

# 木材の疲労強度におよぼす年輪数の影響 (第2報)<sup>†</sup>

## 1～3年輪試験片の疲労強度の比較<sup>\*1</sup>

今山延洋<sup>\*2</sup>

# Influence of the Number of Annual Rings on the Fatigue Strength of Wood II.<sup>†</sup>

## Fatigue strength of 1-3-annual-ring specimens<sup>\*1</sup>

Nobuhiro IMAYAMA<sup>\*2</sup>

The effect of the number of annual rings on the fatigue strength and the fatigue crack process were investigated by using 1-3-annual-ring specimens as shown in Figure 1. The experimental material and methods used in this study were the same as described in the previous report.<sup>1)</sup> The annual rings used were the 17-19th annual rings from the pith. The first annual ring of the test specimens was the 17th annual ring from the pith. The mean specific gravity was 0.44, and the mean moisture content was 12.8%. The results obtained were as follows:

The number of cycles to failure increased rapidly with increases in the number of annual rings. The fatigue process is divided into three steps in all types of specimens. Cracks in all types of specimens in step I propagate in the first part of the latewood of the first annual ring. Cracks in all types in step II propagate interceptibly in the late wood of the first annual ring (steady state). Cracks of 3-annual-ring specimens propagate in the earlywood of the second annual ring from the middle of Step II under less stress. The period of Step II in all types of specimens becomes longer with increases of the number of annual rings.

*Keywords:* fatigue, annual-ring, crack propagation curve.

ベイツ材の1～3年輪試験片について、繰返し両振り面外曲げ荷重を与え、1, 2, 3年輪と年輪数を増したときの疲労強度を比較し、その違いの原因を試験片幅の増加とき裂伝ば挙動の面から検討し、次の結果を得た。破断までの繰返し数は年輪数の増加とともに急激に増加する。き裂伝ば曲線は、いずれの年輪数の試験片とも3段階に分けられる。初期き裂長さの割合は年輪数の増加に伴って急激に減少する。逆に、第I段階終了時の残り断面は急激に増加する。この残り断面に含まれる晩材の数は、1, 2, 3年輪試験片が各々1, 2, 3本である。第II段階最初の晩材が切欠側に近づくほど、かつ、第II段階以降の残り断面に晩材が分散しているほど破断までの繰返し数が増加する。

## 1. 緒 言

前報<sup>1)</sup>のように、一年輪試験片では年輪の内側は早材、外側は晩材であり、半径方向の比重の分布に

は大きな偏りがある。その結果、早、晩材の区別がない南洋材のアガシス材<sup>2)</sup>と比較して、前報<sup>1)</sup>に示すように一年輪試験片の疲労き裂伝ば曲線は、非常に特殊なき裂伝ば曲線を示した。これに対して、建築材などのように実用的な断面に近づけば年輪数も増加し、見かけの比重分布も均一材に近くなり疲労き裂伝ば曲線も年輪が無い材料<sup>2)</sup>に近づくと思われる。本報告では、1, 2, 3年輪と年輪数を増したときの疲労強度を比較し、その違いの原因を試験片幅の増加とき裂伝ば挙動の面から検討する。

<sup>†</sup> Report I: This Journal, 37(8), 688-693 (1991).

<sup>\*1</sup> Recieved March 9, 1991. 本報の一部は、第36回日本木材学会大会 (1986年4月, 静岡) において発表した。

<sup>\*2</sup> 静岡大学教育学部 Faculty of Education, Shizuoka University, Shizuoka 422

## 2. 実験方法

### 2.1 疲労試験

年輪の影響を調べるための疲労試験片には、市販のペイマツ (*Pseudotsuga Douglassii* Carr.) の丸太を用い、Fig. 1 に示す試験片を作成した。成熟材と思われる随より数えて17番目の年輪を、試験片の第一年輪目とした。荷重面は柁目面である。試験片中央部片側に切欠を設けた。いずれの試験片も切欠の深さは3 mm である。切欠の場所は木裏側に設置し、切欠先端より発生したき裂が、木裏側より木表側へ伝ばするようにし、切欠先端より発生するき裂を観察した。切欠率は試験片最小幅に対する切欠深さで表した。試験片の厚さは5 mm である。試験片中央の曲率部の仕上げはピッチ1.3 mm の糸のこを用いた。切欠の製作は剃刀を用いた。平均年輪幅は5.2 mm, 平均気乾比重は0.46, 平均含水率は12.5%であった。

