

木材の圧縮試験時のサーモグラフィ (予報)

奥村 正悟・鈴木 利枝・藤井 義久

Preliminary Study on Thermography of Wood under Compression Load

Shogo OKUMURA, Rie SUZUKI and Yoshihisa FUJII

要 約

金属材料では、塑性加工や切削加工における大変形時の発熱挙動について古くから詳細に検討されてきているが、木材についてはほとんど知見が得られていない。そこで、木材切削における切削温度の解析およびサーモグラフィによる非破壊試験のための基礎資料を得るため、ヒノキ、スギ、ホワイトセラヤの気乾材に縦、横および部分圧縮による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、変形や破壊と温度上昇の関係について検討した。縦圧縮では、試片の中央付近の温度が上昇した後、せん断破壊による急激な温度上昇が生じた。横圧縮では圧縮破壊が層状に生じ、その場所や数は試片ごとに異なったが、温度上昇領域は破壊部分に一致していた。また大きな圧縮ひずみが生じている領域では、温度上昇も大きくなる傾向が認められた。部分圧縮では鋼製のあて板から5 mm程度離れた領域にあて板を取り囲むような温度上昇が認められたが、この温度上昇はあて板を通じた熱の流出の影響を受けるようであった。なお本実験で測定した最大の温度上昇は、縦圧縮で約6℃、横および部分圧縮で約2℃であった。

1. は じ め に

物体に外力を及ぼすと変形の程度に応じて物体の温度は変化する。この温度変化は、断熱状態での弾性変形における熱弾性効果によるものと、塑性変形における内部摩擦によるものに大別される。前者は、物体の変形に伴って体積が変化するときのみ現れ、物体の温度は体積が減少するとき(圧縮の場合)は上昇し、増加するとき(引張の場合)は低下する。その温度変化は通常0.1℃以下というわずかなもので、大型構造物の応力分布測定などに利用されている。一方、弾性域を越えた塑性域での変形では、通常大きな発熱が生じ、物体の温度は上昇する。金属材料の切削や塑性加工で認められる大きな温度上昇のほとんどはこの発熱に伴うものであり、その発熱機構については古くから研究が進められている。しかし、木材の変形に伴う発熱については、切削温度の測定や解析¹⁻⁴⁾などでは不可欠の情報であるが、一般の条件下では温度上昇そのものがそれほど大きくないこともあって、知見は極めて乏しい。

そこで、木材切削における切削温度を解析するための基礎資料を得るため、木材に圧縮大変形を与えたときの温度上昇をサーモグラフィ装置で詳細に測定し、木材の変形や破壊と発熱の関係について検討することを試みた。ここで得られる知見は、切削温度のみならず、木材に外力を与えて欠陥部を検出する非破壊検査⁵⁾にとっても有用な情報をもたらすことが期待される。

なお、本研究の費用の一部は平成7年度文部省科学研究費補助金(試験研究(A))、課題番号

07506002, 代表者 増田 稔) によった。

2. 実

2. 1 圧縮試験

全ての試験は万能試験機 (島津RH10) で行い, 荷重およびダイヤルゲージ式変位変換器で測定したクロスヘッド移動量をペンレコーダに記録した。また, 実験には気乾のヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* Endl., 比重0.44~0.51), スギ (*Cryptomeria japonica* D. Don, 0.49~0.50), ホワイトセラヤ (*Parashorea spp.*, 0.42~0.45) の直方体試片を用い, その局所的なひずみを調べるため, 直径1.0mm, 点間隔4.8mmの格子点 (レタリング用ドットパターン) を試片の温度測定側表面に貼り付けた (Fig. 1)。

