

木材圧縮強さの寸法効果

大河平行雄・増田 稔*・鈴木 直之

三重大学生物資源学部, *京都大学農学部

The Size Effect of Compressive Strength of Wood

Yukio OKOHIRA, Minoru MASUDA and Naoyuki SUZUKI

Faculty of Bioresources, Mie University Faculty of Agriculture, *Kyoto University

Summary

The size effects of compressive strength in the Hinoki and Hemlock wood were investigated and the results obtained are summarized as follows:

- 1) The size effects were not observed in the compressive strength parallel to the grain of Hinoki and Hemlock.
- 2) The coefficients of size effect of compressive strength perpendicular to the grain of Hinoki were measured as the stress at the proportional limit and the values were found to be 9.6 for tangential strength and 26.5 for radial strength.

Key words: Size effect, Compressive strength, Wood

1. はじめに

破壊現象を説明するために、よく用いられている確率モデル¹⁾は最弱リンクモデルと繊維束モデルである。前者は試料の構成要素が総て直列に接続されていて、最小強度要素の破壊が全体の破壊を意味する力学系に対応している。試料全体の破壊強度は構成要素の個数の大きさ、即ち、試験体の大きさの影響を受け、寸法効果が現れる。強度の分布は、一般に正規分布に従わず、ワイブル分布、あるいは、指数分布で示される。繊維束モデルは各構成要素が並列に結合されていて、試験体全体が破壊するのは構成要素が全部破壊したときで、各構成要素の破壊強度を独立な確率変数とすると、系全体の強度は独立変数の和となる。強度の分布は正規分布に従い、寸法効果は殆ど認められない。

最弱リンクモデルが適用できる材料の容積 V_1 の強度

を S_1 、容積 V_2 の強度を S_2 とすれば、FREUDENTHAL の論文²⁾により、

$$S_1/S_2 = (V_2/V_1)^{1/2\alpha} \quad (1)$$

が成立する。ここに 2α は物質に依存する定数であるワイブル分布

$$f(t) = \lambda m t^{m-1} \exp(-\lambda t^m) \quad (2)^{3)}$$

の m にあたり、(2)式の形のパラメータである。 2α の値が小さい程寸法効果が著しく、大きい程少なくなり、分布の形も正規分布に似てくる。 $2\alpha \rightarrow \infty$ のとき寸法効果が無いと言うことができる。 2α は寸法効果の程度を表わすためには極めて便利な定数であるので色々な材料⁴⁾について求められている。以後、この報告では、 2α を便宜的に寸法効果定数と呼ぶことにする。

木材の繊維に平行な圧縮強さ、あるいは、圧縮破壊強度は古くから多くの樹種について求められてきたが、力学的には不明の点が多い。Fig. 1 は L：繊維方向、R：

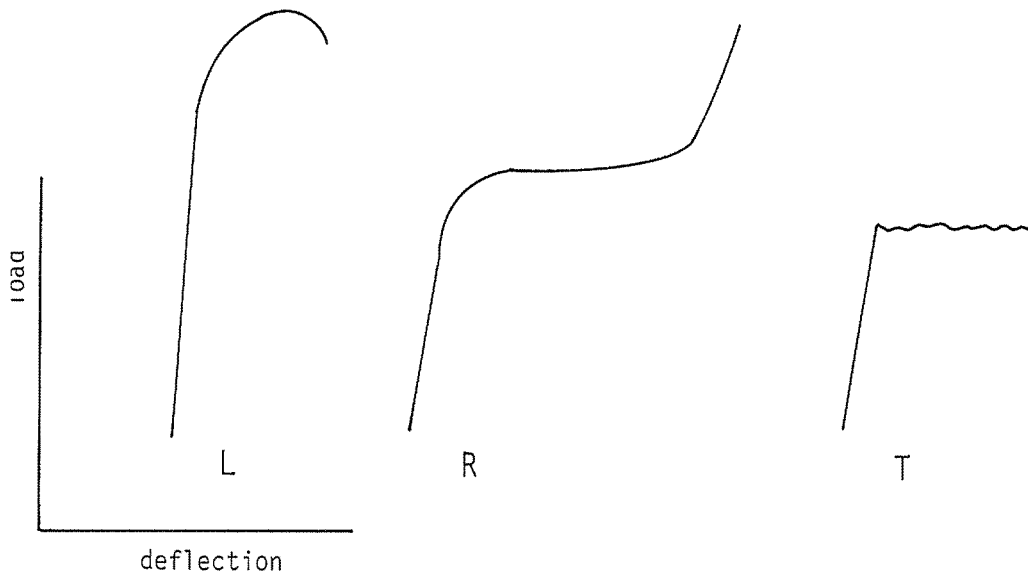


Fig. 1. The load-deflection diagram in the compression test for wood (L: Longitudinal, R: Radial, T: Tangential direction).

