

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

藤 崎 謙次郎*

On the Relation among the Young's Modulus,
Tracheid Length and Microfibril Angle in a Stem of
SUGI (*Cryptomeria japonica* D. Don)

Kenjiro FUJISAKI

Summary : The Young's modulus (E) is one of the most important elastic constants to estimate the mechanical properties of wood.

This series of experiments were performed for the purpose of examining the possibility of presuming E by tracheid length, and further for the purpose of examining the relationship between the tracheid length and microfibril angle which is considered to affect E directly.

As test material, a stem of SUGI (*Cryptomeria japonica* D. Don), 36 year old, was selected.

Results obtained were summarized as follows :

(1) Discs (thickness ca. 7cm) were selected at intervals of 1m above the ground, and specimens for compressive test were cut off successively in four radial directions. E was measured for each specimen by compressive test parallel to the grain, and tracheid lengths were measured for all growth rings included in the specimen, from which the E was measured, and then they were averaged. The averaged tracheid length was presumed the representative trachid length of the specimen.

By analyzing the correlation coefficient between the E and the averaged tracheid length, it was obvious that for almost all discs there was a significant correlation between them, and for all specimens included in the stem a linear regression was recognized between the E and the averaged tracheid length.

(2) Specimens were cut off tangentially and successively from a zone where identical growth rings were included, and the E and averaged tracheid length were expected to vary slightly. By analyzing the correlation coefficient between the E and averaged tracheid length of these specimens, it was recognized that no significant correlation exists between them.

(3) Measurements of microfibril angles of tracheid cell walls in each growth ring in the specimens described in the item (2) were performed. The microfibril angle was determined by measuring the angle between cell axis and major extinction position (m. e. p.) of a tracheid cell wall, and the m. e. p. was determined on a polarizing microscope equipped with a sensitive colour plate under crossed nicols.

The correlation analysis was performed between the E and averaged $\cot \theta$ (θ : microfibril angle) and it was recognized that there was a linear regression between them, and that $\cot \theta$ varies according to the variation of the E which was relatively little within this zone.

* 木材理学講座 助教授

Further, between the averaged tracheid length and averaged cot θ , a logarithmic regression was recognized, but it seems that many experiments remain to be performed to confirm this.

- (4) Thus, roughly speaking, it can be concluded that the tracheid length can be an estimating factor for a population of specimens which includes juvenile and adult wood and in which the E of specimen ranges widely, but for a population of specimens in which the E varies relatively little, the tracheid length can not correspond sensitively. Then, it can be considered that it is preferable to take the microfibril angle for the estimating factor of E .

要旨：木材のヤング係数 (E) は木材の機械的性質を判断するうえで有力な弾性定数であるが、この一連の実験は、仮道管長と E との間にある関係をしらべ、仮道管長が E を推定するうえにどの程度有力であるのか、また E に直接的に影響すると考えられるマイクロフィブリル傾角と仮道管長とはいかなる関係にあるのかを調べることを目的として実施された。供試木として 36 年生スギを択んだ。

得られた結果を要約すると概ね以下のごとくである。

- (1) 地上高 1m 毎に円盤 (厚さ約 7cm) をとり、その円盤から 4 方向に透的に連続して縦圧縮用試験片をとる。この試験片について E を測定し、その E 測定済試験片の一部からその試験片に含まれる全生長輪について仮道管長を測定し、その総平均値をもって、その試験片を代表する平均仮道管長とする。

かくして得た E と平均仮道管長との間の相関関係を調べてみると、殆ど全部の円盤において両者の間には有意な相関関係が認められ、全幹にわたって一括して処理しても両者の間には明らかな直線関係が認められた。

- (2) E においても、仮道管長においても変動が少ないとおもわれる同一生長輪帯に含まれる接線方向連続試験片について、 E と仮道管長との間の相関関係を検討した結果、両者の間には相関関係は認められなかった。

- (3) (2)の項の E 測定済試験片について、それに含まれる全生長輪について、各生長輪毎に仮道管膜のマイクロフィブリル傾角を測定した。マイクロフィブリル傾角は仮道管軸と仮道管膜の主消光位との角を測定することにより求めた。主消光位は鋭敏色板を装着した偏光顕微鏡により膜の干渉色の变化から求めた。

