

## 木材の力学的損失の温度依存性

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/2324/19407>

---

出版情報 : 木材学会誌. 20 (8), pp.349-354, 1974-08-01. 日本木材学会  
バージョン :  
権利関係 :

木材の力学的損失の温度依存性<sup>\*1</sup>北原龍士<sup>\*2</sup>, 松本 勲<sup>\*2</sup>Temperature Dependence of Dynamic Mechanical Loss of Wood<sup>\*1</sup>Ryushi KITAHARA<sup>\*2</sup> and Tsutomu MATSUMOTO<sup>\*2</sup>

The dynamic elastic modulus,  $E'$ , and the loss modulus,  $E''$ , of wood have been investigated using the results of non-resonance and forced longitudinal vibration tests. The tests were done at frequencies of 3.5, 11, 35, and 110 Hz, for various temperatures ranging from about  $-150^{\circ}\text{C}$  to  $+150^{\circ}\text{C}$ . The test specimens were prepared from Todomatsu-wood (*Abies Sachalinensis* Mast.), and were conditioned to several moisture contents which varied from almost 0 % (oven-dry) to about 18 %.

Main results obtained from the investigation are as follows:

1) For oven-dried wood sample, the so-called temperature dispersion was observed at about  $-35^{\circ}\text{C}$ . This temperature dispersion may be due to the motion of micro segment of wood substances.

2) For wood samples containing moisture, the position of the temperature dispersion shifted to lower temperatures, as compared to oven-dried sample. That is, the position of the temperature dispersion shifted to lower temperatures with increasing moisture content (m. c.) for samples containing below about 6 % m. c., but for samples containing more than about 6 % m. c., the shift in the position of the temperature dispersion became smaller.

3) The absolute temperatures,  $T$ , at which the temperature dispersions were observed, were obtained for given frequencies,  $f$ , and a plot of  $\log f$  against  $1/T$  gave a straight line. The straight line for wood sample containing moisture shifted apparently to lower temperatures compared to that for oven-dried wood sample; however, there was no remarkable difference in the slopes between both the straight lines.

二三の一定周波数のもとで、トドマツ材の  $E'$  と  $E''$  の温度依存性を、木材細胞膜中の水分の影響との関連において検討した。全乾状態の木材では、いわゆる温度分散が  $-35^{\circ}\text{C}$  付近に認められるが、水分を含むと、温度分散の位置はさらに低温側に移動する。しかも、含水率およそ 6 % までの水分の増加で、温度分散の位置は大きく低温側に移動するが、6 % をこえると、その移動は小さくなる。またそれぞれの周波数の対数と、温度分散の位置における絶対温度の逆数との間には直線関係が存在し、全乾材の直線とくらべて気乾材のそれは、明らかに低温側にずれる。

## 1. 緒 言

さきの報告<sup>1)</sup>では、木材の振動減衰を観察し、ほかの金属や高分子材料とことなる木材特有の減衰挙動をみいだした。この報告では、木材の力学的分散をもとめ、力

学的減衰の基礎的な挙動について新しい知見を得ることを目的とした。

ところで、温度分散は比較的にもとめやすく、それをもとめることは、木材の力学的性質を明らかにするための有効なアプローチのひとつであろう。また、木材の性質と水分との関係は重要な問題であるので、ここでは動力学的挙動におよぼす水分の影響についても注目したい。

以上のような考えかたから、この報告では、二三の一定周波数のもとで、弾性率と力学的損失の温度依存性をしらべ、さらに繊維飽和点以下での木材中の水分の影響について検討した。

