

106年生カラマツ造林木における仮道管 S₂ 層 ミクロフィブリル傾角の年輪内及び樹幹内半径方向変動*¹

滝本裕美*^{2,3}, 安江 恒*², 徳本守彦*², 武田孝志*², 中野達夫*²

Within Annual Ring and Pith-to-bark Variations of the Microfibril Angle in the S₂ Layer of Tracheid Walls in 106-year-old Plantation Trees of Japanese Larch*¹

Hiromi TAKIMOTO*^{2,3}, Koh YASUE*², Morihiko TOKUMOTO*²,
Takashi TAKEDA*² and Tatsuo NAKANO*²

Observations were made of within annual ring and pith-to-bark variations of the microfibril angle of the S₂ layer (MF angle) of tracheid walls in 106-year-old plantation trees of Japanese larch (*Larix kaempferi* Carr.). The MF angle was measured by the iodine method. The MF angle within the annual ring decreased from the beginning to the end region of earlywood, whereas in latewood there was less variation than in earlywood, regardless of cambial age. The decrease in MF angle in earlywood is gradual in rings of younger cambial age, whereas it is abrupt in rings of older cambial age, regardless of the rate of radial growth. The pith-to-bark variations of MF angle were found to be constant in earlywood. On the other hand, the MF angle of latewood decreased abruptly in the younger stage followed by a stable smaller angle in the older stage after the 15th to 30th rings. There was no significant correlation between ring width and MF angle of latewood in mature wood (after the 30th ring).

Keywords : Japanese larch, microfibril angles, within ring variation, pith-to-bark variation.

106年生の高樹齢カラマツ (*Larix kaempferi* Carr.) 造林木5個体を対象として、仮道管二次壁中層 (S₂ 層) のセルロースミクロフィブリル傾角 (以下 MF 傾角) をヨウ素法により測定した。MF 傾角の年輪内変動は形成層齢によらず、早材では外側に向かうにつれて減少し、晩材では早材よりも変動が小さかった。早材のはじめから早晩材境界にかけての MF 傾角の減少傾向は肥大成長速度の大小に関わらず、形成層齢の増加に伴い緩やかな減少から急激な減少へと変化した。MF 傾角の樹幹内半径方向変動は、晩材では形成層齢の増加に伴い急激に減少した後、緩やかな減少に変化し、30年輪以降その変動は小さくなった。早材では形成層齢の増加に伴う減少は認められなかった。30年輪以降において年輪幅と晩材 MF 傾角には有意な相関は認められないことから、成熟材部の晩材 MF 傾角は年輪幅の変動の影響を受けないといえる。

*¹ Received June 20, 2012; accepted November 28, 2012. 本研究の一部は第50回日本木材学会大会 (2000年4月, 京都), 2000年度日本木材学会中部支部大会 (2000年9月, 岐阜) および第51回日本木材学会大会 (2001年4月, 東京) において発表した。

*² 信州大学農学部 Faculty of Agriculture, Shinshu University, Nagano 399-4598, Japan

*³ Present address : 石川県農林総合研究センター 林業試験場 石川ウッドセンター Ishikawa Wood Center, Forestry Experiment Station, Ishikawa Agriculture and Forestry Research Center, Ishikawa 920-2306, Japan

Corresponding author : H. Takimoto (takimoto@pref.ishikawa.lg.jp)

1. 緒 言

カラマツ (*Larix kaempferi* Carr.) は長野県をはじめとする寒冷地域の主要造林樹種であり、若齢木の成長や材質については早くから研究が進められてきた。若齢木では未成熟材の占有率が高く、ねじれ、狂いが利用上の問題として取りあげられている^{1,2)}。そのため若齢木は構造用材としては敬遠され、坑木などの土木用材として利用されてきた。一方、近年は、構造材としての利用を目指した高樹齢大径木の生産に林業経営方針の比重を移しつつある。構造材として利用するためには、高樹齢大径木の材質を明らかにすることが必要である。カラマツ高樹齢木は若齢木に比べて成熟材の占有率が高い。成熟材部は未成熟材部に比べ仮道管長は増加し、らせん木理が減少するとともに曲げ・圧縮強度も大きくなるため、高樹齢大径木では良質な製材品の出現率が高くなる^{3,4)}。また、年輪構造解析より、カラマツ高樹齢木の成熟材部では肥大成長を促進させても晩材率が低下しないことが明らかにされている^{5,6)}。

