

複層林の上木間伐にともなう下木損傷軽減と複層林造成に関する研究

近藤道治

近年、森林に対する国民の要望は多様化し、とくに複層林は非皆伐であり公益的機能を維持する効果が大きいことから、全国で造成されている。しかし、技術的裏付けが不十分なままに実行が急がれており、上層木が閉鎖して林内が暗く、下層木の成長が抑えられている林分も多い。このため、早急に上木間伐が望まれるが、その際、下木に多数の損傷が発生することから、下木損傷を軽減する作業方法の確立が大きな課題となっている。本論文では、上木伐採にともなう下木損傷の発生と損傷を受けた下木のその後の生育状況を分析し、下木損傷を軽減する作業法と複層林造成法を提案した。その内容は以下のとおりである。(1) 複層林の上木間伐にともなう下木損傷の実態を、林型の異なる複層林で調査したところ、上木と下木をランダムに植栽した点状複層林では多数の下木に損傷が発生し、3残2伐列状複層林(3残2伐列状間伐を行った伐採跡に下木を列状に3列植栽した複層林)で下木損傷が少なかった。(2) カラマツ・ヒノキ複層林で、カラマツの間伐により損傷を受けたヒノキの5成長期経過後の生育状況を調査したところ、伐採により倒伏したヒノキは回復していなかった。また、傾斜したヒノキの33.3%は立ち直っていなかった。幹や梢端が折れたヒノキは、折損部分が「S字状」や「ほうき状」になるものが多くみられた。また、ヒノキの枝が25%以上折れると傾斜するものが多く、「曲がり材」になる可能性が高いと考えられた。樹皮剥離面積の大きいヒノキでは変色や腐朽が広がり、劣化が進んでいた。(3) 上木間伐にともなう下木損傷軽減法を、列状複層林と点状複層林を対象に検討した。その結果、点状複層林では、最大傾斜方向に対し偏角20度未満で伐採すること、列状に伐採すること、山側に向けて伐採すること、列状複層林では、植栽列に沿って伐採すること、山側に向けて伐採すること、が重要であることを明らかにした。(4) 今後複層林を造成するためには、上木を3列以上残す列状(帯状)複層林と最終間伐時に残存木を300本/ha程度まで少なくする点状複層林が良いと考えられた。また、管理および作業のしやすさという視点から路網密度を高めることが重要であり、路網間隔は100mを目標とすることが望ましいと考えられた。

キーワード：複層林、上木間伐、下木損傷軽減、複層林造成

目次

第1章 序論

1.1 緒言

1.2 既往の研究

1.2.1 複層林造成後の下木成長に関する研究

1.2.2 帯状・列状複層林の下木成長に関する研究

1.2.3 庇陰試験と下木成長に関する研究

1.2.4 林内光環境の測定に関する研究

1.2.5 低コスト育林のための複層林造成に関する研究

1.2.6 複層林施業と下木の形質に関する研究

1.2.7 複層林造成後の上木成長と上木枝打ちが上木の形質に及ぼす影響に関する研究

1.2.8 複層林と気象害に関する研究

1.2.9 複層林の土壌保全効果に関する研究

1.2.10 複層林の上木伐採と下木損傷に関する研究

第2章 複層林の上木間伐にともなう下木損傷の実態

2.1 はじめに

2.2 調査方法
2.3 結果と考察

- 2.3.1 残存木の損傷
- 2.3.2 作業別損傷発生状況
- 2.3.3 下木の損傷発生原因
- 2.3.4 損傷形態

2.4 まとめ

第3章 複層林の上木間伐により損傷を受けた下木ヒノキの生育状況

3.1 はじめに

3.2 調査方法

- 3.2.1 伐採にともなう損傷の発生状況
- 3.2.2 受傷木の生育状況
- 3.2.3 標本木による樹幹解析

3.3 結果と考察

- 3.3.1 伐採にともなう損傷発生状況
- 3.3.2 受傷木の生育状況
- 3.3.3 標本木による樹幹解析
- 3.3.4 実質的な下木被害の推定

3.4 まとめ

第4章 列状複層林の上木事前枝払いによる下木損傷軽減

4.1 はじめに

4.2 調査方法

4.3 結果と考察

- 4.3.1 枝払い作業
- 4.3.2 下木の損傷
- 4.3.3 作業別損傷発生状況
- 4.3.4 損傷形態
- 4.3.5 伐倒方向のずれと下木損傷

4.4 まとめ

第5章 点状複層林の上木列状間伐にともなう下木損傷軽減 - 上木の列状間伐と点状間伐の比較 -

5.1 はじめに

5.2 調査方法

5.3 結果と考察

- 5.3.1 下木の損傷
- 5.3.2 列状間伐での集材作業による下木損傷原因の解明
- 5.3.3 列状間伐における倒伏の発生と偏角との関係
- 5.3.4 地形に適した列状間伐を行った場合の下木損傷率の推定

5.4 まとめ

第6章 点状複層林の上木の山側伐倒と上木の事前枝払いにともなう下木損傷軽減

6.1 はじめに

6.2 調査方法

6.3 結果と考察

- 6.3.1 伐倒方向による下木損傷率の比較
- 6.3.2 事前枝払いによる下木損傷軽減効果
- 6.3.3 伐倒木の樹冠内に入った下木の損傷
- 6.3.4 伐倒作業にともなう下木損傷率の推定

6.3.5 伐倒作業にともない発生する下木損傷の形態

6.3.6 集材作業による下木損傷

6.4 まとめ

第7章 下木損傷軽減対策と複層林造成

7.1 はじめに

7.2 下木損傷軽減対策

7.2.1 点状複層林における下木損傷軽減

7.2.2 列状複層林における下木損傷軽減

7.2.3 下木損傷軽減のためのその他の方法

7.2.4 下木損傷軽減のとりまとめ

7.3 今後の複層林造成

7.3.1 路網整備

7.3.2 複層林造成

7.3.3 今後の複層林造成のとりまとめ

第8章 総括

8.1 複層林の上木間伐にともなう下木損傷の実態

8.2 複層林の上木間伐により損傷を受けた下木ヒノキの生育状況

8.3 列状複層林の上木事前枝払いによる下木損傷軽減

8.4 点状複層林の上木列状間伐にともなう下木損傷軽減 - 上木の列状間伐と点状間伐の比較 -

8.5 点状複層林の上木の山側伐倒と上木の事前枝払いにともなう下木損傷軽減

8.6 下木損傷軽減対策と複層林造成

8.7 まとめ

謝辞

引用文献

第1章 序論

1.1 緒言

戦後日本の拡大造林推進の時代には、生産性を高めることや画一的管理の容易さから、大面積皆伐一斉更新が森林施業の主流であった(94)。しかし近年、森林に対する国民の期待は多様化し、森林のもつ多面的機能に深い関心がもたれ、多様な森林づくりに期待が寄せられている(16)。ことに複層林は非皆伐であるため、水資源の確保、山崩れの防止、風致維持など公益的機能を維持する効果が大きく(11)、全国で造成が図られてきている(20)。

長野県でも以前からアカマツ林やカラマツ林の林床にヒノキが植栽され、集約的な複層林施業が行われているところが各所でみられた。これらは林地を有効に利用して収穫の持続性を高めることを目的とした複層林施業であった。また、寒冷地では裸地に植栽した場合、幼樹が寒害を受けることが多いので、それを避けるために林内に樹下植栽するやり方で更新が行われてきた。さらに、

1970年代になって、カラマツ材の売れ行き不振が目立つようになり、カラマツを主伐した後、ヒノキを仕立てていく施業をするために、カラマツの下にヒノキを植栽する機会が増えてきた(87)。

複層林は単層林に対する概念で、2層以上の木本の階層を有する森林のことで、その発達度合いにより二段林、多段林、択伐林などと分けて呼ばれている(20)。また、複層林を林冠層の重複期間で見ると、常時二段林状態を維持する林分と、一時的に二段林を形成する林分がある(58)。一時的な二段林については、その大部分の期間が二段林状態を維持する長期二段林と主伐前のわずかの時期だけ二段林が形成される短期二段林に分けることができる。さらに林分の配置からは、帯状複層林や群状複層林と呼ばれる複層林もみられる。

このような複層林の利点をまとめると次のとおりである(58)。高価値材の生産：上木が長期間残存し、蓄積が増大するとともに大径材生産が可能になる。また、下木は幼齢期に庇陰下で生育

するため、特に直径成長が抑制され、いわゆる芯づまりの年輪幅の揃った材の生産が可能である。従って、結果的に良質材ができるようになる。収穫の保続と弾力性：小面積所有者でも無理なく大径材の生産が可能になり、継続的に収穫ができるようになる。さらに、同一林地から大～小径材が生産し得るため、多様な需要に対応できる。下刈り作業の省力化：皆伐跡地の造林地では、下刈りは6～7年間連続して行わなければならないため労働負担が多く、また、保育経費の45%ほどを占めている。これに対して、複層林施業では更新が林内であるため雑草木の繁茂が少ないので、下刈りの省力化が図られ、ときには省略できる。また、炎天下で行うことの多い苛酷な下刈りの条件緩和になり、作業環境の改善に役立つ。その他にも、諸被害に対する抵抗性の増大、地力維持効果、山腹崩壊防止機能の向上、水源かん養機能の向上、風致・景観の維持などがあげられている。

しかし、現在進められている複層林造成は、施業の本質の理解や技術的裏付けの不十分なままに実行ばかり急がれているらしい(20)、長野県の民有林で造成した複層林においても、上層木が閉鎖して林内が暗く、下層木の成長が抑えられている林分が多い。その理由として、下木を傷めないで、上木を伐倒する技術が明確でないこと、複層林を造成した場合の上木および下木それぞれの適正密度が明確にされていないこと、などがあげられている(88)。

このように、複層林には解決を急がなければならない技術上の課題も多いが、その中で特に緊急を要する課題としては、複層林の上木間伐法があげられている(34)。多くの複層林は造成から時間が経過して、照度調節のために上木を間伐する時期に来ている。しかし、上木伐倒により多数の下木に損傷が発生するといわれているが、調査事例は少なく、下木損傷を軽減する作業方法の提示もほとんどみあたらない。そこで、本論文では上木伐倒にともなう下木損傷の実態を明らかにし、損傷を受けた下木の5成長期後の生育状況を調査するとともに、下木損傷を軽減する作業方法を検討することとした。

まず第2章では、様々な林型の複層林で上木間伐を実施して下木損傷の実態を明らかにした。

第3章では、複層林の上木間伐にともない損傷を受けた下木ヒノキの5成長期後の生育状況を明

らかにした。この調査結果から、損傷が下木の成長に及ぼす影響を検討した。

第4章から第6章にかけては、複層林の上木間伐にともなう下木損傷の軽減法を検討した。

まず第4章では、上木と下木が列状に交互に植栽された列状複層林において、事前枝払いを行った場合と行わない場合での下木損傷の違いを明らかにし、枝払いの有効性について検討した。

第5章では、上木と下木がランダムに植栽された点状複層林において、上木を列状間伐した場合と点状間伐した場合の下木損傷の違いを明らかにし、列状間伐の有効性を検討した。

第6章では、点状複層林において、上木を山側に伐倒した場合と谷側に伐倒した場合で下木損傷の違いを明らかにするとともに、事前枝払いを追加することによる下木損傷の違いを明らかにした。これらのことから、点状複層林における上木の山側伐倒と事前枝払いの有効性を検討した。

第7章では、第2章から第6章までのとりまとめとして、上木間伐にともなう下木損傷軽減対策を、列状複層林と点状複層林に分けて明らかにすることとした。また、複層林造成後の管理のしやすさという視点から、路網整備も含めて今後の複層林造成法を考察した。

1.2 既往の研究

本論文は、筆者らが行った複層林の上木間伐にともなう下木損傷軽減と複層林造成に関する研究成果をまとめたものである。ここでは研究の背景にある既往の研究成果をとりまとめた。まず、複層林造成後の下木成長に関する研究を取り上げ、次に、複層林内光環境の測定方法および低コスト育林のための複層林造成に関する研究を、さらに複層林施業と下木の形質との関係および複層林造成後の上木の成長、複層林と気象害に関する研究などを取り上げる。最後に本論文と関係する複層林の上木伐採と下木損傷に関する研究について概説する。

1.2.1 複層林造成後の下木成長に関する研究

複層林造成を進めるための資料が少なかったこともあり、1970年代から複層林造成後の下木成長や複層林内の光環境に関する研究が精力的に進められた。複層林の下木成長について、上木の樹種別にとりまとめた。

1.2.1.1 上木がスギ・ヒノキの場合

まず、上木がスギ・ヒノキの場合の研究につい

て述べる。玉井ら(152)は、45年生のヒノキ林に植栽した下木ヒノキの2年後の枯死率を調べ、相対照度の低いプロットで枯死率が高く、相対照度が高くなると枯死率が低くなり、30%付近で枯死率0%になることを示した。池本(37)は、スギ幼齢木の伸長率と梢端部における季節別の全光相対照度との関係を調査し、上層木がスギの場合は成長期の全光相対照度が強く関係し、上木が広葉樹の場合は、広葉樹の展葉終了頃の全光相対照度が強く関係していることを示した。川那辺ら(59)は、45年生のヒノキ人工林内で、下木の5年間の成長量と上木の密度や林内相対照度との関係を検討し、下木ヒノキの直径成長量は皆伐区が最大で、間伐の度合いが低い区ほど小さく、樹高成長量は強度間伐区では皆伐区との差は小さいことを示した。

農林水産省林業試験場(現独立行政法人森林総合研究所)の複層林施業研究班(26, 30)は、上木の間伐強度と上木の枝打ち強度を変えた二段林で林分の成長量を比較し、上木の間伐や枝打ち強度が高いほど下木の成長は増加するが、上木の林分成長は逆に減少することを明らかにした。安藤ら(5, 7~10, 13~14)は、上木の林分密度と下木の成長について研究を行い、上木と下木の密度管理と成長予測を行った。鈴木ら(127~128, 131~133)は、上木がヒノキの場合は、上木がスギの場合と比べて林内相対照度の低下が早く、下木ヒノキの成長量も抑制されていることを示すとともに、スギ-スギ複層林において、低密度の上木でも下木の成長量が低下することを明らかにした。兵藤ら(36)は、ヒノキ林分内に植栽されたヒノキが林内相対照度10%以下になると急激に生存率が低下すると報告した。また、山嶋(168)は、ヒノキ-ヒノキ複層林とヒノキ-スギ複層林で、複層林設定から10年間の林分変化について報告した。

上中ら(51)は、ヒノキ林内の更新樹の成長を調査し、強光環境の場合は樹高と直径成長は大きく、形状比は弱光環境の場合が大きく、弱光環境ほど樹高の低い細い樹型になることを示した。中村ら(90)は、複層林化してまもないヒノキ-ヒノキ林の現況を調査し、長野営林局の「複層林の施業基準」と比較したところ、上木の断面積合計はほとんどの林分で過大であることを示した。

酒井ら(119)、竹内ら(137, 147)、近藤ら(61)、古嶋ら(60)は、二段林で上木密度と下木成長との

関係を検討し、下木の成長は上木密度の違いによる林内光環境が反映され、年齢とともにその差が大きくなることを明らかにした。また、竹内(149)は、複層林施業の中でスギ-ヒノキ二段林施業について、比較的年数が経過した林分の実態や短期二段林施業および帯状複層林施業の事例を紹介した。門松ら(49)は、上木スギ・ヒノキ林内にスギを植栽した2つの固定プロットで、下木の成長経過と林内照度について検討し、植栽後2年経過で樹高に差が生じ、15年経過するとその差が大きくなることを示し、この原因として林内照度が大きく関与していると報告した。

池本ら(38)は、林齢16年~89年のスギ林などに18点の試験地を設定し、9年間にわたる調査を行い、全光相対照度が経年により低下する程度は、若年で樹高の低い林分は急激に低下し、高齢で樹高の高い林分は穏やかに低下することを示した。また河原(56)も、複層林を造成する林齢について検討し、上木成長が盛んな林分に樹下植栽すると、かなり短い時期で光調節のための再間伐を実施する必要がある5年間の樹高成長が1m以下まで上木の成長が低下した林分を対象に複層林造成をするのが得策であることを報告した。笹川ら(121)は、二段林下木の林分構造を解析するとともに、二段林下木成長モデルを作成した。さらに、龍原(158)は、上木と下木の成長を統一的に表わすことができるスギ二段林の成長モデルを作成した。

國崎ら(75)は、複層林の造成・維持管理のために作成した指標を用いて民有林で造成された複層林の現況を把握し、スギ-スギまたはスギ-ヒノキ複層林は健全な林分が多かったが、気象害や病害が発生したスギ林分で、下木にスギまたはヒノキを植栽して複層林化した場合は、良好な生育状態を維持しているとは言い難い現状を明らかにした。谷口(155)は、ヒノキ-ヒノキに大ききの異なるギャップを作ってケヤキを植栽し、ギャップ内の植栽位置で変化する積算日射量によってケヤキの伸長量が著しく影響を受けていると報告した。

1.2.1.2 上木がアカマツ・カラマツの場合

次に上木がアカマツ・カラマツの場合の研究について述べる。安藤ら(12)は、岩手大学演習林に生育するカラマツ-ケヤキ複層林の林分解析を行ない、カラマツとケヤキは同時に植栽されたがカラマツの成長がケヤキより勝っていて、複層林状態になったと報告した。河原(57)は、アカマツ

林を間伐して、ヒノキを樹下植栽する場合には、樹冠の閉鎖を 50%くらいになるように間伐して、林内を相対照度 30%前後の明るさにすれば、下木ヒノキの成長は林外のものに比べてそれほど大きな遅れはないと推定した。

片山ら(53~55)は、カラマツを列状間伐して下層にトドマツを植栽し、その後 2 度に分けて 50%の定性間伐を実施した。間伐により下木のトドマツは成長が促進し、残存カラマツも樹高ならびに直径成長が増大したとしている。

片倉ら(52)は、収量比数を指標として、カラマツ人工林の林内相対照度をアカマツ人工林と比較すると、アカマツ林の方が明るいと報告した。

一方、カラマツ - カラマツ複層林の可能性についても研究が行われた。藤田ら(22)は、カラマツを 30 本/ha, 50 本/ha, 70 本/ha, 100 本/ha に強度間伐して樹下に 2000 本/ha のカラマツを植栽し、下木カラマツの成長を低下させないためには林内相対照度 60%以上を維持することが好ましいことを明らかにした。福地(23)は、カラマツ - カラマツ二段林を仕立てるためには上木の本数管理による林内照度のコントロールが重要で、上木の残存本数を ha 当たり 100 本にすると林内照度は 75%程度を確保でき、植栽木の樹高成長の低下を 5 年生までで 10%程度におさえることができると報告している。小山(73)は、カラマツとトドマツを上木とする複層林造成が可能かどうかを判断するための調査を行ない、トドマツ - トドマツ林やカラマツ - カラマツ林という形態は避けた方がよく、カラマツ - トドマツ林の場合は、上木が疎仕立てに保育されている林分において成立可能であると推定している。

1.2.1.3 上木が広葉樹の場合

続いて上木が広葉樹の場合の研究について述べる。沖野(104)は、天然林で択伐を実施して下木にトドマツを植栽したところ、16 年生のトドマツの樹高は裸地が最高で、ついで広葉樹林の樹下、針広混交樹の樹下、針葉樹林の樹下の順であり、孔状裸地の面積が 0.16ha までの範囲では、面積の大きさに比例してトドマツの樹高成長が大きな値を示し、林齢が高くなるほどこの傾向が強くなることを示した。糸屋ら(46)は、有用広葉樹の大径材誘導のため、疎開度を変えた広葉樹林下にスギの下木植栽を行い、林内照度が少ないほど直径成長は劣るが、樹高成長にはあまり影響がみられないと報告した。

中尾ら(91)は、庇陰下でのカシ類の発生当年の成長特性を庇陰試験により比較したところ、耐陰性の強さはアカガシ・ウラジロガシ>シラカシ・イチイガシ>ウバメガシ・ハナガガシ・コナラの順であることを示した。石塚ら(42~43)は、上木が広葉樹とトドマツが混交した林分の林内散光照度と林内に生育する 6 種類の広葉樹稚樹の伸長量を調べたところ、林内散光照度 900 ルクスが林内で下木が生育できるおおよその限界であることを示した。また、落葉広葉樹林内の照度は、全天照度が 50 キロルクス以下のときに全天照度と直線関係に収斂する傾向がみられ、直達光の影響がほとんど無くなっていくことを示した。前田ら(78)は、ケヤキ - スギ二段林でスギの生育状況を調べ、ケヤキの樹冠下のスギは樹冠外のスギに比べて成長は劣り、樹幹下のスギを生かすためには、ケヤキの枝とスギとの間隔を少なくとも 4m 以上確保する必要があると報告した。

山口ら(167)は、広葉樹林において上層木の本数密度を変えて間伐を行った後、下層に広葉樹を植栽し、ミズメ、ブナは庇陰の程度が成長に強く影響するが、耐陰性に優れている樹種であることを示した。また、ミズキ、カツラは庇陰の程度が成長に与える影響は比較的小さいが、耐陰性の劣る樹種であることを示した。

1.2.1.4 上木が混交林の場合

さらに上木が混交林の場合の研究について述べる。赤井ら(1~3)は、近畿地方にみられるヒノキ、スギ、アカマツあるいは広葉樹が階層的に混交した複層林で、その林分構造と複層林造成法を明らかにした。

1.2.2 帯状・列状複層林の下木成長に関する研究

1980 年代後半からは帯状および列状複層林が造成されるようになり、それら複層林の下木成長に関する研究が進んだ。荒上ら(17)は、26 年生のスギに対し 3 残 2 伐と 3 残 1 伐の列状伐採を行い、伐採跡地にヒノキを植栽した。その結果、間伐後の相対照度は 40~60%とかなり明るくなったが、10 数年後には再び数%程度まで低下したことを確認した。また伐採後 20 年経過すると、3 残 1 伐区のスギは光不足のため樹高・直径成長ともに極端に劣り、3 残 2 伐区ではヒノキの樹高成長は優れているが直径成長はやや劣ることを示した。及川ら(99)は、カラマツ林およびアカマツ林にそれぞれ幅 30m の帯状伐採区と帯状保残区を交互に設定し、帯状伐採区にスギを植栽した。

23 年経過した時点のスギ植栽木の胸高直径成長および樹高成長は、アカマツ伐採区よりカラマツ伐採区で良好であり、スギ植栽木の形状比 90 以上の個体は、カラマツ伐採区よりアカマツ伐採区で多いことを明らかにした。

九島ら (77) は、間伐の方式 (1 残 1 伐, 2 残 1 伐, 2 残 2 伐, 3 残 2 伐, 3 残 1 伐 + 定性, 定性) によって、上木カラマツと下木トドマツの胸高直径や樹高などの成長形質に違いが現れるかを明らかにした。上木カラマツの胸高直径は、平均値が最大の 1 残 1 伐と最小の定性区との間に有意な差があったが、その他の間伐方法では有意差はなく、下木トドマツは胸高直径・樹高ともに 2 残 1 伐区が他の間伐方法と比較して有意に小さいことを明らかにした。安藤ら (15) は、小岩井農場で行っている带状更新地の光環境を日射指数で示し、日射指数と 6 年生スギ植栽木の成長との関係を求めた結果、日射指数の大きいところと小さいところでは、胸高直径に 2.2 倍以上、樹高には 1.7 倍の違いがあることを明らかにした。

谷口 (156) は、带状伐採跡地の相対積算日射量は伐採帯の中央付近で 70~90% 前後であり、林縁付近では 30% 以下、保残林内では 20% 以下であると報告した。溝上ら (84) は、優勢木平均樹高が約 18m の 65 年生ヒノキ一斉林において皆伐帯幅約 14m、保残帯幅約 19m で交互带状皆伐が行われてから 26 年経過した带状複層林のスギ・ヒノキ下木の成長を調査し、樹高と胸高直径は皆伐帯中央が大きいことを明らかにし、皆伐帯でのスギ・ヒノキ下木の樹高成長は隣接する一斉林と同程度であることを示した。久保田ら (74) は、高知県内 3 か所の带状伐採地において、日射量計算プログラムの有効性を相対日射量の計算値と測定値との比較により示した。

1.2.3 庇陰試験と下木成長に関する研究

光環境と下木成長の関係を把握するため、1990 年代を中心に庇陰試験に関する研究が進められた。安藤ら (6) は、スギ苗木の成長に及ぼす光の強さと植栽密度との関係を知るため、光の強さと密度をかえて 24 通りに組み合わせた実験を行ない、それぞれの光の強さにおいて、植栽密度の増加に伴い平均個体量は減少したが、単位面積当たりの現存量が増加することを明らかにした。また、それぞれの植栽密度において、光の強さと平均個体量または現存量の関係は最適曲線を描くことを示した。農林水産省林業試験場複層林施業研究班 (27

~29) は、数多くのスギクロンの耐陰性の検討を行なうとともに、複層林下木のスギ稚樹の年間伸長量を調査し、年間伸長量は林内相対照度と関係し、とくに林内相対照度が約 20% 以下で高い相関が認められることを示した。千葉ら (159) は、下木スギ・ヒノキの光環境と生育との関連性を調査し、樹高・根元径の成長量はスギ・ヒノキともに植栽後 1 年目より 2 年目の方が大きいことを示した。

鈴木ら (129) は、光条件と水分条件を変えてスギ、ヒノキ苗木の成長を調べた。その結果、水分条件と樹高成長の関係は、露地区 > 庇陰区 > 庇陰 + 常時水分供給区となり、T/R 率は庇陰が強いほど高い傾向にあることを示した。岡村ら (103) は、四国産スギ精英樹の低照度庇陰下における幹曲がりについて検討し、幹曲がりが小さく枯損が発生しにくいクローンとして奈半利 2、本山 2、馬路 3 が好ましいことを示した。また、竹内ら (136) は、植栽後 6 年間余りを相対照度 5% 前後の環境で生育し、その後 11 年生まで 30% 前後で生育した四国産スギ精英樹のクローンや系統の枯損率を調査するとともに、成長量、幹曲がり等も調査した。

1.2.4 林内光環境の測定に関する研究

複層林の下木を健全に生育させるため、林内光環境を簡易に正確に測定する必要があり、1970 年代から林内光環境測定方法について積極的に研究が進められた。

玉井ら (150~151) は、全天写真を利用して林内の相対照度を求める方法を検討した。その結果、写真撮影は適正露出で撮影し、曇りの日中に林外照度が 20000 ルクス以下の状態で撮影することが望ましいことを示した。農林水産省林業試験場複層林施業研究班 (25) は、全天写真利用およびジアゾ感光紙利用による測定方法を確立し、さらには照度積分計の開発に関する研究を進め、それぞれ実用化の見通しを得た。

宇都木 (163~164) は、全天写真で推定した開空度と下木ヒノキの各成長因子との関係を調べ、材積相対成長率との相関が高いことを示した。また、ヒノキ林下の微細に異なる光環境と、低木層個体の重量及び高さの頻度分布の関係を調べたところ、林内の相対光合成有効光量子束密度が増加すると、同一林内でも低木層の現存量が増え、植生高が高くなることを示した。

遠藤ら (19)、福島 (24)、秋山ら (4) は、簡易

積算日射フィルムを用いた林内光環境の計測方法について検討し、フィルム日射型が簡便で有効であることを示した。斉藤ら(116)は、閉鎖したヒノキ人工林を対象に多数の簡易光量子センサーを用い、林冠内の散光および直達光起源の光の出現様式を解析した。佐々木(123)は、林内の6mの高さでPPFD(光合成有効光量子束密度)及び相対PPFDを計測し、季節変化を認めしたが、高さ1.5mではいずれも季節変化を認めることはできなかったと報告した。

1.2.5 低コスト育林のための複層林造成に関する研究

1990年代には育林費を押さえた次世代の森林造成を複層林で実施する研究が進められた。竹内ら(143,146)、井上ら(39~40)は、帯状伐採跡地にスギ・ヒノキを植栽して下刈りを省略したところ、スギは7年後までに広葉樹との競合から抜け出したが、ヒノキは7年後も競合状態であることを確認した。また、複層林下に生える広葉樹の中で、カラスザンショウやアカメガシワが下木の成長を抑制する可能性のあることを明らかにした。さらに、竹内ら(142,145)は、スギ・ヒノキ60~63年生の林分で50%間伐を実施して0.8mの大型苗木を植栽し、下刈りは実行しなかったが雑草による被害は顕著ではなく、比較的成長は良好であると報告した。

1.2.6 複層林施業と下木の形質に関する研究

1990年代には複層林の下木の形質に関する研究も進められた。竹内ら(138)は、スギ・ヒノキの二段林で下木の植栽位置の違いが下木の幹の傾きやクローネ幅と関連がみられるかを検討し、下木のクローネ幅は上木の反対方向で大きく、上木の樹冠下で特に大きいことを明らかにした。また、竹内ら(144)は、スギ・スギ二段林とスギ・ヒノキ二段林で、上木のすべてを伐採したあとの下木成長について検討した。下木スギの成長量は、伐採後1年目は胸高直径、樹高とも伐採前より増加し、増加程度は胸高直径が樹高に比べて大きかった。その後成長量は増加し、成長量が一定になったのは胸高直径が伐採後3年目以降、樹高が4年目以降であることを示した。また、上木伐採後8年経過しても、下木期の遅れを回復することができないことを明らかにした。

1.2.7 複層林造成後の上木成長と上木枝打ちが上木の形質に及ぼす影響に関する研究

1980年代後半からは、複層林の下木成長と平行

して上木成長についても研究が進められた。また、複層林の林内光環境を維持するための上木枝打ちが上木の生育に及ぼす影響についても研究が行われた。岩神ら(47)は、ヒノキ二段林で上木を間伐したところ、一部の個体を除いて間伐4~5年後に上木に肥大成長の上昇を認めた。竹内(148)は、上木がスギの複層林を対象に後生枝発生個体(間伐後に正常な枝より低い位置に枝が発生した個体)を調査した。後生枝発生個体はすべての林分で認められ、無枝打ちのスギ上木では複層林造成時に間伐率が高く、密度を低くした林分で後生枝の発生が多いことを明らかにした。さらに竹内(141)は、複層林造成後、林内の光環境を改善するために上木スギの枝打ちを実施した林分で、枝打ち部分からの変色発生調査を行い、枝打ちは材内部に変色や腐朽を発生させる可能性が大きいことを明らかにした。

1.2.8 複層林と気象害に関する研究

1980年代中頃からは複層林造成後の気象害について、冠雪被害を中心に研究が進められた。小野寺ら(105,107~108)は、多雪地に造成されて11年が経過した複層林(二段林と10m幅、15m幅、20m幅の帯状複層林)を調査し、林内の積雪深の平均値は20m幅>二段林>15m幅>10m幅の順に大きいことを示した。また、各林分の樹高および根元曲がり量の平均値は、20m幅>15m幅>10m幅>二段林の順に大きいことを明らかにした。

大原ら(98)は、上木のスギを材積率50%の単木択伐と70%群状択伐を実施し、スギを樹下植栽した。その結果、相対照度の高いところでは樹高成長は大きい積雪深も大きくなり、沈降圧の影響が大きいこと、単木区は上木からの冠雪落下による下木の損傷被害が植栽後しばらくの間多く発生し、群状区は移動圧の影響がより大きく現れ、傾幹幅や折損被害が増加することを示した。

小野寺ら(106)、栗田ら(76)は、伏条更新による多数の安定した後継樹が準備されている天然生のスギ複層林では、上層木に対する適正な管理(疎開)を行うことでスムーズな世代交代が可能であり、かつ良好な直径成長が期待できると報告した。樋口ら(33)は、斜面上部と斜面下部が樹高30mのスギ上木にはさまれた帯状複層林で冠雪による被害調査を行い、胸高直径と樹高の大きな個体ほど冠雪による被害が軽度であった。また、斜面下部の下木は重度の被害を受けたものが多く、斜面上部のものはそれより軽く、斜面中部のもの

はさらに軽いか、被害を受けていない個体が多く認められたとの調査結果を示した。

落合ら(110)は、愛媛県久万地方の複層林で発生した冠雪害を調査し、スギに比べてヒノキではほとんど被害は発生していないことを示した。また、幹折れは比較的大きくて形状比の高い個体に多く、幹曲がりには比較的小さな個体に発生していた。さらに、形状比110を超える個体の被害率が非常に高いことを示した。矢野ら(169~170)は、アカマツ・スギとアカマツ・ヒノキ複層林において冠雪害が発生した林分の調査を行ない、アカマツ・スギ複層林ではスギの形状比が高かったため、アカマツ・ヒノキ複層林ではヒノキの樹型が傘状であったため被害が多くなったと述べている。和口ら(165)は、スギ・スギ二段林で冠雪害が発生した林分で調査を行い、皆伐一斉林のスギと比べて形状比が大きくて冠雪害を受けやすい形状であることを示した。また、林間空隙率の大きいところに位置する下木は、上木の保護を十分受けておらず、林間空隙率の小さいところに位置する下木に比べて高い率で被害が発生したと報告した。

高瀬ら(135)は、ヒノキ・ヒノキ複層林の下木に発生した冠雪害について調査し、一斉林の被害率は3~19%であったが、複層林は39%と被害率が高く、複層林の被害は樹冠下にある下木よりもギャップ付近およびギャップにある下木に発生しやすいことを明らかにした。前田(79)は、多雪地帯におけるケヤキ・スギ二段林を対象に樹冠下のスギの成長と樹幹の形状を調査し、隣接するスギ一斉林と比較した。一斉林のスギに比べ、樹冠下のスギは樹高、胸高直径ともきわめて成長が悪く、全体の70%におよぶ立木が雪圧害による倒伏被害を受けていることを報告した。

