# 木材乾燥におけるクリープとセットに関する研究

久田卓 興"

# Takuoki HISADA: Creep and Set Behavior of Wood

#### Related to Kiln Drying

**要 旨** 木材は水分および温度が時間とともに変化するいわゆる非平衡状態で,粘弾性的性質が平衡状態に比べ特異なことが知られている。本研究は木材乾燥の立場から水分非平衡下の木材の粘弾性 的挙動を明らかにし、乾燥操作の適正化に役立たせようとするものである。本報では主として木材の 接線方向のクリープを対象にして,諸因子の影響を検討するとともに,乾燥割れや各種損傷の発生に 関連してドライングセットについて総括的に論じた。主要な成果は次のとおりである。

1) 乾燥過程のクリープに影響を及ぼす因子として、応力、含水率、温度などをとりあげ、その挙動を明らかにした。応力、含水率については線型的な取り扱いが可能な限界が明らかになり、温度については相対クリープが温度上昇により減少することや、樹種により大きな差違のあることが明らかになった。なお、乾燥速度は乾燥過程のクリープに対して影響が小さいと思われた。

2) 樹種別にドライングセットを比較した結果、セット量と自由収縮率との比が、乾燥における初 期割れの指標として利用できる可能性が見出された。

3) ドライングセットの生成過程やセット材の性質,収縮阻止により生じる応力,2軸負荷による クリープなど各種の性質を調べこれに基づいて乾燥過程の木材の粘弾性的変形機構について推論を試 みた。

目

次

緒	言	33
第1章	燥過程の木材の粘弾性に関する既往の研究	34
1.1 🗄	その歴史的経過と概要	34
1.2 車	桑過程の木材のクリープに影響をおよぼす諸因子の検討結果	35
第2章	定荷重下の木材の収縮挙動・・・・・・	37
<b>2.1</b> E	長り応力下の木材の収縮経過	38
2.1.	実験方法	38
2.1.	実験結果と考察	41
2.2 E	宿応力下の木材の収縮経過 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	45
2.2.	実 験 方 法	•••••45
2.2.	実験結果と考察	•••••46
2.3	約	•••••47
第3章	燥過程の木材のクリープにおよばす諸因子の影響	•••••48
3.1 J	力の影響	49
3.1.	実 験 方 法	•••••49
3.1.	実 験 結 果	50
3.1.	考 察	54
3.2	水率の影響	57

木 材-48 Wood Technology-48

3.2.1 実 験 方 法	
3.2.2 実 験 結 果	
3.2.3 考 察	64
3.3 温度の影響	
3.3.1 実 験 方 法	
3.3.2 実 験 結 果	
3.3.3 考 察	
3.4 その他の因子の影響	
3.4.1 乾燥速度の影響	
a) 実 験 方 法	
b) 実験結果と考察	
3.4.2 温度変化の影響	
a) 実 験 方 法	82
b) 実験結果と考察	84
3.5 要約	
第1音 セットの生成とセット材の性	皙
	۵۵ ۵۵
4.1.2 美顿 枯 朱	
4.1.3 考 祭	
4.2 コンテレッションセットの生成	又適程
4.2.1 実 験 万 法	
4.2.2 実験結果と考察	
4.3 樹種別のテンションセット …	
4.3.1 実 験 方 法	
4.3.2 実験結果と考察	102
4.4 テンションセット材の各方向の	D寸法変化と体積の変化 105
4.4.1 実 験 方 法	
4.4.2 実験結果と考察	
4.5 テンションセット材の強度的性	生質の変化 108
4.5.1 実 験 方 法	
4.5.2 実験結果と考察	108
4.6 要約	
第5章 拘束乾燥における応力の発生	と直交する2軸方向に
BI	張り応力が作用する木材の変形 110
5.1 拘束乾燥における応力の発生	
5.1.1 実験方法	
5.1.2 実験結果	
5.1.3 老 容	
5.2 直交する2軸方向に引張り広っ	hが作用する大材の変形 117
5.2.1 実 論 方 注	······································
5.2.2 実 論 結 里	
5.2.3 老 密	
5.3 要 約	
	122

# 木材乾燥におけるクリープとセットに関する研究(久田)

総			括	123
謝			辞	125
引	用	文	献	125
Sur	nma	ry		129

## 緒 言

木材の人工乾燥では,被乾燥材の樹種や形状によって種々の乾燥法がとられ,乾燥技術の面では適する 乾燥方式の選択と各乾燥法に応じた適正な処理条件の採用が重要な課題である。そのため乾燥技術者は木 材の水分移動性の他に,収縮や落込み,強度的・粘弾性的性質などについて十分な知識と理解を持つこと が必要であると考えられる。

人工乾燥では樹種や材種に応じて異なった乾燥スケジュールを用いるが、その限界は予想される種々の の損傷の発生状況に支配される。発生し易い損傷には、割れ、落ち込み、狂いなどがあるが、これらの損 傷多くは損傷の発生が乾燥応力の推移と関係が深く、中でも表面割れは乾燥応力の大小に直接的な影響を 受ける。そのため、古くから乾燥経過中に材内に発生する乾燥応力やひずみの状況を明らかにすることが 必要と考えられ、くし形試験片やスライス法によって乾燥応力を推定する方法がとられてきた。乾燥応力 経過の測定は、乾燥スケジュールの改良や乾燥操作の適正化に大いに役立ったが、近年、この応力経過の 解釈や損傷の発生との関係を知る上で、木材の粘弾性的性質を考慮することが不可欠であると考えられる ようになった。

木材は水分および温度が時間とともに変化するいわゆる非平衡状態で、粘弾性的性質が平衡状態に比べ 特異なことが知られている。水分非平衡下の木材の粘弾性に関する研究の歴史は古く、クリープ、応力緩 和、ドライングセットなどに関して多くの結果が報告されている<sup>1)-13)</sup>。しかし、これを木材乾燥の立場 からみると、ある含水率状態の変化に対してどのくらいのクリープ変形が生じ、それは後でどの程度セッ トの状態を保つか、また乾燥条件や樹種が異なる時はどうかなど不明な問題が多い。乾燥過程の木材の粘 弾性的性質に影響をおよぼす主要な因子は応力、含水率、温度と思われるが、この他にも時間(乾燥速 度)や温度非平衡による影響など検討の必要な因子があり、各因子の影響力の大きさや一般的傾向はまだ 十分に明らかになっていない。

そのため、筆者は木材乾燥の立場から乾燥過程の木材の粘弾性的性質におよぼす諸因子の影響を総括的 に検討する必要があると考え、種々の検討をかさねてきた<sup>13)-18)</sup>。本論文は これらに 関する一連の研究結 果をとりまとめたもので、次の5章からなっている。

第1章では乾燥過程の木材の粘弾性的性質に関する既往の研究について論じた。そのため、まず水分非 平衡下の木材の粘弾性的研究の歴史的経過にふれ、乾燥過程で木材の変形性能が特異な増加を示す理由 や、影響をおよぼす諸因子の検討結果について、既往の研究で明らかになった事実や、不明な問題点につ いて述べた。

第2章では乾燥過程で引張りおよび圧縮応力が作用する時の木材の収縮経過について,次章でクリープ を論ずるのに必要な収縮経過の求め方,およびその測定例を示した。

第3章では乾燥過程の木材のクリープにおよぼす諸因子の影響について論じた。主要な因子と考えられ る応力,含水率,温度の影響を実験により確かめ,このほかクリープにおよぼす影響の大きさについて意 見が分かれている乾燥速度や温度変化の影響についても一部検討を加えた。これらの検討は主として引張 り試験により行ったが、常温における実験では可能なかぎり引張りと圧縮による比較を行った。

第4章ではセットの生成過程について検討し,乾燥初期に生じたクリープひずみが,その後の乾燥過程 でどのようなセット状態を示すかを検討しようとした。また,一定乾燥条件において樹種別のテンション セットを測定し,どのような測定値が乾燥過程の粘弾性的性質を表わす特性値として使えるかを検討し た。この他,テンションセットを生じた材の強度的性質の変化を検討した。

第5章では接線方向の収縮を拘束することによって生じる収縮応力や,直交する2軸方向に同時に引張 り荷重を与えて乾燥した木材の収縮ひずみを実験により測定し,実際に乾燥しつつある木材に発生する乾 燥応力やひずみの状態を考える際に役立てたいと考えた。

本論文の主たる目的は、乾燥過程の木材のクリープやセットに関する一般的性質の把握と発生機構の解 明であるが、このうち前者についてはほぼ目的を達成することができた。しかし、その発生機構について は既往の研究結果も含め可能なかぎり推論を試みたが、いまだ幾つかの疑問が残されている。

乾燥過程の木材の粘弾性的性質の解明は木材乾燥技術の向上にとって不可欠な問題であることは勿論で あるが、これらは他の木材加工分野ならびに木材利用上の諸問題とも密接な関係があり、残された問題は 今後さらに深く追求する必要があると考えられる。

#### 第1章 乾燥過程の木材の粘弾性に関する既往の研究

#### 1.1 研究の歴史的経過と概要

木材の粘弾性的性質は含水状態が変化する場合と変化しない場合とで大きく異なることが知られてい る。この問題を最初に示唆したのは鈴木<sup>1)</sup>で、木材実質の非晶部分が水分移動の際一時的に常態よりゆる んだ構造をとり、これが内部摩擦に変化をもたらすためクリープが増大するとの考え方を示した。

乾燥過程のクリープは、曲げでは負荷後たわみが時間とともに増加する現象であり、引張りおよび圧縮 では荷重を与えたことによって、収縮量が無負荷の場合より減少または増加する現象である。後者の応力 下で乾燥することによって木材の収縮量が変化する現象は、木材乾燥の分野ではドライングセットとして すでに古くから知られている<sup>19)~23)</sup>。ドライングセットが生じる原因として H.D. TIEMANN<sup>19)</sup> はセルロー ス分子鎖のスリップを考え、またフィブリル中のミセルが再配列する可能性があることを示唆した。水分 非平衡下のクリープとドライングセットに関する考え方を併せ、両者が同じ性質のものであることを実験 的に確かめたのは大草<sup>3)8)</sup> である。

大草は圧縮応力下または引張り応力下で乾燥した木材の収縮を調べ,ほぼ応力に比例して収縮ひずみが 増加または減少することや,比例限度よりはるかに小さな応力下で生じたクリープひずみ(無負荷試片の 収縮ひずみと負荷試片の収縮ひずみとの差)が除荷後もほとんど回復せず,ドライングセットが形成され ることを確認した。

水分非平衡下の木材のクリープに関する研究は、時を同じくして諸外国においても積極的に取り組みが 始められ、CSIRO では L. D. ARMSTRONG, R. S. T. KINGSTON, G. N. CHRISTENSEN らにより一連の研究が 進められた<sup>(3)(6)28)</sup>。ここでの研究の対象は長期荷重が与えられた 状態で木材梁の含水率が変動する場合の クリープにあったため、実験は主として曲げで行われ、これらを補足するため繊維方向の引張りおよび圧 縮実験が行われた<sup>(9)</sup>。水分非平衡下で木材のクリープ変形が増大する原因として、彼らは初め i) 外力と

- 34 -

- 35 -

水分傾斜により発生する応力との相互作用,および ii) 含水率変化による粘弾性的性質の一時的変化の 2つを考えた<sup>50</sup>。 そのため試片厚さや乾燥速度を変化させて水分傾斜や乾燥応力の影響が検討されたが, これらは変形を増大させる主要な因子でなく,クリープ変形は含水率の変化速度よりも含水率変化の量に 関係があることが明らかにされた<sup>50</sup>。

水分非平衡下のクリープおよびセットに関する研究は、その後多くの研究者によってクリープやセット に影響を与える因子の解明と、特異な現象を示す原因の解明の両面から研究が進められた。クリープやセ ットにおよぼす諸因子の影響については次の項でとり上げるが、水分非平衡下のクリープが特異な現象を 示す理由について、多くの研究者の推論を集約すれば次のようである<sup>1)3)8)24)-28)</sup>。

湿潤状態の木材では非晶領域の分子鎖間に水分子が介入し、木材成分中の水酸基と水分子が水素結合し て網目構造が形成されている。乾燥によって水分子が離脱すると、隣接したセルロース分子は分子鎖相互 の結合が断たれ、空席となった水酸基は近傍にある他の水酸基と結合して新たな平衡状態に移ろうとす る。このような状態では網目構造にゆるみが生じ、分子の運動は水分平衡状態に比べて容易になり、力が 作用している場合は力の方向にずれた位置に新たな分子鎖の結合を生じる。乾燥が進むと木材成分分子間 には強固な水素結合が形成され、変形が固定されるため乾燥過程で生じた クリープ変形は 非回復性 を示 す。

以上,水分非平衡下のクリープに関して研究の歴史と概要を述べたが,木材の人工乾燥を対象として粘 弾性的性質を取り上げた報告には,藤田<sup>39)</sup>,中川<sup>30)</sup>,竹村<sup>31)30)</sup>,高橋<sup>33)</sup>,佐道<sup>36)</sup>らの報告がある。藤田<sup>39)</sup> は乾燥割れの発生と木材のクリープ現象との関連性について検討し,中川<sup>30)</sup>は板材を乾燥した時の収縮や 変形に対して粘弾性的考察を加えた。また,竹村<sup>31)30)</sup>は粘弾性を取り入れた理論式を提案し,乾燥応力を 推定しようと考えた。高橋<sup>38)</sup>,佐道<sup>38)</sup>らは水分非平衡下の粘弾性が木材乾燥の分野でどのように関係して いるかを総説的に取り上げた。このほか木材乾燥分野への粘弾性的考察の導入の必要性について言及して いる報告は多く見受けられるが,具体的な検討例は少ない。

#### 1.2 乾燥過程の木材のクリープに影響をおよぼす諸因子の検討結果

乾燥過程の木材のクリープに影響をおよぼす因子として応力,含水率,温度および時間が考えられる。 時間の影響は含水率の変化速度の影響と同じと考え,以下,各因子の影響に関する検討結果を既往の研究 からひろい出し,明らかになった事実と不明のまま残されている問題について述べる。

(a) 応力の影響

クリープにおよぼす応力の影響について、一般に問題となるのは、次の事である。すなわち, i) 応力 の増加とクリープひずみの増加とはどのような関係にあるか, ii) 曲げ,引張り,圧縮で性質がどのよう に異なるか, iii) 内部応力はクリープに影響をおよぼすか否か, iv) 応力レベルが高い時,クリープに およぼす応力の影響はどのように変化するか,などである。

乾燥過程のクリープについては、クリープひずみの増加と応力の増加とは比例的であるとする報告が多 く<sup>2030/20320/34/350</sup>, したがって内部応力はクリープに影響を与えないとする考え方が多い。しかし、いくつ かの報告ではこれと異なる結果が得られている。たとえば、吸湿過程と放湿過程では傾向が異なり、クリ ープと応力との関係は比例的でないとする報告<sup>80</sup> (接線方向引張りによる)や、ある荷重以上では比例関 係を示さなくなるとする報告<sup>80/37)</sup> (接線および半径方向の圧縮または半径方向の引張りによる), 乾湿く り返しの回数が多くなると比例関係を示さなくなるとする報告<sup>70</sup> (繊維方向曲げによる), 温度によって異 なるとする報告88)(半径方向圧縮による)などである。

水分非平衡下のクリープに影響をおよぼす因子は多く、この中から、応力の影響のみを摘出するのは必ずしも容易でないが、既往の研究から想像されることは次の様である。i) 応力がある限度以上になる か、乾湿くり返し回数がある限度以上になるとクリープ変形は急に大きくなり、いわゆる非線型性を示 す。ii) クリープにおよぼす応力の影響は、曲げ、引張り、圧縮によって異なることが考えられる。iii) 含水率が時々刻々と変化する状態では、水分傾斜にもとづく内部応力がクリープに影響をおよぼす可能性 がある。

(b) 含水率の影響

クリープにおよぼす含水率の影響に関して問題となる事は,i) クリープ変形量は含水率変化量に比例 すると考えて良いか,ii) 含水率の高低はクリープにどのような影響を与えるか,iii) 含水率変化速度の 違いはクリープに影響を与えるか否か,などである。

水分非平衡下のクリープと含水率との関係について,既往の報告<sup>77839111</sup>は,繊維飽和点以下で含水率変 化の幅が一定であればクリープが含水率の高低に左右されないとするものが多い。また,含水率変化速度 もクリープに影響を与えないとする報告が多い<sup>636389409</sup>,そのため一般にクリープにおよぼす時間の影響 は無視できると考えられている。

これに対して、L.D. ARMSTRONG<sup>6</sup>) らは異なる含水率から実験を開始して、吸湿過程で含水率が5%増加するごとのクリープひずみを測定し、含水率変化の幅が一定であっても、平均含水率が高くなるほどクリープひずみが増大することを指摘している。このほか G.N. CHRISTENSEN<sup>89</sup>) は、クリープひずみの増加量と含水率の変化量との関係が含水率範囲によって異なることや、その傾向が吸湿過程と放湿過程で異なることを指摘している。この場合は含水率18%から5%までの放湿過程で、含水率変化に対するクリープ増加が低含水率域ほど大きくなる傾向が示されている。

以上のように既往の研究ではクリープひずみの増加量と含水率の変化量とが比例し、しかもそれが含水 率の高低に左右されないとする報告と、含水率の高低によって異なるとする報告がある。両者の違いを考 えてみると、前者のクリープが含水率変化に比例するとする報告は概して含水率変化が非常にゆっくりし た場合か、あるいは含水率がある平衡状態から他の平衡状態に移る際の、全クリープひずみ量と全含水率 変化量とを検討の対象とした場合である。含水率が変化しつつある途中のクリープと含水率変化とを検討 した報告には、後者のクリープと含水率変化との関係が含水率域によって異なるとする報告が多いように 思われる。これらのことから水分傾斜や含水率の変化速度はクリープに何らかの影響を与えていることが 考えられる。

クリープにおよぼす含水率の影響を検討するには、クリープひずみの発生経過と含水率経過とを正確に 対応させた測定値を得ることが必要である。しかし、報告された測定例は少なく<sup>8)9)</sup>、このことが水分非 平衡下のクリープ現象の解明を遅らせている原因の一つではないかと思われる。

(c) 温度の影響

クリープにおよぼす温度の影響に関して問題となる事は,i) 温度の高低はクリープにどのような影響 をおよぼすか,ii) 温度の違いによる木材の物性の変化とクリープとはどのような関係にあるか,iii) 温 度が時々刻々と変化するいわゆる温度非平衡状態はクリープにどのような影響を与えるか,などである。 木材の粘弾性的性質が温度によって変化することは良く知られている。クリープにおよぼす温度の影響

— 36 —

は一般に相対クリープ(弾性ひずみに対するクリープひずみの比)によって比較され、含水率変化がない 水分平衡下のクリープでは相対クリープが温度が高いほど大きくなるといわれている<sup>41)~49)</sup>。しかし、含 水率が時間とともに変化する水分非平衡下で相対クリープの温度影響を取り上げた報告は見あたらず、ど のような傾向を示すか明らかでない。

水分非平衡下のクリープと温度との関係については、断片的にいくつかの報告があるが<sup>8)38)38)40,40</sup>, 現 象が多様で一般的傾向を把握することは困難な状態にある。たとえば、SCHNEWIND<sup>8)</sup>は20~40°Cの温度範 囲で実験し、含水率変化量に対する補正を行うと、クリープの温度による影響は見られないとの報告をし ている。有馬<sup>40</sup>は熱板温度を変えてクリープと内部温度や含水率変化との関係を検討し、熱板温度が異な る場合も、同じ含水率変化に対してはほぼ同量のクリープが生じると述べている。また、別の報告<sup>38)40</sup>で は高温になると乾燥初期にクリープの増大が見られるなどの指摘もある。しかし、これらの報告はいずれ も木材の強度的性質が温度によって変化することについては、特にふれていない。したがって、温度上昇 が直接的にクリープの増大に寄与したのか、あるいは温度上昇による木材の強度低下がクリープの増大に 寄与したのかは判断しにくい。

温度の高低の他,温度非平衡状態でクリープが増大することについては、2,3の報告がある。北原ら40 はこれを飽水材の曲げで、SCHNIBWIND<sup>8)</sup> は高含水率材の引張りで、また有馬40 は飽水材の圧縮で、いずれも温度の上昇がクリープの増大を促すと報告している。しかし、これらはいずれも飽水材あるいは繊維飽和点以上の高含水率材について検討されたものである。そのため含水率および温度が同時に変化するいわゆる含水率・温度非平衡状態においては、温度上昇がクリープ増大にどのていど効果があるか不明であるが、効果の有無ならびにその大きさについては検討する必要があると考えられる。

既往の報告からはクリープにおよぼす温度の影響はいくつかの因子の交互作用によっていると考えざる を得ない。しかし、現在のところ温度の影響については、これまでに述べたように多くの問題が疑問のま ま残されている。

## 第2章 一定荷重下の木材の収縮挙動

木材に一定荷重を与えながら乾燥すると、材の収縮は無負荷の場合に比べて変化する。荷重が引張りの 場合は収縮ひずみが無負荷材の収縮ひずみよりも減少し、圧縮の場合は逆に増加する。この収縮ひずみの 減少または増加分は、乾燥過程で荷重を与えていたことによって生じた長さの差で、これは一種のクリー プひずみと考えることができる。したがって、乾燥過程のクリープひずみを引張りまたは圧縮で論ずるに は、まず応力の作用によって木材の収縮ひずみがどのように変化するかを調べる必要がある。一方、収縮 ひずみは本来含水率状態によって変化するものであるため、無負荷試片と負荷試片の収縮ひずみの差から クリープひずみを求めるためには、両試片の含水率は等しいことが不可欠であり、これが異なる場合は含 水率差に起因する両試片のひずみの差が、そのままクリープひずみの誤差になる。

このような観点から既往の研究結果をながめてみると、無負荷試片と負荷試片との含水率に着目し、こ れを実験的に少なくすることや、測定されたデータを補正して用いることに重点を置いた報告は意外に少 ない。多くの報告は両試片を同一空気条件の下で乾燥することによって、両試片が同様な乾燥経過を辿る ものとしているが、通常両試片の間には乾燥過程の各時点でかなりの含水率差があるものと考えられる。 このようなデータを用いる場合は、含水率に対する何らかの補正が必要である。 そのため、本章では乾燥過程で引張りまたは圧縮クリープを論ずるのに、どのような方法で収縮ひずみ を求めるのが適当かを検討し、それに従って行った常温における実験結果を示した。なお、本章で示した 実験結果は第3章でクリープにおよぼす応力の影響ならびに含水率の影響を検討する際に用いるためのも のである。

## 2.1 引張り応力下の木材の収縮経過

木材に引張り荷重を与えて乾燥すると材の正常な収縮は阻止され、荷重を与えない場合に比べ、収縮ひ ずみが減少する。引張り応力下の木材の収縮経過については、すでにいくつかの報告があるが<sup>5)44)47)49)</sup>, 多くの報告は収縮ひずみの経時変化のみを示していて、収縮ひずみと含水率との関係についてはほとんど ふれられていない。無負荷試片と負荷試片とが同じ含水率減少経過を辿れば、両試片の収縮ひずみを時間 に対してプロットした図からクリープひずみを読み取ることができるが、通常は引張りチャックの有無や 試験材の個体差などによってこのような条件を作ることは困難である。したがって、乾燥過程の引張りク リープについてに論じるには、実験方法や実験結果の処理について何らかの適当な方策を講じ、応力下の 木材の収縮ひずみと含水率との関係を正しく把握することが、必要であると考えられる。

ここでは、応力下の木材の収縮ひずみの変化を正確に測定することと、収縮ひずみと含水率との関係を できる限り正しく把握することを目標として行ったマカンバおよびヒノキ材の常温における実験につい て、実験上の問題点と実験結果について述べる。

2.1.1 実験方法

(a) 供試材および試験片

供試材はマカンバ (Betula maximowicziana RBG.) とヒノキ (Chamaecyparis obtusa SIBB.) で, 全 乾比重はそれぞれ0.64~0.67, 0.35~0.36である。乾燥過程の引張りクリープ実験では,各試片の収縮や 乾燥性に関する特性が異なると,安定したクリープ曲線を得ることがむずかしい。そのため,ここでは木 取り位置による材質の違いが少ない材を選ぶことにし,広葉樹材ではマカンバ,針葉樹材ではヒノキを選 んだ。

試験片の製作にあたってはまず樹心からの距離が半径の60~80%の位置から採取した板目材を、鉋仕上



Fig. 1. 試験片の形状 Shape and dimensions of specimen. T:接線方向 Tangential direction, R:半径方向 Radial direction, L:繊維方向 Longitudinal direction. げして厚さ10mm,幅110mmにし、これ を繊維方向長さ5mmに丸鋸で切断した。 試験片の形状をFig.1に示す。

乾燥過程の引張りクリープに関する既往 の報告では,種々の形状の試験片が使われ ている<sup>8)47)~49)</sup>。水分傾斜の影響を少なくす るためには,厚さは出来る限り薄くするこ とが望ましいがあまり薄くすると,木材と しての本来の強度特性が保てなくなる。し たがって,試片厚さは適当な値を選択する 必要がある。Table1は試片厚さが異なる 場合の横引張り強度試験の結果であるが, 試片が薄くなるとヤング係数は低下し,最

試 験 片 厚 さ Thickness of specimen (mm)		最大引張り強さ Ultimate tensile strength (kg/cm <sup>2</sup> )	最大ひずみ Maximum strain (%)	ヤング係数 Youwg's modulus (×10 <sup>8</sup> kg/cm <sup>9</sup> )	比例限応力 Stress at propotional limit (kg/cm <sup>2</sup> )	比例限ひずみ Strain at propotional limit (%)	
2	平均	Mean	52.2	2.3	4.94	20.7	0.42
	範囲	Range	(51.3-53.5)	(2.0—2.5)	(4.80-5.08)	(18.8—22.2)	(0.380.46)
3	平均	Mean	53.8	2.2	5.17	19.6	0, 38
	範囲	Range	(52.7—55.1)	(2.02.6)	(4.99-5.37)	(16,6—22,5)	(0.33-0.44)
5	平均	Mean	53.2	2,1	5.29	18.5	0.35
	範囲	Range	(51.9-54.7)	(1.9—2.6)	(5,10-5,47)	(15, 4-21, 1)	(0.29—0.40)
7	平均	Mean	53.0	1.7	5.66	20.8	0, 37
	範囲	Range	(50.0-55.3)	(1.5—1.9)	(5, 53-5, 96)	(16,9—23,3)	(0.30—0.42)
20	平均	Mean	55.7	1.9	5.64	17.5	0, 31
	範囲	Range	(55.1-57.1)	(1.8—2.3)	(5.14-6.30)	(14, 1-21, 3)	(0.260.41)

Table 1. 接線方向の静的引張り強度におよぼす試験片厚さの影響 Effect of thickness of specimen on static tension test perpendicular to the grain.

樹 種:マカンバ Species:Makanba 試験片:IIS 刑 接線方向

試験片: JIS 型, 接線方向, 生材 Specimen: JIS type, tangential direction, green 試料数:8 Number of samples:8

大ひずみは増加する傾向が見られる。これは繊維方向が短かいため、横方向の引張りに対して細胞が形状 変化を起こし易くなっているためと考えられる。試片厚さは約5mm以上あれば、JIS に準拠した20mm 厚さの試片とほぼ同等な強度が得られる様である。

そこで、少なくとも繊維方向に2細胞長を含むこと なども考慮して、試片厚さは5mmとした。

(b) 実験装置と実験方法

実験に用いた装置は Fig. 2 に示すレバー式の定 荷重試験装置で,分銅により上下対のチャック間に 一定引張り荷重を与えることができる。実験はこの 装置を温度 20±0.3℃,関係湿度 55±1.5% (平衡 含水率10%)の恒温恒湿室内に設置して行った。人 工乾燥で一般的に用いる温湿度条件はこれとは異な るが,温度別の実験は第3章で示すことにし,ここ では標準的な収縮ひずみ経過を各応力下で求めるこ とを目的とした。実験条件の選択にあたっては実験 中の含水率変化を生材から10%付近とすること,平 衡含水率を極端に低くしないことなどを考え,標準 として予想される平衡含水率が10%の温湿度条件を



Fig. 2. 引張りクリープ試験用装置 View of experimental apparatus for tensile creep test.



Fig. 3. 光学式ひずみ計 Apparatus for strain measurement. 1. 試験片

Test specimen 2. 標点ピン Mark of pin



Fig. 4. 誘電式変換器を用いたひずみ計 Electrical strain meter using inductive displacement transducer.

選んだ。

実験は生材状態で試片の接線方向に一定引張り荷重を与え、その後一定期間収縮ひずみおよび含水率が 変化する経過を調べた。各試片は実験開始後約30時間で含水率変化がきわめて小さくなるため、一応平衡 状態に近いものと考え、この時点で荷重を除去した。除荷後は一定期間(約170時間)同一空気条件下に 放置して、除荷後の収縮ひずみや含水率の変化を調べた。これはクリープひずみの回復性を調べるため行 ったものである。

(c) 収縮ひずみの測定方法

収縮ひずみの測定は,乾燥過程では試片の長さ方向(荷重方向)のみとし,荷重を除去した直後および 一定期間放置後に試片の各方向の収縮ひずみを測定した。

乾燥過程での収縮ひずみ測定には Fig. 3 または Fig. 4 のひずみ計を用いた。Fig. 3 のひずみ計は読 取顕微鏡方式で,30mm間隔に打ち込んだ2つの標点ピンの距離の移動量を読みとるものである。この方 式は読取精度が約5/1000mm (0.02%) と優れているが,長時間にわたって測定値を得ようとするとかな り大変である。そのため、これはマカンバの収縮経過の測定のみに用い、他は Fig. 4 の電気的なひずみ 計によった。このひずみ計は小型の差動トランス(HBM社製W1E/5)を応用したもので,測定精度は 約 2/100mm (0.07%) である。

除荷後および一定期間放置後の収縮ひずみ測定は、長さ方向については、試片中央部に40mm間隔で打ち込んだ虫ピンの頭を切り取って標点とし、その距離の移動量を精度 1/1000mm の工具顕後鏡で測定することにより行った。試片幅方向(荷重方向に直角な2方向)の収縮ひずみの測定には、精度 1/100mm



Difference of moisture content between the loaded specimen and the control specimen.

- 負荷試片の中央部分の含水率
   Moisture content at the middle portion of loaded specimen.
- ダミー試片の平均含水率
   Average moisture content of control specimen.

のスクリューマイクロメーターを用いた。

(d) 含水率の測定方法

含水率の測定は負荷試片の中央部の含水率を直接測定するのが望ましいが、精度の良い測定方法がない ため、負荷試片に隣接した部分から取ったダミー試片の重量減少を測定して含水率経過を求め、これから 負荷試片中央部の含水率を推定する方法をとった。いくつかの報告ではダミー試片と負荷試片との含水率 経過を等しいものとしているが、特別な処理をしない限りダミー試片の乾燥は早くなり、負荷試片はチャ ック部分の乾燥の遅れによって試片中央部の乾燥が遅れるように思われる。 Fig. 5 はダミー試片と負荷 試片中央部の含水率を全乾法により比較したものであるが、常に負荷試片中央部の含水率が高い。そのた め、ここではあらかじめ両者の差を補正する表を樹種ごとに求めておき、ダミー試片の含水率経過から負 荷試片の含水率経過を求めるのに用いた。

2.1.2 実験結果と考察

短冊型試片の長さ方向(接線方向)に一定引張り荷重を与えて乾燥し,試片の長さおよび含水率の変化 を測定した。Fig. 6, Fig. 7 はそれぞれマカンバ材とヒノキ材の測定結果である。長さの変化は荷重を 与える前の試片の長さ,すなわち生材試片の長さを基準として,それからのひずみの変化で示し,これを 収縮ひずみと呼ぶことにした。

生材状態で荷重を与えると,試片は荷重に応じて一定量だけ伸びる。その後は,荷重の小さな試片には 一時期ほとんど長さの変化が見られないが,荷重の大きな試片には負荷直後から伸びの増加がおとる。負



Fig. 6. 引張り荷重下で乾燥した試片の収縮ひずみと含水率の経過(マカンバ) Dimensional changes and moisture content changes as a function of drying time for the makanba samples dried from green condition under constant tensile stresses.

