スギ林における壮齢時の間伐は樹高の長期的な成長にどのように影響するか？

正 木 隆^{*1}・櫃 間 岳²・八木橋 勉²・野口麻穂子²・柴田 銃江²・高田 克彦³

1908年に植栽された秋田県のスギ人工林で、45～73年生の期間に強度間伐（収量比数0.6相当）から無間伐（収量比数0.9相当）まで4段階の密度管理が3回の間伐によって行われ、現在104年生に達している林分を対象に、無間伐区と比べて間伐区の個体の樹高成長が低かったかどうかを検証した。間伐前の45年生の時点で間伐区と無間伐区のそれぞれから胸高直径および樹高が同等の立木を1個体ずつ選んでペアとし、それらの中から、間伐処理以降も2個体が同等の直径成長を示したペアを対象に、個体間の樹高および形状比を比較した。その結果、強度間伐区の個体は60年生以降に無間伐区の個体よりも樹高成長速度が低い傾向を示した。中庸度・弱度の間伐区では、少し遅れて70年生以降に同様の傾向がみられた。104年生時には、間伐区の個体の樹高は無間伐区で同等の直径成長を示した個体と比べて平均で1～2 m低く、形状比は平均で2～4ポイント低下していた。104年生時に、強度・中庸度間伐区の形状比は無間伐区よりも低かったが、それは間伐による直径成長の促進だけではなく、樹高成長が相対的に低かったことの影響もあると考えられた。

キーワード：形状比、長伐期施業、密度管理、長期モニタリング、樹高成長

Takashi Masaki,^{*1} Gaku Hitsuma,² Tsutomu Yagihashi,² Mahoko Noguchi,² Mitsue Shibata,² Katsuhiko Takata³ (2013)
How Do Thinning Intensities Affect Long-term Growth of Tree Height in a Japanese Cedar Plantation? J Jpn For Soc 95: 227-233 Change in height growth of Japanese cedar was investigated within a plantation of this species which was planted in 1908, was thinned three times during the age of 45～73 years old with various intensities, and was 104 years old at the last inventory. To test whether the height growth rate of trees should be lower after thinning operations than without thinning operations, pairs of 45-years-old trees were selected; for each pair, one tree was selected from stands with thinning operations and the other from those without thinning, with criteria that they were almost equivalent in terms of diameter and height. Among these pairs (189 in total), the pairs which showed equivalent diameter growth of constituent trees afterward were selected, and height and slenderness (height/diameter) was compared between the trees belonging to the same pair. The trees of intensively thinned stand showed lower height growth beyond the age of 60, and this tendency persisted until age of 104. The trees of moderately and lightly thinned stands showed a similar pattern during the later period. At the age of 104 year old, trees in the moderately- or intensively-thinned stands showed lower values for slenderness than those in the un-thinned stands. This was explained by both greater diameter growth and lowered height growth caused by thinning operations.

Key words: slenderness, longer rotation, density control, long-term monitoring, height growth

I. は じ め に

スギ (*Cryptomeria japonica*) やヒノキ (*Chamaecyparis obtusa*) などの同齡人工林において間伐が不十分な場合、樹高と直径の比、いわゆる形状比が高い値を示すようになり（浅井 2006；嘉戸ら 1992；Wilson and Oliver 2000；Slodicak and Novak 2006）、強風や豪雪などの環境要因に対して脆弱になると考えられている（石井ら 1983；國崎 2005；鳥田ら 2010；Slodicak and Novak 2006；Wilson and Oliver 2000）。樹高成長は間伐などによる密度の変化の影響を受けないが（Skovsgaard and Vancly 2008）、直径成長は密度の影響を受け、高密度の林分ほど平均胸高直径の値が低下するといわれている（安藤 1982；Masaki *et al.* 2006）。これらの説に従えば、間伐が適切に行われた林分と比べ、間伐が不十分な林分で形状比が高くなるのは、樹

高成長は同等であっても直径成長が後者において抑制されることによると考えられる。

しかし、過去の報告には、間伐の強度によって樹高の成長も影響されるという事例も散見される。たとえば河原ら（1989）は、18年生のヒノキ林において間伐試験を行ったところ、試験後の樹高の成長速度は無間伐区の方が高かったことを報告している。また、深田ら（2009）は、40年生前後のヒノキ林において、間伐によって収量比数を0.4～0.5程度に下げると樹高の成長速度が低下し、間伐後数年間で形状比が1～3ポイント低下した事例を報告している。また、清和・菊沢（1987）は、20～50年生のトドマツ人工林の成長を解析し、同じ林齢でも、閉鎖前後の密度下にある個体は、それよりも低密度の個体に比べて高い樹高の値を示した事例を報告している。

