

# 木材の静的負荷による温度の変化(第1報)

## 圧縮負荷による温度変化<sup>\*1</sup>

今 山 延 洋<sup>\*2</sup>

### The Temperature-change Caused by a Static Load Applied to Wood I.

The temperature-change caused by a compressive load<sup>\*1</sup>

Nobuhiro IMAYAMA<sup>\*2</sup>

This paper reports an investigation of the temperature-change caused by a static compressive load applied to wood. The phenomenon of the temperature-change caused by an elastic stress is generally known as the thermoelastic effect.<sup>2)3)4)</sup> J. P. Joule reported on the thermoelastic effect on wood by a compressive load in 1869.<sup>8)</sup> Reports on temperature-change in the plastic region of stress-strain curves are not within the scope of this paper.

The experimental material used in this study was makkanba, monarch birch (*Betula maximowicziana* Regel) having forty-two annual rings. The test specimen was cut from sapwood outside the seventeenth annual ring away from the pith. The shape of the specimen is shown in Figure 1. Its specific gravity was 0.61, and its moisture content was 12.2 percent. The load was applied to the longitudinal direction of the wood. The test was observed under a constant stress-rate, and the unit of stress-rate was expressed in kg/cm<sup>2</sup>/min. The temperature-change was measured with a five series Copper-Constantan thermocouple as shown in Figure 2.

The results were:

(1) Up to the proportional limit of the stress-strain curve, the temperature-change caused by the load is proportional to the stress and strain (Figs. 4 and 5). As is obvious from the results of the load-unload experiment, the temperature-change is reversible up to the proportional limit (Figs. 7 and 8(a)). The thermoelastic effect in an adiabatic state is expressed by equations (1) and (2). As the stress-rate greatly increases, the adiabatic state will be approximated. Then, as shown in Figure 10, the measured values approach the calculated value which is obtained by substituting  $c=0.395$  cal/g°C,  $\alpha=3.57 \times 10^{-6}$ /°C,  $\rho=0.61$  g/cm<sup>3</sup>, and  $T=288^\circ\text{K}$  into equation (2) where  $c$  is the specific heat,  $\alpha$  is the coefficient of linear expansion,  $\rho$  is the density, and  $T$  is the absolute temperature scale. It can be concluded that the temperature-change caused by the stress up to the proportional limit is the thermoelastic effect.

(2) Above the proportional limit of the stress-strain curve, the temperature-change caused by the stress above the proportional limit is proportional to the strain rate (Fig. 6). As is obvious from the results of the load-unload experiment, the temperature-change above the proportional limit is irreversible (Figs. 8(b) and 9).

(3) It can be concluded that the proportional limit agrees with the elastic limit under the conditions of this experiment.

木材に静的圧縮負荷を与えたときに発生する温度の変化について述べた。応力-ひずみ線図における比例限度内の領域では、圧縮負荷に対して可逆的な正の温度変化を示すが、比例限度以上の領域では不可逆的な発熱温度変化を示すことがわかった。

<sup>\*1</sup> Received January 5, 1981. 本報告の一部は第27回日本木材学会大会(1977年4月, 京都)において発表した。

<sup>\*2</sup> 静岡大学教育学部 Faculty of Education, Shizuoka University, Shizuoka 836

## 1. 緒 言

木材に動的負荷を与え疲れが生じると温度上昇を示すことが知られている<sup>1)</sup>。しかしながら、このような動的負荷だけでなく、静的負荷を与えても温度変化を生ずる。一般に静的な負荷の過程で、弾性域における負荷と温度変化の係に熱弾性効果<sup>2~4)</sup>といわれる現象がある。この現象は、結晶体の弾性的性質と電氣的性質と熱的性質との係におけるHeckmannの三角形の一辺に位置している<sup>5,6)</sup>。これらの係は木材にも適用されることが期待され<sup>7)</sup>、すでに、木材の圧電効果や熱電効果について研究が進められている。しかし、弾性域における熱弾性効果はJ. P. Jouleが1869年に報告<sup>8)</sup>しているのみである。一方、塑性的性質を示す領域の温度変化については報告が見られないようである。