次に、年輪数が増すと試験幅も増す。試験片幅が

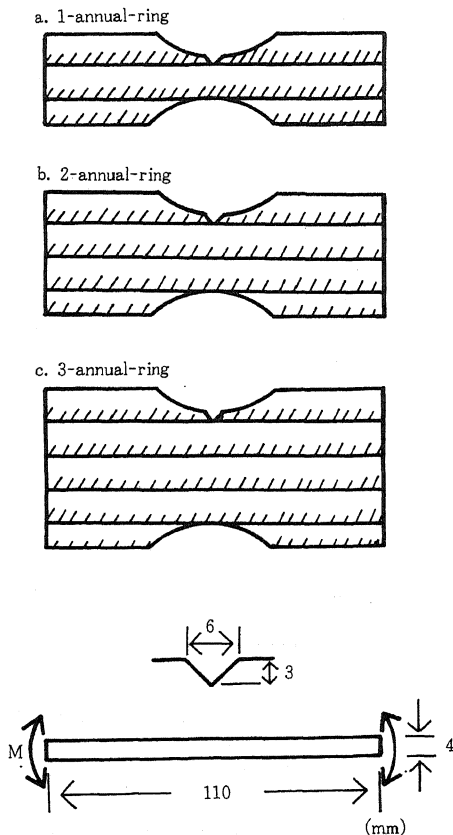


Fig. 1. Fatigue test specimens of 1, 2, and 3 annual-rings.

疲労強度に与える影響をアガシスを用いて調べた。試験片の形状を Fig. 2 に示す。試験片の中央幅1 cm を基準として、1 (1 cm), 2 (2 cm), 3 (3 cm) 倍について疲労強度を比較した。繰返し応力は約300 kgf/cm<sup>2</sup> を用いた。切欠率は約10% である。平均気乾比重は0.42, 平均含水率は11.9% である。

負荷方向は前報<sup>1)</sup>と同じで、繰返し荷重は偏心重錘の遠心力を利用した四点荷重方式による均一曲げモーメントを与える平均荷重がゼロとなる繰返し両振り面外曲げとなる定荷重試験で、繰返し数は毎秒30回である。き裂長さの測定には、実験を中断し装置より試験片を取り外して、読み取り顕微鏡を用いて行った。

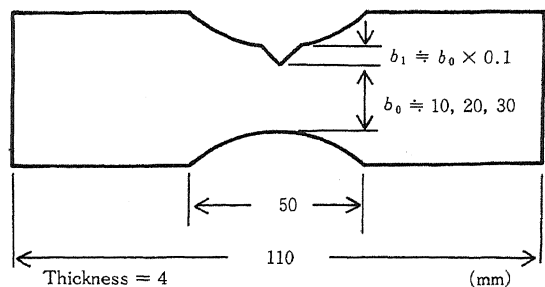


Fig. 2. Test specimens for confirming the effect of specimen widths on the fatigue strength.

### 2.2 静的曲げ試験

疲労試験と並んで、試験片の幅および切欠率の強度への影響をみるために、試験片幅および切欠率を変えて静的曲げ強さを測定した。樹種は疲労試験同様にアガシスを用いた。試験片幅の影響を調べる実験においては、Fig. 3 に示すように、試験片幅は約7.6 mm (1 倍), 15.4 mm (2 倍), 22.2 mm (3 倍) の3種類とした。厚さは約7.5 mm, スパンは150 mm とした。平均気乾比重は平均0.42, 平均含水率は15.0% である。

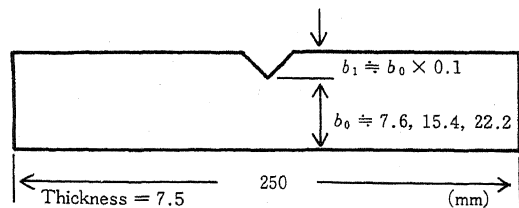


Fig. 3. Test specimens for confirming the effect of specimen widths on the modulus of rupture in bending.