1.2.9 複層林の土壌保全効果に関する研究

1990年代には複層林の土壌保全効果についても研究が進められた。荒木ら(18)、宮川ら(83)は、複層林上木伐採跡地と一斉林皆伐・新植地で林床の植被率を調査したところ、複層林上木伐採跡地の方が植被率は高く、複層林上木伐採前と伐採後で植被率を比較したところ、伐採後の方が植被率は高いことを示した。さらに、複層林の上木伐採により表層土壌の物理性は劣化するが、その程度は皆伐よりも少なく、複層林施業が皆伐施業に比べ土壌保全、水保全機能の面で有利であると報告している。

1.2.10 複層林の上木伐採と下木損傷に関する研究

1990年代になると、複層林造成から時間が経過して上木の樹冠閉鎖が進み、複層林の健全化のために上木間伐を実施する複層林が多くなってきた。それとともに、複層林の上木間伐による下木損傷の研究が行われるようになった。竹内ら(139~140)は、スギ・スギ二段林で伐倒・集材による下木の被害と伐採数年後の幹曲がりを調査し、何らかの被害を受けた下木は全体の50%以上で、被害がひどく回復の見込みのないものも20~40%の範囲であることを示した。また、上木の伐倒・集材によって幹曲がり被害を受けると、その後数年経過しても幹曲がりの欠点が残る個体が多いことを示した。岡ら(100)は、ヒノキ・ヒノキ複層林で小型集材車による伐出作業時に発生した下木損傷を調査し、傾斜が緩やかで高密度に路網が整備されていて、しかも短材であったため、下木への損傷は8~11.5%と少なかったことを示した。田中ら(154)は、ヒノキ・ヒノキ複層林で小型集材車による伐出作業にともなう下木損傷の実態を調査し、小型集材車により伐出を行う場合、集材路をどのくらい、どのように配置するかが集材による損傷を少なく、しかも効率よく作業を行う決め手になると報告している。遊橋(171~172)は、複層林の間伐における伐倒時の下木損傷は、上木がアカマツの場合、損傷率30.0~30.7%と被害は大きかったが、上木がカラマツで下木が上木の下枝近くまで達しておれば、伐採時の下木損傷は2.7%と小さかったと報告している。

丸本ら(80)は、スギ・スギ複層林において上木を本数間伐率22%で伐採したところ、下木の14.6%に損傷が発生し、このうち、材の形質や今後の生育に影響をおよぼすとみられる程度2以上のものは6.4%であった。一方、スギ・スギ複層林において上木を皆伐したところ、下木の48.5%に損傷が発生し、程度2以上のものは33.9%であったと報告している。

鈴木ら(130)は、急傾斜地の複層林の上木間伐をエンドレスタイラー方式により実施したところ、伐倒作業に比べて集材作業による損傷の方が多く、集材線から10m以内では40%の下木に損傷が発生したが、20~30mでは10%程度に減少したと報告している。また、鈴木ら(134)は、スギ(81年生)・スギ(14年生)複層林で上木を本数間伐率30.7%で伐採したところ、健全木が約22.3%、

木起こし等を行うことにより回復が見込める個体が36.1%と、間伐時に成立していた下木の58.4%が生存可能であると判断している。

湊ら(81)は、伐倒作業にともなう保残木の被害の実態を明らかにし、保残木の伐倒作業による被害を軽減する方法を検討した。保残木の10.3%になんらかの被害が発生したが、被害の83.1%は剥皮被害であり、保残木被害は伐採木の伐倒方向が斜面に対して下方に向かうほど大きいことを示した。三島木ら(82)は、アカマツ(31年生) - ヒノキ(11年生)複層林において上木を皆伐したところ、伐倒時の下木損傷は枝折れと幹折れが多く、集材時の下木損傷は樹皮剥皮と傾斜だけであった。また、損傷率は伐倒時25.3%、集材時15.1%で伐倒時と集材時の重複を除いた実質被害は32.2%と報告している。

玉山(153)は、スギ(62年生) - スギ(3年生)複層林の造成初期に本数間伐率14.1%の上木間伐を実施した林分において、下木損傷と翌年の損傷回復状況を調査した。全下木に対する損傷率は9.5%で、伐倒時の損傷は幹折れの被害が多く、集材時はほとんどが傾斜の被害で、間伐後9ヶ月を経過した時点で下木の回復状況を調査したところ損傷木全体の87%が元に戻ったと報告している。

藤下ら(21)は、スギ(71年生) - スギ(17年生)の複層林で上木を69.3%間伐した際の下木損傷を調査したところ、間伐にともなう下木損傷率は71.7%と高率で、全損傷木の半数は倒伏であったことを明らかにした。戸田(162)は、複層林の上木伐倒と林内作業車を使った集材作業を調査し、上層木の伐出作業にともなう下木損傷は、上層木1本の伐出に対して3本程度発生すると報告している。

澤口ら(125)は、ヒバ天然林択伐作業による残存木損傷について解析し、トラクタ全幹集材システムでの作業の結果、残存木損傷は本数率で22.5%に達し、その半数は生育見込みがない損傷であった。しかし、生育見込みがないとされた材積は全材積の2.6%にすぎないことを示した。永島ら(89)は、スギ - ヒノキ複層林において上木スギを本数間伐率41.0%で伐採したところ、下木損傷率は15.9%であり、このうち重大な被害は6.7%であったと報告している。

浜地ら(32)は、スギ - スギ、ヒノキ - スギおよびヒノキ - ヒノキ複層林で上木伐採にともなう

下木損傷について解析し、下木損傷は50%を越え、傾斜が急なプロットほど下木損傷率は高いことを示した。谷山(157)は、愛媛県内の複層林伐出現場における過去の事例から、下木の損傷と伐出経費を主に取り上げ、これらの問題解決に向けた作業方法を提案した。穂屋下ら(34~35)は、複層林の上木間伐前に枝払いを行うことで下木損傷は15.2%となり、枝払いなしの場合の54.5%の1/4になったと報告している。

小野寺ら(109)は、スギ - ヒバ短期二段林における上木の伐採法を検討するため主伐と間伐を行い、伐採による下木の損傷と成長量の変化について調査した。その結果、下木の損傷率は主伐区と間伐区で大差なかった。また、下木の伐採後3年間の樹高成長量と胸高直径成長量は、ともに主伐区 > 間伐区 > 無施業区の順に多いと報告している。酒井ら(120)は、スギ - スギ二段林の上木を本数間伐率52.8%と36.0%で伐採し、下木損傷状況を調査した。下木損傷率はそれぞれ26.3%と13.4%であり、間伐率が高い林分ほど下木損傷率が高いことを示した。

石川ら(44)は、ケヤキの人工林の間伐にともなう天然生実生稚樹の被害について、被害形態を先折れ、先折れと倒伏の複合、倒伏、消失に分けたところ、消失が大部分を占め、被害割合は60~80%を占めることを明らかにした。また、当年生実生稚樹の発生は、間伐を実施した林分で多く、間伐を実施しない林分では少なく、その原因は、間伐木の搬出にともなう地表の攪乱の効果によるものと推定した。

第2章 複層林の上木間伐にともなう下木損傷の実態

2.1 はじめに

複層林施業は、皆伐をしないで森林を再生することができ、森林の持つ公益的機能を高度に発揮する施業法として積極的に推進されている(113)。複層林は、下木の成長に十分な光環境を確保するように造成するが、時間の経過とともに光環境が変化し、下木の成長が低下する事例もみられる(61)。このため、上木を間伐して下木の光条件を改善する必要があるが、その際、上木の間伐では多くの下木に損傷が発生する場合がある(21, 32, 92, 153, 157)。損傷を受けた下木は、損傷部から変色や腐朽が進行し(66)、木材としての価値が低下するだけでなく、樹幹部の強度低下を招く恐れもあり、損傷木が多数発生した場合は風雪害などの気象災害を誘発しやすく、他の公益的機能にも影響を及ぼす可能性がある。

複層林で下木損傷を少なくする方法としては、ねらった方向に正確に伐倒する、伐倒速度を抑えるため隣接する上木の力枝をねらって伐採する、林内路網密度を高くし集材距離を短くする、などの解決策が提案されている(157)が、その効果は検証されていない。

筆者らは、一斉林を列状間伐することで、残存木への損傷が少なくなることを確かめた(62, 65, 114)。長野県では、列状間伐は選木が容易で、生産コストを低減できるという利点を活かし、広範囲で実施しており、中には列状間伐実施後に、伐採列に下木を植栽し列状複層林を造成する場合がある(69, 88, 92)。列状複層林であれば、植栽列

と残存列が異なるため、下木への損傷を軽減できる可能性はあるが、実証事例はない。

そこで本章では、残存木の損傷発生が少ない複層林型を示すことを目的として、列幅が異なる2か所の列状複層林と、下木を均一に植栽した点状複層林の合計3か所で、上木間伐にともなう下木の損傷を比較した。

2.2 調査方法

図-2.1および表-2.1に示した上木カラマツ、下木ヒノキの複層林において、2か所の列状複層林と1か所の点状複層林で上木の間伐を行い、残存木の損傷率や損傷の種類などを比較した。調査地の選定にあたっては、林齢、林分の傾斜、作業員の経験年数、路網からの距離などの条件ができ

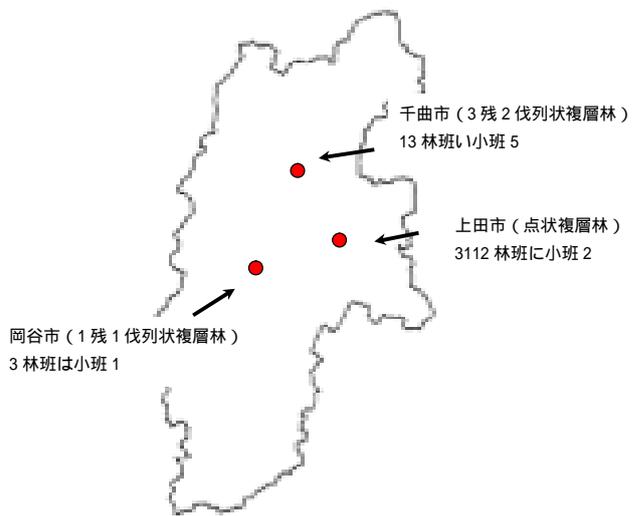


図-2.1 調査地の位置

表-2.1 調査地の概要

林型	林齢 (年)	平均樹高 (m)	平均胸高直径 (cm)	間伐前本数 (本/ha)	調査面積 (ha)	標高 (m)	地形傾斜 (度)
1残1伐列状複層林 (岡谷市)	39	19.9	24.3	522	0.23	950	20
上木カラマツ 下木ヒノキ	15	6.1	7.3	1,360			
3残2伐列状複層林 (千曲市)	54	27.9	33.9	322	0.41	750	15
上木カラマツ 下木ヒノキ	11	4.2	4.1	739			
点状複層林 (上田市)	51	23.6	26.7	374	0.39	1,180	20
上木カラマツ 下木ヒノキ	17	5.7	7.7	1,154			

(注) 岡谷市：3林班は小班1
千曲市：13林班い小班5
上田市：3112林班に小班2

るだけ同じとなるよう配慮するとともに、作業システムが同一であることとした。

岡谷市の複層林は、図 - 2.2、図 - 2.3 に示したように 1989 年に 1 残 1 伐の列状間伐を実施し、翌年伐採跡地にヒノキを 1 列植栽した列状複層林である(以下、1 残 1 伐列状複層林と呼ぶ)。上木の間伐は、カラマツを 1 列おきに谷側に伐倒した。

千曲市の複層林は図 - 2.2、図 - 2.3 に示したように 1992 年に 3 残 2 伐の列状間伐を実施し、翌年伐採跡地にヒノキを 3 列植栽した列状複層林である(以下、3 残 2 伐列状複層林と呼ぶ)。上木の間伐は、カラマツ 3 列の中央 1 列を列状に谷側に伐倒した。

一方、上田市の複層林は図 - 2.2、図 - 2.3 に示したように、1985 年にカラマツを点状間伐(単木

的に伐採木を選択する間伐方法)した樹下に、翌年ヒノキを均一に植栽した点状複層林である。上木の間伐は点状に行い、谷側に向けて伐倒したが、伐倒・集材作業がしやすく、下木の損傷が少ないと思われる方向を個々の立木ごとに選択したため、伐倒方向に規則性はなかった。なお、作業員の経験年数はいずれも 20 年以上であった。

3 種類の複層林の間伐は、(1)チェーンソーで伐倒、枝払い、(2)トラクタのウインチを利用し、全幹材末口吊けん引で土場まで集材、(3)土場ではチェーンソーまたはプロセッサによる玉切り、(4)グラブで極積み、という作業システムで行った。

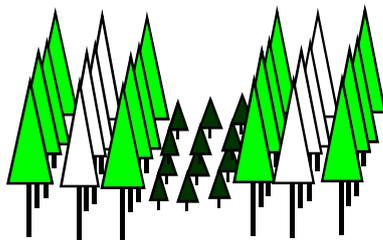
伐倒直後と集材直後に上木と下木の残存木損傷の有無を確認するとともに、発生した損傷につ



1 残 1 伐列状複層林 (岡谷市)



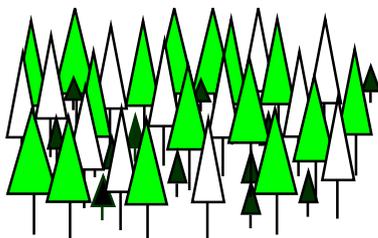
1 残 1 伐列状複層林 (岡谷市)



3 残 2 伐列状複層林 (千曲市)



3 残 2 伐列状複層林 (千曲市)



点状複層林 (上田市)



点状複層林 (上田市)

図 - 2.2 複層林(上木カラマツ, 下木ヒノキ)の模式図
(注)白抜きの上木を伐採

図 - 2.3 複層林の状況
(上木カラマツ, 下木ヒノキ)

いては表 - 2.2 に示すように(1) 梢端折れ, (2) 幹折れ, (3) 傾斜, (4) 倒伏, (5) 枝折れ(大), (6) 枝折れ(中), (7) 枝折れ(小), (8) 樹皮剥離に区分した。なお, 材部損傷は樹皮剥離に含めた。

同一立木に複数種類の損傷が発生することがある。ここでは混乱をさけるため, 将来の樹木成長や材の経済価値に最も大きな影響を与えると考えられる損傷を分析の対象とした。具体的には, 倒伏, 幹折れ, 傾斜, 梢端折れ, 枝折れ(大), 樹皮剥離, 枝折れ(中), 枝折れ(小)の順に優先して選択した。

表 - 2.2 損傷木の区分

損傷区分	定義
梢端折れ	梢端から1~2m付近で主軸が損傷しているもの
幹折れ	幹部分が折れているもの
傾斜	幹全体が傾いているが倒伏には至らないもの
倒伏	樹幹が地面についているもの
枝折れ(大)	枝の50%以上が折れるか抜けるかしたのもの
枝折れ(中)	枝の25%以上50%未満が折れるか抜けるかしたのもの
枝折れ(小)	枝の25%未満が折れるか抜けるかしたのもの
樹皮剥離	樹幹部分の樹皮が剥離され辺材部分がむき出しになったもの

2.3 結果と考察

2.3.1 残存木の損傷

図 - 2.4 ~ 2.6 は各調査地の立木配置を示したもので, 間伐した上木と損傷を受けた上木と下木の位置も示した。また表 - 2.3 は, 上木伐採にともなう残存木損傷の調査結果である。

1 残 1 伐列状複層林は, 上木 120 本のうち 57 本を伐採 (間伐率 47.5%) し, 間伐にともなう上木の損傷はみられなかったが, 下木は 313 本のうちの 87 本 (損傷率 27.8%) に損傷が発生した。3 残 2 伐列状複層林は, 上木 132 本のうち 37 本を伐採 (間伐率 28.0 %) し, 間伐にともなう上木の損傷は, 残存木 95 本のうち 5 本 (損傷率 5.3%), 下木の損傷は 303 本のうちの 2 本 (損傷率 0.7%) であった。一方, 点状複層林は上木 146 本のうち 81 本を伐採 (間伐率 55.5%) し, 間伐にともなう上木の損傷は残存木 65 本のうち 8 本 (損傷率 12.3%), 下木の損傷は 450 本のうち 177 本 (損傷率 39.3%) であった。

点状複層林の上木間伐にともなう下木損傷については, 大型プロジェクト研究・複層林の造成管理技術の開発 (112) で調査が行われている。主として上木がスギやヒノキの場合の上木間伐にともなう下木損傷調査がおこなわれ, 間伐率が 30% 以下の 11 林分の下木損傷は $8.2 \pm 3.8\%$ であり, 間伐率が 31 ~ 50% の 8 林分では $20.5 \pm 12.6\%$ と報告している。ま

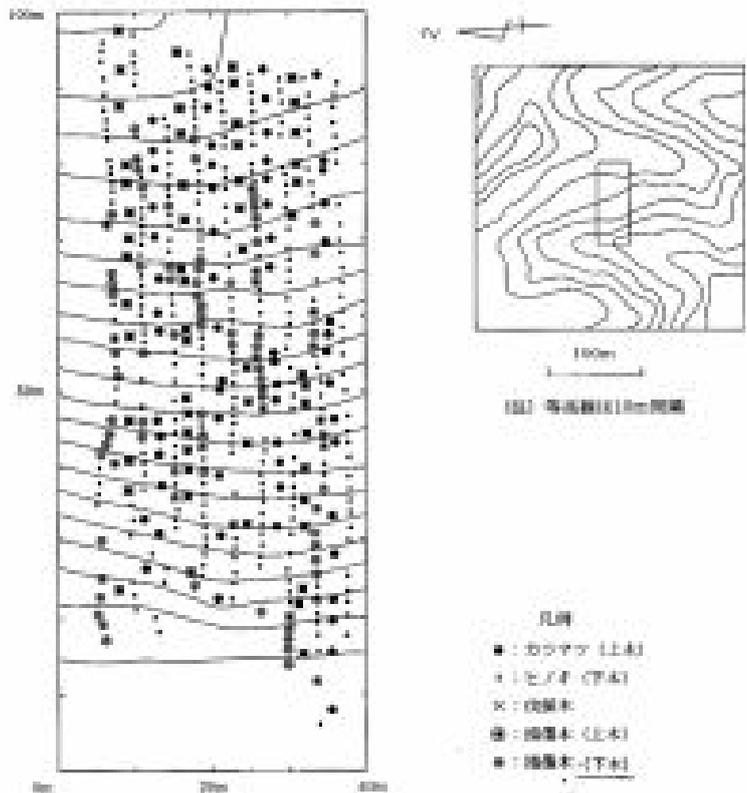


図 - 2.4 1 残 1 伐列状複層林の立木配置 (岡谷市)
(注) 等高線は 2m 間隔

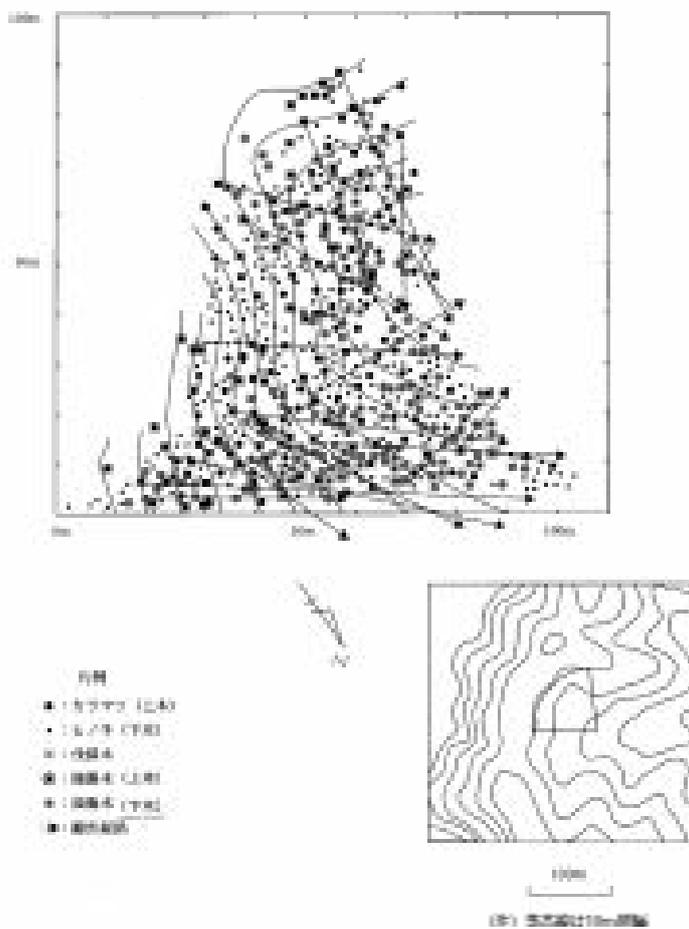
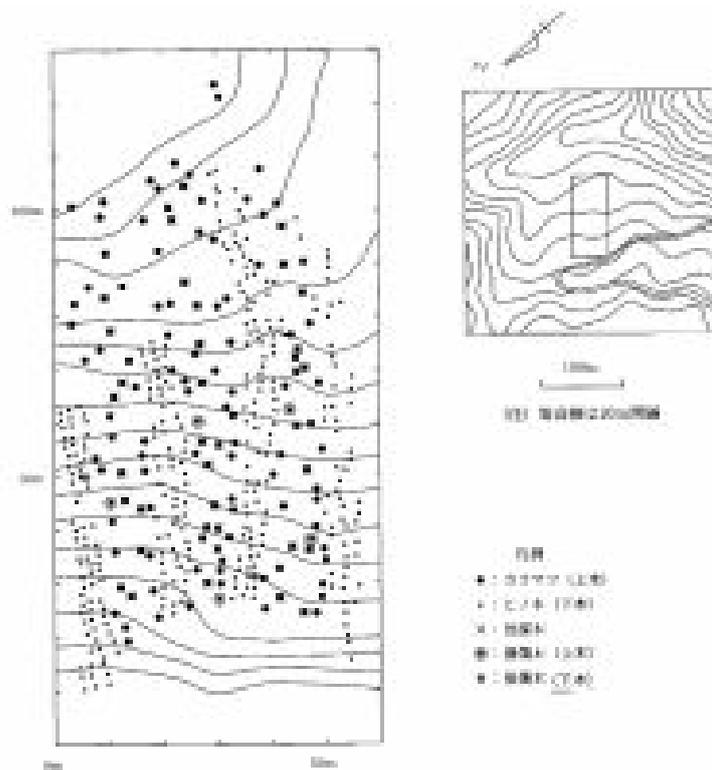


図 - 2.6 点状複層林の立木配置（上田市） （注）等高線は2m間隔

図 - 2.5 3残2伐列状複層林の立木配置（千曲市） （注）等高線は2m間隔

た、戸田(161)がスギ(一部ヒノキ) - スギ・ヒノキ複層林でタワーヤードにより、上木間伐を本数間伐率 17%で実施したところ、下木損傷は 2.6%と極めて少なかったと報告している。その原因として、狙った方向に倒せたこと、倒した木にかぶせるように他の木を伐倒したこと、などをあげている。

一方、浜地ら(32)は、スギ(45年生) - スギ・ヒノキ(20年生)複層林で上木の 35%~40%間伐を実施し、下木損傷が 50%を超えたと報告し、藤下ら(21)は、スギ(71年) - スギ(17年生)の複層林で上木の 69.3%を間伐したところ、下木の 71.7%に損傷が発生した事例も報告していて、下木損傷率に差が発生している。上木と下木の樹種や林齢、地形傾斜、路網からの距離、間伐方法、使用機械等により損傷発生率も変わってくると思われる。

一方、列状複層林の上木間伐にともなう下木損傷は、筆者ら(64, 67, 68, 69, 70, 72)の報告以外にはみあたらない。1残1伐列状複層林での調査は本論文の第4章でも行っており、この場合の下木損傷率は 29.1%で、本章の調査結果とほぼ同じであった。また筆者ら(64)は、本論文の第3章で記載するカラマツ一斉林で2残2伐列状間伐を実施し、伐採跡地にヒノキを造林したカラマツ・ヒノキの複層林(以下2残2伐列状複層林)で、残存カラマツ2列のうち1列を間伐した場合の下木損傷率を調査した。その結果、下木の 10.1%(192本/1901本)に損傷が発生していて、2残2伐列状複層林の下木損傷率は1残1伐と3残2伐の中間程度であることを示した。

さらに、筆者(68)は、本章の1残1伐複層林に隣接するアカマツ・ヒノキの1残1伐列状複層林で上木間伐にともなう下木損傷の調査を実施した。その結果、下木の 37.9%に損傷が発生して、カラマツ・ヒノキ1残1伐列状複層林に比べて下木損傷率が約 10%高いことを明らかにした。その原因として、アカマツはカラマツに比べて曲がり木が多く、クサビを使って注意深く作業しても列中央に伐倒できないことが多かったことや、アカマツの樹冠半径はカラマツと同じだったが、枝がカラマツに比べて太く、下木に衝突した際の衝撃が大きかったこと、などをあげている。上木の樹種により下木損傷率も異なることを示唆した調査結果といえる。

本章の調査地は、前述したように上木の林齢、林分の傾斜、作業員の経験年数、路網からの距離などの条件をできる限り同じとし、作業システムも同一としているため、それぞれの下木損傷は比較可能と考えられる。

本章で扱っている3種類の複層林で発生した上木の残存木損傷率を、伐採率がほぼ同じ1残1伐列状複層林と点状複層林と比較すると、1残1伐列状複層林が 0%、点状複層林が 12.3%と、列状複層林で損傷が少なく、点状複層林で損傷が多い結果となった(表-2.3)。列状複層林より点状複層林で損傷が多い今回の結果は、一斉林で列状間伐と点状間伐を実施し、残存木損傷を比較したこれまでの調査結果(41, 62, 65, 114)と同じ傾向であり、複層林でも点状間伐より列状間伐の方が、上木の損傷発生が少ないことが確認された。

下木の損傷も同様に比較すると、点状複層林の

表 - 2.3 複層林の上木間伐にともなう残存木の損傷

林型	調査面積 (ha)	地形傾斜 (度)		間伐前本数 (本)	間伐本数 (本)	間伐率 (%)	残存本数 (本)	損傷本数 (本)	損傷率 (%)
1残1伐列状複層林 (岡谷市)	0.23	20	上木	120 (522)	57 (248)	47.5	63 (274)	0	0.0
			下木	313 (1,360)			313 (1,360)	87	27.8
3残2伐列状複層林 (千曲市)	0.41	15	上木	132 (322)	37 (90)	28.0	95 (232)	5	5.3
			下木	303 (739)			303 (739)	2	0.7
点状複層林 (上田市)	0.39	20	上木	146 (374)	81 (208)	55.5	65 (167)	8	12.3
			下木	450 (1,154)			450 (1,154)	177	39.3

(注) () はhaあたり本数で、単位は本/ha
損傷率は、残存木に占める損傷木の割合(%)である。

損傷率が39.3%，1残1伐列状複層林の損傷率が27.8%であった。また，3残2伐列状複層林は伐採率がほかに比べ少ないものの，損傷率は0.7%と著しく少なかった。

次に，上木1本の伐採に対して発生する下木の損傷本数を比較すると，点状複層林が2.2本(177本/81本)と最も多く，続いて1残1伐列状複層林の1.5本(87本/57本)，3残2伐列状複層林の0.1本(2本/37本)の順となった(表-2.3)。

3調査地の下木損傷を²独立性の検定で有意差を検討したところ，点状複層林は1残1伐列状複層林に比べ損傷率は有意に高く($P<0.01$)，1残1伐列状複層林は3残2伐列状複層林に比べ損傷率は有意に高かった($P<0.01$)。

これらのことから，上木だけでなく下木においても列状複層林で損傷が少なく，点状複層林で多い結果となった。

2.3.2 作業別損傷発生状況

損傷の状況を把握するため損傷を，(1)伐倒作業のみによるもの，(2)集材作業のみによるもの，(3)両作業が重複したもの，に分類した。「両作業が重複したもの」とは，伐倒作業で「梢端折れ」などの損傷が発生した立木に，集材の際にも「樹皮剥離」などの損傷が発生した場合をいう。

上木の損傷は，いずれの複層林でもすべて集材作業の際に発生し，伐倒作業では発生しなかった。

下木の損傷状況を表-2.4に示した。まず，伐倒作業にともなう損傷についてみると，1残1伐列状複層林では「重複したもの」を含めた伐倒作業による被害が全体の77%を占めた。点状複層林でも「重複したもの」を含めた伐倒作業による被害が全体の71.2%であった。この結果は，下木の

損傷発生約7~8割が伐倒作業によるものとした既往の調査結果(112)とほぼ同じ傾向を示した。また，3残2伐列状複層林の場合，損傷発生のすべてが伐倒によるものであった。これらのことから下木の損傷は，伐倒作業によるものが多数を占めることが明らかになった。

2.3.3 下木の損傷発生原因

下木の損傷発生原因を明らかにするため，下木の損傷を「伐倒作業によるもの」と「集材作業によるもの」に分け，複層林の林型別に損傷発生原因を検討した。

2.3.3.1 伐倒作業

1残1伐列状複層林は，上木と下木を交互に配置した単純な林型で，上木の伐倒は伐採列に沿って機械的に実施すればよく，下木の損傷も少ないと予測した。しかし実際には，表-2.3に示したように下木の27.8%に損傷が発生し，損傷の大半が伐倒作業に関わる被害であった。その原因をみると，1残1伐列状複層林は上木と下木が隣接し，その間隔が2~2.5mであったのに対し，上木の樹冠半径は2.8~3.2mと大きく成長していた(表-2.5)。このため，伐採列に向かって正確に伐倒しても上木の枝が下木に衝突するが多かった。これが，予想以上に損傷が発生した主な原因と考えられる。その他，上木が風などの影響で幹が傾斜しているものも多く，クサビを使って注意深く作業しても列中央に伐倒できず下木の列に向かって倒れる場合もみられた。このように1残1伐列状複層林は，上木と下木が接近しすぎていることが損傷発生に大きく影響していたと考えられる。

3残2伐列状複層林では，下木の損傷はすべて伐倒作業の際に発生したが，損傷率は0.7%とき

表-2.4 複層林上木間伐にともなう下木の損傷発生原因と損傷形態

林型	作業区分	本(%)								
		梢端折れ	幹折れ	傾斜	倒伏	枝折れ(大)	枝折れ(中)	枝折れ(小)	樹皮剥離	合計
1残1伐 列状複層林	伐倒作業	40 (46.0)	1 (1.1)	1 (1.1)	1 (1.1)		2 (2.3)	12 (13.9)		57 (65.5)
	集材作業				2 (2.3)				18 (20.7)	20 (23.0)
	重複	6 (6.9)							4 (4.6)	10 (11.5)
	計	46 (52.9)	1 (1.1)	1 (1.1)	3 (3.4)		2 (2.3)	12 (13.9)	22 (25.3)	87 (100.0)
3残2伐 列状複層林	伐倒作業							2 (100.0)		2 (100.0)
	集材作業									0
	重複									0
	計							2 (100.0)		2 (100.0)
点状複層林	伐倒作業	32 (18.1)		3 (1.7)	3 (1.7)	13 (7.3)	9 (5.1)	11 (6.2)		71 (40.1)
	集材作業			6 (3.4)	4 (2.2)				41 (23.2)	51 (28.8)
	重複	24 (13.5)		6 (3.4)	6 (3.4)	7 (4.0)			12 (6.8)	55 (31.1)
	計	56 (31.6)		15 (8.5)	13 (7.3)	20 (11.3)	9 (5.1)	11 (6.2)	53 (30.0)	177 (100.0)

わめて少なかった。その原因は、上木3列の中央列を伐倒したことにより、伐倒木を両側の上木の間に誘導しやすかったことが最も大きいと判断できる。また、表-2.5に示したように上木の樹冠半径2.2~3.7mに対し、伐倒した上木と下木の平均距離が約5mと、1残1伐列状複層林と比べて約2倍離れていたことも有利に働いたと考えられる。

点状複層林の場合、下木の39.3%に損傷が発生し(表-2.3)、損傷の大半が伐倒作業に関わる被害であった。その原因を知るため、点状複層林調査地で、伐倒にともなう損傷の詳細調査を行った。これは上木12本を伐倒し、その際に発生する下木の損傷について詳しく調査をしたもので、上木伐倒直後に、倒伏した上木の樹冠内に入った下木の本数を調べ、下木損傷の有無、損傷した場合は損傷の形態を確認するとともに、伐倒した上木の幹が衝突して損傷した下木についても同様の調査を実施した。

その結果を表-2.6に示す。12本の上木の伐倒にともない25本の下木が上木の樹冠内に入り、3本が幹と衝突した。合計28本のうち、損傷が発生しなかった下木は4本(本数割合率14.3%)にすぎず、24本(損傷率85.7%)に損傷が発生した。損傷が発生した下木の損傷形態をみると、枝折れ(大)13本、梢端折れ4本、枝折れ(中、小)7

