

多雪地域のスギ人工林の成立過程を考慮した
長期的管理に関する研究

氏名 塚原雅美

新潟大学大学院自然科学研究科博士後期課程

環境共生科学専攻

目次

第一章 序論	1
1-1. 研究の背景.....	1
1-2. 積雪地域の森林に関する既往の研究	3
1-3. 研究の目的と方針.....	8
第二章 研究対象地域の概要	10
2-1. 位置と地形.....	10
2-2. 気象	10
2-3. 森林・林業の概況.....	11
第三章 雪害履歴が林分構造に及ぼす影響.....	13
3-1. 雪圧害がスギ人工林の直径分布に及ぼす影響	13
3-1-1. 目的.....	13
3-1-2. 調査地と調査方法	14
3-1-3. 解析.....	16
3-1-4. 結果.....	18
3-1-5. 考察.....	19
第四章 長伐期施業移行可能性に影響する立地要因.....	23
4-1. 大径木密度に影響する立地要因	23

4-1-1. 目的.....	23
4-1-2. 調査地と調査方法	23
4-1-3. 解析.....	26
4-1-4. 結果.....	27
4-1-5. 考察.....	28
4-2. 降雪に起因する物理的被害の発生傾向および被害確率に影響する立地要因.....	30
4-2-1. 目的.....	30
4-2-2. 調査地と調査方法	30
4-2-3. 解析.....	32
4-2-4. 結果.....	35
4-2-5. 考察.....	38
第五章 雪圧害履歴のあるスギ人工林の密度管理図の適用	41
5-1. 目的	41
5-2. 調査地と調査方法.....	41
5-3. 解析	43
5-4. 結果	45
5-5. 考察	47
第六章 総合考察	51
6-1. 多雪地における林分成立過程	51
6-1-1. 雪圧害がサイズ分布へ及ぼす影響	51

6-1-2. 樹形と立木配置に対する影響と緊密度に関する考察.....	51
6-2. 高齢級林分への誘導モデル.....	52
6-2-1. 肥大成長および被害回避に対する地位選定の重要性.....	52
6-2-2. 物理的被害の発生傾向を考慮した林分管理.....	53
6-2-3. 地位級別資源量を考慮した資源管理計画策定の必要性.....	53
6-3. 雪圧害の影響を考慮した資源量推定方法.....	55
第七章 まとめ.....	56
引用文献.....	58
謝辞.....	70

第一章 序論

1-1. 研究の背景

我が国には 1950～1960 年代に推進された拡大造林政策によって植栽された人工林が広く分布している。これらの多くは伐採適期を迎えている。充実した森林資源を有効に活用していくことは、日本の森林・林業の主要課題である。そして、そのためには、資源の質や量を正確に推計し、評価したうえでの長期的な管理計画が必要である。

これらの人工林は植栽当時の木材需要の逼迫に対処するために植林され、標準伐期齢 35～45 年の短伐期施業による建築用一般材の生産を目標とした。しかしながら、その後の社会情勢の変化により市場性が損なわれたために、森林所有者の収穫意欲は大きく減衰した。そして再造林費用や労働力負担を避けるために伐期は延長される傾向にある（大住ら 2000; Masaki *et al.* 2006, 他多数）。

また、拡大造林政策による人工林造成は、人工林経営の経験のない山地への植栽が一般的であったことから、立地選択の誤りに起因する成長不良林分が生じた。これらは不成績造林地（横井・山口 1998; 横井 2000; 横井・山口 2000）と呼ばれ、短伐期施業による人工林経営を阻害する要因の一つとなっている。特に、積雪地のスギ人工林においては、誤った立地選択によって雪圧害が発生し、林分の健全な発達が阻害されている例が多い。

雪圧害は林木が埋雪することによって生じる折損や樹形変化であり、スギの場合では最深積雪が 150～200 cm 以上の多雪地で高頻度に発生する。日本海側の山地は高い確率で多雪地に属するが、植栽当初はこのような立地選択に関する知見に乏しく、また技術開発により克服可能と考えられ植林が進められた（横井 2000）。そのために、不成績造林地は、日

本海側多雪地の人工林で圧倒的に多い。この地域に造成されたスギ人工林は、過去に雪圧害を受けている可能性が高いことから、当初想定した期間内に目標とする収穫が得られず、伐期を長期化する傾向が強い。

以上のことから、拡大造林による人工林は当初想定していた短伐期皆伐施業からの経営方針の転換が必要になっており、その選択肢として長伐期施業への移行（大住ら 2000; 竹内 2005; Masaki *et al.* 2006; 高橋・竹内 2007 他多数）や広葉樹の導入による混交林化などが検討されている。

伐期の延長に関しては、以上のような消極的な理由だけではなく、経済的合理性や、生物多様性の保全、表土流亡の防止など公益的側面からの積極的な評価もされている。すなわち、更新作業に関わる資本投下コストの相対的減少（遠藤ら 1986）、林齢の経過とともに階層構造の発達による高い多様性と安定性をもった森林群集の形成（藤森 1991）、伐採で一時的に高まる山地災害（塚本 1991; 塚本 1998; 阿部 1998）の発生確率の減少などである。スギについては、高齢級での高い成長の持続（大住 2000; 長濱・近藤, 2006）が報告されており、伐期の延長による資源量の増加も期待できる。

しかしながら、伐期延長に関する研究は少なく、新たな目標林型の設定のための判断基準や、それを支える育林技術の体系化はできていない。

特に雪圧害履歴のある林分の密度低下や成長抑制の影響が林分発達のどの段階まで続くのか、林分の成熟によって過去に受けた雪圧害の影響はどのように変化するのかなどを明らかにする必要がある。なかでも従来の人工林管理で使われている林分密度管理図は、雪圧害のような被害履歴のある林分を対象としていないために、積雪地の資源量の正確な推

計や評価ができない可能性がある。伐期の延長に際しては、冠雪害など気象害のリスクについても不明な点が多い。

したがって多雪地においてスギ人工林の長期的な管理指針を得るためには、雪害後の林分成立過程を明らかにし、資源量の把握方法を再考する必要がある。

1-2. 積雪地域の森林に関する既往の研究

人工林はきわめて自然状態に近い環境に、目的とする林分を成立させるために、その構造や成長に立地、気候、気象などの物理的環境要因の影響を強くうける。人工林に対する物理的な被害は、針葉樹が自生地以外の土地に広く造林されたことに伴って生じるものである (Peterken and Game 1984; Schelhaas *et al.* 2003; Masaki *et al.* 2006)。我が国では、日本海側の産地で大量の積雪が人工林成立の阻害要因となるため、雪害に関する多くの研究が行われてきた。

雪害は、冠雪害と雪圧害に大別される (石川 1983; 石川ら 1987; 嘉戸 2000; Kato and Nakatani 2000)。

冠雪害は樹冠に積雪が付着・堆積し、その荷重によって林木が折損する被害である (嘉戸 2000; Kato and Nakatani 2000)。突発的な気象災害としての性格が強く、降雪地であればどこにでも発生する可能性がある。したがって冠雪害の被害報告は、これまでにヨーロッパや日本など温帯地域を中心とする広い地域で認められ、冠雪害が発生する気象条件についての研究も各地で行われている(高橋 1977; 石川ら 1987; 松田 1981; Solantie 1994)。

気象現象は制御不可能であるために、経営林では常にそれに対して耐久性の高い林分構造を維持することが重要な課題となってきた。そのために、樹形 (Valinger and Petterson 1996; Peltola *et al.* 1997) や立地条件 (Jalkanen and Mattila 2000) など、主に被害に対する感受性・脆弱性を

明らかにする研究が行われてきた。また、保育作業との関係 (Valinger and Pettersson 1996) , 樹形 (Petty and Worrell 1981; Valinger and Fridman 1997; 國崎 2005) , 材質 (Cameron and Dunham 1999) , 被害形態と林齢の対応関係 (高橋 1977; 嘉戸 2000; 國崎 2005) , 被害形態と林分構造との関連性 (杉山・佐伯 1963; 石井ら 1983; Fujimori *et al.* 1987; 松田 1988) , 樹幹の力学的抵抗性 (中島ら 1989; 中谷 1991; Kato and Nakatani 2000; 嘉戸 2000) など、幅広く検討されている。

冠雪害は、10～30年生の閉鎖が進んだ若齢段階の林分に多い。高齢級林分での被害報告は多くないが、70年生の人工林の例では、折損部位が幹の太さと関係していることと、樹高が高くなるほど被害部位は梢端に近づき、主幹の被害は起きにくいことが報告されている (藤森 1987) 。この場合のように、高齢級の林分では幹に対するダメージが少ないことから、伐期延長によって経営上のリスクが増大するとは考えられてはいない。一方で、大径木から構成されるスギ高齢林において、形状比70以上の林木が冠雪害を受けた事例が報告されている (國崎 2005) ことから、冠雪害が高齢級の林分で深刻な被害をもたらすかどうかについては、慎重に検討される必要がある。

これに対して、雪圧害は、積雪中に埋もれた林木が積雪の沈降圧や、斜面上の移動圧によって折損や樹形の変化をきたす現象である (四手井ら 1950; 四手井 1954; 豪雪地帯林業技術開発協議会 1984, 2000; 小野寺 1988, 1990; 野表 1992; Boivin and Bégin 1997; 横井 2000; 横井・山口 2000; Jones *et al.* 2001) 。林分成立段階に顕著であり、積雪深に対して2.5 倍の樹高となる時期 (四手井ら 1950) を超えるとその発生頻度は低下する。日本の代表的な多雪地である新潟県の場合では、林齢10 ～15 年、樹高が6 ～8 m前後 (野表 1988, 1989) を超えると雪圧害により成立本数が大きく減少することはない (野表 1988,

1989, 1992) と報告されている。

ヨーロッパなどで研究事例の多い冠雪害に対して、雪圧害は日本海側の多雪地に造成されたスギ人工林に偏って多い。海外での雪圧害に関する研究は天然林での実態報告 (Boivin and Bégin 1997; Jones *et al.* 2001) に限られる。このことは、日本列島が温帯地域の中では有数の降雪地域であり、他の地域で同様の積雪環境下に人工林が造成されることはまれであるためと考えられる。すなわち、スギ人工林の雪圧害は、スギの適応範囲を超える積雪環境に植林された場合に発生する被害といえる。

スギの適応範囲を超える積雪環境に植林が進められた理由として、拡大造林政策があげられる。元来スギは、針葉樹の中では比較的耐雪性が高い (石川 1983) とされていることから、積雪地への造林樹種として選定されてきた樹種である。しかしながら、天然林において、スギはその生理的適地である斜面下部へは雪圧に阻害され分布を拡大できず (Hirayama and Sakimoto 2003) , 雪圧に対する適応範囲は同所的に成育しているブナなどの広葉樹よりも狭い。拡大造林政策下では旧薪炭林を主とした広葉樹林がスギ人工林に転換された (箕口 2000) ことから、スギの適応範囲を超える立地に造林されるケースも多かったと考えられる。そのため、雪圧害やそれによる不成績造林地についての調査が、1980年代以降北陸から東北まですべての県で積極的に行われた (豪雪地帯林業技術開発協議会, 1984, 2000 他多数)。不成績造林地とは、「ある目的をもって造林したものの、造林木が成長する過程において何らかの原因で成林が阻害され、造林樹種による当初の目的が達成できない、あるいはできないと予測される造林地」のことである (横井・山口 1998) 。

したがって、雪圧害は拡大造林によって造成された人工林に顕著な地域特有の被害形態

と考えることができる。そのための対策として、地域の積雪環境に関する研究（山口 1978; 佐藤 1987）や造林可能な範囲を定めるための地帯区分に関する研究（佐藤・今野 1965; 松田ら 1968; 山口 1978; 佐藤 1980a; 野表 1987; 平 1987）が盛んに進められてきた（横井 2000）。上記の地帯区分以外の雪圧害に関する研究は、階段造林など不成績造林地化の防止、根元曲がり、その軽減に関する技術開発がある。根元曲がり、雪圧害によって生じる樹形の変形で、積雪の重みで毎年倒伏を繰り返すことによって、幹にあて材が形成され（Low 1964; Fayle 1976; 平 1985）、再び立ち直る過程で、根元部分に曲がりが残る（平 1985; Moore *et al.* 2008）現象である。

したがって、根元曲がり、積雪以外にも、風（Moss 1971; Moore *et al.* 2008）や、コンテナ苗（Lindström and Rune 1999）、根切りの影響（Khuder *et al.* 2007）など苗木の形態によって根元の安定を欠く場合に生じる。そのため、林木の成長や支持根の発達（小野寺 1990）によって根元が安定すると、雪圧害の発生頻度は低下する。また、根元周囲の偏心肥大成長が進み、見かけ上根元曲がり、小さくなる（田邊・小野寺 1994; Lindström and Rune 1999; 小野寺 1990）ことが報告されている。

根元曲がり、恒常的なストレスや障害に対して形成される抵抗性樹形（Baig and Tranquillini 1976, 1980; Boivin and Bégin 1997; 野表 1988, 1992）とも言え、柔軟性によって雪圧を回避するための適応の一つとも見なされている（小野寺 1990）。柔軟性の小さい個体は、曲がり根元割れや折れなど致命的被害をうける可能性が大きいためである。ただし、これらの樹幹強度、立ち直り力、根系支持力などのような生物的要因よりも、積雪量、斜面傾斜などの環境要因による影響はより大きく、積雪量、斜面傾斜角の増加とともに根

元曲がり量は増大する(小野寺 1990)ことが知られている。また、雪圧害においては折損を伴わない場合には枯死することはないが、曲がりをもたらす収益上の損失は大きい。

この収益上の損失を軽減するために、1970年代からは、雪起こしなど曲がり量を軽減させる技術の開発やそれに関する研究(佐藤 1971, 1980b, 1981, 1984; 野表 1973, 1976, 1980, 1984, 1986; 野々田・山口 1974a; 野々田・山口 1974b; 野表ら 1977; 豪雪地帯林業技術開発協議会 1984; 栗田・遠田 1986; 平 1987)が行われた。

不成績造林地は、雪圧害によって折損する個体が多く発生することによって生じる。1980年代以降、北陸から東北まですべての県で不成績造林地の調査が行われ、類型化(小野寺 1988; 小野瀬 1995; 横井 2000)されるとともに、広葉樹の侵入(山口 1978; 前田ら 1985; 大原・小野寺 1988; 矢野ら 1988; 小谷 1988, 1990a, 1990b, 2004; 矢野・榎谷 1989; 小谷・矢田 1989; 赤井 1989; 赤井ら 1989; 赤井ら 1990; 大原・栗田 1993; 鈴木ら 1993; 石塚・宇都木 1995; 豪雪地帯林業技術開発協議会 2000; 横井 2000)が明らかになった。そして、広葉樹の定着が良好である場合には最終的な目標林形をスギ・広葉樹混交林とすることが提案され(小野寺 1988; 豪雪地帯林業技術開発協議会 2000; 横井 2000), そしてそのための管理方法(高橋・野呂 1990; 長谷川 1991; 長谷川 1998; 長谷川・平 2000; 小谷 2004)や判断基準(横井 2000; 横井・山口 2000; 和田ら 2009)が体系化されている。

これら多雪地のスギ人工林を対象とした林分構造に関する報告から、雪圧による被害を受け続けた林分では、本数密度の著しい減少(豪雪地帯林業技術開発協議会 1984; 豪雪地帯林業技術開発協議会 2000; 小野寺 1988; 小野寺 1990; 横井 2000; 横井・山口 2000)

や、局所的な被害による不均一な立木配置（豪雪地帯林業技術開発協議会 1984; 野表 1986; 塚原 2000; 横井 2000）が認められる。

これまでの多雪地造林に関する研究の多くは 30 年生以下の林分成立段階を対象としたもので、成林阻害要因の解明と回避技術に焦点があてられてきた。これらの研究は、拡大造林の進展に応じて進められており、長期的管理の視点に立った研究はほとんど無い。積雪地の人工造林地の中には、短伐期では想定した収穫が見込めない場合であっても、成林可能な林分は少なくない。そのような林分を対象にした長期的な管理方法についてもほとんど検討されていない。なかでも、人工林のサイズ分布は、資源量、密度管理、収穫予測など、人工林経営の根幹に広く影響を与える人工林管理の基本情報である。これまでのサイズ分布に関する研究は、密度効果による変化を主な目的としており、雪害履歴のある成熟林分についてはほとんど明らかにされてこなかった。

1-3. 研究の目的と方針

本論文は、多雪地域のスギ人工林の成立過程を考慮した長期的管理の指針を得ることを目的としている。

序論につづく第二章では、研究対象地域の位置と地形、気象の特徴および森林林業の概況を明らかにした。

雪圧害を受けた林分の成育過程は、被害を受けていない林分とは異なる過程をたどると考えられる。多雪地域で成熟しつつある人工林において、適切な経営を行うためには、地域に成立するスギ人工林の成林後のサイズ分布目標を明らかにし、それに合致した管理を行う必要がある。そこで第三章では、雪圧害履歴が林分構造に及ぼす影響について、サイ

ズ分布特性，林分単位の立木配置や林木の形質を定量的に解析し，地域による長期的な林分の取り扱い方法について考察した。

長伐期施業への人工林の伐期延長を検討する場合，大径材生産を目指す場合には肥大成長速度が重要な判断基準となる。また，伐期延長の過程で深刻な気象害を受ける可能性が高ければ，高齢級林分への誘導は困難である。特に積雪地帯では，冠雪害に対する脆弱性について検討しなければならない。そこで，第四章では，積雪地帯のスギ人工林を対象として，一般に長伐期施業の生産目標となる大径木密度と雪害の種類とその発生階層の調査から，伐期延長による大径木生産林への移行可能性と，将来の収穫対象木が被害を受ける可能性を考察した。

雪圧害により林分の生育条件が変化する林分では，原理的に密度管理図の推定誤差が生じる可能性がある。そこで，第五章では，雪圧害履歴のあるスギ人工林のサイズ分布特性が林分密度管理図の推定精度に及ぼす影響を検証し，林分密度管理図を使用する際の補正方法について検討を加える。

以上の結果をもとに，第七章では雪圧害履歴のあるスギ人工林の成立過程のモデルを示し，目標林型の設定と，資源量の把握の方法について論じた。

第二章 研究対象地域の概要

2-1. 位置と地形

本研究は新潟県内の民有林を対象に行った。新潟県は、日本海側に面した本州中部の北陸地方に位置する（図 2-1）。北緯 $38^{\circ} 32' 58''$ から南端 $38^{\circ} 42' 19''$ までの南北に長く、北から下越、中越、上越および佐渡の四地方に区分される。地質的には比較的新しく、フォッサマグナ上に位置することにより県域の多くがフォッサマグナに積層した地層上にある。

地形は、主に山地、丘陵地、低地からなる。本州側は、東側を北から朝日山地、飯豊山地、越後山脈および飛騨山脈の約 $1000\sim 2700\text{m}$ の脊梁山脈に囲まれる。丘陵地は、魚沼丘陵・東頸城丘陵など信濃川中流域に分布する。山地山麓部や丘陵地では小河川や降雨浸食のために数多くの谷が分布している。低地は、信濃川・阿賀野川・関川・姫川等の河川流域および河口部に発達している。

2-2. 気象

研究対象地域は、日本海型気候区の東北・北陸型気候区に属し、ケッペンの気候区分では温帯湿潤気候に該当する。

山間地の多くは日本でも有数の豪雪地帯・特別豪雪地帯である。

平均気温は山沿いでは $11\sim 12^{\circ}\text{C}$ 、海岸・平野部では $13\sim 14^{\circ}\text{C}$ 、年合計降水量は佐渡や下越の海岸部で $1500\sim 2000\text{ mm}$ 、山沿いでは 3000 mm を越えるところもある。

年最深積雪の平年値は、海岸部で 100 cm 未満、上中越の平野部で $100\sim 150\text{ cm}$ 、山沿いでは $200\sim 250\text{ cm}$ である。雪質は、湿り雪地域、乾き雪地域、その中間地域が存在する（石

坂 1995)。1月の平均気温が比較的高い平野部、丘陵部には湿り雪地域が分布し、反対に1月の平均気温が比較的低い山地には乾き雪地域が多い。そして、年最深積雪の多い中越地方には中間地域が広く分布する。

2-3. 森林・林業の概況

研究対象地域は山地の大部分が冷温帯に属し、ブナクラス域（夏緑広葉樹林帯）に属する。表 2-1 に新潟県の森林資源概要（新潟県 2011a）を示した。林野面積は、総面積の 68.4% の 860 千 ha で、そのうちの民有林 568 千 ha のすべてが森林計画対象森林である。また、人工林面積は総面積 163 千 ha(人工林率 19%)、そのうち民有林は 141, 052 ha (人工林率 24.8 %) である。全国平均は林野率 41.2%、人工林率 41.2% (民有林の人工林率 45.9%) であるので、林野率は全国平均と同等であるが人工林率は全国平均のほぼ 50% である。

新潟県の森林計画区は、県内の森林区域を 4 つの森林計画区に区分する。すなわち、下越、中越、上越、佐渡地域である。各計画区の林面積は、中越、下越、上越、佐渡地域の純に大きく、中越と下越で全体の 7 割を占める。人工林率は、最も高い下越地区が 30%、中越地区、上越地区、佐渡地区は 22~23% である。各森林計画での造林、保育指針、標準伐期齢は同一の施業基準が定められており（新潟県 2011b）、これまでの施業方法に大きな違いはない。標準伐期齢は 45 年、植栽密度は 2, 500 ~ 3, 000 本 / ha (新潟県 2011b) で実生苗の使用が一般的である。

最新の地域森林計画変更計画書（新潟県 2011a）によると下越地域は木材生産が最も盛んな地域、中越地域は今後木材生産、間伐が見込まれる地域、上越地域は多雪地、脆弱地質から水土保持を重視する地域、佐渡地域は資源の特質を生かした森林の管理が必要な地

