

本資料は2002年 3 月 18 日付けで
登録区分変更する。 [技術展開部技術協力課]

分置

2 1/4Cr-1Mo 鋼のクリープ疲労き裂 進展拳動試験(II)

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

1987年 3 月



石川島播磨重工業株式会社

本資料は、核燃料サイクル開発機構の開発業務を進めるために作成されたものです。したがって、その利用は限られた範囲としており、その取扱には十分な注意を払ってください。この資料の全部または一部を複写・複製・転載あるいは引用する場合、特別の許可を必要としますので、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)



配 布 限 定

PNC T&S J 2150 87-001

1987年 3 月

2 ¼Cr-1Mo 鋼のクリープ疲労き裂進展挙動試験 (II)

野中 勇[※] 北川正樹[※]

要 旨

2 ¼Cr-1Mo 鋼および Mod. 9Cr-1Mo 鋼の高温におけるき裂伝ば特性を明らかにするために、一連の実験を行い、以下の知見を得た。

- (1) 2 ¼Cr-1Mo 鋼のクリープ損傷材と時効処理材のクリープ疲労き裂伝ば速度は、 ΔJ および ΔJ_c で整理でき、そのき裂伝ば則は処女材のき裂伝ば則とほぼ等しい。また、処女材の 550°C におけるクリープ疲労き裂伝ば速度は 500°C のき裂伝ば速度より大きい。
- (2) 2 ¼Cr-1Mo 鋼の疲労損傷材のクリープき裂伝ば速度は、 J' で整理でき、そのき裂伝ば速度は処女材のき裂伝ば速度とほぼ等しい。また、処女材の 550°C のき裂伝ば速度は、500°C のき裂伝ば速度とほぼ等しい。
- (3) Mod. 9Cr-1Mo 鋼の母材と溶接金属のクリープ疲労き裂伝ば速度は、 ΔJ および ΔJ_c で整理でき、両者のき裂伝ば則はほぼ等しい。
- (4) Mod. 9Cr-1Mo 鋼の母材と溶接金属のクリープき裂伝ば速度は、 J' で整理でき、両者のき裂伝ば則はほぼ等しい。

本報告書は、石川島播磨重工業株式会社が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

契約番号：610D026

事業団担当者：二瓶 勲 (材料開発室)

※：石川島播磨重工業株式会社 技術研究所



LIMITED DISTRIBUTION

PNC SJ2150 87-001

March, 1987

Creep-Fatigue Crack Growth in 2 1/4 Cr-Mo Steel (II)

Isamu Nonaka*

Masaki Kitagawa*

Abstract

A series of experiments were performed in order to clarify the creep-fatigue crack propagation behaviors in 2 1/4 Cr-Mo steel and Mod.9 Cr-Mo steel. The following results were obtained:

(1) The creep-fatigue crack propagation rates in the aged 2 1/4 Cr-Mo steel and the previously creep damaged 2 1/4 Cr-Mo steel were characterized by ΔJ and ΔJ_c . And the crack propagation law of these materials was equal to that of the virgin material. The creep-fatigue crack propagation rate of the virgin material at 550 °C was higher than that of the virgin material at 500 °C

(2) The creep crack propagation rate in the previously fatigue damaged 2 1/4 Cr-Mo steel was characterized by J' . And the crack propagation law of this material was equal to that of the the virgin material. The creep crack

Work performed by Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd. under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

PNC Liaison: Isao Nihei (Material Development Section)

*: Metallurgy Department, Research Institute, Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.

propagation rate of the virgin material at 550°C was equal to that of the virgin material at 500 °C.

(3) The creep-fatigue crack propagation rates in the Mod. 9 Cr-1Mo base metal and the weld metal were characterized by ΔJ and ΔJ_c . And the crack propagation law of the base metal was equal to that of the weld metal.

(4) The creep crack propagation rates in the Mod. 9 Cr-1Mo base metal and the weld metal were characterized by J' . And the crack propagation law of the base metal was equal to that of the weld metal.

目 次

1. 緒 言	1
2. 研究の概要	2
3. 供試材	4
4. 2 ¼Cr-1Mo鋼のクリープ疲労き裂進展挙動試験	9
4.1 目 的	
4.2 試験方法	
4.3 試験結果および考察	
5. 2 ¼Cr-1Mo鋼のクリープき裂進展挙動試験	42
5.1 目 的	
5.2 試験方法	
5.3 試験結果および考察	
6. Mod.9Cr-1Mo鋼のクリープ疲労き裂進展挙動試験	54
6.1 目 的	
6.2 試験方法	
6.3 試験結果および考察	
7. Mod.9Cr-1Mo鋼のクリープき裂進展挙動試験	90
7.1 目 的	
7.2 試験方法	
7.3 試験結果および考察	
8. 結 言	96

表リスト

第 2 章

Table 2. 1	Test program	3
------------	--------------------	---

第 3 章

Table 3. 1	Chemical composition, heat treatment and certified test results for 2 1/4Cr-1Mo steel plate	5
Table 3. 2	Chemical composition, heat treatment and certified test results for Mod. 9Cr-1Mo steel plate	6
Table 3. 3	Welding procedure	7

第 4 章

Table 4. 1	Results of fatigue or creep-fatigue crack propagation test for 2 1/4Cr-1Mo steel	12
------------	--	----

第 5 章

Table 5. 1	Results of creep crack propagation test for 2 1/4Cr-1Mo steel	44
------------	---	----

第 6 章

Table 6. 1	Results of fatigue or creep-fatigue crack propagation test for Mod. 9Cr-1Mo steel	58
------------	---	----

第 7 章

Table 7.1 Results of creep crack propagation test for
Mod. 9Cr-1Mo steel 91

図リスト

Edge preparation	.....	8
Fig. 4. 1	Testing apparatus	13
Fig. 4. 2	Specimen configurations for fatigue crack propagation test	14
Fig. 4. 3	Specimen configurations for creep-fatigue crack propagation test	15
Fig. 4. 4	Definition of S_p and $\Delta \delta$	16
Fig. 4. 5	Relationship between crack length and number of cycles	17
Fig. 4. 6	Relationship between crack propagation rate and crack length	18
Fig. 4. 7	Relationship between cyclic J-integral range and crack length	19
Fig. 4. 8	Relationship between crack propagation rate and cyclic J-integral range	20
Fig. 4. 9	Relationship between crack length and number of cycles	21
Fig. 4.10	Relationship between crack propagation rate and cyclic J-integral range	22
Fig. 4.11	Relationship between crack length and number of cycles	23
Fig. 4.12	Relationship between crack propagation rate and creep J-integral range	24
Fig. 4.13	Relationship between crack propagation rate and cyclic J-integral range	25
Fig. 4.14	Relationship between crack propagation rate and	

	creep J-integral range	26
Fig. 5. 1	Testing apparatus for creep crack growth	45
Fig. 5. 2	Specimen configurations for creep crack propagation test	46
Fig. 5. 3	Relation between crack length and time	47
Fig. 5. 4	Relation between da/dt and J'	48
Fig. 5. 5	Relation between crack length and time	49
Fig. 5. 6	Relation between da/dt and J'	50
Fig. 6. 1	Testing apparatus for fatigue crack growth	59
Fig. 6. 2	Specimen configurations for fatigue crack propagation test(1)	60
Fig. 6. 3	Specimen configurations for fatigue crack propagation test(2)	61
Fig. 6. 4	Definition of S_p and $\Delta \delta$	62
Fig. 6. 5	Relationship between crack length and number of cycles	63
Fig. 6. 6	Relationship between crack propagation rate and crack length	64
Fig. 6. 7	Relationship between crack propagation rate and cyclic J-integral range	65
Fig. 6. 8	Load-crack center opening displacement hysteresis loop (1)	66
Fig. 6. 9	Load-crack center opening displacement hysteresis loop (2)	67
Fig. 6.10	Relationship between $(P_{max}-P_{cL})/(P_{max}-P_{min})$ and crack length	68
Fig. 6.11	Relationship between $\Delta J_p/\Delta J$, $\Delta J_e/\Delta J$ and crack length	69

Fig. 6.12	Relationship between crack length and number of cycles	70
Fig. 6.13	Relationship between crack propagation rate and creep J-integral range	71
Fig. 6.14	Relationship between crack propagation rate and creep J-integral range	72
Fig. 6.15	Relationship between creep J-integral range and crack length	73
Fig. 7. 1	Testing apparatus for creep crack growth	92
Fig. 7. 2	Specimen configurations for creep crack propagation test	93
Fig. 7. 3	Relation between crack length and time	94
Fig. 7. 4	Relation between da/dt and J'	95

写真リスト

Photo. 4. 1	Observation of fracture surface by SEM	(1)	.....	27
Photo. 4. 2	Observation of fracture surface by SEM	(2)	.....	28
Photo. 4. 3	Observation of fracture surface by SEM	(3)	.....	29
Photo. 4. 4	Observation of fracture surface by SEM	(1)	.....	30
Photo. 4. 5	Observation of fracture surface by SEM	(2)	.....	31
Photo. 4. 6	Observation of fracture surface by SEM	(3)	.....	32
Photo. 4. 7	Observation of fracture surface by SEM	(1)	.....	33
Photo. 4. 8	Observation of fracture surface by SEM	(2)	.....	34
Photo. 4. 9	Observation of fracture surface by SEM	(3)	.....	35
Photo. 4. 10	Observation of fracture surface by SEM	(1)	.....	36
Photo. 4. 11	Observation of fracture surface by SEM	(2)	.....	37
Photo. 4. 12	Observation of fracture surface by SEM	(3)	.....	38
Photo. 4. 13	Observation of fracture surface by SEM	(1)	.....	39
Photo. 4. 14	Observation of fracture surface by SEM	(2)	.....	40
Photo. 4. 15	Observation of fracture surface by SEM	(3)	.....	41
Photo. 5. 1	Observation of fracture surface by SEM	(1)	.....	51
Photo. 5. 2	Observation of fracture surface by SEM	(2)	.....	52
Photo. 5. 3	Observation of fracture surface by SEM	(3)	.....	53
Photo. 6. 1	Observation of fracture surface by SEM	(1)	.....	74
Photo. 6. 2	Observation of fracture surface by SEM	(2)	.....	75
Photo. 6. 3	Observation of fracture surface by SEM	(3)	.....	76
Photo. 6. 4	Observation of fracture surface by SEM	(1)	.....	77
Photo. 6. 5	Observation of fracture surface by SEM	(2)	.....	78
Photo. 6. 6	Observation of fracture surface by SEM	(3)	.....	79
Photo. 6. 7	Observation of fracture surface by SEM	(1)	.....	80
Photo. 6. 8	Observation of fracture surface by SEM	(2)	.....	81

Photo. 6. 9	Observation of fracture surface by SEM (3)	.....	82
Photo. 6. 10	Observation of fracture surface by SEM (1)	.....	83
Photo. 6. 11	Observation of fracture surface by SEM (2)	.....	84
Photo. 6. 12	Observation of fracture surface by SEM (3)	.....	85
Photo. 6. 13	Observation of fracture surface by SEM (1)	.....	86
Photo. 6. 14	Observation of fracture surface by SEM (2)	.....	87
Photo. 6. 15	Observation of fracture surface by SEM (3)	.....	88
Photo. 6. 16	Effect of the side groove on the shape of crack front	.....	89

1. 緒 言

1. 緒 言

高速炉機器の構造健全性を評価するためには，破壊力学的手法を確立する必要がある。機器の構造健全性評価手法の確立は設計の合理化，しいては，コストの低減に反映されるため，重要な課題である。

本研究では，2次系の主要材料である2¼Cr-1Mo鋼および Mod. 9Cr-1Mo鋼の高温におけるき裂伝ば特性を明らかにし，構造健全性評価手法を確立するための基礎データとする。

2. 研究の概要

2. 研究の概要

研究の概要をTable 2.1に示す。

2 ¼Cr-1Mo鋼については、まずクリープ損傷を受けた材料の疲労き裂伝ば挙動ならびに、疲労損傷を受けた材料のクリープき裂伝ば挙動を明らかにする。次に、クリープ疲労き裂伝ば挙動におよぼす材料の時効の影響について検討する。さらに設計温度より、50℃高い温度における疲労き裂伝ば挙動とクリープき裂伝ば挙動を明らかにする。

また、Mod. 9Cr-1Mo鋼については、母材と溶接金属における基礎的な疲労き裂伝ば挙動とクリープき裂伝ば挙動を明らかにする。

Table 2.1 Test program.

Material		Mode	Temp. (°C)	Hold time (min)	Unit
2 ¼Cr-1Mo	Creep-damaged (D _c =0.2, 0.5)	Fatigue crack propagation	500	0	2
	GESC			0, 10	2
	Virgin		550	0, 10	2
	Fatigue-damaged (D _F =0.2, 0.5)	Creep crack propagation	500	30000	2
	Virgin		550	18000, 60000	2
Mod. 9Cr-1Mo	Base metal (Virgin)	Fatigue crack propagation	500	0, 1, 10	3
	Weld metal (Virgin)			0, 1, 10	3
	Base metal (Virgin)	Creep crack propagation		18000, 60000	2
	Weld metal (Virgin)				2

3. 供 試 材

3. 供試材

2 ¼Cr-1Mo鋼の化学成分，熱処理および確実性試験結果をTable 3. 1に示す。

また，Mod. 9Cr-1Mo鋼の化学成分，熱処理および確実性試験結果をTable 3. 2に，その溶接施工条件をTable 3. 3に示す。

Table 3.1 Chemical composition, heat treatment and certified test results for 2¼Cr-1Mo steel plate.

(a) Chemical composition

(wt%)

		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
規格値	レードル分析	≤0.15	≤0.50	0.30/0.60	≤0.035	≤0.035	2.00/2.50	0.90/1.10
	チェック分析	≤0.15	≤0.50	0.27/0.63	≤0.035	≤0.035	1.88/2.62	0.85/1.15
試験結果	レードル分析	0.15	0.27	0.55	0.010	0.005	2.39	0.99
	チェック分析	0.15	0.28	0.55	0.011	0.005	2.38	0.98

(b) Results of heat treatment

条件	焼ならし			焼もどし		
	温度(°C)	保持時間	冷却法	温度(°C)	保持時間	冷却法
熱処理結果	920-940	3HRS. 25MIN	A. C.	710-730	5HRS. 25MIN	A. C.

(c) Certified mechanical properties*

	引張試験				曲げ	衝撃試験	
	0.2%耐力 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)		吸収エネルギー (kgf·m)	横膨出量 (mm)
規格	≥32		≥18.0	≥45.0	割れなし	≥6.9	≥0.89
試験結果 RT	44	63.2	29.5	68.6	割れなし	18.7	—

* 695-710°C×8HRS. 55MIN. F. C. のSR熱処理後試験実施

(d) Other certified test results

結晶粒度	外観検査	寸法検査	超音波探傷試験
8.0	Good	Good	Good

Table 3.2 Chemical composition, heat treatment and certified test results
for Mod.9Cr-1Mo steel plate.

(a) Chemical composition

(wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Al	N	Nb
リードル	0.10	0.39	0.42	0.014	0.001	8.75	0.06	0.97	0.21	0.012	0.0505	0.089
チェック	0.10	0.39	0.41	0.013	0.001	8.77	0.06	0.96	0.20	0.011	0.0502	0.087

(b) Results of heat treatment

1050°C×1.08h, A. C. (焼きならし処理)

780°C×1.42h, A. C. (焼もどし処理)

740°C×8.4h, F. C. (PWHT)

(c) Certified mechanical properties

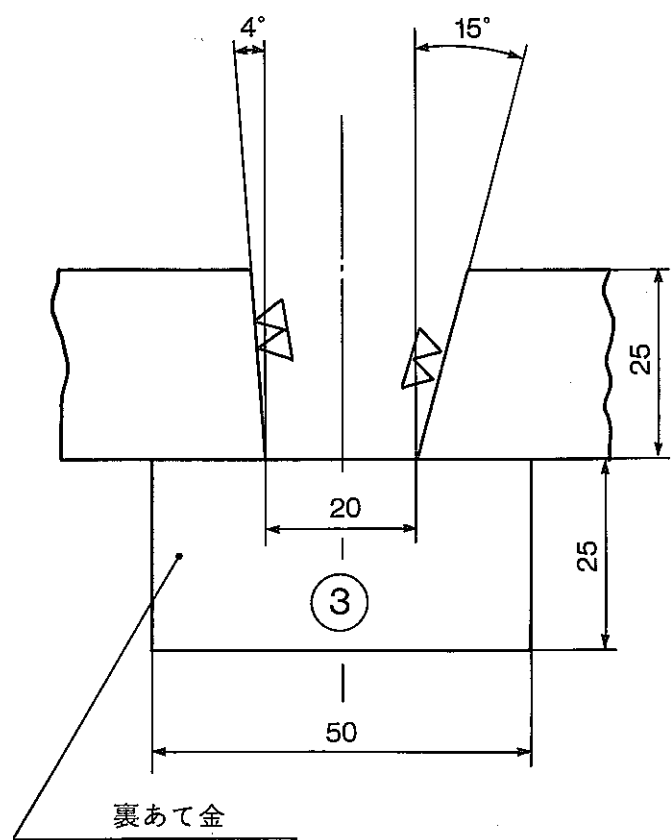
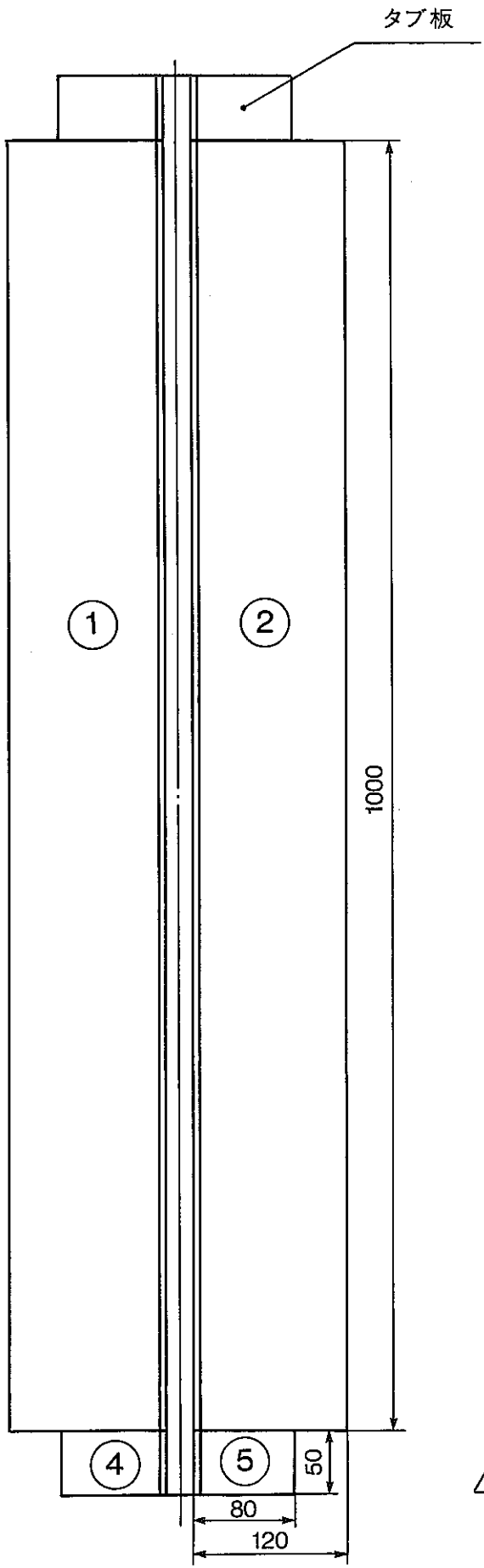
試験温度	0.2%耐力 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	伸び (%)	破断延性 (%)
RT	48.8, 49.9	67.7, 68.2	28.6, 26.0	69.8, 69.0
	52.0, 52.2	69.2, 69.5	26.8, 27.7	68.6, 68.6

(b) Other certified test results

結晶粒度	外観検査	寸法検査	非金属介在物 (%)		
			Aタイプ	Bタイプ	Cタイプ
7.0	良	良	0	0.008	0

Table 3.3 Welding procedure.