その結果、 E と cot θ (θ : マイクロフィブリル傾角) との間には直線的な関係が認められた。即ち、比較の変動の少ない E に対して cot θ はよく追隨して変化をする。

また、平均仮道管長と平均 cot θ との間には対数関数的な関係が認められたが、この点に関しては更に多くの実験を必要とするものと考えられる。

- (4) 未成熟材と成熟材を含めた変動の大きい E の母集団に対しては仮道管長は大まかな意味では E 推定の指標と考えることが出来るが、変動の小さい母集団に対しては敏感に対応できない、むしろマイクロフィブリル傾角をとる方が直接的であると考えられる。

1. はじめに

木材を構造材料として利用する場合、その材料学的適性については、その破壊強さ、弾性定数等が基礎となることはいままでもない。しかし、施工にあたっていちいち使用する木材について破壊試験を行なうことは到底不可能であるので、上記の強度特性を類推しうるような品質指標を考えて、これによって材料としての適否を判断することが考えられてきた。たとえば、比重は木材の物理的、材料学的な性質に対して大きな影響をもっており、基本的な量として重視される。事実、縦圧縮強さに対しては品質指標として極めて優れている。しかし、弾性定数、たとえばヤング率 (E) に対しては、針葉樹の圧縮アテ材に見られるように必ずしも比重をもって一義的に E を類推するわけにはいかない。むしろ、木材の材料学的な品質指標として、直接 E を採ぶほうが現時点では最良の法と考えられる。その理由として、 E は非破壊的に求めうること、他の破壊強さとの関係が密接なること^{1),2)}が考えられる。既に実用化の段階に入っている grading machine は曲げ撓みから E を測り品等区分を行うものであるが極めて理に適ったものといえるであろう。

さて、木材の E は細胞膜の構造特性もしくは繊維の走向等に依存度が高いと考えられている³⁾。たとえば、動的ヤング率⁴⁾と二次膜マイクロフィブリルの間には密な関係があることが認められている。

したがって、二次膜マイクロフィブリル傾角もまた材料学的品質指標として有力であると考えられる。更に、R. D Preston⁵⁾は針葉樹仮道管長(L)とマイクロフィブリル傾角(θ)の間には密接な関係があることを示し、次式で表現している。

$$L = a + b \cot \theta \quad (a, b: \text{定数})$$

以上のことから、仮道管長もまた E と正の相関があることが当然予想されるわけで、筆者はアカマツにおいてこの可能性を示唆している⁶⁾。この研究は、スギについて仮道管長と E との関係を調べ、仮道管長が E 推定のパラメータとしてどの程度有力であるのか、また、マイクロフィブリル測定法の検討を兼ねて Preston の式がスギについてはどの程度適合するのかを検討するのを目的としている。

2. 実験方法

2.1 供試木および木取り

愛媛大学農学部付属演習林1林班は小班において36年生のスギ(*Cryptomeria japonica* D. Don)1本を供試木として採取した。D. B. H.=25cm, H=20m。この供試木について行なった実験は大別して次の3つの項目に分かれる。

- (1) 地上高1m毎の円盤内における E と平均仮道管長との関係の調査、解析。
- (2) 同一生長輪帯における E と平均仮道管長との関係の調査、解析。
- (3) (2)での E 測定済試験片を用いてマイクロフィブリル傾角の測定をなし、平均仮道管長および E との関係の調査、解析。

木取り法は(1)については、地上高0.5m, 1m, 2m, ……14m迄、概ね1m毎に厚さ約7cmの円盤をとり、東西南北の方向に透心的に連続して試験片を採取した。その概要を Fig. 1 に示す。調湿ののち縦圧縮用試験片に仕上げた。寸法は2cm(R) \times 2cm(T) \times 6cm(L)である。

(2)については地上高1.77m~1.84m, および、1.84m~1.91mで円盤2枚をとり、同一生長輪帯を含むように(この実験では20年から30年迄) Fig. 2 に示す要領で、接線方向に連続して試験片を採取した。この実験では、特に繊維走向が試験片軸に完全に平行になるよう慎重を期した。即ち、乾燥割れの入りかたで旋回木理のないことを確かめ、試験片の切り離しには割裂法を用い、仕上げには特に目切れがないよう留意した。試験片寸法は(1)と同じである。

