

JAERI-M
82-068

直流電位差法による高温での
疲れき裂長さの測定

1982年7月

松本 正勝・山内 勇^{*}・吉平 恒夫

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

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。

入手の問合せは、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 日立高速印刷株式会社

直流電位差法による高温での疲れき裂長さの測定

日本原子力研究所東海研究所安全工学部
松本 正勝・山内 勇^{*}・古平 恒夫⁺

(1982年5月27日受理)

疲れき裂進展試験におけるき裂長さの測定を自動的、連続的に行うために、直流電位差法による方法を採用した。本報告は上記の方法によって高温疲れき裂長さを電位差変化として定量的に得るために、SUS 304鋼と $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼についてキャリブレーションカーブを求めたもので高温試験においても室温と同様の精度でき裂長さの測定が可能であることがわかった。

⁺) 高温工学部

^{*}) 外来研究員；新日本製鉄(株)

Measurements of Fatigue Crack Length at Elevated Temperature
by D. C. Electrical Potential Method

Masakatsu MATSUMOTO, Isamu YAMAUCHI^{*} and Tsuneo KODAIRA⁺

Division of Nuclear Safety Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received May 27, 1982)

The direct current (d. c.) electrical potential method was used to automatically and continuously measure the crack length in cyclic crack growth test at elevated temperature. This report describes some results concerning the calibration curves, i.e. the relation between electrical potential change and amount of crack extention, using SUS 304 and 2½Cr-1Mo steels. It can be concluded that the measurements of fatigue crack length is possible even at elevated temperature as well as at room temperature with the equivalent accuracy.

Keywords : D.C. Electrical Potential Method, Fatigue Crack Length, Calibration Curve, Cyclic Crack Growth Test, Sensitivity, Beach Mark, Temperature Dependence, SUS 304 Steel, 2½Cr-1Mo steel

+ Division of High Temperature Engineering, Tokai Research Establishment,
JAERI

* On leave from Nippon Steel Corporation.

目 次

1. 緒 言	1
2. 実験方法	1
2. 1 供試材および試験片	1
2. 2 疲れき裂伝播試験	2
2. 3 疲れき裂長さの測定	2
2. 3. 1 光学的測定法	2
2. 3. 2 直流電位差法による方法	2
3. 実験結果および考察	3
3. 1 検出感度の検討	3
3. 2 直流電位差法によるキャリブレーションカーブ	4
3. 2. 1 室温における結果	4
3. 2. 2 高温における結果	5
3. 3 疲れき裂伝播試験結果	6
4. 結 論	7

Contents

1.	Introduction	1
2.	Experimental Procedure.....	1
2.1	Materials and Specimen	1
2.2	Cyclic Crack Growth Test	2
2.3	Measurements of Fatigue Crack Length.....	2
2.3.1	Optical Method	2
2.3.2	D.C. Electrical Potential Method.....	2
3.	Results and Discussion.....	3
3.1	Sensitivity Measurement	3
3.2	Calibration Curve by D.C. Electrical Potential Method	4
3.2.1	Results at Room Temperature	4
3.2.2	Results at Elevated Temperature	5
3.3	Behavior of Fatigue Crack Growth	6
4.	Conclusions	7
	References	8

1. 緒 言

原子炉圧力容器、配管等の構造健全性を評価する際、材料特性としての疲れき裂伝播速度は重要な因子の一つであり、機器の高温化に伴って高温での疲れき裂伝播データの取得が急がれる。

高温における疲れき裂伝播試験においては、き裂長さの定量的測定がポイントであり、測定手段として拡大鏡や読取顕微鏡による光学的方法¹⁾、また自動的、連続的測定のできる超音波、AE⁵⁾、電位差による方法やコンプライアンス変化を CODゲージで測定する方法などが考えられる。しかしながら高温下では、光学的に精度良く測定できない場合や、CODゲージ、センサーの温度制約等の技術的困難を伴い、現状では電位差法がもっとも有力な手段と考えられる。

電位差法の原理は、き裂を有する部材に一定の電流を流し、き裂をはさんだ電位差検出端子から、き裂進展に伴う電位差の增加分を検出することである。電位差法によるき裂長さの定量的測定には、電位差変化とき裂進展量との関係、いわゆるキャリブレーションカーブが必要であり、これを求めるには理論的方法と実験的方法の2つがある。前者の理論的方法は、比較的簡単な形状の試験片に限られ、たとえば中央切欠き付き有限板についての Johnson の解析¹⁹⁾、片側切欠きに関する Clark と Knott の解析²⁰⁾がある。さらに複雑な形状のものについては最近有限要素法による数値解析が試みられている。²¹⁾これらの解析結果を室温のみならず高温におけるキャリブレーションカーブとして用いるためには、前提条件として試験片と治具が電気的に絶縁され電流の漏洩が全くないことが必要である。しかるに室温はともかく、高温下で試験片と治具を電気的に絶縁することは技術的に容易でない。このため高温下で実験的にキャリブレーションカーブを求める必要があり、この方面的研究も最近行われつつあるが、絶縁なしに高温下でキャリブレーションカーブを求めるための技術的検討はほとんどなされていないと言っても過言ではない。本報告は、上記の課題をふまえ、高温下で電位差法を適用してキャリブレーションカーブを実験的に求める方法を確立するため行ったものである。

2. 実 験 方 法

2.1 供試材および試験片

供試材には板厚 20 mm の SUS 304 鋼および板厚 160 mm の $2\frac{1}{4}$ Cr-1 Mo 鋼 (ASTM A 387 Grade 22 Cf 2) を用いた。表 1 に供試材の化学成分および機械的性質を示す。

試験片の形状、寸法は図 1 に示すように ASTM E 647²³⁾ に準拠した CT 試験片で厚さが $\frac{1}{2}$ インチ (12.7 mm) のものである。試験片の採取は SUS 304 鋼では、板厚中心部より、また $2\frac{1}{4}$ Cr-1 Mo 鋼では板厚の $\frac{1}{4}$ 深さより行い、切欠きは板厚方向に、そしてき裂の進展方向が圧延方向に平行になるように加工している。また試験片には、半径 1.5 mm のサイドグ

1. 緒 言

原子炉圧力容器、配管等の構造健全性を評価する際、材料特性としての疲れき裂伝播速度は重要な因子の一つであり、機器の高温化に伴って高温での疲れき裂伝播データの取得が急がれる。

高温における疲れき裂伝播試験においては、き裂長さの定量的測定がポイントであり、測定手段として拡大鏡や読取顕微鏡による光学的方法¹⁾、また自動的、連続的測定のできる超音波、AE⁵⁾、電位差による方法やコンプライアンス変化を CODゲージで測定する方法などが考えられる。しかしながら高温下では、光学的に精度良く測定できない場合や、CODゲージ、センサーの温度制約等の技術的困難を伴い、現状では電位差法がもっとも有力な手段と考えられる。

電位差法の原理は、き裂を有する部材に一定の電流を流し、き裂をはさんだ電位差検出端子から、き裂進展に伴う電位差の增加分を検出することである。電位差法によるき裂長さの定量的測定には、電位差変化とき裂進展量との関係、いわゆるキャリブレーションカーブが必要であり、これを求めるには理論的方法と実験的方法の2つがある。前者の理論的方法は、比較的簡単な形状の試験片に限られ、たとえば中央切欠き付き有限板についての Johnson の解析¹⁹⁾、片側切欠きに関する Clark と Knott の解析²⁰⁾がある。さらに複雑な形状のものについては最近有限要素法による数値解析が試みられている。これらの解析結果を室温のみならず高温におけるキャリブレーションカーブとして用いるためには、前提条件として試験片と治具が電気的に絶縁され電流の漏洩が全くないことが必要である。しかるに室温はともかく、高温下で試験片と治具を電気的に絶縁することは技術的に容易でない。このため高温下で実験的にキャリブレーションカーブを求める必要があり、この方面の研究も最近行われつつあるが、絶縁なしに高温下でキャリブレーションカーブを求めるための技術的検討はほとんどなされていないと言っても過言ではない。本報告は、上記の課題をふまえ、高温下で電位差法を適用してキャリブレーションカーブを実験的に求める方法を確立するため行ったものである。

2. 実 験 方 法

2.1 供試材および試験片

供試材には板厚 20 mm の SUS 304 鋼および板厚 160 mm の 2 1/4 Cr - 1 Mo 鋼 (ASTM A 387 Grade 22 Cf 2) を用いた。表 1 に供試材の化学成分および機械的性質を示す。