(1) 縦圧縮試験

ヒノキ試片 (繊維方向長さ60mm, 28mm角, 比重0.44~0.51) について, 繊維と平行方向に毎分約180kgf/cm²の荷重速度で負荷をかけた。

(2) 横圧縮試験

ヒノキ試片 (繊維方向長さ38mm, 28mm角, 比重0.43~0.50) について, 繊維と垂直方向に毎分約50kgf/cm²の荷重速度で負荷をかけた。荷重面は柾目 (2個), 板目および追柾 (各1個) である。

(3) 部分圧縮試験

ヒノキ, スギ, ホワイトセラヤの気乾材試片 (繊維方向長さ97~100mm, 28~30mm角) について, 試片側面の中央部に鋼製のあて板 (厚さ12mm, 繊維方向の幅30mm, 長さ45mm) を介して, 毎分約70kgf/cm²の荷重速度で負荷をかけた。なお, 試験時のあて板への熱流出の影響を調べるため, 一部の実験ではミズナラのあて板 (気乾比重0.70, 厚さ9mm, 繊維方向の幅28mm, 長さ34mm) を用いた。

2. 2 温度測定

温度測定系のブロック図をFig. 2に示す。試片の表面温度の測定にはサーモレーサ (日本電気三栄6T62) を用い, 負荷開始から一定時間 (2.5または3.0s) ごとの熱画像を高速GP-IB

験

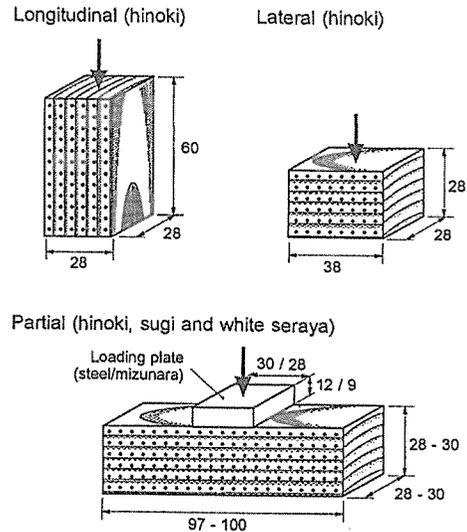


Figure 1. Three types of compression load employed. Note that lattice dots are stuck on the specimen surface for strain measurement.

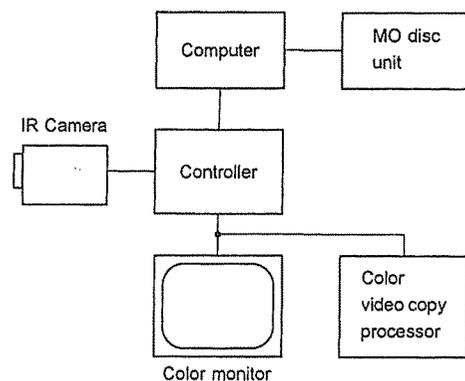


Figure 2. Schema of measuring system.

を通してコンピュータに転送し、一旦ハードディスクに記録した後に光磁気ディスクに保存した。保存した熱画像は実験終了後にサーモレーサに転送してCRT上に表示し、適宜そのハードコピーを得た。温度測定に際しては、試片や強度試験機周辺の気温変動、周辺物体からの熱放射の影響を除去するため、試片の側面および後方20~30cmの位置で、試片および強度試験機クロスヘッドを黒色の布で覆い、前方に赤外線カメラを設置した。また試片設置後、数分から30分程度経て、試片表面の温度分布が充分安定してから温度測定を行った。

3. 結果と考察

3. 1 試験時の温度上昇経過

縦圧縮試験における圧縮量と荷重および試片の最高温度との関係、そのときの熱画像、実験終了後の試片の状況の一例をFig. 3に示す。縦圧縮では、すべての試片において、圧縮応力が極大値 (Fig. 3の場合で約540kgf/cm²) に至る直前から、試片側面の中央付近で温度上昇が起こり、続いてせん断や割裂によって生じる破壊線に沿って急激な温度上昇が認められた。Figure 3の場合、破壊線付近の温度上昇は、破壊線が発生しはじめる時点で約4℃であり、全試片については最高約6℃であった。巨視的な破壊が生じるまでの変形は微小であるため、熱画像上の格子点から局所的なひずみを測定することはできなかったが、破壊前に試片の中央付近で生じる温度上昇部位と最終的にせん断破壊をする場所はほぼ一致していた。

