

林 産 の 部

# 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

小 倉 武 夫<sup>(1)</sup>

## 1. 緒 言

筆者は昭和 28 年 2 月アメリカ合衆国ウイコンシン洲マジソン林産研究所に出張を命ぜられ、同研究所の Division of Timber Physics において J. M. McMillen 氏の指導により「木材乾燥中に生ずる乾燥歪みの温度による影響」について研究を行った。この研究内容の発表については、もとより同研究所の了解をえなければならぬが、幸に部長 Rietz 氏および McMillen 氏の厚意ある許可をえているので、ここに滞米中の実験内容を報告して、責任の一部を果たしたい。

マジソン林産研究所においては、木材をなるべく早く乾燥させるためのスケジュールについて研究を行い、そのためには乾燥中に生ずる材の歪み発生状況を明らかにしなければならないという見地につれて、すでに過去 18 カ年間にわたりこの問題について研究をつづけてきた。この研究に関する実験技術も次第に進歩を加え、その成果も木材乾燥の実用面に広く応用されはじめている。すなわち、Peck<sup>9)</sup> によつて現在の実験方法が発表され、乾燥によつておこる木材表面の引張歪みや内部の圧縮歪みが乾燥の進行につれてどんなに変わっていくかが明らかにされ、Blackgum の乾燥では乾燥歪みが逆転してからは空気の関係湿度を著しく低下させてもよいことが明らかにされた。Loughborough と Smith<sup>5)</sup> は Sweetgum の心材についてこれの補足的な研究をなし、その後 Rietz<sup>10)</sup> がこのような研究成果を応用して乾燥スケジュールをつくる考え方を発表し、1951 年に Torgeson<sup>12)</sup> がこの思想を用いてアメリカの主要樹種に対する新しいスケジュールを組立てているのである。しかし、すでに一応決めた乾燥スケジュールといつても決して改良の余地がないわけではなく、スケジュールを更に向上させるためには乾燥歪みの研究が一層必要であることはいうまでもない。このような見地で J. M. McMillen は数年前から oak について 110°F で乾燥した場合の乾燥歪みに関する研究を行い、すでに関係湿度による歪みの影響<sup>7)</sup>、および板幅による影響<sup>6)</sup> などについて実験を行つてきた。この研究はこれらの一環として計画されたもので、乾燥条件を同じに保つた場合乾燥歪みの変移状況が温度によつてどんなに影響をうけるかを検討し、乾燥スケジュールの温度を定める一つの手がかりを得ようと試みたものである。温度を高くすると木材の強さや弾性的性質も弱くなるけれども、水分移動は早くなり、乾燥を促進することができるわけである。しかし、木材の弾性的性質が温度によつてうける影響などについては未だほとんど明らかでないために、この方面からのスケジュール決定には多くの困難があるものと思われるが、このような研究の成果は将来において大いに期待されるものと思われる。

なお、この研究中の乾燥歪みに関する実験資料のなかから、帰場後において木材の水分拡散係数や水分伝導度の温度による影響を求めることができたので、併せてここに発表する。これらの計算には物理研究室大沼技官の労を煩わしたことを記し、同君に謝意を表す。

(1) 木材部木材々料科長

最後に、本報告の主体である乾燥歪みの測定およびその成果を乾燥スケジュールに結び付ける思想などはすべてマジソン林産研究所に主動性のあることを明確に付け加えておくとともに、この実験結果の発表に対し快く許可を与えられた Rietz, McMillen の両氏の厚意に対し謹んで感謝の意をあらわす次第である。

## 2. 実験方法

### 2.1. 供試材およびその取扱い

供試材は南部ウイコンシン洲産の Red oak (*Quercus borealis*) で伐採後幅約 1 ft., 厚さ 2 $\frac{1}{2}$  in. の板に製材したのち、低温 (30°F) 高湿の貯蔵庫のなかで生材水分の蒸発を防ぐように時々散水し、カンバスでおおつたまま約 1 年放置したものである。それでも若干の水分蒸発はまぬがれなかつたようであるが、この板を 2"×7" に鉤けずりしたので表面のいく分乾燥した部分は削りとられ、いずれも約 80% の含水率であつたので、生材の状態を保つていたものと思われる。このような供試木を 4 個えらび、その各々の表面、側面を鉤けずりしたのち、両木口から 3 in. のところで含水率および水分分布測定のための試験片 (7"×1"×2") をとりそれぞれの目的に供した。つぎにこの供試材から第 1 図に示したように長さ 1 in. の歪み測定の供試片の位置 (歪試験片) を 2 in. ごとにマークし、さらにその 3 個ごとに長さ 1 in. の別の試験片をしるしてこれを水分分布の測定に供した。ただ最初の歪試験片だけは木口より 3 in. のところにマークして、なるべく木口面から蒸発していた影響を除くようにつとめた。このような試験片はどの供試木に対しても 16~18 個づつマークすることができた。なお、各試験片について第 1 図に示したように厚さの方向に 10 等分して薄片のマークをつけ、薄片の幅を測定するのに便ならしめた。

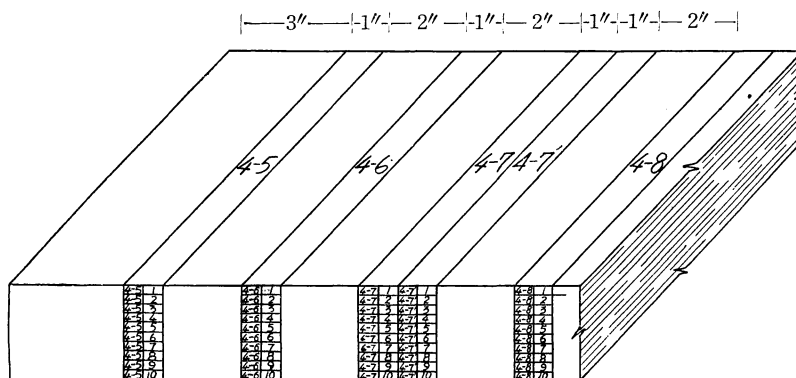


Fig. 1. Method of marking test specimens.

このようなマークを終つたのち、全重量を測定し、さらに各歪試験片の薄片の幅をダイヤルゲージ (0.001") を特殊な金具につけたもの (第 3 図参照) で測定して乾燥前における値とした。もちろん、このような記号つけ、測定などの中には、たえず表面を湿布でおおつて水分蒸発を防いだ。

### 2.2. 乾燥経過

実験に用いた乾燥装置は第 2 図に示した インターナル・ファン型で風速は 250~400 ft./min., 熱源は蒸気であり、温湿度は Foxboro の記録式自動調節器で制御されているが、湿度調節には特に木片の湿度による伸縮を利用した湿度計 (Wood Element Hygrostat) が用いられ、更に湿度の調節には排気筒ダンパーの開閉が併用されている。実際に操作してみたところでは、温湿度ともに調節はごく鋭敏であり、取扱方も容易であつた。

この実験に用いた温度は95°, 110°, 125° および 140°F で、ただ 95°F の場合だけは乾燥経過の後半で関係湿度を所定のように低く保つことができなかったため、乾球温度を 99°F にまで上げざるをえなかった。乾燥スケジュールの乾球温度は上述の4種を用いたが、湿球温度については、空気の木材水分を蒸発させる力が温度のいかにかわかわらず同じになるように決めた。換言すれば各温度において同じ平均含水率に対しては室内空気が同じ平衡含水率をたもつ

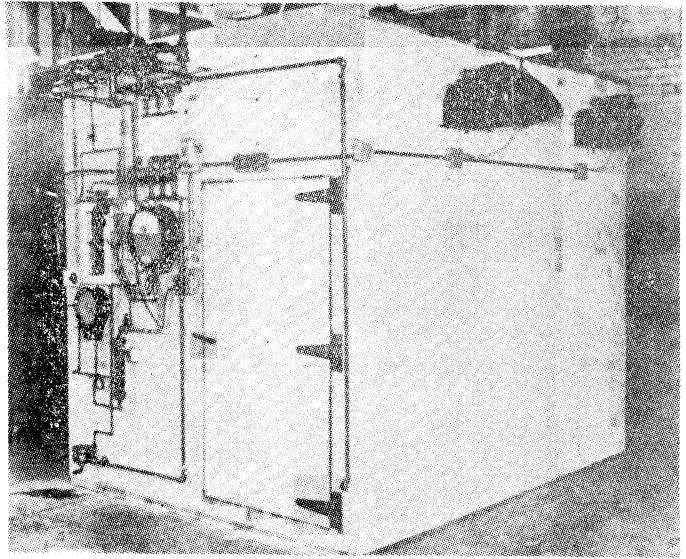


Fig. 2. Small dry kiln used in this study.  
(M 72533 F, F. P. L., U. S. A.)

ようにしたのである。そして、木材の蒸発しうる水分量“E”がある値に低下したときに空気の条件、すなわち乾湿球温度差を次第に大きくして、平衡含水率が低くなるようにした。Eの値は

$$E = \frac{\text{そのときの含水率} - \text{平衡含水率 (E.M.C.)}}{\text{初期含水率} - \text{平衡含水率 (E.M.C.)}}$$

で計算され、空気の条件をかえたときの E-値およびそのときの空気の平衡含水率はほぼ次のごとくである。

| E-値       | E. M. C. (%) | E-値       | E. M. C. (%) |
|-----------|--------------|-----------|--------------|
| 1.00~0.60 | 18.0         | 0.38~0.30 | 9.2          |
| 0.60~0.52 | 16.9         | 0.30~0.25 | 6.3          |
| 0.52~0.45 | 15.1         | 0.25~0.20 | 4.4          |
| 0.45~0.38 | 13.0         | 0.20 以下   | 2.0          |

すなわち、乾燥の経過中に供試材をとり出し、重量を測定し、歪み試験片を切断して、木口をアルミニウム粉末の溶液で塗布したのち、再び重量を測定して乾燥室に入れるが、このとき E-値を計算して、それが空気の条件をかえるべき値になっているときに上表の平衡含水率に相応する乾湿球温度差にかえたのである。

### 2.3. 乾燥歪みの測定

供試材から乾燥の各段階において切りとつた歪み試験片は直ちにアルミニウム膜紙でつつんで木口面からの蒸発を防ぎ、予めマークした各位置における試験片の幅を測定したのち(第3図参照)、薄鋸で薄片に10等分する。もちろんこのさいも各薄片を直ちにアルミニウム膜紙でつつみ(第4図)、その他冷却を防ぐため乾燥室と同温度の板にはさむなど、水分蒸発を防ぐためできるだけの方法を講じて、各薄片の幅およびその重量を測定した。歪み試験片の表面に近い薄片は鋸断と同時に反るので、幅は指でおさえて平らにしたのち測定した。

この試験片の鋸断前後における幅の差が乾燥によつてうけていた応力の種類とその程度を示すことにな

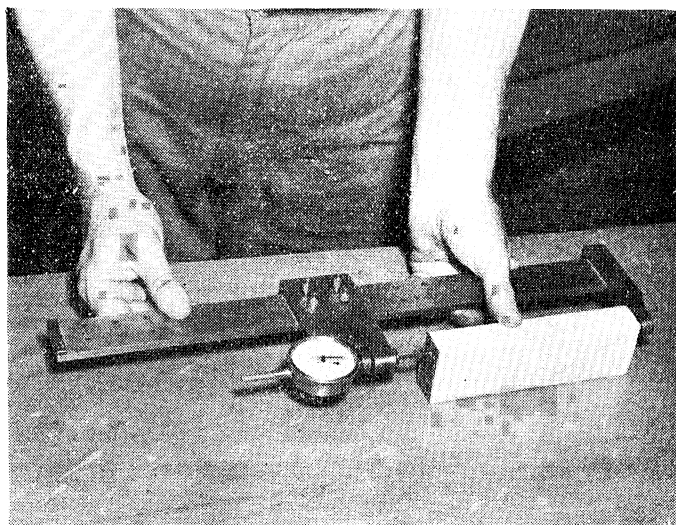


Fig. 3. Measurement of slices in section before cutting. (M 98933 F, F. P. L., U. S. A.)

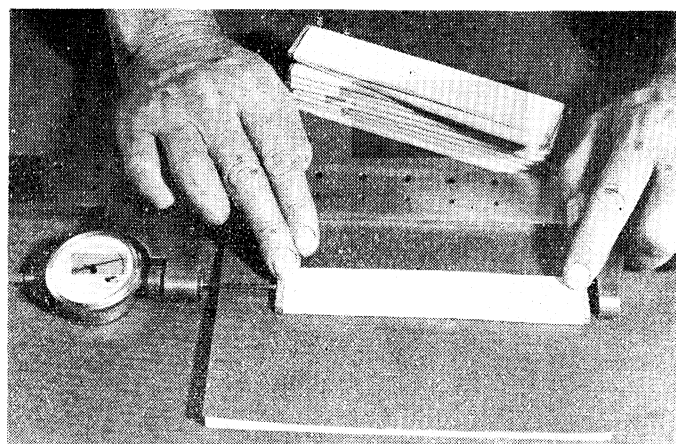


Fig. 4. Remesurement of slices after cutting. (M 90103 F, F. P. L., U. S. A.)

る。すなわち、鋸断後の幅が前よりちぢんでせまくなつたときは引張応力をうけていたことになり、伸びて広がつたときは圧縮応力をうけていたことを示す。

重量の測定をおえた各薄片は絶乾にして含水率を測定しなければならないが、このさい急激な乾燥をすると材が正常な収縮をしないので、これを防ぐため各薄片を 0.1 in. 位の棧木を用いて棧積みし、紐で両端をゆるくしばり、これを 95°F、85% 程度で 1 昼夜乾燥し、さらに 1 昼夜室温に放置したのち 215°F の恒温器中で乾燥して絶乾状態にいたらしめ、デシケーター中で室温まで冷却してから再び重量と幅を測定した。かかる乾燥法はすでに予備実験によつて適当な満足すべき方法であることが認められていたので、このように行つたのである。なお、歪み変化の緩急が温度によりことなるため、とくに乾燥初期において温度 140°F のときは毎日、

温度の低いその他のときは 2~3 日ごとに歪試験片を鋸断して歪みを測定した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1. 水分移動性と温度の関係

##### a. 乾燥経過について

各温度における乾燥経過をまとめて第5図に示した。これらは、それぞれの時刻において切りおとした歪試験片を実際に絶乾してその含水率を測定して求めたものである。どの温度においても乾燥室内の空気条件を“E”の値に対して同じ平衡含水率をたもつように調節したにもかかわらず、明らかに温度の高いほど乾燥速度がはやくなっている。

各乾燥経過曲線からいろいろの含水率における乾燥速度（ある含水率における経過曲線の接線をもつて

あらわす)を图示すると第6図のようである。すなわち、乾燥のごく初期だけは恒率的に含水率が減少するものと想像されるが、その後は次第に乾燥速度が減少し、含水率 50~60%からは再び恒率的のごとくほとんど一定の乾燥速度をもつて最終まで進行している。これは、なるべく速やかに乾燥するように、すなわち

直線的に含水率を低下させるようにスケジュールをまとめたためであると思われる。いずれにしても乾燥歪みの温度による影響を知ることがこの実験の目的であったため、ここでこの乾燥経過について特に論ずることはさしひかえたい。ただ恒率乾燥に相当するごく乾燥初期における速度が温度によつてかなり影響されていることはみうけられる。今乾燥初期における1日あたりの減少含水率(乾燥速度)と温度との関係を图示すると第7図のごとく、直線に近い関係にあるようである。

b. 恒率乾燥の表面蒸発係数

恒率乾燥における乾燥速度は一般に次の式であらわされる。

$$\frac{dw}{A \cdot dt} = \alpha(p_w - p_0) \dots \dots \dots (1)$$

または、

$$\frac{du}{dt} = \frac{2}{l} \cdot \frac{100}{r_0} \cdot \alpha(p_w - p_0) \dots \dots \dots (2)$$

ただし、 $\frac{dw}{dt}$ : 重量の減少速度、 $\frac{du}{dt}$ : 含水率の減少速度、 $l$ : 厚さ (cm)、 $r_0$ : 絶乾比重 (g/cm<sup>3</sup>)、 $p_w$ : 木材表面における蒸気圧 (mmHg)、 $p_0$ : 外周空気の蒸気圧 (mmHg)、 $\alpha$ : 表面蒸発係

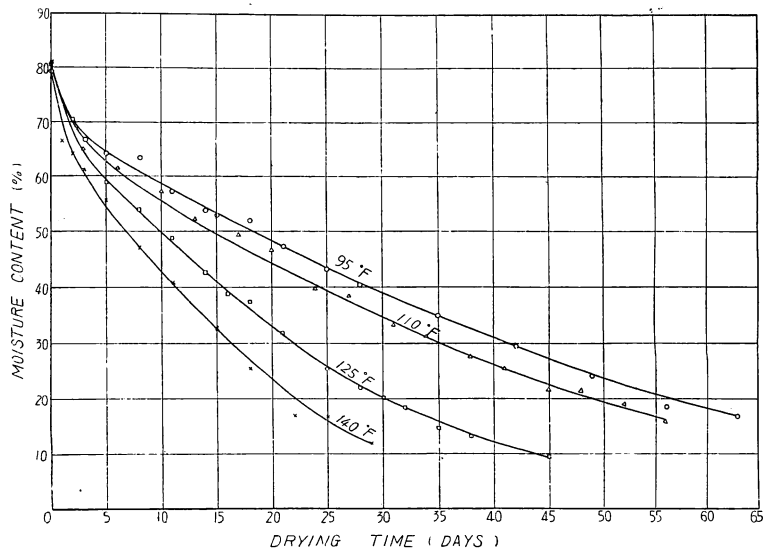


Fig. 5. Drying curves for Red Oak specimens dried at indicated temperatures.