半径方向，T：接線方向の木材の圧縮試験に於ける荷重—変位曲線を模式的に描いたものである。近似的にはFig. 2のA, Bのような理想塑性体の応力—ひずみ曲線と考えることができる。A, Bの素材が並列および直列に接着された場合の合成材料の応力—ひずみ曲線を点線で示す。A, Bの割合は話を簡単にするため，1:2:1である。

並列の場合，圧縮強さ（水平部分）は平均値で，比例限度ひずみは小さい方のAと一致している。応力は平均ではないがA, Bの中間の値である。

直列の場合，強さ，比例限度とも小さい材料Bの値と一致している。木材圧縮試験体が圧縮を受ける場合，多数の構成要素が直，並列に複雑に結合していると考えることができる。並列の要素が多ければ平均則が成立し易く，最弱リンクモデルが当てはまらなくなると言えよう。木材の寸法効果の報告については角谷^{5),6)}によるものがあるが，寸法効果定数の形で求められていない。筆者等は先に，ヒノキ材 (*Chamaecyparis obtusa* Endlicher), 米ツガ材 (*Hemlock*) (*Thuja heterop hy-lla sargent*) の引張強さの寸法効果定数の 2α の測定を行った^{7),8)}。引き続き，木材の基本的強度と考えられる圧縮強さについて，米ツガ材，ヒノキ材で測定を行ったので報告する。

実験は森本定雄君，長谷川秀樹君，太田義弘君，望月広志君が卒論として行なったものであり，作表，製図では草深みゆき事務官の労を煩わした。ここに感謝の意を表する次第である。なお，本研究の一部は昭和58年度，59年度科学研究補助金（一般研究B）を使用して行なわれた。

2. 米ツガ材縦圧縮強さの寸法効果

2.1 試験体および試験方法

米ツガ 10.5 cm×10.5 cm×3 m の角材15本より a : 0.375, 0.75, 1.5, 3.0, 6.0 cm, 長さ $22a$ の棒を2本づつ木取り，各角棒より曲げ試験体と圧縮試験体を1個づつ採取した。試験体の個数はそれぞれ30である。圧縮試験体の高は h は $h=2a$ であり，変形速度はクロスヘッドの移動速度で，それぞれ 0.3, 0.6, 1.2, 2.4, 4.8 mm/min である。

圧縮試験の際はクロスヘッドの変位と荷重をX-Yレコーダーに入力して荷重—変位曲線を描かし，最大荷重 P_{max} ，比例限度荷重 P_p を測定した。また，荷重を試験前の面積で除して応力とした。圧縮試験機として， a : 6.0 cm の試験体には島津 RH-50, a : 3.0 および 1.5 cm 試

