

## 木材の収縮応力 (1)

木材の収縮応力に及ぼす初期引張応力の影響

佐々木 徹\*・山田 正\*

Tohoru SASAKI\* and Tadashi YAMADA\* : Shrinkage Stress of Wood I—The Influence of Initial Tensile Stress on Shrinkage Stress of Wood

### I. 緒 言

木材の水分脱着に伴う収縮過程で、外部拘束によって発生する収縮応力に関する研究は少なく、わずかに2・3の報告をみるのみである<sup>1)2)3)4)</sup>。例えば、LAWNICZAK は、拘束の方向と年輪とが成す角  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  および  $90^\circ$  の pine, oak および beech 材について収縮応力を測定し、収縮応力が樹種に依存すること、および収縮応力が自由収縮の異方性とは一致せず、引張強度のそれに近く、半径方向で最大、 $45^\circ$  方向で最小となることを報告している<sup>5)</sup>。LAWNICZAK と RACZKOWSKI は、初期含水率約30%の熱帯産6樹種を半径方向に拘束して、温度  $100^\circ\text{C}$  で絶乾まで乾燥し、 $27.4\sim 66.4\text{ kg/cm}^2$  の最大収縮応力を得ており、また、引張強度と収縮応力の比が $1.4\sim 2.1$ であることを報告している<sup>6)</sup>。KASS は、aspen 生材試片を種々の外周温度および湿度条件下で乾燥することによって、接線方向の収縮応力を測定し、最大収縮応力が温度ならびに平衡含水率の増加とともに減少すること、拘束試片の自由収縮率が生材の引張破壊ひずみとほぼ等しくても破壊しないことなどを報告している<sup>7)</sup>。さらに、PERKITNY と HELIŃSKA-RACZKOWSKA は、Rotbuche 生材試片について、半径方向の収縮は破壊することなく完全に拘束できるが、接線方向では破壊することを見出し、破壊時の引張応力及び含水率に及ぼす乾燥温度の影響を研究している<sup>8)</sup>。

この収縮応力の発生機構としては、木材実質内の非晶領域に存在する親水性の吸着点相互間における水素結合の形成が考えられる。そこで、本研究では、水素結合のヤング率への寄与が大きいと思われる半径方向に、飽水状態で種々の初期引張応力を与えて収縮応力を測定し、収縮応力の理論的解析の基礎データとして若干の結果を得たので報告する。

### II. 実 験

#### 2.1 試 片

実験に用いた試料はヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* ENDL.) 心材で、気乾比重は0.54である。厚さ1mm (接線方向)、長さ10cm (半径方向)、幅約5cm (繊維方向)の柁目板から、

\* 木材物理部門 (Division of Wood Physics)

幅 4 mm (繊維方向) の連続試片を採取し、各板からそれぞれ任意に選んだ試片について、振動リード型粘弾性測定装置を用いて動的ヤング率を測定し、その値のほぼ等しい板の試片を実験に供した。なお、試片のクランプ部分でのすべりを避けるために、2.5 cm (半径方向) × 4 mm (繊維方向) × 5 mm (接線方向) の材をエポキシ樹脂接着剤 (アラルダイト) で接着補

強し、繊維方向にクランプした。試片の寸法・形状は Fig. 1 に示すとおりである。

また、供試試片数は、各条件につき 4 ~ 5 本である。

## 2.2 方 法

試片を水中に浸漬して飽水材とし、東洋測器 K. K. 製 TENSILON UTM-II 型を用いて、飽水状態で半径方向に 0, 10, 20 および 30 kg/cm<sup>2</sup> の初期引張応力を与えてひずみを一定に保ち、温度 20°C、指示関係湿度 45% の恒温恒湿室内で乾燥し、荷重の変化を経時的に求めた。また、1800 分後に除荷し、回復ひずみおよび断面積を測定した。なお、別に、自由収縮量を読取顕微鏡を用いて測定し、さらに、含水率減少経過を調べた。