本であった。なお、12本の上木の平均樹高は23.6m、平均枝下高11m、力枝の平均長は2.5mであった。

この複層林をモデルとして、図-2.7,2.8に示すように、上木50%を列状に伐倒した場合と、点状に伐倒した場合で樹冠や幹が下木にあたる割合(あたり率)を比較した。その結果、列状に伐倒した場合には、上木の樹冠や幹にあたる下木が伐採列区内に限定されるため、下木のあたり率は20.0%であった。一方、点状の場合は、伐倒木が林内に分散されるため、下木のあたり率は41.7%と高い割合を示した。このうち実際に発生する被害の割合はそれぞれの85.7%(表-2.6注参照)とすると、列状に伐倒した場合の下木損傷率は17.2%、点状に伐倒した場合は35.8%と推定できる。

このモデル図から、下木が均一に植栽された点状複層林で、上木を点状伐採する場合は、伐倒にともなう損傷を回避することは難しいが、列状に伐倒することで、下木の損傷を集中させ、損傷率を低減することが可能であると考えられる。

2.3.3.2 集材作業

表-2.4において、「重複したもの」を含めた集材作業による下木損傷率は、3残2伐列状複層林は0%、1残1伐列状複層林は34.5%であったの

表-2.5 上木(カラマツ)の樹冠半径

林型	平均樹冠半径(m)				
	斜面上	斜面右	斜面下	斜面左	平均
1残1伐列状複層林	2.8	3.2	2.9	2.8	2.9
3残2伐列状複層林	2.2	3.0	3.5	3.7	3.1

(注) 斜面下方から上方を見る

表-2.6 上木の伐採にともない樹冠内に入った下木および樹幹に衝突した下木の損傷形態

							本(%)	
	梢端折れ	幹折れ	傾斜・倒伏	枝折れ(大)	枝折れ(中・小)	樹皮剥離	損傷なし	合計
樹冠内の下木	2(7.1)			12(42.9)	7(25.0)		4(14.3)	25(89.3)
樹幹に衝突した下木	2(7.1)			1(3.6)				3(10.7)
計	4(14.2)			13(46.5)	7(25.0)		4(14.3)	28(100.0)

(注) 28本中24本に損傷が発生し、その割合は85.7%である。

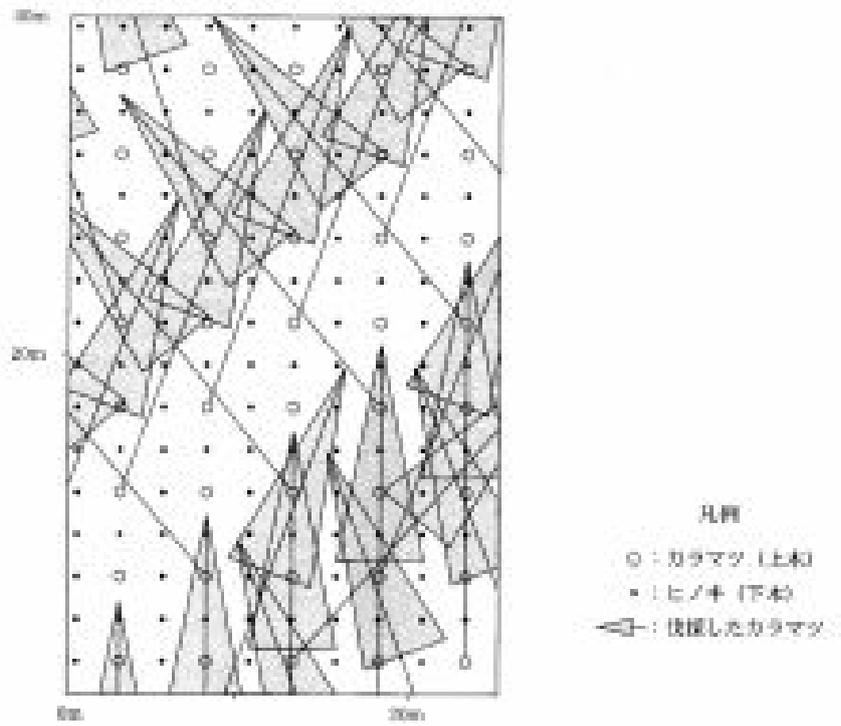


図 - 2.7 点状複層林における列状間伐モデル図

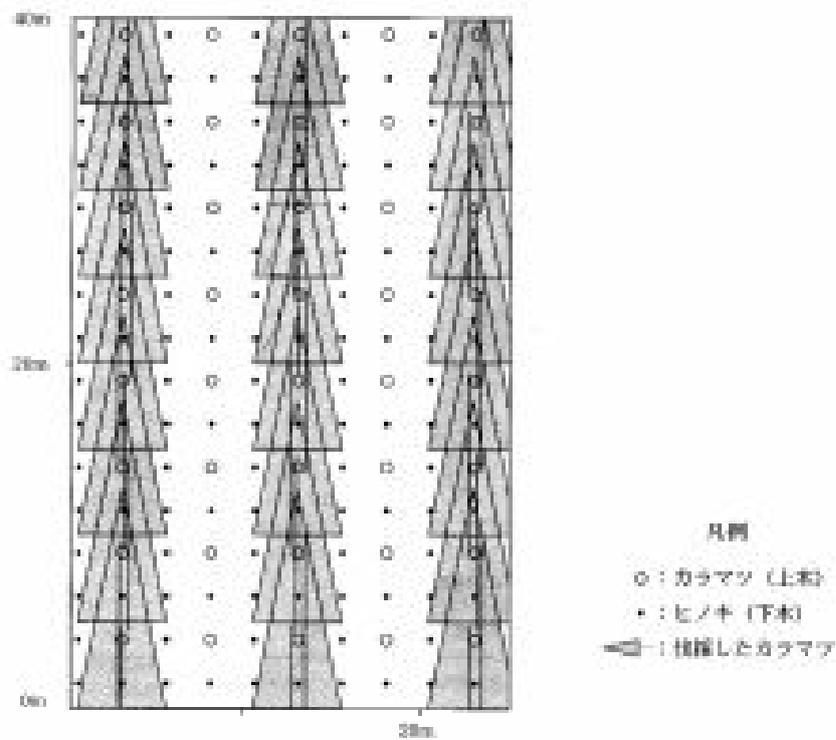


図 - 2.8 点状複層林における点状間伐モデル図

に対し、点状複層林は59.9%であった。この結果から、列状複層林に比べ点状複層林の方が、集材作業による損傷率が高いという傾向がみられた。

集材作業にともなう下木の損傷状況をさらに詳しく知るため、集材作業1回あたり何本の下木に損傷が発生したかを、1残1伐列状複層林と点状複層林で比較した。なお、3残2伐列状複層林は集材の際に下木に損傷が発生していないので除外した。

1残1伐列状複層林の場合は、57本の上木を15回で集材し(3.8本/回)、30本の下木に損傷が発生した。集材1回あたり2.0本の下木に損傷が発生したことになる。一方、点状複層林の場合、81本の間伐木を36回で集材し(2.3本/回)、106本の下木に損傷が発生した。集材1回あたり2.9本の下木に損傷が発生したことになる。この結果から、列状複層林に比べ点状複層林の方が、集材1回あたりの下木損傷本数が多いことが示された。

また、1残1伐列状複層林と点状複層林の集材距離総延長を算出し、集材距離100mあたりの損傷本数を比較した。その結果を表-2.7に示した。1残1伐列状複層林の損傷本数は100mあたり4.0本であったのに対し、点状複層林は9.0本であり、点状複層林の損傷本数は1残1伐列状複層林の2.3倍に相当した。以上の結果から、列状複層林に比べ点状複層林の方が、集材作業による損傷率が9/4倍高いことが示された。

1残1伐列状複層林では点状複層林に比べ損傷は少なかったが、上木と下木の立木間隔が2~2.5mと狭いため、列中央に伐倒されなかった場合や、伐採列が最大傾斜線の方向に対して斜めの場合には、伐倒した上木が横滑りし下木に衝突する場合もみられた。石川(45)は、ウインチ等で木寄せ作業中に丸太が木寄せ方向と直角方向に転落、滑落したり、木寄せ方向や斜面の最大傾斜方向に自重落下する場合について理論的な解析を行った。

斜面傾斜()および木寄せ方向が最大傾斜方向となす角度()と丸太の転落、滑落および自重落下の発生との関係をスギ、ヒノキで調べたところ、 が0~10度のときはどの方向へも木寄せが可能であるが、 が20度では が0~30度、 が30度では が0~20度の範囲にしか木寄せはできない。さらに、 が35度以上では自重落下が発生するため下げ荷は不可能となり、上げ荷についても が0~15度の範囲にしか木寄せはできないことを明らかにしている。また、森ら(86)は、傾斜30度を超える斜面で、下げ荷集材を行った際に転がりが発生する条件は、最大傾斜方向からの交角()が20.4度という結果を示している。

本章の1残1伐列状複層林や点状複層林では、集材方向と最大傾斜方向との関係には注意を払わず間伐作業を行ったため、集材作業時の下木損傷を増加させた可能性がある。今後間伐作業を行う場合には、最大傾斜方向を強く意識し、最大傾斜方向と集材方向を同一方向とするような注意が必要と考えられる。

また、点状複層林は、下木が均一に植栽されているため、長さが20mを超える上木を、下木に損傷を発生させずに集材することはきわめて難しかった。

なお、3残2伐列状複層林では、伐採した上木は、横滑りをした場合でも両側の上木に保護され下木と衝突しなかったため、集材作業による損傷は発生しなかった。

2.3.4 損傷形態

上木の損傷形態はいずれの複層林でもすべて樹皮剥離であった。下木の調査結果は表-2.4に示した。1残1伐列状複層林の損傷形態は、梢端折れと樹皮剥離が多く、それぞれ52.9%と25.3%で、次に枝折れ(小)が多かった。一方、3残2伐列状複層林は損傷のすべてが枝折れ(小)であった。また、点状複層林の損傷形態は、梢端折れ

表-2.7 集材距離と下木の損傷

林型	集材距離の総延長 (m)	下木の損傷本数 (本)	集材距離100m あたりの損傷本数 (本)	調査面積 (ha)
1残1伐列状複層林	759	30	4.0	0.23
点状複層林	1,183	106	9.0	0.39

と樹皮剥離が多く 31.6%と 30.0%を占め、次に枝折れ(大)が多いという結果となった。下木に発生した損傷が、今後の下木の成長にどのように影響するかについては次章で検討することとした。

2.4 まとめ

点状複層林の間伐では、上木の 12.3%、下木の 39.3%と多数の残存木に伐倒・集材を通じて損傷が発生した。点状複層林は上木と下木が近接し、下木が 2.5~3.0m 間隔に均一に植栽されていた。このような林分で長さ 20m を超える上木を、残存木に損傷を発生させずに、伐倒・集材を行うことは極めて困難と考えられる。

一方、2 種類の列状複層林は、上木と下木ともに列状に植栽しており、間伐作業は列状に機械的に実施できる長所があった。このため上木と下木の損傷率は点状複層林に比べ低かった。

しかし、1 残 1 伐列状複層林では、上木カラマツの損傷は発生しなかったものの、下木では残存木の 27.8%に損傷が発生した。この林分では、上木と下木の間隔が 2~2.5m と狭かったのに対して、上木の樹冠半径は 2.8~3.2m と大きく成長しており、伐倒の際に上木の枝が下木に衝突する機会が多かったこと、集材の際も、上木と下木の間隔が 2~2.5m と狭かったため損傷が発生する場合もみられたこと、などから予想以上の損傷が発生した。

これに対し、3 残 2 伐列状複層林では、上木の 5.3%に損傷が発生したものの、下木の損傷は 0.7%とわずかだった。これは、上木 3 列の中央列を伐倒したことにより、伐倒木を両側の上木の間誘導しやすかったことや、伐採した上木は、横滑りをした場合でも両側の上木に保護され下木と衝突しなかったためである。なお、2 残 2 伐列状複層林の下木損傷は 1 残 1 伐と 3 残 2 伐の中間程度発生すると考えられる。

次回の上木間伐を考えると、上木の樹冠はさらに成長するため、点状複層林や 1 残 1 伐列状複層林では、間伐にともなう下木の損傷は今回より多くなると推定できる。しかし、3 残 2 伐列状複層林では、今回の間伐跡に下木を植栽しなければ、間伐跡が次回の間伐の集材路となり、間伐作業は比較的容易で、残存木損傷も今回の調査結果と大差ないと考えられる。

第3章 複層林の上木間伐により損傷を受けた下木ヒノキの生育状況

3.1 はじめに

複層林で上木の間伐作業を実施すると、第2章に示した点状複層林や1残1伐列状複層林のように下木に多数の損傷が発生する場合があります、下木損傷の少ない複層林造成法や管理方法を検討する必要があります。このためには、上木の間伐にともない発生する損傷割合を調査するとともに、梢端折れや樹皮剥離等の損傷の種類を調査することが必要である(67, 70, 71)。それとともに、損傷を受けた下木がその後どのように生育するかについても追跡調査する必要があります。たとえば、上木間伐により幹が傾斜した場合は、立ち直ることができるのか、あるいは、梢端部分が折損した場合は、経済的に価値がある立木として生育できるのか、などである。これらのことが明確になれば、複層林の上木間伐にともない発生する下木被害を、立木の価値が損なわれる「重大な被害」とそうでない「軽微な被害」に分けることができ、複層林の造成法や管理方法の提案につながるものと思われる。

損傷を受けた下木の生育過程については、竹内ら(139)が伐採数年後の幹曲がりの調査を、下木損傷が成長に及ぼす影響については小野寺ら(109)が論じている。しかし、これらの調査は、林分全体の影響を示したもので、損傷を受けた個々の立木がどのように生育したかを追跡調査した事例ではない。

そこで本章では、損傷を受けた個々の下木がどのように生育するのか、また、どのような損傷であれば経済的に価値がある立木として生育する可能性があるのかを明らかにするためカラマツ・ヒノキ複層林で検討を行った。

カラマツの間伐により損傷を受けたヒノキの5成長期経過後の状況を立木ごとに確認し、損傷形

態とその後の生育状況との関係を調査した。さらに、被害形態別に数本ずつ標本木を伐採して樹幹解析を行い、被害部分からの変色や腐朽の広がりなども確認した。

3.2 調査方法

調査地は長野県諏訪市の市有林(図-3.1)で、標高1,300m、傾斜5~30度の東向き平行斜面で、調査地に隣接して林道が開設されている。調査地は1964年にカラマツを2,500本/ha植栽後、1987年に2残2伐の列状間伐を実施し、図-3.2に示したように1988年に伐採跡地にヒノキを2~3列植栽して造成した列状複層林である。この複層林は2000年12月に上木2列のうち1列を列状に伐採(本数伐採率49%)した。伐採直後の林分状況を表-3.1に示した。伐採に先立ち、伐採区域内に1.04ha(約250m×42m)の調査地を設定した。伐採作業はチェーンソー伐倒・枝払い、トラクタ



図-3.1 調査地の位置

表-3.1 調査地の概要(列状間伐直後)

林齢(年)	平均樹高 (m)	平均胸高直径 (cm)	間伐前本数 (本)	間伐率 (%)	調査面積 (ha)	標高 (m)	地形傾斜 (度)
上木カラマツ	38	16.5	488	49.0	1.04	1,300	20
下木ヒノキ	14	4.6	1,901				

ショベル（小松製作所製 D20S，質量 3,760kg，全長 3,650mm，全幅 1,610mm，全高 2,465mm）による上げ荷全幹集材，プロセッサ造材，グラップルはい積み・積み込みのシステムで行った。

調査方法は以下のとおりである。

3.2.1 伐採にともなう損傷の発生状況

複層林の上木伐採直後の 2000 年 12 月に下木損傷の有無を確認するとともに，発生した損傷については第 2 章の表 - 2.2 のとおり区分した。なお，幹折れと梢端折れについては梢端から折損した部分までの長さ（以下，折損長）を調査した。折損した部分が確認できた場合はその長さを測定したが，確認できなかった場合は，折損部分の太さを測定した後，折損木の周辺に生育する同じ程度の大きさの健全な下木を利用して，折損部分と同じの太さの部分から梢端までの長さを測定し，折損長を推定した。

3.2.2 受傷木の生育状況

伐採による損傷から 5 成長期経過した 2006 年 5 ~ 6 月に損傷木の現況を把握した。まず，損傷木の生死を確認し，生きている場合には，損傷形態別に次の項目を調査した。

（ア）倒伏木と幹傾斜木

垂直方向に対する損傷木の傾斜角を測定した。

（イ）幹折れ・梢端折れ木

折損部分の形状に異常があるかどうかを確認し，異常がある場合は「ほうき状」か「S 字状」かに区分した。「ほうき状」とは折損部分から複数の幹が発生したもので主幹が明らかでないもの，「S 字状」とは主幹は一本であるが，折損部分で曲がっているものとした。なお，「S 字状」の場合，図 - 3.3 に示すように折損部の上方 20cm と 50cm の位置で矢高（曲がりの大きさ）を測定し，2 点の平均値をその立木の矢高とした。

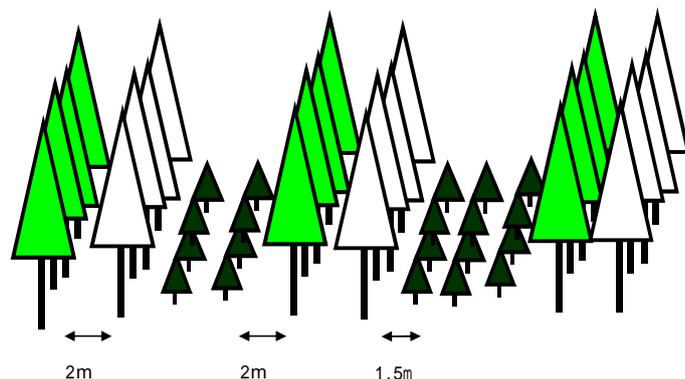


図 - 3.2 2 残 2 伐列状複層林（上木カラマツ，下木ヒノキ）の模式図
（注）白抜きの上木を 2000 年に伐採

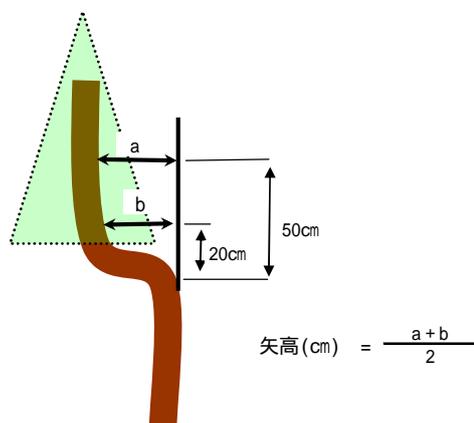


図 - 3.3 S 字状曲がり木の矢高の測定法

(ウ) 枝折れ木

枝折れが発生した立木を現地で観察したところ、枝折れが発生した側と枝折れが発生しなかった側で、立木の枝数のバランスが崩れて傾斜する下木が多くみられた。そこで、枝折れが発生した 76 本のうち、重複被害により傾斜したものなど 17 本を除いた 59 本を対象に、枝折れによりバランスを崩して傾斜した立木の、垂直方向に対する傾斜角度を測定した。

(エ) 樹皮剥離木

樹皮剥離が発生した 22 本の下木のうち、伐倒されたものや枯損したものなど 7 本を除いた 15 本を調査対象とした。外見から樹皮剥離の有無を調査し、確認できた場合は樹皮剥離の縦の長さとの幅、樹皮剥離の中心高を計測した。

3.2.3 標本木による樹幹解析

標本木の樹幹解析を行い、受傷した下木を対象に「損傷部分からの変色や腐朽の広がり」と「偏心成長とアテの発生」について分析を行なった。

(ア) 損傷部分からの変色や腐朽の広がり

岡田(97)によると、本章の下木とほぼ同じ林齢のヒノキ林でサルによるヒノキの樹皮剥皮から変色の発生を確認し、3~4年後に樹皮剥皮部から上下方向へ15cm程度まで変色が認められたと報告している。また、シカによる25年生ヒノキの樹皮剥皮からも変色や腐朽の発生が報告されている(96)。そこで、樹皮剥離部分と折損部分の傷口からの変色や腐朽の広がりについて検討した。

(イ) 偏心成長とアテの発生

傾斜地の立木や傾斜した幹あるいは一定方向から風圧を受けて育った幹などは、本来の正しい位置(垂直方向)を維持しようとして、偏心成長を

示すことがある。その部分は正常材に比べて物理的性質や化学的性質が非常に異なる場合があり、アテ材と呼ばれて木材利用上の欠点とされている(85, 126)。針葉樹の場合、立木の重心が傾くと元に戻ろうとするために傾いた方向に肥大成長やアテが発生するといわれている(85, 126)。

今回の間伐作業で幹が傾斜した立木や、枝折れのために傾斜した立木が元に戻ろうとする時、あるいは、幹折れや梢端折れが発生した部位から新しい幹を立ち上げる際に偏心成長やアテの発生が考えられる。そこで、偏心成長とアテの発生について、損傷形態別に年輪解析法により調査した。なお、偏心成長については、傾斜した方向の年輪成長量(cm)と、傾斜と反対方向の年輪成長量(cm)から次式により偏心率を求めた。また、アテの有無については樹幹解析した木口を目視により確認した。

$$\text{偏心率}(\%) = \frac{\text{傾斜方向の年輪成長量} - \text{反対方向の年輪成長量}}{\text{傾斜方向の年輪成長量} + \text{反対方向の年輪成長量}} \times 100$$

標本木として損傷形態別に胸高直径と樹高ができるだけ平均的な大きさの立木 25 本を選定して伐採した。選定した下木には「梢端折れ」や「樹皮剥離」などの被害が重複しているものもあり、表-3.2のとおり32の試料を得ることができた。なお、表-3.2は伐採直後の損傷形態と追跡調査時の生育状況を対比して示したものである。「S字状」については、矢高の大きさに応じて均等に選定するよう配慮するとともに、傾斜木については、伐採直後30度以上傾斜したものの中から、現在の傾斜が10度以上30度未満を2本、30度以上を1本選定した。

表 - 3.2 標本木の概要 (伐採直後の損傷形態と追跡調査時の生育状況を対比)

(単位: 本)

伐採直後の 損傷形態 (2000年)	梢端折れ・幹折れ・		枝折れ(大) 枝折れ(中)**		傾斜(30度以上)***		樹皮剥離	正常	合計
	11	4	1	3	11	2	32		
追跡調査時の 生育状況 (2006年)	S字状	ほうき状	傾斜(10度未満)	傾斜(10度以上 30度未満)	傾斜(30度以上)	樹皮剥離	正常	合計	
	8	3	5	2	1	11	2	32	

* 幹折れ・梢端折れを受けた下木の折損部分が、「S字状」または「ほうき状」に生育していたものを標本とした。
 ** 枝折れ(大)および枝折れ(中)の損傷を受けた下木で、立木のバランスを崩して傾斜したものを標本とした。
 *** 傾斜30度以上の損傷を受けた下木で、傾斜が10度以上30度未満に回復しているものと、回復していないものを標本とした。

なお、標本として伐採可能な本数の上限が 25 本と決められていたため、損傷程度の小さい枝折れ(小)や伐採直後の傾斜 30 度以下の下木は採取しなかった。一方、連年成長量を比較するため正常なヒノキ 2 本を標本木として採取した。

標本木からは、根元の円板試料(厚さ約 5cm)を採取するとともに、高さ 20cm から 100cm ごとに円板試料を採取した。また、損傷部分の上下 100cm ずつ合計 200cm の幹部はすべて試料として採取した。

3.3 結果と考察

3.3.1 伐採にともなう損傷発生状況

伐採作業にともなう被害発生状況を図 - 3.4 に示す。調査地内の下木 1,901 本のうち 192 本に下木損傷被害が発生し(損傷率 10.1%)、重複被害(伐倒で梢端折れを受けた下木に集材の際にも樹皮剥離が発生するなどの被害)31 本を含め被害は 233 本となった。損傷形態別の内訳は、倒伏 2 本、幹傾斜 16 本、幹折れ 45 本、梢端折れ 72 本、枝折れ 76 本、樹皮剥離 22 本であった。

2 残 2 伐列状複層林では図 - 3.2 に示したように、上木 2 列のうちの 1 列を伐倒したが、残存列の枝が障害になり正確な方向へ伐倒できず、下木の 10.1% に損傷が発生した。これは第 2 章図 - 2.2 に示した上木カラマツと下木ヒノキが 1 列おきに交互に植栽された複層林の下木損傷 27.8% よりは少なかった。しかし、同じく第 2 章で示した上木カラマツ 3 列と下木ヒノキ 3 列が交互に植栽された複層林で、上木 3 列の中央列を伐採した場合の下木損傷 0.7% に比べて多かった。このことから、2 残 2 伐列状複層林の下木損傷は、1 残 1 伐列状複層林と 3 残 2 伐列状複層林の中間程度発生するものと考えられる。

3.3.2 受傷木の生育状況

3.3.2.1 倒伏木

図 - 3.4 に示した倒伏木 2 本のうち 1 本は枯死、もう 1 本は生きてはいるが倒伏したままで、枯死寸前であった。調査本数は少ないものの、倒伏すると回復は困難と考えられる。

3.3.2.2 幹傾斜木

5 年後の幹傾斜木の回復状況を表 - 3.3 に示した。16 本のうち伐採された立木 1 本を除いた 15 本を対象に調査をしたところ、伐採直後に比べ幹傾斜の回復した下木は 60.0% (9 本/15 本)であった。しかし、33.3% (5 本/15 本)は、受傷当時のままの傾斜、あるいは受傷当時より傾斜が増していた。このことから、受傷した立木は 5 年経過してもすべての立木が回復するわけではないことになる。

竹内ら(139)は、スギ - スギ複層林で伐採・集材による 9 年生及び 12 年生の下木の被害と伐採数年後の幹曲がりを調査し、上木の伐採・集材によって幹曲がり被害を受けると、その後数年経過しても幹曲がりの欠点が残る個体が多いと報告している。本調査結果は竹内らの調査結果と同じ傾

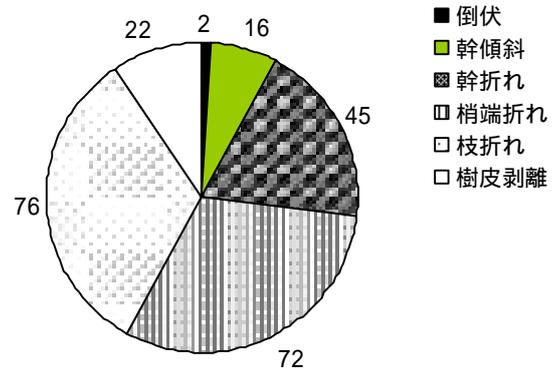


図 - 3.4 下木の被害形態別本数 (伐採直後)
(注)重複被害があるため本数の合計(233本)は被害木本数(192本)と一致しない。

表 - 3.3 幹傾斜木の 5 成長期間の推移

(単位: 本)

年	傾斜10度未満		傾斜10度以上30度未満				傾斜30度以上	
	傾斜なし	傾斜10度未満	傾斜10度未満	傾斜30度以上	枯死	伐採	傾斜10度以上30度未満	傾斜30度以上
2000年	2		7				7	
2006年	1	1	4	1	1	1	4	3

向を示している。また、玉山(153)は、スギ-スギ複層林で上木間伐にともない下木損傷を受けたスギを9ヶ月後に調査したところ、傾斜木は97%回復していたという調査結果を示している。玉山の場合、下木の林齢は3年生という幼齢であったため立木に柔軟性があり、傾斜しても回復可能であったと考えられる。

3.3.2.3 幹折れ・梢端折れ木

幹折れ木45本、梢端折れ木72本を合計した117本の5成長期経過後の現況は図-3.5のとおりである。折損部分が「S字状」や「ほうき状」になるものも多く、伐採された3本を除いた114本の89.5%(102本/114本)を占めた。折損長と損傷部分の形状との関係を調べた結果を図-3.6に示す。折損長が50cm未満の損傷木は約半数が「異常なし」で、残りは「S字状」であった。一方、折損長が50cmを超えると「異常なし」の割合は少なくなり、折損長が長くなるほど「ほうき状」の割合が多くなる傾向がみられた。なお、「ほうき状」になった立木は今後とも幹が複数の状態で生育するため建築材としての利用が困難と考えられ、木材利用上著しく制約を受けると考えられる。

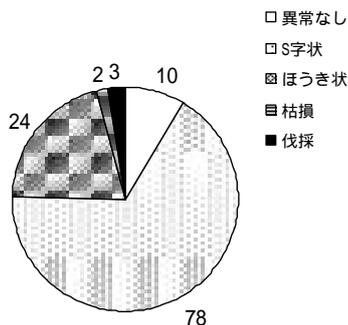


図-3.5 幹折れ・梢端折れ木の5成長期間後の現況

(注) 伐採とは5か年の間に切り倒されたもの

次に「異常なし」と「S字状」の立木を対象に、折損長と矢高の関係を図-3.7に示すと、折損長が長くなるほど矢高が大きくなる傾向がみられた。そこで、折損長を50cm未満、50以上100cm未満、100cm以上~150cm未満、150cm以上の4つに区分し、区分ごとの矢高の大きさを比較したところ、折損長50cm未満の矢高が、100cm以上~150cm未満の矢高および150cm以上の矢高に比べ有意に小さかった(Turkey-Kramerの方法による多重比較, $P < 0.05$)。

ヒノキの梢端部分から発生している枝は直径

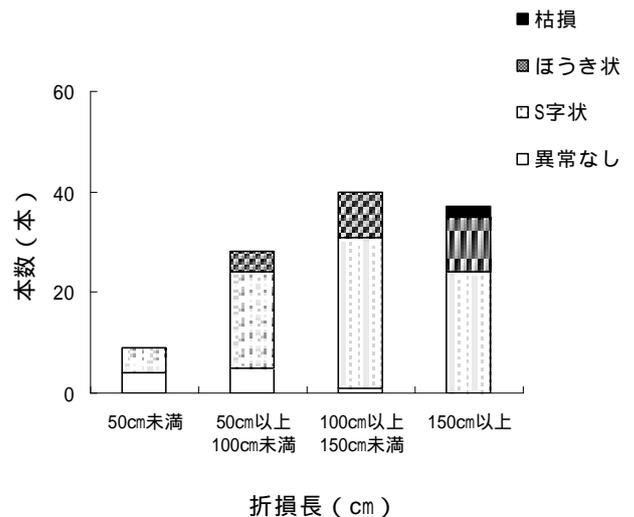


図-3.6 折損長と損傷形態との関係

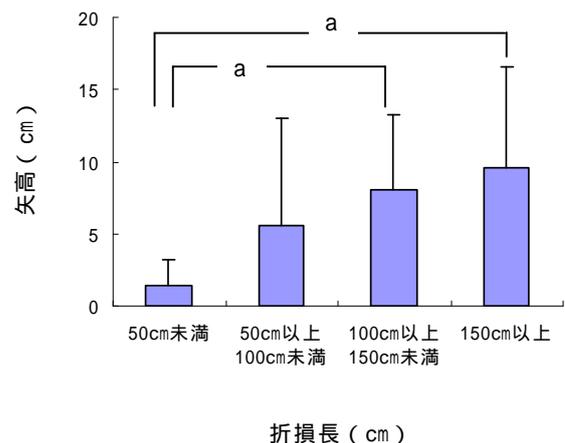


図-3.7 下木の折損長と矢高の関係 (平均値 + SD)

(注) aは危険率5%で有意, nは立木数
矢高: 図-3.3参照

が細くしなやかである。このため、梢端に近い幹部が折損した場合は、枝が新しい幹として立ち上がりやすく、結果的に「異常なし」や矢高の小さい「S字状」になると考えられる。しかし、梢端部分から離れるに従って幹部から発生する枝の直径は太くなる。さらに、ヒノキの葉は3~6年間の寿命(48)で、梢端から離れた枝の基部には葉の着生はみられなくなり、枝は硬化する。このため、梢端から離れた位置の幹部が折損すると、枝が新しい幹として立ち上がるのは容易ではなく、矢高の大きい「S字状」になるものと考えられる。し

かし、「S字状」と「ほうき状」の違いをもたらす原因については推定できなかった。

3.3.2.4 枝折れ木

枝折れが発生した下木の54.2% (32本/59本)に傾斜が発生していたが、そのほとんどが傾斜10度未満と傾斜角度は小さかった。次に図-3.8で枝折れの程度と傾斜角度との関係を見ると、枝折れの程度が小さいほど「異常なし」の割合が多く、折れた枝の割合が25%未満(枝折れ小)であれば傾斜の発生はわずかであった。しかし、25%以上の枝が折れた場合(枝折れ中),下木の70%以上が傾斜していた。このことから、25%以上の枝折れを受けた下木は「傾斜から立ち直ろうとして」曲がり材になるおそれ強いと考えられる。

