

(昭和 36 年 11 月造船協会秋季講演会において講演)

## 造船用鋼材の高応力疲れ試験 (第 3 報)

正員 高橋 幸伯\*

Low Cycle Fatigue Tests of Ship Structural Steels, III

by Yukinori Takahashi, *Member*

## Summary

In the preceeding reports, the author have studied about the low-cycle fatigue properties of ship structural steel, by simple rotatory bending tests of round-notched specimens. Measuring the crack depth in its propagating stage by heat tinted method, the rate of crack growth was proved to be proportional to the current crack depth.

In this report, by some theoretical and experimental analysis, the proportional coefficient is explained to be a function of the dimensions of specimen, notch size, and testing procedures, and independent to the materials and applied stress values. Approximately it can be expressed by a power function of the stress amplitude, and the power index is identified by the slope of the  $\sigma$ - $N$  diagram of the specimen.

## 1 緒 言

造船用鋼材の高応力疲れの特性を明らかにするために、著者は半円形環状切欠試験片の回転曲げによる基礎的試験を行ない、高応力域における  $\sigma$ - $N$  関係、鋼材種別による差、疲れ寿命の統計的分布、熱着色法によつて求めたき裂の進行状況および破断面の模様などについて、第 1 報<sup>1)</sup>および第 2 報<sup>2)</sup>にその概要を報告した。今回は特にき裂の進行機構に焦点をしばつて、簡単な理論解析を試みてみた。

金属材料または構造物の疲れ試験においては、これまでは一般に、完全な破断に至らなくても、ある程度の疲れき裂が肉眼で検出できるようになればすなわち疲れ破壊をしたものと考え、き裂の発生条件によつて設計応力を規定するのがふつうであつた。最近、き裂の検出測定技術の進歩に伴つて、き裂は疲れ試験の比較的初期に発生すること(どの程度の寸法のものを initial crack とするかによつて異なるが)、疲れ限度付近の低応力の繰返してもき裂が発生しうることが明らかになつてきた。そこで、き裂の発生条件で使用応力を規定するという方法は一般には不適當であると考えられる。

構造物内部にたとえ疲れき裂を含んでいても、それが重大な損傷の原因となりうる程に拡大進行せず、所要の耐用期間の間使用に支障がなければよいという fail safe 設計の観点に立てば、材料経済、重量軽減の趣旨に添つた合理的な設計が可能となるわけである。

そこで最近、き裂の検出方法、検出したき裂の危険度の判定およびき裂を含む欠陥材の安全使用条件などの研究に大きい関心が持たれるようになってきた。また、このような実用面だけでなく、純学問的にも現象論的な整理や実験式による表現などからさらに一歩進めて、疲れ破壊の本質的機構を解明しようという目的からも、き裂の研究が盛んに行なわれるようになってきた。

こうして、疲れき裂の進行機構に関する実験や理論的解析が、各方面で種々試みられているが、いずれもまだ定性的論議の域を出ていないようで、日進月歩のめざましい開発をとげつつはあるが、まだ一般的結論を導くまでには至っていない。

これまでの実験は、き裂検出の容易さという点から大型の板状試験片について行なつたものが多く、材料の疲労特性を簡単に知るために実験室的試験で広く用いられている小型の円断面試験片についての研究はほとんど行なわれていない。こういう試験片は、き裂寸法の測定精度が悪いために敬遠されていたものであるが、著者は前

原稿受付 昭和 36 年 6 月 20 日

\* 東京大学生産技術研究所

報<sup>2)</sup>で紹介したように、熱着色法によつて疲れ試験途中のき裂寸法を相当正確に計測することができたので、この結果からき裂の進行機構について一つの解釈を試みた。先賢の研究成果をさらに高めるものではないが、礎石の一つとなれば幸いである。

