

超高密度作業路網を基盤とした 高性能林業機械間伐作業による残存木への損傷

平林慧遠*・澤口勇雄**・立川史郎*

Damage to residual stand due to thinning by high-performance logging machines
on super-high-density forest road network

Eon HIRABAYASHI, Isao SAWAGUCHI and Shiro TATSUKAWA

1. はじめに

拡大造林によって植栽された人工林の多くは間伐を必要としている。また、木材価格の低迷によって林業の採算性が悪化している現状の中で、路網と高性能林業機械を活用した低コストかつ高能率な作業システムに期待が寄せられている(林野庁、2007)。しかし、高能率の反面、作業の過程で発生する残存木への損傷被害(以下、損傷)が問題とされ、被害軽減に向けた研究が必要とされている(岡、1998)。

高性能林業機械を用いた間伐作業による損傷についての研究はいくつかなされている。ハーベスタでは、定性間伐(以下、点状)で由田ら(1991)、岡ら(1992、1998)、4条植栽地の定性間伐で対馬ら(1991)、列状間伐(以下、列状)で湊ら(1991)、岡ら(1992、1998)、澤口ら(2000)が報告している。タワーヤードでは大里ら(1994)、岡ら(2005)がある。岡ら(1992、1998、2005)は、伐採方法を変えることにより損傷率や損傷の位置を比較した。しかし既存の研究では、立木密度、立木幹材積、間伐率、最大木寄距離を類似にし、伐採方法の違いで損傷率を比較した例は見当たらない。また、最近、作業路上での高性能林業機械作業の事例が増え、伐区はもちろん伐区外にも損傷が起きていることが予測される。しかし、伐区外の損傷を定量的に評価した例もない。

Received January 22, 2008

Accepted February 13, 2008

* 岩手大学農学部農林環境科学科森林科学講座

** 岩手大学農学部附属寒冷フィールドサイエンス教育研究センター

本研究では、路網密度250m/haを超える超高密度路網を背景に、立木密度、立木幹材積、間伐率、地形傾斜、最大木寄距離を均一とみなしうる条件で試験することにより、間伐方法（点状、列状）、伐倒・木寄方向の伐採方法の違いが伐区内外の残存木に損傷を与える影響を明らかにした。

II. 試験地概要と調査方法

1. 試験地概要

試験地は岩手大学農学部附属御明神演習林7林班わ2小班44年生のスギ人工林である。試験地の残存木、損傷木、間伐木、路網配置の概要を図1に示す。地形傾斜は7～32度であり、立木密度は点状間伐区が1,498（本/ha）、列状間伐区が1,545（本/ha）で間伐（本数）率は点状が27.0%、列状が26.7%だった（表1）。

平成19年5月～7月に等高線に沿って約50m間隔で平均全幅員約3.5mの作業路が作設された。作業路2路線に囲まれた箇所点状および列状の間伐区を設けた。間伐作業試験（以下、試験）は平成19年10～11月にかけて行われた。作業工程と作業機械を表2に示す。間伐作業は上方伐

