

信州大学審査学位論文

ヒノキ人工林に対する漸伐の導入に向けた終伐の実態解明

2024 年 3 月

信州大学大学院総合医理工学研究科

総合理工学専攻 山岳環境科学分野

大塚 大

## 目次

緒言 .....	1
研究の背景 .....	1
研究の目的 .....	4
研究の方法 .....	4
研究小史 .....	5
1 伐採にかかる下木への損傷 .....	5
2 下木の存在が伐採費用のかかり増しに与える影響 .....	8
研究の意義 .....	9
第 1 章 調査地の概要と施業履歴 .....	11
1.1 奈良本山国有林 .....	11
1.1.1 自然条件 .....	11
1.1.2 施業履歴 .....	13
1.2 金沢山国有林 .....	17
1.2.1 自然条件 .....	17
1.2.2 施業履歴 .....	19
第 2 章 伐採木と損傷した下層木との平面上における関係 .....	22
2.1 調査プロットの概要と採用された作業システム .....	22
2.1.1 調査プロットの概要 .....	22
2.1.2 採用された作業システム .....	23
2.2 終伐前の下層木分布および終伐により発生した損傷木と残存した健全木の分布 .....	24
2.2.1 終伐前の下層木分布 .....	24
2.2.2 終伐により発生した損傷木と残存した健全木の分布 .....	26
2.3 伐採木による衝突が発生する区域の推定 .....	29
2.4 損傷モデルの作成 .....	32
小括 .....	38
第 3 章 伐採木と下層木との衝突に基づく損傷木の発生箇所推定の検証 .....	39
3.1 調査地の概要と作業システム .....	39
3.1.1 調査地の概要 .....	39
3.1.2 採用された作業システム .....	40
3.2 伐採木と下層木の衝突に基づく損傷木発生推定の推定 .....	40
3.2.1 下層木、損傷木、健全木の区域測定 .....	40
3.2.2 伐採木による衝突が発生した区域の推定、終伐後の下層木の状態の推定 .....	42

小括.....	54
第 4 章 伐採費用と施業履歴および再造林費を含めた収益性.....	56
4.1 調査地の概要と作業システム.....	56
4.1.1 調査地の概要.....	56
4.1.2 採用された作業システム.....	58
4.2 終伐の伐採費用にかかる算定方法.....	60
4.2.1 終伐の伐採費用の構成.....	60
4.2.2 伐倒, 枝払い, 木寄せ, 造材にかかる延べ所要時間の算定方法.....	60
4.2.3 集材にかかる延べ所要時間の算定方法.....	63
4.2.4 直接費の積算方法.....	65
4.3 運材の収支にかかる算定方法.....	66
4.3.1 運材費用の算定方法.....	66
4.3.2 市場手数料の算定方法.....	67
4.4 終伐にかかる費用の算定.....	67
4.4.1 伐倒, 枝払い, 木寄せ, 造材にかかる延べ所要時間と変動費.....	67
4.4.2 集材にかかる延べ所要時間と変動費.....	69
4.4.3 終伐の伐採費用と収支.....	69
4.5 過去の施業と下層木による再造林にかかる削減額の算定.....	72
4.5.1 過去の施業に発生した金額の算定.....	72
4.5.2 健全木の残存による再造林費用の削減.....	74
4.6 各プロットの収益性について.....	75
4.6.1 下種伐以降の下層木の造林・保育にかかる収支.....	75
4.6.2 上層木の収穫にかかる収支.....	76
4.6.3 下層木と上層木にかかる収支の統合からみた生産期間における収支の流れ.....	77
小括.....	79
結言.....	81
謝辞.....	82
引用文献.....	a

## 報文目録

本論文は，以下の原著論文に基づいており，ローマ数字で表記する。

- I. Otsuka D, Moriguchi K, Shirota T, Ueki T, Saito M. 2021. Spatial relationship between damaged understory and felled trees during the final cutting in a shelterwood forest. *Int J For Eng.* 32(3):286–292. <https://doi.org/10.1080/14942119.2021.1943801>.
- II. 大塚大，松井美希子，守口海，植木達人，中澤昌彦，瀧誠志郎，齋藤仁志. 2023. ヒノキ漸伐林における終伐の直接作業費. *森利誌.* 38(2). <https://doi.org/10.18945/jjfes.38.107>.
- III. Otsuka D, Saito M, Nakazawa M, Taki S, Ueki T. 2023. Estimating damaged understory based on collisions with harvested trees during final cutting of a shelterwood. *Int J For Eng.*:1–9. <https://doi.org/10.1080/14942119.2023.2201168>.



## 緒言

### 研究の背景

今日では、森林の持つ多面的機能を社会実装することへの期待がかつてなく高まっている。具体的には、2030 年のネイチャーポジティブ達成という G7 サミットにおける国際的協約の採択により、生物多様性の保全と回復のために、陸域と海域それぞれ少なくとも 30% について健全な生態系を保たなければならない (G7 Summit 2021 in Cornwall 2021)。しかし、現在の日本の陸域において、その数値目標は達成されていない (環境省 2023)。したがって、陸域にかかる残る 9.5% の達成には、国立公園など保護地域を除いた Other Effective area-based Conservation Measures (OECMs) に相当する陸地の拡大が重要となってくる。OECMs とは、「生物多様性の原位置保全のために、関連する生態系機能とサービス、および該当する場合には文化的、精神的、社会経済的、その他その地域に関連する価値を伴う、長期的に肯定的かつ持続的な成果を達成するような方法で統治・管理される地域」 (Convention on Biological Diversity 2018) と定義され、対象地には森林施業地も含まれる。日本の国土面積の 26.7% を占める人工林において、森林の多面的機能を適切に発揮させることは、国際的な約束の達成にも貢献する。

また、生物多様性の保全に関連し、企業活動が環境に与える影響や依存度についての情報開示を求める動きも加速している。生物多様性領域にかかる財務開示フレームワークである Taskforce on Nature-related Financial Disclosures (TNFD) の最終提言が発行され (Taskforce on Nature-related Financial Disclosures 2023)、外部より森林セクターにかかる経済的評価の基準が公開された。世界経済人会議の森林担当部門は、バリューチェーンの川上にこそ森林の回復・再生の機会があるとし、実践例として非皆伐の森林管理を挙げている (World Business Council for Sustainable Development 2022)。さらに、欧州では森林破壊防止のためのデューデリジェンスが義務化される (European Parliament, Council of the European Union 2023) など、林業と生物多様性にかかる経済評価のルールメイキングが顕著になっている。国際的に、林業と生物多様性の両立は最早お題目ではなく、林業を経営するうえでの十分条件となりつつある。

日本の森林・林業施策の基本方針を定める森林・林業基本計画では、森林をその階層構造に基づいて育成単層林、育成複層林、天然生林の 3 つに区分している。3 区分のなかで OECMs に適合する施業地は育成複層林であり、漸伐作業 (前更作業、傘伐作業とも記載される。以下、漸伐) と択伐作業 (以下、択伐) の体系によって管理される森林ということになる (南雲・山本 2006)。漸伐や択伐によって連続的に林分構造を維持する利点は、伐採という人為的な森林生態系への影響の軽減にある。伐採に対する感受性は生物種によって異なるものの、一般に伐採強度が低いほど影響は小さい (Brunet et al. 2010)。いくつかの例を

挙げれば、多様性の指標としてよく使われる鳥類だけでなく、着生地衣類や菌類に対しても希少種の保全に貢献することが明らかになっている (Nascimbene et al. 2007; Kellner et al. 2016; Tomao et al. 2020)。「国際的な協調の下で、持続可能な森林経営に向けた取組を推進し、SDGs や国連森林戦略計画等の国際目標の実現を図る」(林野庁 2021) ために、今後の人工林管理において、育成複層林による森林管理が重要である。

しかし、日本においては育成複層林の面積は小さく、人工林全面積のうちわずか 2.2% を占めるに過ぎない (林野庁 2023a)。森林セクターが陸域における 30% の保全数値目標の達成に貢献するために、育成単層林から育成複層林への転換を加速させる必要がある。一斉林の転換から始める必要のある日本においては、漸伐が適しているだろう (Mason et al. 2022)。なぜなら、択伐とは様々な樹齢、大きさの階級の樹木が混合している林分構造であり、育成複層林が確立された後の林況を指しているためである。

漸伐とは、上層木の本数調整によって森林の光環境を制御して前生稚樹の更新状態を管理し、天然下種更新を前提とする総合的な体系である (南雲・山本 2006)。前生稚樹の状態により、上層木の本数調整である伐採の位置づけが異なり、1) 前生稚樹の定着を促すために、林床の腐植の分解を促進し、目的樹種以外の競合植生の緩和を行うための予備伐、2) 種子の豊年期を利用して前生稚樹の発生を誘導するための下種伐、3) 前生稚樹の成長を促進するために上層木を林地から取り除く後伐に区別される。したがって、下種伐後から後伐に至る段階においては、上層木と前生稚樹によって一時的に二段の林冠層が形成されることとなり、漸伐は育成複層林のうち短期二段林施業に相当することとなる。さらに、後伐のうち上層木すべてを林地より取り除く伐採を終伐と呼称し、以上の過程を経て更新を完了する (Ashton and Kelty 2018)。

すなわち、漸伐は、天然更新の誘導の初期段階において、一般に上層木の本数密度を極端に下げないことにより林内光量を低く維持し、耐陰性のある樹種の発生に有利な環境を意図的に形成する (Nyland 2016) ことを本旨とする。続いて、発生した前生稚樹が成長し、光要求度が高まるとともに前生稚樹の光補償点を上回るように上層木を漸次減少させ、前生稚樹の成長促進を意図する体系である (Ashton and Kelty 2018)。以上により、漸伐は目的樹種による連続的な林地被覆が担保される。したがって、皆伐や母樹法などの後更作業と異なり、林地の裸地化が避けられる点から環境保全に対して有利である (林野庁 2021)。

日本の主要造林樹種のなかでは、ヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* Sieb. et Zucc.) が天然更新の容易さや更新過程から漸伐に適していると考えられている (四手井ら 1974; 赤井 1991)。種子の散布から始まるヒノキの天然更新では、種子散布数と発生する前生稚樹数には正の相関関係が認められており、散布様式は集中的で (加茂・赤井 1976)、結果として前生稚樹の初期分布は集中傾向を示す (加茂・赤井 1976; 山本・堤 1979)。種子が前生稚樹として定着するためには、表土が安定し、また適潤地である必要があり、定量的にも緩傾斜地や黒色

土 (BI<sub>D</sub>) において天然更新の可能性が高いことが明らかになっている (松崎・河原 2006)。ただし、発芽直後の前生稚樹は乾燥害や雨滴障害を原因として死亡率は高く (山本・堤 1980; 山本・堤 1985)、前生稚樹を確保するために豊富な種子が必要である。したがって、集中的に供給される種子を林分にまんべんなく散布させ、気象害に対する保護樹としての役割を期待するために、上層木は林地に均等に配置されることが望ましいということになる。

他方、生物的な条件では、競合植生の管理も重要である。特に、ササの成立は前生稚樹の利用できる光量を著しく減少させる (四手井ら 1974)。前生稚樹の発生には 30% の相対照度が必要 (赤井 1991) であり、ササの除去のためには刈払いや薬剤散布といった更新補助作業が有効である (森澤ら 2010; 齋藤ら 2021)。ヒノキ天然更新の長期的実践の場である三浦実験林においては、帯状皆伐では更新成績がまちまちであり、母樹法は上層木の風倒リスクもあり、最も前生稚樹の成立本数の多い漸伐が安全で確実だと示されている (林野庁中部森林管理局 1999)。

これまで明らかにされてきた知見は、ヒノキの天然更新適地においては、適当な更新補助作業を併用することにより、漸伐によって十分に前生稚樹を誘導することが可能であると示している。加えて、天然更新にかかる作業技術は既存の作業技術で対応可能 (赤井 1991; 二見 1991) である。漸伐のうち、下種伐に至るまでの方法論は明確になっていると言えよう。一方で、下種伐以降の二段林となった林分に対する作業方法、すなわち伐採のあり方は現在でも技術的に確立されておらず (公益社団法人 森林・自然環境技術教育研究センター 2019)、「高度な」技術 (林野庁 2020) が必要だと示されているに過ぎない。したがって、漸伐における伐採方法が技術的に整理され、既存の方法論を補完し、進展させることは、漸伐が技術体系として実践の場で適用可能になることを意味すると考えられる。日本において林業と生物多様性を両立させるために欠くことのできない事柄であろう。

海外の研究成果から後伐や終伐に適切な伐採方法の原則を求めるならば、漸伐における伐採は前生稚樹に配慮し (Saveneh and Dignan 1997)、前生稚樹への損傷の発生が抑制されたもの (Aho et al. 1983; Vasiliauskas 2001) でなければならない。前生稚樹は、次世代の主要な立木になることを意図し、労力をかけてあらかじめ定着させたものであることから、損傷の抑制に異論を挟む余地はない。問題は、上層木の伐採による前生稚樹への損傷は、注意することで軽減することはできるものの、完全になくすことはできない点 (Ashton and Kelty 2018) にあり、前生稚樹を健全に保つためには困難がともなう (Sauder and MacIsaac 2004) ことである。

また、下種伐による二次遷移の林分構造は一般に複雑であり (Arroyo-Rodríguez et al. 2017)、さらには伐採によるかく乱の発生地点にも空間バイアスが存在する (Bettinger and Kellogg 1993; Stokes et al. 2009; Bustos et al. 2010; 近藤ら 2011; 杉田ら 2012) など、前生稚樹と上層

木にはどちらも損傷の発生箇所を複雑にする要因がある。したがって、上層木の伐採による損傷の発生にかかる一般的かつ定量的な指標を得るために、伐採と損傷との関係について空間的な分析 (Uhl and Vieira 1989) を行わなければならない。

ところで、日本では下木への損傷を軽減するための伐採費用はかかり増しとなり、樹下植栽によって造成された育成複層林の導入は利益につながらないとして先送りされてきた経緯がある (二見 1991; 本郷 1992)。したがって、漸伐による一斉林の育成複層林への転換を推進するために、漸伐の導入にかかる収支は現実的なものでなければならない。天然更新を活用する漸伐では、終伐後に残存した前生稚樹による造林費用が軽減 (Holmes et al. 2002; Lotfalian et al. 2010) される点で、植栽によって造成された育成複層林とは収支構造が異なる。また、前生稚樹の確立にかかる更新補助作業の費用は追加の支出であり、利子の発生も通常の人工林とは異なると予測される。

しかし、択伐の導入が進む欧州 (Mason et al. 2022) を含め、伐採費用、産出した丸太、天然更新からなる総合的な経済成果に関する研究は限られており (Valkonen and Valsta 2001; Grönlund and Eliasson 2019)、非皆伐の森林管理にかかる実績に基づく長期の財務評価は国際的にも稀だとされる (Granstrom et al. 2022)。ましてや日本では、まったくと言ってよいほど同種の研究は行われていない。TNFD などの外部評価が構築されつつあるにもかかわらず、カウンターパートとしての森林セクターは、伐採費用と天然更新による造林費用の軽減額との関係だけではなく、非皆伐による森林管理の収益性についての理解が及んでいないのが現状である。日本のヒノキ人工林に対して漸伐の導入が現実的な選択肢であるのか判断するために、漸伐の生産期間にかかる収益性の実態を明らかにしてゆく必要がある。

## 研究の目的

以上の背景より、本論では漸伐の終伐によって発生する前生稚樹への損傷の発生箇所を平面上において解明し、加えて、漸伐の生産期間にかかる収益性を明らかにすることによって、ヒノキ人工林に対する漸伐の技術的導入を進展させることを目的とした。

## 研究の方法

まず終伐による前生稚樹の損傷を説明するため、伐採木と前生稚樹との衝突が損傷の要因であると仮説を立て、平面上において損傷の発生を説明できるモデルを構築した。終伐によって損傷し得る樹高 20 cm 以上のヒノキ前生稚樹 (以下、下層木) の出現様式を詳細に観測するために、伐区内に小面積のグリッドを配置した。伐採される上層木 (以下、伐採木) と下層木との衝突の頻度を推定するため、地理情報システム (GIS) 上に終伐を再現した。終伐前に下層木が存在していたグリッドについて、伐採木による衝突の発生が推定された区域と重なった場合、下層木は伐採による影響を受けたと判定した。衝突の頻度を説明変数

としてロジスティック回帰分析を行い、Akaike's Information Criterion (AIC) に基づいてグリッドあたりの損傷率を算出するモデルを決定した。

次に決定した損傷モデルを検証するために、事業として実施された終伐の現実林分において、伐採木と下層木との衝突が損傷を実用的に識別できるかを実証した。実用性の評価は、二項分類の評価指標である Receiver Operating Characteristic (ROC) 曲線下の面積 (Area Under the Curve (AUC)) に基づいた。

さらに終伐にかかる伐採費用に関して、終伐を撮影した動画から作業時間を抽出する時間分析と作業日報に基づいて算定した。また、施業履歴から過去の作業に発生した収支を算定し、プロットの生産期間にかかる収益性を明らかにした。

最後に、以上の方法によって明らかになった成果を総合的に検討し、ヒノキ人工林に対する漸伐の技術的導入手法について考察を行った。

なお、個別の試験地における研究方法については、上述した研究方法を基本としつつも、別途、各章において説明を加えた。

## 研究小史

### 1 伐採にかかる下木への損傷

漸伐をはじめ、上層木の伐採による下木 (以下、ヒノキ前生稚樹である下層木を除き、上層木以外の個体を下木と記述する) への損傷にかかる懸念は古くから共有されてきた問題である。Vasiliauskas (2001) によれば、1926 年にはすでに損傷の重要性が指摘されていたという。さらに、Pinard and Putz (1996) は、損傷した下木の自然死亡率が健全な個体よりも上昇するとしている。樹冠の損傷は成長率の低下にも影響し (Shenkin et al. 2015)、伐採による下木の損傷は長期的な影響としても表れることが明らかにされてきている。また、損傷は木材腐朽の要因であり (Shigo 1966)、Tesch et al. (1990) や Mihelič et al. (2018) は将来の木材価値の損失につながることを示した。したがって、伐採にかかる下木への損傷は可能な限り抑制されることが望ましく、現在に至るまでに世界各地で多くの調査が行われている (Vasiliauskas 2001)。

しかし、従来採用されてきた損傷評価手法では、伐採により損傷の発生箇所に空間的な偏り (Bettinger and Kellogg 1993; 杉田ら 2012) が生じることを表現できない欠点があった。従来の評価手法とは、所与の調査区画における伐採前の下木本数を分母とし、伐採で発生した損傷本数を分子とする損傷率である。この手法では、損傷リスクが平均的な値に丸められてしまい、局所的な損傷強度の空間変動にかかる情報が失われてしまう。一方で、伐採による下木の損傷は、伐採木との衝突によって生じ (湊・寺本 1989; Fjeld and Granhus 1998; Sirén 2001)、衝突の発生箇所は平面上均一ではない。現実の伐採においては、架線搬器が移動する集材線や、走行車両が往復する路網付近において下木の損傷強度が高い (Glöde and

Sikström 2001; 澤口ら 2001; Fajvan et al. 2002; Froese and Han 2006; Stokes et al. 2009)。また、伐倒時の損傷発生は伐倒方向に依存する傾向 (松尾ら 1995; 今井ら 1995; 澤口ら 2001; 佐々木ら 2005; 佐々木ら 2008; 高橋ら 2011) があり、木寄せ、集材では伐採木の移動にもなう (Tesch et al. 1986; 近藤・今井 2007; 佐々木ら 2008) 損傷の発生が観測されている。以上の知見は、伐採による損傷の発生と下木の分布には関係があることを示唆している。つまり、調査区画の平均的な値を示す損傷率は、特定の林分で特定の作業システムを使用した結果、特定の調査区画において特定の損傷が発生したことを報告しているに過ぎない (Bettinger et al. 1998)。

漸伐の伐採において、将来の林分にとって重要な情報は、損傷した下木の割合よりも、残存した下木の数、大きさ、質、空間分布である (Surakka et al. 2011)。したがって、下木への損傷はより詳細に評価すべき (Košir 2008) であり、伐採被害はマッピングや定量的な空間分析を組み合わせる (Uhl and Vieira 1989) 必要がある。

従来の損傷率に代わり得るものとして、伐採地の地理空間情報を説明変数に含むロジスティック回帰分析による損傷率の推定がある (Youngblood 1990; Granhus and Fjeld 2001; Sirén 2001; Surakka et al. 2011; Tatsumi et al. 2014; Sirén et al. 2015)。ロジスティック回帰分析では、ある下木  $\varepsilon$  が伐採によって損傷を受けているか、あるいは健全であるかを推定し、応答変数が二項分布に従うと仮定する (以下の (1) 式から (4) 式):

$$y_{\varepsilon} = 1, \text{ 損傷} \quad (1)$$

$$y_{\varepsilon} = 0, \text{ 健全 (損傷なし)} \quad (2)$$

$$y_{\varepsilon} \sim \text{Binomial}(1, P'), \quad (3)$$

$$\text{logit}(P') = \beta' + \sum \beta'_{\gamma} x_{\gamma\varepsilon}, \quad (4)$$

ここで、 $y_{\varepsilon}$  は下木  $\varepsilon$  の状態を、 $P'$  は推定される損傷率を、 $\beta'$  と  $\beta'_{\gamma}$  は推定パラメータを、 $x_{\gamma}$  は説明変数を示す。応答変数は 0 から 1 の間の範囲をとるため、推定値の解釈、すなわち下木  $\varepsilon$  が損傷しているか、あるいは健全なのか、閾値を設定することにより判定が明確となる。また、二項分類に対してはモデルの評価指標としての ROC 曲線下の AUC があり、モデルの有効性を評価する基準 (Hosmer et al. 2013) も確立している。以上の特徴から、ロジスティック回帰分析は、伐採による下木への損傷を評価するための基礎として適用可能である。

しかし、上記のモデルで採用されている平面上の説明変数は、1) 個体が路網と架空索との内外どちらに分布するかを示すダミー変数 (Youngblood 1990)、2) 最も近い伐採木までの距離 (Tatsumi et al. 2014; Sirén et al. 2015)、3) 最も近い路網までの距離 (Granhus and Fjeld 2001; Surakka et al. 2011; Tatsumi et al. 2014)、4) 周辺の伐採強度 (Surakka et al. 2011; Sirén et

al. 2015), が採用されてきた。これらは作業システムの影響を明示的に示す説明変数ではなく、損傷発生箇所の平面上の再現性が高くはない問題があった。例えば、伐採木までの距離や周辺の伐採強度といった変数は、距離に依存して損傷率が変動する。したがって、距離算定の起点である伐採木や下木  $\varepsilon$  からの距離が等しければ、相対的にどのような位置関係であったとしても、損傷率は同値として推定されることとなる (図 1)。

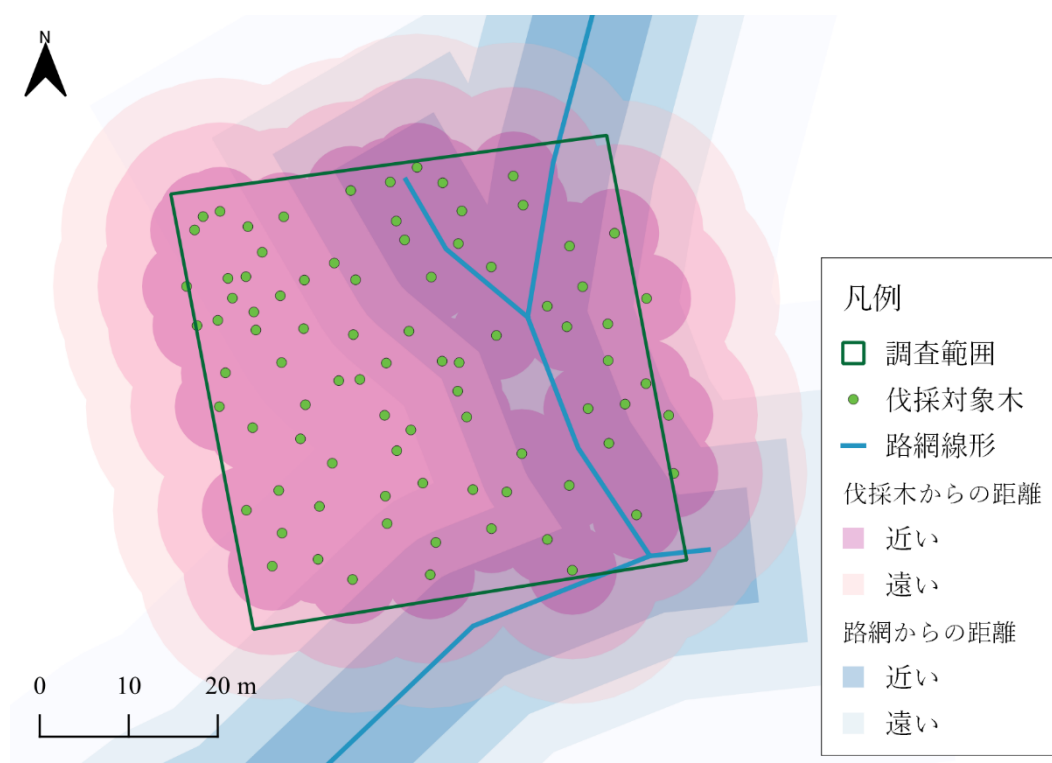


図 1 従来の損傷率モデルによる損傷率推定のイメージ

注) 図中の要因からの距離が近い、すなわち色の濃い地点ほど損傷率が高い。したがって、終伐で上層木がすべて伐採される状況において、伐採木の距離に基づく損傷率の推定では平面上における損傷率の変動が表われにくいと考えられる。

現在までに損傷率のモデルに採用されてきた説明変数では、損傷率の変動はほぼ路網配置に依存することとなり、伐倒方向によって決定される伐倒による損傷を推定できない。むしろ、より単純に、伐倒木が伐倒により接地した樹冠内に位置する下木の損傷率を求める (近藤ら 2009) など、損傷の明示的な要因を取り扱うこと (Tatsumi et al. 2014) で、下木の損傷発生箇所を効率的に説明できるのではないだろうかと考えた。伐採木と下木との衝突の発生箇所に基づく分析であれば、伐採強度の平面上のバイアスに加え、下木の分布をも考慮する (Granhus and Fjeld 2001; Stokes et al. 2009) ことになるため、林分構造に依存しない損傷の評価方法となることも期待できるだろう。

## 2 下木の存在が伐採費用のかかり増しに与える影響

コスト分析を行う基準のひとつは伐採にかかる生産性であり、時間分析や作業日報によって産出量にかかる作業時間を算定する。生産性は、以下の (5) 式によって定義される:

$$\text{生産性} = \text{産出量} / \text{投入量} \quad (5)$$

すなわち、産出量と投入量の比によって算出する。単位時間あたりの生産量と定義される生産速度 (岩岡 2020) は、胸高直径 (DBH)、伐採工程、機械化率、稼働率、伐採面積の順に影響される (Louis et al. 2022)。また、下木によっても影響を受け (Eliasson 2000; Ghaffariyan 2021)、下木の密度 (Kärhä 2006; Niemistö et al. 2012)、樹高 (Kärhä 2006) は生産速度の低下要因である。したがって、下木の損傷を抑制するために配慮された伐採では生産速度が低下し、伐採費用が高額となることが論理的に導かれる。

しかし、下木に配慮することによって、伐採の労働生産性がどの程度低下するのか明らかにされた事例は少ない。日本の育成単層林と育成複層林との間伐の生産速度において、遊橋 (1995) は作業効率が 37% から 63% まで悪化したと報告している (表 1: 右側に作業効率を記載した)。一方、山田ら (2011) は、高齢林のヒノキ林において、単木の材積が大きくなるために一斉林における間伐よりも高効率であったとしている。海外の後伐においては、Eliasson (2000) は伐採木 1 本あたりにかかる延べ所要時間が 21% から 51% 余分にかかることを示している。同様に、Hånell et al. (2000) は、後伐の延べ所要時間は単層林の 97% から 156% かかり増しとなることを確認している。また、終伐においても生産速度は減少し、Niemistö et al. (2012) は皆伐と比較して 19% から 32% 悪化することを示している。下木による作業効率の低下は、下木の存在によって視界が悪化することにより周囲の確認に時間を要し、伐採木や丸太、機械を下木に接触させないように慎重な作業が行われる (Eliasson et al. 1999; Hånell et al. 2000; Niemistö et al. 2012) ことに起因する。ヒノキ漸伐林の終伐では、下層木が 1 m<sup>2</sup> あたり 1 本から 3 本以上成立する (赤井 1991) ことにより実行される。対して、Kärhä and Bergström (2020) は、伐倒において針葉樹下木の本数密度が 1,152 本/ha、樹高 1.42 m に達した場合には作業効率の低下がみられるとしており、少なくとも下層木の本数密度は終伐の作業効率を低下させる水準にある。実際に報告された事例はないものの、ヒノキ漸伐林における終伐の生産性が低下することは明らかである。



表 1 間伐・後伐における作業効率の低下程度

著者	単位	育成単層林	育成複層林	育成複層林対単層林比
遊橋 1995	m <sup>3</sup> /人日	10.18	5.52	0.54
		14.64	5.52	0.37
		10.18	6.43	0.63
		14.64	6.43	0.43
山田ら 2011	m <sup>3</sup> /人日	2.26	5.97	2.64
著者	単位	育成単層林	育成複層林	育成複層林対単層林比
Eliasson 2000	sec./tree	41.20	62.08	1.51
		41.20	50.04	1.21
		41.20	49.82	1.21
Hånell et al. 2000	sec./tree	7.2	18.4	2.56
		7.2	15.9	2.21
		7.2	14.2	1.97

注) 上段 (労働生産性) では、作業効率が高いほど数値が大きくなる。下段 (延べ所要時間) では、作業効率が高いほど数値が小さくなる。

一方で、漸伐は天然更新のために、終伐後に残存した下層木は造林費用を削減する働きがあるため、Eliasson (2000) は、下木による追加支出と造林費用の削減の可能性を慎重に比較する必要性を指摘している。そこで本論では、終伐の生産速度を観測する調査地において、下層木の分布を同時に観測することにより、下層木の存在する林分に特有の伐採費用と、健全な下層木から期待される造林費用の削減額を関連付けて分析した。

## 研究の意義

本論は、今後の国際的な標準となることが推測される、生物多様性に配慮した森林管理を日本において推進するため、人工林に対する漸伐の技術的導入を推進することを目的とした。日本の主要造林樹種のなかで、ヒノキは人工一斉林に対する天然更新の導入についての方法論が理論的に提案されている。一方、伐採による下層木への損傷の発生は今日まで議論されてきた課題であったにもかかわらず、天然更新に起因する下層木のランダムな分布、また伐採による林地かく乱の局所的な変動にも影響を受ける損傷発生箇所の不均一さを説明するものはない。伐採木と下層木の衝突を基にして、伐採と下層木損傷との関係を平面上において明らかにすることは、損傷の発生を客観根拠に基づいて評価することであり、損傷を抑制する伐採方法の定量的な解明に貢献するだろう。また、漸伐の生産期間における経済的

な成果を示すことは、ヒノキ人工林に対する漸伐の導入が現実的な選択肢であるのか明らかにする点で貢献する。

以上により、本論は天然更新の導入に続く終伐、生産期間の収益性をはじめて明らかにすることで、既存の漸伐にかかる方法論を補足し、体系化に寄与することができると考える。

## 第 1 章 調査地の概要と施業履歴

### 1.1 奈良本山国有林

#### 1.1.1 自然条件

調査地のひとつである奈良本山国有林 1180 林班は、長野県小県郡青木村内に位置している (36°32' N, 138°09' E) (図 1-1)。図 1-2 から図 1-4 にかけて、調査地のある 3 次メッシュにおける、過去 30 年間の月別平均気温 (図 1-2)、同月別平均降水量、同 12-3 月における月別平均最深積雪 (図 1-3)、同年平均月別全天日射量 (図 1-4) を示す。調査地は、ケッペンの気候区分において亜寒帯湿潤気候 (Dfa) に相当し (Peel et al. 2007)、年間平均気温は 18.3°C、平均年間降水量は 1159.6 mm、年間平均全天日射量は 15.1 MJ/m<sup>2</sup> である (国土交通省 2022)。両林小班は標高 1000 m から 1160 m の間に位置し、土壌型は適潤性から弱湿性黒色土 (Bl<sub>D</sub> - Bl<sub>E</sub>)、斜面の向きは北東向き 10° である (林野庁中部森林管理局 2014a)。地質はバーディガリアン期よりランギアン期にかかる堆積岩のうち、泥岩である N1 som に区分される (産総研地質調査総合センター 2023)。当該林小班は植林地に区分されるため、潜在的な自然植生を調査地周囲に求めれば、ブナクラス域代償植生地であり、垂直分布としては山地帯に相当する (環境省自然環境局生物多様性センター n.d.)。

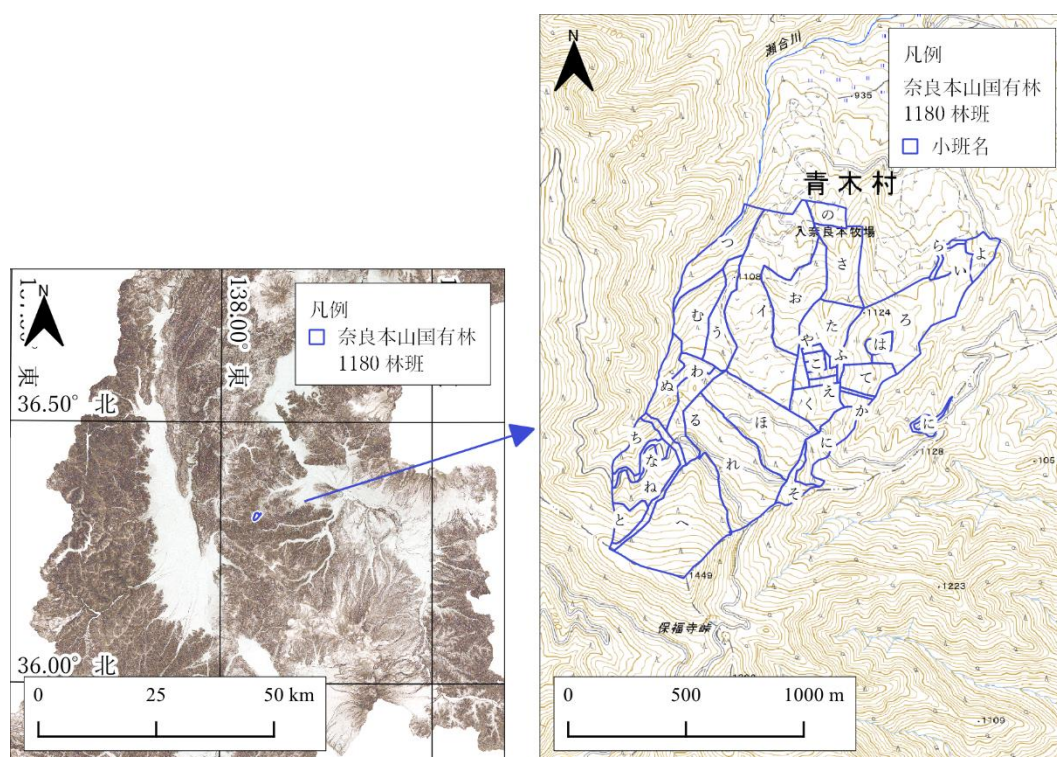


図 1-1 奈良本山国有林 1180 林班位置図

注 1) 左図背景は全国 CS 立体図 (長野県林業総合センター 2017) を加工して作成した。

注 2) 右図は国有林野データ (国土交通省 2019); 地理院タイル (国土地理院 n.d.) を加工して作成した。

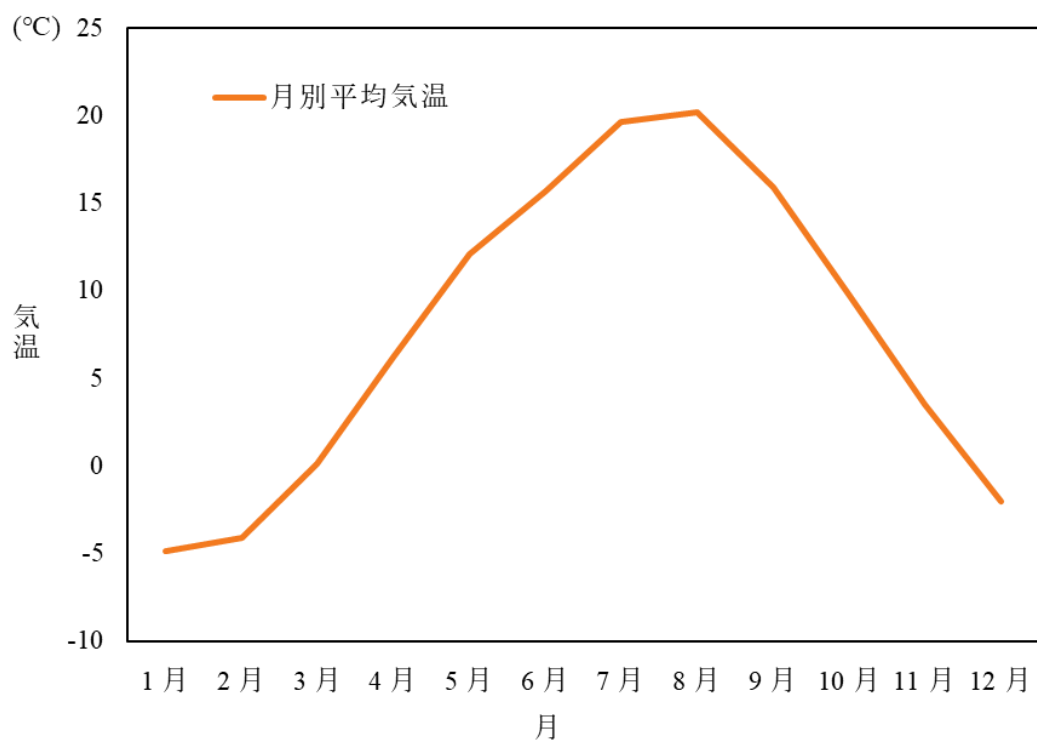


図 1-2 奈良本山国有林 1180 林班における月別平均気温

注) 平年値メッシュデータ (国土交通省 2022) を加工して作成した。

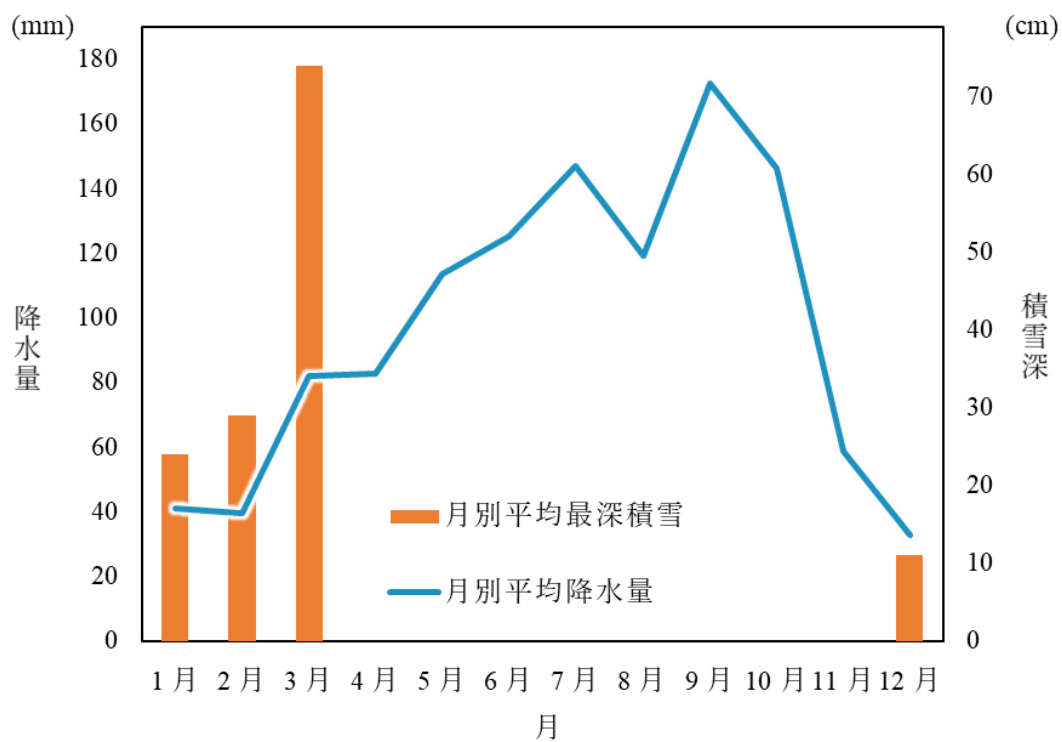


図 1-3 奈良本山国有林 1180 林班における月別平均降水量と月別平均最深積雪

注) 平年値メッシュデータ (国土交通省 2022) を加工して作成した。

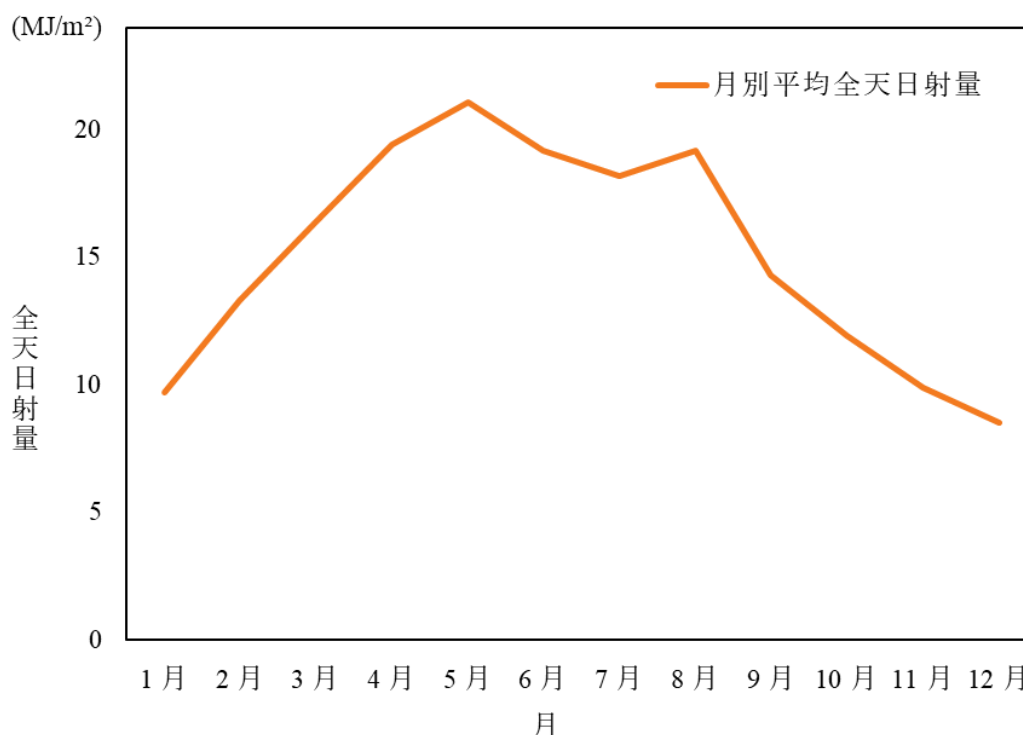


図 1-4 奈良本山国有林 1180 林班における月別平均全天日射量

注) 平年値メッシュデータ (国土交通省 2022) を加工して作成した。

以上の自然的条件について、松崎・河原 (2006) による天然更新の可能性を推定する式に適用する (標高 1000 m 以上, 傾斜度 10° 以下, 下種伐時の林齢 63, 土壌型 Bl<sub>p</sub>, 林床被覆度大, 林床型ササ) と, 当該林小班の成績は 1.828 となり, 天然更新の可能性が小 (河原・井鷲 1988) であったことが示された。

