

針葉樹人工林の健全化のための森林管理技術の確立

大矢信次郎・近藤道治*1・戸田堅一郎・中澤昌彦*2・高野毅*3・小林直樹

針葉樹人工林の健全な育成のための管理技術を確立するため、高齢級林分における間伐効果の検証を進めるとともに、人工林における施業が残存木に与える影響及び各施業の生産性を調査した。13齢級以上の高齢級人工林において間伐を行った結果、間伐後の直径成長効果は判然とせず、間伐率や間伐前の胸高直径との相関関係も認められなかったことから、長期的な観測が必要と考えられた。複層林における上木伐採時の下木損傷を軽減するために、高密度路網を開設し伐出作業を行った結果、下木損傷率を20%程度に軽減でき、さらに作業道上において伐倒木を転回せずに造材を行った場合には、下木損傷率を9%程度に軽減することができた。過去に列状間伐を行った林分において搬出間伐（点状）を行った結果、過去の伐採列内に伐倒できた立木は44%でこれらを集材する際には残存木に損傷を与えることはなかったが、過去の伐採列外に着地した伐倒木を集材した際には集材経路付近の残存木の樹皮に損傷が生じた。北欧製のハーベスタ及びフォワーダを使用した林内走行による列状間伐作業は、同システムによる点状間伐より残存木損傷率がやや高い傾向がみられたが、従来型システムと損傷率を比較した結果、有意差は認められず、その高い生産性からさらなる普及が期待された。

キーワード：高齢級人工林，複層林，下木損傷，列状間伐，残存木損傷

目次

- 1 緒言
- 2 高齢級人工林における間伐が直径成長量に及ぼす影響
- 3 複層林の上木間伐にともなう下木損傷の軽減法の検討
- 4 過去に列状間伐を実施した林分における搬出間伐方法の検討
- 5 先進的車両系林業機械による間伐作業が残存木等に与える影響
- 6 結言
- 7 謝辞

1 緒言

現在、長野県における針葉樹人工林の林齢構成は10～12齢級に集中しており、面積割合で55.2%を占めている（長野県 2014，図-1-1）。2014年4月時点で11齢級以上に属する樹種別の面積割合は、カラマツが72.2%，スギが57.1%，ヒノキが28.2%であり、10年後にはこれらがほぼそのまま13齢級以上の林齢に達することになる。これらの人工林は、標準伐期齢に従えば既に伐採対象林分であり、利用可能な径級に達している林分も少ない。したがって、計画的に伐採・更新を行い、県産材を市場に供給していく必要があるが、皆伐

したとしても十分な収益が期待できないという森林所有者の意向により、伐期が延伸されているのが現状である。

このような背景から、多くの林分では間伐による密度管理を継続しながら択伐や皆伐を行う時期をうかがうことになるが、高齢級化した人工林をどのように管理していくかが極めて重要である。特に間伐を行うにあたっては、さまざまな課題が存在する。まず、高齢級に達した林分において間伐を行うことが残存木の直径成長にどの程度影響を及ぼすのかについては、ほとんど知見がない。また、従来の収穫予想表では、カラマツ等の針葉

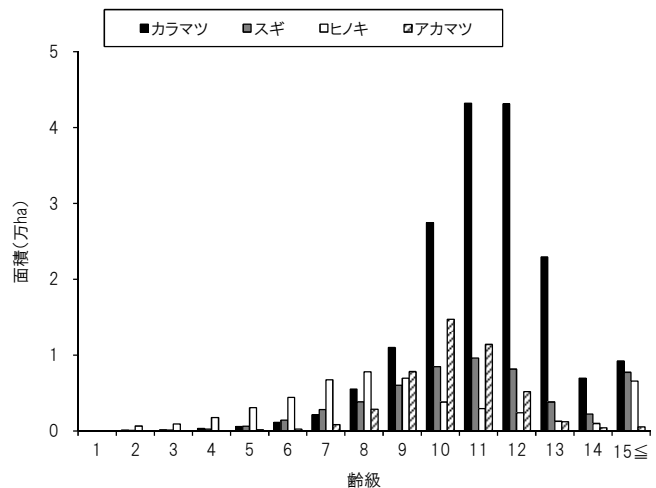


図-1-1 長野県の針葉樹人工林における主要樹種の年齢構成 (2014年現在)

*1 元長野県林業総合センター育林部長，現長野県林業総合センター森林学習展示館

*2 独立行政法人森林総合研究所

*3 元長野県長野地方事務所林務課，現長野県佐久地方事務所林務課

樹は60年生を超えると樹高成長が緩やかになり、樹冠の拡大が抑制され、結果として直径成長が抑制されるとされてきた(長野県 1983a, 長野県 1983b)。しかし、近年の研究では60年生を超えても樹高成長はこれまでの成長予想より良好であることが分ってきた(古川 2002, 片倉ら 2005)ことから、長伐期施業を積極的に行おうと考える場合も多い。

加えて、これらの林分を長期に渡って管理していくためには、間伐や作業道開設する際に立木の損傷を回避することが極めて重要である。搬出間伐作業時等に残存木に生じた損傷は、材部の変色を招くのみならず、腐朽に発展し木材としての利用価値を著しく損なう(近藤ら 2003)ためである。こうした伐採時の立木損傷については近年徐々に研究が進みつつある。例えば、複層林化された林分において大きく成長した上木を伐採する際の下木損傷の発生要因分析及び下木損傷を極力回避する技術(近藤ら 2002, 近藤 2005, 近藤ら 2005a, 近藤ら 2005b, 近藤ら 2006, 近藤ら 2007a, 近藤ら 2007b, 山田ら 2011)等があるが、未だ改善の余地がある。また、過去に列状間伐が行われた林分において次の搬出間伐を行うにあたっては、過去の伐採列を利用することによって残存木を傷つけずに伐倒・搬出が可能であることが想定されているが、実際に検証された事例はない。さらに、近年導入された先進的な林業機械による間伐作業での残存木損傷の多寡や森林土壌に与える影響についてはほとんど検討されていない。

そこで本研究では、高齢級化する現在の人工林を健全に育成するための管理手法を確立することを目指し、これらの諸課題について検討を進めた。なお、本研究は県単課題(平成21~25年度)とし

て実施し、成果の一部は、森林利用学会学術研究発表会(大矢・近藤ら 2011, 大矢・近藤ら 2012, 大矢・近藤 2013), International Ergonomic Workshop of IUFRO RG3.03 (Oya *et al.* 2012), 日本森林学会大会(大矢・近藤ら 2013)において発表した。

2 高齢級人工林における間伐が直径成長量に及ぼす影響

2.1 研究の目的

長野県の針葉樹人工林は、2014年現在で11齢級以上の林分が58.3%の面積割合となっており(長野県 2014), 10年後には13齢級以上の林分の面積が現在の2倍以上に増加する。11齢級以上の林分は、従来の計画では主伐を進めるべき林齢であるが、木材価格の低迷や林業労働力不足などが影響して、伐期を延伸する林分が大半を占めている。これらの林分においては、間伐による密度管理を継続して行う必要があるが、高齢級における間伐については間伐後の成長など未解明な点が多い。また、高齢林の効果的な間伐を実施するための選木、間伐手法等についても検討する必要がある。したがって本研究では、高齢級人工林を健全に管理するための間伐手法を開発することを目的として、高齢林における間伐試験を実施した。

2.2 調査方法

13齢級以上の高齢級人工林における間伐後の残存木の直径成長促進効果を検証するため、カラマツ・ヒノキ・スギの3樹種について、間伐率が異なる3種の試験区(強度間伐区, 普通間伐区, 無間伐区)を設定した(表-2-1)。設定した試験地の所在地と設定時林齢は、松本市波田の62年生カ

表-2-1 各試験地における間伐前後の林況

樹種 (林齢)	試験区	面積 (ha)	間伐前				間伐後				間伐率	
			成立本数 (本/ha)	樹高 (m)	胸高直径 (cm)	収量比数 (Ry)	成立本数 (本/ha)	樹高 (m)	胸高直径 (cm)	収量比数 (Ry)	本数 (%)	材積 (%)
カラマツ (62年生)	強度間伐	0.17	494	23.2	31.7	0.75	259	23.2	37.5	0.55	47.6	31.2
	普通間伐	0.19	474	23.3	31.6	0.74	337	23.6	34.3	0.64	28.9	16.9
	無間伐	0.16	494	22.6	30.9	0.74	494	22.6	30.9	0.74	-	-
ヒノキ (65年生)	強度間伐	0.11	982	16.3	21.5	0.69	436	17.9	24.8	0.50	55.6	44.3
	普通間伐	0.13	800	17.5	22.8	0.67	515	18.8	25.9	0.57	35.6	18.1
	無間伐	0.11	573	18.4	26.9	0.59	573	18.4	26.9	0.59	-	-
スギ (69年生)	強度間伐	0.13	692	23.9	32.0	0.69	369	25.2	35.5	0.51	46.7	33.0
	普通間伐	0.11	682	25.1	34.1	0.71	473	26.2	36.9	0.61	30.7	18.0
	無間伐	0.10	700	26.0	36.3	0.73	700	26.0	36.3	0.73	-	-

