

木材の収縮応力

II. 木材の収縮応力に及ぼす乾燥条件と試験片厚さの影響

藤 田 晋 輔
(森林利用学研究室)

On the Shrinkage Stress of Wood

II. The influence of Drying condition and Thickness of Specimen on the Shrinkage Stress

Shinsuke FUJITA
(Laboratory of Wood Utilization)

緒 言

木材を乾燥するとき、木材内に発生する乾燥応力は割れ、狂い、落ち込みなどの発生原因となる。これらの内、とくに割れの発生は木材を加工材料として使用するとき、致命的な損傷となる。木材の乾燥では温、湿度の組み合わせを操作することによって乾燥装置を制御し、乾燥に伴って発生する乾燥応力によって、上述のような損傷が発生しないようにする努力が払われる。すなわち、あらかじめ乾燥しようとする木材に適合した乾燥スケジュールを作成し、これにしたがって木材は乾燥される。

これまでの乾燥応力の発生機構の解明は木材加工（乾燥）において重要であると認識されているにもかかわらず、その生長機構が非常に複雑で、加えて乾燥中の木材内部に発生している物理的、機械的性質（因子）を互いに分離できないなどの理由から、木材の乾燥応力に関与する解明しなければならない残された課題は非常に多い。

これまで乾燥応力の測定は古く Tiemann¹⁾ によるスライス法により体系化されて以来、多くの手法・拡張が行われてきている。近年、我が国では井阪²⁾、西尾³⁾ などにより表層ひずみの挙動から乾燥応力を推定し、乾燥スケジュールの組み立て、乾燥制御法の改良などを試みている。一方、収縮応力に関する研究は2, 3の研究者⁴⁾⁵⁾⁶⁾によって手がけられるようになった。

ところで、乾燥スケジュールとは「乾燥しようとする木材が損傷せず、乾燥終了材となるようにするための一種の指標」である。この乾燥に伴う損傷の発生はおもに乾燥初期、末期の木材内に生じている応力の状態に依存する。このことはすでに周知のとおりである。すなわち、木材内の水分分布の不均一により、乾燥初期の応力は木材表層部に生じ、その後、乾燥末期にはこれと同一サインの応力が内層部に現われ、残留応力として存在する。したがって、この間の乾燥応力は木材の組織要素の非定形収縮として、木材に影響し、木材に割れ、落ち込みなどの損傷を生じさせる原因となる。この乾燥に伴う損傷の発生は主に乾燥初期、末期の木材内に生じている応力の状態に依存する。

さて、これまで乾燥応力の真の値は直接測定することが出来ていない。本研究では収縮拘束下にある木材の収縮に伴って発生する応力（収縮応力）を乾燥初期における乾燥応力の挙動に対応させることが出来ると考えた。これまで、繊維飽和点以上の含水率範囲から乾燥に伴って生ずる収縮応力の樹

前報：静岡大農演報，第5号，1-17（1979）。

本論文の要旨は第29回日本木材学会大会（1979.7：北海道大学）において発表した。

種特性⁷⁾、乾燥中の温、湿度変化と収縮応力の発生経過⁹⁾について検討した。この間、得られた収縮応力の大きさは収縮・膨潤量の値⁹⁾と同様に試験片の形状・寸法に影響を受けることが明らかとなった。このようなことから、収縮応力に及ぼす試験片の形状・寸法等の影響をさらに詳しく検討するために計画した。そこで、木材に存在する結合水の脱着に伴って発生する収縮応力に及ぼす試験片厚さの影響、すなわち、試験片厚さ別の水分分布の経時変化、水分傾斜の収縮応力の発生経過への寄与などを検討した。

実験材料と実験方法

1. 実験材料および試験片の調整

供試材料は平均比重 0.65 の気乾状態にあるブナ (*Fagus crenata*) である。これより Fig. 1 に示す形状・寸法を持つ短ざく形のまさ目連続試験片を作成した。なお、試験片の寸法の内、厚さ (Fig. 1 の b; 接線方向) は 1.5, 3.0, 5.0, 7.0, 10.0 および 15.0 mm の 6 種類とした。実験に際し、繊維方向にクランプするため、試験片の寸法が薄いと繊維方向の圧縮固定が困難であるため、試験片の側面に 15 mm (繊維方向) × 30 mm (半径方向) × 5~8 mm (接線方向) のあて木 (ホオノキを使用) を接着補強した。このようにして準備した試験片を 30℃, 100 % R. H. に設定した恒温恒湿槽 (デシケーター) 中に放置し、各々の試験片厚さを持つ試験片すべてがほぼ同一の含水率に達するまで、約 6 ヶ月間にわたって調湿した。調湿終了後、乾燥に伴う水分脱着をまさ目面 2 面からだけ行わせるため、木口および板目面にアルミペイントを塗付 (3 回はけぬり) することによって、木口および板目 2 面からの水分脱着を防いだ。

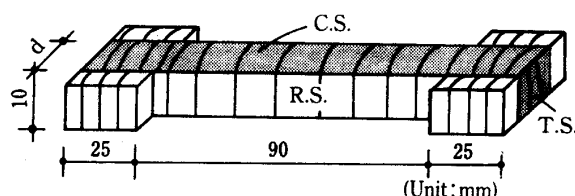


Fig. 1. Shape and dimensions of test specimen.