\*1 Received Sept. 19, 1973. この研究は、第 23 回日本木材学会大会 (1973 年 4 月, 京都) において発表した。

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

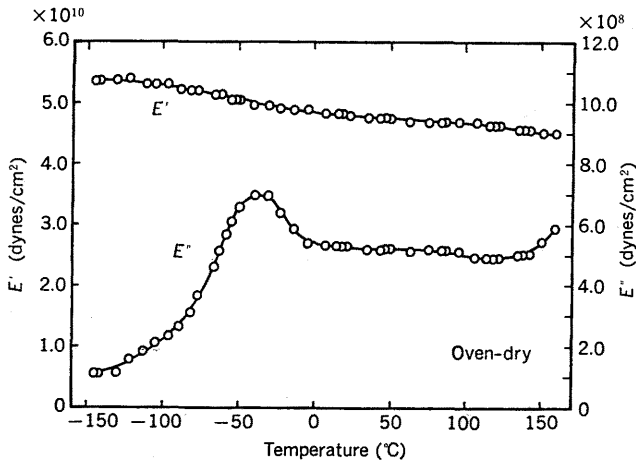


Fig. 1. Temperature dependence of dynamic elastic modulus,  $E'$ , and loss modulus,  $E''$ , for oven-dried wood sample at a frequency of 110 Hz.

## 2. 実験材料と実験方法

トドマツ材の早材部から長さ(繊維方向) 40 mm, 幅 1.0~2.0 mm および厚さ 0.1 mm 程度の大きさの板目木取りの試験片を作り, あらかじめ裏われ, 目切れ, 厚さむらなどをチェックして, 欠点のないものだけを実験に用いた。また, 各試験片の過去における温度と湿度の履歴の影響を均一化するために, これらを 103°C で 24 時間加熱し, そのあと目的とする含水率まで吸湿させた。

測定に際しては, まず試験片の両端をクランプし, あらかじめ試験片にわずかな引張り荷重をあたえた。つぎに, たて振動を試験片の繊維方向と平行に加え, 一端で応力を, 他端でひずみを検出し, その位相の遅れから  $\tan \delta$  を測定する非共振法によって,  $E'$  と  $E''$  をもとめた(測定器は Vibron DDV-II)。測定周波数は 3.5, 11, 35, 110 Hz の 4 種, 温度範囲  $-150 \sim +150^\circ\text{C}$ , 昇温速度  $1^\circ\text{C}/\text{min}$ , 試験片の含水率は全乾から, およそ 18% までにわたって実験を行なった。また温度を下げたとき, 空気中の水分が試験片に影響をあたえないように, 測定室内の空気を窒素ガスで置きかえた。

なお  $-150 \sim 0^\circ\text{C}$  の温度範囲では, 測定中の試験片の含水率の変化は,  $0^\circ\text{C}$  以上の場合とくらべて非常に小さかった。

## 3. 実験結果

実験の結果を示すと, つぎのとおりである。

(1) 周波数 110 Hz での動的弾性率  $E'$  および損失弾

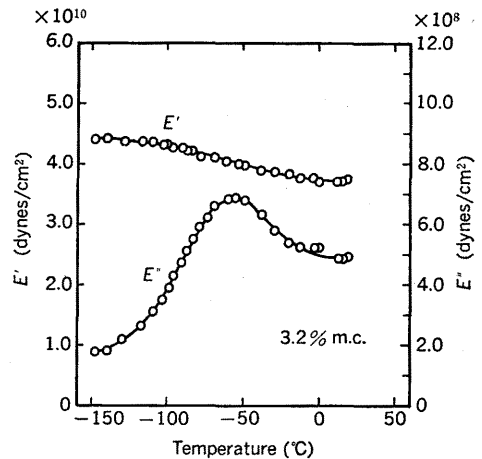


Fig. 2. Temperature dependence of  $E'$  and  $E''$  for 3.2% moisture content (m.c.) sample at 110 Hz.

