

## 乾燥過程の木材の横引張クリープ

### II. 温度および樹種特性

藤田 晋 輔

(森林利用学研究室)

昭和57年 8月10日 受理

### Tensile Creep of Wood during Drying

#### II. The Effect of Temperature and Species on the Tensile Creep Perpendicular to Grain

Shinsuke FUJITA

(Laboratory of Wood Utilization)

#### 緒 言

木材に対する乾燥スケジュールは通常樹種, 初期含水率, 木取り, 被乾燥材固有の水分移動の難易(乾燥時間の長短), 損傷の発生と程度, 収縮の経過などを基準に作成する。

しかし, これまでの多くの報告で明らかのように水分状態の違いにより木材の機械的性質は異なるので, 当然のことながら水分が移動している間の木材の機械的性質は経時的に変化する。さらに木材の機械的性質は温, 湿度によっても変化することは周知の事実である<sup>4), 6)</sup>。したがって, 木材の収縮経過(収縮率)および乾燥速度係数などに加えて, 水分移動中の木材の機械的性質(特に繊維直角方向の引張強さ, 破壊ひずみおよびヤング係数)を考慮する必要がある, 常温時の値をそのまま適用することはできない<sup>3)</sup>。

さらに, 上述の諸性質に加えて, 木材の乾燥障害発生の主たる要因として粘弾性的性質を考えなければならない。この性質も乾燥応力の形や推移に大きな影響を与えている。なかでも水分が変化しているとき, 木材の引張クリープは水分が変化していないときに比べて非常に大きく, 水分移動が粘弾性的性質に及ぼす影響は大きい<sup>1)</sup>。したがって, 今後乾燥スケジュールの作成にあたっては, 木材の機械的性質(引張強さ, 引張破壊ひずみ, ヤング係数など)に加えて粘弾性的性質

(特に引張クリープ, クリープ破壊ひずみ)も考慮すべき現象である。ゆえに, 乾燥時に発生する損傷を主眼として乾燥の立場からクリープ現象を検討するとき, 接線方向の引張によるクリープの検討がとくに重要となる。

このような考え方から, 乾燥過程に発生する損傷(とくに木口割れ, 表面割れ)に関与する条件を得ようとするとき, まず温, 湿度一定条件下における接線方向の横引張荷重(以下荷重とする。)下の収縮経過, クリープ経過, さらにクリープと含水率の対応, クリープ破壊ひずみなどの把握は最も有効な示唆になると考える。

このような考え方に立ち, 乾燥の面から見て特徴あると考えられている代表的4樹種(5サンプル)について, 一定の温, 湿度条件下の乾燥過程の横引張クリープに及ぼす温度の影響と樹種の特徴を検討した。

#### 実験材料と実験方法

供試材料は前報<sup>2)</sup>と同様, 木材乾燥上から特徴あると考えられているつぎの4樹種(5サンプル)である。

ダケカンバ (*Betula ermanii* Cham.)

ヘムロック (*Thuja heterophylla* Sarg.)

アルモン (*Shorea almon* Foxw.)

ラミン (*Gonystylus bancanus* Kurz.)

試験片の形状は前報<sup>2)</sup>に示したように木口面を試験片の幅面とした短冊形で, 接線, 半径および繊維方向の寸法はそれぞれ 130 mm, 10 mm, 2 mm である。つぎに横引張荷重量は生材時の接線方向の横引張強さの 0 (無荷重), 50, 60, 70 および 80% の 5 段階とした。

前報: 鹿大農学術報告, No. 32, 167-173 (1982). 本論文の要旨は第 27 回日本木材学会大会 (1977, 4: 京都大学) において発表した。本研究は文部省科学研究費・総合研究 A (昭和 51 年度, 代表者名古屋大学寺沢 真教授) の助成を受けた。

しかし、ラミン (1), (2) は他の 3 樹種のように 50~80% の荷重レベルを与えることができなかった<sup>2)</sup>。したがって、結果的には他の 3 樹種より低い荷重レベル (横引張強さの 0, 10, 15, 20 および 30% の 5 段階) とした。実験装置は「強制循環式定温器付クリープ試験機」(東洋試験機) を使用した。乾燥温度は 30°C (約 35% R. H.) および 60°C (約 13% R. H.) の 2 条件である。供試材料の生材時の機械的性質および実験方法の詳細は前報<sup>2)</sup> に示したとおりである。

