

木材の乾燥過程のクリープにおける 変形と含水率変化の関係

徳本守彦

信州大学農学部 木材利用学研究室

1 緒 言

応力を受けた状態で、木材中の水分が減少あるいは増加するとき、木材の変形性能は顕著に増大し、含水率一定時の粘弾性的性質からは予想しえない異常な変形を示す。¹⁾ また、結果として生じた変形は、乾燥状態にある限りでは非回復性を示すが、吸湿・吸水によって水分回復することが知られている。¹⁾

これらの現象は、外力と水分変化の交叉現象と考えられ、水分非平衡状態あるいは吸・脱湿過程の粘弾性として、また、mechano-sorptive effect として、多くの研究者により検討されてきた。¹⁾

最近、Grossman¹⁾ は、現在の成果を整理し、トータルに現象を説明するモデルの必要性を記している。含水率平衡状態の粘弾性の主目的は時間、温度の影響を検討することにある。しかし、水分非平衡状態では、時間、温度の効果は明確に現われないことが注目される。²⁾ 現在では、脱湿過程の粘弾性における主要因子は、試片の水分変化量であると考えられるに至っている。

現象をモデル化する試みが、竹村,^{3,4)} Leicester,⁵⁾ Rybarczyk⁶⁾ らによってなされているが、彼らの出発点も、応力と試片の含水率を主要因子とする点にあった。

竹村³⁾ は、結合水の離脱するとき、一時的に空孔が生成され、その空孔中に木材実質が粘弾性的に陥没して行くと想定し、脱湿過程の応力緩和理論を提示した。竹村の結論は、現象を Modified Maxwell model によって説明できるとすることであった。彼のモデルは、Maxwell model の時間 t を水分移動量 M に置き換え、粘性係数 η をパラメータ α^{-1} に置き換えることにより得られる。このモデルをクリープに適用し、彼は乾燥過程のクリープ理論式を提示し、その妥当性を報告している。⁴⁾

Leicester⁵⁾ は、脱湿過程に生じる非回復性のたわみ成分 Δ_m が、試片の含水率 m と荷重パラメータ p の関数として、 $-d\Delta_m/dm = p \cdot f(m)$ なる形で表わされるとした。ここで、 $f(m)$ は含水率のある関数である。興味ある点は、Leicester もまた、Maxwell model を念頭において、彼のモデルを導いていることであろう。

Rybarczyk⁶⁾ の考え方も時間 $t \rightarrow$ 含水率 w という置き換えによって、モデル化する点で、竹村、Leicester らと同様なものと考えられる。

乾燥過程のクリープを考えるとき、従来の検討は、時間経過として表わしたデータについ

てなされる場合が多く、含水率の関数として扱われた例は意外と少ないようである。

そこで、本報では、乾燥過程のクリープを測定し、クリープひずみの発生と試片の含水率変化との関係を明らかにすることを目的とした。乾燥過程で生じたひずみを、含水率の関数として表わし、結果を竹村、Leicester らのモデルと比較検討した。

2 実 験

2-1. 試 料

供試材はブナ (*Fagus Crenata* BL.)材とヒノキ材 (*Chamaecyparis obtusa* ENDL.)であり、気乾状態の厚板より、Fig. 1 に示す形状および寸法の試片を作製した。試片は図に示したように、RL, RT, TR 試片と呼ぶことにする。試片の長さは曲げ: 120mm, 横引張: 150mm である。試片の全乾比重は、ブナ: 0.60~0.64, ヒノキ: 0.31~0.34であった。

作製した試片を飽水状態として、約30分間の煮沸を行った。試片群を二つの群に分け、一方は含水率 100% に調整し、蒸留水で調湿したデンケータ中で保存した。他方は、ゆるやかな乾燥によって含水率約20%に調整し、硝酸カリウム飽和溶液で調湿したデンケータ中に保存し、実験に供した。

2-2. 実験方法

横引張クリープにおいては、試片の両端にアルミ製のつかみ具を取り付け、上端を固定し、下端に垂錘を吊すことによって引張荷重を加えた。試片の標線長を読み取り顕微鏡 (精度1/100mm) を使用して測定した。クランプ間の長さは12cm, 標線長は7~8cm である。

無負荷試片はステンレス細線でUゲージに吊し、収縮率と含水率を同一試片について測定した。Uゲージの出力を増幅し、デジタル電圧計で読み取ると同時に、レコーダで記録した。

加えた引張応力は、初期含水率 100% の場合、ブナ: 0~30kg/cm², ヒノキ: 0~12kg/cm² であり、初期含水率 20% の場合で、ブナ: 0~40kg/cm², ヒノキ: 0~18kg/cm² であった。

横引張クリープでは、RT, RL, TR の三タイプの試片を用いた。

曲げクリープの測定では、支点間距離を 8.5cm とし、中央に集中荷重を加えた。たわみ量は読み取り顕微鏡を用いて測定した。クリープ試片のできるだけ近くに、重量測定用試片を吊し、Uゲージによって重量変化を求めた。曲げ荷重は、10~100g とした。曲げクリープでは、RT と RL 試片を用いた。

試片に荷重を加え、水分平衡状態で 3~4 時間保った後に乾燥を行った。乾燥温度は 30°C, 乾燥剤としてシリカゲルを使用した。含水率 100% の試片は 30°C の測定室内にセットし、ただちに一定応力を負荷した。乾燥初期 3~4 時間は乾燥剤を使用せず、収縮の始まる含水率 50% 付近で、測定室内にシリカゲルを入れ、乾燥を速めた。乾燥初期 3~4 時間のクリープは飽水状態のクリープとみなすことができる。

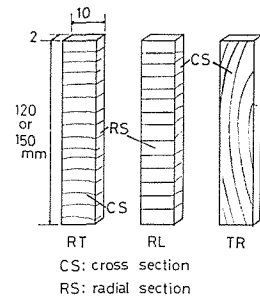


Fig. 1. Shape and size of specimens for bending (120 mm length) and for tension (150 mm length).

