［木材学会誌 Vol. 27, No. 7, p. 535～540 (1981) (論文)］

# 木材の静的負荷による温度の変化(第2報)†

## 引張負荷による温度変化*1

今 山 延 洋*2

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

## The temperature-change caused by a tensile load*1

Nobuhiro IMAYAMA*2

A previous paper[1] reported an investigation of the temperature-change caused by a static compressive load applied to wood. This paper reports an investigation of the temperature-change caused by a static tensile load applied to wood. J. P. Joule reported on the thermoelastic effect[2)3)4)] on wood by a tensile load in 1869,[5] but after that, it seems that there are no reports on this subject. Reports on the temperature-change in the plastic region of stress-strain curves are not within the scope of this paper.

The experimental material and methods used in this study were the same as described in the previous report.[1] The shape of the specimen is shown in Figure 1. The load was applied along the grain of wood.

The results were:

(1) Up to proportional limit of the stress-strain curve, the temperature-change caused by the load is proportional to the stress and strain (Figs. 3 and 4). As is obvious from the results of the load-unload experiment, the temperature-change is reversible up to the proportional limit (Figs. 6 and 7(a)). The thermoelastic effect in an adiabatic state is expressed by equation (1). As the stress-rate greatly increases, the adiabatic state will be approximated. Then, as shown in Figure 9, the measured values approach the calculated value which is obtained by substituting $c$=0.395 cal/g°C, $\alpha=3.57\times10^{-6}$/°C, $\rho$=0.61 g/cm$^3$, and $T$=288°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 in both cases of tension and of compression (Fig. 9).

(2) Above the proportional limit, the temperature-change caused by the stress above the proportional limit is proportional to the strain rate (Fig. 5). As is obvious from the results of the load-unload experiment, the temperature-change above the proportional limit is irreversible (Figs. 7(b) and 8). The pattern of the stress-temperature-change curve of the load-unload experiment up to the proportional limit is the same as the pattern above the proportional limit. Also its pattern is unique compared with that of compression.

(3) Comparing the stress-temperature-change curve with the stress-strain curve, we can easily determine the proportional limit in the stress-strain curve. It can be concluded that the proportional limit agrees with the elastic limit under the conditions of this experiment, and that the elastic limit can be defined as the point where the temperature-change caused by the load becomes irreversible.

木材に静的引張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，圧縮の場合とは逆に可逆的な温度降下を示す。一方，比例限度以上の領域では圧縮と同様に不可逆的な発熱温度変化を示すことがわかった。

† Report I: This Journal, 27, 529 (1981)
*1 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。
*2 静岡大学教育学部 Faculty of Education, Shizuoka University, Shizuoka 836

## 1. 緒　　言

前報[1]において，圧縮負荷による温度変化の挙動とその基本的性質を明らかにした。本実験では，負荷の方向が圧縮とは逆の引張による温度変化について報告する。Joule が 1869 年に木材を引張負荷したときの温度変化を熱弾性効果[2～4]として報告[5]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，圧縮と同様に引張負荷による温度変化の基本的性質が明らかにされていない。本報告では引張負荷による温度変化の挙動を，前報[1]と同様に応力－ひずみ線図の比例限度を境として考察を加え，さらに圧縮と関連させて基本的性質を明らかにした。

## 2. 実験方法

実験方法，温度検出方法等は前報と同様であるのでその概要のみを記す。

供試材は髄から数えて 42 年輪のマカンバ(*Betula Maximowicziana* Regel)である。試験片は髄から数えて 17 年輪以上の辺材部より作製した。試験片の形状を Fig. 1 に示す。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，負荷方向は繊維方向である。荷重試験機はアムスラー型試験機を用い，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。

温度変化の測定には直径 0.1 mm の銅－コンスタンタンの 5 列の熱電対列を用いた。これによって 1 対の熱電対の時の 5 倍の出力を得ることができるので，この出力を前報[1]と同様に増幅器を通さずに，直接に理研電子社製記録計 SP-H 7 V のフルスケール 100 $\mu$V レンジに印可させることによってほとんど雑音を除去することができた。この熱電対およびひずみゲージは試験片中央部まさ目面にそれぞれ隣接して貼付した。

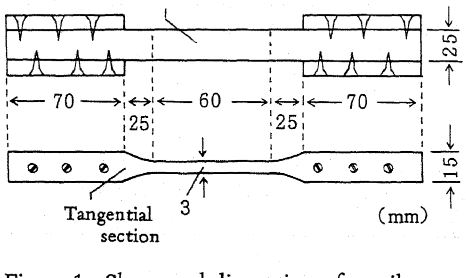


Figure 1 Shape and dimension of tensile test specimen.

