

天然ファイバーの引張強度と寸法との関係*

張 敏**, 岸本芳昌**, 川井秀一**, 佐々木光**

Relationship Between Tensile Strength of Natural Fibers and Their Sizes*

Min ZHANG**, Yoshimasa KISHIMOTO**,
Shuichi KAWAI** and Hikaru SASAKI**

(平成6年7月31日受理)

An image analysis system was used to measure the sizes and shapes of natural fiber bundles such as jute, hardwood, softwood, bamboo and lint, and other fibers such as polyester and glass fibers for the comparison. Fibers were magnified through the microscope and the picture of the fibers was input into the image analyze system to measure the length and diameter of the fiber. The ratio of fiber length to diameter was then calculated.

The moisture content of each kind of fiber was determined. The tensile strength of the fibers were then measured. Based on the experimental results, the mechanical properties and the configuration of the fibers were compared with each other, and the characteristics were discussed.

Experimental results revealed that in natural fibers the tensile strength decreases gradually with increasing fiber length, but the tensile strength and the Young's modulus in tension decrease remarkably with increasing natural fiber diameter.

概 要

画像解析システム (IBAS) を用いて、竹、ジュート、針葉樹、広葉樹、綿などの天然系ファイバー (繊維束) および比較の意味でガラス、ポリエステルファイバーなど無機および合成繊維の寸法を測定し、それぞれのファイバーの長径比 (*length to diameter ratio*) を算出した。

一方、これらのファイバーの平衡含水率と引張強度を測定した。これらの結果から、各種ファイバーの力学的性質と形状を比較・検討し、考察した。

ファイバーの寸法と力学的性質の関係を検討した結果、天然ファイバーでは長さの増加に伴ってその引張強度が徐々に低下すること、また、直径の増加に伴って、引張強度および引張ヤング率が顕著に低下することが認められた。

* 本報の一部は第43回日本木材学会大会 (1993年8月、盛岡) で報告した。

** 構造機能分野 (Laboratory of Structural Function)

Key words: natural fiber, fiber length, fiber diameter, fiber tensile strength.

1. 緒 言

木質ファイバーに他の天然繊維、合成繊維あるいは無機繊維などを混抄することにより、木質ファイバーボードの強度などの性能を改良することが期待される。この時、製品の力学的性質に対して大きな影響を与える因子として、ファイバーの長さおよび直径などを挙げることができる。ファイバーの寸法の測定には種々の方法が試みられている。よく用いられているのは万能投影器による投影拡大測定法と、目盛を付けた光学顕微鏡による直接測定法である。これらの測定は非常に時間がかかり、操作が不便で、精度も低いという欠点がある。ここでは画像解析システムを用いて、竹、ジュート、針葉樹、広葉樹、綿、ガラスおよびポリエステル・ファイバーの寸法・形状を測定し、その形態の特徴を明らかにした。また、各種天然系ファイバーの寸法と強度との関係については公にされたものが少ない。本研究では、各種天然系ファイバーの引張強度を測定し、上述の結果と比較し、ファイバーの寸法と強度との関係を明らかにするとともに、その原因について考察した。

2. 実 験

2.1 ファイバーの寸法・形状の測定

供試ファイバーは東南アジア産の竹、ジュート、広葉樹（ラワン類）、および国産針葉樹（スギ）、綿などの天然繊維と比較試料として無機質のガラス・ファイバーおよび合成高分子のポリエステル・ファイバーの計7種類である。

ファイバーの寸法・形状の測定には、ドイツ KONTORN BILD ANALYSE 社製の画像解析システム IBAS (Interaktive Bild-Analyse System) を用いた¹⁾。ファイバーの直径の測定については、上記7種類のファイバーを、光学顕微鏡を通じて画像入力し、竹、広葉樹および針葉樹のファイバーは128倍に、ジュート・ファイバーは256倍に拡大した後、マウスとカーソルを用いて画像をトレースし、ファイバーの直径を測定した。その際、ファイバーの横断面を円と仮定した。ファイバーの長さの測定では、広葉樹と針葉樹ファイバーの場合は32倍に拡大した後、また他のファイバーの場合は拡大せずに、直接長さを測定した。次いでファイバーの長径比と断面積を算出した。但し、ファイバーの長さ方向では直径が必ずしも一定ではないので、直径を3点測定し、それらの平均値を用いた。

