木材の力学的性質に及ぼす温度履歴の影響 (第2報)[†] 不安定状態にある木材の力学的性質評価に関する最適条件の検討^{*1}

飯田生穂^{*2}, 大井健介^{*2}, 朝田鉄平^{*2}, 王 悦^{*2},
古田裕三^{*2}, 石丸 優^{*2}

The Effects of Quenching on the Mechanical Properties of Wet Wood II.[†]

The most appropriate condition for evaluation of the mechanical properties
of wood in an unstable state^{*1}

Ikuho IIDA^{*2}, Kensuke OOI^{*2}, Teppei ASADA^{*2}, Yue WANG^{*2},
Yuzo FURUTA^{*2} and Yutaka ISHIMARU^{*2}

To study the optimum experiment conditions for determining the mechanical properties of wood which is in an unstable state due to temperature changes, the fluidity ($1 - E_t/E_0$) in stress relaxation, the modulus of elasticity (MOE) and the bending strength of wood were examined. The results obtained are as follows:

- 1) The fluidity ($1 - E_t/E_0$) was independent of initial deformation in stress relaxation.
- 2) The stress relaxation process of water-swollen wood that was immersed in water at 80°C for 3 days was almost the same as that immersed for 0.5 days. Mechanical properties of wood are therefore not affected by hydrolysis or thermal decomposition if the temperature is below 80°C.
- 3) A change of stress relaxation was determined in 0.5~3 min after the wood was rapidly exposed to high temperature. As a result, the best condition to evaluate the degree of instability of wood is 0.5~3 minutes after a temperature change.
- 4) When wood was quenched and returned to the initial temperature quickly, the relative relaxation modulus did not change in comparison with control specimens that were in a stable state for a long time, because of the memory function of wood as a high molecular material.
- 5) The bending strength of wood decreased under the unstable state.

Keywords: stress relaxation, unstable state, bending strength, quenching.

本研究は、温度の急激な状態変化に基づく木材の特異な力学的性質の変化について、応力緩和測定による流動量 ($1 - E_t/E_0$)、その時間経過による解消、すなわち不安定状態の発生と解消を検討する実験上の留意点、最適実験条件、加えて不安定状態にある木材の強度的性質の変化について検討したものである。得られた結果は、以下の通りである。

- 1) 不安定状態にある木材の力学的性質を評価するために、応力緩和におよぼす初期たわみ依存性を検討した。その結果、流動量 ($1 - E_t/E_0$) に及ぼす初期たわみ依存性は認められなかった。
- 2) 温度80°Cにおける飽水材の応力緩和は、80°Cの温度に3日間連続して保持しても0.5日の浸せき時間のものと等しい応力緩和経過を示し、自己加水分解や熱分解の影響のないことが明らかになった。
- 3) 温度急上昇後の測定開始時間による応力緩和の変化を検討した結果、不安定度を評価するに

[†] Report I: This journal 49(4), 253-259 (2003).

^{*1} Received February 18, 2005; accepted September 1, 2005 京都府立大学大学院農学研究科 Research Division of Agriculture, Graduate School of Kyoto Prefectural University, Kyoto 606-8522

あたり、材温との関係で温度変化後に適当な浸せき時間があることが明らかになった。

4) 温度下降、続く上昇の極めて短時間の状態変化による不安定状態の発生を検討した結果、温度履歴試片は、長時間一定に保持したコントロール試片と変わらない緩和量を示した。これは、一般の高分子材料に認められる過去の刺激を記憶している記憶効果の存在によると考えられた。

5) 不安定状態にある木材の曲げ強度は、不安定度に応じて強度の低下を生じることを認めた。

1. 緒 言

木材の加工工程では、常に木材が温度変化や含水率変化などの状態変化を引き起こすことが多い。このような状態変化において木材が新しい雰囲気、湿度、含水率になったとしても木材の力学的性質は、長期一定温度、含水率に保持されたものと比較して著しく異なることが明らかにされてきている¹⁻⁴⁾。これは、木材の微細な組織構造が、その状態変化に応じた安定な状態を瞬時に獲得することができず、獲得するためには有限の時間を必要とするためである。しかし、これまで木材の力学的性質は、材の温度や含水率が一定であれば等しいものと考えられてきた。すなわち、最近まで状態変化による木材の力学的性質変化については、殆ど取り上げられていなかったといつて良い。すなわち、その材がどのような履歴のもとで現在の状態にあるかを考えた力学的性質の評価はなされていない。ごく最近になって、状態変化に伴う不安定状態にある材の相対緩和弾性率は、安定状態のそれに比較して約 1/2、最大 1/3 に達すること、弾性率は低下すること、などが明らかになってきた。これらの力学的性質の変化は極めて大きく、実用面から考えても重要であり、木材の基本物性を知る上からも興味の持たれる問題である。