## 3. 結果と考察

試験片に静的引張荷重が負荷されると，一例を Fig. 2 に示すように，圧縮の場合[1]とは逆に試験片の温度は降下する。図は温度変化($\theta$)，応力($\sigma_t$)およびひずみ($\varepsilon_t$)について破壊までの時間変化を示している。温度変化は実験開始時の試験片の温度を基準とした。荷重は一定速度で増加させた。図から明らかなように，温度変化の前半はほぼ直線的に降下するが，後半は直線的な降下からはずれ，徐々に曲線的に上昇する。このような温度変化の値は非常に小さく，最低値で約 $-5\times10^{-2}$ ℃程度である。これらの値は負荷速度によって若干異なるが，温度変化の形は本実験で用いられた負荷速度の範囲(105～677 kg/cm²/min)では全く同じ経過を示した。

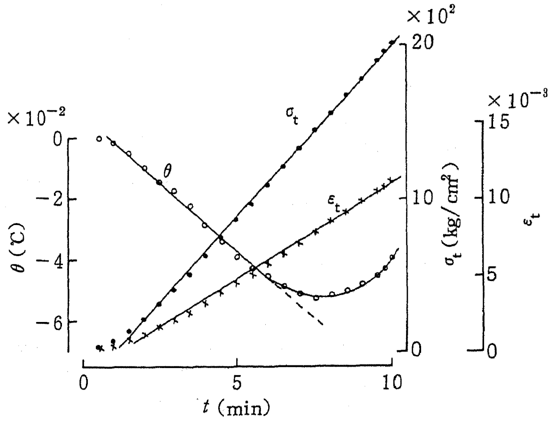


Figure 2 Variation of stress ($\sigma_t$), strain ($\varepsilon_t$), and temperature-change ($\theta$) in static tensile test.
Note: $t$: time.
Stress-rate = 214 kg/cm²/min.

### 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. 3 および Fig. 4 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，応力－温度変化線図，ひずみ－温度変化線図とも比例限度までは直線関係を示し，その後比例限度を越えると直線からはずれる。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関係にあることがわかる。

### 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，Fig. 3 や Fig. 4 から明らかなように，温度変化は応力およびひずみとの直線関係からはずれ，比例限度内の温度変化とその性質を異にしていることを示唆している。

前報[1]の圧縮においては比例限度以上の領域をひずみ

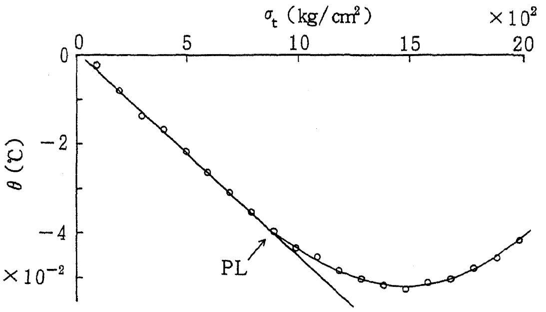


Figure 3　Relationship between tensile stress ( $\sigma_t$ ) and temperature-change ( $\theta$ ).
Note:　PL: Proportional limit.
Stress-rate = 214 kg/cm$^2$/min.