域と位置づけられている（新潟県 2011a）。図 2-2 に新潟県の民有林の齢級分布を示した。

新潟県の人工林は、現在 6～11 齢級のものが多い。これら人工林の多くは、戦後の昭和三十年代、四十年代の拡大造林政策によって造成されたもので、多くはスギ人工林である。

これは、新潟県の山地の大半が積雪地帯であることによる。スギは、建築用材の中では比較的耐雪性が高い（石川 1983）と考えられ、日本海側の多雪山地では広く植林されてきた。

天然林は多くが落葉広葉樹二次林で、多くは薪炭材や建築用材、パルプ材、きのこ栽培用の原木などを得るために伐採された跡地に更新した森林である。特に、萌芽更新によって維持されてきた薪炭林が多い。薪炭林の主な構成樹種はコナラである。また、最深積雪の大きい地域ではブナが生育している。ミズナラは高標高域に分布するが、上越地域では低標高域まで分布する。そして、近年病害虫による資源量の減少が顕著である。薪炭林は昭和 30 年代まで経営が続いていたが、その後化石燃料の普及によって放置されるようになった。天然林の齢級構成のピークが 12 齢級であることがこのことを表している。

地域森林計画の標準伐期齢は 45 年に設定されており、これは植栽当時から変わっていない。すなわちスギ人工林の約半数は当初設定した標準伐期齢（45 年）を超え、伐期の延長が進行している。長伐期施業の施業目標は、1975 年に調整された新潟県収穫予想表（新潟県農林水産部治山課 1980）によると標準伐期齢 60 年、収穫目標直径 45 cm であったが、2011 年の地域森林計画（新潟県 2011b）では、標準伐期齢の 2 倍（90 年）以上など長期化している。しかしながら、目標直径に関する明確な記載は認められない。そのために、これら成熟したスギ人工林資源の利用拡大が新潟県の林業主要施策となっている。

第三章 雪害履歴が林分構造に及ぼす影響

3-1. 雪圧害がスギ人工林の直径分布に及ぼす影響

3-1-1. 目的

雪圧害を受けた林分の成育過程は、被害を受けていない林分とは異なる過程をたどると考えられる。多雪地域で成熟しつつある人工林において、適切な経営を行うためには、地域に成立するスギ人工林の成林後のサイズ分布目標を明らかにし、それに合致した管理を行う必要がある。

そのために、サイズ分布特性を定量的に把握するための有効な指標が必要である。歪度は分布の形を示す基本的な統計量の一つであり、同齢単純林の発達過程と、樹高分布（田中 1983）や直径分布（白石 1985）との関係がわかっている。胸高直径は樹高よりも簡便で正確に測定できることから、歪度を指標とすれば雪圧害と保育の履歴が直径分布に及ぼす影響を明らかにできるだろう。

林分成立段階における雪圧害の影響は、樹形や林木の空間分布にも影響を与えることが知られている。すなわち、雪圧害が頻発する立地環境においては根元曲がりが発達し、林木の配置は偏る（豪雪地帯林業技術開発協議会, 1984; 野表, 1986; 豪雪地帯林業技術開発協議会, 2000）。これらの特徴に関する伐期の延長にともなう林分の発達による変化に関する情報は、間伐時の選木など、管理方法を検討する上で重要である。

根元曲がりについては、根元周囲の偏心肥大成長が進み見かけ上小さくなる（田邊・小野寺, 1994; Lindström and Rune, 1999; 小野寺, 2000）ことが報告されているが、確認された事例は多くない。一方で樹木の空間分布パターンは、局所的に過密な部分で劣勢個体に

選択的に働く場合に次第に集中分布から規則分布に近づいて行くことが天然林の研究 (Kohyama and Fujita 1981)によって明らかにされており、雪圧害の影響により林木の配置が偏った林分 (豪雪地帯林業技術開発協議会 1984; 野表 1986; 塚原 2000; 横井 2000) では全体の密度が高くなくても局所的には過密になる可能性がある。すなわち、林分の発達による局所的な競争の緊密化が生じる場合には、空間分布は規則的になるものと考えられる。

そこで、本章では幼齢期に受けた雪圧害が成熟期の林分構成木のサイズ分布特性、立木の形質および立木配置の規則性に与える影響について検討した。

3-1-2.調査地と調査方法

調査は新潟県下越地方の下越森林計画区で行った。調査を行った下越森林計画区の民有林には少雪地から多雪地まで幅広い積雪環境にスギ人工林が分布している。この計画区では、同一の施業基準が定められていることから (新潟県 2011)、施業方法に大きな違いはない。標準伐期齢は 45 年、植栽密度は 2, 500 ~ 3, 000 本 / ha (新潟県 2011) で実生苗の使用が一般的である。

調査林分は最深積雪 100~250 cm の地域から 35 林分を選んだ (図 3-1, 表 3-1)。この地域を、1969~1998 年度の年最深積雪の累年平均値 (新潟県 1999) により、経済林成立の基準である最深積雪 150 cm (横井・山口 2000) 以上の多雪地とそれ未満の少雪地に区分した。調査林分のうち多雪地に成立していた林分は 28 箇所、少雪地に成立していた林分は 7 箇所であった。なお、最深積雪の値は 1969~1998 年度の年最深積雪の累年平均値 (新潟県 1999) から推定した。

新潟県の森林簿から得られた林齢は 25～105 年生であった。また、多雪地では雪圧害のため植栽木の現存量が極端に低く、広葉樹の定着が顕著な不成績造林地の存在が知られているが（小野寺 1990; 長谷川 1991; 長谷川 1998; 豪雪地帯林業技術開発協議会 2000; 横井 2000; 小谷 2004; 藤森 2006; 和田ら 2009 他多数），本研究では比較的林冠閉鎖の進んでいる林分を対象として調査を行った。そのため、調査した林分のうち、樹高 2 m 以上の広葉樹が定着していた林分は 10 林分のみで、胸高周囲長 5 cm 以上の広葉樹の出現状況は、本数密度の平均値と標準偏差が 3.8 ± 8.7 本/ha，断面積合計の平均値と標準偏差が 0.29 ± 0.86 m² / ha であった。

調査プロットは各林分に一カ所とし、尾根付近や沢筋を避け、傾斜などの地形要素に著しい違いがなく、かつ、林縁効果が及ばないように設定した。調査プロットの面積は 1600 m² とし、そのうちの二林分は地形等の制限により 900 m² と 2000 m² とした。プロットの形状は原則として 40×40m を基準とし、地形などの関係で方形配置に制約があった場合には、面積を変えずに 10×10m の小区画を非方形に配置した。毎木調査は、全ての植栽木を対象として行い、樹高、胸高周囲長、樹冠長、根元曲がり、樹形級を記録した。根元曲がりとは地上 1.5m の高さでの幹の水平方向へのずれの長さとし、樹冠長は樹高から枝下高を差し引いた長さとした。樹形級は、優勢で上層木集団を形成する A 級木、被圧木である B 級木、梢端折れや二又などの被害のある C 級木とし、いずれも生残木を対象とした。枯損・幹折れ木はその本数を集計した。

林分材積の実測値は、生残木の個体幹材積を林分ごとに積算して求めた。以後、これを理論材積とする。なお、個体幹材積は、新潟県の高齢級個体を加味した以下の (1) 式（塚

原 2005) に、毎木調査による胸高周囲長から求めた胸高直径と樹高を代入して求めた。

$$v = d^2 \cdot h / (23436.15 + 150.34 \cdot d) \quad (1)$$

v : 個体幹材積 (m^3) , d : 胸高直径 (cm) , h : 樹高 (m)

3-1-3.解析

毎木調査の生残木のうち A 級木は上層木, B 級木, C 級木は下層木とし, 林分内の下層木全体を下層木集団と定義した。なお下層木には, 競争に起因する被圧木 (田中 1983) と雪圧に起因する被害木 (野表, 1988) があるが, 両者は区別せず同様に扱った。

直径分布の歪度は, その値が 0 より大きい場合は左偏化した分布を, 0 より小さい場合は右偏化した分布を, 0 の場合は左右対称の分布を示す。そこで, 林分単位で生残木の胸高直径の歪度を求め, 負の右偏分布を 0, 正の左偏分布を 1 とした。なお, 調査林分の歪度の絶対値は, 最小値が 0.012 で, 歪度 0 の左右対称の分布を示した林分はなかった。そしてこのカテゴリ化された歪度を応答変数とし, 一般化線形混合モデル (以下, GLMM) を構築した。モデルで使用した確率分布は二項分布 (logit link 関数) で, ランダム要因は林分とし, AIC (赤池情報量規準) を用いてモデル選択を行った。GLMM の説明変数として, 表 3-2 のうち, 以下の 9 個の要因を用いた。すなわち, 林分の発達に関する基本情報としての林齢, 本数密度, 理論材積, そして過去に受けた雪圧害の指標としての平均根元曲がり, さらに保育履歴の指標として, 最近, 除間伐がされていないことを意味する枯損・幹折れ木の本数密度, および上層木集団の緊密さなど, 成長過程の特徴に関連する指標としての上層木の本数密度, 平均胸高直径, 平均形状比, 平均樹冠長である。この時, モデルにおける説明変数のパラメータ推定値が正ならばその変数の値が大きくなるほど胸高直径分布

は左偏化し、負ならばその変数の値が大きくなるほど右偏化する効果がある。

さらに、林分内のある個体が上層木となる確率を応答変数とし、一般化線形混合モデル (GLMM) を構築した。モデルで使用した確率分布は二項分布 (logit link 関数) で、ランダム要因は林分とし、AIC (赤池情報量規準) を用いてモデル選択を行った。GLMM の説明変数は、上記の 9 要因のうち、上層木の本数密度を除き、胸高直径の歪度を加えた 9 要因とした。この時、モデルにおける説明変数のパラメータ推定値が正ならばその変数の値が大きくなるほど林分内のある個体が上層木となる確率は高くなり、負ならばその変数の値が大きくなるほど上層木となる確率は低くなる効果がある。以後、この林分内のある個体が上層木となる確率を上層木確率とする。

また、林分の雪圧害履歴と立木の形質・立木配置との関係を明らかにするために、上層木である A 級木を対象に、樹高、胸高直径、形状比、枝下高率、根元曲がりの林分平均値を求めた。立木配置の規則性に関しては、10×10m のサブプロットの中に入る内の上層木本数の密度の変動係数を求め、その指標とした。以後これを立木配置の変動係数と表記する。そして雪圧害履歴に関係すると考えられる因子 (直径分布の歪度、立木配置の変動係数、生残木の根元曲がり) および林分の発達に関する因子 (林齢、地位指数、林分材積) と、上層木の形質 (樹高、胸高直径、形状比、枝下高率、根元曲がりの平均値) との相関検討するために、*peason* の相関係数を求めた。

これらすべての統計解析は、R ver. 2.12.2 (The R Project for Statistical Computing 2011) を用いて行った。

3-1-4.結果

植栽木の樹高分布 (図 3-2) は、多雪地域、少雪地域ともに高齢林分ほど最頻値の明瞭さが低下する傾向にあった。また、林齢と分布型との関係には両地域とも一定の傾向は認められなかった (図 3-2)。

また、分布型を異なる最深積雪地域間で比較すると、多雪地域では一山型、逆 L 字型、二山型またはピークが不明瞭など、多様な分布型が認められたが、少雪地域では一山型または逆 L 字型に限られていた (図 3-2)。胸高直径と樹高の関係 (図 3-3) は、最深積雪の違いに関係なく、高齢になるほどサイズ分布の幅が大きくなり、またその分布は連続的であった。

表 3-3 に直径分布の歪度に影響を及ぼす林分因子について、GLMM で解析した結果を示した。保育履歴の指標としての枯損・幹折れ木の本数密度、過去に受けた雪圧害の指標としての平均根元曲がりには正の効果をもっていた。AIC が最小となるモデルの説明変数は選択されなかった。AIC が二番目に小さいモデルには、正の効果をもつ林齢が説明変数に加わった (AIC = 52.7)。すなわち胸高直径分布の分布型は、林齢が低いと歪度が負の右偏分布に、反対に林齢が高いと歪度が正の左偏分布になった。

表 3-4 に上層木確率に影響を及ぼす林分因子について、GLMM で解析した結果を示した。保育履歴の指標としての枯損・幹折れ木の本数密度、過去に受けた雪圧害の指標としての平均根元曲がりには負の効果を持っていた。AIC が最小となるモデルの説明変数として正の効果をもつ理論材積と、負の効果を持つ本数密度および上層木の平均胸高直径、平均形状比、平均樹冠長が選択された (AIC=92.6)。したがって、林分の上層木確率を下げる要因

は、理論材積が低く、本数密度、上層木の平均胸高直径、平均形状比、平均樹冠長の値が大きいことであった。さらに AIC が二番目に小さいモデルには、負の効果を持つ平均根元曲がり説明変数に加わった (AIC= 93.4)。

表 3-5 に A 級木の形質と林分の発達および雪害履歴に関する林分因子と間の相関関係を示した。この結果から、立木配置の変動係数と、上層木樹高、胸高直径、樹冠長率との間に $r > 0.4$ の中程度の正の相関関係が認められた。また、雪圧害履歴の指標としたすべての生残木の根元曲がりの平均値と上層木の根元曲がりとは $r > 0.7$ の強い正の相関関係が、また、生残木すべての根元曲がりの平均値と上層木の形状比の平均値には $r < -0.4$ 中程度の負の相関関係が認められた。以上のことから、上層木の立木配置のばらつきが大きい林分では、樹冠長率が高く、過去に受けた雪圧害の程度がより重い平均根元曲がりの大きい林分では、上層木の根元曲がりも大きく、形状比が低い傾向があった。

3-1-5. 考察

最初に、林分構成木のサイズ分布特性を定量的に把握するために、胸高直径分布の歪度と上層木確率に影響する要因を解析した (表 3-3, 4)。その結果、林齢の経過とともに胸高直径分布は歪度が正の左偏分布になった (表 3-3)。そして、上層木確率が低い林分は、理論材積が低く、本数密度、上層木の胸高直径・樹冠長・形状比、生残木の根元曲がりの値が大きかった (表 3-4)。

保育履歴の指標としての枯損・幹折れ木の存在は、最近、除間伐されていないことを意味することから、そのような林分には下層木も残っていることが普通であり、上層木集団から明確に分離した下層木集団が存在すると、樹高や胸高直径におけるサイズ分布の歪度

は負になることが報告されている（田中 1983; 白石 1985）。しかし、本研究で対象とした多雪地の林分では、枯損・幹折れ木の密度が高く、したがって下層木が集団で存在すると推定できる林分であっても、胸高直径分布の歪度は正になった（表 3-3）。

その理由として、今回の調査林分は下層木の本数率が一般的な林分よりも高いことがあげられる。すなわち、田中（1983）の報告の上層木本数率は 80.9 ~100 %であるのに対して、今回の調査林分は全ての生残木に対する上層木の本数率は平均 63.6%（±13.8）（表 3-2）と約 20%も低い。さらに、上層木確率と本数密度とが負の関係であることから（表 3-4）、本数密度の高い林分は上層木確率が低く、下層木の本数密度が高い林分であることがわかる。したがって、この高い比率で存在する下層木によって胸高直径分布が左偏化すると推察できる。

そして、この高い比率で林分内に存在する下層木と胸高直径分布の左偏化は、上層木集団内での競争の結果生じたとは考えにくい。胸高直径分布が左偏化した林分では上層木の本数密度が低いこと（表 3-3）、上層木確率が低い林分で上層木の樹冠長が長いこと（表 3-4）から上層木間の競争は緊密ではなかったと推定できるからである。一方で、過去に受けた雪圧害の指標としての平均根元曲がり、胸高直径の歪度とは正の（表 3-3）、上層木確率とは負の関係（表 3-4）であることから、根元曲がり大きいと直径分布は左偏化し、林分の上層木確率は低くなり、逆に、下層木の確率が高くなる。すなわち、積雪が下層木集団の形成に影響した可能性が高い。

林分初期段階において雪圧害の被害程度の重い個体は長期間成長が抑制され、その後も周囲の健全木の成長を上回ることはない（野表 1988）。したがって、そのような雪圧害を

受ける林分では、各個体が受ける被害程度の違いにより構成木の階層化が起こり、上層から分離した下層木集団が形成されると推察される。そして、下層木と上層木との光の一方的競争効果から、下層木は上層林冠木の成長をほとんど妨げない（甲山・可知 2004; 西村・原 2011）。そのため、粗放な管理では除間伐の対象にならず林分内にとどまる可能性が高い。

以上のことから、積雪の影響によって高い比率で下層木が生じ、一部は枯損・幹折れ木になるが、残った下層木は光資源をめぐる一方的競争関係から上層林冠木の成長をほとんどさまたげないために引き続き管理でも放置され、次第に上層木集団とのサイズ差が開いて、連続的なサイズ分布を形成する（図 3-2, 3）ことが、林齢の経過とともに直径分布が左偏化する原因であると解釈できる。

なお、形状比については、競争が緩やかな低密度な林分でより低い値をとることが一般に知られているが、表 3-4 の結果はその反対で、上層木間の競争が緊密ではなかったと推定できる林分で上層木の形状比は増加する傾向にあった。本報告の解析に用いたデータは林齢の幅が 25~100 年生と大きく、発達段階が多岐にわたっているため、形状比と林齢との関係は一定ではない（竹内 1997）ことに起因すると推測できるが、密度との関係を明らかにできなかった。

しかしながら平均形状比は、過去に受けた雪圧害の大きさと関係のある根元曲がりとの相関関係があった（表 3-5）。また、林齢、地位指数、林分材積など林分の発達に関する指標とは明瞭な関係なかった。このことから、雪圧害をより強く受けた林分では形状比が低くなると考えられる。すなわち、密度の影響よりも、恒常的な雪圧のストレスの抵抗性

樹型 (Baig and Tranquillini 1976; Baig and Tranquillini 1980; Bégin 1991; Boivin and Bégin 1997; 野表 1988; 野表 1992) として、形状比の低い樹形が形成されていると考えられた。また、根元曲がりについては、林分全体の根元曲がりと上層木の根元曲がりとの間に強い正の相関関係があった。したがって、偏心肥大成長による見かけ上の曲がりの低下 (田邊・小野寺, 1994; Lindström and Rune, 1999; 小野寺, 2000) による根元曲がり解消効果は、十分ではなかったと言えた。

立木配置については、上層木の樹高、胸高直径および樹冠長と正の相関関係となっていた。したがって、林分が発達することで上層木の立木配置はより不規則になると言えた。すなわち、天然林の林分が発達にともなう分布の規則性の増大 (Kohyama and Fujita 1981) とは逆の傾向であった。このことは、上層木の階層での競争は、十分な競争が生じるほどの樹幹密度に達していないことを示唆している。すなわち雪圧害の影響がある林分は、サイズ分布の歪度の左偏化 (表 3-3) によって、上層木の階層密度は低い状態が維持され、樹形において高い樹冠長率と低い形状比 (表 3-5) が維持されるものと考えられる。

積雪地のスギ人工林の成熟林分では上層個体が隣り合い一見局所な緊密度が高いように見える場合も少なくないが、隣あった個体間の競争は緊密ではないことを上記の結果は示唆している。そして、この隣り合った個体間の緊密度はその後の樹高成長によって増大すると思われるが、上層木の上長成長のピークを過ぎた成熟林分においてはその可能性は低いだろう。したがってこのような林分の場合には、密度調整や肥大成長を目的とした間伐の必要性が極度に高くなることは考えにくい。また、高い樹冠長率によってその後の肥大成長も期待できることから、伐期延長によって大径材生産林へ誘導しやすいと考えられた。

第四章 長伐期施業移行可能性に影響する立地要因

4-1. 大径木密度に影響する立地要因

4-1-1. 目的

スギの伐期齢は、材積収穫効率に基づいて設定されているが、最深積雪 1.5m 以上の地域では雪圧害の影響により、従来の伐期齢では経済林としての成林は困難であることが指摘されてきた（横井 2000; 横井・山口 2000）。一方で、第三章の結果から、雪圧害の影響が強い林分では、光の一方向的競争が助長されるために、優占木の肥大成長は旺盛である。すなわち、このような林分構造を持つ林分は、大径材生産林への施業転換の可能性が期待できる。

しかしながら、スギ人工林の成立する立地要因は様々であるので、個々の林分の大径材生産林への施業転換可能性を判定する際には、林分構造のほかに地位、地形、積雪深などの気象因子の影響も考慮する必要がある。

この問題に対し、数値標高モデル（以下 DEM）やメッシュ気候値 2000（気象庁 2002）などの公開情報を地理情報システム（以下 GIS）を使用して対応できる可能性がある。これらの公開情報を利用することにより、大径材の成立しやすい条件の予測が可能になれば、長伐期大径材生産林へ移行可能な適地判定に役立つと考えられる。

そこで本章では、施業履歴がほぼ等しいと考えられ、かつ新潟県の標準伐期齢以上のスギ造林地を対象に、林分単位で大径木密度に及ぼす要因を明らかにすることを目的とする。

4-1-2. 調査地と調査方法

調査は新潟県全域の成熟したスギ人工林を対象に行った。調査林分の林齢は 55～72 年生

で、1980年に策定された新潟県収穫予想表（新潟県農林水産部治山課、1980）に示された長伐期施業の標準伐期齢である60年の条件を多くの調査林分が満たしている。またこれらの調査林分は、施業や経営の背景に共通性のある新潟県の県行造林地および官行造林地から76林分を選定した（図4-1、表4-1）。この県行造林地は主に第一次県行造林によって造成された林分である。第一次県行造林は、1930年（昭和5年）から1950年（昭和25年）の間に実施された事業で、最大3,385haが県内全域に造成された。その後不成績造林地の解除や1958年（昭和33年）から繰り上げ伐採が行われ、2006年（平成18年）時点の成立面積は919haであった（新潟県農林水産部林政課2001）。調査は2003年に実施した。選定した調査地の植栽年は1930～1948年で、そのうちの70林分が1930～1940年の10年間に植栽された林分である。積雪量の周期性の解析から（鈴木2006）、1920年代から1945年まではやや多雪期とされているため、大半の調査林分は、植栽後5ないし10年生までの間が多雪期に該当していたと考えられる。多雪期末期の1940年以降に植栽された林分の雪圧害はそれ以前の植栽の林分よりも比較的軽い可能性があるが、調査林分に占める割合は低く、6林分（8%）である。