針葉樹材の主体を成す仮道管の細胞壁 S_2 層ミクロフィブリル傾角 (以後 MF 傾角と略す) もまた木材のヤング係数や収縮率などの物理的・強度的性質に大きく影響し^{7,8)} 材質指標として重要である。しかしながら、カラマツにおける MF 傾角の樹幹内分布に関する報告例は少なく^{9,10)}、しかもそれらは比較的若齢な供試木の限られた個体数、年輪数での知見に限定されている。また、MF 傾角の測定箇所を設定する上で重要な MF 傾角の年輪内変動も、非常に限られた知見しか得られていない^{11,12)}。した

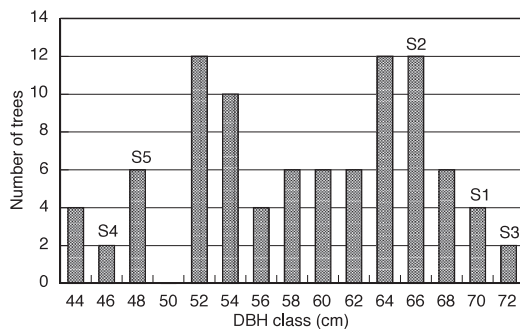


Fig. 1. Distribution of DBH classes for 106-year-old Japanese larch plantations in the study site. The sample trees were chosen from fast grown (Tree No.: S1, S2, S3) and slow grown (S4, S5) categories.

がって、カラマツ高樹齢木における MF 傾角の年輪内および樹幹内変動を明らかにすることは、高樹齢大径木を生産、利用する上で非常に重要である。

そこで、本研究では浅間山国有林産の106年生カラマツ造林木を供試木として、これまで対象とされてきたよりも高樹齢の段階も含めて MF 傾角の年輪内および樹幹内半径方向変動を明らかにすることを目的とした。また、実用的な背景から肥大成長速度が MF 傾角に与える影響についても検討をおこなった。

2. 方 法

2.1 供試木

供試木として長野県浅間山国有林25林班 (36°20'47"N, 138°28'36"E, 標高980 m) から伐採した106年生カラマツ造林木を用いた。この林分のカラマツは1892年に植栽され、寺崎式B種間伐¹³⁾が1903, 1912, 1918, 1924, 1928, 1948年の計6回実施されている。この林分におけるカラマツのうち肥大成長速度が大きい直径階から3本 (供試木 No. S1, S2, S3), 肥大成長速度が小さい直径階から2本 (S4, S5) の計5本を供試木とした (Fig. 1)。MF 傾角の年輪内変動の計測には、このうち肥大成長速度の大きい供試木 (S1) と小さい供試木 (S4) それぞれ1個体ずつ選択して用いた。樹幹内半径方向変動の

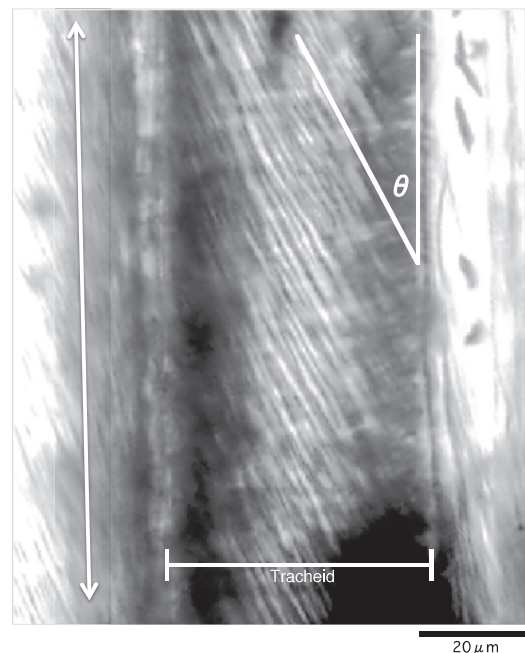


Fig. 2. Measurement of MF angle (θ) on a tangential section. Arrow indicates longitudinal direction.

