

# 繰返し曲げに伴う有節材の熱画像変化

増田 稔・藤本 清彦・瀧野眞二郎\*・佐道 健

## Change of Thermal Images of Timber Including Knots under Repeated Bending

Minoru MASUDA, Kiyohiko FUJIMOTO, Shinjiroh TAKINO\* and Takeshi SADOH

### 要 旨

木材梁に割れや切欠きなどが存在するとき、曲げ負荷を受けるとその部分において応力が集中する。節そのものは応力集中部ではないが、節内部あるいは節周辺部に割れが既に生じているあるいは負荷により生じる場合が多く、その割れの先端に応力集中が生じる。応力集中部の応力-ひずみ曲線は繰返し負荷に対してヒステリシス・ループを描き、ループで囲まれるロス・エネルギーにより局部発熱が生じる。発熱が小さい場合は、繰返し回数を増すことにより発熱量を増すことができ、熱画像装置を用いて発熱部、すなわち応力集中部を検出することができる。また圧縮塑性変形において大きな発熱の生じることを観察した。この方法を応用して欠陥部の検出あるいは非破壊グレーディングを行う具体的方法については今後さらに詳細な検討が必要である。

### 1. 緒 言

応力-ひずみ曲線が非線形域に入ると載荷曲線と除荷曲線に Fig. 10 のようなギャップが生じる。両曲線に囲まれたループをヒステリシス・ループと呼ぶが、このループによって放出されるエネルギーは、ほとんどが熱エネルギーに変換されるものと考えられる。従ってこの発熱を検知すれば応力集中部を検出することができるはずである。幸い木材の熱伝導率は金属などに比べて小さく、熱の拡散は遅い。しかし1回の負荷と除荷では発熱量が小さいので、何10回、何100回と繰返し曲げ負荷を与えることで発熱を累積し、熱画像装置による発熱部の検出を容易かつ確実にする必要がある。このようにして発熱部すなわち節や割れの欠陥部を検出することができれば、製材品の非破壊等級区分に応用できる可能性がでてくる。本研究ではその基礎的な検討を行なった。

### 2. 実験方法

厚さ3cm×幅8.5cmのカナダ産のSPF (Spruce, Pine, Fir) 材の中からPine材のみを選び出し、かつ節が材縁にかかる場合やかからない場合、異なる節径など、種々の節について、節がスパン中央にくるように設定し長さ54cmに切断した。繰返し曲げ負荷は、Fig. 1 に示すようにトータルスパン50cm、ロードスパン20cmのエッジワイズ4点曲げで、ダイナミック・テスター (インストロン製モデル1331) を用いて20°Cの恒温室において行なった。温度分布の測定には赤外線温度測定装置 (日本アビオニクス製、コンパクトサーモ TVS-200ST) を用い、ロードスパンの範

\* 木質科学研究所

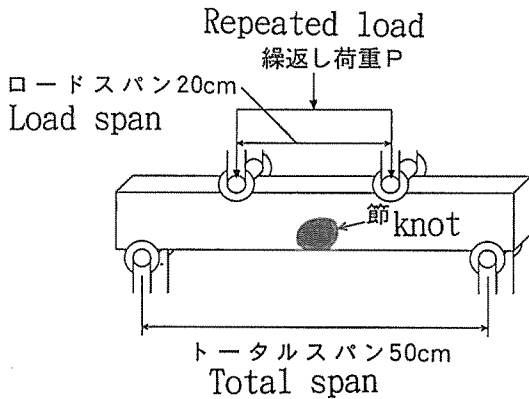


Fig. 1 エッジワイズ4点支持繰返し曲げ試験の模式図  
Schematic diagram of 4-point bending of a beam in edgewise repeated loading.