試験片の形状、寸法は図 1 に示すように ASTM E 647²³⁾ に準拠した CT 試験片で厚さが 1/2 インチ (12.7 mm) のものである。試験片の採取は SUS 304 鋼では、板厚中心部より、また 2 1/4 Cr - 1 Mo 鋼では板厚の 1/4 深さよりを行い、切欠きは板厚方向に、そしてき裂の進展方向が圧延方向に平行になるように加工している。また試験片には、半径 1.5 mm のサイドグ

ループを加工し実断面の厚さを 10 mm として疲れき裂進展の湾曲が生じないよう配慮した。この試験片に直流電位差法を適用し、き裂長さの測定を行うため電流端子と電圧検出端子を各 2 本、計 4 本の銅棒を TIG 溶接した。なお初期き裂長さ (a_0) は放電加工により荷重線から 10 mm 深さに加工した。

2.2 疲れき裂伝播試験

写真 1 に電気炉内に試験片を取付けた状況を示す。試験機は電気油圧サーボ式 10 ton 疲労試験機に電気加熱炉を取付けて、室温および高温で疲れき裂伝播試験を実施した。

SUS 304 鋼についての疲れき裂伝播試験は、大気中にて室温、300 °C および 600 °C で実施した。また $2\frac{1}{4}$ Cr - 1 Mo 鋼については、室温と 400 °C で実施した。試験温度は試験片のき裂線から 1 mm 上表面に熱電対を取付けて温度のコントロールとモニターを行い、所定の温度に安定してから約 1 時間後に実験を開始した。本実験では温度分布と変動を合わせて 3 °C 以内に保持することができた。なお、疲れき裂伝播試験条件としては、繰り返し負荷条件は荷重制御で、応力比は 0.1 であり、疲れき裂伝播試験時の波形は三角波、繰り返し速度は 5 Hz である。

2.3 疲れき裂長さの測定

2.3.1 光学的測定法

光学的なき裂長さの測定は、2つの方法を用いており、1つは写真 2 に試験片の外観を示すように、試験片表面を研磨により鏡面仕上げ後、1 mm 間隔のけがき線を試験片に直接付け拡大鏡により測定を行った。なお、このけがき線とき裂長さは高温での実験においても電気炉に設けた観察窓から鮮明に観察できた。

一方、ビーチマークによるき裂長さの測定は、写真 2 に示した破面写真からわかるように、き裂進展終了後に試験片を破断しビーチマークを現わして行った。ここでビーチマークとは、き裂進展に伴って、あるき裂長さのときに荷重条件を変えて破面写真に示すように疲労き裂の痕跡を試験片に残す。さらに、試験完了後読み取り顕微鏡を用いて破面観察によりき裂長さを測定し、拡大鏡による測定と比較しようとするものである。ビーチマーク導入の荷重条件は図 2 に示すように本実験の場合は P_{max} を一定に保ち、ビーチマーク導入の最小荷重 P_B を $\frac{1}{2} P_{max}$ ²⁴⁾ として目的を達することができた。ビーチマークによるき裂長さの測定は、目視に比べてデータ点は少いが定量的に精度良く測定できる利点がある。

2.3.2 直流電位差法による方法

電位差法は試験片に一定電流を流し、き裂の進展に伴う試験片の抵抗変化を、き裂をはさむ位置で電位差として検出し、き裂長さを求める方法である。定電流電源としては、直流および交流の 2 種類あるが本研究では、つぎの理由から直流法を採用した。すなわち布村らによれば²⁴⁾、交流法では高感度、高安定の交流増幅器の使用が可能である反面、安定した大電流が得難く、

き裂長さとの相関が不安定で、動的き裂の追従性がよくないなどの欠点を報告している。以上の欠点を勘案し直流法を用いた。

試験片内にのみ電流が流れている場合、ポテンシャル ϕ は、任意の点 (x, y) においては(1)式のように表わされる。

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

Johnson¹⁹⁾は、図3に示すような中央切欠きを有する有限板において、解析的検討を加え以下の解を得た。

$$\frac{V}{V_0} = \frac{\cosh^{-1} \left(\frac{\cosh \pi y / w}{\cos \pi a / w} \right)}{\cosh^{-1} \left(\frac{\cosh \pi y / w}{\cos \pi a_0 / w} \right)} \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

ここで、 a_0 は初期き裂長さ、 a が任意のき裂長さであり、 V_0 は切欠きの両側の距離 y における 2 点間の初期電位差、 V は a のときの電位差、そして w は試験片幅である。この式から、き裂長さと電位差との関係は、試験温度、材料等に影響されず、試験片の幾何学的形状、寸法のみに依存することがわかる。したがって、図 3 の中央切欠き付有限板のような比較的簡単な形状の場合には、幾何学的条件を相似に保てば、 a/a_0 と V/V_0 は一義的な対応関係にあることがわかる。

さらに、Clark と Knott²⁰⁾ は、片側切欠き付試験片における電位差とき裂長さとの関係を解析し、 a/a_0 と V/V_0 について Johnson と類似の対応関係を得ている。以上のことから a/a_0 と V/V_0 との関係、すなわちキャリブレーションカーブを得ておけば、試験温度、鋼種等にかかわりなく、電位差変化を測定することによって定量的なき裂長さの測定が原理的に可能であることが推察される。

直流電位差法による疲れき裂長さの測定回路を図4に電位差法ブロック線図として示す。直流定電流電源により5アンペアを試験片に流し、き裂をはさんだ電圧測定端子によりき裂進展に伴う微小電圧の変化を測定するものである。ここでオフセット回路を用いたのは、初期切欠き(a_0)で5アンペア流したときの電位(V_0)の逆電圧を掛けて V_0 を消去し、疲労き裂進展(Δa)による微小電位(V_a)のみを測定するためである。微小電位を記録針に入力し、チャート紙を時間送りさせてき裂長さの進展による電位差変化を読み取った。ステンレス鋼の場合、初期電位 V_0 は600μV程度、き裂進展による変化量 V_a は約500μVであった。また2 1/4Cr-1Mo鋼の場合、初期電位 V_0 は200μV程度、そして変化量 V_a は350μV程度であった。

3. 実験結果および考察

3.1 検出感度の検討

⁷⁾ 直流電位差法において、電圧端子位置が電位差検出感度に影響すると言われており、その程

き裂長さとの相関が不安定で、動的き裂の追従性がよくないなどの欠点を報告している。以上の欠点を勘案し直流法を用いた。

試験片内にのみ電流が流れている場合、ポテンシャル ϕ は、任意の点 (x, y) においては(1)式のように表わされる。

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

Johnson¹⁹⁾は、図3に示すような中央切欠きを有する有限板において、解析的検討を加え以下の解を得た。

$$\frac{V}{V_0} = \frac{\cosh^{-1} \left(\frac{\cosh \pi y / w}{\cos \pi a / w} \right)}{\cosh^{-1} \left(\frac{\cosh \pi y / w}{\cos \pi a / w} \right)} \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

ここで、 a_0 は初期き裂長さ、 a が任意のき裂長さであり、 V_0 は切欠きの両側の距離 y における 2 点間の初期電位差、 V は a のときの電位差、そして w は試験片幅である。この式から、き裂長さと電位差との関係は、試験温度、材料等に影響されず、試験片の幾何学的形状、寸法のみに依存することがわかる。したがって、図 3 の中央切欠き付有限板のような比較的簡単な形状の場合には、幾何学的条件を相似に保てば、 a/a_0 と V/V_0 は一義的な対応関係にあることがわかる。

さらに、Clark と Knott²⁰⁾ は、片側切欠き付試験片における電位差とき裂長さとの関係を解析し、 a/a_0 と V/V_0 について Johnson と類似の対応関係を得ている。以上のことから a/a_0 と V/V_0 との関係、すなわちキャリブレーションカーブを得ておけば、試験温度、鋼種等にかかわりなく、電位差変化を測定することによって定量的なき裂長さの測定が原理的に可能であることが推察される。

直流電位差法による疲れき裂長さの測定回路を図4に電位差法ブロック線図として示す。直流定電流電源により5アンペアを試験片に流し、き裂をはさんだ電圧測定端子によりき裂進展に伴う微小電圧の変化を測定するものである。ここでオフセット回路を用いたのは、初期切欠き(a_0)で5アンペア流したときの電位(V_0)の逆電圧を掛けて V_0 を消去し、疲労き裂進展(Δa)による微小電位(V_a)のみを測定するためである。微小電位を記録針に入力し、チャート紙を時間送りさせてき裂長さの進展による電位差変化を読み取った。ステンレス鋼の場合、初期電位 V_0 は600μV程度、き裂進展による変化量 V_a は約500μVであった。また2 1/4Cr-1Mo鋼の場合、初期電位 V_0 は200μV程度、そして変化量 V_a は350μV程度であった。