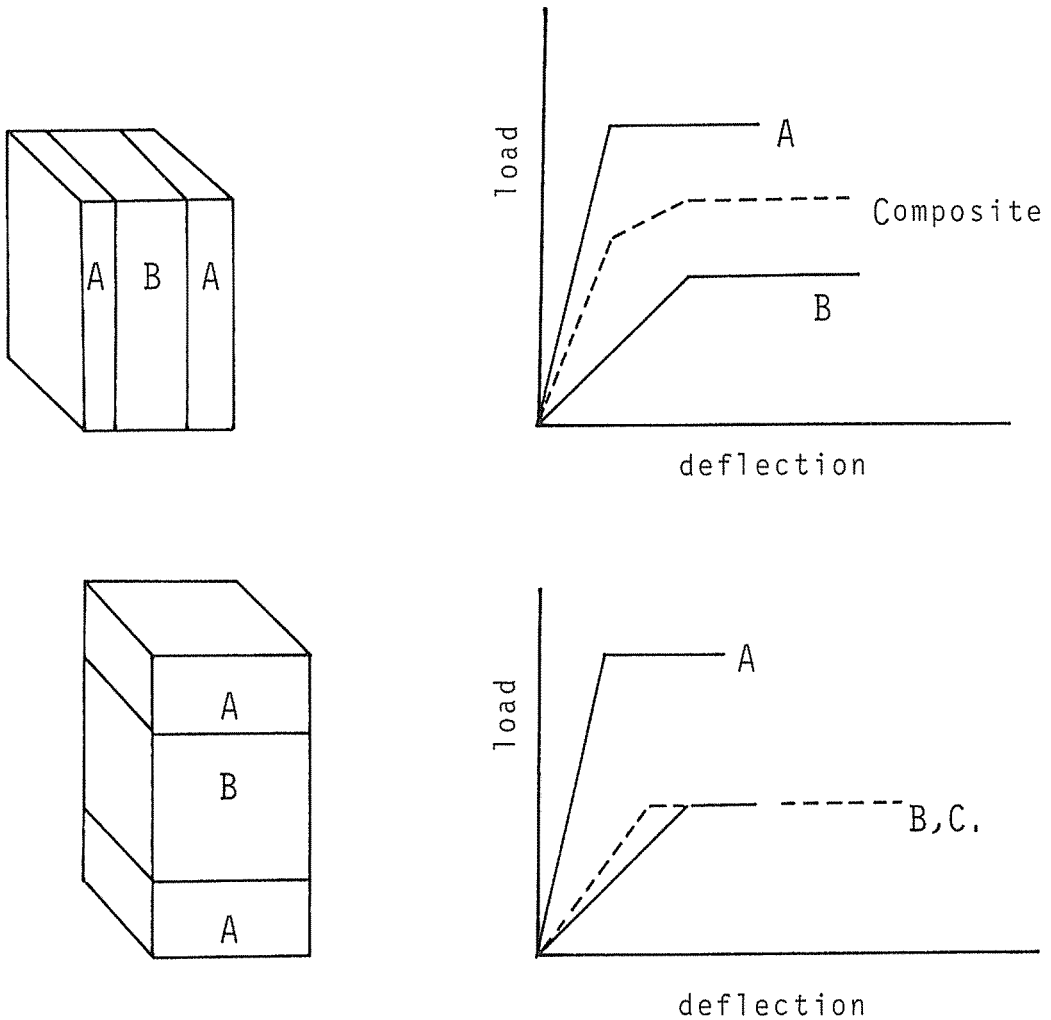


Fig. 2. The composition of the load-deflection diagram.

Table 1. The result of compressive test parallel to the grain of Western hemlock

Specimen size (a: cm)		0.375	0.75	1.5	3.0	6.0
Number		30	30	30	30	30
Density (g/cm ³)	M.	0.460	0.474	0.466	0.459	0.459
	S.d.	0.040	0.049	0.040	0.042	0.041
Moisture content (%)	M.	9.7	11.6	12.1	12.6	12.3
	S.d.		0.9	0.7	0.5	1.0
Strength (σ_{max} : kg/cm ²)	M.	373.6	388.9	416.6	384.3	410.4
	S.d.	45.1	73.5	55.1	61.3	68.1
Proportional limit (σ_p : kg/cm ²)	M.	497.5	486.6	494.6	511.1	514.4
	S.d.	54.8	60.0	51.6	58.3	58.2

