

牛骨の疲労過程におけるき裂の発生と進展特性*

石原 外美*¹, 五嶋 孝仁*¹, 中村 豊*²Crack Initiation and Crack Growth Behavior
during Fatigue Process of the Bovine Bone

Sotomi ISHIHARA, Takahito GOSHIMA and Yutaka NAKAMURA

In order to clarify the fatigue process of bone, rotating bending fatigue tests and creep tests were conducted using bovine femoral compact bone in laboratory air and Ringer's solution. The results obtained are summarized as follows. (1) Fatigue lives in laboratory air and Ringer's solution showed little difference. (2) At high stress levels above 100 MPa, creep rupture time and fatigue failure time are nearly the same, but at low stress levels below 100 MPa, the latter is shorter than the former. This indicates that fatigue damage accumulation controls the fatigue fracture process at low stress levels. (3) During the fatigue process of bovine bone, several microcracks were initiated and propagated accompanied by crack coalescences among them. The crack path was zigzagged. (4) The relationship between the ratio of crack initiation cycles N_i to fatigue cycles N_f and stress amplitude was investigated. The ratio N_i/N_f decreased with a decrease of the stress amplitude region. (5) There is a linear relationship between crack growth rate da/dN and stress intensity factor ΔK on the log-log plot, and the Paris equation $da/dN = C\Delta K^m$ holds, where C and m are $C = 5.25 \times 10^{-9}$ and $m = 1.49$, respectively.

Key Words: Biomechanics, Bovine Bone, Fatigue, Crack Propagation, Crack Initiation, Stress Intensity Factor, Creep

1. 緒 言

近年スポーツ医学等の分野において、過度の連続的な運動による筋肉や骨などの生体を構成する部位の各種損傷が問題になっている。このような損傷を予防する方法を確立するためには、これらの破壊過程を明確にする必要がある。また、最近では生物のもつ優れた機能を機械や構造物の設計に取り入れるため、生体材料の特性を調べる研究も活発に行われてきている。

骨の破壊特性に関する研究は、これまで数多く行われている。たとえば、Piekariski⁽¹⁾の骨の破壊における組織の影響を検討した研究、Bonfieldら⁽²⁾の象牙の破壊における変形を扱った研究、Bonfieldら⁽³⁾の骨の破壊靱性を調査した研究が行われてきている。しかしながら、骨の疲労破壊に関する研究はあまり行われておらず、著者らの知る限りでは、Carterら⁽⁴⁾によるち密骨の疲労寿命に及ぼす応力振幅、温度ならびに骨密度の影響に関する研究を見るのみである。しかし、Carterらの研究においても、骨の疲労進行過程は明確にされておらず、疲労過程のどの時点でき裂が発生し、

それが進行するかは不明のままである。

そこで、本研究では牛のち密骨を供試材として回転曲げ疲労実験を行い、疲労過程の連続観察を通じて骨の疲労過程におけるき裂の発生ならびに進展特性を明らかにすることを目的とした。さらに、引張クリープ実験および静曲げ試験もあわせて行い、これらの破壊過程と疲労における破壊過程との差異についても検討した。

2. 試験片および実験方法

2・1 試験片 供試材は市販の牛の大たい骨のち密質を使用した。購入時、冷凍状態にある牛骨を図1(a)に示すように骨端を切り落とした後、図1(b)に示すように平行部断面を3分割し骨髄を除去した。分割した骨片は、表面に付着している肉片などを取り除いた後、ウスなどを使って洗浄した。試験片長手方向が骨の長手方向と一致するように、3分割した骨片よりそれぞれ1個づつ試験片を採取した。その後機械加工により図2に示す試験片形状に仕上げた。この際、試験片最小部断面が牛骨の大たい骨の中央部に近くなるように加工を行った。試験片表面の仕上げは、エメリー紙(#1500~#2000)で表面研磨後、さらにダイヤモンドペーストによる仕上げ研磨を行った。このよう

* 原稿受付 平成4年5月21日。

*¹ 正員、富山大学工学部 (〒930 富山市五福 3190)。*² 富山大学工学部学生。

にして作成した試験片を実験開始まで一定温度 (278 K) に保ったリンゲル液中に保存した。

図3はこのようにして得た試験片横断面の組織と縦断面の組織を撮影したものである。

2・2 実験方法 用いた疲労試験機は自作の片持ち回転曲げ疲労試験機であり、応力繰返し速度は30 Hzである。疲労試験は、大気中ならびにリンゲル液中の両環境にて、応力比-1の完全両振り試験を行った。大気中疲労試験は室温下で相対湿度60%から80%のもとで行った。また、疲労試験との比較のために引張クリープ実験ならびに静曲げ実験もあわせて行った。

