

# ブナ材における鋼球圧入

大迫靖雄\*・山田正\*

Yasuo OSAKO\* and Tadashi YAMADA\* : Indentation of BUNA Wood by Steel Ball

## 1. 緒言

近年物質の表面に関する問題、いいかえれば、物質の境界上で生ずる諸現象が種々の面から検討されている。その一例として、物質にある他の物質（剛体）を圧入したときの接触表面の附近の変形状態が調べられている。すなわち TABOR<sup>1)</sup> は金属、プラスチック材料の摩擦、摩耗などについての研究を行ない、また R. E. MAIER<sup>2)</sup> は高分子材料について鋼球を圧子として、その圧痕状態の分析ならびに、荷重—圧入深さの関係と引張りにおける荷重—歪の関係との関連性について報告している。伊藤<sup>3)</sup> はロックウェル硬さを調べることで、高分子材料の粘弾性挙動の温度依存性について報告している。田中<sup>4)</sup> はプラスチック材料の摩擦は AMONTONS の摩擦の法則によらず、その摩擦係数は荷重の減少により増加することから、プラスチック材料への球面圧入による圧痕の分析をおこなっている。

木材についても、TABOR<sup>1)</sup> は balsam fir の湿潤材に、鋼球を圧入することにより、その微小変形での、荷重—圧入深さの関係について述べている。本研究においても、この表面に関する問題を追求するために鋼球圧入法を使用した。実験には硬さ試験の方法が用いられた。木材の硬さ試験には古くから多くの研究があるが<sup>5) 6) 7) 8) 9)</sup>、従来の研究には鋼球圧入経過や圧入の時間的変化については考察されていない。そこで本研究においては、木材のレオロジー的性質と関連した考察をおこなおうとした。

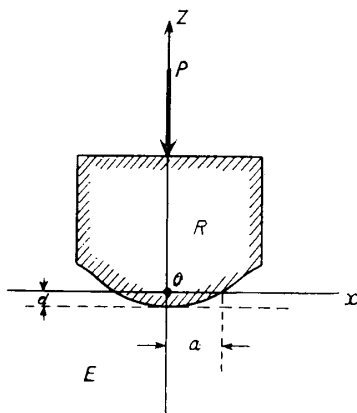


Fig. 1. Deformation due to static stamp indentation.  
 R ; cylindrical rigid stamp  
 P ; load, d ; indentation depth  
 E ; elastic material  
 a ; cast shadow radius

## 2. 接触理論およびクリープ

### 2.1 接触論

木材に鋼球を圧入する際に、その圧入深さ  $d$  と荷重  $P$  の間には次のような関係があるといわれている<sup>7)</sup>。

$$P = k \cdot d^n$$

$n, k$  ; 定数

今これを投影面の半径  $a$  と  $P$  との関係になおすと

$$P = k' \cdot a^{2n} \quad k' ; \text{定数}$$

この式については弾性接触論でしらべられるので以下これについて述べる。

弾性接触については、今までに多くの人々により

\* 木材物理研究部門, Div. of Wood Physic

解明されてきたのであるが、これは均一な等方性を有する弾性体に対して適応されたもので、木材のごとき不均質、異方体においては、その適用は厳密な意味で困難であるが、ここに弾性体の場合の HERTZ の弾性接触の解、または塑性体の接触の場合より求められた実験式から木材における圧入変形状態を推測するために、まず HERTZ の理論をみよう<sup>10)</sup>。

Fig. 1 で示されたごとく法線荷重  $P$  で  $z$  軸に平行にシリンダー状の球形底面を有する剛体を弾性体物質に圧入する時、次式の関係が成り立つ

$$P = -\frac{8\epsilon}{3(1-\nu^2)} A a^3 \quad \begin{array}{l} \epsilon ; \text{弾性係数} \\ \nu ; \text{ポアソン比} \\ A ; \text{定数} \end{array}$$

これが HERTZ の弾性接触論における荷重とスタンプの投影半径との関係である。そこで、球圧入による圧痕が完全な球面の一部であると仮定すれば、荷重と圧入深さ  $d$  との関係は次のようになる。

$$a^2 = d(D-d) \quad D ; \text{鋼球直径}$$

$$D \gg d \text{ とすると } a^2 \doteq dD$$

$$\therefore P \doteq -\frac{8\epsilon}{3(1-\nu^2)} A (dD)^{3/2}$$

したがって  $P$  は  $d^{3/2}$  に比例する。

また種々の金属材料による実験値より、TABOR<sup>11)</sup> は塑性体についての  $P$  と  $a$  の関係を求めている。その結果によると  $P \propto a^2$  となる。そこでこれを  $P$  と  $d$  の関係になおすと  $P$  は  $d$  に比例する。