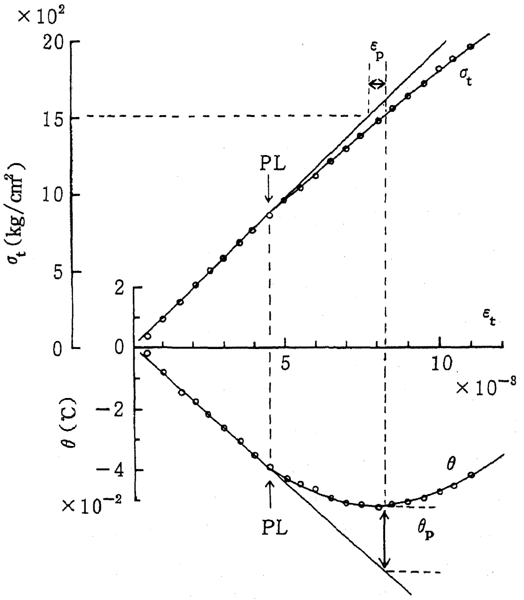


Figure 4　Relationship between tensile strain ( $\varepsilon_t$ ) and temperature-change ( $\theta$ ), and relationship between tensile stress ( $\sigma_t$ ) and strain ( $\varepsilon_t$ ).
Note:　PL: Proportional limit.
$\varepsilon_p$ : Plastic strain.
$\theta_p$ : Plastic temperature-change.
Stress-rate = 214 kg/cm$^2$/min.

速度との関係によって検討したが，Fig. 2からわかるように，引張においては破壊に至る過程でひずみ速度の大きな変化がみられない。そこで，ここでは次に定義する塑性ひずみとの関係を求めた。まず，Fig. 4において塑性ひずみと塑性温度を定義する。図において応力および温度変化の線の比例限度内の直線を延長し，これらの直線と同一応力に対応したひずみおよび温度変化の実測値

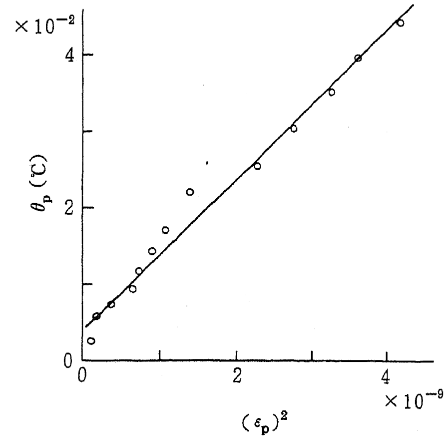


Figure 5　Relationship between plastic temperature-change ( $\theta_p$ ) and plastic strain ( $\varepsilon_p$ ).
Note:　Stress-rate = 214 kg/cm$^2$/min.

との差を，それぞれ塑性ひずみ($\varepsilon_p$)，塑性温度($\theta_p$)とする。塑性ひずみの二乗をとって塑性温度との関係をみると，Fig. 5に示すように両者の間にほぼ比例関係が存在しており，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。

### 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. 6に示す。負荷と除荷の過程で負荷速度ができるだ

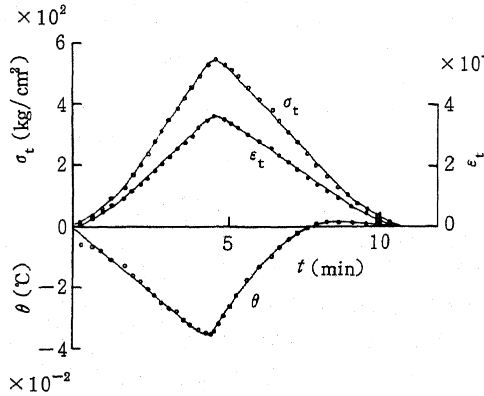


Figure 6　Variation of stress ( $\sigma_t$ ), strain ( $\varepsilon_t$ ), and temperature-change ( $\theta$ ) in load-unload tensile test up to proportional limit.
Note:　$t$: time.

け同じになるようにした。Fig. 6 の場合，負荷の最大値は 550 kg/cm² であり，比例限度の平均値 890 kg/cm² よりも低い。図から明らかなように，除荷により応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った。しかし，除荷の形は負荷の形と左右対称でなく，除荷のはじめで急な温度上昇を示し，後半ではほとんど横ばいとなる。

応力と温度変化の関係をFig. 7 (a)に示した。負荷と除荷の順序を実線の矢印で示す。この場合の応力－ひずみ線図は負荷，除荷ともにそれぞれ直線となり，両者はほとんどかさなる。図から明らかなように，負荷の形はFig. 3 と同様にほとんど直線である。しかし，除荷時ははじめ温度が急に上昇し，後半は横軸に平行で零に戻る。このように，圧縮の場合[1)]とくらべると，負荷時と除荷時の軌跡線がかさならず特徴的な形を示す。しかしながら，応力が元に戻るといずれの実験においても温度も元に戻ることから，比例限度内における温度変化は，圧縮[1)]と同様に可逆的であると考えられる。

