

未成熟材の力学的特性に関する研究(第1報) : スギ 樹幹内の未成熟材の動的ヤング率とフィブリル傾角

太田, 貞明
九州大学農学部

渡辺, 治人
九州大学農学部

松本, 昂
九州大学農学部

堤, 寿一
九州大学農学部

<https://doi.org/10.15017/15888>

出版情報 : 演習林集報. 22, pp.105-116, 1968-01-31. 九州大学農学部附属演習林
バージョン :
権利関係 :

未成熟材の力学的特性に関する研究 (第1報)

スギ樹幹内の未成熟材の動的ヤング率とフィブリル傾角

太田 貞明・渡辺 治人
松本 勲・堤 寿一

Sadaaki OHTA, Haruto WATANABE, Tsutomu MATSUMOTO
and Juichi TSUTSUMI

Studies on Mechanical Properties of Juvenile Wood. I.

Fibril Angle and Dynamic Modulus of Elasticity of
Juvenile Wood in Stem of SUGI-Trees
(*Cryptomeria japonica* D. DON)

1. 緒言

“未成熟材に関する研究”の第1報¹⁾, 第2報²⁾, においてスギ樹幹内には, 内心部に未成熟材部があり, その外周に成熟材部があつて, それぞれ異なる特性を有するので, 同一母集団としてとりあつかうことが無理であることが結論づけられている。

本論文においては各種環境条件下に生育したスギ樹幹内にも, 特性の異なる未成熟材部と成熟材部とが存在することを確認するとともに, 特に未成熟材部の力学的特性について検討した結果を報告する。

木材の力学的特性に関する木材構造上の基本因子の1つとして, 仮道管二次膜中層のフィブリル傾角があることが推論されている¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。未成熟材部の力学的性質とフィブリル傾角との関係をさらに明らかにするためには, 早材, 晩材別にその特性を知ることが必要であると考えられる。そこで, 振動リード法によりそれぞれ生育条件の異なるスギについて, 樹幹の放射方向における各年輪ごとに早材, 晩材別の動的ヤング率の変動をしらべ, それとともにそれぞれ対応する仮道管二次膜中層のフィブリル傾角を測定して, 力学的性質とフィブリル傾角との関連を検討した。

2. 実験材料ならびに実験方法

試験材としては,

1. 愛媛県松山産の肥培スギ (12年生) ……試験木 A
2. 岩手県小岩井産の灌水による肥培スギ (35年生) ……試験木 B
3. 福岡県粕屋産の肥培しない普通スギ (40年生) ……試験木 C

をそれぞれ1本ずつ採り, 地上高2.0 mの部位から厚さ30 cmの円盤を採取し, これからさらに髄を通過して外皮までの柾目板, すなわち接線方向(厚さ)5.0 mm, 繊維方向(長さ)40.0 mmのブロックを作成した。

(1) 動的ヤング率測定用試験片

上記ブロックからミクロトームにより各年輪ごとに早材, 晩材別に生材状態で, 幅(接

線方向) 5.0 mm, 厚さ (半径方向) 0.5 mm, 長さ (繊維方向) 35.0 mm 程度の比較的小さい薄片を木理に平行に作った。作成された試験片は, 温度 20°C, 湿度 65% の恒温恒湿室で約 10 日間調整したのち, 試験片の寸法を, 幅は万能投影器の倍率 10 倍で 0.05 mm まで, 厚さは 1/100 mm 精度の厚みゲージで 0.01 mm まで, 長さは 1/20 mm 精度の読取顕微鏡で 0.05 mm まで測定した。このようにして測定した振動リード測定用試験片の形状は, 5.0×0.5×35.0 mm に統一し, 厚さむらが 2.0% 以内の試験片の一端 5.0 mm をクランプして有効スパン長は 30.0 mm となるようにした。

振動リード法⁶⁾⁷⁾による動的ヤング率の測定としてはマグネチックスピーカの振動部を改造した励振器に試験片をクランプし, 可変低周波発振器によってこれを励振させ, 試験片他端の振幅を読取顕微鏡内のマイクロメーターで読みとり, 最大振幅時, すなわち共振時の周波数をカウンターによって 0.1 c/s まで測定した。共振振動数と試験片の寸法とから動的ヤング率を算出した。

測定に際し, 温度, 湿度の変化をさけるために, 前記恒温恒湿室において測定し, さらに試験片の取りあつかいにはゴム手袋を使用し, 含水率の変化を極力防止し, 試験片を励振器にクランプしたのち, 2~3 分後に測定を行なった。

ところで, 振動リード法は一般にその精度の若干低い点が短所とされている。特に, 木材薄片を対象とする場合には, 試験片が比較的小さいために測定時の温度, 湿度の変動, 試験片の厚さむら, 目切れ, 裏割れ, ならびにクランプ部などの影響が重なり測定結果にかなりのばらつきを生じると考えられる。しかし, この実験に供試された各試験片は恒温恒湿室で十分調整されたのちに測定を行なったから平衡にたっしているものとみなされる。試験片形状から生じる誤差は, 厚さむらが最も大きいと考えられるが, 2.0% 以内のものだけについて測定を行なったから全体として 6.0% 以内の誤差でおさえられた。

クランプ部の影響については, 試験片の両端部を交互にとりかえてクランプして測定した結果, 1% 程度の誤差でおさえられた。したがって, 装置固有の特性から生じる精度の低下は別として, 満足できる精度を得た。なお, 励振器それ自体の共振振動数は, 試験片の共振振動数とはるかに異なるので誤差は生じない。