疲労過程の試験片最小断面における表面連続観察はレプリカ法を用い、すべてシングル液で行った。レプリカの採取は、一定時間ごとに試験機を停止させ、荷重をかけない状態で行った。得られたレプリカを光学顕微鏡にて約100倍で観察し、適宜写真撮影することにより表面組織の変化を追跡した。

3. 実験結果

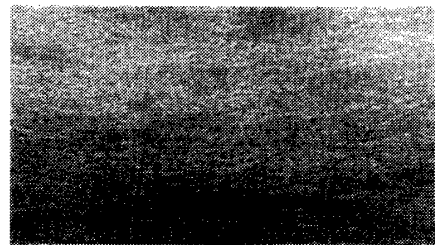
3・1 S-N線図およびS-T線図 図4は牛の大たい骨の大気中ならびにリンゲル液中におけるS-N線図を片対数グラフ上にプロットしたものである。図よりわかるように、40 MPaから80 MPaの範囲で一定の応力振幅のもとで行われた大気中とリンゲル液中の疲労寿命には明確な差異が認められない。また、骨の疲労寿命は著しくばらつくことがその特徴であることがわかる。破壊繰返し数が 10^7 における応力振幅は25~30 MPaであるが、この応力が疲労限度になるのか否かに関しては、本実験の範囲内では明確な結論は

下せない。D. R. Carterら⁽⁴⁾は繰返し速度2 Hz, 引張圧縮条件下で、人の大たい骨の疲労試験を行っている。その結果を図4中に破線で示す。Carterら⁽⁴⁾の実験と本実験とは条件が異なるため両結果の厳密な比較は困難であるが、 N_f が 10^4 から 10^6 の範囲の人骨のS-N曲線と大きな差異は認められない。

疲労過程では、疲労損傷に加えてクリープ損傷も重畳して現われることが予想されたので、比較のためクリープ実験もあわせて行った。図5は縦軸に最大応力 σ_{max} , 横軸に破壊までの時間 T_f をとり、疲労実験結果ならびにクリープ試験結果を整理したものである。図中のハッチングは疲労とクリープの寿命の差異を明確に示すためにほどこしたものであり、その幅は静引張