3. 実験結果および考察

3.1 滲出感度の検討

⁷⁾ 直流電位差法において、電圧端子位置が電位差検出感度に影響すると言われており、その程

度を調べるため、室温にて試験片に一定電流（5アンペア）を流し、電圧測定端子を数個所取付け、疲れき裂長さと電位差変化との関係を調べた。なお、5アンペアの電流を用いた理由は、試験片自体の抵抗、試験片と電流端子との接触抵抗による局部的温度上昇等の不安定要因を軽減せしめるためには、小電流であることが望ましく、またき裂進展に伴う電位差変化量が計測器の感度から考えて十分に検出可能な範囲にあること等により、5アンペアを選定した。ここで検出感度とは、初期き裂(a_0)の電位 V_0 に対する任意のき裂長さ(a)の電位 V_a の比(V_a/V_0)と定義する。図5にSUS 304鋼および $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼の両鋼種について電圧端子間距離と電位差変化との関係を治具の絶縁のある場合とない場合の両方法について示す。同図から電圧測定端子間距離が広くなるにつれ絶縁の有無にかかわらず電位差出力も大きくなっていくことがわかる。すなわち電圧端子間距離が大きいほど検出感度が上昇する。しかしながら同図からわかるように電圧端子間距離が10mm以下であれば、検出感度に対する電圧端子間距離の影響はわずかであり、ほぼ無視できるものと考えて良いであろう。よって本実験では、検出感度がほぼ一定である中央切欠部先端に電圧測定端子を取付け、全ての試験片について電圧端子間距離が一定（本実験では図1に示すように8mm）となるように配慮した。

つぎに治具を絶縁して漏洩電流を無くした場合と、治具の絶縁をしなかった場合を比較して絶縁の有無の検出感度に及ぼす影響をみてみると、絶縁して漏洩電流を無くした方がSUS 304鋼と $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼の鋼種の相違にかかわらず検出感度に差は認められず良い一致を示した。一方、治具の絶縁をしなかった場合は鋼種により検出感度は異ってくる。しかし、その相違は、さほど大きくはないといえよう。なお治具を絶縁しないで疲れき裂長さを測定しようとする場合は、なるべく太い電流通電銅棒を用いて測定系外への漏洩電流が少なくなるようにすることが肝要である。すなわち、通電端子として細い導線や比較的抵抗の大きい導線を用いるとノイズを拾い易く、又、接触抵抗による温度上昇を伴い安定な測定ができない点がみられた。そこで本実験では、直径2.6mmの銅棒をTIG溶接して、実験に供し成功裡にデータを取得できた。

3.2 直流電位差法によるキャリブレーションカーブ

3.2.1 室温における結果

SUS 304鋼では室温、300°C及び600°C、 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼については室温及び400°Cにおいて疲れき裂伝播試験を実施し、き裂長さと電位差変化との関係を求めた。以下に試験片と治具を電気的に絶縁した場合としない場合について結果を詳述する。

図6はSUS 304鋼および $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼の試験片と治具を絶縁しない場合の結果を比較して示す。ここで、 a_0 : 予き裂長さ(人口切欠のみ)、 a : 任意のき裂長さ、 V_0 : a_0 のときの電位、 V_a : a のときの電位である。なお、き裂長さの測定は、拡大鏡およびビーチマークによる光学的方法を併用し、電位差変化との関係に整理して示す。

同図から、 a/a_0 と V_a/V_0 との関係(以下キャリブレーションカーブ)は、ビーチマークおよび拡大鏡による測定とともにバラツキは同程度であることがわかる。さらに、ビーチマークによる疲れき裂前縁の形状観察から、き裂は表面と板厚内部で湾曲ではなく直線状に進展してい

ることがわかった。そこで、両鋼種とともに、すべてのデータについて最小自乗法により最適曲線を求めてみると、図中の実線が得られた。キャリブレーションカーブは、SUS 304 鋼と $2\frac{1}{4}$ Cr-1 Mo 鋼で勾配が異なるけれども、 a/a_0 と V_a/V_0 との関係をみてみると、 V_a/V_0 測定値自体も若干の温度変動等により影響されることを前提としても a/a_0 は両鋼種ともに高々 0.01 程度のずれであり、 a_0 は 2.25 mm であるから 0.2~0.3 mm 程度の誤差でき裂長さを求めることが可能であると推察される。

以上の実験事実から、室温においては治具を絶縁しなくとも試験片毎に電位差法と光学的方法（たとえばビーチマーク）との併用によりキャリブレーションカーブを求めれば、上記程度の精度で疲れき裂長さの連続測定が可能であることが明らかである。

図 7 に治具を絶縁した場合の室温における SUS 304 鋼および $2\frac{1}{4}$ Cr-1 Mo 鋼の疲れき裂伝播試験結果を V_a/V_0 と a/a_0 との関係に整理して示す。なお試験片と治具との絶縁は試験片を取り付けた引張治具の上下にファイバープレートを入れて試験片を電気的に絶縁させ漏洩電流を無くすよう配慮している。同図から SUS 304 鋼及び $2\frac{1}{4}$ Cr-1 Mo 鋼のいずれも良好な直線関係を示しており、さらに図 6 の絶縁なしの場合と比較して特徴的なことは、絶縁した場合は SUS 304 鋼及び $2\frac{1}{4}$ Cr-1 Mo 鋼とともにキャリブレーションカーブは同一とみなしてさしつかえないことである。このことは絶縁処置をして漏洩電流がない場合は Johnson¹⁹⁾ の理論的解析から（2式参照）推察されることではあるが、 V_a/V_0 と a/a_0 との関係（キャリブレーションカーブ）は、試験片形状、寸法、電圧端子位置等の幾何学的条件にのみ依存し、材料、試験温度等には依存しないことより理解されるであろう。

図 8 は Ritchie と Bathe²¹⁾による ADINA コードを用いた有限要素法による数値解析結果と本実験を比較したものである。Ritchie と Bathe も著者らとほぼ同じ試験片形状および電流電圧端子位置を採用している。彼等の数値解析の結果は、通常のキャリブレーションカーブ (V_a/V_0 と a/a_0 との関係) ではなく、 V_a/V_0 と a/w との関係 (w は荷重点からの試験片幅、 a は荷重点からのき裂長さ) で整理されているので、本実験の場合は図 7 をもとに再プロットした。同図から数値解析結果と著者らの実験データは比較的良好な一致を示していることがわかる。

3.2.2 高温における結果

高温では SUS 304 鋼は 300 °C および 600 °C、 $2\frac{1}{4}$ Cr-1 Mo 鋼は 400 °C において疲れき裂伝播試験を実施した。なお高温試験の場合は、試験片と治具を絶縁することが困難なのですべて絶縁しないで行った。

図 9 に SUS 304 鋼の 600 °C での実験結果を示した。同図から明らかなように、拡大鏡によるき裂長さとビーチマークによるき裂長さは同程度のバラツキで良い一致を示しており、またき裂長さと電位差変化は、直線関係にあることがわかる。

図 10 に SUS 304 鋼の室温、300 °C および 600 °C でのき裂長さ（ビーチマークによる）と電位差変化との関係を示す。室温でのき裂長さと電位差変化との関係は直線関係にあるが、300 °C では勾配がゆるくなり 600 °C では、き裂長さが一定量 (V_a/V_0 で約 1.4 程度以上) を越えるとさらに勾配がゆるくなつて V_a/V_0 側に寄つてくることがわかる。これは塑性域の

電位差出力への寄与によるものであり²⁵⁾、き裂が進むにつれて、また高温になればなるほど降伏強さ σ_y が下がり、よりき裂先端の塑性域が大きくなるためと考えられる。なお図9および図10においてビーチマークによるキャリブレーションカーブの場合、前述の図6と比較して明らかのように、データのバラツキがほとんどかわらず、室温と同程度の精度でき裂長さの測定が高温でも可能であるものと考えられる。

