



Title	モウソウチクの強度性能：稈壁内のヤング係数分布について
Author(s)	上田, 恒司; UEDA, Koji
Citation	北海道大學農學部 演習林研究報告, 37(3), 817-836
Issue Date	1980-11
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/21043">https://hdl.handle.net/2115/21043</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	37(3)_P817-836.pdf



# モウソウチクの強度性能\*

— 稈壁内のヤング係数分布について —

上 田 恒 司\*\*

Mechanical Properties of Moso Bamboo\*  
(*Phyllostachys pubescens* MAZEL)

— Distribution of Modulus of Elasticity  
across the Culm Wall —

By

Koji UEDA\*\*

## 目 次

まえがき .....	818
1. 稈壁内における縦ヤング係数の分布仮定 .....	819
1.1 1次関数を仮定したばあい .....	819
1.2 2次関数を仮定したばあい .....	821
1.3 3次関数を仮定したばあい .....	822
1.4 仮定した関数の適合性の評価 .....	822
2. 材料および実験方法 .....	822
2.1 供試材料 .....	822
2.2 曲げ破壊試験 .....	822
2.3 曲げ剛性試験 .....	823
2.4 中立軸の位置の測定 .....	823
2.5 分割試験片のヤング係数および中立軸 .....	823
2.6 貼合せ試験片のヤング係数, 中立軸の位置および曲げ破壊試験 .....	823
2.7 縦圧縮試験 .....	824
2.8 捩り剛性試験 .....	824
2.9 稈壁内の半径方向比重分布の測定 .....	824
3. 実験結果 .....	824
3.1 曲げ破壊試験 .....	824
3.2 曲げ剛性試験 .....	825
3.3 中立軸の位置 .....	826
3.4 分割試験片のヤング係数と中立軸 .....	827

\* 1980年2月29日受理 Received on Feb. 29, 1980.

\*\* 北海道大学農学部林産学科木材加工学教室

Laboratory of Wood and Wood Products Engineering, Dept. of Forest Products, Faculty of Agriculture, Hokkaido University, Sapporo.

3.5 貼合せ試験片のヤング係数, 中立軸および曲げ強度 .....	827
3.6 縦圧縮および捩り試験 .....	828
3.7 半径方向の比重分布 .....	829
4. 各種関数の適合性の評価 .....	829
4.1 分割前試験片における $E_R, E_T, \varphi$ の関係 .....	829
4.2 2次関数仮定に基づく分割試験片のヤング係数および中立軸位置の計算 .....	830
4.3 貼合せ試験体の接線面荷重による曲げヤング係数 .....	832
5. 要 約 .....	833
あ と が き .....	833
参 考 文 献 .....	834
Summary .....	834
付 表 .....	835

## ま え が き

樹木の成長輪は、髓を中心とする同心円状に形成されるため、これより得られる木材の構造は半径方向に一定のパターンの繰返しをもっている。しかしこれを材料として巨視的にみればあいは、3主軸方向に均質な直交異方性体とみなしうるとされている。

これに対して竹材は、筍(たけのこ)の段階ですでに節間ごとの直径が定まっており、節における形成層の細胞分裂によって上長成長のみが生じるとされている。竹材の横断面における組織構造は、木材におけるほどの複雑性はなく、柔組織という基質の中に維管束という補強材が、あたかもFRP(Fiber Reinforced Plastics)材料における無機質繊維のごとく分布しているものとみることができる。竹材とFRP材料との構造が異なるのは、維管束繊維の軸方向が稈軸方向のみであり、それらの分布密度が表皮側から内皮側へ向かって減少する傾向を有する点である。この半径方向における構造形態の不均一性は、稈壁の物理的、機械的性質が「異質異方性」<sup>1)</sup>を示す原因となっており、この点に関してはこれまでに種々の研究がなされている<sup>1-5)</sup>。それらの多くは、竹稈壁の外側部、中間部および内側部から得た分割片についておこなった各種の試験の報告で、いずれの結果においても、外側部で比重、ヤング係数および強度が大であり、内側部でこれらの数値が小となる知見が得られている。外側部および内側部でのこれらの数値は、竹の種類、稈壁厚、地上高等の条件により変動を示しているが、外側から内側へ向かってこれらの数値が漸次減少する傾向は竹材に関して一般的にみられる現象と思われる。

本研究では、モウソウチクの一般的な材質を試験するとともに、稈壁の半径方向における稈軸方向のヤング係数(縦ヤング係数)が連続変化するものとみて関数による表現を試み、この関数の妥当性をいくつかの実験手段により示そうとするものである。

本報告をまとめるにあたり、試料を提供いただいた鹿児島県木材工業試験場・遠矢良太郎氏ならびに各種の技巧的実験にあたって常に協力を惜しまなかった現三井ホーム(株)・椿谷茂氏に深甚の謝意を表するとともに、実験および討論の過程において有益な助言をいただいた北海道大学木材加工研究室の諸兄に感謝するものである。

1. 稈壁内における縦ヤング係数の分布仮定

竹稈壁から採取した角棒の断面は、表皮面および内皮面に曲率をもつ Fig. 1 (1) の形状をもっている。以下の計算における断面としては、接線方向の幅を  $B$ 、半径方向の幅 (稈壁厚さ) を  $H$  とする Fig. 1 (2) の矩形断面として取扱っている。半径方向に  $y$  軸をとり、原点は表皮側外縁に一致させる。本報で扱っているヤング係数とは稈軸方向つまり Fig. 1 では紙面に垂直方向の応力に係わるものである。

ヤング係数の分布形式は、Fig. 1 (1) に模式的に示されている維管束の分布状態と密接な関係をもつと考えられ、その数式表現も種々のものを使用できると思われる。ここでは、 $y=0$  (表皮面) におけるヤング係数を  $E_f$ 、 $y=H$  (内皮面) におけるそれを  $E_c$  とおいて、この中間の位置のヤング係数を (1) 表層から内層へ一様に变化する直線、(2) 内層において最小値をもつ2次曲線、(3) 表層および内層で極値をもつ3次曲線の3種の関数で表現した (Fig. 2 (1), (2), (3))。以下にこれらに関する計算を示すが、いずれにおいても、曲げ応力により生じる歪分布は直線形をなし、圧縮および引張におけるヤング係数は等しい値をもつことが前提となっている。

1.1 1次関数を仮定したばあい

稈壁より採取した厚さ  $H$ 、幅  $B$  の矩形断面棒において  $y=0$  および  $y=H$  におけるヤング係数をそれぞれ  $E_f$ 、 $E_c$  ( $E_f \geq E_c$ ) とおけば原点から距離  $y$  の位置のヤング係数は直線仮定より次式で表現される。

$$E_{(y)} = -\frac{E_f - E_c}{H}y + E_f \quad (1)$$

接線面に垂直に作用する曲げ荷重を受けるばあいのこの棒の見かけの曲げヤング係数  $E_T$  をもとめるために、まず中立軸の位置を計算しなければならない。いま、曲げモーメント  $M$  により棒が変形を生じ、Fig. 3 に示す歪および応力分布を発生したとすれば、これらの間には次の関係が成立する。

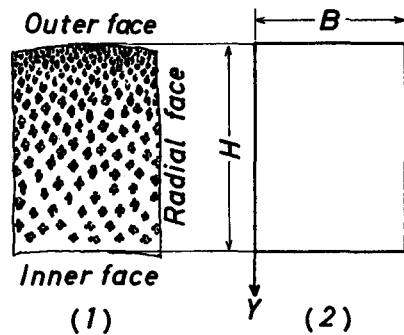


Fig. 1. Cross section of the test piece cut from bamboo culm.  
 (1) Schematic view of cross section  
 (2) Cross section as used in calculation

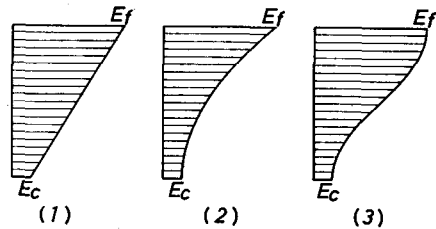


Fig. 2. Assumed distribution of longitudinal MOE across the culm thickness.