(a) 縦断面



(b) 横断面

200 μ m

図3 骨試験片の組織

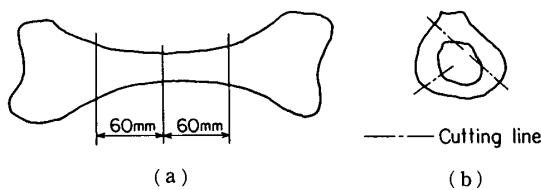


図1 牛の大たい骨

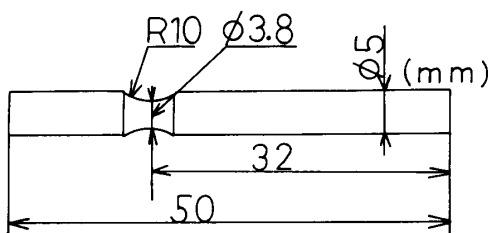


図2 試験片の形状および寸法

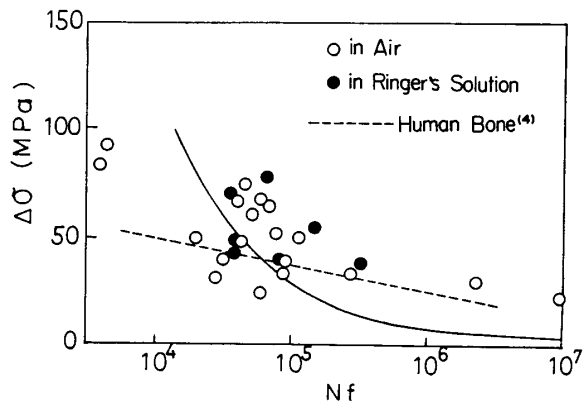


図4 $\Delta\sigma-N_f$ 線図

試験結果のばらつきをもとに、またその傾きは実験結果に適合するように定めた。図より 120 MPa から 140 MPa の比較的高応力域では、クリープ破壊時間と疲労破壊時間はほぼ等しいけれども、100 MPa 以下の低応力域では、疲労破壊時間はクリープ破壊時間よりも大きく減少する傾向が認められる。Lafferty ら⁽⁶⁾は、骨の変動荷重下の破壊過程では、クリープ損傷による破壊が支配的であることを報告しているが、図 5 の実験結果から本研究の牛骨の破壊過程では、クリープ損傷の蓄積による破壊過程に加えて疲労損傷の蓄積による破壊過程を考慮する必要があるを示唆している。すなわち、比較的高応力域の破壊過程では、クリープ損傷が支配的であるのに対し、低応力域では疲労損傷のほうが破壊過程を支配する大きな因子であることがわかる。このような傾向は Carter ら⁽⁶⁾によっても報告されている。以上の傾向は曲げと引張りという負荷様式の異なる試験結果の比較で観察されたものである。もし、回転曲げ疲労試験ではなく引張圧縮疲労試験を行ったと仮定した場合、試験片の危険面積が広くなるため $S-N$ 曲線はやや低寿命側にシフトすると予想されるが、損傷に関する上記観察結果は、引張圧縮疲労試験と引張クリープ試験結果の比較においても同様に得られるものと推察される。

次節以降では、このような微視的疲労損傷が疲労過程でどのように発生、成長するのかを疲労過程の連続観察から調査し、その実体を明らかにする。

3・2 疲労過程の連続観察 図 6 は応力振幅 $\Delta\sigma = 102.3$ MPa, 破壊繰返し数 $N_f = 10\,007$ で破壊した試験片の疲労過程の連続観察結果である。この応力は図 5 において疲労寿命とクリープ寿命がほぼ一致する応力域に属しており、クリープ損傷の特性の現れやすい領域であると予想される。図の 6(b) $N = 5\,010$ の時点で約 $510\ \mu\text{m}$ 程度のき裂が試験片表面の欠陥部から発生し、試験片軸と直交する方向に徐々に進展する。その進展形態は直線的ではなく、骨組織を選択的に縫う

