

木 材 の 応 力 解 析

—光弾性法による第2の試み**—

佐々木 光*・満久 崇麿*

Hikaru SASAKI* and Takamaro MAKU* : Stress Analysis of Wood—The Second Trial Using Photoelastic Method—

は じ め に

異方性材料の対称面内の準2次元応力を解析する新しい方法として、すでに、凍結サンドイッチ法 (Stress Freezing Sandwich Method) と名づける実物光弾性実験法を提案した。その原理の概要は次の通りである。まず、試験片に光弾性樹脂をサンドイッチし、荷重をかけたときに生ずる樹脂層内の光弾性効果を特別な方法で固定する。つぎに、荷重を除き、樹脂層を切り出して、透過型の平面光弾性光学系で観測すれば、樹脂層内の応力の状態がわかる。したがって、樹脂層と試験片のひずみが等しいと考えれば、これらの弾性定数を用いて、試験片の応力分布を算出することができる。

この原理を実際に応用する場合に、樹脂層内に生じた光弾性効果をどのようにして固定するかが問題である。さきに、その一つの試みとして、常温における樹脂の硬化過程を応用して、木材の割裂試験片の応力解析を行ない、かなり合理的と思われる結果を得た¹⁾。ここに発表するものは、これに続く第2の試みで、樹脂の2次転移点における状態変化を応用したものである。この方法は、さきの常温における方法に比べて、実験操作が複雑なうえ、熱応力の残留もわずかながらあるため、あまり合理的なものとはいえないが、この方面の研究の参考資料として役立つものと思われる。その概要は次の通りである。

まず、前報¹⁾と同様に、木材試験片の準2次元応力状態となる層に、2次転移点以上の温度でも変色しない付加型網状ポリマーをサンドイッチし、2次転移点以上の温度で荷重をかけ、そのままの状態を、温度を2次転移点以下まで降下させると、樹脂層内に生じた光弾性効果が、樹脂の2次結合の発達によつて、いわゆる“凍結”されるから²⁾³⁾、樹脂層を切り出した後も、光弾性効果は樹脂層中に残留している。このようにして得た樹脂板を平面光弾性光学系で解析すれば、前報¹⁾と同様に木材試験片のひずみ分布や応力分布の状態を知ることができる。ここでは木材せん断試験片についての実験例を示す。なお、資料とりまとめに協力された勝山三千代夫人に謝意を表する。

* 木質材料部門 (Division of Composite Wood)

** この概要は Meeting of the Working Group “Wood Physics” IUFRO, Section 41, at Paris June 1st 1966 に投稿。

材料と実験方法

1. 光弾性材料と凍結条件

凍結用光弾性材料として、最も多く用いられているエポキシ樹脂の1種、アラルダイトB (Ciba 社) を用い、温度—荷重サイクルを決めるために、次の予備実験を行なった。

アラルダイトBに対し硬化剤 No. 901 (無水フタル酸系) を1/3 混入し、120°C で約20時間加熱硬化させた樹脂板 (厚さ 6mm) から、幅 2cm, 長さ 15cm の試験片を切り出し、電気炉中で曲げ試験を行なって、温度と弾性係数の関係を求めた。結果を Fig. 1 に示す。同図には参考までに、温度と光弾性応力感度、および温度と光弾性ひずみ感度の関係を併記してある。