間伐にともなうこのような樹高成長の相対的な低下は、

* 連絡先著者（Corresponding author）E-mail: masaki@ffpri.affrc.go.jp

¹ 独立行政法人森林総合研究所 〒305-8687 つくば市松の里1（Forestry and Forest Products Research Institute, 1 Matsunosato, Tsukuba 305-8687, Japan）

² 独立行政法人森林総合研究所東北支所 〒020-0123 盛岡市下厨川字鍋屋敷92-25（Tohoku Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute, 92-25 Nabeyashiki, Shimokuriyagawa, Morioka 020-0123, Japan）

³ 秋田県立大学木材高度加工研究所 〒016-0876 秋田県能代市海詠坂11-1（Institute of Wood Technology, Akita Prefectural University, 11-1 Kaieisaka, Noshiro 016-0876, Japan）

（2012年12月18日受付、2013年6月20日受理）

生物学的には十分ありうることである。たとえば、同じ樹種であっても競争環境に応じて樹高成長と直径成長にトレードオフが生じる例が報告されている (Sumida *et al.* 1997; Harja *et al.* 2012)。草本群落 (シロザ; *Chenopodium album*) の研究例でも、他個体との競争が緩和された個体は、高さ方向の成長速度が低下して根への物質配分が増加することが報告されている (Nagashima and Hikosaka 2011)。さらに、混みあった群落では横方向への樹冠伸長ができず、同化器官の展開をするためには上長成長せざるを得ないこともありうるだろう。

このように、植物個体の上長成長は、利用可能な光資源量や近隣個体との競争によって変化することが予想される。しかし、上述の事例は、若齢時の木本の短期間の樹高成長を追跡したもの、あるいは草本の1年間未満の高さ成長を分析したものである。北米では27年生のベヤマツ (*Pseudotsuga menziesii*) 林を間伐したところ、当初は樹高成長速度の低下がみられたが、42~52年生時には樹高成長速度がむしろ改善された事例が報告されている (Harrington and Reukema 1983)。このような例から、人工林における間伐がその後の樹高成長にどのように影響するかは、長期的なデータによって検証される必要があるといえる。

日本では最近、伐期が延長される趨勢にあるが (桜井 2002)、壮齢時までには十分な間伐が行われない森林が多い (中島ら 2007)。そのような森林における長伐期施業では気象害のリスクが懸念され、それを低減させるためには個体の直径成長と樹高成長を適切に管理する必要がある。したがって、間伐 (とくに壮齢時以降に行われたもの) が長期的な成長に与える影響を解明することは重要かつ緊急の課題である。

そこで本研究では、同一小班内で壮齢時以降 (45~73年生) に強度間伐から無間伐まで4段階の間伐処理区が設けられ、現在高齡 (104年生) に達しているスギ人工林を研究対象とし、「間伐強度の高い区ほど無間伐区に比べて樹高成長は低くなるかどうか?」および「樹高成長の変化がみられた場合、その効果はどのくらい持続するか?」という問いに答えてみたい。そしてその結果に基づき、間伐を通じて冠雪害などのリスクを低減させるための長伐期施業のあり方について考察する。

II. 調査地と方法

調査は、秋田県に位置する米代西部森林管理署管内の134林班は小班「添畑沢スギ間伐試験地」において行った (北緯 40° 04' 31", 東経 140° 11' 27", 標高 90 m)。試験地から 19 km 離れた北秋田市旭町 (標高 29 m) における 1988~2001 年の観測データでは、年平均気温 10.1℃ (最低値は1月の-2.3℃, 最高値は8月の22.6℃), 年間降水量 1,550 mm である。冬季の観察からは、試験地における最深積雪は 100~150 cm と推定される。土壌は褐色森林土 (BD) で覆われており、母材は頁岩である。

