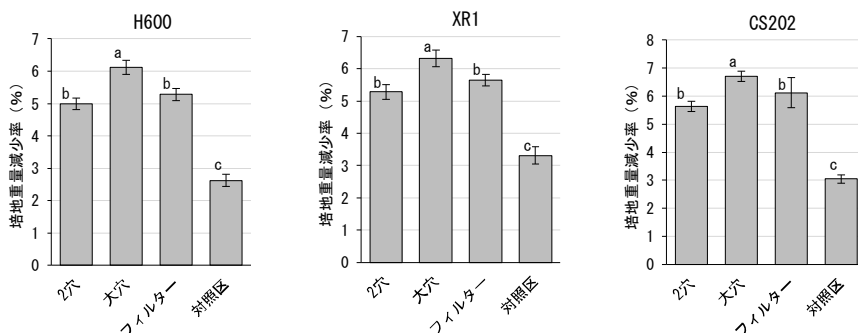


図3-2-5 培養全期間の培地重量減少率（一ビン当たり）

注) 異なるアルファベットは有意差があることを示す (Tukey-Kramer 法, $p < 0.01$, CS202 の大穴とフィルター区間のみ $p < 0.05$)。垂線は標準偏差。

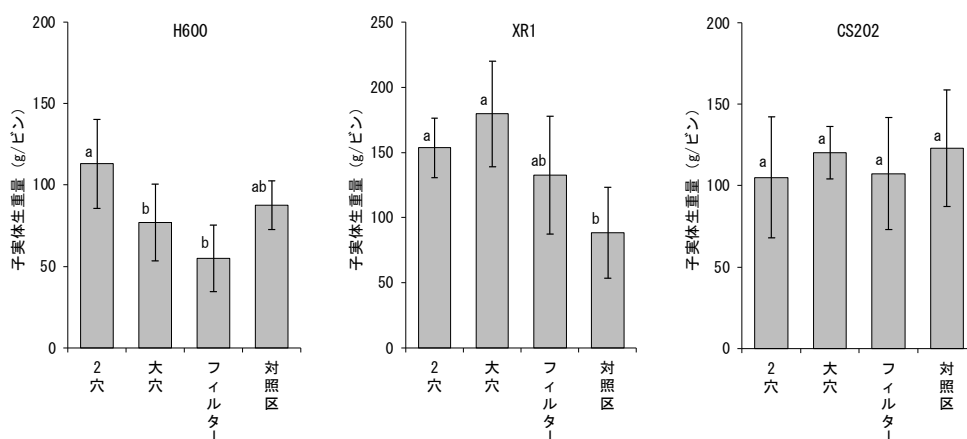


図3-2-6 品種別子実体発生量調査結果

注) 異なるアルファベットは有意差があることを示す (Tukey-Kramer 法, $p < 0.05$ (H600 の2穴と大穴区間, XR1 の2穴と対照区間, $p < 0.01$ (H600 の2穴とフィルター区間, XR1 の大穴と対照区間))。垂線は標準偏差。

を示していた。各期間の重量減少率を見ると、2穴、大穴、フィルターの3区に比べ、対照区の減少率は小さく、培養終了時には大きな差が見られた。

培養全期間の培地重量減少率も3品種で同様の傾向を示し、2穴、大穴、フィルターの3区の減少率は対照区より大きく、有意差も確認された。これら3区の培地重量減少率は5%を超えていた。

XR1の子実体発生量を見ると、2穴及び大穴区は対照区より有意に多かった。なお、この2区の子実体発生量は一ビン当たり150g以上あり、子実体発生重量率は30%を超えていた。H600の2穴区は、大穴及びフィルター区に対して発生量が有意に多かった。CS202は試験区間で有意差は無かった。

以上より、容器の通気性は、蓋に穴をあけたものや、フィルター付きの蓋を使用した試験区で高く、培地重量減少率も5%を超えることが分かった。また、通気性が高い容器で高収量を得られる品種が確認された。ビン容器の通気性が、子実体発生に及ぼす影響には品種間差があることが示唆された。本試験で使用した4種類の蓋の中では、2穴区が

ビン栽培に広く適用できる可能性が示唆された。

3.3 発生管理に関する試験

3.3.1 発生刺激の増収効果に関する栽培試験

(1) 目的

シイタケの原木栽培では、ほだ木を打木（樹脂製ハンマー等でほだ木を叩く操作）することにより、子実体発生量が増加する¹²⁾ことが知られている。菌床シイタケの袋栽培においても、子実体発生を促すために、培地への散水や浸水のほかに、培地を叩く（打床）などの刺激を与えることがある。

そこで、ビン栽培においても、菌床への刺激（発生刺激）が子実体の発生促進に有効かを栽培試験によって検討した。

(2) 試験方法

[種菌] 北研607-S号 (H607), 森XR1の2品種。
[培地] おが粉とおがチップ及びフスマを容積比で8:2:2に混合。含水率60%。[ビン詰め] 一ビン当たり概ね550g充填。[培養] 18~20℃に設定した培養室で104日間培養。培養41日目に、アルミ

箱でビンを被覆。66 日目以降は毎日、室内の蛍光灯を点灯（約 8 時間）。[発生] 11~22℃に設定した発生室で、子実体発生量調査を 183 日間行った。

[発生刺激] 一番発生が概ね終了した発生処理後 67 日目に、以下の二つの方法で実施。①ビン内を水で満たし、約 15 時間放置後に排水（浸水区）、②ビン口及び底部を樹脂製ハンマーでそれぞれ 2、3 回叩いた後に①と同様に浸水を行う（打床区）。また、常法により散水管理を行った対照区を設けた。各試験区の供試数は 10 とした。

(3) 結果と考察

子実体発生量の調査結果を図 3-3-1、子実体の発生経過を図 3-3-2、発生刺激日翌日以降 30 日間の子実体発生量を表 3-3-1 に示す。

H607 は、打床区の子実体発生量が多く、個数では浸水区、対照区に対して有意差が見られた。また、発生刺激日の翌日以降 30 日間の子実体発生量においても、打床区は生重量と個数で浸水区に対して有意に多かった。なお、対照区はこの期間に子実体の発生が無かった。

XR1 は、子実体発生量に 3 区間でほとんど差は見られず、有意差も無かった。発生刺激日以降の子実体発生状況を見ると、刺激を与えた 2 区は子実体が発生したが、対照区では発生が無かった。なお、子実体が発生した 2 区間に有意差は見られなかった。また、発生培地割合は H607 では 70%以上あったが、XR1 は 2 区ともに 40%にとどまった。

以上より、菌床への刺激（発生刺激）は、ビン栽

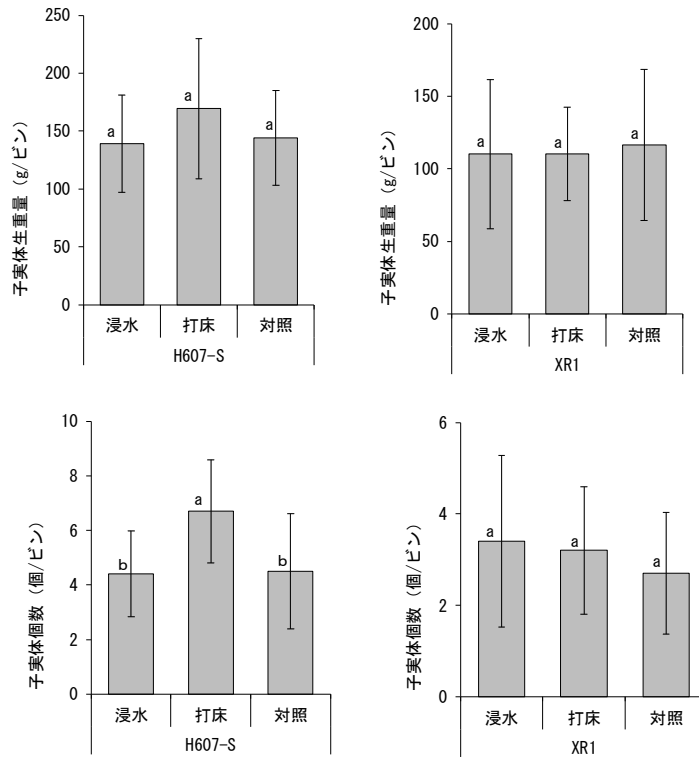


図 3-3-1 品種別子実体発生量調査結果（左：北研 607-S 号，右：森 XR1）

注) 異なるアルファベットは有意差があることを示す (Tukey-Kramer 法, $p < 0.05$)。垂線は標準偏差。

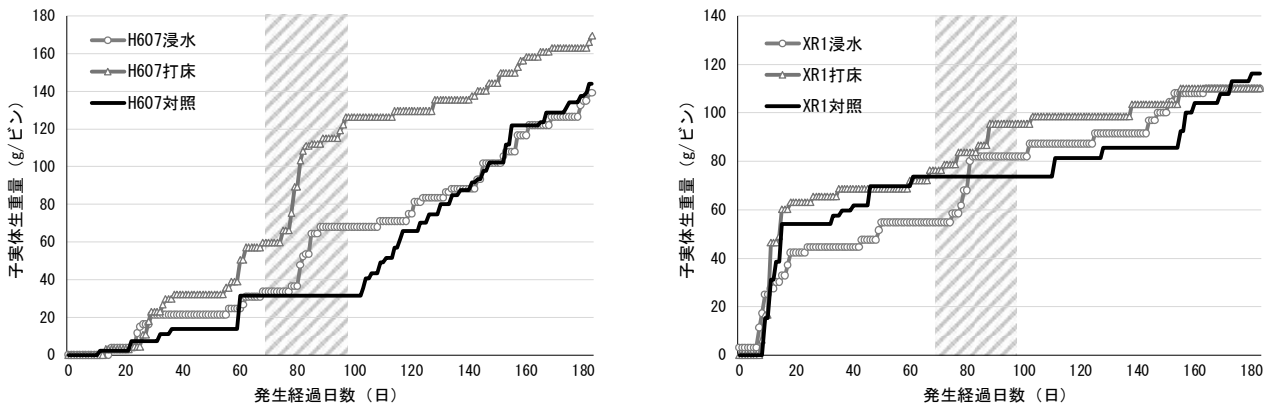


図 3-3-2 品種別子実体発生経過

注) 斜線部は発生刺激翌日からの 30 日間を示す。

表 3-3-1 発生刺激日翌日以降 30 日間の子実体発生量等調査結果

品種	試験区	生重量 (g/ビン)	個数 (個/ビン)	発生培地割合 (%)
H607	浸水	37.1±29.9	1.5±1.4	70
	打床	69.3±27.4*	3.1±1.4**	100
	対照	0	0	0
XR1	浸水	24.4±40.6	0.7±1.3	40
	打床	19.2±30.0	0.4±0.5	40
	対照	0	0	0

注) *は浸水区に対して有意差があることを示す (t 検定, *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$)。発生培地割合 = 子実体が発生した培地数/供試培地数×100。±は標準偏差。

培においても、子実体の発生促進に有効であることが確認された。ただし、この効果の大きさには品種間差があることが示唆された。また、刺激を複数与えるなど、刺激がより強いほうが、効果が大きくなる可能性も示唆された。

3.3.2 高収量・短期栽培を目指した栽培試験

(1) 目的

菌床シイタケのビン栽培において、既存のきのこ栽培ビンを使い、ビン内への光線を遮断して、長期間に渡り子実体発生を行うと、袋栽培と同等の収量が得られることが分かっている¹⁰⁾。このことは、本研究の 3.1.1 においても確認されている。一方で、子実体発生期間が長期化すると、培地の乾燥による収量の低下や、害菌・害虫の被害を受けるリスクが高まる。また、栽培施設に長期間培地が留まることにより、施設の回転率が落ちてしまうことが考えられる。

そこで、高収量かつ短期間での菌床シイタケのビン栽培を目指し、培養期間及び効率的な発生管理手法を検討するための栽培試験を行った。

(2) 試験方法

[種菌] 当所のこれまでの栽培試験の結果等か

ら、短期培養でも高収量が得られる可能性が高いと考えられた、千曲化成チクマッシュ CS202 (CS202)、森 XR1 (XR1) の 2 品種を用いた。[培地] おが粉とフスマを容積比で 10 : 2 に混合。含水率 67%。[ビン詰め] 一ビン当たり概ね 530g 充填。

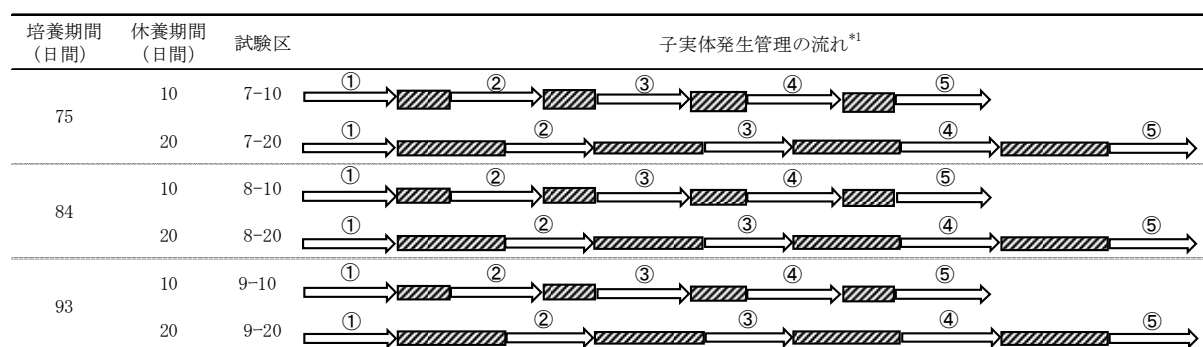
[培養] 19~20℃に設定。培養期間は、75, 84, 93 日間の 3 区分とし、それぞれ 28 日目にアルミ箔でビンを被覆し、培養終了日の 21 日前から室内の蛍光灯を 24 時間連続点灯。[発生] 15~16℃の発生室にて一番発生の子実体発生量調査を行い、発生が途切れた培地を、試験区毎に室温 20~21℃の部屋へ移し、10 日又は 20 日間休養した後、再び 15~16℃の発生室へ戻し、子実体発生量調査を行った (二番発生)。この後、休養と発生を 3 回繰り返し、五番発生まで調査を行った (表 3-3-2)。各試験区の供試数は 12 とした。

(3) 結果と考察

子実体発生量の調査結果を図 3-3-3 に示す。また、子実体発生期間の短期化を検討するために、二番発生までの子実体発生量等の調査結果を表 3-3-3 に示す。

五番発生までの総発生量は、2 品種ともに 6 試験区間に有意差は見られなかった。次に、培養期間

表 3-3-2 培養及び発生管理区分



注) *1 矢印は子実体発生期間、斜線部は休養期間を示す。短い斜線部は 10 日間、長いほうが 20 日間休養を表す。子実体発生期間上の数字は発生回数を示す。

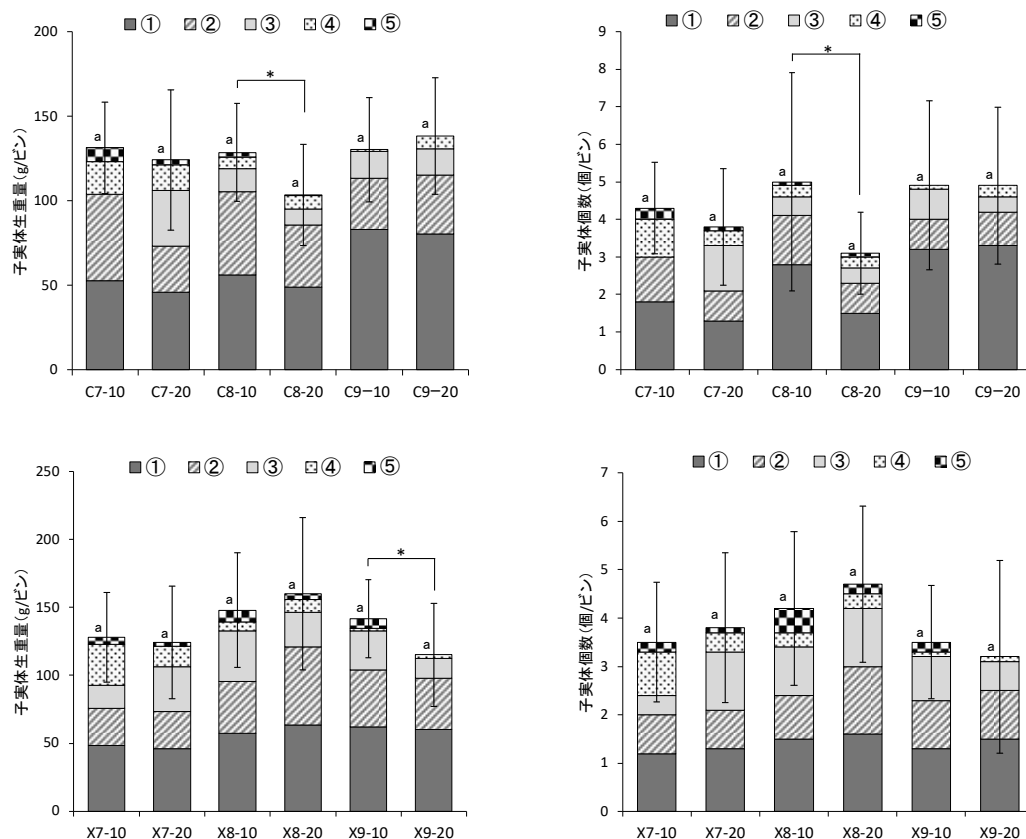


図 3-3-3 品種別子実体発生量調査結果（上：チクマッシュ CS202，下：森 XR1）

注) 異なるアルファベットは有意差があることを示す (Tukey-Kramer 法, $p < 0.05$)。*は表示区間で有意差があることを示す (t 検定, $p < 0.05$)。垂線は標準偏差。

表 3-3-3 二番発生までの子実体発生量等の調査結果
(上：チクマッシュ CS202, 下：森 XR1)

試験区	一番発生のみ			二番発生まで				
	生重量*1 (g/培地)	割合*2 (%)	期間 (日)	生重量*1 (g/培地)	割合*2 (%)	期間 (日)		
C7-10	52.8 ± 21.8	ab	40	18	103.9 ± 21.1	a	79	42
C7-20	45.8 ± 33.5	b	37	18	73.2 ± 39.5	a	59	55
C8-10	55.9 ± 33.0	ab	43	16	105.6 ± 34.1	a	82	52
C8-20	48.8 ± 27.0	ab	47	16	85.6 ± 39.9	a	83	69
C9-10	83.1 ± 14.1	a	64	14	113.4 ± 33.7	a	87	60
C9-20	80.3 ± 37.8	ab	58	14	115.1 ± 40.3	a	83	62
平均	61.1 ± 27.9		48	16	99.5 ± 34.8		79	57

試験区	一番発生のみ			二番発生まで				
	生重量 (g/培地)	割合 (%)	期間 (日)	生重量 (g/培地)	割合 (%)	期間 (日)		
X7-10	48.5 ± 39.4	a	38	18	75.9 ± 30.9	a	59	42
X7-20	45.8 ± 33.5	a	37	18	73.2 ± 39.5	a	59	55
X8-10	57.6 ± 42.1	a	39	16	95.6 ± 41.3	a	65	52
X8-20	63.4 ± 38.8	a	40	16	120.7 ± 54.7	a	75	69
X9-10	62.1 ± 46.8	a	44	14	104.2 ± 41.3	a	73	60
X9-20	60.1 ± 39.0	a	52	14	98.1 ± 44.7	a	85	62
平均	56.3 ± 39.9		42	16	94.6 ± 42.1		69	57

*1 ±は標準偏差。異なるアルファベットは有意差があることを示す (Tukey-Kramer 法, $p < 0.05$)。*2 総発生量 (五番発生までの総生重量) に対するその期間中の発生量 (生重量) の比に 100 をかけた数値。

毎に総発生量を見ると、CS202は84日培養区で生重量と個数ともに、10日間休養区のほうが20日間休養区より有意に多かった(t検定, $p < 0.05$)。XR1は、93日培養区で10日間休養区のほうが20日間休養区より有意に多かった(t検定, $p < 0.05$)。なお、子実体発生重量率(培地重量に対する子実体発生重量の割合)は、6試験区の平均でCS202は24%、XR1は26%であった。

CS202の生重量の、一番発生のみ6試験区の平均は、一ビン当たり61.1gで、総発生量の48%を占めていた。最も多かったのは、93日培養の10日間休養区の一ビン当たり83.1gで、総発生量の64%を占めていた。本試験区と75日培養の20日間休養区の間には有意差が見られたが、その他の試験区間には有意差は見られなかった。二番発生まででは、6試験区の平均で一ビン当たり99.5gとなり、総発生量の79%を占めていた。

XR1の生重量の、一番発生のみ6試験区の平均は、一ビン当たり56.3gで、総発生量の42%、二番発生まででは、同じく94.6gで、69%を占めていた。

以上より、供試した2品種は、本試験で設定した最も短い75日間の培養でも、十分な子実体発生量が得られることが分かった。休養期間も、20日間より短期間の10日間のほうが、発生量が多くなる傾向が見られた。また、二番発生までに総発生量の7~8割の子実体発生量が得られることが分かった。これらのことより、菌床シイタケのビン栽培においては、培地重量に対する子実体発生重量の割合は袋栽培には劣るものの、栽培期間を短縮し、回転率を上げることにより、全体の収量を高めることが出来る可能性が示唆された。

3.4 ビン栽培技術の普及に関する検討

3.4.1 菌床シイタケ生産者施設における現地栽培試験

(1) 目的

菌床シイタケのビン栽培試験は、これまで当所の栽培施設のみで実施してきた。そこで、県内の菌床シイタケ生産現場において栽培試験を行い、既存生産施設でのビン栽培適性を調査するとともに、将来的な技術の普及時の課題を明らかにすることを目的とした。

