

論 文

サーモグラフィ装置を用いた木材の横圧縮変形時の温度測定

栗山欣悟*・澤田 豊*・藤井義久*・奥村正悟*

Temperature Measurement during Deformation by Lateral Compression
of Wood Using a Thermography Device

Kingo KURIYAMA*, Yutaka SAWADA*, Yoshihisa FUJII* and Shogo OKUMURA*

ヒノキの気乾材を横圧縮した時の変形と温度上昇の関係を検討するため、サーモグラフィ装置を用いて表面温度の測定を行い、変形に要した仕事に対する試料に蓄えられた熱エネルギーの割合を計算した。その結果、変形仕事の約24~28%が熱エネルギーに変換されていることが分かった。また、圧縮後の試料の自然及び強制回復における回復率を調べたところ、熱水で回復させた場合は元の寸法の約90%以上まで回復した。さらに、試験中の試料からの熱流出の影響を検討するため、解析式と有限要素法を用いて試料温度を計算した結果、解析式からは表面の温度が約1.91℃上昇したとき、中心部では2.13~2.25℃の温度上昇があること、有限要素法の結果から推定した熱エネルギーへの変換割合は45~52%になる事などが分かった。

キーワード：サーモグラフィ、木材の横圧縮、塑性変形、熱エネルギー、有限要素法

In order to examine the relationship between deformation and temperature rise during lateral compression of air-dried wood specimen of hinoki, surface temperature was measured using a thermography device, and was calculated the ratio of work of deformation to thermal energy accumulated in a specimen. The thermal energy was estimated to be 24-28% of the work of deformation. Compressed specimens recovered in height to about 90% of its original dimension after immersion in boiling water. Furthermore, the analysis on the effect of thermal dissipation to surroundings on the surface temperature of specimen during the experiment showed that the temperature rise in center part was higher by 0.22-0.34℃ than that on the surface. From finite element method (FEM) analysis, the thermal energy generated in specimens was estimated to be 45-52% of the work of deformation.

Key words: thermography, lateral compression of wood, plastic deformation, thermal energy, finite element method

1. はじめに

木材の変形や破壊と発熱の関係は、切削温度の解析^{8,9)}やサーモグラフィを用いた非破壊試験^{3,4)}にとって有用な情報となるだけでなく、木材の変形・破壊の機構にも密接に関係する問題であるが、知見は極めて乏しい。そこで、奥村ら^{5,10)}は木材の圧縮および曲げ試験時の試料の表面温度をサーモグラフィ装置で測定することを試み、それぞれの試験における試料の変形・破壊と温度上昇についていくつかの興味深い知見を得た。その中で、試料の変形と温度上昇の量的関係についても考察を試みたが、十分な信頼性を持った知見を得るまでには至っていない。そこで本研究では、木材の変形と温度上昇の関係を明らかにするため、試料の変形が大きい横圧縮試験を取り上げ、試料に圧縮大変形を与えたときの表面温度をサーモグラフィ装置で測定し、ひずみと温度上昇の関係について検討した。さらに、試験中の試料からの熱の放散が試料温度に及ぼす影響について、熱伝導理論およ

び有限要素法 (FEM) を用いて考察した。

2. 実験

2.1. 試料の横圧縮

試験機にはオートグラフ (島津AGS-5 kNG) を用い、オートグラフとGP-IBケーブルで接続したパソコンに転送し、荷重とクロスヘッド移動量を記録した。試料は寸法を20(R)×20(L)×20(T)mmに調整したヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* Endl., 比重0.35~0.38, 含水率11.4~12.1%) を用い、局所的なひずみを観察するため、試料の柃目面 (温度測定する側) と木口面 (ビデオ撮影する側) に直径1.2mmと直径1.12mmの格子点 (レタリング用ドットパターン) をそれぞれ貼り付けた (図-1)。クロスヘッドスピードは毎分5mmとし、荷重が約5kNになるまで試料の板目面を圧縮し続けた。また、試料から負荷治具 (金属製) への熱流出を抑えるため、試料の上下板目面と負荷治具の間にミズナラの当て板

* 京都大学大学院農学研究科森林科学専攻

* Division of Forest and Biomaterials Science, Graduate School of Agriculture, Kyoto University

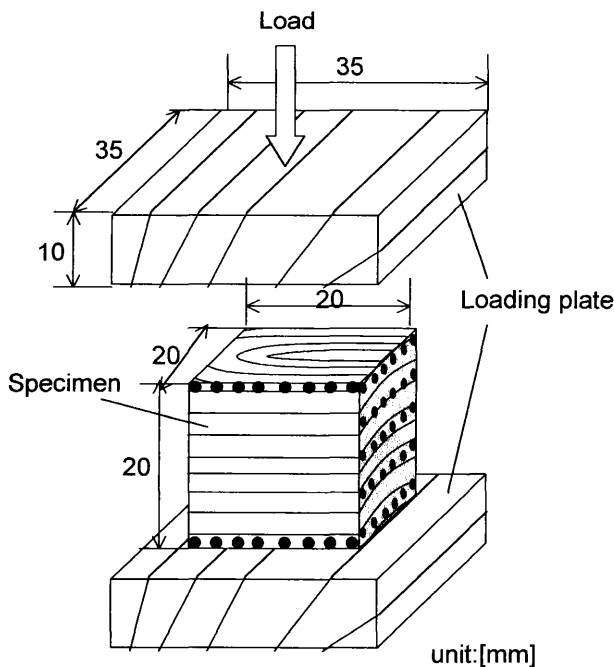


図-1 試料および当て板

Fig.1 Specimen and loading plate

注: 線状及び格子状のドットは試料表面に貼り付けられている。
Note: Array and lattice of dots are stuck on the specimen surface.