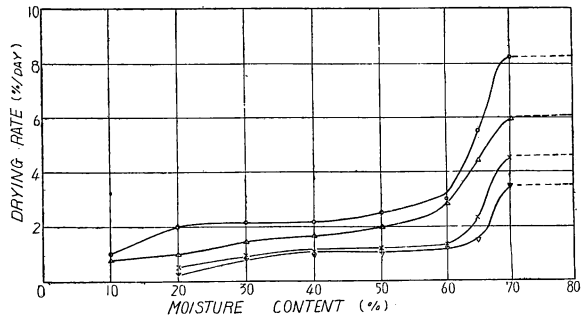


Fig. 6. Drying rate at various moisture content.

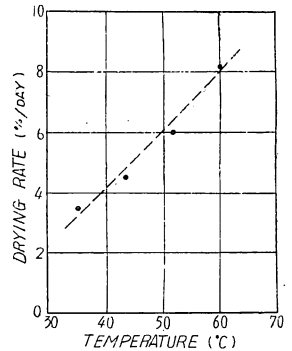


Fig. 7. Effect of temperature on drying rate at constant drying rate.

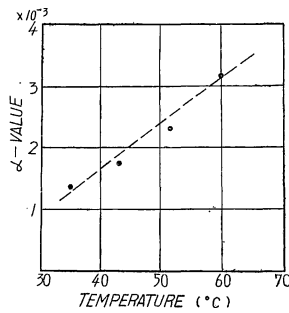


Fig. 8. Effect of temperature on surface evaporation coefficient.  
( $\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}$ )

数 ( $\text{g}/\text{h} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mmHg}$ ),  $A$ : 表面積 ( $\text{cm}^2$ )

したがって、この実験のように ( $p_w - p_a$ ) を温度にかかわらず同じに保つたのに、乾燥速度のことは表面蒸発係数  $\alpha$  および水分の移動係数の値が温度によつて影響をうけていると解釈せざるをえない。寺沢、大沼<sup>13)</sup>の実験によると風速のある場合でも  $\alpha$  の値は温度と共に若干大きくなつている。今 (2) 式に各温度に対する乾燥速度、比重 ( $\rho = 0.63$ ) をいれて  $\alpha$  と温度の関係を求めてみると ( $\Delta p = 1.7 \text{ mmHg}$ ), 第8図のごとく相当明確な関係がみられるが、これらの問題については今後の研究にまわしたい。従来  $\alpha$  の値を直接求めたのは温度  $50^\circ\text{C}$  の場合だけである。第8図から  $50^\circ\text{C}$  における  $\alpha$  の値を求めると  $2.1 \times 10^{-3} \text{ g}/\text{h} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mmHg}$  となるが、既往の風速のないときの値は  $3.58 \times 10^{-3}$

であるから、既往の値が正しいとすればここに求めた値は若干小さいといわなければならない。しかし、ここで求めた各温度における恒率乾燥速度の絶対値そのものの正確さについても問題があり、供試片の厚さもことなるので、これらの値の妥当性についてはふれられない。ただ、ここで求めた値もほぼ似た値であり、温度とは著しい関係にあることだけを報告しておく。

c. 水分拡散係数

木材の水分拡散係数は、すでに報告したように、Egner の方法によつて水分分布の時間的な変化が分

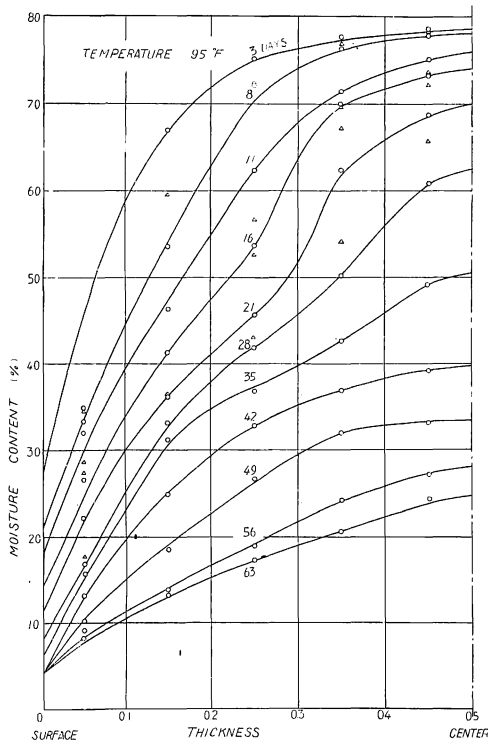


Fig. 9. Moisture distribution at various stages of the drying process dried at temperature of  $95^\circ\text{F}$ .

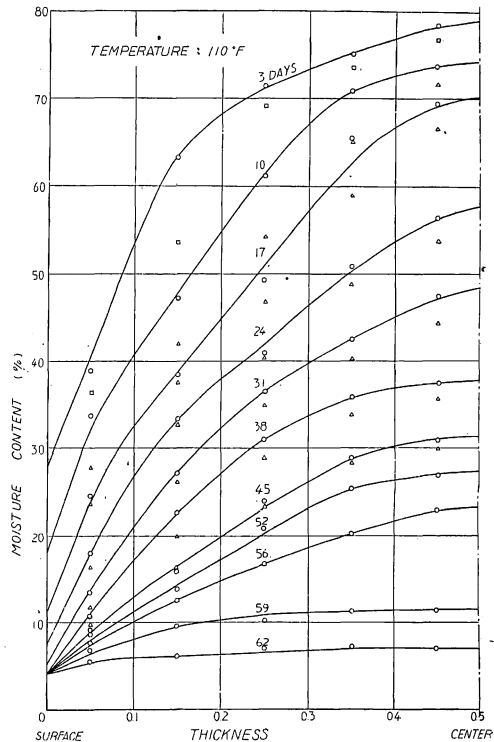


Fig. 10. Moisture distribution at various stages of the drying process dried at temperature of  $110^\circ\text{F}$ .

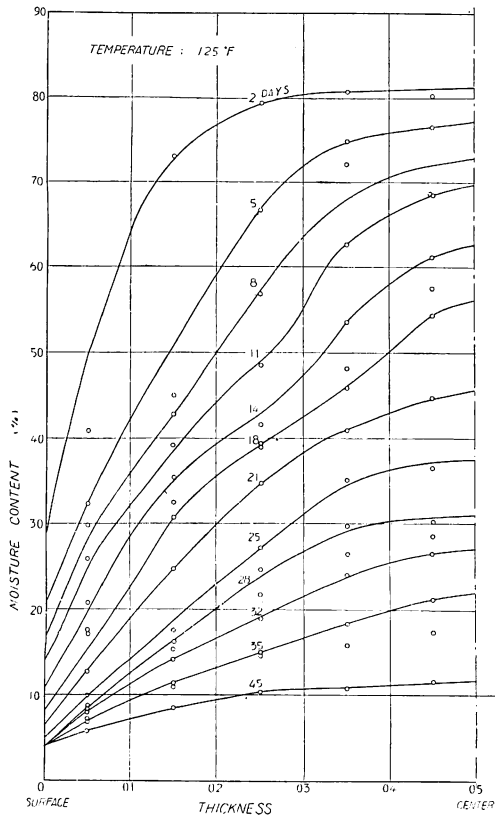


Fig. 11. Moisture distribution at various stages of the drying process dried at temperature of 125°F.

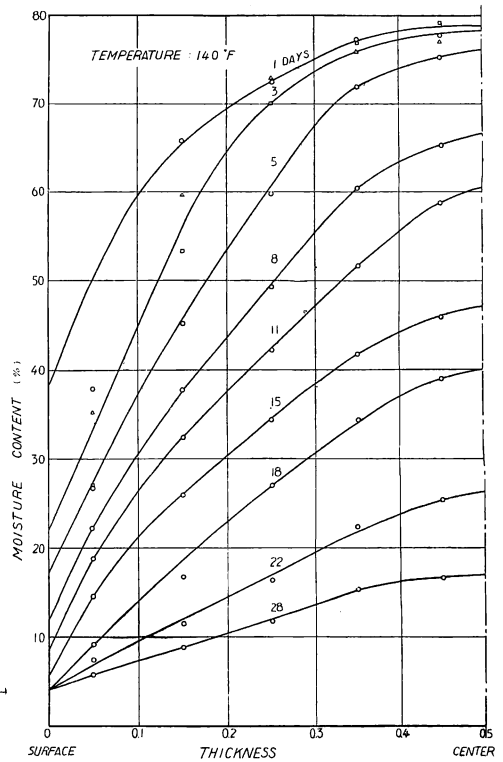


Fig. 12. Moisture distribution at various stages of the drying process dried at temperature of 140°F.

つておれば図上で求められる。すなわち、拡散係数  $\lambda$  は次式であらわされ、この分子は水分分布曲線が

$$\lambda = \frac{r_0}{100} \cdot \frac{\frac{\partial}{\partial t} [\int u \cdot dx]}{\frac{du}{dt}} \text{ (g/cm} \cdot \text{h} \cdot \%)$$

ら各時刻における  $[\int u \cdot dx]$  を求め、その線上において時刻で微分すれば求められ、分母は水分分布曲線から直接知ることができるので、 $\lambda$  の値が計算されるわけである。

この実験では、乾燥の進行にともなつて切断した歪測定用試験片の重量が測定してあるので、これから水分分布の時間的な変化を知ることができる。第9~12図は各温度における水分分布の乾燥にともなう変化を示したものである。これらの図から Egner の方法によつて拡散係数を求めた。この値はすでに報告したように材中のいろいろな位置に対して求められるが、材の中心部と表面との間における値が最も妥当と思われるので、ここではこの位置における値をもつて拡散係数とみなし、各含水率との関係を求めて第13図に示した。いずれも含水率の減少にともない若干の変動をまぬがれないが、概略的にはまず一定値とみなしてよいものと思われる。

このようにして求めた拡散係数  $\lambda$  と温度との関係を第14図に示したが、 $\lambda$  の値は明らかに温度の上昇とともに増加している。ここではこれらの関係を直線でむすんでみたが、直線であるかどうかは今のとこ



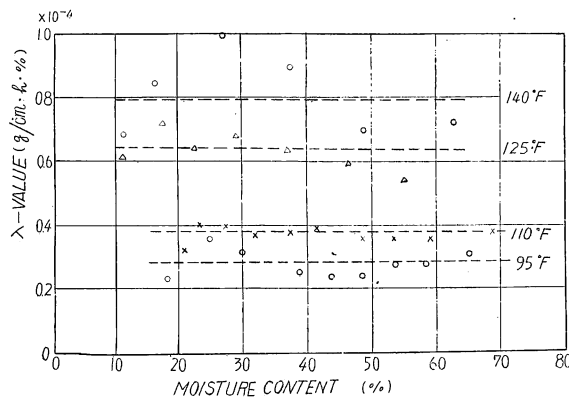


Fig. 13. Relation between moisture content and diffusion coefficient at different temperatures.

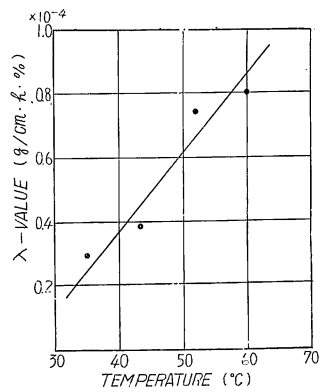


Fig. 14. Effect of temperature on diffusion coefficient.

る断言できない。ただ、外気の乾燥条件をいろいろの温度で同一に保つておいても、温度が高くなると拡散係数が大きくなることだけは言えるであろう。

d. 水分伝導度

木材中の水分移動は含水率が繊維飽和点以下だと以上たるとを問わず、水分拡散方程式  $\partial u/\partial t = K \partial^2 u/\partial x^2$  にしたがって、乾燥速度が恒率乾燥、減率第一、第二乾燥の各段階に変化するにつれて境界条件をそれぞれに適するように決めれば各乾燥速度における水分伝導度 ( $K_1, K_2, K_3$ ) が求められることをすでに報告した\*。この方法によつて各温度における乾燥経過からこれらの  $K$  の値を求めてみる。

(i)  $K_1$

$K_1$  は附録の (13, 14) 式を用いて計算することができる。この式中の  $A$  の値は温度のいかんをとわず乾燥のための条件が同じであるから、各温度とも同一の値をとるものとみなして差支えなく、水分分布曲

Table 1.  $K_1$ -values at various temperatures.

| Time    | $K_1$ (cm <sup>2</sup> /h) |       |       |       |
|---------|----------------------------|-------|-------|-------|
|         | 140°F                      | 125°F | 110°F | 95°F  |
| 15 h    | 0.082                      | 0.056 | 0.041 | 0.040 |
| 24      | 0.060                      | 0.048 | 0.030 | 0.022 |
| Average | 0.071                      | 0.052 | 0.035 | 0.031 |

線による表面層含水率の低下状態、および恒率乾燥における表面蒸発係数より算出される値などを考慮して  $A = -1.8(\%/h)$  とおいた。この値を用いて (13) 式から  $K_1$  を求めるとそれぞれ第1表の値をえた。明らかに温度の上昇とともに  $K_1$  の値は大きくなる傾向がうかがわれる。

(ii)  $K_2, K_3$

減率乾燥における  $K$  の計算には境界条件である (16) 式の係数  $B$  および  $C$  の値をもとめなければならない。 $B$  は恒率乾燥から減率の状態へ移行するときの表面含水率、言いかえると繊維飽和点附近の含水率と乾燥過程の最終段階における外周条件に対する平衡含水率とによつて決められるものであり、 $C$  は樹種、厚さなどによつて決められる値である。しかし、水分伝導度を計算する (26) 式では  $B, C$  の係数が

\* 木材の乾燥機構に関する研究 第6報 水分拡散方程式の解 (林業試験場研究報告第54号) に報告した式のうち、(5) 式より (28) 式までに計算の誤りがあつたので、この報告の附録において、これを訂正する。

それぞれ単独に必要なものでなく、乾燥の進行にともなう表面含水率の減少経過として必要であるため、ここでは水分分布の時間的な変化の状態から表面含水率が繊維飽和点附近たる含水率 30% に達したときと最終段階である外周条件に対する平衡含水率に達したときとを定め、それらの間は指数曲線的に減少し

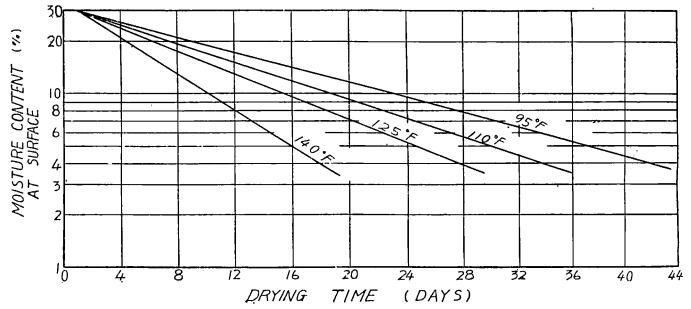


Fig. 15. Computed decreasing courses at first decreasing drying rate for the surface moisture content of the specimens dried at indicated temperatures.