計測にはすべての供試木を用いた。なお、供試木 S1, S2, S3, S4, S5 を含む 6 本の106年生カラマツ造林木の年輪構造、強度特性、用材品質等については既に Zhu ら^{5, 6, 14, 15)} によって報告されている。

2.2 測定方法

各供試木の地上高1.2 mの部位から髓を含む厚さ約10 cmの板材を採材し、さらに樹心から樹皮にかけて半径方向に長い10 mm×10 mm (T×L) の試験片とした。各試料とも極端に狭い年輪を避けるためにできるだけ広く、かつあて材を含まない方向から試験片を採取した。

作成した試験片を樹心から 3, 9, 15, 30, 45, 60, 75, 90年輪、および樹皮を含む10 mm×10 mm×約20 mm (T×L×R) の木材ブロックに分割し、数時間煮沸により軟化した後、スライディングマイクロトームを用いて厚さ10~30 μmの板目切片を切削した。MF 傾角の年輪内変動の測定では、3, 9, 15, 30, 45, 60, 75, 90年輪を対象とした。それ以降の幅が狭い年輪については早材から晩材への移行を区分した切片作成が困難であったので対象から除外した。MF 傾角の測定箇所は、早材において約300 μm 間隔、晩材において約100~300 μm 間隔とし、それぞれ1~2枚の切片を作成した。なお、カラマツの早材から晩材への移行は明白であり、板目切片においても色調および切削面の状態から目視で

充分確認できるので、早材と晩材の区分は目視により判断した。年輪境界において早材と晩材の両方が含まれた切片は測定対象としなかった。MF 傾角の樹幹内半径方向変動の測定では、3, 9, 15, 30, 45, 60, 75, 90年輪に加え、それ以降は早材と晩材の切片をそれぞれ作成可能な年輪を対象とした。MF 傾角の測定箇所は、早材のはじめおよび晩材の終わりとし、それぞれ切片を作成した。

切片をシュルツ氏液(35%硝酸100 mlに塩素酸カリウム6 gを溶解)に約1時間浸漬して脱リグニン処理を行った。続いて水洗、エタノールシリーズ(50%, 70%, 99.5%)にて脱水、3%ヨード・ヨードカリ溶液に数秒浸漬した後、切片に濃硝酸(60%)を1~2滴落としてヨウ素結晶を析出させ、カバーガラスをかけて観察用プレパラートとした¹⁶⁾。このプレパラートを光学顕微鏡(対物×40)を通してデジタルカメラ(OLYMPUS DP10)で撮影し、画像上(Adobe Illustrator)にて測定した(Fig. 2)。MF 傾角は一測定箇所につき仮道管約100本について測定し、その平均値を測定箇所における MF 傾角とした。