Note: Span=150 mm. notched ratio;  $b_1/b_0=10\%$ .

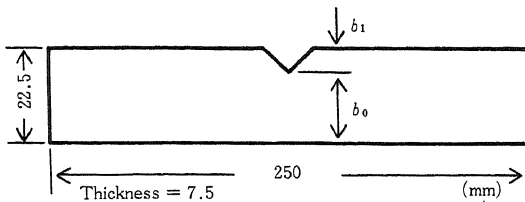


Fig. 4. Test specimens for confirming the effect of notched ratios on the modulus of rupture in bending.

Note: Span=150 mm. notched ratio;  $b_1/b_0 \approx 0, 8, 18, 37, 52\%$ .

切欠率の影響を調べる実験においては、Fig. 4 に示すように、試験片幅を22.5 mm と一定にし、試験片片側面に切欠を設けた。切欠率を約8, 18, 37, 52%の4段階に設定した。切欠先端からの最小幅は切欠率の増加に伴い減少する。応力計算にはこの最小幅を用いた。平均気乾比重は0.39, 平均含水率は17.7%である。試験機は、容量10 tのインストロン型万能引張圧縮試験機(ミネベア(株)新興通信事業部製, TCM-10000)で、負荷速度はクロスヘッドスピード5 mm/min である。負荷の種類はスパンは150 mm の三点曲げで、荷重面は柁目面である。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 1, 2, 3 年輪の疲労強度

1 年輪, 2 年輪, 3 年輪試験片について、繰返し応力 ( $S$ ) に対する破断までの繰返し数 (以後、 $N_f$  とする) の関係 ( $S-N_f$  曲線) を Fig. 5 に示す。図から明らかなように、年輪数が1, 2, 3 年輪と順に増加するに従って、 $N_f$  も増加する。次に、この  $S-N$  曲線の実験式を用いて繰返し応力320 kgf/cm<sup>2</sup> における  $N_f$  の関係を Fig. 6 に示す。このように、年輪数が1, 2, 3 と増すに従って疲労強度が急激に増加していることが分かる。次に、この疲労強度の増加の原因について、試験片幅の増加及びき裂伝ば挙動から検討を行う。

#### 3.2 試験片幅の影響

年輪数が増加するにつれて試験片幅も増加する。試験片幅が静的曲げ破壊係数に及ぼす影響についての結果を Fig. 7 に示す。図中、●印は各試験片幅における平均値を表す。分散分析の結果、危険率5%において1倍と2倍, 2倍と3倍の間では有意差は見られないが、1倍と3倍の間においては有意差がみられた。しかし、1%水準ではいずれの間においても有意差はみられなかった。従って、試験片幅が増すにつれて静的曲げ破壊係数に対して関係がない

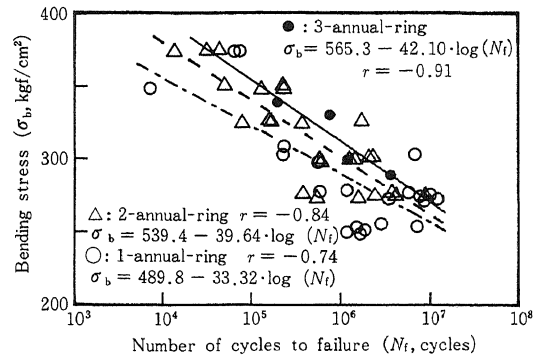


Fig. 5.  $S-N_f$  curves of 1,2,3-annual-ring specimens. Legend:  $r$ : Correlation coefficient.

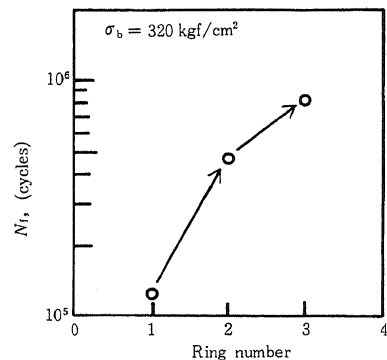


Fig. 6. Comparison of the number of cycles to failures of 1-annual-ring with those of 2 and 3-annual-ring specimens at 320 kgf/cm<sup>2</sup>.