図-1. 調査地の地形図およびプロットの配置

等高線間隔は 10 m で、地図内の右上が尾根地形、左下が沢地形となっている。各プロットの大きさは 40 m×50 m である。

このスギ林は 1908 年に密度 3,000 本/ha で植栽され、1953 年 (45 年生時) に 40 m×50 m のプロットが 8 区画設定された (図-1)。これらは相対的に急な斜面の下に位置する緩斜面上にあり、地位は高いと考えられる。実際、次節に述べる調査の結果では、8 区全体での 45 年生時の平均樹高は 24.8 m, 平均+標準偏差の樹高は 28.6 m であり、秋田県の地位級 1 (たとえば 40 年生時の上層樹高 22.8 m; 田村・細田 2012) に匹敵、あるいはそれ以上の地位であるといえる。

八つの区画は、強度間伐 2 区 (強-1, 2), 中庸度間伐 2 区 (中-1, 2), 弱度間伐 2 区 (弱-1, 2), 無間伐 2 区 (無-1, 2) に割り当てられた (図-1)。間伐は 1956 年 (48 年生), 1969 年 (61 年生), 1981 年 (73 年生) に行われ (表-1)、強度、中庸度、弱度間伐区において、それぞれ収量比数 0.6, 0.7, 0.8 に相当する密度管理が行われた (大住ら 2000)。無間伐区の収量比数は 0.9 前後で推移した (大住ら 2000)。3 回の間伐は、寺崎式 B 種間伐を基本とする下層間伐であった。

調査は 1953 年 (45 年生), 1962 年 (54 年生), 1969 年 (61 年生), 1976 年 (68 年生), 1981 年 (73 年生), 1991 年 (83 年生), 2002 年 (94 年生), 2012 年 (104 年生) の計 8 回、胸高直径 (以下、単に「直径」と記す) と樹高の計測が行われた。測定と間伐が同じ年の場合は、間伐の直前に調査が行われた。直径の測定箇所にはマークが記され、1991 年までは直径テープで直径を測定し、2002 年と 2012 年にはスチール巻尺で周囲長を測定し円周率で除すことで直径とした。樹高の測定は、1991 年まではブルーメライス、

表-1. 各区の履歴

林齢	強-1		強-2		中-1		中-2		弱-1		弱-2		無-1		無-2	
	蓄積	本数	蓄積	本数	蓄積	本数	蓄積	本数	蓄積	本数	蓄積	本数	蓄積	本数	蓄積	本数
45*	875.4 (31.5%)	825 (46.7%)	813.0 (25.5%)	680 (36.0%)	866.1 (17.7%)	660 (26.5%)	917.9 (11.6%)	720 (23.6%)	962.2 (9.9%)	810 (19.8%)	932.7 (9.4%)	850 (24.1%)	922.7 (0.5%)	890 (3.4%)	967.7 (2.6%)	895 (10.6%)
54	825.1	440	818.8	435	954.5	485	1095.2	550	1146.0	650	1123.0	645	1213.5 (1.1%)	860 (7.6%)	1231.3 (0.2%)	800 (0.6%)
61*	979.1 (25.1%)	440 (34.1%)	979.5 (31.7%)	435 (36.8%)	1100.1 (18.0%)	485 (22.7%)	1274.5 (24.6%)	550 (31.8%)	1301.7 (19.5%)	650 (23.1%)	1278.1 (14.5%)	640 (21.9%)	1386.6 (2.5%)	795 (6.3%)	1390.4 (0.7%)	780 (2.6%)
68	893.2	290	801.2	275	1074.5	375	1142.8	375	1247.0	500	1276.7	500	1558.5 (2.0%)	745 (4.7%)	1583.8 (0.9%)	760 (2.6%)
73*	1010.7 (20.1%)	290 (24.1%)	916.1 (19.0%)	275 (25.5%)	1187.0 (23.5%)	375 (30.7%)	1251.9 (21.8%)	370 (29.7%)	1371.9 (7.5%)	500 (12.0%)	1398.1 (9.8%)	500 (14.0%)	1668.3 (3.7%)	710 (9.9%)	1695.0 (3.9%)	735 (9.5%)
83	970.5 (10.0%)	220 (9.1%)	826.2 (5.7%)	205 (5.3%)	1093.9 (6.2%)	260 (7.7%)	1211.4	265	1511.3 (6.6%)	440 (6.8%)	1477.9 (8.0%)	430 (9.3%)	1843.7 (9.8%)	640 (14.8%)	1873.8 (5.0%)	670 (9.7%)
94	966.3 (1.2%)	200 (2.5%)	950.9	195	1100.7	240	1341.2	265	1513.9 (1.0%)	410 (1.2%)	1463.9	390	1743.3 (3.4%)	545 (6.4%)	1863.9 (3.9%)	605 (6.6%)
104	1080.2	195	1132.0	195	1321.6	240	1553.4	265	1723.8	405	1648.2	390	1907.3	510	2008.9	565

