

トドマツ間伐試験地の74年間の成長経過

浅井達弘*

Tree growth and mortality for seventy-four years in a thinning experiment of *Abies sachalinensis* plantation

Tatsuhiko ASAI*

要 旨

1948年（林齢20年生時）に北海道東部の道有林池田経営区（現十勝管理区）に設定された「久保トドマツ人工林間伐試験地」は、設定後5年ごとに50年間、胸高直径（全木）と樹高（サンプル木）が測定されてきた。試験設計は、無間伐（0.1812ha）と2回間伐（0.101ha）、3回間伐（0.101ha）、6回間伐（0.2ha）である。林齢74年生時に無間伐区を中心に台風による大きな被害を受けた。被害直後に間伐試験地の全個体の胸高直径と樹高を測定するとともに被害形態などを調査し、これまでの資料と併せて74年間の成長経過を分析した。

林齢20年生以後74年生までの54年間の枯死木は、無間伐区が最も多く、間伐回数が増えるにしたがって枯死木の数は減少した。無間伐区では、期首の直径が小さかった個体を中心に期首本数の75%以上が枯死した。胸高直径45cm以上の個体は6回間伐区にのみ出現し、40cm以上の個体も間伐回数が多い処理区ほど多数出現するなど、間伐による直径成長の促進効果が認められた。林分成長量は林齢40年生時にピークがあり、以後、漸減傾向を示した。

無間伐区の台風による被害木数は、間伐を行った3区よりも有意に多かった。被害形態では、風害木の80%以上が根返りであった。根返り木の倒れた方向は、間伐回数や胸高直径と関係なく、南東の強風に対応して北から西であった。耐風性の指標に用いられる形状比や枯れ上がり高率は無間伐区で高かったが、区内の風害木の発生は形状比や枯れ上がり高率と無関係であった。

キーワード：枯死木、直径成長、林分成長、根返り

はじめに

北海道東部の道有林池田経営区（現十勝管理区）には、1948年（林齢20年生時）に設定された「久保トドマツ人工林間伐試験地」があり、設定後5年ごとに50年間、胸高直径（全木）と樹高（サンプル木）が測定されてきた。無間伐区の資料は、トドマツ林の最多密度線の決定（真辺，1974；浅井，1984）や林分成長モデルの検証（菊沢，1981）に利用されるなど、世界的にも希有で貴重なものである。しかし、林齢74年生時の2002年10月2日に、北海道を縦断した台風21号により無間伐区に風害木が多数発生し、間伐試験地としての継続は不可能となった。

そこで、台風被害直後の間伐試験地において最終調査を行い、試験地設定後54年間の資料の総括として、

* 北海道立林業試験場 Hokkaido Forestry Research Institute, Bibai, Hokkaido 079-0198

[北海道林業試験場研究報告 第43号 平成18年3月, Bulletin of the Hokkaido Forestry Research Institute, No.43, March, 2006]

これまでの資料と併せて胸高直径や樹高、材積などの経年変化を示す付表を作成した。また、今回の調査で明らかとなったトドマツ人工林の樹高成長や台風被害の特徴について報告する。さらに、枯死木の発生や直径成長量、林分成長量などに対する間伐効果について、これまでの報告内容を確認するとともに新たな視点からの検討を加える。

間伐試験地の概要と調査方法

間伐試験地は、北海道東部に位置する道有林池田経営区（現十勝管理区）の1929年植栽のトドマツ林（2林班93小班：豊頃町）に1948年（林齢20年生時）に設定された。当間伐試験地の概要を、北海道林務部（1982, 1984）、阿部（1983）、阿部ほか（1989）、北海道水産林務部道有林管理室（1999）などの詳細な記載に基づき、以下に抜粋・整理する。

試験地は海拔高120mの丘陵状地形の尾根から南東斜面に位置し、傾斜は5～10°である。地質は新第三紀層凝灰質砂質泥岩の上部に約30cmの火山灰をのせている。土壌型はBl_D型で、I層は腐植に富む新しい火山灰、II層は白色または黄褐色のやや粗粒の火山灰で腐植に乏しい。ⅢA₁層は古い火山灰で腐植に富み黒色～黒褐色を呈し、ⅢA₂層以下の凝灰質の層に漸変している。年平均気温は6℃、年降水量は900mmで降雪量は少ない。

試験目的は、間伐による生立木数の変化と林分の成長量、単木の成長経過の関係を把握することによって、トドマツ人工林の定量的な間伐指針を得ることである。試験設計は、無間伐と2回間伐、3回間伐であり、処理面積はそれぞれ0.1812haと0.101ha、0.101haである。間伐は、2回間伐区では林齢40、60年生時、3回間伐区では林齢20、40、60年生時にそれぞれ実施された。また、1968年（林齢40年生時）に、一般的な施業が行われてきた隣接林分が6回間伐区（0.2ha）として間伐試験地に編入された。6回間伐区では、林齢24、26、30、33、36、40年生時に間伐が実施された。

胸高直径の調査は、試験地内の生立木を個体識別し、林齢20年生時から70年生時まで5年ごとに全木を測定した。ただし、無間伐区を除く各間伐区は林齢45年生時が欠測である。測定方法は、林齢20年生時から45年生時まで、生立木の胸高直径を2方向（斜面方向とその直角方向）から輪尺を用いて測定し、その平均値を1mm単位で記載した。林齢50年生時以降は直径巻尺を用いて1mm単位で測定した。樹高の調査は、林齢20、25年生時は測棒を用いて0.1m単位で全木を測定した。30年生時以降はブルーメライズ測高器を用いて直径階別に十数本の樹高を測定し、樹高曲線を作成して単木ごとの樹高を推定した。単木材積は、中島（1943）の樹高別、直径別の樹幹形数の実験式を用いて算出した。

2002年10月（林齢74年生時）に、北海道を縦断した台風21号により、無間伐区に風害木が多数発生した。風害の発生後1ヵ月が経過した2002年11月に、前回の測定時（林齢70年生時）に生存していた個体を、生立木、風害木（幹折れ、根返り）、台風以前の枯死木に区分し、胸高直径と樹高、生枝下高を測定した。根返り木の樹高、枝下高は巻尺を用いて、その他の木の樹高、枝下高はバーテックス測高器を用いて、それぞれ0.1m単位で測定した。また、根返り木については倒れた方向、幹折れ木については折れた位置（地上高）を測定した。なお、ここでは台風による傾斜木5本は生立木として扱った。

結果と考察

1. 胸高直径と樹高の関係

図-1に、林齢74年生時の胸高直径と樹高の関係を示した。ひとつの図にすると煩雑になるため、図-1Aに無間伐区と6回間伐区を、図-1Bに2回間伐区と3回間伐区をそれぞれ分けて示した。まず、無間伐区と6回間伐区を比較すると、同じ直径階では6回間伐区よりも無間伐区の樹高の方が高い傾向が認められた。実際に、両処理区の個体が数多く混在する30～40cmの直径階で比較すると、無間伐区の平均樹

高(27.4m)は6回間伐区(26.1m)より有意に高かった(t=4.778, P<0.001)。一方、2回間伐区と3回間伐区では、同じ直径階の個体はほぼ等しい樹高の範囲に散らばっていて、30~40cmの直径階で比較しても2回間伐区と3回間伐区の平均樹高(28.4mと28.0m)には有意な差は認められなかった(t=0.854, P=0.197)。