Table 2. Calculation of  $K_2$  and  $K_3$  at 95°F.

| Drying rate | Drying time $t_0$ (h) | Time for calculation $t$ (h) | $u_m$<br>% | $u_s$<br>% | $u_m - u_s$<br>% | $\frac{u_m - u_s}{P} \times \frac{\pi^2}{8}$ | $\frac{Kt}{(\frac{l}{2})^2}$ | $\frac{t}{(\frac{l}{2})^2}$ | $K$<br>( $\frac{cm^2}{h}$ ) |
|-------------|-----------------------|------------------------------|------------|------------|------------------|--|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1st         | 144                   | 118                          | 63.3       | 23.0       | 40.3             | 0.724  | 0.130                        | 18.9                        | $6.9 \times 10^{-3}$        |
|             | 336                   | 310                          | 54.2       | 15.5       | 38.7             | 0.703  | 0.142                        | 49.5                        | 2.9                         |
|             | 528                   | 502                          | 46.6       | 10.5       | 36.1             | 0.656  | 0.170                        | 80.2                        | 2.1                         |
|             | 720                   | 694                          | 39.0       | 7.2        | 31.8             | 0.577  | 0.223                        | 111.0                       | 2.0                         |
|             | 912                   | 886                          | 31.7       | 4.8        | 26.9             | 0.489  | 0.290                        | 142.0                       | 2.0                         |
| 2nd         | 1008                  | 982                          | 23.6       | 4.0        | 24.6             | 0.447  | 0.325                        | 157                         | 2.1                         |
|             | 1104                  | 1078                         | 25.7       | 4.0        | 21.7             | 0.395  | 0.376                        | 172                         | 2.2                         |
|             | 1200                  | 1174                         | 23.0       | 4.0        | 19.0             | 0.345  | 0.432                        | 188                         | 2.3                         |
|             | 1296                  | 1270                         | 20.8       | 4.0        | 16.6             | 0.305  | 0.482                        | 203                         | 2.4                         |
|             | 1392                  | 1366                         | 18.8       | 4.0        | 14.8             | 0.269  | 0.535                        | 219                         | 2.4                         |
|             | 1488                  | 1462                         | 17.2       | 4.0        | 13.2             | 0.240  | 0.579                        | 234                         | 2.5                         |

$$K_3 = 2.31 \times 10^{-3}$$

Table 3. Calculation of  $K_2$  and  $K_3$  at 110°F.

| Drying rate | Drying time $t_0$ (h) | Time for calculation $t$ (h) | $u_m$<br>% | $u_s$<br>% | $u_m - u_s$<br>% | $\frac{u_m - u_s}{P} \times \frac{\pi^2}{8}$ | $\frac{Kt}{(\frac{l}{2})^2}$ | $\frac{t}{(\frac{l}{2})^2}$ | $K$<br>( $\frac{cm^2}{h}$ ) |
|-------------|-----------------------|------------------------------|------------|------------|------------------|--|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1st         | 48                    | 21                           | 70.5       | 28.0       | 42.5             | 0.765  | 0.107                        | 3.36                        | $32.0 \times 10^{-3}$       |
|             | 144                   | 117                          | 61.5       | 22.0       | 39.5             | 0.710  | 0.138                        | 18.7                        | 7.4                         |
|             | 336                   | 309                          | 52.0       | 13.5       | 38.5             | 0.692  | 0.149                        | 49.5                        | 3.0                         |
|             | 528                   | 501                          | 42.5       | 8.3        | 34.2             | 0.615  | 0.197                        | 80.2                        | 2.5                         |
|             | 720                   | 693                          | 34.0       | 5.1        | 28.9             | 0.520  | 0.265                        | 111                         | 2.4                         |
| 2nd         | 816                   | 789                          | 30.5       | 4.0        | 26.5             | 0.476  | 0.300                        | 126                         | 2.4                         |
|             | 912                   | 885                          | 27.0       | 4.0        | 23.0             | 0.413  | 0.358                        | 141                         | 2.5                         |
|             | 1038                  | 981                          | 24.0       | 4.0        | 20.0             | 0.359  | 0.415                        | 157                         | 2.6                         |
|             | 1104                  | 1077                         | 21.8       | 4.0        | 17.6             | 0.320  | 0.463                        | 172                         | 2.7                         |
|             | 1200                  | 1173                         | 19.8       | 4.0        | 15.8             | 0.284  | 0.510                        | 187                         | 2.7                         |

$$K_3 = 2.58 \times 10^{-3}$$

Table 4. Calculation of  $K_2$  and  $K_3$  at 125°F.

| Drying rate | Drying time<br>$t_0$ (h) | Time for calculation<br>$t$ (h) | $u_m$<br>% | $u_s$<br>% | $u_m - u_s$<br>% | $\frac{u_m - u_s}{P} \times \frac{\pi^2}{8}$ | $\frac{Kt}{(\frac{l}{2})^2}$ | $\frac{t}{(\frac{l}{2})^2}$ | $K$<br>( $\frac{cm^2}{h}$ ) |
|-------------|--------------------------|---------------------------------|------------|------------|------------------|--|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1st         | 48                       | 20                              | 70.0       | 28.0       | 42.0             | 0.790  | 0.095                        | 3.2                         | $30.0 \times 10^{-3}$       |
|             | 144                      | 116                             | 58.0       | 20.0       | 38.0             | 0.714  | 0.137                        | 18.5                        | 7.4                         |
|             | 240                      | 212                             | 50.5       | 15.0       | 35.5             | 0.666  | 0.163                        | 33.9                        | 4.8                         |
|             | 336                      | 308                             | 43.0       | 11.0       | 32.0             | 0.601  | 0.205                        | 49.3                        | 4.2                         |
|             | 432                      | 404                             | 36.5       | 8.2        | 28.3             | 0.532  | 0.255                        | 64.6                        | 3.9                         |
|             | 528                      | 500                             | 29.6       | 6.1        | 23.5             | 0.442  | 0.330                        | 80.0                        | 4.1                         |
| 2nd         | 624                      | 596                             | 24.0       | 4.5        | 19.5             | 0.366  | 0.407                        | 95.4                        | 4.3                         |
|             | 720                      | 692                             | 19.5       | 4.5        | 15.0             | 0.282  | 0.515                        | 111.0                       | 4.6                         |
|             | 816                      | 788                             | 15.6       | 4.5        | 11.1             | 0.209  | 0.635                        | 126.0                       | 5.0                         |
|             | 912                      | 884                             | 12.8       | 4.5        | 8.3              | 0.156  | 0.750                        | 141.0                       | 5.3                         |
|             | 1008                     | 990                             | 10.5       | 4.5        | 6.0              | 0.113  | 0.887                        | 158.0                       | 5.6                         |

$$K_3 = 4.96 \times 10^{-3}$$

Table 5. Calculation of  $K_2$  and  $K_3$  at 140°F.

| Drying rate | Drying Time<br>$t_0$ (h) | Time for calculation<br>$t$ (h) | $u_m$<br>% | $u_s$<br>% | $u_m - u_s$<br>% | $\frac{u_m - u_s}{P} \times \frac{\pi^2}{8}$ | $\frac{Kt}{(\frac{l}{2})^2}$ | $\frac{t}{(\frac{l}{2})^2}$ | $K$<br>( $\frac{cm^2}{h}$ ) |
|-------------|--------------------------|---------------------------------|------------|------------|------------------|--|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1st         | 96                       | 69                              | 58.0       | 21.0       | 37.0             | 0.740  | 0.122                        | 11.0                        | $11.1 \times 10^{-3}$       |
|             | 192                      | 165                             | 48.5       | 13.0       | 35.5             | 0.710  | 0.137                        | 26.4                        | 5.2                         |
|             | 288                      | 261                             | 39.0       | 8.0        | 31.0             | 0.620  | 0.193                        | 41.7                        | 4.6                         |
|             | 384                      | 357                             | 30.0       | 5.0        | 25.0             | 0.500  | 0.280                        | 57.2                        | 4.9                         |
| 2nd         | 432                      | 405                             | 25.0       | 4.0        | 21.0             | 0.420  | 0.350                        | 64.9                        | 5.4                         |
|             | 480                      | 453                             | 20.8       | 4.0        | 16.8             | 0.336  | 0.443                        | 72.5                        | 6.1                         |
|             | 528                      | 501                             | 16.5       | 4.0        | 12.5             | 0.250  | 0.562                        | 80.1                        | 7.0                         |
|             | 576                      | 549                             | 14.4       | 4.0        | 10.4             | 0.208  | 0.635                        | 87.8                        | 7.2                         |
|             | 672                      | 645                             | 11.6       | 4.0        | 7.6              | 0.152  | 0.760                        | 103.2                       | 7.4                         |

$$K_3 = 6.62 \times 10^{-3}$$

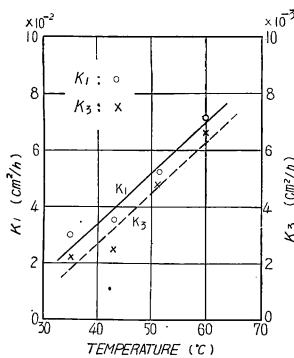


Fig. 16. Effect of temperature on  $K_1$  and  $K_3$ .

たとして第 15 図に示したような表面含水率  $u_s$  の減少経過をとるものとした。この経過が求められると平均含水率の減少経過さえ分れば (27) 式によつて水分伝導度  $K_2$ ,  $K_3$  を計算することができる。第 2~5 表にこれらの計算値を示した。 $K_3$  は各時刻に対してほぼ一定の値であるが、 $K_2$  の値は次第に減少する傾向を示した。この傾向は恒率乾燥時の  $K_1$  から減率第 2 の  $K_3$  に移行するまでの過渡期としてむしろ当然であると考えられる。したがつて、ここで水分伝導度と温度との関係に言及する場合には、ほぼ一定値とみられる  $K_1$  と  $K_3$  とにかぎつておきたい。第 16 図はこれらの関係を示したものであるが、いずれも温度の上昇とともに増大の傾向があるが、概略的には直線に近い関係とみなされよう。

以上の各項でのべたごとく、空気の乾燥に対する条件を木材の同一平均含水率に対して同じ平衡含水率にたもつようにしても、木材の水分拡散係数や水分伝導度は温度が高くなるほど大きくなる結果をえた。このことは木材乾燥技術の改良に一つの示唆を与えるものと思われる。

### 3.2. 乾燥歪み

#### a. 乾燥歪みの変移

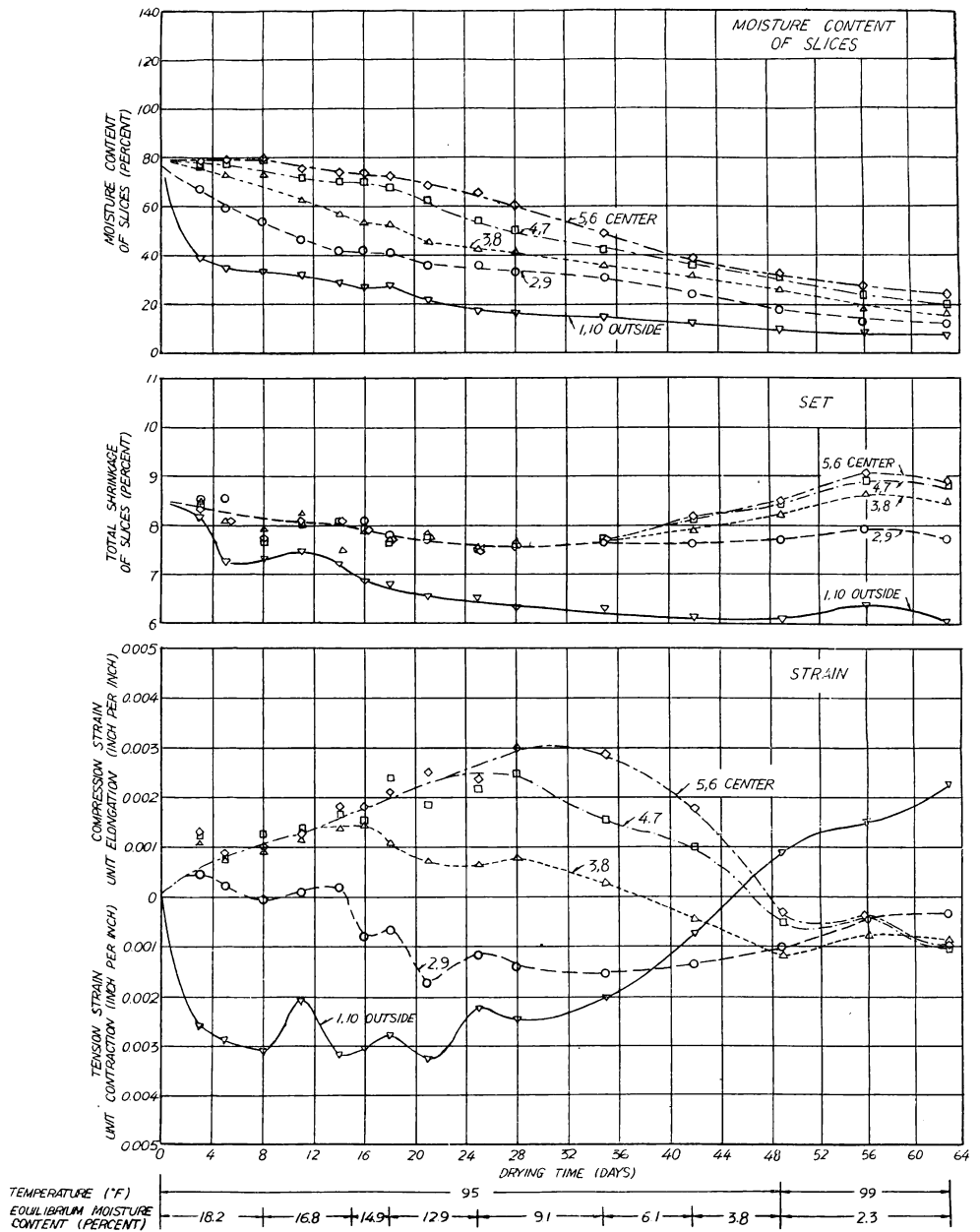


Fig. 17. Strain, shrinkage and moisture content of slices of 2- by 7-inch northern red oak dried at 95°F. (M 94898 F, F. P. L., U. S. A.)

