

木材の疲れに関する研究(第3報)[†]

疲れき裂の伝ば方向と年輪構造^{*1}

今山延洋^{*2}

Studies on the Fatigue of Wood III.[†]

Effect of the annual ring on the fatigue crack propagation^{*1}

Nobuhiro IMAYAMA^{*2}

The effect of the annual ring boundary on the fatigue crack propagation in douglas-fir wood was investigated. Two types (type A and type B) of the fatigue test specimens were tested in this paper. In type A, the fatigue crack propagated radially from the inside surface to the outside surface. In type B, the crack propagated from the outside surface to the inside surface.

As shown in Fig. 1, the direction of the pure bending force applied to the specimen was the tangential direction of the annual ring boundary. The frequency of the stress cycles was 30 cycles per second and the mean stress was zero.

The results obtained are as follows:

The values of the fatigue strength in $S-N$ curve and the crack propagation curve of type B are larger than those of type A. In type A, the crack propagates straight across the annual ring boundary. However, in type B, the crack stays for a long time on the annual ring boundary and then another crack generates in the adjacent ring. It may be suggested that the velocity of the crack propagation across the annual ring boundary is inversely proportional to the ratio of Young's modulus of the early wood and the late wood (E_2/E_1).

木材の疲れに関する研究の一環として、曲げによる疲れき裂が年輪の境界に垂直に伝ばするとき、年輪の境界が疲れき裂の伝ばに与える影響を、き裂が伝ばする方向を木表方向と木裏方向に分けて検討した。

その結果、疲れき裂がまさ目において年輪の境界を木表方向に横切る場合と木裏方向に横切る場合とではき裂の伝ば挙動に大きな違いがあり、クラック伝ば曲線や $S-N$ 曲線にも大きな差が認められた。

1. 緒 言

木材の疲れ強さは大きなバラツキを示す。このバラツキは肉眼で観察可能な疲れき裂発生までの段階と、それ以後の疲れき裂が試験片全体に伝ばして破断するまでの段階に大別される¹⁾。特に、木材は金属などの材料と比較して、このき裂の伝ばに多くの時間を要するのが特徴

である。この原因として、細胞壁の微細構造から細胞の配列状況までの各種レベルでの組織構造が関与していると思われるが、本研究では、巨視的な組織構造のレベルで大きな影響を与えると考えられる年輪構造との関連で疲れき裂の伝ば挙動を検討した。

木材の疲れ強さに密接に関与していると思われる各種応力に対する破壊強さや、ヤング率あるいは比重などの材質指標は、既知のように半径方向において一年輪を周期として鋸歯状に繰返している。つまり、一年輪内の強度およびその材質指標は、一年輪の早材部のはじめで最低で、次に次第に高くなり、晩材部の終りで最大になる。したがって、年輪の境界はその年輪の晩材部の末期と次年輪の早材部の初期で構成されている。言いかえるとこ

[†] Report II: This Journal, 20, 53 (1974)

^{*1} Received February 14, 1980. 本報告は第29回日本木材学会大会(1979年7月,札幌)において発表した。

^{*2} 静岡大学教育学部 Faculty of Education, Sizuoka University, Sizuoka 420

の境界は、強度およびその材質指標が相対的に非常に低い部分と非常に高い部分で構成されている。半径方向に生じたき裂が年輪の境界を木表方向に伝ばしようとするときは、年輪の境界の強度およびその材質指標の構成から、き裂は容易に伝ばするのに対し、逆に木裏方向のときは、き裂の伝ばはかなり困難であろうと考えられる。

このように考えると、一つの年輪の境界において、疲れき裂の伝ば方向によってき裂伝ばの加速、減速、一時的停留あるいは屈折などの現象が起こるのであろう。さらに、年輪が多数になればき裂伝ばの方向による差が累積して大きな差異となって現われると思われるが、き裂の伝ば現象そのものが明確でない現状であるので、まず一つの年輪の境界を伝ばするき裂の挙動について検討を試みた。

2. 実 験

2.1 試験片

前報¹⁾で用いた疲れ実験の方法は、繊維方向が材軸と一致するまき目面荷重による繰返し曲げ実験であった。この場合の疲れき裂は半径方向に生じる。本実験では、この半径方向に生じるき裂の方向を、木裏から木表へき裂が伝ばする木表方向と、木表から木裏へ伝ばする木裏方向の二つに分けるために切欠を有する試験片を用いた。後述のようにき裂は常に切欠先端で発生するので、切欠の位置によりき裂伝ばの方向が決まり、またき裂伝ばの観察も容易である。Fig.1に切欠の位置と試験片の種類および寸法を示す。