3. 結果と考察

3.1 MF 傾角の年輪内変動

肥大成長速度の大きい供試木(S1)と肥大成長

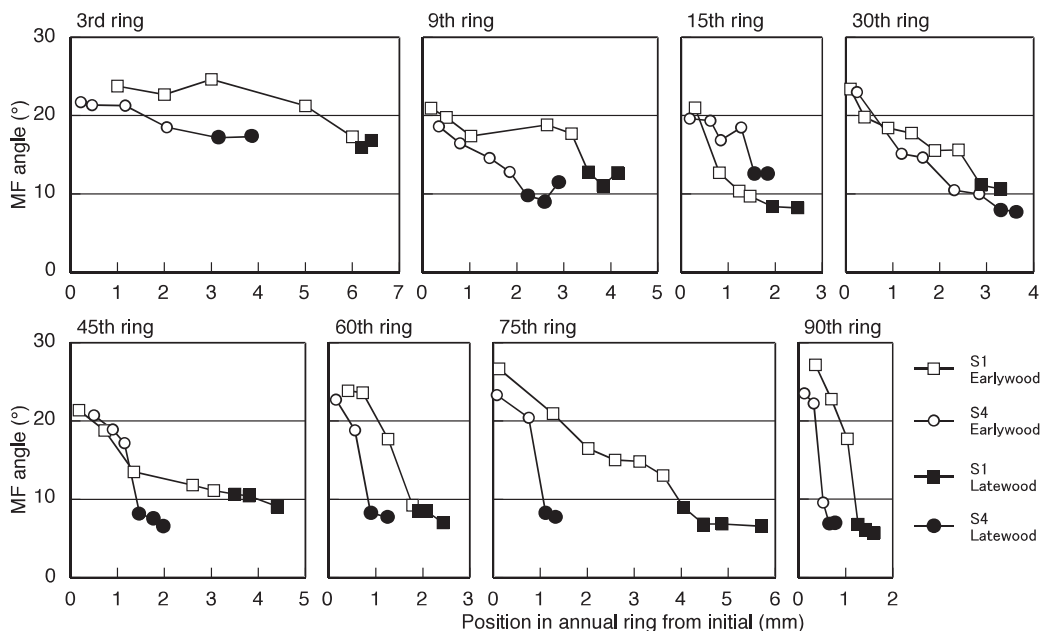


Fig. 3. Within annual ring variations of MF angle for different ring numbers from pith. Trees No. S1 and S4 are fast and slow grown trees, respectively.

速度の小さい供試木 (S4) の MF 傾角の年輪内変動を Fig. 3 に示す。ヨウ素の析出が不鮮明で測定できた仮道管本数が極端に少ない切片については欠測とした。MF 傾角の年輪内変動は、全ての年輪において、早材では外側に向かうにつれて減少した。晩材ではほとんど減少しないか、もしくは若干増減したが、早材よりもその変動幅は極めて小さくなった。

早材における MF 傾角の減少傾向は髄からの年輪数によって異なり、S1 の 3, 9 年輪及び S4 の 3 年輪では早材のはじめでは減少せずに推移し、早材の途中から早晩材境界にかけて減少した。晩材ではほとんど減少しないか若干増加した。S1 の 15 年輪、S4 の 9~15 年輪では、MF 傾角は早材のはじめから緩やかに減少し、早晩材境界に近づくとき大きく減少した。晩材ではわずかに減少した。30 年輪以降では、MF 傾角は早材のはじめから連続的に減少し、その傾向は明らかに 30 年輪以前よりも急激であった。晩材ではわずかに減少した。

MF 傾角の年輪内変動を相対位置 (%) で表示したものを Fig. 4 に示す。年輪の初めや終わりは欠測のため空白となっている年輪もある。肥大成長速度の異なる S1, S4 ともに、3 年輪では早材の途中から減少するが、形成層齢の増加に伴い早材のはじめからその減少傾向がより急激になっていくパターンは相対位置で表示しても明確であった。したがって、MF 傾角の年輪内変動は肥大成長速度の大小に関わらず、形成層齢の増加に伴い、早材の途中から減少するパターンから、早材のはじめから急激に減少す

るパターンへと移行するといえる (Fig. 5)。年輪内での MF 傾角は一定でないことから、早材や晩材を代表する MF 傾角の測定にあたり、年輪内での採取位置が非常に重要である。以後の解析では、早材のはじめを早材 MF 傾角の測定箇所、および晩材の終わりを晩材 MF 傾角の測定箇所とする。

これまで、カラマツの MF 傾角の年輪内変動に関する研究は、45 年生カラマツの 38, 39, 40 年輪について、MF 傾角は早材で急激に減少し、晩材では比較的安定した値を示していると報告されている¹¹⁾。また、54 年生カラマツについて、7 年輪では MF 傾角は早材内の途中から減少し、晩材ではその減少は小さくなるが、30 年輪では、MF 傾角は早材のはじめから連続的に減少し、晩材では安定すると報告されている¹²⁾。本研究でも同様な年輪内変動パターンがより多くの個体に基づいて確認された。特に早材内で MF 傾角が大きく変動することから、早材を代表する MF 傾角を測定する際には、年輪内の切片の採取箇所を明確にする必要があると言える。

3.2 MF 傾角の樹幹内半径方向変動

全供試木の MF 傾角の樹幹内半径方向変動を形成層齢を横軸として Fig. 6 に示す。ヨウ素の析出が不鮮明で仮道管の測定本数が極端に少ない結果となった年輪については除外した。晩材 MF 傾角の樹幹内半径方向変動は、全供試木において形成層齢の増加に伴い急激に減少した後、緩やかな減少に変化し 30 年輪以降安定した。全供試木の 30 年輪以降の晩

