

木材乾燥応力の一測定法について

高	橋	徹
山	田	正
梶	田	茂

Akira TAKAHASHI, Tadashi YAMADA, and Sigeru KADITA

On a method of drying stresses measurment of wood

I 緒 言

木材を乾燥する場合、通常木材内部に乾燥応力が発生する。その因子は主として水分勾配による応力と、木材組織の不均質異方性にもとづく応力とである。

1938年に H. D. Tiemann¹⁾ はこのような乾燥応力の存在を *slotted disk method* で見出した。近年、小倉²⁾, J. M. McMillen³⁾ は Tiemann の手法を拡張して、スライス法によつて木材の乾燥経過中の応力状態を明らかにした。スライス法とは乾燥経過中の木材をスライスして、スライス後の試片の弾性回復による部分の歪量変化によつてその内部応力を推定しようとするものである。

さらに、R. L. Youngs & C. B. Norris⁴⁾, B. N. Ugojew⁵⁾ はこのスライス法を拡張して乾燥応力の定量化を試みている。すなわち Youngs and Norris は前もつて各含水率時の木材の横方向のヤング率を静的強度試験から求めておいて、これと別にスライスされた試片の各部分の瞬間弾性回復量を係数とした応力函数に前述のヤング率の逆数を乗じた応力-歪みの関係式を得た。又 Ugojew は水分応力関係式を Youngs and Norris の式と全く別な考え方で、収縮率、板の厚さ、含水率の程度 (F.S.P. の前後)、含水率の傾斜を考慮して式を導いた。

スライス法によつて、乾燥中に生ずる応力挙動がスライス試片の歪量から定性的に確認されたことは重要な意義があつた。しかし以上述べたように、その定量化の計算は複雑であり、異方性の考慮が欠除していると思われる。

従来のスライス法の問題となる点は、高い含水率においては、木材は完全な弾性体ではなく、スライスによる試片の変形は弾性回復後クリープ回復へと連続的であり、実験では瞬間弾性変形部分の回復だけえたとしているが、必ずある程度のクリープ回復を含んでいること、スライスすることにより、残りのブロックの応力分布の変化が起りうること、スライスするに要する時間的な差による試片の応力分布変化、水分勾配の変化、スライスによつて同一試験片で乾燥全期間中の応力変化が調べられていないこと等である。

1957年10月に木材乾燥における基礎的研究についてのマジソン会議⁶⁾で勧告されたように、木材の乾燥応力に対しては、従来の測定法と異つた新しい乾燥応力の測定法についての研究が要望されている。

筆者等は従来のスライス法による乾燥応力の測定よりも簡便で、正確で、しかも現場で使えるような測定法について種々検討した結果、従来木材に対し直接応力測定に使用されていなかった光弾性法を木材に應用して乾燥中に発生する内部応力の直接測定を試みた。この方法の特徴の一つは乾燥経過中一貫して同一試片について、その内部応力の変化過程を測定しうる点にある。

光弾性は主として物体の形状相似による応力分布相似の法則⁷⁾に基いて構造応力を測定するものである。たとえば F. Kollmann と R. Hiltcher⁷⁾ は木材の春秋材の層状構造にもとづいて、ヤング率の異なる光弾性材料を積層した模型をつくり曲げ応力分布を求めた。また F. Kollmann⁸⁾等は樺材の構造で応力はどのように分布しているかをみるために、合成樹脂材料をモデルとして光弾性法によつて測定している。しかしこれらのモデルは等質等方性の物質であるから、そのような模型から不均質異方性材料である木材の応力分布を推定するには問題が多い。

最近林によれば、合成樹脂にガラス繊維を強化して、等方性材料に異方性を付与して、その応力分布を光弾性的に研究した。

なお本研究を進めるにあたつて、種々の御教示を賜つた京大工学部岡行俊、京大工学研究所森忠次の両氏、実験に多大の御協力をいただいた岡康寛、喜多義和の両氏に感謝致します。

II 実験方法及び装置

実験に使用した光弾性測定器¹⁰⁾は測機舎製の小型反射式で、第1図、写真1のように補整器の取はずしが自由なものである。今回の実験では被測定物である樹脂の色が等色線の黄、オレンジ、赤の中間

