

論 文

単一試験片による J-R カーブ測定への直流 電位差法の適用

古平 恒夫*・松本 正勝*・中島 伸也*

Application of D. C. Electrical Potential Method for Measurement of J-R Curve by a Single Specimen

Tsuneo KODAIRA, Masakatsu MATSUMOTO, and Nobuya NAKAJIMA

Synopsis:

The fracture toughness tests at temperatures from -60°C to 100°C are conducted to develop the new method for the generation of the fracture resistance curve (J-R curve) by a single specimen. The three-point bend specimens with several configurations made of four kinds of nuclear reactor pressure vessel steels are used and the crack extension is measured by the d. c. electrical potential method during testing. From the results obtained, the following conclusions can be drawn:

(1) The relation between the potential difference $(V_0 + \Delta V)/V_0$ and the ratio of crack extension $(a_0 + \Delta a)/a_0$ is a very little bit scattered regardless of the specimen size, type of steels or testing temperatures, when the specimen configurations are kept as the similar figure. Where, a_0 , Δa , V_0 and ΔV respectively denote the initial crack length, the amount of crack extension, the initial potential and the amount of potential difference. This relation is named here as the master curve.

(2) Then, the J- Δa relation (J-R curve) can be developed using the load-deflection record by a single specimen through the above mentioned master curve.

1. 緒 言

原子炉圧力容器用鋼材のような高靱性材料は、上部棚における破壊開始点では不安定破壊を生じない。すなわち、破壊開始点でき裂が発生しても、延性き裂が少なからず進展した後に急速破壊するか、あるいは最後まで延性破壊する。しかも前者の急速に破壊する場合でも、不安定破壊に至るまでにはかなりの余裕がある。したがって、破壊開始点を破壊基準とする J_{IC} 破壊靱性は、かなり安全側のクライテリオンということができ、上記の安定延性破壊が不安定破壊に移行する問題、すなわち、Tearing Instability を扱う破壊基準の確立が望まれている¹⁾。

PARIS ら²⁾は、上記の破壊基準として、Tearing Modulus, T を提唱している。この T は、本質的には、 J 値と延性き裂進展量 Δa (J-R カーブ) との関係より求められるものである。

現在、この J-R カーブは、数本の試験片を用いる Multiple Specimen Technique³⁾⁴⁾ 及び単一試験片を部分除荷し、コンプライアンス変化より Δa を推定する Unloading Compliance 法⁴⁾⁵⁾ などにより求められてい

る。しかるに、前者は多数の試験片を要し、後者は実験技術上かなり難しい面があり、原子炉圧力容器用鋼材の照射材への適用には一考を要する。周知のように、照射脆化研究の分野では、原子炉内スペース、ホットセルにおける操作性などの制約から、なるべく少数の試験片で、簡単な手法で J-R カーブを求めることのできる試験方法の確立が急務である。

単一試験片を用いたき裂長さの定量的測定方法として、疲れき裂伝播の分野で電位差法がかなりの実績を有している^{6)~8)}。さらに、 J_{IC} 試験においても、単一試験片による破壊開始点検出手段として電位差法が注目され、既に幾つかの研究^{9)~17)} がなされている。しかし、 J_{IC} 試験時にき裂進展長さの電位差法による定量的測定を行つた例はほとんどなく、わずかに、同一形状寸法の多数の試験片で較正曲線を得、J-R カーブを求めた報告が¹⁸⁾ある程度である。この理由は、疲れき裂伝播試験に比べ、 J_{IC} 試験では変形が大きく、き裂先端の塑性域の電位差出力への寄与の定量化に困難を伴うためと推察される。そこで、本研究では、直流電位差法を適用し、試験片サイズ、鋼種、試験温度等によらない単一試験片を用いた J-R カーブの新しい測定法を確立することを目

昭和 56 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 56 年 8 月 7 日受付 (Received Aug. 7, 1981)

* 日本原子力研究所東海研究所 (Tokai Research Establishment, Japan Atomic Energy Research Institute, 2-4 Aza-Shirane Shirakata Tokaimura Naka-gun 319-11)

