



Title	木材の硬さに関する研究
Author(s)	宮島, 寛; MIYAJIMA, Hiroshi
Citation	北海道大學農學部 演習林研究報告, 22(2), 539-607
Issue Date	1963-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/20826
Type	departmental bulletin paper
File Information	22(2)_P539-607.pdf



木材の硬さに関する研究

宮 島 寛*

Studies on the Indentation Hardness of Wood

By

Hiroshi MIYAJIMA*

目 次

緒 言	540
I. 木材硬さ試験方法の種類	541
1. 長方形面圧入法	542
2. 円形面圧入法	542
3. 円筒側面圧入法	543
4. 球 圧 入 法	543
5. 針 圧 入 法	548
6. 円 錐 圧 入 法	549
7. くさび圧入法	552
II. 静的押しつけ硬さ試験における荷重とヘコミの深さおよび硬さ数との関係	553
1. ヘコミの深さの測定法	553
2. 荷重とヘコミの深さおよび硬さ数との関係	556
(1) 静止荷重下におけるヘコミの深さの変化	557
(2) 長時間荷重の場合	558
(3) 荷重速度を一定とした場合	560
(i) 10 mm 球圧入	561
(ii) 30 mm 球圧入	563
(iii) 30 mm 円形面圧入	564
(iv) 30 mm 円筒側面圧入	565
(4) 圧入速度を一定とした場合	569
3. 30 mm 球を用いるときの試験方法	572
III. 木材の機械的性質としての硬さ数	573
1. 樹種別硬さ数およびその出現状態	573
2. 1 樹種内における供試木および産地による硬さ数の差異	576
3. 年輪幅と硬さ数との関係	577
4. 比重と硬さ数との関係	581
5. 含水率と硬さ数との関係	583

* 宮島 寛：北海道大学農学部林産学科 助手 林学博士

H. MIYAJIMA: Assistant, Doctor of Forestry, Institute of Forest Products, Faculty of Agriculture, Hokkaido University.

6. 加圧面による硬さ数の差異	585
7. 圧縮強さおよびヤング係数と硬さ数との関係	586
IV. 繊維板および削片板に対する硬さ試験	592
摘 要	594
引用ならびに参考文献	596
英 文 概 要	600
付 表 (硬さおよび圧縮試験結果)	603
図 版	607

緒 言

木材を利用する場合はもちろん、その生産にあたっては木材の性質をよく知っておかねばならない。この木材の性質を測定する方法にはその性質によりいろいろの種類があるが、硬さ試験もそのひとつである。しかし木材の硬さといってもその意味は非常に広範囲にわたり、そのなかには互いに関連のあるものもあり、また全く異質のものもある。一般的に木材の硬さの種類として、ひっかけ抵抗・切削抵抗・摩耗・押しつけ抵抗・衝撃抵抗などがあげられる。これらについてそれぞれ多くの測定法が研究され、議論されまた歴史的にも移り変わりが多く、興味深いものがある(緒方²⁷⁾)。しかしいずれにおいても決定的な方法はなく、国際的に統一されず、それぞれ異なった方法で試験が行なわれているのが現状である。第4回FAO木材加工会議(1958)⁹⁾の報告書には、木材の硬さ試験について「ひろく行なわれている JANKA および MONNIN の方法のほか多くの方法、たとえば球の落下法、円錐を用いる方法などが提案されている。この会議はこれらの異なった方法における関連性を討議し、次回に報告されるよう勧告する」と述べられている。

この論文の内容は2大別される。まず最初の部分では硬さ試験における根本問題であるその種類と測定方法について検討を行なった。ここでは既往の文献について針・円錐・くさび・長方形・球および円筒(側面)を用いる押しつけ硬さ試験方法を検討し、さらに球および円筒の圧入方法については最も合理的な測定方法を見出すよう種々の実験により考察を行ない、その結果 BRINELL の方法についての測定方法さらに直径 30 mm の球を用いるときの新しい試験方法を提案した。他の部分では測定された硬さ数の樹種・産地・供試木によるちがいを、その出現状態などを考察し、またその材の年輪幅・比重・含水率・圧縮強さなどとの関係について論じた。

この研究は著者が学生のとき大沢正之教授の指導によって始められ、同教授退職後は矢沢亀吉教授の指導の下に続けられた。ここに両先生に対し感謝の意を表す。また研究中多くの有益な助言をよせられた、三重大学緒方清八教授、林業試験場沢田稔強度研究室長、同山井良三郎技官に対し感謝する。さらに MONNIN 法についての著者の質問にただちに懇切な回答をよせられたパリ Centre Technique du Bois の強度試験室主任 M. AVALE

氏および同 Director, J. CAMPREDON 氏の好意に対し謝意を表す。また本論文を公刊するにあたり、ご尽力賜わった演習林長宮脇恒教授に対してお礼を申し上げる。

I. 木材硬さ試験方法の種類

木材の硬さ(硬度・硬性・カタサ)というものの真の意味は何かということがまず問題となる。これについては古くから論じられており、たとえば H. NÖRDLINGER (1860)* は木材の硬さは鋸・おの・かんなどによる加工に対してそれぞれ異なった性質があるため、その絶対的な硬さというものは説明できず、ただ相対的にしかいえないといい、鋸による加工性に関連させて硬さにより木材を 8 つの class に分けている。この分類方法はのち、数人の研究者にも用いられた。これらの広い意味の硬さとして、次のものが一般に考えられる⁴⁹⁾。

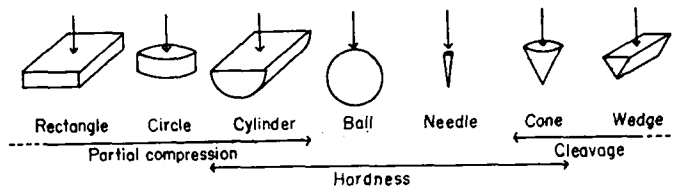
- 1) ひきかきに対する抵抗としての硬さ (scratch hardness)
- 2) 刃物などを用いた場合の加工性に対する硬さ (machinability)
- 3) 摩耗性に対する硬さ (wear hardness)
- 4) 他の物体でおしつけられたときこれに抵抗する硬さ (indentation hardness)
- 5) 他の物体を衝突させたときの吸収エネルギーとしての硬さ (rebound hardness)

さらに別の意味で、木材の強度特性を推定するための簡易試験方法のひとつとしての硬さ試験も考えられる⁴⁷⁾。

以上あげた硬さのうち、1) は鉋物・金属・木炭に主として用いられる。2) は前述の NÖRDLINGER のいうように試験するには多くの問題がある。3) は摩耗試験として一般の硬さ試験とは別に求められる。4) は一般に静的押しつけ硬さ試験として求められるものである。5) は動的試験によるもので、試験方法もその硬さの性質も前者とは異なるものである。これらの硬さには互に関連性をもつものもあり、また一方同一項目のなかでも試験方法の相違により関連性のないものもある。この論文ではごく一般的な方法である 4) の静的押しつけ硬さ試験に限定して論ずるが、これには次のような条件をみたすものが木材に対するひとつの理想的な硬さ試験方法といえる。

- 1) 最も軟らかい材から最も硬い材まで一様の方法で試験が行なえること。
- 2) 木口、板目およびまさ目の 3 面に試験が行なえること。
- 3) 削片板、繊維板にも同様の方法で試験ができ、木材との比較ができること。
- 4) 方法が簡便で、すばやくかつ正確であること。
- 5) 得られた硬さ数値が木材の理学的および他の機械的性質と関連性をもつこと。すなわち、構造用材に対する簡易試験方法として用いうる可能性を有すること。

* R. TRENDELENBURG (1933)⁴⁹⁾ による。



第1図 静的押しつけ硬さ試験の種類

Fig. 1. Various kinds for testing hardness of wood by static indentation method.

ここでいままでに行なわれた木材の静的押しつけによる硬さ試験方法の種類をあげると第1図に示すようになる。

これらのうちで、G. JANKA (1906)⁹⁾ は、球 (ball, Kugel), 円錐 (cone, Kegel), くさび (wedge, Keil), および長方形 (rectangle, Stempel) の4つを用いて実験を行ない、その結果から現在 English-speaking countries において、規格となっているいわゆる JANKA の方法 (直径 11.284 mm の球を用いる) を最適の試験方法として提唱した。

現在硬さ試験方法としてとりあげられているのは第1図における円筒面から円錐までの4つの方法である。

ここにあげた試験方法について、前述の硬さ試験における5つの条件に関連させて述べる。

1. 長方形圧入法

長方形 (rectangle) の平らな面を押しつける方法は前述の JANKA に続き H. HOEFFGEN (1938)⁹⁾ がとりあげ JANKA の球圧入法と比較した。用いた長方形の大きさは長さ 20 mm で一定、幅は 2.5, 5.0 および 10.0 mm の3種類で、これを木材の試験面に 1 mm 圧入するに要する単位面積あたりの荷重を求めて硬さ数とした。この方法では1個の長方形が数多くの年輪にまたがるという特徴があるが、その周囲に剪断力を生じ、長方形の幅により硬さ数は変化する。すなわち、その面積が大きくなればなるほど剪断力の影響は少なくなり、硬さ数は減ずる。これを完全になくするには試験片上全面にわたるような長方形が必要となり、これは圧縮試験となる。HOEFFGEN はこの方法による硬さ数を圧縮強さと比較すると JANKA 球によるよりも密接な関係がえられるので、圧縮試験の簡易試験方法として推めると述べている。しかしこの方法は部分圧縮試験方法として取りあつかわれるべきものと考えられる。

2. 円形面圧入法

平らな円形 (circle) の面を押しつける場合は著者²¹⁾ の実験によれば、長方形の場合とほとんど同じであり、これも硬さ試験というより、部分圧縮試験として考えるべきものである。詳細は後述する。

3. 円筒側面圧入法

円筒 (cylinder) の曲面を押しつける方法は MONNIN* あるいは CHALAIS-MEUDON** の方法と呼ばれる。木材に対する MONNIN の硬さ試験においては直径 30 mm 長さ 30 mm の円筒の側面を試験片のまさ目面に圧入する。試験片の大きさは横断面 2×2 cm 長さ 10 cm とし、2 方まさにする (原則として静的または衝撃曲げ試験片の残りのひとつを利用する)。円筒の軸を試験片の縦軸と直角におき、へこみを明確に得るためにカーボン紙を試験片と円筒の間に挿入する。荷重は 200 kg (試験片の幅 1 cm につき 100 kg) とし円筒を 5 秒間圧入する。へこみの幅 l mm を測定し、次式によって、圧入の深さ t mm を計算する。

$$t = 15 - \frac{1}{2} \sqrt{900 - l^2}$$

硬さ数 N は圧入深さの逆数である。

$$N = \frac{1}{t}$$

へこみの幅の測定は 1/10 mm まで行なう。軟材に対しては荷重を 100 kg (幅 1 cm に対し 50 kg) とし、結果の表示には深さを 2 倍にする。

繊維板および削片板の場合にも同じ方法が用いられる。試験片の幅は 3 cm とし、荷重は 300 kg (幅 1 cm に対し 100 kg) である***。

このように規定からいえば木材の場合、そのまさ目面にのみ試験を行なうことになっている。板目面にも可能であるが、木口面には試験片の形状からいって試験は行ないにくい。また著者の実験結果²¹⁾ では荷重を変えた場合、えられる硬さ数に変化が生ずるので、多くの種類の木材の硬さの比較に対しても最適の方法とはいえない。

4. 球圧入法

球 (ball) を静的に押しつける方法は最も代表的な硬さ試験方法である。したがってその種類も非常に多い。この概略は次のようである。

(1) BRINELL/MÖRATH の方法——J. A. BRINELL (1900), E. MÖRATH (1932)²²⁾

直径 10 mm の球を 50 kg——特に軟らかい材には 10 kg, 特に硬い材には 100 kg——の荷重で試験片におしこむ。適用荷重に達するに要する時間は 15 秒以内、これを 30 秒保持し、さらに 15 秒以内放置する。そこにできたへこみの直径を BRINELL-Lupe で測定し、へこみの単位表面積あたりの荷重を硬さ数 (kg/mm^2) とする。

すなわち

* Centre Technique du Bois, Paris からの回答 (1959 年 6 月) による。

** F. KOLLMANN (1951)¹²⁾ による。

*** これはフランスにおける試験方法であり、後述する FAO 木材加工会議に提案されている MONNIN の方法はこれとは異なる。

$$H_B = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \text{ kg/mm}^2$$

ここで H_B は BRINELL 硬さ数, P は荷重, D は球の直径,
 d はヘコミの直径である。

この方法は後述の JANKA の方法において球の圧入深さが 5.6 mm にも達するので、MÖRATH が圧入深さをもっと少なくして硬さを測定しようと BRINELL の方法について上述のような適用荷重を定めたものである。そして圧入深さは球の直径の 1/3 以内にすべきであるといっている。

(2) WARREN の方法——W. H. WARREN (1911)*

直径 20 mm の球を荷重 1000 kg で 2 分間加圧し、ヘコミの単位表面積に対する荷重をもって硬さ数とする。

(3) 井口の方法——井口常雄 (1935)⁹⁾

直径 30 mm の球を 50 kg または 100 kg の荷重で 5 分間試験面におしこむ。そして荷重をかけたまま圧入深さを読み、ヘコミの単位表面積に対する荷重をもって硬さ数とする。

(4) 日本標準規格原案 (1939)

球の直径は 10 mm, 荷重は 30 kg を標準とし、ほかに 10, 50 および 100 kg と全部で 4 種類あり、荷重を 30 秒間作用させ、荷重除去後または荷重をかけたままヘコミの深さを測定し、ヘコミの単位表面積に対する荷重を求め硬さ数とする。

(5) JES 建築 3107 (1949)

前述の (4) におけるヘコミの深さ測定を荷重除去後 5 分以上経て行なうよう明記したものの。

(6) JIS A 1011 (1954), JIS Z 2117 (1957)

前規格を根本的に変更したものである。球は同じく直径 10 mm のものを用いるが、これを深さ $1/\pi \approx 0.32$ mm まで圧入するに要する荷重を測定する。圧入の速度は毎分 0.5 mm を標準とする。この場合、ヘコミの表面積は 10 mm^2 となり、荷重の 1/10 をもってただちに硬さ数 (kg/mm^2) とすることができる。

(7) 関谷の方法——関谷文彦 (1936)¹²⁾

関谷の実験によると 10 mm 球を圧入するとき、荷重 (P)—ヘコミの深さ (h) の関係は $P = ah^n$ であらわされる。ここで a および n は材の性質および球の直径などによって異なる恒数である。球圧入によってなされた仕事 W は

$$W = \int_0^{h_1} ah^n dh = \frac{a}{n+1} h_1^{n+1}$$

* 井口常雄 (1935)⁹⁾ による。

となり、また生じたへこみの体積 V は

$$V = \pi h_1^2 (D/2 - h_1/3)$$

で表わされるので、エネルギー硬さ数 H_e は

$$H_e = W/V$$

となる。実際には $h_1 = 0.5$ mm, すなわち 0.5 mm 圧入するに要するエネルギーを測定している。

(8) MEYER の方法——E. MEYER (1908)*

MEYER によると荷重を増しながら球を試験片に圧入するとき、荷重 P とへこみの直径 d との間には

$$P = ad^n$$

という関係がなりたつ。ここで a は球の直径により異なる常数で $\frac{a_1}{a_2} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^{n-2}$ という関係があり、 n は球の大きさに無関係の常数である。なお a_1, a_2 は2つの球の常数、 D_1, D_2 はそれぞれの直径を示す。

直径の異なる球を試験片に圧入し、直径 D の球の中心に対し同一角度をなすへこみの直径 d を生ずるような荷重 P から平均圧力 $p = P/\left(\frac{\pi}{4}d^2\right)$, すなわちへこみの単位投影面積に対する荷重を計算すれば、その値が同一材料に対して不変であるという法則を確かめ、BRINELL 硬さ数よりもこの方法が物理的に合理的であるという。

(9) JANKA の方法——G. JANKA (1906)⁹⁾

直径 11.284 mm の球をその半径の深さまで木材に圧入するに要する荷重を求める。この場合へこみの投影面積は 1 cm^2 となる。この方法は English-speaking countries の規格であり、A. S. T. M. (American Society for Testing Materials) では圧入速度を毎分 0.25 in (6 mm) ときめている。

(10) 最大硬さ数法——K. HUBER (1938)⁷⁾

HUBER によると、JANKA 球または 30 mm 球を荷重を増しながら試験面に圧入していくと硬さ数 (MEYER 硬さ数) は増して、最高値に達し、のち再びそれは減ずる。この最高値をもって硬さ数とすべきであるという提唱である。同氏の実験によると、JANKA 球を圧入する場合はこの最高値を示す圧入深さは大部分の樹種について 0.77 mm, 少数のもので 1.653 mm, 最も硬いリグナムバイタ材で 2.821 mm である。このため BRINELL の方法によって 50 kg の荷重を用いるときは、いずれの樹種についても硬さ数の最高値に達しておらず、また JANKA の方法によるときは、すでに最高値を過ぎているので、いずれも小さな硬さ数が求められる。また 30 mm 球を用いるときはへこみの深さ 1.1~1.69 mm で硬さ数の

* 小野鑑正 (1938)⁸⁾ による。

最高値に達する。この最高値は平均して JANKA 球と 30 mm 球を使用したときともほぼ同じ大きさであると述べている。

(11) JANKA の方法の改良型——R. C. WEATHERWAX et al. (1948)*

JANKA 球を用いて荷重を増しながら荷重——ヘコミの深さの関係を求め、その直線部分からヘコミの単位表面積に対する荷重を求め硬さ数とする。JANKA 球を用いるのみで試験方法も硬さ数の算出も JANKA の方法とは全く異なる。これは JANKA の方法が特に硬い木材に対して適用しがたいため考えられた方法である。

(12) KRIPPEL の方法——M. KRIPPEL (N. PALLAY, 1938)⁹⁵⁾

最初に試みたのは直径 25.466 mm の球を深さ 2.5 mm 圧入するに要する荷重を測定する方法である。この場合ヘコミの表面積は 2 cm² となる。しかしこの方法においても針葉樹材など特に軟らかい材には圧入が深すぎる傾向があるとして深さ 2 mm でヘコミの表面積が 2 cm² になるような直径 31.834 mm の球を用いる方法をさらに提唱した。

(13) 繊維板の硬さ試験方法——FAO (1958)⁹⁾

第4回 FAO 木材加工会議の報告書に記載されている方法で以下述べるような3種類がある。試験片はいずれも厚さ 2.5 cm 以上になるよう繊維板をはり合わせる。この場合接着剤には rubber cement か他の適当な弾力性のあるものを用いる。試験面の大きさは JANKA および 30 mm 球圧入の方法では 7.5×15 cm, MONNIN の方法では 2×15 cm である。

a) JANKA の方法: 木材の場合と同様、直径 11.284 mm の球をその半径の深さまで圧入するに要する荷重を測定し、これを硬さ数とする。圧入速度は毎分 6 mm。試験は試験片の両面に各 2 回行ない、滑面と裏面(金網のあとがある)に分けて結果を報告する。試験の位置は試験片の縁または他の試験によるヘコミから 2.5 cm 以上離すこと。

b) MONNIN の方法: これはさきに述べた木材およびフランスにおける繊維板に対する試験方法と異なるものである。この報告書にある方法では加圧体は前述の場合と同じく直径および長さ 30 mm の円筒の側面であるが、荷重は繊維板の比重により 200 kg (比重 0.9 以上), 100 kg (0.40~0.90), 50 kg (0.25~0.40) および 25 kg (0.25 以下) の 4 種がきめられている。圧入速度、試験数および位置は前法と同じである。試験においてはヘコミの測定をしやすくするため円筒面にすずをぬるか、またはカーボン紙を円筒面と試験片の間にはさむ。規定の荷重で円筒面を試験片上に圧入し、荷重除去後、試験片上に残ったヘコミについて幅を 2 箇所測定し、その平均値 W (mm) からヘコミの深さ d (mm) を次式により計算する。

$$d = R - \sqrt{R^2 - \frac{W^2}{4}}$$

* S. GREENE (1959)⁹⁾ による。

ここで R は円筒の半径 (15 mm) である。硬さ数は d の逆数とし、適用荷重を併記する。

この報告書ではとくに注として、この方法は荷重下における変形ではなく試験面に残存するヘコミの測定を行なうものであると述べている。しかし上述のように円筒面にすずをぬるかまたはカーボン紙をはさめば荷重下に生じたヘコミが荷重除去後にも残るので、この注の意味はない。このことは次の 30 mm 球圧入法の場合にも述べられているが、これに対する著者の見解は円筒面の場合と同じである。

c) 30 mm 球圧入法: 直径 30 mm の鋼球を用いるが、荷重 (4 種類)、圧入速度、試験面、個数および位置はすべて前項の MONNIN 法と同じである。そして球にすずをぬるかカーボン紙を用い、荷重除去後生じたヘコミの直径を 2 箇所測定し、その平均値をもって硬さの尺度とし適用荷重を併記する。

以上が球を用いた硬さ試験方法の主なものである。これらは次のように分類できる。

荷重のかけ方について

1) 球を圧入する荷重をきめ、それによって生じたヘコミについて硬さ数をもとめるもの。これは一般にヘコミの単位表面積に対する荷重をもって硬さ数とするもの (BRINELL, 日本標準規格原集, JES 建築 3107, 井口の方法など) である。

2) 一定の深さまで球を圧入するに要する荷重を測定するもの (JANKA, KRIPPEL および JIS Z 2117 (1957) の方法)。

3) 連続荷重による荷重とヘコミの深さの関係から硬さ数を求めるもの。これにはある限度まで (0.5 mm) 圧入するに要するエネルギーを求める関谷の方法、両者の関係における直線部分からヘコミの単位表面積に対する荷重を求める JANKA の方法の改良型、最大硬さ数を求める方法などがある。

4) 直径の異なる球を用いるとき、球の中心に対する同一角度をなすヘコミの直径 d を生ずるような荷重から、単位投影面積に対する圧力を求め、これを硬さ数とするもの (MEYER の方法)。

ヘコミの測定法について

1) 荷重除去後その直径を測定するもの (BRINELL および繊維板に対する 30 mm 球圧入の方法)。

2) 荷重除去後その深さを測定するもの (JES 建築 3107)。

3) 荷重をかけたままその深さを測定するか、またはそれを規準とするもの (井口, JANKA, KRIPPEL, JIS, 関谷, JANKA 改良型など)。

4) 荷重除去後でも荷重をかけたままでもよいもの (日本標準規格原案)。

球の大きさについて

1) 10, 20, 30 mm 球という一定単位のもの。

2) JANKA 球 (直径 11.284 mm), KRIPPEL 球 (31.834 mm) のように硬さを求める計算を容易にしたもの。

圧入深さについて

- 1) 圧入深さの大きいもの (JANKA の方法, 5.64 mm)。
- 2) 荷重を一定とするため, 深さには大きな範囲のあるもの (WARREN の方法)。
- 3) 深さをあまり大きくしないようにするもの (井口, BRINELL/MÖRATH の方法)。
- 4) 深さの適度のところで一定にするもの (KRIPPEL, JIS の方法)。

このように球圧入法には種類多く, それぞれ得失を有している。これらについては実験資料にもとづき後に論ずる。

5. 針 圧 入 法

針 (needle) を用いる方法は古くは M. BÜSGEN (1904)¹⁹⁾ によって行なわれた。しかしこれは前述の直径 11.284 mm の球を用いる JANKA の方法の実現によって行なわれなくなった。しかし H. MAYER-WEGELIN (1950)¹⁸⁾ によって Härtetaster として再び用いられるようになった。この方法については, 著者は実験による検討を行なっていないので, やや詳しく述べる。

BÜSGEN の方法は針を試験面に 2 mm の深さまで圧入するに要する荷重を測定し, これを硬さ数とするもので, 約 200 種類の木材についてその横断面と縦断面に試験を行なっている。この試験結果では大体において縦断面の方が横断面より大きい荷重を必要としている。

MAYER-WEGELIN の Härtetaster では蓄音機の針を用い 30 g の荷重でそれを試験面に圧入し, その深さを 1/100 mm 読みのゲージで測定する。この方法を 0.25 mm 間隔で行ない圧入深さの変化を記録する。この場合針の圧入される深さは大体 0.2~2.0 mm の範囲で, リグナムバイタのように最も硬い材で平均 0.21 mm, バルサのように最も軟らかい材で 4.14 mm となる。また深さ測定ゲージの O 点調整はガラス板上で行なう。この方法が用いられた目的は円盤上における半径方向の硬さ (針の圧入深さ) の変化, とくに春・秋材におけるその差を調べることにあつたようである。このため球・円筒・長方形などによる硬さ試験とは全く異なるものである。

Härtetaster による試験では BÜSGEN の場合と同様, いかなる樹種においても縦断面より木口面の方が針の圧入深さが大きく, 球圧入による硬さとは一致しない。これについて MAYER-WEGELIN は球による硬さは圧縮強さに, 針による硬さは割裂強さに似ていると述べている。また針による硬さの木口面と側面との差は木材の比重が大きくなれば少なくなると述べているが, これは比重が大きいものでは木材構成要素が密になるので当然であろう。さらに側面におけ最大値と最小値の差は, 木口面におけるそれよりも小さい

というが、これも木材細胞の配列から理解できる。H. von PECHMANN (1954)³⁶⁾ はトウヒ材の機械的性質のひとつとして、その円盤について MAYER-WEGELIN の援助のもとにこの Härtetaster による試験を行なっている。そして PECHMANN はこの方法は BRINELL の方法よりもより正確で明瞭であると述べている。このように針を用いる方法は生長と材質との関係、前述のような春・秋材についての材質のちがいなど微小部分における材質の差異を求めるのに適した方法で、PECHMANN がこの方法を採用したことに同意できる。最近この針の先端を平らにしたものを H. H. SACHSSE (1960)³⁷⁾ が用いて試験している。

しかしこの方法を構造材の硬さ試験に用いるときは、その得られる値の範囲が非常に大きいこと、非常に多くの測定によって圧入深さの差を得、その後平均値が求められること、また木材以外の物質との比較はできないことなどその目的に適しない点が多く、構造材に対する硬さ試験方法としては適当な方法とはいえない。

