カラマツにおける間伐強度の違いが年輪構造や 丸太のヤング係数に及ぼす影響^{*1}

安久津久^{*2}, 松本和茂^{*2}, 藤本高明^{*3}, 大野泰之^{*4},
滝谷美香^{*4}, 八坂通泰^{*4}

Effects of Different Thinning Intensities of Japanese Larch (*Larix kaempferi*) on the Annual Ring Structure and Dynamic Young's Modulus of Logs^{*1}

Hisashi AKUTSU^{*2}, Kazushige MATSUMOTO^{*2}, Takaaki FUJIMOTO^{*3},
Yasuyuki OHNO^{*4}, Mika TAKIYA^{*4} and Michiyasu YASAKA^{*4}

The effect of thinning treatments on wood quality in an artificial plantation of Japanese larch (*Larix kaempferi*) was determined by measuring the annual ring width, ring density by soft X-ray densitometry, and dynamic Young's modulus of logs. Ninety-eight 40-41-year-old sample trees from 5 examination plots of different thinning rates (at 0%-50% thinning from full stocking) were examined. Four to 5 years after the experimental setup, the effect of thinning treatment was observed by analysis of variance and multiple comparison test in the each annual ring width at 4 m and 8 m in height. Thinning treatment had influenced each annual ring width until final cutting. The difference in ring width affected earlywood and latewood widths and latewood density. In a heavy thinning plot, although the width of annual rings was large, there was no reduction in annual ring density because the values of latewood width and latewood density were large. Dynamic Young's modulus of the logs was least in the un-thinned plot, and dynamic Young's modulus of the logs was highest in the 40% intensity heavy thinning plot compared to the 30% intensity standard thinning plot. Dynamic Young's modulus in the 50% intensity thinning plot was equivalent to that of the standard thinning plot.

Keywords : Japanese larch, thinning treatment, thinning intensity, wood quality, annual ring structure.

カラマツ人工林の間伐施業による材質への影響を把握するため、間伐強度の異なる5つの試験区(全層間伐による間伐率0~50%)の林齢40~41年生の試験木98本を用い、軟X線デンストメトリ法での年輪幅や年輪密度と丸太の動的ヤング係数について検討を行った。地上高4mと8m

^{*1} Received January 6, 2012; accepted May 7, 2012. 本研究の一部は、第60回日本木材学会大会(2010年3月, 宮崎)において発表した。

^{*2} 北海道立総合研究機構森林研究本部林産試験場 Local Independent Administrative Agency, Hokkaido Research Organization, Forest Products Research Institute, Asahikawa 071-0198, Japan

^{*3} 鳥取大学農学部 Faculty of Agriculture, Tottori University, Tottori 680-8553, Japan

^{*4} 北海道立総合研究機構森林研究本部林業試験場 Local Independent Administrative Agency, Hokkaido Research Organization, Forest Research Institute, Bibai 079-0198, Japan

Corresponding author: H. Akutsu (akutsu-hisashi@hro.or.jp)

部位の年輪幅の変動から分散分析と多重比較検定により間伐による影響を検討した。年輪幅は試験区設定の4, 5年後に試験区間で有意に異なり、主伐まで影響した。試験区ごとの年輪幅の違いは早材幅、晩材幅や晩材密度に影響した。強度間伐区では年輪幅が大きくても晩材幅や晩材密度の値が大きいため年輪密度の低下はなかった。丸太の動的ヤング係数は無間伐区で最も小さく、標準間伐(30%)より強度な40%間伐では丸太の動的ヤング係数が最も大きかった。より強度な50%間伐でも丸太の動的ヤング係数や年輪密度は標準間伐と同等の値であった。

1. 緒 言

カラマツは北海道の主要造林樹種の一つで人工林面積は46万 ha、蓄積9300万 m^3 (平成22年度北海道林業統計)である。近年カラマツ資源は充実し、北海道における素材生産量は137.0万 m^3 で、国産のカラマツ生産量198.5万 m^3 (平成22年度農林水産省木材統計)の約7割を占めており、カラマツ原木の大半が北海道で生産されている。カラマツの原木価格はエゾマツやトドマツなどに比べ安価で、従来から梱包材やパレット材といった産業用資材としての利用が多い。近年、カラマツ住宅の着工数の増加に伴い、集成材や2×4材、合板など建築用材として高付加価値化に向けた利用も進みつつある。一方、林業側でも木材利用の促進に向け、育林コストの低減に向けた取組みが進みつつある。特に、育林コストに占める間伐コストの割合が高く、それは間伐の回数に依存し、間伐の回数を減らすことが育林コスト低減につながるとの報告がある¹⁾。具体的には強度な間伐や低密度植栽を実施し、間伐回数を減らすことで育林経費の削減を目指すものであり、これに対応した間伐方法、間伐回数、低密度植栽等についての議論が活発に行われている。

間伐の本来の目的は大径材をより早期に生産することであり、間伐の肥大成長促進への効果はカラマツに限らずよく知られている。しかし、植栽密度や間伐時期、間伐強度などの施策が材質や素材材積に及ぼす影響についてのデータは少なく、議論もいまだ乏しい。間伐と材質に関する報告は多くはないが、近年、スギに関しては後藤ら^{2, 3)}が報告している。カラマツに関しては、植栽密度や間伐強度を組み合わせで検討したKoga et al.の報告^{4, 5)}、標準間伐と強度間伐のJISの強度試験により検討した王らの報告⁶⁾、間伐遅れ林分での間伐効果を検討した著者らの報告⁷⁾がある。しかし、一概に間伐と材質の検討といっても、間伐の実施時期、間伐回数、間伐強度(間伐率)、地位による違いなどで、様々な施策タイプがあり、一つのモデルを作るにしても複数の林分での検討が必要である。