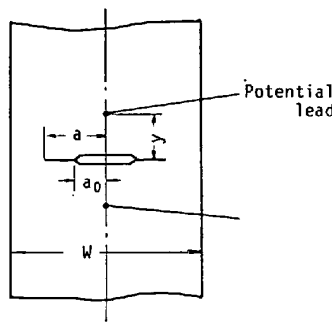
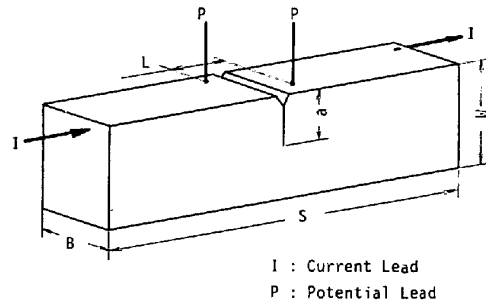


Fig. 1. Specimen geometry and position of potential lead (after JOHNSON)¹⁹⁾.



B	W	S	a	L
10	20	110	~10	5
20	20	110	~10	5
20	40	200	~20	10

Unit : mm

Fig. 2. Details of specimen configurations.

的に、実験を行つた。

2. 電位差法の理論

試験片内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) においてはラプラスの式で以下のように表される。

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

JOHNSON¹⁹⁾ は、Fig. 1 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。

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

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 は切り欠きの両側の距離 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、寸法のみ依存することがわかる。したがって、Fig. 1 の中央切り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写像関数法により解析し、 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、較正曲線（後述のマスターカーブ）を得ておけば、試験温度、鋼種等にかかわらず、電位差変化を測定することによつ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。

3. 実験方法

3.1 供試材及び試験片

本実験には、4 種類の圧力容器用鋼材を供試した。Table 1 に供試材の化学成分及び機械的性質を示す。A 及び B 鋼は板厚 250 mm の A533 B Cl.1 鋼 (JIS SQV 2A 相当)、C 鋼は板厚 300 mm の A508 Cl. 3 鋼 (JIS SFVV3 相当) であり、D 鋼は板厚 200 mm の 2¹/₄Cr-1Mo 鋼である。

これらの供試材の 1/4 厚さの部分 ($T/4$) より、Fig. 2 に示す 3 種類の 3 点曲げ試験片を採取した。これらの試験片の長手方向は圧延方向に直角とし、ノッチは放電加工により板厚方向に加工し、その後疲れき裂を導入した。疲れき裂は、ASTM E399²¹⁾ に準拠し、室温にて繰り返し速度 5~10 Hz で、 ΔK が 25 MPa \sqrt{m} (約 80 kgf \cdot mm^{-3/2}) 以下になるように条件を選んで行つた。そして、表面から疲れき裂先端までの距離（以下、き裂長さという。） a と試験片幅 W との比 a/W を 0.5 とした。さらに、3 点曲げ試験片には、直流電位差法を適用するため、通電用端子及び電位差検出端子をハンダ付けにより取り付けたが、端子位置をそれぞれ I 及び P で示す。なお、電位差法の適用に際しては、Fig. 2 に

Table 1. Chemical composition and mechanical properties of steels used.

Steel	Chemical composition (%)										0.2% yield strength (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu			
A	A533B Cl. 1	0.22	0.21	1.35	0.006	0.004	0.66	0.14	0.50	0.03	459.0	597.2
B	A533B Cl. 1	0.18	0.22	1.48	0.007	0.007	0.66	0.20	0.57	0.01	485.0	612.0
C	A508 Cl. 3	0.18	0.27	1.35	0.007	0.005	0.76	0.11	0.50	0.04	483.5	618.8
D	2 ¹ / ₄ Cr-1Mo	0.16	0.29	0.54	0.013	0.007	0.04	2.13	1.01	0.07	702.2	835.6