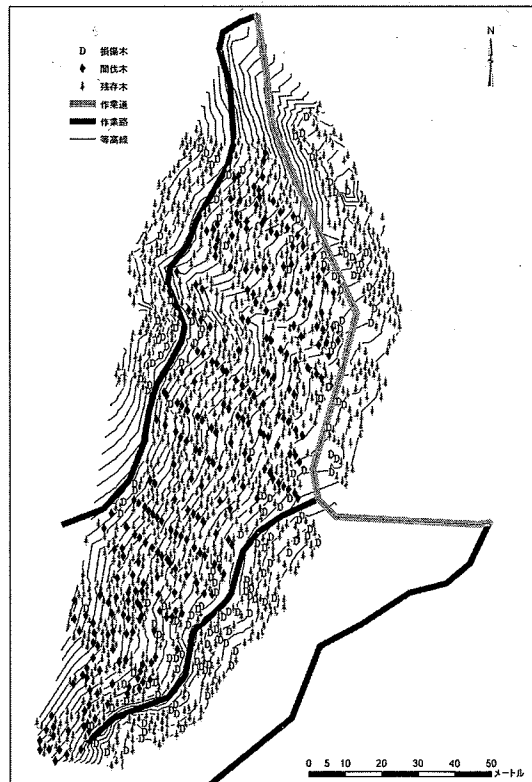


図1 試験地の残存木・損傷木・間伐木の配置図

表1 試験地概要

	点状間伐区	列状間伐区 (1伐3残)
林齢	44	44
面積 (ha)	0.37	0.33
地形傾斜 (度)	10~32	7~32
林分蓄積 (m ³ /ha)	538	632
立木密度 (本/ha)	1,498	1,545
間伐本数 (本)	152	136
間伐材積 (m ³)	45	57
間伐木平均幹材積 (m ³ /本)	0.30	0.42
間伐木平均樹高 (m)	18	19
間伐率 (本数) (%)	27.0	26.7
間伐率 (材積) (%)	23	27
上荷本数 (本)	11	43
下荷本数 (本)	123	73

表2 作業工程と作業機械

工程	機種	ベースマシン	アタッチメント
伐倒	チェーンソー	-	-
木寄	ミニウインチ	(ハーベスタ搭載)	-
造材	ハーベスタ	CAT307B (0.25m ³)	KETO51
積込	ミニグラップル	コマツPC35 (0.11m ³)	イワフジGC-40LJV
運搬	フォワーダ	イワフジU-4S	-
巻立	グラップル	CAT307B (0.25m ³)	イワフジGS65LHV

倒・上荷と下方伐倒・下荷で行った。チェーンソー伐倒を最短距離の作業路方向にすることにより、作業路上のハーベスタヘッドで伐倒木を引き寄せ、伐倒木にヘッドが届かない場合はハーベスタベースマシン搭載の簡易ウインチを用いて全木集材を行った（ハーベスタおよびウインチによる材の引き寄せ作業を以下木寄という）。ハーベスタ造材は伐倒が作業路方向に行われているため、梢端を伐区外に突刺するような作業となる（図2）。その後、送材および枝払いを行い、4mの丸太が採材された。造材丸太はミニグラップルでフォワーダに積載され、土場まで運搬された。ハーベスタのオペレーターは操作歴1年の演習林職員である。

2. 調査方法

試験実行前の平成19年8月に、レーザーコンパスにより立木位置を測量した。胸高直径は直径巻尺、樹高はVertexにより測定し林況を把握した。

試験終了後、伐区内の全残存木および伐区外の作業路端から12mの範囲の全立木を対象に、損傷率、損傷箇所数、損傷形態（樹皮剥離と辺材部損傷）、損傷高（立木の地際から損傷箇所を中心点までの高さ）、損傷箇所における損傷面積を調査した。損傷率と損傷面積は以下の式で算出した。

$$\text{損傷率 (\%)} = (\text{損傷木数} / \text{残存立木数}) \times 100$$

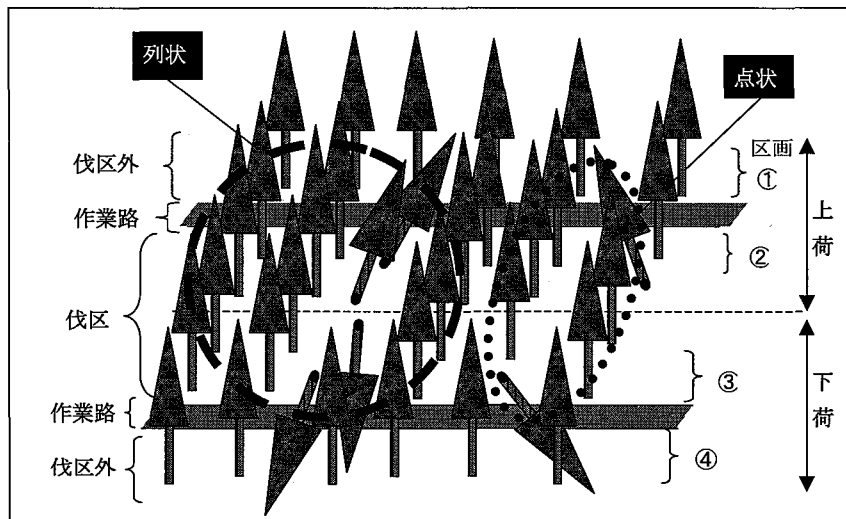


図2 間伐試験地の区画

損傷面積 (cm²) = 損傷箇所平均縦長 (cm) × 損傷箇所平均横長 (cm)