### 1.1.2 施業履歴

表 1-1 に 1180 た林小班の施業履歴を, 表 1-2 に 1180 く林小班の施業履歴を示す。両林小班は当初から漸伐として整備されてきた林分ではなく, 天然更新が確認されたことによって 1977 年にヒノキ人工林天然更新実験林に設定された。く林小班は, た林小班より分筆されたものである (長野営林局計画課 1982)。両林小班は全面笹生地であり, 更新補助作業として, た林小班では延 78 人工, く林小班には延 2 人工の労働力が投入されたことにより (林野庁中部森林管理局東信森林管理署 n.d.), 全面的にヒノキ前生稚樹の成立を完了した林分であった。また遠藤 (2005) によると, 上層木のヒノキは 1915 年に植栽され, 1977 年までに 2 度の伐採が行われてきた。これらの伐採によって大半の林床にヒノキ前生稚樹が生育し, 天然更新実験林として設定された。1979 年には上層木の本数比で 45% の後伐が行われ, 最も高密な地点では前生稚樹が 10 万本/ha の密度で出現している (長野営林局計画課 1982)。1993 年には同 40% で 2 度目の後伐が行われ, 2003 年には同 16% で 3 度目の後伐が行われた。終伐前, た林小班はヒノキが優占する上層木に 5% の経歴不明の

カラマツ (*Larix kaempferi* (Lamb.) Carrière) が混交し、く林小班ではカラマツが 30%, アカマツ (*Pinus densiflora* Siebold et Zucc.) が 10% 混交する林分となっている (林野庁中部森林管理局東信森林管理署 n.d.)。

表 1-1 奈良本山国有林 1180 た林小班の施業履歴

年	林齢	作業	伐採材積 (m <sup>3</sup> /ha)	延人工 (人日)	面積 (ha)	備考
1915	1	植栽		-	23.43	
不明	-	各保育作業		-	23.43	
1965	51	間伐	-	-	23.43	
1977	63	下種伐	43.1	-	23.43	
1979	65	後伐	115.4	-	10.60	
1980	66	刈出し		32	10.46	
1982	68	補植 (山引苗)		8	10.46	
1982	68	除草剤散布		3	10.46	資材 50 kg
1982	68	刈出し		21	10.46	
1983	69	殺鼠剤散布		2	10.46	資材 5 kg
1984	70	刈出し		3	10.46	
1984	70	除草剤散布		1	10.46	資材 20 kg
1986	72	刈出し		8	10.46	
1993	79	後伐	93.7	-	5.22	
2003	89	後伐	39.3	-	5.22	
2015	101	終伐	-	-	-	

注 1) 林野庁中部森林管理局東信森林管理署 (n.d.); 遠藤 (2005) より作成した。

注 2) 空欄は該当なし, 「-」はデータがないことを示す。



表 1-2 奈良本山国有林 1180 く林小班の施業履歴

年	林齢	作業	伐採材積 (m <sup>3</sup> /ha)	延人工 (人日)	面積 (ha)	備考
1915	1	植栽		-	23.43	
不明	-	各保育作業		-	23.43	
1965	51	間伐	-	-	23.43	
1977	63	下種伐	43.1	-	23.43	
1979	65	後伐	115.4	-	10.60	後伐後、 た小班から分筆
1983	69	除草剤散布		2	2.92	資材 77.5 kg
1984	70	後伐	62.6	-	2.92	
1992	78	後伐	96.2	-	2.92	
2003	89	後伐	6.5	-	2.92	
2014	100	終伐	-	-	-	

注 1) 林野庁中部森林管理局東信森林管理署 (n.d.); 遠藤 (2005) より作成した。

注 2) 空欄は該当なし, 「-」はデータがないことを示す。

一方, 下層木はほぼヒノキで構成された 2 段林である (図 1-5)。



図 1-5 奈良本山国有林 1180 く林小班の外観

図 1-6 に、両林小班における前生稚樹、下層木の状況を示す。1977 年の下種伐では、旺盛な天然更新を誘導することに成功した。実験林への指定より後伐に至るまで、ヒノキ前生稚樹は樹高成長するかたわら、成長率・成立本数も低下し (柿本・山本 1999)、2003 年には 1 万本/ha を下回ったことが確認されている (遠藤 2005)。また、1995 年の形状比は 171、2010 年では 128 (業務資料により非公開) と、稚樹の良好な成長の目安とされる 100 (四手井ら 1974) を上回っていた。複層林における下層木の形状比が高い理由は、林分構造に原因があると考えられている (竹内 2004)。上層木の被覆により、多層の葉を透過した林内の散乱光は赤色光が少なく、遠赤色光と青～緑色光が多くなる (佐々木 1979)。したがって、下層木のフィトクロムが不活性化され、伸長成長がより促進されたのだろう。終伐を迎える 2014 年、2015 年では、下層木の平均樹高は 3-4 m に達し、伐採による損傷が懸念される水準 (Youngblood 1990; 赤井 1991; Sikström and Glöde 2000) となっていた。下層木の本数密度と樹高を基準にすれば、1985 年には終伐が実施可能であったと考えられる。また、受傷側の DBH は小さいほど損傷リスクが大きくなる (Tatsumi et al. 2014; Sirén et al. 2015) ため、下層木への被害の発生が甚大となることが懸念されるなかでの終伐の実施となった。

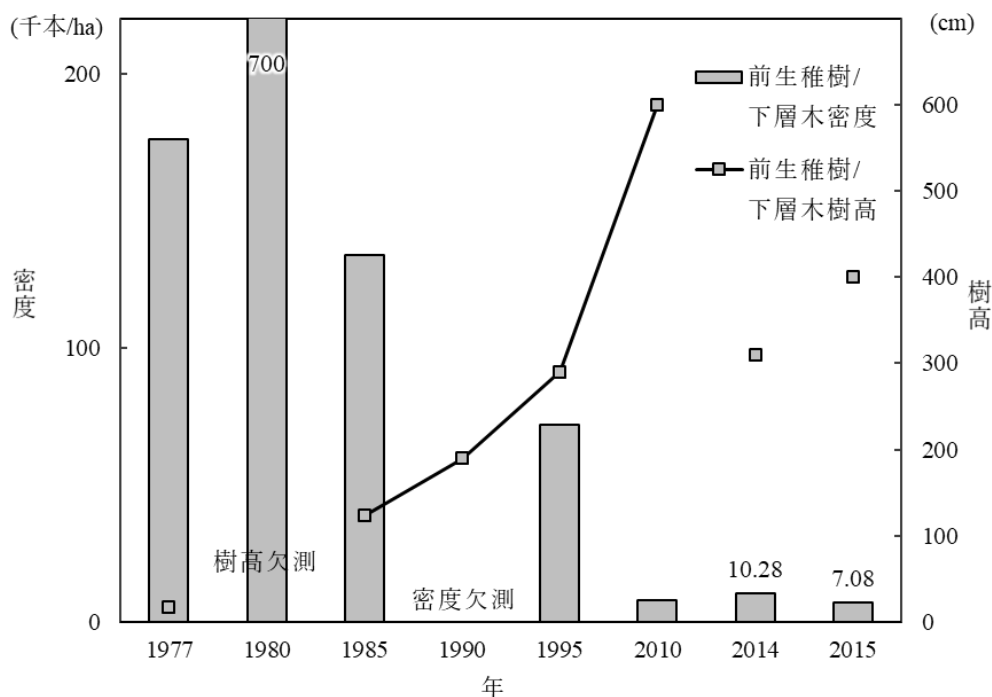


図 1-6 奈良本山国有林 1180 た、く林小班における下層木の状況

注 1) 1977-2010 年の値は長野営林局計画課 (1982); 柿本・山本 (1999) を加工して作成した。

注 2) 2014 年以降は本論の調査において設置したプロットにおける観測値である。



## 1.2 金沢山国有林

### 1.2.1 自然条件

もう一方の調査地は、同県茅野市内に位置する金沢山国有林 1408 に林小班 (35°95' N, 138°17' E) に設けている (図 1-7)。図 1-8 から図 1-10 にかけて、調査地のある 3 次メッシュにおける、過去 30 年間の月別平均気温 (図 1-8)、同月別平均降水量、同 12-3 月における月別平均最深積雪 (図 1-9)、同平年月別全天日射量 (図 1-10) を示す。調査地は、ケッペンの気候区分において亜寒帯湿潤気候 (Dfa) に相当し (Peel et al. 2007)、年間平均気温は 17.8°C、平均年間降水量は 1345.8 mm、年間平均全天日射量は 15.4 MJ/m<sup>2</sup> である (国土交通省 2022)。当該林小班的標高は 1159 m から 1243 m、土壌型は適潤性褐色森林土 (偏乾亜型) を示す BD<sub>d</sub>、傾斜方向は北向き 20° である (林野庁中部森林管理局 2014b)。地質はセランディアン期にかかる高 P/T 型変成岩のうち、珪質片岩である Pg12 mscsi hc に区分される (産総研地質調査総合センター 2023)。当該林小班は植林地に区分されるため、潜在的な自然植生を調査地周囲に求めれば、ブナクラス域代償植生地であり、垂直分布としては山地帯に相当する (環境省自然環境局生物多様性センター n.d.)。

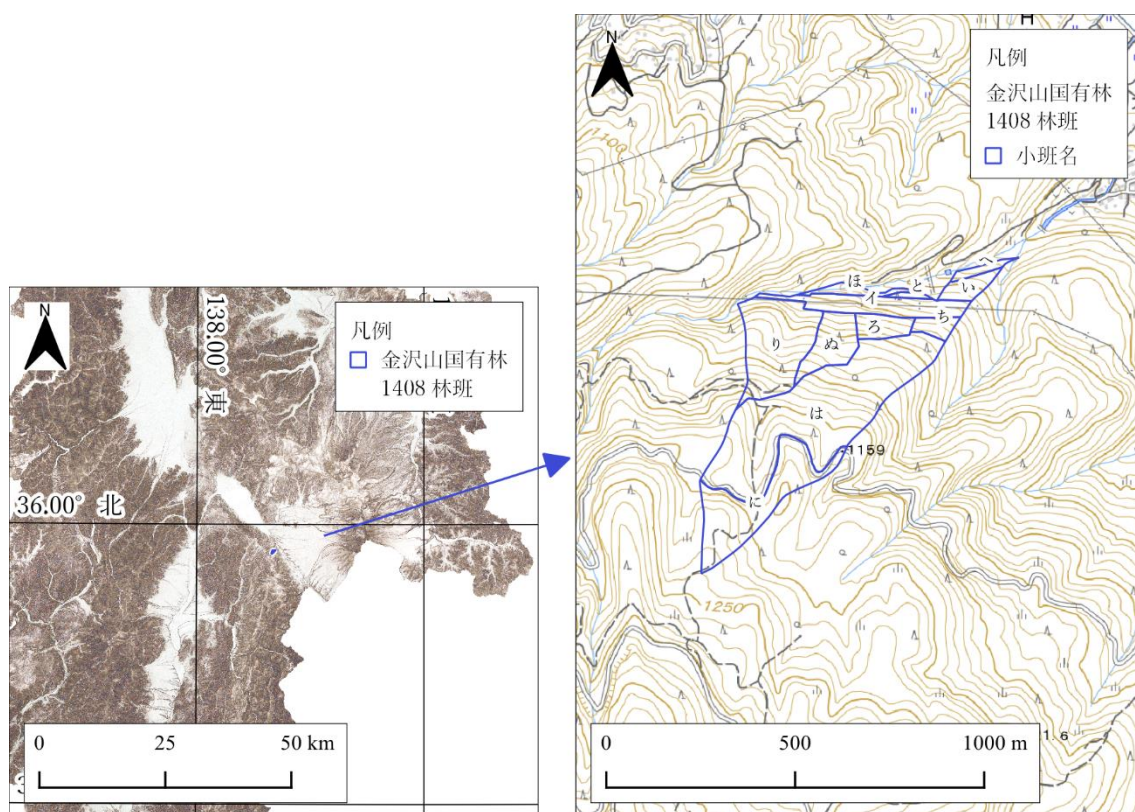


図 1-7 金沢山国有林 1408 林班位置図

注 1) 左図背景は全国 CS 立体図 (長野県林業総合センター 2017) を加工して作成した。

注 2) 右図は国有林野データ (国土交通省 2019); 地理院タイル (国土地理院 n.d.) を加工して作成した。

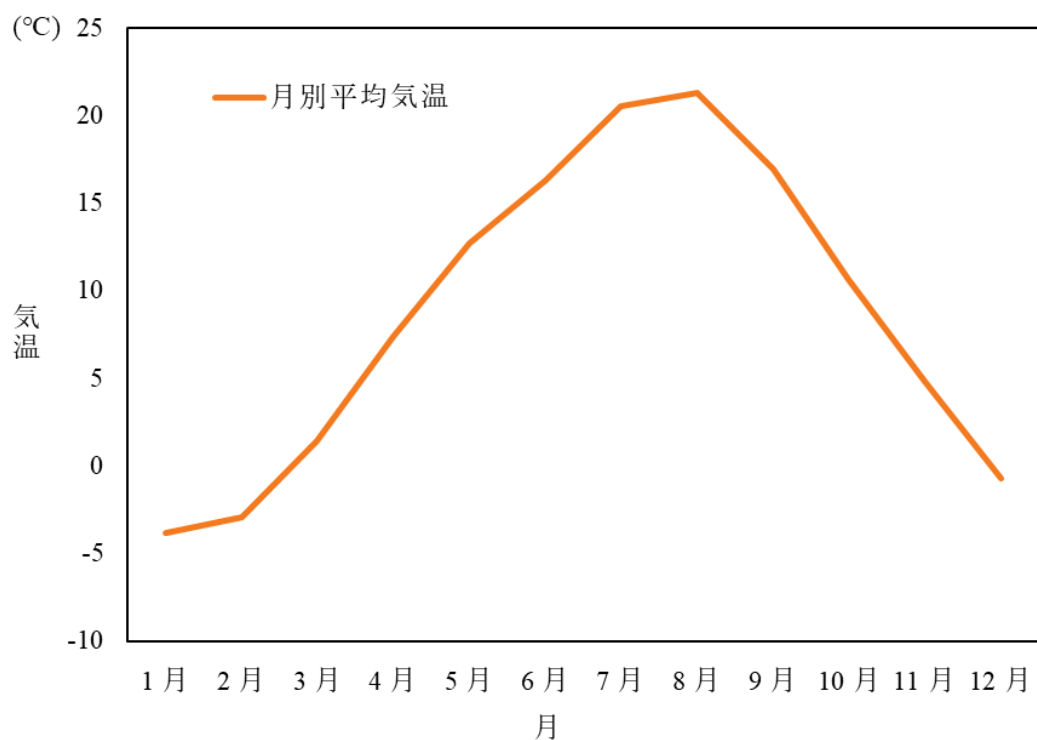


図 1-8 金沢山国有林 1408 に林小班における月別平均気温

注) 平年値メッシュデータ (国土交通省 2022) を加工して作成した。

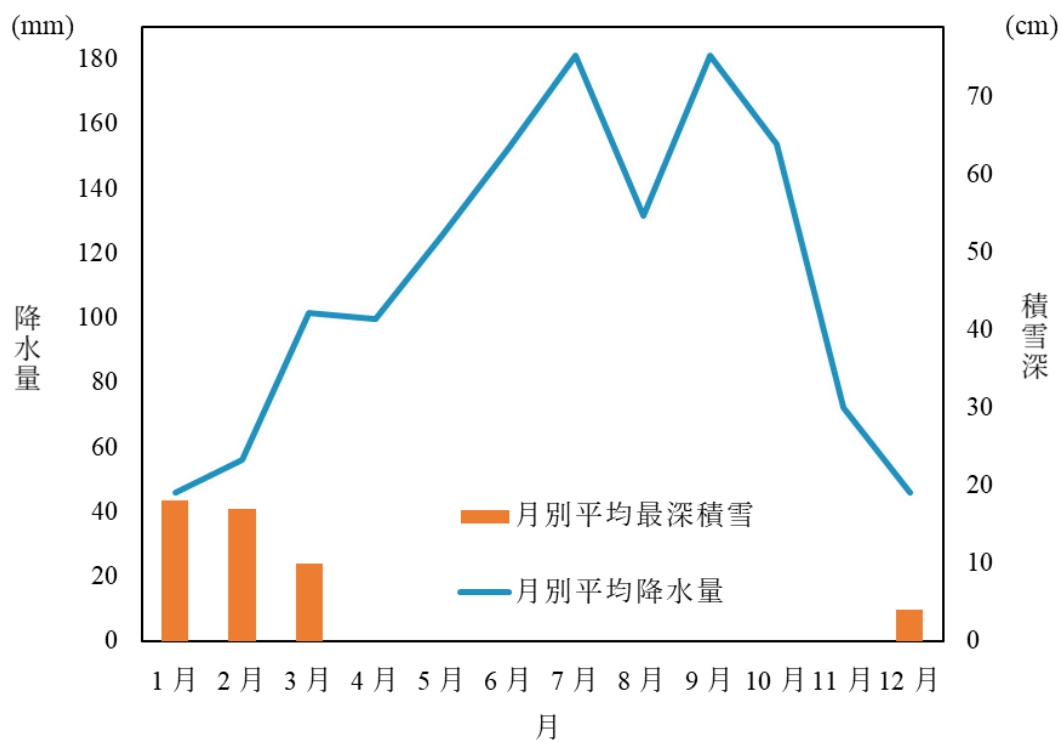


図 1-9 金沢山国有林 1408 に林小班における月別平均降水量と月別平均最深積雪

注) 平年値メッシュデータ (国土交通省 2022) を加工して作成した。

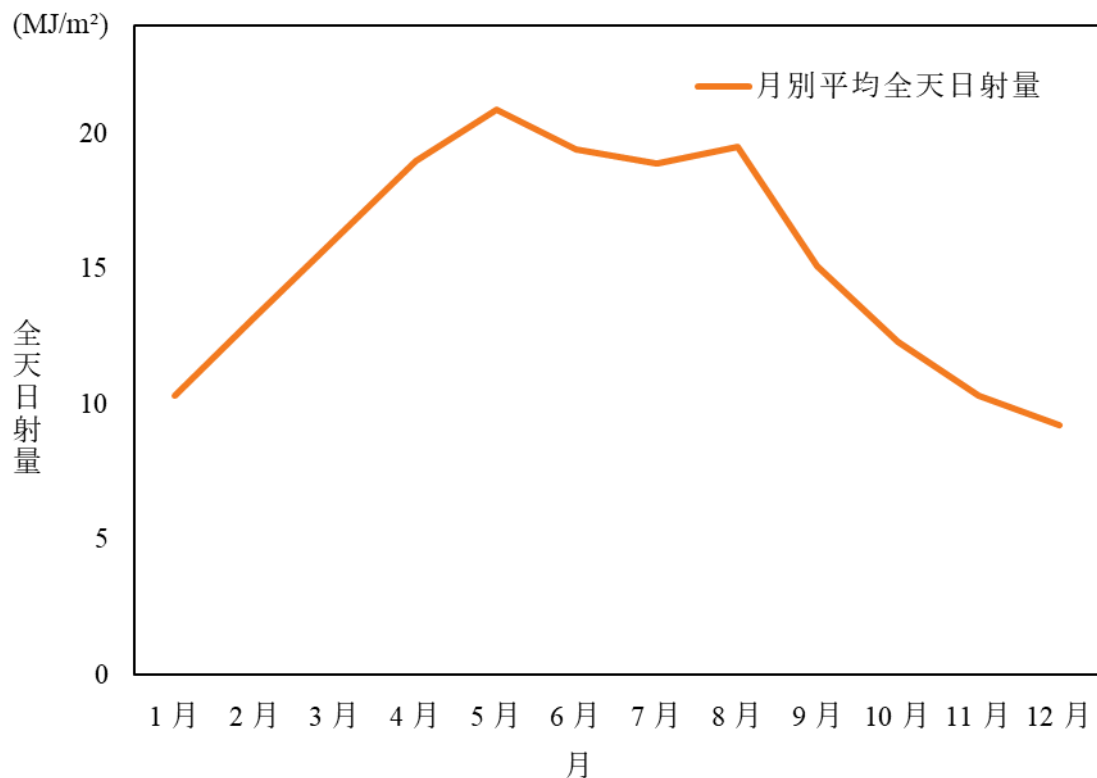


図 1-10 金沢山国有林 1408 に林小班における月別平均全天日射量

注) 平年値メッシュデータ (国土交通省 2022) を加工して作成した。

以上の自然的条件について、松崎・河原 (2006) による天然更新の可能性を推定する式に適用する (標高 1000 m 以上, 傾斜度 20° 以下, 下種伐時の林齢 47, 土壌型 BD, 林床被覆度大, 林床型混在) と, 当該林小班の成績は 1.728 となり, 天然更新の可能性が小 (河原・井鷲 1988) であったことが示された。

### 1.2.2 施業履歴

金沢山国有林も, 当初から漸伐を想定された林分ではなかった。間伐によりヒノキ前生稚樹の天然更新が確認された (林ら 1987) ことにより, 1984 年に天然林施業指標林として設定, 漸伐林分として管理された。

表 1-3 に, 1408 に林小班の施業履歴を示す。上層木のヒノキは 1933 年に植栽され, 1975 年と 1979 年の間伐でヒノキの稚樹が発生している (林ら 1987)。1984 年にはヒノキ以外のすべての高木が除去され, ヒノキが優占する林分として確立されている (林ら 1987; 林野庁中部森林管理局 2014b; 林野庁中部森林管理局南信森林管理署 n.d.)。当該林小班の更新補助作業に費やされた労働力は延 149 人工であった。

表 1-3 金沢山国有林 1408 に林小班の施業履歴

年	林齢	作業	伐採材積 (m <sup>3</sup> /ha)	延人工 (人日)	面積 (ha)	備考
1933	1	植栽		-	4.12	
不明	-	各保育作業		-	4.12	
1975	43	間伐	19.4	-	4.12	
1979	47	下種伐	39.0	-	4.12	
1984	52	後伐	144.3	410	4.15	
1984	52	刈出し		16	4.15	
1985	53	刈出し		46	4.15	
1986	54	刈出し		11	4.15	
1987	55	刈出し		2	4.15	
1988	56	刈出し		9	4.15	
1989	57	刈出し		15	4.15	
1990	58	刈出し		23	4.15	
1990	58	除草剤散布		3	4.15	資材 75 kg
1991	59	刈出し		9	4.15	
1992	60	刈出し		15	4.15	
2005	73	後伐	124.2	-	4.15	
2016	84	終伐 (試験)	141.4	8	0.16	
2021	89	終伐	168.0	110	3.99	

注 1) 林野庁中部森林管理局南信森林管理署 (n.d.); 林野庁中部森林管理局 (2014b) より作成した。

注 2) 空欄は該当なし, 「-」はデータがないことを示す。

図 1-11 に、当該林小班の外観を示す。最終的に上層がヒノキ、下層もヒノキという二段林が形成された。



図 1-11 金沢山国有林 1408 に林小班の外観

図 1-12 に、当該林小班における前生稚樹、下層木の状況を示す。1979 年の下種伐以後、刈払いが投入されることによって旺盛な天然更新の誘導に成功していた。奈良本山国有林における推移と同様に、前生稚樹から下層木のサイズへと成長して以降、下層木の樹高は徐々に高くなりながら、本数密度は減少傾向にあった。一方で、試験的な終伐を迎えた 2016 年においても、下層木の平均樹高は伐採による損傷の折損を避けるために推奨される樹高の範疇であった。

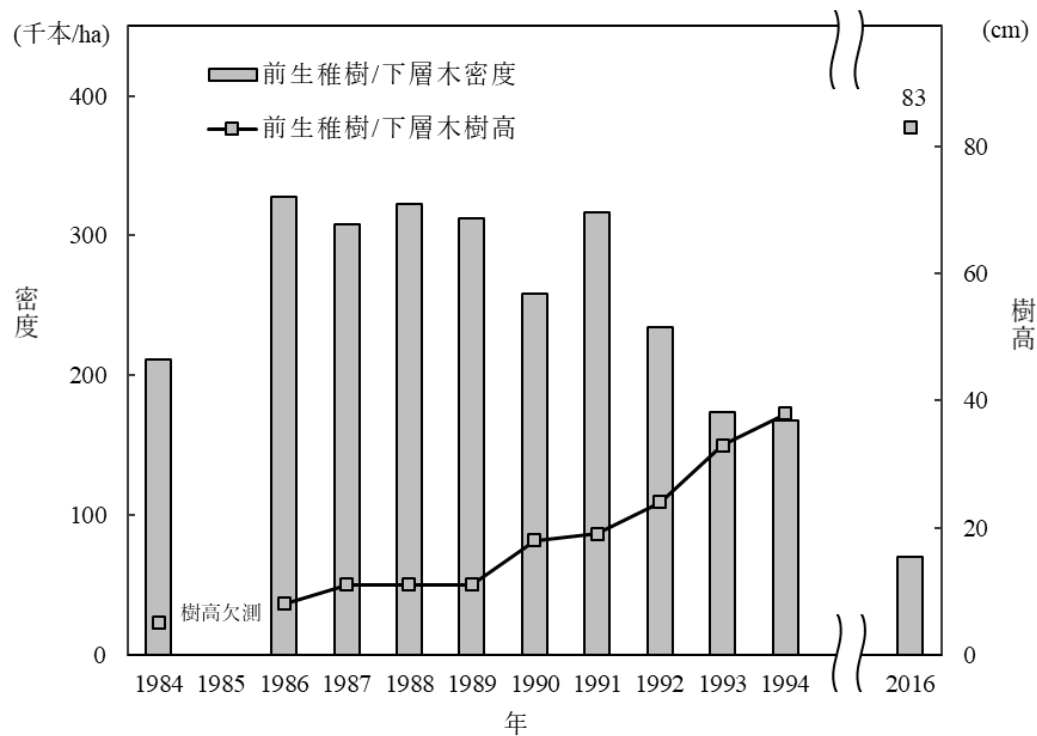


図 1-12 金沢山国有林 1408 に林小班における下層木の状況

注) 林野庁中部森林管理局 (2014b); 松井ら (2017) を加工して作成した。



## 第 2 章 伐採木と損傷した下層木との平面上における関係

### 2.1 調査プロットの概要と採用された作業システム

#### 2.1.1 調査プロットの概要

奈良本山国有林 1180 た林小班を調査地とした。終伐の作業範囲のなかに、東西 25 m、南北 50 m の方形の調査プロット (図 2-1) を設置した。プロットの東側を南北に走る森林作業道は、既存の集材路を補修したものであり、幅員 3 m であった。

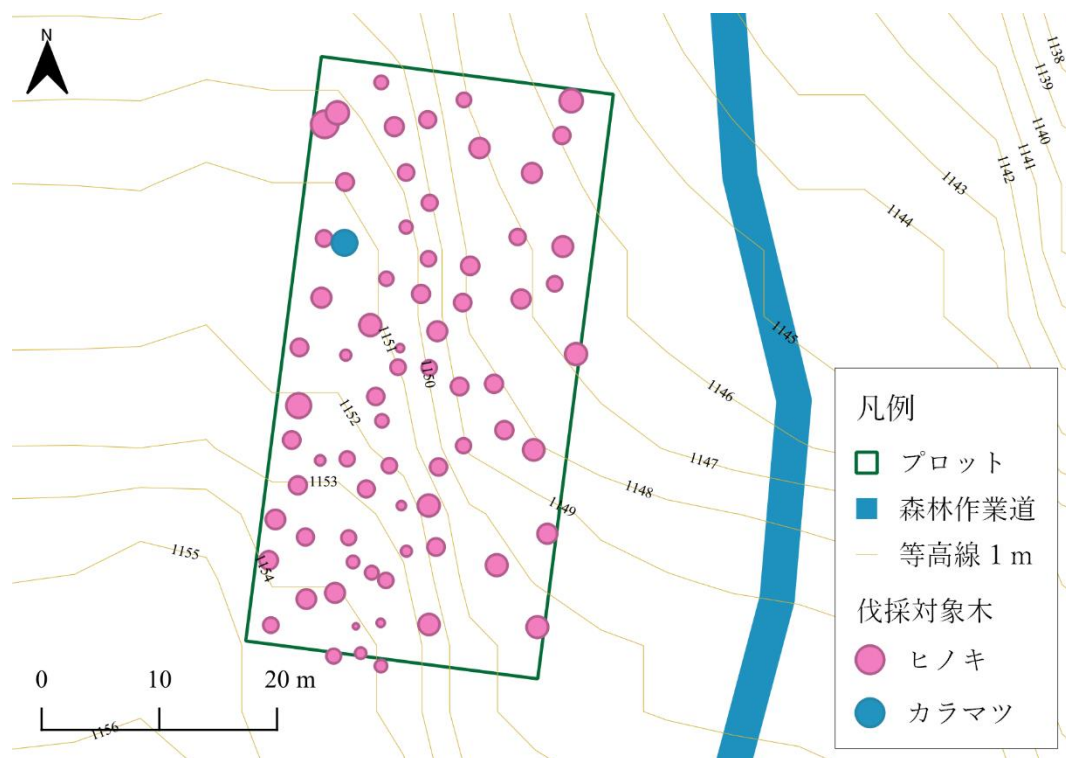


図 2-1 調査プロットの施業図

注 1) 基盤地図情報数値標高モデル (n.d.) を加工して等高線を作成した。

注 2) 伐採対象木のシンボルは、それぞれ DBH を 6 倍強調して表示した。

プロット内の伐採対象となった上層木は 72 本であり、うち 1 本はカラマツであった。上層木について毎木調査 (表 2-1) を行い、林野庁が調製した 2 変数の幹材積式 (1970) を用いて個々の立木幹材積を求めた。

表 2-1 プロットの上層木概要

項目	平均値	標準偏差	最小値	中央値	最大値
DBH (cm)	35.7	8.61	12.8	36.1	57.8
樹高 (m)	22.1	2.49	13.1	22.5	27.4
立木幹材積 (m <sup>3</sup> /本)	1.06	0.49	0.09	1.01	2.69

### 2.1.2 採用された作業システム

終伐は、2015 年 11 月、ウインチ地引きをともなう車両系作業システム (図 2-2) によって行われた。作業班は 2 名の作業員で構成され、各工程は 1 名ずつ担当した。また、作業員は、作業の進捗状況に応じて従事する工程を任意に変更したため、重機専任の作業員は配置されなかった。



図 2-2 終伐の作業システム

まず、作業員は森林作業道に向かってチェーンソーで上層木を伐倒し、直後に伐採木の枝払いを行った。作業員は、作業に支障をきたすと判断した場合、伐採木の周囲に位置する下層木などを刈払った。全幹となった伐採木は、ハーベスタ (KETO 150 Eco Supreme) を装備したベースマシン (KOMATSU PC-138US-10; 車両質量, 13.3 t; 定格出力, 69.7 kW/2050rpm) によって森林作業道上から直取りされるか、ブームに取り付けられた単胴ウインチ (IWAFUJI TW-2S; 平均けん引力, 17.9 kN) を使用して地引きされ、森林作業道に達するまで木寄せされた。なお、本終伐において、ハーベスタは伐倒と枝払いには一切使用されなかった。木寄せの角度は伐倒方向の延長であり、木寄せの基点となるベースマシンは適宜移動された。ウインチは遠隔操作が可能なりモコン式で、作業員は単独でメインラインの引き出しを行った。ウインチ作業中に下層木が伐採木の木寄せに支障をきたした場合、作業員は下層木を支障木と見なして除去することによって問題を解決した。木寄せされた伐採木は、森林作業道上で造材された。元玉は出荷先の木材センターの要望 (当時の聞き取りの記録では、中京圏から買い付けに来る業者より、樹皮の剥がれを抑制してほしいとの要望があった旨の記述が残っている) によりチェーンソーで手造材され、2 番玉以降はハーベスタで機械造材された。丸太は森林作業道に沿って、直交方向に巻立てられた。以上の工程は 11 月 9 日から 11 月 11 日までの 3 日間に行われた。巻立てられた丸太は、後日、グラップルローダーを備えたフォワーダ (IWAFUJI U-5CG; 車両質量, 9.5 t; 定格出力, 120 kN/2000rpm; 最大積載量, 5 t) によって土場まで集材された。

終伐直後、伐根のツルにクリノメーターを当てがい、プロット内の 72 本の伐根から伐倒方向を調査した。本終伐において、ベースマシンは森林作業道のみを移動した。したがって、終伐の際にプロットの下層木に損傷を与えた原因は、プロットの伐採木か、作業員による刈払い作業のいずれかに限定された。

## 2.2 終伐前の下層木分布および終伐により発生した損傷木と残存した健全木の分布

### 2.2.1 終伐前の下層木分布

終伐前、樹高とともに下層木の分布を測定した。プロットを 1m 四方の小さなグリッドに細分化し、グリッドレベルで下層木の分布を把握した (図 2-3)。



図 2-3 グリッドの設置と終伐前の林床の様子

注) 伐採対象の上層木には白テープを巻きつけた。

図 2-4 に、終伐前の下層木の分布を示す。作業員によって刈り取られた下層木を除き、885 本の下層木を観測した。グリッドあたりの下層木の出現頻度は、多くが 1 本/m<sup>2</sup> 以下であり、ひとつのグリッドに複数の下層木が見られたグリッドの総数に占める割合は 5.1% である (図 2-5)。下層木の樹高の分布は一山の形状をしている (図 2-6) ものの、正規性を検定する Shapiro-Wilk test (5% 水準) では  $p < 0.01$  であった。したがって、終伐前の樹高階は正規分布とは言えなかった。