このように、静的負荷による木材の温度変化についての研究は、無負荷の状態から破断にいたるまでの負荷を受ける全領域についてほとんどなされていないのが現状である。

そこで、本研究では木材に静的圧縮負荷を与え、それによる温度の変化を測定し、破断までの温度変化の過程と特徴を、応力-ひずみ線図の比例限度内の領域と比例限度以上の領域に分けて全体的に把握し、基礎的知見を得ることを目的とした。

## 2. 実験方法

供試材は早晚材の差が比較的少ない髓から数えて42年輪の市販のマカンバ(*Betula Maximowicziana* Regel)である。試験片は髓から数えて17年輪以上の辺材部から作製した。試験片の形状はFig. 1に示すとおりである。試験片の気乾比重は0.61、含水率は12.2%、実験温度は室温(15~20℃)であり、負荷の方向は繊維方

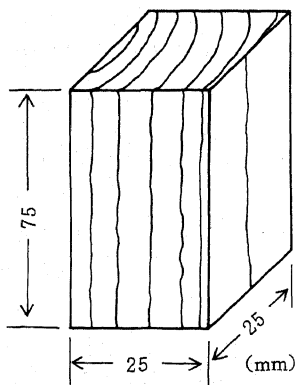


Figure 1 Shape and dimensions of compressive test specimen.

向である。

荷重試験機はアムスラー型試験機を用い、荷重の時間変化を記録計に入れ、その様子をみながら負荷速度を手動で調整し、破壊までほぼ一定の負荷速度を与えた。以後、負荷速度は(kg/cm<sup>2</sup>/min)で表示した。

ひずみ測定には新興通信社製ひずみゲージS 104を用いた。ひずみゲージは、破壊時に圧縮しわが斜めに走る板目面中央部に貼付し、ひずみ計を通してひずみの時間変化として記録した。

温度変化の測定は直径0.1 mmの銅-コンスタンタン熱電対を用いた。

一般に、固体表面の微小温度変化を測定するのは難しく、木材などの固体表面では接触して測温するために接触面積が小さくは困る。しかしながら、微小温度を測定するには検出素子の熱容量が小さい方がよい。さらに、これらと関連して、温度変化に対応するには時間応答性が大きい方がよい、などの諸条件が要求される。これらの理由から、本実験では直径のできるだけ小さい熱電対を用い、さらに熱電対の感度を上げるために、Fig. 2に示すように銅とコンスタンタンを交互に10個所を接続し熱電対列とした。図に示すように、一つおきに冷接点とし、合計5個の冷接点はできるだけ近づけて試験片と同じ材にセロテープで貼りつけて、試験片のすぐ近くで環境温度がほぼ同じ場所に固定した。また、他の5個の接点をできるだけ近づけ、試験片中央部のひずみゲージのすぐ近くにセロテープで固定し、ひずみ変化と温度変化が対応するようにした。試験片の周囲の空気の動きをなくし試験片の温度を安定させるために、試験片の周囲を保温材と布で四重にわたって覆いをした。さらに、2~3時間放置して試験片の温度と環境温度が安定するのをまって実験をおこなった。得られた温度変化は実験開始時の試験片の温度を基準とし、単位は摂氏(℃)で表示した。本実験に用いた熱電対列は5対であるから、1対の熱電対の時の5倍の出力を得ることができる。この出力を増幅器を通さずに直接理研電子社製記録計SP-H7V

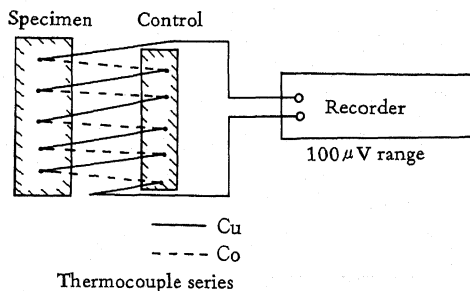


Figure 2 Schematic diagram of temperature-change measurement.