作業路からの距離による損傷率で損傷の水平分布を評価するため、伐区内と伐区外に作業路端から水平距離12mの範囲で、4区画を設定した(図2)。4区画は上方から順に区画①、②、③、④とし、区画②、③は伐区内、区画①、④は伐区外とした。各区画にはArcGISにより作業路端から3m間隔でバッファを与え、それぞれの損傷率を算出した。また、伐採方法と損傷率、損傷高、損傷面積、損傷形態の関係を検討するとともに、伐区内・外における損傷率を比較した。

III. 結果と考察

1. 損傷の水平分布

損傷は全て木寄と造材で発生した。伐区内・外の全損傷木数に占める作業路端から12m以内の損傷木割合は、点状 ($N=84$) 97.6%、列状 ($N=73$) 98.6%で、伐区外は全て12m以内で損傷した(表3)。

表3 損傷木数及び推定損傷率

区分	点状	列状
12m以内の損傷木数割合 (%)	97.6	98.6
全損傷木数 (本)	84	73
推定損傷率 (%)	20.4	19.6
検定統計量Z ₀ (点状・列状)		0.286
伐区内の残存立木数 (本)	412	373

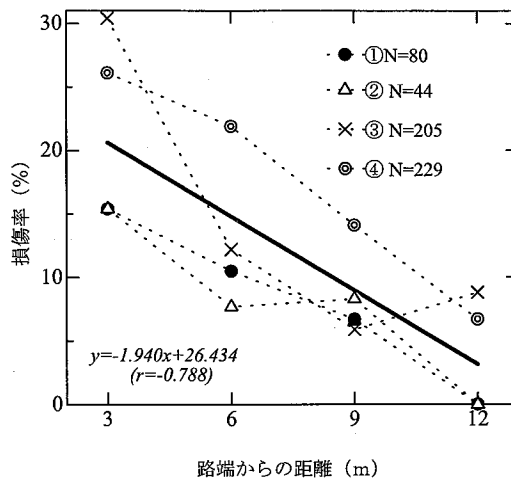


図3 作業路端からの距離と損傷率 (点状間伐)

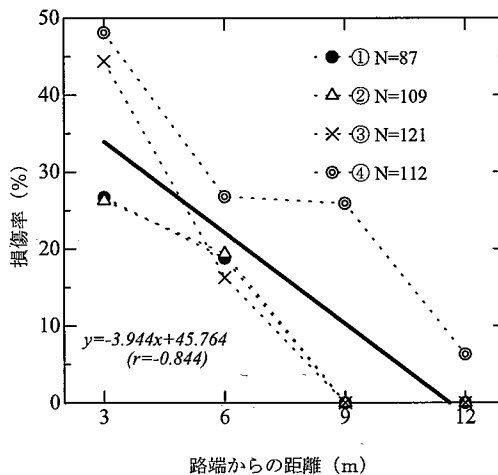


図4 作業路端からの距離と損傷率 (列状間伐)

損傷の水平分布を明らかにするため区画ごとの損傷率を算出した。点状 ($r = -0.788$, $p < 0.01$)、列状 ($r = -0.844$, $p < 0.01$) ともに作業路から離れるにつれて損傷率が下がる負の相関がみられた (図3, 4)。また、図3, 4の回帰式の係数と常数から、列状のほうがより作業路に近いところで多く損傷が発生した。作業路から離れるにつれて損傷率が減ることは、作業路付近で損傷が発生しやすいことになる。この結果は造材に用いられる機械は土場などの広い空間での作業に適しているが (酒井, 1993)、狭い空間の作業路上での造材が多くの損傷を招いたといえる。また、列状が点状に比べて作業路に近いところで多く損傷が発生するのは、列状の

