

論文 (Original article)

強度間伐が行われたスギ高齢人工林における林分および個体の成長

杉田 久志^{1)*}、梶本 卓也²⁾、福島 成樹³⁾、高橋 利彦⁴⁾、吉田 茂二郎⁵⁾

要旨

林齢 90 年生時に本数で 64%、材積で 53%の強度間伐が実施された岩手県のスギ高齢人工林において、その後 114 年生までの林分および個体の成長を復元し、間伐が成長に及ぼした影響と個体の成長のばらつきをもたらす要因について検討した。間伐前の立木密度は 458 本/ha、収量比数 0.55 で比較的疎であり、樹冠長率は 45.0%であった。間伐により立木密度は 167 本/ha、収量比数 0.27 へと低下した。間伐後に枯損した個体はなく、樹高成長速度は 0.15m/年で、間伐前後で変わらなかった。胸高直径の成長速度は間伐前の 0.21cm/年から 0.43cm/年に増加した。間伐後の林分材積成長速度は 8.20m³/ha/年で、間伐直前の 8.55 m³/ha/年からあまり低下しなかった。期首直径と直径成長速度との関係では、間伐前にみられた正の相関が間伐後にみられなくなったが、間伐 20 年後には再びみられるようになった。個体間競争が胸高断面成長速度に及ぼす影響は、間伐後に一方向的な競争の影響がみとめられ、樹冠を接している個体の中で最大サイズのものの成長が旺盛であった。一方、双方向的な競争関係の影響はみられなかった。以上のことから、比較的低い密度で管理されてきたスギ高齢人工林において、強度の間伐を行ってその後きわめて低い密度で管理して超長伐期施業をめざす施業は、大径材や年輪幅からみた高品質材を生産する観点からも、一つの選択肢になり得ると考えられる。

キーワード：スギ、高齢人工林、強度間伐、成長、サイズ依存、個体間競争

1. はじめに

我が国の針葉樹人工林の多くは戦後の拡大造林期に造成され、40～60 年を経て伐期を迎えつつあるが、木材価格の低下や経営コストの上昇による林業経営の悪化、林業従事者の減少などにより皆伐が控えられ、結果的に標準伐期齢を超えて高齢化が進行している(桜井 2002)。また、伐期を 150 年ないしは 200 年に設定して大径木生産をめざす超長伐期施業も模索されている。人工林施業が長伐期へ移行すると、従来の短伐期・一斉皆伐施業で築き上げられた林分密度管理図や収穫予想表をベースにした育林施業体系はそのままでは適用することが難しくなると考えられる。林齢 80 年以上といった高齢人工林を適切に管理する育林技術体系を確立するためには、その基礎として高齢人工林の成長特性を明らかにすることが重要である。

高齢人工林の成長に関しては、固定試験地のモニタリングや伐倒木の年輪解析による成長経過の解析が進められ、とくにスギについて多くの報告がある(丹下ら 1987, 田中 1992, 西村ら 1992a, b, 國崎ら 1999, 大住ら 2000, 吉田ら 2002, 竹内・伊東 2003, 竹内 2005, Masaki et al. 2006, 西園ら 2008, Nisizono et al. 2008, 正木ら 2013, 2015)。これらの事例からは、高齢人工林で

は個体の直径成長が従来考えられてきた以上に持続し、林分単位でも高い材積成長速度を維持していることが明らかにされつつある。また、間伐は個体間競争を緩和して残存木の成長を促し、不良形質木を取り除いて林分の質的向上を図る重要な保育作業であり、間伐実施スケジュールについては、比較的若い段階で間伐を実施しておくことが高蓄積かつ良質材生産可能な高齢人工林を造成するうえで有効であることが指摘されている(鈴木ら 2009)。

しかしながら、高齢期に入ってから実施された間伐の効果について検討した研究は少ない。加齢にともない樹高成長や枝の伸長が低下して葉量の増加が期待できないこと(丹下ら 1987)からその効果を疑問視する見解もあるが、実際に間伐後の成長を解析して評価した事例(國崎ら 1999, 正木ら 2011)はわずかしかない。とくに立木密度を低下させるのに効率的な強度間伐の効果については実施事例が稀でほとんど検討されていない。その効果は間伐履歴や葉量の状況によって異なると考えられるので、いろいろな事例について検討する必要がある。また個体による成長速度のばらつきをもたらす要因を明らかにすることは、高齢人工林の成長予測をするために必要であり、期首のサイズ(田中

原稿受付：平成 29 年 2 月 14 日 原稿受理：平成 29 年 8 月 7 日

1) 元 森林総合研究所 四国支所

2) 森林総合研究所 植物生態研究領域

3) 千葉県農林総合研究センター森林研究所

4) 木工舎「ゆい」

5) 九州大学大学院農学研究院

* E-mail: sugitahisasi@gmail.com

1992, 竹内 2005) や樹冠構造 (吉田・石井 1993)、個体間競争 (國崎・藁谷 2006, Masaki et al. 2006, 宮本ら 2015) の影響について議論されているが、高齢期に入ってから強度間伐が実施された場合について検討した研究はみられない。そのような間伐後の成長特性は、伐期が 150 年さらには 200 年といった超長伐期施業について考えるうえで参考になるものと考えられる。

そこで本研究は、林齢 90 年生時に強度間伐が実施され、それ以来疎な密度で管理されている岩手県のスギ高齢人工林において、114 年生までの林分および個体の成長を解析した。とくに、1) 90 年生という高齢期に実施された強度間伐が成長に及ぼす効果、2) 個体による成長のばらつきをもたらし要因について検証し、それに基づいて 3) 高齢人工林の施業における強度間伐の有効性について検討した。

2. 調査地

調査地は、岩手県滝沢市滝沢の岩手大学農学部滝沢演習林 4 林班つ小班である。北上川沿いの丘陵地の浅い谷に位置し、標高は 210 m、段丘状の平坦面で、中央に小沢が蛇行して流れる谷底面を含む。基盤は古生層であるが、秋田駒ヶ岳や岩手山の火山噴出物に厚く覆われている。土壌は、適潤性黒色土 Bl_b であり、小沢に沿って湿性黒色土 Bl_r がみられる (山谷 1983)。滝沢演習林庁舎前露場 (標高 210m) の気象観測資料によると、年平均気温 8.2℃、年降水量は 1060mm である。最深積雪深は、気象庁メッシュ気候値によれば 27cm である。

調査林分は 1902 年植栽のスギ人工林で、当初は農商務省管轄の国有林であったが、1913 年に盛岡高等農林学校の演習林に編入された。保育履歴は不詳であるが、1975 年以降は間伐が行われなかったようである。1992 年 1～3 月 (90 年生時) に強度の間伐が実施され、同年 5 月にスギ下木が植栽されてスギ・スギ複層林が造成された。2007 年 (16 年生) におけるスギ下木の本数、平均樹高、平均胸高直径は、それぞれ 666 本/ha、9.7m、10.1cm であった (杉田ら 2014)。この林分の概要は西村ら (1992b)、吉田・石井 (1993)、杉田ら (2014) に記述されている。

3. 方法

3.1 現地調査

調査林分には、1989 年に 30m × 40m の固定プロットが設置され、1990 年 10 月 (89 年生、間伐 1 年前) に毎木・伐倒調査が行われ、現存量や成長量が推定されている (西村ら 1992b, 吉田・石井 1993)。毎木調査では胸高直径 (以下、直径とする)、樹高、枝下高 (最下生枝の基部の高さ) が測定され、34 個体 (全個体の 62%) については 4 方向の樹冠半径が測定された (吉田・石井 1993)。伐倒調査ではさまざまなサイズから

供試木 8 本が選定され、高さ 0.2m、1.2m、それ以上は 2m おきに採取された円盤について 5 年ごとに年輪解析が行われた (西村ら 1992b)。

間伐から 16 年後の 2007 年秋 (106 年生) にこの調査プロットを復元し、スギ上木の直径、樹高、枝下高を再び測定した。直径の測定はスチールメジャー、樹高と枝下高の測定はバーテックスⅢを用いた。その後、2011 年 (間伐 20 年後、110 年生) と 2015 年 (間伐 24 年後、114 年生) にも測定を行った。樹冠半径は 2013 年 (間伐 22 年後、112 年生) に全個体について 4 方向の測定を行った。下木については 2007 年 (16 年生) および 2015 年 (24 年生) に直径と樹高を測定した。

個体の空間的配置に基づく個体間競争の影響を検討するために、プロット内の樹木位置図を作成した。プロット外周部でも、プロット内の個体から 10m 以内に位置する個体については、位置を測定し、2007 年以降の直径・樹高等の測定も行った。

3.2 解析

3.2.1 林分構造パラメータの算出

単木幹材積は、青森、岩手、宮城地方のスギ (人工林) の材積表 (林野庁計画課 1970) により求めた。先枯れした個体の幹材積は、前回の樹高測定値を用いて求めた。地位の判定は岩手県林業水産部 (1983)、林齢・地位に応じた林分構造パラメータ目標値の算定は岩手県民有林スギ林分収穫予想表 (木戸口・栗野 2007) を用いた。収量比数は、表東北地方スギ密度管理図 (林野庁 1979) を用い、立木本数と上層木平均樹高により求めた。