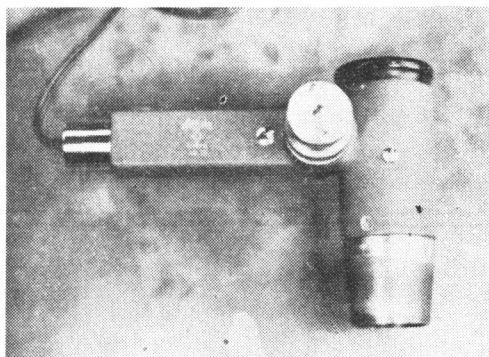


写真 1 (a) 反射式光弾性測定器

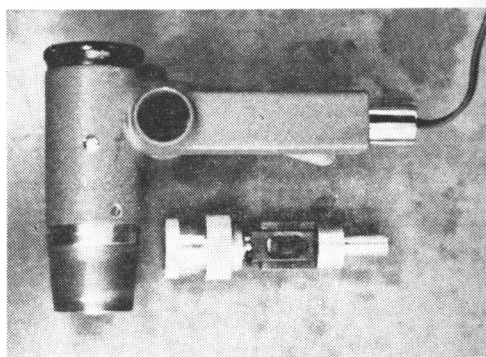
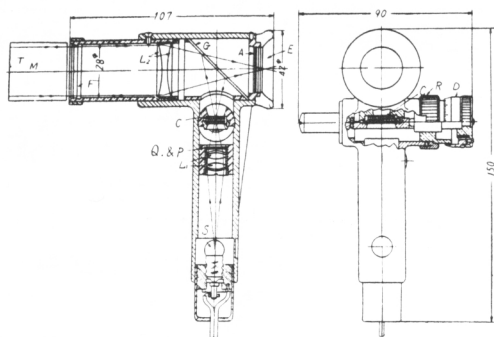


写真 1 (b) : 反射式光弾性測定器から補整器を取除いたもの
下側にあるものが補整器



第 1 図 光弾性測定器（岡 行俊氏による）

S : 光源, L₁ : コンデンサーレンズ, P : 偏光子,
Q : 1/4波長板, C : 補整器, G : ガラス板,
L₂ : 視野レンズ, F : 十字線,
M : 被測定物質(樹脂), T : 反射面(鏡),
A : 検光子, E : 観察窓, R : 補正器固定ネジ
D : 補正器調節ネジ

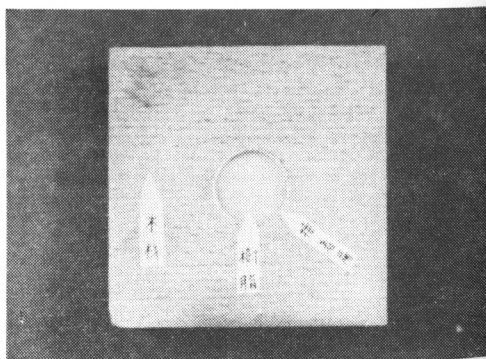


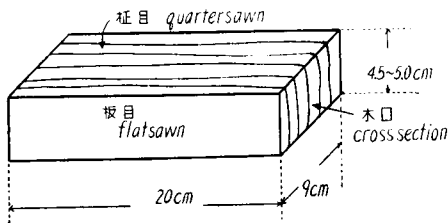
写真 2 木材中に樹脂を埋設したもの

にあるので明確な等色線の判別を欠くために補整器を取除いて測定した。光源は白色光源Sで、Sより出た光はコンデンサーレンズ L_1 を通り、偏光子P、 $\frac{1}{4}$ 波長板Qを経て円偏光となり、補正器Cを通過した後、ガラス板Gの表面で反射して進路を 90° 変えて、視野レンズ L_2 を経て測定片に入射され、Mの裏面(鏡)で反射された光は再び視野レンズを経てガラス板Gを通過し、検光子Aを通つた後、観察点Eから肉眼によつて測定される。ガラス板Fは焦点面におかれて十字線が刻まれている。Dは補整器Cを調節するダイヤルである。Rによつて補整器は固定される。

かかる光弾性測定器を真空乾燥器にとりつける。真空乾燥器は第2図のごとく、両面ガラス張りの金属製シリンダー状のものである。この装置を $40^\circ \pm 1^\circ \text{C}$ に保つようにした。含水率の測定にはスプリングを使用し、その変化をカセットメーター(精度 $1/20\text{mm}$)で読取つた。収縮は木材の半径方向をダイヤルゲージ(精度 $1/100\text{mm}$)で測定した。

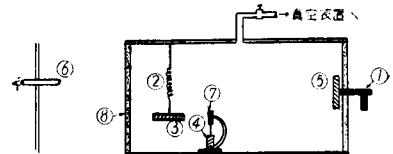
乾燥は真空装置で 20 mmHg 程度まで排気して、一旦コックを閉め、木材より水分が蒸発して一定時間(15分より2時間程度間隔がひらくが、乾燥の度合によつて異なる)の後真空度が $30\sim 50\text{ mmHg}$ になると(真空度が下る程度も木材の乾燥度によつて変える)、コックを開いて再び $20\sim 40\text{ mmHg}$ になるまで、排気して真空度をあげ、この操作を繰返して真空乾燥をおこなつた。

木材試片の寸法は約 $20 \times 9 \times 4.5\text{ (cm)}$ で、木取は第3図のようにし、樹種は青森産ブナ材で伐採、挽材後数年を経過したものである。試験片に加工後適当な含水率に調湿した。絶乾密度は約 $0.63\text{ [gr/cm}^3\text{]}$ である。



