

木材乾燥によつて生じた応力の除去について

小 倉 武 夫⁽¹⁾

梅 原 誠⁽²⁾

小 玉 牧 夫⁽³⁾

1. ま え が き

木材が乾燥しはじめると、それが天然乾燥であろうと人工乾燥であろうと必ず表面には引張り応力、内部には圧縮応力を生ずる。これは、木材中の水分は表面から蒸発されるので、どうしても表面は内部より速く乾燥され、そのため表面の含水率は内部より低くなり、いわゆる水分傾斜を生じ、内部の方がまだ繊維飽和点より高いのに、表面ではそれ以下になつて収縮をおこすからである。しかも、これらの応力の状態は、乾燥がすすむにつれて変化し、いずれも極大値になるが、その後はしだいに小さくなつて、ついには反転し、表面には圧縮応力を、内部には引張り応力をもつようになる。

このような現象は、すでによく知られているところであるが、ただ従来の研究では、応力の値そのものは明らかでない。実験の方法として、歪みが測定され、その結果、上述の傾向が明らかにされたにすぎない。

いずれにしても乾燥を終えた材が表面では圧縮応力を、内部では引張り応力をうけたままになつてゐることは事実である。このような木材に生じた応力は、時間のたつにつれて小さくなり、全く実用的には問題とするにいたらないことも想像されるが、これらのことはほとんど明らかにされていない。しかし、応力が存在するままになつてゐると、このような材をさらに小割りするか、表面を飽割りすると、応力のつり合いが破れて、変形を生ずるはずである。これも、その変形の程度にもよるが、木材加工の技術がすすみ、精度の高い製品を要求されるとともに表面塗装の技術が進歩し、わずかの変形でも塗装の仕上りを不良にする原因にもなるので、このような応力の存在は許されなくなるものと考えられる。したがつて、乾燥の終わりに生じてゐる応力は、できるだけ除去しておくことの好ましいのは当然といえよう。

乾燥によつて生ずる応力については、従来あまり研究が行なわれておらない。アメリカ合衆国マジソンの林産研究所においてはこの研究の重要性を認め、1940年から研究されてきただけで、ほかには例をほとんどみない。しかし、この林産研究所においても、乾燥中に生ずる応力が乾燥条件によつて、どのように影響をうけるかということにはかなり力を注いできたが、生じた応力を除くという点では、ほとんど研究されてないようである。人工乾燥のさい、乾燥操作が終わり、テストピースが所定の含水率に達したとしても、乾燥室内にある個々の材の含水率には、かなりのムラがあるのは事実であり、かつ1本の材でも、表面と内部とでは水分に差があり、これらを均一にするため、イコーライジングやコンディショニングの操作が行なわれている。

* (1) 木材部長・農学博士

(2) 木材部材料科物理研究室員

(3) 元木材部加工科乾燥研究室員

とくに、このコンディショニングの操作は、水分分布を均一にするために行なうものとされているが、これでも乾燥によつて生じた応力がある程度除くことはできるけれども、すくなくとも、この応力を除くために行なうという意味ではないようである。応力除去については、ただ J. W. CHURCHILL¹⁾ や B. N. UGOLJEW¹⁷⁾¹⁸⁾ らの報告があるにすぎないが、いずれも温度の低いコンディショニングではほとんど効果がなく、どうしても温度を上げなければならないとしている。

前述したように、これからの木材加工技術にたいする要求がたかまるにつれて、乾燥材に応力が潜在していることは許されない。したがつて、このような応力を除かなければならないが、その方法として現実と考えられるのは、いわゆるコンディショニング以外にないことも明らかである。この実験は、コンディショニングの条件である温度と処理時間が、応力除去にどのような効果を示すかを知るためにブナ、カンパについて行なつたものである。応力の判定は、直接行なうこともできないので、アメリカ林産研究所で考えられた方法を用い、歪みを測定して、コンディショニングによる歪み残存状況を調べた。

この報告には、これらの結果を発表するとともに、内部応力消失の程度が樹種によつても差があるので、若干の樹種について調べた。ここに用いた方法はかなり複雑で、労力と時間をともなうので、これに代わるべきより簡単な方法を見いだすべく若干の実験を行なつた。その結果をもあわせ報告した。今後、このような問題に取り組む人々のなんらかの参考になれば、著者らの幸せこれにすぎるものはない。終わりにこの実験を行なうにあつて、種々アドバイスならびにご援助をえた寺沢 真枝官、井阪三郎氏をはじめ多くの方々をたいし、謹んで謝意を表する。

2. 実験方法

2.1 方法のあらましと考え方

この実験は、人工乾燥によつて生じた応力をコンディショニングの処理をして最も効果的に除く方法を見いだすことにあるので、まず応力の生じている材を用意しなければならない。そのために、試験材としてえらんだ樹種に応じた一般的なスケジュールを用いて乾燥し、決して無理な乾燥をしてとくに大きい応力を生ぜしめたり、またとくに緩い乾燥をして、応力の生じないようにもせず、まず普通程度の乾燥によつて応力を生ぜしめたものを供試材としなければならなかつた。応力の除かれていく経過を知るためには後述するように、その材を切断してしまうので、処理条件や処理後の経過日数による観察回数などの組合せで、多くの供試材を用意しなければならず、しかも、いずれにも同じ程度の応力をあらかじめもたせておくことは、厳密には至難なことであるが、この点にとくに留意した。

いま、ある温度のコンディショニングについての実験を例にとれば、必要な試験片をとるために長さ70cmの試験材を3～4枚準備し、これを一般的なスケジュールで人工乾燥し、所定の含水率に達したとき操作をおえ、応力の状態を調べるため、各試験材の一部を切りとり、その残りに対して直ちにコンディショニング処理を行なつた。予定したコンディショニング処理時間に達したたびの一部を切りとり、応力を測定するとともに、さらにその一部を一定条件の室内に放置して、その応力の減少していく状態を調べた。これらの詳細は後述するが、ひとつのコンディショニングの処理温度にたいしても、行なうべき実験操作は多く、相当の手間と時間を必要とした。さらに応力の測定において、その変わつていく状況を求めるのに、測定ごとに供試材を異にすることにも問題があり、できれば同一の供試材で、実験を終始することが好ましい。それだけに、今後この種の実験を多く行なうためにはこの応力を調べる方法の、より簡

単なるものを他に求めることを考えなければならない。

このような意味で、ここに用いたアメリカ林産研究所の方法と比較するために、別に詳細を説明する方法(応力のある板を、表面から削り取るとそれに応じて変形するので、その変形の矢高から応力を求める方法)で、特定の樹種にたいして実験を試みた。

またこのような応力の発生や除去は、樹種によつても差があると考えられるので、これら確かめるために、手近かにあつた数種の樹種をえらんで、特定温度のコンディショニング処理をなし、その効果を検討した。このような樹種による相違を求めるには、ここにえらんだ樹種が決して適当なものとは思われないが、供試材入手の関係で、いたし方のなかつたことを断わつておきたい。

以下、測定方法の詳細について説明する。

2.2 試験材

乾燥によつて生じた応力がコンディショニング処理によつて、どのように小さくなつていくかを見るために、ブナ(Beech, *Fagus crenata* BL.), カバ(Birch, *Betula Maximowicziana* REGEL)の2樹種を用いた。また、このような応力の小さくなる傾向は樹種によつても差があるので、これを見るためにコンディショニング処理の条件をきめて、実験を行なつたが、それに用いた樹種はシオジ(Ash, *Fraxinus spaethiana* LINGELSH), ナラ(Oak, *Quercus mongolica* var. *grosseserrata* REHD. et WILS.), シナノキ(Basswood, *Tilia japonica* SHIMONKAI), キリ(Paulownia, *Paulownia tomentosa* STEUD.), ブナ(Beech), カバ(Birch), レッドラワン(Red lauan, *Shorea negrosensis* FOXW.), アルモン(Almon, *Shorea eximia* SCHEFF.)の8樹種である。試験材はいずれも含水率60~90%の生材で心材を用い、柁目板木取りとし、厚さは22 mm, 幅は120 mmで、長さについては、実験装置の大きさの関係から700 mm前後とし、材の表面を鉋仕上げとした。また、なるべく素材による材質の相違をなくするため、同じ条件の実験には同じ原木を用いることとし、長さ約700 mmの試験材を1つの条件試験にたいしそれぞれ3~4枚を用意した。

2.3 供試材としての準備

試験材のマーク記入：これらの試験材にはFig. 1に示したような、長さ10 mmの7個を1組とした供試片をマークして、これを測定ごとに切りとつた。これら1組のなかの7個の供試片は、それぞれ含水率の測定、処理直後の応力および、その後の放置日数1, 3, 10, 40, 120日目の応力を測定するため

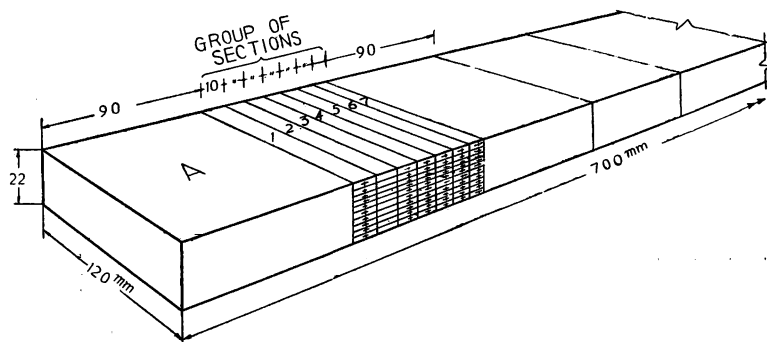


Fig. 1 試験材のマーキング
Marking on test piece.

に用いられた。また、これら1組の供試片群は実験すべきある温度におけるコンディショニング処理の時間数に応じて準備したが、この群の間隔も測定すべき供試片群が切りとられて、その残りがふたたびコンディショニング処理をしても新しい木口としての影響をうけることのないように90mm以上とした。

さらに、応力を測定するかわりに厚さの方向に薄く切りはなして、その歪みを測定することにしたので、各供試片には、厚さ方向に10等分してマークし、いつも同じ位置が測定できるように測点のしるしをした。また、試験材の木口面から水分の蒸発するのを防ぐため、速乾ニスに20%のアルミニウム粉を混合したアルミニウム塗料を3回ずつ塗布した。この実験では所定のコンディショニング処理をしたたびに、供試片群を切りおとすので、そのつど新しい木口面が現われるため、同じ方法で木口面を保護した。

応力の付与：この試験は、乾燥によつて生じた応力をどのような条件でコンディショニングすればよいかを知ることにあるので、まず、応力の生じている試験材を準備しなければならない。そのために各試験材ごとに、上述のマーキングを施したのち、電気熱源の自然循環式乾燥実験装置（奥行800mm、幅600mm）にて仕上がり含水率が8～10%になるように人工乾燥を行なつた。このばあいの乾燥スケジュール

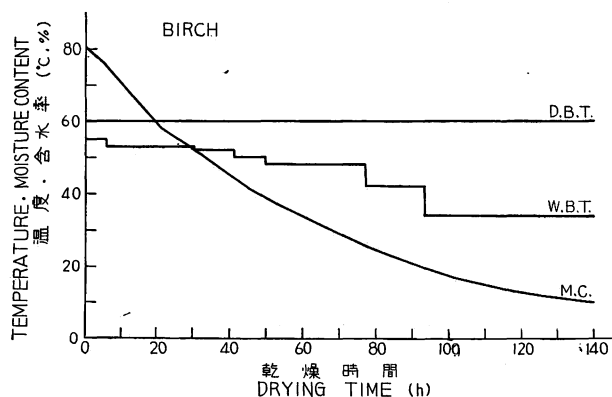


Fig. 2-1 乾燥スケジュール
Drying schedul used for tested species (Birch).

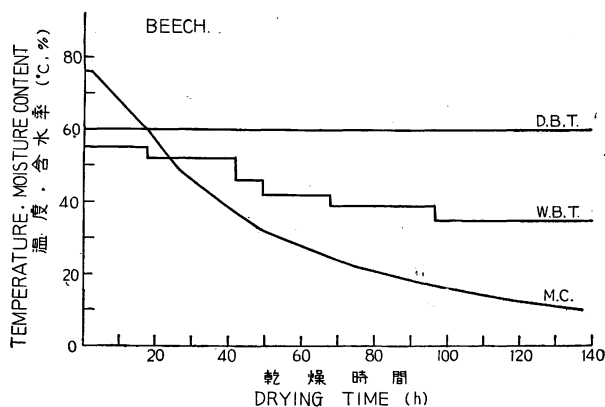


Fig. 2-2 乾燥スケジュール
Drying schedul used for tested species (Beech)

はコンディショニング温度の影響を求めるための試験に用いたブナ、カバについては乾燥温度を60°C一定とし、乾湿球温度差を含水率の減少にともなつて大きくしていつた。これはコンディショニング処理における温度の影響を求めるためであるので、乾燥温度は同じにした方がよいと考えたからである。樹種によるちがいを求める実験では、それぞれ、その樹種にみあつた乾燥スケジュール¹²⁾¹⁴⁾を用いて、人工乾燥を行なつた。Fig. 2-1～2-3に例としてブナ、カバ、ナラの乾燥経過をしめした。このようにしてごく一般の人工乾燥をすると、乾燥操作の終わつたときには、表面に圧縮、内部に引張り応力を生じているはずである。これら乾燥した材のすべてについて、どのような応力を生じているかを知るための供試片群を切りとり、新しい木口面には前述したアルミニウム塗料をぬり、ただちに次に示すようにコンディショニングの試験を行な

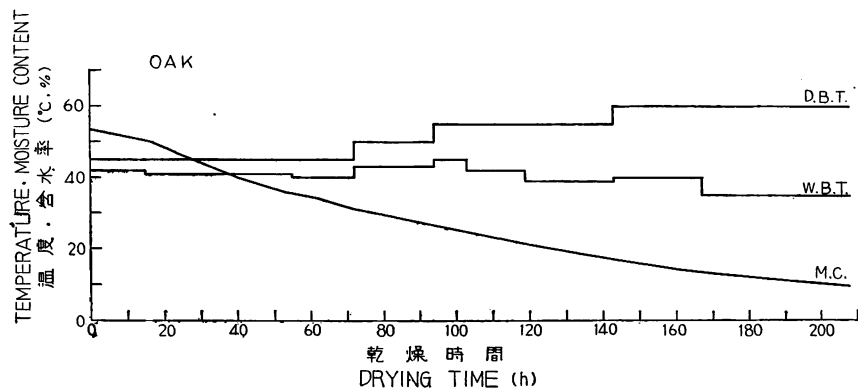


Fig. 2—3 乾燥スケジュール
Drying schedul used for tested species (Oak).

