

ヒノキ材における鋼球圧入

—硬さの温度による変化—

大迫靖雄*・山田正*

Yasuo OHSAKO* and Tadashi YAMADA*: Indentation of HINOKI Wood by Steel Ball; Temperature Dependency of the Hardness.

緒 言

木材の性質を述べる一方法として、硬度が多くの人々によつて調べられてきている¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。その中で木材硬度の表示をいかにするかについてはいろいろな考えが述べられているが、現在、JIS 規格 Z 2117 (1960) ではブリネル試験法を採用している。しかし、それについても最近の研究から、その鋼球の径が 10 mm であるのは小さすぎるので、径 30 mm の鋼球を使用した方がより適切であるという報告など⁵⁾ がなされ、この点については再考の余地がある。

この報告では、最初前報⁶⁾ で述べたと同様な方法で、湿潤状態のヒノキ材の荷重—鋼球圧入深さの関係を検討し、次に JIS Z 2117 (1960) で規定される径 10 mm の鋼球を使用し、ブリネル表示法で求めた硬度値をもととして、硬度の温度依存性を調べるとともに板目面硬さと柃目面硬さの比が木材の異方性によつて、どのような影響をうけるかを調べてみようと思う。

以前に、木材の硬度と他の機械的性質については、例えば沢田ら⁷⁾ により圧縮強度との関係について、たびたびふれられてきている。しかし木材の硬さに及ぼす木材の異方性の影響に注目した論文は少ない。幸いにして山井がおこなつた木材の圧縮異方性に関する研究⁸⁾ で側面での異方性が述べられている。また F. KOLLMANN⁹⁾ は圧縮強度と温度、引張強度と温度などの関係について述べている。これらのことを参考にしながら実験の考察をおこなう。

また木材硬度の温度依存性について、気乾材で試験をおこなうときは、その含水率を均一に保つことなどに多くの問題を含むので、比較的其他の条件を一定にできる湿潤状態を採用して、ヒノキ材の温度依存性にふれるとともに、木材の煮沸によるその軟化程度がどのようになるかという問題を調べた。

実 験

実験に使用された試片は 40 mm×40 mm×40 mm の二方柃目ヒノキ湿潤状態のものである。試片の性質と温度範囲は Table 1 に示す。

なお試片を湿潤状態にするために、サッカーを使用して減圧した後強制吸水させた。また恒温状態を保つために、HAAKE 製の恒温循環装置を使用し、真鍮箱中の水を常時一定温度とし、その容器中で試験をおこなつた。鋼球圧入は、JIS Z 2117 (1960) により、径 10 mm の鋼球を板目面と柃目面に垂直に圧入した。これによつて異方性を検討する。この圧入には東京

* 木材物理研究部門, Division of Wood Physics

Table 1. Test specimen.

Specimen condition	Density in air dry (g/cm ³)	Annual ring breadth (mm)	Moisture content (%)
Tangential section			
20°C	0.45	1.3	180
30°C	0.46	1.7	185
40°C	0.44	1.0	180
50°C	0.41	1.1	210
60°C	0.44	1.4	225
70°C	0.42	1.2	215
Radial section			
20°C	0.43	1.1	220
30°C	0.43	1.2	210
40°C	0.43	0.9	200
50°C	0.44	1.5	190
60°C	0.41	1.3	195
70°C	0.44	1.1	195

衡機製木材硬度試験機を使用し、その圧入速度は 14 kg/min. とした。

以下の測定法は前報⁶⁾と同じである。荷重 1~30 kg について 2 kg ごとに鋼球の圧入深さを 1/100 mm の精度で読み取り、最高荷重に達した後、その最高荷重を一定に保った状態で 0~100分 にわたって鋼球圧入深さを各時間で読みとる。ここで荷重がヒノキの板目面で 35~40 kg を越えると鋼球の圧入深さは 2.30 mm 以上に達し、その変形状態をみると、巨視的に、繊維方向に剪断破壊がみられ、またあるものは繊維と直角方向にちぢみの現象（挫屈に似た現象）がみられた。そこでこの場合の最高荷重は 25~30 kg とし、巨視的に破壊はおこらないが完全に塑性変形が生じていると考えられる範囲で実験をおこなった。また柢目面についても板目面と同じ考えから最高荷重を 24 kg とした。

実験結果

Table 2. Temperature dependency of n on wet HINOKI wood.