以上のことより、荷重と圧入深さの関係を両対数グラフにとり、その勾配を求めると弾性体の場合には 1.5、塑性体の場合には 1.0 となる。このことより、応力-歪曲線がなめらかな曲線を示す一般の粘弾性物質に鋼球を圧入した時の荷重と圧入深さの関係を両対数グラフにとり、その勾配を  $n$  とすると、次の関係が成立つことが予測される。

$$1.5 \geq n \geq 1.0$$

また鋼球圧入の場合の応力の分布は、荷重  $P$  と  $z$  軸に平行な方向に加えた時、 $z$  軸平行方向の圧縮応力を  $\sigma_z$ 、 $x$  軸、 $y$  軸に平行な剪断応力を  $\tau_x$ 、 $\tau_y$  と表わすと次のようになる<sup>12)</sup>。

$$\sigma_z = 2A' \left[ \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{r} \right) - z \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left( \frac{1}{r} \right) \right] = -6A' \frac{z^3}{r^5}$$

$$\tau_x = -2A' z \frac{\partial^2}{\partial y \partial z} \left( \frac{1}{r} \right) = -6A' \frac{yz^2}{r^5}$$

$$\tau_y = -2A' z \frac{\partial^2}{\partial x \partial z} \left( \frac{1}{r} \right) = -6A' \frac{xz^2}{r^5}$$

$$r^2 = x^2 + y^2 + z^2 \quad A' ; \text{定数}$$

ところで球面の中心線上に最大圧力が生ずる。この圧力  $P_0$  を求めると次のようになる。

$$P_0 = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{\pi a^2}$$

今中心線上の応力は剪断応力成分が0になり主応力 ( $\sigma_z$ ) のみが存在する。したがってその応力は次のように表わされる。

$$\begin{aligned} \sigma_z &= -P_0 \frac{a^2}{a^2+z^2} \\ &= -\frac{3}{2} \frac{P}{\pi a^2} \cdot \frac{a^2}{a^2+z^2} \end{aligned}$$

## 2.2 クリープ

木材にある一定荷重を加えたままでは、時間の経過にしたがってその歪が増加する現象を一般にクリープというが、この現象は、もともと瞬間的であるべき弾性要素の変形が、粘性要素のために遅らされるためにおこるもので、Fig. 2 において示されている VOIGT 模型によつて説明する。この場合ばねとダッシュポットが並列にならび、ダッシュポットは粘性変形を遅らせる為の減衰抵抗としての役割を演じている。そこでダッシュポットとばねに作用する応力の大きさは同じでないが、両者の歪は一定である。すなわち

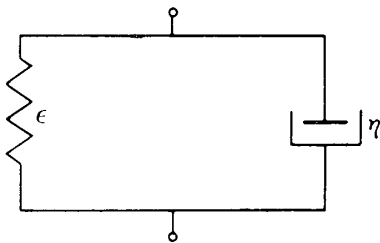


Fig. 2. VOIGT model.  
 $\epsilon$  ; modulus of elasticity.  
 $\eta$  ; viscosity

弾性要素：  $\sigma_1 = \epsilon \gamma$

粘性要素：  $\sigma_2 = \eta \cdot d\gamma/dt$

クリープコンプライアンス  $J = \gamma(t)/\sigma$

$\epsilon$  ; 弾性率  $\eta$  ; 粘性率  $\gamma$  ; 歪

$\gamma(t)$  ; 時間にもなう歪  $t$  ; 時間

伊藤<sup>14)</sup>はこの模型に Maxwell 模型を直結した4パラメーター模型を考え、鎖状高分子、3次元高分子の両材料の場合について一軸圧縮と鋼球圧入での高分子材料の粘弾性挙動の温度依存性について研究している。