(35(R)×35(L)×10(T)mm)を設置した。なお、試料は試験機正面に対して、柁目面と木口面がそれぞれ45度ずつ傾くように設置した(図-2)。試料の圧縮に並行して、オートグラフとGP-IBケーブルで接続されたパソコン上で荷重およびクロスヘッド移動量を記録し、実験終了後、圧縮ひずみと応力の関係として表した。

2.2. 温度測定

温度測定にはサーモレーサ(日本電気三栄 6T62)を用い、赤外線カメラを試料表面から約20cm離れたところに設置した。サーモレーサでは圧縮開始直後から3秒ごとに試料の表面温度を測定し、そのデータはGP-IBケーブルで接続したパソコンに転送し、一旦ハードディスクに記録した後、適宜、光磁気ディスクに保存した。光磁気ディスクに保存した温度データは、実験終了後、簡易表示プログラムを用いてパソコン上で熱画像として表示するとともに、各熱画像について試料表面の平均温度を求めた。また、測定時には周囲物体からの熱放射の影響を避けるため、上下の当て板に黒体塗料(オキツモ耐熱塗料 #11)を塗布し、さらに内側に同じ黒体塗料を塗ったダンボールで荷重部の周囲を覆った。試料を設置した後しばらく放置して、周囲の大気温度が十分安定してから圧縮を開始し、同時に温度測定を行った。

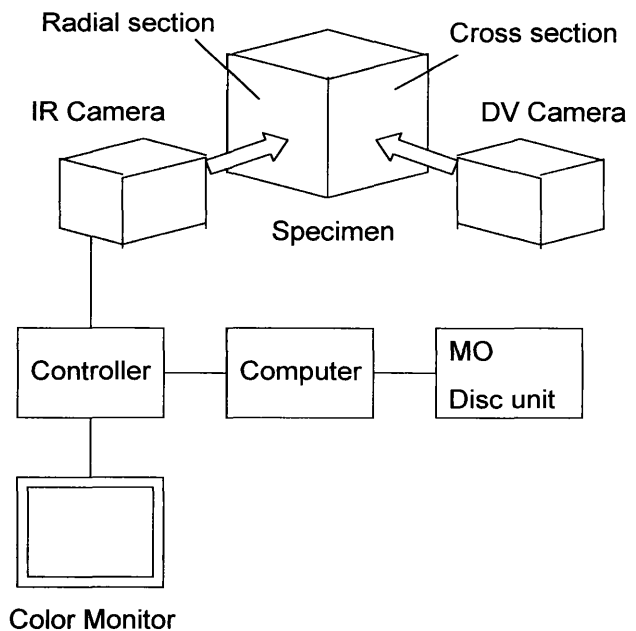


図-2 測定系の概略図

Fig.2 Schema of measuring system

2.3. 木口面の変形の撮影

デジタルビデオカメラ(SONY DCR-TRV20)を試料表面(木口面)から約12.5cm離れた場所に設置して圧縮開始直後より木口面を撮影した。実験終了後、撮影した動画は静止画として加工し、熱画像と同時刻の変形の状態を把握できるようにした。

2.4. 圧縮後の試料寸法の回復

圧縮後の試料を20℃、60%RHを維持した実験室内に放置し、圧縮方向の回復がほぼ安定した4日後に試料寸法を測定した。さらに、この試料を約1週間減圧下で水に浸漬して飽水状態にした後、約100℃の熱水で1時間煮沸した。その後、約80℃に調節した乾燥炉で乾燥してから、前述の実験室に再び静置して気乾状態とし、寸法を測定した。寸法測定は圧縮方向とし、圧縮前の寸法を l_0 、除荷直後の寸法を l_c 、自然回復時の寸法を l_e 、水分、熱を加えて強制的に回復させた時の寸法を l_r とした。また、圧縮前、除荷直後および強制的に回復させた時の試料寸法の値を用いて(1)式により試料の回復率の値を求めた。

