

木材の収縮経過に関する 2, 3 の考察

大 沼 加 茂 也⁽¹⁾

斎 藤 壽 義⁽²⁾

1. ま え が き

木材水分の脱湿にともなう収縮経過は、従前からしばしば報告されている¹⁾²⁾³⁾。これらの報告はおもに樹種特性に主眼がおかれ、乾燥条件による内応力の影響をふくめて収縮を考察した資料は少ない⁴⁾。

乾燥条件が収縮に影響する因子として、木材中に生ずる内応力と組織構造があげられ、前者はおもに水分傾斜にもとづく応力の時間的变化によつてひずみが発生し、木材自身のもつ自由な収縮 (Basic shrinkage) に変化をあたえる。後者は細胞膜層の構成および射出線、木柔細胞などの各種細胞の排列と量が影響すると思われる。たとえば、BARKAS, W. が指摘しているように細胞膜層内の第二次膜は水分の吸脱湿によつて Gel 的な挙動、第一次膜は Sheath 的な役割りをし、第二次膜の易動性を抑制すると報じている⁵⁾。この抑制力は乾燥条件によつて当然変化すると推測されるものである。また構成要素のうち、とくに木柔細胞の多い樹種あるいは木柔細胞が導管の周辺に多く分布している樹種 (たとえば *Quercus*, *Paulownia*, *Cinnamomum* など) は乾燥条件によつて異状収縮が生じやすいことを経験する。これら乾燥条件による収縮現象は複雑な因子が重合するので、一般的な解析はむずかしい。

本小論文は乾燥条件による内応力の影響を考察する一手段として、乾燥後の平衡含水率を一定におさえて加熱温度を変化させ、収縮経過と収縮速度をもとめ、Basic shrinkage におよぼす応力の影響を検討したものである。

本実験を行うにあたり、ご教導をあいだ当场小倉武夫木材部長、上村武材料科長および井阪三郎木材物理研究室長に心から謝意をささげます。

2. 実験方法と試料調整

収縮経過を測定するためには、試料の初期含水率と乾燥後の平衡含水率を一定に規定する必要がある。本実験では、初期含水率を飽水と飽湿の 2 種類の状態に調整した木曾産ヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* SIEB. et Zucc.) をもちい、前者の含水率は 180~220 %, 後者は 24~26 % であつた。乾燥条件は加熱温度 35, 55, 75 および 95°C の 4 種類で各乾燥後の平衡含水率を全乾におさえるために、恒温器内に水酸化加里を封入した容器を入れ、その内で試料を乾かした。

まず予備試験として、水酸化加里を封入した容器内の平衡含水率をもとめるために、厚さ 2 mm から 20 mm にかえたヒノキ材を温度 35°C に保つた恒温器で平衡状態の水分傾斜を測定し、Fig. 1 の結果をえた。

水分傾斜の測定は、各試料の重量が変化しなくなつた後、ただちに厚さ方向に順次鉋削し、鉋削後の厚さと鋸屑の含水率を測定したものである。

(1) (2) 木材部材料科木材物理研究室員

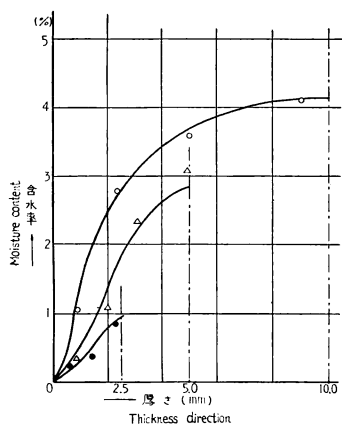


Fig. 1 平衡含水率における厚さべつの水分分布

Moisture distribution at the final moisture content varied with thicknesses of specimen (from the surface to the center)

この予備試験から、試料が厚くなるほど、平衡時の内部水分は残留していることが認められる。すなわち、水分拡散にともなう内部抵抗は厚くなるほど急激に増加しとくに加熱温度が割合低い場合 (35°C) では木材内部と外周空気の蒸気圧差がゼロにならないまま平衡に達し、水分傾斜となつて残つたものと推定される。なお北村¹⁾は濃硫酸 (95%) によつて関係湿度 0%, 加熱温度 40 ± 1°C で収縮経過を測定し、最終の平衡含水率が 4~5% におさえられている。これらの問題については今後さらに検討すべき点であろう。しかし厚さが 2 mm 程度の薄板では、ほぼ全乾に達するものとみなされるので、本実験では試料寸法として厚さ 2 mm, 繊維の長さ方向を 10 mm, 収縮を測長した幅方向 (板目) を 100 mm とした。