本実験に用いた試片の温度 20°C におけ

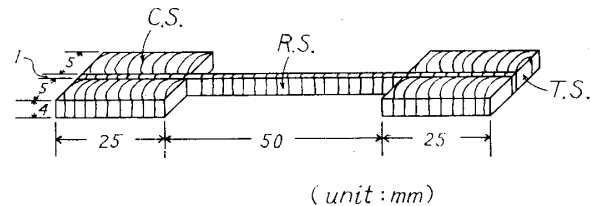


Fig. 1. Shape and dimensions of test specimen. C.S. : Cross section, R.S. : Radial section, T.S. : Tangential section

Table 1. Results of static tensile tests in radial direction at 20°C.

| m.c.<br>(%) | $\sigma_b$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | $\varepsilon_{max}$<br>(%) | $\sigma_p$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | $E$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) |
|-------------|-------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| 136         | 74                                  | 2.60                       | 29                                  | $4.4 \times 10^3$            |
| 9.9         | 130                                 | 2.24                       | 60                                  | 7.4 "                        |

る気乾 (含水率 9.9%) および飽水状態 (含水率 136%) での静的引張試験の結果を Table 1 に示す。

## III. 結 果 と 考 察

外部拘束によって生ずる木材の収縮応力の経時変化  $\sigma(t)$  は、 $P(t)$  および  $A(t)$  をそれぞれ、木材の収縮を拘束するに要する荷重および試片の断面積の経時変化とすれば、 $\sigma(t) = P(t)/A(t)$  で表わされる。しかし、 $A(t)$  を拘束試片そのものについて実測することは困難であるので、本研究では、試片の初期断面積  $A_0$  を用いた  $\sigma'(t) = P(t)/A_0$  をみかけの収縮応力とよび、これで表示する。

Fig. 2a に、飽水試片 (含水率 150%) の半径方向の収縮を拘束して、温度 20°C、指示関係湿度 45% の恒温恒湿室内で乾燥する過程で発生するみかけの収縮応力— $\log t$  曲線を示す。図中の破線は、対照標準試片についての含水率減少経過の一例である。図から明らかなように、みかけの収縮応力は、測定開始後約 20 分から現われる。この時の対照標準試片の平均含水率は、120~132% である。60~70 分以後になると、みかけの収縮応力は急激に直線的に増大し、90~100 分経過すると、増大は緩慢になり、約 150 分で 40.0~43.3 kg/cm<sup>2</sup> の極大値を示し、その後若干減少する傾向を示す。500~600 分から再びみかけの収縮応力が増大し始め、1800 分後にほぼ一定の値 43.8~46.7 kg/cm<sup>2</sup> に達する。この時の最終含水率は平均 10.2% である。60~70 分

における対照標準試片の平均含水率は62~89%, 90~100分におけるそれは35~58%, 150分におけるそれは13.7~18.2%である。また, 500分から1800分の間での平均含水率の変化は, 0.3~0.5%である。

Fig. 2b~2d にそれぞれ, 飽水状態で初期引張応力10, 20および 30 kg/cm<sup>2</sup> を半径方向に与えた後, ひずみを一定に保ち, 前述と同条件で乾燥する際に生ずるみかけの収縮応力—log  $t$  曲線を示す。初期引張応力を与えた場合, 最初に引張応力の緩和が進行し, 最小値を示した後,