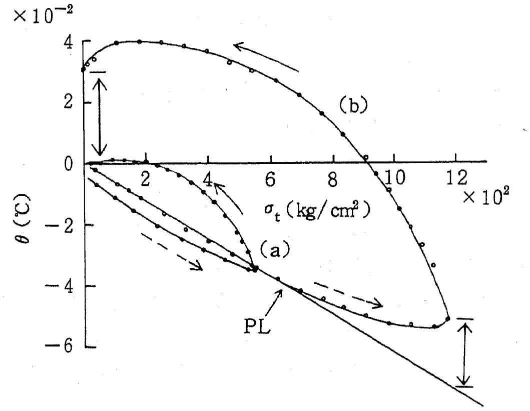


Figure 7 Relationship between tensile stress ($\sigma_t$) and temperature-change ($\theta$) in load-unload test.
Note: (a) up to proportional limit.
(b) above proportional limit.
---→ : loading process.
——→ : unloading process.
PL: Proportional limit.

### 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. 8 に示した。この場合も，負荷速度

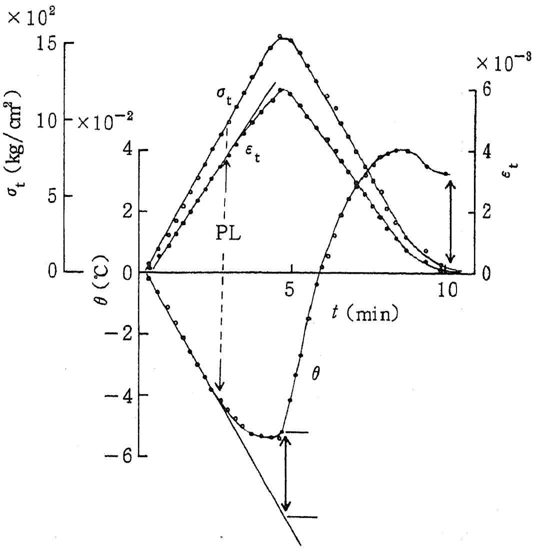


Figure 8 Variation of stress ($\sigma_t$), strain ($\varepsilon_t$), and temperature-change ($\theta$) in load-unload tensile test above proportional limit.
Note: PL: Proportional limit.

は負荷時と除荷時でできるだけ同じになるようにした。負荷のときの温度変化の形はFig. 2 と同じである。除荷のはじまりは温度曲線が最小値を過ぎて少し上向きになった点である。この点と比例限度内の直線を延長した線との差が，比例限度を越えてから温度変化した分である。除荷がはじまるとすぐに急な傾きで温度が上昇し値が正になる。後半はゆるやかな温度変化をし，最後に温度上昇分を残して除荷が終る。除荷終了時において，ひずみの残留分を明確には認めることができなかった。この温度上昇分は，負荷時に比例限度を越えてから正の方向へ温度変化した大きさにほぼ相当している。

この温度変化を応力との関係でみるとFig. 7 (b)になる。温度は負荷が最大となるところではFig. 3と同じであるが，除荷がはじまると前半は急に上昇し，後半は変化がゆるやかとなり，最後に温度上昇分が残って終る。Fig. 7 の(a)と(b)は同じ形を示した。圧縮の場合[1)]と異なって，なぜこのような形をとるのかは今後の課題である。図から明らかなように，応力が零になっても正の温度変化が残っており，これは負荷時に比例限度を越えてから最大応力に達するまでの間に生じた正の方向の温度変化分に相当している。

以上のように，比例限度以上の領域における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。

### 3.4 熱弾性効果

材料に弾性応力が断熱的に作用した場合の温度変化の

一次の近似式は，前報[1]において次式で与えられた。

$$\theta=\frac{\alpha TE}{\rho c}\cdot\varepsilon=\frac{\alpha T}{\rho c}\cdot\sigma \qquad (1)$$

ここで，$\theta$ は試験片の温度変化，$\alpha$ は線膨張係数，$E$は等温ヤング率，$\varepsilon$ はひずみ，$\sigma$ は応力である。また，$\sigma=E\cdot\varepsilon$ と仮定し，圧縮応力を正，引張応力を負にとった。

