

#### 4.4 結果と考察

Table 4-1~4-3は、1年輪を10分割した各部位において推定された材料定数の値を示す。 $G_{TR}$ は $G_{TR}=0.003E_L$ の関係式<sup>(149)</sup>より算出した。ポアソン比は部位による差は無いとみなし、文献値<sup>(150)</sup>より採用した。

Fig.4-9には、スギ、スプルスおよびアカマツの年輪内位置と破壊じん性( $K_{TR}$ )値との関係を示す。実験値と計算値とで一致した傾向が得られた。スプルスおよびアカマツでは計算値の方が若干低い値であったが、これは引張強さを実際より低い値に見積ったためと考えられる。ここにおいて、前章における破壊じん性値の違いは、単にき裂先端部位の材質および細胞の形態変化のし易さに影響されたのではなく、き裂先端位置およびき裂進展方向に依存する応力分布の違いによってき裂先端での応力拡大係数もしくは応力集中度が変化し、その変化によっても影響されていたことが明らかとなった。

ところで、き裂を持つ部材は、き裂先端付近に応力集中を起こす。その先端での応力を次式で表現することにする。

$$\sigma_{tip} = \alpha \sigma \quad (4.2)$$

ここで、 $\sigma_{tip}$ はき裂先端での接線方向の応力、 $\sigma$ は公称応力、 $\alpha$ は応力集中係数である。 $\alpha$ はき裂先端での応力集中の度合を表すものと考えられる。本章での数値解析結果より、き裂進展開始時(き裂先端に接している $0.125\text{mm} \times 0.125\text{mm}$ の1つの正方形要素の平均応力が引張強さに達した時)の $\alpha$ の値を求めた。その結果をスギ、スプルスおよびアカマツについて、Fig.4-10に示す。同じ年輪内位置、すなわち、弾性定数、引張強さが同じでも、き裂進展方向(pith-side notched, bark-side notched)により応力集中係数( $\alpha$ )が異なる結果となった。この結果と前章でのAE計測結果および破面解析結果とを対比させると、ゆっくりと応力が集中(応力集中度が低い)した場合、AEもゆっくりと発生し、き裂進展開始時までに形成されたと考えられた破壊面において壁内破壊が顕著に観察されるようになり、急激に応力が集中(応力集中度が高い)した場合、AEも急激に発生し、壁切断破壊が顕著に観察されるようにな

Table 4-1. Mechanical properties in a single annual-ring of sugi.

Number in Fig. 4-2	E <sub>T</sub>	E <sub>R</sub>	E <sub>L</sub>	G <sub>TR</sub>	σ <sub>LT</sub>	σ <sub>TR</sub>
	(× 10 <sup>3</sup> kgf/cm <sup>2</sup> )				(kgf/cm <sup>2</sup> )	
1	0.966	2.20	53.1	0.159	23.5	32.2
2	0.982	2.23	53.6	0.161	23.8	32.5
3	0.958	2.18	52.9	0.159	23.3	32.0
4	1.13	2.55	57.7	0.173	27.1	35.2
5	1.20	2.69	59.5	0.179	28.6	36.4
6	1.36	3.03	63.6	0.191	32.1	39.2
7	1.74	3.81	72.2	0.217	40.1	45.1
8	2.78	5.92	92.2	0.277	61.5	59.0
9	3.09	6.54	97.4	0.292	67.8	62.7
10	6.02	12.2	138	0.414	124	91.8

Note: ν<sub>LR</sub>: 0.40, ν<sub>LT</sub>: 0.60, ν<sub>RT</sub>: 0.90.

Table 4-2. Mechanical properties in a single annual-ring of spruce.

Number in Fig. 4-2	E <sub>T</sub>	E <sub>R</sub>	E <sub>L</sub>	G <sub>TR</sub>	σ <sub>LT</sub>	σ <sub>TR</sub>
	(× 10 <sup>3</sup> kgf/cm <sup>2</sup> )				(kgf/cm <sup>2</sup> )	
1	2.00	2.38	67.2	0.202	52.0	59.5
2	2.00	2.38	67.2	0.202	52.0	59.5
3	2.10	2.46	69.4	0.208	53.9	61.2
4	2.31	2.60	73.3	0.220	57.2	64.4
5	2.48	2.72	76.5	0.229	59.9	67.0
6	2.61	2.81	78.9	0.237	62.0	69.0
7	3.07	3.10	86.8	0.260	68.9	75.4
8	3.75	3.51	97.8	0.293	78.5	84.3
9	4.89	4.13	115	0.344	93.4	97.6
10	7.55	5.39	148	0.445	124	124

Note: ν<sub>LR</sub>: 0.38, ν<sub>LT</sub>: 0.51, ν<sub>RT</sub>: 0.51.

Table 4-3. Mechanical properties in a single annual-ring of akamatsu.

Number in Fig. 4-2	E <sub>T</sub>	E <sub>R</sub>	E <sub>L</sub>	G <sub>TR</sub>	σ <sub>LT</sub>	σ <sub>TR</sub>
	(× 10 <sup>3</sup> kgf/cm <sup>2</sup> )				(kgf/cm <sup>2</sup> )	
1	2.04	3.85	74.6	0.224	48.1	56.8
2	2.23	4.12	78.8	0.236	51.1	60.4
3	2.26	4.16	79.5	0.239	51.6	60.9
4	2.05	3.86	74.8	0.224	48.3	57.0
5	2.15	4.01	77.2	0.232	50.0	59.0
6	2.30	4.22	80.5	0.241	52.3	61.7
7	2.82	4.95	91.6	0.275	60.4	71.2
8	7.95	11.1	177	0.530	125	147
9	18.7	21.7	304	0.911	228	266
10	21.0	23.7	327	0.980	248	288

Note: ν<sub>LR</sub>: 0.40, ν<sub>LT</sub>: 0.60, ν<sub>RT</sub>: 0.65.



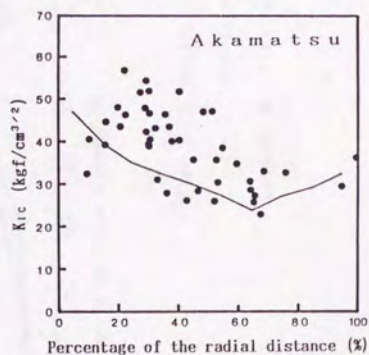
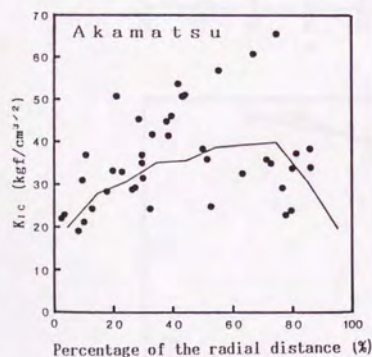
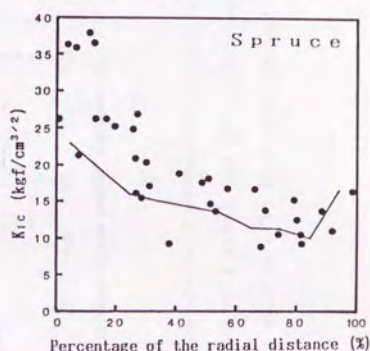
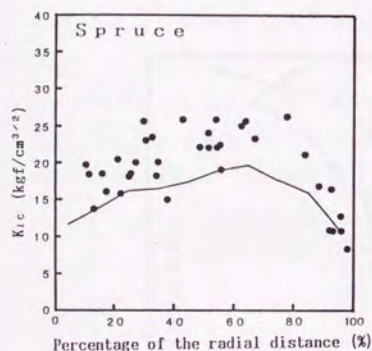
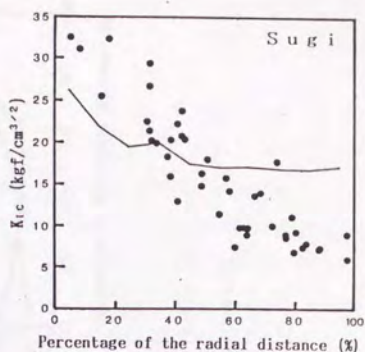
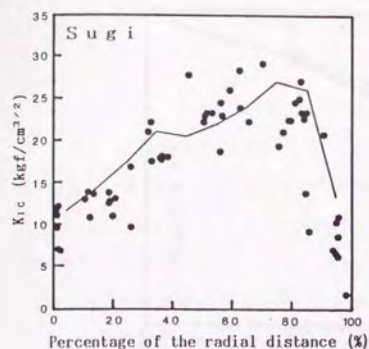


Fig. 4-9. Relationships between the  $K_{Ic}$ 's and the location of a crack tip in a single annual-ring: left, pith-side notched; right, bark-side notched.

Legend: ●:  $K_{Ic}$  by experiment. —:  $K_{Ic}$  by finite element method.

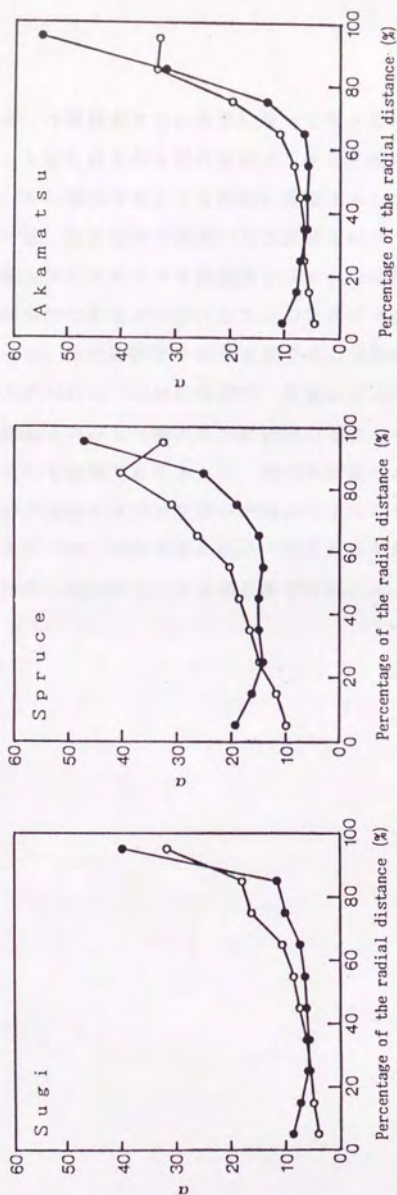


Fig. 4-10. Relationships between stress concentration factor ( $\alpha$ ) and the location of a crack tip in a single annual-ring.

Legend: ●: Pith-side notched, ○: Bark-side notched.

ったといえる。き裂開始までの挙動に限って考えた場合、緩やかな速度で応力が集中したときに生成される壁内破壊は、その生成によってき裂先端の応力集中を緩和し、 $K_{Ic}$ 値を大きくする方向に寄与するものと考えられる。

Ashbyら<sup>43)</sup>は、SEM内で破壊じん性試験を行い、き裂進展挙動を観察し、RTき裂進展システムとTRき裂進展システムの間の方にき裂が進展した場合、細胞境界での剥離が支配的なTRの方にき裂がそれる傾向があるとしている。従って、比較的ゆるやかな速度で応力が集中した場合は壁内破壊が卓越するものと思われる。しかしながら、急激に応力が集中した場合は、佐伯ら<sup>7)</sup>によって報告されたS2層の平坦面破壊が増えたとする無欠点材縦引きにおける結果からも推察できるように、壁切断破壊が卓越するようになると考えられ、それが大振幅AEの発生割合が増加するという形でAEの挙動にも現れたものと考えられる。切欠き材において荷重速度を変えた場合の破壊形態およびAE発生特性の変化については第6章で検討する。



#### 4.5 結論

木材TRき裂進展システムの破壊じん性値が、き裂先端の年輪内位置およびき裂進展方向の違いに由来する応力分布にどのように影響されるかについて、有限要素法による数値解析を行った。その際、き裂先端に接している1個の正方形要素（一辺の長さ0.125mm）が引張強さに達した時を臨界点とした。

$K_{Ic}$ 値の年輪内での変動の仕方は、実測値と計算値とで一致した傾向が得られた。従って、このような $K_{Ic}$ 値のばらつきの原因は、（1）細胞の弾性的な形態変化のし易さが年輪内位置により異なる。（2）き裂先端の年輪内位置およびき裂進展方向に依存する応力分布の違いによってき裂先端での応力拡大係数もしくは応力集中度が変化する。の2点であると結論づけた。

同年輪内位置（弾性定数、引張強さが同じ）でも、pith-side notchedとbark-side notchedの違いにより $K_{Ic}$ 値が異なった、すなわち、応力集中度が異なったことが明らかとなった。このことと前章での破面解析結果とを対比させてみることにより、ゆっくりと応力が集中した場合、壁内破壊が顕著に観察されるようになり、急激に応力が集中すると、壁切断破壊が顕著に観察されるようになることがわかった。

5.1 はじめに

木材の縦引張破壊の場合の破壊じん性値は非常に大きく、延性金属のそれに充分匹敵する<sup>2)</sup>。それに比べれば横引張破壊の場合の破壊じん性値は余りにも小さい。従って、木材中をき裂が繊維に直交して進もうとしている場合、き裂の先端付近で多くのエネルギーを消費するような何か特別な機構が存在するものと考えられる<sup>15)</sup>。この点についてJeronimidis<sup>50)</sup>は、Cookら<sup>49)</sup>の提案した機構によるき裂先端付近での細胞境界(S1近傍)の剥離破壊と、Pageら<sup>32)</sup>の提唱したS2のらせん配列構造に沿った陥没に伴う裂け破壊の2点を挙げ、これらが破壊じん性を高めているとしている。古川<sup>15)</sup>は、き裂伝播の途中で裂け破壊あるいは縦裂破壊がかなりの頻度で発生し、このことが破壊じん性の向上に大きく寄与していると推定して、これらの破壊の発生には、木材の層状構造あるいは軸方向要素に直交して配列する放射組織の存在等、木材に特有の構造が深く関係していると考察している。しかしながら、このような応力集中を緩和する機構が“いつ”発現するかについては諸説<sup>2, 24)</sup>があり、また、厚手の木材の材内部でも同様の現象が起きているのかは不明である。

本章では、前章までに得られた微視的破壊過程で発生するA Eの知見を基にして、直接観察できない材内部での動的な挙動をA E法によりモニタリングすることによって、縦引張破壊時の高い破壊じん性の発現機構の正体を究明することを目的とした。そこで、厚さ10mmの試験体を用いて、L Tき裂進展システムからR Tき裂進展システムまで面外方向の繊維傾斜を変えて破壊じん性試験を行ない、き裂の開始まで、あるいは初期の進展過程で発生するA Eを計測し、破断面のSEMによる観察結果と比較対照することにより、木材の微視的な破壊機構および破壊じん性が繊維傾斜の変化によってどのように変わっていくかを検討した。



## 5.2 供試材料

供試材料にはエゾマツ (*picea jezoensis* Carr.) を使用した。平均年輪幅 2.1mm, 平均晩材率 12.5% であった。試験片は A E 発生源を特定させるために切欠き材を用い, Fig.5-1 のような片側き裂試験片とした。本研究では, 切欠きの方向を常に同じにさせる目的で, 面外に繊維傾斜を変えることとした。Fig.5-2 に示すように繊維方向と荷重方向とのなす角度を  $0^{\circ}$  (LT システム) から  $90^{\circ}$  (RT システム) まで  $15^{\circ}$  ずつ傾斜させ,  $0^{\circ}$ ,  $15^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$ ,  $75^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$  の計 7 種類の繊維傾斜角 ( $\theta$ ) を持つ試験片を作製した。従って, 導入した切欠きの方向は全ての傾斜角で接線方向となる。

試験片は  $20^{\circ}\text{C}$ , 65% RH の雰囲気 で十分に調湿した。荷重方法は直径 6mm の円孔によるピンローディングとしたが, 円孔部分を強化するために  $25 \times 25 \times 2\text{mm}$  の硬材の添木をエボキシ樹脂で接着した。切欠きの入れ方等は第 3 章と同じである。試験片の概要を Table 5-1 に示す。



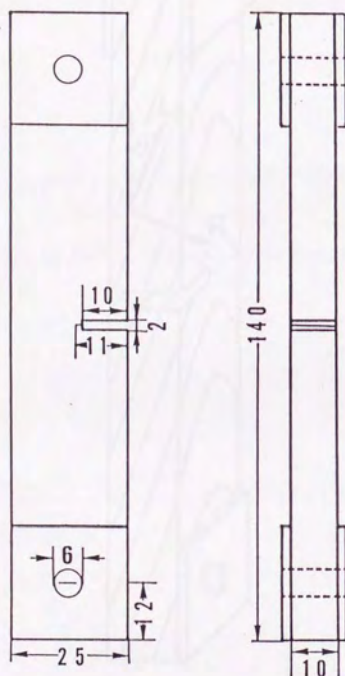


Fig. 5-1. Schematic representation of the single edge notched specimen  
(unit:mm).

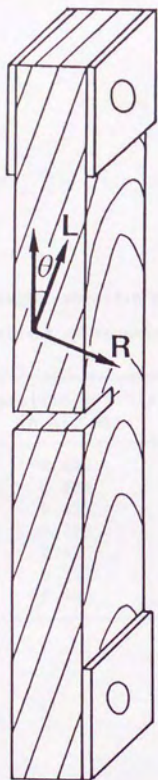


Fig. 5-2. Specimens with various grain angles.

Legend:  $\theta$ : Grain angle.

Note:  $\theta = 0, 15, 30, 45, 60, 75$ , and  $90$  degrees.

Table 5-1. Grain angle, specific gravity, moisture content, and number of specimens of ezomatu.