ラマツ林, 阿智村の 65 年生ヒノキ林, 根羽村の 69 年生スギ林である。強度間伐区では本数間伐率 50%程度, 普通間伐区では同 33%程度の間伐を行った。なお, 間伐は小径木や形質不良木を優先的に選木しつつ, 残存木の均等配置も考慮して実施した。これら 3 林分において, 胸高周囲長, 樹高, 枝下高を間伐前及び間伐後の成長停止期に毎年計測し, 連年直径成長量から間伐の効果を評価するとともに, 直径成長量に影響を及ぼす因子(胸高直径, 樹高, 樹冠長等)を解析した。

2.3 結果と考察

2.3.1 高齢林の林分構造

3箇所の試験地における間伐前の全立木を対象とした胸高直径階分布は, いずれの試験地におい

ても 20cm 未満の小径木から 40cm を超える大径木まで幅広く分布していた(図-2-1)。各試験地ではこれまでに幾度かの間伐が行われているものの, 未だ優劣差が大きい状態であった。そこで, 胸高直径に優劣差が生じた要因を探るために, 個体レベルにおける胸高直径と, 樹高, 樹冠長, 樹冠長率, 樹冠幅(カラマツのみ)との相関関係を解析した。その結果, 樹冠長と胸高直径の間には, いずれの樹種においても強い相関関係が認められた(図-2-2)。一方, 樹冠長率はカラマツでは相関関係が認められたが, スギとヒノキでは認められなかった(図-2-3)。また, 樹高はスギとヒノキで強い相関関係が認められた(図-2-4)。カラマツについてのみ解析した樹冠幅は, 胸高直径と強い相関関係が認められた(図-2-5)。

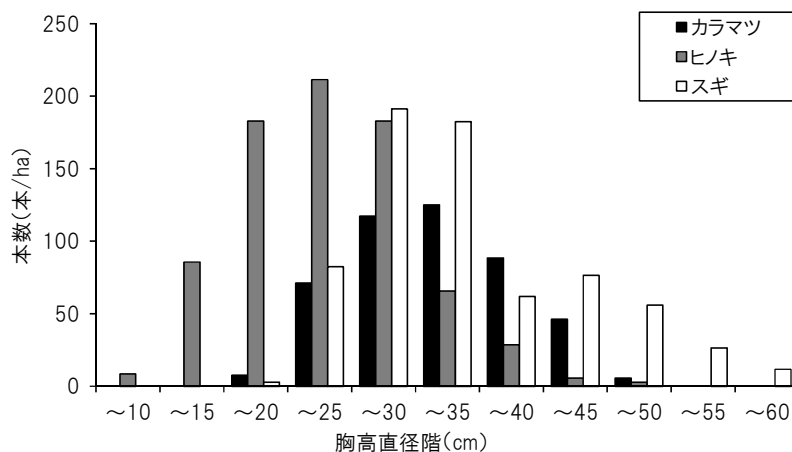


図-2-1 各試験地における高齢林間伐試験地の直径階分布

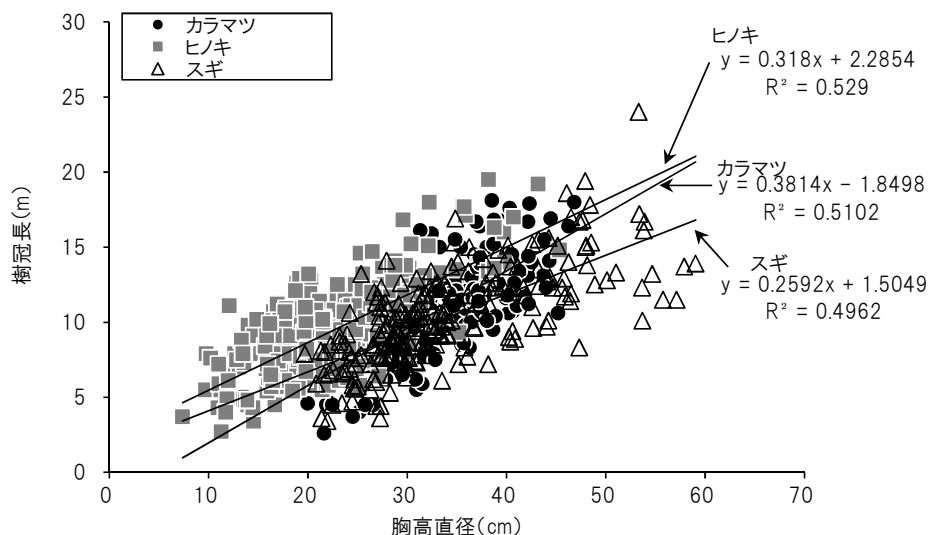


図-2-2 各試験地における間伐前の胸高直径と樹冠長の関係

これらの結果から、高齢級に至るまでの直径成長は、樹冠の大きさと極めて深い関係にあることが確認された。そのためには、間伐を適期に行うことによって大きい樹冠を形成しそれを維持することが、直径成長に寄与するといえる。また、樹冠長率は必ずしも直径成長とは関係がないことが示された。このことは既往の研究でも指摘されている(横井ら 2011) ように、樹高に対する樹冠長

の割合という相対値より、絶対値としての樹冠の大きさ(樹冠長、樹冠幅)の方が直径成長に強く関与していると考えられる。

したがって、高齢林に移行することを計画している人工林においては、間伐を適切に行うことで枝を四方に張れる空間を各個体が確保できるように管理し、枝の枯れ上がりを極力抑制することが重要である。

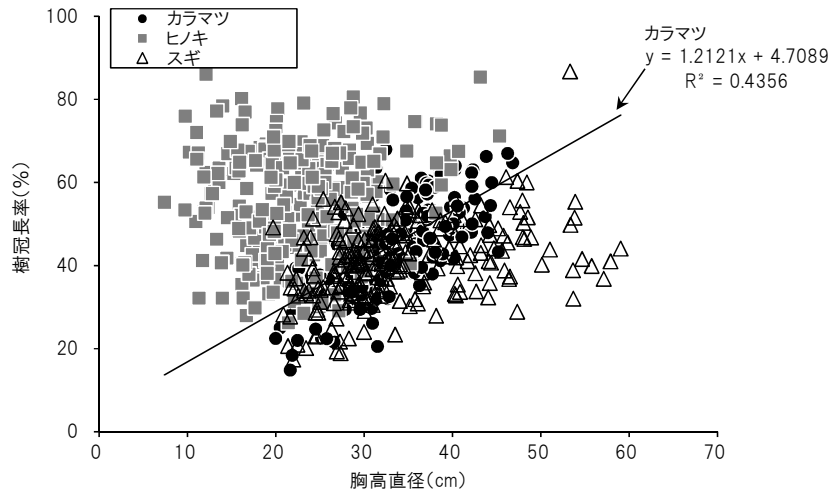


図 2-3 各試験地における間伐前の胸高直径と樹冠長率の関係

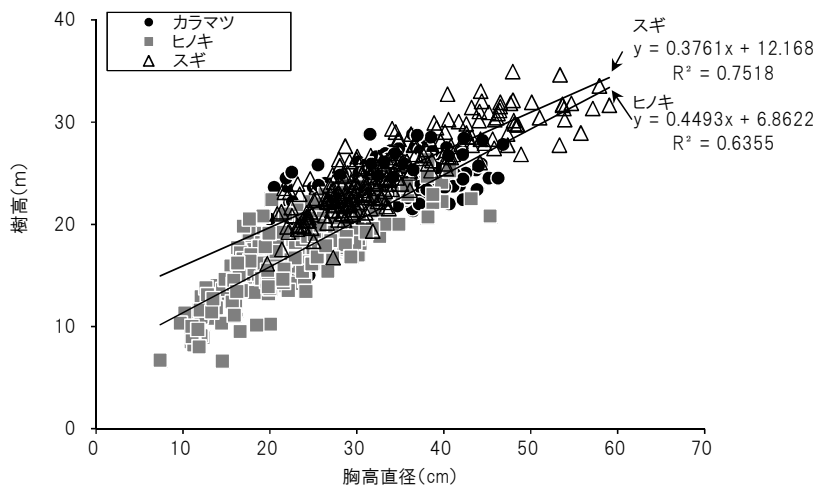


図-2-4 各試験地における間伐前の胸高直径と樹高の関係

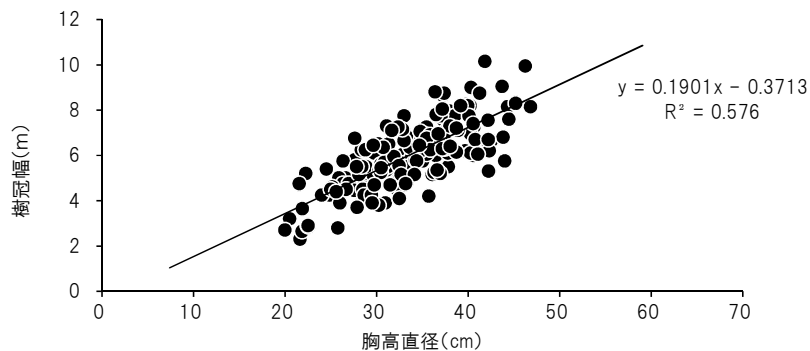


図-2-5 カラムツの胸高直径と樹冠幅の関係

2.3.2 高齢林における間伐後の直径成長量

各試験地における、普通間伐区及び強度間伐区の直径成長量を無間伐区と比較した(図-2-6)。その結果、カラマツとスギにおける各間伐区の直径成長量は無間伐区より有意に高かった(Tukey-Kramerの多重比較検定, $P < 0.05$)。これらは、間伐により胸高直径の小さい個体が淘汰された結果、成長が比較的旺盛な優勢木が残存したためと判断できる。一方、ヒノキの直径成長量は普通間伐区で無間伐区と差がなく、強度間伐区では有意に低かった($P < 0.05$)。既往の報告では、ヒノキ林において強度間伐を行うと水ストレスを生じやすい傾向がみられ枯死を引き起こすケースもあることが指摘されている(上田 2010, 佐藤ら 2012)ことから、本試験地においても強度間伐による成長抑制が起きた可能性が示唆される。

