

JAERI-M

9 9 6 9

疲労き裂成長速度測定値のばらつきと
試験片形状について

1982年2月

辻 宏和・中島 甫・近藤 達男

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Section,
Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura,
Naka-gun Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1982

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 (株)原子力資料サービス

疲労き裂成長速度測定値のばらつきと試験片形状について

日本原子力研究所 東海研究所 燃料工学部

辻 宏和・中島 甫・近藤 達男

(1982年1月26日受理)

原子炉圧力容器用鋼材のS A 533 grade B class 1 鋼を供試材として、K一定型のContoured Double Cantilever Beam 型試験片とASTM E 399 準拠のCompact-Tension 型試験片を用いて大気中疲労き裂成長試験を荷重制御で行ない、両者のデータのばらつきの程度を統計的に評価するとともに、ばらつきの要因について考察した。

標準化されたCT型試験片は簡便ではあるが、K一定型試験片に比べて本質的に測定値のばらつきが多いと判断された。また、測定結果のばらつきが ΔK 水準によって異なることもわかった。その結果、特に精度と再現性が問題となる疲労き裂成長速度の測定のためには、荷重繰返し数Nに対して、直線的なき裂成長挙動を示す ΔK が一定の試験法が好ましいものと結論した。

Effect of specimen geometry on the variability in fatigue crack growth rate

Hirokazu TSUJI, Hajime NAKAJIMA and Tatsuo KONDO

Division of Nuclear Fuel Research, Tokai Research Establishment, JAERI

(Received January 26, 1982)

Fatigue crack growth tests on SA 533 grade B class 1 steel were conducted in air with both contoured double cantilever beam(CDCB) specimens and compact-tension(CT) specimens for comparison, which corresponded to the ΔK constant and ΔK increasing fatigue tests respectively. The variability of the measured values was examined statistically, and possible sources of the determined variability were discussed.

The variability in the ΔK increasing fatigue tests with the CT specimens was found to be substantially greater than that in the ΔK constant fatigue tests with the CDCB specimens employed in the present study. In addition, the width of the scatter as well as in the degree of deviation from the expected linearity in da/dN versus ΔK plots were found to be varied depending on the level of ΔK in the CT specimen.

Based on the results, a conclusion was drawn that constant ΔK type tests should be preferred in the tests where accuracy and reproducibility of crack growth rate measurement was of particular importance.

Keywords: Fatigue, Crack Growth Test, Contoured Double Cantilever Beam Specimen, Compact-Tension Specimen, Stress Intensity Factor Range, Variability, Scatter Band, Statistical Evaluation

目 次

1. 緒 言	1
2. 実験方法	2
3. 実験結果	2
3.1 CDCB型試験片とCT型試験片のき裂成長挙動の比較	2
3.2 CDCB型試験片とCT型試験片の $da/dN - \Delta K$ 線図の比較	3
4. 考 察	3
4.1 き裂成長速度データの統計処理	3
4.2 ばらつきの要因についての考察	5
5. 結 言	7
参考文献	8

CONTENTS

1. INTRODUCTION	
2. EXPERIMENTAL PROCEDURE	
3. RESULTS	
3.1 Comparison of crack growth behavior in the CDCB and the CT specimens	
3.2 Comparison of the da/dN versus ΔK relationship in the CDCB and the CT specimens	
4. DISCUSSION	
4.1 Statistical evaluation of the variability	
4.2 Discussion on possible sources of the variability	
5. CONCLUSION	
REFERENCE	

1. 緒 言

線形破壊力学を応用した試験ならびに評価法の進歩により、き裂成長の知見が豊富になったため、構造物の破壊管理や寿命推定をより精度良く行なうことができるようになった。疲労き裂成長速度の測定に用いられる ASTM⁽¹⁾ の規定する切欠試験片のうち、Compact-Tension 型試験片（以後 CT 型試験片と呼ぶ。）は加工が容易であるとともに、簡便に広い範囲の K 値に関して測定することができるために広く用いられている。しかし、この方法では測定データがある程度ばらつくことが知られている⁽²⁾⁽³⁾。このため、試験の目的によっては測定精度上十分とはいえない場合があり、特に支配因子の複雑な条件下の測定や微妙な挙動の差異の識別などで、このばらつきが問題となることがある。

著者らは 1969 年以来⁽⁴⁾、高温高圧水中の腐食疲労き裂成長速度の測定を進めてきたが、一般に腐食環境下ではデータのばらつきが大きい上、き裂成長速度 da/dN と応力拡大係数範囲 ΔK との間に、大気中とは異なる急な勾配の部分があることを見出した⁽⁵⁾。

一方、近年になって発電用原子炉プラントの構造部材の欠陥評価に関連して、腐食疲労き裂成長速度が重要な関心を集めるに到っている。1977 年に 10ヶ国、30 余名の関連研究者により構成される International Cyclic Crack Growth Rate Committee が発足し、この方面の国際協力研究が精力的に進められている⁽⁶⁾。この国際協力研究においても、ASTM E 399⁽¹⁾ で規定されている CT 型試験片を用いる方法が採用され、ここにおいても測定データのばらつきが問題となっている。本来、腐食疲労など支配因子の複雑な試験においては、精度の高い測定が特に重要な意義をもつので、この種の基本的なばらつきは極力小さくする必要がある。広く採用されているように、CT 型試験片を用いて荷重制御で疲労き裂成長試験を行なった場合の誤差の混入の理由の一つは、縦軸にき裂長さ、横軸に荷重繰返し数をとったき裂成長曲線の勾配から疲労き裂成長速度を求めることにあると考えられる。本来、測定値に対して独立に、しかも一定に設定すべきパラメータ K（応力拡大係数）が、CT 型試験片を用いて荷重制御で疲労き裂成長試験を行なった場合のように、実験中に時々刻々と変化していく試験では、本質的にデータの精度は低下し、ばらつきが大きくなる。精度良くき裂成長速度を測定するためには、荷重繰返し数 N に対して、直線的なき裂成長挙動を示す ΔK が一定の試験法が好ましいと考えられる。すでに、鈴木ら⁽⁷⁾ 著者らと共に、原子炉圧力容器用鋼材の溶接熱影響部に沿う腐食疲労き裂成長速度の評価に Contoured Double Cantilever Beam 型試験片（以後 CDCB 型試験片と呼ぶ。）を用いて、ミクロ組織の影響を調べ、K一定型試験片の持つ特徴を活用している。また、Van der Sluys らも⁽⁸⁾、CT 型試験片を用いて計算機制御による ΔK 一定試験を行なって腐食疲労試験データの精度を高める努力を行なっている。本研究では、 ΔK が一定の試験のうち比較的簡便な CDCB 型試験片による疲労試験を行ない、CT 型試験片を用いて荷重制御で疲労試験を行なった場合とのばらつきの程度について、統計的方法によってより定量的な判断を与えることを試みた。

2. 実験方法

供試材は原子炉圧力容器用鋼材のSA 533 grade B class 1鋼で、その化学組成をTable 1に示す。供試材には、実用材として受ける熱履歴を近似してFig. 1に示すような熱処理を施した結果、Fig. 2にその金属組織写真を示すような焼戻しペーナイト組織となっている。室温における機械的性質はTable 2に示す通りである。試験片はFig. 3とFig. 4にそれぞれその形状を示すようなCDCB型試験片とASTM E 399⁽¹⁾ 準拠のCT型試験片を用いた。いずれの試験片においても疲労き裂の成長方向はASTM E 399に規定されているL-S方向と一致させた⁽¹⁾。試験に先立っては、今後予定している特殊環境下での試験データと比較することを考慮して、試験部を3 μmまでのダイヤモンドペーストで研磨し、さらに高純度メチルアルコール中での超音波洗浄を施した。試験条件はいずれの型の試験片においても、応力比R (= P_{min}/P_{max}) = 0.1で、繰返し速度が0.5 Hzの三角波状の荷重制御試験である。試験機は容量10トンの電気油圧サーボ型の疲労試験機である。き裂長さの測定には、き裂先端の直線性を確認した上で、移動顕微鏡による直接読取りと写真撮影法を併用した。

3. 実験結果

3.1 CDCB型試験片とCT型試験片のき裂成長挙動の比較

本研究に用いたCDCB型試験片の応力拡大係数Kは次式で表わすことができる⁽⁹⁾。

$$K = P \left[\left(\frac{E}{2Bn} \right) \left(\frac{dc}{da} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

P: 荷重, E: 縦弾性係数, Bn: 側溝底における板厚, C: コンプライアンス, a: き裂長さ

(1)式から明らかなように、き裂長さの増加に対するコンプライアンスの変化率dc/daが一定でさえあれば、応力拡大係数Kはき裂長さに対して独立となり、き裂長さにかかわらず、一定荷重に対して一定のK値を与えることになる。Fig. 5は、CDCB型試験片を用いて、き裂長さの増加に対するコンプライアンスの変化率を求めて示したものである。極めて良好な直線関係(相関係数0.994)が得られており、き裂長さの増加に対するコンプライアンスの変化率dc/daは一定であるとみなせる。従って、本研究に用いたCDCB型試験片は、実質的に、一定荷重に対して一定のK値を与えるK一定型の試験片であるといえる⁽¹⁰⁾。実際、荷重振幅を一定にとると、荷重繰返し数Nに対して、き裂の成長挙動は、Fig. 6に示す通り直線的な関係を示した。