6. 円錐圧入法

円錐 (cone) を圧入する方法は P. LUDWICK (1908)³⁸⁾ によって BRINELL の方法を簡単にし、また荷重ならびにヘコミの深さに無関係に硬さ数がえられるようにするために考案された。LUDWICK はこれについて次のように述べている。“金属およびその他の材料について AST, BENEDICKS, BREUIL, BRINELL, LECHATLIER, DILLNER, LEON, MALMSTRÖM, REJTO らの研究によると BRINELL 硬さ数は使用する球の直径と荷重によって影響される。同じ荷重の場合は小さい球を用いたときが、また同じ球の場合は大きい荷重を用いたときが硬さ数は大きい。この原因として「比例抵抗の法則」から、硬さ数の球および荷重の大きさに対する関係はできたヘコミの幾何学的非近似性にその理由があることがあげられ、これを解消するために円錐圧入法を提案する。”

この方法では BRINELL の硬さ数 (Härtezah) に対し、円錐圧入硬さ (Kegeldruckhärte) という表現を用い、荷重除去後残ったヘコミの単位面積に対する荷重をもって表わしている。この場合の円錐の先端の角度は 90° および 120° である。LUDWICK は金属について試験しているが、これを木材に適用させたのが、F. HÖPPLER (1940)* の Konsistometer である。

W. KUMICHEL & D. HOLZ (1955)³⁴⁾ は球圧入法について次のように述べている。“ドイツにおける木材の硬さ測定の方法は今日においてもなお満足させるものはない。個々の硬さ試験方法にみられる欠点および付随する応力が今日においてもドイツになおきまった木材の硬さ測定法がない原因である。一般には BRINELL および JANKA の方法が欠点をもつにもかかわらず用いられている。球を用いる場合にはその直径を大きくして測定の誤差を少なくする方法がとられる傾向がみられる。KRIPPEL の方法 (直径 31.834 mm の球を深さ

* W. KUMICHEL & D. HOLZ (1955)³⁴⁾ による。

2 mm 圧入する)においても JANKA の方法と同様、荷重下の球によるヘコミが硬さ数測定
の根拠となっている。これには木材の弾性的ヘコミを加えたものが入っているので、その
算出した硬さ数値は常に低い。また球使用の場合、ちがった荷重では生ずるヘコミに幾何
学的近似性がない。”

このような理由から両氏は一定の角度をもつ円錐を圧入する HÖPPLER-Konsistometer
の使用を提案している。この円錐の角度は $53^{\circ}08'$ で、これを用いると常にヘコミの深さ
とその直径は同じになる。この円錐に適した荷重をもって 60 秒間試験面に圧入させ、の
ち荷重を除去し 30 秒経てから 0.01 mm の精度でヘコミの深さを読む。硬さ数 Härtezahl
(Kegelfieβpunkt) F_k は次式で求める。

$$F_k = \frac{\text{荷重}}{\text{投影面積}} = \frac{4G}{T^2\pi} \left[\frac{\text{kp}}{\text{cm}^2} \right]$$

ここで G は荷重 (kp=kilopond), T はヘコミの深さ (cm) である。

円錐圧入のときの荷重と硬さ数 (Kegelfieβpunkt) との関係は KUMICHEL & HOLZ に
よると次のようになる。“KICK の相似法則によれば生じたヘコミの面積は用いられた荷
重に比例する。それ故に求められた硬さ数は荷重とは同じ関係にないことになる。しかし
H. von WEINGRABER (1952) によればこの G/F という比例関係は円錐には期待できず、し
たがって硬さ数は常にヘコミの深さと体積との函数となり、また試験される材料の性質に
より荷重の増加とともにヘコミの周囲に周壁または底が生ずる。実験によると円錐圧入に
よる荷重とヘコミの深さとの関係は上方に凸な放物線であらわされる。理想的な放物線は
生じたヘコミの面積が荷重と比例して変化し、得られた硬さ数は使用した荷重とは無関係
に常に一定であることを示す。しかし実験による関係曲線は厳密な放物線とは異なるので
硬さ数は荷重によって変化する。すなわちブナ材についての実験では荷重の小さいときは
硬さ数は大きく、その後荷重の増加とともに減少し、荷重 $G=35$ kp のとき最小値となり、
その後荷重の増加とともに硬さ数は再びわずかずつながら増加する。”

両氏の試験においては生じたヘコミの深さを荷重除去後測定しているが、この荷重除
去後もどる弾性的復元量 (die elastische Rückfederung) はブナ材 ($u=12\%$) で荷重 50 kp
の場合荷重除去後の深さ 2.84~2.94 mm に対し、0.19~0.38 mm である。この量は弾性係
数の大きい木材では大きく、また繊維飽和点までの水分上昇とともに大きくなり、繊維飽
和点では全乾時の数倍となる。このため荷重下のヘコミの深さによると硬さ数は低くなり、
また不明確であると結論している。

以上が KUMICHEL & HOLZ の研究の主要な部分であるが、この方法における最大の欠
点は適用荷重の決定が非常にむずかしいことである。両氏は種々の荷重を用いた実験の結
果から、ブナ材およびマツ材に対し最適の荷重はそれぞれ 40 および 20 kp であるといっ

いるが、これらの最適荷重を決めるために数多くの試験を行なわなければならないというのはまことに不便である。しかも前述のように荷重が変われば求められる硬さ数も変化するという問題もあり、またその測定法に弾性的復元量を除くため荷重除去後にヘコミの深さを測定するというのも納得できない。この理由については後述する。

関谷 (1939)⁴⁹⁾ は LUDWICK の円錐圧入の方法を木材に適用した結果について次のように述べている。“BRINELL 試験機をもって頂角 90° の鋼鉄円錐を試片面に押し込んでみたが、この場合荷重撤去後はヘコミは著しく回復してかなり甚だしい Nailoid 状を呈することを知った。また圧入具が円錐であるため試片面上の位置により、春・秋材の関係位置などが影響して、いろいろ異なる結果が得られるものと考えられるから、木材の試験法としてはあまり適当なものとは思えない。”

円錐を用いた HÖPPLER-Konsistometer について、さらに F. NEDBAL (1957)²⁴⁾ は BRINELL の方法 (10 mm 球使用) と比較している。そこではこの両法について荷重とヘコミの深さの測定を次のようにし実験を行なっている。すなわち円錐の場合は KUMICHEL & HOLZ と同じく、適応した荷重を 60 秒間かけ、のち荷重を除去して 30 秒経てからヘコミの深さを 0.01 mm の精度で測定、また 10 mm 球のときは荷重を 30 秒間かけ、のち荷重を除去して 30 秒たってからヘコミの深さを 0.01 mm の精度で測定している。また一方 BRINELL の方法では荷重 50 kg で 10 mm 球を圧入したとき、ヘコミの深さとその直径とから求めた硬さ数を比較しているが、この場合硬さ数 3 kg/mm² ぐらいまではヘコミの深さとその直径から求めた値はよく一致するが、硬さ数がこれより大きいところではこの両者の差はいちじるしく大きい。これはこの部分では圧入によるヘコミが小さいので、それだけ測定の精度が落ちるためと考えられる。また 10 mm 球を用い、トウヒ・マツおよびブナ材の 3 面について荷重 10~50 kg について 10 kg ごとに BRINELL 硬さ数を求めているが、一般的には荷重の増加とともに硬さ数の増加がみられる。しかし個々の例についてみると、トウヒおよびマツ材では 20~50 kg では硬さ数は安定し、ブナ材ではこのような安定性は認められない。これらのことから NEDBAL は“50 kg 以外の荷重を用いた場合には得られた硬さ数はそれらの比較において全く信頼性はなく、硬い木材において規準荷重 (50 kg) に対し多くの場合、より小さいか大きいかである。”と述べている。一方“円錐圧入の場合は荷重の増加によって硬さ数は減少しはじめるが、最適荷重に達すると硬さ数は安定する。それ故に大きな荷重のところでは硬さ数は変化しない。”と述べている。しかし NEDBAL の論文に掲載されているこの両関係を示す図については、同氏のような結論を出しうるかどうかはなほ疑問である。

NEDBAL はこの円錐圧入硬さ数 (Kegelfießpunkt) を求める最適荷重 (P_0) はトウヒ、マツおよびブナ材について、それぞれ 25, 30 および 41 kg で KUMICHEL & HOLZ によるマ

ツおよびブナ材についての値 20 および 40 kp と非常に似ていると述べている。またこの円錐を用いた場合、木材の木口面の側面に対する硬さの比は 10 mm 球圧入の場合とは全く違った値となる。NEDBAL の試験結果ではトウヒ材の場合、木口面の硬さ数を 1.00 とすれば、Kegelfießpunkt はまさ目面 1.43 ± 0.52 、板目面 1.32 ± 0.38 、BRINELL 硬さ数はそれぞれ 0.48 ± 0.24 、 0.54 ± 0.52 である。このように BRINELL 硬さ数では木口面 > 板目面 > まさ目面となるが、Kegelfießpunkt は逆にまさ目面 > 板目面 > 木口面となる。さらに円錐圧入硬さと球圧入硬さとの関係では、木口面の場合この両硬さは比例的傾向をもつが、側面では円錐圧入硬さがはるかに大きく、木材をとりあつかう場合の実感とはかなり違った値となっている。木材の繊維・板目およびまさ目の 3 方向についての圧縮および部分圧縮試験における荷重に対する歪量(たとえば山井^{52,53})は球圧入の場合と同じような傾向をもっているので、構造材に対するこれらの試験を簡略化した試験方法として硬さ試験方法を取りあげるときは円錐圧入法は全く不適であるといえる。

この円錐圧入法は上述のように、針圧入法と球圧入法の間のような方法であるが、その適用にあたってはいろいろ不便な点がある。すなわち、荷重の変化により得られる硬さ数は大きく変化し、しかもその変化に一定性がない。この方法の提唱者たちは最適荷重の選定に多くの実験を行なっている。また先端が鋭利なため荷重 0 における深さを測定するゲージの調整がむずかしいと考えられ、したがってそのヘコミの深さ測定も正確に行ないうるかどうかという疑問も生ずる。さらに上述の関谷の批判のほか、G. JANKA⁹⁾ もすでに球 (JANKA 球)、円錐、くさび (後述) および長方形の 4 者の圧入試験の結果、円錐圧入法 (59° の先端角をもつ円錐を試験面に深さ 1 cm 圧入する。この場合ヘコミの投影面積は 1 cm^2 となる) では球圧入法によるより低い値が得られ、また木材のような不均質のものには適さないとして、結局、JANKA の方法といわれる球圧入法を提唱したのである。

7. くさび圧入法

くさび (wedge) を圧入する方法は上述のように G. JANKA⁹⁾ が試験的に行なったものである。JANKA の行なった方法はすべて加圧下のヘコミの投影面積が 1 cm^2 になるようにつくられている。すなわち、くさびは幅・高さ・長さすべて 1 cm で、1 cm 圧入したときヘコミの投影面積は 1 cm^2 となる。このくさび圧入のときは、JANKA によると圧入深さに対し正しく比例して抵抗は増大する。しかしこれに対し JANKA はその圧入にはそのエッジによる切断力、両端における剪断力およびくさびによる割裂力の複合した力が働くので、長方形面圧入の場合と同様、木材の硬さ試験には適さないと述べている。

以上いままでに行なわれた硬さ試験方法の主なものを列挙したが、次のように要約できる。

長方形・円形のような底の平らなものを試験面に圧入する方法は、硬さ試験としてで

はなく部分圧縮試験として取り扱うべきである。円筒の側面を圧入する MONNIN の方法は木材の3面について行なうには不便であり、また荷重—硬さの関係の問題もあり、現状の試験方法では適当な方法とはいえない。針を圧入する方法は木口面における細かい組織の変化を測定できるので、春・秋材の比較、生長と材質というような研究に適している。円錐を圧入する方法は適応荷重の決定がむずかしく、そのほか他の方法よりすぐれている点もないので適切なものとはいえない。くさび圧入法は割裂試験に近いもので、硬さ試験方法としては適切でない。これに対し、球圧入法では上記の諸方法にみられるような欠点は少なく、また測定方法の改良により木材に対する最適な静的硬さ試験方法となりうるものがあると考えられるので、以下この球圧入方法を主として実験資料により検討を加えることにする。

II. 静的押しつけ硬さ試験における荷重とヘコミの深さおよび硬さ数との関係

球・円筒など静的押しつけ硬さ試験に用いられる加圧体を、木材の試験面に静的に押し込む場合、荷重とヘコミの深さ、さらに荷重と硬さ数との関係はどのように変化するかということについて種々論ぜられているが、その結論は一様ではない。これは圧縮試験・引張試験・曲げ試験などの場合にみられる荷重—ひずみ(たわみ)曲線がほとんど同じような傾向を示すのとは異なるからである。これはさきに球圧入試験においてその種類を種々の因子により分類したように測定方法における相違が原因となっている。すなわち球の静的圧入において、(1)ヘコミの深さの測定法と(2)荷重のかけ方の2つの問題がある。以下これら2つの問題について論ずる。

1. ヘコミの深さの測定法

球を用いた硬さ試験では J. A. BRINELL (1900) の初期のものから E. MÖRATH (1932)²²⁾ の改良したもの、さらに現在 FAO の繊維板に対する試験方法⁹⁾ においても荷重除去後、ヘコミの直径を測定する方法がとられている。この場合には試験前に球にすずをぬるか、試験時にカーボン紙を球と試験面の間に入れ、生ずるヘコミの直径の測定を行ないやすいようにする。

一方わが国ではこのようにヘコミの直径を測定する方法はほとんど用いられず、ヘコミの深さを測定する方法によって試験が行なわれてきた。しかしこの場合、前述したようにこの測定を荷重をかけたまま行なうか、その除去後に行なうかという問題がある。

ヘコミの深さの測定を荷重除去後に行なうということの理由について次のような見解がある。すなわち、北原(1947)¹¹⁾ はミズメ材の木口面に 10 mm 球を圧入し荷重 10 kg から 100 kg まで 10 kg ごとに次の2種の圧入深さを測定した。ひとつは深さ測定のダイヤルゲ

ージの針の動きが1分間に肉眼で認められなくなったときの深さ、他は荷重除去後5分経たときの深さである。この2種の深さについて荷重との関係を見ると荷重除去後の深さによる方が直線性の精度が高いので、この深さを用いるよう提案した。一方円錐圧入法で述べたように W. KUMICHEL & D. HOLZ (1955)¹⁴⁾ は鋼球圧入によるへこみには弾性的へこみが入っているので硬さ数からこれを除外するため荷重除去後の深さを測定している。

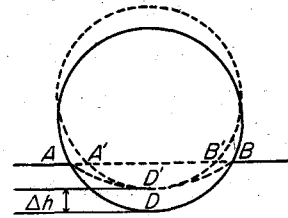
これに対する著者(1954)³²⁾ の意見は次のとおりである。すなわち、球を試験面に圧入するとき、荷重下の球の位置は第2図において \widehat{ADB} となり、これがへこみの表面積算出の基礎となるものである。このときのへこみの直径 $AB=d$ と深さ h との間には

$$h = \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2}, \quad d = 2\sqrt{h(D-h)}$$

という関係がなりたつ。ここで D は球の直径である。荷重除去後にへこみの深さが Δh だけ回復したとすれば、そのときのへこみの縦断面は $\widehat{AD'B'}$ という形となり、 $\widehat{A'D'B'}$ とはならない。すなわち最深部(中央部)のへこみの深さが大きく回復するに対し、周辺部にいくにしたがいその回復は少なくなり、特に木口面の場合最外周での回復はほとんど認められない。また前述のようにへこみの直径から硬さ数を求める場合には球にすずをぬるか、カーボン紙を用いるので、荷重除去後もへこみの直径は荷重下と同じはずである。このように荷重を除いた場合へこみの深さは回復するが、その直径は荷重下と同じものが測定できると考えてよい。これは緒方²⁶⁾ のヒノキの木口面についての試験結果からも明らかである。すなわち木口面においては荷重を除いたのちのへこみの直径から求めた硬さ数は、加圧中のへこみの深さから求めたものに非常に近い値を示している。

ここで荷重除去後の深さ $(h - \Delta h)$ を測定し、これから計算すれば $\widehat{A'D'B'}$ という実在しないへこみの表面積を求めることになり、へこみの単位表面積に対する荷重をもって硬さ数とする BRINELL の方法と合致しなくなる。

また実際にこれらを確認するため次のような実験を行なった。すなわちミズナラ材の繊維方向に3個連続した試験片(横断面 5×5 、長さ 2.5 cm の2方まき)を1組とし、そのひとつを生材状態で、他のひとつを気乾状態、残りを全乾状態として東京衝機製のレバー式定荷重の硬さ試験機を用いて 10 mm 球を圧入した。試験回数は木口面 27 回、側面 18 回



第2図 球圧入によるへこみの状態
Fig. 2. Sketch of deformation of wood specimen due to static ball indentation. \widehat{ADB} : Impression under a dead load. $\widehat{AD'B'}$: Impression after removal of the load. $\widehat{A'D'B'}$: Impression calculated from the depth measured after removal of the load.

ないと考えられる。たとえばこれを除けばゴム、スポンジなどの硬さ数は無限大ということになる。JES 建築 3107 による硬さ数は長時間荷重による値に比べ、生材の木口面で3.3倍、その側面および気乾材の各面で1.6倍、全乾材の各面で2.0倍である。これはこの実験についてのみで、樹種が異なれば、荷重除去後のヘコミの回復率も当然異なるものと思われる。JES 建築 3107 によって硬さ試験を行なった結果⁵¹⁾と荷重下で測定した結果^{19,29,30,31,45,46,50)}とを比較すると、両者の差は針葉樹材の木口面では少ないが、その側面および広葉樹材の各面では大きく、前者は後者の約2倍の値となっている。

JIS Z 2117 (1957) によるときは球の圧入速度を毎分 0.5 mm とし、 $1/\pi \approx 0.32$ mm の深さまで圧入するので、圧入に要する時間は 38 秒となり表中の荷重をかけたまま 30 秒経たとき測定した硬さ数に近い値を示すと思われる。この表で 30 秒経たときの値に対し長時間荷重による硬さ数は生材および気乾材で 82~88%、全乾材で 90~97% である。JIS によらず一定の荷重をもって試験するときは比較的長い時間 (3~10 分) 荷重をかける方法が測定誤差を少なくするので、この長時間荷重の方法が BRINELL の方法として、JIS 設定以前に多く用いられているが、上述のように JIS 硬さ数よりもこの方法による値は全乾材で 3~10%、気乾材および生材で 10~15% 小さいと思われる。

2. 荷重とヘコミの深さおよび硬さ数との関係

BRINELL/MÖRATH の方法は前述のように 10 mm 球を用い、荷重を 50 kg とするが、特に硬い材には 100 kg また軟らかい材には 10 kg とするため、これについて N. PALLAY (1938)³⁹⁾ は次の 3 点をあげ批判している。

- 1) 球圧入の荷重を 3 種類設けることは繁雑となり、また前もって試験しようとする木材の大略の硬さを知らねばならない。それはまた一律的な比較の基礎を与えない。
- 2) ヘコミの平均直径から硬さ数を求めることは特に板目およびまさ目の硬さ数を不確実なものにする。
- 3) 鋼球および荷重は小さ過ぎて実用に適しない。

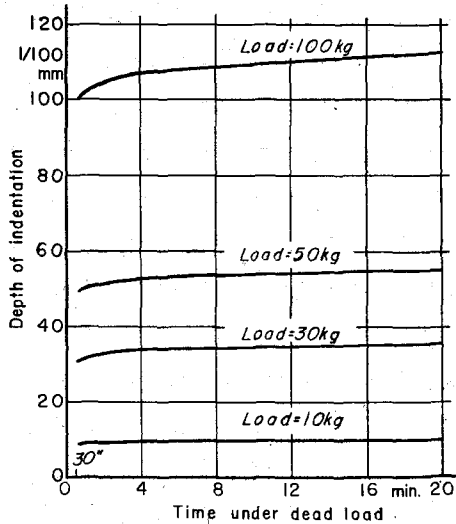
この 1) に述べられたことは、荷重を変えれば、えられる硬さ数にも変化があるということである。これについては前述したように、P. LUDWICK¹⁵⁾ は“同じ荷重の場合は小さい球を用いたときが、また同じ球の場合は大きい荷重を用いたときが硬さ数は大きい”と述べ、K. HUBER²⁾ は最大硬さ数を示すところがあるといい、また関谷⁴²⁾ の実験においては荷重の増加とともに硬さ数は減じている。このように種々の見解がある。これに対し著者 (1952)³⁹⁾、(1955)³⁹⁾、(1961)⁴¹⁾ は 10 mm 球圧入の場合荷重またはヘコミの深さのある範囲内では荷重が変わっても BRINELL 硬さ数は変わらないと主張してきた。これは上述の範囲内では荷重とヘコミの深さとが直線関係にあるため、これと同様のことは井口 (1935)⁴³⁾、北原 (1947)⁴⁴⁾、S. GREENE (1959)⁵⁾ らによっても明らかにされている。しかしこの両者の関係

を求める場合には球の圧入速度、荷重速度または荷重時間の条件がつけられる。この荷重とへこみの深さおよび硬さ数との関係を荷重の条件を変えた場合について以下において論ずるが、その前に静止荷重下におけるへこみの深さの変化について述べる。

(1) 静止荷重下におけるへこみの深さの変化

木材の表面にある荷重で球を押しつかけると、最初大きくへこむが、へこみ方は徐々に遅くなり、ついに肉眼的に静止したと認められるようになる。ミズナラの気乾材の木口面に直径 10 mm の球を圧入して行なった実験のうちの 2 例を第 3 図および第 2 表に示す。第 3 図に示すのは荷重を 10, 30, 50 および 100 kg とし、それぞれ同一試片上の別の位置に行なった実験結果で、各荷重に達してから 30 秒経たときにまずへこみの深さを読み、その深さの変化がはげしいうちは 30 秒おきに、そののちは 1 分おきに測定し、各 20 分間測定したものである。この図から明らかなように荷重が大きければ大きいほど、へこみの深さが安定するに要する時間は長くなる。一方第 2 表に示すのは同一点に荷重を 10 kg から 50 kg ま

で増しながら測定した結果である。まず 10 kg の荷重をもって 10 mm 球を圧入し、その荷重になってから 30 秒経たときのへこみの深さを読み、そのまま荷重をかけておき、へこみの深さを示すダイヤルゲージの針の動きが 1 分間内において肉眼的に認められなくなったときの深さを測定し、その後荷重を 10 kg ずつ増しこの方法で測定したものである。カッコ内はこの測定に要した時間 (分) である。表中の A/B に示すように、へこみの深さ測定における誤差を考慮しなければ、荷重が小さいほど、すなわちへこみの深さが小であるほど



第 3 図 定荷重下におけるへこみの深さの変化
Fig. 3. Variation of indentation depth under dead load. Tested on the end surface of air-dried Mizunara-wood.

第 2 表 定荷重下におけるへこみの深さの変化
Table 2. Variation of indentation depth under dead load.

Load (kg)	Depth (1/mm)		Ratio A/B
	at 30 sec. (A)	after long time* (B)	
10	11.5	12.0 (5 min.)	0.96
20	20.3	21.8 (7 min.)	0.93
30	31.0	34.2 (12 min.)	0.91
40	40.0	45.0 (18 min.)	0.89
50	48.4	57.0 (19 min.)	0.85

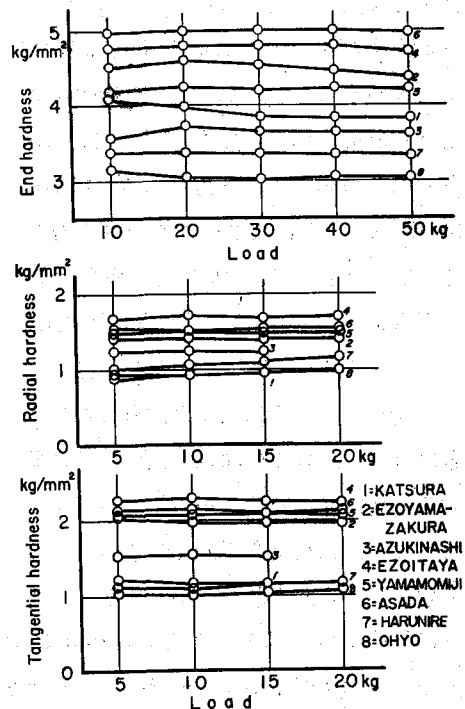
(Remarks) * The depth was measured when variation of the dial indicator (1/100 mm) under the dead load in one minute became unrecognizable by the naked eye. Tested on the end surface of air-dried Mizunara-wood by using a 10 mm ball.

荷重時間の影響は少ないといえる。このように荷重が同じでも荷重時間によって荷重とヘコミの深さとの関係は変ってくる。

(2) 長時間荷重の場合

まず 10 mm 球を用い、一定の荷重を長時間かけた場合における荷重とヘコミの深さおよび BRINELL 硬さ数の関係を求めた。これには北海道産広葉樹材 8 種を用い、前述の定荷重の木材硬さ試験機で試験を行なった。試験片は 5 cm 立方の正確な 2 方まき木取りとし、1 樹種 5 個につき、木口面に各 9 回、側面には各 5 回の試験を気乾状態で行なった。木口面では荷重 10 kg ごとに 50 kg まで、側面では 5 kg ごとに 15 kg または 20 kg まで荷重を増しながら生じたヘコミの深さを 0.01 mm 読みのダイヤルゲージで測定した。この深さは各荷重ごとに荷重をかけたまま放置し、ダイヤルゲージの動きが 1 分間において肉眼的に認められなくなったときに測定された。このため前述したようにヘコミの深さが増すにつれて測定には長時間を要した。この試験の結果えられた荷重と硬さ数との関係を第 4 図に示す。この図における各点は平均値である。

この結果から、この試験の範囲では硬さ数は荷重の変化にかかわらず、一定であるといえる。これは荷重とヘコミの深さとが直線関係にあるためである。すなわち BRINELL 硬さ数 (H_B) は $H_B = P/\pi Dh$ (ここで P , D および h はそれぞれ荷重、球の直径およびヘコミの深さ) で求められるので、 P と h とが原点を通る直線関係にあれば H_B は一定値を示すことになる。この図において、木口面の場合カツラおよびアズキナシ材の 10~30 kg の間で、この関係はやや乱れているがその後一定値を示すので、これらは測定の誤差の影響と考えられる。実際個々の資料についてみると荷重の小さいときにこのように関係が乱れることがあるが、平均すると上述のような結果となる。この測定の誤差には荷重 0 点におけるゲージの針の 0 への調整および試験片の仕上げの状態も入る。このような誤差と荷重時間による影響を除くためには、実験結果からヘコミの深さを 0.3~0.6 mm 程度にすればよいと考えられる。



第4図 荷重と BRINELL 硬さ数との関係

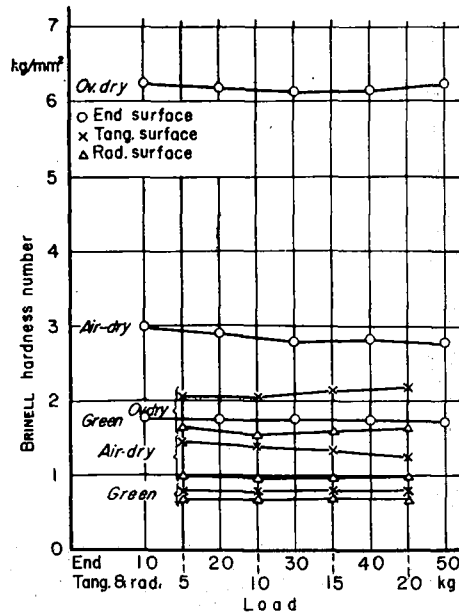
Fig. 4. Relation between load and BRINELL hardness number.