図11に $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼についてのき裂長さと電位差変化との関係を室温と 400°C におけるキャリブレーションカーブとして示す。き裂長さと電位差変化は、 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼の場合は直線関係にあり室温と 400°C では良い一致を示す。このことはSUS 304鋼に比して $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼は 400°C 程度ではまだ降伏強さも高く、塑性域の寄与の程度は少いために室温と 400°C でキャリブレーションカーブがかわらないものと思われる。

図12にADINAコードを用いた有限要素法による数値解析結果と高温におけるSUS 304鋼および $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼に関する実験結果を対比して示す。前者は図8の解析結果²¹⁾と同一のものであり、後者は本実験で得られた絶縁なしの場合のデータである。同図から、絶縁を施してないためもあり両者の一致は必ずしも良くない。

以上述べてきたことから明らかなように、試験片と治具を電気的に絶縁した場合は、実験によるキャリブレーションカーブは室温において、数値解析結果と比較的良好な一致を示し、理論式のように鋼種の相違、試験温度に無関係となることも予測され、高温用キャリブレーションカーブとしての適用も原理的には可能と推察される。しかし前述のように一般に高温においての試験片と治具との絶縁はCT試験片のような場合は技術的に困難である。しかしながら、以上の高温における実験結果から明らかなように絶縁のない場合でもビーチマークによる光学的方法と直流電位差法を併用すれば、高温での疲れき裂長さの測定は室温と同程度の $0.2 \sim 0.3$ mm 以内の精度で可能であることがわかる。

3.3 疲れき裂伝播試験結果

SUS 304鋼の(600°C)での疲れき裂伝播試験結果をき裂伝播速度 da/dN を応力拡大係数範囲 ΔK で整理して図13に示す。ここで、き裂伝播速度 da/dN は、直流電位差法と数点のビーチマークの併用によりき裂長さと電位差変化との関係をキャリブレーションとして、き裂長さを求めて解析に供したものである。 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼の 400°C での疲れき裂伝播試験結果を図14に示す。同図においてもキャリブレーションカーブをビーチマークと直流電位差法を併用して得て、き裂長さを求め da/dN と ΔK に整理したものである。図13及び図14にJamesのデータ^{26, 27)}も併せて示すが著者らの実験結果と比較して両者はかなり良好な一致を示しているとみてさしつかえないであろう。

以上述べてきたことから明らかなように直流電位差法は、高温における疲れき裂伝播試験におけるき裂長さの測定手段として有力な方法であることを示しているといえよう。

4. 結 論

SUS 304鋼及び $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼より採取したC T 試験片（厚さ10 mm）を用い、室温及びSUS 304鋼で300°Cと600°C、 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼では400°Cにおいて疲れき裂伝播試験を実施した。疲れき裂長さの測定は、直流電位差法および拡大鏡とビーチマークによる光学的方法を用い、試験片と治具との絶縁の有無を含めて、直流電位差法の高温疲れき裂伝播試験法への適用性を検討した結果、以下の結論が得られた。

- 1) 電位差検出感度に及ぼす電位端子間距離の影響は、端子間距離の増加につれて感度も増加するが、10 mm以内であれば検出感度は一定となる。
- 2) 室温で治具に絶縁を施して、き裂長さと電位差変化の関係を求めるとき鋼種の違いによらず、同一のキャリブレーションカーブとなり、ADINAコードによる有限要素法の数値解析結果と比較して良好な一致を示す。
- 3) 高温での絶縁は技術的に困難な場合が多いので絶縁なしで実験した結果、キャリブレーションカーブは試験片毎に異なっていた。しかしビーチマークと電位差法によって各試験片ごとに、キャリブレーションカーブを求めて、き裂長さを推定すれば0.2~0.3 mm程度の誤差で疲れき裂長さの測定が可能である。

最後に、本実験を遂行するに当たり、有益な御助力、御助言を賜りました構造強度研究室、宮園昭八郎室長、柴田勝之副主任研究員、高温材料強度研究室、奥達雄室長に深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) C. E. Richards : "The Measurement of Crack Length and Shape During Fracture and Fatigue", edited by C. J. Beevers, Engineering Materials Advisory Services LTD., United Kingdom, 461 (1980)
- 2) J. M. Coffey : ibid, 345 (1980)
- 3) M. M. Catou et al, :ibid, 387 (1980)
- 4) P. J. Mudge :ibid, 393 (1980)
- 5) T. C. Lindley and P. McIntyre :ibid, 285 (1980)
- 6) M. D. Halliday and C. J. Beevers :ibid, 85, (1980)
- 7) J. F. Knott :ibid, 113, (1980)
- 8) G. S. Booth :ibid, 136, (1980)
- 9) I. M. Austen :ibid, 164, (1980)
- 10) R. P. Wei and R. L. Brazill :ibid, 190 (1980)
- 11) K. R. Watt :ibid, 202 (1980)
- 12) W. D. Dover et al :ibid, 222 (1980)
- 13) R. W. Gardiner :ibid, 261, (1980)
- 14) K. H. Schwalbe and W. Setz :ibid, 267 (1980)
- 15) D. Slagter and M. A. Lont :ibid, 272 (1980)
- 16) T. V. Duggan and M. W. Procter :ibid, 1, (1980)
- 17) C. E. Richards and W. F. Deans :ibid, 28, (1980)
- 18) P. M. Scott and A. E. Truswell :ibid, 69, (1980)
- 19) H. H. Johnson :Materials Research and Standards, 442~445, (1965)
- 20) G. Clark and J. F. Knott :J. Mech. Phys. Solids, 23, (1975), 265~276.
- 21) R. O. Ritchie and K. J. Bathe :Int. J. of Fracture, 15 (1979), 47~55.
- 22) A. Saxena :Engg. Fracture Mechanics, 13 (1980), 4, 741~750.
- 23) ASTM E 647-78T : Tentative Test Method for CONSTANT-LOAD-AMPLITUDE FATIGUE CRACK GROWTH RATES ABOVE 10^{-8} m/CYCLE.
- 24) 布村成具, 肥後矢吉 :鉄と鋼, 67 (1981), 9, A177
- 25) 古平恒夫, 松本正勝, 中島伸也 :鉄と鋼, 68, (1982), 8, 1040~1045
- 26) L. A. James :Atomic Energy Review, 141, (1976) 37~85
- 27) L. A. James :Trans. ASME, J. of Engg Materials and Technology, 102 (1980), 187~191

表1 SUS 304, 2^{1/4}Cr-1Mo 鋼の化学成分および機械的性質

a) 化学組成

	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo
SUS 304	0.07	0.55	1.04	8.86	18.39	0.09
2 ^{1/4} Cr-1Mo	0.15	0.05	0.56	0.11	2.35	0.96

b) 機械的性質

	引張強さ (kg/mm ²)	0.2%耐力 (kg/mm ²)	伸び (%)
SUS 304	60.0	25.0	62.0
2 ^{1/4} Cr-1Mo	60.0	47.0	23.8

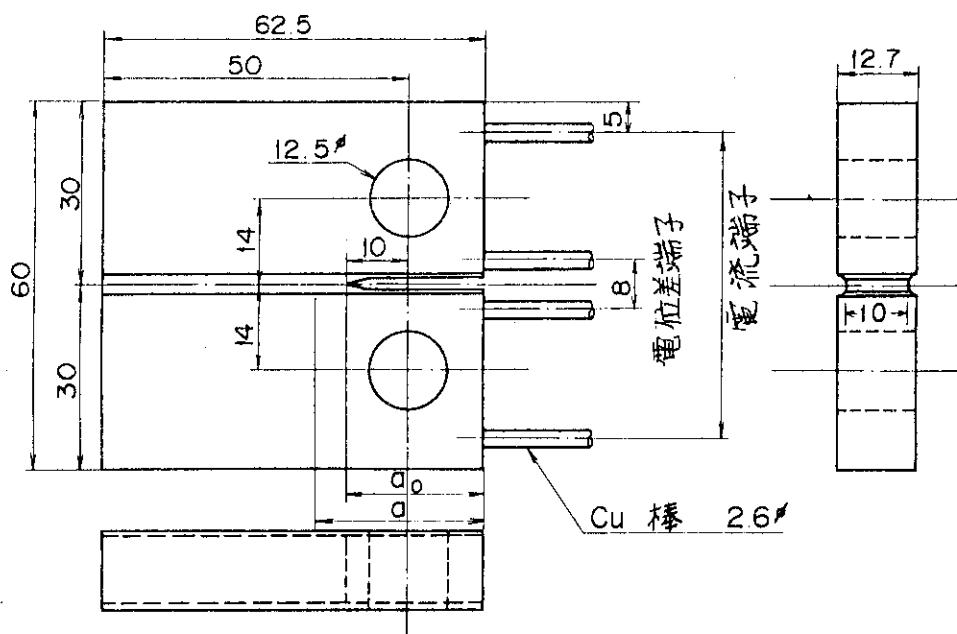


図1 CT 試験片 (ASTM E647)