一方、本研究に用いたCT型試験片の応力拡大係数Kは次式で表わすことができる⁽¹⁾。

2. 実験方法

供試材は原子炉圧力容器用鋼材のSA 533 grade B class 1鋼で、その化学組成をTable 1に示す。供試材には、実用材として受ける熱履歴を近似してFig. 1に示すような熱処理を施した結果、Fig. 2にその金属組織写真を示すような焼戻しペーナイト組織となっている。室温における機械的性質はTable 2に示す通りである。試験片はFig. 3とFig. 4にそれぞれその形状を示すようなCDCB型試験片とASTM E 399⁽¹⁾準拠のCT型試験片を用いた。いずれの試験片においても疲労き裂の成長方向はASTM E 399に規定されているL-S方向と一致させた⁽¹⁾。試験に先立っては、今後予定している特殊環境下での試験データと比較することを考慮して、試験部を3 μmまでのダイヤモンドペーストで研磨し、さらに高純度メチルアルコール中での超音波洗浄を施した。試験条件はいずれの型の試験片においても、応力比R (= P_{min}/P_{max}) = 0.1で、繰返し速度が0.5 Hzの三角波状の荷重制御試験である。試験機は容量10トンの電気油圧サーボ型の疲労試験機である。き裂長さの測定には、き裂先端の直線性を確認した上で、移動顕微鏡による直接読取りと写真撮影法を併用した。

3. 実験結果

3.1 CDCB型試験片とCT型試験片のき裂成長挙動の比較

本研究に用いたCDCB型試験片の応力拡大係数Kは次式で表わすことができる⁽⁹⁾。

$$K = P \left[\left(\frac{E}{2Bn} \right) \left(\frac{dc}{da} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

P: 荷重, E: 縦弾性係数, Bn: 側溝底における板厚, C: コンプライアンス, a: き裂長さ

(1)式から明らかなように、き裂長さの増加に対するコンプライアンスの変化率dc/daが一定でさえあれば、応力拡大係数Kはき裂長さに対して独立となり、き裂長さにかかわらず、一定荷重に対して一定のK値を与えることになる。Fig. 5は、CDCB型試験片を用いて、き裂長さの増加に対するコンプライアンスの変化率を求めて示したものである。極めて良好な直線関係(相関係数0.994)が得られており、き裂長さの増加に対するコンプライアンスの変化率dc/daは一定であるとみなせる。従って、本研究に用いたCDCB型試験片は、実質的に、一定荷重に対して一定のK値を与えるK一定型の試験片であるといえる⁽¹⁰⁾。実際、荷重振幅を一定にとると、荷重繰返し数Nに対して、き裂の成長挙動は、Fig. 6に示す通り直線的な関係を示した。

一方、本研究に用いたCT型試験片の応力拡大係数Kは次式で表わすことができる⁽¹⁾。

$$K = \frac{P}{B\sqrt{W}} \cdot \frac{(2+\alpha)}{(1-\alpha)^{\frac{3}{2}}} (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{a}{W}$$

P : 荷重, B : 板厚, W : 板幅, a : き裂長さ

この型の試験片の場合には, Kはき裂長さの単調増加関数であり, 荷重制御の疲労試験においては, K値は, き裂の成長に伴い, 時々刻々と変化していくことになる。そのき裂成長曲線の例をFig. 7に示す。

Fig. 8に, CDCB型試験片とCT型試験片の疲労き裂成長挙動を模式図で示した。CDCB型試験片の場合には, き裂成長速度 da/dN は, き裂成長量 Δa を荷重繰返し数 N で除した値として求めた。これは, ΔK が一定という等しい条件での現象を何度も繰返し起こさせ, その平均値をとることを意味している。CT型試験片の場合には, き裂成長速度 da/dN は, 7 points incremental polynomial technique⁽¹⁾⁽¹⁾ を用いて決定した。この方法は, 測定したき裂長さのデータ点を7点ずつのサブグループに分け, その各々に対して最小自乗法を用いて二次曲線近似を行ない, その微分係数を da/dN とする方法である。

3.2 CDCB型試験片とCT型試験片の $da/dN - \Delta K$ 線図の比較

Fig. 9にCDCB型試験片で得られた $da/dN - \Delta K$ 線図を示す。試験に供した試験片は6枚, 得られたデータセット数は26である。この図から, 全領域に渡ってばらつきの少ない極めて良好な直線関係が得られていることがわかる。どの試験片においても直線関係は良好であり, また, どの ΔK 水準をとっても, 試験片間のばらつきはほとんどない。

Fig. 10にCT型試験片で得られた $da/dN - \Delta K$ 線図を示す。試験に供した試験片は10枚, 得られたデータ点は277点である。この図から, CDCB型試験片の場合と比較して, かなりばらつきのあるデータとなっていることがわかる。それぞれの試験片内の直線関係もややばらついており, また, 試験片間のばらつきもかなり認められる。

なお, 試験に供したCDCB型試験片6枚, CT型試験片10枚についての荷重条件をTable 3にまとめておいた。

4. 考 察

4.1 き裂成長速度データの統計処理

疲労き裂成長速度 da/dN と応力拡大係数範囲 ΔK の間には, ある適当な ΔK の領域で

$$da/dN = C_0 \cdot \Delta K^n \quad (3)$$

$$K = \frac{P}{B\sqrt{W}} \cdot \frac{(2+\alpha)}{(1-\alpha)^{\frac{3}{2}}} (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{a}{W}$$

P : 荷重, B : 板厚, W : 板幅, a : き裂長さ

この型の試験片の場合には, Kはき裂長さの単調増加関数であり, 荷重制御の疲労試験においては, K値は, き裂の成長に伴い, 時々刻々と変化していくことになる。そのき裂成長曲線の例をFig. 7に示す。

Fig. 8に, CDCB型試験片とCT型試験片の疲労き裂成長挙動を模式図で示した。CDCB型試験片の場合には, き裂成長速度 da/dN は, き裂成長量 Δa を荷重繰返し数 N で除した値として求めた。これは, ΔK が一定という等しい条件での現象を何度も繰返し起こさせ, その平均値をとることを意味している。CT型試験片の場合には, き裂成長速度 da/dN は, 7 points incremental polynomial technique⁽¹⁾⁽¹⁾ を用いて決定した。この方法は, 測定したき裂長さのデータ点を7点ずつのサブグループに分け, その各々に対して最小自乗法を用いて二次曲線近似を行ない, その微分係数を da/dN とする方法である。

3.2 CDCB型試験片とCT型試験片の $da/dN - \Delta K$ 線図の比較

Fig. 9にCDCB型試験片で得られた $da/dN - \Delta K$ 線図を示す。試験に供した試験片は6枚, 得られたデータセット数は26である。この図から, 全領域に渡ってばらつきの少ない極めて良好な直線関係が得られていることがわかる。どの試験片においても直線関係は良好であり, また, どの ΔK 水準をとっても, 試験片間のばらつきはほとんどない。

Fig. 10にCT型試験片で得られた $da/dN - \Delta K$ 線図を示す。試験に供した試験片は10枚, 得られたデータ点は277点である。この図から, CDCB型試験片の場合と比較して, かなりばらつきのあるデータとなっていることがわかる。それぞれの試験片内の直線関係もややばらついており, また, 試験片間のばらつきもかなり認められる。

なお, 試験に供したCDCB型試験片6枚, CT型試験片10枚についての荷重条件をTable 3にまとめておいた。

4. 考 察

4.1 き裂成長速度データの統計処理

疲労き裂成長速度 da/dN と応力拡大係数範囲 ΔK の間には, ある適当な ΔK の領域で

$$da/dN = C_0 \cdot \Delta K^n \quad (3)$$

C_0, n : 定数

の関係が成立することはよく知られている⁽¹²⁾

本実験で供試したそれぞれの試験片に対して、パラメータ C_0 と指数 n を求めてみると、Fig. 11 のようにほぼ直線関係が得られる。ここで得られた直線関係から大きく逸脱するデータを与えるような試験片は存在しないことから、以下の統計処理に当っては、全ての試験片すなわち CDCB 型試験片においては 6 枚、CT 型試験片においては 10 枚から得られたデータ点をもれなく採用することとした⁽³⁾。

それぞれの試験片内において、(3)式による直線近似をした場合の相関係数および標準偏差を Fig. 12 に示す。なお、この場合の標準偏差は次式で求めた⁽³⁾。

$$S = \sqrt{\frac{\sum (X_i - X_{ib})^2}{Z - 2}} \quad (4)$$

S : 標準偏差, X_i : ΔK_i における $\log(da/dN)$, X_{ib} : ΔK_i における $\log(da/dN)$ のその試験片の最適値, Z : データ数

この図によると、CDCB 型試験片の場合には、相関係数はいずれも 0.99 以上であり、全データセットから得られた相関係数も 0.993 と極めて良好な直線関係を示している。また、標準偏差も、CDCB 型試験片の場合には、どの試験片においても 0.1 以下であり、ばらつきの小さいことを示している。CT 型試験片の場合には、相関係数は CDCB 型試験片に比べて低めであり、全データ点から得られた相関係数は 0.931 となっている。また、標準偏差も CDCB 型試験片の場合よりもばらつきの大きいことを示している。