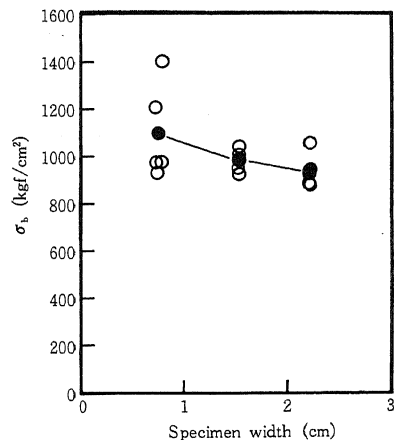


Fig. 7. Relationships between specimen widths and moduli of rupture in bending ( $\sigma_b$ ).

Legend: ●: Mean value.

か、あるいはやや負の関係が存在すると思われる。次に、疲労強度の結果を Fig. 8 に示す。横軸に試験片幅を、縦軸に繰返し応力約300 kgf/cm<sup>2</sup> を与えた

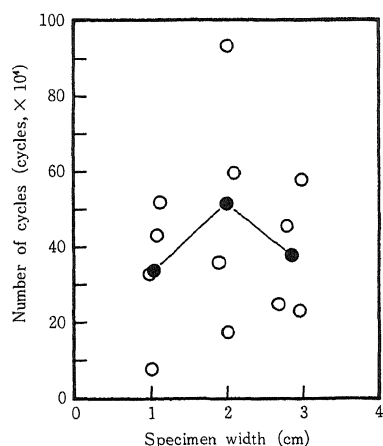


Fig. 8. Relationships between specimen widths and fatigue strengths (number of cycles at  $\sigma_b = 300 \text{ kgf/cm}^2$ ).

Legend: ●: Mean value.

ときの  $N_f$  を示している。実際の繰返し応力は  $300.8 \sim 304.9 \text{ kgf/cm}^2$  の範囲であった。また、切欠率の範囲は  $9.0 \sim 13.8\%$  であった。分散分析の結果、危険率  $5\%$  においていずれの幅の間においても有意差は認められなかった。従って、試験片幅の違いによる  $N_f$  の明瞭な違いは認められないと思われる。

### 3.3 切欠率の影響

切欠率を変化させたときの静的曲げ破壊係数の結果を Fig. 9 に示す。切欠率  $0\%$  の時の結果も示した。●印は各々の切欠率の時の平均値である。

分散分析の結果、いずれの切欠率の間にも危険率  $5\%$  において有意差が認められなかった。このよう

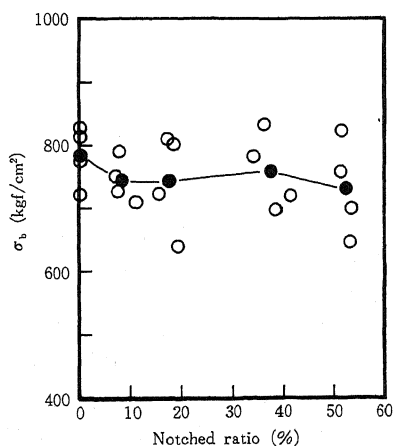


Fig. 9. Relationships between notched ratios and moduli of rupture in bending ( $\sigma_b$ ).

Legend: ●: Mean value.

に、実験の範囲では試験片幅の増加による切欠率の変化によっては、静的曲げ破壊係数は影響を受けないと思われる。

以上のように、年輪数の増加に伴って生じる試験片幅の増加や切欠率の変動が及ぼすと考えられる静的曲げ破壊係数や疲労強度への影響はないことが分かった。従って、年輪数が  $1, 2, 3$  と増すにつれて疲労強度が増加する原因が、試験片幅の増加によるものでないことが明らかになった。

### 3.4 き裂伝ば挙動と年輪数

#### 3.4.1 1 年輪試験片のき裂伝ば挙動

次に、Fig. 5 や Fig. 6 に示されたように、年輪数の増加に伴って  $N_f$  が増加する原因を明らかにするために、切欠先端より発生したき裂長さを測定し、各年輪試験片におけるき裂伝ば曲線の特徴を明らかにする。