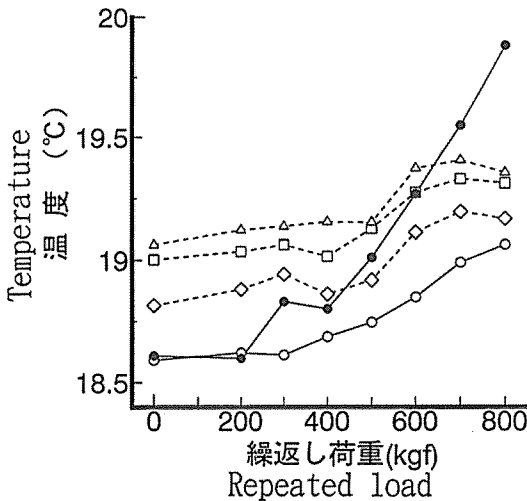


Fig. 2 エッジにかかった生節をもつ材の繰返し荷重の増加に伴う温度変化

Temperature change of lumber including intergrown knot on the edge according to the increase of repeated load. (500 repetitions for each load level). The same specimen as Fig. 3.

温度測定位置 Points of temperature measurement

- 節内部の割れの先 crack tip in the knot (see the photo in Fig. 3)
- 節 knot
- 引張縁 tension edge
- ◇ 中立軸 neutral axis
- △ 圧縮縁 compression edge

囲内を測定した。温度測定の最小検知面積（1画素の対応する試験体上での面積）は約0.6mm×0.6mmであった。試験体の表面は製材（鋸挽き）されたままの状態である。繰返し荷重の振動数は10 Hzであり、200 kgfから始め、順次100 kgfずつ荷重を増し、800 kgfまで各荷重レベル毎に500回ずつ繰返し荷重を行なった。なお、荷重Pが800 kgfのときの縁応力は166 kgf/cm<sup>2</sup>であり、これはパインの短期許容応力度（190 kgf/cm<sup>2</sup>）の約90%にあたる。アクチュエータが測定台の下側にあるので、その発熱の影響を排除するため、発泡スチロール板を測定台の上に張り出させた。また、熱画像のノイズを除去するため、連続した32フレーム（30フレーム/秒）を平均し、各荷重段階毎にフロッピーディスクに記録した。これを試験後再生し、節や切欠き底、材縁、中立軸など、異なる位置での温度変化を測定・検討した。

### 3. 有節材での発熱の観察

繰返し荷重に伴う有節材での熱画像変化について測定を行なったが、大きく分けて、節が引張側の材縁にかからない場合と、かかる場合に分けられる。また、節がワイドフェイスの材縁にかからない場合についても、下面（引張面）に貫通している場合と、反対側の側面（ワイドフェイス）に貫通している場合に分けられる。これら3種類の測定結果の例をFigs. 2～5に示す。

負荷前において節の部分は周辺より少し低い温度を示した（Fig. 2）。これは、節部分では熱伝導率の大きいすなわち表面の熱が移動し易いこと、あるいはまた、節の部分は密度が高いためより平滑な切削表面となり熱放射率が小さくなるが、温度表示では、熱放射率が全面において同一であるとの前提に立っており、結果的に低い温度として表示されたものと考えられる。このように初期にわずかなではあるが表示温度に分布が存在するため、主として初期状態との温度差を基に以下の観

