



Title	木材の弾性挙動に関する基礎的研究
Author(s)	上田, 恒司; UEDA, Koji
Citation	北海道大學農學部 演習林研究報告, 40(3), 627-708
Issue Date	1983-08
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/21098
Type	departmental bulletin paper
File Information	40(3)_P627-708.pdf



木材の弾性挙動に関する基礎的研究*

上 田 恒 司**

Basic Studies on the Elastic Deformation of Wood*

By

Koji UEDA**

目 次

第1章 結 論	628
第2章 既往の研究	631
第3章 道産広葉樹材の弾性定数	635
3.1 材料および方法	635
3.2 結果と考察	637
3.3 弾性係数間の関係	653
3.4 要 約	656
第4章 あて材の弾性定数	657
4.1 材料および方法	657
4.2 結果と考察	659
4.3 要 約	669
第5章 有節材の弾性定数	670
5.1 材料および方法	670
5.2 結果と考察	672
5.3 要 約	694
第6章 木取寸法と曲げヤング係数の関係	694
6.1 厚さ方向に不均質な材料	694
6.2 木材の年輪内ヤング係数変動	695
6.3 木取法による曲げヤング係数の変動	695
6.4 試験片の材せいと k の関係	699
6.5 要 約	700
第7章 総 合 考 察	700
第8章 摘 要	702
謝 辞	703
参 考 文 献	703
Summary	705

* 1982年8月31日受理

Received August 31, 1982.

** 北海道大学農学部木材加工学研究室

Laboratory of Wood Engineering, Faculty of Agriculture, Hokkaido University

第1章 結 論

木材は、人類が最初に手にした道具ではなかっただろうか。木の枝を持って狩に出た時、ヤナギの生枝を持った男よりも乾いたカシの枝を持った男の方がいつも獲物が多かったに違いない。我々の祖先が手を使うようになって以来、日常の生活の中でのこのような経験の積重ねによって、人類は用途に応じて木材を使用することを学んで来たのであろう。鉄を使用するには、鉱物資源と一定の技術水準とがどうしても不可欠であるのに対して、樹木は倒れたままの状態でも単純な梁——丸木橋——として直ちに利用できた。

ある樹種の植生範囲は地域的に限定されているものが多いが、その地域内に産する木材の種類は一般に多様で、例えば熱帯材の中には比重が約0.2のバルサ材から、比重1.2を超えるリグナムヴァイタ材までが含まれており、軽軟で加工の容易なものから、重く強度の高い材まで用途によって選択できる。温帯から寒帯にかけて生育する樹木の材の比重は、南方産の材に比較すればいくらか狭い範囲となる。それにしても、ヤナギ、モミなどの0.4程度のものから、ナラ、カラマツなどの0.8に近いものまでは入手できる。木材の利用形態は、それぞれの地域で産する多様な樹木から目的とする材を選び、そこで必要とされる形状に加工するという段階に長いあいだ留まっていたようである。

我国における建築物は長いあいだ木造が主流を占めてきたが、これらは大工の勘と経験の産物であった。この勘と経験に基づく構造物のいくつかは何百年かを経た現在も残っているが、これらは今日の科学技術をもって見るならば、多くの合理性に支えられていることが判明する。これらの構造物を組立てた経験則が一般化されて合理的な技術体系となるに至らなかった理由には、勘と経験が秘伝的なものであったことは考えられるが、それよりも、使用できる木材が豊富にあって、その中から質の良いものを自由に選択できたことがあげられよう。

木材は現在も、後から出現した鉄、アルミニウムあるいはプラスチック等とならんで人間生活にとっては不可欠の材料である。材料としての性質つまり材質の評価も、他の材料と同一の手法により行われるようになってきたが、木材などの生物材料に特有の異方性が顕著であるため、各種性能の測定法、計算法あるいは結果の表示法が必然的に複雑になる。これに加えて生育条件による材の不均質性と部分的な特異性によって木材は、一般に等方性とみて扱われている工業材料とは一線を画して取扱われてきたようである。

木材の材質は、樹種間では勿論のこと、同一樹種であっても個体間で、さらに同一樹幹内でもその試料を採取した位置によってかなりの変動を示すのが普通である。力学的性質ひとつをとりあげても、大きな断面のままで木材を使用する構造材などのばあいには、その寸法での剛性と強度に関する性能が把握できれば目的はほぼ達せられるが、断面がこれよりも小さくなると、節やこれに伴う目切れの影響が相対的に増大するため、これらの因子をも考慮に入れねばならない。さらに小形の木材となると、早晚材からなる積層構造をもつこと、時にはそれ

その層の繊維方向が材軸に対して傾斜をもって積層されていること(旋回木理ないし交錯木理)などを無視して取扱うことができなくなる。

早晚材の力学的性質はさらに、これらを形成する種々の組織の形態、占有率、配列方向などに依存しているが、中でも個々の仮道管あるいは木繊維の構造により全体として見た木材の変形性能がほぼ決まるとみて良いであろう。電子顕微鏡のレベルで見る細胞壁は、材質を異にするベニヤをある角度で交差させて接着した異方性板に類似しており、さらにそのベニヤに相当する壁層は、リグニンに富んだものからセルロースに富んだもの、方向性をもつものからもないものへと種々のパターンを示し、細胞の構造を一層複雑にしている。木材はこのように分子レベルの要素が何層にも重ね合わされたいわば多重複合構造をなして組立てられた材料ということであり、その力学的性質の解明のためにはさらに多くの分野での研究成果を総合することが必要である。

木材を構造材として使用する時に重視される剛性や耐力などの強度性能は、いくつかの指標(年輪構成、繊維走行方向、欠点の種類とその存在位置、含水率、比重など)と一定ていどまで相関をもつことが知られているが、これらすべての指標を木材利用の場で実際に調査し、品質の予測を行うことは事実上不可能であり、現段階では目視による材の等級付けが最も一般的な方法となっている。この方法で等級付けされた材の強度試験結果からみると、等級間の差は確かにみとめられ、一定の品質区分が可能であることは明らかである。しかしその評価基準は本来相対的なもので、これによって木材の材質を定量的に把えることは困難であった。

近年、木材資源の偏在化、国産材の有効利用の促進あるいは木材の工業材料としての品質表示などが言われて、木材の材質予測に関する研究が進み、そのひとつとして非破壊検査法が種々検討されてきた。金属材料では、内部の微細な欠陥が応力集中の原因となることから、X線や超音波による内部探査が非破壊検査法として実用化されている。

木材に関して現在行われている非破壊検査法のひとつに、弾性限度内での(低応力レベルの)曲げ剛性試験がある。一般に、ヤング係数と曲げ破壊係数とは高い相関を有することが知られており、これに基づいて、ヤング係数を材軸方向に連続測定しその材の強度を推定しようとする方法がこれである。この方法を適用する前提としては、欠点を含んだ材の剛性と強度の関係が明らかになっている必要がある。

合板や木質複合材を使用するばあいの変形挙動の予測のためには、ヤング係数の他にせん断弾性係数およびポアソン比が重要な基礎データである。これら2者の実測はヤング係数の実測に比較して容易とは言えないが、木材の合理的な使用あるいは新しい利用法の開発のためには不可欠のものである。

本論文は著者がこれまでに行った実験の中から、木材の弾性定数に関するものいくつかをまとめたものであり、木材の弾性挙動の認識を基礎として、将来における木材資源の合理的かつ経済的利用への手掛とすることを目的としたものである。

論文の構成は、緒論、既往の研究に続き第3章では、北海道産広葉樹3種（ミズナラ、ニレおよびブナ）を取りあげ、これらの材について一般的な直交異方性材料としての取扱い法を適用し、弾性定数ならびに曲げ、圧縮およびせん断強度について行った試験の結果を述べる。ここで行った一連の試験は、強度設計を前提とした木材の材質評価のための基礎資料としては必要最小限の項目を含んでいると考える。また、この試験では使用したすべての試験体の繊維方向のヤング係数 E_L が測定されているため、これを媒介とする他の各種強度値の推定の可能性も同時に検討できると思われる。

第4章では、異常材としてのあて材の弾性定数が正常材のそれとどのような点で特徴的な相違を示すかを実測値により検討した。通常、あて材そのものが原料材として要求されることはないため、あて材の弾性定数の測定は、一般の木材のばあいとはいくらか意味を異にすると思われる。それは、ここで得られた弾性定数が、あてを含む材の特徴である曲がりや振れ等の発生機構をその組織構造的な特異性と関連づけて考察するための資料となる一方、実用面ではあてを一部に含むために生じる木材の狂いを予測し、発生した狂いを抑制するに要する力の大きさを推定するためなどに応用可能と考えられるからである。またこれは、林木材質の観点からすれば、弾性定数によるあての程度の判断あるいはあてを生じた樹幹の風圧や積雪荷重などの外力に対する変形応答の特徴を知るための基礎資料にもなると考えられるのである。

以上の2章では、正常材および異常材の弾性についてこれらをいずれも直交異方性を有しその材質は弾性主軸方向に均質であるものとして取扱っている。

第5章では、このような均質材の長さ方向に部分的に異質材を含むばあいの弾性係数について、有節材を使用して実験的に検討を加えたものである。ある材料の弾性定数は、外力とこれにより生じる変形（撓み、傾斜角、振り角あるいは歪など）との関係から算出されるものであるから、不均質な材料のばあいは荷重方法あるいは変形の測定方法によって、得られる値が変動することは容易に予想される。いま図-1.1(a)の例に示す2体の材料の変形曲線を考えてみる。材料Aは材端付近に剛性の小さい部分を含み、材料Bは中央部に欠点を含んでいるものとする。これら2材が中央集中荷重を受けたばあい、図-1.1(b)のよように材料Aでは左支点付近の曲げ剛性の低い部分でふくらみの大きい撓み曲線となり、材料Bは中央部で急に折れ曲った曲線を示すことになる。もし、同一の荷重で中央撓みも同一であれば、撓み曲線の形状に拘らず両材は同一のヤング係数をもつと判断されてしまう。しかし、変形の測定方法を変えて、

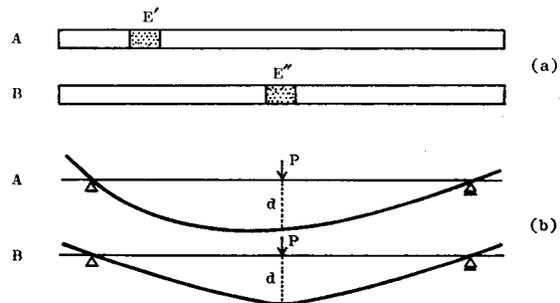


図-1.1 (a) 欠点をもつ材料

(b) 模式的に表した撓み曲線

Fig. 1.1. (a) Two boards including defects.

(b) Respective flexural curves.

例えば、左側支点の傾斜角のみを測定し、これよりヤング係数を算出すると、材料Aのヤング係数がBよりも小と評価されるであろう。本章では、測定方法により種々の値を示すこのような材料の見かけのヤング係数を、部分的なヤング係数との関係から検討することを試みた。

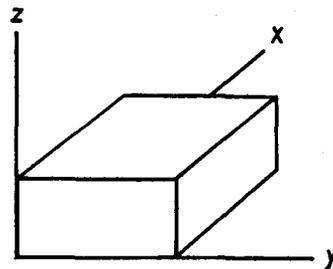
第6章では、厚さ方向に不均質な材料をとりあげた。この種の材料としては、合板、集成材あるいは各種の複合材等があるが、これらの材料の弾性定数に関する研究は多数発表されており、合板に関しては著者等もすでに発表を行ってきた^{1,2,3,4)}のでここでは省略する。本章では木材そのものを複数の年輪層から成る積層体とみて、これの示すヤング係数について考察した。一般の用途に使用される木材の寸法は年輪幅に比較してはるかに大きなものであるため、年輪内の材質変動を無視しても実用上何ら問題は生じない。しかし、小形の試験片による精密な実験あるいは無欠点小試験片による基礎的強度試験においては、試験片断面に含まれる年輪の数やその配置が測定される弾性係数に影響を与えると考えられる。木材の1年輪内のヤング係数分布に関しては、モウソウチク稜壁を年輪層モデルとして行った実験⁵⁾から、表皮からの距離に関する2次関数でこれを近似的に表現できることが判ったため、木材にこれを適用し、試験体断面内に含まれる年輪の数により見かけ上曲げヤング係数がどのように変動するかの試算を行った。

第7章では、以上の試験結果を総合して今後の木材研究における課題、材質評価の方法等について若干の考察を行っている。

第2章 既往の研究

i. 弾性定数

R. HOOKE がバネの実験によって有名なフックの法則を発表したのは1678年であり、T. YOUNG が応力と歪の関係式 $\sigma = \epsilon E$ において E を modulus of elasticity と呼んだのが1809年ごろである (Young's modulus とも言われるのはこの故)。木材の力学的性質に関する研究が急速に進展したのは第1次大戦後の1920年代のイギリス、ドイツ、フランスなどの西欧諸国においてである。BACH と BAUMANN は材料の応力と歪の関係を $\epsilon = \alpha \sigma^n$ なる指数式で表現し、応力にかかる n は材料により変化すると述べ、鋳鉄、銅、コンクリートでは $n > 1$ 、皮革と麻ロープで $n < 1$ 、鋼、アルミニウム、木材などでは $n = 1$ を使用すれば良いとした⁶⁾。ポアソン比は S. D. POISSON が1829年に発表した次元をもたない数値であり、弾性限度内では同一材料で一定の値をとるとされている。これは、ある物体に垂直応力が作用するとき、この方向に生じる歪 ϵ_y に対する、これと直角方向に生じる歪 ϵ_x の比の絶対値つまり $\mu = |\epsilon_x / \epsilon_y|$ と定義されている。



図—2.1 直交3軸による弾性体の取扱い

Fig. 2. 1. Three axes for materials with rhombic symmetry.

弾性体としての木材の力学的性質の表現法は通常、結晶学の分野で使用される斜方晶系の対称軸にあてはめて行われている⁷⁾。木材についてフックの法則が成立するものとすれば、図-2.1の直交3軸に木材の3個の弾性主軸の方向を一致させるばあい、応力と歪の関係は次式のように一般化して表現することができる。

$$\begin{aligned}
 \epsilon_x &= s_{11}\sigma_x + s_{12}\sigma_y + s_{13}\sigma_z \\
 \epsilon_y &= s_{12}\sigma_x + s_{22}\sigma_y + s_{23}\sigma_z \\
 \epsilon_z &= s_{31}\sigma_x + s_{32}\sigma_y + s_{33}\sigma_z \\
 \gamma_{yz} &= s_{44}\tau_{yz} \\
 \gamma_{zx} &= s_{55}\tau_{zx} \\
 \gamma_{xy} &= s_{66}\tau_{xy}
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

ここで、 ϵ および σ の添字は垂直歪および垂直応力の生じる方向を示し、 γ および τ の添字はせん断歪およびせん断応力の生じる平面を示している。 s_{11} 、 s_{22} 、 s_{33} はそれぞれ x 、 y 、 z 方向のヤング係数の逆数、 s_{44} 、 s_{55} 、 s_{66} はそれぞれ yz 、 zx 、 xy 面内のせん断弾性係数の逆数である。また、

$$\begin{aligned}
 s_{12} = s_{21} &= -\frac{\mu_{xy}}{E_x} = -\frac{\mu_{yx}}{E_y} \\
 s_{13} = s_{31} &= -\frac{\mu_{xz}}{E_x} = -\frac{\mu_{zx}}{E_z} \\
 s_{23} = s_{32} &= -\frac{\mu_{yz}}{E_y} = -\frac{\mu_{zy}}{E_z}
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

いま、 xy 面内の平面応力条件において弾性主軸が座標軸と一致しないばあいは、この座標軸に関する応力、歪および弾性係数の関係はそれぞれの記号に'を付して次のように表現する。

$$\begin{aligned}
 \epsilon_{x'} &= s'_{11}\sigma_{x'} + s'_{12}\sigma_{y'} + s'_{16}\tau_{x'y'} \\
 \epsilon_{y'} &= s'_{21}\sigma_{x'} + s'_{22}\sigma_{y'} + s'_{26}\tau_{x'y'} \\
 \gamma_{x'y'} &= s'_{61}\sigma_{x'} + s'_{62}\sigma_{y'} + s'_{66}\tau_{x'y'}
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

この座標軸の弾性係数 s' と材料本来の弾性主軸に関する弾性係数 s の関係は、微小三角形要素の釣合条件および歪エネルギー不変則から次のようになる。

$$s'_{11} = \frac{1}{E_{x'}} = s_{11}m^4 + (2s_{12} + s_{66})m^2n^2 + s_{22}n^4 \tag{2.4}$$

$$s'_{22} = \frac{1}{E_{y'}} = s_{22}m^4 + (2s_{12} + s_{66})m^2n^2 + s_{11}n^4 \tag{2.5}$$

$$s'_{12} = s'_{21} = -\frac{\mu_{x'y'}}{E_{x'}} = -\frac{\mu_{y'x'}}{E_{y'}} = (s_{11} + s_{12} - s_{66})m^2n^2 + s_{12}(m^4 + n^4) \tag{2.6}$$

$$s'_{16} = s'_{61} = 2(s_{22}n^2 - s_{11}m^2)mn + (2s_{12} + s_{66})(m^2 - n^2)mn \tag{2.7}$$

$$s'_{26} = s'_{62} = 2(s_{22}m^2 - s_{11}n^2)mn - (2s_{12} + s_{66})(m^2 - n^2)mn \tag{2.8}$$

$$s'_{66} = \frac{1}{G_{x'y'}} = 4(s_{11} + s_{22} - 2s_{12})m^2n^2 + s_{66}(m^2 - n^2)^2 \quad (2.9)$$

ここに、 $m = \cos \theta$, $n = \sin \theta$, θ は座標軸と弾性主軸のなす角

ii. 弾性定数の測定

木材の弾性定数の測定に関係ある研究はこれまでに膨大な数になるであろう。ここでは、木材研究の初期と言える 1920 年代から 40 年代までの主要な研究を概観する。

木材の異方弾性について系統的な実験を行った最初の人物は H. CARRINGTON であろう。彼は円柱形をなす木材から切り出した立方体を、互に直交する 3 弾性主軸をもつ材料として取扱い、これのヤング係数、ポアソン比および捩り剛性率を実測した^{8,9,10}。ヤング係数およびポアソン比は曲げおよび圧縮(引張)試験から比較的容易に得ることができるが、せん断弾性係数をもとめるにはせん断歪の実測が不可欠であるため多くの研究がなされている。荷重方法については、直接せん断¹¹、丸棒および角棒の捩り^{12,13}、平板の曲げ捩り¹⁴などが検討された。これらの弾性係数の測定値は、F. KOLLMANN と W. CÔTÉ JR. によってひとつの表にまとめられている⁷。

iii. 弾性定数に関する影響因子

a. 外的影響因子

一定の形状に仕上げられた木材の弾性定数を変化させる因子としては水分、温度、時間の経過などが考えられる。

木材に関する種々の性質を、含水率を変化させて観察すると、ある含水率を境として性質の変化率が変わる現象がみられ、この含水率を繊維飽和点 (FSP) と呼んでいる。木材のヤング係数は乾燥状態から FSP に至るまではほぼ直線的に減少し、これ以上の含水率範囲ではその変化は小さいという実験結果が得られている^{15,16,17}。同様の傾向が電気伝導率、膨脹率、曲げおよび圧縮強度についてもみとめられている¹⁸。木材が含水率変化を生じるばあい寸法変化とヤング係数の変化が互に相殺されて、曲げ剛性で見るとその変化はあまり大きくはならない^{19,20}。温度とヤング係数は反比例の関係にあることが報告されている^{14,21,22,23}。

b. 比重と弾性係数

正常材のばあいは一般に比重と細胞構成物質の量が比例すると考えられ、弾性係数もこれに比例して増加する結果が多数報告されている^{16,17,24,25,26}。

c. 繊維傾斜

木材の弾性主軸と木取方向が一致しないばあいの弾性定数の算定に関しては KEYLWERTH の詳細な理論的研究によって明らかにされ、異方弾性に関する木材の取扱い法がほぼ完成された²⁷。

iv. あて材の弾性および強度

あて材の材質は正常材のそれに比較して特徴的な差を示すことはこれまでの多くの研究に

より知られている^{28,29,30,31,32,33}。これらの実験結果を総合すると、針葉樹に生じる圧縮あて材では比重、収縮率、圧縮強度は大となり、引張強度とヤング係数は減少する。広葉樹材に生じる引張あて材では、比重、収縮率が圧縮あて材ほどではないが増加し、機械的性質では縦圧縮強度、横圧縮強度、繊維方向の曲げおよびせん断強度ならびにヤング率の減少がみられる。

v. 未成熟材の弾性および強度

小径木の利用を考えるばあい、未成熟材部を含む材の使用が不可避であるため、これに関する報告がなされているが、強度、比強度あるいはヤング率はいずれも成熟材よりも小となっている^{34,35}。せん断弾性係数の低下は小さく、結果的に E/G の値は著しく低減する³⁶。

vi. 年輪内のヤング係数変動

木材は交互に形成される早材と晩材の集合体であるため、横断面における形態、比重、機械的性質などは年輪幅と晩材の割合により変化する。早晩材の細胞の形態あるいは配列に顕著な差を示す環孔材あるいは針葉樹のマツ、スギ、カラマツ、ベイマツなどについて早晩材の材質の違いが実験的にもとめられている^{32,37,38}。図-2.2(a)および(b)ではいずれも早材から晩材へのヤング率の急激な増加が特徴的である。比重の年輪内変動もヤング率のばあいとはほぼ同様の傾向をもつようである。

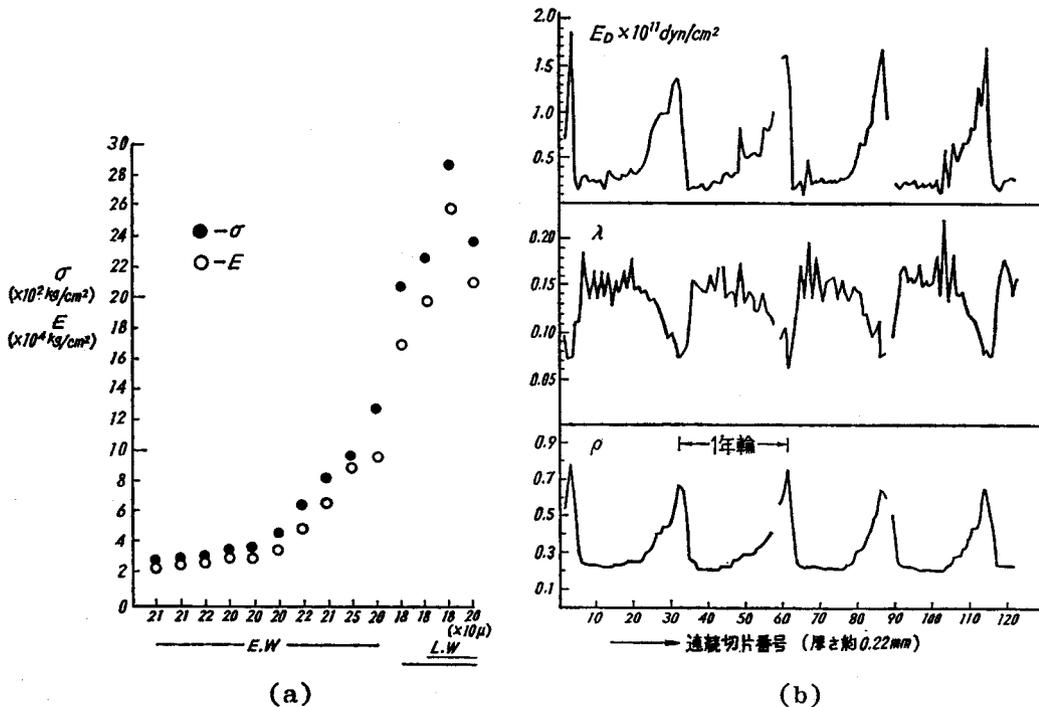


図-2.2 (a) カラマツ1年輪内の引張強度とヤング率の変動³²⁾

(b) スギ半径方向の動的ヤング率(上段)と比重(下段)の変動³⁷⁾

Fig. 2.2. (a) The variation of tensile strength and Young's modulus in a growth ring³²⁾.

(b) The variation of dynamic MOE (top) and density (bottom) in radial direction³⁷⁾.

vii. 年輪幅と比重の関係

環孔材の孔圏の幅は、年輪幅の広狭にあまり影響されないため、年輪幅が増すと比重は相対的に大きくなる傾向をもち、散孔材では一定の傾向を示さないとされている⁷⁾。

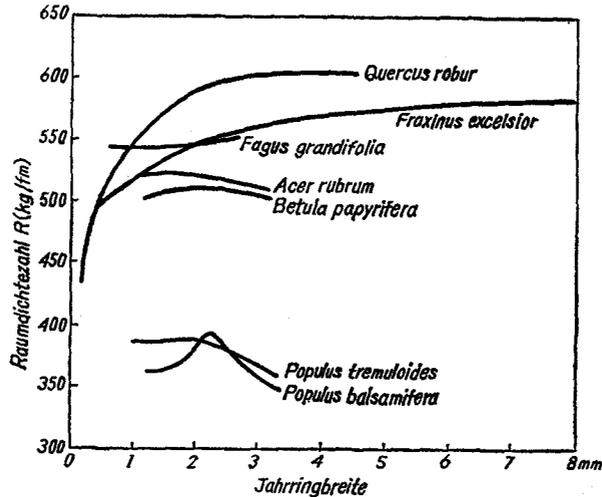


図-2.3 年輪幅と密度⁷⁾

Fig. 2.3. Relation between annual ring width and density⁷⁾.

viii. 竹材の材質

竹材は木材のように構造用材として大規模に使用されることがないため、これに関する力学的性質の研究はまだ多くはない。ヤング係数の測定に関しては、竹稜壁を分割してこれらの切片の測定^{39,40)}、あるいは全断面の見かけのヤング係数および曲げ強度を測定する方法^{41,42)}などがとられているが、このような断面内不均質性をもつ材料に対する試験法は未だ確立されていない。

第3章 道産広葉樹材の弾性定数

3.1 材料および方法

3.1.1 試験材料

試料を採取した原木は北海道大学中川地方演習林産ミズナラ材5本、同雨竜地方演習林産ハルニレ2本、オヒョウニレ1本および同桧山地方演習林産ブナ2本である。なお、ニレ材については冬期伐採であったため葉の形態による識別が不可能であり、樹皮および材色から No. 1および2をハルニレ、No. 3をオヒョウニレと判断したものである。

これらの丸太から厚さ約3cmに柃目挽きした原板を天然乾燥したのから、2.5×2.5×50(cm)の試験体をできる限り多く採取して以下の試験に供した。原木番号、胸高直径、試料採取位置および試験体数は表-3.1に示すとおりである。

表—3.1 供試木および試験体数

Table 3.1. Sample trees and number of specimen

Species	Tree No.	DBH (cm)	Sampling ¹⁾ Position (m)	Number of ²⁾ Specimen
MIZUNARA Oak (<i>Quercus</i> sp.)	1	46	2~4	57
	2	74	2~4	52
	3	70	3~7	88
	4	52	2~4	69
	5	78	4~6	76
NIRE Elm (<i>Ulmus</i> sp.)	1	42	0~2	43
	2	52	0~2	50
	3	54	0~4	48
BUNA Beech (<i>Fagus</i> sp.)	1	56	4~6	49
	2	50	2~4	44

Note: 1) Height above ground level.

2) Specimen size: 50(L)×2.5(R)×2.5(T) (cm).

3.1.2 曲げ剛性試験

試験体全数について比重および両木口面における平均年輪幅を測定したのち、スパン45 cm、中央集中荷重条件による曲げ剛性試験を行った。荷重は接線面に木表方向から加え、撓みは荷重点下にて測定した。荷重は50 kgまでとしたが、このばあいには試験体に生じる最大曲げ応力は200 kg/cm²以下である。ただし、低比重材ではこの応力レベルでは曲げ比例限度を超えるものが出る可能性もあり、撓み量も大となることから、このようなばあいには120 kg/cm²まで適宜応力レベルを低減させている。

3.1.3 曲げ破壊試験

曲げ破壊試験は各原木について試験体通し番号でNo. 5*n* (*n*=1, 2, 3, ...)のものに対して行った。支持条件等は曲げ剛性試験のばあいと同様とし、破壊に至るまでの荷重～撓み曲線から比例限度荷重をもとめた。

3.1.4 振り剛性試験

曲げ破壊試験体および目切れ等の欠点の顕著なものを除いた試験体に関して振りによる見かけのせん断弾性係数を実測した。この試験は、材料の一端を固定し他端に振りモーメントを加え、試験体中央部14 cmの区間に生じる振り角を測定するものである。振り角は標点間隔で設置した2個の鏡の回転をスケール目盛の読みから計算して得られる。加えた振りモーメントは50~70 kg·cmであり、これより計算される平均せん断応力は約22 kg/cm²以下となる。

3.1.5 圧縮試験およびポアソン比測定

圧縮試験は、繊維方向(L)、半径方向(R)、接線方向(T)、半径面内で45°方向(LR45)、接線面内で45°方向(LT45)および横断面内で45°方向(RT45)の6種について行った。L方向試

験片は曲げ破壊を終了した試験体の端部から採取したが、他の方向の圧縮試験片は、曲げおよび振り剛性試験を終了したものの中から木取りの良好なものを選択し、接着法により所定の寸法に作製した。試片寸法はいずれも $2.5 \times 2.5 \times 8.5$ (cm) である。

歪の測定には光楯子を利用したマルテンス式歪計を用いたが、歪測定における標点間隔は縦測定および横歪測定に対してそれぞれ 30 mm および 20 mm とした。各方向のヤング係数およびポアソン比の測定に使用した試験片数をそれぞれの樹種について表-3.2 に示した。

表-3.2 試験片数 (圧縮およびポアソン比)

Table 3.2. Number of specimen for compressive test

Species	Specimen for Compressive MOE						Specimen for Poisson's Ratio			
	E_L	E_T	E_R	E_{LT45}	E_{LR45}	E_{RT45}	$\frac{\mu_{LT}}{\mu_{LR}}$	μ_{TR}	μ_{RT}	μ_{RT45}
Oak	66	32	30	30	30	38	30	22	20	29
Elm	27	12	12	9	9	12	15	6	6	9
Beech	17	12	12	9	9	12	10	6	6	9

Note: Specimen size: $2.5 \times 2.5 \times 8.5$ (cm).

3.2 結果と考察

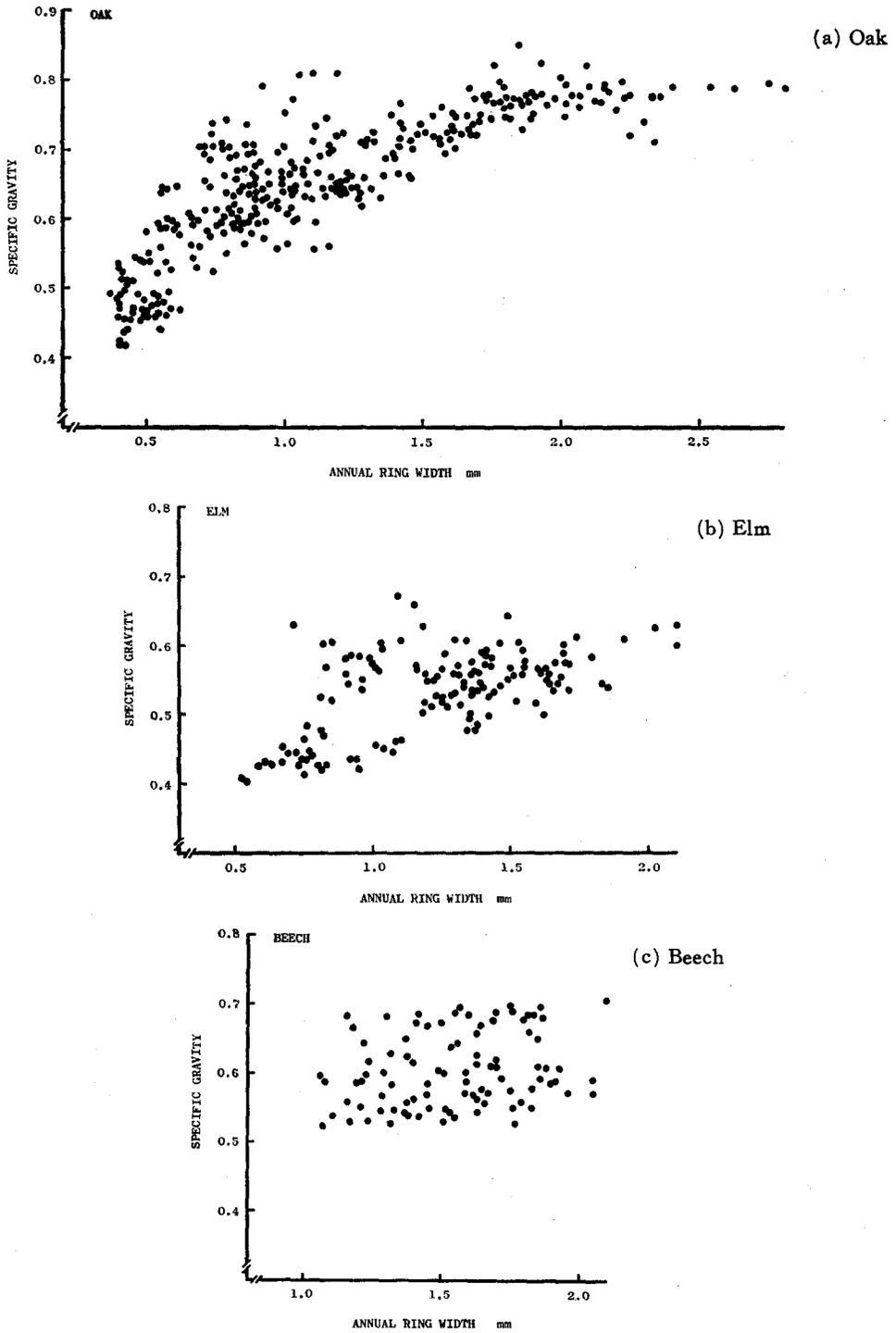
3.2.1 比重と年輪幅

年輪幅による比重の変動傾向は図-3.1(a)および(b)の環孔材と(c)の散孔材とでは差がみられる。図-3.1(a)のナラ材では、年輪幅が約 1 mm 以下の範囲では比重とほぼ比例的な関係を示しているが、1 mm を超える範囲では比重の増加割合は次第に減少し、2 mm 以上の年輪幅をもつ材では比重は約 0.8 で一定となっている。図-3.1(b)のニレ材においても全体的な傾向はナラ材と同様であるが、年輪幅の増加に対する比重の増加割合はナラ材ほど大とはならず、年輪幅が 2 mm 以下でも比重は約 0.6 となっている。図-3.1(c)のブナ材では、年輪幅 1~2 mm の範囲で比重はわずかに増加してはいるが、同一年輪幅における比重の分散も大きいことから、実質的にはこの材料の比重は年輪幅の影響をあまり受けないと考えられるようである。以上のように、年輪幅と比重の関係は、これまでに示されている図-2.3の結果などと同様である。

3.2.2 曲げヤング係数

3 樹種より採取した合計 576 本の試験体について測定された曲げヤング係数 E_L の最小値、平均値および最大値を比重ならびに年輪幅とともに樹種別に表-3.3 に示した。

ナラ No. 1 および No. 4 はヤング係数のみならず比重および年輪幅の分布範囲からみてもほぼ同等の材質をもっており、No. 3 と No. 5 も同じ観点からみてもほぼ同等に扱えると考えられる。No. 3 と No. 5 はヤング係数の最小値が $30 \sim 40$ t/cm² 程度であって、比重および年輪幅の最小値からも判断できるように、ヌカ目材を含むものである。



図—3.1 年輪幅と比重の関係

Fig. 3.1. Relation between annual ring width and specific gravity.