著者らは資源の有効利用、資源管理につながる資

料を得ることを目的とし、成長の良いカラマツ造林地に間伐強度(間伐率)の異なる試験区を設定し、41年生で主伐を実施した林分から試験木を採取し、間伐の有無や間伐強度と材質、素材生産、製材強度などとの関連について研究を行っている。本報では、間伐強度の違いが年輪構造や丸太の動的ヤング係数に与える影響について検討した。

2. 材料と方法

2.1 試験地と試験木

試験地は北海道沙流郡平取町字旭の町有林135林班65小班内にあり、北緯42°39′、東経142°20′に位置する(Fig. 1)。標高は200~220 m、地位 I 等地のカラマツ林内である。この林小班のカラマツは1968年に3000本/haで植栽され、その後、10年生時(1977年)に本数ベースで30%程度の除伐を行っている。16年生時(1983年)に間伐率の異なる5つの試験区(間伐率: 0%, 20%, 30%, 40%, 50%)をそれぞれ0.1 haの方形区で設定し、間伐率に従いT0, T20, T30, T40, T50とした(Fig. 2)。これらの試験区の間伐方法は全層間伐である。間伐に伴う各試験区の立木密度の推移をFig. 3に、除間伐の林齢をTable 1に示した。試験区の間伐処理前の立木密度は1920~2170本/haであった。各試験区の間伐はT50では林齢16, 20年生の2回、T20では16, 24年

Fig. 1. Location of thinning experimental forest.

Fig. 2. The arrangement plan of the thinning experimental plot.

Legend: T0, T20, T30, T40, and T50 indicate no thinning, and thinning rate of 20%, 30%, 40%, and 50%, respectively.

Fig. 3. Variation of stand density accompanying thinning treatment.

Legend: Experimental plot: Refer to Fig. 2.

Note: Values in parentheses show forest age.

生の2回, T30とT40では16, 20, 24年生の3回実施し, いずれも間伐方法は全層間伐である。間伐は24年生を最後に, 主伐の41年生(2008年)まで実施していない。また, 枝打ちも実施していない。この試験地における間伐試験地設定当初の成長経過などは清和ら^{8,9)}が報告し, 主伐前年の40年生までの成長経過などの結果を八坂ら¹⁾が報告している。試験区以外のこの小班のカラマツ林分の施業は, 除伐を10年生で実施し, 間伐率25~30%の定性間伐を17, 22, 27, 34年生の計4回実施している。主伐時(41年生)の立木密度は545本/haで平均胸高直径は26.5 cmであった。この65小班の施業は北海道のカラマツのI等地疎仕立てに近い施業であった¹⁰⁾。この小班の施業を本試験区と対比させると, 試験区T30は間伐回数が1回少ないが, 間伐率が30%, 立木密度が530本/haで平均胸高直径が27.2 cmで最もこの施業に近く, この間伐を標準間伐とすると, 試験区T20は弱い間伐, T40とT50は強度間伐と位置づけられる(Table 1)。

40年生時の試験区と試験木の概要をTable 2に示した。胸高直径($H=1.3$ m)は直径巻尺を用いてmm単位で測定し, 樹高はVertex IV (Haglof社製)を用いて0.1 m単位で測定した。試験区ごとの平均胸高直径はT0の21.6 cmからT50の30.8 cmであった。試験木は試験区内の平均胸高直径の分布範囲が等しくなるように20本ないし18本を選木した。試験区ごとの平均胸高直径はT0の22.0からT50の29.4 cmで, 平均樹高はT20の25.6からT50の27.8 mであった。

試験木は, 予備的な検討を行うことを目的として2007年12月(40年生時)に伐倒し各試験区5本を採取し, 2008年12月(41年生時)の皆伐時に残りの15本ないし13本を採取した。試験木は地際から伐倒し, 材長4 mに玉切り, 1番玉と2番玉を北海道立総合研究機構林産試験場に運搬し, 軟X線デンストメトリによる年輪解析と丸太の動的ヤング係数の測定に供した。

2.2 軟X線デンストメトリによる年輪解析

年輪解析用の試料は各丸太の末口(地上高4 m

Table 1. Forest age of improvement cutting and thinning for each experimental plot.

Experimental plot	Improvement cutting (10)	1st thinning (16)	2nd thinning (20)	3rd thinning (24)	Number of times of thinning	Remarks
T0	○	—	—	—	0	No thinning
T20	○	○	—	○	2	Light thinning
T30	○	○	○	○	3	Standard thinning
T40	○	○	○	○	3	Heavy thinning
T50	○	○	○	—	2	Heavy thinning

Table 2. The outline of the thinning experimental plot and sample trees. (40-year-old trees)

Experimental plot	Experimental forest			Sample tree			
	DBH (cm)	Stand density (Stems/ha)	Stand volume (m ³ /ha)	Number of tree	DBH (cm)	Height (m)	Crown height (m)
T0	21.6 (14-34)	1040	416	18	22.0 (16.1-31.7)	25.6 (23.2-29.1)	21.2 (19.0-23.6)
T20	22.3 (12-34)	800	345	20	23.0 (17.6-31.0)	23.6 (19.2-28.4)	17.3 (13.1-19.2)
T30	27.2 (16-38)	530	377	20	26.7 (20.7-34.4)	25.8 (22.7-28.4)	17.1 (14.7-20.2)
T40	28.2 (18-36)	430	329	20	27.6 (22.2-36.0)	26.9 (22.2-30.7)	16.0 (12.5-19.8)
T50	30.8 (20-40)	410	379	20	29.4 (25.1-33.0)	27.8 (24.6-31.0)	16.1 (12.4-18.3)

Legends: Experimental plot: Refer to Fig. 2. DBH: Diameter at 1.3 m above ground.