示すように、試験片の平面寸法 (W , S , a 及び L) が相似形を保つように配慮した。

3.2 3点曲げによる破壊靱性試験

3点曲げ試験は、電気油圧サーボ式の容量 10 t の試験機を使用し、クロスヘッド速度 0.5~1.0 mm/min で行つた。試験温度は、 -60°C から $+100^{\circ}\text{C}$ の間の数温度であり、恒温槽中に治具をセットし、低温の場合は液化炭酸ガス、高温の場合は電気ヒータにより所定の温度にコントロールしている。3点曲げ時の荷重点間隔は試験片幅の 4 倍とし、試験中は試験片中央の荷重点における変位を試験機下部のアクチュエータに取付けられた変位計により検出し、ロードセル出力と合わせて荷重-変位曲線を X-Y レコーダに記録し、以後の解析に供した。さらに、3点曲げ試験中において、き裂進展をモニターし、延性き裂長さの定量的測定を行うために、直流電位差法 (D. C. Electrical Potential Method) を採用した。すなわち、試験片端に一定の直流電流 (今回は 20~30 A) を流し、き裂をはさんで取り付けられた電位差端子より電位差を検出して、X-Y レコーダに入力記録した。電位差システムの詳細は、前報²²⁾を参照されたい。

J 値は、RICE ら²³⁾の簡便式を用いた。すなわち、任意の変位まで負荷して荷重-変位曲線を得、その面積 A を求めて以下の式より J を計算した。

$$J = 2A/B(W-a) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 B : 試験片厚さ、 W : 試験片幅、 a : き裂長さである。なお、3点曲げの場合、荷重-変位曲線における治具等の変形、試験片の凹みを差し引き、真の荷重-変位曲線を求めるため、剛な試験片を用いて荷重-変位曲線を得て、3点曲げ試験片のそれを補正した。

3.3 き裂長さ a 及びき裂進展量 Δa の測定

3点曲げ試験終了後、試験片を液体窒素に浸漬して取り出し衝撃的に脆性破壊させるか、または疲労破壊により破面を現出させ、初期き裂長さ a_0 及びき裂進展量 Δa の測定を 1/1000 目盛の工具顕微鏡を用いて行つた。初期き裂長さ a_0 は、ASTM E399²¹⁾ 及び機械学会基準²⁴⁾ に準拠し、Fig. 3 に示すように 3ヶ所の平均とし、一方、き裂進展量 Δa は ASTM の J_{1C} 試験方法⁴⁾ を参考にして、表面から裏面にかけて等間隔に 9 点の測定を行い、平均値を Δa とした。

4. 実験結果及び考察

4.1 疲れき裂伝播長さと電位差変化

前述の(2)式から明らかなように、任意のき裂長さ a と初期き裂長さ a_0 との比 a/a_0 は、 a における際の電位差 V と初期電位差 V_0 との比 V/V_0 と一義的対応関係

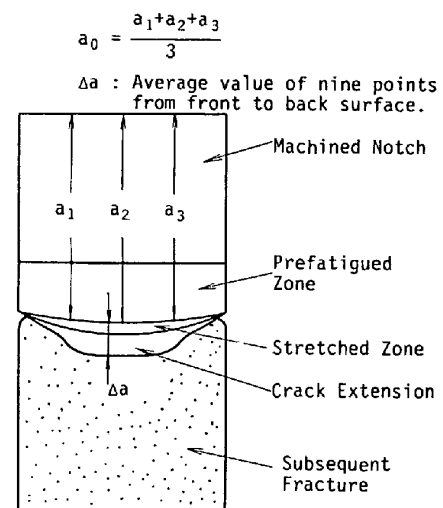


Fig. 3. Measuring location of crack length and crack extension.