(2) 試験方法

培地の作製から培養までは全て当所で行い、発生処理以降は、北信地域の菌床シイタケ生産施設

(以下「生産者施設」と当所において別々に実施した。この生産者施設は空調設備を完備し、普段は変温管理の元、散水方式により菌床全面から子実体を収穫する方式で栽培している。

栽培概要は以下のとおり。[種菌]北研600号(H600)、森XR1(XR1)、千曲化成チクマッシュCS202(CS202)の市販3品種と、予めオガ種菌を作製しておいた、当所所有の野生株MLE9の計4種。[培地]おが粉とフスマを容積比で10:2に混合。含水率65%。[ビン詰め]一ビン当たり概ね520g充填。

[培養]19~20℃に設定した培養室で90日間培養。培養20日目にアルミ箔でビンを被覆。[発生]一旦全ての菌床を当所から生産者施設へ運搬。生産者施設で管理する菌床について発生処理を行い、発生棚に置いた後、当所へ戻り同様に発生処理。発生期間中の管理方法は、生産者施設では、昼間20℃、夜間10℃の変温管理とし、菌床表面が乾いていたら適宜散水。当所では、初めの約1か月間は室温12~14℃とし、その後は10~20℃の範囲で管理し、散水方法は生産者施設と同様。[温度測定]両施設の発生環境を調査するために、おんどとり(TR-52i, T&D社製)を用いて、菌床付近の気温を測定。子実体発生量調査期間は81日間。各試験区の供試数は9とした。

(3) 結果と考察

子実体発生量の調査結果を表3-4-1に示す。また、菌床付近の気温とXR1の子実体生重量の推移を図3-4-1に示す。

子実体発生量は、4品種全てで、当所の発生量が生産者施設より多い傾向が見られ、XR1では個数と生重量、CS202では個数、MLE9は生重量でそれぞれ有意差が確認された。一番収穫所要日数も4品種全てで当所のほうが生産者施設より短い傾向が見られ、H600では有意差が確認された。また、当所のほうが生産者施設に比べ、一番収穫所要日数のバラツキが小さかった。

菌床付近の温度は、発生期間全体を通じて生産者施設のほうが当所に比べ高く、初めの1か月間では、両者の差は2~4℃で推移していた。この間の子実体発生状況を見ると、一番発生が始まる時期には両者に差は無いものの、その後の発生量には大きな差が生じていた。これは、他の3品種についても同様であった。

以上より、既存の菌床シイタケ生産施設においてもビン栽培により子実体が発生することは確認できたが、その発生量には、栽培環境の違いが大き

表 3-4-1 子実体発生量等調査結果

種菌	区分	供試数	子実体発生量(一ビン当たり)		個重 (g)	一番収穫所要日数(日)
			個数(個)	生重量(g)		
H600	生産者	9	2.6 ±2.2	44 ±40	17	43 ±28 *
	当所	9	3.2 ±1.4	68 ±17	21	16 ±6
XR1	生産者	9	2.2 ±1.4 *	74 ±53 *	34	18 ±17
	当所	9	4.8 ±2.6	122 ±42	25	11 ±1
CS202	生産者	9	4.1 ±2.1 *	95 ±45	23	14 ±12
	当所	9	6.6 ±2.5	119 ±9	18	11 ±2
MLE9	生産者	9	4.6 ±2.2	56 ±20 *	12	22 ±17
	当所	9	4.9 ±1.6	73 ±16	15	14 ±5

注)一番発生日は各試験区の平均値。*は両者の間に有意差があることを示す(t検定、 $p < 0.05$)。±は標準偏差。

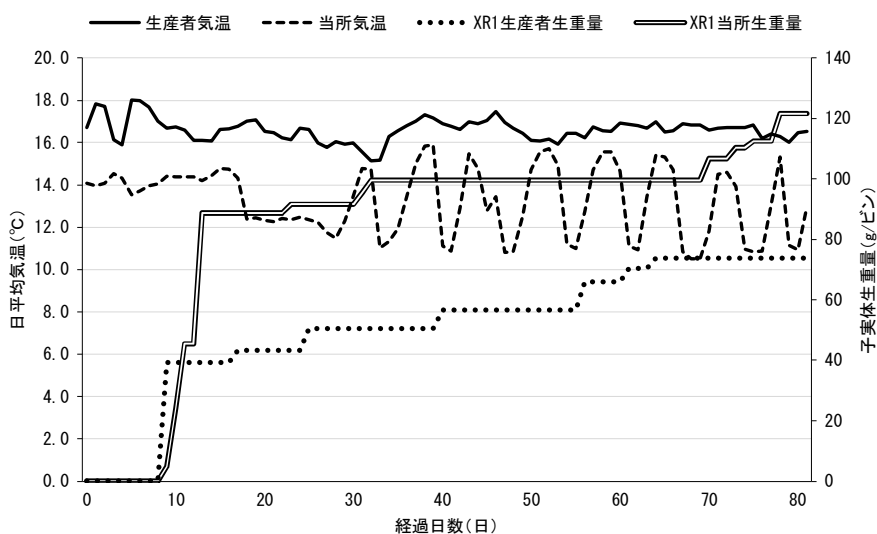


図 3-4-1 菌床付近の気温及び子実体生重量の発生の推移 (品種：森 XR1)

く影響していると考えられた。また、一番収穫所要日数が短いほうが、子実体発生量が多くなる¹⁰⁾ことから、本試験の既存の菌床シイタケ生産施設において菌床シイタケのビン栽培を行う場合、子実体発生初期の温度等の発生環境を改善することが重要と考えられた。

3.4.2 菌床シイタケのビン栽培における生産性の試算

(1) 目的

菌床シイタケの、袋栽培では、通常培地全面から子実体が発生することから、収穫時等の作業性も考慮し、培地同士の間隔を空けて栽培する必要がある。

一方、ビン栽培はコンテナに並べたビンをも、コンテナ同士の隙間無く、栽培棚に置くことができることから、栽培施設の有効活用が可能と考えられるが、これまでに上記について検証した例はほと

んど無い。

そこで本項では、菌床シイタケのビン栽培と袋栽培における生産性の比較検証を行うとともに、今後の課題を探った。

(2) 調査方法

生産性は、ある一定の栽培施設における一年間に発生する子実体の販売額を、それを生産するために必要な培地材料費で除した値とした。

ビン栽培の試算の基になるデータは、3.1.1で一ビン当たり 193g と最も発生量が多く、子実体発生重量率が袋栽培の標準値と同等の 34%であった北研 600 号のチップ 2 区(「最大収量」と、3.3.2で比較的良好な発生がみられた、チクマッシュ CS202 の 75 日培養・10 日休養区 (C7-10) の「一番発生のみ」及び「二番発生まで」の計 3 パターンの子実体発生量等のデータ (表 3-3-3) を用いた。

袋栽培は、栽培の手引書⁴⁾から栽培棚の規模、坪当たりの培地収容数などの数値を引用した。基

準となる栽培施設の規模（発生室の広さ）も、手引書⁴⁾において管理しやすいとされる35坪とした。なお、ビン栽培も同じ施設を使用するとして試算した。

(3) 結果と考察

生産性の試算結果を表3-4-2に示した。

生産性が最も高かったのはビン栽培の「最大収量」の27.4で、以下袋栽培の24.0、ビン栽培の「二番発生まで」の14.7、「一番発生のみ」の7.5と続いた。本調査で設定した栽培施設における、最大収容菌床重量は、ビン栽培と袋栽培間に大きな差が無かったことから、生産性は、年間の回転数と一菌床当たりの子実体発生量に大きく影響を受けると考えられた。「最大収量」は、一菌床当たりの子実体発生量が多いものの、年間の回転数がわずか1.0回のため、総発生量が最も少なかった。しかし、培地材料の使用量も少ない為、結果的に高い生産性

となった。栽培期間が長期化すると、菌床の害菌・害虫被害のリスクも高まり、子実体の品質にも悪影響が生じやすくなることから、この栽培パターンは現実的ではないと考えられた。

「一番発生のみ」や「二番発生まで」のパターンは、回転数が多いものの、一菌床当たりの子実体発生量が少ないため、生産性は低くなっていた。そこで、それぞれのパターンにおいて、子実体の総発生量が袋栽培と同程度となるよう一菌床当たりの子実体発生量を仮に設定した場合の生産性の比較を試みた。その結果、「一番発生のみ」の一菌床当たりの子実体は90gに、「二番発生まで」は113gに増加すると、総発生量が袋栽培と同程度となり、その生産性はそれぞれ、12.8と16.0になり、若干改善することが確認された。さらに生産性を上げる為には、一菌床当たりの子実体発生量の増加や、栽培期間の短縮化による回転数を増やす必要がある

表3-4-2 菌床シイタケのビン栽培における生産性の試算結果（発生室35坪当たり）

項目	ビン（培地重量）			袋（2.5kg）
	最大収量 (570g)	一番発生のみ (530g)	二番発生まで (530g)	
坪当たり収容菌床数（個）	435	435	435	100
最大収容菌床数（個/発生室）	15,225	15,225	15,225	3,500
最大収容菌床重量（kg）	8,678	8,069	8,069	8,750
栽培日数（培養・発生）	349	93	117	190
年間回転数	1.0	3.9	3.1	1.9
年間発生菌床数（個）	15,225	59,378	47,198	6,650
子実体発生量				
一菌床当たり（g）	193	53	104	800
総発生量（kg/年）	2,938	3,147	4,909	5,320
年間販売額*1（円）【A】	2,891,410	3,096,655	4,830,003	5,234,880
年間培地材料使用量				
おが粉（m ³ ）	12	48	38	25
フスマ（kg）	563	2,197	1,746	1,164
培地材料費*2（円）				
おが粉	87,617	341,708	271,614	180,428
フスマ	18,026	70,303	55,882	37,240
計【B】	105,644	412,011	327,496	217,668
所得（円）【A-B】	2,785,766	2,684,644	4,502,507	5,017,212
生産性【A÷B】	27.4	7.5	14.7	24.0

*1 東京都中央卸売市場の生シイタケの令和4年の平均価格の984円/kgで試算（令和4年特用林産物統計調査より）

*2 おが粉（広葉樹）7,140円/m³、フスマ32円/kgで試算（令和5年度長野県きのこ振興方針より）

が、その他には培地材料使用量を減らすことも考えられる。ビン栽培の短期栽培は、袋栽培に比べ、子実体の発生期間が短いため、培地の腐朽・分解があまり進んでいないと推察されることから、使用済み培地を再び培地として再利用することも、生産性を上げるために有効と考えられた。

最後に本調査では、労働生産性の検討をしていないが、ビン栽培の大きなメリットの一つとして省力化があることから、今後は労働生産性の検討も併せて行う必要があると考えている。

4 総合考察

本研究では、シイタケ産業の活性化に資するため、原木シイタケ栽培の効率化や省力化に関する試験、菌床シイタケビン栽培技術の開発試験を行った。以下に成果を簡潔に述べた上で、今後の課題等について考察した。

原木栽培では、封ロウ省略栽培における植菌当年の子実体発生特性を調査した結果、封ロウした場合と同等の子実体発生量が、植菌当年から得られ、さらに3年間の総発生量でも封ロウの有無による差が見られない品種があることを明らかにした。これにより、植菌当年又は翌年³⁾のどちらのタイミングでも、封ロウ省略栽培が可能であることが明らかになった。

わりばし種菌による、大径木を活用した省力栽培では、植菌列数を従来の1列から2列とし、わりばし種菌の接種量を増やすと、その後のほだ化が進みやすく、子実体発生量も増加し、その発生量は一般的な種駒菌を用いた栽培方法と同程度となることが分かった。一方で、植菌列数を増やすと、チェーンソーでの切り込み作業時間が長くなり、身体的な負担が大きくなることから、より負担の少ない植菌方法を検討する必要がある。

休養省力化(蒸し込み)試験では、休養期間中の積極的な加温や加湿処理(蒸し込み)により、通常休養管理よりも、休養期間が短縮されることが分かった。また、その後の浸水発生において子実体発生量の増加が期待できることから、浸水発生の回数を減らすことによる省力化が可能と考えられた。一方、本研究では、空調施設のある室内で試験を行ったが、生産現場で実践可能な簡易的な手法の検討が必要と考えられる。

菌床シイタケビン栽培では、培地材料や品種、栽培容器、発生管理及び将来的な技術の普及を見据えた試験等を行い、以下の①から⑧に示す成果を

得た。①おがチップをビン栽培に用いると、品種間差はあるものの、子実体発生量が増加する。②ビン栽培に適性のある市販品種を新たに1品種確認した。③多くの品種で、光線の遮断時期による子実体総発生量への影響は無いことを確認した。④ビン容器の通気性について検討した結果、蓋に穴をあけたものや、フィルター付きの蓋を使用すると、通気性が高くなり、培地重量減少率も子実体発生量が増加するとされる5%を超えることが分かった。また、通気性が高い容器で高収量を得られる品種が確認された。⑤浸水や打床といった、刺激(発生刺激)をビンに与えたところ、子実体の発生促進に有効であることが確認されたが、この効果の大きさには品種間差があることが示唆された。⑥ビン栽培においては、栽培期間を短縮し、回転率を上げることにより、全体の収量を高めることが出来る可能性が示唆された。⑦既存の生産施設においても、ビン栽培により子実体が発生することは確認できたが、子実体発生量には栽培環境が大きく影響すると考えられた。⑧ビン栽培の生産性を上げるためには、一菌床当たりの子実体発生量の増加や、栽培期間の短縮化による回転数を増やす必要があると考えられた。

菌床シイタケのビン栽培と袋栽培の収量を比較する際、培地重量に対する子実体発生重量の割合が一つの指標となる。本研究においても、この割合を用いて検討した結果、袋栽培と同等の収量を得ようとする、発生期間が長期化してしまい、現実的な栽培方法ではないことが分かってきた。よって、菌床シイタケビン栽培技術を確立するためには、一ビン当たりの収量の増加や、栽培期間の短縮による回転率を向上させ、袋栽培と同等以上の「生産量」を得ることが重要と考えられた。そのためには、上述の研究成果を基に、ビン口部から優先的に形質の良い子実体を発生させる技術など、さらなる栽培技術の検討が必要と考えている。また、本研究において“品種間差”が度々確認されたように、菌床シイタケビン栽培において、適性品種の探索が最も重要な課題と考えられる。今後も、これらの課題解決に向けた試験研究の継続が必要である。

5 結言

現在、シイタケ産業を取り巻く情勢は大変厳しく、生産に関わる様々な資材価格の高騰や、今後将来的に長く影響すると考えられる、少子高齢化による労働力不足対策など喫緊の課題が山積してい

る。本研究では、原木栽培、菌床栽培それぞれの既存栽培技術を見直す中で、栽培の効率化、省力化につながる様々な技術についての研究成果を示すことが出来たと考えている。しかし、原木栽培の更なる省力化や、ビン栽培の実用化には様々な課題があることから、試験研究の継続的な取り組みが必要と考えている。最後に、本研究における種々の研究成果が、実際の原木及び菌床シイタケ生産現場の課題解決に少しでも貢献できれば幸いである。

6 謝辞

本研究を行うに当たり、栽培施設の一部をお貸し頂き、子実体発生量調査等にもご協力頂いた、有限会社グッドウッドパークの小西利幸社長に深く感謝申し上げます。

7 引用文献

- 1) 全国農業協同組合連合会長野県本部編集発行 (2013), 菌床きのこの歩み きのこ系統共販 50年を振り返る, 64-68
- 2) 山中勝次, きのこ技術集談会編集委員会 編, 株式会社農村文化社 (1991), シイタケ菌床栽培「きのこの基礎科学と最新技術」, 212-220
- 3) 小出博志・竹内嘉江 (1994), シイタケの菌床栽培技術の開発ー菌床栽培実用化試験ー, 長野県林業総合センター研究報告第8号, 35-61
- 4) 大森清寿 編・北研食用菌類研究所 著, 社団法人農山漁村文化協会 (1993), 菌床シイタケのつくり方, 59, 65, 72-73, 100-105
- 5) 片桐一弘・鈴木良一・加藤健一・増野和彦 (2019), 原木シイタケ栽培の革新的な省力栽培技術の開発, 長野県林業総合センター研究報告第33号, 9-18
- 6) 全国食用きのこ種菌協会 (2023), きのこ種菌一覧/2024年版, 22-23
- 7) 増野和彦・福田正樹・西澤賢一・吉村智之・細川奈美・伊藤 淳・山本郁勇・高木 茂・竹内嘉江 (2009), 里山を活用したきのこの栽培及び増殖システムの開発, 長野県林業総合センター研究報告第23号, 97-112
- 8) 財団法人日本きのこセンター編 (1986), シイタケ栽培の技術と経営, 77
- 9) 株式会社プランツワールド (2010), 2010年度版きのこ年鑑別冊 最新きのこ栽培技術, 100
- 10) 片桐一弘・加藤健一・増野和彦 (2019), 既存の栽培施設を活用した菌床シイタケビン栽培

技術の開発, 長野県林業総合センター研究報告第33号, 19-34

- 11) 阿部正範 (2005), 菌床シイタケの安定生産に関する研究, 徳島県森林林業研究所研究報告No. 4, 13-26
- 12) 米倉邦明・山下和久・生野柁大 (2021), 温暖化に対応した乾シイタケ栽培技術の開発 (IV)ー1年起こしの検討ー, 大分県農林水産研究指導センター 林業研究部 きのこグループ業務年報第33号, 5-9

タラノキ単年栽培法に関する試験

加藤健一・古川仁

本試験ではタラノキについて、その繁殖力を活用した新たな栽培法を開発するため、実際の圃場（耕作放棄地）を用いて実証試験を試み、以下の結果を得た。

①タラノキ種根の植付けは、春季より晩秋の方が適期である可能性が考えられた。②タラノキ根株を掘り上げる手法について、タラノキを栽培する畝の下に予めシートを敷き掘り上げたところ、人力でも比較的容易に行えた。③タラノキの幹と根を毎年新たに更新させる「タラノキ単年栽培法」の実証試験を休耕田で行ったところ、当該栽培法が有効であること及び休耕田でのタラノキ栽培が可能なが確認できた。④タラノキ単年栽培法は通常の栽培に比べ収穫量は少ないが、毎年タラノメを収穫しながら1年生のタラノキの根を調達でき、栽培規模拡大に必要な種根調達の手法として有効である。

キーワード：タラノキ，タラノメ，種根，掘り上げ，幹の切り返し

1 緒言

タラノキは、山菜としての人気が高く収益の見込める優良な栽培品目である。しかしながら、繁殖力が強く他の所有者の土地に侵入するなど生育管理が難しいこと、人目の少ない場所では盗難の危険性が高いこと等、県内でのタラノキ栽培の普及には多くの課題が存在する。

一方、県内では高齢化が進み、中山間地域での耕作放棄地が年々増加¹⁾している。また、荒廃林地も同様に増加しており、これらの荒廃林地・耕作放棄地の有効活用が中山間地域の課題の一つになっている。

そこで、収益性の高いタラノキ生産と荒廃林地・耕作放棄地の有効活用を結び付け、昨今の物価高や給与所得の伸び悩みに対応できる新たな技術の構築を図った。

2018年12月、タラノキ種根を調達するため林業総合センター構内（以下、構内）に自生する3本のタラノキを掘り上げ、根を除去した。根の除去後、タラノキは元の自生地に戻す予定であったが、失念し翌春まで放置してしまった。しかし、翌年4月下旬、根を除去して放置したタラノキからも周辺のタラノキとほぼ同時に新芽が発芽した。その繁殖力に驚くとともに新たなタラノキ栽培法考案のキッカケとなった。2019年には考案した「タラノキの新たな栽培法」の実証試験を開始し、順次試験と改良を繰り返して「タラノキ単年栽培法」に至った。本報は、「タラノキの新たな栽培法」を考案して実証と改良を繰り返し「タラノ

キ単年栽培法」に至った試験結果、さらに「タラノキ単年栽培法」を休耕田で適応した試験結果を順次記述して、報告するものである。

なお、本研究は県単課題「林床を活用した山菜の増殖技術開発に関する試験」（2018～2022年度）の一環として実施した。

2 タラノキの新たな栽培法

2.1 試験の目的

タラノキの根は増殖用種根として需要がある。緒言に示した事例の規則性が確保されれば、種根を調達しかつタラノメの収穫を行う新たな栽培法が可能となる。そこで、タラノキ栽培のいくつかの課題を解消し、効率的にタラノメを収穫できる「タラノキの新たな栽培法」を考案した。

この栽培法は、タラノキを収穫期以外の期間（5～11月）は、耕作放棄地など「生育エリア」で生育し、収穫期のみ自宅周辺の畑等「収穫エリア」へ移植して収穫し、収穫後、再度「生育エリア」へ株を移植する。この栽培法の長所は、毎年タラノキ増殖用種根の調達と効率的なタラノメの収穫が可能となり、盗難防止にも効果的である。さらに、毎年根を除去することでタラノキの旺盛な生育を制御できる。一方短所は、毎年タラノキ根株を掘り上げる労力である。

