

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、現在は長野県の私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 月現在の長野県私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 $3.6 \text{ m}^3/\text{人日}$ 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動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鈣質土壌の露出、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 下刈機: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
				(計 1,630)	

※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

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畝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、スベ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、現場に合わ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、根を拡げる必要もなく、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、作業道を開削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。

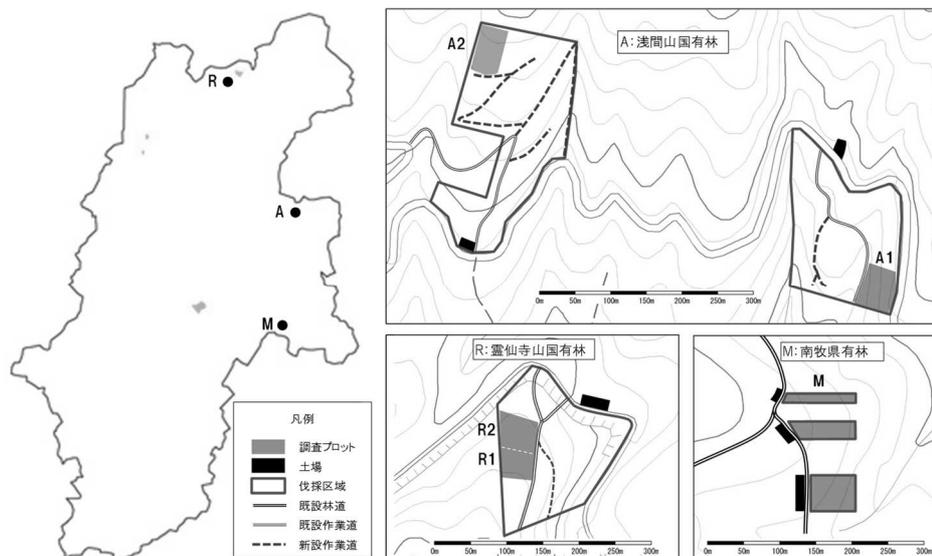


図2-1 試験地の位置図及び平面図

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、ウイ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。

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

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

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	機体価格 (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	130	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