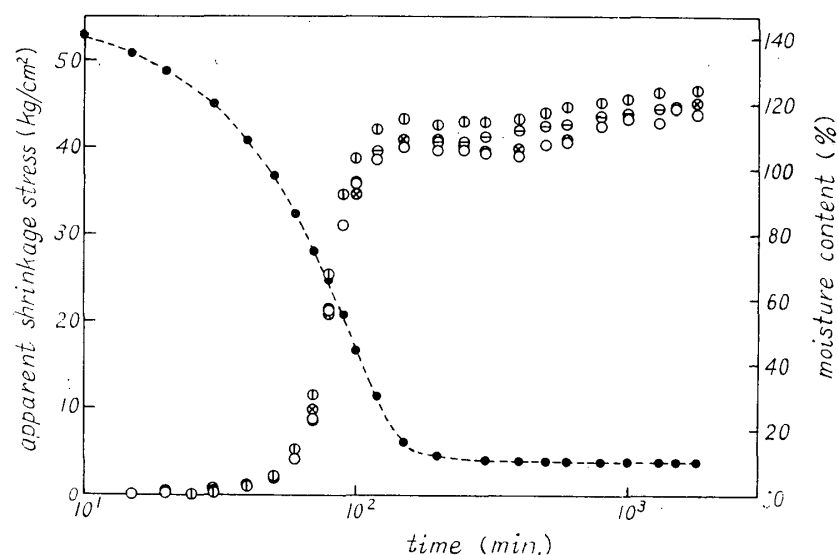


Fig. 2a. Apparent shrinkage stress vs. time curves for initial tensile stress of 0 kg/cm<sup>2</sup>. (Broken line : Change of moisture content of the control specimen)

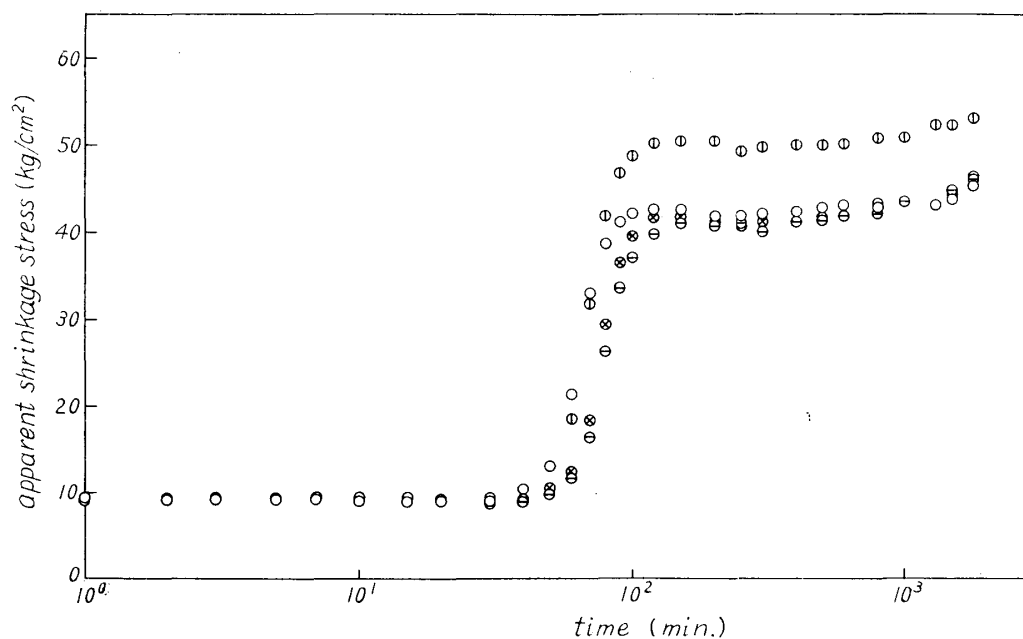


Fig. 2b. Apparent shrinkage stress vs. time curves for initial tensile stress of 10 kg/cm<sup>2</sup>.