3. 実験結果と考察

3.1. 収縮経過

各加熱温度における収縮経過および乾燥経過は Fig. 2, Fig. 3 に示すごとくで、前者は初期含水率が飽水、後者は飽湿状態である。これら収縮経過曲線から図式に収縮速度を計算し、Fig. 4, Fig. 5 をもとめた。いま収縮速度—加熱時間の曲線を検討すると、加熱温度が高いほど、また初期含水率が低いほど最大収縮速度は大きい。しかもこれら曲線群は確率統計の基本型である Poisson 分布、

$$\Delta s / \Delta t = S_0 e^{-m} \frac{m^t}{t!} \dots \dots \dots (1)$$

に近似している。

ここで $\Delta s / \Delta t$: 収縮速度 %/hr, t : 加熱時間 hr, m : 加熱条件によつて決定される係数, S_0 : 平衡時の

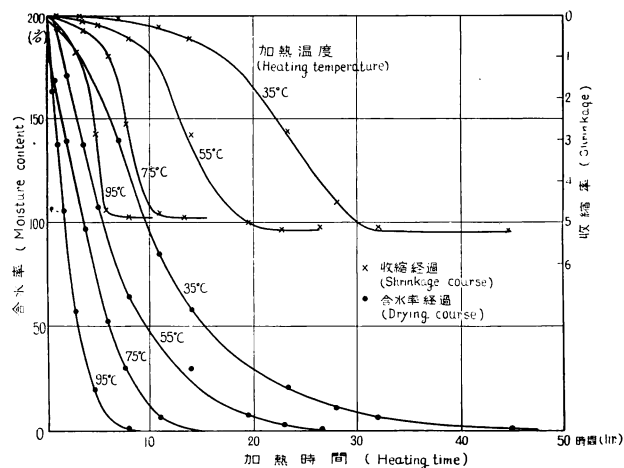


Fig. 2 収縮および乾燥経過 (飽水材)
Shrinkage and drying course with heating time
(Initial moisture content: Green)

収縮率 %

m の値は Fig. 6 に示すごとく、Poisson 分布表から適当にきめたもので、この値を用いて計算した場合は、実測値を比較すると、Fig. 7 のように類似の傾向を示している。なお m の値は飽湿より飽水、また加熱温度が低いほど大きな値を示している。とくに $m \geq 10$ では、Poisson 分布の特性上 Normal 分布とみなされる。すなわち Fig. 8 は加熱温度 75°C 以下の飽水材について、横

軸に時間、縦軸に $\int \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$

の目盛で S/S_0 をプロットし、ほぼ直線的であることからもうなずかれる。

以上の統計的解析が木材の収縮経過に適用しうるか否かの妥当性を検討するまえに、まず平田の報告を引用しよう⁶⁾。

「われわれの観測しうるいろいろの物理量は、物質の粒子的構造にもとづき必然的に統計的な性格をもつてくる。とくに、微視的变化が一方に大きく成長して巨視的变化を生ずるような現象においては、考慮しうべきあらゆる条件を一定に保つても、それに対応してえられる観測値は決して一定で

はなく著しく変動が認められ、ここに確率論的な考察を無視しては論ずることができない問題がある…」

さらに平田はガラスの破壊現象を確率論的に論じ、割れ目の発生速度、割れ目の分布および破断強度などを解析している。

ここで木材の収縮経過を考察すると、結合水の減少量と収縮量が一義的關係にあつても、木材試料のどこの位置に、どれだけ量が、いつ収縮するかは予測しうるものでないので前述の確率的考えが導入しうられると思われる。

いま収縮経過中の任意時刻において、微少時間 Δt の変化に

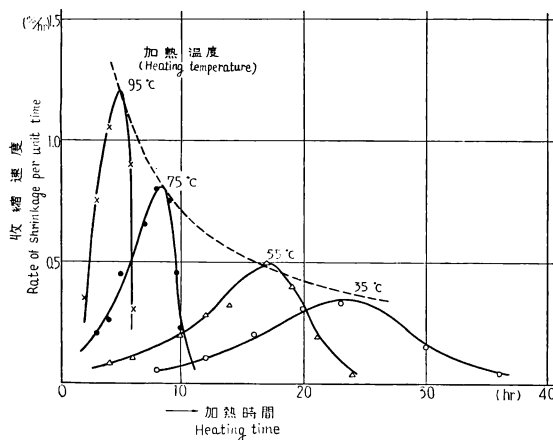


Fig. 4 収縮速度と加熱時間の関係 (飽水から全乾)

