

木材の横圧縮大変形 (Ⅱ)*

応力-ひずみ繰返し図

劉 一星**, 則元 京***, 師岡淳郎***

The Large Compressive Deformation of Wood in the Transverse Direction (II)*
Stress-strain Diagram with Increasing Loading Cycles

Yi-xing LIU**, Misato NORIMOTO*** and Toshiro MOROOKA***

(平成7年8月31日受理)

The compressive tests with increasing loading cycles in the radial direction for sugi (*Cryptomeria japonica*) and inuside (*Carpinus tschonoskii*) woods were carried out in three conditions: air-dry at 20°C, wet at 20°C, wet at 100°C. The deformation in the tangential direction was either free or restricted.

In air-dry condition at 20°C, a large residual strain remained after unloading above the yield point. The difference in the stress-strain diagrams with and without lateral restriction for sugi wood was slight, showing that most of the radial compressive strain was absorbed by internal buckling of the cell walls. However, the diagram without lateral restriction for inuside wood showed a lower yield stress and higher strain levels. This was related with the Poisson's ratio at large deformation.

In wet conditions at 20°C and 100°C, an almost complete recovery of strain was observed whatever maximum stress level had been reached. However, subsequent loadings never followed the previous path and a new plateau with a much lower yield stress was observed.

These results suggested that some ultrastructural damages in the cell walls by loading history occurred, although there were no indications of the damages through SEM observation.

概 要

スギ (*Cryptomeria japonica*) 材とイヌシデ (*Carpinus tschonoskii*) 材について、放射方向の圧縮試験を行った。20℃・気乾状態、20℃・飽水状態、100℃・飽水状態のそれぞれについて、接線方向への試験片の膨張を拘束した場合と拘束しない場合について、ひずみを逐次増大させながら、負除荷を繰り返して、応力-ひずみ図を求めた。

* Report I : 木材学会誌, 39(10), 1140-1145 (1993)

本報の一部は、第42回日本木材学会大会 (1992年4月, 名古屋) において発表した。

** 東北林業大学 Northeast Forestry University, Harbin, China

*** 物性制御分野 (Laboratory of Property Enhancement)

Key words: Stress-strain diagram, Residual strain, Yield stress, Sugi, Inuside

気乾状態では、降伏点を過ぎて高原域に入ると、除荷後に大きな変形が残留した。側面拘束の有無により、スギ材では、応力-ひずみ図にほとんど差異は認められなかったが、イヌシデ材では、拘束がない場合はある場合に比べ、降伏応力が小さくなり、応力-ひずみ図がひずみ軸に沿って引伸ばされた形となった。これらの原因は、スギ材では、圧縮に伴って細胞が座屈し、細胞壁が内腔に折りたたまれて、試験片の側面への膨張が生じないのに対し、イヌシデ材では、ポアソン効果により、膨張を生じるためと考えられた。

飽水状態における結果は、気乾状態のそれと著しく異なった。特に、残留変形が著しく減少し、負除荷繰返しによる変形過程に非可逆性が認められた。このことから、細胞壁の内部で何らかの破壊が生じているものと推察された。

1. 緒 言

木材に横圧縮応力を加えて行くと、まず、応力とひずみが比例する弾性域が現れる。降伏点を過ぎると、細胞が順次圧潰されて行き、応力の増大を余り伴わずに、ひずみが急増する高原域が続く。ほとんどの細胞の内腔が消失する頃に、ひずみの増大は緩慢となり、応力が急増する圧密域に入り、破壊に至る。破壊ひずみは、一般に、比重が大きい木材ほど小さくなるが、例えば、比重0.4程度の木材では、数十%以上にも及ぶ。

木材を高温で横圧縮成形した圧縮木材や、樹脂含浸単板を高压で積層接着した硬化積層材などは、大きく横圧縮できる木材の特性を利用した加工品である。木材繊維やパーティクルに接着剤を加え横圧縮し、成板したものが繊維板やパーティクルボードである。圧縮木材やボード類が水分を吸収すると、製造過程で圧潰し、残留していた細胞の変形が回復する。このことが、これらの製品の寸法不安定性の原因となっている。

最近、木材の横圧縮を応用した表面加飾¹⁾、針葉樹丸太の角材への成形¹⁾、製材の圧縮成形^{2,3)}などの加工が注目されてきている。著者らは、比重が低く、低質の木材を横圧縮した後、熱処理や高压水蒸気処理を行って、変形の回復を抑制し、硬くて、耐摩耗性に優れ、高い強度をもつ圧縮木材の開発研究を進めている²⁻⁴⁾。

木材の種々の加工過程で、木材が横圧縮大変形を受ける場面が比較的多い。しかし、その挙動について詳細に調べられた例は比較的少ない。前報では⁵⁾、広い比重範囲に渡る17種の広葉樹材について、放射方向の圧縮応力-ひずみ図を求め、比重、温度、含水率が異なる場合でも、それが一つの実験式によって表現できることを示し、式に含まれるパラメーターの物理的意味を明らかにした。次いで、針葉樹材として、軟質のスギ材を、広葉樹材として、比重が比較的大きく、従来より圧縮木材の加工に用いられてきたイヌシデ材を選び、残留変形や負荷履歴による材質変化などについて明らかにするため、ひずみを順次増大させながら、負除荷を繰返す圧縮試験を行った。得られた結果の一部については紹介したが⁶⁻⁸⁾、本報では、その詳細について報告する。

2. 実 験

2. 1 供試材料

試験片として、スギ (*Cryptomeria japonica* D. DON) の心材、辺材、およびイヌシデ (*Carpinus tschonoskii* MAXIM) の心材を用いた。試験片寸法は、3 cm (接線方向) × 2 cm (放射方向) × 2 cm (繊維方向) で、気乾比重は、スギ心材で0.46~0.50、辺材で0.44~0.48、イヌシデ心材で0.80~0.82であった。試験片を20℃、相対湿度60%の下で1ヶ月以上調湿し、気乾状態 (含水率約12%) にしたものと、水を減圧注入して飽水状態にし、10日間以上20℃の水中に放置したものを圧縮実験に供した。