継手材質	Mod. 9Cr-1Mo鋼 同材継手 (ASTM A387 GR. 91CLASS 2)
開先形状	付図を参照すること。
溶接種類	継手溶接
溶接施行法	TIG自動溶接
溶接材料	神鋼TGS-9cd (ワイヤ)
棒 径 (mm)	Φ1.2
電 流 (A)	150~250 (ピーク)、100~160 (ベース)
電 圧 (V)	8~13 (ピーク)、8~13 (ベース)
速 度 (mm/min)	70~130
入熱量 (KJ/cm)	
予 熱 (°C)	150 °C以上
パス間温度 (°C)	
後熱処理	直熱後 ; 200 ~ 250°C, 1 hr PWHT ; 740°C×8.4hr
姿 勢	下 向 き
溶 接 長 (m)	1



Edge preparation

4. 2¼Cr-1Mo鋼のクリープ疲労き裂進展挙動試験

4. 2 ¼Cr-1Mo鋼のクリープ疲労き裂進展挙動試験

4.1 目的

本研究の目的を以下に示す。

- (1) クリープ損傷材の疲労き裂伝ば特性を明らかにする。
- (2) 時効処理（GEステップクーリング）材のクリープ疲労き裂伝ば特性を明らかにする。
- (3) 設計温度より50℃高い 550℃でのクリープ疲労き裂伝ば特性を明らかにして、500℃の結果と比較する。

4.2 試験方法

供試材の化学成分、熱処理および確性試験結果については既に、Table 3.1にした。時効材については、受入材にGEステップクーリング処理を行って製作した。また、クリープ損傷材については、平板に所定の時間までクリープ負荷を与えた後にき裂伝ば試験片を採取した。

試験装置の概要をFig. 4.1に示す。き裂長さは電気ポテンシャル法で測定した。試験片の端から、直流20Aを流し、切欠の上下端1mmのところに点溶接したリード線により電圧を測定した。電圧からき裂長さを導出するためにジョンソンの式を用いた。また、き裂伝ば速度を整理するためのパラメータを求めるために、切欠の上下端5mmのき裂開口変位を測定した。

疲労試験片の形状をFig. 4.2に、クリープ疲労試験片の形状をFig. 4.3に示す。いずれも、CCTで、初期切欠は放電加工した。疲労試験片の初期切欠長は2mm、クリープ疲労試験片の初期切欠長は4mmである。また、クリープ疲労試験片には、トンネリング防止とき裂面への変形の集中を考慮して、サイドグループを加工した。

試験は大気中、500℃および550℃で行われた。負荷は荷重制御で、疲労き裂伝ばの場合は完全両振り対称三角波、クリープ疲労き裂伝ばの場合は引張最大荷重保持の台形波である。保持時間は10minである。

疲労き裂伝ば速度を整理するためのパラメータとしては、次式で示すように、繰り返しJ積分範囲 ΔJ を用いた。

$$\Delta J = \Delta K^2 / E + S_p / B b$$

ここで、 ΔK : 応力拡大係数範囲, E : ヤング率, B : 板厚, b : リガメント半長, S_p : 荷重-き裂中央開口変位の履歴曲線から求められるエネルギー (Fig. 4.4 を参照のこと。)

また、クリープ疲労き裂伝ば速度を整理するためのパラメータとしては、次式で示すように、クリープ J 積分範囲 ΔJ_c を用いた。

$$\Delta J_c = [(\alpha - 1) / (\alpha + 1)] \sigma_{net} \Delta \delta$$

ここで、 α : Norton 則における応力指数, σ_{net} : 正味断面応力, $\Delta \delta$: 荷重保持中のき裂開口変位の増分 (Fig. 4.4 を参照のこと。)

4.3 試験結果および考察

試験結果の概要を Table 4.1 に示す。

(1) クリープ損傷材の疲労き裂伝ば

き裂長さとの繰り返し数の関係を Fig. 4.5 に示す。き裂伝ば速度は、クリープ損傷 0.5 > クリープ損傷 0.2 > 処女材の順であった。Fig. 4.6 に、き裂伝ば速度とき裂長さの関係を示す。同一のき裂長さに対するき裂伝ば速度も、クリープ損傷 0.5 > クリープ損傷 0.2 > 処女材の順であった。また、Fig. 4.7 に、 ΔJ とき裂長さの関係を示すが、同一き裂長さに対する ΔJ の大きさも、同様の順であった。き裂伝ば速度と ΔJ の関係を Fig. 4.8 に示す。Fig. 4.6 と Fig. 4.7 から予想されるように、クリープ損傷材のき裂伝ば速度は同一の ΔJ に対して、処女材よりもやや高いものの、ほぼ一致した。一方、クリープ損傷材の破面を Photo. 4.1 ~ 4.3 に示す。き裂伝ば速度が大きくなると、明瞭なストライエーションが観察された。処女材の破面と異なるのは、き裂発生直後の平坦な領域が狭いということである。

(2) 時効処理材のクリープ疲労き裂伝ば

まず、G E S C 材と処女材の疲労き裂伝ばにおけるき裂長さとの繰り返し数の関係について、比較した結果を Fig. 4.9 に示す。両者はほぼ等しい関係を示した。また、き裂伝ば速度と ΔJ の関係を Fig. 4.10 に示すが、G E S C 材は、同一の ΔJ に対して、処女材よりもわずかに大きめの伝ば速度を示すが、両者の関係はほぼ等しい。一方、G E S C 材の破面を観察

した結果をPhoto. 4. 4～4. 6 に示すG E S C材の破面は処女材の破面とほぼ等しい特徴を有する。

次に、G E S C材と処女材のクリープ疲労き裂伝ばにおけるき裂長さと繰返し数の関係について比較した結果をFig. 4.11に示す。両者は、ほぼ等しい関係を示した。また、き裂伝ば速度と ΔJ_c の関係をFig. 4.12に示すが、G E S C材と処女材は、ほぼ等しい関係を示した。一方、G E S C材の破面を観察した結果をPhoto. 4. 7～4. 9 に示す。G E S C材の破面は処女材の破面とほぼ等しい特徴を有する。

(3) 550℃におけるクリープ疲労き裂伝ば

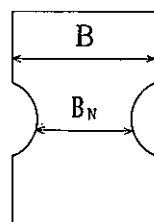
まず、疲労き裂伝ばにおけるき裂伝ば速度と ΔJ の関係について、550℃と500℃の場合を比較した結果をFig. 4.13に示す。550℃の場合は500℃に比較して、大きいき裂伝ば速度を示すことがわかった。550℃の破面を観察した結果をPhoto. 4.10～4.12に示す。550℃での破面は、500℃の破面よりも、酸化されているが、両者はほぼ等しい。

次に、クリープ疲労き裂伝ばにおけるき裂伝ば速度と ΔJ_c の関係について、550℃と500℃の場合を比較した結果をFig. 4.14に示す。両者はほぼ等しい関係を示した。また、550℃での破面を観察した結果をPhoto. 4.13～4.15に示す。破面は厚い酸化膜でおおわれており、破壊の形態は判別できなかった。

Table 4.1 Results of fatigue or creep-fatigue crack propagation test for 2 ¼Cr-1Mo steel.

Material	Temp. (°C)	$\Delta \sigma^{*1}$ (kgf/mm ²)	R	t_H (min)	N_f (cycles)	a_o^{*2} (mm)	a_f^{*3} (mm)	side groove	Sp.No.
Creep-damaged $D_c = 0.2$	500	38	- 1		4450	0.960	4.623	with out	FCC606
Creep-damaged $D_c = 0.5$					2768	0.970	5.533		FCC607
GESC					8390	0.965	5.559		FCC601
		36		10	2035	1.965	5.495	with	FCC604
Virgin	550	34	-1.267		12620	0.478	5.095	with out	FCC536
					15744	0.472	6.162		FCC537
		32	- 1	10	685	1.960	3.778	with	FCC569

(Remarks) * 1



without SG

$$\Delta \sigma = P / (B \cdot W)$$

with SG

$$\Delta \sigma = P / (B_N \cdot W)$$

* 2 Initial crack length,

* 3 Final crack length

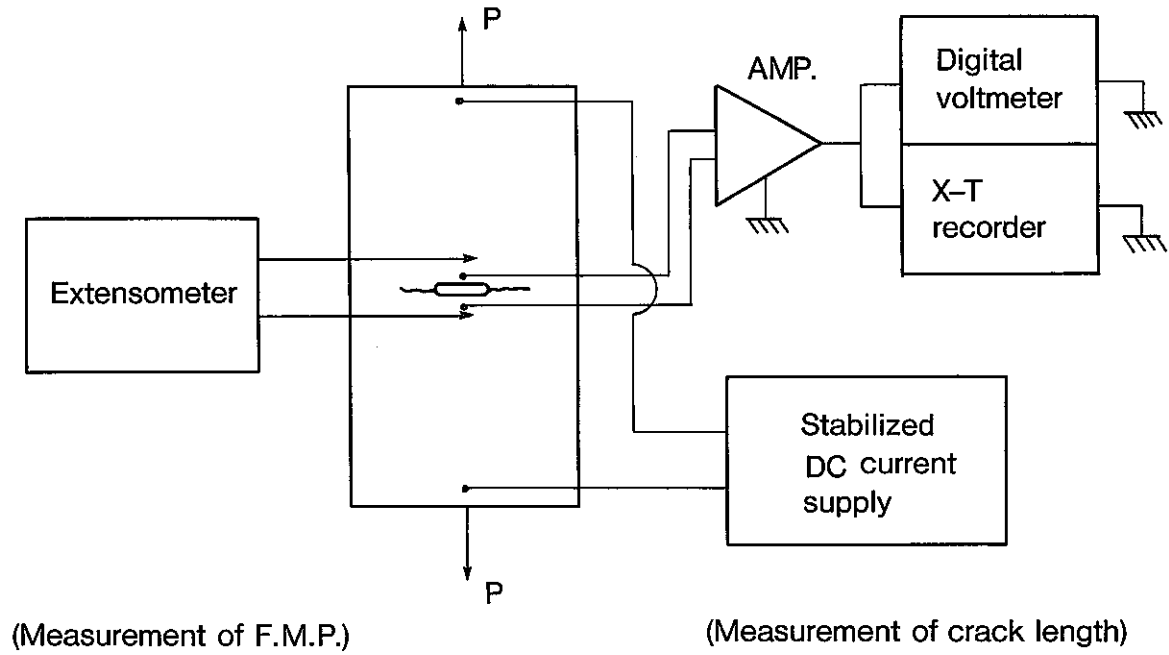


Fig. 4.1 Testing apparatus.

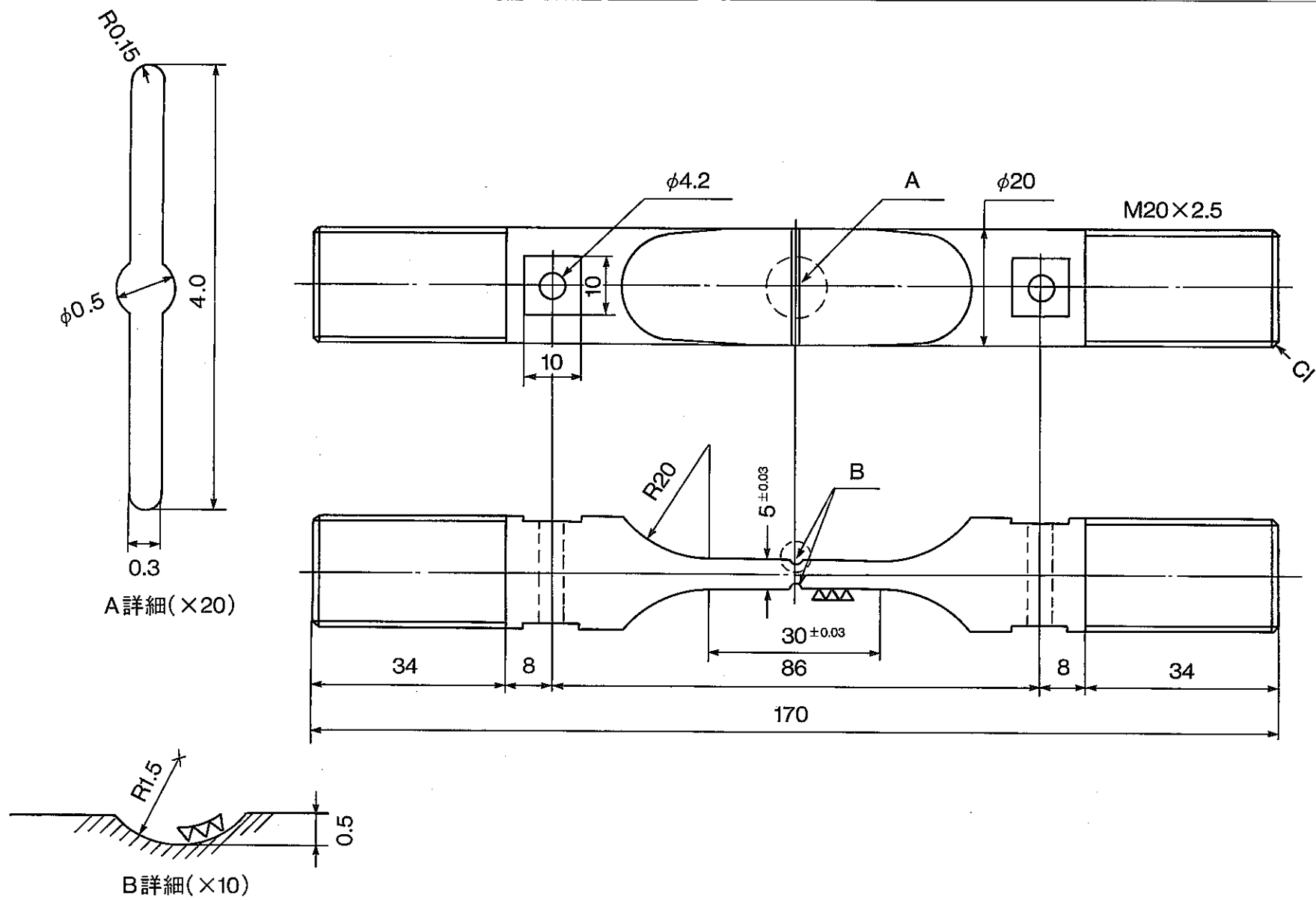
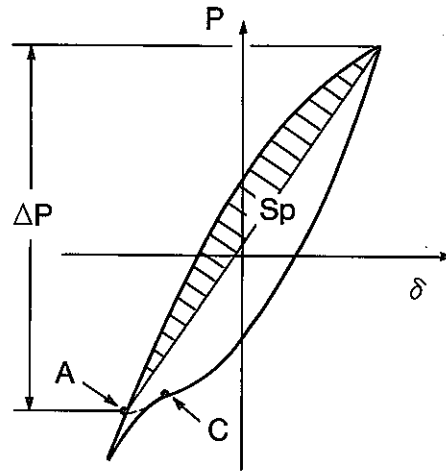
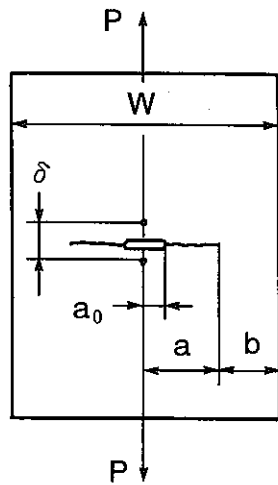
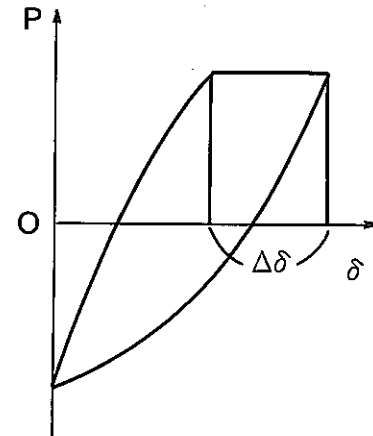


Fig. 4.3 Specimen configurations for creep-fatigue crack propagation test .



Fatigue crack propagation



Creep-fatigue crack propagation

- P ; Load
- δ ; Load line displacement
- C ; Crack closure point
- A ; Start point of S calculation

Fig. 4. 4 Definition of S_p and $\Delta\delta$.

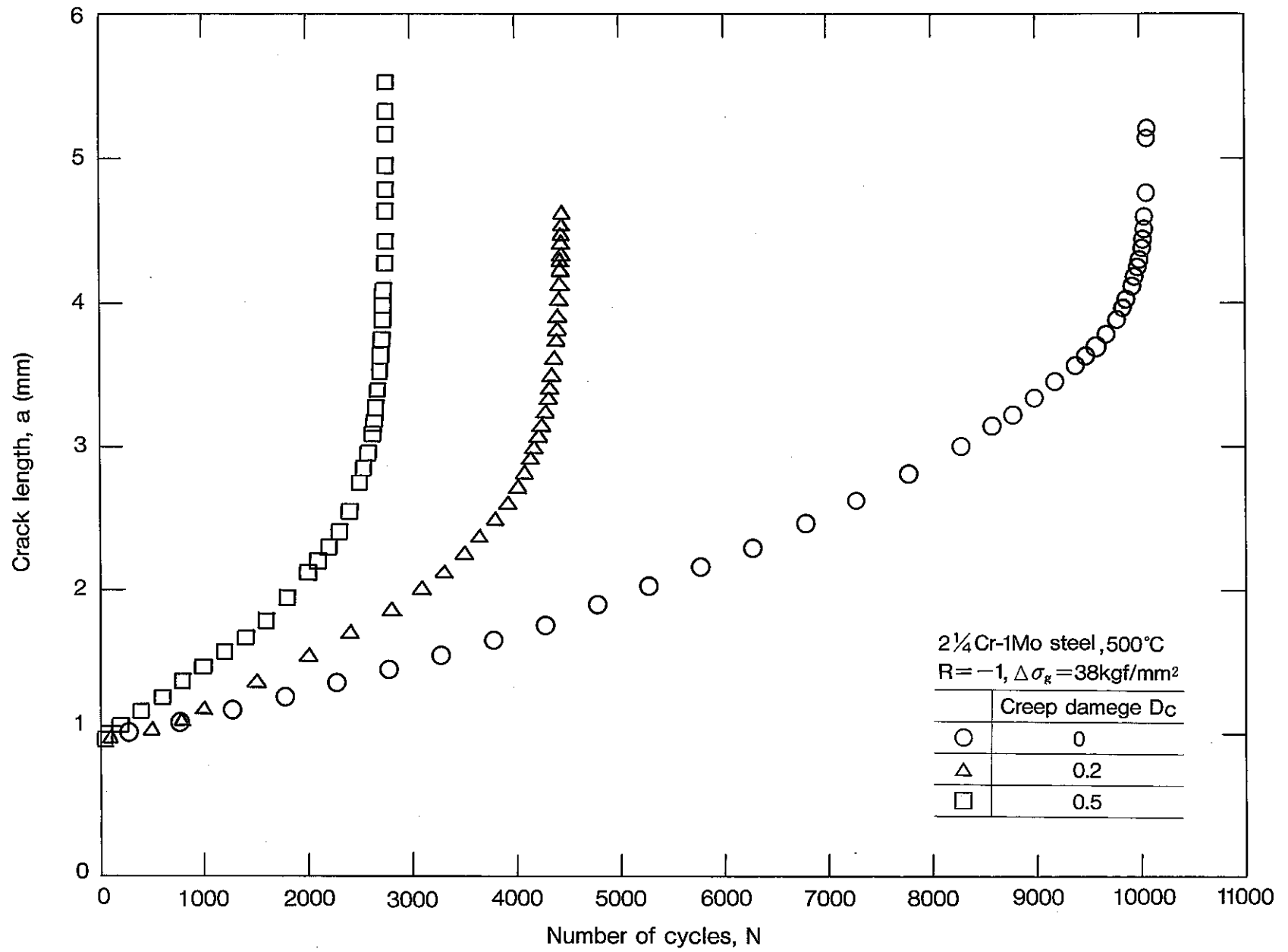


Fig. 4.5 Relationship between crack length and number of cycles.