表-3.3 試験材の基礎的性質

Table 3.3. The basic properties of test materials

Species	Tree No.	Number of Specimen	Specific Gravity			Ring Width (mm)			Modulus of Elasticity (10^9 kg/cm^2)* E		
			min.	mean	max.	min.	mean	max.	min.	mean	max.
Oak	1	57	.633	~0.738	~.850	0.94	~1.54	~2.16	102.5	~137.1	~176.7
	2	52	.550	~0.636	~.722	0.73	~1.07	~1.56	48.8	~ 78.8	~119.5
	3	88	.469	~0.624	~.808	0.37	~0.69	~1.19	42.7	~ 96.6	~166.6
	4	69	.634	~0.737	~.803	1.14	~1.84	~2.87	88.2	~136.6	~174.6
	5	76	.417	~0.551	~.748	0.39	~0.72	~1.21	30.1	~ 73.9	~146.9
	total	342	.417	~0.651	~.851	0.37	~1.13	~2.87	30.1	~103.7	~176.7
Elm	1	43	.528	~0.569	~.671	0.85	~1.32	~1.79	94.0	~109.5	~133.7
	2	50	.420	~0.538	~.642	0.80	~1.45	~2.10	52.1	~ 96.1	~127.7
	3	48	.403	~0.497	~.607	0.53	~0.94	~1.41	49.5	~ 85.3	~129.0
	total	141	.403	~0.533	~.671	0.53	~1.24	~2.10	49.5	~ 96.4	~133.7
Beech	1	49	.522	~0.563	~.610	1.07	~1.57	~2.05	68.8	~ 87.9	~109.1
	2	44	.587	~0.650	~.706	1.06	~1.53	~2.10	79.1	~116.9	~140.8
	total	93	.522	~0.604	~.706	1.06	~1.55	~2.10	68.8	~101.6	~140.8

Note: * MOE from bending test.

ニレ材では No. 1 が最も安定した材質をもち他の 2 本はこれに比べて比重, ヤング係数がいく分小となっている。ブナ材の年輪幅はほぼ同等であるがヤング係数でみると No. 2 の方がかなり大となっている。

比重と曲げヤング係数は, 図-3.2 (a), (b) および (c) に示すようにいずれの樹種においても明らかに比例関係を示している。図中の実線は直線回帰により計算したものである。ナラ材のばあいについては, 比重約 0.6 を境界として 2 本の直線で回帰する方が適合性は良いかも知れないが, 全体を 1 本の直線で回帰しても図中に示したように高い相関係数が得られている。試験したナラ材は, 比重の範囲が約 0.4 から 0.8 を超えるものまでを含んでおり, これに対応する曲げヤング係数は約 30 t/cm^2 から 177 t/cm^2 までの広範囲におよび, ヤング係数の最大値と最小値の比は 6 に近い。ニレおよびブナの出現範囲はこれよりも狭いが最大のヤング係数は最小値の 2.7 倍 (ニレ) および 2 倍 (ブナ) に達している。ニレおよびブナ材のヤング係数は比重に関する 1 次式で表現することが可能と思われる。

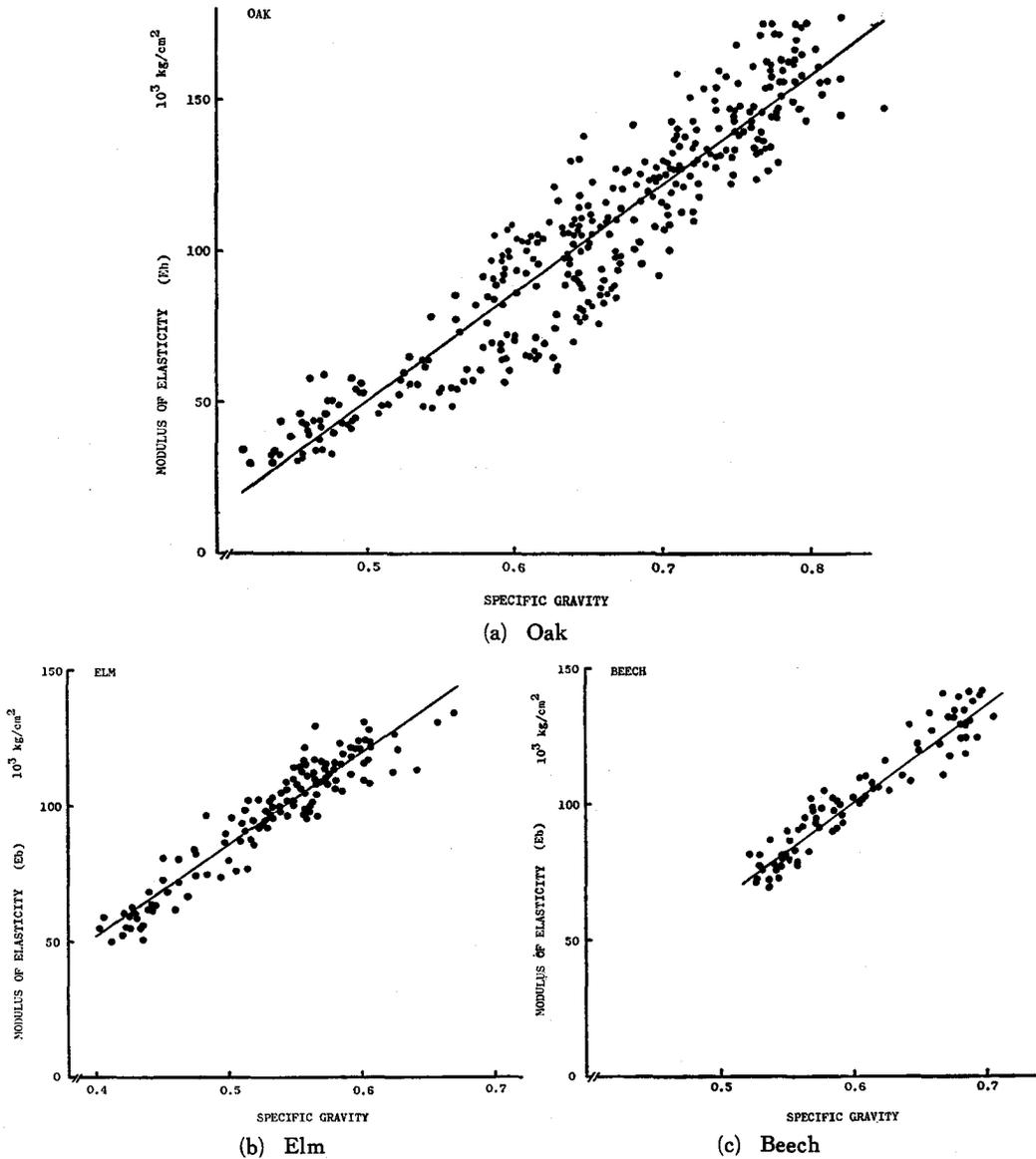


図-3.2 比重と曲げヤング係数

Fig. 3.2. Effect of specific gravity on MOE.

- (a) Oak $E_b = 360.2(S.G) - 130.3$
- (b) Elm $E_b = 336.8(S.G) - 83.1$
- (c) Beech $E_b = 358.3(S.G) - 114.9$

3.2.3 せん断弾性係数

振り試験に使用した総計 351 本の試験体について実測された見かけのせん断弾性係数 G_L の最小値, 平均値および最大値を表-3.4 に示した。

ヤング係数 E_L に関しては大きな分布範囲を示したナラ材も G_L でみると最大値は最小値

表-3.4 捩り試験結果
Table 3.4. Results of torsional test

Species	Tree No.	Number of Specimen	Torsional Modulus (10^3 kg/cm^2) G_L			E_L/G_L			$\sqrt{E_L G_T}$ (10^3 kg/cm^2)		
			min.	mean	max.	min.	mean	max.	min.	mean	max.
Oak	1	28	9.16~	11.11~	12.65	10.9~	12.5~	13.6	31.3~	39.2~	44.7
	2	16	7.97~	9.27~	11.01	6.0~	9.0~	11.6	19.9~	27.9~	35.1
	3	49	6.99~	7.60~	12.46	6.1~	10.7~	14.5	17.3~	30.3~	44.4
	4	38	8.41~	10.69~	12.13	10.5~	13.1~	15.9	27.5~	38.8~	46.0
	5	44	6.29~	8.36~	11.83	4.8~	9.0~	13.0	13.8~	25.3~	41.7
	total	175	6.29~	9.18~	12.65	4.8~	10.9~	15.9	13.8~	32.1~	46.0
Elm	1	33	6.97~	7.74~	9.78	13.0~	14.1~	15.4	25.7~	29.0~	36.2
	2	39	5.11~	7.36~	9.26	9.8~	12.6~	14.7	16.3~	26.3~	33.4
	3	36	5.32~	6.61~	8.06	8.7~	12.7~	18.2	16.8~	23.7~	31.3
	total	108	5.11~	7.23~	9.78	8.7~	13.1~	18.2	16.3~	26.3~	36.2
Beech	1	37	7.03~	8.20~	9.19	8.8~	10.8~	13.3	22.4~	26.9~	30.3
	2	31	8.22~	9.58~	11.12	8.8~	12.2~	14.6	26.2~	33.4~	38.6
	total	68	7.03~	8.83~	11.12	8.8~	11.4~	14.6	22.4~	29.9~	38.6

の2倍以下となり、原木による差も E_L に比較して少くなっている。ニレおよびブナ材に関しても同様で、測定値のばらつきは小さい。このことは図-3.3(a), (b) および(c) から明瞭に読取ることができる。図中の実線は比重とせん断弾性係数を直線関係とみなして算出したものであるが、相関係数はナラ、ニレ、ブナについてそれぞれ 0.96, 0.96, 0.89 となった。また、これら3樹種を一括して扱い、比重と G_L の相関係数をもとめたところ、0.96 を得た。

表-3.4 および図-3.4 の E_L/G_L の値は梁の曲げにおいて、水平せん断応力による付加撓みを決定する定数であるが、3樹種を通じて5~15の範囲に大部分が入っている。ただ、この実験で得られたせん断弾性係数は2方桁木取の正方形断面棒を使用して測定されたものであり、板目面の G_{LT} および桁目面の G_{LR} の複合した値であることに留意する必要がある。表および図中で G_L と記したのはこの理由によるものである。 G_{LT} および G_{LR} の数値については後段の3.3.3で述べる。本実験での曲げ試験の条件では、せん断付加撓みに関与するのは正しくは E_L/G_{LR} の値であり、せん断弾性係数の異方差が大なるばあいにはこの点も考慮に入れる必要がある。

表-3.4 中の $\sqrt{E_L G_L}$ の値は深い梁の横倒れ座屈荷重を決める係数であり、 E/G とともにそ

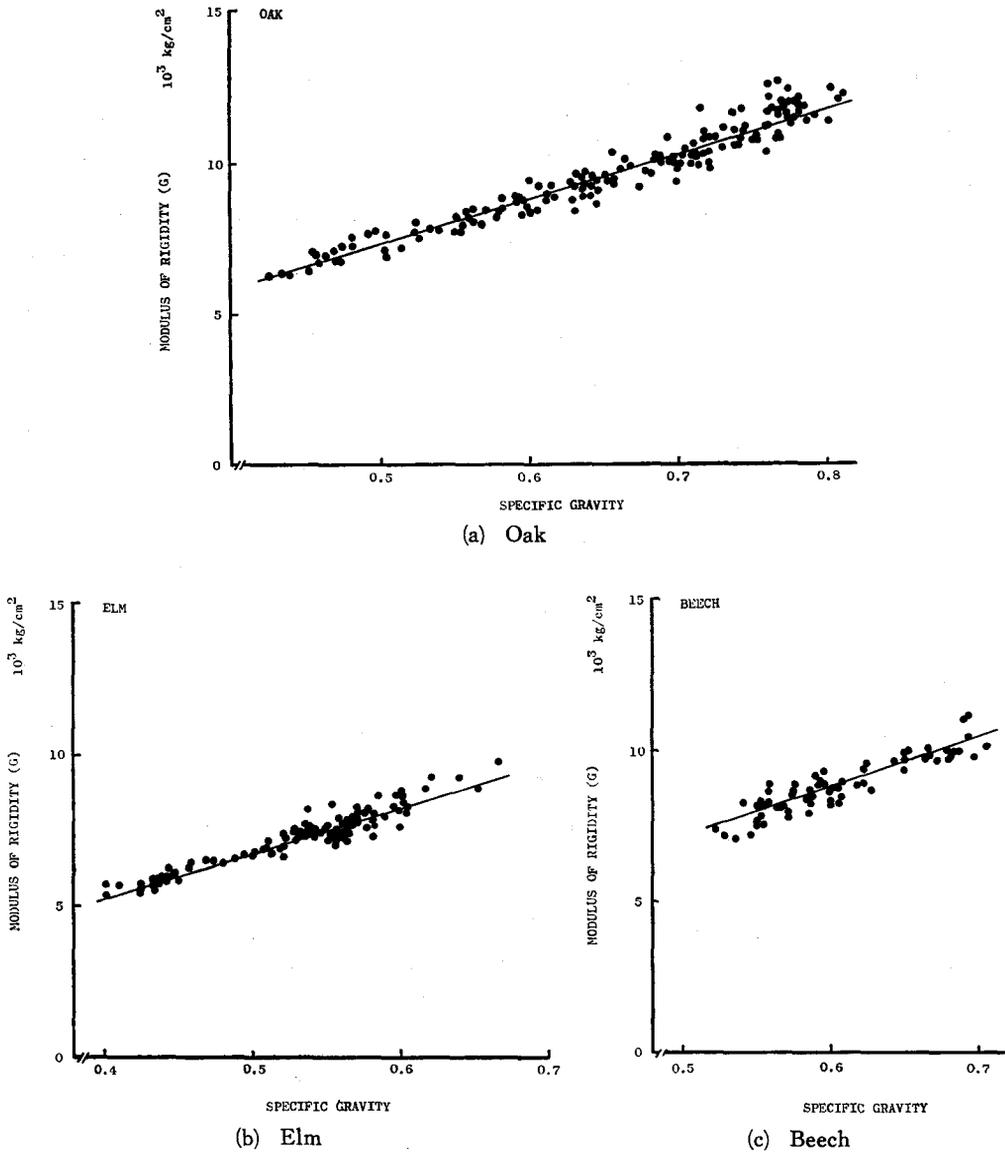


図-3.3 比重とせん断弾性係数

Fig. 3.3. Effect of specific gravity on modulus of rigidity.

(a) Oak $G=14.65(S.G.)+0.02$

(b) Elm $G=15.14(S.G.)-0.85$

(c) Beech $G=16.43(S.G.)-1.08$

の材料に特有の定数であると考えられる。平均値はナラ、ニレおよびブナでそれぞれ 32.1, 26.3 および 29.9 (t/cm^2) となるが、それぞれの平均比重で除した値をみると 49.3, 49.3, 49.5 (10^6 cm) となる。後に述べるヤマナラシおよびヤチダモの正常材ではこの値がそれぞれ 55 および 51 (10^6 cm) と同等の値をとることも併せて考えると、曲げおよび捩り応力に対する木材の変形挙

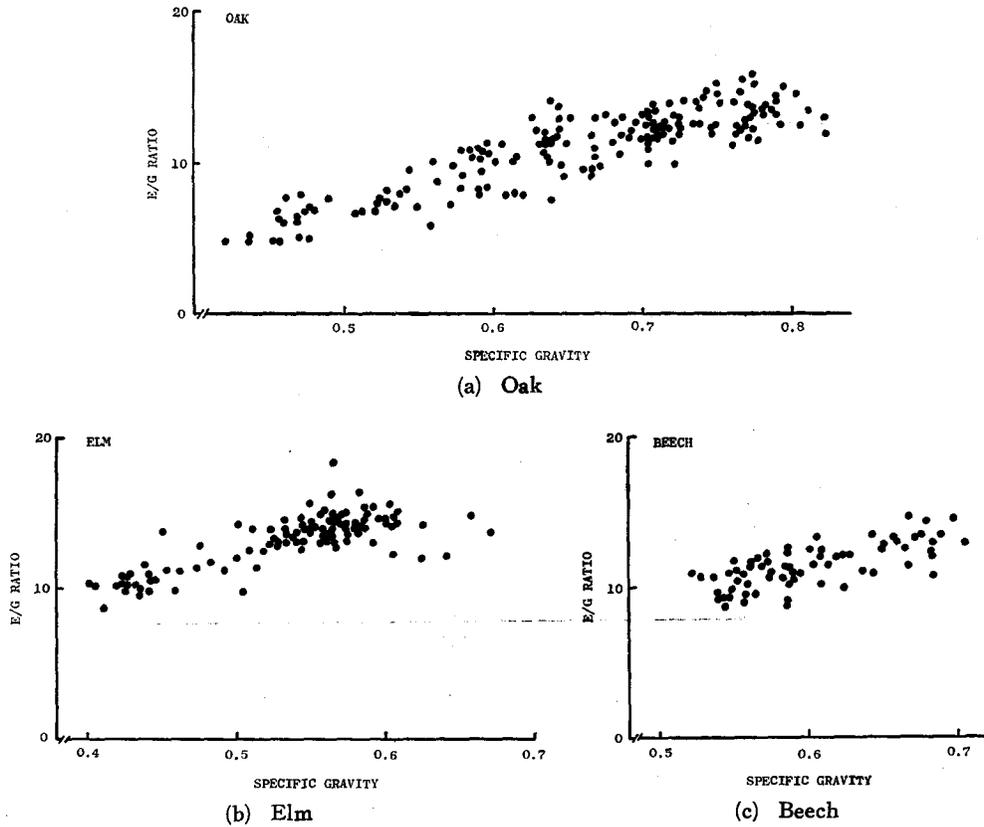


図-3.4 比重と E/G

Fig. 3.4. Relationship between E/G and specific gravity.

動を考察するにあいにこの数値が何らかの手がかりとなることが考えられ、今後追究すべき課題のひとつになると思われる。

3.2.4 圧縮ヤング係数

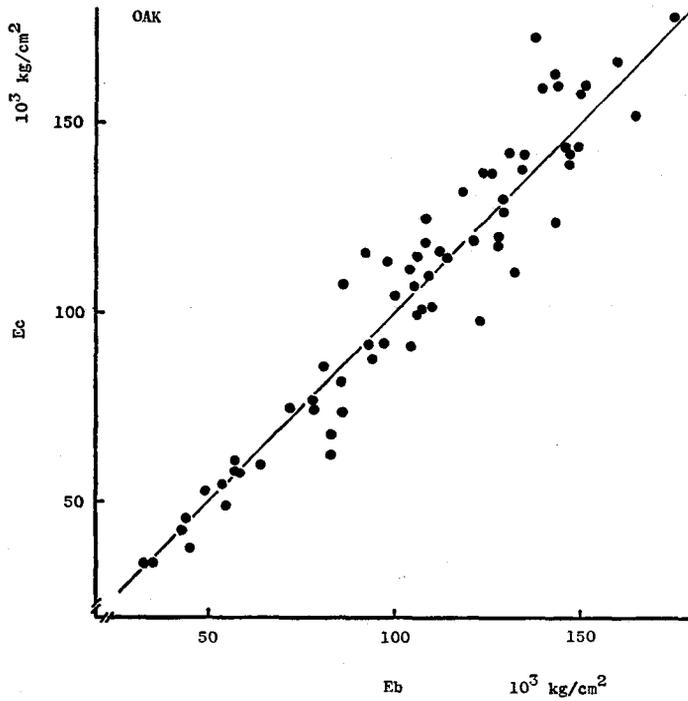
i. E_L

繊維方向のヤング係数 E_L は、同一の試験体について曲げおよび圧縮試験の両方法により測定されたが、これらは本来同一の値を示すはずである。 x 軸および y 軸にそれぞれ曲げおよび圧縮によるヤング係数を取り、測定値を記入すればこれらは原点を通る 45° の線上にのるはずである。結果は図-35 (a), (b) および (c) に示すように、両方法による測定値は良く一致していると見ることができる。ニレおよびブナにおいて試験体数が多くはないが、3 樹種について回帰式をもとめたところ以下の結果が得られた。

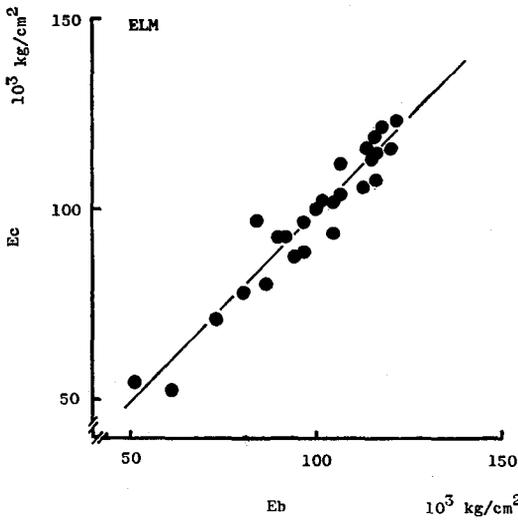
ナラ: $E_c = 1.03E_b - 1.86$; $r = 0.96$; $n = 66$

ニレ: $E_c = 0.99E_b - 0.41$; $r = 0.86$; $n = 27$

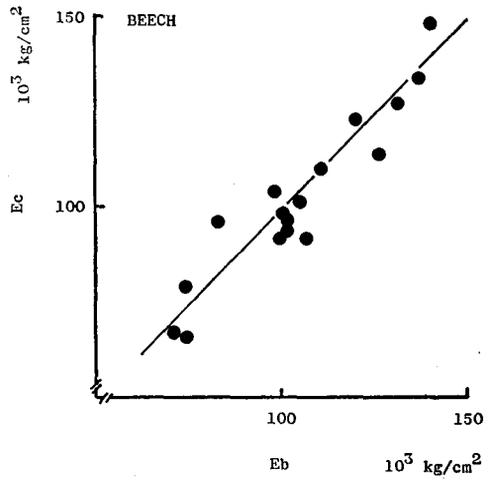
ブナ: $E_c = 0.99E_b + 0.86$; $r = 0.94$; $n = 17$



(a) Oak



(b) Elm



(c) Beech

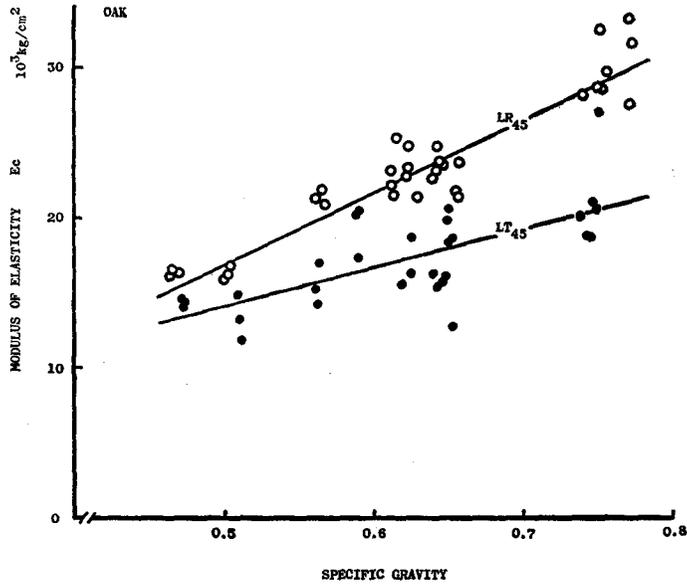
図-3.5 圧縮および曲げによるヤング係数

Fig. 3.5. MOE from compression and bending tests.

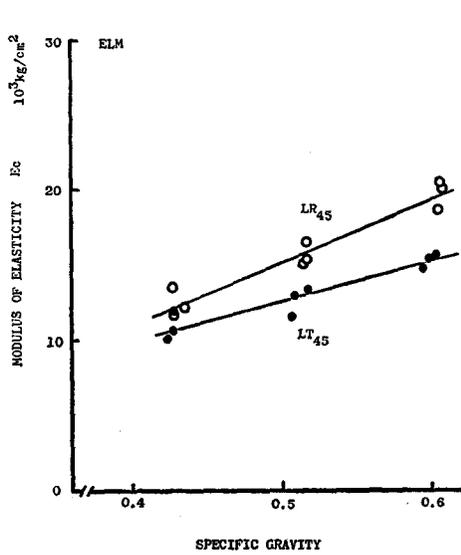
(a) Oak $E_c = 1.03E_b - 1.86$

(b) Elm $E_c = 0.99E_b - 0.41$

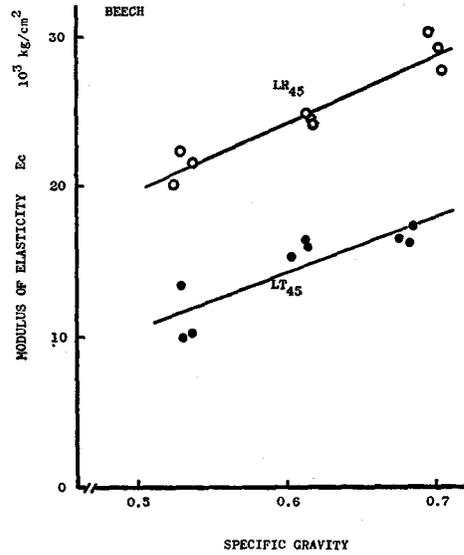
(c) Beech $E_c = 0.99E_b + 0.86$



(a) Oak



(b) Elm



(c) Beech

図—3.6 圧縮ヤング係数

Fig. 3.6. Effect of specific gravity on Young's moduli.

- (a) Oak $E_{LR45} = 48.36 (S.G) - 7.26$
 $E_{LT45} = 25.96 (S.G) + 1.17$
- (b) Elm $E_{LR45} = 41.47 (S.G) - 5.63$
 $E_{LT45} = 25.88 (S.G) - 0.36$
- (c) Beech $E_{LR45} = 45.00 (S.G) - 2.82$
 $E_{LT45} = 37.15 (S.G) - 8.05$

ここで、 E_c : 圧縮によるヤング係数

E_b : 曲げによるヤング係数

r : 相関係数

n : 試験体数

ii. E_{LR45} , E_{LT45}

剛性試験を終了した試験体の中から、それぞれの樹種の比重の分布範囲に応じて高比重、低比重およびこれらの中間の比重をもつ試験体を選択し、接着法により圧縮試片を作製したために、試料数はいずれも充分なものとは言えない。しかし比重の変化に伴うヤング係数の変動傾向は以下に示すように明らかに現れている。図-3.6(a), (b)および(c)に示すように、いずれの樹種においても E_{LR45} は常に E_{LT45} よりも大となっている。また、環孔材のナラおよびニレでは比重が小となるにつれて両方向のヤング係数が接近してくる。これは比重が小となり孔圏の道管の占める割合が増加するにつれて異方性の程度が減少するためと考えられる。ブナ材ではこの傾向はみられない。

iii. E_R , E_T , E_{RT45}

図-3.7(a), (b)および(c)に示すように、 E_R と E_T の比重との関係は E_{LR45} と E_{LT45} のばあい類似しており、低比重域ではナラ、ニレにおいて E_R と E_T が接近する傾向がみられるがブナでは平行のまま推移している。 E_{RT45} に関しては、数値的にも、比重との関係においても E_T に類似する傾向を示すが、回帰式の勾配は E_T よりも急であり、比重の変化に伴う変動割合は大きい。

3.2.5 ポアソン比

各樹種について測定された5種類のポアソン比の平均値、変動係数および試片数を表-3.5に示す。全体的にみてナラとブナの値が同程度で、ニレの μ_{LT} が小となり μ_{RT45} が大となっている。また、 μ_{LT} および μ_{LR} は同一の試験片の板目面および柾目面で測定されたものであるため、両者は直接比較することができ、 $\mu_{LT} > \mu_{LR}$ となる傾向がみられる。

ポアソン比は木材の応力と歪の関係を表す式の中では μ/E の値として出現するので、 μ そのものの値よりも μ/E として取扱うことが合理的であると考えられる。図-3.8(a), (b)および(c)にはこの値を比重との関係で示したが、ナラ材のばあいに明らかに看取されるように直線関係とはなっていない。ここでは指数回帰によりもとめた式とその曲線を図中に示したが、ナラ材のばあい広い比重分布範囲に亘って良い適合性を示している。ニレおよびブナ材に関しては試験片数が少く、ばらつきも大であるが、全体的な傾向は図中の指数式により表現されているとみて良いであろう。

3.2.6 曲げ破壊試験

結果を表-3.6に一括して示した。平均値で比較すると、試験した3樹種の曲げ強度はほぼ同等となるが、ナラ材では最小値と最大値の差が表-3.3のヤング係数のばあいと同様に著

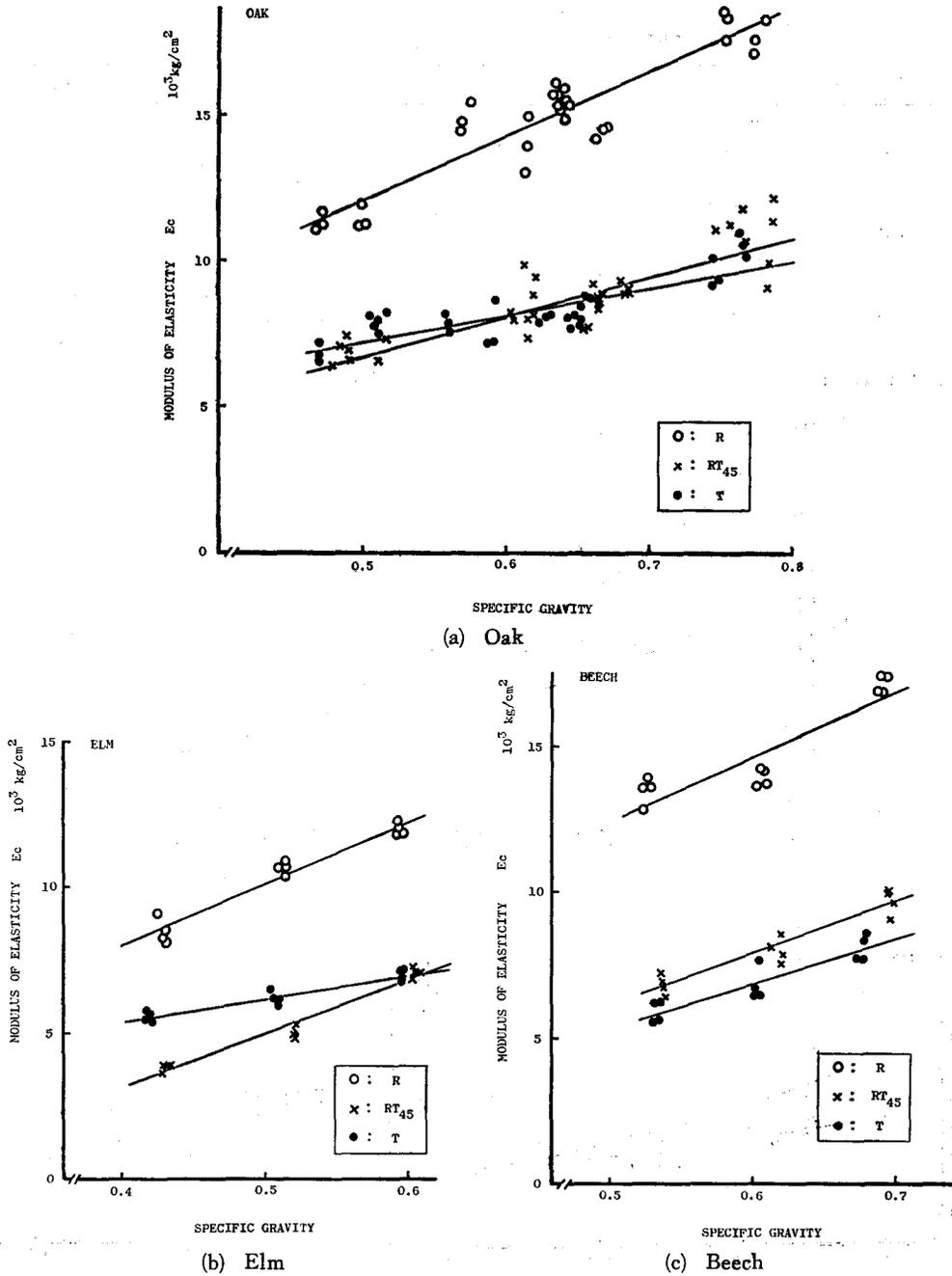


図-3.7 圧縮ヤング係数

Fig. 3.7. Effect of specific gravity on Young's moduli.

