

南九州産スギ材の材質Ⅰ[†] —屋久島スギ材の材料性能にかかわる材質指標—

雉子谷 佳 男* 北 原 龍 士*
佐々木 幸 久** 小野田 勝***

Wood Properties of *Cryptomeria japonica* in Southern Kyushu Ⅰ — Factors Affecting Strength of Yakushima-Sugi Woods —

by

Yoshio KIJIDANI*, Ryushi KITAHARA*, Yukihisa SASAKI** and Masaru ONODA***

Yakushima-sugi woods have high potential as structural timber owing to having their high mechanical properties. However, the factors influencing the mechanical properties have not been investigated. In this study, the wood properties of 25 ~ 50 years old Yakushima-sugi trees grown at four locations in Yakushima, two locations in Tanegashima and one location in Togo district (Kagoshima) are determined.

The dynamic modulus of elasticity, the latewood percentage, and the basic density of Yakushima-sugi woods were higher than those of common sugi-woods. The woods with higher latewood percentages had bands of compression-wood like tracheids in the latewood. In addition, Yakushima-sugi woods had longer tracheids than common sugi-woods.

Both the basic density and the S_2 microfibril angle affect the dynamic modulus of elasticity of Yakushima-sugi woods. There were differences in how these two factors affected the dynamic modulus of elasticity of Yakushima-sugi woods among sites. Higher basic density and/or lower S_2 microfibril angle were the cause of the higher mechanical properties of Yakushima-sugi woods.

Key words : Wood properties, *Cryptomeria japonica*, Yakushima-sugi woods, Dynamic modulus of elasticity, Compression-wood like tracheids

1 ま え が き

近年、柱材を中心とした国産構造用材は、その利用現場において、材料としての木材に厳しい品質管理の概念が求められるようになった。つまり、感性的あるいは化粧的な評価から、科学的な性能に裏付けられた木材の品質管理が要求されてきた。しかし、構造用材の生産あるいは利用現場では、上述に対する対応が極めて立ち遅れていると言わざるを得ない。この背景として、スギ材には、数多くの品種が存在し、その品種によって木材材質が著しく異なる。このことが、スギ材の工業向けの利用をさらに難しくしている。

さて、南九州地方は、その地域特性として、温暖・多雨な気候のために、わが国でも有数の森林資源、とくに木材資源に恵まれた地域である。この地域で生育するスギには、数多くの品種が存在する。なかでも、広く知られている「屋久スギ」は、極めて長寿であることや、その樹体が巨大になるという特徴がある。また、屋久スギ材の材質は、一般的なスギ材に比べて、密度が大きく、樹脂分が多いと言われている。最近、天然あるいは人工更新で生育した25～50年生の若い屋久島スギ材が、比

較的大きな動的縦弾性係数を持つことが判明した。¹⁾さらに、その実大材の力学試験の結果から、構造用材への利用の可能性が示唆された。¹⁾しかし、若い屋久島スギ材の木材材質は、その実態の解明が十分になされておらず、上述の実大材の力学性能の裏付けとなる組織・構造的な材質指標の解明は未解決である。

この研究では、屋久島スギ材の材料性能を明らかにするために、とくに組織・構造的な材質指標を中心に調べる。ひいては、これらの組織・構造的な指標が、屋久島スギ材の力学的性能にどのような影響を与えるか究明する。さらに、屋久島内の各地域、そして屋久島以外の他地域で生育した屋久島スギ材について、それらの材質特性を明らかにする。なお、この研究では、樹齢の大きな、いわゆる屋久スギと区別するために、屋久島内外で生育する若齢のスギを「屋久島スギ」、その木材を「屋久島スギ材」と呼ぶ。

2 実 験

2・1 供試材

屋久島4地域(口永良部島, 屋久町春牧, 上屋久町志戸子, 上屋久町宮之浦), 種子島2地域(西之表市, 南

† 原稿受理 平成12年7月13日 Received July 13, 2000

* 正 会 員 宮崎大学農学部森林科学講座 〒889-2192 宮崎市学園木花台西, Dept. of Forest Science, Miyazaki Univ., Gakuenkibanadainishi, Miyazaki, 889-2192

