

機械化作業システムに適合した森林施業法の開発

—機械化作業が森林にあたえる影響—

近藤道治・宮崎隆幸*・今井 信

トラクタあるいはタワーヤードを集材システムとした 30～40 年生カラマツ林の間伐事業地を主な対象として、間伐によって生ずる残存木の損傷とそれにより発生する材質劣化、ならびに間伐事業地に発生する林地表面の攪乱と土壌堅密化などについて調査解析した。また列状間伐と残存木の幹偏心の関係を解析した。

列状間伐と点状間伐で作業実施にともなう損傷発生割合を比較したところ、車両系、架線系ともに列状間伐の方が低かった。また、残存木の損傷発生は作業者の注意により大きく減少させられるといえた。カラマツでは木質部に達する損傷が与えられると材の変色が必ず発生し、時間経過とともに腐朽に至っていた。トラクタの全木土引き走行や、タワーヤードによる全木集材により林地攪乱が発生したが、攪乱程度は軽微で面積も小さかった。トラクタ走行により土壌表面は堅密化し、この影響は 10 年程度継続していた。トラクタ走行により表層土壌の粗孔隙量が減少したが、原状回復しつつあった。列状間伐は残存カラマツ立木に明らかな樹冠偏倚を発生させていたが、樹冠偏倚と幹の偏心の間に相関はみられなかった。幹の偏心と相関がみられたのは常風の風向といえた。

キーワード：機械化作業、間伐、残存木の損傷、残存木の偏心、林地攪乱

1 はじめに

1.1 研究の背景と目的

木材価格が低迷する中、低コスト林業の展開を目指して、全国で高性能機械の導入が進んでいる。しかし、機械性能が十分に発揮され、しかも環境に与える影響に留意した施業法が確立しているとはいえない。

林業を持続的かつ健全に発展させ、森林の多面的機能を発揮させるためには、生産性を追求するだけでなく、残存木被害や林地攪乱の減少など、森林環境に配慮した森林施業を実施する必要がある。特に、間伐対象林分を大面積に抱える長野県では、森林環境に配慮した機械化間伐作業システムの確立が急務となっている。そこで本研究では、間伐を中心とした機械化作業システム開発を目的として調査研究を行った。

1.2 研究項目

間伐作業の集材システム別（トラクタ、タワーヤード）あるいは間伐方法別（点状間伐、列状間伐）に残存木に発生する損傷の関係を検討するとともに、残存木損傷部の変色について検討した。また、機械走行や間伐材の引き出しによって生ずる土壌環境変化ならびに間伐後に植栽された苗木の成長について検討した。さらに、カラマツ林の列状間伐が幹の偏心に及ぼす影響について検討した。本報告は、林野庁国庫補助大型プロジェクト研究「機械化作業システムに適合した森林施業法

の開発」(1997～2001)で行った研究をとりまとめたものである。本報告の一部は、日本林学会中部支部大会で発表した(近藤ほか 2000, " 2001, " 2002)。

* 下伊那地方事務所林務課普及係主査

2 集材システムと残存木の損傷発生

2.1 研究の目的

間伐は人工林施業において必要不可欠な作業であるが、伐採や集材時に残存木に損傷を与えることも多い。

ここでは、間伐作業におけるトラクタ全木集材とタワーヤーダ全木集材で発生する残存木の損傷状況を明らかにし、今後の高性能機械を利用した間伐作業のための資料を得ることを目的に調査を行った。

2.2 調査地と調査方法

調査地の概要を表 2-1 に示した。山腹傾斜の比較的緩やかな八千穂調査地、川上調査地ではトラクタを搬出機械とした間伐が行われ、傾斜の急な高遠調査地、中野調査地ではタワーヤーダを搬出機械とした間伐が実施された。これらの調査地は、事前に県内各地の間伐予定地の詳細を照会した中から、本調査の必要条件を満たす間伐地として選定した。

調査地では間伐前に林況調査（山腹傾斜、立木密度、胸高直径、樹高）を行うとともに、立木位置の測量を行い、立木配置図を作成した。集材作業をビデオテープに収録し、作業が完全に終了し

たのちに、残存木に発生した損傷程度を立木ごとに調査した。

トラクタ集材 八千穂調査地、川上調査地の 40 年生カラマツ人工林（列状間伐ならびに点状間伐）で調査を行った。

タワーヤーダ集材 高遠調査地 1、高遠調査地 2 の 40 年生カラマツ人工林（点状間伐）で残存木の損傷と集材方向（上げ荷と下げ荷）の関係について検討した。なお、高遠調査地 1 では上げ荷 4 回、下げ荷 4 回、高遠調査地 2 は下げ荷 3 回の集材について調査を行った。また、中野調査地 1、中野調査地 2 のスギ人工林（32、35 年生）列状間伐地で残存木の損傷発生状態を調査した。

2.3 結果と考察

2.3.1 損傷木の発生率

トラクタ集材

八千穂調査地では、列状間伐で 14.6%、点状間伐で 19.4% の立木に損傷が発生し（表 2-2）、列状間伐の損傷発生率が点状間伐よりも低く、これまでの調査結果（井上ら 1998）と一致した。

川上調査地の列状間伐では残存木の損傷は発生せず、点状間伐の損傷率も 1.9% と極めて低かった。

表 2-1 調査地の概要

集材機械	調査地	樹種	林齢 (年)	山腹傾斜 (度)	立木密度 (間伐前) (本/ha)	間伐率 (%)	集材機械	間伐方法	調査面積 (ha)
トラクタ	八千穂	カラマツ	40	15	570	28	トラクタ (イワフジCT-35)	列状	0.10
				15	480	25		点状	0.10
	川上	"	40	20	660	28	トラクタ (イワフジCT-75)	列状	0.20
				22	760	30		点状	0.20
タワーヤーダ	高遠1	"	40	25	674	23	タワーヤーダ (イワフジTY-U3)	点状	0.52
				25	665	28			0.68
	高遠2	"	40	25	700	28	タワーヤーダ (イワフジTY-U4)	列状	1.16
	中野1	スギ	35	25	1,397	27			0.35
	中野2	"	32	30	1,001	22			0.48

(1)トラクタ間伐：チェーンソー伐採＋トラクタ集材＋プロセッサ枝払い・玉切り

(2)タワーヤーダ間伐：チェーンソー伐採＋タワーヤーダ集材＋プロセッサ枝払い・玉切り

表 2-2 残存木の損傷発生率（トラクタ間伐）

間伐方法	残存木数 (本)	損傷木数 (本)	損傷率 (%)	調査地	集材機械	集材形態
列状間伐	41	6	14.6	八千穂	トラクタ	全木集材 地引き方式
点状間伐	36	7	19.4			
列状間伐	95	0	0.0	川上		
点状間伐	107	2	1.9			

八千穂調査地と川上調査地の林分構造を比較すると、川上調査地は八千穂調査地よりも立木密度が明らかに高いにもかかわらず、損傷率が大幅に低かった。この原因は、作業者が残存木に傷を与えないことを強く意識し、トラクタ操作したことと、傷を受ける可能性が高い立木付近にあらかじめ損傷防止用の杭を打ち込んだことなどによると考えられた。

タワーヤーダ集材

点状上げ荷集材と点状下げ荷集材の損傷発生率は上げ荷の損傷率 8.9%に対して、下げ荷は 14.5%および 12.4% (表 2-3) という結果が得られ、下げ荷の損傷発生が上げ荷より多かった。

点状間伐 (高遠調査地・カラマツ) と列状間伐 (中野・スギ) の損傷発生率は、列状間伐の 2.3%, 6.7%に対して、点状間伐では 14.5%, 12.5%だった (表 2-3)。樹種は異なるが、列状間伐地の間伐前立木密度が点状間伐地に比べて高いにもかかわらず、点状間伐より残存木の損傷発生率が明らかに低く、井上ら (1998) の調査結果と一致した。

2.3.2 損傷の高さ

トラクタ集材

八千穂調査地、川上調査地の間伐残存木 279 本のうち 15 本 (17 箇所) に木質部に及ぶ剥皮損傷が発生した。これらのうち 2 箇所は地上高 0.5m 以上に位置し、損傷発生原因は車両接触によるものだった。他の 15 箇所の損傷はすべて地上高 0.5m 未満に認められ、13 箇所は土引きされる間伐材の接触で発生し、2 箇所は車両接触によるものだった。

損傷発生が地際付近に集中したことは既往の知見 (沢口ほか 2000) と一致した。点状間伐と列状間伐の損傷高に差は認められなかった。

タワーヤーダ集材

点状間伐の高遠調査地 1, 高遠調査地 2 で発生した損傷を調査対象とした。

上げ荷集材で発生した損傷位置は、地上高 1.0m 以下に集中していた (図 2-1)。なお、集材線から 10m 以上離れた残存木に発生した損傷は地際付近の低い位置に限られた。

表 2-3 残存木の損傷発生率 (タワーヤーダ間伐)

間伐方法	集材方向	残存木数 (本)	損傷木数 (本)	損傷率 (%)	調査地	集材機械	集材形態
点状間伐	上げ荷	271	24	8.9	高遠1	タワーヤーダ	全木集材 ランニングスカイライン方式
	下げ荷	324	47	14.5			
	下げ荷	581	72	12.4	高遠2		
列状間伐	下げ荷	355	8	2.3	中野1		
		373	25	6.7	中野2		