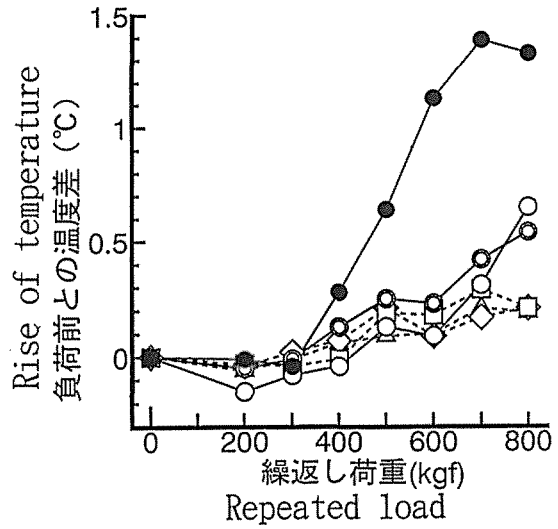
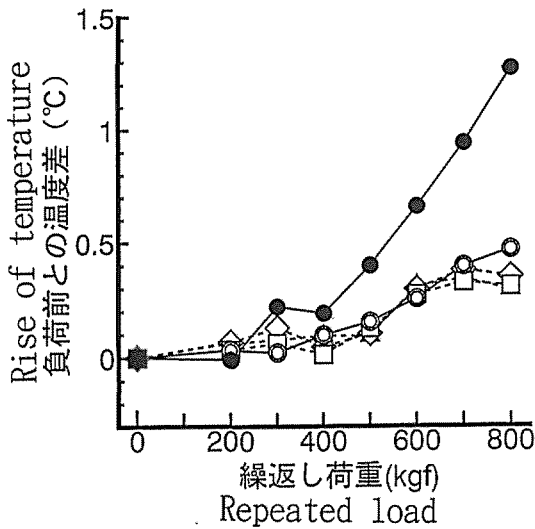
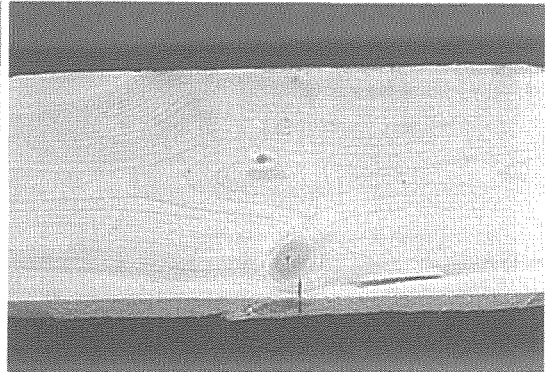
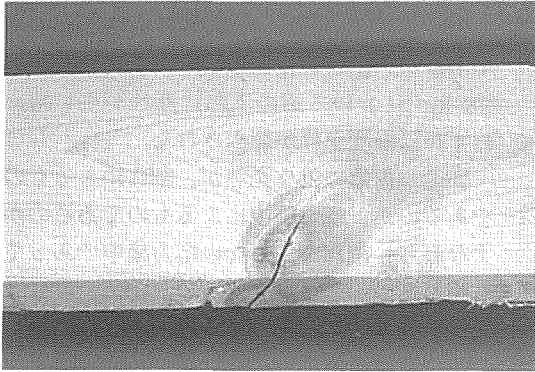


Fig. 3 エッジにかかった生節をもつ材の繰返し荷重の増加に伴う温度変化  
 負荷前の温度との差を縦軸にとっている。他は Fig. 2 と同じ。

Temperature change of lumber including intergrown knot on the edge according to the increase of repeated load.

The same as Fig. 2 except for vertical axis.

- 節内部の割れの先 crack tip at the knot
- 節 knot
- 引張縁 tension edge
- ◇ 中立軸 neutral axis
- △ 圧縮縁 compression edge

Fig. 4 エッジにかからない生節が下面に貫通している場合の温度変化

Temperature change of lumber including intergrown knot at the edge penetrating to lower face.

- 下面の節の割れ crack tip at the knot in the lower face
- 節の上部の割れ crack around knot in the wide face
- 節 knot
- 引張縁 tension edge
- ◇ 中立軸 neutral axis
- △ 圧縮縁 compression edge

