

木材における減衰の機構

北原, 龍士
九州大学農学部

松本, 昴
九州大学農学部

<https://hdl.handle.net/2324/19406>

出版情報 : 木材学会誌. 19 (8), pp.373-378, 1973-08-01. 日本木材学会
バージョン :
権利関係 :

木材における減衰の機構^{*1}北原龍士^{*2}, 松本 昴^{*2}Mechanism of Damping in Wood^{d*1}Ryushi KITAHARA^{*2} and Tsutomu MATSUMOTO^{*2}

The damping mechanism of vibration in wood is investigated using the results of free transverse vibration tests. The tests were conducted under the atmospheric conditions of one atmospheric pressure and a reduced pressure (20 mmHg), for various frequencies of vibration ranging from 25 Hz to 1200 Hz. The test specimens were prepared from Ezomatsu-wood (*Picea jezoensis* Carr.).

The effects of frequency on the damping characteristics are mainly discussed. In addition, the damping characteristics of wood are compared with that of metals and plastic (alloy steel, aluminum, and polycarbonate).

Main results obtained from the investigation are as follows:

- 1) Within the low frequency range, the damping characteristics of wood depend both on Coulomb's friction and the viscosity. As the frequency increases, the dependence on the viscosity becomes superior.
- 2) Coulomb's friction increases with the decrease of frequency.
- 3) Under the atmospheric pressure, the damping characteristics of wood are considerably affected by the resistance of air, within the low frequency range.

木材の自由振動の減衰を大気圧のもと、および約 20 mmHg の減圧のもとで測定し、振動数(ほぼ 25 ~1200 Hz)が減衰に与える影響を検討した。さらに、木材の減衰を金属やプラスチックの減衰と比較した。

木材の自由振動時における時間経過による振幅の減少には、測定した振動数範囲の低い振動数域ではクーロン摩擦および粘性の両者が関与し、振動数が増加するにつれて粘性が主体となることが明らかとなった。なお、木材の内部に存在するクーロン摩擦は、振動数が減少するにつれて増大する傾向がある。

1. 緒 言

木材は、外部からの振動や衝撃を吸収またはシャ断する材料として広く使用されているが、それは木材の振動の減衰が大きいという性質を利用したものである。

これまで、木材の力学的損失の研究は数多くなされてきた。しかし、そこでは減衰の指標である対数減衰率や $\tan \delta$ などが、動的性質の一部として取り扱われているに過ぎず、振動の減衰機構について論じた研究は少ない。そこで、この研究は木材の振動の減衰機構を明らかにすることを目的として始められた。

木材がある正弦波の周期運動を行なう外力を受けてい

るとき、急にその外力が取り除かれると、自由振動する。そのあと、振幅は時間とともに次第に減少する。まず、この減衰が粘性によるのか、クーロン摩擦(固体摩擦または乾性摩擦ともよばれる)によるのか、あるいは両者によるのかをはっきりさせる必要があり、ここでは、それらを振動数との関連で検討した。この際、空気の抵抗を除いて、材料そのものの性質を知るため減圧のもとでの実験も行なった。さらに、木材特有の減衰をより明らかにするために、木材の減衰を金属やプラスチックの減衰と比較した。

2. 実 験

2.1 実験材料と実験方法

エゾマツ (*Picea jezoensis* Carr.) 材の気乾材から、 $250 \times 12.0 \times 2.0$ mm ($l \times b \times h$) の 2 方まの試験片を作り、両側のまさ目面にワイヤーストレインゲージ(ゲージ長 8 mm)をはりつけた。さらに、合金鋼、アルミニ

*1 Received Oct. 5, 1972. この研究は、第 22 回日本木材学会大会(1972 年 4 月、東京農業大学)において一部発表した。

*2 九州大学農学部 Faculty of Agriculture, Kyushu University, Fukuoka

Table 1. Vibration data for test materials.^{a)}

Material	Dimensions of test specimen $l \times b \times h$ (mm) ^{b)}	Density (g/cm ³)	Observed frequency ^{c)} (Hz)	Logarithmic decrement $\times 10^{-2}$	Dynamic Young's modulus (dyne/cm ²)
Ezomatsu-wood	220×12.0×2.0	0.37 ^{d)}	28.0	3.68	6.35×10^{10}
Alloy steel	140×11.0×0.6	7.52	27.1	0.89	2.15×10^{12}
Aluminum	180×12.0×1.1	2.65	27.2	1.86	6.04×10^{11}
Polycarbonate	190×11.0×2.9	1.37	20.7	4.82	3.24×10^{10}

^{a)}under reduced pressure, ^{b)} l : length (longitudinal direction), b : width (radial direction), h : thickness (tangential direction), ^{c)}resonance frequency of the first mode, ^{d)}density in the oven-dry condition.