表4 損傷高

区分	点状	列状
損傷箇所数 (N)	140	128
平均損傷高 (cm)	92.6	112.8
区間推定 (cm) ($p < 0.05$)	[83.3,101.8]	[102.7,122.8]
最大値 (cm)	268	280
最小値 (cm)	5	14
t 値		2.904*
* $p < 0.05$		

表5 損傷面積と損傷形態

区分	点状	列状
損傷箇所数 (N)	140	128
平均損傷面積 (cm ²)	75.2	72.0
区間推定 (cm) ($p < 0.05$)	[58.9,91.5]	[52.9,91.2]
最大値 (cm ²)	600	840
最小値 (cm ²)	4	2
t 値		0.251
樹皮剥離 (%)	75.7	80.5
辺材部損傷 (%)	24.3	19.5

方が1箇所より集中的に造材が行なわれるためと考えられた。

2. 損傷の垂直分布

点状と列状の損傷高を区間推定 ($p < 0.05$) した結果、点状は[83.3,101.8] (cm)、列状は[102.7,122.8] (cm) だった。損傷の多くは点状で80~100cm、列状で100~120cmに発生した。最小~最大値は点状 5~268 (cm)、列状で 14~280 (cm) となり、両者の損傷の出現範囲に差はなく、3m以下ですべての損傷が起こった (表4)。点状と列状の損傷高を t 検定したところ、列状の損傷高が有意に高いとされた ($t=2.904$, $p < 0.05$)。これは、点状の場合、ウィンチを用いた地引による木寄で発生した損傷割合が多いため損傷高が低くなったと考えられる。

3. 損傷面積と損傷形態

1箇所当たりの損傷面積を区間推定 ($P < 0.05$) したところ、点状は[58.9,91.5]、列状は[52.9,91.2]とほぼ一致し、t 検定の結果、両者に有意差はなかった (表5)。

損傷形態は樹皮剥離が点状で75.7%、列状で80.5%となった。両者とも辺材部損傷に比べて樹皮剥離の損傷形態が多くを占め、割合もほぼ一致した。佐々木ら (2005) は残存木への接触時に与える力が強くなるほど、損傷面積が大きくなることを示唆していることから、点状と列状で残存木へ与える力は変わらなかったと考えられる。

4. 上荷・下荷の損傷率

上荷の区画①、②と下荷の区画③、④の損傷率を標本比率の差で検定した。点状は有意に下荷の損傷率が高く ($Z_0=2.104$, $p < 0.05$)、列状は有意差がなかった。両者とも下荷で損傷率が高かった (表6)。これは、上荷本数が少ないことが損傷率に影響したと考えられる (表1) (岡、

表6 上荷・下荷の損傷率

区分	上荷		下荷		検定統計量 Z_0
	損傷率(%)	損傷本数(本)	損傷率(%)	損傷本数(本)	
点状	8.6	9	16.8	73	2.104*
列状	13.2	25	19.9	47	1.826
	損傷木数/本	上荷本数(本)	損傷木数/本	下荷本数(本)	
点状	0.82	11	0.69	123	
列状	0.68		43	0.64	

表7 伐区内・外の損傷率

区分	伐区内		伐区外		検定統計量 Z_0
	損傷率(%)	損傷本数(本)	損傷率(%)	損傷本数(本)	
点状	14.8	37	15.5	45	0.232
列状	10.9	26	24.6	46	3.730**
	点状・列状		点状・列状		
検定統計量 Z_0	1.276		2.465*		

* $p < 0.05$ ** $p < 0.01$

1998)。このため、全木寄本数に対する全損傷木数から算出される、木寄1本あたりの損傷木数を算出した結果、点状では上荷が0.82（損傷木数/本）、下荷が0.69（損傷木数/本）、列状では上荷が0.68（損傷木数/本）、下荷が0.64（損傷木数/本）で、上荷・下荷による大きな違いはなかったが、点状・列状とも上荷がやや高く、損傷率と逆の結果となった。