** 山佐木材(株) 〒893-1206 鹿児島県肝属郡高山町前田, Yamasa Mokuzai Co. Ltd., kimotsuki-gun, Kagoshima, 893-1206

*** 高知県森林局林業振興課 〒780-0850 高知市丸ノ内, Forest Bureau of Kochi Prefecture, Marunouchi, Kochi, 780-0850

種子町) および鹿児島県薩摩郡東郷町1地域, 合計7地域で生育した屋久島スギから, 各地域5本ずつ, 合計35本の丸太を採取した。これらのうち, 東郷町産のスギは, 畑地に植栽された実生苗のスギ人工造林木で, ほかの生育地とは生育環境が大きく異なる。また, 宮之浦産は天然性林木であり, あとの5地域産は実生苗の人工造林木であった。これらの林木を伐倒したのち, 根元から樹幹上方へ2m離れた位置で切断し, 得られた長さ2mの丸太を供試材とした。各林木の伐倒時の樹齢は, 口永良部産47年生, 春牧産40年生, 志戸子産48年生, 宮之浦産50年生, 西之表産30年生, 南種子産40年生, そして東郷町産25年生であった。

2・2 動的縦弾性係数の測定

上述の供試丸太の動的縦弾性係数を, 打撃法による丸太グレーディングマシン(鹿児島県工業技術センター・山佐木材(株)共同開発)を用いて, 測定した。なお, この測定は, 樹皮付きの生材丸太で行われた。

2・3 組織・構造的な材質指標の測定

動的縦弾性係数を測定したのち, 1本の丸太につき, 円板を2枚ずつ切り出して, 材質指標の測定に用いた。これらの円板の採取位置は, スギ林木の地上高ほぼ2m付近であった。円板のうち1枚目は, 容積密度数の測定に, 2枚目の円板を年輪幅, 晩材率, 細胞壁率, 仮道管

二次壁中層(S₂層)のマイクロフィブリル傾角および仮道管長さの測定に用いた。容積密度数の測定では, 髓から木部の最外層に至る放射方向に, 3~5年輪を含む木材小片を連続して取り出し, その容積を水置換法で求め, さらにその全乾重量との比から容積密度数を算出した。上述の2枚目の円板から, 放射方向の各部位で, すなわち3年輪目から6年輪ごとに, 連続して試料を採取した。年輪幅および晩材率の測定には, 万能投影器を用いて, これらの試料の木口面切片を100倍に拡大して行った。細胞壁率は, 画像解析ソフト(NIH image)によって, 供試材の9年輪目(未成熟材部)と21年輪目(成熟材部)で, 年輪内の早材部から晩材部にわたって測定し, その年輪内推移が明らかにされた。マイクロフィブリル傾角の測定では, 早材部および晩材部の仮道管について, 接線壁S₂層のマイクロフィブリル傾角をヨウ素法によって測定し, 各年輪で仮道管30本ずつの平均値を求めた。早材および晩材の仮道管長さは, 各年輪で50本ずつ測定し, その平均値が求められた。

3 結果と考察

3・1 材料性能にかかわる各種材質指標

屋久島スギ材の基本的性質を, 各生育地ごとに, Table Iに示し, 各指標ごとに, 屋久島スギ材の特徴について述べる。

Table I. Wood properties of Yakushima-sugi woods from seven sites.