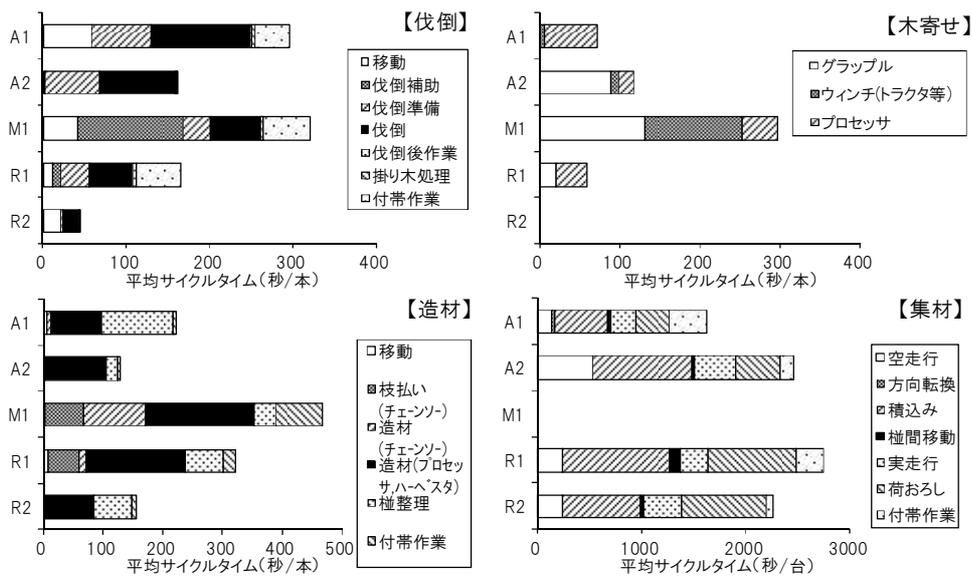


図 2-2 皆伐作業の各工程における要素作業別平均サイクルタイム

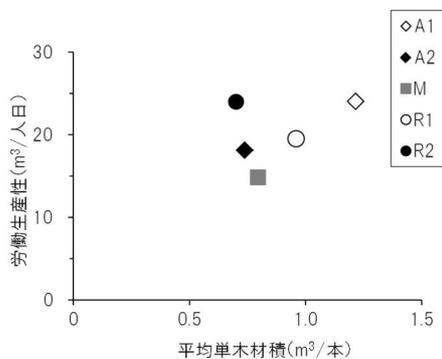


図 2-3 システム全体の労働生産性と単木材積の関係
※A1, A2, M, R1 は高性能林業機械, R2 は先進的林業機械の作業システムを使用

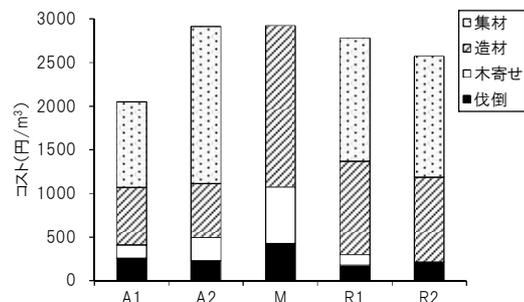


図 2-4 各試験地における生産コスト

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

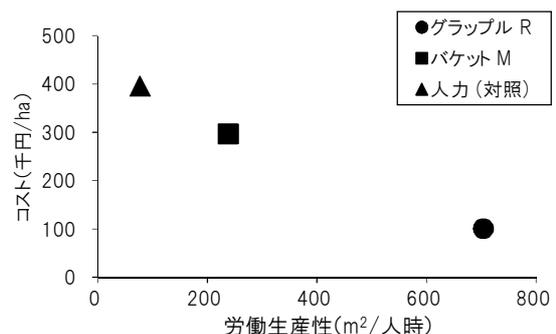


図 2-5 地拵えの労働生産性とコストの関係

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

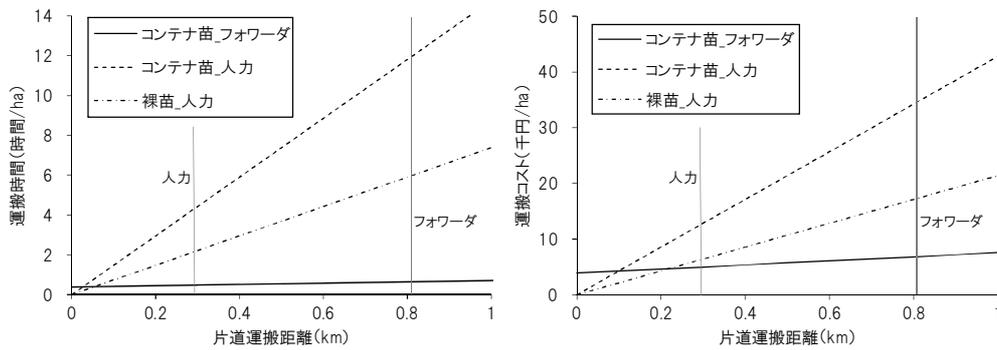


図 2-6 苗木運搬の距離と運搬時間 (左), 運搬コスト (右) の関係

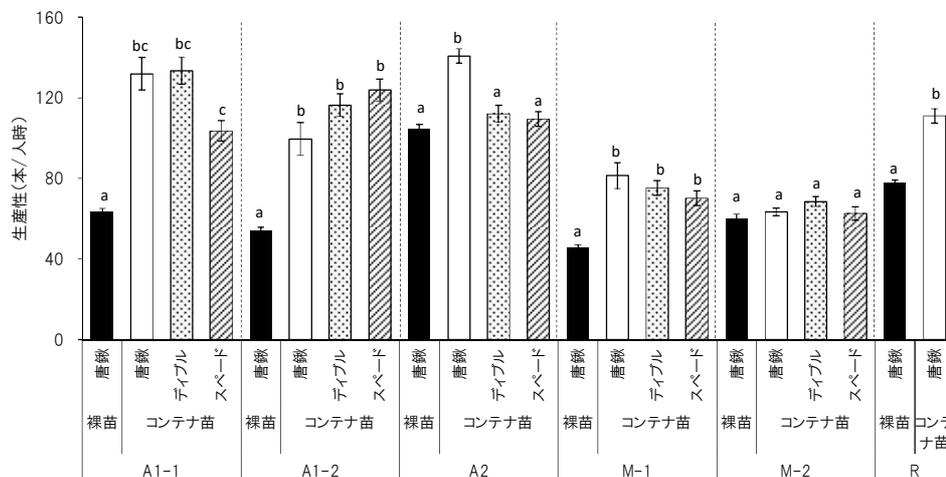


図 2-7 植栽作業の生産性

※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策が期待できる。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。

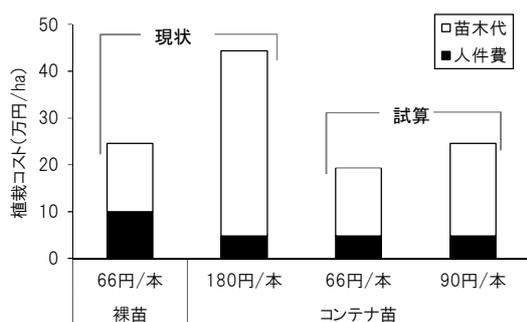


図2-8 試験地A1における植栽コスト試算

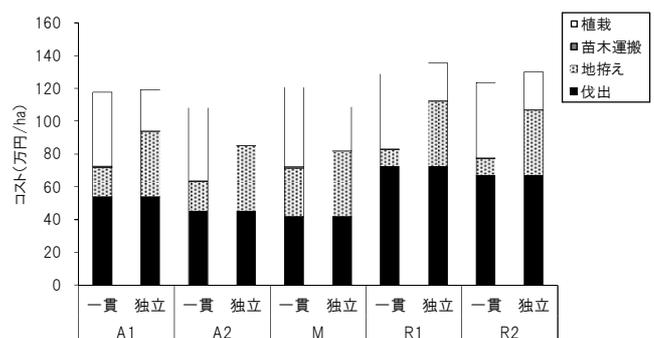


図2-9 一貫作業と独立作業のコスト比較

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]					