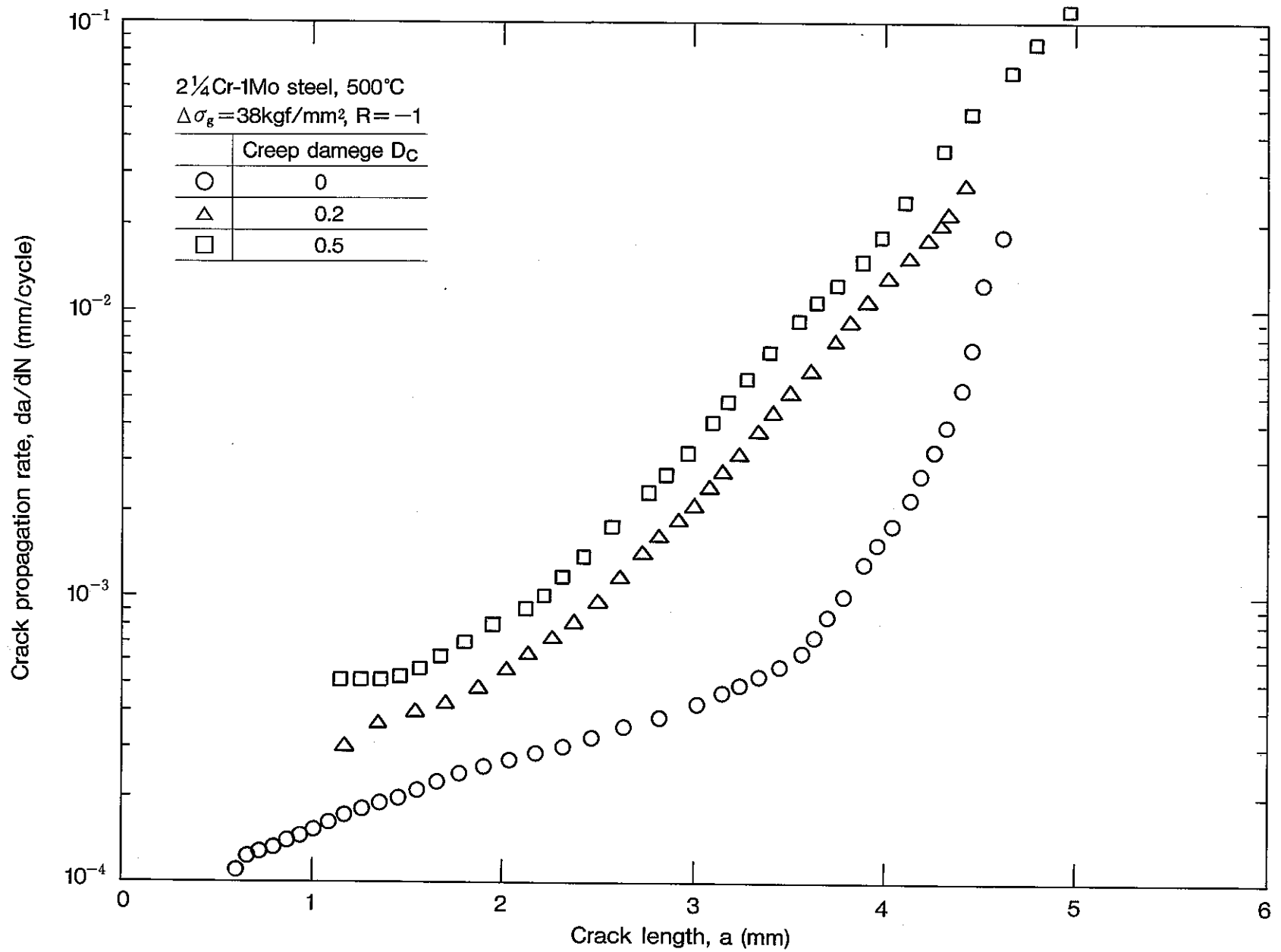


Fig. 4.6 Relationship between crack propagation rate and crack length.

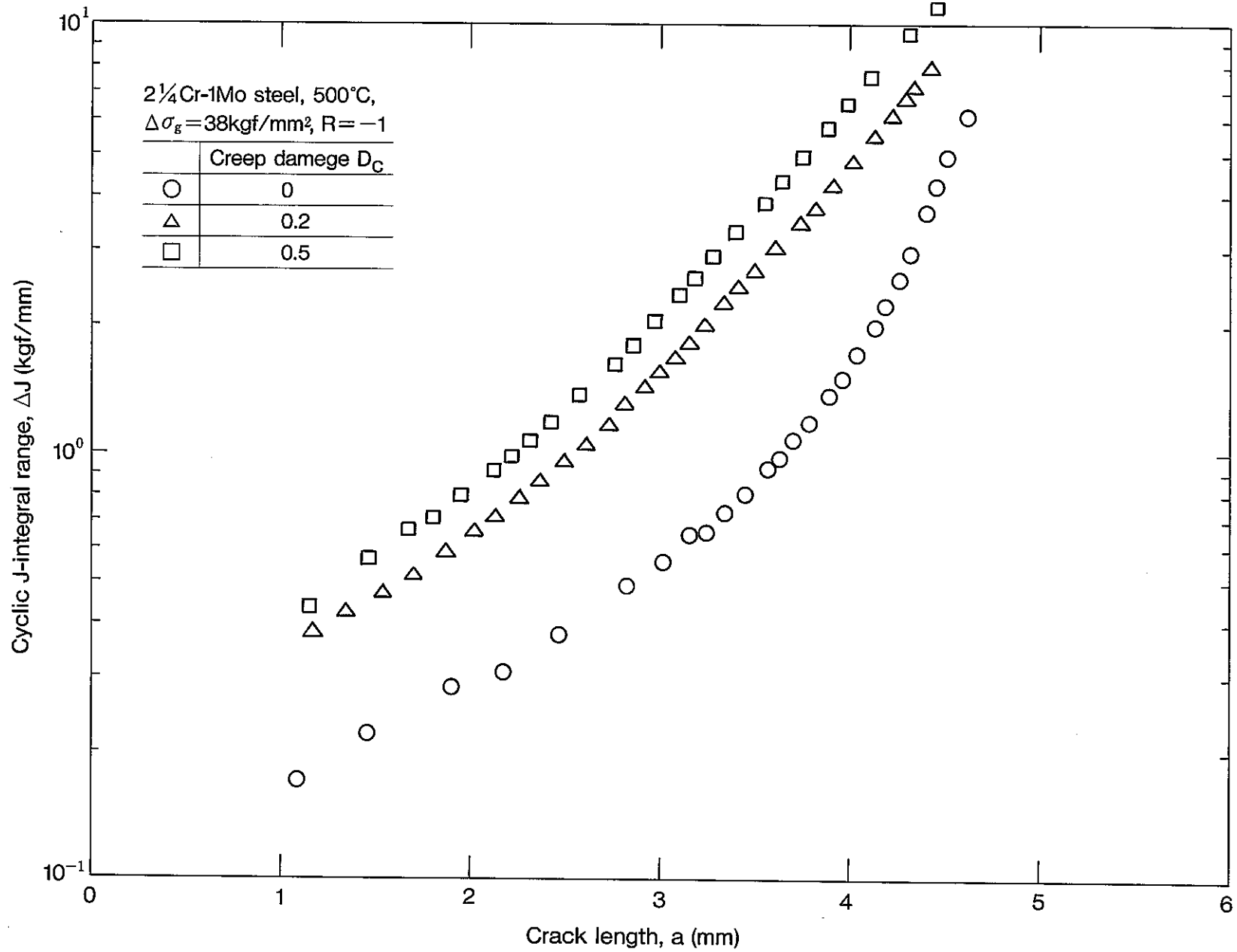


Fig. 4.7 Relationship between cyclic J-integral range and crack length.

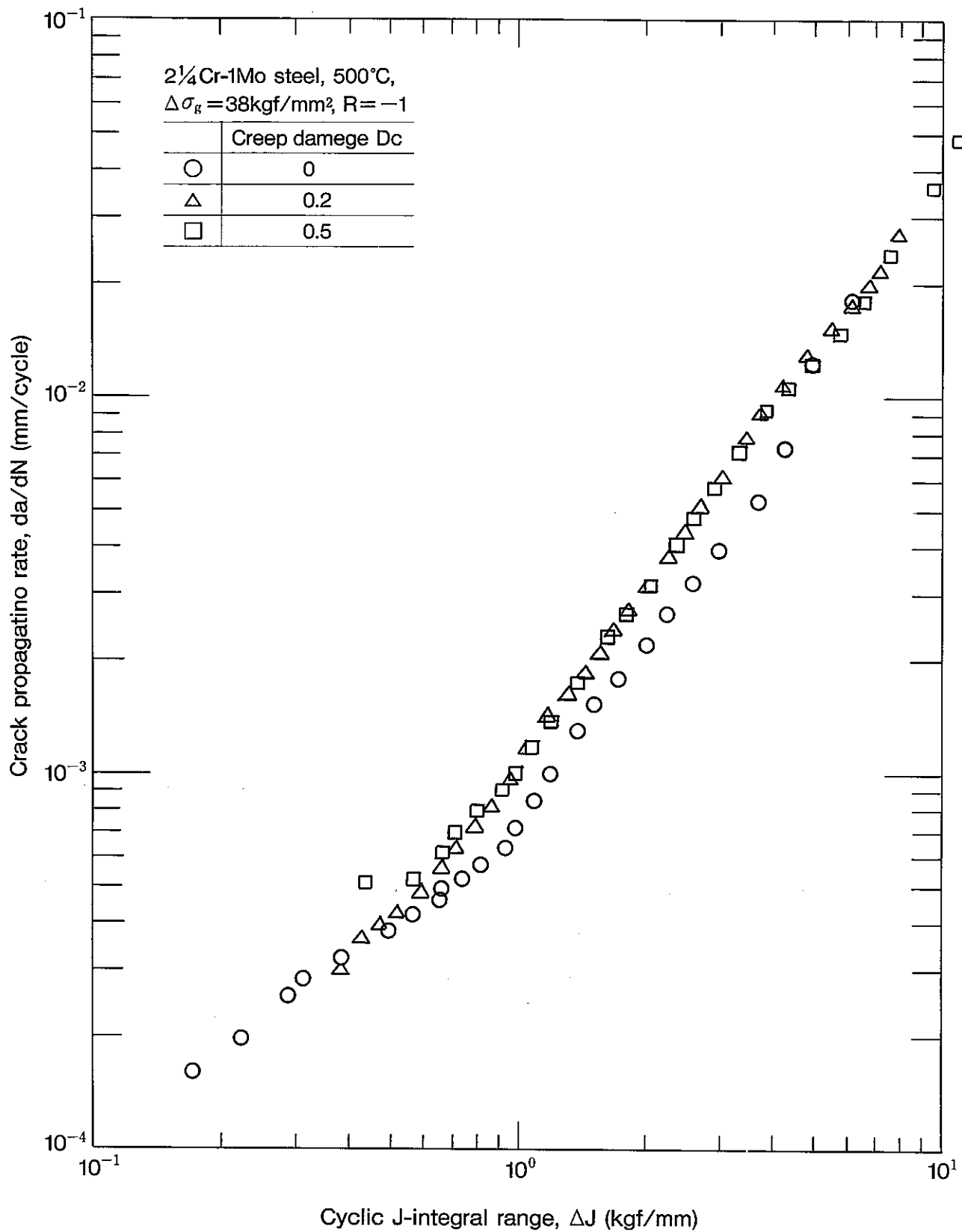


Fig. 4. 8 Relationship between crack propagation rate and cyclic J-integral range.

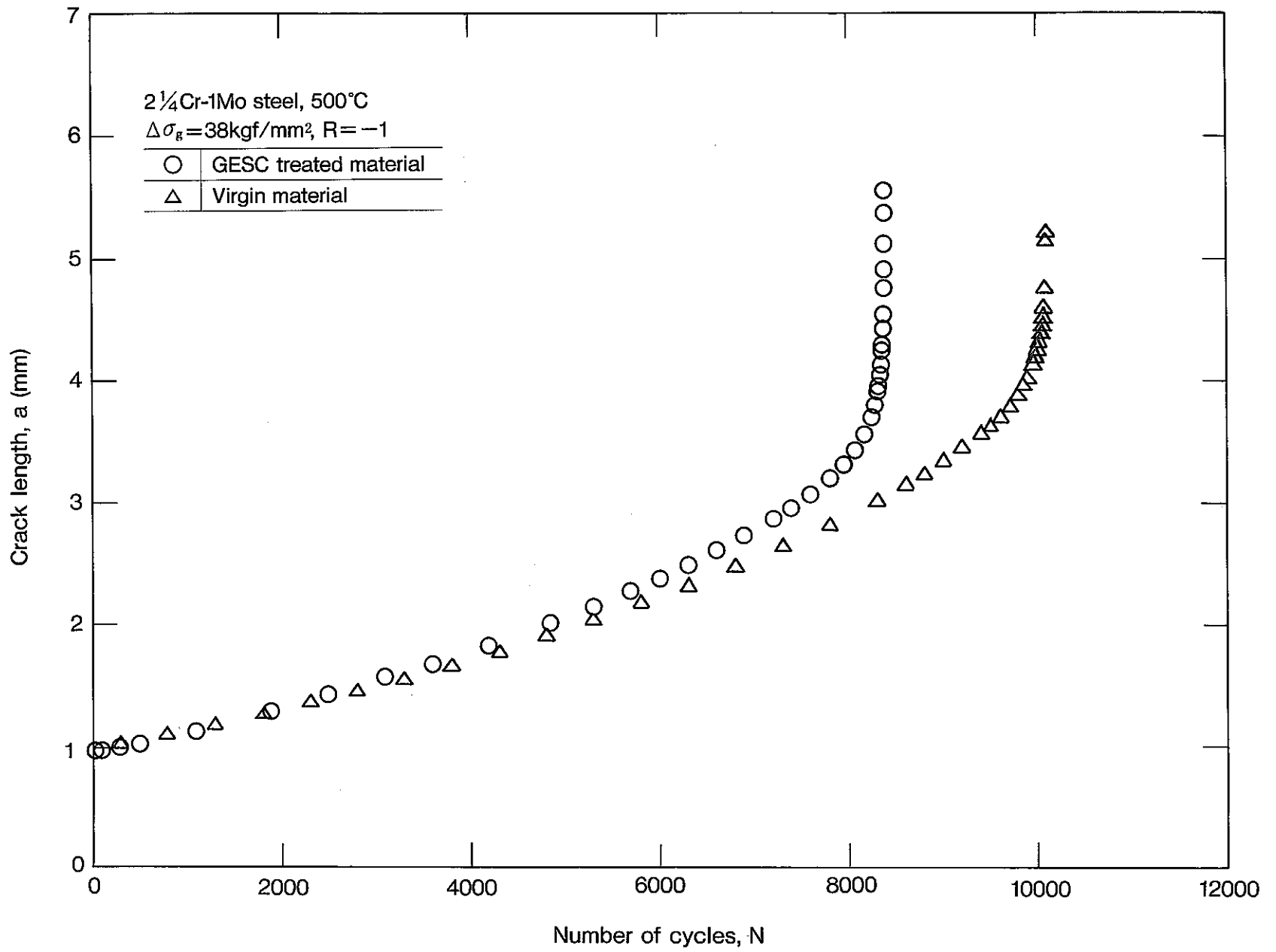


Fig. 4. 9 Relationship between crack length and number of cycles.

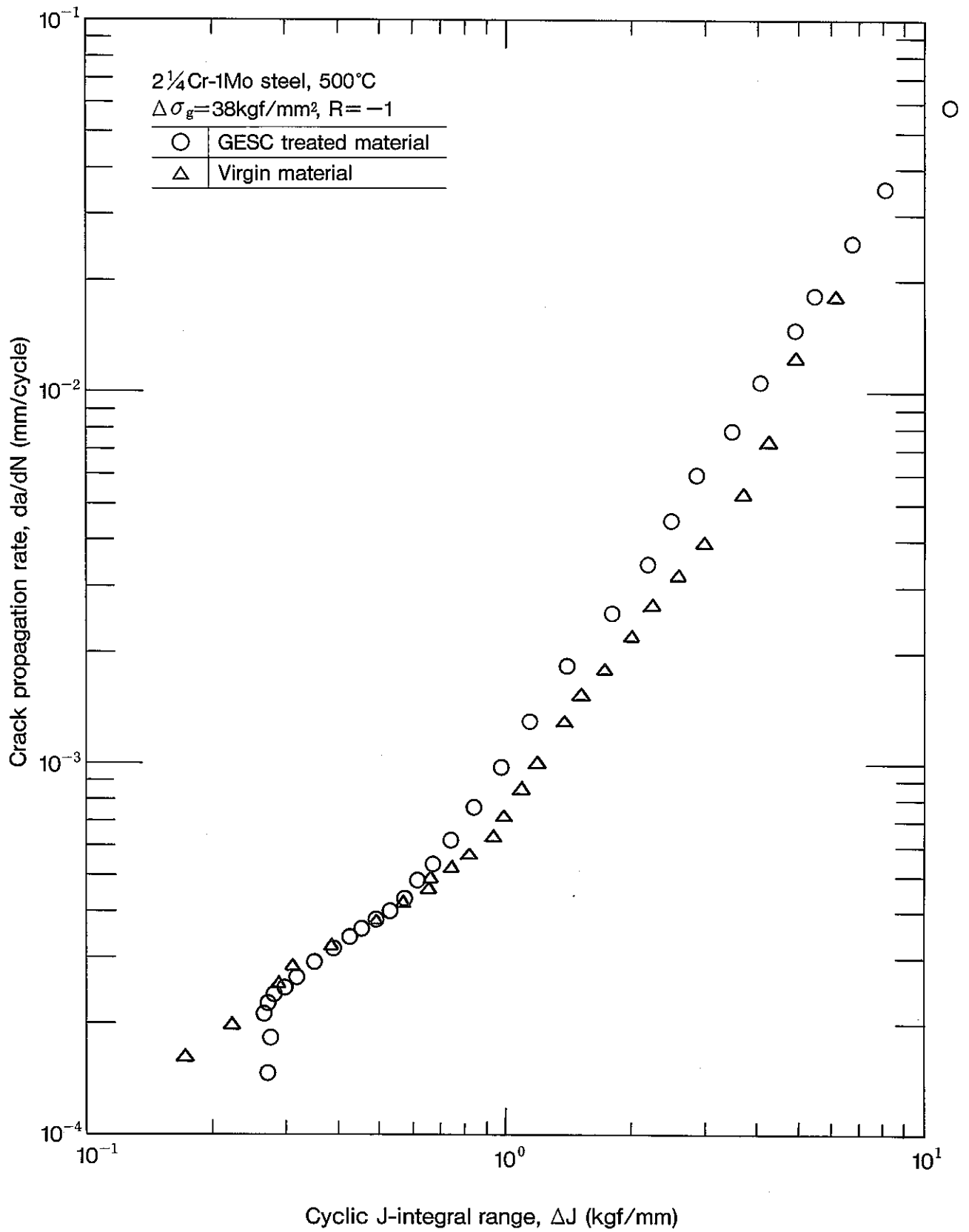


Fig. 4. 10 Relationship between crack propagation rate and cyclic J-integral range.

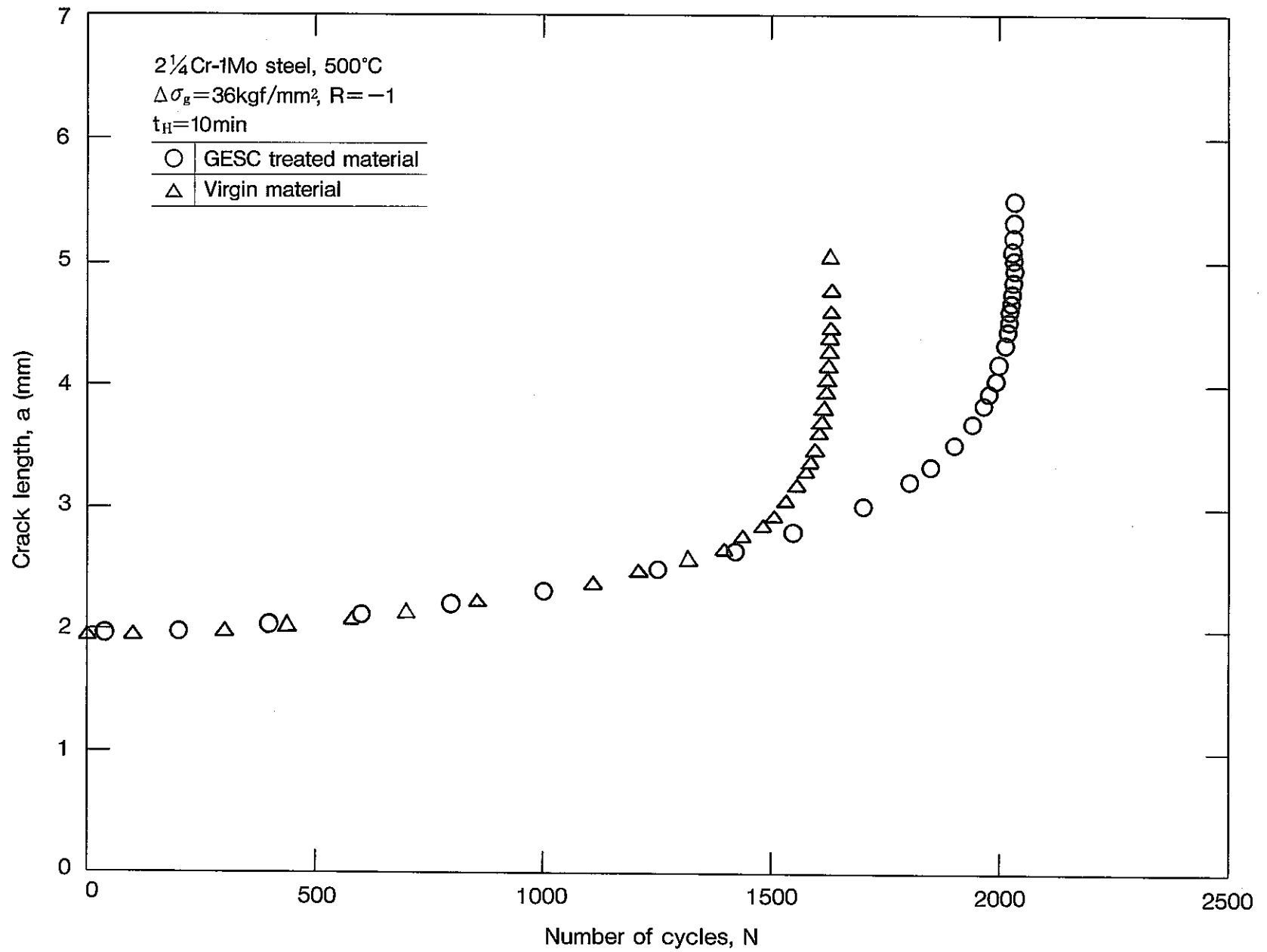


Fig. 4.11 Relationship between crack length and number of cycles.