Sites		R	LP	RW	MFA(degree)		TL (mm)		Ed
		(kg/m ³)	(%)	(mm)	(L)	(E)	(L)	(E)	(Gpa)
Kuchierabu (K)	Mean	393	25	3.6	15	20	2.9	2.9	6.7
	SD	33	5	0.3	3	2	0.2	0.1	1.2
	CV(%)	8	19	8	18	11	7	4	17
Harumaki (H)	Mean	403	27	4.5	17	19	2.9	2.9	7.5
	SD	22	4	0.8	1	2	0.2	0.2	0.5
	CV(%)	5	16	17	8	8	9	6	7
Shitoko (S)	Mean	369	24	4.1	18	19	2.9	2.8	6.6
	SD	27	6	0.9	2	2	0.2	0.2	1.1
	CV(%)	7	25	21	11	12	6	6	16
Miyanoura (M)	Mean	329	14	4	14	17	2.8	2.7	7.2
	SD	38	4	1	3	4	0.3	0.3	1.1
	CV(%)	12	32	25	19	22	11	10	16
Nishinoomote (N)	Mean	384	26	3	17	19	2.7	2.6	6.9
	SD	31	2	0.4	4	2	0.2	0.1	1.3
	CV(%)	8	8	15	22	11	7	6	19
Minamitane (MT)	Mean	390	23	3	15	17	2.5	2.8	8.5
	SD	15	5	0.4	4	3	0.3	0.2	2.2
	CV(%)	4	21	14	30	17	10	8	26
Six sites	Mean	378	23	3.7	16	18	2.8	2.8	7.2
	SD	36	6	0.8	3	3	0.3	0.2	1.4
	CV(%)	9	26	23	20	14	9	7	19
Togo (T)	Mean	360	18	7.2	18	24	2.7	2.6	4.5
	SD	48	7	3.2	3	3	0.1	0.2	1.2
	CV(%)	13	41	45	18	14	6	8	26

R: basic density, LP: latewood percentage, MFA: microfibril angle of S₂ layer in secondary wall in tracheid, L: latewood, E: earlywood, TL: tracheid length, RW: ring width, Ed: dynamic modulus of elasticity, SD: standard deviation, Mean: mean of wood properties of 5 logs, CV: coefficient of variance

3・1・1 動的縦弾性係数 樹幹丸太の平均的な剛性を表す指標といわれている動的縦弾性係数は、木材の静的破壊試験で得られる強さと高い相関関係にある。²⁾そこで、まず、各供試丸太の動的縦弾性係数について調べた。東郷町産を除く6生育地での平均値は、Table Iに示すように、7.2GPaであった。この数値は、同じ南九州地域の宮崎県産スギ丸太の動的縦弾性係数が、最小値4.3Gpa～平均値5.7Gpa～最大値7.9Gpa³⁾であったことを考慮すると、かなり大きな値である。とくに、南種子産材では、Fig. 1に示すように、11.5GPaを示す丸太があり、屋久島スギ材は比較的大きな動的縦弾性係数を持つことが確かめられた。ただし、ほかの6生育地に比べて、生育条件が大きく異なる東郷町産材では、ほかの屋久島スギ丸太に比べて、動的縦弾性係数が極めて小さかった。

3・1・2 晩材率 晩材率は、Table Iに示すように、生育地によって14%から27%までの範囲にあり、6生育地での平均値が23%であった。この値は、213年生の屋久スギの平均晩材率21.3%⁴⁾にほぼ近い。一般に、スギ材の晩材率、6.9～29.3%の範囲にあり、平均15.8%程度と言われている。⁵⁾つまり、屋久島スギ材は、晩材率が著しく高い材であることが明らかになった。また、Table Iに示すように、とくに春牧産材で晩材率が高かった。

この特異な晩材率を持つ屋久島スギ材を、さらに詳細に調べるために、細胞壁率を測定した。その一例として、それぞれに晩材率の異なる宮之浦産材と春牧産材の各細胞壁率を、Fig. 2に示す。すなわち、春牧産材のように晩材率が高いものでは、すでに年輪内の中央部付近から細胞壁率の上昇が認められた。なお、これら2地域産材の細胞壁率は、ともに年輪内の早材部で平均約30%、晩材部で70%～90%の範囲にあった。