(2) 比重測定

比重は髓から外方に向って, 各年輪の早材, 晩材別に動的ヤング率測定用に作った各試験片について求めた気乾比重である (含水率 12%)。

(3) 仮道管二次膜中層のフィブリル傾角

厚さ 20~30 μ の接線断面切片を 2 倍に稀釈した SCHULZE 氏液で処理し, ヨード・ヨードカリ水溶液を用いて細胞膜内のフィブリル間隙にヨードの針状結晶を析出させ⁵⁾, これを顕微鏡写真にとり, 万能投影器の回転ステージを用いてヨードの針状結晶の走向と仮道管軸のなす角度を測定し, これをフィブリル傾角とした。各年輪とも早材部, 晩材部のフィブリル傾角はそれぞれ 30 個の細胞について測定したものの平均値である。

(4) ポアソン比の測定

試験木, C の地上高 2 m 附近の円盤から, 2.5×2.5×5.0 cm の 2 方桁縦圧縮試験片を髓附近の木部 (4 年~7 年), 中間部 (14 年~20 年), 樹皮附近 (23 年~30 年) の 3 部位からそれぞれ 2 箇所ずつ作成し, これをポアソン比測定用試験片とした。試験片を恒温恒湿室で十分に調整したのち, 試験片の両接線面に十字型のストレインゲージをはり, 荷重

はオルゼン型万能試験器を能力 5 ton で使用し、縦方向、および横方向のひずみは 2 台のストレインメーターで同時測定した。

また、フィブリル傾角は、2 箇所ずつ試験片を作成するとき、同じ部位で採取したブロックから求めたものである。

3. 実験結果ならびに考察

1) 動的ヤング率

試験木, A, B, および C について早材部, 晩材部別に動的ヤング率と髄から外方への変動の様子を Fig. 1 に示す。

Fig. 1. Effect of position at a given height in tree trunk on dynamic modulus of elasticity

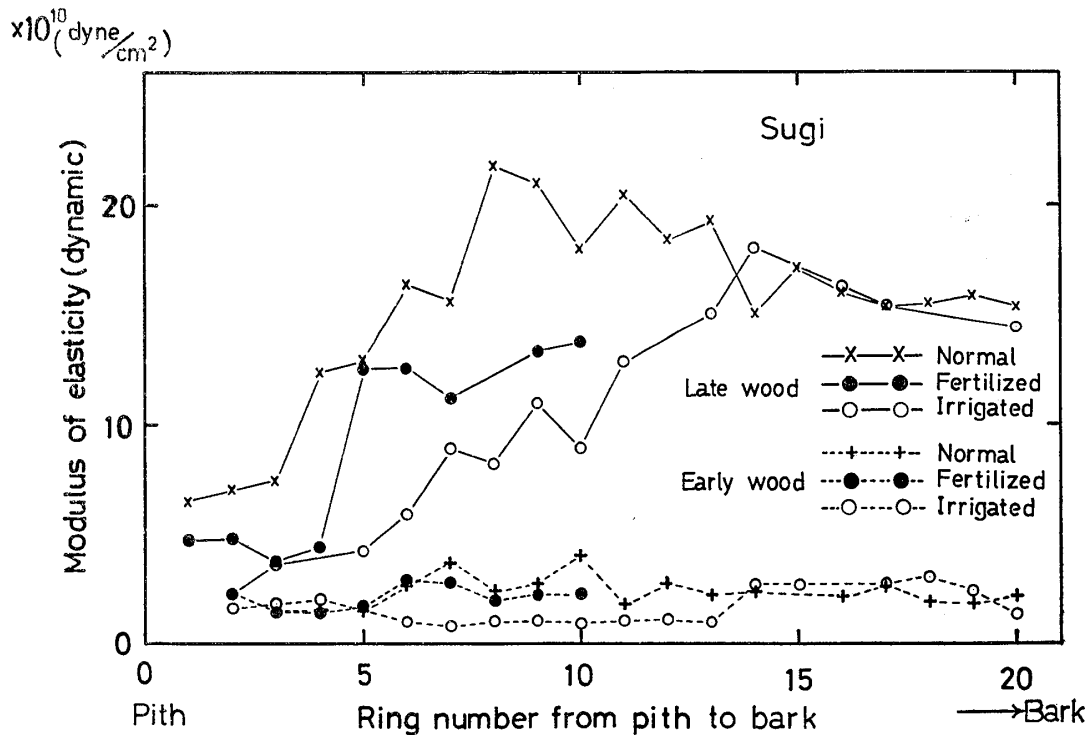


Fig. 1 にみられるように、いずれのスギにおいても晩材部では髄に接する木部で動的ヤング率が最低で髄から外方へ離れるにともなって速やかに大きくなり、試験木, Cではおよそ 10 年輪くらいから、Bではおよそ 13~14 年輪くらいからやや安定する傾向がみられる。試験木, Aでは 10 年輪ではまだ安定するにいたっていない。