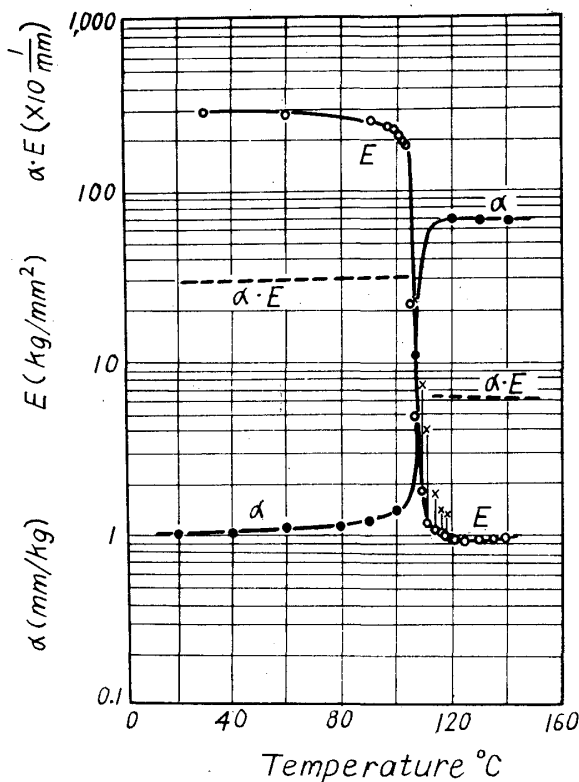


Fig. 1. Photoelastic stress sensitivity (α), modulus of elasticity (E) and photoelastic strain sensitivity ($\alpha \cdot E$) of Araldite B as functions of temperature.

× : The values read just after loading.

○● : The values read three minutes after loading.

この図から、アラルダイトB樹脂の2次転移点が 105°~110°C のあたりにあることがわかる。

この結果から、Fig. 2 のような温度—荷重サイクルを決定した。2次転移点以上の温度では、ひずみ感度が低いことから、荷重の大きさをできるだけ大きくとつた (木材試験片の破壊荷重の約 1/2)。

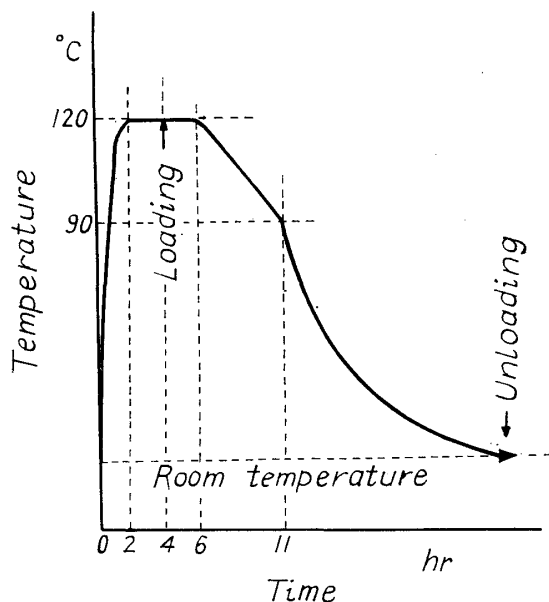


Fig. 2. Load-temperature cycle.

2. 試験片の作製

まず、マカバ材を、内部応力の発生しないように、注意深く全乾にした後、Fig. 3 (a) のように、マイターソーで板目面に平行な3本の挽道をつけた。つぎに、樹脂の流出を防ぐために Fig. 3 (b) のように単板で囲い、120°C に熱しておき、その中に、120°C で融解し、硬化剤を混入したアラルダイトBを流し込み、130°C で1時間、115~120°C で18時間加熱硬化さ

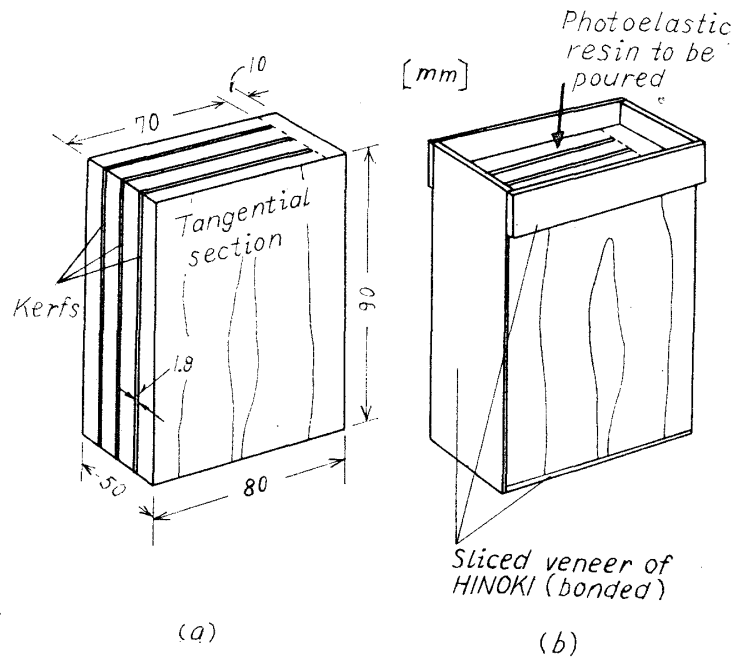


Fig. 3. Preparing wood-photoelastic resin laminated block.