3・1・3 容積密度数 屋久島スギ材の容積密度数は、Table Iに示すように、生育地によって329 kg/m³から

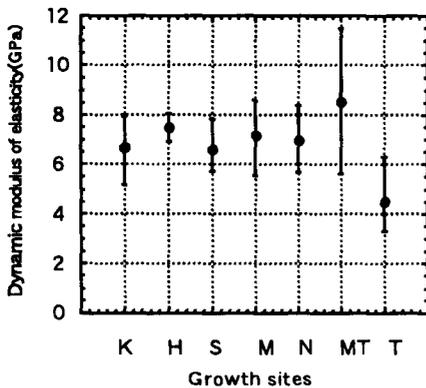


Fig. 1. Dynamic modulus of elasticity of Yakushima-sugi logs in various sites.

K : kuchierabu, H : harumaki, S : shitoko, M : miyanoura, N : nishinoomote, MT : minamitane, T : togo, ● : the mean of dynamic modulus of elasticity of the logs in each site,

Note : the bars indicate the maximum and the minimum of dynamic modulus of elasticity of logs in each site.

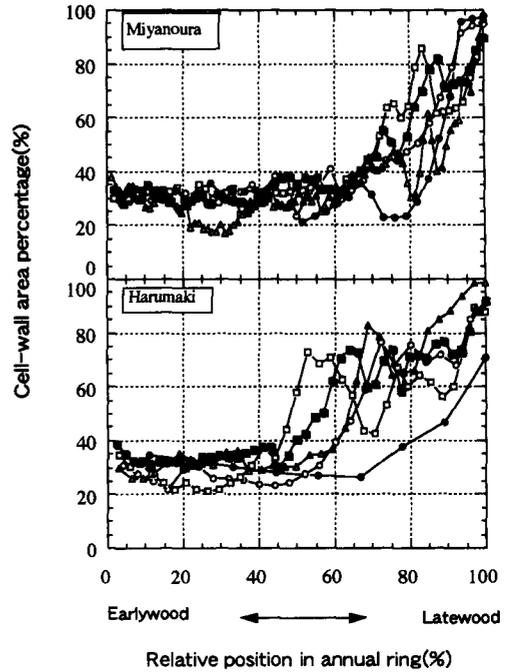


Fig. 2. Relationships between the cell-wall area percentage and the relative position within the 21st annual ring in five logs.

Note : symbols show five logs.

403kg/m³までの範囲にあり、平均値で375kg/m³を示した。九州の代表的なスギ12品種(ホンスギ、ヒゴメアサ、ヤブクグリ、アヤスギ、クモトオシ、ウラセバル、ヒノデ、タノアカ、アラカワ、モトエ、メアサ、ミスギ)の成熟材部での容積密度数が、272 kg/m³から346 kg/m³の範囲にあること⁶⁾を考え合わせると、屋久島スギ材の容積密度数は、代表的なスギ品種に比べて、大きいと考えられる。そこで、屋久島スギ材の容積密度数と晩材率との関係を、Fig. 3に示す。屋久島スギ材では、容積密度数と晩材率との間に相関関係($p < 0.01$)が認められる。すなわち、晩材率が大きくなると、容積密度数

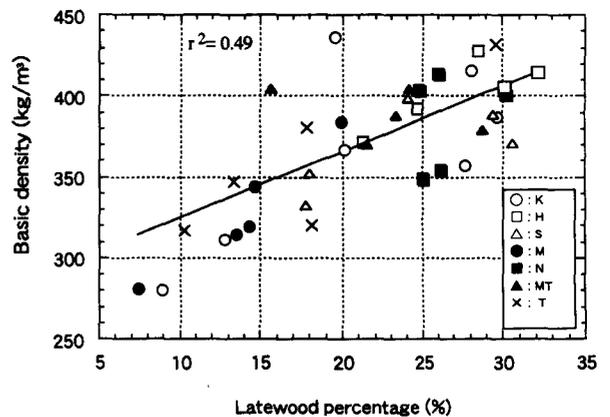


Fig. 3. Relationship between the basic density and the latewood percentage for logs from all sites.