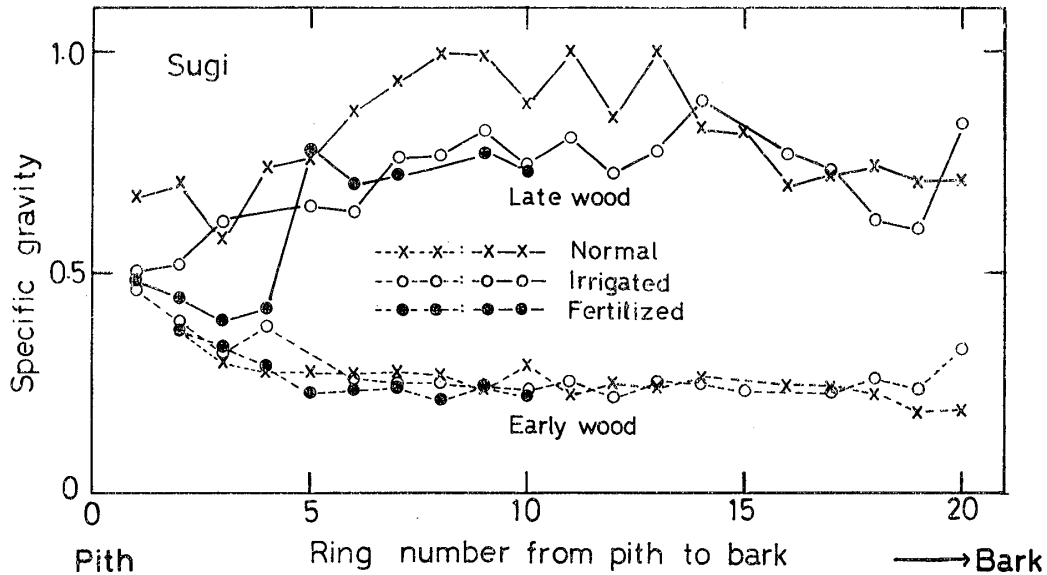
早材部における動的ヤング率は、いずれのスギでも髄から外方へ向っての変動は晩材部においてみられた程大きくなくほぼ一定である。

2) 比重

木材の実質量を示す指標としての比重と髄からの年輪数との関係を早材, 晩材別に Fig. 2 に示す。

Fig. 2 にみられるように、晩材部で髄に接する木部の比重は、それにつづく 2, 3 年輪のものより幾分大きい、やはり不安定、しかも一般に小で髄から外方へ離れるにとも

Fig. 2. Effect of position at a given height in tree trunk on specific gravity



なって速やかに大きくなり、およそ10年輪くらいから変動が少なくなる傾向がみられる。

早材部の比重は髄に接した木部で大きい比重を示し、しかも早晚材の比重が非常に接近しているが髄から外方へ離れるにともなって速やかに大きくなり、およそ5年輪くらいから変動が少なくなるとともに一定化の傾向がある。さらに、全体としては早材部の場合には、髄から外方へ向っての比重の変動は晩材部の変動にくらべて少ない。

3) 比重と動的ヤング率

木材の比重とヤング率は正の相関にあることが多くの研究によってみとめられている。しかしながら、従来この関係については特性を異にする未成熟材部と成熟材部を同一集団であるとして取扱われていたために当然ばらつきがかなり大きい⁶⁾。そこで、特性を異にする未成熟材部と成熟材部を区別して比重とヤング率の関係を求めた場合には、両者を同一集団として求めた場合よりも、はるかにばらつきが小さくなり、成熟材部では正の相関が明確に存在するが、未成熟材部では必ずしも正の相関にあるとはいえない結果をえている¹⁾²⁾。

そこで今回実験に用いた3つのスギについても未成熟材部と成熟材部とは異なった集団であることが認められたので、両材部を区別し、さらに早材部、晩材部別に動的ヤング率と比重の関係を Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5 に示す。

Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5 によると、晩材部については未成熟材部も成熟材部もともに比重が大きくなるにともなって直線的にヤング率も大きくなり従来からいわれているように正の相関関係にあり、両者を同一集団と考えた場合より変動は少ない。しかしながら、Fig. 6 に示すように、晩材部については同一比重で比較すると比重が極端に大きくならない範囲においては未成熟材部の動的ヤング率は成熟材部の動的ヤング率よりも低い値をとる。このように、晩材部においては未成熟材部も成熟材部もともに比重と力学的性質は高い相関にあるといえる。