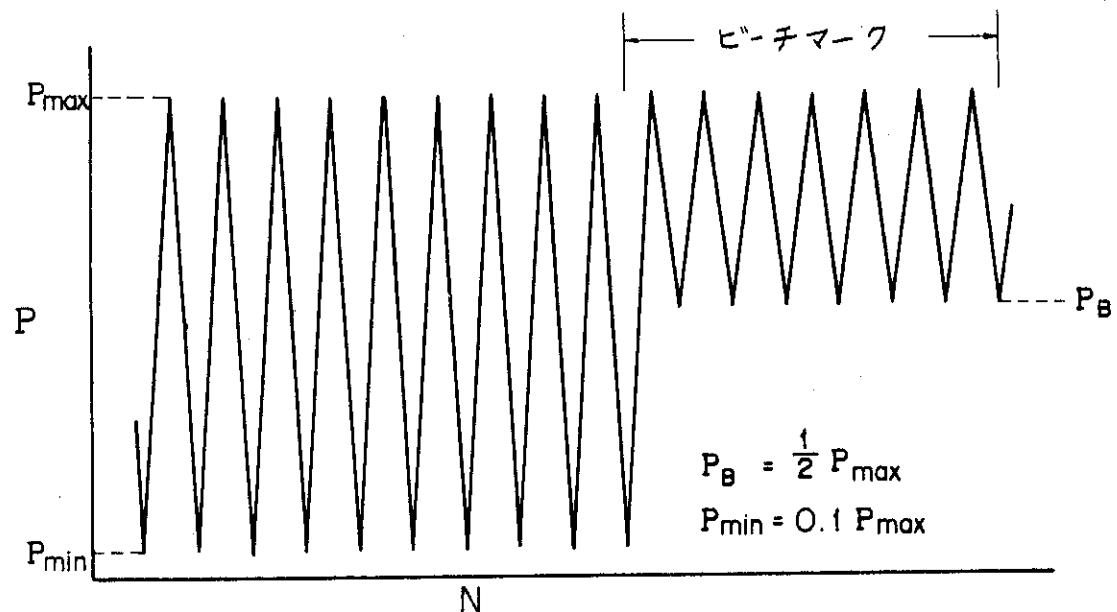


図 2 疲労試験とピーチマークの荷重条件

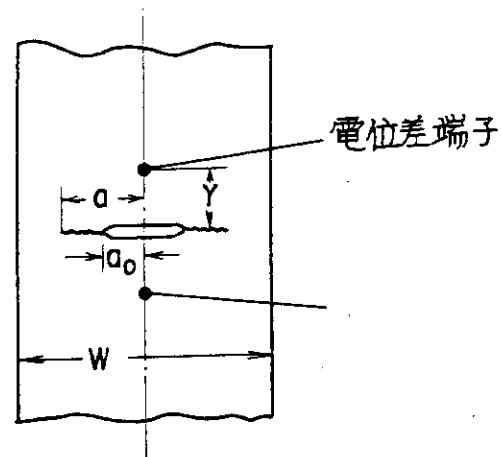


図 3 電位差法の原理

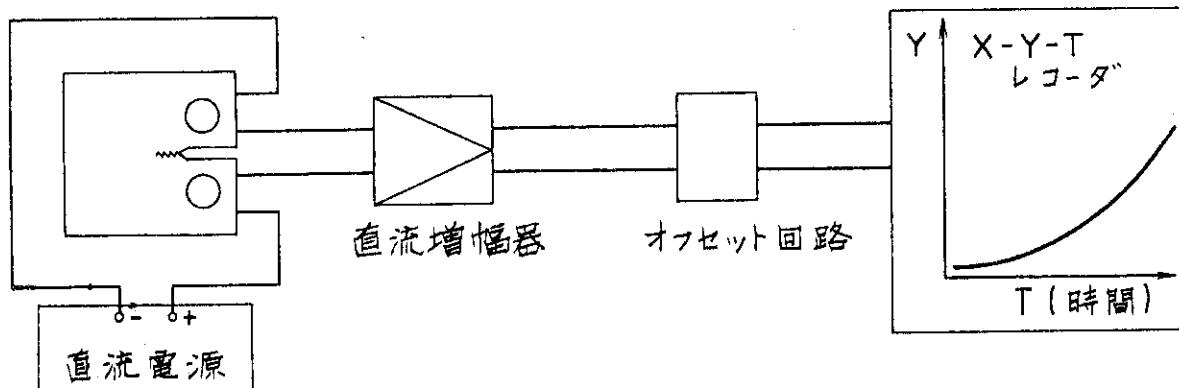


図4 電位差法ブロック線図

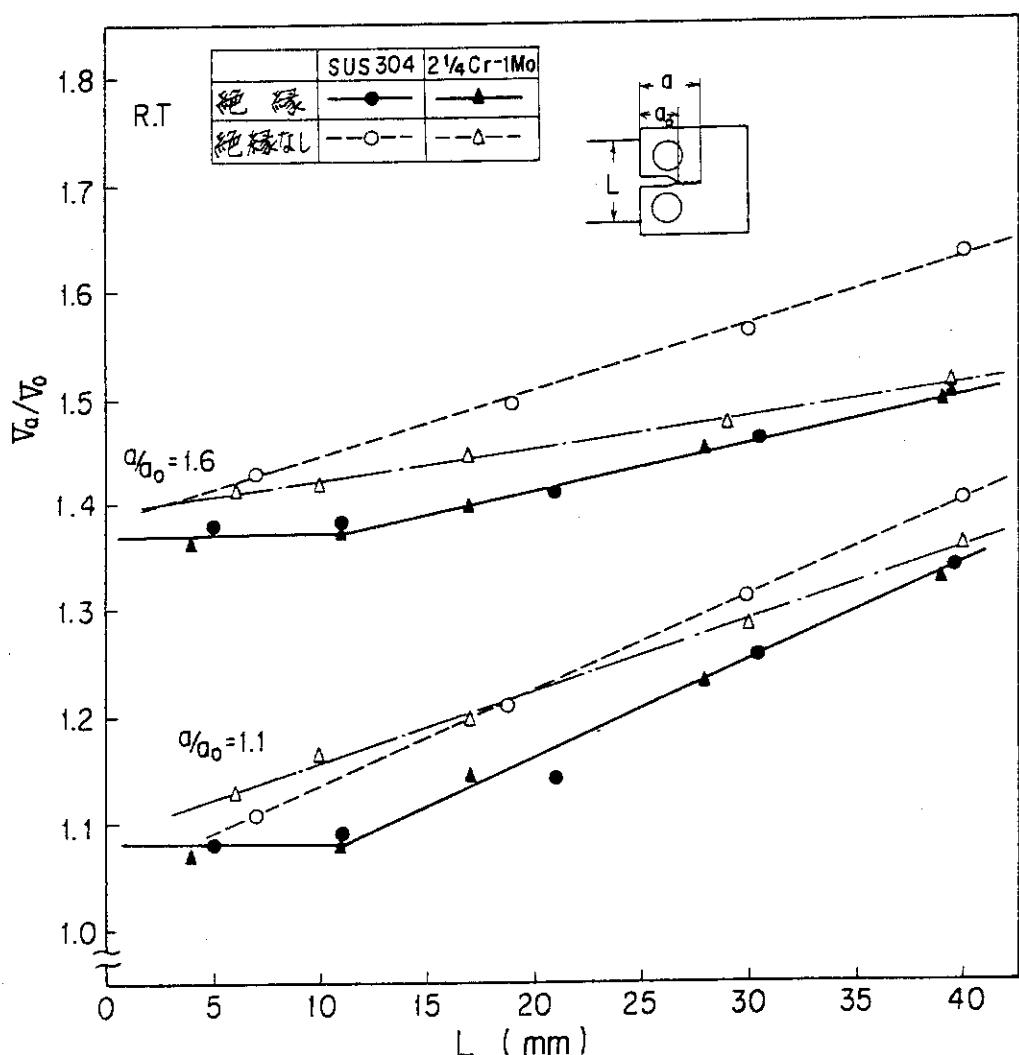