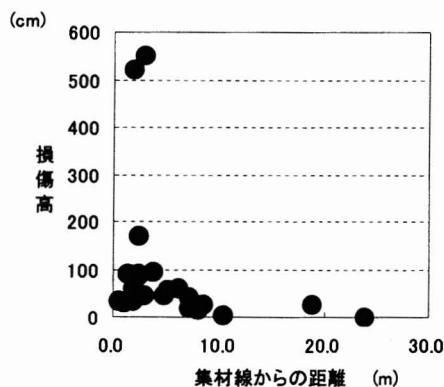


図 2-1 集材線の距離と損傷高 (上げ荷)

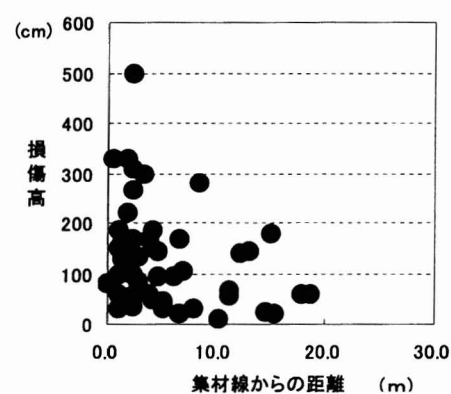


図 2-2 集材線の距離と損傷高 (下げ荷)

下げ荷集材の損傷は集材線付近では地上高 3.5 m 程度まで発生し (図 2-2), 集材線から 10m 以上離れた残存木でも損傷高が 1.0m を超えるものが見られ, 下げ荷集材は上げ荷集材よりも損傷発生が高い範囲に及ぶといえた。

2.3.3 損傷発生原因

タワーヤード集材

点状上げ荷集材 損傷発生に関与する要因を明らかにするため, 損傷本数を目的変数として重回帰分析を行った。

分析資料として高遠調査地 1 の調査結果を用い, 説明変数として①伐倒角度 (α), ②横取り角度 (β), ③旋回角度 ($\alpha - \beta$), ④横取り距離 (L), ⑤立木到着角度 (γ), ⑥立木密度 (N), ⑦間伐木長 (L_t) の 7 要因を与えた (図 2-3)。なお, 分析に変数減少法を用いたところ, これら要因のうち, α , β , γ は影響力が極めて小さいものと判断された。

得られた説明変数別の標準偏回帰係数を表 2-4 に示した。これにより, 損傷発生には旋回角度と立木密度が強く影響しており, 旋回角あるいは立木密度が大きくなるほど損傷木が発生しやすくなることが明らかになった。

なお, 損傷発生に強く影響していた旋回角度と立木密度との関係について検討したが相関は認め

られなかった。一方, 旋回角度と横取り距離の間には相関が見られ, 旋回角度 20 度以下なら損傷木の発生は極めて少なく, 横取り距離が 40m 程度となっても損傷木は発生しないと判断できた (図 2-4)。

注) 横取り距離 (L): 引き寄せ索の引き出し長

伐倒角度 (α): 架線と間伐木倒伏方向の挟角

横取り角度 (β): 架線と引き寄せ索の挟角

立木到着角度 (γ): 引き寄せた間伐木と架線の挟角

点状下げ荷集材 高遠調査地 2 の調査結果を用いて, 下げ荷集材における損傷発生に関して要因分析を行った。分析法は, 上げ荷集材と同一であるが, 説明変数に実搬器集材距離 (L_0) を加えた。

なお, 下げ荷集材では「横取り」後の「実搬器走行」開始時に, 間伐木の自重による滑落的斜面移動や, 牽引角度の急激な変化が生ずることが多く, これに伴って残存木損傷が発生するように観察された。このため, 間伐木が架線下に到着するまでの「横取り」と, 架線下に到着してから元柱に到着するまでの「実搬器走行」に分けて分析を行った。

得られた説明変数別の標準偏回帰係数を表 2-5 に示したが, 「横取り」では横取り距離と立木密度が大きいほど損傷木が多くなり, 「実搬器走行」では立木到着角度が大きくなると損傷木が増加することが明らかになった。

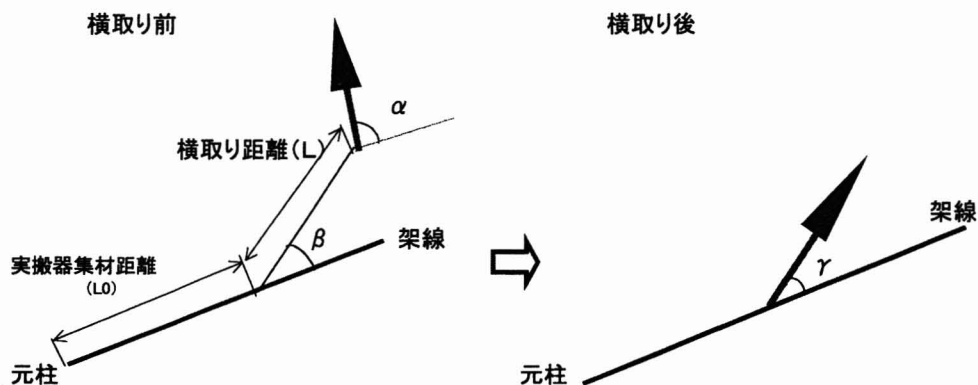


図 2-3 間伐作業の模式図

表 2-4 重回帰分析による目的変数別標準偏回帰 (上げ荷)

目的変数	説明変数			
	旋回角 ($\alpha - \beta$)	横取り距離 (L)	立木密度 (N)	間伐木長 (Nt)
損傷本数	0.3925	-0.1057	0.3430	0.2512

「横取り」における、損傷発生と横取り距離ならびに立木密度の関係を検討したところ、立木密度が 400 本/ha 以下であれば横取り距離 20m 程度まで損傷は発生しにくい、400 本/ha を越えると 10m 以下の横取り距離でも損傷が発生することが明らかになった（図 2-5）。

「実搬器走行」の立木到着角度と損傷発生率の関係を検討したところ、到着角 30° 未満では損傷発生が少ないが、30° 以上になると損傷発生が目立つようになり、50° を越えると損傷発生率 80% 以上となった（図 2-6）。

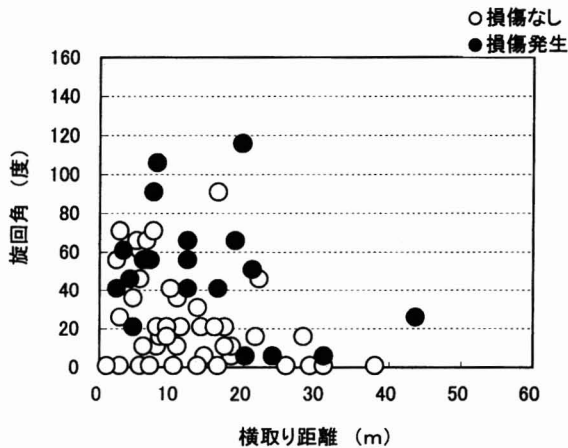


図 2-4 損傷木の発生と横取り距離と旋回角（上げ荷）

表 2-5 重回帰分析による目的変数別

目的変数	説明変数					
	旋回角 ($\alpha-\beta$)	横取り距離 (L)	立木到着 角度 (γ)	架線集材距離 (LO)	立木密度 (N)	間伐木長 (Nt)
損傷本数 (横取り)	0.0863	0.2716	—	—	0.2123	-0.0056
損傷本数 (実搬器走行)	—	—	0.3959	-0.0162	0.1186	-0.1689

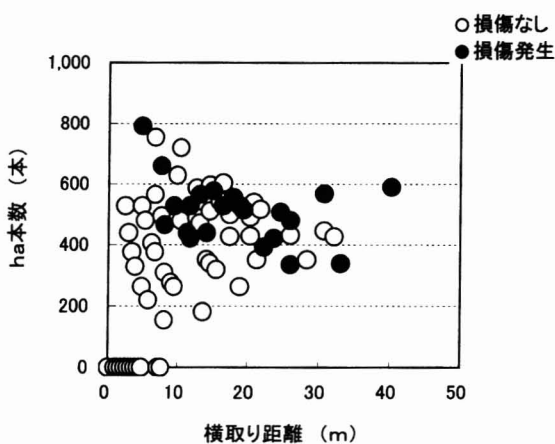


図 2-5 残存木の損傷と立木密度ならびに横取り距離との関係（横取り功程）

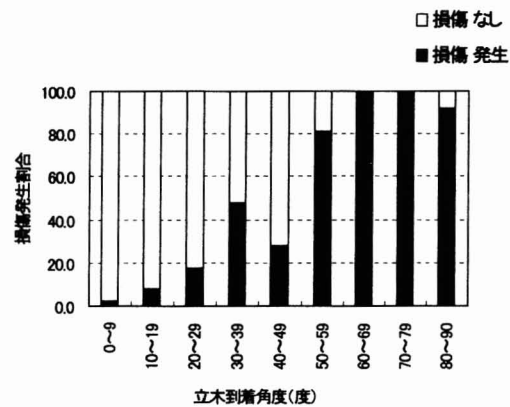


図 2-6 立木到着角度別の損傷発生率（架線功程）

3 間伐時の損傷と材質劣化

3.1 研究目的

間伐時に残存木に損傷を与えると、材質劣化が生ずるといわれている(富田 1981, 徳田ほか 1996, 1998, 2000) が、長野県内での調査事例は少なく不明点も多い。特にカラマツについての調査事例は少なく(武井ほか 2002), 損傷程度と材質劣化の関係など不明な点は多い。