M.: Mean, S.d.: Standard deviation

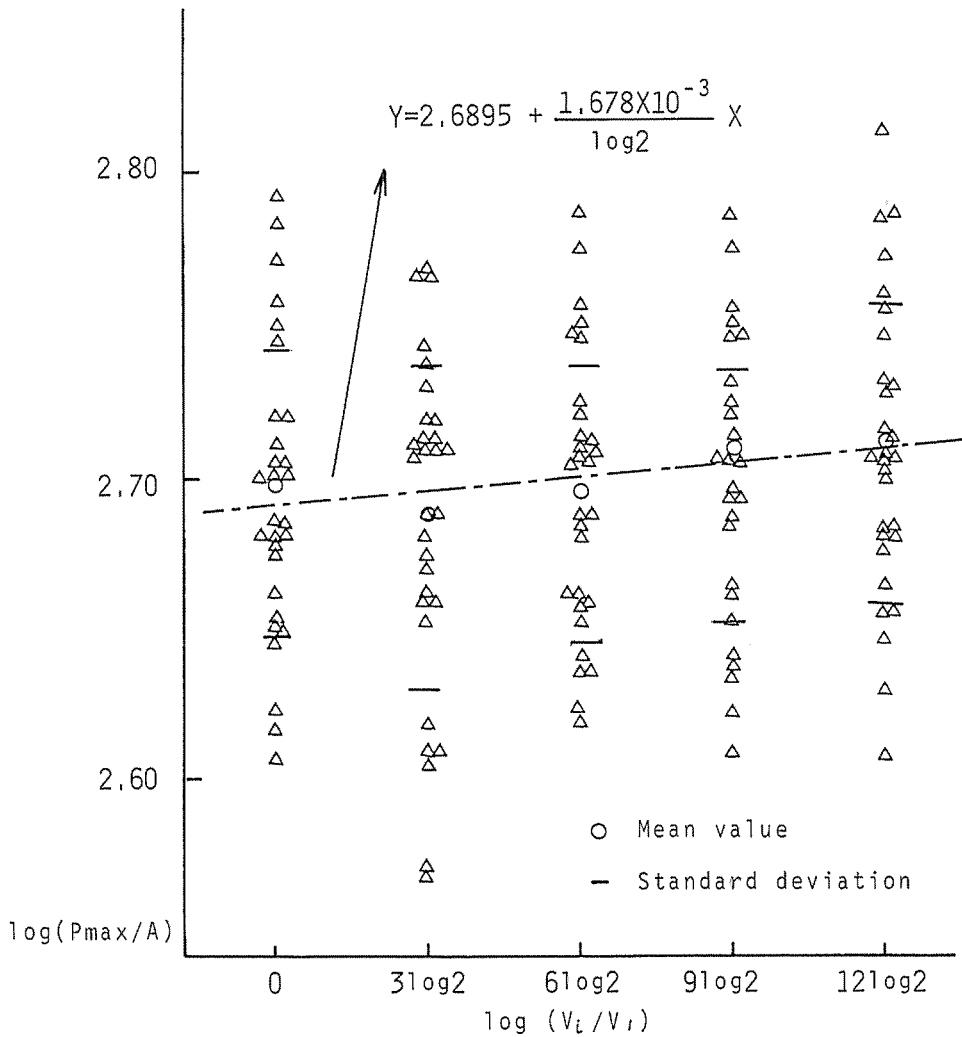


Fig. 3. The variation of $\log \sigma_{max}$ with $\log (V_t/V_l)$ in the compressive test parallel to the grain of Western hemlock.

験体には RH-10, α : 0.75 および 0.375 試験体にはインストロン Model-1000 を使用した。

2.2 試験結果および考察

試験結果は Table 1 に示す。

強さ, すなわち, 最大応力 σ_{max} の対数を Y 軸, X 軸に V_t/V_l の対数を取ると Fig. 3 に示した通りで, 直線 $Y=A+BX$ を当てはめると図の破線のようになり容積の

大なるほど強さを増す傾向を示し, B の値は 0.0056, 2α の値は -179 となるが $B=0$ の検定を行なうと 5% の危険率で仮説は棄却できなかった。寸法効果は認められないと言えよう。