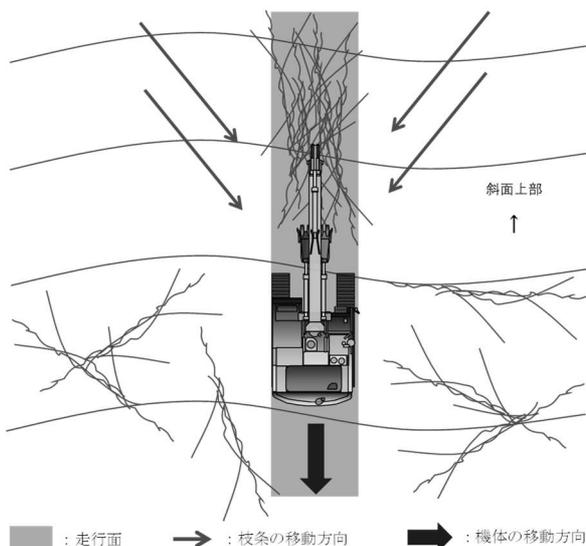


図 3-1 霊仙寺山国有林における機械地拵え作業手順（バケット、グラップル）

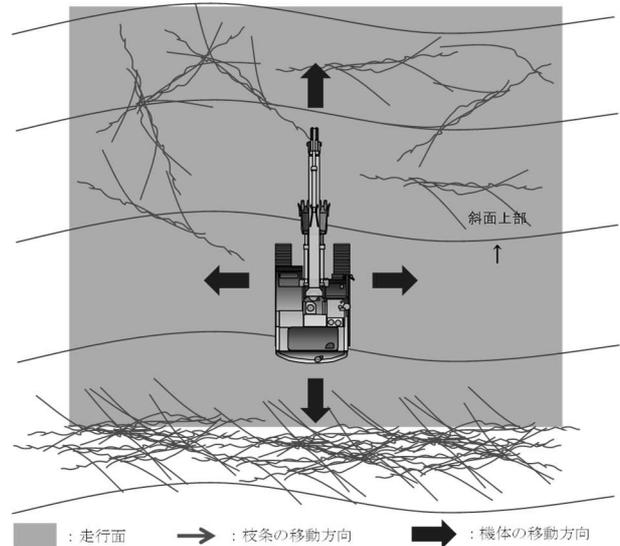


図 3-2 浅間山国有林及び大門山国有林における機械地拵え作業手順（バケット、グラップル）

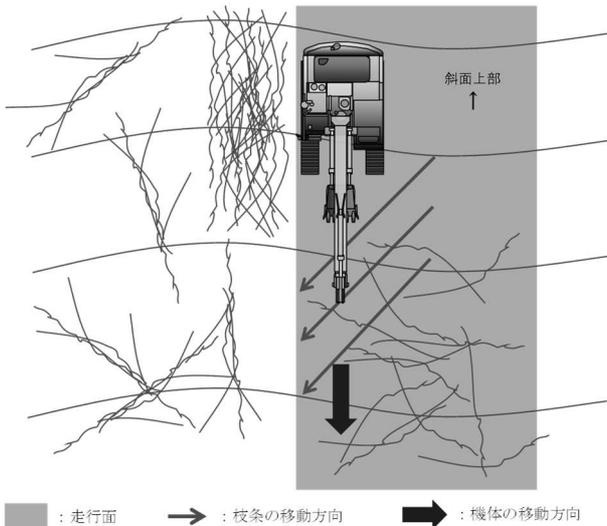


図 3-3 諏訪における機械地拵え作業手順（グラップル）

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

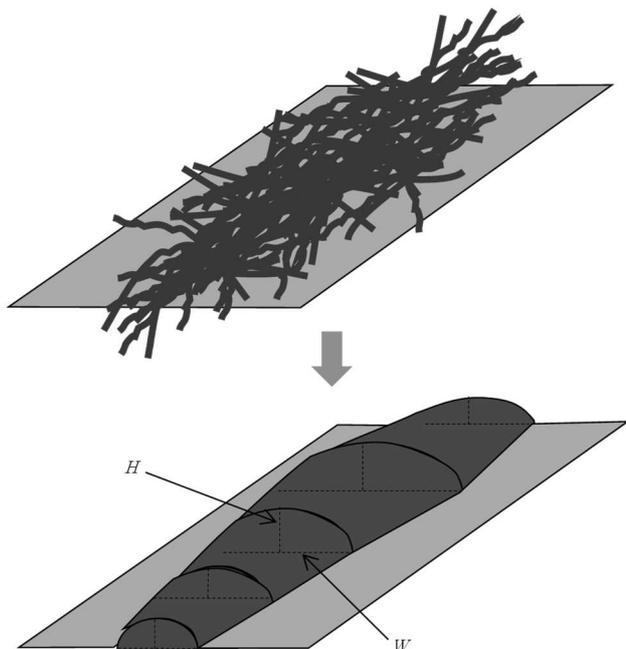


図 3-4 枝条層積の求積模式図

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、

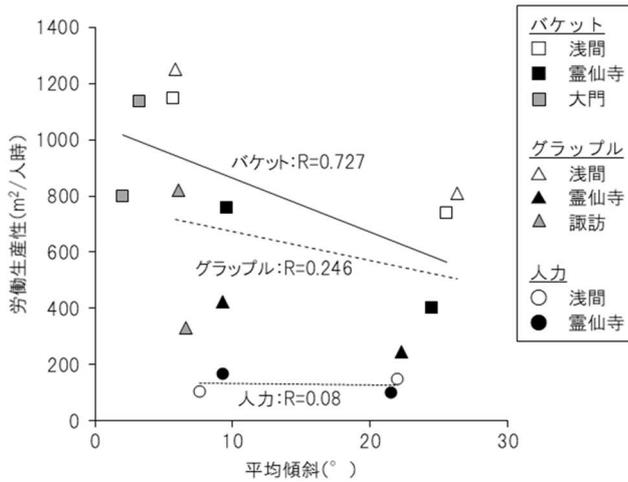


図 3-5 地拵えの労働生産性と傾斜の関係

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		人カ	
	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			