ここでは、カラマツ立木の幹部損傷と変色発生の関係を明らかにすることを目的として試験を行った。

3.2 人工損傷試験

3.2.1 試験方法

長野県塩尻市の長野県林業総合センター構内の40年生カラマツ林(標高870m, 傾斜5度, 西向き斜面)で試験を行った。カラマツ立木4本(①~④)を試験木として, 次のような傷付け処理を行った(図3-1)。



図3-1 傷の設定状況

なお, Dは樹皮下木質部に穿った孔の深さを示している。

① 長方形の小さな傷

W:5×L:1×D:1 cmの傷を, 高さ80cm毎に2カ所ずつ, 4.4mまで計12カ所作成した。

② 正方形の小さな傷

W:2×L:2×D:1 cmの傷を, 高さ80cm毎に2カ所ずつ, 4.4mまで計12カ所作成した。

③ 長方形の大きな傷 + 殺菌剤処理

W:10×L:2×D:2 cmの傷を, 40cm毎に2カ所ずつ, 4.4mまで計24カ所作成した。0.0, 0.8, 1.6, 2.4, 3.2, 4.0mの高さの傷は南北方向に, 0.4, 1.2, 2.0, 2.8, 3.6, 4.4mの傷は東西方向になるように交互に設定した。南北方向は殺菌剤を塗布, 東西方向は無処理とした。

④ 正方形の大きな傷 + 殺菌剤処理

W:10×L:10×D:2 cmの傷を, 高さ40cm毎に2カ所ずつ, 4.4mまで計24カ所作成した。0.0, 0.8, 1.6, 2.4, 3.2, 4.0mの高さの傷は南北方向に, 0.4, 1.2, 2.0, 2.8, 3.6, 4.4mの傷は東西方向になるように交互に設定した。南北方向は殺菌剤を塗布, 東西方向は無処理とした。

傷の設定には木工用のノミを使用した。殺菌剤処理には, チオファネートメチルペーストを使用し, 処理1年後に再度塗布した。

なお, 成長休止期(1999年3月)と成長期(同年6月)の2回に分けて処理を行ったため, 試験木の本数は8本となった。

3月処理の立木は, 平均胸高直径22cm, 平均樹高23m, 6月処理は20cm, 23mだった。

処理後2成長期が経過した2001年4月に処理立木を伐採し, 10cm間隔で幹を玉切った。なお, 処理部が常に玉切り位置となるように配慮した。玉切ったのちに, 切断面の変色面積と変色長を測定した。

3.2.2 結果及び考察

傷の巻き込み 長方形(小)と正方形(小)の処理部は, ほぼ巻き込みが完了していたが, これら以外の処理部は露出したままだった。

変色面積 すべての処理部周辺で木質部が変色し, 処理の大きさが大きいほど変色面積が大きかった(図3-2)。なお, 3月処理と6月処理では明らかな差はみられなかった。殺菌剤塗布は, 変色面積に影響

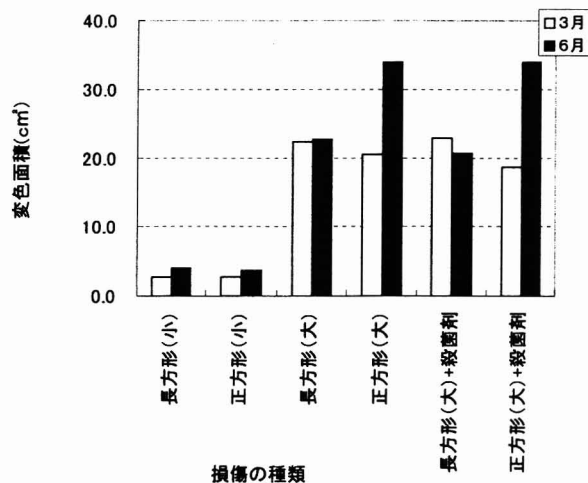


図3-2 損傷部横断面の変色面積

注) 測定点数は各12点

響を与えていなかった。

変色の長さ 傷の大小あるいは、形状に関わらず変色は上下方向に長く発生していた。大きな傷の変色長は極めて長く、処理配置間の80cmを越えて交錯重複したため、最上部処理の上側変色長のみ測定した。小さな傷の上側変色長との比較を図3-3に示した。

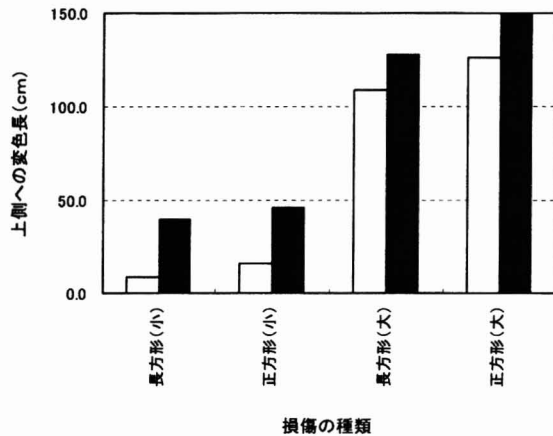


図3-3 上部への変色進行長

注) 測定点数は長方形(小)と正方形(小)は各12

長方形(大)と正方形(大)は各4点

処理の大きさが大きいほど変色長は長かった。

小さな傷では、3月処理と6月処理の間で有意な差が認められたが、大きな傷では有意差はなかった。

カラマツ立木の幹に木質に達する人工的な傷害を与えたところ、すべての傷害部周辺に変色が発生した。傷の大きさが大きいほど変色面積、あるいは変色長が大きくなった。また、成長期に付けた傷と成長停止期の傷との間に明確な差はみられなかった。

小さな傷でも変色が発生していたことから、間伐作業においては残存木に損傷が発生しないように注意する必要があるといえた。

3.3 間伐に伴う損傷で発生した材質劣化

3.3.1 調査方法

八千穂調査地(表2-1)で、間伐実施時(1997年)に損傷を受けたカラマツ立木7本を伐採し、3年後の材質劣化状況を調査した(表3-1)。調査木の損傷高さ、損傷長(上下方向)、損傷幅を測定したのち、損傷部から0.2m長さごとに玉切りし、それぞれの断面における変色面積を測定した。なお、調査木には1984年の間伐時の損傷が認められたのでこれも測定した。

3.3.2 調査結果

7本の調査木に3年前の損傷9箇所が認めら

表3-1 間伐時に生じた損傷部位の材質劣化状況

損傷別	間伐後の経過年数	損傷				変色・腐朽			備考
		高さ	長さ	幅	表面積	面積	面積率	幹上部方向への劣化伸展長	
		(cm)	(cm)	(cm)	(cm ²)	(cm ²)	(%)	(cm)	
1	3	15	10	5	50	5	1	50	腐朽なし
2-1	"	30	10	5	50	18	9	95	"
2-2	"	45	17	4	68	9	5	35	"
2-3	"	236	4	3	12	13	8	160	"
3	"	15	16	5	80	12	3	83	"
4	"	15	10	7	70	15	2	5	"
5	"	11	13	4	52	28	6	50	"
6	"	31	15	10	150	16	3	72	"
7	"	41	17	8	136	6	1	60	"
平均		49	12	6	74	14	4	68	
11	16	10	—	13	—	120(15)	12(2)	180(40)	7年前に巻き込み完了
12	"	30	—	7	—	138(39)	32(9)	250(200)	巻き込み未完了
13	"	0	—	8	—	361(311)	38(33)	300(200)	"
14	"	0	—	5	—	28(—)	4(—)	80(—)	5年前に巻き込み完了
平均		10	—	8	—	162(122)	22(15)	203(147)	

注) 1 損傷別は立木番号である。NO. 2には傷が3カ所あったことを示す。

2 変色・(腐朽) : NO. 1~7は変色を、NO. 11~14は変色と(腐朽)を示す。

3 損傷高は、損傷中央部の高さを示す。

れた (表 3-1)。損傷位置は 0.5m 以下が 8 箇所、2.0m 以上 1 箇所だった。これらの発生原因は、2.0m 以上の 1 箇所が機械接触によるものと推定され、その他は間伐木の接触により発生したものと推定された。損傷形態はすべて樹皮剥離で、3 年経過しても木質露出部が認められた。木質露出部は 74cm^2 (12~150 cm^2)、損傷部断面の変色面積は 14 cm^2 (5~28 cm^2)、断面における変色面積率は 4% (1~9%) だった。損傷面積と変色断面面積の間には相関は認められなかった (図 3-4)。

損傷部から幹上部方向に発達した変色長は 68cm (5~160cm) で、損傷箇所により大きな差がみられた。しかし、受傷時の損傷面積と変色長の間には相関は認められなかった (図 3-5)。この原因は、損傷の深さが一定でなかったためと推定した。

