

ヒノキの曲げ応力緩和に及ぼす湿度の影響*

則元 京**・山田 正**

Misato NORIMOTO** and Tadashi YAMADA** : The effect of relative humidity on the stress relaxation of HINOKI wood

I 緒 言

木材の静的粘弾性に及ぼす水分の影響は、それが平衡状態にある場合より非平衡状態にある場合¹⁾、あるいは吸湿脱湿の繰返しの場合のように水分がある巾をもつて変化する状態で大きく現われ²⁾³⁾、その挙動には非常に興味深いものがある。そこでこの水分の変化が木材の粘弾性に与える挙動を明らかにするための基礎データとして、本実験では水分が平衡状態にある場合の木材の応力緩和に及ぼす水分の効果について調べた。

木材の静的粘弾性に与える水分の効果については、たとえば HEARMON は Celtis 材のクリープ実験で温度 25°C では関係湿度75%以上でクリープ曲線に含水率による差異が生ずることを報告し⁴⁾、竹村らはブナの曲げクリープ実験でクリープ曲線が含水率の増加とともに急昇しクリープ量が時間と湿度を変数とする変数分離形で表わせることを示した⁵⁾。著者らはヒノキの捩りクリープコンプライアンスが湿度とともに単調に増加しないで動的測定で求められた対数減衰率に対応するあたりで最小値を示すことや、遅延スペクトルは $10^3 \sim 10^4$ 秒の間でピークをもち湿度の増加とともにそのピークは短時間側に移動することを報告した⁶⁾。以上はクリープの結果であるが応力緩和に関しては厳密な水分依存性についての報告は少く、しかも広い含水率領域にわたつての研究はみられない⁷⁾。

II 実 験

試料としてヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* ENDL.) を使用した。その寸法形状を Fig. 1 に示す。試片の気乾比重、年輪密度はそれぞれ 0.43, 11年/cm である、測定は温度 15.0, 46.5, 62.5°C の3段階、湿度は 3, 10, 30, 50, 75, 95% R. H. の6段階について行つた。湿度調整にはシリカゲルおよび $ZnCl_2$, $MgCl_2 \cdot 6H_2O$, $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, $NaCl$, $Pb(NO_3)_2$ の飽和溶液を使用した。ヒノキの温度と湿度と含水率との関係は Table 1 に示すとおりである⁶⁾。

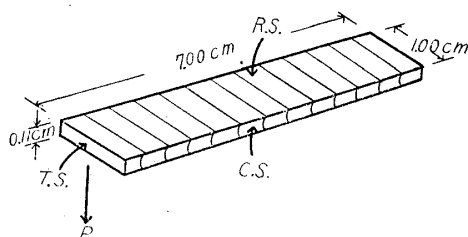


Fig 1 Specimen

C. S. : Cross section

R. S. : Radial section

T. S. : Tangential section

装置はクサリ天秤片持梁曲げ応力緩和装置を使用した。その略図を Fig. 2 に示す。試片に一定撓み量を与えるには試片の固定端を移動することにより行い、それに要する荷重を記録装置に伝えて自記させ

* 第15回日本木材学会大会で発表

** 木材物理研究部門, Division of Wood Physics.

Table 1. Moisture contents of HINOKI wood at various temperatures and relative humidities.

| R.H. (%) \ temp (°C) | 3 | 10 | 30 | 50 | 75 | 95 |
|----------------------|--------|-----|------|------|------|------|
| 15 | 2.5(%) | 5.3 | 11.0 | 13.2 | 18.0 | 22.8 |
| 45 | 2.0 | 4.6 | 9.7 | 11.7 | 16.1 | 20.0 |
| 60 | 1.7 | 4.0 | 8.9 | 10.7 | 14.9 | 18.3 |

る。求めた荷重 $P(t)$ より次の片持梁の曲げの式に代入して緩和弾性率 $E(t)$ を算出し、さらに ALFREY の第一近似式によつて緩和スペクトル $H(\tau)$ を求めた。

$$E(t) = \frac{4l^3}{bh^3y} P(t)$$

ここに b, h, l はそれぞれの試片の巾, 厚さ, 長さであり, y は撓み量である。ここで与えた y の値は 0.40cm であり, 線型範囲内にあると考えられる。

