

応力を受けている木材の収縮・膨潤 (2) 引張応力

大草克巳・林 昭三・小迫恵彦

Katsumi Okusa, Shozo Hayashi and Yoshihiko Kosako :

The Shrinking and Swelling of Wood under Stress (2). Tensile Stress.

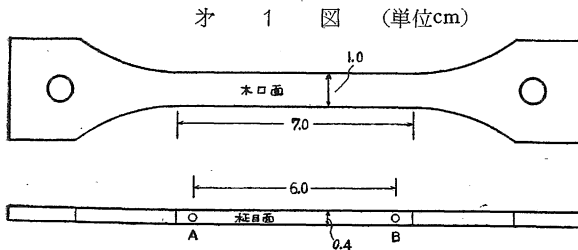
木材は引張又は圧縮の力によつて、伸び又は縮みの歪を生ずる。この歪は応力の大きさと同時に応力が作用する時間によつて定まる。応力を取去つた時、歪は瞬間的に消滅するが、その一部は残留する。残留歪の一部は更に或る時間の後に消滅するが、その残部は永久歪となり、木材の寸度は最初の状態より変化する。

木材の寸度変化は、繊維飽和点以下において、含有水分の変化によつても生ずる。即ち放湿によつて収縮し、吸湿によつて膨潤する。併し木材の水分変化が応力⁽¹⁾の作用の下で行なわれた場合には、その寸度変化が、応力の効果と、水分変化の効果との単なる代数和にはならない。我々はさきに圧縮応力についてこの事実を認めた。ひきつゞいて引張応力を受けている木材の収縮、膨潤について実験を行なつた。その結果を報告する。

供試材料及び試験片

厚さ3 cm、巾20 cmのスギ心材柾目板から、節その他の欠点を含む部分を除き、一端から連続して厚さ4 mmの薄片を切り取り、**図1**に示す形の試験片を作製した。

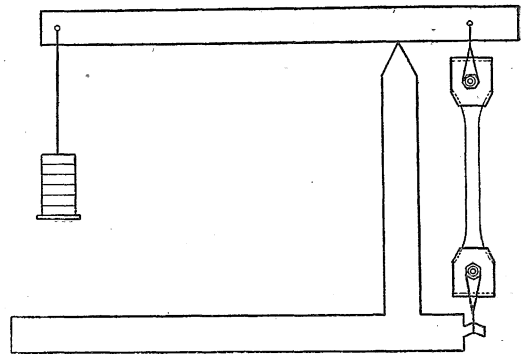
比重(全乾重量/生材容積) : 0.356, 平均年輪巾 : 3.17 mm, 横引張強さ(荷重: 柾目方向) ; 生材時 : 39.4 kg/cm², 気乾時 : 54.1 kg/cm²。



実験方法及び結果

生材状態(含水率約40%)及び全乾状態にある試験片を**図2**の様に柾目方向に定引張荷重を加え、恒温恒湿器の中で夫々放湿又は吸湿させた。荷重の大きさは、

図 2



試片AB(**図1**)間の平均断面積より、その応力が夫々3, 6, 9, 12, 15 kg/cm²となる様に定めた。乾球温度は夫々30, 40, 50及び60°Cとしたが、何れの場合も、試片の最終含水率が約12%になる様湿球温度を調節した。試片の長さは、AB 2点の位置に存在する樹脂細胞の中央を標点とし、この標点間距離を1/100 mm精度の読取顕微鏡によつて測定した。

各試片の生材時長さ(l_g)又は全乾時長さ(l_0)を測定し、夫々所定の荷重を加えて上記一定の温湿度条件下におき、8 hrの後に荷重を取り去つた。この間に試片は放湿又は吸湿によつて何れも約12%の平衡含水率に到達した。直ちに掴み部分を切り取り、試片を試験管に入れて密栓し、室温の下で24hr放置して後再び長さ(l)を測定した。最後に全乾重量を測定してその時の含水率(u)を求めた。24hrの間に弾性的歪は総て回復し、その後長さの変化が生じない事は予備試験の結果確かめられた。