1984 年の間伐による損傷が 4 箇所に認められた (表 3-1)。損傷高は 0~30cm で地際部に位置した。損傷長さは測定不可能だったが、損傷幅は 8cm (5~13cm) と推定された。4 箇所の損傷のうち 2 箇所は巻き込みが完了していた。

変色断面面積 162 cm^2 (28~361 cm^2)、変色面積率は 22% (4~38%) で、1997 年の変色断面面積に比べて約 12 倍に広がっていた。

変色から腐朽に進んだものも 3 箇所あり、腐朽断面面積は 122 cm^2 (15~311 cm^2)、腐朽面積率 15% (2~33%) だった。腐朽は損傷部分から進展して心材部分を取り囲むように三日月状を呈し、著しいものは心材も腐朽していた。

上部方向への変色長は 203cm (80~300cm) で、1997 年の場合の 3 倍だった。また、腐朽長は 40~200cm (平均 147cm) だった。

これらにより、間伐時などにカラマツ立木に木質部が露出する損傷を与えると、致命的な材質劣化要因となり、木材価値が大きく失われることを示しているといえた。

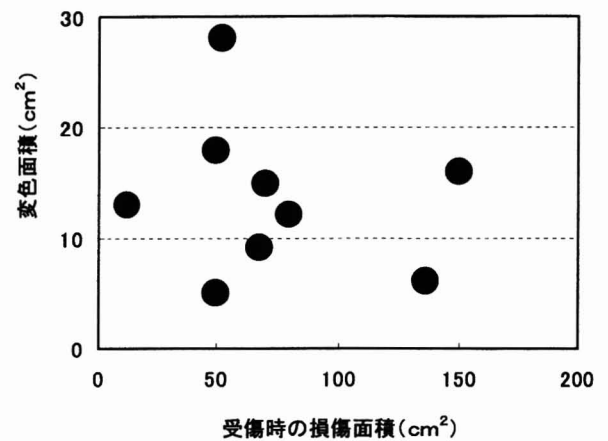


図 3-4 受傷時の損傷面積と変色面積

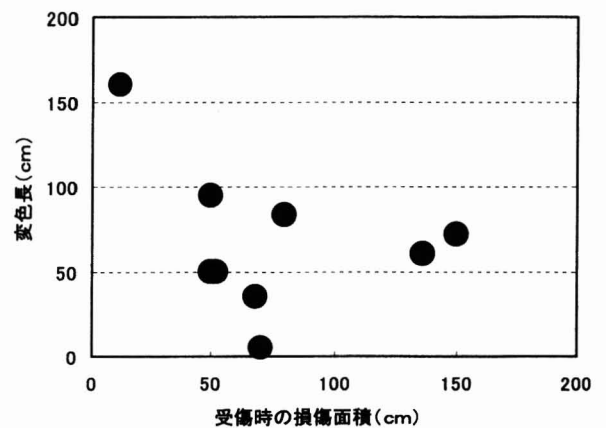


図 3-5 損傷面積と変色進行長

4 列状間伐と残存木の偏心

4.1 研究の目的

列状間伐により発生する樹冠偏倚と幹の偏心成長についてはいくつかの報告があるが、(島崎ほか 1984, 武井 1984, 中山 1997, 姫野 2001) 結論に達しているとはいえない。ここでは、過去に列状間伐が実施されたカラマツ林で残存木の樹冠偏倚と幹偏心について実態を明らかにすることを目的に調査を行った。

4.2 調査方法

10 年以上前に 2 残 1 伐の列状間伐が実施されたカラマツ 3 林分を抽出し、標本木の枝張りを測定して樹冠形を明らかにしたのち伐倒し、年輪解析により幹の偏心状態を調査した(表 4-1)。

標本木は残存 2 列の右列・左列(斜面下部より見て)から同数ずつ選定した(図 4-1)。枝張りは、樹冠開放方向、樹冠閉鎖方向、斜面上部、斜面下部の 4 方向を測定した。測定にあたっては地上から樹冠を見上げ、枝張り先端部から立木の幹中心部までの水平距離を「枝張り」とした。

幹の偏心調査は、胸高部位(1.2m 高)の円板を

採取し、枝張り調査と同一の 4 方向について年輪解析により実施した。

4.3 結果と考察

4.3.1 樹冠偏倚

枝張り調査結果を表 4-2, 図 4-2 に示した。3 調査地ともに列状間伐による開放方向に樹冠偏倚が発生していることは明らかで、既往報告と一致した(島崎ほか 1984, 中山 1997, 姫野 2001)。

4.3.2 幹の偏心

列状間伐後の偏心状態

列状間伐後の 4 方向直径成長経過を表 4-3, 図 4-3 に示した。幹の偏心がすべての調査地で認められたが、これらの偏心は閉鎖方向あるいは開放方向と相関することなく右方向に発達していた。

列状間伐後に残された立木の幹成長は、樹冠偏倚により幹断面が開放方向に著しく発達するため、開放方向に偏心するといわれている。

しかし、調査地では右列・左列ともに残存木の樹幹は同方向に偏心し、樹冠偏倚方向と一致しなかった。また、列の内側に偏心するという報告(中山 1997, 姫野 2001)とも一致しなかった。

表 4-1 調査地の概況

調査町村	林齢 (年)	平均胸高直径 (cm)	平均樹高 (m)	間伐後の経過年数 (年)	調査本数 (本)
佐久町	33	26.5	21.4	15	6
高遠町	42	23.7	22.3	21	2
奈川村	41	27.1	23.2	14	4

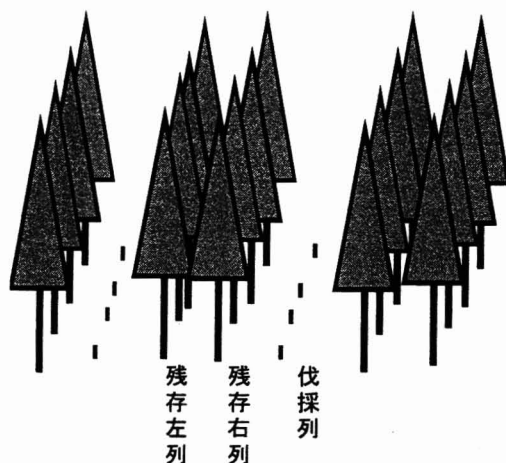


図 4-1 調査地のイメージ

列状間伐以前の偏心状態

列状間伐実施以前の年輪測定結果を表 4-4、図 4-4 に示した。列状間伐後と比較すると小規模ではあるが、3 調査地ともに右方向に幹の偏心が認められ、偏心は列状間伐以前から生じていたといえた。

4.3.3 偏心の発生原因

偏心の発生方向と樹冠偏倚が相関せず、また山腹傾斜とも相関がみられなかった。

しかし、偏心が列状間伐以前から発生していることから、何らかの立地条件が原因と推定し、風衝が原因する可能性を考え、調査地における常風方向を検討した。各調査地の最寄りの気象観測所の最多風向を調査したところ、3 地点ともに幹の偏心方向と常風方向がほぼ一致した（表 4-5、図 4-5）。このため、これら偏心は風衝により形成されたものと推定した。

表 4-2 樹冠の偏倚

単位：m

調査町村	残 存 左 列					残 存 右 列				
	開放方向	閉鎖方向	斜面上部	斜面下部	平均	開放方向	閉鎖方向	斜面上部	斜面下部	平均
佐久町	3.8	1.6	2.1	3.0	2.6	4.0	1.7	3.4	2.7	3.0
高遠町	3.0	1.5	1.5	3.5	2.4	4.0	2.5	2.0	2.0	2.6
奈川村	3.9	1.7	1.8	2.7	2.5	3.8	1.6	1.1	2.5	2.2