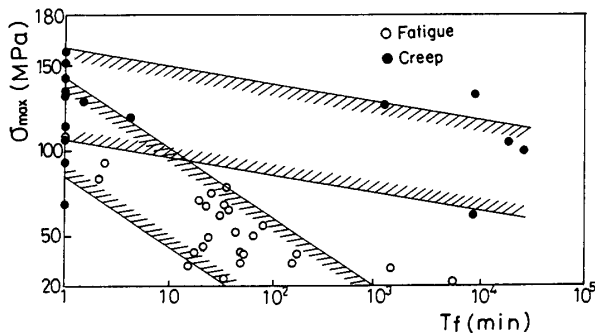


図 5 $\sigma_{\max}-T_f$ 線図

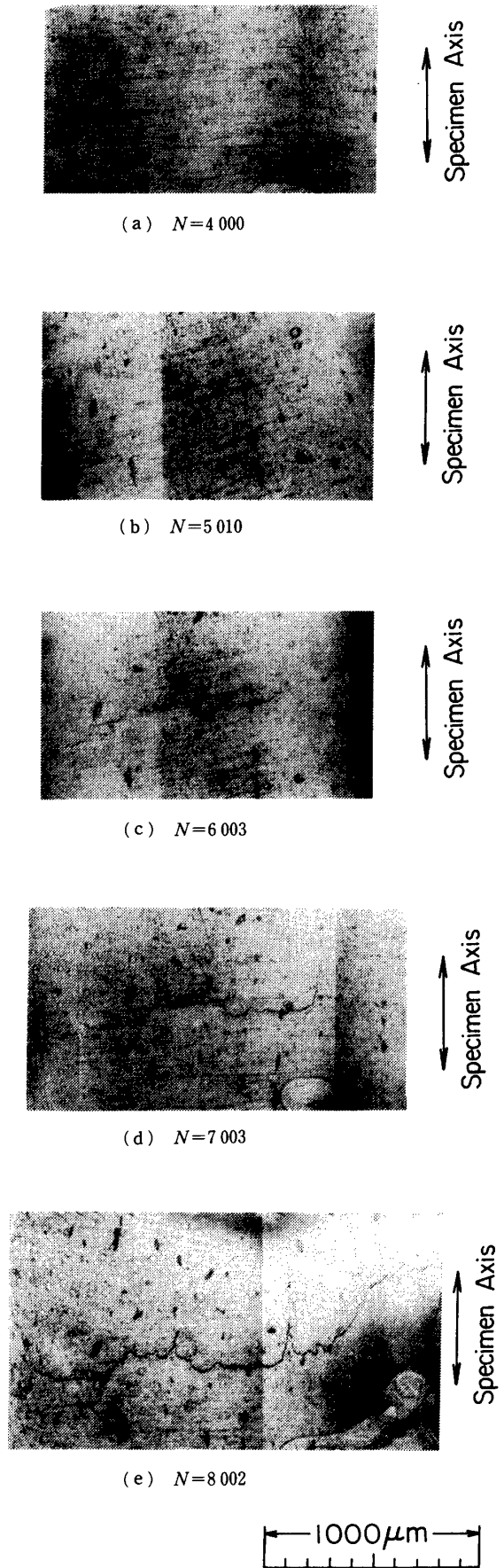


図 6 疲労過程の連続観察 ($\Delta\sigma = 102.3$ MPa, $N_f = 10\,007$)

ように進展する結果、ジグザグの形態をとることがわかる。全寿命に対するき裂発生までの期間は50%程度であり、残り50%がき裂進展期間である。このき裂進展期間の大半は、負荷応力とほぼ90°をなす方向に進展することがわかる。

図7は $\Delta\sigma=83.2$ MPa, $N_f=96\ 011$ で破壊した試験片の疲労過程の連続観察結果を示したものである。この応力域は、図5よりクリープ損傷よりは疲労損傷の現れやすい領域に対応している。図7(b)の $N=54\ 019$ の時点で約400 μm 程度のき裂が発生、進展している。このき裂は初期には試験片軸と直角の方向に進展するが、図7(c)の $N=60\ 014$ の時点でほかのき裂と合体して長いき裂となり、それ以後は試験片軸に対して45°の方向にジグザグ状に進展している。

図8は $\Delta\sigma=61.7$ MPa, $N_f=40\ 013$ で破壊した試験片の疲労過程の連続観察結果を示したものである。この応力域は、さらに疲労損傷の現れやすい領域に対応している。図8(b)の $N=12\ 012$ の時点で約130 μm 程度の複数個のき裂の発生が認められる。このき裂はほかのき裂との合体を繰り返しながら試験片軸とほぼ直角方向に進展し最終破壊に至っている。またき裂進展

形態はき裂進展抵抗の高い骨組織を避け、き裂進展抵抗の低い骨組織を選択しながらジグザグ状に進展することがその特徴である。このような破壊過程は図7の $\Delta\sigma=83.2$ MPaの結果と同様であるが、 $\Delta\sigma=83.2$ MPaの結果に比較して複数き裂の合体による破壊がより明確に表れている。

以上の実験結果より、骨の疲労過程におけるき裂進展の特徴は、き裂進展過程の組織選択性(ジグザグ進展)と、複数個のき裂の合体過程であることが結論される。このようなき裂のジグザグの進展様式は、き裂が進展抵抗の高いハバース層板などの層板組織を避け、進展抵抗の低い層板組織の界面を選択しながら進展するためと考えられるが、本研究ではこの点に関する検討を十分行っておらず、今後の研究課題としたい。

3・3 静曲げ試験における破壊の微視的様相 前節の疲労による破壊過程の特徴を明確にするために、静曲げ試験の破壊過程の連続観察を行い、その結果を図9に示す。図は破断応力 $\sigma_B=265.7$ MPaで破断した試験片の観察結果である。実験は一定時間(5分)荷重保持し、その都度荷重を増加させながら試験片の最