性率  $E''$  と温度の関係を, それぞれの含水率ごとに Fig. 1~5 に示す。

全乾状態の木材では (Fig. 1), 温度の上昇で低温側に  $E'$  のゆるやかな低下と  $E''$  の幅広い極大, いわゆる温度分散を  $-35^\circ\text{C}$  付近で認めることができる。その  $E''$  は, 極大をすぎた  $0^\circ\text{C}$  近くから平らな状態が続く; ほぼ  $+150^\circ\text{C}$  でふたたび上昇を始める。

(2) 木材の細胞膜中に水分を含む場合の温度分散と, その位置の変化をもとめた図が Fig. 2~5 である。これらは室温以上になると, 含水率を一定に保つことがむずかしくなるため, 室温付近まで測定をとどめた。図から明らかなように, 木材が水分を含むことによって, 温

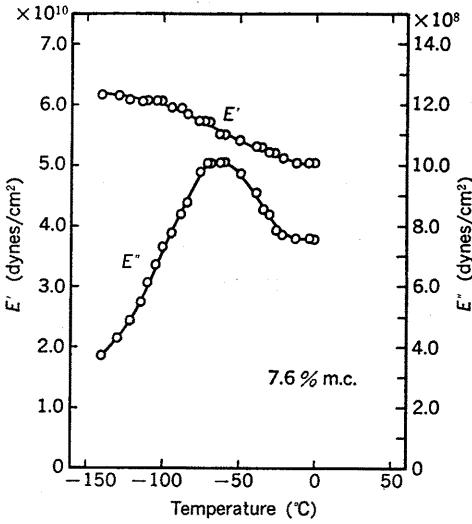


Fig. 3. Temperature dependence of  $E'$  and  $E''$  for 7.6% m.c. sample at 110 Hz.

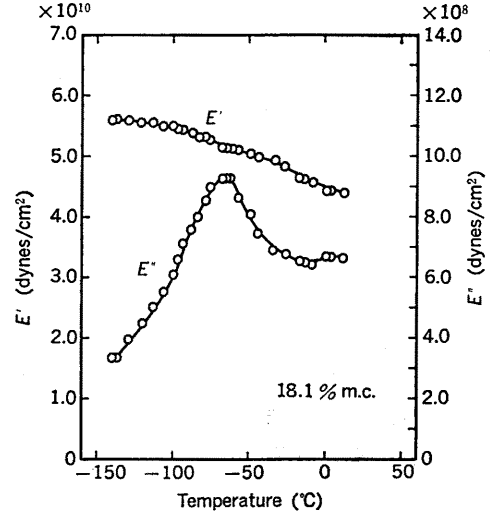


Fig. 5. Temperature dependence of  $E'$  and  $E''$  for 18.1% m.c. sample at 110 Hz.

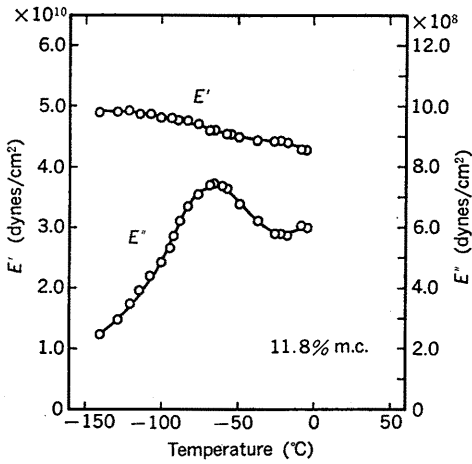


Fig. 4. Temperature dependence of  $E'$  and  $E''$  for 11.8% m.c. sample at 110 Hz.

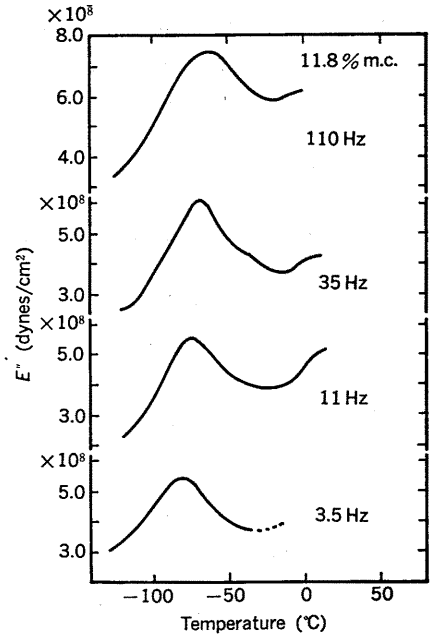


Fig. 6. Temperature dependence of  $E''$  at various frequencies for 11.8% m.c. sample.