- (1) Linear distribution expressed by Eq. (1)
- (2) Quadratic distribution expressed by Eq. (13)
- (3) Cubic polynomial distribution expressed by Eq. (21)

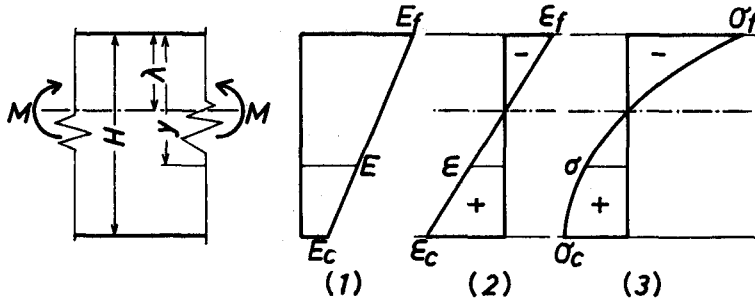


Fig. 3. Stress and strain relationship in a cross section under bending moment  $M$ .

- (1) Linear assumption of MOE distribution.  
 (2), (3) Strain and stress distribution induced by  $M$ .  $E$ ,  $\epsilon$  and  $\sigma$  are respectively MOE, strain and stress at distance  $y$  from outer face.

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\epsilon}{y-\lambda} = \frac{\sigma}{E(y-\lambda)} \quad (2)$$

ここで、 $\rho$ : 中立軸に関する曲率半径

$\epsilon$ :  $y$ における繊維歪

$y$ : 上縁からの距離

$\lambda$ : 上縁から中立軸までの距離

$\sigma$ :  $y$ における繊維応力

$E$ :  $y$ における繊維方向ヤング係数

次にこの断面における垂直応力の釣合条件より、 $B$ を材幅として、

$$\int_0^H B \sigma dy = \int_0^H \frac{B}{\rho} E_{(y)} (y-\lambda) dy = 0 \quad (3)$$

Eq. 1 を代入して  $\lambda$  について解くと、

$$\lambda = \frac{E_f + 2E_c}{3(E_f + E_c)} H \quad (4)$$

つぎに、半径面に垂直に荷重が作用するばあいの見かけのヤング係数  $E_R$  は、

$$E_R = \frac{1}{H} \int_0^H E_{(y)} dy = \frac{E_f + E_c}{2} \quad (5)$$

となる。Eq. 4 および 5 より、

$$E_f = 2(2-3\varphi) E_R \quad (6)$$

$$E_c = 2(3\varphi-1) E_R \quad (7)$$

$$E_f - E_c = 6(1-2\varphi) E_R \quad (8)$$

ここで、 $\varphi = \frac{\lambda}{H}$

さて、中立軸が Eq. 4 で定まったため、 $E_T$  は次のように計算される。上縁より  $y$  なる位置にある要素  $dy$  の中立軸  $\lambda$  に関する曲げ剛性は、Fig. 4 を参照にして、

$$(EI)' = E_{(y)} \left\{ \frac{B(dy)^3}{12} + B(y-\lambda)^2 dy \right\} \quad (9)$$

となる。全断面の見かけの曲げ剛性は、高次微小を無視して全断面について積分することでもとめられる。

$$E_T I = \int_0^H B E_{(y)} (y-\lambda)^2 dy \quad (10)$$

ここで、 $I = \frac{BH^3}{12}$ 、 $E_T$  は接線面荷重における全断面の見かけの曲げヤング係数

Eq. 1, 6 および 7 より

$$E_T = 2(-1+6\varphi-6\varphi^2) E_R \quad (11)$$

ここで特に、断面内でヤング係数が一様なばあいを考えれば、 $E_f = E_c$  を Eq. 4 に代入して  $\lambda = H/2$  が得られ、Eq. 6, 7 および 11 より  $E_f = E_c = E_R = E_T$  となる。これは荷重面が板目、柱目によらず同一のヤング係数が得られることを意味しており、素材梁などの力学的取扱いにおける基本仮定となっている。

## 1.2 2次関数を仮定したばあい

$$E_{(y)} = ay^2 + by + c \quad (12)$$

この式における3個の係数は  $y=0$  で  $E_f$ 、 $y=H$  で  $E_c$  および  $y=H$  において最小値をとることから決定され、次式を得る。

$$E_{(y)} = \frac{E_f - E_c}{H^2} y^2 - \frac{E_f - E_c}{H} y + E_f \quad (13)$$

中立軸および  $E_R$  は前項のばあいと同様の手続きで計算すると、次のようになる。

$$\lambda = \frac{E_f + 5E_c}{4(E_f + 2E_c)} H \quad (14)$$

$$E_R = \frac{E_f + 2E_c}{3} \quad (15)$$

$$E_f = (5 - 8\varphi) E_R \quad (16)$$

$$E_c = (4\varphi - 1) E_R \quad (17)$$

$$E_f - E_c = 6(1 - 2\varphi) E_R \quad (18)$$

$E_T$  についても前と同様にして、

$$E_T = \frac{4}{5} (-2 + 14\varphi - 15\varphi^2) E_R \quad (19)$$

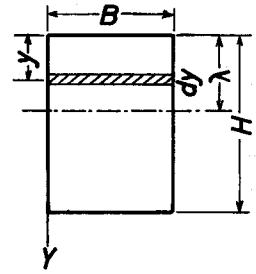


Fig. 4. Calculation of bending stiffness  $EI$

### 1.3 3次関数を仮定したばあい

$$E_{(y)} = ay^3 + by^2 + cy + d \quad (20)$$

において、 $E_{(0)} = E_f$ ,  $E_{(H)} = E_c$ ,  $y=0, H$ において  $dE_{(y)}/dy=0$  より係数を決定すれば、

$$E_{(y)} = \frac{2(E_f - E_c)}{H^3} y^3 - \frac{3(E_f - E_c)}{H^2} y^2 + E_f \quad (21)$$