Temperature (°C)	Value of n	
	Radial section	Tangential section
20	1.20	1.27
30	1.29	1.23
40	1.19	1.18
50	1.15	1.26
60	1.18	1.15
70	1.10	1.10

P : load (kg)

h : indentation depth (mm)

$n = \log P / \log h$

おのおの実験結果を表および図に示す。

最初前報⁶⁾でブナ材について求めたように、径 10 mm の鋼球を圧入したときの荷重 P (kg) — 圧入深さ h (mm) の両対数グラフから得られた直線の勾配 n をヒノキ材について求め Table 2 に示す。

次におのおの状態でのブリネル硬さ H_B を求める。なお H_B は次式で求め、以後これを硬さと呼ぶ。

$$H_B = P / \pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2}) \div P / \pi D h \quad (1)$$

P : 荷重 (kg)

D : 鋼球直径 (10mm)

d : 圧痕の投影直径 (mm)

h : 鋼球圧入深さ (mm)

荷重を 10kg (ほぼ 35 kg 近辺で剪断破壊, あるいはちぢみの現象があらわれるので, その約30%の荷重では, 巨視的には勿論, 微視的にも破壊が生じないという仮定が成り立つものとする) としたときの H_R の値を板目面および柁目面について求め Fig. 1 (a) に示す。同様に最高荷重 (板目面 25~

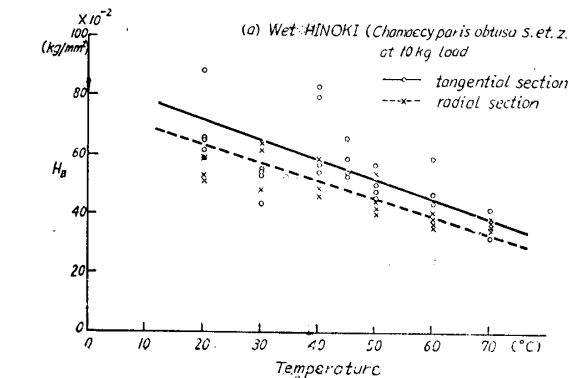


Table 3. Slopes of H_B vs. t (k)

Specimen condition	Values of k ($\text{kg} \cdot \text{mm}^{-2}/^\circ\text{C}$)
In Fig. 1 (a) tangential section	-0.60
radial section	-0.60
In Fig. 1 (b) tangential section	-0.55
radial section	-0.60
In Fig. 1 (c) tangential section	-0.55
radial section	-0.60
In Fig. 1 (d) tangential section	-0.55
radial section	-0.55
In Fig. 1 (e) tangential section	-1.00