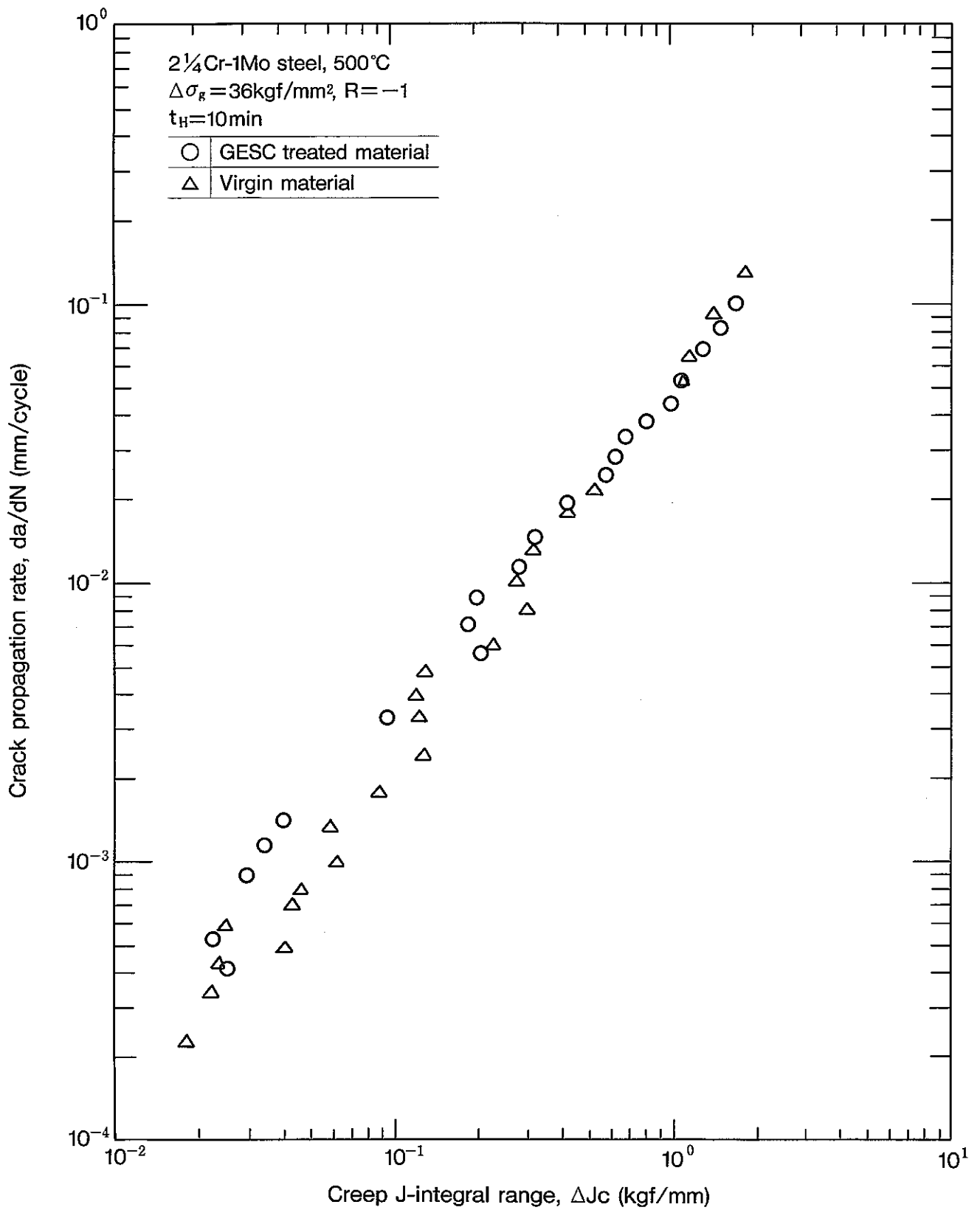


Fig. 4.12 Relationship between crack propagation rate and creep J-integral range.

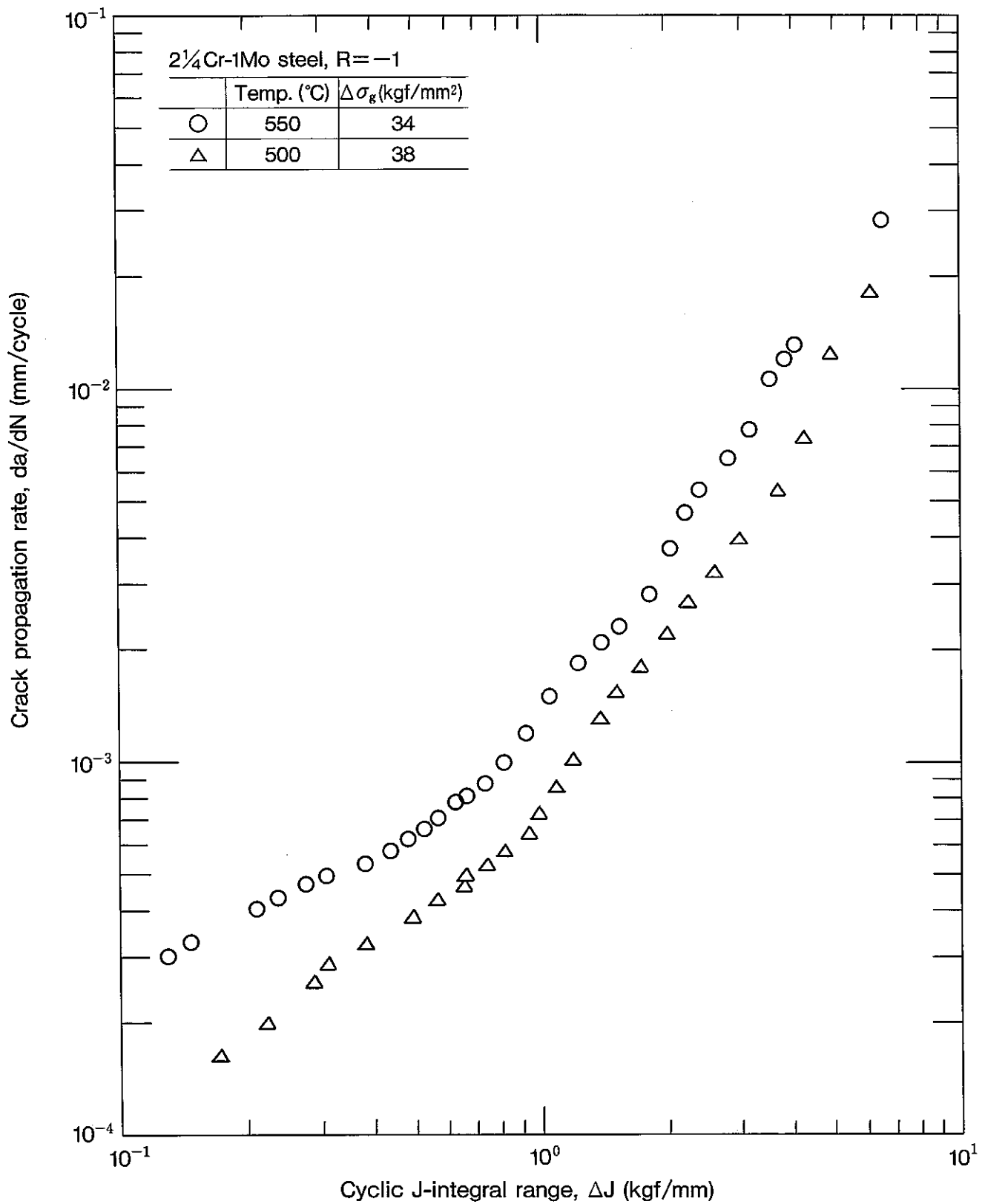


Fig. 4.13 Relationship between crack propagation rate and cyclic J-integral range.

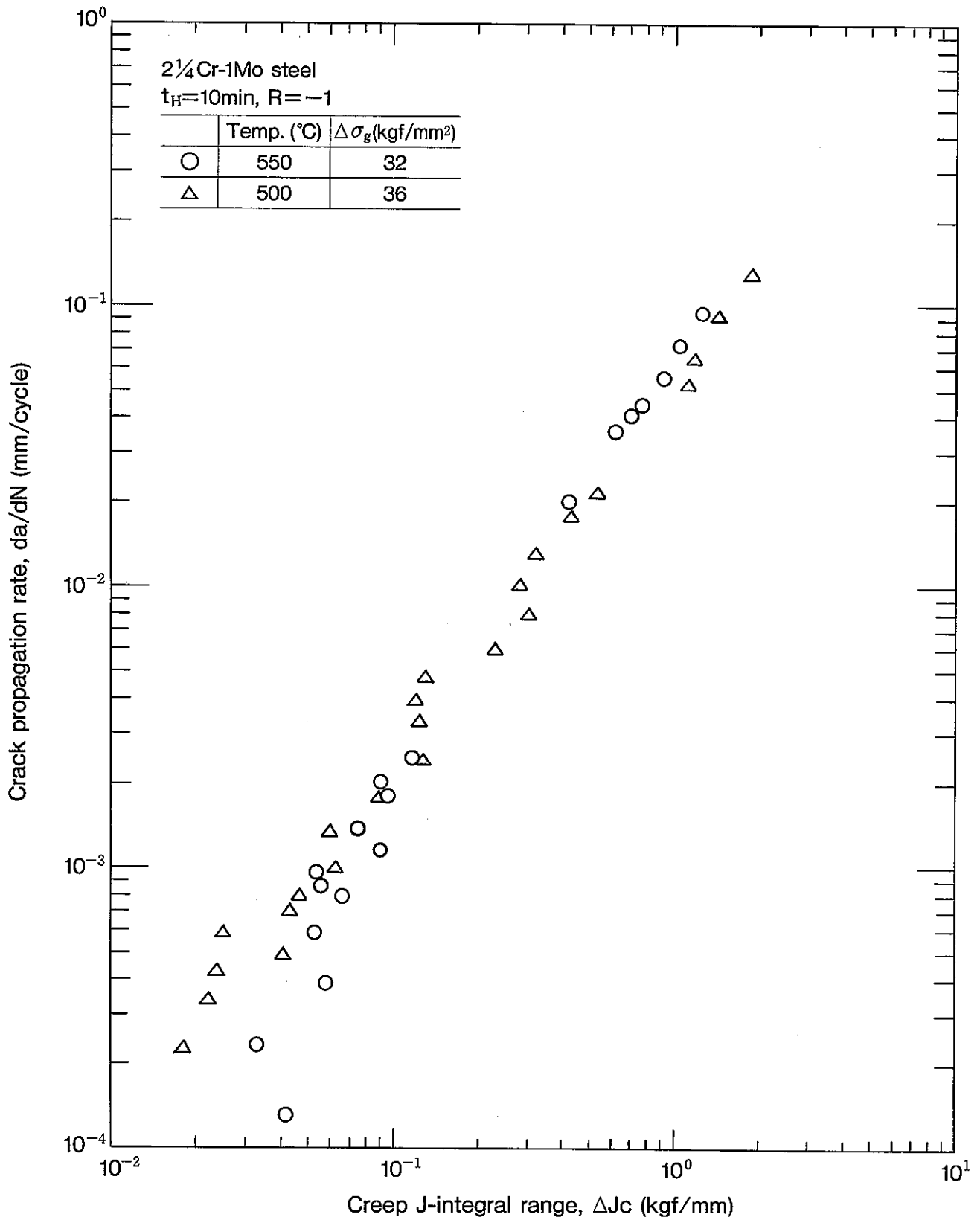
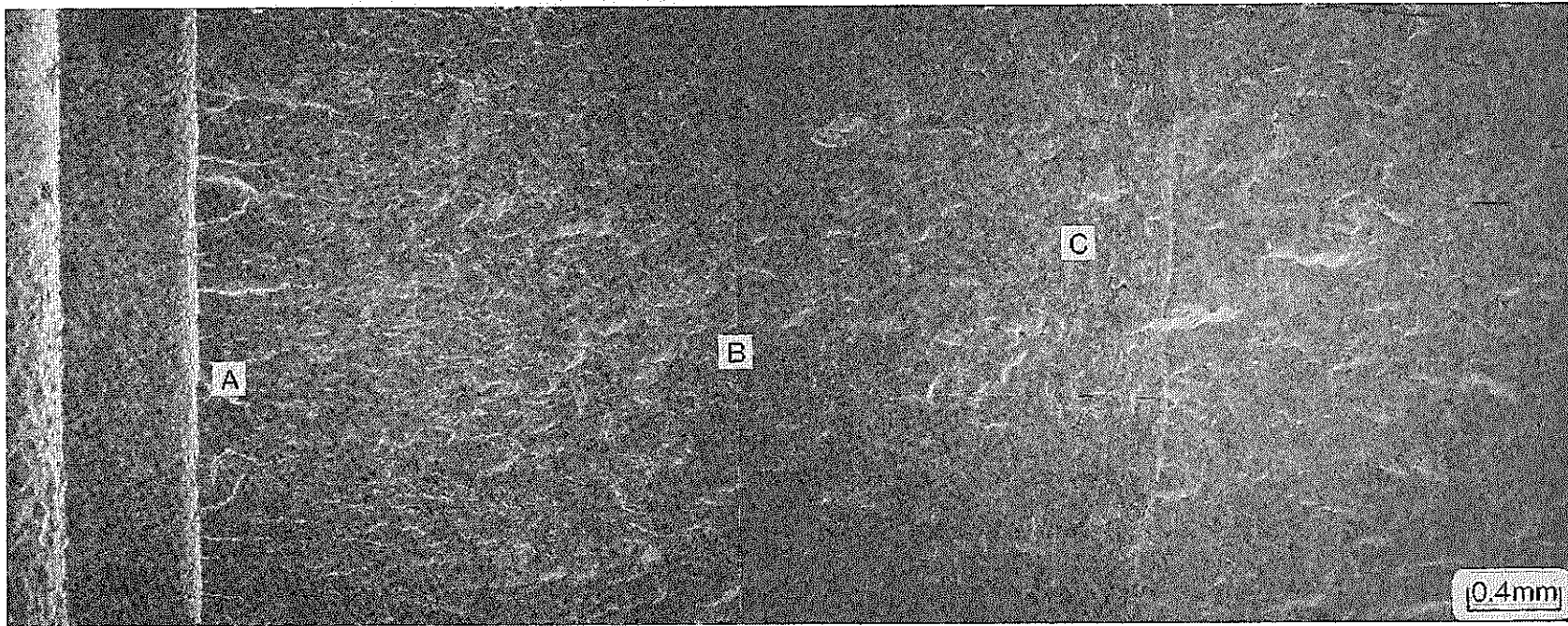
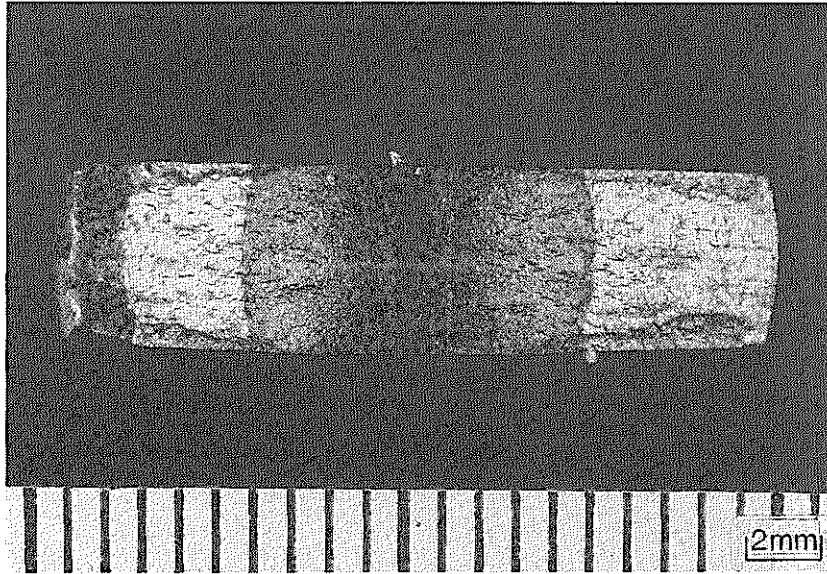


Fig. 4. 14 Relationship between crack propagation rate and creep J-integral range.

Fracture surface

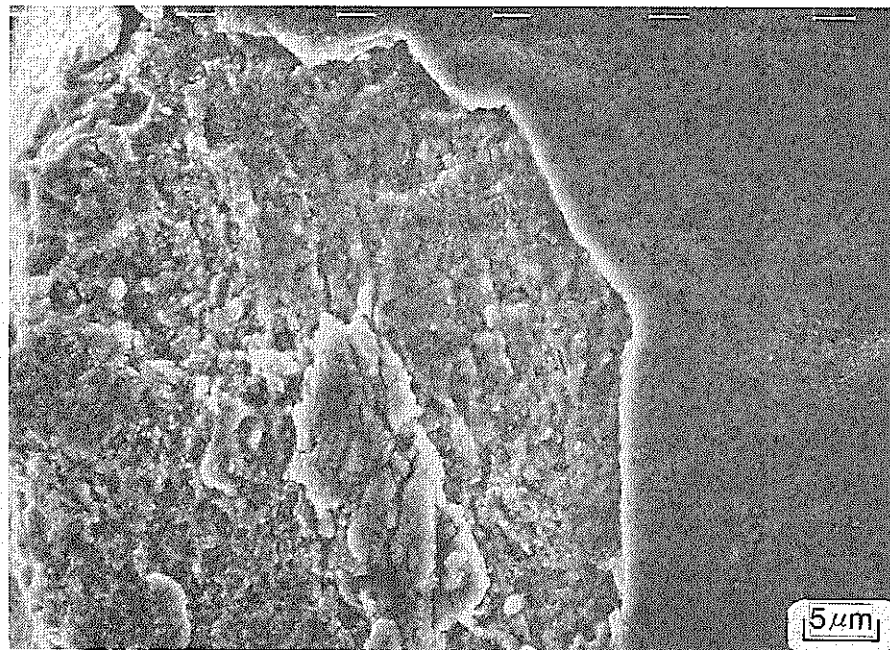
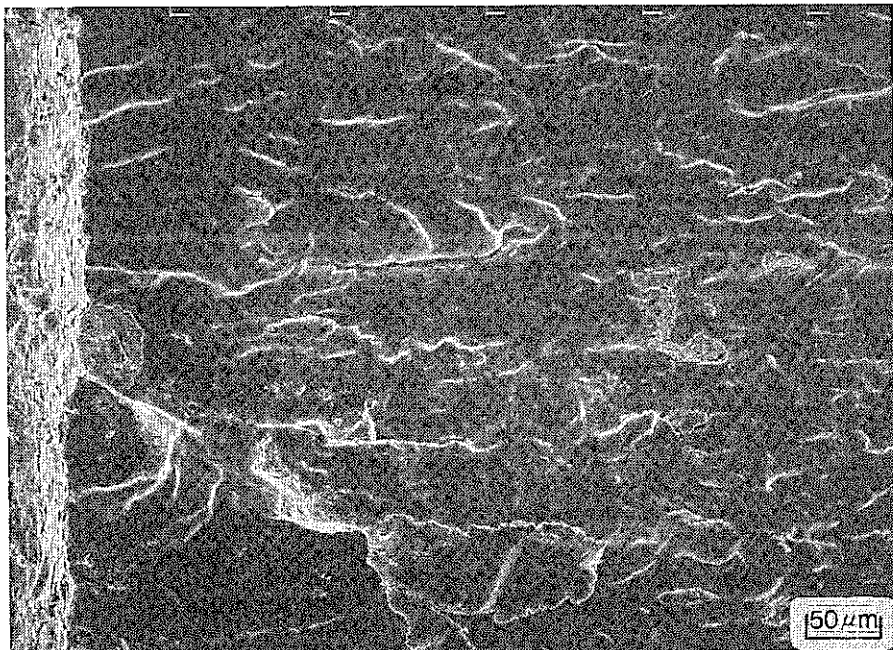
2¼Cr-1Mo, 500°C
 $\Delta\sigma_g=38\text{kgf/mm}^2$, $R=-1$



Initial notch Fatigue failure Rapid failure

Photo. 4.1 Observation of fracture surface by SEM (1).