含水率20%の試片は、温度30°C、硝酸カリウム飽和溶液で調湿した測定室内にセットし、約12時間調整した後、一定荷重を加えた。負荷後3時間は含水率を一定に保ち、その後、シリカゲルを入れて乾燥を行った。

乾燥終了時の含水率は2～3%であった。

3 結果と考察

3-1. 初期含水率100%の場合

ブナRT（木口試片）の0, 10, 20, 30kg/cm²の各応力下での収縮経過をFig. 2に示した。含水率曲線は無負荷試片(0kg/cm²)について求めたものである。図より、負荷応力の増加にしたがって、収縮が減少する傾向が明らかである。おそらく、負荷方向に直交する試片の幅方向（接線方向）の収縮量は、応力に比例して増加していると推定される。Fig. 2では、乾燥初期の含水率100～50%間の経過は省略したが、飽水に近い状態でのクリープが進

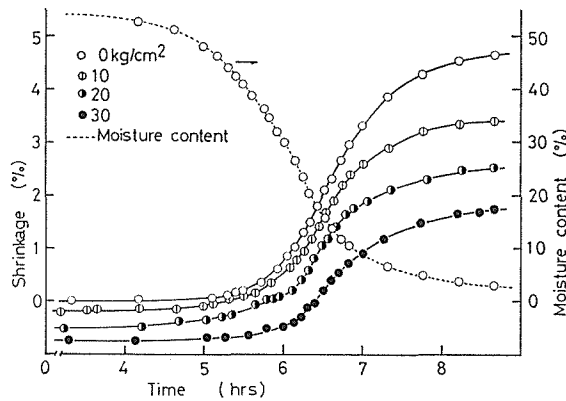


Fig. 2. Shrinkage under stress during drying (RT-specimens of Buna wood)

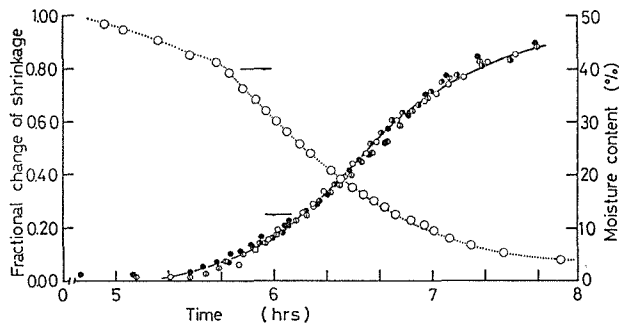


Fig. 3. Fractional changes of shrinkage under stress during drying (RT-specimens of Buna wood). Key to symbols, see Fig. 2.

行した結果、収縮率は初期に負の値を示している。

Fig. 2から、応力の有無にかかわらず、収縮開始含水率はほぼ50%とみることができる。そこで、含水率50%での標線長を基準として収縮率を算出し、求めた収縮率を最終値で除すことによって、収縮経過を比率で表現してみた (fractional shrinkage)。得られた結果は、各試片間に時間的ずれがあるため重ならなかった。そこで、各曲線を時間軸に沿ってわずかに平行移動し、無負荷の収縮曲線に重ねると Fig. 3 のようになった。

Fig. 3 では、応力の有無にかかわらず、各収縮曲線はかなり良い一致を示す。これは、応力を受けた状態では、収縮は抑制され、量的に収縮は顕著な変化を示すが、収縮経過に見られる質的な変化を生じないことを示すものであろう。

また、Fig. 3 は実際の意味を持ち、応力下の試片の含水率を無負荷試片の含水率で代用して良いことを示している。Fig. 2 では、各曲線に若干のずれがあるため、無負荷試片と応力下試片の時間のずれを調整した Fig. 3 を求めて、各試片の含水率を無負荷試片の値で代用することが妥当であろう。

Fig. 3 から、比率で表わした収縮と含水率の関係を求めると Fig. 4 のようになった。収縮曲線は試片内の水分勾配の影響を受け、繊維飽和点以上の含水率50%付近から収縮が始まることを示し、含水率30%で収縮の20%がすでに生じている。含水率20%付近に変化点を示し、以降は正常な収縮経過を示している。なお、含水率20%付近からの直線域を外挿すると含水率26%の値となった。

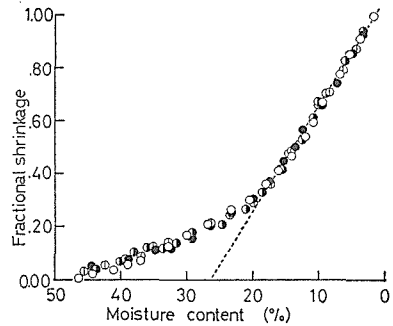


Fig. 4. Fractional shrinkage vs. moisture content curves (RT-specimens of Buna wood). Key to symbols, see Fig. 2.

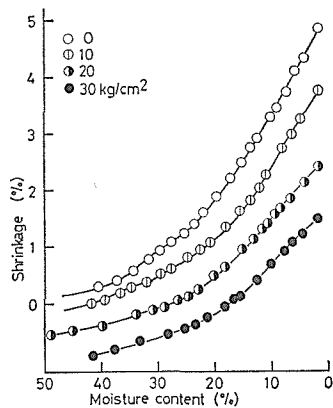


Fig. 5. Shrinkage vs. moisture content curves (RT-specimens of Buna wood).