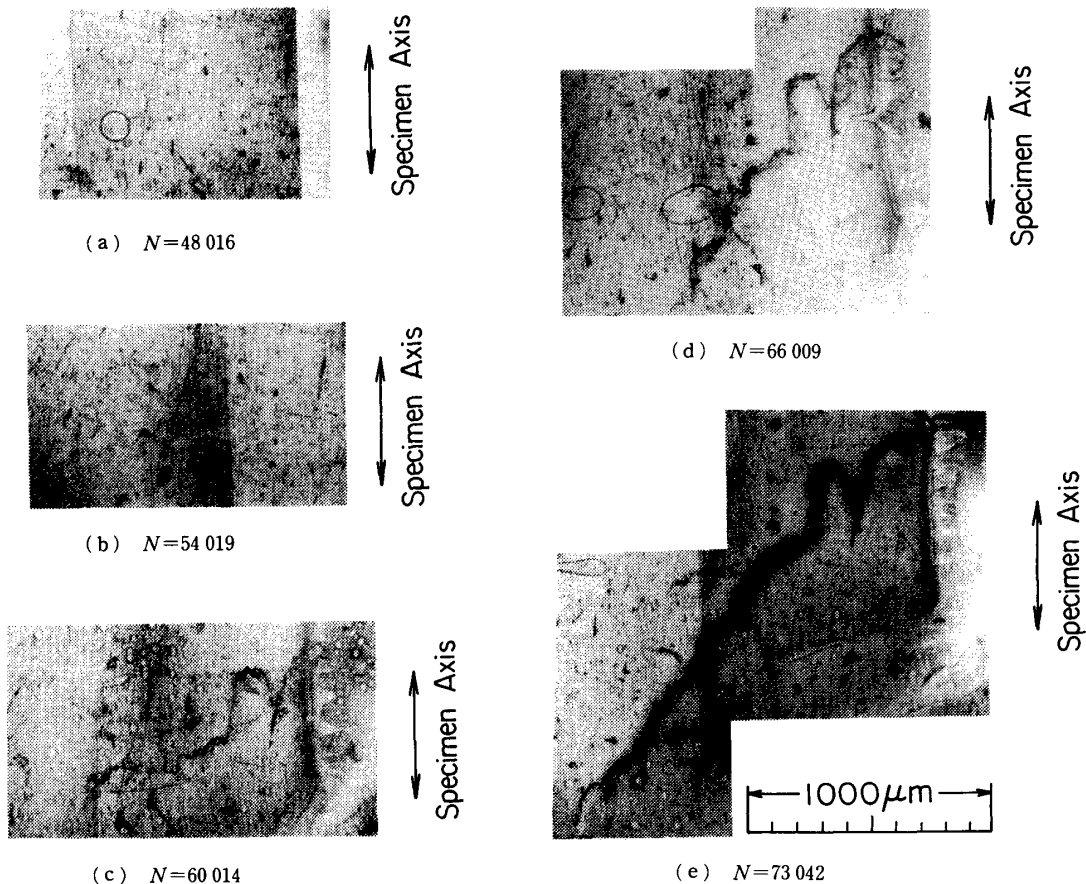


図7 疲労過程の連続観察($\Delta\sigma=83.2$ MPa, $N_f=96\ 011$)

終破壊まで連続的に観察したものである。これらの図よりわかるように、 $\sigma=182.3$ MPaの荷重保持の時点で、試験片表面に微小なき裂が生じ始めている。このき裂は、その後の応力の増加にもかかわらず進展しな

い。しかし、 $\sigma=265.7$ MPaの時点ではほかの箇所から発生したほかのき裂と合体して不安定的に進展し、試験片を破壊に導くことがわかる。このような破壊過程の特徴は、図6の比較的高応力域の疲労破壊過程と類