A



B

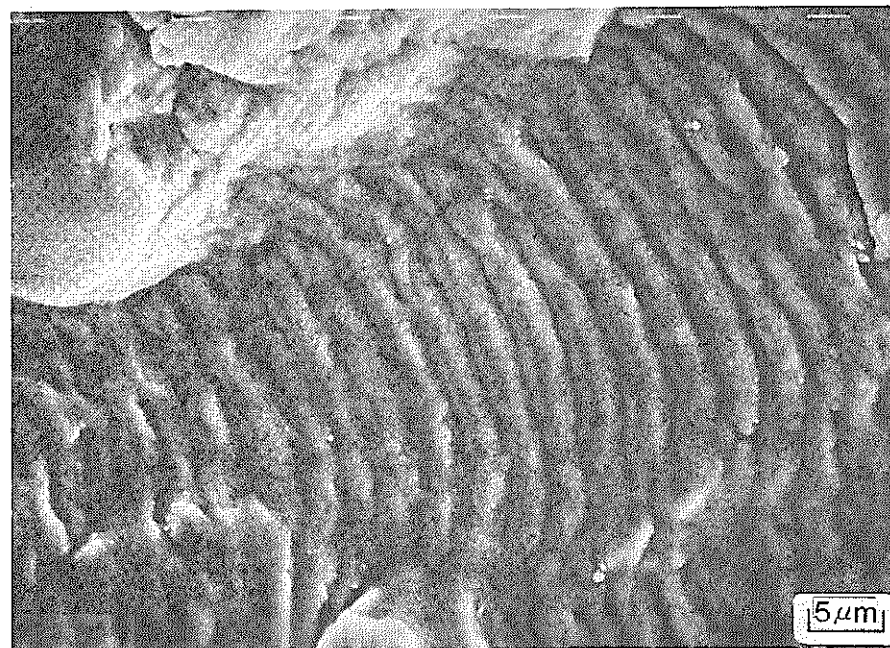
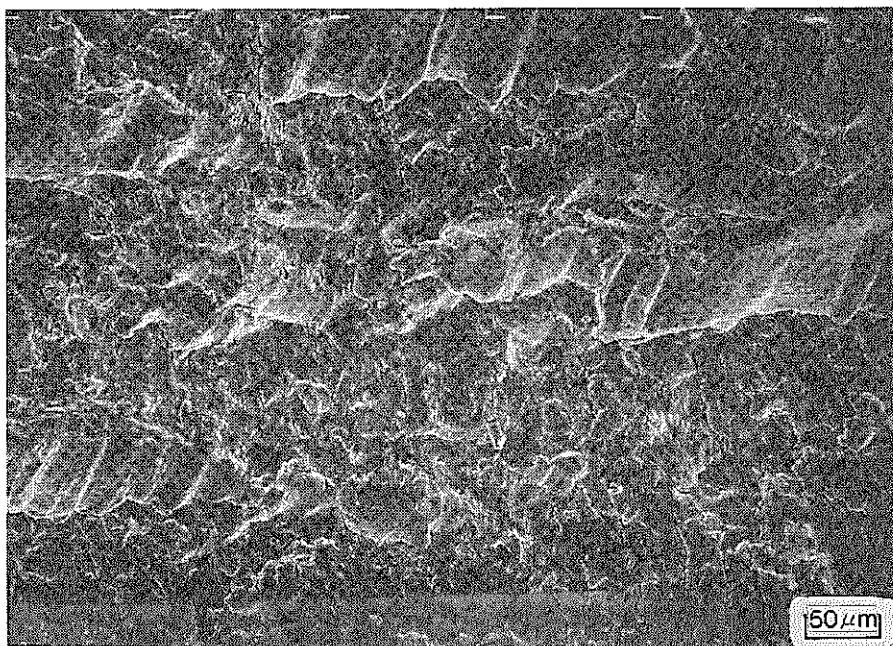


Photo. 4.2 Observation of fracture surface by SEM (2).

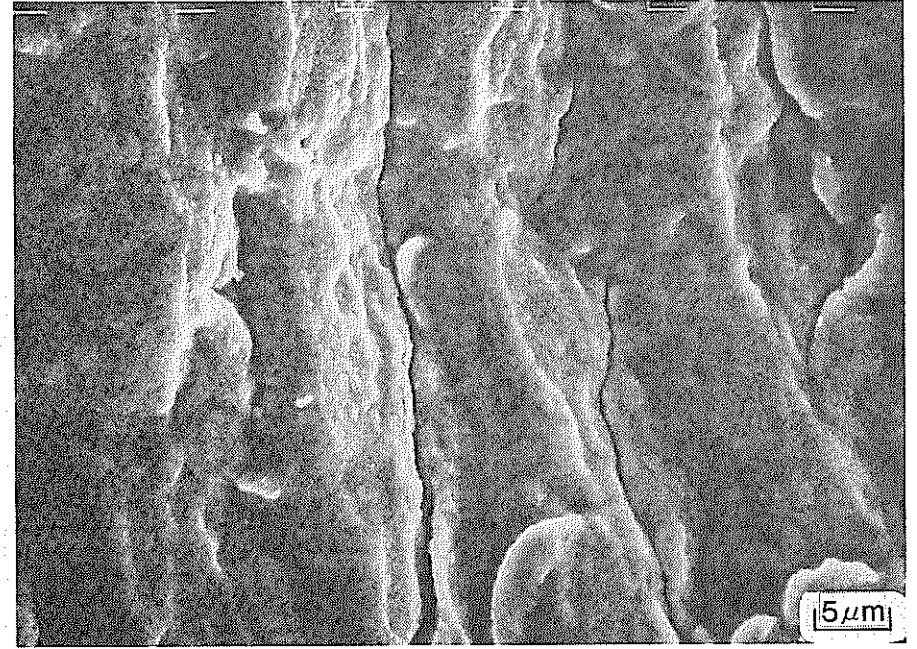
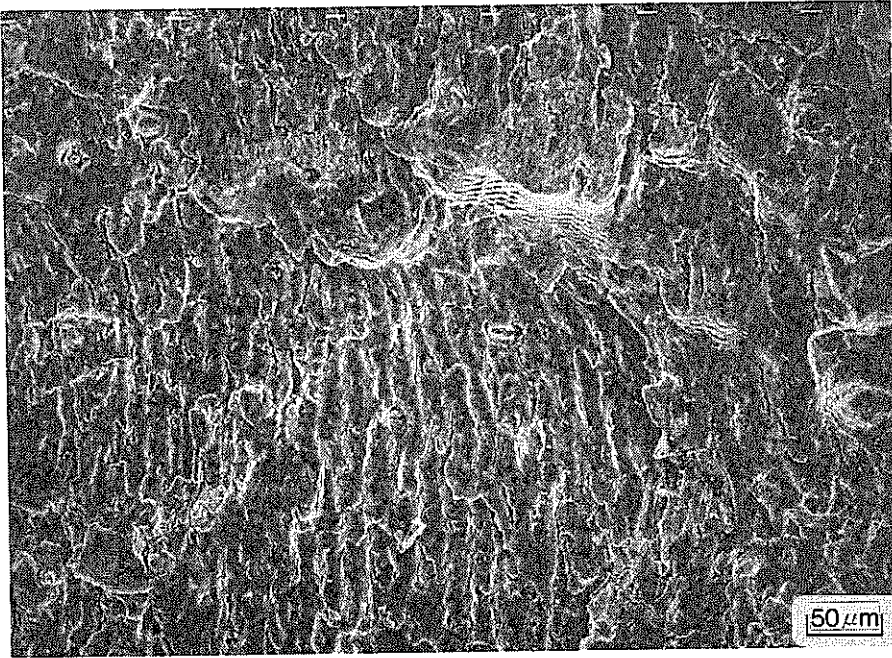
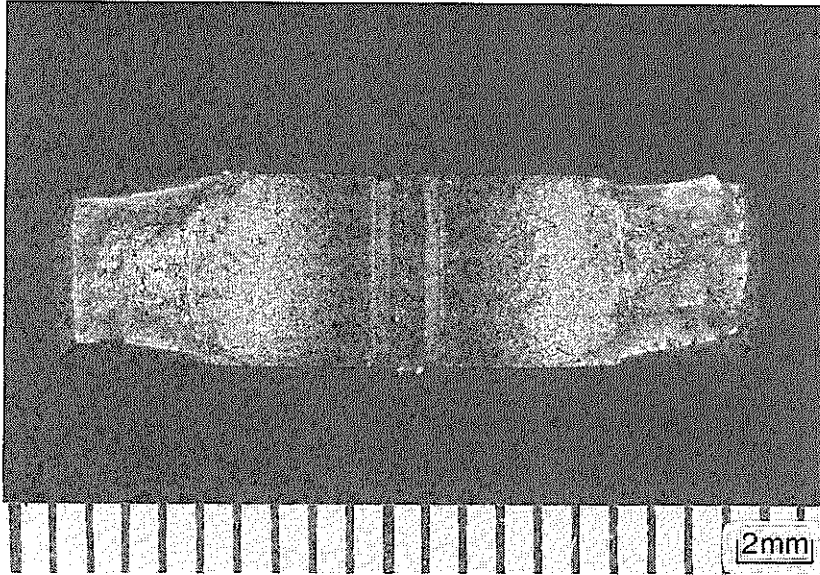


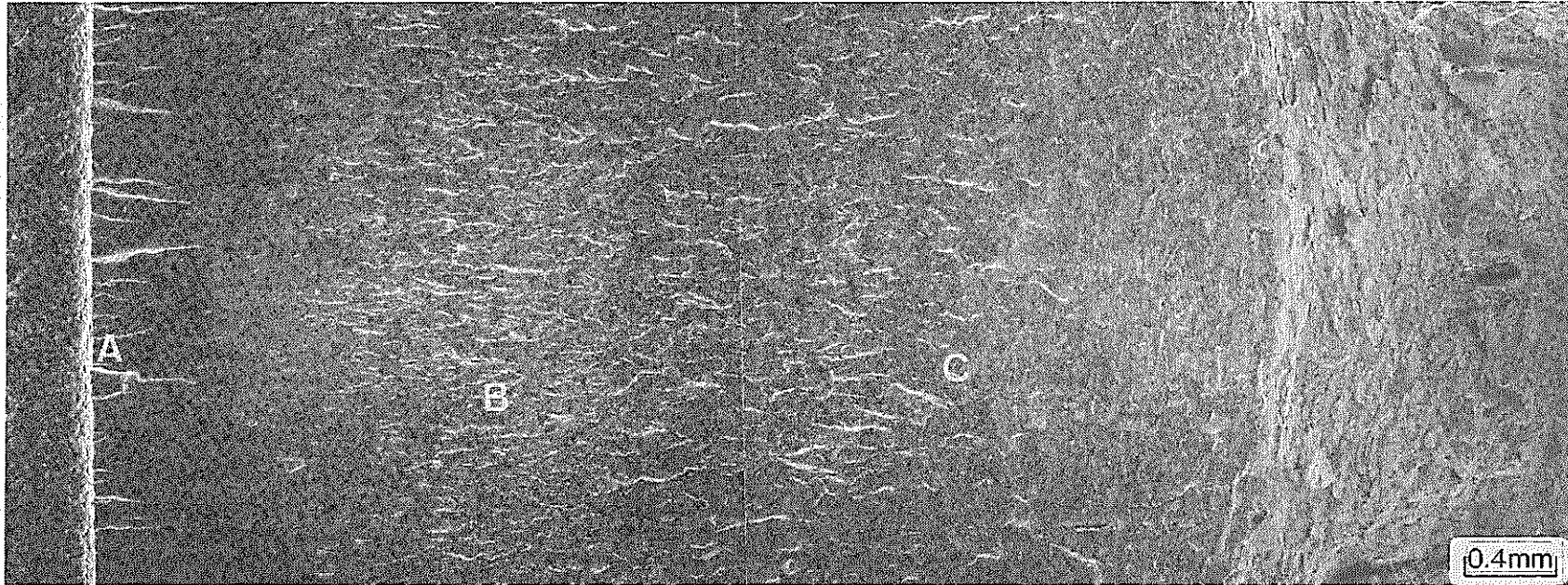
Photo. 4.3 Observation of fracture surface by SEM (3).

Fracture surface



2¼Cr-1Mo steel, 500°C
 $\Delta\sigma_g=38\text{kgf/mm}^2$, $R=-1$

SEM Fractographs



Initial notch Fatigue failure Rapid failure

Photo. 4. 4 Observation of fracture surface by SEM (1).

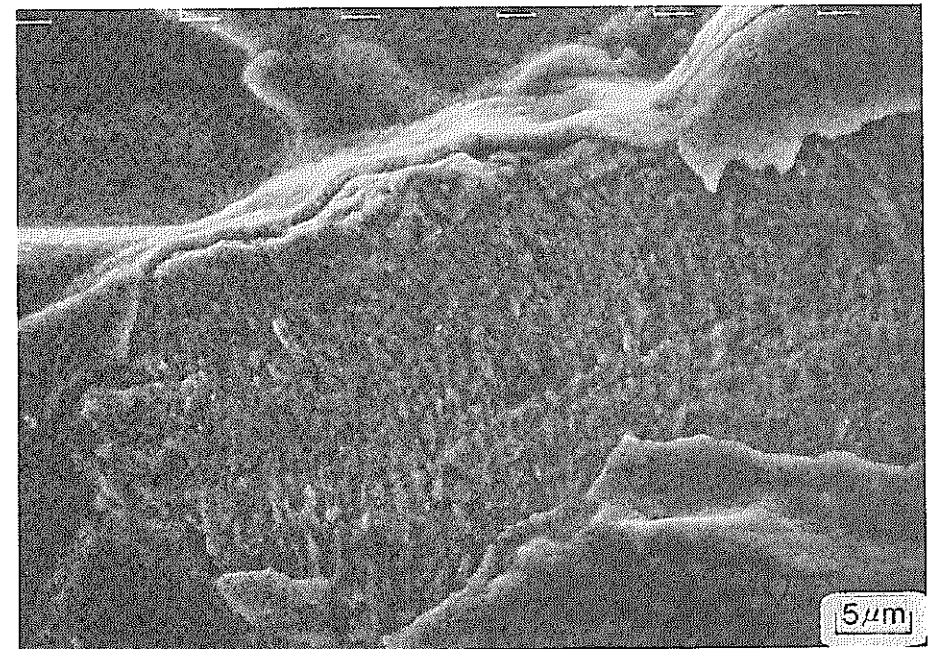
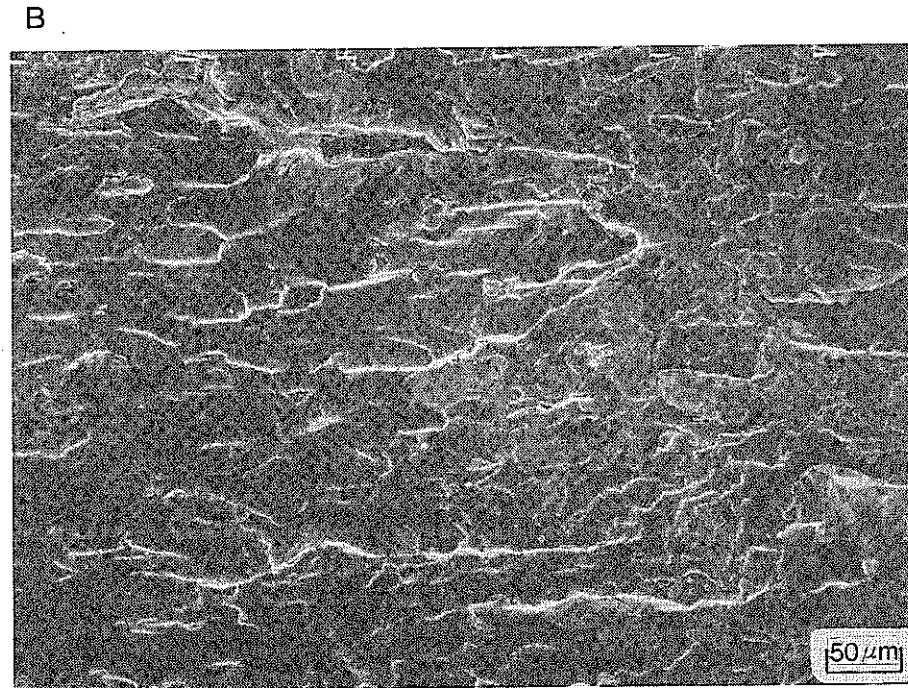
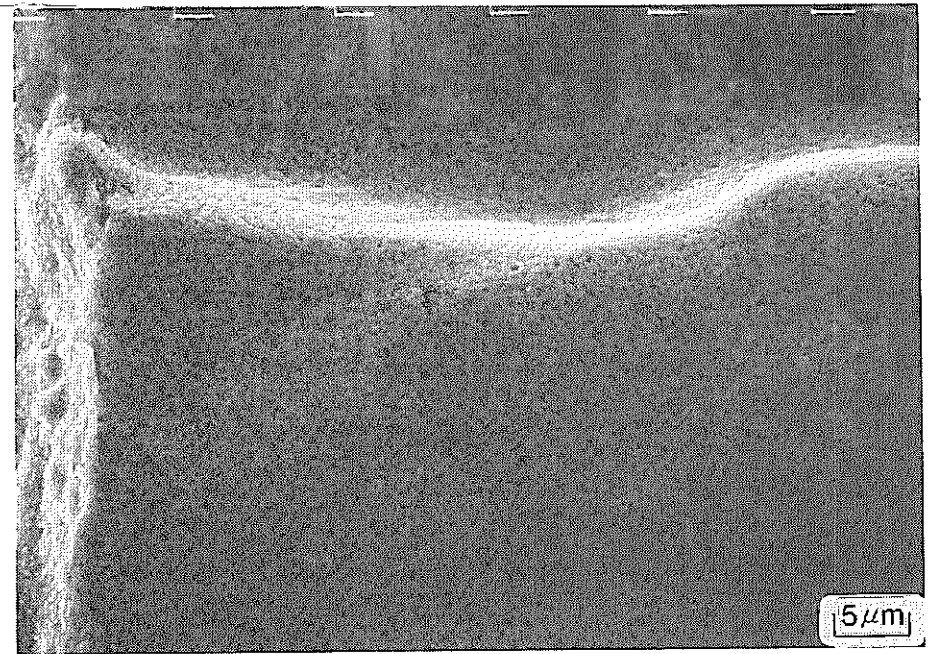
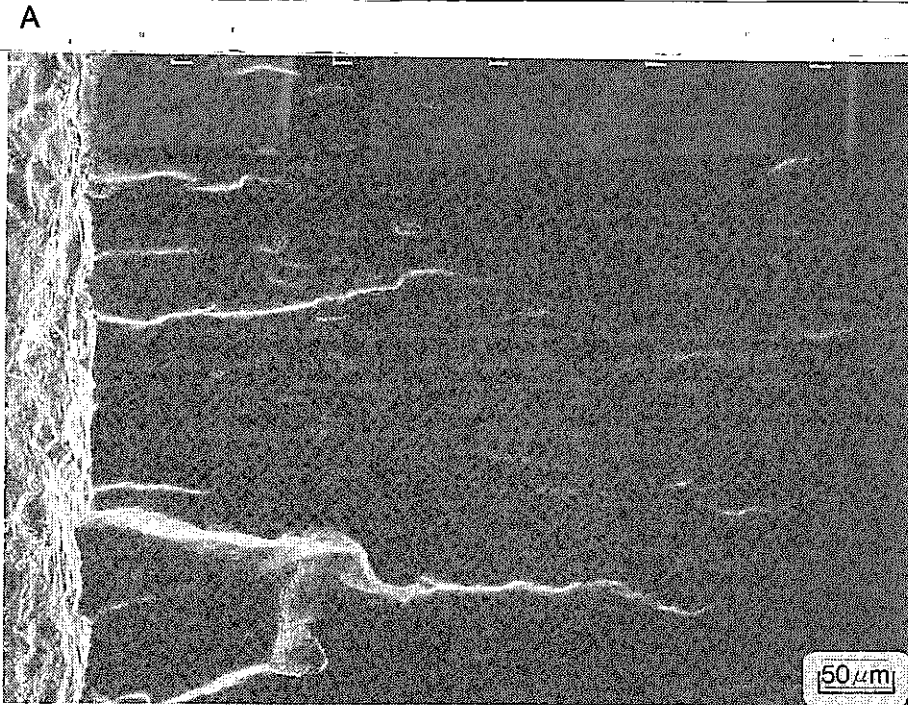


Photo. 4. 5 Observation of fracture surface by SEM (2).