察を行った。

Fig. 3 において、節部分の割れの先端で顕著な発熱が観察されたが、これは割れの先端における応力集中が関係しているものと考えられる。

同様に、材縁にかからない節が下面に貫通している場合の発熱の例を Fig. 4 に示す。この場合も割れの先端の応力集中部での発熱が大きい。

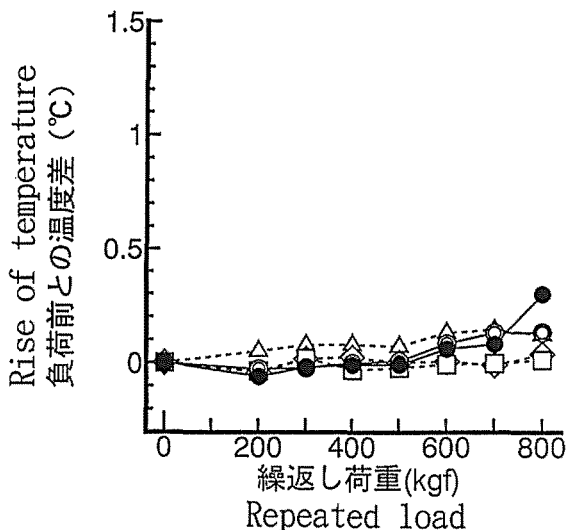
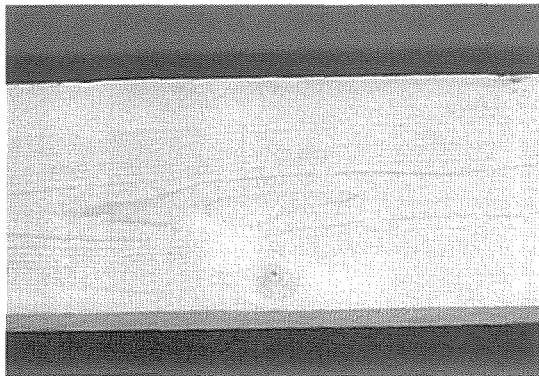


Fig. 5 エッジにかからない生節で裏面に貫通している場合の温度変化

Temperature change of lumber including intergrown knot at the edge penetrating to the opposite wide face.

- 節の右上の割れ crack right upper part around knot
- 節 knot
- 引張縁 tension edge
- ◇ 中立軸 neutral axis
- △ 圧縮縁 compression edge

用していることが明らかとなり (Fig. 9), この部分の応力-ひずみ関係が非線形すなわち塑性域に入っていることがわかる。切欠き幅が小さい場合は, 少したわむと切欠きの材縁側の端部が接触し互いに押し合うので, 切欠き底での応力集中は小さいが, 切欠き幅が大きいと, 材縁での接触がなく応力集中が大きくなり小さい負荷で塑性域に入る。

応力-ひずみ関係が非線形域に入ると, ヒステリシス・ループにより囲まれる面積すなわちロス・エネルギーが大きくなる。このロス・エネルギーのほとんどは熱エネルギーに変換されるものと考え

Fig. 5 は, 節がワイドフェイスからもう一方のワイドフェイスへ貫通している場合の例であるが, 割れが存在しないので発熱もない。800 kgf において節の上部に割れが生じ始め, わずかに温度上昇が認められた。

繰返し荷重に伴う発熱が, 割れによるものであるのか, 応力集中によるものであるのか, すなわち, 割れを伴わない応力集中であっても生じるのかどうかを確かめるため, 次に, 切欠きをもつ梁の繰返し曲げにおける熱画像変化を観察した。

#### 4. 切欠きをもつ梁の曲げに伴う熱画像変化

梁のスパン中央, 引張側あるいは圧縮側に切欠きをもつ場合について, 切欠き深さ及び切欠き幅を変え, 繰返し負荷に伴う熱画像変化を測定した。Fig. 6 に引張側に切欠きのある場合の温度変化を示す。切欠き底での温度上昇が割れの進展とともに小さくなり, 一方, その時々割れの先端での発熱が大きくなってゆく様子が観察される。

では圧縮側に切欠きがある場合はどうかであろうか。圧縮側に切欠きのある場合の熱画像変化を Fig. 7 に示す。切欠き底において非常に大きな発熱が観察される。この発熱が縦圧縮によるのか, 横引張, 横圧縮あるいはせん断によるのかを明らかにするため, 切欠き幅を大きくして実験し, かつ応力解析を行なった。