Notes : Both basic density and latewood percentage are the means of those per rings in logs. K, H, S, M, N, MT and T are the same as Fig. 1.

も増大する。また、春牧産材では、晩材率が高いために容積密度数も大きく、その一方で宮之浦産材は、晩材率が低く容積密度数も小さかった。

3・1・4 晩材部の組織構造的な特徴 前述のように、屋久島スギ材では、晩材率が著しく高いという特徴があった。この要因を検討するために、晩材部の組織形態を詳細に観察した。その結果、Fig. 4 (A) に示すように、晩材部に偽年輪が数多く存在することが明らかになった。さらに、偽年輪を含む晩材部では、Fig. 4 (B) に示すように、細胞の横断面が丸く、細胞間隙が明瞭に認められる圧縮あて材状の仮道管が観察された。圧縮あて材状の仮道管の年輪内での出現は、おもに晩材部で多く認められた。Fig. 4 (B) に示すように、圧縮あて材状の仮道管の帯は正常な晩材部仮道管中に含まれることが多く、晩材部全体が圧縮あて材状の仮道管で占められることはなかった。

このことから、圧縮あて材状の仮道管の帯が形成される要因として、つぎのようなことが考えられる。つまり、この圧縮あて材状の仮道管の帯は、樹幹が傾斜したままの状態では、外力を継続して受けることによって生じるものではなく、強風などの外力によって一時的に樹幹が傾斜し、再び元に戻るような状況のもとで形成されるのではなかろうか。

そこで、この圧縮あて材状仮道管の出現割合を、各産地間で調べた。その結果、屋久島スギ材には、いくつかの生育地で、圧縮あて材状の仮道管の帯を含む年輪が数多く存在することがわかった。すなわち、晩材率が高い春牧産材でその出現頻度が高く、晩材率が低い宮之浦産材や東郷町産材では認められなかった。

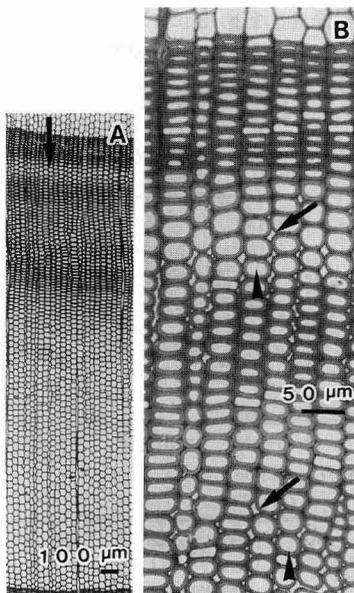


Fig. 4. Transverse sections of the mature wood in a log from Harumaki.

Note : In Fig. 4 (A), the arrow indicates the false ring. In Fig. 4 (B), rounded tracheids (arrow head) with intercellular spaces (arrow) are observed.

3・1・5 二次壁中層 (S₂層) ミクロフィブリル傾角 S₂層ミクロフィブリル傾角と形成層齢との関係を、各生育地別、そして早材部と晩材部ごとに、Fig. 5 に示す。とくに、南種子産材では、早材、晩材ともにS₂層ミクロフィブリル傾角が小さかった。東郷町産材では、早材仮道管のS₂層ミクロフィブリル傾角が大きな値を示した。このことは、前述のように、東郷町産材が他の生育地とは生育条件が大きく異なり、肥大成長速さが極端に促進された結果であることが想像できる。また、Fig. 5 に示すように、早材仮道管のS₂層ミクロフィブリル傾角は、晩材仮道管のそれよりも、生育地間の違いが顕著であった。