C.S. : Cross section, T.S. : Tangential section, R.S. : Radial section.
Each specimen was painted with alminium material on cross and tangential section.

2. 実験方法

1. で準備した各々の試験片はあらかじめ設定した実験条件 (Table 1) に調整されている恒温恒湿槽 (田葉井製作所製, レインボーPR-2; 風速 2.5 m/s) 内の収縮応力測定装置に装着した。すなわち、半径方向の収縮を拘束し、乾燥に伴って発生する収縮応力の経時的变化を荷重のそれとして検出し、

Table 1 Experimental conditions.

Temp. (℃)	55.0	55.0	55.0	55.0
$\Delta\theta$ (℃)	10.0	6.0	5.0	3.0
R. H. (%)	56.5	72.0	76.0	85.0
Air velocity	2.5 m/sec.			

これを自動平衡記録計（共和電業，RC-9007）で記録した。なお，収縮を拘束することによって，木材試験片内に発生する真の収縮応力は，収縮を拘束するために必要な荷重とその時点の試験片の断面積の商によって得る必要がある。しかし，実験中にそれぞれの供試試験片の断面積を実測することは事実上不可能である。したがって，本実験では実験開始直前の試験片の断面積との商を用い，これを「みかけの収縮応力（apparent shrinkage stress）」とした。

供試試験片の数はそれぞれの乾燥条件宛10～15本とし，実験結果のとりまとめは得られた値の算術平均値を使用した。一方，含水率の変化は収縮応力測定装置の一部に設置した秤量用ロードセル（10 g）に吊りさげた止め金に収縮応力測定用試験片と同一形状・寸法を持つ試験片を設置し，経時的に測定した。含水率は収縮応力実験終了後，各々の供試試験片の炉乾重量を求めることにより得た。一方，各々の試験片内の水分分布（水分傾斜）は収縮応力測定用試験片と同一形状・寸法を持つ，試験片を10本準備し，あらかじめ設定した時間毎にナイフでスライスし，炉乾法により求めた。

実験結果と考察

1. 含水率経過

各々の乾燥条件下で各供試試験片厚さに得られた含水率経過を Fig. 2 に示した。試験片の含水率調整の段階で，初期含水率30%を目標としたが，実際の初期含水率は30%よりやや低く，平均28.5%であった。Fig. 2 は繁雑をさけるため温，湿度条件55℃，R. H. 56.5%は実験した全試験片厚さを，他の3温，湿度（55℃，R. H. 85%，55℃，R. H. 76.0% および 55℃，R. H. 72.0%）は5，7 および 15 mm の試験片厚さについて示した。この図は各温，湿度条件の各々の試験片厚さに得られた含水率曲線の1つの傾向を示したにすぎない。この図から明らかなことは，当然のことながら，同一温度では相対湿度が高いほど，実験範囲内における最終の平均含水率（平衡含水率）は高い値を示す。すなわち，55℃，R. H. 85%の最終の平均含水率は55℃，R. H. 56.5%の約2倍のそれを示している。

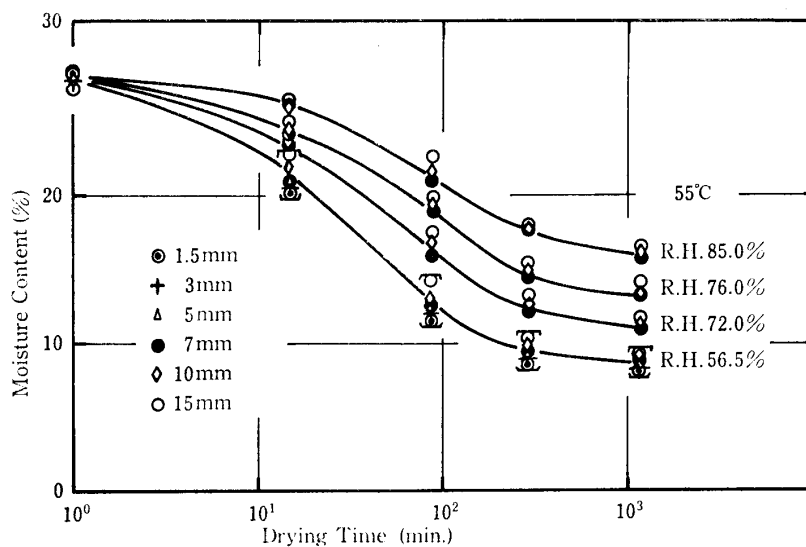


Fig. 2. Average drying curves for the various thickness under each drying condition.