図5 電圧端子間距離と検出感度

2.1

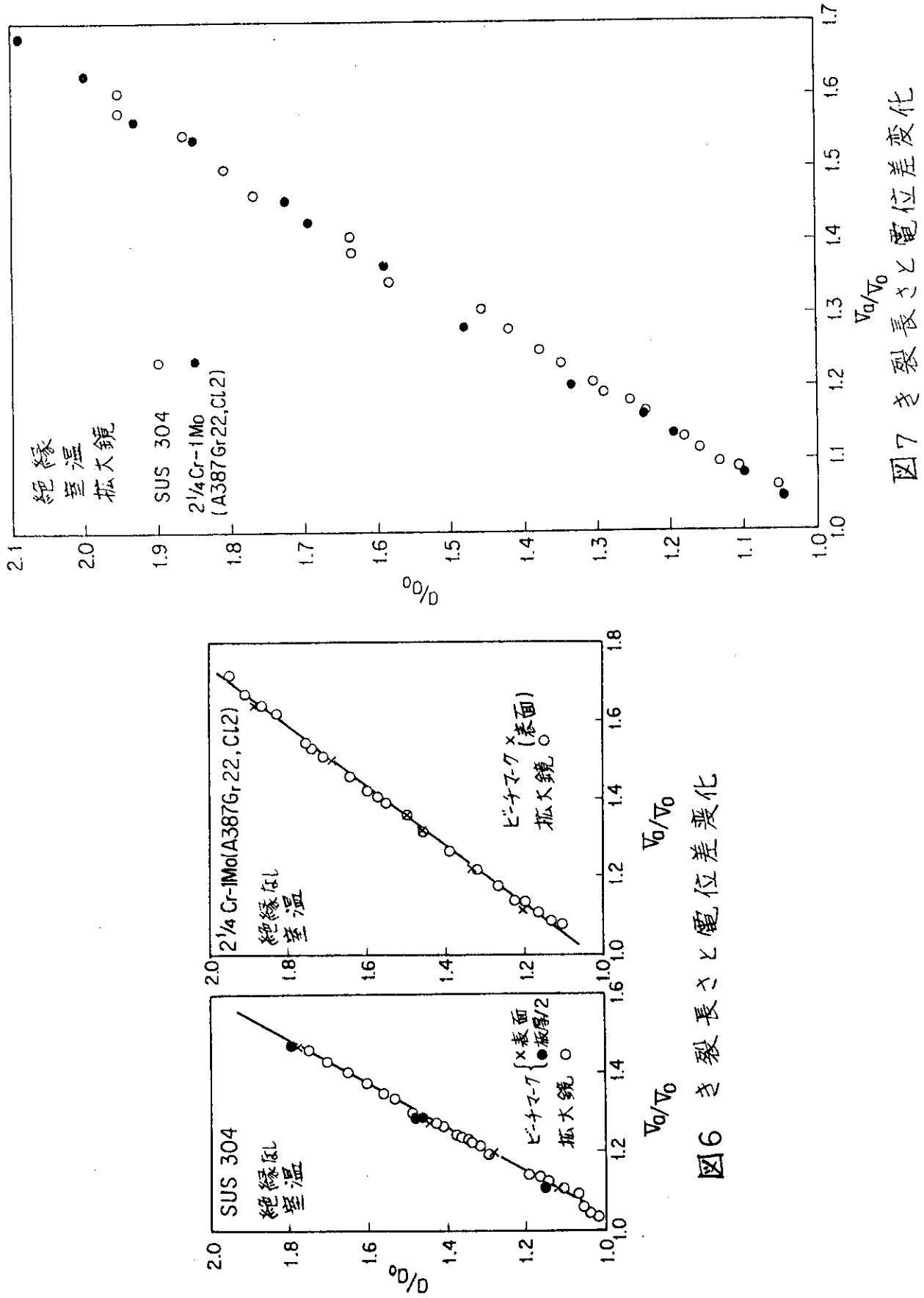


図6 破裂長さと電位差変化

図7 破裂長さと電位差変化

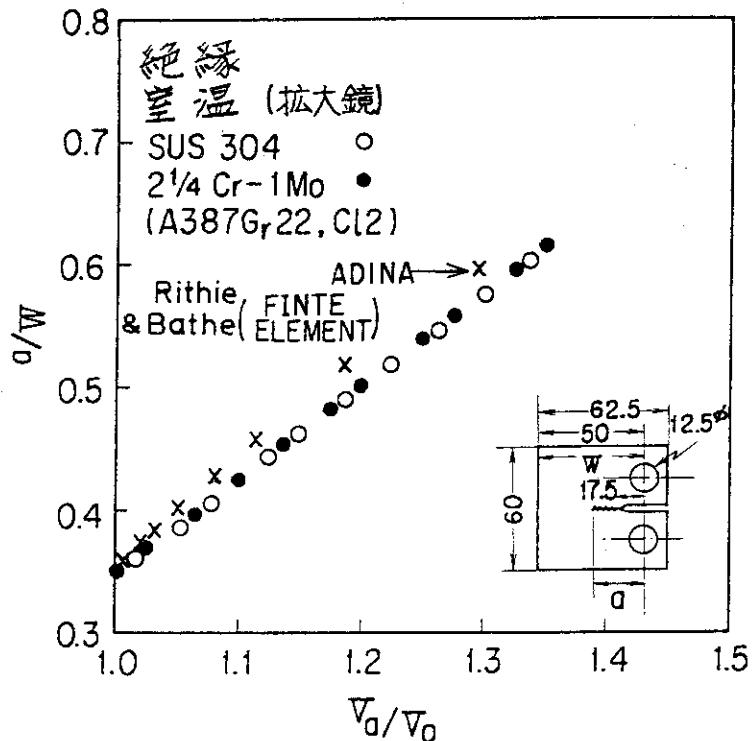


図 8 数値解析結果と実験結果

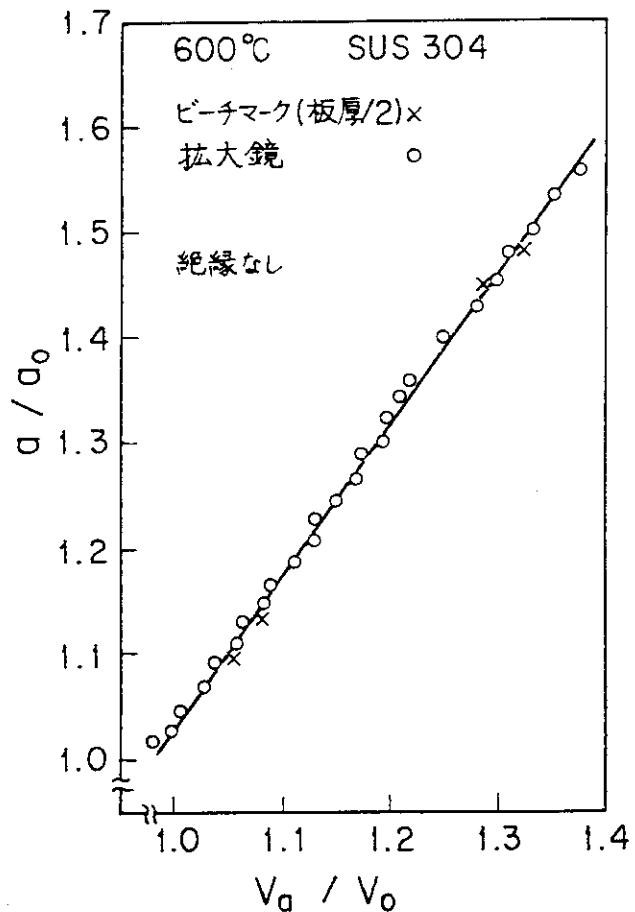


図 9 き裂長さと電位差変化 (600 °C)