Grain angle (degree)	Specific gravity in air dry	Moisture content (%)	Number of specimens
0°	0.436	12.9	12
15°	0.434	13.3	12
30°	0.432	13.1	12
45°	0.453	13.1	12
60°	0.427	12.8	12
75°	0.429	12.5	12
90°	0.444	12.6	12



### 5.3 実験方法

#### 5.3.1 強度試験法

強度試験法は2.2節と同様とし、クロスヘッド速度0.5mm/minの静的引張で行った。

#### 5.3.2 AE計測法

AE計測法は3.3節と同様とし、ガードセンサ機能によりき裂先端部以外からのAEを除去して行った。荷重-き裂開口変位(COD)曲線の比例限度までに発生したAEを計測した。

#### 5.3.3 走査電子顕微鏡による観察

強度試験後の破断面をSEMにより観察し、カミソリの刃で導入したき裂先端部の破断後の性状および初期のき裂進展状況を調べた。SEM観察は3.3節と同様にして行った。

$K_{Ic}$ 値は荷重-COD曲線の比例限度を臨界点(安定き裂開始点)とし、(2.1)式より求めた。

## 5.4 結果と考察

### 5.4.1 破壊力学パラメータの変動

Fig.5-3には、各繊維傾斜角における荷重-COD曲線の典型例を示す。0°以外では、比例限度以降、荷重が最大値を示し最終破断に至った。ところが0°においては、さらに荷重の増加を続け最大値を示さない場合が多かった。

Fig.5-4には、繊維傾斜角と破壊じん性 ( $K_{Ic}$ ) 値との関係を示す。 $K_{Ic}$ 値は角度の増加と共に単調に減少した。Boatrightら<sup>84)</sup>は、South African pineの片側き裂試験片により、LTシステムからTLシステムへと面内で繊維傾斜を変えて4点曲げ試験を行い、0°と15°の間の $K_{Ic}$ 値における差が本実験よりも大きかったものの、ほぼ本実験と一致した傾向を得ている。

Fig.5-5に、繊維傾斜角と臨界COD ( $COD_c$ ) との関係を示す。 $COD_c$ は45°で最大となる。上に凸の曲線を描くように推移した。

### 5.4.2 AE特性

本研究では荷重-COD曲線の比例限度までに計測されたAEを対象としている。カミソリの刃で導入したき裂先端からのき裂の進展は、この比例限度以降に目視により観察されたことより、本研究でのAEは、初期き裂先端近傍での微視的な塑性変形（小規模降伏）に由来すると考えられる。

Fig.5-6には各繊維傾斜角における荷重-COD曲線の比例限度、すなわち $K_{Ic}$ 値に至るまでの荷重-AE事象総数曲線の典型例を示す。繊維傾斜角の増加に伴い曲線の傾きが大きくなっていった。特に0°および15°の場合は他の傾斜角度との差異が著しく大きく、発生開始直後の初期段階での曲線の勾配が極めて小さいのが大きな特徴であった。

Fig.5-7には、 $K_{Ic}$ 値に至るまでのAEの振幅分布の典型的な推移を示す。第3の軸 (Z軸) には荷重-COD曲線の比例限度荷重を100%としたときの相対荷重をとった。85dB以上の大きな振幅を持つAEは、荷重-COD曲線の比例限度とほぼ同時に発生したことより、き裂進展開始に由来するAEであると考え

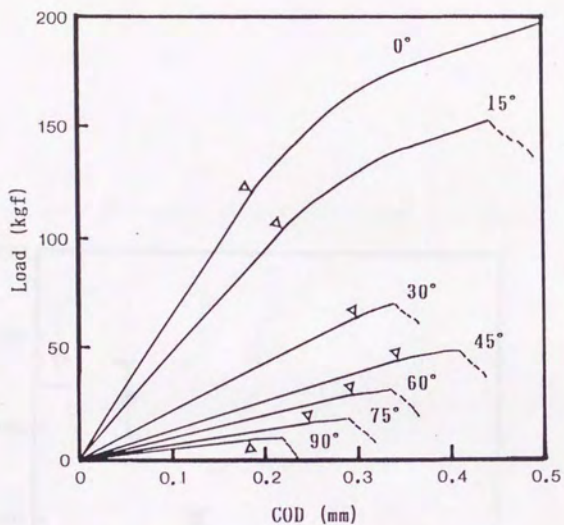


Fig. 5-3. Typical Load-COD diagrams for various grain angles.

Legend: ▽: Proportional limit.



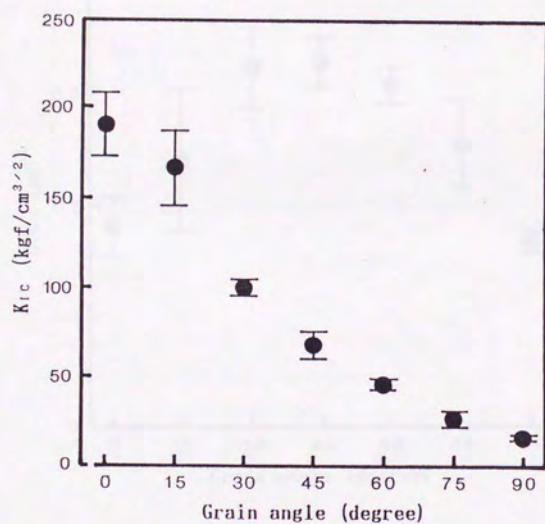


Fig. 5-4. Relationship between  $K_{Ic}$  and grain angle.

Legend: ●: Mean of twelve specimens, — : Standard deviation.

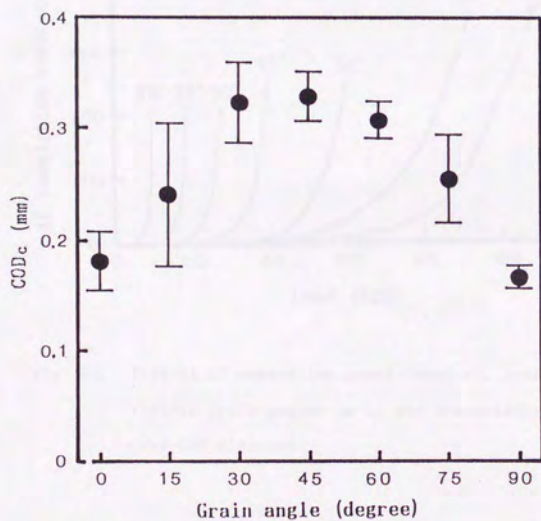


Fig. 5-5. Relationship between COD<sub>c</sub> and grain angle.

Legend: Same as in Fig. 5-4.

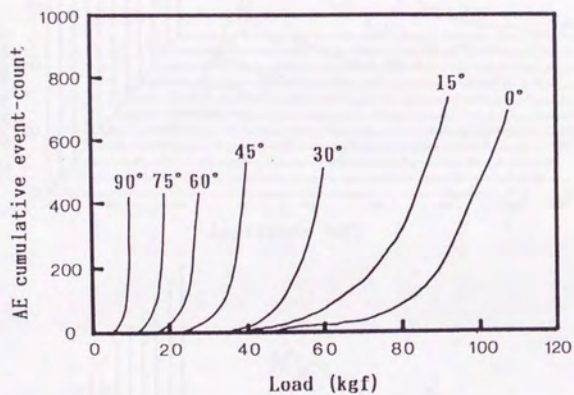


Fig. 5-6. Typical AE cumulative event-count vs. load curves for various grain angles up to the proportional limit in Load-COD diagrams.



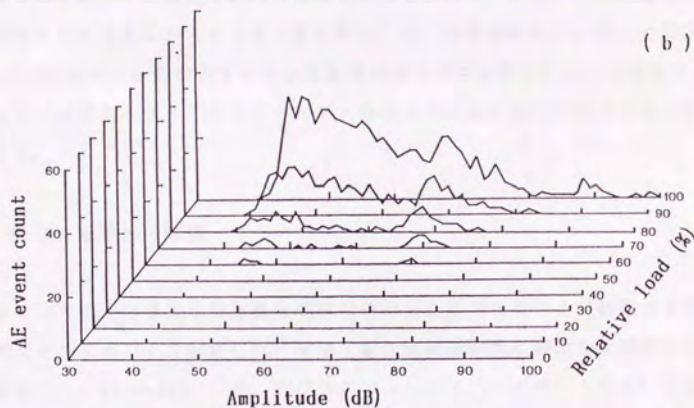
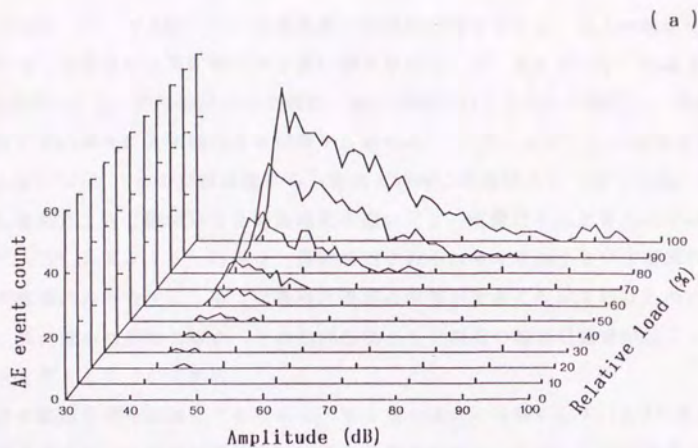


Fig. 5-7. Two typical patterns of AE amplitude distributions for various grain angles at various levels of loading up to the proportional limit in Load-COD diagrams.

Notes: (a):  $0^\circ$  , a representative of 0 and 15 degrees.

(b):  $75^\circ$  , a representative of 30, 45, 60, 75, and 90 degrees.

えられる。0° および 15° の低角度の傾斜角の場合と 30° 以上の傾斜角の場合とで推移の仕方に明らかな違いがみられた。0° および 15° の場合 (Fig. 5-7(a)), 初期段階では小振幅 (40~50dB) の A E のみが発生し、荷重の増加に伴い徐々に大振幅の A E が発生し始めた。一方、30° 以上の場合 (Fig. 5-7(b)), その初期段階から小振幅と同時に大振幅 A E (65~75dB) が発生し始めた。A E 振幅分布は破壊様式の違いによって変化するとされている<sup>114)</sup>。0° および 15° の場合、最初解放されるエネルギーの小さい小規模の微視的破壊のみが発生し、徐々に微視的破壊の規模が大きくなっていったのに対し、高角度の傾斜角の場合、その初期段階から大規模な微視的破壊が起こっていたと考えることができる。

この振幅分布を定量化するために、第3章の場合と同様にして (3.2) 式より  $m$  値を求めた。き裂進展開始時の  $m$  値を求めるために、荷重-COD 曲線の比例限度までに発生した A E より  $m$  値を算出した。繊維傾斜角と  $m$  値との関係を Fig. 5-8 に示す。 $m$  値が小さい方が大振幅の A E 波が卓越することを意味する。従って、傾斜角が大きくなるにつれて大振幅 A E の発生割合が大きくなったと言える。

#### 5.4.3 破壊面の観察

カミソリの刃で導入したき裂先端部近傍の破断後の性状および初期のき裂進展状況を SEM により観察した。初期き裂は繊維傾斜角に関わらず繊維に沿って進展した。Mindessら<sup>41)</sup>も、ダグラスファーの 0°, 45°, 90° の面内繊維傾斜角を持つ CT 試験片のき裂進展挙動を調べ、き裂は繊維傾斜角に関わらず繊維に沿って進展したことを報告している。しかしながら、本研究では、0° および 15° の傾斜角と 30° 以上とでは進展の仕方に大きな違いがみられ、特に早材部において顕著に観察された。

Fig. 5-9 は、0° および 15° の典型例である。カミソリの刃で導入したき裂は極めて平滑であったため、容易にその先端を識別することができた。き裂は最終的には繊維方向に進展したが、接線方向 (最初のき裂の方向) への進展も伴った。すなわち、最初のき裂先端が位置した細胞より直接繊維方向に進展す

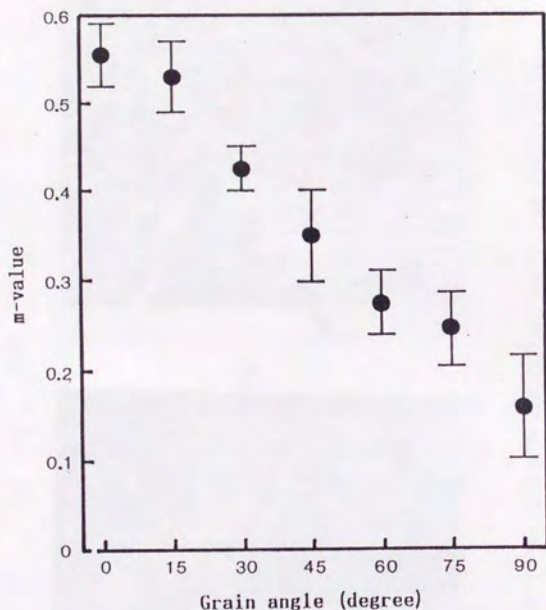


Fig. 5-8. Relationship between m-value and grain angle.

Legend: Same as in Fig. 5-4.

Notes: m-value are given as follows:

$$N(V) = kV^{-m},$$

where V is the peak amplitude of each AE wave. N(V) is the number of AE waves having V, and k and m are constants.

m-value was calculated by the AE data generated up to the proportional limit in Load-COD diagram.



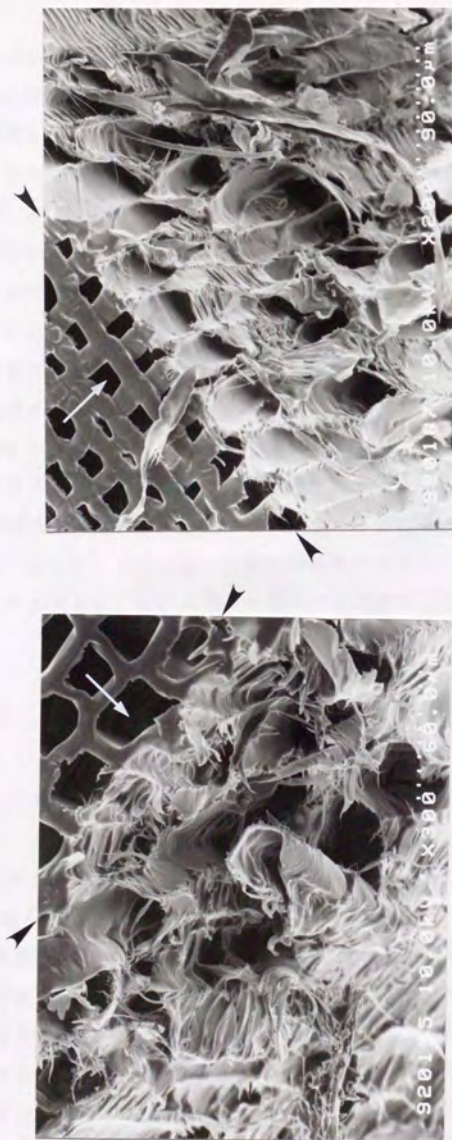


Fig. 5-9. Typical fracture surfaces close to the initial crack tip for the grain angles of 0° and 15°.

Notes: ▶: The initial crack tip.

The arrow indicates the direction of initial crack.

Left: 0°. Right: 0°.

るのではなく、最初のき裂先端より接線方向前方に隣接する1～3列の細胞における横または斜めの切断を伴って進展した。このような切断は、仮道管と放射組織との交差域（分野）を起点として起こっており、接線方向に階段状に観察される例が多かった。繊維方向の進展には細胞の境界に沿って進展する壁内破壊<sup>1)</sup>と細胞を縦方向に切断する縦裂破断<sup>1)</sup>の両者が観察された。

Fig. 5-10は、 $30^\circ$  および  $45^\circ$  の中程度の繊維傾斜角で典型的に観察されたものである。その破壊線<sup>2)</sup>は前述の $0^\circ$  および  $15^\circ$  の場合とは異なり、凹凸の少ない直線状であった。すなわち、接線方向への進展を伴うことなく最初のき裂先端が位置した細胞から直接繊維方向に進展した。その進展様式は、壁内破壊と縦裂破断との混合した様式であった。

Fig. 5-11は、繊維傾斜角の大きな試験片（ $60^\circ \sim 90^\circ$ ）の典型例である。き裂は $30^\circ$  および  $45^\circ$  同様、繊維方向に即座に進展した。その様式は縦裂破断が支配的であり、壁内破壊はほとんど観察されなかった。 $30^\circ$  および  $45^\circ$  は $60^\circ$ 以上に比べて繊維傾斜角が小さいために縦裂破断が起こりにくい。そのために、細胞境界へき裂がそれて進展した事例が多かったと考えられる。

#### 5.4.4 き裂進展開始のメカニズム

A E特性及びSEM観察結果よりき裂進展開始のメカニズムを考察する。

$0^\circ$  および  $15^\circ$  の場合、Fig. 5-6のA E事象総数曲線の傾きが緩やかであったために、弾性エネルギーがゆっくりと解放されていったと思われる。またFig. 5-7のA E振幅分布の推移より、初期段階においてはA Eの振幅の小さい小規模な微視的破壊のみで破壊が進行したが、徐々に破壊の規模が大きくなっていったと考えられた。SEMによる観察では、他の繊維傾斜角の場合とは異なり、接線方向への進展（繊維を横切る切断）を伴った形態が特徴的に観察された。これらのことを以下のように解釈した。荷重方向と繊維方向が平行またはほぼ平行である場合、最初のき裂先端から繊維方向への縦裂破断を含めた進展には大きな応力が必要となる。従って、最初のき裂先端が臨界点に達する（き裂進展開始）以前に、最初のき裂先端より接線方向前方に隣接する1～3列の細胞





Fig. 5-10. Typical fracture surfaces close to the initial crack tip  
for the grain angles of 30° and 45°

Notes: Same as in Fig. 5-9.

Left: 30° , Right: 45° .





Fig. 5-11. Typical fracture surfaces close to the initial crack tip for the grain angle of  $60^\circ$ ,  $75^\circ$ , and  $90^\circ$ .

Notes: Same as in Fig. 5-9.

Left:  $75^\circ$ , Right:  $75^\circ$ .

の境界での剥離（壁内破壊）、あるいは壁孔のような元来木材中に存在するミクロなクラックの開口等、比較的小さい応力下での微視的破壊が進行していたものと考えられる。この2次的に生成される細胞境界での剥離の存在は、古川<sup>21)</sup>が、スギ、板目晩材切片の片側き裂試験で確認している——ただし、き裂進展開始以後に生成されるとしている点、本研究とは解釈が異なる——が、これによりき裂先端の応力集中が和らげられ一層高い $K_{Ic}$ 値が発現したと考えられる。これらの微視的破壊の規模は次第に大きくなっていくが、放射組織と仮道管との交差域などでその進展は拘束され、やがて最初のき裂先端の応力が臨界点に達すると、それまでに起こった微視的破壊を連絡するようにしてき裂が繊維方向に進展し、観察されたような破断面（Fig.5-9）の形態が示されたものと推測できる。

一方、 $30^\circ$ 以上の場合、 $0^\circ$ および $15^\circ$ に比べてA E事象総数曲線の傾きが大きいことから荷重増加につれ急激に弾性エネルギーが解放されていったと思われる。またA E振幅分布の推移より、その初期段階から解放されるエネルギーの大きい微視的破壊が起こったものと考えられた。繊維傾斜角が十分に大きい場合比較的容易に最初のき裂先端よりき裂が繊維に沿って進展する。従って、 $0^\circ$ および $15^\circ$ の場合のような応力の再分布は起こり得ず、その初期段階から細胞壁を縦に切断する縦裂破断のような解放されるエネルギーの大きい微視的破壊が進行したものと予想される。また壁内破壊と縦裂破断の2つの微視的破壊様式が観察され、 $60^\circ$ 以上になると縦裂破断が支配的に観察されるようになった点に関しては、縦裂破断により解放されるエネルギーが壁内破壊のそれよりも大きいと考えれば、Fig.5-8での $m$ 値が繊維傾斜角が大きくなるほど小さくなったことから容易に理解できる。

以上の考察をFig.5-12に模式的に示す。 $0^\circ$ 、 $15^\circ$ において、き裂開始前に壁内破壊が生成され、それがき裂先端の応力集中を緩和する効果を与えていると考えられたことは、第3章で検討したTRシステムの場合と一致する。



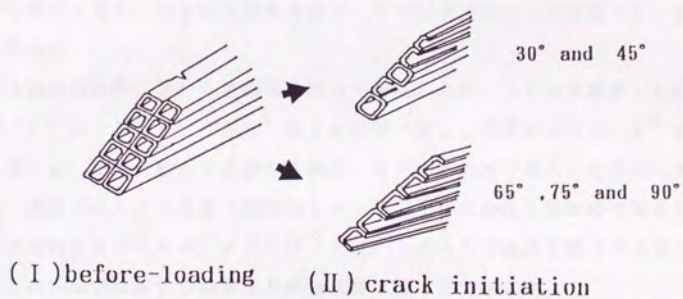
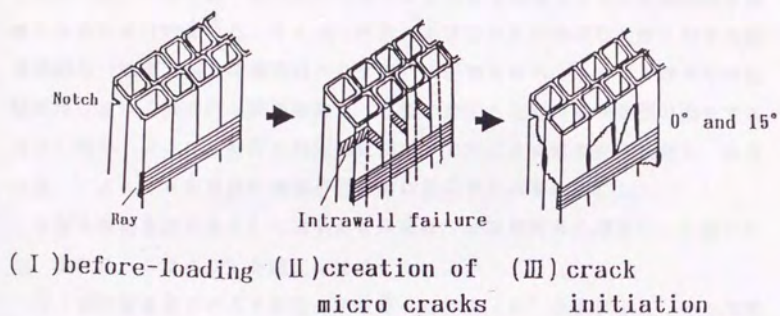


Fig. 5-12. Schematic illustration of the crack-initiation mechanisms.