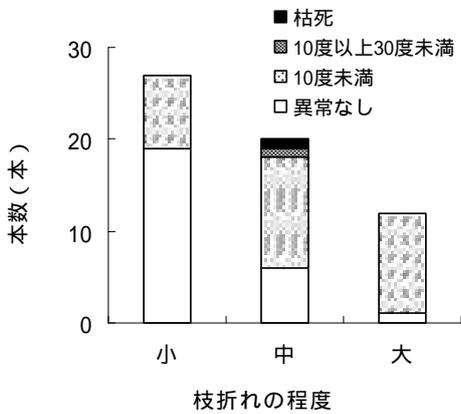


図-3.8 枝折れの程度と幹の傾斜角度

3.3.2.5 樹皮剥離

樹皮剥離被害木では、5成長期経過後に剥離部分が癒合したものが2本(13.3%),未癒合が13本(86.6%)であった。未癒合の下木でも5年間に樹皮の巻き込みが進み、損傷面積は減少していた。図-3.9は損傷直後の2000年の損傷面積(x)と2006年の損傷面積(y)との関係を示したもので、

$$y = 0.333x - 0.472$$

の関係式が導かれた。両者の間には統計的に有意な($P < 0.01$)強い相関($R = 0.82$)が認められ、5年間に損傷面積は約1/3に縮小していた。

三島木(82)によると、樹皮剥離が発生した29本の下木ヒノキを対象に、1年後に外見上の回復状況を調査したところ、50%以上回復した下木が

約65%,50%未満の回復が25%で、枯損したものは10%程度であったという。本調査結果や三島木の結果から、樹皮剥離を受けた下木ヒノキは、外見上は回復が進む可能性が高いと考えられる。しかし、材内部が健全かどうかについては外見だけでは判断できないので、次項の標本木による樹幹解析で検討を加えた。

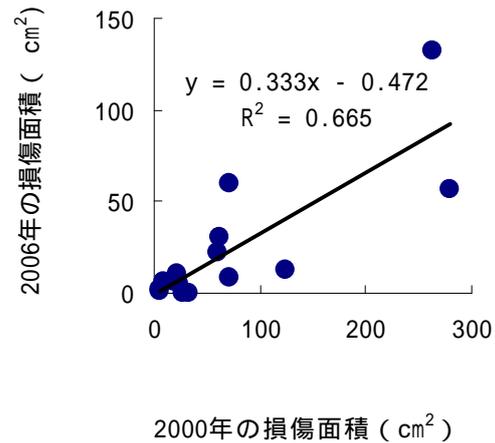


図-3.9 2000年の損傷面積と2006年の損傷面積との関係

3.3.3 標本木による樹幹解析

3.3.3.1 損傷部分からの変色や腐朽の広がり

(ア) 樹皮剥離部分からの変色や腐朽の広がり

樹皮剥離を受けた下木11本を対象に損傷部分からの変色や腐朽の広がりをみた。1本の下木に2か所損傷が発生したのものもあり、13か所の損傷で検討したところ、すべてに変色が発生していた。そこで、受傷中央部分の円板を採取し、円板面積に対する変色面積の割合(以下、変色面積率)を調べたところ、変色面積率10%未満が7か所、10%以上25%未満が4か所、25%以上は2か所であった。変色面積率が25%を超える2か所では腐朽が発生し材の劣化が進んでいた。

損傷部分から上下方向への変色進行長は、10cm未満が7か所(54%),10cm以上~50cm未満が3か所(23%),50cm以上が3か所であった。このうち変色面積率が高かった2本は上下方向への変色進行長も長く200cm以上に広がっていた。

図-3.10は下木の幹円周に対する樹皮剥離幅を計測し、変色面積率との関係を調べた結果で、樹皮剥離幅が大きいほど変色面積率も大きい傾向がみられた。

(イ) 折損部分からの変色や腐朽の広がり

次に、幹折れや梢端折れ部分からの変色や腐朽の発生について11本のヒノキを樹幹解析した。その結果を表-3.4に示した。すべての折損部分で変色が発生しており、損傷部分の変色面積率10%未満が6本、10%以上25%未満が4本、25%以上は1本のみであった。

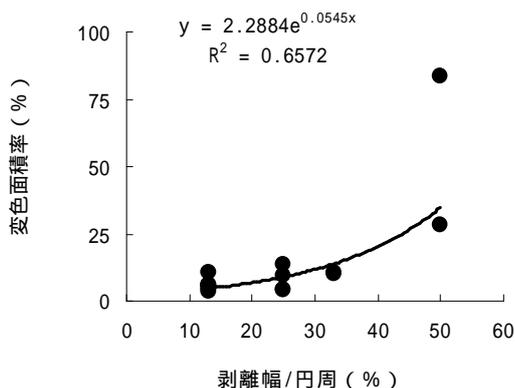


図 - 3.10 樹皮剥離の大きさと変色面積率との関係

しかし、折損部分から上方への変色の進行は認められず、危惧されていた新しい幹(図-3.11参照)への変色の拡大は認められなかった。一方、下方への変色の進行は20cm未満が5本(45.5%)、20cm以上50cm未満が4本(36.4%)とほとんどの立木では下方への広がりそれほど大きくなかった。しかし、下方へ130cm進行している立木が1本みられた(立木番号7)。この下木の折損部を観察してみると、折損時に発生した縦長の樹皮剥離が認められ、そこから変色が拡大していた。なお、この立木は腐朽も下方へ30cm広がっていた。

これらのことから、折損部分には変色は発生するものの、新しく発生した幹への変色の広がり認められず、下方への変色の広がりも、縦長の樹皮剥離から変色などが拡大した場合を除き、それほど大きくはないといえる。

3.3.3.2 偏心成長とアテの発生

(ア) 傾斜木の偏心成長とアテの発生

表-3.2に示した傾斜木3本はすべて山側に傾斜していた。その原因は、集材作業が上げ荷集材であり、集材木を山側に引き上げる際に下木と衝突し、その衝撃で下木が山側に傾斜したためである。樹幹解析の結果を表-3.5に示した。すべて

表 - 3.4 折損部分からの変色や腐朽の発生

立木番号	折損高 (cm)	変色面積率 (%)	変色の上方進行長 (cm)	変色の下方進行長 (cm)	腐朽面積率 (%)	腐朽の下方進行長 (cm)
18	380	31.8	0	0	0.0	0
9	370	15.7	0	20	5.9	0
10	290	15.4	0	20	0.0	0
4	360	14.9	0	10	0.0	0
7	250	14.2	0	130	14.2	30
18	300	7.3	0	50	0.0	0
8	260	4.9	0	25	0.0	0
15	370	2.3	0	0	0.0	0
17	380	1.3	0	30	0.0	0
16	350	1.1	0	10	0.0	0
20	390	1.0	0	10	1.0	10

表 - 3.5 傾斜木の偏心成長とアテの発生

立木番号	傾斜方向	傾斜角度 (度)	間伐前の偏心率 (%)		間伐後の偏心率 (%)		アテの発生	
			高さ0.2m	高さ1.2m	高さ0.2m	高さ1.2m	発生方向	高さ(cm)
1	山側	21	47.1	55.1	88.9	81.3	山側	0~120
3	山側	24	38.1	53.5	74.4	76.9	山側	0~320
2	山側	71	48.3	65.0	測定不能	測定不能	山側	100~320

(注) 偏心率 : 傾斜した方向の年輪成長量 (cm)と傾斜と反対方向の年輪成長量 (cm)から次式により偏心率を求めた。 偏心率 (%) = $\frac{\text{傾斜方向の成長量} - \text{反対方向の成長量}}{\text{傾斜方向の成長量} + \text{反対方向の成長量}} \times 100$
立木番号2は腐朽により偏心率の測定不能

の立木で傾いた山側にアテが発生していた。また、傾斜木 2 本の間伐後の成長は、高さ 0.2m および 1.2m の位置で偏心率が 50 を大きく越え、傾斜方向（山側）に大きく肥大成長していた。一方、立木番号 2 の立木は樹皮剥離被害も併発しており、その部分から腐朽が進んでいて年輪測定ができなかった。2 本の調査結果ではあるが、伐倒や集材により傾斜した立木が元に戻ろうとするため、傾いた方向に肥大成長とアテが発生することが確認できた。これは、立木を人工的に傾斜させ、傾斜方向に肥大成長することを確認した斉藤(115)の調査結果と同じであった。

(イ) 枝折れにより傾斜した下木の偏心成長とアテの発生

枝折れによりバランスを崩して幹傾斜した下木の傾斜方向は、谷側が 2 本、山側が 3 本であった。樹幹解析の結果を表 - 3.6 に示した。高さ 0.2m の間伐後の年輪成長は、傾斜方向と関係なくすべての立木が谷側に肥大成長していた。また、高さ 1.2m では立木番号 6 を除いて傾斜方向に肥大成長していたが、その偏心率は幹傾斜木の場合と比べて小さかった。またアテは、5 本中 4 本で発生していたが、傾斜方向と関係なくすべて谷側に発生していた。

傾斜地に生育した針葉樹の幹は、谷側に成長が大きく、アテも谷側に発生する(124)といわれている。今回の枝折れにともなう幹傾斜がそれほど大きくなかったため、下木のアテと偏心の発生は、幹の傾斜方向ばかりでなく斜面傾斜からも影響を受けたものと考えられた。なお、正常なヒノキ 2 本を樹幹解析したところ、高さ 0.2m と 1.2m とともにアテは確認できなかったが、谷側方向への肥大成長がみられた。

(ウ) 折損部分の偏心成長とアテの発生

梢端折れや幹折れ部分により発生した「S 字状」8 本、「ほうき状」3 本の下木を樹幹解析した。な

お、「ほうき状」の場合は、複数発生した幹のうちもっとも太い幹を樹幹解析した。樹幹解析した下木の折損高や折損部分の現状を表 - 3.7 に示した。樹幹解析の結果、新しく発生した幹には偏心やアテが発生していた。その状況をみてみると、新しい幹として立ち上がる際、曲線部分の外側(図 - 3.11 の A 部分)に肥大成長とアテが発生していた。次に、立ち上がった幹が曲がり過ぎないように、今度は内側(図 - 3.11 の B 部分)に肥大成長とアテが発生していた。このように、肥大成長とアテが連動しながら新しい幹が曲がりすぎないように補正し、最終的にはまっすぐに成長していた。

以上の結果、新しい幹が立ち上がる際に下木の内部に偏心やアテが発生することが明らかになった。今後はこれらが伐期を迎えた時点で木材利用上影響が残るかが検討課題である。

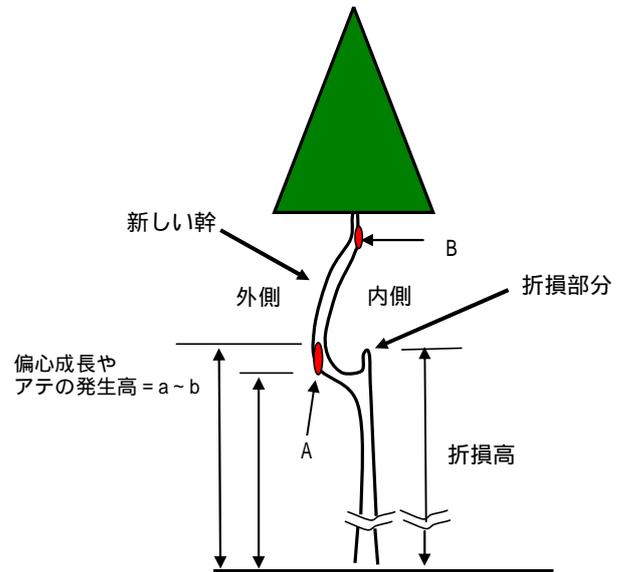


図 - 3.11 折損部分の状況

A : 外側の偏心成長とアテの発生位置
B : 内側の偏心成長とアテの発生位置

表 - 3.6 枝折れにより傾斜した立木の偏心成長とアテの発生

立木番号	枝折れの程度	傾斜方向	傾斜角度(度)	間伐前の偏心率(%)		間伐後の偏心率(%)		アテの発生	
				高さ0.2m	高さ1.2m	高さ0.2m	高さ1.2m	方向	高さ(cm)
11	大	山側	2	45.8	56.8	43.2	52.5	谷側	0 ~ 120
14	中	山側	2	41.7	51.2	45.5	63.2	谷側	0 ~ 120
6	大	山側	4	52.5	50.0	48.5	47.4	-	-
13	大	谷側	6	50.5	47.8	55.4	56.4	谷側	0 ~ 420
12	大	谷側	7	54.9	53.8	51.2	51.5	谷側	120 ~ 320

- : アテの発生なし

3.3.4 実質的な下木被害の推定

本章の調査結果から，第2章で示した1残1伐列状複層林，3残2伐列状複層林，点状複層林の3種類の複層林で下木に発生した損傷のうち，本章の調査と同じ5成長期後まで影響が残ると考えられる損傷被害を推定した。

倒伏したものは回復できないと判断した。傾斜したヒノキの33.3%（5本/15本），梢端や幹が折れたヒノキの89.5%（102本/114本）に影響が残るものと仮定した。さらに，枝折れ（大），枝折れ（中）は傾斜による影響が残るものと仮定した。樹皮剥離については，剥皮被害の大きさの違いにより変色や腐朽の進行の速さに違いがあるものの，変色・腐朽はすべての立木で発生していたため，影響が残るものとした。

この結果5成長期まで影響が残るものは，1残1伐列状複層林では被害木87本のうちの69本，3残2伐列状複層林は2本のうちの0本，点状複層林は177本のうちの150本と計算でき，実質的な下木被害率は，1残1伐列状複層林では22.0%（69本/313本），3残2伐列状複層林は0%，点状複層林は33.3%（150本/450本）と推定できた。

今回は1回目の上木間伐であり，少なくとももう一度上木の伐採を実施しなければ，ヒノキの一斉林とはならない。3残2伐列状複層林では，今回の伐採跡に下木を植栽しなければ，伐採跡が次の間伐の集材路となり，間伐作業は比較的容易で，残存木損傷も今回の調査結果と大差ないと予想できる。しかし，点状複層林や1残1伐列状複

層林では，上木の樹冠はさらに成長するため，間伐にともなう下木の損傷は今回より多くなると推定できる。このため，1残1伐列状複層林や点状複層林などでは下木損傷を軽減する作業方法の検討が緊急を要すると考えられる。

なお，枝折れが25%未満（枝折れ小）の場合は経済的に価値のある立木として生育する可能性が大きいと推定できた。一方，「倒伏」した下木や梢端折れして「ほうき状」になった下木は，今後，経済的に価値のある立木として成育する可能性は小さいと考えられる。しかし，その他の下木損傷については，受傷後5成長期経過の段階では経済的に価値のある立木として生育するかどうか判断できなかった。このため今後とも，受傷した下木を継続して観察する必要があると考えられる。

3.4. まとめ

カラマツ・ヒノキ複層林で，カラマツの間伐により損傷を受けたヒノキの5成長期経過後の状況を調査したところ，伐採により倒伏したヒノキは回復していなかった。また，傾斜したヒノキの60.0%は回復傾向にあったが，33.3%のヒノキは立ち直っていなかった。

幹や梢端が折れたヒノキは，折損部分が「S状」や「ほうき状」になるものが多くみられた。またヒノキの枝折れが25%未満（枝折れ小）の場合は，傾斜するヒノキの割合は少なかったが25%を越えると傾斜するヒノキが多く，「曲がり材」になる可能性が高いと考えられる。

表 - 3.7 折損木の偏心成長とアテの発生

立木番号	折損高 (cm)	折損部分の現状	矢高 (cm)	偏心成長発生高 (cm)		アテ発生高 (cm)	
				外側に肥大成長	内側に肥大成長	外側に発生	内側に発生
19	300	S字状	23	200～350	360～400	250～350	360～400
7	250	"	20	240	250～280	250～260	-
20	390	"	12	360～380	400～440	360～400	400～440
9	370	"	7	360～370	380～390	350～380	390～400
10	290	"	7	290	300	290	300
15	370	"	3	270～360	370～420	270～370	380～420
16	350	"	3	320～340	350	340	360
17	380	"	3	340～370	380～400	370～380	390～400
18	380	ほうき状	-	380～400	-	360～400	-
8	260	"	-	220～250	-	220～250	320
4	360	"	-	300～355	360～370	320～355	360～370

（注）表中の折損高，偏心成長・アテ発生高，内側・外側については図 - 3.11 を参照

損傷を受けたヒノキの標本木を伐採して樹幹解析を行ったところ、樹皮剥離を受けた部分からの変色や腐朽の広がり、ほとんどのヒノキで小さかったが、剥離被害の大きいヒノキでは変色や腐朽が広がり、劣化が進んでいた。幹や梢端が折れたヒノキの折損部分では変色が発生していたが、変色は上方（新しい幹）へは広がっておらず、下方への広がりも大きくなかった。

第4章 列状複層林の上木事前枝払いによる下木損傷軽減

4.1 はじめに

複層林で上木を間伐すると第2章で示した点状複層林や1残1伐列状複層林のように下木に多数の損傷が発生する場合がある。さらに第3章で示したように損傷を受けた下木は、5年経過しても損傷の影響が残るものが多いことがわかり、下木損傷を軽減する方法を検討することが緊急の課題といえる。そこで、第4章から第6章にかけては複層林の上木間伐にともなう下木損傷軽減法を検討することとした。

まず第4章では、1残1伐列状複層林を対象とし、上木の事前枝払いを行って伐採することによる下木損傷軽減について検討した。1残1伐列状複層林は上木と下木を交互に配置した単純な林型であり、枝払いすることで下木損傷軽減効果が期待できると考えられた。なお、「事前に枝払いをする列」と「そのまま伐採する列」を併設することにより、事前枝払いによる下木損傷軽減効果が明確になると考えた。

4.2 調査方法

調査地は、1987年に1残1伐の列状間伐を実施し、翌年伐採跡地にヒノキを植栽した岡谷市のカラマツ・ヒノキ列状複層林である(図-4.1)。今回の間伐は図-4.2に示したように、伐採前に枝

払いをする列(枝払い列)とそのまま伐採する列(対照列)を交互に設定し、下木損傷を比較した。

調査地では、上木106本のうち58本を伐採(間伐率54.7%)した(表-4.1)。伐採した上木のうち下木と隣接しない林縁の上木と、伐採列から離れた下木を除いた、上木45本と下木290本を調査対象とした。



図-4.1 調査地の位置

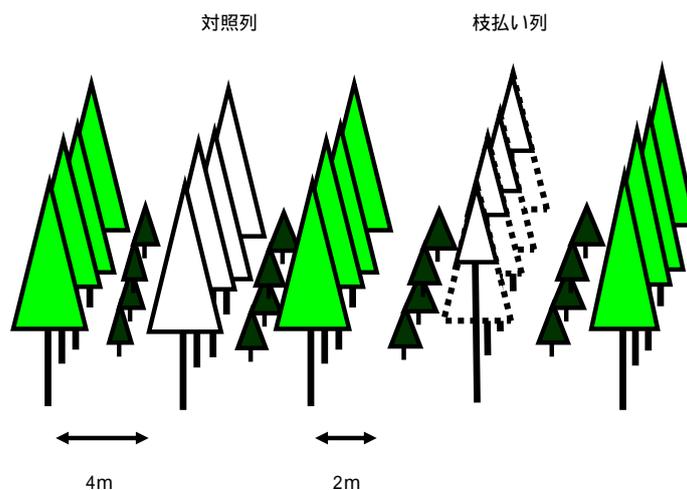


図-4.2 調査地(上木カラマツ,下木ヒノキ)の模式図
(注)白抜きの列を伐採

枝払い作業は、高所作業なので安全に注意しながら、図 - 4.3 のように鋸で行う場合とチェーンソーで行う場合の2つの方法で行った。間伐作業システムは、(1)チェーンソーで伐倒・枝払い、(2)トラクタのウインチを利用し、全幹材末口吊けん引で土場まで集材、(3)チェーンソーで玉切り、(4)グラブではい積み、という方法であった。なお作業は経験年数5年以上の作業員が行った。

残存木損傷調査は、伐倒直後と集材直後に下木損傷の有無を確認するとともに、発生した損傷については第2章表 - 2.2のとおりに区分した。なお、材部損傷は樹皮剥離に含めた。

同一立木に複数種類の損傷が発生することがある。ここでは混乱をさけるため、将来の樹木成長や材の経済価値に最も大きな影響を与えると考えられる損傷を分析の対象とした。具体的には、倒伏、幹折れ、傾斜、梢端折れ、枝折れ(大)、樹皮剥離、枝折れ(中)、枝折れ(小)の順に優先して選択した。

4.3.1 枝払い作業

枝払い列のカラマツ22本の平均樹高は18.6m、平均胸高直径26.6cm、平均樹冠長9.7mで、枝払いは平均樹冠長の50%程度実施した。その結果、表 - 4.2のとおり平均樹冠半径は枝払い前の2.9



図 - 4.3 枝払いの実施

4.3 結果と考察

表 - 4.1 調査地の概要

	林齢 (年)	平均樹高 (m)	平均胸高直径 (cm)	間伐前本数 (本)	間伐本数 (本)	間伐率 (%)	残存本数 (本)	調査面積 (ha)	標高 (m)	地形傾斜 (度)
上木 カラマツ	43	18.2	24.5	106 (424)	58	54.7	48 (192)	0.25	970	5~30
下木 ヒノキ	19	6.8	8.1	352 (1,408)			352 (1,408)			

(注) ()はha本数で、単位は本/ha

表 - 4.2 上木の平均樹冠半径

	枝払い前の樹冠半径(m)					枝払い後の樹冠半径(m)				
	斜面上	斜面右	斜面下	斜面左	平均	斜面上	斜面右	斜面下	斜面左	平均
枝払い列	3.0	3.1	2.6	2.7	2.9	2.1	2.2	1.7	1.8	2.0
						(0.70)	(0.71)	(0.65)	(0.67)	(0.69)
対照列	2.4	2.6	2.7	2.3	2.5	-	-	-	-	-

(注) ()内は枝払い前に対する枝払い後の割合

斜面下方から上方を見る

mから 2.0mに減少した。一方，対照列のカラマツ 23 本の平均樹高は 17.3m，胸高直径 24.5cm，平均樹冠長 7.8m，平均樹冠半径は 2.5mであった。

枝払いを実施したカラマツ 22 本のうちビデオ撮影を行った 16 本を対象に分析を行った。鋸で行った 10 本の平均枝払い長は 3.9mであった。この場合，1 本当たりの所用時間は 1,458 秒（24 分 18 秒）であった。枝払い長と枝払い作業時間の関係を図 - 4.4 に示す。枝払いが長くなると所要時間も長くなると予想していたが，相関は認められなかった。この原因として立木により枝の量や作業の難易度に差があるためと考えられた。佐々木ら（122）は，ヒノキ - ヒノキ複層林で同様な調査を行い，8.2mの枝払いを鋸で実施するのに，1 本当たりの所用時間は 2,259 秒（37 分 39 秒）であったと報告している。佐々木らも枝払い長と枝払い作業時間の間に明確な相関は認められないと報告している。また，西泉（95）は，スギ - ヒノキ複層林で枝払いを斧で行ったところ 6.1mの枝払いを実施するのに 1 本当たりの所用時間は 754 秒（12 分 34 秒）であったと報告している。本章の枝払いは，佐々木や西泉の場合に比べ 1 本当たりの所要時間がやや長い傾向にあるが，これは，作業者に枝払い等の高所作業の経験が少ないことが原因と考えられる。

チェーンソーで枝払いを行った 6 本の平均枝払い長は 5.4mであった。この場合，1 本当たりの所用時間は 1,586 秒（26 分 26 秒）であった。図 - 4.4 は鋸の場合とチェーンソーの場合の枝払い長と所要時間との関係を示したものである。両者を比較すると，枝払い長 5mまでは鋸の方が所要時間は短い。5mを超えるとチェーンソーの方が所要時間が短い傾向が示された。

岡谷市の枝払いでは，鋸の場合約 4mの枝払いを行うのに 25 分，チェーンソーの場合 5.4mの枝払いを行うのに約 26 分程度の時間がかかり，1 日の実労働時間を 6 時間とすると，いずれの場合も 1 日に 12 本程度の枝払いしかできないことになる。作業者の賃金を 1 日 15,000 円とすると，1 本当たりの枝払いコストは 1,250 円にもなる。

4.3.2 下木の損傷

図 - 4.5 に調査地の立木配置を示し，図中に伐採した上木と損傷を受けた下木の位置や集材経路を示した。

対照列と枝払い列で下木の損傷率を比較した

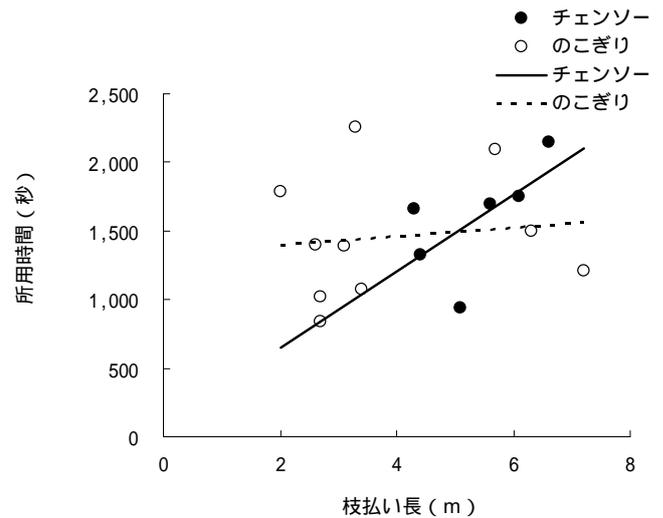


図 - 4.4 枝払い長と所要時間との関係

結果を表 - 4.3 に示した。対照列の損傷率は 29.1%（41 本/141 本）であったのに対し，枝払い実施列は 18.8%（28 本/149 本）であった。また，上木 1 本の伐採に対して発生する下木損傷本数を比較してみると，対照列では 1.8 本（下木 41 本/上木 23 本）であったのに対し，枝払い列は 1.3 本（下木 28 本/上木 22 本）であった。

対照列と枝払い列の下木損傷を²独立性の検定で有意差を検討したところ，対照列の損傷率が有意に高く（ $P < 0.05$ ），枝払いによる下木損傷軽減効果が認められた。このことから，列状複層林における上木事前枝払いによる下木損傷軽減効果が明らかとなった。

4.3.3 作業別損傷発生状況

損傷の原因を把握するため，損傷を（1）伐倒作業のみの損傷，（2）集材作業のみの損傷，（3）伐倒作業と集材作業の重複損傷，に分類した。「伐倒作業と集材作業が重複したもの」とは，伐倒作業で「梢端折れ」などの損傷が発生した立木に，集材の際も「樹皮剥離」などの損傷が発生した場合をいう。

作業別損傷発生状況の調査結果を表 - 4.3 に示した。作業種別に枝払いの損傷軽減効果をみると，伐倒作業では，対照列の下木損傷率は，被害の重複を含めて 23.4%（33 本/141 本）であったのに対し，枝払い列の損傷率は 13.4%（20 本/149 本）と大幅に減少した。両者を²独立性の検定で有意差を検討したところ，対照列の損傷率が有意に高

く ($P < 0.05$), 枝払いによる下木損傷軽減効果が認められた。

一方集材作業は, 枝による下木損傷を防止するため, 枝払いをしたあと集材を行う全幹集材であった。このため, 対照列と枝払い列の集材条件は同じであり, 枝払いによる下木損傷軽減効果は認められなかった。

集材作業による下木損傷を軽減するためには, できる限り路網密度を充実し集材距離を短くするなど, 他の対策を考える必要がある。

4.3.4 損傷形態

損傷形態の調査結果を表 - 4.4 に示した。枝払い列の損傷形態は, 樹皮剥離と梢端折れが多く, いずれも 35.7% で, 次に枝折れ (中・小) が多かった。一方, 対照列の損傷形態も, 梢端折れと樹皮剥離が多く 39.2% と 26.9% を占め, 次に枝折れ (中・小) が多かった。このように両者に大きな違いがみられないことから, 枝払いは損傷形態に大きくは影響しないと考えられる。

4.3.5 伐倒方向のずれと下木損傷

枝払いの有無による上木伐倒作業の難易を作業者に聞いたところ, 「枝払いを実施しない場合は, 伐倒木の枝張りを確認することで, 伐倒木の重心方向がわかりやすく, 思いどおりの方向に伐倒できる場合が多かった。しかし, 枝払いを実施した場合, 力枝周辺の枝がなくなることにより, 伐倒木の重心方向を知ることが難しくなり, 思いどおりの方向に伐倒できない場合があった。」との感想を述べた。

そこで, 伐倒した上木を, (1)列中央: 伐倒した上木の先端が列中央から左右 1m 以内に収まったもの, (2)下木の列方向にずれる: 伐倒木の先端が列中央から 1m 以上ずれるが下木の列には至らなかったもの, (3)下木と衝突: 上木の先端が下木と衝突したものを, に分け, その発生割合を枝払いの有無で比較した。

枝払いの有無で, 伐倒方向のずれを比較したの

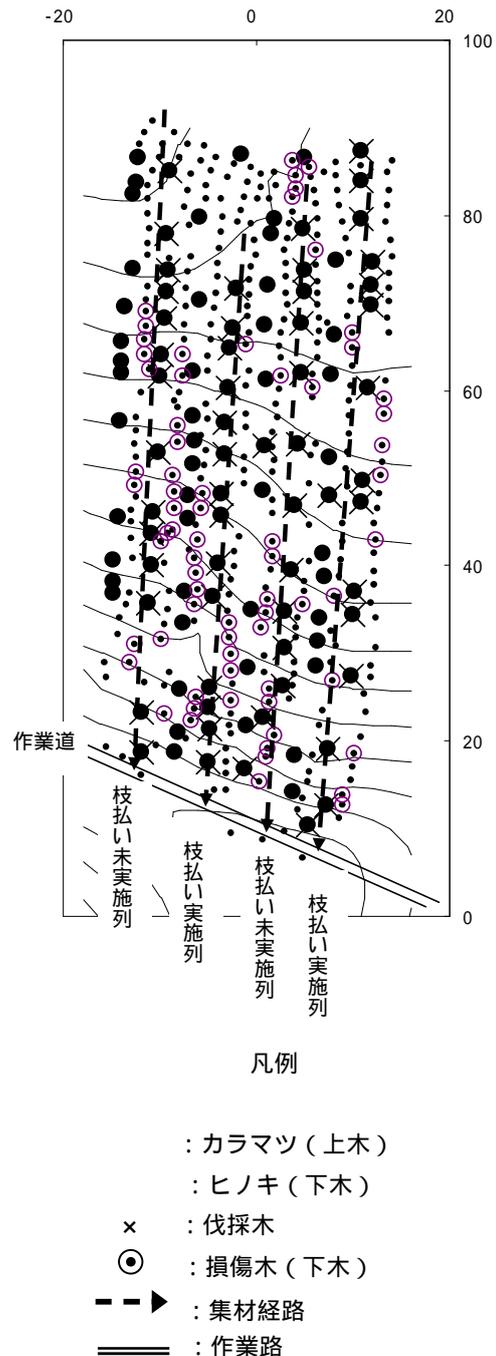


図 - 4.5 調査地の立木配置 (岡谷市)
(注) 等高線は 2m 間隔

表 - 4.3 枝払い実施の有無と下木の損傷

	上木間伐 本数 (本)	下木本数 (本)	下木損傷 本数 (本)	損傷率 (%)	内訳					
					伐倒のみ の損傷 (本)	損傷率 (%)	集材のみ 損傷(本)	損傷率 (%)	伐倒と集材の 重複損傷 (本)	損傷率 (%)
枝払い列	22	149	28	18.8	20	13.4	8	5.4	0	0.0
対照列	23	141	41	29.1	29	20.6	8	5.7	4	2.8
合計	45	290	69	23.8	49	16.9	16	5.5	4	1.4

が図 - 4.6 である。「列中央」に伐倒できた割合は、枝払いの有無に関わらずほぼ同じであった。しかし、対照列では、「下木との衝突」は発生しなかったが、枝払い列では「下木との衝突」が全体の約1割(2本)発生した。このことから、発生回数は多くないものの、作業者の言うとおり、枝払いを実施したことが原因で、思いどおりの方向に伐倒できない場合があるといえた。なお、「下木と衝突」した2本の上木の特徴を胸高直径や樹高の大小、枝払い高などから検討したところ、下木と衝突した立木は、伐採木の中で胸高直径が3番目に大きい立木と樹高が4番目に高い立木であったことから、大きな立木ほど伐倒方向がずれやすいと考えられる。

次に伐倒方向のずれによる下木損傷率を枝払いの有無で比較した。その結果を表 - 4.5 に示した。列中央に伐倒した場合をみると、枝払い列では下木損傷は皆無であったのに対し、対照列では上木伐倒1回あたり1.0本の下木損傷が発生した。また、下木方向にずれた場合でも、枝払い列の下木損傷は上木伐倒1回あたり1.5本であったのに

対し、対照列の場合は上木伐倒1回あたり2.0本の下木損傷が発生した。このことから、列中央が下木方向に多少ずれても枝払いにより下木損傷を軽減する効果は認められた。

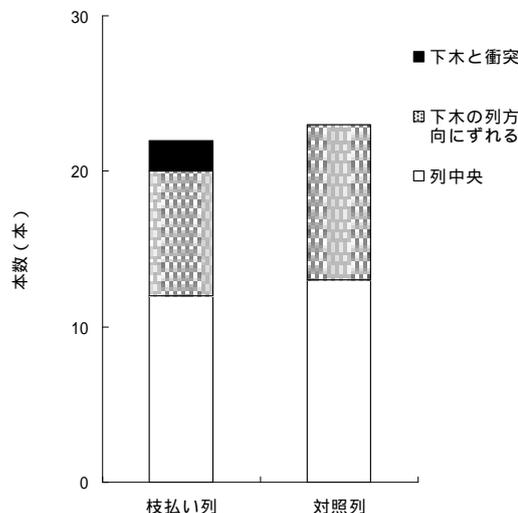


図 - 4.6 伐倒方向のずれの出現本数

表 - 4.4 枝払いの有無による下木の損傷発生原因と損傷形態の違い

							本 (%)	
作業区分	梢端折れ	幹折れ	傾斜・倒伏	枝折れ(大)	枝折れ(中・小)	樹皮剥離	合計	
枝払い列	伐倒作業	10 (35.7)	1 (3.6)		7 (25.0)	2 (7.1)	20 (71.4)	
	集材作業					8 (28.6)	8 (28.6)	
	重複							
計	10 (35.7)	1 (3.6)			7 (25.0)	10 (35.7)	28 (100.0)	
対照列	伐倒作業	14 (34.3)		2 (4.9)	1 (2.3)	10 (24.4)	2 (4.9)	29 (70.8)
	集材作業			1 (2.3)		7 (17.1)	8 (19.4)	
	重複	2 (4.9)				2 (4.9)	4 (9.8)	
	計	16 (39.2)		3 (7.2)	1 (2.3)	10 (24.4)	11 (26.9)	41 (100.0)