次に同一温、湿度条件の中での試験片厚さの差による含水率経過を見ると、含水率21~22%から9~12%付近までの含水率経過は試験片厚さが薄いほど早く低下するが、試験片厚さの差による最終の含水率の差は2%程度となり、あまり大きな差はなくなる。

2. みかけの収縮応力の経過

Fig. 3 は供試試験片厚さの差によるみかけの収縮応力の発生経過の1例を示した。この図に見られるようにいずれの温、湿度条件でも供試試験片の厚さがみかけの収縮応力の発生経過および大きさに大きな影響を与えることがわかる。すなわち、みかけの収縮応力が立ち上がる時間は試験片の厚さが増すほど長時間側にずれ、みかけの収縮応力の時間に対する傾斜はやや緩まとなるが、極大値を示す時間は試験片の厚さにあまり関係しない。Fig. 3 のみかけの収縮応力—時間曲線からこの立ち上がり後の収縮率の経過に及ぼす試験片厚さとの関係に類似している¹⁰⁾。このみかけの収縮応力は、いずれの試験片厚さでも極大を示したあと一定の値を示すか、わずかに減少するかである。

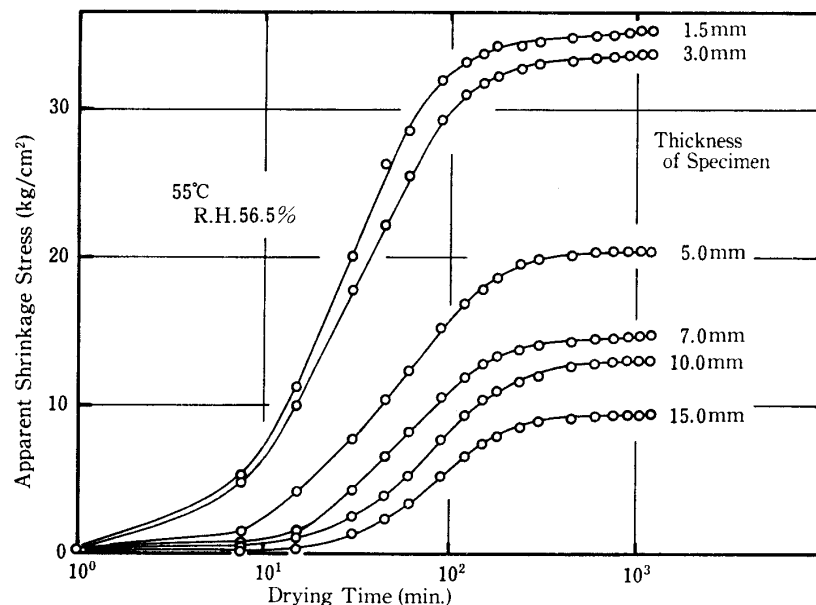


Fig. 3-1. Apparent shrinkage stress curves for the various thicknesses at two drying conditions (55°C, R. H. 56.5 %).

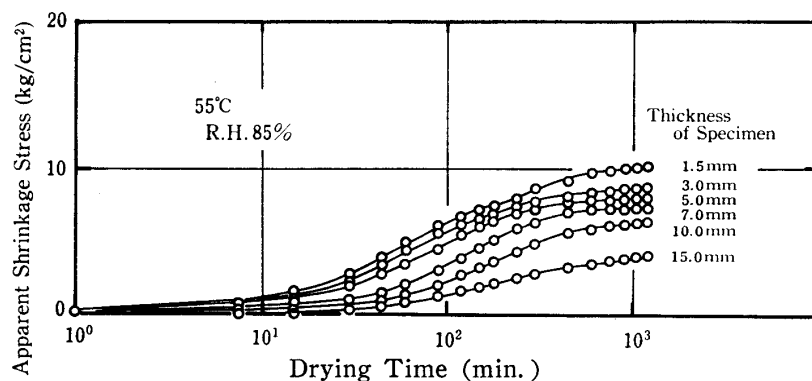


Fig. 3-2. Apparent shrinkage stress curves for the various thicknesses at two drying conditions (55°C, R. H. 85 %).

つぎに、各々の乾燥条件および供試試験片厚さに発生したみかけの収縮応力の極大値は、実験開始後 2,000 分付近と考えられた。この極大値を示す収縮応力値は Kass も報告している⁵⁾ ように試験片の含水率が平衡含水率に到達する以前に発生することがわかる。そこで、同一乾燥条件下におけるみかけの収縮応力値に及ぼす乾燥条件および供試試験片厚さとの関係を見る。Figs. 4, 5 に見られるようにいずれの乾燥条件においても当然のことながら、関係湿度が低いほど、発生するみかけの収縮応力は高い値を示す。それぞれの試験片厚さで、相対湿度 56.5% と 85% に発生しているみかけの収縮応力の最大値の差は、試験片の厚さが厚くなるほど小さくなることがわかる。そこで、それぞれの乾燥条件（乾湿球温度差）とみかけの収縮応力の最大値との関係を示したのが、Fig. 6 である。この図

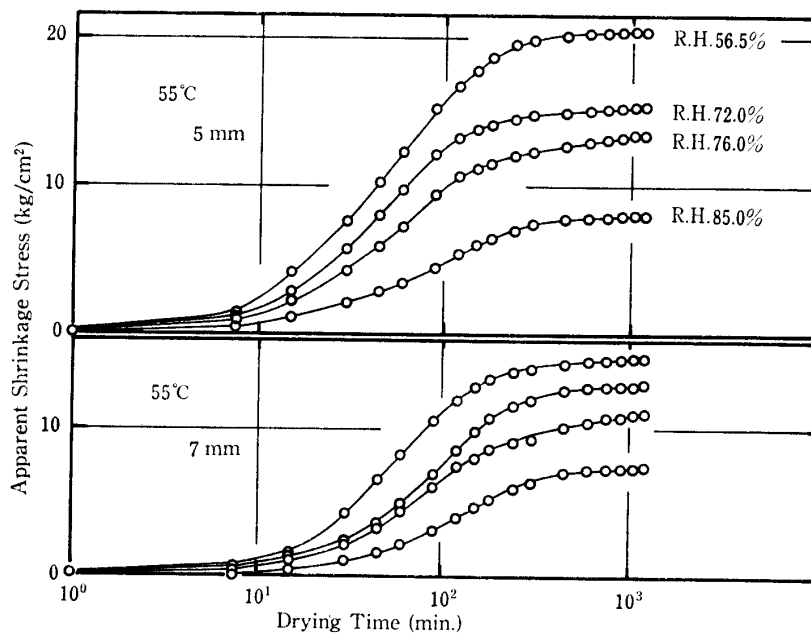


Fig. 4. Apparent shrinkage stress curves at various drying conditions obtained in the specimen of 5 mm and 7 mm thickness.