## 5.5 結論

本章では、木材の縦引張破壊時に発現する大きな破壊じん性の発現機構を究明することを目的とした。そこで、木材（エゾマツ）の破壊じん性に対する繊維傾斜角（繊維方向と荷重方向のなす角）の影響を調べ、さらに、様々な繊維傾斜角における微視的な破壊機構を、き裂の開始と初期の進展過程で発生するAEの特性、および、初期き裂先端近傍のSEMによる観察から検討し、角度の違いによってき裂開始の機構がどの様に変化するかを検討した。

き裂の開始を臨界点として求めた $K_{Ic}$ 値は、繊維傾斜角の増加につれ減少した。臨界CODは $4.5^\circ$ を最大に増減した。

$K_{Ic}$ 値に至るまでのAE振幅分布を調べた結果、 $0^\circ$ および $15^\circ$ の小角度の場合、初期には小振幅のAEのみが発生し、徐々に大振幅のAEが発生し始めたのに対し、 $30^\circ$ 以上の大角度の場合、その初期段階から大振幅のAEが発生し始めた。

き裂は繊維傾斜角に関わらず繊維に沿って進展したが、SEMで観察した破壊面は、 $0^\circ$ および $15^\circ$ と $30^\circ$ 以上との間で著しい差異があった。 $0^\circ$ および $15^\circ$ は、繊維に沿って進展する際に、カミソリの刃で導入した最初のき裂方向（接線方向）への進展（細胞径1～3個の距離にわたる細胞壁の横または斜めの切断）を伴ったが、 $30^\circ$ 以上では、そのような進展を伴うことなく、最初のき裂先端が位置した細胞より直接繊維に沿って進展した。

AEの特性およびSEM観察結果より、き裂進展開始のメカニズムの推察を試みた。小さい角度の場合、最初のき裂先端からの進展に先んじて、最初のき裂の方向前方に隣接する1～3列の細胞の境界での剥離、あるいは、木材中にもともと存在したミクロなクラックの開口等が起こっていたのに対し、大きい角度の場合は、即座に最初のき裂先端より進展したと推察した。すなわち、小さい角度の場合、き裂開始以前に、き裂先端での応力集中を和らげるような機構が働き、それが、破壊じん性をより高める方向に寄与したと考えられた。

複合材料においてき裂が繊維に直交して進む場合、破壊じん性を高める効果として、繊維とマトリックスの界面での剥離<sup>(152, 153)</sup>、あるいは、マトリックス中の塑性域の拡大<sup>(152)</sup>等が寄与していることが確認されている。木材は構成

要素が多く、その配列も複雑であるが、S2のらせん構造、壁層構造、年輪構造、というように、各レベルで比較的規則的な層状構造が存在している。それら各層間の界面での剥離によって局所的な応力集中が緩和され、結果として木材の縦引張破壊に対する高い抵抗力が発現するのであらうと考えられる。

## 第6章 AEならびに破壊性状に及ぼす負荷速度の影響

### 6.1 はじめに

木材は粘弾性材料であるので、その力学的性質に対しては負荷速度の影響が大である。すなわち、力学的性質は時間の関数として表すことができる。外力が急激に作用すると弾性部分の変形が顕著に現われ、長時間外力が作用すると粘性部分の変形が現われてその強度が低下する。無欠点材の場合、破壊強度は負荷速度の対数に比例して上昇する<sup>154-156)</sup>と言われているが、切欠き材の場合、切欠き先端での応力集中効果により逆に低下するという報告<sup>83, 88, 157)</sup>もある。

第3章および4章において、木材TRき裂進展システムにおける $K_{Ic}$ 値がき裂先端の年輪内位置により異なったことを、AE法、破面解析および応力解析により検討した結果、ゆっくりと応力が集中した場合、 $K_{Ic}$ 値に至るまでに形成されたと考えられる破壊面において壁内破壊が顕著に観察されるようになると共に $K_{Ic}$ 値は大きくなり、一方、急激に応力が集中すると壁切断破壊が顕著に観察されるようになり $K_{Ic}$ 値は小さくなることを明らかにした。

前章までの強度試験はある一定のクロスヘッド速度(1mm/minあるいは0.5mm/min)でそれぞれ行ない検討したが、AEが時間に依存する現象であること、および、前述したように応力が集中する速度(言い換えれば負荷速度)の違いにより微視破壊様式が異なることが考えられること等から、クロスヘッド速度の違いによりそのAE発生特性も変化していく可能性もある。そこで本章では、スギ、ヒノキのLTき裂進展システムを用いて、木材の $K_{Ic}$ 値、AEの発生特性および微視的破壊形態が負荷速度の違いによりどのように変化するかを検討する。



## 6.2 供試材料

供試材料にはスギ (*Cryptomeria japonica* D. Don) およびヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* Endl.) の L T き裂進展システムを用いた。試験片の形状および寸法は前章と同様とした。

試験片は20℃, 65% RHの雰囲気ですばやく十分に調湿した。試験片の概要をTable 6-1に示す。

カミソリの刃で導入したき裂長さとその先端位置は、強度試験直前に読取顕微鏡および実体顕微鏡で観察し、測定した。

Table 6-1. Species, crosshead speed, specific gravity, and moisture content of LT systems.

Species	Crosshead speed (mm/min)	Specific gravity in air dry	M.C. (%)	Number of specimens
Sugi	0.1	0.352	13.3	5
	0.5	0.364	13.0	5
	1.0	0.328	13.1	5
	5.0	0.345	12.8	5
Hinoki	0.1	0.435	12.2	4
	0.5	0.460	12.5	5
	1.0	0.451	12.5	5
	5.0	0.444	12.2	5

Legend: M.C.: Moisture content.

### 6.3 実験方法

#### 6.3.1 強度試験法

強度試験は2.2節と同様にして行い、クロスヘッド速度は0.1, 0.5, 1, 5 mm/minの4条件の静的引張で行なった。

#### 6.3.2 AE計測法

AE測定法は3.3節と同様とし、ガードセンサ機能によりき裂先端部以外からのAEを除去して行なった。荷重-COD曲線の比例限度までに発生したAEを計測した。

#### 6.3.3 走査電子顕微鏡による観察

強度試験後の破断面をSEMにより観察し、カミソリの刃で導入したき裂先端部の破断後の性状および初期のき裂進展状況を調べた。SEM観察は3.3節と同様にして行なった。

$K_{IC}$ 値は荷重-COD曲線の比例限度を臨界点（安定き裂開始点）とし、(2.1)式より求めた。



## 6.4 結果と考察

### 6.4.1 破壊力学パラメータの変動

Fig. 6-1には、スギおよびヒノキの各負荷速度における荷重-COD曲線の典型例を示す。いずれの条件でも荷重は比例限度以降増加を続け最大値を示さない場合が多かった。

Fig. 6-2~4には、スギおよびヒノキの、負荷速度に対する破壊じん性 ( $K_{Ic}$ ) 値、 $COD_c$ 、および、ヤング率に比例する物理量であると考えられる<sup>99)</sup> 荷重-COD曲線の直線部分の傾きの変化を示す。両樹種とも $K_{Ic}$ 、 $COD_c$ は右下がりの傾向を示したが、荷重-COD曲線の傾きは、ヒノキでは変位速度に関わらずほぼ一定、スギではやや右上がりであった。いずれにせよ、本研究においては測定系の問題により負荷速度のレンジを狭く取る必要があったために、負荷速度と破壊力学パラメータとの間の明確な関係を導き出すことはできなかった。Sobueら<sup>98)</sup>は、ベイスギ(含水率6.9%)、TRシステムの片側き裂曲げ試験において、撓み速度1~100mm/minの範囲においては撓み速度とともに $K_{Ic}$ 値および $COD_c$ が低下する結果を得ているが、この原因について、撓み速度の増加とともに荷重-COD曲線の直線部分の傾きが増加していることからき裂先端近傍での応力集中効果によるものであると考察している。またSchniewind<sup>83)</sup>は、ダグラスファーのLTシステムの定荷重速度試験(ramp-loading)の結果より、荷重速度が小さいと応力の再分布により $K_{Ic}$ 値が増加すると考察している。切欠き材における負荷速度の影響については、速度増加と共に破壊じん性値が大きくなる結果<sup>90, 98)</sup>と逆に小さくなる結果<sup>82, 88, 157)</sup>が報告されているが、破壊じん性値が大きくなる場合 $COD_c$ は負荷速度によらず一定であり、一方、破壊じん性値が小さくなる場合には $COD_c$ もそれに伴い低下する結果が得られるとする報告<sup>98)</sup>もある。切欠き材の破壊は、き裂先端近傍に集中した応力がそこに存在する組織を破壊し得るような値に至ったときに起こると考えられるが、これとは別に、き裂がある値まで開口した時に起こるという考え方も、すなわち $COD_c$ 概念による破壊基準があり、延伸性材料や非線形弾性材料によく適用される。本実験の結果を検討すると、負荷速度の増加により $COD_c$ が減

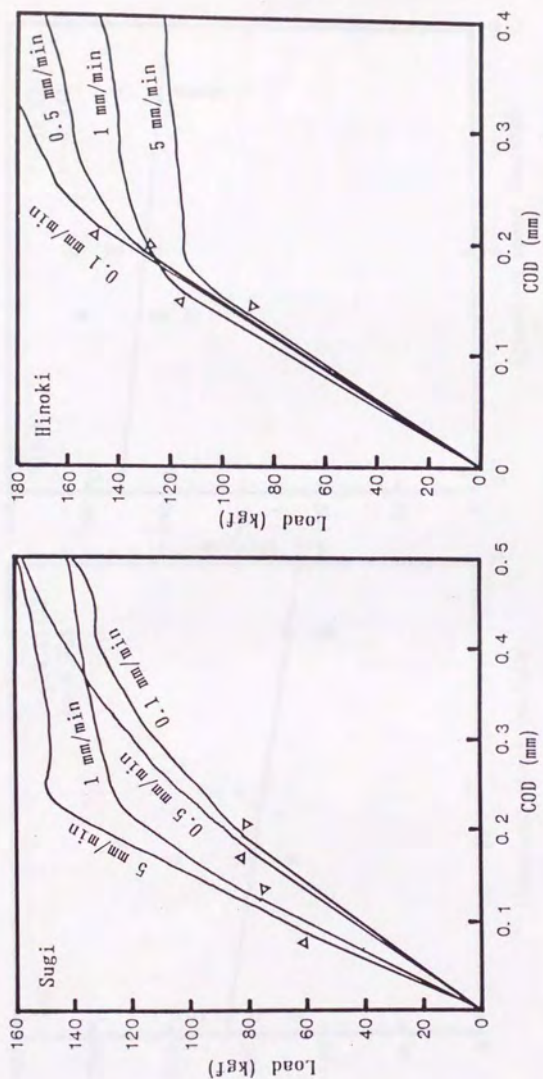


Fig. 8-1. Typical Load-COD diagrams for various crosshead speeds.

Legend: ∇: Proportional limit.

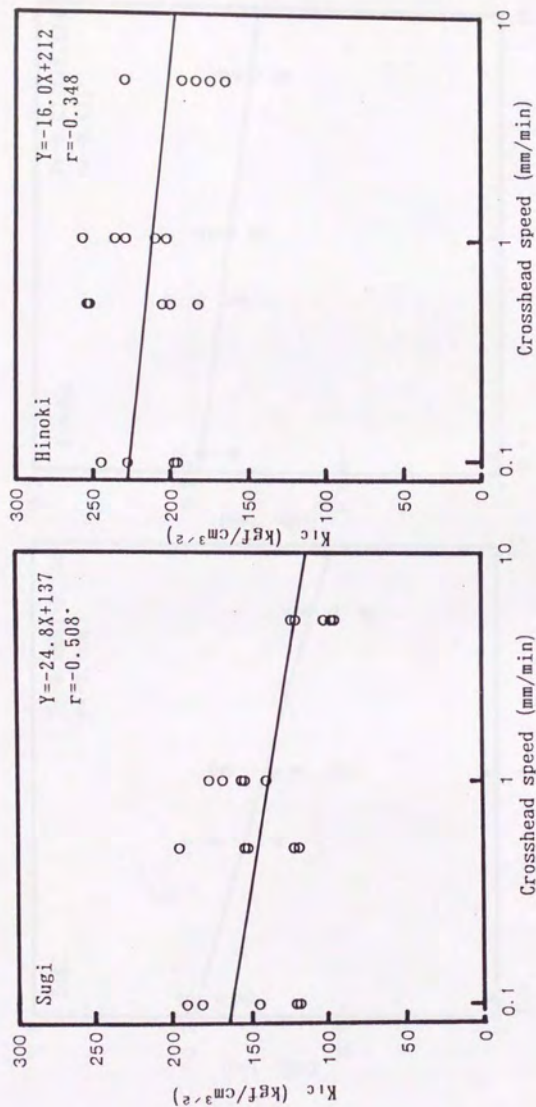


Fig. 6-2. Relationships between  $K_{1c}$  and crosshead speed.



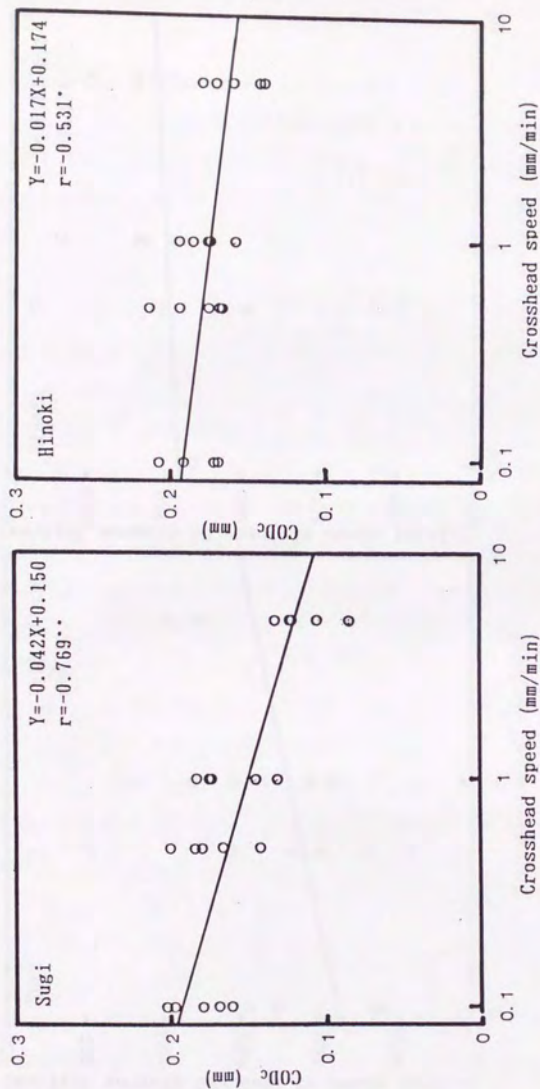
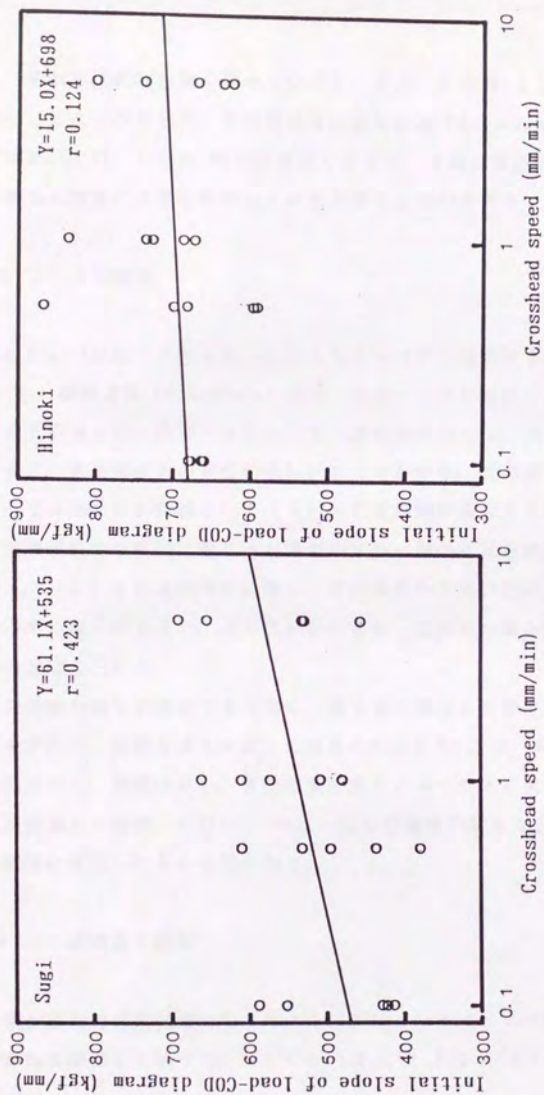


Fig. 6-3. Relationships between COD<sub>c</sub> and crosshead speed.



少し、それが比較的相関が高かったこと、また、C O D<sub>c</sub>とともに破壊じん性値が減少したことなどから、本実験程度の変位速度（0.1～5mm/min）での気乾の木材においては、C O D<sub>c</sub>概念は有効ではなく、き裂先端近傍での応力集中状態が破壊じん性値に大きく寄与していると言うことができる。

#### 6.4.2 AE特性

Fig.6-5～6には、スギL T、ヒノキL Tシステムにおける最高速度（5mm/min）と、最低速度（0.1mm/min）での、荷重－C O D曲線の比例限度に至るまでのAE振幅分布の典型的推移を示す。最高速度の方は、AEの発生数が少なく、また、大振幅AEの発生が著しいことがわかる。大振幅AEの発生割合が大きくなったことの原因として（1）AEは時間に依存する現象であるので、同じ破壊現象が短時間に起こった場合の方が一個のAE波の最大振幅値が大きくなる。（2）き裂進展開始に際し、変位速度が大きい方が大規模な微視的破壊の占める割合が大きい。の2点が挙げられ、これらの総合的要因によるものであると考えられる。

この振幅分布を定量化するために、第3章の場合と同様にして（3.2）式よりm値を求めた。負荷速度とm値との関係をFig.6-7に示す。両樹種とも右下がりの傾向を示し、相関は高い。負荷速度の変化によってAE発生特性が変化し、それが破壊じん性値、C O D<sub>c</sub>、荷重－C O D曲線の傾きなどの各パラメータよりも敏感に反応したものと思われる。

#### 6.4.3 破壊面の観察

き裂が最初のき裂先端からどのように開始したか、SEMにより強度試験後の破断面を観察して調べた。Fig.6-8～9はスギ、Fig.6-10～11はヒノキについて示す。

Fig.6-8はスギの最低速度（0.1mm/min）に典型的にみられた破壊面である。き裂は負荷速度に関わらず繊維方向に進展した。最初のき裂先端間隙では、接線方向における凹凸が大きい。き裂は接線方向に複数の細胞の細胞壁を横また



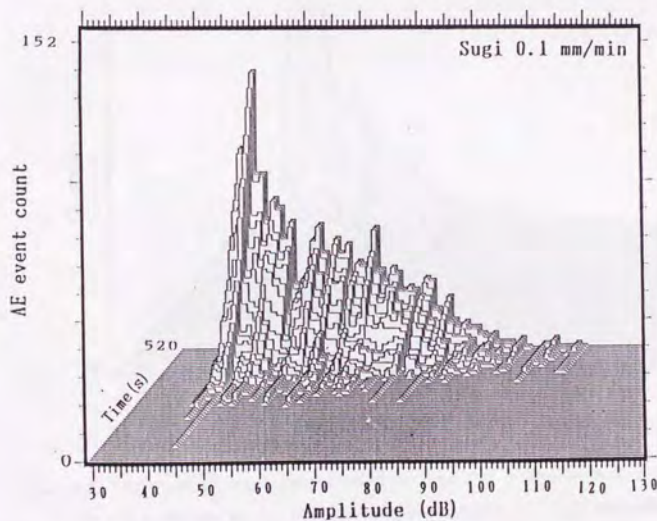
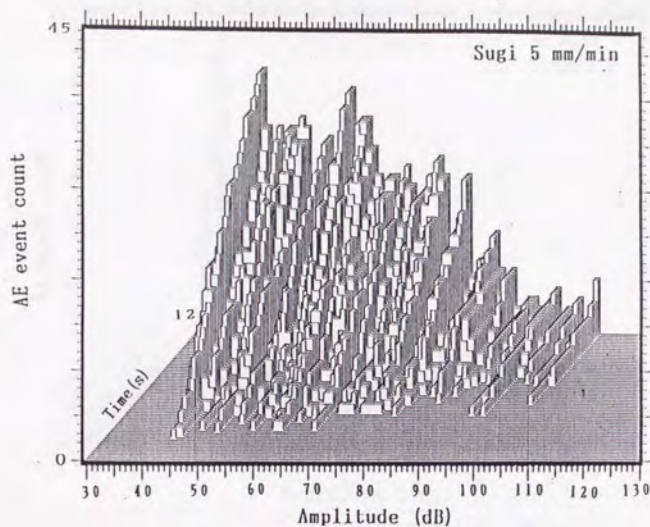


Fig. 6-5. Typical AE amplitude distributions for 5 mm/min and 0.1 mm/min up to the proportional limit in Load-COD diagrams of sugi.

