



Title	スギの組織構造及び力学的特性の樹幹内変動
Author(s)	田戸岡, 尚樹; TADOOKA, Naoki; 小泉, 章夫 他
Citation	北海道大学 演習林研究報告, 62(1), 15-30
Issue Date	2005-09
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/21489
Type	departmental bulletin paper
File Information	62(1)_P15-30.pdf



スギの組織構造及び力学的特性の樹幹内変動

田戸岡尚樹^{1,2} 小泉 章夫¹ 朱 建軍³

The Variation in Anatomical Characteristics and Mechanical Properties Among
the Stem of Japanese Cedar (*Cryptomeria japonica*)

by

Naoki TADOOKA^{1,2}, Akio KOIZUMI¹ and Jianjun ZHU³

要 旨

スギ樹幹内の材質変動を把握するため、林齢78年の秋田スギ4本と林齢50年の道南スギ3本を供試木として、胸高位より上に2m毎に枝下高まで、半径方向に連続的に作成した試験体を各種強度試験に供し、あわせて晩材仮道管二次壁中層のマイクロフィブリル傾角、晩材仮道管長の測定および軟X線デンシトメトリ法による年輪解析を行なった。材質の変動を分析するに当たって、最初に未成熟材と成熟材を定義し区分することで、半径方向変動と鉛直方向変動をより詳細に把握できた。成熟材の定義にはMOE/SGの半径方向変動に指数式を当てはめ、その収束値の90%にあたる形成層年齢を境界としたところ秋田スギでは11~31年、道南スギでは9~19年という形成層年齢が得られた。そして鉛直方向では高位ほどより早い段階で成熟材を作る傾向があった。また、重回帰分析の結果によると力学的特性の変動には比重が強く影響しており、一年輪内における平均密度の変動には早材密度が強く影響していた。

キーワード： *Cryptomeria japonica*, 樹幹内変動, 未成熟材, 利用材質, 重回帰分析

2005年2月28日受理, Received February 28, 2005

1: 北海道大学農学研究科環境資源学専攻木材工学分野 (〒060-8589 札幌市北区北9条西9丁目)

Laboratory of Timber Engineering, Division of Environmental Resources, Graduate School of Agriculture, Hokkaido University, Sapporo 060-8589

2: 現所在: 北海道立林産試験場 (〒071-0198 旭川市西神楽1線10号)

Present address: Hokkaido Forest Products Research Institute, Asahikawa 071-0198, Japan

3: 上海市農業科学院林木果树研究所 (〒201106 上海市南華路35号)

Forestry and Pomology Research Institute, Shanghai Academy of Agricultural Sciences
35 Nanhua Road Shanghai 201106, China

1. はじめに

木材は人類が誕生した時からすでに身近に存在した最も古い材料である。そして大量の金属材料やプラスチック材料が出回っている現在でも、環境に対する負荷が小さいことや高い重量比強度などの多くの利点が活かされ、木材は生活の中のいたるところで使われている。森林は最近では地球温暖化を引き起こす主な原因の一つである二酸化炭素を吸収し固定するはたきや、水源涵養、土砂流出防止などの公益的機能といった役割の方が大きく叫ばれているが、それらの機能をしっかりと果たすためには、森林に対して適正に施業を行ない管理すること、そこから生産された木材をより効率的かつ長期的に利用することが求められる。

木材の効率的利用と今後の育種を考えていくには、実験データを蓄積することで樹種・品種ごとの材質や変動傾向の差異を把握しある程度分類がなされること、またその変動要因を明らかにすることが必要である。しかし実験量は膨大であり長い年月を要するものと思われる。そこで本研究では国内で建築用材として主要な樹種であるスギを供試材料とした。秋田スギと道南スギの2林分において、力学的特性と組織構造特性の樹幹内での変動と相互関係について、特に未成熟材と成熟材の差異に着目して考察した。

2. 材料および試験方法

供試木は秋田県田沢湖町からスギ(以下秋田スギ)4本、北海道ノ国町からスギ(以下道南スギ)3本を得た(Table 1)。いずれも胸高位より上に2m毎の切断位置から長さ約50cmの髓を含む柁目板を採材した。地上高13.2mまで最大7枚の板が得られ、気乾状態まで乾燥した後、元口側数cmを晩材仮道管長(TL)、晩材仮道管二次壁中層のマイクロフィブリル傾角(MFA)の測定、および軟X線デンシトメトリ法による年輪解析用に取り置いた残りを、樹皮側から断面寸法約2×2cmの標準試験体を連続的に作製した。秋田スギは計300体、道南スギは計228体の試験体を得ら

れた。また、道南スギについては生材含水率測定に供するため、最大15.3m位まで約5cm厚の円盤をあわせて採取した。

標準試験体は寸法・平均年輪幅(ARW)・形成層年齢(試験体断面中心部の値を採用。以下CA)を測定した後、振り試験・曲げ試験・縦圧縮試験・せん断試験(秋田スギのみ)に供した。振り試験は試験体の一端を固定し、他端に4.9N×135mmのモーメントをかけて150mmスパンでの振り率の測定値からせん断弾性係数(G)を求めた。それ以外の試験はJIS-Z-2101に準じて行ない、曲げヤング率(MOE)、曲げ強さ(MOR)、縦圧縮強さ(CS)、せん断強さ(SS)を求めた。含水率は試験後の縦圧縮試験体を用いて測定し、秋田スギでは13.1%、道南スギでは12.1%を得た。

生材含水率の測定は約5cmの試験体を辺材と心材に分かれるように連続的に作成すると同時に速やかに質量を測定し、全乾法で含水率を求めた。

TLの測定は、髓からの年輪数が3, 6, 9, 12, 15, 20, その後10年輪ごとに樹皮までの箇所まで晩材部を切り取り、シュルツェ氏液に2~3日浸漬して解繊し、万能投影機を用いて一年輪あたり40本の仮道管の長さを測定した平均値を当該年輪のTLとした。MFAの測定は、TLの測定と同一の箇所各年輪の晩材仮道管の接線壁相互壁孔を撮影し、スリット状の壁孔口の方角と仮道管長軸方向の角度により求め、30個の平均を当該年輪のMFAとした。

年輪解析は繊維方向に5mm厚の髓から樹皮までの木部を含んだ試験体を切り出し、室温20℃、相対湿度65%の恒温恒湿室で調整後、照射距離2.2m, 17kV, 14mAの条件で5分40秒間軟X線を照射し、密度が既知の標準吸収体とともにフィルム(FUJIFILM IX ENVELOPAK)に焼き付けた。そしてデンシトメータ(Joice & Loeble III CS)で濃度を読み取り、標準吸収体の濃度から密度値に換算した。そして早晚材境界の密度値をMorkの定義により算出された550kg/m³

Table 1. An outline of sample trees

Stand	n	Possession	Exposure of slope	Elevation (m)	Stand age	Stand density (per ha)	DBH		Height		Branch height	
							Mean (cm)	CV (%)	Mean (cm)	CV (%)	Mean (cm)	CV (%)
Tazawako, Akita	4	National	West	350	78	475	39.1	5.0	27.2	15.0	12.6	3.6
Kaminokuni, Hokkaido	3	Personal	Flat	40	50	600	40.3	4.0	25.8	3.0	16.5	8.0

Legend. n: Number of sample trees, DBH: Diameter at breast height, CV: Coefficient of Variation

Table 2. Results of the tests

Stand	ARW		SG		G		MOE		MOR		CS		SS	
	Mean (mm)	CV (%)	Mean	CV (%)	Mean (MPa)	CV (%)	Mean (GPa)	CV (%)	Mean (MPa)	CV (%)	Mean (MPa)	CV (%)	Mean (MPa)	CV (%)
Tazawako	3.17	48.3	0.379	9	792	17.4	8.40	21.4	67.6	14	39.1	12.3	6.77	16.2
Kaminokuni	5.30	55.8	0.369	7.9	752	18.0	7.02	25.3	64.1	18.1	33.7	15.8	-	-
Suzuki*	3.73	-	0.386	-	-	-	6.58	-	56.9	-	30.4	-	8.62	-

Legend. ARW: Average ring width, SG: Specific Gravity, G: Modulus of rigidity by torsional test, MOE: Modulus of elasticity in bending, MOR: Modulus of rupture, CS: Compression strength, SS: Shear strength

Note. Numbers of specimens are 288-300 for Tazawako, and 224-228 for Kaminokuni.