いくつかの産地の屋久島スギ材の晩材部には、前述のFig. 4 (B) に示すように、圧縮あて材状の仮道管の帯が多く含まれていた。また、Fig. 5 に示すように、圧縮あて材状の仮道管の帯を含む年輪が最も多く観察された春牧産材でも、やや大きなミクロフィブリル傾角の値を示すが、圧縮あて材に良く見られる45度付近の大きな角度は認められなかった。それゆえ、この圧縮あて材状仮道管の帯は、いわゆる圧縮あて材部とは言えない。

3・1・6 仮道管長さ 仮道管の長さとは形成層齢との関係を、早材部と晩材部に分けて、Fig. 6 に示す。仮道管長さは、早材と晩材ともに、形成層齢が高くなると増大し、ほぼ15年を経過すると一定になる。そのとき、成熟材部での仮道管長さは、早材部と晩材部の両方で、約3.5mmを示した。いわゆる屋久島スギ材の仮道管長さは形成層齢とともに伸長し、約3.5mmで一定になるとされ⁴⁾、この研究の結果と一致する。普通、スギの晩材部仮道管長さは、成熟材部で1.40～3.55mmの範囲にあり、平均

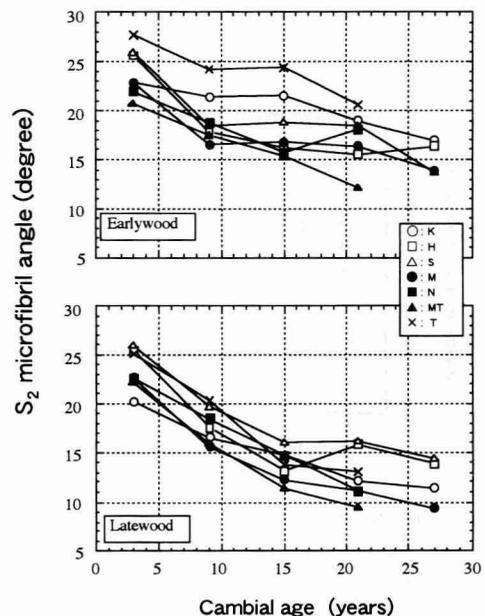


Fig. 5. Relationships between S₂ microfibril angle and cambial age of trees from all sites.

Note : S₂ microfibril angle of each site is the mean of those per logs. K, H, S, M, N, MT and T are the same as Fig. 1.

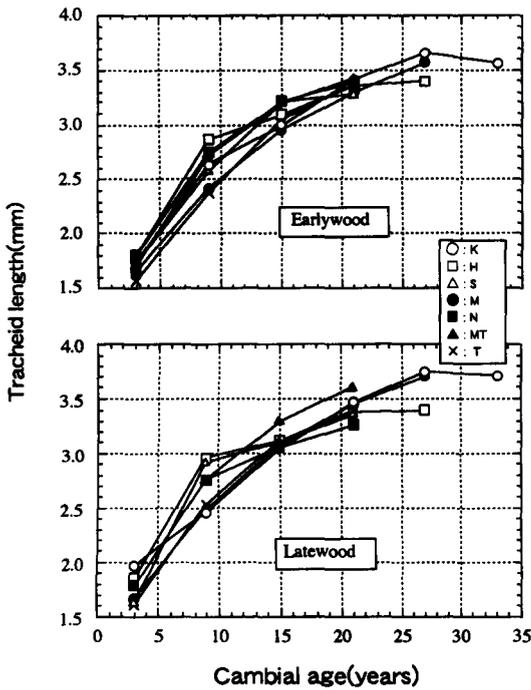


Fig. 6. Relationships between the tracheid length and the cambial age of the logs from all sites.
 Note : tracheid length of each site is the mean of those per logs from K, H, S, M, N, MT and T are the same as Fig. 1.