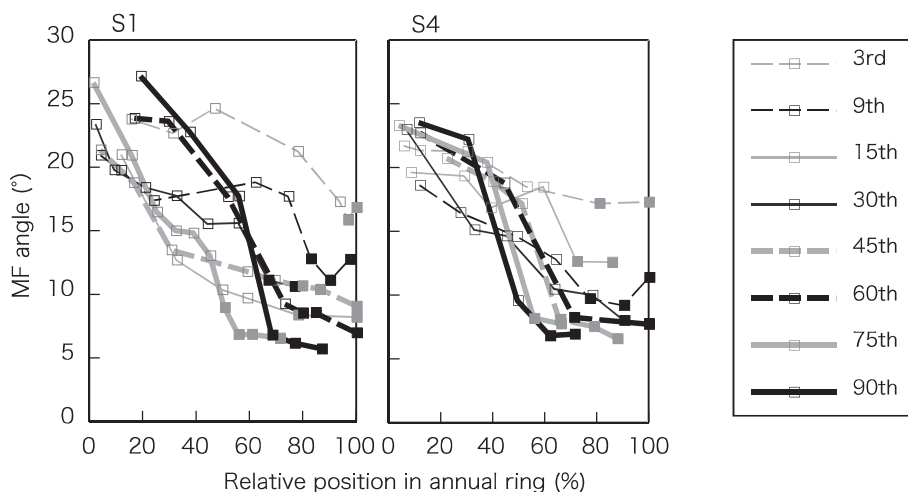


Fig. 4. Within annual ring variations of MF angle displayed by relative position in annual rings for different ring numbers from pith. Shaded marks indicate latewood. Trees No. S1 and S4 are fast and slow grown trees, respectively.

材 MF 傾角は、約 5° ~ 10° の範囲であった。肥大成長速度の大きい S1, S2, S3 が肥大成長速度の小さい S4, S5 に比べ、全ての形成層齢で大きい値を示すという傾向は認められなかった。また、早材 MF

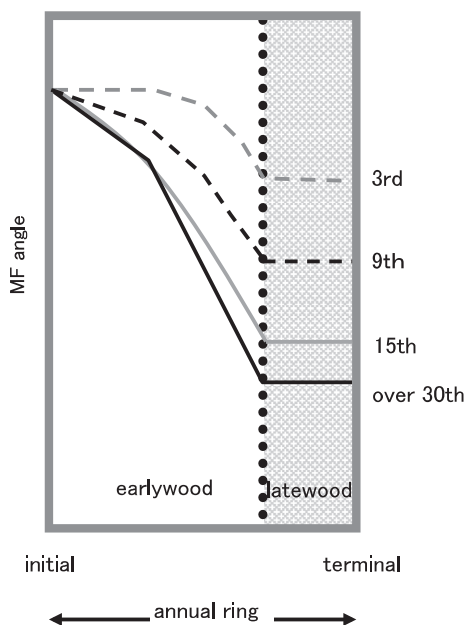


Fig. 5. Schematic changes of MF angle variation within annual rings for different ring numbers from pith.

傾角に形成層齢の増加に伴う減少は認められず、約 18° ~ 32° の広範囲で変動した。このうち肥大成長速度の大きい S2 の早材 MF 傾角は肥大成長速度の小さい S4, S5 に比べ大きい値で推移した。しかし、同じく肥大成長速度の大きい S1, S3 の MF 傾角は、形成層齢によっては S4, S5 に近い値で推移した。

MF 傾角の樹幹内半径方向変動を樹心からの距離で表すと (Fig. 7), 肥大成長速度が大きい供試木 (S1, S2, S3) と肥大成長速度が小さい供試木 (S4, S5) の肥大成長の差は明白であるが、全供試木の晩材 MF 傾角は30年輪 (図中の矢印) 以降安定していた。そこで、本研究では30年輪を境に未成熟材と成熟材に区分して考察する。