2. 2 圧縮試験

材料試験機 (新興通信工業製, TOM-5000X) を用いて、20℃・気乾状態、20℃・飽水状態、100℃・飽

水状態のそれぞれの条件で、試験片の放射方向の圧縮試験を行った。放射方向に圧縮すると、一般に、その方向と直交する繊維方向と接線方向に試験片の膨張を伴う。しかし、繊維方向のそれは、非常に小さい。繊維方向には拘束せず、接線方向を拘束しない場合と、拘束した場合について試験を行った。試験片の側面拘束には、ステンレス製の治具を用いた。負荷と除荷時の変形速度は、ともに10mm/分であった。20℃・気乾状態と飽水状態での試験は、恒温・恒湿室内で、また、100℃・飽水状態での試験は、試験機の圧縮部に水槽を設置し、水温を100℃に制御して行った。試験片の個数は、一部を除き、各測定条件で4個であった。まず、降伏応力に近い所まで圧縮後除荷した。しばらく放置後、再度圧縮し、降伏応力を越えて力-変形図がわずかに横這いする所で除荷した。同様に、力が急増する圧密域に入った適当な所まで、順次変形を増大させながら負除荷を繰返した。繰返し回数は5～7回であった。さらに、スギ材については、接線方向を拘束し、100℃・飽水状態で5mmおよび10mm圧縮した後除荷し、20℃・気乾状態にしたものについて試験を行った。イヌシデ材については、飽水状態で、拘束のある場合とない場合について、20, 40, 60, 80, および100℃で試験を行った。ひずみ(ϵ)は、初期寸法に対する圧縮量の割合を百分率で表した。応力は、初期断面を基準とした公称値(σ)で表した。前報でも述べたように²⁾、ここで採用した応力やひずみは、真の応力やひずみを表すものではないが、実用的には重要な量である。真のひずみ($\bar{\epsilon}$)と(ϵ)の関係は、 $\bar{\epsilon} = \ln(1 - \epsilon)$ で求められる。拘束した場合、公称応力と真の応力は等しくなる。

3. 結果と考察

スギ心材についての20℃・気乾状態、20℃・飽水状態、100℃・飽水状態で、側面拘束のある場合とない場合の応力(σ) - ひずみ(ϵ)繰返し図の代表例を、それぞれFig. 1～3に示す。実線は負荷過程を、点線は除荷過程を、①～⑦の番号は、除荷点を示している。Fig. 1aに示す20℃・気乾状態における側面拘束のない場合の結果は、次の通りであった。第1回目の負荷時の σ が降伏応力(σ_{yi})以下の時、負荷履歴の影響は、ほとんど認められず、2回目の負荷過程で迎える経路は、1回目のそれと同じであった。しかし、 σ_{yi} 以上の σ を与え、 ϵ が横這いした②で除荷後には、大きなひずみ(ϵ_r)が残留した。3回目の負荷過程では、②の点に向かって、曲線は、徐々に傾きを増大させながら変化し、②を過ぎると横這した。3回目の負荷過程で、②点に到達すると、新たな細胞が潰れ出すものと考えられるので、②における σ の値は、負荷履歴を受けた試験片の降伏応力(σ_y)と考えることもできる。3回目以後、4～7回目にも、同様の傾向が認められた。辺材についても、 σ_{yi} やヤング率(E)が小さくなるものの、類似した傾向が認められた。なお、負除荷を繰返すことなく、負荷し続けて行くと、曲線は、③～⑦の点を通じた。Fig. 1aの結果とFig. 1bに示す拘束のある場合の結果は、酷似した。このことから、スギ材では、放射方向に圧縮することに伴う接線方向への試験片の膨張が非常に小さいことが推定される。前報では⁵⁾、圧縮前の接線方向の試験片寸法を b 、比重を ρ 、圧縮によって内腔が消失した時の接線方向の寸法を b' 、その時の比重を ρ_s とし、 $K = b/b'$ と置いて、圧密ひずみ ϵ_d (圧縮によって、細胞内腔が消失する時のひずみ)を $\epsilon_d = 1 - K(\rho/\rho_s)$ で表した。スギ材では、無拘束の場合でも、 $K \approx 1$ であった。スギやラクウショウ材の圧縮試験片早材部の走査型電子顕微鏡写真には、細胞壁が複雑にしゅう曲して細胞は圧潰し、細胞配列はかなり乱れている様子が認められた^{9,10)}。接線方向への膨張が少ないのは、細胞壁がしゅう曲し、内腔に折りたたまれて細胞が圧潰するためと考えられる。 ϵ_r は、 ϵ が増すにつれて増大した。Fig. 1a, 1bに示されるように、木材の $\sigma - \epsilon$ 図が降伏点を過ぎて高原域に至る曲線形や残留変形が大きいことが、金属やプラスチックに見られる結果と類似することから、木材の残留ひずみが、塑性変形によるものと考えられがちである。しかし、この残留ひずみは、熱水処理により、ほとんど(約85%)が回復することから、その大部分は、塑性変形(永久変形)とは考えられない。

Fig. 2a, 2bに示す20℃・飽水状態における拘束のない場合とある場合の結果は、20℃・気乾状態における結果と異なった。気乾状態に比べて、 σ_{yi} は約半分に減少した。 ϵ_r が著しく小さいことと、2回目と

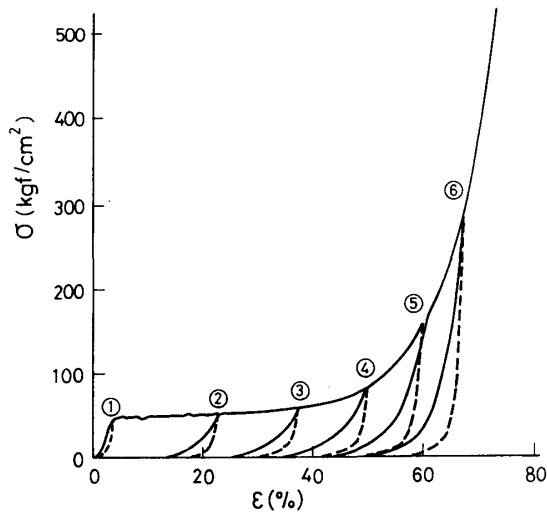


Fig. 1a The compressive stress-strain diagram with increasing loading cycles for sugi heart wood in air-dry condition at 20°C. The stress was applied in the radial direction without the restriction of tangential deformation. The continuous and dotted lines indicate the loading and unloading processes, respectively.