荷後伸びの増加がおこるのはマカンバでは約19~24kg/cm<sup>2</sup> 以上,ヒノキでは約15~20kg/cm<sup>2</sup> 以上の 荷重を与えた場合である。これは比例限以上の荷重を与えたことによって,塑性流動変形が生じたためと 考えられる。

乾燥が進み,含水率が低下するにつれて試片は収縮しようとするが,引張り荷重が与えられているとと によって試片の収縮は抑制され,無負荷試片に比べ収縮ひずみが減少したまま乾燥が進行する。各樹種と も荷重が大きくなるに従って収縮が抑制される度合は強まり,30時間後の乾燥がほぼ終了する時点での収 縮ひずみは,荷重が大きいほど小さくなる。そしてマカンバでは約30kg/cm<sup>3</sup>以上,ヒノキでは約17 kg/km<sup>3</sup>以上の荷重を与えると,収縮ひずみは0以下の値を示すようになる。

実験中に試片に与える荷重をさらに大きくしていくと、途中で試片に破壊が生じるようになるが、その 限界荷重はマカンバでは約 35kg/cm<sup>3</sup>、ヒノキでは約 20kg/cm<sup>3</sup> 付近と思われる。この荷重の大きさを 生材の静的引張り強さに対する応力レベル(百分率)で示すと、それぞれマカンバは約66%、ヒノキは約 78%に当る。

荷重0の時の収縮ひずみの変化は、通常の収縮曲線を示すわけであるが、 Fig. 6 のマカンバでは含水 率で約65%付近から収縮が始まり、Fig. 7 のヒノキでは約37%付近から収縮が始まる。荷重が大きくな ると、収縮ひずみ曲線は位置が全体として右側にずれ、収縮が遅れておこったような挙動を示す。また、 マカンバでは29.2kg/cm<sup>3</sup> 以上の荷重を与えた時、途中で収縮ひずみ曲線にみだれが生ずる。これらは

- 42 ---



Fig. 7. 引張り荷重下で乾燥した試片の収縮ひずみ含水率の経過 (ヒノキ) Dimensional changes and moisture content changes as a function of drying time for the hinoki samples dried from green condition under constant tensile stresses,

いずれも含水率減少に もとづく木材の収縮と,引張り荷重による クリープ とが複合して現れた現象である。

除荷時は瞬間的に弾性回復が生じ、その後無負荷で放置する間に収縮ひずみは徐々に増加する。除荷時 期は含水率変化がほとんど無くなった時期とするのが望ましいが、実際は長期間にわたって徐々に減少す るため負荷期間を相当長くしても除荷後の含水率変化を避けることは出来ないと思われた。そのため、負 荷は30時間で打ち切った。

含水率変化はここではマカンバ,ヒノキとも1曲線のみ示されているが,これは応力別に行った各実験 の含水率減少曲線を1つのグラフ上にプロットし,この図から各樹種の平均的な含水率経過を求めたもの である。

乾燥過程のクリープ現象は木材の含水率変化と対比して論じられるべき問題であり、その意味で基とな る荷重下の収縮ひずみと含水率との関係は、正しく測定されることが大切である。しかし、既往の多くの 報告はこの点に関する配慮が不足していると考えられる。本報では、収縮ひずみと含水率との関係を求め るのに次の方法をとった。負荷試片中央部の含水率経過の求め方は、すでに含水率の測定方法の項で述べ たとおりであるが、実験データーの処理にあたっては、まず1回の実験ごとに収縮ひずみと負荷試片中央 部の含水率との関係を1枚のグラフにプロットし、この図から両者の関係を読み取る方法をとった。

Fig. 8 および Fig. 9 は このような方法で求めた マカンバとヒノキの収縮ひずみと含水率との関係で ある。収縮ひずみと含水率との関係は、マカンバでは含水率約20%以下、ヒノキでは約25%以下でほぼ直 線関係に近いが、全体としては上に凹の曲線を示している。含水率20~25%以上の高含水率域において収

- 43 -



Fig. 8. 引張り荷重下で乾燥した試片の収縮ひずみと含水率との関係 (マカンパ) Relationship between dimensional changes and moisture content for the makanba samples dried from green condition under constant tensile stresses.





縮ひずみと含水率とが曲線関係を示すのは, 試片内の含水率傾斜によるものであるが, こ れをなくすには乾燥速度を大幅に遅くしなけ ればならない。しかし,その場合は平衡含水 率が高くなり,適当な乾燥スケジュールを用 いない限りクリープ実験中の含水率変化の幅 を大きくとることができなくなる。

この種の実験では水分傾斜の影響を少なく しようとして薄い試験片を用いたり、含水率 変化の幅を小さくしたりする手法が用いられ るが、この場合はいずれも次のような問題が 残る。試験片厚さはある程度実大材の強度特 性を保つこと、含水率変化幅は生材から含水 率15%付近までをカバーすることなどが、 木材乾燥におけるクリープを論ずる上ではや はり必要なことであると思われる。

#### 2.2 圧縮応力下の木材の収縮経過

木材に圧縮荷重を与えて乾燥すると、木材の収縮は圧縮荷重によって助長され、引張りの場合とは逆 に収縮ひずみが増加した状態で乾燥が終了する。圧縮荷重を与えて乾燥した木材の収縮経過について、 PBRKITNY<sup>86)</sup>は接線方向に、また大草<sup>30</sup>、有馬<sup>88)</sup>らは半径方向に荷重を与えた実験結果を報告している。木 材乾燥において圧縮クリープが問題になるとすれば、応力転換前の内層部に圧縮応力が作用している時期 と、応力転換後の外層部に圧縮応力が作用している時期であるが、前者は内層部の含水率がまだ繊維飽和 点以上であり、後者は外層部の含水率がすでに相当低くなっていることから、いずれも水分非平衡による クリープ増大現象はこの時期には考慮する必要がないように思われる。その意味で木材乾燥の分野では圧 縮荷重下のクリープが直接、実務的な現象と結びつくことは少ないかもしれないが、本報では水分非平衡 下のクリープを引張りと圧縮で比較し、どのような相違があるかを確かめる目的でこの実験を行った。

以下に、常温における圧縮荷重下の収縮ひずみの経時変化、ならびに収縮ひずみと含水率との関係について述べるが、これらはいずれも第3章で乾燥過程のクリープについて論じる際に用いるためのものである。

2.2.1 実験方法

圧縮応力下の実験はマカンバについてのみ行った。試片形状は断面を引張りの場合と同じく10mm(半 径方向)×5mm(繊維方向)とし、高さを20mm(接線方向)とした。供試材の全乾比重は0.69~0.71, 生材時における接線方向の圧縮ヤング係数は約5.3×10<sup>8</sup>kg/cm<sup>2</sup>であった。

実験に用いた装置は引張り試験に用いた装置と同じ定荷重試験装置であるが、今回はこれに Fig. 10 に 示すカゴ型の治具を取りつけ、試片に一定圧縮荷重を与えた。実験中の温湿度条件は温度 20±0.3℃、関 係湿度 55±1.5% とし、実験方法はほとんど引張り試験に準じた。ただし、この実験では圧縮荷重を与え るのに圧盤上に4個の試片を2個ずつ向かい合わせにして直交方向に対象的に配置し、4試片全体に荷重

を与えるようにした。これは予備実験で,この方法 が最も安定した圧縮荷重を試片に与えることが出来 たためである。このような断面形状の小さな試片に 対しては,一般的な1試片を圧盤上に置いて圧縮荷 重をかける方法では,正しい圧縮荷重を与えること は難しいように思われる。

収縮ひずみの測定は乾燥過程では4試片中,1試 片のみとし,試片中央部に打ち込んだ2つのピンの 標点距離の変化を写真撮影により測定した。また, 4試片にはすべて写真撮影用とは別の虫ピンによる 標点を打ち込み,除荷直後および約200時間後の収 縮ひずみ測定に用いた。打ち込んだ標点ピンの間隔 はいずれも約10mmである。

標点ピンの写真撮影は モーター ドライブ式 の 35 mmカメラにマイクロニッコール55mmレンズを逆 方向に取りつけ,一定時間間隔で自動的に行った。



# Fig. 10. 圧縮クリープ試験の治具, 試片, ひずみ測定部分の様子

View of the loading jig, samples and lens of camera for strain measurement used in compressive creep test. 撮影倍率は約2.5倍である。ひずみはフィルム上に写された2つの標点の距離の移動量を精度1/1000mm の工具顕微鏡で読み取る方法をとった。この写真撮影方式による総合的な収縮ひずみの測定精度は約0.08 %以下であった。

含水率の測定は、引張り試験と同じくダミー試片の重量減少を小型のロードセルによって測定し、これ から負荷試片中央部の含水率を推定する方法をとった。圧縮の場合、引張りチャックのようなつかみ部分 がないため、ダミー試片と負荷試片との含水率差は少ないかと思われたが、負荷試片を狭い圧盤上に4個 置いた事や、近くに治具やひずみ測定装置がある事などによって空気の流れがさまたげられ、むしろ引張 りの場合より大きな含水率差が生じた。

2.2.2 実験結果と考察

木材に圧縮荷重を与えながら乾燥すると、収縮ひずみは荷重を与えない場合に比べて増大する。マカン バ材を用いて実験した結果は Fig. 11 に示すとおりである。

各試片には初め時間0で各圧縮応力に応じた初期ひずみが生じ,その後は約1~2時間の間ほぼ一定値 を保つ。3~4時間後含水率が繊維飽和点付近に達すると収縮ひずみの増加は激しくなるが,やがて含水 率が外周空気の平衡含水率に近づくにつれ収縮ひずみの増加は少なくなり,それぞれの応力に応じた一定 の値に近づく。除荷時は瞬間的に伸びが生じるため収縮ひずみは減少する。その後の放置期間中は,初め のうち収縮ひずみは大きく減少するが,続いて除々に増加または減少しながら一定値に近づく。負荷応力 が小さかった試片は放置期間中に収縮ひずみが増加する傾向にあり,負荷応力が大きかった試片は減少す る傾向にあるが,これは含水率が除荷後もわずかづつ減少したため,含水率減少による収縮ひずみの増加 と、クリープ回復による収縮ひずみの減少とがかさなって生じた現象である。

実験で用いた荷重は最大 31.1 kg /cm<sup>2</sup> であるが、 圧縮ではこれ以上の相当大きな荷重を与えても試片



Fig. 11. 圧縮荷重下で乾燥した試片の収縮ひずみと含水率の経過(マカンバ) Dimensional changes and moisture content changes as a function of drying time for the makanba samples\_dried from green condition under constant compressive stresses.



Fig. 12. 圧縮荷重下で乾燥した試片の収縮ひずみと含水率との関係(マカンバ) Relationship between dimensional changes and moisture content for the makanba samples dried from green condition under constant compressive stresses.

が破壊することはないので,実験した荷重範囲内で一応の傾向は把握できると考え,これ以上の荷重を与 えた実験は行わなかった。

圧縮荷重下の収縮ひずみと含水率との関係を求めるには、引張りの場合と同様のデータ処理方法をとっ た。その結果は Fig. 12 に示すとおりである。圧縮の場合、収縮ひずみはすべて正の側にあり、負荷応力 の増加につれてほぼ比例的で単調な増加傾向を示す。引張りと圧縮を比較して、やや異なるのは生材から 含水率約40%付近までの収縮ひずみの挙動である。圧縮の場合は各応力ともこの間の収縮ひずみの変化が 少ないが、引張りの場合は負荷応力の大きな試片で収縮ひずみが負荷後大きく減少する傾向が見られる。 この時期はまだ含水率が高く、一般的な考え方からすれば、収縮ひずみの変化は水分平衡下のクリープに よるものと考えられる。

2.3 要約

木材試片に一定引張り荷重または一定圧縮荷重を与えながら乾燥し,収縮ひずみと含水率の変化につい て検討した。乾燥過程のクリープひずみを引張り荷重下または圧縮荷重下で求めるためには,まず各荷重 下の収縮ひずみについて測定し,これらと無負荷試片の収縮ひずみとの差からクリープひずみを計算によ り求めることになる。そのため,各荷重下および無負荷の収縮ひずみは,同一含水率の時の収縮ひずみが わかるように測定結果が求められていることが必要である。本章では特にこの点に重点を置き,実験の進 め方や実験データの処理方法について詳しく述べた。本章で取り扱ったのは常温 (20°C) における実験の みであるが,基本的な考え方は次章以後の他の温度の実験についても同様である。

常温の実験で得られた結果を要約すると次のようである。

引張り荷重を与えた実験では、荷重が大きくなるにつれて試片の収縮が抑制される度合は強まり、マカンバでは約30kg/cm<sup>2</sup>、ヒノキでは約17kg/cm<sup>2</sup>以上の荷重を与えると、乾燥終了時の収縮ひずみが0以下の値を示すようになる。荷重をさらに大きくしていくと試片は実験の途中で破壊するが、その時の応力

レベルを生材の静的引張り強さに対する百分率で示すと、マカンバは約66%、ヒノキは約78%である。収 縮ひずみと含水率との関係はマカンバ、ヒノキとも含水率約20%以下ではほぼ直線に近いが、収縮ひずみ の増加は繊維飽和点以上のかなり高含水率時期から始まり、全体としては上に凹の曲線を示している。

圧縮荷重を与えた実験では、荷重が大きくなるにつれて試片の収縮が助長され、乾燥終了時の収縮ひず みは大きな値を示すようになる。ただし、収縮の場合は荷重を相当大きくしても試片に破壊が生じること はないと思われる。収縮ひずみと含水率との関係は、引張りの場合と同じく、含水率約20%以下ではほぼ 直線に近く、全体としては上に凹の曲線を示している。

# 第3章 乾燥過程の木材のクリープにおよぼす諸因子の影響

乾燥過程のクリープに影響をおよぼす主要な因子として,応力,含水率,温度が考えられ,これについ てはすでに第1章で既往の研究結果と不明のまま残されている問題点について述べた。木材乾燥では損傷 の発生が木材の接線方向における強度的あるいは粘弾性的性質と密接な関係があることから,本報ではま ず既往の繊維方向の研究結果が木材の接線方向に関しても成り立つかどうかを検討した。そして,いくつ かの不明な点については,これを実験により確かめようと考えた。以下,各因子の影響を応力,含水率, 温度,その他の4つの項に分けて検討する。なお,この中で一部の実験データは前章における実験結果を 変換して用いている。

各論に入る前に、ここで本章ならびに次章で用いる乾燥過程のクリープやセットに関するる用語を一括 して定義することにする。これは乾燥過程でクリープやセットを論ずる際には、試料の収縮による原寸法 の変化や、含水率低下によるヤング係数や強さの変化が入ってくるため、一般的な用語が用いにくいため である。乾燥過程の木材のクリープ曲線の一般的な形は Fig. 13 に示すようなもので、上の図はひずみ





Schematic curves of strain and creep compliance shown as a function of time.

- ε(0), J(0):初期ひずみ,初期弾性コンプライアンス Initial strain and initial elastic compliance.
- s(t). J(t):負荷期間におけるひずみ、クリープコン
   プライアンス
   Strain and creep compliance while

the stress was applied.

 $\varepsilon_c(t_o), J_c(t_o)$ :除荷直後のひずみ、クリープコンプライ アンス Strain and creep compliance imme-

diately after the stress was released.

se, Je:瞬間弾性回復成分 Instantaneous recoverable component.

er, Jr:遅延回復成分

Retarded recoverable component. ɛ₃, J₂: 非回復成分すなわちドライングセット

Unrecoverable component i.e. drying set.

- 48 --

(Strain)の変化を示し、下の図はこれをクリープコンプライアンス (Creep compliance) に変換した場合を示している。

 $\epsilon(0)$ は荷重を与えた時に生じる瞬間弾性ひずみであり、J(0)は瞬間弾性コンプライアンスである。時間が経過して乾燥が進むにつれひずみは増加し始めるが、やがで t 時間後一定の値に漸近する。本報では この間のひずみを示すのに時間の関数である  $\epsilon(t)$  および J(t) を用い、これらを全ひずみおよび全クリ ープコンプライアンスと呼ぶことにする。 $\epsilon(t)$ 、J(t)には瞬間弾性ひずみ成分が含まれているが、一般に はこの値を差し引いたものを負荷期間中におけるクリープひずみ、あるいはクリープコンプライアンスと している。 $\epsilon(0)$  は負荷時の瞬間弾性ひずみで、 $\epsilon_e$  は除荷時の瞬間回復ひずみであるが、含水率変化のな い一般のクリープでは $\epsilon(0)$  と  $\epsilon_e$  とは同じである。したがって、クリープひずみは $\epsilon(t) - \epsilon(0)$  としても、  $\epsilon(t) - \epsilon_e$  としてもどちらでも良い。しかし、乾燥過程のクリープでは含水率減少によって瞬間弾性ひずみ 成分の大きさが時々刻々と変化するため、これを分離して考えることはできない。そのため、本報では負 負荷期間中あるいは除荷後のひずみをいずれも単に「ひずみ」と呼ぶことにし、記号によって区別するこ とにした。

第4章では乾燥過程のクリープによって生じたひずみの除荷後のひずみ経過について論ずるが、その際 に用いる用語および記号は次のとおりである。

除荷時は瞬間的にひずみが減少するが、除荷直後の残留ひずみに対しては  $\varepsilon_c(t_o)$  の記号を用い、これに 対応するクリープコンプライアンスには  $J_c(t_o)$  の記号を用いる。瞬間弾性回復ひずみには  $\varepsilon_e$ ,残留ひず みのうち一定期間放置する間に回復するひずみには  $\varepsilon_r$ ,回復しないひずみには  $\varepsilon_s$ の記号を用い、これに 対応するクリープコンプライアンスにはそれぞれ  $J_e$ ,  $J_r$ ,  $J_s$ の記号を用いる。

ドライングセットは乾燥過程で生じたひずみが除荷後も回復しないで、いわばひずみが固定される現象 をさすため、本報では除荷後一定期間放置しても回復しないひずみ *ε*。をセットひずみと呼ぶことにする。

## 3.1 応力の影響

応力の種類には引張り、圧縮、せん断、曲げ、ねじりがあるが、このうち木材乾燥の分野では接線方向 に引張り応力が作用する時のクリープ現象が、乾燥応力や損傷の発生に関連して特に注目される。しか し、乾燥過程のクリープを接線方向の引張りで検討した報告例は比較的少なく<sup>8)29)</sup>、多くは曲げあるいは 半径方向の引張りで報告している。前に指摘したように、既往の研究結果からはクリープにおよぼす応力 の影響は比例的であるように思われるが<sup>2)3)23)24)34)35)、いくつかの報告ではこれと異なる結果も得られて いる<sup>7)8)36)~38)</sup>。そこで、本報では接線方向の引張りクリープについて、これを確かめてみることにした。 実験にあたっては、ひずみの測定精度に重点を置き、特にひずみの発生経過を出来るかぎり正確に把握す ることを目標にした。</sup>

また,ここでは1樹種で圧縮荷重の影響をとり上げたが,これは引張りと圧縮で応力の影響がどのよう に違うかを調べるために行ったものである。引張りと圧縮との比較を行っておくことは,既往の曲げによ る実験結果を分析する上で必要なことであると思われる。

3.1.1 実験方法

乾燥過程のクリープひずみを引張りまたは圧縮荷重下で求めるためには,まず各種荷重下で乾燥した木 材の収縮ひずみを調べる必要があるが,これはすでに第2章で示した通りである。ここでは第2章の実験 結果を分析することによってクリープにおよぼす応力の影響を検討した。実験方法は前に詳しく述べたの で省略するが、要点は次のようである。

供試材は引張りではマカンバとヒノキの2樹種を用い,圧縮ではマカンバのみを用いた。乾燥条件は温度20°C,関係湿度55%で、これは平衡含水率表による推定平衡含水率が約10%の乾燥条件である。実験で用いた荷重の範囲はマカンバの引張りでは0~38.8kg/cm<sup>2</sup>,ヒノキの引張りでは0~23.5kg/cm<sup>2</sup>,マカンバの圧縮では0~31.1kg/cm<sup>2</sup>である。

3.1.2 実験結果

接線方向に一定の引張りまたは圧縮荷重を与えて乾燥した木材の収縮ひずみ経過は,第2章でFig. 6, Fig.7 および Fig.11 に示した。Fig. 6 はマカンバの引張り荷重下の収縮ひずみを時間の関数で示した ものであり,Fig.7 はヒノキの引張りについて,また Fig.11 はマカンバの圧縮について同様の関係を 示したものである。乾燥過程のクリープひずみは無負荷で乾燥した木材と荷重を与えて乾燥した木材との 収縮ひずみの差と考えることができるため、これを Fig. 6,Fig.7,Fig.11 の各図から求めると,Fig. 14~Fig.16 の各クリープ曲線が得られる。ただし,Fig.16 の圧縮の場合は引張りと同じ方法でひずみ を求めると,ひずみが負の値となるため、ここでは逆符号の正の値で示した。したがって,引張りでは無 負荷試片に対する負荷試片の収縮ひずみの減少分が正のひずみとして示され、圧縮では無負荷試片に対す る負荷試片の収縮ひずみの増加分が正のひずみとして示されている。

Fig. 14 のマカンバのひずみ経過を見ると、負荷後3~4時間はひずみの変化が比較的少ないが、その後はひずみの増加が著しくなり、これは負荷後10時間を経過するころまで続く。ひずみの増加が顕著な時



Fig. 14. 各種引張り応力下のクリープならびに除荷後の回復経過(マカンバ) Creep and recovery plotted against time and moisture content changes for the makanba samples during the creep tests under different stress levels in tension.

- 50 -



Fig. 15. 各種引張り応力下のクリープならびに除荷後の回復経過 (ヒノキ) Creep and recovery plotted against time and moisture content changes for the hinoki samples during the creep tests under different stress levels in tension.





期は含水率では約30%から15%くらいまでの時期である。約10時間経過後はひずみの増加は鈍り、やがて 一定の値に近づく傾向が見られる。この実験では負荷を30時間で打ち切ったが、Fig. 14 を見るとひずみ はまだ少しずつ増加しているため、負荷期間はもう少し長くとった方がよかったようにも思われる。除荷 時にはひずみは瞬間的に減少するが、その後無負荷で放置する間にもひずみは さらに 少しずつ減少を続 け、やがて一定の値に近づく。

Fig. 15 はヒノキのひずみ経過を示したものであるが、マカンバの場合よりもひずみの増加は早い時期 から始まり、比較的長い間にわたって除々に増加していっている。マカンバとヒノキではひずみの大きさ (最大値)が異なるが、これは樹種によるクリープ特性を表わしていて、ひずみの大きさは与え得る荷重 の最大値や、無負荷試片の収縮量とも関係が深い。

Fig. 16 はマカンバの圧縮におけるひずみ経過を示したものであるが、比較のため同図中に Fig. 14 の 引張りの結果の一部を破線で示した。圧縮と引張りを比べると応力が 19.3kg /cm<sup>2</sup> 以下 では ひずみの発 生経過はほぼ等しい。しかし、応力がそれより大きくなると、特に含水率が平衡状態に近くなってから、 圧縮クリープにおけるひずみの増加が著しくなる。

応力レベルが異なるクリープ曲線を比較するには、ひずみを応力で除したクリープコンプライアンスに よるのがわかり易いが、Fig. 17~Fig. 19 は Fig. 14~Fig. 16 の中から主な荷重レベルのものを選ん で、これをクリープコンプライアンスに変換して示したものである。また、次のTable 2~Table 4 は各 時刻におけるひずみの推移をクリープコンプライアンスの値で示した表である。

引張りクリープについてみると, Fig. 17 のマカンバではクリープ曲線の形が応力レベルによって多少 異なる。応力レベルが小さい場合はクリープ曲線はほぼ同じ形を示し,クリープコンプライアンスにおよ ぼす応力の影響はないように思われるが,応力が 29.2kg/cm<sup>3</sup>以上になると,負荷後3~4時間までの クリープコンプライアンスが大きな値を示す。10~30時間におけるひずみは応力レベルが低いものほど多 少大きくなる傾向が見られるが,あまり明確ではない。むしろ応力レベルが異なっても大きな差がないと 考えた方が良いように思われる。Fig. 18 はヒノキのクリープ曲線であるが,この場合も実験の初期にお



Fig. 17. 引張り応力レベル別のクリープコンプライアンス (マカンバ) Effect of tensile stress levels on creep compliance during drying for makanba.



いてはマカンバと同様に応力レベルが高いほどクリープコンプライアンスが大きくなる傾向が示され、最 終の値については応力レベルによって大差がない傾向が示されている。実験初期のクリープコンプライア ンスが応力レベルが高い場合に大きくなることは、一般の静的な引張り試験における応力一ひずみの関係 から考えてうなずける内容であるが、初期のクリープコンプライアンスが大きいにもかかわらず、最終の クリープコンプライアンスが大きくならないことは、一般的なクリープ現象とは異なり、乾燥過程の引張 りクリープの大きな特徴であると思われる。

圧縮クリープについては Fig. 19 にマカンバの実験結果を示したが、圧縮の場合は引張りで見られたような実験の初期におけるクリープコンプライアンスの増大はこの応力範囲内では認められない。しかし、

あり	応力レベル³ን	クリープコンプライアンス Creep compliance $J(t)$ (×10 <sup>-3</sup> cm <sup>2</sup> /kg)						
/// /J	Stress <sup>a</sup> )						/ ¤g /	
Stress	level	时间 Time <sup>0,1hr</sup>	1hr	5hr	10hr	30hr	30hr <sup>b)</sup>	200hr <sup>b</sup> )
(kg/cm²)	(%)	含水率 76% M.C.	69%	29.0%	15,5%	13.4%	13.4%	12.6%
4.8	9	0.21	0.23	0.52	1.69	1.77	1.65	1.54
9.7	18	0.22	0,23	0,57	1.57	1.75	1.65	1.59
14.4	27	0.22	0,23	0, 59	1.58	1.72	1,61	1.33
19.3	36	0.22	0.24	0.53	1.40	1.62	1.52	1.34
24.1	45	0.23	0.27	0.57	1.44	1.62	1.51	1.41
29.2	55 .	0.26	0.32	0.59	1.37	1.55	1.45	1.33
32,0	60	0.27	0.36	0.65	1.52	1.68	1,57	1.42
33, 8	64	0.29	0.41	0.70	1.48	1.67	1,56	1.40
35.8	67	0,28	0.39	(0. 40, 1	oreak at	1.5hr)		
38.8	73	0.35	(0.45,	break at	: 0.4hr)			

Table 2. 各種引張り応力下のクリープコンプライアンス (マカンバ) Creep compliance for the makanba samples during drying under different tensile stresses.

a) 生材の引張り強さ(53.2 kg/cm<sup>2</sup>)に対する応力の割合

Percentage of stress to the ultimate tensile strength  $(53.2 \text{ kg/cm}^2)$  in green.

b) 無負荷状態 Stress is not applied.

Table 3. 各種引張り応力下のクリープコンプライアンス (ヒノキ) Creep compliance for the hinoki samples during drying under different tensile stresses.

応力	応力レベル <sup>a)</sup> Stress <sup>a)</sup>	クリープコンプライアンス Creep compliance $J(t)$ (×10 <sup>-8</sup> cm <sup>8</sup> /kg)						
Stress	level	時間 Time <sup>0.1</sup> hr	1hr	5hr	10 <b>hr</b>	24 <b>hr</b>	24hr <sup>b</sup> )	200hr <sup>b</sup> ?
(kg/cm <sup>2</sup> )	(%)	含水率 40% M.C.	26,8%	16.8%	15.9%	15 <b>.0%</b>	15.0%	13.5%
4.9	19	0.34	1,08	1.71	1.78	1.90	1,59	1.37
9,8	38	0.33	1.05	1,70	1.73	1,83	1.61	1.28
14.8	58	0, 31	0,93	1.72	1.78	1.84	1.59	1.30
19,6	76	0.52	1.04	1.74	1,81	1.86	1.63	1.36
20.5	80	0.60	(0.71,	break at	t 0.2hr)			
21.4	83	0.61	(0.63,	break at	t 0.12hr)	)		
23.5	91	0,43	(0.60,	break at	t 0.4hr)			

a) 生材の引張り強さ(25.7 kg/cm<sup>2</sup>) に対する応力の割合

Percentage of stress to the ultimate tensile strength (25.7 kg/cm<sup>2</sup>) in green.

b) 無負荷状態 Stress is not applied.

それにもかかわらず除荷時における最終のクリープコンプライアンスは応力の増加とともに大きくなり、 明らかに応力の影響を受ける。

3.1.3 考 察

クリープにおよぼす応力の影響を調べるには、クリープ曲線を応力別に求め、これを比較するのが良い と思われるが、既往の研究で水分非平衡下におけるクリープ曲線を示した報告は、曲げによるものが多 く<sup>6)9)11)</sup>、引張りや圧縮によるものは少ない<sup>8)60)</sup>。この理由は木材乾燥以外の分野では主として曲げクリー

応 力	応力レベル <sup>a)</sup> Stress <sup>a)</sup>	Cree	クリ p compl	ープコン: iance	プライア: J(t)(×	ンス (10 <sup>-8</sup> cm <sup>2</sup>	/kg)	
Stress	level	時間 Time 0.1hr	1 <b>hr</b>	5hr	10 <b>hr</b>	30 <b>hr</b>	30 <b>hr<sup>ь)</sup></b>	200hr <sup>b)</sup>
(kg/cm <sup>2</sup> )	(%)	含水率 70% M.C.	60 <b>%</b>	27.8%	16.6%	13.4%	13.4%	13.1%
4.8	9	0.13	0.15	0.71	1.23	1.63	1.52	1.38
9.8	18	0.16	0,15	0.55	1.38	1.67	1.57	1.37
19.3	36	0.22	0.24	0,65	1.41	1.64	1.58	1,39
24.1	45	0.19	0.22	0,65	1.47	1.86	1.74	1,56
31.1	58	0.22	0,23	0.57	1.58	2.07	1.94	1,75

Table 4. 各種圧縮応力下のクリープコンプライアンス (マカンバ) Creep compliance for the makanba samples during drying under different compressive stresses.

a) 生材の引張り強さ(53.2 kg/cm<sup>2</sup>) に対する応力の割合

Percentage of stress to the ultimate tensile strength (53.2 kg/cm<sup>2</sup>) in green.

b) 無負荷状態 Stress is not applied.