*: Shigehiko SUZUKI (1991)

として、各年輪について年輪幅 (RW)、年輪平均密度 (RD)、早材幅 (EW)、早材平均密度 (ED)、晩材幅 (LW)、晩材平均密度 (LD)、晩材率 (LWP) を求めた。

3. 結果と考察

3.1 各強度試験結果及び生材含水率の測定結果

各強度試験の結果を鈴木 (1991) がまとめたスギ標準試験体の全国平均値とあわせて Table 2 に示す。秋田スギは MOE, MOR, CS では全国平均値よりも 19% ~ 29% 大きい値が得られた。これは今回供試した秋田スギは樹齢が高いため成熟材領域の試験体が多かったことも影響していると考えられる。道南スギでも MOE, MOR, CS では全国平均値よりも 7% ~ 13% 大きい値が得られた。ここで ARW に着目すると、秋田スギは全国平均よりも 15% 小さいが、道南スギでは 57% も大きい値であった。今回得られた道南スギの供試木は多品種と比べて成長が良いわりに比重はそれほど低下せず、強度面においても他品種と比べて遜色なかった。

生材含水率の測定結果を辺材・髄を含まない心材・髄を含む心材の 3 つに分類して Table 3 に示す。スギに関する過去の生材含水率の報告 (三輪 1991, 中田ら 1998, 安久津 1999) より辺材含水率で低い値となった。また、髄を含む心材と含まない心材との間に有意差は認められなかった。しかし、Fig. 1 に示したように、高さ方向での変動を見ると心材の含水率は地際と胸高位で他の高さよりも明らかに高い傾向が見られ、3.3m 位以上では髄を含む心材と含まない心材の平均値間に 1% の危険率で有意差が認められた。変動傾向は、辺材は地上高が高くなるほど緩やかに含水率を減じ、それ以外では 3.3m までの間に急激に含水率が減少させた後にほぼ一定で推移する。また、半径方向で考えると生材含水率の分布は三輪 (1991) が

分類した 4 つのタイプでは、辺材部で高く、心材部で低い髄に近づくにつれて増加するタイプであると考えられる。

3.2 未成熟材領域の定義および方法の検討

未成熟材は、若齢で未成熟な形成層によって作られた木部で、力学的特性はバラツキが大きく材質的に劣るものであることが知られている (渡辺ら 1963, 1964, 太田 1972, 中谷 1991)。未成熟材は髄付近に分布し、形成層が年齢を重ねて安定した材を作るまで材質が変動していく。Fig. 2 に秋田スギについて各高さの MOE と G の半径方向変動を示す。髄に近い領域と樹皮に近い領域で明らかな差異があり、さらに高さによってもその変動傾向が異なっていることが分かる。すなわち未成熟材範囲は樹種や品種などによる違いだけでなく、一本の木の中でも高さによって異なっている。よって未成熟材領域の定義は高さ毎に行い、その樹幹内での変動傾向を明らかにする必要があると考えられる。

これまで未成熟材と成熟材の境界を定義する数々の試みが行われてきているが、境界を定義する意味について Bendtsen ら (1986) は、「境界を定義することによって、研究者、林業家、加工業者が利益を受ける。研究者は未成熟材と成熟材の性質の比較ができる。林業家は植栽、施肥、間伐、主伐期の設定を、樹幹内の未成熟材・成熟材割合に基づいて決めることが

Table 3. Moisture contents for green condition

Position	n	Moisture content (%)			CV (%)	
		Min.	Mean	Max.		
Sapwood	51	91.9	158.6	240.9	17.5	
Heartwood	Without pith	85	40.5	98.5	246.1	59.4
	With pith	24	44.9	106.4	201.6	43.5

Legend. n: Number of specimens

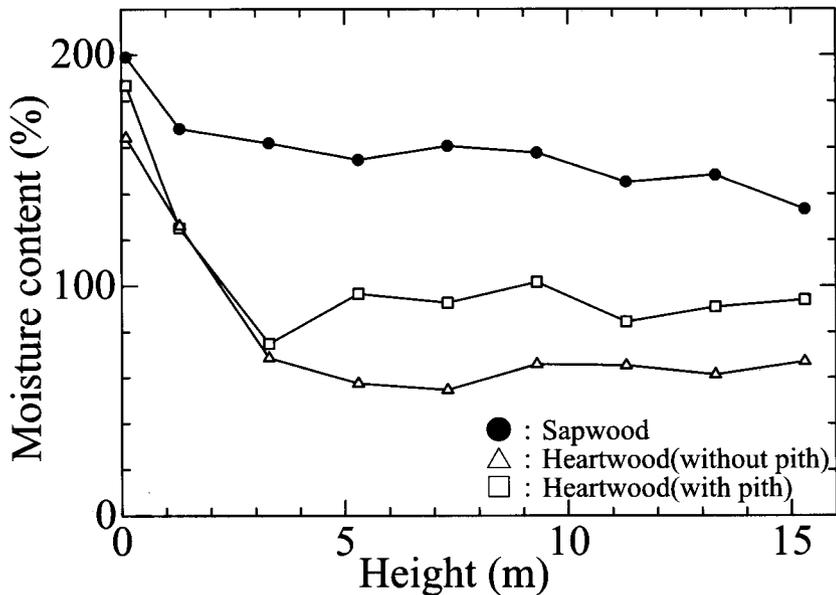


Fig. 1. The vertical variations of moisture contents for green condition

できる。加工業者は乾燥，加工，仕上げなどを未成熟材と成熟材を考慮に入れて行なうことができる。さらには、パルプ配合や構造用材の応力計算などで、未成熟材が存在する時に変更できる。」としている。そのように未成熟材研究が生産と利用に貢献するのが最終的な目標であるが、実際は樹種や品種，生育環境によって組織構造や力学的特性の変動傾向やそれらに基づく未成熟材の範囲は異なり，統一された定義方法によるデータの蓄積が必要である。

いままで未成熟材と成熟材の境界は，力学的なものから組織構造的なものまで様々な指標によって求められているが，採用する指標によって安定に達する形成層年齢が異なる報告も多くある（深沢 1967，太田 1972，朱 2002）。また定義方法についても様々な手法が用いられてきているが，ある指標の半径方向変動がグラフにより視覚的に安定に達していると見做せた点を境界としているものが多い。それ以外にも様々な方法が検討されており，渡辺ら（1964）は比強度と比ヤング率の半径方向変動をグラフ上で視覚的に安定な領域と不安定な領域に区分し，それぞれを線形回帰して与えられた交点より髓側を3等分した上で，その髓寄りの2つを未成熟材としている。一方，塩倉（1982）は TL の変動を対数式で回帰し，1年あたりの増加率が1%を切った点を境界としており，この例のように

主観が入らない方法が望ましい。Bendtsenら（1986）はポプラとテーダマツの MOE, MOR, SG, TL, MFA の変動に，Segmented regression analysis, Discriminate analysis, Analysis of slope と3つの方法を行なったが，一貫した結果が得られなかったため最終的にグラフ上で視覚的に判断している。Abdel-Gadirら（1993）はダグラスファーの一年輪平均密度の変動を Piecewise regression を用いて境界点を求めた。Tasissaら（1998）はテーダマツの比重変動を Iterative solution, Segmented model, Constrained solution を用いて境界点を求めた。Sauterら（1999）はスコットパインの晩材密度変動を Segmented regression を用いて境界点を求めたが，ここでは未成熟材側に二次関数を用いている。このように定量的な境界点の求め方には Segmented regression analysis がよく用いられているが，これは材質変動を変化区間と安定区間の2つの区間に分けて，残差平方和が最小になるように回帰した時の各回帰式の交点を境界点としている。しかし，変化区間から安定区間への移行が不明瞭な場合でも定量的な結果が得られるが，それが境界点として妥当であるかという点に疑問が残る。このように様々な手法を用いた境界点の定義方法が検討されてきているが，ここで重要なのは選んだ指標変動と決定方法が持つ意味を理解することと，大まかな範