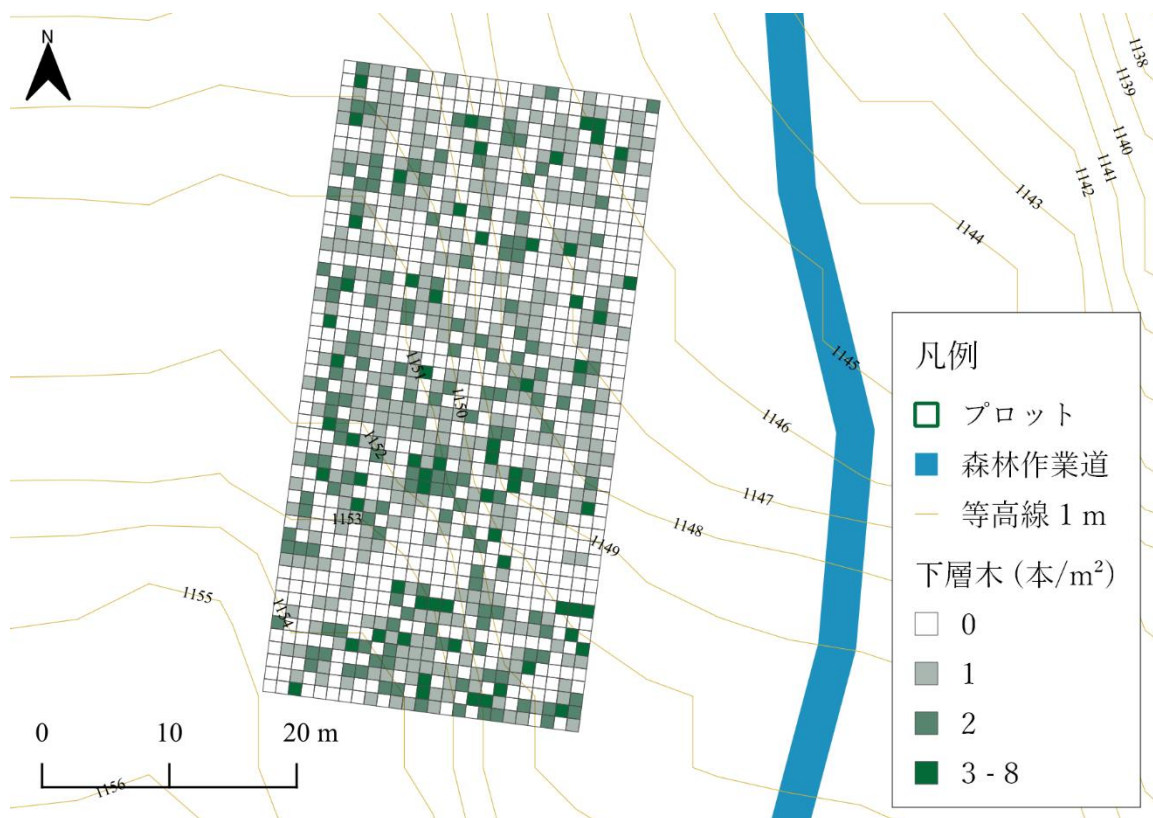


図 2-4 終伐前の下層木の分布

注) 基盤地図情報数値標高モデル (n.d.) を加工して等高線を作成した。

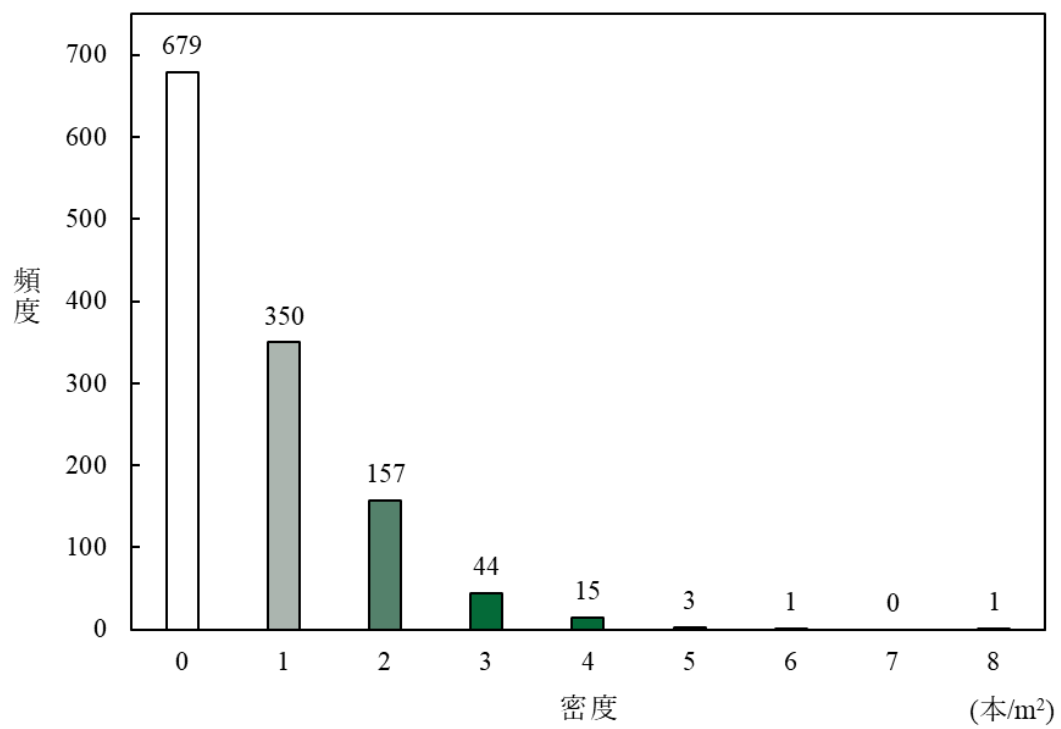


図 2-5 グリッドあたり下層木の出現頻度

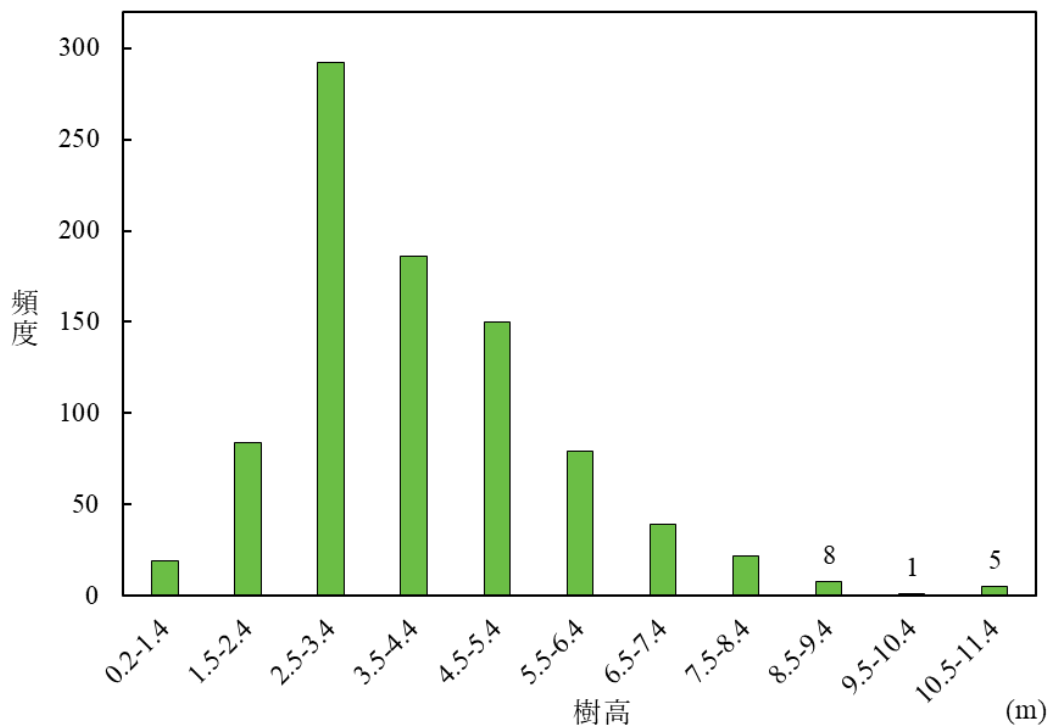


図 2-6 終伐前における樹高階別下層木の出現頻度

### 2.2.2 終伐により発生した損傷木と残存した健全木の分布

終伐後の下層木の状態は、目視調査により以下のように分類した:

- 1) 損傷木 (倒伏, 幹傾斜, 幹折れ, 梢端折れ, 枝折れ, 樹皮剥離)
- 2) 健全木 (未損傷, 終伐により折れた生枝数が終伐前の 25% 未満の下層木)
- 3) 作業員が作業空間を確保するために刈り取ったもの

個体に発生した枝折れの量が終伐前の 25% 未満であれば、経年回復により、材の価値に影響を与えないことが報告されている (近藤ら 2008)。そこで、25% 未満の生枝折れは回復が期待できる軽微な損傷とし、健全木に含めた。3) の区分については、作業員が安全に作業を行うために不可欠なものとし、もともとプロットには存在しなかった個体として後処理を行った (38 グリッド; 41 本)。個体に複数の損傷を観察した場合は、重度の分類を適用した。最後に、樹高による下層木の損傷リスクを比較するため、損傷木と健全木に対し、2 標本の独立性を検定する Chi-squared test (5% 水準) を行った。

図 2-7 に、終伐後の損傷木の分布を示す。444 本の損傷木を観測した。プロット全体での損傷率は 50.2% であった。損傷が軽微なもの、すなわち、生枝の折損が 25% 未満であった個体の出現数は 5 本であった。健全木は損傷木の周辺に残存し、プロットの 24.7% (309/1250 グリッド; 図 2-8) に観測した。グリッドでは、すべての下層木が損傷するか、あるいはすべて残存するか、二極化した状況を観測した (図 2-9)。

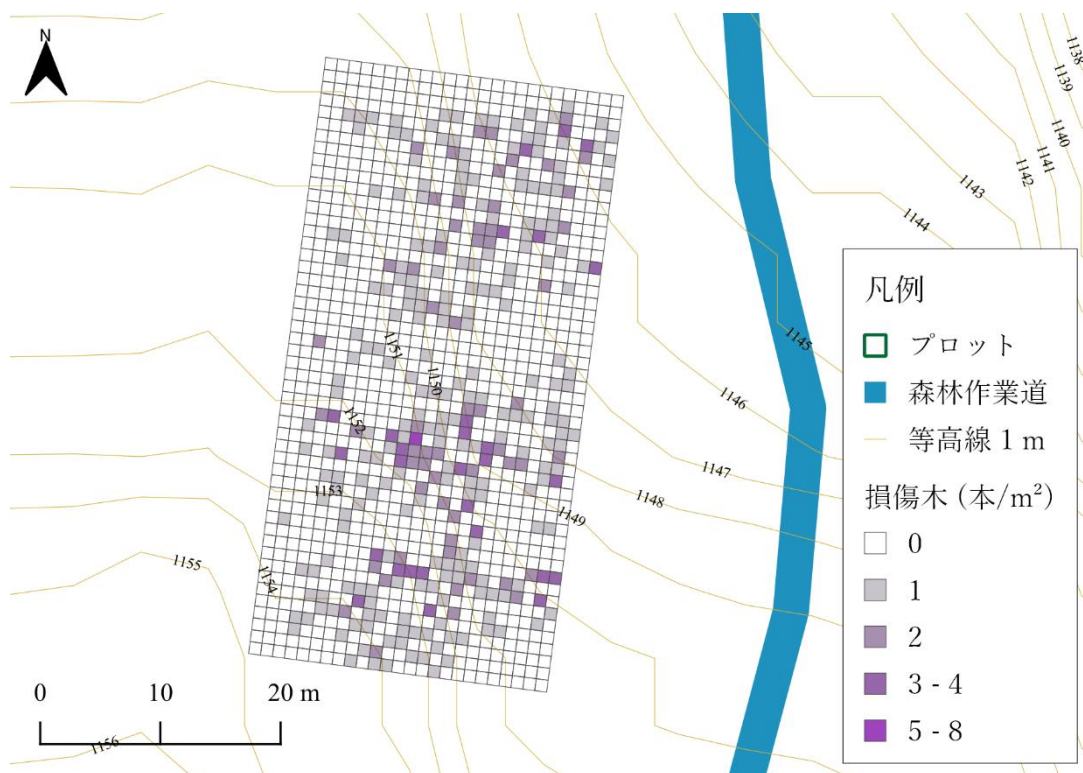


図 2-7 終伐後の損傷木の分布

注) 基盤地図情報数値標高モデル (国土地理院 n.d.) を加工して等高線を作成した。

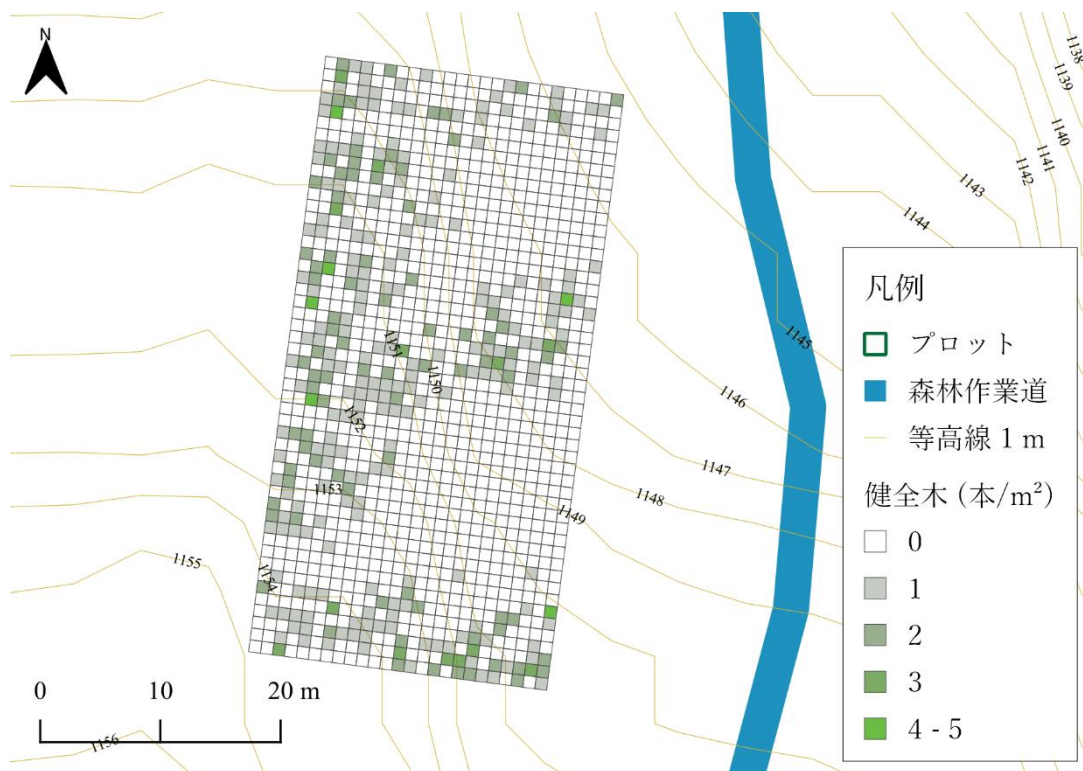


図 2-8 終伐後の健全木の分布

注) 基盤地図情報数値標高モデル (国土地理院 n.d.) を加工して等高線を作成した。

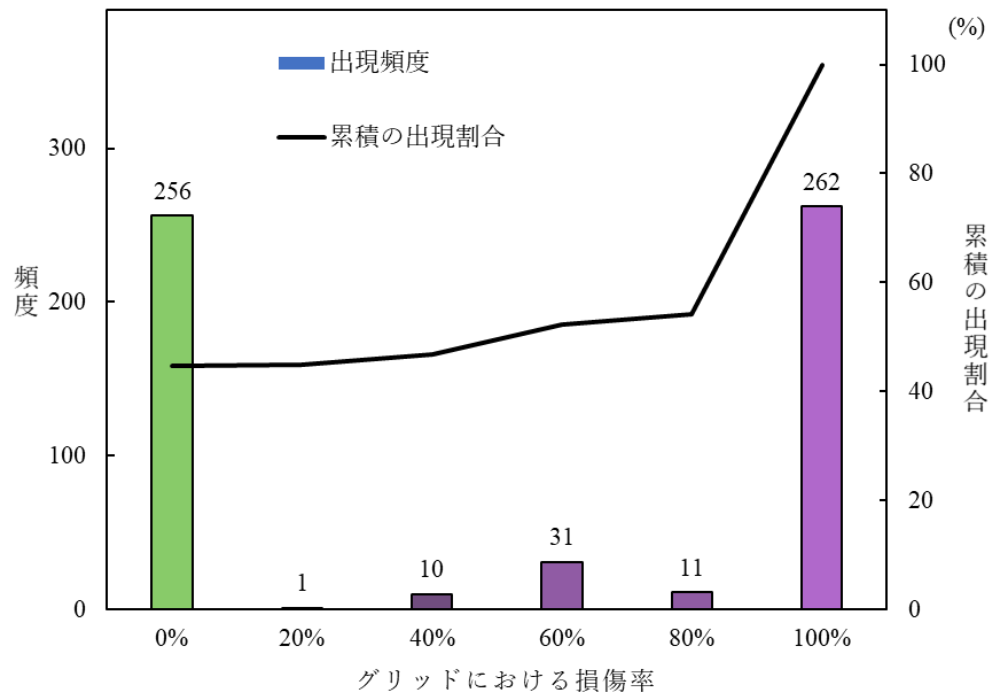


図 2-9 グリッド別の損傷率観測頻度

図 2-10 に、樹高階別の損傷木と健全木の度数分布を示す。損傷木の平均樹高は 3.9 m, 健全木の平均樹高は 4.2 m であった。Chi-squared test (5% 水準) の結果は  $p < 0.05$  であり, 樹高に注目した損傷木と健全木の分布は独立ではないと言えた。

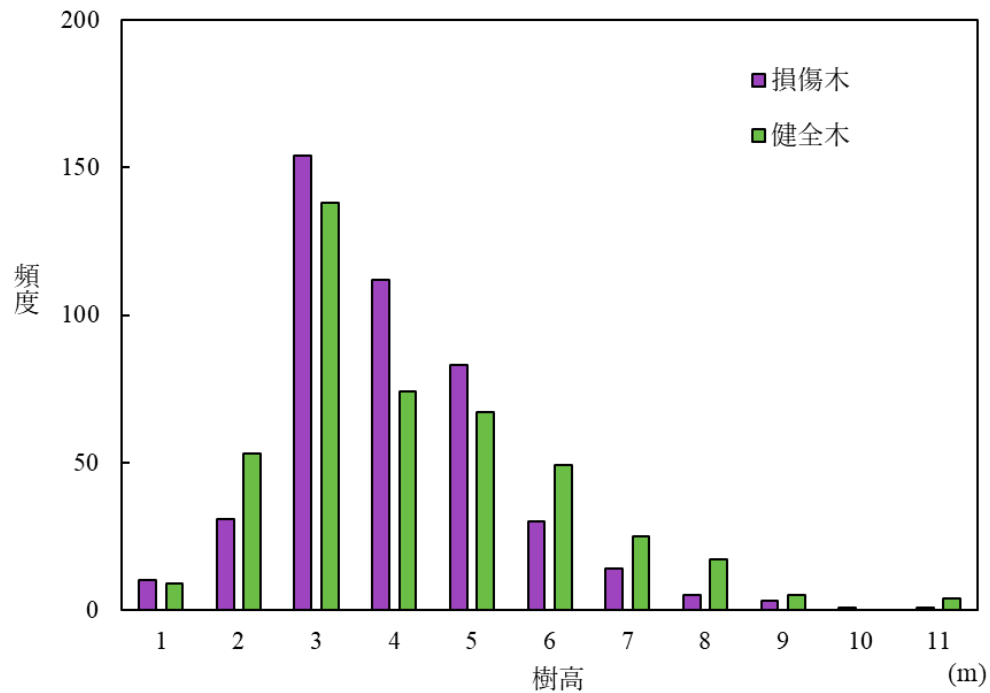


図 2-10 終伐後における樹高階別下層木の観測頻度

### 2.3 伐採木による衝突が発生する区域の推定

終伐時に伐採木と下層木が衝突する機会のある区域を特定するため、GIS より伐採木が林地に影響する区域を推定した。伐倒によって伐採木が林地に接地する区域は、立木状態の上層木を横から見た形状に等しいと仮定し、毎木調査の数値を基に伐採木の形状を復元した。なお、カラマツについては、混在の割合が小さいため、以下に示すヒノキと同様の手順で伐採木の形状復元を行った。

まず、竹下のパラボラモデル (竹下 1985) ((6) 式)を用いて、伐採木の樹冠形状を復元した:

$$Cr = \alpha Cl^{0.5}, \quad (6)$$

ここで、 $Cr$  は樹冠半径 (m)、 $Cl$  は樹冠頂から樹冠基底部までの距離 (m)、 $\alpha$  は樹冠拡張係数である。なお、(6) 式は本来スギ (*Cryptomeria japonica*) の樹冠形状復元に開発されたものであるものの、本論では、ヒノキとスギの樹冠形状が類似していること (林・高橋 1997; Matsue et al. 1999) に基づき、ヒノキに適用した。

樹冠形状の復元には、(6) 式から算出した左右 11 点の相対座標に加え、梢端である樹頂点を加えた 23 点の参照点を用いた。樹冠形状が斜面方向の上下で偏っていない (林・高橋 1997) と仮定し、 $Cr$  には観測した 4 方向の枝張り長の平均値を用いた。

次に、Behre 型の式を用いる井上・黒川 (2001) の手法を用いて、(7) 式より伐採木の樹幹形状を復元した:

$$y_s = x_s / (a + bx_s), \quad (7)$$

ここで、 $x_s$  は梢端を 0、地上端を 1 とした相対高、 $y_s$  は相対高 0.9 における実際の直径に基づく相対半径 (m) を示し、 $a$  と  $b$  は係数である。井上・黒川 (2001) は、相対幹曲線の式の定義に従って (7) 式が常に (0.9, 0.5) を通り (梶原 1973), 相対高 0.7 において正形数  $\lambda_{0.7}$  が 0.7 であると仮定し、 $a$  と  $b$  についてそれぞれ (8) 式および (9) 式を導いている (井上・黒川 2001):

$$a = 0.9(2 - b), \quad (8)$$

$$b = (180\phi - 126\delta) / (20\phi - 63\delta + 70\delta\phi), \quad (9)$$

ここで、 $\phi$  と  $\delta$  は以下の (10) 式、(11) 式から計算される:

$$\phi = 1 - 1.2/h, \quad (10)$$

$$\delta = \sqrt{7/10f}, \quad (11)$$

ここで、 $f$  は胸高形数である。井上・黒川 (2001) は、 $f$  に関して樹高  $h$  (m)、胸高断面積  $g$  (m<sup>2</sup>) および幹材積  $v$  (m<sup>3</sup>/本) の関係を以下の (12) 式のように定義している:

$$g = v/fh, \quad (12)$$

ここに、胸高直径を  $d_b$  (m) として与え、円の面積の定義より (13) 式に変形する (井上・黒川 2001):

$$d_b^2 = 4v/\pi fh, \quad (13)$$

$f$  について整理し、(14) 式のように変形した:

$$f = 4v/\pi d_b^2 h. \quad (14)$$

したがって、DBH、樹高、材積が与えられたとき、任意の  $x_s$  における  $y_s$  を推定することができる。井上・黒川 (2001) は、岡山県のアサキにおいて、相対高 0.2 よりも大きい範囲での相対誤差は 15% 以内であったとする。同様に、石田ら (2012) は、岐阜県において検証を行った結果、相対高 0.2 から 0.95 の推定直径誤差は 1 cm 以内であったと確認している。そこで、本章では精度が確認された相対高 0.2 より大きな区間の変化量 0.1 ごとに樹幹形状の参照点を求めた。また、地際部の根張りは無視し、精度が確認されたうち最も地面に近い値である相対高 0.95 における相対半径を地際部の半径として代用した。樹頂点から相対高 0.2 の区間は梢端に近く、用材が産出されないとみなし、梢端付近の樹幹形状は二等辺三角形とした。最終的に、樹幹構築のための参照点は、(7) 式から算出される左右 8 点の相対座標、地際半径、樹頂点の合計 19 点とした (図 2-11)。

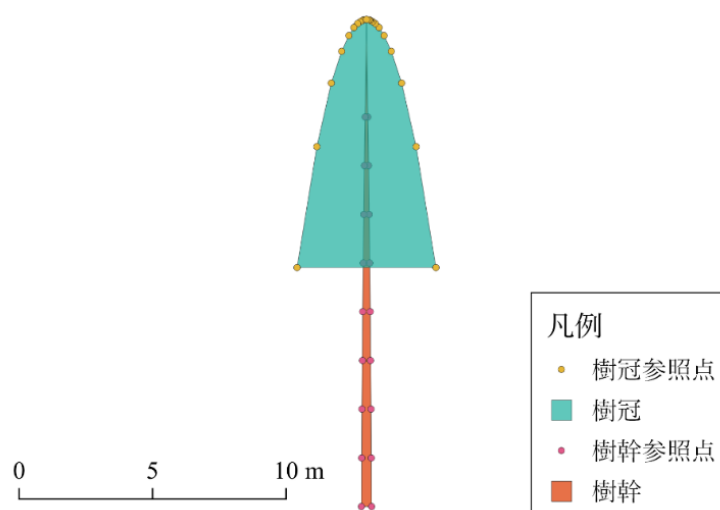


図 2-11 伐採木の形状復元の模式図



プロットでは、伐倒後すぐに枝払いが行われ、全幹方式による木寄せであったことから、樹冠は伐倒時のみ、樹幹は伐倒・木寄せ時に下層木と衝突する機会があったとした。

まず、伐採木の立木位置から伐倒角度を与えて平面上に投影した区域について、伐倒時の伐採木が林地に影響を与える区域と定義した。次に、伐倒方向の先にある森林作業道に到達するまで、伐倒方向の延長線上を伐採木が移動する際に通過するグリッドについて、木寄せ時の伐採木が林地に影響を与える区域と定義した。各工程のグリッドに關与した伐採木の本数を抽出し、グリッドにおける衝突の強度とした。その際、1本の伐採木がひとつのグリッドに影響を与えるのは1度だけとした。すなわち、伐倒による影響の発生を推定したグリッドでは、すでに下層木が衝突を受けたとみなし、木寄せによる同じ伐採木の影響は重複して考慮しなかった。

図 2-12 に、伐採木の伐倒時に下層木に影響すると推定した区域を示す。伐倒で伐採木による衝突を受けたと推定したグリッドに分布する下層木は 593 本に上り、終伐前の 67% に相当した。

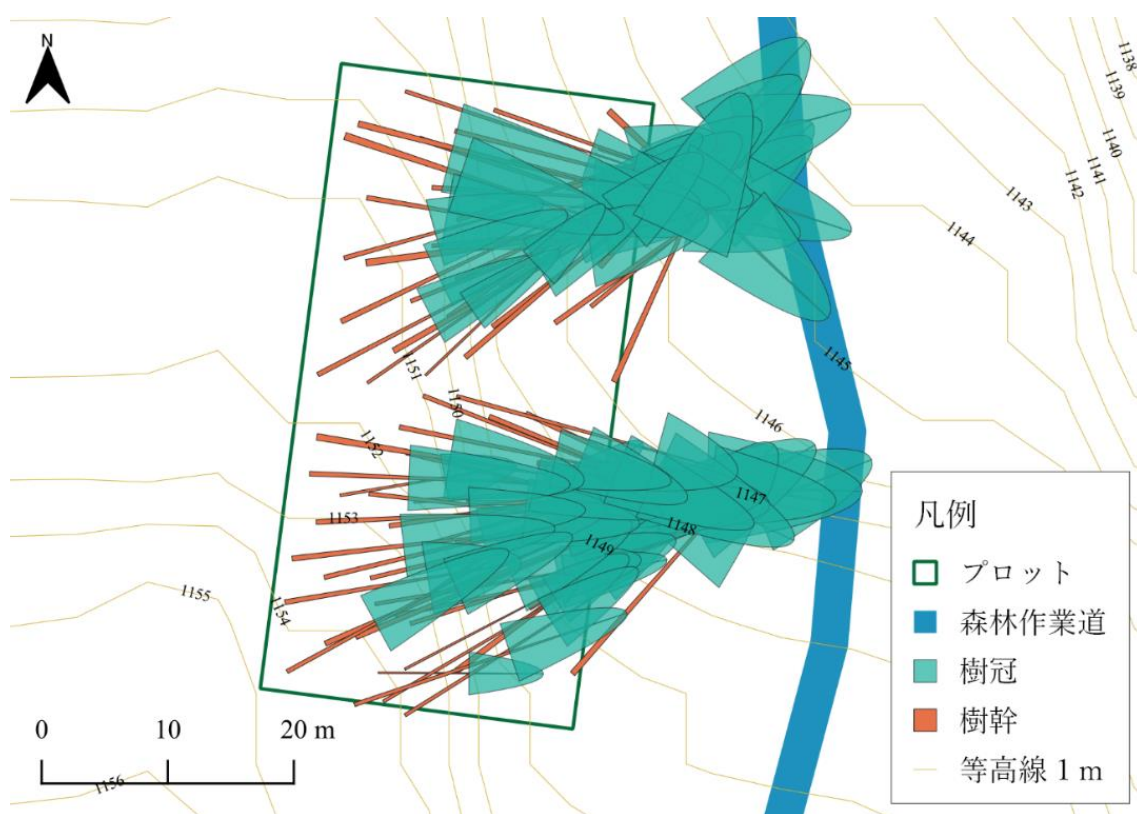


図 2-12 伐倒による下層木への衝突が発生し得る区域の推定結果

注) 基盤地図情報数値標高モデル (国土地理院 n.d.) を加工して等高線を作成した。

一方、木寄せ時に樹幹が移動した軌跡を示すポリゴンのほとんどはプロットの外に表れている (図 2-13)。木寄せ単独による衝突を推定したグリッドに分布していた下層木は 1 本であった。

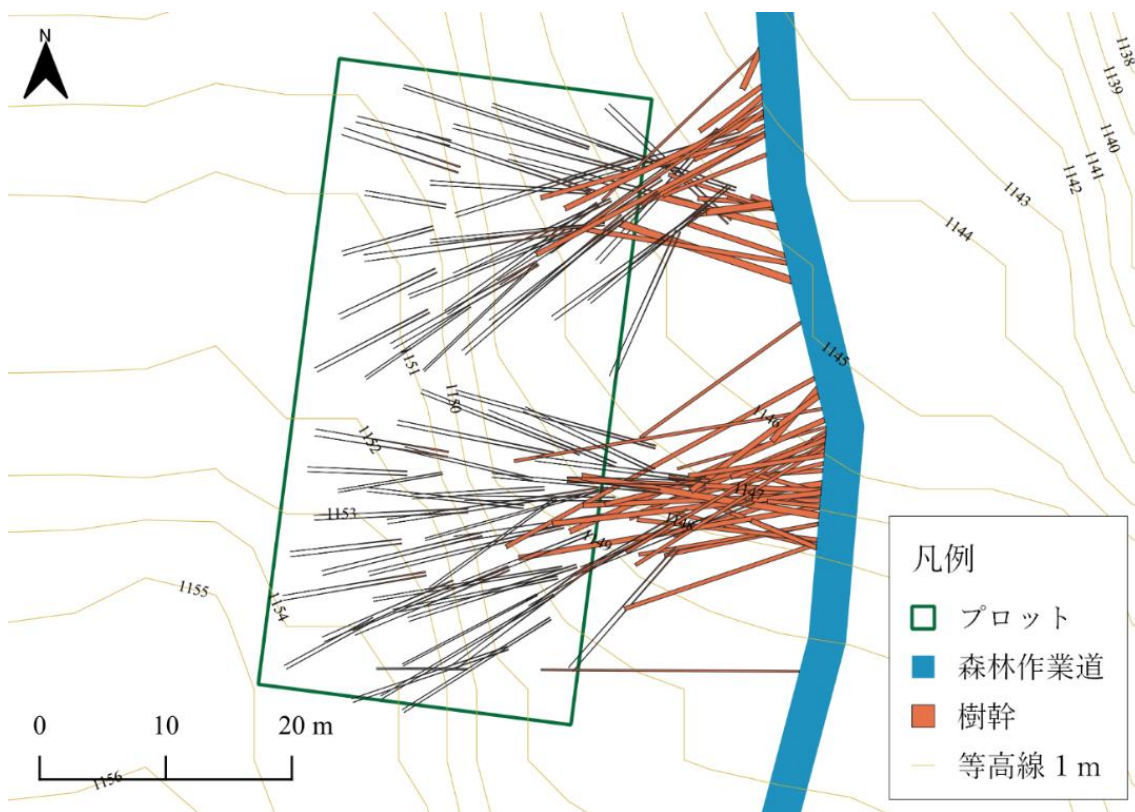


図 2-13 木寄せによる下層木への衝突が発生し得る区域の推定結果

注) 基盤地図情報数値標高モデル (国土地理院 n.d.) を加工して等高線を作成した。

## 2.4 損傷モデルの作成

ロジットリンク関数を用いて、終伐がグリッド内の下層木の損傷率に及ぼす影響を分析した。対象は、終伐前に下層木が存在していた 522 グリッドとし、プロットの外縁部は除いた。終伐後の下層木の状態を二値 (1 が損傷木; 0 が健全木) に分類し、グリッド  $i$  における推定の損傷率  $q_i'$  が (15) 式、(16) 式に示す二項分布に従うと仮定した:

$$y_i \sim \text{Binomial}(N_i, q_i'), \quad (15)$$

$$\text{logit}(q_i') = \beta_0 + \sum_j \beta_j x_{ji}, \quad (16)$$

ここで、 $y_i$  はグリッド  $i$  における観測された損傷木本数、 $N_i$  はグリッド  $i$  における終伐前に観測された個体数、 $\beta_0$  は推定する切片、 $\beta_j$  は説明変数  $j$  の推定するパラメータ、 $x_{ji}$  は



グリッド  $i$  における説明変数  $j$  の値である。使用した変数の要約を表 2-2 に示す。本章では、5 つの説明変数を定義した。

表 2-2 ロジスティック回帰分析に使用した変数の要約

	変数	平均値	標準偏差	最小値	中央値	最大値
$c$	伐倒時の衝突が推定された樹冠数	1.0	1.6	0.0	0.0	9.0
$s_f$	伐倒時の衝突が推定された樹幹数	1.0	1.0	0.0	1.0	6.0
$s_y$	木寄せ時の衝突が推定された樹幹数	0.1	0.4	0.0	0.0	3.0
$h_u$	グリッド内の最大下層木樹高 (m)	4.6	1.7	1.2	4.4	11.0
$n_g$	周囲 8 方向の近傍グリッドにおける 損傷分類 3 を除いた終伐前の 下層木本数 (本/8 m <sup>2</sup> )	6.3	3.1	0.0	6.0	23.0
$N$	損傷分類 3 を除いた終伐前の 下層木本数 (本/m <sup>2</sup> )	1.5	0.8	1.0	1.0	8.0
$y$	損傷木本数 (本/m <sup>2</sup> )	0.8	0.9	0.0	1.0	8.0

説明変数の候補のうち、 $c$ 、 $s_f$ 、 $s_y$  は伐採木による終伐の影響を示す変数であり、伐採と損傷との平面上の関係を表現することを狙った。 $h_u$  は下層木の大きさを説明し、損傷が受傷側の大きさに依存すること (Granhus and Fjeld 2001; Surakka et al. 2011; Tatsumi et al. 2014; Sirén et al. 2015; Chheng et al. 2015) を参照した。 $n_g$  は、局所的な下層木の密度を考慮 (Stokes et al. 2009) した変数で、天然更新したヒノキの分布パターンは一様ではなく (赤井 1975; 加茂・赤井 1976; 山本・堤 1979; 赤井 1991), 密度が高い場所の高い損傷リスク (Fjeld and Granhus 1998) を意識したものであった。

上記のパラメータについて、一般化線形モデルによって推定した。推定には R 4.0.1 (R Core Team 2020) に実装されている `glm()` 関数を使用し、すべての説明変数が含まれるフルモデルに対し、`stepAIC()` 関数を用いてバックワードステップワイズ法により変数を選択し、AIC が最小となるモデルを本章の損傷モデルとして決定した。

最後に、損傷モデルによって推定された下層木への損傷の発生箇所の平面上における再現性を評価するため、グリッドベースでモデルの推定値と実際の観測値を比較した。損傷木本数の期待値推定の閾値は、グリッドごとに異なる下層木の上限を持つため、一律で 0.5 とした。

表 2-3 にモデル選択の過程を示す。伐採木の伐倒時の影響を示す  $c$  (推定した伐倒時の樹冠による衝突頻度) と  $s_f$  (推定した伐倒時の樹幹による衝突頻度) の 2 つの説明変数か

ら構成される単純な構造が損傷モデルとして決定された。プロットにおいて、 $q_i'$  (終伐による推定の下層木の損傷率) は、伐採木の伐倒工程のみによって ((17) 式) 説明された。

表 2-3 変数選択の過程

Backward stepwise selection	AIC
$c^{***} + s_f^{***} + s_y + h_u + n_8 + intercept^{***}$	634.74
$c^{***} + s_f^{***} + s_y + h_u + intercept^{***}$	633.00
$c^{***} + s_f^{***} + s_y + intercept^{***}$	631.70
$c^{***} + s_f^{***} + intercept^{***}$ (Selected)	630.49

Significance level: \*= 5%; \*\*= 1%; \*\*\*= 0.1%.

$$\text{logit}(q_i') = 1.0950c + 1.2680s_f - 1.7069, \quad (17)$$

(17) 式において、残差の逸脱度と自由度の比は 1.06 であり、過分散ではなかった。

図 2-14 に、観測の損傷率と、損傷モデルから推定した損傷率の平面上の分布を示す。複数の伐採木による衝突を推定した東側のグリッドでは、観測値と推定値に差がなかった。西側のグリッドでは、推定値は観測値よりも損傷率を少なく推定したことを示した。