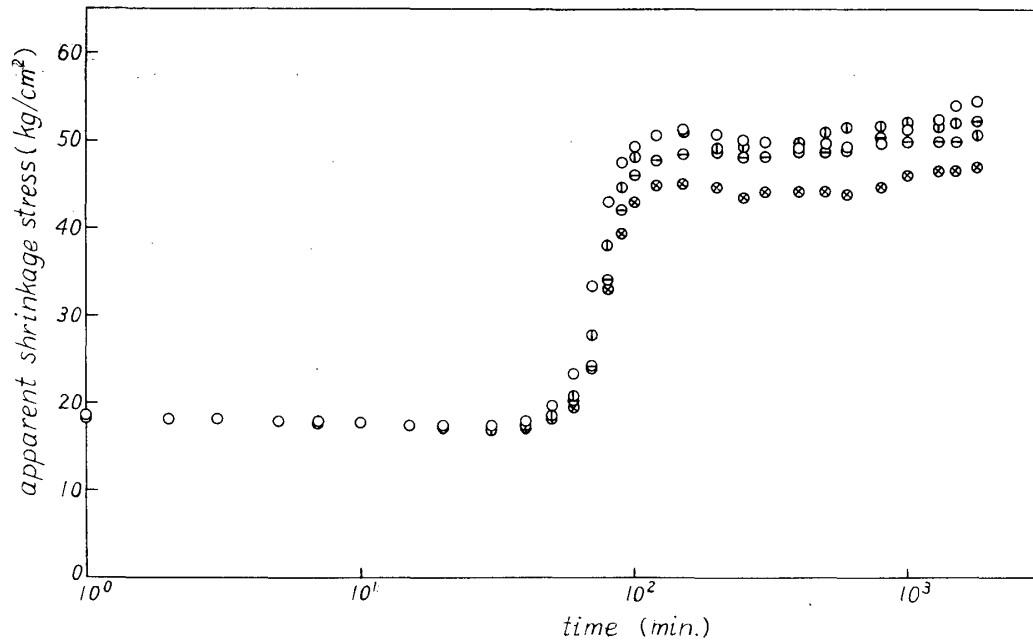


Fig. 2c. Apparent shrinkage stress vs. time curves for initial tensile stress of 20  $\text{kg/cm}^2$ .

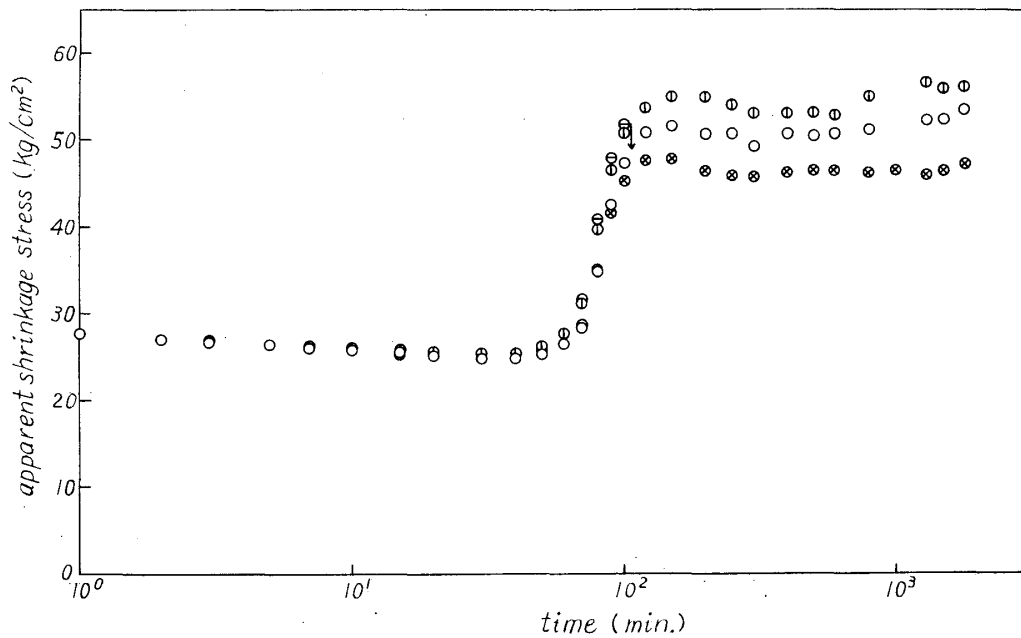


Fig. 2d. Apparent shrinkage stress vs. time curves for initial tensile stress of 30  $\text{kg/cm}^2$ .