t : Temperature

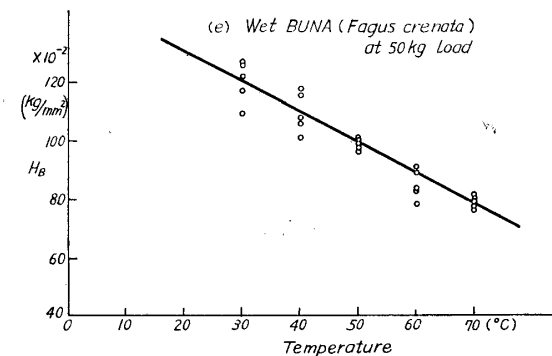
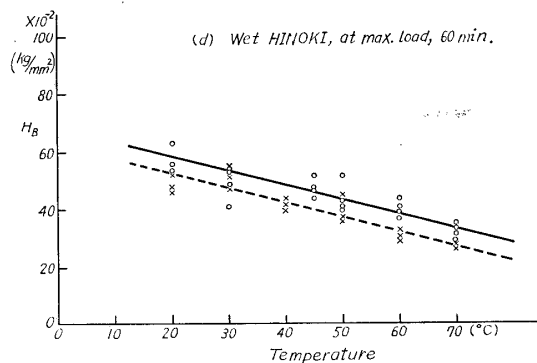
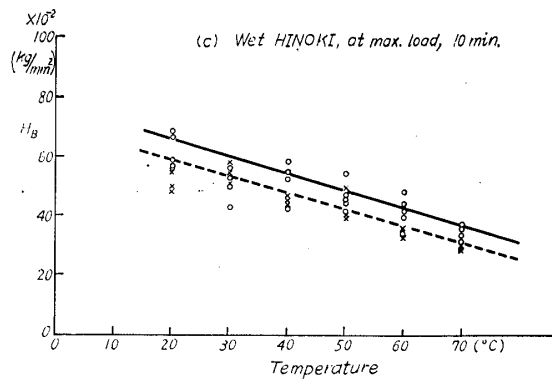
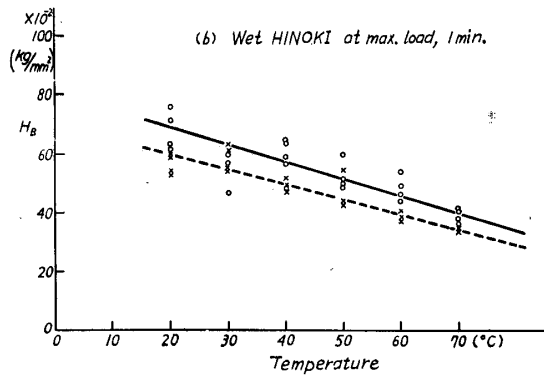


Fig. 1. Brinell hardness vs. temperature.

30 kg, 柁目面 24 kg) にたもつたまま 1 分, 10 分, 60 分経過した後における H_R の値を同図 (b), (c) および (d) に示し, ヒノキ材とブナ材の温度による H_R の変化をみるために, ブ

ナ材の板目面での硬さ—温度の関係を前報⁵⁾のデーターならびに補充実験のデーターから同図(e)に示す。

Fig. 1~4 での板目面の H_R に対する柁目面の H_R の比を, Table 4 ならびに Fig. 2 に示す。

Table 4. The ratio of the Brinell hardness on radial section to that on tangential section of wet HINOKI wood.

Temperature (°C)	Values of p			
	at load 10 kg	after 1 min. at max. load	after 10 min. at max. load	after 60 min. at max. load
20	0.79	0.83	0.76	0.85
30	1.19	1.09	1.01	1.08
40	0.89	0.84	0.77	0.85
50	0.92	0.91	0.83	0.91
60	0.83	0.83	0.74	0.81
70	0.97	0.88	0.78	0.85

$$p = \frac{\text{Brinell hardness of radial section}}{\text{Brinell hardness of tangential section}}$$

なお以上のデーターはおのおのの状態で5個の試片についての平均値である。

考 察

Table 2 によると, 前報⁵⁾で述べた HERTZ の弾性接触論¹⁰⁾, ならびに TABOR の完全塑性体の実験値¹¹⁾より求められた $1.5 > n > 1.0$ の条件はブナ材の場合と同様に, ヒノキ材の場合も満足されている。

その値の傾向をみると, 柁目面では, 60°C, 20°C の値に若干異なる点があるが, 大体他の値については, 高温になるほど小さくなる性質を示し, ブナ材で求めた n と同じ傾向を示す。また板目面についてみると, 50°C において特異な値を示すが他は柁目面と同様, 高温となるにつれて, n は減少する傾向があるように思われる。

以上のことより, ブナ材, ヒノキ材の湿潤状態における n の値は高温になるに従って減少することがわかる。このことより, 前報⁵⁾と同様, 高温側ではより多くの塑性変形要素が現われることが推測される。

次に木材の硬さの温度依存性をみるために, ヒノキ材の湿潤状態のものについてその特性をみる。われわれは木材を煮沸することによつて軟化するというを知っている。しかしそれらの軟化程度にいかなる傾向があるかということには今までふれられていない。ところで圧縮

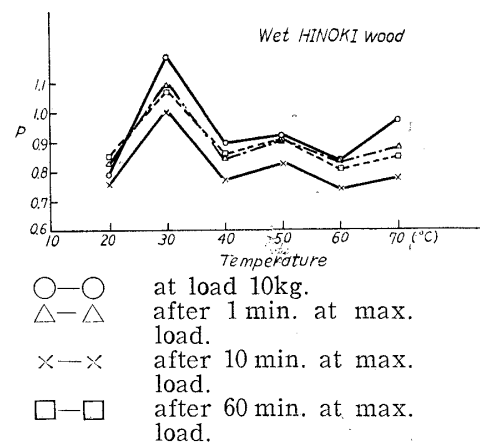


Fig. 2. Ratio of the Brinell hardness on radial section to that on tangential section (p) vs. temperature.