比例限応力の場合を Fig. 4 に示す。B の値は 0.0087, $2\alpha = -115$ で仮説は棄却できなかった。

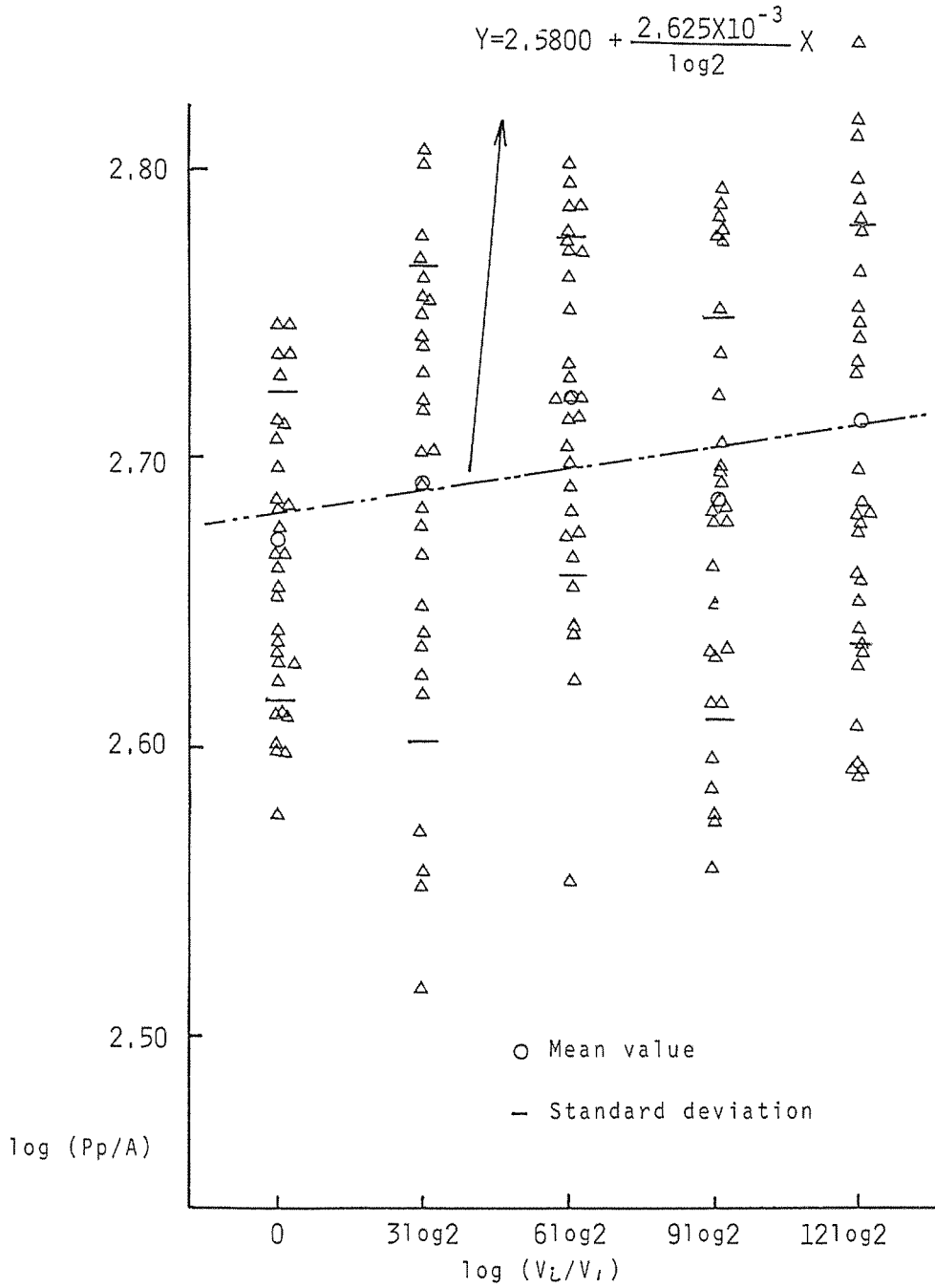


Fig. 4. The variation of $\log \sigma_p$ with $\log (V_i/V_1)$ in the compressive test parallel to the grain of Western hemlock.

3. ヒノキ材縦圧縮強さの寸法効果

始めは米ツガ材と同じような方法で実験を行なったが寸法効果は認められなかった。ヒノキ材についての角谷の報告⁶⁾では僅かではあるが寸法効果が認められているので、再実験を行なった。

3.1 初回の実験

3.1.1 試験体および試験方法

直径約 30 cm のヒノキ丸太を 5 cm の厚さにグラ挽した板材より 15 本の 4.8 cm × 4.8 cm × 80 cm の角棒を木取り加工し、順次、棒を細く切削しながら $a: 4.8, 1.2, 0.6, 0.3$ cm, 高さ $h=2a$ の試験体を 2 個ずつ製作した。その際、4.8 cm の角棒より含水率測定用試験片を採取した。含水率は 14~15% であった。クロスヘッドの変位—荷重曲線より最大荷重 P_{max} , 比例限荷重 P_p を測定し、試験前の面積で除したものを応力とした。変位速度はそれぞれ、4.0, 2.0, 1.0, 0.5, 0.25 mm/min で試験機、試験方法は米ツガ材の場合と同様である。

3.1.2 試験結果および考察

Table 2 の通りである。 $a: 0.3$ cm の場合を除き σ_{max} , σ_p ともに平均値の差の有意性は認められなかった。 $a: 0.3$ cm の場合は試験体の製作加工、実験方法の精度の維持が困難なので過小の値が得られたものと思われる。また木材は繊維方向よりも、繊維に直角方向の方が場所により材質の変動が大きいと考えられたので以下の実験を行なった。

3.2 再実験

5 cm のヒノキ板材より正角材を木取り、年輪中、重量が似たような角材を選び出し、4.8 cm の正方形の角材に成形加工した棒を 9 個用意した。 $a: 4.8, 2.3, 1.0$ cm の試験体を Fig. 5 の様に採取した。4.8 cm の試験体を他端から、さらに、1 個採取したので試験体の個数はそれぞれ、18, 36, 144 である。