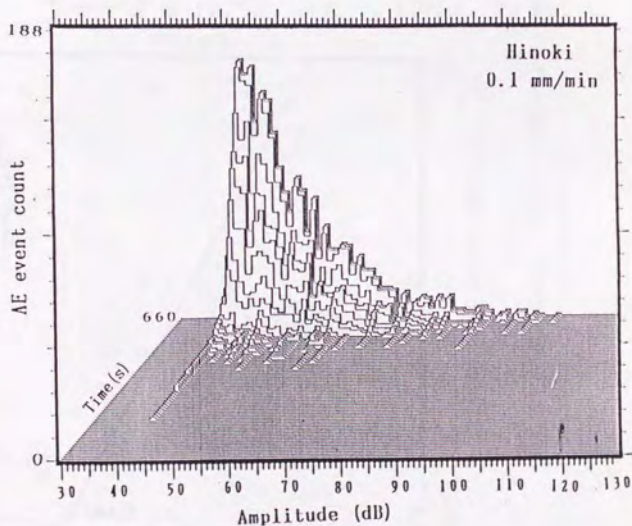
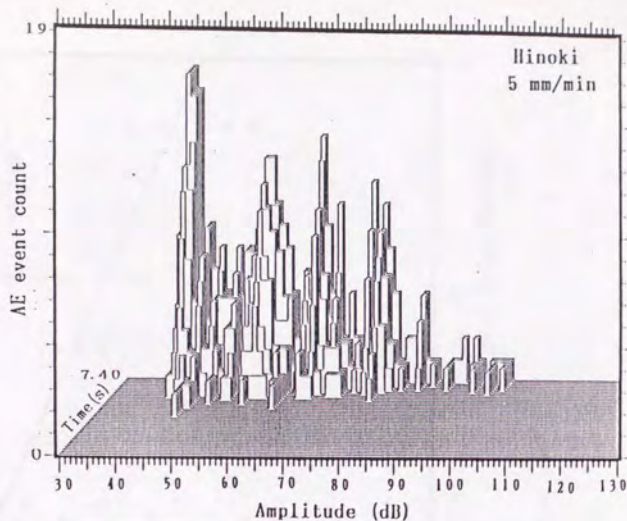


Fig. 6-6. Typical AE amplitude distributions for 5 mm/min and 0.1 mm/min up to the proportional limit in Load-COD diagrams of hinoki.

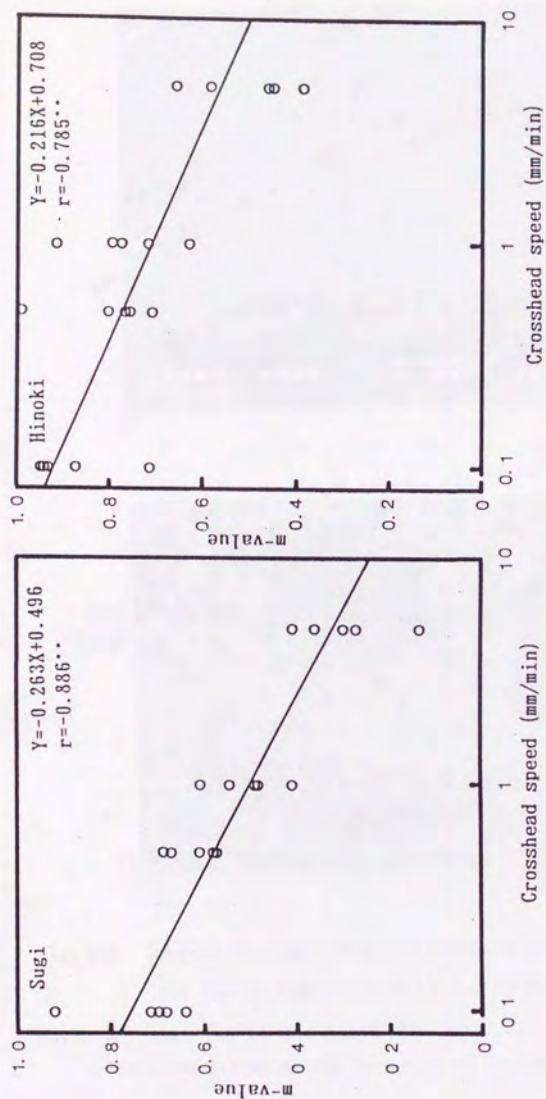


Fig. 6-7. Relationships between m-value and crosshead speed.



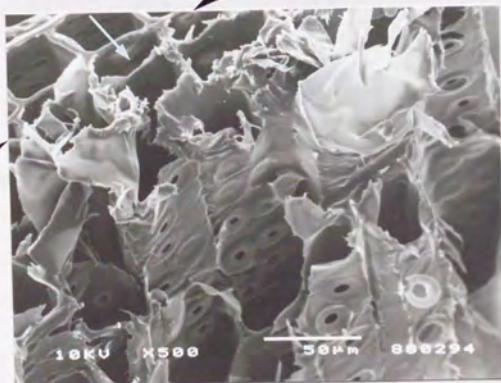
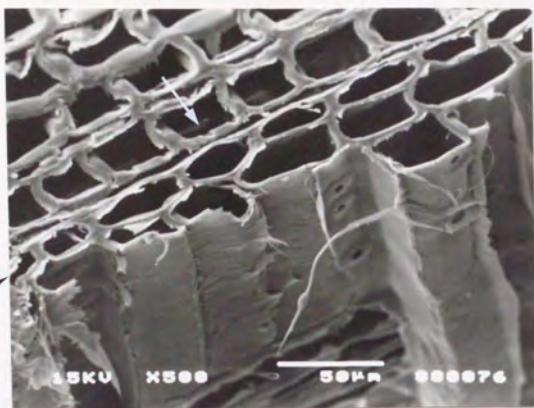


Fig. 6-8. Typical fracture surfaces close to the initial crack tip  
for the crosshead speed of 0.1 mm/min of sugi.

Notes: ➤ ➤: The initial crack tip.

The arrow indicates the direction of initial crack.

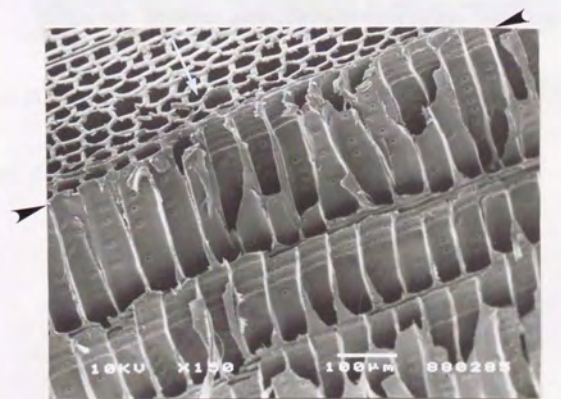
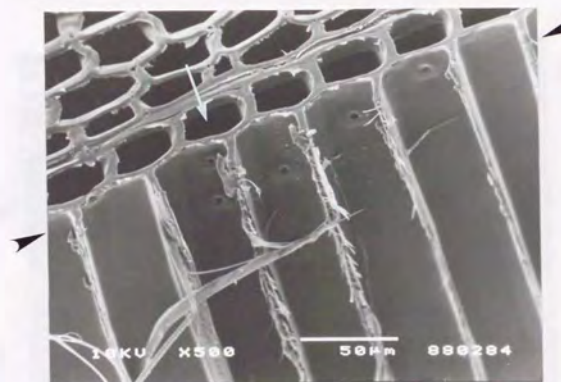
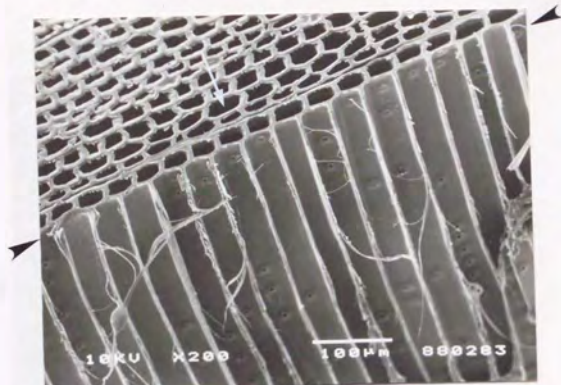


Fig. 6-9. Typical fracture surfaces close to the initial crack tip  
for the crosshead speed of 5 mm/min of sugi.

Note: Same as in Fig. 6-8. 13 3



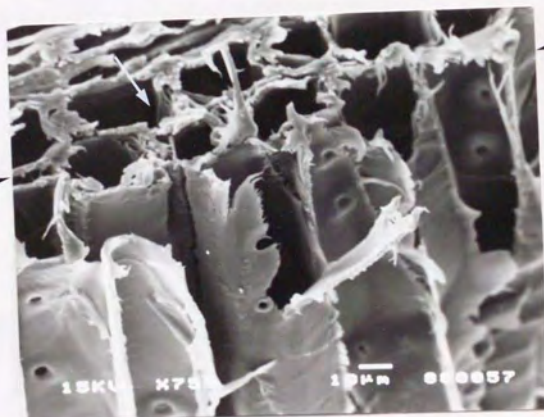
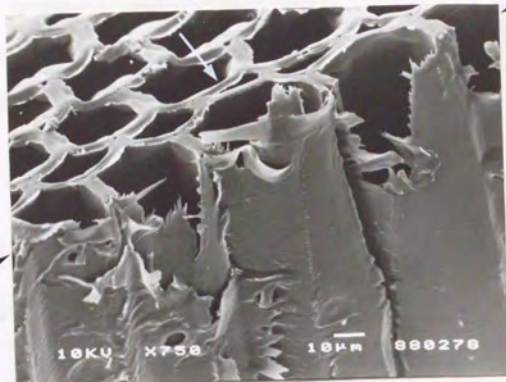


Fig. 6-10. Typical fracture surfaces close to the initial crack tip  
for the crosshead speed of 0.1 mm/min of hinoki.

Note: Same as in Fig. 6-8.



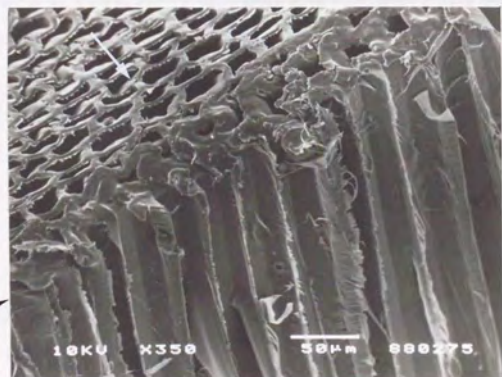
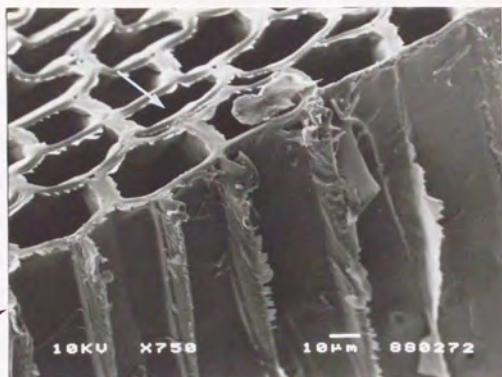


Fig. 6-11. Typical fracture surfaces close to the initial crack tip  
for the crosshead speed of 5 mm/min of hinoki.

Note: Same as in Fig. 6-8.

は斜めに切断しながら、繊維方向へ、細胞境界を通して進展し、縦裂破断は見られない。

Fig. 6-9は、スギの最高速度 (5mm/min) に典型的に見られた破壊面である。柾目面と木口面の境界線が直線的であり、接線方向へ進展せずに最初のき裂先端より即座に繊維方向へき裂が進展したことがわかる。進展様式は縦裂破断であるが、最下図のように放射組織によりき裂の進展が変えられ、ステップ状に進展していく破断面も見られた。

Fig. 6-10は、ヒノキの最低速度 (0.1mm/min) に典型的に見られた破壊面である。スギの最低速度の場合と同様、柾目面と木口面の境界線の凹凸が大きい。き裂は繊維方向へ壁内破壊により進展していく場合が多かったが、スギほど顕著ではなかった。また下図においては、壁孔と壁孔を連絡するき裂が中央の仮道管に見られる。

Fig. 6-11は、ヒノキの最高速度 (5mm/min) に典型的に見られた破壊面である。スギの最高速度の場合と同様、柾目面と木口面の境界線が直線的であり、接線方向に進展せずに最初のき裂先端より繊維方向へ即座にき裂が進展したことがわかる。その進展様式は縦裂破断と壁内破壊が観察されたが、縦裂破断の方が顕著であった。

古川<sup>2,3)</sup>は、スギ、切欠き付きミクローム切片の破壊過程には緩徐き裂伝播 (SCP) 段階と急速き裂伝播 (RCP) 段階が存在するとし、SCP破壊はS2層の裂け破壊とS1層近傍での剥離破壊 (壁内破壊) で進行するのに対し、RCP破壊では剥離破壊はほとんど観察されなくなると報告している。本実験において、最低速度 (0.1mm/min) をSCP段階に、最高速度 (5mm/min) をRCP段階に、それぞれ同様な現象であると考え対比させてみれば、最高速度では剥離破壊がほとんど観察されなかったこと等、ほぼ一致したことが言える。

前項 (7.4.2) で、負荷速度の大きい方が大振幅AEの発生割合が大きくなったことの一因として、負荷速度の大きい方が大規模な微視的破壊の占める割合が大きくなったためと考察した。縦裂破断により解放されるエネルギーは壁内破壊によるものよりも大きいと考えれば、観察された破断面の性状はそれを裏付けるものと言える。



#### 6.4.4 き裂進展開始のメカニズム

負荷速度が小さい、すなわち微視的破壊現象がゆっくりと進む場合、き裂先端の微視的な塑性変形（小規模降伏）による応力の再分布により、き裂先端での応力集中が緩和され、組織に、より均質に応力が分布する。従って、細胞境界または壁孔と壁孔の連絡など、き裂進展の抵抗力の小さい“道”を通りながら徐々に弾性エネルギーを解放し、その後、それまでに生成された微視破壊面を連絡するようにして最初のき裂先端からき裂が開始したと考えられる。従って、A E 振幅分布は小振幅側の事象数のピークが大きいものとなる。一方、負荷速度が大きい、すなわち破壊現象が急速に進む場合、き裂先端での応力集中効果により、木材の微小な構造には影響されず急激にき裂は開始されるので、A E 波一個のエネルギー（振幅）が大きくなる。従って、A E 振幅分布において大振幅側の比重が大きいものとなると考察できる。

第3章から本章までの結果を総合的に検討すれば、高い破壊じん性が発現する場合には、き裂開始前に、き裂先端近傍で壁内破壊が発生することによりき裂先端が“鈍化”し、それによりき裂先端での応力集中が和らげられていると解釈すると統一的に理解できる。本章では、そのような応力緩和現象が負荷速度が小さい場合（ゆっくりと応力集中する場合）に卓越して生じることが明らかとなった。



## 6.5 結論

スギ、ヒノキ片側き裂引張試験片のL T き裂進展システムにおいて、クロスヘッド速度を0.1, 0.5, 1, 5mm/minと変えることにより、破壊じん性、A Eの特性および破壊面の性状に及ぼす時間因子の影響を比較検討し、以下の結果を得た。

(1) き裂の開始点を臨界点として求めた $K_{Ic}$ 値および $COD_c$ は負荷速度の増加とともに減少したが、荷重-COD曲線の直線部分の勾配はやや増加する傾向を示した。

(2)  $COD_c$ が負荷速度増加と共に減少したことから、本研究において $COD_c$ 概念による破壊基準は有効でなく、き裂先端近傍での応力集中度が大きく寄与していることがわかった。

(3)  $K_{Ic}$ 値に至るまでに発生したA Eの振幅分布は、負荷速度の増加につれA E事象数の大振幅側のピークが相対的に大きくなっていった。

(4) SEM観察結果とA Eの特性より、負荷速度によってき裂進展開始の機構がどのように変わるかを推察した。負荷速度が小さい場合、木材の粘弾性的性質により、き裂進展方向前方の細胞境界での剥離等により徐々に弾性エネルギーを解放していったのに対し、負荷速度が大きい場合、き裂先端での応力集中効果により木材の微小な構造にも影響されず急激にき裂が開始され進展していったと考えられた。

## 第7章 木材ミクロトーム切片の引張破壊過程とAE特性

### 7.1 はじめに

針葉樹材のミクロトーム切片による縦引張破壊については、多数の研究結果が報告されている<sup>2, 3, 11, 40, 42, 158-162</sup>。Futó<sup>43</sup>は、20 $\mu$ m厚の柾目切片の無欠点材において、破壊過程の動的観察を光学顕微鏡によって試み、き裂は晩材中では放射組織に沿って進む傾向があるが、早材中では放射組織と関係なく進むことを報告している。また、古川<sup>2, 31</sup>は、スギの切欠き付き切片(60~120 $\mu$ m厚)の動的破壊過程を光学顕微鏡によって詳細に観察し、破壊過程には緩徐き裂伝播段階と急速き裂伝播段階が存在し、それぞれ破壊様式が異なること等を明らかにしている。しかしながら、木材の破壊現象には、樹木として生長中に受けた傷や、木材の加工中、乾燥中などに生じる微小き裂が深く関与していると考えられており<sup>4, 44</sup>、光学顕微鏡で、このような微小き裂と木材の破壊過程との関連性を検討するのは不可能であると思われる。

本章では、SEM観察下で、針葉樹(スプルース、ヒノキ)の切欠き付きミクロトーム切片による引張(縦、横)試験を行ない、破壊過程で発生するAEを計測した。観察は以下に述べる2点を目的とした。すなわち、①SEMレベルでの木材の破壊過程の動的観察、②AE波と微視破壊との対応づけ、である。特に②の目的を達成させるためにはAE発生源となる微視破壊現象を可能な限り視覚的に捕らえる必要がある。言い換えれば、観察される材表面での現象と観察できない材内部での現象とが独立して起こることを極力抑える必要がある。それには材の厚さを可能な限り(木材としての特性を失わない程度に)薄くする方法が最善であろう。この点を考慮して、早材仮道管径で3~4個含まれる程度(120 $\mu$ m)の厚さの切片を主に用いて検討した。

## 7.2 供試材料

樹種は、スプルス (*Picea sitchensis* Carr.)、ヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* Endl.) を用いた。スプルスは、RL, RT, TL, TR, LT, LR の6つのき裂進展システム全てについて試験片を作製し、ヒノキはLRシステムのみ作製した。まず、35(長さ)×5(幅)×50(厚さ)mmのブロックを切り出し、これを飽水にした後、ミクロトーム切削に供した。切片の厚さは主に120 $\mu$ mとしたが、厚さの影響を検討するために0.07mm(70 $\mu$ m)~1mmの切片も作製した。目的厚さに切削した切片は気乾状態まで乾燥させた後、Fig.7-1に示すようにして、13(RまたはT)×10(L)×1(TまたはR)mmの添木をシアノアクリレート系接着剤で接着した。そして、シリカゲル入りデシケータ中に1週間以上放置して乾燥させた後、イオンスパッタリング装置で金を30~40nm厚さに蒸着させた。

切欠きは金を蒸着させる前に新しいカミソリの刃(0.245mm厚炭素鋼)によって約1mmの深さに入れた。



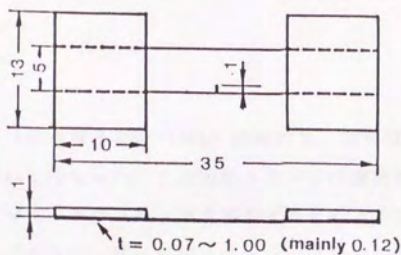


Fig. 7-1. Specimen for tension test within the specimen chamber of a scanning electron microscope (unit:mm).