度上昇ともなう  $E'$  の低下は、全乾材の  $E'$  の低下 (Fig. 1) にくらべて著しくなり、 $E''$  の極大値の位置が低温側に移動する。また含水率が増加すると、 $E''$  の極大がややシャープな形に変化する。

(3) 気乾材の  $E''$  と温度の関係を、それぞれの周波数ごとに Fig. 6 に示す。この図から、 $E''$  の極大値の位置は周波数に依存することがわかる。すなわち、周波数が低くなると、 $E''$  の極大値の位置は低温側に移動する。なお全乾材の  $E''$  の極大値の位置は、それぞれの周波数で、Fig. 6 の結果よりも高温側に移動する (Fig. 8)。

4. 考 察

実験結果から、低温側に木材の温度分散を、またその位置は水分の影響によって変化することを認めた。このように木材の力学的分散、なかでも温度分散を問題にした研究には、たとえば H. Becker and D. Noack<sup>2)</sup> や D.

E. Kline, R. P. Krehling and P. R. Blankenhorn<sup>3)</sup> の論文がある。

さてこの研究では、おもに  $E''$  の極大値の温度位置から検討を行なうが、 $E'$  の値は試験片ごとにちらばりを示し、したがってその絶対値を問題にすることはできない。

まず、Fig. 1~6 における  $E''$  の曲線の形に注目すると、低温側の  $E''$  の極大は幅広い曲線を描いている。これは結晶性高分子物質の無定形域のように、緩和時間の分布が幅広い場合には、吸収の形も幅広くなる<sup>4)</sup> ということが、木材についてもある程度いえそうに思われる。

ところで全乾状態の木材では、Fig. 1 に示すように、低温側に温度分散を認めることができるが、この分散は、木材のどのような運動に対応するものであろうか。このような低温側に現れる温度分散について、たとえば G. A. Bernier<sup>5)</sup> は分子の小さなセグメントの動きにもとづく分散とし、則元<sup>6)</sup> は、木材実質の無定形域における側鎖の  $\text{CH}_2\text{OH}$  基の局所運動にもとづく分散であると説明している。また高柳<sup>7)</sup> は、結晶性高分子物質において、低温側に現れる温度分散は、無定形域の分子鎖の化学構造と関係が深くなる傾向を示し、活性化エネルギーが低く、主鎖のミクロブラウン運動は停止したままで起こるセグメントの小さな動き、あるいはより小さな部分の動きに対応するもので、側鎖の回転による場合もあると述べている。しかし、上に述べたような説明をセルロース、ヘミセルロース、リグニンなどから複雑に構成されている木材について、そのままでははめることはさしひかえるが、低温側に認められる温度分散は、木材実質中のなにか小さな部分の動きにもとづく分散であると思われる。

つぎに全乾状態にある木材では、温度の上昇にともなう  $E''$  の変化は、低温側での  $E''$  の極大をすぎるところから、高温側のほぼ  $+150^\circ\text{C}$  のふたたび  $E''$  の増大が始まるまで、平らな状態が続く (Fig. 1)。しかし、木材が水分を含むと、Fig. 4~5 および Fig. 6 に示すように、温度の上昇で  $0^\circ\text{C}$  付近から  $E''$  の増大が始まっている。これは、水分にもとづく温度分散の存在が予想される。木材中に結合水を含む場合、たとえば Bernier<sup>5)</sup> は  $+87^\circ\text{C}$  で、Becker<sup>2)</sup> は  $+80\sim+100^\circ\text{C}$  の範囲で、水にもとづく温度分散を認めている。

ところで、全乾状態の木材において、高温側で  $+150^\circ\text{C}$  から  $E''$  の増大が認められることは、木材実質中のより大きな運動単位が吸収の機構に関与していることが予想される。

つぎに、木材の細胞膜中に水分を含むことによって、

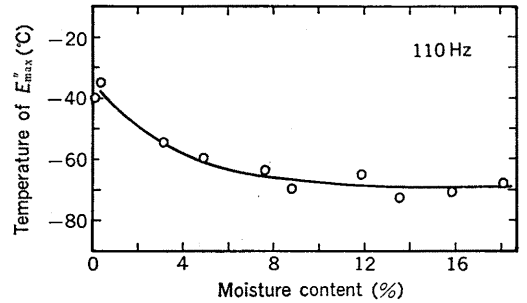


Fig. 7. Temperature of maximum value of  $E''$  as a function of moisture content at 110 Hz.