初期引張応力 0  $\text{kg/cm}^2$  の場合とほぼ同様の経過をたどる。初期における応力の緩和量は、引張応力の増加とともに増大し、みかけの収縮応力が増大し始める時間は、初期引張応力の増加とともに長時間側に移動し、10, 20および 30  $\text{kg/cm}^2$  の場合それぞれ、30, 40および 50分である。これは、引張応力の緩和量に依存するためと考えられる。さらに、みかけの収縮応力発生速度の最大値は、初期引張応力 0, 10, 20および 30  $\text{kg/cm}^2$  でそれぞれ、1.3~1.6, 1.1~

1.4, 0.9~1.1および0.7~1.1 kg/cm<sup>2</sup>/min であり, 初期引張応力の増加とともに減少している。また, みかけの収縮応力が極大に達した後の緩和量に関しては, 初期引張応力 10 および 20 kg/cm<sup>2</sup> の場合, 初期引張応力 0 kg/cm<sup>2</sup> のそれにはほぼ等しいが, 初期引張応力 30 kg/cm<sup>2</sup> の場合, 特に著しく, みかけの収縮応力の極大が明確になる。500~600分以後にみられるみかけの収縮応力の再上昇に関しては, 初期引張応力 0 kg/cm<sup>2</sup> のそれとほぼ類似している。みかけの収縮応力の極大値は, 初期引張応力 10, 20 および 30 kg/cm<sup>2</sup> の場合それぞれ, 41.0~50.7, 45.5~51.4 および 47.9~55.4 kg/cm<sup>2</sup> であり, みかけの最大収縮応力はそれぞれ, 45.3~53.1, 47.1~54.6 および 47.2~56.1 kg/cm<sup>2</sup> である。また, 最終含水率はそれぞれ, 平均 9.8, 10.1 および 10.5% である。なお, 初期引張応力 30 kg/cm<sup>2</sup> の場合, 供試 5 試片のうち 1 試片のみは, 104 分後に破壊した。この時のみかけの収縮応力は 51.8 kg/cm<sup>2</sup>, 含水率は 13.2% であった。

Fig. 3 に, 飽水試片の収縮を拘束せずに前述の条件下で乾燥した場合の収縮曲線および含水

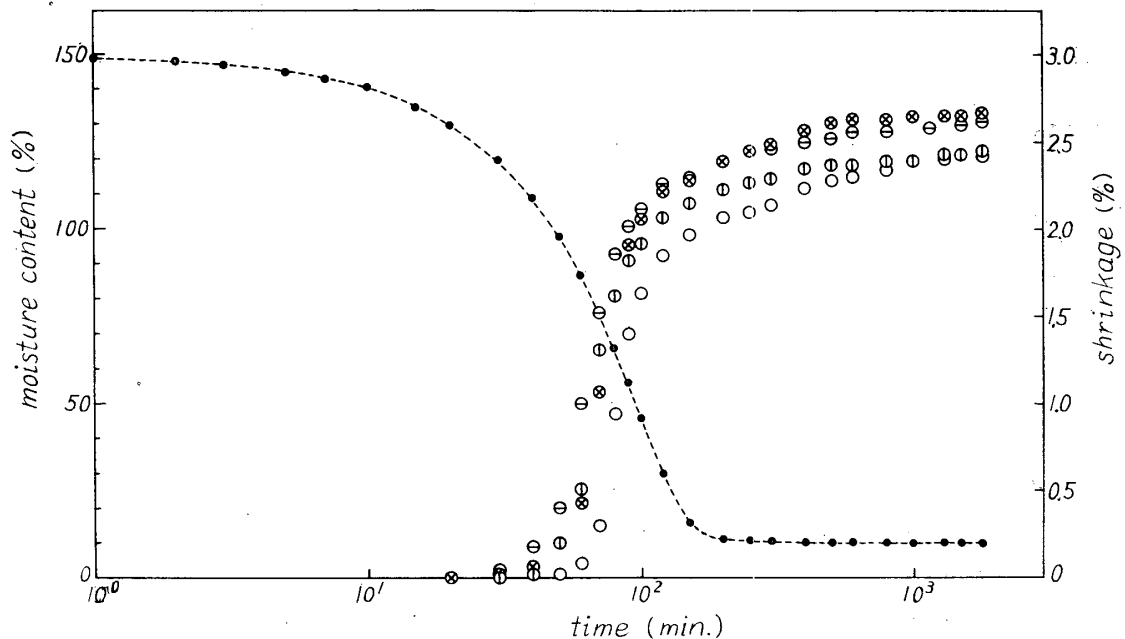


Fig. 3. Changes of shrinkage and moisture content of the unrestrained control specimens.