調査プロットは各林分に一カ所とし、尾根付近や沢筋を避け、傾斜などの地形要素に著しい違いがなく、かつ、林縁効果が及ばないように設定した。調査プロットの面積はすべて1600㎡とした。プロットの形状は原則として40×40mを基準とし、地形などの関係で方形配置に制約があった場合には、面積を変えずに10×10mの小区画を非方形に配置した。各調査プロットの位置は、ハンディGPS端末で位置座標を記録した。また、斜面形状を平衡斜面、凸斜面、凹斜面、複合斜面の四種類に、および土壌型をBD、B_D(d)、B/Dの三種

類に分類し記録した。林齢は県行造林または森林簿の記録から求めた。傾斜，斜面方位については座標値から 50m メッシュの DEM を用いた取得した大塚 (2009) のデータを参照した。DEM から取得された斜面方位は方位角であるため，北 (N) ，東 (E) ，南 (S) ，西 (W) の四方位にカテゴリ化した。カテゴリ化の基準は，北が北西 (275°) ～北東 (45°) ，東が北東 (45°) ～南東 (135°) ，南が南東 (135°) ～南西 (225°) ，西が南西 (225°) ～北西 (320°) である。地位指数曲線は，60 年生を基準年とする地位指数曲線 (Sri *et al.* 2009) によって求めた。標高は 5,000 分の 1 施業図および 25,000 分の 1 地形図を，最深積雪はメッシュ気候値 2000 (気象庁 2002) を用いて求めた。上記のすべての変数のうち数値データについては平均値と標準偏差を表 4-2 に，カテゴリカルデータについては度数分布を表 4-3 に示した。

毎木調査は，全ての植栽木を対象として行い，樹高，胸高周囲長，枝下高，根元曲がり，樹形級を記録した。根元曲がりとは地上 1.5m の高さでの幹の水平方向へのずれの長さとした。樹形級は，優勢で上層木集団を形成する A 級木，被圧木である B 級木，梢端折れや二又などの被害のある C 級木とし，いずれも生残木を対象とした。

林分材積の実測値は，生残木の個体幹材積を林分ごとに積算して求めた。個体幹材積は，新潟県の高齢級個体を加味した以下の (1) 式 (塚原 2005) に，毎木調査による胸高周囲長から求めた胸高直径と樹高を代入して求めた。

$$v = d^2 \cdot h / (23436.15 + 150.34 \cdot d) \quad (1)$$

v : 個体幹材積 (m³) ， d : 胸高直径 (cm) ， h : 樹高 (m)

4-1-3.解析

毎木調査による樹形級区分から、A級木は上層木、B級木、C級木は下層木とした。長期的な生産目標では、直径40cm(桜井 2002)が指標にあげられている。そこで、直径40cm以上の優占木を大径木、それ未満の劣勢木を大径木以外とし、林分内のある全ての植栽木のうち、ある個体が大径木である確率をもとめた。これを大径木確率とする。

そして、林分の大径木の成立しやすさを説明する因子として、表4-2, 3の立地要因を用いた。すなわち、林分の発達に関する基本情報としての林齢、地位指数、立地要因としての標高、斜面方位、土壌型、斜面形状、傾斜、最深積雪である。そして、大径木密度を予測するために、直径40cm以上の個体密度を応答変数とし、一般化線形混合モデル(以下、GLMM)を構築した。説明変数は、表4-2, 3の8因子とし、モデルで使用した確率分布はポワソン分布(log link 関数)で、ランダム要因は林分とし、AIC(赤池情報量規準)を用いてモデル選択を行った。GLMMによって求められる因子型変数のパラメータ推定値は、事前に定められた基準の水準に対する値が推定される(久保 2012)。すなわち、基準となる水準以外の水準のパラメータ推定値が求められ、その値が正の場合には、基準の水準より応答変数の推定値が大きくなる傾向を、負の場合には小さくなる傾向があることを示す。表4-3に示した因子型変数の基準となる水準はそれぞれ東向き斜面(E)、平衡斜面、BD型土壌である。

さらに、林分内のある個体が大径木となる確率を応答変数とし、GLMMを構築した。説明変数は、表4-2, 3の8因子とし、モデルで使用した確率分布は二項分布(logit link 関数)で、ランダム要因は林分とし、AICを用いてモデル選択を行った。GLMMの説明変数は、

上記と同様の 8 要因である。この時、モデルにおける説明変数のパラメータ推定値が正ならばその変数の値が大きくなるほど林分内のある個体が大径木となる確率は高くなり、負ならばその変数の値が大きくなるほど大径木となる確率は低くなる効果がある。以後、この林分内のある個体が大径木となる確率を大径木確率とする。

これらすべての統計解析は、R ver. 2.12.2 (The R Project for Statistical Computing 2011) を用いて行った。

4-1-4.結果

表 4-4 に、大径木の成立本数に影響する因子を示した。AIC によるモデル選択の結果、林齢、地位指数、最深積雪、土壌型が選択された (AIC=194)。表 4-4 から、林齢、地位指数、最深積雪は大径木密度に対して正の効果をもっていた。また、土壌型は BD 型に対して B_D(d) 型が負の、B/D 型は正の効果を持っていた。すなわち、林齢、地位指数、最深積雪の値が大きい立地条件で多く成立しており、土壌型が B_D(d) の立地では少なかった。パラメータ推定値の大きさは、地位の高さに関係する地位指数と土壌型の二つで大きかった。

表 4-5 に大径確率に影響を及ぼす林分因子について、GLMM で解析した結果を示した。AIC によるモデル選択の結果、地位指数と最深積雪が正の効果を持つ因子として選択された (AIC=270.4)。したがって、林分の大径木確率を高める立地要因は、地位指数が高く、最深積雪の大きいことであった。林齢は選択されなかった。

表 4-4, 5 とともに地位指数、最深積雪が大径木の成立に影響する因子として選択され、その推定値の大きさから、地位指数の影響が大きいことがわかった。そこで、調査林分を新潟県の収穫予想表 (新潟県農林水産部治山課 1980) に示されている地位級に分類し、地位

級と最深積雪との関係を示した(図4-2)。このときの地位級は40年生を基準年とした地位指数によってカテゴリ化されており、地位級Ⅳは地位指数22m未満、地位級Ⅲは地位指数22m以上-24m未満、地位級Ⅱは地位指数24m以上27m未満、地位級Ⅰは地位指数27m以上29m未満、地位級特Ⅰは地位指数29m以上である。図4-2から、地位級Ⅰ、特Ⅰでは最深積雪と関係なく大径木密度が高いが、地位級Ⅱ以下では最深積雪が多いほど大径木密度が高い傾向が認められた。

4-1-5. 考察

大径木生産林への移行に適した立地・気象条件を明らかにするために、長伐期施業の標準伐期を超えた人工林の大径木密度に影響する立地・気象条件を検討した。その結果、林分の大径木密度、本数確率ともに、地位指数が高く、最深積雪の大きい林分で高かった。林分成立段階の研究では、雪圧害の発生頻度は傾斜などの地形要素よりも最深積雪の影響をより強く受けることが明らかにされていたが(横井・山口 2000)、成熟段階においては最深積雪よりも地位指数の影響の方が大きかった(表4-4, 5)。地位級Ⅰ、特Ⅰでは最深積雪と関係なく大径木密度が高く、最深積雪の影響が認められたのは地位級Ⅱ以下の林分であった(図4-2)。

これまでは最深積雪は幼齢期の密度低下に関係することから、肥大成長による大径木生産林へ移行が期待されていた。しかしながら、本研究の結果からその影響は限定的で、地位級Ⅱ以下の立地で認められることがわかった。すなわち、地位級特Ⅰ、Ⅰの林分では、十分に高い樹高成長が期待でき、直径は樹高と相対成長関係にあることから、より大きい径級に到達しており、肥大成長に与える効果は、生育密度より大きかった。

したがって、地位級Ⅲ以下の林分は、積雪が多く生育密度が低い状態で推移した場合でも、十分に高い樹高成長が期待できないため、大径木の階層に到達する個体は少なく、伐期延長による大径材生産林への移行は困難であると考えられる。

以上のことから、雪圧害を受けやすい地域で長期的な目標林型を定めるためには、林分密度だけでなく、地位指数による適地判断が必要となると言えた。

4-2. 降雪に起因する物理的被害の発生傾向および被害確率に影響する立地要因

4-2-1. 目的

人工林の伐期延長を検討する場合、気象害に対する脆弱性は重要な判断基準となる。伐期延長の過程で深刻な気象害を受ける可能性が低ければ、高い林分材積を有する林分に誘導できる可能性は高まる。成林後の人工林に対する主な気象害は冠雪害、風害である。積雪地帯では、成林後に冠雪害を受ける可能性（石井ら 1982, 1983; 藤森 1987; 藤森ら 1987; 嘉戸 2000; Kato and Nakatani 2000）について検討しなければならない。しかしながら、これまでの多雪地のスギ人工林における冠雪害の報告は、いずれも最大直径 30 cm 以下の若齢期の林分で、高齢級林分での報告は多くない。

高齢級林分の冠雪害に関する報告としては、國崎（2005）の 160 年生で直径 30 cm を超える高齢林の冠雪害の報告がある。この林齢での被害状況の解析から、高齢級林分であっても形状比が 70 以上の個体は冠雪害を受けやすいため適正な密度管理が必要である。そこで、積雪深の異なる地域の成熟したスギ人工林を対象として、これら降雪に起因する物理的被害の発生傾向と被害確率に影響する立地要因を明らかにし、伐期延長への影響を考察した。

4-2-2. 調査地と調査方法

調査は前章と同様に新潟県全域のスギ人工林を対象に行った。調査林分の林齢は 55～72 年生で、1980 年に策定された新潟県収穫予想表（新潟県農林水産部治山課 1980）に示された長伐期施業の標準伐期齢である 60 年の条件を多くの調査林分が満たしている。また、これらの調査林分は施業や経営の背景に共通性のある県行造林地および官行造林地から 76 林分を選定した（図 4-1, 表 4-1）。この県行造林地は主に第一次県行造林によって造成され

た林分である。第一次県行造林は、1930年（昭和5年）から1950年（昭和25年）の間に実施された事業で、最大3,385haが県内全域に造成された。その後不成績造林地の解除や1958年（昭和33年）から繰り上げ伐採が行われ、2006年（平成18年）時点での成立面積は919haであった。（新潟県2001）。調査は2003年に実施した。選定した調査地の植栽年は1930～1948年で、そのうちの70林分が1930～1940年の10年間に植栽された林分である。積雪量の周期性の解析から（鈴木2006）、1920年代から1945年まではやや多雪期とされているため、大半の調査林分は、植栽後の5ないし10年生までの間が多雪期に該当していたと考えられる。多雪期末期の1940年以降に植栽された林分の雪圧害はそれ以前の植栽の林分よりも比較的軽い可能性があるが、調査林分に占める割合は低く、6林分（8%）である。

調査プロットは各林分に一カ所とし、尾根付近や沢筋を避け、傾斜などの地形要素に著しい違いがなく、かつ、林縁効果が及ばないように設定した。調査プロットの面積はすべて1600 m²とした。プロットの形状は原則として40×40mを基準とし、地形などの関係で方形配置に制約があった場合には、面積を変えずに10×10mの小区画を非方形に配置した。各調査プロットの位置は、ハンディGPS端末で位置座標を記録した。また、斜面形状を平衡斜面、凸斜面、凹斜面、複合斜面の四種類に、および土壌型をBD、B_D(d)、B/Dの三種類に分類し記録した。林齢は県行造林または森林簿の記録から求めた。傾斜、斜面方位については座標値から50mメッシュのDEMを用いた取得した大塚（2009）のデータを参照した。DEMから取得された斜面方位は方位角であるため、北（N）、東（E）、南（S）、西（W）の四方位にカテゴリ化した。カテゴリ化の基準は、北が北西（275°）～

北東（45°），東が北東（45°）～南東（135°），南が南東（135°）～南西（225°），西が南西（225°）～北西（320°）である。地位指数曲線は，60年生を基準年とする地位指数曲線（Sri *et al.* 2009）によって求めた。標高は5,000分の1施業図および25,000分の1地形図を，最深積雪はメッシュ気候値2000（気象庁 2002）を用いて求めた。上記のすべての変数のうち数値データについては平均値と標準偏差を表4-2に，カテゴリカルデータについては度数分布を表4-3に示した。毎木調査は，全ての植栽木を対象として行い，樹高，胸高周囲長，枝下高，根元曲がり，樹形級を記録した。根元曲がりは地上1.5mの高さでの幹の水平方向へのずれの長さとし，枝下高はもっとも樹冠の張り出した部分の枝の付け根の高さとした。明瞭な樹冠の張り出しが認められない場合には最下部の枝の付け根の高さとし，枯死木などで枝下高が不明瞭な個体場合には欠測とした。樹形級は，優勢で上層木集団を形成するA級木，被圧木であるB級木，梢端折れや二又などの被害のあるC級木，幹折れや立ち枯れ木はD級木とした。折れや曲がりなど，降雪に起因すると考えられる物理被害が樹形に認められる場合にはその形態を記録した。

林分材積は，生残木の個体幹材積を林分ごとに積算して求めた。個体幹材積は，新潟県の高齢級個体を加味した以下の(1)式（塚原 2005）に，毎木調査による胸高周囲長から求めた胸高直径と樹高を代入して求めた。

$$v = d^2 \cdot h / (23436.15 + 150.34 \cdot d) \quad (1)$$

v：個体幹材積（m³），d：胸高直径（cm），h：樹高（m）

4-2-3.解析

毎木調査によって得られた林木の物理被害の形態を，藤森ら（1987）に従い以下の5つの

カテゴリに分類した。すなわち、目立つ被害が認められない個体、幹曲がり・片枝などの樹形の変形が認められる個体、梢端折れや二又などの梢端部（陽樹冠の 1/2 より上部）の損傷、幹折れ、枯死である。これらの被害形態のうち、幹曲がりは雪圧害に、梢端折れ、幹折れは冠雪害に起因することが一般的である。被害形態毎木調査で記録された被害形態のうち梢端折れは幹曲がりも複合的に記録されている場合が多かったが、これらはすべて梢端折れに分類した。また、枯死木には立ち枯れ木のほかに幹折れで枯損している個体も含まれる。これは、調査時点では幹折れ後の枯死なのか、立ち枯れ後の幹折れなのかを判別することは困難であるため、樹形級の判定で D 級木に分類された個体はすべて被害形態も枯死に分類した。以後これらの被害形態はそれぞれ無被害、幹曲がり、梢端折れ、幹折れ、枯死と表記する。また、表 4-6 に調査時に記録した被害形態と樹形級との関係を、表 4-7 に樹形級ごとの個体サイズまたは樹形の林分平均値の概要を、表 4-8 に被害形態別本数の概要を示した。

樹形と被害に対する脆弱性との関係を明らかにするために、それぞれの被害形態の有無を応答変数とし、一般化線形混合モデル（以下、GLMM）を構築した。説明変数は表 4-2 のうちの個体サイズ（樹高、胸高直径）と積雪の履歴や脆弱性の指標とされる樹形因子（根元曲がり、形状比、枝下高率）の 5 因子とした。積雪に関連する樹形因子のうちの根元曲がりは雪圧害履歴に、形状比、枝下高率は冠雪害に対する脆弱性と関連が深い。モデルの確率分布は二項分布（log link 関数）とし、ランダム要因は林分とした。そして AIC（赤池情報量規準）を用いてモデル選択を行った。GLMM によって求められる因子型変数のパラメータ推定値は、事前に定められた基準の水準に対する値が推定される。すなわち、基準

となる水準以外の水準のパラメータ推定値が求められ、その値が正の場合には、基準の水準より応答変数の推定値が大きくなる傾向を、負の場合には小さくなる傾向があることを示す。表 4-3 に示した因子型変数の基準となる水準はそれぞれ東向き斜面 (E) , 平衡斜面, BD 型土壌である。

また、階層別の被害をうける可能性を検討するために、上層木である A 級木と被圧木である B 級木について、それぞれの被害形態の有無を応答変数とし、GLMM を構築した。すなわち、応答変数は、各個体に無被害、幹曲がり、梢端折れ、幹折れ、枯れの特徴があるかないか、説明変数は、A 級木であるかないかおよび B 級木であるかないかとし、モデルの確率分布は二項分布で、ランダム要因は林分とした。そして、GLMM によって得られたパラメータ推定値からオッズを求めた。この場合のオッズは、A 級木であること（あるいは B 級木であること）がある被害形態をもつ確率に対する影響の大きさを示す。たとえば、無被害について検討する場合、オッズは無被害の個体が (A 級木である確率) / (A 級木以外である確率) を表し、値が大きいほど A 級木である確率は高くなる。

さらに、それぞれの被害形態が形成されやすい立地要因を明らかにするために、被害形態が形成された個体の確率（以後、被害形態の形成確率）を応答変数とし、GLMM を構築した。応答変数は、林分内の全立木本数に対する無被害、幹曲がり、梢端折れ、幹折れ、枯れの被害形態の本数とした。以後これらの応答変数を無被害木確率、幹曲がり確率、梢端折れ確率、幹折れ確率、枯死木確率とする。モデルの確率分布は二項分布 (logit link 関数) とし、ランダム要因は林分とした。そして AIC (赤池情報量規準) を用いてモデル選択を行った。GLMM の説明変数は、表 4-2, 3 の 8 因子とした。すなわち、林分の発達に関

する基本情報としての林齢，地位指数，立地要因としての標高，斜面方位，土壌型，斜面形状，傾斜，最深積雪である。

これらすべての統計解析は，R ver. 2.12.2 (The R Project for Statistical Computing 2011) を用いて行った。

4-2-4.結果

表 4-9 に立木の被害形態に及ぼす個体サイズと樹形の影響について，GLMM で解析した結果を示した。個体サイズ，根元曲がり，形状比，枝下高率は，物理的被害の受けやすさに影響を与えていた。特に樹高は幹曲がり，梢端折れ，幹折れ，枯死のいずれの被害形態においても負の景況を持っており，樹高の低い個体は物理的被害を受けやすいといえた。

雪圧害履歴を反映する根元曲がりは幹曲がりに正の効果が，冠雪害に起因することが多い梢端折れや幹折れには負の効果があつた。一般的に冠雪害の脆弱性の指標とされる枝下高率も梢端折れ，幹折れに負の効果があつた。したがって，従来から幹曲がりは根元曲がりから立ち直る過程で生じることや，枝下高率が高いほど冠雪害に対する脆弱性は高まることは認識されており，本結果はこれら従来認識を裏付けていた。

同様に冠雪害に対する脆弱性の指標とされることの多い形状比は，無被害，梢端折れに負の効果が，幹曲がり，幹折れに対しては正の効果があつた。すなわち，形状比の低い個体は無被害か梢端折れが形成されやすく，形状比の高い個体は幹折れ，幹曲がりが形成されやすいと言えた。これらの結果から，冠雪害の起きやすさに対して形状比が与える影響は一定ではなく，したがって冠雪害に対する脆弱性の指標としては，成熟期においては適切ではないと言えた。

さらに、表 4-9 の結果を被害形態別にみると、無被害木には樹高、胸高直径が正の、根元曲がり、形状比、枝下高率が負の効果を持っており、AIC 最小モデルでもすべての因子が選択された。すなわち、個体サイズが大きく、根元曲がり、形状比、枝下高率が低い個体は物理的被害の影響を受けにくいといえた。

幹曲がりに対しては、樹高が負の効果、その他のすべての因子には正の効果があり、AIC 最小モデルでは胸高直径は選択されなかった。すなわち、幹曲がりには樹高が低く、根元曲がり・形状比・枝下高率の大きい個体に形成される傾向があった。

梢端折れに対しては、胸高直径以外の因子が正の効果を持っており、AIC 最小モデルでもすべての因子が選択された。

幹折れには、根元曲がり以外のすべての因子に負の効果があり、AIC 最小モデルに樹高は選択されなかった。すなわち、直径が細く、根元曲がり小さく、形状比が高く、枝下高率が低い個体が幹折れをしている傾向があった。

枯死木は樹高、形状比が負に、その他の因子は正の影響をもっていた。AIC 最小モデルでは、胸高直径、根元曲がりには選択されなかった。すなわち、樹高と枝下高率が低く、形状比が高い個体が枯死している傾向があった。

表 4-10 にそれぞれの被害形態に対する上層木 (A 級木) と下層木 (B 級木) のオッズを示した。この結果から、無被害木は A 級木である確率が高く、その他なんらかの被害形態を持つ個体は A 級木以外の階層の個体であった。また、幹曲がり木は B 級木である確率が高かった。

表 4-11, 12 に各林分における被害形態別本数確率に影響を及ぼす林分因子について、

GLMM で解析した結果を示した。無被害木確率に対しては、地位指数は正の、標高および平衡斜面以外のすべての斜面形状は負の効果がある因子として選択された（表 4-12）。すなわち、無被害木確率は、地位指数が高く、標高が低い平衡斜面でより高い傾向があった。また、林齢および最深積雪の影響は顕著ではなかった。

幹曲がり確率に対しては、標高は正の、地位指数と最深積雪は負の効果がある因子として選択された。また、B_D(d)型土壌には負の、B/D 型土壌には正の効果があった（表 4-12）。すなわち、幹曲がり木は地位指数が低く、標高が高く、最深積雪が少なく、B/D 型の土壌の林分で高かった。また、林齢の影響は顕著ではなかった。