次に、各試験地における間伐前の立木の胸高直径を上位・中位・下位の3等級に本数を等分し、間伐後に残存した個体を間伐前に行った区分に従って比較した。その結果、いずれの樹種におい

ても、各等級内における直径成長量は、無間伐区と普通間伐・強度間伐の各試験区間に有意差が認められなかった(図-2-7~2-9, Tukey-Kramerの多重比較検定, $P > 0.05$)。また、同一試験区内における上位・中位・下位の等級間の成長量に有意差が認められた組み合わせは、カラマツ無間伐区の下位:上位, ヒノキ無間伐区の下位:上位, ヒノキ普通間伐区の下位:上位に限られ、スギには等級間差が認められなかった。

これらのことから、各樹種とも13 齢級以上の林齢においては、間伐による直径成長量の増加促進効果が現れにくいことが示唆された。しかし、今回の各間伐試験地は過去に間伐が行われており、今回の間伐前の収量比数が0.60~0.75程度であったため、間伐前からある程度の空間が存在していたことから、残存木は即座に反応を示さなかった可能性が考えられる。今後も調査を継続し樹冠の拡大と直径成長量の関係について検討を進めることとする。

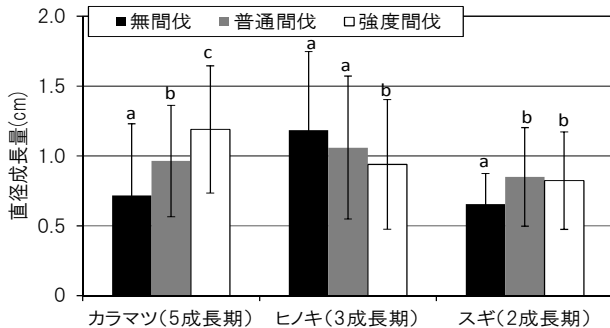


図-2-6 各試験地における間伐後の直径成長量
 ※エラーバーは標準偏差を示す
 ※異なる符号は同一樹種内で有意差があることを示す
 (一元配置の分散分析, Tukey-Kramerの多重比較検定, $P < 0.05$)

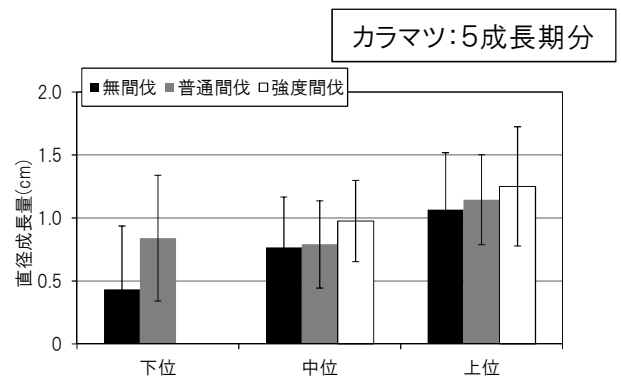


図-2-7 13 齢級カラマツ林における間伐後の直径成長量
 (各等級内における有意差なし)

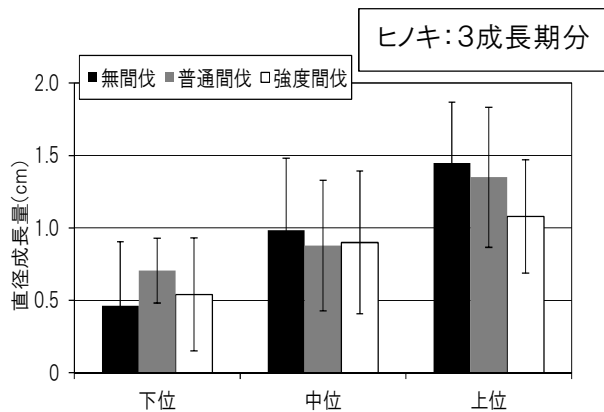


図-2-8 13 齢級ヒノキ林における間伐後の直径成長量
 (各等級内における有意差なし)

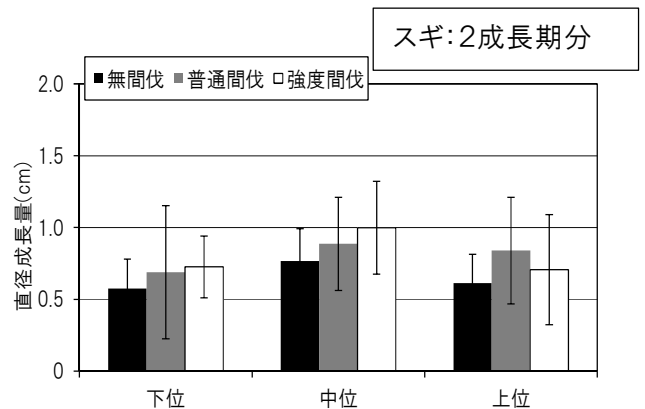


図-2-9 14 齢級スギ林における間伐後の直径成長量
 (各等級内における有意差なし)

3 複層林の上木伐採にともなう下木損傷の軽減法の検討

3.1 研究の目的

複層林は、持続可能な森林経営の模範として取り沙汰され、1980年代を中心として全国的に造成が進んだ。しかし現在、それらの複層林は上木の樹冠が閉鎖している林分や、下木の梢端が上木の枝に遮られている林分が多くを占め、このまま放置すれば下木の成長が抑制されるだけでなく形質の悪化や被圧による枯死を招くことが懸念されている。一方で、この状況を解消するために上木を伐採するとしても、伐倒・集材を行う際に下木を損傷する恐れがあるため、上木の伐採は進んでいない。こうした課題を解決するため、当センターでは複層林における上木伐採時の下木損傷の実態把握（近藤ら 2002, 近藤 2005, 近藤ら 2005a, 近藤ら 2005b）を進めてきた。さらに、下木損傷の軽減法として、上木の列状伐採や最大傾斜方向への伐倒、斜面上方への伐倒、伐倒前の枝打ち等の検討を進め、下木の損傷率を従来の伐採方法によった場合の39%から、20%へ軽減する手法が開発された（近藤ら 2006, 近藤ら 2007）。本研究では、上木伐採時の下木損傷をさらに軽減させるため、近年推進されている高密度路網開設に着目し、作業道からのプロセッサ等による伐倒木直取りを行う場合の作業方法の改善を検討した。

3.2 調査方法

3.2.1 高密度路網開設による損傷軽減効果

調査地は、長野県佐久市のカラマツ・ヒノキ点状複層林である。この複層林では、上木間伐作業に先立ち、林内走行車両が通行するための作業道が開設されたが、その一部の、三方を作業道に囲まれた0.13haの区域を調査地とした（図-3-1）。この調査地は、斜面上下の路網間隔が約25mで、上木のカラマツを上下どちらの方向に伐倒してもプロセッサが直接掴むことが可能であり、極めて路網密度が高い林分であった。2011年の調査時において、上木のカラマツは林齢65年生、成立本数300本/ha、平均樹高24m、平均胸高直径32cm、下木のヒノキは林齢25年生、成立本数1500本/ha、平均樹高5m、平均胸高直径6cmであった。

上木カラマツの伐倒作業にはチェーンソーを使

用し、間伐率は本数で48%、材積で44%となった。伐倒方向は、作業道上に伐倒木の樹冠を着地させることを最優先して決定し、山側方向に伐倒を行う際にはトラクタのウィンチを用いて正確に伐倒方向を誘導した。木寄せ及び造材作業はプロセッサにより行ったが、全木での木寄せ作業は下木損傷を増加させる懸念があるため、木寄せ前にチェーンソーにより枝払いを行った。下木の損傷状況調査は、倒伏、幹折れ、傾斜、梢端折れ、樹皮剥離、枝折れに区分し、伐倒前、伐倒後及び造材後の3回に渡って行った。

3.2.2 作業道における伐倒木非転回造材による損傷軽減効果

プロセッサ作業を行うにあたっては、通常、伐倒木を木寄せする際に転回し、作業道の延長方向に平行に配置してから造材作業を行う。しかし、3.2.1の佐久市での調査では、伐倒木の転回時に下木に損傷を与えることが見受けられたことから、伐倒木を転回せずに造材を行った場合の下木損傷状況を調査した。