他方、早材部においては成熟材部では正の相関にあるが未成熟材部では必ずしも従来からいわれているような正の相関はみられず、逆に負の相関さえみられる。このことは、渡

Fig. 3. Effect of specific gravity on dynamic modulus of elasticity

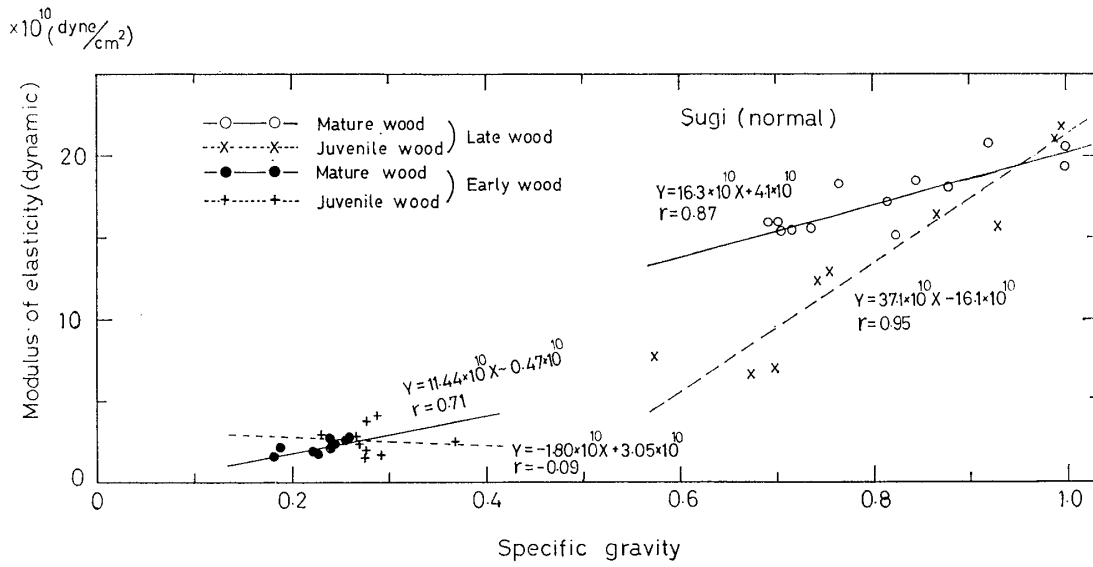


Fig. 4. Effect of specific gravity on dynamic modulus of elasticity (Juvenile wood)

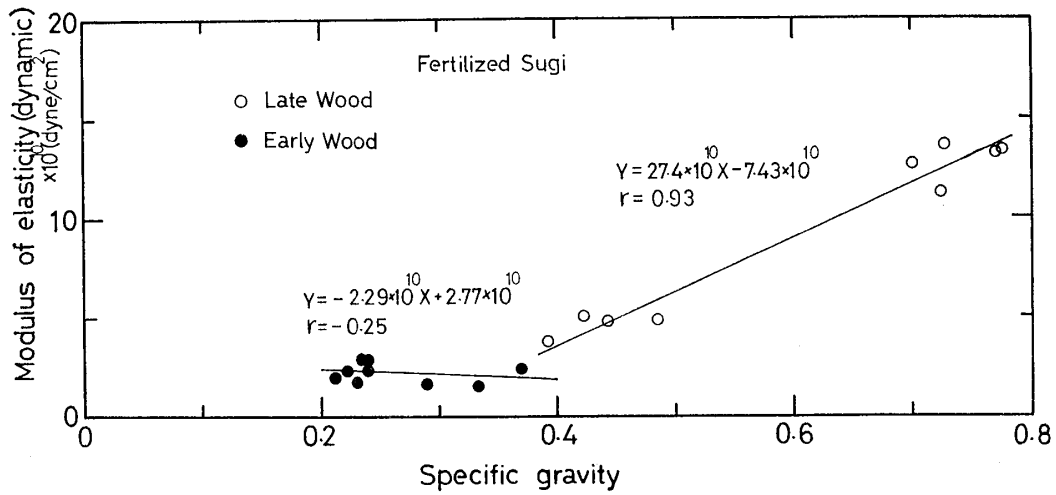


Fig. 5. Effect of specific gravity on dynamic modulus of elasticity (Juvenile wood)

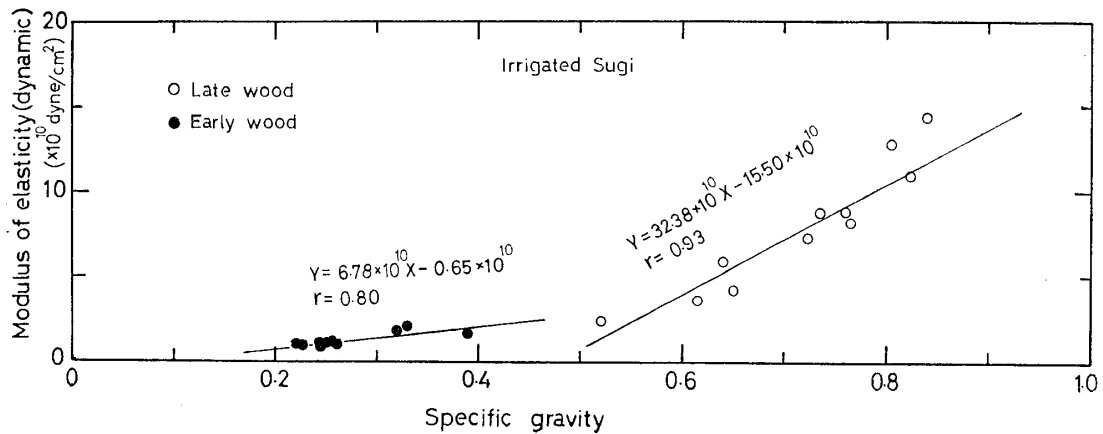
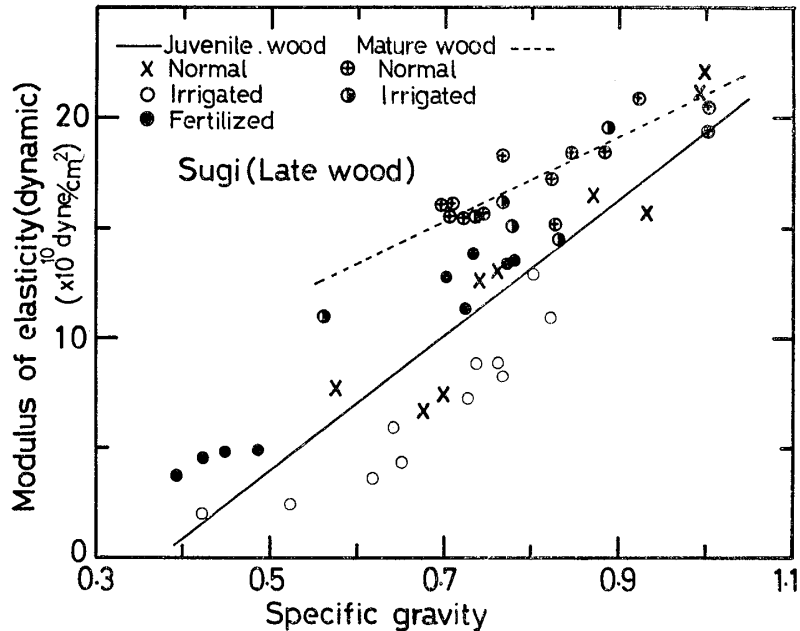