Note: The upper row shows mean value and values in parentheses show the range. Crown height was measured by 15 sample trees of 41-year-old trees.

と 8 m 部位) から厚さ約 5 cm の円板を採取し、円板の偏心の少ない短径側 2 方向から樹心を含む幅 30 mm のストリップを製材し、さらに、ツインソーを用いて繊維方向に厚さ 2 mm の試料を作製した。試料は、アルコール-ベンゼン混合液 (混合比 1 : 1) で脱脂処理を行い、その後、恒温恒湿室で含水率 12 % に調整した。X 線フィルム (フジ工業用フィルム FR) 上に試料を置き、X 線発生装置 (ソフテックス社製 CMB2 型) で、照射距離 76 cm, 照射条件を管電圧 19.5 kV, 管電流 2.5 mA, 露光時間 37 秒で撮影した。デンシトメータはマイクロフォトメータ (コニカメディカル社製 2111 型) を用いスリットを 30 × 300 μm とし、樹心から外側に 1 mm/s で相反する 2 方向を測定し、常法¹¹⁾に従って密度変換を行った。測定時の試料の含水率は 12 % で、気乾での評価を行った。年輪の早材と晩材は、年輪内の密度が 0.55 g/cm³ を越えた部位を晩材部とし早材部と区分した。各試料は樹心から年輪ごとに 2 方向で平均した値を用いた。年輪解析では年輪幅、早材幅、晩材幅、年輪内平均密度 (以下年輪密度とする)、早材密度、晩材密度の 6 形質について検討した。各部位の年輪数は地上高 4 m で 32~37、地上高 8 m で 28~32 であり、個体で年輪数は異なっていた。間伐による影響を検討するため、最外年輪を基準とし、林齢で評価した。測定した試料数は 4 m 部位が 97 (1 試料欠) で 8 m 部位が 96 (2 試料欠) であった。

2.3 丸太の動的ヤング係数の測定

丸太の動的ヤング係数は、材長 4 m に玉切った 1 番玉 96 本 (2 本欠) と 2 番玉 98 本の計 194 本について測定した。皮付き丸太の材長はコンベックスで、丸太の中央径は直径巻尺を用い、それぞれ mm 精

度で測定した。丸太の重量は 0.1 kg 精度で測定した。これらの測定値から丸太の密度 (ρ) を算出した。FFT アナライザ (リオン社製 SA-78) を用いタッピングで固有振動数 (Hz) を測定し、この値と丸太の材長、密度から丸太の動的ヤング係数を次式により求めた。

$$E_d = 4f^2 L^2 \rho / 10^6$$

ここで E_d : 丸太の動的ヤング係数 (GPa) L : 材長 (m) f : 固有振動数 (Hz) ρ : 丸太の密度 (g/cm³) である。

3. 結 果

3.1 間伐による年輪幅の変動

軟 X 線デンシトメトリにより測定した地上高 4 m 部位と 8 m 部位の年輪幅の変動を Fig. 4 に示した。いずれの部位でも若齢時の年輪幅が大きいが、加齢に伴い年輪幅は急激に減少し、林齢 20 年で 4 m 部位の年輪幅は 2 mm 前後、8 m 部位では 3 mm 前後まで減少した。その間、各試験区ともほぼ同様な推移を示した。その後、年輪幅の変動は試験区間で大きく異なった。すなわち、間伐を実施していない T0 区は年輪幅が一貫して減少し、4 m 部位では林齢 31 年、8 m 部位では林齢 35 年以降に年輪幅が 1 mm 未満となった。T20 の年輪幅は若干増加し、22 年には 4 m 部位で 2.3 mm、8 m 部位では 3.0 mm まで増加するが、その後減少した。T20 の変動の傾向は T0 に類似するが、年輪幅が 1 mm 未満になることはなかった。T30、T40、T50 では間伐強度の高い試験区ほど年輪幅が大きく、22 年まで年輪幅は増加し、その後減少傾向を示した。試験区間で年輪幅の順位の変動はほとんどなかった。T40 と T50 の年

Fig. 4. Variation of RW for forest age at height 4 m and 8 m.

Legend: ●: T0 ▲: T20 ○: T30 □: T40 △: T50, T0, T20, T30, T40, T50: Refer to Fig. 2.
RW: Refer to Table 3.

輪幅は28年以降ほぼ同様に推移した。5試験区の41年生の年輪幅は4 m部位で1.0~1.5 mm, 8 m部位で0.9~1.6 mmとその差は小さかった。

間伐後に年輪幅が大きくなることはカラマツに限らず一般によく知られている。間伐に伴う年輪幅の変動について見ると、1回目の間伐(試験区設定時)後の林齢16年から20年までの間も年輪幅は減少した。その後、年輪幅はT0を除き林齢21年から増加し、2回目の間伐の2年後の林齢22年でピークとなった。林齢24年に実施した3回目の間伐後の年輪幅の増加はほとんど無く、緩やかに減少した。その後、林齢37年の年輪幅に新たなピークが見られるが、このピークが間伐による直接的な影響とは考えづらい。