この報告によると一軸圧縮の場合、この模型よりそのクリープコンプライアンス  $J$  を鎖状高分子、3次元高分子の各々の材料について求め、この  $J$  と実験より求めた高分子材料の温度変化 ( $50^\circ \sim 150^\circ$ ) ならびに各温度での時間変化 ( $1 \sim 10^6$  sec) のクリープコンプライアンスについて検討を行なっている。また鋼球圧入の場合はそのロックウェル硬さと温度の関係から、その応力緩和にもとづく挙動の温度による変化を求めている。木材についてもブナ湿潤材の静的測定より求められた  $\tan \delta$  には温度により最大値があることが報告されている<sup>15)</sup>。そこで本研究においても、ブナ材の温度依存性を調べる為上記のクリープの概念を取り入れる。しかし木材への鋼球圧入のような場合のクリープは、圧入球面において、その応力が変化し、その分布は非常に複雑である。そこで、2.1で求めた  $P$  と  $\sigma_z$  の中心線上における関係が近似的に木材にあてはまるとしても、厳密に本研究でのクリープについての測定を行なうには、 $\sigma_z$  を一定としてその歪状態を調べる必要がある。しかし、その測定が非常に困難であるので、本実験では荷重一定下における圧入深さと時間の関係について述べる。これは  $\sigma_z$  が  $a$  の変化に

ともない変化するので上記のクリープの考え方は直接適応できないが、以上の関係からなんらかの木材の特性を見出そうとするものである。

### 3. 実 験

#### 3.1 試 片

試片として Table 1 に示すように気乾状態と湿潤状態でのブナ材 (*Fagus crenata* BLUME) を使用した。試片は同一の材より採集したもので、形状は JIS Z 2117 (1961) にしたがって 40mm×40mm×40mm とした。

Table 1. Test specimen

Specimen condition		Density in air dry (g/cm <sup>3</sup> )	Annual ring breadth (mm)	Moisture content (%)
Air-dry	10°C	0.60	0.32	15
Wet	10°C	0.59	0.32	130
Wet	30°C	0.60	0.34	130
Wet	50°C	0.61	0.36	125
Wet	70°C	0.58	0.32	130

#### 3.2 装 置

試験機は東京衡機製木材硬度試験機を使用し、直径 10mm の鋼球を圧子としたもので、以下は JIS Z 2117 (1961) に従って標準荷重速度は 14kg/min. 他に荷重速度の影響をみる為に手動で 37.5kg/min と 75kg/min の荷重速度で行なった。試片は荷重台上におかれた真鍮箱内に入れて負荷する。温度は恒温水槽内の水をこの真鍮箱内にみちびきこの箱内の試片を一定温度にするように水を循環させる。この時の真鍮箱内の温度は 10°C, 30°C, 50°C および 70°C とした。

#### 3.3 方 法

予備実験として各面における鋼球圧入を行ない、その荷重—圧入深さの関係をみると、Fig. 3 のごとくなる。そこで勾配のバラツキが最も小さい板目面についてのみ本試験をおこなった。まず荷重—鋼球圧入深さの関係をみる為に、荷重 5kg 増加ごとに圧入深さを読み取り、

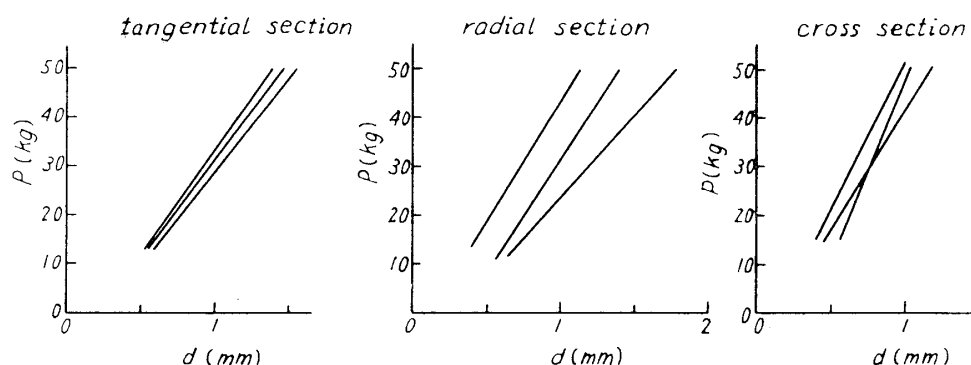


Fig. 3. Load ( $P$ ) vs. depth of indentation ( $d$ ).