試験体数は竹、広葉樹および針葉樹ファイバーについては200本、ジュートと綿ファイバーについては60本、ガラスとポリエステルファイバーについては30本であり、それぞれ無作為に選んで測定に供した。

2.2 ファイバーの引張試験

引張試験に先立って、ファイバーの含水率を測定した。なお、計算に用いた全乾重量は温度65℃の条件で一週間乾燥した値を用いた。各種ファイバーの含水率を Table 1 に示す。

Table 1. Moisture contents of each kind of fiber.

Types of fiber	Bamboo	Jute	Softwood	Hardwood	Lint	Polyester	Glass
Moisture contents (%)	8.6	9.3	8.4	8.6	6.0	0.77	0.13

Table 1 に示すように、各種天然ファイバーの気乾含水率は6～9%の範囲にある。これに対して合成繊維であるポリエステルと無機繊維のガラス・ファイバーは疎水性のファイバーであり、ほとんど吸湿しないことがわかる。

ファイバーの引張試験は新興通信(株)製 TOM 500 万能試験機を用いて行った。引張速度はポリエステル・ファイバーの場合 2 mm/min であり、他のファイバーの場合はすべて 1 mm/min である。

ファイバーの引張試験には JIS L 1069 に準拠して厚紙による支持体を用いた。接着剤にはシアノアクリレート系ゼリー状瞬間接着剤を用い、両接着点間のファイバーは、接着時に可能な限り通直に保ち、ねじれなどが生じないように、十分に注意した^{2,3)}。また、用いた接着剤はゼリー状であるので、ファイバーへの浸透が微少であった。支持体を試験機のチャックに固定した後、厚紙の連結部分を切り、引張試験を行った。支持体へのファイバーの取り付けを Fig. 1 に示す。

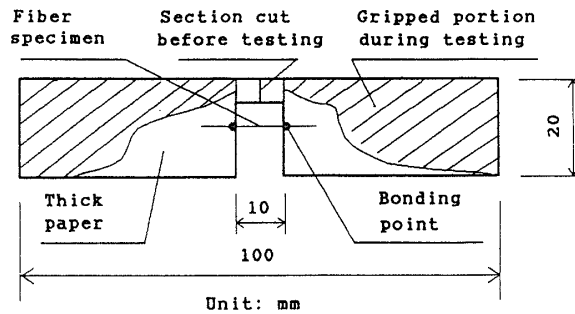


Fig. 1 Illustration of a fiber specimen prepared for tensile test.

供試ファイバーは原料ファイバーから無作為に抽出した。サンプル数は竹とジュート・ファイバーの場合各100本、針葉樹、広葉樹及び綿ファイバーでは各60本、ポリエステルとガラス・ファイバーでは各30本とした。約90%の試料は両接着点の間のファイバー部分で破壊し、残りは接着点で破壊した。したがって、後者の試験値は結果から除外した。

3. 結果と考察

3.1 ファイバーの寸法・形状および力学的性質

測定した7種のファイバーの寸法・形状及び力学的性質を Table 2 に示す。なお、引張ヤング率Eと引

Table 2. Sizes, configurations, and mechanical properties of fiber bundles.