年輪幅が試験区間で統計的に差があるのかを検討するため、試験区を要因とした分散分析を林齢ごとに行った。その結果、1回目の間伐の林齢16年から林齢20年の各年輪幅には試験区間に有意な差が認められなかった。年輪幅で試験区間に有意な差(ANOVA, $p < 0.01$)が認められた年輪は、4 m部位で林齢21年以降に形成された各年輪、8 m部位では林齢20年生以降に形成された各年輪であった。さらに、多重比較検定(Tukey-Kramer法)も実施し、どの試験区間に差があるのかを検討した。分散分析と同様に多重比較検定でも4 m部位で林齢21年以降、8 m部位では林齢20年生以降の各年輪で、多くの試験区間で有意な差が認められた。しかし、T0とT20, T30とT40など間伐率の近い試験区間では、有意な差のある年輪は少なかった。

本研究では間伐後に生じた年輪幅の違いが他の年輪構造や材質に影響するものと考え、分散分析で年輪幅が試験区間で有意に異なる林齢を基準とし、間伐後とした。前述したように4 m部位と8 m部位ではその時期が1年異なっていたが、ここでは一括して林齢20年までを間伐前、21年以降を間伐後と区

分し、この区分をもとに、他の年輪形質について検討を行った。

3.2 間伐による年輪構造の変動

間伐前(林齢20年以前)と間伐後(21年以降)の年輪について、各形質の試験区ごとの総平均と変動係数などをTable 3に示した。また、4 m部位と8 m部位における年輪幅を除いた各形質の林齢に伴う変動をFig. 5に示した。間伐前では、いずれの形質でも分散分析と多重比較検定で試験区間に有意な差が認められなかった。間伐後は、年輪幅、早材幅、晩材幅、晩材密度の4形質でいずれも有意な差(ANOVA $p < 0.01$)が認められ、早材密度と年輪密度の2形質には差は認められなかった。

間伐後の平均年輪幅は4 m部位で1.19 mm (T0)~2.50 mm (T50), 8 m部位では1.50 mm (T0)~2.89 mm (T50)で、いずれの部位でも間伐率の高い試験区ほど大きかった。多重比較検定ではT0とT20, T30とT40の両部位とT40とT50の8 m部位の年輪幅に有意な差はなかった。

年輪密度は林齢によってバラツキが大きいが、加齢に伴い大きくなる傾向を示した。間伐前と間伐後で試験区による差はなかった。

間伐後の平均早材幅は4 m部位で0.72 mm (T0)~1.64 mm (T50), 8 m部位では1.03 mm (T0)~2.05 mm (T50)で、いずれの部位でも間伐率の高い試験区ほど大きかった。多重比較検定ではT0とT20, T30とT40の両部位とT20とT30, T40とT50の8 m部位の早材幅に有意な差はなかった。早材幅の変動は年輪幅に類似していた。早材密度については間伐前も間伐後も試験区間で有意な差は認められなかった。早材密度は若齢時、すなわち、成長初期の4~5年輪の密度が大きく、その後はほぼ一定の値で推移し変動は小さかった(Fig. 5)。

間伐後の平均晩材幅は4 m部位で0.46 mm (T0)

Table 3. Results of mean values of annual ring components in the thinning experimental plot.

Annual ring components		T0		T20		T30		T40		T50		<i>p</i> -value	
		BT	AT	BT	AT	BT	AT	BT	AT	BT	AT	BT	AT
RW (mm)	4 m	4.51(11.7)	1.19(35.4)	4.30(10.7)	1.51(22.7)	4.32(13.0)	1.92(20.7)	4.26(9.3)	2.14(21.5)	4.38(11.3)	2.50(13.3)	0.56	<i>p</i> <0.01
	8 m	4.65(12.9)	1.50(29.7)	4.55(10.8)	1.76(25.0)	4.75(15.3)	2.33(17.1)	4.59(11.9)	2.57(17.0)	4.69(16.7)	2.89(13.5)	0.89	<i>p</i> <0.01
EW (mm)	4 m	3.70(12.7)	0.72(35.8)	3.51(12.4)	0.91(24.3)	3.53(14.4)	1.22(25.8)	3.44(9.0)	1.33(23.6)	3.55(12.6)	1.64(16.0)	0.50	<i>p</i> <0.01
	8 m	3.98(14.2)	1.03(31.0)	3.85(11.2)	1.18(25.4)	4.05(15.6)	1.62(19.4)	3.87(11.9)	1.78(18.0)	3.93(17.9)	2.05(16.2)	0.81	<i>p</i> <0.01
LW (mm)	4 m	0.81(15.6)	0.46(37.7)	0.79(17.2)	0.60(24.8)	0.79(15.4)	0.69(20.8)	0.81(16.0)	0.80(22.6)	0.83(18.4)	0.86(18.0)	0.85	<i>p</i> <0.01
	8 m	0.71(17.2)	0.50(30.3)	0.68(17.1)	0.63(26.9)	0.69(11.4)	0.65(24.6)	0.72(20.6)	0.79(20.7)	0.76(24.0)	0.84(15.8)	0.44	<i>p</i> <0.01
RD (g/cm ³)	4 m	0.412(9.1)	0.488(9.6)	0.411(9.4)	0.500(7.8)	0.415(6.8)	0.491(10.4)	0.422(5.6)	0.505(6.4)	0.424(6.3)	0.491(7.6)	0.63	0.68
	8 m	0.395(8.9)	0.457(6.1)	0.406(9.9)	0.483(7.8)	0.398(10.2)	0.468(10.9)	0.402(8.1)	0.471(6.6)	0.418(10.7)	0.477(9.1)	0.40	0.50
ED (g/cm ³)	4 m	0.307(9.4)	0.289(7.7)	0.311(8.1)	0.286(10.3)	0.309(6.5)	0.272(6.5)	0.309(6.1)	0.282(7.0)	0.315(3.8)	0.286(5.7)	0.81	0.14
	8 m	0.315(10.2)	0.288(8.1)	0.323(9.8)	0.289(5.8)	0.318(11.4)	0.274(9.3)	0.315(8.5)	0.282(7.0)	0.327(11.1)	0.291(9.4)	0.70	0.15
LD (g/cm ³)	4 m	0.747(4.8)	0.702(10.7)	0.738(2.4)	0.750(7.6)	0.756(4.2)	0.794(6.6)	0.762(2.9)	0.807(4.7)	0.754(4.7)	0.814(4.2)	0.11	<i>p</i> <0.01
	8 m	0.743(3.7)	0.717(7.9)	0.748(4.3)	0.780(8.2)	0.750(4.3)	0.811(5.4)	0.763(3.8)	0.820(6.1)	0.768(4.9)	0.846(4.3)	0.10	<i>p</i> <0.01