III 結果および考察

Table 2 および Fig. 3 に緩和弾性率 $E(t)$ と湿度の関係を, Fig. 4 に測定時間10秒および7,200秒における緩和弾性率と湿度の関係を示す。測定時間10秒における緩和弾性率の値は

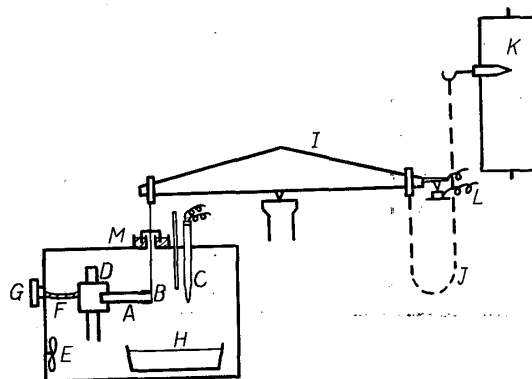


Fig. 2 Experimental apparatus

A. specimen B. hook C. thermometer and thermoregulator D. holder E. fan F. flexible shaft G. handle H. salt solution I. balance J. chain K. recorder L. electrical contact point M. liquid paraffin cup.

Table 2. Relaxation modulus $E(t)$ of HINOKI wood. (radial direction, $\times 10^8$ kg/cm²)
(a) 15°C

| R.H. (%) \ t (sec.) | 3 | 10 | 30 | 50 | 75 | 95 |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|
| 10 | 8.37 | 8.07 | 7.94 | 7.54 | 6.99 | 6.46 |
| 20 | 8.13 | 7.90 | 7.77 | 7.38 | 6.81 | 6.28 |
| 40 | 7.90 | 7.72 | 7.63 | 7.18 | 6.63 | 6.08 |
| 60 | 7.77 | 7.49 | 7.47 | 7.07 | 6.53 | 5.95 |
| 100 | 7.57 | 7.32 | 7.32 | 6.99 | 6.35 | 5.86 |
| 180 | 7.32 | 7.00 | 7.14 | 6.87 | 6.18 | 5.57 |
| 300 | 7.13 | 6.88 | 6.90 | 6.71 | 5.99 | 5.41 |
| 600 | 6.78 | 6.62 | 6.80 | 6.56 | 5.60 | 5.13 |
| 1200 | 6.31 | 6.26 | 6.52 | 6.32 | 5.29 | 4.66 |
| 1800 | 5.97 | 6.00 | 6.37 | 6.23 | 5.12 | 4.44 |
| 3000 | 5.65 | 5.64 | 6.23 | 6.12 | 4.93 | 4.16 |
| 4800 | 5.31 | 5.28 | 6.09 | 5.96 | 4.68 | 3.87 |
| 6000 | 5.13 | 5.10 | 6.02 | 5.86 | 4.59 | 3.74 |
| 7200 | 5.04 | 4.97 | 5.94 | 5.80 | 4.50 | 3.68 |

(b) 46.5°C

| R.H. (%) \ t (sec.) | 3 | 10 | 30 | 50 | 75 | 95 |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|
| 10 | 7.61 | 7.25 | 6.63 | 6.52 | 6.08 | 5.92 |
| 20 | 7.43 | 7.08 | 6.54 | 6.29 | 5.91 | 5.71 |
| 40 | 7.20 | 6.87 | 6.36 | 6.04 | 5.70 | 5.49 |
| 60 | 7.09 | 6.76 | 6.21 | 5.88 | 5.60 | 5.31 |
| 100 | 6.89 | 6.62 | 6.00 | 5.73 | 5.40 | 5.10 |
| 180 | 6.67 | 6.45 | 5.72 | 5.40 | 5.20 | 4.77 |
| 300 | 6.47 | 6.19 | 5.49 | 5.19 | 4.99 | 4.46 |
| 600 | 6.15 | 5.85 | 4.93 | 4.77 | 4.61 | 3.99 |
| 1200 | 5.79 | 5.43 | 4.56 | 4.34 | 4.28 | 3.50 |
| 1800 | 5.55 | 5.10 | 4.29 | 3.97 | 4.04 | 3.13 |
| 3000 | 5.22 | 4.76 | 3.96 | 3.64 | 3.78 | 2.74 |
| 4800 | 4.92 | 4.45 | 3.68 | 3.33 | 3.49 | 2.43 |
| 6000 | 4.78 | 4.30 | 3.58 | 3.20 | 3.37 | 2.35 |
| 7200 | 4.69 | 4.16 | 3.49 | 3.11 | 3.28 | 2.27 |