$$P_r = \frac{l_r - l_c}{l_0 - l_c} \times 100 \quad (1)$$

3. 結果と考察

3.1. 横圧縮変形時に見られる温度上昇と変形の様子

図-3, 4は試料の圧縮ひずみと応力および温度上昇

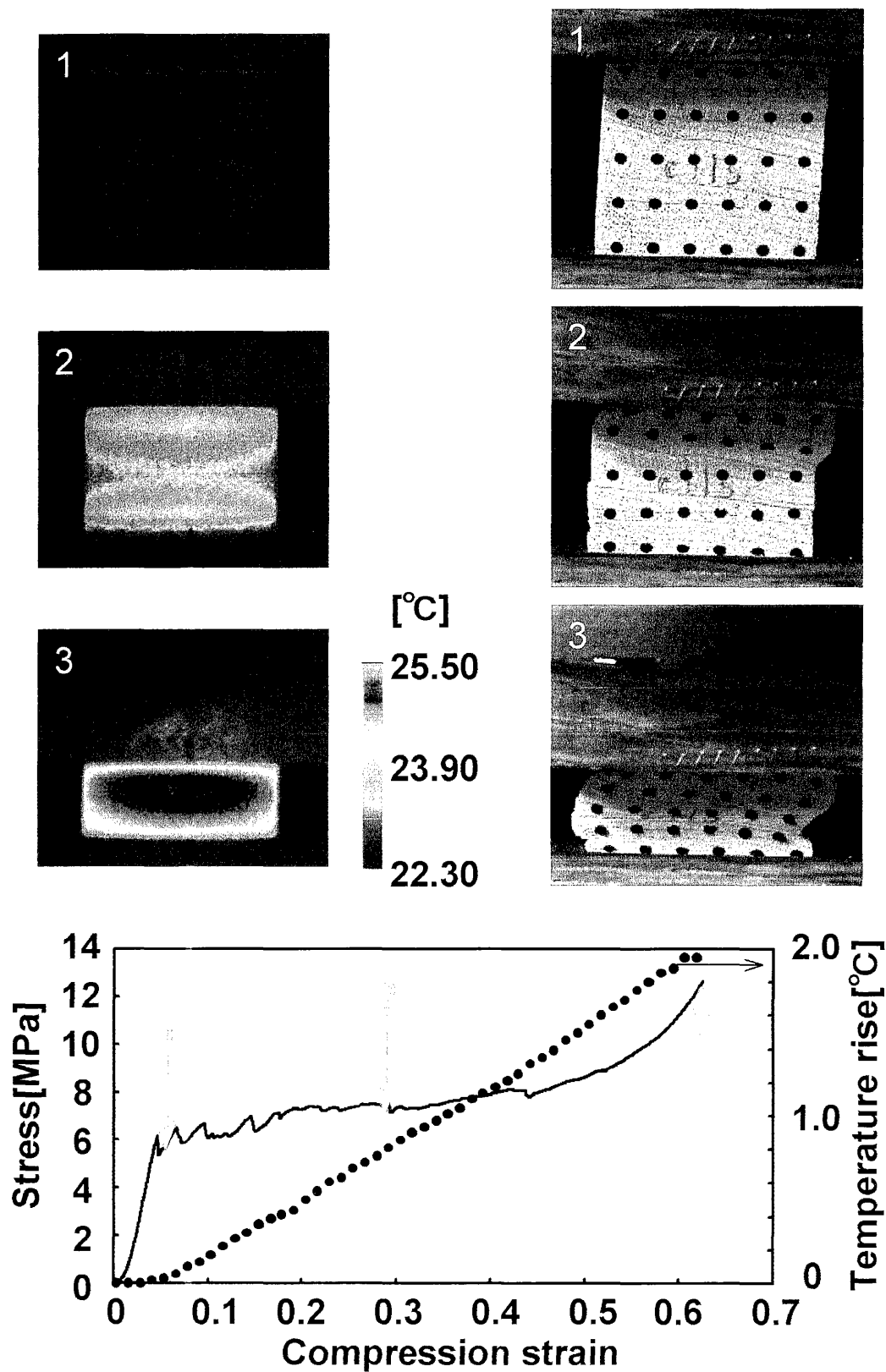


図-3 ひずみと応力および平均温度上昇の関係（平均年輪幅の狭い試料）

Fig.3 Relations of stress and average temperature rise to strain during lateral compression of a specimen with narrow average annual ring width

注: 矢印の1, 2, 3で表された同時刻の熱画像（左上）およびビデオ画像（右上）.

Note: Thermal images (upper left) and video images (upper right) are at the same times indicated by arrows 1, 2, and 3, respectively.