測定結果を Fig. 8 に示す。切欠き底において85°C(温度上昇65°C) という予想を越える非常に高い材温が観察された。

有限要素法による応力解析の結果, 切欠き底において大きなせん断及び縦圧縮応力が作用

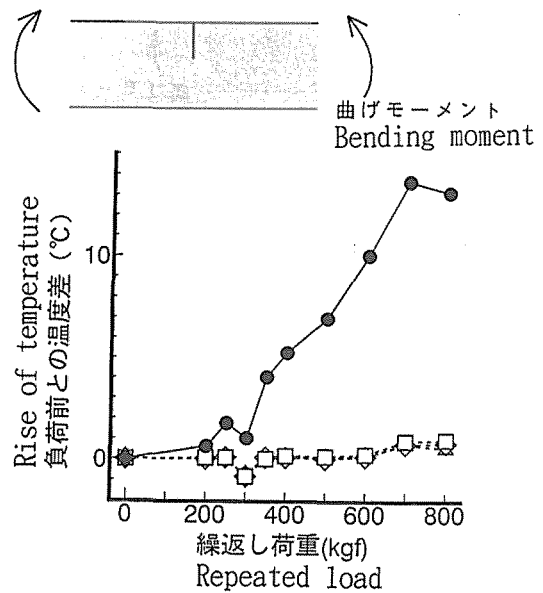
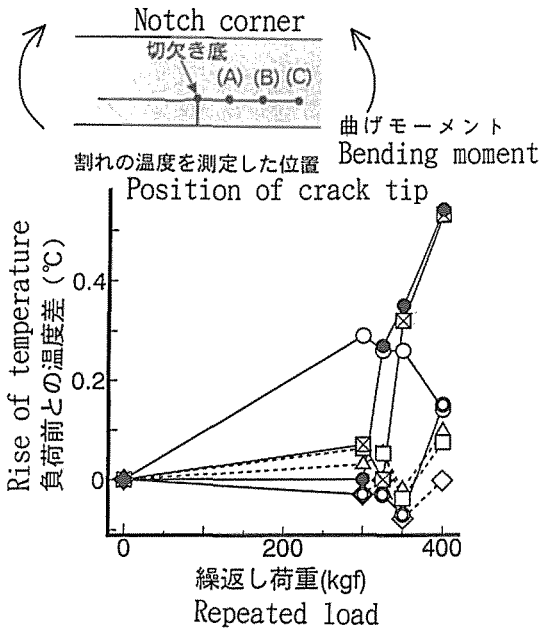


Fig. 6 引張側に深さ 4 cm, 幅 1 cm の切欠きをもつ場合の温度変化  
Temperature change of lumber with a notch of 1mm width and 4cm depth at the tension side.

Fig. 7 圧縮側に深さ 4 cm, 幅 1 cm の切欠きをもつ場合の温度変化  
Temperature change of lumber with a notch of 1mm width and 4cm depth at the compression side.

- 切欠き底 notch corner
- 割れ(A) crack tip (A)
- ⊗ 割れ(B) crack tip (B)
- ⊙ 割れ(C) crack tip (C)
- 引張縁 tension edge
- ◇ 中立軸 neutral axis
- △ 圧縮縁 compression edge

- 切欠き底 notch corner
- 引張縁 tension edge
- ◇ 中立軸 neutral axis
- △ 圧縮縁 compression edge

えられるので、ヒステリシス・ループが大きいほど発熱が大きくなるものと考えられる。次章ではこのことについて検討する。

### 5. ヒステリシス・ループと発熱量の関係

Fig. 2～5 に対応する試験体の荷重-変位曲線を例として Fig. 10 に示す。応力集中部での局所の応力-ひずみ曲線を測定することは、現時点の技術レベルでは非常に困難であるため、取りあえず荷重-変位曲線のヒステリシス・ループの面積すなわち梁全体でのロス・エネルギーを求め、発熱量との関係を調べた。Fig. 11 に有節材の場合を、また Fig. 12 に圧縮側に切欠きをもつ場合を示す。縦および横軸のオーダーが Fig. 11 と Fig. 12 で異なっていることに注意されたい。いずれの場合も、ループが大きいほど上昇温度が大きい傾向が認められる。局部でのヒステリシス・ループが測定できるならば、上昇温度との間にもっと顕著な相関関係が得られるものと推察される。