前報¹⁾では、急冷処理による力学的性質の変化、不安定状態の発生などについて報告した。しかし、その検討結果はなお十分でなく、系統的な検討を行う必要がある。最近、中野⁵⁾は、この不安定状態について検討を加え、その機構について木材の転移温度以上からの木材の急冷、および種々の冷却速度によるクリープ変形を検討し、代表的な 2 つの緩和時間を考えた理論的解析を試み、転移温度以上からの急冷による分子鎖の凍結に基づく自由体積の増加に起因することを説明している。しかし、不安定状態の機構は、なお現在十分に解明されていない。

本研究は、状態変化に伴う不安定状態が、その発生および解消の遷移過程であることからその評価をどのようにするのが妥当か、系統的な検討を開始するにあたって測定上の最適条件を定める必要を認

め、状態変化後の測定開始時間や応力緩和に及ぼす初期たわみの影響、温度 80℃ での保持時間による酸加水分解、熱分解の有無、状態変化の繰返しによる変化など、不安定状態を検討する上での影響因子、要因について検討を行ない、加えて不安定状態下にある木材の強度的性質について調べた。

2. 実験方法

2.1 供試材料及び試験片

供試樹種には、ヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* Endl.) を用いた。試験片は心材外周部の同一年輪帯から、断面 120 mm (R) × 15 mm (T) の柱状ブロックを 3 本切り出し、繊維方向に厚さ 4 mm (L) の試験片を 1 ブロックにつき 80 本以上連続して作製した。これらの試験片は、あらかじめ減圧下で十分吸水させ、飽水状態にした後、過去の乾燥や温度履歴の影響を示さない試験片とするために飽水状態のまま 80℃ 一定の恒温水槽中で 2 時間温度処理を施した。次いで緩慢な温度の下降条件で温度 20℃ とし、以後 1 ヶ月以上にわたって飽水状態のまま 20℃ 一定の部屋に保持して、以下の実験に供した。なお、以下の実験において用いたコントロール試片は、実験条件によって異なるが、各温度に長時間保持した試験片で、一定の温度の恒温水槽中に 1 日以上保持したものをを用いた。

2.2 温度履歴を受けた木材の応力緩和に及ぼす初期たわみの影響

20℃ の飽水状態にある試験片を 80℃ の恒温水槽に素早く移し、温度変化 1 分後より試片の曲げ応力緩和を 3 時間測定した。曲げ応力緩和測定は、スパン 80 mm、与えた初期たわみは 1 mm, 1.5 mm, 2 mm, 3 mm である。なお、80℃ における材の比例限度たわみは、約 1.5 mm であった。

実験には、木口マッチング試片を用い、一方を温度履歴試験片、他方を一定の温度に長時間保持した試験片 (コントロール試験片) とし、両者の結果を比較検討した。

2.3 熱処理時間による飽水材の自己加水分解、及び熱分解の有無

4 個の飽水連続試験片を 80℃ の恒温水槽に浸せき

させ、0.5日(12時間)、1日、2日、3日間、一定温度に保持した後、応力緩和を3時間測定した。

2.4 温度変化を受けた木材の応力緩和に及ぼす測定開始時間の影響

急激な状態変化を与えた試験片が、温度変化後どの程度の時間で試験片全体が一定温度に達するかを明確に予測することは現存の予測式には仮定があり難しい。そこで、20℃に保持した飽水材を80℃の恒温水槽中に瞬時に移行し、移行後の時間を0.5、1、1.5、3分としたときの応力緩和を測定し、状態変化後の時間が応力緩和に及ぼす影響を調べ、測定開始時間の最適条件を検討した。