Types of fiber bundle	Specific gravitie *	Length (mm)	Diameter (mm)	Length to diameter ratio	Young's modulus (tonf/cm ²)	Tensile strength (kgf/cm ²)	Specific Young's modulus (tonf/cm ²)	Specific strength (kgf/cm ²)	Maximum elongation (%)
Jute	1.43	39.0 (8.7)	0.056 (0.024)	810 (360)	340 (210)	5,500 (3,300)	238	3846	1.67 (0.49)
Hard wood	0.60	4.6 (1.8)	0.146 (0.059)	29 (15)	59 (49)	1,300 (1,100)	98	2167	2.43 (1.07)
Softwood	0.50	7.7 (2.7)	0.212 (0.094)	43 (23)	61 (41)	1,400 (1,000)	122	2800	2.47 (0.91)
Bamboo	0.80	30.0 (12.5)	0.130 (0.055)	270 (160)	130 (70)	3,000 (1,800)	163	3750	2.51 (0.82)
Lint	1.50	28.7 (4.8)	15.16 μ m (1.73)	1,900 (380)	120 (55)	4,800 (1,900)	80	3200	4.43 (1.59)
Polyester	1.38	68.3 (2.2)	40.54 μ m (3.80)	1,700 (170)	46 (27)	5,200 (600)	33	3768	20.4 (5.75)
Glass	2.50	48.4 (1.1)	13.40 μ m (2.24)	3,700 (600)	680 (220)	19,000 (5,000)	272	7600	2.77 (0.65)

Note: Figures in parenthesis are the standard deviations.

Legend: * The data are introduced from references 5), 6), 7) and 9).

張強度 S は次式を用いて算出した^{4,5)}。

張：ファイバーの強度と寸法の関係

$$E = \frac{\Delta PL}{\Delta L \pi r^2} \quad (1)$$

$$S = \frac{P}{\pi r^2} \quad (2)$$

ここで、 P は破壊荷重 (kgf)、 r はファイバーの半径 (cm)、 L は引張試験のファイバーの接着点間のスパン (cm) であり、 ΔP 及び ΔL は荷重-伸び曲線の直線部分の荷重差とそれに対応する変位差である。引張強度の測定精度にはチャックと厚紙の滑り、ファイバーの接着点の緩みなどが影響するが、(1)、(2)式より E および S はファイバーの半径の 2 乗に反比例するので、ファイバーの直径の測定が、誤差のうちで大きな比重を占めると考えられる。

供試天然ファイバーはいわゆる単繊維ではなく、そのほとんどが繊維束であるので、破壊の形態は複雑であり、必ずしも最も細い所で破壊するとは限らない。従って、ガラス、ポリエステル、綿など引張伸びが大きいファイバーを除き、破壊した部分の近傍の直径を破壊後に測定し、引張強度の算出に用いた。

このように測定精度を配慮して、種々の工夫を行ったが、測定結果のばらつきは大きく、破壊は繊維束の組成構造に敏感に影響されていることが推察される。また、ヤング率は、ファイバーの接着点の変形、厚紙の変形、厚紙とチャックの滑りなど、多くの因子の影響を受けているので⁶⁾、その絶対値は信頼性に乏しいかもしれない。しかし、諸ファイバー間の比較には十分役立つ値が得られたと考えている。

Table 2 から天然ファイバーの中では、ジュート・ファイバーの引張強度が最も優れていると認められた。ファイバー（繊維束）の引張強度は単繊維細胞壁の強度および単繊維間の結合強度によって決定されと考えられる。細胞の断面における壁と細胞腔の断面積の比、すなわち壁腔比 (*wall/lumen*) はファイバーの強度に直接影響を与える因子の一つであると推定される。綿繊維の細胞は非常に内腔 (*lumen*) が小さく、壁腔比が 15~20 であり、ジュートのそれは 8.5~15、竹では 4.5~7.5、木材細胞では 0.3~1 と順次内腔が大きくなっている。⁷⁻¹⁰⁾。そのため、天然繊維の中では、ジュート、綿および竹ファイバーの強度はウッド・ファイバーのそれより 2~4 倍高くなっている。

実質的な繊維の力学的性質をみるために、強度およびヤング率を比重で除した値すなわち比強度および比ヤング率で比較すると、ガラス・ファイバーが最も優れているものの、天然系ファイバーでは、ジュートが最も高い。ガラス・ファイバーは木質ファイバーとの接着性に乏しいので、木質ファイバーと混抄して補強するファイバーとしてはジュートが最も優れていると考えられる。