(c) 62.5°C

| R.H. (%) \ t (sec.) | 3 | 10 | 30 | 50 | 75 | 95 |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|
| 10 | 6.31 | 5.87 | 5.76 | 5.27 | 5.06 | 5.03 |
| 20 | 6.15 | 5.66 | 5.61 | 5.18 | 4.96 | 4.87 |
| 40 | 5.99 | 5.51 | 5.47 | 5.02 | 4.79 | 4.58 |
| 60 | 5.90 | 5.40 | 5.35 | 4.93 | 4.66 | 4.40 |
| 100 | 5.71 | 5.22 | 5.23 | 4.80 | 4.47 | 4.11 |
| 180 | 5.52 | 4.93 | 5.07 | 4.67 | 4.30 | 3.83 |
| 300 | 5.32 | 4.78 | 4.78 | 4.54 | 4.16 | 3.61 |
| 600 | 5.01 | 4.47 | 4.40 | 4.32 | 3.84 | 3.18 |
| 1200 | 4.67 | 4.17 | 4.04 | 4.02 | 3.39 | 2.78 |
| 1800 | 4.38 | 3.93 | 3.77 | 3.76 | 3.18 | 2.56 |
| 3000 | 4.13 | 3.71 | 3.49 | 3.55 | 2.98 | 2.36 |
| 4800 | 3.80 | 3.47 | 3.29 | 3.37 | 2.77 | 2.22 |
| 6000 | 3.70 | 3.36 | 3.17 | 3.23 | 2.67 | 2.19 |
| 7200 | 3.63 | 3.31 | 3.11 | 3.17 | 2.64 | 2.17 |

一般に湿度の増加とともに単調に減少するとみなせるが、これは CARRINGTON らが Sitka spruce について求めた半径方向における静的弾性率と含水率との関係⁸⁾、および多くの研究者によつて動的測定で求められた弾性率と含水率との関係⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾と類似した傾向である。しかし測定時間が長くなるにつれてその時間における緩和弾性率はこれらの関係からずれ、特に 15°C の場合には湿度30%に達する前に極大値をとることが推定される。

さきに、湿潤ブナ材の曲げ応力緩和の結果から、緩和スペクトルは温度上昇とともに短時間側へ移動することを示し¹³⁾、さらにヒノキの捩りクリープの湿度依存性についての実験結果より、遅延スペクトルは $10^3 \sim 10^4$ 秒にピークをもち、湿度の増加とともに短時間側にそのピーク

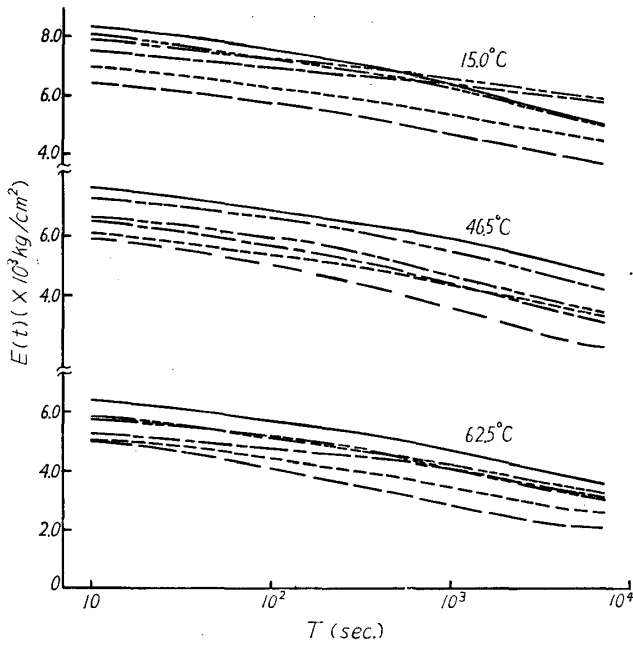


Fig. 3 The effect of relative humidity on relaxation modulus of HINOKI wood.

—— 3% R.H. - - - 50% R.H.
 - · - · 10% R.H. · · · · · 75% R.H.
 - · - · 30% R.H. - - - 95% R.H.