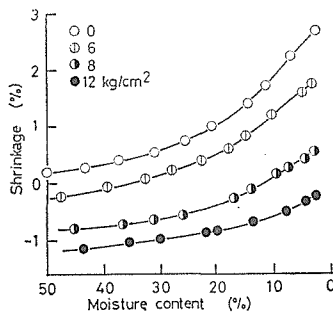


Fig. 6. Shrinkage vs. moisture content curves (RT-specimens of Hinoki wood).

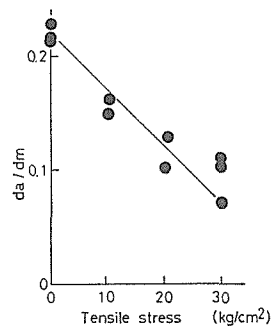


Fig. 7. The relation between shrinkage coefficients da/dm and applied stresses (RT-specimens of Buna wood).

Fig. 4 から通常の収縮率と含水率の関係を求めると、Fig. 5 のようになった。同様の方法で求めたヒノキ RT 試片の収縮—含水率曲線を Fig. 6 に示した。

Fig. 5 において、各応力下の収縮曲線の直線と見なしうる含水率 18% 以降にたいし、最小自乗法を用いて、収縮係数 da/dm を求め、負荷応力にたいしプロットすると、Fig. 7 のようになった。図より明らかに、収縮係数 da/dm は応力の増加に比例して減少する。0~30kg/cm² の応力域において、次の(1)式が近似的に成立する。

$$da/dm = -A \cdot \sigma + da_0/dm. \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 da/dm : 応力下の収縮係数、 da_0/dm : 無負荷試片の収縮係数、 σ : 応力、 A : 定数である。30kg/cm² 付近では応力の影響が減少し、(1)式から多少はずれる様である。

さて、横引張クリープひずみを求めるためには、無負荷試片と応力を受けた試片の収縮率の差を求めなければならない。用いた試片間には収縮率のばらつきがあり、正確なクリープひずみを求めることは困難である。そこで、収縮率の差をクリープひずみの近似値とした。

得られたクリープひずみを含水率 m の関数として、Fig. 8 (ブナ)、Fig. 9 (ヒノキ) に示した。クリープひずみは含水率 50% 付近から増加し始め、含水率 20% 付近からは含水率変化にほぼ比例して増加する傾向を示している。ひずみは収縮の拘束によって生じるから、収縮の始まる時にクリープが増加し始めるのは当然であろう。含水率 20% 付近から、ひずみと含水率の直線関係が想定され、 $d\varepsilon/dm$ (ε : クリープひずみ) という値を定義できることは、(1)式が成立する限り、また当然のことである。

Fig. 8, 9 の横引張クリープの結果と比較するために、乾燥過程の曲げクリープにおけるたわみ量の変化を含水率の関数として、Fig. 10 に示した。Fig. 10 のたわみ量と含水率の関

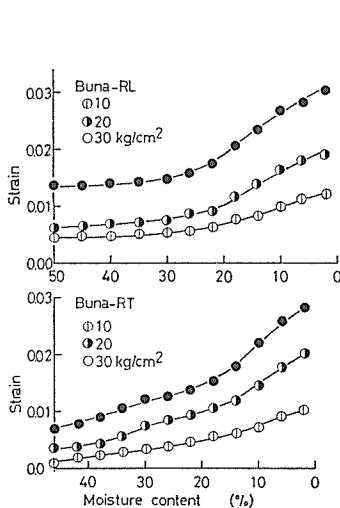


Fig. 8. Changes of creep strain with moisture content change (Buna wood).

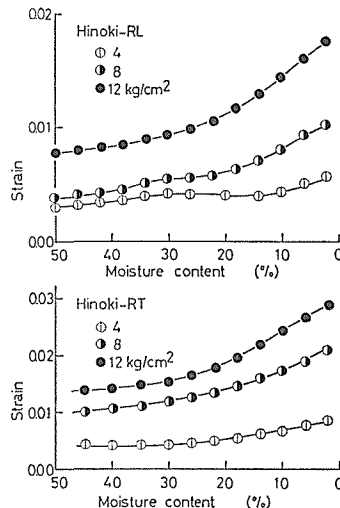


Fig. 9. Changes of creep strain with moisture content change (Hinoki wood).

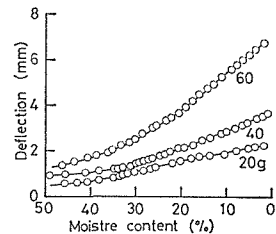


Fig. 10. Changes of deflection with moisture content change in bending (RT-specimens of Buna wood).