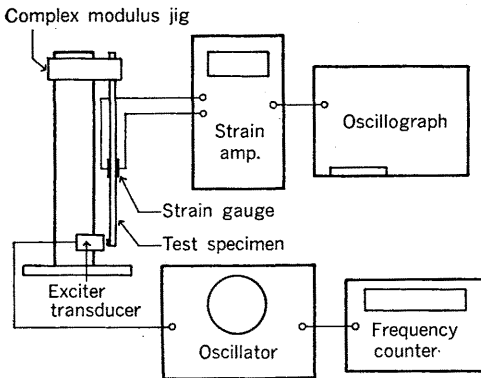


Fig. 1. Free vibration testing set-up.

ウムとポリカーボネートでも同様の試験片を作り実験に供した。

それらの寸法および対数減衰率、ヤング率などは Table 1 に示すとおりである。

Fig. 1 に示すような複素弾性率測定用治具に試験片の一方を固定し、他方を自由端とし、試験片に固有の共振振動数による曲げ振動を行なわせた。なお、振動方向は接線方向（動的曲げ荷重面はまさ目面）とした。共振振動数は、試験片の固定端から自由端までの長さを変えることと、共振次数をかえることによって変化させ、1つの試験片ではほぼ 25 Hz から 1200 Hz にわたっての測定を行なった。さて、共振時において急に外力を取り除くと、自由振動は次第に減衰する。その減衰状態は、動的曲げ荷重面の引張、圧縮ひずみを、試験片にはりつけているワイヤーストレインゲージによって検出し、電磁オシログラフに記録させた。このとき、ワイヤーストレインゲージからのリード線には 0.17 mm の細線を、できるだけ短くしてリード線の重さによる影響を小さくするとともに、リード線による拘束がないように気をつけた。

また、空気の抵抗の影響を確かめるため、約 20 mmHg

に減圧されたデシケーター中でも、上に述べた同じ装置と方法で実験を行なった。

なお、すべての実験は温度 20°C、関係湿度 65 % の恒温恒湿室内で行ない、環境の条件の違いによる影響を小さくするようにつとめた。

2.2 ϵ , s および λ の求め方

粘性とクーロン摩擦の両者が存在する場合の直線振動系についての運動方程式は¹⁾,

$$\frac{d^2\xi}{dt^2} + 2\epsilon \frac{d\xi}{dt} + \omega_n^2 \xi = 0 \quad (1)$$

$$\text{ただし,} \quad \xi = x \pm s \quad (2)$$

ϵ : 粘性成分を表わす係数 (coefficient of representing viscous component)

s : クーロン摩擦を表わす係数 (coefficient of representing Coulomb's friction)

ω_n : 固有角振動数 (characteristic circular frequency)

x : 変位 (displacement), t : 時間 (time)

である。 $\epsilon < \omega_n$ の場合の解は、

$$\xi = e^{-\epsilon t} \cdot a \cdot \sin qt \quad (3)$$

ただし、 a : 振幅 (amplitude)

$$q = \sqrt{\omega_n^2 - \epsilon^2} \quad (4)$$

である。したがって、

$$x = e^{-\epsilon t} \cdot a \cdot \sin qt \mp s \quad (5)$$

となる。

さて、上の式からだけでは、時間経過による振幅の減少が、粘性のみによるのか、クーロン摩擦のみによるのか、あるいは両者によって生じるのか、判断ができない。

そこで、実験によって得られる自由振動曲線 (Fig. 2) から、複振幅 $h_1, h_2, h_3, \dots, h_n, h_{n+1}$ を求め、順次 Fig. 3 に示すようにプロットすると、1つの直線が得られる。この直線の方程式は、

$$h_{n+1} = e^{-\pi\epsilon/q} \cdot h_n - 2s(1 + e^{-\pi\epsilon/q}) \quad (6)$$

となり、直線の傾斜は、

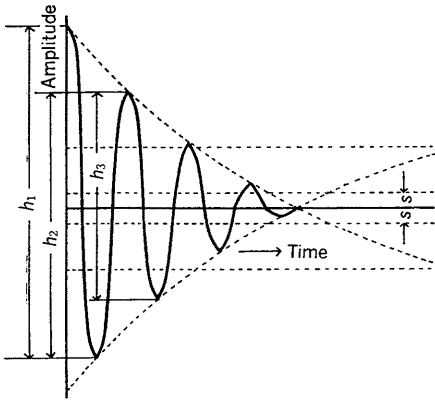


Fig. 2. Free vibration with viscous and Coulomb's friction damping.