にある。ただし、この場合、試験片形状、電位差端子間距離等の幾何学的形状、寸法は、試験片間で平面的に相似でなければならない。

ここでは、まず、上記の対応関係を検討するため、疲れき裂伝播試験に直流電位差法を適用し、き裂長さと電位差変化との関係を調べてみた。 $B=10$, $W=20$, 長さ $S=110$ mm の 3点曲げ試験片を供試し、2 mmV 切り欠き及びストレートノッチの 2 種類を用い、 a_0 は 8 mm とした。2 種類の切り欠きを用いた理由は、CLARK と KNOTT²⁰⁾ の写像関数法による解析によれば、初期き裂長さが比較的浅い場合は、 a/a_0 と V/V_0 との関係が切り欠き形状に依存することが指摘されており、この点を確かめるためである。き裂伝播試験は、室温にて三角波を用い、繰り返し速度 5 Hz で実施した。き裂長さは、試験片表面にけがき線を入れ、拡大鏡にて測定した。電位差法においては、10 A を通電し、初期電位差 V_0 を測定後、これをキャンセルして零ボルトからはじめ、電位差の増分 ΔV を測定した。Fig. 4 にその結果を示す。なお、同図で Δa は試験片表面の疲れき裂進展量であり、 $a = a_0 + \Delta a$ としている。き裂長さと電位差変化との関係は、 $(a_0 + \Delta a)/a_0$ と $(V_0 + \Delta V)/V_0$ とで整理すると、 $(a_0 + \Delta a)/a_0$ 側にわずかに片寄るが、両者は $(a_0 + \Delta a)/a_0 = (V_0 + \Delta V)/V_0$ の関係にあると言つても過言ではなく、前述の CLARK と KNOTT²⁰⁾ の解析結果と良好な一致を示す。また、ノッチ形状は、今回のように初期き裂 a_0 が 8 mm と深い場合は、V 切り欠きとストレート切り欠きで差がなく、切り欠き形状の影響はほとんどないことがわかる。

4.2 3点曲げ試験におけるき裂進展量と電位差変化

(2)式から明らかなように、3点曲げ試験の場合でも

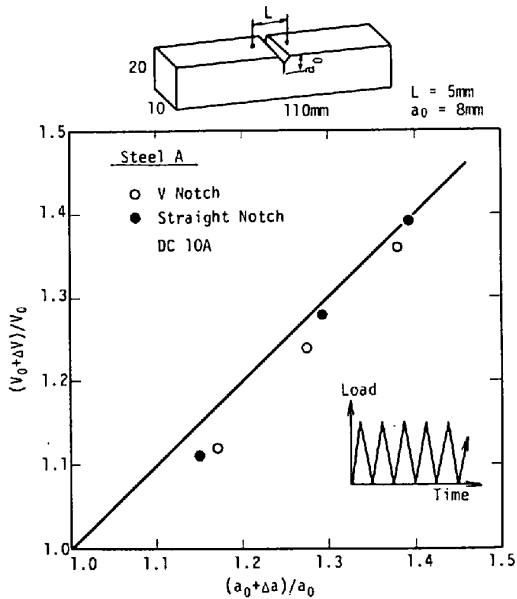


Fig. 4. Relation between crack extension and potential out put in case of fatigue crack growth.

電位差変化よりき裂進展量 Δa を求めることは原理的に可能であるが、疲れき裂伝播の場合に比べてき裂先端の塑性域が大きく、この影響を把握しておく必要がある。そこで、A、B 及びC鋼の3種の鋼材を供試して、電位差法においては 20~30A を通電し、室温において3点曲げ試験を実施した。なお、前述のように、初期き裂長さが深い場合は、2 mm 程度の V 切り欠きはストレートノッチと差異がないことから、供試したすべての試験片は 2 mmV 切り欠きを用いている。

試験中は、Fig. 5 のように荷重-変位曲線及び電位差変化を記録し、電位差変化量は 4.1 で述べたように、初期電位差 V_0 をキャンセル後零ボルトからはじめ、3点曲げ終了までの全変化量を ΔV とした。そして、 $(a_0 + \Delta a)/a_0$ と $(V_0 + \Delta V)/V_0$ との関係で整理すると、Fig. 6 に示す結果が得られた。同図から、電位差端子位置も含めた試験片の平面寸法が相似な場合は、ばらつきの少ない一定の傾向が認められる。しかし、Fig. 4 の疲れき裂伝播の場合に比較して、3点曲げの場合はデータ点が $(V_0 + \Delta V)/V_0$ 側に片寄る傾向が認められる。この現象は、塑性域の寄与によるものと推察されるが、この点を確認するため、以下のモデルにもとづき実験を行った。すなわち、3点曲げ時には、塑性域が広がりながらき裂が進展している訳であるが、これを④塑性域のみの拡大と⑥塑性域なしのき裂進展とに分けてみる。具体的には、④はキーホールノッチ試験片によりき裂が発生しない範囲で3点曲げ試験を行い、⑥は疲れき裂伝播データを用いることとした。得られた室温における結果を Fig. 7 に示す。供試材は B 及び C 鋼とし、10×20×110