横圧縮試験における異なった試片の温度上昇をFig. 4に、試験中の温度上昇経過等の結果の一例として、試片CH4の場合をFig. 5に示す。横圧縮では、試片の温度上昇は圧縮面に平行な層状に起こるが、その場所や数は試片ごとに異なっていた (Fig. 4)。これらの温度上昇領域は、温度を計測した側面とそれより数mm程度内部に入った領域において、大きな圧縮ひずみの発生した領域とほぼ一致しているが、試片CH4の下部に見られるように、割れに伴う温度上昇と考えられる場合

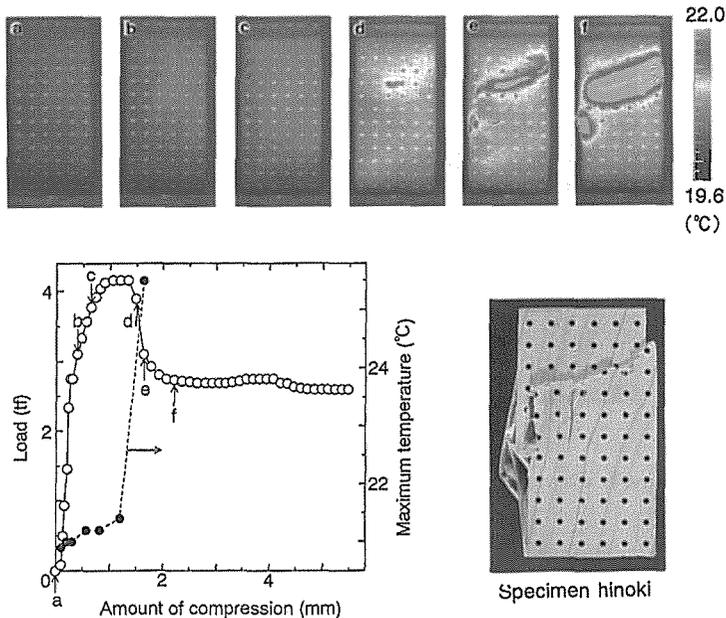


Figure 3. Example of the results for longitudinal compression test.