第3図 木材寸法の木取図

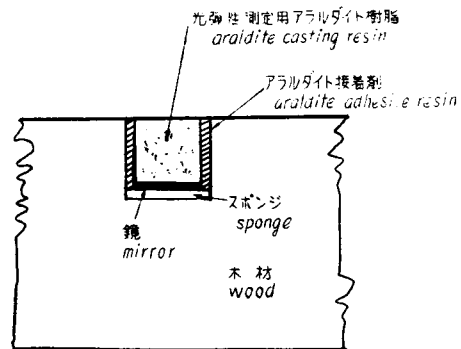
熱をかけて溶かし樹脂分に対し約 $\frac{1}{4}$ の重量比の硬化剤を入れて、これらが十分に溶けたのち、整形器に入れ、約 $120^\circ \text{C} \sim 130^\circ \text{C}$ で数時間保つた後、除冷した。硬化後実験に適する様に加工し、加工歪みを除去するため焼鈍する。アラルダイト樹脂の厚さは $6\text{ mm} \sim 18\text{ mm}$ まで種々調製し、主として円板形に加工した。木材試片の柁目面の中央に樹脂の直径に応じた円形の孔を穿孔し、これに適当な厚さの樹脂板を埋設した。そして第4図の様に断面よりみると、孔の底に薄いスポンジを入れて、その上に鏡を樹脂面に押し上げるようにし、樹脂と木材の接着には同系のアラルダイト接着剤(Araldite Casting Resin D)を使用し木材とアラルダイト樹脂との間隙のないようにした。接着層の厚さは薄いものでは 1 mm 程度、厚いものでは 3 mm 程度であつた。木材中に埋設された樹脂の状況は写真2の如くである。



第2図 真空乾燥器

- ① 光弾性測定器, ② スプリング,
- ③ 含水率測定試片, ④ 収縮率測定試片,
- ⑤ 乾燥応力測定試片, ⑥ カセットメーター,
- ⑦ ダイヤルゲージ, ⑧ ガラス

乾燥応力測定には光弾性測定用合成樹脂、すなわちアラルダイト樹脂(商標名 Araldite Casting Resin B, スイス・シバ社製)を使用した。これは力学的に安定な材料で、かつ光弾性材料としての性能もよい。アラルダイト樹脂は塊状のもので、

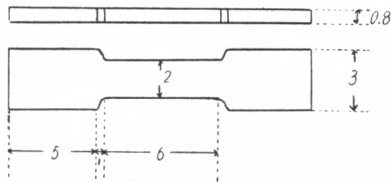


第4図 光弾性測定用アラルダイト樹脂を木材試片中に埋設した図。(断面図)

III 実験結果

III. 1 光弾性樹脂の検定

アララナイト樹脂の引張試験における応力—歪みの実験結果の一例を第6図に示した。この応力歪み曲線からわかるように、約 300 kg/cm^2 までの応力を加えた結果、これはほぼ直線をなしている。



第5図 応力—歪み測定試片 (cm)
(アララナイト樹脂)

この実験に使用した樹脂の試片の形状は第5図の通りである。(ASTM 規格)

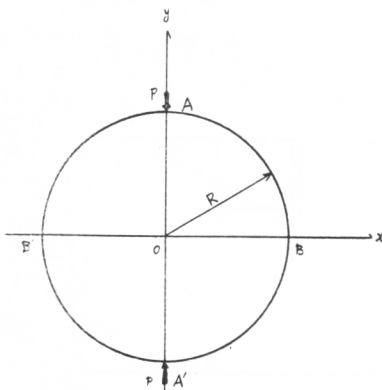
次いで、アララナイト樹脂の光弾性的な性質を明らかにするため、応力と光弾性縞（等色線）との関係を調べた。第7図の様な円板をつくり、両端A-A'より荷重Pを加えると、円板の中心Oにおける応力（主応力差）は次式で与えられる。

$$\sigma = \sigma_1 - \sigma_2 = \frac{8P}{\pi d D}$$

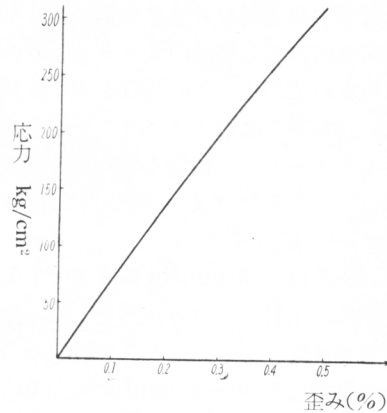
但し、直径を $D=2R$ 、厚さ d 、荷重 P とする。又フリンジ応力（1 mm の厚さの樹脂に一次の光弾性縞が生ずるに必要な応力）を求める式は

$$S = \frac{\sigma d}{n} = \frac{8}{\pi D} \cdot \frac{P}{n} = \frac{1}{\alpha}$$