供試材は髓から数えて26年輪を有する年輪幅の広い市販のベイマツ(*Pseudotsuga Douglasii* Carr.)の丸太から採取した。含水率は12.4%である。図に示すとおり、試験片中央部の幅を狭くしてつかみ部分の破壊への影響をなくした。試験片中央部には髓から数えて第18年輪目の早、晩材と第19年輪の早材部が含まれるように木取りした。年輪幅は第18、19年輪ともに約7.5mmであり、試験片は繊維方向と接線方向とに連続して木取り、年輪幅および早、晩材の割合が一定になるようにした。

試験片側面にV字形切欠を入れ、切欠先端よりき裂が発生し、一定方向から年輪の境界へ向って垂直に伝ばするようにした。第18年輪早材部に切欠を入れた場合をタイプA、反対側の第19年輪早材部に入れた場合をタイプBとした。したがって、切欠先端部で発生したき裂はタイプAでは木表方向へ伝ばし、タイプBでは木裏方

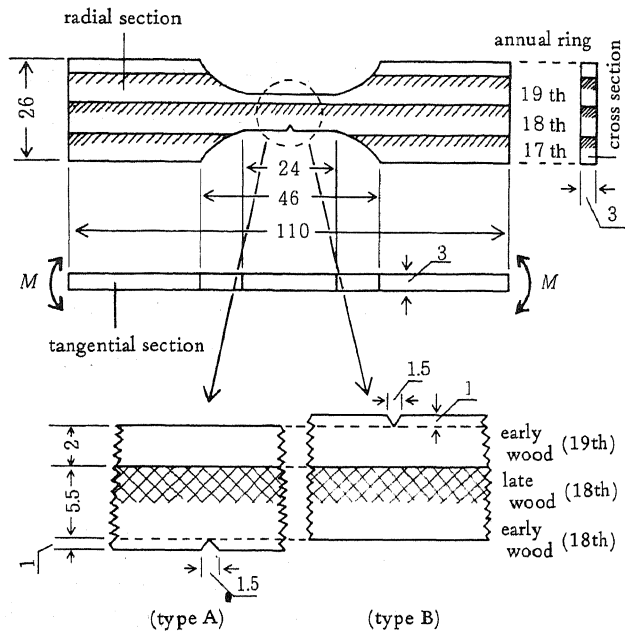


Fig. 1 Test specimens for fatigue. Type A has a notch in early wood of 18th annual ring. Type B has a notch in early wood of 19th annual ring. M : bending moment.

向へ伝ばする。両タイプとも、その年輪の初めから切欠先端までは約2mmである。

2.2.1 疲れ実験方法

疲れ実験装置はFig.2に示すように、偏心重錘の遠心力を利用した島津製作所製島津万能疲れ試験機UF-20である。疲れ試験は均一曲げモーメントを与える純曲げ方式による両振り繰返し曲げ強制振動で、平均応力がゼロ、繰返し速度は毎秒30回の定応力疲れ試験である。荷重の方向は試験片の厚さ方向、すなわち接線方向である。Fig.2のa~b, c~dで試験片を固定する。実験は室温(10~25℃)、大気中でおこなわれた。

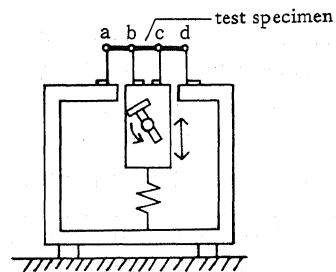


Fig. 2 Apparatus for fatigue test.

2.2.2 発熱温度の測定

前報¹⁾のごとく、疲れ過程と疲れによる発熱温度は相

関があるので、き裂発生の目安として発熱温度を測定した。発熱温度の測定は直径 0.3 mm の Cu-Co 熱電対を用い、一方を試験片まさ目中央部にセロテープで固定し、他方をすぐ近くの安定した大気中に固定しておこなった。検出温度は安定した温度変化を示し、き裂発生の検出に十分役立った。

2.2.3 疲れき裂の観察

任意の応力繰返し数で試験片を取りはずし、実体顕微鏡や金属顕微鏡でき裂を観察し、読み取り顕微鏡でき裂の位置と長さを測定した。その後、実験を再開した。試験片を固定するボルトは、トルクレンチを用いて常に一定の強さに締めた。