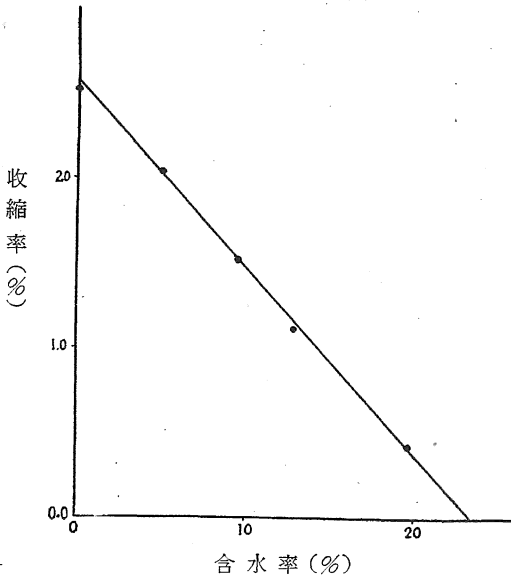
以上の結果から次の様にして平均収縮率(α)及び平均膨潤率(β)を計算した。

$$\alpha = (l_g - l) / l_g (u_c - u) \quad (1)$$

$$\beta = (l - l_0) / l_0 u \quad (2)$$

(1)式における u_c は**図3**における直線と横軸との交点である。**図3**は荷重を受けていない試片の含水率-収

才 3 図



縮率の関係を示すものであるが、含水率20%以下では、その関係は殆ど直線的である。荷重を受けている場合にも u_c は変化しないものと考えて、総て(1)式により $u_c = 23.4\%$ を用いて α を計算した。

才 1 表 $\alpha \cdot 10^3$ の値

応力(kg/cm ²) 温度(°C)	0	3	6	9	12	15	平均
30	1.21	1.15	0.96	0.96	0.48	0.36	0.85
40	1.34	1.05	0.79	0.80	0.67	0.49	0.86
50	1.13	0.88	0.66	0.68	0.60	0.41	0.73
60	1.14	0.94	0.65	0.49	0.43	0.31	0.66
平均	1.21	1.00	0.77	0.73	0.55	0.39	

分散分析結果 { 応力: $F_0 = 45.72 > F_{15}^5 (1\%) = 4.56$
 温度: $F_0 = 7.39 > F_{15}^8 (1\%) = 5.42$

才 2 表 $\beta \cdot 10^3$ の値

応力(kg/cm ²) 温度(°C)	0	3	6	9	12	15	平均
30	0.96	1.20	1.35	1.49	1.65	1.69	1.39
40	1.16	1.27	1.18	1.67	1.72	1.68	1.44
50	1.18	1.23	1.40	1.77	1.52	1.76	1.47
60	1.23	1.54	1.31	1.40	1.63	2.00	1.52
平均	1.13	1.31	1.31	1.58	1.63	1.78	

分散分析結果 { 応力: $F_0 = 13.78 > F_{15}^5 (1\%) = 4.56$
 温度: $F_0 = 1.00 < F_{15}^8 (5\%) = 3.29$

α 及び β の値を才1表及び才2表に示す。この結果によると、応力の影響は極めて顕著であり、応力の大きさに反比例して α は減少し β は増加することが認められる。 α 及び β の応力 σ (kg/cm²) に対する回帰式を求めると次のようになる。

$$\alpha \cdot 10^3 = 0.775 - 0.0521 (\sigma - 7.5) \quad (3)$$

$$\beta \cdot 10^3 = 1.580 + 0.0427 (\sigma - 7.5) \quad (4)$$

温度に関しては、高温になるに従って全様に α は減少し、 β は増加しているが、 β に関する温度の効果は有意でなかつた。

次に、この材の含水状態が一定に保たれている場合の応力による歪、即ち純粋に機械的な歪の大きさを測定して上記の結果と対比する必要がある。一般に木材の弾性的及び塑性的歪は、一定の応力に対して、何れも高含水率において大きい。従つて水中に浸漬して充分吸水した試片について測定すれば、木材の含水率が更に低い場合の歪は、こゝで得た値より更に小さい筈である。飽水試片

才 3 表

引張応力(kg/cm ²)	6	9	12	15	18
歪 (%)	0.10	0.16	0.26	0.33	0.38

を用い前記の装置により、6~18kg/cm² の定引張応力を8hr作用させ、その間試片の表面が常に水でうるおっている状態に保つた。8hr後の歪は才3表の様であつたが、その後荷重を取り去り、24hr 放置後の残留歪の有無をみたところ、その値はこの方法による長さ測定の精度を超えて僅少なものであり、最大応力18kg/cm² の場合においても0.05%を超えないことが認められた。