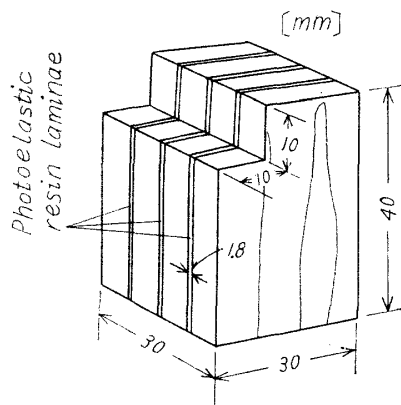


Fig. 4. Specimen.

せ, 120°~130°C で数時間アニールした後, Fig. 4 に示す JIS・Z・2114 (1957) の木材せん断試験片を切り出した。

3. 応力凍結と光弾性効果の観測

Fig. 5 は荷重装置の模式図である。この中で試験片を Fig. 2 の荷重—温度サイクルに従わせた後, 手早く樹脂層を切り出し, サンドペーパーと油砥石で, 表面が平滑な厚さ一定の板に仕上げた。

得られた樹脂板は, 表面の乱反射をさけるために, 樹脂板と同じ屈折率の透明な油の中に入

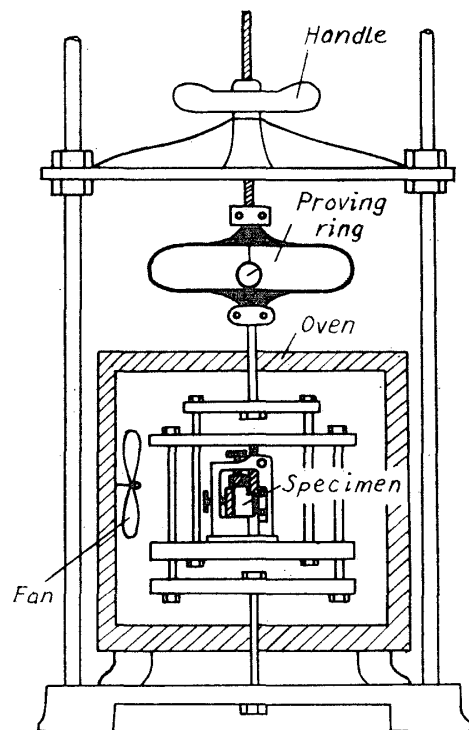


Fig. 5. Apparatus for the loading and the stress freezing.

れ、透過型の平面光弾性装置（理研製大口径型）を用いて、光弾性縞の観測を行なった。まず、各樹脂板について、直交偏光子の場合において、等傾線縞を観測し、つぎに、これら3枚の樹脂板を重ねたものについて、円偏光の場合において、単色等色線縞を観測した。