一方含水率が異なった場合、すなわち生材および全乾材についても気乾材と同様の結果がえられる。第5図にミズナラの生材、気乾材および全乾材について同様の方法で行なった試験の結果を示す。試験片の大きさおよび処理方法は第1表の試験の場合と同じである。試験片の数は各含水状態3個ずつ、図上の各点はそれぞれ木口面27回、側面18回の試験の平均値である。

BRINELLの試験方法について一般に“静かに荷重を与え、かつ、ある時間最大荷重のまま放置して、できるだけ時間の影響を除き、一定の荷重が時間とともに変ぜざるを限度として、試験片上に印せられたへコミの球面積を見出す(小野)³⁰⁾”ときめられている。この規定にもとづき著者は10mm球を用いたBRINELL硬さ試験について、次のように結論した^{31, 32, 19)}。

- 1) 荷重は静かに与え最大荷重のまま30秒以上放置してできるだけ時間の影響を除くこと。
- 2) へコミの深さの測定は荷重をかけたまま行なうこと。
- 3) 上述の方法で測定すれば、荷重またはへコミの深さの後述するようなある範囲では荷重の変化にかかわりなく、えられる硬さ数は一定である。このため適用荷重が異なっても硬さ数の比較は可能である。
- 4) しかし荷重が小さ過ぎるときは測定誤差が大きく影響し、また大き過ぎるときはへコミの安定に長時間を要するので、へコミの深さが0.3~0.6mmぐらゐの範囲になるような荷重を選ぶこと。

一方このBRINELLの方法について、井口⁹⁾はつぎのような検討を行なっている。すなわち、へコミの深さをできるだけ小さくするためと、ひとつのへコミ内の年輪数を多くするために直径20および30mmの球を用い、数種の木材について荷重と硬さ数との関係を求めた。この結果について“荷重がある大きさ以上になれば、硬さは荷重に関係なくほとんど一定となる。この一定の硬さを与えるような範囲における荷重は比較的小なる荷重であって、へコミの深さも0.2~4mmであり、極めて小であるので、へコミの周囲に亀裂等



第5図 荷重とBRINELL硬さ数との関係 (ミズナラ材)

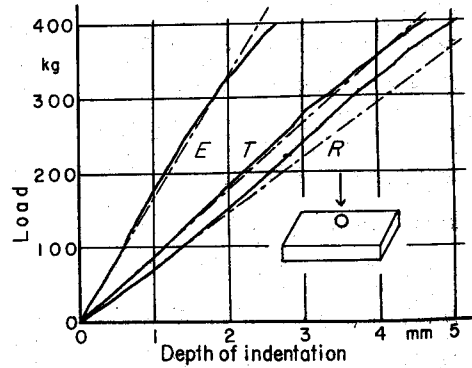
Fig. 5. Relation between load and BRINELL hardness number. (Species: Mizunara)

の生ずるおそれは全然なく、この方法が硬さ試験に相当していることを示す”と述べ、前述のように直径 30 mm の球を、柔材には 50 kg、堅材には 100 kg の荷重で 5 分間圧入し、ヘコミの深さを測定する方法を提唱した。この方法は球の大きさを除けば、著者と同じ考えかたからでている。前述の 10 mm 球使用の場合の著者の結論とこの 30 mm 球使用の場合の井口の方法はともに BRINELL 硬さ試験方法における基本的なものといえる。これらの方法における欠点は試験に要する時間がやや長いことである。この改良例 (JIS および 30 mm 球) については後述する。

この長時間荷重による場合の荷重—ヘコミの深さの関係についてはほかに北原¹³⁾の研究がある。すなわち、前述したような試験の結果から、荷重下のヘコミの深さよりも荷重除去後 5 分経たときの深さの方が荷重との間に直線関係が明瞭であると述べている。一方 F. NEDBAL も荷重除去後の深さを測定し硬さ数を求めているが (試験方法は p. 551 に記載)、そこでは硬さ数に一定の傾向は認められずまたその変化も大きい。このように荷重除去後のヘコミの深さをを用いるときは荷重に対し一定の傾向が認められない場合もあり、またヘコミの深さの測定方法で述べたような理由によりこの方法は合理的とはいえない。

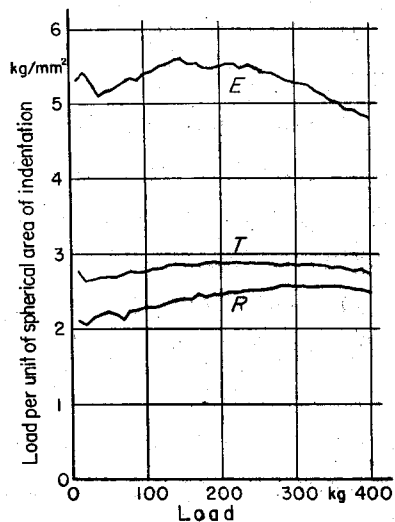
(3) 荷重速度を一定とした場合

荷重速度を一定として、球・円筒および円形面を木材に圧入した場合えられる荷重とヘコミの深さの関係を比較するため、次のような実験を行なった。すなわち、シロザクラ気乾材の木口、板目およびまさ目の 3 面に、手動式アムスラー型 4 トン木材試験機 (荷重能力切換 4000 kg および 400 kg の 2 種) により荷重をかけ、ヘコミの深さをその支柱に固



第6図 10 mm 球圧入の場合の荷重とヘコミの深さとの関係 樹種: シロザクラ
E: 木口面 T: 板目面 R: まさ目面

Fig. 6. Relation between load and depth of indentation. Ball: 10 mm in diameter. Species: Shirozakura. In this figure, E, T and R show tests made on the end, tangential and radial faces, respectively.



第7図 前図と同じ試験における荷重と BRINELL 硬さ数との関係

Fig. 7. Relation between load and BRINELL hardness number for the same tests as shown in figure 6.

第3表 10 mm 球圧入試験の総括 (シロザクラ気乾材)
 Table 3. Summary of 10 mm ball indentation test.
 (Air-dried Shirozakura-wood)

Surface tested (No. of tests)	Av. ring width (mm)	Specific gravity*	Moisture content (%)	BRINELL hardness** (kg/mm ²)
End (5)	Av. 1.4	0.56	12.8	5.18
	Max. 1.7	0.56	12.8	6.37
	Min. 1.0	0.56	12.8	4.42
Radial (4)	Av. 2.0	0.53	15.5	1.96
	Max. 2.2	0.57	14.5	2.28
	Min. 1.8	0.49	14.5	1.59
Tangential (4)	Av. 1.9	0.55	14.6	2.48
	Max. 2.3	0.59	14.7	2.79
	Min. 1.5	0.51	14.5	2.12

*: Based on oven-dry weight and air-dry volume,

** : Based on 50 kg load.

定したダイヤルゲージ (1/100 mm 読み) により測定した。試験片の大きさは円筒側面加圧の場合は MONNIN 法にもとづき加圧面 2×10 cm, 厚さ 2 cm とし, ほかは加圧面 7.5×10 cm, 厚さ 2 cm である。

(i) 10 mm 球圧入

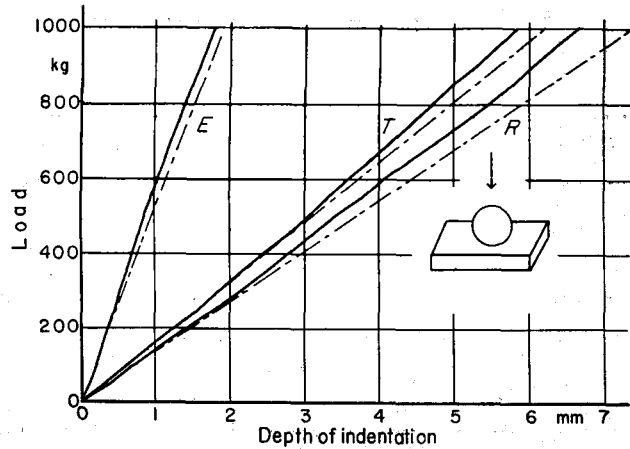
荷重の速度を毎分 20 kg とし, 荷重の 10 kg ごとにヘコミの深さを測定し, 荷重が 400 kg またはヘコミの深さが 5 mm (球の半径) になるまでこれを続けた。この実験によってえられた荷重とヘコミの深さの関係を第 6 図に, 荷重と BRINELL 硬さ数の関係を第 7 図に示す。またこの実験における 50 kg 荷重のときの硬さ数を第 3 表に示す。第 6 図および第 7 図は木口面 5, まさ目および板目面各 4 個の平均値についてのものである。

第 6 図に示す荷重—ヘコミの深さの関係において, 荷重 50~100 kg の範囲まででは原点をとる直線関係がみられるが, これ以上になるとこの直線からはずれる。これから求めた第 7 図の荷重—硬さ数の関係は上述の荷重の範囲において木口面では硬さ数は 5.1~5.6 kg/mm², 板目面では 2.6~2.9 kg/mm², まさ目面では 2.1~2.3 kg/mm² の幅のなかで多少の変動はあるが, ほぼ一定値を示すとみてよいであろう。この変動は測定の精度が 1/100 mm で, この値が硬さ数に影響しているために生ずるものである。荷重が大きくなると, 荷重—ヘコミの深さの関係は原点をとる直線の上方へ行ったり下方へ行ったりして, 安定したものはならなくなる。しかも静止荷重下におけるヘコミの深さの変化の項で述べたように, 荷重が大きくなれば一層, ヘコミの深さの安定に時間を要するので, JANKA の方法 (ASTM) で規定するように毎分 6 mm の速度で 5.64 mm も球を圧入する場合には硬さ数の測定に種々の問題が起ると考えられる。この場合球の圧入速度が速すぎるということと圧入深さが大きすぎるということは明白である。

この ASTM に規定された方法では実際の測定の場合に適用しがたい場合がある。た

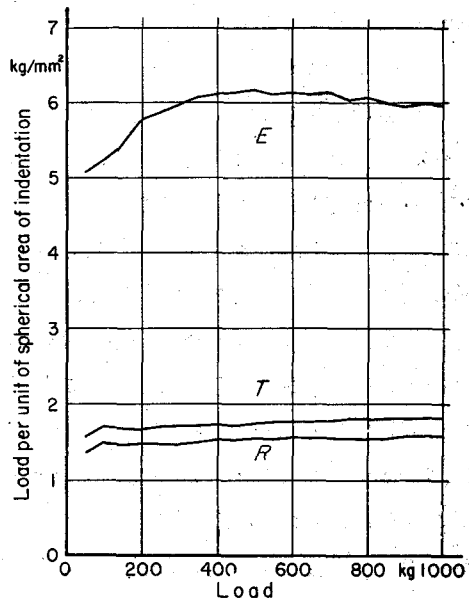
たとえば R. C. WEATHERWAX et al.* は比重の広い範囲の木材について硬さを求めるため前述したような ASTM を改良した方法を用いている。そして S. GREENE⁵⁾ はこの方法を用いてリグナムバイタ材の硬さを測定し、次のように述べている。“規定による ASTM の硬さ試験は特に硬いリグナムバイタ材では試験用の半球を圧入すると材に膨らみが生ずるので不適である。さら

に試験中には材に割れを生ずる。改良試験方法は規定の方法とは異なり、試験用の半球を完全に材に圧入する必要はない。硬さ試験用具の締環をとりぞき、かわりにその軸に 0.001 in. 読みのダイヤルゲージをとりつけ、半球のへこみの深さをある適當の荷重の増加ごとに測定し、荷重—へこみの深さ曲線に直線部分をつくるに充分になるまでこの測定を続けた。そしてこの直線部分の関係から硬さ数をへこみの単位面積に対する荷重 (psi) として求めた。”-このように ASTM (JANKA) の方法はすべての木材に適用しえないという欠点もある。上述の R. C. WEATHERWAX et al. はこの自から提案の方法によって比重 0.13 のバルサ材から 0.70 のシュガーメイプル材までの 11 種の木材の硬さを試験している。この ASTM 改良型はすべての木材に適用しうる



第8図 30 mm 球圧入の場合の荷重とへこみの深さとの関係 樹種：シロザクラ。

Fig. 8. Relation between load and depth of indentation. Ball: 30 mm in diameter. Species: Shirozakura.



第9図 前図と同じ試験における荷重と BRINELL 硬さ数との関係

Fig. 9. Relation between load and BRINELL hardness number for the same tests as shown in figure 8.

* WEATHERWAX, R.C., ERICKSON, E. C. O. and STAMM, A.L.: A means of determining the hardness of wood and modified woods over a broad specific gravity range. *ASTM Bull.* 153. 84-89. 1948 (Cited by S. GREENE⁵⁾).

第4表 30 mm 球圧入試験の総括 (シロザクラ気乾材)
 Table 4. Summary of 30 mm ball indentation test.
 (Air-dried Shirozakura-wood)

Surface tested (No. of tests)	Av. ring width (mm)	Specific gravity*	Moisture content (%)	BRINELL hardness** (kg/mm ²)
End (5)	Av. 1.6	0.55	13.0	5.80
	Max. —	—	—	7.08
	Min. —	—	—	5.18
Radial (6)	Av. 2.3	0.53	14.2	1.55
	Max. 2.9	0.57	14.9	1.66
	Min. 1.9	0.48	13.6	1.35
Tangential (6)	Av. 2.5	0.53	15.1	1.77
	Max. 3.4	0.60	14.5	2.16
	Min. 2.0	0.48	13.4	1.56

*: Based on oven-dry weight and air-dry volume,

** : Based on 200 kg load.

ことおよび荷重とへコミの深さ関係における直線部分から硬さ数を求めることから合理的な方法といえよう。しかし1試験においてかなり多くの測定を要することは試験方法としては必ずしも簡便ではない。

このことは関谷⁴²⁾の方法についてもいえる。すなわち、この方法は10 mm 球を深さ0.5 mm 圧入するに要するエネルギー硬さ数を求めるので、非常に繁雑である。しかも荷重(P)とへコミの深さ(h)との関係を $P = ah^n$ であらわしているので計算は一層めんどうである。

10 mm 球を用いる硬さ試験において、これを一層簡便にするため沢田・辻・近藤(1955)³⁹⁾は球の圧入速度を毎分約0.5 mmとし、10 mm 球を $1/\pi \approx 0.32$ mm 圧入するに要する荷重を測定する方法を提唱した。これがJIS A 1011 (1954)—JIS Z 2117 (1957)—である。この方法は10 mm 球を用いる場合において簡便で、圧入深さが適当さらに測定が迅速に行なわれるので最も合理的であるといえる。

これら10 mm 球圧入方法において一般にいえることは木材に対しては球が小さ過ぎるということである。

(ii) 30 mm 球圧入

荷重速度を毎分100 kgとし、荷重の50 kgごとにへコミの深さを測定し、これを1000 kgまで続けた。この結果を第8, 9図および第4表に示す。

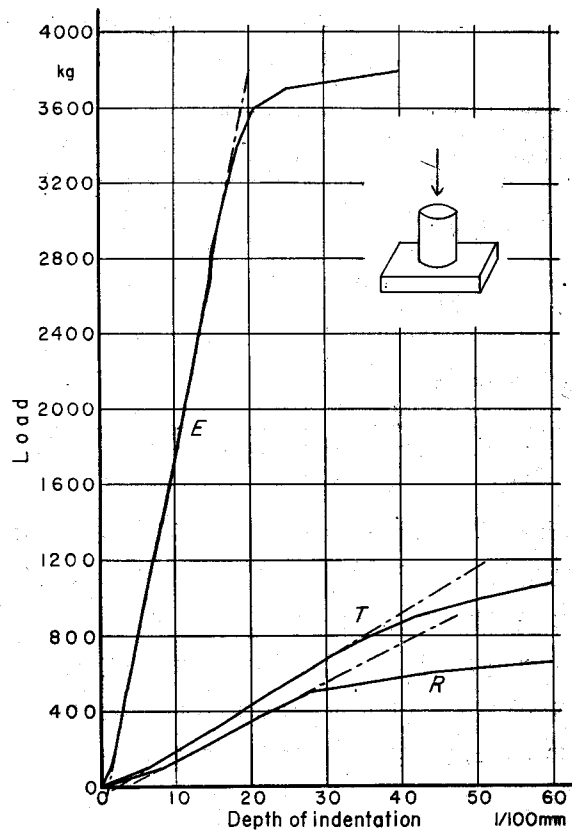
第8図における荷重—へコミの深さ関係は10 mm 球圧入の場合とよく似ている。これから求めた荷重—硬さ数の関係(第9図)において3面とも荷重の初期にあっては硬さ数は増し、のちそれは一定数となる傾向がみられるが、この荷重の初期におけるへコミの深さの小さいときは1/100 mmの精度では前記のようにその硬さ数値にかなり大きく影響するので、ここではへコミの深さの小さい部分における関係について言及することはできな

い。しかし第8図の荷重とへコミの深さとの関係からみて、荷重の初期において硬さ数はほぼ一定、その後は荷重の増加により硬さ数は増すと推察される。

この30mm球圧入方法はFAO第4回木材加工会議でもとりあげられているので、さらに圧入速度を一定にした場合について後述する。

(iii) 30mm円形面圧入

直径30mmの平らな円形面を木材に押しつける方法であるが、これはまだ試験方法として行なわれていないものである。著者はほかの方法との比較のために予備的な実験を行なってみた。すなわち荷重速度を毎分100kgとし、100kgごとにへコミの深さを測定した。この場合荷重の増加によりへコミの深さは直線的に増していったので、この直線関係が終るまで荷重を増していった。試験中の1例を第10図に示す。またその総括を第5表に示す。



第10図 円形面圧入の場合の荷重とへコミの深さとの関係

円形の直径：30mm 樹種：シロザクラ

Fig. 10. Relation between load and depth of indentation.

Circle: 30mm in diameter.

Species: Shirozakura.

第5表 円形面圧入試験の総括 (シロザクラ気乾材)

Table 5. Summary of circular face indentation test. (Air-dried Shirozakura-wood)

Surface tested	No. of tests	Av. ring width (mm)	Specific* gravity	Moisture content (%)	At proportional limit	
					depth (mm)	stress (kg/mm ²)
End	3	Av. 1.5	0.56	12.8	0.21	4.74
		Max. —	—	—	0.23	5.38
		Min. —	—	—	0.16	0.43
Radial	4	Av. 2.2	0.52	14.1	0.28	0.74
		Max. 2.8	0.58	14.5	0.30	0.85
		Min. 1.6	0.49	13.9	0.24	0.71
Tangential	4	Av. 2.4	0.54	14.3	0.44	1.38
		Max. 2.8	0.60	14.5	0.47	1.56
		Min. 1.4	0.49	14.2	0.42	1.28

*: Based on oven-dry weight and air-dry volume.

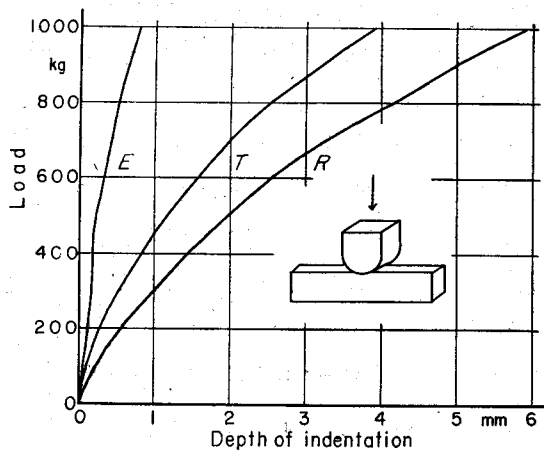
第10図に示す荷重—へコミの深さの関係は、部分圧縮試験による応力—ひずみ曲線とよく似ている (たとえば山井⁵²⁾)。すなわち、荷重の増加によりへコミの深さは直線的に増し、ある点に達するとへコミの深さは急激に増す。このように木口、板目およびまさ目の3面とも明確に比例限度がみられる。H. HOEFFGEN (1938)⁶⁾ が長方形体 (Stempel) をトウヒ、ブナおよびナラ材に圧入して得た応力とへコミの深さ関係においてはいずれも比例限度までは直線関係がみられるが、その後へコミの深さの増加により応力は小さな波状 (増減) を呈しながらゆるやかに増している。

このように底の平らな物体を木材の表面に圧入するときは、その形体が長方形でも円形でも、同じような応力—ひずみ曲線がえられる。HOEFFGEN⁶⁾ によれば、長方形面圧入による硬さ数 (Stempelhärte) は JANKA 硬さ数よりも圧縮強さと密接な関係にある。このため圧縮試験の簡易試験方法としてこの Stempeldruck の方法を推めている。

しかしこれら底の平らな物体を押しつける方法は現行の JIS 木材試験方法における部分圧縮試験と性格がほとんど同じであるので、硬さ試験というよりそのひとつとして考えるのが妥当である。

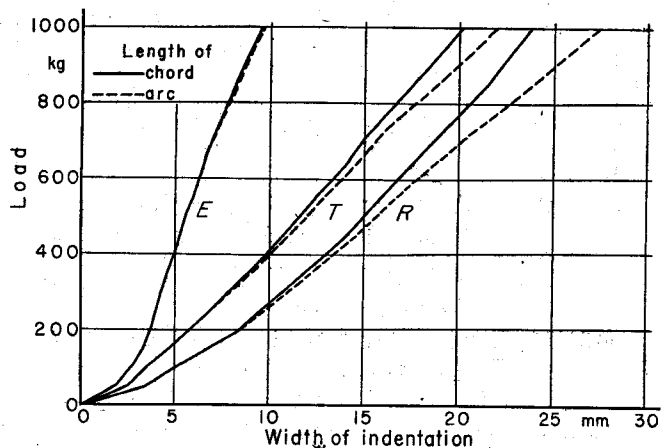
(iv) 30 mm 円筒側面圧入

この実験は MONNINN の方法にもとづいて行なわれたが、同方法の規定以外



第11図 円筒面圧入の場合の荷重とへコミの深さとの関係
円筒の直径 30 mm, 長さ 30 mm
樹種: シロザクラ

Fig. 11. Relation between load and depth of indentation.
Cylindrical face: 30 mm in diameter and 30 mm long.
Species: Shirozakura.



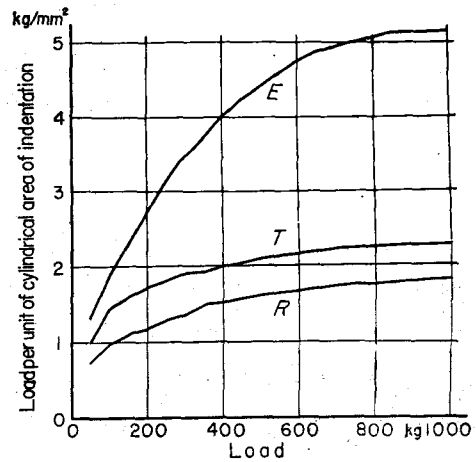
第12図 前図と同じ試験における荷重とへコミの幅との関係

Fig. 12. Relation between load and width of indentation for the same tests as shown in figure 11.

に板目面および木口面にも行なった。また試験の目的は単に MONNIN 硬さ数を求めるということではなく、荷重—へコミの深さ、同幅および単位面積当たりの荷重の関係を探り、また同方法にきめられた2種の荷重(200 および 100 kg) を用いた場合の硬さ数の比較について考究した。

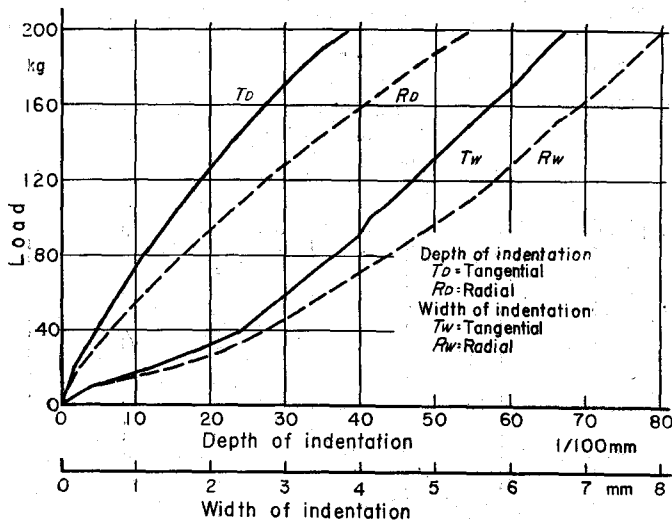
まず、荷重速度を毎分 100 kg とし、荷重の 50 kg ごとに 1000 kg までへコミの深さを測定した。木口面 5 回、側面 4 回の平均値から求めた荷重—へコミの深さ関係を第 11 図に、荷重—へコミの幅(弦および弧の長さ)関係を第 12 図に、荷重—へコミの単位面積あたりの荷重の関係を第 13 図に示す。

第 11 図における関係は 3 面とも曲線であらわされるが、これら曲線のどの部分にも直線関係はない。また第 12 図および第 13 図



第 13 図 前図と同じ試験における荷重とへコミの単位面積あたりの荷重との関係

Fig. 13. Relation between load and stress for the same tests as shown in figures 11 and 12.



第 14 図 円筒面の 200 kg までの圧入による荷重—へコミの深さおよび荷重—へコミの幅の関係
樹種: シロザクラ

Fig. 14. Examples of load-depth and load-width curves obtained by applying load up to 200 kg in indentation of cylinder. In this case, the depth is measured under loading and the width is calculated from the depth. Species: Shirozakura.