プに関する性質が問題になることと、実験的に引張りや圧縮クリープではひずみの経過が求めにくいこと にある。

水分非平衡下のクリープでは、一般にひずみと応力との関係は比例的であるとする考え方が多いが<sup>2030</sup> <sup>28)26)28)380</sup>,条件によっては必ずしも比例関係を示さないとする報告もいくつか見られる<sup>778)380</sup>~<sup>88)</sup>。一方, 水分平衡下のクリープについては、応力レベルが小さい場合はひずみと応力とが比例するが、応力レベル が静的な木材の強さの約40~60%以上になると比例関係がくずれ、ひずみの増加割合が大きくなると言わ れている<sup>51)~64)</sup>。

本報の引張りおよび圧縮クリープ(水分非平衡下)の実験結果について、ひずみと応力との関係を調べ てみると、Fig. 20 および Fig. 21 に示すように、比較する含水率範囲によってはひずみと応力との間に やや非線型性が認められる。Fig. 20 はマカンバとヒノキの引張りについて、また Fig. 21 はマカンバの 圧縮について、ひずみと応力との関係をひずみの発生した含水率範囲別に示したものである。負荷応力レ ベルが生材の静的な引張り強さの約40%以内では、引張り圧縮いずれの場合もひずみの増加と応力の増加 とはほぼ比例するが、応力レベルが高くなると含水率範囲や応力の種類によっては比例関係がくずれてく る。

引張りの場合,応力レベルが高くなると実験初期の高含水率時期におけるひずみの増加が著しくなることは前にふれたが,Fig. 20 を見るとこれがよくわかる。しかし,含水率が外周空気の平衡含水率に近くなるまで連続して荷重が与えられていると,最終的にはひずみと応力との関係が広い応力範囲にわたって 直線的になる。このことは,応力レベルが高く,初期に大きなひずみが生じたものは,含水率が20%ない しはそれ以下に低下してからの末期のひずみの発生が,相対的に少ないことを意味している。従来の報告 で,乾燥過程のクリープにおけるひずみと応力がほぼ比例関係にあると言われていたのは,このような含 水率が平衡状態に近くなるまでの最終ひずみを検討の対象としたためではないかと思われる。

これに対し, 圧縮の場合は Fig. 21 で明らかなように, 応力レベルを高くしても含水率約 20% までは ひずみと応力との関係がほぼ直線的である。しかし, それより低い含水率域においてひずみの発生が応力 の影響を過大に受け, 最終的にはひずみと応力との関係は比例的でなくなる。



Fig. 20. 含水率範囲ならびに引張り応力レベルが異なる時のクリープ Relationship between creep strain induced by the moisture content changes of the different ranges and applied tensile stress.

1) 生材時の静的な引張り強さに対する比

- Percentage of applied stress to the ultimate tensile strength in green. 2) 平衡含水率はマカンバ13.4%, ヒノキ15.0%
  - EMC is 13.4% for makanba and 15.0% for hinoki.



Fig. 21. 含水率範囲ならびに圧縮応力レベ ルが異なる時のクリープ

Relationship between creep strain induced by the moisture content changes of the different ranges and applied compressive stress.

1), 2) Fig. 20 の脚注参照 See footnotes of Fig. 20.

クリープにおよぼす応力の影響について、一般的 な考え方からすれば、実験の初期における含水率が まだ繊維飽和点以上の時のクリープは、含水率減少 があっても水分一定の時のクリープに類似している と考えられる。したがって、この時のひずみと応力 との関係は、Fig. 20 の含水率30%までの曲線のよ うに高い応力レベルでひずみの増加が助長される傾 向にあると思われる。この関係はひき続き含水率の 低下中にも維持され、平衡状態における最終の応力 とひずみの関係も同じ傾向を示すと考えられる。し かし、実際の測定結果はクリープひずみの発生と応 力との関係が、含水率の高低や、引張りと圧縮によ ってもかなり異なっている。このような違いが生じ た原因として考えられることは、含水率傾斜にもと づく内部応力の影響や、含水率の違いによる木材の 物性の変化、あるいは引張りと圧縮の基本的な変形 機構の違いなどであろう。

水分傾斜にもとづく内部応力の影響については, 内部応力が影響を与えないとする考え方と影響を与 えるとする考え方があり,意見が分かれているとと ろであるが、内部応力が影響を与えないとする報告には含水率変化が非常にゆっくりした場合や、含水率 がある平衡状態から他の平衡状態に移った時の全クリープ変形量を検討の対象にした場合が多い。木材乾 燥のように含水率や含水率傾斜が時々刻々と変化する時のクリープに関しては、やはり内部応力が何らか の影響を与えていると考えるのが妥当ではないかと思われる。これについて、E.L. Schaffgr<sup>60</sup> は材内の 各部分のクリープが内部応力によって影響を受けるとする考え方を発表している。それは、乾燥過程で含 水率傾斜のある試片に引張り荷重を与えた場合、外層部では外層部の収縮によって生じた引張りの内部応 力と外力による引張り応力とが加わって作用し、内層部では圧縮の内部応力と外力として与えられた引張 り応力とが打ち消し合うかたちで作用するため、内外層でクリープに違いが生じるとするものである。

このほか含水率傾斜がある場合は、内外層の含水率の違いによるヤング係数の違いや、そのような木材 に一定の荷重を与えた時の応力分布なども、内外層でクリープに違いを生じさせる一因になるかもしれな い。考えられる因子はまだ他にもいくつかあろうが、いずれにしても乾燥過程でクリープを論じる際に は、含水率傾斜の大きさに応じてその影響を考える必要があり、クリープにおよぼす応力の影響はある程 度非線型的であるとして取り扱わなければならないように思われる。

しかし、多くはクリープにおよぼす応力の影響を線型的として取り扱う方が便利であるので、それには 応力レベルが生材の静的引張り強さの約40%以内のクリープを検討の対象とする場合や、引張りクリープ において含水率が平衡状態になるまでの最終のひずみを検討の対象とする場合などに限定して取り扱う必 要がある。

## 3.2 含水率の影響

水分非平衡下の木材のクリープは、水分平衡下の木材のクリープに比べて特異に大きいが、この場合の クリープと含水率との関係について、既往の報告はクリープひずみの大きさが含水率変化量に比例し、含 水率の高低にはほとんど左右されないとするものが多い<sup>798,90,11</sup>。しかし、これらは含水率変化の幅を非常 に小さくしたり、含水率変化速度を極端に遅くするなどの特殊な方法によって検討されたものである。そ のため、通常の乾燥過程で木材が生材から乾燥していく際にも、クリープと含水率との関係を同じく比例 的と考えてよいか、あるいは含水率の高低によってクリープと含水率との関係が異なるかはよくわかって いない。既往の報告でこれについて述べた報告は2、3あるが<sup>89,9389</sup>、いずれもクリープひずみの変化と 含水率の変化との対応が必ずしも十分とは言えない。

そのため、本報では乾燥過程における木材のクリープと含水率との関係を出来る限り正確に把握することをまず第一の目標とし、この結果にもとづいてクリープにおよぼす含水率の影響、すなわち含水率変化 の大きさと含水率の高低による影響について検討を行った。

3.2.1 実験方法

実験方法は次の(a)~(c)の3つに分けられるが、このうち1部は前に示した実験である。

(a) 生材状態で負荷し,平衡状態まで乾燥する実験

この実験は第2章で示した実験で、第2章では実験結果として無負荷および各荷重下の収縮ひずみを時間および含水率の函数で示した。ここでは、このうち収縮ひずみと含水率との関係を用い、図上から乾燥 過程のクリープによるひずみと含水率との関係を求めた。ひずみの求め方は、同一含水率における無負荷 試片と負荷試片との収縮ひずみの差を求める方法をとった。なお、収縮ひずみと含水率との関係を示す図 はマカンバの引張りは Fig. 8 に、ヒノキの引張りは Fig. 9 に、またマカンバの圧縮は Fig. 12 にそれ

ぞれ示されている。

(b) 生材から乾燥する途中のある含水率で負荷し,平衡状態まで乾燥する実験

(a)の実験では荷重を生材状態で与え、荷重を与えたまま含水率が外周空気の平衡含水率に近くなるま で乾燥したが、(b)の実験では荷重を与える時期を少しずつ遅らせていって、クリープ実験中の含水率変 化の幅や平均的な含水率の高低を変化させた。これは含水率変化幅の大小や含水率変化中の含水率の高低 が、クリープにどのような影響を与えるかを調べるために行った実験である。実験はマカンバの引張りに ついてのみ行った。与えた荷重は生材時の試片断面積に対して 10kg/cm<sup>2</sup> となる一定引張り荷重である。 用いた試験片の形状や実験装置、乾燥条件 (20°C, R.H. 55%) などの実験条件はすべて(a)の実験と同じ である。試験片は(a)の実験と同一原木から採取したが、木取り位置の関係から比重の範囲が0.64~0.65 と若千異なっている。

(c) 初期含水率をある含水率に調整した試片を用い,荷重下でその含水率から

平衡状態まで乾燥する実験

生材状態の試片を用い、一定温湿度で乾燥する途中で荷重を与えた(b)の実験では、負荷時に試片内 にある程度の含水率傾斜が生じている。この場合にクリープが含水率傾斜の影響を受けることが考えられ るため、ここでは(b)の実験とは試片内の含水率傾斜が異なるように、あらかじめ試片含水率を何段階か に調整した試片を用いて実験を行い、含水率傾斜によってクリープがどのような影響を受けるか検討し た。

この実験はマカンバとヒノキを用いて行った。与えた荷重は生材時の試片断面積に対してマカンパは10 kg/cm<sup>3</sup>, ヒノキは5kg/cm<sup>3</sup>の一定引張り荷重である。用いた試験片の形状や実験装置,乾燥条件など はすべて(a)の実験と同じである。試験片の比重はマカンパは0.63~0.65, ヒノキは0.38であるが,供試 原木はいずれも(a)の実験と同じである。試験片は水または Nacl, K<sub>3</sub>CrO<sub>4</sub>の塩の鮑和水溶液を入れた 3 つのデシケーターを用い,あらかじめ初期含水率の調整を行ってから実験に供した。試片は生材から調湿 をはじめ,調湿期間は約1ケ月とした。各デシケーターに対して予想される平衡含水率は,20°Cではそ れぞれ28%,20%,15%であるが,実際には調湿期間が短かかったこともあって,樹種によってはそれほ ど含水率が低下しないものもあった。しかし実験開始時の含水率傾斜を小さくするという目的は一応達成 できたはずである。

実験は初期含水率の異なる各試片に,前述の一定引張り荷重を与えて乾燥を始め,試片の含水率が外周 空気の平衡含水率に近くなってから荷重を除去した。この実験では収縮ひずみの測定は除荷直後について のみ行い,収縮ひずみ経過の連続測定は行わなかった。

3.2.2 実験結果

実験の種類別に以下(a)~(c)に結果を示す。

(a) 生材状態で負荷し、平衡状態まで乾燥した実験の結果

第2章で収縮ひずみと含水率との関係を示した Fig. 8, Fig. 9, Fig. 12の3つの図から,乾燥過程の クリープによるひずみと含水率との関係を求め,その結果を Fig. 22~Fig. 24 に示した。Fig. 22 はマ カンバの引張り, Fig. 23 はヒノキの引張り, Fig. 24 はマカンバの圧縮についての実験結果である。

ひずみの変化はいずれも含水率の低下につれて単調に増加する曲線を示し、繊維飽和点以下に着目して も含水率の減少とひずみの増加とは必ずしも正確な比例関係を示していない。各曲線に接線を引くと、単

— 58 —







Fig. 23. 引張り応力下のクリープにおけるひずみと含水率との関係 (ヒノキ) Strain as a function of moisture content for the hinoki samples during the creep tests under various tensile stresses.



Fig. 24. 圧縮応力下のクリープにおけるひずみと含水率との関係(マカンバ) Strain as a function of moisture content for the makanba samples during the creep tests under various compressive stresses.

位含水率減少量あたりのひずみの増加量がわかるが、マカンバの引張りでは含水率15~20%付近におい て、またヒノキの引張りでは含水率25%付近においてひずみの増加が最も大きくなる傾向が見られる。そ して、マカンバの圧縮では含水率約20%以下において、特に応力レベルが高い場合にひずみの増加が著し い。実験を行った樹種が限られているため、これらの結果のみから一般的傾向を見出すことは困難である が、引張りの場合は一定含水率以下に限定すれば、ひずみと含水率との関係を一応直線的と考えて良いよ うに思われる。ただし、ひずみと含水率が直線関係を示す含水率範囲は、樹種や乾燥条件の違いによって ある程度変化するものと思われ、試片内の含水率傾斜の状態がかなり影響をおよぼしているように思われ る。

(b) 生材から乾燥する途中のある含水率で負荷し,平衡状態まで乾燥した実験の結果

生材から乾燥する途中のある含水率時期に試片に一定引張り荷重を与えると、試片の収縮ひずみはFig. 25に示すような経過をたどる。負荷時は各含水率に応じて一定の伸びが生じ、極く短時間収縮ひずみの増 加が鈍るが、すぐに大きく増加し始め、やがて一定の値に平衡する。実験開始から30時間後の平衡時の収 縮ひずみの値は、早い時期に荷重を与えたもの程小さくなり、負荷期間が長くなる程大きなクリープが生 じていることがわかる。

Fig. 26 はこの図から求めたクリープ曲線で,ひずみは無負荷試片の収縮ひずみと負荷試片の収縮ひず みとの差から求めた。乾燥途中で荷重を与えた場合は、負荷後の一時期にひずみが急激に増加するが、そ の増加はすぐに鈍り、ひずみは最終的には負荷時期が遅いものほど、それぞれ低い値に漸近する。負荷時 期が異なるクリープ曲線のひずみ経過を比べるため、ひずみの増加速度を調べてみると、Fig. 27 に示す とおりである。この図で負荷直後のひずみの増加速度を見ると、含水率24%以下で荷重を与えた場合は、 ひずみの増加速度が無負荷試片の収縮速度に近いくらい大きな値となっている。



Fig. 25. 生材から乾燥する途中で荷重を与えた試片の収縮ひずみと含水率の経過(マカンバ)
Dimensional changes and moisture content changes of samples during creep tests in which the stress was applied while drying.
負荷時期とその時の含水率
Time and moisture content while stress was applied were as follows.
0 hr (73%), ▲ 4.8 hr (30.0%), □ 6.1 hr (23.8%),







Creep and recovery plotted against time and moisture content changes for the makanba samples during creep tests in which stress was applied while drying. Fig. 25 の記号参照 See symbols in Fig. 25.









Strain as a function of moisture content for the makanba samples during the creep tests in which stress was applied while drying. このクリープ実験におけるひずみと含水率との関係を示すと、Fig. 28 のとおりである。これによると 生材から負荷したものは、含水率約25%以下でひずみと含水率との関係がほぼ直線関係を示し、乾燥途中 で負荷したものは、負荷後しばらく経ってからひずみと含水率との関係がほぼ直線的になる。しかし、直 線の勾配は負荷時の含水率が低いほど大きく、このことは含水率変化に対するクリープの応答が負荷時期 によって異なることを示している。既往のいくつかの報告は、水分非平衡下のクリープが主として含水率 変化の大きさに依存し、含水率の高低には左右されないとしているが<sup>70809111</sup>、今回の実験結果は明らかに これと異なっている。このような結果が得られた原因として考えられることは、この実験では乾燥の途中 で荷重を与えたことである。生材試片に荷重を与えた場合は、負荷状態で試片に含水率傾斜が生じていく のに対して、この場合は含水率傾斜のある試片に、新たに荷重が与えられることになり、両者は試片内部 の応力分布が異なると考えられる。したがって、水分非平衡下のクリープと含水率との関係を考える際に は、通常、含水率傾斜の問題も併せて考えることが必要であるように思われる。

(c) 初期含水率をある含水率に調整した試片を用い,荷重下でその含水率から

平衡状態まで乾燥した実験

乾燥途中で荷重を与えた(b)の実験では、単位含水率変化に対するひずみの増加が、低含水率で荷重を 与えたもの程大きくなる傾向が見られた。この原因は含水率傾斜によるものではないかと考え、これを調 べるため(c)の実験を行った。(c)の実験では、負荷時に含水率傾斜がフラットな状態を作るため、初期 含水率を何種類かに調整した試験片を用いてクリープ実験を行った。結果は Table 5 に示すとおりであ る。単位含水率変化に対するクリープの増加を表すのに、除荷後の残留ひずみ *ε*<sub>c</sub>(*t*<sub>o</sub>) を負荷期間中の含水 率減少量 *4u* で除した値を用いたが、ここで繊維飽和点以上の含水率変化の取りあつかいが問題となる。 繊維飽和点以上の含水率変化はほとんどクリープに影響を与えないと思われるため、ここでは含水率減少

Table 5. 含水率変化範囲が異なるクリープ実験におけるひずみ(試片含

水率をあらかじめ塩の飽和溶液により調湿) Strain after stress release in the creep test involving different ranges of moisture content change. The initial moisture content of specimens was conditioned by a saturated salt solution in advance.

樹 種 Species	応 力 Stress (kg/cm²)	合水率変化範囲 Range of moisture content change (%)	ひずみ Strain <sub>Ec</sub> (t <sub>0</sub> ) (%)	提*) Ratio*) ε <sub>e</sub> (t <sub>0</sub> )/Δ <sub>u</sub> (%/%)
		46 13	1.73	0.102 <sup>b)</sup>
マカンバ	10	35 13	1.76	0, 104 <sup>b)</sup>
Makanba		24 - 13	1.13	0.111
		16 — 13	0.18	0.071
		45 - 14	0, 88	0.055°)
ヒノキ	F	29 — 14	0,77	0.052
Hinoki	5	23 — 14	0.60	0.065
		16 14	0.15	0.064

a) 含水率変化量に対するひずみの比

Ratio of strain to the range of moisture content change. These are the mean values of some samples. b) 初期含水率を30%として計算

Calculation base on 30% initial moisture content.

- 63 -

### 林業試験場研究報告 第335号

# Table 6. 含水率変化範囲が異なるクリープ実験におけるひずみ (生材から乾燥し,途中で負荷)

Strain after stress release in the creep test involving different ranges of moisture content change. The initial moisture content of specimens was green, and stress was applied while drying.

樹 種 Species	応 力 Stress (kg/cm²)	含水率変化範囲 Range of moisture content change (%)	$\begin{array}{ccc} \mathcal{V} & \vec{\mathcal{J}} & \mathcal{F} \\ \text{Strain} \\ \varepsilon_c(t_0) \\ (\mathcal{H}) \end{array}$	$\mathbb{L}^{\mathrm{a})} \ \mathrm{Ratio}^{\mathrm{a})} \ \varepsilon_c(t_0)/\mathcal{A}_u \ (\%/\%)$
-		73 — 13	1.65	0.099 <sup>b)</sup>
		30 13	1.55	0.092
マカンバ	10	24 — 13	1.21	0.115
Makanha	10	20 — 13	0.95	0.137
		18 — 13	0.76	0.161
		16 — 13	0.66	0.227
	1			

a),b) Table 5. の脚注参照

See footnotes of Table 5.

量を求める際に繊維飽和点を含水率30%と仮定して、それ以上の含水率変化を除外することにした。

Table 5 では4 種類の含水率範囲が示されているが、このうち初期含水率が最も高いものは特にデシケ ーターを用いて試片含水率を調整したものではなく、試片の保管中にこの含水率になったもので、生材状 態に近いものである。そして、他はそれぞれ3つのデシケーターで初期含水率を調整したものである。こ の結果を見ると、マカンバでは含水率範囲約16%から13%の時の  $\epsilon_c(t_o)/4u$  の値がやや小さく、他はほと んど同じである。またヒノキは低含水率域で負荷したものがやや値が大きいが、実験上の誤差を考えれば ほとんど差が無いと見なすことができる。Table 6 は比較のため乾燥途中で荷重を与えた(b)の実験にお けるマカンバの結果を同じ方法で示したものである。この場合は低含水率域で負荷したものほど  $\epsilon_c(t_o)/4u$  の値が大きくなり、含水率範囲約16%から13%の場合は生材状態から負荷した場合の約2 倍くらい大 きな値となっている。

3.2.3 考 察

従来,水分非平衡下のクリープに関する研究では、含水率傾斜によって発生する内部応力の影響を取り 除くという考え方から、形状の小さい試片を用いたり<sup>89)47</sup>,乾燥速度を遅くするといった手法がとられて きた。その結果水分変化とクリープひずみ増加との関係は線型であると言われている<sup>778)9110</sup>。しかし、木 材乾燥でクリープについて考える場合は、通常かなり大きな含水率傾斜がある状態で、クリープひずみと 含水率との関係を論じなければならなく、このような場合のクリープ現象をどう考えたらよいかが焦点に なる。

生材試片を用い、温度20℃、関係湿度55%でクリープ試験を行った結果によると、含水率の変化とひず みの増加との間には明らかに非線型性が認められた。その原因としては、含水率の高低によってクリープ 性能が異なることや、含水率傾斜がクリープに影響を及ぼすことが考えられる。そこで、このことを調べ るため生材から乾燥する途中で負荷する方法と、初期含水率を調整した試片を用いる方法の2つのクリー プ実験の比較を行った。その結果、乾燥途中から負荷した実験では、負荷時期が異なることによって、含 水率変化に対するひずみ増加の割合が変化する傾向が見られ、含水率変化とひずみ増加の関係に非線型性 が認められた。これに対して初期含水率を調整した試片を用いた場合は,あまりそのような傾向は見られ ず,明らかに異なる結果が得られた。

生材から乾燥する途中で負荷した(b)の実験と、初期含水率を調整した(c)の実験についてその違いを 考えてみると、(b)の実験では含水率傾斜の大きな時期に荷重が与えられたため、負荷時に試片各部の応 力分布にアンバランスが生じることと、その後の負荷期間中の含水率傾斜や応力分布の状態が(b)と(c) の実験で異なることが考えられる。実験結果からは含水率傾斜が何らかの形でクリープに影響をおよぼし ていることは確かである。しかし、含水率傾斜の大きさは含水率範囲が最も低い場合が、最も小さいはず で、含水率傾斜の大きさそのものが直接的にクリープに影響しているとは考えにくい。

水分非平衡下のクリープについて論ずる場合,この他に大きな問題は、含水率変化によってヤング係数 などの木材の諸物性が変化することと、試片の断面積が変化することである。一定荷重を与えて乾燥する クリープ実験では、含水率が低下するにつれて試片断面積が減少し、負荷応力は増加する。また、負荷応 力が一定ならば、含水率の低下によってヤング係数が増加するため、実質的には瞬間弾性ひずみの小さな 荷重を与えたのと同じと考えるべきである。含水率低下による断面積の減少割合とヤング係数の増加割合 とでは、後者の方がはるかに大きく、この点からは含水率の低下はひずみを減少させる方向に作用すると 考えられる。しかし、本報で得られた実験結果は低い含水率で荷重を与えたものほど単位含水率減少量あ たりのひずみ増加量が大きく、ヤング係数と試片断面積の変化によってひずみが減少すると考えたのとは 逆の現象がおこっている。

これらの事実を総合して次の事が言える。従来、水分非平衡下のクリープが含水率変化に対して線型挙 動を示すと考えられていたのは、1つは含水率傾斜が非常に少ない場合であろう。また、もう1つは負荷 時には含水率傾斜がフラットで、その後含水率が変化しても最終的に含水率傾斜がフラットになるような 含水率の移行状態において、最終のひずみと含水率変化量との関係を問題にする場合であろう。ただし、 この場合も含水率が変化する途中におけるひずみの増加と含水率変化との関係は必ずしも線型挙動を示す ことはないと思われる。荷重下の試片に含水率傾斜が生じる場合、あるいは含水率傾斜のある試片に荷重 を与える場合のいずれの場合も、試片内部に応力分布のアンバランスな状態が生じ、これがクリープの増 加に寄与していると推測される。含水率傾斜やそれにもとづく試片内部の応力分布のアンバランスな状態 がなければ、含水率変化に対するクリープの応答は本質的には線型で、繊維飽和点以下では含水率の高低 によるクリープ性能の違いは少ないものと思われる。

#### 3.3 温度の影響

クリープにおよばす温度の影響を考える際には、クリープひずみを比較する時の荷重条件をどのように 選ぶかが1つの大きな問題である。同一荷重を与えた時のクリープひずみは、温度が高いほど大きいが、 高温では木材自身の強度が低下するため、破壊応力に対して見れば相対的に大きな応力が与えられている と考えるべきである。このような場合の比較に用いられるのが相対クリープ、すなわち初期ひずみに対す るクリープひずみの比である。

そこで、本報では相対クリープが温度によってどのように変化するかを実験で調べ、これに基づいて引 張りクリープにおよぼす温度の影響を検討した。

ここでは温度影響として温度の高低のみを検討の対象にしたが、この他に温度が時々刻々と変化するい わゆる温度非平衡状態がクリープに影響を及ぼすことも考えられるので、これについては次の項で検討す ることにする。

3.3.1 実験方法

供試材はマカンバとヒノキである。両樹種とも全乾比重が異なる2種類の試験材を用いているが、マカ ンバの場合は同一原木で木取り位置が異なり、ヒノキの場合は原木が異なっている。これは実験の実施時 期が違うものを、ここで一括して示したためである。試験材を区別するため、マカンバは全乾比重0.65~ 0.69をマカンバ(A)とし、0.63~0.67をマカンバ(B)とした。また、ヒノキは全乾比重0.36~0.38をヒノ キ(A)とし、0.39~0.42をヒノキ(B)とした。マカンバの(A)と(B)、およびヒノキ(A)は用いた原木が いずれもこれまでの応力の影響や、含水率の影響を検討した実験と同じであるが、ヒノキ(B)は異なる原 木を用いている。なお、試片の形状はこれまでの実験と同じ短冊型である。

実験装置の概要は Fig. 29 に示すとおりである。この装置はレバー式の定荷重試験機のチャック部分に 恒温恒湿槽を取りつけたもので、外部の乾燥装置から温湿度を調節した空気を供給している。実験は20℃ から 80℃ までの温度範囲について行ったが、この装置には冷凍機がなく、空気を加熱増湿することによ って温湿度の調節を行っているため、20℃ の場合はこの装置では必要な温湿度条件を得ることができな かった。そのため、20℃ については前に Fig. 2 で示した装置を用い、恒温恒湿室内で実験を行った。実 験中の温湿度条件は、温度については 20℃ から 80° Cの範囲で数段階の一定温度とすることにし、関係湿 度は各温度とも平衡含水率による予想平衡含水率が10%になるような条件を選んだ。

実験中の収縮ひずみや含水率の求め方は、これまでの実験(2.1.1 参照)とほぼ同様である。一部の実 験では乾燥中の収縮ひずみ変化を連続的に測定したが、これには Fig. 4 に示す小型の差動トランスを応 用したひずみ計を用いた。このひずみ計は温度変化に対してきわめて安定で、長時間の測定においても十 分必要な精度を保つことができた。含水率の測定は恒温恒湿槽の上部外側に設けられた小型のロードセル によってダミー試片の重量減少を測定し、これから負荷試片の含水率を推定する方法をとった。



Fig. 29. 温度別のクリープ実験に用いた装置の概要 Experimental apparatus used in the creep tests at different temperatures.

A:試験片 Specimen, B:引張りチャック Clamp chuck, C:荷重ビーム Balance beam, D:おもり Weight, E:ロードセル Load cell

- 66 -
|    | 温 度                 |   | Makanba(A)                        |   |   | Hinoki(A)                         |   |
|----|---------------------|---|-----------------------------------|---|---|-----------------------------------|---|
|    | Temperature<br>(°C) | 最大引張り強さ<br>Ultimate<br>tensile<br>strength<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | 最大ひずみ<br>Maximum<br>strain<br>(%) | ャング係数<br>Young's<br>modulus<br>(×10 <sup>g</sup> kg/cm <sup>2</sup> ) | 最大引張り強さ<br>Ultimate<br>tensile<br>strength<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | 最大ひずみ<br>Maximum<br>strain<br>(%) | ヤング係数<br>Young's<br>modulus<br>(×10 <sup>8</sup> kg/cm <sup>2</sup> ) |
| 20 | 平均 Mean             | 51.1  | 1.7                               | 5.09  | 28.9  | 1.9                               | 2.80  |
|    | 範囲 Range            | (47.6—56.1)   | (1.1-2.2)                         | (4.25—5.86)   | (25.3—33.0)   | (1.1-2.7)                         | (2.14-3.58)   |
| 30 | 平均 Mean             | 43.4  | 1,5                               | 4.24  | 26.7  | 2, 1                              | 2.45  |
|    | 範囲 Range            | (39, 3—49, 3)   | (1.2-1.8)                         | (3.98—4.56)   | (25.4—27.5)   | (1.8—2.3)                         | (2.39-2.53)   |
| 50 | 平均 Mean             | 38.3  | 2.3                               | 2.64  | 21.7  | 2.4                               | 1.75  |
|    | 範囲 Range            | (35.7—39.6)   | (1.9–2.8)                         | (2,55—2,62)   | (19, 5—23, 3)   | (2.0-2.9)                         | (1.64—1.83)   |
| 70 | 平均 Mean             | 29.4  | 3.2                               | 1.65  | 17.5  | 3.6                               | 1.08  |
|    | 範囲 Range            | (28.8—29.7)   | (3, 13, 4)                        | (1.62-1.78)   | (17.5—17.6)   | (3, 3—3, 8)                       | (0.93—1.17)   |
| 80 | 平均 Mean             | 24.1  | 3.1                               | 1.36  | 15.5  | 3.5                               | 0.71  |
|    | 範囲 Range            | (22.7—25.9)   | (2.7—3.7)                         | (1.07-1.50)   | (14.5-17.5)   | (3, 2-3, 6)                       | (0.66—0.78)   |

# Table 7. クリープ実験に用いた試片の接線方向の横引張り強度に関する特性 The perpendicular-to-grain mechanical properties of samples used in the creep test.

試験片:JIS型,接線方向,生材

Specimen : JIS type, tangential direction, green condition

試料数:8

Number of samples:8



実験は乾燥過程で収縮ひずみを連続して測定し、これからクリープによるひずみの 経過を 調べる 実験 と、除荷後に収縮ひずみを測定し、除荷直後の残留ひずみを調べる実験とに分かれている。ここでは前者 をAグループの実験、後者をBグループの実験と呼ぶことにするが、Aグループの実験では試験材にマカ ンバ(A)とヒノキ(A)を用い、Bグループの実験ではマカンバ(B)とヒノキ(B)を用いた。

乾燥過程のひずみ経過を調べた A グループの実験では、応力レベルは各温度とも初期ひずみが 0.2% に なる応力レベルとした。また、除荷直後の残留ひずみを調べた B グループの実験では、応力レベルをマカ ンバは初期ひずみ 0.15, 0.25, 0.5% の 3 レベルとし、ヒノキは 0.15, 0.25% の 2 レベルとした。この 時の荷重を求めるにはクリープ実験用試片に隣接した部分から採取した試片を用いて、温度別の静的引張 り試験を行い、その応力---ひずみ曲線から必要な荷重を求めた。

温度別に行った静的な引張り試験結果のうち、マカンバ(A)とヒノキ(A)の結果を示すと、Table 7 の とおりである。マカンバ(B)およびヒノキ(B)については省略したが、マカンバ(B)はマカンバ(A)とほ ぼ同じような値を示し、ヒノキ(B)はヒノキ(A)よりやや比重が大きいため引張り強さ、ヤング係数とも 幾分大きめの値を示していた。

Fig. 30, Fig. 31 はマカンバ(A)とヒノキ(A)のヤング係数と温度との関係であるが,ヒノキ(A)の ヤング係数は温度 80℃ までの範囲で温度上昇により直線的に減少し,マカンバ(A)は指数関数的な減少 傾向を示している。

ャング係数と温度との関係は一般に直線的ではないが,狭い温度範囲では両者は近似的に直線として取り扱われることが多く,既往の報告では次式が用いられている<sup>66,877</sup>。

 ここで,  $E_1$ ,  $E_2$  はそれぞれ温度  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  の時のヤング係数,  $\alpha$  は温度係数である。本報における測定結 果を用いて温度係数  $\alpha$ を求めてみると, Fig. 30 のマカンバは約 0.012~0.014, Fig. 31 のヒノキは約 0.013である。既往の報告では,接線方向の横引張りにおける  $\alpha$ の値として,生材では 0.010~0.014 が得 られている<sup>56)~58)</sup>。また,最近の奥山らの報告<sup>59)</sup> から  $\alpha$ の値を計算すると, 0.012~0.014 で本報における 測定結果とよく一致している。

3.3.2 実験結果

マカンバ(A)およびヒノキ(A)の試料を用い,各温度で無負荷試片と負荷試片の収縮ひずみ経過を測定 した。実験は20℃から80℃の範囲について行ったが,このうち30℃と80℃の測定結果を一例として Fig. 32 および Fig. 33 に樹種別に示した。負荷時の初期ひずみは0.2%で,各温度ともすべて一定で ある。負荷後,含水率が低下するにつれて,ひずみは増加し始めるが,2~3時間経過後ひずみの増加は 鈍くなってやがて一定値に漸近する。

クリープ曲線はこの図から無負荷試片と負荷試片の収縮ひずみの差を読み取り,これを時間軸に対して プロットすることにより求めた。各温度のクリープ実験における試片の含水率減少経過は Fig. 34, Fig. 35 に示すとおりであり,この時のマカンバ(A)とヒノキ(A)のクリープ曲線として Fig. 36 の結果が得 られた。マカンバの含水率減少経過を示した Fig. 34 では、20°C のグラフが他に比べて特に乾燥が遅い が,これは前述の理由から実験を恒温恒湿室内で行ったためで、空気の流れが少なかったためこのような 結果になったものである。また、Fig. 35 のヒノキの場合も、20°Cは同様な実験条件で行ったため、試片 の乾燥はかなり遅れた。



Fig. 32. 30℃ および 80℃ のクリープ実験における収縮ひずみと 含水率の経過 (マカンバ)

Dimensional changes and moisture content changes as a function of drying time during the creep tests at 30°C and 80°C.