Fig. 6. Effect of specific gravity on dynamic modulus of elasticity



辺等¹⁾²⁾の報告にみられるように成熟材部では早材，晩材部がともに正の相関にあるので，早材，晩材を含んだ試験片においても正の相関がみられるが，未成熟材部では，材積的に早材部の占める率が大きくなり，したがって早材部の影響に大きく左右されて全体として従来の関係がみだされる結果になると考えられる。

未成熟材部の早材部において従来の関係がみだされる要因についてはさらに検討する必要がある。

4) 動的比ヤング率

晩材部においては未成熟材部も成熟材部もともに，比重と動的ヤング率との間には正の相関関係にあることがみとめられた。そこで，比重の影響をのぞいた“動的比ヤング率”を用い，これを力学的品質指標として髄からの年輪数との関係についてしらべた。

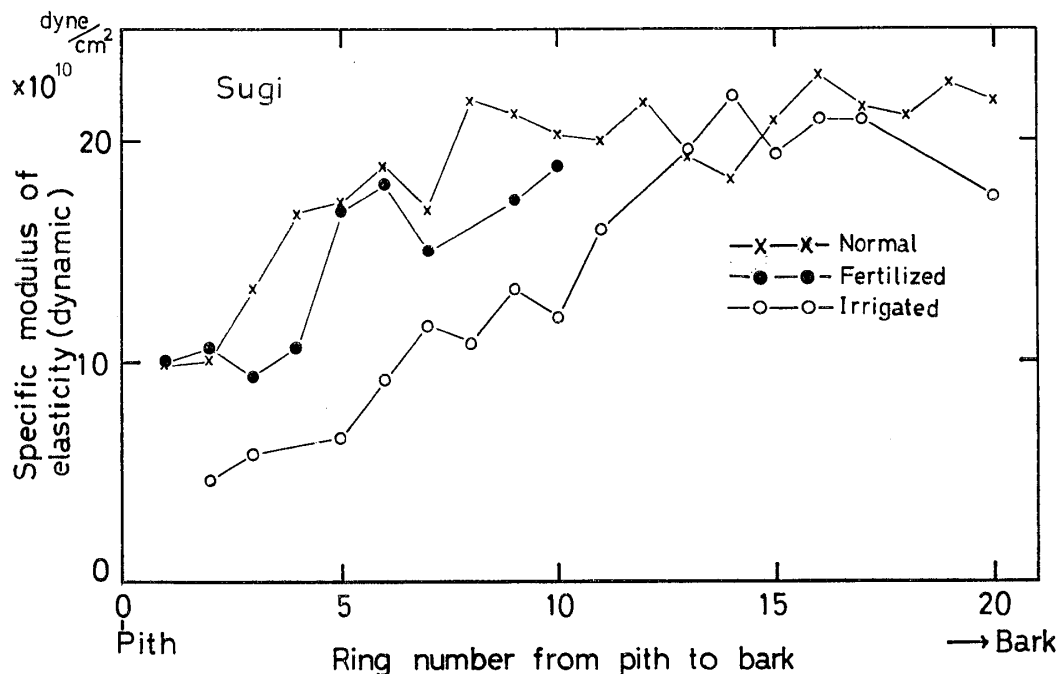
Fig. 7 に示されるように，髄に接する木部では，動的比ヤング率は最小で外方へ年輪を重ねるにともなって次第に大きくなり，およそ8~13年輪くらいで多少とも一定になる傾向がみられる。Fig. 1 と Fig. 7 とを比較すると，前者では比重の影響をうけて，かなり大きなばらつきを示しているのに後者では比重の影響がのぞかれたものであるだけにばらつきが小さくなっている。したがって，動的比ヤング率を未成熟材部と成熟材部の力学的判定因子として用いることは有効であると考えられる。

このように，比重の影響をのぞいても，やはり髄附近から外方へ向って動的比ヤング率が次第に変化向上していき，やがて安定することは比重の他に力学的性質に影響している因子があると考えられる。