における関係についても同様である。これらの関係はいずれも球および円形面圧入の場合のそれと異なる。

次にまさ目および板目について荷重速度を毎分 20 kg とし、荷重の 10 kg ごとに 200 kg までへコミの深さを測定した。この 1 例を第 14 図に示す。この図には同時に荷重—へコミの幅関係も示してある。この幅はへコミの弦の長さでこの程度では弧との差はほとんどない。この関係において

も直線的な比例はみとめられない。

MONNIN の試験においては、前述のように円筒側面を 200 kg の荷重で試験面に圧入し、荷重除去後測定した幅から計算したヘコミの深さの逆数を硬さ数として用いる。材料が特に柔らかいときは荷重を 100 kg とし、計算された深さを 2 倍にする。この場合、異なった荷重によって求められた硬さ数がたがいに比較しうるかどうかを確かめるため、板目およびまさ目各 10 個の試験片につき、同一面に対して荷重 200 kg と 100 kg について各 1 回ずつ試験を行なった。この結果の平均値に他の荷重による結果も加え第 6 表に示す。また 2 種の荷重による個々の試験結果を第 7 表に示す。

さきに荷重とヘコミの深さ関係において述べたが、これに直線的関係はみられず一般に荷重の増加によりヘコミの深さの増し方は急激となるので、荷重が大きければ MONNIN 硬さ数が減ずることは当然である。これは第 6 表においても明瞭である。なおこの表において木口面の場合 100 kg 荷重による硬さ数値が 200 kg のときより小さくでているが、100 kg のときの平均深さが 0.066 mm という極めて小さい値であり、したがって測定精度の影響もあるので明確な説明は困難である。また荷重をかけたまま測定したヘコミの深さとその除去後測定した幅からもとめた深さとを比較すると荷重 200 kg ぐらいまでではほとんど差はないが、荷重が大きくなると後者の値は小さくなる。これは荷重が大きいときには第 15 図に示すような変形が試験片にみられるからである。第 7 表に示す MONNIN 硬さ数ではいずれにおいても 100 kg 荷重のものは 200 kg 荷重のものより大きい。

以上述べたように現行の MONNIN の方法では試験はまさ目面にしか行なわず、またそ

第 6 表 円筒面圧入試験の総括 (シロザクラ気乾材)

Table 6. Summary of cylinder indentation test.
(Air-dried Shirozakura-wood)

Surface tested	Load (kg) (n)	Av. ring width (mm)	Specific gravity	Moisture content (%)	Depth** (A) (mm)	Depth*** (B) (mm)	MONNIN hardness from	
							(A)	(B)
End	100 (5)	1.1	0.56	12.7	0.066	—	7.58	—
	200 (5)				0.115	—	8.97	—
	1000 (5)				0.769	0.745	6.50	6.71
Radial	50 (4)	1.7	0.55	14.2	0.058	0.057	4.3	4.4
	100 (10)	2.1	0.51	14.7	0.22	0.20	2.28	2.50
	200 (10)	2.1	0.51	14.7	0.64	0.56	1.56	1.79
	900 (1)	1.4	0.47	14.9	8.20	5.70	0.55	0.79
	1000 (4)	2.7	0.59	14.0	5.87	4.34	0.85	1.16
Tangential	100 (10)	2.1	0.51	14.7	0.136	0.13	3.68	3.85
	200 (10)	2.1	0.51	14.7	0.36	0.35	2.78	3.14
	1000 (3)	2.5	0.56	14.0	4.01	3.53	1.29	1.45
	1200 (1)	3.6	0.59	14.9	5.65	4.19	1.06	1.43

*: Based on oven-dry weight and air-dry volume,

** : Measured under loading,

*** : Calculated from width measured after removal of load.

第7表 MONNIN 硬さ試験の結果 (シロザクラ気乾材)

Table 7. Results of MONNIN hardness test.
(Air-dried Shirozakura-wood)

No.	Surface tested	Av. ring width (mm)	Specific gravity	Moisture content (%)	Load (kg)	Depth** (mm)	Width*** (mm)	MONNIN hardness from	
								depth	width
1	Radial	2.9	0.51	14.3	100	0.195	4.9	2.57	2.50
					200	0.585	8.2	1.71	1.75
2	"	2.1	0.51	14.7	100	0.208	4.8	2.40	2.63
					200	0.566	8.0	1.77	1.85
3	"	2.4	0.51	15.2	100	0.220	5.0	2.27	2.38
					200	0.660	8.5	1.52	1.64
4	"	2.6	0.51	15.1	100	0.170	4.5	2.94	2.94
					200	0.550	7.3	1.82	2.22
5	"	2.6	0.50	15.3	100	0.220	5.1	2.27	2.27
					200	0.600	8.3	1.67	1.71
6	"	1.6	0.47	14.9	100	0.233	5.0	2.14	2.38
					200	0.696	8.5	1.44	1.62
7	"	3.5	0.49	14.9	100	0.220	5.1	2.27	2.27
					200	0.726	8.5	1.38	1.62
8	"	2.0	0.50	14.9	100	0.220	5.0	2.27	2.38
					200	0.726	8.3	1.38	1.71
9	"	2.4	0.54	15.0	100	0.234	5.2	2.14	2.18
					200	0.644	8.0	1.55	1.85
10	"	2.6	0.54	15.8	100	0.226	4.6	2.21	2.78
					200	0.620	7.5	1.61	2.08
11	Tangential	2.0	0.49	14.3	100	0.128	3.9	3.91	3.85
					200	0.383	6.9	2.51	2.50
12	"	2.4	0.50	14.6	100	0.108	3.5	4.64	5.00
					200	0.267	5.7	3.75	3.70
13	"	1.3	0.49	14.2	100	0.090	3.3	5.55	5.56
					200	0.250	5.5	4.00	4.00
14	"	2.3	0.49	14.2	100	0.168	4.3	2.98	3.22
					200	0.448	7.1	2.24	2.32
15	"	1.3	0.49	14.8	100	0.073	3.0	6.85	6.67
					200	0.246	5.8	4.07	3.58
16	"	2.1	0.51	15.2	100	0.128	3.8	5.90	4.17
					200	0.266	6.0	3.76	3.34
17	"	2.5	0.50	14.9	100	0.158	4.4	3.17	3.17
					200	0.412	7.0	2.43	2.43
18	"	1.9	0.53	14.8	100	0.134	3.8	3.74	4.17
					200	0.326	6.1	3.07	3.23
19	"	2.0	0.55	15.3	100	0.240	5.1	2.08	2.27
					200	0.727	8.0	1.38	1.85
20	"	2.7	0.52	15.0	100	0.130	3.9	3.85	3.85
					200	0.300	6.0	3.33	3.33

*: Based on oven-dry weight and air-dry volume,

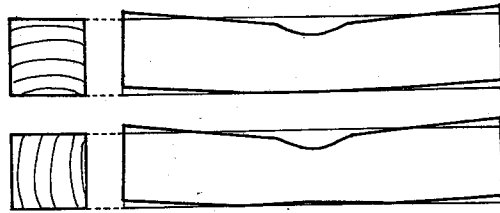
**: Measured under loading,

***: Measured after removal of load.

の規定により軟らかい材に対して 100 kg の荷重を用いた場合、MONNIN 硬さ数は荷重が大きくなれば減るので、200 kg 荷重によるものとの比較はできない。

一方繊維板に対する試験方法において、FAO 第4回木材加工会議の報告書に記載されている方法による場合は試験しようとする繊維板の比重によって4種類の荷重がきめられている。このためあらかじめ試験片の比重を知っておかなければならない。これは簡便な方法とはいえない。さらにこの場合、木材のときと同じく荷重を変えた場合は硬さ数の

比較ができないと考えられるので、比重の異なる繊維板の硬さの比較もできないことになる。これに対し、フランスにおける繊維板の MONNIN 硬さ試験方法では、試験片の幅を円筒側面の長さと同じ 3 cm とし、荷重 300 kg で試験するので、この場合は試験片の幅が 2 cm の木材に対し 200 kg の荷重を適用した場合と硬さ数を比較できる。



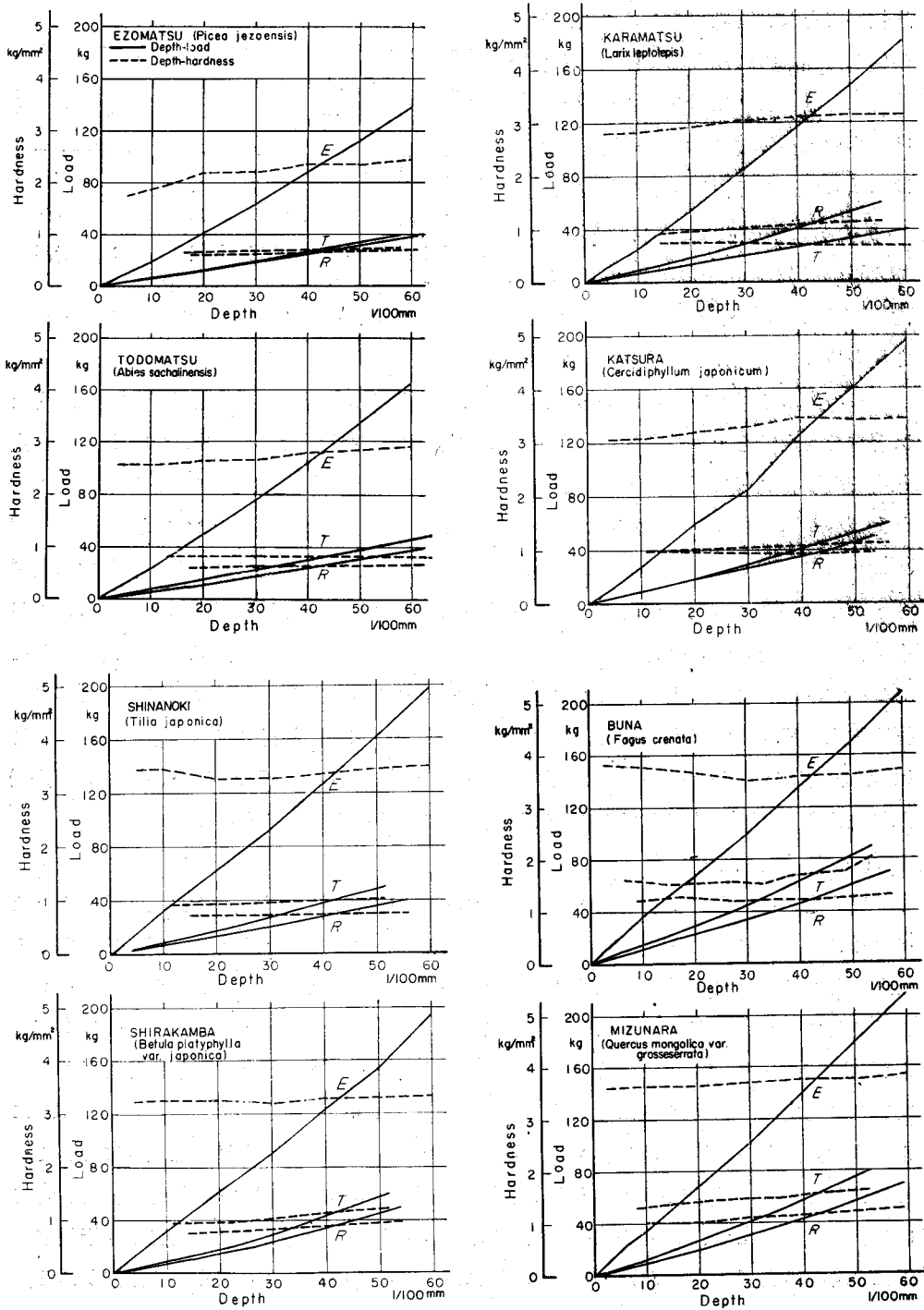
第15図 円筒面の過度の加圧による木材の変形

Fig. 15. Sketch of typical deformation of wood specimen due to excessive penetration of cylinder.

この方法を試験方法としてとりあげるには以上述べた荷重の種類を統一するか、または荷重を変えても硬さ数を比較しうるようなものにしなければならない。すなわち、一定荷重をもって試験を行なう方式をとるならば荷重は1種類とすべきである。この場合木材および FAO 式の繊維板 (試験片の幅 2 cm) には荷重を 200 kg, フランス式の繊維板 (同 3 cm) には 300 kg とするのがよいと思われる。しかしこの荷重による試験片に生ずるヘコミの大きさの範囲が広くなり、試験片に割れ曲がりなどが生ずるかまたはヘコミが小さすぎて測定しがたいというような支障が生ずるとすれば、JIS Z 2117 の規定のようにある一定の深さまで圧入するに要する荷重を測定する方法をとらねばならない。この円筒側面圧入の場合は球圧入の場合と異なり、円筒側面は完全に平行に試験面と接触しなければ、試験面に生ずるヘコミの幅に差ができ、ヘコミの深さ (荷重下) とその幅 (2箇所) の平均から求める硬さ数に差が生ずることになるので注意すべきであろう。

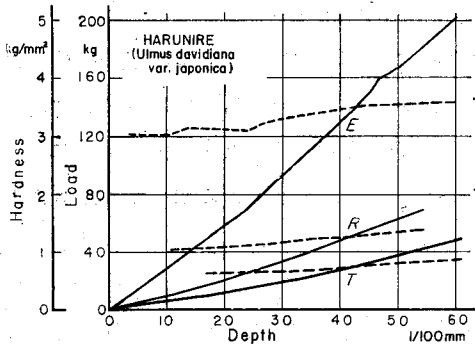
(4) 圧入速度を一定とした場合

いままでに、まず 10 mm 球を用いる BRINELL/MÖRATH の方法において、荷重またはヘコミの深さのある限度内において荷重を長時間作用させて試験するならば、荷重を変えてもえられる BRINELL 硬さ数に変化のないことを確めた。つぎに荷重速度をこれよりもっと速くして、かつそれを一定にした場合における 10 mm 球, 30 mm 球, 30 mm 円形面および 30 mm 円筒側面圧入の方法を検討し、球圧入法が木材の硬さ試験方法として最も適していることを確めた。さらにこの球圧入の場合、10 mm 球を用いるときは JIS Z 2117 による方法が最も合理的であるという結論に達した。しかし FAO 木材加工会議において繊維板に対する硬さ試験には球圧入方法として直径 30 mm の球を用いる方法が提案されている。一方木材についてみても、これからは生長のよい (年輪幅の広い) 人工植栽樹材が市場に多く出ると考えられるから、硬さ試験において圧入面積をより広くする必要がある。10 mm 球を用いる JIS Z 2117 の方法において、試験によって生ずるヘコミの直径は約 3.5 mm であるから、年輪幅の広い材に対してははかなり多くの試験結果の平均によらなければ



第16図 30 mm 球による荷重—ヘコミの深さおよび荷重—硬さ数の関係 圧入速度：毎分0.5 mm

Fig. 16. Load-depth and load-hardness curves obtained by using a 30 mm ball.



第16図 (続き)

Fig. 16. (Continued.)

試験材の性質はわからない。このため 30 mm 球を木材の硬さ試験に用いる方が合理的といえよう。30 mm 球を使用する方法はすでに述べたように井口⁸⁾によって提唱されているが、この方法では1試験に5分要するので、どのような試験方法によれば硬さ試験において必要な“簡便ですばやく、かつ正確”という条件をみたしうるかを検討するため次のような実験を行なった。

手動式アムスラー型4トン木材試験機

の荷重能力を 400 kg とし、荷重点に先端が直径 30 mm の半球になっている鉄円柱をとりつけ、一方支柱に 1/100 mm 読みのダイヤルゲージをとりつけ、荷重を増しながらヘコミの深さを読んでいった。球圧入の速さは JIS Z 2117 の場合と同じく毎分 0.5 mm とした。圧入深さは 1 試験を 1 分程度でおえるように 0.53~0.60 mm までとし、荷重の 10 kg ごとにヘコミの深さを測定した。この実験に供したのはエゾマツ、トドマツ、カラマツ、カツラ、シナ、シラカンバ、ブナ、ミズナラおよびハルニレの気乾材で、その木口、板目およびまさ目の 3 面について各 5 回の試験を行なった。この結果 (平均値) を第 16 図に示す。

第 16 図において、板目およびまさ目の場合は荷重の増加にともないヘコミの深さの増し方がやや少なくなるものもみられるが、ほぼ直線的であるため、ヘコミの深さ—硬さ数の関係においても硬さ数が一定値を示す傾向がみられる。木口面においてはエゾマツ、カラマツ、カツラ、ハルニレなどの比較的硬さ数の小さい材ではヘコミの深さ 0.3~0.4 mm 程度までは荷重の増加にともなうヘコミの深さの増し方はわずかずつ少なくなり、それ以後一定になる傾向がみられる。他のトドマツおよび比較的硬さ数の大である材では、荷重の増加にともなうヘコミの深さの増し方はほぼ一定である。このため硬さ数は荷重の変化にかかわらず一定値を示す。この第 16 図に示す実験結果ではヘコミの深さが 0.4~0.6 mm の範囲では荷重の大きさに関係なく硬さ数はほぼ一定値を示すといえよう。

一方この 30 mm 球を用いて荷重と BRINELL 硬さとの関係を求めた井口⁸⁾の実験結果において、木口面についてヒノキ材では荷重 60 kg までは硬さ数 (kg/mm²) は 2.4 から 2.1 と減じその後 130 kg まで一定値を示す。クルミ材では荷重 120 kg まで 3.5~4.5 と増し、以後ほぼ一定値となっている。側面の場合はヒノキ材では 10~110 kg の範囲で硬さ数はほぼ一定値、クルミ材では 100 kg まで硬さ数はわずか増加し、以後まさ目 220 kg まで、板目 300 kg までほぼ一定値である。この井口の実験においても荷重の初期において、荷重の増加にともなう硬さ数の変化は樹種によって異なるという結果がでている。

この30 mm 球の圧入試験についてつぎのように結論しうる。

30 mm 球圧入の場合も10 mm 球の長時間荷重による圧入の場合と同じく、荷重の小さいときには荷重—硬さ数の関係が不明確な場合があるが、荷重の増加により硬さ数は安定し、ヘコミの深さ0.4~0.6 mm では荷重の変化に対しても硬さ数はほぼ一定値となる。したがってヘコミの深さを一定とする試験方法を採用するときはこの範囲程度のヘコミの深さをえらぶのが妥当であろう。

3. 30 mm 球を用いるときの試験方法

30 mm 球圧入法を硬さ試験方法としてとりあげる場合、球圧入速度および圧入深さまたは荷重をきめなければならない。球圧入速度は試験においてその差異による影響を少なくするためには、できるだけ遅い方がよい(井口の方法では荷重50 kg または100 kg で5分)が、一方実用上試験をできるだけ早く行ないうるようにしなければならない。このためには球の圧入速度はJIS Z 2117 にきめられている毎分0.5 mm が適当である。ASTM およびFAOの繊維板に対する硬さ試験では毎分6 mm で、これに比べれば相当遅いことになる。しかしASTMの場合は直径11.284 mmの球をその半径の深さ(5.642 mm)まで圧入するので、圧入に要する時間は約1分である。圧入深さをもっと小さくすればこれと同じ程度の時間で試験を行ないうることになる。つぎに、BRINELL/MÖRATHの方法、井口の方法などにみられるよう荷重を一定とする方法よりも、特に試験を短時間に行なうようにするには、一定の深さまで圧入するに要する荷重を測定する方法が合理的である。そこでこの深さをいくらにするかという問題が生じてくる。第16図に示す関係曲線から適当なヘコミの深さは0.4~0.6 mm であると結論した。一方測定した荷重から、硬さ数を計算しやすくするための値を考慮に入れるとつぎのような3種の深さが考えられる。

ヘコミの深さ	硬さ数算出式
$\frac{1}{\pi} \doteq 0.32 \text{ mm}$	$H_{30} = \frac{P \cdot \pi}{\pi \cdot D \cdot 1} = \frac{P}{30} \text{ kg/mm}^2$
$\frac{5}{3\pi} \doteq 0.53 \text{ mm}$	$H_{30} = \frac{P \cdot 3\pi}{\pi \cdot D \cdot 5} = \frac{P}{50} \text{ kg/mm}^2$
$\frac{10}{3\pi} \doteq 1.06 \text{ mm}$	$H_{30} = \frac{P \cdot 3\pi}{\pi \cdot D \cdot 10} = \frac{P}{100} \text{ kg/mm}^2$

以上の2つの条件をみたとすヘコミの深さとして $5/(3\pi) \doteq 0.53 \text{ mm}$ が最も妥当と考えられる。

すなわち、木材の静的硬さ試験として30 mm 球圧入法を用いる場合に次の方法を提案する：直径30 mmの鋼球を試験面に $5/(3\pi) \doteq 0.53 \text{ mm}$ 圧入するに要する荷重を測定する。この場合球圧入速度を毎分0.5 mm とする。硬さ数(H_{30})は次式で求める。

$$H_{30} = \frac{P \cdot 3\pi}{\pi \cdot D \cdot 5} = \frac{P}{50} \text{ kg/mm}^2$$

ここで P は荷重(kg)、 D は球の直径(30 mm)である。

III. 木材の機械的性質としての硬さ数

いままでに静的方法による押しつけ硬さ試験方法のうちでは球圧入法が木材に最も適していることを見出し、試験にはつぎのような方法によるのがよいということ述べた。すなわち、10 mm 球を使用し、分鋼荷重のレバー式のような一定荷重で圧入する形式の試験機を用い BRINELL 硬さ数を求めるときは、球圧入の深さが 0.3~0.6 mm ぐらいになるような荷重をえらび、これを 30 秒以上保持してできるだけ時間の影響を除く。そして圧入深さは荷重をかけたまま測定し、これから硬さ数を求める。またこの形式で 30 mm 球を使用するときは井口⁹⁾の方法による。一方普通用いられる加圧試験機に硬さ試験用装置 (10 mm 球) をとりつけて試験を行なうときは JIS Z 2117 による。この場合荷重能力の小さい試験機 (100 kg ぐらい) でないと十分な精度はえられない。JIS に準じた方法で 30 mm 球を圧入するときは、著者が提案するこの球を $5/(3\pi) \approx 0.53$ mm の深さまで圧入するに要する荷重を測定し、硬さ数を求める方法による。

以下述べる硬さ試験の結果にはこのうち 10 mm 球による BRINELL 硬さ数 (H_B)、JIS Z 2117 硬さ数 (H_{JIS}) および著者提案の 30 mm 球硬さ数 (H_{30}) の 3 種があるが、大部分は 10 mm 球による BRINELL 硬さ数である。

1. 樹種別硬さ数およびその出現状態

木材の硬さの樹種による差異の 1 例として、北海道産広葉樹材 8 種についての試験結果を第 8 表に示す。

ここに示す値は気乾状態にある材について 5×5×5 cm の 2 方まきの試験片をつくり、

第 8 表 北海道産広葉樹材 8 種についての硬さ試験結果
Table 8. Results of hardness test for 8 species of hardwoods grown in Hokkaido.*

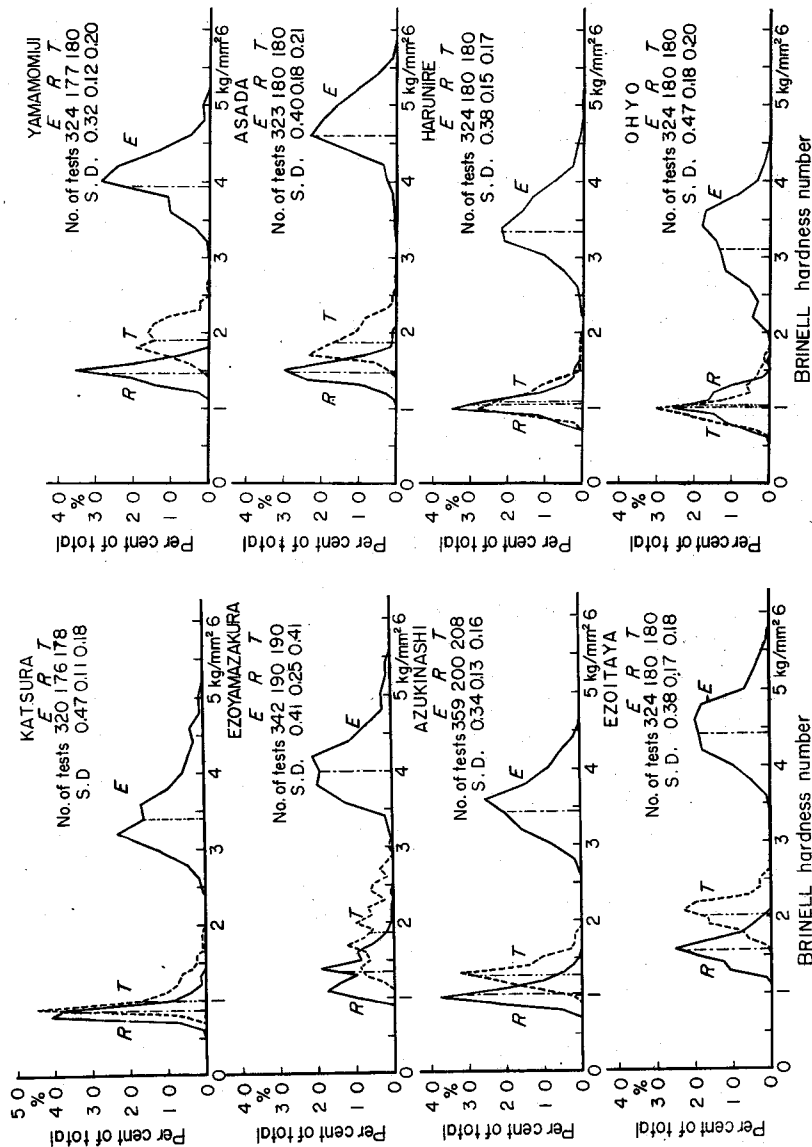
Species	Av. ring width (mm)	Specific** gravity	BRINELL hardness (kg/mm ²)			Ratio of hardness	
			End (e)	Radial (r)	Tangential (t)	$\frac{r+t}{2e}$	$\frac{t}{r}$
KATSURA	1.4	0.41	2.93	0.60	0.78	0.24	1.30
EZOYAMAZAKURA	1.7	0.54	3.85	1.11	1.49	0.34	1.34
AZUKINASHI	1.4	0.50	3.31	0.98	1.21	0.33	1.24
EZOITAYA	1.1	0.64	4.29	1.51	1.99	0.41	1.32
YAMAMOMIJI	1.4	0.60	3.94	1.47	1.91	0.43	1.29
ASADA	1.5	0.65	4.60	1.49	1.87	0.37	1.26
HARUNIRE	1.5	0.52	3.34	1.06	1.09	0.33	1.03
OHYO	1.1	0.51	3.12	1.02	1.02	0.33	1.00

*: Adjusted to 15 per cent moisture content,

** : Based on oven-dry weight and volume at test.

レバー式の試験機によって測定した荷重下の深さから求めた BRINELL 硬さ数 (H_B) である。試験回数および標準偏差は第 17 図に示すとおりである。この表における硬さの値は材の比重におよそ比例している。すなわち、木口面の硬さ数は比重が 0.65 で最大であるアサダが 4.60 kg/mm^2 で最も大、以下ほぼ比重と同じ順位となり、比重が 0.41 で最小であるカツラは硬さ数も 2.93 kg/mm^2 で最も小さい。まさ目面および板目面についても木口面の場合と同様であるが、アサダの硬さ数はエゾイタヤよりやや小さい。

硬さ数のみでなく、木材の性質はその平均値とともに、その値の出現状態が重要であ

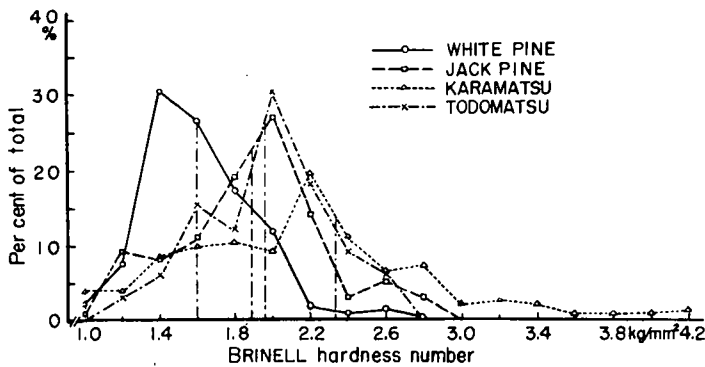


第 17 図 気乾状態における硬さ数の出現状態 S. D.: 標準偏差
 Fig. 17. Variation in the hardness number of wood in air-dry condition. S. D.: Standard deviation.