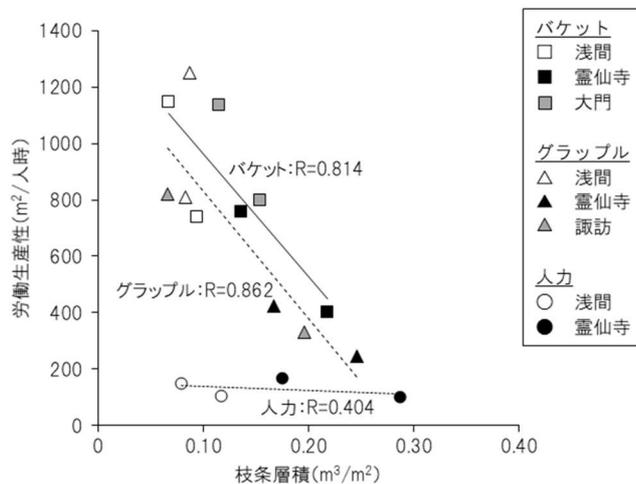


図 3-6 地拵えの労働生産性と単位面積当たりの枝条層積の関係

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

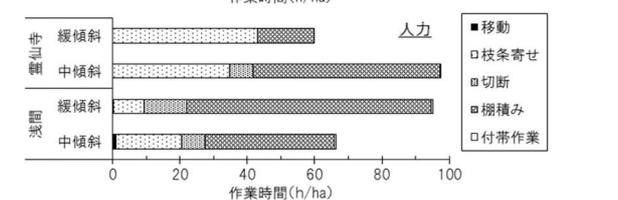
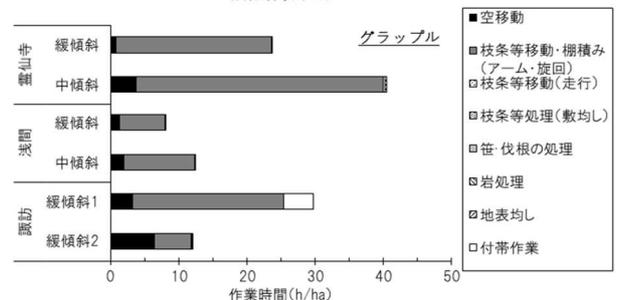
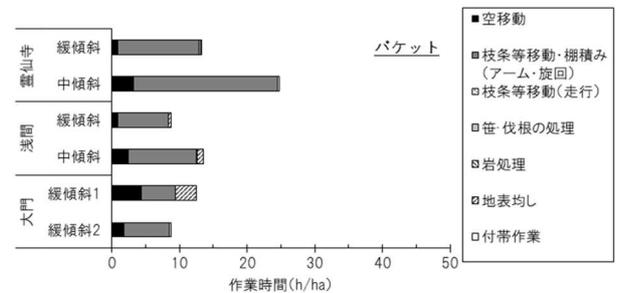