2.5 極めて短時間の温度下降、続く上昇履歴を与えた木材の応力緩和挙動

一般に粘弾性体の応答は、現在の刺激だけでなく、過去の刺激にも依存する。この現象を記憶効果というが、温度の急下降、急上昇などによる力学的性質の変化による不安定の発生についても検討しておく必要がある。80℃のコントロール試験片を20℃の水槽に素早く入れ、また素早く80℃の恒温水槽に戻す温度の下降・上昇の履歴を与え、この履歴試験片の応力緩和挙動の変化を調べた。

実験条件は、温度条件として試片に80℃→20℃→80℃ならびに60℃→20℃→60℃の温度変化を与え、温度下降時の20℃の浸漬時間を1、及び3分の2通りとし、その後、ただちに80℃あるいは60℃の恒温水槽に移し、移行1分後に、水槽中に浸せきしたまま応力緩和を3時間測定した。

なお、応力緩和測定はいずれの場合も小型万能試験機(東洋測器製 テンシロン UTM-4L 型、容量100 kgf)を用い、中央集中荷重方式でスパン80 mmであった。

2.6 温度履歴を受けた木材の曲げ強度変化

温度変化は80℃、70℃、60℃、50℃、40℃、30℃から20℃へ下降する条件であった。実験は、温度変化させた試験片の弾性・強度的性質、及び温度変化後の経過時間によるそれら性質の変化を調べた。すなわち、①温度変化1分後における弾性・強度的性質の変化、ならびに②温度変化後の経過時間による弾性・強度的性質の変化である。

用いた実験装置は小型万能試験機で、中央集中荷重方式でスパン:80 mm、クロスヘッドスピード:5 mm/minで行った。得られた荷重-たわみ曲線から弾性率(MOE)、曲げ強度(MOR)、破壊たわみを求めた。

3. 結果と考察

3.1 温度履歴を受けた木材の応力緩和に及ぼす初期たわみの影響

本来、線型粘弾性の範囲では、木材の応力緩和に及ぼす初期たわみ依存性はない。しかし、温度の急冷、あるいは急上昇処理を施して不安定状態にある材が長期一定温度に保持した安定状態にある材と同様に初期たわみ依存性を示さないとは言えない。急激な温度上昇処理を施した試験片(温度履歴試験片)の応力緩和を評価するにあたって、初期たわみの大きさの影響を検討しておく必要がある。

Fig. 1は、4段階の初期たわみによって測定された応力緩和の結果を相対緩和弾性率で示したものである。図中には、本結果と比較する意味で、80℃一定に長時間保持したコントロール試験片の相対緩和弾性率経過も同時に示してある。図によると応力緩和の経過ならびにコントロール試験片と温度履歴試験片の流動量の差はいずれの初期たわみの場合においてもほぼ等しい。結果として初期たわみによる流動性の変化は認められない。このことは、本実験の初期たわみ範囲(1~3 mm)では、温度履歴試片についても初期たわみ依存性は認められないと言える。

3.2 熱処理時間による応力緩和挙動の変化

飽水状態で80℃の高い温度に長時間保持すると、試片は自己加水分解や熱分解などを受ける可能性がある。したがって、高い温度から材の温度を急冷したり、低い温度から材の温度を急上昇して不安定状態の生起を検討する場合、各温度における試験片の自己加水分解や熱分解の様子、それが不安定状態に及ぼす影響などを調べておくことが必要である。本項では80℃の温度を取り上げて熱処理を施し、熱処理時間による応力緩和の変化を検討し、不安定状態を検討する上での基礎データを得ることとした。

Fig. 2は、試片を80℃の水槽中に0.5日から3日間の異なる4条件に浸漬し、その後に応力緩和を測定したときの相対緩和弾性率経過を示したものである。図によると、相対緩和弾性率はいずれの条件の場合もほぼ一本の等しい曲線として示されることがわかる。この結果は、温度上昇による不安定状態の発生は、温度80℃と高いことによって解消されており、しかも、80℃の温度に最大3日間保持しても、熱処理時間による流動性の程度に差異がないことから、80℃の場合には0.5~3日範囲であれば自己加水分解、熱分解の影響はないと判断できる。

Fig. 1. Effect of initial deflection on the relaxation modulus of the wood in an unstable state.