率減少経過の一例を示す。Fig. 2a に示した初期引張応力 0 kg/cm<sup>2</sup> の結果と比較すると, 収縮応力の発生と無拘束収縮の開始とは時間的に一致するが, その後の経過は異なる。すなわち, 収縮応力の場合, 約 150 分で極大を示し, その後いくぶん緩和するのに対し, 無拘束試片の収縮量は増加の一途をたどり, 1800 分に到ってほぼ一定となる。このような差違は, 時間  $t$  におけるみかけの収縮応力  $\sigma'(t)$  および収縮率  $\alpha(t)$  をそれぞれ, 1800 分後における値  $\sigma'_{max}$  および  $\alpha_{max}$  に対する比で表わした Fig. 4 において, より明瞭であり, このことから, 乾燥過程で拘束によって発生する収縮応力の緩和過程が明確に認められる。無拘束試片の収縮の最大増加速度は, 0.07~0.09%/min であり, 最大収縮率  $\alpha_{max}$  は, 2.42~2.67% である。この値は, 気乾状態における引張破壊ひずみよりいくぶん大きく, 飽水状態におけるそれとほぼ等し

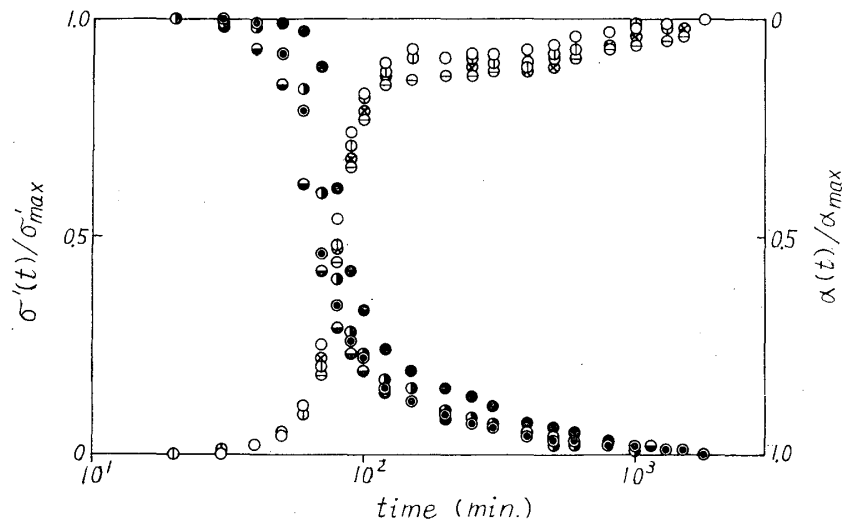


Fig. 4. Normalized curves of apparent shrinkage stress and unrestrained shrinkage.

い。

Table 2 に初期引張応力 0, 10, 20 および 30 kg/cm<sup>2</sup> の場合の最大収縮応力, 厚さ(接線方向)の収縮率および1800分後の回復弾性率と, 無拘束試片の厚さ(接線方向)の収縮率を示す。1800分における荷重を, 除荷後の断面積で除した最大収縮応力は, 初期引張 応力 0 kg/cm<sup>2</sup> の 場 合, 46.9 ~ 50.1 kg/cm<sup>2</sup> である。本実験に類似した方法によって収縮応力値を求めた報告は少なく, LAWNICZAK と RACZKOWSKI<sup>6)</sup>, および KASS<sup>7)</sup> の結果をみるにすぎない。KASS は, aspen 生材試片を接線方向に拘束して, 50~150°F, 平衡含水率 4~20% の外周条

Table 2. The values of the maximum shrinkage stress  $\sigma_{max}$ , shrinkage in thickness (tangential direction)  $\alpha_T$  and the modulus of elasticity at recovery  $E_r$  at various initial tensile stress  $\sigma_0$ .