図 3-7 各地拵え方法における単位面積当たりの要素作業時間

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。

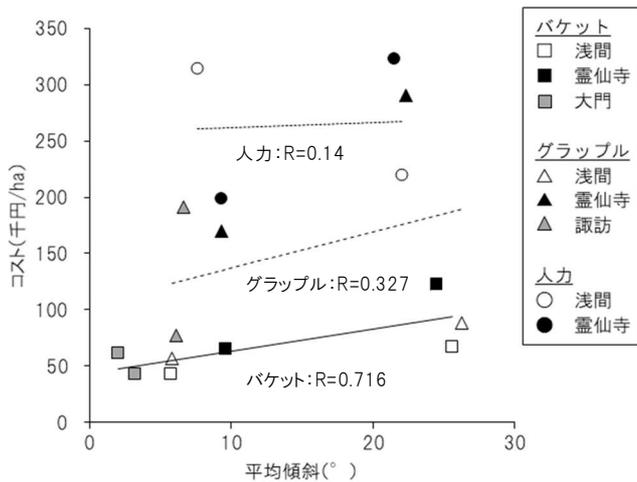


図 3-8 地拵えのコストと傾斜の関係

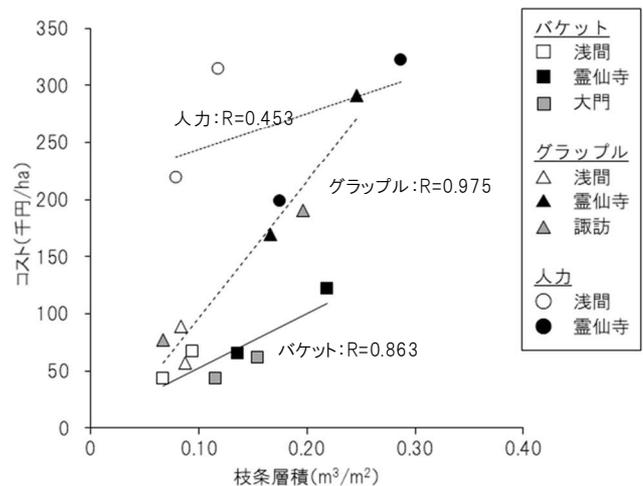


図 3-9 地拵えのコストと単位面積当たりの枝条層積の関係

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

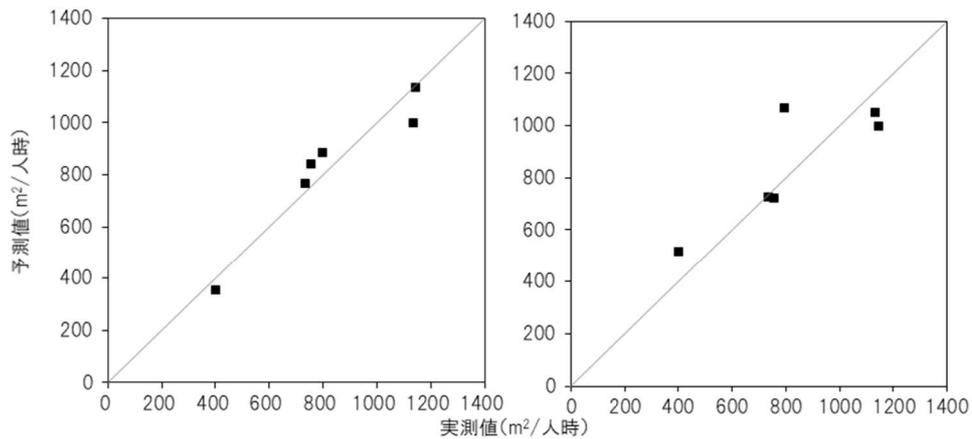


図 3-10 バケット地拵えの生産性実測値と生産性予測値の関係
 (左：枝条層積実測値と傾斜実測値に基づく生産性予測値，右：枝条層積予測値と傾斜実測値に基づく生産性予測値)

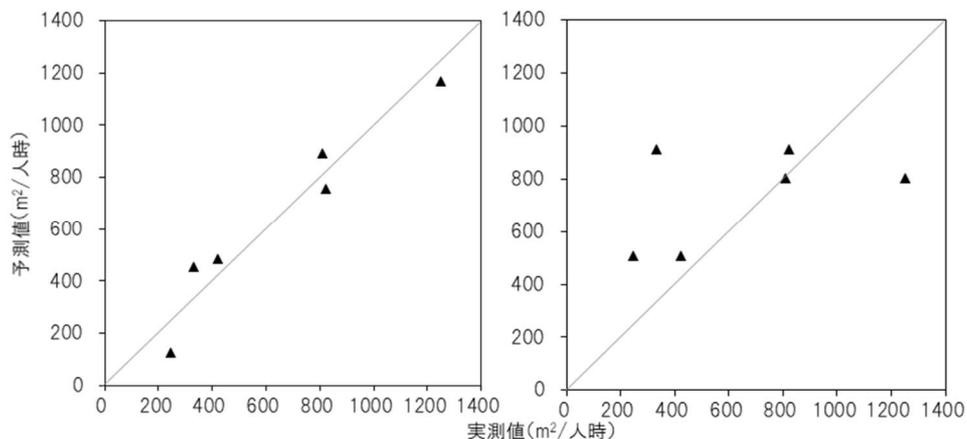


図 3-11 グラップル地拵えの生産性実測値と生産性予測値の関係
 (左：枝条層積実測値に基づく生産性予測値，右：枝条層積予測値に基づく生産性予測値)

(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 $-13\% \sim +34\%$ ($-148 \sim +268 \text{ m}^3/\text{人時}$)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

$\sim +579 \text{ m}^3/\text{人時}$)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

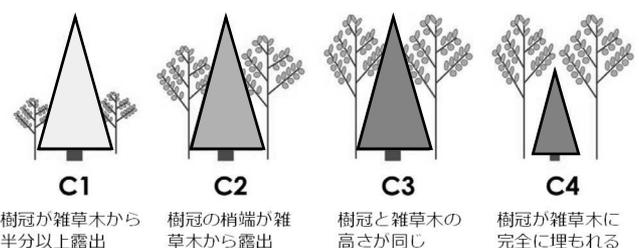


図4-1 競合状態の指標

(原図は山川ら(2016)による)