調査地は、東御市のカラマツ・ヒノキ点状複層林である。この複層林では、下木（ヒノキ）の成長促進を目的として、上木（カラマツ）の皆伐作業が行われた。調査地は、作業に先立って開設された作業道が斜面上部及び中央部を横断する0.2haの区域とした。2013年2月の調査時点における上木のカラマツは58年生・成立本数130本/ha・平均樹高24m、下木のヒノキは20年生・成立本数590本/ha・平均樹高約8mであった。上木の伐倒はチェーンソーにより行い、伐倒木の滑落時及び木寄せ時の下木損傷を最小限にするため、トラクタのウィンチを使用して、近隣の下木を避けつつ極力山側の最大傾斜方向へ伐倒方向を誘導した。また、プロセッサ造材時に下木損傷を発生させる恐れのある枝については、事前にチェーンソーにより枝払い作業を行った。造材作業は、作業道際の下木損傷を抑制するため、伐倒木を最大傾斜方向に保ったままプロセッサにより行った。下木の損傷状況は、倒伏、幹折れ、傾斜、梢端折れ、幹剥皮、枝折れに区分し、伐倒前、伐倒後及び木寄せ・造材後の3回にわたって調査した。また、本作業の労働生産性を評価するため、各作業

工期のビデオ撮影を行い、時間解析により生産性を算出した。

3.3 結果と考察

3.3.1 高密度路網開設による損傷軽減効果

樹冠を作業道上に着地させるように伐倒を行った結果、伐倒木 19 本の樹冠面積合計のうち 43% は作業道上に、42% は林外に入り、調査地内（林内）に入った樹冠の面積は 15% にとどまった（図-3-1, 3-2）。その結果、調査地における上木伐出作業にともなう下木の損傷率（損傷木の本数割合）は約 20% となり（図-3-3）、ほぼ同じ地形及び立木密度で、平均木寄せ距離約 40m の条件下で下木損傷率が 39% であった結果（近藤ら 2005b）と比較して、損傷率は半分程度に抑えられた。これは、伐倒木の樹冠の大部分を作業道上または林外に着

地させたことにより、伐倒木の下木への接触が少なかったことに加え、木寄せ距離がほぼゼロになり木寄せ時の損傷が大きく減少したためと考えられる。しかし、損傷原因となった作業の内訳は、伐倒が 3 割、木寄せ及び造材が 6 割、両作業重複が 1 割で、木寄せ及び造材時により多くの損傷が発生していた（図-3-3）。また、損傷木は作業道に近い箇所に位置しているものが多い傾向がみられ（図-3-4）、I δ 指数（Morisita1959）を用いて損傷木の分布傾向を見ると、L 字型の集中分布を示していた（図-3-5）。すなわち、被害木は作業道付近に集中分布しており、全幹材をプロセッサにより作業道上へ移動及び転回した際に、路際における被害が多発したものと推察された。したがって、作業道における木寄せ及び造材の手法を再検討する必要があると考えられた。

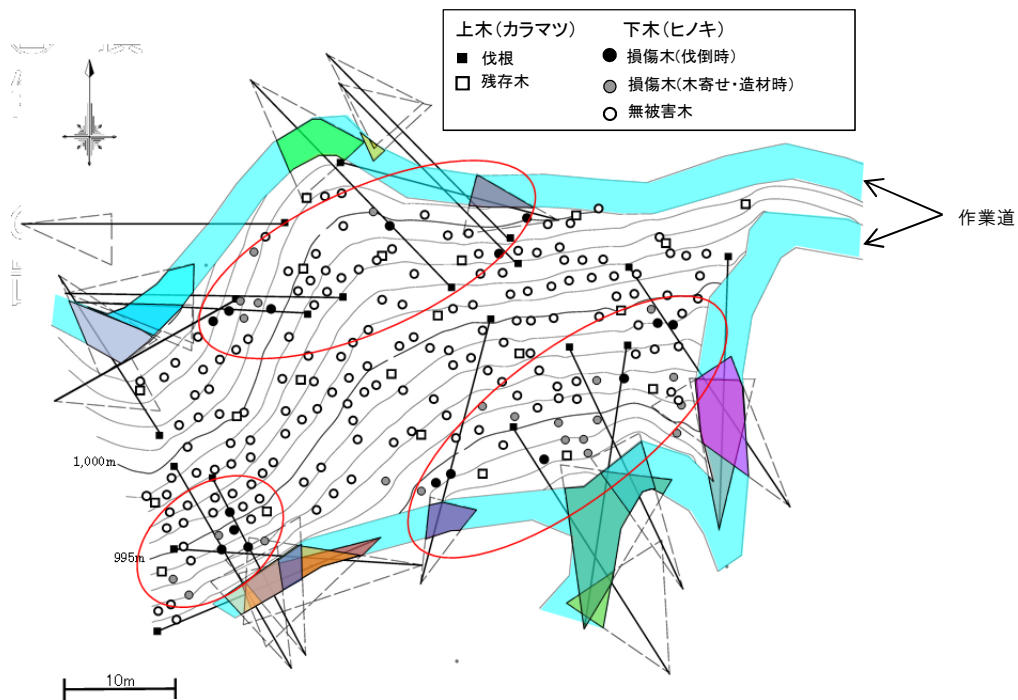


図-3-1 上木の伐倒状況と下木損傷位置

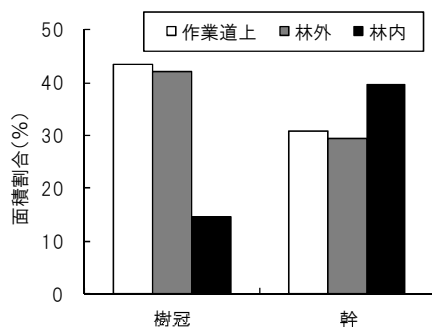


図-3-2 伐倒木の樹冠及び幹の着地位置

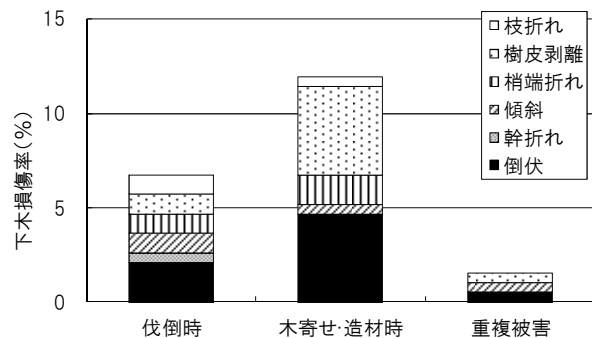


図-3-3 下木損傷の被害区分と損傷率

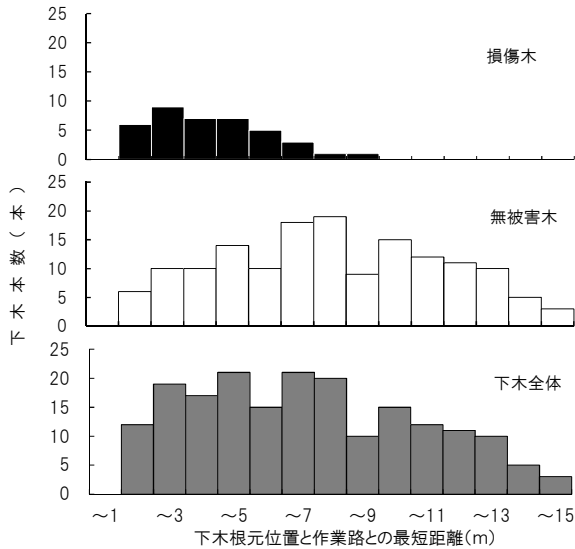


図-3-4 作業道からの距離階級ごとの下木本数分布

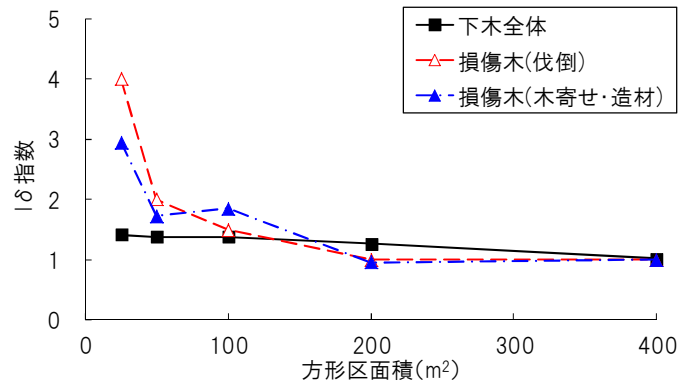


図-3-5 Iδ 指数による下木の分布特性

3.3.2 作業道における伐倒木非転回造材による損傷軽減効果

上木伐出作業後の下木損傷率（損傷木の本数割合）は、伐倒時約5%、造材時約4%、計約9%であった（図-3-6）。前述の佐久市における調査では、伐倒木の樹冠を極力作業道に着地させる伐倒方法を採用した結果、下木損傷率は路網開設を行わない場合（近藤ら 2005b）の39%と比較して1/2程度となる約20%であったのに対して、今回の調査では、下木密度がこれまでの調査地と比較して低かったものの、下木損傷率はさらに減少し2011年の半分程度となった。損傷軽減の要因は、伐倒時に①山側伐倒を行うことで樹冠着地時の衝撃が小さかったこと、②最大傾斜方向への伐倒であるため伐倒木が滑落した場合でも下木への接触が抑制されたこと、などに加えて、木寄せ・造材時に③伐倒木を造材前に作業道上で転回させず最大傾斜方向に保持して造材を行ったことにより路際の損傷が減少した（図-3-7）こと、等が考えられる。なお、今回の結果を過去に行われた点状複層林における上木の点状間伐時の下木損傷率と比較すると、今回の結果はこれまでで最も低い値となった（図-3-8）。