各調査年での蓄積 (m³/ha) および立木の本数 (本/ha) を示す。直径測定の後には間伐が行われた林齢には*を付す。括弧内の数値は、調査時点で生存していた個体のうち、その次の調査年までに間伐されたか、あるいは自然枯死した個体の蓄積・本数の割合を示している。

2002 年はインパルス (Laser Technology Inc.), 2012 年はトゥルーパルス 360 (Laser Technology Inc.) によって行われた。樹高は 45~61 年生時には全木, 68 年~104 年生時には 5~6 割の個体をサンプリングして計測した (ただし, 83 年生時は約 1 割の個体しか測定されなかった)。個々の立木の幹材積は直径と樹高から (樹高が非計測の個体は各林齢で DBH-H 関係にべき乗関数をあてはめ直径から樹高推定した), 秋田, 山形地方の立木幹材積表を用いて計算した。

各区の履歴を表-1 に示す。設定当初 (45 年生) の林況は立木密度 660~895 本/ha, 蓄積は 813~968 m³/ha であった。83 年生 (1991 年) から 94 年生 (2002 年) の期間には, 主に 1991 年の台風 19 号の影響により, 期首材積の 0~10% (期首本数の 0~15%) に相当する立木が枯死した。104 年生の時点では, 立木密度は 195~565 本/ha, 蓄積は 1,080~2,009 m³/ha となっていた。この試験地の履歴や設定および林木の成長についての詳細は大住ら (2000) および Masaki *et al.* (2006) も参照されたい。

III. 解 析

以下で述べる解析では, 104 年生までの期間を生き残った個体のみを対象とし, 各測定年においては, そのうちの樹高が実測された個体のみを対象とした。まず, 45 年生時において無間伐の 2 区内の個体と間伐の行われた 6 区内の個体を総当りで比較した。その結果, 直径が同等 (差の絶対値が 2 cm 未満) かつ樹高も同等 (差 1 m 未満) であった個体のペアを抽出した。その中からさらに, 54 年生以降の各調査時において, 直径が同等の値を示したペアを抽出し, 樹高および形状比を比較することとした。同一の個体が複数のペアに含まれている場合は, その中からランダムに 1 ペアを選出した。ただし, 73 年生以降は強度・中庸度間伐区の個体数が少なくなったので, その林齢以降で無間伐区の 1 個体がさまざまな間伐区の個体とペアとなっていた場合は, 強度・中庸度間伐区の個体から優先的に選

んだ。

間伐が樹高成長と形状比に及ぼす影響を定量化して評価するために, 以下のモデルの当てはめを行った。

$$H_{i,t} = H_{i,n} + h_t \quad (1)$$

$$S_{i,t} = S_{i,n} + s_t \quad (2)$$

ここで, $H_{i,t}$ と $S_{i,t}$ はそれぞれ i 番目のペアの間伐区の個体の樹高と形状比を示し, 添字 t はそのペアの間伐区の個体がどのタイプの間伐区であるか (強度, 中庸度, 弱度) を示す。また, $H_{i,n}$ と $S_{i,n}$ はそれぞれ i 番目のペアの無間伐区 (n で表記) の個体の樹高と形状比を示す。

推定対象は左辺と右辺の差を示すパラメータ h_t と s_t であり, その値が負であれば, タイプ t の間伐によって樹高成長や形状比が無間伐区よりも低くなり, 正であれば逆にそれらの指標が増加したと解釈できる。推定は階層ベイズ法により各測定年 (ただし樹高データの少ない 83 年生は対象外とした) について行った。たとえば樹高については,

$$\hat{H}_{i,t} = H_{i,n} + h_t \quad (3)$$

$$H_{i,t} \sim N(\hat{H}_{i,t}, \sigma_H^2) \quad (4)$$

$$h_t \sim N(\mu_h, \sigma_h^2) \quad (5)$$

というモデルを構築した。このモデルは i 番目のペア (間伐タイプ t) の樹高の実測値 $H_{i,t}$ が $\hat{H}_{i,t}$ (式(1), (3) から計算される予測値) を平均, σ_H^2 を分散とする正規分布に従い, h_t は超パラメータ μ_h と σ_h^2 をそれぞれ平均, 分散とする正規分布に従うことを表している。階層ベイズ法により h_t , σ_H^2 , μ_h および σ_h^2 の事後分布が推定される。分散 σ_H^2 , σ_h^2 の逆数の無情報事前分布は形状母数 0.0001, 尺度母数 10,000 のガンマ分布, μ_h の無情報事前分布は平均値 0, 分散 10,000 の正規分布とした。形状比についても同様に推定を行った。