Relation between rate of shrinkage per unit time and heating time
(from green to oven dried condition)

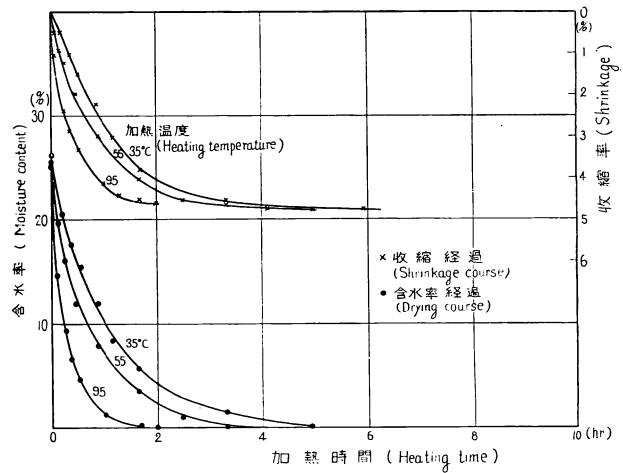


Fig. 3 収縮および乾燥経過 (飽湿材)

Shrinkage and drying course with heating time
(Initial moisture content: Fiber saturation point)

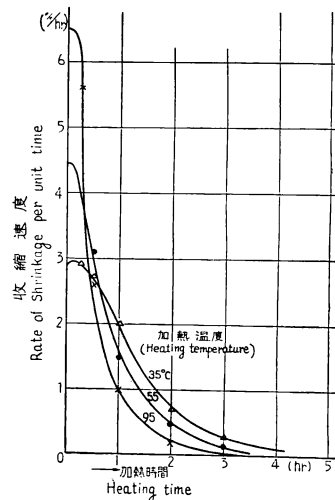


Fig. 5 収縮速度と加熱時間の関係 (飽湿から全乾)

Relation between rate of shrinkage per unit time and heating time
(from fiber saturation point to oven dried condition)

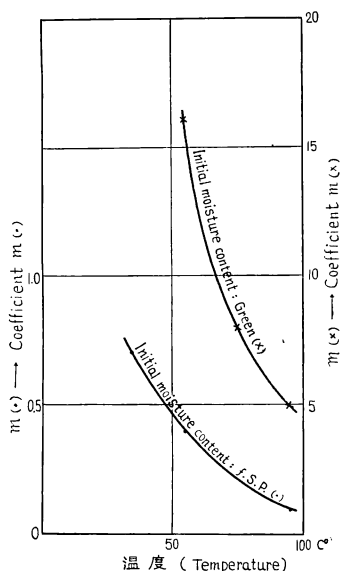


Fig. 6 係数mの値と温度との関係
Relation between coefficient m and heating temperature

$$\Delta\mu(t) = \{[T - (t - \Delta t)] \cdot \lambda \cdot \mu(t - \Delta t) - (T - t) \cdot \lambda \cdot \mu(t)] \dots \dots \dots (2)$$

λ : 生起常数

Δt はTを小分割したときの単位量として、(2)式を積分すると、

$$\mu(t) = \tau C_t \exp(-T\lambda) \{ \exp(\lambda) - 1 \}^t \dots \dots \dots (3)$$

の解がえられ、 $T \rightarrow \infty$, $\lambda \rightarrow 0$, $T \cdot \lambda \rightarrow m$ の極限では、

$$\mu(t) = \{ \exp(-m) / t! \} \cdot m^t \dots \dots \dots (4)$$

になり、(1)式と同じ Poisson 過程をしめしている。

上述の誘導は連続体における確率統計の問題として解析したもので、繊維工業ではすでに糸の太さムラを評価するときに適用している。木材の収縮経過では、水分蒸発を連続性とみなししかも試料内(厚さ方向を考えない薄板)のどの部分の結合水が蒸発するかを確率的として考察したもので、単板のような薄板を乾燥した場合、板表面の含水率分布は非常に不規則であることから前述の考え方が適用されよう。