論 議

木材の力学的性質は温度によつて変化し、一般にその弾性及び強度は温度の増加と共に低下する⁽²⁾。なお Greenhill⁽³⁾ のブナ材横引張に関する実験結果は、この温度の影響が高含水率において著しく、全乾状態では殆ど影響がないことを示している。平均膨潤率の変化に対して温度の効果が認められなかつたのは、 α が $u = 40 \rightarrow 12\%$ において求められたのに対し、 β は $u = 0 \rightarrow 12\%$ の低含水率域で測定されたことに理由があるのかも知れない。しかし、この様な考察は、応力の効果が温度によつて異なると云

う想定に基く。第1表の α について、その応力に対する回帰係数を30, 40, 50及び60°Cの各温度について計算すると、夫々 -0.0596 , -0.0512 , -0.0421 及び -0.0556 となり、これ等の間に有意な差は認められなかつた。

($F_0 = 1.40 < F_{16}^{(5)} (5\%) = 3.63$)

応力による歪特に匍匐歪は高温である程著しいが、こゝで求めた α 及び β に対しては残留永久歪が直接関与する。しかもこの範囲の応力においては残留歪は無視し得る程度である。従つて α に対する温度の効果は他の面から考察しなければならぬ。⁽⁵⁾ Fleischer は種々の乾燥条件で1/4"~1/32"の単板を乾燥し、その巾(板目方向)の収縮が乾燥速度を高める条件(高温、高風速)において小さくなることを明らかにした。これは乾燥中単板内に生ずる応力に起因するものである。我々の実験においては、試片の放湿速度を直接測定し得なかつたが、高温である程より速かに放湿が行われたと云うことは容易に推測される。

引張応力によつて収縮率及び膨潤率が著しく変化することは実験結果から明らかであるが、このことは引張応力のために各試片は引き延ばされたことを意味する。例えば全乾材が 15kg/cm^2 の応力を受けつゝ、吸湿して12%の含水率に到達した時、その寸度変化は、(4)式より $\beta = 1.77 \cdot 10^{-2}$ 、従つて単位長さ当りの伸びは $12\beta = 2.12\%$ となる。しかるに無応力の下で全じく12%まで吸湿膨潤した場合には $\beta = 1.26 \cdot 10^{-2}$ 、従つて伸びは1.51%となり、この差0.61%は引張応力による伸びの増加を示している。しかるにこの大きさの応力に対して、含水平衡状態にある場合には、その機械的永久歪は0.05%以下であるから、"木材の含水率が変化しつゝある"と云う条件によつて、応力の効果が著しく増大されたことになる。

木材が乾燥する場合、その表層は内部より、より速かに水分を減少する。従つて表層と内部との間の含水率の差、従つて収縮の差に基いて応力が発生する。乾燥の前期においては表層に引張応力、内部に圧縮応力が現われる。この様な応力の作用の下で木材は更に水分を減少してゆくから、各部分の収縮量は正常な値即ち無応力の下で示す収縮量より異なつて来る。この現象が木材の⁽⁶⁾ drying-set⁽⁷⁾である。McMillen; 小倉等は、乾燥期間中板材内部に発生する応力及びsetに関して詳細な研究を行なつている。しかしdrying-setを起す限界の応力が、その木材の比例限度であると考えすることは正しくない。この実験においては、比例限度を直接測定しなかつたが、⁽⁸⁾ 沢田その他の実験結果によると、比例限度は破壊応力の約3/4であるから、この試材ではおよそ 20kg/cm^2 と推定

される。従つてこゝで与えた引張応力は、温度の関係を考慮しても、おそらく総て比例限度を超えていないであろう。しかるに第1表の結果は、その応力が極めて僅少な場合においても既に、その収縮率が無応力の場合の値と明らかに異なることを示している。このことはdrying-setが、通常の静的試験で決定される比例限度以下はるかに小さい応力において生ずることを意味している。又乾燥中に生ずるこれ等の応力は、割れその他の損傷を生ずる原因となるから、各部における応力の大きさ及びその変化を知ることは極めて必要である。これについて、金属板の加熱又は放熱の際における熱応力を求めると類似の方法で、その木材の収縮率、ヤング率、ポアソン比等から、内部の水分分布を知つてそこに発生する応力を理論的に計算しようとする提案がある。しかし上述の様に、水分が変化しつゝある状態では特に木材は著しい可塑性を示すから、この様な弾性学的取扱いは妥当しないことが予想される。