1 年輪試験片について、種々の繰返し応力によるき裂発生から破断までのき裂伝ば挙動を Fig. 10 に示す。横軸には応力繰返し数 ( $N$ ) を表し、縦軸はき裂の長さ ( $l$ ) を表す。き裂は実験開始後、繰返し数約  $500$  回ですぐに発生する。このことは、 $2, 3$  年輪試験片についても同様であった。アガシス材を用いた切欠試験片<sup>2)</sup>では、平滑試験片に比べかなり早い時期にき裂が発生したが、本実験のように実験開始直後に発生することはなかった。これは、試験片第 1 年輪目早材部の開始部分に接する切欠が、前年の年輪の晩材部にあり、早・晩材の密度差と切欠の存在の両者が影響し合っ、切欠先端にかなり大きな応力が発生する為と思われる。

次に、Fig. 11 に繰返し数比 ( $N/N_{cp}$ ) (ただし、き裂発生から破断に至るまでの繰返し数を  $N_{cp}$ ) を  $100$ 、試験片幅 ( $W$ ) (破断までのき裂長さを  $100(l/w)$ ) としたときのき裂伝ば曲線を種々の応力について示す。図の右側には早材、早材から晩材への移行部分 (以下、移行部分と略)、晩材の区分を示した。この区分は既報<sup>3)</sup>に従った。図に示すように、破断ま

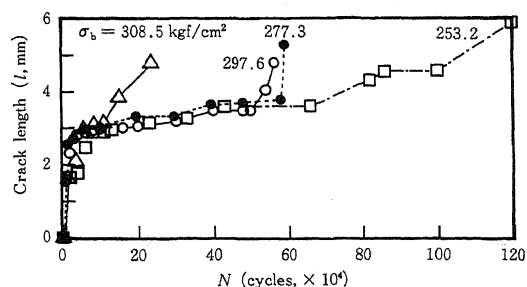


Fig. 10. Crack propagation curves of 1-annual-ring specimens with notches.

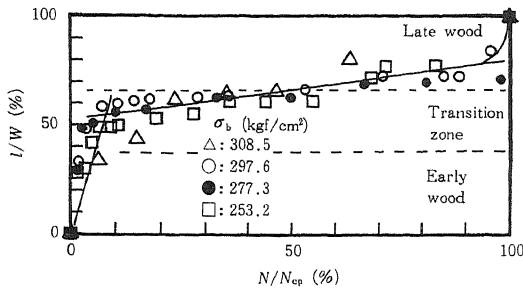


Fig. 11. Crack propagation curves of 1-annual-ring specimens with notches.

Legend:  $l$ : Crack length.  $w$ : Width of specimen.  $N_{cp}$ : number of cycles for crack propagation.

でのき裂の伝ば挙動に三つの段階を考えることが出来る。(1)第I段階: き裂発生後き裂は早材部をすぐに通過し移行部分の中間に至る。(2)第II段階: 緩やかなき裂伝ばをして移行部分の終りから晩材部のはじめへ進む。(3)第III段階: 晩材部の中を第II段階よりはやや急なき裂伝ばをした後破断に至る。また、第I段階は、き裂伝ば寿命の始めの約5~20%を占めるのみで、第II段階と第III段階がき裂伝ば寿命の大部分を占めている。

#### 3.4.2 2年輪試験片のき裂伝ば挙動

2年輪試験片について、種々の繰返し応力によるき裂発生から破断までのき裂伝ば挙動を Fig. 12 (a, b) に示す。また、Fig. 13 に繰返し数比 ( $N/N_{cp}$ ) に対するき裂伝ば曲線を種々の応力について示す。試験片幅には各年輪の幅を100として表示した。これらの図から明らかなように、破断までのき裂の伝ば挙動に三つの段階が考えられる。(1)第I段階: き裂発生後、き裂は1年輪目早材部をすぐに通過し移行部分の後半から晩材部の中間に至る。第I段階は、き裂伝ば寿命の始めの約10%以下である。(2)第II段階: 1年輪目晩材部を非常に緩やかに伝ばする。第II段階はき裂伝ば寿命の約50~70%まで続く。ここまです試験片幅の約半分、1年輪目全体をほぼ占める。(3)第III段階: 1年輪目晩材部の終り直前から第II段階よりは急なき裂伝ばをして、2年輪目早材部、移行部分、更に晩材部を通過して破断に至る。繰返し応力が少し低くなってくる ( $\sigma_b = 274.6$  kgf/cm<sup>2</sup>) と、2年輪目晩材部におけるき裂伝ばがやや緩やかな傾向が出てくる。平均で寿命の約60%から後が第III段階であり、2年輪目全体をほぼ占める。