推定には WinBUGS ver. 1.4.3 による MCMC 法を用いた。何回かの試行を行った結果から, 繰り返し回数は 11,000 回に設定し, 初期の 1,000 回を切り捨てて事後分布を推

定した。Gelman-Rubin の収束診断は、1.001~1.01 の値を示した。推定された事後分布の平均値、および 95% 信用区間をパラメータ推定の代表値として用いた。なお、生態学における階層ベイズ法の使用については、Clark and Gelfand (2006), McCarthy (2009), 久保 (2012) 等による解説を参照されたい。

IV. 結 果

試験地を設定した 45 年生時の平均直径は 32~36 cm, 平均樹高は 25~26 m, 形状比は 74~82 であった (表-2)。104 年生時の平均直径は間伐強度に応じてそれぞれ 51~66 cm の範囲でばらついていて、平均樹高は 38~40 m の範囲に収まっており、形状比は間伐区で低かった (表-2)。形状比 70 未満の個体の割合は 45 年生時点では 24~46% だったが、104 年生時には強度間伐区 90%, 中庸度間伐区 88%, 弱度間伐区 53%, 無間伐区で 28% だった。

45 年生時 (間伐前) と 104 年生時の胸高直径と樹高の関係 (D-H 関係) を図-2 に示す。強度間伐区と無間伐区のどちらにおいても、45 年生時に小径だった個体が 104 年生までの間に間伐され、あるいは自然枯死した。強度間伐区では相対的に大径に属していた個体も間伐の対象となっていた。104 年生時には、強度間伐区と無間伐区で D-H 関係に明瞭な違いがみられ、無間伐区では直径 40 cm 前後の個体の樹高が強度間伐区の同じ直径の樹高を数 m 上回る傾向があった。

45 年生時における無間伐の 2 区内の個体と間伐処理の行われた 6 区内の個体の総当りでのペア数は 324,513 組で、そのうち直径・樹高ともに個体間で同等だったのは 3,432 組、そこからペア間に重複して出現した個体を除くと、残ったのは 189 組であった。それら 189 組のうち、54 年生時には 184 組、61 年生時には 181 組、68 年生時には 174 組、73 年生時には 95 組、94 年生時には 62 組、104 年生時には 72 組が互いに同等な直径を示した。なお、事前の予想として、各間伐区から選ばれた個体はその区における平均的な個体よりも直径が小さく、また、無間伐区から選ばれた個体は、無間伐区の平均的な個体よりも大きいと考えられた。そこで、その偏りの程度を確認した結果、それぞれの区の平均的な個体の直径と比べて大きな偏りは示さなかった。たとえば、104 年生時の直径と標準偏差は、強度間伐区で 60.6 ± 9.5 cm, 中庸度間伐区で 58.0 ± 6.7 cm, 弱度間伐区で

51.7 ± 8.4 cm, 無間伐区で 53.6 ± 8.5 cm であり、各区の全体の直径分布 (表-2) と極端な違いはみられなかった。

図-3 は、104 年生時の 72 組の樹高および形状比を、同一ペア内の個体間で比較したものである。この図から、樹高と形状比のどちらについても間伐区、とくに弱度間伐区と強度間伐区の個体は無間伐区の個体よりも値の低い傾向が見て取れる。

ペア内個体間の樹高と形状比の差 (h_t, s_t) の推定値の、林齢にともなう変化を図-4 に示す。樹高の差については、強度間伐区では 60 年生頃から低下し続け、70 年生以降は -2 m でほぼ一定となった。中庸度間伐区、弱度間伐区では 70 年生以降に低下する傾向を示し、90 年生以降は -1.0~-1.5 m でほぼ横ばいとなった。形状比の差は、樹高の差とはほぼ同じ経年変化のパターンを示し、最大幅で 3~4 ポイントの低下を示した。