3.2. 収縮経過中の内応力の変化

一般に外荷重なしに弾性体内に生ずる応力を

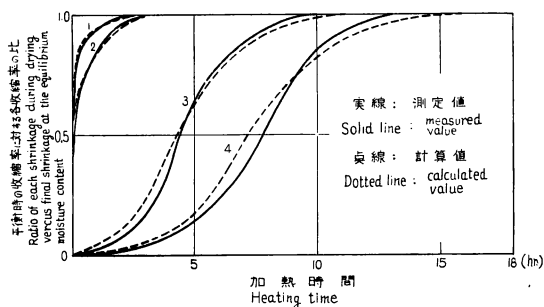


Fig. 7 収 縮 経 過
Course of shrinkage

対し Δs だけ収縮すると、全加熱時間Tでは S_0 の全収縮量が生起する。Tを $t_0, t_1, t_2, \dots, t_{T-1}$ のT個に小分割すればTは場合の総数、 S_0 は頻度総数に意味づけられる。さらに任意時刻tにおいて単位時間に収縮する確率を $\mu(t)$ とし、 $t - \Delta t$ に収縮する確率を $\mu(t - \Delta t)$ とすれば、次式が成立する⁷⁾。

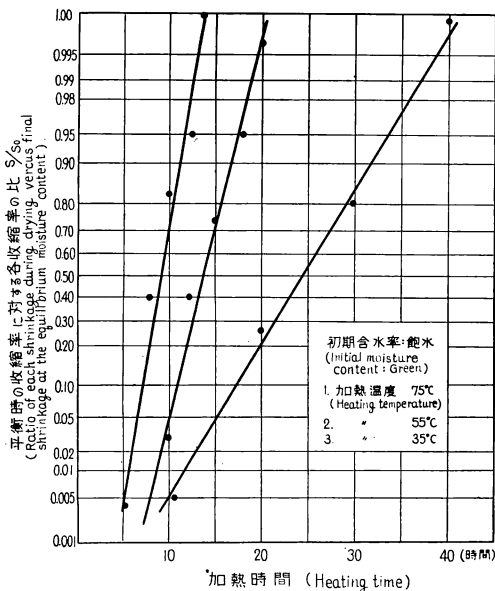


Fig. 8 収 縮 経 過
Course of shrinkage

固有応力あるいは内応力と定義づけられているので、乾燥中の水分傾斜によつて生ずる応力も内応力的一种と考えられる。

本実験のごとく乾燥条件をかえた場合の収縮経過において、これら内応力によるひずみの量的変化が生じていることは容易に推定される。いま初期含水率を飽湿にして、乾燥中の収縮率と含水率の関係を図示すると、Fig. 9 のごとく乾燥条件のきびしいほど含水率に対する収縮率は減少する。なお本図の第3線 (Δ で示す) はデシケーター中に水→飽食塩水→塩化カルシウム→水酸化カリの順でゆっくり乾かしてもとめた収縮率 (室温) である。以上の結果で、含水率が 14 %前後に変異点が認められ、その後は直線的に変化し、しかも乾燥条件がゆるいほど変異点は高い値を示している。

収縮率と含水率との関係は従前から多くの報告があり^{11, 12)}、実験式として直線あるいは指数関数で示され、樹種、繊維方向および初期含水率によつて区々である。直線式で表わされることは、結合水の減少量と収縮量が比例的であるとみなされ木材中になんら応力が生じないで自由収縮したものと考えられる。それゆへ Fig. 9 の点線で示した直線は乾燥初期の水分傾斜が最もつきやすい期間においても自由収縮が生じたものと仮定される理想的な収縮とみなされる。

この点を検討するために(2)に示した実験方法で厚さを厚くして飽湿材の表面収縮率を測定し、全乾とみなされる表面の収縮率 (予備実験 Fig. 1 ですでに認められている) と厚さとの関係をもとめると Fig. 10 のごとく (温度 35°C)、厚くなるほど全乾収縮率は 6 %に近づき Fig. 9 でしめた点線の全乾収縮率に合致してくる。

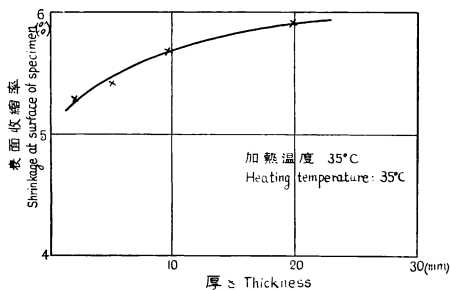


Fig. 10 平衡時の表面収縮率と厚さとの関係
Relation between shrinkage at the surface of specimen at the final moisture content and thickness