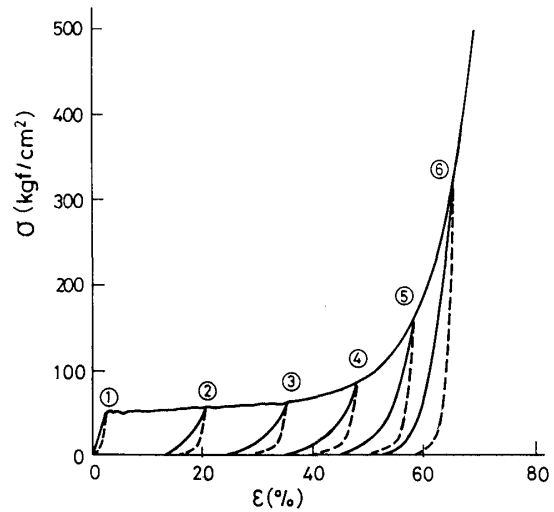


Fig. 1b The stress-strain diagram with the lateral restriction for sugi heart wood in air-dry condition at 20°C.

3回目以後の曲線の軌跡が異なることが大きな相違点であった。例えば、2回目と3回目の負荷過程で、②に至る経過を比較すると、出発点はほとんど同じであったが、異なる経路を辿った。このことから、変形は回復するが、試験片には、何らかの構造変化が生じていることが伺える。因に、変形後乾燥させた試験片についての走査型電子顕微鏡観察では、細胞壁の切断や壁層剝離などの損傷は、認められていない。したがって、構造変化は、超微細構造の領域で生じているものと推察される。3回目の負荷の過程で、 σ は大きく減少するものの、降伏点 (σ_y) が現れた。飽水状態の場合にも、拘束のある場合とない場合の違いは、ほとんど認められなかった。辺材についても、同様の傾向が認められた。

Fig. 3a, 3bは、それぞれ100°C・飽水状態における側面拘束のない場合とある場合の結果を示す。傾向は、20°C・飽水状態の場合と類似していたが、 σ_{yi} をはじめ、同じ ϵ で比較した時の σ は、非常に小さくなった。拘束の有無の違いは、ほとんど認められなかった。辺材についても、同様の傾向が得られた。Table 1に、スギ材の3測定条件での拘束のない場合とある場合の σ_{yi} とEを比較している。

Fig. 4に、スギ心材試験片を100°C・飽水状態で5 mm ($\epsilon \approx 25\%$) および10mm ($\epsilon \approx 50\%$) までそれぞれ圧縮後、除荷・乾燥し、20°C・相対湿度60%で調湿し気乾状態にしたものと、負荷履歴を受けていないものについて、20°C・気乾状態で測定した $\sigma - \epsilon$ 図を比較している。無処理試験片と負荷履歴を受けた試験片についての結果は、著しく異なった。 σ_{yi} は、無処理で50.7kgf/cm²、5 mmの履歴を受けたもので30.3kgf/cm²、10mmの履歴を受けたもので26.5kgf/cm²であった。5 mmの履歴を受けたものでは、 ϵ が20%を過ぎると、 σ が急増し、30%を過ぎると、無処理の曲線と一致した。10mmの履歴を受けたものでは、50%の ϵ の領域まで、同じ ϵ で比べると、無処理よりも小さな σ を示したが、 ϵ が50%を過ぎると、無処理の曲線と同じ軌跡を辿った。100°C・飽水状態で受けた損傷の影響は、乾燥後にも明確に現れた。

以上の結果から、木材を気乾状態で横圧縮した場合に発生する残留変形は、飽水状態にすると、大部分

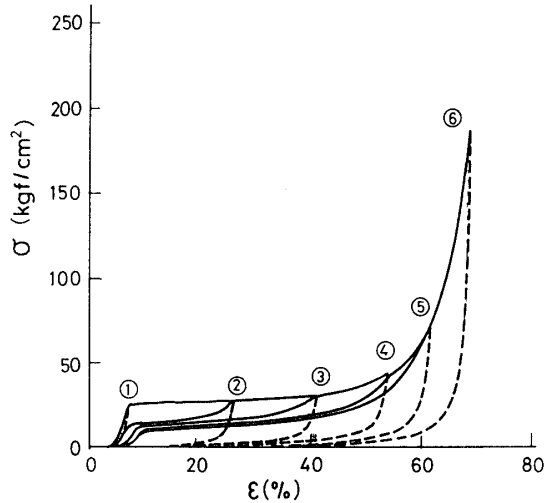


Fig. 2a The stress-strain diagram without the lateral restriction for sugi heart wood in wet condition at 20°C.

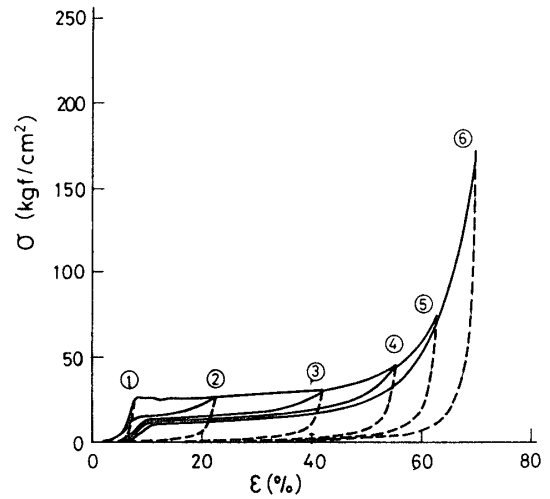


Fig. 2b The stress-strain diagram with the lateral restriction for sugi heart wood in wet condition at 20°C.