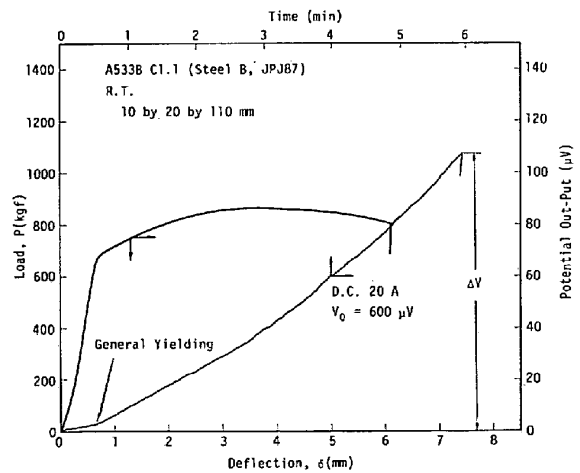


Fig. 5. Typical load-deflection and potential change records in three point bend test.

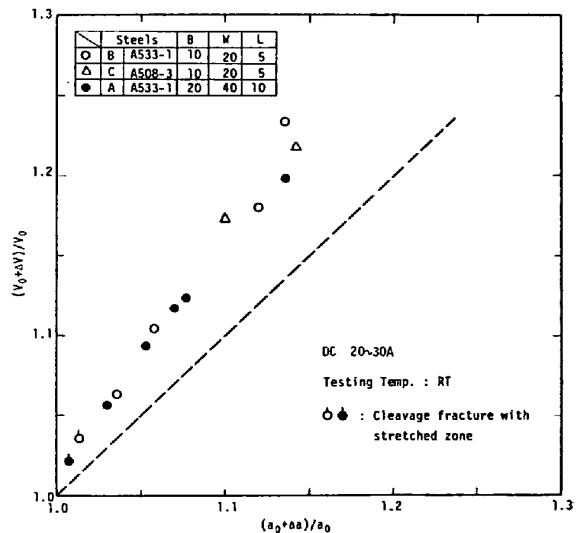


Fig. 6. Relation between crack extension and potential out put in case of fracture toughness test by three point bending.

mm の3点曲げ試験片 (3PB) を用いた。キーホールノッチ試験片の $(V_0 + \Delta V)/V_0$ と $(a_0 + \Delta a)/a_0$ の関係を知りたい訳であるが、実際には、キーホールノッチ試験片ではき裂進展は前述のように起こらない。そこで、キーホールノッチ試験片で3点曲げ試験を行い、 $(V_0 + \Delta V)/V_0$ -変位曲線を得ておき、さらに、疲れき裂を導入した通常の数本の3点曲げ試験片を用いて $(a_0 + \Delta a)/a_0$ -変位曲線を求めた。変位が共通であるから、Fig. 7 に×印で示すように、キーホールノッチ試験片の $(V_0 + \Delta V)/V_0$ -変位曲線から変位を介して仮の $(a_0 + \Delta a)/a_0$ を知ることができる。そして、最終的には、キーホールノッチ試験片の $(V_0 + \Delta V)/V_0$ と $(a_0 + \Delta a)/a_0$ の関係が同図中の①のように得られた。これは、き裂進展がない訳であるから、塑性域の影響を示しているといえる。一方、Fig. 4