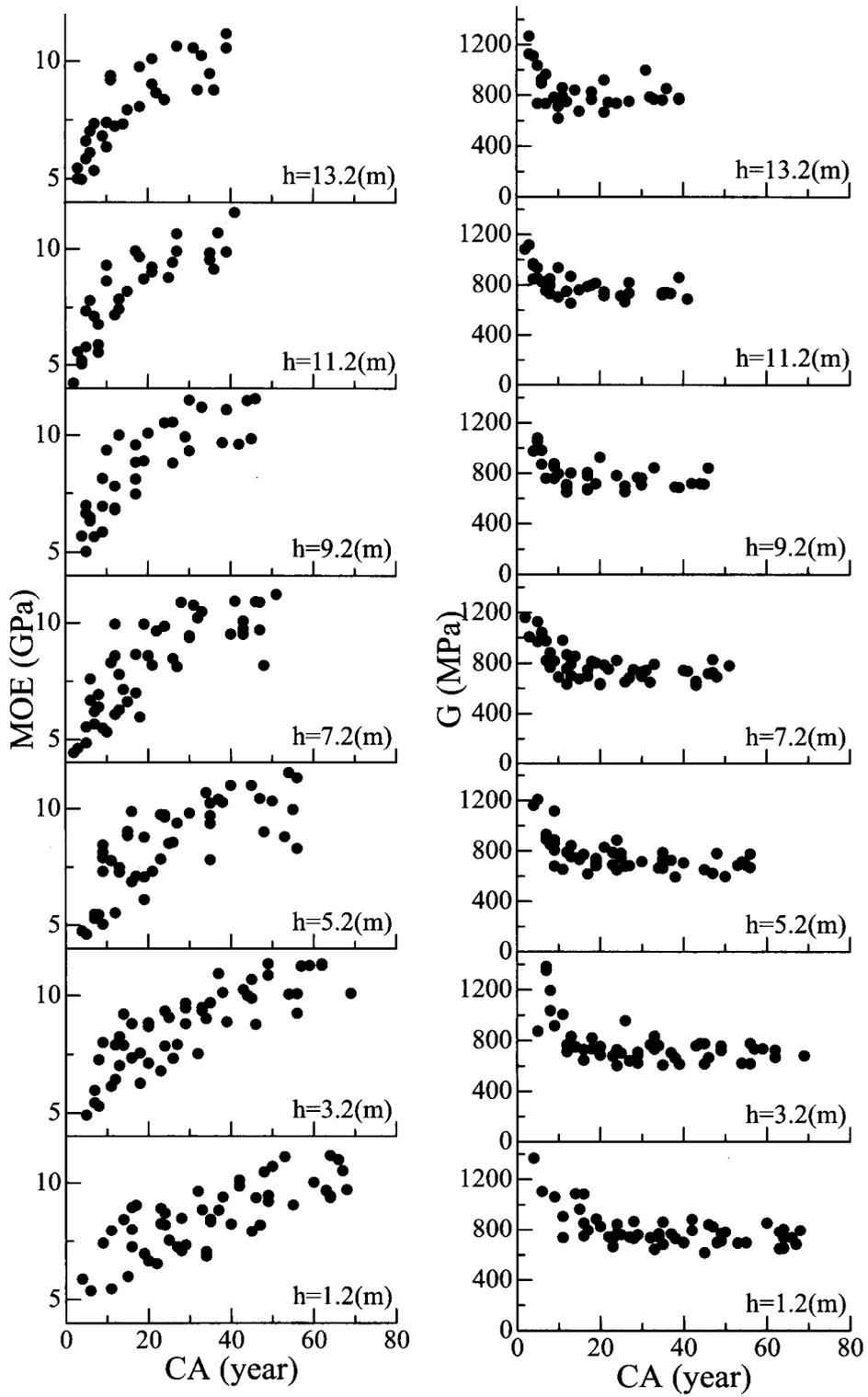


Fig. 2. Variations in MOE and G among tree stems

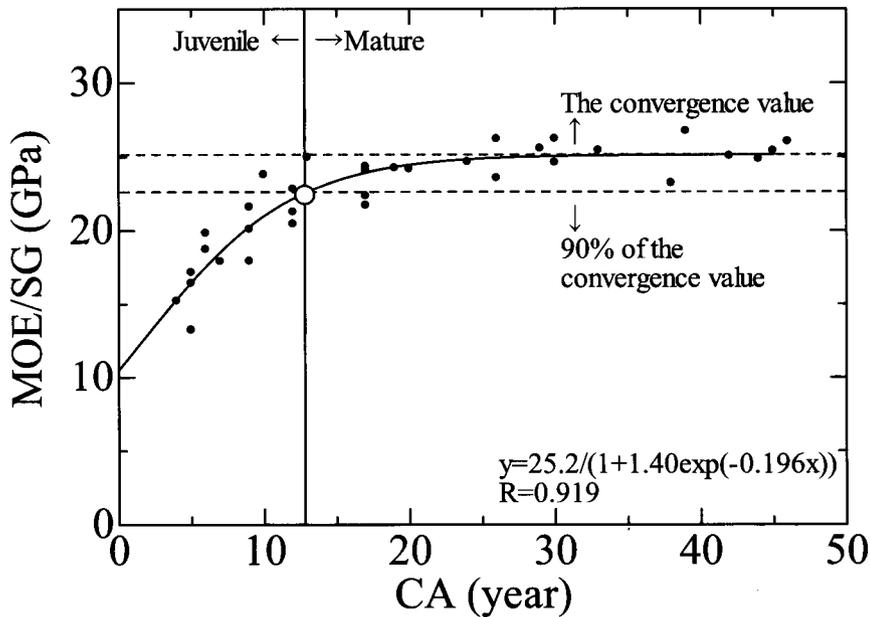


Fig. 3. The definition of the demarcation between juvenile wood and mature wood

囲ではなく定量的に求めることである。そこで今回、新たに成熟材境界の定義方法を提案し、その妥当性について検討した。

木材を構造用材として使用する際に重要なのは、力学的な指標である。ゆえに成熟材の境界を定義する際も力学的な指標を用いるのが好ましいと考えた。今回供試した試験体はスギであり、その樹種特性として髓付近では密度が高くなることが知られており今回もその傾向が認められた。そのため MOR や CS などの破壊強度は未成熟材部でもそれほど小さくならず、境界を定義するための指標としては不适当であったため、MOE を用いることとしたが、日照時間や降水量の違いなどによる年輪幅の増減によって SG が変化する影響を除くために SG で除して使用した。Fig. 3 の

Table 4. CA at the demarcation among the stem

Stand	CA at the demarcation between juvenile wood and mature wood (year)						
	h1	h2	h3	h4	h5	h6	h7
Tazawako	31	22	17	16	13	11	12
Kaminokuni	19	13	12	12	14	9	9

Legend. h1-h7: Heights through the stem that h1 is 1.2m (Tazawako) or 1.3m (Kaminokuni) and the others are above 2m as the subscript number gains one