係は、引張クリープの場合とよく似た傾向を示している。含水率50%付近からたわみは増加し始め、20%以下では、たわみが含水率変化に正確に比例する明確な直線域を示している。

最後に、ブナRT試片について、無負荷試片の収縮、横引張クリープ、曲げクリープの三者を比較し、Fig. 11に示した。クリープ成分の中で、水分非平衡時の成分のみを示した。

Fig. 11から、収縮と引張クリープの経過はよく類似するが、曲げクリープの経過はいくらか異なることがわかる。しかし、三者の開始する含水率がほぼ等しいこと、ほぼ等しい含水率(約20%)から直線域を示すなど、かなり良い対応を示している。

3-2. 初期含水率20%の場合

3-1において、含水率約100%からの乾燥過程のクリープにおいて、ひずみの発生と含水率変化の関係を検討した。その結果、クリープひずみと含水率の関係は、収縮-含水率曲線と類似の性格を持つことが明らかとなった。したがって、含水率約20%以降に見られるひずみの変化と含水率の変化が比例する範囲に注目し、さらにクリープひずみを含水率の関数として検討した。

含水率20%からの乾燥過程における引張応力下の収縮と含水率の関係を、ヒノキRT試片について Fig. 12に示した。収縮-含水率の関係は明らかな直線とならなかったが、各応力下での平均収縮係数 da/dm を求め、負荷応力にたいしプロットすると Fig. 13 のようになった。Fig. 13は前述の式(1)が成立することを示す。

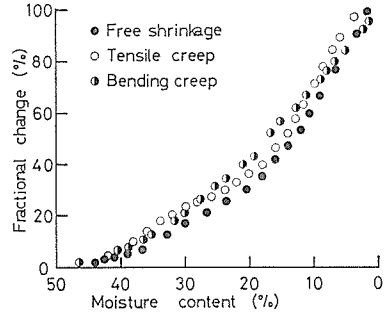


Fig. 11. Changes of shrinkage, tensile creep strain and deflection with moisture content change (RT-specimens of Buna wood).

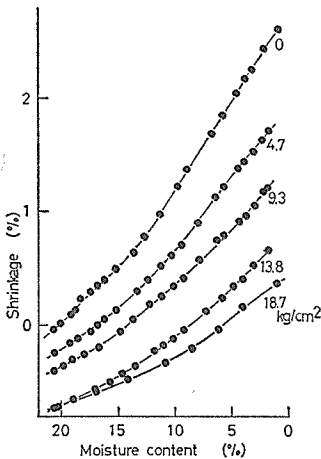


Fig. 12. Shrinkage vs. moisture content curves (RT-specimens of Hinoki wood)

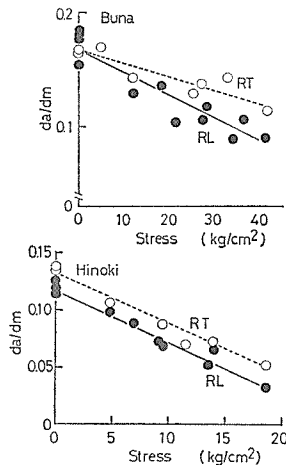


Fig. 13. Relation between shrinkage coefficients da/dm and applied stresses.

Fig. 13 に式(1)を適用し、勾配Aを求めると、ブナ RT : 1.20×10^{-3} , ブナ RL : 1.90×10^{-3} , ヒノキ RT : 4.40×10^{-3} , ヒノキ RL : 4.44×10^{-3} であった。Aの単位は $\text{cm}^2 \cdot \% / \text{kg} \cdot \%$ である。

Aの値はブナに比較してヒノキで高い。ヒノキではRLとRTの差はないが、ブナの場合RTが低い値となった。ブナのRLとRTの差は試片の採取部位の相違によるものと思われる。

乾燥過程のクリープにおいて測定されるひずみは次の三成分からなると考えられる。

$$\epsilon = \epsilon_0 + \epsilon_t + \epsilon_m \quad \dots\dots(2)$$

ここで、 ϵ_0 : 瞬間弾性ひずみ, ϵ_t : 水分平衡状態での時間に依存するひずみ, ϵ_m : 水分非平衡状態で生ずるひずみである。今後は ϵ_m をひずみの非平衡成分, $\epsilon_0 + \epsilon_t$ を平衡成分と呼ぶことにする。

横引張クリープにおけるひずみの非平衡成分 ϵ_m を求め、試片の含水率変化 M(%)の関数としてヒノキについて Fig. 14, 15 に示した。 ϵ_m は含水率変化Mに比例して増加する傾向を示し、 ϵ_m -M の関係は直線で近似される。そこで、最小自乗法によって $d\epsilon_m/dM$ を求め、負荷応力 σ に対しプロットすると、Fig. 16 のようになった。

Fig. 16 は次式が近似的に成立することを示す。

$$d\epsilon_m/dM = \phi \cdot \sigma \quad \dots\dots(3)$$

ここで、 ϵ_m : ひずみの非平衡成分, M : 試片の含水率変化 (%), σ : 応力 (kg/cm^2), ϕ : 定数 ($\text{cm}^2/\text{kg} \cdot \%$) である。式(3)は、単位含水率変化あたり生ずるひずみが負荷応力に比例することを示す。

乾燥過程の曲げクリープにおけるたわみの非平衡成分 y_m を含水率変化 M の関数として

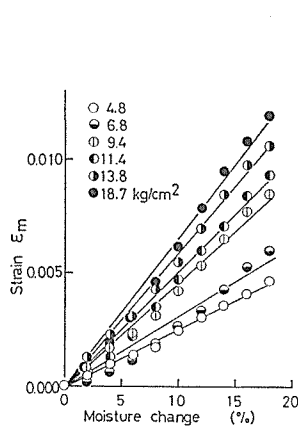


Fig. 14. Changes of non-equilibrium strain component ϵ_m with moisture content change in tension (RT-specimens of Hinoki wood).

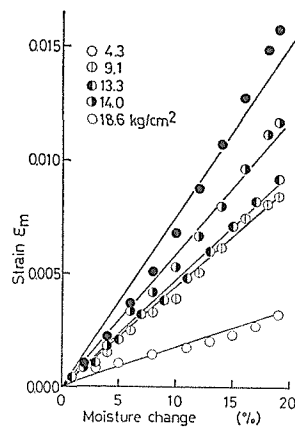


Fig. 15. Changes of non-equilibrium strain component ϵ_m with moisture content change in tension (RL-specimens of Hinoki wood).