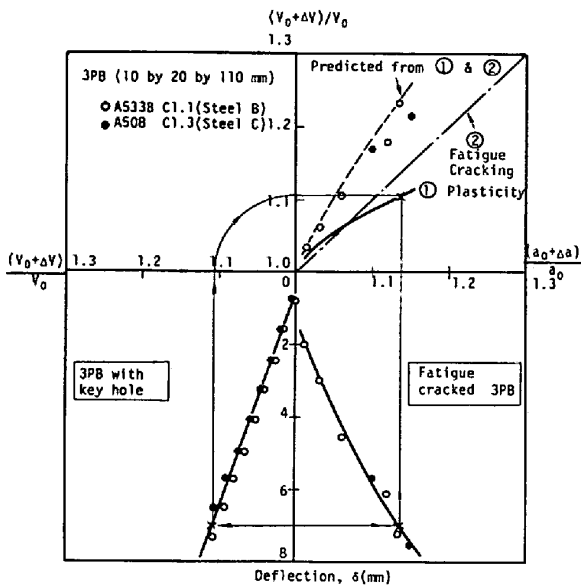


Fig. 7. Effect of plasticity on the relation between crack extension and potential out put.

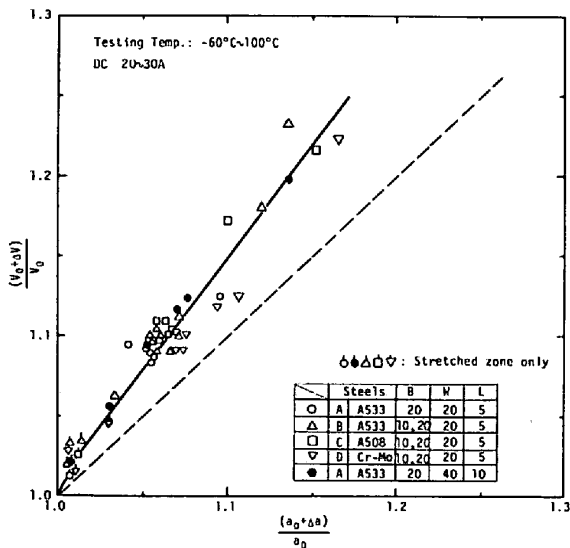


Fig. 8. Relation between $(V_0 + \Delta V)/V_0$ and $(a_0 + \Delta a)/a_0$ in several tested steels (Master curve).

で明らかにしたように、疲れき裂の場合は、②のように $(a_0 + \Delta a)/a_0 = (V_0 + \Delta V)/V_0$ の関係を示していた。したがって、前述のモデルから、①と②の和が3点曲げ試験時の挙動を示すことになり、その予測曲線を点線で示す。同図には、Fig. 6におけるB及びC鋼のデータを併せてプロットして示すが、実験データ点と予測曲線が良好な一致を示している。以上から、3点曲げの場合に $(V_0 + \Delta V)/V_0$ 側に片寄る現象は、塑性域が大きいため起こることが明らかとなった。

Fig. 8 は、Table 1 に示す4鋼種を用いて、 $-60^\circ\text{C} \sim +100^\circ\text{C}$ の間の数温度で直流電位差法を適用して実施した3点曲げによる破壊靱性試験結果を、 $(V_0 + \Delta V)/V_0$ と

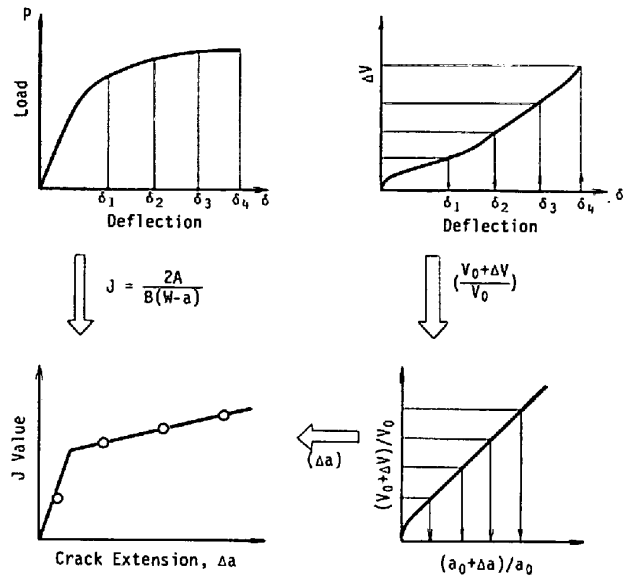


Fig. 9. Procedure for determination of J-R curve by electrical potential method.