実験結果と考察

Fig. 6 (a) は個々の樹脂板の等傾線の平均的なものである。(b) はこれから作図した樹脂

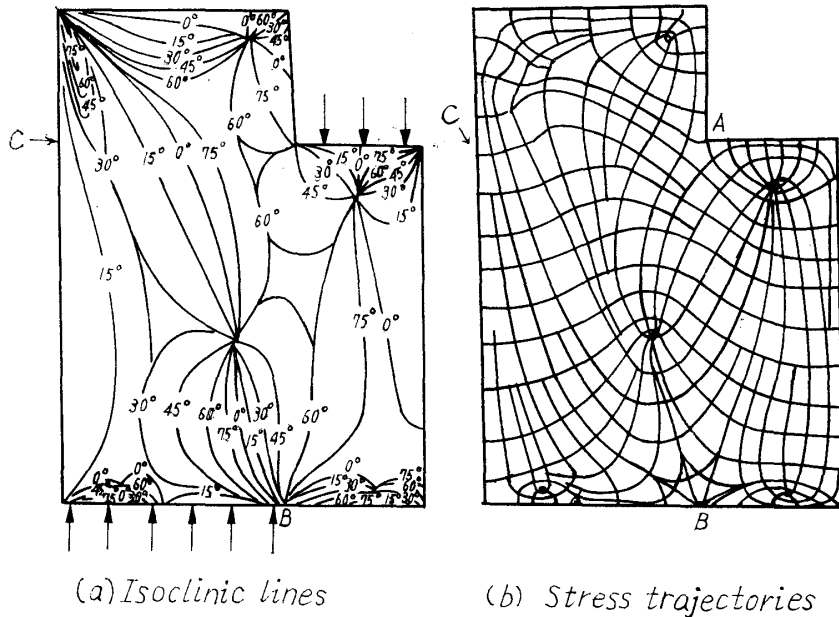


Fig. 6. Isoclinic lines and stress trajectories in the resin laminae cut out of the wood specimen just after the unloading.

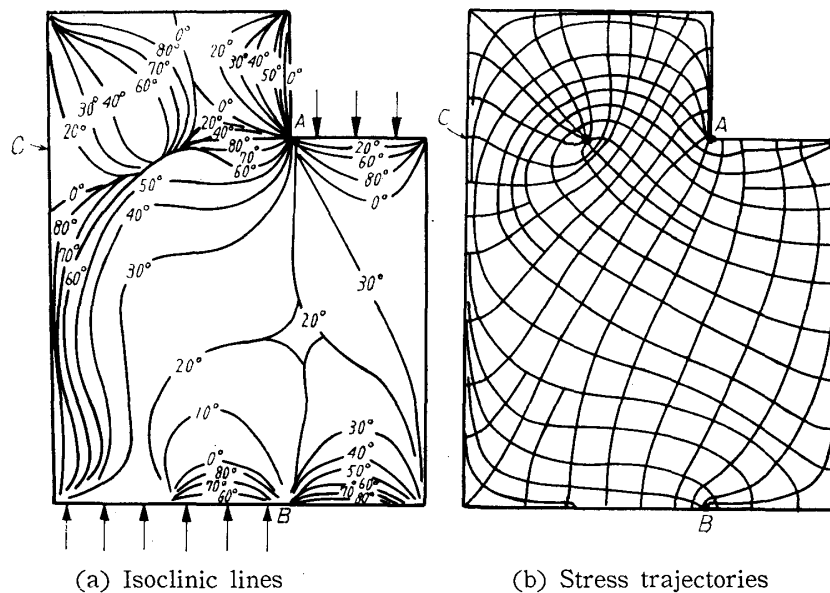


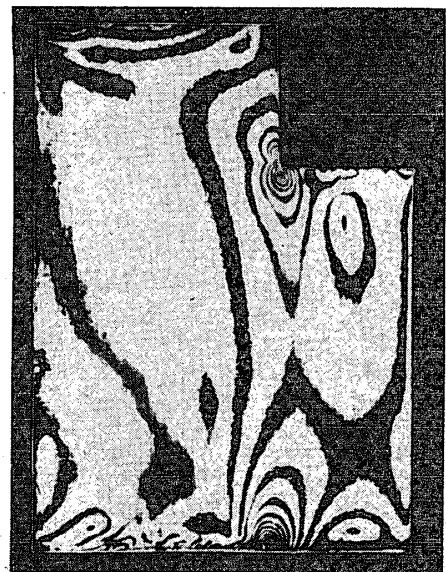
Fig. 7. Isoclinic lines and stress trajectories in the isotropic specimen (Araldite B).