で2.37mmである。⁵⁾ 屋久島スギ材の成熟材部の晩材仮道管長さは、平均値で3.27mmであり、屋久スギ材についての既往の研究でも指摘されているように、⁴⁾ 屋久島スギ材は、通常のスギ材に比べて、極めて長い仮道管を持つと考えられる。また、Table IおよびFig. 6に示すように、仮道管の長さは、早材と晩材との間、そして産地間でも、その変動が極めて小さかった。

3・2 動的縦弾性係数への組織・構造的指標の影響

今回の屋久島スギ材の実験結果では、動的縦弾性係数に大きな影響を与える材質指標として、容積密度数 ($p < 0.05$)、および S_2 層マイクロフィブリル傾角 ($p < 0.01$) があげられた。動的縦弾性係数と容積密度数との関係を Fig. 7に、動的縦弾性係数と S_2 層マイクロフィブリル傾角との関係を Fig. 8に、それぞれ生育地ごとに示した。動的縦弾性係数への S_2 層マイクロフィブリル傾角の影響は、晩材仮道管よりも早材仮道管で大きかった。これに関連して、3・1・5項で述べたように、各生育地の S_2 層マイクロフィブリル傾角の値の特徴が、晩材仮道管に比べて、早材仮道管でより顕著に表れた。なお、屋久島スギ材では、動的縦弾性係数と仮道管長さとの間には、相関関係が見い出せなかった。

つぎに、動的縦弾性係数への上述の材質指標の影響を各産地ごとに検討を行った。春牧産材では、Table Iに示すように、容積密度数が 403kg/m^3 と極めて大きい、動的縦弾性係数は約 7.5GPa と、屋久島産スギ材の平均値よりもわずかに大きな値であった。これは、春牧産材の S_2 層マイクロフィブリル傾角が、早材部仮道管で 19 度、

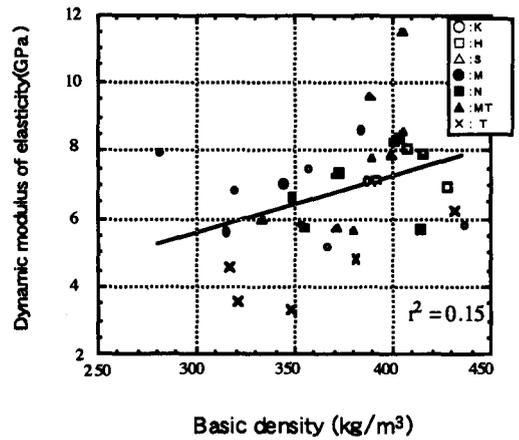


Fig. 7. Relationship between the dynamic modulus of elasticity and the basic density for the logs from all sites.
 Note : K, H, S, M, N, MT and T are the same as Fig. 1.

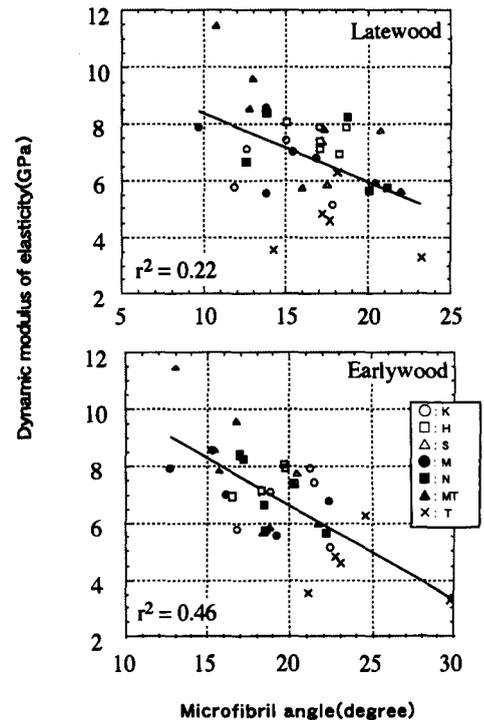


Fig. 8. Relationship between the dynamic modulus of elasticity and the microfibril angle of S_2 layer in secondary wall of earlywood tracheid for logs from all sites.
 Note : K, H, S, M, N, MT and T are the same as Fig. 1.