を得る。以下同様にして、

$$\lambda = \frac{3E_f + 7E_c}{10(E_f + E_c)} H \quad (22)$$

$$E_R = \frac{E_f + E_c}{2} \quad (23)$$

$$E_f = \left(\frac{7}{2} - 5\varphi\right) E_R \quad (24)$$

$$E_c = \left(5\varphi - \frac{3}{2}\right) E_R \quad (25)$$

$$E_f - E_c = 5(1 - 2\varphi) E_R \quad (26)$$

となり、接線面荷重による曲げヤング係数  $E_T$  は、1次関数仮定のばあいと同形の次式となる。

$$E_T = 2(-1 + 6\varphi - 6\varphi^2) E_R \quad (27)$$

### 1.4 仮定した関数の適合性の評価

以上の計算により、仮定した3種のヤング係数分布のばあいについてそれぞれ、半径面荷重による曲げヤング係数 ( $E_R$ )、接線面荷重によるそれ ( $E_T$ ) および中立軸の材厚に対する割合 ( $\varphi$ ) の3者の関係が決定した。これらの数値の実測は、試験片を分割することなしに、比較的容易におこなうことができるため、Eq. 11, 19 あるいは 27 に実測  $E_R$  および  $\varphi$  を代入して算出した  $E_T$  と、実測  $E_T$  とを比較することにより、3式のうちから最も適合性の良好なものを選択することが可能である。

## 2. 材料および実験方法

### 2.1 供試材料

鹿児島県産の3年生モウソウチク (*Phyllostachys pubescens* MAZEL) の胸高部位より採取した竹筒を縦割りしたのち半径面を鉋がけした、断面が約  $1 \times 1$  cm、長さ 20 cm の乾燥竹材 (含水率平均 7.8%) 51 本を使用した。これらの表皮側および内皮側表面には自然の曲面がついたままの状態であるため、曲げ試験において支点あるいは荷重点に接する内皮面は、その部分のみにペーパーがけし、点接触とならないよう配慮した。断面寸法は精度 1/100 mm のダイヤルゲージをセットした測定台を使用して、中央断面の位置において測定した。

### 2.2 曲げ破壊試験

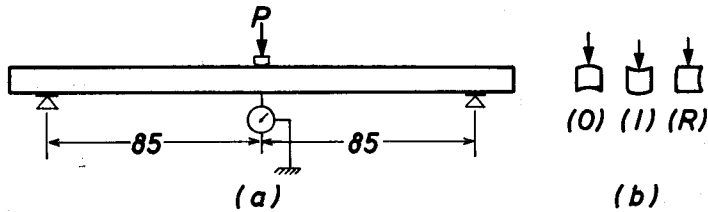


Fig. 5. Bending test method (mm).

- (a) Center loading on 170 mm span. Deflection measured at midspan with a dial gage.
- (b) Loading condition  
(O) Loaded on outer face  
(I) Loaded on inner face  
(R) Loaded on radial face

51本の試験片の中から任意に選択した18本について、スパン17 cm, 中央集中荷重による曲げ破壊試験をおこなった。荷重面は Fig. 1 (1) の Outer face, Inner face および Radial face の3種とし、それぞれ O-Type, I-Type および R-Type と称し各6本ずつとした。撓み測定は荷重点の位置で試験片下面に精度 1/100 mm のダイヤルゲージを設置しておこなった (Fig. 5)。

### 2.3 曲げ剛性試験

破壊試験からもとめられた各荷重方向の比例限度の範囲内で残り33本の試験片についてそれぞれ3方向の荷重についての撓みを測定し、 $E_{(O)}$ ,  $E_{(I)}$  および  $E_{(R)}$  を算出した。ここで添字は前項で述べた荷重面を表わしている。荷重方法、撓み測定位置は Fig. 5 と同様である。

### 2.4 中立軸の位置の測定

荷重面が接線面のばあいの曲げにおける中立軸の位置を算出するために、スパン中央より2 cm はなれた位置で、表面面とこれに対応する内皮面にゲージ長3 mm の抵抗線歪ゲージ (紙ベース) を貼付し、曲げ剛性試験と同一の荷重条件で歪の測定をおこなった。試験片は任意に抽出した6本で、各試験片とも O-Type および I-Type の荷重による歪をそれぞれ測定した。

矩形断面棒が曲げ応力により曲率を生じ、圧縮側外縁に歪  $\epsilon_f$  を、引張側外縁に歪  $\epsilon_c$  を発生したばあい (Fig. 3 (2)), 歪の分布は材厚方向で直線的であるという仮定から、圧縮側外縁から中立軸までの距離は次式で計算される。

$$\lambda = \frac{\epsilon_f}{\epsilon_f + \epsilon_c} H \quad (28)$$

### 2.5 分割試験片のヤング係数および中立軸

前項の測定を終了した6本の試験片を接線面に平行に2分割し、表皮側分割片 A (6本) および内皮側分割片 B (4本) を得た。これら10本についても前と同様にして  $E_{(I)}$ ,  $E_{(R)}$  および中立軸の位置を測定した。

### 2.6 貼合せ試験片のヤング係数、中立軸の位置および曲げ破壊試験

分割片 A, B をそれぞれ Fig. 6 のように組合せて、酸ビ接着剤を使用して貼合せた。分割

片 A の貼合せでは上下面に表皮側が出るように、B の貼合せでは上下面が内皮側となるようにした。組合せのばあいには分割片の厚さがほぼ等しいものを使用した。

### 2.7 縦圧縮試験

曲げ剛性測定を終了した試験片 5 本をそれぞれ長さを 4 等分し、Fig. 7 のように側面接着した断面約  $2 \times 2$  cm、長さ 5 cm の試験体 5 個を作成した。半径面に貼付した歪ゲージにより比例限度をもとめたのち破壊した。

### 2.8 振り剛性試験

7 本の試験片について見かけのせん断弾性係数  $G$  を測定した。振りモーメントは  $10 \text{ kg} \cdot \text{cm}$  以下とし、振り角は試験機のチャック部の回転角に等しいものとして、等方性角棒の振り計算式<sup>6)</sup>から算出した。

### 2.9 稜壁内の半径方向比重分布の測定

長さ 6 cm、断面約  $1 \times 1$  cm の試験片 10 個を、半径方向にそれぞれ 7~9 枚の薄板となるように分割し、化学天秤および水銀測容計をもちいて比重を測定した。

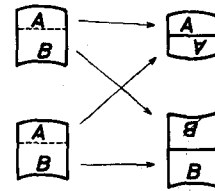


Fig. 6. Construction of glued specimen.

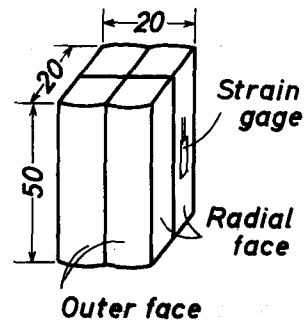


Fig. 7. Edge glued specimen for compressive test (mm).