のフルスケール  $100\mu V$  レンジに印加させることによって雑音をほとんど除去することができた。

### 3. 結果と考察

試験片に静的圧縮荷重が作用するとき、試験片の温度は上昇する。その一例を Fig. 3 に示す。図は試験片が破壊するまでの温度 ( $\theta$ )、応力 ( $\sigma_c$ ) およびひずみ ( $\epsilon_c$ ) の時間変化を示している。荷重は一定速度で増加させた。図から明らかなように、温度変化の形は前半はほぼ直線で、後半は曲線的である。温度変化の値は小さく、前半

の直線部分の終りで  $2 \sim 3 \times 10^{-2}^{\circ}C$ 、後半の曲線部分の終りで約  $1 \times 10^{-1}^{\circ}C$  である。これらの値は荷重速度によって若干異なるが、温度変化は本実験で用いられた荷重速度の範囲 ( $100 \sim 465 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$ ) では全く同じ経過を示した。

#### 3.1 比例限度内の温度変化

応力およびひずみと温度変化との関係をそれぞれ Fig. 4 および Fig. 5 に示す。図中、PL は応力-ひずみ線図の比例限度を表わす。図から明らかなように、いずれの関係も比例限度までは直線であり、その後は直線からは

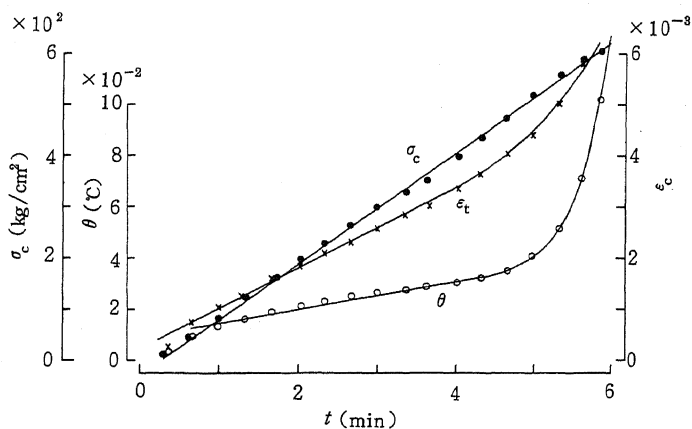


Figure 3 Variation of stress ( $\sigma_c$ ), strain ( $\epsilon_c$ ), and temperature-change ( $\theta$ ) in static compressive test.

Note:  $t$ : time.

Stress-rate =  $100 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$ .

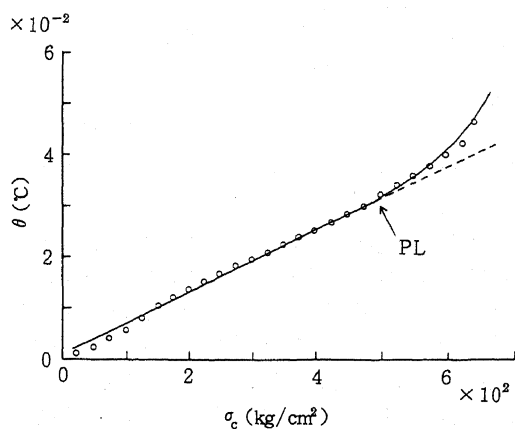


Figure 4 Relationship between compressive stress ( $\sigma_c$ ) and temperature-change ( $\theta$ ).

Note: PL: Proportional limit.

Stress-rate =  $465 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$ .

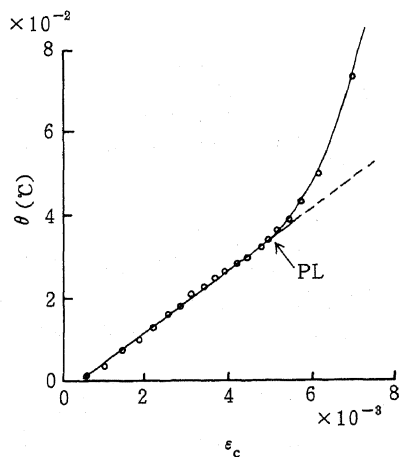


Figure 5 Relationship between compressive strain ( $\epsilon_c$ ) and temperature-change ( $\theta$ ).

Note: PL: Proportional limit.

Stress-rate =  $386 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$ .