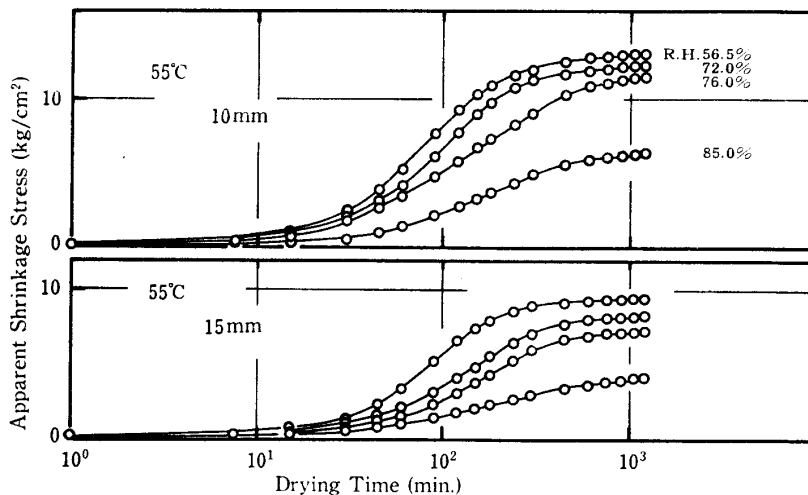


Fig. 5. Apparent shrinkage stress curves at various drying conditions obtained in the specimen of 10 mm and 15 mm thickness.

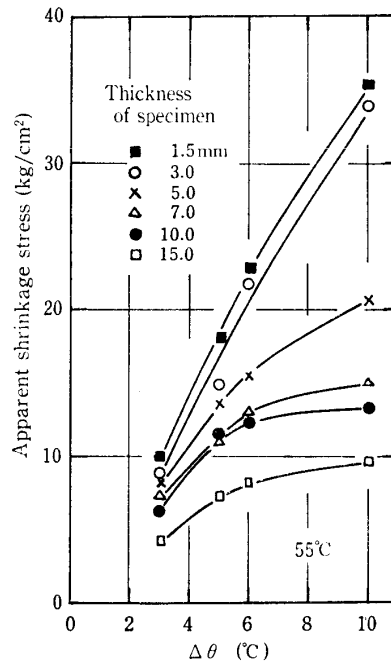


Fig. 6. Relation between apparent shrinkage stress and temperature difference for various thickness of specimen at 55°C.

よりみかけの収縮応力の最大値は、いずれの試験片にあってても乾湿球温度差が大きくなるほど、曲線的に増大し、試験片の厚さが薄いほど、乾湿球温度差の影響は著しく大きい。すなわち、乾湿球温度差10°C差（相対湿度56.5%）と3°C差（相対湿度85%）との差を見ると、試験片厚さ15 mmでは5.16 kg/cm²、5 mm厚さでは12 kg/cm²、15 mm厚さでは27.56 kg/cm²の差が存在する。この原因は試験片厚さが厚いほど内層部の含水率が高いことによると考えられる。

Fig. 7 は各々の供試試験片厚さに発生したみかけの収縮応力の発生速度と乾燥時間との関係の1例（乾燥条件55°C, R. H. 56%）を示した。この図に見られるようにみかけの収縮応力の発生速度は供試試験片の厚さが薄いほど大きく、乾燥開始後、短時間の内に発生し、試験片の厚さが厚くなるほど長時間側に移行している。一方、各々の供試試験片厚さにおけるみかけの収縮応力の発生速度が極大値を示した時点の平均含水率は、試験片の厚さが薄いほど、わずかに高い値を示した。

Fig. 8 は乾燥条件（55°C, R. H. 56.5~85%）とみかけの収縮応力の発生速度との関係を試験片厚さ5 mm および 15 mm について示した。この図から読みとれるように、いずれの試験片厚さにおいても相対湿度が高くなるとみかけの収縮応力の発生速度および最大値は小さくなり、傾斜も小さくなる。一方、このみかけの収縮応力の発生速度が最大値を示すとき、対応させた供試試験片と同一形状のそれに得られた含水率を見る。5 mm 厚さの試験片の含水率は21.3% (R. H. 56.5%)~24% (R. H. 95.0%)、15 mm 厚さのそれは18.6% (R. H. 56.5%)~24.6% (R. H. 85.0%) の間にある。このことからみかけの収縮応力の発生速度が最大値を示すときの含水率は関係湿度が高くなるにしたがって、やや高くなることがわかる。