年輪幅と MF 傾角の樹幹内半径方向変動を Fig. 8 に示す。年輪幅の樹幹内半径方向変動は、肥大成長速度の大きい S1, S2, S3 では樹心から樹皮にかけて増減を繰り返すが、肥大成長速度の小さい S4, S5 では形成層齢の増加とともに減少し安定していた。一方、全供試木において MF 傾角に年輪幅の変動に対応する増減は認められなかった。

全供試木における晩材 MF 傾角と年輪幅の相関関係を Fig. 9 に示す。未成熟材部 (30年輪未満) においては危険率 1% で有意な正の相関 ($r=0.71$) が認められたが、成熟材部 (30年輪以降) においては有意な相関は認められなかった。未成熟材部における晩材 MF 傾角と年輪幅との有意な相関関係は、双方の樹幹内半径方向変動が15年輪まで減少傾向に

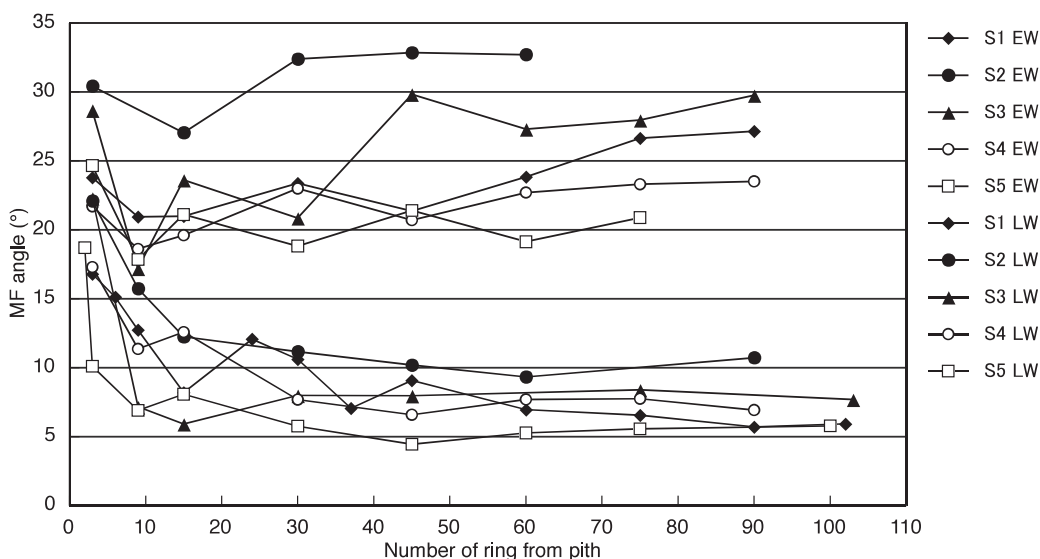


Fig. 6. Pith-to-bark variations of MF angle indicated by ring number from pith. EW, Earlywood; LW, Latewood.

あることに起因すると考えられるが、成熟材部において晩材 MF 傾角は年輪幅の変動の影響を受けないといえる。

カラマツ MF 傾角の樹幹内半径方向分布に関する既往の研究では、50年生カラマツについて、早晚材別、樹高別の MF 傾角の樹幹内半径方向変動は、早晚材ともに形成層齢の増加に伴い約15年輪まで減少し、それ以降は安定することが報告されている⁹⁾。

この報告では、晩材 MF 傾角が形成層齢の増加に伴って減少する点で本研究結果と同様であるが、早材 MF 傾角も同時に減少している点では異なっている。しかし、切片の採取部位が「早晚材部」とのみ記載されており早材内の具体的な位置は不明である。また、別の報告では、5～50年輪の早晚材別 MF 傾角の樹幹内半径方向変動は、早晚材ともに形成層齢の増加に伴い大きく減少し、15～30年輪以降