#### 3.4.3 3年輪試験片のき裂伝ば挙動

3年輪試験片について、種々の繰返し応力によるき裂発生から破断までのき裂伝ば挙動を Fig. 14

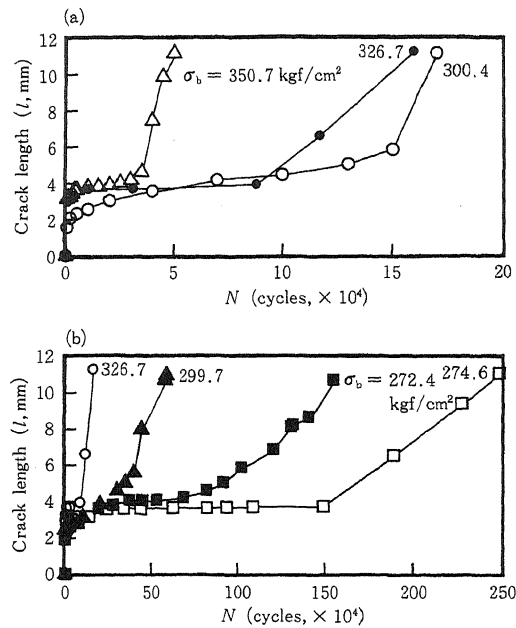


Fig. 12. Crack propagation curves of 2-annual-ring specimens with notches.

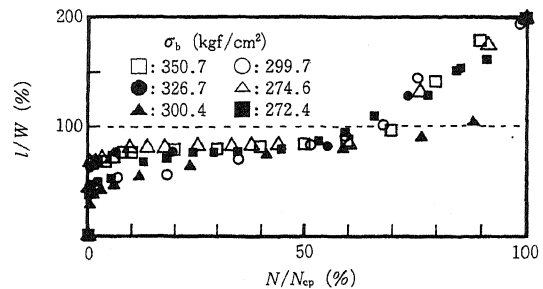


Fig. 13. Crack propagation curves of 2-annual-ring specimens.

Legend:  $l$ : Crack length.  $w$ : Width of annual ring.

(a, b, c) に示す。また、繰返し数比で表示した場合の図を Fig. 15 に示す。いずれの図も、縦軸は、各年輪の幅を100として表示した。これらの図から明らかなように、応力が高い場合は、破断までのき裂の伝ば挙動に三つの段階を考えることが出来る。(1)第I段階: き裂発生後、き裂は1年目早材部をすぐに通過し移行部分の中間部から晩材部の中間に至る。第I段階は、き裂伝ば寿命の始めの約5%以下である。(2)第II段階: 1年輪目晩材部、あるいは移行部分から晩材部にかけて非常に緩やかに伝ばする。繰返し応力が低くなると、1年目晩材部から年輪境界を通過して2年輪目早材部の初めの部分も含めて緩やかに伝ばする。第II段階はき裂伝ば寿命の