梢端折れ確率に対しては、標高、最深積雪が正の効果がある因子として選択された。また、B_D(d)型土壌は負の、B/D 型土壌は正の効果があった（表 4-12）。すなわち、梢端折れ確率は標高、最深積雪が大きく B/D 型土壌の林分で高かった（表 4-12）。しかしながら無被害木、幹曲がり確率に効果があった地位指数は選択されず、地位と関係の高い土壌型の効果についてもすべての因子を投入したモデル（表 4-11）と、AIC 最小モデル（表 4-12）で正と負逆の効果が認められ、梢端折れの形成に対する地位の影響は明瞭ではなかった。また、林齢の効果も顕著ではなかった。すなわち、梢端折れの形成には降雪量の影響があった。

幹折れ木確率に対しては、最深積雪が正の効果があった。また、B_D(d)型土壌は正の、B/D 型土壌は負の効果があり、斜面形状は複合型と凹型斜面が正の、凸型斜面で負の影響があった（表 4-12）。この凸型斜面については、すべての因子を投入したモデルと AIC 最小モデルでは正と負が逆の傾向を示していること（表 4-11, 12），AIC 最小モデルの推定値が

小さいことから、影響力は大きくないと考えられる。また、地位指数、林齢は選択されなかった。以上のことから、幹折れ木は最深積雪が多く、凹型や複合型の局所的に積雪量が多くなりやすい地形で、地位の低い $B_D(d)$ 土壌の林分に発生する確率が高いと言えた。

枯死木確率に対しては、林齢と地位指数が正の、標高と最深積雪が負の効果を持っていた。すなわち、林齢と地位指数が高く、標高と最深積雪が少ない林分で枯死木がより多く林分内に残存していた。

4-2-5. 考察

本研究の結果から、無被害の個体は、より樹高と胸高直径が大きい個体であり（表 4-9）、上層の A 級木である傾向があった（表 4-10）。

無被害木はまた、根元曲がり小さく、枝下高率が低く、形状比が高い個体だった（表 4-9）。そして、無被害木確率は、地位指数の高い林分で高かった（表 4-11, 12）。すなわち、地位指数が高い林分は物理的被害を受けにくい傾向にあると言える。また、この傾向に対する林齢の影響はより大きいとは言えず、林齢の経過によって上層木が深刻な物理的被害を受ける可能性は低いと考えられた。

一方で幹曲がり木は、樹高、形状比、枝下高率が低く、胸高直径が大きい傾向があり（表 4-9）、下層の B 級木に多く認められた（表 4-10）。そして、林分内で幹曲がり確率には、地位の低さに関連する因子の影響が大きかった（表 4-11, 12）。一般的に幹曲がりは、若齢期に雪圧の影響により形成される。しかしながら、成熟段階においては最深積雪に負の影響が認められたこと、傾斜の影響は不明瞭だったことなどから（表 4-11, 12）、雪圧よりも地位指数、樹高など上長成長の影響がより大きいと考えられる。

梢端折れは、樹高がより低く、胸高直径が大きく、根元曲がり、形状比、枝下高率が低い個体に多く発生している傾向があった（表 4-12）。この傾向は無被害木との共通点が多く、相違点は樹高の影響が負である点だけであった。梢端折れ個体の場合、本来の樹高は障害のため計測できないことが普通である。したがって、個体サイズを代表する指標としては樹高よりも胸高直径の方が適当である。そして胸高直径は梢端折れに対して胸高直径は正に影響しており、個体サイズの大きい個体にも梢端折れが発生すると推測できる。また、林分内の梢端折れ木の確率は、地位指数よりも最深積雪が大きく影響していた（表 4-12）。以上のことから梢端折れは、個体サイズが大きい林分でも、最深積雪が大きい地域では発生しやすい傾向があると考えられた。すなわち、冠雪の荷重による折損は、折損部位の太さが一定しているため、樹高が高い個体ほど被害部位は梢端に近づく（藤森 1987）ためと考えられる。

そして、幹折れと枯死木については、樹高や直径が小さく、形状比が高く、枝下高率が低い個体に多く発生する傾向が認められた（表 4-9）。すなわち、被幹折れ木、枯死木ともに被圧木に多く発生する傾向が共通していた。これらの本数確率に影響する立地条件はそれぞれ異なり、幹折れ木は最深積雪が多く、地位の低い林分に、枯死木は地位指数と林齢が高く、最深積雪と標高が低い林分に多く存在していた（表 4-12）。したがって、いずれの被害形態も小サイズ個体に多い形態であるが、サイズの小ささに影響する要因は異なると言える。すなわち、幹折れ木は立地の生産力が低いために成長が劣る個体が降雪によって折損することによって生じていたことに対し、枯死木は林齢と地位指数が高い林分、すなわちより成熟段階が進んだ林分において成長の遅れた個体が被圧によって枯死すること

によって生じたことを示唆していると考えられる。以上のように、標準伐期齢を超える林分における物理的被害の発生要因は被害形態によってそれぞれ異なっていた。しかしながら、よりサイズの大きな個体は被害を受けにくく、個体サイズの小さい被圧個体が被害を受けやすいこと、林齢の影響は明瞭ではないことは共通していたといえる。

そして、無被害木の確率に影響している立地要因は、地位指数、標高、斜面形状であった(表 4-11)。標高は、新潟県の地位指数を推定するスコア表や既存の研究(大塚ら 2009; 新野・阿部 2009)から、地位指数と負の関係にある因子であり、物理被害の発生に対してもっとも影響が大きい要因は地位であった。

上記のことから、三章の結果と同様に、伐期延長によって主林木が深刻な冠雪害をうける可能性は低いと考えられる。しかしながら、下層木は冠雪害に対して脆弱な樹形であることが多いため、希な大雪などの気象条件が生じた場合には、林分内の形状比が高い個体に今後も冠雪害が発生する危険性がないとは言えない。すなわち、被圧木は林分内に多く存在することは、経営上不利であると考えられた。

第五章 雪圧害履歴のあるスギ人工林の密度管理図の適用

5-1. 目的

林分密度管理図（林野庁 1999）は、収量比数を使用した間伐計画の立案に広く用いられている（藤森 2010）。この林分密度管理図の基本になっている密度効果の法則は、林分密度以外の生育条件が同一であることを前提としている。ところが、雪圧害により林分の生育条件が変化する林分では、原理的に推定誤差が生じる可能性がある。そこで、雪圧害に起因する下層木集団が存在する林分では、構成木のサイズ分布を定量的に把握し、林分密度管理図を補正して使用する必要がある。

本章では、胸高直径分布の特性が林分密度管理図の推定精度に及ぼす影響を検証し、林分密度管理図を使用する際の補正方法について検討を加える。

5-2. 調査地と調査方法

調査は、第三章と同様に新潟県の代表的な林業地のひとつである下越森林計画区の民有林で行った。この地域は、最深積雪 50 cm未満から 200 cm以上の山地までスギ人工林が分布している。

この計画区では、同一の施業基準が定められていることから（新潟県 2011b）、施業方法に大きな違いはない。標準伐期齢は 45 年、植栽密度は 2,500 ～ 3,000 本 / ha（新潟県 2011b）で実生苗の使用が一般的である。

調査林分は最深積雪 100～250 cm の地域から 35 林分を選んだ（図 3-1, 表 3-1）。この地域を、1969～1998 年度の年最深積雪の累年平均値（新潟県 1999）により、経済林成立の基準である最深積雪 150 cm（横井・山口 2000）以上の多雪地とそれ未満の少雪地に区分

した。調査林分のうち多雪地に成立していた林分は 28 箇所、少雪地に成立していた林分は 7 箇所であった。なお、最深積雪の値は、図 2-1 の 1969～1998 年度の年最深積雪の累年平均値（新潟県 1999）から推定した。

新潟県の森林簿から得られた林齢は 25～105 年生であった。また、多雪地では雪圧害のため植栽木の現存量が極端に低く、広葉樹の定着が顕著な不成績造林地の存在が知られているが（小野寺 1990；長谷川 1991；長谷川 1998；豪雪地帯林業技術開発協議会 2000；横井 2000；小谷 2004；藤森 2006；和田ら 2009，他多数）。本研究では比較的林冠閉鎖の進んでいる林分を対象として調査を行った。そのため、調査した林分のうち、樹高 2 m 以上の広葉樹が定着していた林分は 10 林分のみで、胸高周囲長 5 cm 以上の広葉樹の出現状況は、本数密度の平均値と標準偏差が 3.8 ± 8.7 本/ha、断面積合計の平均値と標準偏差が 0.29 ± 0.86 m² / ha である。

調査プロットは各林分に一カ所とし、尾根付近や沢筋を避け、傾斜などの地形要素に著しい違いがなく、かつ、林縁効果が及ばないように設定した。調査プロットの面積は 1600 m²とし、そのうちの二林分は地形等の制限により 900 m²と 2000 m²とした。プロットの形状は原則として 40×40mを基準とし、地形などの関係で方形配置に制約があった場合には、面積を変えずに 10×10mの小区画を非方形に配置した。毎木調査は、全ての植栽木を対象として行い、樹高、胸高周囲長、樹冠長、根元曲がり、樹形級を記録した。根元曲がりは地上 1.5mの高さでの幹の水平方向へのずれの長さとし、樹冠長は樹高から枝下高を差し引いた長さとした。樹形級は、優勢で上層木集団を形成する A 級木、被圧木である B 級木、梢端折れや二又などの被害のある C 級木とし、いずれも生残木を対象とした。枯損・幹折

れ木はその本数を集計した。

林分材積の実測値は、生残木の個体幹材積を林分ごとに積算して求めた。以後、これを理論材積とする。なお、個体幹材積は、新潟県の高齢級個体を加味した以下の(1)式(塚原 2005)に、毎木調査による胸高周囲長から求めた胸高直径と樹高を代入して求めた。

$$v = d^2 \cdot h / (23436.15 + 150.34 \cdot d) \quad (1)$$

v : 個体幹材積 (m^3) , d : 胸高直径 (cm) , h : 樹高 (m)

5-3. 解析

林分構成木のサイズ分布特性や積雪が林分密度管理図による推定林分材積と理論材積との差にもたらす効果を明らかにするために、一般化線形モデル(以下、GLM)を構築し、AIC(赤池情報量規準)を用いてモデル選択を行った。モデルで使用した確率分布はガンマ分布(log link 関数)で、応答変数は理論材積との誤差率、説明変数は表 3-2 の要因のうち林齢、理論材積、平均根元曲がり、上層木の本数率および胸高直径の歪度の 5 要因とした。通常、林分密度管理図を用いる際に除外する枯損・幹折れ木密度は、説明変数から除外した。さらに、他の変数と相関の高かった生残木の本数密度および上層木の平均胸高直径、平均形状比、平均樹冠長も説明変数から除外した。なお、説明変数の上層木の本数率は、林分ごとの生残木数に対する上層木数のパーセンテージであり、GLMM の応答変数として使用した上層木確率とは異なる。

推定林分材積は、生残木の平均樹高と本数密度とを裏東北・北陸地方スギ林分密度管理図(林野庁 1999)の(2)式に代入して求めた。なお、一般的に樹高は被圧木、枯損木を除いて推定した上層樹高を用いる(林野庁 1999)。しかしながら、被圧木を分離する定量的

な基準は明確でなく、上層木と B 級木とを定量的にわけることができない。さらに、先に述べたように下層木を被圧と被害の起源によって区別する基準はなく、やはり定量的にわけることができない。本研究の目的は生じうる推定誤差を検証することにあるので、生残木の平均樹高と本数密度とによって推定される林分材積を求めることとした。

$$Ve = (0.060047 \cdot H^{-1.352337} + 3743.3 \cdot H^{-2.824828} / N)^{-1} \quad (2)$$

Ve : 推定林分材積 (m³ / ha) , H : 平均樹高 (m) , N : 本数密度 (本 / ha)

推定林分材積の推定誤差および誤差率は、(2) 式によって得られた推定林分材積と、実測林分材積を (3), (4) 式に代入して求めた。

$$Dv = Ve - Va \quad (3)$$

$$Dr = (| Ve - Va |) / Va \cdot 100 \quad (4)$$

Ve : 推定林分材積 (m³ / ha) , Va : 理論材積 (m³ / ha),

Dv : 推定林分材積の推定誤差 (m³ / ha) , Dr : 推定林分材積の誤差率 (%)

また、すでに林分密度管理図には、推定林分材積と理論材積との誤差を補正する (5) 式が示されており (林野庁 1999; 竹内, 2005) , この補正式 (5) を使用して推定林分材積 (Vc) の誤差率(Drc)を求めて、補正前の誤差率(Dr)と比較した。

$$Vc = Ve \cdot (BAa / BAe) \quad (5)$$

Vc : 補正後の推定林分材積 (m³ / ha) , Ve : 推定林分材積 (m³ / ha) , BAa : 林分調査による胸高断面積 (m² / ha) , BAe : 林分密度管理図による推定胸高断面積 (m² / ha)

さらに、より簡便な推定を行うために、定量的な上層木の判別基準を検討した。雪圧害の発生している若齢段階のスギ人工林の本数密度を調査した野表(1989)は、雪圧害多発期

を超えた林分において、その後の成長によって林冠を閉鎖できる健全木密度が確保されていけば、一斉単純林としての管理が可能との考えを示している。また、広葉樹施業の主木と副木や長伐期林業地における永代木など、大きい個体、形質の良い個体を選抜し育成する方法が一般的であり、その適正密度については相対幹距が有効な指標となる（高橋・竹内，2007）。そこで、これを応用して定量的な基準を設定することとした。すなわち、あらかじめ収穫林齢を想定し、計画樹立時の林齢と上層樹高を地位指数曲線に代入し、対象林分の収穫予定時点での到達樹高と目標密度を定める方法である。以後、想定した収穫林齢を想定伐期、収穫予定時点での到達樹高を予想最大樹高、そしてそのときの密度を目標密度とする。収穫林齢は任意で定め、目標密度も最多密度を超えない範囲で任意である。本研究では、目標密度を 100 年生とし、目標密度は適正密度として一般的に用いられる相対幹距を基準として定めることとした。すなわち、吉野地方の長伐期人工林の相対幹距 13～20%（高橋・竹内 2007）に基づき、相対幹距=20 となる密度を目標密度とした。そして、樹高順位が目標順位以内の個体を収穫対象、それ以外の個体はその他とした。そして、収穫対象木と全生残木を対象とした場合の林分密度と材積を比較、検討した。さらに、胸高直径と根元曲がりについても収穫対象木とそれ以外の個体との比較を行い、樹高順位を基準とした選木の有効性を検討した。

これらすべての統計解析は、R ver. 2.12.2 (The R Project for Statistical Computing 2011) を用いて行った。

5-4. 結果

表 5 -1 に林分密度管理図における推定林分材積の誤差率に影響を及ぼす林分因子につい

て、GLM で解析した結果を示した。説明変数として平均根元曲がりを選択され (AIC = 282.2) , 正の効果があった。さらに AIC が二番目に小さいモデルには、負の効果をもつ上層木の本数率が選択された (AIC = 283.3) 。

図 5-1 に生残木の理論材積と推定林分材積 (Ve) および補正後の推定林分材積 (Vc) との関係を示した。推定林分材積の誤差率 (Dr) の平均値と標準偏差は 23.9 ± 12.6 %であった。このときの推定誤差 (Dv) は第 3 四分位までが負であったことから、最低でも 75% の林分で林分密度管理図による推定林分材積は過小であると推論できる。一方、補正後の推定林分材積 (Vc) の誤差率 (Drc) の平均値と標準偏差は 5.4 ± 4.2 %に低下した。このときの推定誤差 (Dvc) は、最小値から第 1 四分位までが負で過小推定、中央値から最大値までが正で過大推定であった。

上層木の本数率は誤差率 (Dr) に対して負の効果があった (表 5-1) ことから、上層木に限定して林分材積の推定値を求めることにより、推定林分材積の誤差率は低下する。そこで、図 5-2 に生残木の理論材積と上層木の平均樹高(H')と本数密度(N')を(2)式に代入して求めた推定林分材積(Ve')および補正後の推定林分材積(Vc')の関係を示した。その結果、推定林分材積(Ve')の誤差率(Dr')の平均値と標準偏差は 11.4 ± 8.6 %に低下した。このときの推定誤差(Dv')は最小値から中央値までが負で、最低でも 50% の林分が過小推定であった。さらに補正後の推定林分材積の誤差率(Drc')は平均で 5.7 ± 2.9 %に低下した。

図 5-3 に地位指数曲線と相対幹距から求めた収穫対象木の本数密度の頻度分布を、図 5-4 に林齢と収穫対象木の本数率との関係を示した。本研究の調査対象となった林分の収穫対象木の密度は最小 100 本/ha, 最大 338 本/ha, 平均 189 本/ha であった。また、その本数

率、材積率は林齢とともに上昇し、100年生時の平均値は本数率で32%、材積率で22%となった(図5-5, 6)。

図5-7に林齢と収穫対象木および全生残木の平均胸高直径との関係を示した。線形回帰式の回帰係数は、収穫対象木に限定した場合には0.319であったのに対し、全生残木を含めた場合には0.191と小さく、収穫対象木とその他の個体と直径の差は林齢にともなって拡大していた(図5-7)。この式から求めた林分平均直径の想定伐期(100年生)での予測値は、収穫対象木に限定した場合には55.6 cmで、全生残木を対象とした場合の37.5 cmに対して1.5倍の差が認められ、上位木から選木することにより収穫時の出材サイズをよりの確に予測できると考えられた。

図5-8に収穫対象木および全生残木生産木についての根元曲がりの林分平均値の頻度分布を示した。収穫対象木として選定された個体の根元曲がりの平均値はほとんどの林分で60 cm以下となり、その他の個体と比較して小さかった。したがって、樹高順位の上位木から選木することで曲がりの少ない個体も選抜できると言えた。

5-5. 考察

林分密度管理図の推定精度を検証した。表5-1の結果から推定林分材積の誤差率は、根元曲がり大きい、すなわち雪圧害の影響が強い林分において高かった。さらに、二番目にAICが小さいモデルに、上層木の本数率が負の要因として選択された。すなわち、雪圧害と引き続く管理によって生じた下層木集団の存在は推定誤差を大きくする要因であった。

本結果から生残木全ての林分密度管理図の推定林分材積は理論材積より過小に推定されることが明らかとなった(図5-1)。竹内(2005)によれば80年生以上のスギ人工林の調査

でも推定林分材積は過小推定になることが報告されている。また、本結果の平均誤差率 23.9%という値はその報告の平均誤差率 22.7%と同程度であったが、誤差率の標準偏差は 12.7%と、その報告の 9.5%に比べて大きく、材積推定値の精度のばらつきが大きいことが分かった。先に述べたように、推定誤差を大きくする要因は雪圧害と引き続き管理によって生じた下層木集団の存在であり、競争以外の雪害などの影響によって歪度が正になるような下層木集団が存在する林分では上層木比率が低下するので、材積推定には注意が必要である。

これらの結果を受けて、林分密度管理図の補正方法を検討した。林分調査から得られた断面積合計を用いて補正（林野庁 1999）することにより、全立木を対象とした推定林分材積の誤差率は平均 5.4 ± 4.2 %に低下した（図 5-2）。一方で上層木に限定して推定した場合には、誤差率の平均は 5.7 ± 2.9 %になり、ばらつきがより低下した（図 5-2）。したがって、下層木比率の高い積雪地の林分においても断面積合計によって推定値を補正することができ、さらに対象を上層木に限定することにより推定精度を向上させることができる。この上層木に限定して補正する方法は、林分単位で上層木の混み方の指標を得る必要がある間伐計画の樹立の際などに有効である。

さらに、具体的な管理計画策定のために、想定伐期を 100 年としたときの収穫対象木の本数密度を求めた結果、調査林分の収穫対象木の本数密度は最小 100 本/ha, 最大 338 本/ha, 平均 189 本/ha となった。これと比較するための、高齢林の収穫密度の実例としては吉野地方の 153 年生 164 本/ha, 相対幹距 21 (高橋・竹内, 2007) があげられる。また, Masaki *et al.* (2006) は、長伐期施業で林分の総収穫量を最大限にする個体間の距離を 8m 以下とし、

間伐はそれ以下の距離を保つべきだとしている。これは概算すると吉野林業の密度とほぼ同等で、156本/haに相当する。これらと比較すると、本研究の調査地から抽出した収穫対象木の本数密度も平均的にはほぼ同等と考えられる。一方で、野表(1989)は、若齢段階の調査により一斉単純林として管理可能な林分の条件として、健全木密度が300本/ha以上であることを提示しているが、ほとんどの本研究の調査林分の収穫対象木密度は300本/ha以下であった。すなわち、地位によってはそれよりも低い本数密度でも十分閉鎖できる可能性があることが示されたと言える。

さらに、第三章の結果から、上層木の平均林分密度が513本/ha(表3-2)と収穫対象木密度を20%以上上回っていたことから、択伐によって長期に育成・管理することも可能と考えられる。そして、その際の選木の基準として樹高順位を用いることで、根元曲がりの少ない個体が選定でき(図5-4)、収穫時直径の予想もより明確になった(図5-5)。第三章の結果から上層木の配置は不均一でも緊密度も高くはないことが示されていることから、樹高順位によって収穫対象木を決定する方法は、選木の基準として有効であると考えられる。

一方で、吉野地方のスギ大径材生産林の管理基準(高橋・竹内2007)では、択伐木は収穫対象木の配置が均等となるよう配置され、このことが陽樹冠量の制御に有効であることが報告されていることから、択伐によって均等配置になるよう誘導することは経営上さらに有利な効果をもたらすと考えられる。

なお、下層に分布する被圧木は、現存量の推定精度を下げるだけでなく、第四章の結果から物理被害を受けやすいことも明らかになった。光の獲得競争においては上層木の妨げにならないが、土壌水分などの競争が上層木と下層木の間に双方向で生じることが高齢級

林分においては報告されている (Masaki *et al.* 2006)。また、これらが林分内に残存していると支障木として収穫時の経済的価値に影響する。したがって、択伐や間伐の際に除去することが望ましい。