圧縮の場合[1]と同様に，$\rho=0.61\ g/cm^3$，$c=0.395\ cal/gr.℃$[6]，$\alpha=3.57\times10^{-6}/℃$[7]，$T=288°K$を用い計算するとFig. 9 (b)となる。図から明らかなように，負荷速度が増し周囲からの熱の流入が少なくなると考えられるほど，断熱状態の計算値に近づくことがわかる。

Fig. 9 (a)は前報[1]で示した圧縮の結果ある。(a)，(b)を合わせてみると，図から明らかなように，圧縮および引張の負荷速度が増し，周囲との熱の出入が少なくなるほど断熱状態の計算値，つまり(1)式に近づき，圧縮と引張の両方を(1)式は表わしている。

以上のように，引張負荷による比例限度内の温度変化は，引張負荷に対して温度は降下し，応力やひずみと比例関係にあり，さらに可逆的で，負荷速度の増加にともない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であり，圧縮と引張は一つの式で表現できると考えられる。

従来，引張応力－ひずみ線図における比例限度の決定には非常に難しいものがあった。しかし，以上の実験結果から，応力－温度変化線図やひずみ－温度変化線図と対応させることにより，比例限度の決定が非常に容易になると考えられる。

また，本実験の範囲内では比例限度と弾性限度が一致しているとみることができ，さらに，温度変化が不可逆的になる限界として弾性限度を定義することができると考えられる。

## 4. まとめ

木材に静的引張負荷を与えたとき，引張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，圧縮とは逆に，温度は荷重の増加とともに降下し，応力やひ

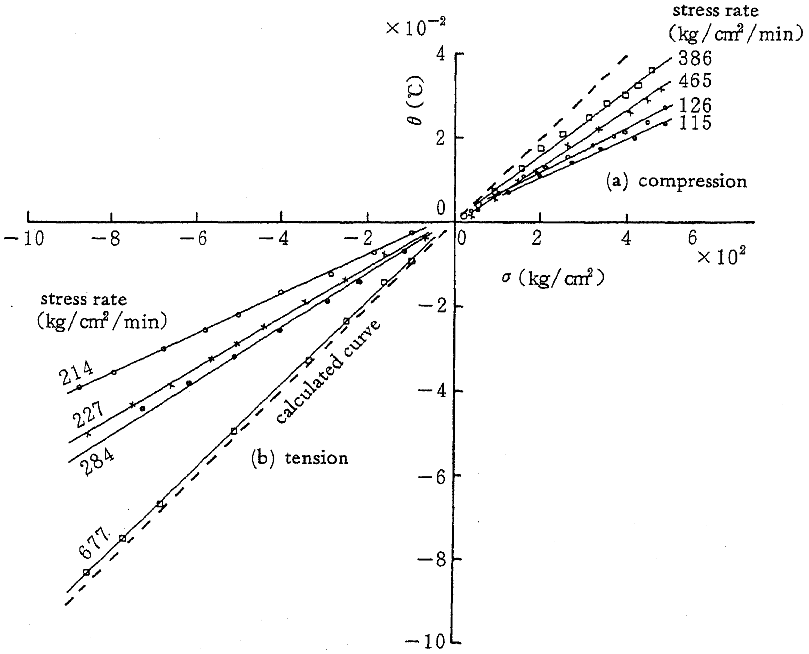


Figure 9 Relationship between stress ($\sigma$) and temperature-change ($\theta$) with various stress-rates in both cases of tension and of compression.
Note: (a): compression. (b): tension.
---- : calculated curve by equation (1).
Compressive stress is plus and tensile stress is minus.

ずみと比例関係が存在する。その性質は可逆的であり，この現象は圧縮と同様に熱弾性効果といえる。

2）比例限度以上の領域においては，圧縮と同様に温度は上昇し，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）本実験の範囲内では，温度変化が不可逆的になる限界として弾性限度を定義することができるであろう。

## 文　献

1) 今山延洋：木材誌，**27**，529 (1981)
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) J. P. Joule: Phil. Trans., Collected Papers, 1, 413 (1859)
6) 林業試験場編："新版木材工業ハンドブック"，丸善，p. 158 (1973)
7) 梶田　茂編："木材工学"，養堅堂，p. 249 (1961)