表 - 4.5 上木の伐倒方向のずれと下木損傷の発生状況

伐倒方向		回数	下木損傷本数	1回当たりの損傷本数
枝払い列	列中央	12 (54.5)	0 (0.0)	0.0
	下木の列方向にずれる	8 (36.4)	12 (60.0)	1.5
	下木と衝突	2 (9.1)	8 (40.0)	4.0
	計	22 (100.0)	20 (100.0)	0.9
対照列	列中央	13 (56.5)	13 (39.4)	1.0
	下木の列方向にずれる	10 (43.5)	20 (60.6)	2.0
	下木と衝突	0 (0.0)	0 (0.0)	0.0
	計	23 (100.0)	33 (100.0)	1.4

しかし、伐倒方向が大きくずれ下木と衝突した場合には、枝払いを実施しても、上木伐倒1回あたり4.0本の下木損傷が発生し、下木損傷を軽減する効果は認められなかった。このため、枝払いによる効果をさらに高めるためには、ウインチなどを使用して、列中央に上木を誘導するよう伐倒することが必要と考えられる。

4.4 まとめ

1残1伐列状複層林で、枝払い列と、そのまま伐採する列（対照列）を交互に設定し、下木損傷を比較した。上木伐採による下木の損傷率は、対照列が29.1%（41本/141本）であったのに対し、枝払い列は18.8%（28本/149本）と枝払いによる損傷軽減効果が認められた。しかし、4mの枝払いを鋸で行う場合1日12本程度しか実施することができず、枝払い作業を併用することで間伐作業の生産性はかなり低減する。また、作業者の賃金を1日15,000円とすると、1本当たりの枝払いコストは1,250円にもなる。このため、複層林の上木伐倒を行うための補助施策の充実などが図られなければ、事前枝払いの実施は難しいと考えられる。

作業種別に枝払いによる下木損傷軽減効果を見ると、伐倒作業では、枝払い列の損傷率は大幅に減少し損傷軽減効果が認められたが、集材作業では両者に差はなかった。

枝払いを実施した場合、力枝周辺の枝がなくなることにより、伐倒木の重心方向を知ることが難しくなり、思いどおりの方向に伐倒できない場合があった。枝払いによる効果をさらに高めるためには、ウインチなどを使用して、列中央に上木を誘導するよう伐倒することが必要と考えられる。

第5章 点状複層林の上木列状間伐にともなう下木損傷軽減

- 上木の列状間伐と点状間伐の比較 -

5.1 はじめに

第4章では上木間伐にともなう下木損傷を軽減する方法として、列状複層林を対象に上木の伐採前枝払いを提案した。その結果、枝払いによる下木損傷軽減効果が認められた。しかし、枝払い作業に時間がかかること、枝払いを実施した場合、力枝周辺の枝がなくなることにより伐倒木の重心方向を知ることが難しくなり、思いどおりの方向に伐倒できない場合があるなど、問題点も多い。

そこで、新たな下木損傷軽減法として点状複層林で上木を列状に間伐する方法について検討した。第2章で示したように列状間伐すれば、下木被害を集中することにより被害発生を軽減できると考えた。この調査結果を、第2章で論じた上田市の点状複層林で上木を点状に間伐した事例と比較し、列状間伐の下木損傷軽減効果について検討した。

5.2 調査方法

上木カラマツ、下木ヒノキの点状複層林において、上木を列状間伐した場合と上木を点状間伐した場合で(図-5.1,表-5.1),下木の損傷率や損傷の種類などを比較した。

点状複層林で上木を列状間伐したのは、図-5.2,5.3に示す松本市の複層林である。この林分は、カラマツを点状間伐(単木的に伐採木を選択する間伐方法)した樹下に、ヒノキを均一に植栽した点状複層林で、標高は1,250m,平均傾斜24度であった。上木間伐は図-5.2に示すように、上木を6m幅に残存列と伐採列を交互に繰り返す列状間伐で、地形の変化には無関係に伐採列を平行に

設定した。なお、上木間伐は2006年1月に実施し、伐倒方向は道路沿いの一部を除き谷側に向けた。

一方、点状複層林で上木を点状に間伐したのは第2章で論じた上田市の複層林である。この林分も、図-5.2,5.3に示したようにカラマツを点状間伐した樹下にヒノキを均一に植栽した点状複層林で、標高は1,180m,平均傾斜20度であった。上木の伐採は2003年1~2月にかけて点状に行い、谷側に向けて伐倒したが、伐倒方向に規則性はなかった。



図-5.1 調査地の位置

表-5.1 調査地の概要

林型	間伐方法	林齢 (年)	平均樹高 (m)	平均胸高直径 (cm)	間伐前本数 (本/ha)	調査面積 (ha)	標高 (m)	地形傾斜 (度)
点状複層林 (松本市)	列状	上木 カラマツ	41	24.7	32.9	0.37	1,250	24
		下木 ヒノキ	20	6.3	7.3			
点状複層林 (上田市)	点状	上木 カラマツ	51	23.6	26.7	0.39	1,180	20
		下木 ヒノキ	17	5.7	7.7			

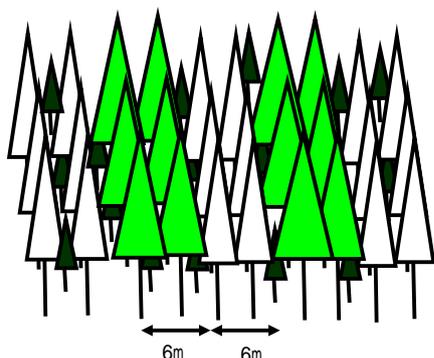
2つの複層林の伐採は、(1)チェーンソーで伐倒、枝払い、(2)トラクタのウインチを利用し、全幹材末口吊りけん引で土場まで集材、(3)土場ではチェーンソーによる玉切り、(4)グラップルで極積み、という同じ作業システムで行った。

トラクタ集材の方法は、松本市の列状間伐では林縁に作業路を開設し、作業路からトラクタのウインチを用いて集材した。一方、上田市の点状間伐では、林縁に開設した作業路からウインチにより集材する場合と、トラクタが林内に進入しウインチにより集材する場合があった。林内に進入する場合も傾斜の関係で進入距離は10m程度であった。なお、集材に使用したトラクタは列状間伐はイワフジT40、点状間伐はキャタピラージャパン(旧・新キャタピラ-三菱)BD2Gであった(表-5.2)。

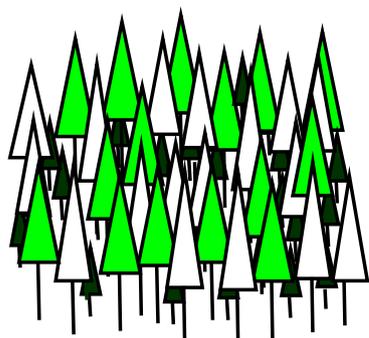
表 - 5.2 トラクタの諸元

	列状間伐(松本市)	点状間伐(上田市)
メーカー	イワフジ工業	キャタピラージャパン
形式	T-40	BD2G
総重量	4,700kg	3,780kg
全長	4,980mm	3,385mm
全幅	2,140mm	2,230mm
全高	2,450mm	1,660mm
足廻り形式	装輪式	装軌式

(注) 装輪式：車輪を装着したもの
装軌式：履帯を装着したもの



点状複層林の列状間伐



点状複層林の点状間伐



列状間伐林分(松本市)



点状間伐林分(上田市)

図 - 5.2 点状複層林(上木カラマツ,下木ヒノキ)の模式図
(注) 白抜きの上木を伐採

図 - 5.3 複層林の状況(上木カラマツ,下木ヒノキ)

伐倒直後と集材直後に上木と下木の残存木損傷の有無を確認するとともに、発生した損傷については第2章表-2.2に示した、(1)梢端折れ、(2)幹折れ、(3)傾斜、(4)倒伏、(5)枝折れ(大)、(6)枝折れ(中)、(7)枝折れ(小)、(8)樹皮剥離に区分した。なお材部損傷は樹皮剥離に含めた。同一立木に複数種類の損傷が発生することがある。ここでは混乱をさけるため、将来の樹木成長や材の経済価値に最も大きな影響を与えると考えられる損傷を分析の対象とした。具体的には、倒伏、幹折れ、傾斜、梢端折れ、枝折れ(大)、樹皮剥離、枝折れ(中)、枝折れ(小)の順に優先して選択した。

調査地の選定にあたっては、林齢、林分の傾斜、作業員の経験年数、路網からの距離などの条件ができるだけ同じとなるよう配慮するとともに、作業システムが同一であることとした。作業員の経験年数はいずれも20年以上であった。

5.3 結果と考察

5.3.1 下木の損傷

図-5.4、5.5は各調査地の立木配置を示したもので、伐採した上木と損傷を受けた下木の位置や集材経路等も示した。また表-5.3は、上木伐採にともなう残存木損傷の調査結果である。

松本市の列状間伐では、上木132本のうち63本を伐採(本数伐採率47.7%)し、伐採にともない下木の32.2%(180本/559本)に損傷が発生した。一方、上田市の点状間伐では、上木146本のうち81本を伐採(本数伐採率55.5%)し、下木の39.3%(177本/450本)に損傷が発生した。松本市の列状複層林は6mおきに伐採列と残存列を交互に設定したが、生育本数が一定でなかったため、本数間伐率は50%を下回る47.7%となった。一方、上田市の点状複層林は50%を目標に間伐木を選定したが、立木配置を均一にするため50%を多少超過した。

下木損傷率は列状間伐の方が点状間伐に比べ約7%少なかったが、第2章で示した1残1伐列状複層林の上木間伐にともなう下木損傷が27.8%であったことを考えると(67)、今回の列状間伐の下木損傷率は予想よりも若干高かった。

点状複層林における列状間伐と1残1伐列状複層林の林分状況等を比較すると、平均傾斜は両者とも大差はなく、下木本数などの林分状況や伐採率にも大きな違いはみられなかった。また、伐倒

方向は両者とも谷側であり、作業員の熟練度にも大きな差はなかった。このため、今回の列状間伐で下木損傷率が予想よりも若干高かった原因は、作業方法によるものと考えられる。

そこで、作業種別の下木損傷率を把握するため、損傷を(1)伐倒作業のみによるもの、(2)集材作業のみによるもの、(3)両作業が重複したものに分類した。「両作業が重複したもの」とは、伐倒作業で「梢端折れ」などの損傷が発生した立木に、集材の際も「樹皮剥離」などの損傷が発生した場合をいう。

調査結果を表-5.4に示した。伐倒作業では、被害の重複を含めた列状間伐の下木損傷率は20.2%(113本/559本)であったのに対し、点状間伐は28.0%(126本/450本)で、列状間伐による軽減効果が認められた。一方、集材作業では、列状間伐の25.2%(141本/559本)に比べて、点状間伐は23.5%(106本/450本)と、列状間伐の方が下木損傷率が高い結果となった。本調査の列状間伐では、損傷軽減効果は伐倒作業に限られていて、集材作業では効果は認められなかった。

一斉林の集材作業で、残存木損傷率を列状間伐と点状間伐で比べると、列状間伐の方が少ないことが知られている(65,114)。しかし、今回の複層林の集材作業では、点状間伐より列状間伐の方が下木の損傷が若干多いという逆の結果となった。現場での観察からその原因は、伐倒方向が関係していると考えられた。松本市の列状間伐は地形方向と無関係に列状伐採したため、伐採方向と最大傾斜方向がずれている場合が多かった。傾斜が急な場合、伐採方向と最大傾斜方向がずれた集材木を移動させると、集材木は傾斜方向に滑り落ち、周辺の下木に損傷が発生する傾向がみられた。

これは、斜面傾斜()および木寄せ方向が最大傾斜方向となす角度()と丸太の転落、滑落および自重落下の発生との関係をすぎ、ヒノキで理論的に解析し、傾斜が急になると木寄せできる範囲が限定される、とした石川(45)の結論と整合する。

5.3.2 列状間伐での集材作業による下木損傷原因の解明

列状間伐で下木に損傷が発生した原因について検討するため、点状間伐に比べ下木損傷率が大きかった集材作業に注目した。検討にあたり、伐採木63本のうち、プロット外に伐倒したものなどを除いた48本を対象とし、集材作業1サイクルごと

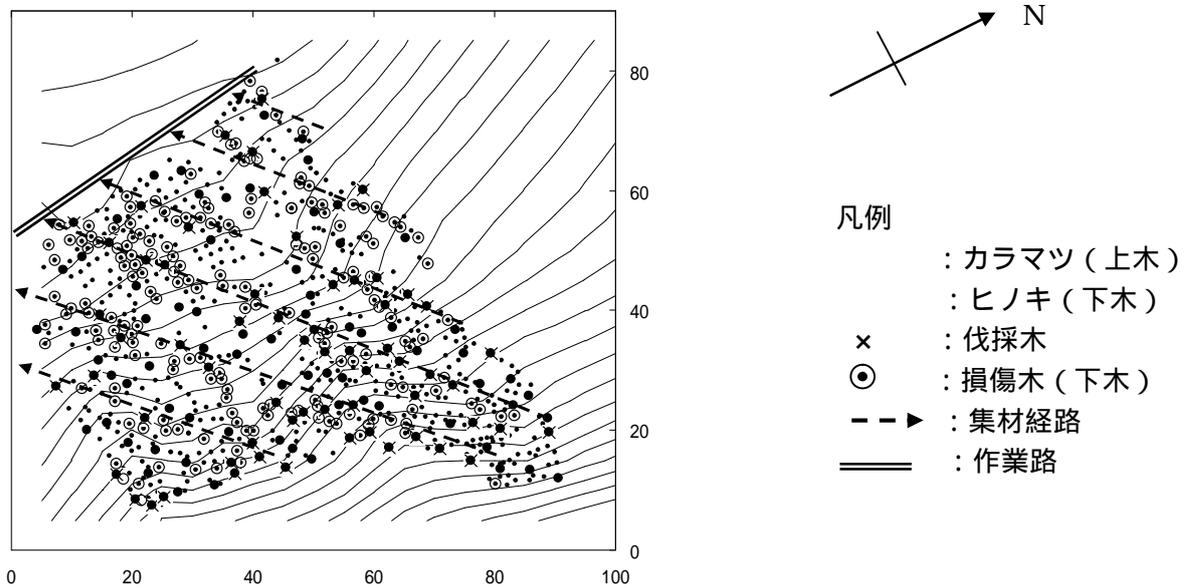


図 - 5.4 列状間伐の立木配置 (松本市)
 (注) 等高線は2m間隔

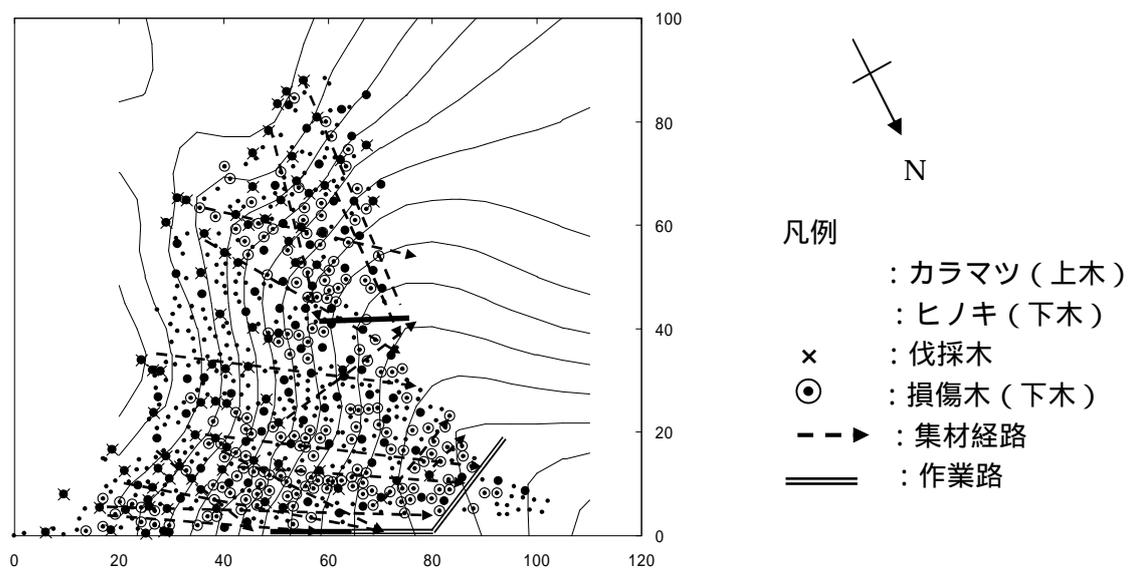


図 - 5.5 点状間伐の立木配置 (上田市)
 (注) 等高線は2m間隔

らかな斜面と 20 度以上の比較的急な斜面に分けて解析を行った。これは現地での観察で、傾斜 20 度付近を境にそれ以上急な傾斜地では集材木が横滑りしやすくなる傾向がみられたためである。

重回帰分析の結果、平均傾斜 20 度未満の比較的なだらかな斜面では、下木損傷率と相関の高い説明変数はなく、すべてを除外した。なお、除外した中でも、下木損傷率と最も相関係数が大きいのは集材木の単木材積であったが、図 - 5.7 に示したように有意な相関はなかった。

に分析を行った。なお、集材作業では 1 サイクルにつき 1 本のカラマツを搬出した。

まず、集材ラインの左右 2m 以内に入る下木のうち損傷した下木を調査し、損傷率を算出した。これを目的変数とし、以下の 5 因子を説明変数として重回帰分析を行った。なお今回の重回帰分析は、目的変数と 0.7 以上の単相関関係を持つ説明変数を選択し、その他を除外することとした。

- (1)平均傾斜(度): 集材ラインの平均傾斜
- (2)立木密度(本/ha): 集材ライン左右 2m 以内の立木密度
- (3)偏角(度): 最大傾斜方向と伐採方向のずれ(図 - 5.6)
- (4)集材木の単木材積(m^3)
- (5)集材距離(m)

分析にあたり、平均傾斜 20 度未満の比較的なだ

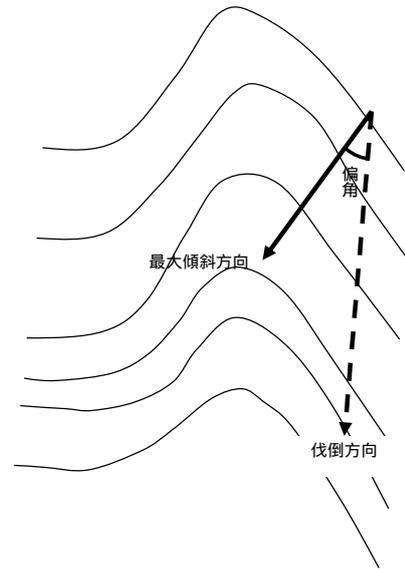


表 - 5.3 残存木の損傷

		間伐前本数 (本)	間伐本数 (本)	間伐率 (%)	残存本数 (本)	損傷本数 (本)	損傷率 (%)	地形傾斜 (度)	面積 (ha)
列状間伐 (松本市)	上木(カラマツ)	132 (357)	63	47.7	69 (186)	7	10.1	24	0.37
	下木(ヒノキ)	559 (1,511)			559 (1,511)	180	32.2		
点状間伐 (上田市)	上木(カラマツ)	146 (374)	81	55.5	65 (167)	8	12.3	20	0.39
	下木(ヒノキ)	450 (1,154)			450 (1,154)	177	39.3		

(注)()は ha あたり本数で、単位は本/ha

表 - 5.4 作業別の下木損傷

	上木間伐 本数 (本)	間伐率 (%)	下木本数 (本)	下木損傷 本数 (本)	損傷率 (%)	内訳					
						伐倒のみ の損傷 (本)	損傷率 (%)	集材のみ の損傷 (本)	損傷率 (%)	伐倒と集材の 重複損傷 (本)	損傷率 (%)
列状間伐	63 (170)	47.7	559 (1,511)	180 (486)	32.2	39	7.0	67	12.0	74	13.2
点状間伐	81 (208)	55.5	450 (1,154)	177 (454)	39.3	71	15.8	51	11.3	55	12.2

(注)()は ha あたり本数で、単位は本/ha

係（傾斜 20 未満）

図 - 5.6 最大傾斜方向と伐倒方向のずれ（偏角）

一方、平均傾斜が 20 度を超える比較的傾斜の急な斜面では、下木損傷率との相関が高い偏角のみを選択し、その他は除外した。そこで、下木損傷率と偏角との関係をみたところ、図 - 5.8 に示したように偏角が大きくなるほど下木損傷率が増加する傾向が認められた。岡ら（101）は、架線系の間伐作業で損傷木が発生する原因を調べた結果、横取り方向（集材木を引き寄せる方向）の影響が大きく、最大傾斜方向に集材する方が等高線方向に行うより材の転がりが抑制され損傷が少なくなると報告している。本調査結果もそれと同様の結果となった。

損傷率（ y ）と偏角（ x ）の関係は、

$$y=0.4483x$$

で、統計的に有意な（ $P<0.01$ ）強い相関関係が認められた（ $R=0.80$ ）。

なお、偏角 0 度の場合は損傷が発生しないと仮定して計算式を算出した。

図 - 5.8 を用いて下木損傷軽減法について検討すると、偏角が 20 度未満の場合、下木損傷率は 10% 以下と推定できる。このため、20 度を超える比較的急な斜面で列状間伐を行うときは、最大傾斜方向を常に意識し、偏角を 20 度未満に設定することで、損傷の発生を軽減できると考えられる。

なお、平均傾斜を 20 度以上 25 度未満と 25 度以上にさらに細分して偏角と下木損傷率との関係を図示したのが図 - 5.9 である。その結果、傾斜が急になっても、偏角と下木損傷率との関係はほぼ同じ傾向となった。これは、複層林の下木のように ha あたり 1,000 本～2,000 本と多数成立している林分では、傾斜が急になり横滑りのエネルギーが大きくても、直近の下木がそれ以上横滑りするのを防止するため損傷範囲は限られる。このため、傾斜が急になっても下木損傷率に差がなかったと考えられる。

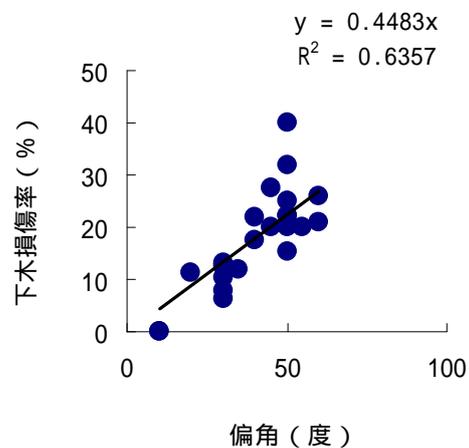


図 - 5.8 偏角と下木損傷率との関係（傾斜 20 度以上）

（注）偏角：図 - 5.6 参照

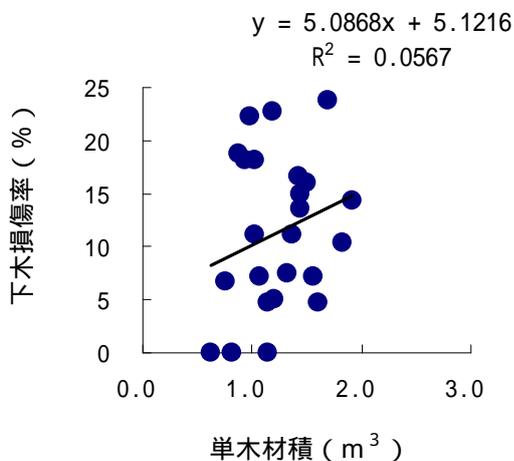


図 - 5.7 伐採木の単木材積と下木損傷率との関係

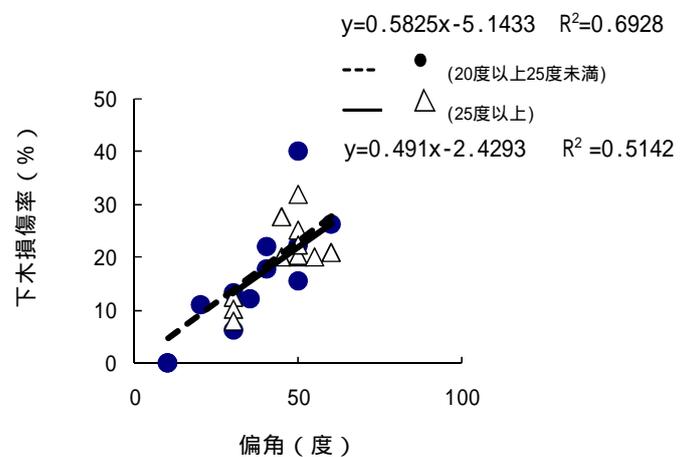


図 - 5.9 偏角と下木損傷率との関係（傾斜 20 度

以上 25 度未満, 25 度以上)
 (注) 偏角: 図 - 5.6 参照

5.3.3 列状間伐における倒伏の発生と偏角との関係

次に今回の列状間伐により発生した下木損傷の質について検討した。集材作業時の下木損傷で、成長や材の経済価値に最も影響を及ぼす損傷形態は「倒伏」である。そこで、集材による被害木のうち倒伏が占める割合を調べたところ、表 - 5.5 の調査結果を得た。点状間伐では 9.4%(10 本/106 本) にすぎなかったが、列状間伐では 30.5%(43 本/141 本) と大幅に増加していた。なお、それぞれの本数は集材作業の本数と重複作業による本数の合計である。

そこで、列状間伐の平均傾斜が 20 度以上の場合を対象として、集材作業 1 回ごとに、発生した損傷木のうちの倒伏した立木割合(倒伏率)を算出し、偏角との関係を調べた。なお、倒伏した立木に、別サイクルの集材木が衝突した場合、新たに倒伏が発生したものとみなした。その結果を図 - 5.10 に示した。偏角の大きい集材作業では倒伏率が高い傾向が認められた。平均傾斜が 20 度以上で、偏角の大きい集材作業では、下木損傷率が高いだけでなく、樹木の成長や材の経済価値に重大な影響を及ぼす損傷である倒伏が発生しやすいと考えられる。このことから、地形に適した列状間伐を行う必要があると判断できる。

5.3.4 地形に適した列状間伐を行った場合の下木損傷率の推定

本章で扱っている列状間伐は地形の変化を考慮せず、伐採列を平行に設定した。そこで、魚骨状列状間伐(20)などのように地形の変化を考慮し、すべての伐採が偏角 20 度未満となるように実施した場合、下木損傷がどの程度発生するかを推定した。推定にあたり、実際の伐採作業で偏角が

20 度未満の場合の下木損傷率はそのままの値を利用することとし、偏角が 20 度以上の場合のみ、偏角が 20 度未満になるように伐採をやり直すと仮定した。この場合、平均傾斜 20 度未満は集材距離が変化しただけ下木損傷率も変わるものとし、傾斜 20 度以上では、図 - 5.8 の関係式に $x = 20$ を代入して得られた下木損傷率 9%を用いて試算した。

その結果、集材にともなう下木損傷率は、重複を含め 25.2%(141 本/559 本) から 14.9%(83 本/559 本)へと大幅に軽減でき、伐倒による損傷を含めた下木全体の損傷率は、32.2%(180 本/559 本)から 27.2%(152 本/559 本)へと軽減できた。

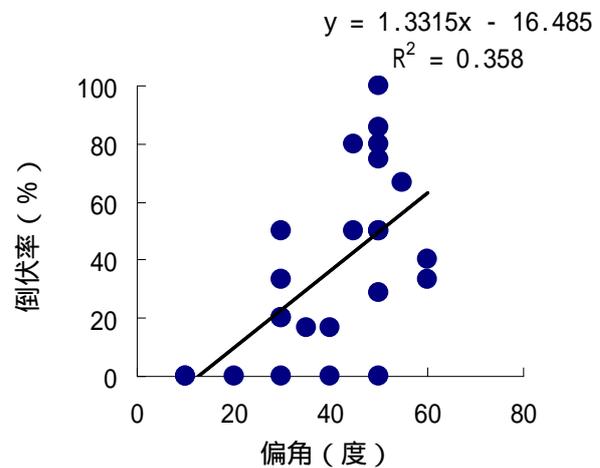


図 - 5.10 偏角と下木の倒伏率との関係(傾斜 20 度以上)

(注) 偏角 : 図 - 5.6 参照

倒伏率: 集材作業 1 回ごとに発生した損傷木のうち倒伏した立木の割合

この結果は図 - 5.11 に示したように、点状間伐の損傷結果 39.3%のほぼ 2/3 にあたり、最大傾斜方向に対し偏角 20 度未満とするなど、地形に応じた

表 - 5.5 下木の損傷発生原因と損傷形態

単位: 本 (%)

作業方法	作業区分	倒伏	梢端折れ	幹折れ	傾斜	枝折れ(大)	枝折れ(中・小)	樹皮剥離	合計
列状間伐	伐倒作業	1 (0.6)	19 (10.6)	3 (1.7)		3 (1.7)	7 (3.8)	6 (3.3)	39 (21.7)
	集材作業	24 (13.3)						43 (23.9)	67 (37.2)
	重複	19 (10.5)		3 (1.7)	1 (0.6)	9 (5.0)		42 (23.3)	74 (41.1)
	計	44 (24.4)	19 (10.6)	6 (3.4)	1 (0.6)	12 (6.7)	7 (3.8)	91 (50.5)	180 (100.0)
点状間伐	伐倒作業	3 (1.7)	32 (18.1)		3 (1.7)	13 (7.3)	20 (11.3)		71 (40.1)
	集材作業	4 (2.2)			6 (3.4)			41 (23.2)	51 (28.8)
	重複	6 (3.4)	24 (13.5)		6 (3.4)	7 (4.0)		12 (6.8)	55 (31.1)
	計	13 (7.3)	56 (31.6)		15 (8.5)	20 (11.3)	20 (11.3)	53 (30.0)	177 (100.0)

(注)()は合計に対する割合

列状間伐を実施することにより，点状間伐に比べて下木損傷をかなり軽減できることが予想される。

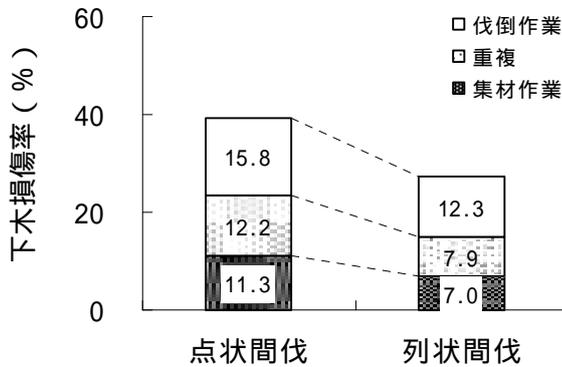


図 - 5.11 地形変化を考慮した場合の下木損傷率の推定

5.4 まとめ

点状複層林の上木を列状に間伐した場合の下木損傷率は 32.2%であった。この結果を，上木を点状に間伐した場合の 39.3%と比較すると，列状間伐の方が下木損傷率は少なかったが，その差は予想よりも小さかった。この原因は，地形の変化を考慮に入れずに，残存列と伐採列を交互に設定したためと考えられる。列状間伐の損傷軽減効果は伐倒作業に限られていて，集材作業では効果は認められなかった。

平均傾斜が 20 度を超える比較的傾斜の急な斜面での集材作業は，最大傾斜方向と伐採方向のずれ（偏角）が大きくなるほど下木損傷率が増加した。下木損傷率（ y ）と偏角（ x ）の関係は，

$$y=0.4483x$$

で示すことができた。

平均傾斜が 20 度を超える場合，偏角が大きくなると樹木の成長や材の経済価値に重大な影響を及ぼす「倒伏」被害の割合も多くなる傾向がみられた。

魚骨状列状間伐などのように地形の変化を考慮して，偏角 20 度未満で列状間伐を実施した場合の下木損傷は 27.2%と推定でき，点状間伐に比べて下木損傷の軽減効果が期待できる。

第6章 点状複層林の上木の山側伐倒と上木の事前枝払いにともなう下木損傷軽減

6.1 はじめに

上木間伐にともなう下木損傷を軽減する方法として、第4章では岡谷市の上木カラマツと下木ヒノキが交互に列状植栽された林分で行った上木列状間伐で、事前枝払いによる下木損傷軽減効果を示した。また、第5章では松本市の点状複層林で上木列状間伐調査を実施したところ、伐採列の方向と最大傾斜方向が一致しない場合が多かったため、下木損傷軽減効果は予想より小さかった。しかし、魚骨状列状間伐など地形を考慮した作業を行えば、列状間伐は点状間伐に比べて下木損傷の軽減が期待できることを明らかにした。