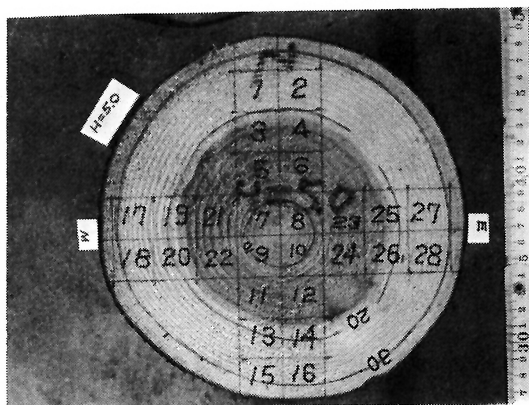


Fig. 1 Cross-sectional view of a disc. Numbered squares show the sampled positions.

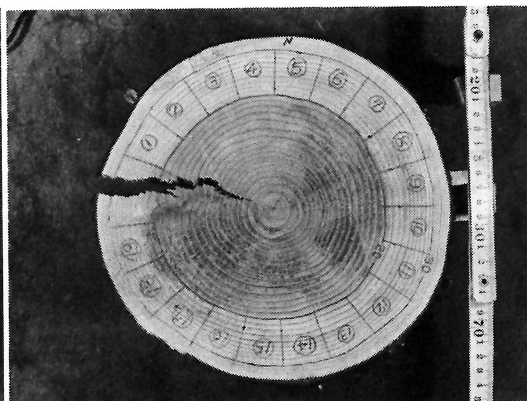


Fig. 2 Cross-sectional view of a disc. Specimens were cut off from the numbered position tangentially and successively.

2.2 縦圧縮ヤング率測定

前項(1)の実験では、歪ゲージを試験片の対向二面(この実験では証目面)に貼り、オルセン型試験機(能力 10ton)で縦圧縮荷重を毎分 50kg/cm² のスピードで加え、比例限度迄 2 回負荷し、その応力 — 歪図から縦圧縮ヤング率を求め、その平均値をその試験片の縦圧縮ヤング率(以下 E_c と略す)とした。

前項(2)の実験では特にばらつきが少ない測定値が望まれたので、歪ゲージを 4 面に貼り、その平均の歪から E_c を求めた。この方法によると測定値のばらつきは最も小さくなることは既に確認してある⁷⁾。

2.3 調 湿

E_c 測定にあたっては、含水率の変動による E_c の測定値のばらつきを除くために、 E_c 測定用試験片は常時約 70% の関係湿度にセットした恒温恒湿槽中に保管しておき、 E_c 測定時だけ外に出して試験を実施した。その結果、全試験片は 15±1% の含水率におさまったので含水率補正は必要ないものとした。

2.4 仮道管長測定

E_c 測定済試験片の一部を繊維方向に約 1.2cm の長さに切りとり、それから透心方向に厚さ約 1mm の薄片を切り出す。つまり、 T 方向に 1mm、 R 方向に約 2cm、 L 方向に約 1.2cm の薄片を切り出すわけである。この薄片から連続的に約 1mm 毎に小棒を切りとってゆき、解離用材料とした。もちろん、各々の所属年令早晚材別は明らかにしておいた。

解離は Jeffrey 液を用い、測定は投影スクリーン上に 50 倍に拡大して測定した。測定本数は小棒 1 本につき 20 本としたので 1 枚の薄片については 500~560 本の仮道管が測長された。そしてこの総平均値をもって、その E_c 測定済試験片を代表する平均仮道管長とした。

2.5 ミクロフィブリル傾角測定

細胞膜のミクロフィブリル傾角測定法として従来様々な方法が提唱されている⁹⁾。このなかで、多数の仮道管膜について測定値をうるためには、なるべく光学顕微鏡で目的を達しようような簡便な方法が望ましい。

この研究では、そのような意味と、もう一つは我国では未だ資料不足とおもわれる偏光顕微鏡を利用する法を採用することとし、偏光顕微鏡によるミクロフィブリル傾角測定の問題点も併せて検討してみることにした。