板の主応力線である。この主応力線は木材試験片の主ひずみ線に等しい。比較のため、厚さ6mmのエポキシ樹脂試験片について凍結法で求めた等方体の結果を Fig. 7 (a), (b) に示す。これらの図から明らかなように、等方体試験片ではせん断線 (AB) 上の主ひずみの方向は、せん断線に対して約 20° (または -70°) 傾いているのに対し、木材試験片では $45^\circ \sim 60^\circ$ (または $-45^\circ \sim -30^\circ$) 傾いている。このことから、等方体試験片では、おそらく、せん断線 (AB) に沿ってせん断破壊の生ずる可能性はないが、木材試験片では、おおざっぱに見て、せん断線 (AB) に沿ったせん断変形が最も大きく、この線に沿うせん断破壊がおこりやすいものと考え

Photo. 1. Isochromatic fringe photographs of the resin laminae cut out of wood specimen just after the unloading.



(a) One resin lamina



(b) Three resin laminae

られる。

Photo. 1 (a) は木材試験片から切り出された1枚の樹脂板の等色線縞模様で、(b) は3枚の樹脂板を重ねた場合のそれである。また、参考までに、エポキシ樹脂試験片による等方体試験片の結果を Photo. 2 に示す。これらの写真から明らかなように、樹脂板を重ねることによつて、高い縞次数が得られ、解析が容易になることがわかる。また木材試験片から切り出された樹脂板では、等方体の場合に比べて、等色線縞模様が繊維方向 (せん断線 AB の方向) に強く引伸ばされた形になっていることがわかる。

いま、等傾線の観測結果から、木材試験片の主せん断ひずみ方向が、近似的にせん断線 AB に一致していると考え、木材試験片から切り出された樹脂板のこの線上の縞次数は、木材

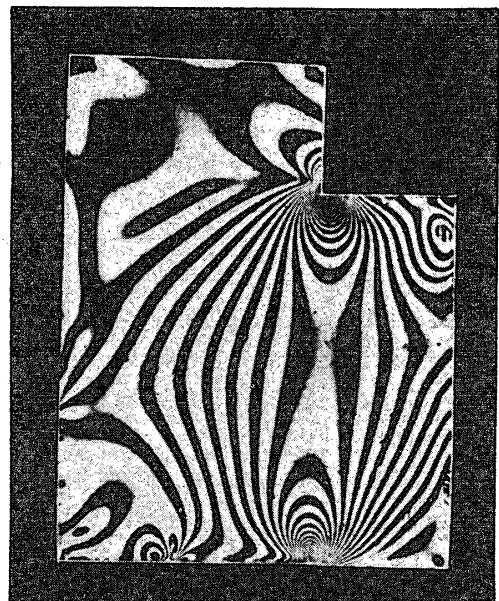


Photo. 2. Isochromatic fringe photograph of the isotropic specimen (Araldite B).

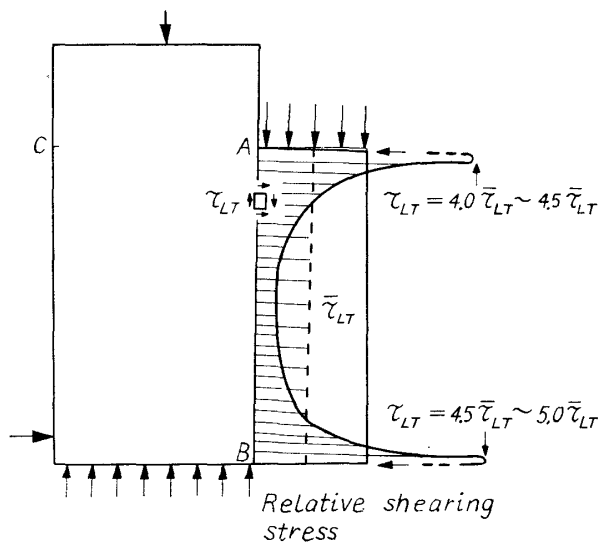


Fig. 8. The relative values of the shearing stress parallel (or perpendicular) to the fiber at points along the shear line of the wood specimen.

τ_{LT} : Average shear stress along the shear line AB.

みを与え、この後に樹脂板を切り出して光弾性観測を行なったところ、残留熱応力は 1.5mm の樹脂板を 4 枚重ねたときに、試験片の周辺部に約 0.5 次程度の等色線縞となつて現われており、試験片が荷重によつて十分に變形されるならば、それ程大きな誤差とはならないようである。

Summary

In the previous paper¹⁾, a photoelastic technique named "Stress Freezing Sandwich Method" was proposed, and plane stresses (or quasi-plane stresses) in an anisotropic body were reasonably analysed.