この栽培法についてタラノメの収穫状況、及び移植後の株の生育状況を確認するため、2019年12月から2020年12月にかけて、構内で実証試験を

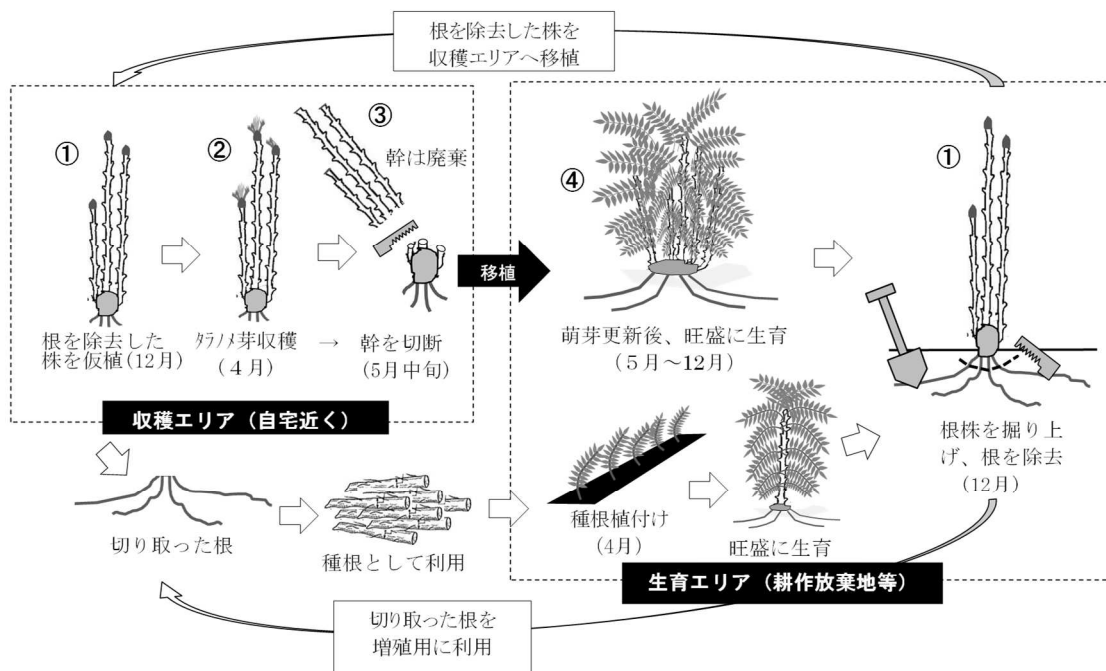


図-1 タラノキの新たな栽培法 概念図

行った。

2.2 試験の方法

考案した「タラノキの新たな栽培法」を図-1 に示す。図-1 に従い以下の通り試験を行った。

①根株の掘り上げ・仮植

2019 年 12 月初旬、構内のアカマツ林床に自生するタラノキ 44 本の根株を掘り上げ、根を除去し、きのこ総合実験棟東側アカマツ林縁部を「収穫エリア」（幅：2m，奥行き：3m）とし、10 cm 間隔に並べ仮植した（写真-1）。なお根は切取って増殖用の種根として利用した。

②タラノメの収穫

2020 年 4 月下旬、タラノメ（頂芽，副芽²⁾）を

適期に収穫した（写真-2）。

③幹の切り返し・④「生育エリア」への移植

タラノメ収穫後の 2020 年 5 月 19 日、幹を地際付近で切り返した。根元付近に生じた萌芽（写真-3）が概ね 10 cm に成長した段階で 44 株を「生育エリア」へ移植した（写真-4）。

なお「生育エリア」は、構内の苗畑（土壌：黒ボク土，幅：2m，奥行き：6m）に設置した。44 株は晩秋，再度「収穫エリア」へ移植することから，掘り上げの労力を軽減するため，根が深く張らないよう防草シートを敷いた。（写真-5～7）。

2020 年 12 月 21 日，44 株の幹長と幹の数を測定した。



写真-1 収穫エリア



写真-2 タラノメ発芽状況



写真-3 萌芽状況



写真-4 萌芽後，移植した株



写真-5 生育エリアの
トラクター耕耘



写真-6 防草シートを敷く



写真-7 防草シートの上
に土を載せる



写真-8 「生育エリア」
の生育状況

2.3 結果と考察

(1) タラノメの収穫

2020年4月下旬から5月中旬にかけて、仮植した44株のうち霜害を受けた2株以外の42株から頂芽を収穫し、頂芽収穫率は95%であった(表-1)。また、タラノメの収穫時期は周辺の野生株とほぼ同時期であり、当該手法によるタラノメの収穫が可能なが確認された。

(2) 幹の切り返し・「生育エリア」への移殖

幹の切り返し後の萌芽の発生は、44株の内38株で確認され、38株の平均萌芽数は1株当たり2.4本であった(表-2)。

(3) 「生育エリア」での生育

萌芽が確認されなかった6株を含む44株を「生育エリア」へ移殖し、その生育状況を表-3に示した(写真-8)。44株の内31株が活着し(活着率:70%)、31株の平均幹長は28.3cmであった(表-3)。

なお、未活着の13株はその後枯死が確認され、この原因として、「生育エリア」へ移殖する際、既に根系が活性化しており、移殖によって株の活力が失われたものと考えられた。この結果から、当該手法によるタラノメの収穫は可能だが、持続可能な栽培法の確立には更なる改良が必要である。

3 種根の植付け適期と栽培に適した圃場条件の検討

3.1 試験の目的

最も一般的なタラノキの増殖法は、栄養繁殖の一つである根挿し法³⁾である。これは植物の一部(根)からその植物を再生させる増殖方法であり、母株と同じ特性を持つ株を増殖できる。

その具体的な手法は、罹病していない1年生の

表-1 タラノメの収穫状況

採取日	頂芽(本)	側芽(本)
4月28日	5	
5月1日	11	
5月5日	10	
5月11日	7	
5月13日		2
5月19日	9	45
合計	42	47

表-2 萌芽数毎の株数

萌芽数(本)	株数(本)
0	6
1	11
2	12
3	8
4	4
5	1
6	2
合計	44
(平均萌芽数)	2.4

表-3 生育エリアにおける成長量

区分	本数	平均幹長 (cm)	備考
成長あり	31	28.3	最大:60cm 最少:5cm
成長なし	13	—	—
合計	44	—	—

表-4 圃場の概要

所在	圃場 No.	区分	圃場 面積(a)	標高 (m)
長野市	1	畑(砂壤土)	5	350
	2	田(粘性土)	2	390
千曲市	3	畑(粘性土)	2	390

母株を選定し、その根を太さに応じて10~15cmに調整した「種根」を3月下旬から4月上旬に圃場に植付ける。

タラノキ栽培地を早期かつ確実に造成する最も大切な要因は、種根からの確実な発芽である。発芽のなかった箇所は、他の植生が繁茂し除草に労力がかかるうえ収益が落ちる。

そこで、タラノキ種根の植付けの適期、発芽後の生育状況、及び栽培に適した圃場条件を検証するため、表-4に示す3箇所の圃場で実証試験を行った。

3.2 試験の方法

(1) 圃場の準備

2022 年 12 月、表-4 の圃場をトラクターで耕耘し、水はけの対策として列間 1.5m、高さ約 20 cm の畝を設け⁴⁾、種根植付け準備を行った。

(2) 種根の調達

2022 年 12 月 19 日、圃場 No. 1 (表-4) で栽培するタラノキから種根を調達するため、タラノキの根株を掘り上げた。

(3) 種根の植付け

圃場 No. 1 では、植付け時期の違いによる発芽率と発芽後の生育状況を比較するため、4 列の畝を設け、その内 2 列は 2022 年 12 月 20 日に、残り 2 列は翌年 4 月 1 日にタラノキ種根を植付けた。

圃場 No. 2 及び No. 3 では、2023 年 3 月から 4 月にかけて植付けを行った。そのため、(2) に調達したタラノキの根は野菜ネット (38×65 cm) に入れて圃場の土壌中で春まで保管した。

2023 年 3 月、野菜ネットを土壌中から掘り出し、

タラノキ根の凍結によって腐敗した箇所を除去し、太さに応じて 10~15 cm に調整し種根とした。

2022 年 12 月 20 日から 2023 年 4 月 14 日にかけて 665 本の種根を 3 箇所の圃場に 50 cm 間隔で植付けた。

3.3 結果と考察

3 箇所の圃場のタラノキの生育状況を表-5 示した。

(1) 種根の植付け適期の検討

2022 年 12 月 20 日に種根を植付けた圃場 No. 1 (畝 No. ①②) の「2023 年 12 月末における残存

表-5 タラノキ種根植付け後の生育状況

所在	圃場 No.	畝 No.	種根植付年月日	畝延長 (m)	植付数 (本) A	2023.12月末の状況					
						残存株		幹長50cm以上の株			
						株数 (本) B	率 (%) B/A	株数 (本) C	率1 (%) C/A	率2 (%) C/B	
長野市	1	①	22.12.20	22.0	44	42	95	22	50	52	
		②	22.12.20	22.0	44	43	98	16	36	37	
		③	23.4.1	22.0	44	17	39	7	16	41	
		④	23.4.1	25.5	51	19	37	8	16	42	
		小計*		91.5	183	121	66	53	29	44	
千曲市	2	①	23.3.20	18.0	36	28	78	15	42	54	
		②	23.3.20	17.5	35	28	80	15	43	54	
		③	23.3.20	16.5	33	26	79	11	33	42	
		④	23.3.20	16.0	32	25	78	9	28	36	
		⑤	23.3.31	15.5	31	26	84	3	10	12	
		⑥	23.3.31	13.0	26	17	65	2	8	12	
		⑦	23.3.31	12.0	24	15	63	1	4	7	
小計*		108.5	217	165	76	56	26	34			
千曲市	3	①	23.3.20	12.0	24	20	83	15	63	75	
		②	23.4.11	12.5	25	13	52	9	36	69	
		③	23.4.11	12.5	25	12	48	11	44	92	
		④	23.4.13	12.5	25	14	56	13	52	93	
		⑤	23.4.13	12.5	25	17	68	13	52	76	
		⑥	23.4.13	12.5	25	14	56	9	36	64	
		⑦	23.4.13	12.0	24	16	67	9	38	56	
		⑧	23.4.13	12.0	24	12	50	8	33	67	
		⑨	23.4.13	11.5	23	14	61	9	39	64	
		⑩	23.4.14	11.5	23	14	61	10	43	71	
		⑪	23.4.14	11.0	22	12	55	5	23	42	
小計*		132.5	265	158	60	111	42	70			
合計			332.5	665	444	67	220	33	50		

*但し「率 1,2」は各圃場の平均値

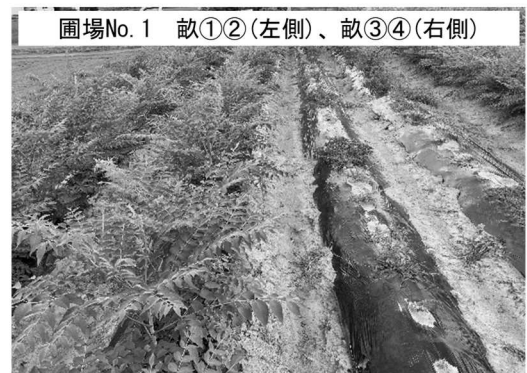


写真-9 タラノキ生育状況 (2023.7.18)

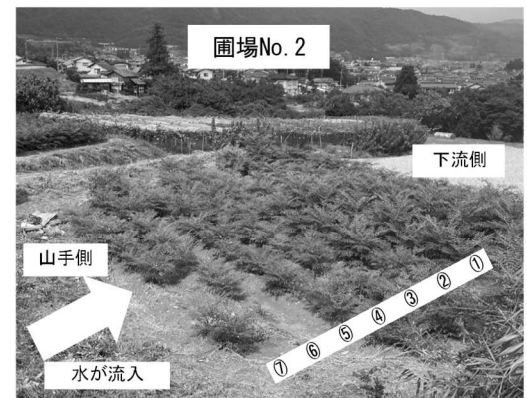


写真-10 タラノキ生育状況 (2023.9.27)



写真-11 タラノキ生育状況 (2023.9.27)

表-6 2023年3月と4月の月平均気温と平年値
(資料：気象庁アメダス「長野」)

	3月(°C)	4月(°C)
2023年	8.3	12.0
平年値	4.3	10.6

株率」(以下、残存株率)は、95%及び98%であり、良い結果となった。一方、同じ圃場の隣接する立地に4月1日に植付けた畝 No. ③④の残存株率は、39%及び37%であり植付け時期による顕著な差が生じた(写真-9)。

この結果から種根の植付け適期が晩秋である可能性が考えられ、「種根の植付け時期は、3月下旬から4月上旬」とする藤嶋(1997)³⁾とは異なる結果となった。この要因の1つは、2023年3月と4月の月平均気温が平年値より大幅に高かったことにあると考えられた(表-6)。近年の長野県における気象状況は、藤嶋³⁾が報告した1900年代後半とは明らかに異なり、常に自然環境に考慮し栽培手法をアップデートしていくことが大切だと考えられた。

また残存株率は、「3.20 植付け」が80%前後であり、「12.20 植付け」に次いで高い結果となった。

このことから、春季に植付けを行う場合には、なるべく早期が好ましいと考えられた。

(2)栽培に適した圃場条件の検討

①圃場の水分状況

休耕田の圃場 No. 2 (写真-10) は、畝 No. ⑦が最も山側にあり、土壤水分量が過多であると推測され、「2023年12月末残存株」の内「幹長50cm以上の株の比率」が7%と最も低くかった。この比率は山側に近づくにつれ(畝 No. ①→⑦)低下し(写真-10)、水はけの状態がタラノキの成長に関係している可能性が示唆され、適切な排水対策が必要だと考えられた。

②根元径成長

頂芽優勢の性質上、タラノキの発芽は頂芽から

表-7 圃場別、50 cm以上の株の幹長と根元径との関係性

圃場 No.	平均幹長 (cm) A	平均根元径 (cm) B	近似線の傾き	形状比 (A/B)
1	63.4	2.3	0.0356	28.0
2	70.4	2.4	0.0331	29.4
3	68.9	2.6	0.0379	26.1

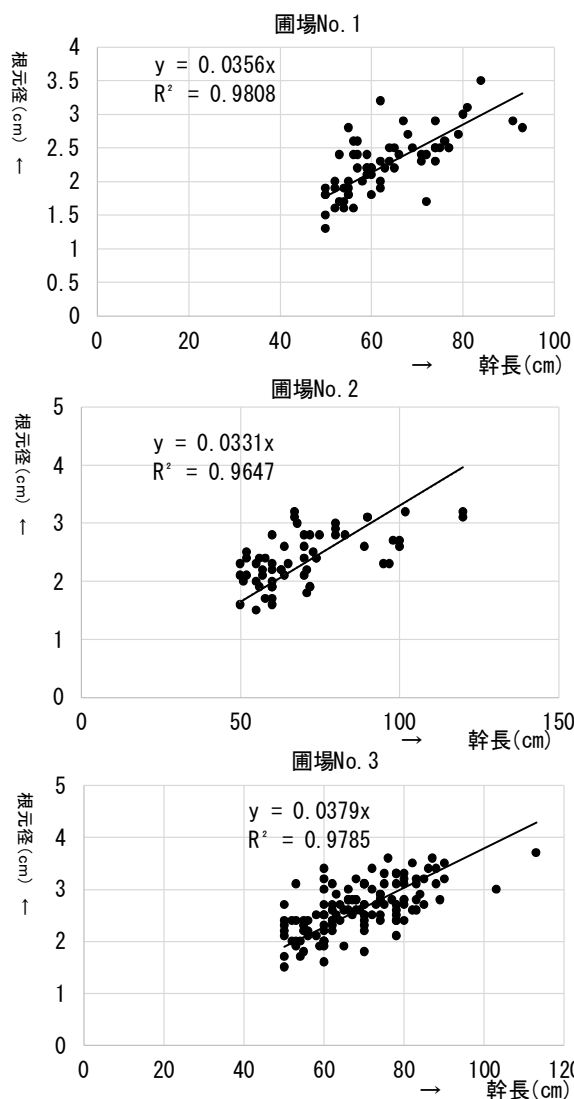


図-2 圃場別、幹長と根元径との関係性

始まり、副芽、次いで下部の側芽へ順次進む。頂芽と副芽は上に伸びて幹になるため太く良質な形状になるが、横へ伸びて枝になる側芽は形が不均一で細く、商品価値がないため通常出荷しない。よってタラノメ露地栽培で出荷できる新芽は、梢

部から発芽する頂芽と副芽のみとし、幹を太く育てる栽培が大切である。

そこで、一定以上に成長した株について（幹長 50cm 以上）、圃場別に幹長と根元径の関係性を調べた（表-7、図-2）。表-7 中の「近似線の傾き」は数値が大きい程、また「形状比」は数値が小さい程根元径の成長が良好であることを示す指標である⁵⁾。

50cm 以上の株の平均根元径が最も大きかった圃場は No. 3 であり、「近似線の傾き」が最も大きく、形状比が最も小さいことから、根元径成長が最も良好な圃場と考えられた。

また、圃場 No. 3 の「内、幹長 50cm 以上の株の比率」の平均値は 70% であり、全体の平均値 50% を大きく上回った。圃場 No. 3 の種根植付け日が全体の中で遅い時期だったことが残存株率が最も低かった原因と考えられたが、生育状況（写真-11）から判断して、仮に晩秋に植付を行っていたら 3 圃場の中で最も良好な栽培地となった可能性もあり、今後の課題としたい。

これらの結果から、圃場毎に生育の傾向が確認できた。来年度以降には、土壌の養分量及び水分量等の調査により根元径成長に影響する因子を検証する必要があると考えられた。



写真-12 ノコギリで周囲の根を切断
写真-13 スコップで株を掘り上げる

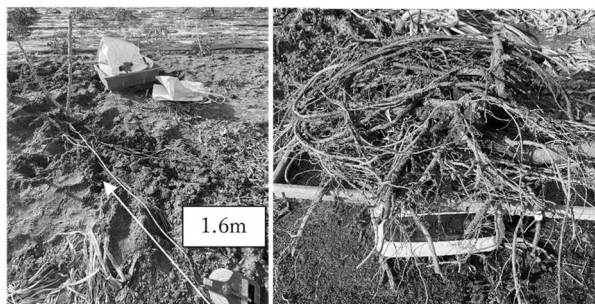


写真-14 周囲に伸びる根を掘り進める
写真-15 1本のタラノキから掘り上げた根

4 タラノキ種根の掘り上げ手法の検討

4.1 試験の目的

タラノキの根を掘り上げる作業は重労働であり、タラノキ人工栽培の課題の一つである。

この作業はパワーショベル等重機を使用する手法が最も効率的だが、パワーショベルは高価で普及が進んでいないため、広く普及しているトラクターを用いて比較的容易に掘り起こせる手法を検討した。

4.2 試験の方法

タラノキの根は浅根性³⁾で、周囲に放射状に広がって伸びる。根の伸長先に新芽ができ、新たな株が生育し周囲へ広がり群生していく。そのため、根を掘り上げるには、それぞれの根をたどって掘り進める必要があり重労働となる。

2019 年、砂壤土で比較的掘りやすい圃場 No. 1 において、タラノキ 1 年生の根株を掘り上げた。最初にノコギリで株の周囲及び下方に伸びた根を幹から切断し（写真-12）、次にスコップで株を掘り上げた（写真-13）。続いて周囲及び下方に伸びた根をたどって掘り進めたが（写真-14, 15）、手作業では深さ 30 cm 程しか掘り起こせなかった。タラノキは浅根性だが、他の樹木の根のない砂壤土では、多くの根が地中に潜り回収できない。

そこで、タラノキの株の下に予めシートを敷くことにより根を水平方向へ誘導できれば、比較的容易に掘り上げられるのではないかと考えた。

(1) シートの選定

タラノキの下に敷くシートは水を通す素材とし、タラノキは列状に栽培するため、施工性を考慮しロール状の防草シート（幅：50 cm、長さ：50m）とした。

(2) 防草シートの設置

2019 年の予備試験では、畝を設けずに栽培したタラノキ根株を掘り上げたので、スコップで下に掘る作業に労力を要した。

そこで、畝でタラノキを栽培すると、根系の位置が畝の高さ分だけ高くなり、畝をスコップで横から崩すことによって比較的容易に根を掘り取れると考えた。

2022 年 6 月 17 日、圃場 No. 2（表 4）の休耕田におけるタラノキ栽培試験においてタラノキポット苗を定植する際、畝の下にシートを敷いてタラ



写真-16 トラクターによる掘り起こし状況（左）
タラノキ根の回収状況（右）



写真-17 防草シートに絡むタラノキの根



写真-18 畔シートの上で水平方向に
伸びたタラノキの根

ノキ栽培を試みた。予め畝となる線上に防草シートを敷き、管理機でシート両側の土壌をシート上に被せ、巾1.2m、高さ20cm、延長17mの畝を3列設け、根株の掘り上げ作業に備えた。

(3) 畔シートの設置

上記(2)において防草シートを試みたところ、根が防草シートの網目に多量に絡んだことから、2022年12月網目のない畔シート（幅：30cm）の使用を圃場No.1で試みた。

畔シートは畝高の中間高に設置することで、シート上に載る土量が少なく、掘り上げ作業が容易になると考えた。

4.3 結果と考察

(1) 防草シート

2022年12月19日、トラクターで防草シートの端を引き、タラノキ根株の掘り上げ作業を行ったところ、比較的容易にタラノキ根株を回収することができた（写真-16）。しかしながら、上記(2)に記載したが、タラノキの根が防草シートの網目を貫通して成長し、根が防草シートの網目に絡み、取り外すのに時間を要するという課題が生じ、網目のある防草シートは不適と判断した（写真-17）。

(2) 畔シート（幅：30cm）の使用

2023年12月2日、畔シートを予め畝の下に敷いた圃場No.1で、タラノキの根株を掘り上げた。

畔シートを畝高の中間に設置したため、シートの上に載る土量が少なく、トラクターを使わなくても人力で作業が行えた。さらにタラノキの根はシートに阻害され直下に伸びることができず、全て水平方向へ伸びた（写真-18）。この方法は比較的容易に一定の太さの根を一定量調達することができ、さらに、畔シートに根が絡むことはなかった。