CDCB 型試験片と CT 型試験片の全データから得られた相関係数がそれぞれ 0.993 と 0.931 であったが、この両者の相関係数は次の方法によって検定できる⁽¹³⁾。

相関係数 $r \neq 0$ の場合、 Z 変換を行なうと、 Z は近似的に正規分布に従う。すなわち

$$Z = \frac{1}{2} \log_e \frac{1+r}{1-r} \quad (5)$$

$$\text{母平均値} \quad \frac{1}{2} \log_e \frac{1+r}{1-r}$$

$$\text{母分散} \quad \frac{1}{N-3}$$

CDCB 型試験片、CT 型試験片のそれぞれの相関係数に Z 変換を施すと

CDCB 型試験片の場合

$$Z_1 = \frac{1}{2} \log_e \frac{1+0.993}{1-0.993} = 2.818$$

CT 型試験片の場合

$$Z_2 = \frac{1}{2} \log_e \frac{1+0.931}{1-0.931} = 1.662$$

Z は近似的に正規分布に従うので

$$t = \frac{|Z_1 - Z_2|}{\sqrt{\frac{1}{N_1-3} + \frac{1}{N_2-3}}} \quad (6)$$

$$= \frac{2.818 - 1.662}{\sqrt{\frac{1}{23} + \frac{1}{274}}}$$

$$= 5.32$$

を標準正規分布表の値と照合することによって有意差の判定を下すことができる。この場合には、有意水準を一般に用いられている5%にとった場合にはもちろん有意差が認められる。ちなみに、この両者の相関係数に有意差があるという仮説がくつがえされる確率は 10^{-5} %程度のものである。

Fig. 13には、試験片間のばらつきと ΔK 水準の関係を示した。CDCB型試験片の場合には、同一 ΔK 水準でのデータ点があるので、そのデータ点相互間で標準偏差、平均値および変動係数を求めた。CT型試験片の場合には、比較的狭い ΔK 水準範囲の中で、それぞれの試験片から代表的なデータ点を一点ずつ採用してることにより、標準偏差、平均値および変動係数を求めた。なお、この場合の標準偏差は次式で求めた⁽³⁾。

$$S = \sqrt{\frac{\sum(Y_i - \bar{Y}_i)^2}{Z - 1}} \quad (7)$$

S : 標準偏差, Y_i : 特定の ΔK 水準における*i*番目の試験片のき裂成長速度, \bar{Y}_i : 特定の ΔK 水準におけるき裂成長速度の平均値, Z : データ数

CDCB型試験片では、変動係数は全て1.5以下であり、試験片間のばらつきはほとんどない。CT型試験片の場合には、試験片間のばらつきがかなり認められ、また、そのばらつきの程度は ΔK 水準によって異なっていることがわかる。すなわち、標準偏差および変動係数のいずれをとっても、 $\Delta K < 60 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-\frac{3}{2}}$ の低 ΔK 領域では、ばらつきは大きく、 ΔK の上昇に伴い、ばらつきは減少していくが、さらに ΔK が大きくなって、 $\Delta K > 100 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-\frac{3}{2}}$ となると、再びばらつきは大きくなるという傾向を示している。

Fig. 14は、今回得られた全データの95%信頼幅を示したものである。これまでに、種々の統計処理によって確認してきたように、CDCB型試験片では、データのばらつきは小さく、95%信頼幅も極めて狭くなっているが、これと対照的にCT型試験片では、データのばらつきは大きく、95%信頼幅も比較的広いバンドとなっている。従って、仮にCDCB型試験片とCT型試験片で得られたデータの回帰直線(Regression line)が全く同一であったとしても、設計に使用される95%信頼上限には差が生じてくることになる。

なお、CDCB型試験片とCT型試験片で得られたデータを比較すると、CT型試験片における方が da/dN が大きく出ているが、この原因については、今後の検討課題である。

4.2 ばらつきの要因についての考察

Fig. 13でみたように、CT型試験片のばらつきの程度は、 ΔK の水準によって異なることが認められた。すなわち、低 ΔK 領域では、ばらつきは大きく、 ΔK の上昇に伴い、ばらつきは減少していくが、さらに ΔK が大きくなると、再びばらつきは大きくなるという傾向があった。これには次のような要因を考えることができる。

疲労試験における本質的な要因として

- ① ミクロ組織の不均質
- ② 平面ひずみ保持性

疲労試験技術上の要因として

- ③ き裂長さの測定精度

これらの関与の可能性について以下に考察する。

- ① ミクロ組織の不均質

CDCB型試験片においては、同一 ΔK 条件での現象を繰返し起こさせておいてから、その平均値を求めるという方法をとっているため、ミクロ組織の不均質性の影響は消失してしまうと思われるが、CT型試験片においては、き裂成長曲線の瞬時値を da/dN として採用することになるので、ミクロ組織の不均質性の影響が、ばらつきの形でより強く出てくる可能性がある。例えば、本供試材では、Fig. 15に示したように、き裂成長方向に垂直に数百 μm の合金富化領域 (Alloy rich band) が数百 $\mu m \sim 1mm$ 間隔で並んでいるため、き裂はこの合金富化領域を時々横切りながら成長していくことになり、当然そこではき裂成長の遅延が予想される。CDCB型試験片においてもCT型試験片においてもデータ取得間隔は1~3mm程度 (CDCB型試験片では同一 ΔK 条件でのき裂成長量。CT型試験片では $av_s N$ データの7点分。) であるが、CDCB型試験片では、その間のき裂成長量だけが da/dN を決定するのに対し、CT型試験片では、その間のき裂成長曲線の軌跡が da/dN を決定する。従って前に述べたように、この種のミクロ組織依存性はCT型試験片に強く出ることになる。しかも、き裂成長量の大きい領域では組織全体の平均的な da/dN を示すが、き裂成長量の小さい領域で、より強くそのようなミクロ組織依存性は出てくるはずであるから、低 ΔK 領域におけるばらつきが大きくなったことと関連がありうるものと推定される。

- ② 平面ひずみ保持性

高 ΔK 領域では、破壊様式の変化から、安定き裂成長状態におけるような再現性の良いデータは得られない。平面ひずみ保持条件に関するASTMの判定条件⁽¹⁾

$$B \geq 2.5 \left(\frac{K}{\sigma_y} \right)^2 \quad (8)$$

から判断すると、今回用いた二種類の疲労試験片における平面ひずみを満足する範囲は次のようになる。

CDCB型試験片	$K_{max} \leq 156 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-\frac{3}{2}}$
	$\Delta K \leq 140 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-\frac{3}{2}}$
CT型試験片	$K_{max} \leq 144 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-\frac{3}{2}}$
	$\Delta K \leq 130 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-\frac{3}{2}}$

この値は、Fig. 13でみられたCT型試験片が、高 ΔK 領域で再びばらつきが大きくなる傾向を示してくる条件と一致しており、平面ひずみ保持条件を逸脱していくことにより、破壊様式が変化したことが、高 ΔK 領域におけるばらつきの増大の原因と考えられる。

- ③ き裂長さの測定精度

き裂長さの測定精度は数十 μm 程度であるから、き裂成長量の小さい条件の試験では、き裂成

長量の評価の精度は低下する。CDCB型試験片の場合には、低 ΔK 条件下においては、それだけ多数回の荷重サイクルを与えることによって、十分なき裂成長量を得ることができる。従って、低 ΔK 条件下でも、測定に際して十分なき裂成長量をとれば、データの精度は低下しない。

また、CT型試験片においては、疲労試験中にき裂長さの絶対値を知る必要があるが、CDCB型試験片においては、疲労試験停止後にき裂成長累積量さえ測定すればよいので、その面の測定精度の制約もCT型試験片において不利となる。

つまり、き裂長さの測定精度の制約から、CT型試験片はCDCB型試験片よりも不利であり、低 ΔK 領域においては、本質的に測定精度が低下する要因を持っている。

以上の推論から、高、低 ΔK 領域のそれぞれについてCT型試験片に特有の有力なばらつきの要因を見出すことができるが、本実験で得られた統計的な傾向は、これらを複合的に反映したものと考えられる。

5. 結 言

原子炉圧力容器用鋼材のSA 533 grade B class 1鋼を供試材として、K一定型のContoured Double Cantilever Beam型試験片とASTM E 399準拠のCompact-Tension型試験片を用いて、大気中での疲労き裂成長試験を荷重制御で行ない、両者のデータのばらつきの程度について比較検討してみた結果、次のことがわかった。

- (1) CT型試験片におけるデータは、CDCB型試験片におけるデータよりもばらつきが大きく、両者のデータの相関係数には明瞭な有意差がある。
- (2) CT型試験片におけるばらつきの程度は、 ΔK の水準によって異なり、推論の結果、ばらつきの要因としては、低 ΔK 領域ではマイクロ組織依存性およびき裂長さ測定精度上の制約が、また高 ΔK 領域では、破壊様式の変化が、最も可能性が高いと考えられた。