(a) Oak

$$E_R = 22.17(S.G.) + 1.00$$

$$E_{RT45} = 13.79(S.G.) - 0.19$$

$$E_T = 9.56(S.G.) + 2.39$$

(b) Elm

$$E_R = 21.25(S.G.) - 0.54$$

$$E_{RT45} = 18.60(S.G.) - 4.36$$

$$E_T = 8.19(S.G.) + 2.06$$

(c) Beech

$$E_R = 22.72(S.G.) + 1.01$$

$$E_{RT45} = 17.71(S.G.) - 2.75$$

$$E_T = 15.46(S.G.) - 2.42$$

表-3.5 ポアソン比測定値
Table 3.5. Poisson's ratios observed

Species		μ_{LT}	μ_{LR}	μ_{RT}	μ_{TR}	μ_{RT45}
Oak	mean	0.499	0.365	0.617	0.335	0.556
	c. v. (%)	11	14	11	10	10
	n	30	30	20	22	29
Elm	mean	0.420	0.330	0.643	0.339	0.646
	c. v. (%)	14	9	9	15	11
	n	15	15	6	6	9
Beech	mean	0.481	0.381	0.671	0.283	0.530
	c. v. (%)	16	12	9	8	13
	n	10	10	6	6	9

Note: c. v.: Coefficient of variation, n: Number of specimen.

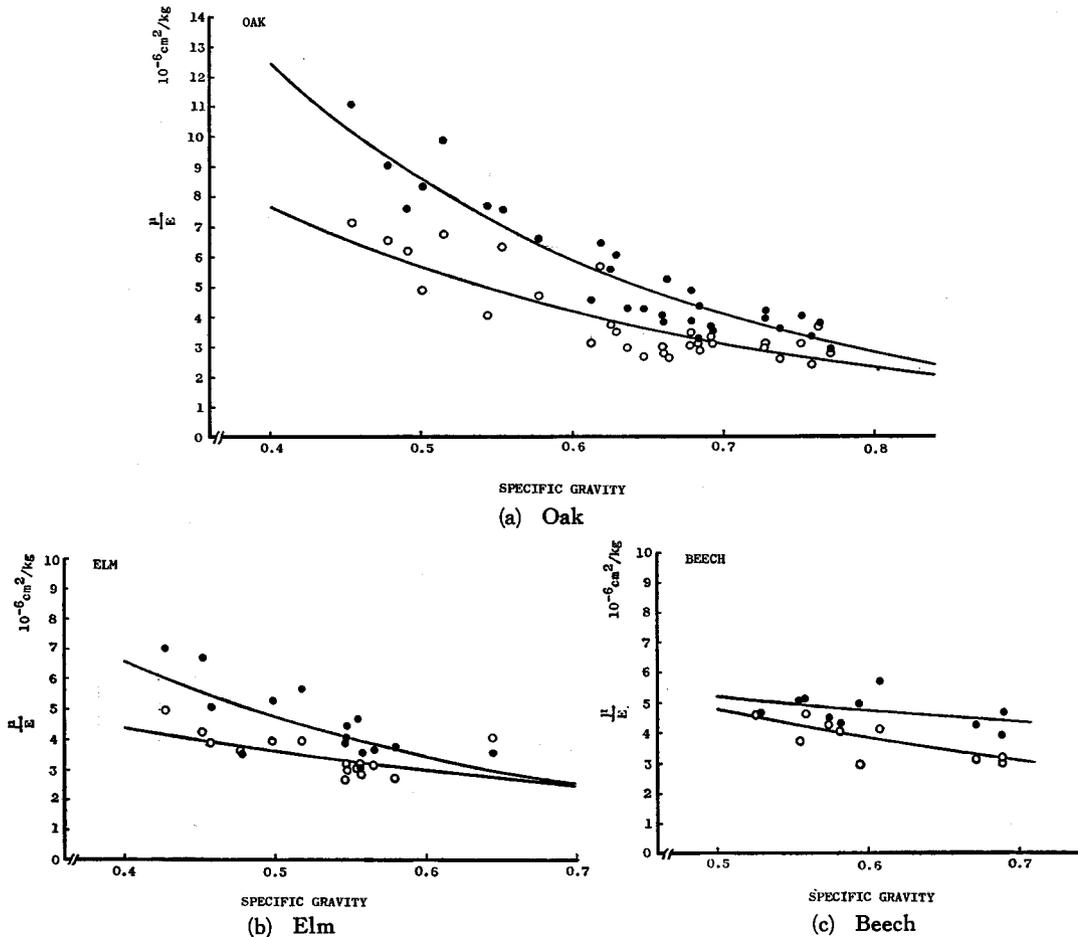


図-3.8 比重と μ/E の関係 ●: μ_{LT}/E_L , ○: μ_{LR}/E_L
Fig. 3.8. Relationship between μ/E and specific gravity.

- (a) Oak $\mu_{LT}/E_L = 54.08 e^{-3.7(S.G.)} \cdot 10^{-6}$, $\mu_{LR}/E_L = 24.99 e^{-3.0(S.G.)} \cdot 10^{-6}$
- (b) Elm $\mu_{LT}/E_L = 23.97 e^{-3.23(S.G.)} \cdot 10^{-6}$, $\mu_{LR}/E_L = 9.26 e^{-1.87(S.G.)} \cdot 10^{-6}$
- (c) Beech $\mu_{LT}/E_L = 7.78 e^{-0.84(S.G.)} \cdot 10^{-6}$, $\mu_{LR}/E_L = 14.55 e^{-2.24(S.G.)} \cdot 10^{-6}$

表-3.6 曲げ破壊試験結果
Table 3.6. Results of bending test

Species	Tree No.	Number of Specimen	Stress at Proportional limit σ_{dp} (kg/cm ²)			Modulus of Rupture σ_b (kg/cm ²)			σ_{dp}/σ_b		
			min.	mean	max.	min.	mean	max.	min.	mean	max.
Oak	1	17	429	529	643	929	1143	1487	0.42	0.47	0.46
	2	14	235	304	452	574	735	1018	0.32	0.41	0.49
	3	27	183	383	672	461	826	1257	0.33	0.46	0.64
	4	20	386	523	621	857	1102	1271	0.39	0.48	0.56
	5	21	140	302	471	359	697	1018	0.35	0.43	0.51
	total	99	140	408	672	359	896	1487	0.32	0.45	0.64
Elm	1	8	431	464	496	929	987	1018	0.44	0.47	0.51
	2	10	281	388	476	709	883	1078	0.39	0.44	0.49
	3	9	194	359	475	581	805	997	0.32	0.44	0.60
	total	27	194	401	496	581	888	1078	0.32	0.45	0.60
Beech	1	9	274	327	367	518	740	925	0.40	0.45	0.53
	2	8	390	435	516	921	1018	1145	0.41	0.43	0.45
	total	17	274	377	516	518	871	1145	0.40	0.44	0.53

Note: Moisture content: 10~13%.

しく大となっている。

曲げ破壊係数に対する比例限度の比率は3樹種全体で0.32~0.64の間にあり、平均ではいずれの樹種でも約0.45となっている。

比重と曲げ強度の関係は図-3.9(a), (b)および(c)に示すように、比重と曲げヤング係数のばあい(図-3.2)に類似した傾向をもっている。直線回帰よりもとめた式を図中に示したが、ナラおよびブナ材では相関係数が0.9以上となった。図-3.10は曲げヤング係数に対する曲げ強度の比(σ_b/E_b)と比重の関係を示したものであるが、比重とは負の相関をもつようである。図中には3樹種を区別せずにプロットしてあるが、これらを一括して直線回帰とみることの妥当性は今後の検討課題のひとつである。

3.2.7 縦圧縮およびせん断強度

ナラ材の圧縮強度は表-3.7にみられるように広範囲に(260~700 kg/cm²)変動しているが、下限値に近いものは低比重のヌカ目材で測定されたものである。ニレ材でも同様であるが強度の分布範囲は320~580 kg/cm²となっている。

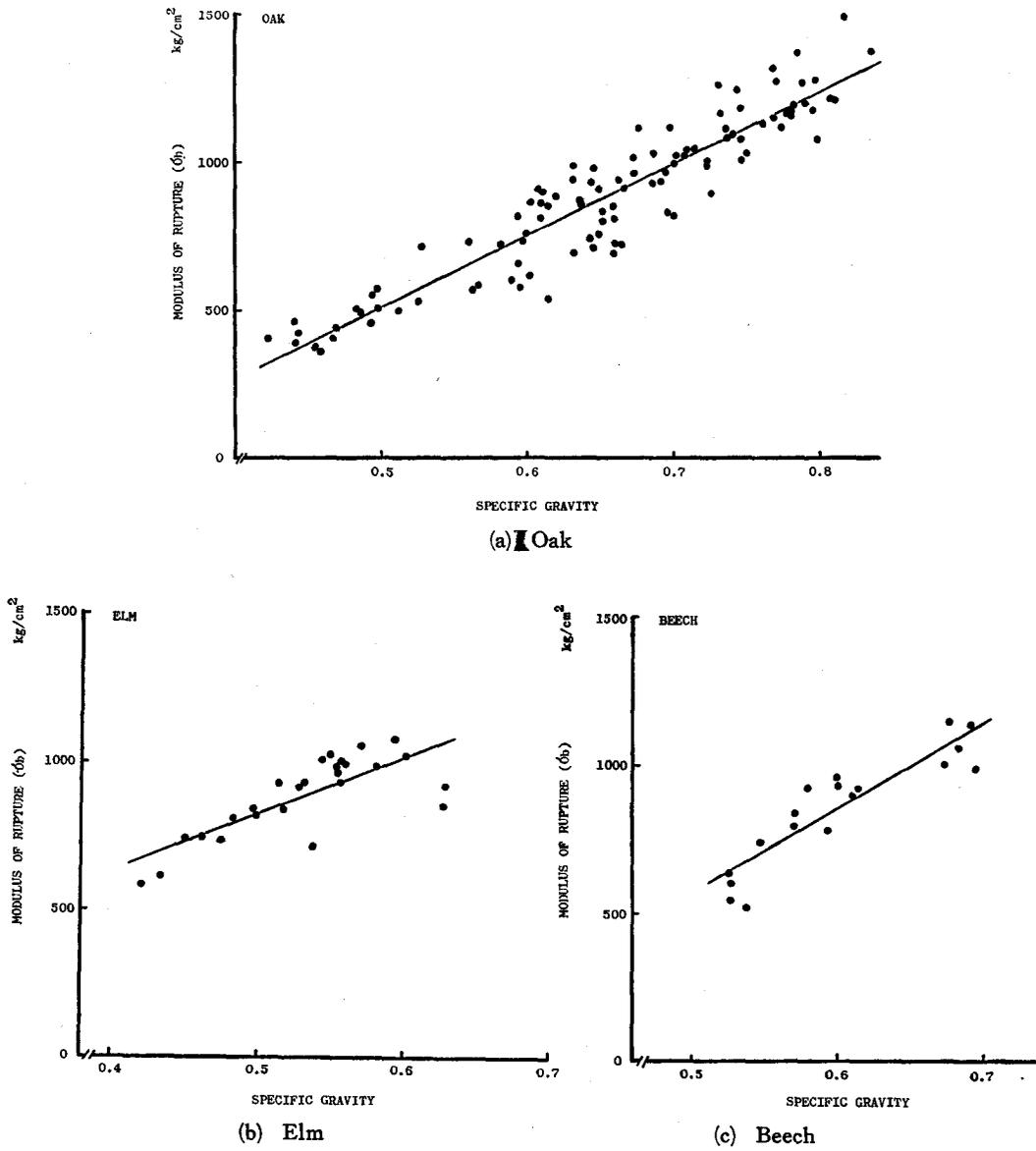


図-3.9 曲げ強度と比重の関係

Fig. 3.9. Effect of specific gravity on modulus of rupture.

(a) Oak $\sigma_b = 2428.7(S.G.) - 706.2$

(b) Elm $\sigma_b = 1917.8(S.G.) - 133.7$

(c) Beech $\sigma_b = 2860.2(S.G.) - 861.4$

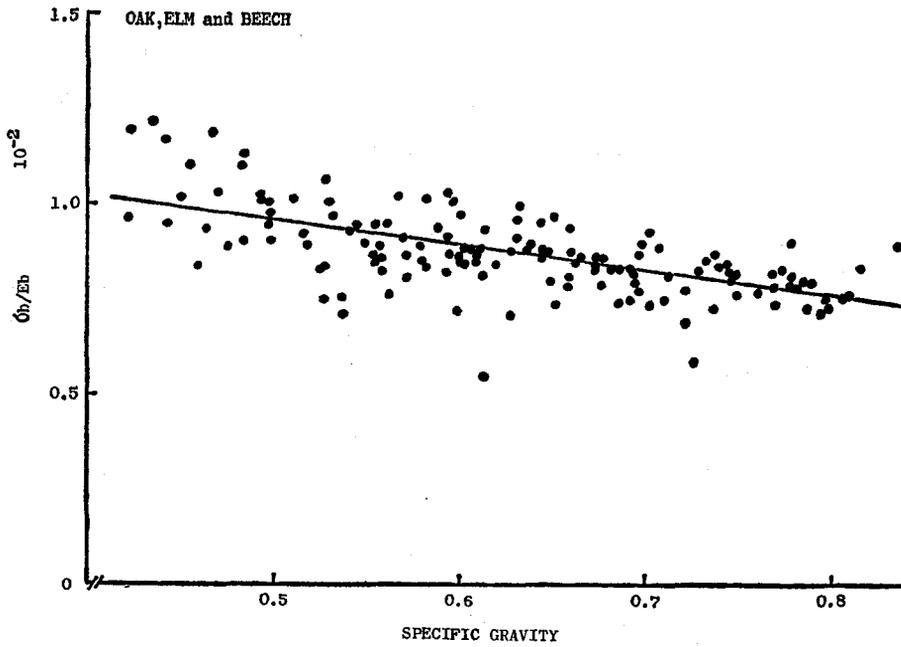


図-3.10 比重と σ_b/E_b の関係

Fig. 3.10. Relationship between σ_b/E_b and specific gravity.

表-3.7 縦圧縮試験結果

Table 3.7. Results of compression test

Species	Tree No.	Number of Specimen	Stress at Proportional limit σ_{ep} (kg/cm ²)			Compressive Strength σ_c (kg/cm ²)			σ_{ep}/σ_c		
			min.	mean	max.	min.	mean	max.	min.	mean	max.
Oak	1	11	225	~ 284	~ 359	480	~ 582	~ 699	0.42	~ 0.49	~ 0.59
	2	10	127	~ 176	~ 257	317	~ 407	~ 525	0.34	~ 0.43	~ 0.49
	3	17	110	~ 222	~ 288	317	~ 466	~ 583	0.32	~ 0.48	~ 0.60
	4	13	191	~ 275	~ 383	486	~ 574	~ 652	0.35	~ 0.48	~ 0.63
	5	15	80	~ 166	~ 259	260	~ 386	~ 551	0.30	~ 0.43	~ 0.51
	total	66	80	~ 223	~ 383	260	~ 479	~ 699	0.30	~ 0.46	~ 0.63
Elm	1	8	272	~ 325	~ 356	477	~ 539	~ 582	0.53	~ 0.60	~ 0.70
	2	10	205	~ 273	~ 354	383	~ 473	~ 550	0.52	~ 0.58	~ 0.64
	3	9	159	~ 246	~ 352	322	~ 437	~ 569	0.50	~ 0.56	~ 0.62
	total	27	159	~ 279	~ 356	322	~ 481	~ 582	0.50	~ 0.58	~ 0.70
Beech	1	9	173	~ 224	~ 275	375	~ 454	~ 522	0.39	~ 0.49	~ 0.59
	2	8	257	~ 290	~ 352	467	~ 558	~ 614	0.45	~ 0.52	~ 0.58
	total	17	173	~ 255	~ 352	375	~ 503	~ 614	0.39	~ 0.51	~ 0.59

Note: Moisture content 10~12%.

圧縮強度に対する比例限度の比はナラ、ニレ、ブナ材でそれぞれ平均で0.46, 0.58, 0.51となる。これらの数値は既往の報告²⁵⁾に比較して全般的に低くなっており、比例限度荷重の判定などの問題が含まれているようである。本実験ではL方向のみならず、T, R, LT45°, LR45°およびRT45°方向に関する圧縮強度も実測したが、ここではL方向のデータのみを示すにとどめた。

せん断強度は表-3.8に結果を一括して示した。せん断面による強度の差はニレ材においては明確ではないが、ブナ材では板目面のせん断強度が柁目面のそれを30 kg/cm²ていど上まわっている(平均値の比較による)。環孔材の板目面せん断では孔圏の道管をつらねて破壊が生じることが多く、散孔材との構造的な相違が強度値に影響を与えているものと思われる。

表-3.8 せん断強度試験結果
Table 3.8. Results of shear test

Species	Tree No.	Number of Specimen	LT Plane			LR Plane		
			min.	mean	max.	min.	mean	max.
Oak	1	11	138	~ 163	~ 199	117	~ 148	~ 165
	2	10	133	~ 148	~ 181	99	~ 120	~ 138
	3	17	110	~ 142	~ 197	88	~ 136	~ 201
	4	13	144	~ 162	~ 185	128	~ 158	~ 179
	5	15	97	~ 130	~ 157	87	~ 119	~ 147
	total	66	97	~ 148	~ 199	87	~ 136	~ 201
Elm	1	8	95	~ 116	~ 132	93	~ 106	~ 114
	2	10	93	~ 110	~ 127	81	~ 108	~ 140
	3	9	79	~ 98	~ 123	71	~ 92	~ 144
	total	27	79	~ 108	~ 132	71	~ 102	~ 144
Beech	1	9	132	~ 140	~ 152	77	~ 101	~ 117
	2	8	139	~ 157	~ 178	123	~ 136	~ 161
	total	17	132	~ 148	~ 178	77	~ 117	~ 161

Note: Moisture content 10~13%.

本試験では、木材の弾性定数に重点をおいたため、強度に関しては実験項目も不十分であり、結果の検討も終了していない。曲げ、圧縮およびせん断強度に関しては今後別の機会に報告する予定である。

3.3 弾性係数間の関係

本節では、以上の実験により測定された木材の弾性定数が直交異方性材料としての取扱いにおいて理論との十分な適合性を有するかどうかについて若干の検討を試みた。

図-2.1の直交3軸 x, y および z に木材の繊維方向 L , 接線方向 T および半径方向 R をそれぞれ一致させれば図-3.11の配置となる。このばあい Eq. 2.1 は次のようになる。

$$\begin{aligned}
 \epsilon_L &= s_{11}\sigma_L + s_{12}\sigma_T + s_{13}\sigma_R \\
 \epsilon_T &= s_{21}\sigma_L + s_{22}\sigma_T + s_{23}\sigma_R \\
 \epsilon_R &= s_{31}\sigma_L + s_{32}\sigma_T + s_{33}\sigma_R \\
 \gamma_{RT} &= s_{44}\tau_{RT} \\
 \gamma_{LR} &= s_{55}\tau_{LR} \\
 \gamma_{LT} &= s_{66}\tau_{LT}
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

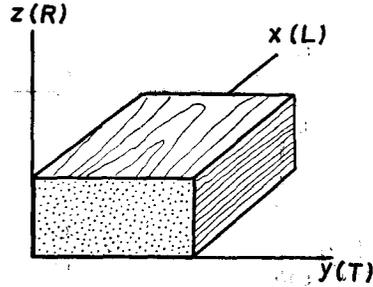


図-3.11 木材の直交主軸
Fig. 3.11. Principal axes in wood.

ここで係数 s は次のようになる。

$$s_{11} = \frac{1}{E_L}, \quad s_{22} = \frac{1}{E_T}, \quad s_{33} = \frac{1}{E_R} \tag{3.2}$$

$$s_{44} = \frac{1}{G_{RT}}, \quad s_{55} = \frac{1}{G_{LR}}, \quad s_{66} = \frac{1}{G_{LT}} \tag{3.3}$$

$$s_{12} = s_{21} = -\frac{\mu_{LT}}{E_L} = -\frac{\mu_{TL}}{E_T} \tag{3.4}$$

$$s_{23} = s_{32} = -\frac{\mu_{TR}}{E_T} = -\frac{\mu_{RT}}{E_R}$$

$$s_{13} = s_{31} = -\frac{\mu_{LR}}{E_L} = -\frac{\mu_{RL}}{E_R}$$

いま、 R 軸を中心にして LT 面内で 45° だけ座標を回転させたばあいを考えると、Eq. 2.4 より平面応力条件では、

$$\frac{1}{E_{LT45}} = \frac{1}{4E_L} + \frac{1}{4E_T} - \frac{\mu_{LT}}{2E_L} + \frac{1}{4G_{LT}} \tag{3.5}$$

LR 面内で 45° の回転を考えると同様にして

$$\frac{1}{E_{LR45}} = \frac{1}{4E_L} + \frac{1}{4E_R} - \frac{\mu_{LR}}{2E_L} + \frac{1}{4G_{LR}} \tag{3.6}$$

RT 面内では、

$$\frac{1}{E_{RT45}} = \frac{1}{4E_R} + \frac{1}{4E_T} - \frac{\mu_{RT}}{2E_R} + \frac{1}{4G_{RT}} \tag{3.7}$$

3.3.1 μ_{RT}/E_R と μ_{TR}/E_T

Eq. 3.4 の相反定理が木材に関して成立することはこれまでも報告されている¹⁴⁾。ここ

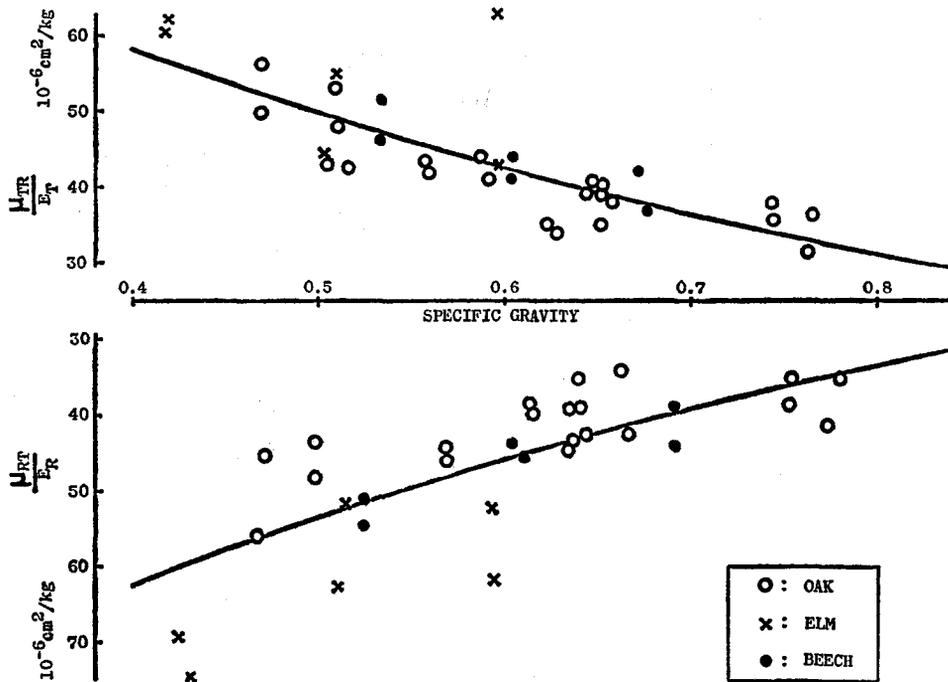


図-3.12 横断面内の μ/E の関係

Fig. 3. 12. Relationship of μ/E in R and T directions.

では比重の変化に伴ってヤング係数が変動したばあいでもこれが成立しているかどうかについて検討してみた。実測したポアソン比は限られているので、Eq. 3.4 のうちの μ_{TR}/E_T と μ_{RT}/E_R の比較のみが可能である。

図-3.12 には、ナラ、ニレおよびブナの各種比重の試片について測定された μ/E の値を記入してある。上下の測定値がほぼ線対称に分布していることが判る。指数回帰により算出した実験式も実測値と良い適合を示しており、3 樹種を一括しても、比重 0.4~0.8 の範囲で $\mu_{RT}/E_R = \mu_{TR}/E_T$ が成立しているものと判断される。

3.3.2 E_L と他の弾性係数との関係

木材のヤング係数およびせん断弾性係数はその材料の比重に関する 1 次式ではほぼ表現できることは 図-3.2, 図-3.3, 図-3.6 あるいは 図-3.7 から明らかとなった。そこで、各樹種の比重の分布範囲内で、いくつかの比重レベルにおける各種の係数をそれぞれの回帰式から算出し表-3.9 に示した。つぎにこれらの値の E_L に対する比を各比重ごとに算出すると表-3.10 が得られる。表の数値からみるとニレ材の E_{RT45}/E_L を除いていずれも比重の増加につれて減少しており、異方向が比重の増加とともに大となることが判る。例えば、比重の増加によって縦方向のヤング係数が 2 倍になることはめずらしい事ではないが、横方向のヤング係数はそのように著しい変化をしないと言うことである。通常、概略的に弾性係数間の関係を a:b:c 等のよ

うに定数の比で表すことが多いが、比重を考慮すれば、より正確な弾性係数間の関係をもとめることが可能になると思われる。

σ_b/E_L は、非破壊的に測定が可能なヤング係数から曲げ強度を推定するばあいのひとつの根拠となる数値であるが、同表に示すように、比重により変動しており、ヤング係数から直ちに曲げ強度を計算することにはいくらか問題があると思われる。

表-3.9 回帰式から算出した弾性係数と σ_b

Table 3.9. Elastic constants and modulus of rupture calculated from regression equations

Species	Specific Gravity	MOE (10^3 kg/cm^2)						G_L (10^3 kg/cm^2)	μ/E ($10^{-6} \text{ cm}^2/\text{kg}$)				σ_b (kg/cm^2)
		L	T	R	LT45	LR45	RT45		μ_{LT}/E_L	μ_{LR}/E_L	μ_{RT}/E_R	μ_{TR}/E_T	
Oak	0.42	21	6.4	10.3	12.0	13.0	5.6	6.2	11.4	7.2	61	56	310
	0.50	50	7.2	12.1	14.2	17.0	6.7	7.3	8.5	5.6	54	50	510
	0.60	86	8.1	14.3	16.8	21.8	8.1	8.8	5.8	4.2	46	42	750
	0.70	122	9.1	16.5	19.4	26.6	9.5	10.3	4.0	3.1	39	36	990
	0.84	172	10.4	19.6	23.0	33.4	11.4	12.4	2.4	2.0	31	29	1330
Elm	0.40	52	5.3	8.0	10.0	11.0	3.1	5.2	6.6	4.4	63	58	630
	0.50	85	6.1	10.1	12.6	15.2	4.9	6.7	4.8	3.6	54	50	820
	0.60	119	7.0	12.2	15.2	19.2	6.8	8.2	3.5	3.0	46	42	1020
	0.67	142	7.5	13.7	17.0	22.0	8.1	9.3	2.8	2.6	41	38	1150
Beech	0.52	72	5.6	12.8	11.4	20.6	6.5	7.5	5.0	4.5	52	48	620
	0.60	100	6.8	14.7	14.2	24.2	7.9	8.8	4.7	3.8	46	42	860
	0.71	139	8.5	17.2	18.4	29.2	9.8	10.6	4.3	3.0	39	36	1170

表-3.10 比重と異方度の関係

Table 3.10. Effect of specific gravity on the anisotropy

Species	Specific Gravity	E_T/E_L	E_R/E_L	E_{LT45}/E_L	E_{LR45}/E_L	E_{RT45}/E_L	G_L/E_L	σ_b/E_L (%)
Oak	0.42	0.31	0.49	0.57	0.62	0.27	0.30	1.48
	0.50	0.14	0.24	0.28	0.34	0.13	0.15	1.02
	0.60	0.09	0.17	0.20	0.25	0.09	0.10	0.82
	0.70	0.08	0.14	0.16	0.22	0.08	0.08	0.81
	0.84	0.06	0.11	0.13	0.19	0.07	0.07	0.77
Elm	0.40	0.10	0.15	0.19	0.21	0.06	0.10	1.21
	0.50	0.07	0.12	0.15	0.18	0.06	0.08	0.96
	0.60	0.06	0.10	0.13	0.16	0.06	0.07	0.86
	0.67	0.05	0.10	0.12	0.16	0.06	0.07	0.81
Beech	0.52	0.08	0.18	0.16	0.29	0.09	0.10	0.86
	0.60	0.07	0.15	0.14	0.24	0.08	0.09	0.86
	0.71	0.06	0.12	0.13	0.21	0.07	0.08	0.84

3.3.3 せん断弾性係数の算出

先に述べたように、本実験で行った2方桁木取りの正方形断面棒の振り試験より得られるせん断弾性係数は桁目面の G_{LR} と板目面の G_{LT} の合成値である。 G_{LR} あるいは G_{LT} を直接測定するには桁目板および板目板のせん断試験によるのが理想的であるが、試験体の準備に多大の困難が伴う。ここでは、圧縮試験より得られたヤング係数を Eq. 3.5~3.7 に代入してそれぞれ G_{LT} , G_{LR} および G_{RT} を算出し、 G_{LT} と G_{LR} の平均値と、正方形断面棒の振りより得た見かけのせん断弾性係数 G_L の実測値とを比較した。代入した数値は表-3.9 に示したものであるが、これらのうち Eq. 3.7 の μ_{RT}/E_R の値は、表-3.9 の μ_{RT}/E_R と μ_{TR}/E_T の平均値を使用している。

計算結果は表-3.11 に各樹種ごとに比重別に示した。ナラ材では、低比重域で $G_{LT} > G_{LR}$ となっているが比重が増加するとこの関係が逆転する。ニレ材では常に G_{LT} が大となり、ブナ材では G_{LR} の方が大となっている。

振り試験より得た G_L と計算値の比は全平均で 0.99、変動係数は約 6% となり、直交異方性理論より導かれた Eq. 3.5, 3.6 および 3.7 で示される弾性係数間の関係が成立していることが実験的に検証された。

表-3.11 計算値と実測値の比較 (G)

Table 3.11. Comparison of observed and calculated modulus of rigidity

Species	Specific Gravity	Calculation using Eqs.			Cal. av.	Observed G_L	Obs. / Cal. av.
		(3.5) G_{LT}	(3.6) G_{LR}	(3.7) G_{RT}	$\frac{G_{LT} + G_{LR}}{2}$		
Oak	0.42	6.64	5.75	1.73	6.20	6.2	1.00
	0.50	7.12	6.90	2.09	7.01	7.3	1.04
	0.60	8.63	9.03	2.57	8.83	8.8	1.00
	0.70	10.35	11.51	3.06	10.93	10.3	0.94
	0.84	12.96	14.91	3.78	13.94	12.4	0.89
Elm	0.40	4.87	4.38	0.91	4.63	5.2	1.12
	0.50	6.60	6.27	1.52	6.44	6.7	1.04
	0.60	8.41	8.07	2.22	8.24	8.2	1.00
	0.67	9.95	9.35	2.73	9.65	9.3	0.96
Beech	0.52	5.94	9.00	2.18	7.47	7.5	1.00
	0.60	7.46	10.54	2.64	9.00	8.8	0.98
	0.71	9.89	12.88	3.25	11.39	10.6	0.93

3.4 要 約

北海道産のナラ、ニレおよびブナに関して、主として弾性定数とそれらの間の関係を実験的に検討する一方、直交異方性材料としての取扱いの妥当性を確かめた。主要な結果を要約すれば下記のとおりである。

1. 本実験において使用した無欠点の試験体について得られた曲げヤング係数は比重との相関係数 0.93 を示した。
2. 角棒の捩りよりもとめられる見かけのせん断弾性係数はほぼ $5 \sim 15$ (t/cm^2) の範囲に入っており、比重とは高い相関を有している (相関係数 0.96)。
3. ヤング係数は、曲げ試験および圧縮試験の両方から得られた値がほぼ一致している。
4. ポアソン比のヤング係数に対する比の値は、比重に関する指数関数で表現することが可能で、比重増加に伴って比の値が減少する傾向がいずれの樹種においてもみとめられた。半径方向および接線方向に関するポアソン比およびヤング係数の関係を検討した結果、比重および樹種に関係なく MAXWELL の相反定理が成立していることが明らかとなった。
5. 圧縮試験より得られた E_L , E_T , E_R , E_{LR45} , E_{LR45} , μ_{LT} , μ_{LR} から算出されたせん断弾性係数 G_{LT} および G_{LR} は実測された見かけのせん断弾性係数 G_L にきわめて近似しており、直交異方性理論による応力と歪の関係式が木材に対しても十分な適合性を有することが確かめられた。
6. 木材の弾性係数間の関係は各樹種についてそれぞれ一定のものではなく、比重の変化に伴ってこれらの関係も変化することが明らかとなった。したがって、ある弾性係数を基準としてこれとの関係から他の弾性係数あるいは強度値等を推定するばあいには、十分な実験的裏付けを得ておく必要があると考えられる。

第4章 あて材の弾性定数

4.1 材料および方法

4.1.1 試験材料

試験体を採取した4樹種の原板あるいは原木の状況は次のとおりである。

トドマツ： 苫小牧産；長径 20 cm，短径 16 cm の顕著なあてを有する丸太。年輪幅が広く、褐色を呈する典型的なあて材部から木取った試片を R-zone 材，これと反対側のあての生じていない部分からのものを N-zone 材，これらの中間部からのものを M-zone 材と称した。同，雨竜産；当別産；天然乾燥された板材で，部分的にあて材を含むもの，原木径などは不明。

イチョウ： 札幌産；直径 25 cm，樹幹の曲がりや偏心成長がみられないが，製材後に特有の色調からあて材を含むと判断されたもの。正常材を N，あて材を C と称している。

ヤチダモ： 札幌産；直径 22 cm の傾斜木で，傾斜の上側に淡色の材部を有し，製材の際には材面に粗い毛羽立ちを生じた。また天然乾燥後の仕上げ面は淡い絹糸状のつやを示した。正常材を N，あて材を T と称している。

ヤマナラン： 札幌産；直径 30 cm，ゆるい S 字形に弯曲した丸太。傾斜の上側にヤチダモと同様のあて材と判断される材部を含んでいる。正常材を N，あて材と判定されたものを T と称した。

4.1.2 曲げ剛性試験

試験体寸法および数量は表-4.1のとおりである。弯曲した原木から木取りした試験片では目切れを含むことが避けられなかったが、少くとも試片中央部では繊維方向とスパン方向が一致するように配慮した。曲げ剛性試験はすべて単純支持、中央集中荷重条件により行い、撓みは荷重点直下で測定した。曲げ試験のスパンおよび応力レベルは表-4.2のとおりである。

表-4.1 曲げ試験片

Table 4.1. The specimen for bending test

Species	Cross Section (cm×cm)	Length (cm)	Number of Specimen	Type ¹⁾ of Wood
Fir	2×2	34	38	N
			14	M
			17	C
Ginkgo	2.5×2.5	50	25	N
			18	C
Ash	{ 2.5×2.5 2×2	50	22	N
		34	25	T
Aspen	2×2	34	37	N
			12	T

Note: 1) N: normal wood. M: intermediate wood.
C: compression wood. T: tension wood.