理論と方法は R. D. Preston およびその他の成書^{9), 10)}に詳しいが、その手順を簡単に列挙すると、

- (1) 何等かの方法で仮道管膜を single wall とする。
- (2) 偏光顕微鏡を白色光を光源として、直交ニコルの状態におく。そのとき視野は暗黒。
- (3) (1)の試料を顕微鏡のステージ上におく。一般に膜は暗黒な視野を背景に輝やいてみえるが、ステージを回転させると、一回転につき 4 回暗黒になる。この暗黒になる位置は互に直角である。
- (4) この 4 つの消光位のうち 2 つは Polarizer からくる光の振動方向と膜のミクロフィブリルの走向とが平行になっている場合であり、他の 2 つはそれが互に直角になっている場合である。前者の場合を major extinction position (m. e. p. と略す) という。
- (5) m. e. p. を決定するために鋭敏色板 (sensitive colour plate) を用いる。すなわち、これを所定の位置に挿入するとその干渉色によって視野は美しい紫紅色を呈する。膜はステージを回転させることにより 4 回視野と同色になる(すなわちこのとき膜は消光位にある)、がステージを時計回りに回わして、膜の干渉色が視野と同じ紫紅色から blue に変わればこのときの消光位が m. e. p. である。この m. e. p. は何回か繰返してその平均位置を記録しておく。
- (6) ステージを回転させ仮道管の長軸と eye piece 中の十字線の縦線とを一致させ、そのときの角度をよみ、(5) で求めた位置との差をとればこれがミクロフィブリルの傾角を与える。

以上の手順のうち、最も問題になるのは(1)でのべた、いかにして仮道管膜を single wall とするかである。

W. J. Cousins は木材を適当な方法で脱リグニンしてスライドガラス上に接着剤によって接着し、接着剤が固化したのち、はぎとって接着層に single wall の状態で膜を残す方法を提唱している¹¹⁾。この方法は、筆者もエポキシ樹

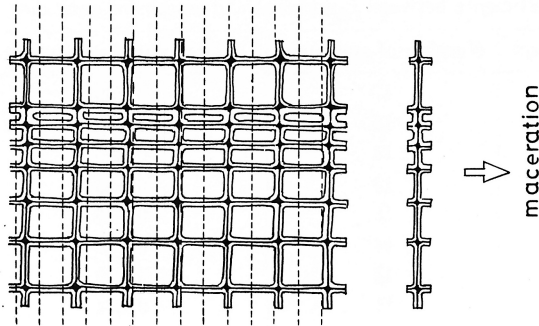


Fig. 3 Schematic representation showing the method of single wall separation of tracheids. Broken lines show the microtome cutting lines.

脂を用いて試みたが、接着剤が適当に固化した時期に脱リグニンした木材ブロックを接着せねばならぬので、その時期の判定が難しいこと、脱リグニンという前処理を要することなどの理由で、この実験では別の方法をとることにした。その方法は Fig. 3 に模式的に示したが、先ず供試ブロックを軟化処理したのちに、木口切片をマイクロームで切りとり、仮道管の接線径 (T 径) を測る。その T 径以下の厚さで (この実験では T 径の半分、概ね 20μ で) 柁目切片をマイクロームで切つてゆけば半径壁で接した切片が必ずとれる筈である。これを適当な方法で macerate すれば single wall の膜が得られるという考え方である。

この方法で得られる single wall は柁目面である、柁目面には、特に早材部で、膜孔が多く、膜孔の周辺マイクロフィブリルは多少乱れているために、マイクロフィブリル傾角の測定面としては、柁目面は必ずしも適当ではない。しかし、早材部仮道管といえども膜孔の少ない部分は必ずあるので測定にはそれほどの困難は感じなかった。むしろ、柁目切片は、測定中の仮道管が、早材部のものか、晩材部のものかの判別が容易であること、 R 径の測定も容易であるという利点をもっている。

本実験に先立ち、本法の有用性を試すためにアカマツ (*Pinus densiflora* Sieb. et Zucc.) の圧縮アテ材について上記の方法でマイクローム切片をとり、Jeffrey 液で分離してスライドガラス上に仮道管をグリセリンと水の混液中に展開して、前述の干渉色の変化から求めたマイクロフィブリル傾角と、アテ材特有の spiral crack の角とを比較してみた。その結果、両者の一致は概ね良好で本法は十分有用であることが認められた。

3. 実験結果と考察

3.1 各円盤内における仮道管長と Ec との関係

地上高概ね 1m 毎の各円盤内の試験片について Ec と平均仮道管長との間の関係を調べるために相関係数を計算して第 1 表に示す。表に示すように殆ど全部の円盤について両者の間には有意、もしくは非常に有意な相関係数が得られている。更に、全試料を一括してプロットして図示したものが Fig. 4 である。両者の間の関係は直線的であることが知られる。