ように MOE/SG 半径方向の変動を指数式 (Eq.1) で回帰し、その収束値の90%に当たる値の形成層年齢を成熟材境界とした。この指数式において係数aは収束値、bはy軸上の切片、cは曲線半径にそれぞれ関わる係数である。y軸上の切片と収束値が得られるのが利点であるが、MOE/SGはTLなどの組織構造的な指標と同様に、あるCAからは安定して推移するため収束値が得られやすい。90%という閾値は恣意的なものであるが、最終的に安定に達した値の90%が保証されればその材の中における材質として満足され得るものと判断した。この境界値によって示された成熟材領域はグラフ上でも視覚的に安定している領域であった。各高さ毎の成熟材境界を Table 4 に示す。成熟材境界の鉛直方向の変動を見ると、胸高位では境界のCAが大きく、高さを増すほど境界のCAを減じる傾向があった。ここで秋田スギでの結果を MOE/SG の分布と合わせて見てみると、MOE/SG の鉛直方向及び半径方向変動の傾向を明確に反映していることが分かる (Fig.4)。これは MFA が髓より半径方向に漸減する領域は樹幹内で円錐状に分布するという平川ら (1996) の報告によって説明される。

$$y = \frac{a}{1 + b \cdot \exp(c \cdot x)} \quad (\text{Eq.1})$$

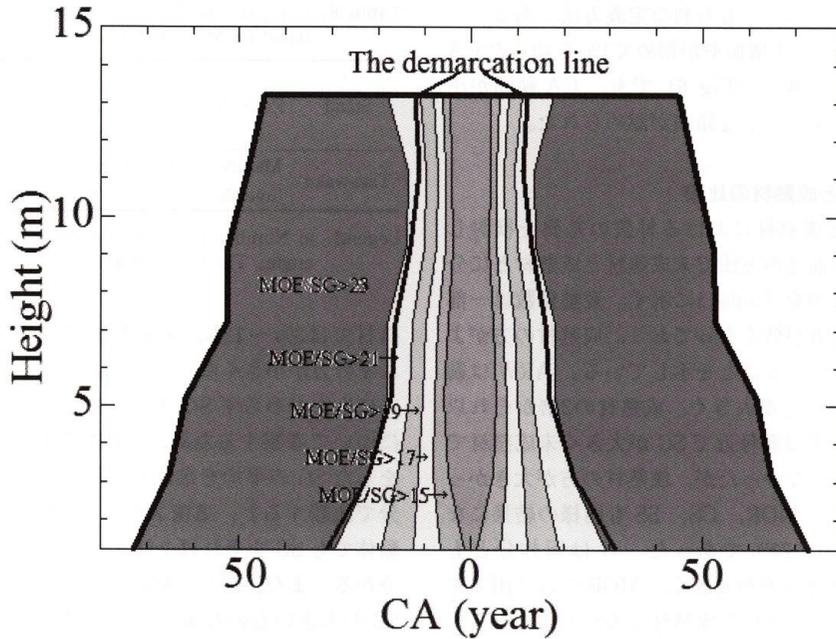


Fig. 4. Variation of MOE/SG among the stem and the demarcation line between mature wood and juvenile wood. Note. A unit of MOE/SG is GPa.

今回は供試木が高樹齢であったが、若齢の供試木の場合は異なる結果が得られるものと考えられる。そこで成熟材境界定義に必要な年輪数について検討するため、高さ毎に全試験体から採用する CA 範囲を、CA の大きい方から2ずつ減らしていった時の境界値の変動を見た (Fig.5)。やはり胸高位では材質が安定するまでに要する CA が大きいためか、回帰式の収束値は CA 範囲が小さいほど低下し、それに伴って境界値も下がるようである。そしてその低下の傾きは他

の高さに比べ特異的である。高い位置ほど、すなわち境界 CA が小さくバラツキが小さいほど、成熟材境界定義に必要な CA 範囲がそれほど大きくなくてもよいと考えられる。3.2m 以上では最大 CA から20年近く CA 範囲を減らしても境界 CA はそれほど下がらず、胸高位以外では樹齢が50年程度あれば推定される成熟材境界値は妥当と考えられる。仮に50年未満の樹齢であっても、この方法を用いればその時点での安定材質に準ずる材の範囲が得られることに変わりはない

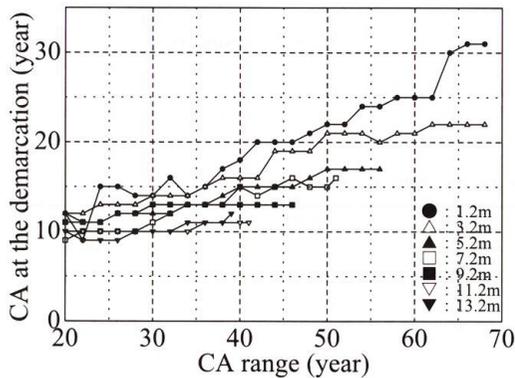


Fig. 5. CA at the demarcation determined with restrict number of CA used for curve fitting

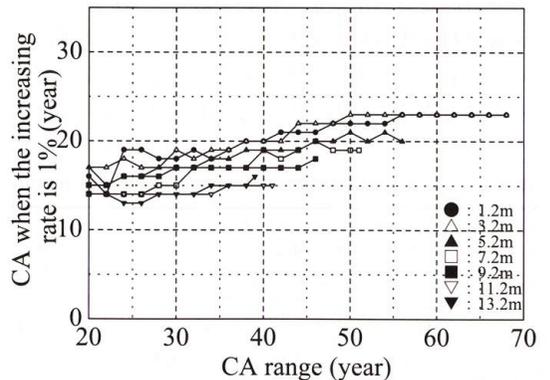


Fig. 6. CA when the increasing rate is 1% with restricted number of CA used for curve fitting

く、実際の設計においても有利な定義方法である。一方で、MOE/SGの年増加率が初めて1%を切ったCAを境界と仮定した場合 (Fig.6) でも、CA範囲が小さいほど境界CAも下がる傾向が認められた。

3.3 未成熟材と成熟材の比較

未成熟材と成熟材における材質の差異を検討した。試験結果を前述の方法で未成熟材と成熟材とに分けてまとめたものを Table 5に示す。変動係数は一部を除き成熟材の方が低くなっており、成熟材の方がより材質が安定していることを示している。ARWは髓に近い未成熟材の方が大きく、成熟材の2倍かそれ以上であった。スギは髓付近でSGが大きく未成熟材でもそれほど小さくはなかったが、成熟材の方が大きかった。それに伴ってMOR, CS, SSも同様の結果になり、その差は10~20%であった。Gは両林分とも15%程度未成熟材の方が大きく、MOEでは秋田スギで37%、道南スギでは48%成熟材の方が大きくなり、未成熟材と成熟材における材質の差異はMOEで最も顕著であった。これはMOEについてはSGよりもMFAの影響が大きいことによる (則元ら 1986, 平川ら1997)。Table 6にMFAとTLの測定結果を未成熟材と成熟材とに分けたものを示す。変動係数が高いことに留意が必要だが、MFAは未成熟材では成熟材の約2倍で、TLは約0.75倍であった。

3.4 秋田スギと道南スギの差異

ここで、試験結果の秋田スギと道南スギとの差異について検討する。道南スギは19世紀に東北地方などから導入されたと言われており、秋田スギと近い傾向があるのではないかと予想された。Table 5に示したそれぞれの材質の平均値を比較すると、ARWにおいて未成熟材と成熟材の両方で道南スギの方が非常に大きいのが目に付くが、それに対しSGはほとんど変わらない値である。その一方で力学的特性においては成

Table 6. Comparisons between juvenile wood and mature wood for MFA and TL

Stand	Position	n	MFA		TL	
			Mean (degree)	CV (%)	Mean (mm)	CV (%)
Tazawako	Mature	111	10.3	35.7	3.38	5.7
	Juvenile	122	21.1	43.5	2.52	23.2

Legend. n: Number of measured spots, MFA: Microfibril angle, TL: Tracheid length

熟材では3%~12%、未成熟材では6%~19%も道南スギの方が小さくなっている。ここで、ARWが大きいかかわらずSGはほとんど低下しなかったことについて考察するため、ARWを1mm毎に階級分けをしたSGの平均を求めた結果をFig.7に示す。二林分で比較すると、道南スギはARWが5mm以上の試験体でもSGをそれ以上減じずに維持していることが分かる。また、同じARWで比べると道南スギの方がSGが大きいものもあった。ARWが大きいものは髓に近い位置のものが多く、スギの特性である髓付近で早材密度が大きくなることから、ARWが大きくてもSGは低下しない理由の一つに考えられる。しかしそ