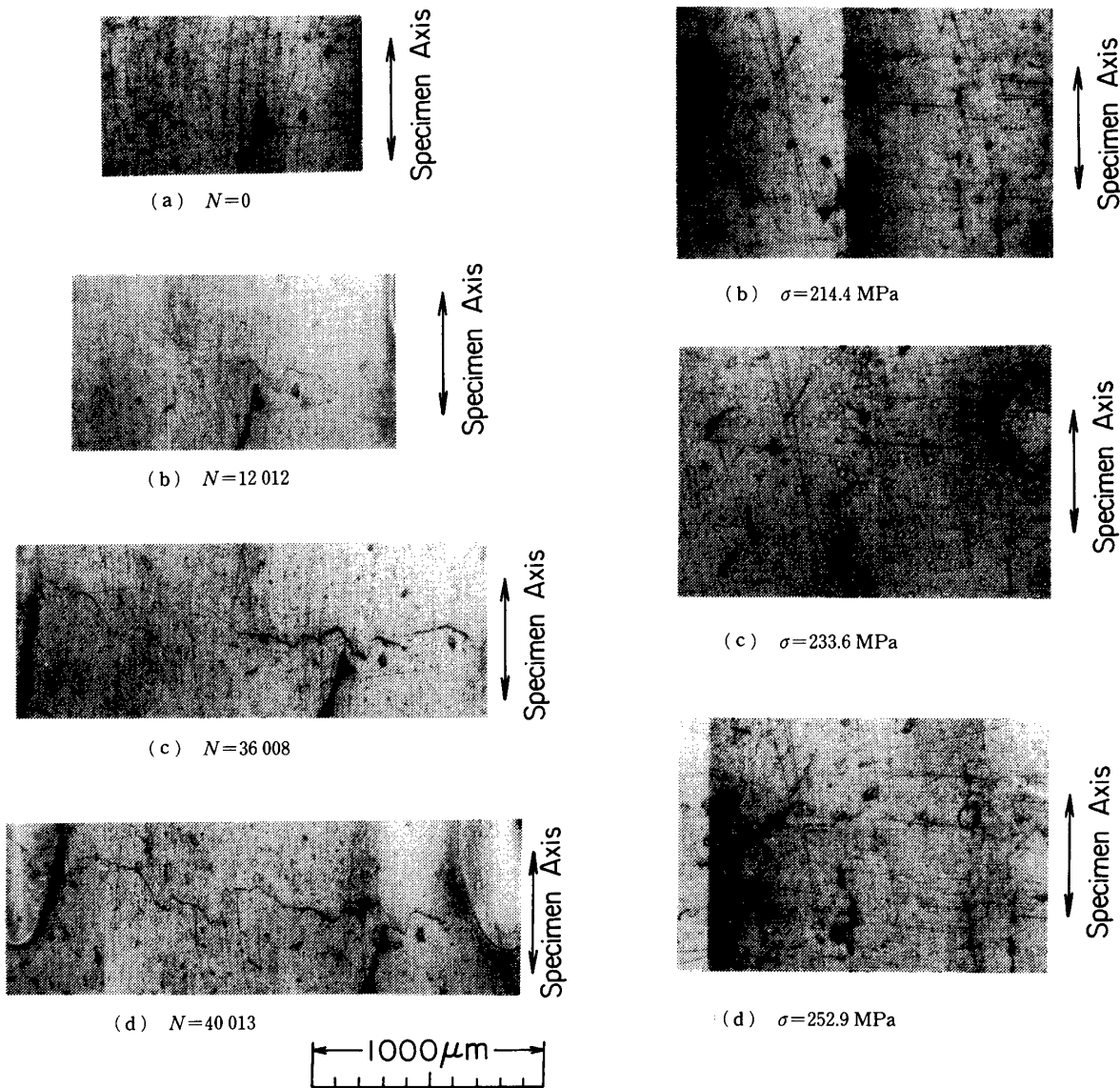


図 8 疲労過程の連続観察 ($\Delta\sigma=61.7$ MPa, $N_f=40\ 013$)

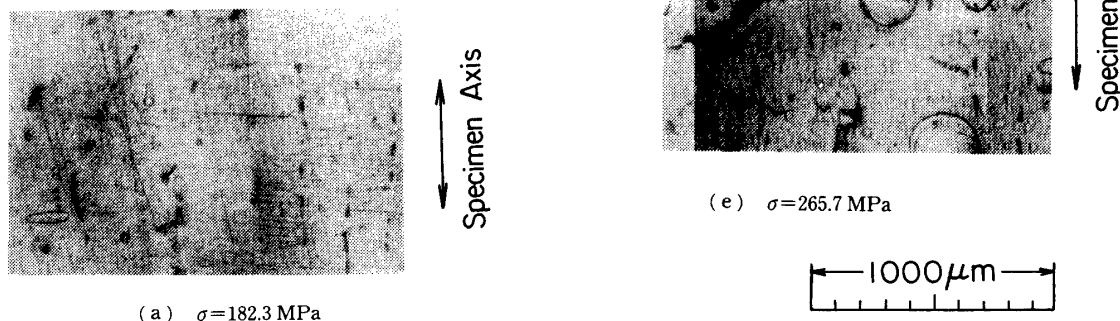


図 9 静曲げ試験における破壊過程

している。すなわち、明確な安定的き裂進展過程を伴わずに、き裂発生から不安定なき裂進展過程を経て最終破壊に至るといった破壊過程の特徴を示しているものと思われる。

4. 疲労過程における微視き裂発生の応力依存性

図10に応力振幅 $\Delta\sigma$ と、疲労寿命に対するき裂発生寿命の比 N_i/N_f の関係を示す。図10より、平均的には全寿命の約40%前後でき裂が発生することがわかる。しかし、疲労損傷が支配的な低応力域では、疲労寿命に対するき裂発生寿命の比は低下し、疲労寿命に対してき裂進展過程が重要になることがうかがわれる。一方、クリープ損傷の支配的な高応力域では低応力域とは逆に疲労寿命に対してき裂発生過程が重要になることが示唆される。図は省くが、クリープ破壊過程においても、寿命の後半になるまでき裂が発生しないことを確認している。