個体のある測定量 Z の定期平均成長量 (以下、成長速度) GZ は、以下の式で定義した。

$$GZ(t) = (Z(t+n) - Z(t)) / n$$

Z : 樹高 H (m)、直径 D (cm)、単木胸高断面面積 ba (m²) あるいは単木幹材積 v (m³)

t : 林齢 (年)、 n : 測定間隔 (年)

林分胸高断面面積 BA (m²/ha) および林分幹材積 V (m³/ha)、それらの成長速度 GBA (m²/ha/年) および GV (m³/ha/年) と林分幹材積成長率 GRV は以下の式により求めた。

$$BA = (\sum ba) / S$$

$$V = (\sum v) / S$$

$$GBA(t) = (BA(t+n) - BA(t)) / n$$

$$GV(t) = (V(t+n) - V(t)) / n$$

$$GRV(t) = (V(t+n) / V(t))^{1/n} - 1$$

S : プロット面積 (=0.12ha)

間伐前の成長速度は、西村ら (1992b) の年輪解析の結果に基づいて供試木 8 本を対象に、伐倒時 (1990 年、89 年生、間伐 1 年前) からさかのぼる 10 年ごとの期間に分けて算出した。間伐後の成長速度は、プロット内のすべての個体 ($n=20$) を対象に毎木調査データ

を用いて算出した。

林冠の閉鎖程度の指標として樹冠占有率を考え、1990 年および 2013 年におけるプロット内の各個体の 4 方向の平均樹冠半径から円形近似で求めた樹冠占有率を合計し、プロットの面積 (0.12ha) で除して算出した。1990 年に樹冠半径が測定されなかった個体については、その時の測定データから導いた直径と平均樹冠半径の直線回帰式を用いて、当時の直径を代入して樹冠半径を推定した。

樹冠表面積 KMF (m^2) を吉田・石井 (1991) の式により 1990 年と 2013 年について算出した。2013 年の算出に際しては、樹冠長は 2011 年の値を用いた。

$$KMF = 4/3 \cdot \pi \alpha (CL + \alpha^2/4)^{1.5}$$

$$\alpha = CR/CL^{0.5}$$

CR : 樹冠半径 (m)、 CL : 樹冠長 (m)

3.2.2 個体間競争の影響の解析

平均個体間距離として、各個体から最も近い他個体までの距離の平均値を求めた。さらに、各個体と樹冠が隣接していない周辺木のうちで最も近いものまでの距離の平均値を求めた。

成長に及ぼす個体間競争の影響については、Masaki et al. (2006)、宮本ら (2015) の方法にならって解析した。まず、対象木を中心とする半径 d (m) の円形の区域内で、以下の 2 つの競争指数を個体ごとに算出した。なお 110 年生時の下木の直径は、106 年生と 114 年生の測定値の平均値として求めた。

BA_L : 直径が対象木より大きい他個体の胸高断面面積合計 (m^2)

BA_T : すべての他個体の胸高断面面積合計 (m^2)

また、 BA_L に関連して、その値に応じて以下の離散値をとる指数 BA_L' も設けた。

BA_L' : $BA_L = 0$ の時、 $BA_L' = 0$ 、 $BA_L > 0$ の時、 $BA_L' = 1$

競争の影響が競合範囲の大きさでどのように変わるか検討するために、距離 d を 5m から 10m まで 1m 間隔で変化させ、それぞれについて 89 年生、106 年生、110 年生時点の各競争指数を求め、 d にともなう競争指数と胸高断面面積成長速度との間の決定係数 R^2 の変化を検討した。決定係数の有意水準については、無作為化検定 (Thomas and Weiner 1989) により検討した。 BA_L については解析対象の個体の成長速度を固定して位置をランダムに置き換え、 BA_T については位置を固定して成長速度を置き替えた。試行回数は 2000 回とした。

次いで、間伐後の時間の経過に伴う胸高断面面積成長速度に影響を及ぼす要因の変化を解析するため、林齢 90 ~ 106 年、107 ~ 110 年、111 ~ 114 年の 3 つの期間について各個体の胸高断面面積成長速度 Gba (m^2 /年) を応答変数とし、期首直径 D (cm) と競争指数 (BA_L 、 BA_L' あるいは BA_T) を説明変数とする以下の 4 つの一

般化線形モデルを構築した。応答変数は正規分布に従うと仮定した。4 つのモデルのうちで自由度調整済み決定係数が最大のものを最良モデルとして選んだ。

D モデル: $Gba(t) \sim D(t)$

BA_L モデル: $Gba(t) \sim D(t) * BA_L(t, d)$

BA_L' モデル: $Gba(t) \sim D(t) * BA_L'(t, d)$

BA_T モデル: $Gba(t) \sim D(t) * BA_T(t, d)$

競争指数を取り入れることにより D モデルと比べてモデルがどの程度改善されたのかを評価するために、壁谷ら (2015) の方法により無作為化検定を行って p 値を算出した。

4. 結果

4.1 林分レベルの成長経過

上層木平均樹高の推移を Fig. 1 に示す。間伐前の地位級は 3 であったが、間伐木の樹高が残存木よりもやや低かった ($p=0.052$, t 検定) ため、間伐時に上層木平均樹高は 26.3m から 27.3m へと増加した。その後、地位級 3 の樹高成長曲線よりも旺盛な成長を示して地位級 2 に近づき、114 年生時には上層木平均樹高 30.8m (最大値 37.6m) となった。

林分構成値の推移を Fig. 2 に示す。間伐 1 年前には、本数 458 本/ha、平均直径 40.1cm、林分材積 768.2 m^3 /ha、収量比数 0.55、平均枝下高 14.5m、平均樹冠長 11.8m、平均樹冠長率 45.0%、平均樹冠半径 2.2m であった。岩手県民有林の収穫予想表 (100 年伐期) の地位級 2 の値と比較すると、本数は若干高く、平均直径、林分材積、収量比数は同等であった。間伐により本数は 167 本/ha、林分材積は 364.4 m^3 /ha、収量比数は 0.27、樹冠占有率は 34.6% となり、間伐率は本数で 64%、材積で 53% に達した。間伐木の直径分布が残存木のそれよりも有意に小径に偏っていた ($p=0.0004$, t 検定) ため、平均直径は 46.3cm へと増加し、平均樹冠長も 12.3m、平均樹冠長率 45.8%、平均樹冠半径 2.5m へ増加した。林分樹冠表面積は 2.17ha/ha であった。

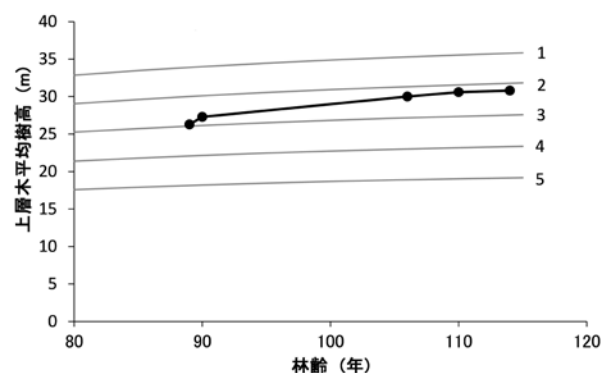


Fig. 1. 上層木平均樹高の推移

曲線は岩手県民有林スギ林の地位級別樹高成長曲線。岩手県林業水産部 (1983) による。

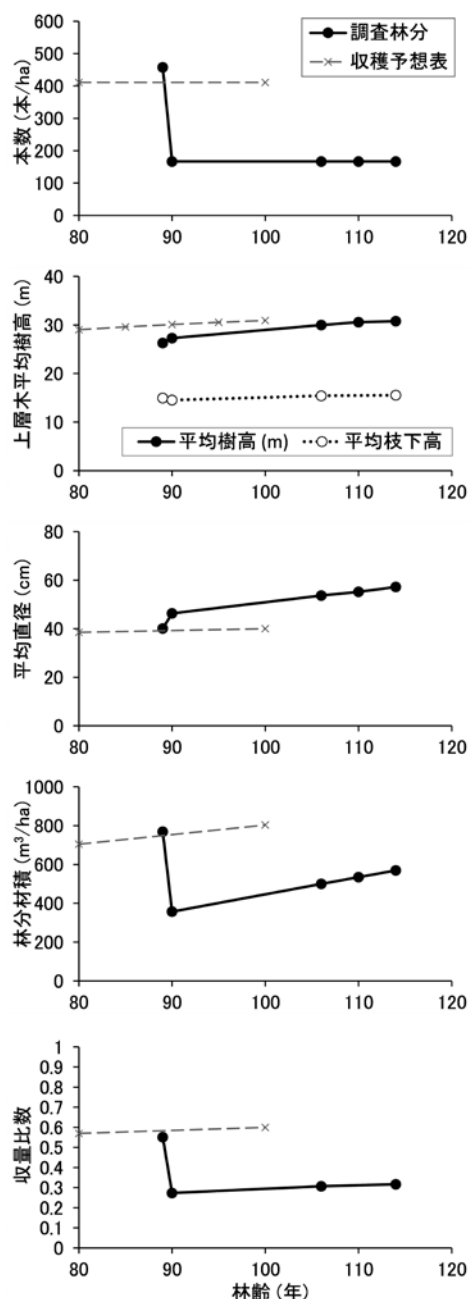


Fig. 2. 林分構成値の推移

破線は100年伐期の施業における目標値（地位級2）を示す。岩手県民有林スギ林分収穫予想表（木戸口・栗野 2007）による。

間伐から24年後（114年生）までに枯損した個体はまったくみられなかった（Fig. 2）。収量比数はわずかに増加したが、24年後でも0.32という低いレベルが持続していた。樹高成長は林齢とともに低下して、60年生以降は0.10～0.20m/年程度になり、間伐後もあまり変化せずほぼ同じ成長を維持した（Fig. 3）。樹高成長速度は90～106年生時に0.16m/年、107～114年生時に0.13m/年、90～114年生時の平均で0.15m/年であった（Table 1）。間伐24年後には先枯れしたもの