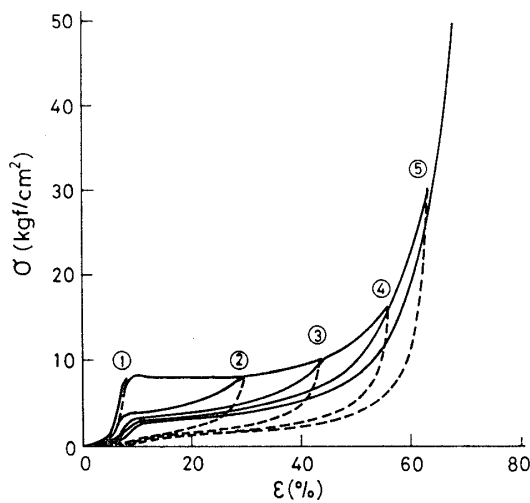


Fig. 3a The stress-strain diagram without the lateral restriction for sugi heart wood in wet condition at 100°C.

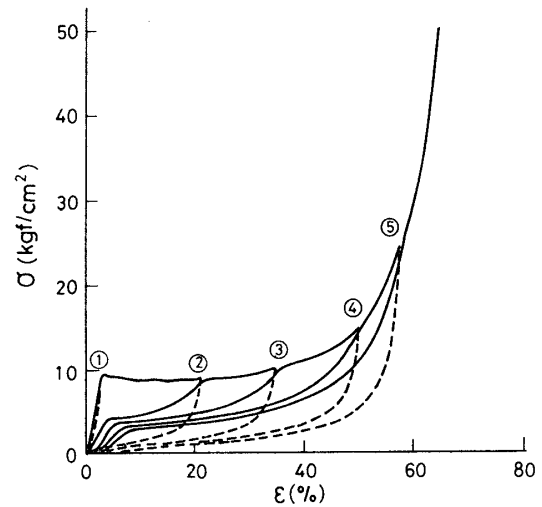


Fig. 3b The stress-strain diagram with the lateral restriction for sugi heart wood in wet condition at 100°C.

が回復すること、飽水状態で生じた変形は、除荷後大部分回復するが、再度変形を与えると、変形を受ける前と異なる軌跡を辿り、同じ ϵ で比較すると、 σ が小さくなることから、気乾状態で見られる残留変形や、飽水状態の木材を大変形させた状態で乾燥した時に残留する変形（ドラインゲット）は、金属において結晶の欠陥を介して起こる結晶面でのすべりによって生じる塑性変形や、無定形の線状高分子固体において分子の流動によって生じる塑性変形とは異なるものである。乾燥状態で大変形が与えられると、細胞壁内でラメラがしゅう曲する過程でそれら相互がずれたり、さらに微細な領域では、ミクロフィブリルとそれらの間隙を埋めているマトリックスがお互に異なる大変形を受けるため、それらの界面では、剥離など

Table 1 Yield stress σ_{yi} and Young's modulus E for sugi and inuside woods obtained by radial compressive tests with or without lateral restriction in three conditions.

measuring condition		sugi wood		inuside wood	
		σ_{yi} (kgf/cm ²)	E ($\times 10^2$ kgf/cm ²)	σ_{yi} (kgf/cm ²)	E ($\times 10^2$ kgf/cm ²)
20°C, air-dry	free	48.8	31.8	276.9	77.8
	restricted	53.5	39.5	293.6	98.7
20°C, wet	free	24.8	19.9	101.1	51.3
	restricted	26.9	17.3	111.6	52.1
100°C, wet	free	7.9	2.2	33.7	9.2
	restricted	8.6	2.9	40.7	13.0

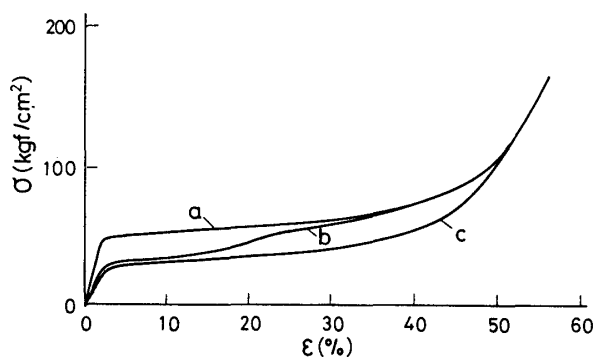


Fig. 4 The stress-strain diagram without the lateral restriction for sugi heart wood in air-dry condition at 20°C.

a: untreated specimen, b: specimen with a 20% strain history in wet condition at 100°C, c: specimen with a 50% strain history in wet condition at 100°C.

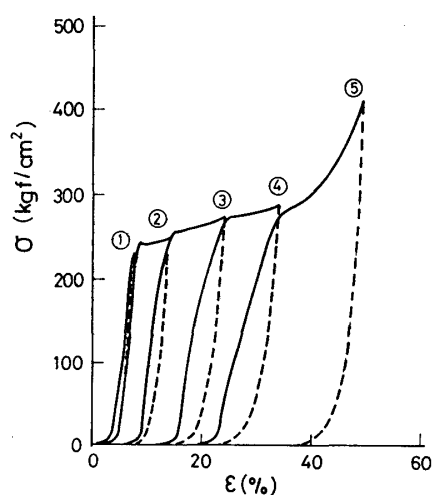


Fig. 5a The stress-strain diagram without the lateral restriction for inuside wood in air-dry condition at 20°C.

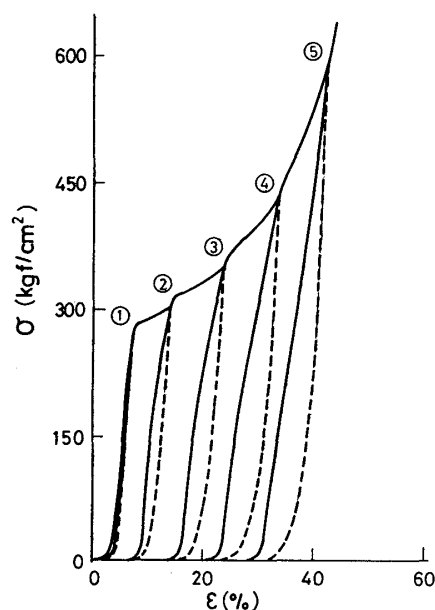


Fig. 5b The stress-strain diagram with the lateral restriction for inuside wood in air-dry condition at 20°C.