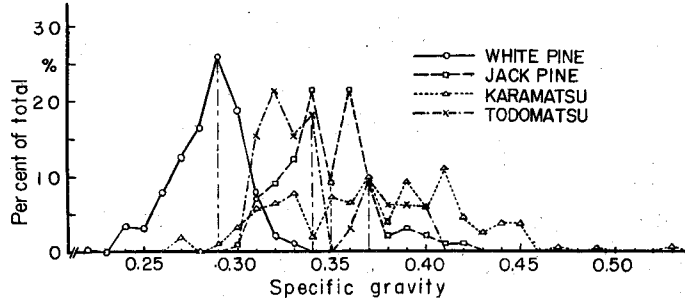
る。この8種の材についての硬さの出現状態を第17図に示す。標準偏差(S.D.)は木口面について、オヒヨウおよびカツラが 0.47 kg/mm^2 で最も大、ついでヤマザクラ 0.41 、アサダ 0.40 、エゾイタヤおよびハルニレ 0.38 、アズキナシ 0.34 、ヤマモミジ 0.32 である。まさ目面硬さ数の標準偏差はヤマザクラ(0.25 kg/mm^2)が最も大きく、ついでアサダ、オヒヨウ(0.18)、エゾイタヤ(0.17)、ハルニレ(0.15)の順であり、アズキナシ(0.13)、ヤマモミジ(0.12)、カツラ(0.11)が小さい。板目面についてもヤマザクラは 0.41 kg/mm^2 で特に大きい値を示すが他は 0.20 付近でありあまり差異はない。このようにカツラおよびオヒヨウの木口面、ヤマザクラの3面では硬さ数のばらつきが大きい。この原因のひとつは試験片の比重の偏異にあると考えられる。すなわち以上の材の気乾比重の変化係数はハルニレ 8.2% 、ヤマザクラ 8.1% 、カツラ 7.1% 、オヒヨウ 6.5% 、アズキナシ 3.7% 、ヤマモミジ 2.8% 、アサダ 2.2% 、エゾイタヤ 2.0% である。

つぎに人工植栽針葉樹材4種の地上高約4mの位置から採取した円盤の半径方向について、1cmごとに測定した生材状態の木口面硬さ数の出現状態を第18図に示す。硬さ測定には10mm球を用い上述のレバー式試験機で20kgの荷重を3分間作用させ、荷重をかけたままへコミの深さを測定し、これからBRINELL硬さ数を求めた。

ストロブマツ(White pine)は 1.4 kg/mm^2 をモードにやや左偏した分布型となり、その標準偏差(S.D.)は 0.31 kg/mm^2 、変化係数(C.V.)は 19.4% である。バンクスマツ(Jack pine)はモード 2.0 kg/mm^2 でストロブマツよりややひろがった範囲に分布し、そのS.D.: 0.39 kg/mm^2 、C.V.: 20.6% とやや大きい。カラマツのモードは 2.2 kg/mm^2 にあるがその出現率は 19.6% で、ストロブマツおよびバンクスマツのモードの出現率 30.4% および 27.0% に比較して非常に小さい。またその分布は $1.0 \sim 4.2 \text{ kg/mm}^2$ のきわめて広い範囲にわたり、S.D.: 0.66 kg/mm^2 、C.V.: 30.8% と非常に大きく、すなわち材質の不均一



第18図 生材状態における木口面硬さの出現状態
 Fig. 18. Variation in the hardness number of wood (End hardness in green condition).



第19図 前図と同じ材における比重の出現状態

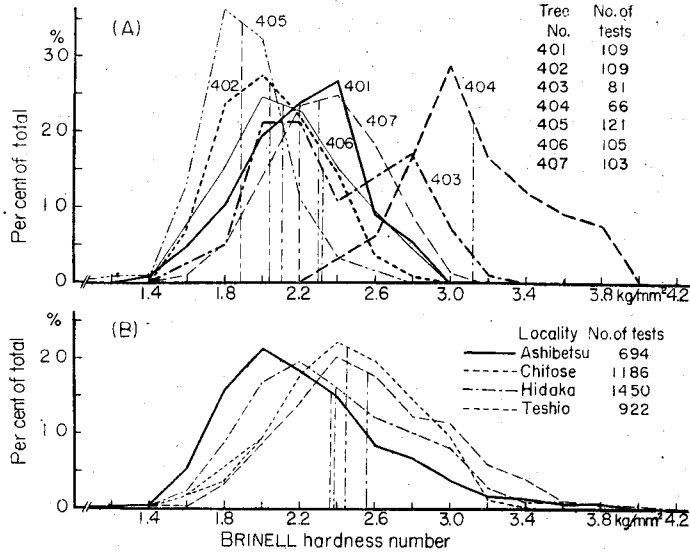
Fig. 19. Variation in the specific gravity of wood for the same specimens as shown in figure 18.

性が大きいことを示す。トドマツは参考のためのせたもので、供試木はただ1本であり、他のものとの比較はあまり適切でない。

この硬さ数の出現状態に対し、同じ位置について測定した比重(R)の出現状態は第19図に示すとおりで、分布の範囲、傾向などは前者の場合によく似ている。このように硬さ数は比重の目安にもなりうる可能性をもつといえよう。

2. 1樹種内における供試木および産地による硬さ数の差異

1樹種内における供試木による硬さ数の差異および産地による差異について調べた例を第20図に示す。これは北海道産ナラ材の材質に関する研究³³⁾の一部であり、芦別産材



第20図 1樹種における硬さ数の出現状態 (ミズナラ生材の木口面硬さ) A: 1産地内の供試木別, B: 産地別

Fig. 20. Variation in the hardness number of wood coming from the trees of a species (end hardness of Mizunara-wood in green condition). A: with respect to the trees from a locality (Ashibetsu). B: with respect to the geographical region of origin.

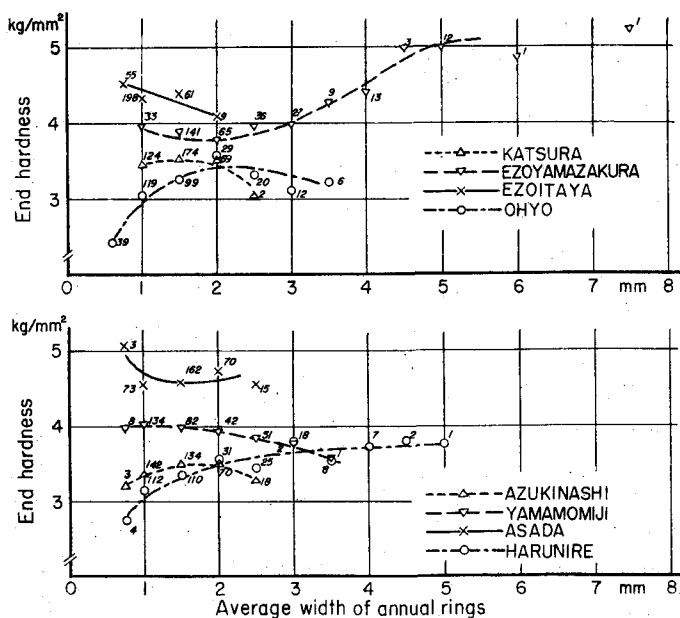
については著者が試験を行なった。試験方法は前述の針葉樹材の場合と同じく、1 供試木の地上高約 4 m の位置から厚さ約 10 cm の円盤を採取し、これについて半径方向の 1 cm ごとに年輪密度、全乾比重および木口面硬さ数 (生材状態) を測定した。第 20 図 (A) に芦別産の 7 供試木についての硬さ数の出現状態を示す。また図 (B) に産地ごとに集計したその硬さ数の出現状態を示す。この図において、(A) の供試木ごとの硬さ数の出現状態の差異は (B) の産地ごとのそれより大きく、また (A) の供試木ごとの各平均値における差異も産地別のそれより大きい。

このように同一地方においても供試木ごとに材質にはかなりの差異がみられるが、一方ある程度集計された値についてみると、産地別にはここに試験した範囲においてはその差異は少なくなる。

3. 年輪幅と硬さ数との関係

林木の生長の遅速が材質に及ぼす影響を検し、さらに年輪幅による材質判定の資料にするために、年輪幅と材質との関係は古から多くの樹種について求められている。そして木材の硬さもまた年輪幅との関係について考究されている。以下著者の行なった実験結果から年輪幅 (または年輪密度) と木口面硬さ数 (H_B , kg/mm^2) との関係をもとめたものについて論ずる。ここにいる年輪幅は試験片についてのものではなく、試験によって生じたヘコミに関係するすべての年輪について求めた平均幅 (または密度) である。

第 21 図に示すのは、道産広葉樹材 8 種について求めた木口面における平均年輪幅と BRINELL 硬さ数との関係である。この図においてまず散孔材から論ずる。カツラは年輪幅の範囲は 1~2.5 mm で狭いが、とくに 1~2 mm の間ではほとんど硬さ数に変化はみられず、2.5 mm においてやや減ずる程度である。カツラは前述の樹種内において硬さ数の変化がもっとも大きかったが年輪幅別に

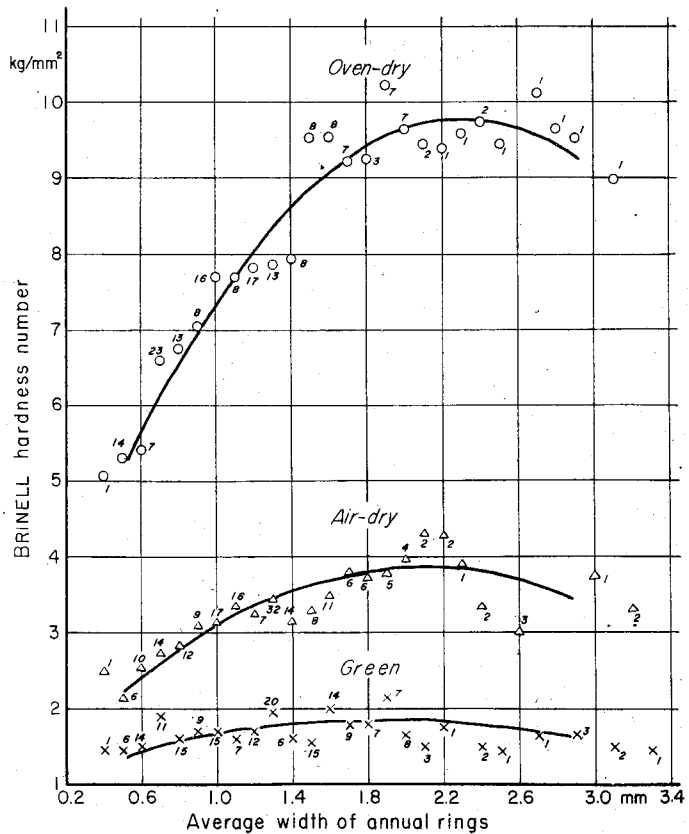


第 21 図 平均年輪幅と硬さ数との関係 (気乾状態)

Fig. 21. Relation of hardness number to rate of growth (in air-dry condition).

平均した値における変化は少ない。このカツラの試験については年輪幅と比重との関係は明らかでなかった。ヤマザクラ*では年輪幅 1 mm から 2 mm までは硬さ数が 3.95~3.80 kg/mm² とわずかに減ずるが、その後は年輪幅 5 mm まで硬さは 5.00 kg/mm² とほぼ直線的に増加する。アズキナシの硬さ数は 1.5 mm および 2.0 mm において最大値を示し、その両側ではやや減じている。エゾイタヤおよびヤマモミジではともにわずかではあるが、年輪幅が広くなれば硬さ数が減ずる傾向がみられる。アサダでは年輪幅との関係は明らかでない。つぎに環孔材であるハルニレおよびオヒヨウではこの両者の関係が明確にあらわれている。すなわちオヒヨウでは年輪幅 0.6~2 mm において硬さ数は 2.4~3.6 kg/mm² と急激に増す。しかしそれ以上年輪幅が広くなっても硬さ数はあまり変わらない。ハルニレに

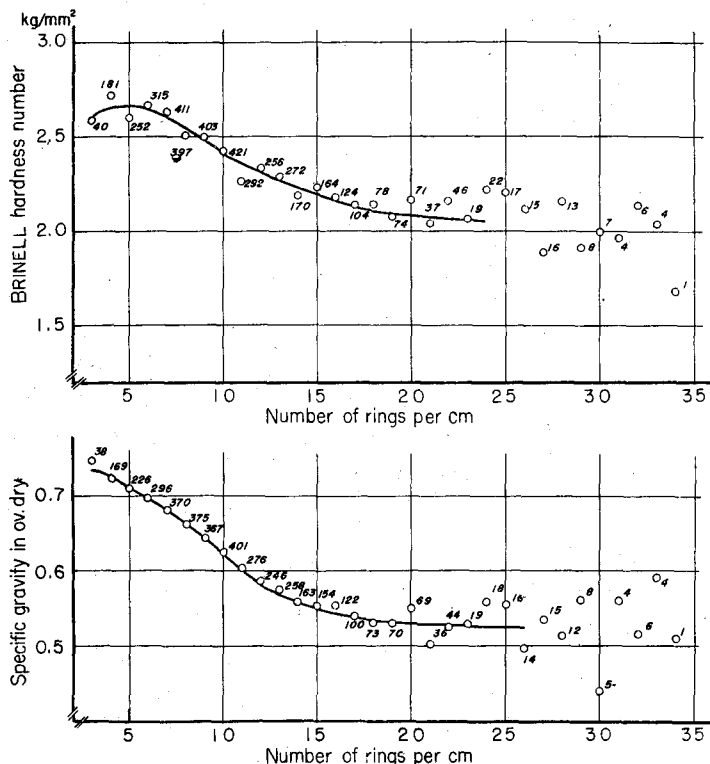
おいても同様で、年輪幅 0.75~2 mm で硬さ数は 2.75~3.55 kg/mm² とオヒヨウとほとんど同じ増加を示し、またその後の変化は少ない。つぎに同じく環孔材であるミズナラ気乾材の木口面硬さを第 22 図についてみると、これも前 2 者と同様、年輪幅 0.5~2.2 mm において硬さ数は平均的 (図中の曲線) にみて、2.2~3.9 kg/mm² と増加する。それ以後はやや減少する傾向がみられる。そしてこのミズナラ材の全乾状態および生材状態のものについても、気乾材と同様の傾向が認められる。全乾材の場合この傾向は明瞭であるが、生材の場合には



第 22 図 ミズナラの生材、気乾材および全乾材における年輪幅と木口硬さの関係

Fig. 22. Relation of hardness number to rate of growth for Mizunara-wood in green, air-dry and oven-dry conditions.

* R. TRENDELENBURG/ H. MAYER-WEGELIN (1955⁸⁰) はサクラ (Kirsche) をクルミ (Nu.) とともに半環孔材 (halbringporige Laubholz) としている。



第23図 ミズナラ材における年輪密度と木口面硬さ(生材)および全乾比重との関係

Fig. 23. Relations of hardness number and specific gravity to rate of growth for Mizunara-wood. Hardness: End hardness in green condition.

硬さ数の差が少なくあまり明瞭でない。しかしこのミズナラの生材においても数多くの資料について、この両者の関係を求めれば、かなり明確になる。すなわち道内4地方から採取したミズナラ材³³⁾について年輪密度(半径方向1cmについての年輪数)と生材木口面の硬さ数との関係を第23図に示す。これを年輪幅になおして論ずれば、年輪幅0.4~2mm(年輪密度25~5)までは硬さ数は2.05~2.68 kg/mm²と上昇する。一方これを同図にある年輪密度と全乾比重との関係にくらべるとほとんど同じ傾向にあることがわかる。

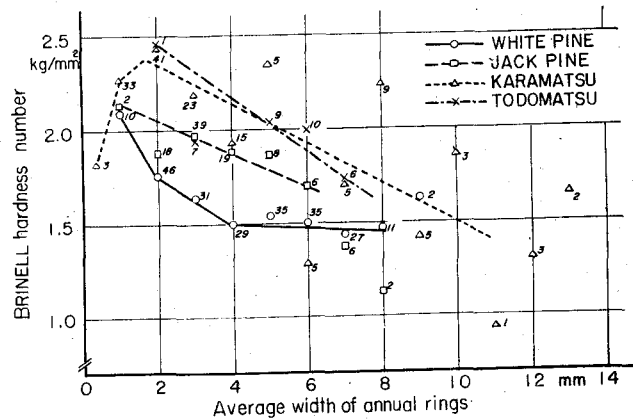
このように広葉樹材における年輪幅と硬さ数の関係についてはつぎのようにいえる。散孔材であるカツラ、アズキナシ、エゾイタヤ、ヤマモミシおよびアサダにおいては年輪幅の広狭による硬さ数の変化は少ない。半環孔材といわれるヤマザクラでは年輪幅の広いものの硬さ数大である。環孔材であるハルニレ、オヒヨウおよびミズナラの3種においていずれも年輪幅約2mmまで硬さ数は明確に増加するが、これ以上の年輪幅のところではその変化はないか、またはやや減少する傾向がみられる。

針葉樹材についての年輪幅と硬さ数の関係は、第24図に示すように前述の環孔材とは逆の傾向がみられる。この図は苫小牧産人工植栽の4種の針葉樹材について生材状態における木口面硬さ数 (H_B) の年輪幅に対する関係を示すものである。ストロブマツでは年輪幅1~4 mmまで硬さ数は2.1~1.5 kg/mm²と減少し、その後8 mmまであまり変化しない。バンクスマツでは年輪幅1~8 mmにおいて硬さ数は2.14~1.14 kg/mm²とほとんど直線的に減少する。カラマツにおいては年輪幅2 mmまでは硬さ数は増加する傾向がみられるが、2~10 mmでは2.4~1.5 kg/mm²と減少する。トドマツにおいても年輪幅2~7 mmの範囲で、硬さ数は2.46~1.73 kg/mm²と減少している。

この硬さ数は10 mm球を用いて測定したBRINELL硬さ数であり、この場合試験面に生ずるヘコミの直径は5 mmぐらゐまでであるため、年輪幅の狭い箇所ではヘコミが春秋材両部にわたるからそれらの平均的な値がえられるが、年輪幅がヘコミの直径より広い箇所では、春材・秋材部のいずれか一方に多くヘコミが生ずるか、またはその一方にのみ生ずることがあり、その測定値の偏差が非常に大きい。このため図において年輪幅6 mm以上のところでは硬さ数のばらつきが大きい。

ここにあげた針葉樹材では、一般的傾向として年輪幅1~2 mmに硬さ数の最高値があり、年輪幅が広くなればある程度まで硬さ数は減ずる。しかし年輪幅の広いところにはアテのあらわれる場合があり、この場合当然硬さ数は増す(たとえば沢田³⁸⁾)。またこの年輪幅と硬さ数との関係は年輪の明瞭なもの(春・秋材の密度の差の大きいもの、たとえばカラマツ材)でははっきりあらわれるが、そのあまり明瞭でないもの(たとえばストロブマツ材などの五葉松類)では前者ほど明確ではない。

このような年輪幅と硬さ数の関係は他の樹種については必ずしも同じではない。たとえばスギ材についての深沢・青木(1960)⁴⁾の研究によれば、1等地のものでは年輪幅の広いものは硬さ数は大きい、3等地のものでは年輪幅が広くなれば硬さ数は減ずる傾向がみられる。カラフト産材の研究において、田中(1932)⁴⁵⁾はトドマツ材では年輪密度9までは木口、まさ目とも硬さは増すが、年輪密度がそれ以上大きくなっても変わらないと述べて



第24図 平均年輪幅と生材の木口面硬さとの関係

Fig. 24. Relation of hardness number to rate of growth (end hardness in green condition).

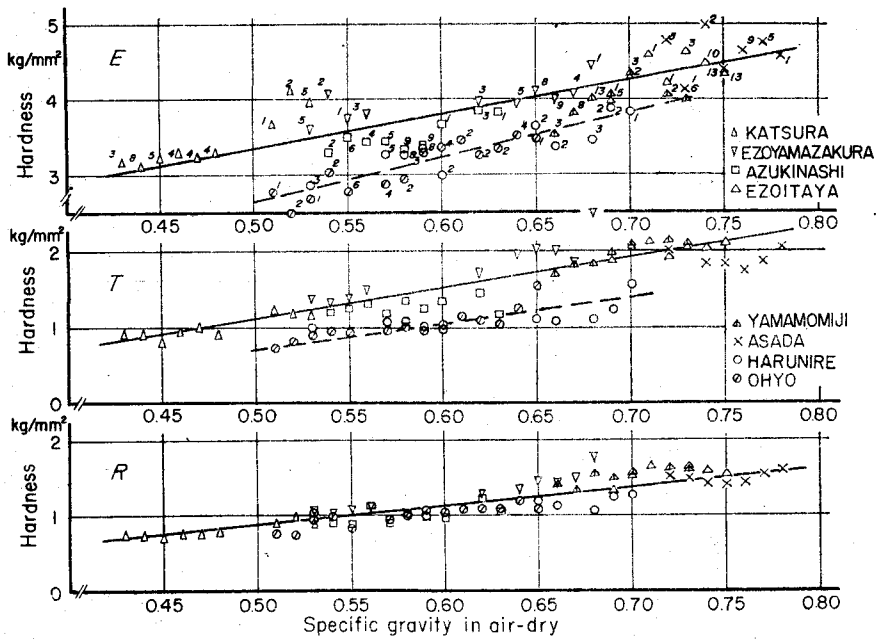
いる。しかし田中・足立(1933)⁴⁶⁾はエゾマツ材について、矢沢(1953)⁴⁴⁾はグイマツ材について、ともに年輪密度と硬さ数との間には明らかな関係は認められないと述べている。

4. 比重と硬さ数との関係

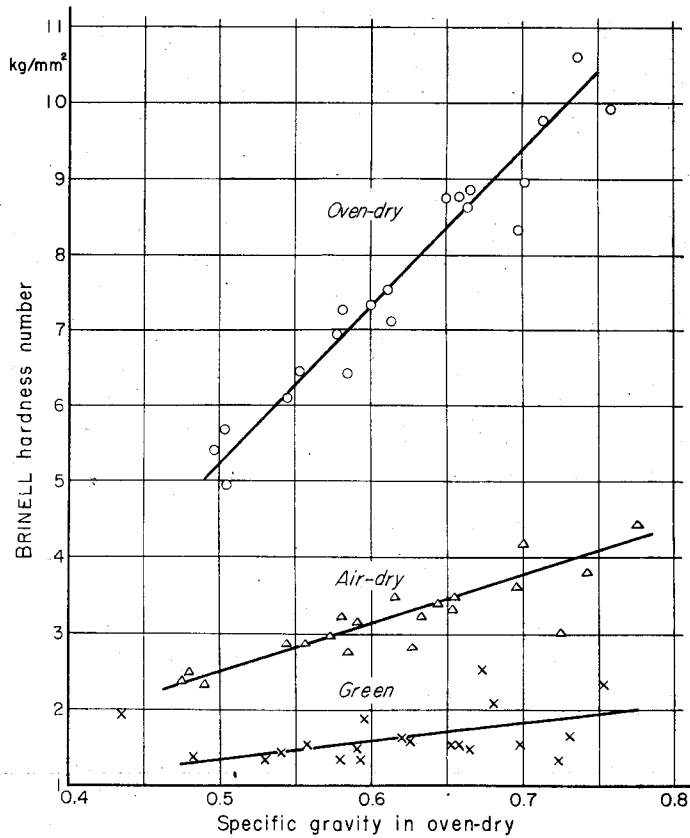
いままで述べてきた資料について求めた比重と硬さ数との関係を第25,26図および第27図に示す。

第25図に示すのは道産広葉樹材について求めたものであるが、比重と木口硬さの関係において、図に2本の直線を引いたように散孔材(ヤマザクラを含む)と環孔材にわけられる。すなわち同一比重の場合散孔材の方が環孔材よりも硬さ数は大である。この関係は比重と板目硬さの場合にも同じであるが、比重とまさ目硬さの場合には認められなくなる。これは加圧面と硬さ数との関係において後述するように、この試験における散孔材では板目硬さはまさ目硬さより大であるが、環孔材であるハルニレおよびオヒヨウにはこの差がほとんどない。これはこの環孔材の板目硬さが同一比重の散孔材のそれより小さいためである。

上述の同一比重の場合における散孔材と環孔材における硬さ数の差と似た傾向が縦圧縮強さの場合にもみられる。すなわち沢田(1958)⁴¹⁾が針葉樹材、散孔材、環孔材などについて比重と縦圧縮強さとの関係を求めているが、ここでは同一比重の場合、縦圧縮強さは

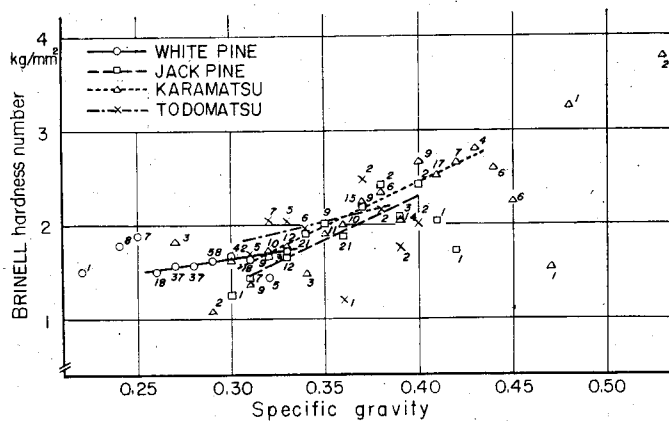


第25図 比重と硬さ数との関係 E: 木口硬さ, T: 板目, R: まさ目
 Fig. 25. Relation of hardness to specific gravity. E: End hardness. T: Tangential. R: Radial.