2.2.4 引張強さ、動的ヤング率、比重の測定

木材の破壊強さおよびその材質指標がき裂の伝ばに与える影響を知るために、疲れ試験片に用いられている第 18 年輪の 1 年輪と第 19 年輪早材部について、年輪内の強度およびその材質指標の変動を調べた。平均応力がゼロの両振り繰返し曲げの疲れ破壊では、圧縮および引張

強さが大きな要因となっていると考えられるが、圧縮強さの年輪内変動を知るには技術的に無理があると思われるので、実験が可能な引張強さを測定し、さらに強度的材質の指標である動的ヤング率および比重も測定した。

供試した疲れ試験片の繊維方向に隣接する部分から、第 18、19 年輪をブロックで切り出し、6 時間煮沸後、繊維方向 40 mm、接線方向 5.7 mm、半径方向 100~150 μm の板目切片をマイクロームで連続的に製作し、気乾状態で乾燥した後、気乾比重を測定した。次に、国際機械振動(株)製振動子 PET-01 を用いて、固定端振動により共振周波数を測定し動的ヤング率を求めた。続いて、この切片をスパン 4.3 cm の穴のあいた台紙に接着剤で固定してから引張装置(テンシロン)に取付けた。装置の引張方向と切片の繊維方向を一致させるために、切片は台紙の中央に描かれた線に沿って固定した。台紙の穴の両側は引っ張る直前に切断した。

結果を Fig. 3 に示す。図から明らかなように、年輪内の縦引張強さ、動的ヤング率、比重ともに同じパターンを示し、明らかに早材部、早材から晩材への移行部分、晩材部の三つの部分に分けられる。

3. 結果と考察

3.1 クラック伝ば曲線

Fig. 4 に疲れに伴う温度変化曲線を示す。繰返し曲げ応力 σ_0 は、切欠部分の最小断面を用いた公称最大曲げ応力の値を示す。図に示すように、疲れに伴う温度変化は四つの段階に分けることができる。これは前報¹⁾のスキを材料とした場合と同じである。前報¹⁾と温度の大きさが異なるが、これは試験片の大きさや、応力繰返し速度が異なっている為と考えられる。き裂は第 II 段階と第 III 段階の間で生ずる。従って、き裂発生時の繰返し数は、疲れ温度変化曲線から明確に判断することができる。図中、タイプ A とタイプ B の二つの曲線は、繰返し応力がほぼ同じ大きさにもかかわらず、疲れ寿命に大きな差を示している。さらに、両者の第 II 段階はほぼ同じだが、第 III 段階が大きく異なっている。

Fig. 5 に S-N 曲線を示す。図から明らかなように、繰返し応力と破壊までの繰返し数(N)との関係において、タイプ A とタイプ B の曲線は明らかに異なり、タイプ A のものが早く疲れ破壊をおこす。

続いて、最初のき裂が発生するまでの繰返し数を N_0 とすると、この N_0 と繰返し応力の関係を Fig. 6 に示す。Fig. 6 に示す曲線は一般にクラック曲線と呼ばれている²⁾。図から明らかなように、タイプ A とタイプ B でクラック曲線を区別することができない。き裂が発生する切欠先端部分は、Fig. 3 に示すように、タイプ A、B と

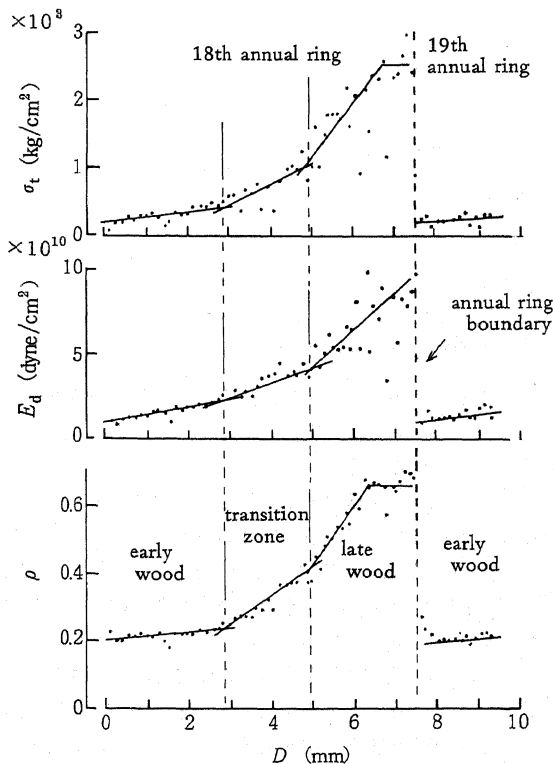


Fig. 3 Variation of tensile strength (σ_t), dynamic Young's modulus (E_d) and specific gravity (ρ) in radial direction of 18th annual ring and early wood in 19th annual ring.
D: distance from annual ring boundary.