5. 疲労微視き裂の進展挙動

図11は疲労過程の連続観察より得られたき裂の進展曲線をすべての応力振幅に対してまとめて示したものである。ただしき裂長さ $2a$ は試験片軸方向に直角な方向に投影した長さをとっている。この進展曲線より、き裂進展速度 da/dN と応力拡大係数幅 $\Delta K (= \Delta\sigma\sqrt{\pi a})$ の関係を調査し、両対数グラフ上に示した結果を図12に示す。図12よりわかるように、40 MPa から100 MPaの広範囲な応力振幅で得られた da/dN と ΔK の関係は、両対数グラフ上でほぼ一本の直線で近似でき、金属材料中の疲労き裂進展現象と同様に次式のパリズ則が成立することがわかる。

$$da/dN = C\Delta K^m \dots\dots\dots (1)$$

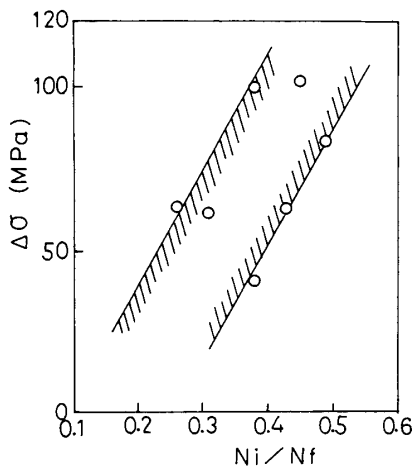


図10 $\Delta\sigma-N_i/N_f$ 線図

ここで、 C, m は材料定数であり、図2中にこれらの値も示した。

次に、式(1)を積分して応力振幅とき裂進展寿命の関係性を求めてみる。ただし、初期き裂長さを $300 \mu\text{m}$ 、臨界き裂長さを $1300 \mu\text{m}$ として計算した。その結果を図4中に実線で示してある。実験データ数が多く、かつ連続観察を主として行った $N_f = 2 \times 10^4 \sim 10^5$ 、応力振幅 $40 \sim 70 \text{ MPa}$ の領域に限定すると、計算結果は、き裂発生寿命を無視したものではあるが、実験結果とほぼ一致している。上記領域以外のさらに高応力域および低応力域では、計算結果と実験結果は一致しなくなる傾向を示す。これは、き裂発生寿命を無視していること、高応力域における疲労以外のクリープによる損傷を考えていないこと、また不安定破壊をもたらす臨界き裂長さの応力振幅依存性を考慮していないことなどがその理由として考えられる。しかし、骨の疲労寿命のばらつきが大きいことを考慮すると、この領域