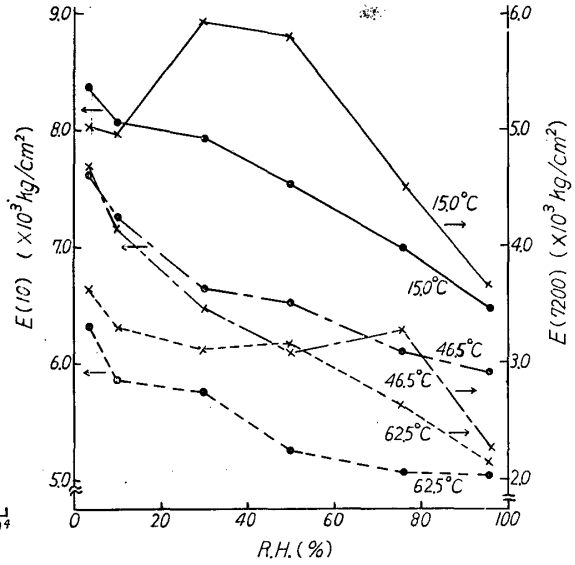


Fig. 4 Relaxation moduli at 10 sec. and 7200 sec. vs. relative humidity.

—— 15.0°C - - - 46.5°C
 - · - · 62.5°C

は移動し、40°C 以上では含水率の増加とともにピークは高かつ平らに近くなることを報告したが⁶⁾、本実験で求めた緩和スペクトルは Fig. 5 の a~c に示すように温度 15°C の場合には湿度が30%、すなわち含水率が10%に達するまでの領域で非常に平坦な形を示し値も低い。これは松本⁹⁾ がスギおよびヒバの動的測定で求めた対数減衰率がおおよそこの含水率域において最小値を示すこと、あるいは KOLLMANN¹¹⁾、PENTONY¹⁹⁾、JAMES¹⁴⁾ らの報告にみられる類似の傾向に対応する。さらにまた KOLLMANN は含水率 6~13%で各種の強度が最大値を示すことを報告しており¹⁵⁾ 強度との関連性がみられ、室温では木材はこの含水率域で時間と応

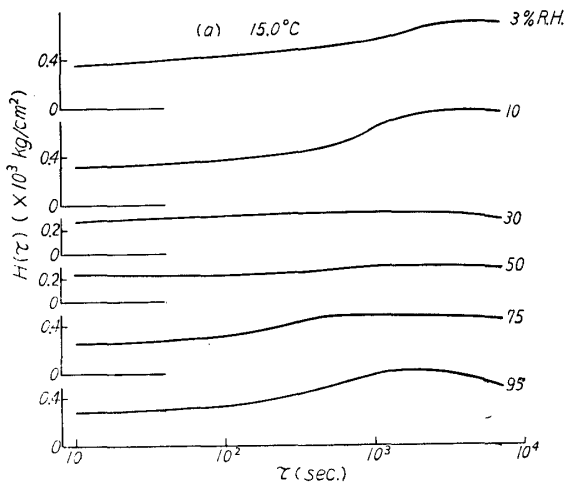


Fig. 5 (a)

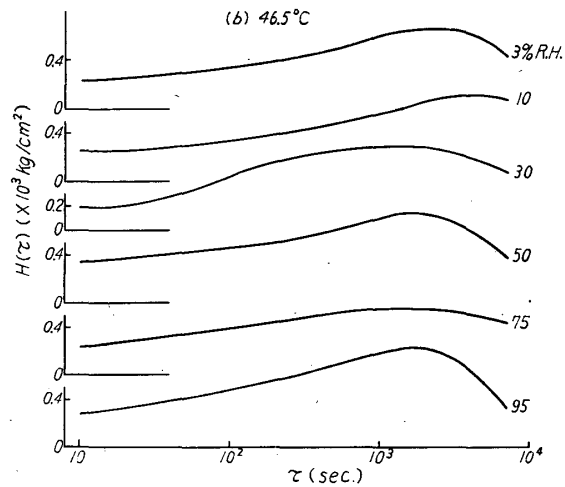


Fig. 5 (b)