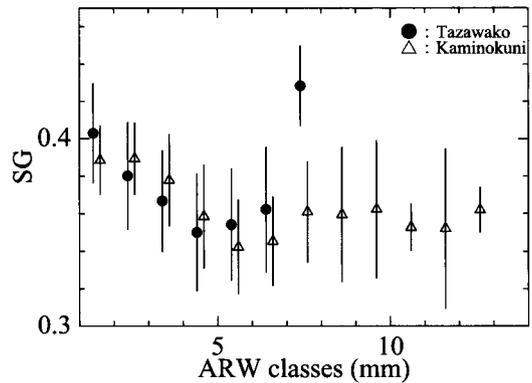
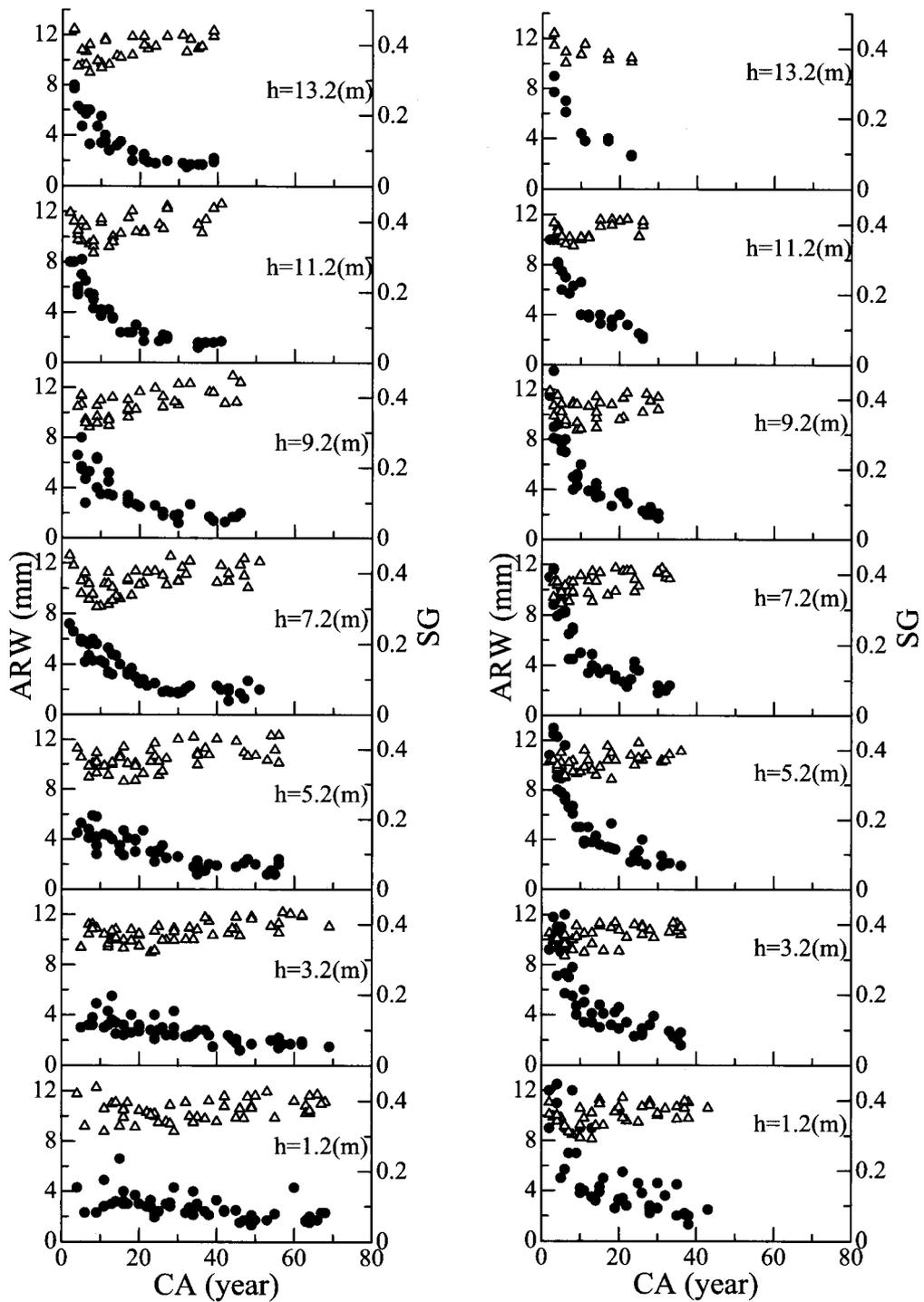


Fig. 7. Means of SG divided by ARW. Note. Vertical lines around plots denote standard deviations.

Table 5. Comparisons between juvenile wood and mature wood for mechanical properties

Stand	Position	n	ARW		SG		G		MOE		MOR		CS		SS	
			Mean (mm)	CV (%)	Mean	CV (%)	Mean (MPa)	CV (%)	Mean (GPa)	CV (%)	Mean (MPa)	CV (%)	Mean (MPa)	CV (%)		
Tazawako	Juvenile	124	4.44	33.2	0.364	9.0	874	18.8	6.90	19.8	61.5	12.1	36.2	10.2	6.37	14.7
	Mature	175	2.28	31.9	0.390	7.9	734	9.9	9.46	12.8	71.8	11.6	41.2	10.8	7.03	15.9
Kaminokuni	Juvenile	108	7.68	34.0	0.357	8.2	811	19.0	5.59	20.4	58.0	16.2	30.7	14.8		
	Mature	120	3.16	29.7	0.380	6.6	701	13.0	8.29	14.1	69.6	15.1	36.3	12.3		

Legend. Same as Table2



a. Tazawako

b. Kaminokuni

Fig. 8. Variations in ARW and SG among tree stems
 Note. ●:ARW, △:SG

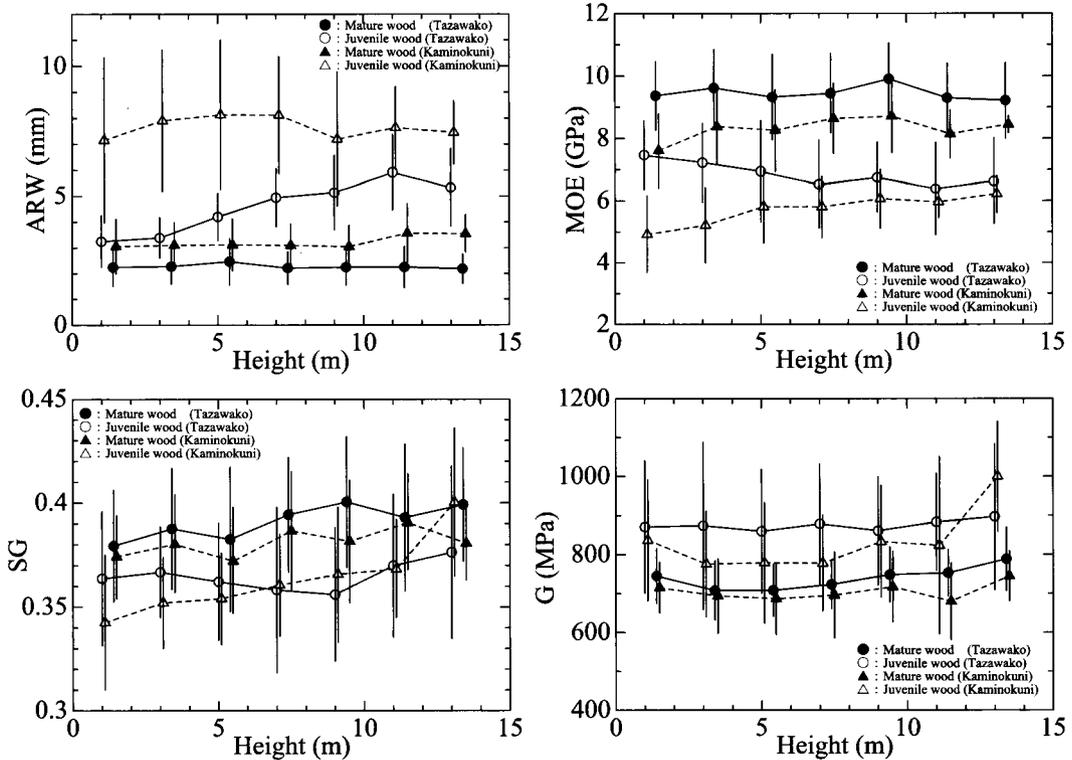


Fig. 9. Vertical variations of ARW, SG, MOE and G
Note. Vertical lines around plots denote standard deviations.