Fig. 9 は乾燥条件55°C, R. H. 56.5%, 72.0%, 76.0%, 85.0%に得られたみかけの収縮応力と含水率との関係の1例を試験片厚さ7 mm および 15 mm について示した。この図より明らかなようにいずれの乾燥条件でも、みかけの収縮応力は初期含水率より約20%（試験片厚さ15 mm）~22%

(試験片厚さ 7 mm) の含水率範囲まではほぼ直線的に増加する。この含水率範囲以下になるとみかけの収縮応力に及ぼす乾燥条件の影響が現われてくる。また、含水率13~16%付近でみかけの収縮応力はショルダーを示しているのが特徴である。

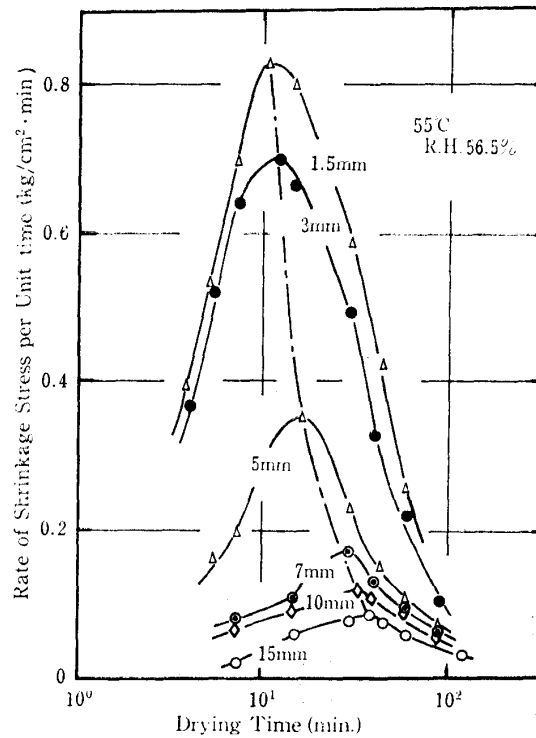


Fig. 7. Relation between rate of apparent shrinkage stress and drying time for various thickness of specimen during drying at 55°C, R. H. 56.5 %.

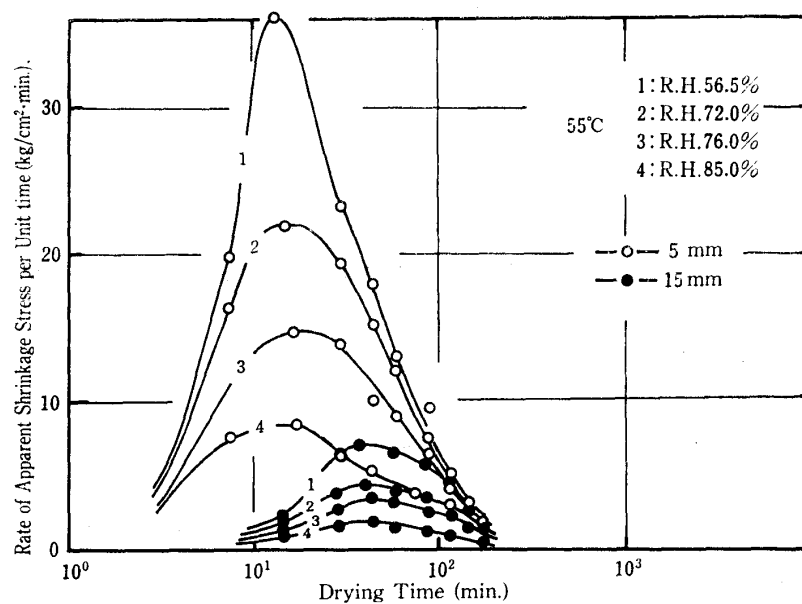


Fig. 8. Relation between rate of apparent shrinkage stress per unit time and drying time at various drying conditions.

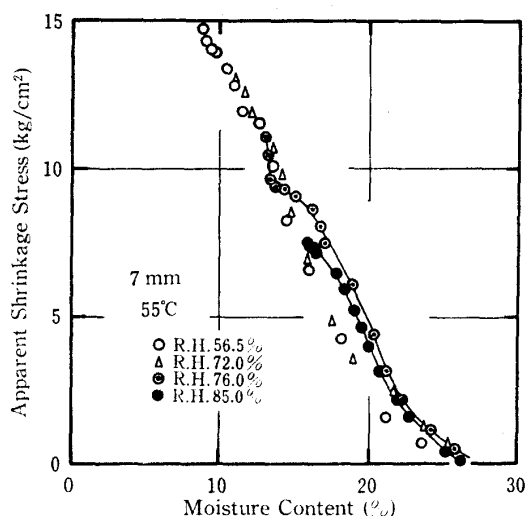


Fig. 9-1. Relation between shrinkage stress and moisture content for 7 mm thick specimen at various drying conditions.

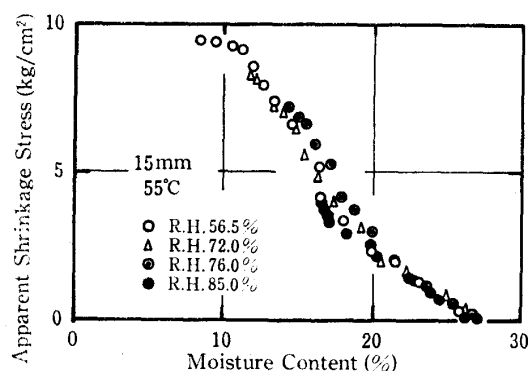


Fig. 9-2. Relation between shrinkage stress and moisture content for 15 mm thick specimen at various drying conditions.