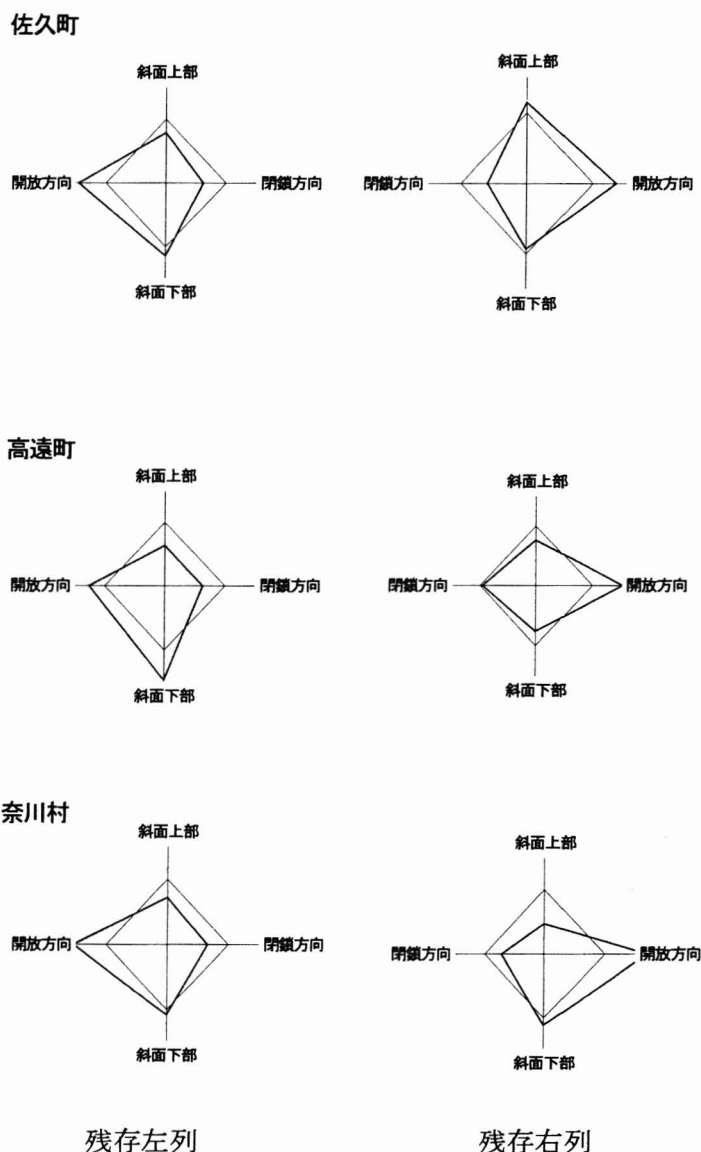


図 4-2 列状間伐による樹冠偏倚

注) 細線は 4 方向の平均値を示す

表 4-3 幹の偏心（列状間伐後）

単位：cm

調査町村	残 存 左 列					残 存 右 列				
	開放方向	閉鎖方向	斜面上部	斜面下部	平均	開放方向	閉鎖方向	斜面上部	斜面下部	平均
佐久町	2.9	3.7	3.4	3.2	3.3	3.3	2.9	3.0	3.1	3.1
高遠町	4.1	5.8	5.3	5.4	5.1	5.5	4.2	4.3	5.9	5.0
奈川村	2.6	3.5	3.0	3.0	3.0	3.1	1.6	2.3	2.4	2.3

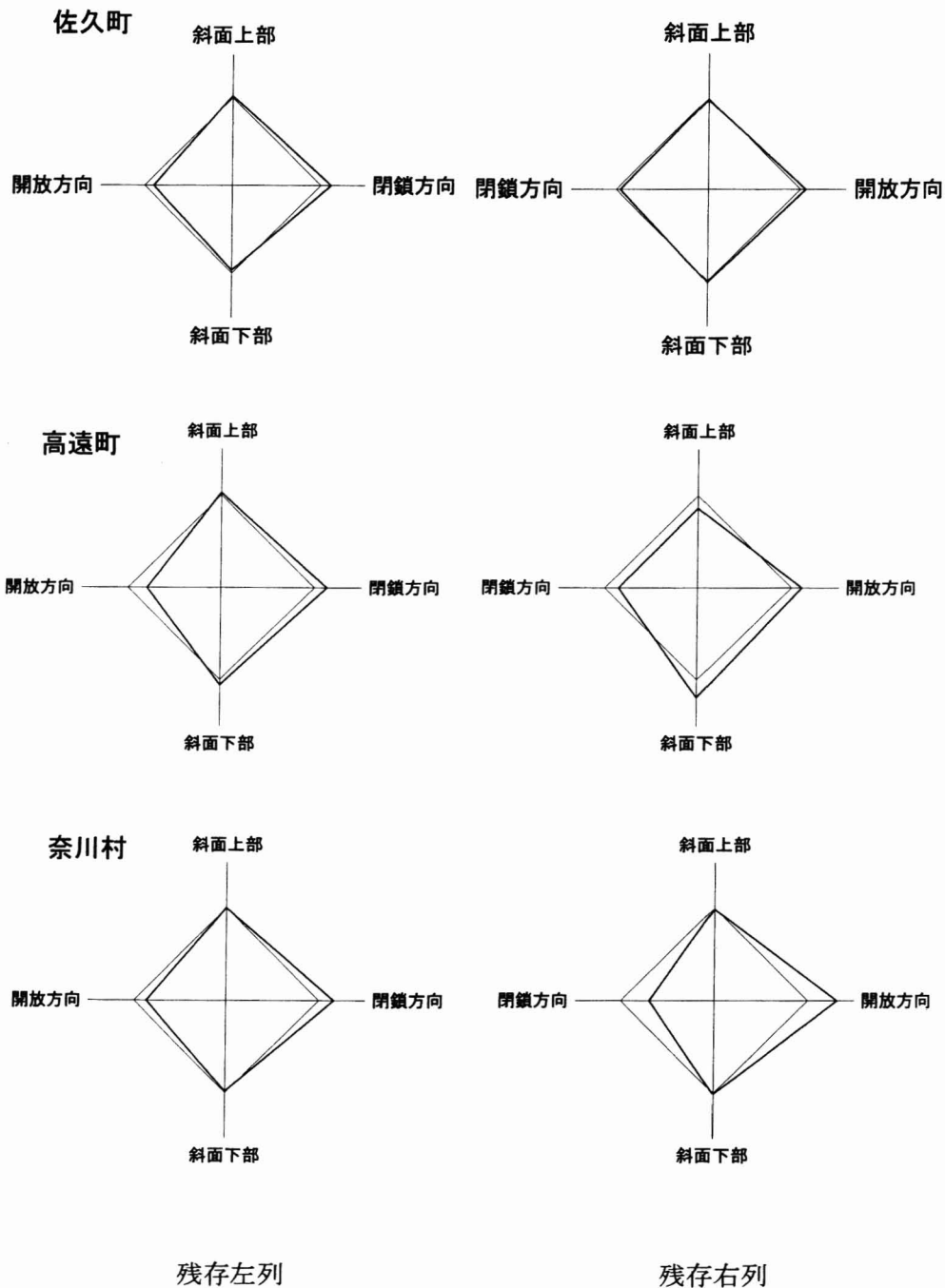


図 4-3 列状間伐後の方位別相対成長（胸高部）

表 4-4 幹の偏心 (列状間伐前)

単位 : cm

調査町村	残 存 左 列					残 存 右 列				
	開放方向	閉鎖方向	斜面上部	斜面下部	平均	開放方向	閉鎖方向	斜面上部	斜面下部	平均
佐久町	7.8	9.4	8.6	8.2	8.5	8.2	7.7	8.1	8.1	8.1
高遠町	6.1	6.4	6.2	6.0	6.2	6.9	5.9	6.4	6.1	6.3
奈川村	8.6	9.4	8.9	9.5	9.1	9.9	7.1	8.3	7.7	8.2

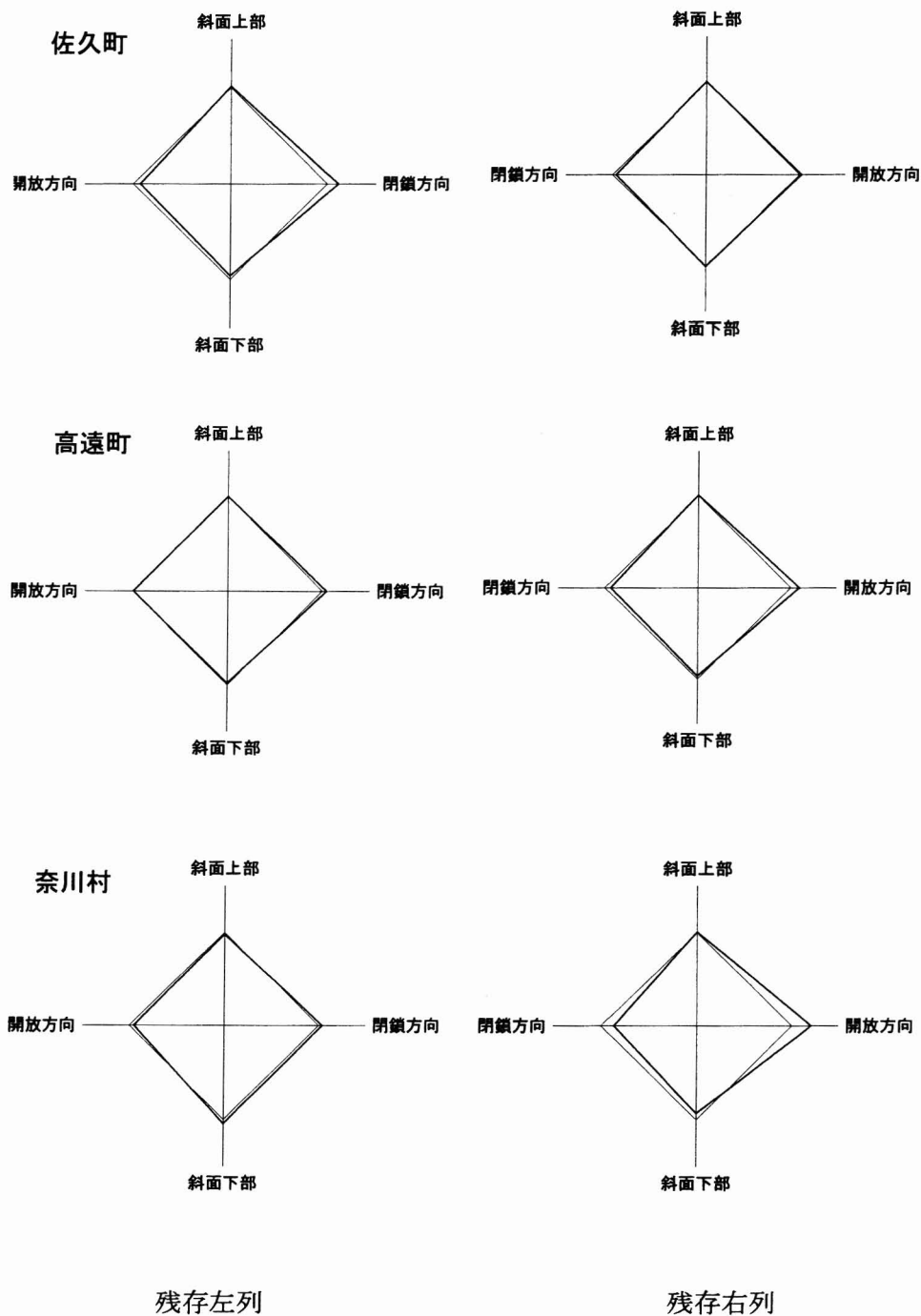


図 4-4 列状間伐前の方位別相対成長 (胸高部)