実験結果を Table 3 に示す。強さ σ_{max} , 比例限応力 σ_p ともに平均値の差がないと言える。

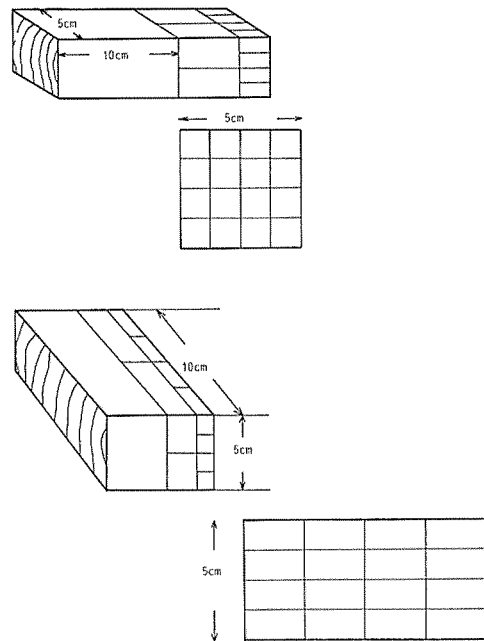


Fig. 5. The cutting method of test-specimens.

Table 2. The result of compressive test parallel to the grain of Hinoki (the first time)

Specimen size (a: cm)		4.8	2.4	1.2	0.6	0.3
Number		14	14	14	26	27
Density (g/cm ³)	M.	0.438	0.449	0.461	0.464	0.436
	S.d.	0.026	0.035	0.045	0.035	0.054
Width of annual ring (mm)	M.	2.42	2.57	2.57	2.61	
	S.d.	0.38	0.82	1.11	1.14	
Strength (σ_{max} : kg/cm ²)	M.	442.6	426.0	422.9	422.8	330.3
	S.d.	34.4	45.0	58.9	41.5	50.5
Proportional limit (σ_p : kg/cm ²)	M.	377.1	304.1	342.4	343.2	270.5
	S.d.	40.4	46.1	67.9	52.6	50.5

M.: Mean, S.d.: Standard deviation

Table 3. The result of compressive test parallel to the grain of Hinoki (re-examination)

Specimen size (a: cm)		4.8	2.3	1.0
Number		17	36	143
Density (g/cm ³)	M.	0.40	0.39	0.388
	S.d.	0.01	0.01	0.022
Width of annual ring (mm)	M.	4.0	3.93	4.1
	S.d.	0.45	0.48	1.32
Strength (σ_{\max} : kg/cm ³)	M.	365.5	362.9	349.4
	S.d.	33.9	28.3	37.3
Proportional limit (σ_p : kg/cm ³)	M.	300.7	284.0	292.9
	S.d.	37.6	43.7	25.0

M.: Mean, S.d.: Standard deviation

4. ヒノキ接線方向横圧縮強さの寸法効果

4.1 試験体および試験方法

試験体は 5 cm × 10 cm × 80 cm に成形加工した角材、8 個を 0.3 cm × 0.6 cm の棒まで切削しながら、 $a : 5.0, 2.5, 1.2, 0.6, 0.3$ cm, 高さ $h = 2a$ の圧縮試験体を $a : 2.5$ cm 以上の試験体は 2 個、未満は 4 個ずつ採取した。

横圧縮強さ、あるいは、強度は、ある力学的性質の限界値であり、非常に定義づけが困難である。実験の難しさを避けるために、クロスヘッドの変位—荷重曲線より比例限荷重 P_p 、5% h 変位の荷重 P_5 を求め、それ等を試験前の面積で除したものを比例限応力 σ_p 、横圧縮強さ σ_5 として採用した。荷重—変位曲線が、変形 5% h になるとどの試験体でも X 軸 (変位) に水平になり、完全塑性体として取り扱う場合、基礎資料として便利であると考えられたからである。

4.2 結果と考察

結果は Table 4 に示す。強さ σ_5 、比例限応力 σ_p の対数を Y 軸に、 V_i/V_1 の対数を X 軸に取り、直線 $Y = A + BX$ を当てはめた状態を Fig. 6, 7 に示す。強さ σ_5 の場合、Fig. 6 に於いて $2a = 1/B$ より $2a = 63.3$ となる。 $a : 0.3$ cm の試験体は加工、実験とも難しく、適正試験体の数倍の不良試験体を産出し、明らかに実験での失敗とみられるものも相当数に達した。この試験体を除くと、点線の直線となり、 $2a = 27.5$ となる。

比例限応力 σ_p の場合は Fig. 7 の通りである。 $2a$ の値は 9.7 で 0.3 cm の試験体を除外すると 11.2 である。比例限を越えてからの試験体の安定が悪くなり、実験を失敗した例が多かった。 $h = 2a$ の試験体で 5% 変形時応力を採用した事が実験を困難にした原因の一つと考えられる。

Table 4. The result of compressive test perpendicular to the grain and tangential to the growth ring of Hinoki