また、工期ごとの生産性をみると、伐倒の労働生産性 P_{ch} が $22.2\text{m}^3/\text{人日}$ で、一般的な伐倒工期の生産性とされる $18\text{m}^3/\text{人日}$ （井上 2001）に比べて高かった。トラクタのウィンチを使用して伐倒方

向を山側に誘導したことにより生産性が落ちたことが想定されるが、平均単木材積が 1.12m^3 と大きかったことから、効率の低下を補う結果になったと考えられる。プロセッサによる木寄せ及び造材は、すべての伐倒木においてその一部が作業道に着地したため、木寄せの工期がほとんど生じず、造材のみの作業となった。造材の労働生産性 P_p は $58.7\text{m}^3/\text{人日}$ で標準的な値であった。今回のように単木材積が高ければ本来はより高い生産性が期待できるが、伐倒木が山側に着地したままの向きで枝払い・造材を行ったことが、効率を低下させたと考えられる。フォワーダによる集搬は、土場までの距離が片道730mで、労働生産性 P_f は $40.6\text{m}^3/\text{人日}$ で標準的な値であった。

以上の結果から、システム労働生産性 P^A ($\text{m}^3/\text{人日}$) を以下の式により求めた。

$$P^A = \frac{1}{\frac{1}{P_{ch}} + \frac{1}{P_p} + \frac{1}{P_f}}$$

P^A は $11.5\text{m}^3/\text{人日}$ であり、従来の高密度路網開設による間伐作業（日本森林技術協会 2010）と同等程度のシステム労働生産性が得られた。

今回実施した上木の伐出作業は、下木の損傷回避を優先した作業方法であり、①高密度に路網を配置すること、②山側へ正確に伐倒すること、③伐倒木を作業道上で転回せずにそのまま造材する

こと、の3点を条件として行ったものである。その結果、下木の損傷を9%に低減でき、システム労働生産性も11.5m³/人日を確保できたことから、

これらの作業方法は複層林における上木伐採を行うにあたり現場で実践可能な実用的技術であると考えられた。

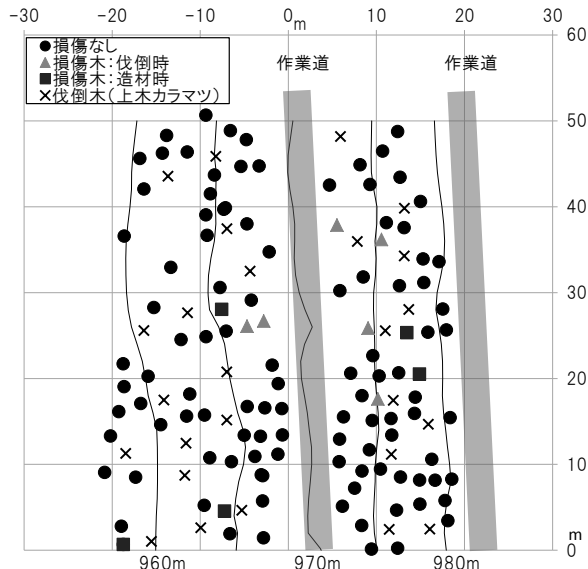


図-3-6 伐倒木非転回造材試験地における下木損傷状況

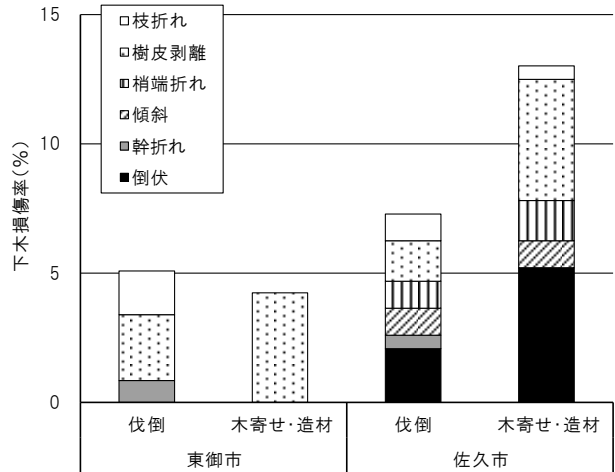


図-3-7 下木損傷率(工期, 損傷種別内訳)の比較

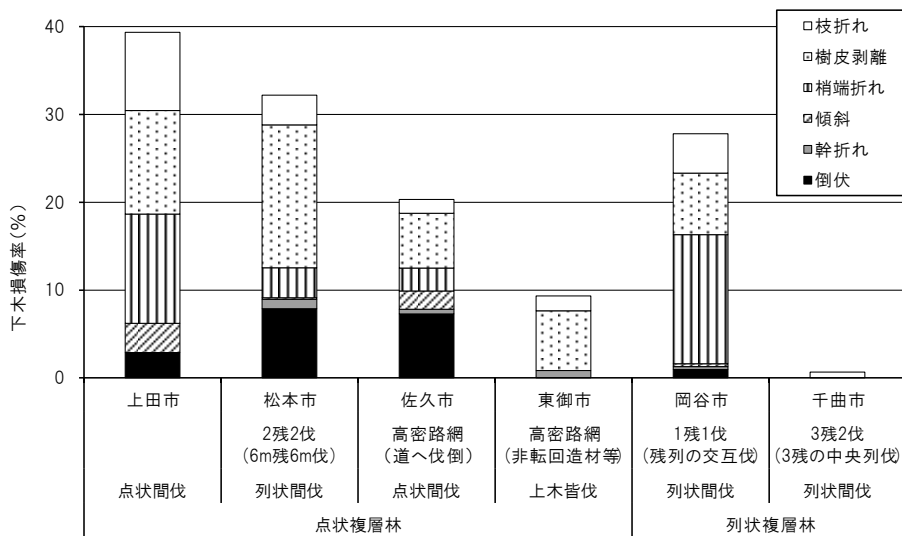


図-3-8 下木損傷率(複層林の種類, 施業種別)の比較

表-3-1 伐倒木非転回造材試験地における伐出作業の労働生産性

作業種	セット人員 (人)	サイクル数	サイクルタイム (人・分)	取扱材積 (m ³)	労働生産性 (m ³ /人日)
伐倒 (チェーンソー)	2	26	9.1	29.2	22.2
木寄せ・造材 (プロセッサ)	1	26	6.9	29.2	58.7
集搬 (フォワーダ)	1	5	8.8	25.9	40.6
システム労働生産性(m ³ /人日) :					11.5

4 過去に列状間伐を実施した林分における搬出間伐方法の検討

4.1 研究の目的

過去に列状間伐を実施した林分では、3残1伐であれば中央列を伐採する方法で作業が進められている。一方、2残1伐実施林分では、立木配置を均一にするために点状間伐を行うことが求められるが、実践例はほとんどない。この場合、過去の伐採列を利用して容易に搬出できるとの考えもあるが、伐倒木が伐採列から逸れてしまい伐出しにくいという意見もある。そのため本研究では、過去に2残1伐列状間伐が行われた林分において点状間伐を行い、伐倒木が想定した方向に着地するのか、またそれらを集材する際の残存木への影響を明らかにするため、調査を行った。

4.2 調査方法

調査地は、伊那市高遠の芝平県行造林地内の64年生カラマツ人工林である。この林分では、平成

19年度に2残1伐の列状間伐(4m伐採・8m残存)が行われており、今回はその伐採列を利用して搬出することを想定した点状間伐が行われた。調査林分は、斜面上部と下部を林道に挟まれた約0.2haの区域で、成立本数450本/ha、平均胸高直径25cm、平均樹高18mであった。間伐の作業システムは、伐倒はチェーンソー、木寄せはプロセッサに搭載された単胴ウィンチ、造材はプロセッサ、集搬はフォワーダにより行った。伐倒作業は、過去の伐採列に向かって斜面下方に伐倒し、木寄せ作業も過去の伐採列を利用して原則として全て上げ荷により行った。残存木の損傷状況は伐倒前・伐倒後及び木寄せ作業後の3回に渡って確認した。また、各作業工程はビデオ撮影を行い、時間解析により生産性を算出した。