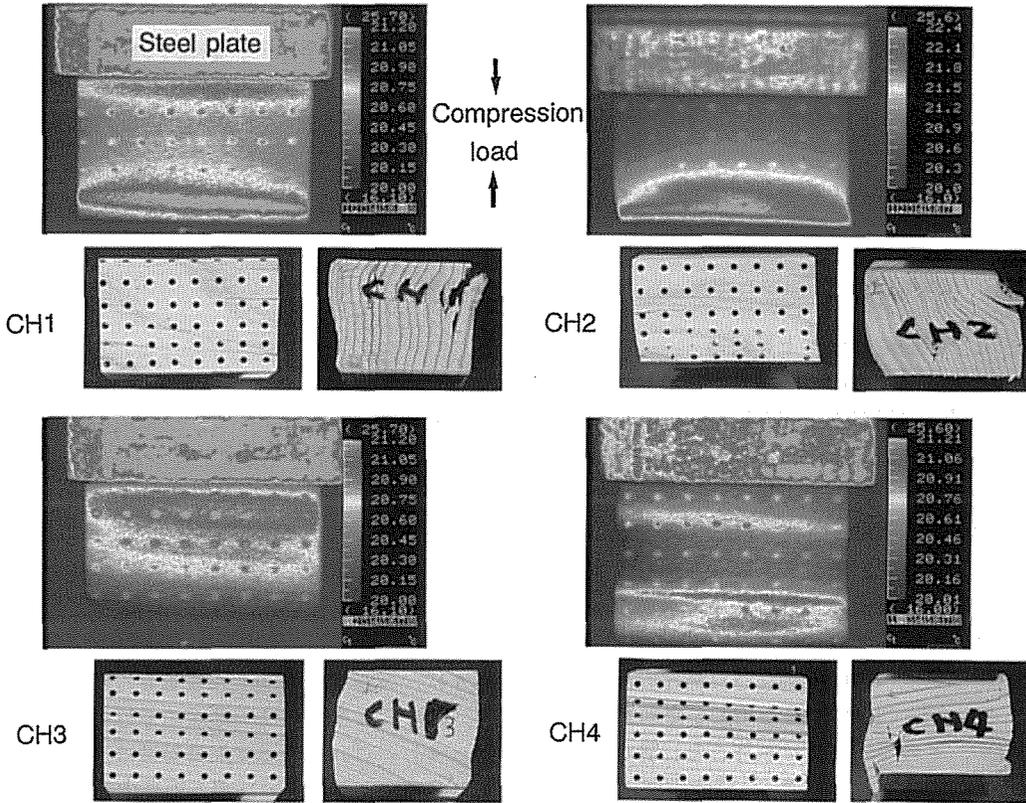


Figure 4. Examples of the thermogram and specimen for lateral compression test.

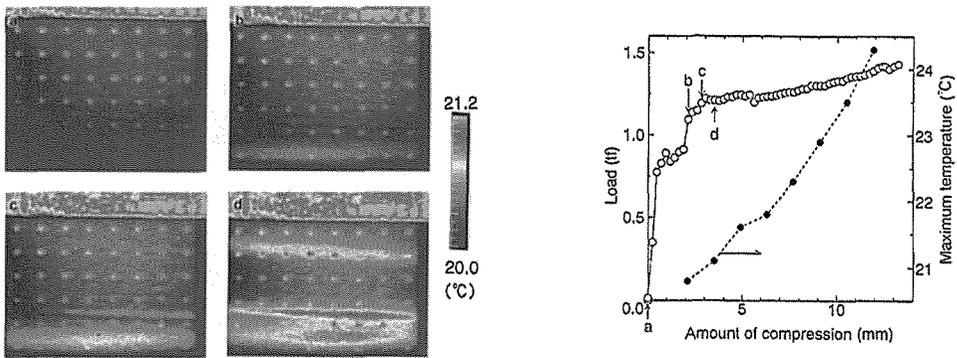


Figure 5. Example of the results for lateral compression test.