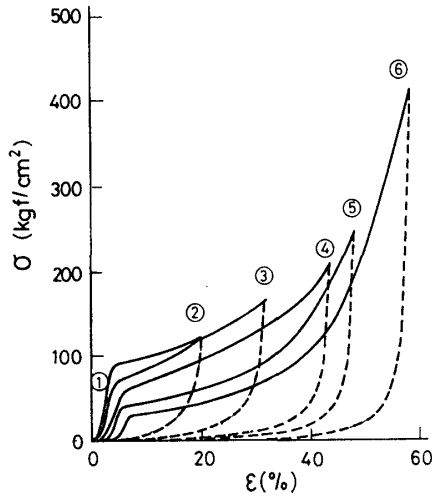


Fig. 6a The stress-strain diagram without the lateral restriction for ininside wood in wet condition at 20°C.

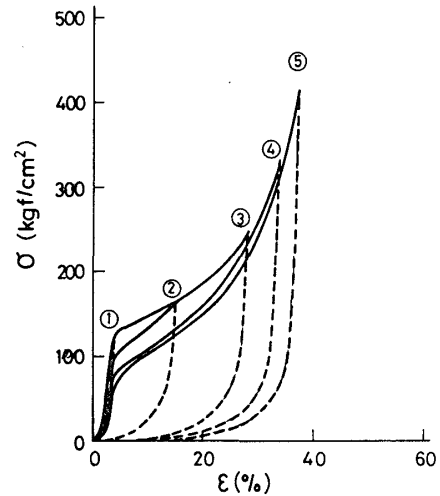


Fig. 6b The stress-strain diagram with the lateral restriction for ininside wood in wet condition at 20°C.

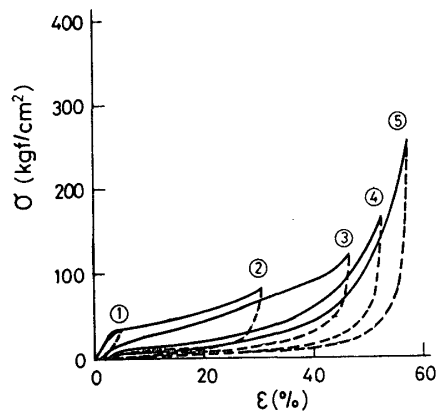


Fig. 7a The stress-strain diagram without the lateral restriction for ininside wood in wet condition at 100°C.

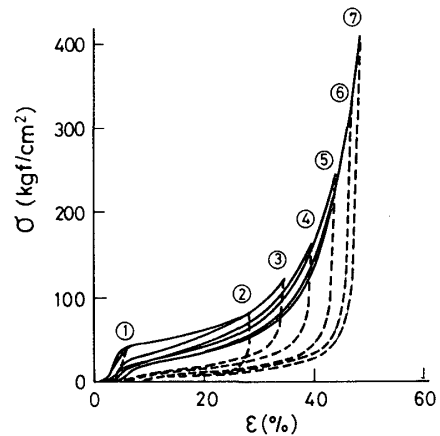


Fig. 7b The stress-strain diagram with the lateral restriction for ininside wood in wet condition at 100°C.

の破壊が生じるものと推察される。マトリックス成分は、軟化していないため、ラメラやマイクロフィブリル束のずれ変形は、それら相互の摩擦力によって固定されるものと思われる。その状態で細胞壁に十分な水分が与えられると、マトリックス成分は軟化して可塑性を増し、摩擦力が減少して、ラメラやマイクロフィブリルの変形が弾性回復するものと思われる。一方、マトリックス成分が十分軟化している状態で、細胞壁が大変形を受けると、界面での破壊を伴いながら、摩擦力を生じることなく、マイクロフィブリル束はエネルギー弾性変形をマトリックスはエントロピー弾性変形を生ずるが、除荷すると、それらの変形は回復する。しかし、破壊が生じているために、再度負荷を与えると、不可逆的な変形が現れる。再度変形を与えると、応力値が小さい時点で降伏点が現れる。マイクロフィブリルとマトリックスの界面などで破壊が生じているため、小さな応力でマイクロフィブリル束が座屈するためと思われる。

Fig. 5～7のa, bに、それぞれイヌシデ材の20℃・気乾状態、20℃・飽水状態、100℃・飽水状態における拘束がある場合とない場合の $\sigma - \epsilon$ 図を示す。全ての条件において、スギ材の結果と類似した。しかし、拘束のある場合の σ_{yi} と σ は、拘束のない場合のそれらに比べ、かなり大きくなった。このことは、試験片の接線方向への膨張が生じていることを示している。前報では⁵⁾、イヌシデ材について、20℃・飽水状態におけるKが0.631～0.651であることを示し、接線方向への試験片の膨張がかなりあることを明らかにした。イヌシデ材では、比較的円形に近い断面をもつ細胞が扁平に圧潰するためと推察される。20℃・気乾状態では、拘束がある場合には、除荷することなし圧密域に至るまで σ を増していくと、曲線は、①～⑥の点を通過した。しかし、拘束がない場合には、曲線は、④の点を通過しなかった。試験片に肉眼で検知できるような破壊は認められないことから、これには、微細構造における破壊が関係していると推察される。Fig. 6a, 7aに示す20℃および100℃・飽水状態で拘束のない場合の結果では、 ϵ の小さい領域を除き、再度負荷した場合の曲線は、除荷点を通らなかった。イヌシデ材においては、非常に大きな ϵ に至っても、試験片に肉眼で見える破壊は認められなかった。

Fig. 8, 9に、それぞれスギ材とイヌシデ材について、20℃・気乾状態、20℃・飽水状態、100℃・飽水状態で負除荷を繰返した時の σ_y と ϵ の関係を示す。ここでの ϵ は、直前に受けた最大ひずみを示す。例