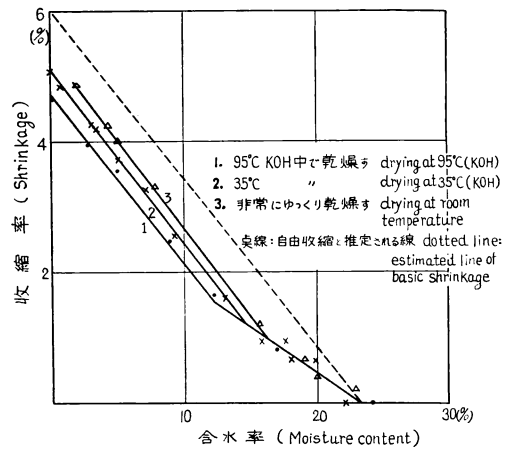


Fig. 9 収縮率と含水率との関係
Relation between shrinkage and moisture content

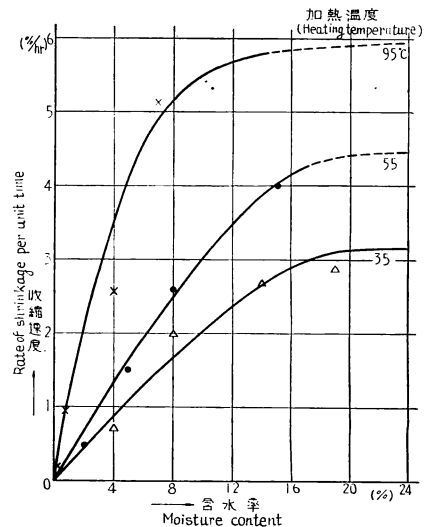


Fig. 11 収縮速度と含水率の関係
(飽湿から全乾)

Relation between rate of shrinkage per unit time and moisture content (from fiber saturation point to oven dried condition)

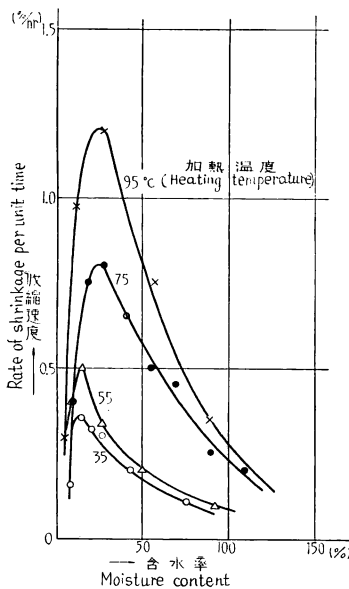


Fig. 12 収縮速度と含水率の関係
(飽水から全乾)

Relation between rate of shrinkage per unit time and moisture content (from green to oven dried condition)

する収縮速度を図示すると Fig. 11, Fig. 12 がえられ、収縮速度—含水率曲線で囲まれた面積 (A) をもとめると Fig. 13 が求められる。この面積は初期含水率が飽湿および飽水材にも適用され次の実験式がもとめられる。

$$S_1 - S = \alpha A^n \dots\dots\dots (5)$$

S: 収縮率, S_1 : A=0 のとき, すなわち理想的にゆつくり乾燥し, なんら内応力が発生しない場合の収縮率, (Fig. 12 から約 6% に相当する)。

n: 常数

BARKAS, W. は吸湿過程における膨潤圧 P と膨脹量 S との関係において,

$$S = ap^k \dots\dots\dots (6)$$

を提示し⁹⁾, (5) 式と同じような放物線式で示している。(6)式は機械的外力の場合と同じ考えを導入したもので、収縮経過も外力的なほふく現象とみなして Creep deformation の式を検討すると、ひずみ量と応力との関係はすべて放物線的関数で示されている⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾¹³⁾。

それゆえ、(5)式で示した収縮速度—含水率曲線で囲まれた面積 A は応力的要素と加熱時間 (収縮の生じている全時間) をパラメーターにもつ係数と考えられる。(なお面積 A を応力的要素とみなす実証すべき実験は今後さらに検討し明らかにしたいと思う。) もちろん収縮経過中の内応力は時間的に厚さ方向において変化し、たとえば乾燥初期の表面層は引張り、終期は圧縮応力となり、内部はその逆の経過をたどるので単純なほふく現象として解析することは不可能である。しかし現象的には平衡時の最終収縮率がなんらかの内応力のほふくと考えて、面積 A を次に検討する。