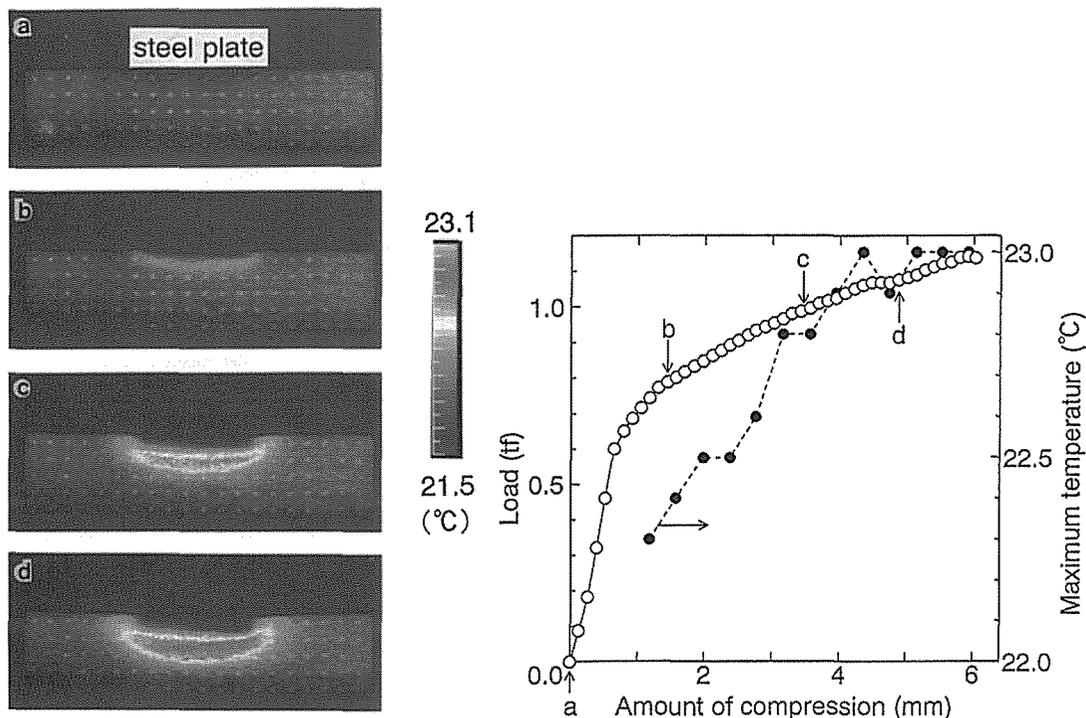


Figure 6. Example of the results for partial compression test.
Specimen : white seraya

もあった。ちなみにCH4の左側面下端部が底面よりも下に突き出しているのは、温度計測の都合上、試片を設置した鋼板台座の側面と試片左側面とが同一平面内にあるようにして圧縮したため、圧縮変形の進行とともに試片の側面部がせりだしたために生じたものである。横圧縮で巨視的な破壊が発生する時点までの温度上昇は、およそ2℃であった。また試片が理想的な二方まさ木取りになっていないため、試片内部や温度計測面と反対側の側面付近では、割裂や褶曲等の複雑な破壊が発生している場合があるが、計測された熱画像にはこれらの破壊による温度上昇は明確には現れていない。

部分圧縮試験における温度上昇経過の一例をFig. 6に示す。部分圧縮では、荷重-圧縮量曲線が直線域からそれ、しばらくしてから (Fig. 6の場合で約90kgf/cm²) あて板の直下付近で温度が上昇し始めた。その後、この領域を中心に温度上昇が顕著になってゆくが、このあて板を取り囲むような温度上昇の発生傾向は、樹種に関係なく認められ、この領域は最も圧縮ひずみが集中する部分に合致する。部分圧縮で巨視的な破壊が発生する時点までの温度上昇はおよそ2℃であった。部分圧縮が進行するにつれて、あて板と接触している試片上面部分がめり込み、その結果試片の上部両端が跳ね上がるように変形し、繊維方向に沿って割裂破壊が生じる場合があった。この傾向はヒノキで顕著で、試片に割れが生じた場合はその部分で一時的な温度上昇が認められた (Fig. 7)。

3. 2 ひずみエネルギーと温度上昇

横圧縮試片のうち、割れの影響のないと考えられるCH1, CH2, CH3について、圧縮の塑性ひず

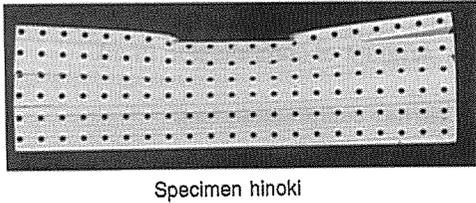
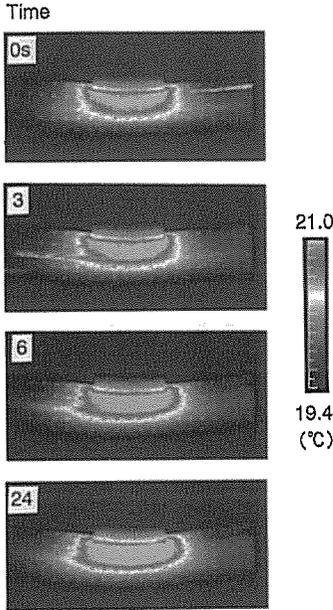


Figure 7. Temperature increase due to cracks generated in partial compression test.