ここに S はフリンジ応力、 α は光弾性感度、 n は縞次数である。今樹脂の両端から集中荷重 P を加える（第7図）と、そのときに円板の樹脂に現れる応力分布は写真3のようである。この写真3は中心に第5次の等色線縞が生じている。



第7図 半径 R の円板に両端から集中荷重を加える。



第6図 アララナイト樹脂の
応力歪み線図

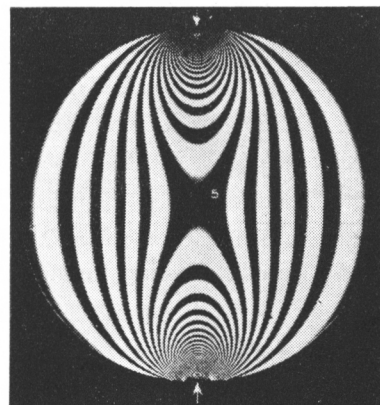
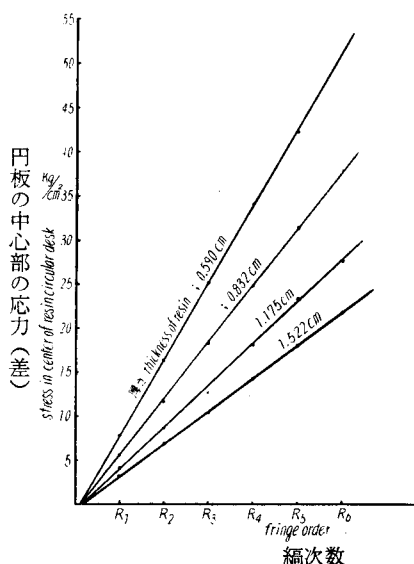


写真3 円板形の樹脂に両端より荷重を加えた場合の光弾性縞

第1表 光弾性樹脂の厚さ、直径を種々に変えた場合の縞次数と各種応力の関係

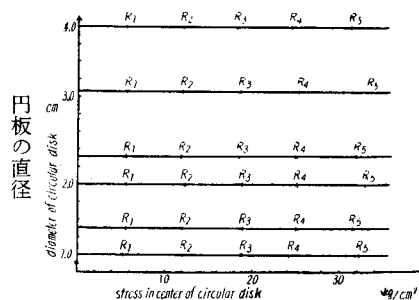
中心の応力 kg/cm^2 , フリンジ応力 kg/mm

縞 次 数	厚さ一定 0.825 cm						直径一定 約 2.5 cm					
	直 径						厚 さ					
	1.49 cm		2.41 cm		3.08 cm		0.590 cm		0.832 cm		1.175 cm	
	中 心 の 力	フ リ ン ジ 力	中 心 の 力	フ リ ン ジ 力	中 心 の 力	フ リ ン ジ 力	中 心 の 力	フ リ ン ジ 力	中 心 の 力	フ リ ン ジ 力	中 心 の 力	フ リ ン ジ 力
B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y ₁	2.7		2.9		2.8		3.5		3.0		2.2	
O ₁	3.9		4.0		4.4		6.3		3.9		3.5	
R ₁	5.5	0.90	5.6	0.92	5.6	0.92	7.6	0.90	5.6	0.92	4.2	0.98
G ₁	6.9		6.5		7.1		9.5		6.5		5.3	
Y ₂	8.5		8.3		8.8		12.1		8.3		6.4	
O ₂	10.4		10.1		10.2		14.6		10.1		7.9	
R ₂	11.2	0.92	11.7	0.96	12.0	0.98	16.4	0.96	11.7	0.98	8.8	1.02
G ₂	13.3		14.2		14.1		18.6		14.3		10.4	
Y ₃	14.9		15.5		15.7		21.3		15.5		11.7	
O ₃	16.4		16.4		17.2		23.5		16.5		13.8	
R ₃	18.9	1.02	18.4	1.02	18.3	1.02	25.6	1.00	18.4	1.02	13.7	1.08
G ₃	21.0		20.7		20.9		24.3		20.8		15.3	
Y ₄	22.0		22.5		22.7		30.9		22.5		16.8	
O ₄	23.5		23.2		23.6		32.3		23.3		17.3	
R ₄	25.3	1.04	24.8	1.02	25.3	1.04	34.2	1.00	24.8	1.02	18.2	1.06
G ₄	27.3		27.7		28.6		38.0		27.7		20.5	
Y ₅	29.1		28.6		30.0		39.9		28.6		21.7	
O ₅	30.0		30.3		31.2		41.4		30.3		22.6	
R ₅	31.5	1.04	31.7	1.04	33.2	1.10	43.4	1.02	31.7	1.04	23.5	1.10
G ₅	33.9		34.9		36.3		48.8		34.9		25.9	
平均	—	0.98 ₄	—	0.99 ₂	—	1.01 ₂	—	0.97 ₆	—	0.99 ₆	—	1.04 ₈