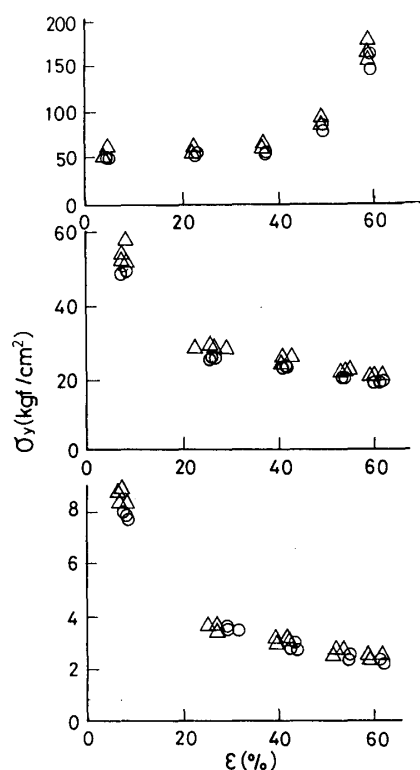


Fig. 8 The relationships between the yield stress (σ_y) and the strain (ϵ) in loading cycles for sugi wood in three conditions, air-dry at 20°C (upper graph), wet at 20°C (intermediate graph), wet at 100°C (lower graph). Circles: without lateral restriction, Triangles: with lateral restriction.

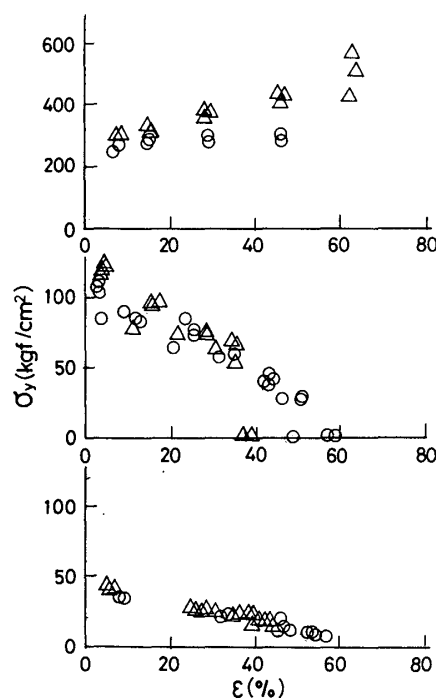


Fig. 9 The relationships between the yield stress (σ_y) and the strain (ϵ) in loading cycles for inuside wood in three conditions, air-dry at 20°C (upper graph), wet at 20°C (intermediate graph), wet at 100°C (lower graph). Circles: without lateral restriction, Triangles: with lateral restriction.

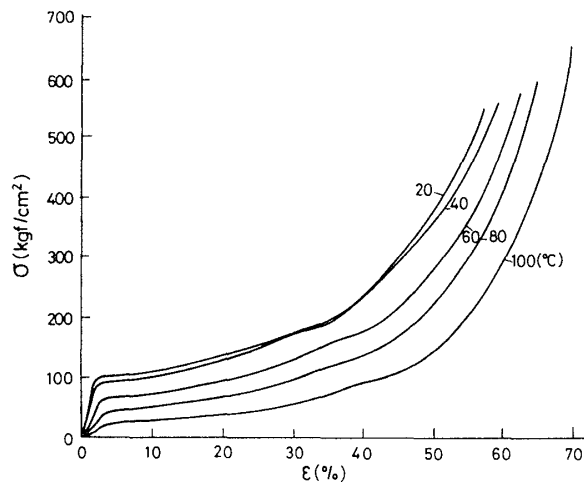


Fig. 10a The stress-strain diagrams without the lateral restriction for inuside wood in wet condition at respective temperatures.

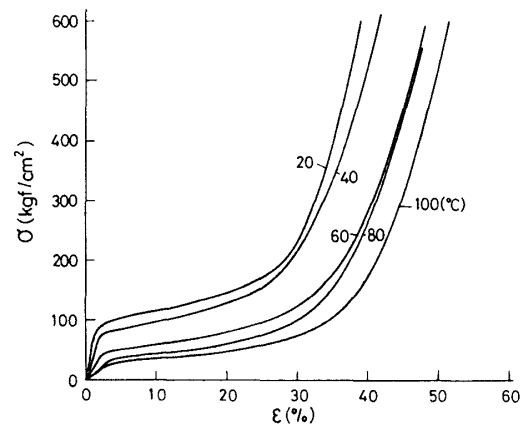


Fig. 10b The stress-strain diagrams with the lateral restriction for inuside wood in wet condition at respective temperatures.

えば、3回目の繰返し曲線における σ_y に対する ϵ は、②の点におけるひずみである。ただし、2回目の繰返し曲線では、1回目に与えた最大応力が σ_{yi} に至っていないので、 ϵ として、 σ_{yi} における降伏ひずみを用いた。Table 1に、イヌシデ材の3測定条件における拘束のある場合とない場合の σ_{yi} とEを示している。20℃・気乾状態においては、スギ材では、 $\sigma_y - \epsilon$ 図は、 $\sigma - \epsilon$ 図と同じ傾向を示した。拘束の有無によって、ほとんど差はないが、同じ ϵ で比べると、拘束のある場合の σ_y はかなり大きかった。イヌシデ材では、拘束のある場合、 $\sigma_y - \epsilon$ 図と $\sigma - \epsilon$ 図は同じ傾向を示したが、拘束の無い場合、 σ_y は ϵ の増大により最初わずかに増大するが、その後ほとんど変化しなかった。20℃で気乾状態から飽水状態に変化すると、 σ_y については、スギ材に比べ、イヌシデ材で低下が大きく、Eについては、逆にスギ材で低下が大きかった。 ϵ が増大すると、20℃・気乾状態での結果と異なり、 σ_y はいずれの樹種でも急激に減少した。また、拘束の有無の差は、いずれの樹種でもわずかであった。100℃・飽水状態における σ_y については、20℃・飽水状態の場合と同様、20℃・気乾状態における値からの低下の割合は、イヌシデ材で大きく、Eの低下割合は、スギ材で大きかった。 ϵ が増大すると、20℃・飽水状態の場合と同様、いずれの樹種でも、 σ_y は急激に減少した。また、拘束の有無の差は、ほとんど認められなかった。