林齢30年生時以降50年生時までの単木ごとの樹高は、調査年ごとに樹高曲線を作成して推定してきた(北海道林務部, 1982)。しかし、林齢55年生時以降70年生時までの4回の調査では、直径階別に測定した十数本のサンプル木の樹高がほぼ頭打ちになっていることから、単木ごとの樹高は林齢50年生時の樹高曲線を用いて推定してきた(北海道林務部, 1984, 1989, 1994; 北海道水産林務部道有林管理室, 1999)。この樹高曲線を林齢74年生時の胸高直径と樹高の関係に当てはめてみると、直径20cm程度までの6回間伐区には適用できるかもしれないが、その他の処理区や直径20cm以上の6回処理区には適用できないことは明らかである(図-1 A, B)。即ち、林齢50年生時の樹高曲線を用いて推定した最近4回の単木ごとの樹高は過小に推定していた可能性が高い。このことは、最上層の個体の樹高が30m(6回間伐区は29m)を超えるような閉鎖林分で、樹高を正確に測定することの困難性を示唆する。今回の場合は、サンプル木の樹高を測定する際に見え難い

梢端を少し低い位置に見積もったであろうことが、樹高の伸びを検出できず前回(林齢50年生時)と同じ樹高曲線の適用に繋がったものと考えられる。また、林齢50年生時の推定樹高と74年生時の実測樹高の差は、6回間伐区で平均2.9m、他の3処理区で平均5.4~5.7m(付表-2参照)に達していたことは注目に値する。それは、林齢50年生以後でもトドマツ人工林の樹高成長が継続することを実証したからである。

いずれにしても、林齢50年生時の樹高曲線を用いた推定値をそのまま使うと、林齢70年生から74年生までの4年間に、樹高が3, 4mも伸びるという非現実的な結果を導くことになる。このような誤りを避けるには、林齢55, 60, 65, 70年生時の各樹高曲線を新たに調製する必要がある。

当間伐試験地の樹高曲線には、次式が用いられている。

$$H = D^2 / (aD + b)^2 + 1.3 \dots\dots\dots(1)$$

ただし、Hは樹高、Dは胸高直径、a, bは係数をあらわす。林齢74年生時の胸高直径と樹高の関係では、

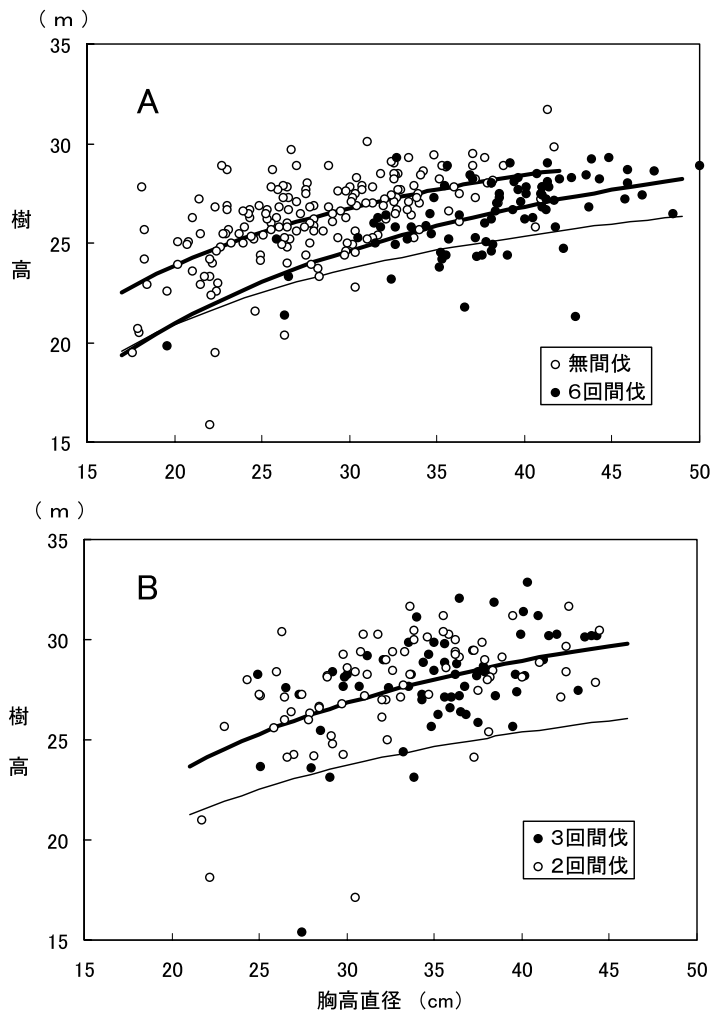


図-1 林齢74年生時の胸高直径と樹高の関係
 A: 無間伐区と6回間伐区 B: 2回間伐区と3回間伐区

注: 図中の太線は、Aの上が無間伐区 $H = D^2 / (0.1736D + 0.7388)^2 + 1.3$, 下が6回間伐区 $H = D^2 / (0.1701D + 1.1104)^2 + 1.3$, Bが2回間伐区と3回間伐区の共通の樹高曲線 $H = D^2 / (0.1679D + 0.8700)^2 + 1.3$ をそれぞれ示す。また、細線はA, Bとも林齢50年生時の全処理区共通の樹高曲線 $H = D^2 / (0.1817D + 0.8856)^2 + 1.3$ (北海道林務部, 1984, 1989, 1994; 北海道水産林務部道有林管理室, 1999)を示す。

無間伐区と6回間伐区に間に差があったこと、2回間伐区と3回間伐区に差はないが両区を併せた30~40cmの直径階の平均樹高(28.2m)は無間伐区(27.4m)より有意に高かった($t=2.808$, $P<0.0028$)ことから、無間伐区、6回間伐区および2、3回間伐区に分け、それぞれ最小2乗法を用いて(1)式の係数a, bを算出して樹高曲線を決定した(図-1 A, B)。また、20年生から50年生までの加齢に伴う樹高曲線の係数a, bの変化はべき乗式でほぼ近似できる(図-2)ので、50年生から74年生の間もべき乗式で近似できると仮定して、処理区別に林齢55, 60, 65, 70年生時の係数a, bを算出した(表-1)。

以上のことから、この報告では林齢55, 60, 65, 70年生時の単木ごとの樹高は新たに決定した樹高曲線式により算出した値を用いることとする。

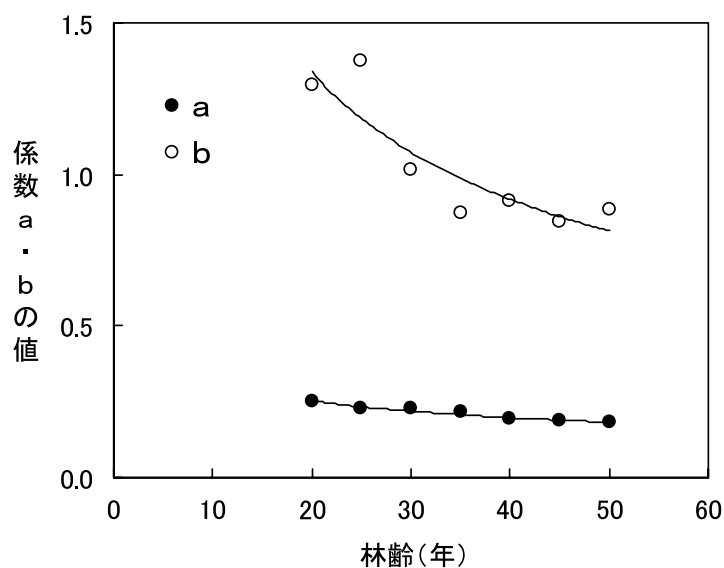


図-2 林齢20~50年の加齢に伴う樹高曲線の係数 a, b の変化

表-1 処理区別・林齢別の樹高曲線の係数 a, b

林齢	無間伐区		2, 3回間伐区		6回間伐区	
	a	b	a	b	a	b
55	0.1797	0.8474	0.1782	0.8819	0.1788	0.9360
60	0.1779	0.8140	0.1751	0.8784	0.1762	0.9842
65	0.1763	0.7844	0.1723	0.8752	0.1739	1.0307
70	0.1747	0.7580	0.1698	0.8723	0.1717	1.0757