低温側に認められる温度分散の位置が、どのように変化するかを考えよう。まず、この実験で用いられたような低温において、木材中の結合水は、どのような状態におかれているかが考えられなければならない。Cudinov<sup>8)</sup> によると、木材中に可動水が存在できる限界温度は  $-80\pm 3^\circ\text{C}$  とし、このような低温にいたるまで、木材中には氷と不凍水とが共存していると述べている。

さて、周波数 110 Hz における  $E''$  の極大値の温度と含水率の関係を示すと、Fig. 7 のとおりである。含水率 6% 付近を境として、その上下の含水率域で、 $E''$  の極大値の温度はことなつた挙動を示す。すなわち、含水率およそ 6% までの水分の増加で、 $E''$  の極大値の温度は明らかに低下している。しかし、6% をこえると、 $E''$  の極大値の温度はあまり低下しない。ところが、Kline<sup>3)</sup> は周波数 2300 Hz での測定から、 $-48\sim-88^\circ\text{C}$  の範囲に温度分散をみだし、これは無定形域に存在する水分の動きにもとづく分散であると説明し、また含水率およそ 6% を境にして、それ以下では損失の極大値の温度は変化せず、それ以上の含水率では水分の増加とともに低下することを認め、この挙動は木材中における水分の吸着状態と関連があると述べている。

ところで、われわれの実験の Fig. 7 に示す結果と Kline<sup>3)</sup> の結果との間に、低温側の温度分散の現れかたと、損失の極大値における温度の含水率による変化とについて、ちがいを生じたことは興味がある。この点に関しては、さらにことなる周波数でのデータなども総合して検討すべきであり、今後の研究にまたなくてはならない。

ここで Fig. 7 の挙動から、つぎのことが考えられよう。強い結合力の働いている含水率 5~6% 以下の低い範囲では、水分子はその動きを拘束されているはずであり、もしこの実験で低温側に認められる温度分散が、水

分にもとづく分散であるならば、 $E''$  の極大値の温度は、含水率およそ 6% 以下の範囲では変化しないはずである。しかし、 $E''$  の極大値の温度は、含水率の低い範囲では水分の増加で低下している。したがって、本質的にはこの実験で低温側に認められる温度分散が、木材中の水分にもとづく分散ではなくて、木材実質にもとづく分散であり、それに水分が影響をおよぼしていると考えべきであろう。つまり Fig. 7 の挙動については、水分子が含水率 6% 程度まで木材中に吸着されたことよって、たとえば木材実質中のある小さな部分の運動性が束縛をとかれて自由になり、分散の生じる温度の範囲で低い周波数 (110 Hz) の力学的刺激に回答した結果、 $E''$  の極大値の温度の低下を生じるものと思われる。さらに、6% 以上の高い含水率域での水分子は、それ以下の含水率域で吸着されている水分子よりも、木材実質中のある小さな部分の運動性におよぼす影響が小さいため、 $E''$  の極大値の温度の低下が小さくなると考えられる。また木材の誘電性の研究で、堤ら<sup>9)</sup>によつて、含水率 3~8% を境にして、その挙動に変化を生じることが明らかにされているが、それはこの実験における含水率およそ 6% を境にして、その上下の水分が、木材への吸着状態にちがひがあることと関連をもつだろう。

つぎに Fig. 6 から、温度分散の位置が周波数によつてことなることがわかったので、それぞれの周波数  $f$  のもとで温度分散が認められる絶対温度  $T$  の逆数を、 $\log f$  に対してプロットすれば、Fig. 8 に示すとおり直線が得られる。そして全乾状態の木材が水分を含むと、