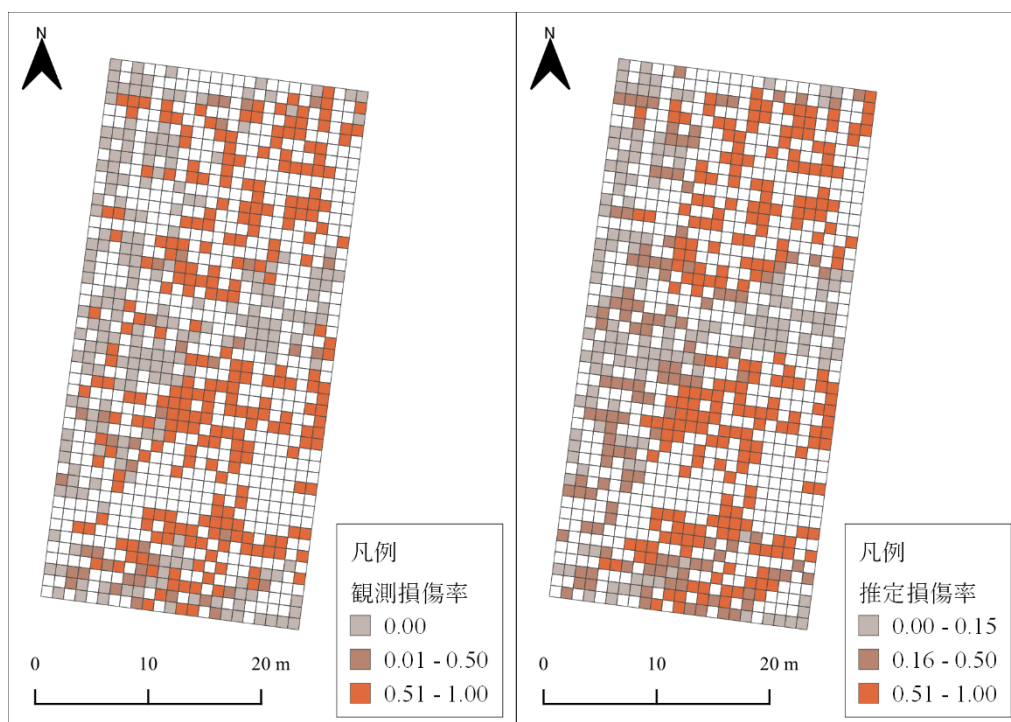


図 2-14 グリッドにおける損傷率の観測値 (左) と推定値 (右)

注) 推定値において、観測損傷率 0.00 に対応する区分が 0.00-0.15 と幅のある値となっている理由は、(17) 式が取りうる最小値を反映させたことによる。

損傷モデルは、66.9% のグリッドで観測値と同等の損傷率を算出している (表 2-4: 太字で示した対角成分)。75 グリッドでは過小評価 (表 2-4: 朱色で着色したセル), 98 グリッドでは損傷木を過大に評価 (表 2-4: 青色で着色したセル) した。また、実際には損傷木が発生したグリッドのうち、損傷モデルは 24 グリッドにおいて損傷木の発生を説明しなかった。

表 2-4 損傷率の観測値と推定値の混同行列

推定値	観測値			小計
	健全	≤ 50%	50% <	
健全	132	12	12	156
≤ 50%	61	16	51	128
50% <	25	12	201	238
小計	218	40	264	522

注) すべて単位はグリッド (m<sup>2</sup>)。

図 2-15 左図 に、損傷モデルから推定した損傷木の分布を、図 2-15 右図には図 2-7 に示した観測による損傷木との推定本数誤差の分布を示す。右図では、損傷モデルから推定される期待値が観測値より大きいグリッドを朱色に着色した。損傷モデルは範囲内に 397 本の損傷木の発生を推定し、実際には 428 本の損傷木を観測した。すなわち、損傷木本数の推定では、損傷モデル推定の対象範囲全体に誤差が表れた。

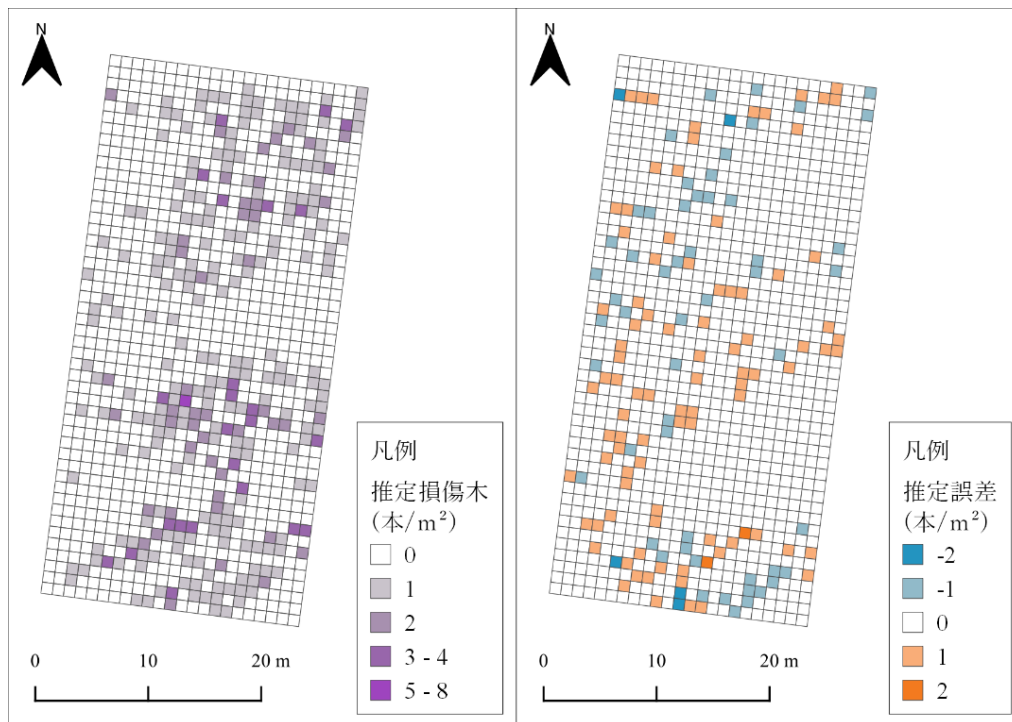


図 2-15 損傷モデルによる損傷木の期待値 (左) と、観測値との本数推定誤差 (右)

以上より、終伐にかかる下層木の損傷率は、伐採木の伐倒時における伐採木と下層木との衝突頻度によって説明され得ることが明らかになった。AIC による変数選択の過程では、はじめに下層木の特徴を示す変数である  $n_8$  (隣接するグリッドの下層木の本数) と  $h_u$  (グリッド内の最大樹高) が除外され、伐採木との衝突を示す変数が残された。Chi-squared test の結果からも、樹高が損傷率に影響しなかったことが支持された。つづいて  $s_y$  (推定した木寄せ時の樹幹による衝突頻度) が除外され、伐採木の伐倒における衝突強度を示す  $c$  と  $s_f$  の 2 つの説明変数から構成される単純な構造が損傷モデルとして決定された。伐採木のみを説明変数とする単純な損傷モデルが得られ、かつ損傷モデルが過分散でなかった推定結果は、終伐における下層木の損傷において、伐採木と下層木の平面上の位置関係に起因する衝突の影響が大きいことを示唆している。健全木を次世代に残存させるために、伐採木の下層木への衝突の機会が平面上において抑制される伐採が終伐に適した伐採だと言える。

本終伐において、伐採木はプロットの南北 2 か所において東向きに伐倒され、プロットの中央部では健全木が残存した。損傷木が発生したグリッドにおいて、すべての下層木が損傷した割合は 83% (図 2-10 参照) に上り、大抵のグリッドにおいて損傷木と健全木を同時に観測することは稀であった。したがって、健全木が残存したグリッドでは終伐前の密度が維持されたままであり、終伐後の下層木の分布は平面上において均一ではないことが明らかになった。損傷率の平面上の出現傾向は、伐倒が集中したプロット南東側と北東側で高く、

伐採木が影響しなかったプロット中央部では 0% に近く、プロット西側では局所的に高い傾向を観測した。対して、損傷モデルによる推定では、ひとつのグリッドに複数の伐採木の部位が影響するようになると、 $q' > 0.5$  と算定する。推定値は、伐採木が集中した区域、伐採木が影響しなかった区域について観測値に近い分布を示した。1 本の樹幹のみがグリッドに影響したプロット西側については誤差が生じていたものの、全体として損傷率基準では 66.9% の一致をみた損傷モデルは、単純な構造ながらも平面上における損傷率の局所的な変動を再現したと言える。

しかし、損傷モデルは損傷木の発生にかかる機構をすべて説明するものではなかった。伐採木による影響がないと推定されたグリッドにおいて、損傷木の出現を本数で 3% (25/807 本)、グリッド数で 5% (24/522 グリッド) 観測した。全体に占める割合は少ないものの、下層木の損傷には、伐採木の衝突以外にも損傷する要因が存在すると示唆された。

損傷モデルの変数選択の過程において、損傷モデルは下層木の個体サイズを示す変数である樹高を除外し、下木の樹高 (Youngblood 1990; Surakka et al. 2011) や、DBH (Tatsumi et al. 2014; Sirén et al. 2015) を採用した既存の損傷率モデルとは異なる結果となった。一般に、樹高が低く (Tesch et al. 1986; Tesch et al. 1990; Naghdi et al. 2009; Tavankar et al. 2017)、下木に柔軟さがある (Eliasson et al. 2003; Nyland 2016) か、あるいは成長して DBH が太くなる (Fajvan et al. 2002; Eliasson et al. 2003; Chheng et al. 2015) ほど損傷率が低下することからすれば、下層木に関する説明変数が除外された損傷モデルは想像外の挙動を示した。プロットの下層木は、伐採に対する樹高による損傷の受けやすさを無視できる状態となっていた可能性が考えられる。中部森林管理局管内の三浦国有林において、軽微な損傷率が観測された終伐における下層木の樹高は 1.0 m 程度 (林野庁中部森林管理局 1999) であったことに対し、プロットの 97.8% (866/885 本) の下層木は、伐採における下層木の折損を回避するための目安である樹高 1.5 m (赤井 1991) を超過していた。したがって、プロットの下層木は、潜在的な損傷リスクがもともと高く、伐採木による下層木への影響が最も鋭敏に反映される林況であった可能性がある。推定した衝突の区域内において、健全木が出現しなかったことで単純な損傷モデルが決定されたのかもしれない。伐倒時に接地した樹冠内に位置するヒノキ下木は、必ずしも損傷しないこともある (近藤ら 2009) ため、損傷発生モデルとしては、係数は小さくとも下層木にかかる個体間変動を説明する変数を含むモデルが適切であっただろう。

また、変数選択の最終段階において、木寄せによる衝突が説明変数より除外された。木寄せ距離の増加とともに影響を受ける残存木が比例的に増加する (井上ら 1974; Bodaghi et al. 2020) ことからすれば、本来は損傷モデルに含まれてしかるべき説明変数であった。プロットでは、木寄せのみが下層木に衝突したと推定される状況は、わずか 1 本と少なかった。伐採木が下層木に影響する区域の推定結果 (図 2-12; 図 2-13 参照) は、プロット内の木寄せ

について、すでに伐倒による衝突を受け、かく乱されたグリッドを通過しただけであったことを示している。本章の調査設計は、木寄せによる損傷木の発生が実質的には観測されていなかったと推測され、データ取得にはプロットの設置状況に基づく平面上におけるバイアスの存在があったと言わざるを得ない。損傷モデルは、(17) 式のままでは長距離の木寄せが発生する林分への適用はできないと考えられる。

## 小括

グリッド設置による目視調査では、終伐前のヒノキ下層木の成立本数は 885 本/0.125 ha (7080 本/ha) であり、終伐後の損傷本数は 444 本/0.125 ha、プロット内の損傷率は 50.2% であった。

終伐における平面上における伐採木の下層木への衝突を説明変数として、損傷木の平面上における発生箇所を推定するための損傷モデルを決定した。終伐にかかる下層木の損傷率について、プロットにおいては伐採木の伐倒における下層木への衝突頻度のみから説明されることが明らかになった。損傷モデルは単純な構造であるにもかかわらず、プロット内 66.9% のグリッドに対して観測値と同等の損傷率を推定し、損傷率の局所的な変動を再現することを視覚的に示した。以上により、伐採木による衝突が下層木の損傷に影響するという、従来では定性的な知見であった現象を平面上において定量的に説明することができた。終伐において、損傷木の出現箇所との平面上の関係は、伐採木と下層木との衝突が発生する平面上の座標によって関連付けることができると言えるだろう。

損傷モデルにおける伐採木と下層木との衝突推定は、実際の伐倒方向の観測による終伐の状況復元に基づいている。したがって、既存の距離従属の説明変数からなる損傷率モデルのように、損傷要因から全周囲に対して同心円状に損傷率を推定するのではなく、損傷モデルでは伐採木にそれぞれ一意な伐倒方向を与えており、伐採木が下層木へ影響し得る区域が平面上において明確となっている。すなわち、損傷要因が下層木に影響する区域を明示化することにより、損傷木の発生箇所が明確に示されることになった。漸伐の将来にとって重要な健全木は、終伐前の下層木から発生した損傷木を差し引いたものである。伐採木と下層木の衝突を基にした損傷モデルによる平面上において明示的な損傷率の推定は、将来的に任意の伐採方法による健全木の残存程度の推定を可能にするだろう。

しかし、損傷モデルの対象は空間的に小規模であり、損傷モデルの構造が事業規模において適用できることを実証する必要があるだろう。また、損傷モデルの説明変数として採用されなかった木寄せによる衝突について、損傷木の発生推定にどのように影響するかを検証する必要がある。



## 第 3 章 伐採木と下層木との衝突に基づく損傷木の発生箇所推定の検証

### 3.1 調査地の概要と作業システム

#### 3.1.1 調査地の概要

本章の調査は、金沢山国有林 1408 に林小班を対象とした。図 3-1 に、施業図を示す。当該林小班に分布する下層木に対し、伐採木が伐倒された範囲を調査範囲とした。なお、当該林小班の北東部では、2016 年に先行して終伐が行われていたため、調査範囲から除外した。下層木に向けて伐倒されたヒノキ上層木は 583 本であり、調査範囲の面積は 2.6 ha であった。当該林小班に接する林道と、既設の森林作業道を合わせた路網（以下、路網と記述する）密度は 270 m/ha に達し、最小幅員は 3 m であった。

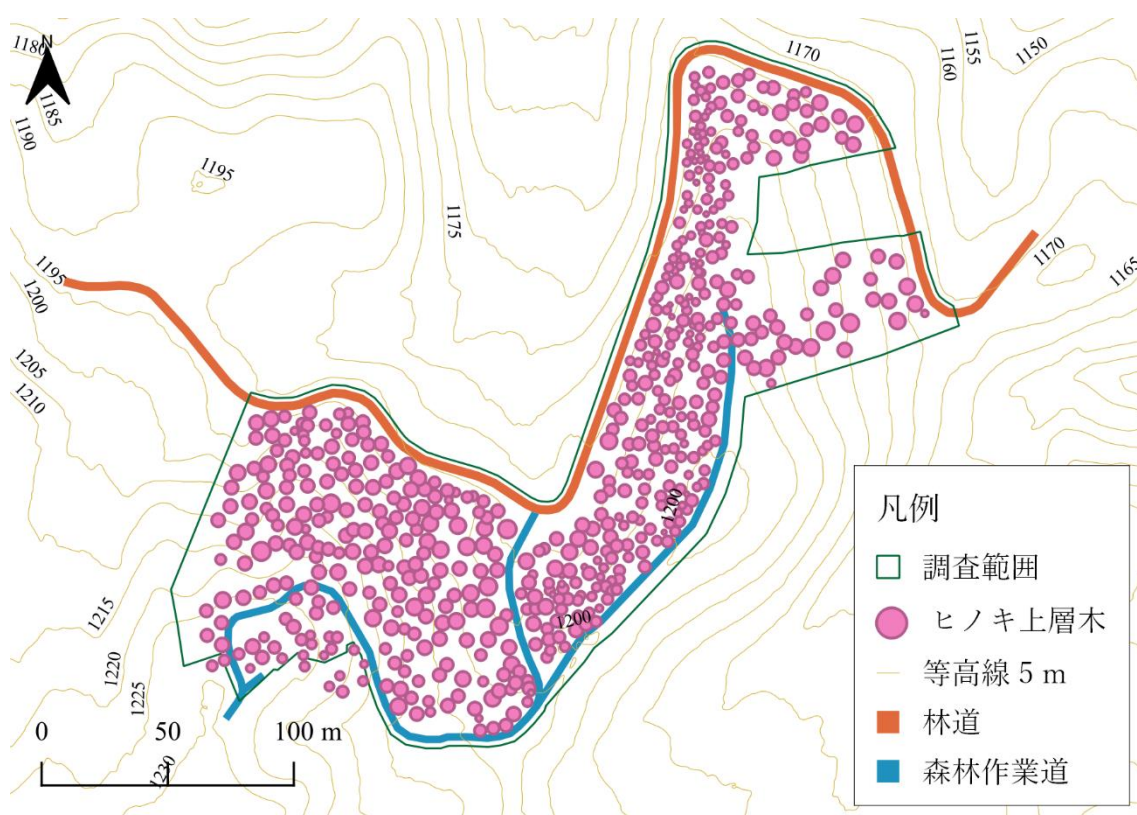


図 3-1 調査範囲と施業図

注 1) 0.5 m メッシュ DEM (長野県林業総合センター 2020) を加工して等高線を作成した。

注 2) 上層木のシンボルは、それぞれ DBH を 4 倍強調して表示した。

当該林小班における上層木の平均 DBH は 34 cm (12-58 cm)、平均樹高は 19 m (12-23 m)、平均立木幹材積は 0.86 m<sup>3</sup>/本 (0.07-2.35 m<sup>3</sup>/本)、立木密度は 195 本/ha である (林野庁中部森林管理局南信森林管理署 2020)。



### 3.1.2 採用された作業システム

終伐は、2021 年 4 月から 5 月にかけて、ウインチ地引きをともなう車両系作業システムによって行われた。重機には専任の作業員が配置され (図 3-2)、伐倒が進行する裏側で 2 名の作業員が木寄せ、造材に従事する、3 名による作業班であった。

工程	伐倒	—	木寄せ	造材	集材
員数	1		2	2	1
機械	チェーンソー (伐倒)	—	ウインチ付き グラップルローダー	チェーンソー (造材) ウインチ付き グラップルローダー	グラップルローダー 付き フォワーダ

図 3-2 作業システム

まず、チェーンソーによる伐倒では、作業員が伐倒方向を選択し、必要に応じて作業の支障になる下層木を除去した。金沢山国有林では枝打ちは省略され、木寄せは全木方式であった。木寄せでは、単胴ウインチ (IWAFUJI TW-3H; 平均けん引力, 26.2 kN) とグラップルアタッチメントを備えたベースマシン (HITACHI ZAXIS135US; 車両質量, 13.4 t; 定格出力, 69 kW/2000rpm) が使われた。金沢山国有林ではベースマシンと同時に行動する作業員が配置され、木寄せでは荷掛け要員として、造材ではチェーンソーによる手造材要員として従事した。伐倒された伐採木は、路網に対する伐採木の方角によって、樹冠の上部か元口付近のいずれかに台付けワイヤーが取り付けられた。多くの伐採木は、下げ荷方向にウインチで木寄せされ、伐採木は路網に到達すると、グラップルローダーが伐採木を取り扱い、造材工程に移行した。伐採木が下層木に絡まって作業の進行が止まった場合、作業員が邪魔な枝や下層木を取り除くことで状況を解消した。木寄せ方向は伐倒方向の延長であり、ウインチの基部であるベースマシンは必要に応じて路網に沿って移動し、下部走行体が林内に侵入しないように配慮された。造材は、路網上で行われた。伐採木の把持にグラップルローダーが使用され、チェーンソーによる手造材が実施された。終伐に使われた林道は一般車両も通行する併用林道であったため、生産された丸太は一時的に路網の脇に巻き立てられた。丸太は、後日グラップルローダーを備えたフォワーダ (IWAFUJI U-5DG; 車両質量, 9.43 t; 定格出力, 128.4 kW/2000rpm; 最大積載量, 5 t) による単独作業により、土場まで集材された。

## 3.2 伐採木と下層木の衝突に基づく損傷木発生の推定

### 3.2.1 下層木、損傷木、健全木の区域測定

本章では、限られた地域を総測定することにより、実証のための適切な資料を収集することを優先する (Sirén 2001) ため、下層木の観測単位を 2 章のグリッドから個体群に拡大した。そして、下層木が 1 本/m<sup>2</sup> (10000 本/ha (四手井ら 1974; 赤井 1991)) を満たす連続し

た区域について、下層木または終伐後の健全木が分布する区域と定義した。したがって、本章では下層木の局所的な本数密度、個体の大きさを考慮しなかった。

終伐前に下層木の分布する区域は、閉合トラバース測量によって求めた。造林補助申請で植栽地として認められる外周 (長野県庁林務部 2021a) を基準として、個体群を構成する外周の下層木の樹幹から 1 m 以内に測点を設置した。測量精度が閉合比 100 分の 1 以内 (長野県庁林務部 2021a) になるまで再測を行い、達成した時点で調査を終了した。

終伐後の下層木の状態は、2 章と同様に、終伐直後の目視調査により分類した。健全木の分布する区域は、終伐前に設置した測点を用いた周囲測量によって求めた。損傷木の区域は、GIS 上で伐採前の下層木の区域から健全木の区域を差し引くことで求めた。

終伐前、10851 m<sup>2</sup> に分布していた下層木 (図 3-3) は、終伐によって健全木の区域が 4852 m<sup>2</sup> まで減少し、差引いた 5999 m<sup>2</sup> の区域に損傷木が出現している (図 3-4)。面積比に基づけば、当該林小班の下層木の区域のうち、55.3% が終伐によって損傷していたことが明らかになった。

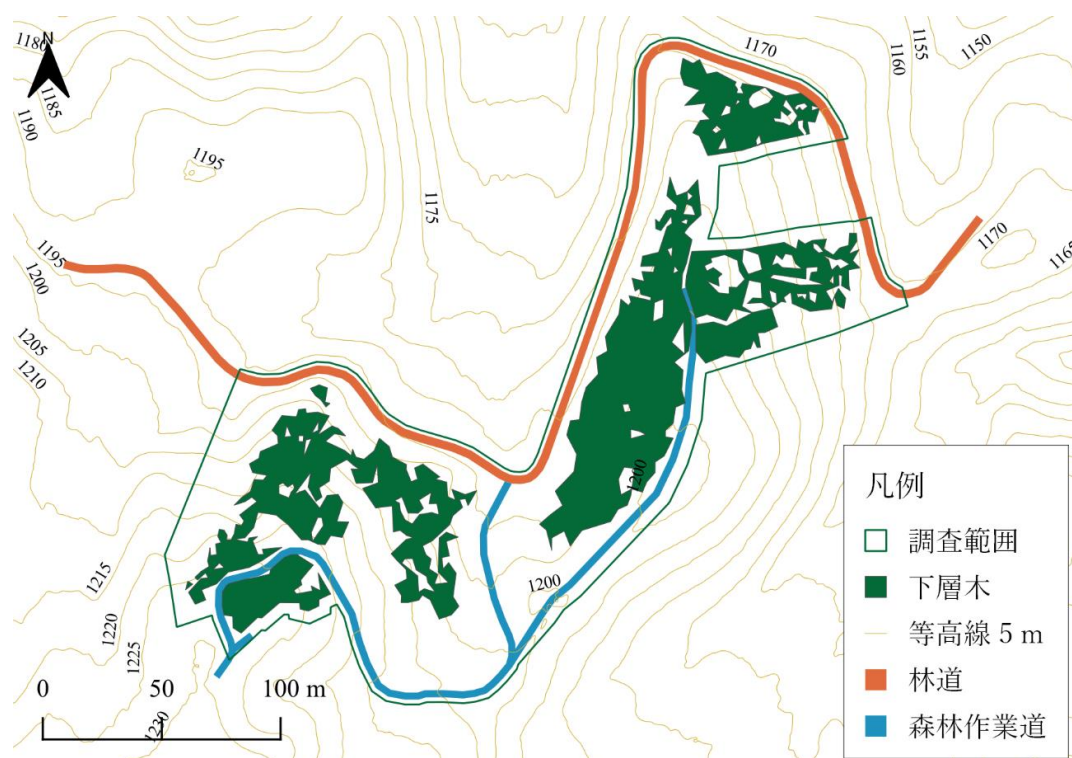


図 3-3 終伐前の下層木の区域

注) 0.5 m メッシュ DEM (長野県林業総合センター 2020) を加工して等高線を作成した。

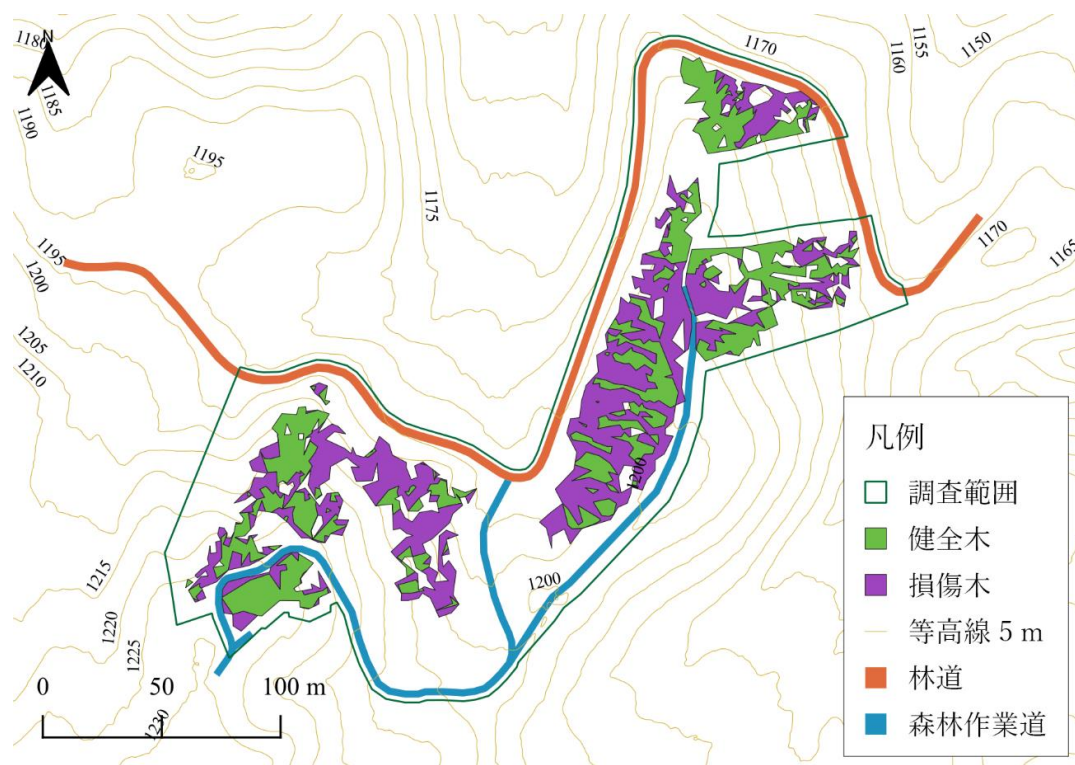


図 3-4 終伐後の健全木と損傷木の区域

注) 0.5 m メッシュ DEM (長野県林業総合センター 2020) を加工して等高線を作成した。

### 3.2.2 伐採木による衝突が発生した区域の推定、終伐後の下層木の状態の推定

伐採木の形状の復元および伐採木が影響を与える区域の推定は、2 章と同じ手法を用いた。DBH は終伐直前に測定し、樹冠長と樹冠幅は 2016 年と 2019 年に実施したプロット調査の値から推定した。上層木の位置は、2020 年秋に撮影した空撮画像から生成した樹頂点とし、樹高は樹頂点と 0.5 m メッシュ DEM (デジタル標高モデル) (長野県林業総合センター 2020) との差分から算出した。空撮画像において樹頂点が明確でなかった上層木の樹高については、終伐直前に直接測定した。立木幹材積は、林野庁が調整した二変量幹材積式 (林野庁 1970) を用いて算出した。以上の結果を表 3-1 に示す。各伐採木の伐倒方向は、終伐直後に伐根にクリノメーターを当てて測定した。

表 3-1 調査範囲内の上層木概要 (n=583)

項目	平均値	標準偏差	最小値	中央値	最大値
DBH (cm)	37.2	8.7	14.9	37.9	60.4
樹高 (m)	18.2	3.1	10.3	18.4	25.4
立木幹材積 (m <sup>3</sup> /本)	0.93	0.48	0.10	0.90	2.42

伐倒方向の測定にあたり、伐倒方向が最大の林地傾斜と一致しない偏角が観察された。偏角は、下げ荷における伐採木の制御を困難にする要因であり (Binkley and Lysons 1968; 藤野

ら 2015), 伐採木に作用する回転の力 (石川 1994; 森ら 2008) は伐採木の木寄せ方向に対する横滑り (石川 1991) を発生させる。本調査地は全木方式による木寄せであったため、伐採木が転落や滑落するとまではいかなくとも、横滑りによる下層木への損傷の発生 (Picchio et al. 2019) が懸念された。そこで本章では、終伐における伐採木の木寄せにおける軌跡について、木寄せ方向に直交する林地傾斜の影響を受けると単純に仮定した。以下に、傾斜補正の算定条件を記述する。

まず、瀧ら (2019) が提示した以下の (18) 式により、伐採木の重心位置を推定した:

$$GH = 0.3438TH + 0.0600CH, \quad (18)$$

ここで、 $GH$  は地面を起点とした重心高 (m),  $TH$  は樹高 (m),  $CH$  は枝下高 (m) である。次に、算出した重心の座標から、伐採木の軸方向に直行する左右 5 m 地点の標高を DEM より抽出し、以下の (19) 式を用いて 5 m の木寄せに発生する横滑り量  $M_s$  とした:

$$M_s = 5 \sin \theta, \quad (19)$$

ここで、 $\theta$  は 2 点間の標高差から算出される伐倒木の重心における軸方向に対する直交勾配 ( $^\circ$ ) である (図 3-5)。伐採木が路網に到達するまで、木寄せ距離 5 m ごとに  $\theta$  を再計算した。伐採木は計算された座標間を直線的に移動するとし、1 本の伐採木にかかる外側の座標をつないだ多角形を、木寄せの軌跡とした。ただし、調査範囲内の 2 本の伐採木については林小班の外の方向を向いていたため、路網に到達するまで、林小班内に留まるように手動で角度を調整した。調査範囲内の伐採木に発生した木寄せの軌跡を融合し、終伐の木寄せ時に伐採木が下層木へ影響を与える区域とした。

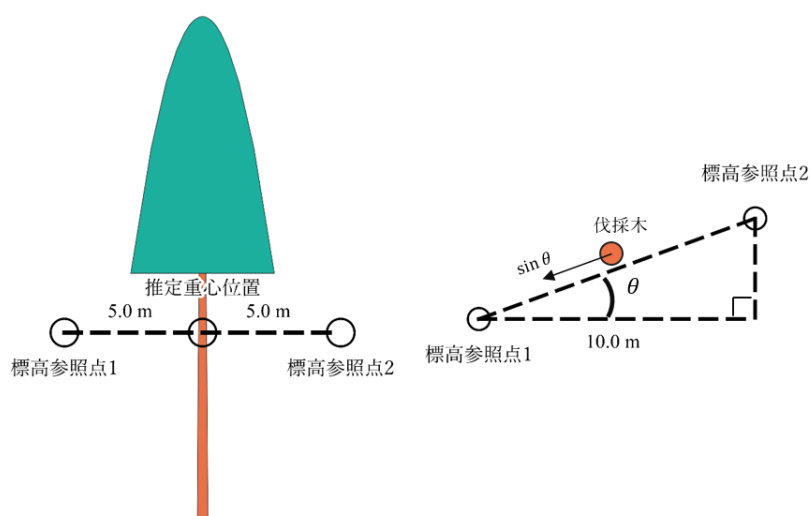


図 3-5 伐採木の木寄せ時に作用する勾配の参照



続いて、下層木の分布する区域と、伐採木が影響を与えると推定した区域を GIS 上で比較した。本章では、伐採木の衝突は下層木を一様に損傷させるものとした。すなわち、伐採木による衝突の発生が推定された区域における下層木の損傷率を 100% とし、損傷木の区域とした。また、下層木の区域から、推定による損傷木の区域を差し引くことにより、推定による健全木の区域とした。以上の過程を経て、終伐の伐採木による下層木への衝突機会を推定し、終伐後の下層木が損傷木または健全木どちらの状態となるのか、面積ベースで識別を行った。

最後に、真陽性率 (推定した損傷木区域のうち、観測した損傷木区域が平面上で一致した率) と、偽陽性率 (推定した損傷木区域のうち、観測した健全木区域が一致した率) を指標として、二項分類の識別精度の評価手法である ROC 曲線下の AUC に基づき、伐採木の衝突に基づく終伐後の下層木の状態を推定する手法に実用性が認められるかを判定した。観測による終伐後の下層木の状態と、推定値を格納する参照点は、GIS の点群発生ツールを用いて、下層木の分布に対して 0.5 m 毎に発生させた格子点とした。実用性の判定基準は、識別結果に対する許容水準とされる  $AUC \geq 0.7$  (Hosmer et al. 2013) とした。

作業員は、下層木の分布する区域に向かって 583 本の上層木を伐採した。伐採木のうち 12 本については、路網拡幅にともなう除根や、造材によって発生した枝条の堆積のため、伐根を見つけることができなかった。したがって、本章では 571 本の伐採木が下層木に影響を与えたものとした。また、3 本の立ち枯れ木は樹幹のみが下層木に影響したとみなした。さらに、木寄せされず林地に残置された 1 本の伐採木 (図 3-6) は、作業の実態に合わせて伐倒の影響だけを考慮した。



図 3-6 林内に放置された伐採木

注) 写真には放置された伐採木を示す朱色の枠を付ける加工を行った。

図 3-7 に、伐採木が伐倒時に下層木に影響を与えると推定した区域を示す。伐倒の時点で、伐採木は下層木の分布する区域の 5375 m<sup>2</sup> に衝突する機会があったと推定した。

図 3-8 に、伐採木が木寄せ時に下層木に影響すると推定した区域を示す。伐倒により路網に到達しなかった伐採木は 335 本であり、推定した木寄せ距離の平均は 15 m、最大は 75 m である (図 3-9)。木寄せでは、伐倒時に加え、1715 m<sup>2</sup> の下層木について伐採木による衝突を受ける機会があったと推定した。

以上より、終伐前の下層木の区域の 65.3% ((5375+1715)/10851 m<sup>2</sup>) において伐採木の衝突が発生したと推定したことになる (表 3-2)。

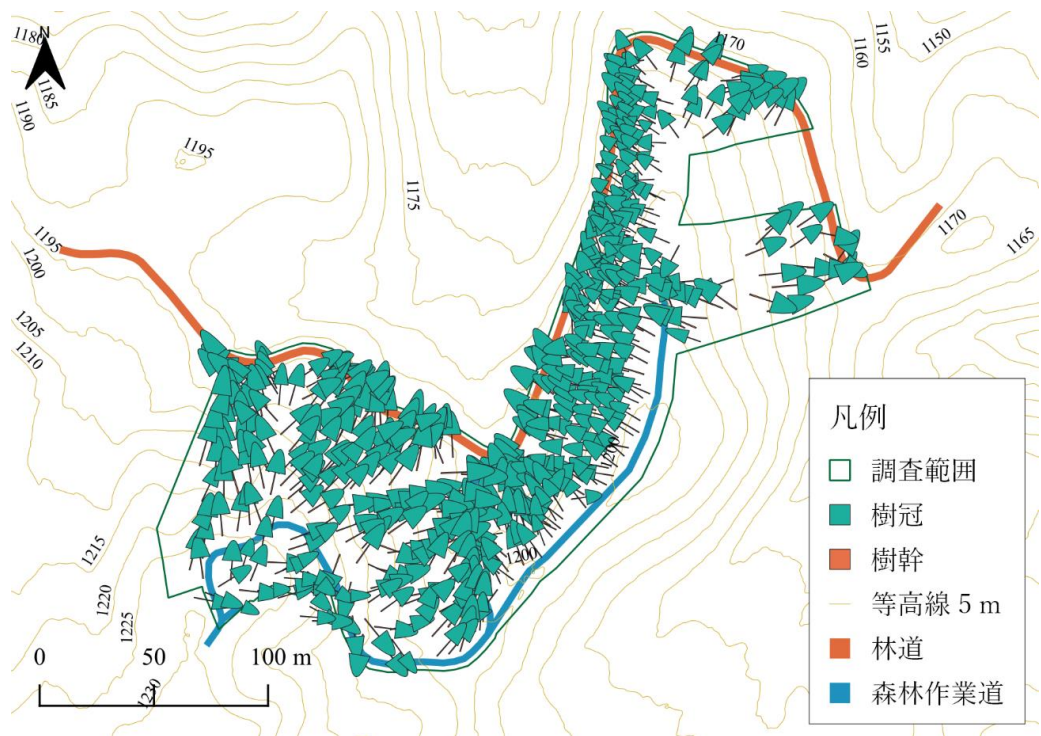


図 3-7 伐倒による下層木への衝突が発生し得る区域の推定結果

注) 0.5 m メッシュ DEM (長野県林業総合センター 2020) を加工して等高線を作成した。

表 3-2 終伐後の下層木の状態にかかる観測値と推定値の混同行列

推定値	観測値		小計
	健全木	損傷木	
健全木	2816	945	3761
伐倒による損傷木	1285	4090	5375
木寄せによる損傷木	752	963	1715
小計	4853	5998	10851