5) 仮道管2次膜中層のフィブリル傾角と力学的性質

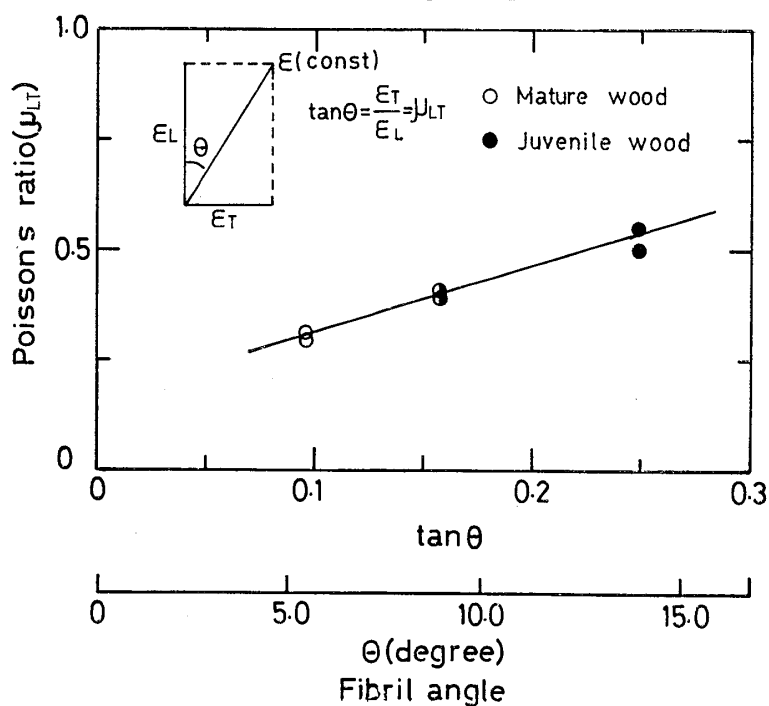
木材の力学的性質は細胞膜のセルロース骨格の配列を示す仮道管2次膜中層のフィブリル傾角の大小に影響をうけると推論されている¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。フィブリル傾角が力学的性質に影響をおよぼしていることを確認するために次の実験を行なった。

Fig. 7. Effect of position at a given height in tree trunk on specific dynamic modulus of elasticity (Late wood)



木材に圧縮あるいは引張力が作用すると、木材は縦方向の変形と横方向の変形が生じる。この縦方向の変形 (ϵ_L) と横方向の変形 (ϵ_T) の比はフィブリル (この場合、マイクロフィブリルと考えても良い) 1本1本の質が一定であり、半径方向における傾角は接線方向の傾角と同じであると仮定して、 $\tan \theta$ とポアソン比 (μ_{LT}) との関係を求めた。この結果を Fig. 8-1 に示す。Fig. 8-1のごとく、ポアソン比 (μ_{LT}) は $\tan \theta$ と測定範囲で

Fig. 8-1. Effect of fibril angle on poisson's ratio



は直線的関係にあり、フィブリル傾角との依存性がみとめられる。

ここに、ポアソン比を測定したのは上述のようなブロック試験であるため次の仮定を前提とした。

1. 木材の縦圧縮試験における外力の方向は完全に繊維軸方向である。したがって材軸と繊維方向との間のねじれはないものとする。
2. 細胞膜中2次膜中層のフィブリル傾角とマイクロフィブリル傾角とは統計的に一致するとする。

このようにして求めたポアソン比 (μ_{LT}) とフィブリル傾角との関係から傾角が大きい未成熟材部のポアソン比 (μ_{LT}) は傾角が小さい成熟材部のポアソン比 (μ_{LT}) より大きい。

このようにして求めたポアソン比 (μ_{LT}) とフィブリル傾角 (θ) との関係について考える場合、山井⁴⁾ のつるまきばねについての理論式から次の関係が導かれる。

$$\Delta R/R = (\Delta h/h)(1/\cot^2\alpha)$$

したがって、

$$\mu_{spring} = \frac{\Delta R/R}{\Delta h/h} = \frac{1}{\cot^2\alpha} = \tan^2\alpha = \cot^2\theta$$

但し

R : 最初の円筒つるまきばねの半径

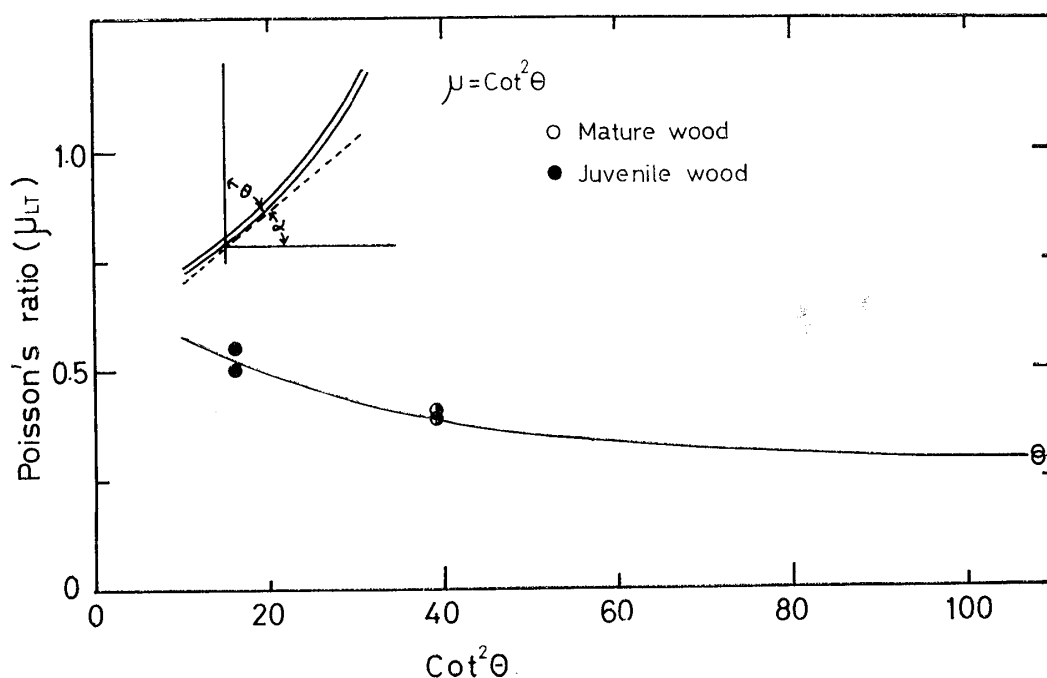
ΔR : 半径の変化量

h : つるまきばねの高さ

Δh : つるまきばねの高さの変化

この式にもとづいて、 μ_{LT} と $\cot^2\theta$ との関係を求めると、Fig. 8-2 を得る。図に示すよう

Fig. 8-2. Effect of fibril angle on poisson's ratio (μ_{spring})