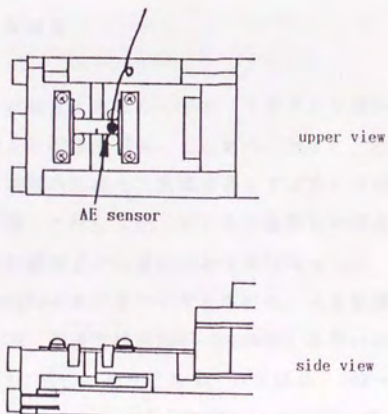


Fig. 7-2. Schematic representaion of the part of the tensile testing fracture apparatus.

### 7.3 実験方法

#### 7.3.1 引張試験法

引張試験は、SEM（日本電子JSM-T330A）鏡筒内で、試料引張ステージ（日本電子T300-TS2）を用いて行なった。この引張ステージは鏡筒外から電動によりスクリューを回転させて、クロスヘッドを動かすことにより引張りを行なうもので、負荷の測定はできない。試料引張ステージの試料取り付け部近傍の外観図をFig.7-2に示す。引張速度は $50\mu\text{m}/\text{min}$ とした。

#### 7.3.2 観察法およびAE計測法

観察と記録には主にTV走査装置と市販のVTR（VHS）を用いたが、この方法では通常の二次電子像より解像度が劣ってしまう。従って、これとは別に、一旦引張試験を中断し、通常の方法で二次電子像をすばやく写真撮影して再び試験を継続する方法も併用して行なった。VTRで観察した場合には後述する方法によって検出波形との画面上での重ね合わせを行なった。

AE計測にはPAC社製3000/3104AEアナライザを用いた。AE変換子には広帯域共振型変換子（NF,AE-900M、周波数特性 $200\sim 1000\text{kHz}$ ）を用いた。AE変換子の取り付け位置はFig.7-2に示した通りである。AE波は、 $100\sim 300\text{kHz}$ のバンドパスフィルタを通した後、プリアンプ（60dB）、メインアンプ（17dB）で増幅し、包絡線検波し、しきい値（0.1V）以上の振幅を持つAEを計測した。この際、イベントの出力をビデオの音声入力に接続することにより、画面で観察される形態変化とAE発生時刻とを対応づけるようにした。AE計測の際のデッドタイムは10msとした。AEパラメータとしては最大振幅値、計数、立ち上がり時間および持続時間を求めた。また、3000/3104AEアナライザで増幅された波形を波形収録装置（オートニクス,S-121）にデジタル化して収録し、GP-IBを介してパーソナルコンピュータ（日本電気,PC-9801DA）に送り込みハードディスクに記録すると共に、コンピュータ内蔵のスーパーインボーズボードによりビデオ画面と検出波形との重ね合わせを行なった。





## 7.4 結果と考察

### 7.4.1 破壊の相変化

木材の破壊の発達段階を顕微鏡オーダの破壊から顕微鏡的破壊へ、さらに巨視的破壊へと破壊の大きさととらえる場合<sup>30)</sup>もあるが、ここでは、き裂の発生 (nucleation)、開始 (initiation)、安定成長 (slow propagation)、そして不安定成長 (unstable propagation) と、相の移行としてとらえることにする。以下、各き裂進展システム (TL, RL, LR, LT, TR, RT) ごとに述べる。なお、以後示される写真は、すべて、一旦引張試験を停止させて撮影したものであるが、ビデオで記録した場合、すなわち連続して引張試験を行なった場合と比べてその後の特徴に差異は認められなかった。また特に断わらない限り切片の厚さは  $120\mu\text{m}$  である。

#### (a) TL システム

Fig. 7-3に典型的なスプルス TL システムの破壊過程を示す。引張力は写真の横方向に作用している。このシステムは最もき裂が進展し易い ( $K_{Ic}$  値、 $COD_c$  ともに低い) システムである。この原因としてき裂進展方向が L 方向であることと RL システムのように放射組織によってき裂進展を拘束されることが無いことの2点を挙げた (第2章参照) が、ミクロトーム切片の破壊過程はそれを裏付けるものとなった。Fig. 7-3(I)は負荷前のき裂先端近くの形態を示し、(II)はき裂の開始から安定成長までの挙動を、(III)には不安定成長の挙動を、それぞれ示す。き裂は必ず切欠き先端より開始し、一旦、細胞の境界 (仮道管-仮道管、仮道管-放射柔細胞) にそれる傾向があった(II)。その後即座に最終破断を起こした(III)。安定成長と考えられる期間が他のシステムに比べて短かったのが TL システムの大きな特徴であった。

#### (b) RL システム

Fig. 7-4~7-7にはスプルス RL システムの典型的な破壊過程を示す。このシステムは TL システムとは異なり引張方向に配列する放射組織の影響を受ける。Fig. 7-4は負荷前の形態、Fig. 7-5はき裂の開始、Fig. 7-6は安定成長、Fig. 7-7は不安定成長の挙動をそれぞれ示す。き裂は必ず切欠き先端より開始する (

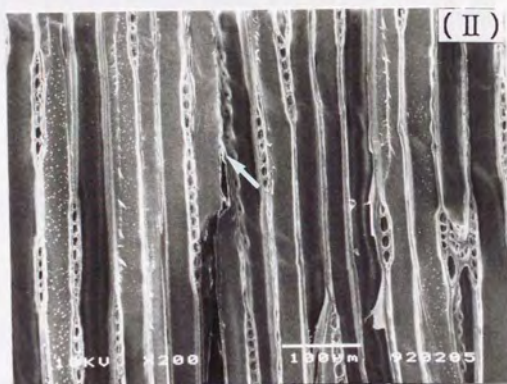
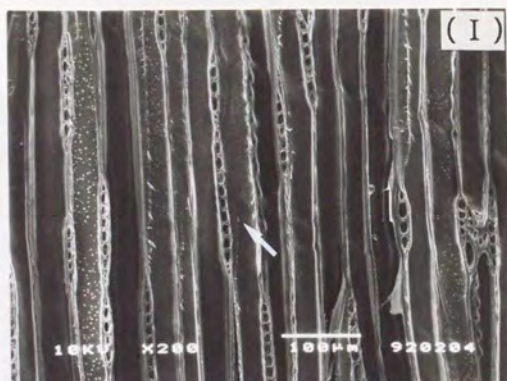


Fig. 7-3. Typical fracture process of the TL system (Spruce,  $t=120\mu\text{m}$ ).

Note: (I): Before-loading, (II): From crack initiation to slow crack propagation, (III): Unstable crack propagation.



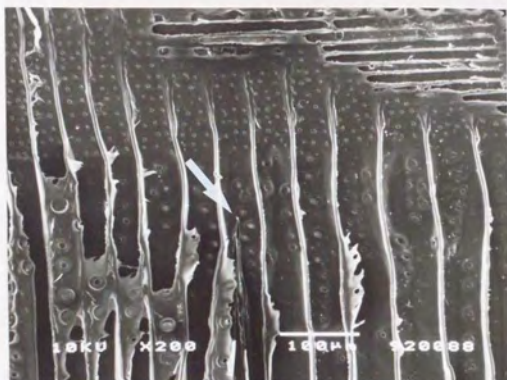


Fig. 7-4. Typical fracture process of the RL system (Spruce,  $t=120\ \mu\text{m}$ ).  
Note: Before-loading.

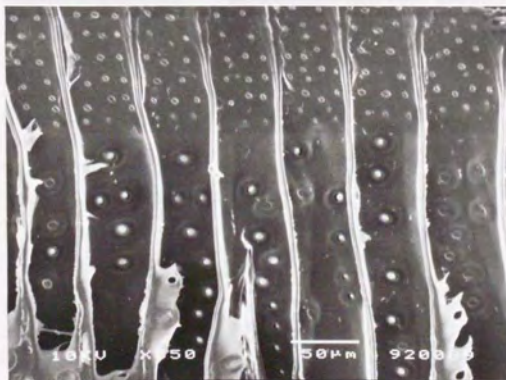


Fig. 7-5. Typical fracture process of the RL system (Spruce,  $t=120\ \mu\text{m}$ ).  
Note: Crack initiation stage.



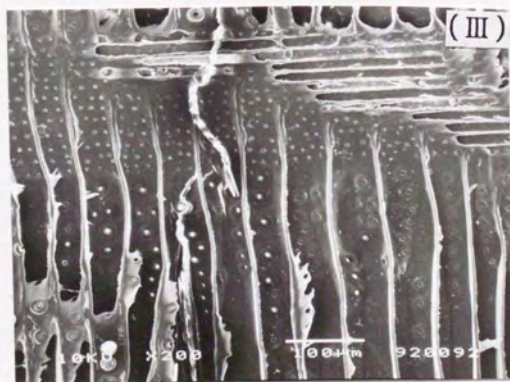
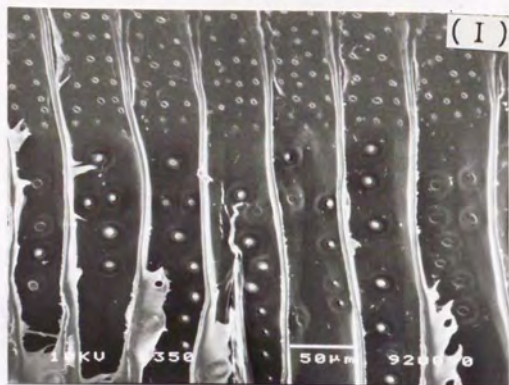


Fig. 7-6. Typical fracture process of the RL system (Spruce,  $t=120\mu\text{m}$ ).  
Note: Slow crack propagation.

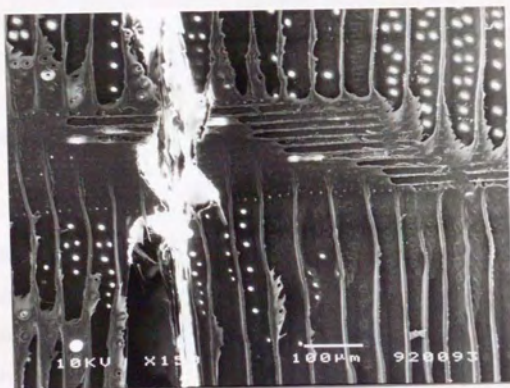


Fig. 7-7. Typical fracture process of the RL system (Spruce,  $t=120\mu\text{m}$ ).

Note: Unstable crack propagation.



Fig. 7-5)が、TLシステムの場合とは異なり、き裂先端部においてき裂の枝分かれあるいは不連続なき裂の発生などが観察される(Fig. 7-6(I))ようになる。このような挙動は、放射組織によりき裂進展が拘束されるに伴い、き裂先端近傍に集中している応力を分散させる効果が働いたものとして理解できる。さらに負荷を続けると、成長したき裂先端から充分離れた部位に長い裂け破壊が生じる(Fig. 7-6(II))。このような裂け破壊は分野(cross field)で発生する例が多く、分野壁孔を連絡するようにして生じた。仮道管S2層のフィブリル間の裂けに起因するものと思われる。やがて最初の切欠き先端から成長したき裂と分野等に生成した裂け破壊とが合体して成長(Fig. 7-6(III))し、不安定成長段階(Fig. 7-7)に至った。以上のようにRLシステムでは、安定き裂成長初期段階(Fig. 7-5, Fig. 7-6(I))でのき裂の枝分かれや不連続な成長、あるいは、安定き裂成長段階後期(Fig. 7-6(II), (III))での裂け破壊等によって最初の切欠き先端より成長したき裂先端で応力が緩和され、そのことが、他の横方向システムに比べて高いRLシステムの破壊じん性を一層高める方向に寄与しているものと考えられる。

#### (c) LRシステム

木材の破壊現象は、樹木として生長中に、あるいは木材の加工中、乾燥中等に生じる微小き裂が深く関与していると考えられている。特に破壊に至るまでに高い応力が組織にかかることになる縦方向システム(LR, LT)はその影響が著しいものと考えられる。

Fig. 7-8~Fig. 7-10は、ヒノキLRシステムの破壊過程の例である。Fig. 7-8は負荷前の形態を示す。切欠きは木裏側から入り、年輪界に近い晩材部にその先端がある。矢印で示した2ヶ所の微小き裂は、カミソリの刃でき裂を入れる際に繊維直角方向に圧縮力が生じ発生したものと思われるが、その後の破壊過程に影響を与えることになる。この程度の微小き裂は一般に木材を加工あるいは乾燥する際にも形成されるであろう。き裂は先端より開始(Fig. 7-9)し、Fig. 7-8で指摘した微小き裂のうち晩材部に形成されたき裂に向かって成長して行く(Fig. 7-10(I))。このき裂成長の途中で晩材部仮道管の細胞間での剥離破壊が生じ、また、Fig. 7-8で指摘したもう一つの微小き裂付近での壁孔の割れを誘発している(Fig. 7-10(II))。このような現象(剥離破壊、壁孔の割れ)は切欠き



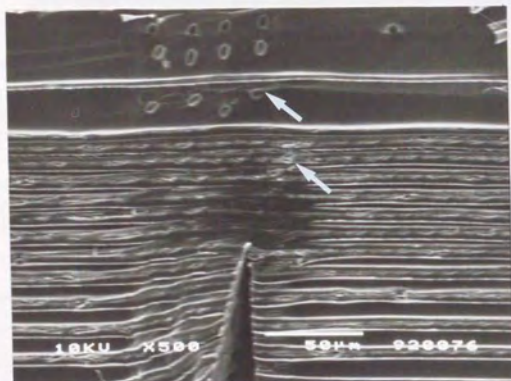


Fig. 7-8. The fracture process of the LR system (Hinoki,  $t=120\mu\text{m}$ ).

Note: Before-loading.

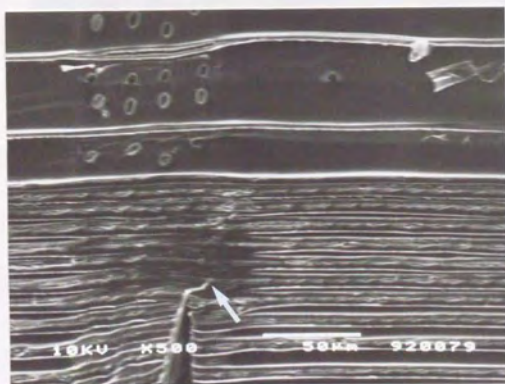


Fig. 7-9. The fracture process of the LR system (Hinoki,  $t=120\mu\text{m}$ ).

Note: Crack initiation stage.

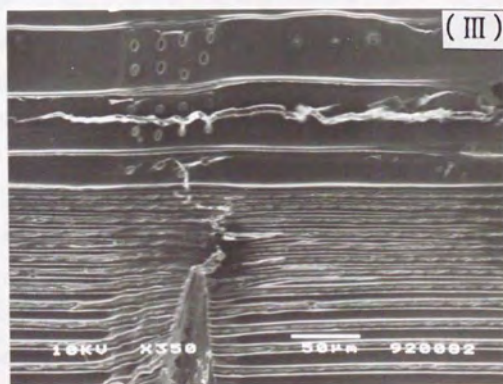
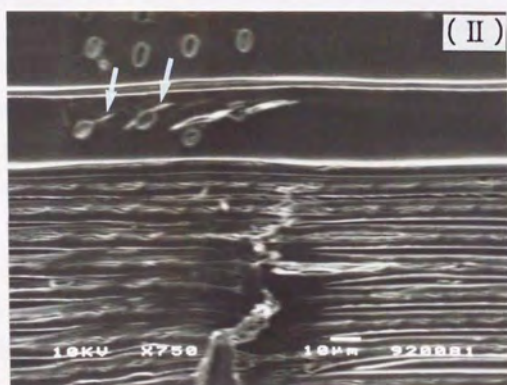
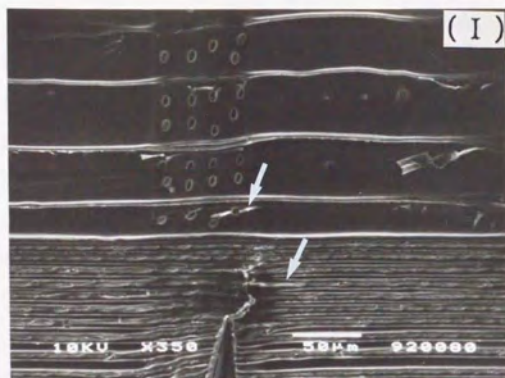


Fig. 7-10. The fracture process of the LR system (Hinoki,  $t=120\mu m$ ).