つた。

2.4 コンディショニング処理の条件

試験材の乾燥には前述のように、電気熱源の乾燥装置を用いたが、これにはコンディショニング処理を行なう設備がないので、別の強制循環式の乾燥装置に移さねばならなかつた。このさい乾燥終了と同時に決められた温度のコンディショニング処理に移れるように、あらかじめその温度に調節しておき、試験材を移したので、試験材の温度は低下することがなかつた（ただし、乾燥温度よりコンディショニング処理温度の低いときは別であるが）。

コンディショニングの温度： コンディショニング温度の効果を求める実験にあつては、その乾球温度をそれぞれ、40, 60, 80および 90°C としたが、いずれの温度でも平衡含水率が 12% になるように湿球温度を調節した。ただ温度 80°C, 90°C のばあいは乾燥装置の温度を調節するための設備だけでは所定の温度を保つことができなかったもので、生蒸気を若干だけ導入して、条件をととのえた。

また、樹種による処理効果の差を求める実験にあつては、どの樹種にたいしても乾球温度 60°C, 湿球温度 55°C（風速1m/s）の一定条件とした。なお、この条件に相応する木材の平衡含水率はほぼ 12% である。

コンディショニングの時間： 乾燥によつて生じた応力の除去は、コンディショニングの温度だけでなく、その処理時間によつても影響をうけると思われるので、処理時間の経過にともなう応力の状態を測定した。すなわち、40°Cを除く他の温度では、72時間まで経過し、その間 0.5, 1, 2, 5, 10, および24時間を経過したときに、応力を測定した。また処理温度 40°Cのときだけは、120時間まで処理した。これらのあらかじめきめられた処理時間を経過したときに試験材をとりだして、すばやく1組の供試片群を切断して、次に示す方法で測定を行ない、残りは前述のように木口面にアルミニウム塗料をぬつてコンディショニング処理をつづけた。

コンディショニング処理後の経過日数： コンディショニング処理によつて応力は低下するが、処理後の経過時間によつても、さらにしだいに低下するはずである。これらを検討するために、所定のコンディショニング処理をおえて、供試片群の一部から応力を測定し、その残りを 20°C ; 75% の恒温恒湿室（平衡含水率 12%）の中に放置し、1, 3, 10, 40, 120日をそれぞれ経過したごとに、供試片群から1個ずつ

を切りとつて、応力を調べた。

2.5 応力の測定

2.5.1 幅の変化による歪みを測定して応力を求める方法

試験材の内部に生じた応力を直接測定することは技術上不可能であるため、アメリカの林産研究所で1938年から考察され、すでに林業試験場研究報告第77号で報告した方法（F. P. L. の方法と呼ぶ）を用いた。

いま、試験片を各小片に鋸断する前の幅を lb 、鋸断後を la とし鋸断前の単位長さの長さにたいする歪みを ε とすれば、これは次式で表わされる。

$$\varepsilon = \frac{lb-la}{lb} \text{ mm/mm} \dots\dots\dots(1)$$

試験片のうけていた応力が引張りか圧縮かによつて歪みの値はそれぞれ正、負を示すことになり、その歪みの厚さ方向の分布を図示すれば、一般には Fig. 3 のごとき分布曲線がえられ、その歪みの総和 $S\varepsilon$ は全厚さにたいしては、

$$S\varepsilon = \int \varepsilon |dh| \dots\dots\dots(2)$$

で表わされるはずである。ここではとくに $S\varepsilon$ を歪積算値とよぶことにした。

応力の値を知るためには、各鋸断された小片の $|\varepsilon_i|$ にそれぞれの条件に応ずる弾性係数 E_i を乗じなければならないが、 E_i を正確に知ることはできないので、応力の有無は歪みで推測する以外に

方法がない。また上述の $S\varepsilon$ は実験の都合上、厚さにたいして両表面より同じ位置の小片の歪みを平均したので、次のごとく表わすことができる。ここではこの値で、すべてを比較検討することとした。

$$S\varepsilon = \frac{1}{2} \int \varepsilon |dh| \div \sum_{i=1}^5 |\varepsilon_i| \frac{h}{10} \dots\dots\dots(3)$$

$$\text{ただし } |\varepsilon_1| = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_{10}}{2}, |\varepsilon_2| = \frac{\varepsilon_2 + \varepsilon_9}{2}$$

$$|\varepsilon_3| = \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_8}{2}, |\varepsilon_4| = \frac{\varepsilon_4 + \varepsilon_7}{2}$$

$$|\varepsilon_5| = \frac{\varepsilon_5 + \varepsilon_6}{2}$$

2.5.2 矢高の変化を測定して応力を求める方法

すでに2.1で述べたように、上述した方法では応力の推移を知るには必ず、別の供試片によらなければならないだけでなく、測定には多大の労を要するので、これに代わるより簡易な方法を求めようとして、比較のためにこの実験を行なつた。すなわち、試験材に応力のあるときは、その表面からある厚さを切りとると、その材のもつ安定していた応力分布が変化し、厚さの減少した材は残存応力につり合つた大きさまで曲がり、ある曲率をもつて安定する。したがつて、順次一定の厚さずつをとり除いてゆくと、その材の反り、すなわち曲率は変化していくことになる。このように、応力のある板からある厚さを除いたあとの曲率を知れば、除かれた部分の応力は次式によつて表わすことができる³⁾⁴⁾¹¹⁾。したがつて、Fig. 4の

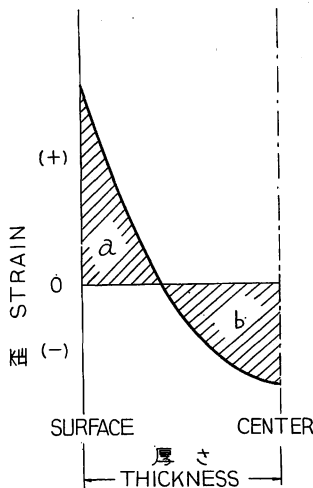


Fig. 3 歪積算値
Integrated strain.

ように、矢高測定器によつて反りを求め、とり除かれた部分の弾性係数を仮定すれば応力を知ることができるので、この方法によつて、板の厚さの半分以上まで順次に表面より切り取り、 E を仮定して応力を求めてみた。

$$\sigma = \frac{E(h-a)^2}{6} \frac{d(1/\rho)}{da} - \frac{2E(h-a)}{3} \frac{1}{\rho} + \frac{E}{3} \int_0^a \frac{1}{\rho} da \dots \dots (4)$$

ここに： E ：ヤング率， $\frac{1}{\rho}$ ：曲率

h ：材の厚さ， a ：とり

のぞかれた部分の厚さ

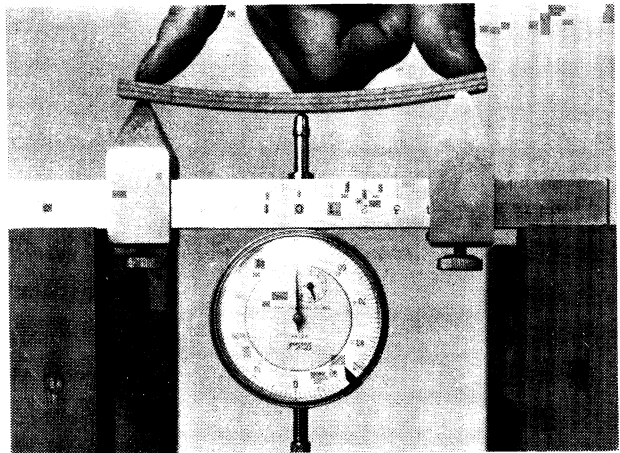


Fig. 4 矢高測定法

Method of measuring the rise on a cupped section.

この方法で求めた各位置の σ を E で除すと、前項(2.5.1)でのべた ε の値に相当するものを知ることができるので、これらを計算して比較してみた。この方法の利点は、厚さを順次とり除いていくときに測定する矢高はいつも同じ位置で測定することができるので、測定値が安定していることである。この比較のための実験はブナとカバを用い、ブナではコンディショニング温度 40, 60, 80 および 90°C において、カバでは 60°C の条件にたいして行なつてみた。

3. 実験の結果

3.1 コンディショニングの温度と時間の効果

さきにのべたように(2.5.1)，材の中にもつている応力の状態は歪積算値で表わすことにしたが，この値はコンディショニングの温度のみならずその処理時間の長さによつてしだいに低下していくことは想像される。材の中の応力の分布，つまり，歪みの分布はコンディショニングの温度やその処理時間によつて変わっていくが，カバについて実験した処理後3日目における歪み分布の結果をFig. 5に示した。ここに3日目の歪み分布を示したのは，歪みは経過日数によつて変化し，処理直後のものは測定値が不安定であるため，3日目の値を用いたのである。これによると，一般には，どの処理温度でも処理時間が長くなると，歪みの大きさは小さくなる傾向が見られた。しかし処理温度が40°Cのときは，あまり顕著な処理時間の影響はみられなかつた。また，80°Cと90°Cでは処理時間が短くても歪みの大きさは非常に小さくなつていたので，処理の時間的な効果はあまりみられなかつた。さらにこれらの関係を明らかにするため，歪積算値によつて検討してみたがFig. 6, Fig. 7に示したごとく，明らかに温度の効果がみとめられ，処理時間にたいして指数的關係をえた。ただ，ブナの処理温度40°Cだけは全体的にはつきりした傾向が認められなかつた（この結果は示されていないが）。これは乾燥を行なつたときの推定含水率が不適当であつたため，乾燥終了時の含水率がいずれも12%程度であつたのが，これだけは7~8%というあまりにも低くなりすぎたためと考えられる。また，温度についても80°Cと90°Cとでは，あまり差が認められなかつたが，実用的の見地からも，80°C以上の処理を行なうことは疑問のようである。さらに，Fig. 8, 9に歪積算値と処理温度との関係を，処理時間，放置日数ごとに示した。これから明

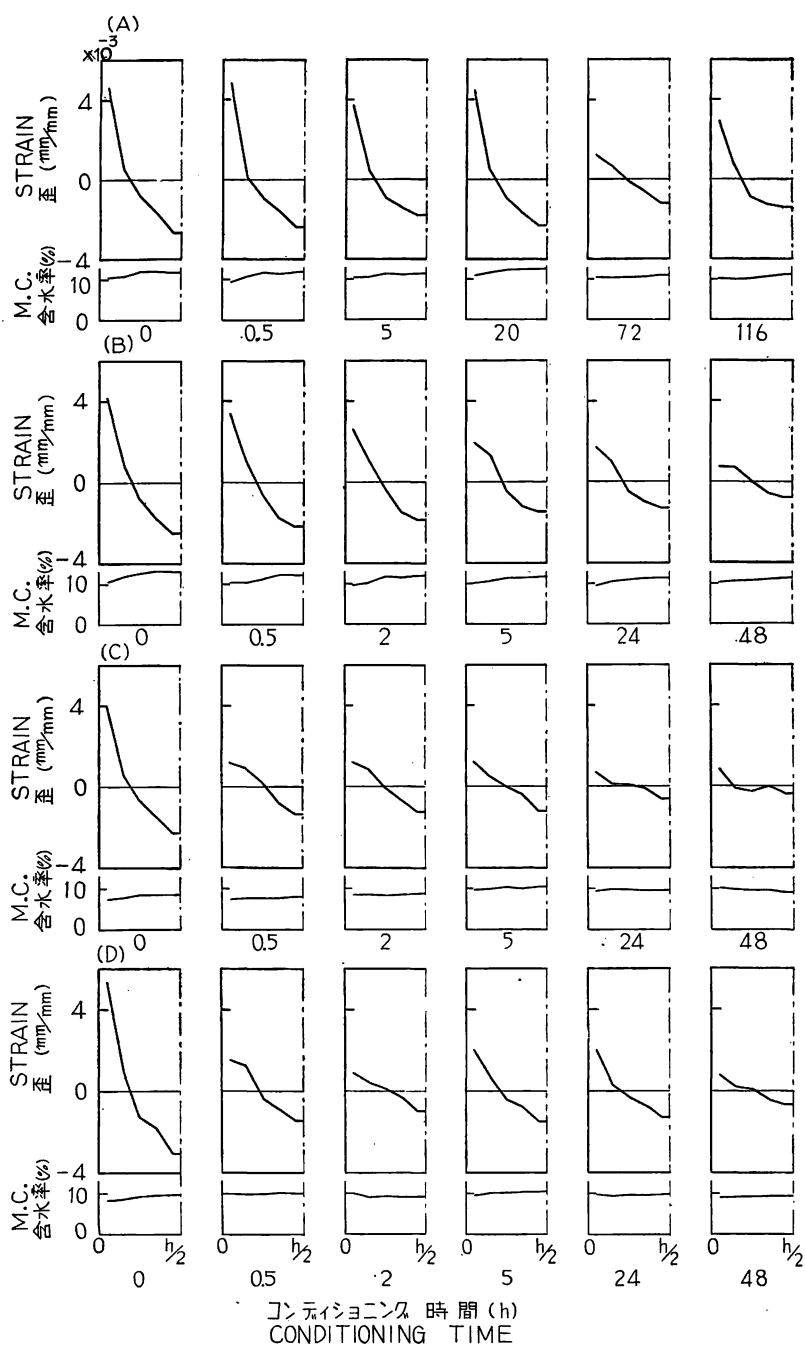


Fig. 5 歪み分布 (カバ, 3日目)

Strain distributions at 3 days after conditioning in various temperatures and times (Birch).