結果と考察

1. 引張クリープひずみの経時変化

前報<sup>2)</sup> では荷重下で生材から含水率 3% 付近まで乾燥したときの収縮ひずみの挙動を検討した。本報では、まずクリープひずみにおよぼす温度の影響を検討する。無負荷試験片の収縮率と負荷試験片のそれとの差を乾燥過程のクリープひずみとした。本実験における無負荷試験片の収縮率 (自由収縮率) の値は他のそれ<sup>8)</sup> と比較してやや小さい値であったが、これはクリープ試

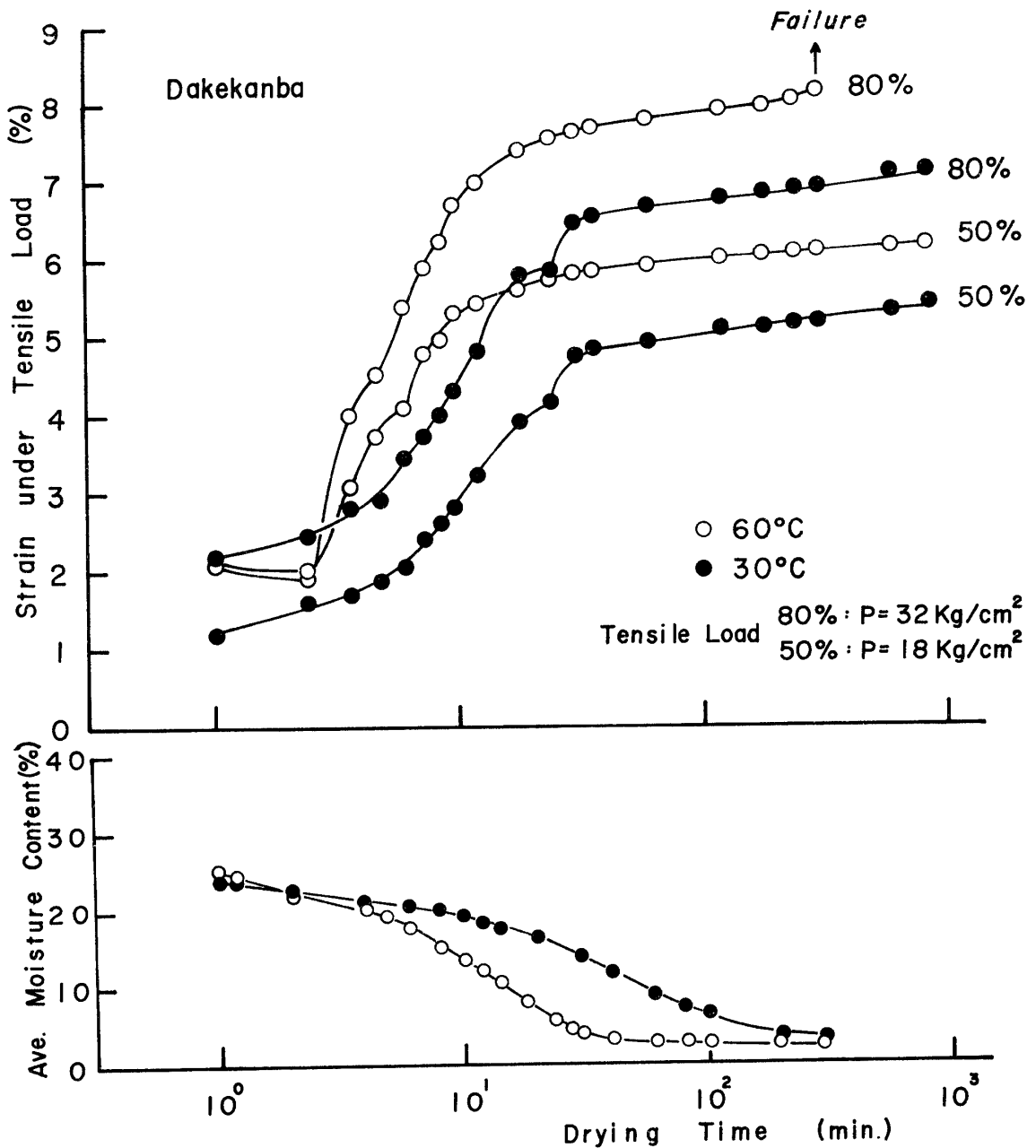


Fig. 1. The relation between creep strain under tensile load, moisture content curves and the drying time at 30°C and 60°C (Dakekanba).