第六章 総合考察

6-1. 多雪地における林分成立過程

6-1-1. 雪圧害がサイズ分布へ及ぼす影響

成熟段階のスギ人工林のサイズ分布特性を解析した結果、雪圧の影響がより強い林分において少数の上層木と多数の下層木によって構成される連続的な分布が形成され、そのサイズ差は林齢の経過とともに拡大する傾向があることが示された。

すなわち、雪圧による被害は、植栽木の樹高が最深積雪の2～2.5倍になるまでは(四手井ら, 1950) 毎年埋雪し続けることによって拡大する。樹高成長の遅い個体は、根元曲がりも大きく(阪上・平, 1986)、根元曲がりの大きい個体は受ける雪圧も大きい(小野寺, 2000)。したがって樹高成長の遅い個体は、より長期間埋雪し続けるため成長の抑制がより長く続き(野表, 1992)、この樹高成長の上下関係が逆転することはない(小野寺, 2000)。したがって、これら雪圧によって成長を著しく障害された個体と比較的軽い障害しか受けなかった個体との間の樹高成長の差は、個体間の成長速度の差以上に拡大し、埋雪しなくなった後にも一方向的競争効果によって引き続き拡大すると考えられる。そして、その結果、雪圧害の影響が少ない林分にくらべてより多くの個体が下層木となるが、それらは上層木の成長を妨げないため、間伐などによって除去されずに取り残される可能性が高いことから、その結果としてサイズ差の広い林分構造が形成されると考えられる(図3-2,3-3)。

6-1-2. 樹形と立木配置に対する影響と緊密度に関する考察

本論において、成熟段階における上層木の空間分布の不規則性は、下層木集団の比率が高い林分で林分の発達とともに拡大する傾向があった(表3-5)。すなわち、雪圧害の影響

のより大きい林分では、成熟段階においても上層木の空間配置には偏りが継続していたといえる。すなわち、雪圧の影響により上層木間の競争は緊密にならないまま推移してきたと言え、その結果として、樹高、胸高直径が大きく、樹冠長率が高い樹形が形成されていたと考えられる(表 3-5)。したがって、上層木の上長成長のピークを過ぎた成熟林分においては、樹高成長によって将来上層木間の競争が緊密になる可能性は低く、また、高い樹冠長率によってその後の肥大成長が期待できることから、伐期延長によって大径材生産林への誘導が可能と考えられた。

一方、樹形に関しては、成熟段階においても平均形状比と平均根元曲がり有意に大きく(表 3-5)、幼齢期の形状比と根元曲がりに関する傾向(四手井ら, 1950; 平, 1985; 野表, 1986 ほか多数)は成熟林分においても継続していた。したがって見かけ上の曲がりの低下(田邊・小野寺, 1994; Lindström and Rune, 1999; 小野寺, 2000)は十分ではなかった。

6-2. 高齢級林分への誘導モデル

6-2-1. 肥大成長および被害回避に対する地位選定の重要性

長伐期化の目標林型の一つに伐期の延長によって大径木生産林への移行に適した立地・気象要因について検討するために、長伐期施業の標準伐期齢を超えた林分の大径木密度と物理的被害の発生状況を明らかにした。その結果、林分の大径木化に影響する因子は、地位指数が高く、最深積雪の大きいことであった(表 4-4, 5)。成熟段階の林分の発達や資源量に関しては、林齢よりも地位の影響が大きいといえる。最深積雪も一定の影響が認められるが、高齢級化の過程での影響は、林分成立段階での影響よりも顕著ではなかった。

また、物理的被害の発生傾向は、被害形態によって異なったが、よりサイズの大きな個

体は被害を受けにくく、個体サイズの小さい被圧個体が被害を受けやすいことと、林齢の影響は明瞭ではないことは共通していた。

上記のことから、肥大成長の維持だけでなく物理的被害の受けにくさという観点においても、地位選定の重要性が再認識されたと言える。

6-2-2.物理的被害の発生傾向を考慮した林分管理

これまでの高齢級林分での降雪に起因する物理被害に関する研究から、高齢級林分でも形状比 70 以上の林木では冠雪害を受ける危険性があると指摘されてきた（國崎 2005）。また、冠雪によって折損する頻度が高い直径は 15 cm（藤森ら 1987）とされている。これらの冠雪害を受けやすい個体の形態的特徴に対して、上層の A 級木は林分の平均形状比は 70 以下と十分低く（表 4-7）、平均直径も 40 cm（表 4-7）と、十分太かった。すなわち、十分堅牢である特徴を備えていたと言える。その一方で下層の B 級木の形態は、林分の平均形状比が 70 以上、平均胸高直径も 23 cm と十分太いとは言えなかった。以上のことから、上層木は上層を形成している主林木が降雪に起因する深刻な物理被害を受ける可能性は低いと考えられたが、下層木には今後も物理被害が発生する可能性がある。すなわち、被害を受けやすい被圧木は除去する方が経営上有利であると考えられた。

6-2-3.地位級別資源量を考慮した資源管理計画策定の必要性

序論で述べたように新潟県には広い面積のスギ人工林が成熟段階に入っている。そのため間伐、択伐が施策として推進されてきた。しかしながら、労働人口や木材需要などとのバランスにより、すべての人工林を均一に管理することは困難と考えられる。すなわち、合理的な管理計画を樹立するためには、管理すべき人工林の優先度を検討することが望ま

しい。また、今後とも高齢級化の進行にともなってし、大径木の資源量が多くなることが予想され、将来予想される必要大径材の搬出に適した出材方法の検討やインフラの整備、需要の醸成・喚起が求められるだろう。

既に述べたように、地位が高い林分や中位の地位で積雪の多い立地の林分では肥大成長が旺盛で、将来的に物理被害を受ける可能性も低いことから、これらの立地に成立する林分は林齢の経過とともに直径・蓄積の増加速度が速いと考えられ、優先的に管理される必要がある。一方で、林齢が若く雪圧害の発生しにくい林分では、従来通りの密度管理を、地位が低い林分は広葉樹との混交林などへ誘導するなどの管理方針を作成することが適切と考える。

現在、林業の資源管理の問題点として、偏った齢級組成に焦点があてられていることが多いが、林分単位の発達段階に応じた管理計画を立てるためには、地位の偏りにも着目するべきと考える。特に新潟県の地域森林計画では、中位の地位に分類されている林分が大半であることから、その細分化とそれを基準とした計画策定が有効と考える。

近年では数値標高モデル（以下 DEM）の公開がすすみ、地理情報システム（以下 GIS）によって地形因子を取得することは比較的容易で、今後も詳細なモデルの公開が期待できる。現行の資源構成表の地位級もスコア表をもとに算出されているものであるが、この DEM は地位の推定に有効（Zushi 2007; 大塚ら 2009）と考えられることから、今後、これらを利用してより詳細な推計を行い、長期育成する林分を抽出、管理してゆくことが重要と考える。しかしながら、影響が大きいもうひとつの因子である最深積雪は、これを計測している気象観測点の数が少なく、計測も困難である。今後、より詳細な推定方法が確立される

ことが期待される。

6-3. 雪圧害の影響を考慮した資源量推定方法

林分密度管理図の推定精度を検証した結果、本結果から生残木全ての林分密度管理図の推定林分材積は理論材積より過小に推定されることが明らかとなった（図 5-1）。推定誤差を大きくする要因は雪圧害と引き続く管理によって生じた下層木集団の存在であり、競争以外の雪害などの影響によって歪度が正になるような下層木集団が存在する林分では上層木比率が低下するので、材積推定には注意が必要である。特に、将来の目標林型の設定や管理計画樹立のためには地位指数曲線から将来的な収穫対象木密度を決定しそれらを管理対象とすることで対応できる。

第七章 まとめ

本研究では、成熟林分の林分構造の解析から、雪害後の林分成立過程の解明（第三章）と、資源量の把握の方法を試みた（第五章）。そして、伐期延長による大径木林への誘導可能性や降雪に起因する物理被害の可能性について森林現況と立地環境から検討を加えた（第四章）。調査した林分の施業履歴は不明であり、その立地条件の範囲も、成長の良い林分はすでに主伐され、またより雪圧害の大きい林分は除外されている可能性が高いことから、植林範囲より狭いと考えられる。このような制約のもとではあるが、当初目的とした林分成立過程の解明と将来予測について、一定の結果を見いだすことができたと考える。すなわち、雪圧害の影響は成熟段階の林分構造に影響を与えていることが明らかになった。すなわち、広いサイズ分布の形成とそれによる上層木間の競争緩和である。その結果、高い樹冠長率が維持され、形状比も低くなった（第三章）。雪圧害の影響によって生じた根元曲がりの大きさは十分解消されたとは言えなかったが、肥大成長が旺盛な小さく（第五章）、今後の肥大成長による見かけ上の曲がりの軽減は期待できると考えられた。すなわち、伐期延長による長伐期大径材生産林への移行のしやすい林分構造が形成され、材質の向上などの利点も多いと考えられる。一方で、大径化や物理被害の受けにくさの観点から、地位の重要性が再認識された。成熟林分においては、雪圧による密度低下や林齢の影響よりも、地位の影響がもっとも大きいことが明らかになった。

本論ではこれらの結果を受けて、林分ごとの資源の正確な把握や管理計画の策定のための収穫木の定量的な選定方法を示した。まず、林分単位での資源量を正確に把握するための密度管理図の利用に関する注意点を示した。すなわち、推定精度を下げる要因となる下

層木を除外して推定する必要がある。その分離基準は明確ではないため、将来の収穫目標密度を定め、樹高順位が目標密度以内の個体を収穫対象木とすることで管理計画の樹立がしやすくなると考えられる。上層木の階層の緊密度は高くなく、また物理的被害も受けにくかったため、密度調整の緊急性は高くない。しかしながら、吉野地方の大径材生産林を参考にするならば、収穫対象木の立木配置を均等にするために、収穫対象木の近隣に同一階層の個体がある場合には、それらを優先的に択伐することがより良いだろう。また、林分の下層に分布する被圧木については、上層木の成長を大きく妨げることはないが、物理被害を受けやすく、上層木と双方向競争関係も生じることから、本数率が高い場合には除去することが望ましいだろう。

以上のように、多雪地の拡大造林地は多大な労力によって育成され、今後その資源量は増大するものとする。しかしながら、その特性は幼齢期に受けた雪圧の影響を残すものであり、これらの資源を有効活用するためには、地域の独自の資源の性質を深く理解し、利用・管理手法を開発してゆく必要があるだろう。

引用文献

阿部和時 (1998) 樹木根系の斜面崩壊防止機能. 森林科学22: 23-29.

赤井龍男 (1989) スギ不成績造林地の混交複層林化した林分の構造と成長. 日林論
100:255-256.

赤井龍男・古野東・真鍋逸平・上田晋之階層混交したスギ不成績人工林の構造と取り扱い方につ
いて. 京大演報61: 71-84.

赤井龍男・古野東州・真鍋逸平・上田晋之助・肥後幸男ら. (1990) 小雪地帯における階層混交し
た不成績人工林の構造と取り扱い方について. 京大演報62: 65-79.

栗田稔美・遠田武 (1986) 雪害回避を考慮した育林技術. 林試東北支年報27: 99-102.

Baig, M.N., Tranquillini, W. (1976) Studies on upper timberline: morphology and anatomy of
Norway spruce (*Picea abies*) and stone pine (*Pinus cembra*) needles from various habitat
conditions. *Can J Bot* 54: 1622-1632.

Baig, M.N., Tranquillini, W. (1980) The effects of wind and temperature on cuticular
transpiration of *Picea abies* and *Pinus cembra* and their significance in desiccation
damage at the alpine treeline. *Oecologia* 47: 252-256.

Boivin, S., Bégin, Y. (1997) Development of a black spruce (*Picea mariana*) shoreline stand
in relation to snow level variations at Lake Bienville in northern Quebec. *Can J Forest
Res* 27: 295-303.

Cameron, A.D., Dunham, R.A. (1999) Strength properties of wind-and snow-damaged stems
of *Picea sitchensis* and *Pinus sylvestris* in comparison with undamaged trees. *Can J*

Forst Res. 29: 595-599.

遠藤利明・田中利美・辻井辰男（1986）長伐期施業における育林労働投下量について. 日林論
97: 703-704.

Fayle, D.C.F. (1976) Stem Sway Affects Ring Width and Compression Wood Formation in
Exposed Root Bases. Forest Science22: 193-194.

Führer, E. (2000) Forest functions, ecosystem stability and management. Forest Ecol Manag
132:29-38.

Fujimori, T., Matsuda, M., Kiyono, Y. (1987) Stand structure and snow damage in relation to
stand age: Sugi [*Cryptomeria japonica*] plantations in Fukui prefecture [Japan] in the
1981 heavy-snowfall. J Jpn For Soc 69:94-104.

藤森隆郎（1987）人工林の被害形態. (冠雪害.わかりやすい林業解説シリーズ.石川政幸・新田隆
三・勝田 柁・藤森隆郎共著,林業科学技術振興所), 23-65.

藤森隆郎（1991）多様な森林施業. 全国林業改良普及協会, pp192.

藤森隆郎（2006）森林生態学: 持続可能な管理の基礎. 全国林業改良普及協会, pp480.

藤森隆郎（2010）間伐と目標林型を考える. 全国林業改良普及協会, pp191.

藤森隆郎・松田正宏・清野嘉之（1987）林齢に沿った林分構造と冠雪害の関係, 56 豪雪福井ス
ギ人工林. 日林誌69: 94-104.

豪雪地帯林業技術開発協議会（1984）雪に強い森林の育て方. 日本林業調査会, 170pp.

豪雪地帯林業技術開発協議会（2000）雪国の森林づくり. 日本林業調査会, 189pp.

長谷川幹夫（1991）スギ不成績造林地での下刈り, 除伐が広葉樹の定着に与える影響. 日林誌

73: 375-379.

長谷川幹夫 (1998) 多雪地のスギ造林地に侵入したウダイカンバの消長に及ぼす下刈り, 除伐の影響. 日林誌80: 223-228.

長谷川幹夫・平英彰 (2000) 多雪地帯のスギ造林地に侵入した広葉樹の種組成構造の特徴. 日林誌82: 28-33.

Hirayama, K., Sakimoto, M. (2003) Regeneration of *Cryptomeria japonica* on a sloping topography in a cool-temperate mixed forest in the snowy region of Japan. *Can J Forest Res.*33: 543-551.

石井弘・片桐成夫・三宅登 (1982) 冠雪によるスギ樹幹の折れ方について. 日林誌64: 87-92.

石井弘・片桐成夫・三宅登 (1983) 冠雪害をうけたスギ人工林の直径分布, 形状比分布と被害の関係. 日林誌65: 366-371.

石川政幸 (1983) 雪害. (新編スギのすべて. 坂口勝美監修, 全国林業改良普及協会.) .380-395.

石川正幸・新田隆三・勝田柁・藤森隆郎 (1987) 冠雪害発生の仕組みと回避法, わかりやすい林業解説シリーズNo.83. 林業科学技術振興所, 東京, 101pp.

石坂雅昭 (1995) メッシュ気候値から推定した日本の雪質分布. 雪氷57: 23-34.

石塚森吉・宇都木玄 (1995) スギ不成績造林地における針広混交林化の実態. 日林論47: 39-40.

Jalkanen, A., Mattila, U. (2000) Logistic regression models for wind and snow damage in northern Finland based on the National Forest Inventory data. *Forest Ecol Manag.*135: 315-330.

Jones, H.G., Pomeroy, J.W., Walker, R.W., Hoham, D.A.: *Snow Ecology, An interdisciplinary*

examination of snow-covered ecosystems. 378pp, Cambridge University
Press, Cambridge., 2001

嘉戸昭夫 (2000) スギ人工林における冠雪害抵抗性の推定とその応用に関する研究. 岩手大学.

Kato, A., Nakatani, H. (2000) An approach for estimating resistance of Japanese cedar to
snow accretion damage. *Forest Ecol Manag*135: 83-96.

Khuder, H., Stokes, A., Danjon, F., Gouskou, K., Lagane, F. (2007) Is it possible to
manipulate root anchorage in young trees?. *Plant and Soil* 294: 87-102.

気象庁 (2002) メッシュ気候値 2000. 財) 気象業務支援センター, 東京 (CD-ROM).

小谷二郎 (1988) 多雪地帯における不成績造林地の改良に関する研究 (I) - スギ造林地内で再
生した広葉樹の生長パターンについて -. *日林論*99: 297-298.

小谷二郎 (1990a) 積雪地帯における広葉樹林造成・改良技術. *石川林試研報*21: 1-13.

小谷二郎 (1990b) 多雪地帯における不成績造林地の改良に関する研究 (III) - 侵入広葉樹の優
占性について -. *日林論*101: 469-470.

小谷二郎 (2004) スギ人工林の冠雪害と広葉樹の侵入パターン. *石川林試研報告*35: 1-86.

小谷二郎・矢田豊 (1989) 多雪地帯における不成績造林地の改良に関する研究 (II) - 放置され
たスギ造林地の林分構造および広葉樹の生育状況 -. *日林論*100: 257-258.

Kohyama, T., Fujita, N. (1981) Studies on the *Abies* population of Mt. Shimagare. *J Plant
Res.* 94: 55-68.

甲山隆司・可知直毅 (2004) 密度効果と個体間相互作用. (植物生態学. 甲山隆司編著, 朝倉書店).

234-261.

久保拓弥 (2012) データ解析のモデリング. 岩波書店, pp267.

國崎貴嗣 (2005) 岩手山麓のスギ高齢人工林における冠雪害の発生傾向. 日林誌87: 426-429.

Lindström, A., Rune, G. (1999) Root deformation in plantations of container-grown Scots pine trees: effects on root growth, tree stability and stem straightness. *Plant and Soil* 217: 29-37.

Low, A.J. (1964) A. Study of Compression Wood in Scots Pine (*Pinus silvestris* L.): With I Plate. *Forestry* 37:179-201.

前田禎三・宮川清・谷本丈夫 (1985) 新潟県五味沢におけるブナ林の植生と跡地更新-スギ造林地の成績とブナの天然更新の提案-. *林試研報*333: 123-171.

Masaki, T., Mori, S., Kajimoto, T., Hitsuma, G., Sawata, S., Mori, M., Osumi, K., Sakurai, S., Seki, T. (2006) Long-term growth analyses of Japanese cedar trees in a plantation: neighborhood competition and persistence of initial growth deviations. *J Forest Res.*11: 217-225.

松田氏淑・稲部茂・加沢貴二 (1968) 造林地の雪害実態調査について (第2報) 多雪地帯の造林技術改善試験. *新潟林試研報*13: 51-66.

松田正宏 (1981) 冠雪害に関する研究 (II) スギの冠雪量について. *日林誌*63: 328-330.

松田正宏 (1988) スギ人工林の冠雪害発生機構に関する研究. 福井県総合グリーンセンター林業試験部研究報告8:178.

箕口秀夫 (2000) 雪国の森林 - その成立過程と現在の課題 - .(雪国の森林づくり.豪雪地帯林業

技術開発協議会編,189pp, 日本林業調査会, 東京.). 45-65 .

Moore, J. R., Tombleson, J. D., Turner, J. A., van der Colff, M. (2008) Wind effects on juvenile trees: a review with special reference to toppling of radiata pine growing in New Zealand. *Forestry*81: 377-387

Moss, A. (1971) Tubed seedling research and development in Britain. *Forestry* 44: 43-65.

中島清・新田隆三・藤森隆郎・勝田柁 (1989) スギの冠雪害抵抗性の要因解析-人口冠雪装置による実験 -. *森林総研研報*356: 1-28.

中谷浩 (1991) 林木の冠雪害に関する樹木力学的研究. *富山県林技研報*4: 1-54.

新潟県 (1999) 新潟県降積雪及び気象観測30年報 昭和44年度～平成10年度. 新潟県, 407pp.

新潟県 (2011a) 平成22年度新潟県の森林・林業 (資料編).

新潟県 (2011) 地域森林計画変更計画書 (中・下越・佐渡及び上越森林計画区).

新潟県農林水産部治山課 (1980) 収穫予想表. 新潟県. 172pp.

新潟県農林水産部林政課 (2001) 新潟県県有林事業経営計画書 (平成13年4月1日から平成18年3月3日まで).

新野雄大・阿部信行 (2009) 小流域におけるラスタ単位の地位推定と間伐優先箇所の抽出. *新潟大学農学部研究報告* 61:167-173.

西村尚之・原俊彦 (2011) 樹木の個体間競争と種の共存. (森林生態学.日本生態学会編, 共立出版東京) .173-188.

野々田三郎・山口清 (1974a) 雪害防止試験-階段造林, 波線階段造林, 寄せ土造林-. *岐阜県寒林試*2: 1-8.

野々田三郎・山口清 (1974b) 省力的雪組こし技術の開発に関する研究-飛騨地方における雪起こ

しの実態と対策-. 岐阜寒林試研報2: 8-19.

野表昌夫 (1973) 豪多雪地帯の造林技術 (I) 新潟県の積雪と施業の実態. 新潟林試研報16:

47-69.

野表昌夫 (1976) 豪多雪地帯の造林技術 (III) スギの幼齢木の整枝の影響. 新潟林試研報19:

45-56.

野表昌夫 (1980) 豪多雪地帯の造林技術(VI)雪起こし作業の効果とその省力化. 新潟林試研報23:

1-18.

野表昌夫 (1984) 豪多雪地帯の造林技術 (VII) 雪起こしの作業方法と効果について. 新潟林試研報

26: 31-41.

野表昌夫 (1986) 豪多雪地帯の造林技術 (VIII) スギ人工林の林分密度と雪害. 新潟林試研報28:

25-34.

野表昌夫 (1987) 積雪環境とスギ人工林の健全性について. 新潟林試研報29: 19-31.

野表昌夫 (1988) 豪多雪地帯の造林技術 (IX) スギ造林木の幼齢期の生長と成林時の樹型との

関係. 新潟林試研報30: 13-26.

野表昌夫 (1989) 湿性豪多雪地帯におけるスギ人工林の雪害と育林技術. 新潟県林業試験場.

pp56.