## 3. 実験結果

### 3.1 曲げ破壊試験

結果の平均値および測定値の範囲を Table 1 に示す。比例限度までの撓みから算出されたヤング係数は、O-Type と I-Type がほぼ同等であるのに対して R-Type ではこれよりも約 17% 大となっている。比例限度力は I-Type が最も低く、O-Type がその約 2 倍となり荷重方向により顕著な差を示し、R-Type がそれらの中間となっている。しかし破壊係数についてみるとこの関係は逆転し、R-Type と I-Type がほぼ同等で、O-Type がこれらよりいくらか低い。破壊までの撓み量も荷重方向により差があらわれており、I-Type では O-Type の約 4 倍

Table 1. Result of bending test

Loading face	Specific gravity ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Modulus of elasticity ( $10^3 \text{ kg}/\text{cm}^2$ )	Proportional stress $\sigma_{bp}$ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	Deflection at $\sigma_{bp}$ (mm)	Ultimate stress $\sigma_b$ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	Deflection at $\sigma_b$ (mm)
Outer	0.717 (0.693~0.749)	105.2 (101.6~111.0)	802.0 (759.5~874.3)	3.5 (3.3~3.9)	1082.5 (1058.3~1136.6)	5.6 (5.1~6.3)
Inner	0.715 (0.694~0.734)	101.2 (97.7~106.0)	418.1 (387.8~473.3)	1.9 (1.8~2.2)	1217.3 (1143.3~1298.8)	22.4 (20.0~26.3)
Radial	0.730 (0.722~0.742)	120.7 (115.7~126.5)	600.9 (572.3~621.2)	3.1 (2.6~3.6)	1249.2 (1199.5~1283.2)	13.1 (11.7~14.0)

となっている。一般に竹材が強靱であると評価されるのは、丸竹での使用時あるいは表皮側に引張応力を生じる状態で使用されるばあい限定されると思われ、内皮側に引張応力が生じる状態では、比例限度は高いものの最大荷重までの撓みは最も小さい。

以上で述べた、竹材の荷重方向による曲げ性能の特徴を模式的に作図すれば Fig. 8 が得られる。I-Type のばあい、比例限度は平均で約  $400 \text{ kg/cm}^2$  と最も低いが、これを超えてからの荷重-撓み曲線で囲まれる部分の面積は最も大となる。これと対称的に O-Type では比例限度が約  $800 \text{ kg/cm}^2$  であるにもかかわらず、それほど大きな変形に至らぬうちに曲げ破壊を生じる。

以上の結果を要約すれば、割竹が内皮側から曲げ荷重を受けるばあいには、比例限度を超えてから破壊に至るまでの撓み量の大きい、いわゆる塑性破壊の様相を示すのに対し、表皮側からの荷重ではむしろ脆性破壊に近い形態を示す。また半径面に荷重が作用するばあいは、これらの中間的な性状を示すようである。このように、竹材の曲げヤング係数および強度の試験結果の表示に際しては、試験体形状と荷重方向の記載が不可欠であることに留意する必要がある。

### 3.2 曲げ剛性試験

破壊試験に使用した 18 本を除いた 33 本の試験結果の平均値および範囲を Table 2 に示す。全数をプロットした Fig. 9 からも直ちに判るように、接線面荷重によるヤング係数  $E_T$  (O-Type と I-Type の平均) に比較して半径面荷重による  $E_R$  は常に大となり (約 14%)、前項と同様に半径方向におけるヤング係数分布の不均一性を示している。

Table 2. Modulus of elasticity in bending (33 specimens)

Modulus of elasticity	Loading face	Min.	Average ( $10^3 \text{ kg/cm}^2$ )	Max.	Standard deviation	Coefficient of variation (%)
$E_T$	Outer	96.3	105.7	113.9	3.3	3.1
	Inner	102.3	107.8	115.0	3.0	2.8
$E_R$	Radial	110.1	121.3	129.7	4.4	3.6

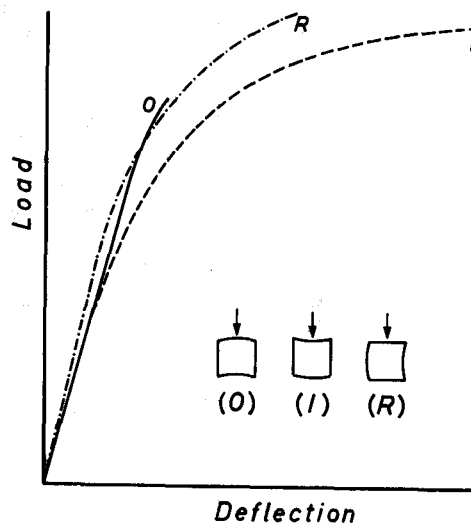


Fig. 8. Typical Load-Deflection curves under three loading conditions.

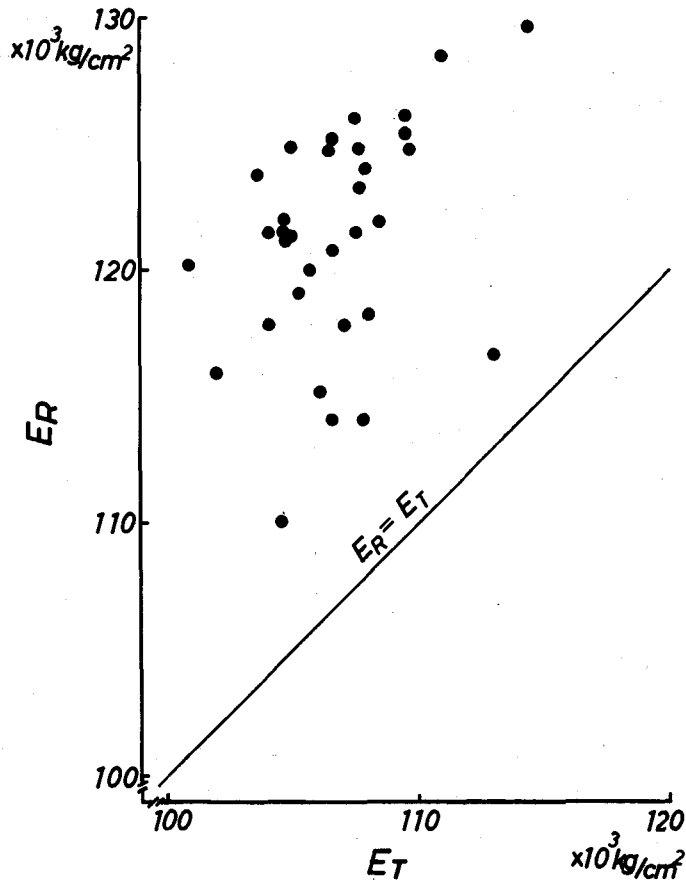


Fig. 9. Observed MOE in bending.

$E_R$ : Loaded on radial face     $E_T$ : Loaded on tangential face

3.3 中立軸の位置

6本の試験片について測定された表皮面および内皮面の歪から、中立軸の位置 $\lambda$ の材厚に対する割合 $\varphi$ をEq. 28より計算した。Table 3の数値は荷重面をO-TypeおよびI-Typeと

Table 3. Observed value of  $\varphi \left( = \frac{\lambda}{H} \right)$

No. of specimen	Thickness (mm)	$E_T$ ( $10^3 \text{ kg/cm}^2$ )	$E_R$ ( $10^3 \text{ kg/cm}^2$ )	$\varphi$
02	10.13	106.6	125.2	0.357
07	10.53	105.7	120.0	0.356
08	10.54	102.0	116.0	0.345
19	10.21	113.0	116.7	0.354
28	10.44	106.6	114.1	0.361
30	11.00	106.6	120.8	0.357
Av.				0.355
S. D.				0.005
C. V. (%)				1.5

して歪測定を繰返し、データの安定したものの平均値である。曲げモーメントの正負による中立軸の位置の変化は見られなかった。試験片数は多くはないが、 $\varphi$ の平均値は0.355となり、ヤング係数の大小にかかわらず数値的に安定していることに注目される。