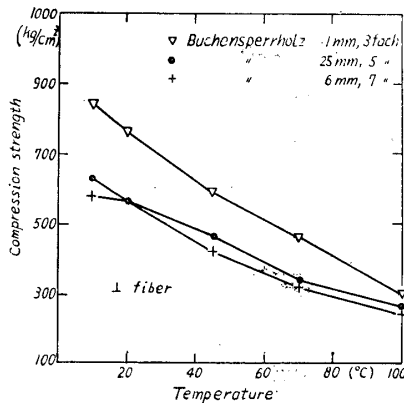


Fig. 3. Compression strength vs. Temperature.
(F. Kollmann and F. Schuls⁹⁾)

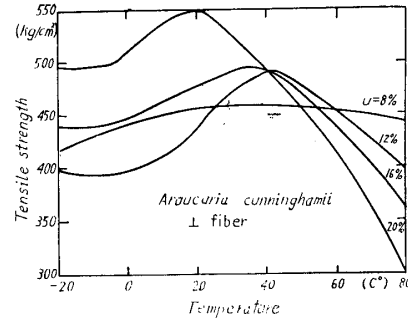


Fig. 4. Tensile strength vs. Temperature.
(P. H. Sulzberger⁹⁾)

強度—温度，引張強度—温度の関係については，F. KOLLMANN により，Fig. 3, 4 で示されるような傾向が述べられている。そこでこれらと比較しながら Fig. 1 について述べる。

Fig. 1 を分析してみると板目面，柁目面ともに温度の上昇にともなつて H_R は減少する。このデーターを見ると，柁目面では 30°C で極大値を，板目面では 30°C で極小値を示すという特異な現象があらわれる。しかしこのことについては後に述べるとして，先ず全体の傾向からみると，板目面では多少のバラツキが生ずるが，ほぼ実線で示すような直線関係であらわすことができ，柁目面については点線で示すような直線関係であらわすことができる。なおこれは Fig. 3 の圧縮強度—温度の関係と類似している。Figs. 1 (a)~(d) のおのおのの直線の勾配を求めると，Table 3 のごとくなる。この結果から板目面，柁目面ともに，この勾配はあまりばらつかない。そこである温度 $t (^{\circ}\text{C})$ での H_R は次式のように表わされる。

$$H_R = a + kt \quad (2)$$

a : 0°C のときの H_R (kg/mm^2)

ここで k を種々の樹種に特有の定数とすると，ヒノキの場合 $k = -0.55 \sim -0.60$ ($\text{kg} \cdot \text{mm}^{-2}/^{\circ}\text{C}$) となる。次に湿潤状態のブナ材の板目面では，硬さ—温度の関係がどのようなものであるかを Fig. 1 (e) によつて見ると，平均値は非常によく直線上にのり， $k = -1.0 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-2}/^{\circ}\text{C}$ である。なおこの場合の H_R は荷重 50 kg のとき求めたものである。この2つの樹種を比較した場合，ヒノキ材よりブナ材の方が温度による硬さの変化が大であるといえよう。この結果は F. KOLLMANN による圧縮強度—温度の関係⁹⁾ の中で示される。比重の大なるほどその勾配が大きくなる傾向と類似している。ところで 30°C 近辺の特異な点を詳しく検討すると，柁目面ではこの温度において最大値があらわれ，Fig. 8 の結果と類似していて鋼球の圧入には引張応力の作用がいちぢるしいように考えられるが，板目面では逆にこの温度で極小値を持つような結果があらわれていて興味深い。