## 2 Initial Crack

疲れ試験開始から破断までの寿命（繰返数 $N$ ）は、前報にも述べた通り次の4段階に分けて考えることができる。

- 第1期 ( $N_I$ ) 試験開始後加工硬化が完了するまで、
- 第2期 ( $N_{II}$ ) 加工硬化完了後き裂が発生するまで、
- 第3期 ( $N_{III}$ ) このき裂が徐々に進行拡大する期間、
- 第4期 ( $N_{IV}$ ) き裂が急激に進行して最終破断に至る期間。

$$N = N_I + N_{II} + N_{III} + N_{IV} \quad (1)$$

これを模型的に図示すれば Fig. 1 のようになる。高応力繰返しでは、 $N_I$  および  $N_{IV}$  はきわめて短いこと、 $N_{III}$  は一定応力振幅（公称応力）ではばらつきが少ないこと、切欠材では  $N_{III}$  が寿命の大部分を占めること、および寿命のばらつきは主として  $N_{II}$  のばらつきに起因すると思われることなどを述べた。

第2期と第3期の境界は微視的なき裂の発生したときであるが、微視的なき裂といえは常識的にはきわめて明確なようであるが、現段階ではまだその正確な定義も定まっておらず、研究者独自の判断に任せられている状態で、同じく「き裂」の語を用いて議論しながらその対象は研究者ごとに異なっている場合が多い<sup>3)</sup>。どの程度のものを initial crack と考えるかによつて、この第2期と第3期の境界が変ってくるわけである。各応力振幅におけるこのき裂発生時期を示すものとして、前報<sup>3)</sup> Fig. 6 に深さ 0.1 mm に対するき裂曲線を示したが、著者の実験結果から 0.05 および 0.03 mm のき裂曲線も併示すると Fig. 2 のようになる。さらに微細な 0.01 mm のき裂に対応するものは、著者の実験の精度から明示することはできないが、ほとんど垂直な直線に近くなり、応力振幅による差はきわめて少なくなるものと考えられる。

北川氏<sup>3)</sup>はこのように測定検出方法などによつて研究者ごとに異なるき裂の観念を調整する方法として、材料力学的にみて無視できないようなき裂、すなわち通常材料試験によつて得られる材料の強さまたは寿命に影響を与える程度のき裂を「有効き裂」と称して、議論の対象をこれに限定することを提唱している。この定義による最小有効き裂は深さ 0.01~0.02 mm 程度で、電子顕微鏡の微視的なき裂や、転位論で考えるような超微視的なき裂は含まれず、現在または近い将来の測定技術で検出可能な範囲のものとなり、しかも従来一般にき裂と呼んでいたものの範囲とも矛盾しない。

著者の行なつた試験では、任意回数の応力繰返しののちのき裂の有無を検査することはできるが、ある寸法の initial crack が発生した瞬間の繰返数を正確にとらえることはできない。しかし、initial crack を上記の最小有効き裂程度のものと定義しても、その発生をきわめて初期に属すると思われる 0.02~0.03 mm 程度のき裂をいくつかは検出することができた。

## 3 き裂の進行機構

簡単のために、Fig. 3 のように単純引張応力  $\sigma$  を受けている無限平板の中に小さなき裂がある場合を考える。

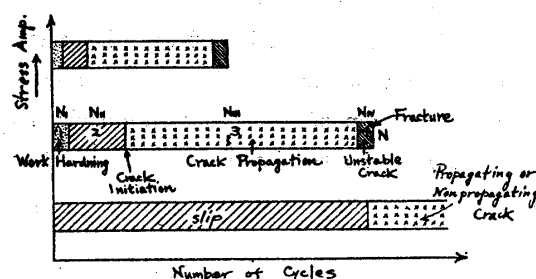


Fig. 1 Stages of fatigue life.