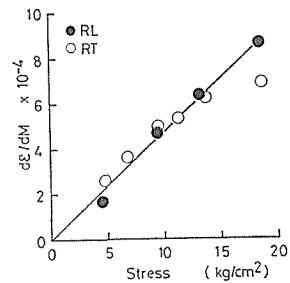


Fig. 16. Relation between $d\epsilon_m/dM$ and stresses in tension (Hinoki wood).

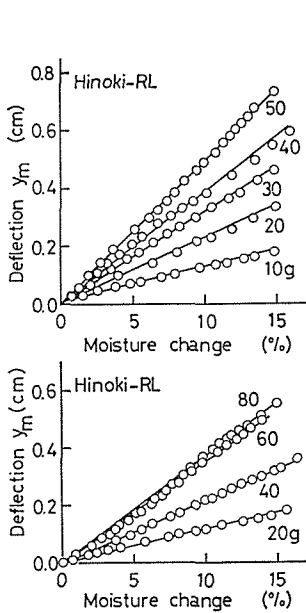


Fig. 17. Changes of non-equilibrium deflection y_m with moisture content change in bending creep during drying (Hinoki wood).

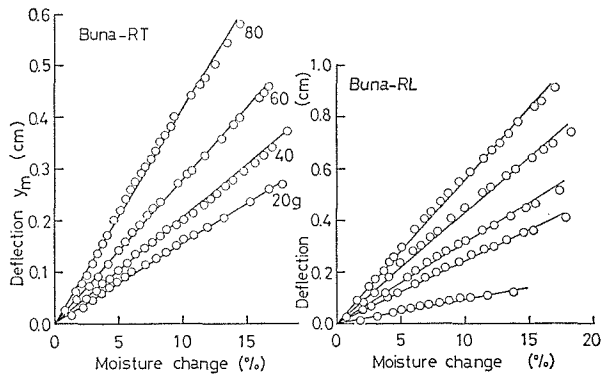


Fig. 18. Changes of non-equilibrium deflection y_m with moisture content change in bending creep during drying (Buna wood). Bending loads are 20, 40, 60, 80 and 100g.

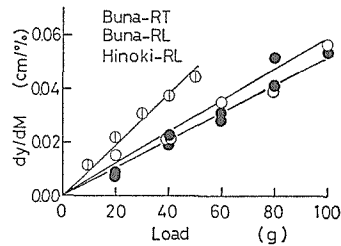


Fig. 19. Relation between dy_m/dM and applied loads P in bending creep during drying. \circ Hinoki-RL, \circ Buna-RL, \bullet Buna-RT.

Fig. 17, 18 に示した。 y_m と M の関係は直線近似でかなり正確に表わされる。

横引張の場合と同様に、 dy_m/dM を求め曲げ荷重 P に対しプロットすると、 Fig. 19 のようになった。図は、曲げクリープにおいても式(3)が成立することを示す。

3-3. 乾燥過程のクリープにおける特性定数

3-2において、ひずみの非平衡成分 ϵ_m は応力 σ と含水率変化 M の関数として、式(3)のように表現されることを示した。式(3)において ϕ は定数であり、 ϕ が既知であれば ϵ_m を予測することができる。それゆえ ϕ は重要な意味を持ち、乾燥過程のクリープにおける特性定数と定義することができる。

再度、式(3)を示す。

$$d\epsilon_m/dM = \phi \cdot \sigma \quad \dots\dots(3)$$

式(3)において、応力 σ を一定とすれば、

$$d(\epsilon_m/\sigma)/dM = dK/dM = \phi \quad \dots\dots(4)$$

ここで $K (= \epsilon_m/\sigma)$ は水分非平衡時のひずみ係数とする。(4)式を用いて ϕ は求められる。乾燥過程のクリープにおいて測定されるひずみは次の三成分よりなると考えた。

$$\epsilon = \epsilon_0 + \epsilon_t + \epsilon_m \quad \dots\dots(2)$$

式(2)の両辺を σ で割れば、各成分のひずみ係数が得られる。

$$J = J_0 + J_t + K \quad \dots\dots(5)$$

Kに比し、 J_0 、 J_t が含水率化Mに対しきわめて鈍感であるとすれば

$$dJ/dM = \phi \quad \dots\dots(6)$$

となり、式(6)を用いて、 ϕ を求めることができる。

また引張応力下の収縮係数と応力の関係式(1)において、 $a_0 - a = \epsilon$ とすれば

$$d\epsilon/dM = A \cdot \sigma \quad \dots\dots(7)$$

となり、Aは ϕ と同じ意味を持つことは明らかであろう。

さて、式(6)を用いて ϕ を求めるために、J-含水率曲線を Fig. 20 (ヒノキの引張)と Fig. 21 (ヒノキの曲げ)に示した。各図において、負荷応力によらずほぼ平行な直線として、J-含水率の関係は示されている。

求めた ϕ の各試片タイプの平均値を表1に示した。 ϕ の値は、試片タイプから見ると、RLとRTの差は少なく、TRではRL、RTのほぼ2倍の値を示し、接線方向の変形の容易さを示している。またヒノキの ϕ はブナに比しかなり高く、ヒノキの変形し易いことを示す。

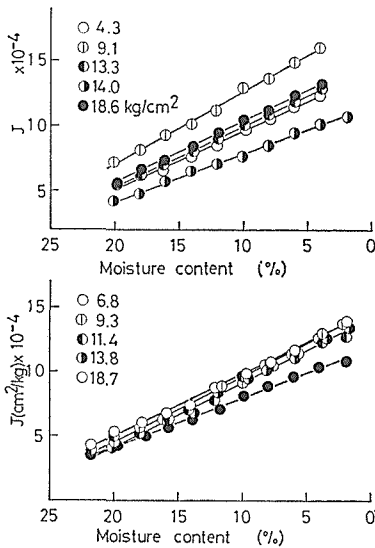


Fig. 20. Changes of creep compliance J with moisture content change in tensile creep during drying (Hinoki wood).