野表昌夫 (1992) 豪雪地帯におけるスギ人工林の成林率と埋雪回数. 雪氷54: 159-164.

野表昌夫・松田氏淑・中沢迪夫 (1977) 豪多雪地帯の造林技術 (IV) 幼齢期の施肥枝打ちと生長,

雪害. 新潟林試研報20: 1-13.

大住克博・森麻須夫・桜井尚武・斎藤勝郎・佐藤昭敏・関剛 (2000) 秋田地方で記録された高齢なスギ人工林の成長経過. 日林誌82: 179-187.

小野寺弘道 (1988) 多様な森林施業を考慮した多雪地帯の育林技術. 森林立地30: 24-30.

小野寺弘道 (1990) 雪と森林. 林業科学技術振興所, pp81.

小野瀬浩司 (1995) スギ不成績造林地の拡大防止と改良施業 (II) スギ不成績造林地の実態と類型化. 山形林試研報25: 45-50.

大原偉樹・栗田稔美 (1993) スギ造林地に由来する針広混交林の階層解析. 日林東北支論45: 119-120.

大原偉樹・小野寺弘道 (1988) 豪雪地帯の造林地における広葉樹の侵入実態. 日林論99: 299-300.

大塚文也・阿部信行・塚原雅美 (2009) 立地・気象要因による新潟県スギ人工林の地位推定. 新潟大学農学部研究報告 62: 31-34.

Peltola, H., Nykänen, M.L., Kellomäki, S. (1997) Model computations on the critical combination of snow loading and windspeed for snow damage of Scots pine, Norway spruce and Birch sp. at stand edge. For Ecol Manag95: 229-241.

Peterken, G.F., Game, M. (1984) Historical factors affecting the number and distribution of vascular plant species in the woodlands of central Lincolnshire. J Ecol.72: 155-182.

Petty, J.A., Worrell, R. (1981) Stability of coniferous tree stems in relation to damage by snow. Forestry54:115-128.

林野庁 (1999) 人工林林分密度管理図. 日本林業技術協会.

桜井尚武 (2002) 長伐期林とは何か. (長伐期林の実際. わかりやすい林業解説シリーズ110. 桜

井尚武編著, 林業科学技術振興所, 東京), p5-10.

佐藤啓祐 (1971) 雪害防止試験. 山形林試研報1: 165-206.

佐藤啓祐 (1980a) 裏日本多雪地の積雪環境と森林被害. 森林立地21: 10-15.

佐藤啓祐 (1980b) 造林木の雪害防止法の再検討 (II) 多雪地帯におけるスギ造林木の雪起こし

の効果. 山形林試研報11: 29-35.

佐藤啓祐 (1981) 雪害発生の動態からみた多雪地におけるスギ林の保育形式に関する二, 三の考

察. 山形林試研報12: 97-107.

佐藤啓祐 (1984) 造林木の雪害防止法の再検討 (III) 斉一な斜面における雪起こしの結束順序

と作業経路. 山形林試研報14: 27-34.

佐藤啓祐 (1987) 山形県の積雪環境に関する研究. 年最深積雪と年根雪日数の推定法. 山形林試

研報17: 1-22.

佐藤啓祐・今野敏雄 (1965) 多雪地帯の造林技術改善試験. 山形林試報7: 183-216.

Schelhaas, M.J., Nabuurs, G.J., Schuck, A. (2003) Natural disturbances in the European

forests in the 19 th and 20 th centuries. *Global Change Biol.*9: 1620-1633.

四手井綱英 (1954) 雪圧による林木の雪害. 林試研報73: 1-89.

四手井綱英・高橋喜平・塩田勇 (1950) 幼齡林の雪害. 林業試験場集報58: 1-24.

白石則彦 (1985) 同齡単純林における直径分布の解析とその生長予測への応用 (I): 歪度変化の

動向とそのメカニズム. 日林誌67: 133-140.

Solantie, R. (1994) Effect of weather and climatological background on snow damage of

- forests in southern Finland in November 1991. *Silva Fennica* 28: 203-211.
- Sri, L., Abe, N., Tsukahara, M. (2009) Predicting site indices of Japanese cedar plantation in Niigata Prefecture using environmental factors. *Journal of Forest Planning*15: 45-51.
- 杉山利治・佐伯正夫 (1963) 昭和 35年12月末の大雪による北陸地方の森林の冠雪害調査報告. *林試研報*154: 73-95.
- 鈴木千秋・富樫誠・荒井賛 (1993) 降積雪環境区分と耐雪性森林の育成技術. *福島林試研報*25: 1-18.
- 鈴木博人 (2006) 新潟県とその周辺における降積雪量の 1927~2005 年の経年変化: 鉄道駅構内の露場で観測された降積雪量データを用いた解析. *天気*53: 185-196.
- 平英彰 (1985) スギ幼齢木の根元曲り形成過程. *日林誌*67: 11-19.
- 平英彰 (1987) スギ根元曲がりの形成機構と制御方法に関する研究. *富山林試研報*12: 1-80.
- 高橋教夫・野呂忠幸 (1990) ブナノキ二次林の成長経過 (Ⅲ) - 豪雪地スギ植栽地に侵入した広葉樹について -. *日林論*101, 227-228.
- 高橋啓二(1997) 造林地の冠雪害とその効果 (わかりやすい林業解説シリーズ61). *日林協*. pp47.
- 高橋絵里奈・竹内典之 (2007) 吉野林業地における長伐期高品質大径材生産林の陽樹冠管理. *日林誌*89: 107-112.
- 竹内郁雄 (2005) スギ高齢人工林における胸高直径成長と林分材積成長. *日林誌*87: 394-401.
- 竹内政夫 (1997) 道路雪氷対策技術の変遷 (1) -時代背景と防雪柵-. *北の交差点*2: 12-17.
- 田邊 (樋口) 裕美・小野寺弘道 (1994) ヒバ (*Thujaopsis dolabrata* var. *hondai*) の積雪移動圧に対する樹種特性-根元曲がりと根系の発達との関係-. *日林誌*76: 18-23.

- 田中和博 (1983) 林齢に伴う直径分布型および樹高分布型の変化に関する一考察. 日林誌65: 473-476.
- 塚原雅美 (2005) 新潟県高齢級スギ大径材への適用可能な材積式の検討. 新潟林試研報46: 5-8.
- 塚原雅美・箕口秀夫・野表昌夫 (2000) 新潟県のスギ人工林における定着広葉樹の樹種と立地環境特性. 新潟林試研報42: 7-13.
- 塚本良則 (1991) 森林は斜面崩壊の抑止にどれだけ役立っているか. 森林科学3: 45-51.
- 塚本良則 (1998) 森林は山地の侵食防止にどのように機能しているか (<特集> 森林は土砂流出をどの程度防げるか). 森林科学22,2-9.
- Valinger, E., Fridman, J. (1997) Modelling probability of snow and wind damage in Scots pine stands using tree characteristics. *Forest Ecol Manag* 97:215-222.
- Valinger, E., Pettersson, N. (1996) Wind and snow damage in a thinning and fertilization experiment in *Picea abies* in southern Sweden. *Forestry* 69: 25-34.
- 和田覚・金子智紀・八木橋勉・杉田久志 (2009) 多雪環境下におけるスギ人工林の成林と混交林化に影響を及ぼす要因. 日林誌91: 79-85.
- 山口清 (1978) 飛騨地方における積雪環境と林業技術. *みどり* 30: 8-10.
- 矢野進治・榎谷金治 (1989) 積雪地帯における広葉樹林の造成・改良技術に関する研究 (II) - 城崎郡日高町万劫地内の一森林の現況 -. 兵庫林試研報36: 35-58.
- 矢野進治・吉野豊・榎谷金治 (1988) 積雪地帯における広葉樹林の造成・改良技術に関する研究 (I) - 養父郡関宮町鶉縄地内の一小流域の森林の現況 -. 兵庫林試研報35: 111-126.
- 横井秀一 (2000) 積雪地帯のスギ不成績造林地に関する造林学的研究.

横井秀一・山口清 (1998) 積雪地帯のスギ不成績造林地におけるスギと広葉樹の生育実態. 森林

立地 40: 91-96.

横井秀一・山口清 (2000) 積雪地帯におけるスギ人工林の成林に影響する立地要因. 日林誌82:

15-19.

Zushi, K (2007) Regional estimation of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don)

productivity by use of digital terrain analysis. *J Forest Res.*12: 289-297.

謝辞

本研究の遂行にあたっては、主指導教員の新潟大学大学院紙谷教授からは、研究の遂行の全課程を通じてご指導をいただいた。副指導教員の新潟大学農学部箕口秀夫教授、同村上拓彦准教授には、本研究のとりまとめに関して貴重なご助言をいただいた。新潟大学阿部信行名誉教授からは、地位指数曲線の推定、調査指導、第三章の校閲など多くのご支援をいただいた。新潟大学高田和彦名誉教授、前新潟大学農学部教授丸山幸平博士からは折りにつけ、貴重なご助言と励ましをいただいた。

豪雪地帯林業技術開発協議会および関東・中部試験研究機関連絡協議会に所属の研究員の皆様には終始励ましていただき、折りにつけ貴重なご助言をいただいた。岐阜県立森林文化アカデミー横井秀一博士、前新潟県森林研究所長野表昌夫氏には第三章の校閲をしていただいた。

調査の遂行にあたっては、新潟大学農学部（当時）杉本康緒、石黒奈々の両氏には野外調査の協力をしていただいた。また、新潟大学大学院在学中、三納圭之輔氏、石田真也博士、望月翔太氏をはじめ、大学院生・学生の諸氏には多くの支援と励ましをいただいた。

新潟県森林研究所長（当時）保科孝且氏には、研究着手の契機を与えていただき、また調査の遂行にあたってご助力いただいた。新潟県森林研究所、治山課森林計画系の各位には、野外調査に協力いただき、また討論を通して多くの示唆をいただいた。新潟県林業技術職員、阿賀町林政係職員、新潟県森林組合連合会、調査対象の森林所有者の各位には野外調査にあたりお世話になった。

本研究はこれら多くの方々の支援を受けた。あらためて心からお礼申し上げます。

表 2-1. 新潟県の森林資源概要

	国有林	民有林	合計
森林面積 (ha)	292, 585	567, 788	860, 373
林野率 (%)			68. 4
人工林面積 (ha)	22, 111	141, 052	163, 163
人工林率 (%)	7. 6	24. 8	19. 0

※ 平成 22 年度新潟県森林・林業(資料編)(新潟県 2011a)

表 3-1. 調査した 35 林分の概要

	平均値	±	標準偏差
林齢 ¹⁾	66.5	±	26.1
平均樹高 (m)	22.8	±	5.9
平均胸高直径 (cm)	35.1	±	8.8
本数密度 (本/ha)	782.6	±	360.4
断面積合計 (m ² /ha)	73.7	±	17.6

1) 林齢は新潟県の森林簿から求めた値。その他は枯損・幹折れ木をのぞいた毎木調査データより求めた値。

表 3-2. 各モデルに使用した説明変数とそれらの変数の 35 林分の平均値±標準偏差

		平均値	±	標準偏差
林齢		66.5	±	26.1
本数密度	(本/ha)	782.6	±	360.4
理論材積	(m ³ /ha)	817.7	±	317.7
平均根元曲がり	(cm)	47.8	±	18.5
枯損・幹折れ木本数密度	(本/ha)	66.8	±	64.5
胸高直径歪度		-0.03	±	0.33
上層木のみ				
本数密度	(本/ha)	513.2	±	297.6
本数率 ¹⁾	(%)	63.6	±	13.8
平均胸高直径	(cm)	41.3	±	11.3
平均形状比	(%)	65.6	±	7.4
平均樹冠長	(m)	10.4	±	3.6

1) 林分ごとの生残木数に対する上層木数のパーセンテージ

表 3-3. 直径分布の歪度¹⁾に及ぼす林分因子の効果 (GLMM)

	全ての変数を 投入したモデル		AIC 最小モデル		AIC が二番目に 小さいモデル	
	パラメータ 推定値	標準誤差	パラメータ 推定値	標準誤差	パラメータ 推定値	標準誤差
切片	1.17442	8.05047	-0.05712	0.33850	-1.25456	0.99085
林齢	0.05326	0.03475			0.01795	0.01384
本数密度	0.00253	0.00387				
理論材積	-0.00071	0.00322				
平均根元曲がり	0.01573	0.02437				
枯損・幹折れ木本数密度	0.00170	0.00613				
上層木のみ						
本数密度	-0.00257	0.00492				
平均胸高直径	-0.05912	0.18203				
平均形状比	-0.04286	0.08173				
平均樹冠長	-0.04559	0.25421				
AIC		66.1		52.5		52.7

1) 負の場合は 0, 正の場合は 1 (歪度=0 はない) としてカテゴリ化した歪度, 確率分布は二項分布 (logit link 関数)

表 3-4. 上層木確率¹⁾に及ぼす林分因子の効果 (GLMM)

	全ての変数を 投入したモデル		AIC 最小モデル		AIC が二番目に 小さいモデル	
	パラメータ 推定値	標準誤差	パラメータ 推定値	標準誤差	パラメータ 推定値	標準誤差
切片	5.36260	1.24331	5.56052	1.18386	5.83605	1.19102
林齢	-0.00579	0.00583				
本数密度	-0.00060	0.00040	-0.00068	0.00040	-0.00060	0.00040
理論材積	0.00134	0.00055	0.00137	0.00054	0.00125	0.00055
平均根元曲がり	-0.00470	0.00431			-0.00458	0.00423
枯損・幹折れ木本数密度	-0.00058	0.00105				
胸高直径の歪度	-0.01701	0.20975				
上層木のみ						
平均胸高直径	-0.04582	0.03229	-0.06572	0.02909	-0.05762	0.02964
平均形状比	-0.02773	0.01347	-0.02942	0.01207	-0.03376	0.01253
平均樹冠長	-0.09870	0.04395	-0.08740	0.04289	-0.09395	0.04267
AIC		98.2		92.6		93.4

1) 林分内のある個体が上層木となる確率, 確率分布は二項分布 (logit link 関数)

表 3-5. 林分の雪害履歴と上層木の形質と相関関係

	樹高	胸高直径	根元曲がり	形状比	樹冠長率
林齢	0.888	0.825	0.147	0.010	-0.183
地位指数	0.120	0.121	0.025	0.032	0.251
林分材積	0.886	0.820	0.170	0.058	-0.183
直径分布の歪度	-0.061	-0.141	0.107	0.212	-0.011
立木配置の変動係数	0.528	0.615	0.180	-0.287	0.513
根元曲がり (生残木)	0.128	0.304	0.912	-0.501	0.291

(※)数値は *pearson* の相関係数。絶対値が 0.4 より大きい関係を中程度以上の相関関係があるものとして、太字で示した。

表 4-1. 調査した 76 林分の概況

	平均値	±	標準偏差
林齢	67.99	±	3.86
地位指数	24.66	±	3.25
平均樹高 (m)	21.07	±	3.63
平均胸高直径 (cm)	34.80	±	5.23
断面積合計 (m ³ /ha)	69.42	±	15.60
本数密度 (本/ha)	700.90	±	203.80
理論材積 (m ³ /ha)	701.30	±	218.10
直径分布の歪度	0.08	±	0.30

1) 林齢は新潟県の森林簿から求めた値。その他は枯損・幹折れ木をのぞいた毎木調査データより求めた値。

表 4-2. 解析に用いた応答変数と説明変数変数(数値型)の平均値±標準偏差

変数	単位	平均値	±	標準偏差
応答変数				
本数密度	(本/ha)	112.14	±	32.61
直径 40 cm 以上の本数密度	(本/ha)	32.13	±	13.78
説明変数				
地位指数	(m)	24.66	±	3.25
林齢	(m)	67.99	±	3.86
標高	(m)	423.99	±	262.42
斜度	(度)	17.20	±	7.42
最深積雪	(cm)	133.28	±	65.19

1) 平均値は 76 林分の平均値の平均と標準偏差。

表 4-3. 解析に用いた説明変数（因子型）の度数分布

斜面方位	度数	斜面形状	度数	土壌型	度数
E	8	平衡	36	BD	49
N	32	複合	2	B ₀ (d)	23
S	21	凹型	33	B/D	4
W	15	凸型	5		

表 4-4. 林分の大径木（直径 40 cm以上）密度に影響する立地要因（GLMM）

		パラメータ推定値	標準誤差	パラメータ推定値	標準誤差
切片		-1.38043	0.83113	-1.33918	0.812281
林齢		0.01810	0.00997	0.019931	0.009764
地位指数		0.13426	0.01440	0.131061	0.013761
標高		0.00027	0.00030		
土壌型（基準：BD）	B _D (d)	-0.07759	0.09134	-0.07415	0.089092
	BD	0.26469	0.31934	0.521197	0.184581
	複合	0.03846	0.23725		
斜面形状（基準：平衡）	凹型	0.06038	0.08429		
	凸型	0.07720	0.16350		
傾斜		0.00246	0.00590		
斜面方位（基準：東）	北	-0.09159	0.13893		
	南	0.03968	0.13400		
	西	-0.04551	0.15198		
最深積雪		0.00047	0.00074	0.000868	0.000597
A I C			210.3		194.0

1) 林分内のある個体の直径が 40 cm以上である確率, 確率分布は二項分布 (logit link 関数)

表 4-5. 林分の大径木（直径 40 cm以上）確率に影響する立地要因（GLMM）

		パラメータ 推定値	標準誤差	パラメータ 推定値	標準誤差
切片		-9.26724	1.87197	-6.432694	0.718458
林齢		0.02665	0.02288		
地位指数		0.25008	0.03183	0.204478	0.027229
標高		0.00019	0.00070		
土壌型（基準：BD）	B _D (d)	0.18207	0.20731		
	BD	0.34988	0.72765		
	複合	-0.19299	0.54922		
斜面形状（基準：平衡）	凹型	0.26429	0.19452		
	凸型	0.35613	0.36070		
傾斜		0.00104	0.01345		
斜面方位（基準：東）	北	-0.43262	0.31676		
	南	-0.22577	0.30831		
	西	-0.34183	0.34783		
最深積雪		0.00278	0.00171	0.003495	0.001323
A I C			283.9		270.4

林分内のある個体の直径が 40 cm以上である確率，確率分布は二項分布（logit link 関数）

表 4-6. 調査した 76 林分の樹形級別被害度本数(本/0.16ha)

樹形級	無被害	曲がり	梢端折れ	幹折れ	枯れ	総計
A	1165	4927	8	34		6134
B	68	2233	9	19		2329
C		39	993	1248	6	2286
D					567	567
総計	1233	7199	1010	1301	573	11316

表 4-7. 樹形級別の個体サイズおよび樹形の林分平均値

		A			B			C			D		
		平均値±標準偏差	n		平均値±標準偏差	n		平均値±標準偏差	n		平均値±標準偏差	n	
樹高	(m)	24.07	3.02	76	16.65	3.61	76	17.83	4.28	75	10.74	3.87	60
胸高直径	(cm)	40.11	4.17	76	22.81	3.27	76	30.79	5.48	75	21.41	5.33	60
枝下高	(m)	13.18	3.39	76	10.11	3.27	76	10.76	3.28	75	8.08	3.03	3
根元曲がり	(cm)	56.29	18.09	76	75.95	30.95	76	67.36	26.59	75	106.25	31.55	3
矢高	(cm)	2.24	0.91	76	4.37	2.17	76	3.53	1.69	75	6.30	5.47	3
枝下高率	(%)	45.76	8.98	76	40.54	9.02	76	38.23	10.35	75	24.89	17.08	3
形状比	(%)	61.40	6.77	76	72.94	11.75	76	58.79	11.89	75	52.11	16.24	60

1) 平均値は 76 林分の平均値の平均と標準偏差。

表 4-8. 被害度別本数の概要(本/0.16ha)

変数	単位	平均値	±	標準偏差
本数密度 (総数)	(本/ha)	116.29	±	31.63
(無被害)	(本/ha)	13.63	±	13.82
(幹曲がり)	(本/ha)	72.51	±	31.67
(先折れ)	(本/ha)	10.87	±	9.14
(幹折れ・枯れ)	(本/ha)	13.68	±	12.74

1) 平均値は 76 林分の平均値の平均と標準偏差。

表 4-9. 立木の被害形態に及ぼす個体サイズと樹形の影響 (GLMM)

	無被害		幹曲がり		梢端折れ		幹折れ		枯死木	
	すべての 変数を 投入した モデル	A I C最 小モデル	すべての 変数を 投入した モデル	A I C最 小モデル	すべての 変数を 投入した モデル	A I C最 小モデル	すべての 変数を 投入した モデル	A I C最 小モデル	すべての 変数を 投入した モデル	A I C最 小モデル
切片	-5.10336	-5.10336	-7.232885	-7.19758	3.946959	3.94696	2.225378	2.71037	-11.09492	-8.88533
樹高	0.16149	0.16149	-0.00246		-0.19753	-0.19753	-0.03313		-0.54666	-0.35421
胸高直径	0.05317	0.05317	0.03927	0.03791	0.03263	0.03263	-0.05880	-0.07734	0.10964	
根元曲がり	-0.02697	-0.02697	0.01164	0.01164	-0.00771	-0.00771	-0.00332	-0.00329	0.01780	
形状比	-0.01010	-0.01010	0.02346	0.02348	-0.03758	-0.03758	0.00685	0.00703	-0.01277	0.01694
枝下高率	-0.02078	-0.02078	0.07855	0.07787	-0.02760	-0.02760	-0.03776	-0.04647	0.03116	-0.01536
AIC	4370	4370	4370	4370	4370	4370	4767	4370	4767	4370

1) 林分内のある個体がそれぞれの被害度である確率, 確率分布は二項分布 (logit link 関数)

表 4-10. それぞれの被害形態に対する上層木と下層木のオッズ

	A 級木		B 級木	
	オッズ	A I C	オッズ	A I C
無被害	29.424	16040	0.148	7672
曲がり	6.427	10300	26.311	6654
梢端折れ	0.004	10290	0.039	7629
幹折れ	0.012	10090	0.012	7610
枯れ	0.000	10910	0.000	8430