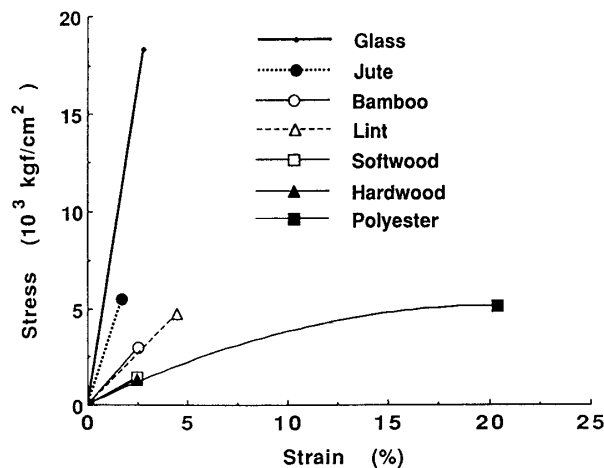


Fig. 2. Stress-strain diagram of each kind of fibers.

Fig. 2 に各種ファイバーの引張応力-ひずみ曲線を示す。Fig. 2 から天然ファイバーの中では、ジュート・ファイバー次いで竹ファイバーや綿ファイバーが剛性が優れていることが認められた。一方、ポリエステル・ファイバーは比較的強度は高いが、剛性が乏しいことが明らかとなった。全体の応力-ひずみ曲線を見ると、ジュート・ファイバーなど天然繊維はポリエステルとガラス・ファイバーの間にある。

3.2 ファイバーの直径と引張強度の頻度分布ならびに両者の関係

ファイバーの長さ、直径および引張強度などの測定における頻度分布の一例として、ジュート・ファイバーの直径および引張強度の頻度分布を Fig. 3, Fig. 4 に示した。

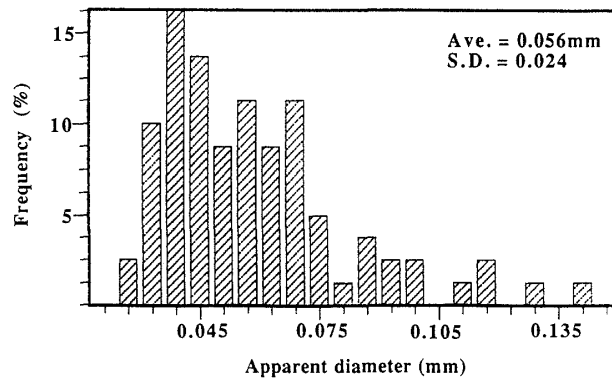


Fig. 3. Frequency distribution in diameters of jute fibers.

Note: Ave. = average, S. D. = standard deviation.

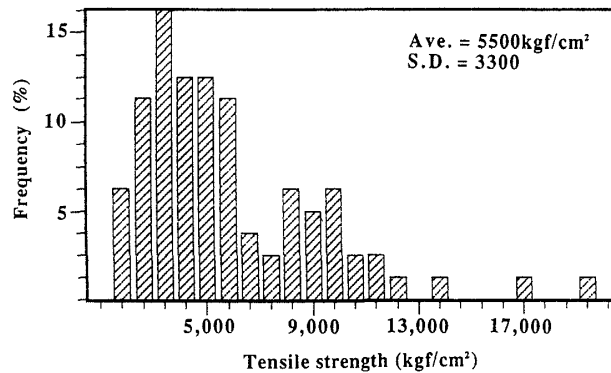


Fig. 4. Frequency distribution in tensile strengths of jute fibers.

Note: Ave. = average, S. D. = standard deviation.

ジュートファイバーの直径および引張強度の頻度分布は、他の天然系ファイバー同様に、ポアソン分布に近い曲線を示した。一方、広葉樹と針葉樹ファイバーの引張強度はばらつきが大きいことが認められた。

ファイバーの長さまたは直径が増すと、その中に分布する欠点の数も増す。試料の長さまたは直径に対して、力学的性能がどのように変化するかは興味ある問題でこれまでに多く検討されている¹¹⁾。本実験においても、天然系ファイバーの引張強度およびヤング率に及ぼすファイバーの寸法・形状の影響が認められた。一例として、ジュート・ファイバーの長さ引張強度および直径と最大伸びの関係を Fig. 5, Fig. 6 にそれぞれ示す。