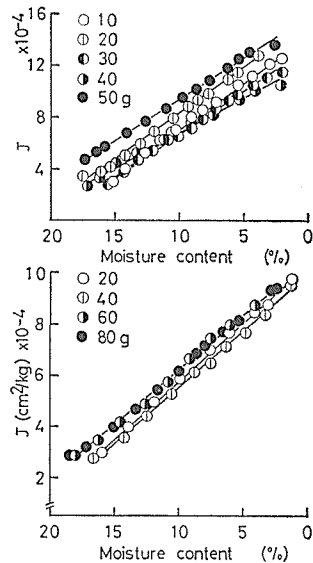


Fig. 21. Changes of creep compliance J with moisture content change in bending creep during drying (Hinoki wood).

Table. 1. Average values of ϕ in tension and bending.

Species	Specimen type	$\phi \times 10^{-5}$ (cm ² /kg·%)	
		Tension	Bending
Buna	R L	2,033	3,614
	R T	1,967	3,664
	T R	4,830	
Hinoki	R L	4,389	6,635
	R T	5,026	5,918
	T R	9,316	

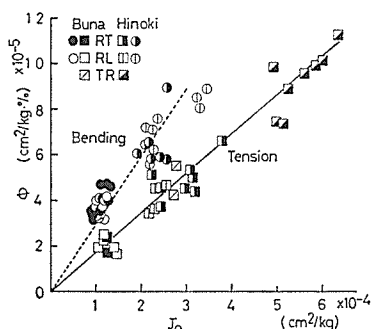


Fig. 22. Relationships between the characteristic constants ϕ and instantaneous compliance J_0 in bending and in tension.

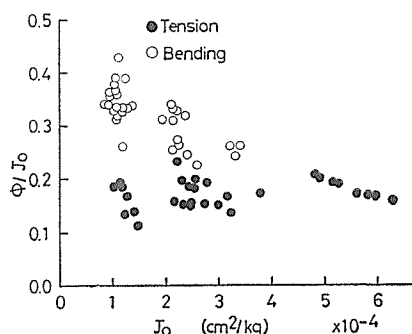


Fig. 23. Relationships between ϕ/J_0 and J_0 in bending and in tension.

また、求めた各々の値を各試片の瞬間コンプライアンス J_0 に対しプロットすると Fig. 22 のようになる。

Fig. 22 はかなり興味深い結果を示している。引張、曲げ各々において、 ϕ と J_0 はかなり良い相関を示し、 J_0 が大きくなると ϕ は高い値を取る。 ϕ は水分非平衡状態の定数であり、 J_0 は水分平衡状態の特性値である。それ故、 ϕ と J_0 が高い相関を持つことは、 J_0 を知ることによって ϕ を予測することが可能であることを意味する。しかし用いた樹種はヒノキとブナに限られているため、 ϕ - J_0 の関係は今後さらに検討する必要がある。

さらに Fig. 22 では、 ϕ - J_0 の関係が曲げと引張りで異なることを示し、負荷様式の相違により効果が異なることを示している。

次に(6)式の両辺を J_0 で割ると、

$$d(J/J_0)/dM = \phi/J_0 \dots \dots \dots (8)$$

となり、相対クリープと M の関係を直線近似する時の勾配として ϕ/J_0 は定義される。

Fig. 23 に ϕ/J_0 と J_0 の関係を示した。横引張では、 ϕ/J_0 の値は J_0 によらずほぼ一定の値 (0.1~0.2) をとるが、曲げでは、 J_0 の増加するとき ϕ/J_0 は減少傾向を示した。 ϕ/J_0 の検討も今後必要であろう。

3-4. 考 察

Fig. 24 に乾燥過程のクリープおよび含水率変化の模式図を示した。本研究では、負荷後3～4時間は水分平衡状態に保った後に乾燥を行った。式(2)に示したように乾燥過程のクリープひずみを三つの成分 ε_0 , ε_t , ε_m から成ると考え、 $\varepsilon_0 + \varepsilon_t$ を平衡成分、 ε_m を非平衡成分とした。そして、ひずみの非平衡成分 ε_m を含水率の関数として検討してきた。

含水率は勿論試片の平均含水率を意味する。したがって、平均含水率を変数として意味を持つ範囲を求める必要があった。3-1においてこの問題を検討した。その結果、クリープひずみの非平衡成分 ε_m と含水率の関係は、収縮一含水率の関係とよく類似することが明らかとなった。そこで、含水率域を20%以下に設定し、通常平均収縮係数を求める場合と同じ意味で、単位含水率変化あたり発生するひずみ $d\varepsilon_m/dM$ を求め、応力との関係を検討した。結果として、 $d\varepsilon_m/dM = \phi \cdot \sigma$ という基礎的な関係を得たことになる。

水分非平衡状態においても、含水率変化の条件が一定であれば、変形と応力の間に線形性が成立することが知られている。⁸⁾ また、乾燥過程の引張クリープでの残留変形が応力に比例して増加することはすでに報告したとおりである。⁹⁾ それゆえ、変形を単位含水率変化あたりのひずみで表わすならば、式(3)の関係は当然、予想されるところのものであった。