この結果によって、仮道管長は Ec 推定のパラメータとして一応有力であると考えられるが、普遍的な結論とするには未だ十分でないと考えられる。何故なら、髓から樹皮側へ向つての仮道管長の変動の仕方は Sanio 則にも明らかかなように髓近くにおいて短かく年輪数を増すに従い増大し、所謂成熟材の領域に入って安定するというパターンを示す。 Ec の変動も亦同様であることはこの実験においてもまた、太田の未成熟材に関する研究⁴⁾においても認められている。すなわち、仮道管長も Ec も透心方向には同じパターンを示すわけであるから、仮道管長と Ec との間に高い相関があるからといって仮道管長をもって Ec 推定のパラメーターとするのは早計であるといった感じは免

Table 1. Correlation coefficient between E and tracheid length for each disc.

Height above the ground (m)	Number of specimen	Correlation coefficient	Significance
0.5	17	0.789	**
1.0	14	0.872	**
2.0	14	0.305	N.S
3.0	14	0.665	*
4.0	15	0.776	**
5.0	14	0.749	**
6.0	14	0.949	**
7.0	11	0.874	**
8.0	11	0.890	**
9.0~10.0	20	0.892	**
11.0~12.0	19	0.845	**

** : Significant at 99% confidence level.
 * : Significant at 95% confidence level.
 N.S : Not significant.

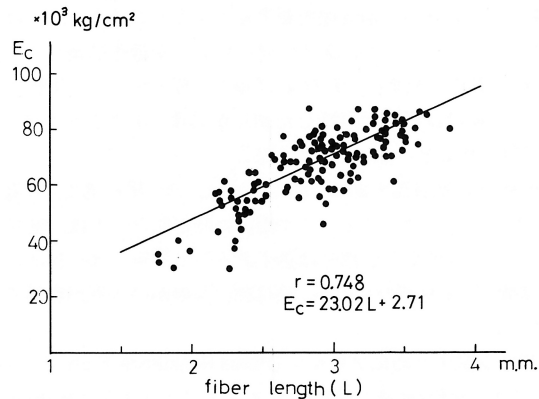


Fig. 4 The relation between E and tracheid length.

れない。

以上のような考え方で、位置的な影響を除いて、つまり、髓からの生長輪数を略々同じくする場所から試料をとって仮道管長と E_c との間の相関関係を検討する必要を認めたので、この点について調べることにした。

3.2 同一生長輪帯からの接線方向連続試験片についての仮道管長と E_c との関係

既に2.1項で述べたように、髓からの位置が同じ試験片群について行うので E_c の変動は少ないことが予想される。したがって、その測定には目切れ、測定技術等にもとづく影響を極力除くべく留意した。

その結果を平均仮道管長と E_c との相関関係で検討すると $r = -0.044$ で無相関の結果を得た。また、比重と E_c の相関係数を求めたところ、 $r = 0.454$ で有意の相関を得たので、 E_c を比重で除した specific E_c を求め比重の影響を除いて、平均仮道管長との間の相関係数を求めてみた。その結果も、 $r \approx 0$ で相関関係は全く認められなかった。

この点を考えてみると、同一生長輪帯で接線方向に連続試験片をとってみても E_c はかなりの中で変動する、即ち E_c は最小値 $57 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ 、平均 $78 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ 、最大値 $96 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ 、でその変動係数は 11.2% であるのにたいして、平均仮道管長は最小値 3.30mm、平均 3.41mm、最大値 3.53mm の範囲をもち、その変動係数は 1.8% で極めて変動が少ない。すなわち、 E_c の変動に対して平均仮道管長は sensitive に追従し得ないことが判る。そもそ

も、仮道管長を E_c の推定因子として利用しようとする考え方の根底には、R. D. Preston のマイクロフィブリル傾角の $\cot \theta$ と仮道管長とは直線的な関係にあるという事実が存するわけであるが、上記の結果を考えると、この実験でのスギについてもそのままあてはまるのかどうか、また、両者の間の関係はどの程度緊密なものであるのか、あらためて検討する必要が認められた。