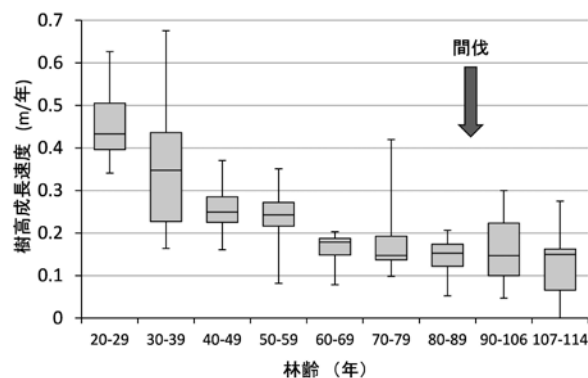


Fig. 3. 樹高成長速度の推移を示す箱ひげ図

間伐前は西村ら（1992b）の年輪解析データに基づき作成（ $n=8$ ）。

間伐後は毎木調査データに基づき作成（ $n=20$ ）。

Table 1. 各種成長速度の推移

林齢（年） 間伐後（年）	間伐前 ¹⁾	間伐後 ⁴⁾	
		90-106 前1-16	107-114 17-24
平均樹高成長速度（m/年）	0.13 ²⁾	0.16	0.13
平均直径成長速度（cm/年）	0.21 ²⁾	0.43	0.44
林分胸高断面成長速度 （ $\text{m}^2/\text{ha}/\text{年}$ ）	—	0.58	0.65
林分材積成長速度（ $\text{m}^3/\text{ha}/\text{年}$ ）	8.55 ³⁾	7.98	8.64
林分材積成長率（%/年）	1.13 ³⁾	1.88	1.63

1) 西村ら（1992b）の年輪解析データ（ $n=8$ ）による

2) 林齢80-89（間伐11-2年前）、間伐後とサイズを揃えるため小径の2本を除外（ $n=6$ ）

3) 林齢85-89（間伐6-2年前）

4) 毎木調査データ（ $n=20$ ）による

が2本出現した。平均枝下高は間伐直後14.9m、24年後15.5mでほとんど変化しなかった（Fig. 2）。樹高の増加に伴って樹冠長および樹冠長率が増加し、平均樹冠長は間伐16年後14.6m、24年後15.3mとなり、平均樹冠長率は16年後48.3%、24年後49.6%となった。平均樹冠半径、樹冠占有率、林分樹冠表面積は22年後にそれぞれ3.4m、61.4%、3.64ha/haに増加した。

直径成長速度は林齢とともに低下し、間伐前の80～89年生時には平均値が0.21cm/年まで低下したが、間伐後は大幅に増加した。90～106年生時に0.43cm/年、107～114年生時に0.44cm/年を示し、間伐後を通して一定の旺盛な成長を示した（Fig. 4、Table 1）。間伐後の林分材積成長速度は、90～106年生時7.98 $\text{m}^3/\text{ha}/\text{年}$ 、107～114年生時8.64 $\text{m}^3/\text{ha}/\text{年}$ 、90～114年生の平均で8.20 $\text{m}^3/\text{ha}/\text{年}$ であり、材積成長率は90～106年生時1.9%/年、107～114年生時1.6%/年、90～114年生を通して1.8%/年であった（Table 1）。24年後の時点で林分材積は間伐直後の1.56倍となり、間伐前の75%まで回復した（Fig. 2）。

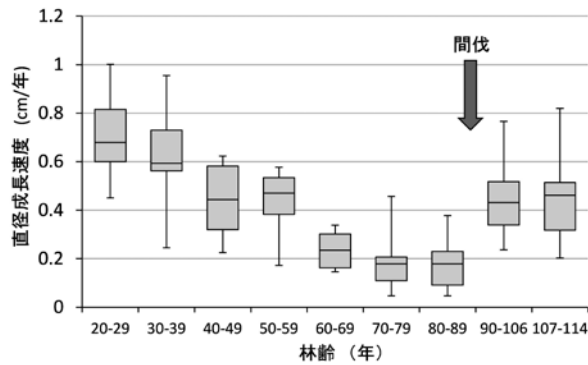


Fig. 4. 直径成長速度の推移を示す箱ひげ図

間伐前は西村ら（1992b）の年輪解析データに基づき作成（ $n=8$ ）。

間伐後は毎木調査データに基づき作成（ $n=20$ ）。

4.2 個体レベルの成長と期首サイズとの関係

期首直径と樹高成長速度との関係は、間伐前には有意な相関がなかったが、間伐後の林齢 90～106 年生時に正の相関がみられた。しかし、107 年生以降は相関がみられなくなった（Fig. 5）。なお、期首樹高と樹高成長速度との間にはいずれの期間でも相関がなかった

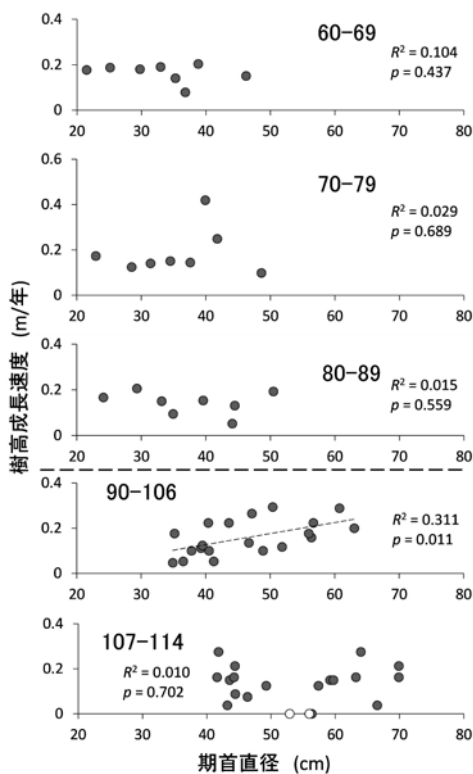


Fig. 5. 林齢別の期首直径と樹高成長速度との関係

破線：強度間伐実施、白丸：先枯れ木
間伐前は西村ら（1992b）の年輪解析データに基づき作成（ $n=8$ ）。
間伐後は毎木調査データに基づき作成（ $n=20$ ）。

($p>0.05$)。

期首直径と樹冠パラメータの増加速度との関係では、樹冠長は間伐時の直径が大きい個体ほど間伐後の増加が大きい傾向がみられたが、樹冠半径、樹冠表面積ではともに有意な正の相関がなく、樹冠半径ではむしろ相関係数が負値 ($R=-0.482$) を示した（Fig. 6）。

期首直径と直径成長速度との関係は、林齢 80 年までは有意な相関がなかったが、間伐直前の 80～89 年になって正の相関がみられた。強度間伐後には相関がみられなくなったが、間伐 21 年後（111 年生）以降に再び正の相関がみとめられた（Fig. 7）。

期首直径と単木胸高断面積成長速度との関係は、70～79 年生の期間を除き、間伐前、間伐後のいずれでも顕著な正の相関を示した（Fig. 8）。期首直径と単木材積成長速度との間にも同様の関係があった。