Fig. 10a, 10bに、イヌシデ材について、飽水状態における拘束のある場合とない場合の $\sigma - \epsilon$ 図に及ぼす温度の影響を示している。温度の上昇に伴って、 σ_{yi} 、Eともに大きく減少した。例えば、拘束のある場合の20, 40, 60, 80, 100℃における σ_{yi} は、それぞれ93.7, 80.9, 48.9, 38.9, 26.6 kgf/cm²であった。 σ_{yi} の低下は、拘束の有無にかかわらず、40~60℃の領域で大きかった。拘束の有無について $\sigma - \epsilon$ 図を比較すると、 ϵ が20%以下の領域では、いずれの温度においても、両者は比較的一致したが、 ϵ が20%を越えると、徐々に無拘束の曲線が ϵ 軸側に引き伸ばされた形となった。これは、既に述べたように、同じ負荷量で比較した時、拘束のない場合、ポアソン効果によって、試験片は接線方向へ膨張するため、負荷面の断面積が増加し、放射方向への圧縮量が大きくなるためと考えられる。

σ_{yi} に対する繰返し後の降伏応力 σ_y の比 σ_y / σ_{yi} と ϵ の関係は、スギ材については、20℃・気乾状態と20℃・飽水状態あるいは100℃・飽水状態のそれぞれについて、拘束の有無にかかわらず、次式で表せた。

劉・則元・師岡：木材の横圧縮大変形（Ⅱ）

$$\sigma_y / \sigma_{yi} = a (\epsilon - \epsilon_0)^b \quad (1)$$

$$\sigma_y / \sigma_{yi} = 1 - c \cdot \log (\epsilon - \epsilon_0) \quad (2)$$

一方、イヌシデ材については、20℃・気乾状態と20℃・飽水状態あるいは100℃・飽水状態のそれぞれについて、次式で表せた。

$$\sigma_y / \sigma_{yi} = 1 + d (\epsilon - \epsilon_0) \quad (3)$$

$$\sigma_y / \sigma_{yi} = 1 - e (\epsilon - \epsilon_0) \quad (4)$$

Table 2 に、定数の値を示す。

Fig. 11および12に、スギ材およびイヌシデ材について、20℃・気乾状態および飽水状態、100℃・飽水状態における ϵ_r と ϵ の関係を示す。この場合の ϵ も、Fig. 7, 8の ϵ と同じである。20℃・気乾状態では、いずれの樹種でも、 ϵ の増加とともに、 ϵ_r は直線的に増大し、また、拘束の有無による差異は、認められなかった。20℃・飽水状態と100℃・飽水状態では、いずれの樹種でも、 ϵ の増加とともに、 ϵ_r は指数関数的に増大したが、20℃・気乾状態に比べ、著しく小さかった。また、スギ材では、拘束の有無による差異は、認められなかったが、イヌシデ材では、同じ ϵ で比較すると、 ϵ_r は拘束のある場合の方が若干大きな値を示した。20℃・気乾状態と20℃・飽水状態あるいは100℃・飽水状態における ϵ_r と ϵ の関係は、それぞれ次式で表せた。

$$\epsilon_r = a (\epsilon - \epsilon_0) \quad (5)$$

$$\epsilon_r = \exp [b (\epsilon - \epsilon_0)] - 1 \quad (6)$$

Table 3 に、定数の値を示す。

3. 結 論

木材に横圧縮大変形を与えた場合に生ずる残留変形量や、負荷履歴による材質の変化などについての知見を得るため、針葉樹材としてスギ材を、広葉樹材としてイヌシデ材を用い、放射方向の圧縮試験を行った。20℃・気乾状態、20℃・飽水状態、100℃・飽水状態の3測定条件について、圧縮した場合に生じる接線方向への試験片の膨張を拘束した場合と拘束しない場合について、圧縮変形量を逐次増大させながら、負除荷を繰返して、応力-ひずみ図を求めた。得られた結果は、次の通りであった。

1) 20℃・気乾状態における結果では、降伏応力を越えて、応力-ひずみ図が横這いした点で除荷後には、大きな残留変形が生じた。スギ材では拘束の有無による差異はほとんど認められなかったが、イヌシデ材では著しい差異が現れた。すなわち、無拘束の場合、降伏応力がかなり小さく、応力-ひずみ図は、ひずみ軸に沿って引伸ばされた形を示した。これらの原因は、スギ材では、細胞壁が薄く、圧縮に伴って座屈し、

Table 2 Constants in equations 1 to 4.

measuring condition	sugi wood	inuside wood
20°C, air-dry	$a = 4.5 \times 10^{-9}$, $b = 5.0$, $\epsilon_0 = 4.4$	$d \div 0^*$, $d = 0.012^{**}$, $\epsilon_0 = 7.8^{**}$
20°C, wet	$c = 0.35$, $\epsilon_0 = 6.4$	$e = 0.015$, $\epsilon_0 = 4.6$
100°C, wet	$c = 0.40$, $\epsilon_0 = 6.8$	$e = 0.016$, $\epsilon_0 = 6.1$

*: free, **: restricted

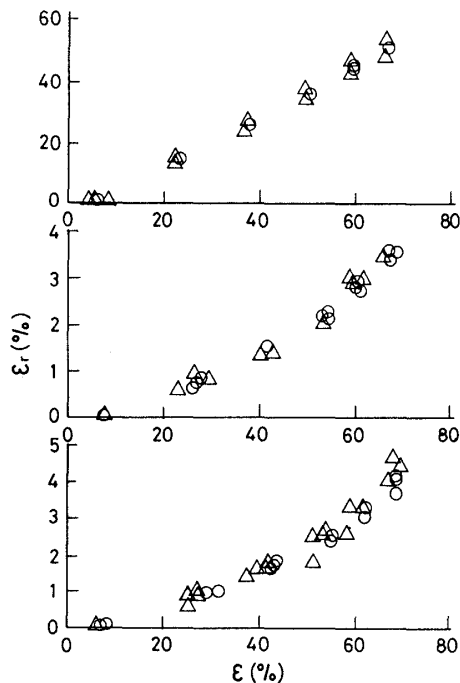


Fig. 11 The relationships between the residual strain (ϵ_r) and the strain (ϵ) in loading cycles for sugi wood in three conditions, air-dry at 20°C (upper graph), wet at 20°C (intermediate graph), wet at 100°C (lower graph). Circles: without lateral restriction, Triangles: with lateral restriction.