最高 50kg に達した後，一定荷重にしたままで，各時間（0.5分～60分）の圧入深さの変化を 0.01mm まで読み取る。

#### 4. 実験結果および考察

##### 4.1 実験結果

実験の結果を Fig. 4～Fig. 7 に示す。

Fig. 4 は荷重—鋼球圧入深さの関係を示したものである。

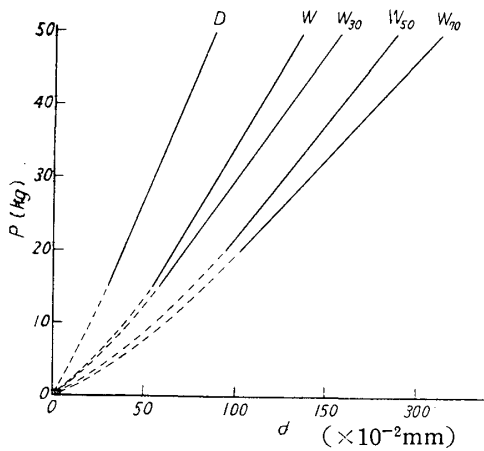


Fig. 4. Load ( $P$ ) vs. depth of indentation ( $d$ ).  
(ball diameter 10 mm)

$D$  ; Air-dry 10°C.     $W$  ; Wet, 10°C.  
 $W_{30}$  ; Wet, 30°C.     $W_{50}$  ; Wet, 50°C.  
 $W_{70}$  ; Wet, 70°C.

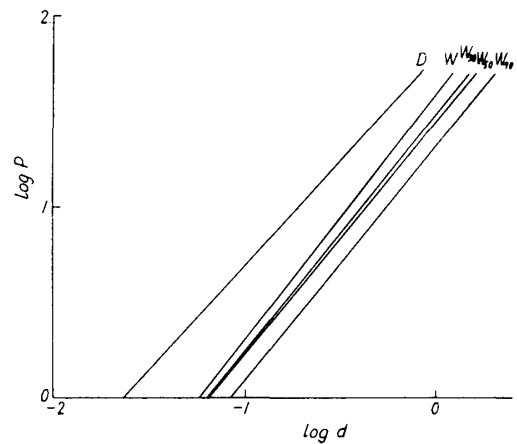


Fig. 5.  $\log P$  vs.  $\log d$ .  
 $P$  in kg,  $d$  in mm.

$D$  ; Air-dry 10°C.     $W$  ; Wet, 10°C  
 $W_{30}$  ; Wet, 30°C.     $W_{50}$  ; Wet, 50°C  
 $W_{70}$  ; Wet, 70°C.

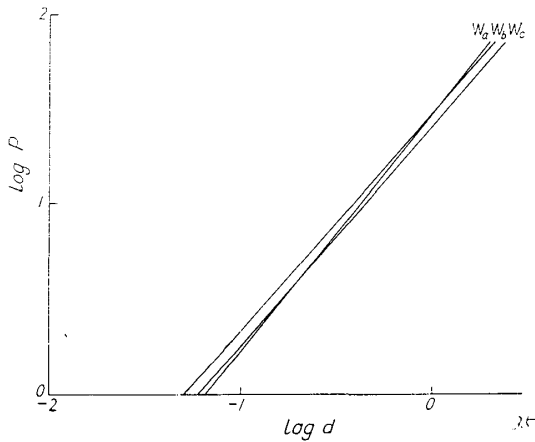


Fig. 6.  $\log P$  vs.  $\log d$  (50°C).

$W_a$  : load velocity 14kg/min  
 $W_b$  ; load velocity 37.5kg/min  
 $W_c$  ; load velocity 75kg/min

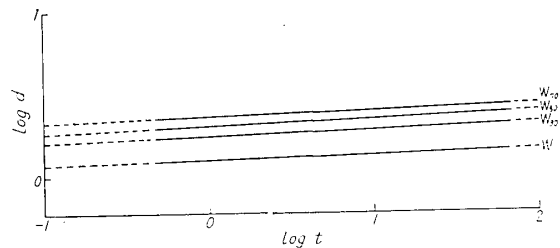


Fig. 7.  $\log d$  vs.  $\log t$  ( $P=50$ kg).  
 $d$  in mm,  $t$  in min

$D$  ; Air-dry 10°C.     $W$  ; Wet, 10°C.  
 $W_{30}$  ; Wet, 30°C.     $W_{50}$  ; Wet, 50°C.  
 $W_{70}$  ; Wet, 70°C.