Legends: ○: Control sample, ●: Quenching sample

Fig. 2. Effect of heat decomposition on the relative relaxation modulus of temperature history samples (80°C).

Legends: □: after 0.5 day ○: after 1 day △: after 2 days ◇: after 3 days

3.3 温度急上昇後の測定開始時間が木材の応力緩和に及ぼす影響

急激に温度上昇させたとき、極めて短時間のうちに応力緩和測定を行うと、試片の表面と内部で温度傾斜が生じ、不安定状態に基づく弾性率、流動性の

評価と異なる結果を与える。また、浸漬時間が長くなると不安定状態から安定状態へ移行するために不安定の解消が大きくなり、十分に不安定度を評価できない。したがって、不安定状態の検討を始めるにあたって最適の測定開始時間を定める必要がある。本実験では、温度変化後の測定開始時間をかえて応力緩和測定を試み、試片の温度傾斜の影響と不安定状態の発生、解消に関する影響を考えた最適条件について検討した。

Fig. 3 は、80°Cの一定温度に長時間保持したコントロール試験片の弾性率を1とした温度急上昇試片の弾性率の変化を示す。図によると、温度変化0.5分後における弾性率比は1以上の値で、他はいずれも1以下の値を示している。ここで0.5分後の1以上の値を示す理由は、急激な温度上昇によって試片の表面温度は外周温度に素早く追従できるが、材内部の温度はなおその温度に達していないため、材の平均温度はより低い温度にあり、そのために弾性率が1以上の値を示したと考えられる。

Fig. 4 は、温度急上昇後の測定開始時間の相違による相対緩和弾性率の変化の様子を示す。図によると、長時間一定温度に保持したコントロール試片と温度を急上昇した試片の相対緩和弾性率の差は、極

めて小さいことがわかる。したがって、両者の間には大差ない値と判断できる。この結果から、弾性率で極めて短い時間では差異を示すが相対緩和弾性率に違いが認められなかった。本実験のサンプル、実

Fig. 3. Change of modulus of elasticity in bending (MOE) of wood with elapsed time after rapid exposure to the high temperature of 80°C.
(MOE) t : MOE of sample that was heated to 80°C rapidly,
(MOE) c : MOE of Control sample

験条件では、急激な温度上昇後に実験を開始する時間は、温度の急上昇1～3分後に測定するのが有効であり、材温との関係で、測定開始時間について温度変化後に適当な浸せき時間があることが明らかになった。

3.4 極めて短時間の温度下降、続く上昇履歴を与えた木材の応力緩和

Fig. 5は、温度を急激に下降後、ただちにもとの温度へ温度上昇させた温度下降・上昇履歴が木材の応力緩和挙動にどのような影響を与えるかについて示したものである。図中の値は相対緩和弾性率で示したもので、図示した80°C→20°C→80°Cの表示は、80°C一定の温度で長時間保持したコントロール試験片を20°Cの恒温水槽に移して1分後に、あるいは3分後に再びもとの温度(80°C)に戻して1分経過してから応力緩和を測定した結果である。図によると、経過曲線はコントロール材のそれと大差ない。したがって、80°Cで安定状態にある木材の緩和挙動は、極めて短時間の冷却履歴によっては殆ど影響を受けない。このことは、温度変化前の初期条件をかなり記憶したままであることが示唆される。この理由は、ある温度状態から異なる温度状態に急激に変化させたときの木材の複雑な複合微細構造は変化後の温度

Fig. 4. Effect of elapsed time on the relative relaxation modulus of wood heated to 80°C rapidly.
Legends : ○ : Control sample, ● : The sample that was heated to 80°C rapidly.

Fig. 5. The memory function of the relative relaxation modulus by reacting to temperature reduction and after temperature elevation.

Legends: □: 80°C → 20°C (1 min) → 80°C (1 min) / 60°C → 20°C (1 min) → 60°C (1 min)
○: 80°C Control sample / 60°C Control sample
◇: 80°C → 20°C (3 min) → 80°C (1 min) / 60°C → 20°C (3 min) → 60°C (1 min)

Fig. 6. The relative change of mechanical properties of wood due to quenching.