Legend: BT: Annual rings before 20-year-old tree, AT: Annual rings after 21-year-old tree, RW: Annual ring width, EW: Earlywood width, LW: Latewood width, RD: Ring density, ED: Earlywood density, LD: Latewood density, *p*-value: The results of probability by ANOVA showing experimental plot differences.

Note: Values in parentheses show coefficient of variation.

～0.86 mm (T50), 8 m 部位では0.50 mm (T0)～0.84 mm (T50), 平均晩材密度は 4 m 部位で0.702 g/cm³ (T0)～0.814 g/cm³ (T50), 8 m 部位では0.717 g/cm³ (T0)～0.846 g/cm³ (T50) で、いずれも間伐率の高い試験区ほど大きかった。晩材幅の多重比較検定では間伐率の差が比較的小さい T0 と T20, T20 と T30, T30 と T40, T40 と T50 の両部位で有意な差はなく、晩材密度は T20 と T30, T30, T40, T50 間の組合せでは両部位で、T0 と T20 は 4 m 部位, T20 と T40 の 8 m 部位で有意な差はなかったが、その他の組み合わせでは両部位ともに有意な差があった。晩材密度は加齢に伴い増加傾向を示し、0.65 g/cm³ から 0.8 g/cm³ 前後まで増加し、その後、年輪幅や晩材幅に連動するように推移していた (Fig. 5)。T0 は 4 m 部位で 32 年以降、8 m 部位で 34 年以降に 0.70 g/cm³ 未満と低い値で推移し、このポイントは年輪幅が 1 mm 未満となる林齢ともほぼ一致していた。

3.3 間伐と丸太の動的ヤング係数

各試験区における丸太の動的ヤング係数の平均と範囲等を Table 4 に示した。試験区ごとの平均値と変動係数 (以下, C.V. と略記する) で見ると、丸太の動的ヤング係数は T0 が最も小さく 1 番玉が 9.00 GPa (C.V. 12.1%), 2 番玉が 9.21 GPa (C.V. 7.9%) であった。標準間伐に近い T30 では 1 番玉が 9.74 GPa (C.V. 13.6%), 2 番玉が 9.73 GPa (C.V. 12.4%) であった。T40 の丸太の動的ヤング係数が最も大きく、1 番玉が 9.82 GPa (C.V. 12.4%), 2 番玉が 9.95 GPa (C.V. 11.0%) であった。試験区 T50 では

1 番玉が 9.72 GPa (C.V. 11.0%), 2 番玉が 9.76 GPa (C.V. 12.1%) で T30 とほぼ同じ値で、強度間伐でも丸太の動的ヤング係数の低下はなかった。また、間伐率の低い T20 は、1 番玉が 9.25 GPa (C.V. 11.5%), 2 番玉が 9.67 GPa (C.V. 8.6%) で、T30 に比べ、丸太の動的ヤング係数は小さかった。1 番玉も 2 番玉も分散分析では試験区間に統計的に有意な差はなかったが、1, 2 番玉を合わせた解析では試験区間に有意な差 (ANOVA *p*<0.05) が認められ、多重比較検定では T0 と T40 のみに有意な差 (ANOVA *p*<0.05) が認められた。

1 番玉の総平均は 9.46 GPa (CV 13.2%), 2 番玉が 9.67 GPa (C.V. 10.7%) で、わずかに 2 番玉の動的ヤング係数は大きい、その差はきわめて小さかった。各供試木の 1 番玉と 2 番玉の動的ヤング係数は $r=0.844^{**}$ と高い正の相関係数が得られ、この両部位で丸太の動的ヤング係数が大きく異なることはなく、スギ丸太の動的ヤング係数のように 1 番玉の値が上部の丸太に比べて低くなる結果¹²⁾とは異なっている。

図表には示していないが、各 1, 2 番玉の動的ヤング係数を 8 GPa 未満, 8～10 GPa, 10 GPa 以上に強度区分し、試験区ごとの出現割合を検討した。その結果、8 GPa 未満の出現割合では、T0 が 14.7%, T20～T40 はいずれも 10.0%, T50 は 5.0% で試験区による差は比較的小さかった。一方、10 GPa 以上の出現割合は T0, T20, T30, T40, T50 がそれぞれ 17.6, 30.0, 40.0, 52.5, 42.5% で、間伐率の高い試験区で出現割合が大きかった。

Fig. 5. Variation of EW, ED, LW, LD and RD for forest age at height 4 m and 8 m.
 Legend: ●: T0 ▲: T20 ○: T30 □: T40 △: T50, T0, T20, T30, T40, T50: Refer to Fig. 2.
 EW, ED, LW, LD, RD: Refer to Table 3.