以上のことから、CDCB型試験片とCT型試験片では、データのばらつきの程度に本質的な差があるものと判断され、腐食疲労などの支配因子が複雑でかつ ΔK に対する da/dN の依存関係が一様でない現象の試験では、この種のばらつきが重要な意味を持つと言える。

謝 辞

本研究で供試材としたSA 533 grade B class 1鋼は高温材料強度研究室 古平恒夫副主任 研究員から提供していただきましたことを付記し、感謝の意を表します。

長量の評価の精度は低下する。CDCB型試験片の場合には、低 ΔK 条件下においては、それだけ多数回の荷重サイクルを与えることによって、十分なき裂成長量を得ることができる。従って、低 ΔK 条件下でも、測定に際して十分なき裂成長量をとれば、データの精度は低下しない。

また、CT型試験片においては、疲労試験中にき裂長さの絶対値を知る必要があるが、CDCB型試験片においては、疲労試験停止後にき裂成長累積量さえ測定すればよいので、その面の測定精度の制約もCT型試験片において不利となる。

つまり、き裂長さの測定精度の制約から、CT型試験片はCDCB型試験片よりも不利であり、低 ΔK 領域においては、本質的に測定精度が低下する要因を持っている。

以上の推論から、高、低 ΔK 領域のそれぞれについてCT型試験片に特有の有力なばらつきの要因を見出すことができるが、本実験で得られた統計的な傾向は、これらを複合的に反映したものと考えられる。

5. 結 言

原子炉圧力容器用鋼材のSA 533 grade B class 1鋼を供試材として、K一定型のContoured Double Cantilever Beam型試験片とASTM E 399準拠のCompact-Tension型試験片を用いて、大気中での疲労き裂成長試験を荷重制御で行ない、両者のデータのばらつきの程度について比較検討してみた結果、次のことがわかった。

- (1) CT型試験片におけるデータは、CDCB型試験片におけるデータよりもばらつきが大きく、両者のデータの相関係数には明瞭な有意差がある。
- (2) CT型試験片におけるばらつきの程度は、 ΔK の水準によって異なり、推論の結果、ばらつきの要因としては、低 ΔK 領域ではマイクロ組織依存性およびき裂長さ測定精度上の制約が、また高 ΔK 領域では、破壊様式の変化が、最も可能性が高いと考えられた。

以上のことから、CDCB型試験片とCT型試験片では、データのばらつきの程度に本質的な差があるものと判断され、腐食疲労などの支配因子が複雑でかつ ΔK に対する da/dN の依存関係が一様でない現象の試験では、この種のばらつきが重要な意味を持つと言える。

謝 辞

本研究で供試材としたSA 533 grade B class 1鋼は高温材料強度研究室 古平恒夫副主任 研究員から提供していただきましたことを付記し、感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) Annual Book of ASTM Standards E 399, E 647 (1980), 580, 749
- (2) P. M. Scott ; Paper presented in Conf. on Tolerance of Flaws in Pressurized Components (May, 1978), London
- (3) W. G. Clark, Jr. and S. J. Hudak, Jr. ; ASTM Journal of Testing and Evaluation 3, 6 (1975), 454
- (4) T. Kondo, T. Kikuyama, H. Nakajima, M. Shindo, and R. Nagasaki ; Proc. of 1st Int. Conf. on Corrosion Fatigue, NACE and AIME (1972), 539
- (5) T. Kondo, T. Kikuyama, H. Nakajima, and M. Shindo ; 6th Information Meeting of Heavy Section Steel Technology Program (Apr. 1972)
- (6) 近藤達男 ; 日本材料強度学会誌, 14, 4 (1979), 141
- (7) M. Suzuki, H. Takahashi, T. Shoji, T. Kondo, and H. Nakajima ; The Influence of Environment on Fatigue, (1977), 161, Inst. Mech. Engrs.
- (8) W. A. Van der Sluys and D. S. DeMiglio ; private communication (to be published in Corrosion)
- (9) S. Mostovoy, B. P. Crosley, and E. J. Ripling ; J. Material, 2, 3 (1967), 661
- (10) H. Nakajima, T. Shoji, M. Kikuchi, H. Niitsuma, and M. Shindo ; ASTM STP 738 (1981), 139
- (11) W. G. Clark, Jr. and S. J. Hudak, Jr. ; to be published in Proceedings of the 22nd Sagamore Army Materials Research Conference on Application of Fracture Mechanics to Design
- (12) P. C. Paris and F. G. Erdogan ; Trans. ASME, Journal of Basic Engineering 85 (1963), 528
- (13) 例えば, 三上操著 "応用推計学" (内田老鶴園) (1959), 76や 東京工業大学統計工学研究会編 "統計工学ハンドブック" (技報堂) (1954), 107

Table 1 Check analysis of ASTM SA 533 grade B class 1 steel. (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Fe
0.22	0.21	1.35	0.006	0.004	0.66	0.14	0.50	0.03	Bal.

Table 2 Tensile properties of specimen material.

σ_y (kg/mm ²)	σ_B (kg/mm ²)	Elongation(%)	Reduction of area(%)
46.1	61.1	27.1	69.1

Table 3 Summary of loading conditions for all CDCB and CT specimens.

a) CDCB R=0.1, f=0.5Hz, Triangular

Specimen No.	Load Range ΔP (kg)
1	1000
	1500
	2100
	2400
2	1200
	1800
	2400
	2400
3	3000
	3600
	4200
	4800
	1200
4	1500
	1800
	2100
	2700
	1800
5	2400
	3000
	3600
	4200
	1800
6	2400
	3000
	3600
	3600

b) CT R=0.1, f=0.5Hz, Triangular

Specimen No.	Load Range ΔP (kg)
1	720
2	900
3	900
4	1080
5	900
6	900
7	900
8	900
9	900
10	720

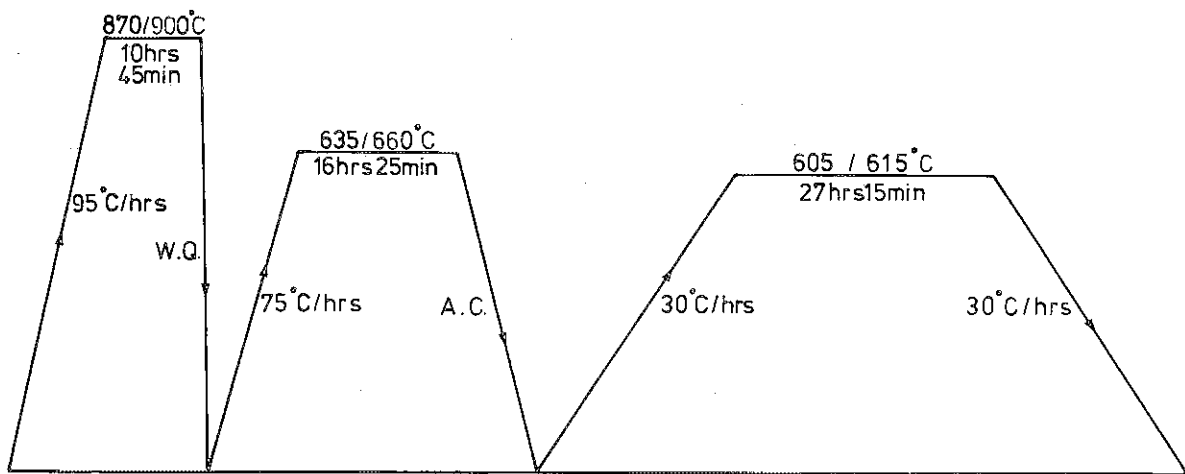


Fig. 1 Schematic diagram of thermal history of material.