$(a_0 + \Delta a)/a_0$ とに整理して示す。同図より、電位差端子位置も含めた試験片の平面寸法が相似な場合は、鋼種、試験温度にかかわらず、ばらつきの少ない一定の傾向が認められる。したがって、塑性域寸法の大きい J_{1C} 試験の場合でも、試験片の平面寸法を相似に保てば、電位差変化よりき裂進展量の推定が可能であり、以後、Fig. 8 をマスターカーブと呼ぶこととする。

4.3 電位差法による単一試験片を用いた J-R カーブの測定

Fig. 9 は、前述のマスターカーブを用いて、単一試験片により $J-\Delta a$ の関係を求める手法を示したものである。直流電位差法を適用して3点曲げ試験を行い、荷重-変位曲線及び電位差変化曲線を得る。荷重-変位曲線を用いて、任意の変位 ($\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots$) において、(3)式により J 値を求める。一方、電位差変化曲線においては、先の変位に相当する ΔV を求め、 $(V_0 + \Delta V)/V_0$ を計算する。そして、マスターカーブを用いて前述の変位 ($\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots$) に相当する $(a_0 + \Delta a)/a_0$ を知り、試験片破面より a_0 を測定し、 Δa を算出すれば、 J と Δa の関係が単一試験片で求められることになる訳である。

Fig. 10 は、上記の電位差法による単一試験片で求めたRカーブと実測データを比較して示す。20×40×200 mmのA鋼による室温の結果である。図中のデータ点は、同一形状寸法の多数の試験片を種々の変位まで負荷して、 J と Δa の関係を求めたものであり、いわゆる、Multiple Specimen 法³⁾⁴⁾による結果である。電位差法によるRカーブは、最大変位した試験片(図中の黒丸印)の荷重-変位曲線及び電位差変化曲線より、Fig. 8 の

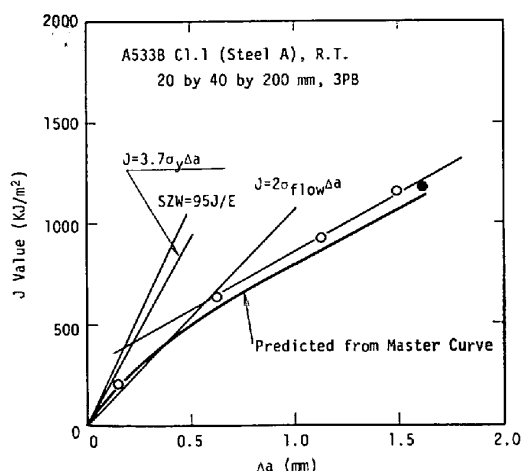


Fig. 10. Comparison of predicted R curve with actual data.

マスターカーブを用いて求めたものである。同図から、 Δa の小さいところでは両者はやや合わないが、 Δa が大きくなると予測と実測 R カーブは良好な一致を示し、単一試験片で R カーブ、 dJ/da そして最終的には T を求めることが可能であることが明らかとなった。

5. 結 論

4 種類の原子炉圧力容器用鋼材を用い、 $-60^{\circ}\sim+100^{\circ}\text{C}$ の間の数温度において、直流電位差法を適用して 3 点曲げによる破壊靱性試験及び疲れき裂伝播試験を行った結果、以下の結論が得られた。

1) 疲れき裂伝播の場合、き裂長さ a と電位差変化の関係を $(a_0+\Delta a)/a_0$ と $(V_0+\Delta V)/V_0$ で整理すると、両者はほぼ $(a_0+\Delta a)/a_0=(V_0+\Delta V)/V_0$ の関係にある。