表-4.2 剛性試験の条件

Table 4.2. The condition of stiffness tests

Species	Cross Section of Test Piece (cm×cm)	Bending Test		Torsion Test	
		Span (cm)	Bending Stress (kg/cm ²)	Gage Length (cm)	Shear Stress (kg/cm ²)
Fir	2×2	32	70	16	12
Ash					
Aspen					
Ginkgo	2.5×2.5	45	110	14	17
Ash					

4.1.3 振り剛性試験

振り試験では、曲げ剛性試験終了後の試験片をそのまま用いて、振りモーメントと振り角を測定した。角度の測定は所定の間隔で試験片に取付けた2個の鏡の回転をスケール目盛から読みとることにより行った。なおこの試験でもとめられるせん断弾性係数は前にも述べたように見かけのものである。振り角測定のための鏡の取付間隔および応力レベルは表-4.2に示した。

4.1.4 曲げ破壊試験

トドマツ、イチョウおよびヤチダモ材については、曲げおよび振り剛性試験を終了したも

のから各樹種 16 本を、ヤマナラシ材については別に用意した試験片 (断面 2.5×2.5 cm) 20 本を使用した。曲げスパンは断面 2×2 cm の材では 32 cm, 断面 2.5×2.5 cm のものは 45 cm とし、荷重はいずれも中央集中荷重である。

4.1.5 圧縮試験およびポアソン比の測定

曲げ破壊後の試験片端部より圧縮試片を木取った。試片寸法はトドマツ材で $2 \times 2 \times 7$ cm, その他の材では $2.5 \times 2.5 \times 9$ cm とした。この試験では歪ゲージにより繊維方向の圧縮歪を測定してヤング係数を算出したほかに、いくつかの試片については横歪も同時に測定し、ポアソン比を算出した。

4.2 結果と考察

4.2.1 比重と年輪幅

トドマツでは、正常材、中間材、あて材の順に、あての程度が大きくなるにつれて、比重と年輪幅が増大し、最も顕著なあて材では、比重が 0.7 を超え年輪幅が 8 mm に近いものが出現した。他の 3 樹種では、平均比重ではあて材の方が大となっているものの、年輪幅ではヤチダモあて材がわずかに広いほかはむしろ狭くなっている (表-4.3)。

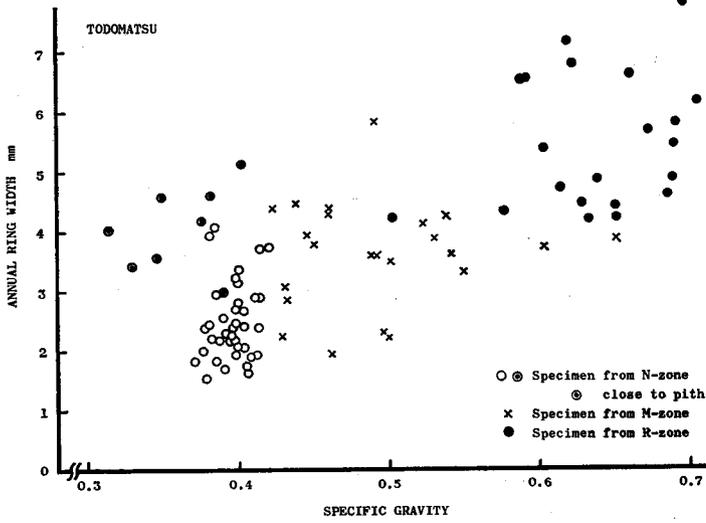
表-4.3 試料の比重と年輪幅

Table 4.3. Specific gravity and annual ring width

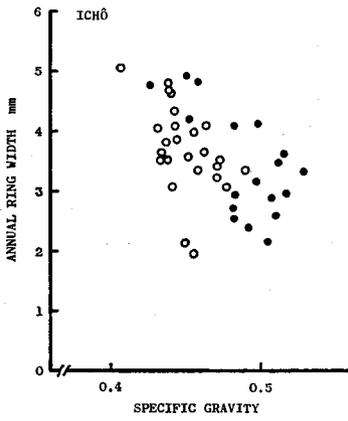
Species	Type of Wood	Specific Gravity			Ring Width (mm)			Number of Specimen
		min.	mean	max.	min.	mean	max.	
Fir	N	0.314	~ 0.389	~ 0.420	1.53	~ 2.78	~ 5.12	38
	M	0.423	~ 0.478	~ 0.539	1.94	~ 3.64	~ 5.83	14
	C	0.503	~ 0.640	~ 0.705	4.15	~ 5.10	~ 7.13	17
Ginkgo	N	0.407	~ 0.450	~ 0.490	1.95	~ 3.69	~ 5.04	25
	C	0.427	~ 0.489	~ 0.529	2.37	~ 3.41	~ 4.92	18
Ash	N	0.614	~ 0.654	~ 0.708	1.84	~ 2.97	~ 5.06	22
	T	0.625	~ 0.689	~ 0.765	2.26	~ 3.14	~ 6.10	25
Aspen	N	0.372	~ 0.418	~ 0.542	2.22	~ 4.45	~ 9.25	37
	T	0.422	~ 0.491	~ 0.560	2.57	~ 3.88	~ 6.00	12

正常材とあて材の分布範囲は図-4.1(a)のトドマツでは明瞭に区別されるが図-4.1(b)~(d)のイチョウ、ヤチダモおよびヤマナラシの 3 樹種では、年輪幅の分布範囲が正常材とあて材でほぼ等しい。この実験で使用したトドマツ以外の 3 樹種では、あての程度がそれほど顕著ではなかったこともあるが、肉眼的にあて材と判断される材においても、年輪幅の増加を必ずしも伴わないことが明らかとなった。

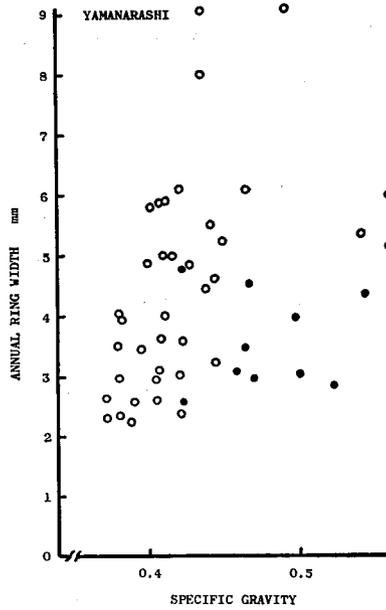
各樹種の正常材およびあて材の比重および年輪幅の最小値、最大値、平均値等を一括して表-4.3に示した。



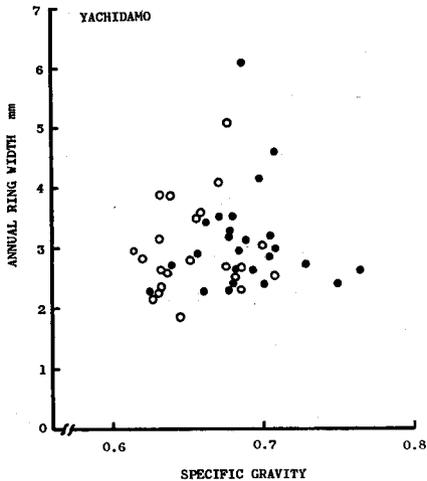
(a) Fir



(b) Ginkgo



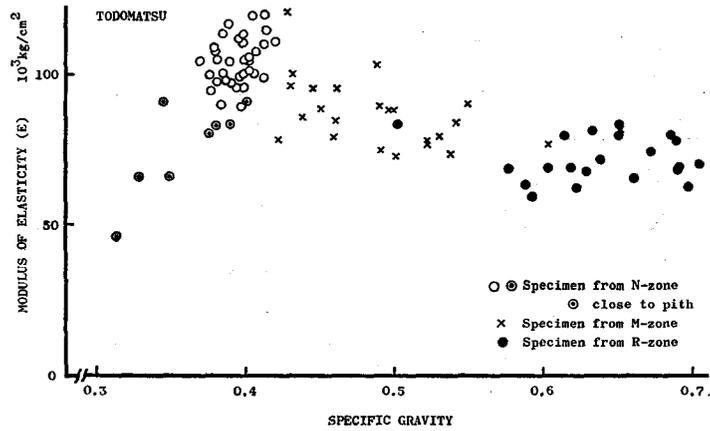
(d) Aspen



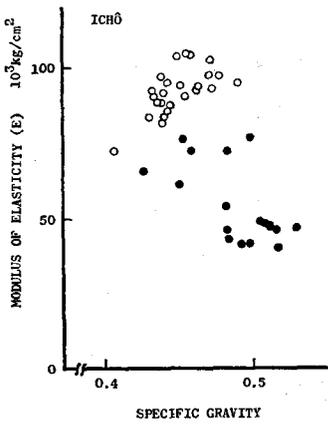
(c) Ash

図-4.1 年輪幅と比重の関係
 ○: 正常材, ●: あて材

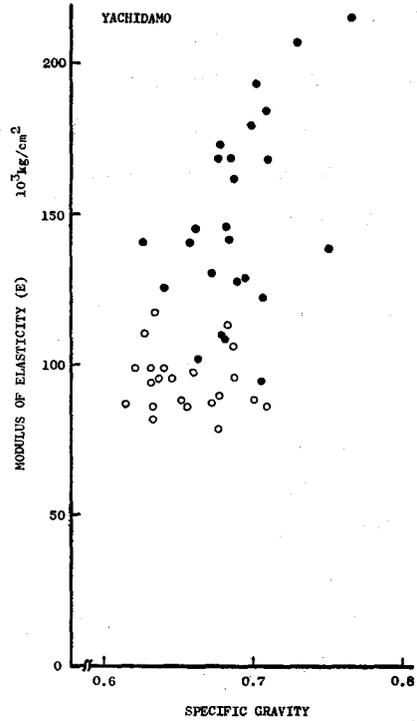
Fig. 4.1. Relationship between annual ring width and specific gravity.
 ○: normal wood, ●: reaction wood.



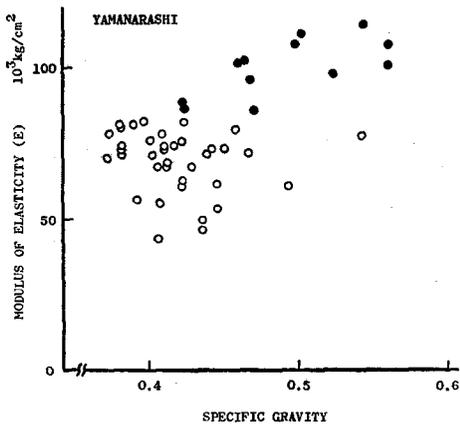
(a) Fir



(b) Ginkgo



(c) Ash



(d) Aspen

図-4.2 比重とヤング係数の関係

○: 正常材, ●: あて材

Fig. 4.2. Effect of specific gravity on MOE.

○: normal wood, ●: reaction wood.

4.2.2 ヤング係数

比重とヤング係数の関係は、図-4.2(a)~(d)に示すとおりである。トドマツ材においては、髓近辺の材および正常材のヤング係数は比重に比例して増加している。しかし、中間部の材およびあて材では逆に比重と反比例してヤング係数は減少し、比重0.6以上の典型的なあて材ではヤング係数が70 t/cm²ていどで一定値となっている。イチョウ材では比重の出現範囲がトドマツのばあいと比較して狭いが、正常材ではヤング係数が比重に比例して増加し、あて材では50 t/cm²ていどまで減少するなど、比重とヤング係数の関係はトドマツのばあいによく似ている。

広葉樹2種のあて材のばあいはこれと対照的で、正常材のヤング係数がある範囲内に分布しているのに対して、あて材では比重とともにヤング係数は増加し、ヤマナラシ材では110 t/cm²を超えるものも出現する。この傾向はヤチダモあて材でさらに顕著になり、200 t/cm²を超えるものもみられた。

4.2.3 せん断弾性係数

あて材のせん断弾性係数については非常に興味ある結果が得られた。すなわち、トドマツおよびイチョウあて材では、ヤング係数のばあいとは逆に、比重の増加とともにせん断弾性係数が大となる関係が明らかになった。図-4.3に示すように、トドマツの比重0.4前後の正常材のせん断弾性係数は5~7 t/cm²であるのに対し、比重0.5ていどの中間材で約10 t/cm²、比重0.6以上の顕著なあて材では約15 t/cm²となり、正常材の2~3倍の値を示す。また、髓近辺の未成熟材とみられる試験体では、比重が小となっているにも拘らずせん断弾性係数の低下はみられない。

図-4.3(b)のイチョウ材のばあいでも、トドマツと同様の傾向がみられる。すなわち、正常材ではせん断弾性係数が8~10 t/cm²であるのに対して、あて材では10~12 t/cm²まで増加していることが判る。

上記の2樹種に対してヤチダモ材では、図-4.3(c)から明らかなように、比重0.6~0.7の正常材のせん断弾性係数が約12 t/cm²で一定となっているのに対しあて材では、比重が同程度以上であっても10 t/cm²以下のものが多く現われている。これはトドマツおよびイチョウ材のばあいと全く逆の現象である。ヤマナラシ材では、正常材、あて材ともにせん断弾性係数は比重と比例関係にあるとみられるが、その勾配は正常材に比較してあて材の方が小さいようである(図-4.3(d))。

4.2.4 E/G 値と \sqrt{EG} 値

通常の使用条件下では、木材が振りモーメントを負担し、せん断弾性係数が材の変形挙動を直接的に左右するばあいはまれであり、殆どのばあいせん断弾性係数の影響はスパンと材せいとの比の比較的小さな梁の曲げにおいて、せん断付加撓みとして現われる。このばあい計算上必要な数値はヤング係数とせん断弾性係数の比 E/G であることから、前章の図-3.4と同様に

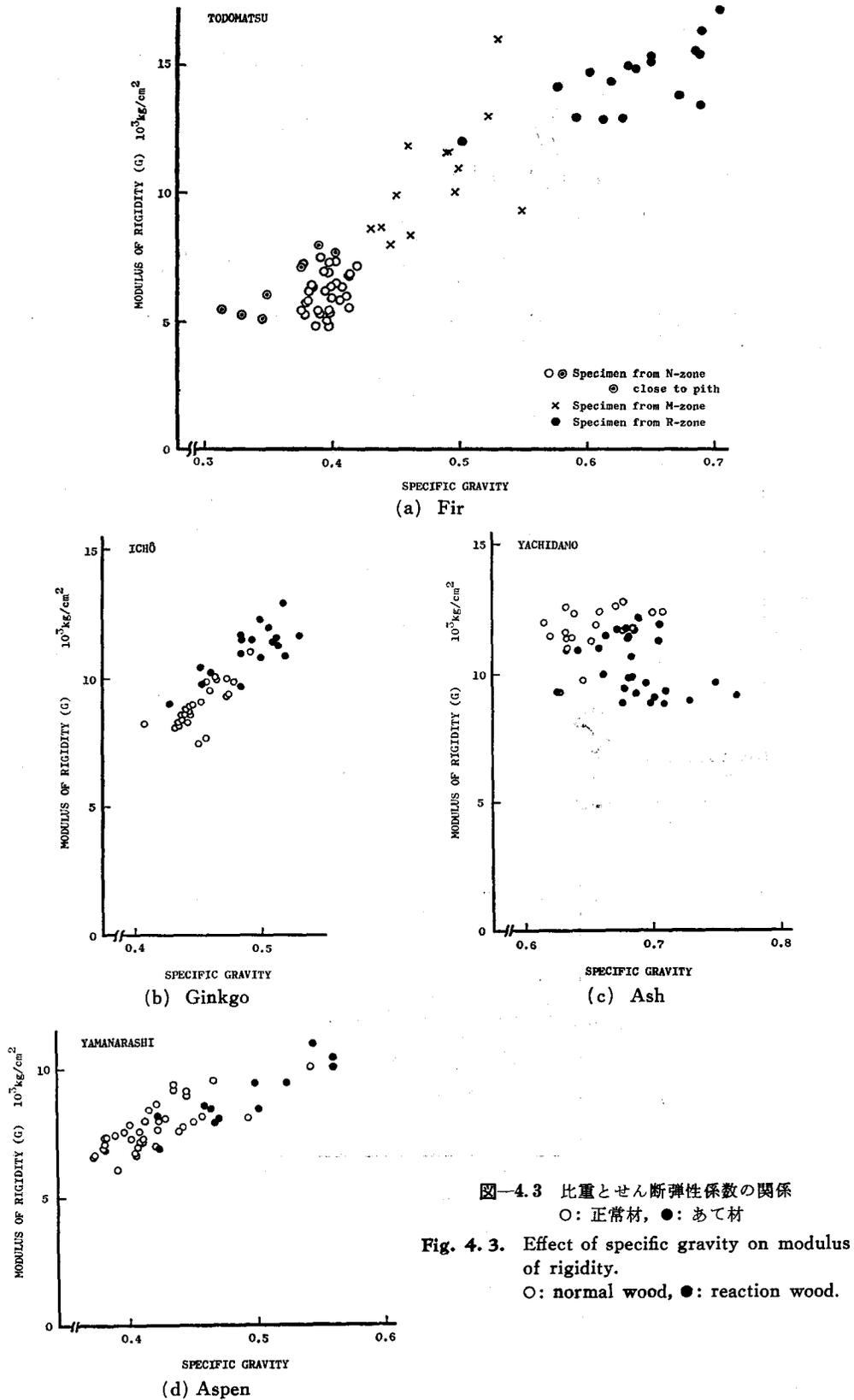
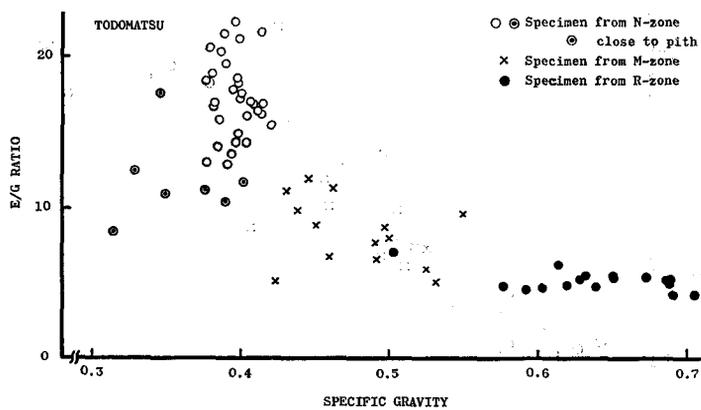
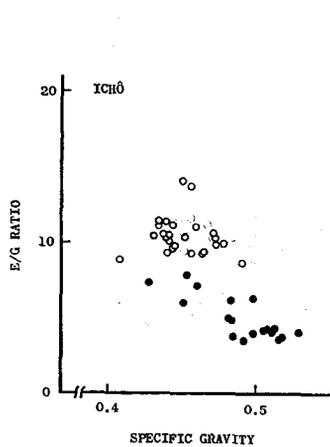


図-4.3 比重とせん断弾性係数の関係
○: 正常材, ●: あて材

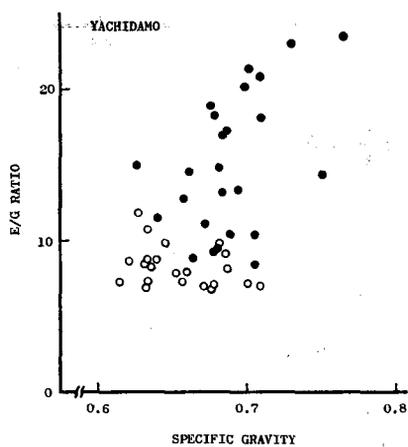
Fig. 4.3. Effect of specific gravity on modulus of rigidity.
○: normal wood, ●: reaction wood.



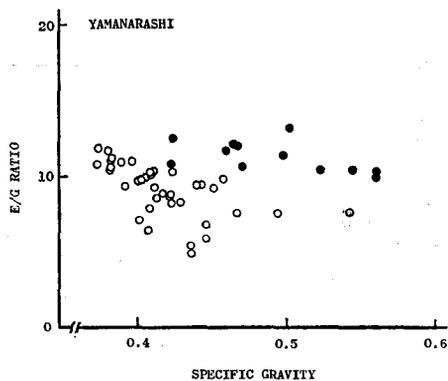
(a) Fir



(b) Ginkgo



(c) Ash



(d) Aspen

図-4.4 比重と E/G ○: 正常材, ●: あて材

Fig. 4.4. Relationship between E/G and specific gravity.

○: normal wood, ●: reaction wood.

これを縦軸にとり、比重を横軸にとって各樹種について作図したものが図-4.4(a)~(d)である。

すでに述べたように、針葉樹あて材ではヤング係数 E が小となり、せん断弾性係数 G が大となるため E/G 値は小となる。また広葉樹のあて材では E が大、 G が小となるため、 E/G 値は針葉樹材のばあいよりも大となり差が拡大されることになる。図-4.4(a)によれば、トドマツ正常材の E/G 値はほぼ13~22の範囲にあるのに対して、中間材では比重の増加に伴って減少し、比重約0.6以上のあて材では E/G は5ていどで一定値をとっている。また未成熟材とみなされる材の E/G は正常材に比較して小さくなっており、どちらかと言えば中間材に近い値を示しており、未成熟材とあて材の細胞構造の類似性を示唆するものとして興味深いものがある。イチョウ材のばあいも、この傾向はトドマツ材と全く同様となっている(図-4.4(b))。

ヤチダモ材では上記の針葉樹材とは逆に、正常材の E/G が7~10であるのに対しあて材では8~24となりトドマツあるいはイチョウ材のばあいと正反対の傾向を示している(図-4.4(c))。ヤマナラン材のばあいは他の樹種と比較するとその差は顕著ではないが、針葉樹材とは反対の傾向を示しているとみることができ(図-4.4(d))。以上の4樹種を一括してみると、 E/G 値で約10を境界としてあて材と正常材の分布域が区別できるようである。

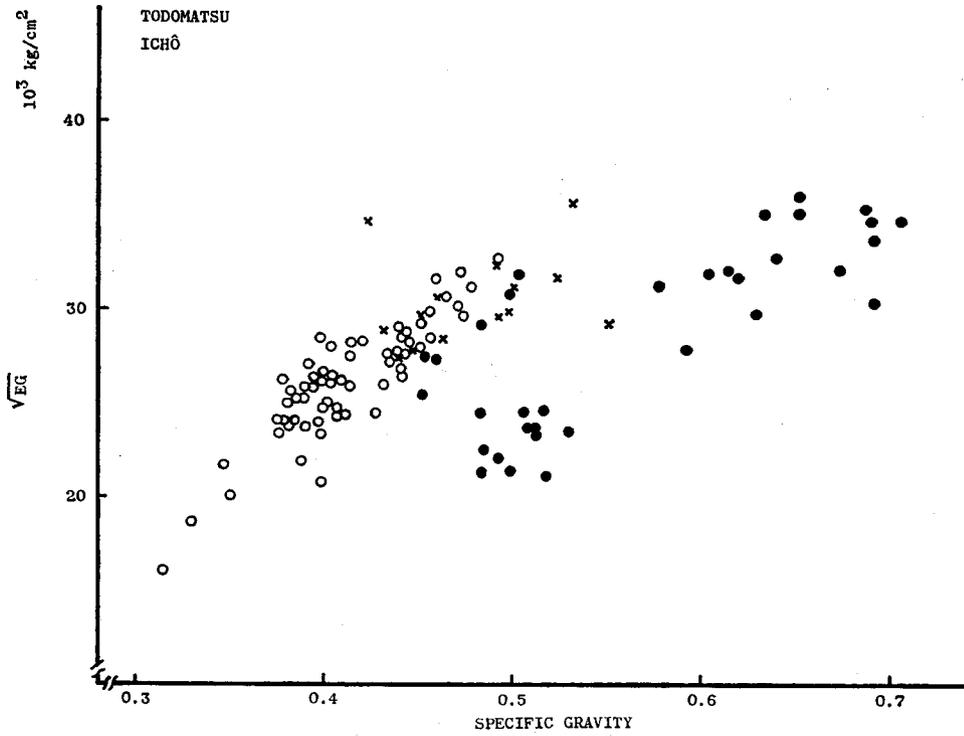
表-4.4 および図-4.5(a) および(b) に示した \sqrt{EG} は、ヤング係数とせん断弾性係数の相乗平均であり、深い梁の曲げにおいて横倒れ座屈荷重を決定する値である。これは木構造の計算において最近問題にされるようになったもので、一定の材積の木材でより大きな曲げ剛性を確保しようとするれば、材幅を減少して材せいを増加する方向に進むからである。各樹種の平均値でみると、ヤマナラン正常材の 23 t/cm^2 からヤチダモあて材の 38.5 t/cm^2 までかなり広い範囲に分散している。また、イチョウ材を除きあて材の \sqrt{EG} は正常材のそれよりも大となっている。

表-4.4 E/G および \sqrt{EG}

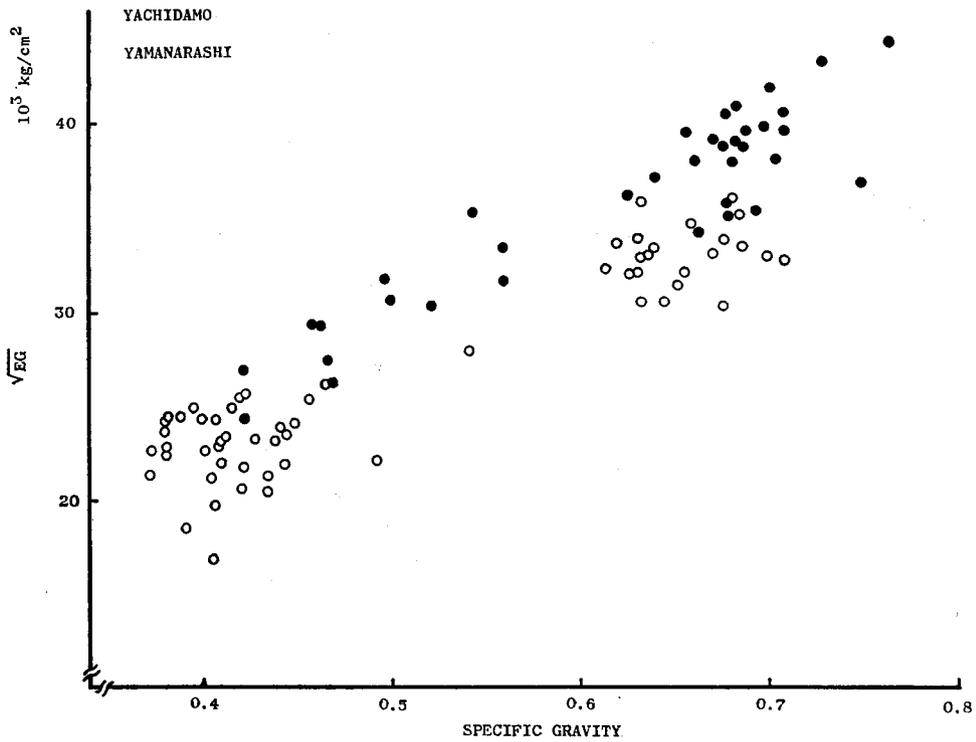
Table 4.4. E/G and \sqrt{EG}

Species	Type of Wood	E/G			$\sqrt{EG} \text{ } 10^3 \text{ kg/cm}^2$		
		min.	mean	max.	min.	mean	max.
Fir	N	12.9	17.2	22.2	20.7	25.3 (64)*	28.4
	C	4.1	6.6	11.9	27.3	31.6 (56)	35.9
Ginkgo	N	8.6	10.4	14.0	24.4	28.7 (64)	32.3
	C	3.6	5.0	7.8	21.0	24.4 (50)	30.7
Ash	N	4.9	9.2	11.8	16.9	23.0 (55)	28.0
	T	10.0	11.3	13.2	24.4	29.7 (61)	35.3
Aspen	N	6.8	8.3	11.9	30.3	33.0 (51)	36.0
	T	8.4	15.1	23.5	34.2	38.5 (56)	44.4

Note *: Values in parentheses are specific flexural-torsional moduli ($\times 10^6 \text{ cm}$) or \sqrt{EG} divided by average specific gravity in Table 4.3.



(a) Fir and Ginkgo



(b) Ash and Aspen

図-4.5 比重と \sqrt{EG} ○: 正常材, ●: あて材

Fig. 4.5. Relationship between \sqrt{EG} and specific gravity.
○: normal wood, ●: reaction wood.

表-4.5 曲げ試験結果
Table 4.5. Results of bending test

Species	Type of Wood	Number of Specimen	Specific Gravity			Modulus of Elasticity E_b (10^3 kg/cm 2)			Stress at Proportional Limit σ_{bp} (kg/cm 2)			Modulus of Rupture σ_b (kg/cm 2)		
			min.	mean	max.	min.	mean	max.	min.	mean	max.	min.	mean	max.
Fir	N	8	0.314	0.379	0.415	58.8	106.1	125.0	320	513	600	489	755	914
	M+C	8	0.448	0.606	0.501	67.7	80.8	102.4	395	473	575	625	924	1108
Ginkgo	N	8	0.405	0.446	0.491	64.4	84.7	100.1	292	404	498	654	791	929
	C	8	0.458	0.496	0.530	39.2	57.7	91.7	188	319	508	558	701	852
Ash	N	8	0.622	0.669	0.706	80.4	95.2	117.9	235	308	376	848	972	1145
	T	8	0.629	0.682	0.714	96.0	156.1	201.2	281	454	608	996	1161	1377
Aspen	N	10	0.363	0.394	0.416	48.5	66.1	78.0	205	288	355	478	635	724
	T	10	0.406	0.462	0.500	55.2	75.8	96.0	220	275	340	523	664	765

表-4.6 圧縮試験結果
Table 4.6. Results of compression test

Species	Type of Wood	Number of Specimen	Specific Gravity			Modulus of Elasticity E_c (10^3 kg/cm 2)			Stress at Proportional Limit σ_{cp} (kg/cm 2)			Compressive Strength σ_c (kg/cm 2)		
			min.	mean	max.	min.	mean	max.	min.	mean	max.	min.	mean	max.
Fir	N	8	0.306*	0.369	0.400	65.1*	115.2	143.1	215*	316	380	290*	412	479
	M+C	8	0.457	0.605	0.694	70.8	86.8	101.9	285	316	345	435	567	647
Ginkgo	N	7	0.395	0.429	0.452	75.8	94.6	111.9	213	287	361	349	404	448
	C	6	0.441	0.469	0.494	44.4	67.6	94.3	151	217	282	343	380	422
Ash	N	8	0.620	0.658	0.689	82.4	97.9	122.6	198	220	279	401	440	493
	T	9	0.598	0.675	0.703	92.8	171.6	219.6	205	330	419	433	519	575
Aspen	N	5	0.371	0.390	0.427	61.8	79.6	96.2	130	195	250	313	337	372
	T	7	0.393	0.431	0.458	67.4	88.9	122.8	160	180	205	273	329	384

Note *: Specimen including pith.