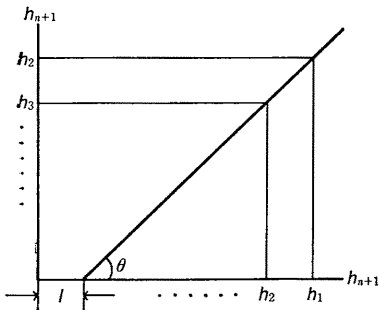


Fig. 3. Diagram of obtaining $\tan \theta$ [Eq. (7)] and l [Eq. (8)].

$h_1, h_2, \dots, h_n, h_{n+1}$: double amplitude (Fig. 2).

$$\tan \theta = e^{-\pi/\alpha} \quad (7)$$

である。 h_n 軸との交点は、

$$l = 2s(1 + e^{\pi/\alpha}) \quad (8)$$

となる。したがって θ と l がわかれば、式 (7) と式 (8) から ϵ と s の両者が求められる。

対数減衰率 λ (logarithmic decrement) は、自由振動曲線から、1 番目の振幅を A_1 (amplitude of vibration corresponding to first cycle), それから n 番目の振動の振幅を A_n (amplitude of vibration corresponding to n th cycle) とすれば、

$$\lambda = \frac{1}{n} \cdot \log_e \frac{A_1}{A_n} \quad (9)$$

として求められる。

3. 実験結果と考察

3.1 実験材料について

実験に用いられたエゾマツ材、ならびに金属とプラスチックは Table 1 に示すとおりである。なお、エゾマ

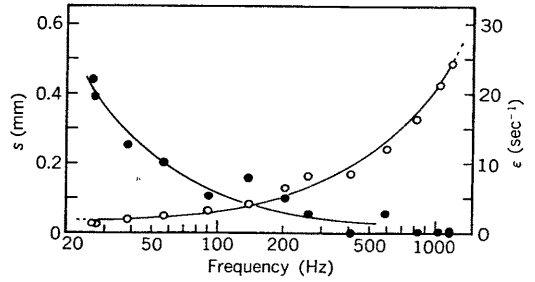


Fig. 4. Effects of frequency on s and ϵ under atmospheric pressure (Ezomatsu-wood).

s : coefficient of representing Coulomb's friction (mm), ϵ : coefficient of representing viscous component (sec^{-1}), \circ, \bullet .

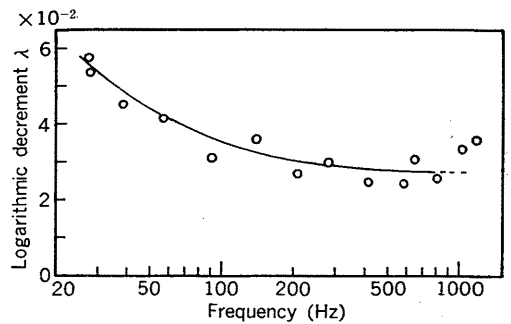


Fig. 5. Effects of frequency on logarithmic decrement (λ) under atmospheric pressure (Ezomatsu-wood).

ツ材は数本の試験片について実験がなされたが、ここには代表的な 1 例を示す。

3.2 大気圧のもとでの振動減衰

粘性成分を表す係数 ϵ とクーロン摩擦を表す係数 s が、振動数とどのような関係にあるかを知るために Fig. 4 を得た。 ϵ は振動数の増加にもなって増加するが、 s は高い振動数域では認められず振動数が減少するにつれ、とくに 150 Hz 以下において増大する。谷口の著書¹⁾によると、クーロン摩擦は、ふつうは振動数とは無関係に一定であるように取り扱われるけれども、細かく議論する場合は、振動数が低いときは粘性抵抗とは逆に振動数の増加にもなって減少すると述べられている。