次に Fig. 10 は乾燥条件 55°C, R. H. 56.5% のみかけの収縮応力と含水率の関係を各供試試験片厚さについて見たものである。この図よりいずれの試験片厚さでも約 28% 付近の含水率に至り、収縮応力の発生が始まる。すなわち、みかけの収縮応力—含水率曲線の挙動を見ると、みかけの収縮応力は試験片の厚さ 1.5 および 3 mm では、ほぼ直線的に増大するが、それ以上の試験片厚さ (5, 7, 10 および 15 mm) になると、みかけの収縮応力の発生経過における傾斜はわずかに緩やかになる。そして、試験片厚さ 1.5 mm および 3 mm に現われないショルダーが見られた。その時の含水率は試験片の厚さによって異なるが、含水率 11~16% の範囲にある。この時のみかけの収縮応力は試験片厚さ 5 mm → 17.5 kg/cm², 7 mm → 11.5 kg/cm², 10 mm → 8.5 kg/cm² および 15 mm → 4.5 kg/cm² を示した。それぞれの値をみかけの収縮応力の最大値との比を求めると、試験片厚さ 5 mm では 87%, 7 mm → 73%, 10 mm → 64%, 15 mm → 48% を示し、試験片厚さが厚いほどより低いみかけの収縮応力値でショルダーを示した。この含水率付近で収縮ひずみも一時的なショルダーを示していることから、これは落ち込み現象とのかかわりがあると考えられる。このようなことから、試験片が何らかの形での収縮拘束を受けると、試験片の含水率が繊維飽和点よりはるかに低い含水率に至っても、落ち込みの現象ひいては内部割れの発生の可能性を秘めていると考えられる。

3. 見かけの収縮応力の最大値と乾燥条件および試験片厚さとの関係

Fig. 11 は各々の乾燥条件における試験片の厚さとみかけの収縮応力の最大値との関係を示した。この図に見られるように、いずれの乾燥条件においてもみかけの収縮応力の最大値は試験片厚さ5 mm以上ではいずれの乾燥条件でも類似の傾斜を示す。しかし、試験片厚さ15 mm, 30 mmでは55℃, R. H. 56.5%のみかけの収縮応力の最大値は他の4つの乾燥条件とやや異なる挙動を示した。測定した試験片厚さに得たみかけの収縮応力を結んでいる実線は平均的な傾向を示したもので、数的に求めたものではない。それぞれの乾燥条件のみかけの収縮応力の最大値は試験片厚さが増すほど曲線的に減少している。Fig. 12に見られるように試験片厚さが増すほど試験片内層部の含水率が試験片表層部のそれより高い。したがって、試験片厚さが厚ければ、試験片表層部の収縮能は含水率のいまだ高い試験片内層部の収縮能により、収縮を阻止されていることを裏づけるものと考えられる。故に、試験片の厚さが大きいほどみかけの収縮応力は小さい値を示すことになる。

4. 試験片厚さと水分分布

Fig. 12 は供試試験片の水分分布の変化の1例（乾燥条件55℃, R. H. 76%）を示した。いずれの試験片の厚さにあっても、初期含水率はほとんど同一であると考えて良い。一方、試験片固体内の水分分布は表層部と内層部を比較すると、表層部分がわずかに低い値を示した。これは調湿装置から取り出した時点での表層部の水分蒸発に影響を受けたものと考えられる。しかし、以後の検討では表層部分および内層部分の含水率はほぼ同一なものとして取り扱うことにした。

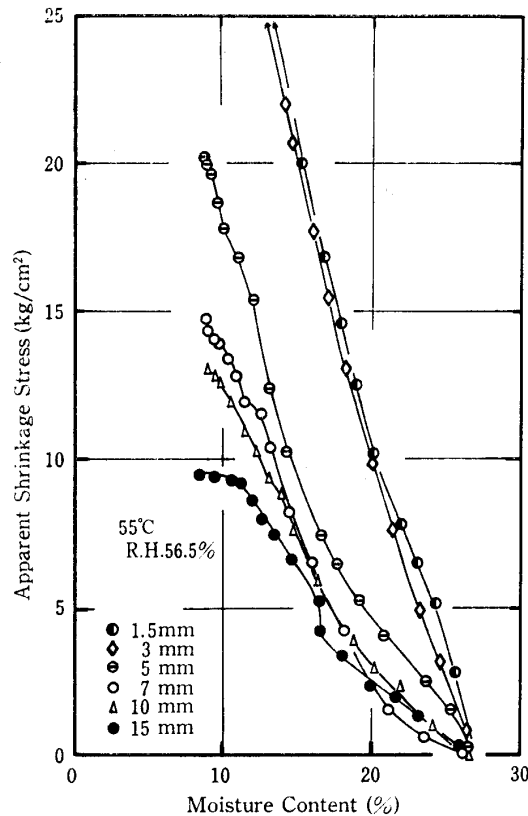


Fig. 10. Relation between apparent shrinkage stress and moisture content for various thickness of specimen during drying at 55°C, R. H. 56.5 %.