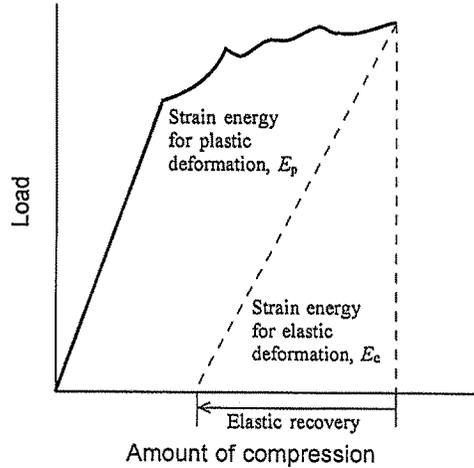


Figure 8. Estimation of strain energies from load-displacement curve.

みエネルギー E_p 、弾性ひずみエネルギー E_e 、温度上昇に使われた熱エネルギー E_t を、荷重-圧縮量曲線、試験終了後回復した圧縮量および熱画像から求めた。圧縮の塑性ひずみエネルギー E_p および弾性エネルギー E_e は、Fig. 8 に示すように試験終了時までの荷重-圧縮量曲線と座標軸とで囲まれる部分の面積から求めた。温度上昇に使われた熱エネルギー E_t については、原理的には試片側面の熱画像上の 1 画素について、

そこでの試験終了時までの温度上昇分に、1 画素に相当する試片面積、幅（奥行き長さ）、比重および比熱を乗じて得られる熱エネルギーを求め、これを側面上の全画素について加算する方法で求めた。実際には、 0.3°C 幅で設けた温度帯域ごとの面積をサーモグラフィの解析機能を用いて求め、これによってエネルギーを算出した。その際、試片の比熱は $0.324\text{cal/g}\cdot^\circ\text{C}$ とし、以下の 3 つの仮定をおいた；

- ① 試片は奥行き方向の温度分布は一様である。
- ② 試片内での密度のばらつきはない。
- ③ 外力による仕事のすべては、ひずみエネルギーか試片の温度上昇に変換される。

計算の結果、全ひずみエネルギー ($E_p + E_e$) に対する圧縮の塑性ひずみエネルギー (E_p) の割合 ($E_p / (E_e + E_p)$)、百分率は、試片 CH 1 から 3 についてそれぞれ 81, 76, 84% であった。また熱エネルギー (E_t) の塑性ひずみ (E_p) に対する割合 (E_t / E_p) は、27, 30, 36% であった。試片の数が比較的少なく、木取りによる変形様式のばらつきが大きいことなどから、これらの数値の妥当性は十分検討できないが、このような圧縮変形時のエネルギー収支についての詳しい検討が、今後の課題として残る。