A=Conditioning temperature	40°C
B=	60°C
C=	80°C
D=	90°C

らかなことは、処理温度 40~80°C は有効であり、しかも処理温度と直線的な関係の部分すら見られた。

3.2 処理後の経過による応力の低下

コンディショニングによって、材の応力は小さくなるが、さらに処理後の時間が経過するにつれて徐々に小さくなるものと想像されるので、2.4 に述べたように恒温恒湿室内に最長 120 日まで放置しておいた結果を歪積算値についてまとめてみると Fig. 10, 11 のごとくである。すなわち、一般には、放置しておくとき歪積算値はしだいに小さくなるが、ただ最初のうちは比較的速やかに小さくなり、長くなるほど減少のしかたが小さくなってしまふ。すなわち 100 日も経つと、この値はほとんど変わらなくなった。しかも、当初のコンディショニング処理時間との関係はなく、同じような大きさになったといえよう。このことは乾球温度 60°C、乾湿球温度差 5°C の処理条件で、70~100 時間の処理をしたことが処理時間を短くして、処理後 100 日も放置したときの効果と同じであることを意味している。しかしこのような傾向は、どの樹種にたいしても同じであるとはいいきれないようである。たとえば、ブナ、キリでは処理時間を長くすれば、応力除去には非常に効果があり、いくら放置日数を長くしても、応力が消滅することはなかつた。

また、歪積算値の大きさは、Fig. 8 でわかるように、コンディショニング直後よりも処理後 1~3 日間放置したときの方が大きくなることが認められた。しかもこの傾向は、どの樹種にたいしても認められた。これは、処理直後では材の温度が高く、ヤング率が小さいために、応力が小さく、歪積算値も小さく

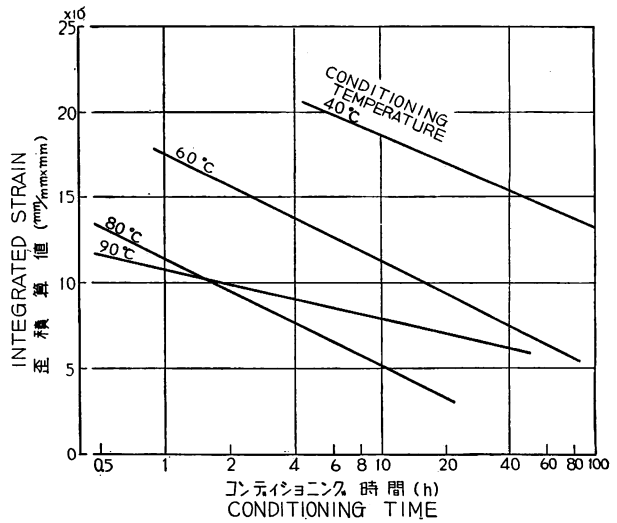


Fig. 6 温度と歪積算値とコンディショニング時間との関係 (カバ)

Relation between integrated strain and conditioning time treated at various temperatures (3 days after conditioning : Birch).

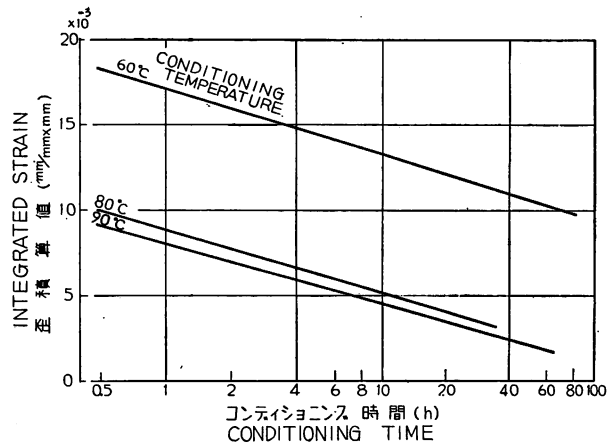


Fig. 7 温度と歪積算値とコンディショニング時間との関係 (ブナ)

Relation between integrated strain and conditioning time treated at various temperatures (3 days after conditioning : Beech).

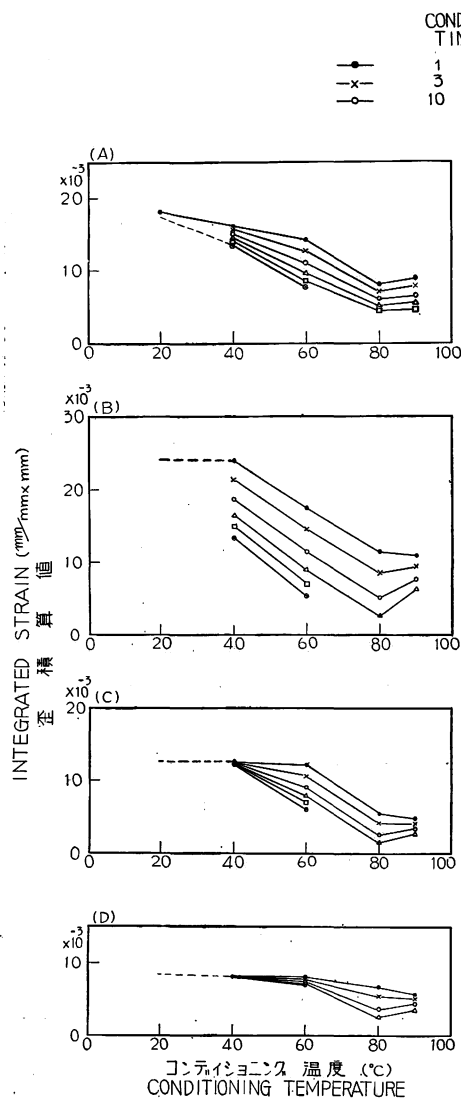


Fig. 8 歪積算値と処理温度との関係
Effect of conditioning temperature on integrated strain (Birch).

A=immediately after conditioning.
B=3 days after conditioning.
C=40 days after conditioning.
D=120 days after conditioning.

なる傾向にあり、また、含水率分布も表面が低く、中心部が高いのが通常である。しかし時間の経過につれて、表面層は吸湿し、膨張しようとするため、これが応力の増加をもたらし歪積算値の増加という結果になったものと思われる。

しかし、このような一時的な歪積算値の増加も、放置日数がさらに長くなるにつれて、完全に消失し、

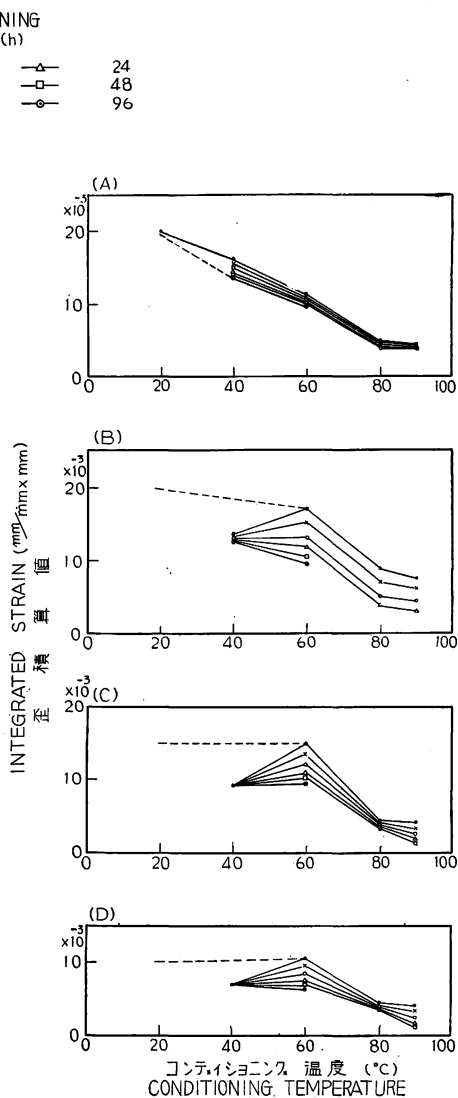


Fig. 9 歪積算値と処理温度との関係
Effect of conditioning temperature on integrated strain (Beech).

A=immediately after conditioning.
B=3 days after conditioning.
C=40 days after conditioning.
D=100 days after conditioning.

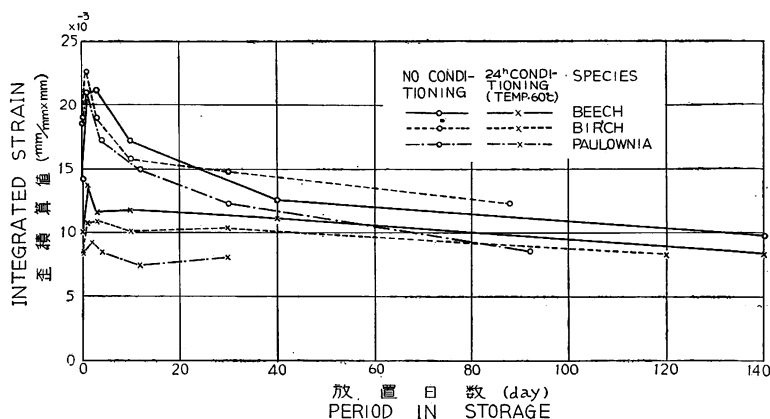


Fig. 10 歪積算値の
放置日数による低下
Decreasing rate
of integrated strain
with period in stor-
age (comparison
of the effect of
conditioning treat-
ment with that of
no-conditioning).

時間の経過とともにしだいに小さくなっていく。

3.3 樹種による相違と、コンディショニングの総合効果

前述したように8樹種について、乾燥によつて生じた応力がコンディショニング処理によつて、いかに除かれるかを求めた結果を, Fig. 12 に示した。なお, その詳細を知るため, キリとブナについて, 応力分布の推移をそれぞれ, Fig. 13, 14 に示した。これはおののの処理後, 恒温恒湿室内 (温度 20°C, 平衡含水率 12%) に放置した経過によつて, 歪分布がどのように変化したかが, 測定時における含水率分布とともに示されている。これらの結果をみても, すでにのべたように処理時間の短いものは時間の経過とともに, 歪みの大きさは小さくなり, 放置の効果がみとめられた。しかし, キリでは48時間, ブナでは72時間も処理をしても, いずれも放置中それほど, 歪みの大きさは小さくならなかつた。いま, 処理後3日目における歪分布から求めた歪積算値と処理時間との関係を示す。これをみると, かなりのバラツキはまぬがれないうえ直線とみなすことができる。Fig. 15 に例としてブナ, キリ, シナノキを示した。これをみても, 応力がコンディショニングによつて消え

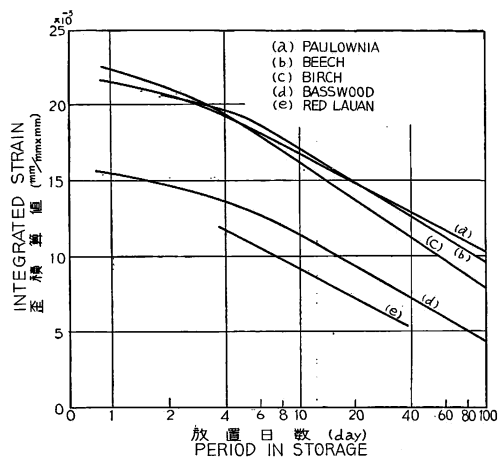


Fig. 11 歪積算値の放置日数による低下
Decreasing rate of integrated strain in
period in storage for various kinds of
species.

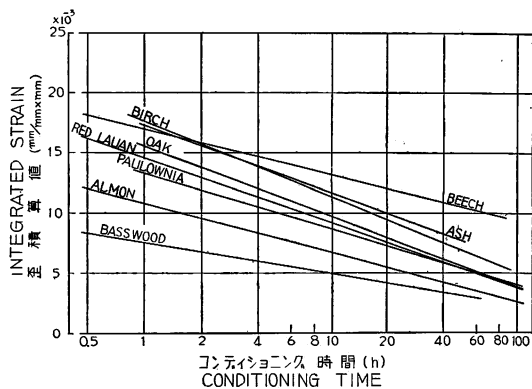


Fig. 12 各樹種にたいするコンディショニング効果
Effect of conditioning time on integrated
strain (3 days after conditioning) for various
kinds of species.