次に木材の異方性についてみるために，山井⁸⁾ によつて求められたデーターをもとにして，柁目面に負荷したときのヤング係数と板目面に負荷したときのヤング係数の比をみると，針葉樹の場合 $0.42 \sim 0.52$ ，広葉樹の場合 $0.40 \sim 0.78$ の範囲に分布している。したがつてその比は，

ほぼ板目面：柁目面=2：1に近い値をあらわす。ところが日本産気乾材のデータ¹²⁾をみると、板目面硬度に対する柁目面硬度の比の分布は、針葉樹の場合1.0~1.3, 広葉樹の場合1.3~0.8であり、しかも針葉樹の硬度は、柁目面の方が板目面より大きな値を示す（この実験に使用したヒノキ材はほぼ1.0の比を示す）のに対して、広葉樹の場合2, 3の例（キリ, ブナ, ニセアカシア）をのぞいて、大部分が板目面硬度が柁目面硬度より大となり、針葉樹と逆の結果をあらわしている。これをヤング係数の場合と比較してみると、板目面と柁目面での値の変化はそれほどはげしくなく、木材異方性の影響が少ないことがあきらかになっている。圧入深さが大きい場合には、ヤング係数よりも圧縮強度や割裂強度などの異方性と比較することが重要となる。しかもこれらの強度値は板目面、柁目面でヤング率ほど明瞭な異方性はあらわれていない¹⁴⁾。これらのことから硬度の場合、木材の異方性に関する関係がどのような形で存在するかについて調べるのは一つの問題である。

それには鋼球の圧入における応力の方向ならびに分布の解明が必要である。しかし球圧入における応力分布は他の強度試験（例えば、引張り、圧縮、曲げなど）における応力分布と比較して、著しく複雑なのでまだ明らかでない。そこでこの木材の異方性が硬さに及ぼす影響が不明瞭となる原因を追求することより、球圧入での応力分布になんらかの手がかりをつかめれば幸いと思うが、今回はそれまで述べるに到らなかつたので今後の問題としたい。またもう一つの問題として、硬度試験すなわち鋼球圧入が試片に及ぼす影響はたんに表面の問題に限られるのか、あるいは試片全体に関する問題であるのか、この点について若干考察の必要がある。これらの問題は木材以外の材料¹⁵⁾ (mild steel, plasticine) で取り上げられているが、木材についてはまだ取り上げられていない。そこで破壊に到るまでの歪量が多い湿潤状態の木材を使用して、これらの問題を取り上げることは適当な方法ではないかと思う。これらについてはいずれ考えなければならない。まずその手始めとして、木材の異方性が木材の硬度にどのように影響してくるのか具体的に述べるため、ヒノキ湿潤材での板目面と柁目面の硬度について本実験結果を調べてみる。Tabl 4 で示すように各状態での板目面硬さに対する柁目面硬さの比を取った。これを図示すると Fig. 2 のごとくなる。これらのいずれの状態においても、30°Cでの値が1.0以上である以外は0.75~0.95の間にあり、この間ではほぼ安定した関係を示している。また各荷重、時間についての値も顕著な変化がみられないで、ほぼ似たような状態を示す。そこで以上の結果からは、硬度の場合、木材の異方性が温度、圧入時間、圧入荷重に顕著に影響するとは思われない。

要 約

湿潤状態のヒノキの板目面と柁目面との鋼球圧入試験の結果を要約すると次のようになる。

1) 湿潤状態におけるヒノキ材は前報⁶⁾で述べた弾性体に対する HERTZ の理論¹⁰⁾ならびに、塑性体に対する D. TABOR の実験結果¹¹⁾より求められる n の範囲 ($1.0 < n < 1.5$) を満足し (Table 2), しかも前報ブナ材⁶⁾の場合と同様、高温になると n の値が減少する傾向を示す。

2) 湿潤状態におけるブナ材、ヒノキ材では、ブリネル硬さ H_B は温度の上昇により減少し、Fig. 1 (a)~(d) の実線および点線で示されるように、板目面と柁目面のいずれの場合も直