Legends: ■: 80°C → 20°C ■: 70°C → 20°C ■: 60°C → 20°C
■: 50°C → 20°C ■: 40°C → 20°C ■: 30°C → 20°C

に直ちに追従できず、有限の時間を必要とする遷移過程であることを示唆する。すなわち、不安定状態の生起が、急激な状態変化により新しい状態に直ちに追従できないことに起因するとの考えに基づくとき、急激な状態変化後、再び新しい元の状態にただちに变化した場合、温度変化に追従して変化しようとしても有限の時間が必要で極めて短時間の変化は見かけ上その変化を生じないまま、もとの存在した位置状態が保持されることとなる。すなわち過去の記憶を残している、いわゆる記憶効果が存在する結果となる。したがって、不安定状態の基本的性格は、もとの温度に極めて短い時間で復帰するとき、見かけ上不安定状態を生じない挙動を示すと言える。

3.5 温度履歴を受けた木材の曲げ強度変化

Fig. 6 は、温度下降させた条件での流動性の変化、強度変化、弾性率変化、破壊たわみ変化を各温度条件のものについて示したものである。図によると、

Fig. 7. Relationship between the decreased ratio of bending strength and the decreased ratio of modulus of elasticity of wood in an unstable state.

急激な温度下降による材の不安定状態の発生は、流動性、破壊たわみの増加を引き起こし、弾性率、強度の減少を生じる。ここで、等しい不安定度であっても木材の力学的性質に与える影響は異なることが明確である。検討結果によると、最も顕著な力学的性質の変化は流動性に示され、次いで破壊ひずみ、弾性率、強度の順である。いま、弾性率と強度は基本的に異なる機構によるものであるが、実用面から両者の関係を知ることは非破壊予測に役立ち有効である。そこで弾性率と強度の関係をプロットしてみると、Fig. 7 となる。両者は、ほぼ比例関係を示している。この結果から弾性率は最大約25%の減少となる。減少程度は強度低下が弾性率低下に比べて小さい。

以上をまとめてみると、不安定状態の発生によって MOE, MOR はコントロール材に比べて減少し、破壊たわみは増大する。MOE, 破壊たわみは、温度変化による不安定状態の影響を顕著に示し、その値の変化はかなり大きい。しかし、MOR の変化は、MOE, 破壊たわみほど顕著でない。

4. 結 言

本研究は、温度の急激な状態変化に基づく木材の特異な力学的性質の変化について、応力緩和測定による流動量 ($1-E_t/E_0$)、その時間経過による解消、すなわち不安定状態の解消を検討する実験上の留意点、最適実験条件、加えて不安定状態にある木材の強度的性質の変化について検討したものである。得られた結果は、以下の通りである。

- 1) 不安定状態にある木材の力学的性質を評価するために、応力緩和におよぼす初期たわみ依存性を検討した。その結果、流動量 ($1-E_t/E_0$) に及ぼす初期たわみ依存性は認められなかった。
- 2) 温度80℃における飽水材の応力緩和は、80℃の温度に3日間連続して保持しても0.5日の浸せき時間のものと等しい応力緩和経過を示し、自己加水分解や熱分解の影響のないことが明らかになった。

3) 温度急上昇後の測定開始時間による応力緩和の変化を検討した結果、不安定度を評価するにあたり、材温との関係で温度変化後に適当な浸せき時間があることが明らかになった。

4) 温度下降、続く上昇の極めて短時間の状態変化による不安定状態の発生を検討した結果、温度履歴試片は、長時間一定に保持したコントロール試片と変わらない緩和量を示した。これは、一般の高分子材料に認められる過去の刺激を記憶している記憶効果の存在によると考えられた。

5) 不安定状態にある木材の曲げ強度は、不安定度に応じて強度の低下を生じることを認めた。

文 献

- 1) 工藤充康, 飯田生穂, 石丸 優, 古田裕三: 木材学会誌 **49**(4), 253-259 (2003).
- 2) 亀井克之, 石丸 優, 飯田生穂, 古田裕三: 木材学会誌 **50**(1), 10-17 (2004).
- 3) 古田裕三, 則元 京, 矢野浩之: 木材学会誌 **44**(2), 82-88 (1998).
- 4) Ishimaru, Y., Ohshima, K., Iida, I.: *J. Wood Sci.* **47**(4), 254-261 (2001).
- 5) Nakano T.: *J. Wood Sci.* **51**(2), 112-117 (2005).