注 1) すべて単位は (m<sup>2</sup>)。

注 2) 太字は、観測と推定の結果が平面上において一致した面積を示す。

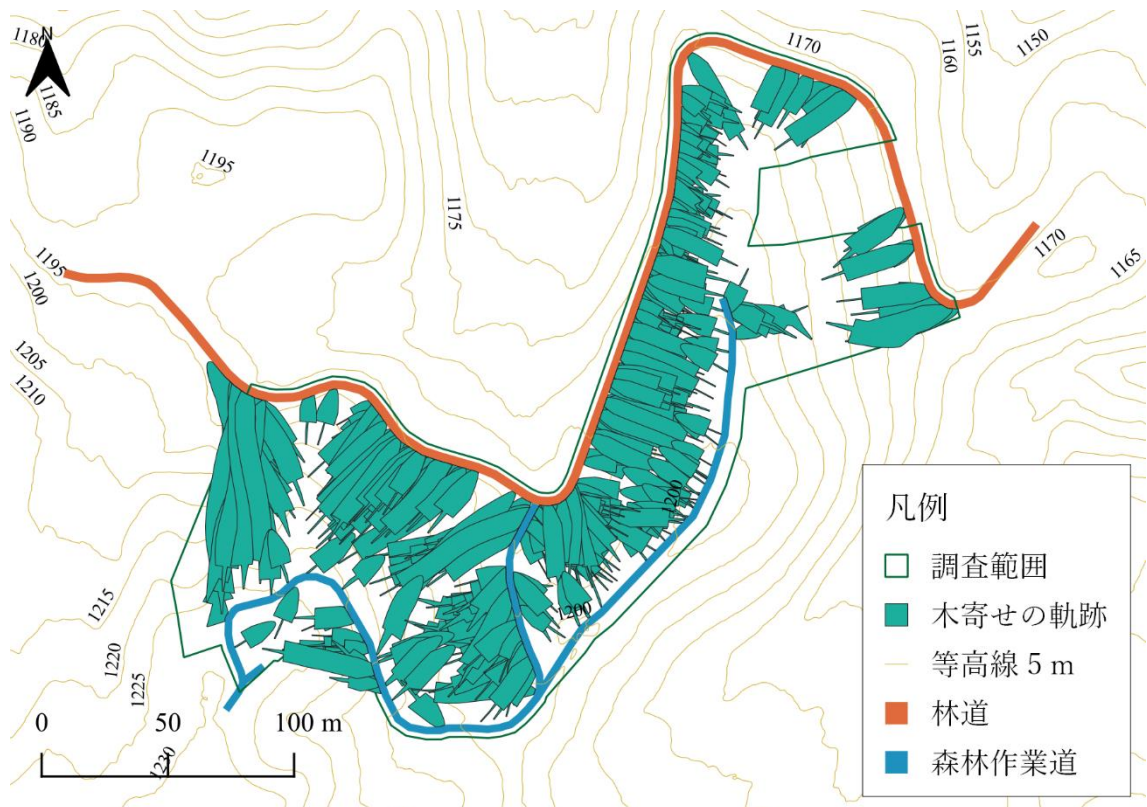


図 3-8 木寄せによる下層木への衝突が発生し得る区域の推定結果

注) 0.5 m メッシュ DEM (長野県林業総合センター 2020) を加工して等高線を作成した。

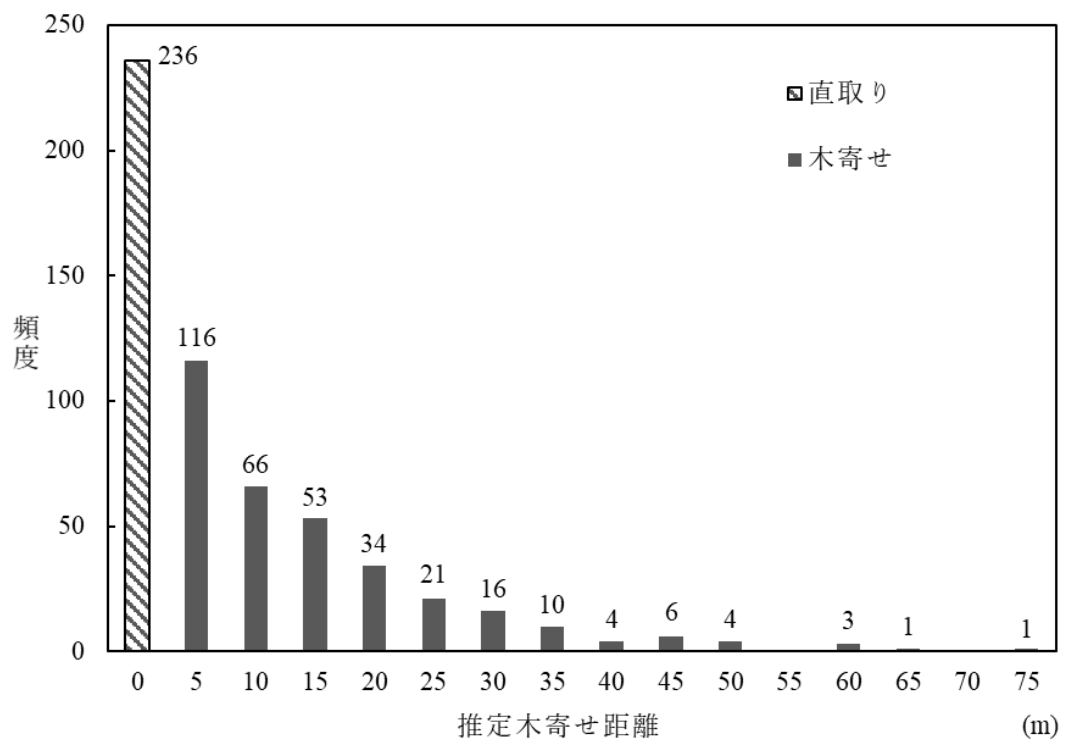


図 3-9 推定した木寄せ距離の頻度分布



前掲した表 3-2 より、本調査地において、伐採木の衝突に基づく真陽性率 (推定した損傷木区域と観測した損傷木区域の面積比) は 84.2%  $((4090+963)/5998 \text{ m}^2)$  (図 3-10: 紫系 2 色のポリゴン) であったことが明らかとなった。

一方、偽陽性率 (推定した損傷木区域と観測した健全木区域の面積比) は 42.0%  $((1285+752)/4853 \text{ m}^2)$  を示している (図 3-11: 緑と黄のポリゴン)。

また、伐採木の衝突から損傷木を推定した区域に対する観測の損傷木区域の比 (適合率) は 71.1%  $((4090+963)/(4090+963+1285+752) \text{ m}^2)$  であった。観測値と、伐採木と下層木との衝突に基づく推定値が一致する正解率は、72.5%  $((2816+4090+963)/10851 \text{ m}^2)$  であった。伐採木の影響を推定した区域に基づく終伐後の下層木の状態を推定した識別にかかる AUC は 0.713 であり (図 3-12), 識別精度は許容できる水準にあった。一方、伐採木の伐倒と木寄せによる衝突の推定から説明されない損傷木は 15.8%  $(945/5998 \text{ m}^2)$  であった。

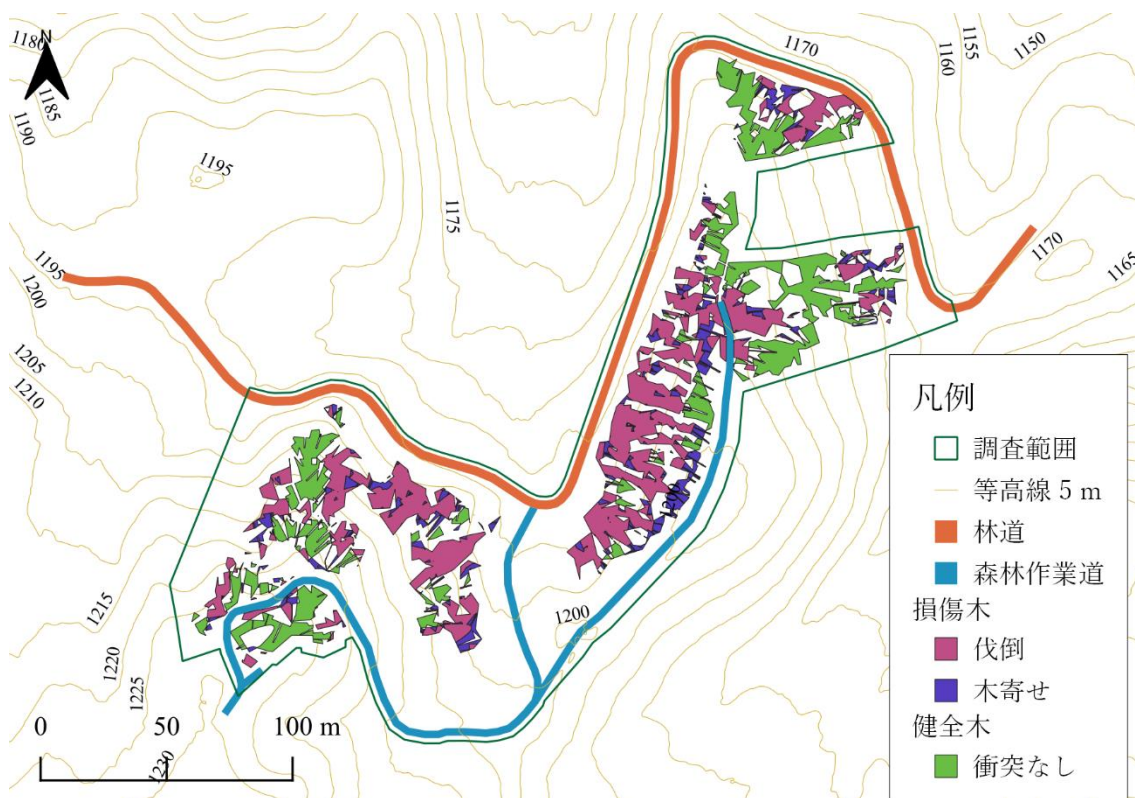


図 3-10 伐採木の衝突に基づき下層木の状態を平面上で正しく識別した区域  
注) 0.5 m メッシュ DEM (長野県林業総合センター 2020) を加工して等高線を作成した。

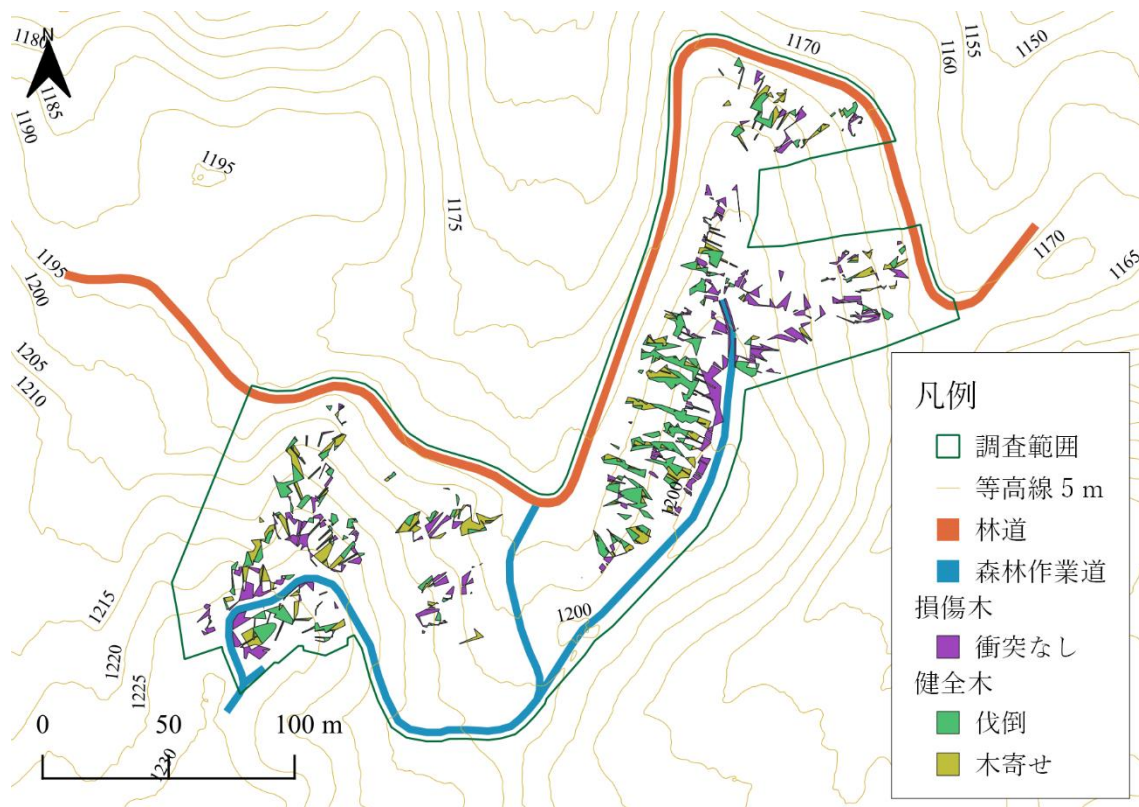


図 3-11 伐採木の衝突に基づく下層木の状態推定における誤差分布

注) 0.5 m メッシュ DEM (長野県林業総合センター 2020) を加工して等高線を作成した。

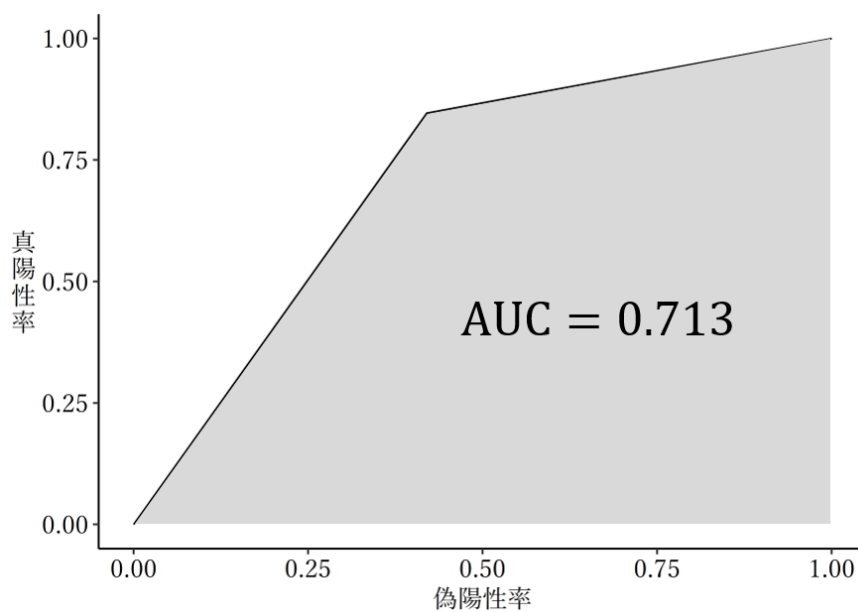


図 3-12 表 3-2 に基づく ROC 曲線

2 章と同様に、伐採木の伐倒時のみの衝突に基づく下層木の推定結果 (表 3-3) の真陽性率は 68.2% (4090/5998 m<sup>2</sup>)、偽陽性率は 26.5% (1285/4853 m<sup>2</sup>)、適合率は 76.1%

(4090/(4090+1285) m<sup>2</sup>), 正解率は 70.6% ((3568+4090)/10851 m<sup>2</sup>) であった。伐採木の伐倒時のみの衝突に基づく下層木の状態を推定した識別にかかる AUC は 0.710 (図 3-13) であり, 伐倒時の影響のみを考慮した場合にも, 識別精度は許容できる水準にあった。

表 3-3 伐倒時の衝突に基づく下層木の状態にかかる観測値と推定値の混同行列

推定値	観測値		小計
	健全木	損傷木	
健全木	<b>3568</b>	1908	5476
伐倒による損傷木	1285	<b>4090</b>	5375
小計	4853	5998	10851

注 1) すべて単位は (m<sup>2</sup>)。

注 2) 太字は, 観測と推定の結果が平面上において一致した面積を示す。

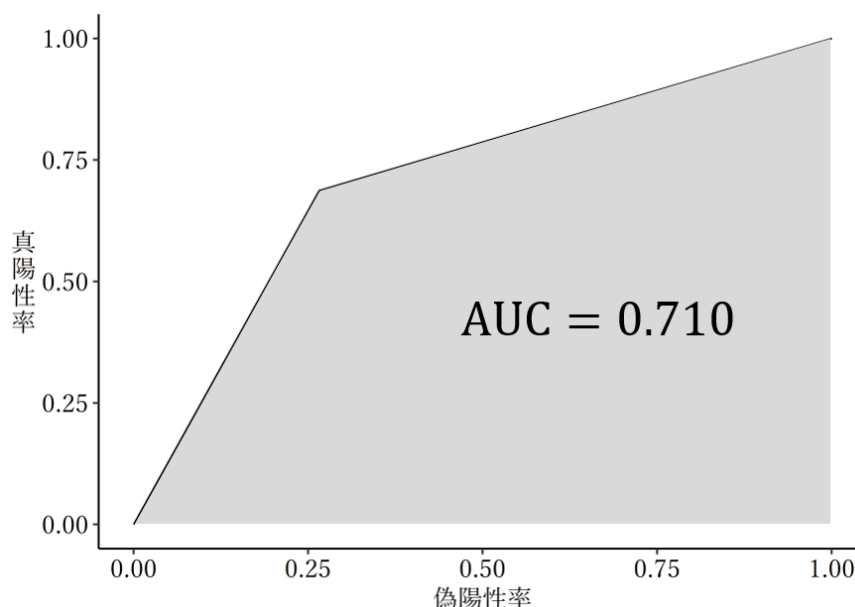


図 3-13 表 3-3 に基づく ROC 曲線

終伐により発生した損傷木の区域は一様ではなかった。また, 林小班全域を測定することにより, 路網に対して直交方向に損傷木と健全木の区域が交互に表れる規則性を観測した。伐採木と下層木の衝突の発生箇所に基づき, 終伐後の損傷木あるいは健全木のどちらの状態に変化するかを推定した結果の AUC は, 平面上においてばらつきのある観測値に対して受け入れられる水準であった。したがって, 本手法は, 伐採の事業規模である林小班に適用できると言えるだろう。伐採木と下層木の衝突が発生する座標は, 少なくとも 2 事例について終伐と損傷木の出現箇所との平面上の関係を説明する共通した指標であった。



2 章において調査設計の不備が考えられた木寄せにかかる衝突を考慮することにより、伐倒時の衝突のみを考慮した場合における損傷木の区域面積の検出力が改善し、また全体の正解率もわずかながら上昇した。すなわち、伐倒時の衝突のみに基づく推定では損傷木の発生箇所を十分に説明するものでなく、終伐では木寄せに起因する損傷木が発生していたと示された。したがって、2 章の損傷モデルから木寄せの説明変数が除外された理由は、単にデータの取得方法に問題があったためだと言える。

一方で、木寄せの衝突に基づく損傷木の区域にかかる適合率は 56.1% ( $963/(963+752) \text{ m}^2$ ) (表 3-2 参照) であり、本章で仮定した木寄せによる推定区域のおよそ半量については損傷木を過大に評価したことになった。また、推定した損傷木の区域における真陽性率が 16.0% ( $963/5998 \text{ m}^2$ ) でしかなかったにもかかわらず、偽陽性率は 15.5% ( $752/4853 \text{ m}^2$ ) にも上った。両者のバランスは、伐倒による衝突にかかる 76.1% ( $4090/(4090+1285) \text{ m}^2$ ) の適合率に対する 26.5% ( $1285/4853 \text{ m}^2$ ) の偽陽性率と比較して悪い。したがって、終伐による損傷木をもれなく検出するために、伐倒と木寄せの両方を考慮する必要があるものの、木寄せにかかる衝突の推定精度、すなわち木寄せの軌跡は、より正確な仮定が必要であったと言える。

また、伐採木の衝突に基づく推定では、検出できなかった損傷木の 15.8% の区域面積のうち、路網に沿った一部では造材によって発生した枝条が林地に堆積されたことによって、下層木が下敷きとなった区域も見られる (図 3-14)。伐採木の衝突では損傷発生之机を推定できないため、本手法では検出できない損傷木が実際に発生していたことが認められた。

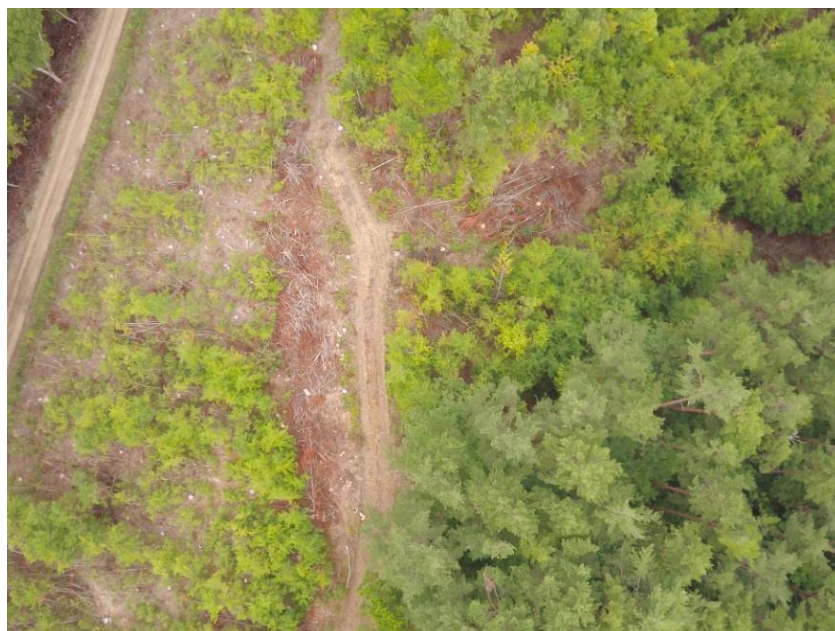


図 3-14 路網沿いに堆積した枝条残渣

最大傾斜方向に沿った損傷木と健全木の出現にかかる規則性は、終伐を行った作業員の選択に起因した可能性がある。伐採木は、伐採の進行とともに生成するギャップに向けて伐

倒されることがあり (Panfil and Gullison 1998), 本調査地においては, 木寄せ距離の長い中央部において, 伐倒方向がまとめられたことは伐根より明らかである (図 3-7 参照)。

終伐後の下層木の識別が観測と異なる推定誤差は, 調査範囲の全域で発生しており (図 3-11 参照), 路網に対して異なる 2 方向への出現傾向を観測した。ひとつは, 伐採木の衝突が推定された区域のうち, 最大傾斜方向に沿っている区域 (図 3-11 の緑と黄のポリゴン) である。もうひとつは, 衝突の発生が本手法により推定されなかった区域で, 路網と平行に走る誤差 (図 3-11 参照: 紫のポリゴン) である。

前者については, 伐採木の等高線方向の挙動に対する推定が不正確であった可能性がある。まず, 伐倒時の伐採木は, 偏心していない通直な形状 (図 2-11 参照) を仮定した。一方で, 作業員は, 立木の傾きを考慮したうえで希望する方向に伐倒するために, 意図する伐倒方向とは異なる方向に受口を作成することがある (Husqvarna AB (publ) 2012; ジェフ 2012)。また, 立木の傾き (Nikooy et al. 2013), ツル幅の不一致 (Nagao and Yamada 2019) は, 伐倒方向の誤差の原因となり, 事実上, 手作業による伐倒はハーベスタよりもずれが生まれる可能性が高い (Fjeld and Granhus 1998) とされている。さらに, 自身の作業経験に基づく, 立木幹材積の大きな伐採木ほど伐倒時の倒伏中にツルが切断し, 伐根から遠く離れた位置に接地することもあった。手作業による伐倒は古典的な方法であるにもかかわらず, 科学的には定量的な評価が遅れている分野である (上村 2015)。観測の都合より, 本章では伐根に残されたツルの方向に基づいて伐倒方向を計測したものの, 実際の伐採木の挙動は大きく異なっていたのかもしれない。

続く木寄せでは, 木寄せの仮定において斜面方向への横滑り量の推定を単純化したことが損傷木の区域にかかる推定精度を低下させた一因であったと考えられる。斜面上の木寄せにおける材の挙動について, 丸太では理論的な解析が行われている (石川 1994) もの, 下層木が存在し, かつ全木方式である場合の挙動については明らかでない。木寄せされる伐採木には下層木が干渉するため, かかり木が通過する際に発生する抵抗 (森岡ら 1996; 松本 2010; 松本ら 2017) に似た応力が発生すると推測される。ヒノキ立木の枝の角度はやや上向き (水永 1995) であり, 木寄せの方向によっても下層木が干渉する度合いは変化するだろう。さらには, 伐倒によってすでに移動の起点に誤差が生じていた可能性もあった。伐採木に作用する複雑な物理現象を再現することは, 単純な伐倒木の形状復元と木寄せにかかる軌跡の仮定には含まれていない。終伐の状況をより正確に復元するには, 伐採にかかる物理現象を解明する必要があった。

後者については, 伐採木により検出できなかった損傷木は, 路網沿いの損傷である (図 3-11 参照: 紫のポリゴンの一部)。路網沿いの損傷は, 一般に造材の際の丸太の取り扱いが原因 (Fjeld and Granhus 1998) であるとされ, 路網周辺の下木は伐倒から運材までの間傷つきやすい (Surakka et al. 2011)。ハーベスタ伐倒の作業システムにおいては, 伐倒以外の工程に

において衝突の 40% 程度が発生することもあるとされる (Sirén 2001)。間接的には下層木が枝条残渣の下敷きになることも損傷発生の一因であり (Gottfried and Jones 1975; Sikström and Glöde 2000; Glöde and Sikström 2001; Surakka et al. 2011), 造材による損傷の推定を取り入れることにより、未検出であった 15.8% の損傷木を検出を改善することができると考えられる。

一方で、本調査地では、伐採木による衝突の推定が完全に不一致となった状況を観測した。伐倒による影響を推定した区域のうち、調査範囲の南西部において、健全木が伐採木の形状のままに残存した一区画が確認できる (図 3-11 参照)。おそらく、伐倒された伐採木が複数の下層木によって支えられ、伐採木が一時的に宙に浮いた状況 (図 3-15) が発生したと想像される。本章の分析は、衝突によって下層木に直ちに損傷が発生するという仮定に基づいて行った。しかし、隣り合う個体によって風速に対する集団的剛性が見られる (Kamimura et al. 2022) ように、伐倒による衝突を同時に受ける下層木の集合体は、伐採木が発生させる運動エネルギー (湊・寺本 1989; Hartsough 2003) に耐える応力を有していた可能性がある。Sirén (2001) は、衝突を受けた残存木にも損傷が見られなかった個体の存在を報告している。今後の損傷木の発生にかかる推定は、1) 衝突の発生の有無の判定、2) 衝突による損傷の発生の判定、について 2 段階に分けて行うことが下層木にかかる損傷発生機構を解明する方法として適切だろう。



図 3-15 複数の下層木により伐倒直後の伐採木が下支えされた例

注 1) 撮影は奈良本山国有林であり、伐採木と下層木の条件は金沢山国有林とは異なる。

注 2) 衝突を受けた複数の下層木が同時に撓うことにより、この時点では損傷しなかった。



これまでの検討によって、伐採木と下層木の衝突に基づく損傷木の推定により、終伐後の下層木の状態の分布が面積として表現できる可能性がある。観測における健全木の区域面積が  $4853 \text{ m}^2$  であったことに対し、推定による健全木の区域面積は  $3761 \text{ m}^2$  である (図 3-16: 左図)。すなわち、今回の推定において、平面上の一致率は  $57.9\%$  ( $2814/4853 \text{ m}^2$ ) (図 3-16: 右図) に過ぎないものの、終伐による損傷木の発生推定を行うことにより、健全木から造林が不要となる数量が検討可能になった。健全木の視覚化は、期待できる造林費用の減額にかかる貨幣価値 (Lotfalian et al. 2010) の具体的な算定につながる。伐採木という明示的な要素を扱うことにより、所与の終伐において残存する下層木から期待できる人工再造林が不要な数量を金額として提示できることは、漸伐の収益性を評価するうえで重要な意義を有する。今後の課題は、推定精度の向上にある。そのうえで、下層木の分布が予め判明している終伐において、衝突機会を最小化する、すなわち健全木の残存面積から再造林費用が最小となる伐採方法を数理計画法として求めること (Shirasawa et al. 2017) により、最適な伐採方法が視覚的に明らかとなる可能性がある。

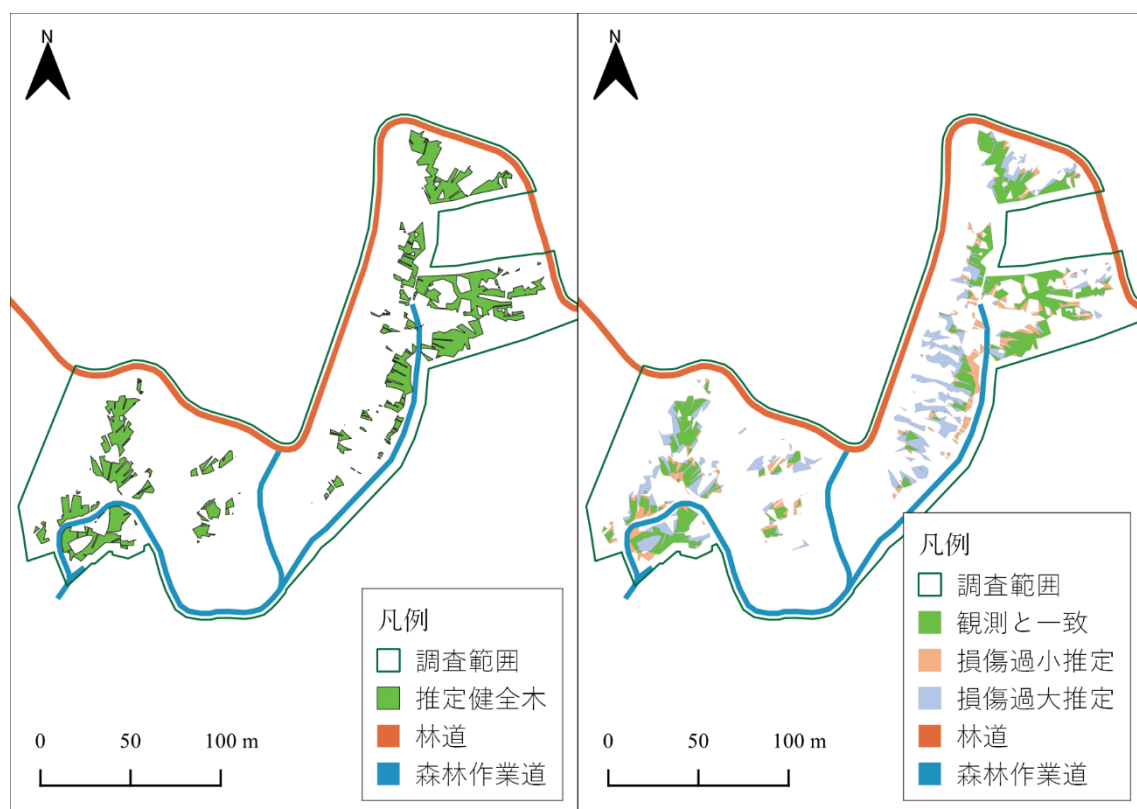


図 3-16 推定による健全木の区域および観測との誤差の分布

例えば、伐採木の伐倒による影響の区域を最小化する伐倒方向を与えた場合 (図 3-17: 左図), 下層木の区域に被覆する伐採木の投影面積は  $4153 \text{ m}^2$  となり、実際に観測した伐採の衝突にかかる区域面積のうち、 $22.7\%$  を軽減できる試算となる。伐採木の伐倒のみによる識



別の正解率より、29.4% の誤差が含まれると仮定すると、4728-6698 m<sup>2</sup> の区域には健全木が残存すると推定できる。意図的に衝突機会を集積させることは、損傷木発生抑制に有効な手段だろう。路網を下層木の存在しないギャップに見立て、伐採木の樹冠を路網上に集積させる (Hedin 1996; Eliasson 2000; Glöde and Sikström 2001; Granhus and Fjeld 2001) 計画的な方向伐倒 (Dykstra and Heinrich 1996; Pereira et al. 2002; Krueger 2004; Forshed et al. 2006) は、下層木への衝突機会抑制の観点より支持することができる。

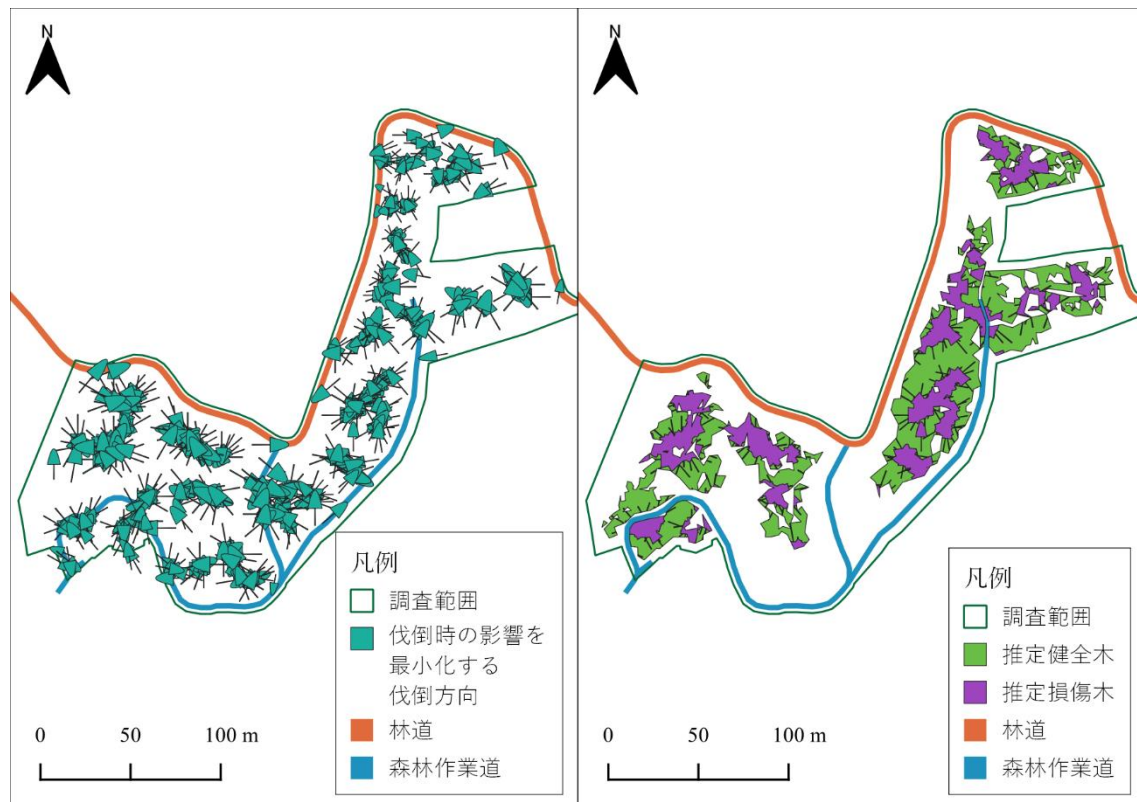


図 3-17 伐採木の伐倒による影響区域を最小化した例および下層木識別の推定

## 小括

終伐における下層木の損傷発生箇所について、伐採木と下層木との衝突によって説明されることを実証するため、2.6 ha を対象とした事業規模での検証を行った。測量により、終伐前の時点で 10851 m<sup>2</sup> に分布していた下層木は、終伐によって 4852 m<sup>2</sup> まで減少し、面積比で 55.3% の損傷木の発生が明らかになった。

伐採木の衝突に基づく終伐後の下層木の状態にかかる識別の推定精度は、平面上において測量に基づく観測値に対し、72.5% の面積において一致した。また、AUC による識別精度の判定では  $AUC \geq 0.7$  を満たしており、本手法が受け入れられる水準であったことを示

した。伐採木による下層木への衝突が発生すると推定した座標は、損傷木の発生を平面上において説明する指標であったことが明らかとなった。

したがって、終伐後に残存する健全木とは、伐採木による衝突を免れた下層木であることを定量的に示すことができたと換言することができるだろう。伐採木の影響する区域が平面上において定まることにより、伐採の後に残存する下層木の分布あるいは区域が算定可能となる。下層木の残存する区域を拡大するために、伐採木の下層木への衝突機会が最小となる伐採方法を検討することにより、漸伐に最適な伐採方法が定量的に明らかになる可能性がある。

今後の伐採による損傷木の発生予測では、伐採の進行により変化する林況を反映するとともに、造材や集材など、すべての工程にかかる下層木への衝突の発生機会を考慮することにより、損傷の過小推定の改善につながると示唆される。また、各工程における伐採木の挙動をより正確に把握することは、損傷木推定にかかる誤差の改善につながるだろう。さらに損傷モデルを改良し、Eliasson (2003) の曲げ試験や Gardiner et al. (2000) の耐風性モデルで示されているように、個々の下層木における伐採に対する物理的応力を解明することは、損傷発生機構の解明にあたりとりわけ重要であるだろう。個体に発生した損傷には経年回復の要素があり (Tesch et al. 1990; 近藤ら 2008; 竹嶋ら 2019), 被圧からの開放に対する成長速度の反応 (竹内ら 1992; 中岡ら 2001; Metslaid et al. 2005) に関連する伐採後の枯死率の変動 (Tatsumi et al. 2014; Ruel and Gardiner 2019) も存在する。損傷の発生推定に個体単位の分析を行うことで、伐採後の長期動態予測までシームレスに関連付けることができると期待できるだろう。

## 第 4 章 伐採費用と施業履歴および再造林費を含めた収益性

### 4.1 調査地の概要と作業システム

#### 4.1.1 調査地の概要

本章では、奈良本山国有林 1180 た，く両林小班 (図 4-1) と，金沢山国有林 1408 に林小班 (図 4-2) において実施された終伐を調査対象とした。4 つのプロット (表 4-1) を設置し，プロット内の伐採木を土場に集積するまでにかかる伐採費用，市場への運材費用，丸太販売にかかる市場手数料を算定した。奈良本山国有林の終伐は，2014 年 11 月下旬から 12 月上旬の 5 日間 (以下，奈 14)，2015 年 11 月上旬の 3 日間 (以下，奈 15) に観測した。金沢山国有林では，2016 年 12 月中旬の 2 日間 (以下，金 16)，2021 年 5 月中旬の 1 日間 (以下，金 21) にわたり終伐を観測した。