C

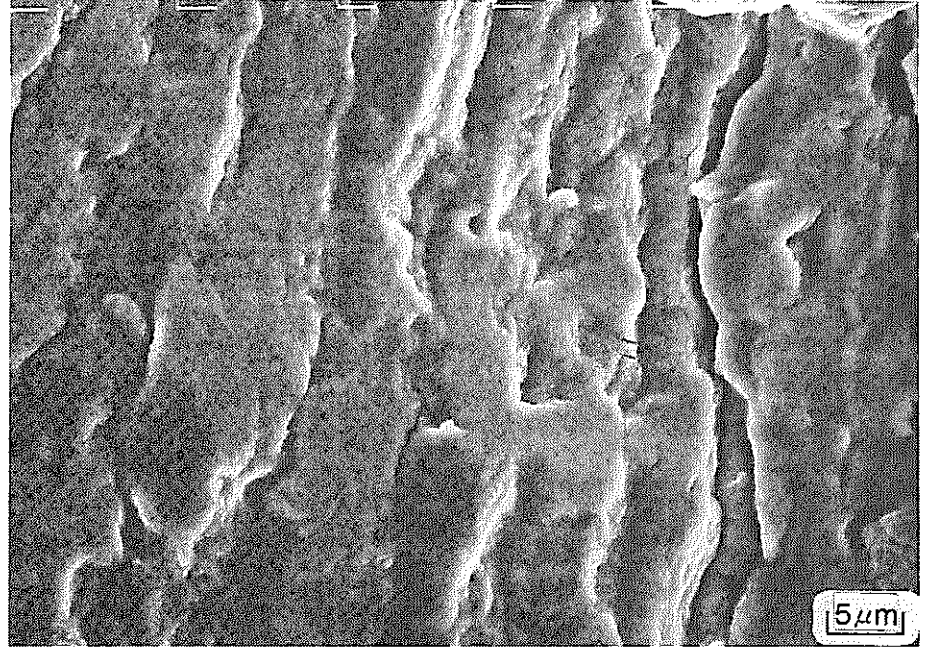
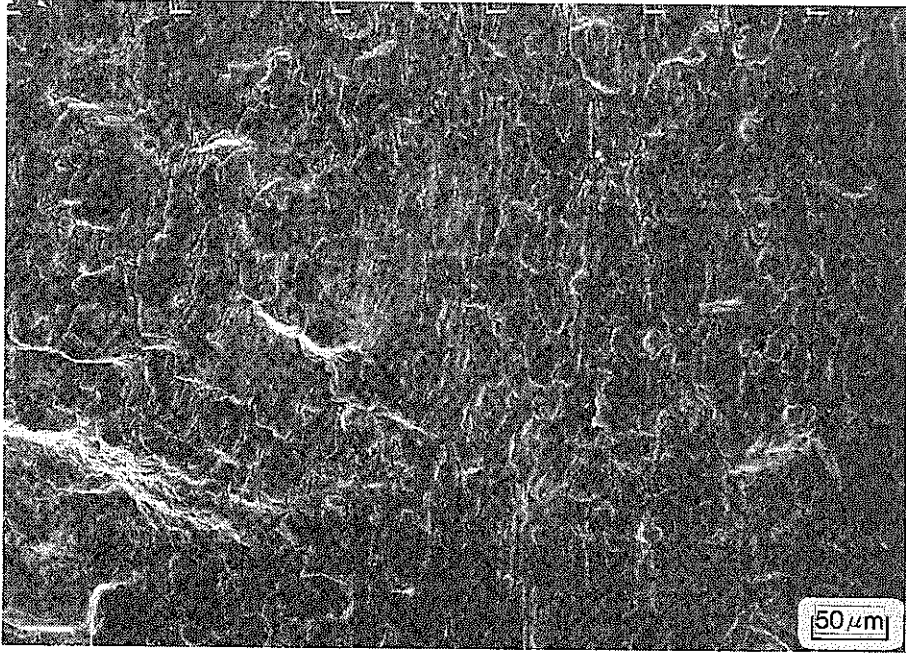
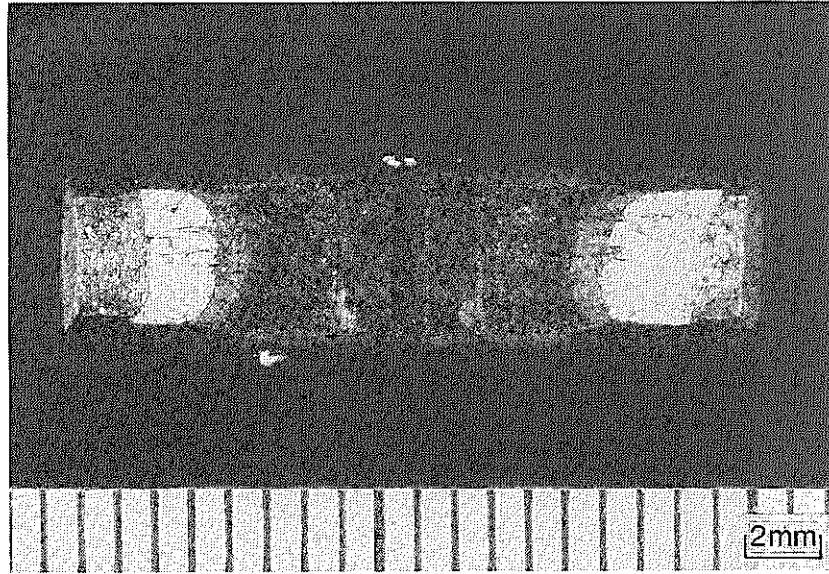


Photo. 4. 6 Observation of fracture surface by SEM (3).

Fracture surface

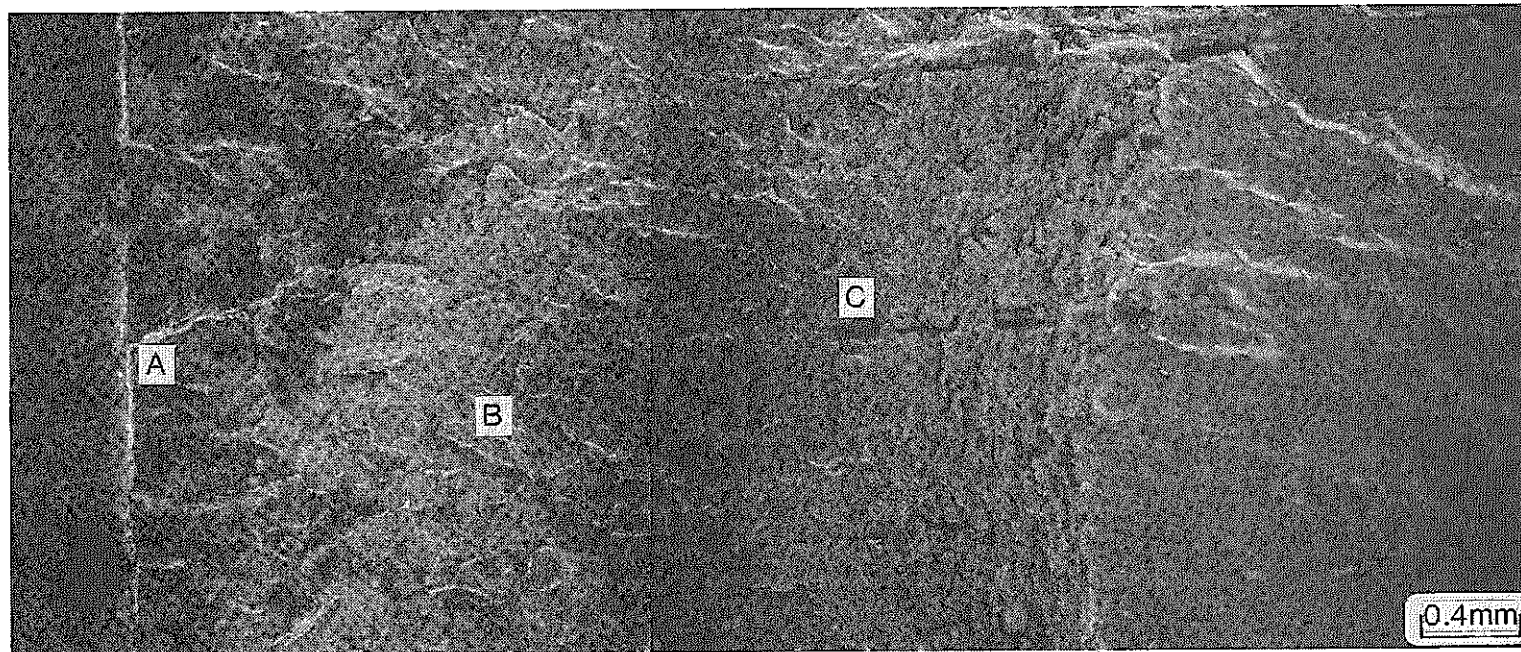


2¼Cr-1Mo, 500°C

$\Delta\sigma_g = 36\text{kgf/mm}^2$, $R = -1$

$t_H = 10\text{min}$

— 33 —



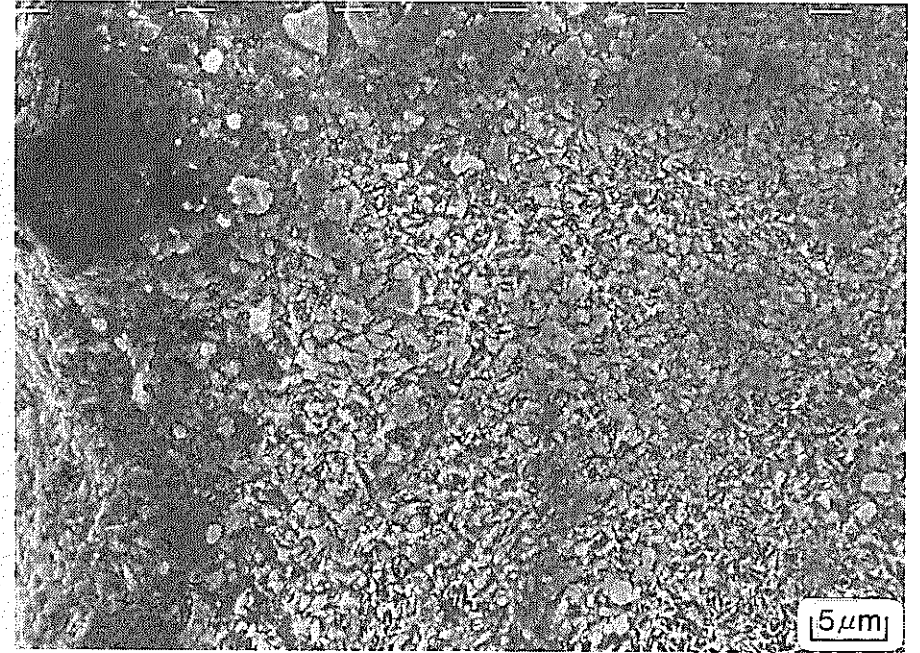
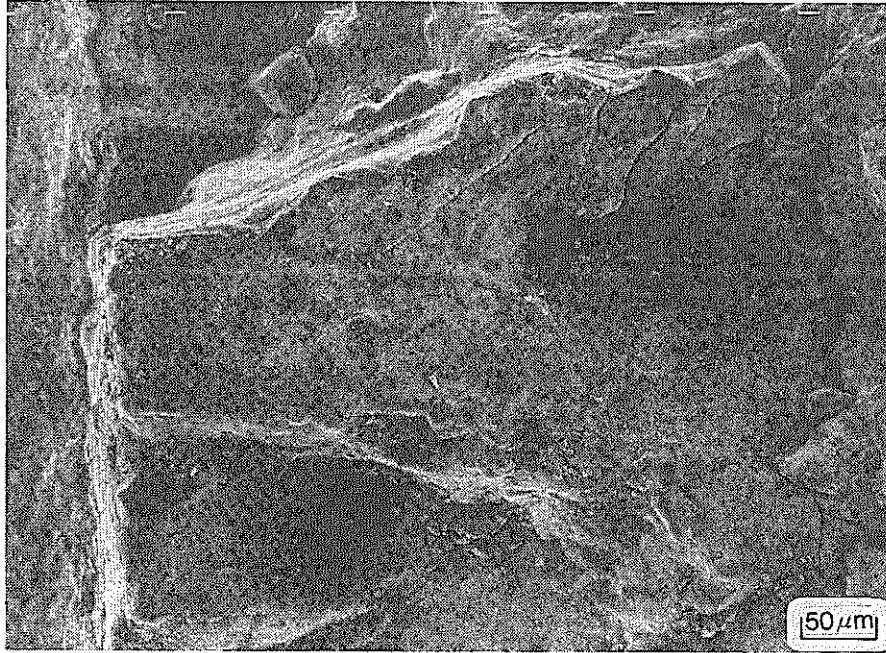
Initial notch

Creep-Fatigue failure

Rapid failure

Photo. 4.7 Observation of fracture surface by SEM (1).

A



— 34 —

B

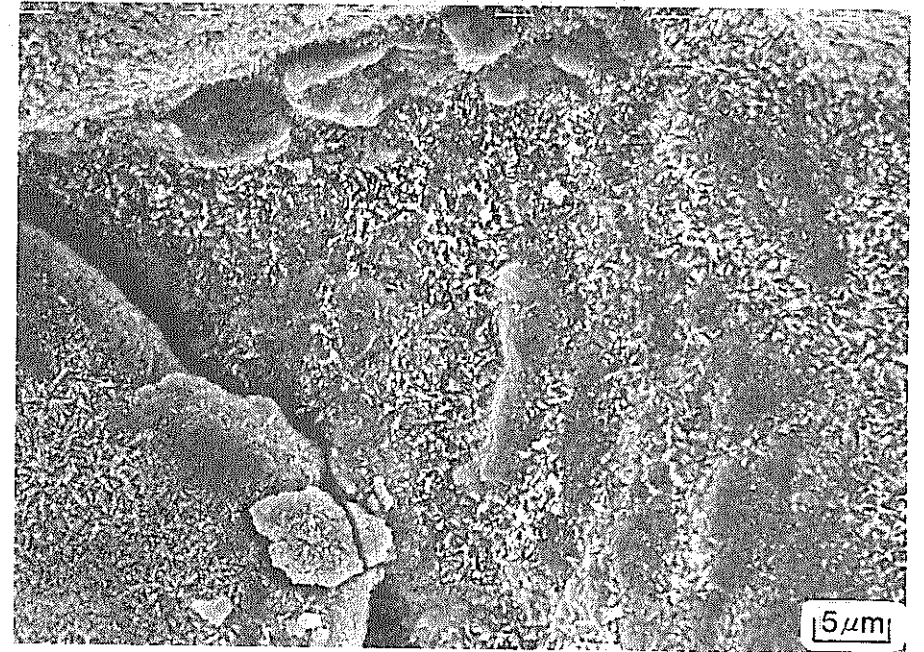
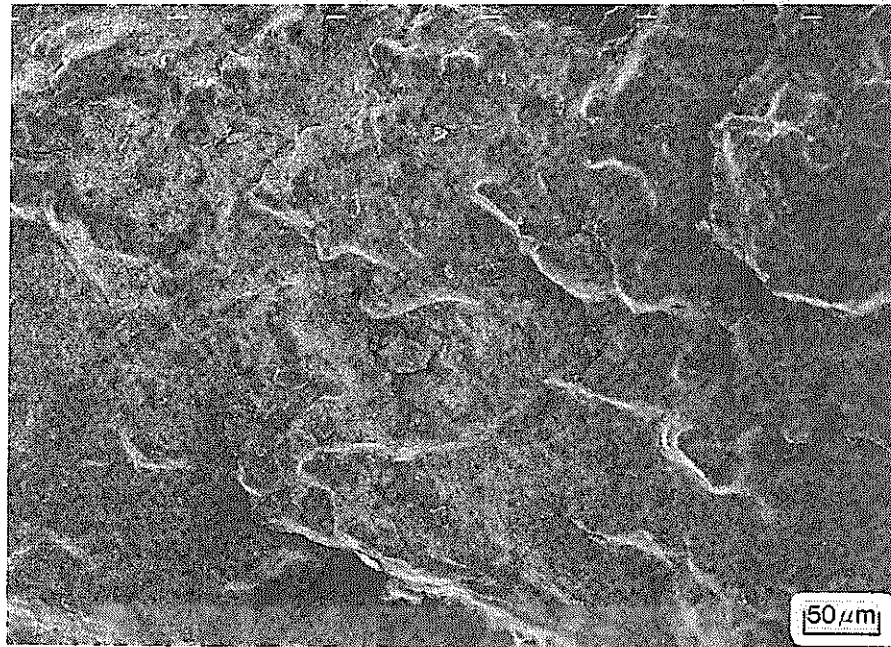


Photo. 4. 8 Observation of fracture surface by SEM (2).