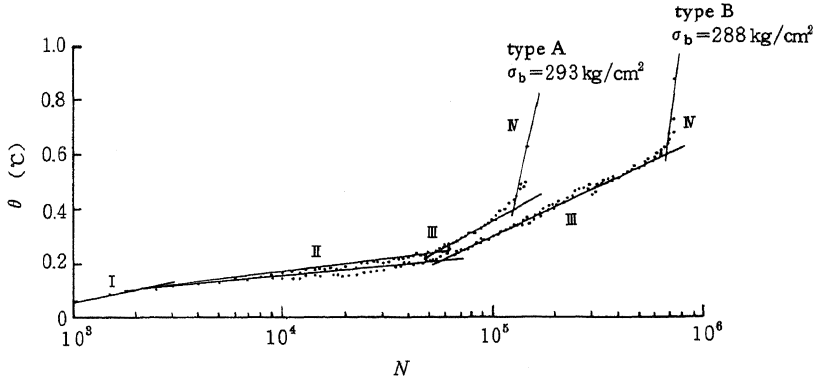


Fig. 4 Temperature-rise curve of type A and type B caused by fatigue.
 N : number of cycles to rupture. θ : temperature-rise.
 σ_b : amplitude of the alternative bending stress.

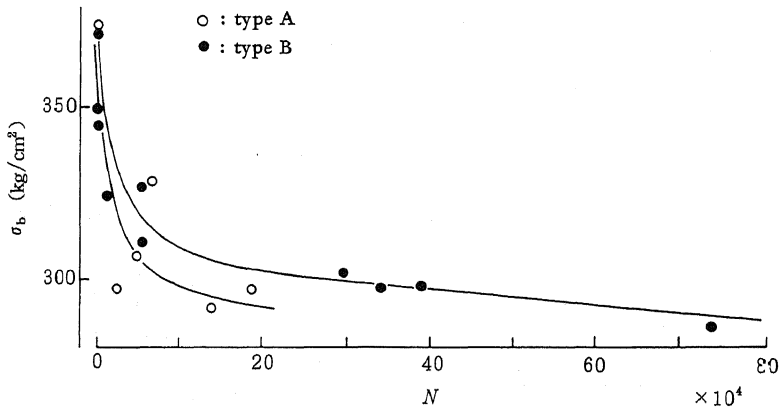


Fig. 5 $S-N$ curve of type A and type B.
 N : number of cycles to rupture.
 σ_b : amplitude of the alternative bending stress.

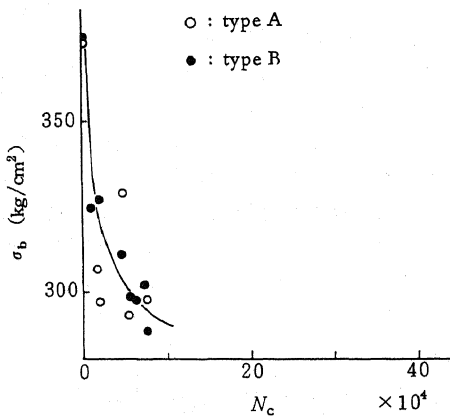


Fig. 6 Crack curve of type A and type B.
 N_c : number of cycles at crack initiation.
 σ_b : amplitude of the alternative bending stress.

もに早材部の後半に相当し、強度およびその材質指標が同じであり、したがって、両者のクラック曲線に差がみられないものと考えられる。

次に、クラック伝ば曲線を Fig. 7 に示す。最初のき裂が切欠部に発生してから試験片が破断するまでの繰返し数 ($N - N_c$) と繰返し応力との関係をクラック伝ば曲線とする。図から明らかなように、高い応力では両タイプの間には差が認められないが、応力が低くなるにしたがって明瞭に二つの曲線を区別することができる。つまり、低応力でき裂が伝ばする場合、タイプ B の方が疲れ破壊までにより多くの繰返し数を必要としている。したがって、 $S-N$ 曲線のタイプ A とタイプ B の差は、クラック伝ばの段階における両タイプの差と考えることができる。

ところで、クラック曲線は両タイプとも同じであるから、き裂発生までの繰返し数の何倍の繰返し数をき裂伝ばに要したかを両タイプについて比較してみると、Fig.