2. 間伐効果

林齢20年生時から5年間隔で測定を続けてきた当間伐試験地の胸高直径、樹高および本数・材積の推移を付表1~3に示した。これらの値は、北海道林務部(1982)によって整理された単木ごとの年度別調査資料を基に精査・追跡したものであるが、本数などの一部はそれらの値と異なるものとなった。また、林齢55年生以降については、新たに決定した樹高曲線を用いたので、樹高や材積などは既報値(北海道林務部, 1984, 1989, 1994; 北海道水産林務部道有林管理室, 1999; 阿部ほか, 1989)とは当然異なった。しかし、前者の相違箇所は限定的で、数値的な相違も小さかったことと、後者の相違は各処理区に共通していたことから、今回の調査結果はこれまでの報告(菊沢, 1981; 阿部, 1983; 阿部ほか, 1989; 北海道林務部, 1984, 1989, 1994; 北海道水産林務部道有林管理室, 1999など)の主旨に変更を加えるようなものではない。ここでは、枯死木の発生や直径成長量、林分成長量などに対する間伐効果について、これまでの報告内容を確認するとともに新たな視点からの検討を加えた。

なお、この節で検討の対象とする期間は、間伐試験地設定の林齢20年生時から台風被害の発生した74年生時(被害前の状態)までである。台風被害(被害後の状態)については次節で検討する。

(1) 枯死木の発生

表-2に、林齢74年生時の生残木と間伐試験地設定以後54年間の枯死木、間伐木の1ha当たりの本数を示した。合計欄は間伐試験地設定時(林齢20年生時)の本数、下欄のカッコ内の数値は各区の合計に対

表-2 林齢74年生時の生残木と間伐試験地設定以後54年間の枯死木、間伐木の1ha当たりの本数

	無間伐区	2回間伐区	3回間伐区	6回間伐区
生残木	982 (24.6)	772 (18.8)	644 (15.3)	420 (13.0)
枯死木	3,008 (75.4)	1,287 (31.3)	426 (10.1)	210 (6.5)
間伐木		2,059 (50.0)	3,129 (74.5)	2,600 (80.5)
合計	3,990 (100.0)	4,118 (100.0)	4,198 (100.0)	3,230 (100.0)

注：() は各区の合計に対する100分率を示す。

する100分率を示す。間伐試験地設定時の無間伐区、2回間伐区、3回間伐区の本数は、1929年に植栽した本数の4,200本（北海道林務部、1982）に近く、この時点では立木密度に起因する枯死木の発生は少なかったと推察される。一方、林齢40年生時に間伐試験地に編入された6回間伐区の20年生時の本数は3,230本であり、他の処理区と比べて700~1,000本少なかった。6回間伐区では、間伐試験地編入以前に5回、2,270本/ha、166m³/haの間伐が行われたとの記述（北海道水産林務部道有林管理室、1999）があるが、もともとの植栽本数が少なかったのか、20年生時まで何らかの被害を受けて本数が減少したのかは明らかでない。

生残木と枯死木は無間伐区で最も多く、間伐回数が増えるに従って生残木と枯死木の数は減少した。また、間伐木は3回間伐区で最も多かったが、合計に対する比率で比較すると間伐回数が多い処理区ほど間伐木の占める比率が高かった。このように、間伐を多く行うと生残木はその分だけ少なくなるが、放置しておくで枯死する個体を伐採することや残した個体の光環境が良くなることなどから、枯死木の発生はずっと少なくなる。即ち、間伐には枯死木の発生を防ぐ効果があるといえる。

一方、無間伐区では過去54年間に期首本数の75%以上の個体が枯死した。どのような大きさの個体が生き残り、あるいは枯死したかを確認するために、図-3に、林齢20年生時の胸高直径階別の頻度分布を、林齢74年生時の生残木とこの54年間に発生した枯死木とに区分して示した。期首の直径が6cm未満の個体の枯死率は100%、6cm以上8cm未満で91%、以下10cm未満で79%、12cm未満で60%と漸減し、16cm以上の個体の枯死率は17%にまで低下した。このように、閉鎖直後と推測される林齢20年生時の直径がその後54年間もの長期間にわたる枯死の発生と密接な関係が認められるのは興味深い。枯死木の発生が期首の個体サイズに大きく依存する傾向は、ダケカンバ二次林（浅井ほか、1997）においても認められている。

閉鎖時に林冠に達していない下層木（大

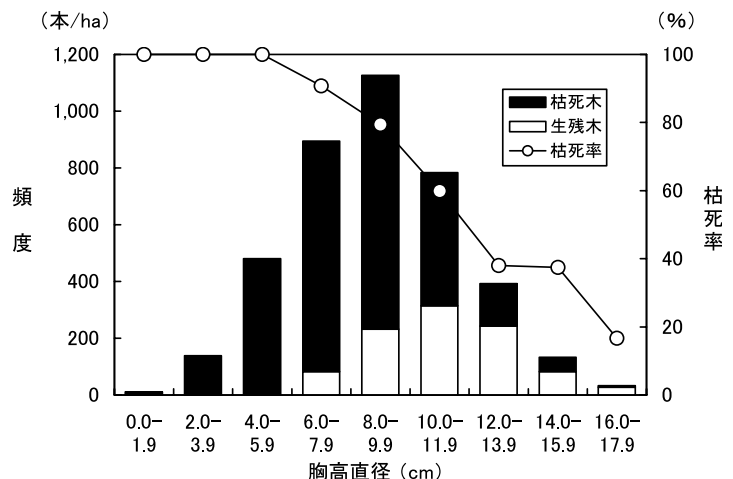


図-3 林齢20年生時の胸高直径階別の頻度分布と枯死率（無間伐区）

注：枯死木は林齢74年生までの54年間の発生本数を、生残木は林齢74年生時の本数をそれぞれ示す。また、枯死率は、各直径階における枯死木の割合を示す。

半は相対的に直径の小さい個体)は光条件が好転しない限り徐々に光合成量が低下し、枯死に至るものと推察される。樹木は一度定着するとその場を移動できないことから、光条件の好転は隣接木の枯死以外に期待できない。樹木の枯死は各種の気象害や病虫獣害などが誘因になって生じると考えられる。しかし、そのような誘因がない場合には、隣接木の伐採(間伐)が下層木の枯死を防ぐ唯一の手段となる。枯死木の発生を防ぐという側面でも間伐は大きな効果を発揮するものとする。

(2) 直径成長量

間伐の主要な目的(効果)の一つに残した個体の直径成長の促進が挙げられる。図-4に、処理区別の平均胸高直径の経年変化を示した。間伐試験地に6回間伐区が編入された林齢40年生時以降では、無間伐区の胸高直径が最も小さく、2回、3回、6回と間伐回数が増えるに従って胸高直径は大きい値を示した。処理区間の平均直径の差はどの組み合わせにおいても統計的に有意な差を示した(Tukey-Kramer Test: 5%水準)。

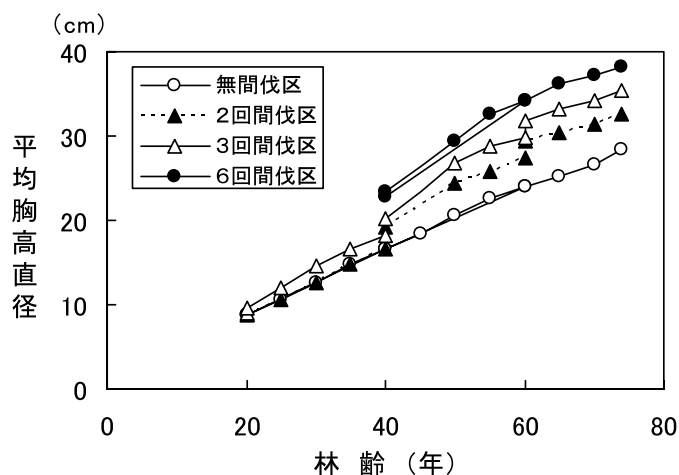


図-4 処理区別の平均胸高直径の経年変化

林分の平均直径は、生残木の直径成長によって増加するだけでなく、小径木の除去によっても増加する。表-3に、間伐試験地で実施された6回の間伐について、間伐前後の平均胸高直径の差の検定結果(t検定)を示した。間伐前の平均直径(D)に対する間伐木の平均直径(d)の比: d/D は、いずれも1より小さいことから、比較的小さいサイズの個体がより多く間伐されたことが分かる。t検定の結果は、6回間伐区を除いた、いずれの間伐においても間伐後の平均直径が間伐前のそれよりも有意に大きいことを示した。このように、小径木を除去するだけで計算上、平均直径が有意に大きくなることは、直径成長に対する間伐効果を検討するには十分に注意を払う必要がある。