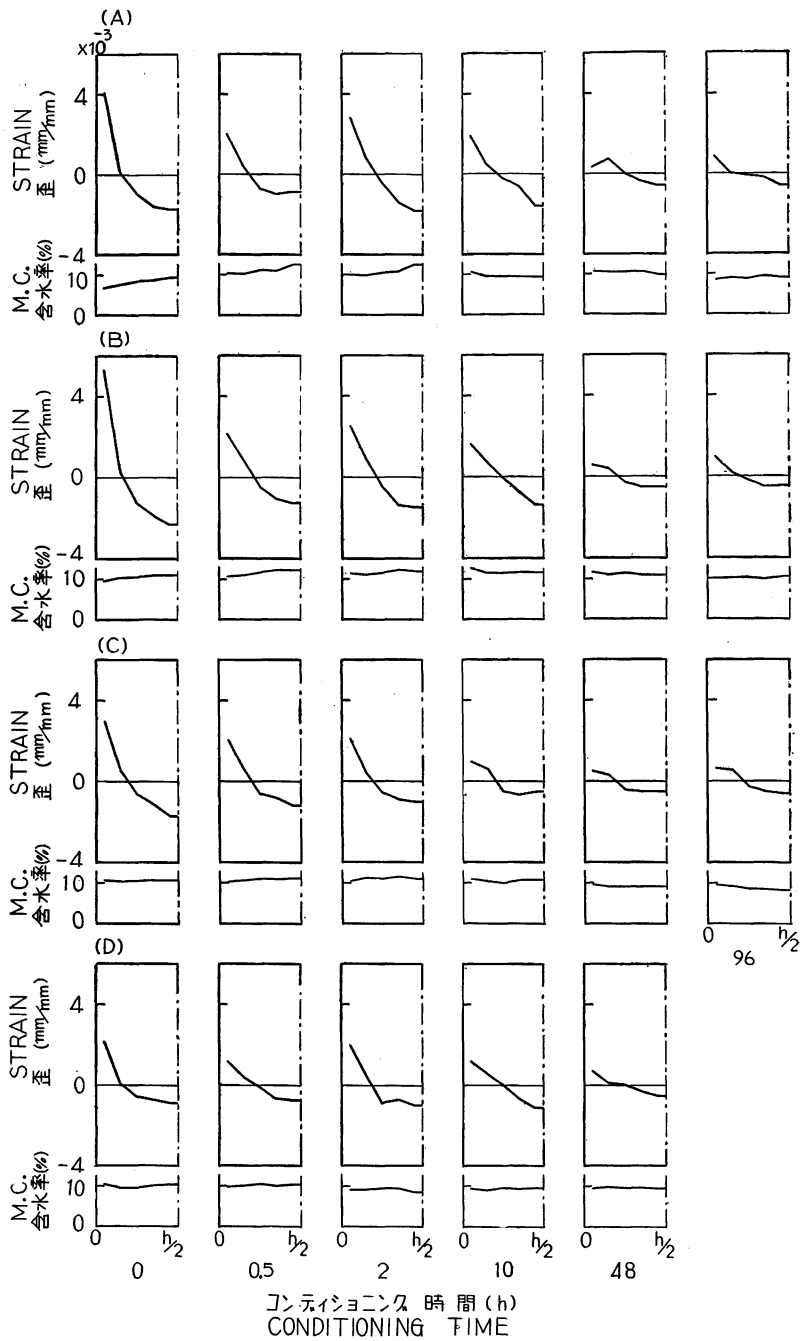


Fig. 13 歪み分布のコンディショニングによる変化

Effect of conditioning time and period in storage on integrated strain (Paulownia : 60°C, 0~96 h).

A=immediately after conditioning.

B=1 day after conditioning.

C=30 days after conditioning.

D=92 days after conditioning.

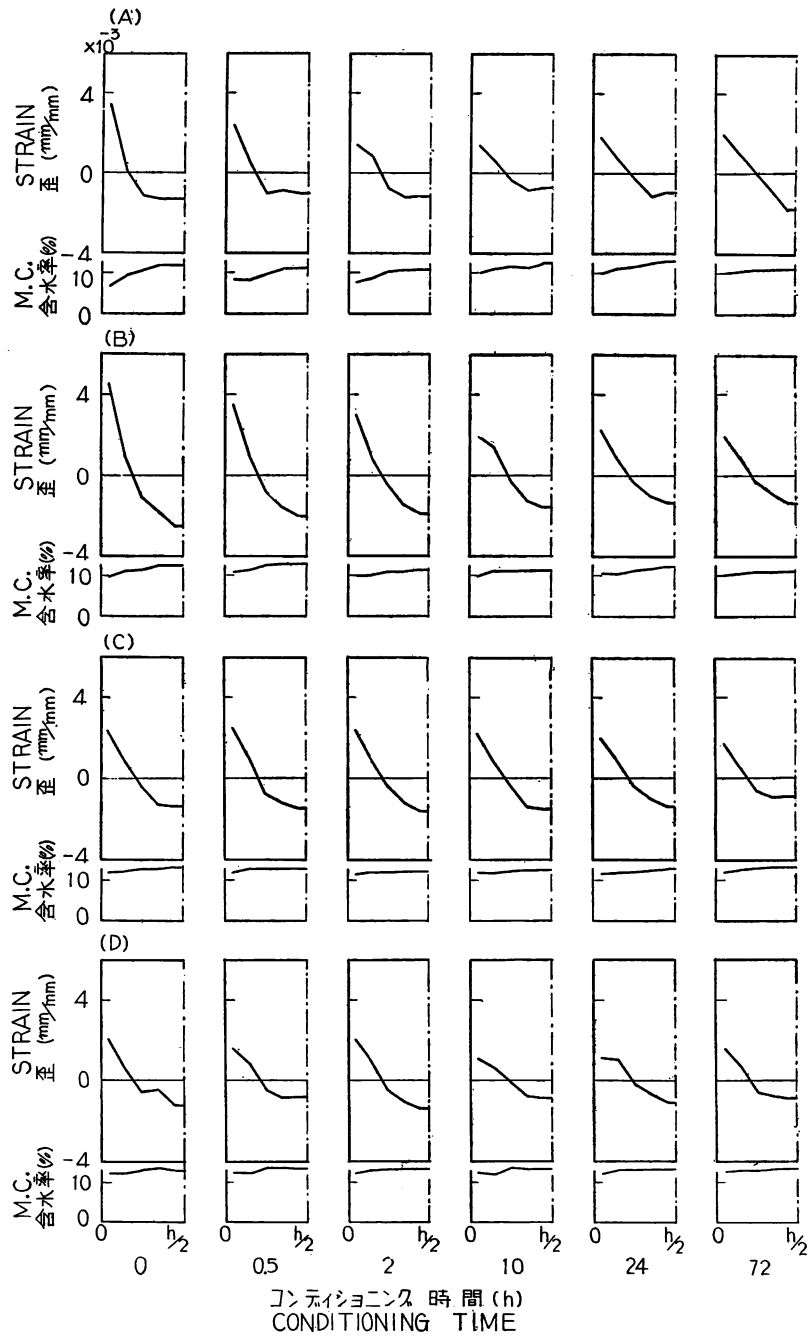


Fig. 14 歪み分布のコンディショニングによる変化
Effect of conditioning time and period in storage on integrated strain (Beech : 60°C, 0~72 h).

A=immediately after conditioning.

B=3 days after conditioning.

C=40 days after conditioning.

D=140 days after conditioning.

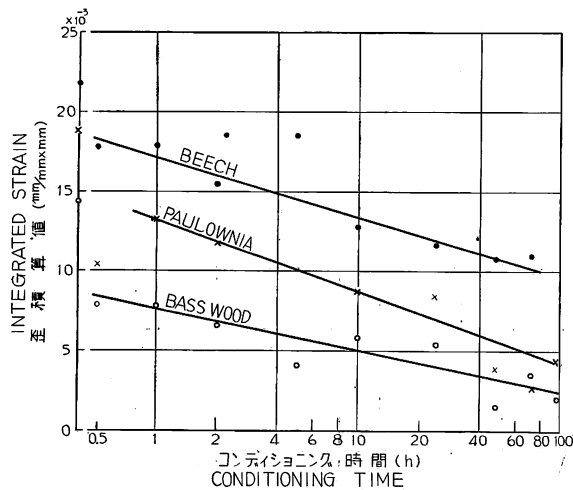


Fig. 15 歪積算値とコンディショニング時間との関係
Effect of conditioning time on integrated strain (3 days after conditioning).

の消失されていく傾向がやや安定したところで m の値を求めるためである。Table 1 にこれら m の値を示した。これによると、 m の値はブナを除いてはあまり差がみられず、どの樹種でも処理時間を長くすることによって、歪積算値が減少していく割合は、あまり変わらないといえることができる。しかし、実用的に必要なのは、このような歪積算値の減少する割合でなくて、処理によって、歪積算値がどの程度にまで小さくなってきたか、その絶対値の大きさそのものである。このような意味でコンディショニングを10時間行なつたのち、3日間放置したときの歪積算値を求め、Table 1 に示した。これによると、比較的歪みの小さいのはシナノキ、アルモンであり、次に大きいのは、キリ、レッドラワン、ナラ、最も大きいのはシオジ、カバ、ブナの順であつた。さらに歪積算値が10時間の処理によって、処理前の値にたいして、どの程度に小さくなつたかを求めたが（前者の後者に対する比で表わした）、歪積算値が元の値の50%以下

ていく程度が樹種によつてやや相違することがうかがわれる。このようなコンディショニングによる歪積算値の消失していく程度が図のような直線で表わされるとみなせば、その傾向は一般には次のような簡単な式となり、その係数 m によつて、樹種の特長を示すことができる。

$$f = f_1 (1 - m \log t) \dots\dots\dots (5)$$

f_1 : 処理1時間目の歪積算値

f : 処理 t 時間目の歪積算値

この式において、とくに処理1時間目における歪積算値を用いたのは処理前、ならびに0.5時間処理したときの歪積算値がかなり区々であつたので、歪積算値

Table 1. 歪積算値と m 値

樹 種 Species	全乾比重 Density Go/Vo	歪積算値 Integrated strain					m 値 m -value
		コンディショニング時間 Conditioning time					
		0 ^h (A)	1 ^h (B)	Ratio (B)/(A)	10 ^h (C)	Ratio (C)/(A)	
		mm/mm × mm	mm/mm × mm	%	mm/mm × mm	%	
シオジ Ash	0.53	20.9	17.3	83	11.7	56	0.32
ナラ Oak	0.72	18.2	15.5	85	9.7	53	0.37
レッドラワン Red lauan	0.52	14.1	14.5	103	9.1	64	0.37
アルモン Almon	0.41	12.9	10.7	83	6.7	52	0.37
シナノキ Basswood	0.29	14.4	7.5	52	4.9	34	0.35
キリ Paulownia	0.28	18.9	13.3	70	8.6	45	0.35
ブナ Beech	0.63	21.9	17.0	78	13.3	61	0.22
カバ Birch	0.65	19.0	17.6	93	11.3	59	0.36

Conditioning temperature ; 60°C. At 3 days in storage.

になつたのは、シナノキ、キリであり、ブナは 61%，レッドラワンは 64%であつて、樹種による差異がみとめられた。

ここで問題となるのは、コンディショニング処理によつて、歪積算値がどの程度になつたときに応力がなくなり、実用的に支障なくなつたと判断するかということである。これにたいしては合理的なよい方法は見あたらないが、ここでは次項にのべるように板の厚さを半分にしたときの板の反り、すなわち、中央における矢高との関係で、歪積算値が $4.4 \times 10^{-3} \text{mm/mm} \times \text{mm}$ 以下は、全く応力のなくなつたものとみなし、4.4~8.8, 8.8~13.1, 13.1~17.4, $17.4 \times 10^{-3} \text{mm/mm} \times \text{mm}$ 以上の各段階の順に応力が存在するものとみなした。それをそれぞれ、応力状況 AA, A, B, C および D として、上述の樹種にたいして、コンディショニング処理を行なつた結果、応力がどのようになつたかを上の符号で示して、一覧表と