験機の測定機構によると考えられる。また、負荷しない時の含水率の変化と負荷したときのそれには、若干の時間的な差があり、これがクリープひずみの測定誤差に直接含まれてくると思われるが、これの相違を実験的に求めることは困難であった。したがって、以下の考察の中で含水率の値は負荷しないときのそれを利用した。

いま、前報<sup>2)</sup> Fig. 5 の供試材のうち、ダケカンバの50%および80%荷重レベルに得られた乾燥過程のクリープ経過の1例を含水率の経過とともに Fig. 1 に示した。Fig. 1に見られるように温度30°Cにおけるそれぞれの荷重に対する初期クリープひずみは当然のことながら荷重が大きいほど大きく現われる。以後のクリープひずみの経過の中でクリープひずみの大きさに荷重の差が明瞭に見られるが、そのパターンはほぼ平行移動した形をとる。一方、温度60°Cになると、実験開始直後の瞬間のクリープひずみは荷重により顕著な差が現われなかったが、含水率23%付近よりクリープひずみにおよぼす荷重の影響が大きく現われる。そして、実験の範囲内の乾燥後半に至り、クリープひずみ約8%で破断した。また、それぞれの温度、荷重下のクリープひずみ経過曲線の中で、荷重の大きさに関係なく、30°Cでは実験開始後15分、60°Cでは5~6分付近において、肩(shoulder)を示したのち、再びクリープひずみは増大する。その後緩慢となりながら安定もしくは破断に至る。肩が現われる時間は上述したように温度が高いほど実験開始後短時間のうちに発生するが、そのときの含水率は温度に関係なく15~16%付近にある。

## 2. クリープひずみと平均含水率

上述の方法によりそれぞれの樹種に得られた乾燥過程のクリープひずみ経過と平均含水率の経過を対応させ、クリープひずみ—平均含水率の関係を求めたのが Fig. 2 である。ラミンはいずれの温度でも実験開始後数分以内の横引張荷重下の収縮ひずみが伸び(負の収縮ひずみ)から上向き(正の収縮ひずみ)へと移行する間に破断することが多かった。このことから、ラミンの場合、クリープひずみとはいい難い。したがって、Fig. 2 に図示したが、他の樹種と同じ考え方で検討することは困難と考えられるので、ここでは検討から除外した。Fig. 2 においてラミン以外の3樹種についていえることは、当然のことながら、荷重が大きいほど、また同一の荷重においては温度が高いほど、クリープひずみの最大値もしくは破断時のクリープひずみは大きい。それぞれの供試樹種で初期含水率を異にするの

で、全樹種にわたる統一した見解は述べられないが、いずれの樹種でもクリープひずみは乾燥開始と同時に増大し、含水率20~12%以降で安定する。しかし、このときの含水率は樹種によって差が現われる。これは初期含水率の差とそれぞれの樹種固有の乾燥速度にも依存する<sup>7)</sup>と考えられる。他方、乾燥温度の差によるクリープひずみ—含水率曲線のパターンは顕著な差を見ない。いま、それぞれの供試樹種について見ると、ダケカンバでは温度、荷重レベルに関係なく、含水率15%付近まで急激な増加を示し、その後やや緩慢な増加となり、含水率4%付近に至り安定する。アルモンのクリープひずみはダケカンバ同様実験開始と同時に急激に増大する。その後温度30°Cでは含水率30%、温度60°Cでは含水率20%付近に至りやや緩慢となり安定域にはいる。荷重が80%になると温度30°Cでは含水率40%付近、温度60°Cでは含水率30%付近に到達するまでにほとんど破断する。このときのクリープ破壊ひずみは温度30°Cで3~4% (生材の横引張破壊ひずみの1.4~1.8倍)、温度60°Cで3.5~4.5% (生材の横引張破壊ひずみの1.6~2.1倍)を示す。つぎにヘムロックのクリープひずみは含水率20~25% (それぞれ30°C, 60°C) 付近まで急激に増大し、その後温度30°Cでは荷重レベル70%以下で試験片は破断しないが、80%レベルの荷重になるとクリープ破断を生じる試験片が多くなる。一方、温度60°Cにあって60%以下の荷重レベルではクリープ破断を生じないが、70%以上の荷重レベルではクリープ破断を発生する個体が多くなる。