そこで、林齢20年生時の3回間伐区と無間伐区のデータを基に、間伐直後の平均直径の増加(計算上の増加)と林齢30年生時までの平均直径の増加(成長)を比較した。まず、間伐直後の平均直径の増加は、間伐前の平均直径8.9cmと間伐後の平均直径9.7cmの差、0.8cmであった。次に、林齢30年生までの10年間の直径成長について、間伐した場合としない場合に分けて推定した。間伐しなかった場合を、林齢20年生時のha当たりの本数や平均胸高直径が類似する無間伐区のデータ(付表-1, 3参照)で代用した。ただし、無間伐区の全個体を対象にするのではなく、大きい個体から順番に、その平均直径が3回間伐区の間伐後と同じ9.7cmになる個体までを抽出した。このような無間伐区から抽出した個体群と3回間伐区

表-3 間伐前後の平均胸高直径の差の検定結果

	20年生		40年生		60年生	
	t検定	d/D	t検定	d/D	t検定	d/D
2回間伐区			***	0.873	**	0.829
3回間伐区	***	0.879	***	0.905	**	0.778
6回間伐区			NS	0.961		

注: **, ***は、間伐前後の胸高直径の平均値にそれぞれ1%, 0.1%水準で統計的に有意差のあることを、NSは有意差のないことを示す。また、 d/D は間伐前の平均直径(D)に対する間伐木の平均直径(d)の比で、間伐強度の指標のひとつである。

の10年間の平均直径成長量は、それぞれ4.0cmと5.0cmであった。即ち、間伐によって平均直径は10年間で1.0cm多く成長すると推定した。以上のことから、林齢20年生時に間伐を行った場合、10年後には無間伐の場合に比べて、平均直径が1.8cm大きくなると推定された。ただし、このうち小径木を間伐したことによる計算上の増加が0.8cmを占めており、この値は決して小さくないと考える。特に直径成長が衰える壮年期以後に小径木に偏った間伐を行う場合には、平均直径の増加の大半を計算上の増加が占める可能性がある。なお、図-4では、平均直径の計算上の増加は垂直方向への上昇として、直径成長の良否は各処理区の調査データを結ぶ線分の勾配の大小として表れる。

菊沢(1981)は、当間伐試験地の間伐区と無間伐区のデータをY-N曲線にあてはめ、林分全体の本数、材積は無間伐区が間伐区よりも大きい、大径木側では間伐区のY-N曲線が無間伐区のY-N曲線より上方にずれ、間伐効果の生じていることを認めている。ここでいう間伐効果は、胸高直径がある大きさ以上の個体をより多く生産することをさす。そこで、今回のデータから林齢74年生時に、ある大きさ以上の個体が処理区別にどれだけ生残しているかを調べた(表-4)。胸高直径30cm以上の個体は3回間伐区と2回間伐区に多く、35cm以上の個体は3回間伐区に多く出現した。6回間伐区は、林齢74年生時の生残木が420本と少ないことがこの範囲の直径階の本数を制限していると考えられる。しかし、胸高直径45cm以上の個体は6回間伐区にのみ出現し、40cm以上の個体も間伐回数が多い処理区ほど多数出現した。このように6回間伐区は、林分材積では他の3区の70%(図-5参照)に過ぎないものの、胸高直径40cm以上の大径木が多数出現したこと、また、無間伐区では40、35、30cm以上のいずれの直径階を対象にしてもその本数が最も少なかったことなどから、当間伐試験地においても間伐効果は十分に発現していると考えてよい。

表-4 林齢74年生時の胸高直径階別の本数 (/ha)

直径階	無間伐区	2回間伐区	3回間伐区	6回間伐区
45cm 以上				35
40cm 以上	22	79	109	165
35cm 以上	116	267	376	320
30cm 以上	386	505	535	400

(3) 林分成長量

図-5に、この54年間の林分材積の経年変化を示した。林齢20年から40年にかけての無間伐区と2回間伐区の材積増加の軌跡はかなり類似していた。20年生時に間伐を行った3回間伐区は他の2処理区より少し材積の少ない位置を平行移動するような軌跡を示した。これら3区の材積増加の軌跡は林齢25~40年で最も勾配が急で、トドマツ人工林の最も旺盛な成長時期を示唆するものとする。無間伐区では55年生以降になると材積の増加は頭打ちになり、70年生以降では材積の低下が生じた。一方、2回

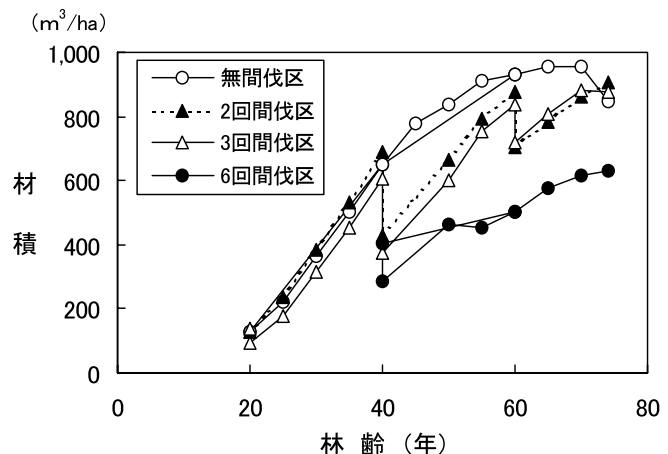


図-5 林分材積の経年変化

間伐区と3回間伐区は40年生以降、同じような材積の増減を示した。40年生と60年生時にそれぞれ間伐を行って立木密度を低下させたことで、材積増加の頭打ち時期が無間伐区よりも遅延したと考える。6回間伐区は、間伐試験地に編入された40年生時の生残木が他の3区の1/2以下と少なかった。このことが他の間伐区と比べて材積増加の勾配を緩くすることになったと考えられる。

各処理区の林分材積の最大値は、無間伐区で958 m^3 （林齢65年生時）、2回間伐区で908 m^3 （林齢74年生時）、3回間伐区で882 m^3 （林齢70年生時）、6回間伐区で633 m^3 （林齢74年生時）であった。トドマツ人工林の林分材積が900 m^3 を超えるような報告は今のところ見当たらない。

純成長量は、ある期間の期末材積から期首材積を引いた値であり、その期間中に間伐木や枯死木が多い場合には負の値となる。一方、粗成長量は、純成長量にその期間中の間伐木や枯死木の材積を加えた値であり、常に正の値となる。この粗成長量は、幹量のみを対象とした場合の（生態学で用いられる）純生産量の概念に近いといえる。純生産量とは、ある期間中に植物体となった有機物の総量であり、次式で示される。

$$\text{純生産量} = \text{植物体増加量} + \text{枯死・脱落量} + \text{被食量} \dots\dots\dots(2)$$

植物体増加量は、ある期間の期末の植物体量から期首の植物体量を引いた値であり、幹量のみを対象とした場合は純成長量そのものである。脱落量はその期間中の落葉・落枝量であり、被食量は食葉性害虫などに食害された葉・枝・幹などの量である。幹量のみを対象とした場合には、脱落量や被食量は無関係または無視できる量となることから、純生産量は植物体増加量（純成長量）に枯死量（枯死・間伐材積）を足した値、即ち粗成長量と同じになる。