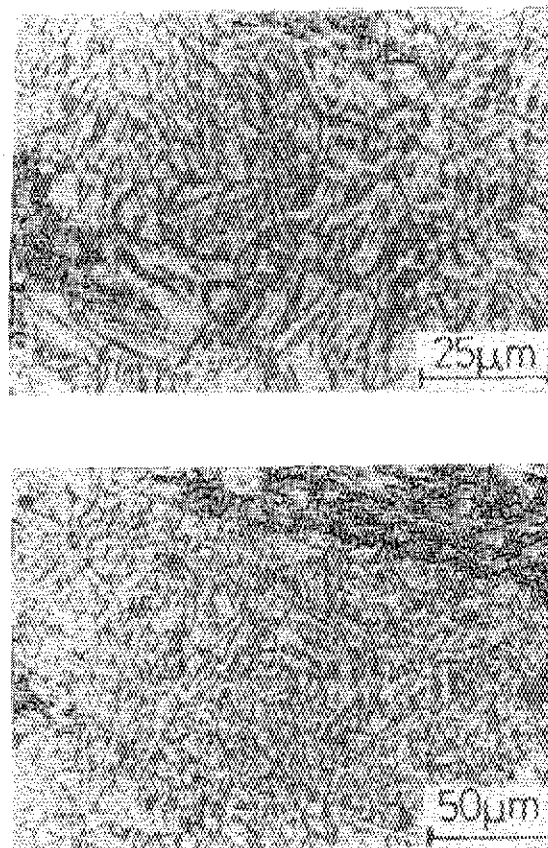
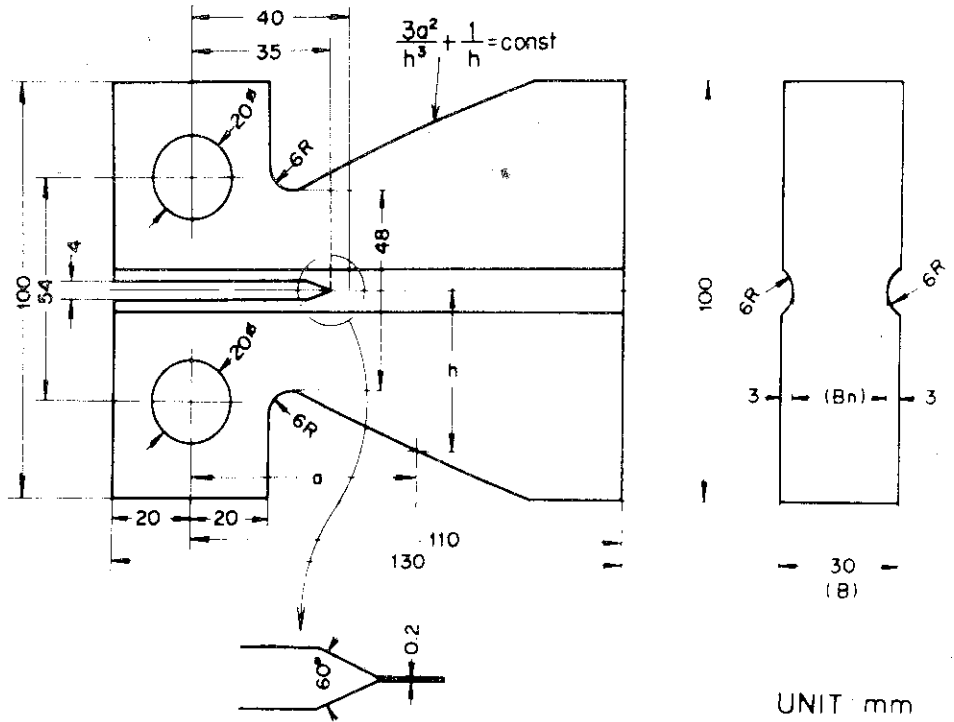


Fig. 2 Typical microstructure of the specimen material in two different magnifications.

CDCB

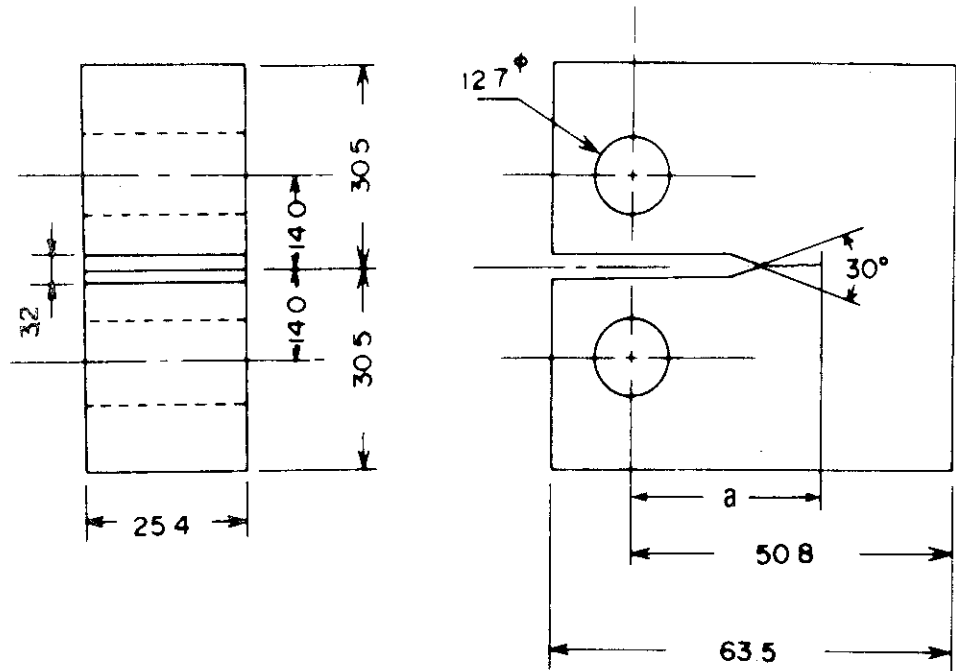


UNIT mm

$$K = P[(E / 2Bn)(dC/da)]^{1/2} \text{ after Mostovoy et al (1967)}$$

Fig. 3 Geometry of Contoured Double Cantilever Beam specimen.

CT



UNIT mm

$$K = (P/BW^{1/2})Y, Y = f(a/W) \text{ after ASTM E399}$$

Fig. 4 Geometry of Compact-Tension specimen.

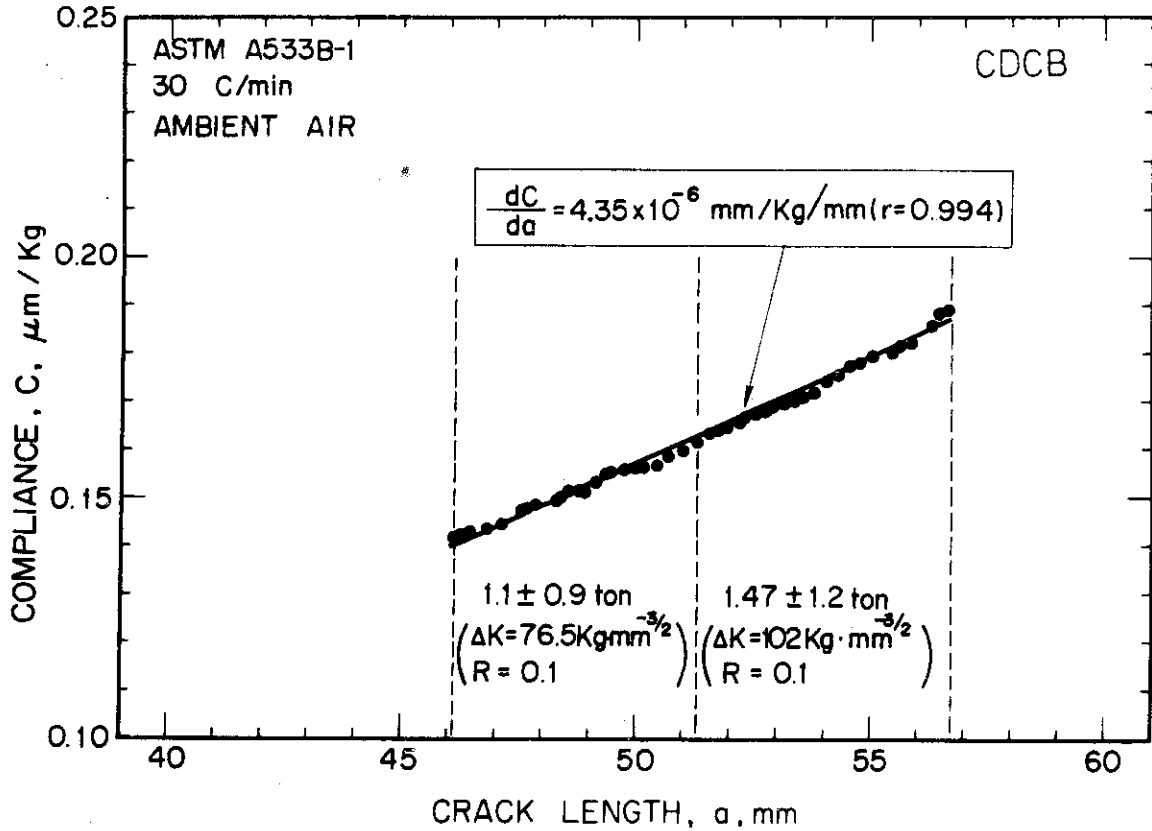


Fig. 5 Relationship between compliance and crack length for a CDCB specimen.