The present paper concerns with the second trial to apply the principle on stress analysis of a wood specimen.

A rectangular parallelepiped with three kerfs as Fig. 3 (a) was cut out of an oven dried MAKABA (*Betula maximowiczii* REGEL) block, and enclosed with veneer as shown in Fig. 3 (b). It was then heated at 130°C and the melted Araldite B mixed with the hardener was poured into the kerfs. After heating cycle of 130°C for 1 hr, 115~120°C for 18 hr and 120~130°C for 3 hr, the block was shaped into a standard wood shearing test specimen shown in Fig. 4 (JIS Z 2114 (1957)).

Fig. 5 shows the apparatus for the stress freezing^{2,3)} in which the specimen was subjected to a load-temperature cycle shown in Fig. 2. The resin laminae were, then, cut out of the specimen immediately, and finished into about 1.6 mm thick in average with sanding papers and oil whetstone. The isoclinic lines were obtained on each

試験片のこの線に沿つたせん断応力の値に比例的な関係にある。このように考えた場合の木材試験片のせん断線 AB に沿つたせん断応力の相対的な分布は Fig. 8 のようになる。この図から明らかなように、この線上のせん断応力は、一様な分布ではなく、A および B 点から試験片の内部に向つて、わずか入つた点で極大値をとり、その値は平均せん断応力の 4 ~ 5 倍と考えられる。

なお、この結果に影響していると考えられる凍結サイクル中の熱応力の残留について、実験的な検討を行なつた結果を参考までに述べると、次の通りである。

樹脂板をサンドイッチした木材試験片を、電気炉の中に入れ、Fig. 2 のサイクルのうち、荷重をかけず温度サイクルの

resin lamina, and then the isochromatic lines were obtained on the three resin laminae piled together to a nicety in linseed oil.

Sketches of the typical isoclinic lines and stress trajectories in the resin laminae are shown in Figs. 6 (a) and 6 (b). These stress trajectories coincide with the strain trajectories in the wood specimen (but in general, do not with the stress trajectories in the wood specimen). For the comparison, the isoclinic lines and the stress trajectories in an isotropic specimen made of Araldite B only were obtained and shown in Figs. 7 (a) and 7 (b).

From these figures, it is obvious that while the directions of the principal strain at points along the shear line (AB in the figures) in the isotropic specimen incline at an angle of 20° (or -70°) to the shear line, those in the wood specimen incline at angles $45^\circ\sim 60^\circ$ (or $-45^\circ\sim 30^\circ$). These facts mean that the principal shearing strains at points along the shear line (AB) in the isotropic specimen do not take place in the direction parallel to the shear line, but in the wood specimen approximately parallel to the shear line. Thus the shearing failure along the shear line will not occur in the isotropic specimen but do in the wood specimen.

The isochromatic fringe photographs of the one resin lamina and that of the three plies are shown in Photos. 1 (a) and 1 (b), respectively. And for the comparison, that of the isotropic specimen (Araldite B) is shown in Photo. 2.

From these photographs, it is obvious that the fringe pattern of the laminae cut out of the wood specimen is considerably stretched in the fiber direction (which is parallel to the shear line).

As mentioned above, the principal shearing strain at points along the shear line of the wood specimen is produced approximately in the direction parallel (or perpendicular) to the fiber and thus its relative distribution can be obtained immediately from the fringe order. This is nothing but the relative distribution of the shearing stress parallel (or perpendicular) to the fiber at points along the shear line of the wood specimen, which is shown in Fig. 8. In this figure, the shearing stress does not distribute uniformly along the shear line, and at the just inside of reentrant corner A and point B, it becomes the maximum and reaches about 4~5 times as large as the average shear stress.

文 献

- 1) SASAKI, H. and T. MAKU, Wood Research, No. 36, 33 (1965).
- 2) OPPEL, G., Forsch. Gebiete Ingenier W., 7, 240 (1936).
- 3) KAWATA, K., J. Polymer Sci., 19, 359 (1956).