れだけではなく別の理由も考えられ、道南スギについても年輪解析を行なって詳しく分析する必要がある。

成熟材境界については道南スギの方が境界CAが小さく、より早い段階で安定しているようである (Table 4)。未成熟材から成熟材の移行に関して、遺伝的な要素と環境的な要素のどちらが大きく作用するかは明らかになっていないが、今回の結果で考えてみるとどちらとも言えない。SGがそれほど変わらないのに道南スギの方では強度が落ちている点からMFAに差がある可能性があるが、その場合遺伝的に異なるものであると考えられる。しかし一方でARWとSGそれぞれの樹幹内変動を見比べると、秋田スギと道南スギで変動傾向が異なる (Fig.8)。秋田スギでは樹幹下部ほどCAが小さいところでARWが小さいが、道南スギではCAが小さいところでも高さによらず同程度にARWが大きくなっている。SGでは、CAを増すにつれていったんSGを減少していき増加に転じる時のCAが、秋田スギでは樹幹下部ほど大きいものに対して、道南スギでは高さによらずほぼ同じ

CAで増加に転じている。これらのことより、施業履歴を含めた環境的な要素の影響も示唆される。今回は道南スギの試験体に関して強度試験しか行っていないので詳しく言及できないが、今後の育種を考える上でこれらのことは重要であり、異なる環境で育った同一の品種で検討を行なうことが好ましい。

3.5 鉛直方向での材質変動

Fig.2, 8のように、高さによって材質の半径方向での変動傾向とその値が異なることが分かるが、定量的に比較するため高さ毎に未成熟材、成熟材別での平均値と標準偏差を示す (Fig.9)。

ARWは秋田スギの未成熟材のみ高さを増すほど値を増加させ、それ以外は高さによらずほぼ一定の値を示した。また、道南スギの未成熟材は低位で標準偏差が非常に大きい。SGは秋田スギの未成熟材以外は概ね高位に行くほど緩やかに増加しているように見える。これらはMOR, CS, SSでもほぼ同じ傾向であった。やはり破壊強度にはSGの影響がよく表れている

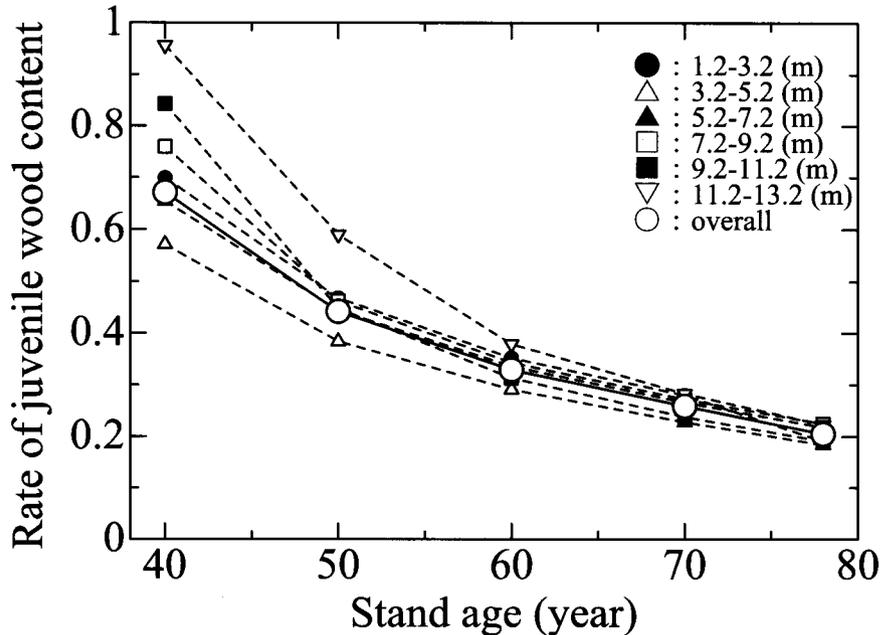


Fig. 10. Variations in rate of juvenile wood content with stand age

ようである。MOEは秋田スギにおいては成熟材ではそれほど変動せず、未成熟材では高位ほど緩やかに値が減少していたが、逆に道南スギではいずれも高位ほど緩やかに値を増していた。秋田スギの未成熟材で低位の方が値が大きくなった理由として、秋田スギでは低位ほど髓付近の年輪幅が狭く、Fig.2で認められるように低位ではCAが小さい試験体が高位よりも相対的に少なかったこと、低位では成熟材境界CAが大きいため成熟材寄りの未成熟材の試験体が多かったことが考えられる。Gは道南スギの未成熟材で13.3m位が高くなった以外は、高さによる差異は認められなかった。今回は成熟材と未成熟材それぞれの平均値であったため差異はあまり大きくならず認められないものもあったが、Fig.4で確認できるように、同じCAでの値を比較すると高さによる差異は認められた。

未成熟材では高さを増すほどバラツキが小さくなるものもあったが、高さによるバラツキの差異はそれほど顕著ではなかった。

3.6 未成熟材の材積含有率の加齢による変動

Bendtsenら(1986)は30年生のテーダマツとポプラの地上高1.8mから得た試験体で、未成熟材範囲をテーダマツでは髓から約13年、ポプラでは約18年とし、伐期20年でテーダマツは60%、ポプラは80%の未

成熟材を含むとしている。そしてその後の半径成長速度を仮定して計算することで、伐期40年ではいずれの樹種も約25%、伐期60年では約10%に未成熟材含有率が低下するとしており、60年を超えるまで収穫を待つべきだとしている。しかし単一の高さのみである点と供試木が30年生でありその後の成長が推測である点、そして未成熟材の範囲が定量的に求められたものではない点から実用には適していない。本研究ではこれらの条件を満たした上で未成熟材の材積含有率の加齢による変動について考察した。

年輪解析の結果を基に未成熟材領域を髓からの距離に換算すると、胸高位で16~17cm程度、3.2m位~7.2m位では14~15cm程度、9.2m位~13.2m位では12~13cm程度であった。そして高さ毎に、各切断面間の丸太及び内部の未成熟材領域を円錐台と仮定して、丸太と未成熟材の材積をそれぞれ計算し樹幹内における未成熟材含有率を求めた。その際林齢が40, 50, 60, 70年時点での未成熟材含有率もあわせて求め、加齢による樹幹内の未成熟材含有率の変動を把握した。枝下樹幹材積の変動をTable.7に、高さ毎の未成熟材含有率の変動をFig.10に示す。

樹幹全体で見ると林齢40年で未成熟材含有率は約67%であったが、徐々に減じていき最終的に林齢78年で約20%まで落ちることが分かった。これは今回

Table 7. Variations of volume with increasing stand age

Stand age (year)	Volume of the stem below blanch (m ³)	Volume of juvenile wood (m ³)	Rate of juvenile wood content
40	0.264	0.177	0.671
50	0.427	0.189	0.442
60	0.575	0.189	0.329
70	0.729	0.189	0.259
78	0.924	0.189	0.205

の成熟材境界の定義方法から、安定材質の90%以上の性能を持つ材を樹幹内に約80%含んでいるということの意味している。

高さによる違いを見ると、3.2m位より上では樹幹上部の丸太ほど未成熟材含有率が高くなっているが、それより低位である胸高位と3.2m位間の丸太でも高くなっていることが分かる。これは、樹齢は同じでも樹幹上部ほど形成層の年齢が若く成熟材が少ないこと、下部ほど成熟材境界のCAが大きく、特に胸高位ではそれが著しいことによる。いずれの高さにおいても加齢によって未成熟材含有率を減じていき、他の高さとの差が小さくなっていく。そして林齢78年では高さによる差がほとんどなくなっていることが分かる。これ以降は未成熟材含有率の低下速度は減少し、ある程度の林齢に達するとほぼ一定値に収束すると考えられる。肥大成長量の変動と合わせることで使用目的に合った適正な伐期を設定できるようになることが期待される。