ずれている。これらの結果から、比例限度内の温度変化は応力やひずみと比例していることがわかる。

### 3.2 比例限度以上の領域の温度変化

比例限度を越えて荷重が増加すると、応力およびひずみと温度変化の関係は、Fig. 4やFig. 5に見られるように直線関係からはずれる。そこで、比例限度以上の領域に関係が深いと思われるひずみ速度と温度変化の関係をFig. 6に示す。図中、ひずみ速度はFig. 3におけるひずみの各プロット、2点間の変化を時間変化で除したものである。図から明らかなように、比例限度内では両者は無関係であるが、比例限度以上の領域ではひずみ速度と温度変化の間に比例関係を示している。このように、比例限度以上の領域を一つの領域としてみることができる。

以上のように、比例限度内の温度変化と比例限度以上の領域の温度変化が全く異なった性質をもつことが明らかになった。

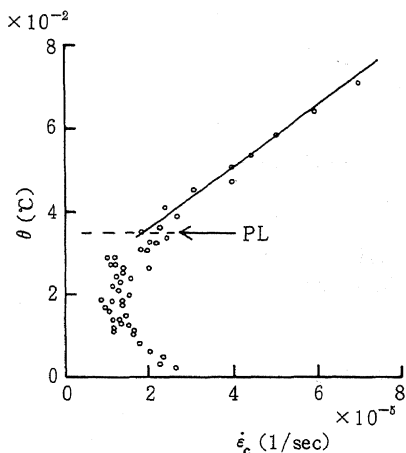


Figure 6 Relationship between temperature-change ( $\theta$ ) and compressive strain rate ( $\dot{\epsilon}_c$ ).

Note: PL: Proportional limit.

Stress rate = 100 kg/cm<sup>2</sup>/min.

### 3.3 負荷—除荷による温度変化

#### 3.3.1 比例限度内の温度変化

負荷の最大応力が比例限度内となるような負荷—除荷実験をおこない、応力やひずみが元に戻ったとき温度変化もゼロになるか否かによって、比例限度内の負荷による温度変化の可逆性を検討した。

負荷のはじめから除荷の終わりまでの時間変化にともなう温度変化の一例を応力およびひずみの変化とともにFig. 7に示す。負荷と除荷の過程で負荷速度ができるだけ同じになるようにした。Fig. 7の例の場合、負荷の最大値は450 kg/cm<sup>2</sup>であり、比例限度の平均値490 kg/cm<sup>2</sup>よりも低い。図から明らかなように、除荷により応

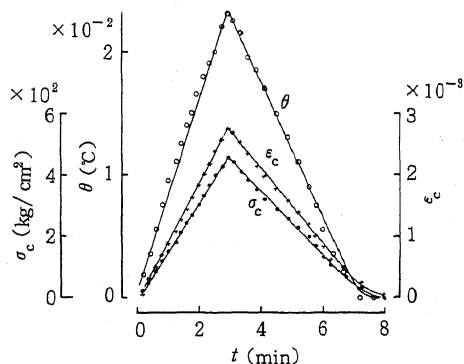


Figure 7 Variation of stress ( $\sigma_c$ ), strain ( $\epsilon_c$ ), and temperature-change ( $\theta$ ) in load-unload compressive test up to proportional limit. Note:  $t$ : time

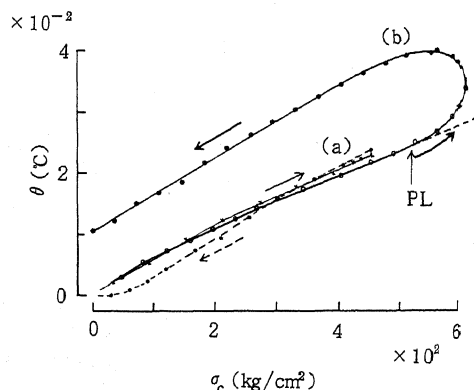


Figure 8 Relationship between compressive stress ( $\sigma_c$ ) and temperature-change ( $\theta$ ) in load-unload test.

Note: PL: Proportional limit. (a): up to proportional limit. (b): above the proportional limit.

—○—: loading process.

---●---: unloading process.