晩材部仮道管で 17 度と比較的大きな値を示すことが原因ではなかろうか。他方、南種子産材では、Fig. 7とFig. 8に示すように、動的縦弾性係数が 11GPa を超える供試材がある。これは、Fig. 7からわかるように、容積密度数が約 400kg/m^3 と大きいことに加えて、Fig. 8に示すように、晩材部および早材部の S_2 層マイクロフィブリル傾角が、それぞれ約 11 度と 13 度と小さかったためと考えられる。また、東郷町産材では、Table Iに示す

ように、容積密度数が 360kg/m^3 であるものの、 S_2 層マイクロフィブリル傾角が、早材部仮道管で 24 度、晩材部仮道管で 18 度と大きいために、動的縦弾性係数の値が小さくなっている。さらに、宮之浦産材は、Table I に示すように、容積密度数が 329kg/m^3 と著しく小さいが、 S_2 層マイクロフィブリル傾角が早材部仮道管で 17 度、晩材部仮道管で 14 度と小さいので、動的縦弾性係数は比較的大きな値を示している。前節で述べたように、屋久島スギ材の特徴として、全般的に容積密度数が大きな値を示した。しかし、宮之浦産材にもみられるように、容積密度数は小さくとも、 S_2 層マイクロフィブリル傾角が比較的小さな供試材では、大きな動的縦弾性係数の値を示した。このように、屋久島スギ材では、容積密度数が大きいか、もしくはマイクロフィブリル傾角が小さいとき、または両者を兼ね備えたときに、動的縦弾性係数が増大した。

4 結 論

この研究では、屋久島スギ材の材料性能を明らかにするために、その基本的材質、とくに組織・構造的な材質を調べた。すなわち、これらの組織・構造的な材質指標が、屋久島スギ材の力学的性能にどのような影響を与えるか究明した。

この研究で得られたおもな結果を、つぎに示す。

- 1) 屋久島スギ材の動的縦弾性係数は、一般的な南九州産スギ材に比べて大きく、南種子産材では 11.5GPa を示す例もあった。
- 2) 屋久島スギ材は、すでにその材質が調査された他のスギ品種に比べて、長い仮道管を持ち、晩材率が高く、しかも容積密度数の値も、他の九州産の代表的なスギ品

種に比べて、大きかった。容積密度数と晩材率との間には、正の相関関係が認められた。さらに、晩材率の大きな試験材では、偽年輪が多く存在し、晩材中に圧縮あて材状の仮道管の帯が含まれた。このことが、屋久島スギ材の晩材率および容積密度数を増大させる要因と推察された。

3) 動的縦弾性係数との間に密接な相関関係を持つ指標として、容積密度数と S_2 層マイクロフィブリル傾角があげられた。動的縦弾性係数へのこれら 2 つの指標の関与の仕方には、生育地によって特徴があり、容積密度数が大きいか、もしくはマイクロフィブリル傾角が小さいとき、または両者を兼ね備えたときに屋久島スギ材の動的縦弾性係数が増大した。

参 考 文 献

- 1) 熊本流域林業活性化センター、「屋久島産スギ材生産加工体制整備促進事業」調査報告書, 9 (1999).
- 2) 大熊幹章, 有馬孝礼, 川井秀一, 安藤直人, 神谷文夫, 占沢富志雄, “木材工学”, p.101 (1991) 文永堂出版.
- 3) 宮崎県木材協同組合連合会, 平成 10 年度 県産スギ材新需要開拓事業 スギ平角材強度試験結果報告書, 1 (1999).
- 4) S. Fujita, S. Morita, J. Tsutsumi and S. Ohta, “Recent advances in wood anatomy”, p.26 (1996) New Zealand Forest Research Institute Limited.
- 5) 鈴木滋彦, “木材の科学と利用技術 II 5. スギ”, p.68 (1991) 日本木材学会.
- 6) 小田一幸, 渡部演一, 堤 壽一, 九州大学演習林報告, **62**, 115 (1988).