5. 伐区内・外の損傷率

区画②、③（伐区内）と区画①、④（伐区外）の損傷率を標本比率の差で検定をした。点状の損傷率は伐区内14.8%、伐区外15.5%で両者に有意差はなかった。列状は伐区内10.9%、伐区外24.6%で有為に伐区外が高かった（ $Z_0 = 3.730$, $p < 0.01$ ）（表7）。また、伐区内・外において、点状と列状の損傷率を標本比率の差で検定した。伐区内は点状が14.8%、列状が10.9%で両者に有意差はなかったが点状の損傷率が高かった。伐区外は点状が15.5%、列状が24.6%で有意に列状が高かった（ $Z_0 = 2.465$, $p < 0.05$ ）（表7）。伐区内における点状の損傷率が列状より高かったことは、伐区内の損傷原因は主に木寄であり、列状は伐採空間を使って木寄ができるため列状の損傷率が低かったと考えられる。これは木寄（架線系集材）で発生した損傷率は点状と列状では点状の方が高いとする岡ら（2005）と同様の結果となった。伐区外における列状の損傷率が高い原因は、伐採列に沿って造材が行われるため伐区外に加害要因が集中するのに対し、点状の場合、造材場所が集中しないため加害要因が分散したためと考えられる。損傷は伐区内では木寄空間の広狭、伐区外は造材本数の集中具合によって損傷の発生する確率が異なるため、列状の伐区内・外の損傷率に大きな違いが生じたと推定された。

伐区外で損傷が発生する原因に伐倒方向があげられる。今回の作業システムでは、造材時に伐倒木を一度伐区外に出すため、損傷被害が伐区外までおよぶことになる。伐倒方向を逆にす

ることで、狭い幅員の作業路上でハーベスタ造材をしたとしても、伐区外の狭い範囲に損傷が留まることが予測される。

6. 作業システムの損傷率の推定

今回の試験は伐区外での間伐による損傷を考慮していない。このため伐区外の間伐により伐区内に損傷が発生したと仮定して、伐区内・外の損傷木が重複しないことを前提として、伐区内の推定損傷率を以下の式で算出し、点状・列状で標本比率の差を検定した。

$$\text{推定損傷率 (\%)} = \{(\text{伐区の損傷木数} + \text{伐区外の損傷木数}) / \text{伐区の残存木数}\} \times 100$$

その結果、点状は20.4%、列状は19.6%となり、両者の推定損傷率に有意差はなかった(表3)。

IV. おわりに

点状と列状の損傷のほとんどが作業路端から12m以内に存在し、作業路付近に損傷が多く発生し、列状でその傾向が強かった。損傷高は点状より列状の方が高い傾向を示し、範囲はいずれも3m以下で、多くは100cm前後に集中した。損傷の分布特性の把握は、損傷防具を取り付けるための重要な知見なので、精度を上げて更なる実態の把握をしたい。

点状と列状の損傷率の比較で、伐区内は伐採空間を使うて木寄をした列状の損傷が少なく、伐区外は造材本数が一箇所によく集中しなかった点状の損傷が少なく、伐区内・外をあわせた推定損傷率は両者とも違いがなかった。両者の損傷を軽減するには伐倒方向を逆にし、元口を手前にして木寄を行ない、伐区外に伐倒木を出さずに伐採空間を使って造材を行なうことで可能になると考えられる。最近では民有林で重要視されてきた施業の集約化により(湯浅ほか、2007)、複数の所有者が介在する林分で本作業システムを導入する場合、作業路に隣接する林分を所有する所有者の立木にまで損傷がおよぶ可能性がある。このため伐区外を含めた作業システム全体の損傷率の予測、損傷発生メカニズムの把握、伐区外への損傷を減らす技術の構築が求められている。