張：ファイバーの強度と寸法の関係

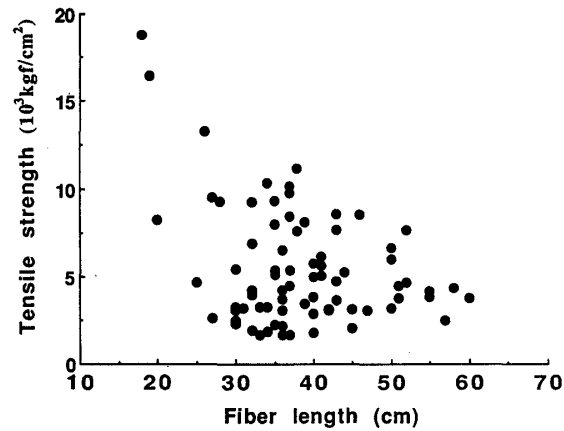


Fig. 5. Relationships between jute fiber length and tensile strength.

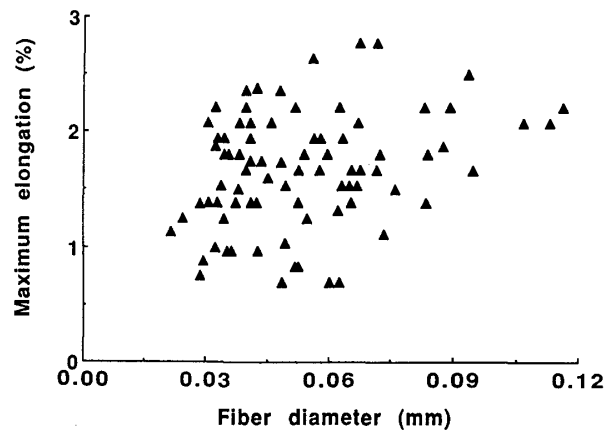


Fig. 6. Relationships between jute fiber diameter and maximum elongation.

ファイバーの長さの増加に伴って、ファイバーの引張強度が低下する傾向が見られ、一方、ファイバーの直径の増加に伴って、その最大伸びも徐々に増加する傾向が認められた。

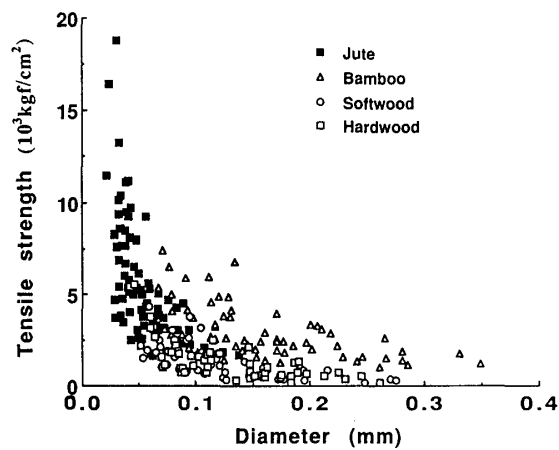


Fig. 7. Relationships between natural fiber diameters and tensile strengths.

寸法の増加に伴う強度の低下は天然系ファイバー全体についてプロットすると、より明確である。天然ファイバーの直径と引張強度の関係を Fig. 7 に示す。図より、ファイバーの直径の増大に伴って、フ

ファイバーの引張強度は著しく低下していることがわかる。天然系の綿ファイバーは極めて細く、直径が $18\mu\text{m}$ に過ぎないので、ここでは省略しているが、その直径と引張強度の関係も Fig. 7 と同様であった。また、各種天然系のファイバーの直径と引張ヤング率の関係についても Fig. 7 と同様の傾向を示している。