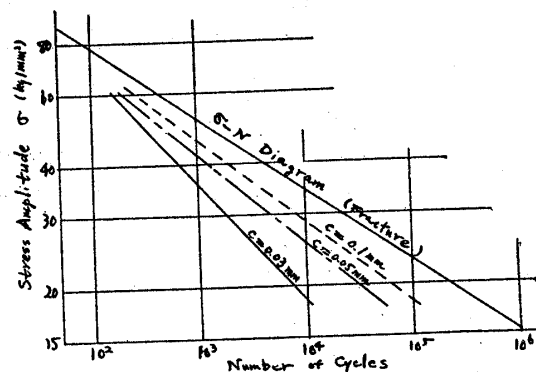


Fig. 2 Cracking line

き裂先端付近には応力集中を生じ、 $\sigma$ がある程度以上大きくなれば塑性ひずみを生ずる領域が表われてくる。しかし、き裂近傍のひずみ分布は、弾性範囲内にある場合と同様に幾何学的に相似で、応力とひずみの分布に関する長さの独立変数はそのときのき裂の深さ(板の場合はき裂の長さという方が適当と思われるが、これまでの所論に従って Fig. 3 の  $x$  方向の寸法を深さと称することにする)だけであることが実験的にも確かめられてい

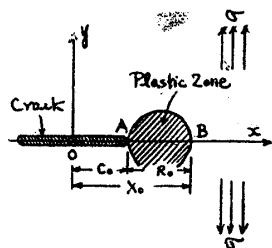


Fig. 3 Vicinity of a crack in a infinite plate

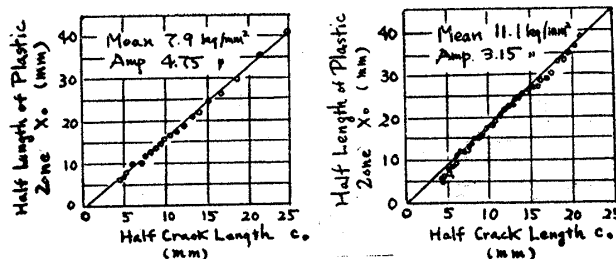


Fig. 4 Length of plastic zone v. crack length for mild steel (frost<sup>4</sup>)

る。たとえば Fig. 4 は Frost ら<sup>4</sup>)の実験結果で、幅 254mm、平行部長さ 254mm、厚さ 3.25mm の軟鋼板の中央に、長さ 3.8 および 12.7mm、幅 0.05mm、先端曲率半径 0.025mm のスリットを機械加工したものに、軸方向繰返引張試験(片振り)を行なつたものである。Fig. 3 において、き裂の深さおよび塑性領域の深さの各 1/2 をそれぞれ  $c_0$  および  $X_0$  とすると、 $c_0-X_0$  の関係は Fig. 4 に例示した通り、各応力振幅においていずれも原点を通る直線で表示することができる。すなわち、塑性領域の深さと幅はそのとき存在するき裂の深さに比例することが確かめられた。

この結果から

$$X_0 = c_0 \varphi(\sigma) \quad (2)$$

または  $R_0 = X_0 - c_0$  として

$$R_0 = c_0 f(\sigma) \quad (3)$$

と書くことができる。ここに  $\varphi(\sigma)$  および  $f(\sigma)$  は同一材料では応力  $\sigma$  だけの函数である。

ここで、Hult<sup>5)</sup> のねじり疲れ試験における考え方に従つて、材料を Fig. 5 のような微小幅のブロックに分割し、各ブロック内では応力およびひずみは一定であると考える。き裂先端付近の応力およびひずみ分布は大体図示のようになり、塑性域では応力は降伏応力  $\sigma_s$  で一定であるが、ひずみはき裂先端に近づくに従つて急激に大きくなり、き裂に一番近いブロック内で最大で

$$\epsilon_{\max} \propto \frac{R_0}{\rho} \epsilon_s \quad (4)$$

となる。ここに  $\rho$  はブロックの幅、 $\epsilon_s$  は降伏点におけるひずみである。これに (3) 式を代入すると、 $A$  を比例常数として

$$\epsilon_{\max} = A \frac{c_0}{\rho} \epsilon_s f(\sigma) \quad (5)$$

となる。ここで、このブロック内のひずみが材料の破壊ひずみ  $\epsilon_f$  よりも大きくなれば、このブロックは破壊してき裂がブロックを貫通する。材料をブロックの積層でなく連続体と考えれば、き裂先端から距離  $\rho$  の点  $P_0$  のひずみ  $\epsilon(\rho)$  が  $\epsilon_f$  に達すれば、き裂が  $\rho$  だけ伸長すると考えることができる (Fig. 6.)。