### 3.4 分割試験片のヤング係数と中立軸

前項の試験片6本を接線面に平行にそれぞれ2分割したが、No. 02 および No. 30 では表皮側分割片Aを厚く木取りしようとした結果、分割片Bが破壊し、使用不可能となったため、試験したB片は4本である。竹材を接線面で分割するばあい、A, B片の曲げ剛性に大きな差があると、ナイフの進向方向が一方に偏りを生じる傾向がみられた。中立軸に近い面での分割は比較的容易であった。

分割片AおよびBのヤング係数と中立軸の位置を原断面のそれと対比してTable 4に示した。

Table 4. Observed MOE and  $\varphi$

No. of specimen	Divided section				Original section		
	Thickness (mm)	$E_T$ ( $\times 10^3$ kg/cm <sup>2</sup> )	$E_R$ ( $\times 10^3$ kg/cm <sup>2</sup> )	$\varphi$	$E_T$ ( $\times 10^3$ kg/cm <sup>2</sup> )	$E_R$ ( $\times 10^3$ kg/cm <sup>2</sup> )	$\varphi$
02 A	6.95	133.1	147.3	0.380	106.6	125.2	0.357
07 A	4.50	172.2	161.4	0.445	105.7	120.0	0.356
08 A	4.50	175.1	186.7	0.443	102.0	116.0	0.345
19 A	4.00	183.0	189.0	0.438	113.0	116.7	0.354
28 A	4.30	188.4	185.4	0.438	106.6	114.1	0.361
30 A	6.05	150.3	163.9	0.396	106.6	120.8	0.357
07 B	6.05	76.4	76.0	0.447	105.7	120.0	0.356
08 B	6.05	73.7	72.6	0.462	102.0	116.0	0.345
19 B	6.20	81.9	72.9	0.443	113.0	116.7	0.354
28 B	6.10	73.9	72.4	0.484	106.6	114.1	0.361

表皮側分割片Aのヤング係数は、 $E_T$ ,  $E_R$ ともに分割前のそれよりも増加している。また増加の傾向は分割片の厚いものよりも薄いものの方に顕著にみられる。内皮側分割片Bではこれと逆にヤング係数の大幅な低下がみられる。

中立軸の位置 $\varphi$ は分割前には平均0.355であったものが、A片で0.38~0.45に、B片では0.44~0.48にとそれぞれ分割片の中心位置(0.5)へ向って近づいている。このように、分割前後においてみられるヤング係数および中立軸位置の変化を説明するには、表皮側のヤング係数が内皮側のそれに比較して著しく大きいと結論する以外に理由は考えられない。

### 3.5 貼合せ試験片のヤング係数、中立軸および曲げ強度

貼合せ材のヤング係数の値には、前項の結果がさらに極端な形で表われており、A片よりなる接着試験片の $E_T$ はいずれも $200 \times 10^3$  kg/cm<sup>2</sup>を超えた。これと対称的に、B片よりなる貼

Table 5. Results of bending test on glued specimens

Glued specimen	Thickness (mm)	$E_r$ ( $10^3$ kg/cm $^2$ )	$\varphi$	Proportional stress $\sigma_{bp}$ (kg/cm $^2$ )	Deflection at $\sigma_{bp}$ (mm)	Ultimate stress $\sigma_b$ (kg/cm $^2$ )	Deflection at $\sigma_b$ (mm)
02A+30A	12.75	201.7	0.502	1269.8	2.4	2183.4	missing
07A+08A	8.75	243.2	0.503	1391.7	3.2	2587.3	16.9
19A+28A	8.20	231.3	0.512	1275.9	3.2	2410.1	15.9
07B+19B	12.20	63.5	0.519	327.9	2.0	721.4	6.5
08B+28B	12.10	56.0	0.514	342.7	2.4	679.2	6.5

合せ試験体の  $E_r$  は、B片単体のヤング係数をさらに下まわる約  $60 \times 10^3$  kg/cm $^2$  まで低下している (Table 5)。中立軸の位置はほぼ厚さの 1/2 となっている。

A片による貼合せ試験体の強度は、Table 1 の I-Type のそれに比較して比例限度で約 3 倍、曲げ強度で約 2 倍とその性能は著しく向上する。B片による貼合せ試験体では、Table 1 の O-Type をはるかに下まわる強度を示した。

### 3.6 縦圧縮および振り試験

圧縮試験では試験体の 1 面にみに歪ゲージを貼付したため、その測定値は圧縮荷重により生じた座屈の変形の影響を受け、ヤング係数の計算には不適當となった。Table 6 の比例限度力度もそのため信頼性に欠けるものとなった。

振り試験の結果は Table 7 に示す。この試験における作用トルクは 10 kg·cm であり、こ

Table 6. Result of compressive test

No. of specimen	Specific gravity	Proportional stress $\sigma_{cp}$ (kg/cm $^2$ )	Crushing stress $\sigma_c$ (kg/cm $^2$ )	$\sigma_{cp}/\sigma_c$
01	0.74	466	768	0.61
04	0.74	396	741	0.53
05	0.72	320	708	0.45
06	0.73	310	717	0.43
29	0.74	255	724	0.35

Table 7. Result of torsional test

No. of specimen	Specific gravity	Thickness		Modulus of rigidity $G$ ( $10^3$ kg/cm $^2$ )
		Width		
03	0.73	1.067		10.5
24	0.75	1.205		11.8
25	0.75	1.204		11.0
35	0.73	1.175		10.8
36	0.72	1.100		10.6
39	0.72	1.206		10.2
41	0.73	1.273		11.3
Av.				10.9

れより計算される見かけのせん断応力は約  $50 \text{ kg/cm}^2$  となる。この応力が竹材のばあい充分比例限度内にあるかどうかは不明であるが、荷重—振り角の関係はいずれの試験片においても直線的であった。

### 3.7 半径方向の比重分布

10 個の試料より得た合計 82 枚の薄片の比重を縦軸に、その薄片の稈壁厚さ方向の相対位置を横軸にとり作図すると、Fig. 10 を得る。最外層を含む薄片の比重は約 1.2 であり、これより内側へ向かって急激な低下がみられ、最内部に存在する厚膜細胞層(髓層)に隣接する部分で約 0.5 となる。表層からこの位置までの変動傾向はほぼ 2 次曲線形とみることができる。稈壁の最内層を構成している厚膜細胞層を含む薄片の比重は不連続とも思われる突然の増加を示し、0.7 となった。この部分の力学的性質は明らかにされていないが、組織構造的には維管束の存在しない部分であり、また曲げ試験においてこの部分が引張側となるばあいには、低応力レベルで微細なクラックが全面に生じるなどの知見から、強度的性質にはその比重から考えられるほどの影響は与えていないものと推定される。

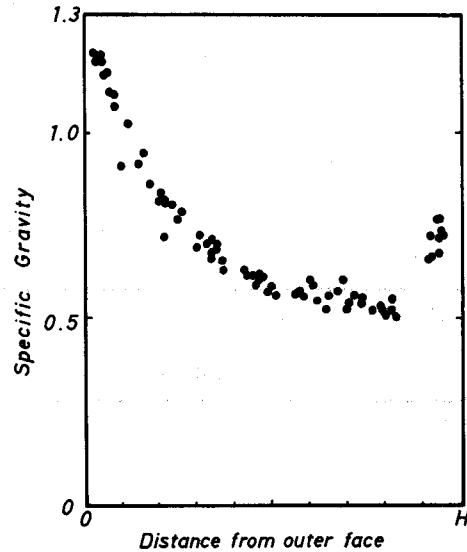


Fig. 10. Distribution of specific gravity of 82 split pieces from various positions across the culm wall.