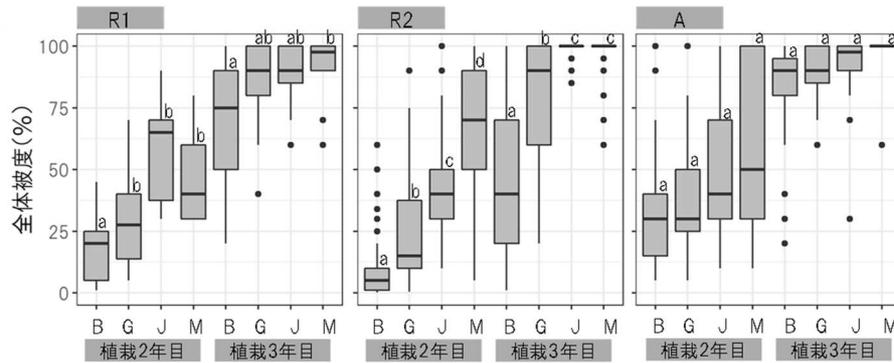


図 4-2 地拵え区分ごとの全体被度の分布
 ※箱の右肩の添字は、各試験地の各年次において同一アルファベットを含まない組み合わせの間に有意差があることを表す。

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

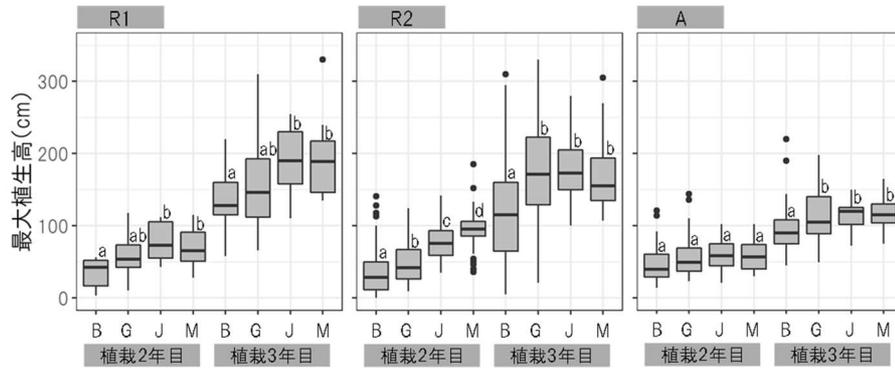


図4-3 地拵え区分ごとの最大植生高の分布
 ※箱の右肩の添字は、各試験地の各年次において同一アルファベットを含まない組み合わせの間に有意差があることを表す。

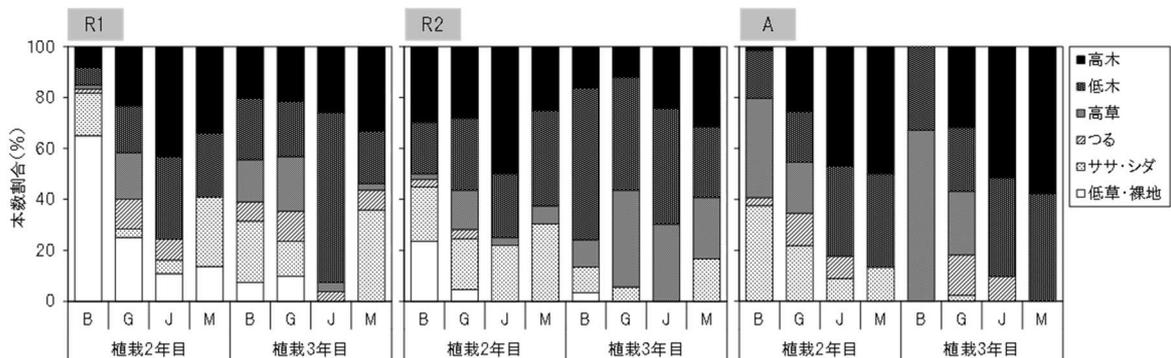


図4-4 地拵え区分ごとの各植栽木周辺の最大植生タイプ

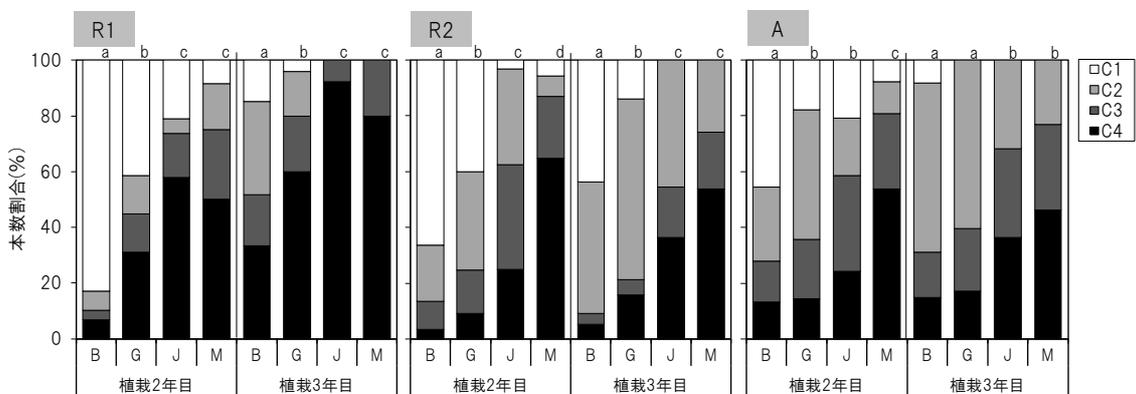


図4-5 地拵え区分ごとの植栽木と競合植生の競合状態
 C1: 植栽木の樹冠が周辺の雑草木から半分以上露出
 C2: 植栽木の梢端が周辺の雑草木から露出
 C3: 植栽木と雑草木の梢端が同位置
 C4: 植栽木が雑草木に完全に覆われている
 ※バー上の添字は、各試験地の各年次において同一アルファベットを含まない組み合わせ間で、競合状態の平均順位に有意差があることを表す ($p < 0.01$)。