Table 4. Number, E_d and diameter at top end of logs from each thinning experimental plot.

experimental plot	Log no.	Number of logs	E_d of logs (GPa)	Diameter at top end (cm)
T0	First	16	9.00 (7.51~11.21)	19.8 (14.3~26.9)
	Second	18	9.21 (7.97~10.55)	17.8 (13.2~25.2)
T20	First	20	9.25 (7.17~11.48)	21.2 (15.8~27.1)
	Second	20	9.67 (7.64~10.97)	18.9 (13.1~25.3)
T30	First	20	9.74 (7.07~12.66)	24.5 (19.7~30.4)
	Second	20	9.73 (7.55~12.97)	22.4 (17.9~29.0)
T40	First	20	9.82 (7.39~11.56)	25.8 (19.8~31.0)
	Second	20	9.95 (7.38~12.18)	23.7 (17.9~29.0)
T50	First	20	9.72 (8.13~11.57)	27.1 (22.2~30.3)
	Second	20	9.76 (7.47~11.56)	24.9 (20.2~28.5)

Legend: E_d : Dynamic Young's modulus, Experimental plot: Refer to Fig. 2.

Note: The length of a log is 4 m, Values in parentheses show the range.

4. 考 察

4.1 間伐による年輪構造への影響

本研究では間伐による年輪幅への影響を年輪幅が増加し、試験区間で大きく異なった林齢21年以降をとしたが、これは間伐実施から5年以降であった。八坂らは同一試験区の胸高直径から、成長は林齢20年生以降で有意に異なるとしており¹⁾、これとほぼ一致した結果であった。年輪幅は間伐後すぐに増加するのではなく、数年後に増加するといった王や著者らの報告^{6,7)}からも、間伐施業でカラマツが枝条を広げ成長量が増加するまでに数年間を要するようである。このことは部位が異なっても同様で、4 m 部位と 8 m 部位では、林齢に伴う変動パターンは類似していた。多重比較検定で間伐後の平均年輪幅に有意な差が認められなかった組合せは、いずれも間伐率の差が小さい試験区間であった。T30と T40 の場合、ともに 3 回の間伐を実施しているが、3 回目の間伐後の27年と29年にだけ年輪幅に有意な差が認められた。T0 と T20 では、T20 で 2 回目の間伐を実施していないので T0 との年輪幅の差は小さく 3 回目の間伐後の26年、27年、31年に年輪幅に差が認められ、この間伐により T0 との年輪幅の差が保たれたと考えられる。T40 と T50 の場合、T50 は 3 回目の間伐を実施していないので28年以降の年輪で T40 との年輪幅に有意な差は認められなかった。しかし、T50 は 2 回の間伐でも T40 より年輪幅は大きかった。

年輪幅以外の形質については21年まで試験区間で差はないが、間伐後の年輪幅の変動は早材幅、晩材幅、晩材密度の3形質に影響した。これら3形質の値は間伐率が高く、年輪幅の大きい試験区ほど、大きくなった。間伐後の早材密度は試験区間で差はな

かったが、晩材幅と晩材密度は間伐強度の大きい試験区ほど大きかった。したがって強度間伐で年輪密度も大きくなると考えられるが、年輪幅が広がれば早材幅も広くなり、早材密度は間伐で差が生じないので、結果として年輪密度に試験区間で差は生じなかった。年輪密度に寄与するもう一つの指標に晩材率がある。4 m 部位の間伐後の晩材率は T0, T20, T30, T40, T50 がそれぞれ39.1, 39.7, 36.5, 37.6, 34.7%で、間伐率の小さい試験区で高い結果であった。8 m 部位は 4 m 部位より年輪幅の差が大きいので、試験区間の晩材率の差は 4 m 部位より顕著に現れる。これらのことから、強度間伐区では、晩材率が低くても年輪幅の増加で晩材幅や晩材密度が大きくなり、年輪密度の低下には至らず、試験区間に差が生じなかったと考えられる。これらの結果は間伐後に晩材幅が増加することや晩材率への間伐の影響がないとした Koga et al. の報告⁴⁾とも一致している。カラマツの晩材幅や晩材密度は材密度や強度性能に大きく寄与する形質と考えられるので、間伐後の年輪幅と晩材幅や晩材密度との関連を 4 m 部位の間伐後の個体平均を用い検討した。年輪幅と晩材幅の関係を Fig. 6 に、年輪幅と晩材密度の関係を Fig. 7 に示した。年輪幅と晩材幅、年輪幅と晩材密度はともに高い正の相関関係を示した。これらの関係式から、年輪幅の増加で晩材幅も大きくなり、年輪幅が 2~3 mm の範囲であれば晩材密度は 0.8 g/cm³ 以上の比較的高い値が得られることが明らかになった。逆に無間伐の T0 のように年輪幅が 1 mm 程度では晩材密度は 0.7 g/cm³ と小さかった。これらのことは、間伐による年輪幅の増加がなければ、晩材部の密度低下につながることを示唆している。この結果は著者らが69年生のカラマツで調査した無間伐区での密度低下⁷⁾とも一致し、信州のカラマツ

Fig. 6. Relationship between RW and LW.
 Legend: RW, LW: Refer to Table 3. **: significant at 1% level.
 Note: After thinning treatment means annual rings after 21-year-old tree.