3.3 同一生長輪帯からの接線方向連続試験片についてのマイクロフィブリル傾角と E_c および仮道管長との関係

3.2 で得た結果をうけて、3.2 での E_c 測定済試験片から 2.4 でのべた手法によりマイクロフィブリル傾角を測定することとした。即ち、仮道管長測定部位に接して征目切片をとり（切片厚は T 径が 40μ であったので、その半分の 20μ とした）、実体顕微鏡下で 1 生長輪毎に分離し、各生長輪毎に Jeffrey 液で解離した。測定本数は 1 生長輪について晩材部 10 本、早材部 20 本とし、1 試験片に含まれる全生長輪についての総平均値をもってその試験片を代表するマイクロフィブリル傾角とした。かくして得たマイクロフィブリル傾角の $\cot \theta$ をとり、 E_c との関係プロットしたのが Fig. 5 である。 $r=0.749$ で非常に有意であり、 E_c の変動にたいして $\cot \theta$ はよく追従すると考えられ、両者の関係は直線的であるとおもわれる。

次に、仮道管長と $\cot \theta$ の間にはどのような関係があるのであろうか、この場合、仮道管長と θ の対応のさせ方は、1 本の仮道管について、その θ と長さを同時に測りうるものがのぞましいのだが、ここに用いた測定法では仮道管の

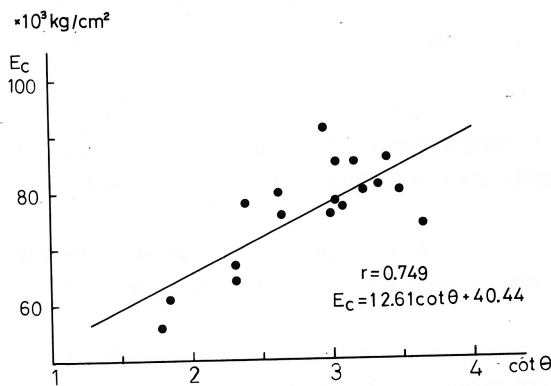


Fig. 5 The relation between E_c and $\cot \theta$. (θ : microfibril angle)

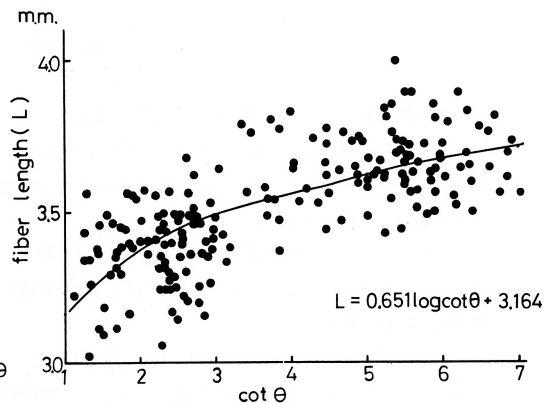


Fig. 6 The relation between tracheid length and $\cot \theta$ (θ : microfibril angle)

全長を損なわずに単膜化することは殆ど不可能なので、同一生長輪に属する早晚材別の平均仮道管長と平均 $\cot \theta$ とを対応させることとした。その結果を Fig. 6 に示す。

図をみると、 $\cot \theta$ が小さいとき、つまり、マイクロフィブリル傾角が大なるとき、仮道管長は短くなり、傾角が小になると仮道管長は長くなる傾向は認められるが、両者の関係はさほど緊密であるとおもえない。また、両者の関係は Preston のいうごとく直線的であるとするのは無理があるようにおもわれる。むしろ、対数曲線的であると考えられるので $\log \cot \theta$ をとってプロットすると Fig. 7 のごとくになる。図に示すように、どうにか直線化された様におもわれるので、その相関係数を求めてみると、 $r=0.714$ を得、回帰式として、

$$L = 0.651 \log \cot \theta + 3.164$$

を得た。Fig. 6 にその曲線が描きこんである。

もちろん、これだけの資料から仮道管長と $\cot \theta$ の間の関係は非直線的であるとするはできない、今後更に多くのデータの蓄積が要望される。また、1 本の仮道管についてその長さ θ とが同時に測定しうる技術、たとえば奥村等¹²⁾の仮道管切開法などがもっと popular なものに開発される必要が感じられる。