Note: Slow crack propagation. 151



先端が早材部にある場合も観察された。また、き裂の開始以前に生成される場合もあった。さらに負荷を続けると、最初の切欠きから成長したき裂先端より前方に離れた場所で仮道管の縦裂破断が起こり (Fig. 7-10 (III)), やがて最終破断 (不安定成長) に至った。

Fig. 7-11~7-12はスプルスLRシステムの例である。Fig. 7-11は負荷前の形態である。き裂は放射組織上を進展しようとしている。切欠き先端より開始したき裂 (Fig. 7-12 (I)) は壁孔を連絡するようにはほぼ放射方向に成長して行く (Fig. 7-12 (II))。その後 Fig. 7-12 (III) で観察されるように、放射方向に隣接する仮道管細胞との境界で成長は一旦停止した後、き裂伝播経路から約50  $\mu\text{m}$  右に離れたところで裂け破壊 (恐らく放射柔細胞のS2フィブリル間) や壁孔の割れ (矢印) が発生する。このような微小き裂が最初の切欠き先端より成長したき裂が停止した状態のまま多数発生した後、急激に最終破断に至った。

Fig. 7-13はヒノキLRシステムの別の例である。(I)は負荷前の形態であり、(II)はき裂開始までの挙動を示している。(II)で見られる切欠き先端からのき裂の開始は、切欠き先端の左側で観察される複数の微小き裂の発生以後であった。これらの微小き裂が元来存在していたき裂に起因したものかどうかは不明である。その後最初の切欠き先端より成長したき裂は階段状にR方向に進展して行くが、進展中にも伝播経路から離れた場所での微小き裂の発生、あるいは、き裂の枝分かれといった現象が観察された (Fig. 7-13 (III))。

LRシステムの破壊現象は千差万別であったが、共通して言えたのは、き裂の開始以前に、あるいはき裂の開始後一旦成長が停止した状態で、細胞境界での剥離破壊、壁孔の割れ、最終的なき裂伝播経路から充分離れた場所での裂け破壊等が起こるということである。これらの微視的破壊の発生により、RLシステムの場合と同様き裂先端での応力集中を緩和させる効果が働いたものと考えられる。

#### (d) LTシステム

LTシステムはLRシステムと同様の傾向であった。Fig. 7-14~7-17はスプルスLTシステムの破壊過程の例である。Fig. 7-14は負荷前の状態、Fig. 7-15はき裂の開始を、Fig. 7-16は安定成長の挙動を、Fig. 7-17は不安定成長の状況をそれぞれ示す。き裂は開始後枝分かれし、その後最終破断に至った様子を



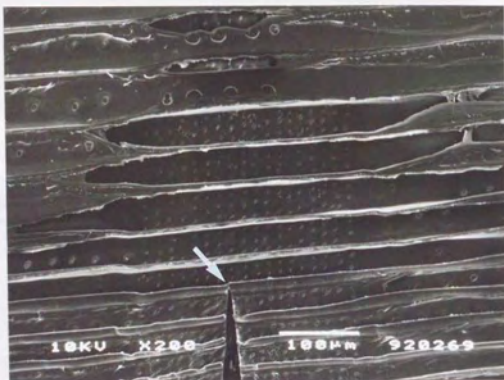


Fig. 7-11. The fracture process of the LR system (Spruce,  $t=120\mu\text{m}$ ).

Note: Before-loading.

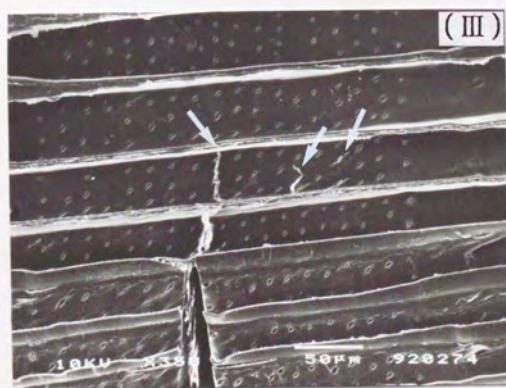
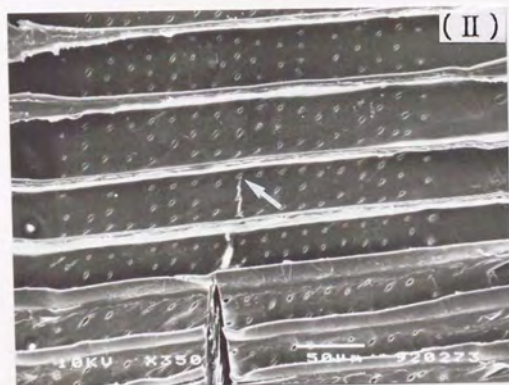
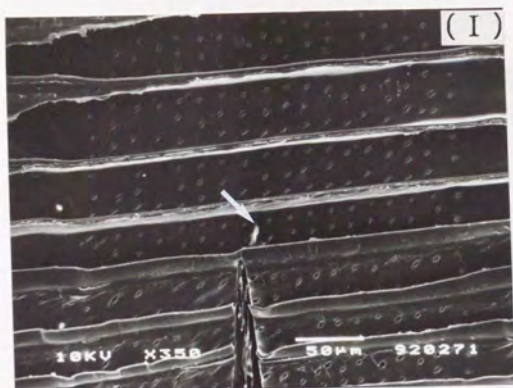


Fig. 7-12. The fracture process of the LR system. (Spruce,  $t=120\mu\text{m}$ ).

Note: From crack initiaion to slow crack propagation.



Fig. 7-13. The fracture process of the LR system (Hinoki,  $t=120\mu\text{m}$ ).

Note: (I): Before-loading. (II): Crack initiation. (III): Crack propagation



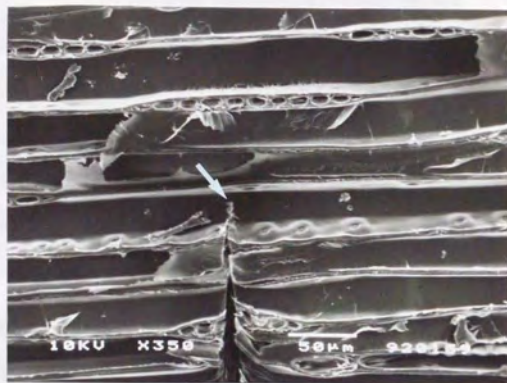


Fig. 7-14. The fracture process of the LT system (Spruce,  $t=120\mu\text{m}$ ).

Note: Before-loading.



Fig. 7-15. The fracture process of the LT system (Spruce,  $t=120\mu\text{m}$ ).

Note: Crack initiation stage.

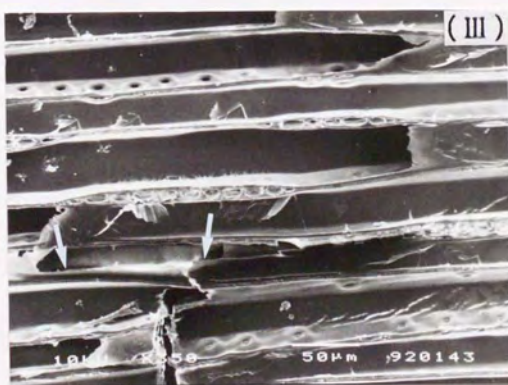
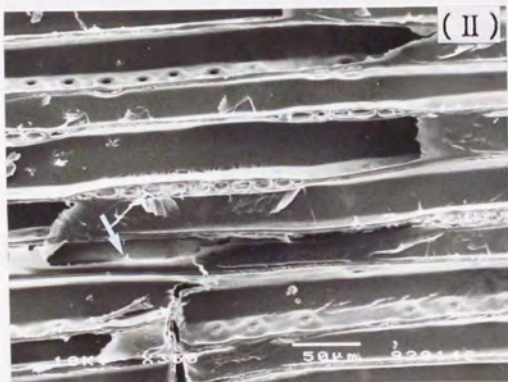
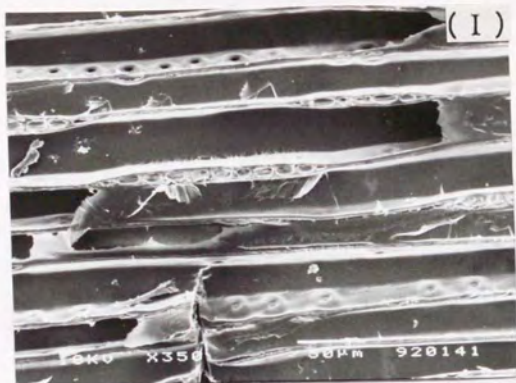


Fig. 7-16. The fracture process of the LT system (Spruce,  $t=120\mu\text{m}$ ).  
 Note: Slow crack propagation.

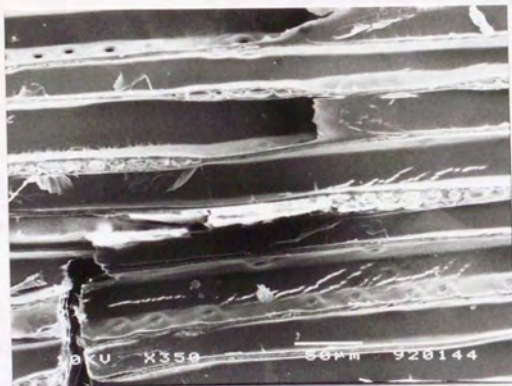


Fig. 7-17. The fracture process of the LT system (Spruce,  $t=120\ \mu\text{m}$ ).

Note: Unstable crack propagation.



示している。

(e) TRシステム

以上述べてきたシステム (TL, RL, LR, LT) では切片の厚さ (0.07 ~ 1mm) によらずほぼ一様の挙動が観察されたが, TRおよびRTシステムは, 0.5mm厚以上の比較的厚手の切片では急激に破断を起こすため破壊過程の観察はできなかった。しかしながら, 0.12mm (120  $\mu$ m) 厚の切片は板厚が薄い故にTおよびR方向における細胞の形態変化がしやすくなり, 破壊過程の観察が可能であった。木口切片の場合, 120  $\mu$ m厚程度の薄手の切片ではL方向の拘束が弱まり実際の木材の破壊過程とは異なる挙動を示す恐れがあったが, 1mm厚の切片の場合と比較して, 最終的なき裂伝播経路の特徴にほとんど差異は認められなかったことから厚さによらず同じ様式でき裂が伝播すると推察し, 120  $\mu$ m厚の切片で検討することにした。

Fig. 7-18~20はスプルスTRシステムの典型的な破壊過程を示す。TRシステムは細胞が整然と配列しているR方向にき裂の方向があるために細胞境界(壁内)を通して進展する場合が多い。Fig. 7-18は負荷前の状態, Fig. 7-19はき裂の開始から安定成長までの挙動, Fig. 7-20は不安定成長時の挙動をそれぞれ示す。切欠きは徐々に開口しながらゆっくりと1個の細胞の放射壁の壁内を進展(Fig. 7-19(I))し, 放射壁から湾曲部へ移行する付近でその進展が一時拘束される(Fig. 7-19(II))。さらに負荷を続けると, 4細胞径の距離を瞬間的に急速に進展し再び放射壁から湾曲部へ移行する付近でその進展が拘束される(Fig. 7-20(I))。このような挙動(停止→急速進展)がそれ以降も繰り返され, ついには切片全体が幅方向に切断された(Fig. 7-20(III))。ところで, 横引張破壊時に細胞内のどこから破壊が始まるのかについての実験的知見はこれまで得られていない。大釜ら<sup>23)</sup>は細胞壁内の応力分布の計算から接線方向の引張破壊は放射壁から湾曲部へ移行する付近において生じる可能性が高いと指摘している。本実験において観察された, き裂進展を一時拘束し応力を集中させる部位と, 大釜らの指摘した破壊の開始点とが一致したことは興味深い。

Fig. 7-21~7-22はスプルスTRシステムの破壊過程の別の例を示す。Fig. 7-21は負荷前の状態, Fig. 7-22は安定的な成長過程を示す。このように細胞壁の切断によって進展する例も見られた。き裂は放射方向に隣接する細胞との重

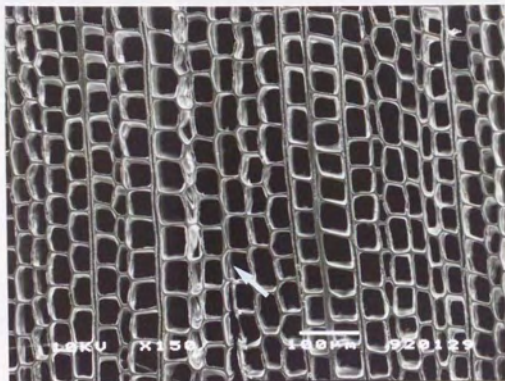


Fig. 7-18. Typical fracture process of the TR system (Spruce,  $t=120\mu\text{m}$ ).  
 Note: Before-loading.



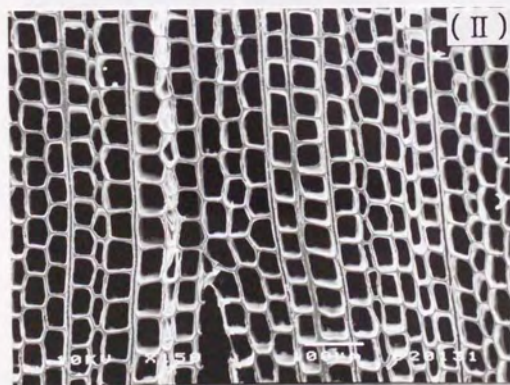
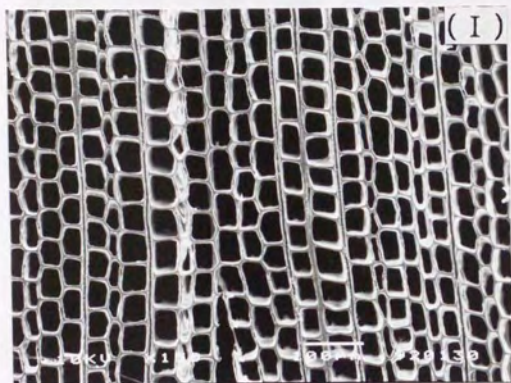


Fig. 7-19. Typical fracture process of the TR system (Spruce,  $t=120\mu m$ ).  
 Note: From crack initiation to slow crack propagation.



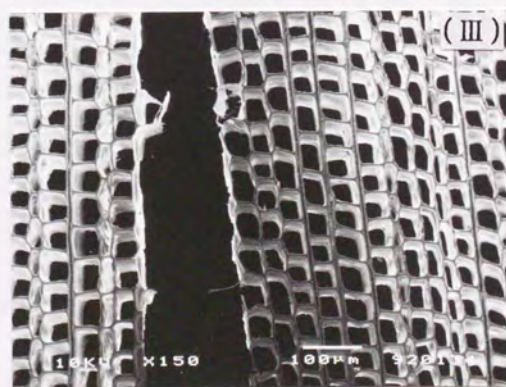
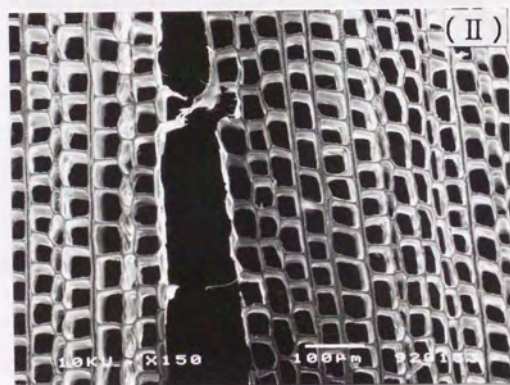
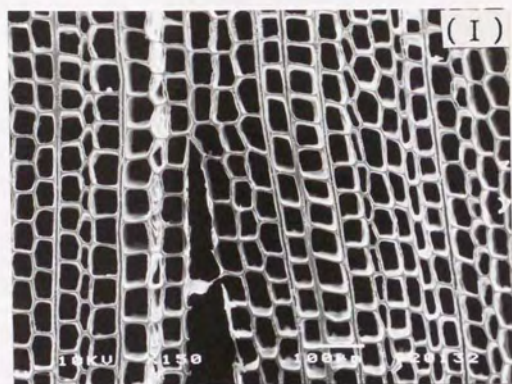


Fig. 7-20. Typical fracture process of the TR system (Spruce,  $t=120\mu\text{m}$ ).  
 Note: Unstable crack propagation.

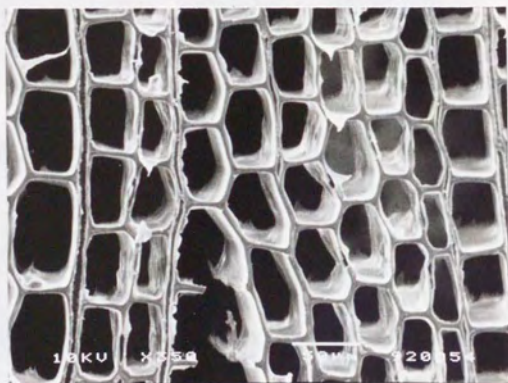


Fig. 7-21. The fracture process of the TR system (Spruce,  $t=120\mu\text{m}$ ).

Note: Before-loading.



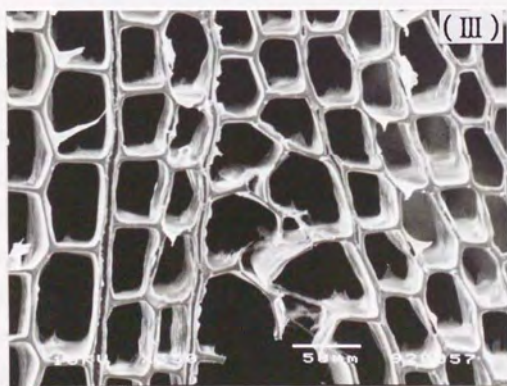
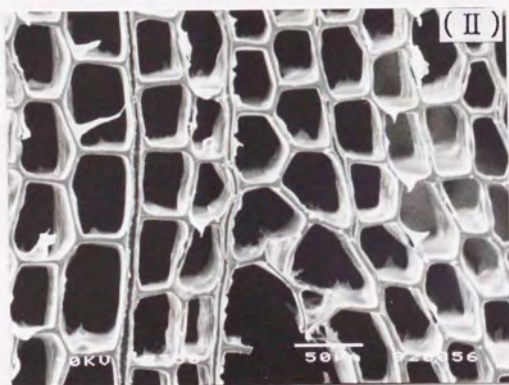
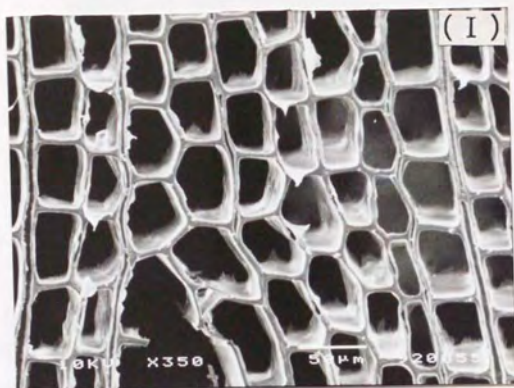


Fig. 7-22. The fracture process of the TR system (Spruce,  $t=120\mu\text{m}$ ).