## 4. 各種関数の適合性の評価

1.1~1.3 で述べたように、竹稈壁の半径方向におけるヤング係数の分布をある関数で表現すれば、割竹の見かけのヤング係数  $E_T$ ,  $E_R$  および中立軸の位置  $\lambda$  の間の関係が定まる。ここでは、実測された数値を 3 種の関数仮定から導かれた計算結果に代入してそれらの妥当性を検討する。

### 4.1 分割前試験片における $E_R$ , $E_T$ , $\varphi$ の関係

中立軸の測定に使用した 6 試験体については、 $E_R$ ,  $E_T$  および  $\varphi$  の値がそれぞれ実測されているため、これら数値を Table 8 にまとめた。Eq. 11, 19 および 27 に 2 個の実測値を代入し、他の 1 個の値をそれぞれ算出すると同表の計算値が得られる。これらの計算値をそれぞれ実測値で除した比をみると (Table 9)、1 次および 3 次関数の仮定に基づく計算値は、 $E_R$  および  $\varphi$  で約 20% ていど過大となっている。2 次関数仮定のばあいにも平均で 5% ていどの差はみられるが、変動係数も小さく、他の関数仮定に比較すれば最も良い適合を示す。もちろん、他の関数表現により適合率のより良い計算式をもとめることは可能であろうが、測定精度ある

Table 8. Observed and calculated MOE and  $\varphi$ 

No. of specimen	Observed			Calculated from Eq. 11, 27			Calculated from Eq. 19		
	$E_R$	$E_T$	$\varphi$	$E_R$	$E_T$	$\varphi$	$E_R$	$E_T$	$\varphi$
02	125.2	106.6	0.357	141.1	94.6	0.389	122.6	108.9	0.350
07	120.0	105.7	0.356	141.0	89.9	0.400	122.2	103.8	0.361
08	116.0	102.0	0.345	143.0	82.7	0.400	121.9	97.1	0.361
19	116.7	113.0	0.354	151.8	86.8	0.449	131.2	100.5	0.405
28	114.1	106.6	0.361	138.7	87.7	0.426	121.2	100.4	0.386
30	120.8	106.6	0.357	141.1	91.2	0.401	122.6	105.0	0.362
Av.	118.8	106.8	0.355	142.8	88.8	0.411	123.6	102.6	0.371

$E_R, E_T: (\times 10^3 \text{ kg/cm}^2)$

Table 9. The ratio of calculated to observed value

No. of specimen	Eq. 11, 27			Eq. 19		
	$E_R$	$E_T$	$\varphi$	$E_R$	$E_T$	$\varphi$
02	1.12	0.89	1.09	0.98	1.02	0.98
07	1.18	0.85	1.13	1.02	0.98	1.02
08	1.23	0.81	1.16	1.05	0.95	1.04
19	1.30	0.77	1.27	1.12	0.89	1.15
28	1.22	0.82	1.18	1.06	0.94	1.07
30	1.17	0.86	1.12	1.01	0.98	1.02
Av.	1.20	0.83	1.16	1.04	0.96	1.05
C. V. (%)	5.1	5.1	5.4	4.7	4.6	5.6

いは個体毎の材質変動による実測値のばらつきを考慮すると、複雑な関数によるヤング係数の分布の表現はあまり意味をもたないと思われる。

#### 4.2 2次関数仮定に基づく分割試験片のヤング係数および中立軸位置の計算

Fig. 11 (2) に示す表皮側分割片 A の厚さを  $H_A$  とし、この分割片の新しい中立軸の位置を  $\lambda_A$  とすると、Eq. 3 の  $H$  を  $H_A$  に変え、 $\lambda$  を  $\lambda_A$  とおいて Eq. 13 を代入して解けば、

$$\varphi_A = \frac{\lambda_A}{H_A} = \frac{(1-2\varphi)(3\Psi_A-8)\Psi_A+(5-8\varphi)}{4(1-2\varphi)(\Psi_A-3)\Psi_A+2(5-8\varphi)} \quad (29)$$

ここで、 $\Psi_A = \frac{H_A}{H}$ ,  $\varphi = \frac{\lambda}{H}$  (分割前)

接線面荷重による曲げヤング係数  ${}_A E_T$  は Eq. 10 と同様の計算をおこなえば、

$${}_A E_T = \frac{4}{5} \left\{ 3(1-2\varphi)(6-15\varphi_A+10\varphi_A^2)\Psi_A^2 - 15(1-2\varphi)(3-8\varphi_A+6\varphi_A^2)\Psi_A + 5(5-8\varphi)(1-3\varphi_A+3\varphi_A^2) \right\} E_R \quad (30)$$

半径面荷重による曲げヤング係数  ${}_A E_R$  は

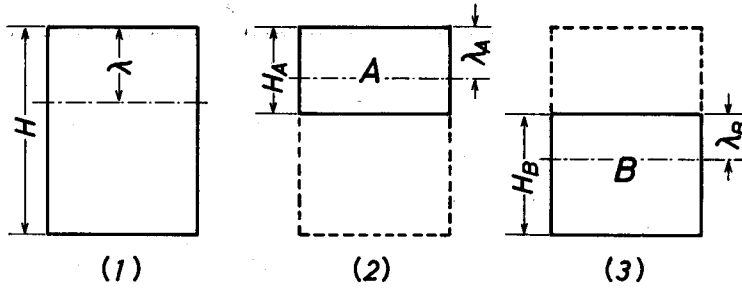


Fig. 11. Expression for divided specimens.

- (1) Original cross section  $\varphi = \frac{\lambda}{H}$
- (2) Divided specimen A including outer face  $\varphi_A = \frac{\lambda_A}{H_A}, \Psi_A = \frac{H_A}{H}$
- (3) Divided specimen B including inner face  $\varphi_B = \frac{\lambda_B}{H_B}, \Psi_B = \frac{H_B}{H}$

$${}_A E_R = \frac{1}{H_A} \int_0^{H_A} E_{(y)} dy = \left\{ 2(2\varphi - 1)(3 - \Psi_A)\Psi_A + (5 - 8\varphi) \right\} E_R \quad (31)$$

ここで  $E_R$  は分割前の半径面荷重による曲げヤング係数

Fig. 11 (3) の分割片 B についても同様に中立軸の位置  $\lambda_B$ , 接線面荷重によるヤング係数  ${}_B E_T$  および半径面荷重による  ${}_B E_R$  を計算すれば以下のとおりとなる。

$$\varphi_B = \frac{\lambda_B}{H_B} = \frac{(1 - 2\varphi)\Psi_B^2 + (4\varphi - 1)}{4(1 - 2\varphi)\Psi_B^2 + 2(4\varphi - 1)} \quad (32)$$