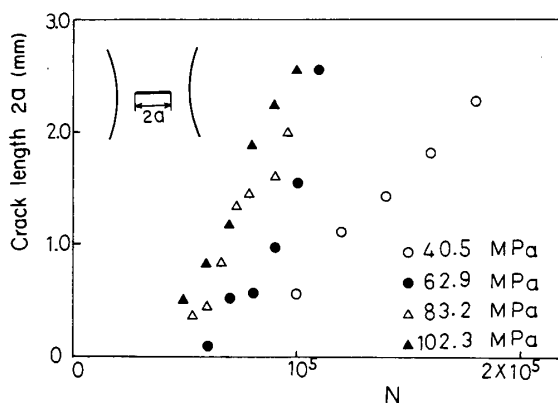


図11 き裂進展曲線

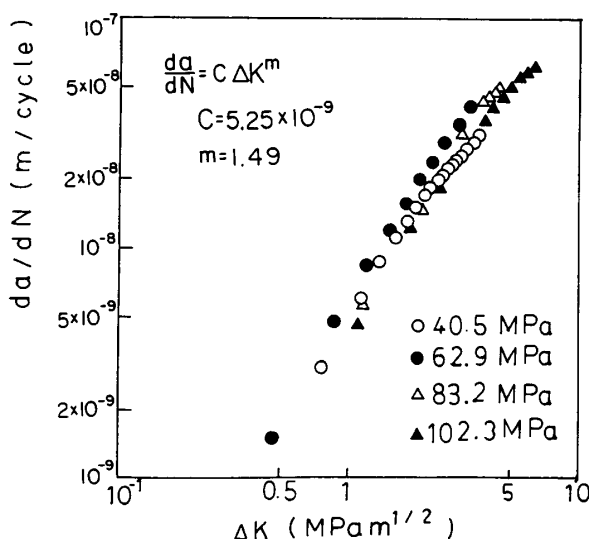


図12 $da/dN-\Delta K$ 線図

における両結果の比較にはもう少しデータの補充を行う必要があると考えられる。なお、本研究結果は応力繰返し速度 30 Hz に対するものであるが、以下に疲労特性に及ぼす繰返し速度の影響を、クリーブ効果（時間効果）とひずみ速度効果（ひずみ速度の増加による静的強度の増加する効果）にわけて検討する。まず、クリーブ効果に関しては、比較的高い応力域では疲労による損傷以外にクリーブによる損傷が重畳するため繰返し速度の低下に伴いクリーブによる被害が増し破壊寿命が減少すると思われるが、低応力域ではクリーブによる損傷はほとんどないと予想される。したがって比較的低い応力域で得られた本実験結果には、クリーブによる大きな影響はないと考えられる。次に、ひずみ速度効果に関しては、Lafferty⁽⁷⁾が疲労特性に及ぼす繰返し速度（ひずみ速度）の影響を検討しており、繰返し速度 f が 30 Hz 以下では疲労寿命は繰返し速度に依存しないが、30 Hz 以上では f の増加とともに疲労寿命が増加することを報告している。したがって、本実験の 30 Hz の繰返し速度においては、上記ひずみ速度の効果は大きくないと考えられる。以上のことより、本研究結果における繰返し速度効果の影響は大きくないと推察されるが、疲労特性に及ぼす繰返し速度の影響は複雑であると考えられ、また、生体においては 2 Hz 以下の低繰返し速度の負荷が作用するのが通常であることから、今後、低繰返し速度域での研究を行う必要があると考えられる。

6. 結 言

牛の大たい骨を用いて両振り片持ち回転曲げ疲労試験を行い、牛骨の疲労破壊過程を詳細に調査した。得られた結論を要約すれば以下のとおりである。

(1) 牛の大たい骨の大気中ならびにリンゲル液中における疲労実験において、40 MPa から 80 MPa の範囲で一定の応力振幅のもとで行われた大気中とリンゲル液中の疲労寿命には明確な差異は認められなかった。

(2) 120 MPa から 140 MPa の比較的高応力域では、クリーブ破壊時間と疲労破壊時間はほぼ等しいけれども、100 MPa 以下の低応力域では、疲労破壊時間はクリーブ破壊時間よりも著しく減少する。したがっ

て、牛骨の低応力域の疲労過程では、クリーブ損傷の蓄積による破壊過程よりも疲労損傷の蓄積による破壊過程が支配的であることが示唆された。

(3) 疲労過程の連続観察から、牛骨の疲労破壊過程では、発生した複数個の微視き裂は骨組織を選択しながらジグザグ状に進展し、合体を繰返しながら進展して、ある一定のき裂寸法に達すると不安定に破壊する傾向が観察された。一方、静的曲げ試験の破壊過程では、疲労破壊過程とは異なり、微視き裂の安定的進展過程が明確に認められず、発生していたき裂が破壊直前のある応力値で不安定に進展して破壊に至る傾向が観察された。

(4) 応力振幅 $\Delta\sigma$ と、疲労寿命に対するき裂発生寿命の比 N_i/N_f の関係を調査したところ、低応力振幅域ほど N_i/N_f の値は低下し、疲労寿命に対して相対的にき裂進展過程が重要になる。一方、高応力域では低応力域とは逆に相対的に疲労寿命に対してき裂発生過程が重要になる。

(5) 40 MPa から 100 MPa の応力振幅範囲で、き裂進展速度 da/dN と応力拡大係数幅 ΔK の関係を調査したところ、両者の間には両対数グラフ上でほぼ一本の直線関係が存在し、 $da/dN = C\Delta K^m$ なるパリス則が成立する。ここで、 C , m は材料定数であり、 $C = 5.25 \times 10^{-9}$, $m = 1.49$ の値を得た。

終わりに本研究の実施に当たりご協力いただいた当時富山大学工学部学生 梅基敦、野原正幹の両君に謝意を表する。

文 献

- (1) Piekarski, K., *J. Appl. Phys.*, **41**(1970), 215.
- (2) Bonefield, W. and Li, C. H., *J. Appl. Phys.*, **36**(1965), 3181.
- (3) Bonefield, W. and Datta, P. K., *J. Biomech.*, **9**(1976), 131.
- (4) Carter, D. R. and Caler, W. E., *Trans. ASME, J. Biomech. Eng.*, **105**(1983), 166.
- (5) Lafferty, J. F. and Raju, P. V. V., *Trans. ASME, J. Biomech. Eng.*, **101**(1979), 112.
- (6) Carter, D. R. and Caler, W. E., *J. Orthop. Res.*, **3**(1985), 84.
- (7) Lafferty, J. F., *Aviation, Space and Environmental Medicine*, (1978), 170.