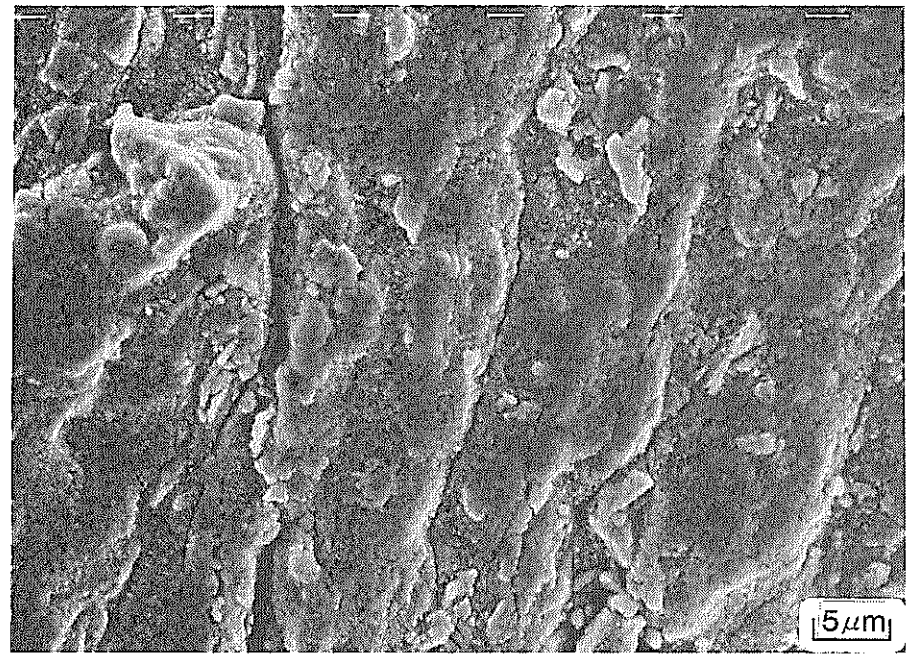
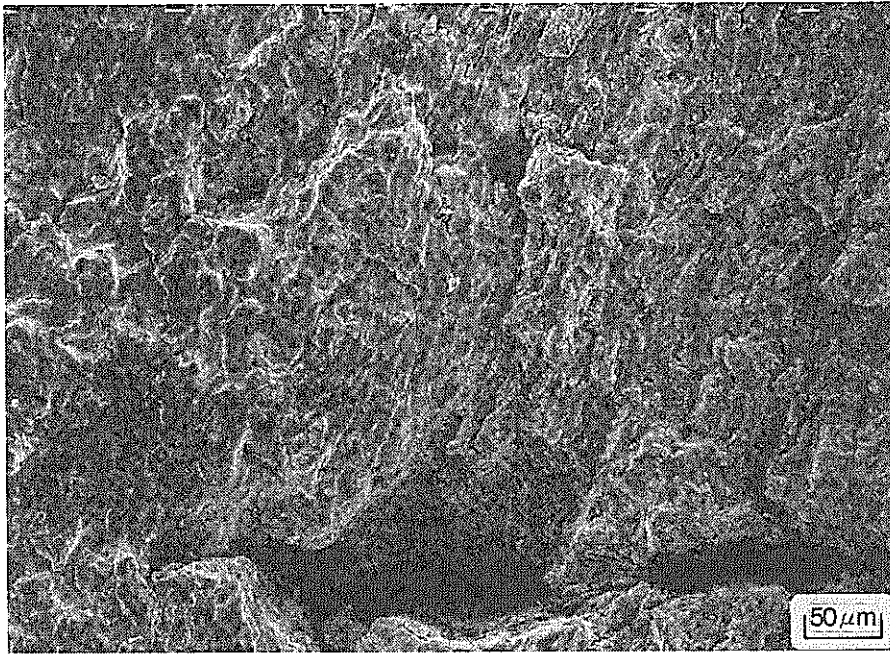
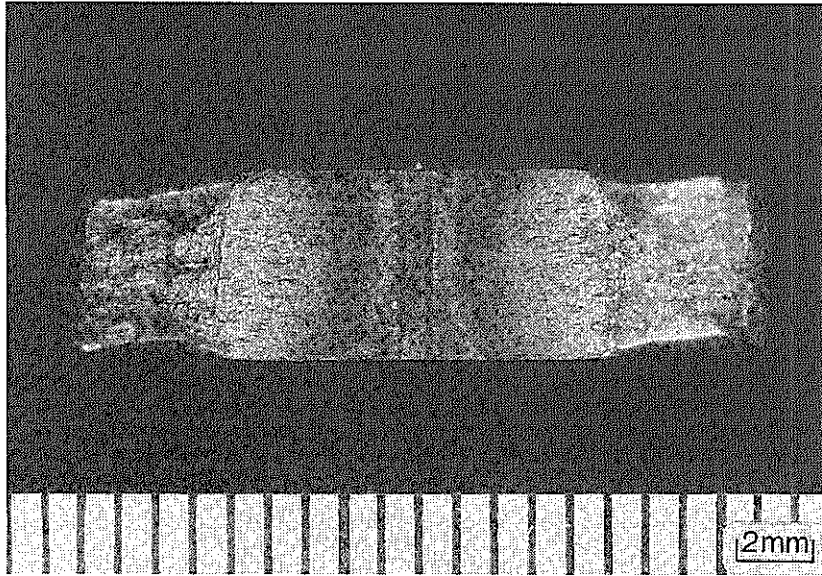


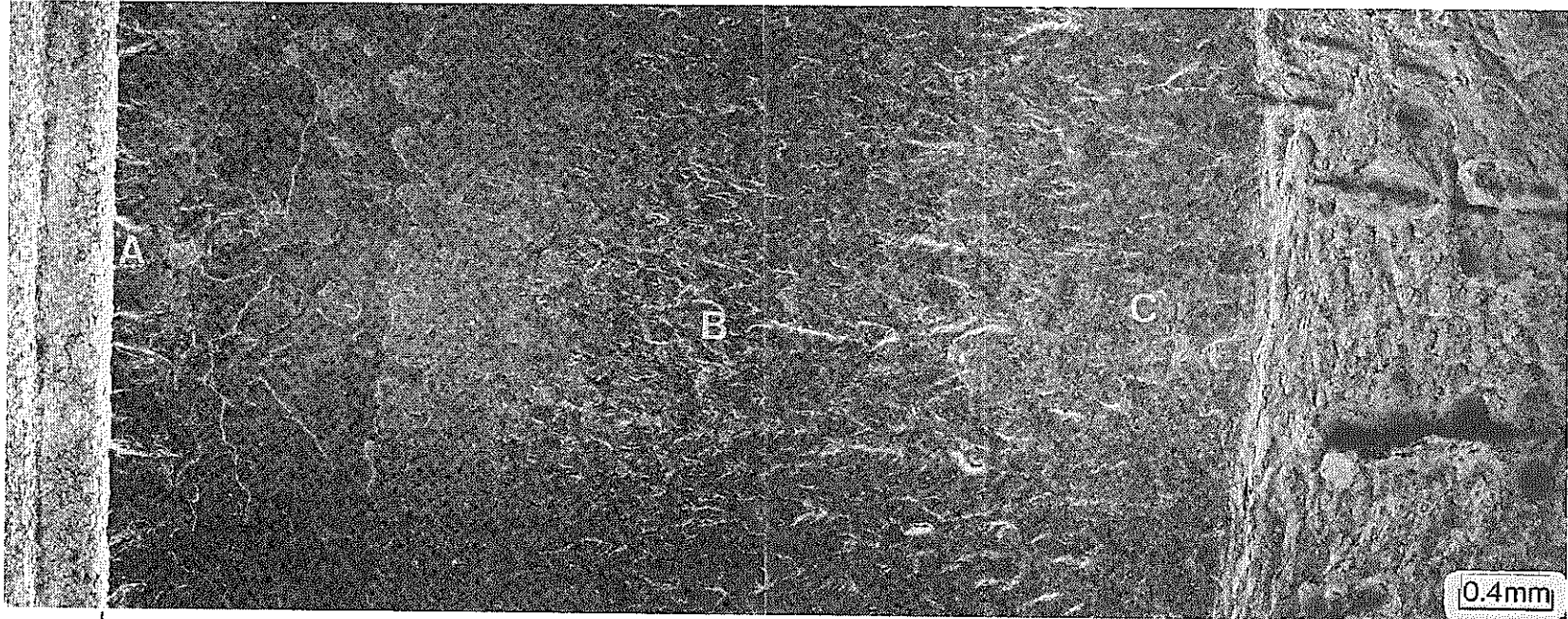
Photo. 4. 9 Observation of fracture surface by SEM (3).

Fracture surface



2¼Cr-1Mo steel, 550°C
 $\Delta\sigma_a = 34\text{kgf/mm}^2$, $R = -1$

SEM Fractographs



Initial notch Fatigue failure Rapid failure

Photo. 4.10 Observation of fracture surface by SEM (1).

A

— 37 —

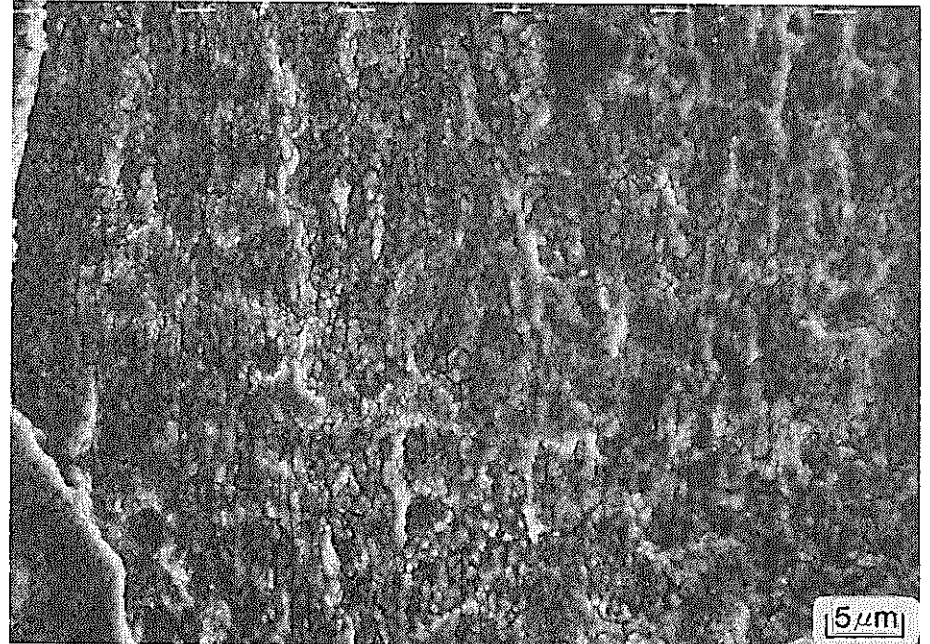
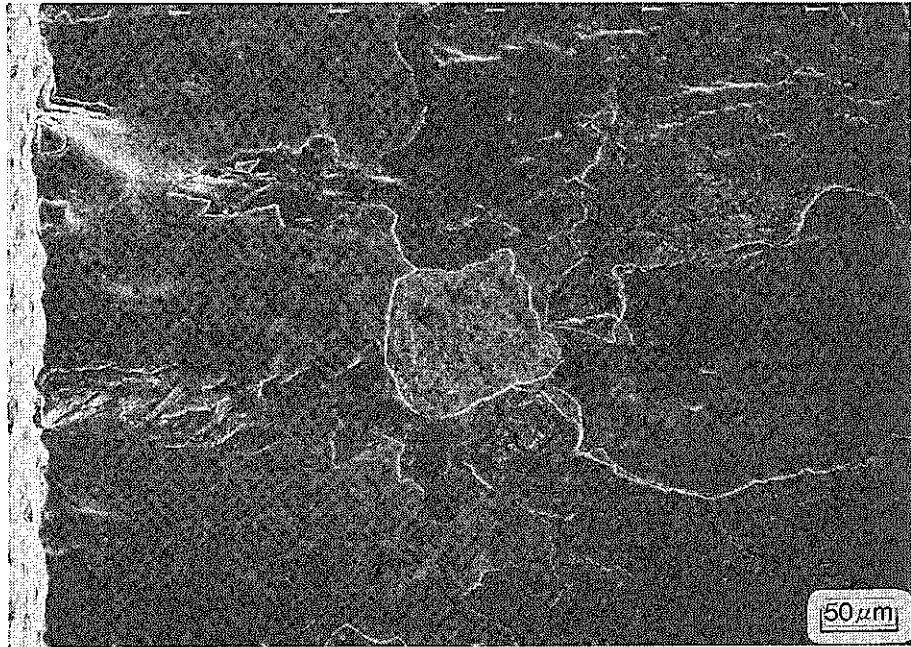
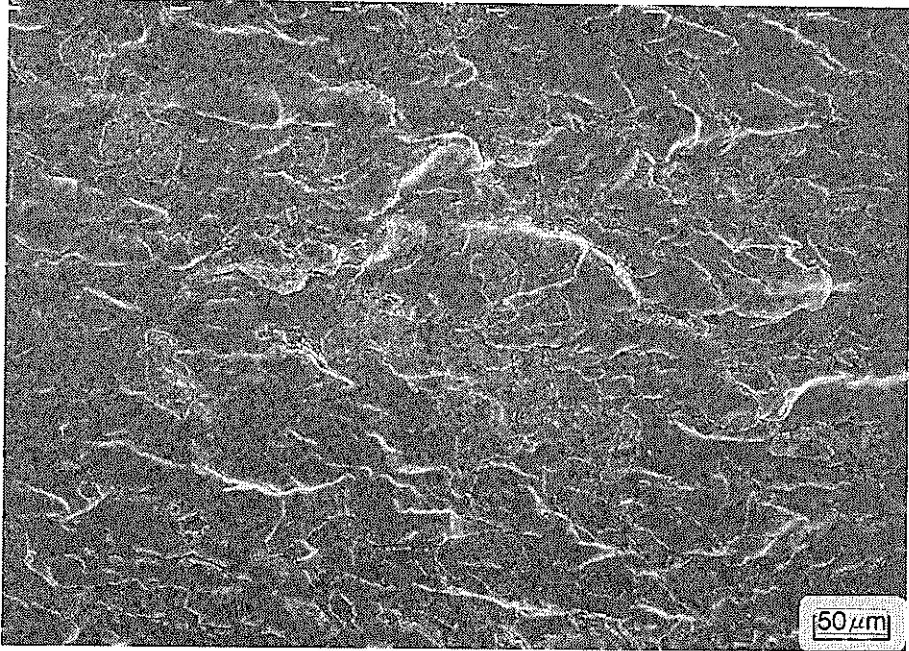


Photo. 4.11 Observation of fracture surface by SEM (2).

B



C

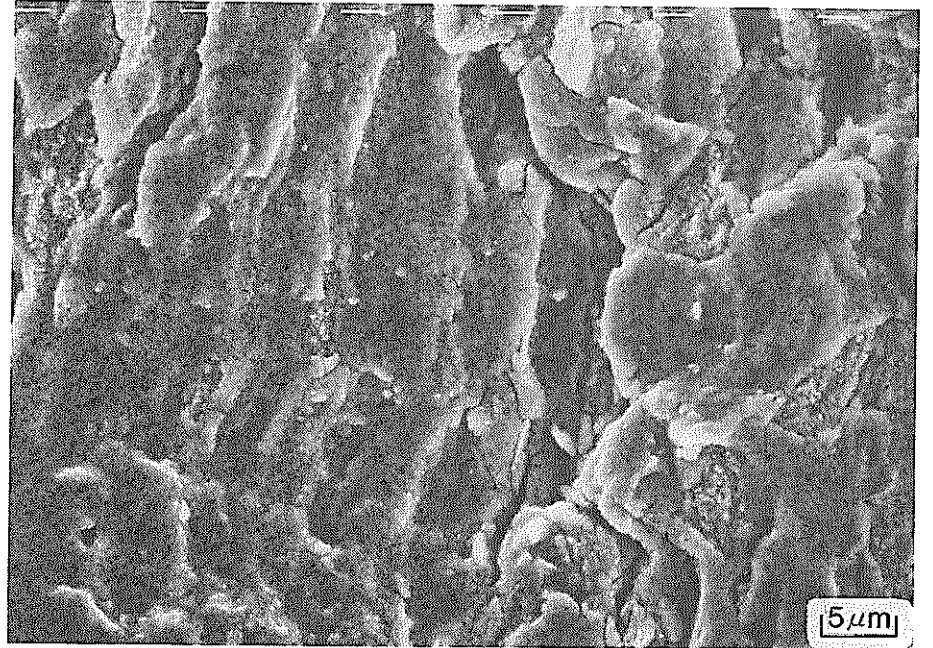
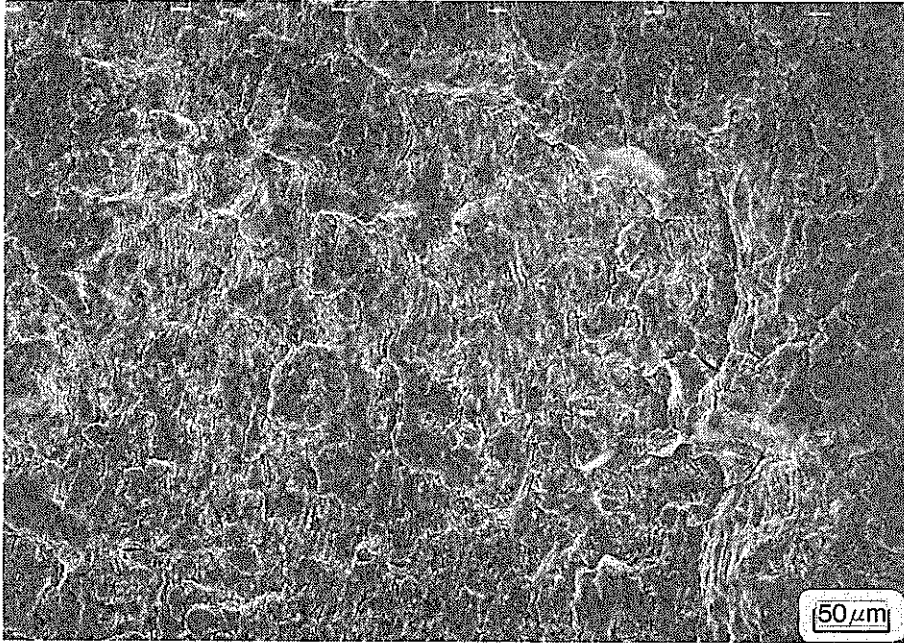
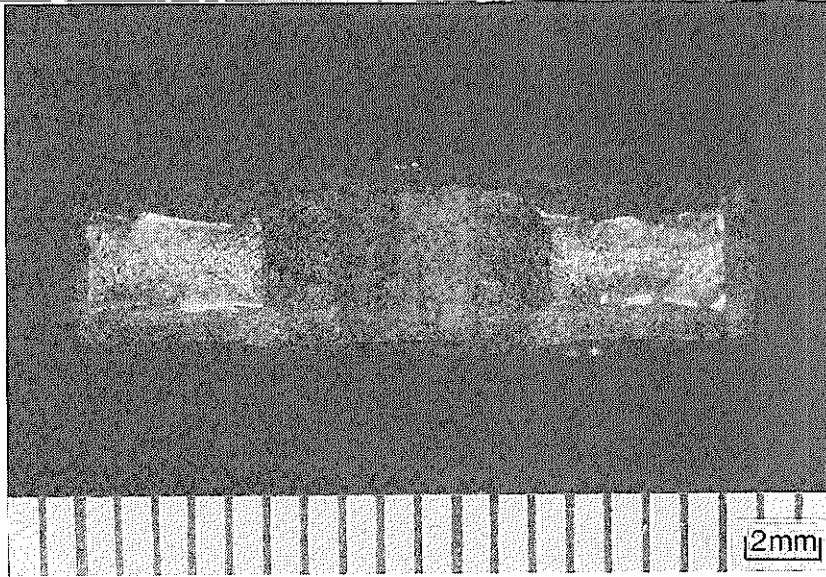
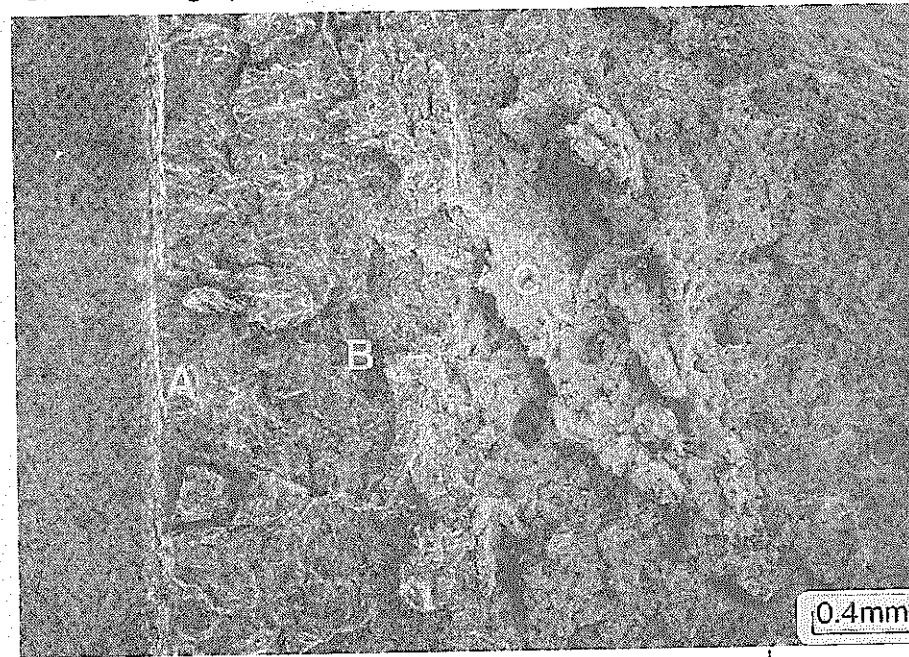


Photo: 4. 12. Observation of fracture surface by SEM (3).