さて、クーロン摩擦には外的な減衰の要因として、空気の抵抗およびクランプなどによる損失が考えられる。そこで、まず後者に対しては、試験片のクランプをできるだけ完全にして、振動に際して、系の可動部分の機械的な接合点におけるクーロン摩擦の発生を防止した。なお、測定中の試験片の振幅は微小であり、したがって

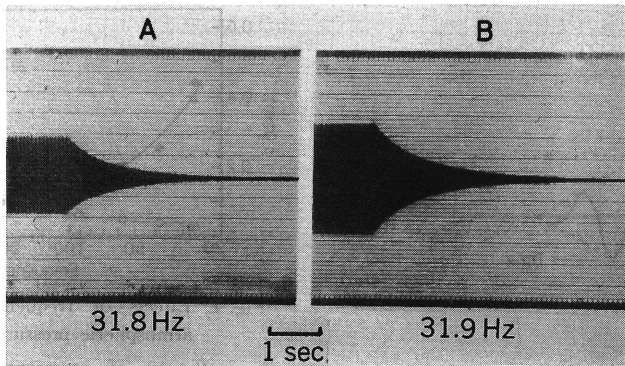


Fig. 6. Typical decay envelopes for specimens of Ezomatsu-wood in free vibration.

A: under atmospheric pressure, B: under reduced pressure (20 mmHg).

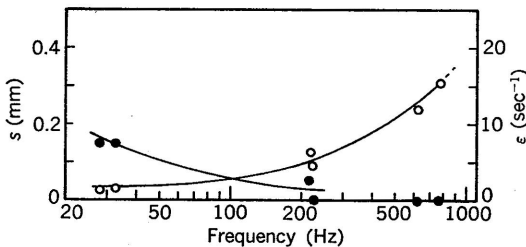


Fig. 7. Effects of frequency on s and ϵ under reduced pressure (Ezomatsu-wood).

○ ϵ , ● s .

s , ϵ および対数減衰率 λ が振幅の影響の少ない範囲であることを予備実験で確かめた。

つぎに、減衰の一般的な指標である対数減衰率 λ と振動数の関係を Fig. 5 に示す。 λ の値は低い振動数域で大きく、振動数の増加とともに減少するが、約 150 Hz 以上ではほぼ一定となる。 λ は、その値のみで減衰を表わす尺度となるため、Fig. 4 で示したクーロン摩擦と粘性成分の両者を含んでいることになる。

3.3 減圧のもとでの振動減衰

前に述べたように、振動の減衰の外的な要因となり得ると考えられる空気の抵抗を除くために、減圧のもとでも、大気圧のもとでと同様の実験を行なった。

大気圧のもと、および減圧のもとで、他の条件を一定にしたときの自由振動を電磁オシログラフに記録したものが、それぞれ Fig. 6 の A, B に示される。減圧のもとでは空気の抵抗が少なくなったために、明らかに大気圧のもとにおけるものよりも自由振動の振幅が大きく、減衰時間も長い。

さて、減圧のもとでの ϵ , s への振動数 (ほぼ 25~800 Hz) の影響を Fig. 7 に示す。大気圧のもとで測定した

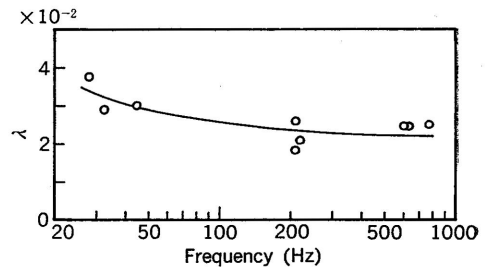


Fig. 8. Effects of frequency on logarithmic decrement under reduced pressure (Ezomatsu-wood).

結果と同じように、 ϵ は振動数の増加とともに増加する。 s は、大気圧のもとで測定したものと比べ、ほぼ 100 Hz 以下で明らかに低下している。すなわち、このことは空気の抵抗が s の値に影響を与えていたことを示すであろう。

以上の検討から、この研究に採用した振動数範囲では、低い振動数域でクーロン摩擦と粘性の両者が関与し、振動数が増加するにつれて粘性が主体となることが明らかとなった。

ところで、約 20 mmHg の減圧のもとで測定した結果において、ほぼ 100 Hz 以下の低い振動数域に、なお s の値が存在することは、前に述べた外的な要因のほか、内的な要因としてのクーロン摩擦が存在することを示すものと考えられる。なお Fig. 7 に示すように、木材の内部に存在すると考えられるクーロン摩擦は、低い振動数域において振動数の減少とともに増大する傾向が認められる。さらに、減圧のもとで測定した λ と振動数の関係を Fig. 8 に示す。ほぼ 100 Hz 以下では、振動数の減少とともに λ はやや大きくなるが、100 Hz 以上