繰返荷重の場合は、点  $P_0$  の塑性ひずみ  $\epsilon(\rho)$  が繰返応力によつて重畳されて  $\epsilon_f$  に達すれば、き裂が  $\rho$  だけ進行すると考えてよい。 $n$  回の繰返しによつて  $P_0$  点の塑性ひずみは

$$\sum \epsilon(\rho) = Bn \frac{c_0}{\rho} \epsilon_s f(\sigma) \quad (6)$$

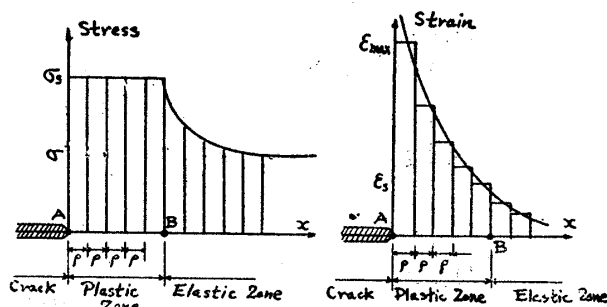


Fig. 5 Stress and strain distribution around the crack-tip

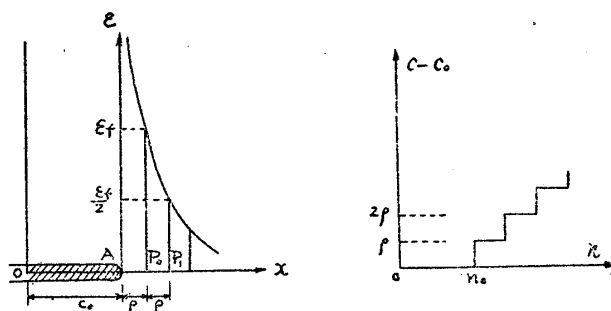


Fig. 6 Crack propagation

となり、き裂が  $P_0$  まで進行するに要する繰返数は

$$n_0 = \frac{1}{B} \frac{\rho}{c_0} \frac{\epsilon_f}{\epsilon_s f(\sigma)} \quad (7)$$

となる。ここで、 $n=n_0$  となつたとき、 $P_0$  からさらに  $\rho$  だけ離れた点  $P_1$  の累積ひずみは (6) と同様に

$$\sum \epsilon(2\rho) = B n_0 \frac{c_0}{2\rho} \epsilon_s f(\sigma) = \frac{1}{2} \epsilon_f \quad (8)$$

となるが、き裂が進行したことによる  $P_1$  のひずみ増加は、この値に比べてきわめて小さく、さらにき裂が進行するためには、その累積ひずみがさらにほとんど  $\epsilon_f/2$  程度増加する必要がある。すなわち、さらに  $\Delta n = n_0/2$  回の繰返しによつてき裂は  $\rho$  だけ進行する。そこで、き裂の平均進行速度は

$$\frac{\Delta c}{\Delta n} = \frac{\rho}{n_0/2} = B c \frac{\epsilon_s f(\rho)}{\epsilon_f} \quad (9)$$