各温度において測定した乾燥による歪みの変移状況を，収縮量や水分分布の変化とともに第 17, 18, 19 および 20 図に示した。ここに示した乾燥歪み，収縮量および水分分布の値は，これらを測定したときいずれも試験片を第 1 図に示したように一たん 10 個の薄片に切断したので，例えば表面の値は薄片 No. 1 と No. 10 との，中心部の値は No. 5 と No. 6 と，というように，それぞれ相対する 2 個ずつの平均値が示してある。

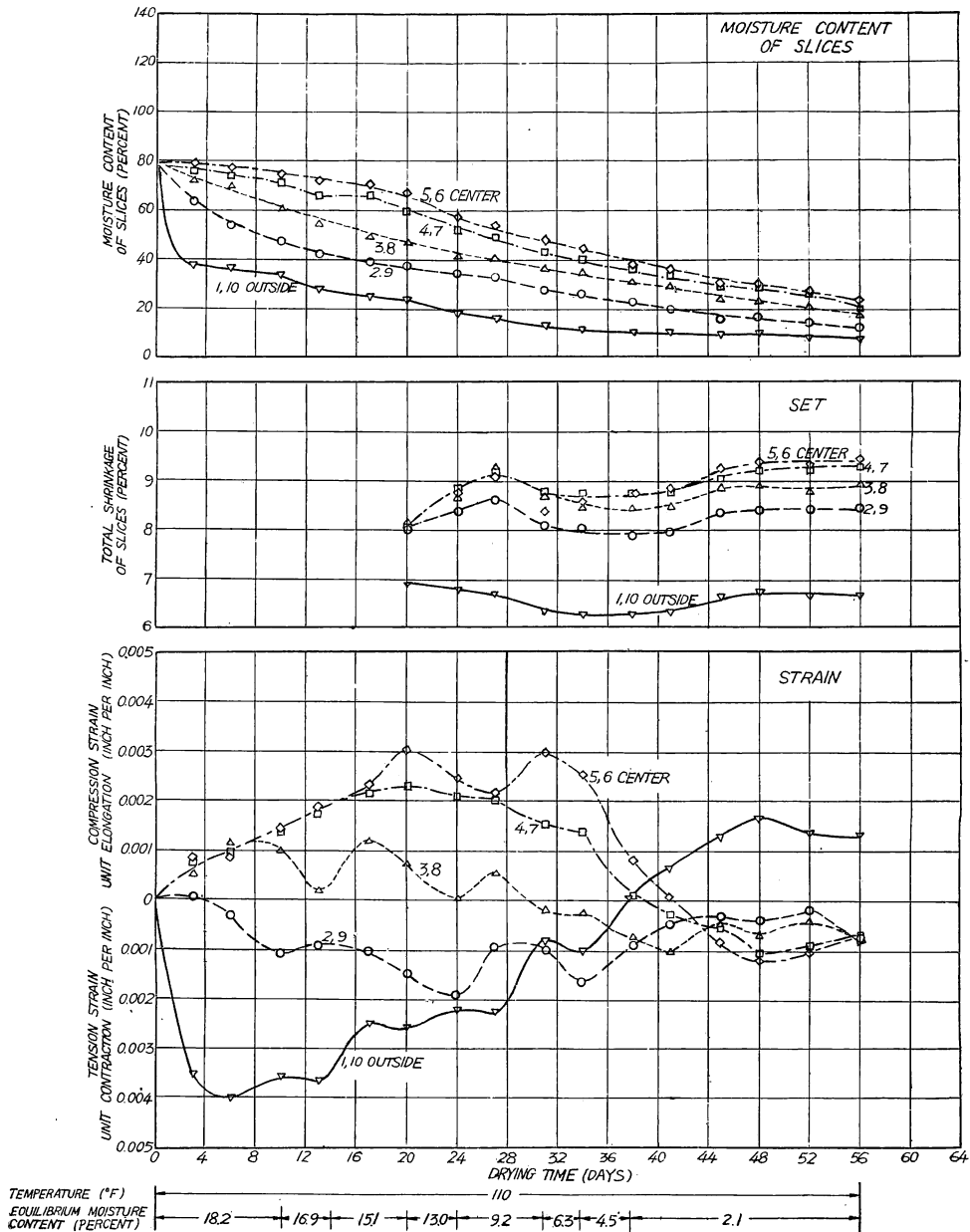


Fig. 18. Strain, shrinkage and moisture content of slices of 2- by 7-inch northern red oak dried at 110°F. (M 94896 F, F. P. L., U. S. A.)

さて、乾燥の進行にともなつて乾燥歪みの変化していく状態はこれらの図で明らかなように、どの温度でも大体同様の経過をたどっていることが分る。すなわち、表面の薄片は乾燥の初期に非常に引張られてその歪み量は最大値に達し、その後次第に減少して遂に零になり逆に圧縮歪みをうけ、その大きさも乾燥につれて次第に増加している。これに対して内部の薄片はまず圧縮歪みをうけ、それが最大値に達したのち次第に除去されて遂に引張歪みに変つている傾向をもっている。ただ薄片が内部になるほど圧縮歪みの

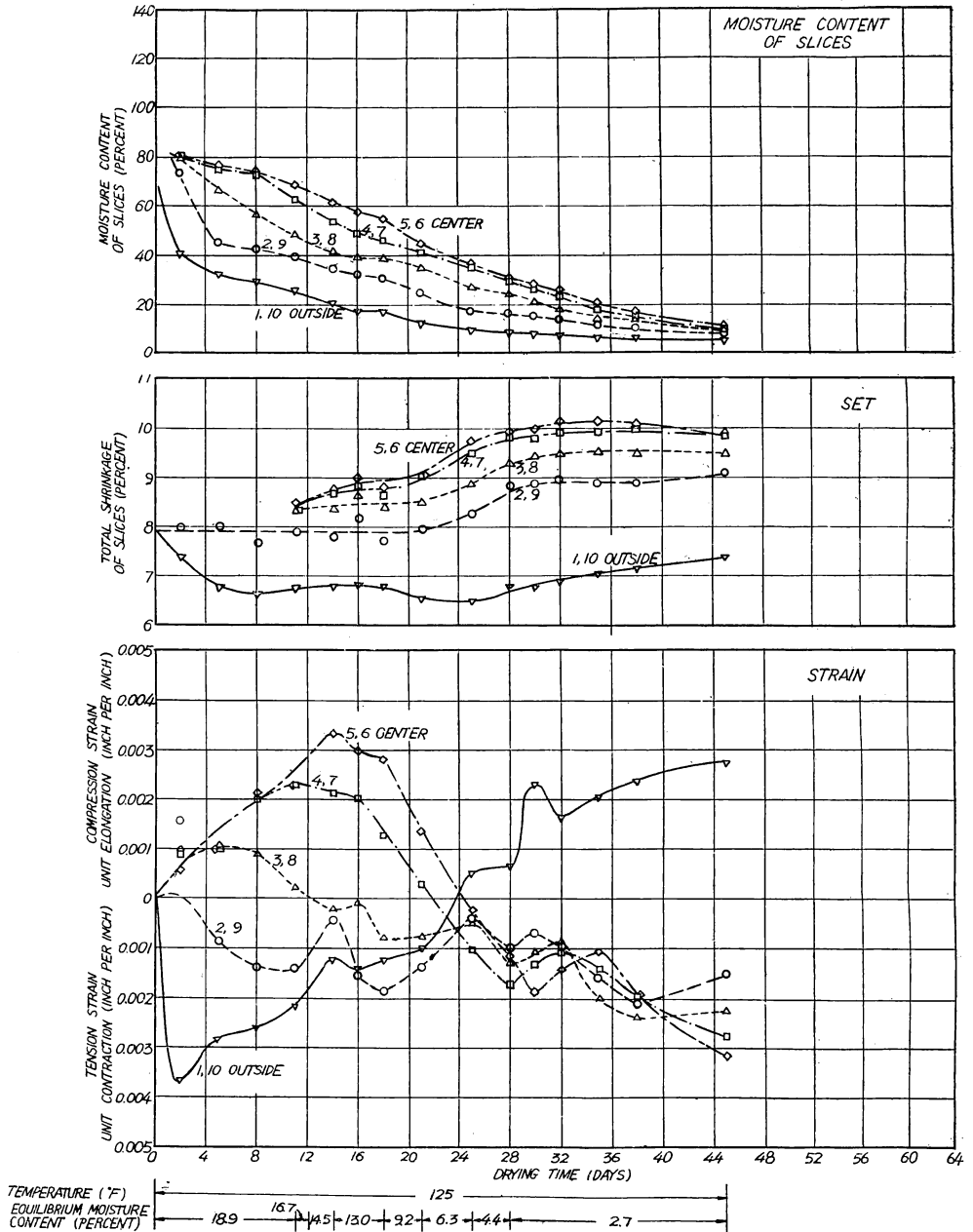


Fig. 19. Strain, shrinkage and moisture content of slices of 2- by 7-inch northern red oak dried at 125°F. (M 94899 F, F. P. L., U. S. A.)

値も大きく、その最大値を示す時期もおくれている。これらは乾燥歪みの変移する状態の一般的な説明で、この範囲では温度にかかわらず同一とみることができるが、なお些細にみると明らかに温度による特徴を見出すことができる。第6表に表面薄片が最大の引張歪みをうけた乾燥開始後の日数、その大きさ、薄片の平均含水率および外周空気条件に対する平衡含水率などを示した。この表からは、乾燥温度を高くするほど表面薄片に最大引張歪みが早くあらわれることがわかる。さらにまた、その歪みの絶対値も温度の高いほ

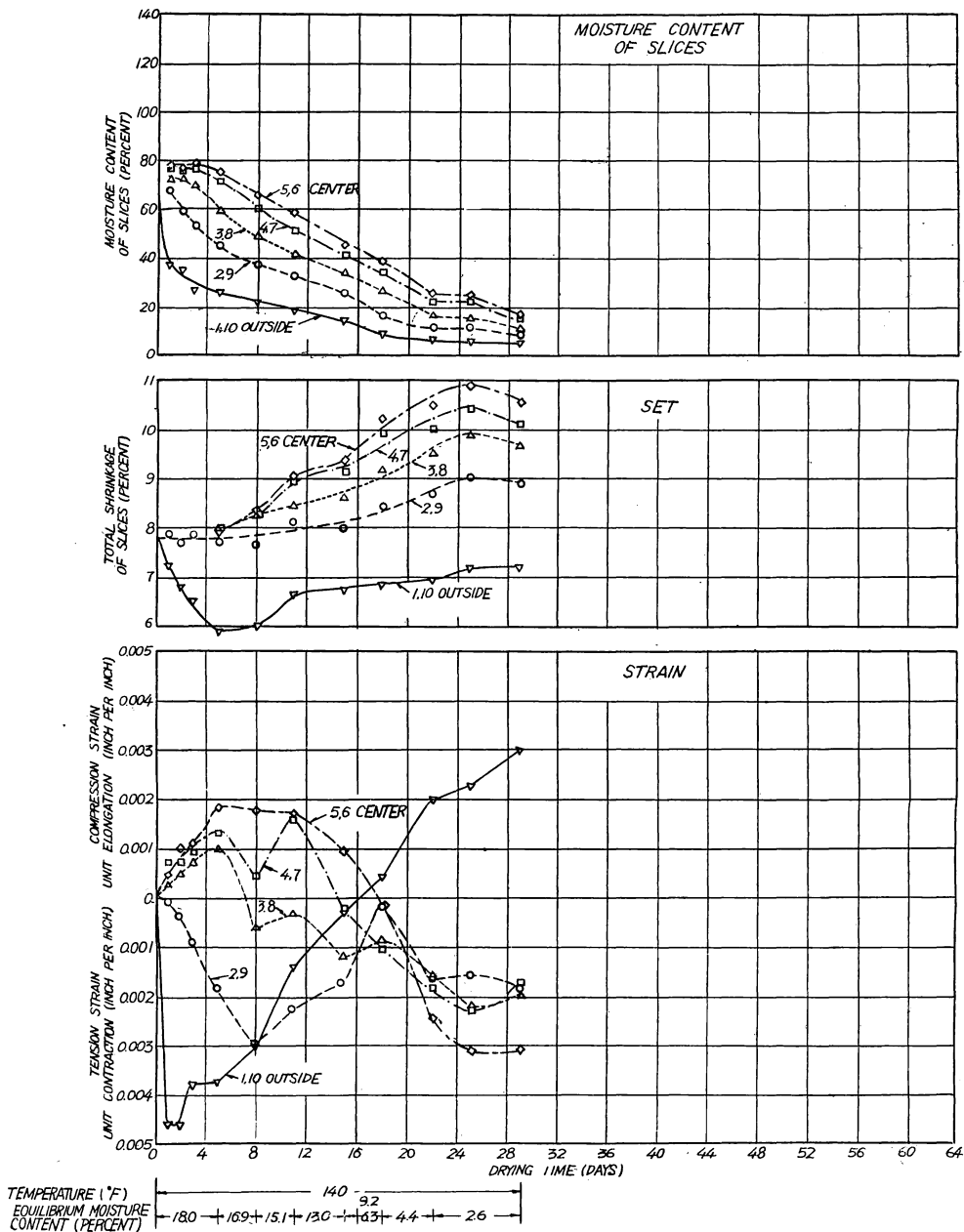


Fig. 20. Strain, shrinkage and moisture content of slices of 2- by 7-inch northern red oak dried at 140°F. (M 94897 F, F. P. L., U. S. A.)

どわずかではあるが大きくなる傾向を示している。しかし、歪みの絶対値に関しては測定した供試片も1個であり、測定誤差の点からもこの程度の差では温度の高いほど歪み量が大きくなるとは必ずしも断言できないようである。

中心部の薄片に関しては、これも表面薄片と同じように乾燥の進行とともに圧縮歪みを生じて最大値を示しているが、その発生する時期はいずれも表面薄片が引張歪みの最大値をあらわす時期よりかなりおくれており、かつ表面薄片の引張歪みが最大値から次第にのぞかれつつある途上ではあるが、なおまだ引張歪みを確実にうけている時期であるといえる。さらに中心部の圧縮歪みが減少して零になる時期は表面薄片の引張歪みが減少して零になるのとはほぼ一致しており、このことはどの温度についても同様であつた。しかし、これらのこともただこの実験についての結果であつて、樹種や乾燥条件がかわればまた別の結果がえられるかも知れない。いずれにしても乾燥の進行にともなつて乾燥歪みは変わりつつあり、一つの薄片でもその時期によつて一面では引張歪みをうけているが、他の面では圧縮歪みをうけ、薄片の内部で剪断歪みをうけているような時期もあることと思われる。

中心部薄片が最大圧縮歪みをうけた時期、その歪み量、平均含水率およびそのときの乾燥条件に対する平衡含水率などを第7表に示した。最大圧縮歪み量は、温度 140°F の場合だけ若干低い値となつたが、その他の温度ではどれも1吋当りほぼ 0.003" 程度であつた。第7表で明

Table 6. Strain and moisture content at time of maximum tension strain in outer slices.

| Temperature | Time to maximum strain | Maximum strain | Average moisture content | Equilibrium moisture content in kiln |
|-------------|------------------------|----------------|--------------------------|--------------------------------------|
| <i>F.</i>   | <i>Days</i>            | <i>In.</i>     | <i>Percent</i>           | <i>Percent</i>                       |
| 95          | 8                      | 0.0031         | 63.5                     | 18.0                                 |
| 110         | 6                      | 0.0040         | 61.9                     | 18.0                                 |
| 125         | 1.5                    | 0.0037         | 70.9                     | 18.0                                 |
| 140         | 1                      | 0.0046         | 66.0                     | 18.0                                 |

Table 7. Strain and moisture content at time of maximum compression strain in center slices.

| Temperature | Time to maximum strain | Maximum strain | Average moisture content | Equilibrium moisture content in kiln |
|-------------|------------------------|----------------|--------------------------|--------------------------------------|
| <i>F.</i>   | <i>Days</i>            | <i>In.</i>     | <i>Percent</i>           | <i>Percent</i>                       |
| 95          | 28                     | 0.0030         | 40.5                     | 9.2                                  |
| 110         | 20                     | 0.0030         | 46.7                     | 15.1                                 |
| 125         | 14                     | 0.0033         | 42.6                     | 14.5                                 |
| 140         | 8                      | 0.0018         | 47.0                     | 16.9                                 |

らかなように、最大圧縮歪みを示した時期の平均含水率および乾燥条件などは温度によつて若干異つており、温度にたいして何ら一定の傾向を見出すことはできなかつたが、その理由は明らかでない。

なお、表面と中心部との中間薄片の歪み変移については、温度 140°F の場合をのぞけば、中心薄片が最大値を示す以前にまず薄片 3—8、次いで薄片 4—7 が、それぞれ最大となり、しかもそれらの最大歪み値は薄片が中心部に近いほど大きくなつている。かつ、表面に近い薄片ほど中心部の圧縮歪みが零になるよりはやく零になり、引張り歪みに移りかわつている。もちろん各薄片の歪み変移も滑らかなものでなく、若干の凹凸がみられたが、これらの状態も決して確定的なものでないので、詳細についてはふれられない。ただ温度 140°F の場合だけは薄片 3—8 および薄片 4—7 の歪み変移状態が他の場合と著しく相異しているように見える。これも確実なことは言えないにしても、薄片 4—7 が第 11 日目に著しく圧縮歪みをうけていること、薄片 3—8 では速かに圧縮歪みが最大値になつてすぐ零になつていること、さらに薄片 2—9 の引張歪みが急激に最大になりかつその量も大きいことなどが、相互に関連しているのではないと思われる。



Table 8. Moisture content at time of stress reversal in the outer slices.