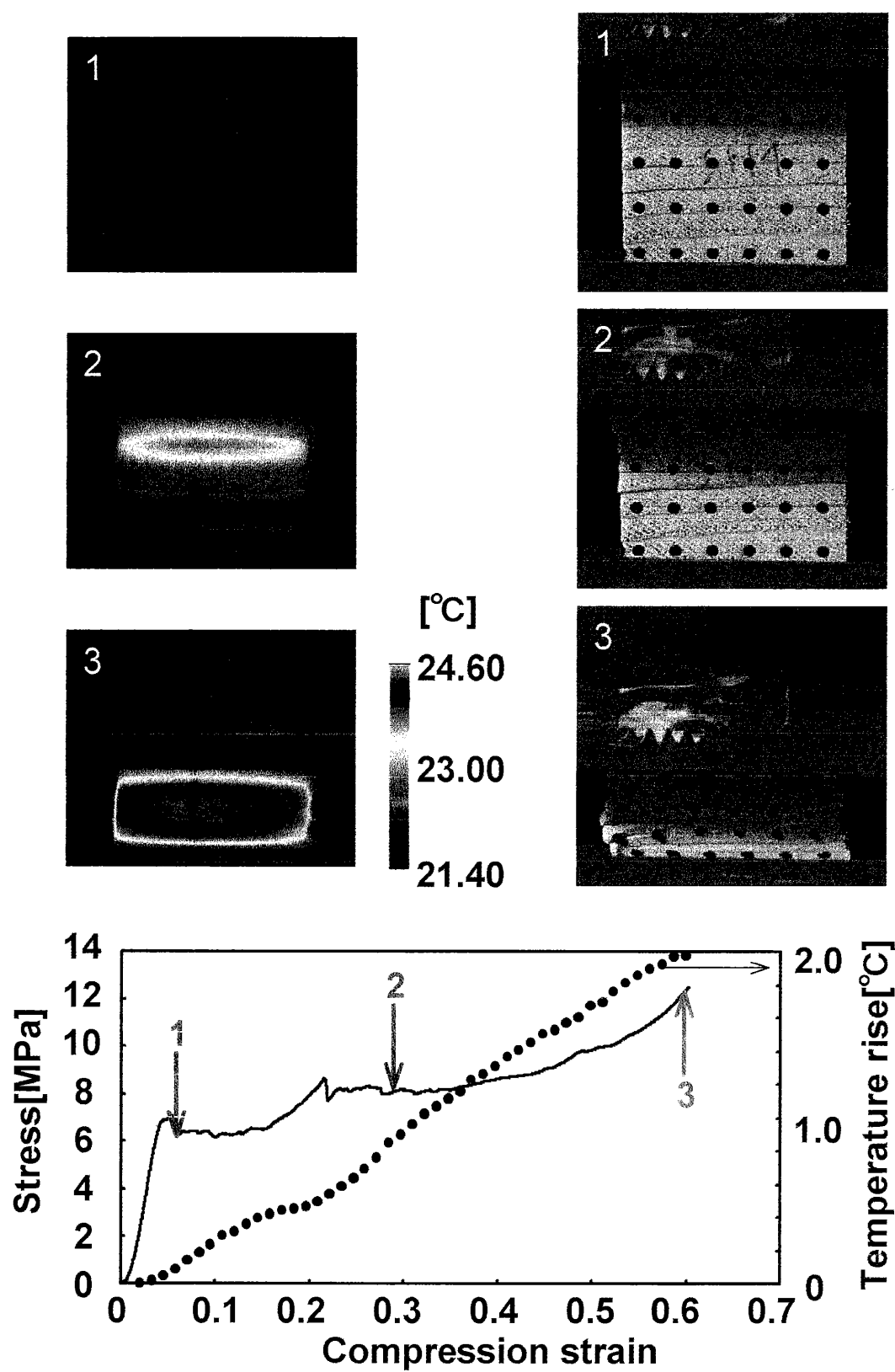


図-4 ひずみと応力および平均温度上昇の関係 (平均年輪幅の広い試料)
 Fig.4 The same as Fig.3, but for a specimen with broad average annual ring width

(試料表面の平均値)の関係,ならびに試験中の異なる時点における熱画像と木口面の写真を示した例である.図-3の試料の平均年輪幅は0.8mm,図-4は1.6mmである.両図における木口面の写真からわかるように,変形が集中している部分で温度上昇が顕著であることがわかる.また,試験終了時では柁目面の中心付近で温度が最も高く,外側に行くに従ってより低くなる横長の同心円状の温度分布が見られた.これは,試料が4つの側面で接する大気への熱伝達や,上下の圧縮面における当て板への熱伝導などによって熱が流出したことによるものと考えられる(後述).試料の温度上昇は,例外的に低い場合を除くと,1.8~2.0℃であった.ここで,図-3のように年輪幅が狭い試料では温度上昇が直線的であったのに対し,図-4のように年輪幅の広い試料では温度上昇が階段状であった.これは,年輪幅の狭い試料では試料に含まれる年輪数が多く,多数の早材部が試料全体に比較的均一に散在するため,試料の変形が試料全体で比較的均一に起こったのに対し,年輪幅の広い試料では試料に含まれる年輪数が少なく,一年輪内の早材部分が広いため,変形が局所的かつ断続的に生じ,その結果温度上昇も断続的になったと考えられる.

3.2. 変形仕事と熱エネルギーの関係

圧縮大変形を与えた試料は,次節で述べるように,除荷後の時間経過とともに,またその後の水中浸漬によって寸法が大きく回復するため,変形に要したエネルギーから熱などとして消散する部分を抽出するのは難しい¹⁾.そこで,試料の変形と熱画像として測定した温度上昇の関係について検討するために,試料の変形に要し

た仕事と試料に蓄えられた熱エネルギーを計算して比較した.変形仕事は,試料の横圧縮時の応力-ひずみ曲線で囲まれる面積から求めた.一方,熱エネルギーは,試料全体の温度が表面温度(平均値)と等しいと仮定し,試料の比熱と質量と温度上昇の積から求めた.ここで,比熱 c_u は全乾木材の比熱を c_0 ($=1.358 \times 10^3 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$),水の比熱を c_w として,各試料の含水率 u を用いて(2)式²⁾より求めた.

$$c_u = \frac{u c_w + 100 c_0}{u + 100} \quad (2)$$

なお,求めた熱エネルギーは単位体積あたりの値に換算するために,圧縮前の試料体積で除した.このようにして求めた変形仕事と熱エネルギーおよび両者の比を表-1に示す.表から,変形仕事 U に対する熱エネルギー E_t の割合は24~28%であることが分かる.なお,一部の試料では17~19%であり,温度上昇も1.2~1.3℃と小さかったが,その理由については不明である.