未成熟材についての既往の研究は、境界の定義とそれによって定められる範囲についてのみにしか言及していないものが多く、樹幹内での材積含有率やその変動について言及しているものはほとんどない。しかし、実際に木材を使用する立場から考えると一番求められているがこういった情報なのであり、今後今回のような研究が継続されることで樹種毎、品種毎のデータが蓄積されていくことが望ましい。

3.7 強度特性に対する組織構造の影響

木材の材質はそれを構成する組織構造に由来するものであり、組織構造の変動に大きく左右される。例えば、細胞壁が厚いほど比重は大きくなり強度は増加する。それだけではなく、繊維の傾斜、細胞壁を構成するマイクロフィブリルの角度、抽出成分や欠点など様々な要素が絡み合うことで一つの材質となる。安定

した材質の木材を生産するための育種や施業を行なうに当たって、組織構造と強度の関連性を解明することはきわめて重要である。今まで数多くの組織構造研究が行なわれてきているが、力学的特性との関係を総合的に考察した例は、特に大径材においては少ない。そこで今回、秋田スギにおいてTL, MFA, SGが力学的特性にどれほど影響しているのかを把握するため、重回帰分析を用いて検討した。TL, MFAは半径方向の分布に指数式(Eq.1)をあてはめ、試験体のCAに対応する値をその試験体のTL, MFAとした。相関係数はTLで0.936~0.978, MFAで0.724~0.916であった。

未成熟材と成熟材それぞれについて、目的変数としてMOE, G, MOR, CS, SSを用い、説明変数としてSG, TL, MFAを用いて重回帰分析を行った(Table 8)。変数減少法により有意な変数を残していき、それらの目的変数への影響度を検討するために標準偏回帰係数を求めた。寄与率(決定係数)は目的変数の変動を説明変数によってどの程度説明できるかを表す。一部で低い値となったが、概ね説明変数として満足できる値が得られた。ここで、成熟材のCSとSSは説明変数としてSGのみが残されたため標準偏回帰係数は示さず、寄与率はSGのみでの値である。

それぞれの標準偏回帰係数について見てみると、いずれの目的変数においてもSGの影響が大きく、突出して標準偏回帰係数が高かった。従来から言われているように破壊強度にはSGが重要な要素であることが分かる。一方でGと未成熟材のMOEにおいてはTLが最も高くなった。また、Gや他のいくつかの目的変数ではTLの標準偏回帰係数が負になっているのが見られる。Gについては髓付近で大きく、減少後ほぼ一定で推移するというTLと逆の変動傾向であることから説明できるが、実際に仮道管が長い方がせん断変形しやすいとは考えにくい。これは重回帰分析

Table 8. Multiple regression analysis of mechanical properties

Criterion variable	Position	Determination coefficient	Statistical item	Explanatory variable		
				SG	TL	MFA
MOE	Juvenile	0.614	Simple correlation coefficient	0.197*	0.576***	-0.493***
			Partial standard regression coefficient	0.602	0.860	-
	Mature	0.777	Simple correlation coefficient	0.874***	0.162*	-0.341***
			Partial standard regression coefficient	0.842	-	-0.124
G	Juvenile	0.596	Simple correlation coefficient	0.520***	-0.703***	0.519***
			Partial standard regression coefficient	0.308	-0.410	0.285
	Mature	0.108	Simple correlation coefficient	0.197**	-0.248***	0.198**
			Partial standard regression coefficient	0.216	-0.264	-
MOR	Juvenile	0.545	Simple correlation coefficient	0.622***	0.028NS	-0.296***
			Partial standard regression coefficient	0.702	0.215	-0.244
	Mature	0.853	Simple correlation coefficient	0.915***	0.015NS	-0.298***
			Partial standard regression coefficient	0.899	-0.110	-0.127
CS	Juvenile	0.854	Simple correlation coefficient	0.817***	-0.012NS	-0.266**
			Partial standard regression coefficient	1.01	0.39	-0.13
	Mature	0.839	Simple correlation coefficient	0.938***	-0.233**	0.030NS
			Partial standard regression coefficient	-	-	-
SS	Juvenile	0.593	Simple correlation coefficient	0.723***	-0.582***	0.148NS
			Partial standard regression coefficient	0.69	-0.23	-
	Mature	0.478	Simple correlation coefficient	0.729***	-0.254***	0.083NS
			Partial standard regression coefficient	-	-	-

Legend. *** : Significant at 0.1% level, ** : Significant at 1% level, * : Significant at 5% level, NS: Not significant
 Note. CS and SS have no indication of partial standard regression coefficient in mature wood because only SG was adopted as explanatory variable.

では変動の傾向そのものが回帰係数に表れるため、仮にMFAなど他の要素による影響であっても、仮道管が短い試験体でGが大きく、長い試験体でGが小さかったという事実による。そしてGの変動に対し

てTLが最もそれに追従するような変動を示すことにより標準偏回帰係数が高くなったと考えられる。その他の目的変数については、髓付近で比重が高くなることの影響が考えられる。

MOEの変動にはMFAの影響が大きいと言われており、平川ら(1997)は樹齢22年のスギ(オビアカ)のMOE変動についてMFAとSGを説明変数として重回帰分析を行い、寄与率0.906を得た上で標準偏回帰係数によりMFAの影響の方が大きいとしている。しかし今回MFAの標準偏回帰係数は成熟材では値が低く、未成熟材では有意な説明変数とならなかった。成熟材ではSGの影響の方が大きかったためと考えられるが、一方未成熟材でMFAの影響が小さかったことについては、今回のMFAとTLの測定値を標準試験体へ適用した方法にも原因があると考えられる。すなわち当てはめた指数式の相関係数が小さい場合、実際の値との誤差が大きくなってしまふこと、また試験体には複数の年輪が含まれていることによる誤差が影響しているものと考えられる。藤崎(1974)はMOEとTLの関係について、同一成長輪帯において測定したMOEとTLの間に相関はないが、未成熟材から成熟材を含む広い範囲では相関があるとしている。今回の結果でMOEの変動にMFAよりもTLの方がより大きく影響していたことについては、TLの方がバラツキが小さく回帰式の相関係数が高かったことが考えられる。実際にTLをMOE予測の指標として使用できるか、また今後の育種に繋げていくための要素となり得るかどうかには検討が必要であろう。

3.8 一年輪平均密度の変動要因

力学的特性に大きく影響しているSGの変動要因を把握するため、年輪解析によって得られたRDを目的変数にし、ED、LD、LWPを説明変数として重回帰分析を行なった(Table 9)。早晚材の密度とその割合が分かっているので当然寄与率は1に近くなる。未成熟材ではEDが最も標準偏回帰係数が高くなり、成熟材ではLWPも同等に高くなったが僅かにEDの方が高くなった。LDは変動係数が5.6%と、あまり値にバラツキがないこともあり、RDの変動にはほとんど影響しなかった。

従来からSGとLWPが強い相関を示すことはよ

く言われてきており、Kuboら(1996)が全国5地域の供試木を用いて行なった同様の分析ではすべての供試木でLWPが最も標準偏回帰係数が高くなった。しかしそれらは髓から20年輪以降の成熟材と思われる部分のみの結果であり、また約30年生という比較的若い林分の供試木である。未成熟材は髓付近に分布し成熟材よりも肥大成長が旺盛であるため年輪幅が大きくなるが、晩材幅はそれほど変わらずに早材幅が大きくなることから、晩材率よりも早材の密度そのものの方が年輪の平均密度の変動により大きく影響したものと考えられる。

成熟材において標準偏回帰係数が高くなったLWPは、肥大成長への環境影響が反映されているものであることから施業からのアプローチに、そして双方で標準偏回帰係数が高くなったEDは育種において重要な要素となるものと考えられる。

4. まとめ

木材の材質は、樹種や品種、生育環境や施業履歴などで大きく異なることにより、単一の研究をもって結論付けることができないものが多く、長期的に研究データの蓄積がなされていくことで把握されていくことになる。本研究ではその前段階として樹幹内での材質変動に着目し、未成熟材と成熟材とに区分することでより詳細な考察が可能になることを示した。材質の研究が今後の施業や育種に反映されるためには、継続的に研究を行なうことはもちろん、これらの分野とより密な連携をとる必要がある。以下に本研究の結果をまとめる。