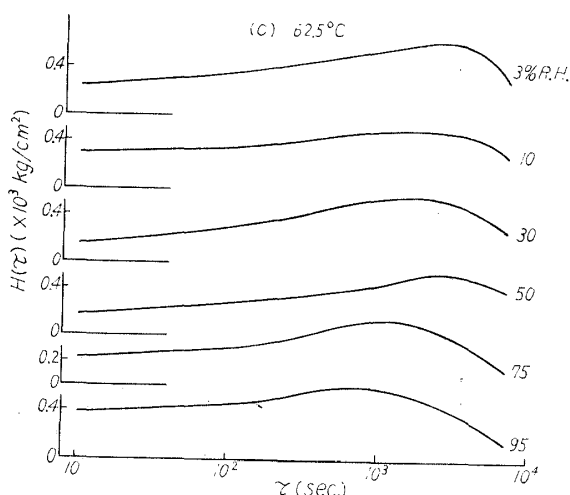


Fig. 5 Relaxation spectra at various humidities for HINOKI wood. (62.5°C)

含水率において現われるピークは、水分子が非結晶領域に存在する隣接鎖状分子間の水素結合を切断することに起因するものと思われ、したがってピークの位置は含水率の増加とともに短時間側に移動している。15°C のとき低く平坦であつた湿度 30% のときのスペクトルは温度が上昇して 46.5°C に達すると高いピークをもつ巾広い山となる。62.5°C ではピークは湿度増加とともに単調に短時間側に移動していて、15°C のときに見られた一種の安定状態は極く低湿度側に移行したものとみなされ、かつスペクトルは 46.5°C のそれに比し一般に低い。すなわち 46.5°C のとき低湿度で実験時間の範囲内では緩和が最も著しいといえる。

小野木らは親水性結晶高分子のナイロン 6 についての応力緩和で、時間—温度のみでなく時間—湿度の重ね合わせも成立することを報告している¹⁷⁾。木材に関しては、さきに、ブナ湿潤材の曲げ応力緩和の結果から、温度 28°C を基準温度にとり緩和弾性率曲線を時間軸に平行移動して重ね合わせて合成曲線の作成を試みているが、求められた合成曲線は完全に重なり合うことはない。しかしシフトファクターの対数と絶対温度の逆数は直線関係を示し、その勾配より求めた活性化エネルギーは 53Kcal/mol となり、ブナのクリープで同様に温度 25°C を基準

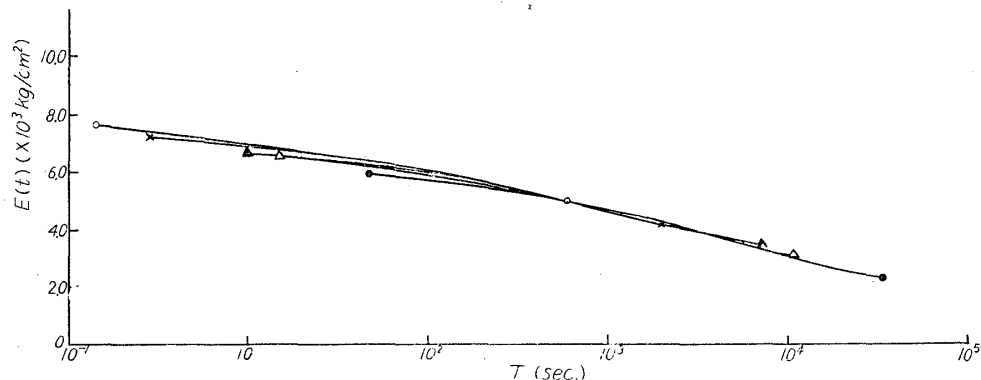


Fig. 6 Time-humidity superposition test for HINOKI wood at 46.5°C. The reference humidity is 30% R.H.

○—○ 3%R.H. ×—× 10%R.H. ▲—▲ 30R.H.
△—△ 50%R.H. ●—● 95%R.H.