3.3. 熱および水分による試料寸法の回復

前節の考察で,変形仕事の内,約4分の1が熱エネルギーに変換された事が分かった.この発熱が試料の塑性変形に伴うものとする,変形仕事の大部分は塑性変形以外に消費されたことになる.そこで,試料の変形機構について考察するため,試験後の試料の自然および強制回復について2.4の方法で調べた(表-2).表-2から分かるように,試料に水分と熱を与えることにより圧縮変形の約90%以上が回復した.このことは,本実験における試料の発熱は金属の塑性変形に見られるような発熱

表-1 変形に要した仕事(U)に対する試料に蓄えられた熱エネルギー(E_t)の割合
Tab.1 Ratios of work of deformation (U) to thermal energy accumulated in specimen during test (E_t)

Specimen	U	E_t	E_t/U
No.	$[\times 10^{-3} \text{ J/mm}^3]$		[%]
A-1	4.24	1.19	28.2
B-1	4.68	1.22	26.2
C-1	4.51	1.08	24.0
D-1	4.84	1.25	25.7
E-1	4.09	0.75	18.2
Average	—	—	24.8

表-2 試料の寸法変化と回復率
Tab.2 Dimensional changes of specimen and the percentage of recovery

Specimen	l_0	l_c	l_e	l_r	P_r
No.	[mm]				[%]
A-1	19.75	7.63	12.00	19.15	95.0
B-1	19.90	7.45	11.75	19.25	94.8
C-1	19.95	7.27	11.95	19.30	94.9
D-1	19.85	7.89	12.10	19.05	93.3
E-1	20.20	6.33	11.60	19.60	95.7
Average	—	—	—	—	94.6

Note: l_0 is height of specimen before compression test, l_c is height of specimen immediately after compression test, l_e is height of specimen after four days from the end of compression test, l_r is height of specimen after immersion in boiling water, and P_r is percentage of $(l_r - l_c)$ to $(l_0 - l_c)$.

とは別の機構を考える必要があることを示している。

3.4. 試料の表面温度についての考察

3.2.では、熱エネルギーを計算する際に、試料全体の温度が測定された表面温度に等しいものと仮定して計算した。しかし、試料の温度が上昇すると、試料を取り囲む大気との間に温度差が生じるため、試験中にいくらかの熱量が試料表面から大気中に逃げ出していると考えられる。また、試料は上下の圧縮面で当て板と接しており、この方向にもいくらか熱の流出があるものと考えられる。そこで、測定された表面温度と試料内部温度との差を二種類の方法で推定した。

3.4.1. 解析式を用いた一次元非定常熱伝導モデルでの温度分布の推定

横圧縮時の状態に近い、一次元非定常熱伝導モデルについて解析式を用いた熱伝導の計算を行い、表面温度と試料内部温度の差を計算した。モデルは以下の二例とし、いずれにおいても繊維方向の熱伝導率 $\lambda_{//} = 0.21 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 、繊維と直交方向の熱伝導率 $\lambda_{\perp} = 0.10 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 、試料密度 $\rho = 380 \text{ kg/m}^3$ 、比熱 $c = 1.676 \times 10^3 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 、熱伝達係数 $\alpha = 5.82 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ とした。なお、これらの数値の内、熱伝導率、熱伝達係数の値は文献値^{1,7)}、それ以外の値は実測値を用いた。また、両モデルとも試験開始直後から30 sごとに、時間 t が132 sまでの温度を求めた。

(A) 初期温度 0°C 、内部で単位体積当たり A の発熱がある厚さ $2d$ の平板を温度 0°C の大気中に放置したときの表面及び内部の温度応答

時間 t [h]における温度を θ [$^\circ\text{C}$]、平板の中心からの距離を x [m]、 $A = 1.0475 \times 10^4 \text{ W/m}^3$ 、半分の厚さ $d = 0.01 \text{ m}$ とし、解析式には (3) 式⁶⁾ を用いた。

$$\theta = \frac{A}{2\lambda h} \left\{ 2d + hd^2 - hx^2 - 4h^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-K_n^2 \alpha t} \cos K_n x}{K_n^2 \{d(K_n^2 + h^2) + h\} \cos K_n d} \right\} \quad (3)$$

ここで、 K_n は $Kd \tan(Kd) = hd$ の正根であり、 $K_1 \sim K_5$ までを求めた。また、 h は相当熱伝達率であり、(4) 式によって表され、 a は温度伝導率であり、(5) 式によって表される。

$$h = \alpha / \lambda \quad (4)$$

$$a = \lambda / (\rho c) \quad (5)$$

(B) 無限固体内の初期温度 θ_0 は一部の領域では 1.91°C 、その他の領域では 0°C としたときの熱伝導による温度応答

初期温度が周囲よりも高い区間を $[l, m]$ とし、解析式

には (6) 式⁷⁾ を用い、 $l = 0$ 、 $m = 19.75 \times 10^{-3} \text{ m}$ として計算した。ここで、 $\text{erf } y$ とは誤差関数であり、(7) 式で表される。

$$\theta = \frac{\theta_0}{2} \left\{ \text{erf} \frac{m-x}{2\sqrt{at}} - \text{erf} \frac{l-x}{2\sqrt{at}} \right\} \quad (6)$$

$$\text{erf } y = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^y e^{-\xi^2} d\xi \quad (7)$$

モデル (A) について132 s 後の温度分布を図-5に、モデル (B) の温度分布の時間変化を図-6に示す。両図から、表面の温度は内部よりかなり低くなっていることが分かる。例えば、表面温度が約 1.91°C 温度上昇したときに、表面から接線方向に10mm内部の点の温度上昇は表面より 0.34°C 、繊維方向では 0.21°C 高くなった (図-5)。図-6では、初期温度が高い領域の温度は最終的には傾