力やひずみが実験開始時と同じ状態に戻るとき温度も元に戻ることが明らかになった。

さらに、Fig. 8 (a)に応力と温度変化の関係の一例を示す。負荷と除荷の順序を実線の矢印で示す。図から明らかなように、負荷、除荷時ともほぼ直線関係を示し、しかも両者はほとんど重なっている。図示していないが、応力—ひずみ線図も同様な結果を得た。以上のことから、比例限度内の温度変化が応力やひずみと同様に可逆的であることを示している。

#### 3.3.2 比例限度以上の領域の温度変化

一般に、塑性領域を経験した材料は負荷がなくなってもひずみは完全には元に戻らず、ここで生じた非弾性的

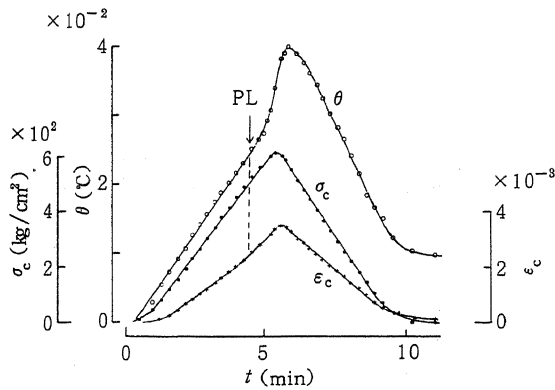


Figure 9 Variation of stress ( $\sigma_c$ ), strain ( $\epsilon_c$ ) and temperature-change ( $\theta$ ) in load-unload compressive test above proportional limit.

Note:  $t$ : time. PL: Proportional limit.

なエネルギーは熱などに変換され、いわゆる不可逆性を示すと考えられる。

最大応力が比例限度を越えた場合の負荷-除荷による時間変化に対する温度変化の一例を、応力およびひずみの変化とともに Fig. 9 に示した。この場合も、負荷速度は負荷時と除荷時とできるだけ同じになるようにした。図からわかるように、負荷時において比例限度を越えてから急に温度が上昇している。除荷時では温度はほとんど同じ傾きで降下し、最後の除荷終了時に温度上昇分が残る。この大きさは、負荷時の比例限度以上の領域における温度上昇分とほぼ同じ大きさである。

この温度変化を応力との関係でみると Fig. 8 (b) のようになる。負荷、除荷をそれぞれ (○) および (●) 印で示す。負荷時において、比例限度までは Fig. 8 (a) と同じ経過である。比例限度以上の領域になると曲線的に上昇する。除荷がはじまっても曲線的な上昇がわずかに続くが、やがてゆるやかに低下をはじめ、比例限度を通過したところから直線的に低下する。この直線の傾きは負荷のそれとほぼ同じであり、また Fig. 8 (a) の除荷の傾きとも同じである。除荷が終わったとき、明らかに温度上昇分が残る。したがって、Fig. 8 (b) は比例限度以上の領域で生じた温度変化分を、比例限度内の温度変化である Fig. 8 (a) につぎたした形となっている。

このことは、比例限度以上の領域での温度変化は不可逆的であり、したがって発熱変化と考えることができるであろう。更に、以上の結果から、本実験の範囲内では比例限度は弾性限度と一致しているとみることができるであろう。

### 3.4 熱弾性効果

これまでのことで、比例限度内の温度変化は応力やひ

ずみと比例関係にあり、さらに可逆的性質をもつことがわかった。換言すると、この温度変化は弾性的応力やひずみによって生ずる弾性的変化であるといえる。

一般に、材料に弾性応力が急激に加えられ、周囲とよんの熱の交換もなしに最大応力に達し、その材料は熱を出したり受けたりせず、材料の温度変化がそれに加えられた負荷によってのみ生じたものであるとき、これを断熱変化といい、弾性応力によって温度変化を生じる現象を熱弾性効果という<sup>3)</sup>。断熱変化の場合の温度変化は次式で与えられる<sup>3)</sup>。

$$\frac{\partial T}{\partial \epsilon} \Big|_s = \frac{V_m \alpha E T}{c} \quad (1)$$