そこで、本章ではさらなる下木損傷軽減法を明らかにするために、佐久市のカラマツ・ヒノキ点状複層林で、2つの作業方法を検討した。まず、上木を山側に伐倒することによる下木損傷軽減効果について調査を試みた。山側に伐倒すれば、谷側伐倒に比べ上木が倒れる際の衝撃強度が小さくなり、損傷被害を軽減できると考えられた。

次に、列状複層林で被害軽減効果のあった事前枝払いが点状複層林でも適用できるか検討した。複層林の林型が異なれば、被害軽減効果も異なる可能性がある。これら2つの作業方法の組み合わせから、新たな下木損傷軽減法を検討した。

6.2 調査方法

調査地は長野県佐久市大沢の上木カラマツ、下木ヒノキの複層林である。この林分は、カラマツを点状間伐(単木的に伐採木を選択する間伐方法)した樹下に、ヒノキを均一に植栽した点状複層林で、図-6.1に示すように調査地は50mほど離れ

た2か所に設定した。また、2か所の調査地は表-6.1のように、上木と下木の林齢は同じで、林分状況には大きな差はみられなかった。また、標高は2か所とも同じ930m、平均傾斜も25~26度の平衡斜面であった。

上木は列状に間伐したが、伐倒にあたっては列ごとに次の4種類の作業方法を採用した。(1)谷側方向への伐倒(以下、谷側・枝払いなし)、(2)山側方向への伐倒(以下、山側・枝払いなし)、(3)事前枝払いを行ってから谷側方向への伐倒(以下、谷側・枝払いあり)、(4)事前枝払いを行ってから山側方向への伐倒(以下、山側・枝払いあり)である。なお、プロット面積の関係上、図-6.1に示したように「谷側・枝払いなし」と「山側・枝払いなし」は両プロットとも1か所ずつ設置したが、枝払い作業についてはプロット1では「山側・

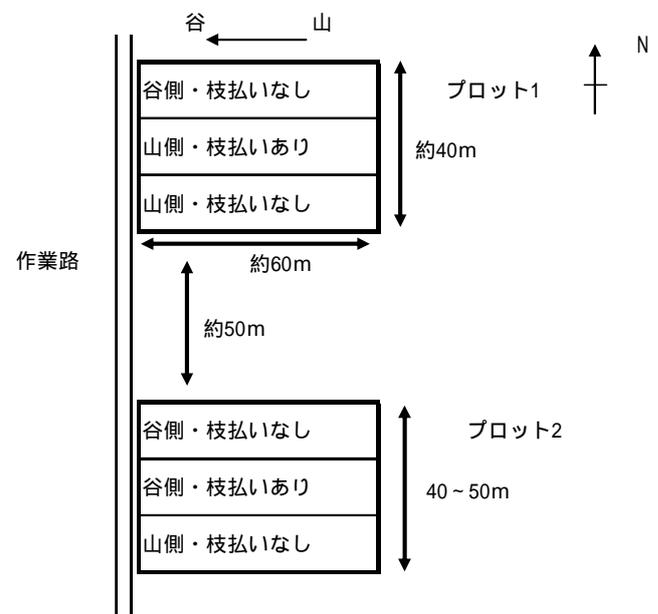


図-6.1 調査地の設定

表-6.1 調査地の概要

		林齢	平均樹高	平均胸高直径	間伐前本数	調査面積	標高	地形傾斜
		(年)	(m)	(cm)	(本/ha)	(ha)	(m)	(度)
プロット1	上木 カラマツ	42	20.9	28.0	253	0.19	930	26
	下木 ヒノキ	22	8.8	11.4	1,332			
プロット2	上木 カラマツ	42	21.5	26.8	341	0.27	930	25
	下木 ヒノキ	22	8.9	10.9	1,063			

枝払いあり」のみを，プロット2では「谷側・枝払いあり」のみを配置した。

伐採作業は，(1)チェーンソーで伐倒，枝払い，(2)トラクタのウインチを利用し，全幹材末口または元口吊りけん引で土場まで集材，(3)土場ではチェーンソーによる玉切り，(4)油圧ショベルで椋積み，という作業システムで行った。トラクタ集材は，林縁に作業路を開設し，作業路からトラクタのウインチを用いて行った。なお，集材に使用したトラクタは，キャタピラージャパン(旧・新キャピラー三菱)BS3Hであり，集材作業は枝による下木損傷を軽減するため，枝払いを実施したあと集材する全幹集材であった。また，枝払いはセイレイ社製枝打ち機「えだうちやまびこAB351R」を使用した。作業員の経験年数はいずれも10年以上であった。

伐倒直後と集材直後に上木と下木の残存木損傷の有無を確認するとともに，発生した損傷については，第2章表-2.2に示したように梢端折れ，幹折れ，傾斜，倒伏，枝折れ(大)，枝折れ(中)，枝折れ(小)，樹皮剥離の8区分とした。なお，材部損傷は樹皮剥離に含めた。

同一立木に複数種類の損傷が発生した場合は前章までと同様に，将来の樹木成長や材の経済価値に最も大きな影響を与えと考えられる損傷を優先した。具体的には，倒伏，幹折れ，傾斜，梢端折れ，枝折れ(大)，樹皮剥離，枝折れ(中)，枝折れ(小)の順に優先して選択した。

この調査では伐倒作業に注目し，まず上木を谷側へ伐倒した場合と山側に伐倒した場合で，下木の損傷率や損傷の種類などを比較した。次に事前の枝払いを追加することで，谷側へ伐倒した場合と山側に伐倒した場合の下木損傷率や損傷の種類などに違いが発生するか分析した。

6.3 結果と考察

6.3.1 伐倒方向による下木損傷率の比較

前章までと同様，図-6.2，6.3に各調査地の立木配置を示した。図中に伐採した上木と損傷を受けた下木の位置や集材経路及び作業方法を示した。

表-6.2は，プロット1と2の上木伐採にともなう下木の損傷を調査した結果である。プロット1と2の合計をみると，上木140本のうち72本を列状間伐(本数伐採率51.4%)した結果，伐採にともない下木の24.6%(133本/540本)に損傷が発生した。その内訳は，伐倒作業のみによる下木損

傷は9.1%(49本/540本)，集材作業のみによる下木損傷は9.3%(50本/540本)，伐倒作業で損傷を受けた下木が集材作業でも損傷を受けた重複損傷が6.3%(34本/540本)であった。

次に集材作業を除いた，伐倒作業のみを対象として「谷側・枝払いなし」と「山側・枝払いなし」で下木損傷率を比較した。なお，プロット1と2の林分状況はほぼ同じことから，分析にあたっては両プロットの集計値を用いることとした。その結果を表-6.3に示した。「谷側・枝払いなし」区域の下木損傷は20.3%(43本/212本)であったの対し，「山側伐倒・枝払いなし」区域の下木損傷は10.4%(13本/125本)と下木損傷率は半減していた。両者を²独立性の検定で有意差を検討したところ，「谷側・枝払いなし」の損傷率が有意に高く($P<0.05$)，山側伐倒による下木損傷軽減効果が認められた。

下木損傷は伐倒木から受ける衝突強度の大きさに関係があり，衝撃強度は同一質量であれば落下距離に比例すると湊ら(81)によって報告されている。伐倒した立木の水平面に対する傾斜角を測定したところ，山側伐倒の平均値は24.1度，谷側伐倒の平均値は-22.7度であった。山側に伐倒した場合の落下距離(衝撃強度)を1.0とすると，図-6.4に示したように谷側に伐倒した場合の落下距離は2.3と試算できる。このようなことから山側に伐倒することで下木に対する衝撃強さを軽減でき，その結果下木損傷が軽減できたと考えられる。

なお，山側に伐倒した場合は全幹元口吊り集材により土場まで集材した。元口吊り集材方法のメリットは，地面に対する接地面積や地面にかかる重量が小さいため，運転が容易で集材木をコントロールしやすく，残存木損傷や林地攪乱を軽減できることである。一方，元口吊り集材方法のデメリットとしては，集材時に切り株が障害となり作業が滞る場合があること，荷掛け者の負担が元口吊り集材に比べて大きいことなどがあげられる。

6.3.2 事前枝払いによる下木損傷軽減効果

次に，伐倒前枝払いによる下木損傷軽減効果を検討するため，伐倒前に枝払いを行った区域と行わなかった区域内の上木伐倒にともなう下木損傷率を比較した。

伐倒前に枝打ち機で事前に枝払いを行ったカラマツ立木の本数は山側伐倒が9本，谷側伐倒が13本の合計22本である。枝払い立木の平均樹高は

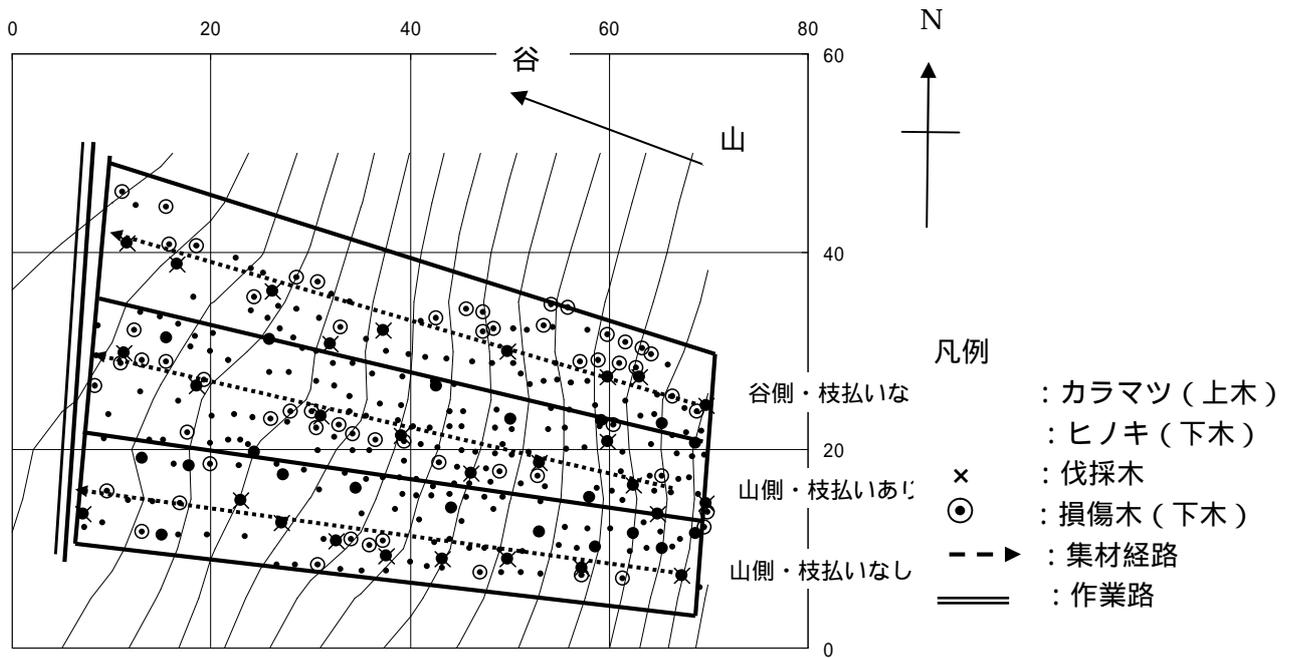


図 - 6.2 調査地の立木配置 (プロット1)
 (注) 等高線は2m間隔

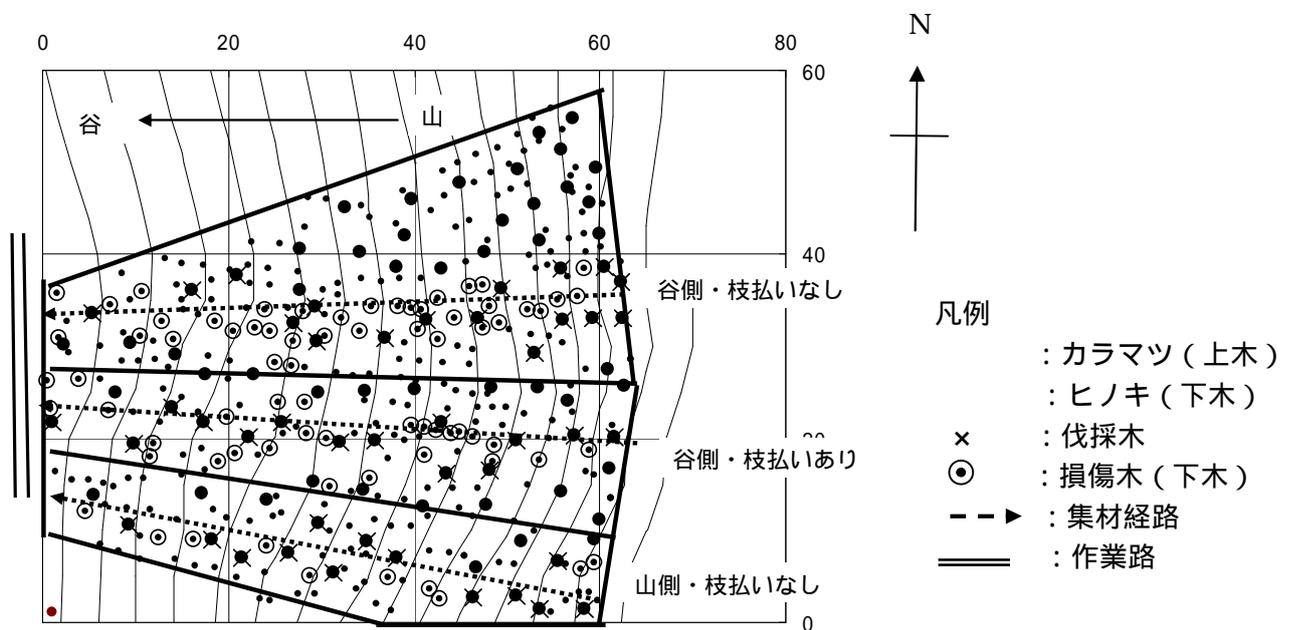


図 - 6.3 調査地の立木配置 (プロット2)
 (注) 等高線は2m間隔

21.6m, 平均胸高直径は 26.7cm, 平均樹冠長 (図 - 6.5 参照) 11.3m であった。平均樹冠長の 50% を目標に枝払いを実施したが, 枯れ枝も多く着生していたため作業に手間取り, 枝払い長は平均樹冠長の 41% にあたる 4.7m であった。

枝払いを行った上木の伐倒にともなう下木損傷結果を表 - 6.3 に示した。「谷側・枝払いあり」区域は 19.0% (16 本/84 本) であったのに対し, 「山側・枝払いあり」区域の下木損傷は 9.2% (11 本/119 本) で, 枝払いを行わず伐倒した場合と同様に, 山側伐倒の下木損傷率は半減した。

一方, 同じ伐倒方向で, 枝払いを行った場合と行わない場合で比較してみたところ, 山側伐倒と谷側伐倒ともに, 枝払い作業を行った方が下木損傷率は低かったが, その差はわずかであった。第 4 章で示したように, 岡谷市で行った調査結果では, 列状複層林で枝払いを行ってから列状間伐を実施すると, 軽減効果は明らかであったが, 本章

の結果では, 枝払いによる効果は明確ではなかった。

列状複層林の場合は, 上木と下木が列状に約 2 m 間隔で明確に分かれている。このため, 上木で枝払いを行い, 上木列に沿って正確に伐倒することで, 上木の枝や幹が下木に衝突せずに伐倒され

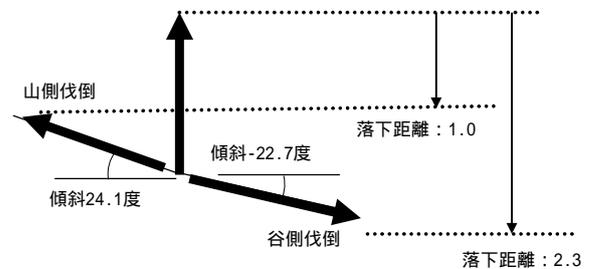


図 - 6.4 山側伐倒と谷側伐倒の落下距離の比較

表 - 6.2 上木間伐にともなう下木の損傷

	間伐前 本数 (本)	上木間 伐本数 (本)	間伐率 (%)	下木 本数 (本)	下木損傷 本数 (本)	損傷率 (%)	内訳					
							伐倒のみの 損傷(本)	損傷率 (%)	集材のみの 損傷(本)	損傷率 (%)	伐倒と集材の重複 損傷(本)	損傷率 (%)
プロット1	48 (253)	28 (147)	58.3	253 (1,332)	59 (311)	23.3	21	8.3	22	8.7	16	6.3
プロット2	92 (341)	44 (163)	47.8	287 (1,063)	74 (274)	25.8	28	9.8	28	9.8	18	6.3
合計	140 (304)	72 (157)	51.4	540 (1,174)	133 (289)	24.6	49	9.1	50	9.3	34	6.3

(注)() は ha あたり本数で, 単位は本/ha

表 - 6.3 伐倒方向と枝打ち有無別の伐倒作業における下木損傷率

作業方法	上木本数 (本)	上木間伐本数 (本)	間伐率 (%)	下木本数 (本)	下木損傷本数 (本)	下木損傷率 (%)	調査面積 (ha)	備考
谷側・枝払いなし	55 (324)	27 (159)	49.1	212 (1,247)	43	20.3	0.17	プロット1と2 の合計
山側・枝払いなし	34 (283)	23 (192)	67.6	125 (1,042)	13	10.4	0.12	プロット1と2 の合計
谷側・枝払いあり	30 (333)	13 (144)	43.3	84 (933)	16	19.0	0.09	プロット2
山側・枝払いあり	21 (263)	9 (113)	42.9	119 (1,488)	11	9.2	0.08	プロット1
合計	140 (304)	72 (157)	51.4	540 (1,174)	83	15.4	0.46	

(注)() は ha あたり本数で, 単位は本/ha

る可能性は高くなる。しかし、点状複層林の場合は、枝払いを実施しても下木がランダムに植栽しており、上木の枝や幹と下木が衝突することは避けられない。特に今回のように枝払いが平均樹冠長の40%程度の場合はその可能性は高いと考えられる。このように点状複層林の林分配置が列状複層林と異なることが、枝払いの下木損傷軽減効果が認められなかった原因の一つと考えられる。

6.3.3 伐倒木の樹冠内に入った下木の損傷

図-6.5に示したように、伐倒した上木1本ごとに、樹冠内に入ったヒノキの本数を調べ、このうち損傷を受けた下木の割合を調査した。この値を樹冠内損傷率とした。なお、対象とした上木は、伐倒した72本の内、伐倒立木がプロット外に倒れたものを除く63本とした。樹冠内損傷率の調査結果を、伐倒方向と枝払いの有無で4区分し、それぞれを分散分析で解析し、平均値の差をTukey-Kramerの多重比較で解析した。

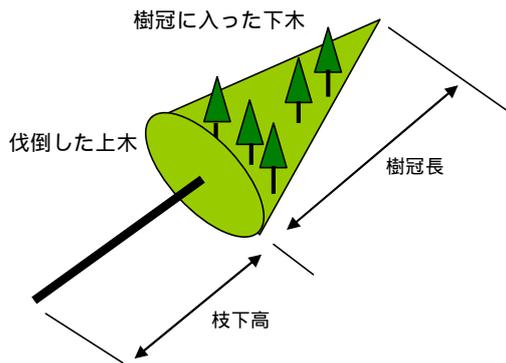


図-6.5 伐倒木の樹冠内に入った下木

結果を図-6.6に示した。「谷側・枝払いなし」と「山側・枝払いなし」、「谷側・枝払いあり」と「山側・枝払いなし」、「谷側・枝払いあり」と「山側・枝払いあり」の組み合わせに統計的に有意な差が認められたが、その他の組み合わせには有意差はみられなかった。このことから、枝払いを行った場合も行わない場合も、山側伐倒は谷側伐倒に比べて損傷を軽減する作業方法であるといえる。

同じ伐倒方向で、枝払いを実施したものと実施しなかったものを比較したところ統計学的には有意でないものの、枝払いを実施した方の下木損傷率が多少高かった。その原因として、現場での観察から枝払いを行った伐倒木は、行わない伐倒木と比較して倒れる速度が速い傾向がみられたこと、

枝払いにより力枝をはじめとする長くてしっかりした枝がなくなったことによる枝のクッション効果の低減などがあげられる。

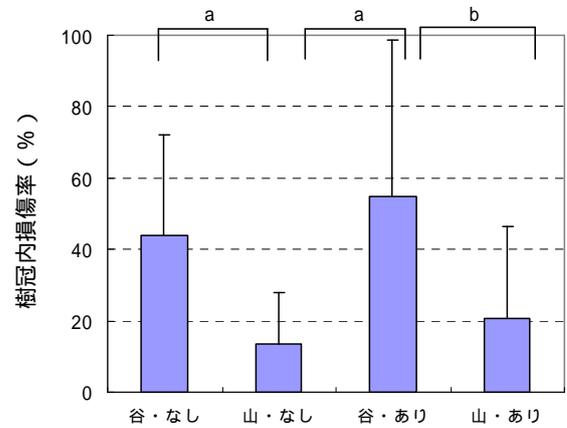


図-6.6 伐倒木の樹冠内に入った下木の損傷率と分散分析結果

伐倒作業を撮影したビデオの映像を用いて、立木が倒れ始めてから倒伏するまでの時間を、谷側伐倒の場合の枝払い有無により比較した。比較したのはプロット2の「谷側・枝払いあり」13本と「谷側・枝払いなし」16本である。なお、両者の間には、立木の大きさや上木が倒れ始めてから地面と衝突するまでの回転角度に大きな差異はなかった。「谷側・枝払いあり」の倒伏するまでの時間は1本あたり4.4秒であったのに対し、「谷側・枝払いなし」は5.2秒であった。「谷側・枝払いあり」の方が倒れ始めてから倒伏するまでの時間が15%短く、この原因として、枝払いによって伐倒木の樹冠面積が小さくなることで伐倒の際の空気抵抗が小さくなったこと、枝払いにより重心の位置が高くなったこと、などが考えられる。その結果、上木の枝や幹と下木が衝突した際の衝撃が増大し、樹冠内に入った下木に損傷が発生する危険性が高まると推定できる。

このように枝払いには下木損傷を増加させる危険性もあることが、枝払いによる下木損傷軽減効果が認められなかった原因の一つと考えられる。

穂屋下ら(35)は、ヒノキ-ヒノキ点状複層林で上木のヒノキの枝を平均樹冠長の65%(平均樹冠長11.0m 枝払い長7.2m)枝払いしたところ、明確な枝払い効果が認められたとしている。一方、西泉(95)は、平均樹冠長の54%(平均樹冠長11.1

m, 枝払い長 6.1m) の枝払いを行ったが, さほど効果がみられなかったとしている。なお, 佐久市の場合は平均樹冠長の 41% (平均樹冠長 11.3 m, 枝払い長 4.7m) の枝払いを行っている。

立木のすべての枝を払った場合は, 立木は棒状になり, これを伐倒すれば下木損傷軽減効果は確実に認められるものと考えられる。また, 穂屋下らのように, 枝払いにより樹冠面積が著しく減少した場合にも, 枝払い効果は現れるものと考えられる。しかし, 本章の場合のように枝払いの割合が十分でない場合, 枝払いにより倒れる速度が早くなるとともに, 枝払いにより力枝をはじめとする長くてしっかりした枝がなくなることによる枝のクッション効果の低減などで, 枝払い効果は十分に発揮されなかったと考えられる。

6.3.4 伐倒作業にともなう下木損傷率の推定

本項では上木伐倒にともない発生する下木損傷率を推定することを目的とした。具体的には伐倒した上木の樹冠内に入った下木のうち, 損傷を受ける割合を推定する方法を検討した。前項の検定に使用した上木 63 本のうち, 枝払いを実施した 22 本を除いた 41 本を対象として分析を行った。前述のとおり, 枝払いを行うと倒伏速度が速くなり, 下木に損傷が発生する危険性が高まることから, 「枝払いなし」の上木だけを調査対象とした。

上木伐倒にともなう樹冠内損傷率を目的変数とし, 以下を説明変数として重回帰分析を行った。

- (1) 上木の胸高直径 (cm)
- (2) 上木の樹高 (m)
- (3) 上木の樹冠面積 (m²): 上木を伐倒した際, 枝が地面を覆った面積
- (4) 下木の立木密度 (本/ha): 伐倒した上木の左右 5m 範囲内の下木立木密度
- (5) 上木の回転角度 (度): 上木が地面と衝突するまでに回転する角度

なお, 説明変数として立木の落下距離を採用せず回転角度を採用したのは, 落下距離と回転角

度の間に強い相関があり (R=0.99), さらに回転角度は地形傾斜に変換が容易で, 下木損傷率の推定基準としやすいからである。

重回帰分析の結果, 上木の回転角度は標準偏回帰係数 0.702 と高かったが, その他の説明変数の標準偏回帰係数は極めて小さかった。このことから, 上木の回転角度が樹冠内損傷率を推定する重要な変数といえた。そこで, 樹冠内損傷率と上木の回転角度との関係を図 - 6.7 に示した。回転角度が大きくなるほど樹冠内損傷率が増加する傾向が明らかで, 上木の回転角度 (x) と樹冠内損傷率 (y) の関係は

$$y=0.6709x-31.48 \quad (R=0.58)$$

で示され, 有意な相関が認められた (P<0.01)。なお, x はエネルギーに関わる y との関係を現象的に説明するモデルである。

この結果から, 樹冠内損傷率と回転角度, 地形傾斜との 3 者の関係を表 - 6.4 に示した。傾斜 30 度の斜面で伐倒作業を行った場合, 谷側に伐倒す

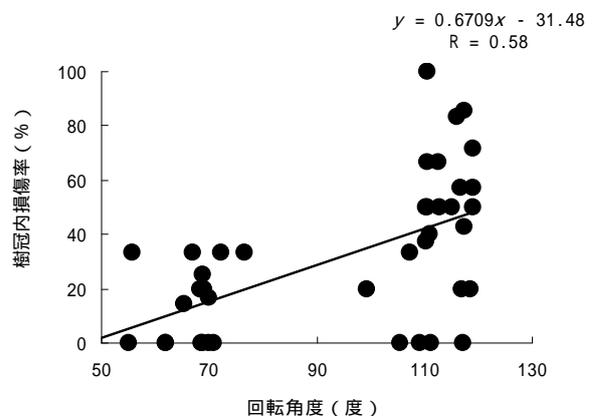


図 - 6.7 回転角度と樹冠内損傷率

表 - 6.4 回転角度と地形傾斜および樹冠内下木損傷率との関係

伐倒方向	山側伐倒				平坦地	谷側伐倒			
	50	60	70	80		90	100	110	120
回転角度 (度)	50	60	70	80	90	100	110	120	130
地形傾斜 (度)	+40	+30	+20	+10	0	-10	-20	-30	-40
樹冠内下木損傷率 (%)	2.1	8.8	15.5	22.2	28.9	35.6	42.3	49.0	55.7

ると樹冠に入った下木の 49.0%に損傷が発生するのに対し，山側に伐倒した場合の下木損傷は 8.8%に軽減できると予想される。このことから山側伐倒が谷側伐倒と比較して下木損傷を軽減できる作業方法と考えられる。

6.3.5 伐倒作業にともない発生する下木損傷の形態

次に，上木伐倒作業にともない発生する下木損傷の形態を把握するため，すべての損傷木を対象に下木損傷の形態を調査し，作業方法別にとりまとめた。その結果を表 - 6.5 に示した。このうち，第 3 章の調査結果から将来の木材の経済価値に影響がないと考えられる軽度の損傷「枝折れ（小）」の占める割合を図 - 6.8 に示した。「山側伐倒・枝払いなし」では「枝折れ（小）」は損傷全体の 53.8%（7 本/13 本）であったのに対し，「谷側伐倒・枝払いなし」の場合は全体の 30.2%（13 本/43 本）であった。このことから，谷側伐倒に比べ山側伐倒の方が，下木損傷程度の軽いものが多いことが明らかとなった。

一方，同じ伐倒方向で枝払いを実施した場合と実施しなかった場合の枝折れ（小）の割合をみるところ，山側伐倒の場合は，「山側伐倒・枝払いあり」が 45.5%（5 本/11 本）に対し「山側伐倒・枝払いなし」が 53.8%（7 本/13 本），谷側伐倒の場合は，「谷側伐倒・枝払いあり」が 18.8%（3 本/16 本）に対し，「谷側伐倒・枝払いなし」が 30.2%（13 本/43 本）と，枝払いを行った方がいずれの場合も枝折れ（小）の割合が少ない結果となった。このことから，枝払いを行うことにより，損傷を受けた下木の損傷程度は重度になる傾向が認められた。

6.3.6 集材作業による下木損傷

本章で調査した佐久市大沢の集材作業にともなう下木損傷は，表 - 6.2 に示したとおり重複被害を含めて 15.6%（84 本/540 本）であった。前章で調査した松本市の点状複層林の上木列状間伐では，伐採列の方向と最大傾斜方向が一致しない場合が多く，集材作業にともなう下木損傷は重複被害を含めて 25.2%と高い値を示した。しかし，同調査地において魚骨状列状間伐など，伐採列の方向と最大傾斜方向を一致させるように地形を考慮した作業を行えば下木損傷は 14.9%に軽減されると推定した。

本章の佐久市の作業は平衡斜面でもあり，伐採列の方向と傾斜方向が一致するケースが多かった。佐久市の集材作業にともなう損傷率 15.6%と松本市の推定損傷率 14.9%を比較したところほぼ同じであったことから，前章で示した推定は妥当と考えられる。

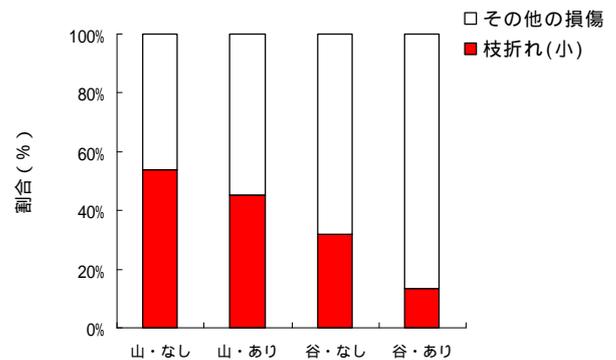


図 - 6.8 伐倒方向と枝打ち有無別の枝折れ（小）の割合

注)「谷」は谷側伐倒で，「山」は山側伐倒。

「なし」は枝払いなし，「あり」は枝払いあり
枝折れ（小）: 最も軽度の損傷で，この割合が高いほど 全体の損傷は軽度となる。

表 - 6.5 作業方法別損傷形態

(単位: 本)

作業方法	梢端折れ	幹折れ	傾斜	倒伏	枝折れ(大)	枝折れ(中)	枝折れ(小)	樹皮剥離	損傷本数合計	下木本数合計
谷側・枝打ちなし	16	3	4		2	5	13		43	212
山側・枝打ちなし	2		1			3	7		13	125
谷側・枝打ちあり	9		1		1	1	3	1	16	84
山側・枝打ちあり		1	2	1		1	5	1	11	119
合計	27	4	8	1	3	10	28	2	83	540

6.4 まとめ

点状複層林の列状間伐にともなう下木損傷を、谷側伐倒した区域と山側伐倒した区域で比較したところ、山側伐倒区域の下木損傷率は谷側伐倒区域と比較して半減した。同じ伐倒方向で、枝払いを行った場合と行わない場合で比較したところ、山側伐倒と谷側伐倒ともに、枝払いを行った方が下木損傷率は低かったが、その差はわずかで枝払いによる軽減効果は明確ではなかった。

上木伐倒にともない樹冠に入ったヒノキのうち損傷を受けた下木の割合を調査した。調査結果を、伐倒方向と枝払いの有無で4区分し、解析したところ、枝払いを行った場合も行わない場合も、山側伐倒と谷側伐倒の間に有意差が認められ、山側伐倒の軽減効果が認められた。しかし、同じ伐倒方向では枝払いによる軽減効果は認められず、統計学的に有意ではないものの、枝払いを実施した方の下木損傷率が多少高かった。

損傷を受けたすべての下木を対象に、伐倒方向と枝払いの有無により将来の木材の経済価値に影響がないと考えられる軽度の損傷「枝折れ(小)」の占める割合を調べたところ、山側・枝払いなしでは枝折れ(小)が損傷全体の53.8%を占めたのに対し、谷側・枝払いなしの場合は損傷全体の30.2%であった。このことから、山側伐倒の方が谷側伐倒より下木損傷程度が軽くなることが明らかとなった。

一方、同じ伐倒方向で枝払いを実施した場合と実施しなかった場合の枝折れ(小)の割合をみたところ、山側伐倒も谷側伐倒も、枝払いを行った方が枝折れ(小)の割合が少ない結果となった。このことから、枝払いを行うことにより、損傷を受けた下木の損傷程度は重度になる傾向が認められた。

なお、枝打ち機「えだうちやまびこ AB351R」により枝払いを行ったプロット2のカラマツ13本を対象にビデオ解析を行ったところ、1本当たりの枝払い時間は893秒(14分53秒)であった。1日作業時間を6時間とすると、24.2本の枝払いを実施できる。しかし、機械の総重量は32.8kgあるため2人で操作する必要があるため、1日あたりの生産性は12.1本/人日と、第4章の人力による枝払いとほぼ同じ生産性であった。作業者の賃金を1日15,000円とすると、枝払い1本当たりのコストは1,200円にもなる。