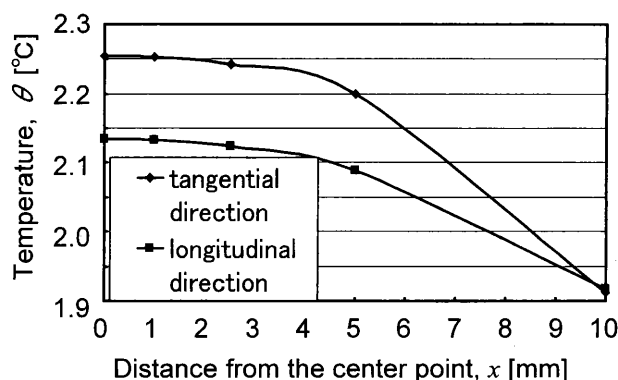


図-5 モデルAの $t = 132 \text{ s}$ における接線および繊維方向での温度分布

Fig.5 Temperature distributions along tangential and longitudinal direction for model A at $t = 132 \text{ s}$

注: $x = 0$ は平板の中心を表し、 $x = 10$ は平板の表面を表す。

Note: $x = 0$ indicates the center point and $x = 10$ surfaces.

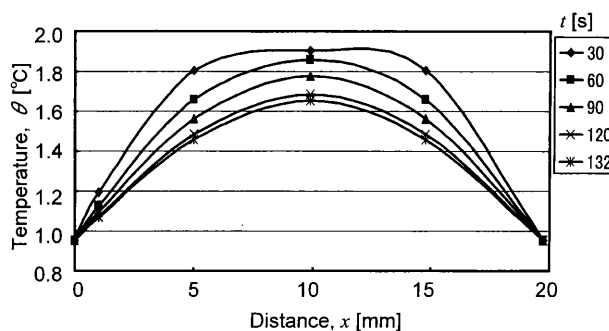


図-6 モデルB内の初期温度 $\theta_0 = 1.91^\circ\text{C}$ が与えられた領域における半径方向の温度分布

Fig.6 Temperature distributions along radial direction at the area which was applied initial temperature $\theta_0 = 1.91^\circ\text{C}$ for model B

注: $0 \leq x \leq 19.75$ の区間には初期温度 $\theta_0 = 1.91^\circ\text{C}$ が与えられた。

Note: The area $0 \leq x \leq 19.75$ was applied initial temperature $\theta_0 = 1.91^\circ\text{C}$.

域の中心部分で 0.26°C 、端部分で 0.96°C 低下している。実際には、最初は大気との温度差が小さく、また試料内部での継続的発熱もあるため、これほどの温度低下は起こらないと考えられるが、計算上は領域の中心部分と端部分（表面）で 0.70°C の温度差が生じると推定された。これらのことより、試料表面から大気や当て板への熱の流出によりサーモグラフィによって計測した表面温度は試料内部の温度よりもかなり低く、表面温度から推定した熱エネルギーは実際よりも低くなるものと推定される。

3.4.2. 有限要素法を用いた三次元非定常熱伝導モデルでの試料温度の推定

前項の一次元非定常熱伝導の解析ではR, L, Tの各方向について別々に計算を行うため、各方向の熱伝導を統合して考える事が出来ない。そこで、汎用の有限要素解析ソフトを用いて試料内部で発熱がある場合の三次元非定常熱伝導の解析を行った（試料の変形は考慮していない）。モデル構築および計算結果の解析にEMRC社のDISPLAY IVを、非定常熱伝導の有限要素解析に同社のNISA/HEAT IIIを用いた。試料を想定した一辺 0.02 m の正六面体形状モデルと当て板を想定した幅 0.035 m 、厚さ 0.01 m の直方体モデルからなる三次元形状モデルを、六面体要素（次数1）で要素分割し、有限要素モデルを

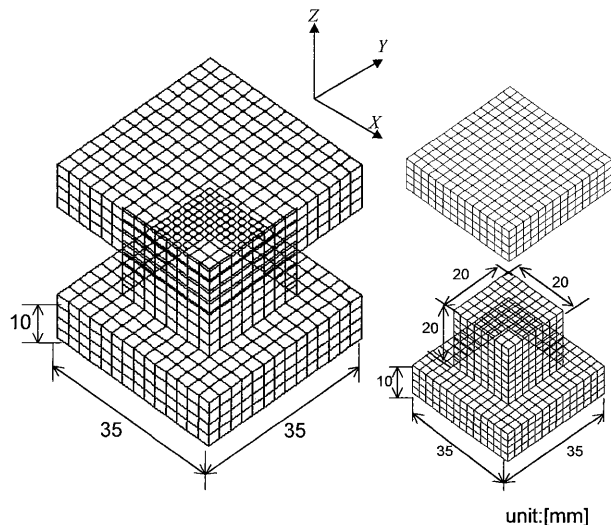


図-7 有限要素法での要素分割モデル

Fig.7 Element division model for the finite element method (FEM)

注: 試料モデルでは, X, Y, Z軸はそれぞれ繊維, 接線, 半径方向に相当し, 当て板モデルでは, X, Y, Z軸はそれぞれ半径, 繊維, 接線方向に相当する。

Note: In specimen X, Y, and Z-axes correspond to longitudinal, tangential, and radial directions, respectively. In loading plate X, Y, and Z-axes correspond to radial, longitudinal, and tangential directions, respectively.