3. 3 あて板への熱流出の影響

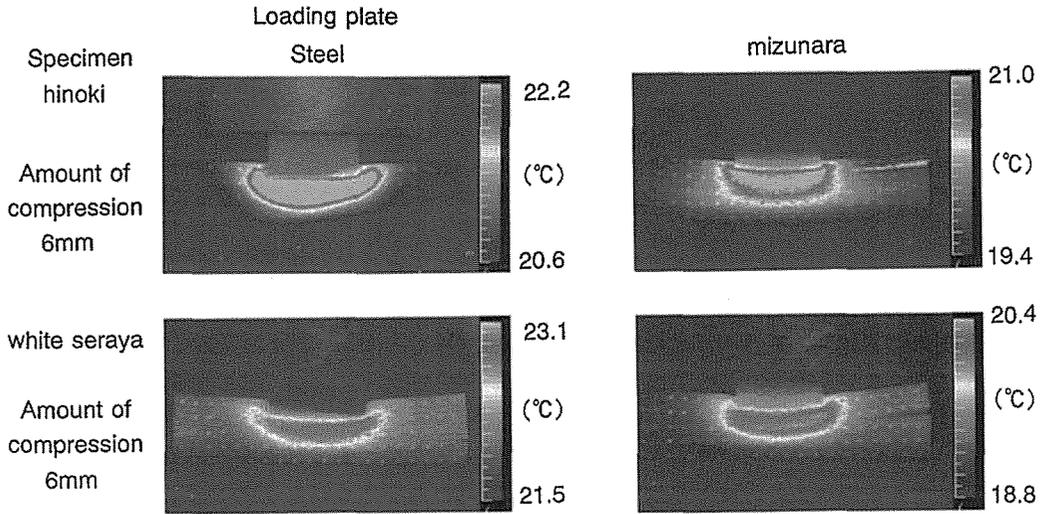


Figure 9. Influence of thermal flow through loading plate on thermogram.

縦圧縮や横圧縮では、試片とそれを支持する上下の鋼製治具との接触境界から比較的離れた位置で、温度上昇が見られるのに対して、部分圧縮ではあて板と試片の境界面付近で高い温度上昇が見られる。そのため木材内部で発生した熱があて板側に流入すると考えられ、あて板の材質やそれと試片との接触状態によって、温度分布が異なると考えられる。

Figure 9は、ヒノキとホワイトセラヤ試片について、あて板を鋼板とミズナラ材とした場合の熱画像を示す。鋼板の場合、試片から伝導した熱はすばやくあて板内部に拡散するため、あて板内での温度上昇は認められず、あて板-試片の境界線と温度上昇領域とそれ以外との境界は一致している。同図で鋼製あて板内部に温度上昇部分があるように見えるのは、割れた試片の一部分があて板の前にはみ出た影響による。一方、ミズナラのあて板の場合には、あて板内部にも温度勾配が見られるが、これは試片側から伝わった熱やあて板自身の圧縮変形による熱が、あて板内を比較的ゆっくりと拡散していくのを反映しているためと考えられる。そのためあて板-試片の境界線と温度上昇領域とそれ以外との境界は一致しない。また鋼板のあて板の

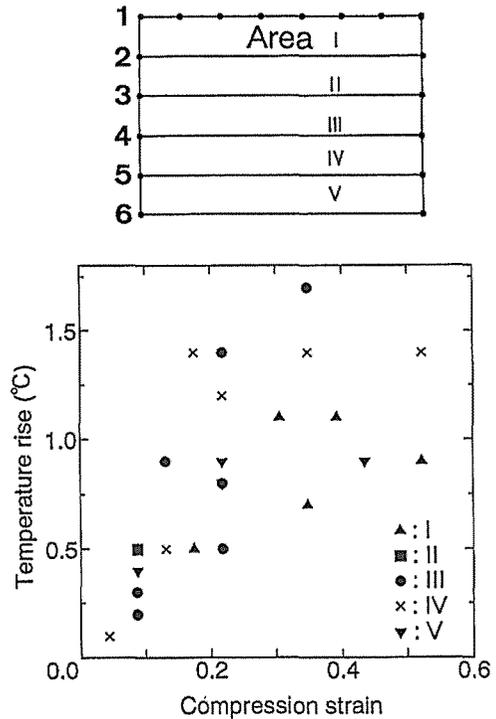


Figure 10. Relationships between compression strain and temperature increase for lateral compression test.