となる。

同様の過程を経て順次き裂が進行するものとすれば、き裂進行速度はそのときのき裂の深さ  $C$  に比例するといふことができる。すなわち

$$\frac{dc}{dn} = \mathcal{K} c \quad (10)$$

または

$$\log(c/c_0) = \mathcal{K} n \quad (11)$$

となる。ここに、 $n$  はき裂発生後の繰返数、 $c_0$  は initial crack ( $n=0$ ) の深さの半分を表わしている。比例常数  $\mathcal{K}$  は、そのときの外部応力振幅  $\sigma$ 、材料の降伏ひずみ  $\epsilon_s$ 、および破壊ひずみ  $\epsilon_f$  の函数である。

ここでは、一応  $\epsilon_s$ 、 $\epsilon_f$  とともに材料によつては一定と考えたが、加工硬化の度合等によつて静的試験の値とはそれぞれ異なり、また試験片内部においても必ずしも均一ではないと考えられる、今後さらに検討を要する問題である。

Frost ら<sup>4)</sup>は上記とやや異なる論法によつて同様の推論を下したのち、実験によつて (10) 式の関係を確かめ、比例常数  $\mathcal{K}$  の応力依存性を検討している。すなわち、 $\mathcal{K}$  の値は試験材料（軟鋼とアルミ）および平均応力値に関係なく、応力振幅  $\sigma$  の 3 乗にほぼ比例する

$$\mathcal{K} = \mu \sigma^3 \quad (12)$$

という非常に興味ある結果が得られたと報告している。

$\mathcal{K}$  の函数形そのものについては検討を要するが、この函数形が材質や応力値によつて変らないことは、前記の推論から当然予想できることである。すなわち、 $\mathcal{K}$  はき裂周辺の応力およびひずみ分布を規定する比例係数で、試験片の形状寸法や荷重形式（引張圧縮とか回転曲げとか）等によつて変ることは考えられるが、材質や応力値によつては変らないはずである。

いまかりに

$$\mathcal{K} = \mu \sigma^x \quad (13)$$

とすれば、(11) 式は  $\mu$  を常数として

$$\log(c/c_0) = \mu \sigma^x n \quad (14)$$

となる。き裂深さが  $C_f$  に達したとき破壊するとすれば、このときの繰返数を  $N$  として

$$\sigma^x N = (\log c_f - \log c_0) \mu \quad (15)$$

となる。 $N$  はき裂発生後の繰返数であるが、この場合は最初からき裂があるから総寿命に相当する。また  $\log c_f$  の応力振幅による変化もきわめて小さい（たとえば前報 Fig.8 参照）から、上式の右辺を常数と考えて  $\alpha$  とすれば

$$\sigma^x N = \alpha \quad \text{または} \quad \log N = \beta - x \log \sigma \quad (16)$$

となり、これが試験片の破壊条件すなわち  $\sigma$ - $N$  線図を表わすことになり、 $x$  は  $\log$ - $\log$  表示した  $\sigma$ - $N$  線図の傾斜を示す値である。Frost らの試験片についての  $\sigma$ - $N$  線図は得られないが、他の類似の寸法の試験片における傾斜は、ほぼ  $x=3$  に近いようである。

#### 4 試験結果の検討

前項の所論は無限平板におけるもので、き裂が多少進行しても若干離れた場での応力振幅は変化しないと考え

ている。板幅が有限であつても、き裂深さが板幅の  $1/8$  程度までは影響が表われないことが実験で確かめられている<sup>4)</sup>。著者の試験<sup>1)2)</sup>のように小形丸棒の回転曲げ試験では、半径方向の応力勾配がきわめて大きく、き裂進行に伴う断面減少に基づく応力増加がき裂進行速度に影響する時期も早くなるものと想像される。このような場合に、試験開始時の公称応力  $\sigma$  のみと考えると前項のような関係が成立するかどうかを、理論的に解析するのは困難であるので、試験結果について検討を加えてみる。