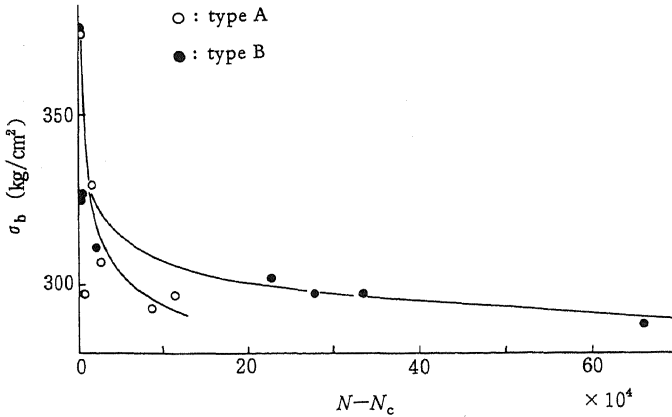


Fig. 7 Crack propagation curve of type A and type B.
 $N-N_c$: number of cycles of crack propagation after crack initiation (N_c).
 σ_b : amplitude of the alternative bending stress.

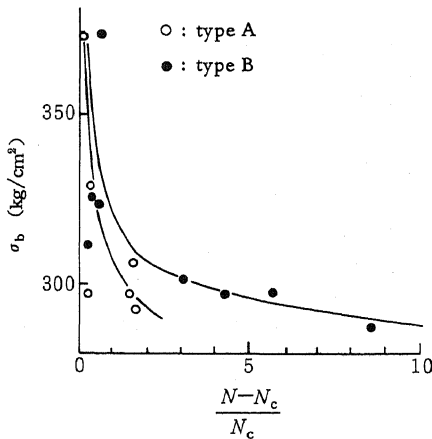


Fig. 8 Relation between the alternative bending stress (σ_b) and cycle ratio ($\frac{N-N_c}{N_c}$) of crack propagation ($N-N_c$) to crack initiation (N_c).

8に示されるように、高い応力では両タイプに差がみられないが、応力が低くなると両タイプの差が明瞭に出てくる。つまり、低い応力では、繰返し数の比率はタイプAでは2以下で小さいのに対し、タイプBでは3~9と大きい。

以上のように、タイプAとタイプBとではき裂の伝ばに差があることが明らかになった。そこで、次にき裂伝ばの挙動について調べることにする。

3.2 き裂伝ばの挙動

タイプAとタイプBの試験片中央部の表面に疲れき裂が拡大する様子の一例を、それぞれFig.9に示す。タイ

プAでは切欠で発生したき裂は、年輪の境界を横切りそのまま反対側に達している。タイプBでは切欠で発生したき裂は年輪の境界で停滞したまま、かなりの繰返し数の後に、第18年輪の中間部(Fig.9(b)では繰返し数 21.7×10^4 回の個所)で新たなき裂が発生し両側へ拡大している。

き裂の長さの変化を調べた結果をFig.10とFig.11に示す。き裂の長さは試験片の幅方向の変化のみで表わしており、切欠の先端が $l=0$ であり、反対側の端が $l=7.5\text{mm}$ である。横軸は応力繰返し数であり、右へ進むほど疲れが進行することになる。また、それぞれの図の右側にFig.3で明らかにした三つの年輪内区分を示している。タイプAの場合、Fig.10に明らかなように三つの段階に分けることができる。つまり、 $l=2\sim 3\text{mm}$ まではき裂が急速に伝ばするが、それ以後、 $l=3\sim 5\text{mm}$ の間はゆっくり伝ばしている。この部分は移行部分から晩材部までに相当する。最後に、年輪の境界が近づくとき裂が急速に伝ばし、年輪の境界を横断し反対側に達する。