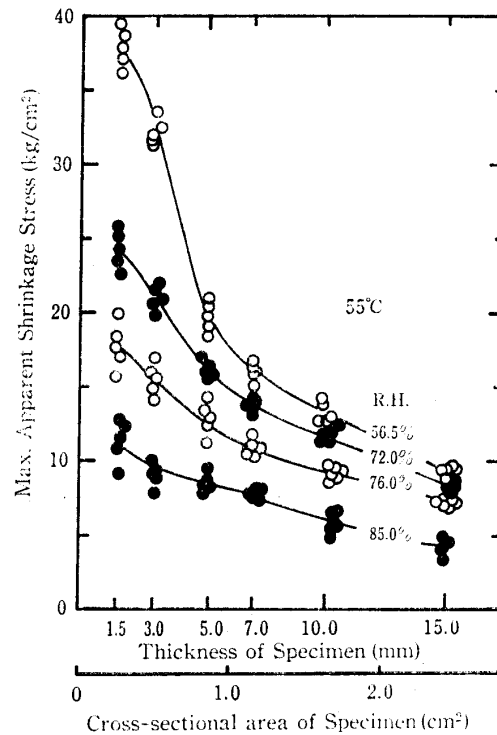


Fig. 11. Relation between maximum apparent shrinkage stress and thickness of specimen at each drying condition.

Fig. 12 より乾燥開始後15分に至り、試験片の内層部の含水率の差は試験片の厚さの影響が出て来る。試験片厚さ7 mm 以上の試験片の内層部の含水率は約26.5%を、試験片厚さ1.5, 3 および 5 mm ではそれぞれ 21.0, 24.2 および 25.8%を示した。しかし、乾燥中期（含水率 20%程度）付近に至ると、試験片内の含水率分布は、試験片厚さによる影響が見られない。一方、試験片表層部の含水率経

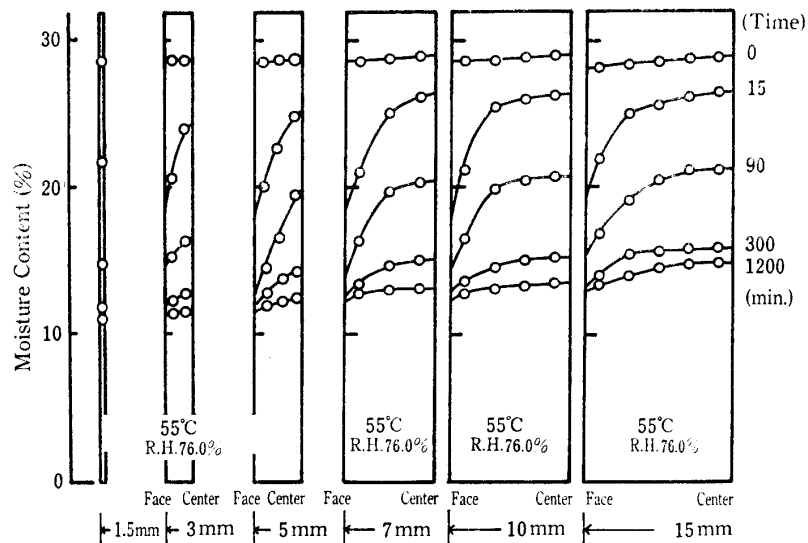


Fig. 12. Moisture distributions at various times for each thickness of specimen during drying at constant condition of 55°C, R. H. 76 %.

過を見ると、当然のことながら試験片の厚さの差による影響は存在していない。以上のことから、同一乾燥条件にある乾燥過程の水分分布はほとんど同一のパターンを示している。

Fig. 13 は乾燥条件と乾燥過程における水分分布の関係の1例（試験片厚さ 10 mm）を示した。乾燥開始後15分における試験片内層部の含水率は乾燥条件に関係なくほぼ類似の値を示している。乾燥時間の経過と共に乾燥条件がきびしいほど試験片表層と内層部との含水率の差は大きくなることがわかる。しかし、試験片の表層部の含水率と乾燥条件との関係を見ると、乾燥条件がきびしいほど表層部の含水率は低くあらわれ、表層部分の乾燥速度はより早いことになる。

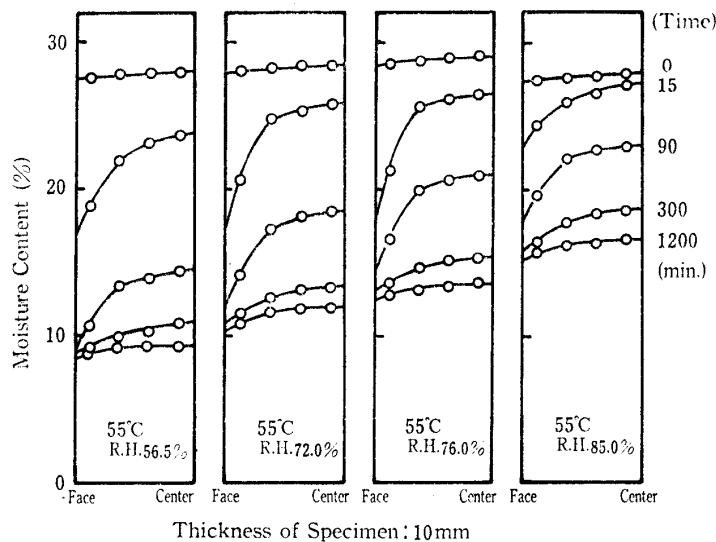


Fig. 13. Moisture distributions at various times for 10 mm-thick specimen during drying at constant various conditions.