構築した（図-7）。試料モデルの熱伝導率は $0.21\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ （繊維方向）、 $0.10\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ （繊維直交方向）とし、密度は $380\text{ kg}/\text{m}^3$ 、比熱は $1676\text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ とした。当て板モデルの熱伝導率は $0.30\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ （繊維方向）、 $0.15\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ （繊維直交方向）とし、密度は $860\text{ kg}/\text{m}^3$ 、比熱は $1676\text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ とした。モデル全体の要素数は2080個、節点数は2817個であった。座標軸において、試料モデルは繊維方向をX軸、接線方向をY軸、半径方向をZ軸とし、当て板モデルは半径方向をX軸、繊維方向をY軸、接線方向をZ軸として、三方向の熱伝導率を与えて計算した。境界条件として、周囲の温度は 273 K で一定、モデルの初期温度は 273 K とし、試料モデルを構成する各要素から $1.72\times 10^4\text{ W}/\text{m}^3$ の発熱があり、また試料モデルが大気と接している面からは熱伝達係数が $5.82\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ の割合で熱が流出するものとし、当て板モデルと大気との境界面は断熱境界とした。温度分布は3 sおきに150 sまで計算し、試料の変形は考慮していない。

図-8は試料モデル上の節点①～⑧の温度の時間変化を示す。図-9は節点①～⑧を含むX-Z平面の132 s後の温度分布を示している。試料の柢目面にあたる表面の節点④と試料の中心の節点⑧では132 s後、 0.52 K の温度差となっている。またこの表面（柢目面）の全節点温度の平均温度は 274.92 K であり、試料中心を含む切断面（節点⑤～⑧を含む面）での平均温度は 275.37 K で、 0.45 K の温度差となった。この結果と解析式の結果とあわせて考えると、測定した表面温度の平均値は、試料中央部での平均値よりも少なくとも 0.5 K 程度は低かったと

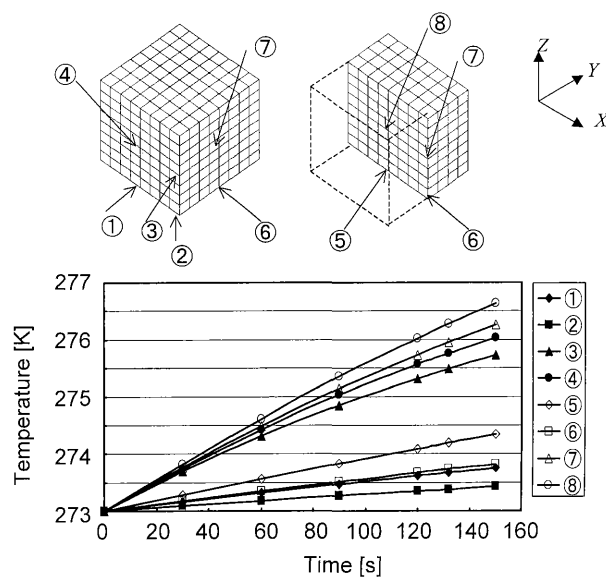


図-8 節点①から⑧における温度の時間変化

Fig.8 Temperature variation with time at nodes ① to ⑧

考えられる。さらに、試料中心部でも試料側面および当て板への熱の流出の影響があり、FEMモデルで試料部分の側面からの熱の流出がない場合、節点⑧の132 s後の温度は、他の条件をそろえて計算した結果、熱の流出を考えた場合より0.1K高いという結果が得られた。ただし、これらの計算では試料の圧縮変形を考慮していないため、正確に温度上昇を推定するためには、これらの事を考慮してさらに検討する必要がある。

3.4.3. FEM解析結果を元にしたエネルギー割合の推定

3.2節では、変形に要した仕事（ U ）の24～28%が試料に蓄えられた熱エネルギー（ E_t ）に変換されたと推定した（表-1）。前項のFEM解析で、試料モデルの要素の発熱量を変化させ、132 s後の表面の平均温度上昇

が実測と同じ1.92Kとなるモデル（図-9）を求め、そのモデルについて3.2と同様の計算を行うと、 $1.22 \times 10^{-3} \text{ J/mm}^3$ の熱エネルギーが試料に蓄えられたことになる。一方、FEMモデルの要素に与えた発熱の条件からは132 sの間に $2.27 \times 10^{-3} \text{ J/mm}^3$ の熱エネルギーが発生していることになる。その結果、試料で実際に発生した熱エネルギーは表面温度から求めた値の約1.86倍となり、変形仕事に対する熱エネルギーの割合は45～52%程度であったことになる。ただし、実際の試料で測定した温度分布とFEM解析で得られた温度分布は若干異なることから、熱伝達係数の値、接触熱抵抗の影響などについてさらに検討する必要がある。