4.3 結果と考察

試験区域内の90本のカラマツ立木のうち伐倒対象としたのは22本で、それらのうち18本は過

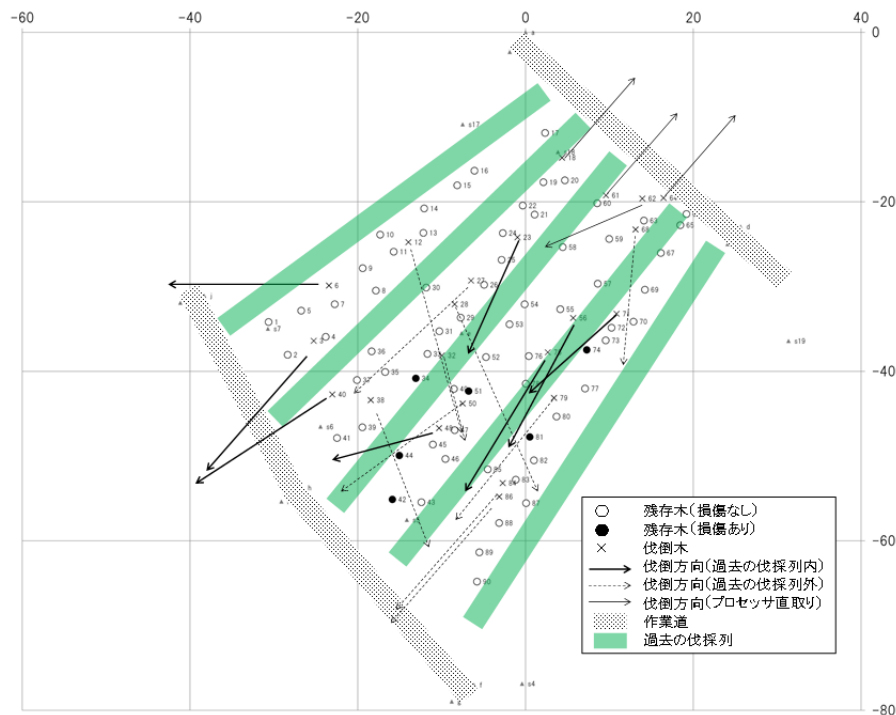


図-4-1 伐倒木と残存木の配置及び伐倒方向

表-4-1 各作業工程の生産性及び労働生産性

作業工程	セット人員 (人)	生産性 (m ³ /時)	生産材積 (m ³)	労働生産性 (m ³ /人日)
伐倒	1	7.5	9.2	44.9
木寄せ	2	6.0	9.2	18.1
造材	1	12.4	6.3	74.6
集搬	1	6.7	6.3	40.4

システム労働生産性：8.6m³/人日

去の伐採列に樹冠を着地させるように伐倒を行った(図-4-1)。その結果、伐採列内に伐倒できたものは8本で、これらを上部の林道へ木寄せする際には、残存木の損傷は発生しなかった。また、伐倒木のうち10本は、掛り木が発生するなどの原因により過去の伐採列からそれた方向に着地し、木寄せ時に6本の残存木(残存木総数の9%に相当)に損傷を与えた。

各作業工程のシステム労働生産性 P は $8.6\text{m}^3/\text{人日}$ となり(表-4-1)、既往の2残1伐列状間伐の労働生産性の $3\text{m}^3/\text{人日}$ (木幡 2001) より高い値を示した。高い生産性が確保できたのは、当調査地の伐倒木の単木材積が $0.4\text{m}^3/\text{本}$ で既往の結果の3倍以上であったことに加え、過去の伐採列を利用して比較的円滑に集材ができたことに起因すると考えられる。

これらの結果から、過去の伐採列内に確実に伐倒方向を誘導することができれば、残存木損傷を減少させられるとともに、木寄せ作業が効率化し労働生産性をより一層向上させられる可能性があると考えられた。そのためには、牽引機器やクサビ等の使用等による伐倒方向誘導の有効性の評価を行う必要がある。

5 先進的車両系林業機械による間伐作業が残存木等を与える影響

5.1 研究の目的

ハーベスタとフォワーダの林内走行による CTL システム (Cut to Length ; 短幹集材) は、架線系林業機械を使用する場合に比べて高い生産性を上げることが期待され、長野森林組合では北欧製のホイールタイプ小型ハーベスタとフォワーダを導入した。従来型のクローラタイプのハーベスタ・フォワーダシステムによる伐出作業は、架線系集材システムに比べて残存木に対する損傷が多いこと(井上ら 1998) や、森林土壌の攪乱が大きいこと(近藤ら 2003) が報告されていることから、本研究では、ホイールタイプのハーベスタとフォワーダを使用したシステムが、間伐作業を行う際に残存木及び林地に与える影響を調査した。

5.2 調査方法

5.2.1 北欧製ハーベスタとフォワーダによる間伐作業後の残存木損傷と林地攪乱

調査地は、長野県上水内郡信濃町の個人所有のスギ人工林 0.33ha で、間伐前の成立本数は 950本/ha であった。この林分を2分割して点状及び列状により間伐を行った。伐採率は、どちらも本



写真-5-1 SAMPO SR1046Pro(ハーベスタ)



写真-5-2 VIMEK 608(フォワーダ)

表-5-1 北欧製ハーベスタ及びフォワーダの諸元

	ハーベスタ	フォワーダ
型 式	SAMPO SR1046Pro	VIMEK 608
生産国	フィンランド	スウェーデン
全 長	8,700mm	6,200mm
全 幅	2,300mm	1,900mm
全 高	3,100mm	2,600mm
重 量	8,500kg	3,500kg
エンジン出力	73.5kw/2,200rpm	18kw/3,600rpm
作業半径(リーチ)	7.1m	5.2m
その他	ハーベスタヘッド:KETO 100S	最大積載量:4,500kg

数で約 30%とした。伐木造材にはフィンランド SAMPO ROSENLEW 社製のホイール式ハーベスタ SR1046Pro (写真-5-1) を使用し、集材作業にはスウェーデン VIMEK 社製 VIMEK608 (写真-5-2) を使用した(表-5-1)。点状間伐及び列状間伐について、ハーベスタ作業終了後及びフォワーダ作業終了後に、残存木の損傷を調査した。調査項目は、①損傷部位(幹、根張り、根)、②原因(機械の接触、材の接触)とした。また、フォワーダ作業終了後、森林土壌の攪乱状況を調査した。調査項目は、林内走行路におけるハーベスタ及びフォワーダの①走行軌跡、②走行回数、③轍の幅・長さ・深さとした。

5.2.2 北欧製ハーベスタ・フォワーダシステム及び従来型作業システムの列状間伐作業における残存木損傷

調査地は、長野県上水内郡信濃町の黒姫山国有林内の、上下を林道と新設の作業道で挟まれたス

ギ人工林(0.5ha)で、平均斜度は約 15°、間伐前のスギの成立本数は 1400 本/ha であった。最大傾斜方向に 9 mおきに伐採列中心線を 7 本設定した(L1~L7)。伐採は、各中心線の両側 1.5mずつ(3 m幅)において行うこととし、残存列幅は各 6 mとした(図-5-4)。これらの 7 本の列の中で、4 種類の作業システムによる伐出作業を行い(表-5-2)、伐出作業終了後、各列における残存木の損傷状況を調査し、損傷率を比較した。

5.3 結果及び考察

5.3.1 北欧製ハーベスタとフォワーダによる間伐作業後の残存木損傷と林地攪乱

ハーベスタ作業による残存木の損傷は、点状間伐で 6.9%、列状間伐で 11.9%発生した(図-5-1)。列状間伐では、車体の接触は点状に比べて 1/4 であるのに対して、材の接触は 3 倍に及んでいた。SAMPO のハーベスタはアーティキュレート構造を採用し小回りが効くが、点状間伐では複雑な操舵

表-5-2 列状間伐作業における残存木損傷調査の試験区分

作業列名	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7
機械分類	①先進的機械 車両系 (ホイール式)	①先進的機械 車両系 (ホイール式)	②従来型機械 車両系 (クローラ式)	④従来型機械	②従来型機械 車両系 (クローラ式)	③従来型機械 架線系	③従来型機械 架線系
作業システム	伐倒 ハーベスタ (SAMPO SR1046Pro + KETO100S)	伐倒 ハーベスタ (SAMPO SR1046Pro + KETO100S)	伐倒 ハーベスタ (住友SH75 +KESLA20SH)	チェンソー プロセッサ (CAT314D + KETO150P)	伐倒 ハーベスタ (住友SH75 +KESLA20SH)	チェンソー プロセッサ (CAT314D + KETO150P)	チェンソー プロセッサ (CAT314D + KETO150P)
木寄せ	フォワーダ (VIMEK608)	フォワーダ (VIMEK608)	フォワーダ (諸岡MST- 800VDL)	単脚ウインチ (南星PWB-02, プロセッサに装着)	フォワーダ (諸岡MST- 800VDL)	スイングヤード (CAT312C)	スイングヤード (CAT312C)
上げ荷・ 下げ荷区分	↑ 上げ荷 (上り)	↓ 下げ荷 (下り)	↓ 下げ荷 (下り)	↑ 上げ荷 ↓ 下げ荷	↑ 上げ荷 (上り)	↓ 下げ荷	↑ 上げ荷

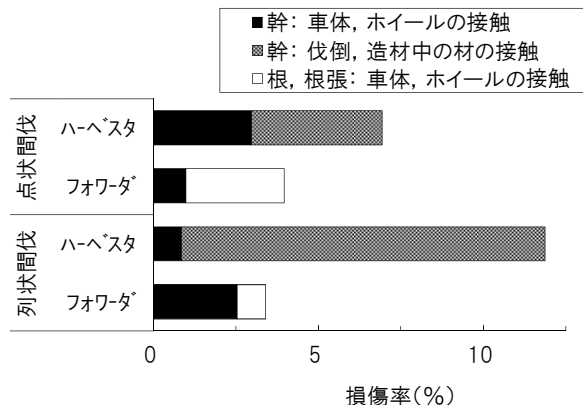


図-5-1 ハーベスタ・フォワーダ作業時の残存木損傷率

のため車体の接触が増加し、列状間伐では操舵が単純であるため車体の立木接触が少なくなったと考えられた。材の接触による損傷は列状間伐で多かった。架線系集材材での列状間伐では、伐倒により生じた空間へ順に伐倒して行くのに対して、ハーベスタによるCTL作業ではあらかじめ定められた進行方向に伐倒しながら造材を行う必要があるため、材の接触が増加したものと推察される。