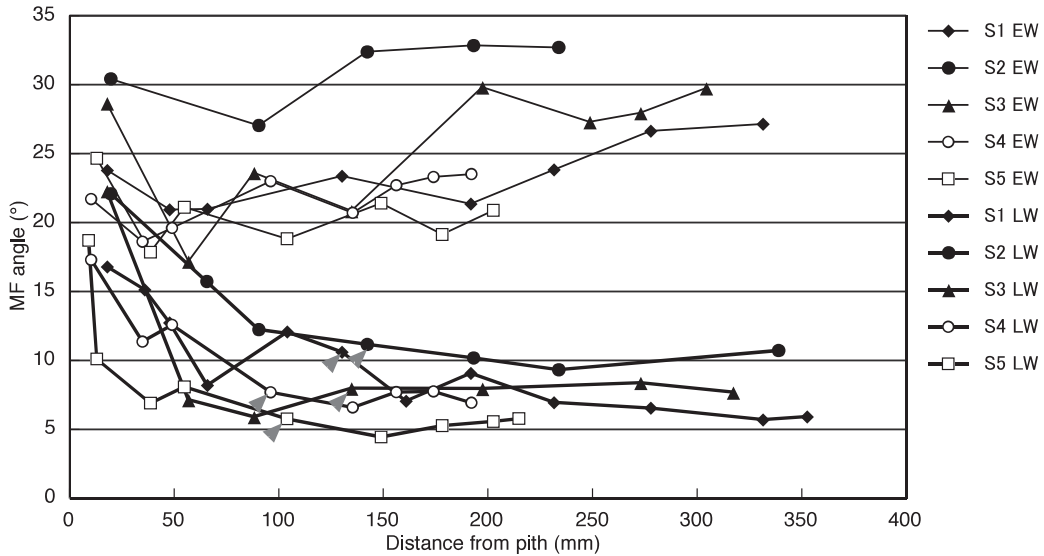


Fig. 7. Pith-to-bark variations of MF angle indicated by distance from pith. Arrows indicate the boundary between juvenile and mature wood (30th rings). EW, Earlywood ; LW, Latewood.

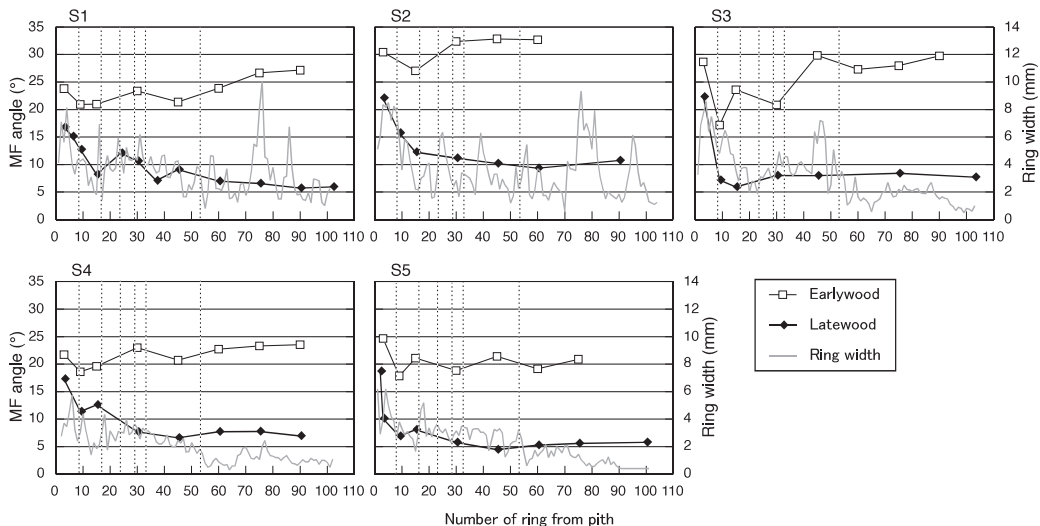


Fig. 8. Pith-to-bark variations in MF angle and ring width with ring numbers from the pith. Broken lines indicate the timing of thinnings (8th, 17th, 23rd, 29th, 33rd and 54th rings).

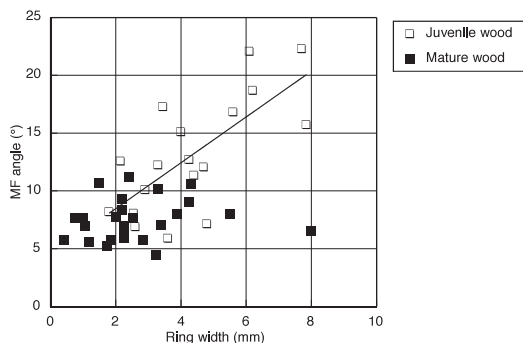


Fig. 9. Relationships between ring width and MF angle in latewood tracheids of juvenile wood (< 30th ring) and mature wood (30th ring \leq). Line indicates regression line for juvenile wood ($r=0.71, p<0.01$).