表 4-5 最寄りの観測所と年間最多風向

調査町村	最寄りの観測所	年間最多風向	調査年
佐久町	佐久市	東北東	1992～1997
奈川村	奈川村	南南西	〃
高遠町	伊那市	南西	〃

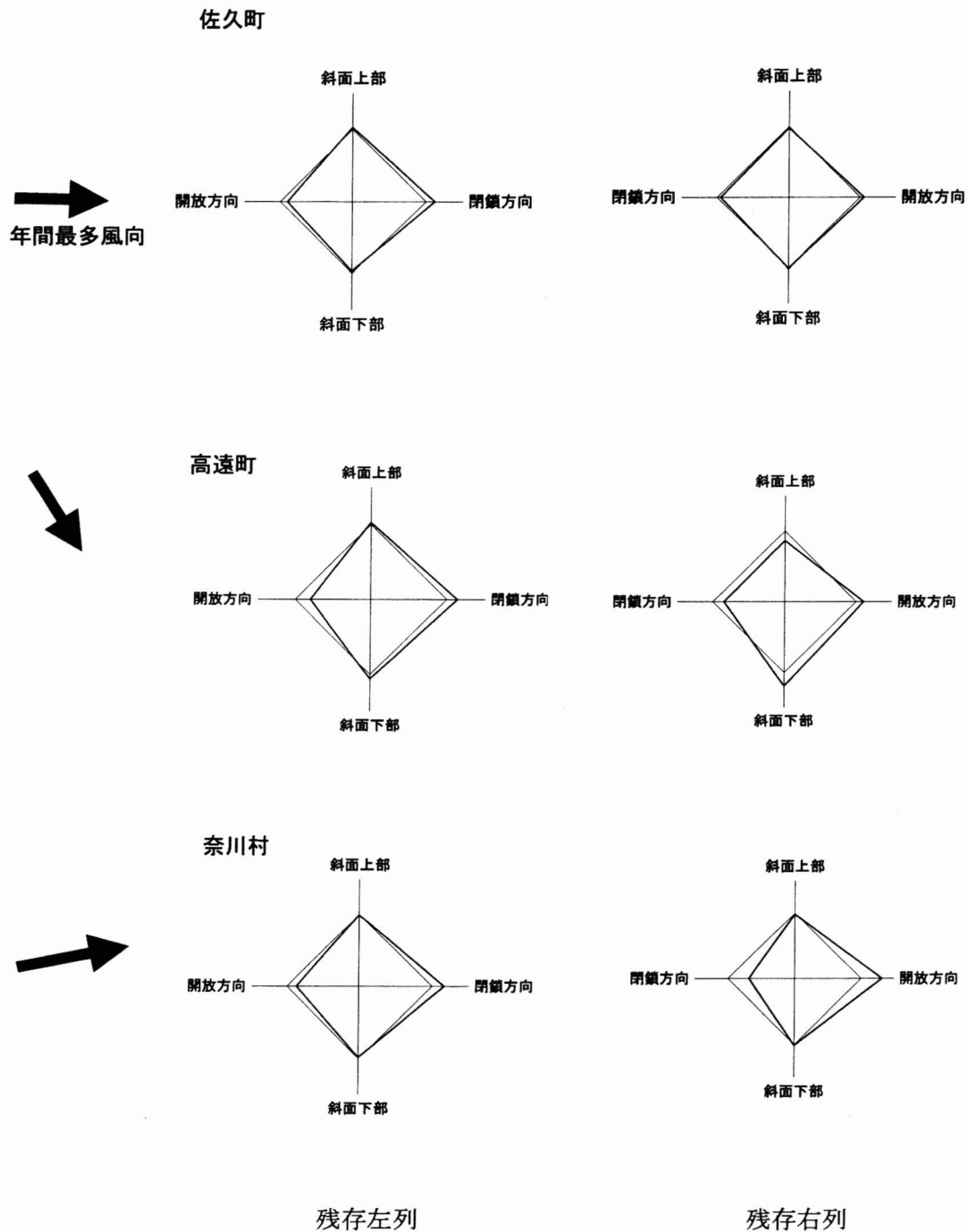


図 4-5 幹部の偏心と年間最多風向との関係

5 林業機械の林内走行が土壤環境変化ならびに植栽苗木の成長に与える影響

5.1 研究の目的

間伐作業にともなう林業機械の林内走行ならびに間伐材の地引きなどにより土壤構造などに変化が生ずると考えられる。このため、機械化された間伐作業が土壤に及ぼす影響を明らかにするとともに、植栽木の成長に及ぼす影響についても明らかにすることを目的に調査を行った。

5.2 調査地と調査方法

5.2.1 林地攪乱

トラクタ集材を行った川上調査地と、タワーヤーダ集材を行った高遠調査地1で林地攪乱度の調査を行った(表2-1)。なお、トラクタ集材地では機械走行と間伐材の地引きにともなう林地攪乱を、またタワーヤーダ集材地では間伐材の地引きにともない発生した林地攪乱を調査した。

調査は目視により、攪乱状態を判定したのち攪乱面積を測定することとし、間伐直後に調査を実施したのち、年1回の調査を継続した。なお、攪乱状態は、重度攪乱、中度攪乱、軽度攪乱の3区分とした(表5-1)。

5.2.2 土壤硬度

トラクタ集材を実施した八千穂調査地(表2-2, 以下、八千穂2とする)と川上調査地で土壤表層の硬度調査を実施した。また、1991年にハーベスタ+フォワーダによる間伐を実施して調査を行っ

た(岡ら1992)八千穂村のカラマツ林(表5-2, 以下、八千穂2とする)で土壤硬度測定を行い、1991年のデータと比較した。なお、いずれの調査地も走行地の走行回数は1~10回程度だった。

また別に、林業総合センター構内でロギングトラクタ(イワフジ製T30, 重量3.3トン)の走行が土壤硬度に与える影響調査をおこなった。試験は1997年12月に実施し、1回走行地、2回走行地、5回走行地、10回走行地、20回走行地、対照地(非走行)の6種を設定した。土壤硬度測定は走行直後に実施したのち、年1回の測定を継続した。

なお、いずれの測定にもコーンペネトロメーターを使用し、土壤深度5cmごとに40cmまでの土壤硬度を測定した。なお測定結果による処理間の有意差検定はt検定(有意水準5%, 両側検定)によった。

5.2.3 土壤孔隙量

トラクタ集材を実施した川上調査地と八千穂2で、採土円筒法(400cc)により表層下部5cm程度までの鉱質土壌を採取して土壤孔隙量を測定した。川上調査地では間伐作業直後に調査を実施したのち、1年に1回調査を実施した。また、八千穂2では1997年、2000年に調査を実施した。なお、八千穂2の間伐直後のデータは斉藤(1991)によった。

5.2.4 植栽苗木の成長

八千穂2で、間伐翌年の1992年春にヒノキを

表5-1 林地攪乱区分(森林総研1999)

林地攪乱区分	定 義
重度攪乱	材や車輛の通過により土壤が深く削られ無機質土が大部分露出している。
中度攪乱	材や車輛の通過により落葉層が攪乱され一部無機質土が露出している。
軽度攪乱	材や車輛の通過跡は残るが無機質土は露出していない。 攪乱はごく浅い範囲にとどまっている。 下層植生は折れ曲がる程度。地表面の沈下はごくわずか。

表5-2 調査地の概要

調査地	使用機械	樹種	間伐林齢
八千穂2	ハーベスタ KF746 (11.2トン) フォワーダ RM-8WD-HG (2トン)	カラマツ	34

樹下植栽して複層林が造成された。1998 年春と 2002 年春に、トラクタ走行地と非走行地に分けてヒノキの根元直径と樹高を測定し、成長量を比較した。検定は、t 検定、有意水準 5%，両側検定で行った。

5.3 結果及び考察

5.3.1 林地攪乱

トラクタ集材地（川上調査地）の調査結果を表 5-3 に示した。間伐直後の林地攪乱面積は 159 m²と計測され、調査地 0.4ha に対しての攪乱率は

4%だった。攪乱程度別にみると、重度攪乱 5 m²（3%）、中度攪乱 78 m²（49%）、軽度攪乱 76 m²（48%）と、中度攪乱と軽度攪乱で 97%を占めた。なお、重度攪乱はトラクタが旋回した場所で発生していた。