Fig. 7 の内容を個々のファイバーについて見ると、ジュート・ファイバーの直径と引張強度の相関は他に比べて最も大きい。この現象を解釈するために、各種天然ファイバーの単繊維の形態に着目して考察してみる。針葉樹繊維の直径および長径比は広葉樹のそれより大きい。すなわち、文献 8, 10) によれば、スギ、マツ類の針葉樹単繊維の平均直径は $40\mu\text{m}$ 以上で、その長径比は60以上であり、一方、ラワン類などの広葉樹単繊維の平均直径は $15\sim 25\mu\text{m}$ 、その長径比は40~60である。木材に比べると、竹やジュートの単繊維直径は小さくて、長径比が大きく、細長い繊維であると言える。例えば、竹単繊維の平均直径は $12\sim 16\mu\text{m}$ 、その長径比は140以上であり、ジュート単繊維のそれは $20\sim 25\mu\text{m}$ 、 $75\sim 200^{7,9)}$ である。Fig. 7 に示されているファイバーの直径から、供試された広葉樹、針葉樹ファイバーと竹ファイバーはすべて繊維束であり、ジュートファイバーのみは少数の単繊維の混ざった繊維束であることが明らかである。

単繊維の引張強度は細胞壁の強度のみと関係するのに対し、繊維束の場合は単繊維間の結合点および単繊維の端末部に存在する欠陥の増加に伴って、引張強度が低下するものと考えられる。Fig. 7 に示すように、単繊維の混ざった繊維束（ジュート）はその直径と強度の関係が、繊維束のみ（竹、針葉樹、広葉樹）の場合より著しく明瞭である。ジュート単繊維の引張強度はその繊維束のそれより極めて大きく、かつファイバーの直径と強度の相関が非常に高かった。

4. 結 論

天然繊維、合成繊維および無機繊維の寸法・形状および力学的性質を測定し、これらのファイバー（繊維束）の形態を比較し、ファイバーの力学的性質に及ぼす寸法の影響を考察して、以下の結論を得た。

- 1) 天然系ファイバーの中では、綿ファイバーは極めて細長く、寸法の均一性が高く、引張強度はジュートに次いで高かった。また、ジュート・ファイバーも細長く、寸法が比較的均一で、強度はポリエステルより高かった。広葉樹と針葉樹ファイバーは太短くて、寸法の分散が大きく、引張強度はジュートの $\frac{1}{4}$ 、竹の $\frac{1}{2}$ 程度であった。竹ファイバーの寸法ならびに分散はジュートと木材ファイバーの間であった。
- 2) 天然繊維の中では、ジュート・ファイバーの比強度および比ヤング率は最も大きく、竹がそれに続き、木質ファイバーの補強材料としてジュート・ファイバーが最も優れていることが推定される。
- 3) 合成繊維および無機繊維の力学的性質は繊維の寸法・形状にあまり依存しないのに対し、天然ファイバーの場合には、力学的性質に及ぼす寸法の影響が大きいことが認められた。すなわち、ファイバーの直径の増加に伴ってファイバーの引張強度およびヤング率は顕著に低下した。

文 献

- 1) I-chen Wang; Yun-chuan Ku: *Forest Products Industries*, 9 (1), 57-65 (1990)
- 2) 古川郁夫：“針葉樹材の縦引張破壊のフラクトグラフィー的研究”，鳥取大学農学部演習林報告 第12号別刷，1980，P.7-11
- 3) 林毅：“複合材料工学”，日科技連，1971，P.963-972
- 4) 日本木材学会・物理・工学編編集委員会：“木材科学実験書Ⅰ．物理・工学編”，中外産業調査会(旬)，1985，P.191-193
- 5) 日本材料学会木質材料部門委員会：“木材工学辞典”，工業出版，1981，P.751-774
- 6) 張敏，川井秀一，佐々木光：木材学会誌，40 (8)，P.816-823 (1994)

張：ファイバーの強度と寸法の関係

- 7) 繊維学会：“図説繊維の形態”，朝倉書店，1982，P.78-184
- 8) 機能紙研究会：“化繊紙から機能紙へ”，ユニ出版株式会社，1988，P.49-809
- 9) 繊維学会：“繊維物理学”，丸善(株)，1962，P.1-204
- 10) 東北林学院：“繊維板製造学”，中国林業出版社，1981，P.4-20
- 11) 桜田一郎：“繊維，放射線，高分子”，高分子化学刊行会，1961，P.57-67