フォワーダ作業による残存木損傷はハーベスタに比べて少なく、点状間伐で4.0%、列状間伐で3.4%発生した。根及び根張りの剥皮が集材路上でみられ、特に点状間伐と列状間伐の共通の集材路上で目立った(図-5-2)。これらの箇所では轍が深く形成されており、そのほとんどがフォワーダの走行回数が10回以上であることから、走行回数が根及び根張りの損傷に影響を及ぼしていると考えられる。これらのことから、CTLシステムによる伐出作業では、走行路が直線的になる列状間伐は、残存木の車体接触は減らせるが、特に伐倒や造材作業中の残存木への材接触に留意することや、フォワーダの走行回数を減少させること、枝条による地床保護対策が必要であると考えられた。

次に、土壌の攪乱強度を0～3にレベル分けし、各間伐区内における攪乱箇所の面積割合と集材路区間割合(図-5-3)に示した。なお、点状間伐と列状間伐の共通の集材路は攪乱の評価に含めていない。A₀層が消失し深さ15cm以上の沈下が認められる攪乱強度2以上の箇所の面積割合は、点状間伐が試験区内の0.1%にすぎなかったが、列状間伐では2.8%に及んだ。また、林内集材路における攪乱強度の区間割合は、点状間伐では攪乱強度2以上の区間が3.1%であったが、列状間伐では16.1%となった。フォワーダの走行軌跡は、列状間伐で集中し、繰り返し走行が行われたことから、集材路が掘り下げられたと考えられた。

北欧製ハーベスタ及びフォワーダを利用したCTLシステムによる間伐作業では、列状間伐で造材作業中の幹損傷が多く、フォワーダの繰り返し走行によって残存木の根の損傷や重度の土壌攪乱が引き起こされた。これらの問題点を改善するためには、フォワーダの走行経路を分散させることや、枝条の敷きならし等による林地の保全措置について検討する必要がある。

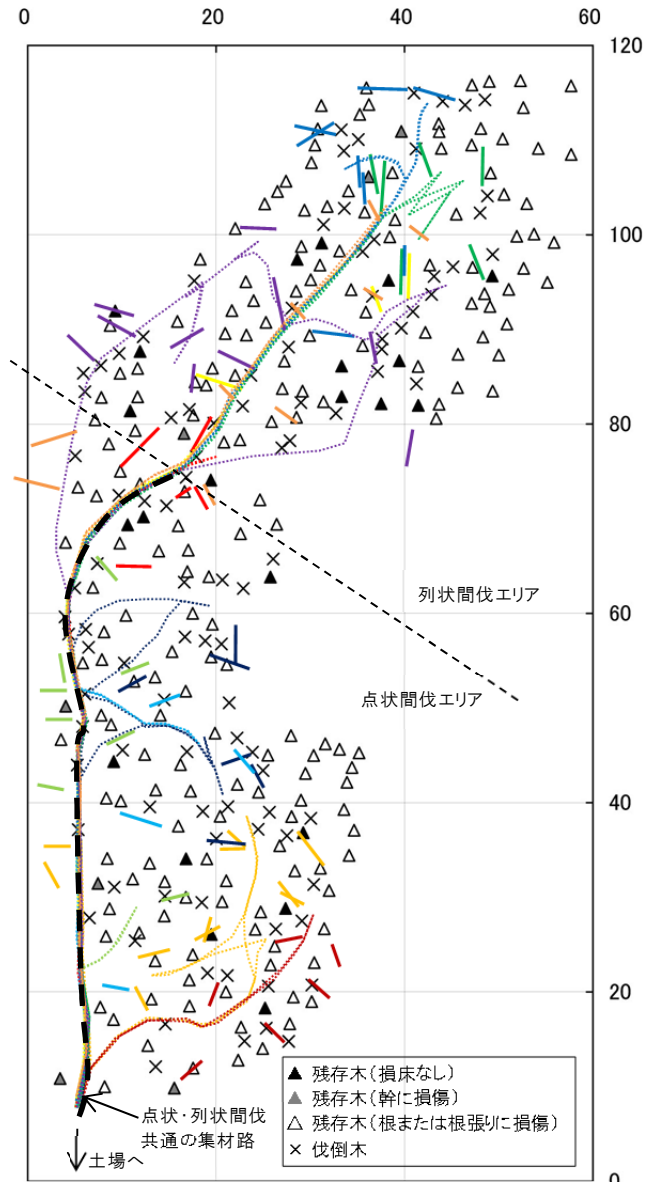


図-5-2 フォワーダの走行軌跡と損傷木の位置

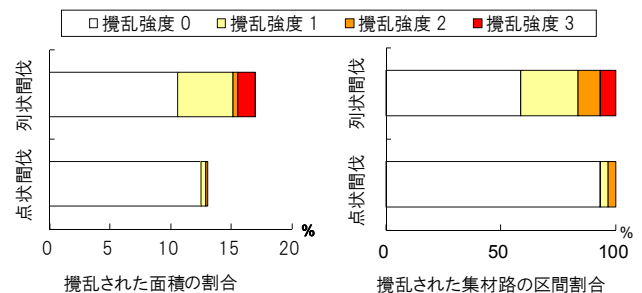


図-5-3 ハーベスタ・フォワーダ作業後の林地攪乱状況

攪乱強度0: 沈下なし
 攪乱強度1: 深さ10cm以下、A₀層が覆われている
 攪乱強度2: 深さ15cm以下、A₀層が消失しているがガリは認められない
 攪乱強度3: 深さ15cm以上、A₀層が消失してガリが認められる

5.3.2 北欧製ハーベスタ・フォワーダシステム及び従来型作業システムの列状間伐作業における残存木損傷

残存木の損傷は、幹・根張りにおける樹皮剥離

のみで、倒伏等の重篤な損傷はなかった。残存木損傷率は、架線系作業システムが1.6~2.4%、車両系作業システムが3.2~8.3%で、架線系の方が低い傾向がみられた。車両系作業システムでは上り作業の方が下り作業より損傷率が高く、架線系作業システムでは下げ荷作業の方が上げ荷作業より損傷率が高い傾向がみられた(図-5-4、表-5-2)。車両系の中で先進的機械と従来型機械の損傷率を比較すると、上げ荷、下げ荷とも従来型の方がやや低い値を示していた。ただし、各列の残存木損傷率を χ^2 独立性の検定により評価したところ、作業システム及び上げ荷・下げ荷のすべての組み合わせにおいて、有意差は認められなかった($P>0.05$)。

また、ハーベスタの傾斜地での走行性を比較す

ると、SAMPO SR1046pro は約23°の上り勾配で登坂限界となった一方、従来型の住友SH75ハーベスタは斜面を完登したものの、最大斜度は20°であったため、両者の差は明確ではなかった。なお、本試験での各システムの労働生産性は、北欧製ハーベスタ・フォワーダシステムが上り・下りとも他のシステムに比べて最も高い値を示している(中澤ら2014)。

以上の結果から、北欧製のホイール式ハーベスタ・フォワーダシステムは、残存木損傷の面で従来型と差はないことが確認された。本作業システムは、従来型に比べてはるかに高い20m³/人日というシステム生産性が期待できる(中澤ら2013)ことから、CTL作業システムの展開は長野県の林業振興に極めて有効と考えられる。

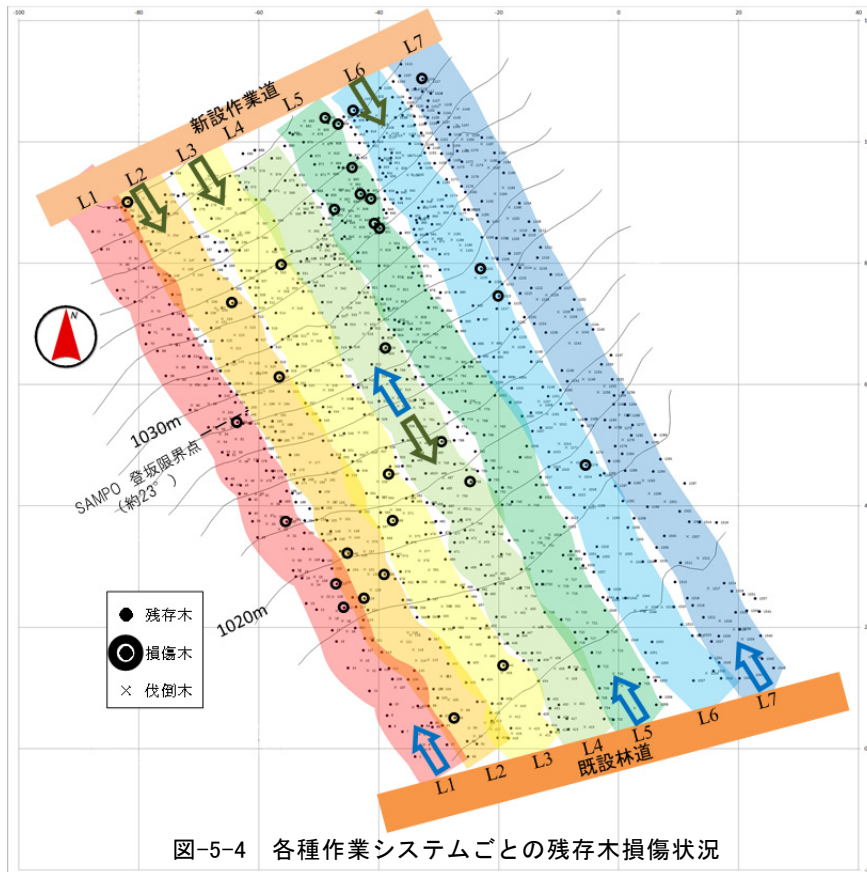


図-5-4 各種作業システムごとの残存木損傷状況

表-5-2 各種作業システムごとの残存木損傷率

作業列名	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7
機械分類	①先進的機械 車両系 (ホイール式)	①先進的機械 車両系 (ホイール式)	②従来型機械 車両系 (クローラ式)	④従来型機械	②従来型機械 車両系 (クローラ式)	③従来型機械 架線系	③従来型機械 架線系
集材方向	上げ荷	下げ荷	下げ荷	上半:上げ荷 下半:下げ荷	上げ荷	下げ荷	上げ荷
残存木 本数	48	116	124	126	124	128	63
損傷木 本数	4	7	4	3	9	3	1
損傷率 %	8.3	6.0	3.2	2.4	7.3	2.3	1.6