V. 考 察

本研究の結果、スギの樹高成長は間伐後、長期的に無間伐区の個体よりも低くなる傾向が示された。これは、樹高成長は間伐の影響を受けないという見方 (Skovsgaard and Vancley 2008; 安藤 1982; 田中 1991) を否定するものであり、植物個体の肥大成長と上長成長には競争環境に応じてトレードオフが生じるという見解 (Sumida *et al.* 1997; Nagashima and Hikosaka 2011; Harja *et al.* 2012) を支持するものといえる。

たとえば本研究の場合、強度間伐区の個体は、2 回目の

図-2. 強度間伐区 (上) と無間伐区 (下) の 45 年生 (左) と 104 年生 (右) 時の D-H 関係

黒丸は 104 年生時に生き残っていた個体を示し、白丸は 45~104 年生の期間のどこかで間伐されたか、あるいは自然枯死した個体を示す。実線はべき乗関数を当てはめた結果を表す。強度間伐区については、同じ林齢の無間伐区の D-H 関係 (=下の図で実線で示されているもの) も破線で記入し比較できるようにした。

表-2. 各区の 45 年生時および 104 年生時における直径、樹高、形状比

		胸高直径 (cm)	樹高 (m)	形状比
45 年生時	強度間伐区	33.4 ± 8.2	23.7 ± 3.4	73.6 ± 13.5
	中庸度間伐区	35.7 ± 8.8	25.7 ± 3.8	74.7 ± 13.6
	弱度間伐区	33.5 ± 8.5	24.6 ± 3.6	76.0 ± 12.7
	無間伐区	32.2 ± 8.9	25.2 ± 3.9	82.3 ± 16.0
104 年生時	強度間伐区	65.6 ± 9.3	38.3 ± 2.6	60.2 ± 7.0
	中庸度間伐区	65.8 ± 8.2	40.2 ± 2.0	63.0 ± 6.6
	弱度間伐区	55.9 ± 9.6	38.4 ± 2.7	70.1 ± 9.3
	無間伐区	51.2 ± 11.4	38.9 ± 2.9	79.4 ± 13.6

数値は個体の平均値および標準偏差を示している。

図-3. 無間伐区と間伐区から45～104年生にかけて同等の直径成長を示した個体のペアを選びペア内の個体間で樹高および形状比を比較した結果

上段は強度間伐区、中段は中庸度間伐区、下段は弱度間伐区に対応し、左列は樹高、右列は形状比に対応する。図中の直線は等値線を示す。

間伐の前に樹高成長が無間伐区の個体よりも低い傾向を示し始めた。具体的には、直径の成長経過が同等だった無間伐区他個体に比べ、70年生前後で樹高は約1～1.5 m低い値を示し、差がもっとも拡大した90年生以降には樹高は2 m以上低い値を示した。間伐強度のより低い中庸度間伐区や弱度間伐区でも、3回めの間伐の終了した70年生以降に強度間伐区と同様の傾向がみられ、無間伐区との樹高の差分は1.5 m程度まで広がった(図-4)。このことから、間伐の強度が高いほど樹高成長の変化はより早く顕れ、変化の度合いはより著しいものになると考えられる。

過去において日本では、40年生以下のヒノキ人工林で間伐後の樹高成長が低下する事例が報告されている(河原ら1989; 深田ら2009)。しかし、それらの研究では、壮齢期以降の間伐でも同じ現象が起こるかどうかは不明であ

り、さらにその傾向が長期的に持続するかどうかとも検証されていない。本研究の結果、少なくとも今回調査したスギについては、50年生以降の間伐においても個体の樹高成長が相対的に低くなること、そして累積的な効果は100年生を超えて継続することが示された。

一方で、本研究の結果を評価するにあたっては、試験の条件・設定について注意を払う必要がある。第一に、本調査地の地位はこの地域の地位級1に匹敵するか、あるいはそれ以上であり、94年生で樹高40 mを超えても平均約20 cm/年の樹高成長速度を示している(正木 未発表データ)。本調査地よりも地位の低い立地に植栽され、樹高成長がもっと若い段階で停滞するスギ林の場合、肥大成長と上長成長との間の可塑性は、より早い段階に失われる可能性がある。第二に、本研究では間伐が45～73年生の間に