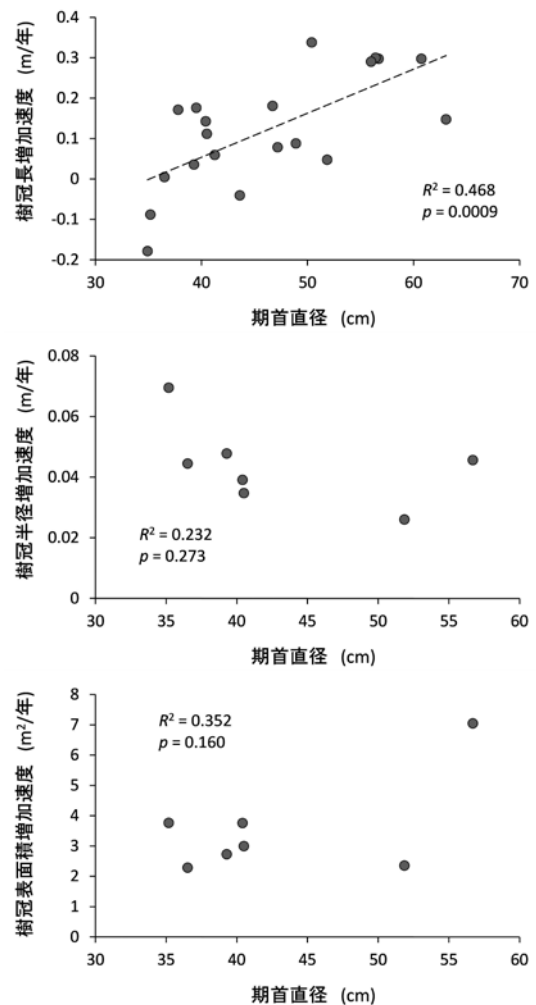


Fig. 6. 期首直径と樹冠長、樹冠半径、樹冠表面積の増加速度との関係

対象期間は、樹冠長が 90-110 年生、樹冠半径と樹冠表面積が 90-112 年生。

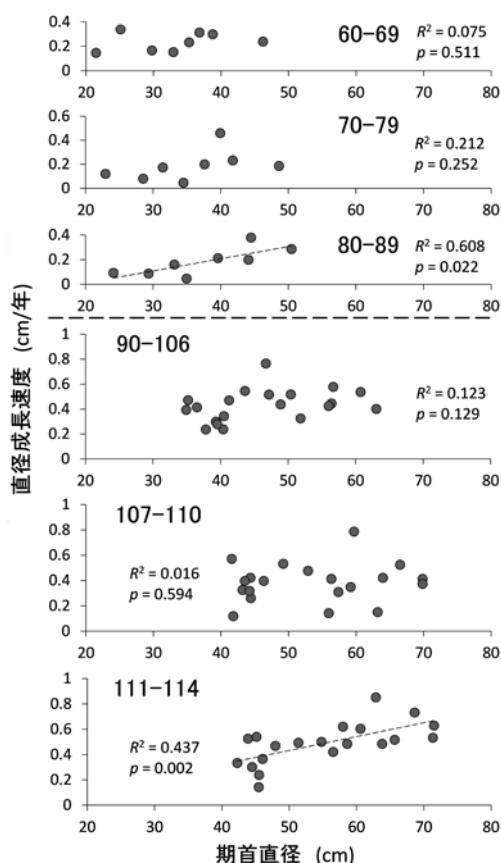


Fig. 7. 林齢別の期首直径と直径成長速度との関係
凡例については Fig. 5 を参照。

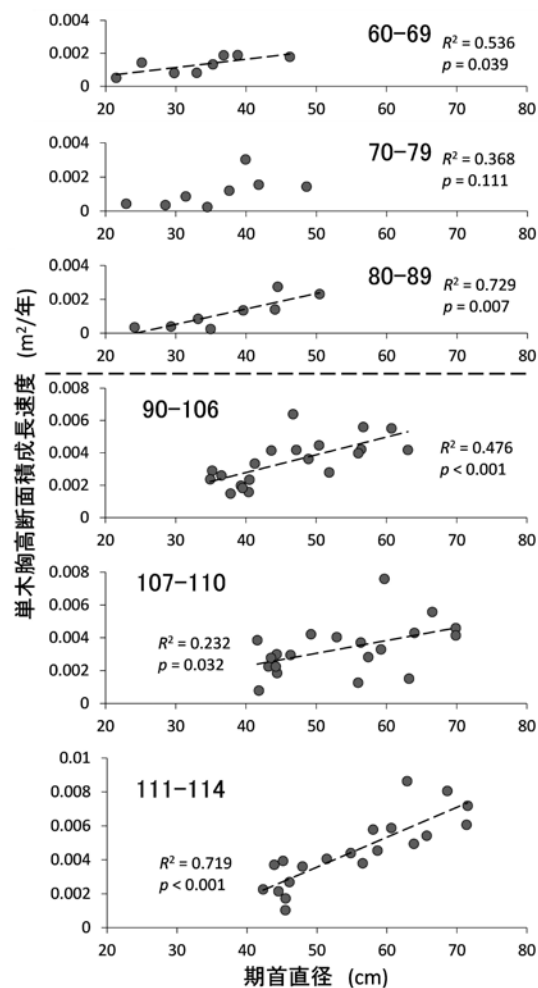


Fig. 8. 林齢別の期首直径と単木胸高断面成長速度との関係
凡例については Fig. 5 を参照。

4.3 個体レベルの成長と樹冠構造との関係

期首の樹冠構造パラメータと直径成長速度との関係では、期首樹冠半径、期首樹冠長率、期首樹冠長および期首樹冠表面積のいずれも、どの期間にも有意な相関はなかった ($p > 0.05$)。胸高断面成長速度との間でも、期首樹冠半径と期首樹冠長率はこの期間にも有意な相関を示さなかった。期首樹冠長、期首樹冠表面積は、90～106年生時に有意ではなかったが、111～114年生時になってともに有意な相関がみられた (Fig. 9)。

4.4 個体レベルの成長と競争指数との関係

各個体から最も近い他個体までの距離の平均値は 5.6 ± 1.3 m、樹冠が隣接していない周辺木のうち最も近いものまでの距離の平均値は 8.4 ± 0.6 m であった。

距離 d ともなう各競争指数と胸高断面成長速度との決定係数の変化を Fig. 10 に示す。 BA_L では、いずれの期間でも $d=9$ m で決定係数が最大となった。90

～106年生の $d=9$ m および 111～114年生の $d=8$ m では $p < 0.05$ のレベルで有意となったが、111～114年生では有意なものはみられなくなった (無作為化検定)。それぞれの期間において有意と判定されたもののなかで決定係数が最大となる d の値における BA_L と胸高断面成長速度との関係を Fig. 11 に示す。 $BA_L=0$ 、つまり対象木自身よりも大きな個体が半径 8～9 m の円内に存在しない個体は $BA_L > 0$ の個体よりも有意に胸高断面成長速度が高かった (90～106年生: $p=0.0003$; 107～110年生: $p=0.0004$; 111～114年生: $p=0.0002$, t 検定)。 $BA_L > 0$ の個体のなかではいずれの期間でも有意な相関はみられなかった (90～106年生: $p=0.132$; 107～110年生: $p=0.647$; 111～114年生: $p=0.130$)。一方、 BA_T についてはどの期間でも d にかかわらず決定係数が低く、有意ではなかった (Fig. 10)。なお、下木を含めないで算出した場合でも結果は同様であった。