第8図 樹脂円板の直径一定(2.5cm)のときの樹脂の厚さの変化に対する縞次数と円板の中心部の応力との関係

第1表は光弾性樹脂の厚さ、直径を種々変えた場合の縞次数—中心部の応力、フリンジ応力の関係である。フリンジ応力を求める式において、この実験の場合、反射式であるから光路は倍、即ち円板の厚さを2倍とする。これらの関係を図示すれ

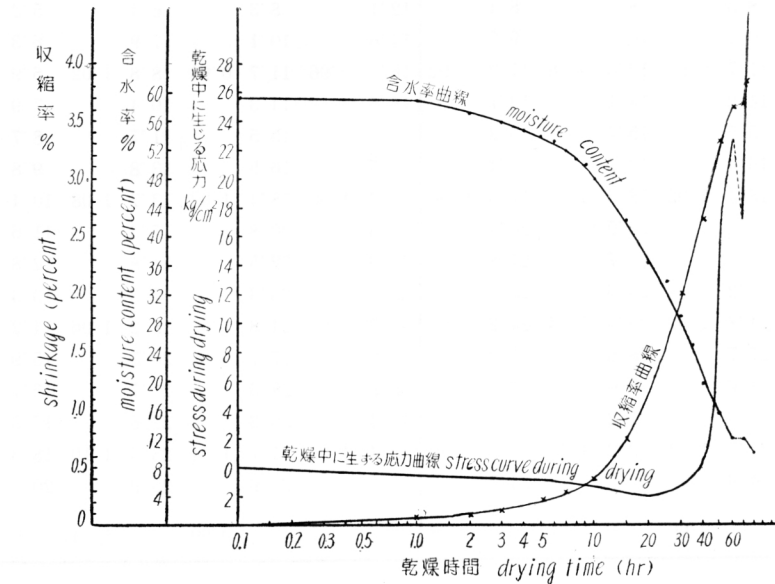


第9図 樹脂円板の厚さ一定(約0.832 cm)のとき、直径が種々変わる場合の縞次数と中心の応力との関係。

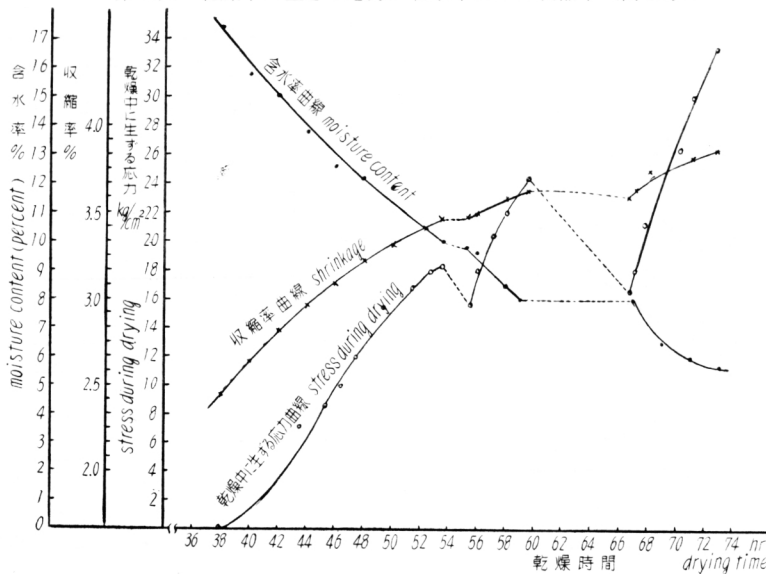
ば、第8図、および第9図のようになる。第8図は直径を一定(約2.5 cm)にして、厚さを種々変えた場合、円板の中心に現れる光弾性縞次数と円板中心の主応力差の関係であるが、厚さが厚い程感度が良くなっている。第9図は厚さを一定(約0.832 cm)にしたとき、直径を種々変えても、円板の中心部の主応力差と縞次数との関係は変化していない。もつとも、この測定器は大体縞次数が5次になると、感度が低下している。ここに $R_1, R_2, \dots$ の R は等色線が赤色であることを示し、又添字の 1, 2, 3... は縞次数を示している。(第1表の B, Y_1, O_1, R_1, G_1 は第一回目に現われた等色線の縞の色で、それぞれ黒, 黄, オレンジ, 赤, 緑の各色を, Y_2, O_2, R_2, G_2 は第2回目のそれらを示している。)