場合、試片の厚さ方向の温度分布は、あて板との境界付近で急激に変化しているが、ミズナラのあて板ではより緩やかであった。

3. 4 ひずみと温度上昇

圧縮ひずみと温度上昇との関係を検討するため、横圧縮試験におけるひずみと温度上昇との関係をFig.10に示す。図では試片側面に設けた格子点によって決まる5つの測定領域ごとの結果を示す。この測定領域は、横方向約36mm（格子点間隔6.5個分）、縦4.8mm（1個分）の長方形形状とし、試片の厚さ方向に隣接して設定した。各領域内の平均温度の時間変化を計測するとともに、領域の上下辺上の格子点群の平均距離の変化から、その時の圧縮ひずみを求めた。ひずみの計算は熱画像上の画素数単位で行い、その際の距離分解能（圧縮方向）は、1画素あたり0.21mmであった。

図は横圧縮全ての試片のデータについて領域毎の温度上昇をみたもので、測定領域によるばらつきが相当あったり、ドット読みとり不可能のために生じたデータの欠落もあるが、概ね圧縮ひずみが増大するにつれて、温度上昇分も大きくなる傾向が見られることがわかる。また試片上下の治具に近い領域ⅠやⅤでは、治具への熱の移動の影響を受けて、温度上昇は小さく、中央の領域Ⅲでは、大きくなる傾向があった。ちなみに、Figure 4で試片CH2のドットが剥落しているのは、ひずみ計測後に写真撮影をしたためである。

4. お わ り に

木材の変形や破壊と発熱の関係について検討するために、気乾の木材小試片に圧縮大変形を与えたときの温度上昇をサーモグラフィ装置で測定した結果、温度の上昇挙動の概ねを明らかにすることができた。今後、本研究で得られた知見を礎に、ひずみと温度上昇との関係や熱的な境界条件の温度上昇への影響をさらに詳しく検討する必要がある。

引 用 文 献

- 1) Okumura, S., T. Okuda and H. Sugihara (1983) Temperature distribution on the side face of a saw tooth in interrupted cutting I. Orthogonal cutting. *Mokuzai Gakkaishi* 29 (2), 123-130
- 2) Okumura, S. (1985) A theoretical approach to the cutting edge temperature in interrupted cutting of wood. *Mem. Coll. Agric., Kyoto Univ.* No.127, 29-36
- 3) Okumura, S., S. Nanba and M. Noguchi (1993) Thermographic temperature measurement of tool-chip-work system in slow-speed wood cutting. *Proceedings of the 11th International Wood Machining Seminar, Honne, Norway.* p.41-55
- 4) Okumura, S. (1995) A numerical analysis of tool edge temperature in rubbing against wood. *Proceedings of the 12th International Wood Machining Seminar, Kyoto, Japan,* p.529-537
- 5) 増田 稔・藤本清彦・瀧野眞二郎・佐道 健 (1995) 繰り返し曲げに伴う有節材の熱画像変化. *京大演報.* 67, 167-173

Résumé

Surface temperature of small air-dried wood specimen of sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don), hinoki (*Chamaecyparis obtusa* Endl.) and white seraya (*Parashorea spp.*) under three types of compression load was measured by a thermographic device (Figure 1 and 2). The relationships between the strain and fracture of the specimen and the temperature distribution was discussed.

On the surface of the specimen compressed longitudinally, rapid increase of the temperature along the plane of maximum shear stress was found, after the temperature in the middle of the surface had once increased (Figure 3). In the test of lateral compression, the compression fracture in a stratified form concentrated in the areas different among the specimen (Figure 4). However, the areas where higher temperature was found on the thermal images, corresponded to those of the fracture (Figure 5). When the specimen was compressed partially by a steel plate, temperature rise was found in the vicinity up to 5mm from the boundary between the specimen and the steel plate (Figure 6 and 7). It was also confirmed that the thermal flow from the specimen into the plate had influenced significantly on the temperature distribution (Figure 9). Analytical approaches have given us some suggestions about the relationships between the strain and the temperature rise (Figure 10). The maximum temperature rises observed in this study were about 6 and 2°C, for the longitudinal compression and the lateral and partial compression tests, respectively.