攪乱程度は年々軽微になり、2年後にはすべてが軽度攪乱と位置づけられた。また、攪乱面積は4年後には間伐直後の2.5%となった。

タワーヤード集材地（高遠1）の調査結果を表 5-4 に示した。間伐直後の攪乱面積は 97 m²で、調査地 1.2ha に対する林地攪乱率は 0.8%だった。

表 5-3 車輛系の林地攪乱（川上）

	1998/12/2	1999/10/26	2000/10/19	2001/9/18
	間伐直後	340日経過	700日経過	1030日経過
重度攪乱	5(3)	0	0	0
中度攪乱	78(49)	10(12)	0	0
軽度攪乱	76(48)	73(88)	11(100)	4(100)
合計	159	83	11	4
間伐直後に対する割合 (%)	100.0	52.2	6.9	2.5
プロット面積に対する割合 (%)	4.0	2.1	0.3	0.1

注) () 内の数字は合計に対する割合。プロット面積は 0.4ha

表 5-4 架線系の林地攪乱（高遠1）

	1999/12/3	2000/10/4	2001/9/19
	間伐直後	300日経過	650日経過
重度攪乱	3(3)	0	0
中度攪乱	10(10)	0	0
軽度攪乱	84(87)	25(100)	0
合計	97	25	0
間伐直後に対する割合 (%)	100.0	25.8	0.0
プロット面積に対する割合 (%)	0.8	0.2	0.0

注) () 内の数字は合計に対する割合。プロット面積は 1.2ha

攪乱程度別には、重度攪乱 3 m^2 (3%), 中度攪乱 10 m^2 (10%), 軽度攪乱 84 m^2 (87%) と、ほとんどが軽度攪乱だった。なお、重度攪乱、中度攪乱は架線下の傾斜変換点(凸型地)で発生しており、こうした地点は地引きされる間伐木が頻繁かつ強く林地に接触するため攪乱程度が大きくなるといえた。攪乱程度は年々軽微になり、1年後にはすべてが軽度攪乱となり、2年後には攪乱地が消滅した。

トラクタ集材、タワーヤード集材とともに間伐直後の攪乱面積は予想外に小さく、攪乱程度も軽微だった。また、これらの攪乱も年数経過とともにすみやかに軽微となった。これらのことから、40年生前後のカラマツ林におけるトラクタ集材、タワーヤード集材による間伐は、林地に重大な攪乱を生じさせないと判断した。

5.3.2 土壌硬度

間伐調査地

八千穂1の土壌深度別硬度を図5-1, 5-2に示した。図5-1は間伐直後、図5-2は間伐後4年経過した2001年の調査結果であり、間伐直後は、深さ5~30cmで機械走行地の土壌硬度が非走行地より有意に高く、4年後でも10~35cmで機械走行地の土壌硬度が有意に高かった。

川上調査地では間伐直後の深さ5~20cmで機械走行地の土壌硬度が非走行地より有意に高く、3年後でも深さ5~15cmで機械走行地の土壌硬度が有意に高かった。

また、八千穂2では間伐6年後に深さ10~15cmで、9年経過では深さ5~25cmで機械走行地の硬度が非走行地に比べ有意に高かった。

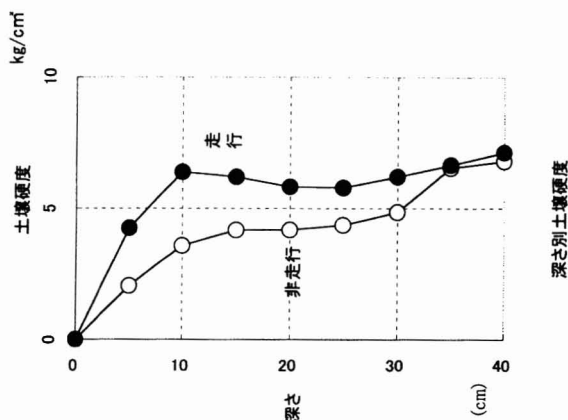


図5-1 深さ別土壌硬度 (八千穂・1997年)
注) 測定点数は走行16点, 非走行14点

以上のことから、トラクタ走行により表層土壌は圧密化され、土壌硬度が高くなると判断され、その影響範囲は土壌表層より下部30cm程度に及び、3~9年が経過してもその影響は残るといえた。

走行試験

走行直後(1997)と3年半後(2001)の測定結果を図5-3, 5-4に示した。非走行地は土壌深度25cmまでは深さに比例して土壌硬度が増加し、それ以下は深さ40cmまではほぼ一定した値をとっていた。これに対して、走行地では、深さ20cm程度まで走行回数の増加にともなって土壌硬度が増し、深さ5~10cmにピークを有する曲線を示した。また、走行1回目から影響が顕著にあらわれ、猪内(1982)とほぼ同じ傾向を示した。4年後には(図5-4), 走行地の深さ5cm~10cmの土壌硬度が全体的に低下し膨軟化を示したが、その他の深さでは大きな変化を示さなかった。

走行地と非走行地の土壌硬度について、走行回数別に有意差の検定を行い、表5-5ならびに表5-6を得た。走行直後は走行回数による差はみられず、深さ5cm~35cm付近で有意差がみられた。この傾向は3年6ヶ月後も同様で、深さ5cm~20cm付近だけで有意差がみられた。

これらのことから、機械走行により表層土壌は堅密化され、その影響は3年6ヶ月後にも残っているといえた。

5.3.3 土壌孔隙組成

八千穂2の最表層における土壌孔隙量調査結果

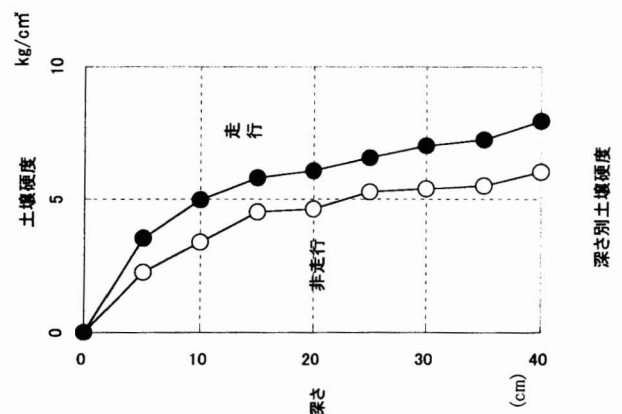


図5-2 深さ別土壌硬度 (八千穂・2001年)
注) 測定点数は走行19点, 非走行8点

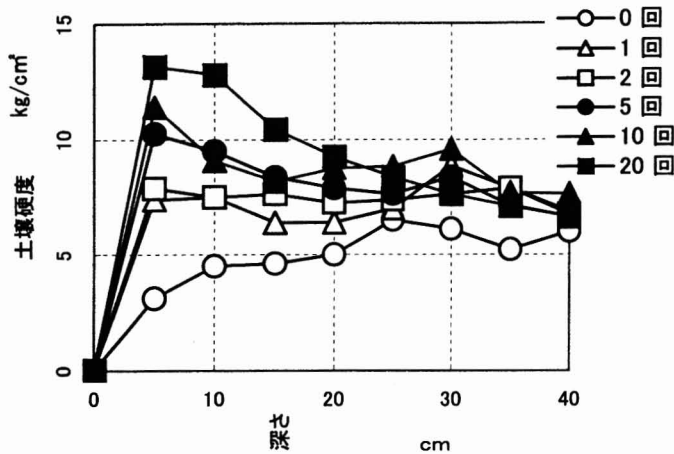


図 5-3 走行試験結果（塩尻市・1997 年）

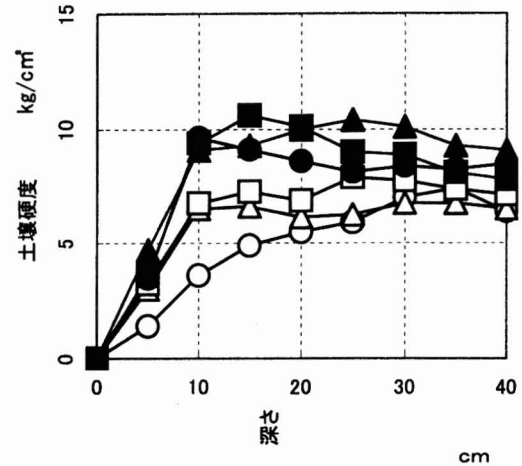


図 5-4 走行試験結果（塩尻市・2001 年）

表 5-5 走行試験地の検定結果・走行直後（塩尻市，1997 年）

	5cm	10cm	15cm	20cm	25cm	30cm	35cm	40cm	測定点数
1回走行	*	*	*	-	-	*	*	-	8
2回走行	*	*	*	*	*	*	*	-	8
5回走行	*	*	*	*	*	*	*	-	8
10回走行	*	*	*	*	*	*	*	*	12
20回走行	*	*	*	*	-	*	*	-	11

注) *は有意差あり。-は有意差なし。

表 5-6 走行試験地の検定結果・走行後3年6ヶ月経過（塩尻市，2001 年）

	5cm	10cm	15cm	20cm	25cm	30cm	35cm	40cm	測定点数
1回走行	*	*	*	-	-	-	-	-	8
2回走行	*	*	*	-	*	-	-	-	8
5回走行	*	*	*	*	*	-	-	-	8
10回走行	*	*	*	*	-	-	-	-	12
20回走行	-	*	*	*	-	-	-	-	11