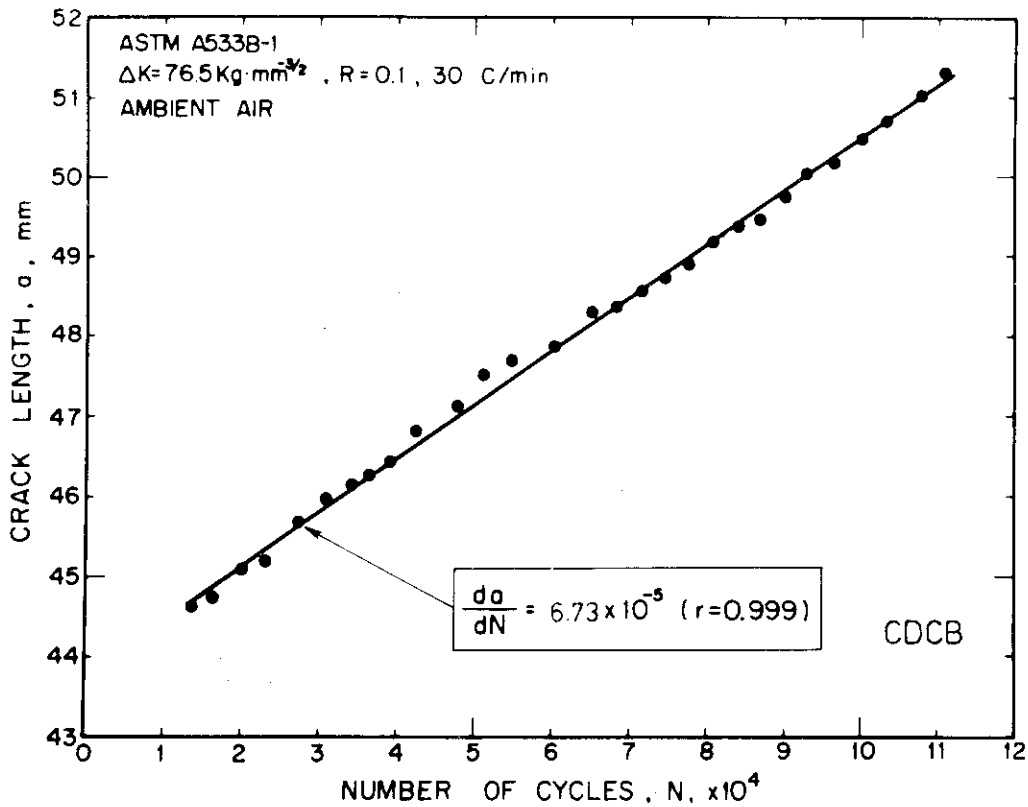


Fig. 6 Typical crack growth curve from a CDCB specimen.

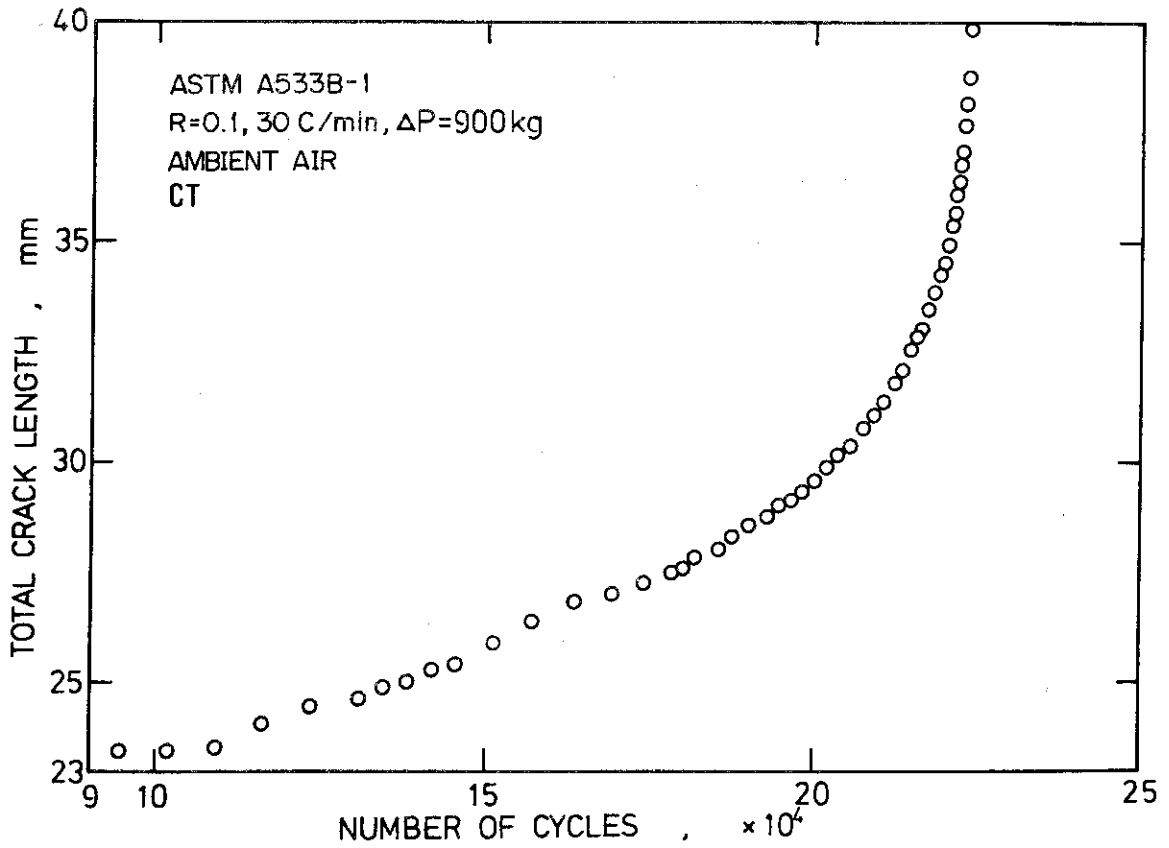


Fig. 7 Typical crack growth curve from a CT specimen.

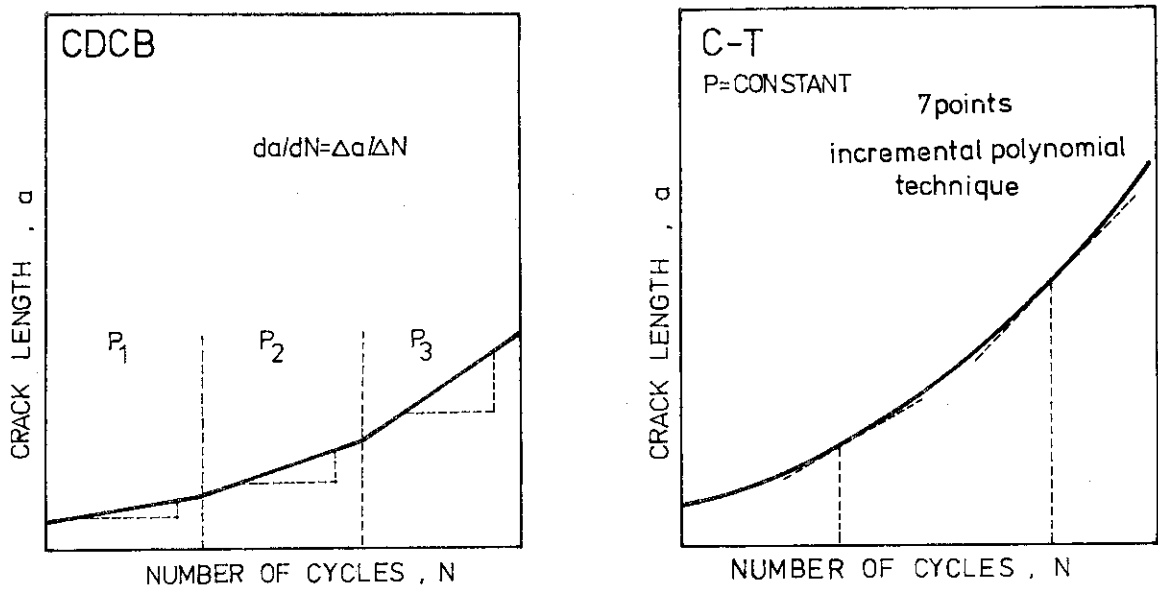


Fig. 8 Schematic drawings for comparison of data processing in the CDCB and the CT specimens.

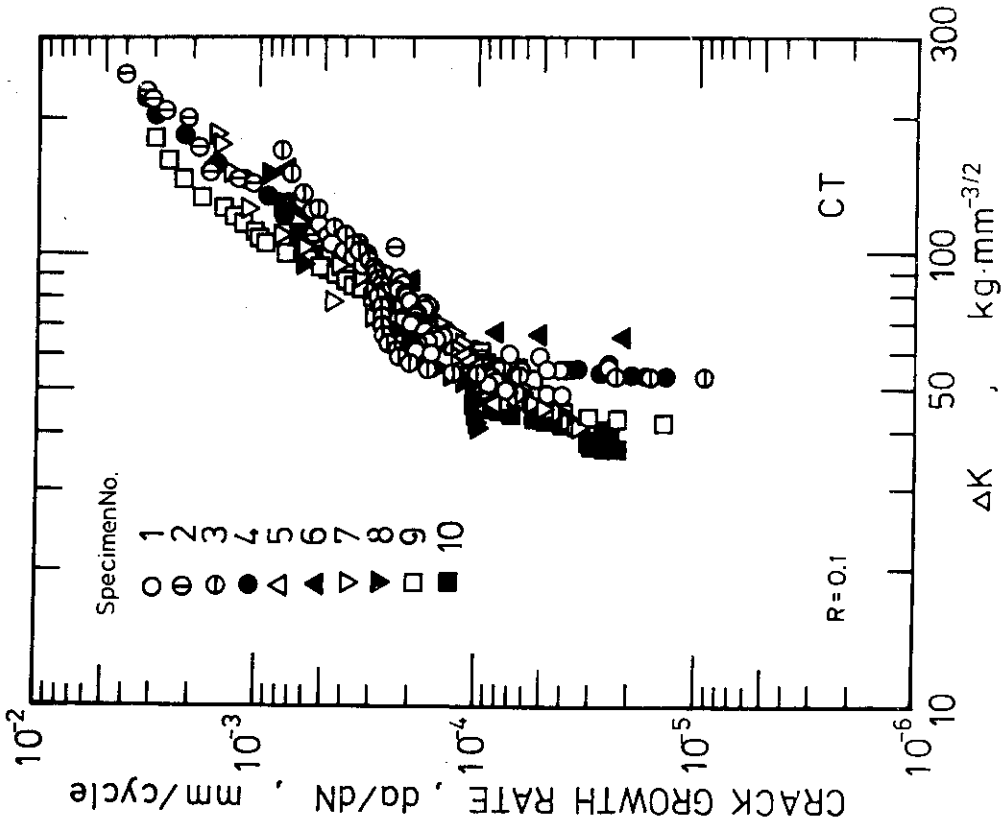


Fig. 10 Relationship between da/dN and ΔK for CT specimens.