図-6に、純成長量と粗成長量の経年変化を示した。純成長量は、林齢30~40年生時をピークに低下し、70年生を超えると、無間伐区だけでなく3回間伐区でも負になった。ただし、林齢55年生時に6回間伐区で純成長量が負になったのは風害とその整理のための伐採によるものである。このように処理区間のばらつきが大きい純成長量と比べて、粗成長量の経年変化は各処理区とも類似した変化を示した。6回間伐区を除く3処理区では、粗成長量はいずれも林齢40年生時にピークがあり、以後、漸減傾向を示した。粗成長量は、前述したように幹量を対象とした場合の純生産量（ある期間中に蓄えた幹量）、即ち各林分のそれぞれの時点での生産力と考えてよい。したがって、間伐回数の異なる4つの林分（処理区）の粗成長量がいずれも同様の漸減傾向を示すことは、トドマツ人工林の生産力そのものが低下し、もはや間伐などの密度調節では回避できない状態にあることを示すものと推察される。このような粗成長量の漸減傾向から、人工林としてのトドマツの寿命（粗成長量 ≈ 0 ）は長くても100年程度とみ

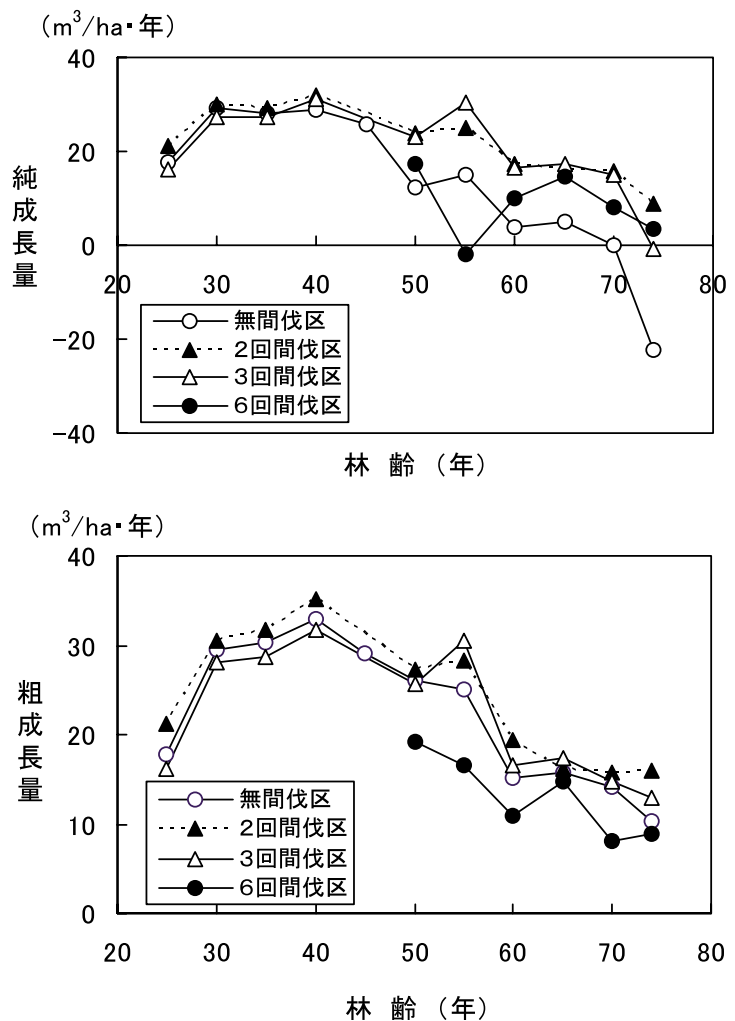


図-6 純成長量と粗成長量の経年変化

てよく、その意味では長伐期には不向きな樹種であると考えられる。

なお、各処理区の純成長量と粗成長量の最大値は、無間伐区で1 ha当たり1年当たり28.8と32.9m³（林齢40年生時）、2回間伐区で31.9と35.2m³（林齢40年生時）、3回間伐区で31.1と31.8m³（林齢40年生時）、6回間伐区で17.4と19.3m³（林齢50年生時）であった。30m³を越す純成長量や35m³もの粗成長量はトドマツ人工林としては極めて大きい値であるといえる。

図-7に、林齢74年生時の生残木と20~74年生の期間中の枯死木および間伐木の積算材積を示した。これまでに当場で実施された数多くの間伐試験（菊沢・浅井, 1979；清和ほか, 1986；菊沢, 1987；水井ほか, 1987；阿部ほか, 1989；浅井, 1995；梅木, 2001など）から、閉鎖林分に間伐を行った場合、材積間伐率が30~40%程度であれば、林分成長量は大きく低下しないことが経験的に知られている。今回の間伐試験地で実施された計6回の間伐の材積間伐率は14.0~38.5%（付表-3参照）であったことから、間伐による林分成長量の低下は少ないと推察された。実際に、生残木、枯死木、間伐木の合計材積は、6回間伐区を除くと、ほぼ等しい値を示した。6回間伐区では、林齢24, 26, 30, 33, 36, 40年生と2~4年ごとに6回の間伐が実施されており、林冠閉鎖の前にも間伐が実施された可能性が高い。このことが6回間伐区の合計材積を少なくしたと推察される。

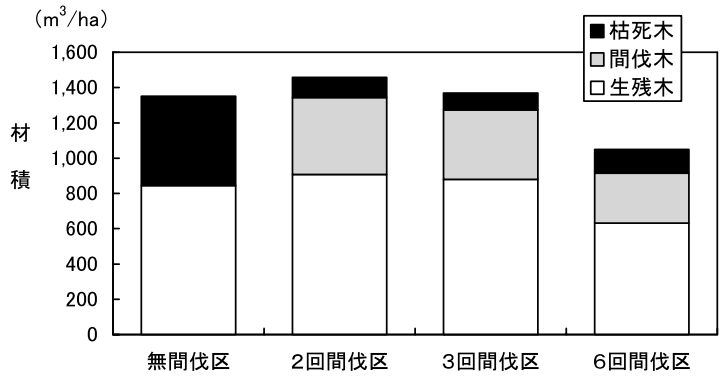


図-7 林齢74年生時の生残木と20~74年生の期間中の枯死木および間伐木の積算材積

から、間伐による林分成長量の低下は少ないと推察された。実際に、生残木、枯死木、間伐木の合計材積は、6回間伐区を除くと、ほぼ等しい値を示した。6回間伐区では、林齢24, 26, 30, 33, 36, 40年生と2~4年ごとに6回の間伐が実施されており、林冠閉鎖の前にも間伐が実施された可能性が高い。このことが6回間伐区の合計材積を少なくしたと推察される。

これまでの74年間に、6回間伐区を除く3処理区では1 ha当たり1,350~1,450m³の材を幹に蓄えた。このうち、無間伐区では505m³（37%）が枯死木となったのに対し、間伐区の枯死木は95~113m³（7~8%）に過ぎなかった。このように、幹に蓄えた量、言い換えると二酸化炭素の固定量は無間伐区と間伐区ではほぼ同じであるが、収穫して木材として利用できる量と利用した量、即ち、生残木と間伐木の合計量は間伐区の方が無間伐区よりもずっと大きかった。枯死木は二酸化炭素の発生源になることから、間伐は、枯死木の発生を防ぐことにより、吸収・固定した二酸化炭素を無駄なく利用する手段として、地球温暖化防止に貢献しているといえそうである。