本試験におけるき裂進行状況は、さきに前報 Fig. 8 に示した通りであるが、さらにわかりやすくするため、熱着色後の第2段応力  $\sigma_2$  の 23, 35 および 51 kg/mm<sup>2</sup> の3グループについて、横軸に第2段荷重による破断までの繰返数  $n_2$ 、縦軸に第1段荷重による（第2段開始時における）き裂深さ  $c_1$  をプロットすると Fig. 7 が得られる。図中には等荷重2段のもの ( $\sigma_1 = \sigma_2$ )、重複荷重2段 ( $\sigma_1 \neq \sigma_2$ )、および鋭いV型切欠のものをそれぞれ別の記号でプロットしたが、これらの間に有意の差は認められず、大体において1直線上に分布している。すなわち、第2段試験開始時における残り寿命は、そのときのき裂深さと第2段の応力値のみで定まり、過去の荷重経歴はあまり関係がない。

図中の各点はそれぞれ別の試験片に対応するものであるが、1本の試験片について連続記録をとつても、ほぼ

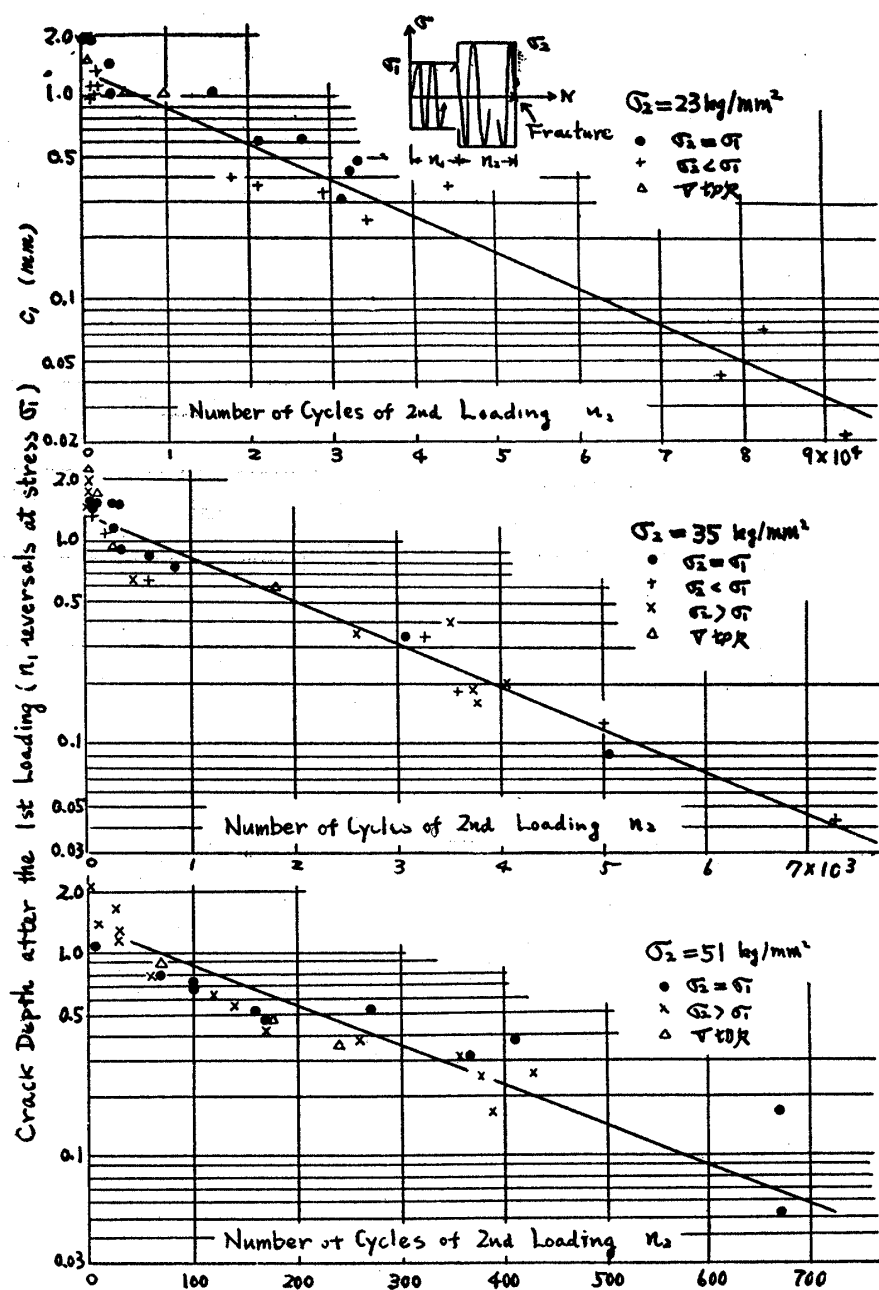


Fig. 7 Crack depth v. remainder of fatigue life

この直線上をたどるものと思われる。すなわち、任意の試験片について Fig. 8 A のような関係があり、これを

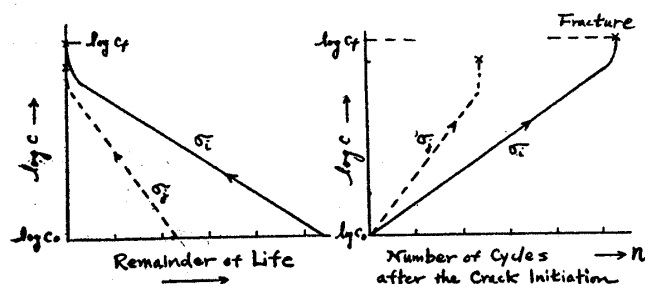


Fig. 8 c-n diagrams

き裂発生後の  $c$ - $n$  線図に直せば向きが逆になった B 図のようになる。ここで、横軸は initial crack  $c_0$  発生後の繰返数  $n$  で、 $n = N_{III} + N_{IV}$  に達すると  $c = c_f$  となつて破断する。破断直前の第 4 期に相当する点以外は  $\log c$ - $n$  線図において直線表示され、前節 (10) および (11) 式の関係が成立している。しかも、この関係はこれまでの荷重経歴にほぼ無関係で、そのときのき裂深さとこれからの応力振幅だけで規定される。