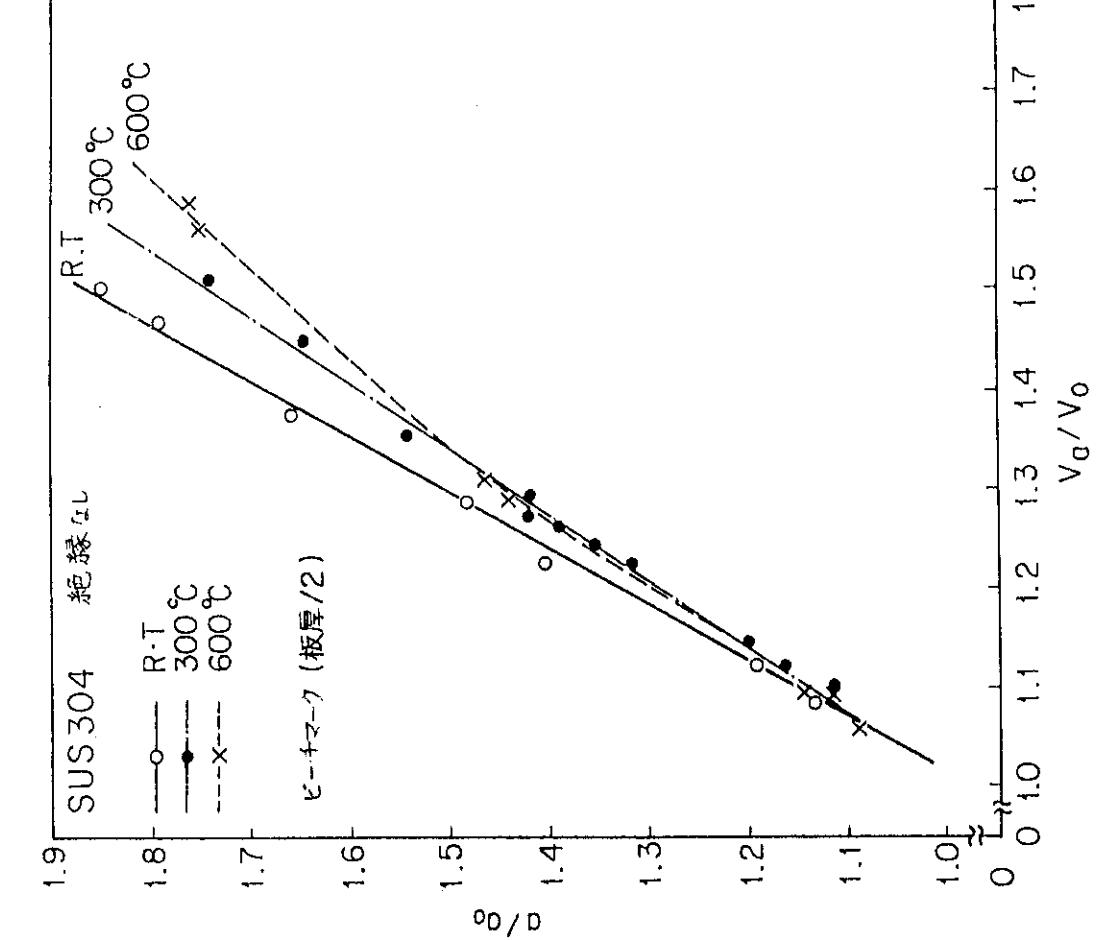


図 10 ピーチマークによるき裂長さと電位差変化

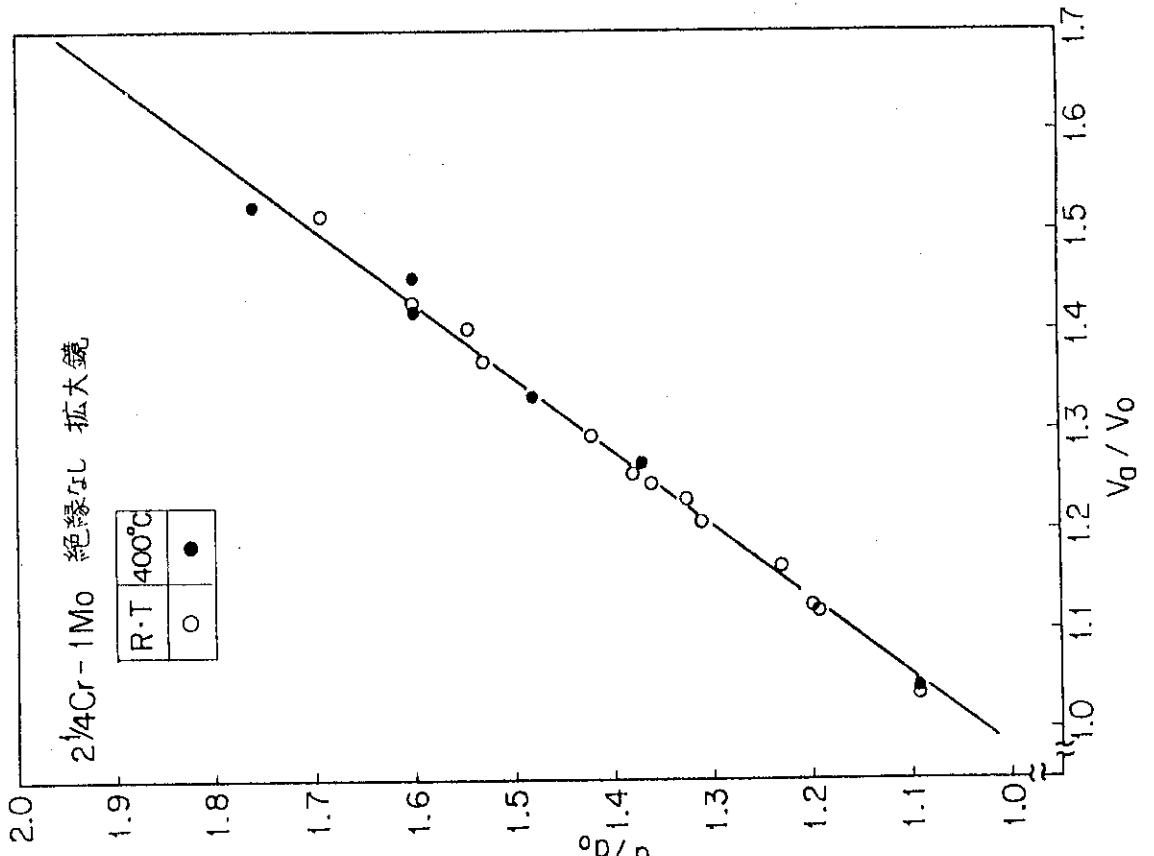


図 11 き裂長さと電位差変化

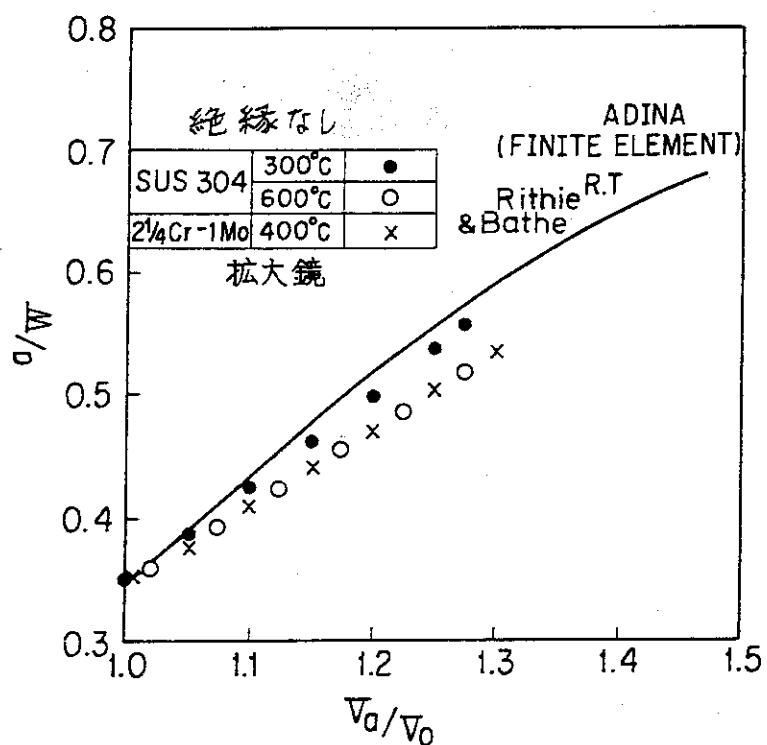


図 12 数値解析(室温)と実験結果(高温)