注) *は有意差あり。-は有意差なし。

を図 5-5 に示した。1991 年と 2000 年の土壌粗孔隙組成を比較したところ、1991 年の土壌粗孔隙率は走行地 21%，非走行地 42%で、走行地ではハーベスタとフォワーダの踏み固め効果による粗孔隙率の減少が著しかった。しかし、2000 年の孔隙組成率は、走行地 42%，非走行地 47%で、両者の差は減少しており、機械の踏み固めにより生じた土壌の圧密化は 9 年で原状に回復しつつあると判断できた。なお、八千穂 1，川上調査地でも八千穂

2 と同様に原状回復しつつある傾向がみられた。

5.3.4 植栽苗木の成長

1998 年と 2002 年のヒノキの樹高と根元直径を図 5-6，5-7 に示した。いずれにおいても、樹高、根元直径ともに走行地と非走行地の差はわずかで有意な差はなかった。このため、ハーベスタあるいはフォワーダによる 1～10 回走行程度の踏み固め効果は、下木に植栽したヒノキの成長に大きな影響を及ぼさなかったと判断した。

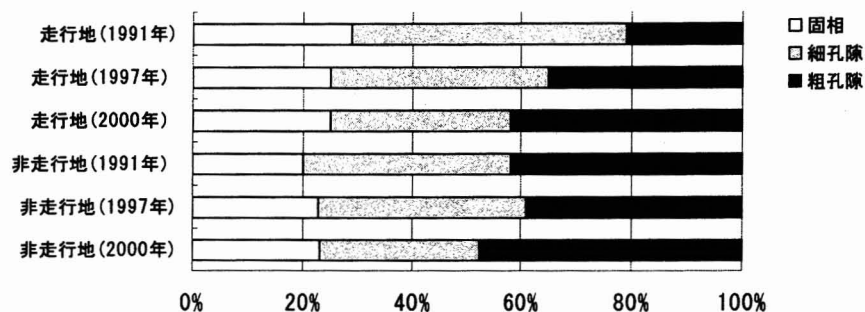


図 5-5 土壌孔隙組成の変化 (八千穂 2)

注) 1991 年は斉藤 (1991 年) による

1997 年の測定点数は走行 2 点, 非走行 4 点

2001 年の測定点数は走行 4 点, 非走行 4 点

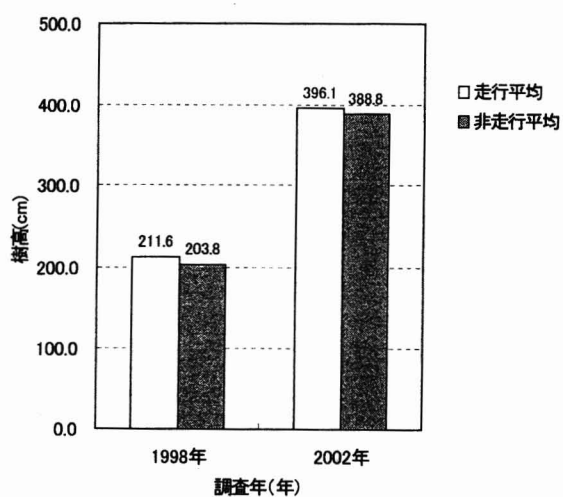


図 5-6 樹高成長 (八千穂 2)

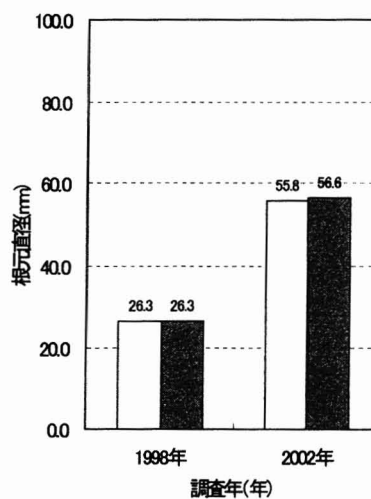


図 5-7 根元直径成長 (八千穂 2)

6 まとめ

6.1 集材システムと残存木の損傷発生

6.1.1 点状間伐と列状間伐

列状間伐の残存木損傷発生率が点状間伐より低かった。このことは、トラクタ集材、タワーヤダ集材に共通した。

なお作業実施者が残存立木の保護を意識することで、損傷木の発生は著しく低下するといえた。

6.1.2 タワーヤダ集材の上げ荷と下げ荷 (点状間伐)

下げ荷集材は、上げ荷に比較して明らかに損傷率が高かった。上げ荷集材では、間伐木の伐採方向と横取り索の引き寄せ方向を同一にすることで40m程度までは損傷木を発生させずに横取りすることが可能だった。

6.2 間伐時の損傷と材質劣化

6.2.1 人工損傷と材質劣化

カラマツ立木に木質に達する損傷を与えたところ、すべての損傷から変色が発生し、損傷面積が大きいほど変色の広がりも大きくなった。

損傷を与えた時期（3月と6月）と変色の進行には明らかな関係はみられなかった。

6.2.2 損傷後の時間経過に伴う材質劣化の進展

3年前に間伐損傷を受けたカラマツ立木では、すべての損傷部から変色が発生していた。幹の上下方向への変色伸展速度は、それぞれ約20cm/年と推定できた。

16年前の損傷部では腐朽が発生し、幹上方200cmに及ぶ腐朽もみられた。

6.3 列状間伐と残存木の偏心

6.3.1 樹冠偏倚

10年前に列状間伐が実施されたカラマツ林では、残存木の樹冠が開放方向（間伐列方向）に偏倚成長していた。

6.3.2 幹の偏心成長

列状間伐後の胸高部肥大成長は樹冠偏倚と同調せず、同一方向への偏心を示した。偏心原因としては風衝が考えられた。

6.4 林業機械の林内走行が土壌環境変化ならびに植栽苗木の成長に与える影響

6.4.1 林地攪乱と土壌堅密化

トラクタ集材、タワーヤダ集材システムともに林地攪乱の発生面積は少なく、これらによる間

伐は林地に重大な攪乱を起こさないといえた。

間伐（機械走行）後に表層土壌は堅密化し、3～9年を経過してもその影響は残っていた。

機械走行後に土壌粗孔隙の減少が著しかったが、9年後には原状回復しつつあった。

6.4.2 植栽苗木の成長

間伐実施地に植栽したヒノキの成長と、機械走行有無の間に有意差は認められなかった。

6.5 おわりに

本研究を進めるにあたり、ご協力をいただいた八千穂村、南佐久北部森林組合、南佐久南部森林組合、上伊那森林組合、北信木材生産センター協同組合の皆様、ならびに佐久地方事務所をはじめとする関係地方事務所林務課の皆様、そのほか本調査にご協力をいただいた皆様にこの場を借りて厚く御礼申し上げます。

引用文献

- 姫野光男(2001)列状間伐—残置林木への影響, 林業技術 709, 24-27.
- 猪内正雄(1982)トラクタ走行による土壌の締め固めと植栽苗木の成長 (I), 岩大演報 13 号, 33-41.
- 井上源基ほか(1998)森林総合研究所研究成果選集, 森林総合研究所, 12-13.
- 近藤道治ほか(2000)機械化作業が森林環境にあたえる影響, 中林研 48, 117-120.
- 近藤道治ほか(2001)機械化作業が森林環境にあたえる影響Ⅱ—タワーヤダによる間伐作業が残存木にあたえる損傷, 中林研 49, 149-150.
- 近藤道治ほか(2001)機械化作業が森林環境にあたえる影響Ⅲ—タワーヤダによる間伐作業が残存木にあたえる損傷, 中林研 50, 201-202.
- 中山富士雄(1997)列状間伐の林分に与える影響について, 日林九支研講 50, 79-80.
- 岡 勝ほか(1992)高性能林業機械の伐出作業システムに関する研究 (I) 103 回日林論: 655-656.
- 林野庁(1997)試験研究設計書, 林野庁, 35.
- 斉藤奈生子(1991)高性能機械によって林地が受けた被害について, 信州大学卒業論文.
- 澤口勇雄ほか(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, 森利学誌 15(1), 33-42.
- 島崎洋路ほか(1984)カラマツ樹幹の偏心生長について, 日林中支講 32, 89-92.

- 武井富喜雄(1984)カラマツ列状間伐における残存木の偏心生長について, 日林中支講 32, 93-96.
- 武井利之ほか(2002)人為的傷害に由来するカラマツ材の劣化, 東北森林科学会誌 7(1), 20-22.
- 徳田佐和子ほか(1996)林業機械作業によるトドマツ立木の損傷と腐朽, 107 回日林論, 227-280.
- 徳田佐和子(1998)エゾシカによる剥皮被害から進行したトドマツ生立木の腐朽, 109 回日林論, 379-382.
- 徳田佐和子(2000)剥皮部から進行したトドマツ生立木の腐朽, 48 回日林北支論, 98-101.
- 富田ひろし(1981)スギ樹幹に対する打撃ならびにはく皮による変色, 92 回日林論, 331-332.