る。しかし、これらの値をそれぞれの樹種の平均比重で除して単位比重あたりの数値でみると表-4.4の括弧内に示すように 50×10^6 cm から 64×10^6 cm の範囲に全体が入っている。比重との関係は図-4.5(a)および(b)に針葉樹と広葉樹をそれぞれ一括して示した。いずれも比重とはほぼ直線的な比例関係をもち、その傾斜も等しいとみられるが、針葉樹あて材では正常材に比較して低いレベルで推移し、広葉樹ではあて材がいくらか高い値をとっている。

4.2.5 曲げおよび圧縮強度試験

試験結果は表-4.5および表-4.6に示した。比重およびヤング係数に関してはこれまでに述べてきたものと同様の差を示している。曲げ比例限度はトドマツおよびイチョウあて材で正常材よりも低下しているが、曲げ破壊係数においてはトドマツあて材が正常材を上まわっている。広葉樹材ではヤチダモあて材が比例限度、破壊係数ともに高くなっているのに対しヤマナラシ材では正常材とはほぼ同等となっている。しかし、これらの数値から曲げ破壊係数と曲げヤング係数の比 σ_b/E_b を算出して比較すると針葉樹と広葉樹とは明らかに違った傾向をもつことが判る(表-4.7)。

圧縮試験においても、強度の大小関係は曲げのばあいと殆ど同様である。表-4.7の σ_c/E_c (最大比例短縮度²⁵⁾ で比較すると、針葉樹あて材で正常材の1.3~1.8倍、広葉樹あて材では同じく0.7~0.9倍となっている。この実験では引張試験は行っていないため、曲げ、圧縮および引張強度の間関係については検討できなかったが、今後これらの資料が蓄積されれば、あて材の強度に関する研究が一層進展するものと考えられる。

表-4.7 σ/E
Table 4.7. σ/E

Species	Type of Wood	σ_b/E_b	σ_c/E_c	σ_{cp}/σ_c
Fir	N	0.71	0.36	0.77
	M+C	1.14	0.65	0.56
Ginkgo	N	0.93	0.43	0.71
	C	1.21	0.56	0.57
Ash	N	1.02	0.45	0.50
	T	0.74	0.30	0.64
Aspen	N	0.96	0.42	0.58
	T	0.88	0.37	0.55

σ/E : 10^{-2} ; suffix *b* denotes bending, *c* compression, *p* proportional.

4.2.6 ポアソン比

ポアソン比については試験片数も少く、歪の測定値も不安定であったため、絶対値については多少問題があるが、トドマツあて材で μ_{LT} および μ_{LR} が大となる結果が得られた。しかし他の樹種においては明らかな差はみとめられなかった(表-4.8)。

表—4.8 μ と μ/E Table 4.8. Poisson's ratios and μ/E

Species	Type of Wood	Number of Specimen	μ_{LT}	μ_{LR}	μ_{LT}/E_c	μ_{LR}/E_c
Fir	N	4	0.382	0.351	3.51	3.04
	M+C	4	0.543	0.441	6.44	5.25
Ginkgo	N	0	—	—	—	—
	C	4	0.533	0.419	8.73	6.82
Ash	N	5	0.527	0.406	5.17	3.99
	T	5	0.459	0.414	2.55	2.22
Aspen	N	4	0.426	0.391	5.23	5.08
	T	3	0.461	0.383	4.15	4.09

Note: μ/E : 10^{-6} cm²/kg.

4.3 要 約

あて材を含むトドマツ、イチョウ、ヤチダモおよびヤマナランの丸太から採取した試験片を、傾斜樹幹における位置あるいは材色などを基準にして肉眼的に正常材とあて材に分類し、これらについて比重、年輪幅、曲げヤング係数、捩りによるせん断弾性係数、曲げならびに圧縮強度およびポアソン比を測定した。結果は次のように要約される。

1. あて材の比重はいずれの樹種においても正常材よりも平均で大となった。
2. 年輪幅はトドマツあて材において顕著な増加がみられたが、他の樹種においては必ずしも明瞭な差は示さなかった。
3. ヤング係数は針葉樹あて材で減少するのに対して、広葉樹あて材では逆に正常材よりも大となった。
4. せん断弾性係数はヤング係数のばあいとは逆に、トドマツおよびイチョウあて材で正常材よりも大となり、ヤチダモおよびヤマナラン材では小となる。
5. E/G 値は針葉樹あて材で約4~11、正常材で約9~22となり、広葉樹あて材では約10~22、正常材で約5~12の範囲に入る。これをごく大まかに見れば $E/G=10$ が正常材とあて材の境界値となる。
6. \sqrt{EG} 値は比重によりほぼ直線的に変動するが、単位比重あたりの数値に換算すると、針葉樹あて材で小となり広葉樹あて材で大となる。またこの値は、針葉樹あて材と広葉樹正常材では $50 \times 10^6 \sim 56 \times 10^6$ cm、針葉樹正常材と広葉樹あて材で $56 \times 10^6 \sim 64 \times 10^6$ cm の範囲に入っている。

第5章 有節材の弾性定数

5.1 材料および方法

5.1.1 試験材料

北海道産エゾマツおよびトドマツ挽板を天然乾燥後厚さ2~2.2 cm, 幅10~11 cm, 長さ150~210 cmに仕上げたもの合計40枚を使用した。材料に現れた欠点としては節, 目切, あて, 貫通割れがある。これらの欠点のうちで, 材長方向の均質性を大きく損なうものとして節の大きさとその位置に注目して以下の実験を行った。

5.1.2 局部的ヤング係数の測定

試験体の長さ方向のヤング係数分布を欠点の位置と関連づけて測定するために, 図-5.1の形状の矢高測定ゲージを5個作製した。これは, 18 cmの測定棒の中央に10 mm ストローク, 精度1/100 mmのダイヤルゲージの本体を固定した構造をもち, 試験材の任意の位置にのせて, 曲げにより生じる18 cm区間の中央矢高を測定するものである。試験に際しては, 5個の測定器を2 cm間隔で材料上にならべ(ダイヤルゲージ相互の間隔は20 cmとなる), 2点荷重による一様曲げモーメント区間で各位置に生じる撓みを測定した(図-5.3(a))。測定器の位置を5~10 cmずつ移動して実験を繰返し, それぞれの位置でのヤング係数を算出した。

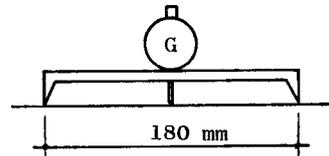


図-5.1 撓み測定器

Fig. 5.1. Deflectometer for 18 cm section.

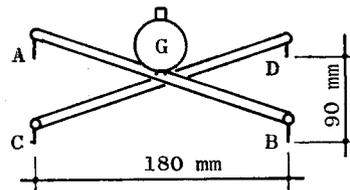


図-5.2 撓り角測定器

Fig. 5.2. Device for twist angle measurement.

5.1.3 局部的せん断弾性係数の測定

撓り角を測定するために図-5.2に示す測定器を作製した。これはダイヤルゲージ本体に固定した棒の脚A, Bと, 測定子とともに上下に移動する脚C, Dからなるものである。この測定具を, 試験体上の任意の位置に設定した長さ18 cm, 幅9 cmの長方形の4隅角に脚A~Dが一致するように置き, 材料の一端に撓りモーメントを加えると, 当初は同一平面内にあった4隅角は面外方向に変位を生じる。このばあいのダイヤルゲージの読みは面外方向への変位の1/2であるから, 18 cm区間の撓り角は変位を d (mm)として, $2d/90$ となる。

せん断弾性係数は等方性材料に関する次式により算出した。

$$G = \frac{M_t}{J\theta}$$

ここで, M_t =撓りモーメント

θ =単位区間長あたりの撓り角

$$J = \frac{a^3 b}{3} \left(1 - \frac{192}{\pi^5} \cdot \frac{a}{b} \sum_n \frac{1}{n^5} \tanh \frac{n\pi b}{2a} \right)$$

ただし、試験材断面の辺長を a, b とし、 $a < b$ として式に代入する。

振りモーメント M_t は試験体の端部に取付けた横木の先端に錘を吊り下げることにより加えた。試験体に生じるせん断応力が 10 kg/cm^2 以内となるよう錘の重量を調節した。

5.1.4 見かけの E の測定

一般に木材の曲げヤング係数の測定においては、材料を比較的長いスパンで支持し、集中荷重あるいは2点荷重等の外力を作用させてスパン中央の撓みを測定し計算される。ここでは図-5.3(b)および(c)に示した2種の方法で撓みの測定を行った。前者は、上記の局部撓み測定のはあいと同一の荷重条件下(一様曲げモーメント区間)で80 cm区間の中央矢高を測定するものであり、後者はスパン80 cmの中央集中荷重条件で荷重点の撓みを測定するものである。荷重はいずれのばあいにも曲げ応力が 100 kg/cm^2 以内となるように決めた。

測定されるヤング係数は3種類となるので、以下ではこれらを区別するために、図-5.3(a)で測定された撓みを δ_{18} 、これより算出されるヤング係数を E_{18} と称する。以下図-5.3(b)ではそれぞれ δ_{80} 、 E_{80} 、図-5.3(c)については δ_0 、 E_0 とした。

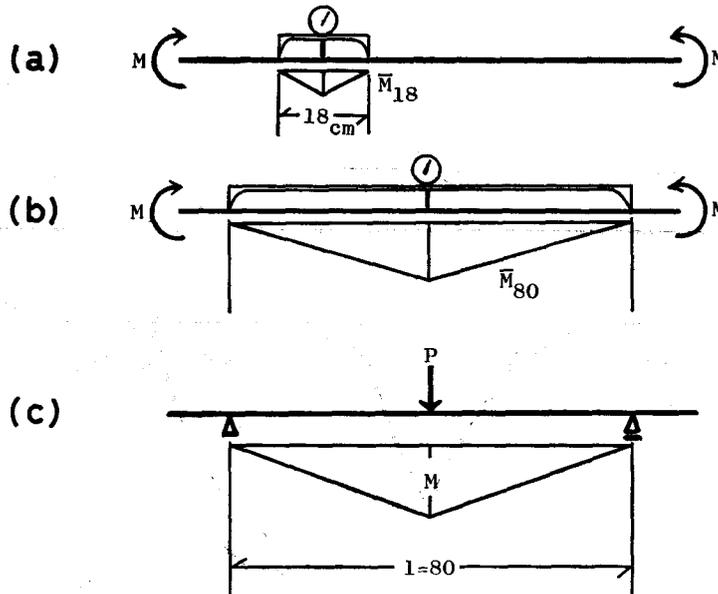


図-5.3 試験方法

Fig. 5.3. Methods of bending tests.

- (a) local deflection measurement.
- (b) center deflection under constant bending moment.
- (c) a concentrated load at mid-span.

5.2 結果と考察

5.2.1 材長方向における撓みおよび振り角の変動

材長方向に沿って撓みおよび振り角を測定し、左端の測定点を基準として各測定値の逆数比を百分率で表したものが図-5.4である。測定間隔は5あるいは10 cm であるため、測定点の値を結ぶ線は折線となる。測定間隔をさらに小さくすると、なめらかな曲線が得られるはずである。図中の記号 P01 から P22 まではエゾマツ材で、A01 から A18 まではトドマツ材である。各図の上段には試験材表面にみられる主要な欠点のスケッチを、中段および下段に局部

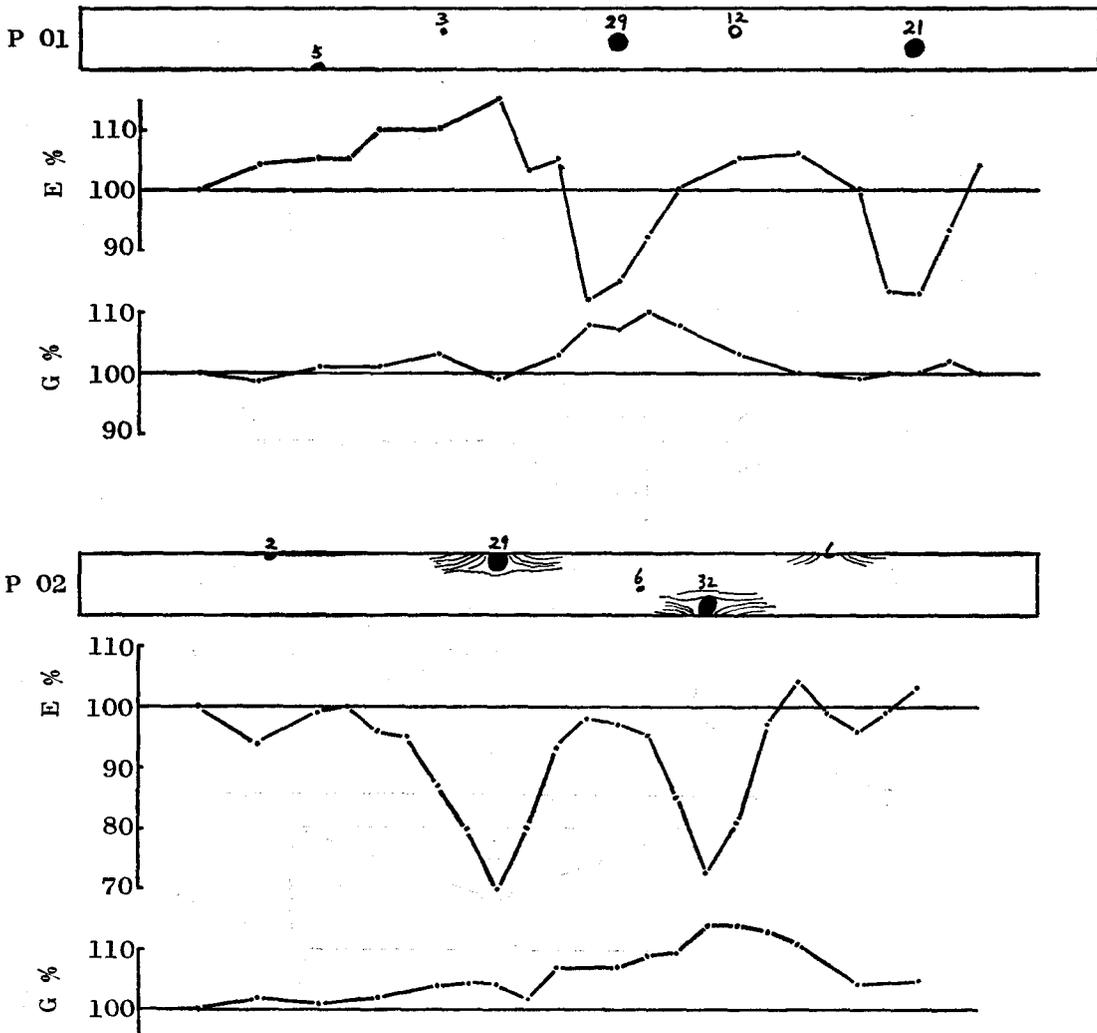


図-5.4 試験材中の E および G の変動 (左端=100)

Fig. 5.4. Longitudinal variation of modulus of elasticity and modulus of rigidity in percentage.

Note: Figures in the sketch denote knot size in mm, CW compression wood, S split.

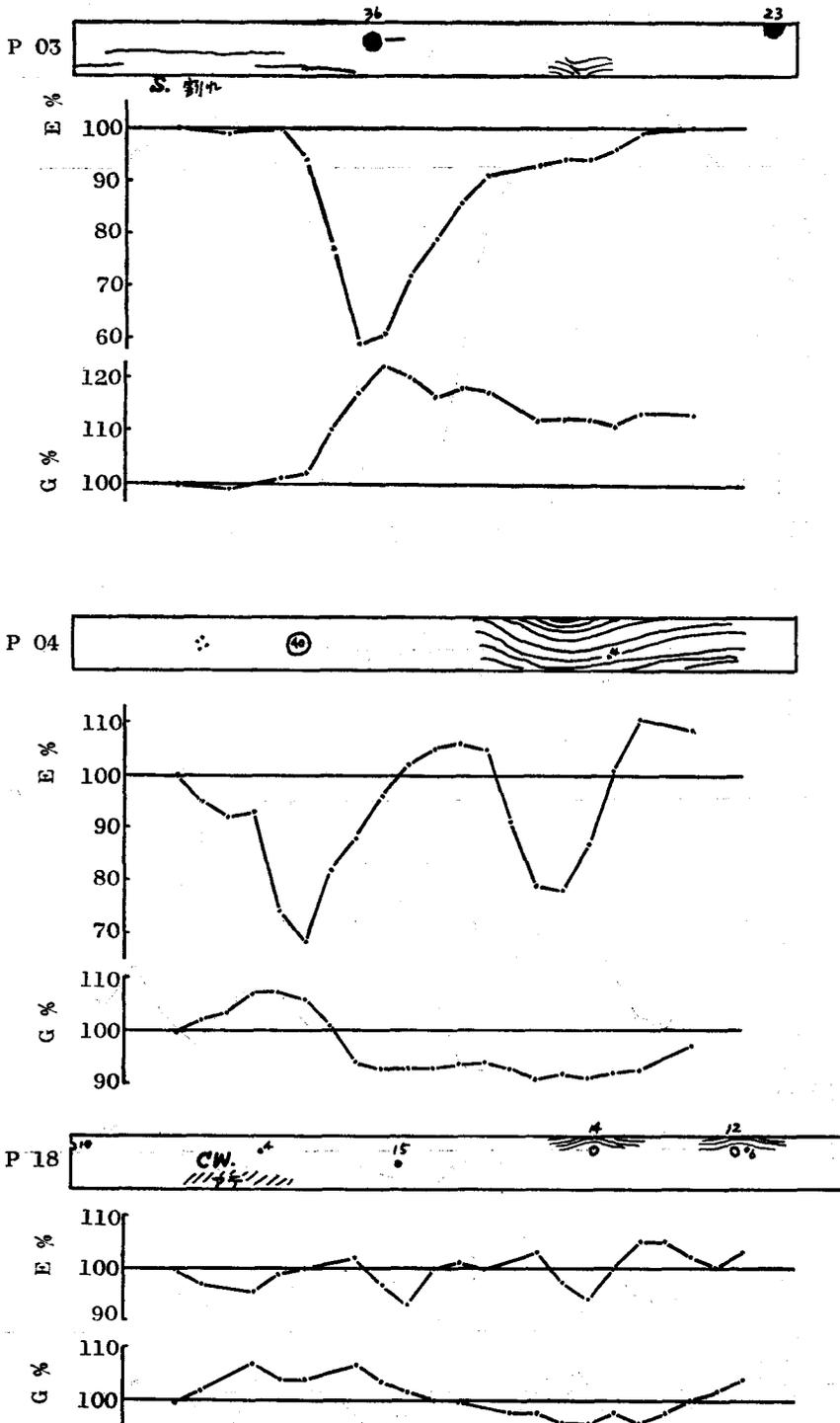


Fig. 5.4. (Continued).

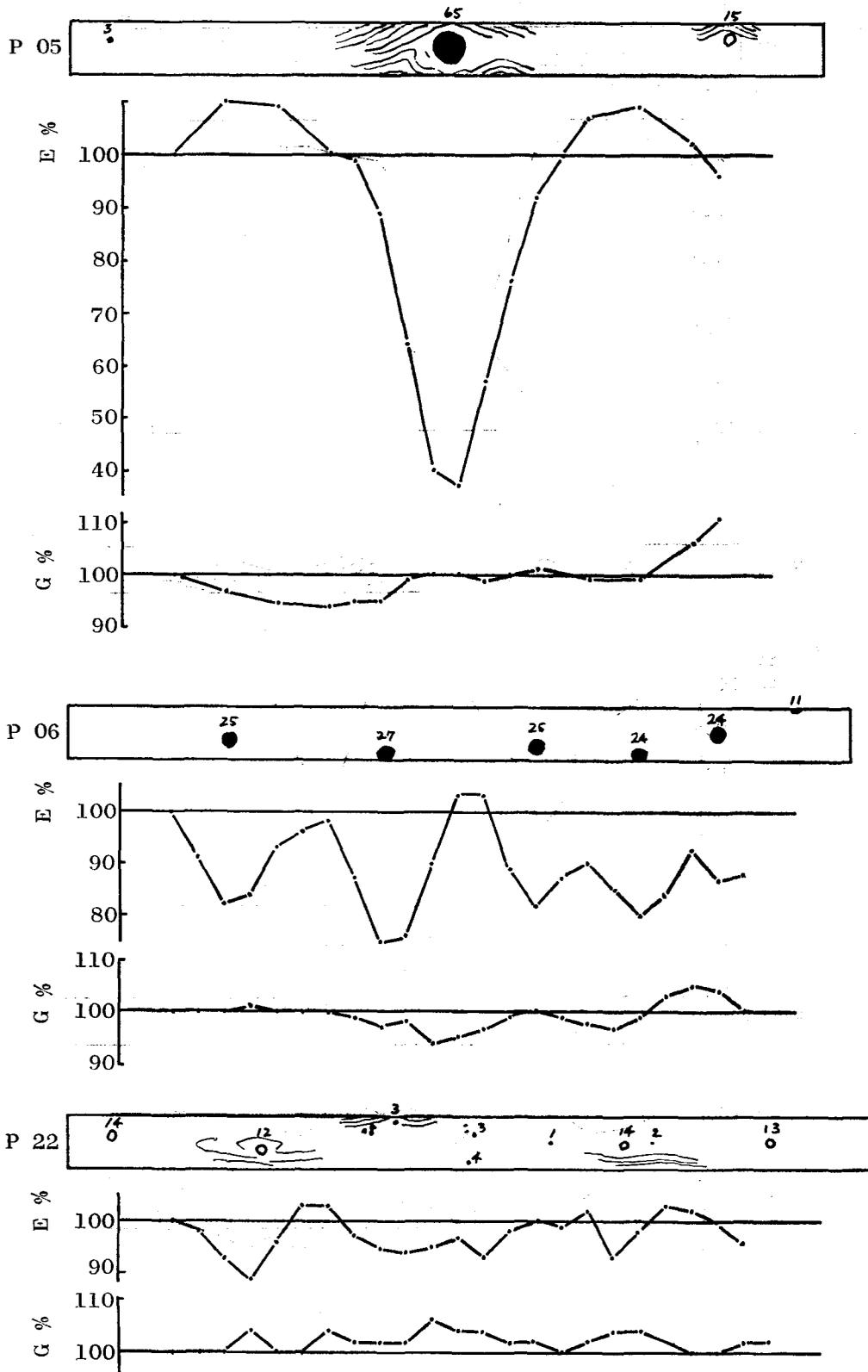


Fig. 5.4. (Continued).

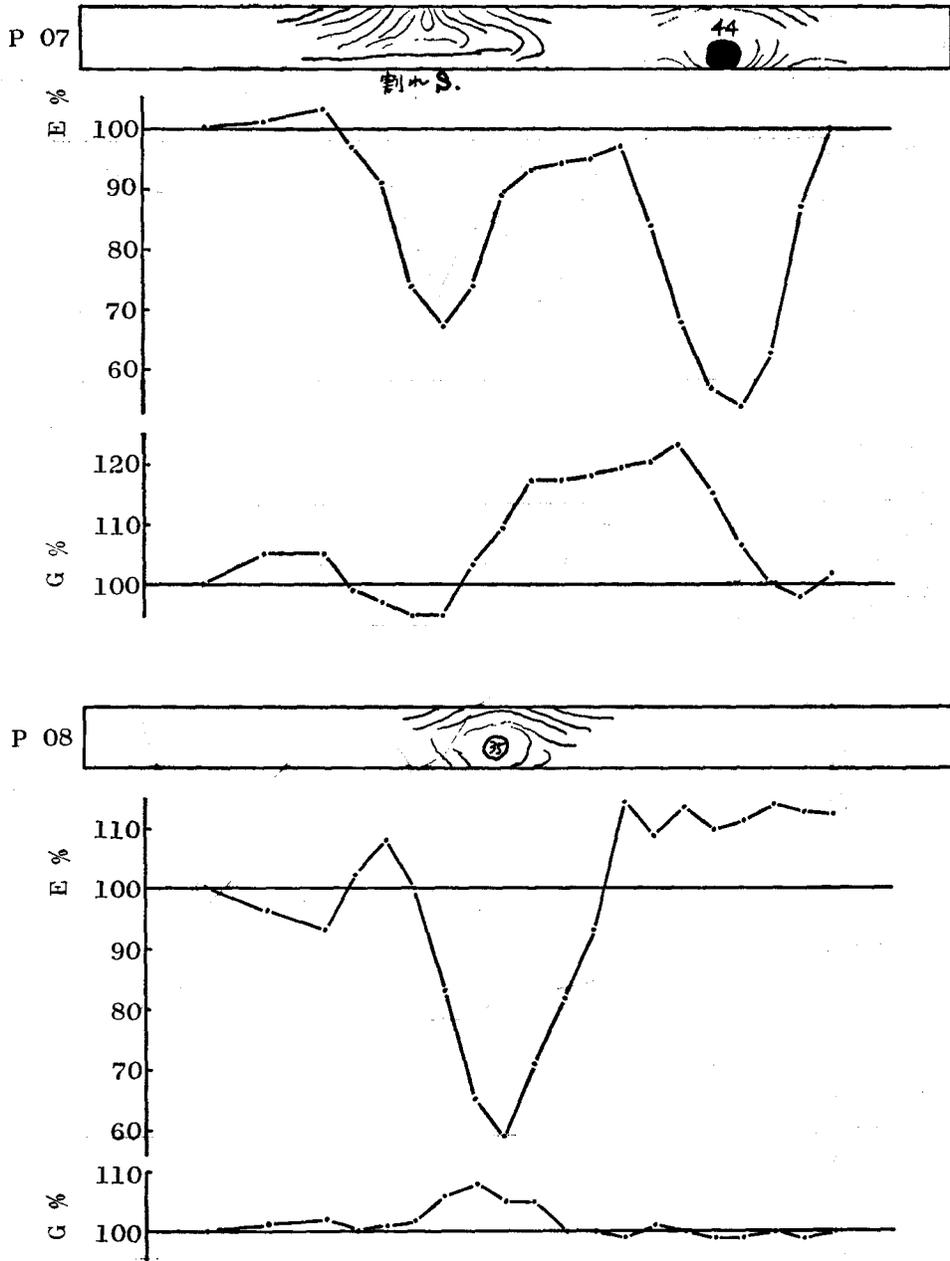


Fig. 5.4. (Continued).

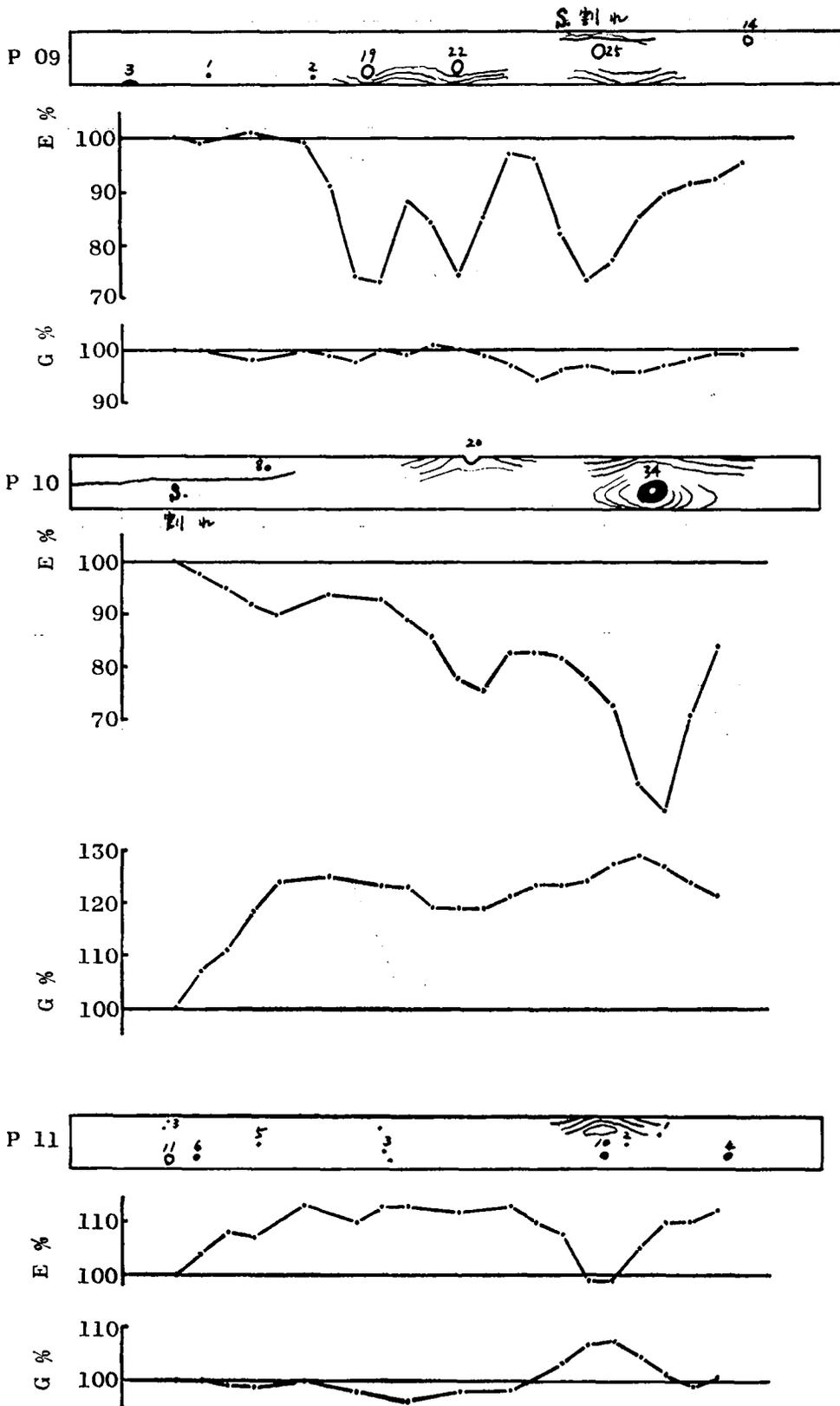


Fig. 5.4. (Continued).

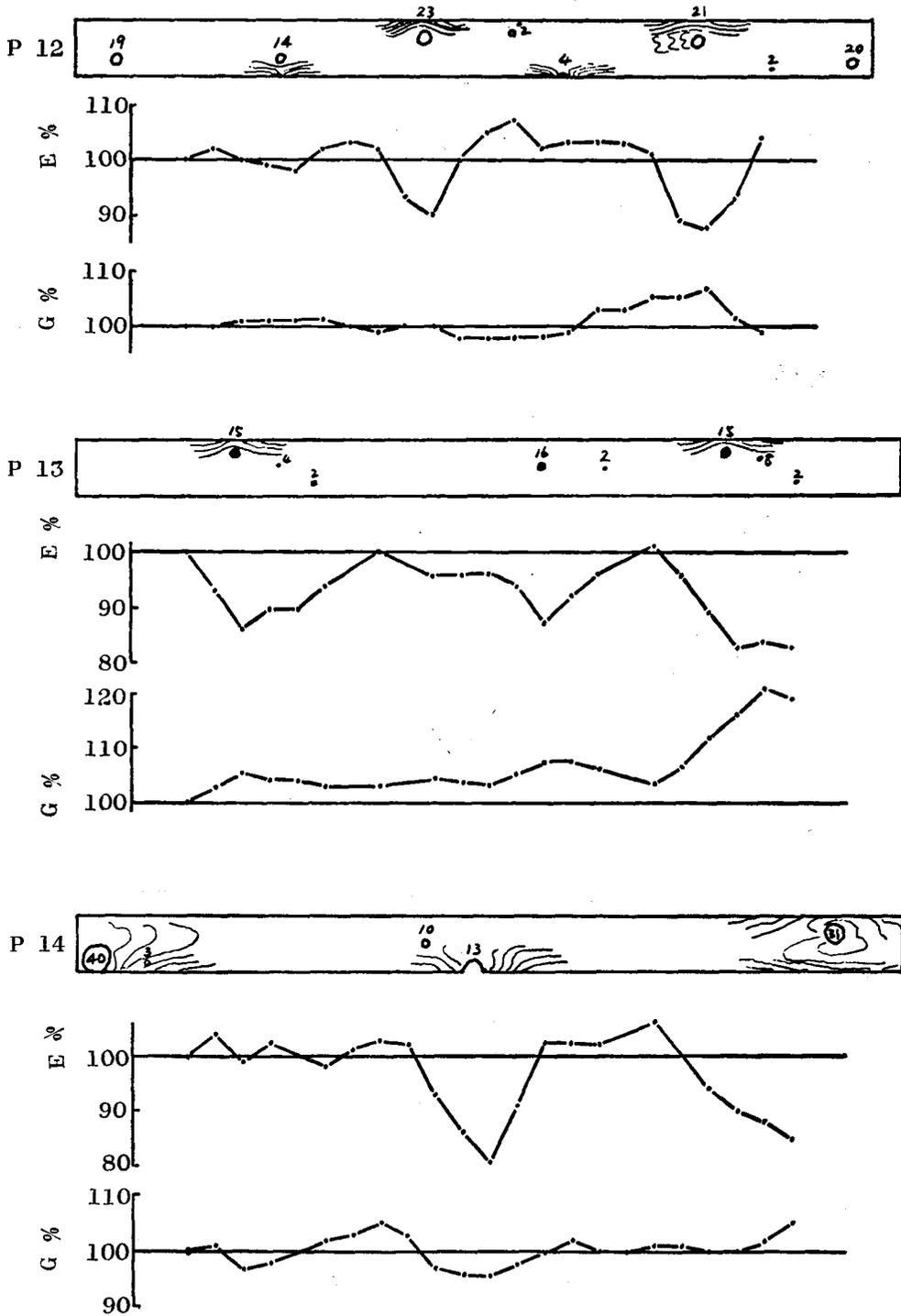


Fig. 5.4. (Continued).