にこの測定範囲では、Fig. 8-1 とほぼ同様の結果を得るが μ_{spring} の関係式とは逆の傾向である。しかしながら、この式は1本のつるまきばねのポアソン比を示す式であり、これをもって直接木材の力学的性質と対応させることは当然問題が多い。

6) フィブリル傾角と動的比ヤング率

木材の力学的性質にフィブリル傾角が影響していることは、ポアソン比とフィブリル傾角との関係から認められた。そこで、力学的品質指標としての動的比ヤング率とフィブリル傾角との関係について Fig. 9 に示す。

Fig. 9. Effect of fibril angle on specific modulus of elasticity in dynamic (Late wood)

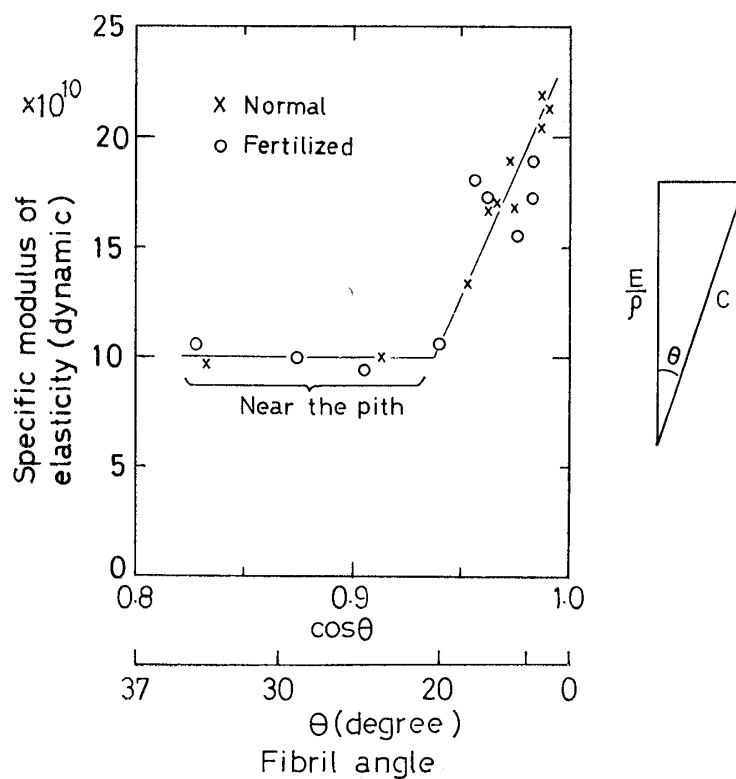


Fig. 9 によると、髓に接した木部においてはフィブリル傾角が小さくなくても動的比ヤング率はほとんど変化しない。そして、フィブリル傾角がおよそ20度より小さくなると動的比ヤング率とは高い正の相関関係にあることが認められる。

このことは、C. L. LEE⁸⁾ の報告にみられるように、結晶化度も髓から外方へ向って次第に変化向上していき、およそ髓から15年輪くらいからはほぼ安定していることから考えると、未成熟材部では構成しているフィブリル（この場合マイクロフィブリルと考えても良い）1本1本の質が力学的性質に大きく影響しているのではないかと考えられる。

なお、山井⁴⁾ のフィブリル傾角と対応させたつるまきばね模型の力学的考察によると

$$E = \frac{P}{(\Delta h - h)2\pi R d}$$

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{32PR^2}{d^4\pi \cdot \cos \theta} \left\{ \frac{2 \cos^2 \theta}{E_s} + \frac{\sin^2 \theta}{G_s} \right\}$$

但し,

P : 荷重

d : つるまきばね線の直径

E_s : つるまきばね線のヤング率

G_s : つるまきばね線の剪断弾性率

である。

この関係から E あるいは E/ρ は当然 θ の関数として示されるはずである。このことについての実験結果との関係は別に報告する。

上述のごとく、動的比ヤング率とフィブリル傾角が正の相関にあることを考慮してフィブリル傾角で動的比ヤング率を除して、フィブリル傾角の影響をのぞいた指標 $\left(\frac{E}{\rho \cos \theta}\right)$ をフィブリル 1 本 1 本の質を示す指標と考え、 $\left(\frac{E}{\rho \cos \theta}\right)$ と髄からの年輪数との関係を Fig. 10 に示す。

Fig. 10. Effect of position at a given height in tree trunk on $\frac{E/\rho}{\cos \theta}$ and fibril angle