Note: Slow crack propagation. 164



複細胞壁を切断することによって進むのではなく、接線方向に隣接する細胞との境界、しかも、放射壁から湾曲部へ移行する付近で剥離破壊を起こすことにより開始される (Fig. 7-22 (I))。その後次々と接線方向に隣接する細胞との境界で同様な剥離破壊を誘発しながら放射方向に進展していく挙動 (Fig. 7-22 (II), (III)) を示す。剥離された壁は完全には分離されないまま後に切断破壊されるに至った。さらに負荷を続けると、別の箇所でも壁内破壊が発生してしまいその後の挙動を観察できないことがほとんどであった。これは壁内破壊よりも壁を切断する破壊の方が多くのエネルギーを消費するためと考えられる。

#### (f) RT システム

Fig. 7-23 にはスプルス RT システムの破壊過程の典型例を示す。Fig. 7-23 (I) は負荷前、(II) は安定き裂終了時の形態、(III) は不安定成長の挙動をそれぞれ示す。壁内破壊で進展開始したき裂は細胞が整然と配列していない T 方向に隣接する細胞の壁で一旦拘束される (II)。さらに負荷を続けると脆性的にき裂は進展する (III)。不安定成長段階において断続的に進展する挙動を示した T システムとは大きく異なった。

### 7.4.2 破壊の相変化と AE の特性

前項 (5.4.1) で 6 つのき裂進展システムの破壊過程のパターンを検討した。LR, LT, RL の高い破壊じん性の発現するシステムでは、き裂の開始前、あるいは、き裂開始後一旦成長が停止した状態で、き裂の枝分かれ、壁孔割れ、細胞境界での剥離等の現象がき裂先端近傍で発生するのが特徴的であった。ここでは、これら特徴的な挙動を示したシステム (LR, LT, RL) における相変化に対応してどのような AE 波が発生したかを検討する。なおここで検討する AE はすべて、ビデオで形態変化を記録した場合、すなわち途中で中断せずに連続して引張試験を行なって AE を計測した場合の結果である。破壊過程は AE との関連で次の 4 Stage に分類することができた。

① Stage. 1 (き裂進展開始以前) : き裂の開口。き裂進展方向前方に壁孔割れ等が発生する場合もあった。この段階でも AE は計測されたが、壁孔割れ程度の比較的小さい規模の微小き裂と対応づけてきた例は希であった。板厚が薄す

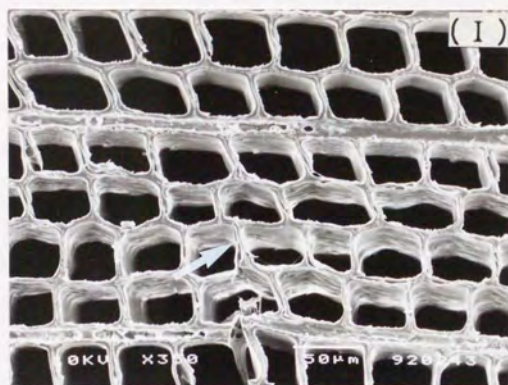


Fig. 7-23. Typical fracture process of the RT system (Spruce,  $t=120\mu\text{m}$ ).

Note: (I): Before-loading. (II): Slow crack propagation. (III): Unstable crack propagation.



きた ( $120\mu\text{m}$ 厚, A E波検出器の周波数特性 $100\sim 300\text{kHz}$ ) ために音波が伝わりにくかったためと考えられる。

② Stage. 2 (き裂の開始→安定き裂成長前半): 切欠き先端よりき裂が成長し、一時的に停止するまでの段階。この段階では前述したようなき裂の枝分かれ、壁孔割れ、S 2層の裂け破壊、細胞境界での剥離等の微小き裂が付随して生成される。これらの微小き裂の生成とA E波の同定にいくつか成功した。特にS 2層のフィブリル間の裂け破壊はほぼ100%同定できた。しかしながら、A E波が発生しているにも関わらず画面に何ら変化が現われない場合や、逆に、微小き裂(S 2層の裂け破壊以外)が生成しているにも関わらず、それに対応するA Eが発生しなかった例も見受けられた。前者の理由については観察できない材内部での破壊に由来するA Eが計測されたためと考えられる。後者はStage. 1で考えられたのと同じ理由によるものと考えられる。

③ Stage. 3 (安定き裂成長後半): Stage. 2で一旦停止していたき裂が再び成長を開始する段階。早材細胞径で1~3個分にわたってき裂が進展する。この程度の規模の破壊はほぼ100%同定できた。Stage. 2で形成された微小き裂を連絡するように成長する場合と、それらとは無関係な経路を進展する場合とがあった。

④ Stage. 4 (不安定成長): 最終破断を起こす段階。早材細胞径で10個分以上を瞬間的に進展する。A E発生数は多い。

以上4 Stageで計測されるA Eは、それぞれ、破壊の規模および現象の速度が異なるので、各々のStage毎に計測されるA E波の最大振幅値に特徴があると考えられる。スプルーースLTシステムの各Stage毎に計測されたA Eの振幅分布をFig. 7-24に示す。試験片14本分の累積である。Stage. 1, Stage. 2では、40~42dBおよび50~52dBにピークがあったが、Stage. 2の方が50~52dBのピークが大きいものとなっている。Stage. 3になると、前Stageではみられなかった68~70dBの大きなピークが現われるようになる。60~70dBのA Eは、一旦き裂の成長が停止した後のき裂の進展に由来するものであったが、Stage. 2におけるき裂進展時に発生したA Eの振幅値よりも大きくなっていることがわかる。

Stage. 4になると90dB以上のA Eが発生し始めたが、この段階はもはや細胞レベルの破壊ではなく、組織の破壊であろう。



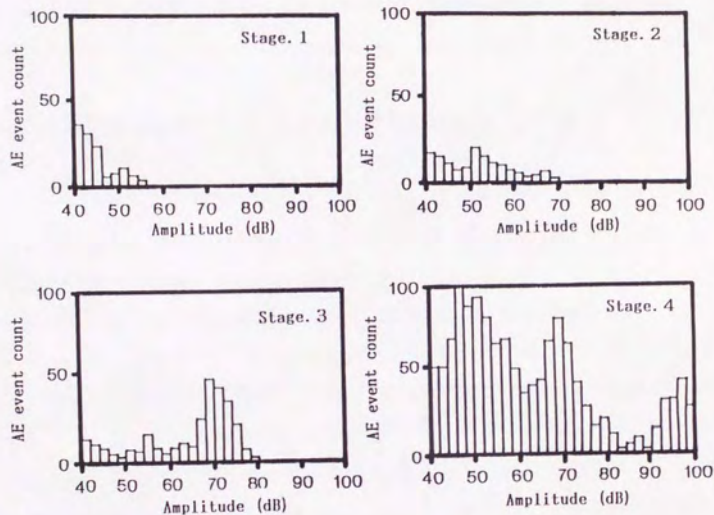


Fig. 7-24. AE amplitude distributions of four stages of the LT system.

破壊の相変化として破壊の規模が大きくなるにつれ、振幅分布は大振幅側のピークが新しく出現すると共に徐々に大きくなっていった。A Eが木材の微視的破壊の相変化に対応して発生していることは明らかである。

## 7.5 結論

本章では、SEM鏡筒内で、木材（スプルース、ヒノキ）の6つのき裂進展システム（TL, RL, LR, LT, TR, RT）切欠き付きマイクローム切片の引張試験を行ない、各々のシステムの破壊過程を検討した。同時に破壊過程で発生するAEを計測し、微小き裂の生成および進展とAEとの対応づけを行なった。

(1) 微視的破壊過程は高い破壊じん性値が発現するシステム（LR, LT, RL）と、それ以外のシステムとではその挙動が異なった。

TLシステムは、6システムの中で最も $K_{Ic}$ 値および $COD_c$ が低いシステムであるが、安定き裂成長の期間が短く、き裂の開始とともに即座に不安定き裂成長あるいは最終破断に移行する傾向があった。一方、RLシステムは、安定き裂成長時に特徴的な挙動を示した。き裂の開始後、き裂先端部において、き裂の枝分かれ、不連続なき裂、あるいは、き裂進展方向前方に存在する仮道管と放射組織との交差域（分野）においてS2層フィブリル間の裂け破壊等が発生する。このような挙動は切欠きより成長したき裂がほぼ停止した状態で繰り上げられる。従って、これらの微小き裂の発生は、引張方向に配列する放射組織によりき裂進展が拘束されるに伴い、切欠きより成長したき裂先端近傍に集中している応力を分散させる効果を与えていると考えられる。

LR, LTシステムでは、木材中に先天的に存在する壁孔などの欠陥の他にも、樹木として生長中に、あるいは加工中、乾燥中などに生ずる微小き裂がその破壊現象に深く関与していることが窺えた。き裂の開始以前に、あるいはき裂の開始後一旦成長が停止した状態で、細胞境界での剥離破壊、壁孔の割れ、最終的なき裂伝播経路からかなり離れた場所での裂け破壊等が発生し、これらは元来存在していた微小き裂が関与して起こる場合が多かった。これらの微小き裂の発生により、RLシステムの場合と同様き裂先端での応力集中を緩和する効果が働き、そのことが破壊じん性値を一層高める方向に寄与したと考えられる。

TRシステムのき裂進展様式には壁内破壊と壁切断破壊（壁横断破壊）があ



ったが、壁内破壊が主に観察された。壁内破壊の場合、切欠き先端より発生したき裂はゆっくりと1個の細胞の放射壁の壁内を進展し、放射壁から湾曲部へ移行する付近でその進展が一時拘束され、その後不安定成長段階に至った。壁切断破壊の場合は、T方向に隣接する細胞との境界、しかも、放射壁から湾曲部へ移行する付近で剥離破壊を起こすことにより開始し、その後次々とT方向に隣接する細胞との境界で同様な剥離破壊を誘発しながら放射方向にゆっくりと進展していく挙動を示した。一方、RTシステムは、壁内破壊により開始される。細胞が整然と配列していないT方向にき裂の方向があるためT方向に隣接する細胞の接線壁により一旦進展が拘束され、その後不安定成長段階に至った。TR、RTシステムの場合、TRシステムでは細胞の形状に起因して、RTシステムでは細胞の配列に起因して、それぞれき裂進展を一時的に拘束し応力集中源となる特異点が存在し、それらが横引張時の破壊開始点となることが予想できる。

(2) 高い破壊じん性が出現するシステム(LR, LT, RL)において、破壊過程の相変化に対応してどのようなAE波が発生したかを検討した。破壊過程はAEとの関連で次の4 Stageに分類することができた。すなわち、Stage1(き裂開始以前)、Stage2(き裂開始から安定き裂成長前半)、Stage3(安定き裂成長後半)およびStage4(不安定き裂成長)である。

き裂の生成および進展とAE波との同定にいくつか成功した。しかしながらStage1で観察されるような壁孔割れ程度の比較的小さい規模の現象と対応づけた例は希であった。この原因は板厚が薄すぎたために音波が伝わりにくかったことにあると考えられる。

各Stage毎に発生したAEの振幅分布を検討した。破壊の相変化として破壊の規模が大きくなるにつれ、振幅分布は大振幅側のピークが新しく出現すると共に徐々に大きくなっていった。AEが木材の微視的破壊の相変化に対応して発生していることは明らかである。

木材の複雑な破壊現象を、その組織構造と関連させて究明することは、木材を構造材料として加工、利用する場合のみならず、たとえば他材料との複合化等によって木質系材料の特性をより高度に活かした新しい材料の開発・設計を目指す場合においても、その基礎的知見を与えるものとして必要不可欠である。本研究では、従来から行なわれてきたフラクトグラフィーの手法では動的観察（破壊過程の追跡）に限界があることを考慮し、動的観察法としてアコースティック・エミッション（AE）法に着目し、フラクトグラフィーの手法と併用して検討することによって、特に、これまでほとんど検討されていない安定き裂成長時のき裂進展挙動を明らかにすることを目的とした。

（１）第１章では、木材の破壊モードと形態に関するこれまでの研究成果を概説し、研究内容をさらに発展させるには何らかの動的観察法と併用して研究する必要があること、および、動的観察法としてはAE法が適していること等を指摘した。

（２）第２章では、き裂進展しにくさを表わす破壊力学パラメータの１つである破壊じん性値（ $K_{Ic}$ ）とAEとの関係について概説した。

まず、 $K_{Ic}$ およびAE事象数に及ぼす樹種およびき裂進展システムの違いによる影響を検討した。 $K_{Ic}$ 値、COD値のシステムによる違いは、木材を構成する細胞の形状、配列等を考慮することにより理解することができた。AEは荷重-COD曲線の比例限度以前から発生し始め、木材の場合、比較的初期の段階から微視的な塑性が起こっていることが窺えた。 $K_{Ic}$ 値に至るまでのAE事象総数は組織構造の変動性との関連で説明できた。すなわち、組織構造の変動が大きい樹種ほど不均質に応力が分布し、発生数が多くなることがわかった。

$K_{Ic}$ 値およびAE事象数に及ぼす含水率の影響について検討した。 $K_{Ic}$ 値は、全乾あるいは気乾で最大となり、繊維飽和点以上の条件（含水率46%および200%）ではほぼ同じ値で低かった。また、 $K_{Ic}$ 値に至るまでのAE事象総数は、含水率の増加につれ少なくなっていく、繊維飽和点以上ではほぼ一定となることが明らかとなった。

（３）第３章から６章では、AEとその破壊源での細胞レベルでの破壊形態と



の関係について検討し、統一的な知見を得ることを目的とした。第3章では、気乾材と飽水材のTRキ裂進展システムを用いて、き裂先端の放射方向における年輪内位置を変えて破壊じん性試験を行い、木材の破壊じん性に対するき裂先端の組織構造および含水率の影響について、き裂の開始まで、あるいは初期の進展過程で発生したAEの計測およびSEMによる破壊形態の観察により検討し、以下の結果を得た。

き裂の開始を臨界点として求めた $K_{IC}$ 値は、気乾材の場合、き裂先端位置およびき裂進展方向（木裏→木表、木表→木裏）によって大きく異なった。一方、飽水材の場合、き裂先端位置、き裂進展方向との間に関係が認められず、ほぼ一定値を示した。

$K_{IC}$ 値に至るまでに発生したAEの振幅分布は、気乾材では2つのピーク（45dB, 70dB）が認められたが、飽水材では単一のピーク（45dB）のみが存在し、大振幅のAEはほとんど計測されなかった。振幅分布が試験片によって大きくばらついた気乾材において、振幅分布がべき乗則分布形を示すことに着目して求めた指標（ $m$ 値）と $K_{IC}$ 値との間に正の直線関係が認められたことより、

$K_{IC}$ 値が小さいほど大振幅AE波が卓越して発生することが明らかとなった。

荷重-COD曲線の比例限度までに計測されたAEの発生源と考えられた破壊面をSEMで観察した。気乾材では壁内破壊と壁切断破壊との複合化した形態が一般的であったが、飽水材では壁内破壊が極端に支配的な形態を示していた。ここで、破壊形態を定量的に議論するために“壁内破壊度”（D.I.F., Degree of Intrawall Failure）を導入した。破壊形態がばらついた気乾材についてD.I.F.と $m$ 値との関係を調べた結果、正の直線関係があった。このことから、小さい振幅のAEが卓越した場合、その発生源と考えられた破壊面において壁内破壊の占める割合が大きくなることがわかった。また、 $m$ 値と $K_{IC}$ 値との関係もまた正の直線関係であったことから、き裂進展開始時までに主に形成された破壊面において壁内破壊の占める割合が大きくなると、 $K_{IC}$ 値もそれにつれ大きくなることが明らかとなった。

（4）第4章では、木材TRキ裂進展システムの破壊じん性値が、き裂先端の年輪内位置およびき裂進展方向の違いに由来する応力分布の変化にどのように影響されるかについて、有限要素法による数値解析を行った。



$K_{IC}$  値の年輪内での変動の仕方は、実測値と計算値とで一致した傾向が得られた。従って、 $K_{IC}$  値のばらつきの主要原因は、き裂先端の年輪内位置およびき裂進展方向に依存する応力分布の違いによってき裂先端での応力集中度が変化した点にあると結論づけた。また、前章での破面解析結果と対比させてみるにより、ゆっくりと応力が集中した場合、壁内破壊が顕著に観察されるようになり、急激に応力が集中すると、壁切断破壊が顕著に観察されるようになることがわかった。

(5) 第5章では、木材の破壊じん性に対する繊維傾斜角（繊維方向と荷重方向のなす角）の影響を調べ、さらに、様々な繊維傾斜角における微視的な破壊機構を、き裂の開始と初期の進展過程で発生するAEの特性、および、初期き裂先端近傍のSEMによる観察から検討し、木材の縦引張破壊時の高い破壊じん性の発現機構を究明することを目的とした。

き裂の開始を臨界点として求めた $K_{IC}$  値は、繊維傾斜角の増加につれ減少した。 $K_{IC}$  値に至るまでのAE振幅分布を調べた結果、 $0^\circ$  および $15^\circ$  の低角度の場合、初期には小振幅のAEのみが発生し、徐々に大振幅のAEが発生し始めたのに対し、 $30^\circ$  以上の高角度の場合、その初期段階から大振幅のAEが発生し始めた。AEの特性およびSEM観察結果より、き裂進展開始のメカニズムを推察した。小さい角度の場合、最初のき裂先端からの進展に先んじて、最初のき裂の方向前方に隣接する1～3列の細胞の境界での剥離、あるいは、木材中にもともと存在したミクロなクラックの開口等が起こっていたのに対し、大きい角度の場合は、即座に最初のき裂先端より進展したと推察した。すなわち、小さい角度の場合、き裂開始以前に、き裂先端での応力集中を和らげるような機構が働き、それが、破壊じん性をより高める方向に寄与したと考えられた。

(6) 第6章では、木材LTき裂進展システムにおいて、クロスヘッド速度を4段階に変えることにより、破壊じん性、AEの特性および破壊面の性状に及ぼす時間因子の影響を比較検討し、以下の結果を得た。

き裂の開始点を臨界点として求めた $K_{IC}$  値およびCODは負荷速度の増加とともに減少した。 $K_{IC}$  値に至るまでに発生したAEの振幅分布は、負荷速度の増加につれAE事象数の大振幅側のピークが相対的に大きくなっていった。

SEM観察結果とAEの特性より、負荷速度が小さい場合、き裂進展方向前方の細胞境界での剥離等により徐々に弾性エネルギーを解放していったのに対し、負荷速度が大きい場合、き裂先端での応力集中効果により木材の微小な構造にも影響されず急激にき裂が開始され進展していったと考えられた。

(7) 第7章では、SEM観察下で、木材の6つのき裂進展システム(TL, RL, LR, LT, TR, RT)切欠き付きマイクローム切片的の引張試験を行ない、各々のシステムの破壊過程を検討した。同時に破壊過程で発生するAEを計測し、微小き裂の生成および進展とAEとの対応づけを行なった。

微視的破壊過程は高い破壊じん性値が発現するシステム(RL, LR, LT)と、それ以外のシステムとではその挙動が異なった。TLシステムは、安定き裂成長の期間が短く、き裂の開始とともに即座に不安定き裂成長あるいは最終破断に移行する傾向があった。一方、RL, LR, LTシステムは、安定き裂成長時に特徴的な挙動を示した。き裂の開始以前あるいは開始後、き裂先端部において、き裂の枝分かれ、不連続なき裂の発生、細胞境界での剥離破壊、壁孔割れ、あるいは、き裂より充分離れた場所でのS2層フィブリル間の裂け破壊等が発生する。このような挙動は切欠きより成長したき裂がほぼ停止した状態で繰り広げられる。従って、これらの微小き裂の発生は、切欠きより成長したき裂先端近傍に集中している応力を分散させる効果を与えていると考えられた。TR, RTシステムの場合、TRシステムでは細胞の形状に起因して、RTシステムでは細胞の配列に起因して、それぞれき裂進展を一時的に拘束し応力集中源となる特異点(TR:放射壁から湾曲部へ移行する付近, RT:T方向に隣接する細胞の接線壁)が存在し、それらが横引張時の破壊開始点となることが予想できた。

き裂の生成および進展とAE波との同定に成功した。また、高い破壊じん性が発現するシステム(LR, LT, RL)において、破壊過程の相変化に対応してどのようなAE波が発生したかを検討した結果、破壊過程はAEとの関連で次の4 Stageに分類することができた。すなわち、Stage1(き裂開始以前)、Stage2(き裂開始から安定き裂成長前半)、Stage3(安定き裂成長後半)およびStage4(不安定き裂成長)である。各Stage毎に発生したAEの振幅分布を検討した結果、破壊の相変化として破壊の規模が大きくなるにつれ、振幅分