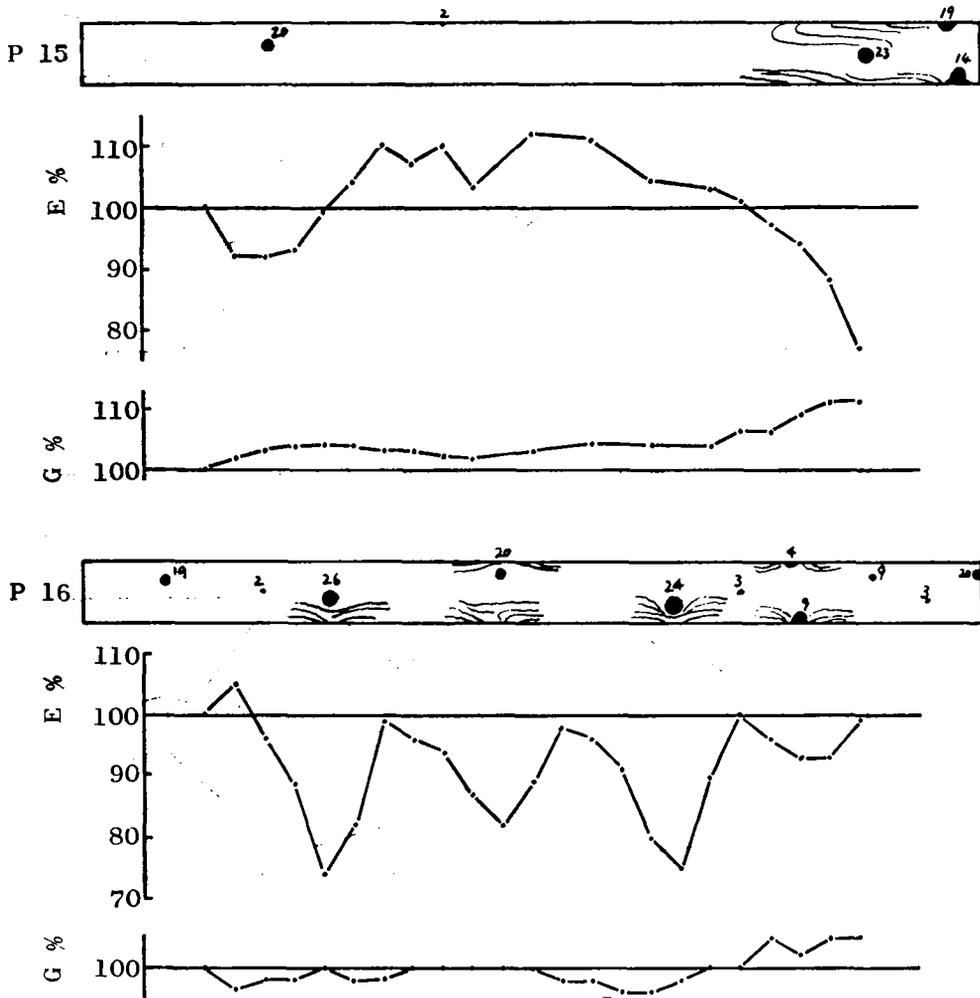


Fig. 5.4. (Continued).

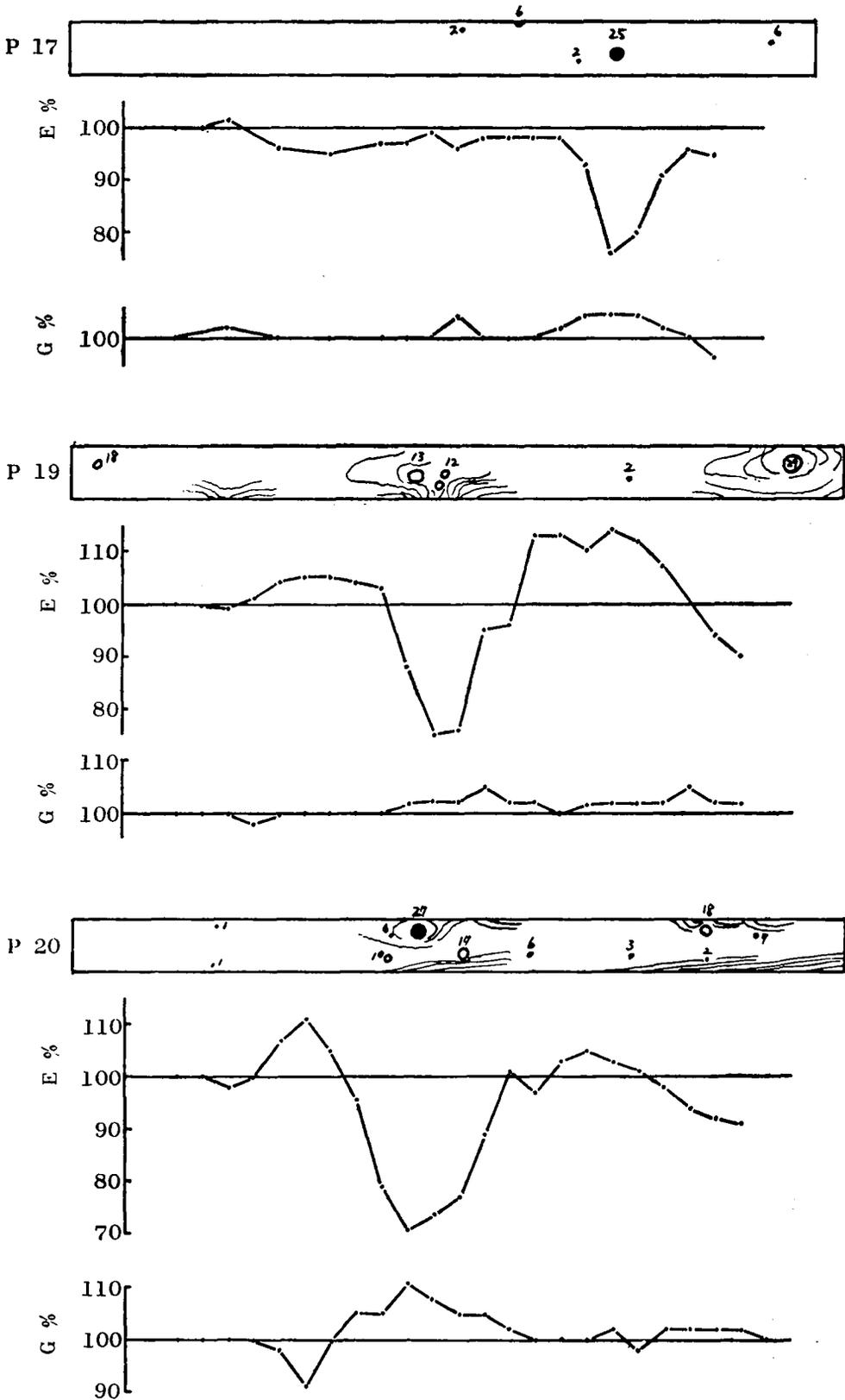


Fig. 5.4. (Continued).

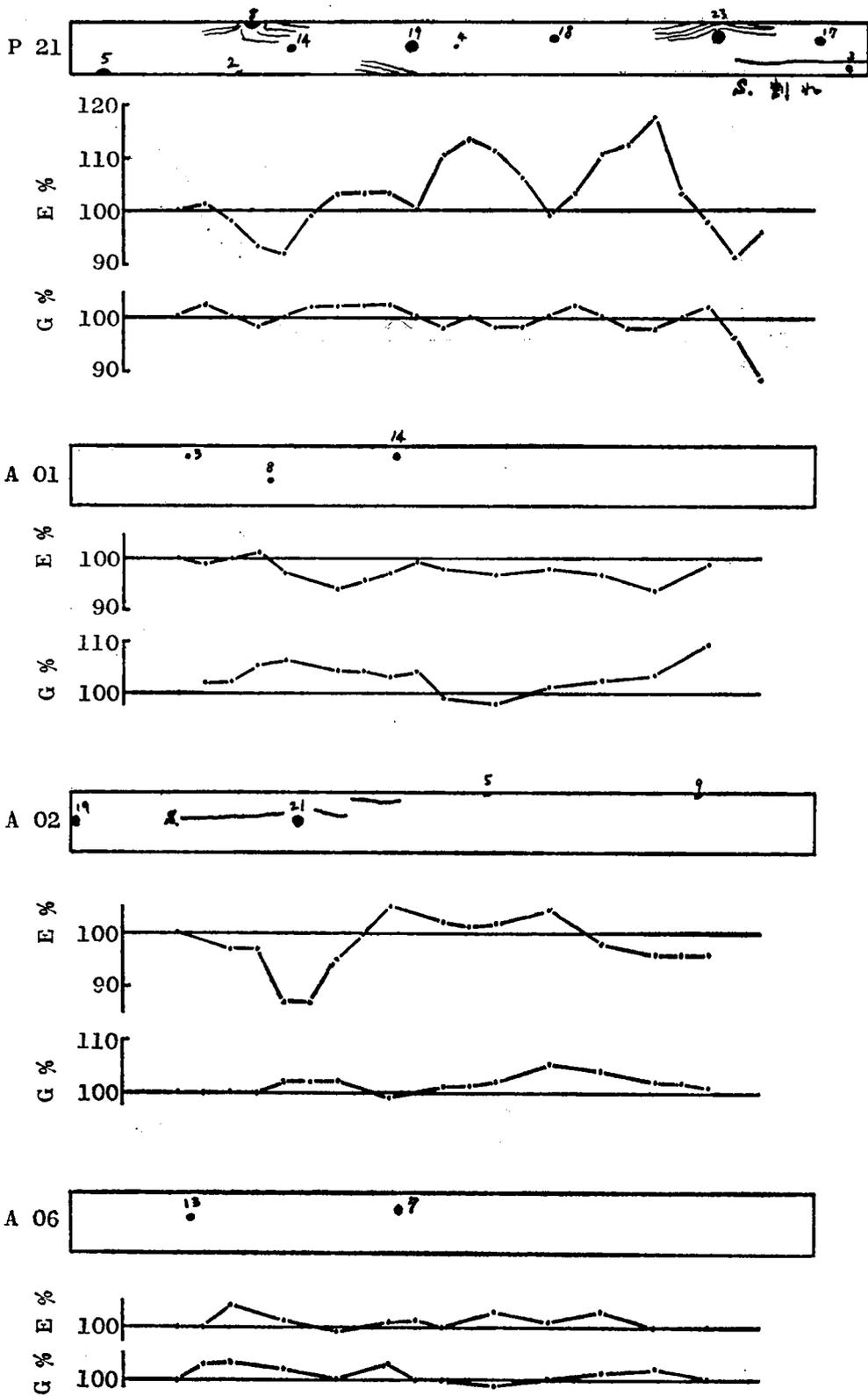


Fig. 5. 4. (Continued).

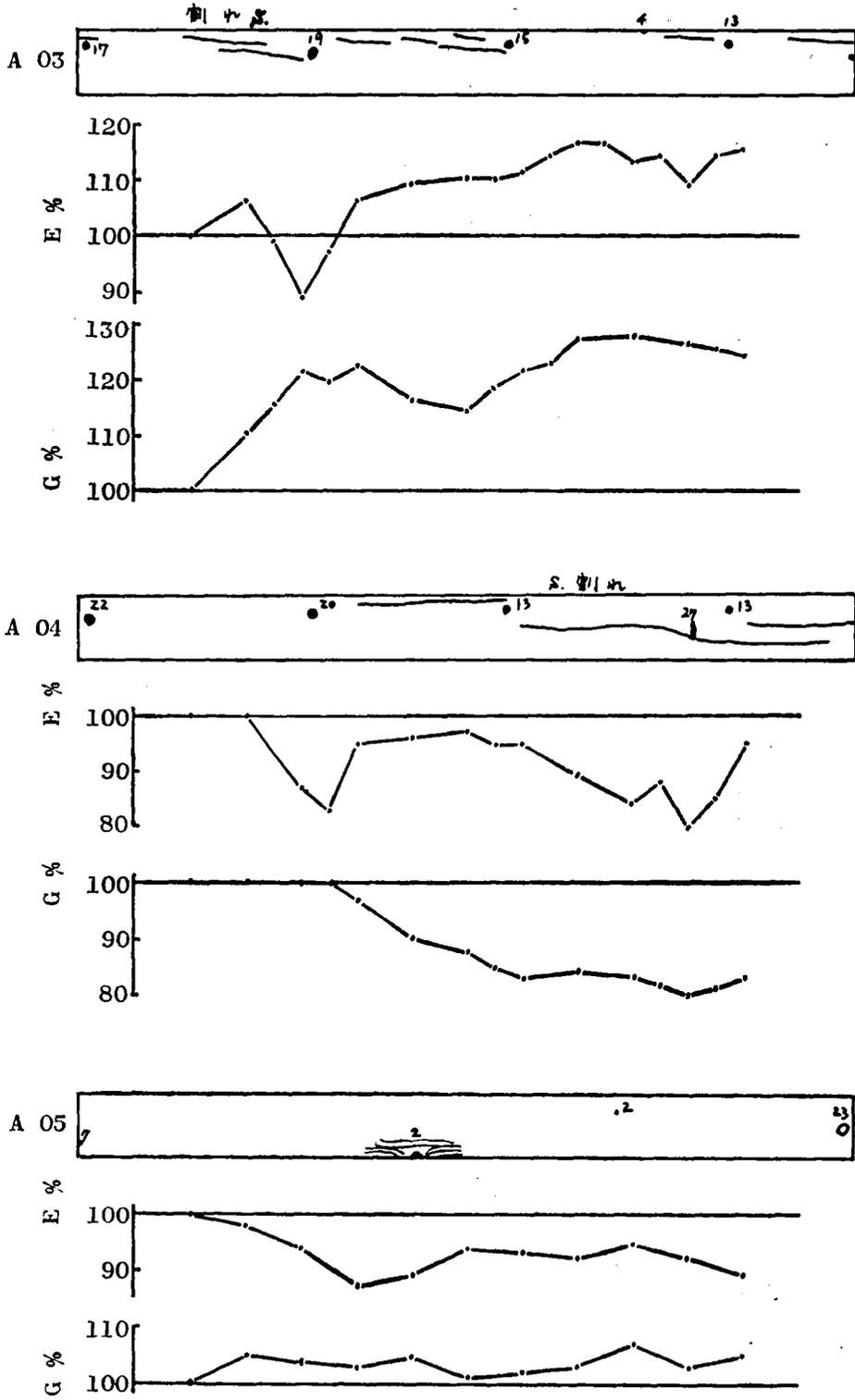


Fig. 5.4. (Continued).

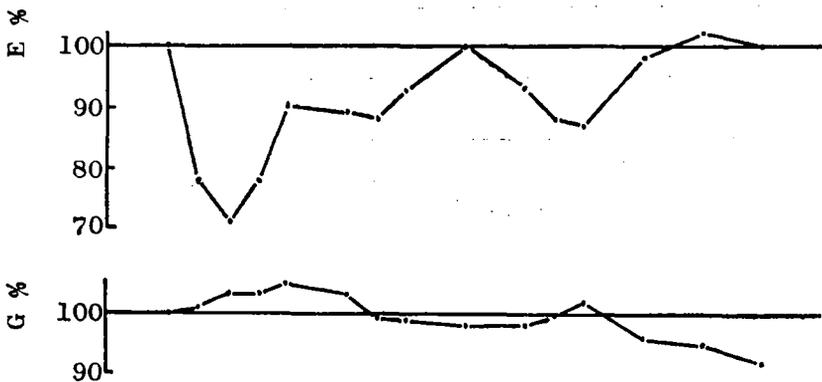
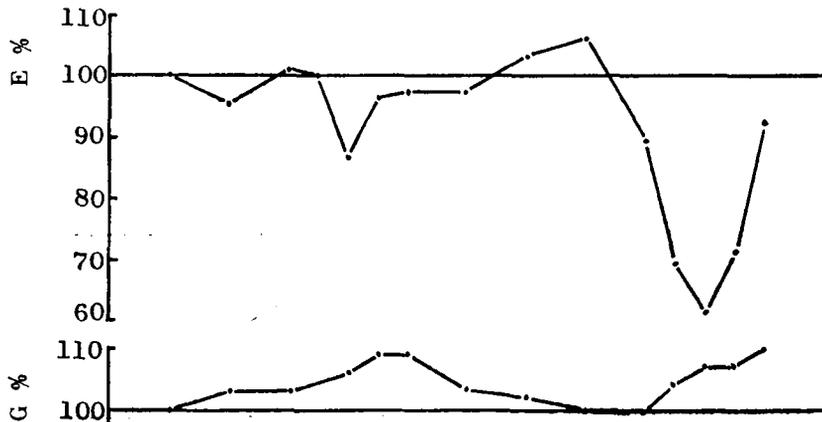
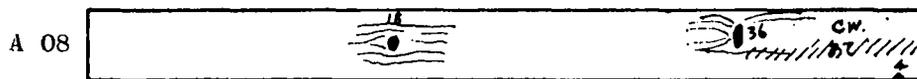
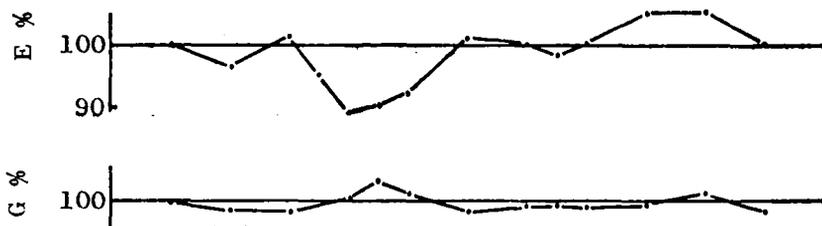
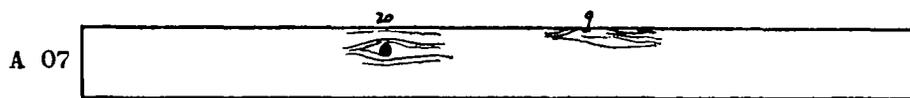


Fig. 5.4. (Continued).

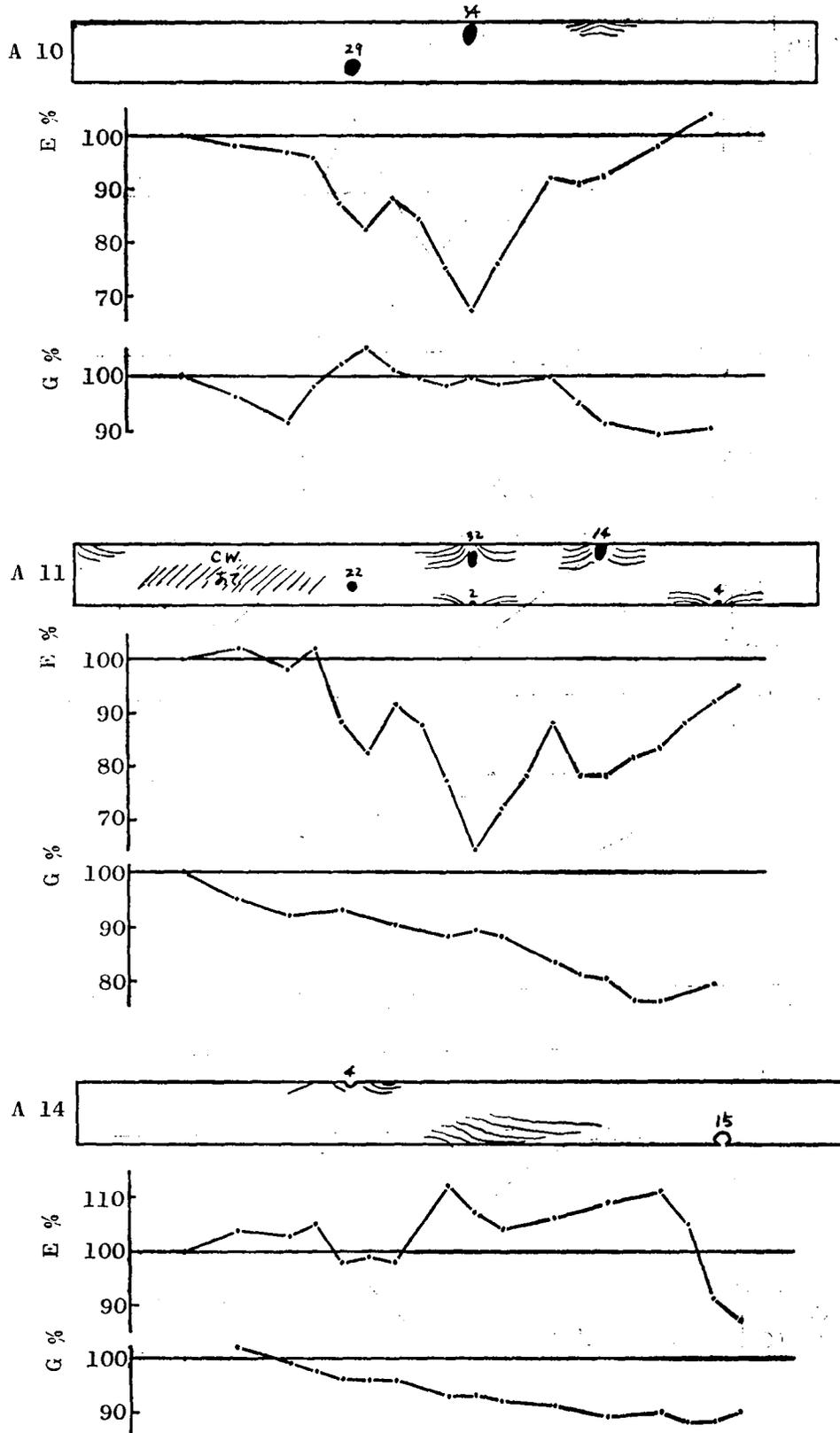


Fig. 5.4. (Continued).

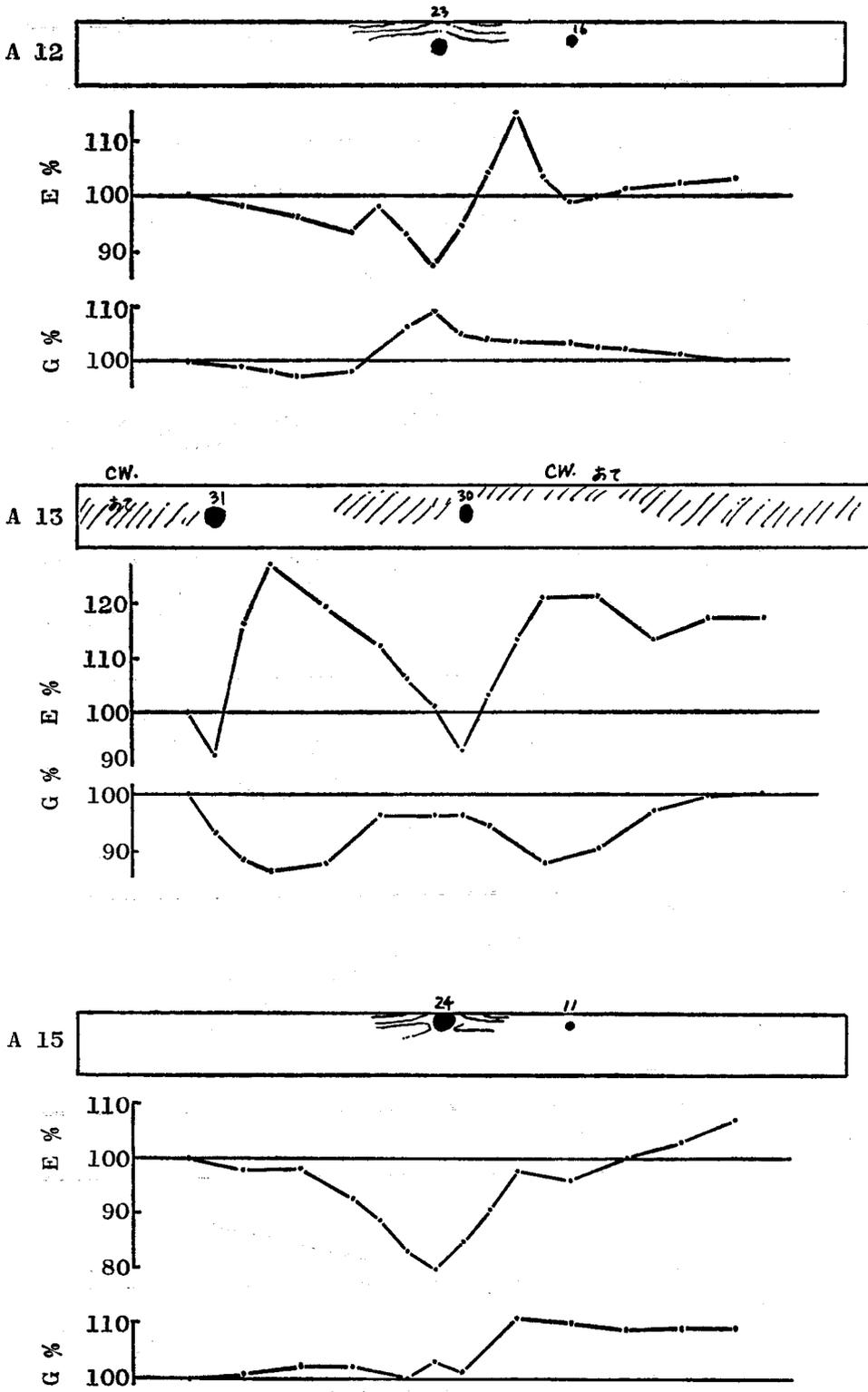


Fig. 5.4. (Continued).

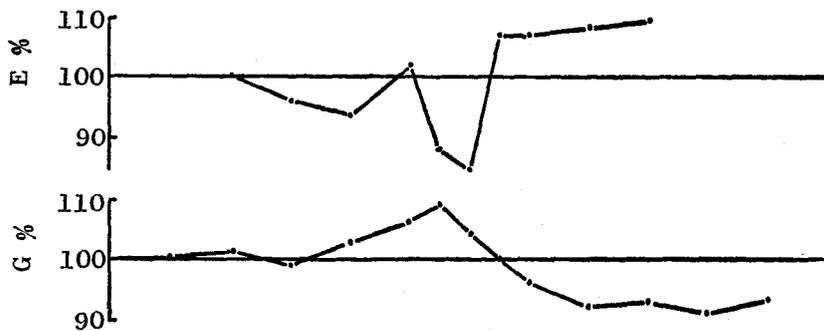
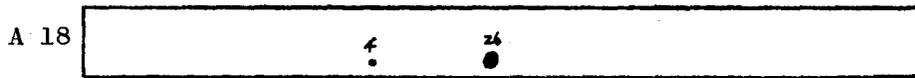
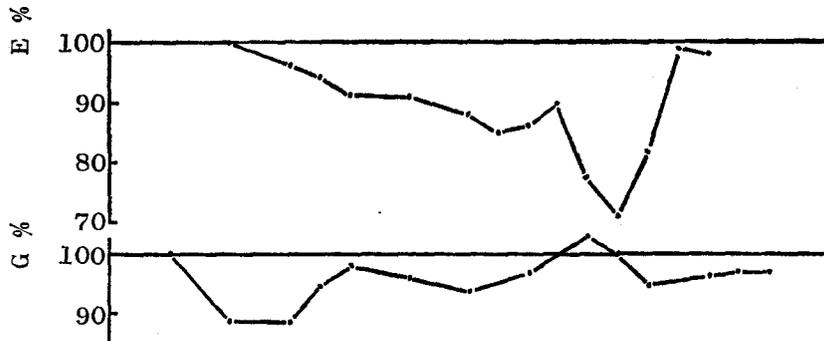
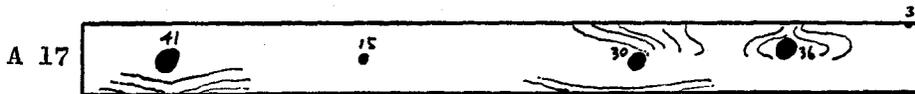
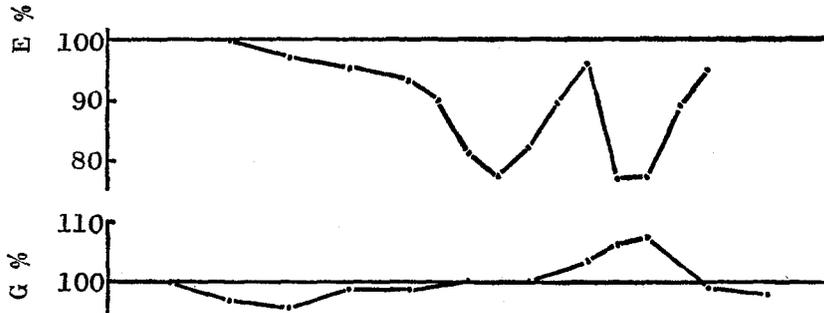


Fig. 5.4. (Continued).

的に測定されたヤング係数およびせん断弾性係数の変動の様子を示している。材面スケッチ中の数字は、板幅方向に測定した節径 (mm) で、表裏の平均径である。使用した材料の幅は約 10 cm であるため、図の節径がほぼ節径比 (%) に相当する。節周辺の目切れ、貫通している材面の割れおよびあて材部等の異常部分も図中に記入した。

以上の 40 体の材料について測定されたヤング係数の変動曲線を検討した結果、次のような一般的傾向が存在することがみとめられた。

i) 節の影響

節を有する板の局所的なヤング係数の変動は節の位置近辺で著しく、常にヤング係数の低減として測定される。この低減の程度は節径により差があるが、測定した位置に節がなくても隣接部に節があったばあいはその影響を受けていることが明らかにみとめられた (例: P 04, P 07, A 14 など)。このように、節径比としては 0% のばあいでも、節周辺の目切れの影響を受けている板では局所的にかなりのヤング係数の低減が生じていることは注目される。また、節を有する板であっても、節からある距離以上の部分ではほぼ一定のヤング係数を示す (例: P 02, P 14, P 17, A 08 など)。

ii) 割れの影響

板面に現われた割れの影響は、本実験のような flatwise の曲げでは小さい (例: P 03, P 10, A 4 など)。しかし edgewise の曲げにより測定を行えば、この種の割れはヤング係数に著しい低減をもたらすと考えられる。

iii) あて材の影響

あてを含む材部ではヤング係数の低減がみられる (例: P 18)。

せん断弾性係数の変動範囲は概して小さいが、その変動状態と欠点の関係が明白であるばあいが多い。

i) 節の影響

せん断弾性係数は有節部でむしろ増加している。これは木材のせん断弾性係数が目切れの影響をあまり受けないことと、材の比重の増加とともにせん断弾性係数が大となることが原因となっていると考えられる (例: P 01, P 08, P 11, A 12, A 18 など)。

ii) 割れの影響

板面に割れの存在するばあいのせん断弾性係数の低減は著しく、異常な測定値から逆に割れの存在を発見したばあいもあった (例: P 07, P 10, P 03, P 21, A 4 など)。

iii) あて材の影響

あてを含む材ではその部分のせん断弾性係数が増加しており、第 4 章で述べた試験結果がそのまま現われている (例: A 8, A 11, A 13)。

5.2.2 節径比と E_{ts} の関係

上に述べたように、有節材のヤング係数は節周辺で低下するが、無節部ではほぼ一定の値

を示すとみられることから、この一定値に対する有節部 18 cm 区間のヤング係数の比を節径比に関して作図した。

図-5.5 に模式的に表したように、無節部の一定ヤング係数を E_0 とすれば、節 i および j を含む部分ではヤング係数が減少し、それぞれ E_{k_i} および E_{k_j} となる。このばあい、 $E_{k_i}/E_0 = 1 - \alpha$ を縦軸にとり、節径比 d/B を横軸にとれば、実測値は図-5.6 のようになる。 α を節周辺におけるヤング係数の低減率とすれば、エゾマツおよびトドマツ両材について α は節径比にほぼ相当するとみられる。また、節の種類や位置による差は明らかでない。この実験では試験体数も多くはなく、節径比の出現範囲も限定されたものであるため、上述の傾向を一般化することはまだできない。また、18 cm 区間で測定される撓みからヤング係数を算出するばあい、無

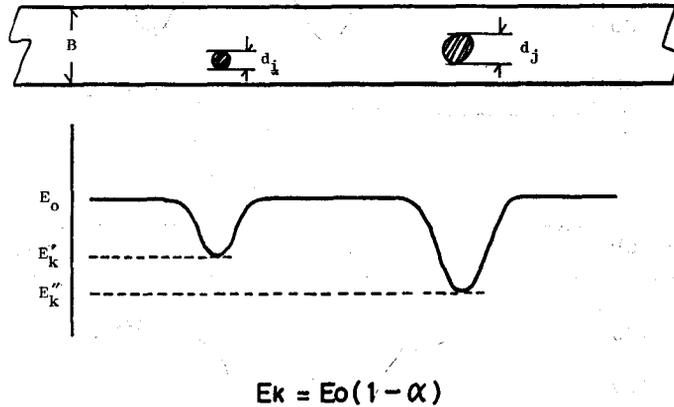


図-5.5 節による局部的ヤング係数の低減

Fig. 5.5. Reduction of local MOE. α : reduction factor.