胸高断面成長速度を応答変数とする一般化線形モ

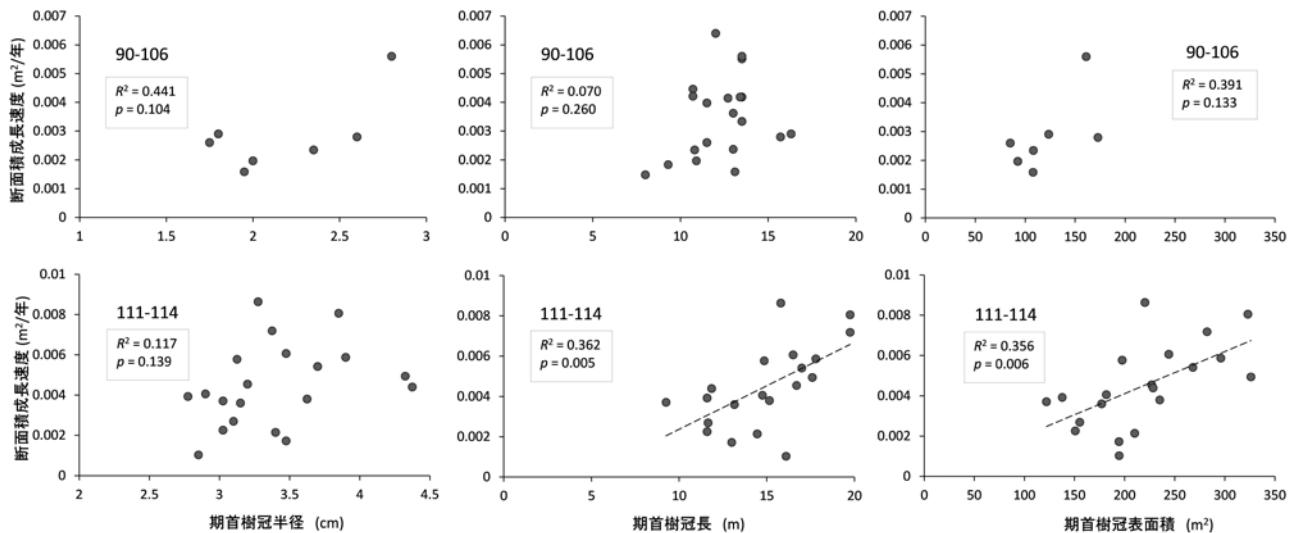
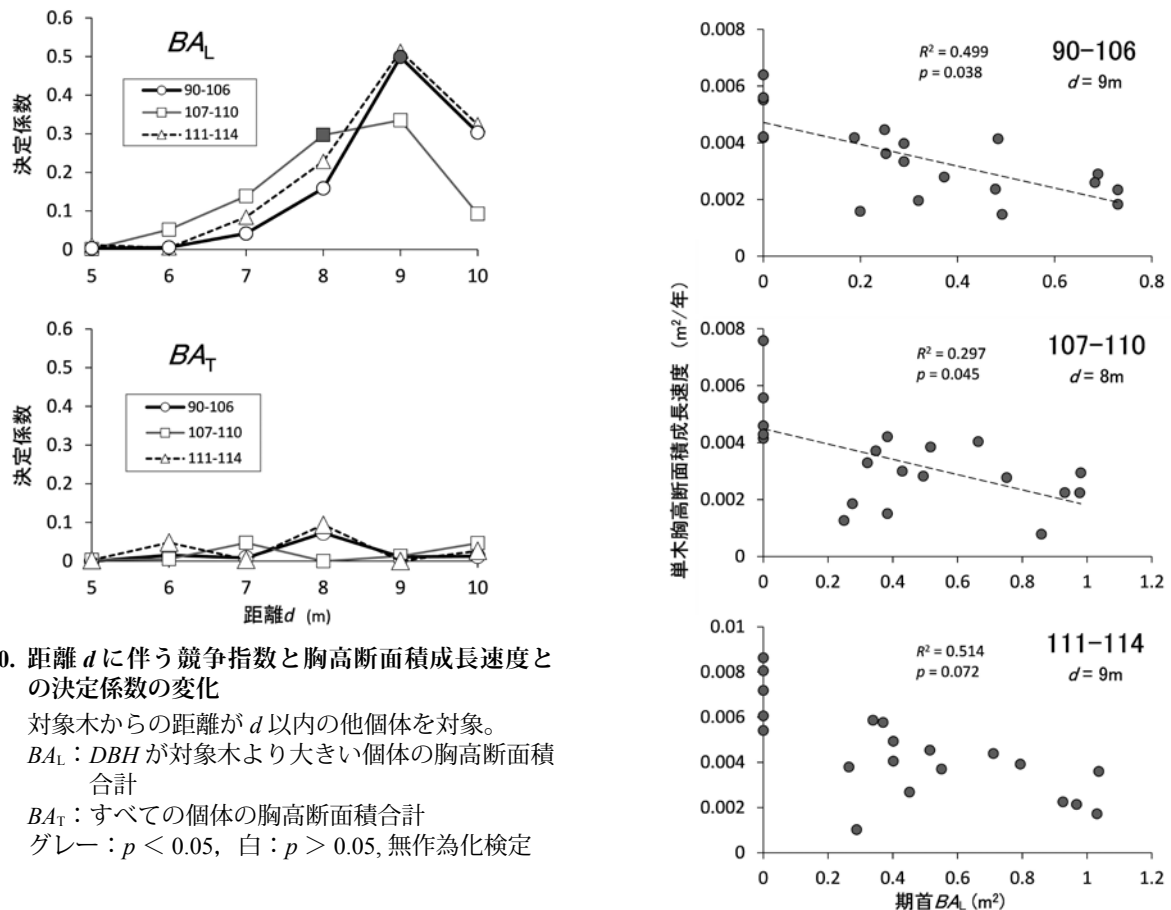


Fig. 9. 期首樹冠半径、期首樹冠長および期首樹冠表面積と胸高断面積成長速度との関係

Fig. 10. 距離 d に伴う競争指数と胸高断面積成長速度との決定係数の変化

対象木からの距離が d 以内の他個体を対象。
 BA_L : DBH が対象木より大きい個体の胸高断面積合計
 BA_T : すべての個体の胸高断面積合計
 グレー: $p < 0.05$, 白: $p > 0.05$, 無作為化検定

Fig. 11. 林齢別の期首 BA_L と胸高断面積成長速度との関係

無作為化検定で有意 ($p < 0.05$) なもののなかで決定係数が最大となる d の場合を示す。有意な値が得られなかった場合 (111-114 年生) は決定係数が最大となる d の場合を示す。

Table 2. 一般化線形モデルで採択された変数と自由度調整済み決定係数

林齢	D モデル			BA _L モデル			BA _L ' モデル			BA _T モデル				
	自由度調整済み		<i>d</i> (m)	自由度調整済み		<i>p</i>	自由度調整済み		<i>d</i> (m)	自由度調整済み		<i>p</i>		
	変数	決定係数		変数	決定係数		変数	決定係数		変数	決定係数			
90-106	<i>D</i>	0.447	9	<i>D</i> +BA _L	0.498	0.119	9	<i>D</i> *BA _L '	<u>0.686</u>	0.014	8	<i>D</i> +BA _T	0.422	0.732
107-110	<i>D</i>	0.190	8	<i>D</i> +BA _L	0.316	0.067	8	<i>D</i> +BA _L '	<u>0.487</u>	0.008	7	<i>D</i> +BA _T	0.321	0.069
111-114	<i>D</i>	0.704	9	<i>D</i> +BA _L	0.690	0.654	9	<i>D</i> *BA _L '	0.752	0.101	8	<i>D</i> +BA _T	0.695	0.727

モデル内で自由度調整済み決定係数が最大となる d を採用。

p : D モデルとの決定係数の差の p 値 (無作為化検定)

下線: 最良モデル (モデル間で自由度調整済み決定係数が最大)

デルの解析により、それぞれの期間に各モデルにおいて自由度調整済み決定係数が最大となったものを Table 2 に示す。いずれの期間でも BA_L' モデルが最良モデルに採択され、そのうち 90 ~ 106 年生と 107 ~ 110 年生時は D モデルより有意に自由度調整済み決定係数が高かったが、111 ~ 114 年生時には有意ではなくなった。一方、BA_T モデルは、90 ~ 106 年生時と 111 ~ 114 年生時には D モデルより自由度調整済み決定係数が低く、107 ~ 110 年生時には D モデルより高い値を示したが有意な差ではなかった ($p > 0.05$)。

5. 考 察

5.1 林分の成長経過に及ぼす強度間伐の効果

調査林分の林分構造パラメータは、間伐前の 89 年生時点には、岩手県民有林において伐期 100 年の施業を行う場合の目標値にほぼ合致しており (Fig. 2)、平均樹冠長率も 45% に達していた。樹冠長率は、長伐期化を目指す場合、個体の成長を維持するために必要な着葉量の指標になると考えられており、例えば、その値は最低でも 30% が必要、50 ~ 60% を目標とするのが望ましい (藤森 2006)、40% を目標としたい (千葉 2009)、あるいは 40% 以下では混み過ぎ (准フォレスト 研修基本テキスト作成委員会 2013) といった具体的な目安が示されている。本研究の調査林分の平均樹冠長率はこれらの値を超えており、長伐期施業を目指すための条件を満たしていたと考えられる。

90 年生時に行われた間伐は、複層林造成のために本数で 64%、材積で 53% を伐採して収量比数を 0.27 まで下げたもので、通常よりもはるかに強度のものである。その結果、直径成長は間伐後に明瞭な促進効果がみられ、成長速度は同等の直径のもので比較しても間伐前の 0.21cm/年 から 0.43cm/年 へと倍増した (Fig. 4、Table 1)。100 年生以上のスギ高齢人工林の直径成長速度の調査事例としては、奈良県の 127 ~ 232 年生の林で 0.27 ~ 0.37cm/年 (竹内 2005)、三重県で 168 ~ 180 年生時に 0.37cm/年 (田中 1992) という値が報告されており、本事例の間伐後の値はこれら既報の値と比べるとやや大きめの値である。高齢期に入ってから実施された間伐の効果については、岩手県のスギ人工林で 145 年生時に行われた間伐 (國崎ら 1999) や、奈

良県のスギ人工林で 100 年生頃および 160 年生頃に行われた間伐 (高橋・竹内 2001)、岩手県のアカマツ人工林で 94 年生時に行われた間伐 (正木ら 2011) において直径成長の改善が報告され、高齢人工林であっても間伐が成長促進効果をもたらすことが報告されている。ただし、岩手のアカマツ林の事例のような過密林分 (収量比数 0.9、樹冠長率 20 ~ 40%) では、大径木を含む林型に到達するには成長促進が不十分で、長伐期施業が可能かどうかは疑問であるとされている (正木ら 2011)。本事例では、間伐による成長促進効果が顕著にみられ、旺盛な直径成長が 20 年以上継続している。それには、間伐前の樹冠長率が高くて十分な葉量があったこと、間伐率が高くて未だに閉鎖していないことが関与していると考えられる。