式(3)を用いて ϕ を求め、 ϕ と J_0 の間にかなりの相関が認められることを示した。 ϕ と J_0 の間に明確な関係が存在するとすれば、乾燥過程のクリープの量的な把握の問題は解決することになる。この点については、今後の検討が必要とされる。

Bethe⁷⁾ は、乾湿繰り返し過程の曲げクリープを検討し、6サイクル後のたわみ f_e の初期たわみ f_0 に対する比 (f_e/f_0) が試片の初期弾性率 E_0 の増加に比例して減少することを示し、 E_0 が $9 \times 10^4 \text{kp/cm}^2$ から $14 \times 10^4 \text{kp/cm}^2$ になると、 f_e/f_0 は9から3へと、1/3に減少することを指摘している。

また、Armstrong & Kingston⁸⁾ は、Radiata pine, Mountain ash, Blackbutt の3樹種を用いて乾燥過程のクリープを測定し、樹種の相違は相対クリープ (max. fractional deformation) に顕著な差を生じないとしている。

Bethe の検討は乾湿サイクル下のクリープに関するものであるが、Armstrong らの指摘とともに、乾燥過程のクリープにおける特性定数 ϕ と J_0 の検討と関連して注目すべきものであろう。

式(3)は実験的に求められた関係であるが、すでに提示されている竹村の理論式、あるいは Leicester のモデルと密接な関係を持つものである。式(3)のひずみの非平衡成分 ε_m は、Fig. 24に示したように、含水率が変化することによって生じたひずみを意味する。竹村および Leicester は、乾燥終了後の水分平衡状態において回復測定を行い、非回復成分のみを分離し、これに注目している。

Leicester は、乾燥過程の曲げクリープにおいて、たわみの非回復成分 (irrecoverable

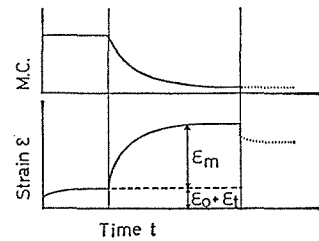


Fig. 24. Schematic representation of creep during drying: Total strain in creep is taken to be composed of an equilibrium component $\varepsilon_0 + \varepsilon_t$ (ε_0 : instantaneous elastic strain, ε_t : time-dependent strain in moisture equilibrium state) and a non-equilibrium strain component ε_m .

mechano-sorptive component) Δm が次式で表現されるとするモデルを想定した。⁵⁾

$$-d\Delta m/dm = p \cdot f(m) \quad \dots\dots(9)$$

ここで, $f(m)$: 含水率 m の関数, P : 荷重パラメータである。

Leicester は Maxwell model を念頭において, 式(9)を導いたことは明らかである。式(9)において, $f(m)=一定$ とし, Δm の代りに ε_m をとれば, ($p \rightarrow \sigma$ として)

$$d\varepsilon_m/dM = \phi \cdot \sigma \quad \dots\dots(3)$$

となり, (3)式は Leicester の式(9)の一つの単純化の結果となる。

式(3)は, 粘性法則の式(10)に対応すると考えられる。

$$d\varepsilon/dt = (1/\eta) \cdot \sigma \quad \dots\dots(10)$$

ここで, $d\varepsilon/dt$: 変形速度, η : 粘性係数である。(10)式において, $t \rightarrow M$, $1/\eta \rightarrow \phi$ と置き換えれば, 式(3)となる。

Maxwell model を応力緩和に適用すると式(11)の応力緩和式が得られる。

$$S = S_0 \exp(-t/\tau), \quad \tau = \eta/E \quad \dots\dots(11)$$

ここで, S : 時間 t での応力, S_0 : 初期応力, τ : 緩和時間, E : 弾性率, η : 粘性係数である。式(11)において, $t \rightarrow M$, $1/\eta \rightarrow \phi$ と置き換えれば

$$S = S_0 \exp(-M/\tau'), \quad \tau' = 1/E\phi \quad \dots\dots(12)$$

が得られる。式(12)は竹村の modified Maxwell model の緩和式に対応する式であると考えることができる。³⁾

このように, 式(3)は, 竹村, Leicester らの式と形式的ではあるにせよ, 密接な関係を持つことは明らかであろう。

乾燥過程のクリープ現象は, ある意味で, 木材の収縮現象とよく似た性格を持つと考えられ, 今後, 式(3)をさらに収縮と対応させ検討する必要があるであろう。

4 要 約

乾燥過程の木材の横引張クリープおよび曲げクリープを, ブナ (*Fagus Crenata* BLUME) 材とヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* ENDL.) 材の, 厚さ 2 mm, 幅 10 mm の短冊型試片について測定した。試片長は曲げ試片で 120 mm, 引張試片で 150 mm であった。試片の長さ方向と幅方向を組み合わせ, RL, RT, TR の三種類の試片を用いた。試片に一定荷重を加え, 3~4 時間, 水分平衡状態で保った後, 30°C 下で含水率約 2% まで乾燥を行った。乾燥開始含水率は 100% と 20% の二条件とした。

乾燥過程のクリープにおいて観測されるひずみは二成分から成ると考え, 水分平衡状態で生じたひずみを平衡成分, 乾燥過程に発生するひずみを非平衡成分 ε_m とした。

初期含水率 100% からの乾燥過程においては, 含水率約 50% 付近から ε_m は発生し始め, 繊維飽和点では ε_m の最終値の 20% がすでに生じていた。含水率 20% 付近から, ε_m は含水