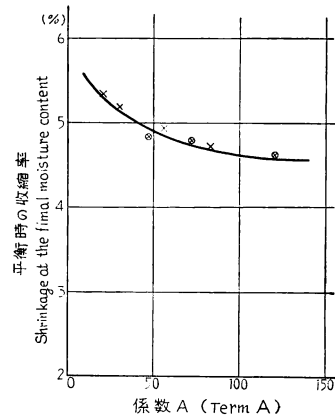


Fig. 13 平衡時の収縮率と係数 A との関係
Relation between shrinkage at the final moisture content and term A

以上の事がらから考察されることは、厚くなるほど同一乾燥条件では表面の乾燥がゆるくなるので応力発生は少なく、その収縮率は Basic shrinkage に漸近すると思われる。

いま内応力を定性的に考えるまに各含水率に対

3.3. 内応力と機械的外力との関係

前項において収縮速度—含水率曲線で囲まれた面積Aは全収縮経過に対するはふくと考え、機械的外力といかなる関係にあるかを検討してみた。すなわち板の幅方向(板目)の収縮が厚さ方向の外力によつて、いかに阻止されるかについて関係をもとめると、すでに著者らが報告したように¹²⁾、圧縮荷重を変化させて熱圧した場合(温度 105°C で飽水材を全乾まで乾燥する)の加熱時間と収縮率の実験資料を基にして考察した。

Fig. 14 はその資料から計算した加熱時間と収縮速度の関係曲線で、Fig. 15 は各含水率における収縮速度曲線である。Fig. 16 は圧縮力と全収縮率との関係で、すでに発表したごとく圧縮力が 4.2 kg/cm² 程度において全収縮は阻止される結果を示している。

以上の関係図から面積Aと収縮阻止に働く圧縮力 σ kg/cm²の関係をもとめると Fig. 17 がえられ放物線の傾向が認められる。ここで面積Aが収縮を阻止する圧縮力 σ と全収縮時間Tの函数として、南の Creep deformation の実験式 $A=f(\sigma, T^k)$ をもちいた⁹⁾¹⁰⁾。さらに実験常数kは σ に影響するものといわれているので、kを σ の一次的関係にあるとし面積Aと $\sigma \cdot T^k$ の関係をもとめると、Fig.

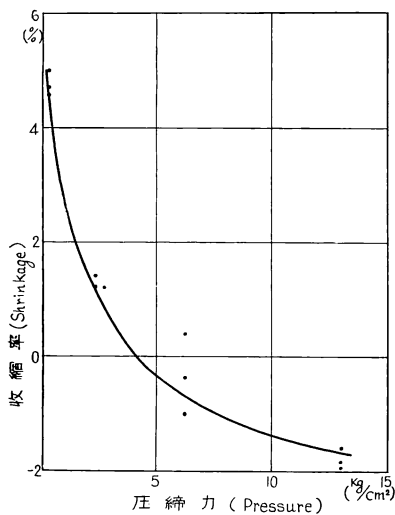


Fig. 16 収縮率と圧縮力の関係
Relation between shrinkage and pressure

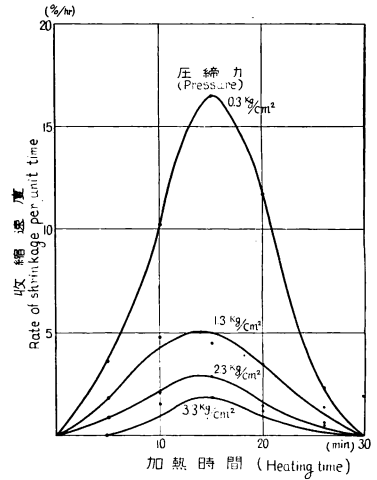


Fig. 14 熱圧による収縮速度と加熱時間の関係

Relation between rate of shrinkage per unit time and heating time with hot pressing

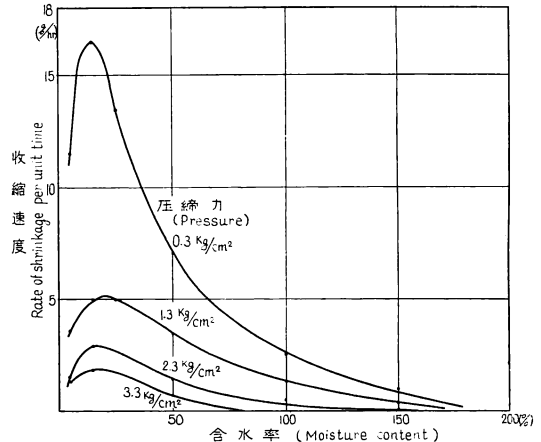


Fig. 15 熱圧による収縮速度と含水率の関係
Relation between rate of shrinkage per unit time and moisture content with hot pressing