Fig. 7. Relationship between RW and LD.
 Legend: RW, LD: Refer to Table 3. **: significant at 1% level.
 Note: After thinning treatment means annual rings after 21-year-old tree.

で年輪幅が1 mm 未満になると強度低下を招くとした重松の報告¹³⁾とも一致している。

以上林齢を中心に考察したが、本研究での間伐の影響時期は4 m 部位では樹心から16年輪前後であり、カラマツの未成熟材と成熟材部の境界¹⁴⁾とはほぼ一致している。橋爪はカラマツの成熟材部の肥大成長は、強度的に優れた部位が蓄積されるので間伐

を推進し、肥大成長を促すことの重要性を示している¹⁵⁾。本試験で林齢16年に行った初回間伐は成熟材部の肥大成長の促進に寄与し、その後、同じ間伐率で1～2回間伐したことが、主伐までの年輪幅に差となって現れたと考えられる。

ところで、40%以上の間伐は従来の間伐に比べかなり強度な間伐である⁸⁾。しかし、間伐回数が少なかったこともあり、間伐後の4 m 部位の平均年輪幅はT40で2.1 mm、T50で2.5 mm、個体の最大でもT40の2.8 mmとT50で3.4 mmであった。ここで、北海道で通常行われているカラマツ林施業では、年輪幅がどの程度なのかを類推した。カラマツ人工林施業の手引¹⁰⁾では地位や植栽密度、仕立て別別に施業体系と収穫予測を提示している。成長の良いI等地疎仕立てでは25～30%程度の間伐を40年までに4回実施する。林齢15年と40年の平均胸高直径から年輪幅を推定すると、その間の平均年輪幅は3.0 mmであった。本研究の成果から類推すると、年輪の密度低下につながらない範囲であると思われる。この値よりもT40とT50の年輪幅は小さく、これらの強度間伐で年輪幅が大きくなり、材密度の低下につながることはないと考えられる。

4.2 間伐と丸太の動的ヤング係数

無間伐区の丸太の動的ヤング係数は間伐区より小さく、間伐区の中ではT20～T40は間伐率が高いほど丸太の動的ヤング係数が大きく、T50は標準間伐のT30とほぼ同等の値で、強度間伐でも丸太の動的ヤング係数の低下はなかった。間伐前は試験区間で年輪幅や密度にも差がなかったため、丸太の動的ヤング係数に差はなく、間伐後の加算分が丸太の動的ヤング係数の違いとなった推察される。

ここで、丸太の動的ヤング係数と丸太の気乾密度との関係についての検討を試みた。丸太の気乾密度については、1番玉は4 m 部位、2番玉は8 m 部位の年輪密度から検討した。年輪密度は加齢に伴い上昇し (Fig. 3)、間伐後の年輪幅は試験区間で大きく異なるので、以下のような手法で密度を算出した。すなわち、木口断面を円と仮定し、年輪を林齢20年までと林齢21年以降の2つに分け、年輪幅からそれぞれの面積を算出し、面積に密度を加重して丸太の平均密度 (以下平均密度) を求めた。1番玉の平均密度と動的ヤング係数の関係を Fig. 8 に示した。その結果、平均密度と動的ヤング係数には $r = 0.651^{**}$ の比較的高い正の相関関係が認められた。図には示していないが2番玉でも $r = 0.570^{**}$ の相関係数が得られた。間伐後 (林齢21年以降) の試験区ごとの面積割合はT0, T20, T30, T40, T50で

Fig. 8. Relationship between means of estimated density and E_d of first logs.

Legend: E_d : Refer to Table 4. **: significant at 1% level.

Note: Estimated density is rectified by the area which was divided to BT and AT, at height 4 m.

Legend: BT, AT: Refer to Table 3.

それぞれ52, 58, 65, 68, 72%であり, 平均密度は0.452, 0.460, 0.463, 0.476, 0.471 g/cm³であった。その結果, T0の間伐後の年輪密度は他の試験区と差はないが, 間伐後の面積割合が小さく, より面積の広い間伐前の密度が影響し丸太の平均密度が小さく, 丸太の動的ヤング係数も小さかったと考えられる。一方, 強度間伐のT50では年輪密度は他区とほぼ同じであるが, 間伐後の面積割合が大きく, 丸太の平均密度が低下することなく, 比較的高い値が得られた。スギの丸太の動的ヤング係数はマイクロフィブリル傾角と材密度によって説明がされるとの報告¹⁶⁾がある。本試験では重み付けをした平均密度のみで検討したが, それでも比較的高い正の相関関係が得られた。

丸太の動的ヤング係数と各年輪形質の関連を明らかにするため, 丸太の動的ヤング係数とそれに対応した部位の間伐前と間伐後の年輪形質との相関係数

をTable 5に示した。この表から, 丸太の動的ヤング係数と間伐後の年輪形質との相関は比較的高く, 間伐後の年輪幅, 年輪密度, 晩材幅, 晩材密度と4 m部位の早材幅などに正の相関関係が認められた。このことは, 間伐による肥大成長の促進は強度的に優れた部位を多く蓄積し, 間伐強度が高く, 年輪幅が大きくても丸太の動的ヤング係数の高い木材生産に寄与することを示唆している。長野県のカラマツ造林木においても, 50%間伐を実施した林分でも通常の間伐に比べ成長がよく, 強度の低下はなかったとされている⁶⁾。以上のことから, カラマツの間伐施業は, 強度の優れた木材生産に寄与するものと思われる。