次に Fig. 5 は 2.1 で述べた理論の適用を検討する為に、Fig. 4 の関係を両対数グラフにプロットしたものである。

Fig. 6 は荷重速度の影響を求めたもので、50°C での湿潤材について荷重—鋼球圧入深さの関係を両対数グラフにプロットしたものである。

Fig. 7 は一定荷重下における圧入深さの時間的变化をみたもので、荷重—鋼球圧入深さの実験につづいて、その時の最大荷重 50kg に保つた状態で求めたものである。

#### 4.2 考 察

4.1 で述べた各図よりその結果を考察する。先ず、Fig. 4 について述べると、ごく精密な機械で低荷重のデータを集めてみる必要があると思われるが、今回の報告の場合、微小変形よりむしろ大変形の場合に焦点を合わせたのでこの部分の追求はここでとりあげないが、この部分の結果を報告したものがあるので後述する。そこでこの Fig. 4 の関係よりあきらかなことは、ある荷重まではこのグラフは曲線を示すがその点を越えると、ほぼ直線を示す。これは Polyoxymethylene<sup>2)</sup> で行なわれた結果とよく一致している。以上のことより木材にも高分子と同様な変形機構が予測される。

Fig. 5 について次に述べる。これは Fig. 4 による直線部についてしらべるものである。なおこれは宮島<sup>16)</sup> によりおこなわれた cherry wood の場合と一致している。ここで問題とするのは、この直線の勾配  $n$  である。この勾配を Table 2 に示す。この勾配の値を 2.1 で述べ

Table 2. Dependence of  $n$  on temperature and moisture content.

Specimen condition	Value of $n$
Air-dry, 10°C	1.07~1.09~1.15
Wet, 10°C	1.22~1.26~1.36
Wet, 30°C	1.20~1.23~1.26
Wet, 50°C	1.17~1.20~1.25
Wet, 70°C	1.18

た弾性接触論ならびに TABOR が塑性体の実験によつて求めた値と比較して木材の変形機構を示す一つの目安と考えた。本研究について述べる前に TABOR の balsam fir<sup>1)</sup> (含水率67%) について述べられたものを記す。この場合は比較的微小な変形(最高荷重, 10kg ただしこの場合の鋼球直径は 3/8 in.) すなわち Fig. 4 の曲線部にあたる部分の勾配を求めている。なおこの結果から  $n$  をもとめると、1.4 という値が得られる。なおこの値より TABOR は

木材が HERTZ の弾性接触論よりみちびかれる  $P \propto a^3$  よりずれるので木材は弾性体でないことを述べているが、本研究では TABOR のものと比較して大きな変形のものについてみる。

Table 2 より  $n$  の値をみるとあきらかなごとく、気乾材と湿潤材を比較すると、その値は前者より後者の方が大きい。換言すれば湿潤材の方が弾性体の値に近いことがいえる。これより予測できることは、湿潤材の方がより多くの弾性的な変形を含んでいることである。これは一見逆なごとく見えるのであるが、YOUNGS による圧縮試験ならびに引張試験より同様な結果が報告されている<sup>17)</sup>。

次に湿潤材での温度依存性をみる。まず Fig. 5 をみると、その歪量は温度の上昇にともない増大し、 $n$  の値は温度の上昇にともない減少する。これは温度上昇にともない粘(塑)性流動が著しくなることに一致するといえよう。

Table 3. Load velocity dependence of  $n$   
specimen condition : wet, 50°C

Load velocity (kg/min)	Value of $n$
14.0	1.17~1.20~1.25
37.5	1.14
75.0	1.10

また荷重速度による影響をみる為に行なつたのが Fig. 6 である。この試験では  $n$  は荷重速度が大になるにつれて、その値は減少しているが検討を要する。次に Fig. 7 は木材の変形にあたり当然起るべきクリープに注目して圧入深さ一時間の関係（一定荷重— 50kg）を表わしたものである。この両対数グラフ上で

の圧入深さ一時間の勾配を求めてみる。この値  $m$  を Table 4 に示す。これを図示すると Fig. 8 のごとくなる。この図より  $m$  の値は 30°C~50°C の間に最大値のごときものがあらわれることが予測される。これはブナ湿潤材の曲げクリープにおける結果<sup>15)</sup> と類似していてこの附近に木材の転移点のごときものが存在するのではないかと思われるが、この点について今後研究を進めたい。

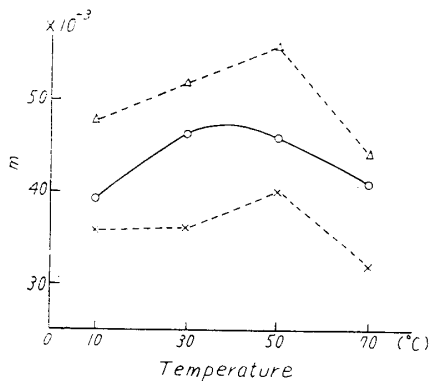


Fig. 8.  $m = \frac{d(\log d)}{d(\log t)}$  vs. temperature.