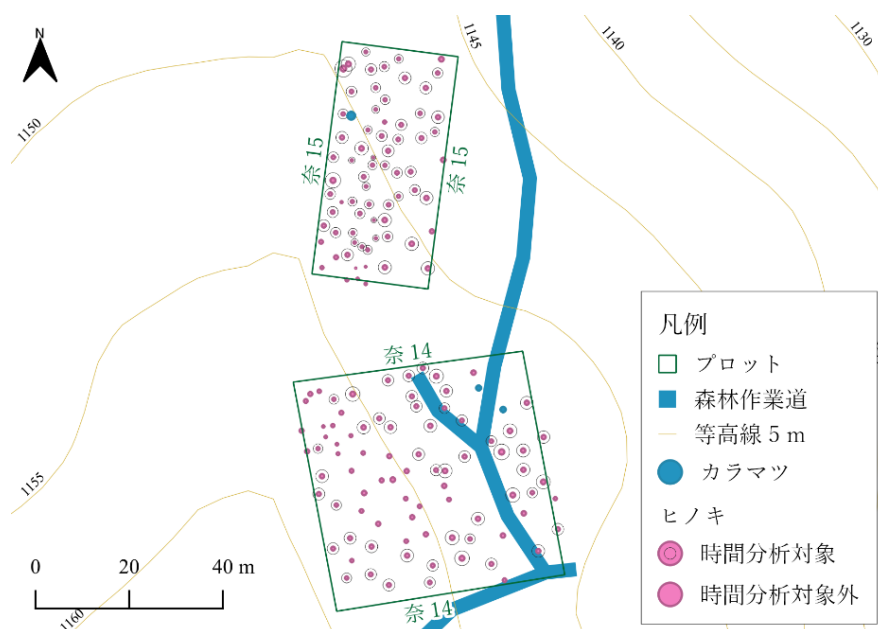


図 4-1 奈良本山国有林の調査プロット

注 1) 基盤地図情報数値標高モデル (国土地理院 n.d.) を加工して等高線を作成した。

注 2) カラマツ，ヒノキのシンボルは，DBH をそれぞれ 1.67 倍強調して表示した。

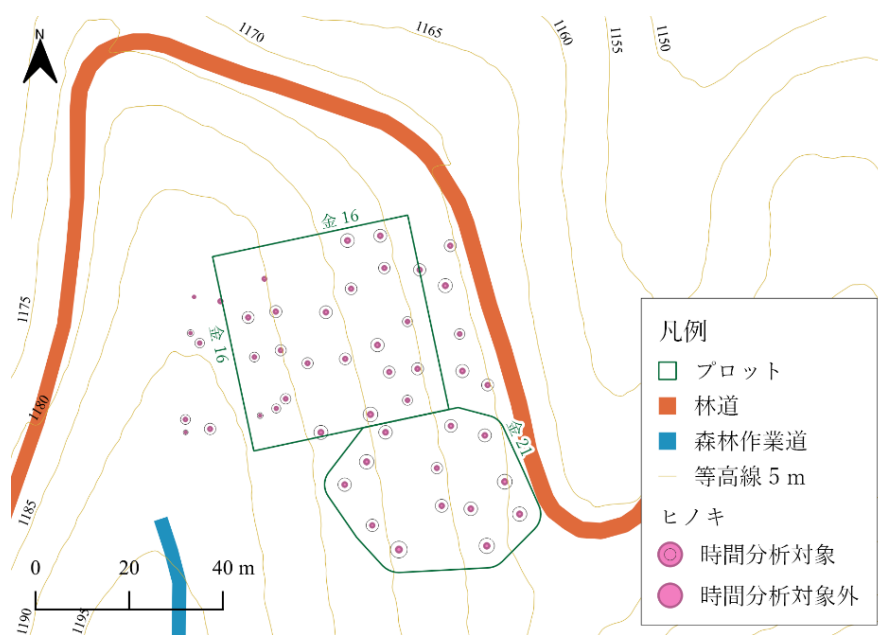


図 4-2 金沢山国有林の調査プロット

注 1) 0.5 m メッシュ DEM (長野県林業総合センター 2020) を加工して等高線を作成した。

注 2) ヒノキのシンボルは、DBH を 1.67 倍強調して表示した。

表 4-1 終伐前のプロット概況

項目	奈 14	奈 15	金 16	金 21
終伐時林齢 (年)	99	100	84	89
平均 DBH (cm)	40.4 (5.45)	35.7 (8.61)	39.8 (6.08)	47.1 (4.48)
上層木 平均樹高 (m)	23.8 (1.32)	22.1 (2.49)	18.6 (1.69)	20.3 (1.63)
平均幹材積 (m <sup>3</sup> /本)	1.36 (0.339)	1.06 (0.489)	1.01 (0.311)	1.46 (0.367)
立木密度 (本/ha)	340	576	150	107
下層木 平均樹高 (m)	3.1 (1.79)	4.0 (1.62)	0.83	-
立木密度 (本/ha)	10280	7080	70238	-
被覆率 (%/プロット)	59.2	47.2	78.9	51.6
調査面積 (ha)	0.250	0.125	0.160	0.121
平均林地傾斜 (°)	8.6	10.4	19.3	21.6

注 1) () は標準偏差, 「-」はデータがないことを示す。

注 2) 金 16 の下層木平均樹高は、樹高階頻度 (松井ら 2017) より算出した。

注 3) 奈 14 では 2 本の、奈 15 では 1 本のカラマツ上層木を含む。

#### 4.1.2 採用された作業システム

図 4-3 に、各調査地の作業システムを示す。伐倒と枝払いは金 21 以外すべてチェーンソーで行われた。ただし、金 21 では全木方式が採用されたため、枝払いは造材に合わせて実施された。木寄せ以後の工程については、奈良本山国有林には重機専属の作業員は配置されず、作業の進捗状況に応じて作業員の従事する工程は変更された。

一方、金沢山国有林にはウインチ付グラップルローダー専属の作業員が配置され、木寄せ、造材は 2 名の作業員によって行われた。すべての調査地において、伐採木から造材された丸太は、土場へとフォワーダによって集材された。出材材積は、極積みされた丸太の末口径 14 cm 以上を対象として末口二乗法によって求めた。作業班員は、奈 14 では 2 名、奈 15 では 2 名、金 16 では 4 名、金 21 では 3 名であった。

調査の都合により、奈 14 では 2 日、奈 15 では 1 日分の作業観測ができなかった。一方、金 16、金 21 では、プロット内の伐採対象木について、伐倒から造材まで不足なく観測した。4 か所のプロットにおいて、伐倒から造材まで一貫して追跡したヒノキ伐採木の観測数は 152 本であった。内訳は、伐倒によって伐採木が路網に到達した直取り対象木、到達しなかった木寄せ対象木の順に、奈 14 では 43 本と 6 本 (プロット内の伐採木の 57%)、奈 15 では 25 本と 33 本 (同 80%)、金 16 では 12 本と 20 本 (同 91%)、金 21 では 9 本と 4 本 (同 100%) であった。奈 15、金 16、金 21 では、集材が別日程で実施されたため、観測できなかった。作業員への聞き取りや、作業日報 (林野庁中部森林管理局南信森林管理署 2021) などから、それぞれ集材には 2 日 (奈 15)、1 日 (金 16; 金 21) を要したと推測した。金 16 の集材に使用した機械は記録が残っていなかったものの、金 21 と同じ素材生産業者が終伐を行ったことから、同じ機械が使用されたとみなした。

工程	伐倒	枝払い	木寄せ	造材	集材
員数	1	1	1	1	1
奈 14 機械	チェーンソー (伐倒)	チェーンソー (伐倒)	トラクタ (IWAFUJI T-30A)	チェーンソー (造材) ハーベスタ (CAT 312D+KETO 150)	グラップルローダー付き フォワーダ (IWAFUJI U-4SBG)
供用日	7	(7)	7	7/7	7
員数	1	1	1	1	1
奈 15 機械	チェーンソー (伐倒)	チェーンソー (伐倒)	ウインチ付き ハーベスタ (KOMATSU PC138+ KETO 150+IWAFUJI TW-2S)	チェーンソー (造材) ウインチ付き ハーベスタ (KOMATSU PC138+ KETO 150+IWAFUJI TW-2S)	グラップルローダー付き フォワーダ (IWAFUJI U-5CG)
供用日	4	(4)	4	4/(4)	2
員数	1	1	2	2	1
金 16 機械	チェーンソー (伐倒)	チェーンソー (伐倒)	ウインチ付き グラップルローダー (HITACHI ZAXIS135US+ IWAFUJI TW-3H)	チェーンソー (造材) ウインチ付き グラップルローダー (HITACHI ZAXIS135US+ IWAFUJI TW-3H)	フォワーダ (機種不明)
供用日	2	(2)	2	2/(2)	1
員数	1		2	2	1
金 21 機械	チェーンソー (伐倒)	—	ウインチ付き グラップルローダー (HITACHI ZAXIS135US+ IWAFUJI TW-3H)	チェーンソー (造材) ウインチ付き グラップルローダー (HITACHI ZAXIS135US+ IWAFUJI TW-3H)	グラップルローダー付き フォワーダ (IWAFUJI U-5DG)
供用日	1		1	1/(1)	1

図 4-3 作業システム

注 1) 枝払いのチェーンソーは伐倒で使された機械と同一である。

注 2) 奈 15, 金 16, 金 21 では, 造材と木寄せに使された機械は同一である。

## 4.2 終伐の伐採費用にかかる算定方法

### 4.2.1 終伐の伐採費用の構成

本章では、上層木の伐倒から丸太が山土場に集材される間に発生する費用を終伐の伐採費用とした。図 4-4 に、作業（伐採）費用の構成を示す（林野庁 2023b）。我々が通常費用として認識しているものは、標準単価に間接費のうち現場監督費と社会保険料を加算した金額を指している。間接費の係数は、林野庁の通知（2023c）によりそれぞれ 21%、18% と定められており、標準単価に 1.39 を乗算した金額が伐採費用となる。また、標準単価は事業の実行に直接必要な直接費、間接費のうち共通仮設費から構成され、共通仮設費は直接費の合計額の 8.4% に相当する額と定められている（林野庁 2023c）。直接費は、労務費、機械経費からなり、事業の生産量に依存しない固定費と、生産量に比例する変動費によって算定する。本章では、固定費は作業日報より、変動費は終伐にかかる延べ所要時間に基づいて算定した。延べ所要時間は、終伐をビデオカメラで撮影し、録画した映像のタイムコードに基づき、丸太の生産にかかる有効時間を抽出する時間分析によって求めた。調査の都合による欠測データについては、延べ所要時間の推定式を作成することによって補足した。

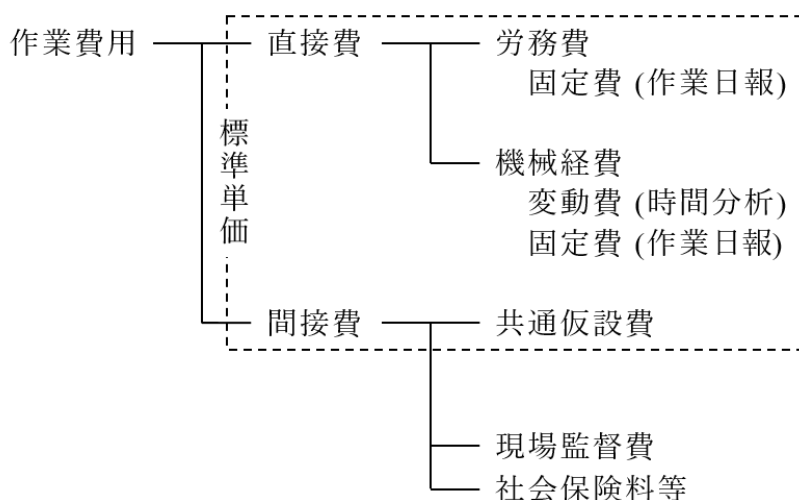


図 4-4 本章で設定した作業費用の構成

注) 林野庁 (2023b) を参考とし、作成した。

### 4.2.2 伐倒、枝払い、木寄せ、造材にかかる延べ所要時間の算定方法

伐採木  $k$  の伐倒から造材までに発生する延べ所要時間  $T_k$  (秒/本) を、以下の (20) 式のように定義した:

$$T_k = \sum M_{wk} (t_{wk} + D_{wk}), \quad (20)$$



ここで、 $M_w$  は工程  $w$  における員数 (人) であり、対象とする工程は、伐倒、枝払い、木寄せ、造材の 4 工程である。金沢山国有林においては、木寄せ、造材工程において 2 名の作業員が同時に従事していた。 $t_w$  は工程  $w$  における主体作業時間 (秒/本/人)、 $D_w$  は工程  $w$  における付帯作業時間 (秒/本/人) である。

主体作業時間とは、丸太の生産に直接費やされた時間を指す。伐倒は作業員の伐倒対象木への移動開始から伐倒後の伐根周りの整理まで、枝払いは作業の開始から終了まで、木寄せは対象への移動開始から荷外し後のワイヤーの片付けまで、造材は対象への移動開始から路網脇への巻立てまで、集材は対象への移動開始から土場に到着し、荷下ろしが完了するまでを計測の対象とした。

付帯作業時間とは、給油、作業員同士の打ち合わせ、伐倒補助具の運搬や作業待ち、ワイヤーの乱巻き解消など、丸太の生産に直接関与しない準備作業の期間を指す。それぞれ調査地において、給油や目立て作業は定期的には発生していなかった。また、付帯作業時間は、直後に発生した主体作業の対象に関連する時間とみなした。なお木寄せにおいて、金 21 でのみ観察された伐採木の枝と下層木との絡まりによって作業が中断した時間は、別に記録、集計した。調査員への安全喚起、調査設計の確認、一般車両の通行による一時的な作業中断など、通常の業務では発生しない時間は集計から除外した。

奈 14、奈 15、金 16 のプロットでは、53 本の伐採木について欠測し、共通して全幹方式による木寄せであった。そこで、3 つのプロットにおいて伐倒から造材まで、一貫して観測した 139 本の伐採木に基づき、奈 14、奈 15、金 16 における伐採木  $k'$  の伐倒から造材にかかる推定延べ所要時間  $T'_{k'}$  (秒/本) の推定式を (21) 式のように定義した：

$$T'_{k'} = \sum M_{wk'} (t'_{wk'} + D'_{wk'}), \quad (21)$$

ここで、 $t'_{wk'}$  は工程  $w$  における伐採木  $k'$  の推定主体作業時間 (秒/本/人)、 $D'_{wk'}$  は工程  $w$  における推定付帯作業時間 (秒/本/人) である。付帯作業は作業とは直接関係のない性質であり、正確に定量化するのは困難であると考えられている (Spinelli and Visser 2008) ため、各工程で観測された平均値とした。次に、 $t'_{wk'}$  は以下の (22) 式から (26) 式に示すガンマ分布に従うと仮定した：

$$t_{wk'} \sim \text{Gamma}(t'_{w}, s_{wk'}), \quad (22)$$

$$\log(t'_{fk'}) = \beta_{f0} + \beta_{f1}V_{k'} + \beta_{f2}U_{k'} + \beta_{f3}S_{k'}, \quad (23)$$

$$\log(t'_{dk'}) = \beta_{d0} + \beta_{d1}V_{k'}, \quad (24)$$

$$\log(t'_{yk'}) = \beta_{y0} + \beta_{y1}V_{k'} + \beta_{y2}L_{k'}, \quad (25)$$

$$\log(t'_{pk'}) = \beta_{p0} + \beta_{p1}V_{k'}, \quad (26)$$

ここで、 $\beta_f$ ,  $\beta_d$ ,  $\beta_y$ ,  $\beta_p$  はそれぞれ工程における説明変数あるいは切片の推定するパラメータ、 $s_w$  は工程  $w$  における分散である。添え字は工程を示し、 $f$  は伐倒、 $d$  は枝払い、 $y$  は木寄せ、 $p$  は造材である。 $V_{k'}$  は伐採木  $k'$  の立木幹材積、 $U_{k'}$  は伐採木  $k'$  が伐倒前に立木であったときに位置していたグリッドと周囲 8 方向の近傍グリッドにおける下層木本数、 $S_{k'}$  は伐採木  $k'$  が伐倒前に立木であったときの周囲 2 m の平均傾斜、 $L_{k'}$  は伐採木  $k'$  の木寄せ距離である (表 4-2)。

表 4-2 伐倒、枝払い、木寄せ、造材の延べ所要時間のパラメータの推定に使用した変数

変数	観測数	平均値	標準偏差	最小値	中央値	最大値
$V$ (m <sup>3</sup> /本) 立木幹材積	139	1.18	0.427	0.13	1.18	2.42
$U$ (本/9 m <sup>2</sup> ) 伐倒時周囲の下層木	112	20	42.4	0	9	263
$S$ (°) 伐倒時周囲の平均傾斜	112	11.8	5.07	4.2	10.7	31.1
$L$ (m) 木寄せ距離	59	18.0	12.78	3.6	13.6	59.6
$t_f$ 伐倒主体作業時間	112	503	272.6	140	445	2067
$t_d$ 枝払い主体作業時間	127	432	238.6	69	366	1961
$t_y$ 木寄せ主体作業時間	59	368	236.1	135	304	1182
$t_p$ 造材主体作業時間	139	582	213.7	116	556	1338
$D_f$ 伐倒付帯作業時間	112	104	165.7	0	0	835
$D_d$ 枝払い付帯作業時間	127	31	62.9	0	0	336
$D_y$ 木寄せ付帯作業時間	59	73	83.3	0	22	252
$D_p$ 造材付帯作業時間	139	109	162.1	0	44	799

注)  $t$  と  $D$  の単位は (秒/本/人)。

プロットでは、すべてチェーンソーによる伐倒であった。本章では、酒井ら (1988) が示す受口追口切りと立木材積が比例関係にあることを根拠として、立木幹材積を伐倒にかかる主体作業時間の説明変数の候補とした。移動距離は、時間分析において明確に特定できなかったために説明変数の候補として考慮しなかった。また、終伐が進むにつれて下層木が徐々に損傷したことから、個々の作業に直接影響する下層木を特定することは困難であった。そこで、ハーベスタでの伐採に際し、伐倒木の周囲半径 1.24 m を予め事前に刈り取るべきという作業員の回答結果 (Kärhä and Bergström 2020) を参考とし、伐倒における立木周辺の下層木の本数のみを下層木にかかる変数として考慮した。

枝払いと造材では、伐倒にかかる延べ所要時間と同様に、比例関係が指摘されている立木幹材積 (酒井ら 1988) を説明変数として考慮した。

木寄せに関連して、集材の生産速度には集材距離、横取り距離、架空索のスパン長、荷掛

けした材の特性という説明変数が使用されている (Lindroos and Cavalli 2016)。本章では、車両系作業システムに該当する木寄せ距離、木寄せ対象の立木幹材積を説明変数の候補とした。伐採木と林床との摩擦によるけん引抵抗 (沼田・山下 1986; 酒井ら 1988; Sakai 1989) や、作業中の傾斜 (Ghaffariyan et al. 2009) の変動は、本章の調査設計では検証不可能であるため考慮しなかった。

上記のデータセットを用いて、二重一般化線形モデルからパラメータを推定した。推定には R 4.2.1 (R Core Team 2022) に実装されている `dglnm()` 関数を使用した。各作業工程の説明変数として利用できる候補が限られているため、Wald 検定において 0.1% 水準で有意な変数を延べ所要時間推定の説明変数として採用した。決定したモデルから、終伐を観測していない 53 本にかかる  $T'_{kr}$  を推定し、実測の  $T_k$  と組み合わせることで、プロット内すべての伐採木にかかる延べ所要時間を算定した。なお、造材にかかる主体時間の推定では、手造材と機械造材を区別しておらず、2 名作業であった金沢山国有林の木寄せ、造材にかかる主体作業時間は、それぞれ作業員 1 名に等しい延べ所要時間が発生すると仮定した。また、奈 14、奈 15 に含まれる 3 本のカラマツは (21) 式より延べ所要時間を推定した。

工程にかかる主体作業時間の推定式である (23) 式から (26) 式のうち、採用水準を満たさなかった説明変数は  $U_{kr}$  (伐倒における周囲の下層木本数) と木寄せにおける  $V_{kr}$  (立木幹材積) であった。したがって、未観測の伐採木にかかる推定の延べ所要時間  $T'_{kr}$  について、以下の (27) 式を得た:

$$T'_{kr} = M_{fk'}(\exp(4.7965 + 0.6435V_{kr} + 0.0531S_{kr}) + 104) + M_{dk'}(\exp(5.2055 + 0.6893V_{kr}) + 31) + M_{yk'}(\exp(5.3684 + 0.0266L_{kr}) + 73) + M_{pk'}(\exp(5.8351 + 0.4356V_{kr}) + 109). \quad (27)$$

最後に、実際に観測した 152 本の伐採木にかかる延べ所要時間について Games-Howell 法を用いて多重比較 (5%) を行い、伐倒から造材までに発生した延べ所要時間の差がプロットごとに見られるのか検定した。

#### 4.2.3 集材にかかる延べ所要時間の算定方法

本章では、所与の集材サイクル  $m$  に発生するサイクルタイム  $T_m$  (秒/サイクル) を (28) 式のように定義した:

$$T_m = t_{ex.1m} + t_{ex.2m} + t_{ex.3m} + t_{ex.4m} + D_{ex.m}, \quad (28)$$

ここで、 $t_{ex.1}$  は空走行時間 (秒/サイクル)、 $t_{ex.2}$  は積込み時間 (秒/サイクル)、 $t_{ex.3}$  は実走行時間 (秒/サイクル)、 $t_{ex.4}$  は荷下ろし時間 (秒/サイクル)、 $D_{ex.}$  は付帯作業時間 (秒/サイクル) である。集材の主体時間は、土場から空走行を開始し、プロットの近くで丸太を積込み、土場に向かって実走行し、積荷を荷下ろしするまでの期間とした。典型的な付帯作業は

給油であり、観測を行った奈 14 の平均値を採用した。また、通常の作業で発生しない遅延は集計から除外した。

各調査地における走行区間は、土場からプロットに至るまでの路網上の距離とし、GIS で計測した。

表 4-3 に、フォワーダの作業条件を示す。走行速度の設定値は、既往研究より求めた。岡ら (2007) は、路網の仕様と勾配に対する速度率を算定し、勾配が  $10^\circ$  以下の集材路では、フォワーダの実走行速度は仕様における最高速度の 29% から 57% に減少し、林道では同 33% から 79% に減少することを報告している。本章では、猪俣らの採用した走行速度の仮定 (猪俣ら 2020) に倣い、それぞれの路網規格における減少率の中央値を用いて実走行速度とした。また、空走行速度の減少率は不明なために実走行速度と同値であると仮定した。さらに、奈 14 の観測における平均の積載材積は  $2.3 \text{ m}^3/\text{サイクル}$ であったことから、斎藤ら (2021) の示したヒノキ立木の容積比重により、積載材積上限は使用されたフォワーダの最大積載量の 65.6% に相当する材積とした。

表 4-3 フォワーダ諸元の設定

プロット		集材材積 ( $\text{m}^3$ )	集材距離 ( $\text{m}/\text{サイクル}$ )	走行速度 ( $\text{m}/\text{秒}$ )	積載材積上限 ( $\text{m}^3/\text{サイクル}$ )	サイクル数
観測	奈 14	69.8	150-220	1.1	2.3	30
推定	奈 14	19.7	200	1.1	2.3	9
	奈 15	60.9	260	1.3	3.8	17
	金 16	22.6	80	1.7	3.8	6
	金 21	13.4	40	1.7	3.8	4

注 1) 走行速度の算出には、フォワーダの諸元値 (イワフジ工業株式会社 n.d.) を用いた。

注 2) 積載材積上限は、ヒノキ立木の容積比重 (斎藤ら 2021); フォワーダの諸元値 (イワフジ工業株式会社 n.d.) より設定した。

一方、本章では、積込み、積み下ろしにかかる延べ所要時間については奈 14 における観測値をもとに推定した。積込み ( $t_{\text{ex.2}}$ ), 荷下ろし ( $t_{\text{ex.4}}$ ) にかかる主体作業時間について、以下の (29) 式から (32) 式に示すガンマ分布に従うと仮定した:

$$t_{\text{ex.2m}} \sim \text{Gamma}(t'_{\text{ex.2}}, s_{\text{ex.2m}}), \quad (29)$$

$$t_{\text{ex.4m}} \sim \text{Gamma}(t'_{\text{ex.4}}, s_{\text{ex.4m}}), \quad (30)$$

$$\log(t'_{\text{ex.2m}}) = \beta_{\text{ex.2}} + \beta_{\text{ex.21}} V'_m, \quad (31)$$

$$\log(t'_{\text{ex.4m}}) = \beta_{\text{ex.4}} + \beta_{\text{ex.41}} V'_m, \quad (32)$$

ここで、 $\beta_{\text{ex},2}$ ,  $\beta_{\text{ex},21}$ ,  $\beta_{\text{ex},4}$ ,  $\beta_{\text{ex},41}$  はそれぞれ工程における説明変数あるいは切片の推定するパラメータ、 $s_{\text{ex},2m}$ ,  $s_{\text{ex},4m}$  は分散、 $V'_m$  は集材サイクル  $m$  における積載材積である (表 4-4)。

表 4-4 積込み、荷下ろしにかかる延べ所要時間のパラメータの推定に使用した変数

変数	観測数	平均値	標準偏差	最小値	中央値	最大値
$V'$ (m <sup>3</sup> /サイクル) 積載材積	30	2.3	0.71	1.1	2.4	3.6

上記のデータセットを用いて、二重一般化線形モデルからパラメータを推定した。推定には R 4.2.1 (R Core Team 2022) に実装されている `dglm()` 関数を使用した。説明変数として利用できるデータが限られているため、Wald 検定において 0.1% 水準で有意な場合のみ、延べ所要時間推定の説明変数として採用した。

集材の延べ所要時間の推定式である (31) 式および (32) 式では、採用水準を満たさない説明変数はなかった。したがって、それぞれプロットの  $T'_{m'}$  について以下の (33) 式から (36) 式を得た：

$$T'_{m'}(\text{奈 14}) = \frac{200}{1.1} + \exp(5.2341 + 0.1948V_{k'}) + \frac{200}{1.1} + \exp(5.3198 + 0.1799V_{k'}) + 283, \quad (33)$$

$$T'_{m'}(\text{奈 15}) = \frac{260}{1.3} + \exp(5.2341 + 0.1948V_{k'}) + \frac{260}{1.3} + \exp(5.3198 + 0.1799V_{k'}) + 283, \quad (34)$$

$$T'_{m'}(\text{金 16}) = \frac{80}{1.7} + \exp(5.2341 + 0.1948V_{k'}) + \frac{80}{1.7} + \exp(5.3198 + 0.1799V_{k'}) + 283, \quad (35)$$

$$T'_{m'}(\text{金 21}) = \frac{40}{1.7} + \exp(5.2341 + 0.1948V_{k'}) + \frac{40}{1.7} + \exp(5.3198 + 0.1799V_{k'}) + 283. \quad (36)$$

#### 4.2.4 直接費の積算方法

変動費は、終伐に設定した単価 (表 4-5) を、伐採木 1 本あたりの延べ所要時間、または集材 1 サイクルあたりの延べ所要時間に積算することで算定した。固定費は、使用した機械の供出日に応じて積算した。終伐の直接費は、プロットごとの変動費と固定費を合計した金額とした。また、実際に観測した 153 本の伐採木に対して、Games-Howell 法を用いて多重比較 (5%) を行い、伐倒から造材までに発生した変動費の差異がプロットごとに見られるのか検定した。

表 4-5 単価表

項目	固定費 (円/日)	変動費 (円/時)
特殊作業員	22900	-
運転手 (特殊)	22000	-
チェーンソー (伐倒)	554	371
チェーンソー (造材)	406	397
トラクタ	24107	2050
ハーベスタ	44381	4036
ウインチ付きハーベスタ	44381	4249
ウインチ付きグラップルローダー	23021	2056
フォワーダ (4t クラス)	25487	2316
フォワーダ (5t クラス)	35230	3299

注 1) 労務費は国土交通省 (2021), 機械経費は全国林業改良普及協会 (2001) より求めた。

注 2) 1 日あたりの労働 (拘束) 時間は, 休憩時間を加味して 8 時間とした。

#### 4.3 運材の収支にかかる算定方法

##### 4.3.1 運材費用の算定方法

奈良本山国有林で生産された丸太は, 長野県安曇野市の木材センターに運材された。片道の運材距離は 32.0 km であった。金沢山国有林で生産された丸太は, 長野県伊那市の木材センターに運材された。片道の運材距離は 34.5 km であった。

どちらの運材経路においても, 使用された機材は 7t 積みトラックであった。斎藤ら (2021) の容積比重に基づき丸太材積に換算すると, 1 台あたりの積載量は 8.1 m<sup>3</sup>/台となる (表 4-6)。産出した丸太材積を積載量で割ることにより, 運材回数を算出した。

表 4-6 終伐の運材費用

プロット	運材材積 (m <sup>3</sup> )	運材距離 (km)	積載量 (m <sup>3</sup> /台)	運材回数 (台)	単価 (円/台)	運材費用 (円)
奈 14	89.5	32.0	8.1	12	20000	361623
奈 15	60.9	32.0	8.1	8	20000	241082
金 16	22.6	34.5	8.1	3	20000	90406
金 21	13.4	34.5	8.1	2	20000	60271

注 1) 単価は, 標準的な運賃計算シート (n.d.) によって設定した。

注 2) 運材費用は経費を含んでいる。

### 4.3.2 市場手数料の算定方法

市場手数料は、出荷先の木材センターに従い、運材材積  $V_{11}$  に対して発生する極積手数料  $C_1$  (円/m<sup>3</sup>; (37) 式) と、税抜販売価格  $V_{12}$  に対して発生する販売委託手数料  $C_2$  (円; (38) 式) により算出した:

$$C_1 = 680V_{11}, \quad (37)$$

$$C_2 = 0.075V_{12}. \quad (38)$$

## 4.4 終伐にかかる費用の算定

### 4.4.1 伐倒、枝払い、木寄せ、造材にかかる延べ所要時間と変動費

時間分析の結果、実際に観測した伐採木 1 本あたり延べ所要時間の平均は 2285 秒/本 (標準偏差 1079.6 秒/本) であった。図 4-5 に、延べ所要時間の分布を示す。プロットの平均値には、5% 水準で有意差が認められた。

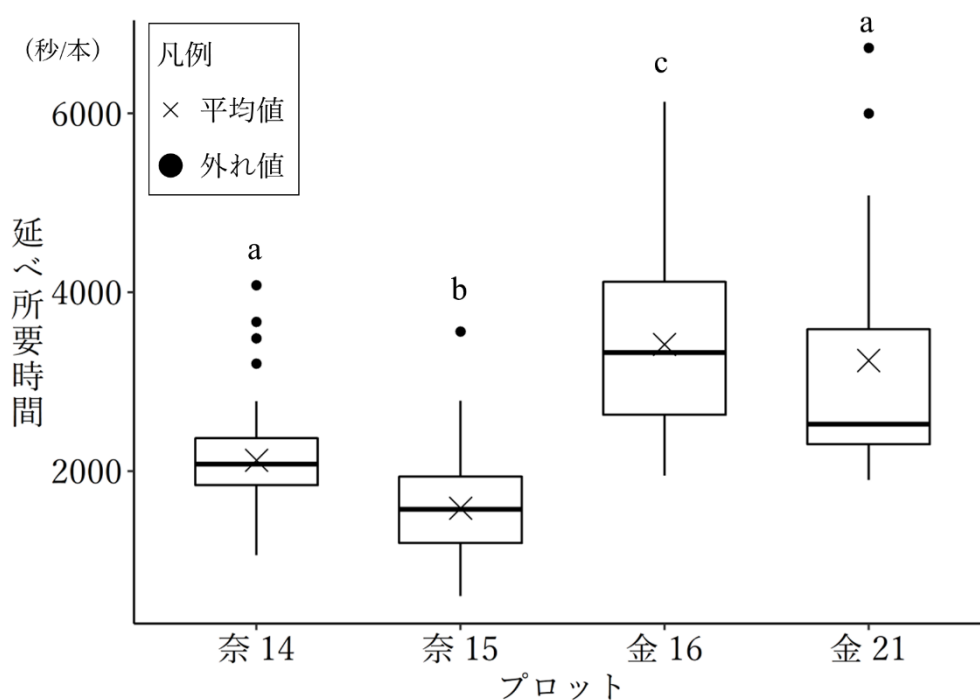


図 4-5 プロット別の伐採木の伐倒から造材に発生した延べ所要時間

注) 同じアルファベットは統計的に有意に異なる (Games-Howell 法; 5% 水準)。

伐採木 1 本あたりの付帯作業時間の平均は 413 秒/本 (標準偏差 517.0 秒/本) に上り、平均延べ所要時間の 18% に相当した。金 21 における木寄せでは、伐採木に干渉する下層木を解消するだけに、平均して 1500 秒/本 (観測数 4) が費やされた。

表 4-7 に、時間観測を行った伐採木の伐倒から造材にかかる変動費の概要を、図 4-6 には変動費の分布を示す。プロットの直接費には、5% 水準で有意差が認められた。



表 4-7 伐倒から造材にかかる変動費

伐採木観測数 (本)	変動費の平均額 (円/本)	変動費の平均額のうち造材 (円/本)	造材の延べ所要時間 (秒/本)
奈 14	49	1117	961
奈 15	58	1076	738
金 16	32	774	917
金 21	13	830	1303

注 1) 表中の変動費は観測値より算定したものであり、推定値は含んでいない。

注 2) 金沢山国有林の作業システムでは、作業員 2 名が従事した時間となっている。

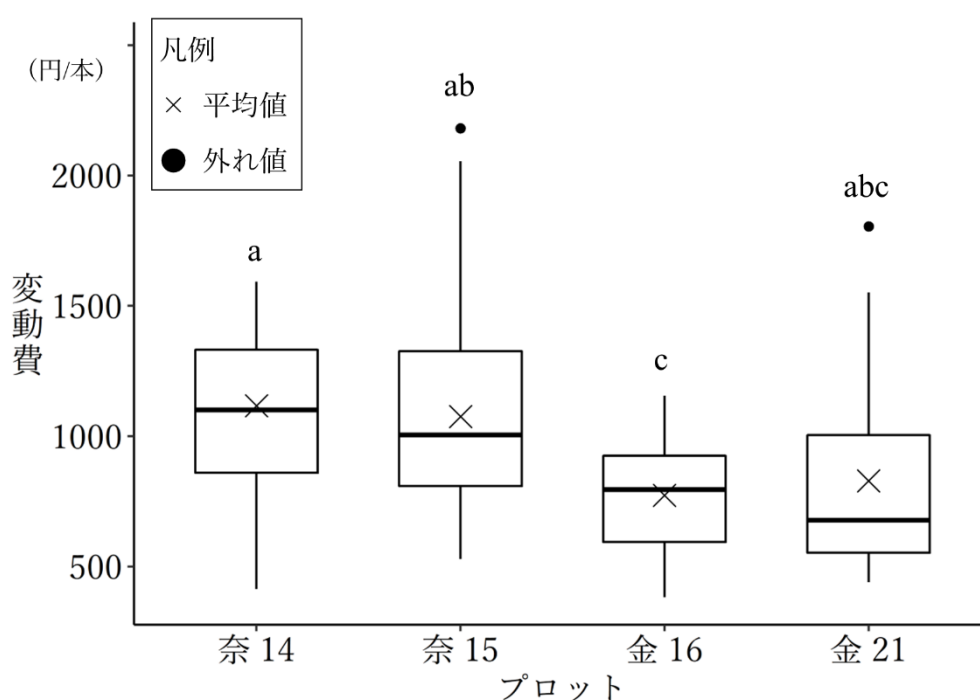


図 4-6 プロット別の伐採木の伐倒から造材にかかる直接費

注) 同じアルファベットは統計的に有意に異なる (Games-Howell 法; 5% 水準)。

1 本の伐採木の伐倒から造材にかかる変動費の平均は 1005 円/本 (標準偏差 368.2 円/本) であり、伐採木の伐倒から造材にかかる変動費のなかでは、金 16 の作業システムが最も低額であった。奈良本山国有林では、金沢山国有林と比較して、伐採木 1 本の伐倒から造材にかかる延べ所要時間が少ないにもかかわらず、変動費は同等 (奈 15) か高額 (奈 14) となった。従来型の機械で構成された作業システムである金沢山国有林よりも、高性能林業機械を導入した奈良本山国有林の変動費が上回った結果は、本終伐においてハーベスタの導入が経済的な効果を得ることができなかったことを示唆している。

#### 4.4.2 集材にかかる延べ所要時間と変動費

時間分析の結果、奈 14 の集材サイクルあたり延べ所要時間の平均は 1289 秒/サイクル (標準偏差 319.4 秒/サイクル) であった。また、付帯作業時間の平均は 283 秒/サイクル (標準偏差 230.4 秒/サイクル) で、平均の延べ所要時間の 21.9% に相当した。

表 4-8 に、延べ所要時間から積算した集材の変動費を示す。1 サイクルの集材にかかる変動費の平均は 989 円/サイクル (標準偏差 262.6 円/サイクル) であった。

表 4-8 集材にかかる変動費

観測数および推定数 (サイクル)		変動費の平均額 (円/サイクル)
奈 14	39	825
奈 15	17	1334
金 16	6	1074
金 21	4	984

注) 表中の変動費には推定値が含まれている。

#### 4.4.3 終伐の伐採費用と収支

表 4-9 に、プロットの伐採木から生産された丸太を山土場に運材するまでに発生した終伐の伐採費用の総額を示す。丸太の生産に最も経済的な作業システムは奈 15 であり、プロットの直接費に間接費 (共通仮設費など) を加えた伐採単価は、少なくとも 14000 円/m<sup>3</sup> に達することが明らかになった。また、すべてのプロットで直接費に占める固定費の割合が高くなっていた。高い固定費の割合より、終伐に使用された機械のうち、重機の非稼働時間が長かったことが示唆された。

表 4-9 終伐の伐採費用

プロット	固定費 (円)	変動費 (円)	直接費 (円)	伐採単価 (円/m <sup>3</sup> )	直接費に占める 固定費の率 (%)
奈 14	985145	122581	1107726	18653	88.9
奈 15	480824	106657	587481	14525	81.8
金 16	241692	34073	275765	18367	87.6
金 21	149911	14712	164623	18527	91.1

図 4-7 に、終伐に発生した金額の収支を示す。奈 15 を除き、支出超過となった。ほぼ固定費用である運材費用と市場手数料を除き、伐採費用の損益分岐点は、条件の良いプロットにおいて 18300 円/m<sup>3</sup> (奈 15) , 悪いプロットでは 12500 円/m<sup>3</sup> (金 16) であった。すな

わち、単事業としての採算が取られるためには、奈 14 では 5 %、金 16 では 32 %、金 21 では 6 % の伐採費用が観測結果より軽減される必要があったと言える。