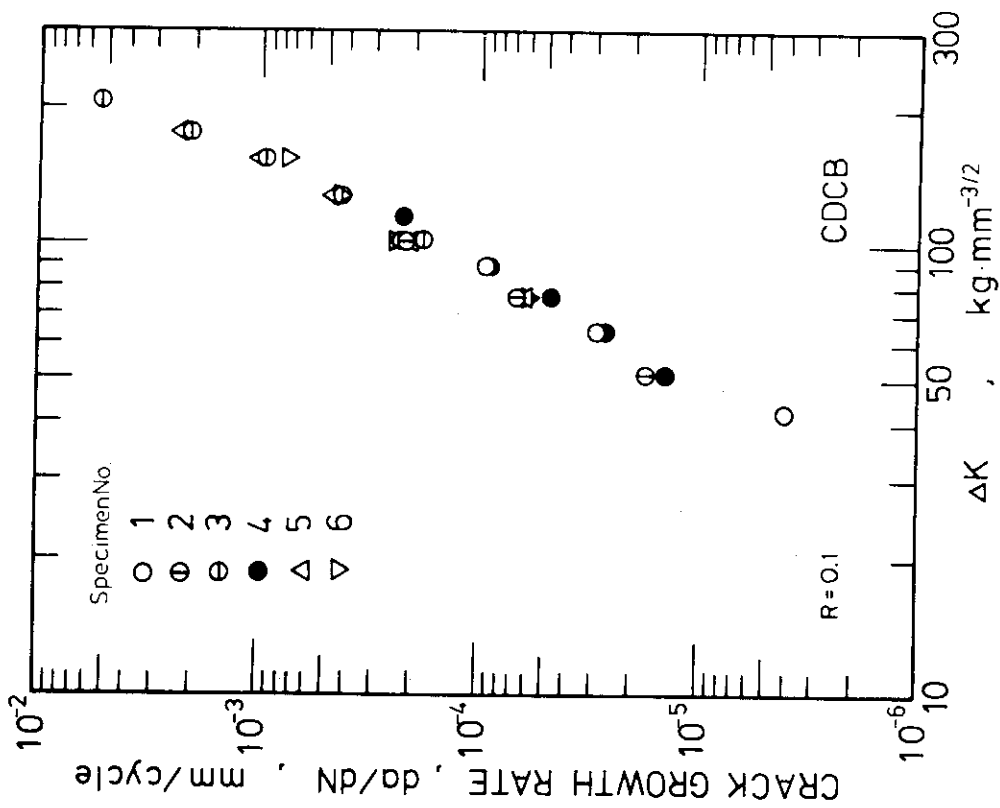


Fig. 9 Relationship between da/dN and ΔK for CDCB specimens.

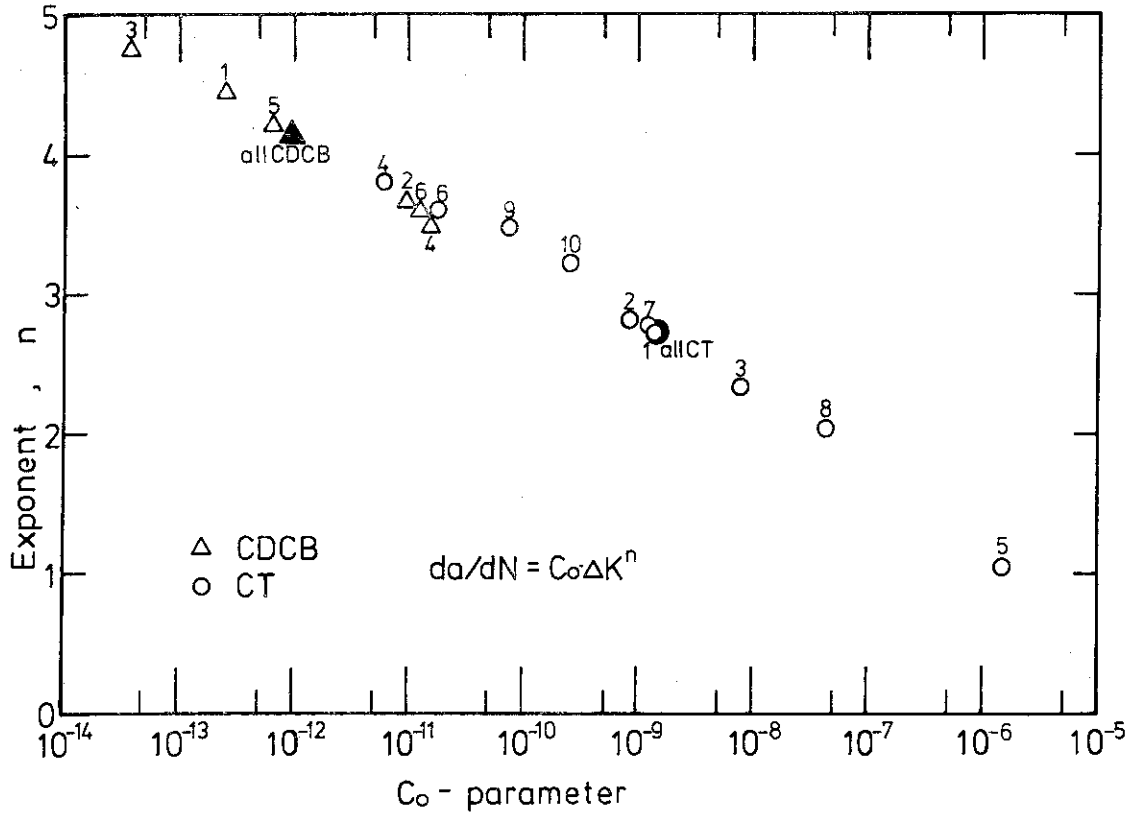


Fig. 11 Exponent n as a function of C_o for all CDCB and CT data.

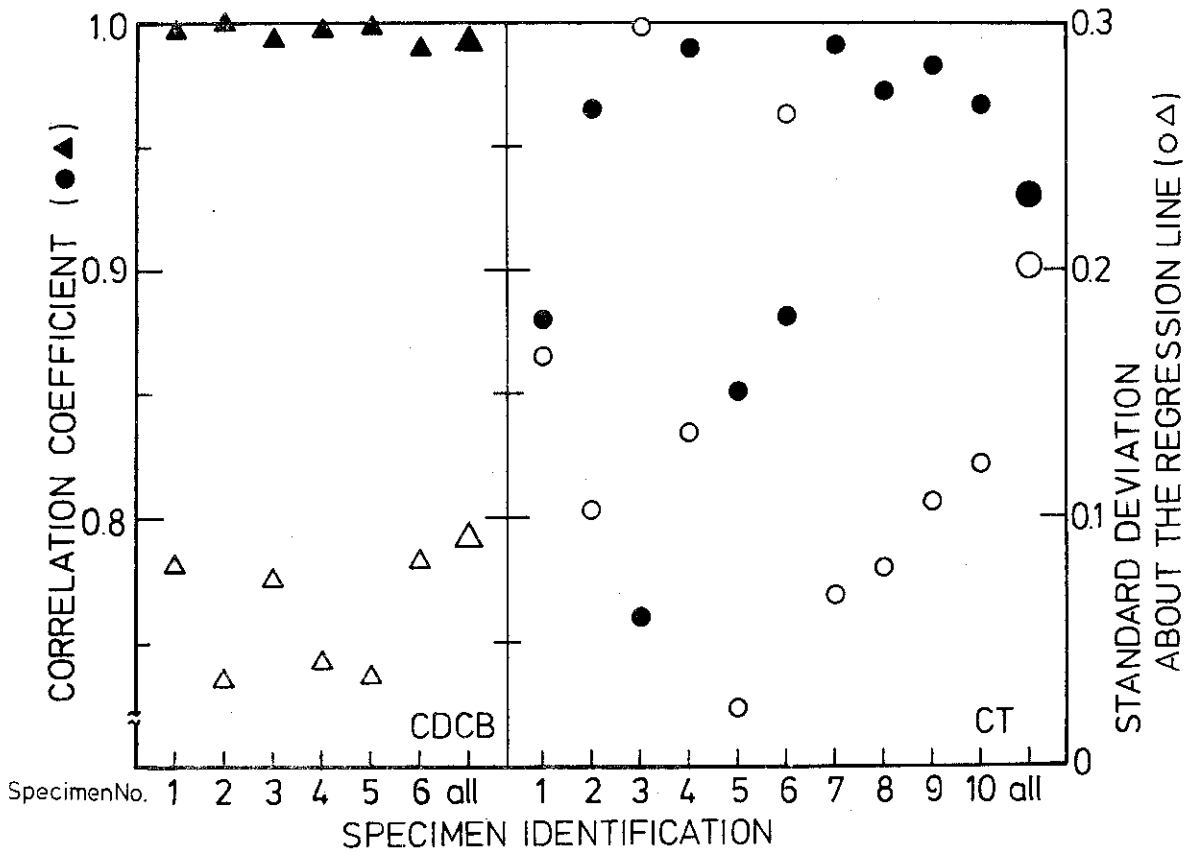


Fig. 12 Correlation coefficient and standard deviation about the regression line.