第26図 ミズナラの生材、気乾材および全乾材における比重と木口硬さとの関係

Fig. 26. Relations of end hardness to specific gravity for Mizunara-wood in green, air-dry and oven-dry conditions.



第27図 比重 (R) と生材状態の木口面硬さとの関係

Fig. 27. Relation of end hardness to specific gravity in green condition.

針葉樹材が最も大で、ついで散孔材、環孔材の順となっている。このように縦圧縮強さと木口硬さには似た性質があることがわかる。

第 26 図にミズナラの生材、気乾材および全乾材についての全乾比重と木口硬さとの関係を示す。この気乾材の場合の関係は第 25 図のハルニレおよびオヒヨウの木口硬さにおける関係に近い。

針葉樹材における比重 (R) と生材状態の木口硬さとの関係を第 27 図に示す。この図においてストロブマツは比重 0.22~0.33 の範囲にあるが、この両者の関係はあまり明瞭でなく、わずかに 0.26~0.33 の範囲において、硬さ数は比重に比例しゆるやかに増加する。他の樹種についてはこれよりも急激に比重とともに硬さ数は増す傾向がみられる。

比重と硬さ数との関係は多くの研究者によって、多くの樹種について求められているが、この場合同一樹種またはその似かよったものなかにおいては、比重が増せば硬さ数も直線的に増す傾向がみられる。しかし樹種が異なる場合は必ずしも同一比重のものは同一硬さ数を示さない。これは縦圧縮強さ、引張り強さなどの場合と同様である。この原因として材の構成要素率、組成分などの差異が考えられる。

5. 含水率と硬さ数との関係

硬さ数においても他の強度にみられるように繊維飽和点以下の含水状態では含水率の増加とともに硬さ数は減ずる。この場合、繊維飽和点以上、気乾材 ($u=15\%$) および全乾材の硬さ数の比較をミズナラ材について行なった。これは長さの方向に連続した 3 個の試験片をそれぞれ前記の 3 状態にして試験を行なったものである。この試験における総括を第 9 表に、その平均値における比較値を第 10 表に示す。

第 9 表 ミズナラの生材、気乾材および全乾材に対する硬さ試験結果
Table 9. Results of hardness test for Mizunara-wood under various moisture conditions.

Moisture condition	Av. ring width (mm)	Specific gravity in ov. dry	Moisture content (%)	BRINELL hardness (kg/mm ²)		
				End	Radial	Tangential
Green	Av. 1.2	0.62	63.1	1.68	0.66	0.79
	Max. 2.1	0.75	79.9	3.32	1.65	2.20
	Min. 0.6	0.44	52.9	1.17	0.46	0.44
Air-dry	Av. 1.2	0.62	16.2 (15.0)	3.21 (3.51)	1.07 (1.20)	1.40 (1.54)
	Max. 2.0	0.79	17.7	4.75	1.79	2.54
	Min. 0.6	0.48	13.1	2.08	0.73	0.75
Oven-dry	Av. 1.2	0.62	0.8	7.73	2.24	2.85
	Max. 2.0	0.76	1.1	12.05	4.15	6.05
	Min. 0.6	0.50	0.2	4.63	1.26	1.59

第10表 ミズナラの生材、気乾材および全乾材における硬さの比

Table 10. Percentage ratios in the hardness of Mizunara-wood in green, air-dry and oven-dry conditions.

Moisture condition	Hardness ratio		
	End	Radial	Tangential
Green	48	53	51
Air-dry*	100	100	100
Oven-dry	220	188	185

* Adjusted to 15 per cent moisture content.

このように含水率の変化による硬さ数の増減は大きく、気乾材 ($u=15\%$) を基準にすれば生材では木口 48%、まさ目 53% および板目 51% とほぼ半分の値となる。また全乾材ではそれぞれ 220%、188% および 185% となり、ほぼ 2 倍になる。

また気乾状態における含水率 1% の増減にともなう硬さ数の変化はこのミズナラ材では木口硬さ 0.24 kg/mm^2 、まさ目硬さ 0.10 kg/mm^2 および板目硬さ 0.12 kg/mm^2 である。これは 15% 時の硬さ数に対し、それぞれ 6.8%、8.3% および 7.8% にあたる。

この含水率と硬さ数との関係は他の樹種については同じような比率にはならない。たとえば矢沢⁵⁴⁾ のグイマツ材についての試験では、木口硬さは含水率 1% の変化で平均 0.47 kg/mm^2 (平均値の 9.1%)、板目硬さでは 0.04 kg/mm^2 (2.7%) およびまさ目硬さ 0.13 kg/mm^2 (7.2%) の影響があると述べている。またこの場合気乾材 ($u=16.6\%$) の硬さ平均値は木口、板目およびまさ目がそれぞれ 5.04、1.56 および 2.03 kg/mm^2 であり、全乾材ではそれぞれ 8.50、1.86 および 2.63 kg/mm^2 で気乾材の硬さに対する全乾材の比率は著者のミズナラ材の場合よりいずれも小さい。

前述の 3 つの水分状態におけるミズナラ材についての年輪幅と木口硬さおよび比重と木口硬さとの関係はすでに第 22 図および第 26 図に示したが、これは平均的に次のような式で表わしうる。

年輪幅とミズナラ材の木口硬さ数との関係：

$$\text{生材状態 } H_B = 1.05 + 0.874 W - 0.23 W^2 \text{ kg/mm}^2$$

$$\text{気乾状態 } H_B = 1.10 + 2.62 W - 0.632 W^2 \text{ kg/mm}^2$$

$$\text{全乾状態 } H_B = 2.48 + 6.32 W - 1.37 W^2 \text{ kg/mm}^2$$

ここで H_B は BRINELL 硬さ数、 W は平均年輪幅 (mm) である。この式からもわかるように年輪幅の広狭が硬さ数に及ぼす影響は含水率の低いものほど大きい。これは比重と木口硬さとの関係についても同様である。

比重とミズナラ材の木口硬さ数との関係：

$$\text{生材状態 } H_B = 2.44 r_0 + 0.13 \text{ kg/mm}^2$$

$$\text{気乾状態 } H_B = 6.20 r_0 + 0.6 \text{ kg/mm}^2$$

$$\text{全乾状態 } H_B = 21.0 r_0 - 5.3 \text{ kg/mm}^2$$

ここで r_0 は全乾比重である。

このように含水率が低いものほどその年輪幅または比重が硬さに及ぼす影響が大きいことは縦圧縮強さについてもみられる。すなわち、矢沢・深沢(1956)⁵⁵⁾ のヒノキの飽湿、気乾および絶乾材についての年輪幅および比重と縦圧縮強さとの関係において同様の傾向がみられる。

各含水状態におけるときのまさ目および板目硬さの木口硬さに対する比は、第 11 表に示すように含水率の低いもの程その比が小さくなり、木口硬さと側面硬さとの差が大きくなる。

6. 加圧面による硬さ数の差異

木材の木口面、板目面およびまさ目面における硬さ数のちがいは第 8 表および第 11 表に示すとおりである。この表によれば板目およびまさ目硬さの平均(側面硬さ)は木口硬さの 0.25~0.40 倍である。さらにこの値は比重の小さいものでは少なく、その大きいものではこの比も大きくなり、比重が大きくなると木口と側面における硬さ数の差が少なくなる傾向がみられる。すなわち第 8 表において、比重 0.41 のカツラ材では 0.24、比重 0.50~0.52 のアズキナシ、ハルニレおよびオヒヨウ材ではいずれも 0.33、比重 0.60 のヤマモミジ材 0.43、同 0.64 のエゾイタヤ材 0.41、同 0.65 のアサダ材 0.37 である。第 11 表に示す全乾比重 0.62 のミズナラ材(気乾)では 0.39 である。

以上は北海道産広葉樹材についてのみであるが、すでに発表された文献によると、この側面硬さの木口硬さに対する割合はつぎのようである。カラフト産材ではトドマツ(田中)⁴⁵⁾ は比重(S_0)0.34 で 0.27、エゾマツ(田中・足立)⁴⁶⁾ は比重 0.41 で 0.32、グイマツ気乾材(矢沢)⁴⁴⁾ は比重 0.59 で 0.33 である。このカラフト産針葉樹材についての一連の研究においても比重の増大によって側面硬さ/木口硬さの値は増す傾向がみられる。スギ材についての研究ではこの比は沢田・辻・近藤³⁹⁾ によれば、秋田産(気乾比重 0.27~0.29)で 0.27~0.31、飢肥産(同 0.32~0.38)で 0.30~0.33、深沢・青木⁴⁾ によれば、くらがり国有林産人工植栽材(同 0.39)で 0.30 である。また満久・後藤・佐々木¹⁶⁾ の大阪営林局管内産のもの(同 0.35~0.41)では平均 0.26 である。このスギ材については最後の例を除けば、前述の比重に対する傾向が大体認められる。この比を他の樹

第 11 表 ミズナラ材における木口面、まさ目面および板目面における硬さの比

Table 11. Percentage ratios in the hardness of end, radial and tangential surfaces of Mizunara-wood.

Moisture condition	Hardness ratio		
	End	Radial	Tangential
Green	100	39	47
Air-dry*	100	34	44
Oven-dry	100	29	37

* Adjusted to 15 per cent moisture content.

種についてみると、沢田ほか^{39,40)}によればアカマツ材(気乾比重 0.41~0.47)で 0.20~0.31, エゾマツ材(同 0.43~0.47)で 0.23~0.33, プナ材(同 0.58~0.69)で 0.34~0.35, ミズナラ材(同 0.62~0.78)で 0.37~0.41, ニセアカシヤ材(同 0.72~0.78)で平均 0.45 であって、この試験結果においても大体前述の比重に対する傾向が示されている。比重がさらに大きくなった場合の例として S. GREENE⁵⁾ のリグナムバイタ材についての試験結果があり、この材の平均比重(全乾重量/気乾体積)は 1.21, 硬さ数は木口面 11.58 kg/mm², 板目面 13.86 kg/mm² およびまさ目面 15.60 kg/mm² である。このようにリグナムバイタ材についてはまさ目硬さが最も大で、側面硬さは木口硬さの 1.27 という値になる。

つぎにまさ目硬さと板目硬さの比は、著者の試験結果では第 8 表および第 11 表に示すように、ハルニレおよびオヒヨウ材についてはその差はほとんどなく、他の散孔材およびミズナラ材では板目硬さ/まさ目硬さの値は、およそ 1.25~1.35 の範囲にあっていずれも板目硬さの方が大である。しかしこの値には前述のような比重との関連性はない。

この比も樹種によりまた同一樹種のなかにもかなりちがいがある。既往の文献についてみると、板目硬さの方が大きいものはトドマツ(田中⁴⁵⁾、プナ(沢田ほか³⁹⁾および満久ほか¹⁶⁾、ミズナラ(沢田ほか³⁹⁾、ニセアカシヤ(沢田ほか⁴⁰⁾、ヒノキ(満久ほか¹⁶⁾、ラジアーターパイン(緒方・大河平²⁸⁾などである。板目硬さとまさ目硬さに差がないか、または不明瞭なものはエゾマツ(田中・足立⁴⁶⁾および沢田ほか³⁹⁾、まさ目硬さが板目硬さより大きいものはグイマツ(矢沢⁵⁴⁾、アカマツ(沢田ほか³⁹⁾および満久ほか¹⁶⁾、リグナムバイタ(S. GREENE⁵⁾)である。スギ材については種々の結果がある。すなわち深沢・青木⁴⁾はまさ目硬さは板目硬さよりやや大きいようであるが、同じ値もありとくに 3 等地では両者はほぼ等しいとみてよいようであると述べている。沢田ほか³⁹⁾によればまさ目/硬さ板目硬さの値は 0.83~1.40 の範囲にわたるが、全体の平均値では板目硬さの方がやや大きい。しかし満久ほか¹⁶⁾の結果ではまさ目 0.67 kg/mm², 板目 0.52 kg/mm² でまさ目硬さの方が大きい。

この同一材のまさ目、板目両硬さの差を生ずる原因は年輪における春・秋材の割合、両面における射出線のあらわれ方の差異、その他各樹種の解剖的特性や試験方法によるところが大きいと思われるが、これらについては今後さらに検討を要するものであろう。

以上はすべて球の静的圧入による硬さ試験についての結果であるが、試験方法における円錐圧入方法で述べたように同一樹種であっても円錐圧入によって測定した硬さ数では加圧面による差異は球圧入の場合と全く異なった結果となる。

7. 圧縮強さおよびヤング係数と硬さ数との関係

木材の硬さとほかの機械的性質との関連性については、その試験方法からいって圧縮強さおよび同ヤング係数ととくに関係があると思われる。さきに比重と硬さ数との関係に

において述べたように、同一樹種または材質のよく似た樹種のなかにあつては、比重の増大とともに硬さ数もまた比例的に増す。これは圧縮強さおよび同ヤング係数についてもいえる。したがって硬さ数と圧縮強さおよび同ヤング係数との間にひとつの関連性があることが推察される。すでに沢田・辻・近藤³⁹⁾はスギ、アカマツ、エゾマツ、ブナ、ミズナラおよびニセアカシヤ材について木口面硬さ (H_t , JIS Z 2117 による) と縦圧縮強さ (σ_c) との間には

$$\sigma_c = \alpha \cdot H_t, \quad (\alpha = 90 \pm 5)$$

という関係が成立し、

$$\sigma_c = 90 \cdot H_t$$

としてもその変化係数は $\pm 5.3\%$ であるとのべている。この場合、気乾比重 (r_u) と木口面硬さとの間には

$$H_t = \beta \cdot r_u, \quad (\beta = 7.5 \pm 0.58)$$

さらに気乾比重と縦圧縮強さとの間には

$$\sigma_c = \gamma \cdot r_u, \quad (\gamma = 650 \pm 45)$$

という関係が成立している。

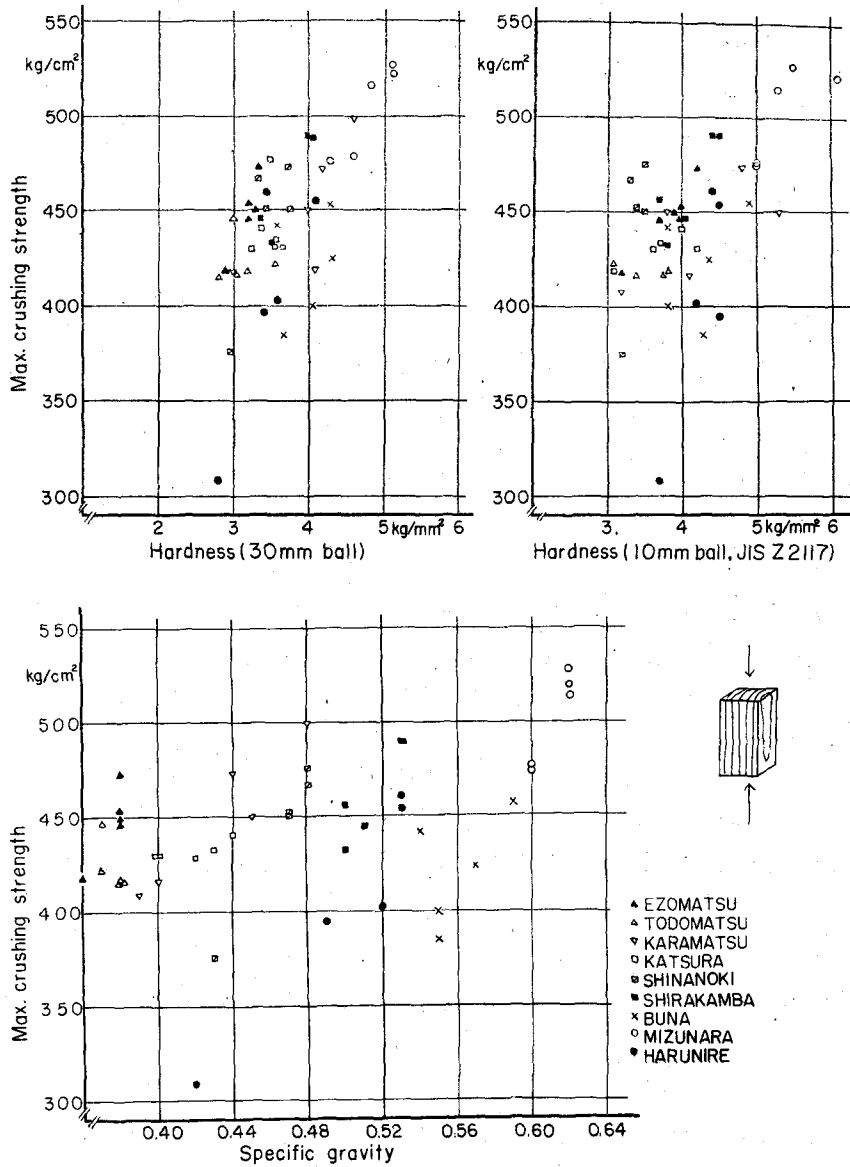
一方、緒方・大河平 (1960)²⁹⁾ はラジアーターパインについて木口面硬さ (H_e , JIS Z 2117 による) と縦圧縮強さ (σ_c) との関係は

$$\sigma_c = 92.7 H_e, \quad (H_e: 1.7 \sim 4.4)$$

という一次式で表わされ、ここで 10% 棄却帯は $\sigma_c \pm (55 \sim 58)$ で、木口面硬さで縦圧縮強さを推定する方法はかなりばらつきが小さく、比重や年輪幅によるよりもはるかに正確であると述べている。この両試験においては木口面硬さ数 (kg/mm^2) の約 90 倍が縦圧縮強さ (kg/cm^2) に相当するという結果がでている。

以上のような結果がすでに発表されているので、著者は 1 樹種についての試験片数を少なくし、樹種を多くした場合に硬さ数と圧縮強さおよびヤング係数との関係は、個々の試験片についてどの程度のばらつきがあるかを確かめるためつぎのような実験を行なった。すなわち、供試材として、針葉樹材 (エゾマツ・トドマツ・カラマツ)、散孔材 (カツラ・シナ・シラカンバ・ブナ)、環孔材 (ミズナラ・ハルニレ) の 9 樹種を用いた。そして第 28~31 図に示すような縦および横圧縮用の $2 \times 2 \times 4 \text{ cm}$ の試験片をつくり、まずそのひとつの $2 \times 2 \text{ cm}$ 面に JIS Z 2117 による 10 mm 球圧入の硬さ試験を、つぎに他の $2 \times 2 \text{ cm}$ 面に 30 mm 球による硬さ試験 (p. 572 の方法による) を行なった。この場合半径方向の横圧縮用試験片については 10 mm 球の試験は木裏に、 30 mm 球の試験は木表に行なった。そ

の後圧縮試験を行なったが、この際試験片の4 cm 長さの面の中央2 cm に鏡式エックス
 ソメーターをとりつけ、0.001 mm の精度で変形量を測定した。この場合同時に、試験片
 全長の変形を試験機のラムヘッドにとりつけた0.01 mm 読みのダイヤルゲージで測定し



第28図 木口面硬さおよび比重と縦圧縮強さとの関係

Fig. 28. Relations of maximum crushing strength in compression parallel to the grain to end hardness and specific gravity. Specific gravity: Based on oven-dry weight and volume at time of test.

た。この変形量の測定を、縦圧縮試験では荷重の 100 kg ごとに、横圧縮試験ではその 10 kg ごとに行なった。その他は JIS Z 2111 (1957) によった。試験片の数は 1 樹種につき各荷重方向 5 個ずつとした。使用した試験機は手動式アムスラー型 4 トン木材試験機である。この試験の結果をすべて付表に示す。なおこの付表にあるヤング係数はすべて鏡式エッキステンソメーターによって測定したものである。

木口面硬さと縦圧縮強さとの関係

第 28 図は 30 mm 球硬さ数 (H_{30})、JIS Z 2117 硬さ数 (H_{JIS}) および比重と縦圧縮強さとの関係を示す。まずここで比重と縦圧縮強さの間には、1 樹種のなかにはかなり明白な関係がみとめられるが、全体としてはそれは認められない。両硬さ数と縦圧縮強さの間には比重の場合よりややまとまった関係がみられ、さらにこの両硬さのうち、30 mm 球による H_{30} の方が一層まとまった範囲にあるといえよう。とくにここに試験に供したカラマツ材のように年輪幅の広いもの (4~8 mm のものが多い) には明らかに 30 mm 球使用の方が縦圧縮強さとの関係はより明白に認められる。JIS Z 2117 によるときは試験面に生ずるヘコミの直径は約 3.5 mm であり、30 mm 球によるときは約 7.9 mm であるので当然であろう。

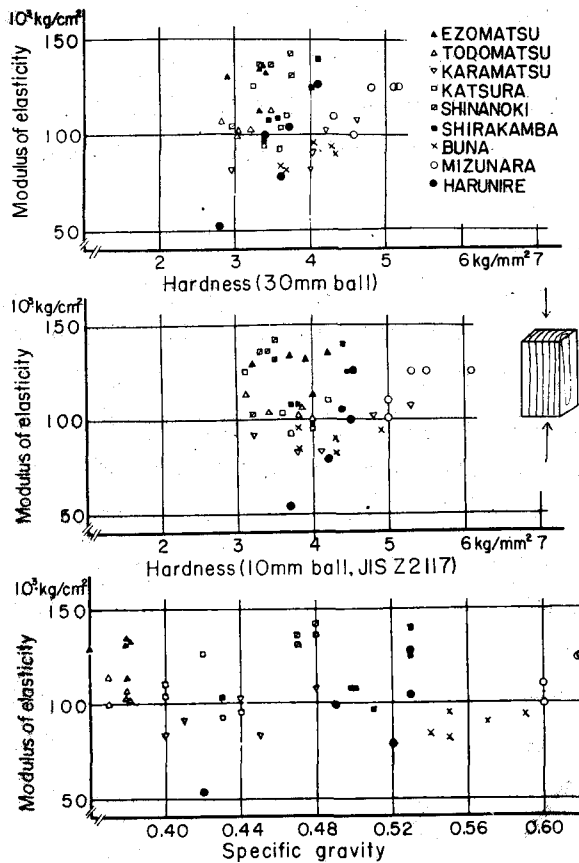
この試験の結果についてみると縦圧縮強さは H_{30} の 99 倍以上、その最大値はさらに +140 kg/cm²、 H_{JIS} の 83 倍以上で、その最大値は +193 kg/cm²、また比重の 700 倍以上で最大値は +207 kg/cm² となる。これによれば上述のように 30 mm 球による硬さ数が縦圧縮強さの推定に最も適すと見える。

また同一比重の他の材に対し、縦圧縮強さの小であるブナおよびハルニレ材においては、硬さ数についても同じく、その同じ他の材より硬さはやや小さい。しかしこれはなお多くの資料について検討されねばならない。

以上のように、この試験における木口硬さ数および比重と縦圧縮強さとの関係においては、30 mm 球による硬さ数と圧縮強さの場合が最もまとまっているが、これにおいてもなお前述の沢田ほかおよび緒方・大河平によるような相関関係はえられなかった。これはこの第 28 図からみられるように、硬さと圧縮強さの関係において樹種による差異がかなり明らかにみられるからで、このため多くの樹種についてはそれを 2~3 種類の群にわけて、それぞれについて硬さ-圧縮強さの関係を求める必要があると考えられる。

木口面硬さと縦圧縮ヤング係数との関係

この関係は第 29 図に示すように H_{30} 、 H_{JIS} および比重のいずれについても前述の場合より両者の関係は不明確である。しかしこの場合、 H_{30} とヤング係数との関係についてみると、カラマツ・ブナ・ミズナラの一群と他の一群にわけられ、それぞれにおいてやや明らかな関係がみられるようである。

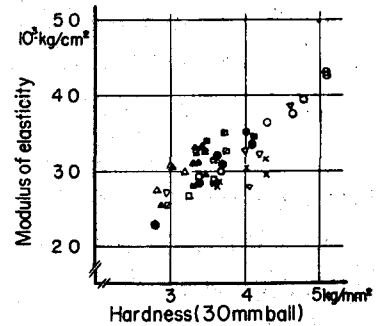


第29図 木口面硬さおよび比重と縦圧縮ヤング係数との関係

Fig. 29. Relations of modulus of elasticity in compression parallel to the grain to end hardness and specific gravity.