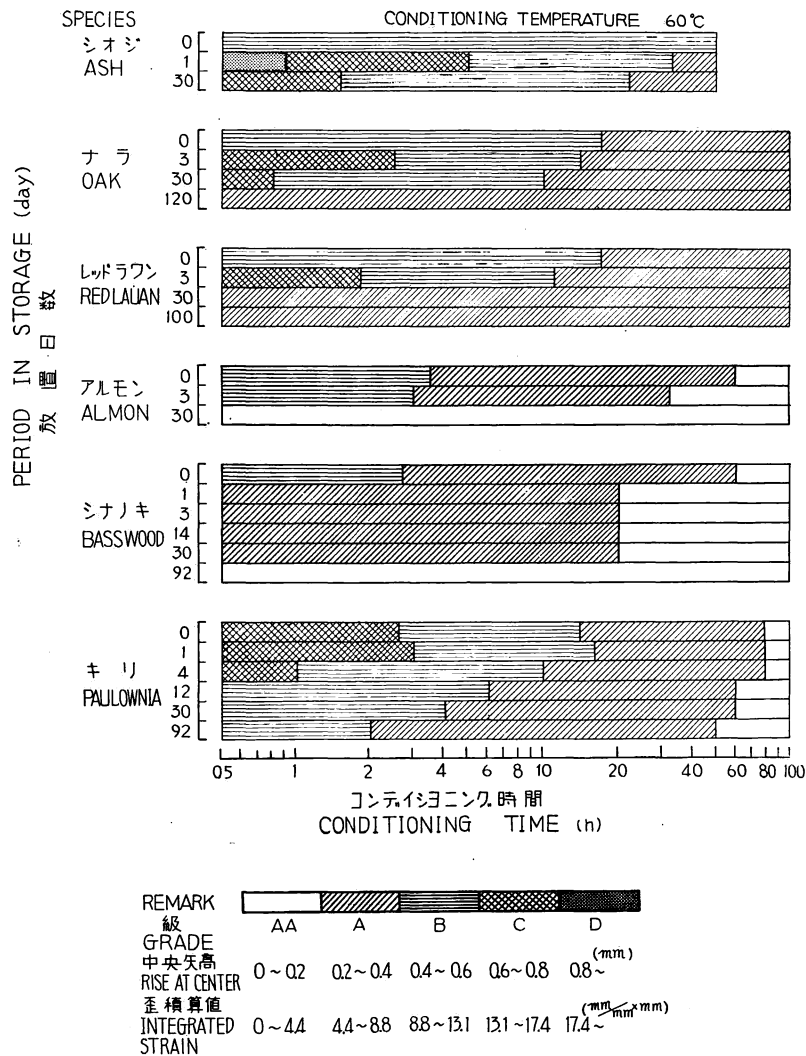
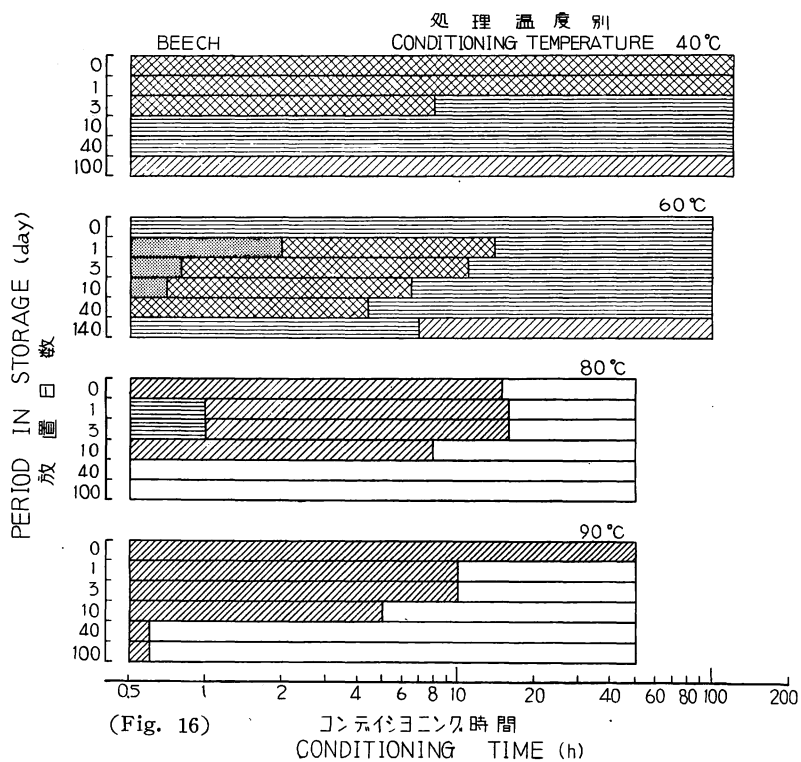
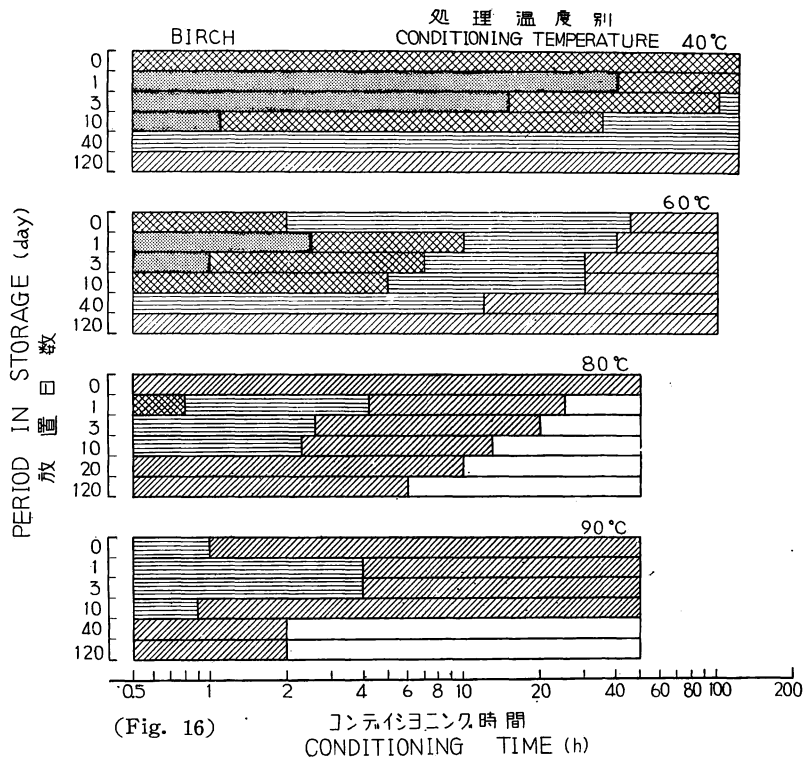


Fig. 16 コンディショニング効果の一覧表

Scheme of stress-existence in various days in storage after conditioning in various temperatures and times.



してみた。Fig. 16 がこれで、各樹種にたいする応力を除くための処理条件を容易に知ることができる。

3.4 矢高測定による歪みの値と歪積算値

2.5.2 でのべたように、応力の分布しているものを、表面からとり除くと、応力のつり合がやぶれて湾曲し、その矢高を測定することによつて、弾性係数の値を仮定すれば、その位置の応力を求めることができ、さらに、計算に用いた E で除すと、その歪みを求めることができる。いま、ブナについてコンディショニング温度 60°C と 90°C 、いろいろの処理時間ののち、3日間放置して、この方法で求めた歪みの分布と2.5.1による結果とを Fig. 17 に示した。この両者はほぼ一致した歪みの分布を与えているので、そのいずれの方法で測定しても、歪み分布は同じように求められることを認めた。

次に今まで述べてきた歪積算値が、この矢高測定による歪みの値と、どのような関係にあるかを求めるために、試験片の厚さをちょうど半分にしたときに生ずる矢高で求めてみた。

いま、カバ、ブナについて測定した多くの矢高と、同時に求められる歪積算値との関係を図示すると、Fig. 18 のようにながりのバラツキはまぬがれないが、直線的な関係が認められた。すなわち、各区分ごとの平均値を同図に示したのが直線 (a) である。

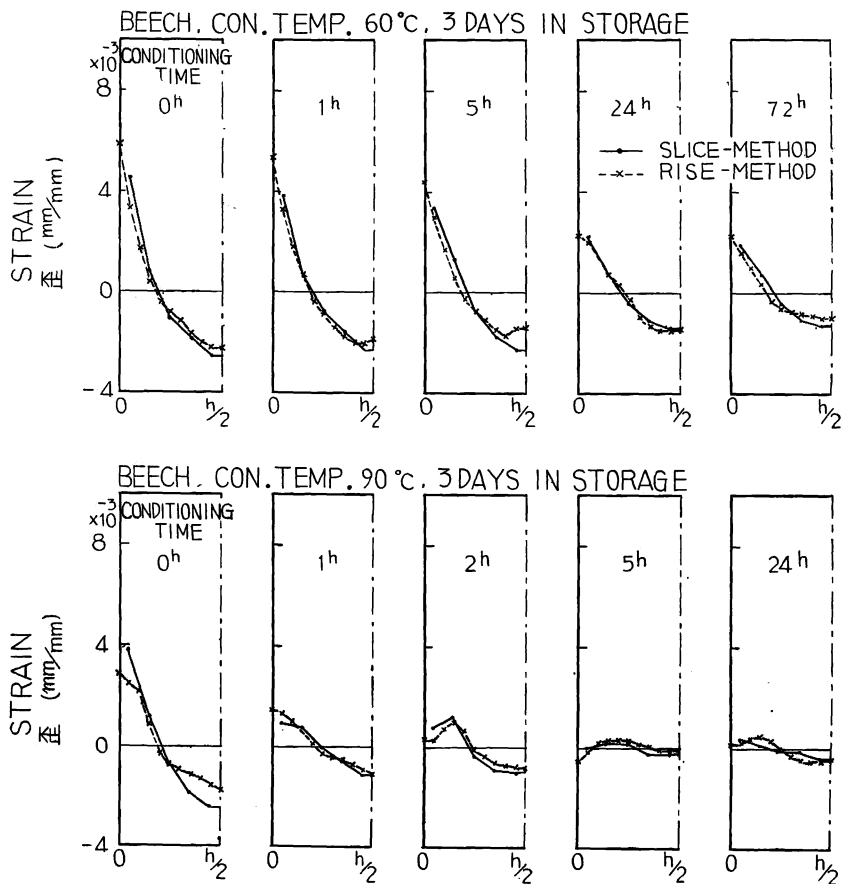


Fig. 17 歪み分布の測定値と計算値との比較

Comparison of strain distribution measured by slice-method with that calculated by rise-method.

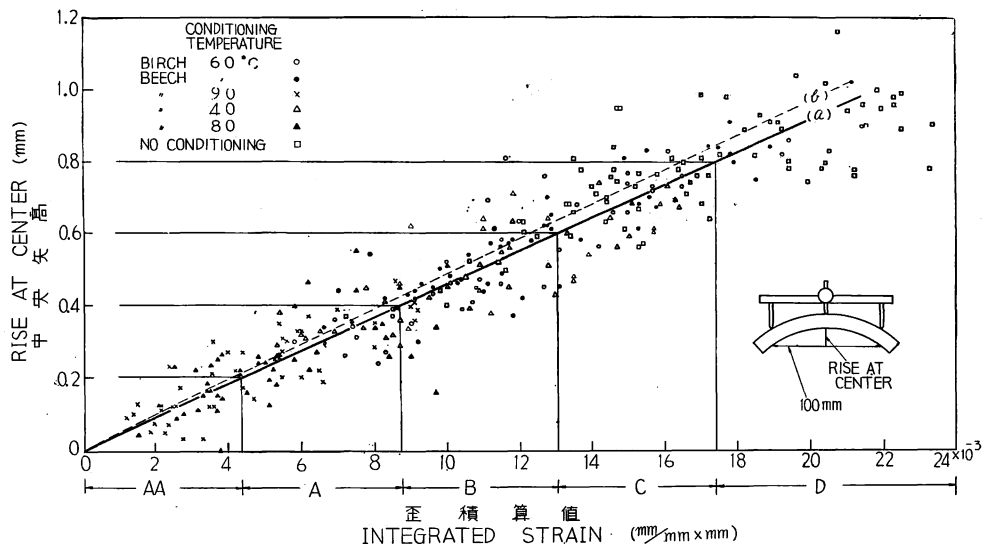


Fig. 18 矢高値と歪積算値との関係

Relation of the rise at mid-point in span-length of 100 mm to integrated strain.

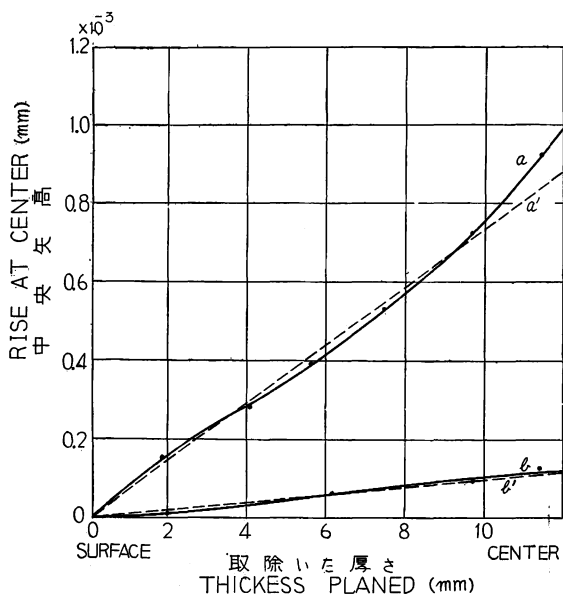


Fig. 19 矢高の大きさと取り除いた厚さの関係
Relation between the rise at mid-point and the thickness planed.

$$\sigma = \frac{En}{6} [h^2 - 6a(h-a)] \quad (7)$$

ここで、板厚の中央における矢高をいろいろの程度に仮定すれば、(6) 式と (7) 式から、それぞれの

一方、板の厚さを半分にしたときの矢高の大きさと、歪積算値との関係を計算的に求めてみた。そのため、まず応力のある板を表面からけずり、その厚さと、矢高との間にどのような関係があるかを調べた。表面からの厚さがまずにつれて、矢高の大きくなるのは当然であるが、この両者の間は、Fig. 19 のように厳密にはやや、S 字形に似た関係が認められた。しかも、応力の大きいときは図の a 線 (S 字状)、また、小さいときは b 線 (逆 S 字線) のようであった。しかし、これは近似的には、直線ともみなすことができる。

これを直線とみなすと、矢高 ($1/\rho$) と、けずられる厚さ (a) との間には、

$$\frac{1}{\rho} = na \quad (6)$$

なる関係があり、(4) 式による応力の計算は次のように比較的簡単に求められる。

矢高における板の厚さ方向の応力分布を求めることができ、歪積算値も求めることができる。Fig. 19 の b 線はこのようなして計算によつて求めたもので、(a) 線とやや若干ずれているのは、 $1/p$ と a との関係を目線とみなしたためと思われる。しかし、この方法によると計算は簡単で、結果も実際にはほぼ一致しているのだから、今後多少でも利用できると思われるので、あえて記述しておいた。

いずれにしても、歪積算値は、板厚を半分にしたときの中央における矢高と直線的な関係にあることを知った。前項でのべた、どの程度の歪積算値が実用的に応力のない状態とみなすかということにたいして、実用的な見地から板の厚さを半分にしたときの反りが、肉眼で認められる限度によつて決めることにしてみた。すなわち、板の厚さを半分にしたときに、100 mm のスパンにたいして、0.3~0.4 mm の矢高のときに、肉眼では多少とも反つていと認められるので、100 mm スパンにたいして、矢高が 0.2 mm 以下のときは応力の全くないもの、ついで、0.2~0.4 mm、0.4~0.6 mm、0.6~0.8 mm および 0.8 mm 以上の順にそれぞれ、応力のある段階を示すものと仮定してみた。これは、全くの経験の域を出ない判断であるが、他によりよき方法を見つけることができなかったため、この方法によつた。