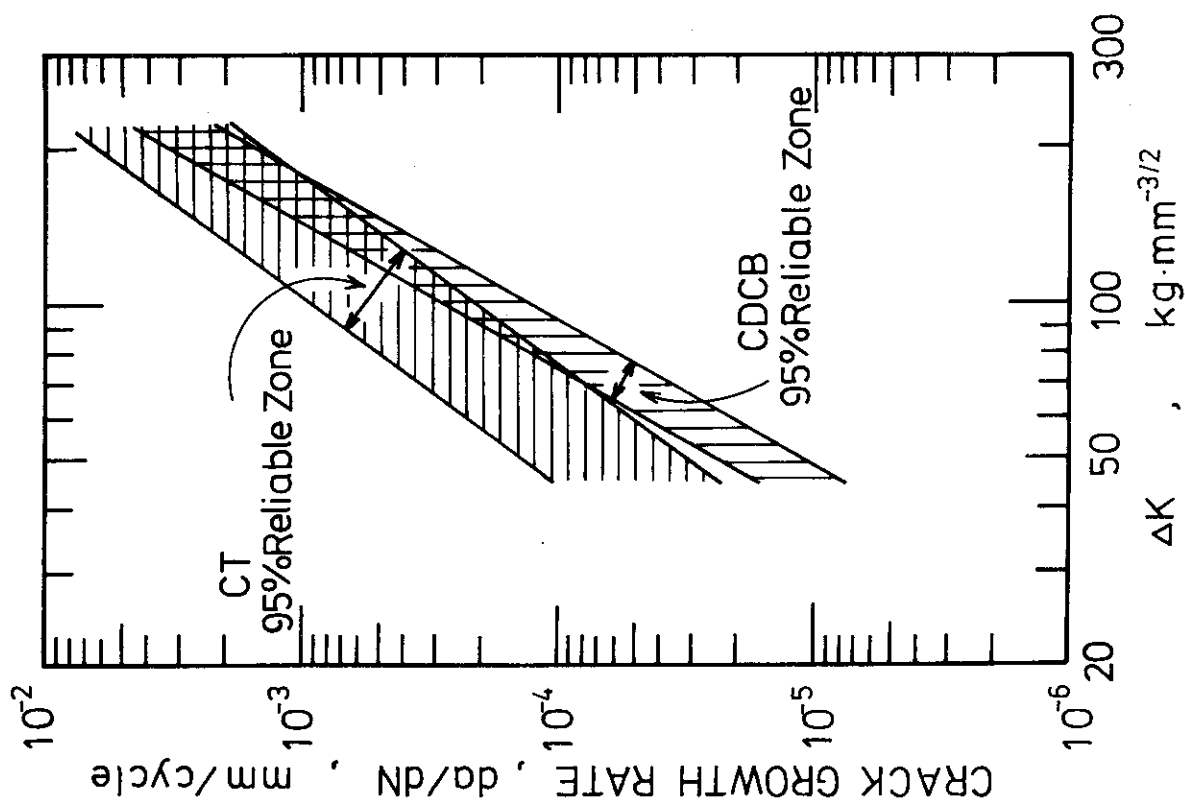


Fig. 14 95% reliable zone for both CDCB and CT specimen.

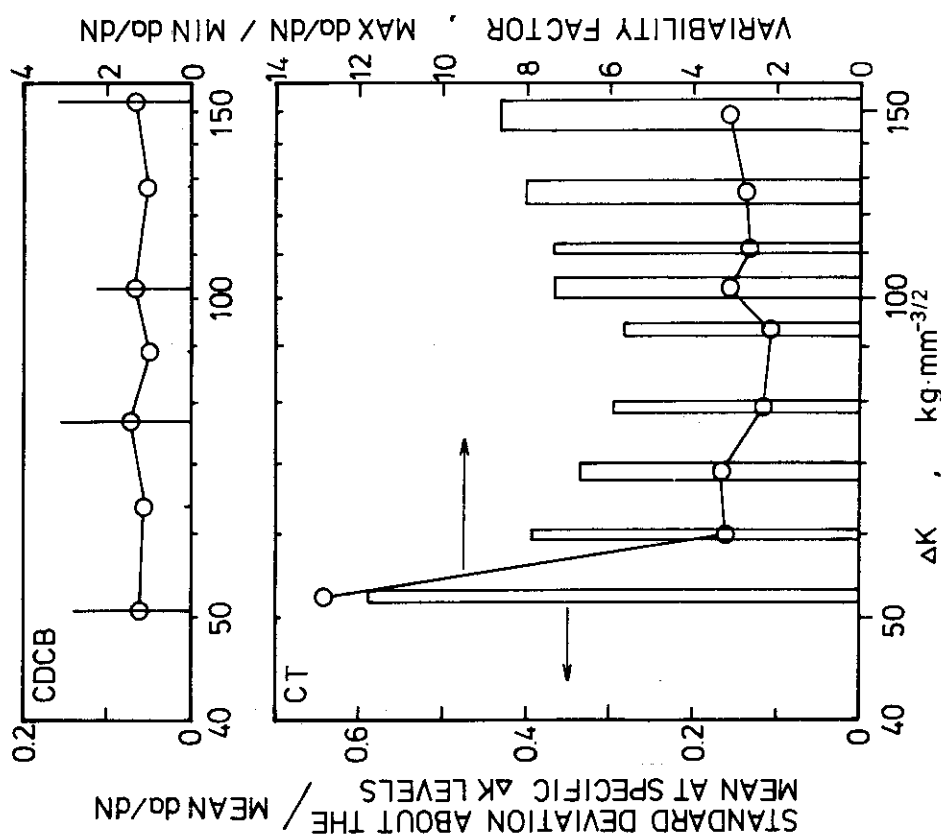


Fig. 13 Standard deviation about the mean and the variability factor.

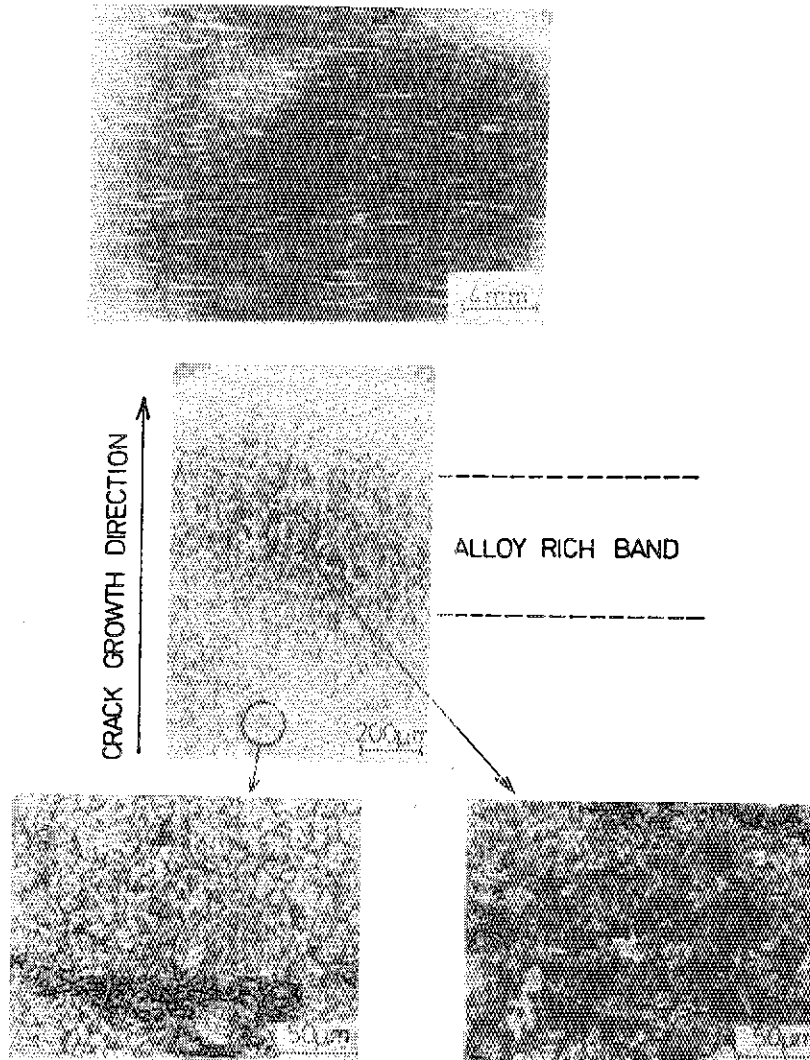


Fig. 15 Macro and microstructure of the specimen material at a section along the crack growth direction.