これまで述べてきたように荷重70, 80%レベルでクリープ破断が生じなければ、クリープひずみ—平均含水率曲線はほとんど一致する。これは荷重70%に至れば、クリープひずみは変形しうる最大の値となる。加えて、木材が乾燥することによって、ヤング率も増大する。したがって、その後のクリープ変形の余裕が少なくなることに原因していると考えられる。ゆえに、木材の変形しうる最大の領域にはいり、クリープ破断が発生するいわゆる限界応力の近隣にあると考えられる。

一方、乾燥温度とクリープ経過、クリープ破断の関係を見ると、温度が高いほどクリープひずみは大きく、実験開始後短時間内の含水率が比較的高いあいだに破断することが多くなる。このようなことから乾燥速度が早くなっても表層部だけが乾燥し、内部の含水率はまだそれほど低くなっていない時期であるから、高温度、高荷重を受けている試験片の破断は生材時におけ

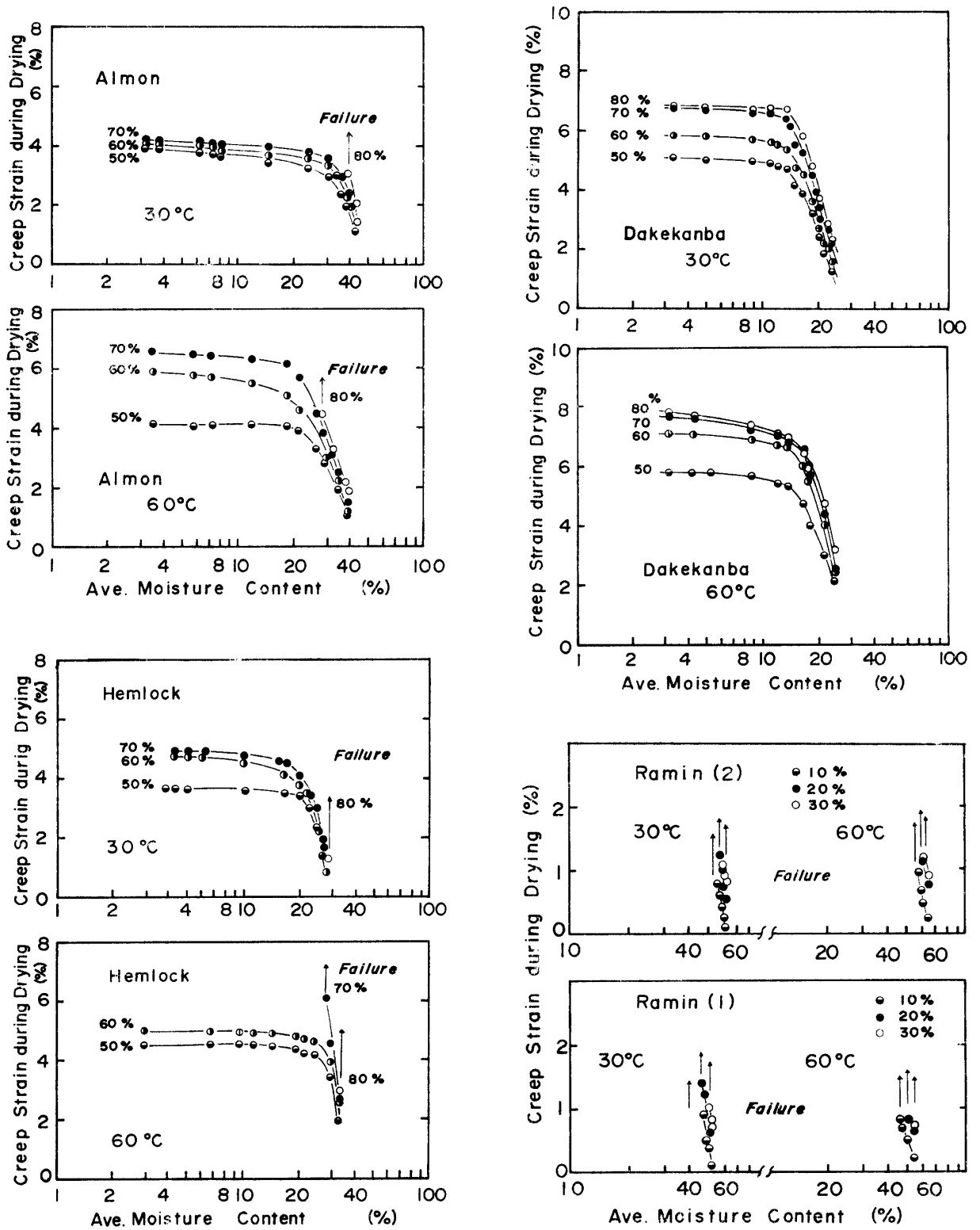


Fig. 2. The relation between the creep strain and the average moisture content under each load level at 30°C and 60°C.