このような段階に区分した、それぞれの矢高にたいする歪積算値を、Fig. 19 の (a) 線によつて求め、応力の全くない歪積算値が、 $4.4 \text{ mm/mm} \times \text{mm}$ 以下、ついで 4.4~8.8、8.8~13.1、13.1~17.4、 $17.4 \text{ mm/mm} \times \text{mm}$ 以上の順に、応力のある状態を示すものとしたのである。

4. 考 察

4.1 応力の発生とその大きさ

乾燥中の木材に応力の発生することは、さけられない現象である。これをさらに観察してみると、まず乾燥初期に生じた表面層の引張りセットは、ほぼそのままの大きさで乾燥の末期までつづき、しかもその大きさは乾燥する板幅の 1.5~2.0% にも達し、これが温度とともに増大することが、すでに報ぜられている⁹⁾。この程度の歪みの大きさは、比例限度の応力に相応する歪みの 2~3 倍にも達しているため⁵⁾⁸⁾、セットの状態が発生することも当然といえよう。また一方、中心部の圧縮セットの大きさは、乾燥初期にはかなり小さいが、乾燥とともに大きくなり、ついに表面層の引張りセットと同じくらいになつてしまうことも観察されている⁹⁾。このためにも、たとえ水分分布が一樣になつても、セットの発生は当然の結果と考えられる。しかし、このようなセットの発生するのは、木材乾燥のような水分の変化しつつある状態では、比例限度よりかなり小さい応力で生ずるものと推論されており¹⁰⁾¹⁵⁾、このためにもセットの量はさらに大きいものとなるわけである。いずれにしても、乾燥直後において材の中に生じた応力は大きく、これを除去しておかなければ、それを加工するばあいに支障をきたすおそれがある。

コンディショニング処理を行なわないと、はたしてどれほどの応力が板の表面にあることになるのかの推定は、きわめて困難である。これは歪みを測定すれば、弾性係数 E の値を乗じて、応力は求められるわけであるが、乾燥末期の表面に生じている応力は、一たん、引張りから圧縮に反転しているため、正常な歪みを示すかは疑問であるからである。すなわち、Fig. 20 に示したように、少なくとも表面層では、引張りによつて永久歪みをうけてしまうものが、応力反転によつて圧縮応力をうけているので、このばあいの瞬間弾性歪みが、はたして正常な値を示すかは明らかでない。しかし、このような異常な応力経過をへたものの弾性係数を求めた結果はないので、すでに求められている正常状態の値を利用するほかはない。

乾燥の終了後、室内で放置し冷却させただけで、表面に生じている圧縮歪みの大きさは、測定結果に

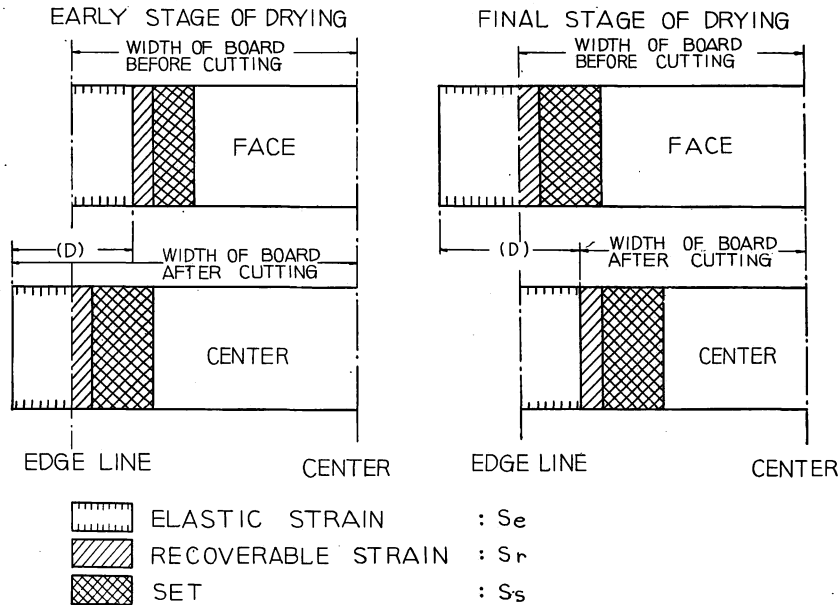


Fig. 20 乾燥初期と末期の板幅の変化

Scheme of three components of strain in board at early and final stage of drying.

よると、ブナ、カバにおいてそれぞれ $4 \sim 5 \times 10^{-8}$, $5 \sim 6 \times 10^{-8} \text{mm/mm}$ であつた⁹⁾。いま、弾性係数を 13.5 , $11.0 \times 10^3 \text{kg/cm}^2$ とすれば¹²⁾、うけていた圧縮応力はブナにおいて $54 \sim 68 \text{kg/cm}^2$ 、カバで $55 \sim 66 \text{kg/cm}^2$ ということになる。また、中心部における引張り応力については、歪みがそれぞれ $2 \sim 3 \times 10^{-8}$, $2.5 \sim 3.5 \times 10^{-8} \text{mm/mm}$ であつたので⁹⁾、その応力は $27 \sim 40$, $27.5 \sim 38.5 \text{kg/cm}^2$ ということになる。これらの値は、圧縮および引張りの比例限度とどの程度の関係にあるか比較するに、各種条件が異なるため正当な判断はできないにしても、たとえばブナ、カバの圧縮が 30kg/cm^2 程度であるのと比べれば、かなり比例限度をこえていることは想像される。ただ、木材の強さと比べれば、決して問題になるほどの大きいものではないと思われる。しかし、この程度の応力が生じていても、たとえば厚さの方向に2分したりすると、乾燥をおえたときの歪積算値が $13 \sim 21 \times 10^{-8} \text{mm/mm} \times \text{mm}$ になるので、Fig. 18 から求めれば幅 100mm にたいして $0.6 \sim 1.0 \text{mm}$ の矢高を生ずることになり、到底見のがすことのできない程度の反りを生ぜしめることになる。したがって、生じている応力の値としては小さくても、除去しなければならないものと思われる。

4.2 応力緩和と処理条件

Fig. 20 は乾燥の進行経過とともに、歪みの発生を模式的に示したもので、乾燥の終わったときの歪み ϵt は次のものからなりたつていると思われる。

$$\epsilon t = \epsilon p + \epsilon r + \epsilon e \dots \dots \dots (8)$$

ここに ϵe : 瞬間的に消失する弾性歪み、

ϵr : 余効的に消失する歪み、

ϵp : 残留する永久歪み

このうち本研究で対象となつてゐる応力に相当する歪みは、瞬間的に消失する ε_e が主体であることはいうまでもない。この歪みをふくむ部分をなるべく処理によつて除いておくことが必要になつてくる。ただ、応力をうけていても応力緩和によつて余効的に消失する応力があるため、これに相対する歪みは除去すべき応力の対象とする必要がないものと考えられる。

乾燥によつて生じた応力を除くということは、前項でのべたようなコンディショニング処理によつてその応力を緩和させることにほかならない。木材に生じた応力は、SCHNIEWIND¹⁸⁾ のいうごとく、木材を構成する個々の細胞、組織、さらに材自身として、それぞれ個有の応力状態が考えられるが、ここでは材としての巨視的な見方からのみ検討する以外に、現在のところ方法がないと思われる。

材が応力をうけていると、応力の大きさに応じて必ずクリープ現象が生じ、時間とともに応力は低下して、いわゆる応力緩和をおこす。このばあい、その程度は材の含水率や温度の影響を受けることはもちろんで、すでに若干の研究が行なわれている²⁾¹⁷⁾¹⁹⁾。YOUNGS¹⁹⁾ は前掲の KITAZAWA⁷⁾ の式 (5) に類似の式を用いて緩和係数 m を求め、常温においては引張りのばあいが圧縮よりも明らかに大きく、応力の値とともに大きくなるが、高温度 (180°F) になると、引張りでは常温時の3倍、圧縮では5倍に達すると報告している。いま、YOUNGS が温度 180°F において求めた m の値と、この実験の数値 (表2) とを比

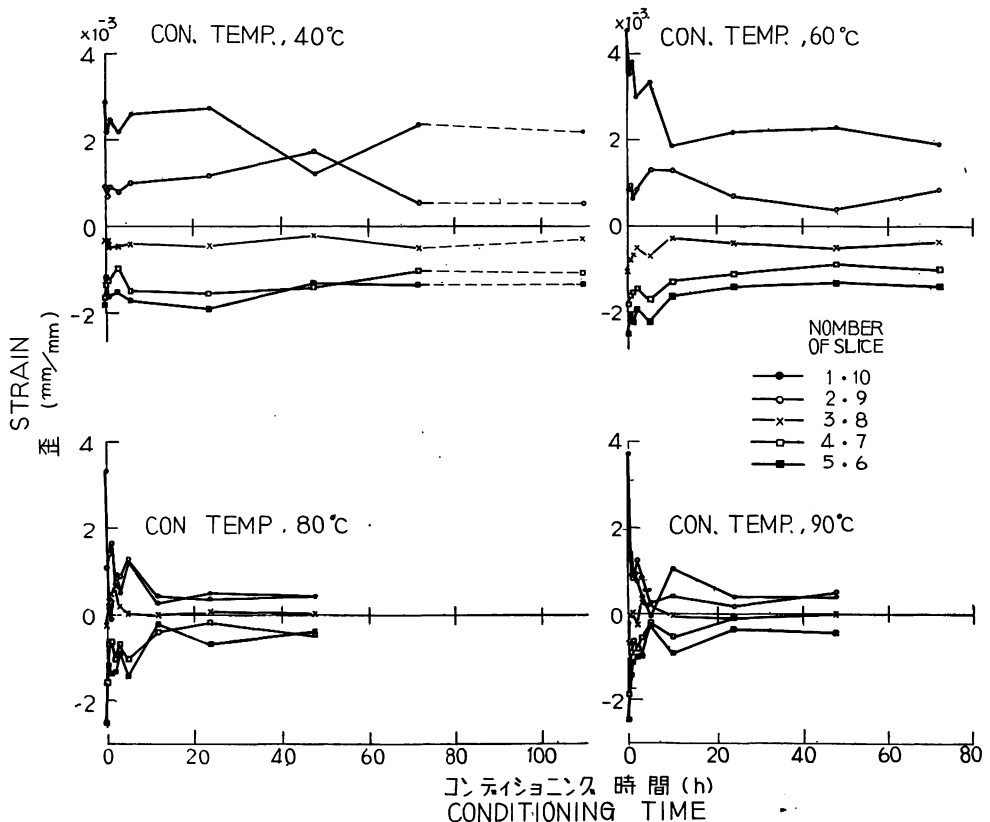


Fig. 21-1 各スライス片の歪みの変化

Decreasing rate of strain in each of slices by means of conditioning treatments (3 days after conditioning Beech).

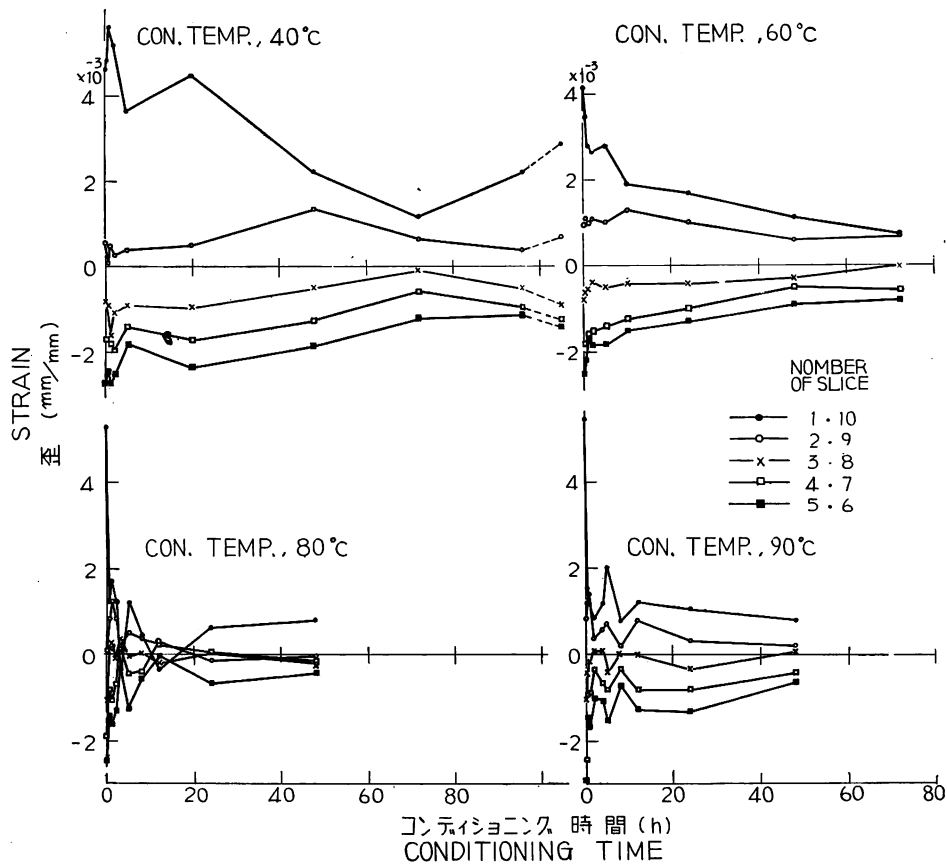


Fig. 21—2 各スライス片の歪みの変化

Decreasing rate of strain in each of slices by means of conditioning treatments (3 days after conditioning Birch).