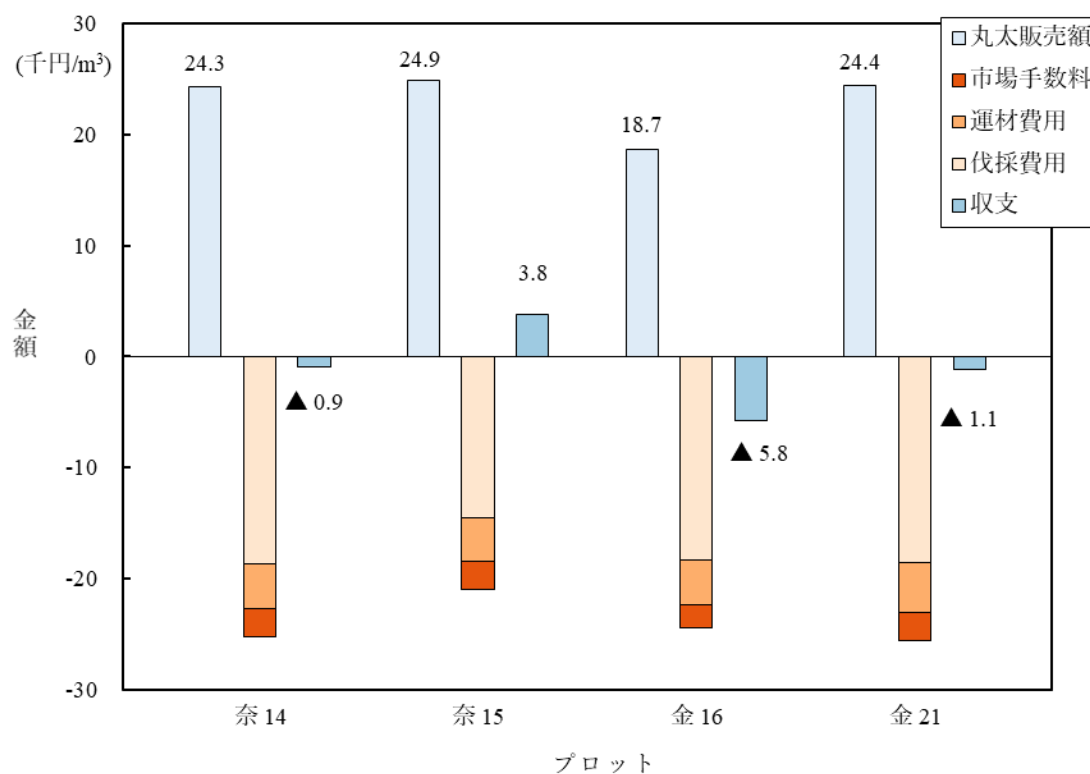


図 4-7 終伐の収支

注 1) 丸太販売額は、消費者物価指数 (総務省統計局 2021) により調整を行った。

注 2) 金額はプロットの平均値であり、▲は支出超過を示す。

プロットの伐採費用のうち、直接費は過去の複層林における金額と比較して高額ではなかった (図 4-8)。しかし、このことを逆説的にとらえると、現在まで育成複層林における高額な伐採費用が指摘されてきたにもかかわらず、作業効率の改善にかかる技術の発展や普及がなされてこなかった可能性が考えられる。育成複層林の推進のために、単事業において支出超過とならないような伐採費用を達成可能な仕組みを構築する必要がある。

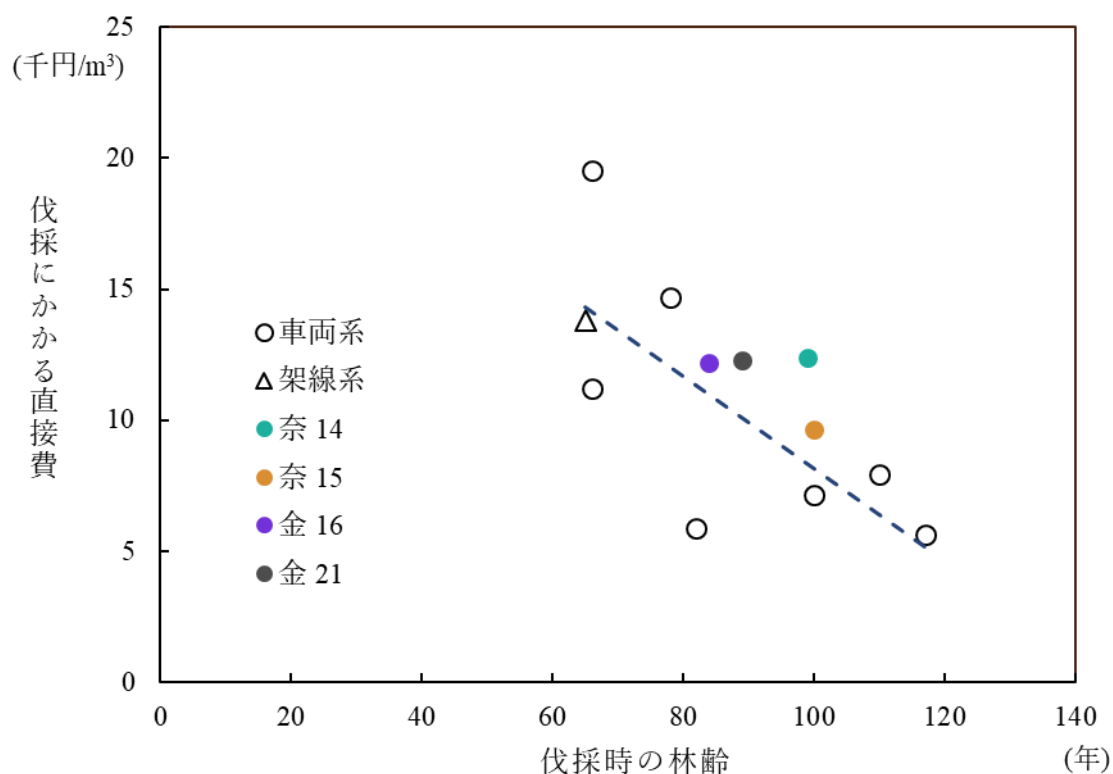


図 4-8 複層林における伐採にかかる直接費の比較

- 注 1) 車両系と架線系の金額は、谷山 (2004); 山田ら (2011) を参照した。  
 注 2) 過去の金額は、消費者物価指数 (総務省統計局 2021) により調整を行った。  
 注 3) 図中の破線は、既報の値の傾向について、単純に目安として示したものである。  
 注 4) 比較のため、プロットの金額は伐採費用ではなく直接費とした。

本調査地の結果は、終伐において固定費の割合が高いことを浮き彫りにした。労働生産性を向上させるとともに、機械の稼働率を高めることが重要になるだろう。特に、奈 14 では、2 名の作業員に対し 3 台の重機が配置されたため、常時 1 台は稼働しないこととなる。奈 14 において木寄せが発生した伐採木は、推定を含め 9 本であり、木寄せに使用されたトラックの事業期間における待機時間が長かったことを示唆している。奈 14 における最大木寄せ距離は 25 m であり、隣接する奈 15 で使用されたウインチで対応可能な距離であった。重機の所有状況を考慮しなければ、ウインチ付きハーベスタを導入することで、機械台数を削減し、固定費を削減することによって収益性の改善が期待できるだろう。また、ハーベスタの使用は木寄せ (奈 15 のみ)、2 番玉以降の造材、造材後の巻立てに限定されており、実質的にはプロセッサとしてのみの役割で運用される作業システムであった。

変動費では、単価の安い重機を採用し、チェーンソーによる手作業を多用する金 16 の作業システムが最も経済的であったことが示された。伐倒から造材にかかる延べ所要時間と変動費が逆転関係にあることから、ハーベスタの機能が十全に活用されなかったことを

示唆している。表 4-5 より、ハーベスタの変動費はグラップルローダーのおよそ 2 倍であった。したがって、ハーベスタの造材にかかる延べ所要時間はグラップルローダーの 2 分の 1 とならなければならなかった。しかし、変動費の積算対象となる重機一台あたりの延べ所要時間は、むしろ金沢山国有林で短くなった。このことは、一人で元玉の手造材と 2 番玉以降の機械造材を切り替えるために、作業員が重機を乗り降りすることが負担となっていたことが理由として考えられる。また、特に森林作業道を挟んで両側に下層木が分布した奈 14 では、路網沿いの下層木に配慮したために奈 15 よりも時間を要した可能性もある。

金 21 で観測した全木方式の木寄せによる遅延 (平均 1500 秒/本) に対し、プロットの隣接する金 16 の枝払いにかかる所要時間が 3 分の 1 (平均 463 秒/本) であったことを加味すれば、現状の車両系によるヒノキ林の終伐に対しては、全幹方式による木寄せかつ従来型の林業機械を使用した作業システムが適していたことが明らかとなった。

一方、海外の漸伐林分においては、すでにハーベスタが主体となった伐採作業となっている。終伐の伐採木 1 本の伐倒から造材に至るまでにかかる延べ所要時間は、25.4-98.4 秒/本である (Glade 1999; Glöde and Sikström 2001; Niemistö et al. 2012)。Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) の林分において、奈良本山国有林 (表 4-1 参照) と同程度の立木幹材積 (0.98 m<sup>3</sup>/本)、低い上層木立木密度 (平均 195 本/ha)、より豊富な下層木密度 (平均 16400 本/ha) という条件下では、73.8-80.4 秒/本で処理される (Glade 1999)。奈良本山国有林の終伐における平均の延べ所要時間は 1830 秒/本であり、両終伐の生産速度には大きな開きがある。

奈良本山国有林の伐採に使用されたハーベスタと同等型式の仕様によれば、最大伐倒直径は 56 cm である (Kone-Ketonen Oy 2020)。奈良本山国有林の上層木の平均 DBH は 38.2 cm、最大でも 57.8 cm であり、大半の伐採木はハーベスタによる伐倒が可能だったと推察できる。仮に、伐採から造材までを 80.4 秒/本 (Glade 1999) で完了した場合、奈 14 と奈 15 の変動費は 95 円/本程度となり、伐採費用は大幅に削減される。ハーベスタの運用が想定される傾斜の上限が 30° であること (鈴木ら 2015) からすれば、金沢山国有林にもハーベスタの導入が可能であった。また、緩傾斜ではヒノキ前生稚樹の定着可能性も高く (四手井ら 1974; 松崎・河原 2006)、高密路網ほど下木の損傷も低下する (Košir 2008) など、機械化は天然更新のポテンシャルとも矛盾しない。ヒノキ漸伐林においても、ハーベスタの従事する工程の拡大により、終伐にかかる伐採費用には削減の余地が十分にあると考えられる。

## 4.5 過去の施業と下層木による再造林にかかる削減額の算定

### 4.5.1 過去の施業に発生した金額の算定

表 4-10 に、終伐を除く各作業について設定した労務単価を示す。下種伐以前の作業や更新補助作業については、2021 年時点における長野県庁林務部 (2021b) の標準単価とした。

一方で、下層木の存在がどの程度生産速度に影響するかは明らかにできていない。そこで、前掲の表 1 より、国内における作業効率の低下程度が最も大きい 0.37 を、下層木による遅延と仮定し、二段林となった後伐では、育成単層林における間伐の標準単価に 0.37 の逆数である 2.07 を乗算した金額を労務単価として設定した。また、労務単価のうち、1.07/2.07 の金額については下層木のために発生するかかり増しの費用とし、1.00/2.07 の金額は上層木の伐採に直接発生する費用として区分した。なお、本章では、森林作業道の作設費用は考慮しなかった。

表 4-10 過去の作業にかかる単価表

作業	単価 (円/ha)	単価 (円/人)	資材費 (円/kg)	林齢	備考
地拵え	351800	-	-	1	ササ丈 1 m 以下、密
植栽	701300	-	-	1	ヒノキ裸苗 3000 本/ha
下刈り (年)	188400	-	-	1-7	7 年間実施
除伐 (初回)	164100	-	-	11	
除伐 (2 回目)	164100	-	-	17	
保育間伐	124400	-	-	20	同時選木、伐倒のみ 実行年不明の間伐に適用
間伐	176800	-	-	51	事前選木、定性、伐倒のみ、 搬出材積 10 m <sup>3</sup> /ha 未満
間伐 (下種伐)	264100	-	-	-	事前選木、定性、車両系、 搬出材積 20 m <sup>3</sup> /ha 未満
間伐 (下種伐)	356000	-	-	-	事前選木、定性、車両系、 搬出材積 40 m <sup>3</sup> /ha 未満
間伐 (下種伐)	400100	-	-	-	事前選木、定性、車両系、 搬出材積 50 m <sup>3</sup> /ha 未満
刈出し	-	23100	-	-	
補植	-	19800	-	-	山引苗
除草剤散布	-	19800	1500	-	テトラピオン粒剤
殺鼠剤散布	-	19800	1100	-	リン化亜鉛粒剤
後伐	840000	-	-	-	事前選木、定性、車両系、 搬出材積 10 m <sup>3</sup> /ha 未満
後伐	962200	-	-	-	事前選木、定性、車両系、 搬出材積 40 m <sup>3</sup> /ha 未満



表 4-10 (続き)

作業	単価 (円/ha)	単価 (円/人)	資材費 (円/kg)	林齢	備考
後伐	1254600	-	-	-	事前選木, 定性, 車両系, 搬出材積 70 m <sup>3</sup> /ha 未満
後伐	1338200	-	-	-	事前選木, 定性, 車両系, 搬出材積 80 m <sup>3</sup> /ha 以上

注 1) 長野県庁林務部の C 単価 (2021b); 林野庁 (2023c); 林野庁中部森林管理局 (2013; 2019) に加え, 間伐の林齢は遠藤 (2005) より作成した。

注 2) 資材費は 2023 年 10 月時点の実勢価格を参考とした。

間伐, 後伐から産出された丸太の販売による収入は, それぞれ実施年における製材用素材価格ひのき中丸太の全国価格 (総務省統計局 2015) を参照し, 消費者物価指数「生鮮食品を除く総合」(総務省統計局 2021) の年度平均により調整した金額とした。また, プロットから産出する丸太材積は, 施業履歴 (表 1-1; 表 1-2; 表 1-3 参照) に示す伐採材積に基づき, 作業対象面積に対するプロット面積の比より算出した。

以上の収支には, 年 1.10% の金利 (日本政策金融公庫 2023) が発生するものとし, プロットの生産期間にかかる収益性を算定した。間伐など丸太販売のたびに負債の一部を返済するものとし, 終伐をもって算定を終了した。

#### 4.5.2 健全木の残存による造林費用の削減

2 章, 3 章における下層木分布の調査手法に合わせ, 奈 14, 奈 15, 金 16 では 1 m 四方のグリッド, 金 21 では個体群の面積により, 終伐直後に健全木が 1 本/m<sup>2</sup> の本数密度を満たす区域を調査した。健全木が分布する区域に応じ, それぞれ地拵え, 植栽, 下刈りが不要になるとみなし, プロットの終伐における収入 (表 4-11) とした。

表 4-11 プロットの健全木により削減される造林費用

プロット	残存木被覆 (m <sup>2</sup> )	残存木の被覆割合 (%)	削減される造林費用 (円)
奈 14	775/2500	31.0	180546
奈 15	309/1250	24.7	71985
金 16	987/1600	61.6	229934
金 21	336/1200	27.8	78275

注 1) 金額は表 4-10 を参照した。

注 2) 2 年生以降の下刈りにかかる金額について, 金利 1.1%/年 (日本政策金融公庫 2023) として植栽時の現在価値に換算した。

## 4.6 各プロットの収益性について

### 4.6.1 下種伐以降の下層木の造林・保育にかかる収支

図 4-9 に、下種伐以降の下層木にかかる収支の推移を示す。支出額は更新補助作業、後伐と終伐のうち下層木の存在によるかかり増しを仮定した金額に利子を加えた額であり、収入額は終伐の後に残存した健全木によって削減される造林費用である。いずれのプロットにおいても、下層木にかかる収支は採算が取られていなかった。

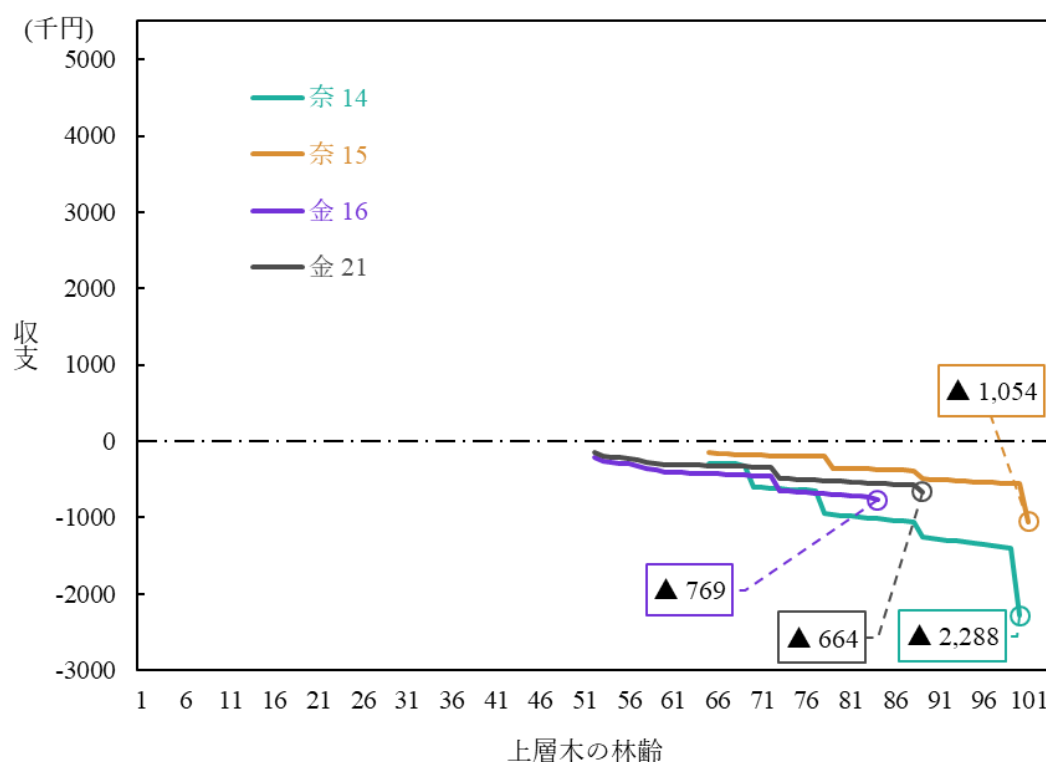


図 4-9 各プロットの下層木にかかる収支

注) 図中の▲は支出超過を示す。

なお、本章の仮定では、例えばプロットの全面を健全木が残存していたとしても、すべてのプロットにおいて支出超過となる (表 4-12)。

表 4-12 健全木がプロットの全面に残存した場合の試算

プロット	最大に削減される 造林費用 (千円)	下層木にかかった 支出 (千円)	差引 (千円)
奈 14	582	▲2335	▲1753
奈 15	291	▲1006	▲714
金 16	372	▲926	▲553
金 21	280	▲690	▲409

注) 表中の▲は支出超過を示す。

#### 4.6.2 上層木の収穫にかかる収支

図 4-10 に、上層木にかかる収支の推移を示す。いずれのプロットも単層林として整備された林分であり、造成段階において造林費用、保育費用が発生した。奈良本山国有林では実験林、金沢山国有林では施業指標林に指定されて以降、下種伐、後伐が実施され、どのプロットにおいても、初回の後伐において初期の投資金額が回収され、以降は収入額が増加する傾向にあった。すなわち、すべてのプロットにおいて、上層木にかかる収支は採算が取られていたと言える。

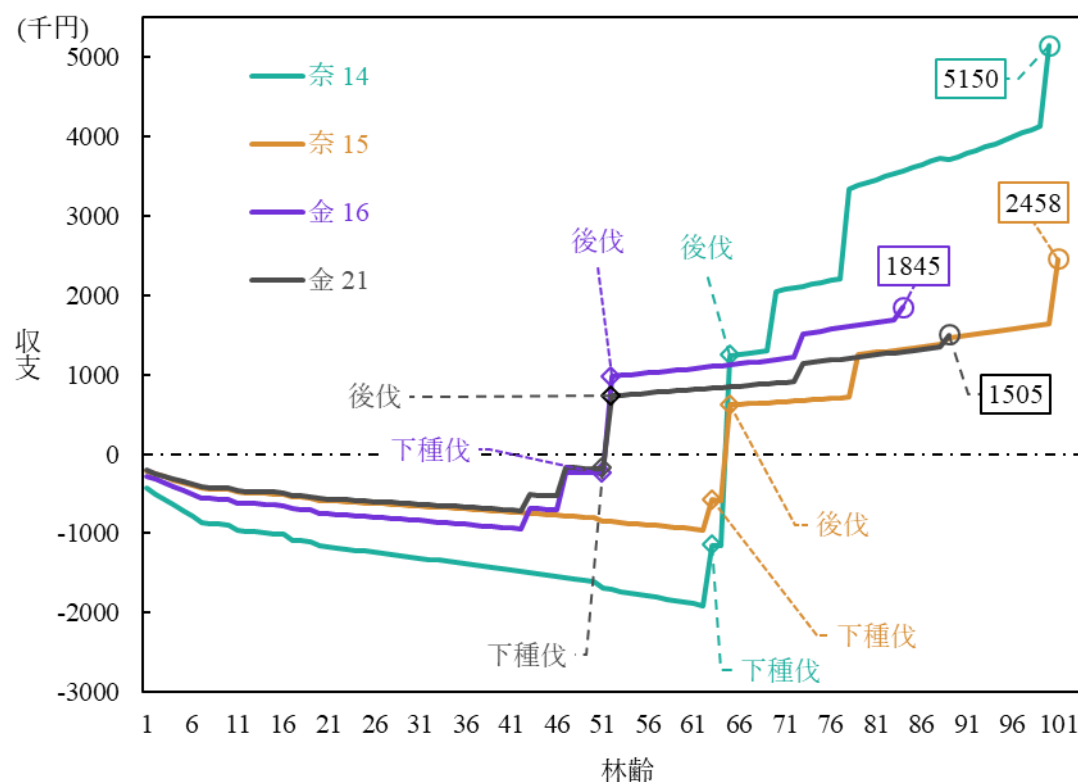


図 4-10 各プロットの上層木にかかる収支

注 1) 収支が上方に推移している林齢では、丸太販売による収入がある。

注 2) 丸太販売価格は当時の全国平均価格 (総務省統計局 2015) とし、消費者物価指数 (総務省統計局 2021) により調整を行った。

#### 4.6.3 下層木と上層木にかかる収支の統合からみた生産期間における収支の流れ

図 4-11 に、プロットの生産期間中に発生した収支の推移を示す。すべてのプロットで採算が取られており、ヒノキ漸伐には収益性のあることが明らかとなった。前掲の図 4-10 は、間伐や下種伐、後伐の収入が終伐の収入額と比較して大きかったことを示し、上層木の初期投資が早期に回収された点は、利子の観点でプロットの収益性に好影響を与えたと言える。また、下層木の収支を統合した収支の推移は上層木のみとの推移と同じ動きであり、プロットの収益性は上層木の収入に依るところが大きかったとも言える。

一方、前述したように、下層木にかかる収支の均衡は取られていなかった。終伐後に健全木がプロットを被覆する割合は金 16 を除き低位であり、プロットにおいて下層木は収益性にマイナス影響を与えていたと示唆された。更新補助作業を投入して成立した下層木のいくらかは終伐により損傷してしまうことは明らかであるため、天然更新にかかる労力はより省力的なものであるべきだったと言える。

ヒノキ漸伐林の生産期間にかかる収支の算定において、終伐の収支が支出超過となるプロットがあったにもかかわらず、長期的には利益が得られることが明らかになった。プロットは、実際に一斉林から育成複層林へと転換した林分であったことから、生物多様性に配慮した森林管理として、ヒノキ人工林に対するの漸伐の導入は現実的な選択肢になり得るだろうと判断できる。

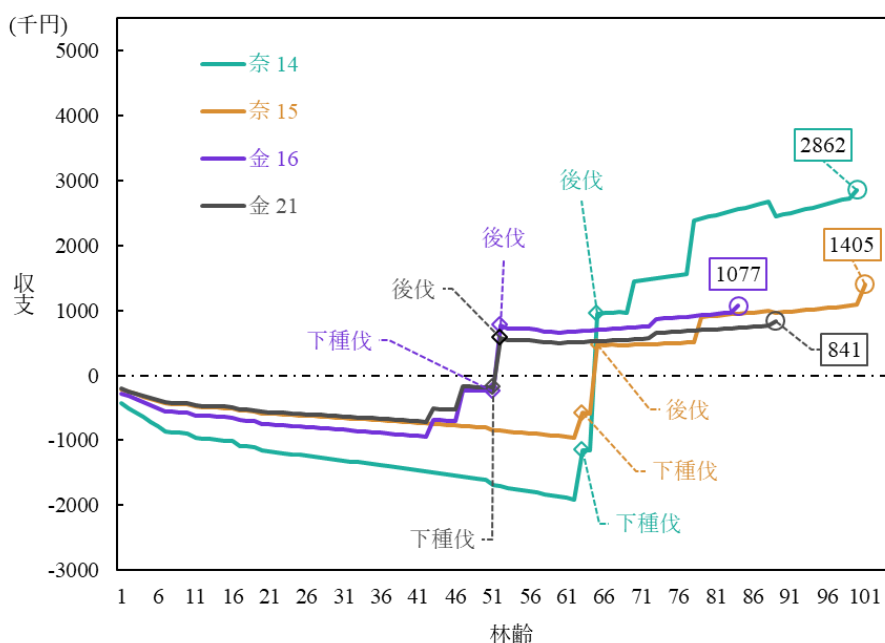


図 4-11 各プロットの生産期間における収支の推移

注 1) 収支が上方に推移している林齢では、丸太販売による収入がある。

注 2) 丸太販売価格は当時の全国平均価格 (総務省統計局 2015) とし、消費者物価指数 (総務省統計局 2021) により調整を行った。

プロットにおける収支の分析は、現状では下層木に投下された支出に見合う利益を得られていなかったことを浮き彫りにした。天然更新による純収益の増加が見込めない点において、ハーベスタ主体の作業システムによる終伐と同様の結果 (Grönlund and Eliasson 2019) であった。漸伐としての収益性を高めるために、下層木にかかる収支構造は改善される必要がある。プロットの施業履歴に加え、これまで明らかにしてきた終伐と損傷木の平面上の関係より、2 点の改善案が提案できよう。

ひとつは、終伐時期の早期化による利子負担の軽減である。下層木の樹高は、伐採後の環境変化に一定の耐性を示す目安とされる 20 cm (四手井ら 1974: 赤井 1991) を超えていた (図 1-5; 図 1-10 参照)。むしろ、奈 14, 奈 15, 金 16 においては、それぞれ 82.2%, 98.7%, 19.7% (松井ら 2017) の下層木は、損傷の拡大が予想される大きさまで成長していた。樹高 20 cm を目安とするならば、奈良本山国有林では 1985 年に、金沢山国有林では 1992 年に終伐を実施することが可能だった。ここで、残存する健全木が観測値と同等であると仮定し、終伐が早期に実施された場合における下層木にかかる収支の試算を図 4-12 に示す。すべてのプロットにおいて、図 4-9 に示した現状よりも下層木への支出が軽減される試算が得られた。しかし、終伐を早期に実施するのみでは、プロットの支出超過の状況を解消するには至らないことが示された。

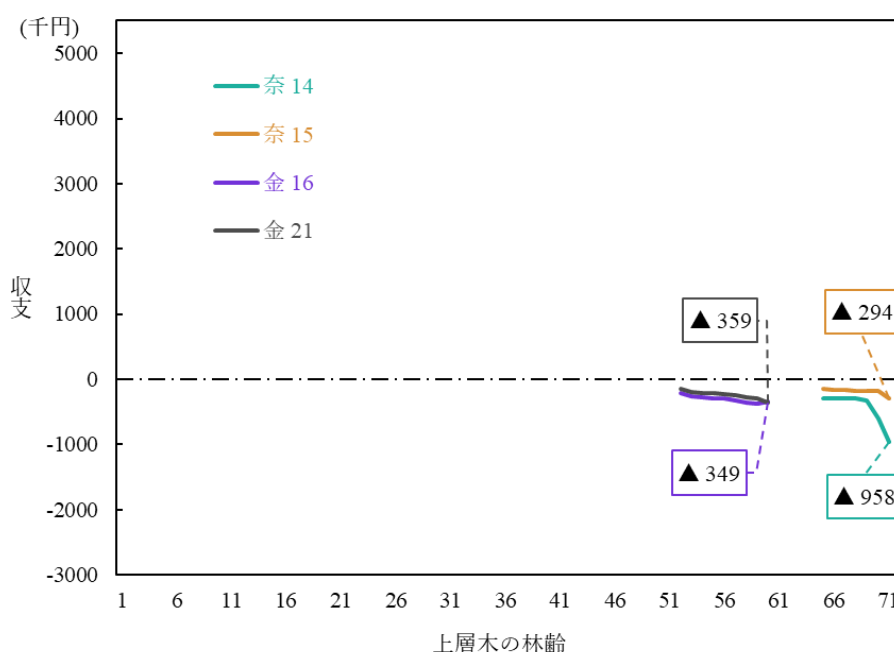


図 4-12 終伐が早期に実施された場合における各プロットの下層木にかかる収支の試算  
 注 1) 林分蓄積は林班沿革簿 (林野庁中部森林管理局南信森林管理署 n.d.) から算定し、造材歩留は 0.697 (斎藤ら 2021) とした。  
 注 2) 終伐の伐採費用、残存木の被覆面積はプロットの実測値とした。  
 注 3) 図中の▲は支出超過を示す。

もうひとつは、更新補助作業に投入された支出の回収効率を高めることである。すなわち、天然更新に注力する区域を予め定めることにより、回収不可能となる資本の投入を未然に防ぐことを目論む必要があるだろう。繰り返しになるが、伐採による下層木への損傷を完全になくすことはできない。終伐では、下層木に世代交代を行うためにはまとまった量の上層木を伐採しなければならず、伐採木によるかく乱が発生し得る区域は必然的に多くならざるを得ない。事実として、プロットにおいて健全木が残存した区域は更新面の一部であった。天然更新の過程において、次世代の下層木を林地全面に画一的に仕立てることを目指したとしても、最終段階である終伐も含む後伐によって失われてしまうのでは意味をなさず、非経済的な行動になりかねない。そこで、伐採行為による損傷リスクの高い範囲の可視化が有益な情報を提供するだろう。前掲した図 3-17 のように伐採木が下層木へ衝突する区域や、伐採木が集積する路網付近においては、予め天然更新誘導への努力を放棄し (Meek and Légère 1998)、終伐後の補植 (Ashton and Kelty 2018) 費用を予め想定しておくなど、伐採による影響を受けない更新方法の併用を考慮すべきであろう。

## 小括

漸伐の生産期間にかかる収益性を明らかにするため、時間分析と作業日報に基づいて終伐にかかる延べ所要時間を抽出して伐採費用を算定するとともに、過去の施業履歴に基づいてプロットの収支を算定した。終伐にかかる伐採費用の単価は、平均的な皆伐と比較して高額であったことが明らかになった。また、運材費用と市場手数料を含む終伐の総費用が収入を上回る例もあった。しかし、生産期間にかかる収支はすべてのプロットにおいて採算が取られており、ヒノキ人工林に対する育成複層林への転換の手段として、漸伐の導入は現実的な選択肢であることが長期的かつ総合的な経済成果から明らかになった。

以上の結果を踏まえて換言すれば、ヒノキ漸伐は生物多様性に配慮した森林管理と林業の両立が可能であったと示した。したがって、高額とされる伐採費用という瞬間的な支出の分析では、長期的な収益性が算定されていなかった可能性が考えられた。国際的な協調の下で林業を経営するために、日本においても非皆伐施業の経済成果を明らかにしてゆく必要があるだろう。

一方で、プロットの生産期間の収支において、下層木は負に作用していたことが明らかになったことから、天然更新にかかる収益構造は改善する必要がある。例えば早期に終伐を実施することによる更新補助作業にかかる金利発生抑制や、天然更新に注力する範囲を予め定めることにより、下層木に投下される資本の回収効率を高める必要がある。

本章では延べ所要時間の量的要因としての下層木の影響を示すことができなかった。しかし、ハーベスタの生産性は、下層木のない終伐と比較して 10-30% 低くなることが明らかになっている (Niemistö et al. 2012)。今後は、下層木と延べ所要時間の関係を明確にする



ため、終伐による下層木への損傷発生の推定と同様に、終伐の地理空間情報に基づいた生産速度の定量化を進めるべきであろう。

## 結言

ヒノキ人工林に対する漸伐の技術的導入を進展させることを目的として、1) 終伐による下層木への損傷を平面上で説明する損傷モデルを構築し、損傷モデルの実用性を実証するとともに、2) 終伐にかかる伐採費用を算定し、生産期間にかかる収益性を評価した。

1) に関しては、終伐における伐採木の下層木への衝突の発生を説明変数に含め、変数選択を経て損傷率を推定する損傷モデルを決定した。損傷モデルは伐採木が伐倒時に下層木へと衝突する機会の頻度のみによって構成される単純な構造であったにもかかわらず、プロット内に発生した損傷率の局所的な変動を再現した。損傷モデルは過分散ではなく、終伐における伐採木と損傷木の出現箇所との平面上の関係は、伐採木と下層木との衝突が発生する座標によって説明されることが示唆された。そのうえで、事業規模である 2.6 ha の終伐を対象とした検証を行った。伐採木の下層木への衝突に基づく推定による終伐後の下層木の識別は、観測値に対して 72.5% の面積で一致し、AUC による識別精度の判定も受け入れられる水準であった。したがって、伐採木が下層木に衝突する座標は、損傷木の発生を説明する指標になると言える。

2) に関しては、実際の終伐に基づいて算定した伐採費用は、丸太販売による収入を上回ったプロットがあったにもかかわらず、生産期間にかかる総収支では採算が取られていたことが明らかになった。調査地は一斉林の途中で漸伐に転換した林小班であり、長期的な実績として、ヒノキ人工林への漸伐の導入が経済的に可能な選択肢であることを示した。

一方で、下層木は収益性に負の影響を与えていたことが明らかになった。天然更新にかかる経済性を高めるために、少なくとも終伐は下層木の成長に応じて速やかに実施される必要がある。また、伐採木と下層木との衝突する座標を指標として、衝突機会を定量的に最小化することで、平面上において、下層木に配慮した伐採方向とともに、損傷が不可避となる地点を明示することが可能になるだろう。このことは、伐採技術の高度化にもつながる。

これまで日本における漸伐の実践例は少なく、最終的な収益性にかかる実績は途上である。しかし、現時点でも採算が取れたということは、漸伐の導入がただちに支出超過とはならないことを実証している。伐採費用のみを理由として、漸伐の導入が先送りされる懸念は軽減された。天然更新適地では、漸伐による育成複層林への転換は現実的だと言えよう。

本論の分析では、終伐の伐採木、下層木にかかる空間分析に課題を残した。まず、損傷木の推定では、伐採木の挙動が不正確であったことに起因すると考えられる推定誤差が 30% 程度残された。また、生産速度低下の要因としての下層木の影響も示すことができなかった。複層林における収益性にかかる不確実性は、伐採費用と下層木への損傷に現れる (Valkonen and Valsta 2001) という。伐採と下層木損傷、下層木と伐採効率低下、それぞれの関係をより明確に把握するために、地理空間情報に基づく定量化が推奨される。

## 謝辞

信州大学学術研究院農学系植木達人教授には、指導教官として本研究の実施の機会を与えていただき、長年にわたるご指導、ご校閲をいただいた。ここに深謝の意を表する。東京農工大学農学研究院自然環境保全学部門岩岡正博准教授、並びに、信州大学学術研究院農学系岡野哲郎教授、同安江恒准教授、同小林元准教授には、副査としてご助言をいただくとともに、細部にわたりご指導をいただいた。ここに感謝の意を表する。岩手大学農学部森林科学科齋藤仁志准教授には、筆者の修士課程在籍時より、長年にわたるご指導、ご校閲をいただいた。ここに感謝の意を表する。

本研究の遂行にあたり、貴重な調査地を提供いただいた林野庁中部森林管理局、林野庁中部森林管理局東信森林管理署、林野庁中部森林管理局南信森林管理署の各位に感謝の意を表する。

本研究の第2章の分析では、高知大学農林海洋科学部自然科学系農学部門守口海講師、並びに、信州大学学術研究院農学系城田徹央助教より、分析手法に対する有益なご助言をいただいた。ここに感謝の意を表する。また、森林総合研究所林業研究部門林業工学研究領域白澤紘明主任研究員には、分析結果の応用について重要な示唆をいただいたことに感謝の意を表する。

最後に、膨大な現地調査に並々ならぬご協力をいただいた、信州大学農学部施業・経営学研究室の学生諸氏、並びに、武居玄氏に対し謝意を表する。

## 引用文献

- Aho PE, Fiddler G, Srago M. Logging damage in thinned, young-growth true fir stands in California and recommendations for prevention [Internet]. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station; [accessed 2023 Sep 23]. 1983. <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/25187>
- Arroyo-Rodríguez V, Melo FPL, Martínez-Ramos M, Bongers F, Chazdon RL, Meave JA, Norden N, Santos BA, Leal IR, Tabarelli M. Multiple successional pathways in human-modified tropical landscapes: new insights from forest succession, forest fragmentation and landscape ecology research. *Biological Reviews*. 92(1):326–340. 2017. <https://doi.org/10.1111/brv.12231>
- Ashton MS, Kelty MJ. *The Practice of Silviculture: Applied Forest Ecology*. Tenth. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc. 2018.
- Bettinger P, Bettinger KA, Boston K. Correlation among spatial and non-spatial variables describing a cut-to-length thinning site in the Pacific Northwest, USA. *For Ecol Manag*. 104(1–3):139–149. 1998. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00250-8](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00250-8)
- Bettinger P, Kellogg LD. Residual stand damage from cut-to-length thinning of second-growth timber in the Cascade Range of western Oregon. *Forest Products Journal*. 43:59–64. 1993.
- Binkley VW, Lysons HH. Planning single-span skylines [Internet]. Portland: Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, U.S. Dept. of Agriculture; [accessed 2023 Jul 24]. 1968. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.94512>
- Bodaghi AI, Nikooy M, Naghdi R, Tavankar F. Logging damage to residual trees during sustainable harvesting of uneven-age stands in the Hyrcanian forests of Iran. *NZ J For Sci*. 50:1–11. 2020. <https://doi.org/10.33494/nzjfs502020x15x>
- Brunet J, Fritz Ö, Richnau G. Biodiversity in European beech forests - a review with recommendations for sustainable forest management. *Ecological Bulletins*. 53:77–94. 2010.
- Bustos O, Egan A, Hedstrom W. A Comparison of Residual Stand Damage along Yarding Trails in a Group Selection Harvest Using Four Different Yarding Methods. *Northern Journal of Applied Forestry*. 27(2):56–61. 2010. <https://doi.org/10.1093/njaf/27.2.56>
- Chheng K, Mizoue N, Khorn S, Kao D, Sasaki N. Tree-based approach to evaluate size dependence of residual tree damage caused by selective logging: Case study in tropical semi-evergreen forests of Cambodia. *For Ecol Manag*. 356:285–292. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.06.031>
- Convention on Biological Diversity. Protected areas and other effective area-based conservation measures (Decision 14/8) [Internet]. 2018. <https://www.cbd.int/doc/decisions/cop-14/cop-14-dec-08-en.pdf>
- Dykstra DP, Heinrich R. *FAO model code of forest harvesting practice*. Rome : Lanham, MD: Food and Agriculture Organization of the United Nations. 1996.
- Eliasson L. Effects of Establishment and Thinning of Shelterwoods on Harvester Performance. *Journal of Forest Engineering*. 11(1):21–27. 2000.
- Eliasson L, Bengtsson J, Cedergren J, Lageson H. Comparison of Single-Grip Harvester Productivity in Clear- and Shelterwood Cutting. *Journal of Forest Engineering*. 10(1):43–48. 1999. <https://doi.org/10.1080/08435243.1999.10702723>

Eliasson L, Lageson H, Valinger E. Influence of sapling height and temperature on damage to advance regeneration. *For Ecol Manag.* 175(1):217–222. 2003. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00180-9](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00180-9)

European Parliament, Council of the European Union. Regulation (EU) 2023/1115 of the European Parliament and of the Council of 31 May 2023 on the making available on the Union market and the export from the Union of certain commodities and products associated with deforestation and forest degradation and repealing Regulation (EU) No 995/2010 [Internet]. [accessed 2023 Oct 14]. 2023. <http://data.europa.eu/eli/reg/2023/1115/oj>

Fajvan MA, Knipling KE, Tift BD. Damage to Appalachian hardwoods from diameter-limit harvesting and shelterwood establishment cutting. *Northern Journal of Applied Forestry.* 19(2):80. 2002.