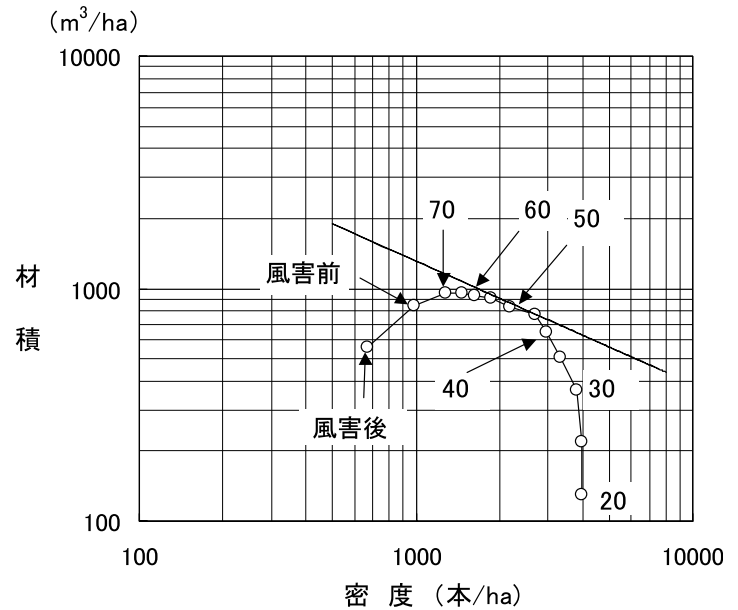


図-8 無間伐区の密度・材積関係の経年変化

注：図中の直線は最多密度線（浅井, 1984）を、数字は林齢をそれぞれ示す。

今回の間伐試験地の無間伐区は、試験地設定の林齢20年生時から完全な無間伐の状態を維持しながら5年間隔の調査が継続されてきた林分である。これらの貴重なデータは林分成長モデルの検証（菊沢, 1981）に活用されてきたほか、最多密度線の決定（真辺, 1974；浅井, 1984）などにも利用されてきた。図-8に、無間伐区の密度・

材積関係の経年変化を示した。林齢40年生以後70年生までの30年間、材積・密度関係の軌跡が最多密度線（浅井，1984）に沿って移動したと見るか、放物線とみなして最多密度線に点で接したと見るかは見解が分かれよう。いずれにしても、この無間伐区の軌跡が密度効果の機構解明に大きな示唆を与えるものと考えられる。今後の検討課題としたい。

3. 台風による被害の特徴

2002年10月2日に北海道の中央を南から北へ縦断した台風21号は、十勝地方の森林に大きな被害を与えた。間伐試験地に近い帯広では、午前6時過ぎに最大瞬間風速32.3m/sの南東風を記録した（気象庁，2006）。林齢74年生の当間伐試験地においても、無間伐区を中心に風害木が多数発生した。

表-5 処理区別の風害前後の本数、材積（m³）と被害率（%）

	無間伐区		2回間伐区		3回間伐区		6回間伐区	
	本数	材積	本数	材積	本数	材積	本数	材積
風害前	178	153.1	78	91.7	65	88.8	84	126.5
	982	845.1	772	907.5	644	878.7	420	632.5
風害木	57	52.1	2	1.2	10	12.3	17	24.9
	315	287.3	20	11.4	99	121.5	85	124.5
風害後	121	101.1	76	90.5	55	76.5	67	101.6
	668	557.7	752	896.2	545	757.2	335	508.0
被害率	32.0	34.0	2.6	1.3	15.4	13.8	20.2	19.7

注：各処理区の本数、材積の上欄は区当たりの、下欄は1ha当たりの値を示す。

無間伐区の面積は0.1812ha、2回間伐区と3回間伐区は0.101ha、6回間伐区は0.2haである。また、***、*は無間伐区の風害個体数に対して、それぞれ0.1%、5%水準で有意差のあることを示す（カイ2乗検定）。

表-5に、処理区別の風害前後の本数、材積と被害率を示した。間伐試験地では、2回間伐区の1ha当たり20本から無間伐区の315本まで、処理区により本数に違いはあるが、すべての処理区で台風による被害が発生した。各処理区を込みにした間伐試験地全体の風害木は86本であった。このうち無間伐区の風害木数は、間伐を行った3処理区よりも有意に多かった（対2回間伐区： $\chi^2=26.54$ ， $P<0.001$ ，対3回間伐区： $\chi^2=6.60$ ， $P=0.0102$ ，対6回間伐区： $\chi^2=3.91$ ， $P=0.0480$ ）。風害前の生立木に対する被害本数率は2回、3回、6回の各間伐区および無間伐区で、それぞれ2.6、15.4、20.2および32.0%であった。

図-9に、無間伐区の74年生時の胸高直径の頻度分布を示した。1998～2002年（林齢70～74年生）の4年間に台風以外で枯死（自然枯死）した木の平均胸高直径（22.2cm）は生立木（28.0cm）に比べて有意に小さく（ $t=-6.782$ ， $P<0.001$ ），枯死は過密に起因する自然間引きによるものと考えられる。無間伐区の自然枯死木55本は、2回間伐区の4本、3回間伐区の5本、6回間伐区の3本よりも有意に多かった（対2回間伐区： $\chi^2=13.97$ ， $P<0.001$ ，対3回間伐区： $\chi^2=9.18$ ， $P=0.0024$ ，対6回間伐区： $\chi^2=17.34$ ， $P<0.001$ ）。一方、風害木の平均胸高直径（29.2cm）は生立木と統計的な有意差が認められなかった（ $t=1.459$ ， $P=0.073$ ）。

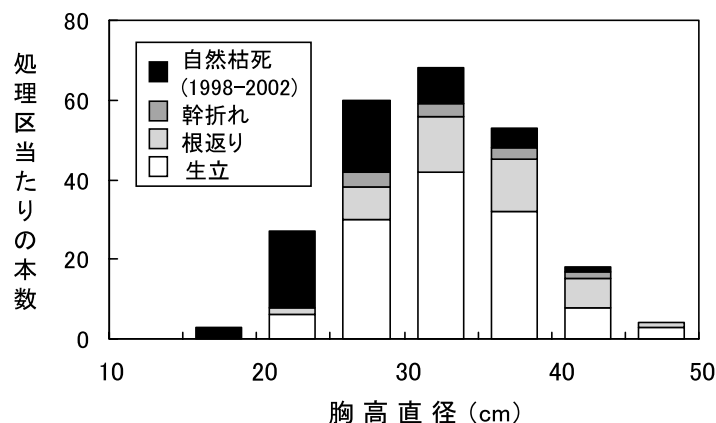


図-9 74年生時の胸高直径の頻度分布（無間伐区）

風害木86本の被害形態は、幹折れが14本、根返りが72本であった。根返り木は、間伐回数や胸高直径と関係なく、ほぼすべての被害木が北から西の方向に倒れた(図-10)。この風倒方向は、帯広で観測された最大瞬間風速の風向の南東風に対応するものと考えられる。また、幹折れ木は、間伐回数や胸高直径と無関係に、9本が地上高2m以下、3本が10m以上の位置で折れていた。

図-11に、処理区別の平均直径、形状比、枯れ上がり高率(生枝下高/樹高)および被害本数率を示した。平均直径は、前述したように間伐回数が多いほど、言い換えると立木密度が低いほど大きく、間伐による直径成長の促進効果の現れと考えてよい。また、耐風性の指標に用いられる形状比や枯れ上がり高率は無間伐区の方が間伐区よりも高かった。無間伐区は、過密のために自然枯死が多数発生する状態にあったと同時に、耐風性も低い状態にあったと考えられる。ただし、無間伐区の風害木と生立木との間に形状比や枯れ上がり高率などに違いはなく、どのような要因が風害木と生立木とを分けたかは不明である。