2) 3 点曲げによる破壊靱性試験の場合、 $(a_0+\Delta a)/a_0$ と $(V_0+\Delta V)/V_0$ との関係は上記の場合と異なり、 $(V_0+\Delta V)/V_0$ 側に片寄るが、これは大変形に伴うき裂先端の塑性域の寄与により説明される。なお、電位差端子位置も含めた試験片の平面寸法を相似形に保てば、 $(a_0+\Delta a)/a_0$ と $(V_0+\Delta V)/V_0$ の関係は、鋼種、試験温度にかかわらずばらつきの少ない一定の傾向が認められる(マスターカーブ)。

3) 以上の結果より、マスターカーブを用いて、単一試験片で J-R カーブを求めることが可能である。

終わりに、本実験を遂行するに当たり、有益な御助言、御助力をいただいた日本原子力研究所、宮園昭八郎

博士、奥達雄博士ならびに高温構造安全技術研究組合、藤村理人博士に深甚なる感謝の意を表します。

文 献

- 1) NUREG/CP-0010, CSNI Report No. 39 (Jan. 1980)
- 2) P. C. PARIS, H. TADA, A. ZAHOR, and H. ERNST: ASTM STP, 668 (1979), p. 5 p. 251
- 3) J. D. LANDES and J. A. BEGLEY: ASTM STP, 560 (1974), p. 170
- 4) ASTM E 813-81 : Standard Test for J_{IC}, A MEASURE OF FRACTURE TOUGHNESS (1981)
- 5) G. A. CLARKE, W. R. ANDREWS, P. C. PARIS, and D. W. SCHMIDT : ASTM STP, 590(1976), p. 27
- 6) R. O. RITCHIE and K. J. BATHE: Int. J. of Fracture, 15 (1979) 1, p. 47
- 7) V. BACHMANN and D. MUNZ: Engg. Fracture Mechanics, 11 (1979), p. 61
- 8) A. SAXENA, : Engg. Fracture Mechanics, 13 (1980), p. 741
- 9) 大路清嗣, 小倉敬二, 康 祥隆, 藤本隆史: 機械学会講演論文集, No. 790-2 (1979), p. 174
- 10) 横幕俊典, 豊田裕至, 太田定雄: 機械学会講演論文集, No. 790-2 (1979), p. 168
- 11) 中山弘武, 児玉昭太郎, 長谷川光彦, 三沢啓志: 機械学会講演論文集, No. 790-12 (1979), p. 235
- 12) 宮本 博, 土方明躬, 吉岡純夫, 熊沢道夫, 遠田治正: 日本機械学会第 15 回シンポジウム, 弾塑性破壊力学, No. 780-9 (1978), p. 11
- 13) 橋本宗到, 多々良敏行, 草場邦明: 同上, p. 23
- 14) 松下久雄, 岸本宏次, 印藤弘郷: 機械学会講演論文集, No. 800-1 (1980), p. 49
- 15) 古平恒夫, 中島伸也, 松本正勝: 鉄と鋼, 64 (1978) 7, p. 877
- 16) 中野善文, 鉄と鋼, 64 (1978) 7, p. 891
- 17) 藤田春彦, 田中 学, 神谷 修: 鉄と鋼, 67 (1981) 2, p. 382
- 18) 布村成員, 肥後矢吉: 鉄と鋼, 67(1981)9, A177
- 19) H. H. JOHNSON, : Material Research and Standards (1965), p. 442
- 20) G. CLARK and J. F. KNOTT : J. Mech. Phys. Solids, 23 (1975), p. 265
- 21) ASTM E399-78 : Standard Test Method for PLANE-STRAIN FRACTURE TOUGHNESS OF METALLIC MATERIALS.
- 22) 古平恒夫, 中島伸也, 松本正勝, 深谷 清: 鉄と鋼, 68 (1982) 8, p. 1032
- 23) J. R. RICE, P. C. PARIS, and J. G. MERKLE : ASTM STP, 536 (1973), p. 231
- 24) JSME S 001-1981 : 弾塑性破壊靱性 J_{IC} 試験方法