また、本章で使用した枝打ち機は幹直径35cm

までの大径材に対応できる利点もあるが、直径が15cm以下の幹には対応できず、先端近くまで枝払いができない。さらに、枝打ち機が10mをこえる高い位置での作業中に、枝打ち機の刃が太い枝に食い込んで動けなくなった場合の対応は困難で、作業には常に緊張がともなう。

本章の調査結果から、点状複層林での山側伐倒は、谷側伐倒と比較して下木損傷を軽減する作業方法と認められたが、枝打ち機による枝払い作業は困難がともなうとともに、樹冠長の40%程度の枝払い作業は下木損傷を軽減する方法とはいえないなかった。

第7章 下木損傷軽減対策と複層林造成

7.1 はじめに

本章では、まず第4章から第6章にかけて論じてきた下木損傷軽減法のとりまとめ結果から、現状の複層林を対象に下木損傷の軽減が可能な上木間伐法を、点状複層林と列状複層林に分けて提案した。

次に、造成後の管理のしやすさという視点から、複層林造成を行う場合の路網整備や複層林の林型をどのように考えればよいかを考察した。

7.2 下木損傷軽減対策

7.2.1 点状複層林における下木損傷軽減

7.2.1.1 伐採方法

第5章において、点状複層林の上木を列状間伐した松本市と点状間伐した上田市の、伐倒作業と集材作業にともなう下木損傷率を比較した。この結果、上木を列状間伐した場合の下木損傷率は32.2%で、上木を点状間伐した場合の39.3%と比較すると、列状間伐の方が下木損傷率は低かった。しかし、松本市の列状間伐では地形の変化を考慮に入れずに、残存列と伐採列を一定方向に交互に設定したため、平均傾斜が20度を超える比較的傾斜の急な斜面では、最大傾斜方向と伐採方向のずれ（偏角）が大きくなるほど集材作業での下木損傷率が増加していた。偏角20度以上で集材すると、樹木の成長や材の経済的価値に重大な影響を及ぼす倒伏被害の割合が大きくなる傾向が認められた。

そこで、地形の変化を考慮して偏角20度未満で列状間伐を実施した場合の下木損傷率を推定すると27.2%（152本/559本）と計算でき、上木を点状間伐した場合の39.3%と比較して下木損傷を軽減できると考えられた。

以上のことから、点状複層林で下木損傷を軽減するための伐採方法は、(1)上木を列状に伐採すること、(2)地形の変化を考慮して最大傾斜方向に対する偏角20度未満に列方向を設定して伐採すること、が重要なポイントと考えられる。

7.2.1.2 伐倒方向

第6章では上木の伐倒作業にともなう下木損傷を、谷側伐倒した区域と山側伐倒した区域で比較した。その結果、山側伐倒区域の下木損傷率は谷側伐倒区域と比較して有意に低かった。さらに、上木伐倒にともない樹冠に入った下木ヒノキのうち損傷を受けた下木の割合を伐倒方向で比較した

ところ、山側伐倒の下木損傷率は、谷側伐倒に比較して有意に低かった。また、損傷を受けたすべての下木を対象に、軽度の損傷である枝折れ（小）の占める割合を調べたところ、山側伐倒では枝折れ（小）が損傷全体の53.8%を占めたのに対し、谷側伐倒は損傷全体の30.2%であった。このことから、山側伐倒は谷側伐倒より下木損傷程度の軽度なものが多いと考えられた。

これらの結果は、下木損傷は伐倒木から受ける衝撃強度の大きさと関係があり、衝撃強度は同一質量であれば落下距離に比例するため、山側伐倒では落下距離が最小になることから説明できた。一方、山側伐倒の場合、急傾斜地では上方から滑落してくる伐倒木に巻き込まれて作業員が重大事故を起こすことがある（50）といわれている。

以上のことから点状複層林で上木を山側に伐倒することは、下木損傷率と下木損傷程度を軽減する方法として有効な手段と考えられるが、急傾斜地での間伐作業は安全に配慮して慎重に実施する必要がある。

7.2.1.3 事前枝払い

第6章で同じ伐倒方向で間伐前に樹冠長の40%程度の枝払いを行った場合と行わない場合で伐倒作業にともなう下木損傷を比較した。その結果、伐倒方向が山側の場合も谷側の場合も、枝払い作業を行った方が下木損傷率は低かったが、その差はわずかで点状複層林における枝払いによる下木損傷軽減効果は明確でなかった。

次に上木伐倒にともない伐倒木の樹冠に入ったヒノキだけを対象として損傷を受けた割合を調査した。調査結果を、同じ伐倒方向の枝払いの有無で比較したところ、統計学的には有意でないものの、枝払いを実施した方の下木損傷率が多少高かった。さらに、損傷を受けたすべての下木を対象に、伐倒方向と枝払いの有無により軽度の損傷である枝折れ（小）の占める割合を調べたところ、山側伐倒と谷側伐倒ともに、枝払いを行った方が枝折れ（小）の割合が少ない結果となった。このことから、枝払いを行うことにより、損傷を受けた下木の損傷程度は重度になる傾向が認められた。

以上の結果から、点状複層林において樹冠長の40%程度の枝払い作業は下木損傷を軽減する方法とは認められなかった。

7.2.2 列状複層林における下木損傷軽減

7.2.2.1 伐採方法

列状複層林は一般的には最大傾斜方向に植栽列

が設定されている。このため、設定された植栽列に沿って伐採を行えばよい。ただし、植栽列の設定が最大傾斜方向とずれてしまっている場合には、点状複層林の場合と同じ理由から、植栽列とは関係なく最大傾斜方向に対して偏角が 20 度未満となるように伐採列を設定して列状伐採する必要がある。

7.2.2.2 伐倒方向

点状複層林における下木損傷軽減法として山側伐倒の有効性を第 6 章および第 7 章で述べた。ここでは、列状複層林の山側伐倒を著者らが調査した事例(72)を引用して考察する。これは第 2 章で調査したカラマツ - ヒノキ 1 残 1 伐列状複層林と隣接する林分で、同じくカラマツ - ヒノキ 1 残 1 伐列状複層林を対象に上木カラマツを山側伐倒した事例である。調査の結果、伐倒作業と集材作業にともなう下木損傷率は 12.8%であり、第 2 章の谷側伐倒の 27.8%に比べ下木損傷率が半分以下に軽減した。山側伐倒と谷側伐倒を²独立性の検定で有意差を検討したところ、谷側伐倒は山側伐倒に比べ損傷率は有意に高かった($P < 0.01$)。列状複層林においても山側伐倒の効果が確認でき、山側に伐倒することは、下木損傷率を軽減する方法として有効な手段と考えられる。

7.2.2.3 事前枝払い

第 4 章では、1 残 1 伐列状複層林で、枝払い列と、そのまま伐採する列(対照列)を交互に設定し、伐倒作業と集材作業にともなう下木損傷を比較した。その結果、上木伐採による下木の損傷率は、対照列が 29.1%(41 本/141 本)であったのに対し、枝払い列は 18.8%(28 本/149 本)と枝払いによる下木損傷軽減効果が認められた。

点状複層林では認められなかった事前枝払いの効果が列状複層林では認められたが 4m の枝払いを鋸で行う場合、1 人 1 日 12 本程度しか実施することができず、枝払い作業を実施することで間伐作業の生産性はかなり低減する。このため、複層林の上木伐倒を行うための補助施策の充実などが図られなければ、間伐前枝払いの実施は難しいと考えられる。

7.2.3 下木損傷軽減のためのその他の方法

以上 点状複層林と列状複層林別に、伐採方法、伐倒方向、間伐前枝払いの有効性についてとりまとめたが、その他の下木損傷軽減法について次に述べる。

7.2.3.1 集材方向

伐倒された上木の集材方向(上げ荷集材、下げ荷集材)について検討する。筆者らは、長野県伊那市の平均傾斜 25 度の 40 年生カラマツ一斉林で点状間伐を実施した。集材方法はランニングスカイライン方式によるタワーヤード全木集材で、上げ荷集材と下げ荷集材で残存木の損傷率を比較した(63)。なお、伐倒は谷側に向けて行われた。その結果、上げ荷集材は残存木の 8.9%、下げ荷集材は 14.5%に損傷が発生し、下げ荷集材の方が損傷発生率は高かった。両者を²独立性の検定で有意差を検討したところ、下げ荷集材の損傷率が有意に高く($P < 0.05$)、上げ荷集材による残存木損傷軽減効果が認められた。この原因として、下げ荷では集材木が自重により斜面方向へ滑落するなどして、上げ荷よりコントロールが難しいこと、谷側伐倒を行ったため、下げ荷は末口吊り集材となり不安定さが増したこと、などが考えられた。複層林で伐倒した上木についても、一斉林と同じく上げ荷集材の方がコントロールしやすく、下木損傷を軽減できるものと考えられるので、上げ荷集材と下げ荷集材のどちらも可能な場合には、上げ荷集材を優先すべきと考えられる。

7.2.3.2 防護具の使用等

最大傾斜方向に向けて列状に山側伐倒するとともに、細心の注意を払って集材しても、林内から路網上に引き出すための林縁の旋回部分や魚骨状間伐を行った場合の旋回部分などでは損傷が発生しやすい(93)。

岡ら(102)は、簡単な防護具を用いた残存木損傷の軽減効果を検討し、ポリ配水管を利用した防護具が効果の高いことを示した。また、筆者らは低コスト作業システム構築事業報告書(93)の中で、県内の素材生産業者からの聞き取りとして、損傷が発生しそうな区域では間伐木を高さ 1 m 程度の高い位置で伐採し、間伐木の切り株に残存木損傷防止のための杭の役目をさせたり、特に損傷が集中しそうな区域では、特定の立木に損傷を集中させて周辺の立木を保護し、集材が終わってから切り捨て間伐を実施すること、などを行い効果を上げている事例を報告している。

このように集材作業にともなう損傷が集中しそうな立木にはポリ配水管で保護したり、高い位置での伐採、損傷を集中させて周辺の立木を保護するなどの配慮を行えば、さらに下木損傷が軽減できるものと考えられる。

7.2.4 下木損傷軽減のとりまとめ

以上の下木損傷軽減法をとりまとめて表 - 7.1 に示した。

点状複層林は、最大傾斜方向に対し偏角 20 度未満で列状に伐採するとともに、山側に向けて伐倒すること、列状複層林では、植栽列に沿って山側に向けて伐倒すること、が重要と考えられる。集材方向は、上げ荷集材の方がコントロールしやすいため、上げ荷集材と下げ荷集材のどちらも可能な場合には、上げ荷集材を優先すべきと考えられる。また、集材時に損傷が集中しそうな立木には防護具を設置したり、高い位置での伐採や損傷を集中させて周辺の立木を保護するなどの配慮を行えば、さらに下木損傷が軽減可能と考えられる。

7.3 今後の複層林造成

次に、複層林造成後の管理の容易さという視点から、路網整備を含めて今後の複層林造成の留意点について考察する。

7.3.1 路網整備

本項については、関連文献を中心に検討する。複層林施業を行うためには、林道・作業道がよく整備されていることが必要であり(20, 166)、路網密度が高いこと、すなわち地利条件の良いことは複層林の必須条件で、林道・作業道沿いの林地であることが基本であるといわれている(92)。具体的には、路網から 50m 以内に複層林を造成できるよう計画すべき(58)との考え方や、トラクタを利用する場合は、ha 当たり 100m 内外の集材路を作設する配慮が必要である(160)との考え方がある。

また、岐阜県の石原林材は ha 当たり 107m に及ぶ路網密度であることにより複層林施業を維持している(111)としている。実際に田中ら(154)は、ヒノキ - ヒノキ複層林で集材路延長が長いほ

ど集材による損傷率は低く、集材による下木損傷は長距離の木寄せを行ったところに多いことを明らかにしている。以上のことから、複層林では路網整備が極めて重要と考えられる。

路網間隔については、林分の状況に応じて柔軟に対応すればよいが、一応の目標を示すこととする。筆者ら(72)は、作業道に隣接する飯綱町の 47 年生のカラマツ一斉林で間伐調査を実施した。間伐前の立木密度は 1,079 本/ha の過密林分で、3 残 1 伐の列状間伐を実施した(本数間伐率 31%)とて、当林分は作業道から最大で 30m 離れていたが、平均樹高 22.9m の立木を谷側に伐倒することで伐倒木が谷側にすべり落ち、すべての立木を作業道上のプロセッサで直接つかんで集材することができた。このためワイヤーを利用して集材する場合に発生する立木の横滑りが防止でき、残存木に衝突することなく集材できた。また、林内から作業道への立木の引き出しも、プロセッサで玉切を行うことでスムーズに行われ、残存木損傷は 1.4% (1 本/69 本) に過ぎなかった。

この調査結果から、路網に隣接した林分で、プロセッサやグラップルなどで直接集材した場合、集材時の残存木損傷がほとんど発生しないことがわかる。複層林の上木伐採については、下木の成立密度が高く一斉林よりも作業条件は厳しい。しかし、作業道等の路網に隣接した林分においてプロセッサやグラップル等を利用して集材作業を行えば立木の横滑りなどを防止でき、下木損傷を大幅に軽減できると考えられる。

そこで、すべての立木を路網から集材できる路網間隔を考えてみる。本論文の調査結果から、複層林の上木を山側に伐倒することにより下木損傷を軽減できることが明らかとなっており、複層林の上木はすべて山側に伐倒することを前提とする。

表 - 7.1 下木損傷軽減法のとりまとめ

林型	伐採方法	伐倒方向	集材方向	その他
点状複層林	・ 列状伐採	・ 山側	・ 上げ荷集材と下げ荷集材が可能な場合は、上げ荷集材を優先する	・ 防護具を使用する
	・ 伐採列は最大傾斜方向に対し偏角20度未満			・ 損傷が発生しやすい場所の間伐木を高い位置で伐採し、損傷防止杭として利用する
列状複層林	・ 植栽列に沿って列状伐採			・ 損傷を集中させる立木を設け、周辺立木を保護する
	・ 植栽列が最大傾斜方向とずれている場合は、伐採列は最大傾斜方向に対し偏角20度未満			

上げ荷集材の場合 斜面傾斜を 25 度と仮定して傾斜補正すると、集材距離が (樹高 + プロセッサのアームの長さ) × cos25° の範囲内であればすべての立木をプロセッサ等で直接集材できることになる。樹高が 20m の林分の場合には約 23m、樹高が 25m の林分の場合には 27m まで集材できる範囲である。一方、下げ荷集材の場合はアームの長さ約 5m まで集材可能範囲である (31)。この結果、すべての立木をプロセッサ等で直接集材するには、路網を約 30m 間隔に配置するのが複層林施業では理想的と考えられる。しかし、この場合の路網密度は 400m/ha を越える高密路網となり、林地保全や路網開設コストを考えると、現実的ではない。

酒井 (118) は、タワーヤード、スイングヤード、ウインチ・クレーンなどの車両を道路に停めて行う集材作業を「駐車形」と呼び、作業距離は短いが機動的で高能率な作業を行うことができ、少量の作業や頻りに移動しなければならない間伐や択伐に適しているとしている。さらに酒井 (117) は、作業距離が長くなると集材費用は高くなるため作業道を開設するが、作業道の延長が長くなると道路の費用がかかってくるので、両者の関係から最適値の目安を示した。これによると、路網費用が安ければタワーヤード、スイングヤード、ウインチ・クレーンなど短距離集材に適した「駐車形」作業方式が有利となるケースが生まれてきて、100m/ha 以上に路網密度を高めることも可能であるとしている。これらのことから路網密度 100m/ha (路網間隔約 100m) を目標とすることが妥

当と考えられる。

間伐作業法は図 - 7.1 および表 - 7.2 に示すように、間伐対象林分の路網からの距離に応じて柔軟に対応すればよい。上げ荷集材の場合、路網からの距離が約 25m の範囲の林分であれば、プロセッサ等で直接集材できる。また、プロセッサ等に装備されたウインチを 20m ~ 30m 程度使用すれば樹高分を含めて、路網から 50m 程度までは効率的に集材できる。路網からの距離が 50m を越える林分の場合はタワーヤード、スイングヤードを使用して集材作業を行うのが良いと考えられる。

一方、下げ荷集材では、路網からの距離が約 5m の範囲の林分であれば、プロセッサ等で直接集材できる。また、20 ~ 30m 程度までの林分であれば、プロセッサ等に装備されたウインチを使用してプロセッサ等で集材するのが効率的と考えられる。路網からの距離が 20 ~ 30m を越える林分の場合はタワーヤード、スイングヤードを使用して集材作業を行うのが良いと考えられる。

7.3.2 複層林造成

今後複層林を造成する際の林型を考えた場合、列状 (帯状) 複層林と点状複層林が考えられる。それぞれについて概略を述べる。

7.3.2.1 列状 (帯状) 複層林の造成

第 2 章においては、3 種類の複層林 (点状複層林、1 残 1 伐列状複層林、3 残 2 伐列状複層林) で上木を間伐した結果を示した。点状複層林で上木間伐を行った場合は、下木の 39.3% に損傷が発生した。一方、残り 2 種類の列状複層林の下木損

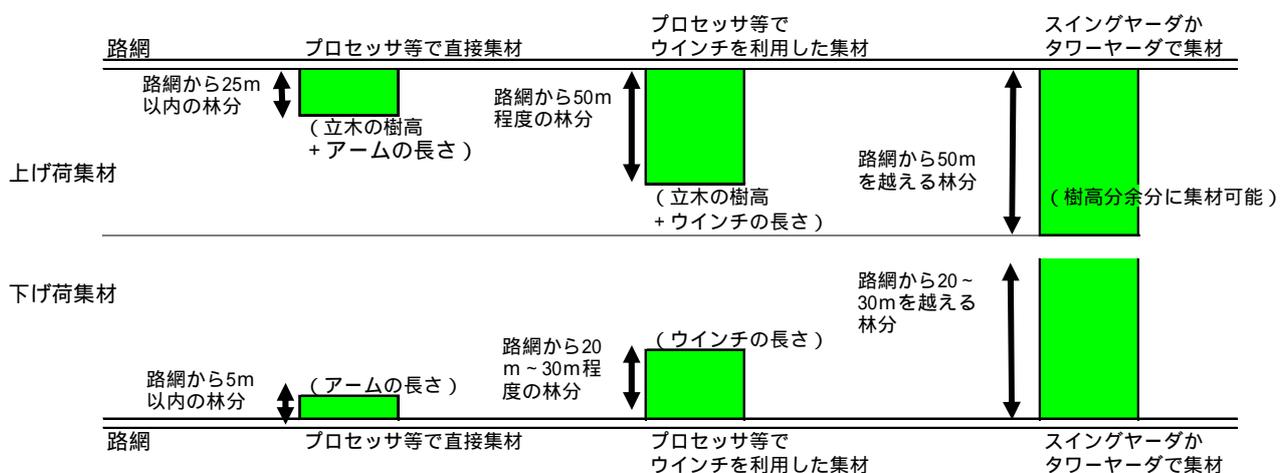


図 - 7.1 林分の路網からの距離と間伐作業法

傷率は点状複層林に比べ低かったが、1残1伐列状複層林は下木の27.8%に損傷が発生した。これに対し3残2伐列状複層林は下木の損傷は0.7%とわずかだった。これは、上木3列の中央列を伐倒したことにより、伐倒木を両側の上木の上に誘導しやすかったことや、伐採した上木は、横滑りをした場合でも両側の上木に保護され下木と衝突しなかったためである。

次回の上木間伐を考えると、上木の樹冠はさらに成長するため、点状複層林や1残1伐列状複層林では、次回の間伐にともなう下木の損傷は今回より多くなると推定できる。しかし、3残2伐列状複層林では1回目の間伐跡が次回の間伐の集材路となり、間伐作業は比較的容易で下木損傷も今回の調査結果と大差ないと考えられる。なお、上木を3列よりも多く残す列状(帯状)複層林の作業を考えた場合も、両端の列を伐採せずに残すなどすることで、3残2伐複層林と同様に下木の損傷を少なくすることが期待できる。

以上のことから、本調査結果とともに今後の上木伐採も考えると、残存木の損傷が少ない複層林として列状複層林が適しており、上木を3列以上残す列状複層林(帯状複層林)が最も適していると考えられる。なお、列状複層林の列方向は最大傾斜方向に向けて造成するのがよい。

列状(帯状)複層林造成後の管理方法を図-7.2に示した。

まず、中央列の間伐(図中)を実施し、次に残存列の間伐を点状に行う(同)。伐採跡地を利用すれば図中 の間伐作業も比較的容易と考えられる。カラマツ皆伐後(同)にはヒノキ等の耐陰性の強い樹種を植栽することで複層林型を維持できる。上木となったヒノキは中央列を列状間伐(同)することで作業を比較的容易にできる。その後の管理は を繰り返すことで複層林の維持が可能である。

なお、列状(帯状)複層林造成時の林齢は必ずしも高齢である必要はなく、複層林型を何代にもわたって継続することも可能である。傾斜が急な林分など列状(帯状)の伐採跡が最大傾斜方向に連続するのが好ましくない場合は、図-7.3に示すように残存区域と新植区域をモザイク状に配置することで対応可能と考えられる。

7.3.2.2 点状複層林の造成

本論文第2章で論じた点状複層林では下木の39.3%に損傷が発生したが、数年後~10年後にはもう一度伐採作業を実施しないとヒノキ一斉林ならず、さらに下木損傷が増加することが懸念される。この複層林は上木カラマツが34年生時にhaあたり374本まで本数を減らした後に複層林が造成されている。林齢34年であればカラマツ林冠の再閉鎖速度は早く、複層林を維持するための間伐頻度も高くなる(20)。このように、本論文の点状複層林は維持管理の難しい林齢で造成されてい

表-7.2 集材方向別の間伐対象林分の路網からの距離と作業方法

集材方向	間伐対象林分の路網からの距離	作業方法	間伐方法	伐倒方向
上げ荷集材	25m以内	プロセッサークラッパブルが直接集材	列状間伐	山側
	50m程度	プロセッサークラッパブルのウインチを利用した集材		
	50mを越える場合	スイングヤードカタワーヤードによる集材		
下げ荷集材	5m以内	プロセッサークラッパブルが直接集材	列状間伐	山側
	20m~30m程度	プロセッサークラッパブルのウインチを利用した集材		
	20~30mを越える場合	スイングヤードカタワーヤードによる集材		

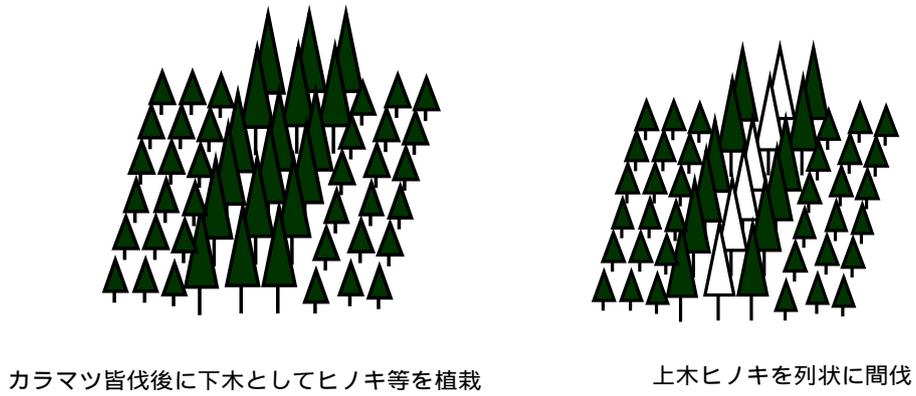
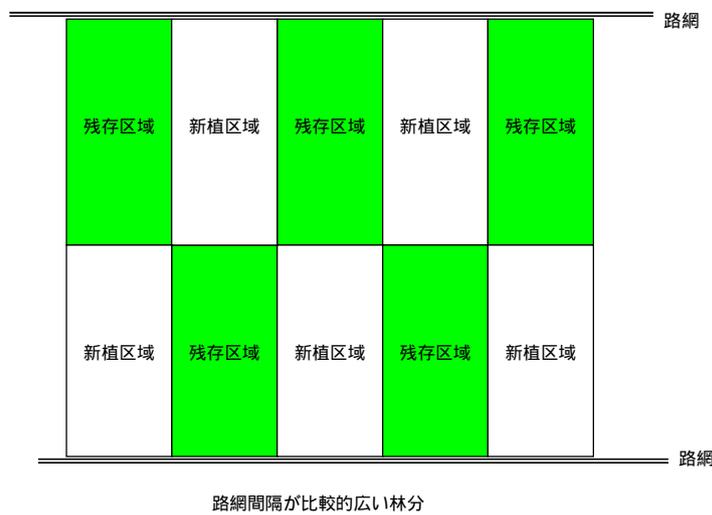
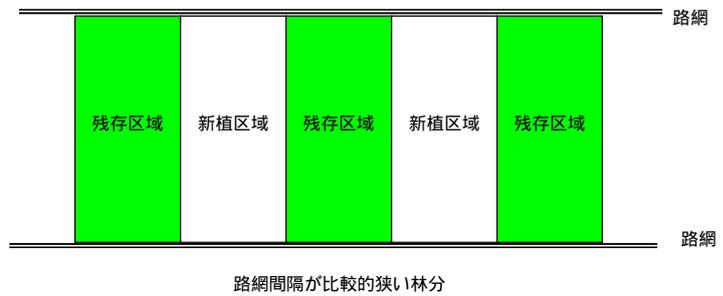


図 - 7.2 列状（帯状）複層林の管理方法



た。

維持管理のしやすい点状複層林造成法としては、林齢 60～70 年生の最終間伐時に、残存本数を 300 本/ha 程度まで少なくしてから下木を植栽する方法が考えられる。この場合、複層林化して 10 年程度を目途に上木をすべて伐採してしまうため複層林の期間は短いが、皆伐の欠点である表土の流亡や保水機能の低下、炎天下の苛酷な下刈り作業など(20)を軽減する効果は大きいと考えられる。さらに上木は高齢のため林冠の再開鎖速度は遅いこと、上木本数も少ないこと等のため、上木伐採にともなう下木損傷は、本論文第 2 章の点状複層林と比べて軽減できると考えられる。また、上木伐採が一度だけで済むというメリットは大きい。

なお、管理しやすい列状(帯状)複層林と点状複層林の造成林齢、造成時の立木密度などの要点を表 - 7.3 に示した。

7.3.3 今後の複層林造成のとりまとめ

複層林を造成する場合、路網密度を高めることが重要で、路網間隔 100m を目標とし、間伐作業法は当該林分の路網からの距離に応じて柔軟に対応する。目標林型としては上木を 3 列以上残して造成する列状複層林(帯状複層林)と、最終間伐時に残存本数を 300 本/ha 程度まで少なくして造成する点状複層林が適していると考えられる。

表 - 7.3 管理のしやすい複層林造成

	列状(帯状)複層林	点状複層林
造成林齢	収穫間伐時に造成可能 (40年～50年生程度より高齢であれば可能)	最終間伐時 (60年～70年)
造成時の立木密度	立木密度はそれほどこだわらない	300/ha程度まで立木密度を下げる
複層林の期間	複層林を持続することが可能	10年を目途
複層林造成のメリット	表土の流亡や保水機能の低下、炎天下の苛酷な下刈り作業などを軽減する効果は点状間伐に比べ劣る	表土の流亡や保水機能の低下、炎天下の苛酷な下刈り作業などを軽減する効果は大きい
作業のしやすさ	作業はしやすい	列状(帯状)複層林に比べ劣る

第8章 総括

以下、本研究で得られた結論をまとめる。

8.1 複層林の上木間伐にともなう下木損傷の実態

点状複層林の上木を規則性なしに間伐したところ、下木の39.3%に損傷が発生した。点状複層林は上木と下木が近接し、下木が2.5~3.0m間隔に均一に植栽されていたため、残存木に損傷を発生させずに、伐倒・搬出を行うことは極めて困難と考えられた。

一方、2種類の列状複層林は、上木と下木ともに列状に植栽しており、間伐作業は機械的に実施できる長所があった。このため上木と下木の損傷率は点状複層林に比べ低かった。

しかし、1残1伐列状複層林は、上木カラマツに損傷は発生しなかったものの、下木の27.8%に損傷が発生した。この林分では、上木と下木の間隔が2~2.5mと狭かったのに対して、上木の樹冠半径は2.8~3.2mと大きく成長しており、そのため予想以上の損傷が発生した。

これに対し、3残2伐列状複層林の下木損傷は0.7%とわずかだった。これは、上木3列の中央列を伐倒したことにより、伐倒木を両側の上木の間誘導しやすかったことや、伐採した上木は、横滑りをした場合でも両側の上木に保護され下木と衝突しなかったためである。

8.2 複層林の上木間伐により損傷を受けた下木ヒノキの生育状況

カラマツ・ヒノキ複層林で、カラマツの間伐により損傷を受けたヒノキの5成長期経過後の生育状況を調査したところ、伐採により倒伏したヒノキは回復していなかった。また、傾斜したヒノキの33.3%は立ち直っていなかった。

幹や梢端が折れたヒノキは、折損部分が「S字状」や「ほうき状」になるものが多くみられた。またヒノキの枝折れが25%を越えると、傾斜するヒノキが多く、「曲がり材」になる可能性が高いと考えられた。

損傷を受けたヒノキの標本木を伐採して樹幹解析を行ったところ、すべての立木で樹皮剥離を受けた部分から変色が発生していたが、変色や腐朽の上下方向への広がり、ほとんどのヒノキで小さかった。しかし、剥離被害の大きいヒノキでは変色や腐朽が広がり、劣化が進んでいた。幹や梢

端が折れたヒノキの折損部分ではすべての立木で変色が発生していたが、変色は上方へは広がっておらず、下方への広がりはそれほど大きくなかった。

8.3 列状複層林の上木事前枝払いによる下木損傷軽減

1残1伐列状複層林で、枝払い列と、そのまま伐採する列(対照列)を交互に設定し、下木損傷を比較した。上木伐採による下木の損傷率は、対照列が29.1%(41本/141本)であったのに対し、枝払い列は18.8%(28本/149本)と枝払いによる損傷軽減効果が認められた。しかし、4mの枝払いを鋸で行う場合1人1日12本程度しか実施することができず、枝払い作業を併用することで間伐作業の生産性はかなり低減する。このため、複層林の上木枝払いを行うための補助施策の充実などが図られなければ、事前枝払いの実施は難しいと考えられた。

なお、枝払いを実施した場合、力枝周辺の枝がなくなることにより、伐倒木の重心方向を知ることが難しくなり、思いどおりの方向に伐倒できない場合があった。

8.4 点状複層林の上木列状間伐にともなう下木損傷軽減 - 上木の列状間伐と点状間伐の比較 -

点状複層林の上木を列状に間伐した場合の下木損傷率は32.2%であった。この結果を、上木を点状に間伐した場合の39.3%と比較すると、列状間伐の方が下木損傷率は少なかったが、その差は予想よりも小さかった。列状間伐の損傷軽減効果は伐倒作業に限られていて、集材作業では効果は認められなかった。この原因は、地形の変化を考慮に入れずに、残存列と伐採列を交互に設定したためと考えられた。

平均傾斜が20度を超える比較的傾斜の急な斜面での集材作業は、最大傾斜方向と伐採方向のずれ(偏角)が大きくなるほど下木損傷率が増加し、偏角が大きくなると樹木の成長や材の経済価値に重大な影響を及ぼす「倒伏」被害の割合が高くなる傾向がみられた。

地形の変化を考慮して偏角20度未満で列状間伐を実施した場合の下木損傷率は27.2%と推定でき、点状間伐に比べて下木損傷の軽減効果が期待できた。

8.5 点状複層林の上木の山側伐倒と上木の事前枝払いにともなう下木損傷軽減

伐倒作業にともなう下木損傷を、谷側伐倒した区域と山側伐倒した区域で比較したところ、山側伐倒区域の下木損傷率は谷側伐倒区域と比較して半減した。同じ伐倒方向で、枝払いを行った場合と行わない場合で比較したところ、山側伐倒も谷側伐倒とも、枝払い作業を行った方が下木損傷率は低かったが、その差はわずかで枝払いによる軽減効果は明確ではなかった。

上木伐倒にともない伐倒木の樹冠に入ったヒノキだけを対象に損傷を受けた割合を調査した。調査結果を伐倒方向と枝払いの有無で4区分し解析したところ、枝払いを行った場合も行わない場合も、山側伐倒と谷側伐倒の間に有意差が認められ、山側伐倒の下木損傷が有意に少なかった。同じ伐倒方向では枝払いによる有意差は認められなかったが、枝払いを実施した方の下木損傷率が多少高かった。

損傷を受けたすべての下木を対象に、伐倒方向と枝払いの有無により軽度の損傷である枝折れ(小)の占める割合を調べたところ、山側・枝払いなしでは枝折れ(小)が損傷全体の53.8%を占めたのに対し、谷側・枝払いなしの場合は損傷全体の30.2%で、山側伐倒の方が谷側伐倒に比べ下木損傷程度の軽いものが多いことが明らかとなった。一方、同じ伐倒方向で枝払いを実施した場合と実施しなかった場合の枝折れ(小)の割合をみたところ、山側伐倒も谷側伐倒も、枝払いを行った方が枝折れ(小)の割合が少ない結果となった。このことから、枝払いを行うことにより、損傷を受けた下木の損傷程度は重度になる傾向が認められた。