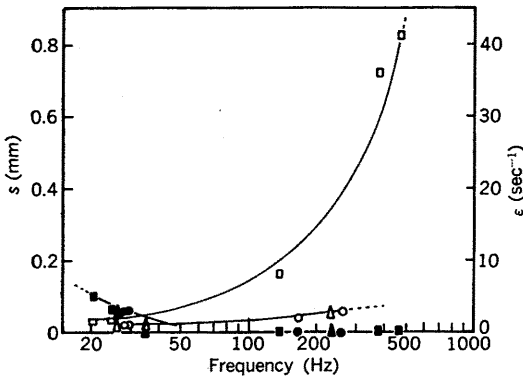


Fig. 9. Effects of frequency on s and ϵ under atmospheric pressure (metals and plastic).

Alloy steel: ○ ϵ , ● s ; aluminum: △ ϵ , ▲ s ; polycarbonate: □ ϵ , ■ s .

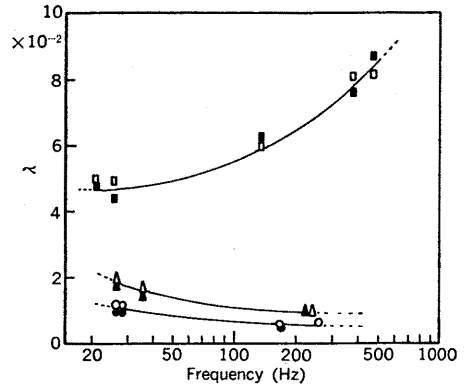


Fig. 11. Effects of frequency on logarithmic decrement under atmospheric pressure and reduced pressure (metals and plastic).

Under atmospheric pressure: ○alloy steel, △aluminum, □polycarbonate, under reduced pressure: ●alloy steel, ▲aluminum, ■polycarbonate.

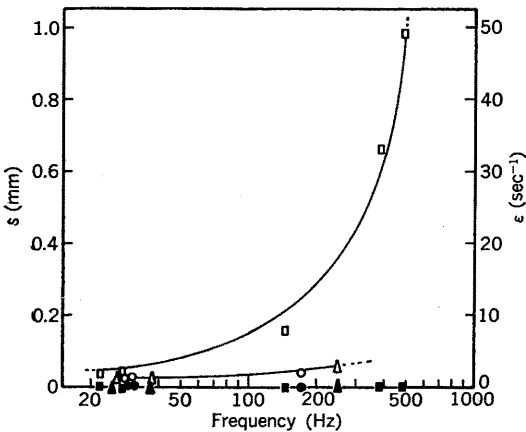


Fig. 10. Effects of frequency on s and ϵ under reduced pressure (metals and plastic).

Symbols are the same as in Fig. 9.

ではほぼ一定となる。ここで、Fig. 8 と Fig. 5 のそれぞれにおける λ を比較すると、ほぼ 150 Hz 以下の低い振動数域では、振動数の減少とともに両者の λ の差が大きくなる。このことは、ほぼ 150 Hz 以下の振動では、 λ の値に空気の抵抗の影響が大きかったことを意味していると考えられる。しかしながら、減圧のもとで測定した結果においても、なおほぼ 100 Hz 以下で λ がかなり存在することは、木材の内部に存在するクーロン摩擦が影響を与えているためであろう。

小野木²⁾は結晶性の繊維などを例にあげ、大きい粒子が応力によって互いにすべり合うときには、つねにクーロン摩擦の生じる可能性があるとして述べている。そこで、木材についても、大きくは木材を構成する要素である細

胞の大きさのオーダーでの細胞間のすべり合いから、小さくは細胞膜内の微細構造的要素のすべり合いを含んでいると考えなければならない。

楳木ら^{3,4)}は、スプリングとダッシュポット、さらにクーロン摩擦機構であるスライダーとから構成される力学的モデルによって表現される粘弾塑性理論を提案した。また河合⁵⁾は、繊維などの結晶領域および非結晶領域の混合体と考えられる結晶性高分子材料などに、クーロン摩擦要素を取り入れた粘弾塑性理論による取り扱いを行なうことは、きわめて有効であると述べ、藤野ら⁷⁾や関口ら^{8,9)}によって、いろいろの材料について粘弾塑性理論による取り扱いがなされている。