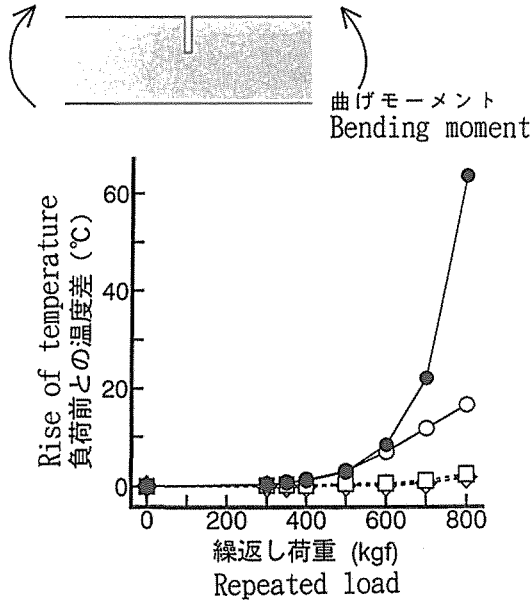


Fig. 8 圧縮側に深さ4cm, 幅10cmの切欠きをもつ場合の温度変化

Temperature change of lumber with a notch of 10mm width and 4cm depth at the compression side.

- 切欠き底右 right notch corner
- 切欠き底左 left notch corner
- 引張縁 tension edge
- ◇ 中立軸 neutral axis
- △ 圧縮縁 compression edge

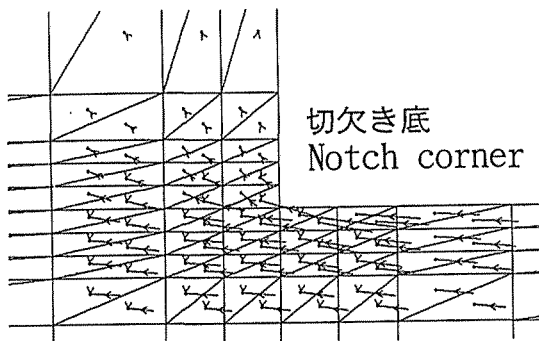


Fig. 9 切欠き底付近の応力線図

線の長さは応力の相対的な大きさを表し, 点に向かう矢は圧縮を表す。

Stress distribution diagram.

Length of an arrow indicates magnitude of stress. An arrow head facing to a point indicates compression stress.

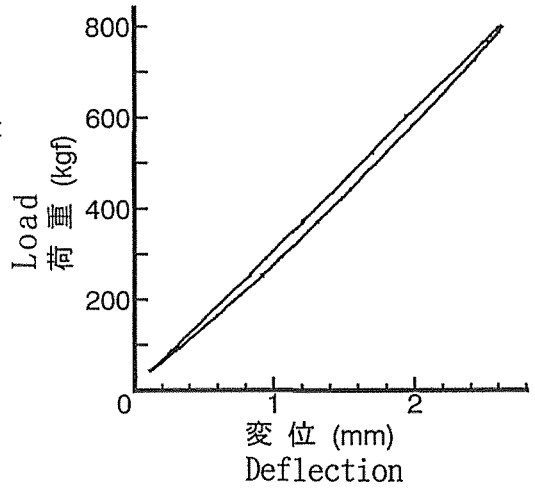


Fig. 10 荷重-変位曲線のヒステリシス・ループの例 Fig. 2 および 3 の場合

An example of a hysteresis loop of a load-deflection curve.

In case of the same specimen of Fig. 2 and 3.