線的な傾向を示す。なおこれは Fig. 3 の F. KOLLMANN により示された圧縮強度—温度の関係⁹⁾と類似している。また Figs. 1 (a)~(d) の直線のおおの勾配を求めると Table 3 のごとくなり、ヒノキ材の場合 $-0.55 \sim -0.60$ 、ブナ材の場合 -1.0 という比較的バラツキの少ない値を示す。その結果勾配を k として (2) 式で示されるような直線関係が成り立つ。この場合ヒノキ材の k の値が、ブナ材のそれより小さいことから、温度による H_B の変化はヒノキ材の方がブナ材より小さいことがわかる。

3) 鋼球圧入の試験方向による H_B の差異は、圧縮試験から求められたヤング係数の差⁸⁾に比較して小さい。そこで湿潤状態のヒノキ材の温度変化による板目面硬さと柀目面硬さの比の変化を調べた (Table 4)。この結果から荷重の変化、ならびに最高荷重 (板目面 25~30 kg, 柀目面 24 kg) に達した後、一定荷重を保ち 1 分, 10 分, 60 分後の H_B を計算し, Fig. 2 に示した。この図からわかることは、荷重の変化および一定荷重下での時間変化によつて H_B に著しい変化が表われないということである。このことから、この実験に関する限り、木材の異方性が温度ならびに一定荷重下での時間変化によつて H_B に顕著な影響をあたえるとは思えない。ただ気乾状態でのヒノキ材の板目面硬さに対する柀目面硬さはほぼ 1.0 である¹¹⁾のに対して、湿潤状態では 30°C 近辺以外ですべて 1.0 以下であり、板目面硬さの方が柀目面硬さより大であることを示している (Fig. 2, Table 4)。

Summary

In the present paper, the authors investigate the Brinell hardness on both radial and tangential section of wet HINOKI (*Chamaecyparis obtusa* s. et. z.) by the method previously⁶⁾ used, and the results obtained are given in Figs. 1~2 and Tables 1~4.

1) The slopes (n) of $\log P - \log h$ curves fall between 1.0 and 1.5, and decrease with increasing temperature (Table 2). These results show that wood behaves as an elasto-plastic body as described in the previous report on BUNA wood⁶⁾ (*Fagus crenata* BLUME).

2) Brinell hardness (H_B) at $t^\circ\text{C}$ may be roughly shown by the following relation in both species

$$H_B = a + kt \quad \dots\dots\dots (2)$$

where a is the Brinell hardness at 0°C (kg/mm^2), t is temperature ($^\circ\text{C}$) and k is characteristic coefficient of specimen ($\text{kg}\cdot\text{mm}^{-2}/^\circ\text{C}$), $k = -0.55 \sim -0.60$ for wet HINOKI wood and $k = -1.0$ for wet BUNA wood.

3) The ratio of the Brinell hardness in radial section to that in tangential section of wet HINOKI wood is given in Fig. 2 and Table 4. From these data, it is shown that the effects of temperature and time on the ratio are little except at 30°C .

文 献

- 1) 緒方清八, 木材学会誌, 2, 115 (1956) .

- 2) KOLLMANN, F., Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe, Bd. 1, 909, Springer, Berlin (1951).
- 3) 関谷文彦, 木材強弱論, 224, 朝倉書店 (1947) .
- 4) 梶田 茂編, 木材工学, 206, 養賢堂 (1961) .
- 5) 宮島 寛, 北海道大学農学部演習林報告, No. 22, 539 (1963).
- 6) 大迫靖雄, 山田正, 木材研究, No. 33, 29 (1964).
- 7) 沢田 稔, 辻 完司, 近藤孝一, 林試報, No. 78, 149 (1955).
- 8) 山井良三郎, 林試報, No. 113, 57 (1959).
- 9) KOLLMANN, F., Holz als Roh-und Werkstoff 7, 269 (1952).
- 10) ガーリン, 佐藤訳, 弾性接触論, 第II章, 日刊工業新聞社 (1958) .
- 11) TABOR, D., The hardness of metals, Oxford (1950).
- 12) 林業試験場編, 木材工業ハンドブック, 1964, 丸善 (1958) .
- 13) SHAW, M. C., Wear 6, 140 (1963).
- 14) VORREITER, L., Holztechnologisches Handbuch, Bd. I, Georg Fromme & Co., Wien (1949).