V. 謝辞

本研究を行うにあたり、様々な方からのご支援をいただいた。作業試験の実行に当たって数々のご支援いただいた御明神演習林職員各位、調査の準備および、調査に協力をいただいた森林管理学研究室、林業生産工学研究室各位、農学部の河村詞朗君、菊池甲君、奥天あい花さんにこの場を借りて厚く御礼を申し上げる。

引用文献

- 湊克之、孔徳剛（1991）高性能林業機械による伐採作業に関する研究（I）－TOHR987Sハーベスタによる間伐作業での1事例－. 日林論 103:655～656.
- 大里正一・鈴木誠・前原忠・佐倉詔夫・石原猛・山中征夫（1994）タワーヤードによる間伐材搬出における立木の損傷（I）－梨ノ木台28年生スギ人工林の事例－. 日林関東支論45：103～106.
- 岡勝・近藤耕次・吉田智佳史・田中良明・佐々木達也・井上源基・近藤道治・山口達也・小嶋重幸（2005）伐出作業に伴う残存木被害軽減策の検討（I）－架線系集材における被害分析－. 日林関東支論 56: 79～80.
- 岡勝・吉田智佳史・井上源基（1998）高性能林業機械による林地環境への影響（II）－残存木の損傷－. 日林関東支論 49：107～108.
- 岡勝・吉田智佳史・田中良明・井上源基・田所幹夫（1992）高性能林業機械の伐出作業システムに関する研究（I）－ハーベスタとフォワーダの組み合わせによる伐出作業－. 日林論 102：655～656.
- 林野庁（2007）森林・林業白書. 165pp, 日本林業協会, 東京.
- 酒井秀夫（1993）伐出作業を革新するプロセッサプロセッサを主体とした作業仕組み－. 152pp, (社) 林業機械化協会, 東京.
- 佐々木達也・岡勝・近藤耕次・山田健・遠藤利明・上村巧（2005）伐出作業に伴う残存木被害軽減策の検討（II）. 日林関東支論 56：81～82.
- 澤口勇雄・猪内正雄・菊池智久（2000）ハーベスタ・フォワーダシステムによる列状間伐が残存立木に与える損傷. 森林利用学会誌 15(1): 33～42.
- 対馬俊之・由田茂一・浅井達弘・木幡靖夫・戸田治信（1991）ハーベスタによる間伐作業（II）－4条植栽のトドマツ林の場合－. 日林論 102：707～708.
- 由田茂一・対馬俊之・木幡靖夫・浅井達弘・北川建雄（1991）ハーベスタによる間伐作業－通常植栽のカラマツ林の場合－. 日林論 102: 705～706.
- 湯浅勲・藤森隆郎・梶山恵司・大橋慶三郎・坪野克彦・藤野正也（2007）実践マニュアル－提案型集約化施業と経営. 134pp, 全林協, 東京.

要旨

本研究では、スギ人工林において超高密度作業路網と、高性能林業機械による間伐作業が残存木に及ぼす損傷について分析した。その結果、損傷は作業路付近に多く、損傷高は地表から100cm前後に多く発生した。造材では伐区外にも多くの損傷が発生した。また、上荷と下荷に

よる損傷率に違いはなく、点状と列状の比較では、伐区内では列状が、伐区外では点状の損傷が少なかった。作業空間の狭い作業路上での機械作業による損傷を軽減するためには、伐倒方向を変えることが有効と考えられるが、このためにも造材作業における損傷発生メカニズムのさらなる解明が必要である。

Summary

We examined the damages to a residual stand after point thinning and line thinning operations were conducted by using high-performance logging machines in planted forest of the Japanese cedar built super-high-density road network. As a result, the forest roads in the vicinity or a range of approximately 100 cm from the ground to the damage point incur heavy damage; further, severe damage is caused when the bucking process is conducted outside the cutting area. The damage due to the abovementioned reasons is similar to the damage caused by uphill and downhill yarding. The damage due to line thinning is lesser than that due to point thinning in the inner cutting area, and the damage due to point thinning lower than line outside cutting area. In order to reduce the damages to a high-performance logging system in a narrow space on the forest roads, conditions such as the felling direction should be varied, and the characteristics of the distribution of the damage due to bucking should be analyzed further.