| $\sigma_0$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | $\sigma_{max}$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | $\alpha_T$<br>(%) | $E_r$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) |
|-------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------|--------------------------------|
| 0                                   | 48.8                                    | 6.5               | $9.5 \times 10^3$              |
| 10                                  | 51.6                                    | 7.0               | 9.6 "                          |
| 20                                  | 55.4                                    | 7.3               | 9.7 "                          |
| 30                                  | 56.4                                    | 7.0               | 9.9 "                          |
| unrestrained shrinkage              | —                                       | 5.0               | —                              |

件下で乾燥する際に発生する収縮応力を求めている。それによると, 本実験の乾燥条件に近い 75°F (23.9°C), 平衡含水率 8% の条件における最大収縮応力値として, 250~320 psi (17.5~22.4 kg/cm<sup>2</sup>) が得られている。収縮応力値は, 乾燥条件が同じ場合には, 樹種, 比重, 拘束方向, 自由収縮率および弾性率等の力学的性質に依存するので, 直接の比較はできないが, 本実験では, KASS の求めた値の約 2~2.5 倍の最大収縮応力値が得られている。なお, LAWNICZAK は, 半径方向に拘束した場合の方が, 接線方向に拘束した場合に比較して大きな最大収縮応力を示すことを報告している<sup>5)</sup>。また, 最大収縮応力に及ぼす初期引張応力の影響に関しては, 引張応力 0 kg/cm<sup>2</sup> と, 20 および 30 kg/cm<sup>2</sup> の場合の最大収縮応力の間に有意の差が認められる。しかし, Fig. 5 から明らかなように, 種々の初期引張応力における最大収縮応力は, 初期引張応力の差よりはるかに小さい差を示すにすぎない。したがって, 木材の収縮応力に及ぼす

初期引張応力の影響は、きわめて大きいと考えられる。厚さの収縮率に関しては、拘束を受けた場合には、無拘束の場合と比較して30%以上増大し、統計的に有意差が認められる。また、初期引張応力  $0 \text{ kg/cm}^2$  の場合と、 $10 \text{ kg/cm}^2$  以上の場合との間にも有意差が存在するが、初期引張応力が  $10 \text{ kg/cm}^2$  以上の間には有意差が認められない。一方、幅（繊維方向）の収縮も、拘束によっていくぶん増大するようであるが、無拘束の場合でも収縮率はわずか0.2%程度にすぎないので、拘束の影響を調べるには、さらに研究することが必要であろう。回復弾性率に関しては、Table 1. に示した気乾状態の静的弾性率と比較して、

著しく大きく、また、初期引張応力の増加に伴ってやや増大するように思われる。ここに示した回復弾性率は、1800分後に応力が0になるまで  $1 \text{ mm/min}$  の速度で試験機のクロス・ヘッドを移動したときの変位量と、除荷前の試片長よりひずみを求め、これと除荷前の応力とから算出したものである。

収縮応力の発生機構に関しては、未だ定説をみないが、LAWNICZAK ら<sup>6)</sup> が吸着水の離脱に伴う木材構成要素相互間をひきつける力の増加と述べているように、木材実質中の非晶領域に存在する親水性の吸着点から水分子が離脱することによって活性化した吸着点間に、水素結合が新たに形成され、鎖状分子が互に接近しようとする過程で、ひずみが拘束されているためにそれに相当する力が発生することによるものと考えられよう。従って、半径方向のヤング率に及ぼす水素結合の影響が大きいこと<sup>9)</sup> から、収縮応力に及ぼす初期引張応力の影響が大きく現われると考えられる。

また、Fig. 2a~2d で示されているように、500~600分以後にみかけの収縮応力が再び増大する現象が観察されるが、この原因としては、前述の水素結合の他に、水分非平衡下における大規模な鎖状分子の運動に起因することが考えられ、回復弾性率が大きく現われることと考え合わせて興味ある問題であり、今後この分野における分光学的な研究が必要であろう。