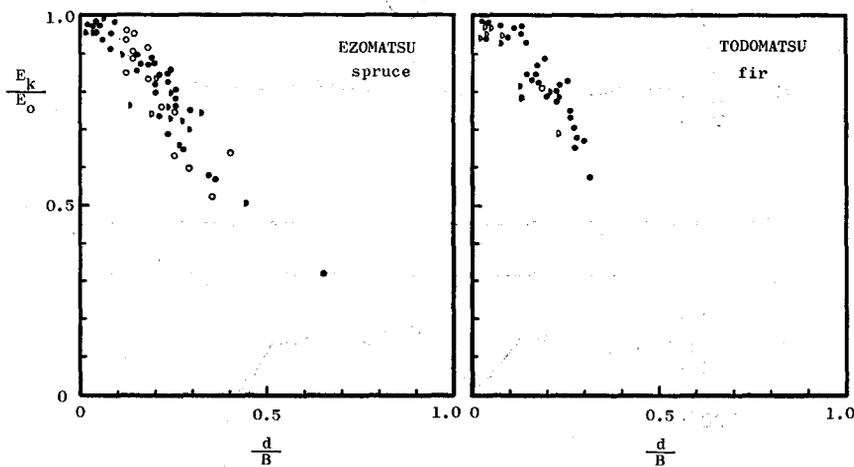


図-5.6 節径比とヤング係数の低減

Fig. 5.6. Effect of knot size on MOE.

●: sunod knot, ○: loose knot, ▽: edge knot.

欠点部に関しては正確な値が得られることになるが、この区間内の一部分に節や目切れ等の異常部分が存在するばあいは得られた値はあくまでも見かけ上のものになってしまう。理論的には測定区間を短縮して行くと真のヤング係数に近づくはずであるが、実験的には、撓み量が微小となり精度の良い測定は望めないであろう。以後の計算および考察は、この実験で使用した18 cm 区間の矢高測定器によるヤング係数 E_{18} をその点のヤング係数であるとして行ったものである。

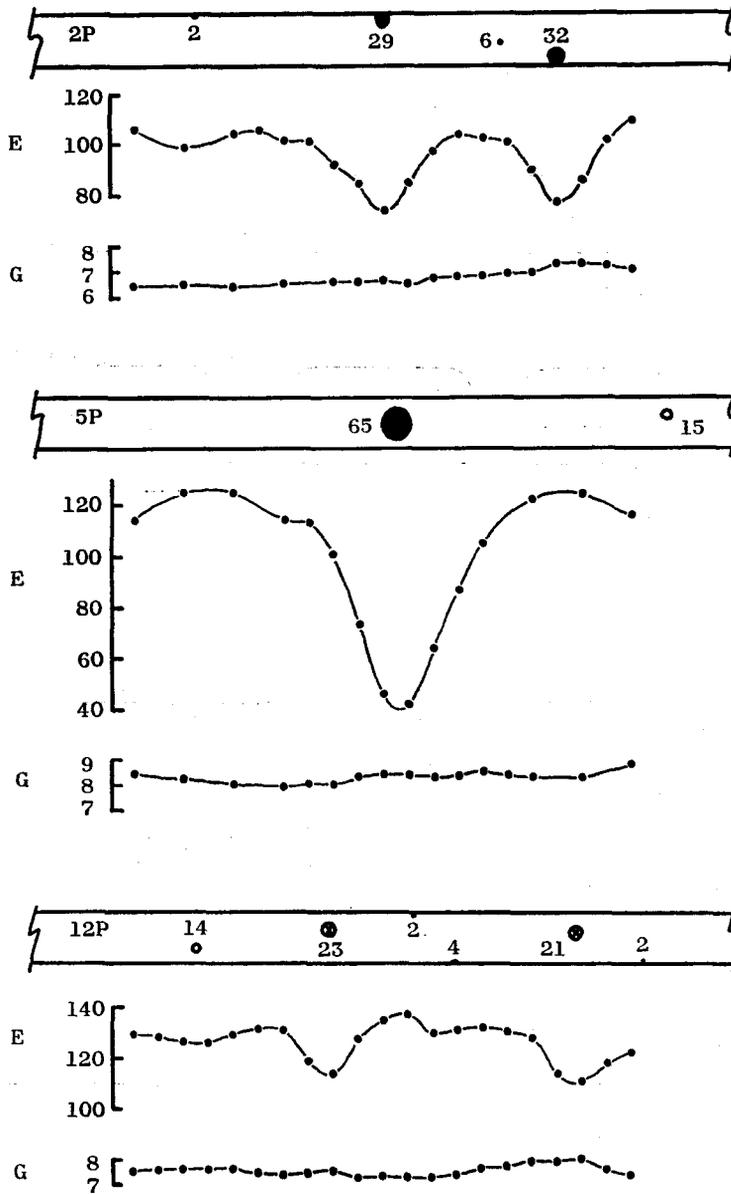


図-5.7 ヤング係数およびせん断弾性係数の変動 ($\times 10^3 \text{ kg/cm}^2$)
 Fig. 5.7. Longitudinal change of MOE and G (in 10^3 kg/cm^2).

5.2.3 ヤング係数およびせん断弾性係の変動

試験体の中からエゾマツ 6 体, トドマツ 3 体を選び弾性係数の値をなめらかな曲線にしたのが図-5.7である。

2Pは30%ていどの節が2個あり, この部分のヤング係数 E_{18} が 80 t/cm^2 以下となって

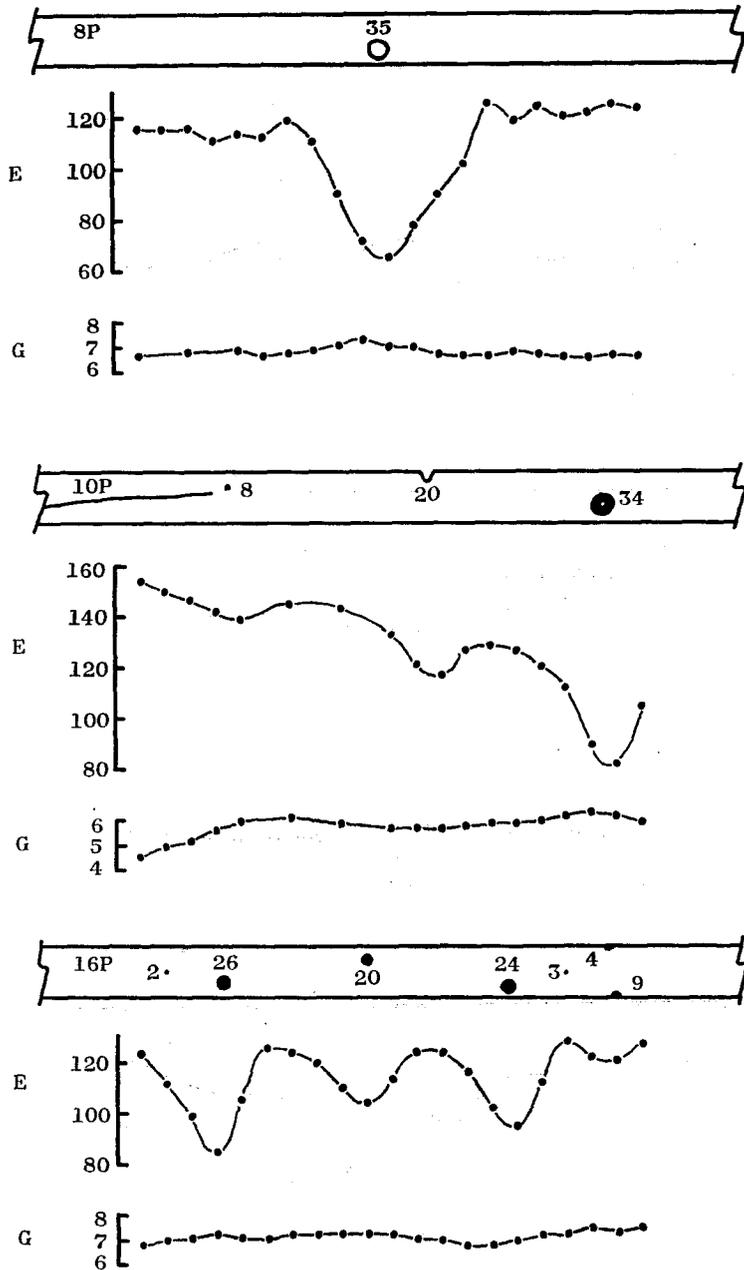


Fig. 5.7. (Continued).

いるが、無欠点部では $100\sim 110\text{ t/cm}^2$ の一定値をとっている。これに対してせん断弾性係数は無欠点部で約 6.5 t/cm^2 であるが有節部で次第に増加し 7 t/cm^2 を超える部分もみられる。

5P では中央の大径節周辺で E_{18} の大幅な減少がみられるが、 G に関しては何らの低減もみられない。16P は2P と同様の変動傾向をもっている。8P は中央部に抜節のあるばあいの例であるが、5P と本質的に同一の形状を示している。

10P は他の材とはいくらか違った曲線となった。 G が左端で低減しているのは材面を貫通する割れの存在によるもので、無欠点部(割れない部分)の G は $5.5\sim 6\text{ t/cm}^2$ となってい

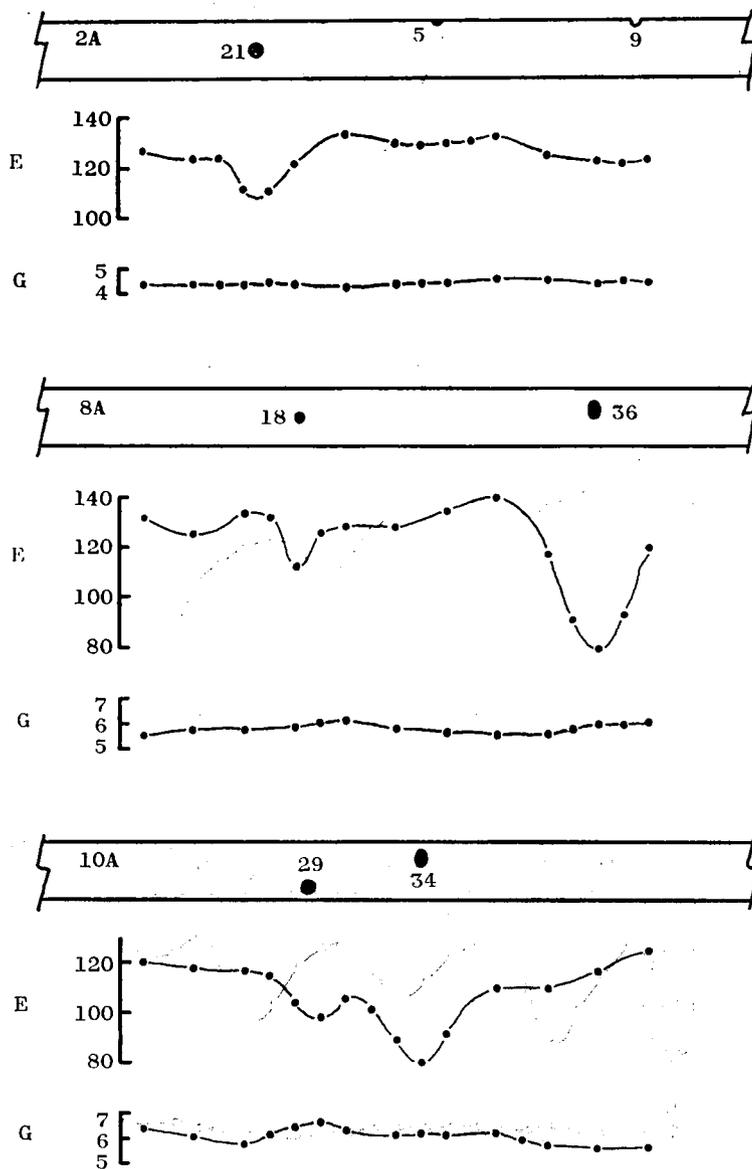


Fig. 5.7. (Continued).

る。\$E_{18}\$は全体的傾向として右端へ向かって低下しており、これに節の位置での低減が重ね合せられているとみられる。このように考えると、この板の基礎材質が材軸方向で変化していることがこの曲線形の原因となっていると判断される。図から無欠点部のヤング係数を読み取ると、この板の左端では \$150 \text{ t/cm}^2\$、右端では約 \$130 \text{ t/cm}^2\$ になると推定される。

12 Pは死節を持つ例、2 A, 8 A および 10 A はトドマツ材の例であるが、いずれも上記の傾向を示すことは図から明らかである。

5.2.4 \$E_{18}\$, \$E_{80}\$ および \$E_0\$ の関係

本実験では図-5.3に示す3種の方法により撓みの測定を行った。ここでは、これら3種の測定法によりもとめられたヤング係数の関係を検討してみる。

ある材料の任意の80 cm区間のヤング係数を実測して、10 cm区間ごとにある値がもとめられたとする。このヤング係数を \$E_1 \sim E_8\$ とすれば、図-5.3(b)の条件で測定される中央撓み \$\delta_{80}\$ および図-5.3(c)のばあいの中央撓み \$\delta_0\$ は図-5.8より計算される。

i) 一様モーメント \$M\$ を受けるばあい

80 cm区間の中央撓み \$\delta_{80}\$ は図-5.8(c)および(f)の \$M_1\$ および \$\bar{M}\$ より次のようになる。

$$\begin{aligned} \delta_{80} &= \frac{1}{E_1 I} \int_0^{10} M_1 \bar{M} dx + \frac{1}{E_2 I} \int_{10}^{20} M_1 \bar{M} dx + \dots \\ &\quad + \frac{1}{E_7 I} \int_{60}^{70} M_1 \bar{M} dx + \frac{1}{E_8 I} \int_{70}^{80} M_1 \bar{M} dx \\ &= \frac{25M}{I} \left(\frac{1}{E_1} + \frac{3}{E_2} + \frac{5}{E_3} + \frac{7}{E_4} + \frac{7}{E_5} + \frac{5}{E_6} + \frac{3}{E_7} + \frac{1}{E_8} \right) \end{aligned} \tag{5.1}$$

また、

$$E_{80} I \delta_{80} = \int_0^{80} M_1 \bar{M} dx = 800M \tag{5.2}$$

(5.1), (5.2)より

$$E_{80} = \frac{32}{\left(\frac{1}{E_1} + \frac{3}{E_2} + \frac{5}{E_3} + \frac{7}{E_4} + \frac{7}{E_5} + \frac{5}{E_6} + \frac{3}{E_7} + \frac{1}{E_8} \right)} \tag{5.3}$$

ii) 中央集中荷重 \$P\$ を受けるばあい

図-5.8の \$M_2\$ および \$\bar{M}\$ より、

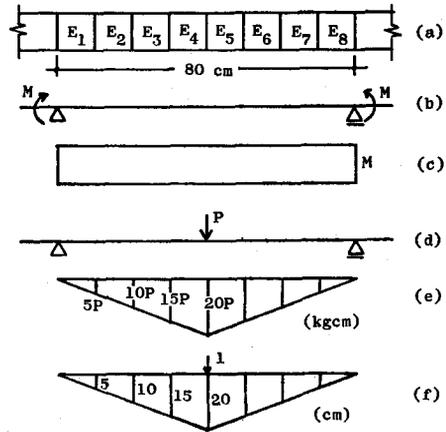


図-5.8 見かけの \$E\$ の算出

Fig. 5.8. Calculation of apparent MOE.

- (a) local MOE's assigned to each section.
- (b) moment \$M\$ applied to ends.
- (c) induced bending moment (\$M_1\$).
- (d) load \$P\$ applied at mid-span.
- (e) induced bending moment (\$M_2\$).
- (f) bending moment (\$M\$) induced by unit load.

$$\begin{aligned} \delta_0 &= \frac{1}{E_1 I} \int_0^{10} M_2 \bar{M} dx + \frac{1}{E_2 I} \int_{10}^{20} M_2 \bar{M} dx + \dots \\ &\quad + \frac{1}{E_7 I} \int_{60}^{70} M_2 \bar{M} dx + \frac{1}{E_8 I} \int_{70}^{80} M_2 \bar{M} dx \\ &= \frac{250P}{3I} \left(\frac{1}{E_1} + \frac{7}{E_2} + \frac{19}{E_3} + \frac{37}{E_4} + \frac{37}{E_5} + \frac{19}{E_6} + \frac{7}{E_7} + \frac{1}{E_8} \right) \end{aligned} \quad (5.4)$$

$$E_0 I \delta_0 = \int_0^{80} M_2 \bar{M} dx = \frac{32000}{3} P \quad (5.5)$$

(5.4), (5.5) より

$$E_0 = \frac{128}{\left(\frac{1}{E_1} + \frac{7}{E_2} + \frac{19}{E_3} + \frac{37}{E_4} + \frac{37}{E_5} + \frac{19}{E_6} + \frac{7}{E_7} + \frac{1}{E_8} \right)} \quad (5.6)$$

Eq. 5.3 および 5.6 を比較すると明らかなように、各部分のヤング係数の全体のヤング係数に対する寄与率が荷重条件によって異なっている。すなわち、どちらのばあいも中央に近い部分のヤング係数の影響が大となるが、中央集中荷重のばあいにその程度がはるかに大きくなることがわかる。

以上の計算を本実験の結果に適用し実測値との比較を行った。このばあい、Eq. 5.3 あるいは Eq. 5.6 に使用する $E_1 \sim E_8$ の数値は、実測したヤング係数の変動曲線を 10 cm ごとに分割しその区間の平均値をとったものである。

表-5.1 のように、40 体の試験材の全平均で見ると、計算値は実測値に良く一致していることがわかる。

表-5.1 実測値と計算値の比較

Table 5.1. Comparison of observed and calculated MOE's

Species	Number of Specimen	E_{80} in Fig. 5.3(b)			E_0 in Fig. 5.3(c)		
		Observed	Calculated	Obs. Cal.	Observed	Calculated	Obs. Cal.
EZOMATSU Spruce	22	119.7	120.9	0.99	114.9	119.4	0.96
TODOMATSU Fir	18	115.4	117.4	0.98	110.8	116.9	0.95
total	40			0.98			0.95

次に中央集中荷重条件で板材のヤング係数の変動曲線をもとめるばあい、たとえば 80 cm の間隔で固定してあるローラー支点上を材料を移動しながら中央集中荷重を加え、その時の撓みを連続的に測定する装置で有節材のヤング係数を連続測定するばあいを考える。このばあいの見かけのヤング係数は Eq. 5.6 に局部的ヤング係数の値を順にずらして代入し計算を行えばもとめられるわけである。4 体について試算した結果を図-5.9 の点線で示している。一様モーメント区間における 18 cm 区間の矢高測定にもとづくヤング係数の変動曲線 (実線) に比較する

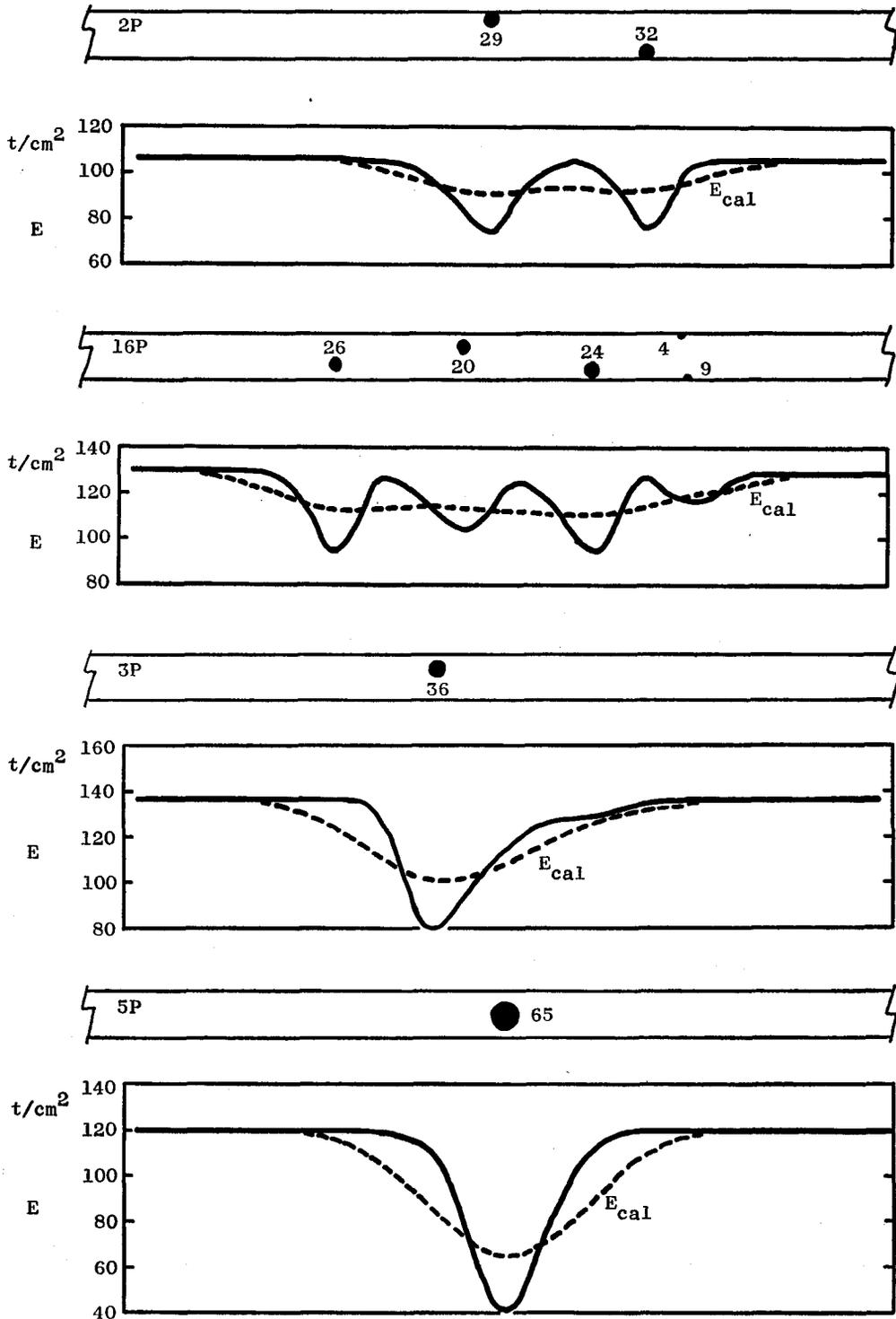


図-5.9 ヤング係数の変動

実線: 図-5.3(a)による実測値

破線: 図-5.3(c)のばあいの計算値

Fig. 5.9. Longitudinal change of MOE.

solid line: observed successively by the method in Fig. 5.3(a)
 broken line: calculated for the condition in Fig. 5.3(c).

と、個々の節によるヤング係数の大幅な変化は感知されず、板全体としてのヤング係数の低減としてのみ評価されることになるのがわかる。

将来、有節材から節等の欠点を除去し、縦つぎ工法により集成材原板等を製造することが予想されるが、このばあいには除去すべき節径の限界あるいは切断すべき位置の決定等についての一定の方法を確立する必要があると思われる。現在実際に使用されているグレーディングマシンは、支点間隔が比較的大きいため上に述べたように、局所的なヤング係数の変動に対しては鈍感であるため、これに代る新しい材質連続測定装置を開発する必要があるであろう。

5.3 要 約

材料の長さ方向に異質材部を含むばあいの例として有節挽板を取りあげ、その変形挙動に関して実験的検討を行った。18 cm 区間の曲げ撓みおよび捩り角の測定を材長方向に沿って連続的に行い、有節材の弾性定数の変動傾向を明らかにした。結果は次のように要約される。

1. ヤング係数は節およびこれに伴う目切れの存在する位置で顕著な低減を示し、その程度は節径比に比例する。
2. 有節材であっても節のない部分のヤング係数はほぼ一定値を示す。
3. あて材の存在する部分でもヤング係数の低下がみられた。
4. せん断弾性係数は節周辺部でむしろ増加する傾向がみられた。
5. 材料表面を貫通する割れがあるばあい、せん断弾性係数の低下が著しい。
6. あて材の存在はせん断弾性係数を増加させる。
7. 欠点を有する材の弾性定数の測定に際しては、試験条件による影響を十分に考慮して、得られた数値を評価する必要がある。

第6章 木取寸法と曲げヤング係数の関係

6.1 厚さ方向に不均質な材料

前章では、材長方向に局所的な異質部を含む材料として有節材をとりあげ、これの見かけの曲げヤング係数について実験的検討を行った。本章では厚さ方向の材質が一様とされない材料のひとつとして木材そのものを考え、この曲げヤング係数について考察している。

通常、厚さ方向に材質が変化している材料として取扱われているものには、集成材や合板のようにヤング係数の異なる原板ないし単板を接着したもの、木材小片を堆積し圧縮接着した3層パーティクルボードおよび小片に方向性を与えたパーティクルボード、あるいはこれらの材料からなる複合板などがある。しかしこれらの材料は一般に厚さ方向で材質がほぼ対称な配置になるよう製造され、各々の層の材質は均質であるという前提にもとづいている。実際にこれらの材料の全体としてのヤング係数は、各々の層のヤング係数が既知であれば十分な精度で予測計算することが可能である。

6.2 木材の年輪内ヤング係数変動

第3章および第4章では、木材は直交異方性材料であり、その材質は3弾性主軸方向にそれぞれ均質であるという仮定のもとに考察を進めてきた。しかし、木材の年輪は一定寸法の細胞の様な集合体ではなく、かなりの材質差をもつ早材と晩材の重ね合わせにより構成されているために、ひとつの年輪層をとり出したばあい、これを一様材質をもつ構成要素とみることはできない。そのため、このような要素の集合体から切り出された試験片は一般に厚さ方向に関して対称構成とはならず、その木取法により横断面に現われる年輪の配置は無限に変化しうることになる。

一年輪内での繊維方向のヤング係数の変動に関しては図-2.2などの結果が発表されている^{32,37)}。このヤング係数は半径方向に連続的に採取した切片について測定されたもので、早材から晩材へかけてのヤング係数の変動状況はいずれも曲線的に増加する傾向を示している。著者はこの傾向を一般化するために、モウソウチク稈壁を木材の年輪モデルとしてとりあげこれに関する実験を行った⁵⁾。それによると、稈壁内のヤング係数分布は図-6.1の2次曲線仮定に良く適合する結果を得た。以下ではこの結果を木材の年輪に適用して、比較的小きな断面の試験片で測定される木材の曲げヤング係数について考えてみる。

6.3 木取法による曲げヤング係数の変動

JISによる木材の標準試験法では、曲げヤング係数の測定には正方形断面の無欠点材を使用することとなっており、その最小断面寸法は2×2(cm)である。この寸法では、その木口面に含まれる年輪数はおよそ10数個から数個まで、間伐材や未成熟材ではこれよりも少くなるばあいもあると考えられる。上に述べたように、小試片の曲げ試験からもとめられるヤング係数は各年輪層のヤング係数により決まるのであるが、年輪内のヤング係数の変動が大きく、断面内に含まれる年輪数の少い試験片では、木取位置による変動がかなり大きくなると思われる。

i. 材せいが年輪幅に等しい試験片

いま、年輪幅 (W) が一定の木材から、幅が B (接線方向)、材せいが H (半径方向) の2方柱

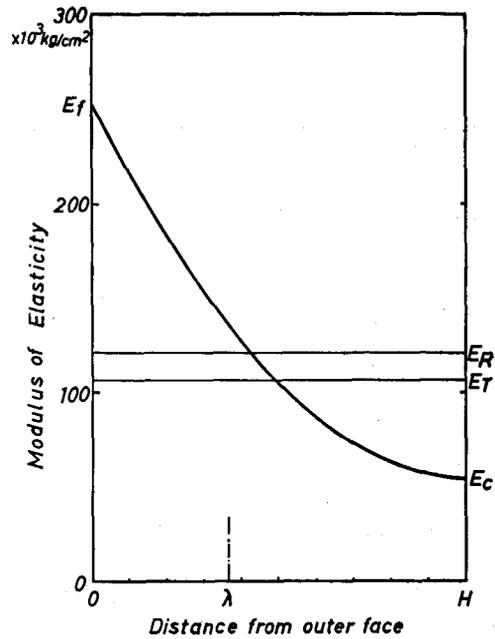


図-6.1 モウソウチク稈壁内の E 分布⁵⁾

Fig. 6.1. MOE distribution across the culm wall of Moso-bamboo (*Phyllostachys pubescens*)⁵⁾.

$$E = \frac{200}{H^2} y^2 - \frac{400}{H} y + 250 \quad (\times 10^3 \text{ kg/cm}^2)$$

y : distance from outer face.

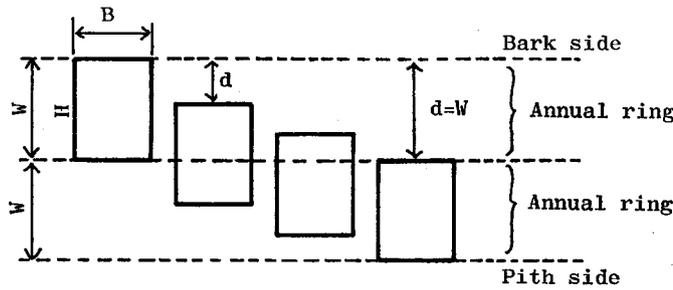


図-6.2 年輪幅に等しい材せいをもつ試片の木取り
 Fig. 6.2. Sampling of test pieces having an equal thickness H to the ring width W .