| Temperature | Time to reversal | Average moisture content | Equilibrium moisture content in kiln |
|-------------|------------------|--------------------------|--------------------------------------|
| <i>F.</i>   | <i>Days</i>      | <i>Percent</i>           | <i>Percent</i>                       |
| 95          | 45               | 27.0                     | 3.8                                  |
| 110         | 38               | 27.6                     | 4.5                                  |
| 125         | 24               | 30.0                     | 6.3                                  |
| 140         | 16               | 33.0                     | 6.3                                  |

表面薄片の引張歪みが圧縮歪みに移りかわる時期は第 8 表に示したように高い温度の方が低いときより早くなっている。このことはそのあらわれた日数をさしうただけでなく、その時期における平均含水率および乾燥条件に対する平衡含水率から指摘することができる。すなわち、歪みの逆転した時期に相当する平均含水率は温度の高いほどわずかではあるが高くなっており、乾燥条件もそれだけゆるく、乾燥のすすんでいない時期になつている。平均含水率は各温度ともほぼ

30% をなかにして 3% 程度の変動であるから、表面は繊維飽和点以下であつても内部はそれ以上の含水率をもつていることになる。

さらに中心薄片の圧縮歪みが引張り歪みに移りかわる時期は、どの温度でも表面薄片が引張り歪みから圧縮歪みに転向する時期より、ごくわずかではあるがおくれている。中心薄片が引張歪みに転移してからは

Table 9. Strain and moisture content at time of first maximum of tension strain in center slices.

| Temperature | Time to maximum strain | Maximum strain | Average moisture content | Equilibrium moisture content in kiln |
|-------------|------------------------|----------------|--------------------------|--------------------------------------|
| <i>F.</i>   | <i>Days</i>            | <i>In.</i>     | <i>Percent</i>           | <i>Percent</i>                       |
| 95          | 52                     | 0.0005         | 21.2                     | 2.3                                  |
| 110         | 48                     | 0.0012         | 21.2                     | 2.1                                  |
| 125         | 30                     | 0.0018         | 19.6                     | 2.7                                  |
| 140         | 25                     | 0.0031         | 15.8                     | 2.6                                  |

表面薄片と同様にわずかず増大して最大値を示すが、ときにはさらに乾燥のすすむにつれて歪み量の大きい第 2、第 3 の極大値を示すこともある。第 9 表に中心薄片が引張歪みに転移してからはじめての極大値を示した時期、その圧縮歪み量、平均含水率、空気条件に対する平衡含水率を示しておいた。

つぎに、乾燥末期においては表面薄片はすべて著しい圧縮歪みをうけたままであり、中心部薄片もいろいろな程度の引張歪みをうけたままになつている。しかし、これはこの実験ではいわゆる“set”を除くための調湿、conditioning の処置、を行つていないので当然のことであろう。ただ本実験では、乾燥過程が完全に終了するまでに歪測定用供試片を使いつくしたため余儀なく実験を終了しなければならなかつた場合もあつたので、最後の含水率が区々であり最終段階における歪み量と温度との関係などについて十分にふれることはできない。また、乾燥歪みの変移も温度 110°F の場合だけは圧縮、引張り歪みともに同時に最大値に達してそれぞれ減少の傾向にあるが、その他の場合ではどれも乾燥歪みの増大する途上において実験が終了したかたちとなつているので、乾燥が完全に終了した時期における歪みの分布状態についても言明できない。しかし、乾燥を終了した直後にみられる歪み分布はその後永い間室温の所に放置して、水分傾斜もほとんどなくなつてから、再び歪みを測定してみても、あまり変化をうけていなかった。これらのことについては後述するが、要するに乾燥中に生じた歪み分布は、特に Set を除くための高湿処理でもしないかぎり（この処置によつて歪み分布が変るかどうかは明らかでないが）あまり変化しないものと言えよう。

b. 最大歪みの時期における水分分布

表面薄片が最大引張り歪みを示したときの水分分布状態を第 21 図に示した。これを見ると、どの場合で

も表面の近くではかなり急な水分傾斜をもっており、温度の高い場合の方が低いより急になっている。平均含水率はどれも高く 62~70% であり、表面薄片の平均含水率も 35~41% で、まだ繊維飽和点以上であるにもかかわらず、表面層はすでにその時の外周空気の条件に対する平衡含水率の 18% 付近になっていると考えられるので、このような薄いものですら表面と内部とでは図にみられるように 40% 近い水分傾斜をもっており、表面附近にいかにか大きい水分傾斜があるかがうかがわれる。したがって、歪みを測定した薄片をさらに薄くしたならば、より大きい歪みをえたものと想像される。いずれにしても、表面薄片のうける引張歪みが最大値を示す時の水分分布は内部の水分がまだほとんど低下しておらず、表面附近だけが乾燥しはじめて著しく急な水分傾斜になっていることだけは明らかである。

中心部薄片が最大の圧縮歪みをうけたときの水分分布状態を第 22 図に示した。概略的にいえば水分傾斜はどの温度の場合でもほぼ同様であり、平均含水率も明らか

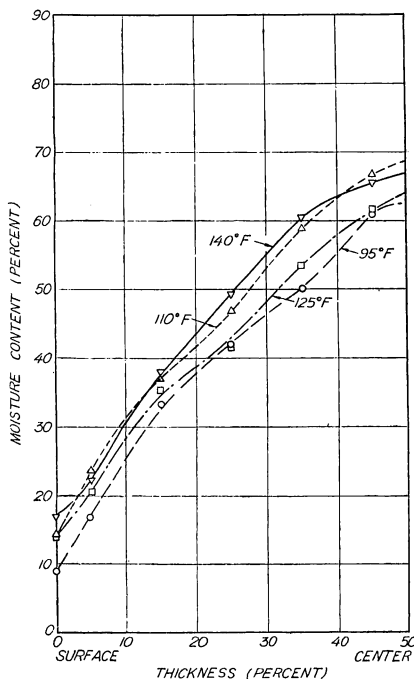


Fig. 22. Moisture gradients, as indicated by whole slices, at time of maximum compression stress in center slices. (M 94891 F, F. P. L., U. S. A.)

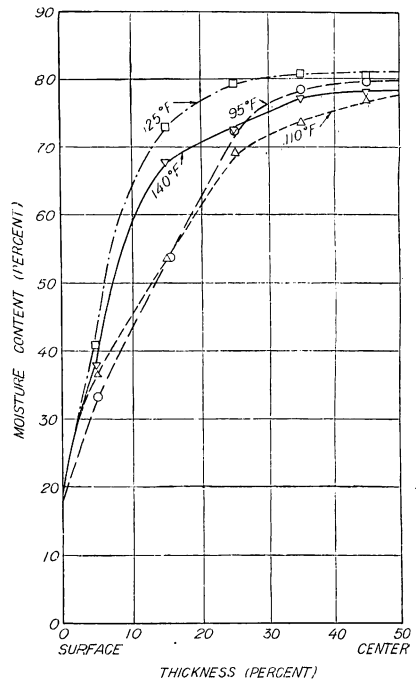


Fig. 21. Moisture gradients, as indicated by whole slices, at time of maximum tension stress in outer slices. (M 94894 F, F. P. L., U. S. A.)

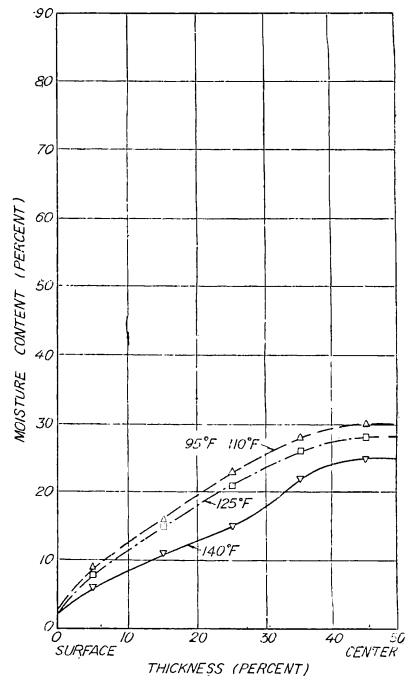


Fig. 23. Moisture gradients, as indicated by whole slices, at time of first maximum tension stress in center slices. (M 94895 F, F. P. L., U. S. A.)

に繊維飽和点よりかなり高いばかりでなく、試験片の中心部はまだ60%以上の含水率をもっている。薄片3—8および4—7でもその含水率はまだ繊維飽和点以上である。これに対して表面薄片だけは明らかに繊維飽和点以下であり、薄片2—9では表面に近い方は繊維飽和点より低く、他はそれ以上の水分をもっているものと思われる。

さらに中心薄片が引張歪みに転移してからはじめての最大値を示す時期の水分分布状態を第23図に示した。この図によると中心薄片が最大の引張歪みをうけるようになっても、まだ中心部の含水率は繊維飽和点附近か、これよりやや高いことになる。しかもこの部分のうける応力は、繊維に直角方向の引張応力であるために、いわゆる内部割れの欠点を生ずるおそれが多分にあるといえよう。これらの点については3.3.の項でふれる。

### c. 最大歪み量

乾燥によつてうける歪み量を弾性学的に検討してみよう。まず、表面の引張歪みに関しては、その最大量は第6表に示されたように0.003から0.0046 in/inの程度である。この問題の検討に必要な資料はRed oakの繊維に直角な引張りに対する弾性的性質であるが、従来横引張りに関する研究、特にその温度との関係についてはW. L. Greenhill<sup>9)</sup>, F. Kollmann<sup>4)</sup>, およびE. L. Ellwood<sup>1)</sup>などの資料があるが、応力—歪曲線に至つては私の知るかぎりではただKollmannのoakに対する結果があるだけである。しかし、この結果も測定方法に問題があり、応力に対する歪み量が大きすぎるばかりでなく、比例限界点については全く明らかでないため、この問題の検討には参考とすることができない。これらのほかに最近沢田<sup>11)</sup>がミヅナラ外若干の樹種に対して単純横引張試験によつて求めた結果がある。これは温度が常温であり、試験片の含水率も約17%であるが、応力—歪曲線を正確にとり比例限応力、伸長度、破壊強さなどを求めているので、参考にしうる唯一の資料かと思われる。これから他の温度、含水率に対する値を推定して検討をすすめたい。沢田によるとミヅナラに対する比例限伸長量は $0.59 \pm 0.11\%$ で、破壊強さは $67 \text{ kg/cm}^2$  ( $\approx 960 \text{ lb/}\square\text{'}$ )である。アメリカ林産研究所によるとRed oak (*Q. borealis*)の横引張破壊強さは $800 \text{ lb/}\square\text{'}$ であるので、沢田の結果よりやや小さいが、比例限伸長もRed oakに対してほぼ同値かやや小さい値とみなして差支えなく、0.005~0.006 in/inと推定されよう。

さて、表面層のうける最大引張歪みは前述のように0.003~0.0046 in/inであつたので、この数値だけから考えれば、この歪みはほぼ比例限伸度と同じであつて、弾性域の範囲内か或いは塑性域との境界附近とみうけられる。しかし、歪みを測定した薄片の厚さはほぼ4 mmで、歪みはこの厚さに対する平均値を測定したことになつている。それゆえ、ただ表面層の歪みだけを考えるとこの値よりはさらに大きくなつていものと考えられる。したがつて、表面層における歪みはこの比例限をこえ、塑性歪みになつていものと思はれて間違ひなからう。また、圧縮歪みの最大値も第7表に示したように0.003前後の値であるが、従来の当場強度研究室の実験結果によると、比例限伸長は引張も圧縮もほとんど変わらず却つて圧縮の方が小さい傾向にあり、その上材の中心部の歪み量は第7表の数値より若干大きいものと考えられるので、中心部においてもまた塑性的圧縮歪みをうけているものと考えられる。

このように塑性歪みを長時間うけていると、その部分の応力が減少しても、すなわちその部分に歪みを与えていた水分傾斜が消失して引張張力をうけていた部分は縮まんとし、圧縮応力をうけていた部分が伸びんとしてもすでに塑性歪みをうけた部分は正常な伸縮を示さないようになってしまう。このような性質になつたことを“Set”されたと称しておく。

乾燥による引張歪みと温度の関係については、第 6 表に示したように最大歪み量は温度の高いほど大きくなっている。すでに W. L. Greenhill, F. Kollmann; E. L. Ellwood などは繊維に直角方向の引張力が温度の高いほど低くなる結果をえているが、これは高い温度を用いて乾燥すると、乾燥初期には表面割れ、末期に内部割れなどをおこす危険の多いことを示している。このような乾燥操作上注意しなければならぬ点については後述する。

### 3.3. Set

#### a. Set のあらわし方

上に規定した Set の量をいかにしてあらわすかが問題であるが、このような Set の意義からいえば、材がきわめて徐々に乾燥されて正常な収縮をしたときの収縮量と、いわゆる Set された部分が実際に乾燥されて生じた収縮量との差をもつて示すのが適当であると思われる。このような見地から、ここでは次のようにあらわすことにした。各試験片の薄片を乾燥前に測定した長さとし、それを絶乾にしたときの長さとの差をもつて全収縮量とし、これの元の長さに対する比をもとめて各薄片の収縮率とした。この収縮率の乾燥にとまう変移の状態を第 17~20 図に示してあるが、この収縮率変移の中で最も変動少なく、終始あまり変らない値を示しているのは薄片 2—9 であり、かつ歪み量の圧縮、引張りを通じて最も変動のないのも薄片 2—9 であるので、これが最も歪みのうけない正常な収縮をしているものと見なして差し支えない。したがってここでは、各薄片のある時期における収縮率と薄片 2—9 の収縮率との差をもつて Set の程度をあらわすこととした。ただ実際には各薄片の含水率を求めるため 212~220°F で絶乾にしなければならないが、これらを直接この 212°F の恒温器に入れなくて 95°F、75% 程度で一昼夜、そののち室温で一昼夜放置してから恒温器中で絶乾にした。このような処置をとつても若干の Set はまぬがれなかつた。この意味でここに得た結果がどれほど正確なものであるかは問題であるが、各薄片を一度は絶乾にしなければならないので、ある程度のは Set はまぬがれない。したがって、ここに示された結果は Set の絶対値には十分の信頼がおかれなくても、Set の変移状態は十分に推測することができる。

#### b. 収縮率の変移

第 17~20 図中央のグラフには各薄片の収縮率の変移が示してある。これをみるとどの薄片の収縮率も乾燥開始の直後においては薄片 2—9 とほぼ同じである。この基準になる薄片 2—9 の収縮率の変移も実際に得た結果では温度によつて若干異なっているが、一般的にいえば乾燥の初期から、各薄片とくに表面薄片と中心薄片がその最大歪みの時期をこえてそれぞれが零に近づいた時期までは、薄片 2—9 の収縮率はほぼ同じであり、この時期をすぎると次第に上昇をして、時には最大値を示したつたがやや減少の傾向になるものもある。

いま、薄片 2—9 の収縮率変動状態を各温度について吟味してみる。温度 95°F の 2—9 線は乾燥ともにおわずただけ減少の傾向をたどり、乾燥日数 25 日より 42 日目までは全く変動していない。この期間はずべての薄片の歪みがほとんど零にちかづくときに相応しているようである。その後においてやや収縮量の増加をみている。これは中央部薄片の応力が逆転したことに関係があるのではないかと思われる。温度 110°F の結果については第 18 図のように第 20 日目までの収縮量が示してない。これは他のすべての供試片の正常な収縮量が 7.5~8.0% 程度であるのに対し、この場合だけはそれよりも著しく低くなつており、第 20 日目ごろからは正常な値になつていたので、これ以後の部分だけを示しておいたのである。この原因は各薄片を絶乾にする場合、その前処理が適当でなかつたためかと思われる。第 20 日目以後の

薄片 2—9 線は、表面と中心部の歪み量が丁度零になつた以後において漸次増大している。この傾向は他の温度においても見られる共通の点である。さらに温度 125°F, 140°F においては第 19 および第 20 図で見られるように薄片 2—9 線は多少の変動をまぬがれないが、当初は同じでも歪み線の逆転したあとにやや増大の傾向を示している。薄片 2—9 の収縮曲線に比べて表面薄片 1—10 の収縮線は常にこれより低く、内部薄片 3—8, 4—7 および 5—6 の収縮曲線はいずれも高くなつている。すなわち、表面薄片は正常な収縮に対してそれほど収縮しなかつたことを示し、内部薄片はそれ以上収縮したことを示している。薄片 1—10 においては引張歪みをうけたまま Set したために正常以下の収縮をしたのであり、内部薄片は圧縮歪みをうけたまま Set されたので正常以上の収縮をしたのである。これらは明らかに前者は引張 Set を、後者は圧縮 Set をうけていることを示している。