Ⅲ. 2. 乾燥中に生ずる応力の測定

第4図, 写真2の如く, 木材中に樹脂を埋設して木材を乾燥した場合の乾燥時間と乾燥中に生ずる

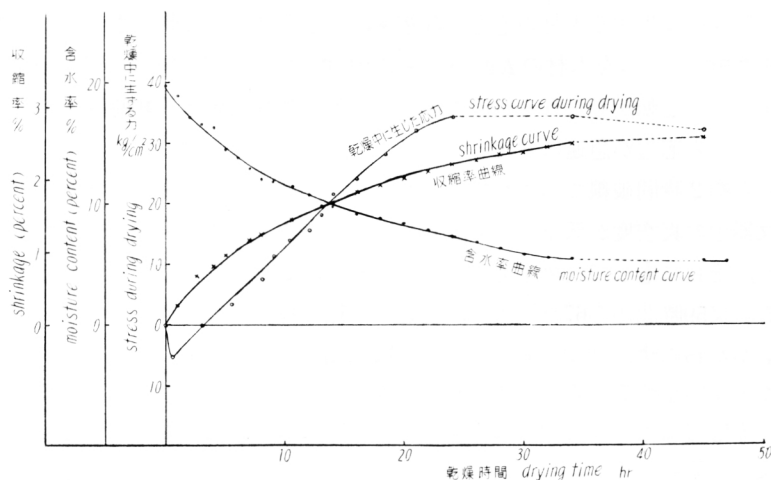


第10図 乾燥中に生ずる応力, 含水率および収縮率(樹脂厚さ 6mm)

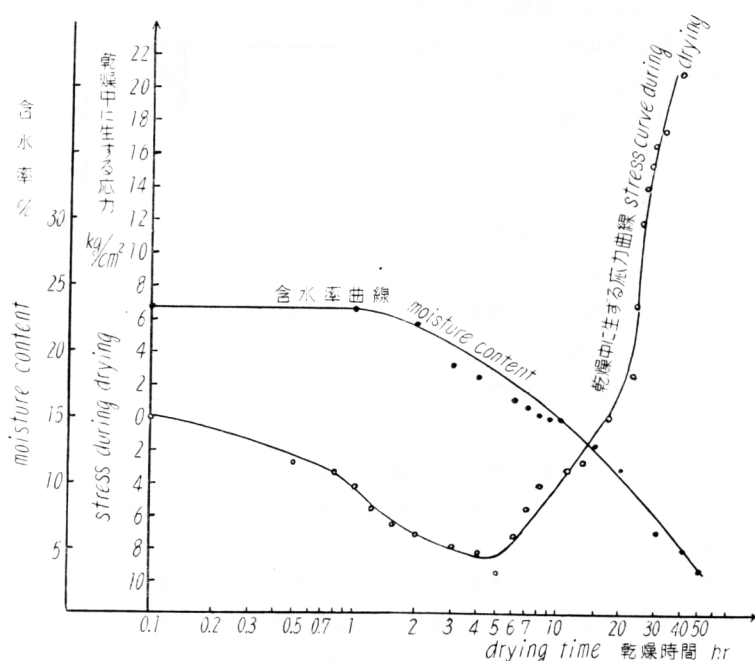


第11図 第10図の38時間以後の拡大図

応力との関係は第10図, 第11図, 第12図, 第13図に示される。第10図, 第11図は樹脂の厚さ6 mm, 第12図は樹脂の厚さ 8.9mm を第13図は樹脂の厚さ 15mm のものである。



第 12 図 乾燥中に生じた応力, 含水率, 収縮率と乾燥時間との関係
(樹脂厚さ 8.9 mm)



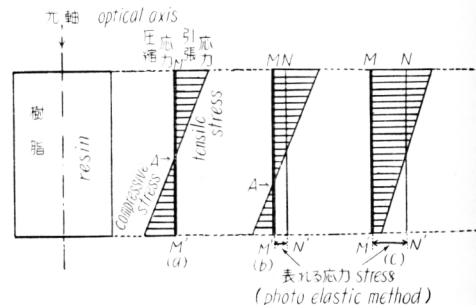
第 13 図 乾燥中に生ずる応力, 含水率と乾燥時間との関係
(樹脂厚さ 15 mm)

木材中に樹脂を埋設した試片を第2図の乾燥器中で乾燥するに従つて, 試片に埋設した樹脂の等色線がしだいに変化していく。この等色線の色から第1表を用いて, それぞれの応力が算出される。樹脂検定の際は集中荷重であるが, 乾燥中に生ずる応力は主として繊維直角方向から樹脂の周囲に相当に均一な応力が働いていることが縞模様から観察され, 前者の集中荷重の場合と等色線模様が相当に異なる。しかし検定で得た応力-等色線の間を縞模様の異なる乾燥応力に使用しうるのは, いかなる状