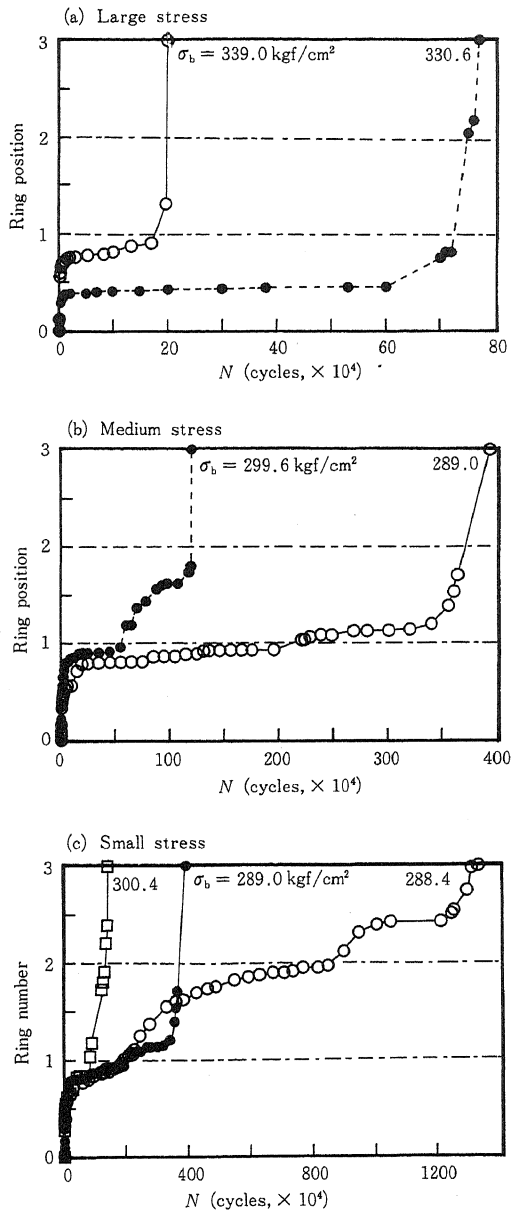


Fig. 14. Crack propagation curves of 3-annual-ring specimens.

約90%まで続く。き裂長さは、ここまです試験片幅の約40%、1年輪目全体、あるいは2年輪目早材の初期までをほぼ占める。(3)第Ⅲ段階：1年輪目晩材部、あるいは晩材部の終り直前、あるいは2年輪目早材部の初めから急なき裂伝ばをして、2年輪目と3年輪目を通して破断に至る。第Ⅲ段階はき裂伝ば寿命の約10%を占める。次に、Fig. 14のbやcなどから明らかなように、応力が低くなるに従って2

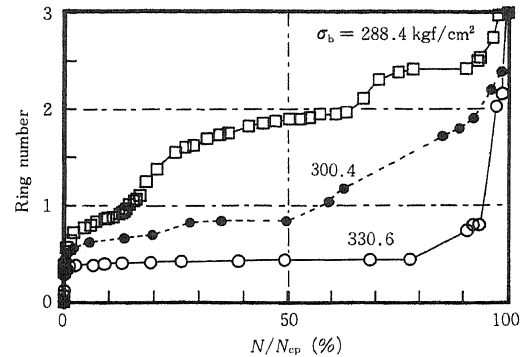


Fig. 15. Crack propagation curves of 3-annual-ring specimens.

年輪目の繰返し数が増し、更に応力が低くなると3年輪目での繰返し数も増し、疲労寿命は大幅に増加する。

#### 3.4.4 き裂伝ば挙動の比較

2年輪、3年輪試験片の幅を1年輪試験片の幅の2、3倍と仮定して、き裂伝ばのパターンを比較したのがFig. 16である。横軸は、Fig. 5に示したS-N曲線において、繰返し応力320 kgf/cm²における繰返し数の関係を、3年輪試験片の繰返し数を基準にした比率で表わした。これを見ると、試験片の幅、つまり年輪数が増しても、初期き裂の長さはほぼ等しく、移行部分から晩材のはじめまでである。その後でき裂が停滞する位置も大体同じで、第一年輪目晩材であることが分かる。このように、初期き裂の長さはほぼ同じであることがわかる。このことは、逆に、試験片幅に対する第Ⅰ段階の初期き裂長さの割合が、年輪数の増加に伴い急激に減少していることになる。このことは、Fig. 17において明かである。

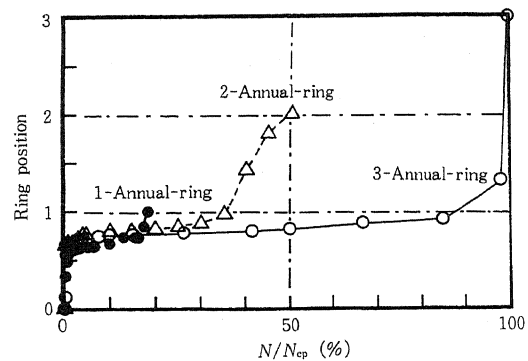


Fig. 16. Comparison of crack propagation curve of 1-annual-ring specimen with those of 2 and 3-annual-ring specimens.