- △.....△ upper limit
- average
- ×.....× lower limit

Table 4.  $m$  dependence of temperature

Temperature (°C)	Value of $m$
10°C	0.036~0.039~0.048
30°C	0.036~0.046~0.052
50°C	0.040~0.046~0.056
70°C	0.032~0.041~0.044

## 5. 要 約

ブナ材の板目面における鋼球圧入において、荷重—圧入深さの関係、一定荷重下での圧入深さ—時間の関係を調べてみると次のことがあきらかになった。

1. 荷重—圧入深さの関係は、ある荷重以上ではほぼ直線関係となる。
2. 荷重—圧入深さの関係を両対数グラフに表わし、その勾配  $n$  の値を求めると、 $1.5 > n > 1$  となり、かつ気乾状態と湿潤状態では前者より後者が大きく、温度依存性については温度上昇にともない  $n$  の値は小さくなる。
3. 一定荷重下で圧入深さ—時間の両対数グラフよりその勾配をみると、30°C~50°C 間にその最大値があらわれる。これはブナ湿潤材の曲げのクリープの場合と一致する。

## Summary

In the present paper we investigate the contact problems between BUNA wood and steel ball with diameter 10 mm using the BRINELL hardness tester, and the results are given in Figs. 6, 7, 8 and 9, and Tables 2, 3 and 4.

From these results the following deduction may be drawn ;

1) It appears that the depth of indentation ( $d$ ) increases linearly with increasing load ( $P$ ) beyond a certain load (about 10 Kg).

2) The slopes of  $\log P - \log d$  curves ( $n$ ) are given in Fig. 7 and Table 2.

If the HERTZ's theory on elastic contact is applied to wood, the value of  $n$  equals 1.5, and if the TABOR's induction on plastic contact is applied to the case,  $n$  equals 1.

Hence the results given in Table 2 show that  $n$  value of wood lies between the above two values, and it is larger in wet wood than in air-dried, and decreases with increasing temperature in wet wood.

These results may be taken to indicate that the deformation at contact region in wet wood is more elastically recoverable than air-dried wood, and the plastic deformation increases with increasing temperature in wet wood.

3) From Table 4 and Fig. 9 the slopes of  $\log d - \log t$  curve has the maximum value at a temperature between 30°C and 50°C when it is wet.

This is in agreement with the fact that there is a maximum value of  $\tan \delta$  derived from the static bending creep data in small deformation of wet BUNA wood.

## 文 献

- 1) ATACK, D. and D. TABOR, : Proc. Roy. Soc., A. 246 : 539 (1958).
- 2) BAER, E., R. E. MAIER and R. N. PETERSON : S. P. E. J., 7 : 1203 (1961).
- 3) 伊藤勝彦 : 材料試験 9 : 580 (1960) .
- 4) 田中久一郎 : 応用物理 30 : 283, 446 (1961) .
- 5) 緒方清八 ; 木材学会誌 2 : 115 (1956)
- 6) KOLLMANN, F. : Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe : 909 (1951).
- 7) 関谷文彦 : 木材強弱論, 朝倉書店 : 224 (1947) .
- 8) 梶田茂綱 : 木材工学, 養賢堂 : 206 (1961) .
- 9) 宮島 寛 : 北海道大学農学部演習林報告 : 540 (1963) .
- 10) ガーリン, 佐藤常三訳 : 弾性接触論, 日刊工業新聞社 : 第II章 (1958) .
- 11) TABOR D. : The hardness of metals, Oxford (1950).
- 12) たとえば, 小野鑑正 : 材料力学, 丸善 : 570 (1938) .
- 13) たとえば FERRY, J. D. : Viscoelastic properties of polymers, New York (1961).
- 14) 伊藤勝彦 : 材料試験 9 : 534 (1960)
- 15) 山田 正 : 京都大学農学部附属演習林報告, No. 34 : 159 (1960) .
- 16) 宮島 寛 : 木材学会誌 7 : 8 (1961)
- 17) YOUNGS, R.L. : F. P. J., 7 : 315 (1957).