- (1) 曲げヤング率、曲げ強さ、縦圧縮強さは秋田スギではおよそ2~3割、道南スギでは約1割全国平均値よりも大きい値であった。道南スギでは平均年輪幅が6割近くも全国平均よりも大きい値であり、成長が良いわりに、強度面において多品種と比べても遜色なかった。
- (2) MOR/SGの半径方向変動を指数式で回帰し、その収束値の90%をとる形成層年齢を未成熟材と成

Table 9. Multiple regression analysis of ring density

Criterion variable	Position	Determination coefficient	Partial standard regression coefficient		
			ED	LD	LWP
RD	Juvenile	0.977	0.789	0.116	0.330
	Mature	0.984	0.637	0.217	0.573

Legend. RD: Ring density, ED: Early wood density, LD: Late wood density, LWP: Late wood percentage

熟材の境界とした。その際、樹齢50年程度は必要であると考えられる。境界形成層年齢は高さによって明らかな差異が認められた。胸高位では境界形成層年齢は大きいが高さを増すほど値を減じ、より早い段階で形成層が成熟する。

- (3) 成熟材と未成熟材の差異は曲げヤング率で最も顕著だった。スギでは髓付近で比重が大きくなるため、破壊強度では曲げヤング率ほどの差が表れなかった。
- (4) 道南スギは秋田スギよりも平均年輪幅が非常に大きいにもかかわらず比重はほとんど低下しなかったが、一方で力学的特性については道南スギの方が成熟材では3%~12%、未成熟材では6%~19%小さかった。成熟材境界についてはいずれの高さでも道南スギの方が境界形成層年齢は小さかった。これらが環境的な要因によるのか遺伝的な要因によるのかは不明である。
- (5) 力学的特性の高さによる差異は顕著ではなかった。
- (6) 枝下樹幹内の未成熟材材積含有率は林齢40年では約67%であったが、加齢とともに徐々に減じていき最終的に林齢78年で約20%にまで低下した。いずれの高さでも加齢によって未成熟材含有率が減じていくことで他の高さとの差は小さくなっていったが、林齢78年では高さによる差がほとんどなくなっていた。
- (7) いずれの力学的特性においても比重の影響が大きかったが、せん断弾性係数と未成熟材の曲げヤング率においては仮道管長が最もそれらの変動を説明していた。しかし実際に仮道管長を強度特性の指標として使えるかどうかは検討が必要である。今回晩材仮道管二次壁中層のマイクロフィブリル傾角は強度特性の変動を説明する因子としてはそれほど重要ではなかったが、測定値の試験体への適用に際しての誤差が影響していたのかもしれない。
- (8) 一年輪の平均密度の変動には早材密度の影響が最も大きかった。特に未成熟材においてはそれが顕著であり、成熟材では晩材率も同等に影響が大きかった。

謝辞

本研究を進めるにあたって秋田県立大学木材高度加工研究所の方々にご助力をいただいた。また、道南スギ供試木の採取に北海道ノ国町農業委員会の太田

垣茂氏、北方生物圏フィールド科学センター檜山研究林の夏目俊二氏からご協力をいただいた。ここに深く感謝の意を表す。

引用文献

- 鈴木滋彦 (1991) : 標準試験体, 日本木材学会研究分科会報告書「木材の科学と利用技術 II 5 .スギ」, 68-74
- 三輪雄四郎 (1991) : 生材含水率, 日本木材学会研究分科会報告書「木材の科学と利用技術 II 5 .スギ」, 10-13
- 中田了五・藤澤義武・平川泰彦・山下香葉 (1998) : スギの生材含水率の個体内樹高方向での変化, 木材学会誌, 44(6), 395-402
- 安久津久 (1999) : 道南地方のスギ精英樹クローンの材質検定 (第1報), 北海道林産試験場報告 13(1), 6-15
- 渡辺治人・堤寿一・小島敬吾 (1964) : 未成熟材に関する研究 (第1報) スギ樹幹についての実験, 木材学会誌10(4), 125-130
- 渡辺治人・堤寿一・松本勲・太田貞明 (1963) : 未成熟材に関する研究 (第2報) スギ樹幹内の比圧縮強度と比圧縮ヤング率の分布, 木材学会誌 9 (6), 225-230
- 太田貞明 (1972) : スギ・ヒノキ樹幹内における未成熟材の力学特性に関する基礎的研究, 九州大学演習林報告45, 1-80
- 中谷浩 (1991) : 林木の冠雪害に関する樹木力学的研究, 富山県林業技術センター研究報告 No.4, 1-54
- B. A. Bendtsen・John Senft (1986) : Mechanical and anatomical properties in individual growth rings of plantation-grown eastern cottonwood and loblolly pine, Wood and Fiber Science 18(1), 23-38
- 深沢和三 (1967) : スギ樹幹内の材質変動に関する研究, 岐阜大学農学部研究報告25, 47-125
- 朱健軍 (2002) : 信州産高樹齢カラマツ造林木の成長と材質, 信州大学農学部演習林報告38, 61-99
- 塩倉高義 (1982) : 針葉樹幹材における未成熟材の区分とその範囲, 木材学会誌28(2), 85-90
- A. Yassin Abdel-Gadir・Robert L. Krahmer (1993) : Estimating the age of demarcation of juvenile and mature wood in Douglas-fir, Wood and Fiber Science 25(3), 242-249
- Gudaye Tasissa・Harold E. Burkhart (1998) : Juvenile

- mature wood demarcation in loblolly pine trees. *Wood and Fiber Science* 30(2), 119-127
- Udo H. Sauter·Rüdiger Mutz·B. David Munro (1999) : Determining juvenile-mature wood transition in scots pine using latewood density. *Wood and Fiber Science* 31(4), 416-425
- 平川泰彦・藤澤義武 (1996) : スギの晩材仮道管 S2 層のマイクロフィブリル傾角の樹高方向における変動, *木材学会誌*42(2), 107-114
- 則元京・田中文男・大釜敏正・生宗里佳子 (1986) : 木材の繊維方向における比動的ヤング率と内部摩擦, *木材研究・資料*, 22, 53-65
- 平川泰彦・山下香菜・中田了五・藤澤義武 (1997) : スギ丸太のヤング率の変動に関わる晩材仮道管 S2 層のマイクロフィブリル傾角と密度の影響, *木材学会誌* 43(9), 717-724
- 藤崎謙次郎 (1974) : スギにおけるヤング率と仮道管長およびマイクロフィブリル傾角との関係について, *愛媛大学演習林報告* 11, 11-19
- Takafumi Kubo·Sugio Jyodo (1996) : Some Characteristic of the annual ring structure related to wood density variation in sugi, *Mokuzai Gakkaishi* 42(12), 1156-1162

Summary

To discuss the variation in anatomical and mechanical properties among the stem of Japanese cedar, we tested small clear specimens taken continuously in radial (pith to bark) direction from the breast height to the branch height every 2m of the sample trees. Four trees were sampled from Tazawako, Akita which were 78 years old and three trees were from Kaminokuni, Hokkaido which were 50 years old. In addition, we measured microfibril angle of the S₂ layers of latewood from tracheids, tracheid length of the latewood, and growth ring characteristics obtained by X-ray densitometry.

At first, the demarcation method between juvenile wood and mature wood was discussed in order to understand the radial variation and the vertical variation in more detail. We defined the demarcation between juvenile wood and mature wood as the cambium age when MOE/SG reached 90% of the convergence value from exponential expression curve-fit of radial variation. Cambium ages at the demarcation were 11-31 years on Tazawako, Akita, and 9-19 years on Kaminokuni, Hokkaido, and to higher taken position of the specimen was, cambium age at the demarcation was younger.

The results of multiple regression analysis showed that the variations of mechanical properties were most affected by specific gravity, and the variation of average density in a ring was affected by earlywood density.

Keywords. *Cryptomeria japonica*, Variation among tree stem, Juvenile wood, Mechanical quality, Multiple regression analysis