樹高成長は、60 年生以降はその後強度間伐を経ても 0.10 ~ 0.20m/年 と、ほぼ同じ程度の成長速度を維持していた (Fig. 3)。100 年生以上のスギ人工林の樹高成長については、奈良県吉野の 228 年生林分でも毎年樹高の成長が確認されており、成長が小さい個体では林齢によらず 0.05 ~ 0.06m でほぼ一定であるが、成長が大きな個体では 124 年生林の 0.16m/年 から 228 年生林の 0.10m/年 まで林齢に伴って徐々に低下している (竹内・伊東 2003)。それと比較すると、本研究の事例は 100 ~ 130 年生の林分としてはほぼ同等である。間伐が樹高成長に及ぼす影響については、成長促進効果が直径成長に対するほどではないことが指摘されている (安藤 1982)。さらには間伐により樹高成長が抑制された事例も報告され (河原ら 1989、深田ら 2009)、間伐の強度が高いほどその低下が早く現れ、低下の度合いも著しいことが指摘されている (正木ら 2013)。本研究の調査林分において間伐による樹高成長抑制が見られなかったこと (Table 1) は、これらの報告とは異なる傾向を示している。既報は若齢 ~ 壮齢期に、本研究は 90 年生の高齢期に行われた間伐を対象としており、このような間伐実施林齢のちがいによって樹高成長に及ぼす間伐の影響が異なる可能性が考えられる。また強度な下層間伐が行われたため間伐前からすでに優勢木であったもののみが残存木となったことも関係しているかもしれない。

高齢人工林では樹高や枝の伸長が低下して葉量の増

加が期待できない（丹下ら 1987）とされてきた。しかし本研究では、間伐後に枝の枯れ上りがほとんど起こらず枝下高があまり変化しなかった一方で、樹高が緩やかながら成長を持続したため、平均樹冠長率は間伐後もさらに増加して約 50% に達した（Fig. 2）。平均樹冠半径は、間伐直後の 2.1m から間伐 22 年後の 3.4m へと大きく拡張し、樹冠表面積も 1.68 倍に増加した。本事例は、高齢林分でも間伐後に樹冠の拡大がみとめられることを示している。この林分は間伐前から樹冠長率が比較的高く、一定量の葉量が確保されていたことがその拡大をもたらしたと考えられる。秋田県の樹高 20m 以上のスギ高齢人工林では、樹冠半径が樹高の 5～10% の範囲にあり、収量比数が低いほどこの値が大きくなることから、目安として樹冠半径が樹高の約 10% となるように管理することが提案されている（澤田 2004）。本事例では、この樹冠半径／樹高の割合は間伐 1 年前が 7.8%、間伐 22 年後が 11.1% であり、間伐後の値は秋田の高齢人工林における目標値を超えている。

林分の材積成長については、成長率でみると間伐直前に 1.1%/年、間伐後には 1.6～1.9%/年となり、間伐による明瞭な促進効果がみとめられた。また、成長速度でも、間伐直前が 8.55m³/ha/年（西村ら 1992b）、間伐後が 7.98～8.64m³/ha/年と、間伐により林分材積が半減したにもかかわらず残存木の大幅な成長促進により間伐後もほぼ同じ値を示した（Table 1）。高齢スギ人工林の林分材積成長速度の測定事例として、高知県で 80 年生時に 10.3 m³/ha/年（西村ら 1992a）、秋田県の 94～95 年生の林分で 16～27 m³/ha/年（大住ら 2000）、千葉県で 122～126 年生時に 11.1 m³/ha/年（丹下ら 1987）、岩手県で 143～153 年生時に 10.3～11.9 m³/ha/年（國崎ら 1999）、三重県で 168～180 年生時に 6.0 m³/ha/年（田中 1992）、奈良県の 127～177 年生の林で 16～19 m³/ha/年、232 年生の林で 12 m³/ha/年（竹内 2005）という値が報告されており、100 年生以上になっても 10 m³/ha/年前後、あるいはそれ以上の場合が多い（竹内 2005）。本事例の値は、これらの既報と比べると、やや小さいがその範囲に含まれている。

間伐率と林分の材積成長速度の関係については、間伐率がある値より低ければ、材積成長速度は間伐率にかかわらず無間伐区と大差ないが、それを超える強度の間伐では低下することが指摘されており、その閾値は材積間伐率で 40% 程度とされている（小坂ら 1967, 菊沢・浅井 1979, 清和ら 1986, 菊沢 1987, 菊地 1991）。本研究では、この閾値を超える強度の間伐が実施されたにもかかわらず、林分材積成長速度が間伐前からあまり低下しておらず、既報で指摘されている面積当たりの成長量低下がそれほど問題にならない場合があることが示唆される。ただし、高齢期に実施された強度間伐は事例が少ないので、今後さらに調査事例を増や

し、材積成長速度に及ぼす影響について間伐履歴による葉量のちがいに着目して、どのような条件下で成長が維持、促進されるかを検討する必要がある。

5.2 個体による成長のばらつきをもたらした要因

5.2.1 期首サイズの効果

多くのスギ高齢人工林で個体の直径成長速度と期首の直径との間には正の相関がみられ、高齢になっても一般に個体の直径成長がサイズ依存的なことが報告されている（田中 1992, 竹内 2005, 國崎 2001, 國崎・藁谷 2006, Masaki et al. 2006, 宮本ら 2015）。その原因として、大きな個体ほど樹冠長、樹冠半径が大きく、着葉量が多いことがあげられている（竹内 2005）。本研究においても期首直径と直径成長速度の間には正の相関がみられたが、その関係が顕著な期間は限定的で、強度間伐直前の 10 年間と間伐から 20 年以降の 2 つの期間のみであった（Fig. 7）。間伐前の最も混み合った期間にその傾向が顕れ、強度間伐の実施によって消滅したように見受けられる。つまり、上述した従来の報告は比較的弱度の間伐が行われてきた事例であり、本事例で異なる挙動がみられたのはきわめて強度の間伐が行われたことが原因と考えられる。そのメカニズムのひとつは、間伐により劣勢木が除かれ、ある程度葉量を保持した個体ばかりになるので、個体サイズへの成長の依存性が不明瞭になったことがあげられる。もうひとつの可能性は、強度な間伐では小径木でも光環境が大いに改善されて成長が促進されたことが影響したことである。菊沢（1987）は 21 年生ヨーロッパトウヒ林で行われた間伐試験について、横軸に間伐直後の直径、縦軸にその 4 年後の直径をとって直線で回帰すると、無間伐区（本数間伐率 0%）から弱度区（15%）、中度区（31%）そして強度間伐区（50%）までは原点付近を通る直線となり、間伐率が増すとともにその勾配が増加していくのに対し、超強度間伐区（78%）は原点をはずれて無間伐区の直線を平行移動したような直線になることを報告している。つまり、ある程度の範囲までは間伐率の増加とともに期首直径が大きいほど成長も大きくなるが、それを超えて超強度な間伐になるとサイズ依存性が弱くなることを意味している。菊沢（1987）は、「大径木は強度間伐ですでに満度に光を得ているので、超強度間伐になってもそれ以上には成長しないが、小径木では超強度間伐になってようやく満度に光を得るだろう。その結果、強度と超強度との間では大径木の成長はあまり差がないが、小径木の成長は超強度のほうが大きいので超強度間伐区の成長速度が直径にかかわらず一定になる」と解釈している。本事例でも、このようなメカニズムで強度間伐が成長と直径との相関を不明瞭にしたと考えられ、比較的小径の個体でも強度の被陰を免れ、梢端・枝を伸長させて葉量を増やし、大径木と遜色ない直径成長をす

ることができたと考えられる。葉量の増加を指標すると考えられる樹冠半径や樹冠表面積の増加が必ずしも間伐時の直径に依っているわけではなく、樹冠半径の増加はむしろ小径のもののほうが大きい傾向がみられたこと (Fig. 6) も、関連した現象であると考えられる。

一方、期首直径と単木の胸高断面成長速度 (Fig. 8) および材積成長速度との間には間伐後を通して顕著な正の相関がみられた。この林分では、伐倒調査木の解析データから、間伐前の時点においても直径と材積成長の間に同様の関係がみとめられている (西村ら 1992b)。直径と材積成長速度との正の相関は他のスギ高齡人工林でも報告されている (丹下ら 1987, 渡邊・茂木 2007)。個体サイズが同化器官である葉の量を規定し、着葉量が体積や重量としての成長量を規定するため、間伐時にすでに多くの葉量を保持していた大きな個体は、間伐後にも良好な成長が維持・促進されたものと考えられる。

5.2.2 樹冠構造の効果

樹冠長、樹冠半径、樹冠表面積といった樹冠構造は直接的に着葉量を反映し、成長に関係するパラメータであると考えられている。とくに樹冠表面積は着葉量と密接な関係があり、成長量と相関があることが報告されている (梶原 1985, 1990)。本林分においても、吉田・石井 (1993) が間伐直前 (89 年生時) に樹冠表面積と材積成長の間に直線的な関係があることを報告しており、高齡になってもその関係がみられることが示されている。しかしながら、強度間伐後にはこれらのパラメータと胸高断面成長との関係は期首直径が示したほどは明瞭ではなく、とくに 90 ~ 106 年生にはいずれパラメータも有意な相関を示さなかった (Fig. 9)。その原因は強度間伐の何らかの影響であると考えられるが、詳細は不明である。ひとつの可能性として、一次枝枯損後に発生した萌芽枝の着葉量が無視できないほど大きく、樹冠構造パラメータが必ずしも着葉量を反映していなかったことが考えられる。間伐後 20 年を経過した 111 年生以降に期首樹冠長と期首樹冠表面積が有意な相関を示すようになった (Fig. 9) のは、陽樹冠部の着葉量が増加して樹冠構造パラメータと着葉量との関係が明瞭になったためかもしれない。