6 結言

長野県の人工林では、近い将来 13 齢級以上の高齢林が大半を占める時代が到来する。これらの森林資源を有効に利用するためには、小面積皆伐により積極的に更新を図る林分と、間伐を進めながら大径材を生産しつつ公益的機能をより向上させる林分に区分し、計画的な伐採を進める必要がある。そのためには、長伐期施業のメリットとして第一に挙げられている、材の大径化が実現できるのか検証していかなくてはならない。本研究では、高齢級化しつつある林分を間伐し、その後の成長量の推移を調査したが、これまでの成長経過は樹冠長や樹冠幅などの要素で説明できたものの、今後の成長量を予測するだけの要因を特定することは困難であった。間伐による直径成長効果が現れるにはしばらく時間を要することが考えられ、今後も継続的な調査を行っていくこととする。

また、これらの高齢化しつつある人工林を次世代に受け継いでいくためには、健全な状態を保つ必要がある。そのためには、立木に極力傷を付けないことが肝要であり、本研究では、複層林の上木伐採、列状間伐後の搬出間伐（点状）、先進的林业機械の利用等、いくつかの損傷防止対策や損傷発生パターン把握を行った。立木の損傷は、年数を経過するにつれて材の変色や腐朽が拡大し、収穫する頃には幹材積の大半が利用できない状況になることもあり、将来の収益を大きく左右することになる。高齢級化する人工林を管理していくうえでは、「立木に傷を付けない施業方法」をさらに追求していくことが必要であり、当センターでも重点的に取り組んでいくこととしたい。

7 謝辞

本研究の実施に当たっては、試験地を設定する際に、候補地の情報提供をはじめ県営林・個人有林の試験地としてのご提供、林分の事前調査、測量、森林所有者との調整など多くの面で山形村・阿智村・根羽村の各役場の林務担当係の皆様、長野県の現地機関である佐久・上小・上伊那・下伊那・松本・長野の各地方事務所林務課の普及係・林産係・普及林産係の皆様から御支援をいただきました。また、試験地設定時の毎木調査や伐採作業等については、松本広域森林組合、飯伊森林組

合、根羽村森林組合、須江林産、信州上小森林組合、長野森林組合、高遠興産の皆様にご協力をいただきました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

引用文献

- 古川仁 (2002) 高齢ヒノキの樹高成長. 中森研 50 : 17-18.
- 井上源基・竹内郁雄・大川畑修・豊川勝生・広部伸二 (1998) 高性能林业機械作業システムの構築. 森林総研平成 10 年度研究成果選集:12-13.
- 井上源基 (2001) 伐出コストを計算しよう. (機械化のマネジメント. 全普協編, 239pp, 全普協, 東京). 135-155.
- 片倉正行・山内仁人・古川仁 (2005) ヒノキおよびカラマツ人工林の長伐期施業に関する研究—長期育成循環施業に対応する森林管理技術の開発—. 長野県林総セ研報 19 : 1-16.
- 木幡靖夫 (2001) 高性能林业機械による列状間伐作業の生産性と残存木の成長. 光珠内季報 124 : 10-13
- 近藤道治・青柳智司 (2002) 列状複層林の上木伐採にともない発生する残存木の損傷. 中森研 50 : 199-200.
- 近藤道治・宮崎隆幸・今井信 (2003) 機械化作業システムに適合した森林施業技術の開発—機械化作業が森林にあたる影響—. 長野県林総セ研報 17 : 1-20.
- 近藤道治・宮崎隆幸 (2003) 人工損傷から発生したカラマツ立木の変色. 中森研 51 : 213-214.
- 近藤道治 (2005) 列状複層林の上木伐採にともなう下木の損傷 (II) —アカマツ—ヒノキ複層林の事例—. 日林学術講演 116.
- 近藤道治・今井信 (2005a) 列状複層林の上木伐採にともなう下木の損傷. 森利誌 19 (4) : 331-333.
- 近藤道治・今井信 (2005b) 複層林の上木伐採にともなう残存木の損傷. 森利誌 20 (3) : 171-182.
- 近藤道治・今井信 (2006) 複層林の上木伐採にともなう下木損傷軽減法の検討. —上木の伐採前枝打ち—. 森利誌 20 (4) : 277-280.
- 近藤道治・今井信 (2007a) 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—上木の列

- 状伐採と点状伐採の比較－. 森利誌 22(1):5-14.
- 近藤道治・今井信 (2007b) 長期育成循環施業等に対応した高性能林業機械作業システムの開発 (Ⅱ)－機械化作業が森林に与える影響－. 長野県林総セ研報 22:11-32.
- Morisita, M. (1959) Measuring of the dispersion of individuals and analysis of the distributional patterns. Mem. Fac. Sci. Kyushu Univ., ser. E, 2: 215-235.
- 長野県林務部 (1984a) 長野県民有林カラマツ スギ表系 スギ裏系人工林林分材積表 人工林収穫予想表. 78pp.
- 長野県林務部 (1984b) 長野県民有林ヒノキ アカマツ人工林林分材積表 人工林収穫予想表. 66pp.
- 長野県林務部 (1991) 長野県民有林カラマツ人工林・長伐期施業の手引き. 115pp.
- 長野県林務部 (2014) 長野県民有林の現況. 195pp.
- 中澤昌彦・吉田智佳史・佐々木達也・上村巧・鈴木秀典・山口浩和・大矢信次郎・戸田堅一郎・高野毅・岩岡正博 (2014) 小型ホイール式ハーベスタ・フォワーダによる CTL システムと従来型システムの間伐生産性. 日林学術講演 125:134.
- 中澤昌彦・吉田智佳史・佐々木達也・上村巧・鈴木秀典・陣川雅樹・近藤道治・大矢信次郎・戸田堅一郎・高野毅 (2013) ホイール式小型ハーベスタとフォワーダを用いた間伐作業システムの開発－点状間伐と列状間伐の生産性－. 森利誌 28 (3): 187-192.
- 日本森林技術協会 (2010) 路網と高性能林業機械を組み合わせた低コスト作業システム導入マニュアル. 246pp
- 大矢信次郎・近藤道治・陣川雅樹・吉田智佳史・佐々木達也・中澤昌彦 (2011) 複層林の上木伐採にともなう下木損傷軽減法の検討－高密度路網開設による損傷軽減効果－. 森利学術講演 18:18.
- Oya, S. ・ Kondo, M. ・ Toda, K. ・ Nakazawa, M. ・ Yoshida, C. ・ Sasaki, T. ・ Uemura, T. ・ Suzuki, H. ・ Jinkawa, M. ・ Takano, T. (2012) The damage to remaining trees and the disturbance of the forest floor after ordinary and line thinning using a small harvester and forwarder in Japan . Proceedings of International Ergonomic Workshop of IUFRO RG3. 03.
- 大矢信次郎・近藤道治・戸田堅一郎・中澤昌彦・吉田智佳史・佐々木達也・鈴木秀典・陣川雅樹・高野毅 (2012) 北欧製ハーベスタとフォワーダによる間伐作業後の残存木損傷と林地攪乱. 森利学術講演 19:28.
- 大矢信次郎・近藤道治・戸田堅一郎・中澤昌彦・吉田智佳史・佐々木達也・上村巧・山口浩和・鈴木秀典・陣川雅樹・高野毅 (2013) 列状間伐作業における残存木損傷－各種作業システムによる比較－. 日林学術講演 124:138.
- 大矢信次郎・近藤道治 (2013) 複層林の上木伐採にともなう下木損傷軽減法の検討－作業道における伐倒木非転回造材による損傷軽減効果－. 森利学術講演 20:22.
- 佐藤重穂・松本剛史・奥田史郎 (2012) 強度間伐を実施したヒノキ林における立枯れ発生と立地条件. 樹木医学研究 16 (1):9-14.
- 上田正文 (2010) ヒノキの取り扱いには注意が必要. 樹木医学研究 14:146-147.
- 山田容三・小谷芙蓉・古橋茂人 (2011) 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－愛知県におけるヒノキ上木 100 年生複層林の調査例－. 日林誌 93 (2): 79-83.
- 横井秀一・大洞智宏・早川幸治 (2011) 岐阜県七宗町の高齢ヒノキ林における林分構造および個体の胸高直径と樹冠構造の関係. 岐阜県森研研報 40:15-19.