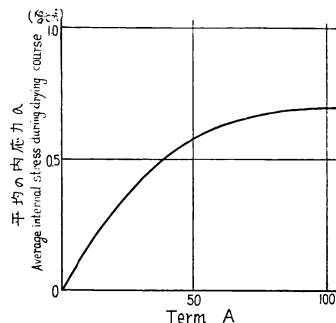


Fig. 17 式(5)におけるAと平均の内応力との関係
Relation between term A at equation (5) and average internal stress during drying course

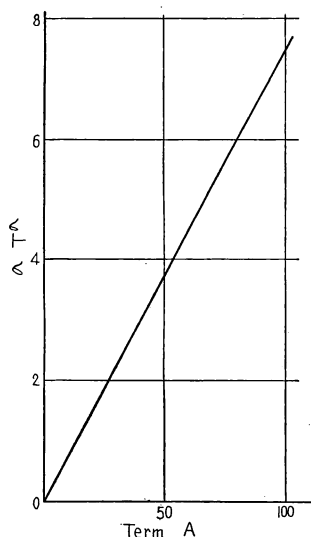
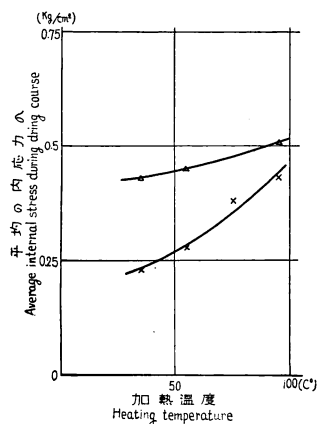


Fig. 18 式(5)における A と $\sigma \cdot T^n$ の関係

Relation between term A at equation (5) and $\sigma \cdot T^n$



× : 飽水材 (Initial moisture content: green)

Δ : 飽湿材 (Initial moisture content: fiber saturation point)

Fig. 19 平均内応力と加熱時間の関係

Relation between average internal stress during drying course and heating temperature

18 のごとく直線的で示される。

それゆえ、(5)式に代入して機械的な収縮阻止の応力と収縮率の関係を導びくと、

$$S_0 - S = \alpha (\beta \sigma T^n)^n \dots\dots\dots (7)$$

の実験式がえられる。

(7)式を用いて 前述の 空気加熱 における収縮阻止応力を計算すると、Fig. 19 がえられる。ここで、 σ は乾燥条件によつて異なる収縮阻止の応力を一定圧縮力に置換した値であるので、空気乾燥中の平均内応力とみなしうるものと考えられる。この推定的な応力についてはさらに実験的に検討する必要がある、今後の問題点として残される。本報告では一応内応力とみなして Fig. 19 をみると加熱温度が上昇するほど σ の値は増加し、この増加傾向は初期含水率が低い方が大きな値を示している。なお T^n というほふく効果が収縮経過において影響されるのも特異な現象と思われる。

以上これらの考え方は、今まで経験的な推察に合致したものであるが、十分な定量性をもつて結論とするには更に実証すべき実験方法を検討する必要がある。

4. む す び

以上の結果を要約すると、初期含水率が飽水および飽湿状態のヒノキ材を温度条件をかえて全乾まで乾燥し、その間の収縮経過を測定し次の結果をえた。

i) 収縮経過曲線から収縮速度を図式に計算し、加熱時間との関係をみると連続体における確率統計の問題として解析された。すなわち収縮現象は細胞膜内の結合水の除去によるとすれば、収縮経過中の結合水の除去する位置、時間および量を確率的な問題として扱うことの妥当性を認め、Poisson 分布に類似の型をたどることを明らかにした。

ii) 収縮にともなつて生ずる内応力は乾燥条件 (本実験では加熱条件) によつて異なると思われ、収縮率と内応力との関係を検討しつぎの事がらをもとめた。

(a) 単位時間に対する収縮量と結合水の除去量が比例的であれば、収縮率—含水率の関係が直線式であり内応力が生じないわけであるが、本実験によると含水率のある点から変異し全収縮経過に対し直線関係は認められなかつた (初期含水率: 飽湿)。すなわち乾燥初期に急しゆんな水分傾斜が生じ、そのために内応力による変異点が生ずると考えられ、しかもこの変異点は乾燥条件がゆるいほど直線域が長いので、なんら内応力の生じない Basic shrinkage を推定し約