#### IV. 要 約

本研究では、ヒノキ飽水材を半径方向に拘束して、温度  $20^\circ\text{C}$ 、指示関係湿度 45 % で乾燥する過程で発生する収縮応力に及ぼす初期引張応力の影響を調べた。さらに、無拘束試片について、収缩量および含水率を測定した。得られた結果を要約すると次のとおりである。

1) みかけの収縮応力-時間曲線はS字型を呈し、約150分で極大を示す。また、500~600分以後に、みかけの収縮応力の増加が認められる。

2) 最大収縮応力は、初期引張応力の増加とともにいくぶん増加し、初期引張応力  $0 \text{ kg/cm}^2$

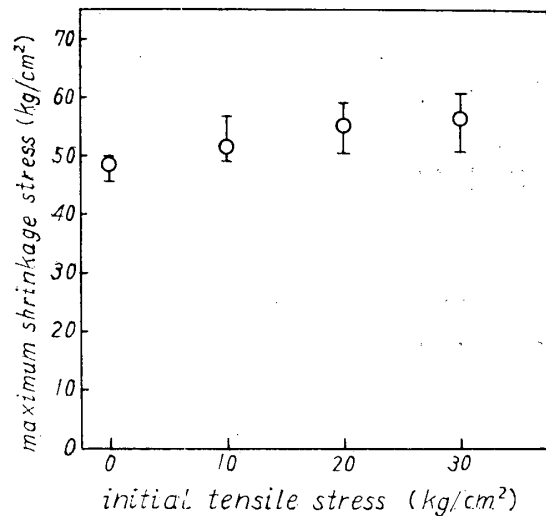


Fig. 5. Relation between the maximum shrinkage stress and initial tensile stress.

と 20 kg/cm<sup>2</sup> 以上との間で有意差が認められる。

3) 拘束によって、厚さ（接線方向）の収縮は 30 % 以上大きくなり、しかも、初期引張応力の増加に伴って増大する。

4) 除荷後の回復弾性率は、気乾状態の弾性率より約 30 % 大きく、初期引張応力の増加に伴っていくぶん増大するように思われる。

### Summary

In this paper the influence of initial tensile stress on shrinkage stress, which developed in initially water-saturated HINOKI (*Chamaecyparis obtusa* ENDL.) wood under strain restraint in radial direction during drying at 20°C and 45 % relative humidity, was investigated. In addition to shrinkage stress, the amount of shrinkage and moisture content were measured for the unrestrained control specimens. The results obtained are summarized as follows:

1) Apparent shrinkage stress versus time curves are sigmoid and have a peak at 150 minutes. And they rise again after 500~600 minutes.

2) The maximum shrinkage stress increases with increasing initial tensile stress and the significant difference exists between the case of initial tensile stress of 0 kg/cm<sup>2</sup> and that of above 20 kg/cm<sup>2</sup>.

3) The amount of shrinkage in thickness (tangential direction) of radially restrained specimens is 1.3 times larger than that of unrestrained ones and increases with increasing initial tensile stress.

4) The value of the modulus of elasticity at recovery is larger than the modulus of elasticity in air-dry condition by about 30 % and seems to increase with increasing initial tensile stress.

### 文 献

- 1) 山田 正, 木材研究, No. 44, 1 (1968).
- 2) 山田 他 5 名, 木材研究, No. 40, 28 (1967).
- 3) 山田 他 7 名, 木材研究, No. 43, 17 (1968).
- 4) 山田 他 7 名, 木材研究, No. 46, 19 (1969).
- 5) LAWNICZAK, M., Roczniki Wyższej Szkoły Rolniczej w Poznaniu, 11, 301 (1961).
- 6) LAWNICZAK, M. and J. RACZKOWSKI, Revue Bois et Forêts des Tropiques, No. 82, 53 (1962).
- 7) KASS, A. J., Forest Prod. J., 15, 225 (1965).
- 8) PERKITNY, T. und L. HELIŃSKA-RACZKOWSKA, Holztechnologie, 8, 225 (1967).
- 9) 梶田 茂, 山田 正, 鈴木正治, 木材誌, 7, 29 (1961).