Note:(1) 負荷応力は Table 8 のとおり

- Stresses are shown in Table 8.
- (2) ----○--- 30°C 無負荷 (Unloaded), ---●-- 30°C 負荷 (Loaded) --△-- 80°C 無負荷 (Unloaded), --▲-- 80°C 負荷 (Loaded)

- 69 --



含水率の経過(ヒノキ)

Dimensional changes and moisture content changes as a function of drying time during the creep tests at  $30^{\circ}$ C and  $80^{\circ}$ C.

Note:(1) 負荷応力は Table 9 のとおり

Stresses are shown in Table 9. (2) 記号は Fig. 32 参照

See symbols in Fig. 32.





--○-- 20°C\*, ---△ 30°C, ---□ 50°C,
 --● 70°C, ---▲ 80°C
 \*この実験は 20°C, 55% RH の恒温恒湿室内で行った。
 This test was performed in an air

conditioned room at 20°C and 55% R.H.











Creep curves for makanba(A) and hinoki(A) calculated from the dimensional differences between the loaded samples and the unloaded samples.

Note:(1) 負荷応力は Table 8 および Table 9 のとおり





Fig. 37. 温度別のクリープ実験における ひずみと含水率との関係(マカン バA,ヒノキA)

Strain as a function of moisture content for makanba (A) and hinoki (A) samples during the creep tests at various temperatures.

- Note: (1) 負荷応力は Table 8 および Table 9 のとおり Stresses are shown in Table 8 and Table 9.
  - (2) --O-- 20°C\*, \_\_\_\_\_ 30°C, \_\_\_\_\_\_
    \_\_\_\_\_\_ 50°C, \_\_\_\_\_ 70°C, \_\_\_\_\_
    \_\_\_\_\_\_ 80°C
    \*Fig. 34 参照
    See note of Fig. 34.

Fig. 36 のクリープ曲線を見ると,乾燥温度が高 くなるにつれて,ひずみの増加は早い時期に始まる が,最終のひずみの大きさはむしろ小さな値となる 傾向が示されている。しかし,これは Fig. 34 や Fig. 35 に示した含水率減少経過と深い関係がある ことで,ひずみ経過は含水率との関係としてとらえ なければならない。

ひずみの発生と含水率との関係は Fig. 37 に示す とおりであるが、樹種によってかなり特徴が見られ る。この中でマカンバの 70℃と 80℃ の曲線は他の 曲線と傾向が異なっている。マカンバの50℃以下と ヒノキ(20℃~80℃)では繊維飽和点付近まではひず みの発生は少なく、その後含水率が低下するにつれ てひずみが大きく増加する。これに対してマカンバ の 70℃と 80℃の場合は、最終的なひずみの半分以 上が含水率30%くらいまでに発生し、その後の含水 率約25%~15%の間はほとんどひずみの増加が見ら れない特異な傾向を示している。これは細胞の落込 みとその復元の影響によるものと考えられる<sup>60,61)</sup>。

この実験では乾燥条件を選ぶ際に,各温度の平衡 含水率が10%一定になるような乾燥条件を平衡含水 率表から求め,これに従って実験したが,実際の平 衡含水率は必ずしも 10% とはならず,Fig. 34 や Fig. 35 に示したような乾燥経過をたどった。ここ で,クリープ実験における乾燥条件,含水率の変化 範囲,負荷応力,除荷直後のひずみの値などに関す る諸数値を Table 8 および Table 9 に一括して示 しておくことにする。表中のひずみ  $\varepsilon_c(t_o)$ の値は換 算値が示されているが,これは各温度とも除荷時の 含水率が 10% 一定であるとして 換算したものであ

る。この場合の換算は含水率30%以下で含水率の減少とひずみの増加とが比例するものとして行った。

このほか Table 8, Table 9 にはマカンバ(B) およびヒノキ(B) を用い,除荷直後の残留ひずみのみ を測定したBグループの実験結果が示されているが,この実験では各温度とも応力レベルをマカンバは3 条件とし,ヒノキは2条件としている。

Table 8 および Table 9 の実験結果によると、含水率の変化範囲が等しく、初期ひずみも等しい条件 の下では、クリープによって生じるひずみは温度が高くなるほど小さくなる傾向が見られる。従って、初 期ひずみに対するクリープひずみの比である相対クリープは温度が高くなるほど小さくなる傾向にある。

試 験 片 Samples	温度 Temp. (℃)	関係湿度 R.H. (%)	含水率変化範囲 Range of m.c. changes (%)	自由収縮率 <sup>a)</sup> Free <sup>a)</sup> shrinkage <i>α<sub>t</sub></i> (%)	負荷応力 Applied stress (kg/cm <sup>2</sup> )	初期ひずみ Initial strain (%)	ひずみ <sup>a),b)</sup> Strain <sup>a),b)</sup> E <sub>e</sub> (t <sub>0</sub> ) (%)	比 Ratio $\varepsilon_c(t_0)/\alpha_t$	クリープコンプライアンス Creep compliance $J_c(t_0)$ (×10 <sup>-3</sup> cm <sup>2</sup> /kg)
	20	55	55-12.7	5.82	10.7	0.2	1.97	0.34	1,97
	30	57	5511.0	5.74	8.5	0.2	1.66	0.29	1.95
(A)	50	63	54-10.7	5.50	5.4	0.2	1.08	0.20	2,00
	70	70	53- 9.8	6.10	3.3	0.2	0.92	0.15	2.79
	80	73	55— 9.3	6.31	2.6	0.2	0,90	0.14	3.46
(B)	20	55	75-12.2	5.01	7.5 12.5	0.15 0.25	1.54 2.36	0. 31 0. 47	2.05 1.89
					23.3	0.50	4.42	0.88	1.90
	40	60	74—11.0	5,23	5.3 8.8 16.7	0.15 0.25 0.50	1.22 2.13 3.84	0. 23 0. 41 0. 73	2.30 2.42 2.30
	60	67	69— 9.9	5.90	3.2 5.3 11.1	0.15 0.25 0.50	1.11 1.78 3.43	0. 19 0. 30 0. 58	3. 47 3. 36 3. 09
	70	70	67— 9.1	6.08	2.5 4.1 8.6	0.15 0.25 0.50	1.19 1.78 3.22	0.20 0.29 0.53	4.76 4.34 3.74

Table 8. 温度および応力レベルが異なる時のクリープ実験結果(マカンバ)

Results of creep tests for makanba at various drying temperatures and stress levels.

a) 含水率変化範囲を生材から含水率10%までとした時の補正値

These values were corrected on the assumption that the moisture content changed from green to 10%.

b) 除荷直後の値

Strains were measured after the stress was released.

73

試 験 片 Samples	温度 Temp. (°C)	関係湿度 R.H. (%)	含水率変化範囲 Range of m.c. changes (%)	自由収縮率 <sup>a)</sup> Free <sup>a)</sup> shrinkage <i>α<sub>l</sub></i> (%)	負荷応力 Applied stress (kg/cm <sup>3</sup> )	初期ひずみ Initial strain (%)	ひずみ <sup>a),b)</sup> Strain <sup>a),b)</sup> E <sub>0</sub> (t <sub>0</sub> ) (%)	比 Ratio ɛc(t0)/æt	クリープコンプライアンス Creep compliance $J_c(t_0)$ (×10 <sup>-8</sup> cm <sup>9</sup> /kg)
	20	55	40-13.8	4.45	5.6	0.2	1.21	0.27	2.16
	30	57	42	4.34	4.9	0.2	1.05	0.24	2.14
(A)	50	63	41-11.5	4.15	3.5	0.2	0.80	0.19	2, 29
	70	70	39-10.2	4.09	2.1	0.2	0.70	0.17	3, 33
	80	73	40— 9.1	3.99	1.5	0.2	0, 59	0.15	3. 93
	20	55	41—13.3	3.31	4.1	0.15	0.57	0.17	1,39
					6.8	0.25	0.93	0.28	1,37
	40	60	39-12.3	3.44	3.0	0.15	0,49	0.14	1.63
(B)					5.0	0,25	0,78	0.23	1.56
	60	67	44-10.8	3.78	2.0	0.15	0.44	0.12	2, 20
					. 3.4	0.25	0.74	0.20	2,18
	70	70	42-10.2	3.75	1.5	0.15	0.42	0.11	2.80
					2.5	0.25	0,70	0,19	2,80

Table 9. 温度および応力レベルが異なる時のクリープ実験結果(ヒノキ) Results of creep tests for hinoki at various drying temperatures and stress levels.

a), b) Table 8. の脚注参照

See footnotes of Table 8.

林業試験場研究報告 第335号

- 74



クリープに関する報告では、クリープひずみを表わすのに単位応力あたりのひずみの大きさ、すなわち クリープコンプライアンスが用いられることが多いが、この場合に負荷時のヤング係数の逆数である弾性 コンプライアンスが分かっていれば、相対クリープはクリープコンプライアンスと弾性コンプライアンス との比として求めることができる。

水分平衡下では、クリープコンプライアンスは温度の上昇とともに指数関数的に増加するといわれている<sup>41)</sup>が、水分非平衡下ではその増加がどのような傾向にあるか、あまりよく分かっていない。本報では残留ひずみから求めたクリープコンプライアンスについて、温度の影響を調べてみた。Fig. 38 は水分平衡下と比較する意味でクリープコンプライアンスと温度との関係を片対数グラフにプロットしたものであるが、両者は直線関係を示さず、20~80°Cの温度範囲でむしろ次の2次曲線がよくあてはまるように思われる。

 $J_c(t_o) = a(\theta - 20)^2 + b$  .....(3.2)

ここで、*J*<sub>e</sub>(*t*<sub>o</sub>) は除荷直後のひずみから求めたクリープコンプライアンス、θ は温度、*a* と *b* は定数で ある。Fig. 38 における実線は (3.2) 式による回帰式を示したもので、各回帰式の定数*a*, *b*, ならびに 相関係数は Table 10 のとおりである。定数*a* は温度の影響を表わし、*b* は各供試材のクリープ性能を表 わす定数と考えることができる。

一方,弾性コンプライアンスはヤング係数の逆数であり,これはクリープ実験における初期ひずみから 求めることができるが、クリープ実験で初期ひずみを精度良く測定することは容易でないので,むしろ一

樹 租 Species	1	a	b	r <sup>a)</sup>
マカンバ Makanl	oa (A)	4,17×10 <sup>-4</sup>	1.84	0.97
"	(B)	9.13×10-4	1.94	0.97
ヒノキ Hinoki	(A)	5.11×10-4	2.04	0.99
"	(B)	5.58×10 <sup>-4</sup>	1.36	1.00

Table 10. Fig. 38 の回帰式  $(J_c(t_0) = a(\theta - 20)^2 + b)$  の回帰係数 The coefficients in the regressive equation  $(J_c(t_0) = a(\theta - 20)^2 + b)$  for Figure 38.

a) 相関係数

Correlation coefficient.



般の静的な強度試験から求めた値を用いる方が良いように思われる。温度別の静的な強度試験結果は前に Table 7 および Fig. 30, Fig. 31 に示してある。

本報の実験結果を用いてクリープコンプライアンス *J*<sub>c</sub>(*t*<sub>0</sub>) と弾性コンプライアンス *J*<sub>0</sub> の比を 求めて みると, Fig. 39 の結果が得られるが, この図は相対クリープの温度による変化を表わしている。これに よると相対クリープは両樹種とも温度が高くなるほど小さくなる傾向にある。しかし,温度50°Cから80°C くらいの温度範囲についてみると,両樹種とも相対クリープの温度による変化はそれほど大きくないとも 言える。相対クリープはむしろ 20°C から 50°C の温度範囲において大きく変化する傾向があるように思わ れる。

3.3.3 考 察

木材は温度の上昇によって変形性能を増すことが知られている。乾燥過程で応力が作用する時の木材の 変形は,弾性変形と流動変形とに分けられるが,これらの変形に寄与する分子運動の状態やマクロな組織 構造的な変形形態はそれぞれ異なると考えられる。したがって,弾性変形と流動変形とでは温度の影響が 異なって表れることが想像される。 水分非平衡下のクリープにおよぼす温度の影響については報告が少なく,一般的傾向はよく分かってい ないが,本報の実験結果によると20°Cから80°Cの温度範囲で,クリープコンプライアンスは温度の2乗 に比例して増加する傾向にあった。しかし,初期ひずみに対する相対クリープを表す *J*<sub>c</sub>(*t*<sub>o</sub>)/*J*<sub>o</sub>の値は温 度が上昇するほど減少する傾向を示していた。水分平衡下のクリープでは,温度が上昇すると相対クリー プが増加すると言われており<sup>41</sup>~<sup>43</sup>,水分非平衡下と水分平衡下では明らかに傾向が異なる。

クリープコンプライアンスの測定では、温湿度条件の設定が正しく、収縮ひずみが正しく測定されてい れば、その他の実験上の誤差は入りにくいので、ここで再度ヤング係数の測定値と温度との関係を検討 し、各温度のクリープ実験で与えた荷重がどのようなものであったか検討しておく必要があると思われ る。ヤング係数と温度の関係が近似的に(3.1)式で示されることは前に述べたが、温度係数αの値は繊 維に直角方向の場合が繊維に平行方向の場合よりも大きいと言われている<sup>56)</sup>。この点を考慮すると、水分 非平衡下のクリープコンプライアンスは温度の上昇により著しく増加するが、温度の上昇はさらに著しい ヤング係数の低下をもたらすため、瞬間コンプライアンスが増加して相対クリープは低下すると考えるこ とができる。

ここで,弾性変形と含水率平衡状態および含水率非平衡状態における流動変形について,その変形機構 と温度との関係を考えてみる。

生材状態の木材に荷重を与えた時の弾性変形は原子間隔の変化や水素結合部分の伸縮などによって受け 持たれると考えられ、含水率平衡状態では負荷後の流動変形は側鎖の運動や主鎖のミクロブラウン運動な どが主体となって分子鎖相互で徐々に変形が進行すると考えられる。これに対して、木材が繊維飽和点以 下に乾燥する場合は、分子鎖間に存在する水分子の離脱によって分子鎖相互の結合が断たれ、分子鎖の相 対的な位置の移動はきわめて容易になり、力が作用している場合は力の方向に分子運動によって容易に分 子が転移していくと考えられる。

以上のような変形機構のもとで、温度の上昇は弾性的変形の増大や分子のミクロブラウン運動を活発化 することに役立つと思われる。また、水分非平衡下の変形は直接的には水分子の離脱によって生じた空隙 の総量に依存し、分子のミクロブラウン運動の大きいことは2次的に変形の増大に寄与していると推測さ れる。そのため、水分非平衡下のクリープでは温度の影響が弾性変形や水分平衡下のクリープの場合に比 べ、それほど大きく現れてこないのではないかと思われる。

#### 3.4 その他の因子の影響

クリープに影響をおよぼすその他の因子として,乾燥速度および温度変化を取り上げた。これらはいず れも乾燥過程のクリープにとって主要な因子とは思われないが,影響の有無やその大きさが種々論議され ている問題である。本報では各因子の影響の大きさがどの程度であるか,その目安を得ることを主たる目 的として検討を行った。

#### 3.4.1 乾燥速度の影響

a) 実験方法

クリープ実験において乾燥速度が異なるということは、含水率がある範囲を変化する時に要する時間が 異なると言うことで、クリープに時間の影響が入る可能性がある。また、この場合は含水率傾斜も影響を 及ぼす可能性がある。ここでは、特に時間や含水率の影響を単独に取り上げることは出来ないが、乾燥速 度の違いがクリープにどの程度の影響を及ぼすか検討した。 実験は, i) 乾燥速度を一定にして乾燥温度を変化させる実験と, ii) 乾燥温度を一定にして乾燥速度 を変化させる実験の2種類を行った。前項(3.3)の温度の影響を検討した実験では, 乾燥条件として平 衡時の含水率が一定になるような乾燥条件を選んだが, この場合は乾燥速度が温度によって異なり, 乾燥 温度の影響と乾燥速度の影響が両方含まれている可能性がある。そこで, i)の実験では各温度とも乾燥 速度を一定にして実験し, これを前項の実験と比較することによって, 乾燥速度がクリープにどのように 影響を及ぼすかを調べた。

供試材はマカンバとヒノキであるが、前項で温度の影響を検討した際のマカンバ(B)およびヒノキ(B)の試験片とほぼ類似した試験片を用いた。この実験で用いた試片の全乾比重はマカンバが0.62~0.67,ヒノキが0.39~0.42である。

実験に用いた装置はほとんど前項(3.3 温度の影響)の実験で用いたものと同じであるが、今回は試片 の乾燥速度をコントロールするため、装置の温湿度調節部に部分的な改造を加えた。ブロックダイヤグラ ムを Fig. 40 に示す。収縮ひずみの測定は、試片に虫ピンによる標点を打ち込み、除荷後に標点距離の 移動量を工具顕微鏡で測定する方法をとった。

i) の実験で、乾燥温度が異なる各実験における乾燥速度を一定にするため、含水率を次式に従って変化させた。

#### $u = Ae^{-Kt} + u_e$

ここで、uは試片含水率(%)、tは経過時間(hr)、 $u_e$ は平衡含水率(%)、Kは乾燥速度係数(1/hr)、Aは定数(%)である。

乾球温度一定で,試片含水率をこの式に従って変化させるためには,湿球温度を常に変化させていく必要があるが,その方法はダミー試片の含水率が所定の含水率よりも高い時は湿球温度を下げ,低い時は湿 球温度を上げる方法とし,これを自動的に行った。実験で用いた(3.3)式の各常数は,平衡含水率 ueを 10(%)一定とし,マカンバの場合は定数Aの値を40(%),定数Kの値を1.5(1/hr)とした。また,ヒノキの場合は定数Aを30(%)とし,定数Kを1.0(1/hr)とした。

ii) の実験で,乾球温度を一定にして乾燥速度を変化させる方法としては,(3.3)式のKの値を変える



Fig. 40. 実験装置のブロックダイヤグラム Block diagram of experimental apparatus.

A:試験片 Specimen, B:恒温槽 Testing chamber, C:温度センサー Temperature sensor, D:ロードセル Load cell



方法と、風速により乾燥速度を変化させる方法、および湿球温度を順次変化させて乾燥速度を変化させる 方法を試みた。この3つの実験はいずれもマカンバについてのみ行った。Kの値を変える実験は、乾球温 度を60℃とし、Kの値を1.5と3.0に変化させた。風速を変える実験は、乾球温度を20℃とし、風速を 約10cm/sec以下と約2m/secに変化させた。湿球温度を変化させる実験は、乾球温度を60℃とし、湿球 温度を適当に変化させることによってある程度大きな乾燥速度の違いが得られるようにした。

b) 実験結果と考察

i) 各温度とも含水率減少経過がほぼ等しくなる乾燥条件を用いて、クリープひずみと温度との関係を 調べ、これを前項(3.3)の各温度で含水率減少経過がそれぞれ異なる場合の実験結果と比較することに よって、乾燥速度がクリープと温度の関係に影響を及ぼすか否かを検討しようと考えた。乾燥速度の影響 が大きければ、この2つの実験結果は大きく異なるはずである。

Fig. 41 および Fig. 42 は各温度の実験における試片の含水率減少経過を示したもので、それぞれマカンバとヒノキの結果である。マカンバの場合、70°Cの経過が多少異なるが、違いがこの程度であれば問題ないものと思う。ただし、最終含水率については含水率の違いがひずみに大きく影響するので、これについては後で補正して用いている。

クリープ実験における除荷時の含水率や,無負荷試片の収縮ひずみ,あるいは負荷応力,無負荷試片と 負荷試片の収縮ひずみの差として求めた除荷直後の残留ひずみなどの値を, Table 11 および Table 12 に示した。Table 11 はマカンバの結果で, Table 12 はヒノキの結果である。

Table 11 および Table 12 の今回の実験結果と,前の Table 8, Table 9 のマカンバ(B)およびヒ

Table 11. 含水率減少経過が等しく,温度が異なる時のクリープ実験結果 (マカンバ) Results of creep tests for the makanba samples performed at different temperatures under similar drying processes.

温度 Temp. (°C)	含水率変化範囲 Range of m.c. changes (%)	自由収縮率 <sup>a)</sup> Free <sup>a,)</sup> shrinkage <i>a<sub>t</sub></i> (%)	負荷応力 Applied stress (kg/cm <sup>2</sup> )	ひずみ <sup>a),b)</sup> Strain <sup>a),b)</sup> E <sub>c</sub> (t <sub>0</sub> ) (%)	比 Ratio $\varepsilon_c(t_0)/\alpha_t$	クリープコンプライアンス Creep compliance $J_c(t_0)$ (×10 <sup>-3</sup> cm <sup>2</sup> /kg)
40	50-10.0	4.99	8.8	1,98	0.40	2.25
50	50-10.2	5.47	6.8	2,16	0,39	3,18
60	50-10.2	5.37	5.3	1.82	0.34	3, 43
70	50- 7.2	5.88	4,1	1,66	0.28	4.05

予定した含水率減少経過 Expected process of moisture content changes:  $U=40e^{-1.5t}+10(\mathcal{H})$ , t:時 間 time (hr),

初期ひずみ Initial strain: 0.25%,

試料数 Number of samples: 3-4-

a) 含水率変化範囲を生材から含水率10%までとした時の補正値

These values were calculated on the assumption that the moisture content changed from green to 10% M.C.

b) 除荷直後の値

Strains were measured after the stress was released.

Table 12. 含水率減少経過が等しく,温度が異なる時のクリープ実験結果 (ヒノキ) Results of creep tests for the hinoki samples performed at different temperatures under similar drying processes.

温 度 Temp, (℃)	含水率変化範囲 Range of m.c. changes (%)	自由収縮率 <sup>a)</sup> Free <sup>a)</sup> shrinkage <i>&amp;<sub>t</sub></i> (%)	負荷応力 Applied stress (kg/cm <sup>2</sup> )	ひずみ <sup>a),b)</sup> Strain <sup>a),b)</sup> E <sub>c</sub> (t <sub>0</sub> ) (%)	比 Ratio $\varepsilon_{c}(t_{0})/\alpha_{t}$	クリープコンプライアンス Creep compliance $J_c(t_0)$ (×10 <sup>-3</sup> cm <sup>2</sup> /kg)
40	40- 9.8	3, 27	5.0	0,66	0.20	1.32
50	4010.5	3.27	4.3	0,68	0, 21	1:58
60	40 9,6	3, 47	3.4	0.65	0.19	1.91
70	40 9.7	3,36	2.5	0.60	0.18	2,40

予定した含水率減少経過 Expected process of moisture content changes:  $U=30e^{-1.0t}+10(\%)$ , 時間 t: time (hr),

初期ひずみ Initial strain: 0.25%,

試料数 Number of samples: 2-5

a), b) Table 11. の脚注参照

See footntes of table 11.

ノキ(B)の実験結果とを比較すると、いずれの場合もひずみ ε<sub>c</sub>(t<sub>o</sub>)や、ひずみ比 ε<sub>c</sub>(t<sub>o</sub>)/a<sub>t</sub> の値に顕著 な差は認められない。前項で温度の影響を検討した際に初期ひずみに対する相対クリープが、温度が高く なると減少する傾向にあることを指摘したが、前項の実験では温度が高くなると乾燥速度が増してクリー プに要する時間が短かくなる。したがって、クリープが時間の影響を受ければ、高温側でひずみが相対的 に小さく測定されるおそれがある。この実験ではそれを避けるため、すべての温度城で乾燥速度を一定に したが、そのような処置をしても高温側でひずみが増加するような傾向は見られなかった。この結果から は、乾燥速度はクリープに影響を与えないように思われる。

T	able 13.	乾燥速度が異なる時のクリープ実験結果(マカンバ)	
Results of creep	tests for	the makanba samples performed under different drying rate	:s.

温 度 Temp. (℃)	乾燥速度係数 <sup>c)</sup> Drying rate <sup>c)</sup> coefficient <i>K</i> (1/hr)	含水率変化範囲 Range of m.c. changes (%)	自由収縮率 <sup>a)</sup> Free <sup>a)</sup> shrinkage <i>a<sub>t</sub></i> (%)	負荷応力 Applied stress (kg/cm <sup>2</sup> )	初期ひずみ Initial strain (%)	ひ ず み <sup>a),b)</sup> Strain <sup>a),b)</sup> E <sub>c</sub> (t <sub>0</sub> ) (%)	比 Ratio $\varepsilon_c(t_0)/\alpha_t$	クリープコンプライアンス Creep compliance $J_c(t_0)$ (10 <sup>-8</sup> cm <sup>2</sup> /kg)
60	1.5	50—10.2	5.37	5.3	0.25	1.82	0.34	3. 43
	3.0	50—10.0	5.49	5.3	0.25	1.79	0.33	3. 38

試料数 Number of samples:3

a), b) Table 11. の脚注参照

See footnotes of Table 11.

c)  $U=40e^{-Kt}+10(\%)$ ,

t:時間 time(hr)

	Results of creep tests for the makanba samples performed under different drying rates.								
温度 Temp. (℃)	乾燥時間 <sup>。)</sup> Drying <sup>c)</sup> time (hr)	合水率変化範囲 Range of m.c. changes (%)	自由収縮率 <sup>a)</sup> Free <sup>a)</sup> shrinkage <i>a<sub>t</sub></i> (%)	負荷応力 Applied stress (kg/cm <sup>2</sup> )	初期ひずみ Initial strain (%)	ひずみ <sup>a),b)</sup> Strain <sup>a),v)</sup> $\varepsilon_c(t_0)$ (%)	比 Ratio $\varepsilon_c(t_0)/\alpha_t$	クリープコンプライアンス Creep compliance $J_c(t_0)$ (×10 <sup>-8</sup> cm <sup>2</sup> /kg)	
20	1.7	75—12.2	4.95	12,5	0, 25	2, 36	0.48	1.89	
	5.0	75—12.6	5.09	12,5	0, 25	2, 29	0.45	1.83	
	0.7	69— 9.9	5.90	3.2	0, 15	1.11	0.19	3. 47	
	3.2	67—10.2	7.23	3.2	0, 15	1.30	0.18	4. 06	
60	0.7	69— 9.9	5.90	5.3	0. 25	1.78	0. 30	3.36	
	3.2	67—10.1	7.23	5.3	0. 25	2.22	0. 31	4.19	

Table 14. 乾燥速度が異なる時のクリープ実験結果(マカンバ)

試料数 Number of samples: 2-3

a), b) Table 11. の脚注参照

See footnotes of Table 11.

c) 含水率30%から10%までの乾燥時間

Drying time during the changes of moisture content from 30% to 15%.

- 81

ii) の実験では乾燥温度を一定にして、乾燥速度を色々な方法で変化させた。その結果は Table 13 および Table 14 に示すとおりである。Table 13 は乾球温度を $60^{\circ}$ C一定とし、(3.3) 式の乾燥速度係数 *K*を変化させたものであるが、*K*の値が異なる 2 つの測定値にはほとんど差が認められない。これに対して乾燥速度を大幅に変化させた Table 14 の実験結果では、 $60^{\circ}$ C の場合に無負荷試片の収縮ひずみやひずみ  $\varepsilon_c(t_0)$  の値が乾燥速度の違いによって大きく異なる。この場合は、乾燥速度を含水率が30%から15% まで変化する時間で示しているが、前の Table 13 について同様の表わし方をすると、*K*が 1.5 の場合は 含水率30%から15%までの乾燥時間が 0.9hr に相当し、*K* が 3.0 の場合は 0.4hr に相当する。

Table 14 の 60°C の場合, 乾燥速度を遅くすると無負荷試片の収縮ひずみ  $\alpha_t$  とひずみ  $\varepsilon_c(t_0)$  の値は いずれも増加し, したがって クリープコンプライアンス  $J_c(t_0)$  も 大きく増加する。 しかし, ひずみ比  $\varepsilon_c(t_0)/\alpha_t$  は乾燥速度が異なってもほぼ一定である。この結果からすると, ひずみ  $\varepsilon_c(t_0)$  の増加はクリー プに対する時間効果があったためと言うよりは, むしろ乾燥時間を長くしようとして高湿条件をとったこ とによる落ち込みの影響ではないかと考えられる<sup>60,60)</sup>。

そこで、次の実験では落ち込みの影響を少なくするため乾球温度を 20℃ とし、 乾燥速度の変化は 風速 を変えることによって与える実験を行った。その結果は同じく Table 14 に示してあるが、無負荷試片の 収縮ひずみ  $\alpha_t$  およびひずみ  $\epsilon_c(t_o)$  のいずれの値も、乾燥速度の違いによる差がほとんど生じなかった。

乾燥速度の影響を調べるために行った i) および ii) の2種類の実験結果から,乾燥過程のクリープで は乾燥速度すなわち時間の違いはクリープにほとんど影響を及ぼさないように思われる。しかし,温度が 高い時に乾燥速度を 遅くしようとして 高湿条件をとると,樹種によっては落ち込みの影響によって クリ ープひずみが増加し,一見乾燥速度の遅いことが クリープの増加に 寄与しているように 見えることがあ る。

3.4.2 温度変化の影響

a) 実験方法

温度が時間とともに変化するいわゆる温度非平衡状態では、温度一定の場合に比ベクリープが増大する といわれている<sup>8)46)46)</sup>。水分非平衡状態でこのことを調べるため、本報では温湿度条件をプログラム制御 することによって、各種の温度ならびに含水率の変化状態を作り、クリープ実験を行った。

供試材はマカンバとヒノキであるが、この実験では前に温度の影響(3.3.1 参照)を検討した際に用いた試験片のうちのマカンバ(A)およびヒノキ(A)に類似した試験片を用いた。供試材の全乾比重はマカンバが 0.65~0.69 で、ヒノキが 0.36~0.38 である。

実験に用いた装置は前の温度の影響を検討した際に用いた Fig. 29 の装置とほぼ同様であるが、この実 験では乾湿球温度を時間的なプログラムに従って変化させた。収縮ひずみの測定方法は、これも温度の影 響を検討した際に用いた方法と同じで、実験中の収縮ひずみ経過の測定には Fig. 4 の電気的なひずみ計 を用いた。なお、このひずみ計の温度変化に対するドリフトはほとんど無いことをあらかじめ確認してあ る。

実験は温度変化方法によって大きく次の3つのタイプに分けられる。Table 15 はタイプ別に温度,温度変化を与えた時期とその含水率,負荷応力,初期ひずみの各実験条件を示したものである。

タイプAは全期間を通じて一定温度の実験で、各温度とも初期ひずみを0.2%一定にしている。この実

樹 <sub>、</sub> 種 Species	実験の種類 Type of test	温 度 Temp.	温度上昇の時 含水率変化 Ranges of t during temp	期とその間の ime and M.C. perature rise	負 荷 応 力 Applied stress	初期ひずみ Initial strain
		(°C)	$\begin{array}{c c} (^{\circ}C) & 1 \text{ ime} & M.C. \\ (hr) & (\%) \end{array}$		(kg/cm <sup>2</sup> )	(%)
	<b>A</b> 1	30	·		8.5	0,2
	A2	50		_	5.4	0,2
マカンバ	<b>A</b> 3	70			3.3	0,2
	B1	30→50	0—0.5	53	5.4	0.13
Makanba	<b>B</b> 2	30→50	1.0-1.5	33—23	5.4	0,13
	<b>B</b> 3	50→70	1.0-2.0	24—13	3.3	0.12
	С	30→70	1.1-3.1	29—11	8.5→3.3	0.2
	Al	30	_	_	4.9	0.2
	<b>A</b> 2	50	—		3.5	0,2
ヒノキ	<b>A</b> 3	70		—	2.1	0.2
- · ·	<b>B</b> 1	<b>30→</b> 50	00.7	5726	3.5	0.14
Hinoki	<b>B</b> 2	30→50	0.6-1.1	23—16	3.5	0.14
	<b>B</b> 3	50-→70	0.4-0.9	24-14	2.1	0.12
	С	30→70	0,5-1,5	23—12	4.9-→2.1	0.2

Table 15. クリープ実験中の温度および応力の条件 The experimental conditions about temperature and stress.