表 4-11. 被害形態別の本数確率に影響する立地要因のパラメータ推定値 (GLMM, すべての因子を投入したモデル)

		無被害	幹曲がり	先折れ	幹折れ	枯れ
切片		0.559265	2.449104	-5.54552	-6.80277	-11.70901
林齢		-0.05151	-0.00499	0.025337	0.023467	0.058993
地位指数		0.06977	-0.05268	-0.00453	0.072046	0.137987
標高		-0.00345	0.00122	0.001116	-0.00055	0.001284
土壌型 (基準: BD)	B ₀ (d)	-0.31405	-0.42600	0.425731	0.612615	0.280882
	B/D	1.38820	0.48106	-3.83973	-0.03295	-1.039941
	複合	-1.16374	0.43531	-0.38886	0.773462	0.409802
斜面形状 (基準: 平衡)	凹型	-0.79422	-0.20565	0.058217	1.080714	0.395438
	凸型	-0.32141	0.01949	-0.19564	0.151842	0.398929
傾斜		0.01648	-0.02219	0.052317	-0.00674	0.016203
斜面方位 (基準: 東)	北	0.43036	0.31899	-0.36286	-0.59368	0.392903
	南	0.06129	0.40849	-0.41321	-0.70865	0.347353
	西	0.52859	-0.15061	-0.12234	-0.24174	0.743454
最深積雪		-0.00036	-0.00353	0.002848	0.008492	-0.004856
A I C		266	261	221	283.4	217.2

表 4-12. 被害形態別本数確率に影響する立地要因のパラメータ推定値
(GLMM, AIC 最小モデル)

	無被害	幹曲がり	梢端折れ	幹折れ	枯れ
切片	-3.57448	1.55177	-3.80578	-4.06402	-10.13684
林齢					0.05698
地位指数	0.106144	-0.04926			0.13786
標高	-0.00287	0.00174	0.39474		-0.00454
土壌型 (基準: BD)	B ₀ (d)	-0.33653	-2.80262	0.445228	
	B/D		0.09023	0.04190	-0.81571
	複合	-1.20286			1.045937
斜面形状 (基準: 平衡)	凹型	-0.80987		1.049853	
	凸型	-0.25103		-0.08389	
傾斜					
斜面方位 (基準: 東)	北				
	南				
	西		-0.00348		
最深積雪		-0.33048	0.00432	0.007726	-0.00454
A I C	259.5	252.3	207.8	275.3	204.2

表 5-1. 林分密度管理図における林分材積の推定値の誤差率¹⁾に及ぼす林分因子の効果 (GLM)

	全ての変数を 投入したモデル		AIC 最小モデル		AIC が二番目に 小さいモデル	
	パラメータ 推定値	標準誤差	パラメータ 推定値	標準誤差	パラメータ 推定値	標準誤差
切片	3.05222	0.71225	2.51494	0.22968	3.06157	0.50339
林齢	-0.00722	0.00653				
平均根元曲がり	0.01209	0.00486	0.01315	0.00449	0.01165	0.00458
理論材積	0.00064	0.00051				
胸高直径の歪度	-0.16346	0.25981				
上層木本数率	-0.00857	0.00731			-0.00754	0.00614
AIC		288.1		282.2		283.3

1) $(| \text{推定林分材積} - \text{理論材積} |) / \text{理論材積} * 100$, 確率分布はガンマ分布 (log link 関数)

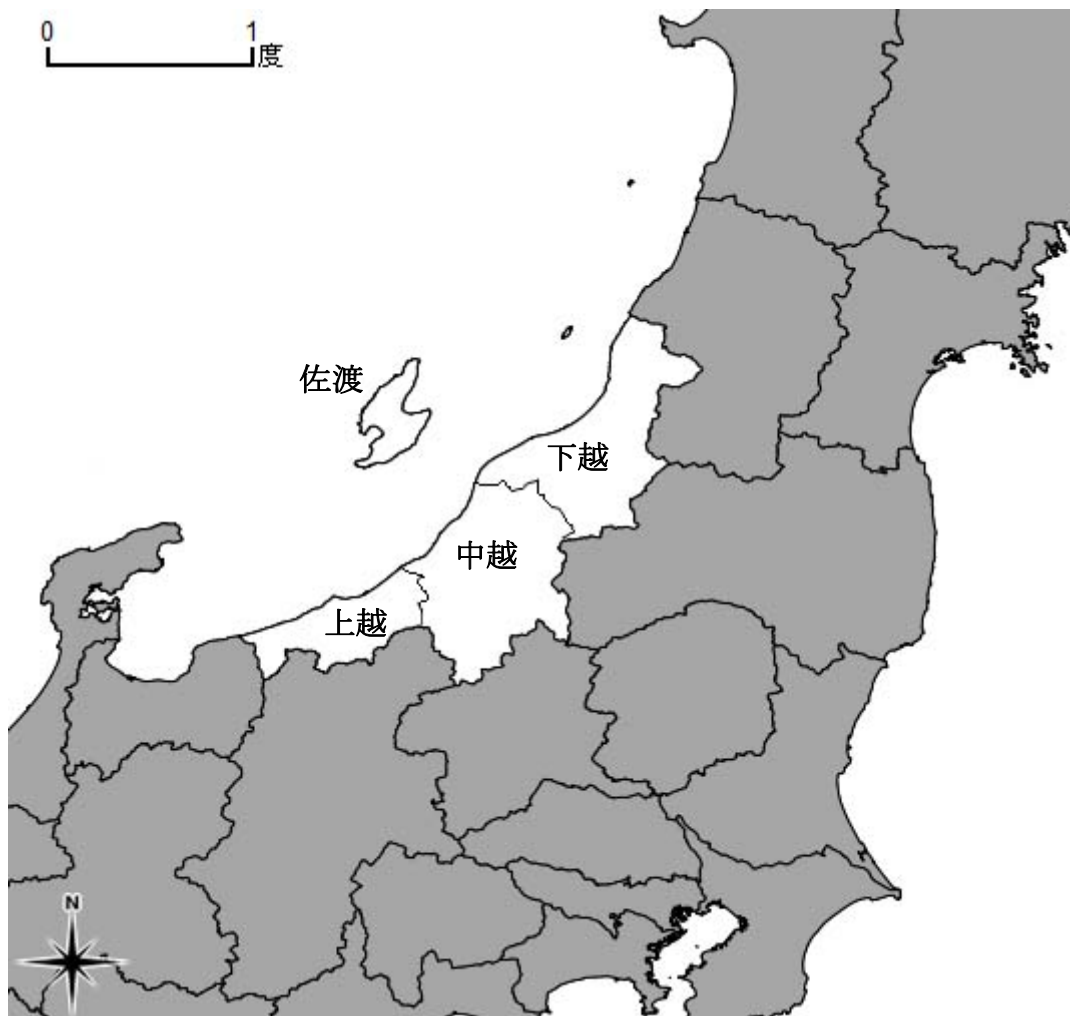


図 2-1. 新潟県（白抜き部分）と森林計画区（上越・中越・下越・佐渡）の位置

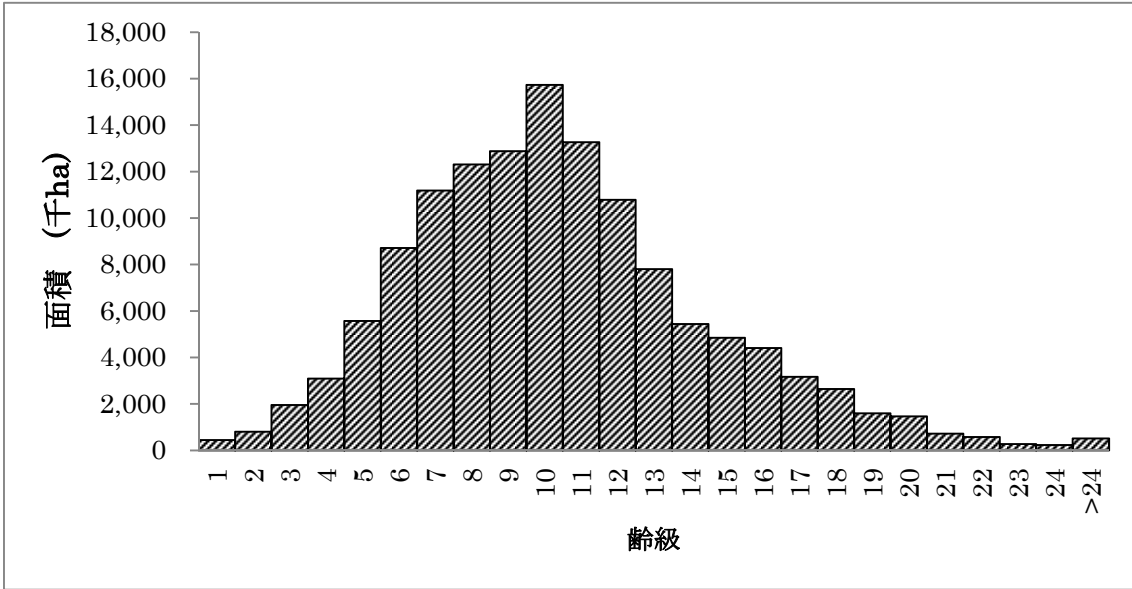


図 2-2. 新潟県スギ人工林年齢別面積 (平成 23 年度末 森林計画データベースより)