Fjeld D, Granhus A. Injuries After Selection Harvesting in Multi-Store Spruce Stands – The Influence of Operating Systems and Harvest Intensity. *Journal of Forest Engineering.* 9(2):33–40. 1998.

Forshed O, Udarbe T, Karlsson A, Falck J. Initial impact of supervised logging and pre-logging climber cutting compared with conventional logging in a dipterocarp rainforest in Sabah, Malaysia. *For Ecol Manag.* 221(1–3):233–240. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.10.007>

Froese K, Han H-S. Residual Stand Damage from Cut-to-Length Thinning of a Mixed Conifer Stand in Northern Idaho. *Western Journal of Applied Forestry.* 21(3):142–148. 2006.

G7 Summit 2021 in Cornwall. G7 2030 Nature Compact [Internet]. [accessed 2023 Oct 9]. 2021. <https://www.mofa.go.jp/mofaj/files/100200012.pdf>

Gardiner B, Peltola H, Kellomäki S. Comparison of two models for predicting the critical wind speeds required to damage coniferous trees. *Ecological Modelling.* 129(1):1–23. 2000. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(00\)00220-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(00)00220-9)

Ghaffariyan MR. Review of studies on motor-manual felling productivity in eucalypt stands. *Silva Balcanica.* 22(1):77–87. 2021. <https://doi.org/10.3897/silvabalcanica.22.e58750>

Ghaffariyan MR, Stampfer K, Sessions J. Production Equations for Tower Yarders in Austria. *Int J For Eng.* 20(1):17–21. 2009. <https://doi.org/10.1080/14942119.2009.10702571>

Glade D. Single- and Double-Grip Harvesters – Productive Measurements in Final Cutting of Shelterwood. *Journal of Forest Engineering.* 10(2):63–74. 1999.

Glöde D, Sikström U. Two felling methods in final cutting of shelterwood, single-grip harvester productivity and damage to the regeneration. *Silva Fenn.* 35(1):71–83. 2001. <https://doi.org/10.14214/sf.604>

Gottfried GJ, Jones JR. Logging Damage to Advance Regeneration on an Arizona Mixed Conifer Watershed. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station. 1975.

Granhus A, Fjeld D. Spatial distribution of injuries to Norway spruce advance growth after selection harvesting. *Can J For Res.* 31(11):1903–1913. 2001. <https://doi.org/10.1139/x01-103>

Granstrom M, Crandall MS, Kenefic LS, Weiskittel AR. Tree quality and value: results in northern conifer stands after 65 years of silviculture and harvest. *Can J For Res.* 52(5):794–807. 2022. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2021-0279>

Grönlund Ö, Eliasson L. Birch shelterwood removal – harvester and forwarder time consumption, damage to understory spruce and net revenues. *Int J For Eng.* 30(1):26–34. 2019. <https://doi.org/10.1080/14942119.2019.1595943>

Hånell B, Nordfjell T, Eliasson L. Productivity and Costs in Shelterwood Harvesting. *Scand J For Res.* 15(5):561–569. 2000. <https://doi.org/10.1080/028275800750173537>

Hartsough B. Economics of Harvesting to Maintain High Structural Diversity and Resulting Damage to Residual Trees. *Western Journal of Applied Forestry.* 18(2):133–142. 2003. <https://doi.org/10.1093/wjaf/18.2.133>

Hedin IB. Shelterwood harvesting with a skyline system in a coastal second-growth forest. Pointe-Claire, QC: Forest Engineering Research Institute of Canada. 1996.

Holmes TP, Blate GM, Zweede JC, Pereira R, Barreto P, Boltz F, Bauch R. Financial and ecological indicators of reduced impact logging performance in the eastern Amazon. *For Ecol Manag.* 163(1–3):93–110. 2002. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00530-8](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00530-8)

Hosmer DW, Lemeshow S, Sturdivant RX. *Applied Logistic Regression*. Third. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc. 2013.

Husqvarna AB (publ). *Working with chainsaws*. [place unknown]. 2012.

Kamimura K, Nanko K, Matsumoto A, Ueno S, Gardiner J, Gardiner B. Tree dynamic response and survival in a category-5 tropical cyclone: The case of super typhoon Trami. *Sci Adv.* 8(10):eabm7891. 2022. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abm7891>

Kärhä K. Effect of undergrowth on the harvesting of first-thinning wood. *Forestry Studies.* 45:101–117. 2006.

Kärhä K, Bergström D. Assessing the Guidelines for Pre-Harvest Clearing Operations of Understory in First Thinnings: Preliminary Results from Stora Enso in Finland. *Eur J For Eng.* 6(1):14–22. 2020. <https://doi.org/10.33904/ejfe.645639>

Kellner KF, Ruhl PJ, Dunning JB, Riegel JK, Swihart RK. Multi-scale responses of breeding birds to experimental forest management in Indiana, USA. *For Ecol Manag.* 382:64–75. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.10.008>

Kone-Ketonen Oy. KETO-150 ECO SUPREME. Kone-Ketonen Oy [Internet]. [accessed 2023 Oct 28]. 2020. <https://kone-ketonen.fi/product/keto-150-eco-supreme/>

Košir B. Damage to Young Forest Due to Harvesting in Shelterwood Systems. *Croat J For Eng.* 29(2):141–153. 2008.

Krueger W. Effects of future crop tree flagging and skid trail planning on conventional diameter-limit logging in a Bolivian tropical forest. *For Ecol Manag.* 188(1–3):381–393. 2004. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2003.08.006>

Lindroos O, Cavalli R. Cable yarding productivity models: a systematic review over the period 2000–2011. *International Journal of Forest Engineering.* 27(2):79–94. 2016. <https://doi.org/10.1080/14942119.2016.1198633>



Lotfalian M, Emadian SF, Kooch Y, Parsa Khoo A. A method for economic assessment of logging damage on forest stand and regeneration. *Scand J For Res.* 25(1):78–88. 2010. <https://doi.org/10.1080/02827581003620339>

Louis LT, Kizha AR, Daigneault A, Han H-S, Weiskittel A. Factors Affecting Operational Cost and Productivity of Ground-Based Timber Harvesting Machines: a Meta-analysis. *Curr Forestry Rep.* 8(1):38–54. 2022. <https://doi.org/10.1007/s40725-021-00156-5>

Mason WL, Diaci J, Carvalho J, Valkonen S. Continuous cover forestry in Europe: usage and the knowledge gaps and challenges to wider adoption. *Forestry: An International Journal of Forest Research.* 95(1):1–12. 2022. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpab038>

Matsue K, Iwagami S, Yamamoto T, Shibayama Z. Modelling Crown Form of Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) Based on Branch Measurement. *J For Plann.* 5(1):13–18. 1999. [https://doi.org/10.20659/jfp.5.1\\_13](https://doi.org/10.20659/jfp.5.1_13)

Meek P, Légère G. Trials of two harvesting systems for shelterwood cutting in softwood stands. Pointe-Claire, QC: Forest Engineering Research Institute of Canada. 1998.

Metslaid M, Ilisson T, Vicente M, Nikinmaa E, Jogiste K. Growth of advance regeneration of Norway spruce after clear-cutting. *Tree Physiology.* 25(7):793–801. 2005. <https://doi.org/10.1093/treephys/25.7.793>

Mihelič M, Spinelli R, Poje A. Intensifying the Management of Protection Forestes in the Alps. *Drewno.* 61(201):23–37. 2018. <https://doi.org/10.12841/wood.1644-3985.D03.07>

Nagao M, Yamada Y. Physical effects of hinges shape on chainsaw felling direction in Japanese Cypress. *Int J For Eng.* 30(3):182–189. 2019. <https://doi.org/10.1080/14942119.2019.1613611>

Naghdi R, Lotfalian M, Bagheri I, Jalali AM. Damages of Skidder and Animal Logging to Forest Soils and Natural Regeneration. *Croat J For Eng.* 30(2):141–149. 2009.

Nascimbene J, Marini L, Nimis PL. Influence of forest management on epiphytic lichens in a temperate beech forest of northern Italy. *For Ecol Manag.* 247(1–3):43–47. 2007. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.04.011>

Niemistö P, Korpunen H, Laurén A, Salomäki M, Uusitalo J. Impact and productivity of harvesting while retaining young understorey spruces in final cutting of downy birch. *Silva Fenn.* 46(1):81–97. 2012. <https://doi.org/10.14214/sf.67>

Nikooy M, Naghdi R, Ershadifar M. Survey of Directional Felling and Analysis of Effective Factors on Felling Error (Case Study; Iranian Caspian forests). *Caspian Journal of Environmental Sciences.* 11(2):177–184. 2013.

Nyland RD. *Silviculture*. Third. Long Grove: Waveland Press, Inc. 2016.

Panfil SN, Gullison RE. Short term impacts of experimental timber harvest intensity on forest structure and composition in the Chimanes Forest, Bolivia. *For Ecol Manag.* 102(2–3):235–243. 1998. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00165-5](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00165-5)

Peel MC, Finlayson BL, McMahon TA. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences.* 11(5):1633–1644. 2007. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>

Pereira R, Zweede J, Asner GP, Keller M. Forest canopy damage and recovery in reduced-impact and conventional selective logging in eastern Para, Brazil. *For Ecol Manag.* 168(1–3):77–89. 2002. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00732-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00732-0)

Picchio R, Tavankar F, Bonyad A, Mederski PS, Venanzi R, Nikooy M. Detailed Analysis of Residual Stand Damage Due to Winching on Steep Terrains. *Small-scale Forestry.* 18(2):255–277. 2019. <https://doi.org/10.1007/s11842-019-09417-5>

Pinard MA, Putz FE. Retaining Forest Biomass by Reducing Logging Damage. *Biotropica.* 28(3):278. 1996. <https://doi.org/10.2307/2389193>

R Core Team. R: A language and environment for statistical computing [Internet]. 2020. <https://www.R-project.org/>

R Core Team. R: A language and environment for statistical computing [Internet]. 2022. <https://www.R-project.org/>

Ruel J-C, Gardiner B. Mortality patterns after different levels of harvesting of old-growth boreal forests. *For Ecol Manag.* 448:346–354. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.06.029>

Sakai H. Comparison of the Tractive Resistance between Full-Tree Skidding and Tree-Length Log Skidding. *JOURNAL OF THE JAPANESE FORESTRY SOCIETY.* 71(12):497–502. 1989. [https://doi.org/10.11519/jjfs1953.71.12\\_497](https://doi.org/10.11519/jjfs1953.71.12_497)

Sauder EA, MacIsaac DA. Using alternative harvesting techniques to protect the boreal mixedwood understorey: evaluation of harvesting productivity and costs. *Advantage.* 5(12):1–44. 2004.

Saveneh AG, Dignan P. The use of shelterwood in Eucalyptus regnans forest: the effect of overwood removal at three years on regeneration stocking and health. *Australian Forestry.* 60(4):251–259. 1997. <https://doi.org/10.1080/00049158.1997.10676151>

Shenkin A, Bolker B, Peña-Claros M, Licona JC, Putz FE. Fates of trees damaged by logging in Amazonian Bolivia. *For Ecol Manag.* 357:50–59. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.08.009>

Shigo AL. Decay and Discoloration Following Logging Wounds on Northern Hardwoods. Upper Darby, PA: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station. 1966.

Shirasawa H, Otsuka D, Saito M. Method for Determining Felling Directions to Prevent Damage to Saplings. In: *Proceedings of Joint Regional Meeting of IUFRO RG30300 and RG30600 in Agia.* Matsuyama and Kochi: IUFRO RG3.03; p. 134–138. 2017.

Sikström U, Glöde D. Damage to *Picea abies* Regeneration After Final Cutting of Shelterwood with Single- and Double-grip Harvester Systems. *Scand J For Res.* 15(2):274–283. 2000. <https://doi.org/10.1080/028275800750015091>

Sirén M. Tree Damage in Single-Grip Harvester Thinning Operations. *Journal of Forest Engineering.* 12(1):29–38. 2001. <https://doi.org/10.1080/08435243.2001.10702760>

Sirén M, Hyvönen J, Surakka H. Tree Damage in Mechanized Uneven-aged Selection Cuttings. *Croat J For Eng.* 36(1):33–42. 2015.

Spinelli R, Visser R. Analyzing and Estimating Delays in Harvester Operations. *Int J For Eng.* 19(1):36–41. 2008. <https://doi.org/10.1080/14942119.2008.10702558>

Stokes V, Kerr G, Ireland D. Seedling height and the impact of harvesting operations on advance regeneration of conifer species in upland Britain. *Forestry*. 82(2):185–198. 2009. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpn053>

Surakka H, Sirén M, Heikkinen J, Valkonen S. Damage to saplings in mechanized selection cutting in uneven-aged Norway spruce stands. *Scand J For Res*. 26(3):232–244. 2011. <https://doi.org/10.1080/02827581.2011.552518>

Taskforce on Nature-related Financial Disclosures. Recommendations of the Taskforce on Nature-related Financial Disclosures [Internet]. [accessed 2023 Dec 21]. 2023. [https://tnfd.global/wp-content/uploads/2023/08/Recommendations\\_of\\_the\\_Taskforce\\_on\\_Nature-related\\_Financial\\_Disclosures\\_September\\_2023.pdf?v=1695118661](https://tnfd.global/wp-content/uploads/2023/08/Recommendations_of_the_Taskforce_on_Nature-related_Financial_Disclosures_September_2023.pdf?v=1695118661)

Tatsumi S, Owari T, Kasahara H, Nakagawa Y. Individual-level analysis of damage to residual trees after single-tree selection harvesting in northern Japanese mixedwood stands. *Journal of Forest Research*. 19(4):369–378. 2014. <https://doi.org/10.1007/s10310-013-0418-x>

Tavankar F, Bonyad AE, Nikooy M, Picchio R, Venanzi R, Calienno L. Damages to soil and tree species by cable-skidding in Caspian forests of Iran. *For Syst*. 26(1):e009. 2017. <https://doi.org/10.5424/fs/2017261-09100>

Tesch SD, Crawford MS, Baker-Katz K, Mann JW. Recovery of Douglas-fir Seedlings from Logging Damage in Southwestern Oregon: Preliminary Evidence. *Northwest Science*. 64(3):131–139. 1990.

Tesch SD, Lysne DH, Mann JW, Helgersen OT. Damage to regeneration during shelterwood overstory removal on steep terrain : a case study. Corvallis: Oregon State University. 1986.

Tomao A, Antonio Bonet J, Castaño C, de-Miguel S. How does forest management affect fungal diversity and community composition? Current knowledge and future perspectives for the conservation of forest fungi. *For Ecol Manag*. 457:117678. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117678>

Uhl C, Vieira ICG. Ecological Impacts of Selective Logging in the Brazilian Amazon: A Case Study from the Paragominas Region of the State of Para. *Biotropica*. 21(2):98. 1989. <https://doi.org/10.2307/2388700>

Valkonen S, Valsta L. Productivity and economics of mixed two-storied spruce and birch stands in Southern Finland simulated with empirical models. *Forest Ecology and Management*. 140(2–3):133–149. 2001. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00321-2](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00321-2)

Vasiliauskas R. Damage to trees due to forestry operations and its pathological significance in temperate forests: a literature review. *Forestry*. 74(4):319–336. 2001. <https://doi.org/10.1093/forestry/74.4.319>

World Business Council for Sustainable Development. Forest Sector Nature-Positive Roadmap Phase I: A shared definition of nature-positive [Internet]. [accessed 2023 Aug 5]. 2022. <https://www.wbcsd.org/download/file/15278>

Youngblood AP. Effect of shelterwood removal methods on established regeneration in an Alaska white spruce stand. *Can J For Res*. 20(9):1378–1381. 1990. <https://doi.org/10.1139/x90-182>

イワフジ工業株式会社. フォワード U-E シリーズ [Internet]. [accessed 2022 Aug 17]. n.d. [http://www.iwafuji.co.jp/products/forest\\_u-e.html](http://www.iwafuji.co.jp/products/forest_u-e.html)

ジェフジェプソン. 「なぜ?」が学べる実践ガイド納得して上達! 伐木造材術. 東京: 全国林業改良普及協会. 2012.

上村巧. 伐木技術の変遷と課題. 森利誌. 30(1):5-10. 2015.  
<https://doi.org/10.18945/jjfes.KJ00009844650>

中岡圭一, 豊田信行, 金本知久. スギ・ヒノキ複層林造成後の成長と光環境. 愛媛県林業試験場研究報告.(21):1-9. 2001.

二見鎌次郎. 行政からみた複層林施業. 森林科学. 3:64-66. 1991.

井上昭夫, 黒川泰亨. 相対幹曲線式の新しい推定方法. 日本林学会誌. 83(1):1-4. 2001.  
[https://doi.org/10.11519/jjfs1953.83.1\\_1](https://doi.org/10.11519/jjfs1953.83.1_1)

井上源基, 藤原登, 上飯坂実. トラクタ集材作業における立木の損傷. 東京大学農学部演習林報告.(66):307-324. 1974.

今井辰雄, 大竹清美, 北島瑞穂, 鈴木千秋, 青砥一郎, 富樫誠, 大久保圭二, 渡部政義. 複層林の造成管理技術の開発. 福島県林業試験場研究報告.(27):1-37. 1995.

佐々木尚三, 石橋聡, 倉本恵生. 天然林における択伐作業による林分被害について. 日本森林学会北海道支部論文集. 56:129-131. 2008. [https://doi.org/10.24494/jfsha.56.0\\_129](https://doi.org/10.24494/jfsha.56.0_129)

佐々木尚三, 石橋聡, 鷹尾元, 高橋正義, 阿部真, 酒井佳美, 山口岳広. 幾寅天然林における択伐作業による林分被害について. 森利誌. 19(4):301-304. 2005.  
<https://doi.org/10.18945/jjfes.KJ00007485278>

佐々木恵彦. マレーシアの熱帯降雨林におけるフタバガキ科樹種の生長習性と環境. 森林立地. 21(1):8-18. 1979. [https://doi.org/10.18922/jjfe.21.1\\_8](https://doi.org/10.18922/jjfe.21.1_8)

全国林業改良普及協会. 機械化のマネジメント. 東京: 全国林業改良普及協会. 2001.

公益社団法人 森林・自然環境技術教育研究センター. 非皆伐施業の現状と今後のあり方に関する調査研究: 平成 30 年度報告書. 2019.

加茂皓一, 赤井龍男. ヒノキ人工林における再生産過程の検討 (III). 京都大学農学部演習林報告. 48:57-68. 1976.

南雲秀次郎, 山本博一. 森林作業法: 東京大学北海道演習林の経営実験. 森林計画学会誌. 40(Special):1-54. 2006. [https://doi.org/10.20659/jjfp.40.Special\\_1](https://doi.org/10.20659/jjfp.40.Special_1)

岩岡正博. 森林作業の生産性とコスト. 吉岡拓如, 酒井秀夫, 岩岡正博, 松本武, 山田容三, 鈴木保志. 森林利用学. 初版. 東京: 丸善出版株式会社. 85-98 ページ. 2020.

四手井綱英, 赤井龍男, 斎藤秀樹, 河原輝彦. ヒノキ林. 東京: 地球社. 1974.

国土交通省. 国土数値情報| 国有林野データ [Internet]. [accessed 2024 Jan 13]. 2019. <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-A45.html>

国土交通省. 令和 3 年 3 月から適用する公共工事設計労務単価について [Internet]. [accessed 2022 Jun 8]. 2021. [https://www.mlit.go.jp/report/press/tochi\\_fudousan\\_kensetsugyo14\\_hh\\_000001\\_00026.html](https://www.mlit.go.jp/report/press/tochi_fudousan_kensetsugyo14_hh_000001_00026.html)

国土交通省. 国土数値情報| 平年値メッシュデータ [Internet]. [accessed 2023 Dec 25]. 2022. [https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-G02-v3\\_0.html](https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-G02-v3_0.html)

国土地理院. 地理院地図| 地理院タイル一覧 [Internet]. [accessed 2024a Jan 13]. n.d. <https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>

国土地理院. 基盤地図情報: DEM5A [Internet]. [accessed 2022b Jul 27]. n.d. <https://fgd.gsi.go.jp/download/mapGis.php?tab=dem>

小坂真弘. 標準的な運賃計算シート [Internet]. [accessed 2023 Oct 28]. n.d. [https://jta.or.jp/member/kaisei\\_jigyoho/kaisei\\_jigyoho\\_202008.html#3](https://jta.or.jp/member/kaisei_jigyoho/kaisei_jigyoho_202008.html#3)

山本進一, 堤利夫. ヒノキ人工林における天然生ヒノキ稚樹の個体群動態 (I). 日本林学会誌. 61(8):287–293. 1979. [https://doi.org/10.11519/jjfs1953.61.8\\_287](https://doi.org/10.11519/jjfs1953.61.8_287)

山本進一, 堤利夫. ヒノキ人工林における天然生ヒノキ稚樹の個体群動態 (II). 日本林学会誌. 62(9):343–349. 1980. [https://doi.org/10.11519/jjfs1953.62.9\\_343](https://doi.org/10.11519/jjfs1953.62.9_343)

山本進一, 堤利夫. ヒノキ人工林における天然生ヒノキ稚樹の個体群動態 (VI). 日本林学会誌. 67(12):486–494. 1985. [https://doi.org/10.11519/jjfs1953.67.12\\_486](https://doi.org/10.11519/jjfs1953.67.12_486)

山田容三, 小谷芙蓉, 古橋茂人. 複層林施業における上木間伐作業の機械化に関する研究. 日林誌. 93(2):79–83. 2011. <https://doi.org/10.4005/jjfs.93.79>

岡勝, 中澤昌彦, 田中良明, 吉田智佳史, 近藤耕次, 加利屋義広. フォワーダの走行速度に及ぼす路網規格と積載量の影響. 森利誌. 22(3):163–170. 2007. <https://doi.org/10.18945/jjfs.KJ00005009505>

斎藤仁志, 佐々江希望, 白澤紘明, 松澤義明, 植木達人. 樹種別の造材歩留まりが木質資源利用可能量へ与える影響. 日林誌. 103(6):443–448. 2021. <https://doi.org/10.4005/jjfs.103.443>

日本政策金融公庫. 利率一覧 (令和 5 年 10 月 19 日現在) [Internet]. [accessed 2023 Oct 28]. 2023. [https://www.jfc.go.jp/n/rate/pdf/kinrikaiteimikomi\\_051019b.pdf](https://www.jfc.go.jp/n/rate/pdf/kinrikaiteimikomi_051019b.pdf)

- 本郷浩二．複層林施業をめぐる政策上の諸問題．森林科学．4:72-74．1992．  
[https://doi.org/10.11519/jjsk.4.0\\_72](https://doi.org/10.11519/jjsk.4.0_72)
- 杉田久志, 猪内次郎, 田口春孝, 高橋利彦．カラマツウダイカンバ二段林における上木伐採による下木の被害状況．東北森林科学会誌．17(1):1-7．2012．
- 松井美希子, 斎藤仁志, 植木達人, 藤井勝, 竹内智絵．ヒノキ漸伐林における終伐後の林分状況と造林費の推定．長野：中部森林管理局．2017．
- 松尾正史, 丸本順次, 内田健, 山田詳生．複層林造成技術に関する研究 (II): 複層林の上木伐倒に伴う下木への影響．山口県林業指導センター試験報告.(9):46-76．1995．
- 松崎誠司, 河原輝彦．ヒノキ人工林における天然更新施業の可能性．東京農業大学農学集報．51(1):1-7．2006．
- 松本武．ヒノキ間伐林分において発生したかかり木が残存立木間を通過する際の接触抵抗力．日林誌．92(3):134-138．2010．<https://doi.org/10.4005/jjfs.92.134>
- 松本武, 前嶋宏美, 岩岡正博．傾斜地のヒノキ林分における 2 立木樹冠に接触して発生したかかり木のけん引処理．森利誌．32(1):15-23．2017．<https://doi.org/10.18945/jjfes.32.15>
- 林拙郎, 高橋洋子．樹形のモデル化について．日本林学会誌．79(4):222-228．1997．
- 林達夫, 中畑浩次, 元島清人, 樋口昭英, 伊藤邦夫．金沢山国有林におけるヒノキ複層林(天然林)について [Internet]．長野：長野営林局；[accessed 2022 Apr 26]．1987．  
[https://www.rinya.maff.go.jp/chubu/gijyutu/pdf/s611\\_050.pdf](https://www.rinya.maff.go.jp/chubu/gijyutu/pdf/s611_050.pdf)
- 林野庁．立木幹材積表 東日本編．東京：日本林業調査会．1970．
- 林野庁．林政審議会 (令和 2 年 10 月 12 日) 配布資料: 資料 5 多様で健全な森林への誘導 [Internet]．[accessed 2022 May 18]．2020．  
<https://www.rinya.maff.go.jp/j/rinsei/singikai/attach/pdf/201012si-17.pdf>
- 林野庁．森林・林業基本計画 (令和 3 年 6 月 15 日閣議決定) [Internet]．[accessed 2022 May 15]．2021．<https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/plan/attach/pdf/index-10.pdf>
- 林野庁．森林資源の現況: 森林資源現況総括表 (令和 4 年 3 月 31 日現在) [Internet]．[accessed 2023 Dec 3]．2023a．<https://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/genkyou/r4/attach/pdf/3-1.pdf>
- 林野庁．森林環境保全整備事業実施要領の運用 (最終改正: 令和 5 年 3 月 29 日付け 4 林整整第 773 号)．2023b．



林野庁. 森林環境保全整備事業における標準単価の設定等について (最終改正: 令和 5 年 3 月 28 日 4 林整第 867 号) [Internet]. 2023c. [accessed 2023 Oct 28]. [https://www.rinya.maff.go.jp/j/seibi/sinrin\\_seibi/attach/pdf/index-22.pdf](https://www.rinya.maff.go.jp/j/seibi/sinrin_seibi/attach/pdf/index-22.pdf)

林野庁中部森林管理局. 三浦実験林 30 年のあゆみ. 長野. 1999.

林野庁中部森林管理局. 伊那谷国有林の地域別の森林計画書 [Internet]. [accessed 2024 Jan 3]. 2013. <https://www.rinya.maff.go.jp/chubu/policy/business/sinrinkeikaku/pdf/keikakuinadani.pdf>

林野庁中部森林管理局. 試験地台帳 No. 5 [Internet]. [accessed 2022 Sep 12]. 2014a. <https://www.rinya.maff.go.jp/chubu/gijyutu/pdf/naraihonyama.pdf>

林野庁中部森林管理局. 指標林施業記録簿 No. 9 [Internet]. [accessed 2022 Sep 12]. 2014b. <https://www.rinya.maff.go.jp/chubu/gijyutu/pdf/kanazawayama.pdf>

林野庁中部森林管理局. 千曲川上流国有林の地域別の森林計画書 [Internet]. [accessed 2024 Jan 3]. 2019. <https://www.rinya.maff.go.jp/chubu/policy/business/sinrinkeikaku/attach/pdf/sinrinkeikaku21-110.pdf>

林野庁中部森林管理局南信森林管理署. 金沢山 1408 に林小班復命書 (業務資料). 2020.

林野庁中部森林管理局南信森林管理署. 作業日報. 2021.

林野庁中部森林管理局南信森林管理署. 林班沿革簿: 金沢山. n.d.

林野庁中部森林管理局東信森林管理署. 林班沿革簿: 奈良本山. n.d.

柿本一広, 山本輝雄. ヒノキ人工林天然更新施業についての一考察 [Internet]. 長野: 長野営林局; [accessed 2023 May 8]. 1999. [https://www.rinya.maff.go.jp/chubu/gijyutu/pdf/pdf/h11\\_017.pdf](https://www.rinya.maff.go.jp/chubu/gijyutu/pdf/pdf/h11_017.pdf)

梶原幹弘. スギの相対幹曲線について. 日本林学会誌. 55(2):63–70. 1973. [https://doi.org/10.11519/jjfs1953.55.2\\_63](https://doi.org/10.11519/jjfs1953.55.2_63)

森勇佑, 田坂聡明, 有賀一広, 松英恵吾, 齋藤仁志, 馬場修平. 列状間伐における残存木被害発生因子の検討. 森利誌. 22(4):255–260. 2008. <https://doi.org/10.18945/jjfs.KJ00005009537>

森岡昇, 近藤稔, 小木曾謙治. 伐採木樹冠が残存木樹冠の間を通過するときの最大抵抗力と通過仕事. 名古屋大学農学部演習林報告.(15):69–83. 1996.

森澤猛, 杉田久志, 橋本良二, 赤井龍男. 空中写真から解析した木曽地方三浦実験林のヒノキ帯状皆伐天然更新試験地におけるササおよび更新木樹冠被覆の 36 年間の変遷. 日本森林学会誌. 92(1):22–28. 2010. <https://doi.org/10.4005/jjfs.92.22>

水永博己. 吉永町南部地域のヒノキの樹冠構造と生産力. 岡山県林業試験場研究報告.(12):21–36. 1995.

河原輝彦, 井鷲裕司. ヒノキ天然更新の適地区分に関する要因分析 (中間報告). 1988.

沼田邦彦, 山下金二. 伐出作業の作業環境と作業方法に関する研究. 静岡大学農学部研究報告.(35):29–36. 1986.

湊克之, 寺本守. 北海道大学和歌山地方演習林におけるスギ・ヒノキ複層林の施業実験 (II). 北海道大学農学部演習林研究報告. 46(3):719–733. 1989.

澤口勇雄, 宇野博子, 猪内正雄, 立川史郎. ヒバ天然林択伐作業による残存木損傷. 森利誌. 16(2):83–92. 2001. <https://doi.org/10.18945/jjfes.KJ00007484877>

瀧誠志郎, 中澤昌彦, 上村巧, 赤松玄人. 立木の重心高さ推定のためのモデル式の構築. 森利誌. 34(4):217–222. 2019. <https://doi.org/10.18945/jjfes.34.217>

猪俣雄太, 山田健, 宗岡寛子, 佐々木尚三, 古家直行. 北海道国有林における土場の配置実態と車両系集材機械の走行距離が生産性に与える影響. 森利誌. 35(1):31–38. 2020. <https://doi.org/10.18945/jjfes.35.31>

環境省. 令和 5 年版 環境・循環型社会・生物多様性白書. 2023.

環境省自然環境局生物多様性センター. 5 万分の 1 現存植生図 (1293 面, 第 2 回・第 3 回 自然環境保全基礎調査) [Internet]. [accessed 2023 Dec 25]. n.d. [https://www.biodic.go.jp/vg\\_map/one-to-fifty-thousand/index.htm#pagetop](https://www.biodic.go.jp/vg_map/one-to-fifty-thousand/index.htm#pagetop)

産総研地質調査総合センター. 20 万分の 1 日本シームレス地質図 V2 Web API [Internet]. [accessed 2023 Dec 25]. 2023. <https://gbank.gsj.jp/seamless/v2/api/1.3.1/tiles/{z}/{y}/{x}.png>

石川知明. 間伐材搬出作業における小形集材車のための作業路の路網配置 (I). 日本林学会誌. 73(6):442–447. 1991. [https://doi.org/10.11519/jjfs1953.73.6\\_442](https://doi.org/10.11519/jjfs1953.73.6_442)

石川知明. 木寄せ作業中に丸太の転落, 滑落および自重落下が発生する条件. 日本林学会誌. 76(1):43–51. 1994. [https://doi.org/10.11519/jjfs1953.76.1\\_43](https://doi.org/10.11519/jjfs1953.76.1_43)

石田仁, 直井聡, 渡辺将康, 都竹彰則, 青木将也. 樹高と胸高直径のみによる相対幹曲線の推定方法の実用性評価. 日林誌. 94(4):188–191. 2012. <https://doi.org/10.4005/jjfs.94.188>

竹下敬司. パラボラ樹冠形モデルによるスギ林の構造解析. 九州大学農学部演習林報告. 55:55–104. 1985. <https://doi.org/10.15017/10812>

竹内郁雄. スギ・ヒノキ二段林施業と技術的課題. 森林科学. 41:8–13. 2004. [https://doi.org/10.11519/jjsk.41.0\\_8](https://doi.org/10.11519/jjsk.41.0_8)

竹内郁雄, 落合幸仁, 川崎達郎, 安藤貴. 短期二段林の上木伐採後における下木の成長. 森林総研研報. 362:155–169. 1992.

竹嶋一紗, 鈴木保志, 山崎敏彦. 架線系システムの間伐作業による残存木損傷の回復状況. 森利誌. 34(4):205–215. 2019. <https://doi.org/10.18945/jjfes.34.205>

総務省統計局. 木材統計調査: 長期累年. 政府統計の総合窓口 (e-Stat) [Internet]. [accessed 2023 Oct 29]. 2015. <https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00500217&tstat=000001014476&cycle=0&tclass1=00001034722&tclass2val=0>

総務省統計局. 消費者物価指数: 2020 年基準消費者物価指数 2021 年次年報. 政府統計の総合窓口 (e-Stat) [Internet]. [accessed 2023 Nov 11]. 2021. <https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&toukei=00200573&tstat=000001150147>

藤野正也, 渡辺亮介, 近藤稔, 山口浩和, 白井漸. 主索ウインチ付スイングヤードによる集材作業で発生する残存木の損傷. 森利誌. 30(4):153–157. 2015. <https://doi.org/10.18945/jjfes.KJ00010157206>

谷山徹. 複層林伐出技術の高度化を目指して. 森林科学. 41:35–41. 2004. [https://doi.org/10.11519/jjsk.41.0\\_35](https://doi.org/10.11519/jjsk.41.0_35)

赤井龍男. 天然更新に関する研究 (III): 尾鷲地方におけるヒノキ林の更新. 京都大学農学部演習林報告. 47:34–47. 1975.

赤井龍男. 合自然的な森林造成の技術体系. 京都大学農学部演習林集報. 21:1–53. 1991.

近藤道治, 今井信. 点状複層林の上木伐採にともなう下木損傷軽減法の検討. 森利誌. 22(1):5–14. 2007. <https://doi.org/10.18945/jjfes.KJ00005009436>

近藤道治, 今井信, 宮崎隆幸, 岡勝, 佐々木達也. 点状複層林の上木間伐にともなう下木損傷軽減法の検討. 森利誌. 24(1):3–10. 2009. <https://doi.org/10.18945/jjfes.KJ00005581727>

近藤道治, 今井信, 山内仁人, 佐々木達也. 複層林の上木間伐により受傷した下木ヒノキの5成長期後の生育状況. 森利誌. 23(3):179–188. 2008. <https://doi.org/10.18945/jjfes.KJ00005339482>

近藤道治, 大矢信次郎, 三石一彦. 複層林の上木皆伐にともなう下木の損傷. 森利誌. 26(2):117–121. 2011.

遊橋洪基. 複層林の造成管理技術の開発. 長野県林業総合センター研究報告.(9):1–15. 1995.

遠藤寛子. ヒノキ人工林における漸伐作業法の体系化に関する基礎的研究 [Internet]. 長野: 中部森林管理局; [accessed 2023 Jul 26]. 2005. [https://www.rinya.maff.go.jp/chubu/gijyutu/pdf/pdf/h16\\_122.pdf](https://www.rinya.maff.go.jp/chubu/gijyutu/pdf/pdf/h16_122.pdf)

酒井秀夫, 伊藤幸也, 石原猛. チェーンソーによる間伐木の伐木造材作業. 日本林学会誌. 70(1):1–10. 1988. [https://doi.org/10.11519/jjfs1953.70.1\\_1](https://doi.org/10.11519/jjfs1953.70.1_1)

鈴木保志, Ahmad HS, 後藤純一. 人工林の高齢級化に伴う伐出システムの観点からみた路網整備の方向性と課題. 日林誌. 97(4):191–202. 2015. <https://doi.org/10.4005/jjfs.97.191>

長野営林局計画課. ヒノキ複層林施業関係調査報告書. 松本: 藤原印刷株式会社. 1982.

長野県庁林務部. 要領別紙 1 森林環境保全整備事業 [Internet]. [accessed 2022 Apr 28]. 2021a. <https://www.pref.nagano.lg.jp/shinrin/sangyo/ringyo/seibi/zorin/documents/bessil sinnrinnkannkyou hozenn.pdf>

長野県庁林務部. 令和 3 年度 信州の森林づくり事業標準単価表 [Internet]. [accessed 2022 Jun 8]. 2021b. <https://www.pref.nagano.lg.jp/shinrin/sangyo/ringyo/seibi/zorin/documents/r3kokkohyouzyuntankahyou.pdf>

長野県林業総合センター. 全国\_CS\_立体図\_10m\_08 [Internet]. [accessed 2023 Dec 25]. 2017. <https://www.geospatial.jp/ckan/dataset/cs-10m-08>

長野県林業総合センター. 長野県 0.5 m DEM: 諏訪 [Internet]. [accessed 2023 Oct 23]. 2020. <https://www.geospatial.jp/ckan/dataset/nagano-dem/resource/d652d713-9782-4565-b395-bbe04b40987e>

高橋功一, 福土憲司, 小池征寛, 犬飼慎也, 算用子麻未, 尾張敏章. 天然林択伐作業に伴う残存木の損傷と稚幼樹の消失・発生: 東京大学北海道演習林 51 林班の事例. 日林北支論. 59:87–90. 2011. [https://doi.org/10.24494/jfsha.59.0\\_87](https://doi.org/10.24494/jfsha.59.0_87)

齋藤智之, 酒井武, 壁谷大介, 杉田久志, 九島宏道, 星野大介, 楯直顕, 早川幸治, 久保喬之, 今村正之, 黒田誠. 刈払いおよび抑制剤散布を用いた林冠下のササ抑制の効果. 日林誌. 103(3):179–185. 2021. <https://doi.org/10.4005/jjfs.103.179>