図-12Aに、無間伐区の風害木、自然枯死木の空間分布を示した。図-12Bの値は、図-12Aの2本の直線によってほぼ4等分された小調査区ごとの本数を示す。図-12Aから、左上(南東部)の小調査区に被害木・枯死木が集中していることがうかがえる。そこで、これを確かめるために、自然枯死や台風被害の発生する確率はどの小調査区でも等しいと仮定した場合に得られる理論度数(期待値)と実現度数(観測値)の差を検定した。その結果、1998年の生立木数から期待される幹折れ木や自然枯死木の小調査区ごとの本数(期待値)は観測値と統計的な有意差は認められなかったが、根返り木や風害木、枯死木の期待値は観測値と0.1%水準で統計的に有意な差が認められた(カイ2乗検定)。このように南東部に位置する小調査区でより多数の倒木が生じたことは、北西の風倒方向と同様に、台風21号の南東の強風に対応するものと考えられる。いずれにしても、今後はこの部分が風の侵入口となって恒常的に風害が発生し、林分の崩壊へと進行すると推察される。

風害後、無間伐区の材積は2回間伐区、3回間伐区よりも200m³以上少なくなった(表-5)。このため無間伐区は、間伐区の成長の比較対照としての意義を失った。道有林では、間伐試験地としての調査は今回で終了するものの、無間伐区についてはトドマツ人工林の衰退や倒木の腐朽状況、森林の再生を観察する場として現状のまま保存することとしている(北海道水産林務部道有林管理室, 2004)。

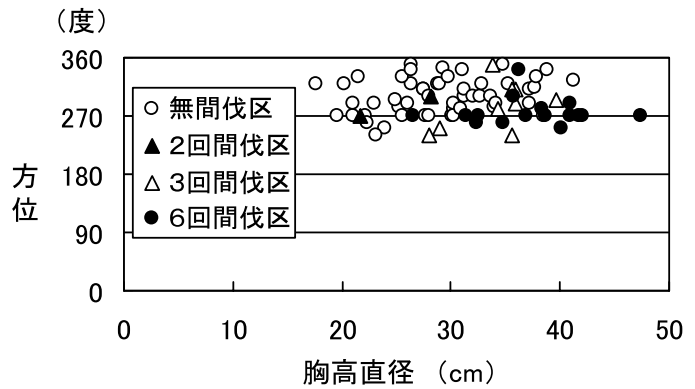


図-10 処理区別、胸高直径別の根返り木の倒れた方向

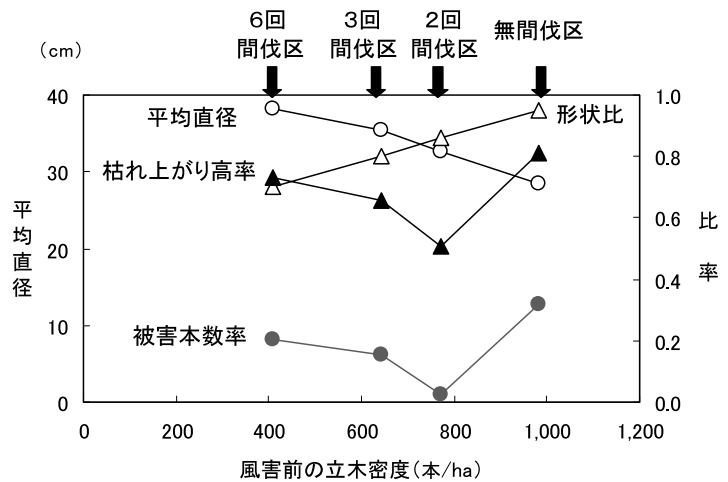


図-11 処理区別の平均直径、形状比、枯れ上がり高率および被害本数率

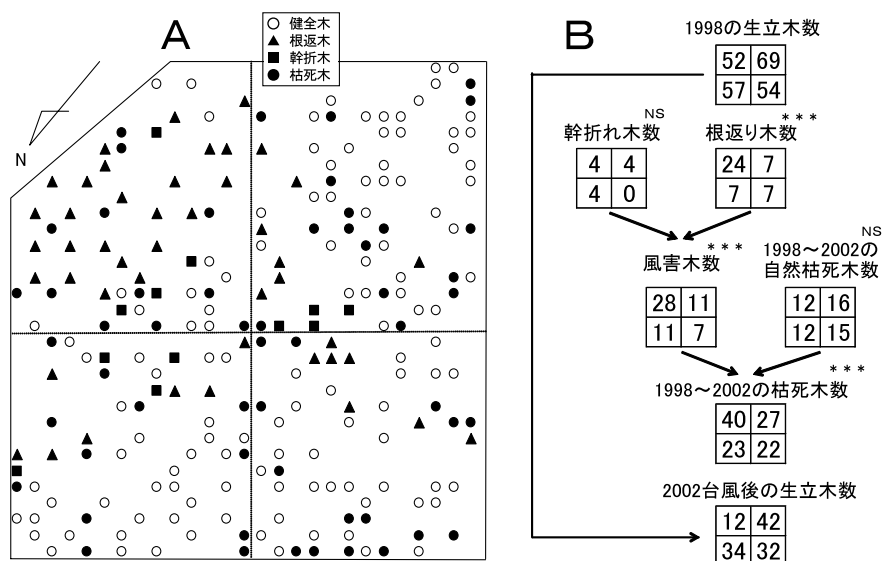


図-12 無間伐区の風害木，自然枯死木の空間分布(A)と4等分した小調査区ごとの本数(B)

注：図-12Bの数値は，図-12Aの直線によってほぼ4等分された小調査区ごとの本数を示す。また，文字の肩のNSは小調査区ごとの本数に統計的な有意差のないことを，***は0.1%水準で有意差のあることをそれぞれ示す（カイ2乗検定）。なお，図-12Aの枯死木は1998~2002の自然枯死木である。

謝 辞

本間伐試験地は，旧池田林務署の馬淵冬樹氏によって設定され，以後，池田林務署，十勝森づくりセンターをはじめとする道有林の多くの関係者によって長期間，維持・管理されてきた。5年ごとの定期調査も上述の方々を中心に，後半からは北海道立林業試験場の経営科，資源解析科が参画した。2002年の台風直後の調査は，北海道立林業試験場の育林科，防災林科，道東支場の参加を得て実施された。これらの方々および各関係機関に厚く感謝の意を表す。

文 献

- 阿部信行 1983 トドマツ人工林の施業法に関する研究(IV)久保トドマツ間伐試験地の生長解析. 北林試報 21:10-28.
- 阿部信行・佐伯堅三・浜田 革 1989 トドマツ間伐試験林における40年間の成長量の比較. 日林誌 71:481-490.
- 浅井達弘 1984 高密度に植栽したトドマツ模型林分の解析—密度効果の機構とその原因について—. 北林試研報 22:33-42.
- 浅井達弘 1995 機械作業を前提とした森林施業. 林業技術シンポジウム 28:7-12.
- 浅井達弘・水井憲雄・菊沢喜八郎 1997 残存密度を異にしたダケカンバ二次林の10年間の成長. 日林北支論 45:50-52.
- 北海道林務部 1982 久保トドマツ人工林間伐試験地の資料整理に関する報告書. 112p
- 北海道林務部 1984 林業経営試験 道有林における実践例. IV
- 北海道林務部 1989 林業経営試験 道有林における実践例. V
- 北海道林務部 1994 林業経営試験 道有林における実践例. VI
- 北海道水産林務部道有林管理室 1999 林業経営試験 道有林における実践例. VII
- 北海道水産林務部道有林管理室 2004 森林施業試験 道有林における実践例. VIII

- 菊沢喜八郎 1981 間伐効果に関する定量的研究 (I) 収量-密度図を用いた分析. 日林誌 63: 51-59.
- 菊沢喜八郎 1987 ヨーロッパトウヒの間伐試験. 北林試研報 25: 28-35.
- 菊沢喜八郎・浅井達弘 1979 日高地方における広葉樹林の林分構造と生長量. 北林試報 16: 1-17.
- 気象庁 2006 気象統計情報 災害をもたらした気象事例 2002年台風21号.
<http://www.data.kishou.go.jp/bosai/report/2002/20020930/20020930.html>
- 真辺 昭 1974 トドマツ密度管理図. 69p 北方林業会
- 水井憲雄・菊沢喜八郎・浅井達弘・清和研二 1987 トドマツ人工林の間伐試験 (I) -間伐後4年間の生長量と葉量の回復-. 北林試研報 25: 18-27.
- 中島広吉 1943 北海道立木幹材積表. 興林会北海道支部叢書 1: 46p
- 清和研二・浅井達弘・水井憲雄・菊沢喜八郎 1986 カラマツ人工林の間伐試験-強度間伐の有効性-. 日林北支論 35: 122-124.
- 梅木 清 2001 ヨーロッパトウヒ間伐試験地の林分成長と間伐の個体成長・形態に対する影響. 北林試研報 38: 37-46.