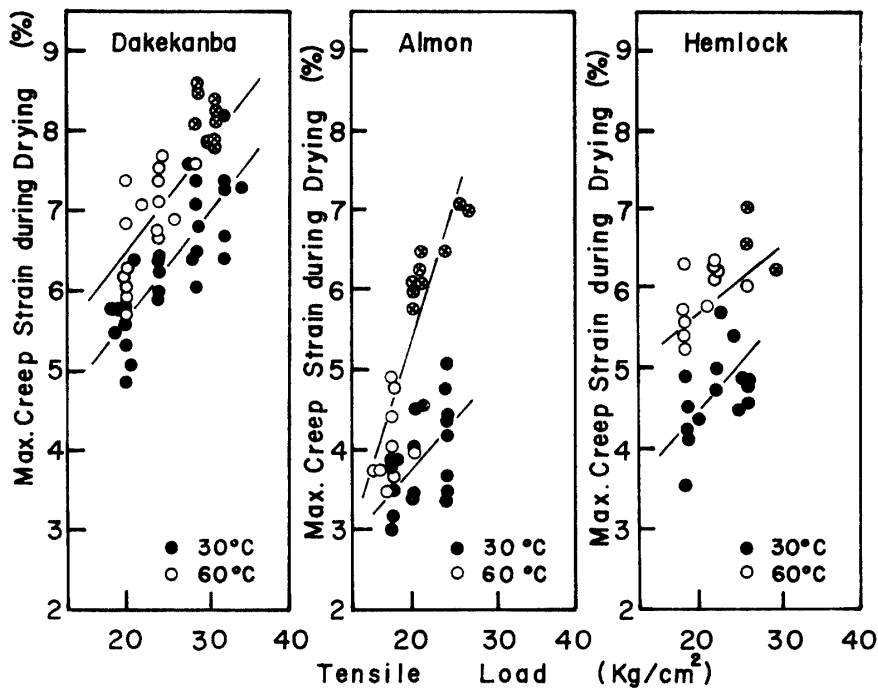


Fig. 3. The relation between the maximum creep strain during drying period and the tensile load at 50, 60, 70 and 80% (in Dakekanba, Almon and Hemlock). (⊗: Failed)

る水分平衡下のクリープ破断に近い状態で発生していると考えられる。

### 3. クリープひずみの最大値と樹種

供試したそれぞれの樹種、乾燥温度について、荷重とクリープひずみの最大値の関係を Fig. 3 に示した(ただし、図中⊗印はクリープ破断した点である)。Fig. 3 に見られるようにそれぞれの条件下におけるクリープひずみの最大値をクリープ限界応力と呼べば、この値は乾燥割れの発生しうる点とする有効な指標になるものと思われる。いま、クリープひずみの最大値におよぼす温度の影響を見ると、いずれの樹種でも乾燥温度が高いほどクリープひずみの最大値は大きくなる。これは温度が高いほど弾性的性質が低下し、粘性が増大することを示唆するものと考えられる。すなわち、温度 30°C ではほとんど破断しないが、温度 60°C になると破断する場が多くなる。いま、温度 60°C で破断したクリープひずみの値を見ると、ダケカンバ7.8% (含水率3%)、ヘムロック5.8% (含水率24%) およびアルモン5.7% (含水率3%) を示している。このクリープひずみ値を越えるとクリープ破断が発生する危険を伴うことを示唆することでもある。つぎにそれぞれの樹種の荷重とクリープひずみの最大値の関係をみる。30°C、60°C とともにクリープひずみの最大値は荷重が増大すれば直線的に増大する。

Fig. 3 からわかるようにダケカンバ、ヘムロックは温度が異なっても、最大値の差が現われるが、パターンは類似している。しかし、アルモンのクリープひずみの最大値は同一荷重であっても温度が高いほど大きく、荷重が大きいほどその差は大きい。このことからアルモンはダケカンバ、ヘムロックに比べて、クリープひずみの挙動、クリープひずみの最大値に対して温度の影響を受けやすいことが明らかとなった。