木取の矩形断面棒を切出すばあいを考えてみる。年輪境界から試験片上面までの距離を d とすれば、図-6.2 に示すように $d=0$ のばあいは試験片の上下面が丁度年輪境界に接している時となり、 d が $W/2$ となれば境界が試験片中央に位置するばあいとなる。 $d=W$ で1周期が終了しこの後は繰返しとなる。木材の1年輪内での縦ヤング係数の分布を次の2次式で表すと、 E_f は晩材終点のヤング係数、 E_c は早材始点のヤング係数、 W は年輪幅、 y は各年輪境界から髓方向へ測られる距離となる。

$$E_{(y)} = \frac{E_f - E_c}{W^2} y^2 - \frac{2(E_f - E_c)}{W} y + E_f \tag{6.1}$$

このようなヤング係数分布をもつ木材(図-6.3(a))から、幅 B 、材せい H (=年輪幅 W) の断面の試験片を年輪境界から d だけはなれた位置から切出したとすれば(図-6.3(b))、その試験片内のヤング係数分布は図-6.3(c)の形状となる。

さて、年輪幅 W を単位寸法1とし、 d を W に対する比 α で表すと ($0 \leq \alpha \leq 1$)、Eq. 6.1 は、

$$E_{(y)} = ay^2 + by + c \tag{6.2}$$

ただし、
 $a = E_f - E_c$
 $b = -2E_f + 2E_c$
 $c = E_f$

いま、木表から荷重が加えられてこの試験片に曲げ応力が生じたとすれば、歪が直線的変化をなすという仮定のもとで、ある断面における垂直応力の釣合が成立しなければならない。中立軸の位置を試片上面から λ とすれば、

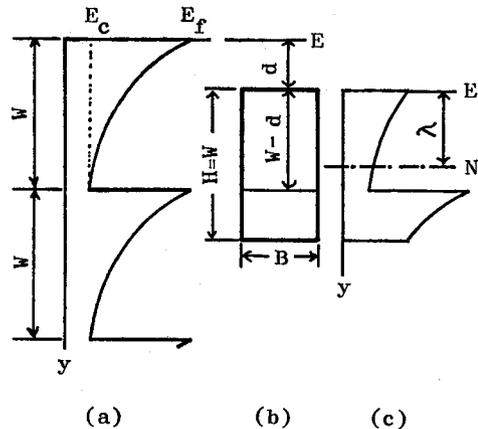


図-6.3 試験体内の E 分布
 Fig. 6.3. Distribution of MOE in a test piece.
 (a) cyclic change of MOE in radial direction of wood.
 (b) a test piece with thickness H cut out from the position d apart from annual ring boundary.
 (c) MOE change in the piece.

$$\int_0^{1-\alpha} \frac{1}{\rho} E_{(y)}(y-\lambda) B dy + \int_{1-\alpha}^1 \frac{1}{\rho} E_{(y)}(y-\lambda) B dy = 0 \quad (6.3)$$

$E_{(y)}$ は, $0 \leq y \leq 1-\alpha$ においては,

$$E_{(y)} = a(y+\alpha)^2 + b(y+\alpha) + c \quad (6.4)$$

$1-\alpha \leq y \leq 1$ では

$$E_{(y)} = a\{y-(1-\alpha)\}^2 + b\{y-(1-\alpha)\} + c \quad (6.5)$$

となるから, これらを Eq. 6.3 に代入して解けば,

$$\lambda = \frac{4a\alpha(\alpha-1)(\alpha-2) + E_f + 5E_c}{4(E_f + 2E_c)} \quad (6.6)$$

$E_f/E_c = 5$ とすれば,

$$\lambda = \frac{8\alpha(1-\alpha)(2-\alpha) + 5}{14} \quad (6.7)$$

次に接線面(木表)に荷重を加えたばあいの見かけの曲げヤング係数は

$$\begin{aligned} E_T &= 12 \int_0^{1-\alpha} \{a(y+\alpha)^2 + b(y+\alpha) + c\} (y-\lambda)^2 dy \\ &\quad + 12 \int_{1-\alpha}^1 \{a\{y-(1-\alpha)\}^2 + b\{y-(1-\alpha)\} + c\} (y-\lambda)^2 dy \end{aligned} \quad (6.8)$$

これを解いて $E_f/E_c = 5$ とおけば,

$$\begin{aligned} E_T &= \frac{12}{35} \{7 + 10\alpha(1-\alpha)(5 - 5\alpha + \alpha^2) - 40\lambda(1-\alpha)(2-\alpha)\alpha + 5\lambda(7\lambda - 5)\} E_R \\ &= k E_R \end{aligned} \quad (6.9)$$

E_R は柁目面に荷重を加えたばあいの見かけの曲げヤング係数で,

$$E_R = \frac{1}{H} \int_0^H E_{(y)} dy = \frac{E_f + 2E_c}{3} \quad (6.10)$$

Eq. 6.9 に Eq. 6.7 の λ を代入すれば,

$$k = \frac{3}{245} \{71 + 40\alpha(1-\alpha)(15 - 57\alpha + 71\alpha^2 - 40\alpha^3 + 8\alpha^4)\} \quad (6.11)$$

柁目面荷重による曲げヤング係数 E_R を基準としたのは, この値が, 材せいが年輪幅の整数倍であるかぎり常に一定値をとるためである。材せい(半径方向の寸法)が年輪幅の整数倍とならないばあいは, E_R も木取位置により変動するがその変動幅は E_T のばあいに比較するとはるかに小さいと推定される。

以上の結果は 図-6.4 の $H=W$ の曲線となる。これによると, 年輪境界から髓方向へ約 $0.2W$ はなれた位置から採取した試験片が最大の曲げヤング係数を示し, 約 $0.7W$ はなれた位置からのものが最小の値となってその大きさは約 2 倍の差を示すことがわかる。

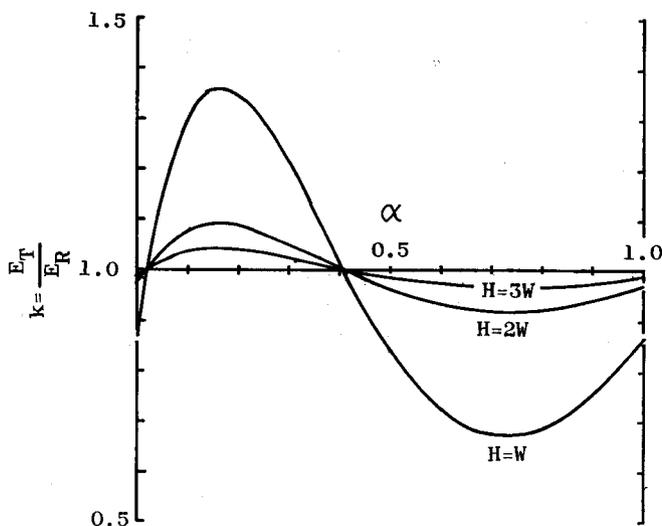


図-6.4 木取り位置による見かけの E の変動 ($\frac{H}{W}=1, 2$ および 3 のばあい)

Fig. 6.4. Variation of apparent MOE caused by the positions of cutting out the pieces ($\frac{H}{W}=1, 2$ and 3).

ii. 材せいを年輪幅の2倍としたとき

中立軸の位置は前と同様の手続きで次式からもとめられる。

$$\int_0^{1-\alpha} \{a(y+\alpha)^2 + b(y+\alpha) + c\} (y-\lambda) dy \\ + \int_{1-\alpha}^{2-\alpha} [a\{y-(1-\alpha)\}^2 + b\{y-(1-\alpha)\} + c] (y-\lambda) dy \\ + \int_{2-\alpha}^2 [a\{y-(2-\alpha)\}^2 + b\{y-(2-\alpha)\} + c] (y-\lambda) dy = 0 \quad (6.12)$$

$$\lambda = \frac{4(n-1)\alpha(1-\alpha)(2-\alpha) + (3n+9)}{4(n+2)} \quad (6.13)$$

ただし $n = E_f/E_c$

$n=5$ とすれば,

$$\lambda = \frac{4\alpha(1-\alpha)(2-\alpha) + 6}{7} \quad (6.14)$$

$$E_T = \frac{3}{35} \{37 + 10\alpha(1-\alpha)(9-7\alpha+\alpha^2) \\ - 40\alpha(1-\alpha)(2-\alpha)\lambda + 5\lambda(7\lambda-12)\} E_R \\ = kE_R \quad (6.15)$$

λ を代入して計算すれば,

$$k = \frac{3}{245} \{79 + 10\alpha(1-\alpha)(15-57\alpha+71\alpha^2-40\alpha^3+8\alpha^4)\} \quad (6.16)$$

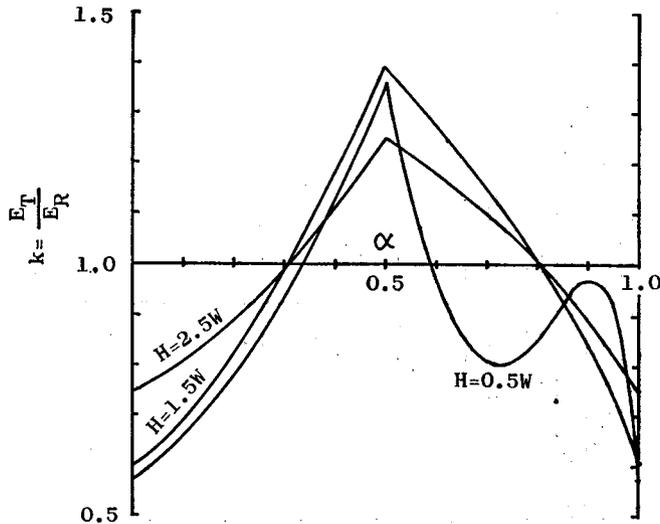


図-6.5 木取り位置による見かけの E の変動 ($\frac{H}{W} = 0.5, 1.5$ および 2.5)

Fig. 6.5. Variation of apparent MOE ($\frac{H}{W} = 0.5, 1.5$ and 2.5).

α に関する k の変動曲線は 図-6.4 の $H=2W$ の曲線となり、 $H=W$ のばあいと比較してその変動幅は大きく減少する。

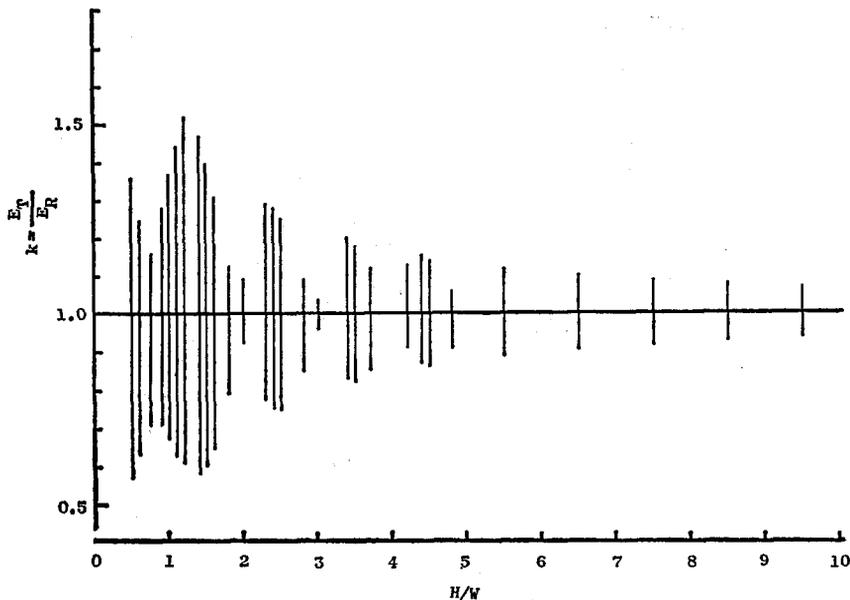
$H=3W$ のばあいは 図-6.4 に、 $0.5W$ 、 $1.5W$ および $2.5W$ のばあいは 図-6.5 にそれぞれ k の変動曲線を示した。これらと比較して注目すべきことは、材せい H が増加しても k の変動幅は単調に小さくはならないことである。たとえば、年輪幅の 2 倍の材せいをもつ試験片ならば、どの位置から切出しても、測定される曲げヤング係数の最大値と最小値の差は 1.2 倍ていどにしかならないのに対して、年輪幅の 2.5 倍の材せいをもつ試験片では最大の曲げヤング係数は最小値の 1.6 倍にもなることがあるわけである。

6.4 試験片の材せいと k の関係

以上に示したように、接線面荷重により測定される曲げヤング係数は、試験片材せい H と年輪幅 W の比および試験片の木取り位置によって見かけ上の値が変動することが明らかとなった。

図-6.6 には、種々の H/W について算出した k の変動幅を実線の長さで示してある。材せいが年輪幅の整数倍のばあいは k の収斂は早く、 $H/W=3$ で変動幅が 10% 以内となるが、材せいが年輪幅の整数倍とならないばあい変動幅は大となり、 $H/W=4.5$ としても変動幅は 30% 近い値を示し、その収斂も遅い。木取位置により生じるヤング係数の最大値と最小値の差を 20% ていどに抑えるには、材せいは少くとも年輪幅の 7 倍ていどとする必要がある。

試験片断面に入る年輪数が数個以下のばあいの曲げヤング係数の測定値は、木取位置の影響を受けている可能性が大きく、測定された曲げヤング係数のばらつきの原因をその材の材質



図—6.6 材せい/年輪幅比による k の変動

Fig. 6.6. k as affected by specimen thickness/ring width.

変動のみに帰することは適当ではない。また、以上の計算は木材の年輪内のヤング係数の分布形を2次関数を仮定して行ったものであり、これと異なった分布仮定によれば結果はこれと同じとはならないことは当然である。しかし、早材から晩材へかけての材質の変動傾向が連続的な増減を示すかぎり上述の木取位置による影響は避けられないことである。

ここで扱ったのは板目面荷重による曲げヤング係数であるが、同様の考え方は比重の測定値に対しても適用できるのであり、これに関しては別の機会に検討を加える予定である。

6.5 要 約

木材の1年輪をモウソウチク稈壁と同等の性質をもつ材料と仮定し、これの積層体としての木材の接線面荷重による曲げヤング係数について考察した。晩材終点および早材始点のヤング係数の比を5と仮定し、試験片材せいと年輪幅の関係が曲げヤング係数に与える影響を試算したところ、材せいを年輪幅の7倍でいどにすれば測定されるヤング係数の最大値と最小値の比を1.2以内に抑えられることが判った。早材～晩材のヤング係数の分布形は樹種、樹齢等により異なることが予想され、実験的な検証も含めて今後明らかにすべき課題は多いと思われる。

第7章 総 合 考 察

現在我国での木材消費量は1人あたりにすると年間約 1 m^3 にのぼっている。今後の需要量がこのままであったとしても、木材がますます貴重な資源になることは間違いないと思われる。このような時代に、木材を効率良く利用することは木材の消費を少しでも低減させることにつながると思われる。

木材の材質の適正な評価法の研究は、増加しつつある人工造林材あるいは未利用材の合理的な使用のための基礎条件であり、同時に現在使用されている木材の一層有効な利用技術の開発への手がかりとなるものと考えられる。

木材は言うまでもなく生物のうみ出した材料であり、その構造は中空薄肉のパイプつまり細胞の集合体から成り立っているものである。さらにこの集合体は年輪という明らかな1単位が多数積層された構造形式をとっているものが多い。この研究では、このような構造をもつ木材の弾性挙動に注目して試験を行い、材質評価のための基礎的資料を得ようとしたものである。

試験に使用した材料はその構造形式から次の3種の材料に分類される。

1. 均質異方性材料
2. 異質材からなる材料
3. 不均質異方性材料

第3章および第4章で扱ったナラ、ニレ、ブナ、トドマツ、イチョウ、ヤチダモおよびヤマナラシは弾性主軸方向にそれぞれ均質な弾性的性質をもつものとして1.に属し、第5章の有節材は均質な正常材の中にこれと異質な部分つまり節を含むものとして2.に入るべきものである。また厚さ方向に何層かの異質材が重なり合ったものとしての合板もこの分類に入るが、これに関しては文献2)に報告してある。第3の分類は直交する3弾性軸を有しながら、ひとつの軸方向の材質が一樣でないものとして木材の年輪構造を考えた。モウソウチク稈壁が第3の分類に入ることはすでに報告した⁴⁾。

第1の分類に属するものの材質指標は比重であることはすでに述べたとおりで上記7樹種の正常材については、ヤング係数およびせん断弾性係数の両者が比重と非常に高い相関を有することが共通している。

第2の分類の有節材の弾性挙動を決定するのは局部的に存在する節および節周辺の材質の変動である。有節材全体の見かけの剛性は局部的なヤング係数の低減傾向が測定されていれば計算が可能であることから、節径と節周辺の繊維傾斜が重要な材質指標となる。

第3の分類で考えている材料はある方向のヤング係数が一定の傾向で変動し、これが周期的に繰返されるものであって、早晚材からなる木材を厳密に取扱おうとするばあいには年輪内のヤング係数の変動パターンが材質指標となる。

弾性係数の測定に関して言えば、均質材については試験方法によらず同一の値が得られ、直交異方性理論による計算値は実測値にはほぼ一致する。有節材に関しては荷重位置、変形の測定法により、得られる値は変動する。より正確な値を得るには可能なかぎり短かいスパンで連続的に変形を測定することが必要である。小形の試験片の曲げ試験では木取位置による影響が測定値のばらつきを助長することになり、どうしてもあるていど大きな断面寸法の材を使用しなければならない。これが不可能なばあいには、木取位置により生じる測定値の変動幅を考慮に入れておく必要がある。

以上で述べた木材に関する各種の試験から、木材の材質特性が比重、節、あて、年輪等の生物材料に必然的に伴う因子の影響を強く受けていることが明らかとなったが、弾性挙動については、これらの変動要因を詳細に検討し、計算にとり入れることにより一定程度まで定量的に材質を把握できることが明らかとなったと考える。特にここで扱った3種の広葉樹無欠点材の弾性および強度は比重との高い相関を示しており、材質と構造的特徴により広葉樹材を分類する手がかりがつかめたと考えられる。また針葉樹あて材と広葉樹あて材の弾性定数における特異な挙動はあて材識別の手段として応用できる可能性を示すものである。以上の観点から言えば、木材の基礎材質を表わす項目としてこれまでの比重、ヤング係数に加えてせん断弾性係数が必要であると考えられる。

あて材の試験結果が示すように、曲げと振りに対する木材の抵抗性能は針葉樹と広葉樹とは明らかな差異があるが、この事実は、風あるいは積雪などの外力に対する立木の応答が針葉樹と広葉樹とで特徴的な相違を示すことを予想させ、この分野での研究にも何らかの手がかりになると思われる。また、1年輪内の材質変動に関する知見は木材のみならず稲、麦、トウモロコシ等農作物の外力に対する抵抗機能の解明にも共通の手法として適用が可能と考えられる。

第8章 摘 要

1. 道産広葉樹材の弾性定数

ナラ、ニレおよびブナ無欠点材について曲げ、振りおよび圧縮試験を行い、ヤング係数、せん断弾性係数およびポアソン比を測定した。

- i. ヤング係数およびせん断弾性係数は比重と高い直線相関を有している。
- ii. ポアソン比とヤング係数の比 μ/E は、比重に関する指数関数で表現可能で、比重増加に伴って値が減少する傾向がいずれの樹種においてもみとめられる。また、半径方向および接線方向に関するポアソン比とヤング係数の関係は MAXWELL の相反定理を満足している。
- iii. 圧縮試験で得られたヤング係数およびポアソン比から算出されたせん断弾性係数は、実測された見かけのせん断弾性係数にきわめて近い値となり、直交異方性理論による木材の取扱いの妥当性が確かめられた。
- iv. 弾性係数間の関係は樹種により一定とはならず、比重の変化に伴ってこれらの関係も変化することが明らかとなった。

2. あて材の弾性定数

あて材を含むトドマツ、イチョウ、ヤチダモおよびヤマナラン材から採取した試験片について比重、年輪幅、曲げヤング係数、せん断弾性係数、ポアソン比等を測定した。

- i. 平均値によれば、あて材の比重はいずれの樹種においても正常材のそれよりも大となっている。
- ii. ヤング係数は針葉樹あて材で減少し、広葉樹あて材で増加する。

iii. せん断弾性係数はヤング係数とは逆に、針葉樹あて材で増加し、広葉樹あて材で減少傾向を示す。

iv. ヤング係数とせん断弾性係数の比は、針葉樹あて材で約4~11, 正常材で9~22となるのに対して広葉樹あて材では約10~22, 正常材で5~12の範囲に出現しており、あて材と正常材の境界値がおよそ10となる。

3. 有節材の弾性定数

節を含む挽板の材長方向の弾性定数の変動を18 cm 区間の撓みおよび振り角の連続測定により明らかにした。

i. ヤング係数は節およびこれに伴う目切れの存在する位置で低減を示し、その程度は節径に比例する。

ii. あて材の存在する部分でもヤング係数は低下するが、材面を貫通する割れの影響はみられない。

iii. せん断弾性係数は節の近辺でいくらか増加する傾向を示す。

iv. あて材の存在する部分ではせん断弾性係数は増加するが、表面を貫通する割れが存在すると著しい低下を生じる。

v. 比較的大きな支点間隔で測定される有節材の見かけのヤング係数には、欠点による局部的な剛性低下が十分に反映されない。

4. 木取寸法と曲げヤング係数の関係

早晚材からなる木材の1年輪内のヤング係数分布を仮定し、試験片の木取位置および寸法による見かけの曲げヤング係数の変動を試算した。2次関数によるヤング係数分布を仮定したばあい、測定される曲げヤング係数のばらつきの幅を±10%以内とするには試験片断面に7個以上の年輪が入る必要のあることが判明した。

謝 辞

本論文に係る実験の遂行ならびに結果のとりまとめに際して終始御指導いただいた北海道大学名誉教授 沢田稔先生ならびに北海道大学農学部 宮島寛教授に心から感謝すると同時に、試験材料の入手にあたって多大な御協力をいただいた北海道大学農学部演習林の皆様、北海道立林産試験場の関係諸氏、各種の実験を行うにあたって御助力いただいた北海道大学農学部木材加工学講座の卒業生諸君、大学院生および教職員の皆様方に深甚の謝意をここに記して表すものである。

参 考 文 献

- 1) 沢田 稔・上田恒司: 北大演報, 25, 61 (1967).
- 2) 上田恒司: 北大演報, 26, 143 (1968).
- 3) 上田恒司: 材料, 20, 1181 (1971).

- 4) 綿貫幸宏・上田恒司・奥山裕美：北大演報, 29, 335 (1972).
- 5) 上田恒司：北大演報, 37, 817 (1980).
- 6) BACH, C. und R. BAUMANN: Elastizität und Festigkeit, 9. Auflage (1924) (7) による。
- 7) KOLLMANN, F. and W. A. CÔTÉ, Jr.: Principles of Wood Science and Technology I (1968).
- 8) CARRINGTON, H.: Phil. Mag. 41, 848 (1921).
- 9) CARRINGTON, H.: Phil. Mag. 43, 871 (1922).
- 10) CARRINGTON, H.: Phil. Mag. 45, 1055 (1923).
- 11) YLINEN, A.: Holz als Roh- u. Werkstoff, 5, 375 (1941).
- 12) HÖRIG, H.: Ing.-Arch. 6, 8 (1935).
- 13) STAMER, J.: Ing.-Arch. 6, 1 (1935).
- 14) HEARMON, R. F. S.: FPR Special Report, No. 7. (1948).
- 15) CARRINGTON, H.: Aeron. J., 26 (1922) (45) による。
- 16) KOLLMANN, F. u. H. KRECH: Holz als Roh- u. Werkstoff, 18 (1960).
- 17) KOLLMANN, F.: Technologie des Holzes u. d. Holzwerkstoffe, Bd. 1, 2. Aufl. (1951).
- 18) KOLLMANN, F.: VDI-Forschungsheft, Nr. 403 (1940).
- 19) 猫塚 満：北海道大学農学部林産学科卒業論文, 8 (1972).
- 20) 佐藤 始：北海道大学農学部林産学科卒業論文, 9 (1973).
- 21) 石田茂雄：北大演報, 17, 1-14 (1954).
- 22) THUNEL, B.: Holz als Roh- u. Werkstoff, 1 (1941).
- 23) KOLLMANN, F.: Holz als Roh- u. Werkstoff, 18 (1960).
- 24) BAUMANN, R.: VDI-Forschungsheft, Nr. 231 (1922).
- 25) 沢田 稔：林試研報, 103, 116 (1958).
- 26) 山井良三郎：林試研報, 113, 57 (1959).
- 27) KEYLWERTH, R.: VDI-Forschungsheft, Nr. 430 (1951).
- 28) 松本 勳：木材学会誌, Vol. 7, 90 (1961).
- 29) 森 三郎：林試報告, No. 33, 35 (1933).
- 30) 尾中文彦：木材研究, No. 1, 1 (1949).
- 31) 酒田金治・佐伯 浩：鳥大農演報, 2, 47 (1961).
- 32) 鈴木正治：林試研報, No. 212, 89 (1968).
- 33) 矢沢亀吉・深沢和三：岐大農研報, No. 7, 70 (1956).
- 34) 渡辺治人ら：木材学会誌, Vol. 10, 125 (1964).
- 35) 太田貞明：九大演報, 45, 1 (1972).
- 36) 山本宏ら：木材学会北海道支部講演集, No. 6 (1974).
- 37) 松本 勳：九大演報, 36, 1 (1962).
- 38) RACZKOWSKI, J.: Holzforschung, 17 (6), 189 (1963).
- 39) 太田 基：九大演報, No. 29 (1957).
- 40) 鈴木 寧：材料, 12, 121 (1963).
- 41) 北村博嗣：宇大農学術報告, 9 (2) (1975).
- 42) 遠矢良太郎・山田式典：日本林学会九州支部研究論文集, No. 31 (1978).
- 43) 日本木材学会：材質指標と材料としての性質の関連 (1980).
- 44) 平井信二・北原覚一：木材理学 (1953).
- 45) 渡辺治人：木材理学総論 (1978).
- 46) BOSSHARD, H. H.: Holzkunde, Bd. 2 (1974).
- 47) PANSHIN, A. J. and C. DEZEEUW: Textbook of Wood Technology, Vol. 2nd ed. (1970).
- 48) TRENDLENBURG, R. und H. MAYER-WEGELIN: Das Holz als Rohstoff (1955).
- 49) TSOU MIS, G.: Wood as Raw Material (1968).
- 50) USFPL: Wood Handbook, USDA Agr. Handbook No. 72 (1955).

Summary

Wood has been an indispensable material in our history. The technical research on mechanical properties of wood was, however, left out of consideration until the 20th century, owing to its anisotropic nature in elasticity and strength. Moreover, the growth conditions of each tree made it more complicated to evaluate the properties of wood and its products.

The wood quality is commonly different in species, in individual trees and even in a log. Test pieces of wood cut out from a log show considerable deviations in mechanical properties according to the size and their positions in the stem. The smaller the size of a test piece, the more evident becomes the effect of knots, local irregularities of grain direction and macro structure of wood. In some cases, wood section must be assumed to be a layered system of earlywood and latewood.

Mechanical properties of lumber as used for structural purposes are found to have close correlations with some indices, for example, knot size, grain orientation, kind and location of defects, moisture content, specific gravity, construction of annual rings etc. Since the thorough examination of these indices in the site of wood processing is practically impossible, the actual inspection of the lumber is mainly made by visual method. From technical standpoint, however, the establishment of a method for qualitative evaluation of lumber is the matter of great urgency.

In this research, the elastic constants of some wood species are experimentally determined and discussed, which may be a basic information for further research on effective use of wood materials. Four experiments included in this paper are briefly stated as follows:

1. The elastic constants of hardwoods grown in Hokkaido

Three hardwoods, oak, elm and beech, grown in Hokkaido prefecture were investigated on elastic constants and inter-moduli relationships to ascertain the suitability of applying orthotropic elastic theory to wood.

Small clear bending specimens in air dry condition were prepared from these hardwoods (Table 3.1.). After all specimens were determined the specific gravity, annual ring width and flexural modulus of elasticity in low stress level, every fifth specimens were broken by bending test. From the ends of failed specimens, test pieces for compression and block shear tests were prepared. Torsion test was carried out on selected specimens. The results are summarized as follows.

1. The modulus of elasticity has a close correlation with specific gravity (Figs. 3.2, 3.6 and 3.7).

2. The apparent modulus of rigidity determined from torsional test also shows more correlative figures (Fig. 3.3).

3. Moduli of elasticity obtained from bending and compression tests are essentially of the same value (Fig. 3.5).

4. The relationship between Poisson's ratio to the modulus of elasticity μ/E and specific gravity may be expressed by an exponential curve (Figs. 3.8 and 3.12). The relationship in radial and tangential directions conforms very well to the Maxwell's reciprocal theorem.

5. Elastic constants E_L , E_T , E_R , E_{LT} , E_{LR} , μ_{LT} and μ_{LR} from compressive tests are put into Eqs. 3.5 and 3.6 to calculate true moduli of rigidity, G_{LT} and G_{LR} , which show good agreement with apparent moduli of rigidity (Table 3.11). This may be one evidence that the

orthotropic theory can be applied to wood.

6. The relation between elastic constants is variable with specific gravity change, which indicates more suitable index be needed for precise estimation.

2. The elastic constants of reaction woods

The object of this experiment is to get some knowledges about characteristic differences between normal wood and reaction wood. The four species used in this experiment are fir (*Abies sachalinensis*), ginkgo (*Ginkgo biloba*), ash (*Fraxinus mandshurica*) and aspen (*Populus sieboldii*). The experimental procedure and tested items are similar to those in the preceding paragraph.

1. Specific gravity of reaction wood is on the average greater than that of normal wood. A significant increase in annual ring width is observed in fir compression wood (Fig. 4.1 (a)), while in other species the difference is not evident (Fig. 4.1 and Table 4.3).

2. Modulus of elasticity of compression wood, fir and ginkgo, is comparatively low, while the tension wood, ash and aspen, shows greater modulus of elasticity than normal wood (Fig. 4.2).

3. The compression wood in fir and ginkgo indicates a considerable increase in modulus of rigidity in contrast with modulus of elasticity. On the other hand, the modulus of rigidity in hardwoods becomes smaller in tension wood (Fig. 4.3).

4. The range of E/G ratios in compression wood is roughly 4 to 11; in normal wood of softwood 9 to 22; in tension wood 10 to 22 and in normal hardwood 5 to 12. E/G value of 10 may be an approximate index for distinguishing reaction wood from normal wood (Fig. 4.4 and Table 4.4).

5. The value \sqrt{EG} , which determines the lateral buckling load of deep beams, is greater in reaction wood except ginkgo. Divided by specific gravity, however, it becomes greater in tension wood than in compression wood (Table 4.4).

3. The flexural behaviour of knotty boards

Modulus of elasticity of a material is derived from statical formulas, into which the observed stress and deformation relationship is substituted. In the case of inhomogeneous materials, the calculated value is not constant depending on the test method.

For instance, consider two boards in Fig. 1.1 (a), the board A has a weak portion near the left end, while the board B has a defect at the center. When the boards are supported on the same span, applied concentrated load at the center, the board A will show asymmetric sagging at the left-hand side. The flexural curve of the board B is symmetric but it has a sharp curvature at the center portion (Fig. 1.1 (b)). If each deflection at the center is identical, the boards may be judged to have the same modulus of elasticity. When the angle of rotation is measured at the left supporting point instead of the deflection measurement, the calculated moduli may differ considerably.

In this experiment, the apparent stiffness of lumber including local defects is investigated. Test materials are 40 flat-sawn lumber of spruce and fir with 2 by 10 (cm) cross section. The local deflections are successively measured along the board under constant bending moment by the device illustrated in Fig. 5.1. The experimental conditions are also schematically shown in Fig. 5.3. Local moduli of rigidity are calculated from twisting angle measured under application of torsional moment at the ends of the board. Test results are as follows.

1. Local moduli of elasticity generally decrease at the position of knot, cross grain and compression wood, where torsion moduli increase (Fig. 5. 4).
2. Defect-free portions indicate nearly constant stiffness in one board.
3. The effect of knots on the stiffness is proportional to its size (Fig. 5. 6).
4. Assuming a stepwise change of modulus of elasticity to each section along the length of a board (Fig. 5. 8(a)), apparent modulus of elasticity for two test conditions are derived (Eqs. 5. 3 and 5. 6). From comparison of two equations, it is concluded that the degree of contribution of sectional moduli of elasticity to apparent moduli is different. Observed sectional moduli are put into Eqs. 5. 3 and 5. 6 to obtain E_{θ} and E_{ϕ} . As shown in Table 5. 1, observed and calculated moduli are in good agreement.
5. When the board is driven lengthwise on two fixed supports, which occurs in the case of machine grading, observed also is an apparent modulus of elasticity. The simulated curves under 80 cm span for four boards are shown in broken lines (Fig. 5. 9). Typical changes of sectional modulus of elasticity at the position of knots (solid lines) are obscured by general reduction of apparent modulus of elasticity, which may be a cause to misjudge the board quality.

4. A discussion on the apparent modulus of elasticity determined by bending test

In design and calculation of wooden structures, it is general to treat wood as a homogeneous material, homogeneous in the direction of its principal axes, because the cross-sectional dimension of structural lumber is by far larger than any unit of wood tissues. The small clear specimens used in the standard test, however, contain about 15 annual rings at most. Softwood specimens have sometimes only a few rings in the same cross section. In such case, the arrangement of annual rings must be accounted for to evaluate the stiffness determined, because the longitudinal modulus of elasticity is not uniform in a growth ring. The cyclic change of this modulus in the cross section forms a saw-toothed pattern.

The overall stiffness of comparatively small bending specimen is thus influenced by the position it was removed from. In this respect, the change of apparent MOE in bending was discussed in relation to the ring width and specimen size, assuming parabolic MOE distribution across the ring width (Eq. 6. 2).

The neutral axis of a test piece with thickness H equal to the ring width W cut out from wood section is derived for flatwise bending, i. e. the load applied to tangential plane (Eq. 6. 7). The apparent MOE in this case, E_T , is calculated from Eq. 6. 8. Ratio of E_T to E_R varies with α , the relative distance of annual ring boundary from the top surface of the specimen. Fig. 6. 4 shows the variation of k ($=E_T/E_R$) against α ($=d/W$) for $H/W=1, 2$ and 3 in which k seems to contract rapidly to unity. When the quotient H/W is not an integer, the contraction of k becomes less rapid (Fig. 6. 5). From further calculations, Fig. 6. 6 is obtained. The variance of k becomes less than 10% in the region of $H/W \geq 7$.

Conclusion

The test materials used may be classified into three groups; 1. orthotropic homogeneous material, 2. composites of orthotropic homogeneous materials and 3. orthotropic inhomogeneous materials.

In paragraph 1 and 2, the normal and reaction woods are treated as the material in

the group 1. The primary index which relates to the mechanical properties of this kind of wood is specific gravity. Reaction wood, however, shows significant variance in specific gravity. In this case, modulus of elasticity and modulus of rigidity may be suitable indicators.

Knotty lumber belongs to the group 2, where it is essential to survey local characteristics as they affect overall properties. Apparent MOE determined from conventional bending test agrees well with MOE calculated from local moduli. That means the relation between specific knot diameter as well as cross grain and stiffness reduction be needed for estimating lumber quality more precisely.

In comparatively small bending specimens which include a few annual rings, the variation of Young's modulus across the growth rings may apparently affect its modulus of elasticity. The possible deviation of MOE depends on the pattern of Young's-modulus change in wood cross section and sample-depth/ring-width ratios.