験は、すでに前項(3.3 温度の影響)に示したものであるが、温度変化を与えた他のタイプの実験と比較 するため、再度ここに示した。

タイプBは途中で温度を上昇させた実験である。湿球温度は、温度上昇中もその温度に対する平衡含水 率が10%になる条件をあらかじめ表から求めておいて、これに従って変化させる方法をとった。したがっ て、実験終了時の試片含水率はいずれもほぼ10%になるはずである。実験条件として荷重の選び方が1つ の問題になるが、たとえばB1で初期ひずみ0.2%の荷重を与えて温度を上昇させると、温度上昇はヤン グ係数の低下につながるため、上昇後の温度に対する応力レベルは相対的に大きくなっていると考えなけ ればならない。そのため、この実験では温度上昇後の温度を基準にして荷重条件を決めた。すなわち温度 変化が 30°C から 50°C の場合は、50°C において生材試片の引張りひずみが0.2%に なるような荷重を、 あらかじめ静的な引張り試験で求めておいて、その荷重を与えた。したがってタイプBの実験における実 際の初期ひずみは、Table 15 に示したように0.2% より小さい。

タイプCは温度上昇方法はタイプBに準ずるが、荷重の与え方が異なる。タイプBの場合は、荷重が温 度上昇後の温度を基準にして定められているため、温度が低い間は相対的に低い荷重条件となっている。 そこでタイプCでは、終始初期ひずみ0.2%に相当する荷重が与えられるように、温度上昇中にヤング係 数の変化に合わせて逐次荷重を変化させる方法をとった。実験例として、マカンバの実験における乾湿球 温度の変化方法ならびに荷重の変化方法を Fig. 43 に示した。初期荷重の 8.5 kg/cm<sup>9</sup> は初期ひずみが 0.2%になる荷重であり、末期荷重の 3.3kg/cm<sup>9</sup> は70°C の生材試片の引張りひずみが 0.2%になる荷 重である。



Fig. 43. タイプCのクリープ実験における温度,負荷応力,含水率の経過 Changing pattern of temperature, stress and moisture content during the creep test of type C for the makanba samples.

b) 実験結果と考察

各タイプのクリープ実験結果を一括して Table 16 と Table 17 に示した。Table 16 はマカンバ, Table 17 はヒノキの結果である。自由収縮ひずみ,除荷直後の残留ひずみ,除荷直後のクリープコンプライアン スの各値は,実測値と換算値を併記しているが,換算値とは仮に含水率が10%であった時の値を計算によ り求めた値である。この換算は除荷時の含水率が必ずしも正確に10%にならないため行ったものである。

マカンバの実験結果を見ると、無負荷試片の自由収縮ひずみはA3の終始70℃一定の場合がやや大き いが、その他はほぼ同じような値である。クリープによって生じた残留ひずみについては、途中で 30℃ から50℃までの温度変化を与えたB1およびB2の値がA2の50℃一定の値よりやや大きく、50℃か ら70℃までの温度変化を与えたB3の値はA3の70℃一定の値よりやや小さな値を示している。Fig.44 はこれらの実験におけるひずみ経過を示したものである。実線はクリープ実験の途中で温度を上昇させた 場合で、点線は終始温度一定の場合である。B1では含水率が生材に近い高含水率時期に温度変化を与 え、B2では含水率が繊維飽和点近くになって顕著なクリープ増加が生じると思われる時期に温度変化を 与えたが、いずれも最終的なひずみには大きな差が生じなかった。B3では含水率25%から20%付近の最 もクリープ増加速度が大きいと思われる時期に温度変化を与えたが、この場合も特に温度変化がクリープ 増加を促すような傾向は認められなかった。

タイプCの実験結果については後で述べることにして、次に Table 17 のヒノキの結果について 述べ る。無負荷試片の自由収縮ひずみは一部にやや値の大きいものが含まれているが、これは乾燥条件の違い によって生じたものとは考え難く、試片の個体差と思われる。30℃から 50℃ までの温度変化を与えたB 1とB2の残留ひずみの値は50℃のA2の値とほぼ等しく、50℃から 70℃までの温度変化を与えたB3 の値は 70℃のA3の値よりやや小さい。これらの実験におけるひずみ経過は Fig. 45 に示すとおりであ るが、いずれもマカンバの場合とほぼ同じ傾向を示している。

タイプBの実験では、最終温度が同じであれば、温度一定の場合と温度変化を与えた場合とで最終的な

温度 含水率変 化範囲 Range of M.C.		自由収縮率 Free shrinkage a <sub>t</sub> (%)		arphi Str $arepsilon_{c}(t_{0})$	す み <sup>a)</sup> ain <sup>a)</sup> (%)	クリープ コンプライアンス <sup>a)</sup> Creep compliance <sup>a)</sup> $J_{c}(t_{0})(\times 10^{-8} \text{cm}^{2}/\text{kg})$	
(°C)	changes (%)	測定值 measured	換算值 <sup>b)</sup> converted <sup>b)</sup>	測定值 measured	換算值 <sup>b)</sup> converted <sup>b)</sup>	測定值 measured	換算值 <sup>b)</sup> converted <sup>b)</sup>
30	55-11.0	5.42	5,74	1.58	1.66	1.86	1,95
50	54-10.7	5.26	5.50	1.04	1.08	1,93	2,00
70	53- 9.8	6,16	6.10	0.93	0.92	2.82	2,79
30→50	5511.2	5.29	5,66	1.07	1.14	1.98	2.11
30-→50	54—10.3	5.33	5.43	1,18	1.19	2,19	2,20
50 <b>&gt;</b> 70	53—10.0	5.76	5.76	0.89	0.89	2.70	2.70
30 <b>-→</b> 70	54-10.0	5.75	5.75	1.28	1.28	2.17°)	2.17°)
	温 度 Temp. (℃) 30 50 70 30→50 30→50 50→70 30→70	<ul> <li>温度</li> <li>査水率変化範囲</li> <li>Range of M.C. changes</li> <li>(℃)</li> <li>30</li> <li>55—11.0</li> <li>50</li> <li>54—10.7</li> <li>70</li> <li>53—9.8</li> <li>30→50</li> <li>55—11.2</li> <li>30→50</li> <li>54—10.3</li> <li>50→70</li> <li>53—10.0</li> <li>30→70</li> <li>54—10.0</li> </ul>	温度         含水率変 化範囲         自由           Temp.         Range of M.C. changes (°C) $\pi t$ 30         5511.0         5.42           50         5410.7         5.26           70         539.8         6.16           30→50         5511.2         5.29           30→50         5410.3         5.33           50→70         5310.0         5.76           30→70         5410.0         5.75	温度 Temp.         含水率変 化範囲 Range of M.C. changes (°C)         自由収縮率 Free shrinkage $\alpha_t$ (%)           30         55—11.0         5.42         5.74           50         54—10.7         5.26         5.50           70         53—9.8         6.16         6.10           30 $\rightarrow$ 50         55—11.2         5.29         5.66           30 $\rightarrow$ 50         54—10.3         5.33         5.43           50 $\rightarrow$ 70         53—10.0         5.76         5.76           30 $\rightarrow$ 50         54—10.3         5.33         5.43           50 $\rightarrow$ 70         53—10.0         5.76         5.76           30 $\rightarrow$ 70         54—10.0         5.75         5.75	温度         含水率変化範囲         自由収縮率         ひ           Temp.         Range of M.C. changes $ree shrinkage$ Str ree (%)           (°C)         (%) $ree shrinkage$ $ree (%)$ 30         55-11.0         5.42         5.74         1.58           50         54-10.7         5.26         5.50         1.04           70         53-9.8         6.16         6.10         0.93           30→50         55-11.2         5.29         5.66         1.07           30→50         54-10.3         5.33         5.43         1.18           50→70         53-10.0         5.76         5.76         0.89           30→70         54-10.0         5.75         1.28	温度 Temp.         含水率変 化範囲 Range of M.C. changes (°C)         自由収縮率 Free shrinkage 加定值 (%)         ひずみ*) Strain*)           30         55-11.0         5.42         5.74         1.58         1.66           50         54-10.7         5.26         5.50         1.04         1.08           70         53-9.8         6.16         6.10         0.93         0.92           30→50         55-11.2         5.29         5.66         1.07         1.14           30→50         54-10.3         5.33         5.43         1.18         1.19           50→70         53-10.0         5.75         5.75         1.28         1.28	温度 化範囲 Temp.含水率変 化範囲 Range of M.C. changes (°C)自由収縮率 Free shrinkage $\alpha_t$ (%)ひずみ*) Strain*)クリープ コンプ Creep cd $\varepsilon_c(t_0)$ (%)(°C)(%)加定値 measured換算値b) convertedb)測定値 measured測定値 convertedb)測定値 measured3055-11.05.425.741.581.661.865054-10.75.265.501.041.081.937053-9.86.166.100.930.922.8230→5055-11.25.295.661.071.141.9830→5054-10.35.335.431.181.192.1950→7053-10.05.765.760.890.892.7030→7054-10.05.755.751.281.282.17°)

Table 16. 温度および温度変化方法が異なる時のクリープ実験結果(マカンバ) Free shrinkage and strain for the makanba samples in creep tests performed in various temperature ranges.

a) 瞬間弾性成分は含まず

Instantaneous elastic component is not included.

b) 含水率変化範囲を生材から含水率10%までとした時の換算値 These values were calculated on the assumption that the moisture content changed from green to 10% M.C.

c) 負荷応力は乾燥期間中の平均値として計算 Calculation was based on the average value of applied stresses during drying.

Table 17.	温度および温度変化方法が異なる時のクリープ実験結果(ヒノキ)					
Free sh	nrinkage and strain for the hinoki samples in creep tests					
performed in various temperature ranges.						

実験の 種類 Type of		含水率変 化 範 囲 Range of M.C.	自由収縮率 Free shrinkage <i>a<sub>t</sub> (%</i> )		$\begin{array}{c} \nabla\\ & \\ & \\ & \\ & \\ & \\ & \\ & \\ & \\ & \\ $	ず み <sup>a)</sup> ain <sup>a)</sup> (%)	クリープ コンプライアンス <sup>a)</sup> Creep compliance <sup>a)</sup> $J_c(t_0)(\times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{kg})$	
test	(°C)	changes (%)	測定值 measured	換算值 <sup>b)</sup> converted <sup>b)</sup>	測定値 measured	換算值 <sup>b)</sup> converted <sup>b)</sup>	測定値 measured	換算值 <sup>b)</sup> converted <sup>b)</sup>
Al	30	42-13.3	3,63	4.34	0.88	1,05	1.80	2.14
<b>A</b> 2	50	41-11.5	3,81	4.15	0.74	0.80	2.11	2.29
<b>A</b> 3	70	39—10.2	4.04	4.09	0.69	0.70	3.29	3.33
B1	30→50	45—11.9	3.74	4.16	0.72	0.80	2.06	2.29
B2	30→50	39-11.3	3.90	4.19	0,76	0.81	2,17	2.31
<b>B</b> 3	5 <b>0→</b> 70	41-10.7	4.01	4.16	0,61	0.63	2,90	3.00
С	30-→70	38—10.0	4.32	4.32	0.85	0.85	2.43°)	2, 43°)

a) 瞬間弾性成分は含まず

Instantaneous elastic component is not included.

b) 含水率変化範囲を生材から含水率10%までとした時の換算値

These values were calculated on the assumption that the moisture content changed from green to 10% M.C.

c) 負荷応力は乾燥期間中の平均値として計算 Calculation was based on the average value of applied stresses during drying.





B1, B2, B3: 実験の種類は Table 15 参照 Types of test were listed in Table 15.



Fig. 45. 乾燥過程のクリープにおよぼす温度上昇の影響 Effect of elevated temperature on creep deformation during drying, T:温度上昇期間 The period of rising temperature.

B1, B2, B3: 実験の種類は Table 15 参照 Types of test were listed in Table 15.



Fig. 46. 乾燥過程のクリープにおよぼす温度上昇の影響 Effect of elevated temperature on creep deformation during drying. T:温度上昇期間 The period of rising temperature. C:実験の種類は Table 15 参照 Type of test was listed in Table 15.

ひずみの値に大きな差が生じなかった。これはマカンバもヒノキも同様であった。しかし,温度変化を与 えた実験では,温度が低い間は相対的に小さな荷重が与えられていたわけで,それでも最終的なひずみに 差が生じなかったことは,温度変化がクリープの増加にあるていど寄与したとも考えることができる。そ こで,この点をさらに追求するため次のタイプCの実験を行った。

タイプCの実験では、クリープ実験中の全期間を通じて負荷が同レベルになるように、初期ひずみは 0.2%を与え、温度上昇中はヤング係数の低下に合わせて荷重を減少させていく方法をとった。実験結果 は Table 16, Table 17 ならびに Fig. 46 に示すとおりである。この場合は温度変化の幅を 30℃から 70℃と大きくとったが、平均的な温度を 50℃と考え、A 2の 50℃一定の実験結果と比較すると、マカ ンバでは Table 16 の修正値がタイプCの方が 2 割ほど大きい。また、Table 17 のヒノキの場合もタイ プCの方がやや大きな値を示している。

ここで得られた実験結果を総合して考えると、乾燥途中における温度の上昇はクリープの増大にいくら か効果があるように思われる。しかし、その量は1~2割程度で、既往の報告<sup>45)</sup>の水分平衡状態について 得られた結果に比べ、クリープ増大効果は極く少ないものと思われる。温度が高くなるとクリープが増大 する理由は、分子の運動エネルギーの増大や、リグニンおよびヘミセルロースのガラス転移温度の低いこ となどによって、ある程度説明ができる。しかし、温度の非平衡状態がクリープ増大に寄与することにつ いては、その原因が考えにくい。既往の報告には、温度傾斜がクリープ増大に役立っているとの指摘もあ るが、その影響があったとしても、水分非平衡下のクリープでは全ひずみ量の一部を占めるのにすぎない のではないかと考えられる。

#### 3.5 要約

乾燥過程のクリープに影響をおよぼす主要な因子として,応力,含水率,温度の影響について検討し, この他に乾燥速度と温度非平衡の影響についても若干の検討を行った。各因子の影響を要約すると次のようである。

#### 応力の影響

応力レベルが生材の静的強度の約40%以内では、乾燥過程のクリープによって生じるひずみと応力との 関係はほぼ比例関係を示す。そのため、クリープコンプライアンスの値は負荷応力が異なってもほぼ一定 である。また、引張りと圧縮ではほとんど差がない。しかし、応力レベルが大きくなると、対象とする含 水率範囲によってはひずみの増加と応力の増加とが比例しなくなり、その関係が引張りと圧縮で異なる。 引張りの場合は含水率約25%以上の高含水率域におけるクリープが応力の影響を受け易く、圧縮の場合は 逆に含水率約20%以下の低含水率域におけるクリープが応力の影響を受け易い。

含水率の影響

乾燥過程のクリープと含水率の関係について示した既往の報告は、繊維飽和点以下における含水率の減 少量とひずみの増加量とがほぼ比例的で、また含水率の高低による差はほとんど無いとするものが多い。 しかし、平衡含水率約10%の乾燥条件の下で行った本報の実験結果によると、乾燥途中のある含水率の時 期に荷重を与えた場合、負荷直後にクリープが著しく増大し、その後の単位含水率減少量あたりのクリー プ増加も、低含水率になってから荷重を与えたものほど大きい傾向が見られた。一方、初期含水率を約46 %から16%の範囲で何段階かに調整した試片を用いた場合は、そのような傾向は見られなくなり、含水率 減少量とクリープ増加量とがほぼ比例する傾向を示した。

これらのことから、乾燥過程のクリープで含水率の減少量とひずみの増加量とが比例関係を示すのは、 含水率変化の幅が小さいか、あるいは含水率の変化速度が非常にゆっくりで、含水率傾斜が少ない場合で あると考えられる。含水率傾斜が大きい場合は、クリープと含水率の関係を非線型的に取り扱う必要があ るように思われる。

3) 温度の影響

乾燥過程のクリープは温度の上昇により著しく増大し、クリープコンプライアンスはほぼ温度の2乗に 比例して増加する。しかし、温度の上昇は同時にヤング係数の低下につながるため、初期ひずみに対する クリープひずみの増加割合を示す相対クリープは、温度の上昇によりむしろ減少する傾向にある。水分平 衡下のクリープでは、温度が上昇すると相対クリープは増加すると言われており、水分非平衡下と水分平 衡下では明らかに傾向が異なっている。

相対クリープが温度によって変化する割合は、温度域によって異なり、温度範囲が 50°C から 80°C の場合は、相対クリープの温度による変化は少ない。しかし、温度範囲が 20°C から 50°C の場合は、その変化 はかなり大きい。また、マカンバとヒノキを比べると、マカンバの方が相対クリープの温度による変化が 大きい。このように、相対クリープの温度による変化が、温度域や樹種によって異なるのは、弾性変形に およぼす温度の影響と、含水率減少によって生じる流動変形におよぼす温度の影響が、それぞれ異なるた めであろう。

- 88 --

#### 4) 乾燥速度の影響

乾燥過程のクリープにおいて乾燥速度が異なることは、ひずみの増加に要する時間が異なることを意味 するが、乾燥速度の違いによる負荷時間の長短は、クリープにほとんど影響を及ぼさないように思われ る。しかし、乾燥速度の違いは湿度条件と密接な関係があるため、樹種によっては温湿度の組み合わせに よって落ち込みの影響が混入し、間接的に乾燥速度の違いがクリープに影響しているような挙動が見られ ることがある。

#### 5) 温度非平衡の影響

水分平衡下のクリープでは、実験中に温度を上昇させるいわゆる温度非平衡状態がクリープの増大に大きな効果があると言われている。しかし、乾燥過程のクリープではそれほど大きな効果はないような思われる。本報の実験結果からは温度非平衡によるクリープ増大効果は、せいぜい1~2割以内と思われるが、これについては効果の有無やその理由がまだ十分明らかでない。

#### 第4章 セットの生成とセット材の性質

乾燥過程で生じたクリープひずみは除荷後の回復が少なく、ドライングセットを形成しやすいことが知られている<sup>19)~23)</sup>。本章ではセットの生成過程とセットに関連する問題として、樹種別のセット、セット材の体積変化、セット材の強度的性質の変化を取り上げた。

#### 4.1 テンションセットの生成過程

テンションセットは引張りクリープひずみ中の非回復ひずみ成分をさすが、除荷後の水分状態によって 回復挙動は異なると考えられる。木材乾燥では乾燥初期に生じたクリープひずみが、その後の乾燥過程で どのようなセット状態を保つかが、乾燥後半の応力の発生に関連して重要な問題である。本報では、クリ ープひずみの発生時期や除荷後の含水率状態によって、セットの生成がどのような影響を受けるかを調 べ、セットの生成過程に関して検討を行った。

4.1.1 実験方法

クリープ実験において、荷重が与えられている時期や除荷後の含水率状態を種々変えるため、次のA, B, Cの3種類の実験を行った。Fig. 47 は各実験の荷重が与えられている期間の含水率範囲を示したものである。

実験Aは乾燥途中のある含水率の時期に荷重を与え、平衡状態になってから除荷したものである。これ は前章(3.2.1)の(b)の実験である。

実験Bでは生材状態で荷重を与え、乾燥の途中で荷重を除去し、その後放置する間のクリープ回復挙動 を調べた。

実験Cでは乾燥途中の各含水率時期に1時間だけ荷重を与え,除荷後同一空気条件下に放置して回復挙 動を調べた。

供試材にはマカンバを用いた。試験片はすべて同じ原木から採取したが、実験Aに用いた試験片と、ここで新しく追加した実験BおよびCに用いた試験片とは、木取り位置の関係で全乾比重がやや異なる。実験Aに用いた試験片の全乾比重は0.64~0.65で、実験BおよびCに用いた試験片の全乾比重は0.67~0.68である。

実験中与えた荷重は、生材時の試片断面積を基準にした応力が10kg/cm<sup>3</sup>となる一定荷重である。乾





Relation between the type of creep test and the range of moisture content while stress was applied. 燥条件はすべて温度20℃,関係湿度55%(平衡含水 率10%)である。

各実験におけるクリープひずみの大きさや,除荷 後の回復量,セットの大きさなどを比較するため, クリープひずみ をクリープコンプライアンス *J(t)* で表し,これを次の3つの成分に分けて考えた。

J(t)=J<sub>e</sub>+J<sub>r</sub>+J<sub>s</sub> ………(4.1) J<sub>e</sub> は除荷時の瞬間回復成分, J<sub>r</sub> はこれに遅れて 回復するクリープ回復成分, J<sub>s</sub> は非回復成分であ る。これらの関係は, 第3章の Fig. 13 に模式図と

4.1.2 実験結果

して示している。

実験Aの結果はすでに 前章(3.2.2) で 示した。 ひずみの発生経過は Fig. 26 に示されている。ここ で,実験BおよびCのひずみ経過を,それぞれFig. 48 および Fig. 49 に示す。

実験Aのように、含水率が外周空気の温湿度にほ ぼ平衡してから除荷した場合は、クリープ回復は少





Creep curves in the creep test of type B. 除荷時期とその時の含水率 Time and moisture content when stress was released were as follows;

- **I** - **4**.5hr(34.0%), -▲ - 5.5hr(29.0%), -● - 7.2hr(22.4%), -□ - 8.5hr(19.2%), -△ - 11.0hr(15.0%), -○ - 30.0hr(13.4%)



Fig. 49. タイプCの実験のクリープ曲線

Creep curves in the creep test of type C. 負荷時期とその時の含水率

Time and moisture content when stress was applied were as follows:

-0-	$3.2hr(42.5\%), -\triangle$	- 4.7hr(32.0%),
-[]-	5.7hr(26.6%),	- 6.8hr(22.3%),
	8.3hr(19.0%), —	- 13.4hr(15.3%)

ないが,実験BおよびCのように,乾燥途中の含水率がまだ減少しつつある時期に除荷した場合は,クリ ープ回復はかなり大きい。

荷重の与えられている時期が異なるA, B, Cの3種類の実験におけるひずみの大きさや,除荷後のク リープ回復量あるいはセット量を比較するため,ここではクリープによって生じたひずみを回復成分と非 回復成分とに分けて考えることにした。回復成分はさらに除荷時の瞬間回復成分と,その後遅れて回復す るクリープ回復成分とに分けた。Table 18~Table 20 は A, B, C の各実験におけるひずみを各成分別 に示したもので,数値はすべてクリープコンプライアンスで示している。

実験Aは荷重を与えた時期が異なるが、除荷時期はいずれも試片含水率がほぼ平衡に達してからである。Fig. 50 は負荷時期の違いが各ひずみ成分にどのような影響を及ぼすかを見たものである。瞬間回復成分 *J* は除荷時の含水率が一定であるためほぼ一定で少ない。また、この実験ではクリープ回復成分 *J* が少なく、全ひずみの約80~90%は非回復成分である。そして、この傾向はクリープひずみの発生した含水率の高低とは無関係である。

実験Bは生材から荷重を与え、乾燥途中のそれぞれ含水率が異なる時期に除荷したものである。Fig.51 は各ひずみ成分と除荷時の含水率との関係を示したものであるが、ここではクリープ回復成分  $J_r$ が特異 な傾向を示している。 $J_r$ の値は除荷時の含水率が約25%付近まではほぼ一定である。しかし、除荷時期 がこれより低含水率になると、含水率約15~20%付近までは $J_r$ の値が徐々に増加し、除荷時期がさらに 低含水率になると、今度は $J_r$ の値は急激に減少する。これは、含水率約15~20%までに除荷されれば回 復可能であったひずみが、その後も荷重が与えられていたことによって非回復なひずみに変化したことを

#### 林業試験場研究報告 第335号

## Table 18. タイプAの実験におけるクリープコンプライアンスと その3成分 (マカンバ,引張り) Creep compliance and its three components in the creep tests of type A.

(Tensile creep test for Makanba)

含水率変化範囲 Range of	クリープコンプライアンスとその成分 <sup>a)</sup> Creep compliance and its components <sup>a)</sup> (×10 <sup>-8</sup> cm <sup>3</sup> /kg)						
M.C. changes (%)	J(t)	Je	$J_r$ (ratio) <sup>b)</sup>	Js (ratio) <sup>b)</sup>			
73.0→13.6	1.76	0, 11	0,26 (0,16)	1, 39 (0, 84)			
30.0→13.7	1,66	0,11	0, 27 (0, 17)	1.28 (0.83)			
23.8→12.8	1,33	0.12	0.10 (0.08)	1.11 (0.92)			
20. 2→13. 4	1.06	0.11	0.21 (0.22)	0.74 (0.78)			
18.0→13.3	0.90	0.14	0.09 (0.12)	0.67 (0.88)			
16.2→13.3	0,78	0,12	0.11 (0.17)	0, 55 (0, 83)			

a)  $J(t) = J_e + J_r + J_s$ 

J(t):負荷後30時間における全変形

Total creep compliance when t=30hr after loading.

Je :瞬間回復成分

Instantaneous recoverable component.

- Jr : クリープ回復成分 Retarded recoverable component.
- J<sub>s</sub> : 非回復成分 Unrecoverable component.

負荷応力 10kg/cm<sup>2</sup>

Applied stress was 10kg/cm<sup>2</sup>.

b) (J<sub>r</sub>+J<sub>s</sub>) に対する比 Ratio to(J<sub>r</sub>+J<sub>s</sub>)

示すもので、この時期以後ひずみのセットがおこったと見られる。

実験Aおよび実験Bの結果から、クリープ回復にはクリープひずみの発生した含水率時期よりも、ひず みが発生した後の拘束条件や含水率状態の方が関係深いように思われた。そこで、次の実験Cではクリー プひずみが発生した後、短時間のうちに除荷し、ひずみの回復をなるべく拘束しないようにした。

実験Cは乾燥途中の含水率がそれぞれ異なる時期に一定時間(1時間)荷重を与え,その後自由にクリ ープ回復させたものである。実験結果は Table 20 および Fig. 52 に示すとおりである。これによる と,ひずみの発生量が最も大きな含水率 25% 付近において,除荷後の残留ひずみの約 50% は回復し,約 50%はセットになる。そして,これよりさらにひずみの発生時期が低含水率側になると,回復成分の割合 はむしろ増加する傾向にあった。ただし,このうち全体のひずみ量が少ないものは,回復成分と非回復成 分の割合を求める事が実験精度の面から無理であるかもしれない。ここではクリープひずみの発生時期と クリープ回復性との関係を,十分に明らかにすることは出来なかったが,乾燥過程のクリープひずみは除 荷後の含水率状態によって,約50%近くも大きく回復することが明らかになった。

### 木材乾燥におけるクリープとセットに関する研究(久田)

# Table 19. タイプBの実験におけるクリープコンプライアンスと その3成分(マカンバ,引張り)

Creep compliance and its three components in the creep tests of type B. (Tensile creep test for Makanba)

含水率変化範囲 Range of	クリープコンプライアンスとその成分 <sup>a)</sup> Creep compliance and its components <sup>a)</sup> (×10 <sup>-8</sup> cm <sup>2</sup> /kg)					
M.C. changes (%)	J(t)	Je	$J_r$ (ratio) <sup>b)</sup>	Js (ratio) <sup>b)</sup>		
75→34.0	0. 43	0.21	0.22 (1.00)	0 (0)		
75→29.0	0.59	0,19	0.23 (0.57)	0. 17 (0. 43)		
75 <b>→</b> 22 <b>.</b> 4	0.95	0,20	0.27 (0.36)	0.48 (0.64)		
75 <b>→</b> 19 <b>.</b> 2	1.20	0,16	0.40 (0.38)	0.64 (0.62)		
75→15.0	1.46	0,14	0, 33 (0, 25)	0.99 (0.75)		
75→13, 4	1.63	0.09	0.09 (0.06)	1, 45 (0, 94)		

a), b) Table 18 の脚注参照

See footnotes of Table 18.

# Table 20. タイプCの実験におけるクリープコンプライアンスと その3成分 (マカンバ,引張り)

Creep compliance and its three components in the creep tests of type C. (Tensile creep test for Makanba)

含水率変化範囲 Range of	クリープコンプライアンスとその成分 <sup>a)</sup> Creep compliance and its components <sup>a)</sup> (×10 <sup>-8</sup> cm <sup>2</sup> /kg)						
M.C. changes (%)	J(t)	Je	$J_r$ (ratio) <sup>b)</sup>	Js (ratio) <sup>b)</sup>			
42.5→34.0	0, 20	0.18	0.02 (—)	0 (—)			
32.0→26.4	0, 31	0.18	0,01 (0,08)	0,12 (0,92)			
26.6→22.7	0.63	0.19	0, 19 (0, 43)	0.25 (0.57)			
22. 3→19. 8	0,59	0.15	0.24 (0.55)	0.20 (0.45)			
19.0 <del>-→</del> 17.5	0,41	0.14	0.24 (0.89)	0.03 (0.11)			
15.3→14.8	0.27	0.11	0.16 (1.00)	0 (0)			

a), b) Table 18. の脚注参照

See footnotes of Table 18.





Relationship between moisture content when stress was applied and total creep compliance or its components in the creep test of type A. J(t),  $J_e$ ,  $J_r$ ,  $J_s$ : Table 18 の脚注参照

See footnotes of Table 18.



Fig. 51. タイプBの実験における全クリープ コンプライアンスならびに,その3成 分の大きさと除荷時の含水率との関係

Relationship between moisture content when stress was released and total creep compliance or its components in the creep test of type B.

J(t), Je, Jr, Js: Table 18 の脚注参照 See footnotes of Table 18.



Fig. 52. タイプCの実験における全クリープ コンプライアンスならびにその3成分 の大きさと負荷期間中の平均含水率と の関係

Relationship between moisture content while the stress was applied and total creep compliance or its components in the creep test of type C.