ここで,  $\Psi_B = \frac{H_B}{H}, \varphi = \frac{\lambda}{H}$  (分割前)

$${}_B E_T = \frac{4}{5} \left\{ 3(1 - 2\varphi)(1 - 5\varphi_B + 10\varphi_B^2)\Psi_B^2 - 5(1 - 4\varphi)(1 - 3\varphi_B + 3\varphi_B^2) \right\} E_R \quad (33)$$

Table 10. Observed and calculated MOE and  $\varphi$  of divided pieces

No. of divided specimen	$\Psi_A$	observed			Calculated from Eq. 29~34		
		$\varphi_A$	${}_A E_T$	${}_A E_R$	$\varphi_A$	${}_A E_T$	${}_A E_R$
02 A	0.686	0.380	133.1	147.3	0.392	141.3	156.1
07 A	0.427	0.445	172.2	161.4	0.438	174.1	180.0
08 A	0.427	0.443	175.1	186.7	0.438	168.5	174.2
19 A	0.392	0.438	183.0	189.0	0.457	157.6	159.8
28 A	0.412	0.438	188.4	185.4	0.448	159.3	162.9
30 A	0.550	0.396	150.3	163.9	0.419	155.5	164.3
	$\Psi_B$	$\varphi_B$	${}_B E_T$	${}_B E_R$	$\varphi_B$	${}_B E_T$	${}_B E_R$
07 B	0.575	0.447	76.4	76.0	0.427	75.0	75.4
08 B	0.574	0.462	73.7	72.6	0.427	72.3	72.7
19 B	0.607	0.443	81.9	72.9	0.454	89.8	88.8
28 B	0.584	0.484	73.9	72.4	0.444	79.1	79.7

$\Psi_A, \Psi_B$ : Refer to Fig. 11,  $E$ : ( $\times 10^3$  kg/cm<sup>2</sup>)

Table 11. The ratio of calculated to observed value

No. of divided specimen	$\varphi_A$	$A E_T$	$A E_R$
02 A	1.03	1.06	1.06
07 A	0.98	1.01	1.12
08 A	0.99	0.96	0.93
19 A	1.04	0.86	0.85
28 A	1.02	0.85	0.88
30 A	1.06	1.03	1.00
	$\varphi_B$	$B E_T$	$B E_R$
07 B	0.96	0.98	0.99
08 B	0.92	0.98	1.00
19 B	1.02	1.10	1.22
28 B	0.92	1.07	1.10
Av.	0.99	0.99	1.02
C. V. (%)	4.9	8.5	11.2

$${}_B E_R = \left\{ 2(1-2\varphi) \Psi_B^2 + (4\varphi-1) \right\} E_R \quad (34)$$

ここで  $E_R$  は分割前の半径面荷重による曲げヤング係数

分割片のヤング係数および中立軸は、Eq. 29~34 に分割前の  $E_R$ ,  $\varphi$  および分割厚さ  $H_A$  あるいは  $H_B$  を代入することで計算できるわけである。前項の A 片 6 本, B 片 4 本についておこなった計算結果を Table 10 に、実測値に対する計算値の比を Table 11 に示した。平均値ではいずれも良好な一致をみているが、変動係数では  $E_R$  の計算値がいくらか大となっている。しかし全般的にみると使用した計算式の適合性は良く、これを誘導した原式つまり 2 次関数仮定の Eq. 13 が稜壁のヤング係数分布をかなり忠実に表現しているものと考えられる。

#### 4.3 貼合せ試験体の接線面荷重による曲げヤング係数

Table 5 に示したように、貼合せ試験体の中立軸は厚さのほぼ中央に位置していることから、この試験体のヤング係数分布を Fig. 12 のように対称形と想定して計算をおこなった。

Table 12 に結果を示す。ここで注目すべきことは、A の貼合せ試験体の見かけのヤング係数  $E_T$  は Fig. 12 より明らかなように最外縁のヤング係数  $E_f$  よりも小となり、同様に B 片の貼合せ試験体の  $E_T$  は最内層の  $E_c$  よりも大となることである。この点から考えれば、Table 12 より  $E_f > 200 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ ,  $E_c < 60 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$  となる。また Eq. 16 および 17 から計算される値は  $E_f$  が約  $260 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ ,  $E_c$  が約  $50 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$  となり (Table 13), 上の不等号を満足する範囲に入る。最後に、Table 2 の

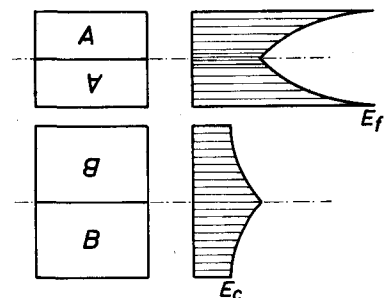


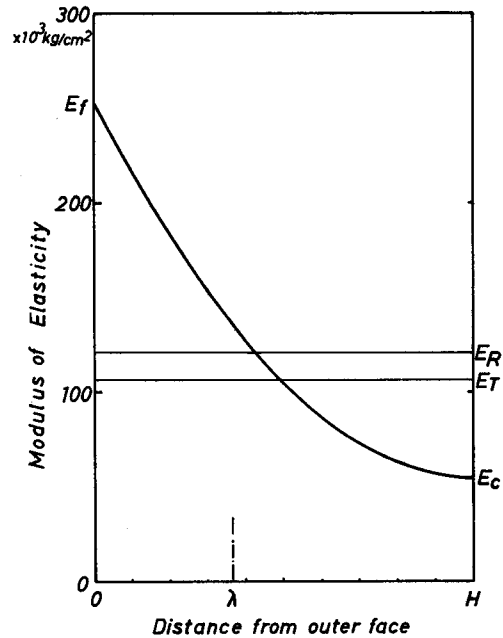
Fig. 12. Assumed distribution of longitudinal MOE in glued specimen.

**Table 12.** MOE of glued specimens  
( $\times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ )

Specimen	Observed $E_T$	Calculated $E_T$	Cal./Obs.
02A + 30A	201.7	207.9	1.03
07A + 08A	243.2	211.7	0.87
19A + 28A	231.3	185.4	0.80
07B + 19B	63.5	68.8	1.08
08B + 28B	56.0	69.9	1.25

**Table 13.** MOE of outermost fiber calculated from Eq. 16, 17

No.	$E_f$	$E_c$
02	268	54
07	259	51
08	260	44
19	253	49
28	241	51
30	259	52
Av.	257	50

 $E_f, E_c: (\times 10^3 \text{ kg/cm}^2)$ **Fig. 13.** Calculated distribution of MOE across the bamboo culm wall.