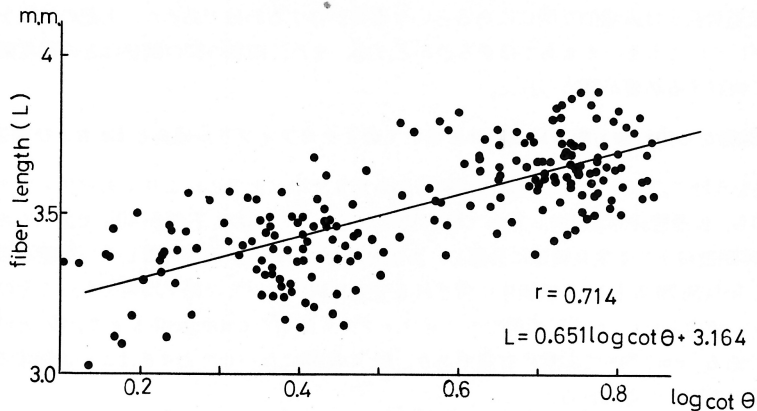


Fig. 7 The relation between tracheid length and $\log \cot \theta$. (θ : microfibril angle)

4. 結 論

以上の実験結果、および考察から本実験の結論として以下のごとく要約したい。

- (1) 透心方向に連続的に試験片をとり、 E_c を測定し、その測定済試験片から平均仮道管長を求め、両者の間の相関を検討すると、殆ど任意の地上高において有意の相関が認められ、全幹的に一括して取扱っても同様であり、その関係は直線的である。
- (2) E_c においても、仮道管長においても変動が少ないと考えられる同一生長輪帯に含まれる接線方向連続試験片について、 E_c と平均仮道管長との間の相関関係を検討した結果、両者の間は無相関であり、specific E_c と平均仮道管長の間も同様であった。
- (3) (2)での E_c 測定済試験片から平均マイクロフィブリル傾角を求め、その cotangent と E_c の相関を検討すると、両者の間には有意な相関関係が認められ、その関係は直線的であると考えられた。
- (4) 仮道管長は E 推定の因子として、どの程度まで有力であるかという問題にたいして、次のように考えたい、即ち、未成熟材から成熟材まで含む、 E_c の変動巾の広い母集団に対しては仮道管長はマクロな意味で E_c の推定因子たりうるが、変動巾の小さな母集団に対しては sensitive ではない。むしろ、マイクロフィブリル傾角をとる方が直接的である。

謝 辞

数多くの仮道管長測定やマイクロフィブリル傾角測定については、門屋斐子氏の御協力に負うところが多い。また、データの統計計算は愛媛大学のコンピューターセンターの HIPAC 103 によった、併せて謝意を表する。

引 用 文 献

- 1) 中村徳孫：南九州産林からのひき板の強度等級に関する研究。宮崎大演報 6：1~82, 1973
- 2) 藤崎謙次郎：木材の圧縮強さと圧縮ヤング率の関係について。愛媛大演報 8：67~71, 1971
- 3) 沢田 稔：木材の力学的特性と材質指標。材料 20：1151, 1971
- 4) 太田貞明：スギ、ヒノキ樹幹内における未成熟材の力学的特性に関する基礎的研究。九州大演報 45：1~80, 1972

- 5) R. D. Preston: Interdisciplinary approaches to wood structure, in "Cellular ultrastructure of woody plants": 1 ~ 31, 603pp. Syracuse Univ. Press, New York 1965
- 6) 藤崎謙次郎: 縦圧縮弾性係数と仮道管長との関係について。第16回日本木材学会大会研究発表要旨 p. 54 (1966)
- 7) ————.: 木材の縦圧縮ヤング率の測定法について。愛媛大演報 6, 3~8, 1968
- 8) R. E. Mark: Cell wall mechanics of tracheids. 310pp. Yale Univ. Press, New Haven & London. 1967
- 9) R. D. Preston: The molecular architecture of plant cell walls. Chapman and Hall, 1952
- 10) 坪井誠太郎: 偏光顕微鏡 297pp. 岩波書店 1965
- 11) W. J. Cousins: Measurement of mean microfibril angles of wood tracheids. Wood sci. & tech. 6: 58, 1972
- 12) 奥村正悟・原田浩・佐伯浩: 仮道管切開法による細胞壁構造の研究。京大演報 45, 171~180, 1973

(1974年3月29日受理)