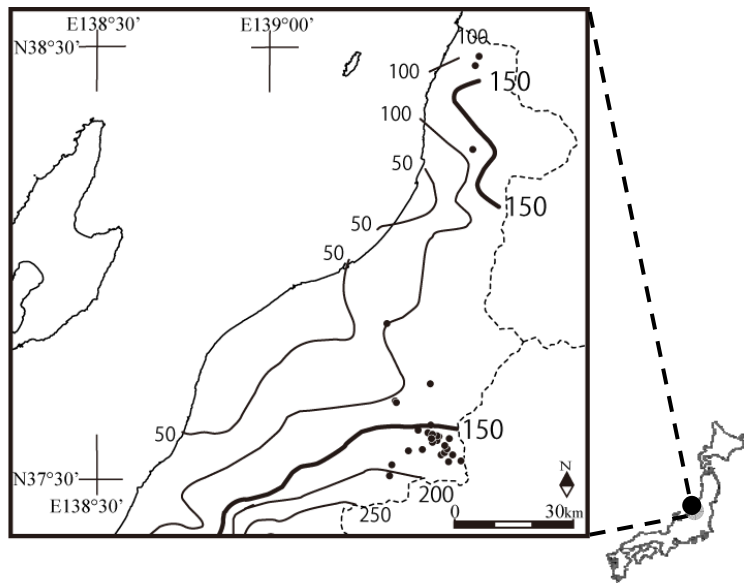


図 3-1. 調査地位置

黒丸 (●) は調査地域内の調査地の位置を示す。また、実線とその端の数字は、それぞれ最深積雪 50 cm 間隔の等値線とその値 (新潟県, 1999) を示す。

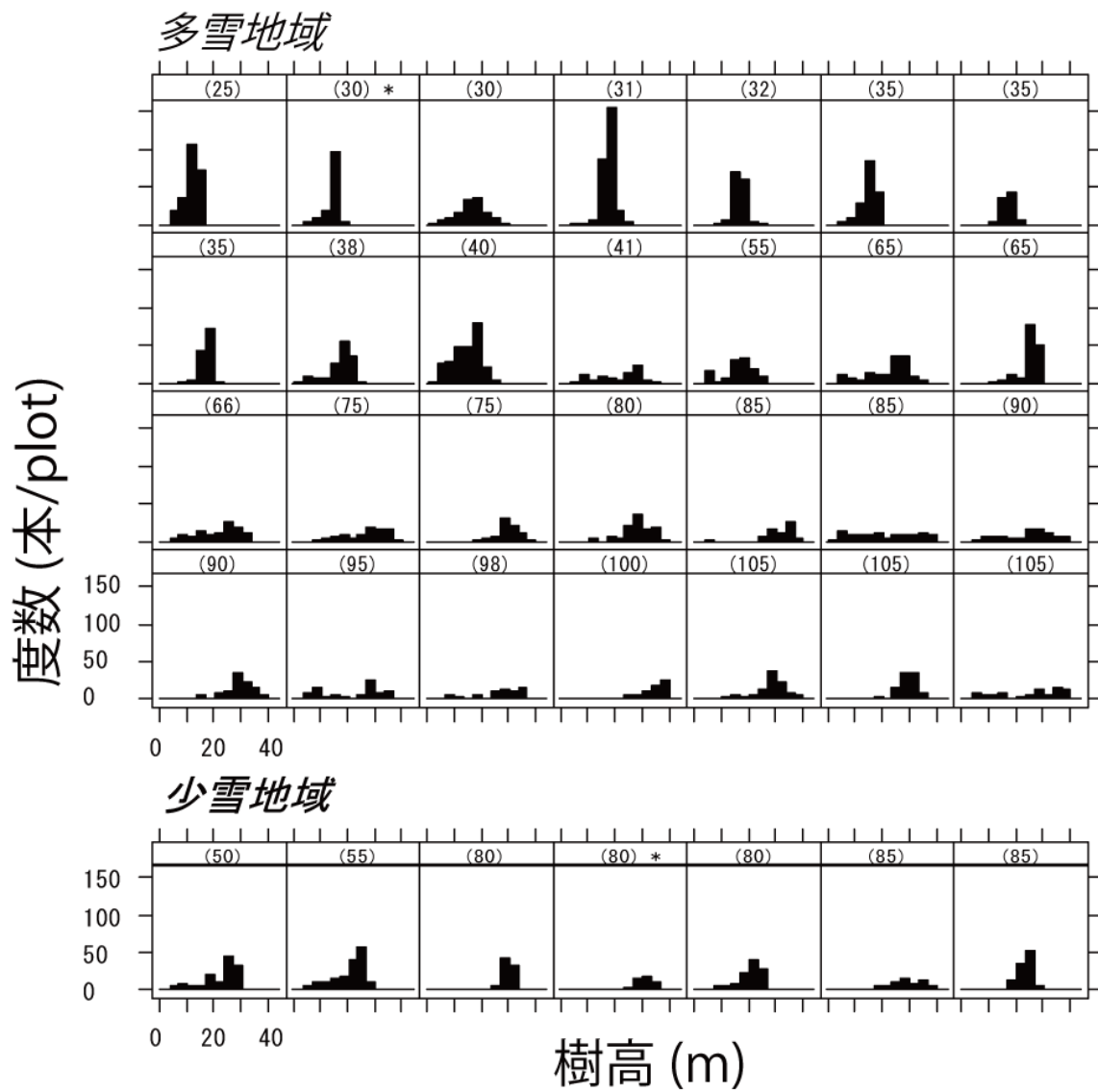


図 3-2. 植栽木の樹高の頻度分布

括弧内の数値は森林簿の林齢；*，プロット面積が 0.09 ha の調査林分，その他の調査林分のプロット面積は 0.16 ha。

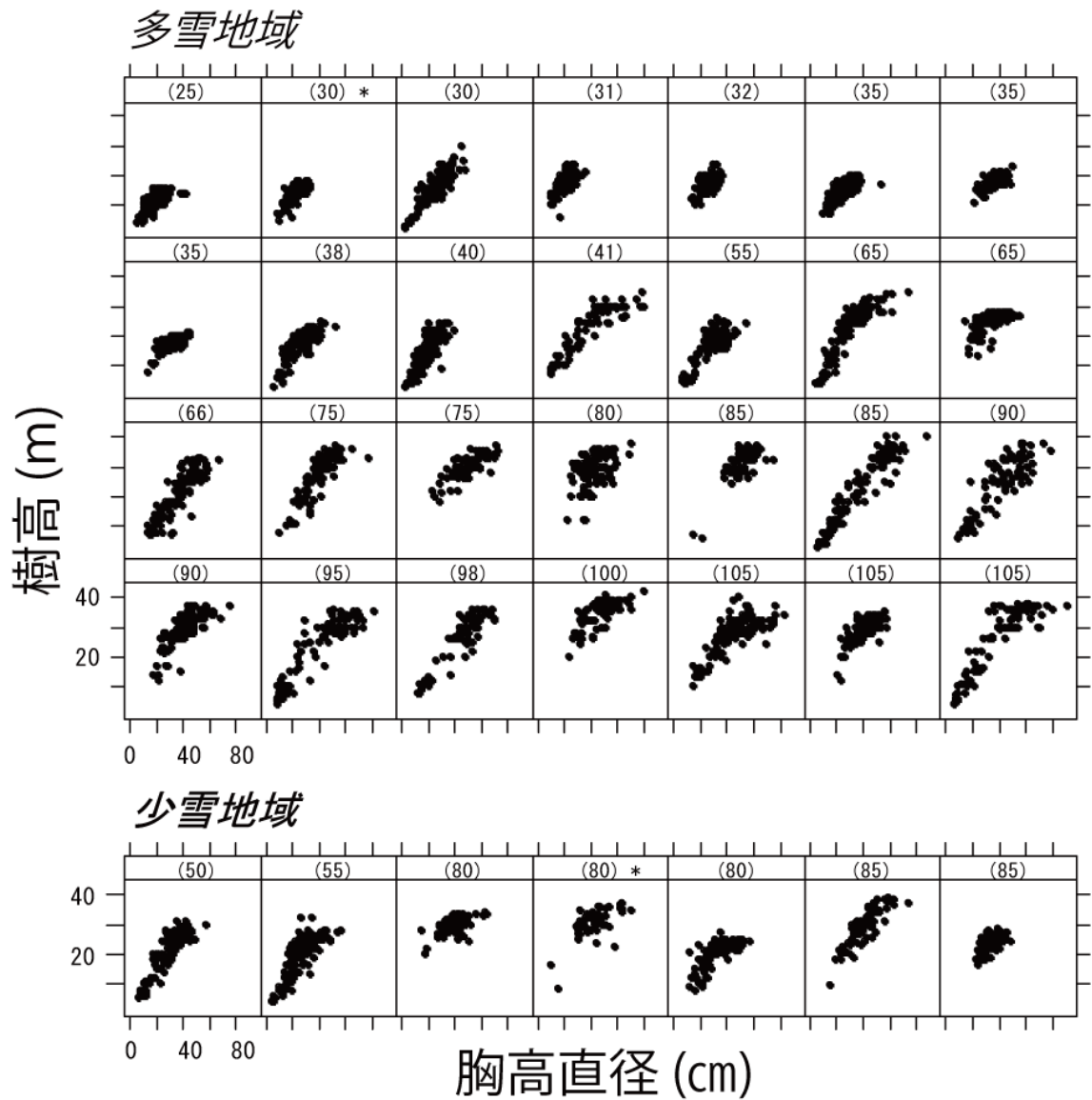


図 3-3. 植栽木の胸高直径と樹高の関係

括弧内の数値は森林簿の林齢; *, プロット面積が 0.09 ha の調査林分, その他の調査林分のプロット面積は 0.16 ha

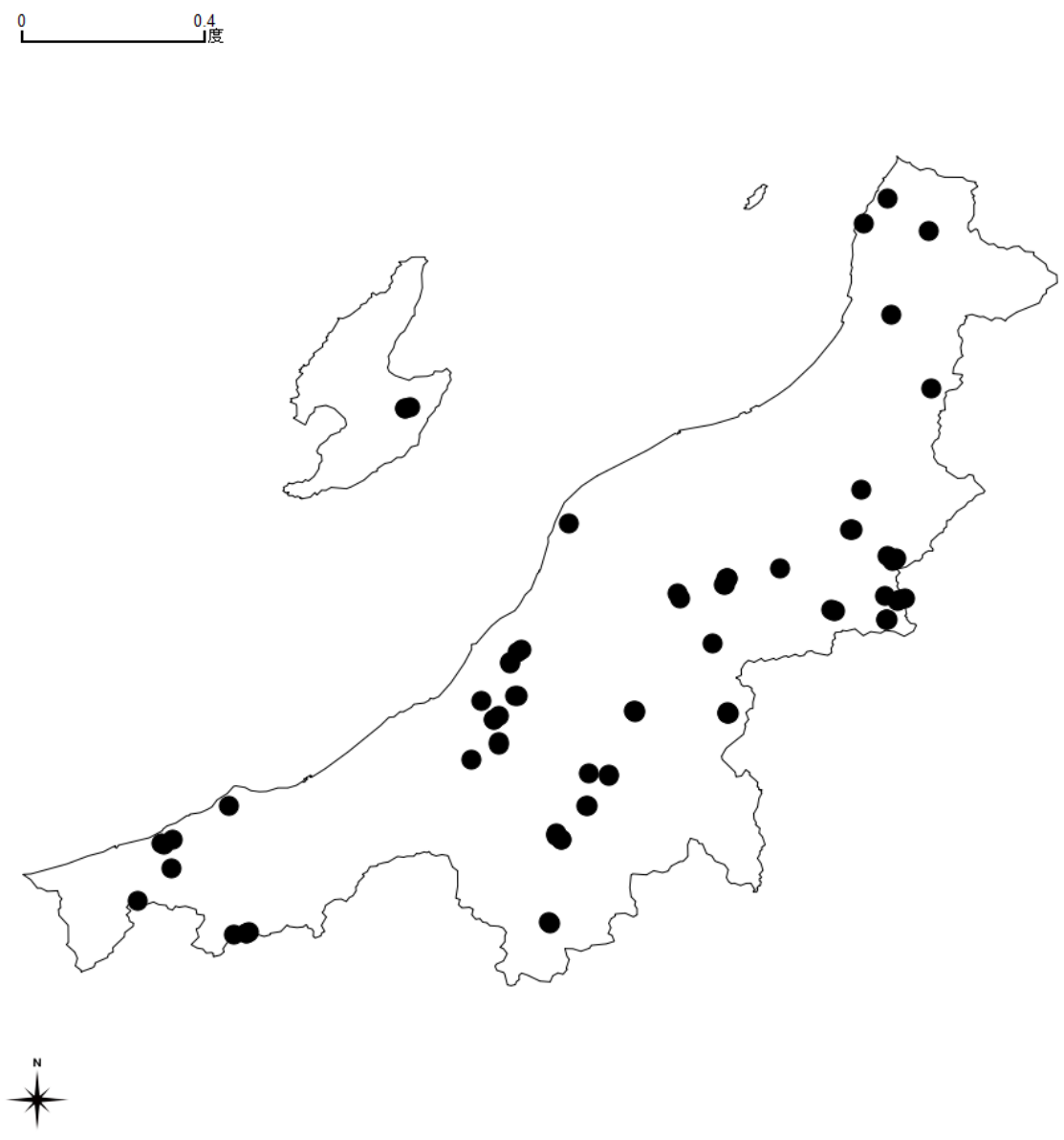


図 4-1. 調査地位置

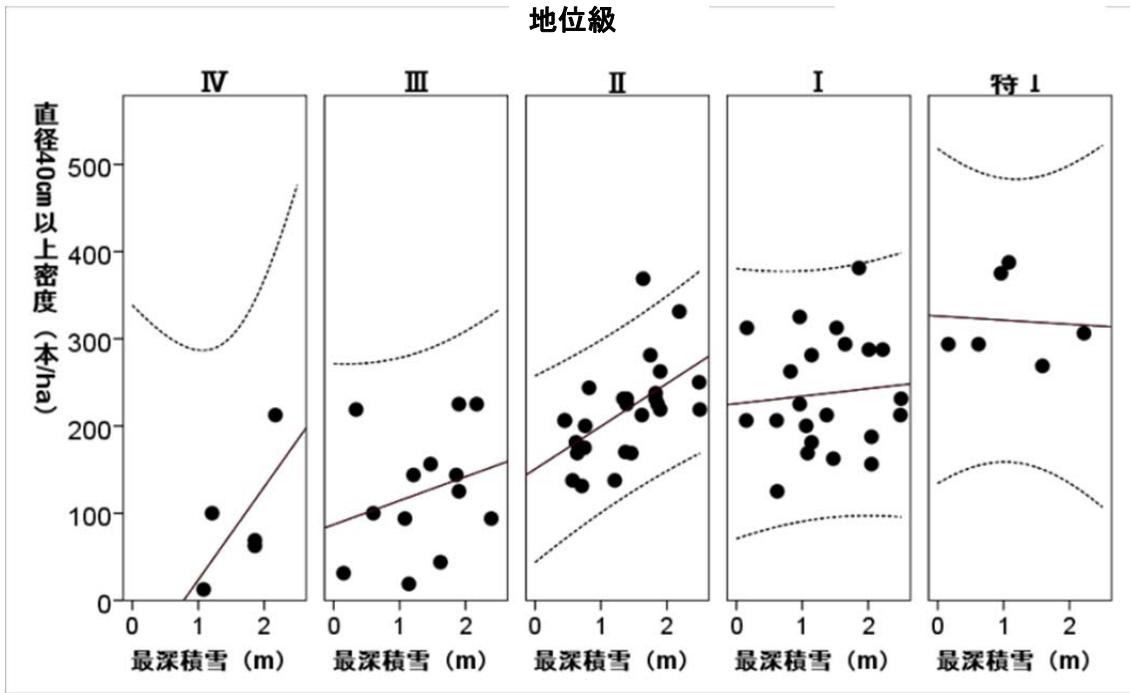


図 4-2. 地位別の大径木（直径 40 cm 以上）密度と最深積雪の関係

※点線は 95%信頼区間を示す。

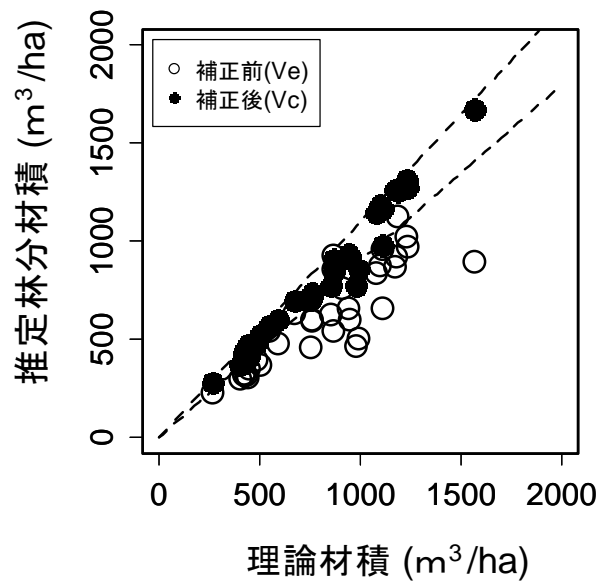


図 5-1. 全ての生残木の理論材積と推定林分材積および補正後の推定林分材積の関係

白丸 (○) は林分密度管理図による推定林分材積(V_e)を，黒丸 (●) は断面積合計による補正後の林分密度管理図による推定林分材積(V_c)を示す。また，破線は，誤差率 10%の等値線を示す。

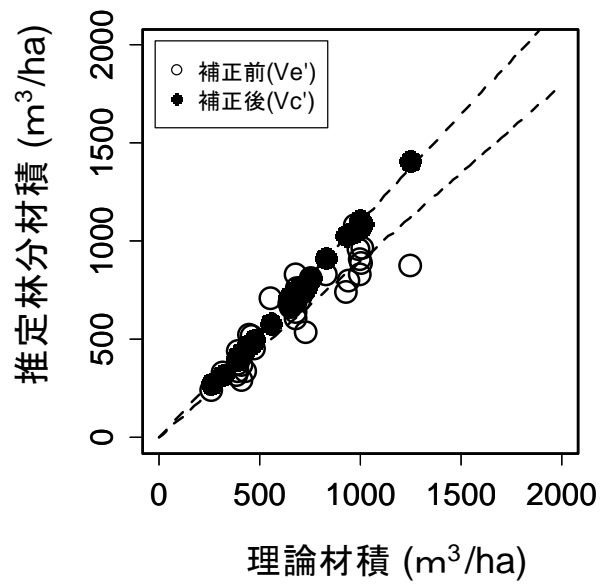


図 5-2. 上層木の理論材積と推定林分材積および補正後の推定林分材積の関係
 白丸 (○) は林分密度管理図による上層木の推定林分材積(Ve')を, 黒丸 (●) は断面積合計
 による補正後の上層木の推定林分材積(Vc')を示す。また, 破線は, 誤差率 10%の等値線を
 示す。

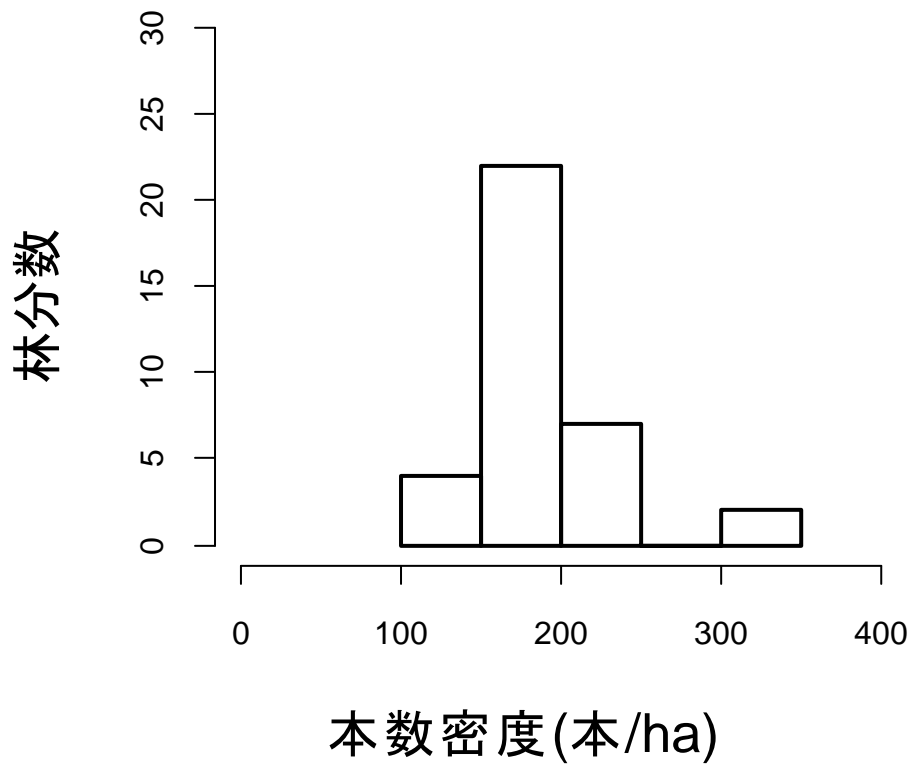


図 5-3. 調査林分の収穫対象木の本数密度の頻度分布

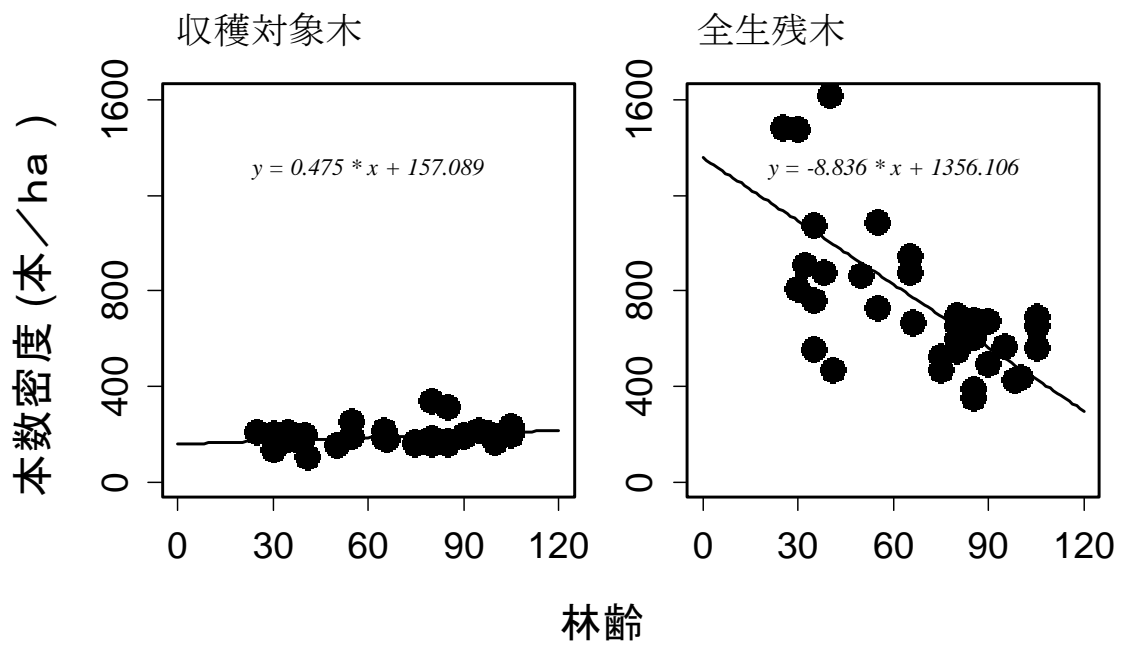


図 5-4. 林齢と収穫対象木の本数密度および全生残木の関係

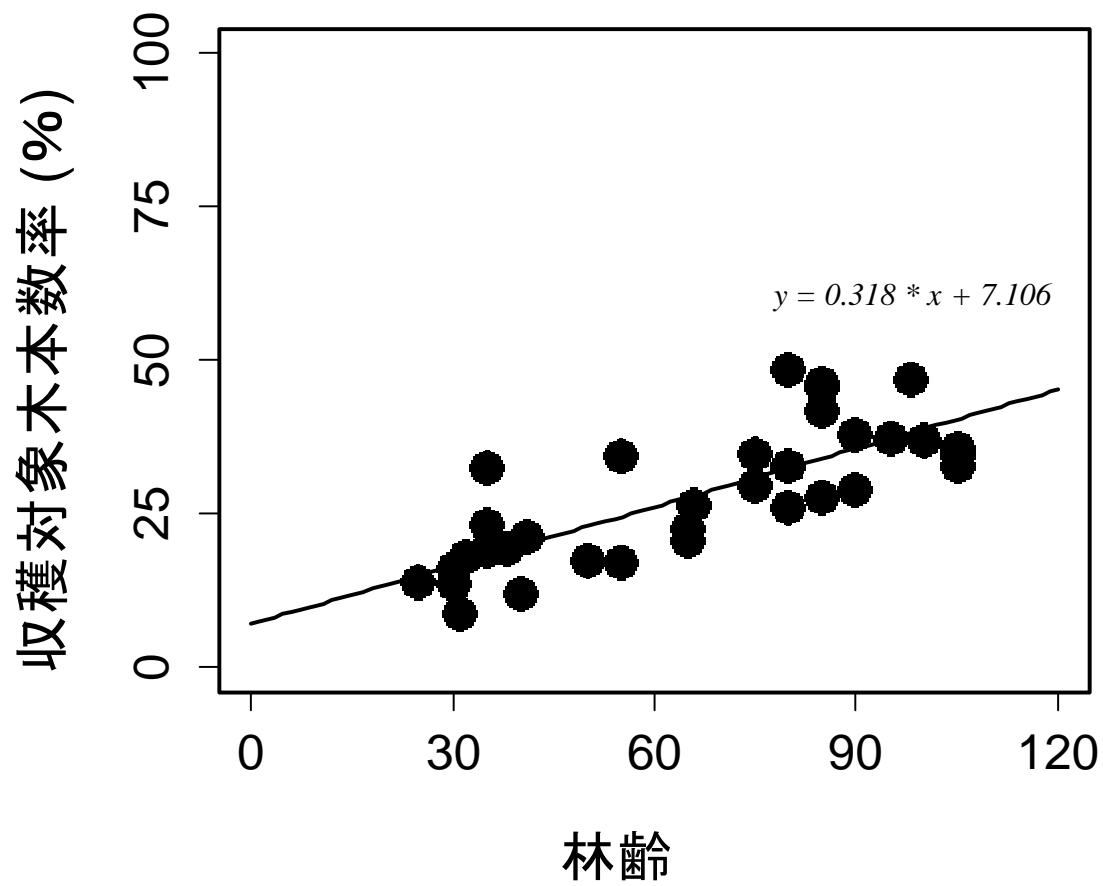


図 5-5. 林齡と收穫対象木の本数率との関係

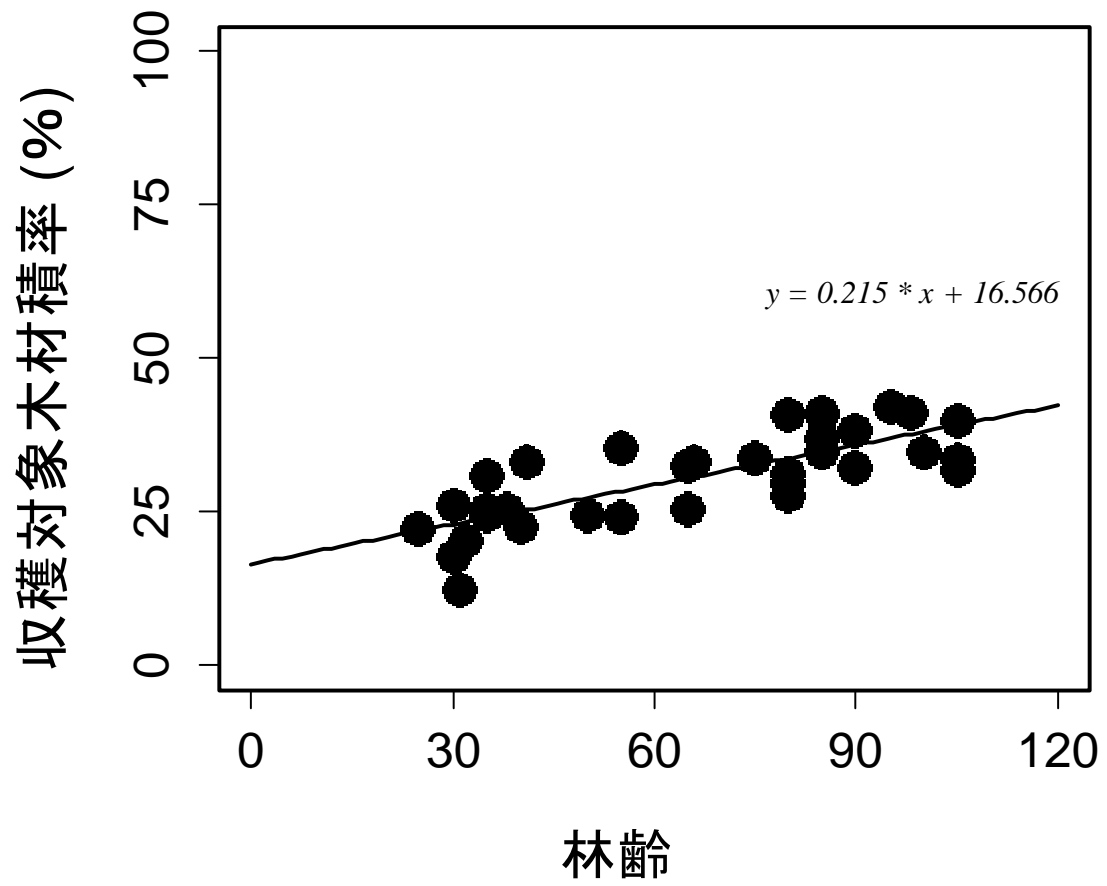


図 5-6. 林齡と收穫対象木の材積率との関係

収穫対象木

全生残木

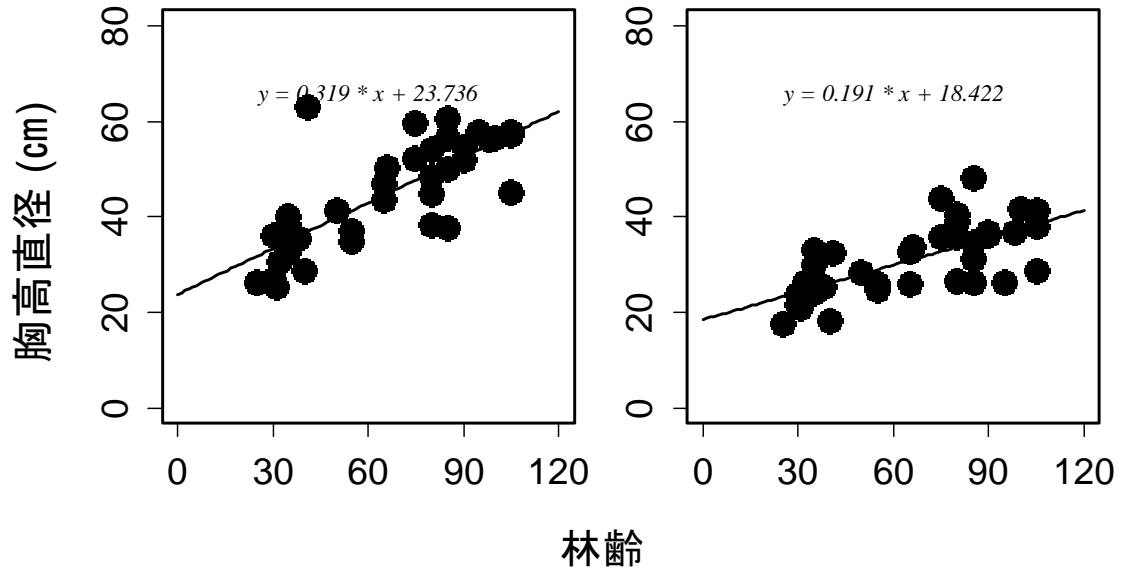


図 5-7. 林齢と収穫対象木および全生残木の胸高直径との関係

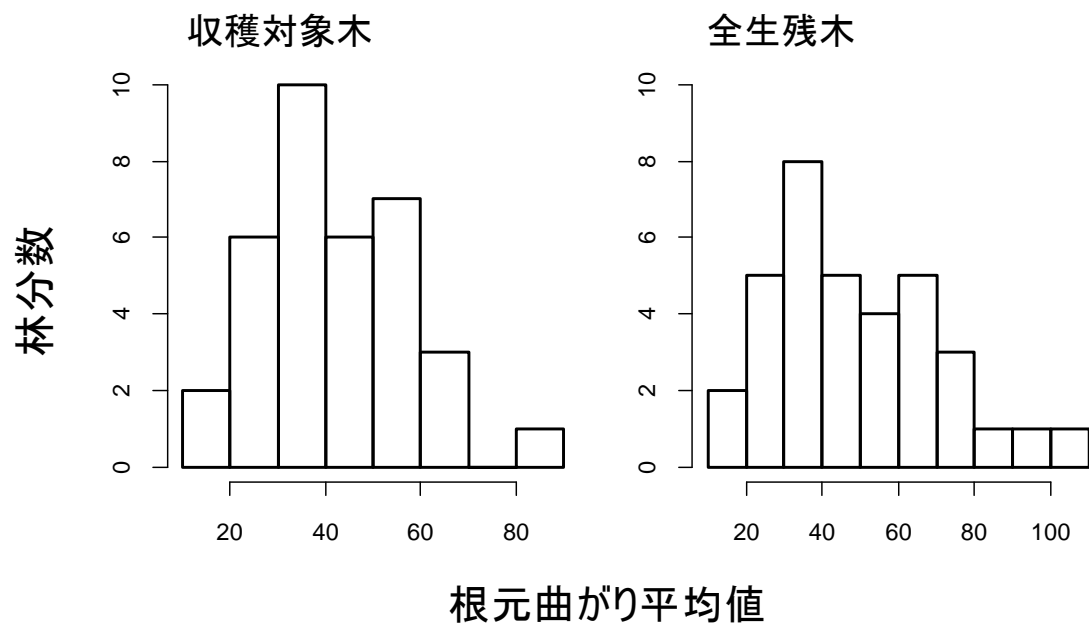


図 5-8. 収穫対象木および全生残木の根元曲がりの林分平均値