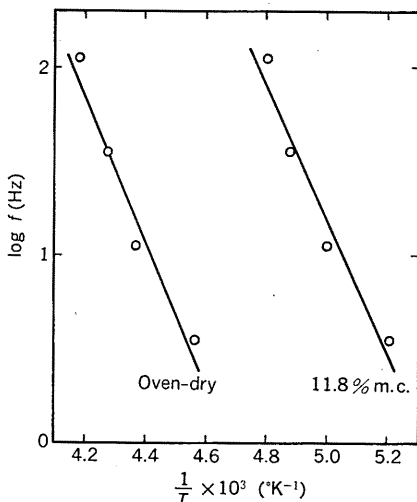


Fig. 8. Log. of frequency,  $f$ , as a function of reciprocal absolute temperature,  $1/T$ , for oven-dried and 11.8% m.c. samples.

明らかに直線は低温側にずれる。しかし、直線の傾きをくらべると、全乾材と気乾材の直線の間に大きなちがいはみられない。これは、この実験で低温側に認められる温度分散が、水分にもとづく分散ではなくて、木材実質にもとづく分散であることを示しているように思われる。参考までに、Fig. 8 の直線の傾きからもとめた“みかけの活性化エネルギー”の値を示すと、全乾材でおよそ 17.6 kcal/mole、気乾材でおよそ 16.3 kcal/mole であった。

## 5. 結 論

この研究では、トドマツ材を実験材料として 3.5, 11, 35, 110 Hz の 4 種の周波数、 $-150 \sim +150^\circ\text{C}$  の温度範囲で、木材の細胞膜中の水分が動的弾性率  $E'$  と損失弾性率  $E''$  におよぼす影響を検討し、つぎのような結果を得た。

1) 全乾状態の木材では、いわゆる温度分散が  $-35^\circ\text{C}$  付近に存在する。この温度分散は、木材実質中のある小さな部分の動きにもとづく分散であると考えられる。

2) 木材が水分を含むと、温度分散の位置は全乾状態の木材とくらべて低温側に移動する。しかも、含水率およそ 6% までは、温度分散の位置は水分の増加により低温側に移動するが、6% をこえると、温度分散の位置の移動は小さくなる。

3) それぞれの周波数  $f$  について、温度分散が認められる絶対温度  $T$  をもとめ、 $\log f \sim 1/T$  の関係を含水率ごとに示すと、直線関係が存在する。なお、全乾材の直線とくらべて水分を含む木材のそれは、明らかに低温側にずれる。しかし、直線の傾きには両者の間に大きなちがいはみられない。

## 謝 辞

この研究を行なうにあたり、測定装置を使用させていただき、そのうえ多くのご助言をたまわりました九州大学工学部応用理学教室の竹村哲男教授、および中福千壽助手に感謝いたします。

## 文 献

- 1) 北原龍士, 松本 勲: 木材誌, **19**, 373 (1973)
- 2) H. Becker and D. Noack: *Wood Sci. Techn.*, **2**, 213 (1968)
- 3) D. E. Kline, R. P. Krehling and P. R. Blankenhorn: "Advances in Polymer Science and Engineering," ed. by K. D. Pae *et al.*, Preum Press, N. Y. and

- London, p. 185 (1972)
- 4) 高柳素夫: “レオロジー入門, 転移点結晶化”, 東洋ボードウイン(株), p. 3 (1962)
  - 5) G. A. Bernier and D. E. Kline: *For. Prod. J.*, **18**, 79 (1968)
  - 6) M. Norimoto and T. Yamada: *Wood Research* No. 50, 36 (1970)
  - 7) 高柳素夫, 芳野正継: “レオロジー入門, 粘弾性吸収法”, 東洋ボードウイン(株), p. 16 (1962)
  - 8) B. S. Cudinov and V. I. Stepanov: *Holztech.*, **10**, 156 (1969) [山田 正: 木材研究資料, No. 5, p. 9 (1971)]
  - 9) 堤 壽一, 渡辺治人: 木材誌, **12**, 115 (1966)