各応力振幅における平均の全寿命は Tab.1 の通りであるが、initial crack を 0.02mm 程度のもと考えれば、試験のきわめて初期にき裂が発生し、寿命のほとんど大部分を第 3 期が占めていることがわかる。

Tab.1 Statistical mean life and value of  $\mathcal{K}$

Stress Ample $\sigma$ (kg/mm <sup>2</sup> )	Number of Specimens	Mean life (cycles)	Value of $\kappa$
23	27	100,500	$1.82 \times 10^{-5}$
35	28	9,050	$2.13 \times 10^{-4}$
51	46	1,190	$1.96 \times 10^{-3}$

Fig.7 の直線から (11) 式の  $\mathcal{K}$  を計算すると同じく Tab.1 のようになり Fig.9 に示す通り  $\log \sigma$ - $\log \mathcal{K}$  は完全に直線関係にあつて

$$\mathcal{K} = \mu \sigma^{5.8} \quad (17)$$

となり、 $\sigma$ - $N$  関係は  $\sigma^{5.8}N = \alpha$  すなわち

$$\left. \begin{aligned} \log N &= 5.8 \log (\sigma_0 / \sigma) \\ \log (\sigma_0 / \sigma) &= 0.17 \log N \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

となつて、さきに求めた  $\sigma$ - $N$  線図<sup>1)2)</sup>と完全に一致している。この傾斜が鋼材種別によつて変らないことも第 1 報に示した通りであるが、参考のため Fig.10 に再録する。

切欠丸棒の回転曲げ試験でも、平板の引張り疲れ試験の場合と同様に、き裂進行速度はそのときのき裂深さに比例し、その比例係数は試験片形状寸法、切欠き形状寸法および荷重形式などによつて定まるが、ほぼ (13) 式の形で表わすことができ、この函数形は材質や応力値によつては変らないこと