ところで, 強度間伐に伴い強度低下をまねく可能性のある形質に萌芽枝の発生による節の存在があり, ここで若干触れておく必要がある。清和の報告⁹⁾では, この試験地の1回目の間伐から7年目の調査で, 間伐率30%以上の試験区で萌芽枝が確認されている。本研究では丸太での節の確認は行っていないが, 一連の試験で製材(ラミナ)の節に関する調査も行っている。その結果, 強度間伐で節の増加や節径が大きくなることはなかった。王らの報告⁶⁾にもあるように, カラマツは一般に下枝が枯れやすい樹種で下枝の増加は危惧するほどではないと思われた。

5. 結 論

間伐強度の異なるカラマツ林分の試料を用い年輪構造や丸太の動的ヤング係数との関係を調べ, 以下の結論を得た。

1. 間伐による年輪構造への影響は試験区ごとの年輪幅の変動をもとに, 試験区で年輪幅が大きく異なる林齢21年生以降とした。この区分は, 間伐試験区設定から5年経過した時期であった。それ以降41年生まで間伐率の高い試験区で年輪幅は大きい傾向で推移した。
2. 間伐による年輪幅の変動は早材幅, 晩材幅, 晩材密度などへ影響を及ぼし, 無間伐区で晩材幅や晩材密度が低下し, 強度間伐のT40やT50で年輪

Table 5. The correlation coefficient of E_d of logs with each annual ring component.

		RW	EW	LW	RD	ED	LD
E_d of first logs	BT (4 m)	0.062 ^{ns}	0.021 ^{ns}	0.154 ^{ns}	0.236*	0.155 ^{ns}	0.208*
	AT (4 m)	0.382**	0.261*	0.561**	0.530**	-0.061 ^{ns}	0.571**
E_d of second logs	BT (8 m)	0.162 ^{ns}	0.090 ^{ns}	0.255*	0.240*	0.169 ^{ns}	0.240*
	AT (8 m)	0.209*	0.092 ^{ns}	0.362**	0.555**	0.092 ^{ns}	0.389**

Legend: RW, EW, ED, LW, LD, RD: Shown in Table 3. BT, AT: Shown in Table 3. E_d : Shown in Table 4. **: significant at 1% levels, *: significant at 5% levels, ^{ns}: not significant.

幅が他の試験区より大きくても、晩材幅や晩材密度が大きく、年輪密度の低下にはつながらなかった。

3. 丸太の動的ヤング係数は無間伐区 T0 が間伐区より小さく、間伐区の中では T20～T40 では間伐率が高いほど丸太の動的ヤング係数が大きく、T50 の丸太の動的ヤング係数は標準間伐の T30 とほぼ同等であり、強度間伐でも丸太の動的ヤング係数の低下はなかった。
4. 丸太の動的ヤング係数と丸太の平均密度には比較的高い正の相関関係が認められ、平均密度には間伐後の年輪幅、年輪密度、晩材幅、晩材密度が寄与したと考えられる。

以上のことからカラマツの間伐は、その後に形成された材の密度を低下させることはなく、丸太の動的ヤング係数の増加に寄与するものと考えられた。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、平取町産業課林務係の皆様には試験林の維持管理、データ採取などの協力にいただいた。また、北海道立総合研究機構森林研究本部企画グループの山田健四氏、大箭敏雄氏、藤本恵二氏、林業試験場道東支場の中川昌彦氏、オホーツク総合振興局網走東部森林室の根井三貴氏には試験に際してデータ採取、選木、伐採などにご助力にいただいた。ここに記して感謝の意を表します。本研究の一部は農林水産省新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業「道内カラマツ資源の循環利用促進のための林業システムの開発（課題番号：1935）」の一部として実施したものである。

文 献

- 1) 八坂通泰, 山田健四, 大野泰之, 中川昌彦: 日林北支論 57, 89-91 (2009).
- 2) 後藤崇志, 中山茂雄, 岩淵 隆, 原 勇治, 吉野毅: 木材工業 63(7), 307-312 (2008).
- 3) 後藤崇志, 中山茂雄, 岩淵 隆, 吉野 毅: 木材学会誌 55, 146-154 (2009).
- 4) Koga, S., Oda, K., Tsutsumi, J., Fujimoto, T.: *Mokuzai Gakkaishi* 42, 605-611 (1996).
- 5) Koga, S., Oda, K., Tsutsumi, J., Fujimoto, T.: *IAWA Journal* 18(3): 277-286 (1997).
- 6) 王 賀新, 佐々木賢治, 魚住侑司, 植木達人, 加藤正人, 関 慶偉: 信州大学農学部 AFC 報告 1, 63-71 (2003).
- 7) 安久津久, 松本和茂, 藤本高明, 滝谷美香, 八坂通泰: 日林北支論 58, 51-54 (2010).
- 8) 清和研二, 浅井達弘, 水井憲雄, 菊沢喜八郎: 日林北支論 34, 122-124 (1986).
- 9) 清和研二: 日林東北支論 46, 87-88 (1994).
- 10) 北海道立林業試験場: カラマツ人工林施業の手引き (2008).
- 11) 野掘嘉裕: 日本林学学会誌 76(1), 89-94 (1994).
- 12) 山下香菜, 平川泰彦, 藤澤義武, 中田了五: 木材学会誌 46, 510-522 (2000).
- 13) 重松頼生: 文部省科学研究費補助金研究成果報告書一般研究 (C) (1984-1986).
- 14) 塩倉高義: 木材学会誌 28, 85-90 (1982).
- 15) 橋爪丈夫: 組織と材質研究会春季シンポジウム, 松本, 2009.
- 16) 平川泰彦, 山下香菜, 中田了五, 藤澤義武: 木材学会誌 43, 717-724 (1997).