較してみると、ほぼ同じような値であるが、ただ前者は供試片全体を単純な圧縮または引張りの応力を与えたときの緩和係数であるのにたいし、この実験で求めた値は、1つの供試片にふくまれる圧縮、引張り応力の総合的な歪積算値の低下する傾向を示す係数であるため、本質的に異なり、両者を比較することには必ずしも妥当ではない。しかし、いずれも処理時間によつて応力や歪積算値が低下していく割合を示しているもので、それらの傾向がほぼ同じであるということではできよう。

なお、表面と中心部における圧縮歪み、引張歪みが処理時間によつて低下していく経過の一例を Fig. 21 に示した。これによると、処理前における歪みの大きさは、表面層が中心部に比べてかなり大きいにもかかわらず、処理時間を長くするにつれて、表面の引張り歪みの方が中心部の圧縮歪みより除去される程度が大きく、処理時間が長ければ、この両者はほぼ同程度になることがうかがわれる。これはコンディショニング処理の効果が、表面層の方がその他の部分より速やかにあらわれ、その程度も大きいことを示しているといえよう。

4.3 応力除去

乾燥によつて生ずる応力、あるいはその歪みなどの現象についての研究は、アメリカの林産研究所をは

じめ, ELLWOOD²⁾, SCHNIEWIND¹³⁾, 鈴木¹⁵⁾, 大草¹⁰⁾ など多くがあるが, 発生した応力の除去に関するものは少なく, CHURCHILL¹⁾, KUEBLER⁷⁾, UGOLJEW¹⁷⁾, WINKEL¹⁸⁾ にすぎないようである。前者¹⁾ は木材, 後者⁷⁾ はベニヤ(1/8")を取り扱っているが, この両者の応力測定法は同じでなく, この研究ともまた異なっている。しかし, 応力除去に対する方法は, いずれも温度を高く, 処理時間を長くするほど効果のあることを指摘している。CHURCHILL の応力測定法は簡単で, ただ表面と中心との歪みの差だけで表わしているところに問題はあるが, これによると 150°, 170°, 190° F にてそれぞれ平衡含水率が 5, 7, 9% になるような適当な関係湿度との組合せが最もよいことをのべるとともに, 処理の時間があまり長すぎると逆表面硬化をおこすので注意を要することを警告している。KUEBLER はベニヤについての応力除去は, 可塑の状態では完全に行なわれ, とくに低温度(80° F)では湿度を95%以上に高くし, 高温(320° F)ではきわめて湿度を低くしてもよいことをのべ, 木材乾燥のばあいでも完全に応力を除くことのできることを示唆している。また, 木材を非常に塑性的にする条件下におくと, 応力は完全に除くことができ, 従来は応力除去のために数時間から数日も必要とされていたのが, 1時間以下に短縮できようとのべている。しかし, 木材乾燥ではベニヤのごとく薄くないため, 応力除去の条件が全く異なり, 100°C以上の温度にすることも現実には困難であり, 本実験の結果をみても, このような短時間で応力が除去できるとは考えられない。

さて, 処理によつて除去しなければならない応力は Fig. 20 の弾性歪みに相当する応力である。つまり, 同図で示されたスライズされた後の表面の伸びと中心部の縮みの合計 D の大きさを処理によつてできるだけ小さくすることである。このためには2つの方法が考えられる。そのひとつは弾性的応力を緩和させることであり, 他の方法は乾燥初期に表面に発生したセットの部分を除くことである。このいずれも, 木材の粘弾性的性質をできるだけ効果的に利用すればよいわけである。このようなことから, 表面層の圧縮, 中心部の引張りの応力をできるだけ速やかにクリープさせるような条件を与えることで, これには温度ならびに湿度の処理がその具体的な方法であることはいうまでもない。しかも, 従来から, たとえ比例限度以下の小さい応力でも, クリープをおこすことが認められているため⁶⁾, この可能性は十分に予期されるところである。

また, セットで変形された細胞の形, すなわち引張りセットでは細長に, 圧縮セットでは扁平になったのを, 水分を吸収させて温度を高くすると普通の形状に回復させることもすでに知られているところで¹⁶⁾ このために応力を除去するのに効果があるものと考えられる。

このような諸現象にたいする実験的な証明は非常に困難であり, さらにこれに関連する多くの基礎的なことが, あまりにも不明のままである。この研究によつて決定的な方法が明らかにされたわけではなく, ただ, ひとつの具体的な傾向が見いだされただけで, むしろ今後の研究に待たなければならない。

5. 摘 要

人工乾燥によつて生じた応力は, 高い加工精度を要求するには, これをあらかじめ除いておかなければならない。これには調湿処理(コンディショニング)がきわめて効果的であることは, すでに知られている。この研究は, その処理温度, 時間および処理後の放置時間などによつて, その効果はいちじるしく影響されるので, これらの関係を知るために行なつたものである。その結果の概要は次のようである。

(1) 処理の温度は 60°C ないし 80°C が適当であり, 関係湿度はその材が使用される条件とほぼ平衡するものとし, できれば加工前になるべく長期間放置しておくことが望ましい。

- (2) 加工前の放置日数を長くするほど調湿の処理時間を短くすることも期待できるようである。
- (3) 歪みの測定法には、アメリカ林産研究所のスライズ法の代わりに、矢高法を検討して、歪積算値と矢高との間に直線関係を見いだした。
- (4) 歪み除去の難易は、樹種によつてかなりの差が認められたが、その原因までは明らかにできなかった。
- (5) したがつて、木材の粘弾性的性質、とくに温度、関係湿度、処理時間のこれに及ぼす影響などの基礎的な研究が強く望まれるとともに、他の樹種にたいする実用的な処理法の決定に、この小論文が多少でも参考となれば、この上なき幸せである。

文 献

- 1) CHURCHILL, J. W. : The effect of time, temperature and relative humidity on the relief of casehardening stresses. Jour. of Forest Products Research Society **4**, 5 (1954) p. 264~270.
- 2) ELLWOOD, E. L. : Properties of american beech in tension and compression perpendicular to the grain and their relation to drying. Yale University, Bull. 61, (1954)
- 3) 川田雄一 : 残留応力とその測定, 日本機械学会誌, **55**, 406, (1952) p. 720.
- 4) 川田雄一・渡辺 敏 : 板の残留応力測定法における一改良について, 材料試験, **5**, 35, (1956) p. 497.
- 5) 北原覚一・末松 章 : 木材圧縮に及ぼす温度の影響, 木材学会誌, **1**, 2, (1955), p. 47~51.
- 6) KITAZAWA, G. : Relation of wood under constant strain. New York State College of Forestry. Tech. Publ., 67, (1947).
- 7) KUEBLER, H. : Drying stresses and stress relief in thin sections of wood. U. S. A. Forest Products Laboratory, 2164, (1960).
- 8) McMILLEN, J. M. : Drying stresses in red oak : Effect of temperature. Forest Products Jour., Aug., (1955) p. 230~241.
- 9) 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, 林業試験場研究報告, **77**, (1955) p. 35~68.
- 10) 大草克巳・林 昭三 : 応力をうけている木材の収縮, 膨脹 第1報, 圧縮応力 : 木材学会誌, **2**, 1, (1956) p. 5~7.
- 11) 応力測定技術研究会編 : 応力測定法.
- 12) 林業試験場編 : 木材工業ハンドブック, (1958) p. 273.
- 13) SCHNIEWIND, A. P. : On the nature of drying stresses in wood. Holzforschung **14**, 6, (1960) p. 161~168.
- 14) 寺沢 真・小玉牧夫 : 木材人工乾燥における乾燥時間の推定図表について, 林業試験場研究報告, **97**, (1957) p. 61~92.
- 15) 鈴木 寧 : 木材の加熱乾燥による収縮, 木材学会誌, **2**, 1, (1956) p. 43~48.
- 16) TIEMANN, H. D. : Wood Technology, constitution, properties and uses. Pitman Publishing Corp. (1951).
- 17) UGOLJEW, B. N. : Retspannungen in Holz und Method zu ihner Beseitigung. Holz als Roh- und Werkstoff, **14**, 9, (1956) p. 376.
- 18) WINKEL, L. D. : Casehardening stress relief of ponderosa pine. Forest Products Jour., **6**, 33, (1956), p. 124~128.
- 19) YOUNGS, R. L. : The perpendicular-to-grain mechanical properties of red oak as related to temperature, moisture content and time. U. S. A. For. Prod. Lab., No. 2079, (1957).

Relief of the Stress Occurring in Wood during Drying.

Takeo OGURA, Makoto UMEHARA and Makio KODAMA

(Résumé)

The stress that occurs in wood while it is being dried in the kiln, that is, the compressive stress developed at the surface layer and the tensile stress in the center portion at the final stage of kiln drying, needs to be relieved if the material is to be used to make superior products.

This experiment was carried out to obtain moderating conditions for treatment such as conditioning-temperature and -time which are effective for stress relief, as well as to obtain a decreasing rate of the stress which still exists in wood even after conditioning treatment. Also an attempt was made to obtain the difference of the effect of conditioning treatment on stress relief between certain kinds of species and the simple method to measure the internal stress in wood, instead of the slice-method developed in the Forest Products Laboratory, U.S.A., a procedure needing much labour and time to measure.

Testing Procedure

It is a well-known fact that wood dried in a kiln occasions compressive stress at the surface and tensile stresses in the center at the final stage of drying. When the board in which drying-stresses exist is resawn or planed away at the surface, the stresses become unbalanced. Such unbalanced stress leads to distortion or deformation of the products made from the material. Therefore, the wood for items of superior construction..... laminating, cabinet work, and furniture.....need stress relief.

Specimens tested

The specimens used were Birch (*Betula Maximowicziana* REGEL) and Beech (*Fagus crenata* BL.) for the purpose of obtaining the effect of the temperature and the time to be used in conditioning treatment on stress relief, and also eight species of Oak (*Quercus mongolica* FISHER var. *grosseserrata* REHD. et WILS.), Ash (*Fraxinus spaethiana* LINGELSH), Basswood (*Tilia japonica* SHIMONKAI), Paulownia (*Paulownia tomentosa* STEUD.), Red lauan (*Shorea negrosensis* FOXW.) and Almon (*Shorea eximia* SCHEFF.) including Birch and Beech, were used for the experiments, in which the difference between species concerning possibility of stress relief was obtained.

The specimens were clear, quarter-sawn heartwood and green. Moisture content was between 60 and 90 per cent. Each specimen was planed off in dressing it to the final dimensions of 120 by 22 mm by 70 cm long.

Marking

The marking of every group, each having 7 pieces of 10 mm strain section at 9 cm intervals along the length of the specimens as illustrated in Fig. 1, was completed. One section was used for measuring moisture content, an other one for measuring the strain immediately after conditioning treatment, and the other five for the strain after being placed for 1, 3, 10, 40 and 120 days respectively in a room controlled in constant temperature at 20°C and relative humidity of 75 per cent after conditioning. An effective end coating of aluminum paint mixed with 20 per cent of aluminum powder in varnish was used to protect the end section from drying.

Giving stresses in specimen by drying process

Special considerations were made to prepare the specimens for the evidencing of drying stresses. After marking on the specimens as above-mentioned, each specimen was carefully dried to final moisture content of 8 to 10 per cent in an experimental kiln of natural ventilated type. The dry temperature of drying schedule used to dry specimens was a constant temperature of 60°C and the wet bulb depression was increased as the moisture content of specimens decreased. This is because it is better not to use higher temperature for drying schedule than that to be used in the conditioning treatment, in order to obtain the effect of temperature on stress relief.

All specimens were dried according to ordinary drying schedule for each of the species, some of the schedules being shown in Fig. 2. Thus, materials to be tested have drying stresses in each of them.

Method to measure strain

As soon as the specimens were dried to the final moisture content of 8 to 10 per cent, the conditioning treatment was started.

The temperatures used in conditioning treatment were 40°, 60°, 80° and 90° C, and the wet bulb depression in conditioning was controlled so that the equilibrium moisture content of the specimen was 12 per cent at each temperature respectively.

The effect of conditioning on stress relief depend not only on the temperature used, but also on the time continued. In this experiment, the times continued were for 0.5, 1, 2, 5, 10 and 24 hours in each conditioning treatment except at the temperature of 40°C, and only in the case of 40°C was it continued for 120 hours besides the time mentioned above.

After treating the desired conditioning, the specimen was taken out of the kiln and a group of sections, as illustrated in Fig. 1., was cut from the specimen as rapidly as possible. Only the first section was cut from the group of sections, and the strain in each of the slices was measured by using the slice-method⁸⁾⁹⁾. That is, the width of each strain section was measured at the points designed for the mid-width of each slice. The strain section was then sawn into ten slices, and each slice was measured at the same point of the width as before. The magnitude of the strain was expressed by the difference between the widths of slices before and after sawing. The group of the other sections was placed in a controlled room for desired time as described above, and after being placed there for each of the designated times, the strain section was cut from the group and the strain measurement was done.

All of the specimens used for the experiment of obtaining the difference between species for stress relief were treated in a constant condition of dry bulb of 60°C and wet bulb of 55°C for various times, and then placed in the controlled room.

Expression of the values of strain

It is necessary that not only the compressive stress on the surface of section, but also the tensile stress in the center be completely released by conditioning treatments. The magnitude of strain which shows the existence of stress must not be measured only on the surface, but on the whole strains distributed from the surface to the center of the section. The value of strains used in this study was as follows.

$$S\varepsilon = \frac{1}{2} \int |\varepsilon| dh$$

$$\div \sum_{i=1}^5 |\varepsilon_i| \times \frac{h}{10}$$

where : $|\varepsilon|$ = absolute value
of strain. h = thickness of board

This was called the integrated strain $S\varepsilon$, and was always used for the arrangement of the data obtained in this experiment except in cases of special description.

Rise method to measure stress

In addition, in order to compare with the slice-method, a new method was tried to measure the magnitude of stresses.