他方、タイプBの場合がFig.11である。切欠で発生したき裂は年輪の境界にすぐに達するが、その後は長い間この境界で停滞する。応力が高い場合はこの状態が寿

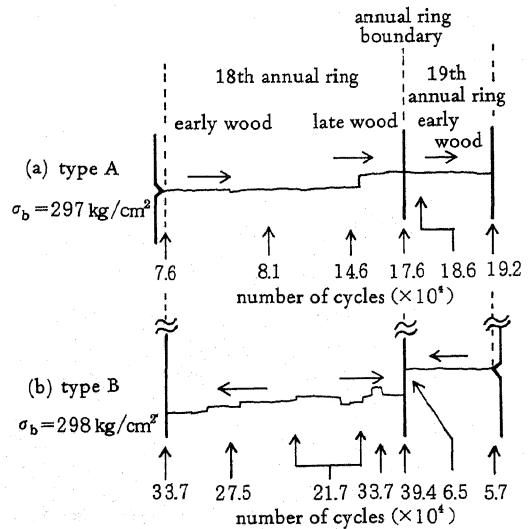


Fig. 9 Examples of crack propagation of type A and type B.
 σ_b : amplitude of the alternative bending stress.

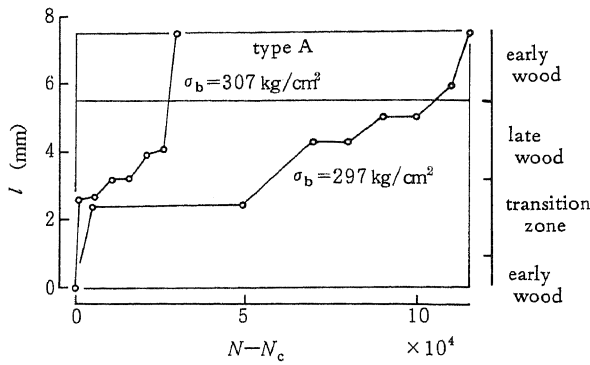


Fig. 10 Behaviors of crack propagation across the specimen of type A.

$N-N_c$: number of cycles of crack propagation after crack initiation (N_c).
 l : distance from the notch tip.
 σ_b : amplitude of the alternative bending stress.

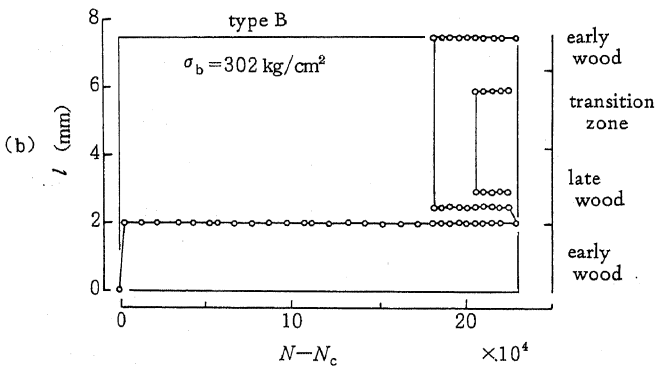
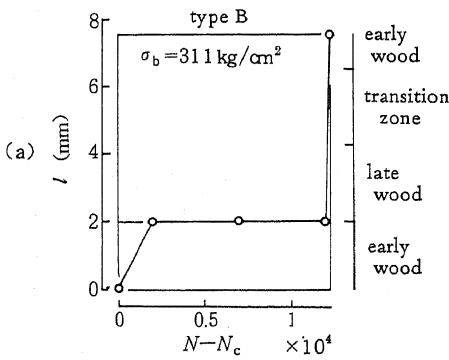
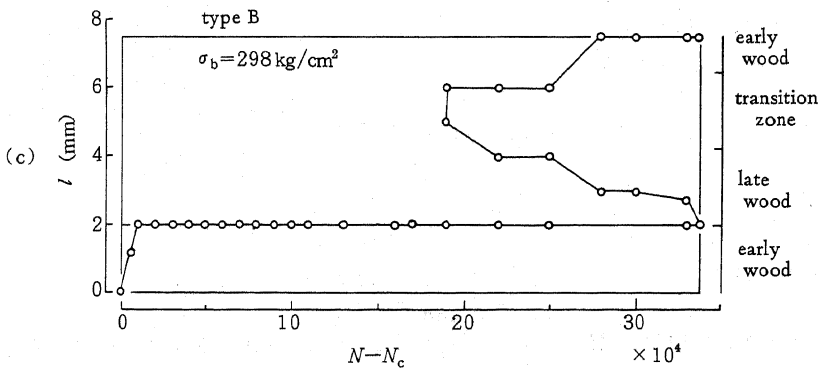


Fig. 11 Behaviors of crack propagation across the specimen of type B.