### 4. 乾燥過程のクリープひずみと割れとの関連性について

木材の乾燥割れは木材の持つ生材時の破壊ひずみ ( $\epsilon_{max}$ ) と乾燥中に発生する収縮ひずみ ( $\alpha_{max}$ ) もしくは荷重下にあるときのクリープ破壊ひずみ ( $\epsilon_c$ ) とのかねあいで見ると考えると、 $\epsilon_{max}$  に対するそれぞれの比  $\epsilon_{max}/\alpha_{max}$  または  $\epsilon_{max}/\epsilon_c$  の値が小さいほど、 $\epsilon_{max}$  に対する  $\alpha_{max}$  もしくは  $\epsilon_c$  の値が大きいことになり、割れが生じやすいと考えられる。これまでの経験から表面割れが最も生じやすい樹種としてランクづけされているラミンは低荷重 (破壊荷重の 10~30% 以下) 下でも乾燥開始後、短時間のうちに破断するので、他の3樹種と同一条件で検討することは無理であるため、あらためて検討する。したがって、ここではダケカンバ、ヘムロックおよびアルモンについて上述の考え方にもとづき検討する。それぞれの樹種に対す

Table 1. Effect of drying temperature and load level on the failure in the tensile creep test during drying period

Species	Dakekanba ( $\rho=0.52$ )		Almon ( $\rho=0.54$ )		Hemlock ( $\rho=0.71$ )			
Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	30	60	30	60	30	60		
Free shrinkage ( $\alpha\%$ )	5.55	6.06	5.10	5.99	5.79	6.38		
Tensile strain at maximum stress in green ( $\epsilon_{\max}\%$ )	2.96		2.17		1.81			
	Load level when failed	70%~	60%~	70%~	50%~	70%~	70%~	
Tensile creep test	Creep strain at failure ( $\epsilon_c\%$ )	6.59	7.73	3.66	4.72	3.14	5.61	
	Moisture Content at failure (%)	5.5	3.0	30.7	27.0	21.8	21.8	
$\epsilon_{\max}/\alpha$ (Ave.)	0.54	0.51	0.48	0.43	0.40	0.36	0.30	0.28
$\epsilon_{\max}/\epsilon_c$ (Ave.)	0.45	0.45	0.45	0.57	0.54	0.51	0.49	0.35
$\epsilon_{\max}/\alpha$ by T. Okuyama (1976) ( $20^{\circ}\text{C}$ )	0.36		0.32		0.24			

る温度別の  $\alpha_{\max}$ ,  $\epsilon_{\max}$ ,  $\epsilon_{\max}/\alpha_{\max}$  および  $\epsilon_{\max}/\epsilon_c$  の結果を Table 1 に示した。この表に見られるように  $\epsilon_{\max}/\epsilon_c$  の平均値はダケカンバ0.45, ヘムロック0.42 およびアルモン0.54の値をえた。これらの結果と奥山<sup>5)</sup>によるそれを比較すると、わずかに大きい値を示している。これらの値は供試試験片の寸法の差, 水分移動の差などの要因を考慮していないため, 完全に一致しないが, 得られたデータのバラツキを考慮に入れば, おおまかな点では対応していると考えられる。しかしながら, 乾燥時間, 水分移動中の木材の機械的性質の変動などの条件が考慮されていないので, その絶対値そのものは意味を持たない。このような考え方に妥当性があるとすれば, Table 1の結果から“割れ易さ”の序列をつけることができる。 $\epsilon_{\max}/\alpha$  について見れば, ヘムロック→アルモン→ダケカンバの順となり, 奥山<sup>5)</sup>により提案された「割れ易さの指標 k」と一致している。しかし,  $\epsilon_{\max}/\epsilon_c$  について見れば,  $30^{\circ}\text{C}$  ではダケカンバ→ヘムロック→アルモン,  $60^{\circ}\text{C}$  ではヘムロック→ダケカンバ→アルモンとなる。この序列を見ると温度の影響があると考えられる。ここに温度効果を無視すれば, ヘムロック→ダケカンバ→アルモンとなり, 割れ易さから見ると不都合となる。しかし, これらの関係も「割れ」に対するなんらかのかかわりがありそうである。これは今後に残された課題である。