乾燥初期に急しゆんな水分傾斜が生じ、そのために内応力による変異点が生ずると考えられ、しかもこの変異点は乾燥条件がゆるいほど直線域が長いので、なんら内応力の生じない Basic shrinkage を推定し約

6%の値をえた。

(b) また試料の厚さがふえるほど、全乾時の表面収縮率は6%に近づくので、厚材表面の内応力は減少すると推測された。

(c) 以上の内応力特性をしらべるために、収縮速度—含水率でしめる面積 A をほふくのともなつた全応力とし、 A と機械的な外力の関係をもとめるために前回は報告した収縮を阻止するための圧縮力との関係を検討し、 $A = \beta \sigma T^n$ の実験式がえられた。 σ は収縮を阻止する外力であるが、一応全収縮域の平均内応力とみなされ、しかも収縮時間 T の函数と考えられるので、収縮経過はほふく効果が大いことを認めた。

以上の考察を導く過程にまだ検討すべき問題が含まれているので、さらに実証すべき実験方法をもとめ、定量的な内応力の評価を追及してゆくつもりである。

文 献

- 1) 北村博嗣：有用樹種別収縮現象の特異性に関する研究 (予報)，林学会誌，37，9，(1955) p.396～401
- 2) 蕪木自輔：木材材質の森林生物学的研究 (第1報)，林試報，46，(1950) p. 37～70
- 3) 加納 孟：木材材質の森林生物学的研究 (第2報)，林試報，46，(1950) p. 71～109
- 4) 鈴木 寧：木材の加熱乾燥による収縮について，木材学会誌，2，1，(1956) p. 43～48
- 5) BARKAS, W. W.: The swelling of wood under stress. His majest. stat. office. (1949)
- 6) 平田森三：理工学における統計的現象，機械の研究，1，(1949)
- 7) 統計工学ハンドブック，昭和 28 年，技報堂
- 8) BARKAS, W. W.: Recent work on the moisture in wood in relation to strength and shrinkage. His majest. stat. office. (1938)
- 9) 南 義夫：木材の簡匐的性質 (1)，木材工業，4，4，(1949) p. 156～160
- 10) 南 義夫：木材の簡匐的性質 (2)，木材工業，4，5，(1949) p. 222～227
- 11) 北原覚一・岡部 登：木材の曲げクリープに及ぼす温度の影響，木材学会誌，5，1，(1959) p. 12～18
- 12) 大沼加茂也・斎藤壽義：加熱圧縮による薄板の収縮率について，木材工業，13，9，(1958) p. 21～25
- 13) YON-HAN PAS, MARIN, J.: An analytical theory of the creep deformation of materials. J. App. Mech, 20, 2, (1953) p. 245～252

Some Aspects of the Effect of Temperature upon the Shrinkage of Wood

Kamoya OHNUMA and Hisayoshi SAITÔ

(Résumé)

The purpose of the present paper is to investigate the effect of temperature upon the shrinkage of wood and the development of internal stress in wood as it dries.

The material used for this investigation is Hinoki (*Chamaecyparis obtusa* SIEB. et ZUCC.) and its shrinkage is carried out under each combination of the following temperature and drying range of moisture content;

Temperature: 35°, 55°, 75° and 95°C

Drying range: From green and fiber saturation point to zero per cent moisture content.

On the experimental procedure, the thermostat for drying of test specimen contains granular hydroxide Kalium to conduct the zero percentage of equilibrium moisture content at each heating condition.

After the measurement of shrinkage of wood as it dries under various heating conditions (Fig. 2 and Fig. 3), the rate of shrinkage per unit time is graphically obtained as shown in Fig. 4 and Fig. 5.

It was found that these curves would fit well by use of the statistical analysis based on the Poissen distribution equation (eq. 1) as shown in Fig. 7.

The above relationship thus suggests that the course of shrinkage may introduce the probability that the amount of bond water related to shrinkage is evaporated at random throughout the width of specimen and heating time.

This paper in the main reveals that the effect of internal stresses depend on the differential shrinkage in wood and develop with the heating conditions to which the wood is exposed. The magnitude and effect of these stresses exert a significant influence with the heating conditions by introducing the creep behavior during drying and as formerly reported of plastic deformation with hot press heating, as shown in Fig. 13 through Fig. 19.