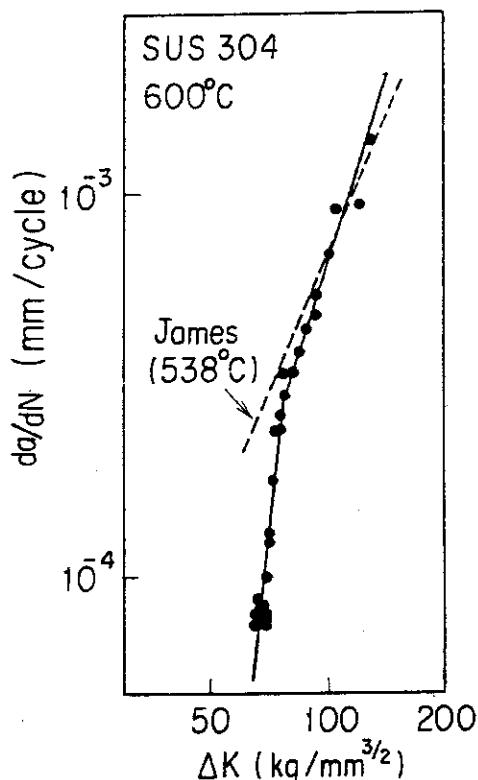


図 13 疲れき裂伝播試験結果

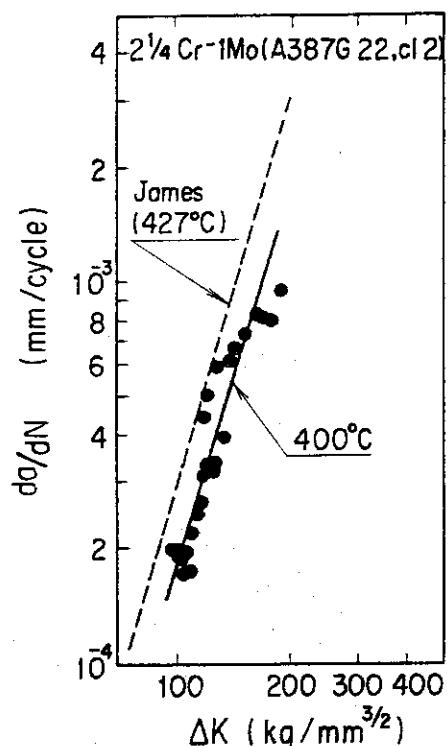


図 14 疲れき裂伝播試験結果

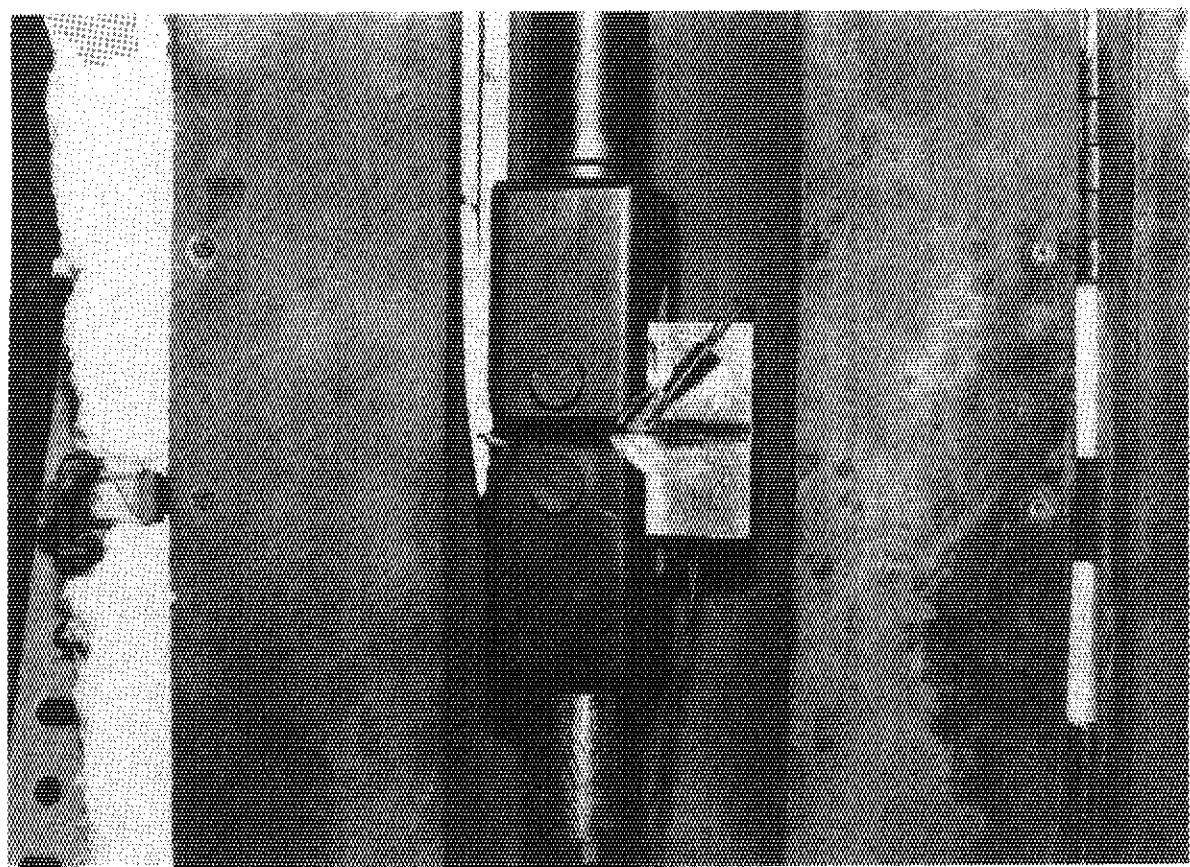


写真 1 高温疲労試験概観

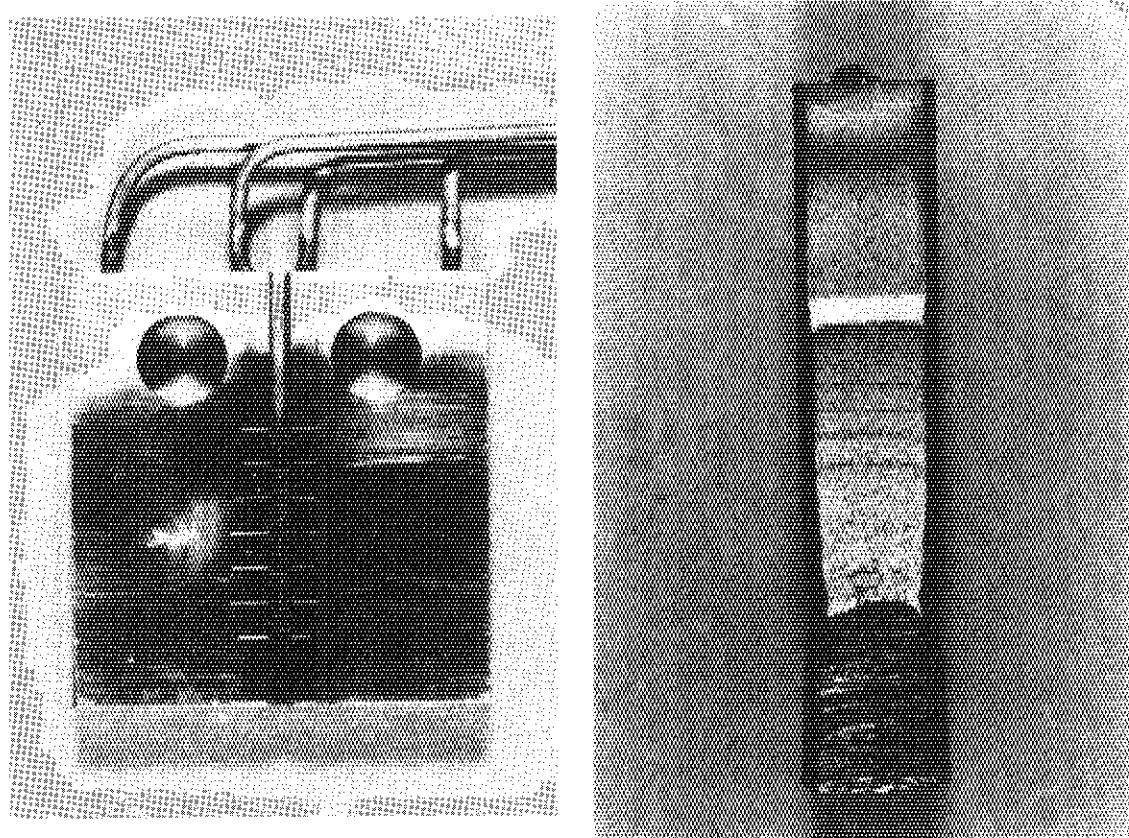


写真 2 試験片と破断面(ビーチマーク)