## 要 約

現在利用されている乾燥スケジュールをより正確なものに修正することを目標とした昭和50~51年度文部省科研費「木材人工乾燥スケジュールに関する研究」の中で計画されたテーマの一つである。研究対象とした樹種は乾燥の面から見て特徴ある樹種と思われるダケカンバ, ヘムロック, アルモンおよびラミンの4樹種である。前報<sup>2)</sup>につづいて, 本報は乾燥過程の横引張クリープにおよぼす温度の影響および樹種特性を検討した。その結果の概要はつぎのとおりである。

1. 乾燥過程のクリープひずみは同一の荷重でも高温ほど大きく, クリープ破断が生じやすい。特にアルモンは, 同一の荷重レベルでも温度が高いほどクリープひずみが非常に大きい。クリープ破断ひずみの限界値はダケカンバ6.59%, ヘムロック3.14%, アルモン3.66%の値を示した。

2. 乾燥過程に発生するクリープひずみの最大値と樹種の間を見比べると, 比重が大きいほどクリープひずみの最大値は大きい。

謝辞 この研究は昭和50~51年度文部省科学研究費(総研A)「木材人工乾燥スケジュールに関する研究」(代表者名古屋大学寺沢 真教授)の補助を受けた。代表者である寺沢教授, とりまとめにあたって御助言を賜った寺沢教授を始め, 研究グループの各位, 実験装置の利用に際し御快諾いただいた静岡県工業試験場金沢宏工芸部長に謝意を表します。

## 文 献

- 1) 藤田晋輔・中戸莞二：乾燥割れに関する研究（第1報）  
引張荷重下における収縮の挙動，木材誌，**11**，36-40（1965）
- 2) 藤田晋輔：乾燥過程の木材の横引張クリープ I. 横引張荷重下の収縮経過，鹿大農学術報告，**No. 32**，167-132（1982）
- 3) 久田卓興：木材乾燥におけるクリープとセット（第1報）  
含水率の変化範囲が異なる時のクリープについて，木材誌，**25**，688-696（1979）
- 4) 奥山 剛. 他：木材の強度異方性に及ぼす温度の影響  
（第1報）繊維直角方の曲げについて，木材誌，**23**，609-616（1977）
- 5) 奥山 剛：曲げ強さの異方性と乾燥割れの異方性について，寺沢 真編：木材の人工乾燥スケジュールに関する研究（III），昭和51年度文部省科学研究費（総研A）研究成果報告集，18-26（1977）
- 6) R. L. Youngs.: The perpendicular-to-grain mechanical properties of red oak as related to temperature, moisture content and time. F. P. L. Rpt., **No. 2079**（1957）
- 7) 佐藤庄一：乾燥速度係数，寺沢 真編：木材の人工乾燥スケジュールに関する研究（III），昭和51年度文部省科学研究費（総研A）研究成果報告集，5-7（1977）
- 8) 寺沢 真編：木材の人工乾燥スケジュールに関する研究（III），昭和51年度文部省科学研究費（総研A）研究成果報告集（1977）

## Summary

In this paper, the effects of stress level and drying temperature on the creep strain were investigated under tensile load perpendicular to grain. The perpendicular-to-grain tensile creep tests of Dakekanba, Hemlock, Almon and Ramin were performed under the both drying conditions the one at 30°C (R. H. 35%) and the other at 60% (R. H. 13%). Each sample is loaded with different stress level through the ranges of 50 to 80% in the short-term ultimate tensile strength of Dakekanba, Hemlock and Almon; and through the ranges of 10 to 30% in Ramin. Selection of these ranges (50 to 80% or 10 to 30%) was made in such a way as the majority of samples would fail the period of the experiments. The dimension of every specimen is 130×10×2 mm (T×R×L).

The results were summerized as follows:

1. In the early stage of drying when moisture content was high, the higher were stress level and temperature, the larger was creep strain.
2. From the relation between the applied tensile load and the maximum creep strain which developed during the period when the moisture content changed from green to 3% moisture content under two temperature conditions, it was ascertained that amount of creep strain increased linearly with the increasing of the stress level ranges in the present experiment.
3. The strains at creep failure induced in Dakekanba, Hemlock and Almon showed the values of 6.59%, 3.14% and 3.66%, respectively. The ratio of maximum creep strain to the ultimate tensile strain may be regarded as an effective index of the occurrence of initial checking in kiln drying.