図-4. 無間伐区の個体に対する間伐区個体の樹高および形状比の差の、林齢にともなう変化

配置は図-3に準ずる。縦線は95%信用区間を示す。X軸上の矢印は、間伐が行われた年を表す。

3回行われたことである。上述のとおり、弱度・中庸度間伐区での樹高成長のパターンの変化は2~3回目の間伐以降の時期に顕れた。1回のみの間伐では個体の成長パターンに影響を及ぼさないが(図-4)、さらに間伐が繰り返されることで、樹高成長に差が顕れた可能性がある。このように本研究の結果は、あくまでも地位が高く、間伐が45年生以降に約10年間隔で3回繰り返されたスギ林における事例であることに留意する必要がある。

たとえばHarja *et al.* (2012)の研究からは、直径成長と樹高成長の配分の変化は、林冠の再閉鎖が生じない、あるいは再閉鎖に長期を要するような状態に個体がおかれたときに生じることが示唆されている。本研究の場合は、初回の強度間伐がほぼそれに匹敵する状態をもたらした、さらにその後も間伐が繰り返されることでその状態が維持されたと考えられる。また、中庸度間伐区や弱度間伐区については、間伐が3回実行された時点で強度間伐区と同等の条件になったのかもしれない。27年生のベイマツ(*Pseudotsuga menziesii*)林を間伐した後の樹高成長の低下が短期的だったという北米での事例(Harrington and Reukema 1983)も、若齢期の1回の間伐だけでは個体の競争環境が早い時期に間伐前の状況に復するため、効果が持続しなかった可能

性が考えられる。また、本研究のスギも、今後120年生、140年生と齢をさらに重ねると、無間伐区の樹高がほぼ最大に達するとともに間伐区の樹高が追いついてきて、過去の間伐の樹高に対する効果がみえなくなる可能性もある。

ベイマツ(*Pseudotsuga menziesii*)の研究では、ある程度の林齢以降では間伐による形状比の改善効果がみられない事例が報告されている(Wilson and Oliver 2000)。また、高齢アカマツ(*Pinus densiflora*)の研究(正木ら2011)では、樹冠のサイズや形状比と局所的な混み具合との間に高い相関がみられないことが報告されている。おそらくこれらの先行事例は、本研究の場合のように樹高成長が継続している段階でなければ、樹木の形状を間伐で制御することが不可能であることを示しているのではないだろうか。しかし、この問いに一般性をもって答えられるだけのデータは、全国的にみて足りない。より多くの事例、それらなるべく個体別の成長データをともなった事例を集めて分析することが必要である。本研究の試験地でも今後のモニタリングを継続することで、樹木の長期的な成長に関する新たな知見が得られることが期待される。

本研究で示された間伐にともなう樹高成長の変化は、長期的にD-H関係に反映されていた。図-2に示されるよう

に、104年生の時点で無間伐区のD-H曲線は間伐区のD-H曲線よりも上に位置していた。平均値を比べても、無間伐区の胸高直径は間伐区よりも小さい値を示していたが、樹高は間伐強度にかかわらず、ほぼ同等の値を示していた(表-2)。このような直径・直径の成長のパターンが間伐処理による形状比の大きな違いとなって顕れたものと考えられる(表-2)。

本研究の結果を長伐期施業に応用する観点からは、以下のようにまとめられる。第一に、本調査地のように地位が高い立地に植栽されたスギ林の場合、壮齢期以降無間伐で放置すると、100年生を超えた段階に至っても大半の個体が形状比70を上回り、冠雪害のリスク(石井ら1983; 國崎2005)が懸念される状態となった。第二に、なるべく多くの個体について形状比70以下を目標にした場合、本研究では強度間伐区($R_y=0.6$ 相当)と中庸度間伐区($R_y=0.7$ 相当)で達成された(図-3)。第三に、樹高成長の制御には1回ではなく複数回の間伐が必要と考えられた。以上のことから、長伐期施業においては、壮齢期以降もこまめな間伐を行うことで直径の成長を促すとともに樹高成長を抑えて形状比をコントロールすることが可能であり、それによって主伐時までの冠雪害等のリスクを低減できると考える。