しかしながら、畔シートの下部の大半にモグラの穴があり、さらにネズミの棲み処として利用されていた。

畔シート設置以降、ネズミを捕食する野生動物によると思われる畝の破壊が複数確認されていることから、今後更なる検討が必要である。

5 休耕田におけるタラノキ単年栽培法の試み

5.1 試験の目的

2019, 20年度に試みた「タラノキの新たな栽培法」では、タラノキ株の移殖時期により、株の活力が失われて枯損木が生じたと推察された。

そこで、この栽培法におけるタラノキ株の移殖時期を、4月下旬（タラノメ収穫後）から12～3月（根の調達後の休眠期）とし、同じ圃場内での移殖とした。

この栽培法は、成長した根と幹を毎年除去し、他の農作物と同様、毎年新たに作物を仕立てることから、「タラノキ単年栽培法」と称し、その概要を図-3に示した。

一方、タラノキの生育適地は水はけの良い傾斜地であり、田のように水はけの悪い粘土質土壌は

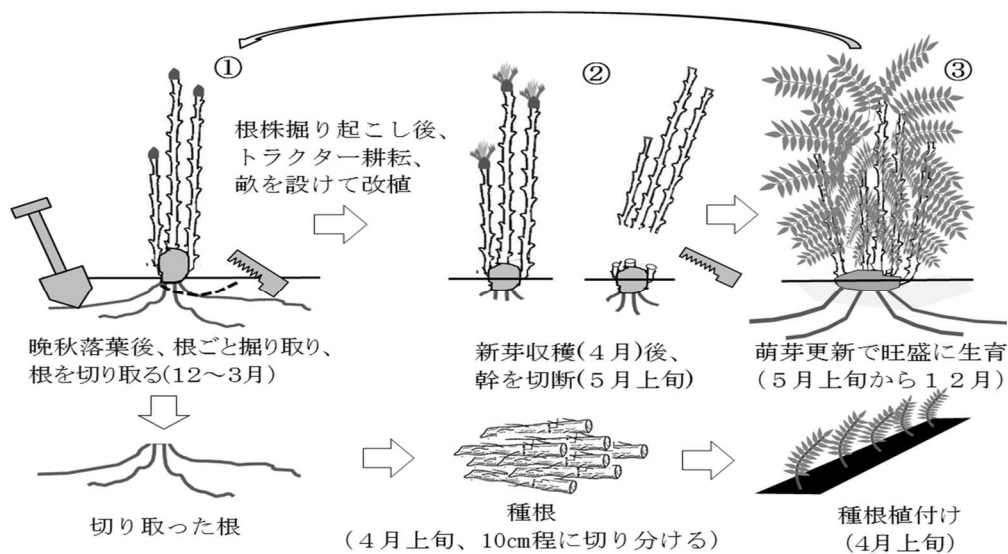


図-3 タラノキ単年栽培の概要

不適地とされる³⁾。しかし休耕田でのタラノメ栽培が可能になれば、耕作放棄地を解消する選択枝の一つに成り得ると考えた。

そこで、休耕田の圃場 No. 2 を用いてタラノキ単年栽培法の実証試験を行い、休耕田でのタラノメの収穫状況（頂芽の数と重量）と萌芽更新後の株の生育状況を確認した。

なお、休耕田の水はけを改善するため、タラノキ栽培の前年に緑肥のすき込みを行った。

5.2 試験の方法

(1) 緑肥による水はけの改善

水はけの悪い圃場の土壌中には硬盤層があるとされ³⁾、重機や資材を使わず水はけを改善する最も簡易な手法として、緑肥による硬盤破壊が一般的である。そこで、土壌の排水性、通気性を高める緑肥としてセスパニア (*Sesbania rostrata*) を採用した。セスパニアは草丈 3～4 m、根は直根性で 1 m 以上地中に入り硬盤層を破壊する⁶⁾。ま

た、耐湿性にも優れ、重粘土質土壌や湿害圃場の改善に効果的であるとされる。

2021 年 6 月 5 日、圃場 No. 2 に深さ約 5 cm の溝を列状に掘りセスパニアの種子を播種したところ、6 月 11 日に発芽した。その後急速に成長し、8 月末に草丈 2 m に達し（写真-18）、9 月初旬に開花した。セスパニアの種子の拡散を防ぐため結実前の 9 月 1 日、刈り払い機で根元から刈り払った。乾燥後、チップパー機で破碎し（写真-19）、10 月 28 日、トラクターで耕耘し圃場にすき込んだ（写真-20）。

(2) ポット苗の定植

粘土質土壌での根挿し法は、発芽率の低下が懸念され、より確実な方法としてタラノキのポット苗を育苗し定植した。

① 育苗

2022 年 4 月初旬、太さ 1 cm 以上のタラノキの根を約 10 cm に切り種根とし、ポットに植付け、6 月



写真-18 約 2 m まで成長したセスパニア(2021.8.24)



写真-19 刈り払い・乾燥後、チップパー機で粉碎 (2021.9.23)



写真-20 トラクターすき込み状況 (2021.10.28)



写真-21 タラノキポット苗



写真-22 定植作業状況



写真-23 定植完了

中旬までに苗高 15 cm 程度のポット苗 98 本を仕立てた (写真-21)。

②圃場の準備

当該圃場は休耕田のため水はけが悪いと判断し、畝を設けてタラノキを栽培することとした。

2022 年 6 月 17 日、トラクターで耕耘し、管理機を用いて畝を 3 列設け、根株の掘り上げ作業に備えて予め畝の下に防草シートを敷いた。(詳細は 4.2 (2) を参照)

③定植

2022 年 6 月 22 日、タラノキポット苗 98 本を 50 cm 間隔で定植した。当該圃場は土壌の構造がゴルフボール程度に大きく、植穴の底部及び埋戻し土に別途調達した腐植土を用い、乾燥防止のため根元に、当センター林内ホダ場から収集したコナラを主とする落葉を敷き定植完了とした (写真-22)。

また、定植後 1 ヶ月間、降雨が少なく猛暑日が続いたため、朝夕適度に散水した。

(3) 根株の掘り上げと改植 (図-3 の①)

2022 年 12 月 19 日、タラノキ根株の掘り上げ作業を行った (詳細は 4.3(1) を参照)。

掘り上げた株は、12 月中に改植すべきであったが、降雪により実施できなかった。

2023 年 3 月 9 日、12 月に根株を掘り上げた圃場をトラクターで整地し管理機で畝を設けた。3 月 20 日、全 93 株の内、幹長 20 cm 以上の 70 株を 50 cm 間隔で改植し (写真-23)、4 月のタラノメの収穫に備えた。

(4) タラノメの収穫と幹の切り返し (図-3 の②)

4 月上旬以降タラノメを収穫した (写真-24)。

幹の切り返しは、頂芽と副芽を収穫後、側芽が伸びる前までに行うとタラノキの活力が無駄に消費されず、新たな幹となる萌芽の成長に使われるとされている。また、5 月中旬以降に幹の切り返しを行うと生育が遅れ、翌年の収穫に影響を及ぼす⁷⁾、との報告もあり、これらを参考に切り返し時期を決定した。

(5) 幹の切り返し後の生育状況 (図-3 の③)



写真-24 改植完了状況



写真-25 タラノメ発芽状況



写真-26 幹の切り返し後の萌芽状況



写真-27 大雨によって冠水した状況
(2023.6.2)



写真-26 タラノキの生育状況 (2022.10.13)

幹の切り返し後、萌芽による良好な生育がみられた (写真-25)。5月中旬から6月下旬まで除草作業を行い、7月初旬に隣接するタラノキの空間が枝葉で閉鎖したため、それ以降の除草作業は不要となった。

また6月中旬に萌芽が出揃い、根元径成長を促すため1株当たり最大3本を目安に細い幹を除去した。

5.3 結果と考察

(1) 緑肥による水はけの改善

セスバニアをすき込んだ翌年の2023年6月2日、激しい降雨により圃場は冠水し (長野気象台の雨量観測値 51.5 mm, 写真-26), また, タラノキの生育状況 (表-5, 写真-10) などから考慮しても, 現在のところ明らかな緑肥による水はけ改善の効果は確認されていない。

(2) 定植後の生育状況

6月22日に定植したポット苗98本は、12月初旬までに93本が枯死せずに生育し (活着率:95%), その平均幹長は36 cm, 平均根元径は1.7 cmであった (写真-27)。

苗の活着率は高い結果となったが、株の生育は経験上十分とはいえなかった。この原因として、ポット苗の育苗に2ヶ月を要し、圃場での生育期間が短くなったこと、及び苗の定植後、平年より降水量が少なく猛暑が続き、活着に時間を要したことが考えられた。種根を圃場に直接伏せこみ、欠株の箇所のみポット苗を補植した方が良好な株の生育が望め、かつ省力的だと考えられた。

表-8 幹の切り返し後の生育状況

畝No.	萌芽数 (本)	平均幹長 (cm)	平均根元径 (cm)	幹数 (本)
①	1	77.8	2.4	9
	2	69.8	2.0	40
	3	72.4	2.0	18
	小計	71.6	2.1	67
②	1	62.4	2.2	20
	2	67.1	1.9	28
	3	55.0	2.1	3
	小計	64.6	2.0	51
合計	68.5	2.0	118	

(3) 根株の掘り上げ

タラノキ株の畝の下に予め敷いたシートをトラクターで引いて掘り上げたところ、シートを敷いた面では容易に根株を回収できたが、粘土質土壌ではシート面より広く伸長した根は地中に潜り、土が固く掘ることが困難なため殆ど回収できなかった。

この結果から根株の掘り上げ作業は、砂地や柔らかい土壌が向いており、「タラノキ単年栽培法」は休耕田には向かないと判断した。

(4) タラノメの収穫と切り返し

2023年4月6日にタラノメの収穫が始まり、4月21日に終了した。改植した70株のうち、霜害で発芽しなかった頂芽が15芽あり、それ以外の全ての株で頂芽の収穫が行え、合計55芽 (頂芽),

633g を収穫した (11.5g/本)。

タラノメの収穫後、2023 年 4 月 13 日から幹の
 切り返し作業を開始し 4 月 21 日に終了した。

(5) 切り返し後の生育状況

2023 年 12 月 26 日に測定したタラノキ 2 年生株
 の生育状況を表-8 に示す。栽培したタラノキ 70
 株に枯損はなく、平均幹長:68.5 cm, 平均根元径:
 2.0 cm, 平均幹数:1.7 本となり良好な生育が確認
 できた。休耕田では「タラノキ単年栽培法」は向
 かないが、栽培は十分に可能なことが確認できた。

2019, 20 年に試みた「タラノキの新たな栽培法」
 では、タラノキ 44 株のうち 13 本が枯損したが、
 当該試験では枯損がなく、移殖時期を改善した結
 果と考えられた。しかしながら生育状況では、1 年
 目成長量 (平均幹長:36 cm, 平均根元径:1.7 cm)
 と比較すると幹長は十分であるが根元径は若干
 不十分と思われ、来年以降、幹を太らす施肥の検
 討が必要だと考えられた。

6 総合考察

前述 3 項で実施した 3 箇所の圃場で行った種根
 植付け試験、及び前述 5 項で実施したポット苗の
 定植試験における生育状況を図-4 に示し比較し
 た。

1 年生株を比較すると、株の下にシートを敷い
 て栽培したタラノキの生育状況は、シートを敷か
 なかった株より幹長、根元径どちらも劣り、シー

トの遮断により地下部の生育が制限され地上部
 の生育が劣ったものと推察された。

そのため株の下にシートを張るタラノキ単年栽
 培法は、シートを張らない通常の栽培法に比べ生
 育が劣り、タラノメの収穫量も少ないと考えられ
 る。

しかしながらタラノキ単年栽培法は、毎年タラ
 ノメを収穫しながら 1 年生のタラノキの根を調達
 でき、栽培規模拡大に必要な種根調達的手段とし
 て有効である。なお、タラノキ種根が不要な場合
 にはタラノキを掘り上げる必要がないため、タラ
 ノメ収穫後の切り返しと若干の除草作業のみで、
 10 年程度は継続的にタラノメの収穫が行える。

また今回試みたポット苗の定植では、活着率が
 95%と良好だったが、定植当年の生育状況は種根
 植付けの生育状況と比較して十分ではなかった
 (図-4)。そこで、ポット苗の育苗についても種根
 植付け適期同様、12 月中にポットに種根を植え付
 け発芽時期を早め、5 月中旬頃までに定植するこ
 とで良好な生育が期待できると考えられた。

7 まとめ

本研究では、種根からタラノキ栽培地を仕立て
 る方法について試験を行い、タラノキ種根の植付
 け適期、タラノキ根株を掘り上げる手法について
 一定の成果を得ることができた。またこれらの成
 果を応用して「タラノキ単年栽培法」を構築する

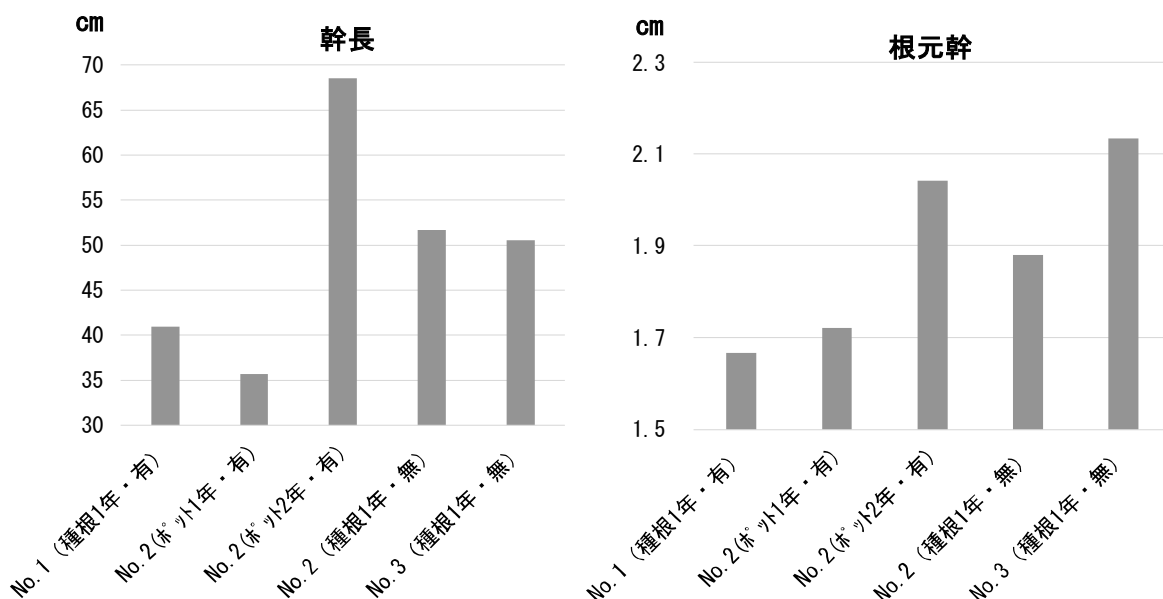


図-4 種根及びポット苗による生育状況比較
 (株の下にシートを敷いた場合は有、敷いていない場合は無)

ことができた。

今後は、タラノメの収穫量に着眼した研究を行う必要があると考える。

圃場 No. 2 で仕立てたタラノキ 1 年生株の約 2 割は、根元径が 3 cm を超える優良株だった。タラノメの収穫には 1 年 4 か月の期間を要するため、初年度から比較的大きなタラノメが収穫できることは大きな魅力である。このことから、今後どの程度の大きさの種根から 1 年で根元径が 3 cm を超える優良株を仕立てられるのか検証を行っていく。

この他、幹を太くする施肥の方法について、タラノメの収量を最大にする剪定法についてなどを検証し、さらにタラノキを魅力ある山菜とすべき栽培手法のさらなる開発を進めていく。

引用文献

- 1) 長野県農政部(2023), 長野県農業の概要, 39-40
- 2) 吉良今朝芳(1998), 山菜・薬用植物・花き類の栽培技術 タラノキ, 社団法人全国林業改良普及協会林「林業技術ハンドブック」, 1861-1863
- 3) 藤嶋勇(1997), 新特産シリーズ タラノメ農文協, 24, 36-38, 87
- 4) 長野県林業総合センター, 社団法人長野県林業改良普及協会(2007), タラノキの栽培
- 5) 森林林業・木材辞典編集委員会(1993)「森林林業・木材辞典」, 115
- 6) 雪印種苗ホームページ, セスバニア種子(商品名: 田助)
- 7) 大矢信次郎・田中裕二郎・柳澤賢一・加藤健一(2023), 小面積皆伐地における低コスト・高収益更新モデルの構築, 長野県林業総合センター研究報告第 37 号, 7-8

長野県産カラマツ大径材から製材された心去り平角材の乾燥特性及び強度性能の解明

奥原祐司・吉田孝久・今井信^{*1}・山口健太^{*2}

今後、生産の増産が見込まれるカラマツ大径丸太の強度性能と、この大径材から製材された心去り平角材の乾燥特性及び曲げ強度性能を把握し、その利用有効性について検討した。

(1) 素材の大 (140 本) の縦振動ヤング係数の平均値±標準誤差は $12.0 \pm 0.13 \text{ kN/mm}^2$ 、中 (41 本) は $13.8 \pm 0.25 \text{ kN/mm}^2$ となり、現在の本県の素材の大及び中のカラマツ丸太の縦振動ヤング係数の平均は $E_f 130$ になると推測する。(2) 2 丁取りした心去り平角材の一方を蒸気圧力併用式乾燥ともう一方を蒸気式乾燥した結果、平均含水率は 12.6%と 15.0%となり、蒸気圧併用式乾燥は約 3 割以上の時間短縮が期待できる。また、強度性能については、目視等級の基準強度を満足し一部の試験材を除けば機械等級も満足した。(3) 2 丁取りした心去り平角材をガラスハウス乾燥した結果、約 6 カ月間で含水率 15%を下回り、強度性能では目視等級及び機械等級区分の基準強度をほぼ満足した。(4) 丸太の縦振動ヤング係数とそこから製材された 2 本の平角材の縦振動ヤング係数の平均値には相関関係が認められた。しかし、個々の平角材の曲げヤング係数では丸太の曲げヤング係数と必ずしも一致しない場合もあった。(5) 1 本の丸太から製材された実大材試験体と無欠点試験体について、実大材試験体の曲げヤング係数は無欠点試験体の範囲内にあり、また、実大材試験体の曲げ強さは 4 割強 (正角材に対しては約 2 割) 寸法効果により低下していた。

キーワード：カラマツ、心去り、平角材、中温乾燥、ガラスハウス乾燥

目次

緒言

第 1 章 丸太の強度性能

- 1.1 供試材
- 1.2 試験方法
- 1.3 結果と考察

第 2 章 蒸気式と蒸気圧力併用式乾燥特性の比較

- 2.1 供試材
- 2.2 試験方法
- 2.3 結果と考察

第 3 章 ガラスハウス乾燥の特性

- 3.1 供試材
- 3.2 試験方法
- 3.3 結果と考察

第 4 章 丸太と製材品の強度性能の関係

- 4.1 供試材
- 4.2 結果と考察

第 5 章 半径方向の強度性能

- 5.1 供試材
- 5.2 試験方法
- 5.3 結果と考察
- 5.4 無欠点試験体と実大材試験体の比較

まとめ

結言

緒言

長野県内人工林の過半を占めるカラマツ林は、13 齢級がピークとなる成熟期を迎えており、今後、伐採量の増大が見込まれるカラマツ大径材からは曲げヤング係数が高い丸太の生産が想定される。しかし、現在の主な用途は合板であり、構造用製材としての利用は少ない。

県内の製材工場で製造可能な心去り平角材は高い曲げヤング係数の活用を図り、かつ、高温セットによる割れ防止も不要なことから乾燥コスト面から有望と考えるが、建築材料をはじめとした用途には、その材質を把握しておく必要がある。平角材は、乾燥時間が長時間になることからコスト低減を目的に高温乾燥による強度低下¹⁾を考慮する必要がある。しかし、カラマツ心去り材における乾燥特性や強度性能に関わる文献は少ない(例えば 2, 3, 4)。

本報告では、第 1 章では、現在の本県のカラマツ丸太の強度性能を把握し、第 2 章では、乾燥方法の違いによる乾燥時間の短縮や強度性能を検討した。第 3 章では、人工乾燥と天然乾燥の中間に位置する低コスト乾燥方法として化石燃料に依存しないガラスハウスを使用した乾燥⁵⁾及びその強度性能を検討した。第 4 章では丸太と製材品の強度性能の関係を検討し、第 5 章では無欠点試験片による大径材の半径方向の強度分布や実大材との強度比較を行い、今後の心去り平角材の利用方法を探った。

^{*1}元 林業総合センター木材部、^{*2}現 北アルプス地域振興局林務課

第1章 丸太の強度性能

1.1 供試材

長野県産のカラマツ（産地：東信，中信，北信）の素材の日本農林規格（以下，JAS と標記）における中及び大の素材 181 本を対象とした。なお，番玉の区分はしていない。

1.2 試験方法

素材の JAS の縦振動ヤング係数試験に準じて山土場及び製材工場の土場で調査した。丸太の測定方法は，両木口の短径及び長径並び材長をコンベックスにより 1 mm 単位，固有振動数は ATA 社製 HG-2020 変形タイプ等により 0.1Hz 単位，重量はクレーンスケールにより 0.5 kg 単位で測定した（写真 1-1）。なお，次式により，見かけの密度（ ρ ）及び縦振動ヤング係数（ E_{fr-L} ）を計算した。また，第 1 章以降のデータの分析には Microsoft® Excel® for Microsoft 365 MSO 64 ビット及び 4Steps エクセル統計（第 4 版）を使用し，2 郡の比較には，F 検定により等分散性の有無を確認した後，対応のない t 検定（両側検定）によって確認し， $p < 0.05$ を統計的に有意であると判断した。

また，相関関係については，正規性の検定により正規分布の有無を確認（ $p < 0.05$ ）し，ピアソンの相関係数またはスピアマンの順位相関係数の検定（両側検定）によって確認し， $p < 0.05$ を統計的に有意であると判断した。

$$\rho = \frac{W}{D^2 \times \frac{\pi}{4} \times L \times \frac{1}{10000}}$$

ρ : 見かけの密度 (kg/m^3)