木材のこの様な性質は匍匐に対して又重要な役割を演ずる。⁽¹⁰⁾ Tiemann は木材梁の死荷重による曲げ試験を行い、長期間にわたつて撓みの変化を測定した。その結果梁の撓みは空気の湿度が変化する時、その平均の湿度で一定に保たれている時より、著しく増大することを報告している。⁽¹¹⁾ 南も又木材の曲げ匍匐に関し全様な湿度変化の影響を認めておる。このことは空気の湿度変化に応じて木材は吸湿又は放湿するが、応力の作用の下にあるから、梁の引張側では、膨潤はより大きく収縮はより小さく、圧縮側ではその関係が逆になり、従つて湿度変化が繰返される毎に撓みは益々増大することになる。

木材の力学的諸性質が含水率によつて影響されると云うことは既に木材に関する常識である。しかしこゝで我々の得た結果は、単に含水率の大きさのみでなく、その含有水分が平衡した安定状態にあるか、或は平衡に到る過渡状態にあるかによつて更にその性質が変化することを示している。即ち放湿又は吸湿によつて水分が変化しつゝある状態では、異常に可塑的変形性能が増大する。これに関しては鈴木も既にその事実を認めており、⁽¹²⁾ 「水分移動の際、木材実質の非晶部分が一時的に常態より弛んだ構造をとり、これが内部摩擦に変化をもたらすものであろう」と推論している。我々は更に立ち入つた推論をさげなければならない。しかし一時的に構造が弛緩すると云うことは次の様に考えられないだろうか。即ち或る一定量の水分を含んでいる木材は、その木材—水系に、全体として一つの平衡状態が存在する。その状態においては各分子は夫々相互の力関係に依つて最も安定した位置にあり、従つて外力に対して最も有効に抵抗し得

る。若しその一部の水分が放出され、或は又更に水分が附加される時、それは次の平衡状態に移らなければならない。その間に或る有限な時間を必要とし、而もその遷移状態においては各分子相互間の凝集力が完全に有効に働らき得ない状態にある。従つて応力による位置転移の可能性が高まり、変形性能が一時的に増大することになる。

引用文献

(1) 大草・林：日本木材学会誌 Vol.2, No.1 (1956)
 (2) F. Kollmann: Holz als Roh-und Werkstoff 10 Jg. Heft 7. (1952)

(3) W. L. Greenhill: J. Counc. Sci. Ind. Res. Vol. 9, p.265 (1936)
 (4) 大草：島根農専研究報告, No.2 (1952)
 (5) H. O. Fleischer: Forest Products J. Vol. 4, No.1 (1954)
 (6) J. M. McMillen: Forest Products J. Vol. 5, No.1, No.4 (1955)
 (7) 小倉：林業試験場研究報告 No.77 (1955)
 (8) 沢田：日本林学会誌 Vol. 35, No.8 (1955)
 (9) 押田：蒸発・乾燥 (1950)
 (10) H. D. Tiemann: Wood Technology (1951)
 (11) 南：東大航空研究所彙報, No.136 (1935)
 (12) 鈴木：61回日本林学会講演集 (1952)

SUMMARY

In this work, the effect of dead tensile stress on the shrinking and the swelling of wood was examined and the following results being obtained: the coefficient of shrinking (α) becomes smaller and the coefficient of swelling (β) becomes larger in proportion to the increase of stress. This means that wood became set in the stretched condition caused by the tensile stress.

Generally speaking, if wood is stretched below its proportional limit, it regains the original dimension when the load is removed. However, wood may act as a plastic material under prolonged

strain, and as a result a permanent deformation may form, even though the load were never great enough to strain the wood beyond its proportional limit. And hence, we investigated that permanent deformation of wood in moisture-equilibrium state which is caused by the dead tensile stress. The value obtained was negligible even under the maximum stress (15 kg/cm^2) used in the firstly-mentioned examination.

From these results, we can say that wood becomes very plastic when its moisture is changing.