$N-N_c$: number of cycles of crack propagation after crack initiation (N_c).

l : distance from the notch tip.
 σ_b : amplitude of the alternative bending stress.



命の末期まで続いて、破壊寸前になって急に進行し反対側に達して破断する(a)。しかし、応力が低くなるにつれて、(b)、(c)の例が多くなる。切欠で発生したき裂はすぐに年輪の境界に達するが、その後長期間停滞が続く。後半になって、第18年輪内の2、3個所に1~3mmの新しいき裂が発生する。これらが両側へ伝ばするか、あるいは相互に合体する。最後に、このき裂の一方が試験片内の切欠と反対側の端に達した後に、年輪の境界に達し、第19年輪の切欠から発生したき裂と年輪の境界で合体し破断する。

タイプAの場合、Fig.10に示すように、き裂伝ばの大部分を占めているゆるやかな傾斜をしている部分が、1年輪の中では移行部分の終りから晩材部の中間ないしは終りの方に相当している。き裂の伝ばがゆるやかなのは、Fig.3に示すように移行部分の後半から晩材部において、強度およびその材質指標の値が高い値をしているためと思われる。その後、年輪境界では、これらの数値が高いところから急に低いところへと進むので、き裂先

端が大きな応力集中源となって、き裂は容易に急速に進むものと考えられる。また、年輪の境界に近づくとき裂が急速に伝ばしているのは、境界を経て19年輪目の早材部の強度およびその材質指標が、第18年輪晩材部のそれらと比べて相対的に非常に低いことと関係していると思われる。

一方、タイプBの場合、第19年輪早材部の切欠で発生したき裂は、年輪の境界で停滞する。これは、強度およびその材質指標が最も低いところから急に最も高いところへと不連続的に高くなるため、このため、き裂先端は有効な応力集中源となりえず、き裂の伝ばは不可能であると思われる。

次に、年輪の境界におけるき裂の形をみると、タイプAの場合、き裂は年輪の境界に対し垂直で直線的に横断する。一例をFig.12(a)に示す。これに対して、タイプBでは、第19年輪の切欠で発生、伝ばし年輪境界で停滞しているき裂と、その後、第18年輪内で発生、伝ばし年輪の境界に達したき裂とが、年輪の境界面で合体す

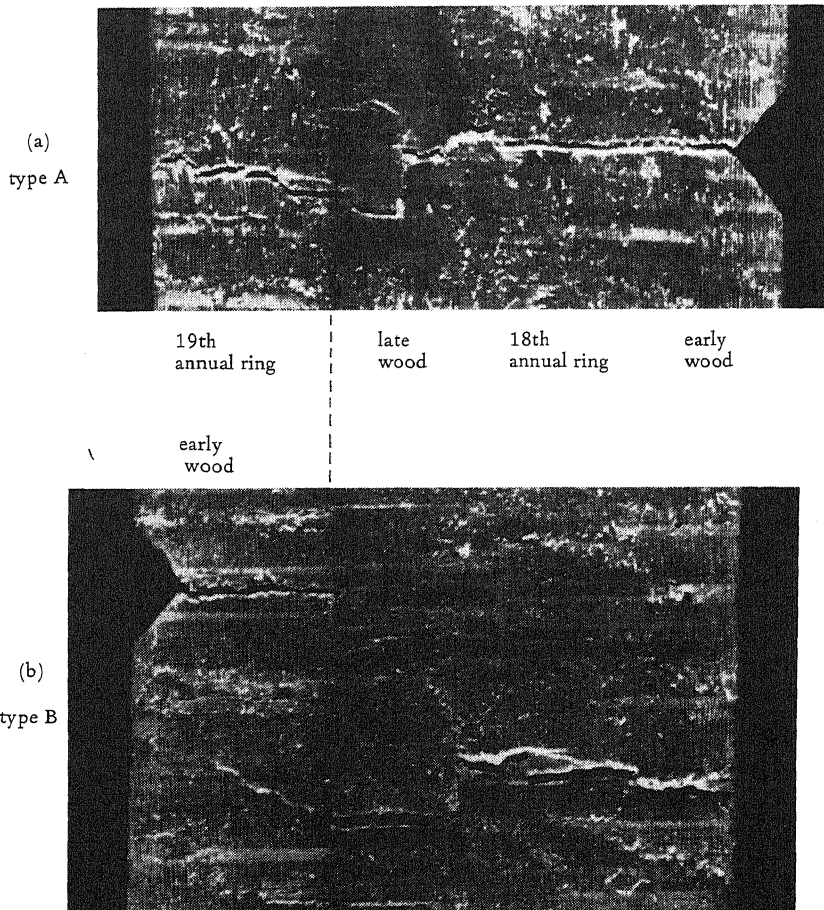


Fig. 12 Photographs of crack observed on type A and type B.