表面薄片 1—10 の収縮量曲線も乾燥開始のときは薄片 2—9 の値と同じであるが、乾燥がすすむと急に減少し、とくに温度の高い 125°F, 140°F ではこの現象が明らかで、ちょうど表面薄片の歪み曲線が最小値になつた後にこれも最小値を与えている。その後、温度 140°F 以外では、いつたん収縮量は大きくなるがふたたび減少しちょうど歪み曲線が引張圧縮ともに零に到達したところに最小値となり、ふたたび多少増加しているのがみられる。温度 140°F の場合に収縮量曲線が第 20 図でみられるようにはじめの最小値を与えたのちはただ増加のみで最低値がないが、これは乾燥末期において薄片 2—9 も内部薄片 5—6 の著しい収縮量増加の影響をうけて収縮が増大したことによるのではないかと思われる。しかし、後述するように Set としてはこの末期に他の温度の場合と同じように極大値を示している。

つぎに中心部薄片 5—6 の収縮量変移については、どの温度でも圧縮歪みが最大値になるまでは薄片 2—9 と同じ程度の収縮量であるが、それ以後において次第に大きくなり、とくに歪みが逆転して内部薄片の引張り歪みが大きくなるとともに収縮量も大きくなつているようにみられる。これは内部薄片がいつたん圧縮 Set をうけていても歪みが逆転して引張り応力をうけ、しかもそれが比例限界をこえない程度であるならば応力が除かれるとその歪みの大きさに相応するだけ縮んで収縮量が大きくなるものと思われる。このことは薄片 2—9 に対してもいえることであろう。常に正常な伸縮を示す標準と仮定してきた薄片 2—9 でも、各図で明らかのように最初から若干の引張り歪みをうけており歪み曲線が逆転し内部薄片が引張り歪みをうけるようになってからはこの歪みの影響があらわれて薄片 2—9 の収縮もやや増加しているものと考えられる。

c. Set の大きさ

以上各薄片の収縮量の変移についてのべてきたが、これらから標準となる薄片 2—9 と他の薄片との収縮量の変差、すなわち Set の大きさについて、その最も著しい表面薄片と中心薄片の推移を図示すると

Table 10. Set values and excess shrinkage expressed as a percentage of green dimension.

| Temperature | Set in slices 1 and 10 caused by tension | Set in slices 5 and 6 caused by compression | Excess shrinkage in slices 2 and 9 |
|-------------|--|---|------------------------------------|
| F.          | Percent                                  | Percent                                     | Percent                            |
| 95          | 1.7                                      | 1.0   | 0.25                               |
| 110         | 1.8                                      | 1.0   | 0.48                               |
| 125         | 2.0                                      | 1.5   | 1.00                               |
| 140         | 1.8                                      | 1.8   | 1.16                               |

第 24 図のごとくである。特に乾燥の初期において測定にかなりの変動がみられるが、その測定法から推察されるように必ずしも常に同一点を測定することができないのでこの程度は実験誤差によるものかと思われる。この初期の変動を除けば、引張り Set にあつては表面薄片が最

大引張歪みをすぎたところから次第に増大し、極大値を経て一旦やや減少し、乾燥歪みが逆転したのちふたたび極大の値を示す傾向がうかがわれる。そしてこの傾向は温度の高いほど明瞭であり、温度95°Fではこのような傾向はほとんど見られない。圧縮 Set についても同様に内部薄片に圧縮歪みが生じてその極大値に達したのち急激に増大してほぼ歪みが逆転したところかあるいはその後において最大を示しているようである。引張、圧縮 Set のいずれの場合でも歪み曲線がそれぞれ最大値に達して零に近づくにしたがって、逆に Set は次第に大きくなっており一見矛盾のようにみえるが、歪みが弾性域をこえて塑性域になり、Set されたのち乾燥にともない水分傾斜がゆるやかになつて応力が除かれ、歪みもこれに応じて減少してくるにかかわらず、このように Set はそのまま残留歪みの形で残つてくるので、むしろ当然であろう。

第10表に各温度における Set の最大量を表示した。これによると引張り Set は温度が高くなつてもそれほど大きくなるとはいえないが、圧縮 Set は温度と共に増大している。これは温度が高くなると可塑性をまし、それだけ Set されるからである。一般には常に引張り Set が圧縮 Set に比して大きい

が、この差は温度が高くなるほど少なくなり、140°F においてはこの両者は全く等しくなっている。このように温度が高くなると圧縮 Set の量が大きくなることは乾燥操作上注意しなければならないことではあるが、木材は圧縮に対してはきわ

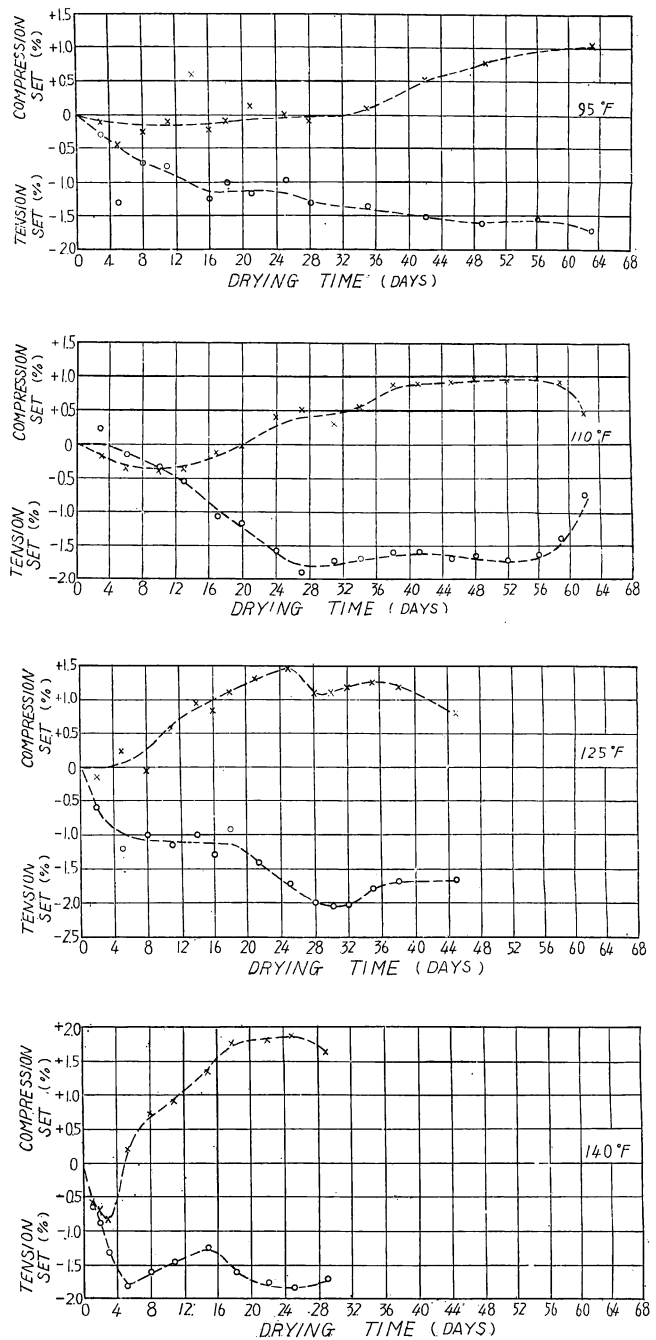


Fig. 24. Curves showing the changes of the set developed in outer and center slices as the specimens were dried at different temperatures.

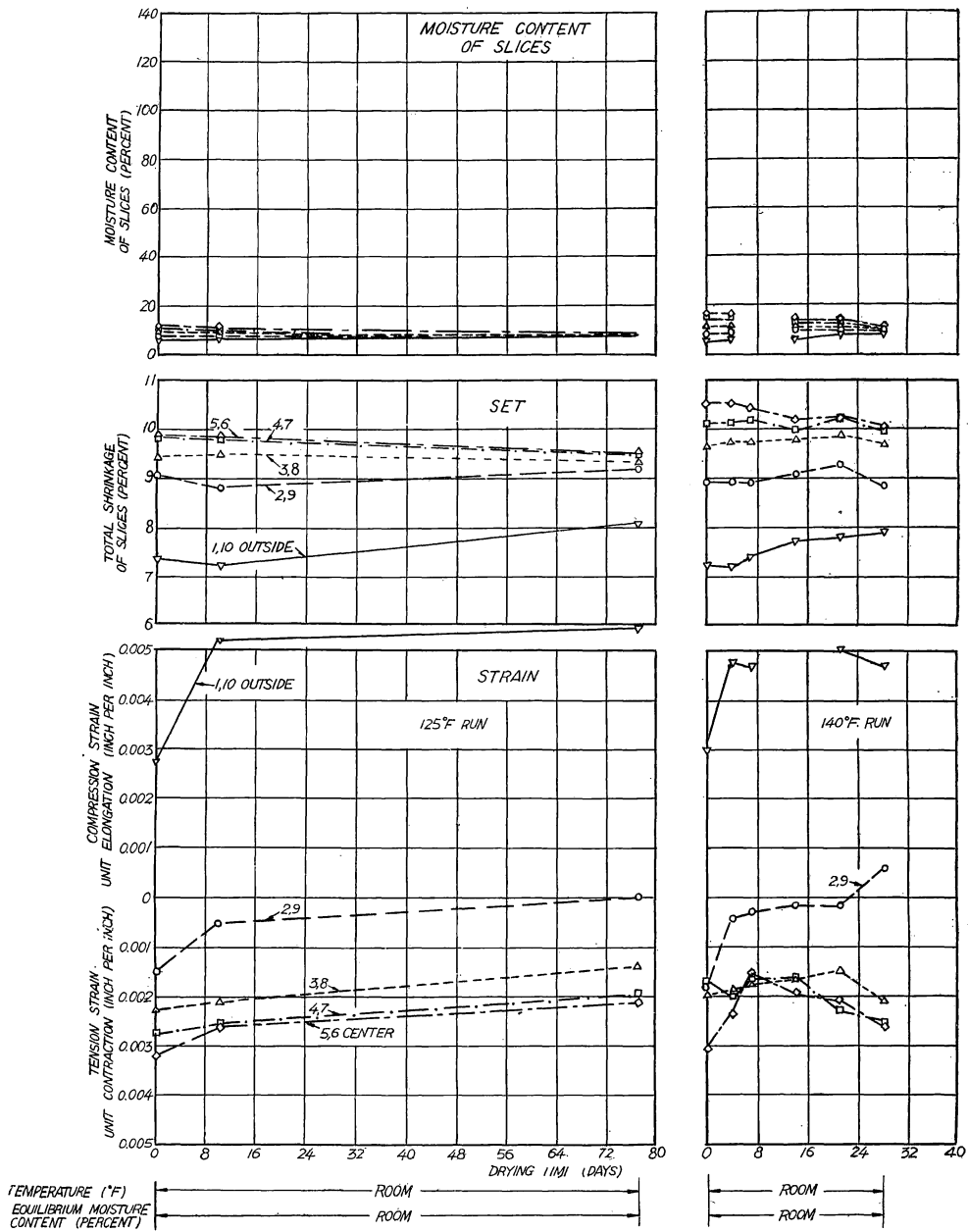


Fig. 25. Strain, shrinkage and moisture content of slices of 2- by 7-inch northern red oak specimens during storage at room conditions after kiln drying at 125° and 140°F. (M 94900 F, F. P. L., U. S. A.)

めて可塑的であり、ここに加えられる程度の応力では組織が破壊されるにはいたらないため、この点に対しては引張りに対するほどの注意を払う必要はなからう。

d. 乾燥後における歪み, Set の変化および応力分布曲線

乾燥操作の終了したときには、どの温度においても表面に著しい圧縮歪みが、内部には引張歪みがそれ

それあることをすでに述べた。乾燥の終つたときにはまだ水分分布も均一でなく、供試片によつてはまだはなはだしい水分傾斜があつた。このような供試片のうち、温度 125°F で乾燥したものは約 2 カ月半、140°F で乾燥したものは約 1 カ月間室温のところ放置しておき、これらを前と同様に薄片に切断して歪みを測定した。その結果は水分分布がすでに均一になつているにかかわらず、第 25 図に示すようにまだ乾燥終了時と同じ程度の歪み分布が残つている。つまり 1 カ月や 2 カ月の放置期間ではこの歪み分布はほとんど変化するものではない。しかし、さらに長年月間放置すれば減少するかも知れないが、この点は明らかでない。また、とくに Set を除くために乾燥を終了する前に高温処理でもすれば別問題とならう。これらについても今後の研究にまたなければならぬ。しかし収縮量曲線から分るように Set の大きさは放置しておく間に若干減少することがうかがわれる。すなわち、いつたん Set された表面および内部薄片も正常な収縮量にちかづくことになる。これは Set の時に生じた残留歪みが水分傾斜も少なくなり、長時間放置されると僅かずつでも減少するためと想像される。このような現象を説明できるような弾性的性質についての資料がないので今のところ明らかでない。

木材の乾燥中において各部分に生ずる歪みが求められればその部分の弾性係数が分るとそこにはたらい

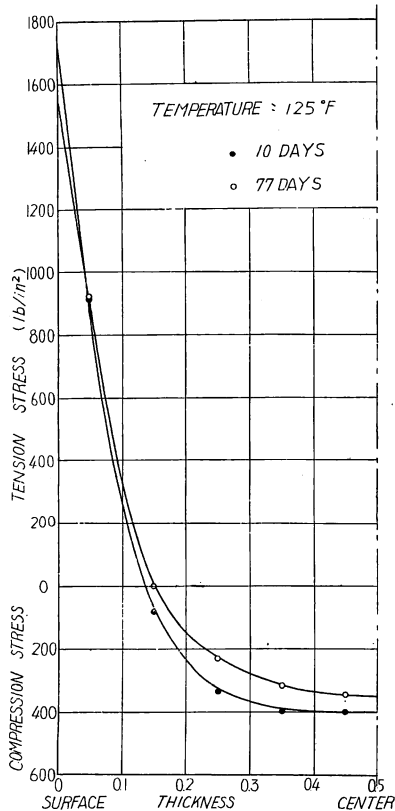


Fig. 26. Hypothetical distribution of stress in 2-by 7-inch northern red oak stored for 10 and 77 days at room temperature after drying at 125°F.

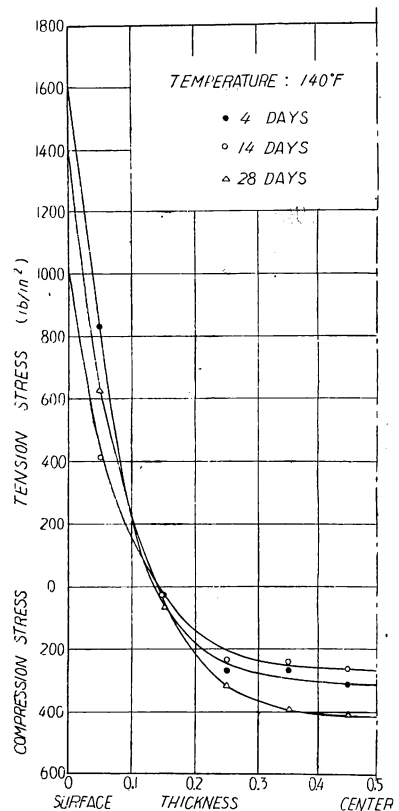


Fig. 27. Hypothetical distribution of stress in 2-by 7-inch northern red oak stored for 4, 14 and 28 days at room temperature after drying at 140°F.