布は大振幅側のピークが新しく出現すると共に徐々に大きくなっていくことがわかった。



## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり終始懇切なご指導と激励を賜りました東京大学農学部教授岡野 健博士ならびに東京大学農学部助教授太田正光博士に深甚なる感謝の意を表します。さらに、本研究を遂行するにあたり終始変わらぬご指導とご援助をいただいた東京農工大学農学部教授伏谷賢美博士ならびに東京農工大学農学部助教授久保隆文博士に対し心から謝意を表します。また、本研究の遂行にあたり常日頃有益なご助言とご援助をいただいた東京農工大学農学部佐藤敏一助手に衷心より感謝の意を表します。また、多くの面でご助言をいただいた東京大学農学部助手三城昭義博士、東京大学農学部助手杉山淳司博士、東京大学農学部吉原浩助手に、試験片の作製と終始変わらぬ激励をいただいた元東京農工大学農学部技官泉順太郎氏ならびに東京大学農学部技官土屋欣也氏に心から御礼申し上げます。また、研究に係わる各種の実験にあたって御助力頂いた船田 良博士、佐藤快信博士、加藤正雄氏、藤沢泰士氏、鈴木貴祐氏、石橋 真氏に、常に激励をいただいた東京大学農学部木材物理学教室ならびに東京農工大学農学部植物材料学研究室（旧木材材料学研究室）の方々にここに深く感謝致します。

なお、本研究の一部は平成3年度科学研究費補助金（特別研究員奨励費）によった。

文 献

- 1) 佐伯浩: 材料, 37, 529-534 (1988).
- 2) 古川郁夫: 鳥取大学農学部演習林報告, No.12, 1-118 (1980).
- 3) 古川郁夫: 木材学会誌, 24, 598-604 (1978).
- 4) 平井信二: 東京大学農学部演習林報告, No.44, 139-151 (1953).
- 5) 佐伯浩, 原田浩, 野淵正, 藤田稔: "昭和61年度科学研究費補助金(総合研究A)研究成果報告書", 1987, p.7-22.
- 6) Korán, Z.: Tappi, 50, 60-67 (1967).
- 7) 佐伯浩, 古川郁夫, 原田浩: 京都大学農学部演習林報告, No.43, 309-319 (1972).
- 8) 北原龍士, 堤壽一, 松本昂: 木材学会誌, 27, 1-7 (1981).
- 9) 今村祐嗣, 和田博, 則元京, 林昭三: 同上, 28, 743-749 (1982).
- 10) Keith, C.T.: Wood Science, 4, 71-82 (1971).
- 11) Aiuchi, T.; Ishida, S.: Mokuzai Gakkaishi, 24, 507-510 (1978).
- 12) 藤田晋輔, 竹内修二: 同上, 25, 82-85 (1979).
- 13) Kim, N.-H.; Okano, T.; Ohta, M.: Bulletin of the Tokyo University Forests, No.78, 83-95 (1988).
- 14) 林大九朗, 栃木紀朗, 井上裕之: 木材工業, 26, 306-312 (1971).
- 15) Triboulot, P.; Asano, I.; Ohta, M.: Mokuzai Gakkaishi, 29, 111-117 (1983).
- 16) Furuno, T.; Saiki, H.; Goto, T.; Harada, H.: ibid., 29, 43-53 (1983).
- 17) Saiki, H.: ibid., 30, 88-92 (1984).
- 18) Korán, Z.: Svensk Papperstidning, 71, 567-576 (1968).
- 19) 大沢純二, 米田豊: 木材学会誌, 24, 790-796 (1978).
- 20) 佐伯浩: 同上, 36, 900-908 (1990).
- 21) Ifju, G.: Forest Products Journal, 14, 366-372 (1964).
- 22) 佐伯浩: 材料, 22, 894-902 (1973).
- 23) 大釜敏正, 増田稔, 山田正: 材料, 26, 433-438 (1977).
- 24) Mark, R.E.: "Cell Wall Mechanics of Tracheids", Yale Univ.Press, 1967.
- 25) Forgacs, O.L.: Tappi, 44, 112-119 (1961).
- 26) Page, D.H.; El-Hosseiny, F.; Winkler, K.; Bain, R.: Pulp and Paper Magazine of Canada, 73, T198-T203 (1972).
- 27) 原田浩, 佐伯浩: "昭和56年度科学研究費補助金(総合研究A)報告書", 1982, p.1-5.
- 28) Suzuki, S.; Okuyama, T.; Terasawa, S.: Mokuzai Gakkaishi, 25, 177-183 (1979).
- 29) 飯田生穂: 同上, 35, 875-881 (1989).
- 30) Kollmann, F.F.P.: Holzforschung, 17, 65-71 (1963).
- 31) 古川郁夫: 木材学会誌, 35, 58-62 (1989).
- 32) Page, D.H.; El-Hosseiny, F.; Winkler, K.: Nature, 229, 252-253 (1971).
- 33) 臼田誠人ほか4名: 紙バ技協誌, 20, 257-264 (1966).
- 34) 古川郁夫: 木材工業, 28, 10-15 (1973).
- 35) Furukawa, I.; Saiki, H.; Harada, H.: Mokuzai Gakkaishi, 19, 399-402 (1973).



- 36) Furukawa, I.; Saiki, H.; Harada, H.: *Journal of Electron Microscopy*, 23, 89-97 (1974).
- 37) 古川郁夫, 佐伯浩, 原田浩: 京都大学農学部演習林報告, No.46, 170-178 (1974).
- 38) 古川郁夫, 佐伯浩, 原田浩: *材料*, 24, 855-861 (1975).
- 39) 古川郁夫: *木材学会誌*, 24, 369-374 (1978).
- 40) Futó, L.P.: *Holz als Roh-und Werkstoff*, 27, 192-201 (1969).
- 41) Mindess, S.; Bentur, A.: *Wood Science and Technology*, 20, 145-155 (1986).
- 42) Gibson, L.J.; Ashby, M.F.: "Cellular Solids - Structure and Properties", Pergamon Press, 1988, p.278-315.
- 43) Ashby, M.F.; Easterling, K.E.; Harrysson, R.; Maiti, S.K.: *Proc. Roy. Soc. Lond. A*, 398, 261-280 (1985).
- 44) Debaise, G.R.; Porter, A.W.; Pentoney, R.E.: *Materials Research and Standards*, 6, 493-499 (1966).
- 45) 佐伯浩, 今村祐嗣: 第19回日本木材学会大会研究発表要旨集, 札幌, 1969, p.47.
- 46) 藤田晋輔: *木材学会誌*, 15, 99-103 (1969).
- 47) 金谷紀行, 山田正: *木材研究*, No.41, 47-62 (1967).
- 48) Davies, G.W.: *Holzforschung*, 22, 177-180 (1968).
- 49) Cook, J.; Gordon, J.E.: *Proc. Roy. Soc. Lond. A*, 282, 508-520 (1964).
- 50) Jeronimidis, G.: "Wood Structure in Biological and Technological Research", Leiden Univ.Press, 1976, p.253-265.
- 51) Gordon, J.E.; Jeronimidis, G.: *Nature*, 252, 116 (1974).
- 52) Drouillard, T.F.: *Journal of acoustic emission*, 9, 155-176 (1990).
- 53) 岸上冬彦: *地震*, 6, 25-31 (1934).
- 54) Kaiser, J.: *Archiv für das Eisenhüttenwesen*, 24, 43-45 (1953).
- 55) Kitayama, S.; Noguchi, M.; Satoyoshi, K.: *Acoustic Letters*, 9, 43-45 (1985).
- 56) Noguchi, M.; Kitayama, S.; Satoyoshi, K.; Umetsu, J.: *Forest Products Journal*, 37, 28-34 (1987).
- 57) Lamaster, R.L.; Klamecki, B.E.; Dornfeld, D.A.: *Wood Science*, 15, 150-160 (1982).
- 58) 村瀬安英, 池賢二郎, 森稔: *木材学会誌*, 34, 207-213 (1988).
- 59) 吉村昇ほか6名: 同上, 33, 650-653 (1987).
- 60) 佐藤敏一, 森潤, 伏谷賢美: 東京農工大学農学部演習林報告, No.28, 23-29 (1991).
- 61) 竹内玄ほか4名: 第7回アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集, 静岡, 1989, P.95-99.
- 62) Sato, K. et al.: *Journal of Acoustic Emission*, 9, 209-213 (1990).
- 63) Beall, F.C.; Wilcox, W.W.: *Forest Products Journal*, 37, 38-42 (1987).
- 64) Fujii, Y.; Noguchi, M.; Imamura, Y.; Tokoro, M.: *ibid.*, 40, 34-36 (1990).
- 65) 野口昌巳: *木材学会誌*, 37, 1-8 (1991).
- 66) Lord, A.E.Jr.: "Physical Acoustics - Principles and Methods,



- Vol. X I", Mason, W.P. and Thurston, R.N. ed., Academic Press, 1975. P.289-353.
- 67) Sato, K.; Okano, T.; Asano, I.; Fushitani, M.: Journal of Acoustic Emission, 4, 240-243 (1985).
  - 68) Sato, K.; Fushitani, M.: "Nondestructive Testing and Evaluation for Manufacturing and Construction", Reis, H.L.M. ed., Hemisphere Publ. Corp., 1990, p.189-195.
  - 69) Dedhia, D.D.; Wood, W.E.: Materials Evaluation, 28, 28-32 (1980).
  - 70) 中山義雄, 浜田淳彦, 藤原新二: 第29回日本木材学会大会研究発表要旨集, 札幌, 1979, p.103.
  - 71) Morgner, W.; Niemz, P.; Theis, K.: Holztechnologie, 21, 77-82 (1980).
  - 72) Ansell, M.P.: Wood Science and Technology, 16, 35-58 (1982).
  - 73) 佐藤敬一, 伏谷賢美, 野口昌巳: 木材学会誌, 30, 117-123 (1984).
  - 74) 佐藤敬一, 亀井信之, 伏谷賢美, 野口昌巳: 木材学会誌, 30, 653-659 (1984).
  - 75) 鈴木弘志, 佐々木栄一: 材料, 39, 382-386 (1990).
  - 76) Schniewind, A.P.; Hartels, H.J.; Gammon, B.W.: Proceedings of the First International Conference on Wood Fracture, Vancouver, B.C., 1979, p.227-238.
  - 77) Suzuki, M.; Schniewind, A.P.: Wood Science and Technology, 21, 121-130 (1987).
  - 78) 佐藤敬一, 野口昌巳, 伏谷賢美: 木材学会誌, 29, 409-414 (1983).
  - 79) Tomin, M.: Wood Science, 5, 118-121 (1972).
  - 80) Schniewind, A.P.; Pozniak, R.A.: Engineering Fracture Mechanics, 2, 223-233 (1971).
  - 81) Barrett, J.D.: *ibid.*, 8, 711-717 (1976).
  - 82) Porter, A.W.: Forest Products Journal, 14, 325-331 (1964).
  - 83) Schniewind, A.P.: Wood and Fiber, 9, 216-226 (1977).
  - 84) Boatright, S.W.J.; Garrett, G.G.: Journal of Materials Science, 18, 2181-2199 (1983).
  - 85) Schniewind, A.P.; Centeno, J.C.: Wood and Fiber, 5, 152-159 (1973).
  - 86) Schniewind, A.P.; Ohgama, T.; Aoki, T.; Yamada, T.: Wood Science, 15, 101-109 (1982).
  - 87) Sobue, N.; Bajolet, N.; Pluvinage, G.: Mokuzai Gakkaishi, 31, 528-531 (1985).
  - 88) Sobue, N.; Asano, A.: *ibid.*, 33, 7-11 (1987).
  - 89) Mindess, S.; Nadeau, J.S.; Barrett, J.D.: Wood Science, 8, 389-396 (1975).
  - 90) Johnson, J.A.: *ibid.*, 6, 151-158 (1973).
  - 91) Schniewind, A.P.; Lyon, D.E.: Wood Science and Technology, 7, 45-59 (1973).
  - 92) 佐藤清: 材料, 37, 535-537 (1988).
  - 93) Schniewind, A.P.; Bartels, H.J.; Gammon, B.W.: Proceedings of the First International Conference on Wood Fracture, Banff, 1979, p.227-239.
  - 94) Pellicane, P.J.; Bodig, J.; Goodman, J.R.: Wood Science, 14.

- 168-177 (1982).
- 95) Petterson, R.W.; Bodig, J.: *Wood and Fiber Science*, 15, 302-316 (1983).
  - 96) Graham, L.J.; Alers, G.A.: *Materials Evaluation*, 32, 31-37 (1974).
  - 97) Gerberich, W.W.; Atteridge, D.G.; Lessar, J.F.: *Metallurgical Transactions A*, 6A, 797-801 (1975).
  - 98) Ono, K.; Ucisik, J.: *Materials Evaluation*, 34, 32-44 (1976).
  - 99) Clark, G.; Knott, J.F.: *Metal Science*, 11, 531-536 (1977).
  - 100) Suzuki, M.; Abe, H.; Takahashi, H.; Tamakawa, K.; Kikuchi, M.: *Technology Reports, Tohoku Univ.*, 43, 231-240 (1978).
  - 101) 高橋秀明, 菊池正明, 桜井達也, 鈴木正彦: 非破壊検査, 27, 801-806 (1978).
  - 102) 平修二, 田中啓介, 中井善一: 材料, 28, 203-210 (1979).
  - 103) Wadley, H.N.G.; Furze, D.C.; Scruby, C.B.; Eyre, B.L.: *Metal Science*, 13, 451-462 (1979).
  - 104) 中村正久ほか5名: 非破壊検査, 28, 555-563 (1979).
  - 105) 岡村弘之: "線形破壊力学入門", 培風館, 1976, p.217.
  - 106) 喜多山繁, 里吉健二, 野口昌巳: 木材工業, 40, 464-469 (1985).
  - 107) 島地謙, 伊藤隆夫: "図説木材組織", 地球社, 1982, p.76, 77, 112, 113.
  - 108) 則元京, 山田正: 木材研究, No.38, 32-39 (1966).
  - 109) 伏谷賢美ほか8名: "木材の物理" 文永堂, 1985.
  - 110) Tattersall, H.G.; Tappin, G.: *Journal of Materials Science*, 1, 296-301 (1966).
  - 111) Spiegelberg, H.L.; Tappi, 49, 388-396 (1966).
  - 112) 浅野猪久夫(編): "木材の辞典", 朝倉書店, 1982, p.189.
  - 113) Khafagy, A.H.; Britton, W.G.B.; Stephens, R.W.B.: "Progress in Acoustic Emission II", The Japan Society for NDI., 1984, p.523-533.
  - 114) 大塚裕光: 日本複合材料学会誌, 10, 102-106 (1984).
  - 115) Awerbuch, J.: *DFVLR-Mitt.*, 25, 45-83 (1981).
  - 116) Sato, N.; Kurauchi, T.; Sato, S.; Kamigaito, O.: *Journal of Materials Science*, 19, 1145-1152 (1984).
  - 117) Narisawa, I.; Oba, H.: *ibid.*, 19, 1777-1786 (1984).
  - 118) Kimpara, I.; Ohsawa, I.: "Progress in Acoustic Emission II", The Japan Society for NDI., 1984, p.464-471.
  - 119) 佐藤紀夫: 日本非破壊検査協会006特別研究委員会資料, No.81, 15-21 (1987).
  - 120) 佐藤紀夫: 同上, No.88, 18-23 (1989).
  - 121) 高橋清, 崔洛三: 同上, No.91, 1-6 (1990).
  - 122) 砥綿真一: 同上, No.91, 7-12 (1990).
  - 123) 前川善一郎, 濱田泰以: 同上, No.91, 13-18 (1990).
  - 124) Sato, N.; Kurauchi, T.; Sato, S.; Kamigaito, O.: *Journal of Composite Materials*, 22, 850-873 (1988).
  - 125) Weng, T.; Hiltner, A.; Baer, E.: *ibid.*, 24, 103-121 (1990).
  - 126) Quarles, S.L.: "Progress in Acoustic Emission IV", The Japan Society for NDI., 1988, p.642-649.
  - 127) Quarles, S.L.: *Journal of Acoustic Emission*, 9, 189-195 (1990).
  - 128) 仲佐博裕: 非破壊検査, 27, 236-244 (1978).



- 129) 地学団体研究会(編): "地学事典", 平凡社, 1981. p.62.
- 130) 岸輝雄: 材料, 29, 765-775 (1980).
- 131) Keylwerth, R.: Holz als Roh-und Werkstoff, 9, 253-260 (1951).
- 132) Boutelje, J.B.: Holzforschung, 16, 33-46 (1962).
- 133) 金谷紀行, 山田正: 木材研究, No.33, 47-55 (1964).
- 134) 大釜敏正, 山田正: 材料, 20, 1194-1200 (1971).
- 135) 大釜敏正, 山田正: 同上, 24, 873-878 (1975).
- 136) 大釜敏正, 山田正: 同上, 30, 707-711 (1981).
- 137) Barrett, J.D.; Foschi, R.O.: Engineering Fracture Mechanics, 9, 371-378 (1977).
- 138) Hunt, D.G.; Croager, W.P.: Journal of Materials Science Letters, 1, 77-79 (1982).
- 139) Mall, S.; Murphy, J.F.; Asce, M.; Shottafer, J.E.: Journal of Engineering Mechanics, 109, 680-690 (1983).
- 140) Cramer, S.M.; Goodman, J.R.: Wood and Fiber Science, 15, 338-349 (1983).
- 141) Triboulot, P.; Jodin, P.; Pluvinaige, G.: Wood Science and Technology, 18, 51-58 (1984).
- 142) Cramer, S.M.; Goodman, J.R.: Wood and Fiber Science, 18, 446-459 (1986).
- 143) 増田稔: 京都大学農学部演習林報告, No.58, 241-250 (1986).
- 144) 鈴木直之, 佐々木光: 木材学会誌, 33, 182-187 (1987).
- 145) 鈴木直之, 佐々木光: 同上, 33, 188-192 (1987).
- 146) Zandbergs, J.G.; Smith, F.W.: Wood and Fiber Science, 20, 97-106 (1988).
- 147) 増田稔, 大河原行雄: "第32回日本木材学会大会研究発表要旨集, 福岡, 1982, p.107.
- 148) 越島哲夫ほか4名: "基礎木材工学", 文教出版, 1983, p.100.
- 149) 澤田稔: 材料, 12, 749-753 (1963).
- 150) 林業試験場(編): "木材工業ハンドブック", 丸善, 1973, p.173,174.
- 151) 古川郁夫: "昭和56年度文部省科学研究費補助金(総合研究A)報告書", 1982, p.6-9.
- 152) Fowlkes, C.W.: Journal of Adhesion, 6, 49-84 (1974).
- 153) 北川英夫, 渡辺勝彦: 日本複合材料学会誌, 5, 136-142 (1979).
- 154) 奥山剛: 木材学会誌, 18, 291-298 (1972).
- 155) 奥山剛: 同上, 20, 210-216 (1974).
- 156) Sugiyama, H.: Wood Science and Technology, 1, 289-303 (1967).
- 157) Mai, Y.W.: Wood Science, 8, 364-367 (1975).
- 158) Kloot, N.H.: Aust. J. Appl. Sci., 3, 125-143 (1952).
- 159) Ifju, G.; Kennedy, R.W.: Forest Products Journal, 12, 213-217 (1962).
- 160) Ifju, G.; Wellwood, R.W.; Wilson, J.W.: ibid., 15, 13-14 (1965).
- 161) Wardrop, A.B.: Aust. J. Sci. Res., B4, 391-414 (1951).
- 162) Wellwood, R.W.: Pulp and Paper Magazine of Canada, 63, T61-T67 (1962).