3.4 金属およびプラスチックの振動減衰

木材以外の3種の材料について、大気圧のもとと減圧のもとで測定した ϵ , s と振動数 (ほぼ 20~500 Hz) の関係をそれぞれ Fig. 9 と Fig. 10 に示す。合金鋼とアルミニウムの ϵ は、振動数とともにわずかながら増加してはいるが、Fig. 4 のエゾマツ材に比べてはるかに小さい。ポリカーボネートの ϵ は、振動数の増加とともに顕著に増加し、エゾマツ材に比べてはるかに大きい。

これら3種の材料の s は、大気圧のもとでは Fig. 9 に示すように、ほぼ 30 Hz 以下でわずかに認められるが、減圧のもとでは Fig. 10 からわかるように s を認めることができない。ここで Fig. 4, Fig. 7 に示すエゾマツ材の s と Fig. 9, Fig. 10 に示す合金鋼、アルミニウム、ポリカーボネートの s をそれぞれ比較してみると、明らかな違いがある。すなわち、大気圧のもとでの実験では、ほぼ 150 Hz 以下でエゾマツ材の s (Fig. 4) が、合

金鋼, アルミニウム, ポリカーボネートの s (Fig. 9) よりも大きな値を示している。減圧のもとでの実験では, 合金鋼, アルミニウム, ポリカーボネートで認めることができない s (Fig. 10) が, エゾマツ材では認めることができる (Fig. 7)。これらのことは, 金属やプラスチックでは認められない内部的なクーロン摩擦が, 木材には存在することを示している。

さらに Fig. 11 には, 木材以外の3種の材料の大気圧のもとと減圧のもとで測定した λ と振動数の関係を示している。Fig. 5 と Fig. 8 に示しているエゾマツ材の λ と, Fig. 11 とを比較すると, 合金鋼とアルミニウムの λ は, 大気圧のもとでも減圧のもとでも, ともに小さく, 変動が小さい。しかし, ポリカーボネートの λ は, エゾマツ材に比べてその値も大きく, 振動数の増加とともに λ の値は上昇している。また, 木材以外のこれら3種の材料は, 大気圧のもとでの λ と減圧のもとでの λ の差が, 木材に比べて小さい。

金属は ϵ , s ともに小さく, さらに λ の値も小さいことから, 非常に減衰しにくい材料であることを示す。プラスチックでは, s が小さく ϵ は大きい。これは, 減衰の主体が粘性であり, さらに測定した振動数範囲で振動数の増加とともに λ は上昇を続け, その値も大きく, 減衰しやすいことを示す。

以上のように, 金属およびプラスチックの減衰との比較によって, 木材の振動の減衰の特性を明らかにした。

4. 結 論

木材に自由振動を行なわせた場合, 時間経過による振幅の減少には, 測定した振動数範囲 (ほぼ 25~1200 Hz) の低い振動数域ではクーロン摩擦および粘性の両者が関与し, 振動数が増加するにつれて粘性が主体となることが明らかとなった。なお, 木材の内部に存在するクーロン摩擦は, 低い振動数域で振動数が減衰するにつれて増大する傾向がある。

木材の大気圧のもとで測定した減衰には, 低い振動数域で空気の抵抗がかなりの影響を与えていることが判明した。

文 献

- 1) 谷口 修: “振動工学”, コロナ社, p. 44 (1970)
- 2) 小野木重治: “レオロジー要論, 第 11 版”, 槇書店, p. 49 (1971)
- 3) Y. Sawaragi and H. Tokumaru: *Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyoto Univ.*, **16**, 100 (1954)
- 4) 榎木義一, 得丸英勝: 材料試験, **6**, 199 (1957)
- 5) 河合弘迪: “高分子の物性 I”, 高分子学会編, 共立出版, p. 86 (1959)
- 6) 河合弘迪: “繊維物理学”, 繊維学会編, 丸善, p. 275 (1962)
- 7) 藤野清久ほか 3 名: 繊維機械学会誌, **13**, 699 (1960)
- 8) 関口久美ほか 2 名: 材料試験, **5**, 172 (1956)
- 9) 関口久美ほか 3 名: 同上, **6**, 665 (1957)