W : 各本の重量 (kg)

D : 両木口の最大径と最小系の平均を平均した値 (cm)

π : 3.14 とする。

L : 材長 (m)

$$E_{fr-L} = [(2 \times f_L \times L)^2 \times \rho / n^2] / 10^9$$

E_{fr-L} : 縦振動ヤング係数 (GPa 又は $10^3 N/mm^2$)

L : 材長 (m)

f : 振動数の n 次の固有振動数 (Hz)

ρ : 見かけの密度 (kg/m^3)

n : 固有振動数の次数

1.3 結果と考察

今回の供試材の産地割合は，東信地域 76%，中信地域 13%，北信地域 11% であり，素材の割合は大が 77%，中が 23% であった。素材の大及び中の測定結果を表 1-1 及び 2 に示す。

素材の JAS の縦振動ヤング係数区分による分布を図 1-1 及び 2 に示す。素材の大で最も多かったのは Ef130 であり，全体の 39% を占めており，次いで Ef110，Ef150 であった。素材の中で最も多かったのは Ef150 であり，全体の 56% を占めており，次いで Ef130 であった。

見かけの密度と縦振動ヤング係数の関係を図 1-3 に示す。素材の大についてスピアマンの順位相関係数の検定を用いた結果，両者の相関係数が 0.25 となり正の相関が認められ（ $p < 0.01$ ），また，素材の中について，ピアソンの相関係数の検定を用いた結果，両者の相関係数が 0.45 となり正の相関が認められた（ $p < 0.01$ ）。よって，見かけの密度が増加すると縦振動ヤング係数も増加することが示唆された。

末口年輪数と縦振動ヤング係数の関係を図 1-4 に示す。素材の大及び中の末口年輪数と縦振動ヤング係数の相関関係について，スピアマンの順位相関係数及びピアソンの相関係数の検定を用いた結果，両者には相関が認められなかった。よって，長伐期により高齢化しても必ずしも縦振動ヤング係数は増加しないことが示唆された。

今回の試験結果から素材の最大の縦振動ヤング係数の平均値は $12.0 kN/mm^2$ ，標準誤差は $0.13 kN/mm^2$ ，中の縦振動ヤング係数の平均値は $13.8 kN/mm^2$ ，標準誤差は $0.25 kN/mm^2$ となり，現在の本県の素材の大及び中のカラマツ丸太の縦振動ヤング係数の平均は Ef130 になると推測する。



写真 1-1 測定状況

現在のカラマツ丸太の主な用途は構造用合板であるが、高い縦振動ヤング係数のカラマツ丸太は広く活かれているとは言い難い。今後は、縦振動ヤング係数の測定等のコスト高の問題は残るが、ヤング係数に対応したカスケード利用を推進する必要がある。

なお、この供試材の一部から得られた平角材と丸太の関係は第 4 章の丸太と製材品の強度性能の関係の中で検討した。

表 1-1 素材の太の測定結果

	末口 (cm)		年輪数 (年)	元口 (cm)		長さ (m)
	短径	長径		短径	長径	
平均値	38.4	39.9	66	43.8	45.5	4.256
最大値	52.5	55.0	92	61.0	65.5	5.315
最小値	30.3	32.5	44	34.5	36.5	3.982
標準偏差	3.2	3.2	11.5	4.9	5.4	0.4
変動係数 (%)	8.3	7.9	17.5	11.2	11.9	8.5
供試体数	140	140	140	140	140	140

	重量 (kg)	固有振動数 (Hz)	ρ (kg/m ³)	E_{fr-L} (kN/mm ²)
平均値	418.3	489	705	12.0
最大値	747.5	600	927	16.5
最小値	259.5	341	528	8.5
標準偏差	105.9	56.5	89.6	1.5
変動係数 (%)	25.3	11.6	12.7	12.8
供試体数	140	140	140	140

表 1-2 素材の中の測定結果

	末口 (cm)		年輪数 (年)	元口 (cm)		長さ (m)
	短径	長径		短径	長径	
平均値	24.1	25.1	48	27.1	28.1	4.092
最大値	29.5	32.5	57	33.0	36.5	4.145
最小値	17.0	17.0	33	20.5	20.5	4.03
標準偏差	2.6	3.0	5.4	2.8	3.1	0.0
変動係数 (%)	10.8	11.8	11.2	10.3	10.9	0.6
供試体数	41	41	41	41	41	41

	重量 (kg)	固有振動数 (Hz)	ρ (kg/m ³)	E_{fr-L} (kN/mm ²)
平均値	182.0	502	821	13.8
最大値	300	585.9	996	18.0
最小値	110.5	414.1	660	9.9
標準偏差	46.1	30.8	90.9	1.6
変動係数 (%)	25.3	6.1	11.1	11.6
供試体数	41	41	41	41

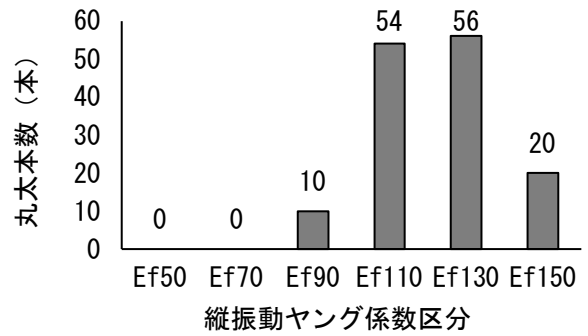


図 1-1 素材の太の縦振動ヤング係数分布

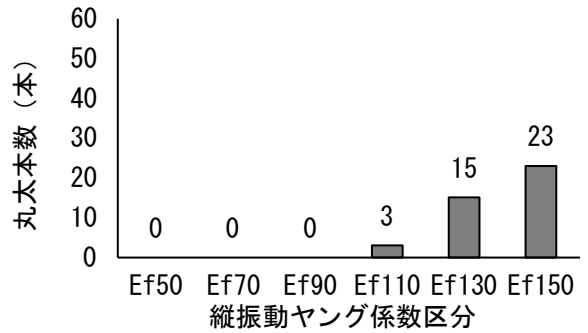


図 1-2 素材の中の縦振動ヤング係数分布

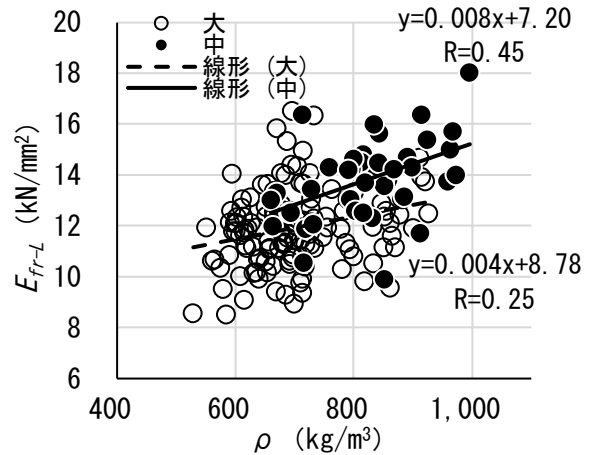


図 1-3 ρ と E_{fr-L} の関係

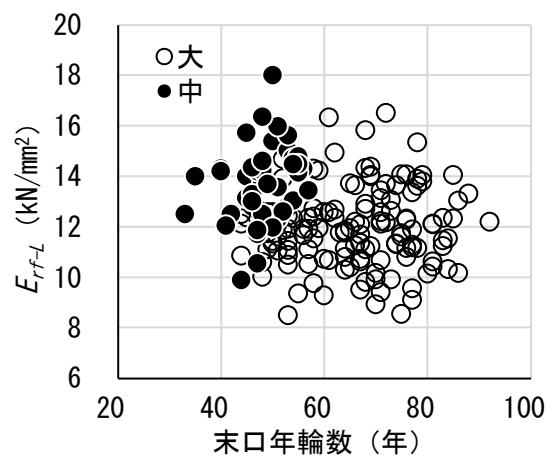


図 1-4 末口年輪数と E_{fr-L} の関係

第2章 蒸気式と蒸気圧力併用式乾燥特性の比較

試験の概要を表 2-1 示す。

表 2-1 試験区分

樹種	カラマツ（心去り平角材）	
製材寸法	135×255×4,000mm	
乾燥方法	蒸気式	蒸気圧力併用式
乾燥温度	90℃	90℃
丸太本数	12本	
製品本数	12本	12本

2.1 供試材

東信地域のカラマツ丸太 12 本（写真 2-1）を第 1 章の 1.2 試験方法により測定した。

図 2-1 に示した木取りにより心去り平角材（135×255×4,000 mm）を 2 本ずつ、計 24 本を側面定規で製材した。



写真 2-1 供試材（丸太）

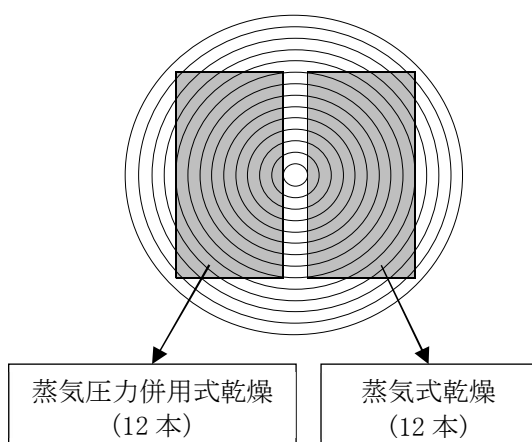


図 2-1 木取り図

2.2 試験方法

2.2.1 乾燥試験

図 2-1 のとおり 1 本の丸太から製材した 2 本の平角材について一方を 90℃の蒸気圧力併用式中温乾燥（以下、蒸気圧力併用式と標記）とし、もう一方を 90℃の蒸気式中温乾燥（以下、蒸気式と標記）を行った（写真 2-2）。

乾燥スケジュールを表 2-2 及び 3 に示した。しかし、初期に設定した乾燥スケジュールでは目標含水率の 15%以下とならなかったため、表中での再乾燥を両者 90℃/60℃3.5 日間の蒸気式中温乾燥を追加で行った。

乾燥前後に寸法，質量，縦振動ヤング係数，含水率計による含水率を測定し，乾燥後の形質変化を蒸気圧力併用式と蒸気式の結果について比較検討した。また，全乾法による含水率，水分傾斜の測定は，曲げ強度試験後の非破壊部から切り出して実施した。

表 2-2 乾燥スケジュール（蒸気圧力併用式）

項目	乾球温度 (°C)	湿球温度 (°C)	温度差 (°C)	圧力 (kPa)	時間 (h)
蒸煮	95	95	0	0	12
中温乾燥	90	60	30	-70	216
再乾燥	90	60	30	-70	84

312時間
13日間

表 2-3 乾燥スケジュール（蒸気式）

項目	乾球温度 (°C)	湿球温度 (°C)	温度差 (°C)	時間 (h)
蒸煮	95	95	0	12
中温乾燥	90	60	30	336
再乾燥	90	60	30	84

432時間
18日間

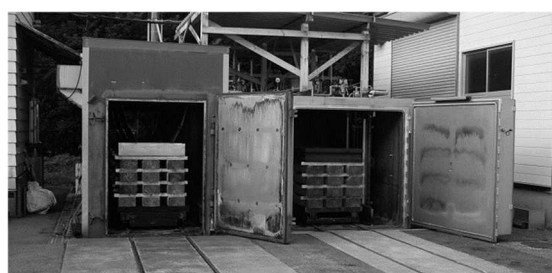


写真 2-2 左：蒸気式乾燥機
右：蒸気圧力併用式乾燥機

2.2.2 強度試験

試験体は、120×240mm の断面に整形し実施する予定だったが、ねじれの発生が想定よりも大きかったため、115×235×4,000mm に整形して行った。

試験方法は、(財)日本住宅木材・技術センターの「構造用木材の強度試験マニュアル」に準じて、実大材曲げ強度試験機 UH-1000kNA (島津製作所製) を用い、下部支点間距離 3,900 mm, 上部荷重点間距離 1,300 mm の 3 等分点 4 点荷重方式で実施した。なお、上部及び下部支点の形状はフラットである。載荷方向はエッジワイズとし、上下の方向はランダムとした。載荷速度は 15 mm/分とした(図 2-2)。曲げ強さ (f_m)、曲げヤング係数 (E_m)、縦振動ヤング係数 (E_{fr}) は以下の式により求めた。また、データの分析は第 1 章 1.2 試験方法と同様とし、乾燥方法の違いによる曲げヤング係数、曲げ強さ、含水率、全乾密度について比較検討した。

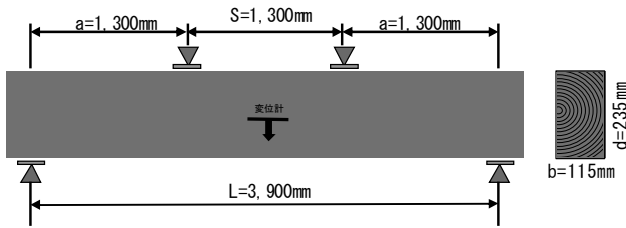


図 2-2 曲げ試験方法

$$f_m = \frac{aF_{ult}}{2Z}$$

a : 支点から荷重点までの距離 (mm)

f_m : 曲げ強さ (N/mm^2)

F_{ult} : 最大荷重

Z : 断面係数, 矩形断面では $bd^2/6$, ただし b は材幅

$$E_m = \frac{a(3L^2 - 4a^2)(F_2 - F_1)}{48I(W_2 - W_1)}$$

E_m : せん断影響を含んだ曲げヤング係数 (kN/mm^2)

a : 支点から荷重点までの距離 (mm)

I : 断面 2 次モーメント, 矩形断面では $bd^3/12$

$F_2 - F_1$: 荷重変形曲線の直線部分の荷重の増分。

F_1 は $F_{ult,est}$ (最大荷重) の約 10%, F_2 は約 40%

$W_2 - W_1$: $F_2 - F_1$ に対応する変形の増分

$$E_{fr} = (2fl)^2 \rho / 10^9$$

E_{fr} : 縦振動ヤング係数 (kN/mm^2)

l : 材長 (m)

f : 振動数の 1 次の固有振動数 (Hz)

ρ : 見かけの密度 (kg/m^3)

2.3 結果と考察

2.3.1 丸太の特性

丸太の各測定結果を表 2-4 に示す。産地は東信地域であり、丸太は素材 JAS の大の素材であった。

素材 JAS の縦振動ヤング係数により区分した分布を図 2-3 に示す。最も多かったのは Ef110 であり、全体の 75% を占めており、次いで Ef130 であった (写真 2-3)。

表 2-4 丸太の各測定結果

	末口			元口		長さ (m)
	短径 (cm)	長径 (cm)	年輪数 (年)	短径 (cm)	長径 (cm)	
平均値	38.2	40.1	56	44.9	47.3	4.120
最大値	42.0	42.3	64	48.1	53.2	4.169
最小値	30.3	38.0	50	40.9	41.9	4.072
標準偏差	3.1	1.5	4.2	2.6	3.2	0.03
変動係数 (%)	8.2	3.7	7.4	5.8	6.8	0.7
供試材数	12	12	12	12	12	12

	固有振動数 (Hz)	重量 (kg)	ρ (kg/m^3)	E_{fr-L} (kN/mm^2)
平均値	497	400.0	680	11.4
最大値	532	466.0	756	12.4
最小値	478	343.5	637	10.5
標準偏差	16.3	35.8	34.2	0.6
変動係数 (%)	3.3	8.9	5.0	4.8
供試材数	12	12	12	12

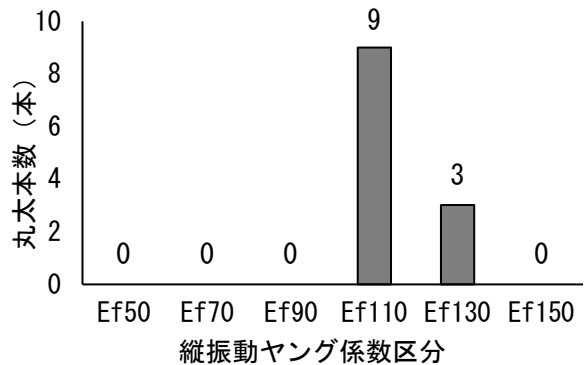


図 2-3 丸太の縦振動ヤング係数の分布



写真 2-3 No. 2 及び 8 供試材

2.3.2 乾燥試験

乾燥前の各測定値を表 2-5 及び 6 に示す。曲がり及び反りの測定箇所は図 2-4 のとおりである。曲がり、ねじれ、割れは無く、反りは、24 本中 16 の平角材に発生し、その発生方向は全て木表側に現れた。

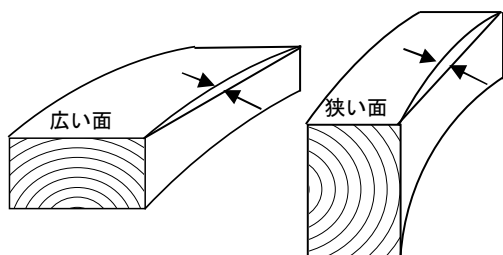


図 2-4 曲がり (左図), 反り (右図)

表 2-5 乾燥前の各測定値 (蒸気圧力併用式)

	Efr (kN/mm ²)	曲がり (mm)	反り (mm)	ねじれ (mm)	割れ (mm)	含水率計 含水率 (%)
平均値	11.24	0.0	2.6	0.0	0.0	43.3
最大値	12.23	0.0	6.0	0.0	0.0	51.0
最小値	10.11	0.0	0.0	0.0	0.0	34.5
標準偏差	0.73	0.0	2.2	0.0	0.0	4.9
変動係数 (%)	15.34	-	1.2	-	-	8.9
試験体数	12	12	12	12	12	12

表 2-6 乾燥前の各測定値 (蒸気式)

	Efr (kN/mm ²)	曲がり (mm)	反り (mm)	ねじれ (mm)	割れ (mm)	含水率計 含水率 (%)
平均値	10.71	0.0	2.8	0.0	0.0	44.2
最大値	12.19	0.0	5.0	0.0	0.0	58.5
最小値	8.87	0.0	0.0	0.0	0.0	33.5
標準偏差	1.10	0.0	1.9	0.0	0.0	6.1
変動係数 (%)	9.75	-	1.5	-	-	7.3
試験体数	12	12	12	12	12	12

含水率の経過を表 2-7 及び 8 に示す。再乾燥前の推定平均含水率±標準偏差は、蒸気圧力併用式は 9.5 日間で 17.6±4.0%、蒸気式は 14.5 日間で 20.3±2.8%であった。本試験では目標含水率 15%としていたが、今回の含水率がやや高いため追加で 3.5 日間の再乾燥を行った。再乾燥後の全乾法による平均含水率±標準偏差は、蒸気圧力併用式

で 12.6±3.4%、蒸気式で 14.9±2.7%となった。これにより蒸気圧併用式は 13 日間、蒸気式は 18 日間となり蒸気圧併用式は蒸気式に比べて、実際の乾燥日数や含水率の差等から判断して約 3 割以上の時間短縮が期待できる。なお、含水率が 15%の以上の試験材は、蒸気圧併用式が 12 本中 2 本、蒸気式が 12 本中 5 本であったが、蒸気圧併用式と蒸気式の含水率の平均値には、有意差は認められなかった (p=0.09)。

表 2-7 含水率経過 (蒸気圧力併用式)

	乾燥前 (%)	乾燥後 (%)	再乾燥後 (%)
平均値	45.8	17.6	12.6
最大値	56.1	25.4	20.3
最小値	38.0	12.3	7.4
標準偏差	5.9	4.0	3.4
変動係数 (%)	12.9	22.4	27.1
試験体数	12	12	12

表 2-8 含水率経過 (蒸気式)

	乾燥前 (%)	乾燥後 (%)	再乾燥後 (%)
平均値	47.3	20.3	14.9
最大値	55.0	25.8	19.8
最小値	43.0	17.1	11.6
標準偏差	3.8	2.8	2.7
変動係数 (%)	8.0	13.6	17.9
試験体数	12	12	12

乾燥後の水分傾斜の例を図 2-5 に示す。乾燥方法の違いによる水分傾斜の形状に大きな違いは見られず、全体含水率が高いほど水分傾斜も大きかった。

乾燥後の形質変化を表 2-9 及び 10 に示す。材面割れは、蒸気式に比べ蒸気圧併用式の方が多かったが、これらは、本来、割れが発生する木表側ではなく木裏側の髓付近に多く発生していた。また、髓が直線的ではないことから製材時に蒸気圧併用式の方に髓部分が含まれた試験体が多かったことや、仕上がり含水率の違いが木裏側に髓割れが発生した原因と推測される (写真 2-4)。

曲がりや反りの発生量については、挽き直し修正により使用可能な範囲にあったが、ねじれについては、既往の心持ち材の平角材より少なかった。

た。ねじれが 20 mm/4m を超える材にあっては修正挽きによっても削り残しが出る材があった（写真 2-5）。

乾燥方法の違いによる全乾密度を比較した結果、有意差は認められなかった（ $p=0.287$ ）。

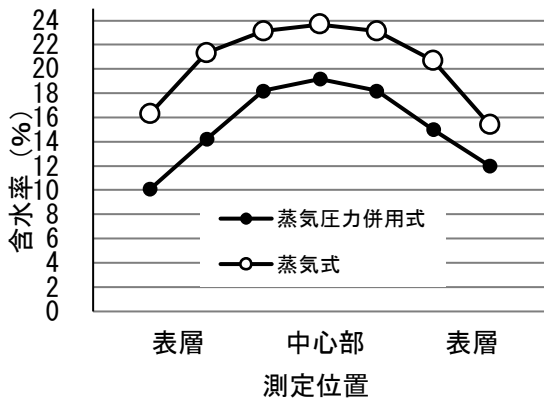
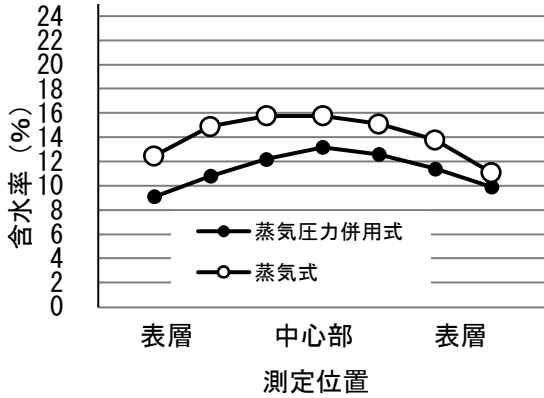