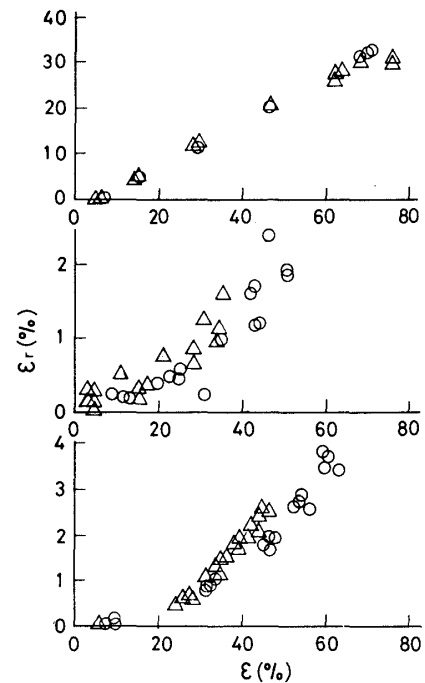


Fig. 12 The relationships between the residual strain (ϵ_r) and the strain (ϵ) in loading cycles for inuside wood in three conditions, air-dry at 20°C (upper graph), wet at 20°C (intermediate graph), wet at 100°C (lower graph). Circles: without lateral restriction, Triangles: with lateral restriction.

Table 3 Constants in equations 5 and 6.

measuring condition		sugi wood	inuside wood
20°C, air-dry	free	$a = 0.80, \epsilon_0 = 4.4$	$a = 0.48, \epsilon_0 = 6.6$
	restricted	$a = 0.80, \epsilon_0 = 4.4$	$a = 0.48, \epsilon_0 = 6.6$
20°C, wet	free	$b = 0.025, \epsilon_0 = 6.4$	$b = 0.022, \epsilon_0 = 3.2$
	restricted	$b = 0.025, \epsilon_0 = 6.4$	$b = 0.021, \epsilon_0 = 3.2$
100°C, wet	free	$b = 0.027, \epsilon_0 = 7.3$	$b = 0.031, \epsilon_0 = 7.0$
	restricted	$b = 0.027, \epsilon_0 = 7.3$	$b = 0.028, \epsilon_0 = 8.2$

変形が増すにつれて内腔に折りたたまれる形になるため、側面への膨張が生じないのに対し、イヌシデ材では、そのような細胞の変形が生じ難く、ポアソン効果により、接線方向への膨張を生じるためと考えられた。

2) 20°Cおよび100°C・飽水状態における結果は、20°C・気乾状態の結果と著しく異なった。特に、除荷後の残留変形が著しく減少し、応力-ひずみ繰返し図が非可逆性を示した。したがって、負除荷を繰返すと、

試験片には肉眼には何ら破壊は認められなかったが、細胞壁の内部で微細な破壊などの構造変化が生じているものと推察された。拘束の有無の違いは、気乾状態における場合と同様、スギ材ではほとんど認められなかったが、イヌシデ材では顕著に認められた。

3) 負除荷繰返しにおいて、ひずみが逐次増大するにつれて、気乾状態では、スギ材の拘束がある場合とない場合、およびイヌシデ材の拘束のある場合に、降伏応力はひずみが増大するにつれて増大したが、イヌシデ材の拘束がない場合には、降伏応力はひずみによってほとんど変化しなかった。飽水状態では、いずれの樹種でも降伏応力はひずみの増大により低下し、拘束の有無の差はほとんど認められなかった。一方、残留変形は、気乾状態では、いずれの樹種でも、ひずみの増大とともに直線的に増大し、拘束の有無による差も認められなかった。飽水状態では、いずれの樹種でも、ひずみの増大とともに、それは指数関数的に増大したが、気乾状態の場合に比べ、値は著しく減少した。

文 献

- 1) 棚橋光彦：木材の高温高圧圧縮化技術，生研報告，No.38，36-64（1994）
- 2) 井上雅文，則元 京：熱処理による圧縮変形の永久固定，木材研究・資料，No.27，31-40（1991）
- 3) 井上雅文，門河倫子，西尾治郎，則元 京：木材中の水分を利用した水熱処理による圧縮変形の永久固定，木材研究・資料，No.29，54-61（1993）
- 4) M. INOUE, M. NORIMOTO, M. TANAHASHI and R. M. ROWELL: Steam or heat fixation of compressed wood, Wood and Fiber Sci., 25(3), 224-235 (1993)
- 5) 劉 一星，則元 京，師岡淳郎：木材の圧縮大変形（第1報），応力－歪図と比重，木材学誌，39(8)，1140-1145（1993）
- 6) 則元 京：木材の横圧縮と加工，木材研究・資料，No.30，1-15（1994）
- 7) 則元 京：木材の圧縮大変形，木材学誌，39(8)，867-874（1993）
- 8) J. GRIL and M. NORIMOTO: Compression of wood at high temperature, Proc. of COST 508 Wood Mechanics Workshop on Wood, Plasticity and Damage (Ireland), 136-144 (1993)
- 9) 飯田生穂，則元 京，今村祐嗣：圧縮セットの水分・熱回復，木材学誌，30(5)，354-358（1984）
- 10) 井上雅文，青木 務，額川五郎：圧縮セット木材の水分・熱回復特性を活かした新しい教材の開発，木材研究・資料，No.28，59-71（1992）