J(t), Je, Jr, Js: Table 18 の脚注参照 See footnotes of Table 18. 4.1.3 考 察

乾燥過程で発生したクリープひずみは,除荷後に水分変化がない場合はほとんど回復せず,ドライング セットの状態を保つことが知られている。しかし,除荷後に含水率が変化する場合はかなりのひずみが回 復すると考えられる。

荷重が与えられている時期の異なる3種類の実験結果によると、含水率20~25%の時期に短時間(1時間)の負荷によって生じたひずみ(除荷直後の残留ひずみ)は、除荷後含水率が低下する間に約1/2が回復し、約1/2がセットひずみとして残る。一方、生材から含水率20~25%付近まで継続して荷重が与えられていた場合は、除荷直後の残留ひずみの約1/3がその後の含水率減少過程で回復し、約2/3がセットひずみとして残る。そして、負荷期間がさらに長くなって、含水率平衡状態まで継続して荷重が与えられていた場合は、大部分のひずみがセットひずみとして残る。これらの結果から、テンションセットの生成にはクリープひずみが発生した後、そのひずみが固定されて安定な状態を得るまでの一定期間が必要であると思われる。また、安定な状態を得るためには、この期間中に含水率変化のないいわゆる水分安定状態にあることが必要であるように思われる。

水分非平衡状態における木材のクリープ変形は、水分子の離脱によって隣接したセルロース分子の分子 鎖の結合が断たれ、空席となった水酸基が力の方向にずれた位置で他の水酸基と新たな結合を生じること によって進行すると考えれば、セットの生成は次のように説明できる。すなわち含水率の変化がなくなっ てから除荷する場合は、除荷後セルロース分子の結合状態は変化しないためひずみの安定状態が得られ る。これに対して、除荷後含水率が変化する場合は、木材が本来元の形に戻ろうとする性質を持っている ため、水分子の離脱によって自由になった水酸基が、今度はそれまでの変形方向と逆の方向にある他の水 酸基と結合することによって、クリープ回復がおこると考えられる。

テンションセットは吸放湿をくり返すことによってほとんど消失することが報告されている<sup>84)637-64)が,</sup> この場合も同様に水分子の吸脱着と木材の原形に復そうとする力の作用が,クリープ回復に寄与している ものと考えられる。

4.2 コンプレッションセットの生成過程

圧縮荷重下で生じたクリープひずみのうち非回復なひずみをコンプレッションセットとしている。コン プレッションセットは圧縮荷重下で乾燥した木材の収縮ひずみの増加分をさし、落ち込みが原因となって 収縮ひずみが増加する場合も、寸法変化から見た現象は同じである。しかし、両者を区別することは困難 であるので、本報では圧縮荷重下で生じた収縮ひずみの増加分を一括してコンプレッションセットとして いる。

木材乾燥の分野では、材内の応力状態と含水率状態の推移の組み合わせから考えて、コンプレッション セットが起きるケースは少ないと思われるが、テンションセットと比較する意味でここに取り上げた。

4.2.1 実験方法

引張りの場合とほぼ同様な方法で実験を行ったが、圧縮では実験Aに相当する実験は行わなかった。す なわち、生材状態で荷重を与え、乾燥の途中で除荷する実験と、乾燥の途中で各含水率時期に1時間だけ 荷重を与える実験を行った。

供試材は全乾比重0.69~0.71のマカンバで、これは第2章の圧縮応力下の木材の収縮経過を測定した際 に用いた試料と同じである。圧縮荷重の与え方や収縮ひずみの測定方法はすべて第2章(2.2.1 参照)に 示した通りである。ただし、荷重条件は1レベルのみで、生材時の試片断面積に対する応力が10kg/cm<sup>3</sup>となる一定荷重を与えた。乾燥条件は温度20℃、関係湿度55%(平衡含水率10%)である。

4.2.2 実験結果と考察

実験結果を Table 21 および Fig. 53 に示した。Table 21 の上段と Fig. 53 の(I)は同じ実験であ る。この実験は荷重を生材状態で与え,乾燥の途中で除去したものである。Fig. 53 の(I)の横軸は除荷 時の含水率であるが,除荷時の含水率が約15~20%よりも低くなるとクリープ回復成分 *J*r は減少する傾 向が見られる。このことは乾燥途中で荷重が取り除かれれば回復可能であったひずみ成分が,その後もひ き続き荷重を与えられていたことによって非回復なひずみに変化したことを示すもので,前の引張り荷重 下の実験でもこれと同様の傾向が認められた。

Table 21 の下段および Fig. 53 の(II)は、乾燥途中のある時期に1時間だけ圧縮荷重を与えた場合で ある。 この実験ではひずみの大きさや  $J_e$ ,  $J_r$ ,  $J_s$  の各成分の割合が引張りの場合とやや異なる。 圧縮の 場合は、ひずみの発生量そのものが全体にやや大きく、そのうち非回復成分  $J_s$  の占める割合もやや大き い。引張りと圧縮を比較して大きな違いがあるのはクリープ回復成分  $J_r$  の含水率約20~25%以下の挙動

> Table 21. 試片含水率が生材からEMCまで(70%から13%まで)変化する間の, それぞれ異なる時期に荷重が与えられた場合のクリープコンプライアン スとその3成分(マカンバ,圧縮)

Creep compliance and its three components. Stress was applied in various ranges of moisture content while the samples were dried from green to EMC;  $70\rightarrow13\%$ .

時 間 <sup>a)</sup> Time <sup>a)</sup>	含水率変化範囲 Range of	クリープコンプライアンス <sup>b)</sup> Creep compliance <sup>b)</sup> (×10 <sup>-8</sup> cm <sup>2</sup> /kg)					
(hr)	M.C. changes (%)	J(t)	Je	Jr (ratio)°)	Js (ratio)°)		
04.2	70—33, 0	0,40	0,18	0.06 (0.28)	0, 16 (0, 72)		
06	70—19.2	1,10	0,18	0.22 (0.24)	0.70 (0.76)		
0—8	70—18.6	1.25	0.15	0.37 (0.34)	0,73 (0,66)		
0—12	70—15.3	1.51	0.10	0.27 (0.19)	1, 14 (0, 81)		
0—30	70—13.2	1.56	0.09	0.11 (0.07)	1.36 (0.93)		
5—6	33. 4-26. 7	0,53	0,15	0.24 (0.63)	0.14 (0.37)		
6—7	24.5—20.7	0.96	0.21	0.33 (0.44)	0,42 (0,56)		
8—9	18.8—17.3	0.50	0, 15	0.10 (0.29)	0. 25 (0. 71)		
11-12	16.0—15.5	0.56	0,12	0, 22 (0, 50)	0.22 (0.50)		

(Compressive creep test for Makanba)

a) 荷重が与えられていた時期,負荷応力は10kg/cm<sup>2</sup>

Drying time while the stress was applied. Applied stress was 10kg/cm<sup>2</sup>

b), c) Table 18 の脚注参照

See footnotes of Table 18.





- (1) 生材状態で負荷し乾燥の途中で除荷
- Stress was applied to green sample and was released while drying. (II) 各合水率時期に1時間だけ負荷
  - Stress was applied only one hour at the various moisture content levels. 1) 除荷時の含水率
    - M.c. when stress was released.
    - 負荷期間中の平均含水率 Average m. c. for one hour while the stress was applied.

である。引張りの場合は含水率20~25%以下の時期に発生したひずみはかなり回復し、含水率15%付近で はほとんど回復する。これに比べて圧縮の場合は回復量が少ない。圧縮の場合は、含水率20~25%の時期 に発生したひずみの約5割以上は回復せず、ドライングセットとして残ると見られる。

この違いの生じた原因として、クリープ変形時の木材成分分子の位置の移動方向と、除荷後の乾燥過程 で収縮時に分子の位置の移動がおこる方向との組み合わせが、引張りと圧縮で異なることが考えられる。 引張り荷重下のクリープでは、木材成分分子の位置の移動方向は無負荷材に比べれば伸びた方向であり、 圧縮荷重下のクリープでは縮んだ方向である。除荷後、水分子が離脱する際には木材成分分子は現在の位 置より縮んだ方向へ位置を換えようとするが、引張りクリープによってすでに伸びた状態にある場合は、 分子の位置の移動がクリープを回復させる方向に作用する。一方、圧縮クリープによってすでに縮んだ状 態にある場合は、水分子の離脱が木材成分分子の位置をさらに縮んだ方向へ移動させようとするため、ク リープ回復は起こりにくいと考えることができる。

#### 4.3 樹種別のテンションセット

乾燥過程の木材の変形性能は、人工乾燥における応力や損傷の発生に関係の深い因子の1つである。変 形性能の大きな木材は、水分傾斜が大きくなって応力が発生する要因が生じても、材自身の変形が容易な ためそれ程応力は増加しない。逆に変形性能の小さな木材は、内外層の収縮差によって発生する応力がす ぐに大きくなって、損傷の発生する危険が高まる。本報では変形性能を表わす尺度としてクリープを取り

Table 22. 引張り荷重を与えて乾燥した Shrinkage and drying set of tested

番 号 Species number	樹  種 Species (学  名) (Scientific name)	産 地ª' Origin <sup>a)</sup>	全乾比重 Specific gravity in oven dry	引張り強さ 生材 Tensile strength in green (kg/cm <sup>2</sup> )	負荷応力 Applied stress (kg/cm <sup>2</sup> )	初期ひずみ Initial strain (%)
1—1	ヒノキ Hinoki (Chamaecyparis obtusa)	Kiso	0.36	25.7	0 4.9 9.8	0 0.18 0.39
1—2	ヒノキ Hinoki (Chamaecyparis obtusa)	Kanto	0.41	29.0	0 5.1 8.5	0 0.15 0.25
2—1	マカンバ Makanba (Betula maximowi- cziana)	Hok.	0.64	53.2	0 5.0 9.9 20.1	0 0.12 0.23 0.52
2—2	マカンバ Makanba (Betula maximowi- cziana)	Hok.	0.63	52.3	0 7.1 11.2 20.2	0 0.14 0.22 0.43
3	ミズナラ Mizunara (Quercus mongolica)	Hok.	0.61	53.7	0 9.7 19.6	0 0.16 0.33
4	キャンプノスパーマ Campnosperma (Campnosperma)	Sol.	0.45	48.8	0 5.7 9.4	0 0.14 0.25
5	カナリウム Canarium ( <i>Canarium</i> )	N.G.	0.50	24.8	0 1.85 2.98	0 0.15 0.25
6	ターミナリア Terminalia ( <i>Terminalia</i> )	N.G.	0.45	47.3	0 7.9 13.1	0 0, 15 0, 25
7	エーリーマ Erima (Octomeles)	N.G.	0.33	31.4	0 3.1 5.1	0 0.16 0.25
8	アピトン Apitong (Dipterocarpus)	Phi.	0.72	62.4	0 9.8 19.8	0 0.12 0.28
9	クルイン Keruing (Dipterocarpus)	Mly.	0.82	52.7	0 6.6 9.9	0 0.15 0.24
10	レッドラワン Red lauan (Shorea negrosensis)	Phi.	0.53	48.7	0 4.9 9.8 19.6	0 0.10 0.22 0.57

含水率 Moisture content		収 縮 率 Shrinkage (%)					
(9	6)	長さ方向(T) Length(T-direction)			幅方向(R) Width(R-direction)		
初 期 Initial	気 乾 Air dry	気 乾 Air dry	出 <sup>b)</sup> Ratio <sup>b)</sup>	全 乾 Oven dry	気 乾 Air dry	上 <sup>b)</sup> Ratio <sup>b)</sup>	全 乾 Oven dry
43	13.8	3.43	0	6.32	1.34	0	2,76
42	13.6	2.74	0.21	5.75	1.70	-0.25	3.05
42	14.3	2,16	0.35	5,23	2.05	-0.58	3.40
40	13.8	3, 29	0	6.32	1.38	0	2.92
40	13.6	2.69	0.19	5.75	1.65	-0.17	3,13
40	13.7	2, 31	0.30	5.42	2,01	-0.44	3.26
74	11.9	4.37	0	7.74	3, 28	0	6, 29
71	12.0	3.53	0.19	6.92	3.63	-0.12	6.66
75	12.1	2.86	0.34	6.36	4.22	-0.31	7.25
	12.6	1.36	0.68	5.00	5.21	-0.89	8.14
76	11.6	4.58	0	7.69	3.54	0	6.23
76 75	11.7	3.34	0.27	6.61	4.15	-0.18	0.87
75	11.0	1.42	0.38	4, 70	5, 30	-0.30 -0.49	7.93
82	12.8	5, 10	0	8, 83	2, 55	0	4, 65
83	13.6	3.83	0.21	7, 45	2.82	-0.17	4.95
79	12.9	2,89	0.43	6, 80	3, 59	-0.42	5, 35
150	12.2	4 52	0	7 54	1.06		2.74
109	10.0	4.52	0 11	7.04	1,70	0.25	3.74
163	13.7	3.94	0.11	7.05	2.30	-0.25	4.07
159	13.3	3.53	0.22	0,02	2,75	-0.40	4,40
107	12.6	8,91	0	13.40	3.53	0	6.75
104	12.4	7.92	0.12	12,53	3,95	-0.10	7,29
104	12.4	7.27	0.19	11,90	4.17	-0.17	7.51
95	13.2	2.05	0	4.16	1.33	0	3.07
99	13.3	1.71	0.16	4,05	1.53	-0.16	3.13
93	13.2	1.47	0, 28	3,81	1.60	0. 20	3.15
198	13.4	7.70	0	10.16	1.95	0	3.37
198	13.3	4.00	0.49	6.66	2.24	-0.14	3.69
199	13.0	2.96	0.62	5,20	2,21	-0.11	3.61
61	12.1	7.47	0	11.49	3.02	0	5,58
68	12.3	6.34	0.17	10,42	3.12	-0.05	5,22
60	12.6	5.63	0.26	10.08	3,61	-0.24	6.15
59	12.7	10.17	0	14.77	4.62	0	7.78
59	12.7	8.64	0.15	13,54	5.41	-0.17	8.48
58	12.6	8.08	0.21	13.01	5.81	-0.25	8.78
80	12.5	5.53	0	8,57	2.24	0	3.94
79	12.7	4.74	0.13	7.84	2.47	-0.12	4.07
78	13.1	4,04	0,25	7,27	2,83	-0.31	4.41
90	12.9	2,91	U <b>.</b> 46	6,45	3.42	-0.57	4,92

# 木材の収縮率とドライングセット species dried under various tensile stresses.

Table 22. つづき (Continued)

番 号 Species number	樹 種 Species (学 名) (Scientific name)	產 地 <sup>a)</sup> Origin <sup>a)</sup>	全乾比重 Specific gravity in oven dry	引張り強さ 生 材 Tensile strength in green (kg/cm <sup>2</sup> )	負荷応力 Applied stress (kg/cm <sup>2</sup> )	初期ひずみ Initial strain (%)
11	ニューギニアバスウッド New Guinea Basswood (Endospermum)	N.G.	0.30	30.6	0 3.7 5.9	0 0.15 0.25
12—1	ラミン Ramin (Gonystylus)	Kal.	0.71	40.6	0 6.4 10.7	0 0.15 0.25
12—2	ラミン Ramin (Gonystylus)	Kal.	0.66	51.4	0 9.8 19.8	0 0. 20 0. 42
13	カロフィルム Calophyllum ( <i>Calophyllum</i> )	Sol.	0.57	48.3	0 6.6 11.8	0 0.13 0.24
14	リツェア Litsea ( <i>Litsia</i> )	N.G.	0. 37	43.8	0 4.6 7.5	0 0.15 0.25
15	インツィア Intsia (Intsia)	N.G.	0.65		0 12.7 20.1	0 0.15 0.25
16	セプターパヤ Sepetir paya (Pseudosindora)	Swk.	0, 57	52.5	0 9.0 14.4	0 0.18 0.30
17	ジョンコン Jongkong (Dactylocladus)	Swk.	0, 53	27.7	0 5.0 7.7	0 0.15 0.25
18	タウン Taun (Pometia)	N.G.	0, 51	48.7	0 4.0 6.8	0 0.10 0.16
19	ナトー Nato (Palaquium)	Sol.	0.66	57.5	0 8.2 13.9	0 0.15 0.25
20	ホワイトシリス White siris (Ailanthus)	N.G.	0.40	28.5	0 3.9 6.3	0 0.15 0.25
21	グメリナ Gmelina (Gmelina)	N.G.	0.52	53,6	0 7.5 11.8	0 0, 15 0, 25

注) 乾燥条件:温度 20°C, 関係湿度 55%, 試料数:3~4
 a) Hok.:北海道, Sol.:ソロモン, N.G.:ニューギニア, Phi.:フィリピン, Mly.:マラヤ, Kal.:カリマンタン, Swk.:サラワク
 b) 自由収縮率に対するテンションセットの割合。伸びセットは正の値, 縮みセットは負の値で示した。

含水率 Moisture content		収 縮 率 Shrinkage (%)					
(%)		長さ方向(T) Length(T-direction)			幅方向(R) Width(R-direction)		
初 期 Initial	気 乾 Air dry	気 乾 Air dry	此 <sup>b)</sup> Ratio <sup>b)</sup>	全 乾 Oven dry	気 乾 Air dry	出 <sup>b)</sup> Ratio <sup>b)</sup>	全 乾 Oven dry
119	12.6	3, 27	0	5.81	1.20	0	2,71
116	12.2	2,77	0,17	5.35	1.54	-0.24	2,98
114	12.2	2,46	0, 27	5,06	1,73	-0,40	3, 20
66	12.7	6,69	0	11.30	2,49	0	5.25
65	12.7	6.05	0.10	10.73	2.92	-0,17	5.57
66	12.7	5.72	0.14	10.50	3.05	-0.23	5.62
54	12.3	5.53	0	9.78	2, 25	0	4.80
60	12.5	4.83	0,12	9.19	2.70	-0.23	5.10
59	12.6	3.92	0.28	8,32	3.10	-0.42	5.39
108	13.2	4.11	0	7.03	2.34	0	4.71
108	13.4	3.41	0.16	6.51	2,50	-0.08	4.77
104	13.4	2,99	0.27	6.50	3.13	-0,36	5.62
156	12.9	3,65	0	6.52	1.25	0	2.83
153	12.6	2.56	0.31	5.51	1.49	-0.16	2.81
156	12.9	2.05	0.44	5.04	1.55	-0.24	2, 91
85	13.6	1,55	0	4.37	0.91	0	2,19
85	13.4	1.37	0.14	4.24	0.95	-0.02	2,09
86	13.8	1.15	0.22	3.97	1,11	-0.24	2.29
68	14.2	4.06	0	7.24	2.20	0	4.87
69	14.0	2, 39	0.42	5.76	2,46	-0.10	5,06
70	14.1	1.99	0.52	5 <b>. 32</b>	2,59	-0.16	5.22
99	13.5	4.60	0	8.32	2.16	0	4.45
99	13.2	4,01	0.14	7.78	2.48	-0.12	4.67
101	13.3	3,68	0,21	7,59	2,70	-0.23	4.96
68	13.0	3.95	0	6.70	2,09	0	4.21
69	13.0	3.39	0.14	6,40	2.40	-0.15	4.67
70	13.1	3.07	0.22	5.94	2,44	-0.18	4.31
99	13.6	4.91	0	8.54	2,19	0	4,60
96	13.8	4.32	0.11	8.17	2.55	-0.18	4.77
99	13.7	3, 97	0.19	7,80	2,69	-0.24	5.04
128	13.4	4,16	0	7,32	2,08	0	4.01
131	13.3	3.54	0.15	6.79	2.40	-0,15	4.22
129	13.4	3.28	0.21	6.66	2,54	-0.22	4.38
117	11.8	3.56	0	6.93	1.32	0	2,95
117	11.6	2.97	0.19	6,56	1.55	-0,16	3.03
117	11.8	2,67	0.26	6.27	1.68	-0.29	3, 23

Note) Drying Cconditions : Temperature 20°C, R.H. 55%. Number of samples : 3-4.
a) Hok.: Hokkaido, Sol.: Solomon, N.G.: New Guinea, Phi.: Philippines, Mly.: Malaya, Kal.: Kalimantan, Swk.: Sarawak
b) Ratio of tension set to free shrinkage. Set of expansion was shown by positive value and set of contraction was shown by negative value.

上げたが、乾燥過程でクリープひずみを求めようとすると、厳密には第3章の冒頭で述べたように、弾性 的なひずみ成分の取り扱いについて問題がある。しかし、近似的にはクリープ実験における除荷直後の残 留ひずみ、あるいは一定期間放置後のセットひずみによっても、ほぼクリープひずみの大きさを知ること ができる。ここでは、乾燥過程の木材の変形性能の違いを樹種別に調べるため、テンションセットひずみ を測定したので、その結果について述べる。

4.3.1 実験方法

供試材の種類は実験結果の表, Table 22 に示した21樹種である。試験片の採取方法は第2章(2.1.1) に示した方法と同じで,試片形状は長さ 110mm,幅 10mm,厚さ 5 mm の短冊型である。実験は温度 20℃,関係湿度55%(平衡含水率10%)の恒温恒湿室で行った。

各樹種のテンションセットひずみを求めるため、短冊型試験片の長さ方向(接線方向)に一定引張り荷 重を与えて乾燥した場合と、無負荷で乾燥した場合について、両試片の収縮ひずみを測定した。荷重の与 え方は試片の上下をチャックでつかみ、下側チャックに一定重量の重りを吊り下げる方法をとった。荷重 条件は初期ひずみが0.2%の時のテンションセットひずみを比較できるように、これをはさんだ2~3段 階の荷重を選んだ。除荷時期は試片の含水率変化がほとんどなくなる48時間としたが、除荷後さらに1 週間以上放置してから収縮ひずみを測定した。収縮ひずみの測定は、長さ方向については試片中央部に 40mm間隔で打ち込んだ虫ピンの頭を切り取って標点とし、距離の移動量を工具顕微鏡で読み取る方法と した。また、幅方向についてはスクリューマイクロメーターを用いて試片中央部の寸法変化を測定する方 法とした。

テンションセットは乾燥過程で生じた引張りクリープひずみが、除荷後もあまり回復しないで永久変形 となって残る現象をさし、その関係は第3章で Fig. 13 に模式図として示した。 Fig. 13 では除荷後の 残留ひずみのうち非回復成分に & の記号を付したが、本報ではこれをテンションセットひずみとした。 本報では樹種別にテンションセットを比較するのにセット比を用いているが、これは無負荷試片の収縮ひ ずみに対するテンションセットひずみの比である。各樹種は平衡含水率の違いによって、テンションセッ トひずみを求めた時の含水率が多少異なるが、セット比を求める際にはすべて含水率13%の時のセット比 の値が得られるように補正計算を行った。補正計算は、クリープ実験が終了した試片の全乾状態までの収 縮ひずみ増加が、含水率減少に比例するとして行った。

4.3.2 実験結果と考察

各樹種の実験結果を一括して Table 22 に示した。この表で,気乾状態(Air dry)とは除荷後1週間 以上試片を同一恒温恒湿室内に放置した状態をさし,全乾状態(Oven dry)とはその後無負荷で全乾に した状態をさす。恒温恒湿室の温湿度から予想される平衡含水率は約10%であるが,各樹種の気乾状態に おける含水率はいずれもこれよりやや高い値に平衡した。気乾状態から,全乾状態までの収縮ひずみの増 加量は,負荷期間中の応力が異なる場合もほとんど同じであった。したがって,この間のクリープ回復は 極く少ないことになる。前の実験(4.1および4.2参照)で,除荷後含水率が変化する場合はクリープひ ずみがかなり回復する傾向が見られたが,ここでは除荷後含水率が約11~14%減少してもクリープ回復は わずかであった。この違いは含水率傾斜がまだ大きな時期に除荷され,その後含水率が減少した場合と、 含水率傾斜がほとんどなくなってから除荷され,その後含水率が減少した場合との違いである。後者の場 合は,除荷時期までにすでにひずみの安定状態が形成されていたため,その後含水率が減少しても、クリ
ープ回復は少なかったと推測される。

樹種別にテンションセットひずみを比較する場合,色々な比較の方法が考えられる。1つは荷重一定の 時のひずみを比べる方法で,これはひずみを応力で除した値,すなわちテンションセットコンプライアン ス *J*<sub>s</sub>の値を比べるものである。しかし,荷重一定の場合は,静的強度の小さな木材ほど相対的な荷重レ ベルが大きいため,*J*<sub>s</sub>の値の大小によって各樹種の変形性能を評価することは出来ない。

もう1つの方法は初期ひずみが一定になる荷重を与えた時のセットひずみを比較する方法である。すな わち、相対クリープを比較することで、これは樹種的な変形性能を表す尺度になり得るものである。ま た、これと類似の方法は、静的な引張り強さに対して一定割合の荷重を与え、その時のセットひずみを樹 種別に比較する方法であるが、この場合は測定技術の面で、静的引張り強さの正確な値が求めにくいとい う問題がある。

この中では、初期ひずみ一定の時のセットひずみを比較する方法が、比較的安定した測定値が得られる ことから、樹種別の変形性能を比較する方法として適していると思われる。しかし、これを一歩進め、木 材乾燥における損傷発生の難易を予知しうる特性値として利用できるようにするためには、何か別の表示 方法を用いる必要がある。そのため、ここでは初期ひずみ一定の時のセットひずみと無負荷試片の収縮ひ ずみとの比をとったセット比を考え、これが損傷の発生に関係深い特性値として利用できるかどうか検討 した。

乾燥過程の木材は、表層部の含水率が繊維飽和点以下になると収縮しようとするが、内層部は収縮でき ないため表層部には引張り応力が発生する。この後さらに含水率が減少していく過程では表層部は引張り クリープの状態にあり、クリープ能力の大きさとその材の本来持っている収縮能力の大きさによって、乾 燥応力の発生は影響を受けると考えられる。クリープ能力が大きな樹種は、収縮能力が大きくても乾燥応 力の発生は少なく、逆にクリープ能力が小さな樹種は、収縮能力がそれ程大きくなくても乾燥応力が大き くなり易いと考えられる。したがって、クリープ能力と収縮能力の比率は、乾燥応力の発生に関係の深い 特性値として利用できる可能性がある。クリープ能力をテンションセットひずみの大小で表し、収縮能力 を無負荷試片の収縮ひずみの大小で表すと、両者の比は前述のセット比である。

Fig. 54 は横軸を初期ひずみとして各樹種のセット比を示した図である。初期ひずみ 0.2% の時のセット比の大きさによって各樹種を分類すると, Table 23 のように区分けすることができる。 セット比の大きな樹種として, エリマ, セプターパヤ, リツェアが挙げられ, 小さな樹種として, ラミン, ナトーが挙 げられる。

Table 24 は セット比と実際に木材を乾燥する時の初期割れのおこり易さとの関連性を調べるため、割 れ易さによる分類を行ったものである。クラス分けはセット比の場合と同じく5 段階としているが、これ は 100°C 試験法<sup>65)</sup>の初期割れの程度によって各樹種を5 つに区分したものである。100°C 試験法は厚さ 2 cm,幅10cm,長さ 20cmの板目材を 100°C で乾燥した時に発生する割れの程度から、初期割れのおこり 易さを予想するもので 8 区分に分けているが、ここではこれを5 区分に分類しなおして用いた。Table 23 と Table 24 を比較すると、初期割れのおこり易いクルイン、ラミン、ナトーなどについては、ある程度 セット比と初期割れの程度とが関係があるように思われるが、他の樹種については必ずしも一定した傾向 が見られない。ただし、ここで求められたセット比の値は常温の実験によるものであり、温度が高い場合 は異なった傾向を示す樹種もいくつかあると思われる。今回測定したセット比の値を、直接乾燥割れと結





Numbers in the circles are the species number in Table 22.

区 分 Class	セット比 <sup>a)</sup> Ratio of set <sup>a)</sup>	樹 種 Species
I	0.35以上 above 0.35	エリマ, セプターパヤ, リツェア Erima, Sepetir paya, Litsea
Ш	0.35-0.25	マカンバ, ミズナラ, タウン Makanba, Mizunara, Taun
Ш	0. 25—0. 20	レッドラワン, カロフィルム, ニューギニアバスウッド, ヒノキ, グメリナ, ターミナリア, アピトン Red lauan, Calophyllum, New Guinea Basswood, Hinoki, Gmelina, Terminalia, Apitong
IV	0. 200. 15	ホワイトシリス, クルイン, ジョンコン, インツィア, キャンプノ スパーマ, カナリウム White siris, Keruing, Jongkong, Intsia, Campnosperma, Canarium
v	0.15—0	ナトー, ラミン Nato, Ramin

Table 23.	テン	23	ンヨ	$\boldsymbol{\nu}$	Ի	セッ	, ጉይ	とによる	る楂	種の区分	け
Classificatio	n o	fs	spe	cie	s	by	the	ratio	of	tension	set.

a) 初期ひずみ 0.2% の時の自由収縮率に対するテンションセット比 Ratio of tension set to free shrinkage at 0.2% initial strain.

初期割れの区分 Class of initial checking	樹 種 Species
I	ヒノキ, グメリナ Hinoki, Gmelina
П	ミズナラ, ニューギニアバスウッド, インッィア, キャンプノスパ ーマ, エリマ, カロフィルム, リツェア, ジョンコン Mizunara, New Guinea Basswood, Intsia, Campnosperma, Erima, Calophyllum, Litsea, Jongkong
ш	マカンバ, ターミナリア, アピトン, レッドラワン, ホワイトシリス, セプターパヤ, タウン Makanba, Terminalia, Apitong, Red lauan, White siris, Sepetir paya, Taun
IV	ラミン, ナトー Ramin, Nato
v	クルイン Keruing

Table 24. 初期割れの程度による樹種の区分け Classification of species by the grade of initial checking.

びつけることはまだ無理があるが、ある程度関連があることは感じられる。今後、テンションセットひず みを測定する時の温湿度条件や、これを乾燥割れと結びつけるための数値の表示方法について、さらに検 討すれば、有効な指標が得られることが期待できる。

4.4 テンションセット材の各方向の寸法変化と体積の変化

クリープ実験において試片の長軸方向に一定荷重を与えながら乾燥すると,長軸方向の収縮ひずみは荷 重の大きさに応じて変化する。ここでは長軸方向と直交する方向の収縮ひずみ,ならびに体積の変化につ いて検討した。

4.4.1 実験方法

供試材はマカンバ,ヒノキ,ラミン,レッドラワンで,全乾比重はそれぞれ0.64~0.67,0.35~0.36,0.65~0.66,0.52~0.55 である。試験片の作製方法および寸法はおおむね第2章(2.1.1) に示した通りである。ただし、レッドラワンについては試片長軸方向を接線方向にした試片と、半径方向にした試片の2種類を作製した。

マカンバの引張りおよび圧縮荷重下の実験と、ヒノキの引張り荷重下の実験は、いずれも第2章に示し た実験である。今回、新たにラミンおよびレッドラワンの引張り荷重下の実験をこれに追加した。実験方 法はすべて同じで、用いた乾燥条件は温度 20℃、関係湿度 55%(平衡含水率 10%)である。

ここでは、一定荷重を与えながら乾燥した試片の、除荷直後の収縮ひずみの値について検討を行った。 収縮ひずみの測定は、試片長軸方向については、試片中央部に40mm間隔で虫ピンを打ち込み、頭を切り 取って標点とし、その距離の移動量を工具顕微鏡で読み取る方法をとった。長軸方向と直交する2方向に ついては、試片の寸法の変化をスクリューマイクロメーターで測定する方法をとった。

4.4.2 実験結果と考察

短冊型試片の長軸方向に一定荷重を与えて乾燥し,除荷後試片の長軸方向の収縮ひずみと,長軸方向に 直交する2方向の収縮ひずみを測定した。実験結果を Fig. 55~Fig. 57 に示すが,試片の長軸方向に直 交する2方向のうち1方向は木材の繊維方向にあたり,寸法の変化は非常に少ないため,その結果は省い





Effect of tensile and compressive stresses on the dimensional changes and volumetric shrinkage of specimen after stress was released.