るものと思われる。そのため、タイプBのき裂は年輪の境界で屈折した形を示す。その例がFig. 12 (b)である。

3.3 ヤング率の比とき裂の伝ば速度

今、年輪の境界をヤング率 E が異なる二つの材料(E_1 , E_2)の境界と考え、き裂がこの境界に垂直に進入した場合、き裂の伝ば方向に対して境界の手前の材料のヤング率を E_1 、境界の向う側のヤング率を E_2 とする。つまり、 $E_2/E_1=1$ のときは同一材料のときであり、 $E_2/E_1<1$ のときはヤング率が高い材料から低い材料へき裂が進み、これはタイプAに相当する。逆に $E_2/E_1>1$ のときはヤング率が低い材料から高い材料へき裂が進み、これはタイプBに相当する。Fig. 3より第19年輪早材部初期の平均ヤング率を 1.5×10^{10} dyne/cm²、第18年輪晩材部末期の平均ヤング率を 8.5×10^{10} dyne/cm²とすると、タイプAは $E_2/E_1=0.17$ 、タイプBが $E_2/E_1=5.6$ である。そして、この E_2/E_1 の大小と境界におけるき裂伝ばの難易を比較した。つまり、タイプAでは境界におけるき裂の伝ばは非常に容易であり、この時の E_2/E_1 は0.17であり、タイプBでは境界におけるき裂の伝ばは停滞しており非常に困難であり、この時の E_2/E_1 は5.6である。

一方、ヤング率の異なる異種金属材料を接合した報告⁸⁾では、 $E_2/E_1=0.5$ のときは境界におけるき裂伝ばの速さは $E_2/E_1=1$ のときの約1.5倍であり、逆に $E_2/E_1=2$ のときは $E_2/E_1=1$ のときの約半分である。

この結果を本報告と合わせて考えると、 E_2/E_1 を小さい値から順に0.17, 0.5, 1, 2, 5.6と並べると、き裂の伝ばはそれぞれ“非常に容易”, “ $E_2/E_1=1$ のときの約1.5倍”, “普通”, “ $E_2/E_1=1$ のときの約半分”, “非常に困難”と対応している。この報告⁸⁾の実験方法は板の面内曲げであり、本実験と負荷方法が異なっているの

で同じレベルで比較するのは無理であるが、いずれの場合もき裂の伝ば方向が境界に垂直であるので、この点で比較材料になると思われる。

このように、境界をはさむ材料のヤング率の比とき裂の伝ば速度との間には対応関係が存在すると予想される。今後、早材と晩材の比が異なる多くの樹種について検討を進めたい。

4. ま と め

曲げ疲れ試験において、疲れき裂が年輪境界に直角に伝ばする際、き裂の伝ば方向を木表方向と木裏方向に分けて1年輪内のき裂伝ばの挙動を観察し、疲れき裂の伝ばに与える年輪境界の影響を検討し、以下の結果を得た。

(1) 疲れき裂が木表方向へ走る場合よりも木裏方向へ走る場合の方が、き裂伝ばに多くの繰返し数を要し、この二つのタイプはクラック伝ば曲線、S-N曲線において明確に区別される。

(2) クラック伝ば曲線のちがいは、年輪の境界における両タイプのき裂挙動のちがいであり、年輪の境界にまで伝ばしたき裂は木表方向では加速的に伝ばするが、木裏方向では年輪の境界にき裂が到達したとき、き裂は長期間停滞する。

(3) 年輪の境界におけるき裂の伝ばし易さを、 E_2/E_1 でまとめられることが予想される。

文 献

- 1) 今山延洋, 松本 勲: 木材誌, **20**, 53 (1974)
- 2) 横堀武夫: “材料強度学”, 技報堂, 第8版, P. 161 (1966)
- 3) 大路清嗣, 他4名: 「材料」, **28**, 67 (1979)