Specimen size (a: cm)		5.0	2.5	1.2	0.6	0.3
Number		14	16	16	30	32
Density (g/cm ³)	M.	0.454	0.434	0.439	0.440	0.427
	S.d.	0.025	0.033	0.030	0.056	0.034
Width of annual ring (mm)	M.	2.10	2.90	2.90	3.11	2.15
	S.d.	0.41	0.80	0.93	0.93	0.83
Moisture content (%)	M.	14.9	14.8	14.8	14.7	14.8
	S.d.	0.9	0.5	0.6	0.5	0.7
Strength (σ_5 : kg/cm ³)	M.	36.81	39.82	45.81	45.54	41.53
	S.d.	5.72	7.28	10.81	8.41	16.93
Proportional limit (σ_p : kg/cm ³)	M.	14.82	25.34	14.36	31.98	37.05
	S.d.	1.98	4.20	5.91	8.07	11.07

M.: Mean, S.d.: Standard deviation

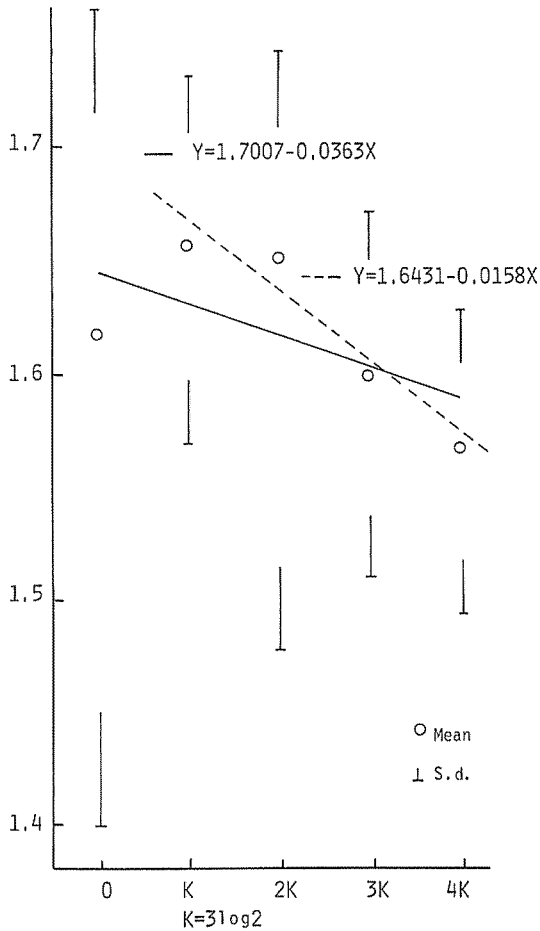


Fig. 6. The variation of $\log \sigma_5$ with $\log (V_i/V_1)$ in the tangential compressive test of Hinoki.

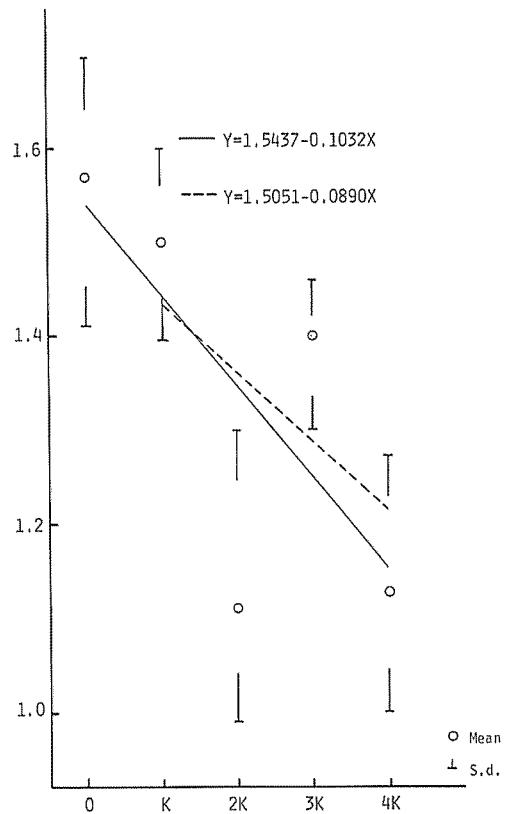


Fig. 7. The variation of $\log \sigma_p$ with $\log (V_i/V_1)$ in the tangential compressive test of Hinoki.