図 2-5 水分傾斜

表 2-10 乾燥後の各測定数値（蒸気式）

	曲がり (mm)	反り (mm)	ねじれ 狭(mm)	ねじれ 広(mm)	割れ (cm)
平均値	2.4	2.9	5.8	11.5	5.7
最大値	12.0	6.0	16.0	25.0	68.0
最小値	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
標準偏差	3.9	1.7	5.3	7.9	19.6
変動係数(%)	161.2	59.3	90.4	68.6	346.4
試験体数	12	12	12	12	12

	全乾密度 (kg/m ³)	平均年輪幅 (mm)
平均値	495	4.0
最大値	540	4.8
最小値	467	2.6
標準偏差	26.7	0.6
変動係数(%)	5.4	14.2
試験体数	12	12

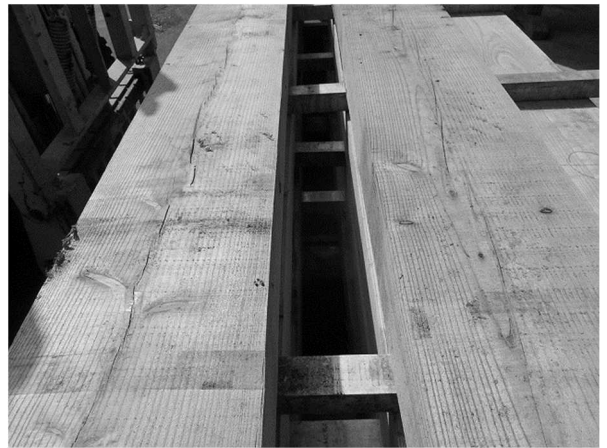


写真 2-4 木裏側の髓割れ

表 2-9 乾燥後の各測定結果（蒸気圧力併用式）

	曲がり (mm)	反り (mm)	ねじれ 狭(mm)	ねじれ 広(mm)	割れ (cm)
平均値	2.6	5.5	6.7	13.1	215.8
最大値	10	11	12	27	389
最小値	0	0	0	2	0
標準偏差	3.0	3.4	4.0	8.0	110.9
変動係数(%)	114.9	62.3	59.4	61.4	51.4
試験体数	12	12	12	12	12

	全乾密度 (kg/m ³)	平均年輪幅 (mm)
平均値	500	4.1
最大値	521	4.7
最小値	473	3.4
標準偏差	14.3	0.4
変動係数(%)	2.9	10.3
試験体数	12	12

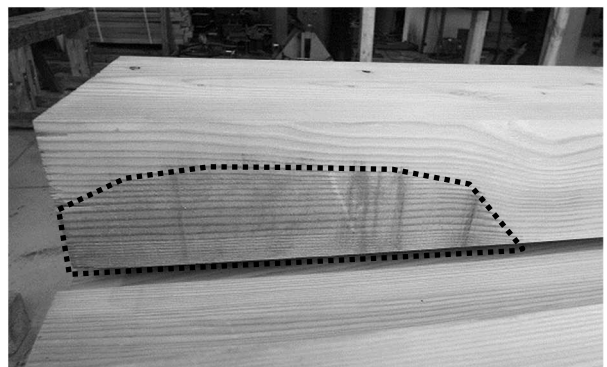


写真 2-5 狭い面の削り残し

2.3.3 曲げ強度試験

曲げ強さ (f_m) や曲げヤング係数 (E_m) 等の結果を表 2-11 及び 12 に示す。

曲げヤング係数の平均値±標準偏差は、蒸気圧力併用式乾燥材 12.46±0.93kN/mm²、蒸気式乾燥材 11.21±1.60kN/mm²であった。乾燥の違いによる曲げヤング係数について、せん断破壊及び目まわり等 (写真 2-6 及び 7) を除いたデータで比較した結果、有意差は認められなかった (p=0.028)。

曲げ強さは蒸気圧力併用式乾燥材で 48.6±11.2 N/mm²、蒸気式乾燥材で 40.4±9.0N/mm²であった。

曲げ強さと曲げヤング係数の関係を図 2-6 に示す。なお、せん断または、目まわりによる破壊は三角の白抜きの表示とした。

乾燥方法の違いはあるが、平成 12 年 5 月 31 日建設省告示 1452 号 (以下、告示と標記) の目視等級区分構造用製材 (以下、目視等級区分と標記) のカラマツの基準強度を両乾燥材とも満足し、また、せん断破壊や目まわりによる破壊等の試験材を除けば機械等級区分構造用製材 (以下、機械等級区分と標記) の基準強度もほぼ満足した。

表 2-11 曲げ強度結果 (蒸気圧力併用式)

	E_{fr} (kN/mm ²)	E_m (kN/mm ²)	f_m (N/mm ²)
平均値	13.41	12.46	48.6
最大値	15.07	14.54	62.4
最小値	11.86	11.12	26.0
標準偏差	0.87	0.93	11.2
変動係数 (%)	6.52	7.47	23.0
試験体数	12	12	12

表 2-12 曲げ強度結果 (蒸気式)

	E_{fr} (kN/mm ²)	E_m (kN/mm ²)	f_m (N/mm ²)
平均値	12.25	11.21	40.4
最大値	14.07	13.24	56.2
最小値	9.60	7.88	26.6
標準偏差	1.51	1.60	9.0
変動係数 (%)	12.30	14.25	22.3
試験体数	12	12	12

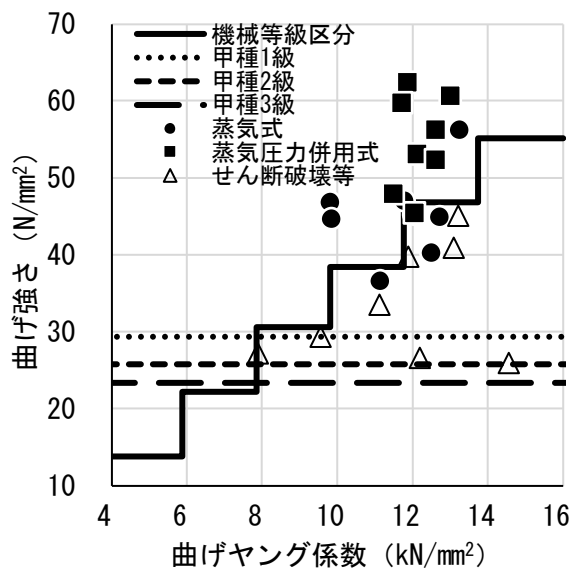


図 2-6 曲げヤング係数と曲げ強さの関係



写真 2-6 せん断破壊



写真 2-7 目まわりによる破壊

第 3 章 ガラスハウス乾燥の特性

試験区分を表 3-1 に示す。

表 3-1 試験区分

樹種	カラマツ (心去り平角材)
製材寸法	120×255×4,000mm
乾燥方法	ガラスハウス乾燥
乾燥温度	-0.5~40℃
丸太本数	11 本
製品本数	19 本*

※ 丸太 11 本の内 10 本から平角を製材し、内 1 本は乾燥用テストピースとして使用

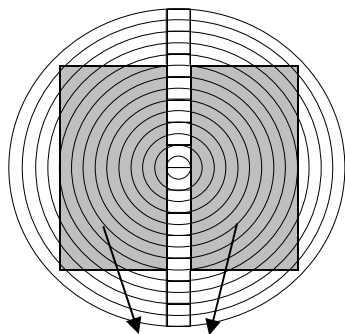
3.1 供試材 (実大材曲げ試験体)

木曽森林管理署管内 (王滝 2060-0 ろ 02-0) において林齢 96 年生の林分から生産されたカラマツの丸太 11 本 (写真 3-1) を第 1 章の 1.2 試験方法により測定した。

図 3-1 に示した木取りにより 10 本の丸太から心去り平角材 (120×255×4,000mm) を 2 本ずつ、計 20 本を側面定規で製材し、丸太 No. に-1 及び-2 を追記した。



写真 3-1 供試材 (丸太)



ガラスハウス乾燥 (20 本)

図 3-1 木取り図

3.2 試験方法

3.2.1 乾燥試験

製材後は、ヤニ滲出防止のため、蒸気式乾燥機で 90℃蒸煮を 12 時間実施し、その後、ガラスハウス内に静置し、2019.2.8 から 2020.1.27 まで乾燥を実施した (写真 3-2)。乾燥状況を確認するため、試験材 20 本の内、3 本の試験体 (No.4-2, 10-1, 11-2) の質量を定期的に測定し、平衡含水率に達した後に No.11-2 を端部から 1m の部分で全乾法による含水率試験片等 (図 3-2) を切り出し、残りの約 3m 試験材の切断面にはシリコンによりシーリングした後、他の試験体と同様に屋外に静置し、3 カ月間養生を実施後長さ方向の水分傾斜を測定した (図 3-2)。また、ガラスハウスの温湿度を計測するため、3 個の温湿度計を上段、中段、下段に設置した (図 3-3)。なお、ガラスハウスは、背面が建物の外壁を利用し、正面口はビニールによる巻き上げ式、天井及び側面はガラス製となっており、ファン等の送風装置はないが、天井窓があり開閉可能である。



写真 3-2 ガラスハウス乾燥機

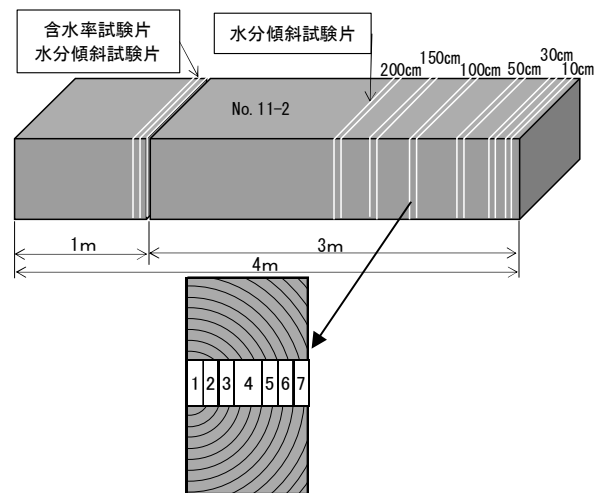


図 3-2 含水率及び水分傾斜試験片

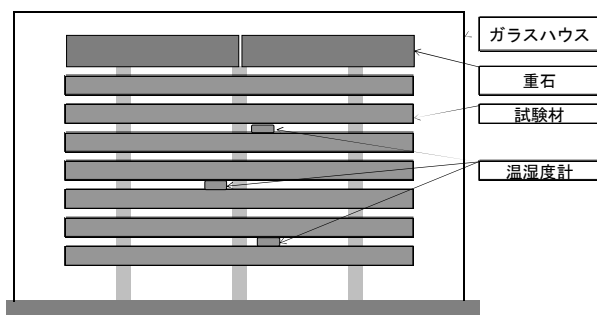


図 3-3 ガラスハウス正面図

3.2.2 曲げ強度試験

図 3-4 のとおり実施 (写真 3-3) し、追加でヨークを用いて上部荷重点間のたわみ量も測定した (写真 3-4)。また、载荷方向はエッジワイズ、かつ、木表側を全て東向きに統一して実施した。曲げ試験前に上部荷重点間において、製材の JAS の目視等級区分の規格である甲種構造材の基準のⅡ種に準じて節による等級区分を行った (写真 3-5)。

また、データの分析は第 1 章 1.2 試験方法と同様に行い、曲げヤング係数、曲げ強さ、含水率、全乾密度について比較検討した。

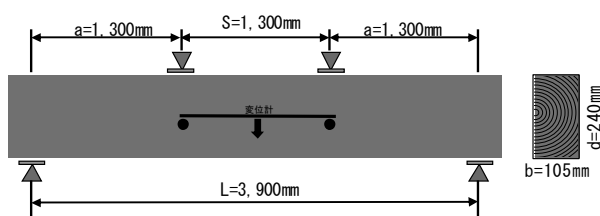


図 3-4 曲げ試験方法

曲げモーメントが一定になる荷重点間のたわみ量からせん断変形の影響を含まない曲げヤング係数 (E_b) は以下の式により求めた。

$$E_b = \frac{al^2(F_2 - F_1)}{16I(W_2 - W_1)}$$

E_b : 曲げモーメントが一定になる荷重点間のたわみ量からせん断変形の影響を含まない曲げヤング係数 (kN/mm^2)

I : 断面 2 次モーメント, 矩形断面では $bd^3/12$

a : 荷重点と支点の距離 (mm)

l : 荷重点内の変位量測定区間の長さ (mm)

$F_2 - F_1$: 荷重変形曲線の直線部分の荷重の増分。

F_1 は $F_{\text{ult.est}}$ (最大荷重) の約 10%, F_2 は約 40%

$W_2 - W_1$: $F_2 - F_1$ に対応する変形の増分

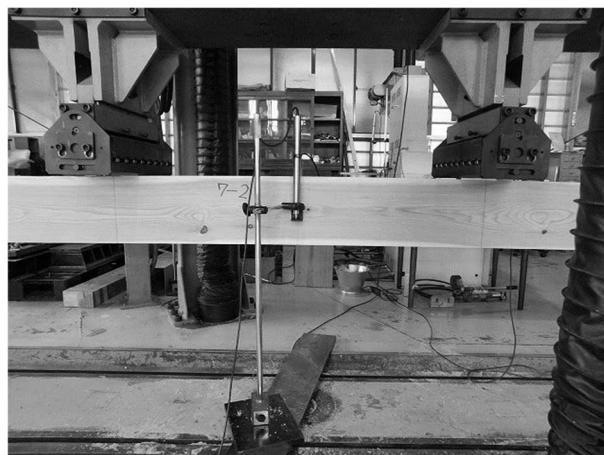


写真 3-3 木表側で全体のたわみ測定

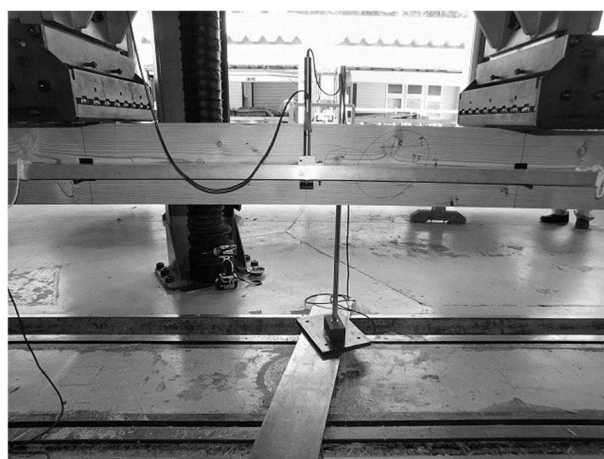


写真 3-4 木裏側で荷重点間のたわみ測定 (ヨーク)

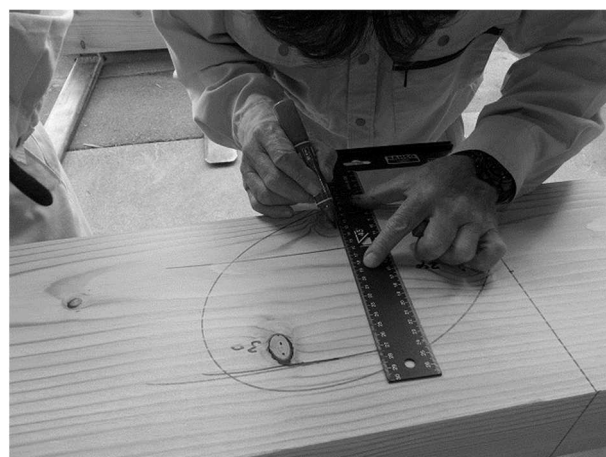


写真 3-5 荷重点間の節の測定

3.3 結果と考察

3.3.1 丸太の特性

丸太の各測定結果を表 3-2 に示す。産地は中信地域であり、全供試材が素材 JAS の大の素材であった。素材 JAS の縦振動ヤング係数により区分した分布を図 3-5 に示す。最も多かったのは Ef110 であり、全体の 45% を占めており、次いで Ef150 であった。

写真 3-6~9 に縦振動ヤング係数区分の木口写真を示す。目視により縦振動ヤング係数の高低を判断することは困難であった。

表 3-2 丸太の各測定結果

	末口			元口		長さ (m)
	短径 (cm)	長径 (cm)	年輪数 (年)	短径 (cm)	長径 (cm)	
平均値	40.5	41.9	77	43.9	45.6	4.145
最大値	37.8	38.0	71	41.2	41.5	4.09
最小値	47.0	50.0	86	48.5	51.0	4.18
標準偏差	2.9	3.4	4.5	2.4	3.2	0.03
変動係数(%)	7.2	8.0	5.8	5.4	7.1	0.6
供試体数	11	11	11	11	11	11

	固有振動 数 (Hz)	重量 (kg)	ρ (kg/m ³)	E_{fr-L} (kN/mm ²)
平均値	459	502.9	832	11.4
最大値	402	424.0	787	12.4
最小値	502	673.0	870	10.5
標準偏差	32.7	78.1	31.4	0.6
変動係数(%)	7.1	15.5	3.8	4.8
供試体数	11	11	11	11

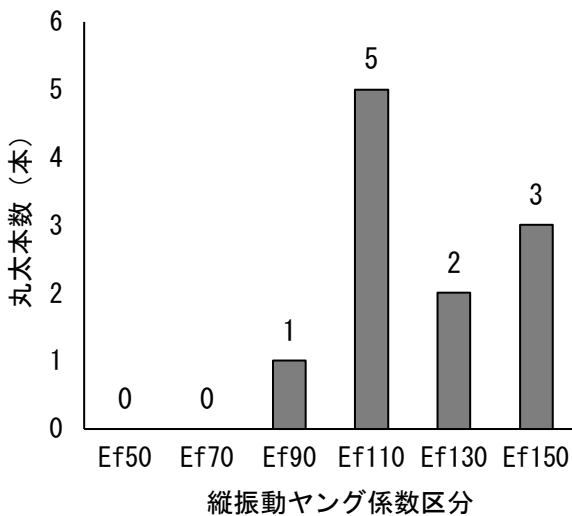


図 3-5 丸太の縦振動ヤング係数の分布



写真 3-6 Ef90 の供試材



写真 3-7 Ef110 の供試材



写真 3-8 Ef130 の供試材



写真 3-9 Ef150 の供試材

3.3.2 乾燥試験

乾燥前の各測定結果を表 3-3 に示す。縦振動ヤング係数（平均値±標準偏差，以下同様）は $11.88 \pm 1.58 \text{ kN/mm}^2$ ，曲がり は $0.4 \pm 0.8 \text{ mm}$ ，反りは $3.5 \pm 2.1 \text{ mm}$ であった。

テストピース 3 本の全乾法による含水率の経過を図 3-6 に示す。3 本の内 2 本（No.4-2 及び 10-2）が約 90 日で含水率 15% を下回った。残りの 1 本（No.11-2）は約 180 日で下回った。

乾燥開始後約 350 日（約 12 カ月）経過後の水分傾斜を見ると中心部の含水率は 15% を下回っていた（図 3-7）。テストピースの全乾密度を表 3-4 に示す。最も乾燥の遅い No.11-2 の全乾密度は 484 kg/m^3 であり，これはテストピースの中では中間の値の試験材であった。今回の試験結果から乾燥の遅い材も含めて約 6 カ月間で含水率 15% を下回ると推測される。

約 350 日（約 12 カ月）経過後の木口から長さ方向（10, 30, 50, 100, 150, 200 cm）の水分傾斜を図 3-8 に示す。木口から長さ方向に 50 cm 以降はほぼ同じ水分傾斜になった。なお，参考までにガラスハウス内の 2019.4.18～2020.4.18 の一年間の温湿度結果を表 3-5 に示す。

全試験材の約 12 カ月後の含水率等の測定結果を表 3-6 に示す。含水率（平均値±標準偏差，以下同様） $12.3 \pm 0.2\%$ ，全乾密度 $492 \pm 24 \text{ kg/m}^3$ ，平均年輪幅 $3.50 \pm 0.74 \text{ mm}$ であった。

約 6 カ月間で全試験材が含水率 15% を下回っており，製材の JAS（構造用製材 SD15）の基準を満足していた。

表 3-3 乾燥前の各測定結果

	Efr (kN/mm^2)	曲がり (mm)	反り (mm)	含水率計 含水率 (%)
平均値	11.88	0.4	3.5	43.2
最大値	14.40	3.0	8.0	56.0
最小値	9.06	0.0	0.0	29.0
標準偏差	1.58	0.8	2.1	6.6
変動係数(%)	13.32	205.2	59.0	15.3
試験体数	20	20	20	20