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

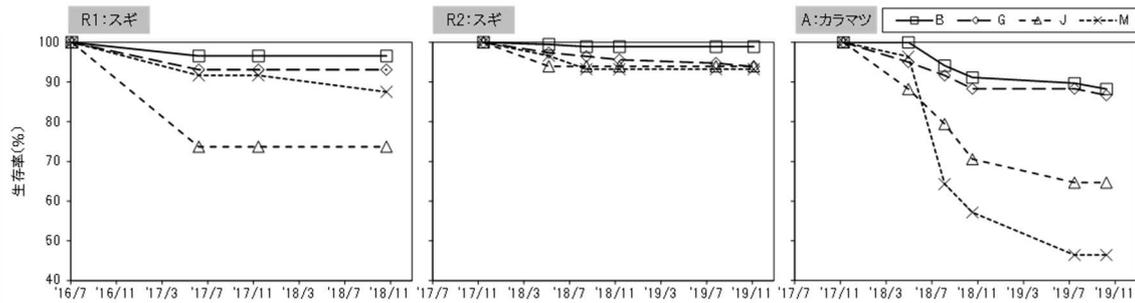


図 4-6 地拵え区分ごとの植栽木の生存率の推移

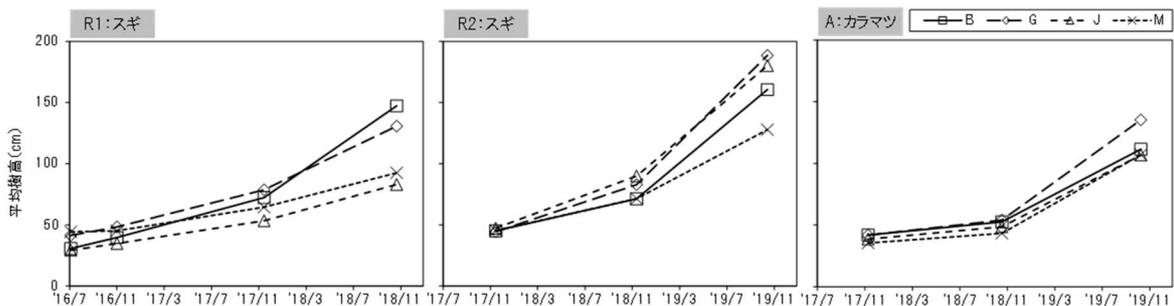


図 4-7 地拵え区分ごとの平均樹高の推移

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

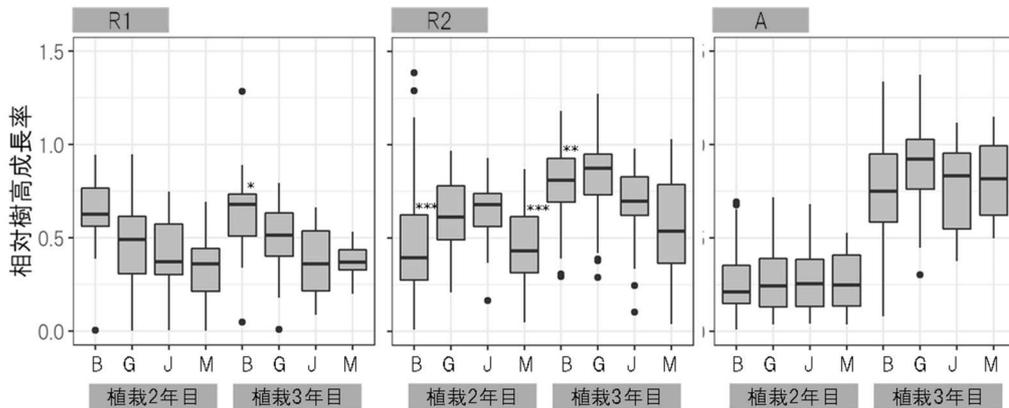


図 4-8 地拵え区分と相対樹高成長率の関係

※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)。

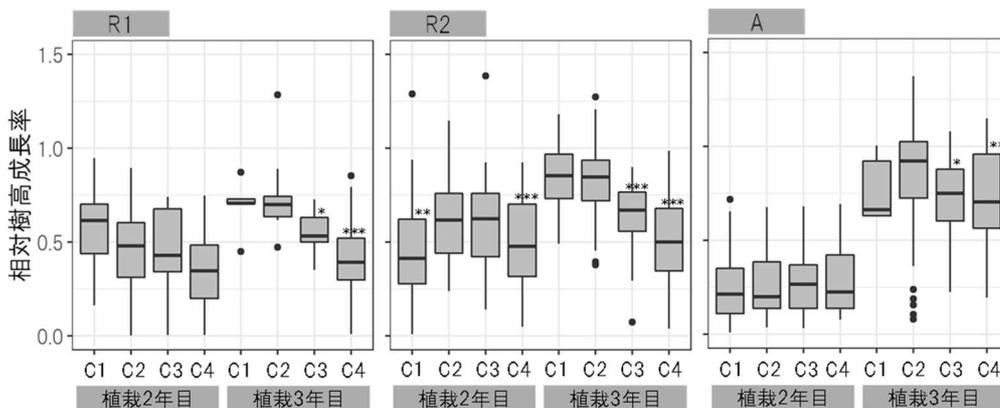


図 4-9 競合状態と相対樹高成長率の関係

※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再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る、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、 A_0 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價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
従来作業	裸中苗	人力	伐出		人力地拵え		植栽	下刈				
		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)		下刈	下刈	下刈
一貫作業	裸大苗	グラップル					伐出	グラップル地拵え		下刈	下刈	下刈
		バケット					伐出	バケット地拵え			下刈	下刈