$E_T$  および  $E_R$  の平均値をもちいて算出した竹稈壁におけるヤング係数の分布モデルを Fig. 13 に示した。 $E_f$  および  $E_c$  は実際に測定することの不可能な、計算上の数値であるが、以上に述べた各試験の結果を総合すれば、おそらく  $E_f = 250 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ 、 $E_c = 50 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$  と考えて良いと思われる。

## 5. 要 約

モウソウチク割材の見かけの曲げヤング係数が荷重方向により異なるのは、稈壁内の縦ヤング係数が表皮面からの距離により連続的に変化しているためであると考え、この分布形を簡単な数式で表現することを試みた。表皮からの距離  $y$  に関する 1 次、2 次および 3 次の関数式を仮定し、見かけの曲げヤング係数および中立軸位置の実測値をもちいてこれらの式の適合性を検討したところ、2 次関数による表現が最も良い結果を示した。またこの 2 次式に基づいて計算された分割片および貼合せ試験片の見かけのヤング係数も、実測データと良く一致し、2 次関数によるヤング係数の分布形の表現が実用的にも応用可能であることがわかった。

## あ と が き

本実験の結果より考えると、竹材の表層部のヤング係数は約  $200 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$  ていどとみられ、この数値はスキー板等で一般に使用されているガラス繊維板のそれに勝るとも劣らない。この性質はすでに和弓、釣竿等で発揮されており、この実験は経験的に確立されている竹

の利用法の正当性を裏付けする結果ともなっている。高い力学的性能を持つ天然材料がここにもあることを再認識した次第である。

#### 参 考 文 献

- 1) 鈴木 寧：竹材の異質異方性。材料, 12巻, 121号, 1963.
- 2) 鈴木 寧：竹材の研究(第1報), (第3報)。東大演報, 第36号, 1948.
- 3) 太田 基：竹材の性質に関する研究(第15報)。九大演報, 第29号, 1957.
- 4) 北村博嗣：開花モウソウチク材の材質試験。宇大農「学術報告」, 第9巻, 第2号, 1975.
- 5) 遠矢良太郎・山田式典：肥培モウソウチクの機械的材質。日本林学会九州支部研究論文集, 第31号, 1978.
- 6) TIMOSHENKO, S.: 材料力学(上). 1955.

#### Summary

In this study, some mechanical properties of 51 specimens cut from Moso bamboo (*Phyllostachys pubescens* MAZEL) were determined. Test results are summarized as follows:

In bending test, the load-deflection curves showed three characteristic figures according to loading faces (Fig. 8). When loaded on outer face, fracture occurs to some extent suddenly as in the case of brittle materials. Under the condition of inner face loading, however, the test piece is so pliable as to deflect four times larger than in outer face loading.

The modulus of elasticity from bending test showed some discrepancies between loading faces (Table 1, 2 and Fig. 9). This fact is to be attributed to the ununiform distribution of longitudinal modulus of elasticity across the radial direction of bamboo culm. In order to calculate the modulus of elasticity at any section in the culm, three mathematical expressions were assumed (Eqs. 1, 13, and 21). Estimated values from these equations are summarized in Table 8 along with observed values. The values obtained from Eq. 19 based on quadratic function agreed best with tested values (Table 9).

The validity of the equation was also examined by applying it to divided specimens (Fig. 11) and glued specimens (Fig. 12). Tables 11 and 12 also proved the suitability of the equation.

Moduli of elasticity of outermost fibers were finally calculated from Eqs. 16 and 17 (Table 13). The modulus of elasticity of outer face is about five times greater than that of inner face, which agrees well with the result shown in Table 12.

Appendix List of all specimens used in this study

No. of specimen	B (mm)	H (mm)	Specific gravity	Note	$E_{(O)}$ ( $\times 10^3 \text{kg/cm}^2$ )	$E_{(I)}$ ( $\times 10^3 \text{kg/cm}^2$ )	$E_{(R)}$ ( $\times 10^3 \text{kg/cm}^2$ )
01	11.09	10.15	0.738	C	108.3	104.8	124.8
02	9.93	10.13	0.731	$\varphi$ , Div.	106.0	107.1	125.2
03	9.81	10.47	0.731	G	106.7	109.1	114.1
04	9.89	10.32	0.739	C	104.8	109.4	117.8
05	10.89	10.20	0.723	C	107.5	108.7	118.2
06	10.78	10.55	0.731	C	102.7	106.5	110.1
07	10.67	10.53	0.734	$\varphi$ , Div.	104.4	106.9	120.0
08	10.46	10.54	0.730	$\varphi$ , Div.	101.4	102.6	116.0
09	9.85	10.22	0.736		104.1	104.1	117.9
10	9.42	10.09	0.724		104.8	104.8	121.4
11	8.94	10.11	0.725		105.9	102.3	121.5
12	8.03	10.35	0.714	B	—	100.1	—
13	8.27	10.22	0.721		105.2	107.0	115.2
14	8.60	10.32	0.729	B	—	103.5	—
15	8.52	10.22	0.739		107.6	107.6	121.5
16	8.03	10.58	0.694	B	—	96.1	—
17	8.04	10.36	0.726	B	—	—	116.0
18	8.63	10.20	0.742		113.9	115.0	129.7
19	9.94	10.21	0.751	$\varphi$ , Div.	112.4	113.6	116.7
20	8.46	10.17	0.749	B	109.9	—	—
21	7.79	10.28	0.730	B	—	—	123.6
22	8.18	10.41	0.693	B	101.5	—	—
23	8.64	10.36	0.734	B	107.5	—	—
24	8.58	10.34	0.753	G	107.9	111.0	125.4
25	8.57	10.32	0.749	G	106.7	108.7	123.3
26	8.74	10.37	0.654		109.1	108.0	121.9
27	7.24	10.18	0.732	B	—	—	114.9
28	11.63	10.44	0.737	$\varphi$ , Div.	101.9	111.4	114.1
29	11.07	10.40	0.741	C	108.3	113.8	128.5
30	10.26	11.00	0.718	$\varphi$ , Div.	103.8	109.4	120.8
31	9.72	10.37	0.750		108.5	110.9	124.8
32	9.47	10.80	0.722	B	—	—	119.3
33	8.58	10.57	0.715	B	—	102.9	—
34	9.27	11.00	0.713		96.3	105.4	120.2
35	9.10	10.69	0.731	G	103.6	105.8	121.4
36	9.47	10.42	0.717	G	103.2	106.4	121.3
37	8.57	10.50	0.728		106.1	109.2	124.8
38	8.88	10.65	0.706	B	102.0	—	—
39	8.69	10.48	0.718	G	104.3	106.3	119.1
40	8.52	10.54	0.724		101.7	105.5	123.8

## Appendix continued

No. of specimen	<i>B</i> (mm)	<i>H</i> (mm)	Specific gravity	Note	$E_{(O)}$ ( $\times 10^3 \text{kg/cm}^2$ )	$E_{(I)}$ ( $\times 10^3 \text{kg/cm}^2$ )	$E_{(R)}$ ( $\times 10^3 \text{kg/cm}^2$ )
41	8.33	10.60	0.726	G	103.2	106.1	122.0
42	8.76	10.52	0.720		109.5	109.5	126.1
43	8.45	10.63	0.743		106.8	108.9	124.0
44	7.72	10.57	0.731		104.5	105.4	124.9
45	7.37	10.50	0.742	B	—	—	123.5
46	8.08	10.33	0.722		107.9	107.0	126.0
47	7.68	10.55	0.703	B	—	100.5	—
48	6.35	10.45	0.748	B	109.8	—	—
49	6.89	10.46	0.730	B	—	—	126.7
50	7.37	10.54	0.734	B	—	106.8	—
51	6.36	10.97	0.726	B	104.5	—	—

Note C: Specimen used for compressive test.

φ, Div.: Specimen used to determine neutral axis and divided into pieces A and B shown in Fig. 11.

G: Specimen for torsional test.

B: Specimen for bending strength test.