本研究は、森林総合研究所の交付金プロジェクト「人工林施業の長伐期化に対応した将来木選定の指針策定」(H23-25年)の一環として行われた。また、試験地を設定された故 寺崎 渡・故 寺崎康生両氏、長期間にわたって試験地の維持・計測に尽力された東北森林管理局(旧秋田営林局)関係諸氏、および故 森麻須夫氏・故 佐藤昭敏氏・斉藤勝郎氏・桜井尚武氏・大住克博氏・関 剛氏・森 茂太氏・梶本卓也氏ら森林総合研究所東北支所の関係諸氏に深く敬意を表するとともに、2012年の調査にご協力いただいた森林総合研究所の杉田久志氏、同四国支所の宮本和樹氏・酒井 敦氏、山形県森林研究研修センターの上野 満氏の各氏に篤く感謝の意を申し上げる。また、前述の大住氏、宮本氏、および森林総合研究所の壁谷大介氏には、データの分析および論文の執筆にあたり、数々の有益なご助言をいただいた。ここに深く謝意を申し上げる。

引用文献

- 安藤 貴(1982) 林分の密度管理. 農林出版
 浅井達弘(2006) トドマツ間伐試験地の74年間の成長経過. 北海道林業試験場研究報告 43: 22-35
 Clark JS, Gelfand A (eds) (2006) Hierarchical modelling for the environmental sciences. Oxford University Press
 深田英久・渡辺直史・宮田弘明・山崎敏彦(2009) 強度間伐が残存木の成長および材質等に与える影響. 高知県森技セ研報 34: 56-83

- Harrington CA, Reukema DL (1983) Initial shock and long-term stand development following thinning in a Douglas-fir plantation. Forest Sci 29: 33-46
 Harja D, Vincent G, Mulia R, van Noordwijk M (2012) Tree shape plasticity in relation to crown exposure. Trees 26: 1275-1285
 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
 嘉戸昭夫・中谷 浩・平 英彰(1992) ボカスギ林の冠雪害と林木および地形要因の関係. 日林誌 74: 114-119
 河原輝彦・加茂皓一・井鷲裕司・清野嘉之(1989) スギ、ヒノキ若齢林の利用間伐試験. 森林総研研報 356: 47-62
 久保拓哉(2012) データ解析のための統計モデリング入門——一般化線形モデル・階層ベイズモデル・MCMC——. 岩波書店
 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
 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 For Res 11: 217-225
 正木 隆・森 茂太・梶本卓也・相澤州平・池田重人・八木橋勉・柴田銃江・櫃間 岳(2011) 高齢・高密度のアカマツ林の間伐は個体の成長を改善するか. 日林誌 93: 48-57
 McCarthy MA (2009) 生態学のためのベイズ法. 野間口眞太郎訳, 共立出版
 Nagashima H, Hikosaka K (2011) Plants in a crowded stand regulate their height growth so as to maintain similar heights to neighbours even when they have potential advantages in height growth. Ann Bot 108: 207-214
 中島 徹・広嶋卓也・白石則彦(2007) 京都議定書3条4項林面積の拡大を視野に入れた森林施業の実施面積に関する分析. 日林誌 89: 167-173
 大住克博・森麻須夫・桜井尚武・斉藤勝郎・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
 桜井尚武(編著)(2002) 長伐期林の実態——その効果と取り扱い技術——. 林業科学技術振興所
 清和研二・菊沢喜八郎(1987) トドマツ人工林における樹木の大きさごとの空間分布の林齢にともなう変化. 日林誌 69: 465-471
 Skovsgaard JP, Vanclay JK (2008) Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. Forestry 81: 13-31
 Slodick J, Novak J (2006) Silvicultural measures to increase the mechanical stability of pure secondary Norway spruce stands before conversion. For Ecol Manag 224: 252-257
 Sumida A, Ito H, Isagi Y (1997) Trade-off between height growth and stem diameter growth for an evergreen oak, *Quercus glauca*, in a mixed hardwood forest. Funct Ecol 11: 300-309
 島田宏之・渋谷正人・小泉章夫(2010) カラマツ林の力学的解析による風害予測. 日林誌 92: 127-133
 田村浩喜・細田和男(2012) 子吉川流域におけるスギ林分収穫表. 秋田県森技研報 21: 37-51
 田中和博(1991) 林分の成長に伴う樹高曲線の転位と修正 Henricksen 式の適用. 日林誌 73: 172-177
 Wilson JS, Oliver CD (2000) Stability and density management in Douglas-fir plantations. Can J For Res 30: 910-920