態の応力でも樹脂に発生する等色線の色と応力との関係は一義的に定められることにもとづく。このことはフリンジ応力からも明らかである。

第10図には、乾燥中に生ずる木材の応力、収縮率、含水率に対する時間を示した。これは前述のように樹脂の厚さ6mmのものを木材の表面から深さ6mm埋設したのであるから、表面から深さ6mmまでの応力経過で応力逆転が見られるが、この応力逆転は乾燥開始後約40時間で生じている。約40時間を経過した以後から応力が急速に変化している。これについては第11図に更に詳しく示した。第11図中53.5時間から約2時間破線で示されているが、この間は乾燥器を密閉したままで、木材の乾燥にともなつて乾燥器中の真空度が低下しても放置した区間である。この図から知られるように含水率はやや少なくなり、それに応じて収縮率も増加しているが、これに反してその間に応力は約 2.4kg/cm^2 に減少している。又59時間から67時間まで、前述と同様な操作を繰返すと含水率、収縮率はほとんど変化しないにもかかわらず、供試材の応力は約 8kg/cm^2 減少している。これらのことから、木材の乾燥を進めることを中止するならば、すなわち条件を緩めるならば、水分勾配が緩和し平均化して乾燥中に生じている応力は大いに緩和されるものと結論される。ただしここで水分勾配の経過を的確に掴むことが必要である。

前述のように応力逆転について光弾性樹脂を埋設した場合の考え方として、第14図に示すように図の光軸と示してある方向より光弾性測定器よりの光が入射する。ここでは応力は光軸に対し直角方向から加わっている。今(a)図に示された様にMM'に対し上部に引張応力が、下部に圧縮応力が加わっている場合でその強さが同じであれば、光弾性として応力状態は0である。今応力が(b)図の様に応力逆転位置Aが(a)図のAより移動したならば、全体として応力はMN N'M'として光弾性に現われる。又(c)図に於て圧縮応力が全くなり引張側に全部応力が移動するとMN N'M'即ち大きさはMNとしてあらわれる。(b)図でも同様にMNとして光弾性に応力があらわれるが、応力逆転位置Aはまだ樹脂中に存在している。



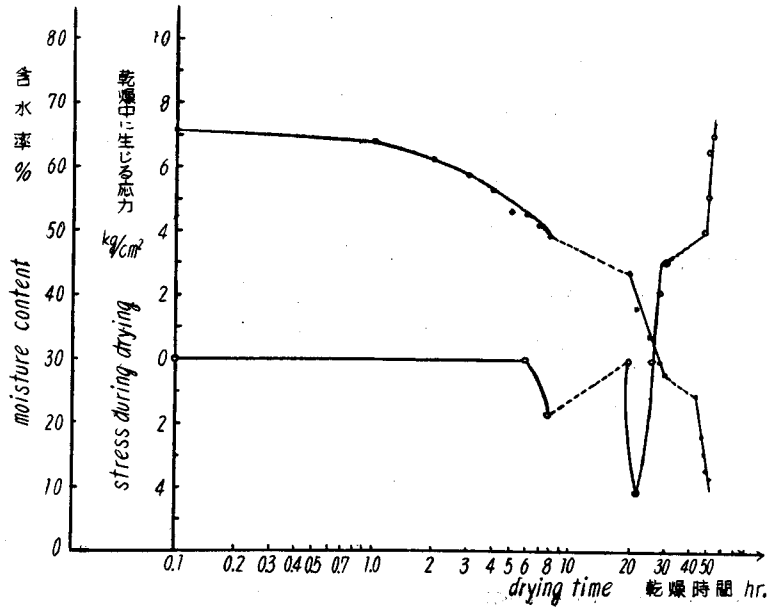
第14図 樹脂に応力が加わった場合光弾性に現われる応力の模式図

以上の説明からわかるように逆転位置は乾燥条件によつて変化するから乾燥中に生ずる応力を知るためには同一の木材試片中に厚さの異なる樹脂を数ヶ所に埋設しなければならない。

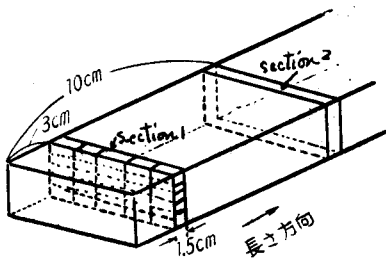
第12図は樹脂の厚さ8.9mmのものを木材中に埋設した場合、乾燥中に生じた応力、収縮率、含水率に対する時間の関係である。この図によれば乾燥中に生ずる応力は早期に応力が逆転している。次いで第13図では厚さ15mmの樹脂を埋設した場合の含水率、乾燥中に生ずる応力に対する時間の関係について示した。以上第10図より第13図までの応力の逆転時間がそれぞれ著しく異つていますが、この理由としてそれぞれ乾燥条件—初期含水率、真空度および真空乾燥運転法などが異なるためと思われる。

第15図は含水率が約50%になつた時、前述のように真空に保つて密閉したままで、排気を約13時間中止した時の経過である。この場合、乾燥中に生じた応力は減少してなくなり、再び20時間から30時間まで乾燥を進めると応力は急速に変化することを示している。