率変化に比例して増加する傾向を示した。 ϵ_m と試片含水率の関係は、収縮一含水率曲線に類似するものであった。

次いで、 ϵ_m と含水率の間の直線域に注目し、含水率20%からの乾燥過程のクリープを検討し、次の結果を得た。

1) 引張応力下の収縮係数 da/dm と応力 σ の間に次の関係が成立した。

$$da/dm = -A \cdot \sigma + da_0/dm \quad \dots\dots(I)$$

ここで、 da_0/dm ：無負荷試片の収縮係数、 A ：定数である。

2) 乾燥過程に生じる非平衡ひずみ ϵ_m は、含水率変化 M (%) と応力 σ を用いて次式のように表わされた。

$$d\epsilon_m/dM = \phi \cdot \sigma \quad \dots\dots(II)$$

ここで、 ϕ は定数 ($cm^2/kg \cdot \%$) である。

3) 式(II)の定数 ϕ は乾燥過程のクリープの特性定数と考えられ、次式により求められる。

$$dJ/dM = \phi \quad \dots\dots(III)$$

ここで、 J はクリープ・コンプライアンスである。

4) ϕ と J_0 (瞬間コンプライアンス) の間にかんがりの相関が認められた。

5) ϕ と J_0 の関係は曲げと引張で異なり、負荷様式による効果の相違を示すものであろう。

6) ϕ/J_0 の値は、引張では J_0 によらず、0.1~0.2 とほぼ一定となるが、曲げでは、 J_0 の増加するとき減少する傾向を示した。

最後に、式(II)と粘性則との対応を示し、Leicester、竹村のモデルとの類似性を考察した。

文 献

- 1) Grossman, P. U. A. : Wood Sci. Technol., 10, 163, (1976)
- 2) Schniewind, A. P. : Holz als Roh-und Werkst., 24, 87 (1966)
- 3) Takemura, T : Mem. coll. Agric., Kyoto Univ., No. 88, 31 (1966)
- 4) 竹村富男 : 木材誌, 14, 406 (1968)
- 5) Leicester, R. H. : Wood Sci. Technol., 5, 211 (1971)
- 6) Rybarczyk, W. and R. Ganowicz : Wood Sci. Technol., 8, 233 (1974)
- 7) Bethe, E. : Holz als Roh-und Werkst., 27, 291 (1969)
- 8) Armstrong, L. D. and R. S. T. Kingston : Aust. J. Appl. Sci., 13, 257 (1962)
- 9) 徳本守彦 : 木材誌, 19, 577 (1973)

The Relation between Deformation and Moisture Change in Creep of Wood during Drying.

By **Morihiko TOKUMOTO**

Laboratory of Wood Science and Technology, Fac. Agric., Shinshu Univ.

Summary

Creep of wood during drying was studied in tension and in bending. The specimens of $2 \times 10\text{mm}^2$ cross section of Buna (*Fagus crenata* Blume) wood and Hinoki (*Chamaecyparis obtusa* ENDL.) wood were tested under condition of decreasing moisture content. Initial moisture content of specimens were about 100 % and 20 %.

In tension tests, the specimens of 150 mm length were used and tensile loads were applied perpendicular to the grain (radial and tangential directions). Unload specimens were used as controls and its weight changes were measured with U-gauge.

In bending tests, beams of 120 mm length were tested over a span of 85 mm and loads were applied at the center of the span. The central deflection was observed with a cathetometer.

After creep was measured in moisture equilibrium state for 3~4 hours, drying was begun at constant temperature of 30°C.

The total strain in creep during drying was taken to be made up of an equilibrium component $\varepsilon_0 + \varepsilon_t$ (ε_0 : elastic strain, ε_t : time-dependent strain in moisture equilibrium state) and a non-equilibrium component ε_m . The main purpose of this report was to clarify the relation between ε_m and moisture content change M in creep during drying.

In the process of drying from about 100 % moisture content, ε_m begins to increase at 50 % moisture content and 20 % of final value of ε_m is occurred at the fiber saturation point. Then, after the moisture content of specimen reaches to about 20 %, a change of ε_m is in proportion to moisture content change. The relation between ε_m and moisture change is similar to the shrinkage-moisture content relationship.

Then, creep during drying from about 20 % moisture content were measured and the relation between ε_m and moisture change M was investigated further. The results obtained are summarised as follows.

1) The average shrinkage coefficients da/dm under tensile stresses are related to the applied stress σ and moisture content m as follows.

$$da/dm = -A \cdot \sigma + da_0/dm \quad \dots\dots(I)$$

where da_0/dm is the average shrinkage coefficient of unload specimen (control) and A is a constant.

2) Non-equilibrium strain component ε_m in creep during drying is expressed as a function of moisture change M (%) and the applied stress σ .

$$d\varepsilon_m/dM = \phi \cdot \sigma, \quad \dots\dots\text{(II)}$$

where ϕ is a constant.

3) ϕ in Eq. (II) is defined as a characteristic constant in creep during drying and determined by the next Eq. (III).

$$dJ/dM = \phi, \quad \dots\dots\text{(III)}$$

where J is creep compliance (cm^2/kg).

4) ϕ are dependent on the instantaneous compliance J_0 in tension and in bending.

5) The relation between ϕ and J_0 in tension is different from in bending. This fact shows the effect of different loading modes.

6) ϕ/J_0 are approximately constants independent on J_0 in tension, but are not independent on J_0 in bending.

Lastly, Eq. (II) was discussed in relation to the Takemura's and Leicester's models that explain the coupling effect of applied stress and moisture change in specimen in creep of wood during drying.