ここで、 $\frac{\partial T}{\partial \epsilon} \Big|_s$  はエントロピーが一定のもとにおけるひ

ずみによる温度変化を表わし、 $V_m$  は物質のモル容積、 $E$  は等温ヤング率、 $\alpha$  は線膨張係数、 $T$  は絶対温度、 $c$  は比熱である。(1) 式の解の一次近似をとり、 $dT = \theta$ 、 $V_m/c = 1/\rho c$  ( $\rho$  は密度)、 $\sigma = E \cdot \epsilon$  とすると、

$$\theta = \frac{\alpha T E}{\rho c} \cdot \epsilon = \frac{\alpha T}{\rho c} \cdot \sigma \quad (2)$$

となる。ただし、(1)、(2) 式とも圧縮応力および圧縮ひずみを正とした。本実験の場合にあてはめて、 $c = 0.395 \text{ cal/gr. } ^\circ\text{C}^{\circ})$ 、 $\alpha = 3.57 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}^{10)}$ 、 $\rho = 0.61 \text{ gr./cm}^3$ 、 $T = 288^\circ\text{K}$  を用い、(2) 式より応力と温度変化の関係を求め Fig. 10 に “calculated curve” として示した。図中に種々の負荷速度について求めた結果も併記した。図から明らかなように、負荷速度がまし周囲への熱の流出が少なくなると考えられるほど、断熱状態である計算値に近づくことがわかる。

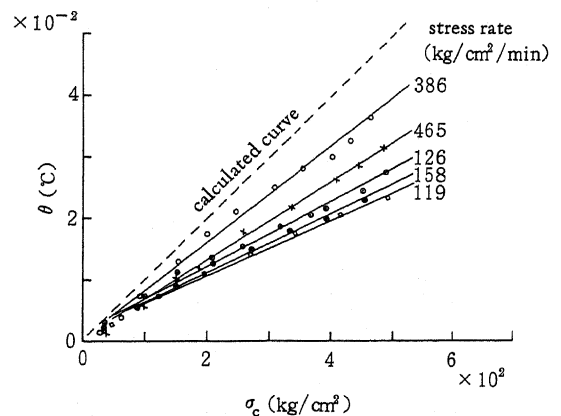


Figure 10 Relationship between compressive stress ( $\sigma_c$ ) and temperature-change ( $\theta$ ) with various stress rates.

Note: ----: calculated curve by equation (2).

以上のように、静的圧縮負荷による比例限度内の温度変化は、応力やひずみと比例関係にあり、また可逆的であり、さらに負荷速度の増加にともなって断熱状態の計算値に近づくことから、この現象は熱弾性効果といえる。

#### 4. ま と め

木材に静的圧縮負荷を与えたとき、圧縮負荷による温度変化の現象は、比例限度を境として相反する性質をもつ二つの領域が存在することが確かめられ、次のような基礎的知見が得られた。

1) 応力-ひずみ線図の比例限度内においては、荷重の増加とともに温度は上昇し、その温度上昇と応力やひずみとの間には直線関係が存在する。その性質は可逆的であり、この現象は熱弾性効果といえる。

2) 比例限度以上の領域においても温度は上昇するが、その性質は不可逆的である。したがって、この温度変化は発熱変化といえる。

3) 本実験の範囲内においては比例限度は弾性限度と

一致しているとみることができるであろう。

#### 文 献

- 1) 今山延洋, 松本 勲: 木材誌, **20**, 53 (1974)
- 2) M. J. Sinnott: “固体物性”, 丸善, p. 286 (1972)
- 3) J. Wulff: “材料科学入門Ⅲ”, 岩波書店, p. 42 (1967)
- 4) R. A. Swalin: “固体の熱力学”, コロナ社, p. 24 (1970)
- 5) Heckmann, G.: Springer Tracts in Modern Physics, Berlin, 4, 140 (1925)
- 6) J. F. Nye: “Physical Props. of Crystals”, Oxford University Press, London, 170 (1957)
- 7) 渡辺治人: “木材理学総論”, 農林出版, p. 389 (1978)
- 8) J. P. Joule: Phil. Trans., Collected Papers, 1, 413 (1859)
- 9) 林業試験場編: “新版木材工業ハンドブック”, 丸善, p. 158 (1973)
- 10) 梶田 茂編: “木材工学”, 養賢堂, p. 249 (1961)