The sections, which were cut from the specimens and stressed in compression at the surface and in tension at the center, were planed away by a certain thickness from the surface. This made the section deform or to cup, because the stress in section had become unbalanced, and the deformation became stable in a certain curvature when the remaining-stress and the corresponding compressive strain at the surface were balanced.

In this experiment, the deflection rises at the middle point over a certain length on the cupped section instead of the curvatures were measured (Fig. 4). The stresses or strains at the surface of the section from which certain thick layers were planed, were calculated by the equations shown in the following, in the case in which its curvature was measured⁸⁾⁴⁾¹¹⁾.

$$\sigma = \frac{E(h-a)^2}{6} \cdot \frac{d(1/\rho)}{da} - \frac{2E(h-a)}{3} \cdot \frac{1}{\rho} + \frac{E}{3} \int_0^a \frac{1}{\rho} da$$

σ : stress

E : Young's modulus

$1/\rho$: Curvature

h : Thickness of board

a : Thickness of layer planed-away

The strain of the planed layer also can be obtained by dividing the stress value obtained in the above equation by Young's modulus.

Beech and Birch were used as the test materials. The temperatures used in conditioning treatment were 40°, 60°, 80° and 90°C for Beech and only 60°C for Birch, and the equilibrium moisture content in conditioning was kept at 12 per cent at any temperature as before.

Results and Discussion

Effect of the conditioning-temperature and -time

Fig. 5 shows the strain distributions in the sections at three days after conditioning treatment in various temperatures and times. The reason why the data after 3 days are used is that the strain value in section is fairly unstable immediately after conditioning treatment, an unsuitable state for measuring, and also that it increases at the first day after treatment, because the stress on the surface is increased by the fact that the surface absorbs some moisture and will be followed by swelling. The effects of the temperature and the time in conditioning on stress relief, which were expressed by the integrated strain, are as shown in Fig. 6 and 7. These indicate that the effects of conditioning on stress relief increase exponentially as the temperature and the time used in treatment increase, and at such a low temperature as 40°C the stress relief can hardly be expected.

Scarcely any difference between the effect of 80°C on stress-relief and that of 90°C was found, but it was found that by treating at high temperature above 80°C, even if

treated for a very short time, the stress can be considerably relieved. This suggests that high temperature treatment should be used to relieve the stress.

Stress relaxation

The stresses which are still existing in wood in spite of the accomplishment of conditioning treatment, gradually relax with increasing the period of time in storage. Such a stress relaxation was observed for 120 days of storage at 20°C and 70 per cent relative humidity. The results obtained are shown in Fig. 10 and 11. It appears that the stress was released about proportional to the logarithm of time during storage, and that the relaxed stress approached the similar independent of the conditioning time. It is also indicated that the effect of conditioning treatment for 70 to 100 hours in dry temperature of 60°C and wet bulb depression of 5°C on stress relief is the same as that of storage for as long as 100 days after conditioning treatment for a short time. In spite of having such a tendency of stress relaxation during storage, however, all species cannot necessarily be expected to yield the same effect for relaxation of the stress. This stress relaxation appears to be dependent upon the characteristic of the species, as described in the next paragraph.

Combined effects of conditioning treatment and species

Fig. 12 shows the effect of conditioning treatment on stress relaxation for eight kinds of species abovementioned. How the stress distributions of Paulownia and Beech can be changed with the period in storage being kept in constant temperature of 20°C and E. M. C. of 12% are shown in Fig. 13 and 14 respectively. From the results, the effect of stress relaxation was recognized except in Paulownia and Beech. No stress relaxation was observed on Paulownia treated in conditioning for 48 hours and on Beech for as long as 72 hours.

There was nearly a linear relationship between the integrated strain, which was obtained by strain distributions in sections at 3 days after conditioning, and logarithm of treating time.

Fig. 15 shows some examples measured in Beech, Paulownia and Basswood. This indicates that some difference between species was recognized in stress-relief by means of conditioning treatment.

Such a linear relationship can be expressed by a simple formula.

$$f = f_1 (1 - m \log t)$$

f_1 : integrated strain at 1 hour of conditioning.

f : integrated strain at t hour of conditioning.

m : constant designated as the relaxation coefficient.

This equation is the same as that applied to stress relaxation of wood by KITAZAWA⁶⁾. The constant of m in this equation indicates the possibility of stress relief by treatment in species. The m -values obtained are shown in Table 1. This indicates that no difference in the values of m can scarcely be found at all between species except Beech; that is to say, the decreasing rates of the integrated strain by conditioning treatment of 60°C and 5°C depression are almost equal independent of the species. What is important in practice of conditioning treatment, however, is not the decreasing rate of the integrated strain, but the strain itself to which the integrated strain can be decreased by conditioning treatment. In such a meaning, in Table 1 were shown the integrated strains at 3 days after conditioning treatment of 10 hours. According to this Table, the species

which could be released to a comparatively slight strain were Basswood and Almon, and those released to more intensive strain were Paulownia, Red lauan, Oak, and those to the most intensive were Ash, Birch and Beech.

Moreover, the species which could be released to less than 50 per cent of the initial integrated strain were Basswood and Paulownia, that to 61 per cent was Beech, and that to 64 per cent was Red lauan. This means that the difference between species could be recognized in stress relief. The reason for such difference existing between species, however, cannot yet be explained.

Comparison of the integrated strain with the rise in cup

As described before (p. 27), the stress of a certain thick layer planed away from the surface of the board, in which the internal stress exists, can be expressed by equation (2) in the case in which its curvature was measured, and the strain at that point can be obtained by dividing the stress-value by Young's modulus E .

Fig. 17 shows the strain distributions obtained by the sliced-method about the test piece at 3 days after conditioning treatment at 60°C, 90°C and 12 per cent of equilibrium moisture content for various periods, with those calculated by applying equation (2) about the test piece treated in the same condition as above mentioned. It can be said that both of the strain distributions are very similar to each other. In order to obtain the relation of the integrated strain obtained by the sliced method to the rise at the middle point in a certain distance on a cupped board at a half thickness, many points of the integrated strains were marked on section paper against the rise as shown in Fig. 18. There was found a linear relationship between them.

On the other hand, an attempt was made to determine the limit of the rise which could be recognized as a defect of cup, when the board was resawn at the center of thickness. Since the magnitude of the rise of more than 0.3 mm in the span length of 100 mm on a cupped board can be recognized as a cup with the naked eye, it was assumed that in the case of a rise less than 0.2 mm no stress in board would be present, and the stress is increased in every range of 0.2~0.4, 0.4~0.6, 0.6~0.8 mm and more than 0.8 mm. From such an assumption, the stress remaining in board was divided into five degrees of the integrated strain of less than 4.4, 4.4~8.8, 8.8~13.1, 13.1~17.4 and more than 17.4 $\times 10^{-3} \text{mm/mm} \times \text{mm}$ corresponding to the range of the rise abovementioned respectively on the linear line in Fig. 18. Fig. 16 is a scheme showing the relation of conditioning-temperature, -time and the period in storage to the degree stress-relieved for each species. In these Figures, the mark of AA represents the part in which the stress is completely relieved, that is, the integrated strain of less than $4.4 \times 10^{-3} \text{mm/mm} \times \text{mm}$. A represents the integrated strain of 4.4~8.8 $\times 10^{-3} \text{mm/mm} \times \text{mm}$ and B, C and D represent that of 8.8~13.1, 13.1~17.4 and more than 17.4 $\times 10^{-3} \text{mm/mm} \times \text{mm}$ respectively.

Thus, merely by measuring the rise at the mid-point in a certain span-length on the cupped-face developed when the stressed board was cut into one half thick board, the integrated stress could be obtained by the use of Fig. 18, instead of the slice-method. It can be said that this rise method is a simple one to measure the stress occurring in wood, and is useful in practice.

Discussion

It is reported⁹⁾ that the magnitude of the set developed by tensile strength on surface layer at the early stage of drying reaches 1.5~2.0 percent of the width of the board and

increases with temperature, and also that the magnitude of compression set becomes the same as that of tension set at the final stage of drying. The development of set inevitably occurs in drying of wood because of the fact that the magnitude of the tensile strain developed on surface layer while wood is dried is fairly much over the proportional limit, and that the set probably occurs even at somewhat less than the stress at proportional limit..... one half of it or less if the moisture in wood moves through the surface of wood as it does in wood drying¹⁰⁾¹⁵⁾.

The compression stress developed on the surface can be computed as $54\sim68\text{kg/cm}^2$ in Beech and $55\sim66\text{kg/cm}^2$ in Birch, assuming that the magnitude of compression strain, which was measured before, is $4\sim5\times10^{-3}\text{mm/mm}$ in Beech and $5\sim6\times10^{-3}\text{mm/mm}$ in Birch⁹⁾ and Young's modulus is 13.5, $11.0\times10^3\text{kg/cm}^2$ respectively¹²⁾. As for the tensile stress in the center portion, $27\sim40\text{kg/cm}^2$ in Beech and $27.5\sim38.5\text{kg/cm}^2$ were computed respectively. When the board, of which a great magnitude of compression stress is existing on the surface layer, is sawn at one-half of thickness, it would be of cup character at the rise of $0.6\sim1.0\text{mm}$ at center of span length of 100mm . As such a large amount of cup is clearly recognized as a defect with the naked eye according to Fig. 18, the stress should be relieved.

The total strain, which is observed when the stressed board is sliced, usually consists of three separate components, the elastic strain released immediately after being sliced, the after-effectively recoverable strain and the irrecoverable, permanent strain that is the so-called set. Fig. 20 is a scheme of the strain developed in both the outer layer and the center portion of a board during the early and the final stage of drying. The stress occurring in the final stage of drying appears to be caused by the irrecoverable strain shown in Fig. 20 as well as the elastic strain.

The way to remove the stress in wood is to relax its stress by means of conditioning treatment, which can be expected by applying the properties of wood on plasticity, that is properties that the magnitude of stress in wood gradually decreases with time, depending on moisture content and temperature. Young reported¹⁹⁾ that m -value of the relaxation coefficient in equation(3) at normal temperature is larger in tension than in compression, but that of temperature of 180°F is three times in tension and is five times in compression as large as that of normal temperature respectively. The m -values obtained in this experiment, as shown in Table 1, are almost the same values as those obtained by Young at temperature of 180°F . This means that the stress and the integrated strain in wood can be relieved with the time of conditioning treatment at the same rate as the stress in wood is relaxed. Fig. 21 shows the decreasing course of compression strain in surface layer and that of tension strain in center portion by conditioning treatment. This means that the conditioning treatment works on stress-relief more effectively and more quickly on surface layer than in the other portions.

As far as the studies on stress-relief of wood drying are concerned few, papers¹⁷⁾¹⁷⁾¹⁸⁾ have been issued, whereas many reports⁵⁾⁶⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾¹³⁾¹⁵⁾¹⁹⁾ on the occurrence of stress in drying have been made available.

CHURCHILL¹⁾ reported that best results on the relief of stress were obtained when a combination of moderate relative humidities and high temperature were used, from the results of the experiments of 150° , 170° and 190°F , and in equilibrium moisture content

conditions of 5, 7 and 9 per cent. KUEBLER⁷⁾ recently found for veneer drying that the complete stress relief was obtained only in plastic conditions, that is, the stress was relieved at low temperature such as less than 100°F with high relative humidity more than 95 per cent, and at 150° F and 80 per cent relative humidity when the treating time was longer than 60 hours, and also at 240°F and 65 per cent relative humidity with longer treatment. He also suggested that the usual long stress relieving for wood drying probably can be cut down from several hours and days to less than 1 hour, it appears to be impossible to cut down the times required for stress relief to such a short period of time, since the conditions for relieving the stress occurring in wood, which is considerably thicker than veneer, are quite different from those for veneer drying, and the use of such a high temperature cannot be permitted in the practice of wood drying.

It is clear that the strain corresponding to the stress which should be removed is the elastic strain. In order to remove the stress, however, the difference between the width of the outer layer and that of the center portion of board after being sliced, which is marked D in Fig. 20, should be made smaller. There are two ways to reduce a difference of this magnitude. The one is to relax the elastic stress, and the other is to remove the set developed due to the irrecoverable strain at the early stage of drying. Both of them can be expected by means of applying effectively the properties of wood on plasticity. To do this, the increase of the existing stresses to cause yielding in compression at the outer layer of board and in tension at the center portion, the plasticization of board to produce yielding by increasing moisture content with high temperature and a sufficient time to permit the time-temperature effects should be considered as the principle for stress relief. Moreover, the shape of the cell deformed by set, which is slender in tension set and plain in compression set, may be restored to normal shape by increasing moisture content with high temperature. This also results in reducing the difference D in Fig. 20 and in relieving the stress.

Conclusion

It is obvious that the stress occurring in wood needs to be relieved by conditioning treatment before it is processed into superior products. The effects of conditioning-temperature, -time, and the period of time in storage on the stress-relief were obtained by experimenting with 8 kinds of species, in which the stress was measured by Madison's slice-method and was expressed by the integrated strain.

As to the treatment to relieve the stress developed in board, a moderate condition of high temperature of 60° to 80° C, relative humidity for the expected equilibrium moisture content and a sufficient time of treatment should be applied, and further, the placement of the board in storage for as long a time as possible before being processed is essential. Moreover, the longer the period of placement in the storage, shorter the time required for conditioning.

To simplify the method of measuring the stress as an alternative to the slice-method, the rise method, in which the rise at the midpoint in the span-length of 100 mm on a cupped board was measured, was checked, and a relationship between the integrated strain and the rise was found as a linear line. The existence of difference between species also was ascertained pertaining to the possibility of stress-relief, although at this stage of experimentation the reason cannot be determined. Future works should be done, therefore, on basic problems such as the properties of wood on plasticity, especially the

effect of temperature, humidity and time treated on plasticity as well as on the practical treatment of stress-relief for the other important species.