力に関しては比較的安定な状態をとると考えられる。この含水率域の上下では緩和スペクトルにピークが現われるが、低含水率領域に現われるものと高含水率側のものとは本質的にその機構が異なるものと考えられる。低含水率域では木材実質の非結晶領域の鎖状分子はある程度配列した状態でお互に水素結合を形成しているのではなく、局部的には不自然に屈曲した状態で結合しているものと考えられ、KOLLMANN はこのような状態では引張応力が生じていることを述べている¹⁶⁾。このように考えるならば低含水率域で現われるピークはこの異常な応力に起因するものと考えられる。一方高

にとって重ね合わせて求めた値とほとんど一致することを報告している¹³⁾。竹村らはスギのクリープと温度について、クリープ量が時間と温度の2因子を変数とする変数分離形でかけることを示し、時間—温度重ね合わせは測定時間の全域については成立しないが、時間の巾を微小区間に限れば近似的に成立することを明らかにした¹⁸⁾。則元らはヒノキの捩りクリープの結果より、クリープコンプライアンスは含水率の増加とともに単調に減少せずある含水率で最小値を示し、したがって時間—湿度の重ね合わせは困難であることを示している⁶⁾。本実験において曲線形より最もシフトの可能とみられる温度 46.5°C について、湿度30%を基準にとつて時間—湿度の重ね合わせを試みた結果 Fig. 6 のようになるが、各曲線の一端または両端において分枝を生じたが、湿度の重ね合わせは成立しないものと思われる。

IV 要 約

ヒノキの曲げ応力緩和に与える湿度の効果について調べた結果を得た。

(1) 緩和弾性率の値は短時間側においては一般に湿度の増加とともに減少するが、長時間側においてはこの関係がずれる。

(2) 室温附近では関係湿度10%~30%の間で緩和スペクトルは平坦であるが低および高湿度ではピークが現われる。しかし両者の機構は本質的に異なるものと考えられる。

(3) 各湿度における緩和曲線を適当な距離だけ対数時間軸にそつて水平移動しても完全な合成曲線は得られず、したがって時間—湿度の重ね合わせは成立しない。

Summary

The authors investigated the effect of relative humidity on the stress relaxation of HINOKI wood (*Chamaecyparis obtusa* ENDL.) by bending test and obtained the following results.

(1) The value of the relaxation modulus generally decreases with increasing relative humidity at the shorter time region, but its relation goes out of order at the longer time region.

(2) In the region of the relative humidity between 10% and 30% the relaxation spectrum is very flat and its value is fairly low at room temperature. Above and below this region the spectrum has a clear peak, and both of them seem essentially to be caused by different reason.

(3) By shifting the relaxation curves at each relative humidity only in the horizontal direction by proper distance, a smooth master curve cannot be obtained. So the method of time-humidity superposition is invalid for wood.

文 献

- 1) 竹村, 福山, 池田, 島根農大研報, **11A**, 106 (1963).
- 2) HEARMON, R. F. S. and J. M. PATON, Forest Prod. J., **14**, 357 (1964).
- 3) ARMSTRONG, L. D. and G. N. CHRISTENSEN, Nature, **191**, 869 (1961).
- 4) HEARMON, R. F. S., The Mechanical Properties of Wood and Paper, Interscience Pub. Inc., New York, (1953).

- 5) 竹村, 福山, 春名, 島根農大研報, **9A-2**, 103 (1961).
- 6) 則元, 宮野, 山田, 木材研究, No. 34, 37 (1965).
- 7) 山田, 角谷, 則元, 大迫, 竹村, 鈴木, 木材研究, No. 34, 205 (1965).
- 8) HEARMON, R. F. S., The Elasticity of Wood and Plywood, Forest Product Res. Special Rep., No. 7, 23 (1948).
- 9) 松本 勳, 九大農学部演習林報告, No. 36, 46 (1962).
- 10) 梶田, 山田, 鈴木, 木材誌, **7**, 31 (1961).
- 11) KOLLMANN, F. und KRECH, H., Holz als Roh-und Werkstoff, **18**, 2 (1960).
- 12) 深田榮一, 小林理研報告, 1, 第1号, 22 (1951).
- 13) 山田, 佐道, 白石, 材料試験, **11**, 50 (1962).
- 14) JAMES, W. L., Forest Prod. J., **9**, 383 (1961).
- 15) KOLLMANN, F., Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe, 2Auf. Bd. 1, Springer-Verlag, Berlin, (1951).
- 16) KOLLMANN, F., Holz als Roh-und Werkstoff, **18**, 41 (1960).
- 17) ONOGI, S., K. SASAGURI, T. ADACHI, and S. OGIHARA, J. Polymer Sci., **58**, 1 (1962).
- 18) 竹村, 福山, 島根農大研報, **7A**, 196 (1959).
- 19) PENTONY, R. E., Comp. Wood, Ed. 2, Nr. 6, 131 (1955).