の全長の変形をダイヤルゲージで測定し、それから求めたヤング係数について木口硬さ数 (H_{30}) との関係を見ると第30図に示すようになる。このヤング係数は前述の試験片の中央1/2について求めたものより相当小さく約1/3の値である。しかしこの図から明らかなように硬さ数との関係は直線的であり、その分散の程度も前図とくらべてはるかに小さい。木材が圧縮される時、変形の大きさは両端に近い部分と中央部では相当差があり、これはまた樹種によっても異なると考えられる。すなわちこの試験の結果を各樹種ごとに平均するとヤング係数における(中央1/2)/(全長)の値*はエゾマツおよびシナでは4.2~4.3で最も大、トドマツ・カツラおよびシラカンバ3.6、カラマツ・ブナ・ミズナラおよびハルニレでは2.9~3.1である。この値の材の比重との関連性はみとめられない。

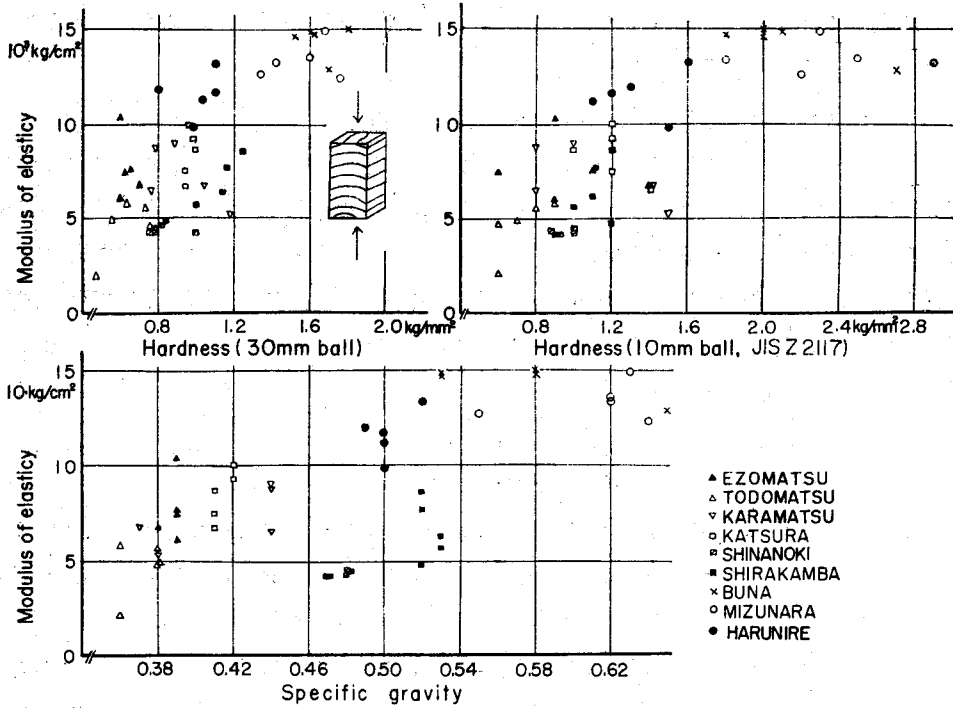
* これは吉論・竹鼻(1957)により全面圧係数となづけられている(沢田¹¹⁾による。



第30図 30mm球による硬さ数と縦圧縮ヤング係数。(このヤング係数はダイヤルゲージにより測定した試験片全長のひずみから求められたものである。)

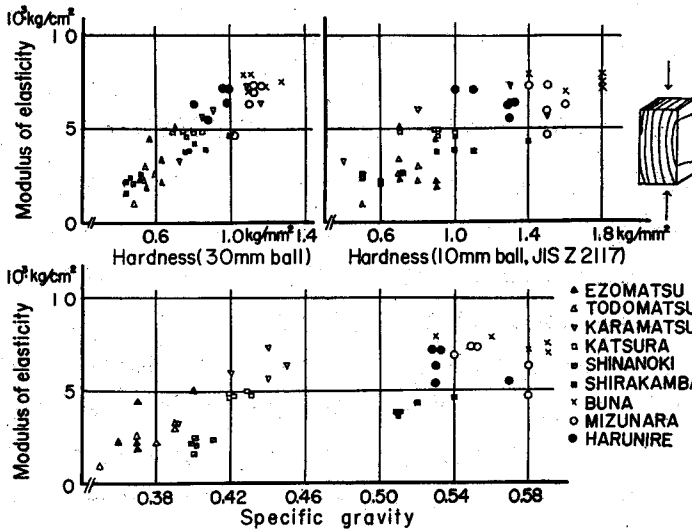
Fig. 30. Relation of modulus of elasticity in compression parallel to the grain to end hardness (30 mm ball). This modulus of elasticity has been calculated from total longitudinal deformation of a specimen measured by using a dial gage.

この結果からは硬さ試験による縦圧縮ヤング係数の推定はあまり正確に行ないえないと思われるが、試験片の大きさ、試験方法の改善によりその推定の可能性も生じてくるとも考えられる。たとえば縦圧縮試験においてその試験片



第31図 板目面硬さおよび比重とまさ目方向の横圧縮ヤング係数との関係

Fig. 31. Relations of modulus of elasticity in compression perpendicular to the grain to tangential hardness and specific gravity. Loading direction: Radial.



第32図 まさ目面硬さおよび比重と板目方向の横圧縮ヤング係数との関係

Fig. 32. Relations of modulus of elasticity in compression perpendicular to the grain to radial hardness and specific gravity. Loading direction: Tangential.

以上のことから、木材の木口面の硬さ数は試験片の全長の変形から求めた圧縮ヤング係数とかなり密接な関係があるといえる。

板目面硬さと半径方向の横圧縮ヤング係数との関係

第31図に示すように、この両者にはかなりの幅はあるが、板目硬さの増大によりヤング係数もまた増す傾向が認められる。しかしその試験片の形態からわかるように硬さ試験を行なった面と、ヤング係数を測定した面との間にはほとんど関連がなく、また硬さ試験を行なう面が春・秋材のいずれか一方のみのこともあるので、この試験において硬さ試験によりヤング係数を推定することは厳密には困難であろう。試験片全体が均質（たとえば年輪幅が均等、心材・辺材のいずれか一方など）な場合には、上述の関係があることになろう。

まさ目面硬さと切線方向の横圧縮ヤング係数との関係

この関係は第32図に示すように、とくに H_{30} とヤング係数との間にかかなり明白に認められる。しかも比重との関係よりも明白である。これはその試験片にみられるように硬さとヤング係数の測定位置において年輪幅、秋材率などに関連があるからである。

硬さ数と圧縮強さとの間にはかなり緊密な関係があるとされているが、本研究によれば樹種が異なれば同一比重でも硬さに差異が生ずる場合があるから、多くの樹種をとり扱う場合は硬さ数により圧縮強さを推定する常数に変化をもたせることも必要と思われる。またヤング係数については縦圧縮の場合は木口硬さと試験片の全長の変形からもとめたヤング係数との間には密接な関係がある。また横圧縮の場合にはまさ目硬さと板目方向横圧縮ヤング係数との間にかかなり明らかな直線関係が認められる。

IV. 繊維板および削片板に対する硬さ試験

さきに述べたように繊維板および削片板に対する硬さ試験方法として第4回 FAO 木材加工会議 (1958) の報告書には JANKA, MONNIN および 30 mm 球圧入の3種類の方法が記載されている。このうち JANKA の方法では直径 11.284 mm の球をその半径の深さまで圧入するので、繊維板ではその厚さよりも圧入深さが大きい場合が多い。このため試験は材料を積層して厚さを 2.5 cm 以上として行なわれるが、この JANKA の方法は木材に対しても適切な方法とはいえないので、繊維板、削片板に対しても適切とはいえないであろう。MONNIN および 30 mm 球の試験では材料の比重により荷重が4種類に分けられ、繁雑である。これらの理由から、著者がさきに提案した 30 mm 球を深さ $5/(3\pi)$ mm まで圧入する方法と JIS Z 2117 の2種の試験を比重の異なる各種材料に対し行ない、その適用性を確めた。材料の大きさはすべて 7.5×15 cm とし、厚さは 2 cm 以上になるように積層した。その結果を第12表に示す。

第12表 削片板および繊維板に対する硬さ試験
Table 12. Hardness tests for particle and fiber boards.

Kind of board	Material	Specific gravity	H_{JIS} (kg/mm ²)			H_{30} (kg/mm ²)			No. of tests
			Av.	Max.	Min.	Av.	Max.	Min.	
Particle board	1 Wood	0.59	1.9	2.2	1.6	1.15	1.28	0.80	10
	2 "	0.61	1.8	2.3	1.0	1.05	1.18	0.91	10
	3 "	0.63	2.1	3.0	1.2	1.18	1.50	0.90	10
	4 "	0.65	2.1	2.8	1.5	1.20	1.37	0.96	10
	5 "	0.71	2.3	3.7	1.8	1.33	1.58	1.21	10
	6 "	0.74	2.4	3.2	1.6	1.50	1.80	1.27	10
	7 Bamboo	0.87	3.0	3.4	2.7	2.22	2.46	2.00	5
Fiber board	1* Bark & wood	0.74	0.7	1.0	0.5	0.47	0.60	0.34	10
	2** "	0.93	1.3	1.9	1.1	0.93	1.06	0.74	10
	3 Bark	1.01	1.8	2.7	1.4	0.74	0.76	0.74	5
	4 Wood	0.32	—	—	—	0.08	0.08	0.08	5
	5 "	0.74	0.6	0.7	0.6	0.46	0.50	0.44	5
	6 "	0.96	3.7	4.0	3.2	2.39	2.76	2.06	5
	7 "	0.98	2.6	2.9	2.4	1.65	1.72	1.50	5
	8 "	1.01	2.4	2.6	2.2	1.11	1.24	1.06	5
	9 "	1.05	2.9	3.2	2.6	1.24	1.36	1.06	5
	10 "	1.05	3.1	3.4	2.5	1.71	1.96	1.60	5
	11 "	1.08	3.1	3.4	2.9	1.59	1.70	1.52	5
	12 "	1.09	4.5	5.0	4.2	2.98	3.44	2.76	5
	13 "	1.13	4.5	5.0	4.3	3.29	3.56	3.04	5
	14 "	1.17	4.2	4.7	4.1	2.13	2.40	2.00	5
	15 "	1.37	2.6	3.1	2.2	1.34	1.40	1.28	5

* Overlaid with wood particles.

** Overlaid with paper.

用いた材料の比重(気乾)は削片板で0.59~0.87, 繊維板で0.32~1.37である。このうち比重0.32の繊維板には10mm球を用いるJISの方法では試験できなかったが, 30mm球を用いる方法では試験できた。また個々の値をみると, JISの方法による場合の方が値のばらつきが大きかった。これはヘコミの直径が小さいので当然である。つぎに比重と硬さとの関係についてみると, 削片板においては比重の増加により硬さ数は比例的に増加しているが, 繊維板においては材料, 添加物などの影響があり, 必ずしも硬さ数は比重に比例していない。このことからFAO報告書にある適用荷重を材料の比重によって分ける方法は妥当でないと考えられる。

繊維板に対する硬さ試験としてJ. KR PAN(1960)¹³⁾の結果がある。同氏は平均比重1.00の繊維板に対し10mm球を100kgの荷重で作用させ, 荷重除去して1分後および10分後

へコミの深さを測定し、その深さから BRINELL 硬さを求め、他の試験結果に比べ硬さは大であるといっているが、これは II の 1 に述べたように荷重除去後の深さからは BRINELL 硬さ数は計算できないので、他の結果とは比較できない。

上述のように著者の提唱する 30 mm 球を $5/(3\pi)$ mm 圧入する方法は繊維板、削片板にも適用しうるし、またその適用範囲も JIS Z 2117 の方法よりも広い。

摘 要

この論文の内容は木材の硬さ試験方法に関するものと、機械的性質としての硬さに関するものとの2つに分けられる。

1. 硬さ試験方法について

木材の硬さ試験に関する種々の方法について検討した結果、静的圧入法においては球を用いる方法が最もよいことを見出した。この球圧入法およびその他の種々の方法についての考察はつぎのように要約される。

1) 10 mm 球をある一定荷重をもって試験面に圧入する BRINELL の方法においては、まず球圧入により生ずるへコミの深さが 0.3~0.6 mm ぐらいになるような荷重を選び、これを 30 秒以上できるだけ長時間保持し、荷重時間による影響を少なくし、荷重をかけたままへコミの深さを測定する。この深さから硬さ数を求める。この方法によれば異なった荷重による試験結果の比較も可能である。また試験に際し球にすずをぬるか、または球と試験片の間にカーボン紙を入れて、荷重除去後に測定したへコミの直径からもとめた硬さ数は上述の硬さ数と理論的に一致する。

2) 同じく 10 mm 球を用いる JIS Z 2117 (1957) の方法は上述の BRINELL の方法を短時間にできるようにしたもので、最も合理的な方法といえる。

10 mm 球使用の硬さ試験に共通することであるが、年輪幅の広い人工植栽樹材の多くなった現在では球が小さいと考えられる。この場合、本法は材料全体の材質判定とそのなかの微小部分の材質判定の中間的な試験法となる。

3) 30 mm 球を使用する静的硬さ試験方法にはすでに井口の方法があり、また最近 FAO 木材加工会議に提案されている繊維板に対する方法がある。前者は球のちがいが以外は 1) に述べた方法とほとんど同じ趣旨である。後者は材料の比重によって 4 種の荷重がきめられており、取りあつかいが不便である。著者は JIS Z 2117 に準じてつぎの方法を提案する。30 mm 球を $5/(3\pi) \approx 0.53$ mm の深さまで圧入するに要する荷重を測定する。この荷重 (kg) の $1/50$ をもって硬さ数 (kg/mm^2) とする。圧入速度は JIS と同じく 0.5 mm/min とする。この方法は繊維板および削片板に対しても適用しうる。

4) 直径 11.284 mm の球をその半径の深さまで圧入する JANKA の方法は、多くの研

究者によって指摘されているように、その圧入深さが大き過ぎて試験片に大きな破壊を生じ、その完全な圧入時にはヘコミの状態が不安定である。このため正確な測定は行なわれがたいと思われる。

5) 直径 30 mm の円筒側面を圧入する MONNIN の方法には現在 200 kg および 100 kg の 2 種類の荷重があるが、この 2 種の荷重を用いた場合、硬さ数は異なり、これらは互いに比較できない。また FAO の繊維板に対する方法は木材の場合と異なり適用荷重が 4 種類もあり、このため比重の異なる繊維板の硬さの比較、さらに木材との比較もできない。この方法を押し進めるには適用荷重を統一するか、圧入深さを一定にする方法をとらねばならないと考えられる。

6) 針を圧入する H. MAYER-WEGELIN の Härtetaster は円盤上の半径方向における微小部分の材質の差を測定するのに適しており、また針の先端を平らにした H. H. SACHSSE の方法も同様の目的に適している。これらの方法は球圧入法とは別の目的に用いられるべきものである。

7) 円錐を圧入する HÖPPLER-Konsistometer ではその方法に問題があり、今後なお検討されねばならない。

8) くさびを圧入する方法は硬さ試験というより割裂試験に近いものである。

9) 長方形、円形などの平らな面を押しつける方法は部分圧縮試験として取りあつかわれるべきである。

2. 機械的性質としての木材の硬さについて

木材に対する硬さ試験は上述の方法のうち、10 mm 球を用いる BRINELL の方法および JIS Z 2117 の方法ならびに著者の提案した 30 mm 球圧入の方法で行なわれた。

試験結果は次のように要約される。

1) 各樹種における BRINELL 硬さ数の出現状態はその比重の出現状態に似ている。このため、たとえば円盤上の半径方向について一定間隔に硬さ数を測定すればその比重の分布状態を推定しうるであろう。

2) ミズナラ材についての試験結果では、1 地方内における各供試木別の硬さ数のばらつきは産地別のそれより大であった。

3) 年輪幅と木口硬さとの関係は散孔材においては明確でない。しかし半環孔材であるヤマザクラ材では年輪幅の広いものの硬さ数は大であった。環孔材ではハルニレ・オヒヨウおよびミズナラはともに年輪幅が広くなれば硬さ数も増す傾向がみられたが、ある程度以上広くなるとその関係は不明確であった。針葉樹材の場合には年輪幅の増大にともなって硬さ数は減ずる傾向がみられた。しかし年輪幅のとくに狭い部分 (0.5 mm 以下) の硬さ数は大きくない。

4) 同一樹種については比重が増せば硬さ数が増すのは当然であるが、異樹種間においては同一比重のものは必ずしも同じ硬さ数を示さない。同一比重の場合の硬さ数は環孔材の方が散孔材よりやや小さいという傾向がみられた。

5) ミズナラの生材、気乾材および全乾材について試験した結果では、硬さ数はそれぞれ各面とも約 50, 100 および 200 という割合になった。年輪幅、比重、加圧面の相違による硬さ数の差異は含水率の低いものほど大きかった。

6) 木口面と側面の硬さ数の差は低比重のものでは大きく、比重の増大とともに少なくなる傾向がみられた。板目面とまさ目面の差は樹種によって異なる。散孔材では一般に板目面の硬さが大であった。環孔材では、ミズナラは前者と同じであったが、ハルニレおよびオヒヨウではこの差がみられなかった。

7) 木口硬さと縦圧縮強さの間にはかなり緊密な関係があるとされているが、多くの樹種を混合した場合にはややばらつきが大きい。このため多くの樹種に対してはこれを2~3種類の群に分け、それぞれについて両者の木口硬さと圧縮強さの関係を求める必要があると考えられる。

8) 縦圧縮の場合には、木口硬さと試験片全長の変形から求めたヤング係数との間にはかなり明白な直線関係がみとめられた。また横圧縮の場合にはまさ目硬さは切線方向の横圧縮ヤング係数とかなり明白な関係があったが、板目硬さと半径方向の横圧縮ヤング係数との間には上述の関係はみられなかった。このため硬さ数による圧縮ヤング係数の推定も半径方向の圧縮を除けば、かなり正確に行ないうるのであろう。

引用ならびに参考文献

References

- 1) BÜSGEN, H.: Zur Bestimmung der Holzhärten. *Zeitschr. f. Forst- u. Jagdw.* **36**. 543-561. 1904.
- 2) 朱 會 芳: 中国木材之硬度研究. *金陵学報*. **5**. 1-134. 1935.
CHU Hwei-fang: Untersuchungen über die Härte der in China wachsenden Hölzer. *Nanking Jour.* **5**. 1-134. 1935.
- 3) FAO: The final report of the 4th Conference on Wood Technology of FAO. 1958.
- 4) 深沢和三・青木明治: 中部地方における人工植栽スギ材の生長状況と理学的性質との関係. 第6報カタサ試験. *岐阜大農研報*. **12**. 109-117. 1960.
FUKAZAWA, K. and AOKI, A.: Studies on the relation between physical properties and growth condition for planted SUGI (*Cryptomeria japonica* D. DON) in central district of Japan. (VI) On the hardness test. *Res. Bull. Fac. Agr. Gifu Univ.* **12**. 109-117. 1960.
- 5) GREENE, S.: An investigation of certain physical and mechanical properties of Lignum-vitae. *For. Prod. Jour.* **9**. 303-307. 1959.
- 6) HOFFMANN, H.: Härteprüfung des Holzes durch Stempeldruck. *Holz als Roh- und Werkstoff*, **1**. 289-293. 1938.

- 7) HUBER, K.: Die Prüfung der Hölzer auf Kugeldruckhärte. *Holz als Roh- und Werkstoff*, **1**. 254-259. 1938.
- 8) 井口常雄 (IGUCHI, T.): 木材試験法. 実験工学講座 II. 15. 共文社. 東京. 1935 (pp. 79-84).
- 9) JANKA, G.: Die Härte des Holzes. *Centralbl. f. d. ges. F.* **32**. 193-202. 1906.
- 10) JANKA, G.: Die Härte der Hölzer. *Mitt. a. d. forst. Versuchswesen Österreich*, **39**. 1915.
- 11) 北原覚一: 木材硬度試験法について. *木材工業* **2**. 12-15. 1947.
KITAHARA, K.: On the testing method of wood hardness. *Wood Industry*, **2**. 12-15. 1947.
- 12) KOLLMANN, F.: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. 2. Aufl., Bd. **1**. Berlin/Göttingen/Heidelberg 1951 (ss. 909-926).
- 13) KRAPAN, J.: Die physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Holzfasertafeln. *Holz als Roh- und Werkstoff*, **18**. 452-458. 1960.
- 14) KUMICHEL, W. und HOLZ, D.: Das HÖPPLER-Konsistometer—ein Gerät zur Bestimmung der Kegeldruckhärte von Hölzern. *Holz als Roh- und Werkstoff*, **13**. 188-193. 1955.
- 15) LUDWIK, P.: Die Kegelprobe. Ein neues Verfahren zur Härtebestimmung von Materialien. Berlin 1908.
- 16) 満久崇磨・後藤輝男・佐々木光 (MAKU, T., GOTO, T. and SASAKI, H.): 木材材質に関する調査 (第1報). 大阪営林局. 1960.
- 17) 織田視明: 振り子装置による木材の硬さ試験について. 東大演報. **49**. 205-216. 1955.
MAMADA, S.: Hardness test of wood by a pendulous friction apparatus. *Bull. Tokyo Univ. For.* **49**. 205-216. 1955.
- 18) MAYER-WEDELIN, H.: Der Härtetaster. *A. Forst- u. Jagd-Ztg.* **122**. 12-23. 1950.
- 19) MIYAJIMA, H.: The hardness test by static ball indentation for wood, especially for nara-wood under various moisture conditions. *Res. Bull. Coll. Exp. For., Hokkaido Univ.* **17-2**. 746-768. 1955.
- 20) 宮島 寛: 苫小牧演習林産人工植栽ストローブマツ, パンクスマツおよびカラマツの材質試験. 北大演報. **19-3**. 99-216. 1958.
MIYAJIMA, H.: The physical and mechanical properties of plantation-grown white pine, jack pine and Japanese larch in the Tomakomai Experiment Forest of Hokkaido University. *Res. Bull. Coll. Exp. For., Hokkaido Univ.* **19-3**. 99-216. 1958.
- 21) MIYAJIMA, H.: Comparison between ball and cylinder methods for testing hardness of wood. *Jour. Jap. Wood Res. Soc.* **7**. 8-12. 1961.
- 22) MÖRATH, E.: Studien über die hygroskopischen Eigenschaften und die Härte der Hölzer, Hannover 1932.
- 23) NARAYANAMURTI, D. und PLANT, H. C.: Orientierende Untersuchungen mit einem Kugelfallversuch an Vollholz, Holzwerkstoffen und Kunststoffen. *Holz als Roh- und Werkstoff*, **18**. 447-451. 1960.
- 24) NEDBAL, F.: Der Vergleich zwischen der HÖPPLER- und BRINELLHärte des Holzes. *Holz als Roh- und Werkstoff*, **15**. 215-220. 1957.
- 25) NEDBAL, F.: Die Anwendung des HÖPPLER-Konsistometers zur Verformungsmessung an Kiefernspiltholz. *Holz als Roh- und Werkstoff*, **19**. 9-14. 1960.
- 26) 緒方清八: 鋼球圧入による木材の変形 (1). 61 回日林講. 213-214. 1952.
OGATA, S.: Déformation du bois produete une bille d'acies sous une pression déterminée. 1. Hinoki. *Trans. 61st Meet. Jap. For. Soc.* 213-214. 1952.

- 27) 緒方清八：木材の硬度，硬性，カタサー日本に於けるカタサ試験の史的考察一。木材誌。2. 114-118. 1956.
OGATA, S.: Recherches historiques sur la méthode expérimentale de la dureté-du bois au Japon. *Jour. Jap. Wood Res. Soc.* 2. 114-118. 1956.
- 28) 緒方清八・大河平行雄：ニュージーランド産ラジアーターパインの縦圧縮およびカタサ試験。木材誌。6. 223-226. 1960.
OGATA, S. and OKOHIRA, Y.: On the compression parallel to grain and hardness tests of "Radiata Pine" grown in New Zealand. *Jour. Jap. Wood Res. Soc.* 6. 223-226. 1960.
- 29) 大沢正之・石田茂雄 (OHSAWA, M. and ISHIDA, S.): 北海道産潤葉樹の材質に関する研究. I. なら属3種の年輪密度, 比重及強度. 北大森林利用研抄報. 1. 1-7. 1945.
- 30) 大沢正之・中野 学・橋詰猪一郎 (OHSAWA, M., NAKANO, M. and HASHIZUME, I.): 北海道産潤葉樹の材質に関する研究. II. 散孔材6種 (*Betula*, *Fagus*, *Alnus*, *Tilia*, *Magnolia* sps.) の年輪密度, 比重及強度. 北大森林利用研抄報. 3. 1-9. 1946.
- 31) 大沢正之・宮島 寛：北海道産広葉樹材八種の硬度試験. 北大演報. 15-2. 263-301. 1952.
OHSAWA, M. and MIYAJIMA, H.: Hardness test of woods, 8 species of broad-leaved trees in Hokkaido. *Res. Bull. Coll. Exp. For., Hokkaido Univ.* 15-2. 263-301. 1952.
- 32) 大沢正之・宮島 寛：鋼球圧入による木材の変形とその測定法. 北大農邦記. 2-1. 1-5. 1954.
OHSAWA, M. and MIYAJIMA, H.: Deformation of wood due to ball indentation and its measuring method. *Memo. Fac. Agr. Hokkaido Univ.* 2-1. 1-5. 1954.
- 33) 大沢正之・宮島 寛・東山一男：北海道産ナラ材の材質に関する研究. 1. 産地別ナラ材の材質の比較. 北大演報. 17-2. 793-869. 1955.
OHSAWA, M., MIYAJIMA, H. and HIGASHIYAMA, K.: Studies on the properties of nara-wood grown in Hokkaido. 1. Comparisons of some properties of nara-wood grown in various localities. *Res. Bull. Coll. Exp. For. Hokkaido Univ.* 17-2. 793-869. 1955.
- 34) 小野鑑正 (ONO, A.): 材料力学. 丸善. 東京. 1938.
- 35) PALLAY, N.: Über die Holzhärteprüfung. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 1. 126-130. 1938.
- 36) PECHMANN, H. von: Untersuchungen über Gebirgsfichtenholz. *Forstw. Cbl.* 73. 65-91. 1954.
- 37) SACHSSE, H. H.: Zur Methodik der Strukturprüfung von Hölzern mit dem Nadelstichverfahren. *Holzforschung*, 14. 168-178. 1960.
- 38) 沢田 稔：トドマツあて材の剪断及び硬度試験. 日林誌. 33. 379-383. 1951.
SAWADA, M.: Tests on the shear and hardness of compression wood of Todo-fir (*Abies Mayriana* MIYABE et KUDO). *Jour. Jap. For. Soc.* 33. 379-383. 1951.
- 39) 沢田 稔・辻 完司・近藤孝一：木材のカタサと圧縮強度との関係. (第1報) 林試報. 78. 149-174. 1955.
SAWADA, M., TSUJI, K. and KONDO, K.: Relation of hardness to compressives trength of wood. Rep. 1. *Bull. Gov. For. Exp. Sta.* 78. 149-174. 1955.
- 40) 沢田 稔・山井良三郎・辻 完二・石川知子・児玉芳郎・近藤孝一：秋田産ニセアカシアの材質試験. 林試報. 90. 145-244. 1956.
SAWADA, M., YAMAI, R., TSUJI, K., ISHIKAWA, T., KODAMA, Y. and KONDO, K.: Strength and related properties of Black Locust (*Robinia pseudoacacia* L.) grown in Akita prefecture, Japan. *Bull. Gov. For. Exp. Sta.* 90. 145-244. 1956.
- 41) 沢田 稔：木材の強度特性に関する研究. 主としてその木材梁への応用. 林試報. 108. 115-224. 1958.