※植栽密度は2300本/haとして試算

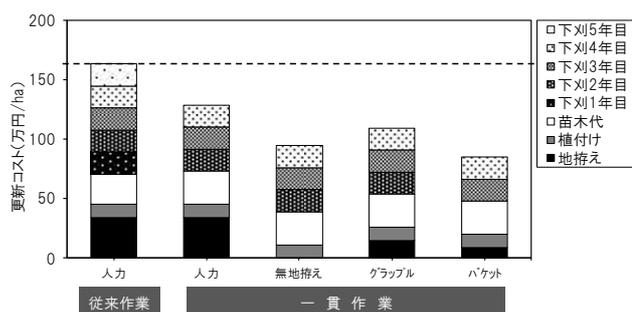


図5-1 各種地拵え区分ごとの施業スケジュールによるコスト比較

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

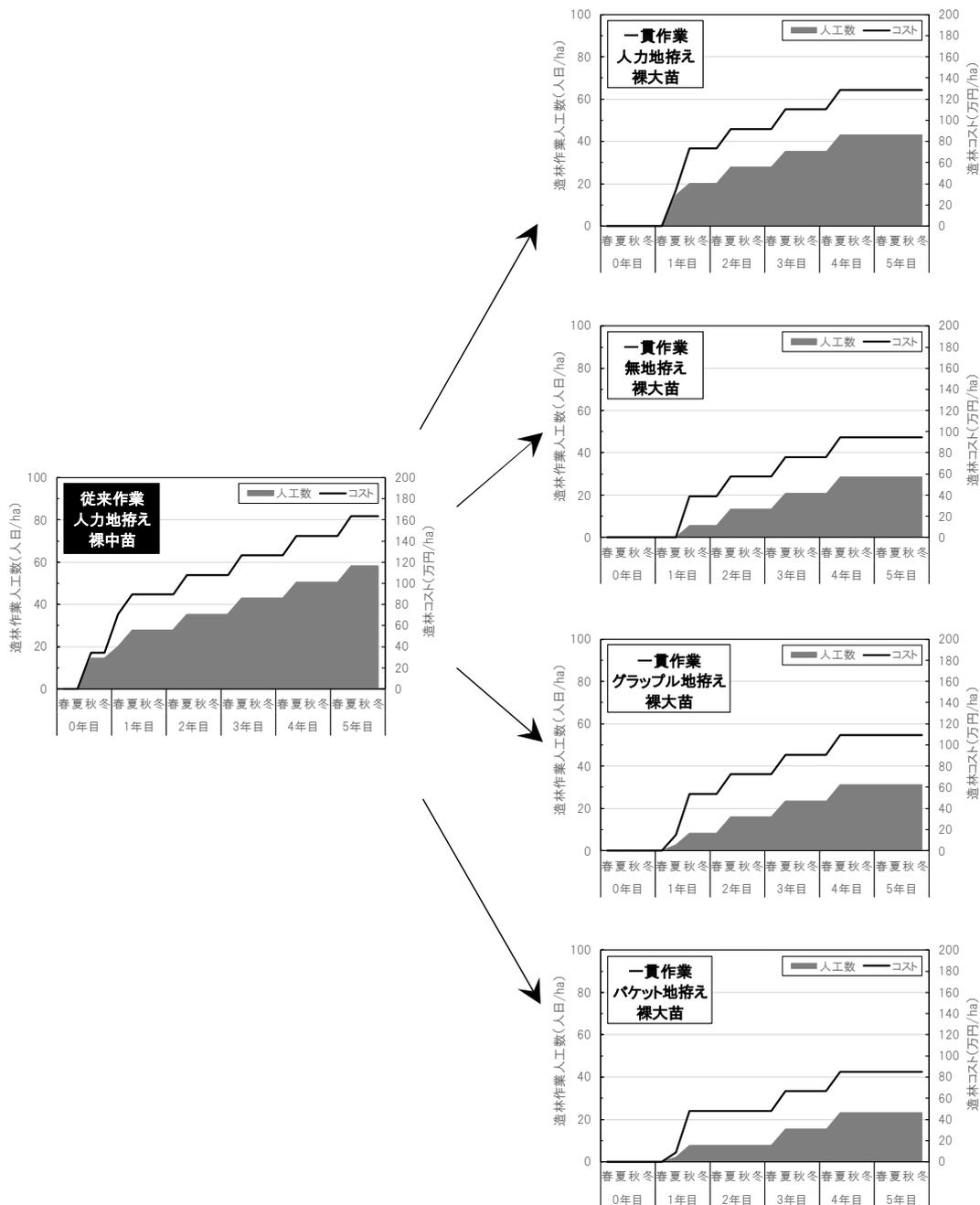


図 5-2 従来作業及び一貫作業の造林における人工数及びコストの比較

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プル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) ブラッシュユ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.