Summary

In a thinning experiment of *Abies sachalinensis* plantation started in 1948 (at the stand age of 20 year), diameter at breast height (DBH) and tree height (for sample trees) were measured every five years for 50 years. Four experimental plots were established; unthinned (0.1812ha), two-times thinned (0.101ha), three-times thinned (0.101ha), and six-times thinned (0.2ha). The stand suffered the serious wind damage by a typhoon mainly in the unthinned plot at the stand age of 74 year. Immediately after the damage, DBH and tree height of all individuals in the stand were measured and the damage types were recorded. Combining the previous data of the stand development, tree growth and mortality in the stand during 74 years were analyzed.

The number of trees died for 54 years from 20 to 74 year at the stand age was highest in the unthinned plot, and it decreased as the times of thinning increased. In the unthinned plot, more than 75 percent of trees that had been alive in 1948 died for the following 54 years and the size of those dead trees had been relatively small as compared with the survived trees. The trees with DBH of 45 cm or larger appeared only in the six-times thinned plot. The number of trees with DBH of 40 cm or larger was also higher in the more frequently thinned plots. Thus, thinning promoted diameter growth effectively. The stand volume growth had a peak at the stand age of 40 year and showed the gradual decrease after that.

The number of damaged trees by the typhoon in the unthinned plot was significantly higher than the other three thinned plot. As for the damage type, more than 80 percent of the damage trees was uprooted. The direction which the uprooted trees fell toward was between west and north, corresponding to the strong southeasterly wind, regardless of the frequency of thinning and DBH of the damage trees. Although the ratio of stem height to diameter and the ratio of clear length to tree height as indices of wind resistance were higher in the unthinned plot as compared with the other plots, wind damage occurred regardless of these two ratios within the unthinned plot.

Keywords : dead tree, diameter growth, stand growth, tree uprooting

付表-1 平均胸高直径 (cm) の推移

処理区	項目	1948 (20)	1953 (25)	1958 (30)	1963 (35)	1968 (40)	1973 (45)	1978 (50)	1983 (55)	1988 (60)	1993 (65)	1998 (70)	2002 (74)	2002台風後
無間伐区	(間伐前)	8.8	10.7	12.6	14.8	16.5	18.3	20.6	22.5	24.0	25.2	26.6	28.4	28.0
	枯死木		1.8	5.8	7.0	9.6	10.6	13.1	14.1	16.4	18.9	20.0	22.1	29.2
2 回間伐区	間伐前	8.8	10.6	12.6	14.8	16.5		24.3	25.9	27.4	30.5	31.5	32.7	32.9
	間伐木					14.4				22.7				
	間伐後					19.2				29.4				
	枯死木		1.0	6.9	7.0	9.6		8.7	23.3	15.9			22.8	24.9
3 回間伐区	間伐前	8.9	11.9	14.7	16.6	18.3		26.7	28.8	29.8	33.2	34.2	35.3	35.5
	間伐木		7.8			16.6				23.2				
	間伐後		9.7			20.3				31.9				
	枯死木			11.9	9.5	8.0		8.5					29.8	34.6
6 回間伐区	間伐前					22.8		29.4	32.6	34.2	36.2	37.2	38.1	38.3
	間伐木					21.9								
	間伐後					23.3								
	枯死木							16.7	26.7	28.5			35.1	37.6

注：最上欄の数値は調査年（林齢）を示す。

付表-2 平均樹高 (m) の推移

処理区	項目	1948 (20)	1953 (25)	1958 (30)	1963 (35)	1968 (40)	1973 (45)	1978 (50)	1983 (55)	1988 (60)	1993 (65)	1998 (70)	2002 (74)	2002台風後
無間伐区	(間伐前)	7.3	9.0	11.6	14.8	17.1	19.1	20.7	22.2	23.3	24.3	25.2	26.2	26.2
	枯死木		2.5	5.7	8.3	11.9	14.1	16.7	17.9	19.8	21.5	22.7	23.9	26.2
2 回間伐区	間伐前	7.2	9.0	11.5	14.3	17.1		22.1	23.2	24.4	25.9	26.8	27.7	27.8
	間伐木					16.2				23.0				
	間伐後					18.2				24.9				
	枯死木			6.4	8.3	11.8		12.6	21.3	19.4			24.4	22.6
3 回間伐区	間伐前	7.5	9.7	12.4	15.0	17.8		22.8	24.0	25.0	26.5	27.4	27.9	28.2
	間伐木		7.0			17.2				23.0				
	間伐後		7.9			18.5				25.6				
	枯死木			9.5	9.7	10.7		12.3					26.5	26.3
6 回間伐区	間伐前					19.6		23.5	24.4	25.0	25.6	26.0	26.4	26.4
	間伐木					19.4								
	間伐後					19.7								
	枯死木							17.6	22.8	23.6			26.0	26.6

注：最上欄の数値は調査年（林齢）を示す。1948年と1953年、2002年は個体ごとの実測値、それ以外の年は樹高曲線から算出した個体ごとの推定値のそれぞれ平均値である。

付表-3 本数・材積 (m³) の推移

処理区	項目	1948 (20)		1953 (25)		1958 (30)		1963 (35)		1968 (40)		1973 (45)		1978 (50)		1983 (55)		1988 (60)		1993 (65)		1998 (70)		2002 (74)		2002台風後		
		本数	材積	本数	材積	本数	材積	本数	材積	本数	材積	本数	材積	本数	材積	本数	材積	本数	材積	本数	材積	本数	材積	本数	材積	本数	材積	
無間伐区	(間伐前)	723	23.6	720	39.8	690	66.1	601	91.5	532	117.5	478	140.8	394	151.9	337	165.4	295	169.0	266	173.6	233	173.4	178	153.1	121	101.1	
	枯死木	3,990	130.4	3,974	219.5	3,808	384.9	3,317	504.8	2,936	648.6	2,638	777.2	2,174	838.1	1,860	912.5	1,628	932.5	1,468	957.8	1,286	956.8	982	845.1	668	557.7	
2 回間伐区	間伐前																											
	間伐木																											
	間伐後																											
	枯死木																											
3 回間伐区	間伐前	416	13.0	415	23.7	402	38.8	350	53.6	311	69.8	298	16.6	464	69.8	315	51.3	232	55.4	160	53.7	182	71.7	304	152.7	315	287.3	
	間伐木	4,119	128.8	4,109	235.1	3,980	384.5	3,465	531.2	3,079	690.9			1,238	666.6	1,208	791.4	1,158	877.6	812	784.6	812	863.8	772	907.5	752	896.1	
	間伐後																											
	枯死木																											
6 回間伐区	間伐前																											
	間伐木																											
	間伐後																											
	枯死木																											

注：最上欄の数値は調査年（林齢）を示す。本数、材積の上欄は処理区当たり、下欄は1 ha当たりの値を示す。

6 回間伐区は、林齢40年生まで5回、2,270本/ha、166m³/haの間伐が行われた（北海道水産林務部道有林管理室、1999）。また、50年生までの材積、枯死材積、間伐材積は北海道林務部（1982）から引用した。