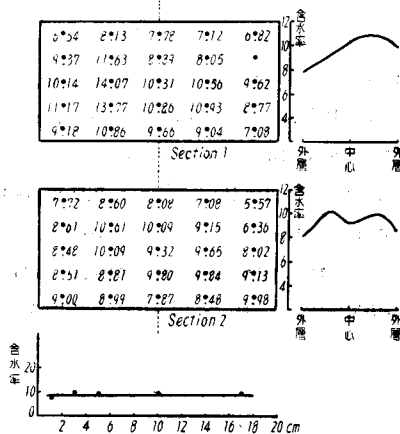
真空乾燥によつて生ずる水分勾配については第16図、b cに示される通りである。第16図は乾燥開始後24.5時間のもので、第17図は50時間後の水分分布である。これらの場合の応力、収縮率、含水率に対する時間の関係は省略するが、24.5時間では応力が 7.2kg/cm^2 、含水率14%、収縮率1%であり、



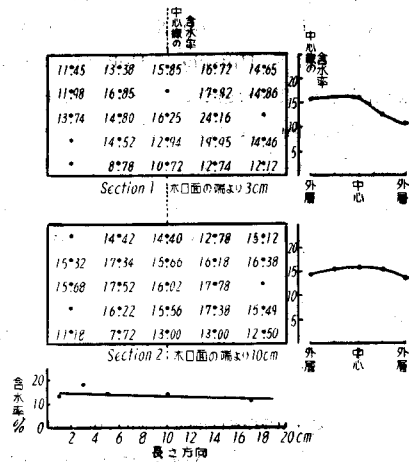
第 15 図 乾燥中に生ずる応力，含水率に対する乾燥時間との関係（樹脂厚さ 18mm）



第 16 図 a) 木材試片より水分分布用 Section の採り方



第 16 図 c) 試片の水分分布図（乾燥開始後50時間）



第 16 図 b) 試片の水分分布図（乾燥開始後24.5時間）図中の数字は含水率値（木取りは第3図と同じ）

50時間で $14\text{kg}/\text{cm}^2$ ，含水率約10%，収縮率約2%である。これら第16図 b) c) の関係を見ると水分勾配は通常の高湿乾燥に比して緩いことが知られる。

IV む す び

従来のスライスによる乾燥応力測定法のもつ欠点を除いて、より精密に応力を測定する目的で光弾性法による実験をおこなった。すなわち応力測定には中実円盤状アラルダイト樹脂を用い、木材試片中に埋設して反射式光弾性測定器により縞次数を求める。あらかじめ圧縮試験を行って求めた次数—応力関係は図8及び9にみるように樹脂の径によりあまり変化をうけないが、厚みには著しく影響される。木材の真空乾燥中に生ずる応力は第10図～第13図にみるように樹脂の埋設位置や乾燥条件の相違により、応力逆転などの時間的経過を異にする。これらの結果から光弾性法による乾燥応力測定の可能性は明らかに認められるが、その定量化には木材中に樹脂を埋設した場合の応力分布応力集中についてさらに研究しなければならない。又木材の収縮力が乾燥応力に同時にどれだけつけ加わっているか定量的に考慮する必要もある。

文 献

- 1) Tiemann H. D.; Wood Technology (1951)
- 2) 小倉武夫; 林試報, 77 (1955)
- 3) McMillen J. M.; F. P. J. 5. 1. (1955)
- 4) Youngs R. L. and C. B. Norris; F. P. J. Vol IX, No.10, (1959)
- 5) Ugoljew B. N.; Holz a. Roh-Werk. (1959)
- 6) Youngs R. L.; F. P. J. Vol X, No. 3. (1959)
- 7) Kolmann F. und R. Hiltcher; Holz als Roh-Werk. 13. No.6. (1955)
- 8) Kollmann F., R. Teichgräber und F. G. Kollmann; Holz als Roh-Werk (1960) pp 236~242.
- 9) 林 毅; Non-homogeneity in elasticity and plasticity. paper 18
- 10) 平松良雄, 丹羽義次, 岡行俊; 光弾性応力計による地圧の測定 水曜会誌第14巻1号. (昭和34年12月)
- 11) 応力測定技術研究会編; 応力測定法. (朝 倉 書 店)
- 12) Frocht M. M.; Photoelasticity Vol. 2.

Résumé

A photoelastic method is employed for the determination of the stress built up in Buna wood (*Fagus crenata* Blume) block during vacuum drying at 40°C. The photoelastic polariscope used is shown in Fig. 1 and in Photo 1, and the photoelastic test piece which is a disc of Araldite Casting Resin is laid in the wood block (Fig. 4 and Photo 2). The relation between the photoelastic fringe order and the stress at the center of the disc is previously estimated (Fig. 8, 9 and Table 1). As the block dries, the change of the photoelastic fringe pattern is observed in the disc. From this pattern, the stress is calculated and is plotted against drying time in Fig. 10~13 and 15.