ている応力を計算することができる。とくに、表面に生ずる木理に直角の引張応力がその材の引張強さより大きくなると当然表面割れを生ずるので、このような状態に至らしめる乾燥条件は適当でないことになる。このような見方はたしかに乾燥スケジュールを決める場合の一つの手がかりになると考えられるのでぜひこの方面の研究が今後発達することを望みたい。しかし弾性係数は温度や含水率によつて著しい影響をうけるがこれらの関係はほとんど明らかにされておらず、しかも乾燥進行中の木材の含水率や温度を求めることも困難であるので、乾燥中に生じている応力を計算することは実際にはまだきわめてむずかしい。しかし、室温で長時間放置しておいた材料では、弾性的性質さえ明らかであれば、温度や含水率の測定も容易であり、応力分布の計算も可能である。このような試みが今後のこの方面の発達に何らか役にたてばと思ひ、ここにその結果を附記しておく。温度 125°F, 140°F にて乾燥したものをほぼ 80°F の室温中にそれぞれ 10, 77 日および 4, 14, 28 日間放置しておいて、前と同じ方法で切斷して歪みと水分分布を測定した。含水率に応ずる弾性係数  $E$  が分ると、 $P = \frac{\Delta l}{l} \cdot E$  によつてその部分の応力  $P$  が計算される。しかし、oak に対する各含水率に応ずる弾性係数の関係は明らかでない。このような関係についてはただ Greenhill<sup>3)</sup> の Beech に対する結果があるにすぎないので、ここではこの値を用いて計算してみた。この結果は第 26, 27 図に示したごとくで、各点を平滑な曲線でむすんで表面へ挿外するとその部分に生じている引張応力を求めることができる。この結果表面にはかなりの応力が生じており、既往の引張強さの値から考えると明らかに比例限度以上で破壊されうる程度の応力がはたしているようである。また、通常考えられることは、この応力の値は時間の経過とともに減少するようにみえるが、140°F の場合には必ずしもそうではなく 28 日目も最大大きくなつていた。その理由は明らかでない。

この結果から実用上考えられることは、このような応力分布をもっている板を薄く切つたり、鉋で削つたりすると必ず反ることである。したがつて、これを防ぐために乾燥終了時に調湿をすることが考えられるが、その効果はたしてどれほどあるかは今後の研究にまたなければならない。

#### 4. む す び

本実験の結果によつて、空気の温度が高くなると木材水分の蒸発に対する空気条件を同じにたもつても木材中の水分移動性は大きくなり、乾燥速度も早くなることを知つた。このことは木材乾燥において温度を高くすれば、乾燥時間が短くなり操作の点では有利なわけである。しかし、乾燥の初期に表面のところでは生ずる引張応力は温度が高いと早くその最大値に達するので、操作の上からはとくに湿度を正確にするように注意しなければならない。さもなければこの時期において表面割れ、木口割れをおこすおそれがある。

温度 125°F~140°F では乾燥開始後 1~2 日中にこの最大張力をうけるので、とくに比重の大きい乾燥の困難な樹種にあつてはこの注意が必要である。したがつて、このような樹種に対しては乾燥の初期に温度を高くしない方が有利ではないかと思われる。

また、中心部では乾燥の末期に近くなると引張応力が生じ、その最大値もかなり大きくなるばかりでなく、この時期の中心部の含水率はまだ繊維飽和点附近か、それよりやや高くて木材自体の引張強度も決して大きくないので操作上は注意をしなければならない時期である。とくに温度が高くなると木材の引張強度も著しく低下するのでなおさらである。したがつて乾燥末期において中心部の含水率が繊維飽和点以下になるのをまつて乾燥条件をきびしくするのが安全といえよう。さもなければ末期においてもなお内部割

れの発生する危険がある。

以上この簡単な実験でえた結果から操作上の問題に言及してむすびとする。木材乾燥の重量課題であるスケジュールの決定はもとより乾燥室自体の習性を考えなければならないが、この点をのぞき木材の乾燥に対する特性からスケジュールを決める場合だけを考えてみても、スケジュールはただ木材の水分移動性からだけでは決定されるものではなく、乾燥にともなう歪み、その発生経過、さらに塑性的性質などを考慮して決めなければならない。この実験が今後におけるこの方面の研究に多少とも役だてば望外の幸せである。

### 附 録 (Appendix)

On the solution of diffusion equation.

林業試験場研究報告第 54 号に発表した木材の乾燥機構に関する研究第 6 報水分拡散方程式の解において計算に誤りがあつたのでここに訂正をする\*。

#### III 水分拡散方程式の解

(i) 恒率乾燥時

Constant rate of drying.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = K_1 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \dots \dots \dots (5)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{境界条件} \quad x=0 \quad u=At+u_s=u_s \\ \quad \quad \quad x=l \quad u=At+u_s=u_s \end{array} \right\} \dots \dots \dots (6)$$

ただし,  $u_s \geq 30\%$

$$\text{初期条件} \quad t=0 \quad u=u_0 \dots \dots \dots (7)$$

今  $u=u'+u''$  とおき,  $u', u''$  はそれぞれ右の条件を満足するものとする。

この  $u', u''$  をとくと次のごとくなる。

$$u' = \frac{A}{2K_1} \left[ \left( x - \frac{l}{2} \right)^2 - \frac{l^2}{4} \right] + At + u_0 \dots \dots (8)$$

$$u'' = \sum C_n e^{-K_1 \alpha_n^2 t}, \quad \cos \alpha_n \left( x - \frac{l}{2} \right) \dots \dots \dots (9)$$

$$\text{ただし,} \quad \alpha_n = \frac{(2n-1)\pi}{l}$$

初期条件を用いて  $C_n$  を求めると,

$$C_n = (-1)^{n-1} \cdot \frac{4Al^2}{K_1(2n-1)^3\pi^3} \dots \dots \dots (10)$$

となるので  $u$  の解は

$$u = u_0 + At + \frac{A}{2K_1} \left[ \left( x - \frac{l}{2} \right)^2 - \frac{l^2}{4} \right] + \frac{4Al^2}{K_1\pi^3} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{(2n-1)^3} e^{-K_1 \frac{(2n-1)^2}{l^2} \pi^2 t} \times \cos \frac{(2n-1)\pi}{l} \left( x - \frac{l}{2} \right) \dots \dots \dots (11)$$

\* この誤りを指摘し助言を与えられた島根農科大学大草克己氏に謹んで謝意を表す。

近似的には、

$$u = u_0 + At + \frac{A}{2K_1} \left[ \left(x - \frac{l}{2}\right)^2 - \frac{l^2}{4} + \frac{8l^3}{\pi^3} e^{-K_1 \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 t} \cdot \cos \frac{\pi}{l} \left(x - \frac{l}{2}\right) \right] \dots \dots \dots (12)$$

また、ある時刻における平均含水率  $u_m$  は、

$$u_m = \frac{2}{l} \int_0^{l/2} u \cdot dx = u_0 + At + \frac{A}{K_1} \left( -\frac{l^2}{12} + \frac{8l^3}{\pi^4} e^{-K_1 \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 t} \right) \dots \dots \dots (13)$$

したがって、 $t$  に対する  $u_m$  を知れば  $K_1$  を求めることができる。しかし、この式は  $t$  の指数関数であるために平均含水率  $u_m$  の減少速度はやはり指数的になるためいわゆる恒率乾燥式を示す式としては不合理になるわけである。木材乾燥の経過は一般に指数曲線であるが、恒率乾燥の部分は全経過のごく初期であり、この部分は直線とみななければならない。また全経過からみて、この部分は近似的には直線とみても差支えないので (13) 式の指数の項がある点  $t_0$  における接線の式にかえた。

すなわち、

$$u_m = u_0 + At + \frac{A}{K_1} \left[ -\frac{l^2}{12} + \frac{8l^3}{\pi^4} e^{-K_1 \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 t_0} \left\{ 1 + \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 K_1 (t_1 - t) \right\} \right] \dots \dots \dots (14)$$

この式から  $t$  に対する  $u_m$  を知れば  $K_1$  を求めることができる。

(ii) 減率乾燥時

Decreasing rate of drying.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = K_2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \dots \dots \dots (15)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{境界条件} \quad x=0 \quad u = Be^{-ct} + u_e = u_s = \phi(t) \\ \quad \quad \quad x=l \quad u = Be^{-ct} + u_e = u_s = \phi(t) \end{array} \right\} \dots \dots \dots (16)$$

$$\text{初期条件} \quad t=0 \quad u = F(x)$$

$$F(x) \equiv u_1 + At_0 + \frac{A}{2K_1} \left[ \left(x - \frac{l}{2}\right)^2 - \frac{l^2}{4} + \frac{8l^3}{\pi^3} e^{-K_1 \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 t_0} \cdot \cos \frac{\pi}{l} \left(x - \frac{l}{2}\right) \right] \dots (17)$$

今  $u = u_1 + u_2$  とおきそれぞれ次の条件を満足するものとする。

これらをとくとそれぞれ次のごとくなる。

|       | $\frac{\partial u_1}{\partial t} = K_2 \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2}$ | $\frac{\partial u_2}{\partial t} = K_2 \frac{\partial^2 u_2}{\partial x^2}$ |
|-------|---|---|
| $x=0$ | $u_1=0$   | $u_2 = \phi(t)$   |
| $x=l$ | $u_1=0$   | $u_2 = \phi(t)$   |
| $t=0$ | $u_1 = F(x)$  | $u_2 = 0$   |

$$u_1 = \sum_1^{\infty} A_n e^{-K_2 \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 t} \cdot \sin \frac{n\pi}{l} x \dots (18)$$

ただし、 $A_n = \frac{2}{l} \int_0^l F(\lambda) \cdot \sin \frac{n\pi}{l} \lambda \cdot d\lambda$

$$u_2 = \frac{2}{l} \sum_1^{\infty} B_n \cdot \sin \frac{n\pi}{l} x \dots \dots \dots (19)$$

ただし、 $B_n = \varepsilon_n \frac{n\pi}{l} K_2 e^{-K_2 \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 t} \int_0^t \phi(t) e^{K_2 \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 t} \cdot dt$

$\varepsilon_n = 2 \quad (n=1, 3, 5, \dots)$

$\therefore u = u_1 + u_2$

$$= \frac{2}{l} \sum_1^{\infty} e^{-K_2 \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 t} \cdot \sin \frac{n\pi}{l} x \left[ \int_0^l F(\lambda) \sin \frac{n\pi}{l} \lambda d\lambda + \varepsilon_n \frac{n\pi}{l} K_2 \int_0^t \phi(\lambda) e^{K_2 \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 \lambda} d\lambda \right] \dots \dots \dots (20)$$

これを計算すると次のごとくなる。

$$u = \frac{2}{l} \sum_1^{\infty} e^{-K_2 \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 t} \cdot \sin \frac{n\pi}{l} x \left[ \frac{2l}{s\pi} (u_1 + At_0) - \frac{A}{2K_1} \cdot \frac{4l^3}{s^3\pi^3} + \frac{l}{2} \cdot \frac{A}{2K_1} \cdot \frac{8l^3}{\pi^3} e^{-K_1 \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 t_0} \right]$$

$$+ \varepsilon_n \frac{n\pi}{l} K_2 \left\{ e^{\left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 K_2 t} \left[ \frac{B e^{-ct}}{\left(\frac{n\pi}{l}\right)^3 K_2 - c} + \frac{u_c}{\left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 K_2} \right] - \frac{B}{\left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 K_2 - c} - \frac{u_c}{\frac{n\pi}{l} K_2} \right\} \dots\dots\dots(21)$$

ただし,  $s = 2n - 1$

さらにせいりすると,

$$\begin{aligned} u = & \left[ \frac{4}{\pi}(u_0 + At_0) - \frac{A}{2K_1} \cdot \frac{3l^2}{s^2\pi^3} \right] \sum \frac{1}{s} e^{-K_1 \left(\frac{s\pi}{l}\right)^2 t} \cdot \sin \frac{s\pi}{l} x \\ & + \frac{A}{2K_1} \cdot \frac{8l^2}{\pi^3} e^{-K_1 \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 t_0} \cdot \sum e^{-K_2 \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 t} \cdot \sin \frac{\pi}{l} x \\ & + u_c \left( 1 - \frac{4}{s\pi} \cdot \sum \frac{1}{s} e^{-K_2 \left(\frac{s\pi}{l}\right)^2 t} \cdot \sin \frac{s\pi}{l} x \right) \\ & + B \left[ \frac{e^{-ct}}{\sin w\pi} \{ \sin w(\pi - \frac{\pi}{l}x) + \sin w \frac{\pi}{l} x \} - \frac{4}{\pi(s^2 - w^2)} \sum e^{-\left(\frac{s\pi}{l}\right)^2 K_2 t} \cdot \sin \frac{s\pi}{l} x \right] \\ = & \left[ \frac{4}{\pi}(u_0 + At_0) - \frac{u_c}{s} \right] - \frac{A}{2K_1} \cdot \frac{8l^2}{s^2\pi^3} \sum \frac{1}{s} e^{-K_1 \left(\frac{s\pi}{l}\right)^2 t} \cdot \sin \frac{s\pi}{l} x \\ & + \frac{A}{2K_1} \cdot \frac{8l^2}{\pi^3} e^{-K_1 \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 t_0} \cdot \sum e^{-K_2 \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 t} \cdot \sin \frac{n\pi}{l} x + u_c \\ & + B \left[ \frac{e^{-ct}}{\sin w\pi} \{ \sin w(\pi - \frac{\pi}{l}x) + \sin w \frac{\pi}{l} x \} - \frac{4}{\pi(s^2 - w^2)} \cdot \sum e^{-\left(\frac{s\pi}{l}\right)^2 K_2 t} \cdot \sin \frac{s\pi}{l} x \right] \dots\dots\dots(22) \end{aligned}$$

ただし,  $w^2 = \frac{cl^2}{K_2\pi^2}$

この式のうち  $B$  の項は

$$x=0 \text{ にては } B e^{-ct} \dots\dots\dots(23)$$

となり,

$$x = \frac{l}{2} \text{ にては } B \left\{ e^{-ct} \cdot \frac{2 \sin \frac{cl}{2K_2}}{\sin \frac{cl}{K_2}} - \frac{4}{\pi(s^2 - w^2)} \sum e^{-\left(\frac{s\pi}{l}\right)^2 K_2 t} \right\} \dots\dots\dots(24)$$

となる。  $t$  の値が大きくなると  $e$  の項は小さくなるが、また  $c, l, K_2$  の数値によつては  $B$  の項の第1項は無窮大に近い値にもなりうるし、水分分布を示す式としては不合理になる。ここではこれらの式はただ実験式的意味において水分分布を示し、かつ  $K_2$  の値を算出できることが望ましい。実験的には  $B$  の項をただ (23) 式とみなしただけの式でも、  $K_2$  の値が適当であれば測定した水分分布とよく合致した分布を示すことができるので、  $K_2$  を求める計算の便宜上、数学的には問題があるにしても、ここでは  $B$  の項に (23) 式を用い、次のごとく簡単なものに省略した式をもつて、実験式的な水分分布を示すものとしておく。

$$\begin{aligned} u = & u_c + B e^{-ct} + \left[ \frac{4}{\pi}(u_0 + At_0) - u_c \right] - \frac{A}{2K_1} \cdot \frac{8l^2}{\pi^3} \left( 1 - e^{-K_1 \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 t_0} \right) \\ & \times e^{-K_2 \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 t} \cdot \sin \frac{\pi}{l} x \dots\dots\dots(25) \end{aligned}$$

なお、表面含水率を示す項  $u_c + B e^{-ct}$  の値が時間とともに変化する間は第一減率乾燥時であり、すでに外周空気条件に平衡に達して変化しなくなつた時は第二減率乾燥を示すものである。

また、平均含水率  $u_m$  は次のごとくなり、  $u_m$  を知れば  $K_2$  を計算することができる。

$$\begin{aligned}
 u_m &= \frac{2}{l} \int_0^{l/2} u \cdot dx \\
 &= \underbrace{u_c + Be^{-ct}}_{u_c} + \frac{8}{\pi^2} \left[ (u_1 + At_1) - u_c \right] - \frac{A}{2K_1} \cdot \frac{2l^2}{\pi^2} (1 - e^{-K_1 \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 t_1}) \\
 &\quad \times e^{-K_2 \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 t} \dots\dots\dots (26)
 \end{aligned}$$

$$\therefore \frac{u_m - u_c}{P} = \frac{\pi^2}{8} e^{-K_2 \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 t} \dots\dots\dots (27)$$

REFERENCES CITED

- 1) Ellwood, E. L.; Properties of beech in tension perpendicular to grain and their relation to drying. Forest Products Research Society Journal, December 1953, Vol. III, No. 5.
- 2) Forest Products Laboratory, ANC-21, Kiln Certification. Published by Aeronautical Board, Washington, D. C., 1945.
- 3) Greenhill, W. L.; Strength test perpendicular to the grain of timber at various temperatures and moisture contents. Journal of the Council for Scientific and Industrial Research (Australia), Vol. 9, No. 4, November 1936.
- 4) Kollmann, F.; Untersuchunger über die Ursachen von Chaden bei der Trocknung von Grünen Eichenholz, zugleich Mitteilung über Festigkeits-prüfungen an Holz im Hochfrequenten Wechselfeld.
- 5) Loughborough, W. K. and Smith, H. H.; Development of stress schedules for the Kiln Drying of lumber. Unpublished Forest Products Laboratory report filed July 13, 1943.
- 6) McMillen, J. M., and Baltes, R. C.; Development of streeses in Red Oak during drying: Effect of width at 110°F. Unpublished report U. S. Forest Products Laboratory.
- 7) McMillen, J. M., and Youngs, R. L.; Development of stresses in Red Oak during drying.: Effect of relative humidity changes at 110°F. Unpublished report, U. S. Forest Products Laboratory.
- 8) Ogura Takeo: Studies on the mechanismus of drying of wood. (6) On solution of the diffusion equation of moisture in wood. Bull. of the Gov. For. Exp. St. No. 54, 1952.
- 9) Peck, E. C.; A new approach to the formulation of hardwood dry-kiln schedules. Southern Lumberman, December 15, 1940.
- 10) Rietz, R. C.: Accelerating the Kiln Drying of Hardwoods. Southern Lumberman, July 1, 1950.
- 11) Sawada Minoru: Method of tension test perpendicular to grain. The Journal of the Japanese Forestry Society, Vol. 35, No. 8, 1953.
- 12) Torgeson, O. W.: Schedules for the kiln drying of wood. U. S. Forest Products Laboratory Report 1791, 1951.
- 13) Terasawa S. and Ohnuma K.: Study on the effects of air velocity on the evaporation of water in wood during the constant rate of drying. Transactions of the 62nd meeting of the Japanese Forestry Society. April, 1954.