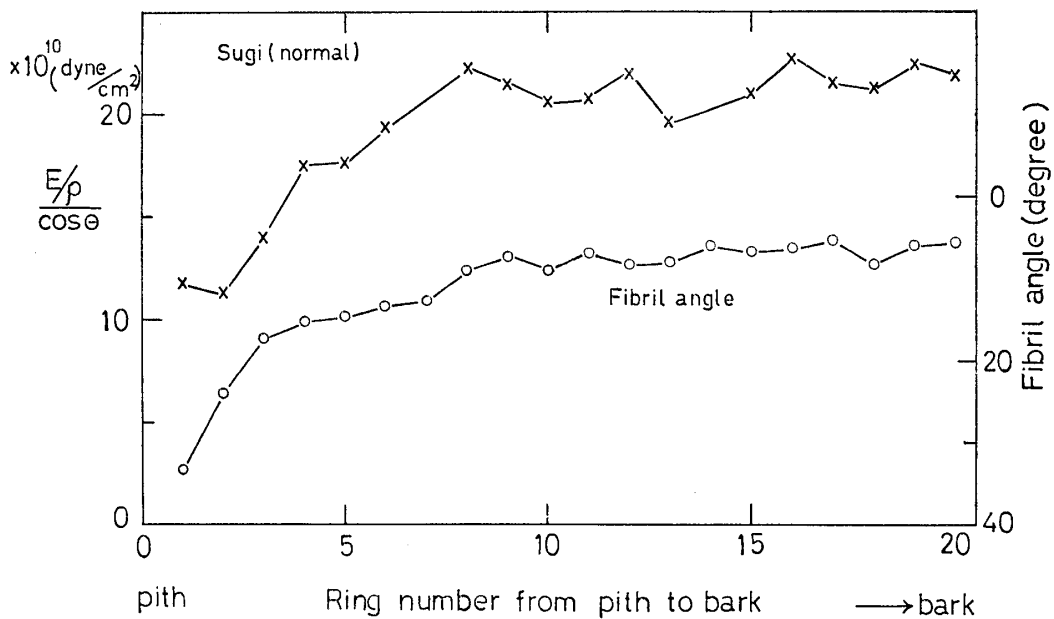


Fig. 10 によるとフィブリルの質を示す指標も髄からほぼ 10 年輪くらいまで変化向上していき、のちほぼ安定した質を示すようになると考えられる。この結果は、C. L. LEE⁸⁾ が Western hemlock におけるセルロースの結晶度についての報告と一致する。Fig. 9 のように、フィブリル傾角が小さくとも髄附近の木部においては、力学的な品質が向上しないのは、1 本 1 本のフィブリルの質が非常にわるいためであると考えられる。

4. 結 論

“未成熟材に関する研究”の第 1 報、第 2 報において、スギ樹幹の 1 断面における木部は

髓から10~15年輪目位を境にして内側に未成熟材部、外側に成熟材部が存在することがみとめられている。

今回の実験では、生育条件の異なる3つのスギ——(A)肥培スギ、(B)灌水肥培スギ、(C)普通生長スギ——の地上2.0mの横断面について、動的比ヤング率、仮道管2次膜中層のフィブリル傾角をはじめ、いくつかの因子が力学的特性に及ぼす影響を検討し次の様な知見を得た。

(1) 肥培スギ、灌水スギ、普通スギの樹幹の各横断面において、内心部に力学的特性をことにする未成熟材部が存在することを確認した。

(2) 動的ヤング率と比重との関係においては、晩材部および成熟材部の早材部については、正の相関関係が認められるが、内心部の未成熟材部の早材部は正の相関がみだされることがみとめられる。

(3) 仮道管2次膜中層のフィブリル傾角は、晩材部については動的比ヤング率と正の相関にあり、力学的性質に影響をおよぼす因子の1つであると考えられる。

(4) 力学的性質には、フィブリル傾角、比重の影響の他に、1本1本のフィブリル(ミクロフィブリルと考えても良い)の質も髓から外方へ向って次第に変化向上していくことが予想される。

文 献

- 1) 渡辺治人・堤 寿一・小島敬吾：木材誌，9，225 (1963).
- 2) 渡辺治人・松本 勲・堤 寿一・太田貞明：木材誌，10，125 (1964).
- 3) WELLWOOD, R. W.: Pulp and Paper Magazine of Canada, 63, T-61 (1962).
- 4) 山井良三郎：九大・農・学芸雑誌，13，234 (1951).
- 5) 小林称一：日林誌，34，392 (1952).
- 6) 松本 勲：九大・農・演習林報告，36，1 (1962).
- 7) NOLLE, A. W.: Journal of Applied Physics, 19, 753 (1948).
- 8) LEE, C. L.: Forest Products Journal, 11, 108 (1961).

Résumé

This paper aims at gaining informations about the "mechanical properties of juvenile wood" on stem of SUGI-trees (*Cryptomeria japonica D. Don*).

The test specimens were taken from disks of 12-year-old fertilized SUGI, 30-year-old irrigated SUGI and 40-year-old non-fertilized SUGI stems cut at 2.0 m above the ground.

Measurements were made of the specific gravity, the dynamic modulus of elasticity and the poisson's ratio. The fibril angle of the middle layer of the secondary wall of tracheid was measured from the same test samples.

The following conclusions can be deduced from the experimental findings.

(1) There are distinct differences between the juvenile wood and the mature wood. The former locates within 10—15 annual ring from the pith and the later locates the outer part at given height in each SUGI stem.

(2) The relationship between specific gravity and dynamic modulus of elasticity in each stem can be found a very high degree of positive correlation at late wood. But at the early wood, the positive correlation can be seen only

the mature wood.

(3) High degree of correlation is able to found between the fibril angle of the middle layer of the secondary wall of tracheid and the specific dynamic modulus of elasticity. It may be considered that these factors influence on the mechanical properties of wood.

(4) In addition to these factors, fibril angle and specific gravity, it is suggested that the quality of the microfibril may be improved significantly through successive growth rings from the pith to bark.