5.2.3 個体間競争の効果

以上議論してきた個体自身のサイズや樹冠構造とともに、近隣木との個体間競争の影響も個体の成長に影響を及ぼす要因として重要である (宮本・天野 2002, 國崎・藁谷 2006, Masaki et al. 2006, Inoue et al. 2008, 宮本ら 2015)。競争関係には、光を巡って優勢木が弱勢木を被陰するような自身より大きな木からのみ影響を受ける一方方向的なもの、水分や養分を巡る競争のように大きな木からも小さな木からも影響を受ける

双方向的なものがある (Weiner 1990)。Masaki et al. (2006) は秋田県のスギ人工林において、前者の指標として BA_L を、後者の指標として BA_T を用いて対象木から半径 8m の範囲内での競争効果を解析し、壮齡期には一方方向的競争と双方向的競争の両方が影響を及ぼすが、より高齡の 61 ~ 73 年生になると双方向的競争主体へとシフトし、83 年生ではどちらの影響もみられなかったことを報告している。宮本ら (2015) も高知県のスギ林において、壮齡期 ~ 65 年生には半径 8 ~ 10m 程度の競合範囲で一方方向的競争と双方向的競争の両方が影響を及ぼし、65 ~ 75 年生には双方向的競争の影響が顕著になり、75 ~ 91 年生になるとどちらの効果もみられなくなったことを報告している。

本研究の結果では、一方方向的競争の指標である BA_L と胸高断面成長速度との間に顕著な関係がみとめられ (Fig. 10)、間伐後を通して BA_L' を組み込んだモデルが最良モデルに採択されて、間伐 20 年後までは D モデルよりも有意に改善されていた (Table 2)。顕著な関係を示した d の値は 8 ~ 9m 程度で (Fig. 10)、各個体と樹冠が隣接していない周辺木のうちで最も近いものまでの距離の平均値 8.4m に相当しており、樹冠の接する範囲が競合範囲となっていることを示している。 $BA_L=0$ の個体が $BA_L>0$ の個体より直径成長速度が高かったことは、その範囲のなかで最大のサイズをもち隣接樹冠から側圧されていない個体の成長が促進されたことを意味している。ただし、間伐 20 年後以降には BA_L' を組み込むことによるモデルの改善が有意ではなくなっており、一方方向的競争の影響が明瞭ではなくなってきた傾向がみられる。強度間伐は、弱勢の小径木の成長を促進させて直径一直径成長の相関関係を不明瞭にすると同時に、大径の優勢木のなかでもとくに周辺木からの側圧を受けていない優勢木の成長を促進させる方向にも作用し、やがて期首直径と直径成長との相関を復活させ (Fig. 7)、一方方向的競争の影響の重要性を相対的に低下させるに至ったと考えられる。

一方、双方向的競争の指標である BA_T と胸高断面成長速度との間には一貫して明瞭な関係がみられなかった (Fig. 10, Table 2)。強度間伐が水や養分を巡る競争を緩和したことが考えられるが、間伐前からすでにそのような競争があまりなかった可能性もある。本研究の結果は、Masaki et al. (2006)、宮本ら (2015) が報告した、壮齡期に一方方向的競争と双方向的競争の両方の影響がみられ、その後に双方向的競争主体へとシフトするというパターンとは異なっている。そのちがいが林齡のちがいによるものか、間伐強度のちがいによるものなのか、事例を増やして論議する必要がある。

5.3 高齡人工林の施業における強度間伐の有効性

長伐期施業により大径材生産を行うためには成長を

持続させる必要があり、そのためには低い密度で管理して個体あたりの着葉量を確保する必要がある。ヒノキ人工林では、林齢 50 年生までに 500 ～ 1000 本/ha 以下に密度を低下させておけば、その後に間伐を省略しても高蓄積の人工林を造成することが可能であることが指摘されている（鈴木ら 2009）。スギ人工林でも、林齢 70 ～ 80 年生までに 400 ～ 700 本/ha 程度まで密度が低下した林分において、さらに 100 年生以降に 200 本/ha 程度にまで減少させたような林分が高齢人工林として存続できるという施業スケジュールも提示されている（千葉 2008）。低い立木密度にするためには間伐を何度も実施する必要があり、吉野林業では弱い間伐を繰り返している（高橋・竹内 1999）が、経費や人手の関係で頻繁な間伐が困難な場合には、強度間伐は密度を一気に低下させるのに効率的な方法である。ただし、過度に強度な間伐は林分材積成長速度をかえって低下させることがある（菊沢 1987）。

本研究で行われた強度間伐では、きわめて強度の間伐を行ったにもかかわらず林分の材積成長速度が顕著には低下しなかった（Table 1）。個体レベルの成長においても、間伐後に年輪幅 2mm 前後の直径成長が 20 年以上持続しており（Fig. 4）、この程度の年輪幅が高品質大径材の条件とされること（鈴木 1995, 高橋・竹内 2007）を考えると、材質的にも良好な結果をもたらしたと考えられる。立木密度が 167 本/ha、収量比数 0.3 程度という疎林状態となり、すでに主伐時の目標とされる本数まで密度を落としたことになるため、今後さらに密度管理のために経費をかける必要はないと考えられる。以上のことから、高齢スギ人工林の施業スケジュールとして、100 年生前後に一度強度間伐を行い、その後きわめて低い密度で伐期 150 年、さらには 200 年といった超長伐期施業をめざすことは、経営的に大径材や年輪幅からみた高品質材を生産する観点からも、一つの選択肢になり得ると考えられる。本調査林分はその可能性を検証することができる試験地であり、今後も長期的にモニタリングを継続することが望まれる。ただし、本林分は強度間伐以前から比較的低い本数密度で管理されたものであり、それゆえ着葉量の目安とされる樹冠長率も高かった事例であることに留意する必要がある。最近、従来の短伐期施業のもと十分に密度管理がなされないまま壮齢あるいは高齢に達した林分が増えつつある。そうした林分を長伐期林へ移行させることも考えると、どのような条件の高齢人工林をどの段階で、しかもどの程度の間伐で密度を低下させれば超長伐期施業が可能なのか、さらに事例を増やして検討する必要がある。

謝 辞

本研究の調査対象となったスギ高齢人工林の間伐試験地を設定し貴重なデータを残してくださった元岩手

大学農学部のご安藤 貴博士に深く敬意を表する。森林総合研究所の宮本和樹博士には解析方法で多大なご協力をいただいた。2 名の査読者には有益・適切なコメントをいただいた。森林総合研究所の正木 隆博士、西園朋広博士、富山県農林水産公社の嘉戸昭夫博士、富山県農林水産総合技術センター森林研究所の図子光太郎博士には、研究を進めるにあたり貴重なご助言をいただいた。岩手大学農学部滝沢演習林の齋藤 誠、濱道寿幸、藤田泰崇の各氏には現地調査にご協力いただいた。岩手大学農学部附属寒冷フィールドサイエンス教育研究センター各位には調査に便宜をはかっていただいた。以上の方々に深く感謝する。本研究の一部は、森林総合研究所運営費交付金プロジェクト（課題番号：201108）により補助を受けた。

引用文献

- 安藤 貴（1982）林分の密度管理. 農林出版, 東京, 126pp.
- 千葉 幸弘（2008）長伐期化への道筋を考える（I）—高齢林の成長特性. 森林技術, 801, 9-15.
- 千葉 幸弘（2009）長伐期化への道筋を考える（II）—樹冠長を目安とした高齢林の管理. 森林技術, 802, 11-17.
- 藤森 隆郎（2006）長伐期施業の意義と課題. 全林協編“長伐期林を解き明かす”. 全林協, 東京, 12-32.
- 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.
- Inoue, S., Shirota, T., Mitsuda, Y., Ishii, H. and Gyokusen, K. (2008) Effects of individual size, local competition and canopy closure on the stem volume growth in a monoclonal Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) plantation. Ecological Research, 23, 953-964.
- 岩手県林業水産部（1983）岩手県民有林スギ収穫予想表等作成に関する基礎調査書. 86pp.
- 准フォレスター研修基本テキスト作成委員会編（2013）准フォレスター研修基本テキスト. 林野庁, 278pp.
- 壁谷 大介・太田 敬之・正木 隆・梶本 卓也（2015）立木の競争指標の評価方法. 関東森林研究, 66, 139-142.
- 梶原 幹弘（1985）樹冠量と幹材積生長量との関係に関する過去の調査結果. 京都府大演報, 29, 83-90.
- 梶原 幹弘（1990）スギ, ヒノキ同齢林分内における単木の陽樹冠表面積と幹材積, 胸高直径および樹高の各成長量との相関. 京府大演報, 34, 41-45.
- 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.
- 木戸口 佐織・栗野 義之（2007）岩手県民有林におけるスギ高齢林の現状と収穫予想表の作成. 岩手県林技セ研報, 15, 1-8.