以上の図から試験片の厚さが異なっても表層部の水分状態はほぼ同一である。しかし、試験片の厚さがより厚ければ、試験片そのものの平均含水率は高く、内層部から表層部への水分の移動距離が長くなるため、表層部と内層部の水分（含水率）の差は非常に大きくなる。したがって、試験片が厚ければ、内層部の含水率は常に表層部に比較して高くなる。故に、試験片表層部に生じている収縮能を内層部のそれが阻止し、さらに内層部の含水率が高いことによる応力緩和も加味され、結果的に低い収縮応力を示すことになると考えられる。一方、薄い試験片厚さの場合、表層部と内層部の水分の差は厚い試験片に比較しかなり小さくなる。したがって、試験片表層部の収縮能に及ぼす内層部の小さい収縮能による阻止、応力の緩和は小さいため、そこに発生する収縮応力は大きい値を示すことになる。

要 約

本研究では繊維飽和点以下で、木材の含水率を減少させることによって生じる収縮応力を、ブナ材 (*Fagus crenata*) の半径方向について測定した。すなわち、半径方向の収縮を拘束し、4 乾燥条件 (55°C, 乾湿球温度差 3°C, 5°C, 6°C, 10°C) 下で乾燥するとき、ここに発生するみかけの収縮応力に及ぼす試験片厚さの影響、試験片内の水分分布の経過、水分傾斜の収縮応力に及ぼす影響を検討した。得られた結果の概要は次のとおりである。

1. 試験片厚さが増すほどみかけの収縮応力が発生する時間は長時間側に移動し、ここに生ずるみかけの収縮応力の最大値は小さくなる。
 2. みかけの収縮応力の最大値は乾燥条件の影響を受け、乾燥条件がきびしいほど、みかけの収縮応力の最大値は大きい値を示す。
 3. みかけの収縮応力の発生速度は、実験に供した試験片厚さにおいて、どの試験片厚さでも、時間経過と共に増加するが、含水率18~22%の範囲で極大値を示す。
 4. 収縮応力の発生経過に及ぼす乾燥条件の影響は、いずれの試験片厚さでも含水率16~18%付近に変曲点（ショルダー）が現われる。
 5. 乾燥条件および試験片厚さは、乾燥経過中の水分分布を通して、みかけの収縮応力の発生開始、発生経過に影響を及ぼす。
- 以上の結果から乾燥経過中に発生するみかけの収縮応力を評価するには、供試試験片の厚さはもちろん、乾燥条件、特に相対湿度の影響を十分に考慮する必要がある。

文 献

- 1) H. D. Tiemann: "Wood Technology", Pitmann Publishing Corporation (1951).
- 2) 井阪三郎: 木材工業, 32, 8 (1979).
- 3) 西尾 茂: 木材工業, 27, 596 (1972).
- 4) 金川 靖・寺沢 真: 第27回日本木材学会大会要旨集, 267 (1978).
- 5) Kass, A. J.: *For. Prod. J.*, 15, 225 (1965).
- 6) 佐々木 徹・山田 正: 木材研究, 48, 31 (1969), 木林誌, 18, 169 (1972).
- 7) 藤田晋輔: 第25回日本木材学会大会要旨集, p. 256 (1977).
- 8) 藤田晋輔: 第27回日本木材学会大会要旨集, p. 250 (1979).
- 9) 三城昭義: 木材誌, 24, 902 (1978).
- 10) 藤田晋輔・上田久平: 静大農研報, 第5号, 13 (1979).
- 11) 金川 靖・服部芳明: 木材誌, 25, 184 (1979).

Summary

Shrinkage stress during drying is influenced by some factors, such as drying condition (dry bulb temperature, wet bulb temperature and air velocity), initial moisture content, thickness of specimen and etc.

In this paper, the influence of drying condition, especially wet bulb temperature and thickness of specimen on apparent shrinkage stress was investigated. Specimen was taken from a heart-wood of Buna wood (*Fagus crenata*), and it was prepared specimens with the dimensions of 150 mm (R) × 15 mm (L) with five types thickness in the range of 1.5 to 15 mm in the tangential direction for the measurement of shrinkage stress as shown in Fig. 1. The specimen with the initial moisture content in the range of about fiber saturation point were dried, the shrinkage stress were measured under strain restraint along the radial direction during drying at various drying conditions as shown in Table 1. Moisture distributions of specimen were measured by used to a slice method.

The results are summarized as follows:

- (1) The maximum apparent shrinkage stress increase with decreasing a relative humidity condition at 55 °C (Fig. 5), and decrease with increasing a thickness of specimen in the range of 1.5 to 15 mm (Fig. 10).

(2) A rate of apparent shrinkage stress per unit time during drying increase with decreasing a relative humidity condition, and a maximum of that decrease with increasing thickness of specimen. Those points showed are located in about 18~22.8 % moisture content range (Figs. 6 and 7).

(3) Apparent shrinkage stress showed the shoulder area in 15~18 % moisture content range. It is appeared that this phenomenon correspond to residual cell collapse deformation (Figs. 8 and 9).