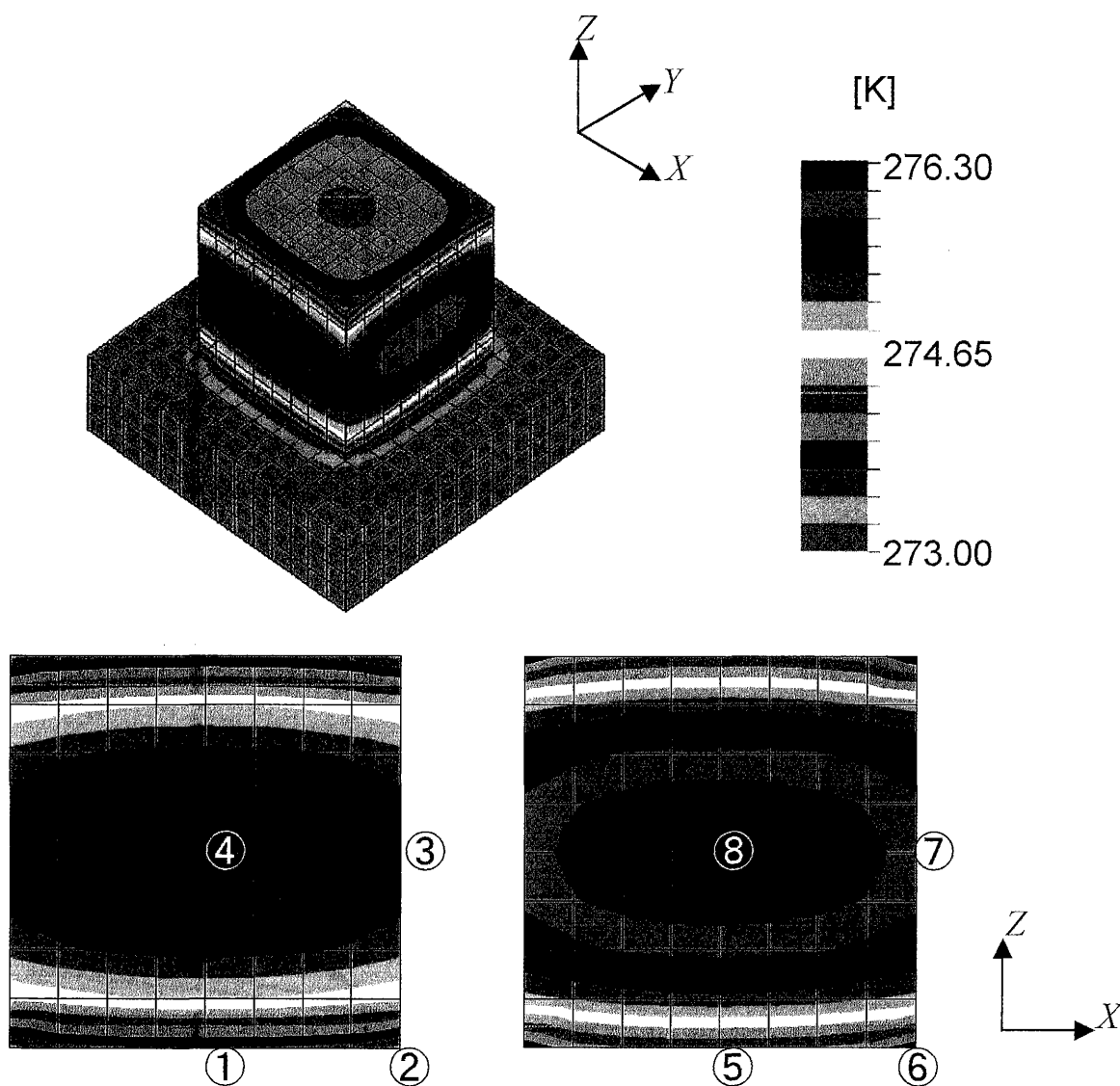


図-9 節点①から④と⑤から⑧を含む2つのX-Z平面における温度分布（ $t=132 \text{ s}$ ）
Fig.9 Temperature distributions on two X-Z planes which including nodes ① to ④ and ⑤ to ⑧（ $t=132 \text{ s}$ ）

引用文献

- 1) 千輝淳二 (1981) 伝熱計算法. 342pp, 工学図書, 東京
- 2) 平井信之 (1985) 熱と木材. (木材の科学 2 木材の物理. 伏谷賢美・木方洋二・岡野 健・佐道 健・竹村富男・則元 京・有馬孝禮・堤 壽一・平井信之著, 286pp, 文永堂, 東京). 195-207
- 3) 増田 稔・藤本清彦・瀧野真二郎・佐道 健 (1995) 繰返し曲げに伴う有節材の熱画像変化. 京大演報. **67**. 167-173
- 4) 増田 稔・高橋信吾 (1998) 繰返し負荷に伴う有節材, フィンガー・ジョイント及びメタル・プレート・コネクタの熱画像変化. 京大演報. **69**. 114-128
- 5) 内藤茂樹・澤田 豊・藤井義久・奥村正悟 (1998) 木材の曲げ試験時のサーモグラフィ. 京大演報. **69**. 104-113
- 6) 日本機械学会 (1975) 伝熱工学資料 (改訂第3版), 351pp, 日本機械学会, 東京
- 7) 西川兼康・藤田恭伸 (1982) 機械工学基礎講座 伝熱学. 471pp, 理工学社, 東京
- 8) Okumura, S. (1985) A theoretical approach to the cutting edge temperature in interrupted cutting of wood. Mem. Coll. Agric., Kyoto Univ. **127**: 29-36
- 9) Okumura, S., S. Nanba and M. Noguchi (1993) Thermographic temperature measurement of tool-chip-work system in slow-speed wood cutting *In* Proceedings of the 11th International Wood Machining Seminar, Honne, Norway. 41-55
- 10) 奥村正悟・鈴木利枝・藤井義久 (1996) 木材の圧縮試験時のサーモグラフィ. 京大演報. **68**. 161-169
- 11) 徳本守彦 (1985) 塑性. (新編木材工学. 中戸莞二編著, 457pp, 養賢堂, 東京). 177-185