Note:  $\sigma_b = 320 \text{ kgf/cm}^2$ .

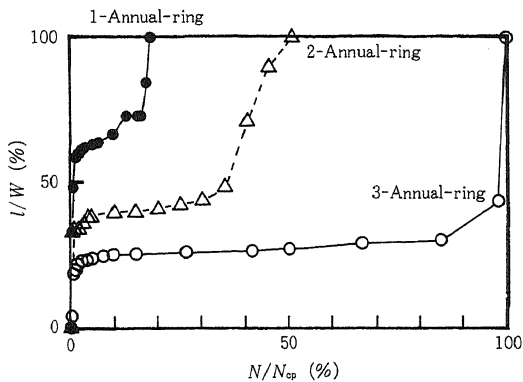


Fig. 17. Comparison of crack propagation curve of 1-annual-ring specimen with those of 2 and 3-annual-ring specimens.

Note:  $\sigma_b = 320 \text{ kgf/cm}^2$ .

Legend:  $l$ : Crack length.  $w$ : Width of specimen.

次に、Fig. 17 に示すように、第 I 段階が終了した段階で残りの試験片断面についてみると、1 年輪試験片は残り約 40% 弱の断面に晩材のみ、2 年輪試験片は残り約 60% の断面に第 1 年輪目の晩材と 2 年目年輪、3 年輪試験片は残り 70% 以上の断面に 1 年目年輪の晩材と 2 年目および 3 年目年輪である。このように、第 I 段階終了時の残り断面は試験片の年輪数が増すに従って急激に増加している。

また、第 II 段階以降における晩材の数を比較してみると、試験片の年輪数が増すに従って、1 本、2 本、3 本と増加している。更に、晩材の位置が、1 年輪試験片が試験片幅の端であるのに対して、2 年輪試験片では晩材が試験片幅の中央と端であり、3 年輪試験片では第 1 年輪目晩材が切欠先端から試験片幅の 1/3 の位置に、第 2 年輪目晩材が切欠先端から試験片幅の 2/3 の位置に、第 3 年輪目晩材が試験片幅の端である。このことは、第 II 段階における最初の晩材が切欠に近いほど、また第 II 段階以降の残り断面に晩材が多数分散しているほど、 $N_f$  が増加すると

思われる。このように、残りの断面の広さ及び晩材の数や位置からみても、年輪の増加にともなって  $N_f$  が増加することが明かである。

以上を総合すると、一年輪目の晩材の位置が切欠側に近づくほど初期き裂は短くなり、かつ、第 II 段階以降の残り断面は年輪数の増加とともに広くなる。更に第 II 段階以降の残り断面に晩材が分散しているほど疲労強度が増していることが分かる。

#### 4. ま と め

ベイマツ材の 1～3 年輪試験片について、繰返し両振り面外曲げ荷重を与え、1, 2, 3 年輪と年輪数を増したときの疲労強度を比較し、その違いの原因を試験片幅の増加とき裂伝ば挙動の面から検討し、次の結果を得た。

1. 破断までの繰返し数 ( $N_f$ ) は年輪数の増加とともに急激に増加する。
2. 年輪数の増加に伴って生じる試験片幅の増加や切欠率の変動が及ぼすと考えられる静的曲げ破壊係数や疲労強度への影響はないことが分かった。
3. き裂伝ば曲線は、いずれの年輪数の試験片とも 3 段階に分けられる。
4. 初期き裂長さの割合は年輪数の増加に伴って急激に減少する。逆に、第 I 段階終了時の残り断面は急激に増加する。この残り断面に含まれる晩材の数は、1, 2, 3 年輪試験片が各々 1, 2, 3 本である。
5. 第 II 段階最初の晩材が切欠側に近づくほど、かつ、第 II 段階以降の残り断面に晩材が分散しているほど破断までの繰返し数 ( $N_f$ ) が増加すると考えられる。

#### 文 献

- 1) 今山延洋：木材学会誌, 37(8), 688-693 (1991).
- 2) 今山延洋：同上, 33(6), 457-463 (1987).
- 3) 今山延洋：同上, 26(9), 595-602 (1980).