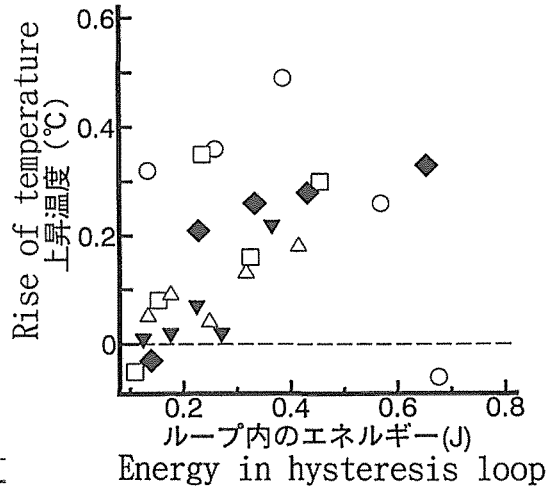


Fig. 11 荷重-変位曲線のヒステリシス・ループに相当するエネルギーと, 発熱部の上昇温度の関係—有節試験体の場合。

同一記号は同一試験体を表わす。

Relation between temperature rises of heat generated portions and equivalent energy to hysteresis loops of load-deflection curves—in case of lumber including a knot.

The same symbol denote the same specimen.

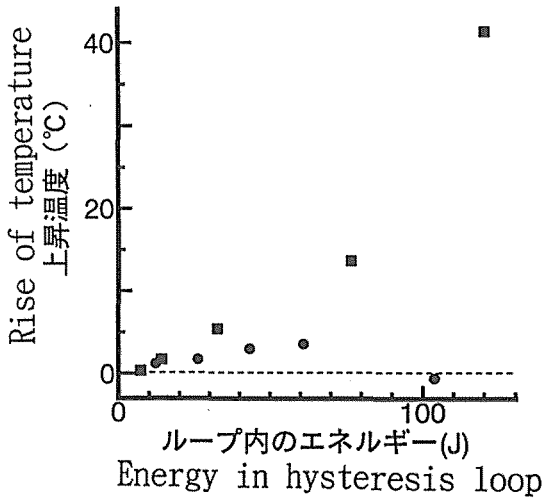


Fig. 12 荷重-変位曲線のヒステリシス・ループに相当するエネルギーと、発熱部の上昇温度の関係 — 圧縮側に切欠きのある場合

Relation between temperature rises of heat generated portions and equivalent energy loss of hysteresis loops of load-deflection curves — in case of lumber with a rectangular notch at compression side.

## 6. 結 言

以上の結果より、曲げ荷重下の梁において応力集中部が存在する場合、特に、応力-ひずみ関係が非線形となっている部分において、温度上昇が観察されることが明らかとなった。応力が集中する部分とは、割れや欠陥部あるいは力学的に好ましくない部分である場合が多い。従って、繰返し曲げ荷重に伴う熱画像変化を用いて、欠陥部の検出、あるいは非破壊検査グレーディングに応用することも可能であると考えられる。実用化に向けての克服すべき課題は多いが、適用分野によっては早い時期に実現化するものと期待される。

## 文 献

- 1) 村田功二・佐道 健 (1994) 節を含む針葉樹表層での熱伝導と熱吸収. 木材学会誌, 40(1), 1180-1184

## Summary

Lumber in bending including a crack or a notch has a stress concentration at the crack tip or the notch corner. A knot itself is not a portion of stress concentration. But a crack often exists at a knot or around a knot, and/or a crack grows by loading. At the crack tip stress concentrates and the stress-strain relationship shows a hysteresis loop. Heat is generated according to the loss energy of the hysteresis loop. The amount of the generated heat can be increased by repetition of loading. The location of the heat generating portion can be detected by using a thermal image equipment (infrared thermodetector). If the rise of the temperature is too small to detect, increase of repetition number of loading will give clear image. High temperature rise caused by the large hysteresis energy loss was observed at the plastic deformation in compression. To apply this thermal image method to practical use for non-destructive evaluation or grading, more precise investigation and improvement will be required.