- SAWADA, M.: Studies on the mechanical characteristics of woods. Mainly, as affecting factors of wood beams. *Bull. Gov. Exp. Sta.* 108. 115-224. 1958.
- 42) SEKIYA, F.: Experimental study on the static ball indentation test of wood. *Bull. Mié Coll. Agr. For.* 7. 1-77. 1936.
- 43) 関谷文彦 (SEKIYA, F.): 木材強弱論. 賢文館. 東京. 1939 (pp. 224-253).
- 44) 田中勝吉 (TANAKA, K.): 木材硬度試験. 林学会雑誌. 34. 62-74. 1926.
- 45) 田中勝吉: 樺太産有用針葉樹材の機械的性質に関する研究. I. 呂呂産トドマツ. 樺太中試報. 2類2号. 1-131. 1932.
TANAKA, K.: Untersuchungen über die Elastizität und Festigkeit der wichtigsten Nadelhölzer Südsachalins. I. Tanne von Horo. *Rept. Sachalien Cent. Exp. Stat. Ser. 2, No. 2.* 1-131. 1932.
- 46) 田中勝吉・足立三郎: 樺太産有用針葉樹材の機械的性質に関する研究. II. 呂呂産エゾマツ. 樺太中試報. 2類4号. 1-129. 1933.
TANAKA, K. und ADACHI, S.: Studien über die mechanischen Eigenschaften der wichtigsten Nadelhölzer Südsachalins. II. Fichtenholz aus Horo. *Rept. Sachalien Cent. Exp. Stat. Ser. 2, No. 4.* 1-129. 1933.
- 47) THUNELL, B.: Gütebestimmung und zerstörungsfreie Prüfung von Bauholz. *Holz als Roh- und Werkstoff.* 13. 101-111. 1955.
- 48) TIMOSHENKO, S. and MACCULLOUGH, G. H.: Elements of strength of materials. 3rd ed. *D. Van Nostrand Co.* 1949 (pp. 354-357).
- 49) TREDELENBURG, R.: Die Härteprüfung der Hölzer. Ein Vergleich der Verfahren von BRINELL und JANKA. *Forstarchiv* 9. 37-43. 1933.
- 50) TREDELENBURG, R. und MAYER-WEGELIN, H.: Das Holz als Rohstoff. 2. Aufl. *München*, 1955.
- 51) 渡辺 誠・陳 陸 圻: 満洲国産材の材質試験. (第1報). 東大演報. 30. 1-22. 1942.
WATANABE, M. and LU Chi Chen: The physical properties of Manchurian woods (1). *Bull. Tokyo Imp. Univ. For.* 30. 1-22. 1942.
- 52) 山井良三郎: 木材の応力-歪曲線 (2). 部分圧縮応力-歪曲線 (1). 林試報. 78. 101-147. 1955.
YAMAI, R.: Stress-strain curves of wood. (Rept. 2) Stress-strain curves for partial compression perpendicular to grain (Schwellendruck). (1). *Bull. Gov. For. Exp. Stat.* 78. 101-147. 1955.
- 53) 山井良三郎: 木材の圧縮異方性に関する研究. 林試報. 113. 57-110. 1959.
YAMAI, R.: Studies on the orthotropic properties of wood in compression. *Bull. Gov. For. Exp. Stat.* 113. 57-110. 1959.
- 54) 矢沢亀吉: 樺太産有用針葉樹材の機械的性質に関する研究. III. 敷香郡内川産グイマツ. 樺太中試報. 2類6号. 1-317. 1935.
YAZAWA, K.: Untersuchungen über die mechanisch-technischen Eigenschaften der wichtigsten Nadelhölzer Südsachalins. III. Lärchen aus Schikka. *Rept. Sachalien Cent. Exp. Stat. Ser. 2, No. 6.* 1-317. 1935.
- 55) 矢沢亀吉・深沢和三: 中部地方における人工植栽ヒノキ材の生長状況と理学的性質との関係. 第5報. 飽湿, 気乾及び絶乾状態の縦圧縮強さについて. 岐阜大農研報. 7. 70-77. 1956.
YAZAWA, K. and FUKAZAWA, K.: Studies on the relation between physical properties and growth condition for planted HINOKI (*Chamaecyparis obtusa* ENDL.) in central district of Japan (V). On the compressive strength parallel to grain under green, air-dry and oven-dry conditions. *Res. Bull. Fac. Agr. Gifu Univ.* 7. 70-77. 1956.

Summary

In this paper, various methods of testing hardness of wood were discussed within a limitation of the static indentation hardness and also the results of hardness tests for wood were presented in connection with its physical and compressive properties. The results are summarized as follows:

1. On the method of testing hardness of wood.

1) The ball indentation method is the most suitable for testing the hardness of wood. In the BRINELL method, the hardness number should be based on the diameter of indentation remaining on the specimen after removal of the ball or on the depth of indentation measured under load. It seems unreasonable that the hardness number should be obtained from the depth of indentation remaining on the specimen after removal of the ball.

2) In using a 10 mm ball, it seems that the method of JIS Z 2117 (1957) is the most reasonable, because tests according to this method may be quickly, easily and accurately made.

3) To get a fair average for a wider area of fine and coarse grain or spring and summer wood, it may be convenient to use a 30 mm diameter ball instead of a 10 mm ball. In using the 30 mm ball, the author proposes the following method: the measurement is made of the load required to indent the ball into wood surface to a depth of $5/(3\pi) \approx 0.53$ mm. In this case, the ball is indented at a uniform rate of 0.5 mm per min. and 1/50 of the load readings (kg) is accepted as the hardness number (kg/mm^2). This method is applicable to the hardness test for fiber and particle boards.

4) In the JANKA method, since an excessive penetration, 5.642 mm in depth, is made on the specimen and the rate of penetration (6 mm per min.) seems too fast, a fair index of the hardness may not be obtained.

5) In the MONNIN method of using a cylindrical face, the hardness values based on different applied loads are not comparable with each other. In order to carry out this test rationally, a fixed amount of load, as for example 200 kg, should be applied. But in this case, if a fracture takes place on the surface of indentation in very soft material, or the impression is too small to measure it in case of a very hard material the measurement should be made of the load required to indent the cylinder into the specimen until a certain depth is reached, like the method of JIS Z 2117.

6) The method of using a needle is fundamentally different from the ball indentation method. The needle penetration method may be convenient for measuring the variation in hardness of a disk of wood and the difference between spring and summer wood.

7) W. KUMICHEL & D. HOLZ¹⁴⁾ used a HÖPPLER-Konsistometer fitted with a cone for testing the hardness of wood. In their test, the depth of indentation was measured after removal of the cone, and the load-hardness relation was obtained. The hardness number (*Kegelstießpunkt*) is the pressure in kp per mm^2 of the projection area of the

impression. Since the load-hardness relations in their test varied irregularly, they determined an optimum load for each species as for example 40 kp for beech wood and 20 kp for pine wood. In order to determine the optimum load, many preliminary experiments would have to be carried out before a regular test is made. This determination of the optimum load complicates the test.

8) G. JANKA⁹⁾ used a wedge for determining hardness of wood, but this might really be a cleavage test.

9) Since the method of using a flat circular or rectangular face may be one characterized by partial compression parallel or perpendicular to the grain, it may be seen that such test differs from the hardness test.

2. On the results of hardness tests for wood.

Hardness tests for wood were made in accordance with (a) the BRINELL method using a 10 mm ball (H_B), (b) the method of JIS Z 2117 (H_{JIS}) or (c) the author's 30 mm ball method (H_{30}).

1) Frequency curves of the hardness number of wood, especially of the end hardness number, are very similar to those of its specific gravity.

2) Studies on the hardness of Mizunara-wood show that variation in the hardness traceable to region does not exceed in magnitude that encountered in different trees in a given locality.

3) For the case of diffuse-porous woods such as *Cercidiphyllum*, *Acer*, *Sorbus* and *Ostrya* species, the rate of growth apparently has little effect upon the hardness. For the ring-porous woods such as *Ulmus* and *Quercus* species, the hardness increases with increase in the width of annual rings, especially within the range of 0.5-2.0 mm. For the semi-ring-porous wood such as *Prunus* species, the hardness increases with increase in the width of annual rings within the range of 2-5 mm. For the coniferous woods such as *Pinus*, *Larix* and *Abies* species, the curves presenting this relation indicate an optimum growth-rate (1-2 mm of ring width) for the highest hardness values.

4) For any species, the hardness increases directly with increase in its specific gravity. In this case, the end and tangential hardness values for the diffuse-porous and semi-ring-porous woods noted above are slightly higher than those for *Ulmus* species with the same specific gravity. In the radial hardness, however, this difference is not seen.

5) The ratio in the hardness of green, air-dried (15 per cent) and oven-dried Mizunara-wood is approximately 0.5:1:2 on end, radial and tangential surfaces.

6) The side hardness is about 25-40 per cent of the end hardness and this ratio decreases with increase in the specific gravity. The tangential hardness is about 125-135 per cent of the radial hardness for some hardwoods excepting *Ulmus* species in which such difference is not seen.

7) When hardness and compression tests are made on specimens from many species of woods, the end hardness has an approximate linear relation with the modulus of elasticity which is obtained from the total deformation of the specimen in compression parallel to the grain.

8) The radial hardness increases directly with increase in the modulus of elasticity in compression perpendicular to the grain when the load is applied in the tangential direction of the specimen.

List of species used (mostly Japanese names)

- Todomatsu (*Abies sachalinensis* MASTERS)
- Ezomatsu (*Picea jezoensis* CARR.)
- Karamatsu (*Larix leptolepis* GORDON)
- White pine (*Pinus strobus* L.)
- Jack pine (*Pinus banksiana* LAMB.)
- Shirakamba (*Betula platyphylla* SUKATCH. var. *japonica* HARA)
- Asada (*Ostrya japonica* SARG.)
- Buna (*Fagus crenata* BL.)
- Mizunara (*Quercus mongolica* FISCH. var. *grosseserrata* REHD. et WILS.)
- Harunire (*Ulmus davidiana* PLANCH. var. *japonica* NAKAI)
- Ohyo (*Ulmus laciniata* MAYR)
- Katsura (*Cercidiphyllum japonicum* SIEB. et ZUCC.)
- Shirozakura (*Prunus maximowiczii* RUPR.)
- Ezoyamazakura (*Prunus sargentii* REHD.)
- Azukinashi (*Sorbus alnifolia* C. KOCH)
- Ezotitaya (*Acer mono* MAXIM.)
- Yamamomiji (*Acer palmatum* THUNB. var. *matsumurae* MAKINO)
- Shinanoki (*Tilia japonica* SIMK.)

付 表

同一試験片に対する硬さおよび圧縮試験結果

(記 号)

W: 平均年輪幅 (mm)*r_u*: 比 重 (全乾重量/試験時体積)*u*: 含 水 率 (%)*JIS*: *JIS Z 2117* による硬さ数 (kg/mm²)30 mm: 30 mm 球による硬さ数 (kg/mm²)*SPL*: 比例限度応力 (kg/cm²)*C*: 圧 縮 強 さ (kg/cm²)*E*: ヤ ン グ 係 数 (10³·kg/cm²)

APPENDIX

Results of the hardness and compression tests carried out on a specimen.

Symbols used are as follows:

W: Average width of annual rings in mm,*r_u*: Specific gravity based on oven-dry weight and volume at time of test,*u*: Moisture content in per cent of oven-dry weight,*JIS*: Hardness number obtained according to *JIS Z 2117* method in kg/mm²,30 mm: Hardness number obtained by using a 30 mm ball in kg/mm²,*SPL*: Stress at proportional limit in kg/cm²,*C*: Maximum crushing strength in kg/cm²,*E*: Modulus of elasticity in 10³ kg/cm².

Appendix: Hardness and compression tests.

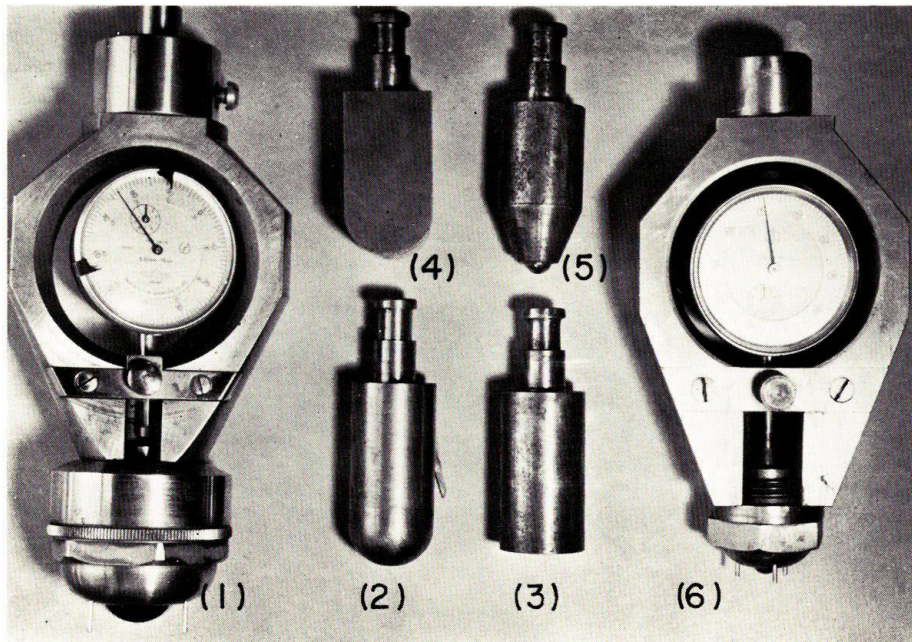
Species	Surface loaded	No.	W	r_u	u	Hardness		Compression		
						JIS	30 mm	SPL	C	E
EZOMATSU	End	1	1.8	0.36	12.6	3.2	2.90	350	418	130
		2	1.9	0.38	12.7	4.2	3.36	375	473	136
		3	1.7	0.38	12.8	3.7	3.33	375	446	134
		4	1.9	0.38	12.7	4.0	3.32	276	454	113
		5	1.7	0.38	12.7	3.9	3.40	350	450	132
TODOMATSU	End	1	2.2	0.37	12.5	4.0	3.01	344	447	101
		2	2.4	0.38	12.6	3.4	3.04	294	416	104
		3	2.2	0.38	12.7	3.8	2.83	293	416	107
		4	2.2	0.38	12.1	3.8	3.20	329	417	103
		5	1.0	0.37	12.4	3.1	3.48	313	422	114
KARAMATSU	End	1	4.8	0.44	12.3	4.8	4.20	352	473	102
		2	4.5	0.40	13.0	4.1	2.96	277	416	83
		3	4.8	0.45	12.5	3.8	4.00	302	450	83
		4	5.0	0.41	13.0	3.2	4.08	275	408	92
		5	2.8	0.48	12.5	5.3	4.60	352	499	108
KATSURA	End	1	1.3	0.40	12.9	4.2	3.68	275	430	110
		2	1.8	0.43	12.8	3.7	3.58	252	433	92
		3	1.7	0.42	12.7	3.1	3.24	252	428	126
		4	1.8	0.44	12.3	4.0	3.38	275	441	95
		5	1.3	0.40	12.0	3.6	3.56	250	430	104
SHINA	End	1	1.6	0.47	11.3	3.5	3.74	275	450	131
		2	1.0	0.48	11.6	3.3	3.32	251	467	136
		3	1.6	0.47	11.4	3.4	3.42	251	452	136
		4	1.0	0.48	11.1	3.5	3.72	276	475	142
		5	1.0	0.43	11.1	3.2	2.94	200	375	103
SHIRAKAMBA	End	1	3.1	0.50	12.4	3.7	3.44	296	457	108
		2	3.1	0.53	12.6	4.4	4.10	300	490	140
		3	4.8	0.50	12.8	3.8	3.56	222	432	108
		4	3.2	0.53	12.7	4.5	4.01	350	490	125
		5	4.5	0.51	12.8	4.0	3.38	300	445	97
BUNA	End	1	1.5	0.54	12.2	3.8	3.60	202	442	84
		2	1.7	0.57	12.0	4.3	4.32	253	424	90
		3	1.6	0.55	12.5	3.8	4.04	200	400	95
		4	1.4	0.55	12.3	4.3	3.66	200	385	82
		5	2.0	0.59	12.2	4.9	4.28	253	454	94
MIZUNARA	End	1	2.0	0.62	13.0	5.5	5.12	375	528	125
		2	1.8	0.62	14.0	6.1	5.12	325	522	125
		3	1.7	0.60	13.3	5.0	4.30	275	475	110
		4	1.8	0.62	13.7	5.3	4.78	275	515	125
		5	1.7	0.60	13.3	5.0	4.64	300	476	100
HARUNIRE	End	1	0.7	0.42	12.9	3.7	2.80	175	308	53
		2	1.2	0.53	12.7	4.4	3.72	270	461	104
		3	0.9	0.49	12.8	4.5	3.40	247	395	99
		4	1.2	0.53	12.6	4.5	4.10	246	454	126
		5	0.9	0.52	12.6	4.2	3.60	222	402	78

Appendix: Hardness and compression tests (continued).

Species	Surface loaded	No.	W	r_u	u	Hardness		Compression	
						JIS	30 mm	SPL	E
EZOMATSU	Tangential	1	2.0	0.39	13.0	0.9	0.60	24.9	10.4
		2	2.0	0.38	13.7	1.4	0.70	17.3	6.8
		3	1.8	0.39	13.2	0.9	0.60	19.8	6.1
		4	1.7	0.39	13.0	0.6	0.62	19.9	7.5
		5	1.9	0.39	12.8	1.1	0.75	25.0	7.6
	Radial	1	2.0	0.40	12.8	0.7	0.70	25.0	5.1
		2	1.9	0.37	12.6	0.9	0.56	12.4	4.5
		3	2.0	0.37	13.0	0.9	0.55	8.8	1.9
		4	2.0	0.36	12.8	0.7	0.51	8.7	2.3
		5	1.9	0.37	12.6	0.9	0.63	11.5	2.2
TODOMATSU	Tangential	1	2.1	0.38	12.4	0.8	0.73	19.7	5.6
		2	2.3	0.38	12.5	0.6	0.76	19.4	4.8
		3	2.5	0.36	12.8	0.6	0.47	11.2	2.1
		4	2.5	0.38	12.6	0.7	0.55	14.5	4.9
		5	2.4	0.36	13.0	0.9	0.63	17.2	5.8
	Radial	1	2.4	0.39	12.3	0.7	0.59	12.1	2.6
		2	2.2	0.35	12.5	0.5	0.48	6.1	1.0
		3	2.1	0.39	12.3	0.8	0.54	12.2	3.0
		4	2.0	0.39	12.3	0.7	0.63	12.4	3.4
		5	2.2	0.38	12.2	0.8	0.52	12.3	2.2
KARAMATSU	Tangential	1	7.4	0.38	13.0	1.5	1.18	27.4	5.3
		2	7.8	0.37	13.0	1.4	1.04	32.5	6.8
		3	4.0	0.44	12.9	0.8	0.76	32.3	6.5
		4	4.0	0.44	12.8	1.0	0.88	35.0	9.0
		5	3.6	0.44	12.7	0.8	0.78	30.0	8.8
	Radial	1	7.5	0.39	12.9	0.4	0.72	32.4	3.3
		2	5.0	0.42	12.8	0.8	0.90	35.0	6.0
		3	4.3	0.44	12.7	1.5	0.84	24.8	5.7
		4	3.4	0.45	12.0	1.3	1.16	37.5	6.4
		5	2.6	0.44	13.1	1.3	1.08	37.0	7.5
KATSURA	Tangential	1	1.5	0.41	11.6	1.2	0.94	32.5	7.5
		2	1.3	0.42	11.6	1.2	0.96	32.5	10.0
		3	1.5	0.42	12.1	1.2	0.98	35.0	9.2
		4	1.6	0.41	12.0	1.4	0.94	32.6	6.7
		5	1.3	0.41	11.8	1.0	0.99	32.5	8.7
	Radial	1	1.7	0.42	12.0	0.9	0.68	24.9	4.9
		2	1.7	0.42	12.1	0.9	0.76	25.3	4.6
		3	1.7	0.42	12.0	0.7	0.84	29.9	4.8
		4	1.7	0.43	12.0	0.9	0.74	24.9	4.9
		5	1.8	0.43	12.2	1.0	0.80	24.9	4.8
SHINA	Tangential	1	1.1	0.48	10.9	1.0	0.82	22.4	4.6
		2	1.1	0.47	11.1	0.9	0.78	22.1	4.2
		3	1.3	0.47	11.1	1.0	0.75	17.3	4.2
		4	1.1	0.48	11.2	0.9	0.90	14.9	4.2
		5	1.3	0.48	11.0	0.9	0.78	20.0	4.3

Appendix: Hardness and compression tests (continued).

Species	Surface loaded	No.	W	r_u	u	Hardness		Compression	
						JIS	30 mm	SPL	E
SHINA	Radial	1	0.7	0.40	11.0	0.6	0.44	15.2	2.2
		2	1.1	0.40	11.2	0.5	0.44	13.6	1.6
		3	0.9	0.40	11.2	0.6	0.48	14.9	2.1
		4	1.4	0.40	11.5	0.7	0.52	17.5	2.5
		5	0.9	0.41	11.1	0.5	0.56	12.5	2.4
SHIRAKAMBA	Tangential	1	2.2	0.52	12.2	1.1	1.16	22.3	7.7
		2	2.1	0.52	12.6	1.2	1.24	25.0	8.6
		3	2.9	0.52	12.8	1.2	0.84	22.5	4.8
		4	3.6	0.53	12.6	1.1	1.14	22.6	6.3
		5	3.3	0.53	12.8	1.0	1.00	20.1	5.7
	Radial	1	2.7	0.54	12.7	1.0	1.00	25.0	4.7
		2	2.7	0.51	12.7	0.9	0.75	25.0	3.8
		3	4.0	0.51	12.7	1.0	0.86	22.6	3.9
		4	2.5	0.52	12.6	1.4	0.80	22.4	4.3
		5	3.3	0.51	11.8	1.1	0.75	22.6	3.8
BUNA	Tangential	1	2.4	0.58	12.2	2.0	1.82	44.9	15.0
		2	1.5	0.53	12.1	2.0	1.52	47.5	14.6
		3	1.4	0.53	12.2	2.1	1.60	45.7	14.8
		4	2.5	0.58	12.1	1.8	1.62	39.6	14.7
		5	2.2	0.65	11.8	2.7	1.70	44.6	12.9
	Radial	1	2.0	0.59	12.0	1.8	1.26	30.0	7.5
		2	3.0	0.59	12.0	1.6	1.08	32.7	7.0
		3	2.3	0.58	12.0	1.8	1.18	32.4	7.2
		4	1.5	0.56	12.2	1.4	1.06	30.0	7.9
		5	1.5	0.53	12.0	1.8	1.10	30.0	7.9
MIZUNARA	Tangential	1	1.9	0.62	13.0	2.5	1.60	52.5	13.5
		2	1.7	0.55	12.7	2.2	1.34	42.3	12.7
		3	2.2	0.64	13.0	2.9	1.52	47.3	13.3
		4	2.1	0.63	13.0	2.3	1.68	45.0	14.8
		5	1.9	0.62	13.0	1.8	1.76	49.1	13.4
	Radial	1	1.4	0.58	13.1	1.6	1.10	29.5	6.3
		2	1.4	0.58	13.1	1.5	1.00	41.8	4.7
		3	1.5	0.54	12.8	1.5	1.12	27.2	6.9
		4	1.7	0.55	13.0	1.4	1.16	34.9	7.3
		5	1.5	0.55	12.4	1.5	1.12	32.2	7.3
HARUNIRE	Tangential	1	1.1	0.50	12.6	1.1	1.04	32.0	11.2
		2	1.1	0.50	12.8	1.5	0.98	24.9	9.8
		3	1.0	0.49	12.9	1.3	0.80	35.0	11.9
		4	1.1	0.52	12.8	1.6	1.10	29.7	13.2
		5	1.1	0.50	12.3	1.2	1.10	34.8	11.6
	Radial	1	1.2	0.57	12.7	1.3	0.87	32.5	5.5
		2	1.3	0.53	12.7	1.3	0.98	24.8	6.4
		3	1.1	0.53	12.7	1.3	0.80	22.5	6.3
		4	1.1	0.53	12.7	1.0	0.98	32.4	7.1
		5	1.2	0.53	12.7	1.1	0.96	27.7	7.1



図版の説明

試験に用いた器具

- (1) 30 mm 球 (直径 30 mm の球, ダイアルゲージおよび 3 脚をもつ装置)
- (2) 30 mm 球 (先端が直径 30 mm の半径になっている丸棒)
- (3) 30 mm 円 (先端が直径 30 mm の平らな円になっている丸棒)
- (4) 30 mm 円筒 (先端が直径 30 mm の円筒面で, その長さ 30 mm の器具)
- (5) 10 mm 球 (先端に直径 10 mm の球がついている器具)
- (6) 10 mm 球 (直径 10 mm の球, ダイアルゲージおよび 3 脚をもつ装置)

Explanation of Plate

Instruments used for testing hardness of wood

- (1) 30 mm ball (a loading apparatus having a 30 mm diameter ball, a dial gage and a tripod).
- (2) 30 mm ball (a steel bar with a 30 mm diameter hemispherical end).
- (3) 30 mm circle (a steel bar with a flat circular end of 30 mm diameter).
- (4) 30 mm cylinder (a steel loading head having a right cylindrical loading surface with a diameter of 30 mm and a length of 30 mm).
- (5) 10 mm ball (a loading head having a 10 mm diameter ball).
- (6) 10 mm ball (a loading apparatus having a 10 mm diameter ball, a dial gage and a tripod).