表 3-4 テストピースの全乾密度

No.	4-2	10-1	11-2
全乾密度 (kg/m^3)	537	469	484

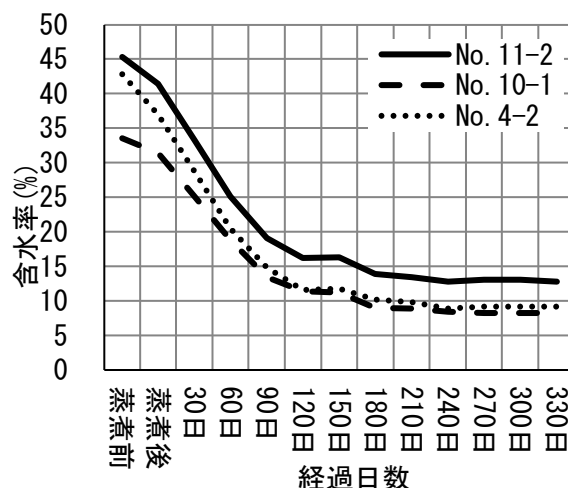


図 3-6 含水率の経過図

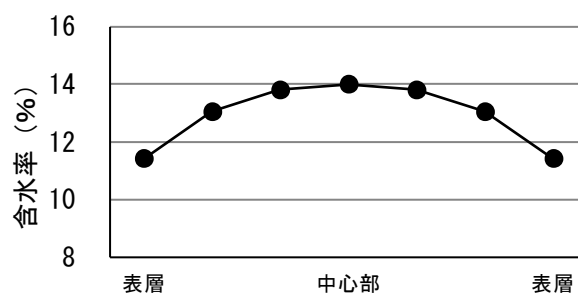


図 3-7 水分傾斜（約 12 カ月後）

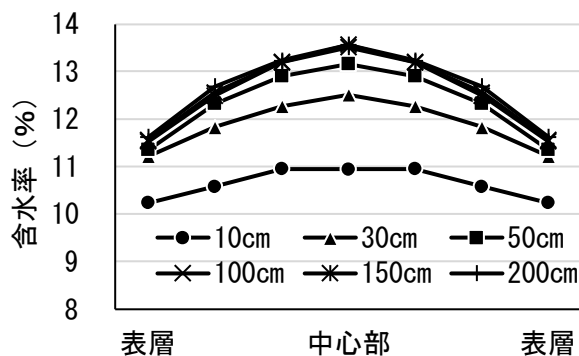


図 3-8 長さ方向の水分傾斜（約 12 カ月後）

表 3-5 ガラスハウス内の温湿度

温度 (°C)	平均値	下段	中段	上段
平均値	16.8	16.2	16.7	17.4
最大値	39.5	38.1	39.2	41.6
最小値	-5.1	-5.7	-5.2	-4.5
標準偏差	9.13	9.04	9.13	9.26
変動係数 (%)	54.42	55.74	54.55	53.27
データ数	8784	8784	8784	8784
湿度 (%)	平均値	下段	中段	上段
平均値	55.5	57.3	55.7	53.6
最大値	97.0	97.8	95.6	97.5
最小値	14.2	14.7	14.5	13.1
標準偏差	15.87	16.30	15.29	16.20
変動係数 (%)	28.58	28.43	27.46	30.25
データ数	8784	8784	8784	8784

表 3-6 含水率等測定結果

	含水率 (%)	全乾密度 (kg/m ³)	平均年輪幅 (mm)
平均値	12.3	492	3.5
最大値	12.7	539	5.2
最小値	11.7	465	2.6
標準偏差	0.2	24	0.7
変動係数(%)	2.0	4.8	21.2
試験体数	19	19	19

乾燥後の形質変化を表 3-7 に示す。

曲がり及び反りは、使用上問題ない数値であった。また、ねじれは、S 旋回と Z 旋回があったが、使用上問題ない数値となった。

表 3-7 乾燥後の各測定結果

	曲がり (mm)	反り (mm)	ねじれ 広(mm)	ねじれ 狭(mm)
平均値	0.6	2.6	3.9	2.2
最大値	3	8	15	7
最小値	0	0	0	0
標準偏差	1.1	2.3	4.7	2.4
変動係数(%)	176.7	88.9	119.0	111.7
試験体数	19	19	19	19

3.3.3 曲げ強度試験

上部荷重点間の節の等級を図 3-9 に示す。2 級及び 3 級が全体の 90%であった。しかし、曲げ試験の結果、上部荷重点間の外の節で破壊された試験材があり、これは、狭い材面の径比 70%を超える節であったことから、この試験材は格外とした(写真 3-10)。

曲げヤング係数 (E_m , E_b) 及び曲げ強さ (f_m) 等の結果を表 3-8 に示す。それぞれの平均値±標準偏差は、曲げヤング係数 (E_m)

12.29±1.62kN/mm², 曲げヤング係数 (E_b)

13.04±1.93kN/mm², 曲げ強さ (f_m) 51.1±10.7

N/mm², また、曲げヤング係数 (E_m) と曲げ強さ (f_m) の関係を図 3-10 に示す。なお、図中の×の凡例は、格外及び荷重点外の節から破壊した試験体である(写真 3-11)。

平角の縦振動ヤング係数 (E_{fr}) と曲げヤング係数 (E_m) の関係を図 3-11 に示す。構造用木材の強度試験マニュアル⁶⁾にあるとおり E_{fr} の方が高くなり、13.0~4.4%の範囲(平均値±標準偏差 8.2±2.3%)となった。また、相関係数が 0.988 となり両者には極めて強い正の相関があり ($p < 0.01$), カラマツの心去り平角材の E_{fr} を測定する

ことで曲げヤング係数を推定することが可能であると示唆された。

平角材の曲げヤング係数 (E_m) と曲げヤング係数 (E_b) の関係を図 3-12 及び 13 に示す。 $E_b > E_m$ となった(1つの試験体を除く)。

全乾密度と曲げヤング係数 (E_m) の関係を図 3-14 に示す。ピアソンの相関係数により確認したところ両者の相関係数 0.57 となり正の相関が認められた ($p=0.01$)。

平均年輪幅と曲げヤング係数 (E_m) の関係を図 3-15 に示す。ピアソンの相関係数により確認したところ両者の相関係数 0.47 となり負の相関が認められた ($p=0.07$)。

ガラスハウス乾燥を実施した結果、節の等級の違いはあるが、告示の目視等級区分の基準強度を満足し、また、一部の試験材を除けば機械等級区分の基準強度もほぼ満足した。

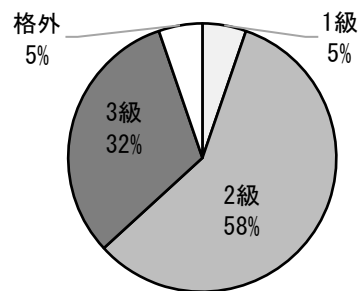


図 3-9 節等級区分



写真 3-10 荷重点外の狭い面の節(格外)

表 3-8 曲げ試験結果

	全乾密度 (kg/m ³)	E_{fr} (kN/mm ²)	E_m (kN/mm ²)	E_b (N/mm ²)	f_m (N/mm ²)
平均値	492	13.30	12.29	13.04	51.1
最大値	539	16.41	15.06	16.02	70.7
最小値	465	9.98	9.39	9.42	33.2
標準偏差	23.8	1.79	1.62	1.93	10.7
変動係数(%)	4.8	13.49	13.21	14.80	20.9
試験体数	19	19	19	19	19

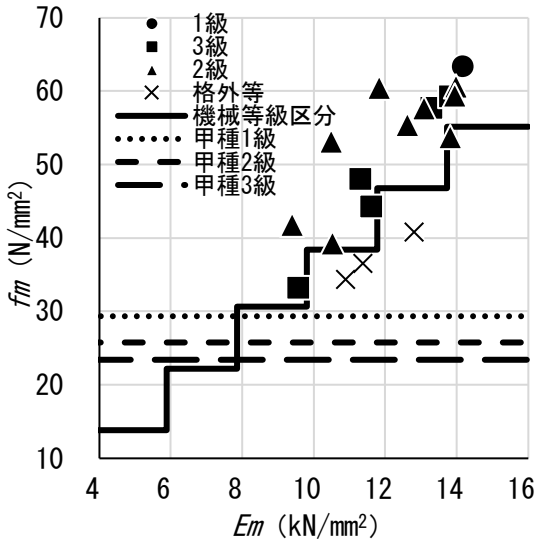


図 3-10 E_m と f_m の関係

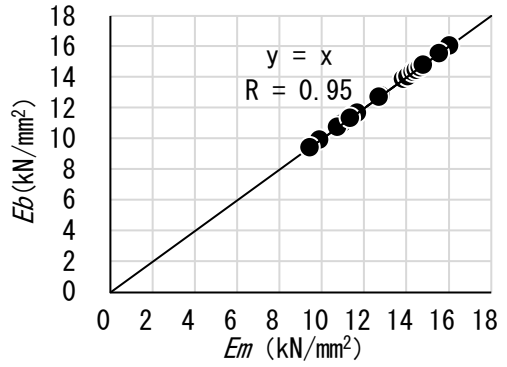


図 3-12 E_m と E_b の関係

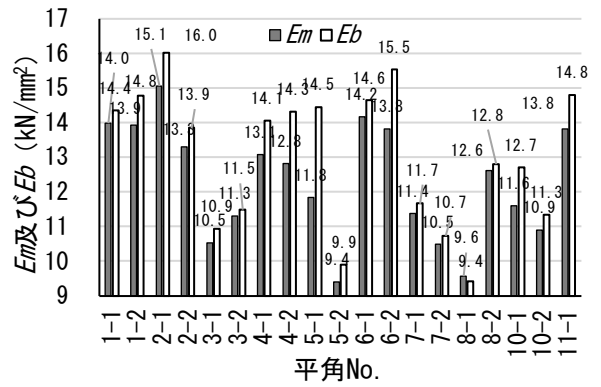


図 3-13 各平角の E_m と E_b の関係

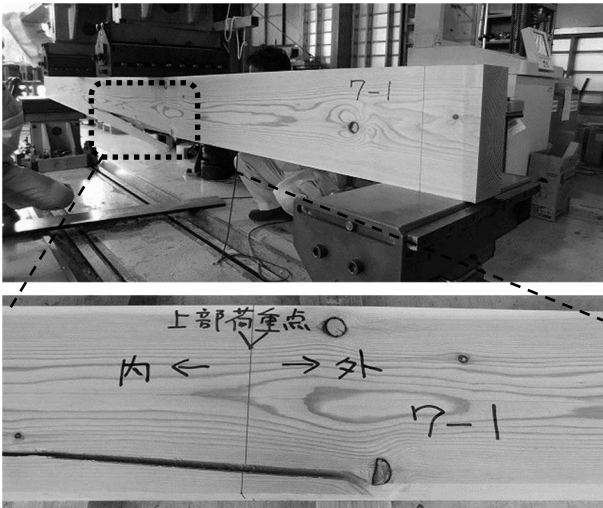


写真 3-11 荷重点外からの破壊

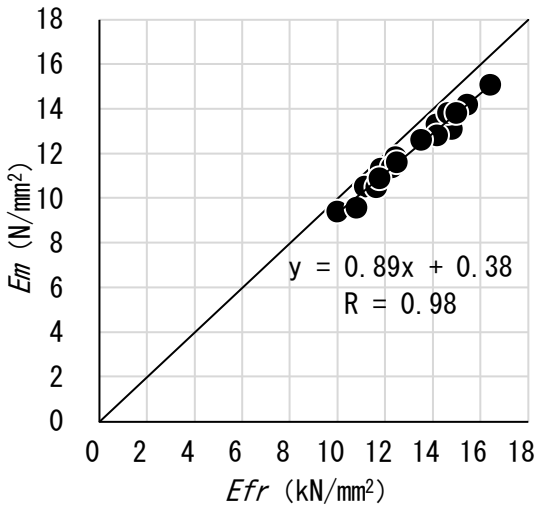


図 3-11 E_{fr} と E_m の関係

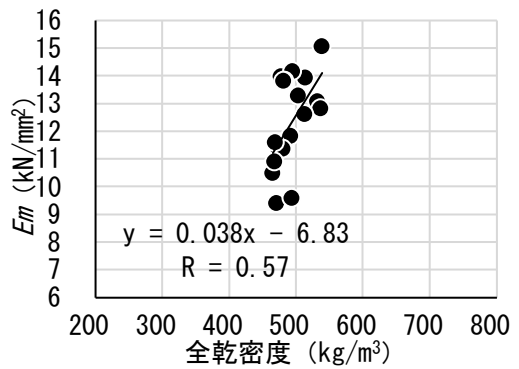


図 3-14 全乾密度と E_m の関係

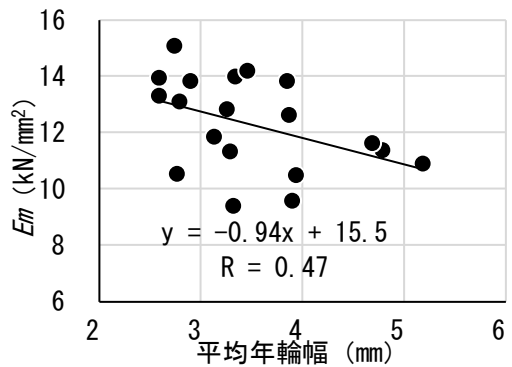


図 3-15 平均年輪幅と E_m の関係

第 4 章 丸太と製材の強度性能の関係

4.1 供試材

第 2 章及び第 3 章の丸太と平角材の強度性能の関係について検討した。

4.2 結果と考察

第 3 章の丸太 9 本から製材された平角材 18 本について、曲げヤング係数 (E_m) 及び全乾密度を 図 4-1 に示す。1 本の丸太から 2 本の心去り平角材を試験材としたがこのときの両者の曲げヤング係数は、ほぼ同じではないかと予想したが、丸太によってはかなり差が出る試験材もあった。例えば試験体の No.2, 5, 8 の曲げヤング係数の差はそれぞれ 1.77kN/mm^2 , 2.44kN/mm^2 , 3.04kN/mm^2 であった。これらの大きな曲げヤング係数の差は全乾密度と同様の差が見られたことから (図 4-2), 全乾密度の影響が大きいと考えられる。

1 本の丸太から製材された 2 丁取りの平角材について、両者の関係を見ると、木取りの状況から見ても未成熟材部と成熟材部の割合が大きく異なることは無かった (写真 4-1)。また、丸太状態では偏心や曲がりもほとんど見られなかった。

2 丁取りの心去り平角材であっても両者のヤング係数の標準偏差が 1.62kN/mm^2 となった (表 3-8)。これは、節による影響も考えられるが要因は不明である。

2 丁取りされた平角材について、曲げ強さ (f_m) を 図 4-3 に示す。両者には大きな差がみられる試験材が多かった。曲げ強さが低い No.2, 5, 8 については、曲げヤング係数の差が曲げ強さに影響したことは推測できる。他の材については、節の位置が材縁や狭い面の下部支点側にある場合に多く存在した試験材が低い数値になったことから節の大きさや位置が影響したと推測される。

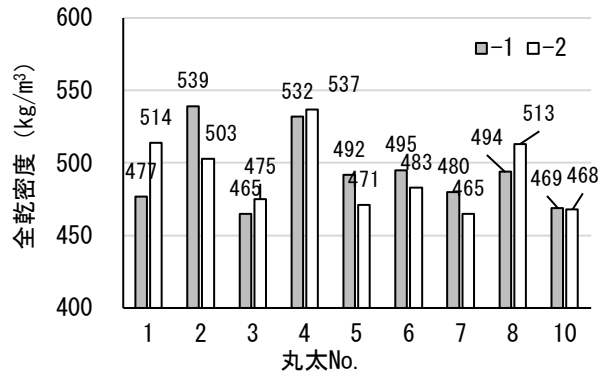


図 4-2 各丸太の全乾密度

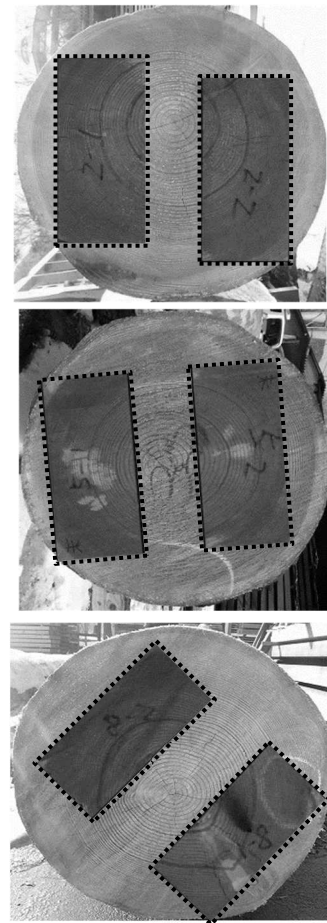


写真 4-1 上から No. 2 (元口), 5 (末口), 8 (元口)

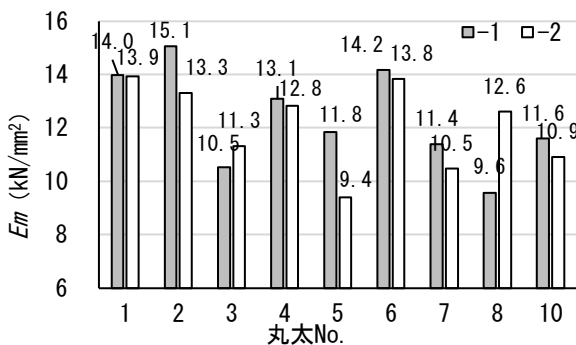


図 4-1 各丸太の曲げヤング係数 (E_m)

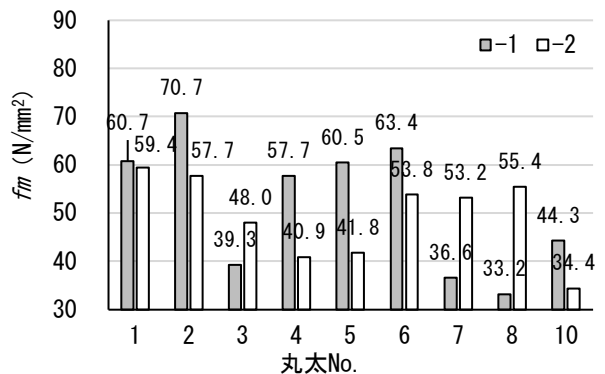


図 4-3 各丸太の曲げ強さ (f_m)

第2章及び第3章の試験体を合計した丸太と平角材の平均した縦振動ヤング係数 (E_{fr}) を図4-4に示す。

丸太は全て大の素材であり、丸太と平角材の縦振動ヤング係数についてスピアマンの順位相関係数の検定により確認したところ相関係数0.67となり両者には正の相関が認められた ($p < 0.01$)。よって、丸太の縦振動ヤング係数が高いほど2丁取りされた平角材の平均縦振動ヤング係数が高くなることが示唆された。しかし、個々の平角材の E_{fr} を見ると必ずしも丸太の縦振動ヤング係数と同値にはならず2本の平角材には縦振動ヤング係数の高低の差が大きい試験体が複数存在した。丸太よりも低い縦振動ヤング係数の平角材が多かった原因は不明である (図4-5)。

2丁取りされた平角材の縦振動ヤング係数は、丸太の縦振動ヤング係数よりも低い材が多く見られた。

丸太の末口平均直径と平角材の縦振動ヤング係数の関係を図4-6に示す。末口平均直径と平角材の縦振動ヤング係数についてピアソンの相関係数の検定により確認したところ両者には相関関係は認められなかった ($p = 0.72$)。よって、本試験結果では丸太が大の素材の場合、未成熟材よりも成熟材の割合が多いと想定されるが、製材される心去り平角材の縦振動ヤング係数が高くなるとは限らないと思われる。

丸太の末口年輪数と平角材の縦振動ヤング係数の関係を図4-7に示す。末口年輪数と平角材の縦振動ヤング係数についてピアソンの相関係数の検定により確認したところ両者には相関関係は認められなかった ($p = 0.15$)。よって、本試験結果では長伐期により高齢化した丸太から製材される心去り平角材の縦振動ヤング係数が高くなるとは限らないと思われる。

以上のことから、カラマツ林を長伐期により大径化することで必ずしも高い曲げヤング係数の丸太が生産されるとは限らず、そこから製材される心去り平角材も必ずしも丸太同様の曲げヤング係数が得られるとは限らない。丸太よりも高いヤング係数の平角材も得られるが、むしろ曲げヤング係数が0~2kN/mm²低めの平角材が得られる可能性が高い。

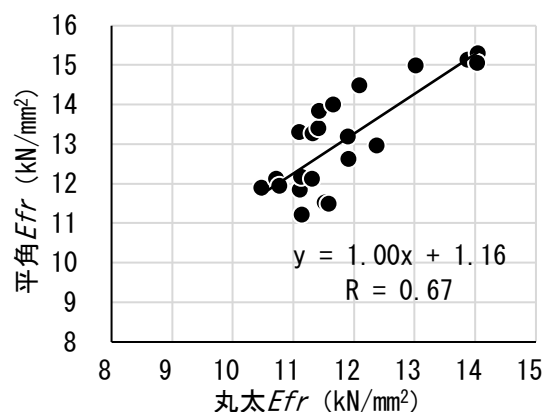


図4-4 丸太と平角材の E_{fr} 関係

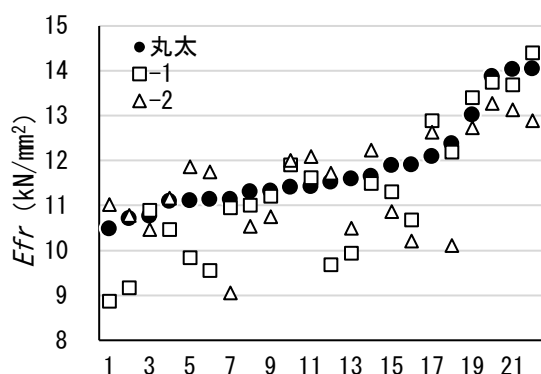


図4-5 順位化した丸太及び平角材の E_{fr} の関係

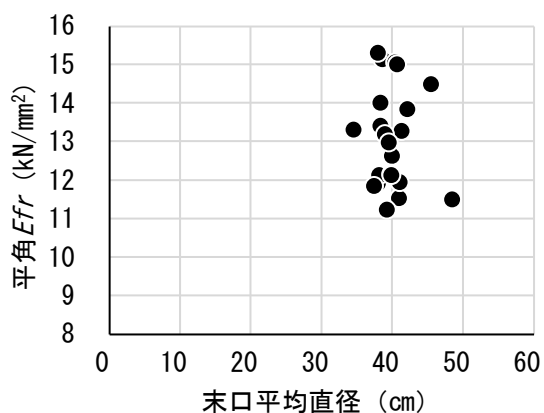


図4-6 末口平均直径と平角の E_{fr} の関係

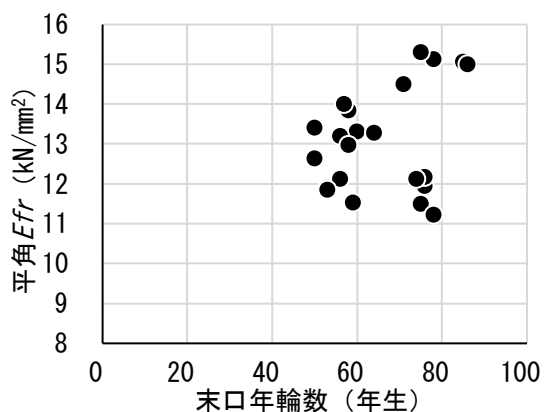


図4-7 丸太の末口年輪数と平角の E_{fr} の関係

第 5 章 半径方向の強度性能

5.1 試験体（無欠点試験体）

第 3 章の丸太から図 5-1 のとおり髓を含む板材（450～500×50×4,000 mm）10 枚を製材し、その後、板材のまま屋内において 2019 年 2 月から 2020 年 4 月までの 1 年 3 カ月間天然乾燥を実施した。