Table 5. The result of compressive test perpendicular to the grain and radial to the growth ring of Hinoki

Specimen size (a: cm)		5.0	2.3	1.1
Number		20	40	156
Density (g/cm^3)	M.	0.491	0.489	0.517
	S.d.	0.018	0.027	0.052
Width of annual ring	M.	2.96	2.49	3.16
Moisture content (%)	M.	14.6	14.8	14.7
	S.d.	0.7	0.7	0.6
Strength (σ_5 : kg/cm^2)	M.	57.94	53.61	54.92
	S.d.	12.59	12.33	18.60
Proportional limit (σ_p : kg/cm^2)	M.	29.15	26.31	33.99
	S.d.	9.61	5.57	13.82

M.: Mean, S.d.: Standard deviation

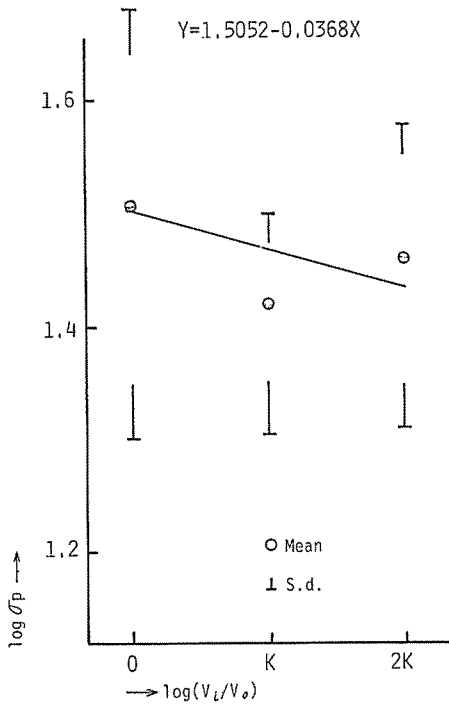


Fig. 8. The variation of $\log \sigma_p$ with $\log (V_i/V_1)$ in the radial compressive test of Hinoki.

5. 半径方向横圧縮強さの寸法効果

5.1 試験体および試験方法

接線方向横圧縮試験の結果、小試験体ほど、加工、実験に於ける精度低下が著しく、各試験体の材質の変動を受け易いため、これ等为了避免べく Fig. 5 に示したように試験体を採取した。5 cm×10 cm×80 cm の角材を10個用意し、各角材より $a: 5$ cm の試験体を2個、 $a: 2.4$ cm の試験体を4個、 $a: 1.1$ cm の試験体を16個づつ採取した。試験方法は前節と同じである。

5.2 試験結果および考察

Table 5 の通りである。強さ σ_0 の場合、前節と同様に直線を当てはめてみると、 $Y=1.768-0.0042X$ となり、 $2\alpha=238$ で寸法効果は無いと言える。次に比例応力 σ_p について同様に処理すると 2α の値は26.5となる。

6. むすび

圧縮強度特性値の寸法効果について、若干の実験、考察を行なった。要約すると以下の通りである。

6.1 米ツガ材、ヒノキ材の縦圧縮に於いては、強さ、比例応力とも寸法効果は認められなかった。

6.2 横圧縮強度の指標として5%変形時応力を導入したが接線方向では 2α の値は27.5、半径方向では寸法効果は認められなかった。大変形の実験では試験体の形状を考慮する必要がある。

比例応力の場合、接線方向の寸法効果定数 2α は9.6で半径方向は26.5である。

文 献

- 1) 堀 素夫. 破壊現象におけるランダムネス. 数理科学, 122: 22-28 (1973).
- 2) FREUDENTHAL, A. M. Stastical Approach to Brittle Fracture, Fracture II, Academic Press, New York p. 591-619 (1968).
- 3) 近藤次郎. 確率論と其の応用. 日科技連, 東京 (1965).
- 4) SABNIS, G. M. and S. ARONI. SIZE EFFECT IN MATERIAL SYSTEM. Structure, Solide Mechanics and Engineering Design Part 1 (ed. by M. TE'ENI, WILEY-INTER-SCIENCE, New York) p. 131- 142 (1969).
- 5) 角谷和男, 杉原彦一. 木材の引張りおよび曲げ破壊強度における寸法効果について. 木材誌, 3(5): 168-173 (1957).
- 6) 角谷和男, 川越信哉, 杉原彦一. ヒノキ圧縮強度における寸法効果. 木材研究, 24: 46-48 (1960).
- 7) 大河平行雄. ヒノキ割裂試験における横引張強さの寸法効果について. 三重大農学報, 60: 71-75 (1980).
- 8) 大河平行雄, 増田 稔, 鈴木直之. 米ツガ引張強さの寸法効果. 三重大生資報, 1: 1-6 (1988).