> 負荷方向:接線方向,負荷期間の含水率変化:生材から約13%まで The stresses were applied to the tangential direction during the moisture content change from green to about 13%.



#### びに体積収縮率の変化。

Effect of tensile stress on the dimensional changes and volumetric shrinkage of specimen after stress was released.

負荷方向:接線方向,負荷期間の含水率変化:生材 から約13%まで

The stress was applied to the tangential direction during the moisture content change from green to about 13%.

た。すなわち, Fig. 55~Fig. 57 は接線方向の収 縮ひずみ,半径方向の収縮ひずみ,および体積収縮 率と負荷応力との関係を示している。なお,応力は 生材の静的な引張り強さに対する百分率で示し,引 張りを正,圧縮を負の値とした。

Fig. 55 はマカンバ材を用い, 圧縮から引張りに わたる広範囲の荷重を接線方向に与えた場合であ る。応力0の状態では接線方向の収縮ひずみは約 4.5%,半径方向の収縮ひずみは約3.5%である。引 張り応力が大きくなると,負荷方向である接線方向 の収縮ひずみはほぼ直線的に減少し,負荷方向と直 交する半径方向では収縮ひずみが増加する。そし て,応力レベルが静的な引張り強さの約64%以上に なると試片に破壊が生じる。圧縮応力を大きくして いくと,引張りとは逆に接線方向の収縮ひずみは増 加し,半径方向の収縮ひずみは減少していく。しか し,圧縮の場合は荷重を大きくしても試片は破壊せ ず,高い応力レベルで接線方向の収縮ひずみの増加 が著しくなる傾向が見られる。負荷方向に直交する 半径方向の収縮ひずみは、負荷方向の収縮ひずみの 増減を補うように変化するが、完全に補うことは出 来ず、体積収縮率は負荷応力によって変化する。体 積収縮率は引張り応力が大きくなると減少し、圧縮 応力が大きくなると増加する傾向があり、応力にほ ほ比例して増減する。体積収縮率の変化はかなり大 きく、Fig. 55 では最大値と最小値で約2倍近い差 がある。

Fig. 56 はヒノキ材とラミン材を用い,接線方向 に引張り荷重を与えた場合である。収縮ひずみの変 化や体積収縮率の変化は,いずれも Fig. 55 のマ カンバの場合と同様である。ただし,Fig. 56 では 応力0の時の接線方向と半径方向の収縮ひずみの差 が,Fig. 55 に比べて大きいため,やや図の形が異 なって見える。ヒノキの場合はかなり応力レベルが 大きくなるまで試片の破壊が生じないが,ラミンの 場合は生材の静的引張り強さの約40%近くで破壊が 生じ,クリープ変形の小さな樹種であることがわか る。

Fig. 57 は試験片の木取りが異なるもので,引張 り荷重を与える方向が接線方向の場合と半径方向の 場合を比較した。実験に用いた樹種はレッドラワン である。なお,この実験では特に破壊限界まで荷重



Effect of tensile stress on the dimensional changes and volumetric shrinkage of specimen after stress was released.

負荷方向:1)接線方向,2)半径方向,負荷期間の含 水率変化:生材から約13%まで

The stress was applied during the moisture content change from green to about 13%.

1) Stress was applied to the tangential direction.

2) Stress was applied to the radial direction.

を増やしていったわけではなく、最大荷重 20kg/cm<sup>2</sup> の範囲で実験を行った。

荷重を与える方向が木材の半径方向の場合、半径方向の収縮ひずみは応力にほぼ比例して減少し、接線 方向の収縮ひずみは応力にほぼ比例して増加する。すなわち、試片長軸方向は負荷により収縮ひずみが減 少するが、その減少量は接線方向に荷重を与えた場合の方が大きい。また、長軸方向に直交する方向の収 縮ひずみの増加量は、試片の木取りが異なってもほとんど変らない。そのため、体積収縮率の変化は接線 方向に荷重が与えられた場合の方が大きく、より引き伸ばされた状態になっていると考えられる。

1軸方向に荷重を与えて乾燥した時の木材の変形は、軸方向に直交する方向への変形の難易や、体積変 化の難易によってかなり影響を受けると思われる。試片の軸方向に直交する方向への変形がしにくい木材 は、軸方向の収縮を引張り力によって抑制しようとすると、直交方向の変形抵抗性によって大きな力が必 要になる。逆に直交方向の変形が容易な木材の場合は、それほど大きな力を必要としないと考えられる。 また、体積変化が生じることは、細胞壁の伸縮、あるいは細胞と細胞の結合部分にある種の空間が生じる ことで、体積変化が容易であれば軸方向への変形も容易であると考えられる。したがって、乾燥過程の木 材の変形性能を考える場合は、1軸方向への変形のみでなく、他の方向への変形とも関連して考える必要 があるように思われる。

#### 林業試験場研究報告 第335号

# 4.5 テンションセット材の強度的性質の変化

乾燥過程でクリープ変形を生じたセット材は,正常に収縮した材に比べ分子配列や組織構造に何らかの 変化が生じていると考えられ,強度的性質も変化することが考えられる。ここでは,テンションセット材 の強度的性質の変化を横引張りについて検討した。

4.5.1 実験方法

木材の接線方向に一定引張り荷重を与えながら乾燥したテンションセット材と,無負荷のまま乾燥させた正常材について横引張り試験を行い,引張り強さ,最大ひずみ,ヤング係数の違いを調べた。試片は JIS 準拠のダンベル型であるが厚さは5mmにした。供試材はマカンバ,アピトン,ラミン,レッドラワンの4 樹種である。各樹種の全乾比重は実験結果の表に示した。

テンションセット材の作製は、温度 20℃,関係湿度 55% (平衡含水率 10%) または関係湿度 75% (平 衡含水率15%)の恒温恒湿室で行った。セットを作製するため乾燥中に与えた荷重は、マカンバ、アピト ン、ラミンの場合は 20kg/cm<sup>2</sup>の一定引張り荷重である。また、比重の異なる 2 種類のレッドラワンの 場合は、初期ひずみが 0.2% になる荷重である。

強度試験にはオルゼン型試験機を用い、ひずみの測定はマルテンス鏡式ひずみ計によった。強度試験は 温度 20℃、関係湿度 75%の恒温恒湿室で行った。試験時の試片含水率は約 15% である。

4.5.2 実験結果と考察

テンションセット材と正常材について横引張り試験を行った結果を Table 25 に示した。テンションセ



Fig. 58. テンションセット比とヤング係 数比との関係

Relationship between tension set and Young's modulus.

樹種:マカンバ, 乾燥条件:20°C, 55% R.H. Species:Makanba, Drying condition:20°C,

- 55% R.H. 1) 無負荷試片のヤング係数に対する負荷試片の ヤング係数の比。無負荷試片のヤング係数は
  - $7.0\times 10^3\,kg/cm^2$  Ratio of Young's modulus of set specimen to one of the stress-free specimen.

Young's modulus of stress-free specimen is  $7.0 \times 10^3$ kg/cm<sup>2</sup>

無負荷試片の収縮率に対するテンションセットの比

Ratio of tension set to free shrinkage  $(\varepsilon_{\delta}/\alpha_t)$ .

ット材は正常材に比ベヤング係数が増加し,最大ひ ずみが著しく減少する傾向が見られる。しかし,最 大強さはほとんど同じか,あるいはわずかに増加が 認められる程度で,いずれにしても大きな変化はな い。

ャング係数の増加と最大ひずみの減少については 他の報告<sup>66)~69)</sup> でも 同様な点が指摘されており, セ ット材の一般的性質と考えてよいと思われる。第2 章の Fig. 6 の除荷時の瞬間弾性回復ひずみからヤ ング係数を求め, セット量との関係を求めてみる と, Fig. 58 に示すようにセットひずみの増加とヤ ング係数の増加とはほぼ比例する。

引張り強さについては、セット材は強さが減少す るとの報告<sup>70)</sup> や、逆に増加するとの報告<sup>67)</sup> がある が、この違いは樹種、荷重条件、乾燥条件、試片形 状の違いによって生じるのではないかと思われる。 変形性能の劣る樹種を用いた場合や、厚い試片を用 いた場合、乾燥条件や荷重の条件がきびしかった場 合など、その組み合わせによっては細胞間層の剝離 などの後細な破壊が部分的に生じていることが考え

Table 25. テンションセット材の強度的性質の変化 Changes of mechanical properties of woods induced by appliance of tensile stress during drying.

樹 種 Species	全乾比重 Specific gravity in oven dry	負荷応力 Applied stress (kg/cm²)	ヤング係数 Young's modulus (×10 <sup>8</sup> kg/cm <sup>2</sup> )	引張り強さ Tensile strength (kg/cm²)	最大ひずみ Maximum strain (%)
マカンバ Makanba <sup>a)</sup>	0.66	0	6.9 (6.7—7.1)	87.0 (85.1—90.1)	2, 5 (2, 4-2, 5)
	(0.65—0.67)	20	8, 2 (7, 9—8, 3)	88.5 (84.5—91.8)	1.7 (1.4—1.8)
アピトン Apitong <sup>a)</sup>	0.72	0	8.7 (7.9—9.0)	84.7 (77.6—87.6)	1.6 (1.4—1.9)
	(0.71—0.72)	20	9.5 (9.2—10.0)	85.4 (83.8—86.8)	1, 2 (1, 1—1, 2)
ラミン Ramin <sup>a)</sup>	0.51 (0.51—0.52)	0	4, 4 (4, 4—4, 5)	50.6 (49.2—51.7)	1.5 (1.4-1.6)
		20	4.5 (4.3—4.7)	52.1 (50.0—52.8)	1.4 (1.4—1.5)
レッドラワン Red lauan <sup>b)</sup>	0.45	0	4.0 (3.8—4.2)	48.2 (42.9—52.2)	<sup>2, 1</sup> (1.9–2, 3)
	(0.45—0.46)	8.0	5.6 (5.5—5.7)	54.8 (51.6—59.2)	1.2 (1.1—1.4)
レッドラワン Red lauan <sup>b)</sup>	0.53	0	6.4 (6.2—6.6)	66.6 (64.9—69.0)	1.7 (1.6—1.8)
	(0.51—0.55)	9.6	8.3 (8.28.5)	69.3 (65.0—74.1)	1.0 (1.0—1.1)

Note):試験片: JIS 型, 試料数: 4, 試験時含水率: 約15%

Specimen : JIS type, Number of samples : 4,

Moisture content when the tensile test was performed : about 15%.

a) 乾燥条件:温度20°C, 関係湿度75%

Drying condition: Temperature 20°C, R.H. 75%. b) 乾燥条件:温度20°C, 関係湿度55%

Drying condition : Temperature 20°C, R.H. 55%.

られる。

微細な破壊が生じていれば、セット材のヤング係数は減少することも考えられるが、一般的にはセット 材のヤング係数の変化は次の理由に支配されているのではないかと思われる。テンションセット材は引張 り力によって細胞形状が力の方向に大きく引き伸ばされた状態で、一種の安定状態にあると考えられる。 これをさらに引張り力を与えて引き伸ばそうとすると、大きな力が必要であり、この状態から破壊に至る までのひずみは小さくなり、ヤング係数の増加と最大ひずみの減少が見られるものと思われる。すなわ ち、セット材は正常材に比べ硬化した状態にあると考えられる。

4.6 要約

ドライングセットの生成過程やセット材の性質,あるいは樹種的な違いなどセットに関連したいくつか の問題を取り上げ,乾燥過程におけるクリープやセットの発生機構ならびに一般的性質を明らかにしよう と考えた。得られた結果を要約すると次のようである。 1) 水分非平衡状態における木材のクリープ変形は、水分子の離脱によって隣接したセルロース分子の 分子鎖の結合が断たれ、空席となった水酸基が力の方向にずれた位置で他の水酸基と新たな結合を生じる ことによって進行すると考えられる。この状態が続き、水分子の離脱がなくなった時点では、応力が除去 された後もひずみの回復しない準安定状態が得られ、ドライングセットが形成されると考えられる。これ に対して、水分子の離脱が盛んな時期に荷重が除去された場合や、準安定状態が得られた後で水分子の吸 脱着が生じる場合は、かなり大きなクリープ回復がおこる。この原因は、木材が本来元の形に戻ろうとす る性質を持っているため、水分子の離脱によって自由になった水酸基が、今度はそれまでの変形方向と逆 の方向にある他の水酸基と結合をおこすことによると考えられる。

2) 引張り荷重下で生じたクリープひずみと、圧縮荷重下で生じたクリープひずみでは、除荷後含水率 が減少する時のクリープ回復性が異なる。含水率減少による木材の収縮は、引張り荷重下で生じたクリー プひずみの回復を助ける方向に作用するが、圧縮荷重下のクリープはひずみが縮みの側に生じたものであ るため、除荷後の含水率減少はひずみの回復を助ける方向に作用しない。そのため、除荷後含水率が減少 する場合は、圧縮よりも引張り荷重下で生じたひずみの方がクリープ回復が大きい。

3) 水分非平衡下の木材の変形性能は樹種によって大きく異なり、この性質を既存の水分平衡下でのク リープ特性や比重、収縮率あるいは静的な強度的性質などから推測することは困難であると考えられる。 水分非平衡下の木材の変形性能を表す特性値として、本報では初期ひずみ一定の荷重条件におけるテンシ ョンセットひずみを考え、これを21 樹種について測定した。このテンションセットひずみと自由収縮ひ ずみとの比(セット比)は木材乾燥における初期割れの発生につながる特性値として利用出来る可能性が あるように思われた。

4) 短冊型試片の長軸方向に一定引張り荷重を与えて乾燥すると、長軸方向の収縮ひずみは無負荷試片に比べて減少し、長軸方向と直交する2方向のうち1方向の収縮ひずみは増加する。荷重が圧縮の場合は、各方向における収縮ひずみの増減が、引張りの場合とは逆になる。いずれの場合も、軸方向に直交する方向は、軸方向の収縮ひずみの増減を補うように動くが、軸方向の収縮ひずみの変化によって生じる体積の変化を、直交方向への変形によって補償することは出来ない。負荷が引張りの場合は、体積収縮率は減少し、圧縮の場合は、体積収縮率は増加する。乾燥応力の発生には、軸方向への変形性だけでなく、軸方向に直交する方向への変形性が深く関係しているように思われる。

5) テンションセット材は正常材に比べヤング係数が増加し、最大ひずみが著しく減少する。しかし、 最大強さはほとんど同じか、あるいはわずかに増加が認められる程度で、ほとんどセットの影響を受けな い。テンションセット材は乾燥中に引張り力が与えられたことによって、細胞形状が力の方向に大きく引 き伸ばされた状態で、一種の安定状態にあると考えられる。そのため、これをさらに引き伸ばすには大き な力が必要であり、この状態から破壊に至るまでのひずみは小さいと考えられる。

# 第5章 拘束乾燥における応力の発生と直交する2軸方向に 引張り応力が作用する木材の変形

木材乾燥における乾燥応力の発生や,乾燥による種々の損傷の発生にとって,含水率減少過程の木材の 粘弾性的性質が深い関係があると考え,その性質をクリープ実験によって把握しようと考えた。しかし, 実際に乾燥中の木材内部で生じている現象は,クリープよりはむしろ応力緩和に近い現象であるとも言え る。また、応力の作用する方向は単一ではない。そのため、本章では収縮を拘束することによって生ずる 応力や、2軸方向に引張り荷重を与えた時の木材の変形について検討を行い、木材乾燥におけるクリープ や応力緩和などの粘弾的現象を考える際に役立てたいと考えた。

#### 5.1 拘束乾燥における応力の発生

乾燥中の材の表層部では、含水率低下に伴う収縮が内層部によって阻止されるため、引張り応力が発生 する。そして応力がある限度を越すと乾燥割れが発生する。この時の応力を知る方法として、小試片の収 縮を阻止しながら乾燥し、これに必要な力を測定する方法が考えられる。

5.1.1 実験方法

クリープ実験に用いた試片と同形状の短冊型試片(長さ110mm,幅10mm,厚さ5mm)を用い,試 片の長さ方向の寸法変化を阻止しながら乾燥して,発生する応力を測定した。木材乾燥では木材の接線方 向の応力や損傷の発生が問題になるため,測定は接線方向について行った。供試材はマカンバ,ヒノキ, アルモン,ラミンである。全乾比重はマカンバが0.65,ヒノキが0.36,アルモンが0.47で,ラミンは0.67 と0.57の2種類である。ラミンの全乾比重0.67の材はラミン(1)と呼ぶことにし,0.57の材はラミン(2) と呼ぶことにする。

実験に用いた装置は自動ひずみ制御式の材料試験機(オートグラフ)である。実験は短冊型試片の中央 部のひずみを第2章の Fig. 4 に示したひずみ計によって検出し,乾燥中も常にこのひずみが0の状態に なるようにクロスヘッドを自動的に上下させた。乾燥条件は温度 20℃,関係湿度 55 % で,これは平衡含 水率10%にあたる。

測定結果を応力値で示す場合,収縮による試片の断面積の減少分の取り扱いが問題になる。ここでは応 力経過をグラフで連続的に表示する場合については,試片断面積として生材の断面積を用いたが,最大値 を求める場合にはその時の断面積に近い値を用いた。応力が最大の時の断面積を求めるため,実験中は必 要に応じて拘束試片の断面積を測定した。

含水率経過の測定方法は、これまでのクリープ実験における方法と同じく、ダミー試片を用いてその含 水率から応力を測定した試片の中央部の含水率を推定する方法をとった。

5.1.2 実験結果

乾燥過程で試片中央部のひずみを0の状態に保つのに必要な応力,すなわち収縮を阻止するのに必要な 応力を測定した。結果は Fig. 59 に示す通りである。また、この時の試片の含水率経過は Fig. 60 の通 りである。比重が異なる2種類のラミンはいずれも応力の増加が著しく、実験の途中で試片に破壊が生じ た。ラミン(1)は含水率がまだ比較的高い約22%の時期に破壊が生じたが、ラミン(2)に破壊が生じたの は相当低含水率の約16%になってからである。その他の樹種は含水率の低下とともに応力が徐々に増加 し、応力が樹種別にある一定レベルに達した後は、ほとんど変化しないかやや減少する傾向を示し、破壊 は生じなかった。

実験結果を応力と含水率との関係で示すと、Fig. 61 のようになる。ヒノキとラミンは、含水率が35~ 40%に達するまでの応力は比較的小さく、その後は含水率の低下とともに応力が単調に増加する傾向を示 す。繊維飽和点以下では含水率の減少と応力の増加はほぼ比例するように思われる。これに対して、マカ ンバとアルモンは相当含水率の高い時期から応力増加が始まっている。これは、含水率傾斜や細胞の落ち 込みによって、平均含水率の高い時期に木材が収縮しようとしたため生じた現象であると思われる。特に









time of some species dried at 20°C, 55% R.H.

アルモンに注目すると, Fig. 59 では 2~3 時間後一時的に応力増加が停滞し, Fig. 61 では含水率30~ 35%付近に変曲点が見られる。途中で応力増加が停滞することや, 変曲点が見られる原因としては, 細胞 の落ち込みの回復が考えられる<sup>61071</sup>。含水率40~45%の時期には, 含水率傾斜と細胞の落ち込みによって 応力は増加するが, 含水率30~35%の時期になると, 含水率傾斜による応力増加と落ち込みの回復による 応力緩和とがほぼ均衡して, 一時的に応力増加が鈍ると考えることができる。



Fig. 61. 木材試片を温度 20℃, 関係湿度 55% で乾燥した時の 収縮応力と含水率との関係

Relationship	between sl	hrinkage	stress	and	moisture
content of se	ome species	dried at	20°C,	55%	R.H.

Table 26. 収縮拘束により発生する応力(乾燥条件 20°C, 55%R.H.) Maximum restrained shrinkage stress of some species dried at 20°C, 55% R.H.

樹 種 Species	最大応力時含水率 Moisture content at maximum stress (%)	最大応力 Maximum stress σ (kg/cm <sup>2</sup> )	静的引張り強さ <sup>a)</sup> Static <sup>a)</sup> tensile strength <sup>σ<sub>m</sub></sup> (kg/Cm <sup>2</sup> )	応力比 Ratio of stress <sub>σ/σm</sub>	見かけの最大伸び Maximum apparent elongation $\varepsilon$ (%)
マカンバ Makanba	14	42.2	95	0.44	5.1
ヒノキ Hinoki	15	20.9	48	0.44	3.6
アルモン Almon	14	32.0	53 0.60		4.8
ラミン Ramin(1)	22	40.9	71	0.58	1,9
ラミン Ramin(2)	16	43.2	61	0.71	4.4

a) 最大応力時含水率に対応する静的引張り強さ

Static tensile strength corresponding to the the moisture content at maximum stress.

収縮を拘束することによって生じる応力の最大値は Table 26 の通りである。応力の大き さは ラミン (2)、マカンバ、ラミン(1)の順で、アルモン、ヒノキはやや値が小さい。 Table 26 では最大応力を計 算する際に、その時の試片断面積の値を用いたため、Fig. 59 や Fig. 61 とは値が若干異なっている。 みかけの伸び  $\epsilon$  は、拘束試片が無拘束試片に比べどれだけ伸ばされた状態にあるかを示すもので、同一含 水率における両試片の収縮ひずみの差である。ラミン(1)は約 1.9% の伸びにしか耐えることが出来なか ったことになる。 乾燥割れは乾燥応力が木材の破壊強さを越えることによって生じると考えると、拘束乾燥により発生す る応力の最大値と木材の静的な引張り強さとの比は、乾燥割れの限界を表わす指標として役立つと思われ る。Table 26 の応力比はこれを示したものであるが、応力比が大きいことは乾燥割れに対する危険が高 いと判断される。これによると、ラミン(2)は静的な引張り強さの71%において試片に破壊が生じ、ラ ミン(1)は58%において破壊が生じたことになる。その他の樹種では破壊は生じなかったが、アルモン は応力比が0.60とかなり大きく、破壊限度に近い状態にあったのではないかと推測される。

実験中に試片に破壊が生じなかったマカンバ,ヒノキ,アルモンについては破壊限度がわからないが, 平衡含水率を下げて,より大きな収縮応力が生じるようにすれば,これらの樹種にも破壊が生じるように なるかもしれない。しかし,実験的にそのような空気条件を作るには別の装置を必要とするので,その代 わりにここではあらかじめ試片に一定の伸びを与えておいて,そのまま拘束状態で乾燥し,発生する応力 ならびに試片に破壊が生じる時期を調べた。

Fig. 62~Fig. 64 は試片に与える初期ひずみを変えて、応力経過を調べたものである。Fig. 62 のマカ ンパは試片に1%までの伸びを与えて乾燥しても、破壊は生じなかったが、1.2%の伸びを与えると破壊 が生じた。Fig. 63 のヒノキでは、マカンバとほぼ同じく1~1.3%の間で破壊が生じ、Fig. 64 のアル モンでは0.7~0.8%の間で破壊が生じた。Table 27 は初期ひずみが異なる各実験の中から破壊限度に近 いものだけをひろい出したものである。これによると破壊が生じる時の応力は、静的な引張り強さに対す る比が約0.5~0.7 付近にあるように思われる。Table 26 のラミンの場合も応力比はほぼ同じような値で あるので、破壊限度の目安として応力比約0.5~0.7 が得られる。



しながら乾燥した時に発生する応力の経過

Relationship between the restrained shrinkage stress of makanba initially tensioned and dried at 20°C, 55% R.H. and time.









Fig. 64. 初めに一定引張りひずみを与え,そのまま収縮を拘束 しながら乾燥した時に発生する応力の経過

Relationship between the restrained shrinkage stress of almon initially tensioned and dried at 20°C, 55% R.H. and time.

### 林業試験場研究報告 第335号

# Table 27. 初期引張りひずみを与えた試片の収縮を拘束することにより 発生する応力(乾燥条件 20°C, 55% R.H.) Restrained shrinkage stress of some species initially

樹 種 Species	初期ひずみ Initial strain (%)	破壞時含水率 Moisture content at break- down (%)	破壞時応力 Stress at breakdown	静的引張り 強さ <sup>a)</sup> Static <sup>a)</sup> tensile strength <sub>σm</sub> (kg/cm <sup>3</sup> )	応力比 Ratio of stress <sub>σ/σm</sub>	見かけの伸び Apparent elongation を (%)
	1.0 <sup>b)</sup>	(14)	(44.8)	(95)	(0. 47)	(6.1)
マカンパ Makanba	1.2	24	35.0	69	0.51	2.9
mandu	1.5	40	42.0	51	0.82	1.5
ヒノキ Hinoki	1.0 <sup>b)</sup>	(15)	(26,6)	(48)	(0, 55)	(4.6)
	1.3	15	27.3	48	0.57	4.6
	1.5	29	19.7	32 -	0,62	2.2
	2.3	34	22, 1	31	0.71	2.7
	0, 7b)	(14)	(35, 9)	(53)	(0, 68)	(5.5)
アルモン Almon	0.75	15	35.5	53	0.67	5.0
	0.8	22	28.0	47	0.59	3.2
	1.0	41	30.2	42	0.72	2.0
	1.4	47	31.4	42	0.75	1.4

tensioned and dried at 20°C, 55% R.H.

a) 破壊時含水率に対応する静的引張り強さ

Static tensile strength corresponding to the moisture content at breakdown.

b) 破壊せず, カッコ内は発生した応力の最大値 In this test, breakdown of specimen did not occur. The values in the brackets are the values at the maximum stress.

#### 5.1.3 考 察

含水率減少に伴なう収縮を阻止することによって生じる収縮応力を測定しようとする試みはいくつかあ るが<sup>TD-74</sup>, 必ずしも十分信頼できる測定結果は得られていない。引張りチャックを用いて収縮を拘束す る実験では、チャック部分のすべりを防ぐことができず、測定された値は小さい可能性がある。また、完 全にすべりを防ぐことができたとしても、チャックに近い部分は中央部に比べて乾燥が遅れる。収縮応力 の最大値のみを測定する場合は、これでも問題はないが、含水率の減少と収縮応力の増加との関係を求め たい場合は、この方法では正確な値は得られない。これに対して、本報では試片の中央部でひずみを測定 し、常にひずみが0になるように自動的に試験機のクロスヘッドを上下させた。この方法は、ひずみの測 定ならびにクロスヘッドの自動制御が精度良く行われれば、既往の試片両端を固定して拘束乾燥する場合 に比べ、正しい収縮応力の値を求めることが出来るはずである。

拘束乾燥によって発生する応力の大きさは、樹種によって異なり、これには木材の収縮や粘弾性的性 質、あるいは強度的性質などの多くの要因が関係している。その意味で、この中には木材乾燥における損 傷の発生に関連する有益な情報が含まれていると思われる。本報では、まず拘束乾燥における応力の最大 値と材の静的な引張り強さとの比を、乾燥割れの指標として用いることができるか検討した。その結果 は、各樹種とも破壊が応力比0.5~0.7付近で生じ、一応この値が乾燥割れの限界の目安になるように思わ れた。既往の報告で、同様の測定を行ったものとしては、Kass<sup>780</sup>の測定結果がある。Kassは厚さ2.5mm の Aspen を用い,接線方向を拘束して含水率約5%まで乾燥した時の応力について報告しているが,静 的な引張り強さに対する最大収縮応力の比として約0.45が得られている。また,Oakでは含水率30~35 %の時期に試片が破壊しているが,応力比は試片厚さが2.5mmの時0.64,試片厚さ6.1mm」の時0.42 がそれぞれ得られている。この他,半径方向を拘束した報告では,応力比として0.48~0.71<sup>23</sup>,あるい は0.38<sup>74)</sup>の各測定結果が報告されている。既往の報告に示されている値は概して低めの値であるが,拘 束部分で多少のすべりがある危険性を加味すると,破壊限度の応力比として0.5~0.7はほぼ妥当なとこ ろではないかと思われる。

しかし、ここで1つの問題点は、割れ破壊を応力が限界を越すことによって生じると考えるか、ひずみ が限界を越すことによって生じると考えるかである。 Kass はこの点について、破壊限度はひずみの側か らとらえるべきであると述べている<sup>730</sup>。事実、本報の実験結果においても、Table 26 のラミン(1)とラ ミン(2)の応力比の値は0.58と0.71で、ラミン(1)が小さいが、試片の破壊はラミン(1)の方がむしろ高 含水率の時期に生じている。また、実際に板材を乾燥した時の割れの発生も、ラミン(1)の方がおこり易 い。この点では応力比よりもひずみの方が、乾燥割れの実情に近い。しかし、ここで さらに1つの 問題 は、ひずみが無拘束試片と拘束試片との差で示されるみかけのひずみである点である。みかけのひ ずみ は、その材の持っている収縮能に大きく影響されると思われる。したがって、収縮能の似かよった樹種で はみかけのひずみが破壊限度の目安として使えるかもしれないが、多くの樹種に共通して用いるには不適 である。これを補うため、みかけのひずみを無拘束試片の収縮ひずみで除した値を用いることも考えられ る。

拘束乾燥によって発生する応力を測定する事と,一定荷重下で乾燥過程のクリープひずみを測定する事 とは,ごく近い類似した現象を測定しているものと思われるが,現在までのところ両者を結ぶ共通の指標 は見つかっていない。しかし,拘束乾燥時の応力やテンションセットの値などを,今後さらに広い温湿度 条件のもとで測定していくことは,乾燥過程の木材の粘弾的性質を知る上できわめて有効なことであると 思われる。

5.2 直交する2軸方向に引張り応力が作用する木材の変形

1軸方向に引張り荷重を与えながら乾燥すると、軸方向の収縮ひずみは減少し、軸方向と直交する方向 の収縮ひずみは増加する。このことはすでに第4章(4.4)で述べたが、これは引張り応力によって軸方 向の収縮が抑制されたため、収縮変形が直交方向に過大に現れたものと考えられる。もし、直交方向の収 縮も抑制されるならば、収縮挙動は両方向の応力の大きさによって種々異なるはずである。ここでは、軸 方向とこれに直交する1方向の両方に引張り荷重を与え、収縮ひずみの変化ならびに乾燥過程の木材の変 形挙動について検討を行った。

5.2.1 実験方法

前章までのクリープ実験では、短冊型試片の長軸方向のみに一定荷重を与えた。長軸方向と直交する2 方向のうち、1方向は木材の繊維方向にあたるが、繊維方向ではどの実験においてもほとんど寸法の変化 は生じなかった。そこで、本実験では寸法変化の生じない繊維方向には荷重を与えないこととし、接線方 向および半径方向の2方向に引張り荷重を与えることにした。用いた試験片の形状は Fig. 65 に示すもの である。長さ120mm (接線方向)、幅25mm (半径方向)、厚さ5 mm (繊維方向)の短冊型試験片の中 央部25mmには側面近くに直径1 mm の穴を8 個あけた。そして、断面が等しい長さ50mm の別試片に







Fig. 66. 二方向引張りクリープ試験に用 いた実験装置 View of experimental apparatus for two directional tensile creep test.