Takeo OGURA: Effect of Temperature on the Moisture Conductivity  
in Wood and on the Strain developed in Wood as it dries.

Résumé

This is a report of the research made by the author as a collaborator while participating in research work at the Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin, U. S. A. for eight months in 1953.

This study was made under the guidance of Mr. J. M. McMillen on definite lines of study connected with drying strain developed in wood during the drying period.

Acknowledgements are cordially made to Mr. Rietz and Mr. McMillen for their guidance in conducting this work, and for their kindness in allowing me the privilege of writing a publication in my own language on the results of the works done while the author was there.

On the standpoint of developing practical drying kiln schedules for drying wood as rapidly as possible without lowering its quality, numerous researches on drying strain developed in wood during drying have been made at the Forest Products Laboratory for 18 years. The experimental technique to measure drying strain developed in wood was described by Peck,<sup>9)</sup> and the general patterns of drying strain were published in the Kiln Certification Manual.<sup>2)</sup> The method of utilizing these preliminary studies to set up a new concept of kiln drying schedules was described by Rietz.<sup>10)</sup> In 1951 Torgeson<sup>12)</sup> brought out a whole new series of kiln schedules for American woods based on these principles.

In order to make further advance in the development of kiln drying schedules for wood based on drying strain, a more thorough knowledge of the effect of various variables on drying strain in wood is required. J. M. McMillen is continuing to make comprehensive studies of the strain that developed in red oak during drying from the standpoint mentioned above. This study, on the effect of temperature on the drying strain in wood, is the third in the series of studies. Reports are in preparation on a preliminary study of the effect of relative humidity at 110°F.<sup>7)</sup> and the effect of width of specimens at 110°F.<sup>6)</sup>

*Experimental method.*

The specimens used in this study were the red oak (*Quercus borealis*) stored in a low-temperature, high-humidity storage room for about one year. Each specimen was planed off in dressing it to the final dimension of 2 by 7 inches by 5 feet long, and the initial moisture content was about 80 percent.

After the marking 1-inch strain section at 2-inch intervals along the length of the specimens as illustrated in Fig. 1 was completed, and the width of each strain section was measured in green condition at the points designed for the midwidth of each slice, the specimen was placed in the kiln. The temperatures used in this study were 95°, 110°, 125° and 140°F. In carrying out the drying schedules at each temperature, an attempt was made to use the proper wet-bulb depression at each stage of the drying, so as to keep the equilibrium moisture content (E. M. C.) condition the same at each temperature for each stage of the average moisture content of specimens. Changes of wet-bulb temperature

depression were based on the “E” value, which is calculated from the following formula,

$$E = \frac{\text{Current moisture content} - \text{E. M. C.}}{\text{Original moisture content} - \text{E. M. C.}}$$

so as to achieve equality of drying condition between specimens dried at different temperatures. The E-values at which changes were made and the approximate E. M. C. condition were as follow, :

| <i>E-Value</i> | <i>E. M. C.</i> |
|----------------|-----------------|
| 1.00—0.60      | 18 (%)          |
| 0.60—0.52      | 16.9            |
| 0.52—0.45      | 15.1            |
| 0.45—0.38      | 13.0            |
| 0.38—0.30      | 9.2             |
| 0.30—0.25      | 6.3             |
| 0.25—0.20      | 4.4             |
| 0.20—          | 2.0             |

At each time of test, the section was cut from the specimen and the width of each slice marked on the section was measured. The strain section was then sawed into ten slices, and each slice was measured at the same point of the width as before, as shown in Fig. 3 and 4. The weight and the moisture content of each slice was measured.

### Results

The moisture diffusion coefficients, moisture conductivities and the effects of temperature on the moisture movement through the wood were obtained after the author returned to Japan, using the experimental data obtained in Madison, that is the drying curves (moisture content vs. time) for specimens dried in the equal drying conditions at different temperatures as mentioned above.

#### (1) Moisture conductivity.

##### a) Evaporating coefficient $\alpha$ at constant drying rate.

Moisture evaporating coefficients  $\alpha$  on surface at constant drying rate were calculated by the following equation;

$$\frac{dw}{A dt} = \alpha(p_w - p_0)$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{2}{l} \cdot \frac{100}{r_0} \cdot \alpha(p_w - p_0)$$

Although the drying condition ( $p_w - p_0$ ) was kept in equality at different temperatures, the drying rate increased with temperatures increase. Figure 8 shows the effect of temperature on the moisture evaporating coefficients.

##### b) Moisture diffusion coefficient; $\lambda$

Moisture diffusion coefficient was calculated by Egner's method in which it can be obtained by the following equation, using the moisture distribution

$$\lambda = \frac{r_0}{100} \cdot \frac{\frac{\partial}{\partial t} [\int u dx]}{\frac{du}{dx}}$$

curve at each drying stage shown in Figs. 9 to 12. The moisture diffusion coefficients  $\lambda$  calculated at different moisture contents are shown in Fig. 13, and this shows that  $\lambda$ -values are approximately equal regardless of moisture contents. The effects of temperatures on  $\lambda$ -values are shown in Fig. 14,

and it seems certain that the  $\lambda$ -values increased linearly with temperatures, in spite of keeping the drying condition in equality at different temperatures.

c) Moisture conductivity  $K$

Moisture conductivity  $K$ , which is the coefficient of the diffusion equation  $\frac{\partial u}{\partial t} = K \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ , was calculated by utilizing the equation described in the Appendix. Moisture conductivity  $K_1$  at constant drying rate was obtained by equation (14),  $K_2$  and  $K_3$  at the decreasing drying rate by equation (27).

$K_1$ -values obtained at different temperatures are shown in Table 1 and the relation between  $K_1$  and temperature is shown in Fig. 16.  $K_2$ -values were obtained in assuming that the moisture content on surface of specimens decreased exponentially as shown in Fig. 15 as they dried, and Table 2~5 showed the calculated values with  $K_3$ -values of the second decreasing drying rate. Both  $K_1$ - and  $K_3$ -values linearly increased with temperature as shown in Fig. 16. As mentioned above, all coefficients which mean the faculty of moisture movement through wood increased with temperatures, notwithstanding that the drying condition was kept in equality at different temperatures.

(2) Drying strain

a) Strain pattern

As shown in Figure 17, 18, 19 and 20, the general patterns throughout the drying process were generally the same for all temperatures studied. In other words, the outside slices were severely stretched, went into tension early in the drying, and reached a maximum tension strain. Tension strain in outer slices then started to subside to zero and, in reversal of stress, strain changed from tension to compression. Strain in the 2nd and 9th slices remained close to zero and did not become set. Strains in the other interior slices gradually increased to maximum in compression, then subsided to zero and reversed to tension set at the same time as the outside slices were going from tension to compression.

Table 6 shows the time, after the start of drying, that the maximum tension strain in the outside slices appeared, the magnitude of it and the average moisture content of wood, and the equilibrium moisture content condition in which the maximum strain occurred at each temperature. According to Table 6, it can be said that the higher the temperature in the kiln, the faster the time when the maximum tension strain occurs in the outside slices. Also, there is a general tendency for a greater maximum tension strain at the higher temperature, although the magnitude of the strain when it approached 110° and 125°F was about the same.

As far as the center slices are concerned, the maximum strain in compression always occurred considerably later than the maximum strain in tension in the outside slices, as shown in the strain patterns. The time to maximum strain, the magnitude of the maximum strain, the average moisture content of the slices, and the E. M. C. of kiln condition at time of maximum compression strain are shown in Table 7. As indicated in this table, the time to maximum compression strain in the center slices was considerably shorter for the higher temperature. As indicated by the E. M. C. values shown, this point was slightly later in the drying period for the lower temperature than for the higher temperature. This means that at the higher temperatures the point was reached while the wood held a higher average moisture content.



The time at which the tension strain in the outside slices changed to compression differed for each of the temperatures, occurring earlier at the higher temperature than at the low temperature. The times, the average moisture content of the slices, and the E. M. C. conditions in the kiln at this point are shown in Table 7. The change from tension to compression occurred at a higher average moisture content at the higher temperatures. Also, the kiln conditions were milder at this point for the higher temperatures, as shown by the higher E. M. C. values. It will be noted, however, that the average moisture content in all cases was around 30 percent. At this average moisture content, of course, the outside slices are below the fibre saturation point, and the interior slices are above the fibre saturation point. The compression strain in the center slices always changed to a tension strain later than the other slices did, and this change occurred at a later time than the time at which the outside slices changed from tension to compression.

At the end of drying in all cases, the outer slices are left with a higher degree of compression strain, and the inner slices with varying degrees of tension strain. This is a final condition found whenever hardwoods are dried without a conditioning treatment to relieve the strain known as casehardening.

b) Moisture distribution at maximum strain.

The moisture distribution at which the maximum tension strain appears in the outside slices is shown in Fig. 21. This shows that the moisture distribution in all cases was fairly steep near the surface and the steepest at the higher temperature. Figure 22 shows the moisture distribution at which the maximum compression strain occurred in the center slices. In all cases, the moisture gradient was about the same, the average moisture content apparently was considerably above the fibre saturation point, and the moisture content in the center slices was still over 60 percent. The moisture distribution at the time of the first maximum tension strain in the center slice after changing its strain is shown in Fig. 23. This figure shows that the moisture content in the center slices at the time of the maximum tension strain is still near or above the fibre saturation point, and that at this stage honeycomb is likely to occur.

c) Magnitude of the maximum strain

In order to determine the effect of the magnitude of the strain that occurs in the outside and center slices on the development of surface check and honeycomb, it is necessary to have information on the elastical properties of wood such as the stress and the elongation at proportional limit, strain—stress relations perpendicular to grain in both tension and compression, and the effect of temperature and moisture content on these elastical properties.

Some works in the testing of the strength of wood perpendicular to grain at various temperatures and moisture content values were reported by Greenhill,<sup>3)</sup> Kollmann<sup>4)</sup> and Ellwood.<sup>1)</sup> Although work on stress-strain relation perpendicular to grain of oak was done, as far as I know, only by Kollmann, there seems to be a certain doubt about the method of measuring stress-strain curve, and also the stress at proportional limit cannot exactly be ascertained. The study made by Sawada<sup>11)</sup> about the stress-strain relation in both tension and compression perpendicular to grain of several Japanese woods including oak, at moisture content of 17% and at room temperature is the only one which can be used for testing the development of check during drying. He reported that the magnitude of elongation at proportional limit was  $0.59 \pm 0.11\%$  in Japanese oak. The general order of magnitude of the maximum tension

strain in surface by whole slices was 0.003~0.0046 inch per inch as shown in Table 6. Consequently, it might be said that the magnitude of strain occurring on the surface layer of wood will be considerably larger than the average by whole slice, and will be about the same as the elongation at perpendicular limit or slightly above it. It is believed that the maximum strain on the surface is beyond the elastical zone and in the plastic zone on the surface tension strain, and the maximum strain in the center is also in the plastic zone of the compression strain in the center.

d) Set

“Set” is defined as the difference between the true normal shrinkage of the wood if it can be slowly dried without restraint, and the actual shrinkage of the wood as influenced by self-imposed restraint. In this case, the true normal shrinkage was estimated as the shrinkage observed for the second and ninth slices which, as illustrated in Fig. 17 to 20, were subjected to the uniform shrinkage for a time at the beginning of the drying process. The patterns of development of set in wood as it dried are shown in Fig. 24. According to this figure, tension set in the outside slices gradually increased after the maximum tension strain in it, thereafter lightly decreased and again increased after strain reversal. This tendency increased at higher temperature used in kiln.

The patterns of compression set in the center slice show approximately the same trend as tension set in the outside slice. The magnitudes of set are shown in Table 10. This table shows that there is a trend for greater compression set in the direction of higher temperature, but not so much as for tension set.

e) Strain, set, and stress distribution in wood after drying.

The strain and the shrinkage in wood kept in room condition for one and for two and a-half months after drying were observed. The same strain as that observed just after completing the kiln operation remained essentially unchanged, although the moisture distribution in wood turns uniform, as shown in Fig. 25. If the strains occurring in wood and the modulus of elasticity are known, it should be possible to calculate the magnitude of stress by formula:  $P = \Delta l/l \times E$ . However, it appears difficult, perhaps impossible, to calculate the stress in the wood at various stages in the drying process, because of the difficulty in obtaining either the exact value of moisture content in various portions of the wood, and in the Young's modulus corresponding to temperature at test and in the moisture content at that time. The author believed it might be helpful, however, to attempt a hypothetical analysis of the stress distribution in the wood at room temperature after the completion of drying. Figure 26 and 27 show the results of stress analysis, in which Young's modulus on beech in tension perpendicular to grain obtained by Greenhill<sup>2)</sup> were used. There seems to be a tendency for decreased stresses after longer storage in room. Little decrease of the stress at the surface of wood, however, can be expected, even though the wood stressed is kept for two and a-half months. It can be said, therefore, that a high-humidity high temperature conditioning treatment at the end of kiln drying is imperative in order to prevent casehardening from taking place.

f) Care in kiln operation.

Since maximum tension stress in the outside zone appears early in the drying process, it is during this stage that greatest care should be paid to

control of relative humidity so as to avoid surface and end checking. At the higher temperatures, this point of maximum tension stress in the outside occurs very early, so error in kiln operation must be avoided during the first day or two of drying. The fact that the present experiment indicates maximum stresses are greater at the higher temperatures also indicates that it would be wise to use higher relative humidity if a higher temperature is used. Better still, in the drying of wood which is especially susceptible to surface and end checking, high temperatures probably should be avoided at the start of drying.

Since the point of maximum tension in the center occurs while that zone still is at a comparatively high moisture content—at or above the fibre saturation point—and the wood is no stronger than it would be in the green condition, high temperature that weakens the wood should not be used at this point. This is the stage at which honeycombing is most likely to occur. As the interior dries down below the fibre saturation point, the wood becomes stronger and is better able to withstand the tension stresses, even though they remain high or increase, and higher temperatures can then be used.