その減少は小さくなるとされている¹⁰⁾。ただしこの報告では MF 傾角の測定箇所について、各対象年輪における早材部と晩材部とも複数箇所を測定して早材と晩材ごとに平均値を求めた、とある。前述したように、MF 傾角は早材の初めから早晩材境界にかけて減少しているため、早材のはじめ以外の箇所を測定していれば、樹心から30年輪あたりまで早材部の MF 傾角が減少する傾向にあるとの報告とは整合性がある。測定箇所により得られる MF 傾角も異なるので、MF 傾角の測定にあたっては、年輪内のどこを測定したか明らかにする必要があり、また測定箇所が統一されるべきである。

本研究の結果、成熟材部における晩材 MF 傾角は年輪幅の変動の影響を受けないことが示唆された。カラマツ高樹齢木の成熟材部では年輪幅が増加しても晩材率が低下しないこと^{5,6)}を併せ、30年輪以降において年輪幅を増加させると、樹幹内の晩材率が低下することなく晩材 MF 傾角が小さい成熟材部の占有率が上がることになり、物理的・強度的性質のより優れた製材品の出現率の上昇を期待できる。

4. 結 論

本研究では高樹齢カラマツ材の MF 傾角の年輪内、及び樹幹内半径方向変動について検討し、以下の結論を得た。

1. MF 傾角の年輪内変動は、形成層齢によらず、早材では外側に向かうにつれて減少し、晩材では早材よりもその変動幅は極めて小さくなった。また早材のはじめから早晩材境界にかけての MF

傾角の減少傾向は、肥大成長速度の大小に関わらず、形成層齢の増加に伴い緩やかに減少するパターンから急激に減少するパターンへと移行した。

2. 晩材 MF 傾角の半径方向変動は、全供試木において形成層齢の増加に伴い急激に減少した後、緩やかな減少に変化し、30年輪以降その変動は極めて小さくなった。早材 MF 傾角の半径方向変動に形成層齢の増加に伴う減少は認められなかった。
3. 30年輪以降において年輪幅と晩材 MF 傾角には有意な相関は認められないことから、成熟材部の晩材 MF 傾角は年輪幅の変動の影響を受けないといえる。

文 献

- 1) 加納 孟：林業技術 No. 250, 21-24 (1963).
- 2) 加納 孟, 中川伸策, 斎藤久夫, 小田正一：林業試験場研究報告 No. 162, 1-42 (1964).
- 3) 重松頼生：木材工業 45(10), 445-451 (1990).
- 4) 重松頼生：木材工業 46(1), 9-16 (1991).
- 5) Zhu, J., Nakano, T., Hirakawa, Y.: *J. Wood Sci.* 44(5), 392-396 (1998).
- 6) Zhu, J., Nakano, T., Hirakawa, Y.: *J. Wood Sci.* 46(6), 417-422 (2000).
- 7) Cave, I. D., Hutt, L.: *Wood Sci. Tech.* 2, 268-278 (1968).
- 8) 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).
- 9) 塩倉高義, 渡辺治人：東京農大農学集報 13(2), 99-104 (1968).
- 10) 重松頼生, 秋津裕司, 稲垣利樹, 今西 洋：第36回日本林学会中部支部大会論文集, 名古屋, 1988, pp. 123-126.
- 11) 岡野 健, 佐藤達郎, 平井信二：木材学会誌 15(2), 62-66 (1969).
- 12) 塩倉高義, 渡辺治人：東京農大農学集報 17(1), 81-85 (1973).
- 13) 寺崎 渡：林業試験場研究報告 No. 148, 51-71 (1963).
- 14) Zhu, J., Nakano, T., Tokumoto, M., Takeda T.: *J. Wood Sci.* 46(4), 284-288 (2000).
- 15) 朱 建軍, 中野達夫, 徳本守彦, 武田孝志：木材工業 56(1), 13-16 (2001).
- 16) 小林彌一：日本林学会誌 34(12), 392-393 (1952).