- 菊地 健 (1991) ブナ二次林の上層木伐採試験 ―林分構造と7年間の林分成長量―. 北林試報, 29, 63-70.
- 菊沢 喜八郎 (1987) ヨーロッパトウヒの間伐試験. 北林試報, 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.
- 小坂 淳一・寺崎 康正・都築 和夫・金 豊太郎 (1967) 林分成長量からみた間伐方法. 日林誌, 78, 60-61.
- 國崎 貴嗣 (2001) 樹木同齡單純林における胸高直径分布とその動態 ―針葉樹を中心として―. 森林計画誌, 35, 31-45.
- 國崎 貴嗣・藁谷 紀恵 (2006) 岩手山麓のスギ高齢人工林における幹直径成長量の個体間差. 岩大演報, 37, 47-55.
- 國崎 貴嗣・藁谷 紀恵・柴田 信明 (1999) 岩手山麓におけるスギ高齢林の林分構造と成長. 日林誌, 81, 346-350.
- 正木 隆・櫃間 岳・八木橋 勉・野口 麻穂子・柴田 銃江・高田 克彦 (2013) スギ林における壮齡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? 日林誌, 95, 227-233.
- 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.
- Masaki, T., Mori, S., Kajimoto, T., Hitsuma, G., Sawata, S., Mori, M., Osumi, K., Sakurai, S. and 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・大住 克博・関 剛・森 茂太・梶本 卓也・櫃間 岳・八木橋 勉・柴田 銃江・野口 麻穂子 (2015) 添畑沢スギ間伐試験地における45年生から104年生までの長期成長データ. 森林総研研報, 14, 65-72.
- 宮本 麻子・天野 正博 (2002) 立木の空間分布および生育条件が個体成長に及ぼす影響. 森林総研研報, 2, 163-178.
- 宮本 和樹・酒井 敦・大谷 達也・松岡 真如・山崎 敏彦 (2015) 四国地方の高齡級スギ・ヒノキ人工林における個体間競争が植栽木の成長に及ぼす影響. 日林誌, 97, 171-181.
- 西村 武二・吉川 賢・池本 彰夫・永森 通雄 (1992a) 高齡スギ人工林の現存量と成長経過 (1) 高知県本川村奥南川山国有林80年生スギ林の場合. 高知大演報, 19, 73-81.
- 西村 武二・吉川 賢・池本 彰夫・永森 通雄・安藤 貴 (1992b) 高齡スギ人工林の現存量と成長経過 (2) 岩手大学滝沢演習林89年生スギ林の場合. 高知大演報, 19, 83-97.
- 西園 朋広・田中 邦宏・粟屋 善雄・大石 康彦・林 雅秀・横田 康裕・天野 智将・久保山 裕史・八巻 一成・古井戸 宏通 (2008) 秋田地方のスギ人工林における林分材積成長量の経年推移. 日林誌, 90, 232-240.
- Nishizono, T., Tanaka, K., Hosoda, K., Awaya, Y. and Oishi, Y. (2008) Effects of thinning and site productivity on culmination of stand growth: results from long-term monitoring experiments in Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) forests in northeastern Japan. J For Res, 13, 264-274.
- 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齡なスギ人工林の成長経過. 日林誌, 82, 179-187.
- 林野庁 (1979) 表東北地方スギ密度管理図. 日本林業技術協会, 東京.
- 林野庁計画課 (1970) 立木幹材積表 東日本編. 日本林業調査会, 東京, 176pp.
- 桜井 尚武 (編著) (2002) 長伐期林の実際 ―その効果と取り扱い技術―. 林業科学技術振興所, 東京, 173pp.
- 澤田 智志 (2004) 長期育成循環施業に対応する森林管理技術の開発. 秋田県森技研報, 13, 65-88.
- 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―. 日林北支講, 35, 122-124.
- 杉田 久志・高橋 利彦・齋藤 誠・濱道 寿幸・藤田 泰崇 (2014) スギースギ複層林で発生した下木の冠雪害被害に対する形状比および上木樹冠との位置関係の影響. 日林誌, 96, 6-11.
- 鈴木 正 (1995) 大径材生産の林業. 全国林業改良普及協会, 東京, 175pp.
- 鈴木 和次郎・池田 伸・平野 辰典・須崎 智応・和佐 英二・石神 智生 (2009) 高齡級ヒノキ人工林の林分構造にみる間伐履歴の影響. 日林誌, 91, 9-14.
- 高橋 絵里奈・竹内 典之 (1999) 東吉野村におけるスギ人工林の密度管理 (II) ―東吉野村における除間伐の特徴―. 森林応用研究, 8, 121-124.
- 高橋 絵里奈・竹内 典之 (2001) 奈良県川上村上多古および高原における高齡スギ人工林の現状と今後の施業方針. 森林研究, 73, 59-66.
- 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) スギ高齡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 郁雄・伊東 宏樹 (2003) スギ高齡林の樹高成長. 日林誌, 85, 121-125.
- 田中 和博 (1992) 平倉演習林藤堂スギ林分の林齡168年から180年までの定期成長. 三重大演報, 17, 211-231.

- 丹下 健・山中 征夫・鈴木 誠 (1987) スギ高齢人工林の成長と現存量. 演習林 (東大), 25, 243-259.
- Thomas, S. C. and Weiner, J. (1989) Including competitive asymmetry in measures of local interference in plant populations. *Oecologia*, 80, 349-355.
- 渡邊 仁志・茂木 靖和 (2007) 92 年生スギ人工林における成長経過と現存量. 岐阜県森林研研報, 36, 1-7.
- Weiner, J. (1990) Asymmetric competition in plant populations. *Trends in Ecol. Evol.* 5, 360-364.
- 山谷 孝一 (1983) 岩手大学農学部滝沢演習林土壌調査報告. 岩大演報, 14, 33-60.
- 吉田 茂二郎・石井 弘 (1991) スギ高齢林分の樹冠構造について. 鹿大演報, 19, 19-30.
- 吉田 茂二郎・石井 弘 (1993) スギ高齢林分の樹冠構造について (II) 岩手大学滝沢演習林 89 年生林分の場合. 鹿大農学術報, 43, 87-95.
- 吉田 茂二郎・安元 岳玄・溝上 展也・今田 盛生・寺岡 行雄 (2002) 白鹿岳間伐試験地におけるスギ高齢林の間伐効果について — 相対幹距比を基礎にした分析 —. 九大演報, 83, 53-61.

Stand and individual growth in an old *Cryptomeria japonica* plantation after intensive thinning

Hisashi SUGITA^{1)*}, Takuya KAJIMOTO²⁾, Shigeki FUKUSHIMA³⁾,
Toshihiko TAKAHASHI⁴⁾ and Shigejiro YOSHIDA⁵⁾

Abstract

Stand- and individual-level growth responses after intensive thinning were investigated in a 114-year-old *Cryptomeria japonica* plantation in Iwate Prefecture, focusing on the effects of relatively late thinning (when the stand was 90-year-old) on growth, and on factors causing variation in individual diameter growth. Before this late thinning, stem density, the relative yield index, and the crown length ratio (crown/height) were 458 trees ha⁻¹, 0.55, and 0.45, respectively, indicating that the stand was not crowded. The thinning removed 64 % and 53 % of trees in terms of number and volume, respectively, and reduced stem density and the relative yield index to 167 trees ha⁻¹ and 0.27. The mean annual height growth rate after the thinning was almost the same as the value before the thinning. The mean annual diameter growth rate was 0.21 cm year⁻¹ before the thinning, and increased to 0.43 cm year⁻¹ after the thinning. The stand-level stem volume growth rate after the thinning was 8.20 m³ ha⁻¹ year⁻¹, which was not greatly lower than the pre-thinning value, 8.55 m³ ha⁻¹ year⁻¹. The diameter growth rate at the individual level before the thinning was found to correlate significantly with the initial diameter size at the beginning of each census period. However, this correlation became unclear after the thinning, and then re-emerged at 20 years after the thinning. Analysis using a neighborhood inter-tree competition model recognized effects of one-sided competition on diameter growth after the thinning, while the effects of two-sided competition were not observed. These results suggest that, in a well-managed old *C. japonica* plantation, intensive thinning at a relatively late growth stage (ca. 100 years) to keep the stand at extremely low density may be a good option for producing large-sized and high quality timber in the future when a hyper-long rotation is applied (e.g., >150 years).

Key words: *Cryptomeria japonica*, old plantation, intensive late-thinning, growth, size-dependence, neighborhood competition

Received 14 February 2017, Accepted 7 August 2017

1) Shikoku Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) Department of Plant Ecology, FFPRI

3) Forestry Research Institute, Chiba Prefectural Agriculture and Forestry Research Center

4) Woodworks "Yui"

5) Faculty of Agriculture, Kyushu University

* E-mail: sugitahisai@gmail.com