以上のことから、点状複層林での山側伐倒は、谷側伐倒と比較して下木損傷を軽減する作業方法と認められたが、第6章で示したような樹冠長の40%程度の枝払い作業は下木損傷を軽減する方法とはいえ、実施費用も負担するとなると実用的とは思われない。

8.6 下木損傷軽減対策と複層林造成

点状複層林は、最大傾斜方向に対し偏角20度未満で列状に伐採するとともに、山側に向けて伐採すること、列状複層林では、植栽列に沿って山側に向けて伐採することが重要と考えられる。集材

方向は、上げ荷集材の方がコントロールしやすいため、上げ荷集材と下げ荷集材のどちらも可能な場合には、上げ荷集材を優先すべきと考えられる。また、集材作業による損傷が集中しそうな立木には防護具を設置すること、高い位置での伐採や損傷を集中させて周辺の立木を保護すること、などの配慮を行えば、下木損傷がさらに軽減可能と考えられる。

今後複層林を造成する場合、路網密度を高めることが重要で、路網間隔100mを目標とするのが良く、目標林型としては上木を3列以上残して造成する列状複層林(帯状複層林)と最終間伐時に残存木を300本/ha程度まで少なくして造成する点状複層林が適していると考えられる。

8.7 まとめ

本論文は長野県に広く造成されているカラマツ・ヒノキ複層林を対象に、点状複層林ばかりでなく、今まで調査されていない列状複層林の上木間伐にともなう下木損傷を明らかにするとともに、下木損傷が発生しにくい複層林の林型も示した。また、今まで調査されていなかった上木間伐により損傷を受けた下木の、その後の生育状況も明らかにした。さらに、本論文により、複層林の下木損傷を軽減するための上木間伐法に目途がたったものと考えられる。なお、本論文の結果は、カラマツ・ヒノキ複層林ばかりでなく、すべての複層林で応用できるものと考えられる。

謝辞

本論文をまとめるにあたり、東京大学大学院農学生命科学研究科酒井秀夫教授に多大なるご支援、ご指導を賜りました。厚くお礼申し上げます。さらに東京大学大学院農学生命科学研究科丹下健教授、龍原哲准教授、仁多見俊夫准教授、東京農業大学地域環境科学部森林総合科学科豊川勝生教授の各先生からご指導をいただきました。ここに謹んで感謝の意を表します。

調査に関しては、森林総合研究所元生産技術部長辻井辰雄氏、森林総合研究所元林業機械研究領域長井上源基氏、森林総合研究所林業工学研究領域収穫システム研究室長岡勝氏にご指導をいただきました。ここに謹んで感謝の意を表します。

鹿児島大学農学部生物環境学科竹内郁雄氏、北海道立林業試験場木幡靖夫氏、岐阜県森林科学研究所古川邦明氏には日頃の研究活動の中で、ご厚情を賜り、数々のご助言をいただきました。

長野県林業総合センター所長片倉正行氏ならびに宮崎隆幸氏、岡田充弘氏、小山泰弘氏、山内仁人氏には日頃より多大なご指導、ご支援をいただきました。また、本論文作成に際し、林業総合センター元所長武井富喜雄氏ならびに育林部長橋爪丈夫氏、木材部長柴田直明氏には適切なご助言をいただきました。さらに、折橋睦子、市川万有美の皆さんにはデータ整理のお手伝いをいただきました。これらの方々には厚くお礼を申し上げます。

松本地方事務所林務課の今井信氏には、林業総合センター在職中、長年にわたり現地調査やとりまとめのために苦楽を共にしました。厚くお礼申し上げます。

最後になりましたが、現場で作業をしていただいた方々をはじめ、ご指導ご協力を賜ったすべての方々に心から感謝申し上げます。

引用文献

- (1) 赤井龍男・吉村健次郎・真鍋逸平・上田晋之助・本城尚正 (1983) 混交複層林の構造と造成法 (1) ヒノキ, アカマツ, 広葉樹の階層混交について. 京大演報 55: 63~79.
- (2) 赤井龍男・吉村健次郎・真鍋逸平・上田晋之助・本城尚正 (1986) 近畿地方にみられる各種混交複層林の構造と造成法. 日林論 97: 261~262.
- (3) 赤井龍男・吉村健次郎・真鍋逸平・上田晋之助・本城尚正 (1986) 混交複層林の構造と造成法 (2) 植栽スギと天然生スギ, ヒノキ, アカマツ, 広葉樹の階層混交について. 京大演報 58: 105~123.
- (4) 秋山侃・酒井徹・富久尾歩・賈書剛・篠田成郎 (1999) フィルム式簡易積算日射計による林内光環境の計測. 日本写真測量学会・日本リモートセンシング学会: 23~26.
- (5) 安藤貴・竹内郁雄・斉藤明・渡辺秀彦 (1969) 人工二段林における物質生産量の測定例. 日林誌 51(4): 102~107.
- (6) 安藤貴・宮本知子 (1972) スギ苗の生長に及ぼす光の強さと植栽密度の影響. 日林誌 54(2): 47~55.
- (7) 安藤貴・宮本倫仁・桜井尚武・竹内郁雄・谷本丈夫 (1983) 二段林の光環境の経年変化. 林試研報 323: 65~73.
- (8) 安藤貴・竹内郁雄・宮本倫仁・桜井尚武 (1983) スギ・ヒノキ二段林上木間伐試験地の林分生長. 林試研報 323: 182~189.
- (9) 安藤貴・竹内郁雄・落合幸仁 (1986) スギ, ヒノキ複層林の施業と生長の経過 (1) - スギ - スギ二段林 K0 - の事例 - . 日林関西支講 37: 175~178.
- (10) 安藤貴・竹内郁雄・落合幸仁 (1986) スギ, ヒノキ複層林の施業と生長の経過 (2) - スギ・ヒノキ複層林 K0 - の事例 - . 日林関西支講 37: 179~182.
- (11) 安藤貴 (1986) 人工林の複層林施業. 研究ジャーナル 9(5): 23~27.
- (12) 安藤貴・石川実 (1990) カラマツ - ケヤキ複層林の林分構造と成長. 岩大演報 21: 15~31.
- (13) 安藤貴・柴田信明・吉田好幸 (1990) スギの二段林下木と単層林立木の直径成長の経過. 日林論 101: 57~58.
- (14) 安藤貴・竹内郁雄 (1990) スギ, ヒノキ二段林の密度管理指針の作成と成長予測方法の検討.

森林計画研究会会報 331 : 1 ~ 11 .

(15) 安藤貴・比屋根哲・只野琢也・田口春孝 (1993) 小岩井農場の帯状更新地における光環境とスギ植栽木の成長 . 日林東北支会 45 : 121 ~ 124 .

(16) 安藤貴 (1993) 森林施業の多様化について . 岩大演習林第 1 回演習林セミナー記録 . 34pp , 岩手 .

(17) 荒上和利・汰木達郎 (1988) 列状間伐による複層林の形成に関する研究 . 九大演報 58 : 1 ~ 15 .

(18) 荒木誠・宮川清 (1990) ヒノキ複層林施業の土壤保全効果 () - 今市署管内ヒノキ複層林における上木伐採後の表層土壌の物理性的変化 . 日林論 101 : 65 ~ 66 .

(19) 遠藤良太・石川敏雄 (1994) 複層林における光環境の測定法 - 色素フィルムを用いた簡易積算全天日射計と照度計の比較 - . 日林論 105 : 437 ~ 438 .

(20) 藤森隆郎 (1992) 複層林マニュアル - 施業と経営 - . 119pp , 全国林業改良普及協会 , 東京 .

(21) 藤下章男・大場孝裕・鈴木善郎 (1996) スギ - スギ二段林の上木間伐に伴う下木の損傷事例 . 日林中支論 44 : 95 ~ 96 .

(22) 藤田博義・影山勇治 (1989) 複層林施業について カラマツ (上木) - カラマツ (下木) タイプ . 北方林業 41 (10) : 18 ~ 23 .

(23) 福地稔 (1990) カラマツ二段林における植栽木の生長 . 日林北支論 38 : 11 ~ 13 .

(24) 福島成樹 (1998) 簡易積算日射計フィルムを用いた林内光環境の推定法 - フィルムの退色と光量子量の関係 - . 日林論 109 : 289 ~ 290 .

(25) 複層林施業研究班 (1983) 人工林の複層林施業に関する研究 () - 林内光環境の測定方法 - . 林試研報 323 : 3 ~ 32 .

(26) 複層林施業研究班 (1983) 人工林の複層林施業に関する研究 () - 林内光環境の変動 - . 林試研報 323 : 33 ~ 84 .

(27) 複層林施業研究班 (1983) 人工林の複層林施業に関する研究 () - 庇陰下における樹品種の生態的特性 (1) - スギクローンの耐陰性 . 林試研報 323 : 85 ~ 101 .

(28) 複層林施業研究班 (1983) 人工林の複層林施業に関する研究 () - 庇陰下における樹品種の生態的特性 (2) - 下木の光環境と生長 . 林試研報 323 : 103 ~ 130 .

(29) 複層林施業研究班 (1983) 人工林の複層林

施業に関する研究 () - 庇陰下における樹品種の生態的特性 (3) - 人工庇陰下における生長 . 林試研報 323 : 131 ~ 152 .

(30) 複層林施業研究班 (1983) 人工林の複層林施業に関する研究 () - 複層林の林分構造と生長 - . 林試研報 323 : 181 ~ 210 .

(31) 後藤純一 (2008) 傾斜地における高密作業路網を活用した間伐材搬出システムの選択 . 機械化林業 658 : 1 ~ 6 .

(32) 浜地秀展・佐々木重行 (2003) 複層林に関する研究 () - 上層木の間伐が下層木に与える影響について - . 九州森林研究 56 : 196 ~ 197 .

(33) 樋口裕美・小野寺弘道・大原偉樹 (1991) スギ帯状複層林における上木の被陰の影響と下木の冠雪害 . 日林東北支誌 43 : 103 ~ 104 .

(34) 穂屋下浩平・藤田巖・富田文雄 (1994) 複層林の造成管理技術の開発に関する研究 () - 二段林上木 (ヒノキ - ヒノキ) の生長および間伐 - . 静岡県林技セ研報 22 : 39 ~ 44 .

(35) 穂屋下浩平・藤田巖・富田文雄 (1994) 複層林の造成管理技術の開発に関する研究 () - 二段林における下木の生長と形質および上木間伐にともなう下木の損傷 - . 静岡県林技セ研報 22 : 45 ~ 49 .

(36) 兵藤博・入口誠 (1986) 間伐率をかえた林内相対照度の変化と樹下植栽木の生長 . 日林関西支講 37 : 171 ~ 174 .

(37) 池本隆 (1977) 天然林内における明るさ及びスギの生長 . 鳥取県林試研報 20 : 28 ~ 37 .

(38) 池本隆 (1986) スギの各種林分構造下における林内相対照度の経年変化及び下木の生長並びに相対照度の間接測定法 . 鳥取県林試研報 29 : 14 ~ 44 .

(39) 井上昭夫・岩神正朗・田淵隆一・川崎達郎・酒井武・竹内郁雄 (1996) 下刈りを省いた帯状更新地におけるスギ・ヒノキ下木の成長 . 高知大演報 23 : 1 ~ 10 .

(40) 井上昭夫・田淵隆一・川崎達郎・酒井武・竹内郁雄 (1996) 下刈りを省いた帯状更新地におけるスギ , ヒノキ下木と侵入広葉樹との競合 . 日林九支研論 49 : 19 ~ 20 .

(41) 井上源基・竹内郁雄・大川畑修・豊川勝生・広部伸二 (1998) 高性能林業機械作業システムの構築 . 森林総研研究成果選集 : 12 ~ 13 .

(42) 石塚森吉・菅原セツ子・金沢洋一 (1988) 林内照度と広葉樹数種の伸長量 . 日林北支論 36 :

48~50.

(43) 石塚森吉・菅原セツ子・金沢洋一(1989)8月の落葉広葉樹林における林内照度と全天照度の関係. 日林北支論 37: 18~20.

(44) 石川実・安藤貴(1989)ケヤキ人工林の間伐にともなう前生稚樹の被害と稚樹の発生. 日林東北支誌 41: 139~140.

(45) 石川知明(1994)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. 日林誌 76(1): 43~51.

(46) 糸屋吉彦・小西明(1987)樹下植栽した産地別スギの成績 - 林冠疎開度と成長の関係 -. 日林東北支誌 39: 146~148.

(47) 岩神正朗・福田克之(1987)ヒノキ二段林の間伐後の上木の肥大生長について. 高知大演報 15: 29~35.

(48) 岩坪五郎(1996)森林生態学. 306pp, 文永堂, 東京.

(49) 門松昌彦・野田真人・湊克之・小宮圭示(1997)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() - 複層林化 15年間の樹下植栽木の成長 -. 北大演研報 54(2): 159~174.

(50) 上飯坂實・神崎康一(1990)森林作業システム学. 292pp, 文永堂, 東京.

(51) 上中作次郎・西山嘉彦・佐藤五郎(1988)ヒノキ複層林施業における受光伐の程度と更新樹の生長特性. 日林九支研論 41: 117~118.

(52) 片倉正行・遊橋洪基・大木正夫・古川仁(1995)カラマツ及びアカマツを上木とする二段林の管理技術に関する研究. 長野県林総セ研報 9: 16~29.

(53) 片山和亮・船越三朗(1989)カラマツ・トドマツ人工林の間伐と光環境. 日林論 100: 399~400.

(54) 片山和亮(1990)カラマツ人工林に樹下植栽したトドマツの成長 - 上木伐採後 10年間の下木の伸長・肥大成長 -. 日林北支論 38: 14~16.

(55) 片山和亮(1991)落葉広葉樹伐採跡地に植栽したカラマツ, トドマツの成長と光環境. 日林論 102: 415~416.

(56) 河原輝彦(1988)複層林誘導のための林内照度のコントロール. 森林立地 30(1): 10~13.

(57) 河原輝彦(1989)アカマツ林下に植栽されたヒノキの成長. 日林東北支誌 41: 126~127.

(58) 河原輝彦(2001)多様な森林の育成と管理. 133pp, 東京農大出版会, 東京.

(59) 川那辺三郎・玉井重信(1981)ヒノキ林内

に樹下植栽されたヒノキの生長について()植栽後 5年間の生長. 京大演報 53: 33~42.

(60) 古嶋重幸・竹内郁雄・五十嵐哲也(2000)ヒノキ - ヒノキ二段林における上木の間伐が下木成長に及ぼす影響. 日林九支研論 53: 79~80.

(61) 近藤道治・竹内郁雄・五十嵐哲也・伊藤武治・酒井敦(1999)上木密度が異なるヒノキ複層林下木の成長. 日林関東支論 50: 59~60.

(62) 近藤道治・宮崎隆幸(2000)機械化作業が森林環境にあたえる影響. 中森研 48: 117~120.

(63) 近藤道治・宮崎隆幸(2001)機械化作業が森林環境にあたえる影響() - タワーヤードによる間伐作業が残存木にあたえる損傷 -. 中森研 49: 149~150.

(64) 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.

(65) 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法の開発 - 機械化作業が森林にあたえる影響 -. 長野県林総セ研報 17: 1~20.

(66) 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.

(67) 近藤道治・今井信(2005)複層林の上木伐採にともなう残存木の損傷. 森林学誌 20(3): 171~182.

(68) 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() - アカマツ - ヒノキ複層林の事例 -. 日林学術講演 116.

(69) 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. 森林学誌 19(4): 331~333.

(70) 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 -. 森林学誌 20(4): 277~280.

(71) 近藤道治・今井信(2007)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 -. 森林学誌 22(1): 5~14.

(72) 近藤道治・今井信(2007)長期育成循環施業等に対応した高性能林業機械化作業システムの開発() - 機械化作業が森林にあたえる影響 -. 長野県林総セ研報 22: 11~32.

(73) 小山浩正(1993)カラマツ・トドマツ人工林の林内照度と下木の生育予測. 北方林業 45(4): 20~22.

- (74) 久保田典子・藤本浩平・西村武二(1996) 帯状伐採地における日射環境と植栽木の成長量について. 高知大演報 23: 11~24.
- (75) 國崎貴嗣・斉藤信人・劔持直樹・比屋根哲(2002) 岩手県民有林で造成された複層林の林分構造と下木の樹高成長. 岩大演報 33: 29~38.
- (76) 栗田稔美・小野寺弘道・糸屋吉彦・今川一志(1989) 多雪地のスギ天然生複層林の動態(2) 稚樹の発生様式について. 日林東北支誌 41: 90~92.
- (77) 九島宏道・金澤洋一・大沢晃・石塚森吉(1993) カラマツ列状間伐・トドマツ列間造林の21年目の結果. 日林北支論 41: 27~29.
- (78) 前田雄一・藤田亮・植田幸秀・谷本丈夫(1989) ケヤキ・スギ二段林の実態解析. 日林論 100: 249~252.
- (79) 前田雄一(1997) 多雪地帯におけるケヤキ・スギ二段林の実態 - 樹冠下のスギの成長と倒伏被害 -. 森林応用研究 6: 59~62.
- (80) 丸本順次・山田詳生・内田健(1990) 複層林造成技術に関する研究. 山口県林指セ業務年報: 34~47.
- (81) 湊克之・寺本守(1989) 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() - 伐採に伴う保残木の被害について -. 北大演研報 46(3): 719~733.
- (82) 三島木進・皆川隆一・山内健史(1991) 複層林の上木皆伐に伴う下木の損傷 - アカマツ・ヒノキ二段林の事例 -. 日林東北支誌 43: 54~56.
- (83) 宮川清・荒木誠(1990) ヒノキ複層林施業の土壌保全効果() - 今市署管内ヒノキ複層林における上木伐採後の地床状態および表層土壌の変化. 日林論 101: 61~64.
- (84) 溝上展也・伊藤哲・井剛(2002) 宮崎県諸塚村における帯状複層林のスギ・ヒノキ下木の成長特性. 日林誌 84(3): 151~158.
- (85) 木材活用事典編集委員会(1994) 木材活用事典. 738pp, 産業調査会, 東京.
- (86) 森勇佑・田坂聡明・有賀一広・松英恵吾・斉藤仁志・馬場修平(2008) 列状間伐における残存木被害発生因子の検討. 森林学誌 22(4): 255~260.
- (87) 長野県(1989) 複層林造成による多様な森林づくりのための基礎技術の解明. 87pp, 長野県, 長野.
- (88) 長野県緑の基金(1994) 長野県の複層林. 67pp, 長野県緑の基金, 長野.
- (89) 永島守・堀江俊輔(2001) 複層林造成後の管理技術に関する研究. 島根県林技セ業報 32: 3~4.
- (90) 中村雅志・石橋整司(1993) 複層林化されてまもないヒノキ二段林の林分構造と施業実行上の問題点. 日林論 104: 261~264.
- (91) 中尾登志雄・中倉博之・黒木嘉久(1988) 人工庇陰下におけるカシ類実生稚樹の生長. 日林論 99: 337~338.
- (92) 日本林業技術協会(1982) 複層林の施業技術. 164pp, 日本林業技術協会, 東京.
- (93) 日本林業技士会(2008) 低コスト作業システム構築事業報告書. 249pp, 日本林業技士会, 東京.
- (94) 日本治山治水協会(1991) 水土保持のための複層林施業技術事例調査. 150pp, 日本治山治水協会, 東京.
- (95) 西泉敏行(1982) 複層林施業における集材方法の機械化に関する研究. 愛媛県林試研報 7: 71~87.
- (96) 野口琢郎(2004) シカ被害防止及びモニタリング技術開発に関する研究. 熊本県林指研報 30: 1~9.
- (97) 岡田充弘(1999) ニホンザルによる針葉樹造林木の剥皮被害について() - ヒノキ立木の地際樹幹剥皮被害, および剥皮が木質部に与える影響 -. 中森研 47: 79~80.
- (98) 大原偉樹・小野寺弘道(1986) 多雪地域に造成されたスギ複層林の現況() - 上木の状態と下木の雪害 -. 日林論 97: 259~260.
- (99) 及川伸夫・中村松三・太田敬之(1992) カラマツ・アカマツ帯状伐採区に植栽されたスギの成長試験結果. 日林東北支誌 44: 95~96.
- (100) 岡勝・田中良明・梅田修史・今富裕樹・井上源基・林公彦(1990) 車両系集材による複層林伐出技術に関する研究() - 小型集材車による集材作業 -. 日林論 101: 67~68.
- (101) 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・古嶋重幸(2005) 伐出作業に伴う残存木被害軽減策の検討(1) - 架線系集材における被害要因の分析 -. 日林関東支論 56: 79~80.
- (102) 岡勝・佐々木達也・近藤耕次・鹿島潤・濱本高光・加利屋義広・小林洋司(2006) 簡易な防護具を用いた残存木損傷の軽減効果の検討. 森利

学誌 20(4) : 273 ~ 276 .

(103) 岡村政則・竹内寛興・安藤貴 (1987) スギ
精英樹の耐陰性について - 幹曲がりを中心に - .
日林関西支講 38 : 123 ~ 126 .

(104) 沖野孝・安達洋 (1987) 複層林の造成と広
葉樹林の育成について . 森林計画研究会会報
308 : 24 ~ 28 .

(105) 小野寺弘道・大原偉樹 (1986) 多雪地域に
造成されたスギ複層林の現況 () - 単木択伐区
と帯状伐採区における下木の生長 - . 日林論 97 :
255 ~ 257 .

(106) 小野寺弘道・栗田稔美・糸屋吉彦 (1989)
多雪地のスギ天然生複層林の動態 (1) 林分の構
造について - . 日林東北支誌 41 : 87 ~ 89 .

(107) 小野寺弘道・田辺裕美・梶本卓也・大原偉
樹・栗田稔美 (1994) スギ複層林における積雪深
の年変動と下木の生育経過 . 日林東北支誌 46 : 73
~ 76 .

(108) 小野寺弘道・田辺裕美・梶本卓也・大原偉
樹・栗田稔美 (1996) スギ複層林下木の根元曲が
り量の経年変化と雪害の発生過程 . 日林誌 78
(1) : 61 ~ 65 .

(109) 小野寺賢介・今博計 (2006) スギ - ヒバ二
段林における上木伐採方法の違いが下木の損傷率
と成長量に及ぼす影響 . 日林誌 88(6) : 546 ~ 549 .

(110) 落合幸仁・竹内郁雄・安藤貴 (1987) 複層
林下木の冠雪害 - 形状比を中心とする被害の解析
- . 日林関西支講 38 : 267 ~ 270 .

(111) 林業機械化協会 (2000) 複層林施業におけ
る上木の伐採・搬出の作業システムに関する調査
報告書 . 53pp , 林業機械化協会 , 東京 .

(112) 林野庁 (1996) 複層林の造成管理技術の開
発 . 156pp , 林野庁 , 東京 .

(113) 林野庁 (2002) 平成 13 年度森林及び林業
の動向に関する年次報告 . 336pp , 日本林業協会 ,
東京 .

(114) 林野庁 (2004) 大型プロジェクト研究成果
- 機械化作業システムに適合した森林施業法の開
発 - . 220pp , 林野庁 , 東京 .

(115) 斉藤秀樹・四手井綱英・菅誠 (1968) 樹幹
形についての考察 - 2, 3 の幹形の表し方および幹
における同化物質の垂直配分についての考え方 - .
京大演報 40 : 93 ~ 110 .

(116) 斉藤哲・石塚森吉・宇都木玄 (1995) ヒノ
キ人工林における林冠内の光環境 . 日林論 106 :
335 ~ 336 .

(117) 酒井秀夫 (2004) 作業道 - 理論と環境保全
機能 - . 281pp , 全国林業改良普及協会 , 東京 .

(118) 酒井秀夫 (2007) 作業道ゼミナール・高密
路網による低コスト林業 - 林業機械の集材費 - .
現代林業 4 : 38 ~ 41 .

(119) 酒井武・川崎達郎・田淵隆一・竹内郁雄
(1996) 長期二段林下木の成長経過 - スギ 96 年生 ,
ヒノキ 64 年生林分の事例 - . 日林論 107 : 205 ~
206 .

(120) 酒井武・奥田史郎 (2005) 二段林の上木伐
採による下木の損傷事例 . 四国の森を知る 4 : 4 ~
5 .

(121) 笹川裕史・箕輪光博・白石則彦・鈴木誠・
村川功雄・里見重成 (2000) 人工二段林における
林分構造の解析および距離従属型下木成長モデル
の作成 . 東大演報 103 : 307 ~ 322 .

(122) 佐々木重樹・中田理恵 (2003) ヒノキ - ヒ
ノキ二段林の上木伐採搬出作業における伐倒前枝
打ち作業が労働生産性に与える影響 . 静岡県林技
セ研報 31 : 17 ~ 21 .

(123) 佐々木重行 (2000) 複層林に関する研究 ()
- 林内光環境 - . 日林九支研論 53 . 81 ~ 82 .

(124) 佐藤大七郎・堤利夫 (1978) 樹木 - 形態と
機能 - . 309pp , 文永堂 , 東京 .

(125) 澤口勇雄・宇野博子・猪内正雄・立川史郎
(2001) ヒバ天然林択伐作業による残存木損傷 .
森利学誌 16 (2) : 83 ~ 92 .

(126) 島地謙・伊東隆夫 (1982) 図説木材組織 .
176pp , 地球社 , 東京 .

(127) 鈴木誠 (1983) 非皆伐施業地における二段
林造成に関する研究 () - 下木の生長 - . 日林
論 94 : 405 ~ 406 .

(128) 鈴木誠・高浜静子 (1985) 非皆伐施業地
における二段林造成に関する研究 () - 樹冠回復
状態と下木の生長 - . 日林論 96 : 435 ~ 436 .

(129) 鈴木誠・丹下健・高浜静子 (1986) 非皆伐
施業地における二段林造成に関する研究 () -
被陰および土壌水分の違いとスギ , ヒノキ苗木の
生長 - . 日林論 97 : 253 ~ 254 .

(130) 鈴木誠・丹下健・鈴木貞夫 (1987) 非皆伐
地における二段林造成に関する研究 () - 伐倒・
集材による残存立木の損傷 - . 日林論 98 : 321 ~
324 .

(131) 鈴木誠・高浜静子・榎本進 (1987) 非皆伐
施業地における二段林造成に関する研究 () -
樹下植栽後 8 年目のスギ・ヒノキの形態 - . 日林

関東支論 39 : 49 ~ 52 .

(132) 鈴木誠・鈴木保・鴫田好・高浜静子 (1990) 非皆伐施業地における二段林造成に関する研究 (11) - 上層木の密度の違いと下木の現存量 - . 日林論 101 : 55 ~ 56 .

(133) 鈴木誠・龍原哲・南雲秀次郎 (1996) スギ二段林下木の成長 - 低密度の上木による庇陰が下木の成長に与える影響 - . 日林誌 78 (1) : 50 ~ 56 .

(134) 鈴木誠・村川功雄・龍原哲 (1997) ヒノキ - スギ二段林における上木の間伐に伴う下木への影響 . 日林論 108 : 99 ~ 100 .

(135) 高瀬香代 (1993) ヒノキ - ヒノキ複層林の下木に発生した冠雪害について . 日林関東支論 44 : 53 ~ 54 .

(136) 竹内郁雄・安藤貴・落合幸仁 (1988) 長期間低照度下におかれた四国産スギ精英樹の耐陰性と成長 . 日林関西支論 39 : 75 ~ 78 .

(137) 竹内郁雄・落合幸仁・森茂太 (1988) スギ - ヒノキ二段林の成長経過 . 森林総研四国支所年報 30 : 13 ~ 14 .

(138) 竹内郁雄・森茂太・川崎達郎 (1990) スギ - ヒノキ二段林下木の幹の傾き . 森林総研四国支所年報 31 : 12 ~ 14 .

(139) 竹内郁雄・落合幸仁・安藤貴 (1990) 上木の伐採による下木被害とその後の幹曲がり . 日林関西支論 41 : 141 ~ 144 .

(140) 竹内郁雄 (1990) 複層林施業と下木の形質 . 林業技術 584 : 21 ~ 24 .

(141) 竹内郁雄 (1990) 複層林の林内照度管理法 - 上木の枝打ちは適切な手段か? - . 森林総研四国支所四国情報 3 : 1 ~ 2 .

(142) 竹内郁雄・川崎達郎・森茂太 (1992) 低コスト育林の事例 () - 下刈りを省いた二段林の造成 - . 日林論 103 : 455 ~ 456 .

(143) 竹内郁雄・川崎達郎・森茂太 (1992) 低コスト育林の事例 () - 下刈りを省いた帯状更新 - . 日林論 103 : 457 ~ 458 .

(144) 竹内郁雄・落合幸仁・川崎達郎・安藤貴 (1992) 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 .

(145) 竹内郁雄・川崎達郎 (1995) 低コスト育林の事例 () - 下刈りを省いた二段林における広葉樹の成長 - . 日林関西支論 4 : 123 ~ 124 .

(146) 竹内郁雄・川崎達郎 (1995) 低コスト育林の事例 () - 帯状更新地におけるスギ・ヒノキの成長 - . 日林関西支論 4 : 125 ~ 126 .

(147) 竹内郁雄・落合幸仁 (1996) スギ - スギ二段林における下木の初期成長 . 日林関東支論 48 : 43 ~ 44 .

(148) 竹内郁雄 (1998) 複層林スギ上木の後生枝の発生 . 日林論 109 : 311 ~ 312 .

(149) 竹内郁雄 (2004) スギ・ヒノキ二段林施業と技術的課題 . 森林科学 41 : 8 ~ 13 .

(150) 玉井重信・四手井綱英 (1971) 林内の照度 () . 京大演報 43 : 53 ~ 62 .

(151) 玉井重信・四手井綱英 (1972) 林内の照度 () - 全天空写真による解析 (1) - . 京大演報 44 : 100 ~ 109 .

(152) 玉井重信・堤利夫 (1977) ヒノキ林内に樹下植栽したヒノキの生長について () . 日林論 88 : 223 ~ 224 .

(153) 玉山俊彦 (1992) 複層林の上木間伐に伴う下木の損傷 - スギ - スギ二段林初期の事例 - . 日林東北支論 44 : 121 ~ 122 .

(154) 田中良明・梅田修史・岡勝・山田容三・井上源基・林公彦 (1990) 車両系集材による複層林伐出技術に関する研究 () - 伐出による下木損傷について - . 日林論 101 : 69 ~ 70 .

(155) 谷口真吾 (1998) 針広混交林の造成技術に関する研究 () - ヒノキ林人工ギャップの相対積算日射量とケヤキ下木の伸長成長との関係 - . 森林応用研究 7 : 63 ~ 66 .

(156) 谷口真吾 (2002) 帯状更新地におけるケヤキ, スギ, ヒノキの成長 - 植栽から 9 年目および 11 年目の結果 - . 森林応用研究 11-2 : 43 ~ 47 .

(157) 谷山徹 (2004) 複層林伐出技術の高度化を目指して . 森林科学 41 : 35 ~ 41 .

(158) 龍原哲 (1996) 人工複層林の成長に関する理論的研究 - スギ二段林の成長モデル - . 東大演報 94 : 49 ~ 113 .

(159) 千葉幸弘・佐々木研・河村嘉一郎・岡田滋 (1986) 人工庇陰下でのスギとヒノキ精英樹苗木の生長の違い . 日林論 97 : 399 ~ 400 .

(160) 飛岡次郎・山崎忠久 (1989) 非皆伐施業における伐出作業システムの調査事例 . 日林論 100 : 705 ~ 707 .

(161) 戸田正和 (1994) 複層林上層木の伐出作業 - タワーヤダを使った事例 - . 機械化林業 448 : 34 ~ 39 .

(162) 戸田正和 (1997) 車両系集材機械システムによる複層林上木伐採技術の研究 (1) . 愛媛県林試研報 18 : 24 ~ 34 .

(163) 宇都木玄・石塚森吉(1993) 全天写真で推定した光環境とヒノキ下木の成長．日林関東支論 44：51～52．

(164) 宇都木玄(1994) ヒノキ林下層木の光環境とサイズの頻度分布の関係．日林論 105：259～260．

(165) 和口美明・柴田叡弐・米田吉宏・隅孝紀(1992) スギ・スギ二段林の下木に発生した冠雪害．日林誌 74(2)：87～90．

(166) 早稲田収(1981) 複層林の仕立て方 249pp，全国林業改良普及協会，東京．

(167) 山口清・横井秀一(1993) 間伐した広葉樹林の下層に植栽された広葉樹の成長．日林中支論 41：81～84．

(168) 山嶋喜一(1987) 複層林(二段林) 施業について() - 満 10 ヶ年の施業経過 - ．日林中支論 35：91～94．

(169) 矢野進治・前田雅量・榎谷金治(1989) アカマツ・スギ混交林におけるアカマツ伐採後に発生した冠雪害．日林関西支講 40：247～250．

(170) 矢野進治・前田雅量・榎谷金治(1990) 複層林の上木伐採後に発生した冠雪害．雪と造林 8：40～43．

(171) 遊橋洪基(1995) 複層林施業における伐出方法と作業能率．長野県林総セ研報 9：2～11．

(172) 遊橋洪基(1995) 複層林施業の伐出に伴う下木・地床の損傷．長野県林総セ研報 9：12～15．