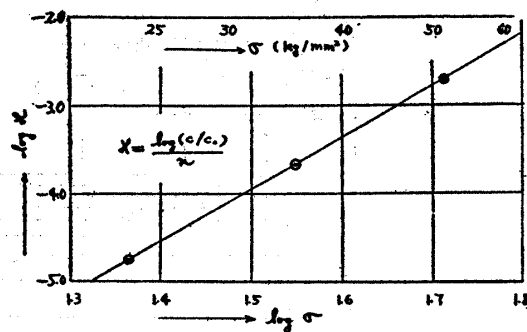


Fig.9 Relation between  $\kappa$  and  $\sigma$

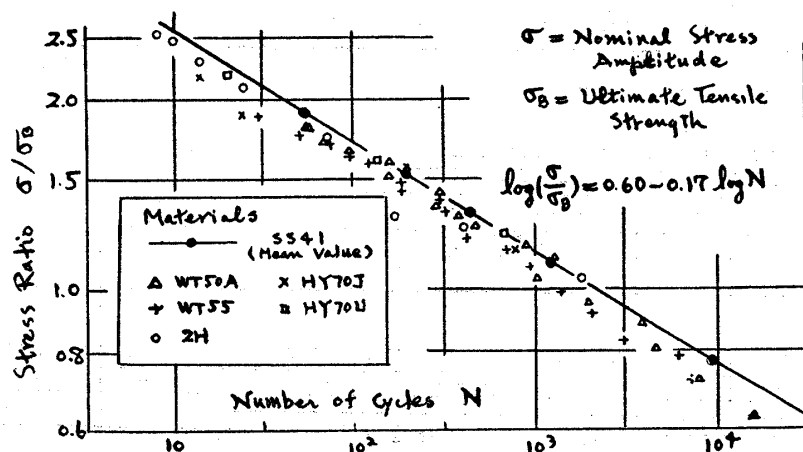


Fig.10  $\sigma$ - $N$  diagrams of rotatory bending test of round notched specimens

が確かめられた。上記の結果から、一定の試験片寸法、荷重形式については、 $\sigma-N$  線図が得られればその傾斜から任意の応力振幅におけるき裂進行速度を類推することができ、この逆もまた可能である。

## 5 結 言

前2報に続いて、造船用鋼材の切欠丸棒の回転曲げ試験により、高応力繰返しの場合の疲れき裂の拡大進行機構を検討した。

き裂進行速度はそのときのき裂深さに比例することは前に述べたが、その比例係数が試験片の形状寸法、切欠きの形状寸法および荷重形式などの函数で、その函数形は材質や応力値によつては変わらないことを確かめた。近似的には、この比例係数は応力振幅の、べき函数の形  $\sigma^x$  で表わすことができ、べき指数  $x$  はその試験の疲れ破壊曲線（ $\sigma-N$  線図）の傾斜と一義的な関係がある。

マクロ的観点からき裂の進行機構の解析を試みたが、initial crack についてはまだ検討を要する問題が多い。超微視的なき裂の発生機構についての解明が待たれる。

終りに、本試験に御援助御指導を賜わつた八幡製鉄株式会社建設用鋼材研究委員会造船部会の方々、東京大学吉識雅夫教授、運輸技術研究所秋田好雄部長に心から感謝する次第である。

## 文 献

- 1) 高橋幸伯：造船協会論文集，108号，昭35，pp.239—245
- 2) 高橋幸伯：同上，109号，昭36，pp.361—368
- 3) 北川英夫：生産研究，13巻1号，昭36，pp.3—12
- 4) N. E. Frost & D. S. Dugdale ; J. Mech. Phys. Solid, Vol. 6, No. 2, 1958, pp. 92—110
- 5) J. A. H. Hult ; Ditto., Vol. 6, No. 1, 1957, pp. 47—52