も同様に穴をあけ、両者をナイロン糸で結びつけて、短冊型試片に横方向の荷重を与えるようにした。試 片の中央部には図の位置に収縮ひずみ測定用の標点ピンを打ち込み、2方向の収縮ひずみを測定した。ひ ずみの測定は除荷直後に行った。

実験装置は Fig. 66 に示すもので,縦方向へは引張りチャックで死荷重を与え,横方向へは滑車を介し て方向を変えて死荷重を与えた。なお,横方向に荷重を与えるためのチャックの自重はスプリングにより 打ち消すようにした。

供試材はマカンバと ヒノキで, 全乾比重はマカンバが 0.65, ヒノキが 0.36である。乾燥条件は温度 20℃, 関係湿度 55% で, これは平衡含水率 10% にあたる。

5.2.2 実験結果

短冊型試片の長軸方向と、これに直交する1方向の両方向に荷重を与えて乾燥し、両方向の収縮ひずみ を測定した。Fig. 67 と Fig. 68 はマカンバの実験結果である。Fig. 67 は木材の半径方向の荷重を一 定にし、接線方向に与える荷重の大きさを数段階に変えた時の、両方向の収縮ひずみならびに体積収縮率 の変化を示したものである。収縮ひずみ測定時の試片含水率は約13%である。また、Fig. 68 は Fig. 67 とは逆に、接線方向の荷重を一定にし、半径方向に与える荷重レベルを変えた場合である。

Fig. 67 で短軸方向の荷重が0の場合,長軸方向の荷重レベルが大きくなると長軸方向(T方向)の収 縮ひずみは減少し,短軸方向(R方向)の収縮ひずみは増加するいわゆる一般のクリープ実験の結果が得 られる。この関係は短軸方向に 10kg/cm<sup>2</sup> または 20kg/cm<sup>2</sup> の一定荷重を与えた場合も同様である。し かし,短軸方向に与える荷重が大きくなると,長軸方向の収縮ひずみは全体として大きくなり,短軸方向 の収縮ひずみは全体として小さくなる傾向が見られる。長軸方向の荷重を大きくした時の破壊限度応力 は、短軸方向の応力の大小によって異なるように思われたが、この実験の応力範囲ではそれほど大きな違 いは認められなかった。試片の体積収縮率 は両方向の応力が大きいほど小さな値にな るが、これは両方向の収縮が外力によって 抑制されたことによって木材内部に何らか の伸び変形が生じたことを意味している。

Fig. 68 はグラフの表示のしかたを Fig. 67と変えたものである。この図は,長軸方 向(T方向)の応力が一定の時,短軸方向 (R方向)の応力レベルが異なることによ って,T方向およびR方向の収縮ひずみが どのように変化するかを示している。

Fig. 69 と Fig. 70 にはヒノキの実験結 果を示した。グラフの表示方法は Fig. 67 および Fig. 68 のマカンバの場合と同じで ある。Fig. 69 は長軸方向の応力が異なる ことによって, 収縮ひずみや体積収縮率が 変化する様子を示し、Fig. 70 は短軸方向 の応力が異なることによって収縮ひずみや 体積収縮率が変化する様子を示している。 負荷応力レベルが異なることによって、収 縮ひずみや体積収縮率が増加または減少す る傾向は、マカンバもヒノキもほぼ同様で ある。しかし、ヒノキの場合は負荷応力レ ベルが比較的低い状態で試片に破壊が生じ てしまった。これは短軸方向へ荷重を与え るのに, 試片中央部の側面近くに穴をあけ たため、その部分から破壊が生じたもので ある。これらの実験結果から破壊限度を求 めることは、負荷方法から考えて無理があ るが, 直交する2軸方向の応力の大きさに よって,木材の収縮挙動がどのように変化 するか、一般的傾向を把握することはできたと思う。



Effect of two directional tensile stresses perpendicular to the grain on anisotropic shrinkage for makanba ( $\sigma_R$  is constant).

or:接線方向の応力

σR:半径方向の応力

 $\sigma_T$ : Stress in tangential direction.  $\sigma_R$ : Stress in radial direction.

5.2.3 考

察

乾燥過程で応力が作用する時の木材の変形について考えてみる。Fig. 71 は応力状態が異なる2つの場合について、木材の変形を模式的に示したものである。上の図は接線方向に30kg/cm<sup>2</sup>の荷重を与えた場合を示し、下の図は接線方向に10kg/cm<sup>3</sup>、半径方向に18kg/cm<sup>2</sup>の荷重を与えた場合を示している。なお、この模式図は Fig. 67 および Fig. 68 のマカンバ材の実験結果にもとづいて作成した。 Fig. 71



する時のマカンバ材の収縮率(*σ<sub>r</sub>*一定)

Effect of two directional tensile stresses perpendicular to the grain on anisotropic shrinkage for makanba ( $\sigma_T$  is constant).

 $\sigma_T$ :接線方向の応力  $\sigma_R$ :半径方向の応力  $\sigma_T$ :Stress in tangential direction.  $\sigma_R$ :Stress in radial direction.

の1点破線は生材状態における木材の寸法を表し、破線は無負荷で含水率約13%まで乾燥した時の乾燥後の寸法を表している。そして、太い実線は各応力下で乾燥した木材の寸法を表している。

1 軸方向に引張り荷重を与えた一般のクリープ実験では,試片の変形状態は Fig. 71 の上図のようにな り,マカンバの場合は 30 kg/cm<sup>2</sup> の引張り荷重を与えると,乾燥後の接線方向の寸法が生材試片の寸法 とほぼ同じになる。この時のクリープひずみは無負荷試片の乾燥後の寸法Aと,負荷試片の乾燥後の寸法 Bとの差によって求められる。一方,軸方向に直交する半径方向では接線方向の荷重が大きいため負荷試 片の寸法が大幅に減少する。

Fig. 68 で、両方向の応力が0の場合、長軸方向(T方向)の収縮ひずみは約5%であるが、長軸方向のみに 10kg/cm<sup>2</sup>の荷重を与えると収縮ひずみは約3.3%に減少する。次に、長軸方向の荷重を一定(10kg/cm<sup>2</sup>)にして、さらに直交する短軸方向(R方向)へも荷重を与えると、今度は短軸方向の荷重が大きくなるにつれて、長軸方向の収縮ひずみが増加する。そして、短軸方向の荷重が約18kg/cm<sup>2</sup>の時、長軸方向の収縮ひずみは約5%になって、無負荷試片の収縮ひずみとほぼ等しくなる。Fig. 71の下側の図はこの時の変形状態を示したものである。接線方向のクリープひずみはAとBの寸法の差として求められることになるが、この場合は接線方向に 10kg/cm<sup>2</sup>の応力が作用しているにもかかわらず、クリープひずみは0である。しかし、半径方向の寸法は無負荷で乾燥したものに比べれば伸びた状態にあり、半径



Fig. 69. 接線および半径の二方向に引張 り応力が作用する時のヒノキ材の 収縮率 (σ<sub>R</sub>一定)

Effect of two directional tensile stresses perpendicular to the grain on anisotropic shrinkage for hinoki ( $\sigma_R$  is constant).

ar: 接線方向の応力

oR:半径方向の応力

 $\sigma_T$ : Stress in tangential direction.

 $\sigma_R$ : Stress in radial direction.



ヒノキ

Effect of two directional tensile stresses perpendicular to the grain on anisotropic shrinkage for hinoki ( $\sigma_T$  is constant).

σ<sub>T</sub>:接線方向の応力 σ<sub>R</sub>:半径方向の応力 σ<sub>T</sub>:Stress in tangential direction.

 $\sigma_R$ : Stress in radial direction.

方向にはクリープ変形が生じている。

このように、乾燥過程のクリープでは1方向に直交する別の方向の応力の作用によって、各方向の変形 が大きく変化する性質があり、しかもそれが比較的小さな応力の作用で容易に起こることがわかる。

乾燥過程における木材内部の応力の分布は複雑であるが、今後変形挙動は1方向の応力の大きさだけで なく、各方向に作用する応力の大きさの組み合わせによって考えていくことが必要になるであろう。クリ ープ変形は、細胞壁の伸縮や内腔の変化、あるいは細胞と細胞の接合部における変形などのミクロな変形 要素と、細胞形状が変化するマクロな変形要素が複合して生じると考えられるが、その際、各方向に作用 する応力の比率は、細胞形状の変化を伴うマクロな変形に関係が深く、ミクロな変形には応力の大きさが 関係しているように思われる。そして、乾燥過程のクリープでは特にマクロな変形要素が重要な役割を果 していると考えられる。





#### Dimension after drying under free stress condition.

#### 5.3 要約

乾燥過程の木材では、収縮による応力の発生と応力下で木材が変形することによっておこる応力の緩和 とが複合した状態で含水率が低下していく。本章では、接線方向の収縮を拘束することによって発生する 応力、ならびに直交する2軸方向に引張り荷重を与えて乾燥した木材の収縮ひずみについて検討し、乾燥 過程の木材に発生する応力やひずみの状態を考える際の基礎資料にしたいと考えた。得られた結果を要約 すると次のようである。

1) 試片の1軸方向の収縮を阻止することによって発生する収縮応力を測定した結果,最大値として生 材の静的引張り強さの約45~70%の値が得られた。供試材のうちラミンは実験の途中で試片に破壊が生じ たが,破壊の発生の有無や収縮応力の大きさは樹種や乾燥条件によって異なると思われる。また,収縮応 力の発生経過は樹種により特徴が見られた。マカンバとラミンは含水率40~50%以上のかなり高含水率の 時期から応力の増加が始まったが,これは試片の含水率傾斜だけでなく,細胞の落ち込みの影響にもよる ものと考えられる。

2) 乾燥割れは材に発生する収縮応力の大きさが、材の引張り強さを越すことによって生じると考える と、拘束乾燥によって発生する応力と木材の静的な引張り強さとの比(応力比)は乾燥割れの指標として 役立つように思われる。応力比が大きいことは破壊限度に近い状態にあり、応力比が小さいことは破壊に 対して安全な状態にあると判断される。本報の実験結果および既往の報告の実験結果から,破壊限度はお よそ応力比0.5~0.7付近にあるとみられ,これは樹種が異なる場合もほぼ一定と推測される。

3) 乾燥過程のクリープ実験で、応力が1方向のみに作用する場合は、クリープによるひずみの変化量 はその応力の大きさにほぼ比例する。しかし、応力が繊維に直角な2方向に作用する場合は、1方向にお ける応力の大きさとひずみの変化量とは必ずしも比例せず、他の1方向の応力の大きさによって大きく変 化する。すなわち、乾燥過程で繊維に直角な2方向に同時に応力が作用する場合は、細胞の断面形状が両 方向の応力の大きさとその比率に応じて変化する。

4) 繊維に直角な2方向に引張り荷重を与えて乾燥すると、両方向の荷重が大きくなるにつれて体積収 縮率は減少する。したがってこの状態の木材では、木材内部のある部分に伸び変形が生じているはずであ る。変形は細胞壁あるいは細胞と細胞の結合部に生じていると思われるが、破壊はこの変形が一定限度を 越すことによって生じると考えられる。

# 総括

木材は水分および温度が時間とともに変化するいわゆる非平衡状態で,粘弾性的性質が平衡状態に比べ 特異なことが知られている。木材の人工乾燥における応力の発生や,乾燥割れなどの損傷の発生には,水 分移動性のほかこの粘弾性的性質の特異性が大きな影響を及ぼしていると考えられる。本報は水分非平衡 下の木材の粘弾性を木材乾燥の立場でとらえ,主として接線方向の引張りクリープを対象にして,諸因子 の影響を検討するとともに乾燥による損傷の発生に関連してドライングセット,収縮応力の特性をも含め 総括的な検討を行った。

1) 乾燥過程の木材のクリープに及ぼす諸因子の影響に関して得られた結果は次のとおりである。

クリープにおよぼす応力の影響は、応力レベルが一定限度以下の場合に比例的と考えられ、その目安は 応力レベルが生材の静的な引張り強さの約40%以内であるとみられる。応力レベルがそれ以上に大きくな ると、クリープによるひずみと応力との比例関係はくずれ、応力の増加に対するひずみの増加割合が、含 水率範囲や引張りと圧縮の違いによってそれぞれ異なる。ここでは、乾燥過程のクリープと応力との関係 について、線型的な取り扱いが可能な応力レベルの限界が明らかになった。

クリープにおよぼす含水率の影響は本質的には線型的で、繊維飽和点以下では含水率減少量とひずみの 増加量とが比例し、また含水率の高低による差はないと考えられる。しかし、本報の実験結果や他のいく つかの報告にあるように、含水率減少量とひずみの増加量とが比例関係を示さないことは、しばしば見受 けられる。このような非線型的な挙動は試片の含水率傾斜や内部応力分布の状態が不安定なことによるも のと推測される。したがって、木材乾燥において材内に大きな含水率傾斜が生じるような場合は、クリー プにおよぼす含水率の影響を非線型的に扱うことが必要になるであろう。

乾燥過程のクリープは、20°C から 80°C の温度域で温度の上昇により著しく増大し、クリープコンプラ イアンスがほぼ温度の2乗に比例して増加することが明らかになった。しかし、初期ひずみ一定の時のク リープを表す相対クリープは、温度の上昇によりむしろ減少する傾向にある。これは、温度上昇によるク リープの増加割合よりも、温度上昇によるヤング係数の減少割合が大きいためである。水分平衡下につい ては、相対クリープが温度の上昇により増加すると言われており、明らかに傾向が異なっている。

乾燥過程のクリープに影響をおよぼす因子として、このほかに乾燥時間の長短や、乾燥温度が時間とと

もに変化する温度非平衡による影響について検討したが、これらは乾燥過程のクリープにとって主要な因 子ではないことが明らかになった。

乾燥過程のクリープの樹種による違いは、これまでほとんど検討されていないが、木材乾燥にとって は、樹種による乾燥応力の発生状況や損傷のおき易さを予想する上で、きわめて重要である。本報では、 樹種的な比較に際し、常温の一定温湿度条件で得られたクリープひずみの除荷後の非回復ひずみ(セット ひずみ)を用いた。その結果、初期ひずみ一定の荷重下で得られたセットひずみと無負荷の収縮ひずみと の比をとったセット比を考えることによって、これが初期割れのおき易さの指標としてある程度利用でき る可能性が見出された。

2) セットの生成とセット材の性質に関して得られた結果は次のとおりである。

乾燥過程で生じたクリープひずみは、除荷後含水率変化がなければほとんど回復せず、ひずみが固定されたいわゆるセットの状態を保つ。これに対し、クリープ実験の途中で除荷すると、クリープひずみがかなり回復する結果が得られたが、これは除荷後の乾燥過程において材内で部分的に水分子の吸脱着が生じ、これに木材が本来元の形に戻ろうとする性質を持っていることが加わって生じた現象であると推論される。

ドライングセットを生じた木材の負荷方向に直交する方向では、負荷方向とは逆の収縮ひずみの増減が おこる。しかし、これによって体積変化を補償することは不可能で、引張り荷重下では荷重の増加につい て体積収縮率は減少し、圧縮荷重下では増加することがわかった。また、強度的性質に関しては、従来一 部の報告で指摘されていたテンションセット材のヤング係数が増加することや、最大ひずみが減少するこ とが、より明りょうに明らかにされた。これらのことから、テンションセット材は組織構造的に力の方向 に引き伸ばされた状態で、またコンプレッションセット材は逆に押し縮められた状態で、一種の安定状態 にあることが想定される。

3) 拘束乾燥における応力の発生と直交する2軸方向に引張り応力が作用する木材の変形に関して得ら れた結果は次のとおりである。

木材乾燥における乾燥応力は、木材が収縮を制限されることによって発生し、また木材はこの応力の作 用下で種々の変形をおこす。実験的に接線方向の収縮を阻止しながら乾燥すると、木材試片には収縮応力 が発生するが、応力の大きさやその発生経過は樹種によって特徴がある。このうち各樹種の収縮応力の大 きさと材の引張り強さとの比(応力比)は、乾燥割れのおき易さの指標として役立つように思われた。

木材の接線および半径の2方向に同時に荷重を与えて乾燥すると、クリープひずみは負荷応力の大きさ そのものよりも、両方向に作用する応力の比率に大きく依存することが明らかになった。接線方向と半径 方向の応力の比率を約1:2にすると、かなり大きな荷重を与えた場合にも、試片は無負荷材に近い収縮 状態を示す。これらのことから、乾燥中の木材の表層部や内層部の各位置の変形状態について考える場合 は、応力の作用を1方向だけでなく、異方的に考えることが必要と思われた。

4) 本報で得られた実験結果ならびに既往の報告の結果を総合し, 乾燥過程のクリープの発生機構について考察すれば次のようである。

セルロース, リグニン, ヘミセルロースなどの木材成分の水酸基と水分子とは水素結合によって網目構 造を形成していると考えられる。乾燥によって水分子が脱着すると,相手のいなくなった水酸基は近傍に ある他の水酸基と結合しようとするが,その際力が作用している場合は,力の方向にずれた位置で新たな 結合を生じ,分子の位置の移動がおこる。このような分子の位置の転位は,細胞を構成している木材成分 中の各部分で生じ,その結果細胞壁は形状を大きく変化させることが出来る。これに対して水分の移動が 無い場合は,水素結合の切断と再結合は力の作用のみでは容易におこらず,水分移動がある場合に比べ変 形は生じにくいと考えられる。

本研究では乾燥過程の木材のクリープにおよぼす諸因子の影響について,ほぼその全容を明らかにする ことが出来た。また,木材乾燥における乾燥応力の発生や損傷の発生には,水分非平衡下の粘弾性的変形 の異方性がきわめて重要な鍵をにぎっていることがわかった。しかし,乾燥過程のクリープの発生機構に ついては,一応の推論は試みたもののまだ不明な点が多く,物理化学的あるいは組織構造的な観点から発 生機構を解明していくことが今後に残された問題である。

#### 謝 辞

本研究をすすめるにあたり,終始御指導を賜った農林水産省林業試験場,筒本卓造木材部長,ならびに 名古屋大学 寺沢真名誉教授に対し,心より感謝の意を表する。また,研究の実施に際し御援助,御協力 いただいた農林水産省林業試験場 鷲見博史乾燥研究室長,乾燥研究室 佐藤庄一主任研究官,および試 験片の作製に際し御協力いただいた大尾重夫,推橋宗末両技官に厚く御礼申し上げる。

### 引用文献

- 1) 鈴木 寧: 含水平衡状態にない木材梁の匍匐について、日林講, No. 61, 210, (1952)
- 2) 大草克己・林 昭三:応力を受けている木材の収縮・膨潤(第1報),木材誌,2,5,(1956)
- 3) 大草克己・林 昭三・小迫恵彦:応力を受けている木材の収縮・膨潤(2) 引張応力,島根農大研 報, No. 4, 93, (1956)
- 4) ARNO P. SCHNIEWIND : On the nature of drying stress in wood, Holzforschung, 14, 161, (1960)
- 5) L. D. ARMSTRONG and G. N. CHRISTENSEN: Influence of moisture changes on deformation of wood under stress, Nature, 191, 869, (1961)
- 6) L. D. ARMSTRONG and R. S. T. KINGSTON: The effect of moisture content changes on the deformation of wood under stress, Aust. J. Appli. Sci., 13, 257, (1962)
- 7) R. F. S. HEARMON and J. M. PATON: Moisture content changes and creep of wood, Forest Prod. J., 14, 357, (1964)
- Arno P. SCHNIEWIND: Über den Einfluß von Feuchtigkeitsänderungen auf das Kriechen von Buchenholz quer zur Faser unter Berücksichtigung von Temperatur und Temperaturänderungen, Holz Roh-Werkstoff, 24, 87, (1966)
- 9) 竹村冨男: 放湿過程のクリープについて, 木材誌, 14, 406, (1968)
- 10) 藤田晋輔:木材の乾燥過程の異常変形,静大農研報, No. 19, 117, (1969)
- 11) R. H. LEICESTER : A rheological model for mechanosorptive deflections of beams, wood Science and Technology, 5, 211, (1971)
- 12) Alfo Ranta-Maunus: The viscoelasticity of wood at varying moisture content, Wood Science and Technology, 9, 189, (1975)
- 13) 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, (1979)
- 14) 久田卓興: 同上(第2報), 引張りクリープにおよぼす応力レベルの影響, 木材誌, 25, 697, (1979)
- 15) 久田卓興:同上(第3報), テンションセットの生成における応力履歴の影響,木材誌, 26, 233, (1980)

- 16) 久田卓興:同上(第4報), 圧縮クリープやセットにおよぼす応力レベルの影響,木材誌, 26, 519, (1980)
- 17) 久田卓興:同上(第5報), クリープにおよぼす乾燥温度の影響,木材誌, 27, 381, (1981)
- 18) 久田卓興:同上(第6報), クリープにおよぼす乾燥速度の影響,木材誌, 27, 390, (1981)
- 19) H. D. TIEMANN: Wood Technology, p. 158, Pitman, (1951)
- 20) J. M. McMillen: Drying stress in Red Oak, Forest Prod. J., 5, 71, (1955)
- 21) 小倉武夫:木材の水分移動性および乾燥中に生ずる歪みの温度による影響,林試研報, No. 77, 35, (1955)
- 22) 鈴木 寧:木材の加熱乾燥による収縮について、木材誌, 2, 43, (1956)
- L. D. ARMSTRONG and R. S. T. KINGSTON: Effect of moisture changes on creep in wood, Nature, 185, 862, (1960)
- 24) L. ERIKSON and B. NORÉN: Der Einfluß von Feuchtigkeitänderungen auf die Verformung von Holz bei zug in Faserrichtung, Holz Roh-Werkstoff, 23, 201, (1965)
- 25) E. BETHE: Festigkeitseigenschaften von Bauholz bei Lagerung im Wechselklima unter gleichzeitiger mechanischer Belastung, Holz Roh-Werkstoff, 27, 291, (1969)
- 26) 土井 登, 伏谷賢美, 蕪木自輔:ドライングセットによる木材中のセルロース結晶の格子面間隔変 化,木材誌, 24, 217, (1978)
- 27) 則元 京:マイクロ波による木材の塑性曲げ加工,木材研究資料, No. 14, 13, (1979)
- 28) 佐道 健:木材の乾燥,塑性加工,はりの異常たわみ(水分変化過程の木材の力学的挙動をめぐって),木材工業,35,455,(1980)
- 29) 藤田晋輔:木材の乾燥割れ発生機構に関する研究,京都大学学位論文,(1974)
- 30) 中川 宏:熱気乾燥における板材の収縮と変形に関する研究,北海道林産試研報, No.48, 1, (1966)
- 31) 竹村冨男:放湿過程の木材の記憶効果(第3報),乾燥応力の予測原理,木材誌, 18, 1, (1972)
- 32) 竹村冨男:同上(第4報),乾燥応力の予測,木材誌,18,105,(1972)
- 33) 高橋 徹:木材乾燥におけるクリープ,木材工業,21,349,(1966)
- 34) 徳本守彦:ドライングセットの水分回復(第1報),セット材の全膨潤経過,木材誌,19,577,(1973)
- 35) 飯田生穂: 引張荷重下における木材の収縮挙動(4), セットに関与する2, 3の因子について(その1), 京府大演報, No. 21, 14, (1977)
- T. PERKITNY: Über Wechselbeziehungen zwischen Sorption, Desorption und Rheologie von Holz, Holz Roh-Werkstoff, 23, 173, (1965)
- 37) 藤田晋輔,中戸莞二:乾燥割れに関する研究(第2報),変形とクリープ破壊に対する引張荷重の影響,木材誌,11,236,(1965)
- 38) 有馬孝禮:木材の熱圧締時のレオロジー的研究(第1報),木材の熱圧締時の変形におよぼす圧締温度,圧締圧の影響,木材誌,15,160,(1969)
- 39) G. N. CHRISTENSEN: The use of small specimens for studying the effect of moisture content changes on the deformation of wood under load., Aust. J. Appli. Sci., 13, 242, (1962)
- 40) 有馬孝禮:木材の熱圧締時のレオロジー的研究(第2報),熱圧過程の変形におよぼす木材内部温度 および含水率の影響,木材誌,20,355,(1974)
- 41) 北原覚一・岡部 登:木材の曲げクリープに及ぼす温度の影響,木材誌,5,12,(1959)
- 42) 竹村冨男・福山万次郎: スギのクリープと温度について, 島根農大研報, No. 7, 196, (1959)
- 43) R. W. DAVIDSON: The influence of temperature on creep in wood., Forest Prod. J., 12, 377, (1962)
- 44) 藤田晋輔:乾燥割れに関する研究(第3報),引張荷重下の乾燥における2,3の挙動におよぼす温 度の影響,木材誌,12,266,(1966)

- 126 ---

- 45) 北原覚一・湯川公夫:木材の曲げクリープに及ぼす温度変化の影響について、木材誌, 10, 169, (1964)
- 46) 有馬孝禮:温度変動過程における木材のクリープ(第1報),温度一定,上昇,下降過程におけるクリープ,木材誌,18,349,(1972)
- 47) 藤田晋輔・中戸莞二:乾燥割れに関する研究(第1報),引張り荷重下における収縮の挙動,木材 誌,11,36,(1965)
- 48) 高橋 徹・山田 正:木材の Drying Set に関する研究(第1報),水分非平衡下の引張りクリー プ,特に荷重依存性について,木材誌, 12, 6, (1966)
- 49) 徳本守彦:ドライングセット性能の検討,28回木材学会要旨,p. 154,(1978)
- 50) 高橋 徹・藤田晋輔・桜井敏夫:熱帯産材の粘弾性(第3報),引張荷重の収縮への影響,島根大農 研報, No. 3, 46, (1969)
- 51) 南 義夫:木材の匍匐的性質(2),木材工業,14,156,(1949)
- 52) E. G. KING: Creep and other strain behavior of wood in tension parallel to the grain., Forest Prod. J., 7, 324, (1957)
- 53) R. S. T. KINGSTON an L. N. CLARKE : Some aspects of the rheological behaviour of wood., Aust. J. of Appli. Sci., 12, 211, (1961)
- 54) 伏谷賢美:木材の静的粘弾性におよぼす脱リグニン処理の影響(第4報),応力緩和のひずみ依存性 およびクリープの応力依存性,木材誌,14,166,(1968)
- 55) E. L. Schaffer: Modeling the creep of wood in a changing moisture environment, Wood and Fiber, 3, 232, (1972)
- 56) 渡辺治人:木材理学総論,農林出版, p. 483, (1978)
- 57) 福山万次郎・竹村富男:木材の横引張に及ぼす温度の影響,木材誌,8,185,(1962)
- 58) R. L. Youngs: The perpendicular-to-grain mechanical properties of red oak as related to temperature, moisture content, and time, FPL Report No. 2079, (1957)
- 59) 奥山 剛・小林拓治郎:最大ひずみと乾燥割れ,木材の表面割れに関する研究,寺沢真編, p. 42, (1982)
- 60) R. W. ERICKSON and D. J. SAUER : Flexural creep behavior of redwood heartwood during drying from the green state, Forest Prod. J., 19, 45, (1969)
- 61) 林 和男・寺沢 真: 飽水バルサ材の落ち込みに関する研究(第3報),引張応力による落ち込み量の変化,木材誌, 21, 278, (1975)
- 62) 飯田生穂・福山萬治郎: 引張荷重下における木材の収縮挙動(2), ドライングセットの発生とセットされた木材の膨潤, 収縮について, 京府大演報, No. 16, 60, (1971)
- 63) 徳本守彦:ドライングセットの水分回復(第2報),セットの回復に及ぼす吸着水分量および乾湿繰り返しの効果,木材誌,19,585,(1973)
- 64) 飯田生穂・福山萬治郎・流上弘幸:引張荷重下における木材の収縮挙動(3),セットされた木材の 膨潤・収縮について,京府大演報, No. 19, 7, (1974)
- 65) 寺沢 真:木材乾燥スケジュールの簡易決定法,木材工業,20,216,(1965)
- 66) 筒本卓造: Tension set 材の収縮率およびヤング係数について、第17回木材学会要旨, p. 83, (1967)
- 67) 藤田晋輔・高橋 徹:熱帯材の粘弾性(第2報),乾燥中にうけた温度と応力がその強度的性質に与 える履歴効果,木材誌, 15, 271, (1969)
- 68) 久田卓興・筒本卓造:南洋材のドライングセットについて、木材工業、28、61、(1973)
- 69) 徳本守彦:セット材の弾性率,材料,24,89,(1975)
- 70) 高橋 徹・山田 正: Drying set を生じた材の横引張強度,木材研究, No. 37, 46, (1966)
- 71) 金川 靖・服部芳明:木材の収縮経過(その2),細胞の落ち込みに基づく収縮応力,木材誌,25, 184, (1979)

# — 128 —

- 72) M. LAWNICZAK and J. RACZKOWSKI: A study of resorption stresses developed in the contraction of certain tropical woods, Bois et Forests des Tropiques, No. 82, 53, (1962)
- 73) A. J. KASS: Shrinkage stress in externally restrained wood, Forest Prod. J., 15, 225, (1965)
- 74) 佐々木 徹・山田 正:木材の収縮応力(1),木材の収縮応力に及ぼす初期引張応力の影響,木材 研究, No. 48, 31, (1969)

## Creep and Set Behavior of Wood Related to Kiln Drying

# Takuoki Hisada<sup>(1)</sup>

#### Summary

The rheological behavior of wood changes more remarkably in the non-equilibrium states of moisture content and temperature compared with the equilibrium states. In the process of wood drying, the growth of drying stress, checking and other drying defects are affected very much by the rheological behavior in addition to the water sorption. In this study, the rheological behavior of wood in the non-equilibrium states of moisture content was investigated from the view point of wood drying. For this purpose, most of experiments were performed on the tensile creep of tangential direction of wood. This study consists of the following three parts. Results are summarized as below.

1) The effects of various factors on the creep of wood during drying :

Effect of stress level was linear under 40% of the static tensile strength of green wood. Above this level, the linear relationship could not be held especially in compression.

Effect of water desorption itself was considered to be linear in substance under the fiber saturation point. Non-linear phenomena, however, were recognized in many cases of creep tests. This is due to the moisture content gradient and the unstable state of the inner stress of wood. It is considered that the same phenomena will also occur in the actual drying process.

In the temperature range from 20°C to 80°C, creep compliance increased proportionally to the square of the increase in temperature. But, relative creep to the constant initial strain rather decreased with increases in temperature. This phenomena will be caused by the relatively severe decreases of Younc's modulus by temperature rising as compared with increases of creep.

Effect of species of wood was recognized clearly. In order to clarify the difference of creep among the species, the strain of drying set (unrecoverd strain after the release of stress) of many species was investigated. It was found that the ratio of set to free shrinkage would be one of the useful indicators to predict the occurrence of initial checking in kiln drying.

Other factors such as drying rate and temperature rising with time did not seem to be the main factors for the creep during drying.

2) The formation of drying set and the properties of wood subjected to drying set :

Creep strain developed during drying was hardly recovered when the moisture content did not change after release of the stress. It was considered that these phenomena of the strong setting of creep strain was caused by the formation of hydrogen bridges between the near-by celullose molecules. But, when the stress was released on the way of drying, the creep strain was considerably recovered. These facts suggest that the moisture content change after the stress release will greatly influence on recovery of creep.

Concerning the wood subjected to drying set, the phenomenon of increase and decrease of shrinkage in the direction of applied stress was reversed in the orthogonal direction. However, it would be impossible to compensate the change of volumetric shrinkage. The volumetric

Received April 18, 1985

<sup>(1)</sup> Wood Technology Division

shrinkage decreased when the tensile stress had been applied and increased when the compressive stress had been applied.

Regarding the mechanical properties of set wood, it was clearly explained that Younc's modulus increased and the maximum tensile strain decrased with the amount of drying set.

3) The shrinkage stress and the anisotropic deformation of wood under the stresses in tangential and radial:

The procedure and the maximum values of shrinkage stresses under restraint in tangential direction were various in the species of wood. It was considered that the ratio of the maximum stress obtained by restraint of the shrinkage to the maximum static tensile strength would also be one of the useful indicators for checking formation.

The shape of wood structure changes by applying the stress. When the stresses were applied to the orthorgonal directions of tangential and radial, the shrinkage changed variously in accordance with the ratio of stresses of two directions. Furthermore, the change of shrinkage was proved not to depend on the stress levels alone. Therefore, it would be necessary to consider the two directional stresses for discussion of the deformation of wood substance in the drying process.

Finally, it would be emphasized that the anisotropic rheological deformation in the nonequilibrium state of moisture content would play a very important part in the occurrence of drying stress and drying defects.