天然乾燥後、図 5-2 のとおり末口及び元口の木口面から長さ方向に 1,000 mm でクロスカット後、髓で板材を 2 分割した。分割した板材に試験材の幅 30 mm と帯鋸の刃の幅 2 mm を書き入れて、試験材ごとに年輪を測定する標本を作製した。なお、最小と最大の年輪を平均したものを各試験材の平均年輪とした。板材を小割し、28.5×28.5×456 mm（一部、25.7×25.7×456 mm）に整形後、恒温恒湿室内（温度 20℃、湿度 65%、EMC11.8%）で 11 カ月間調湿した。

試験材は、末口と元口を区分し髓側から樹皮側に向かって昇順に No. を付与した（写真 5-1）。

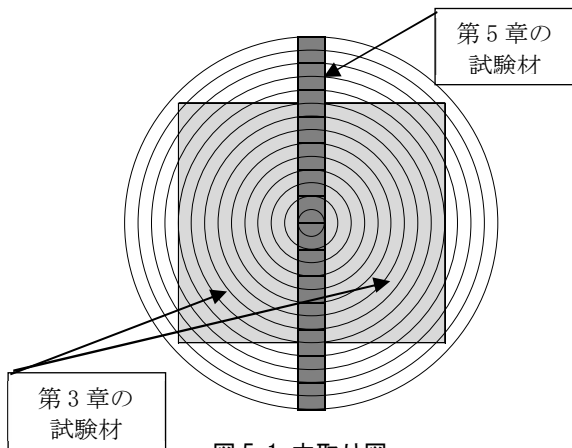


図 5-1 木取り図

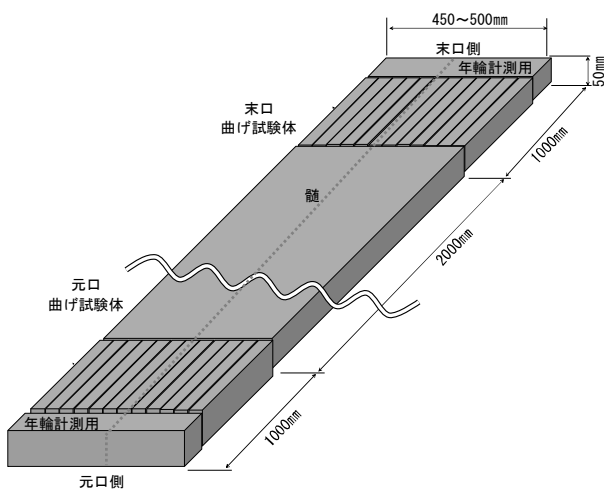


図 5-2 試験材の配置図

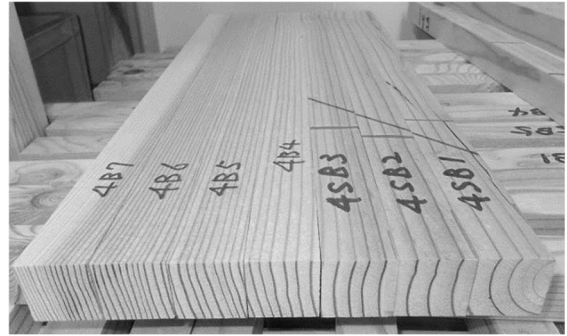


写真 5-1 試験材

5.2 試験方法

JIS Z 2101(2009)曲げ試験に基づき中央集中荷重 3 点曲げ方式、支点間距離 399 又は 360 mm、載荷速度は 5 mm/min で実施した（図 5-3）。なお、スパン中央部のたわみ量は、ストローク値を使用し、次式により曲げ強さ（ σ_b ）と見掛けの曲げヤング係数（ E_{b-ap} ）を計算した。

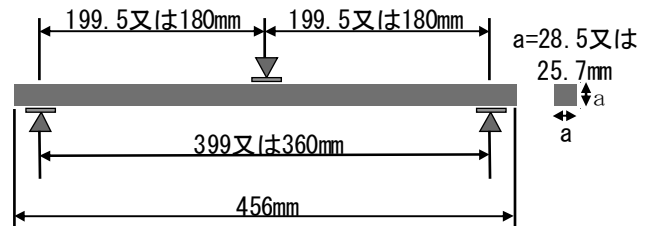


図 5-3 曲げ試験方法

$$\sigma_b = \frac{P_m l}{4Z}$$

σ_b : 曲げ強さ (N/mm²)

P_m : 最大荷重 (N)

l : 支点間距離 (mm)

Z : 断面係数 $Z = \frac{a^3}{6}$ (mm³)

$$E_{b-ap} = \frac{\Delta P l^3}{48 I \Delta y}$$

E_{b-ap} : 見掛けの曲げヤング係数 (kN/mm²)

l : 支点間距離 (mm)

I : 断面 2 次モーメント $I = \frac{a^4}{12}$ (mm⁴)

ΔP : 最大荷重における約 40% と約 10% との差 (N)

Δy : ΔP に対応するスパン中央のたわみ (mm)

5.3 結果と考察

試験結果を表 5-1 に示す。また、見掛けの曲げヤング係数 (E_{b-ap}) と曲げ強さ (σ_b) の関係を図 5-4 に示す。スピアマンの順位相関係数の検定により両者の相関係数は 0.93 となり、極めて強い正の相関があると認められた ($p < 0.01$)。

平均年輪と見掛けの曲げヤング係数を図 5-5 に示す。平均年輪が 20 年前後で傾きが大きく変化しており、試験体の隣接部付近における仮道管長の半径方向の分布と同様の結果となった。

年輪が 40 年以降の高い部分では、見掛けの曲げヤング係数が低下している試験材が複数あった。

平均年輪幅と全乾密度及び見掛けの曲げヤング係数の関係を図 5-6 及び 7 に示す。木材の物理⁹⁾の図 2-2 様々な樹種の年輪幅と密度の関係と同様の結果となったが、丸太でのこの外側の部分は平角材の製材時に切り落とされることから、使用上問題ないと思われる。写真 5-2 の場合、樹皮側に最も近い No.3A9 とその隣接する No.3A8 の見掛けの曲げヤング係数の差は 2.32kN/mm²あり、晩材の厚さを見ると No.3A9 < No.3A8 となりこのことが要因と推測される。また、No.3A1 の E_{b-ap} が最も低い 3.72kN/mm²となり、これは早材部が厚く、晩材部が薄いことが要因と推測される。

表 5-1 試験結果

	σ_b (N/mm ²)	E_{b-ap} (kN/mm ²)	含水率 (%)	全乾密度 (kg/m ³)	平均年輪幅 (mm)
平均値	74.6	9.80	13.3	471	4.2
最大値	115.1	15.35	14.1	632	11.6
最小値	32.4	3.72	12.2	348	1.0
標準偏差	17.7	2.52	0.3	64	2.3
変動係数(%)	23.7	25.69	2.3	13.6	55.2
試験体数	242	242	242	242	242

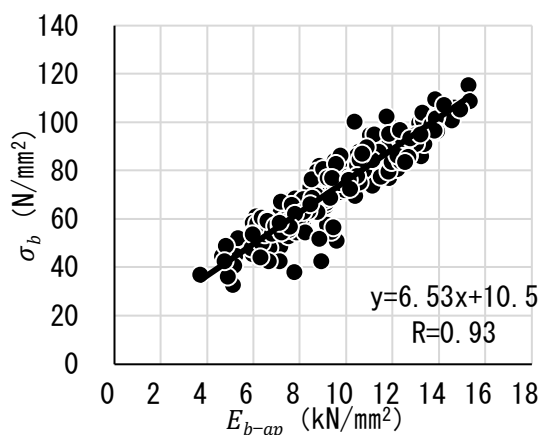


図 5-4 E_{b-ap} と σ_b の関係

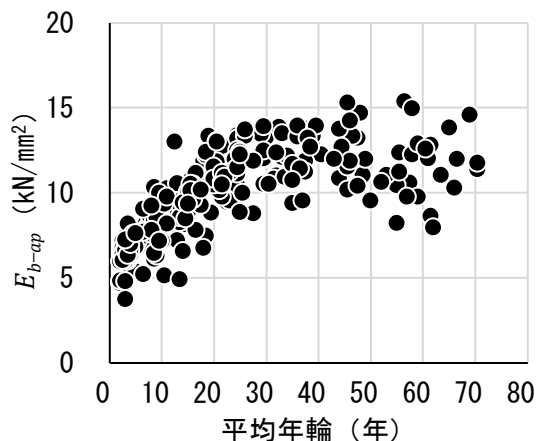


図 5-5 平均年輪と E_{b-ap} の関係

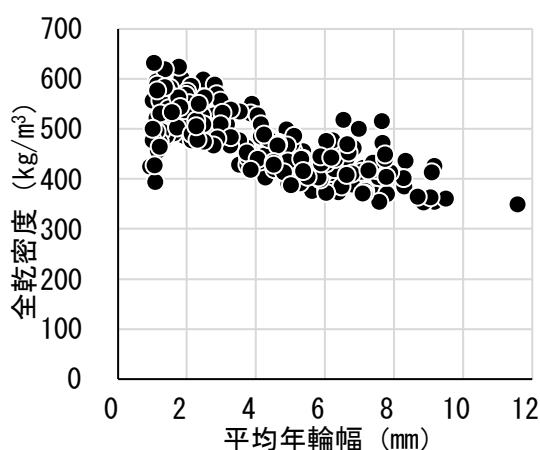


図 5-6 平均年輪幅と全乾密度の関係

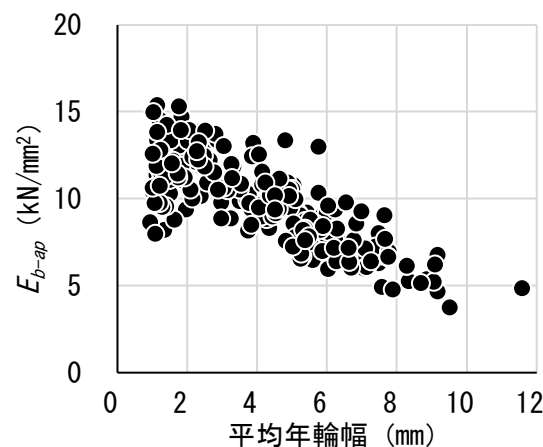


図 5-7 平均年輪幅と E_{b-ap} の関係

全乾密度と見掛けの曲げヤング係数の関係を図 5-8 に示す。スピアマンの順位相関係数の検定により相関係数が 0.85 となり両者には極めて強い正の相関があると認められた ($p < 0.01$)。

また、末口側と元口側の試験体の見掛けの曲げ

ヤング係数の有意差は認められなかった (P=0.17)。よって、4m 材での両端付近の見掛けの曲げヤング係数はほぼ変わらないと推測する。

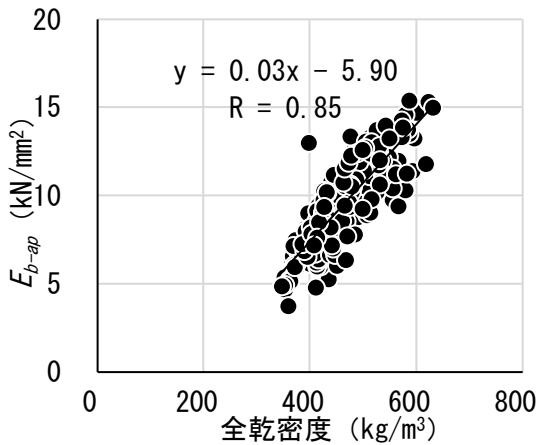


図 5-8 全乾密度と E_{b-ap} の関係

造用製材の基準曲げ強度についても寸法に対する低減率を適応することが必要と考える。

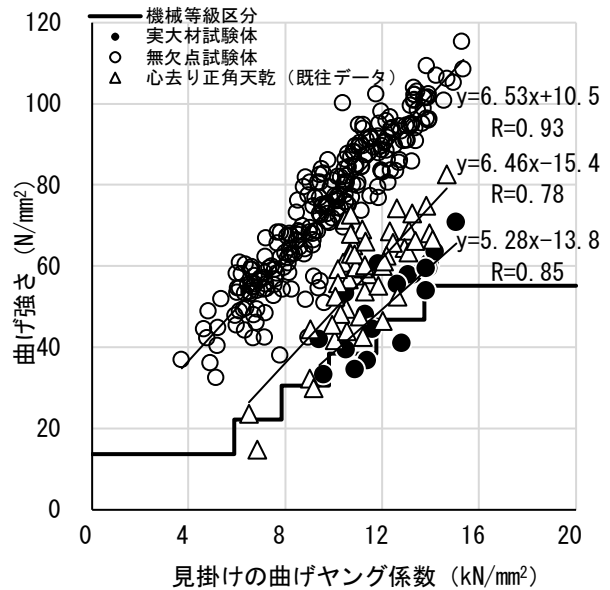


図 5-9 無欠点試験体と実大材試験体の比較

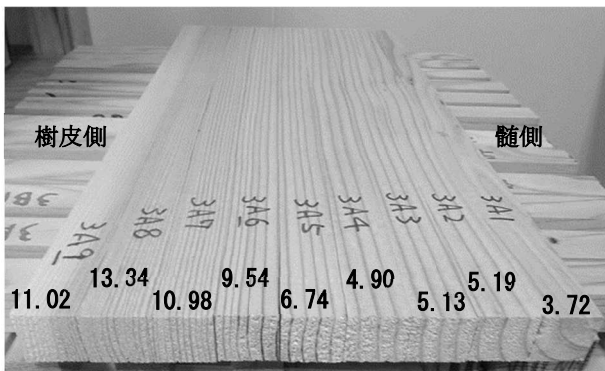


写真 5-2 試験体と見掛けの曲げヤング係数

5.4 無欠点試験体と実大材試験体の比較

見掛けの曲げヤング係数と曲げ強さの関係を図 5-9 に示す。なお、図中には既往の心去り正角材 (120×120 mm, 天然乾燥) を追加した。

実大材試験体の見掛け曲げヤング係数は、無欠点試験体の範囲内にあった。

一方、実大材試験体の曲げ強さは、それぞれの近似式に実大材試験体の見掛けの曲げヤング係数の平均値 12.29kN/mm² を代入した結果、無欠点試験体の 4 割強低下していた。また、心去り正角材と同様に比較した場合、約 2 割低下していた。このことは、実大材の有する節などの欠点により低下したと思われる (寸法効果)。なお、今回の実大材の平角の材幅は 105 mm であったが、曲げ強度に対して材幅による寸法効果を考慮する必要はないと考えられている⁹⁾。このように製材 JAS の構

まとめ

第 1 章 丸太の強度特性

県産 (地域割合が東信 76%, 中信 13%, 北信 11%) のカラマツ丸太 (素材の割合が大 77%, 中 23%) 181 本の縦振動ヤング係数を試験した。その結果、見かけの密度が増加すると縦振動ヤング係数も増加することが示唆された。また、素材の大の縦振動ヤング係数の平均値 12.0kN/mm², 標準誤差 0.13kN/mm², 中の縦振動ヤング係数の平均値 13.8kN/mm², 標準誤差 0.25kN/mm² となり、現在の本県の素材の大及び中のカラマツ丸太の縦振動ヤング係数の平均は Ef130 になると推測する。

第 2 章 蒸気式と蒸気圧力併用式乾燥特性の比較

東信地域のカラマツ丸太 12 本 (大の素材) を心去り平角材 (2 丁取り) に製材し、一方を 90℃ の蒸気圧力併用式乾燥 (13 日間) と、もう一方を 90℃ の蒸気式乾燥 (18 日間) を行った。その結果、平均含水率は、蒸気圧力併用式 12.6%, 蒸気式 14.9% となり、蒸気圧力併用式を行うことにより約 3 割以上の乾燥時間短縮が期待できる。形質は使用上問題なかった。また、強度性能については、乾燥方法の違いはあるが、90℃ の中温乾燥材は、告示の目視等級区分のカラマツの基準強度を満足し、また、一部の試験材を除けば機械等級区分の基準強度もほぼ満足した。

第3章 ガラスハウス乾燥の特性

木曽森林管理署管内において林齢96年生の林分から生産されたカラマツの丸太10本（大の素材）から心去り平角材（2丁取り）に製材し、ヤニ滲出防止のための蒸煮を12時間行った後に、ガラスハウス内に静置し、2019.2.8から2020.1.27まで乾燥を実施した。その結果、約6カ月経過で含水率15%を下回りJAS（構造用製材SD15）の基準を満足していた。形質変化は使用上問題なかった。また、強度性能では節の等級の違いはあるものの、告示の目視等級区分の基準強度を満足し、一部の試験材を除けば機械等級区分の基準強度もほぼ満足した。

第4章 丸太と製材品の強度性能の関係

第2章及び第3章の試験体を合計した丸太と2丁取りした平角材については、丸太の縦振動ヤング係数が高いほど2丁取りされた平角の平均縦振動ヤング係数が高くなることが示唆された。しかし、個々の平角材の縦振動ヤング係数を見ると必ずしも丸太の縦振動ヤング係数と同値にはならず2本の平角材には縦振動ヤング係数の高低の差が大きい試験体が複数存在した。また、今回の試験では、丸太の末口平均直径及び末口年輪数と縦振動ヤング係数とに相関関係が認められなかったことからカラマツ林を長伐期により大径化することで必ずしも高い曲げヤング係数の丸太が生産されるとは限らず、そこから製材される心去り平角材も必ずしも丸太同様の曲げヤング係数が得られるとは限らない。

第5章 半径方向の強度性能

実大材試験体の曲げヤング係数は、無欠点試験体の曲げヤング係数の範囲内にあった。一方、実大材試験体の曲げ強さは、無欠点試験体の4割強（正角材に対しては約2割）低下していた（寸法効果）。このことは、実大材の有する節などの欠点により低下したと思われる、製材JASの構造用製材の基準曲げ強度についても寸法に対する低減率を適応することが必要と考える。

結言

本県の現在の大径カラマツ丸太の強度性能とそこから製材された心去り平角材について乾燥特性と強度性能についてある程度の知見を得た。数値

の信憑性を高めるためにも、今後も継続した試験が必要と考える。

謝辞

本試験を行うに当たり、データ入力等にお手伝い頂いた当センター非常勤職員の蒲原静子氏に深く感謝申し上げます。

引用文献

- 1) 柴田直明・吉田孝久・山内仁人, 安全・安心な乾燥材生産技術の開発(Ⅱ), 長野県林業総合センター研究報告第29号, pp.75-94, (2015)
- 2) 橋爪丈夫, 長野県産カラマツ構造材の強度特性に関する研究, 長野県林業総合センター研究報告第13号, pp.16-30, (1998)
- 3) 吉田孝久・奥原祐司・今井信・山口健太・柴田直明・田畑衛・山内仁人・山岸信也, カラマツ大径材から得られる心去り正角材(2丁取り)の乾燥特性及び強度特性の解明, 長野県林業総合センター研究報告第33号, pp.49-64, (2019)
- 4) 奥原祐司・今井信・吉田孝久・山口健太, 3心去り無垢梁桁材の乾燥特性及び強度特性の解明, 長野県林業総合センター研究報告第35号, pp.124-139, (2021)
- 5) 吉田孝久・伊東嘉文, 高温セット処理を行った柱・桁材の太陽熱乾燥, 長野県林業総合センター研究報告第24号, pp.171-184, (2009)
- 6) (公財)日本住宅・木材技術センター, 構造用木材の強度試験マニュアル(第4版), pp.59-78, (2013)
- 7) 細尾佳宏ほか, カラマツ大径材の強度特性と仮道管長の半径方向分布, 第71回日本木材学会大会ポスター発表, 1P67, (2021)
- 8) 石丸優・古田裕三・杉山真樹(編), 木材科学講座3木材の物理(改訂版), p.40, (2022)
- 9) 長尾博文・井道裕史・加藤英雄・三浦祥子・下田優子, スギ製材の曲げ強度に対する寸法効果(材せいと材幅の影響), 木材学会誌 Vol.60 No.2, pp.100-106, (2014)

長野県林業総合センター研究報告

Bulletin of the Nagano Prefecture Forestry Research Center

第 38 号

令和6年3月 発行
(2024)

発行 長野県林業総合センター

Nagano Prefecture Forestry Research Center

〒399-0711

長野県塩尻市大字片丘 5739

5739 Kataoka, Shiojiri-shi, Nagano, 399-0711 Japan

TEL (0263) 52-0600 FAX (0263) 51-1311