2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo steel, 550°C
 $\Delta\sigma_g = 32\text{kgf/mm}^2$, R = -1
 $t_H = 10\text{min}$

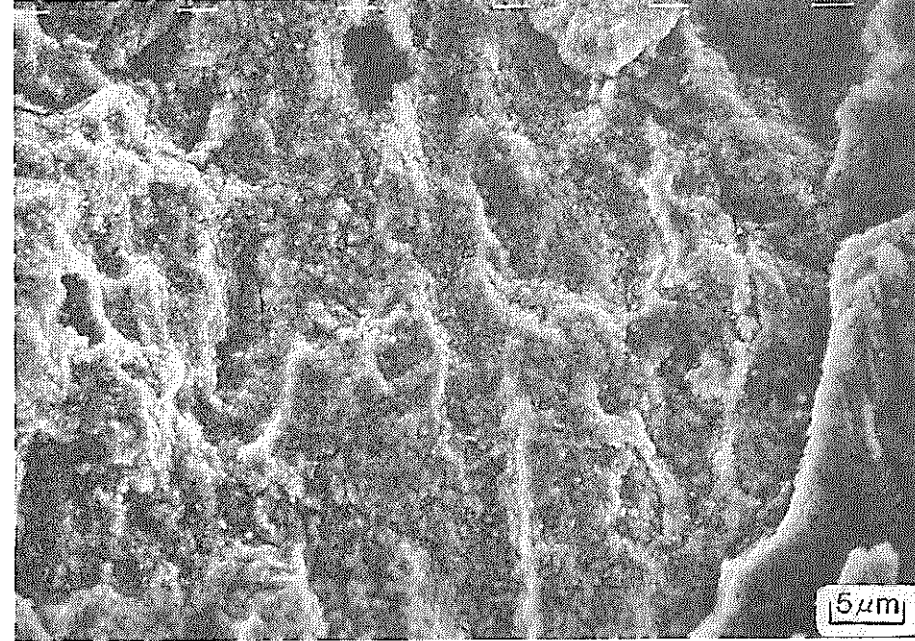
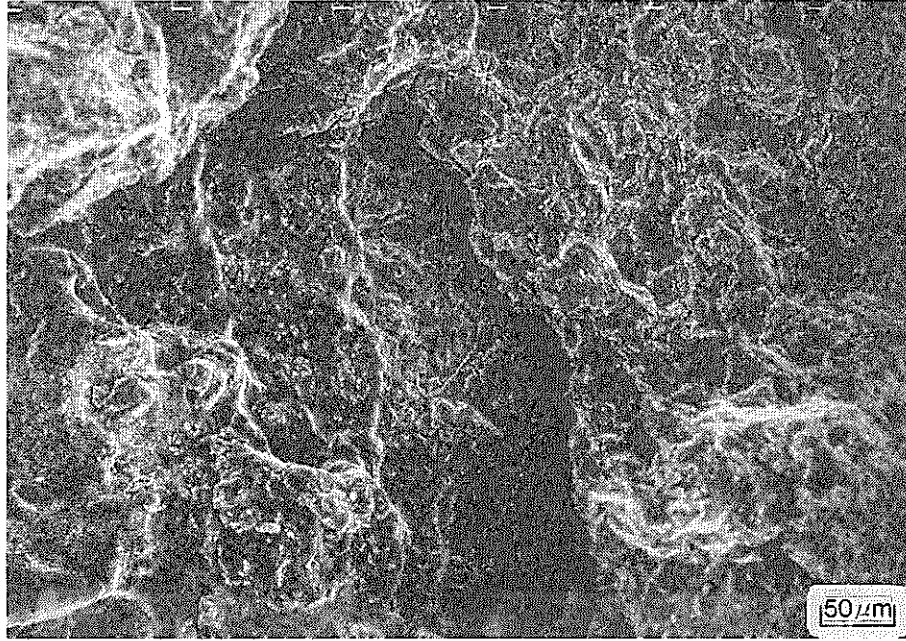
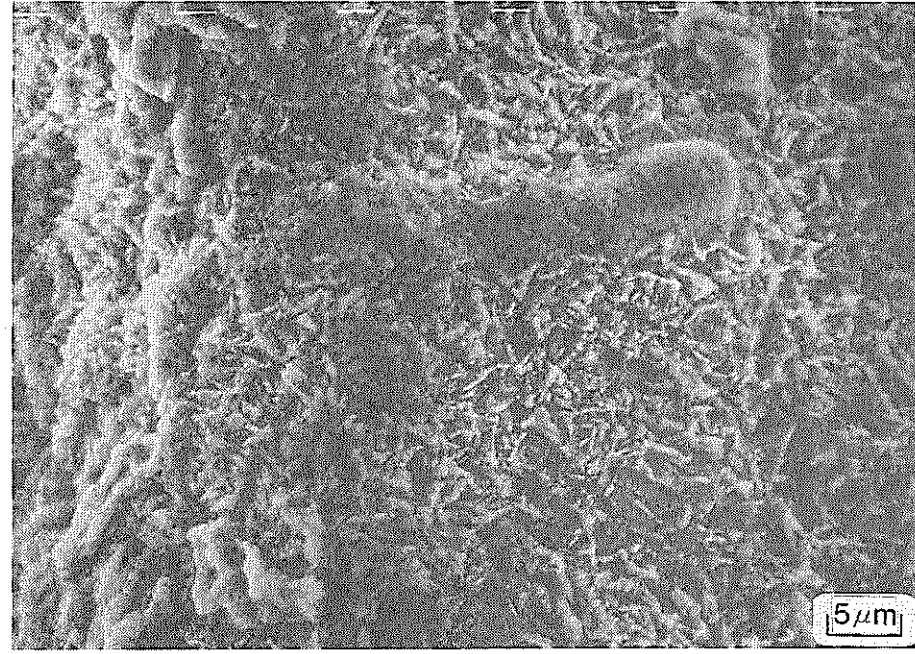
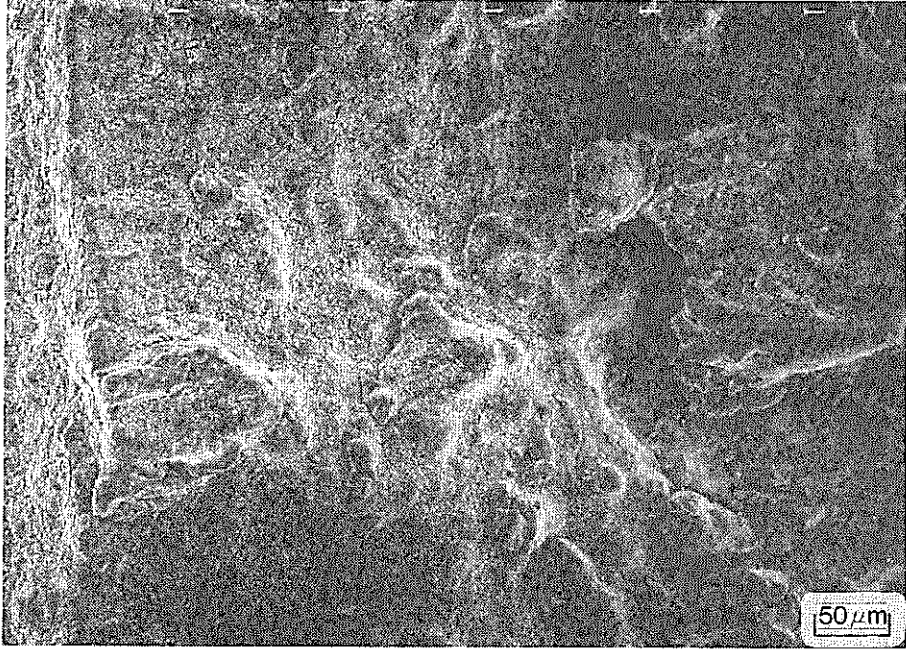
SEM Fractographs



Initial notch → Creep-fatigue failure → Rapid failure

Photo. 4.13 Observation of fracture surface by SEM (1).

Photo. 4.14 Observation of fracture surface by SEM (2).



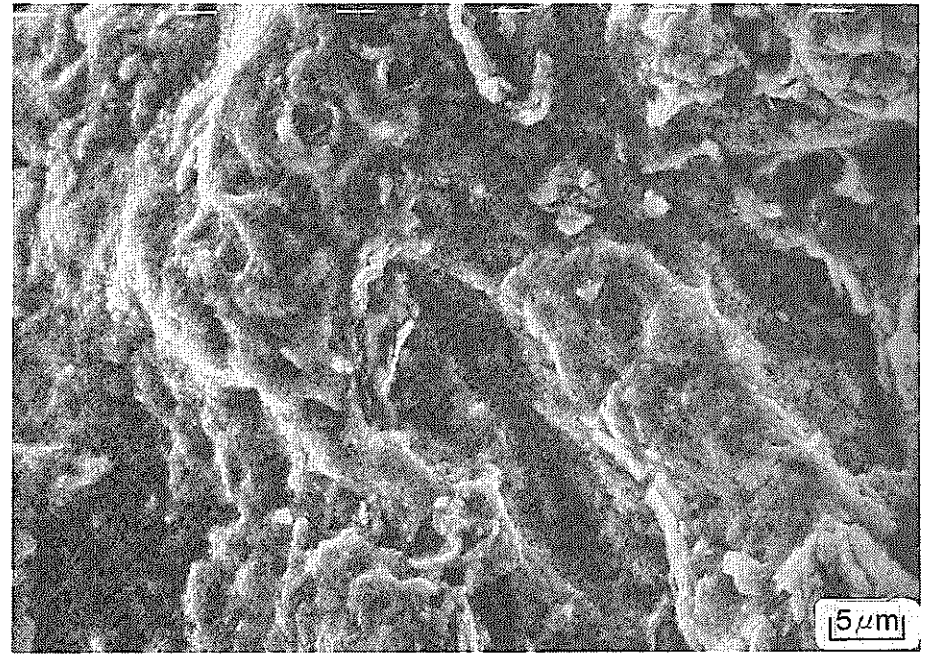
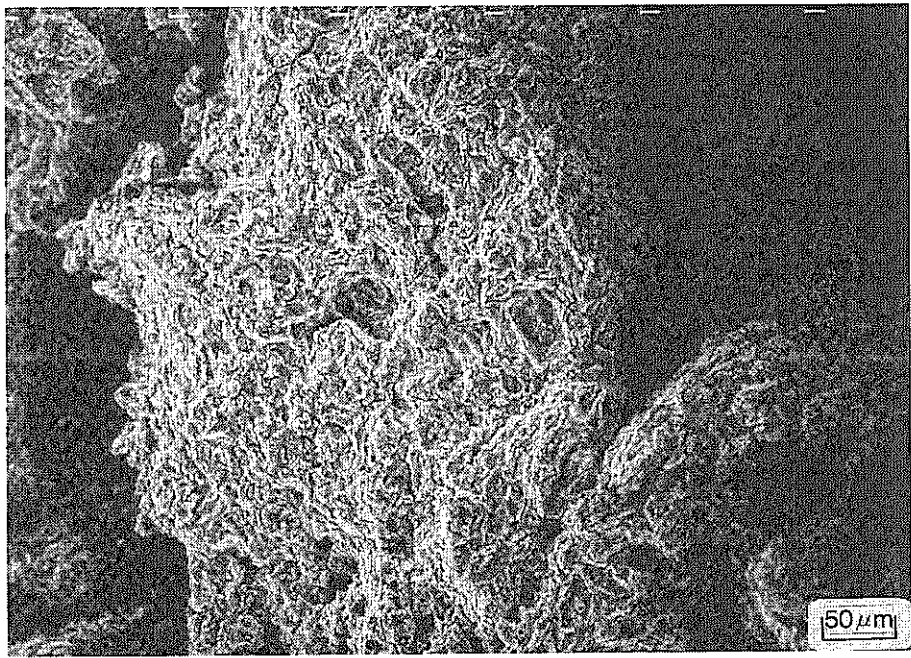


Photo. 4.15 Observation of fracture surface by SEM (3).

5. 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼のクリープき裂進展挙動試験

5. 2 ¼Cr－1 Mo鋼のクリープき裂進展挙動試験

5.1 目的

本研究の目的を以下に示す。

- (1) 疲労損傷材のクリープき裂伝ば特性を明らかにする。
- (2) 設計温度より50℃高い 550℃でのクリープき裂伝ば特性を明らかにして、500℃の結果と比較する。

5.2 試験方法

供試材の化学成分、熱処理および確性試験結果については、既にTable 3.1に示した。疲労損傷材としては、平板に所定のサイクルの疲労損傷を付与した後に、き裂伝ば試験片を採取したものをを用いた。

試験装置の概要をFig. 5.1に示す。き裂長さは電気ポテンシャル法で測定した。試験片の端から直流20 Aを流し、切欠の上下端1 mmのところに点溶接したリード線により電圧を測定した。電圧から、き裂長さを導出するためにジョンソンの式を用いた。また、き裂伝ば速度を整理するためのパラメータを求めるために、切欠の上下端5 mmのき裂開口変位を測定した。

試験片の形状をFig. 5.2に示す。長さ4 mmの初期切欠を放電加工した。また、トンネリング防止とき裂面への変形の集中を考慮して、サイドグループを加工した。

き裂伝ば速度を整理するためのパラメータとしては、次式で示すように、修正J積分 J' を用いた。

$$J' = [(\alpha - 1) / (\alpha + 1)] \sigma_{net} \dot{\delta}$$

ここで、 α : Norton則における応力指数,

σ_{net} : 正味断面応力, $\dot{\delta}$: き裂開口変位速度

5.3 試験結果および考察

試験結果の概要をTable 5.1に示す。

- (1) 疲労損傷材のクリープき裂伝ば

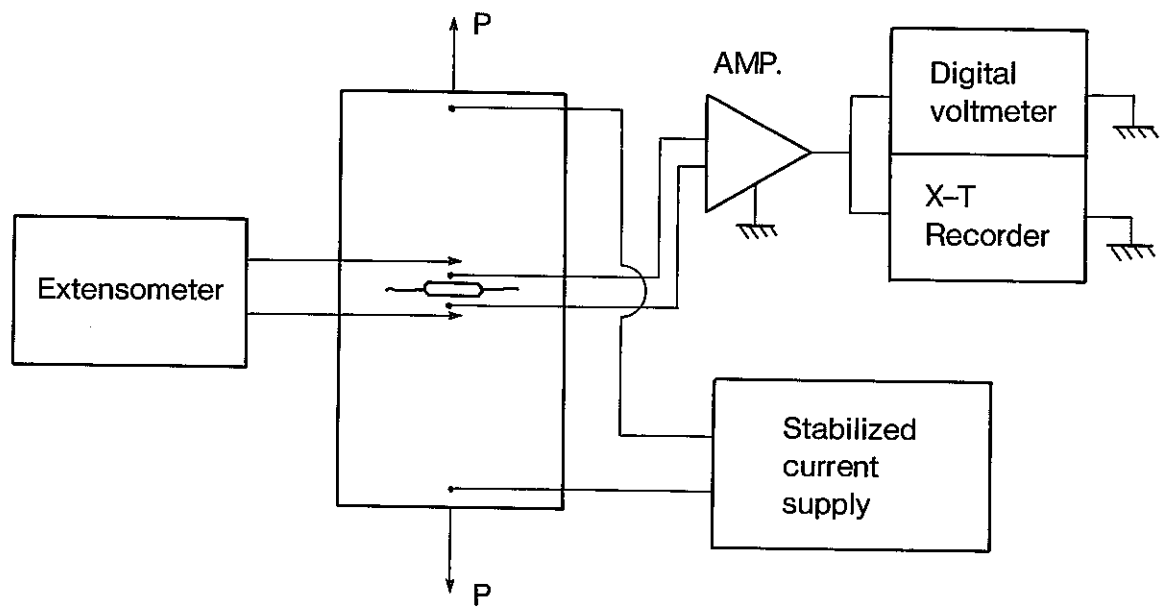
疲労損傷0.2，疲労損傷0.5 および処女材のき裂長さと試験時間の関係をFig. 5.3に示す。同様に，き裂伝ば速度と J' の関係をFig. 5.4に示す。疲労損傷材と処女材は同一のき裂伝ば則に支配されていることがわかった。

(2) 550℃におけるクリープき裂伝ば

550℃と500℃におけるき裂長さと試験時間の関係をFig. 5.5に示す。同様に，き裂伝ば速度と J' の関係をFig. 5.6に示す。500℃と550℃のき裂伝ば則はほぼ等しいことがわかる。また，550℃における破面を観察した結果をPhoto. 5.1～5.3に示す。負荷が大きいため，破断までに，クリープによって進展したき裂長さは小さいが，破面は粒界破壊的である。

Table. 5.1 Results of creep crack propagation test for 2 ¼Cr-1Mo steel.

Material	Temp. (°C)	$\sigma_{net,0}$ (kgf/mm ²)	t_r (h)	a_0 (mm)	a_r (mm)	sp. No.
Fatigue-damaged $D_F=0.2$	500	25.65	592.59	1.894	5.425	FCC608
Fatigue-damaged $D_F=0.5$		26.0	379.73	1.984	4.841	FCC609
Virgin	550	19.0	388.3	1.9935	5.332	FCC571
		22.0	140.7	1.9945	4.926	FCC570
		24.0	75.5	1.9605	4.703	FCC535



(Measurement of F.M.P.)

(Measurement of crack length)

Fig. 5.1 Testing apparatus for creep crack growth.

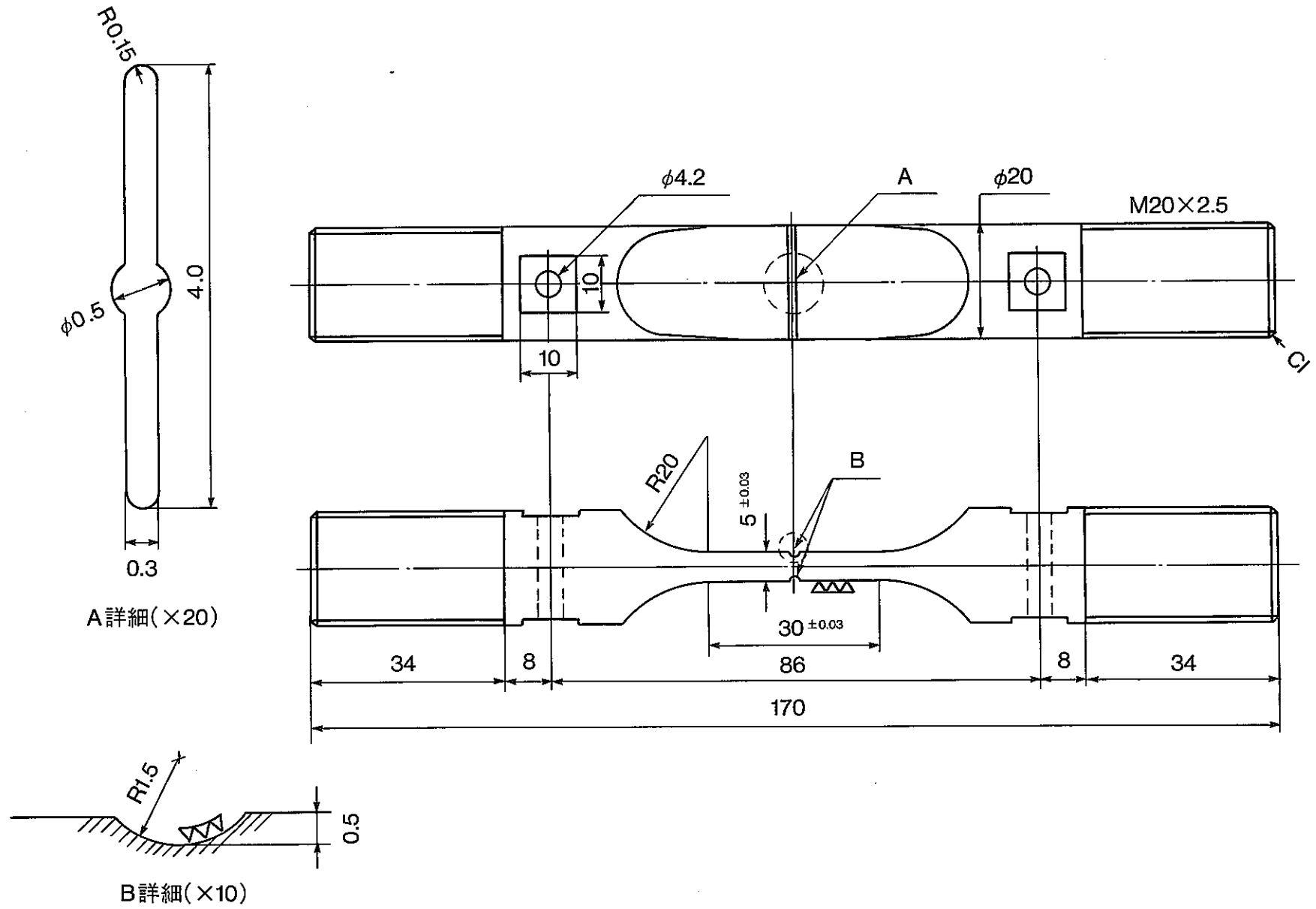


Fig. 5.2 Specimen configurations for creep crack propagation test.

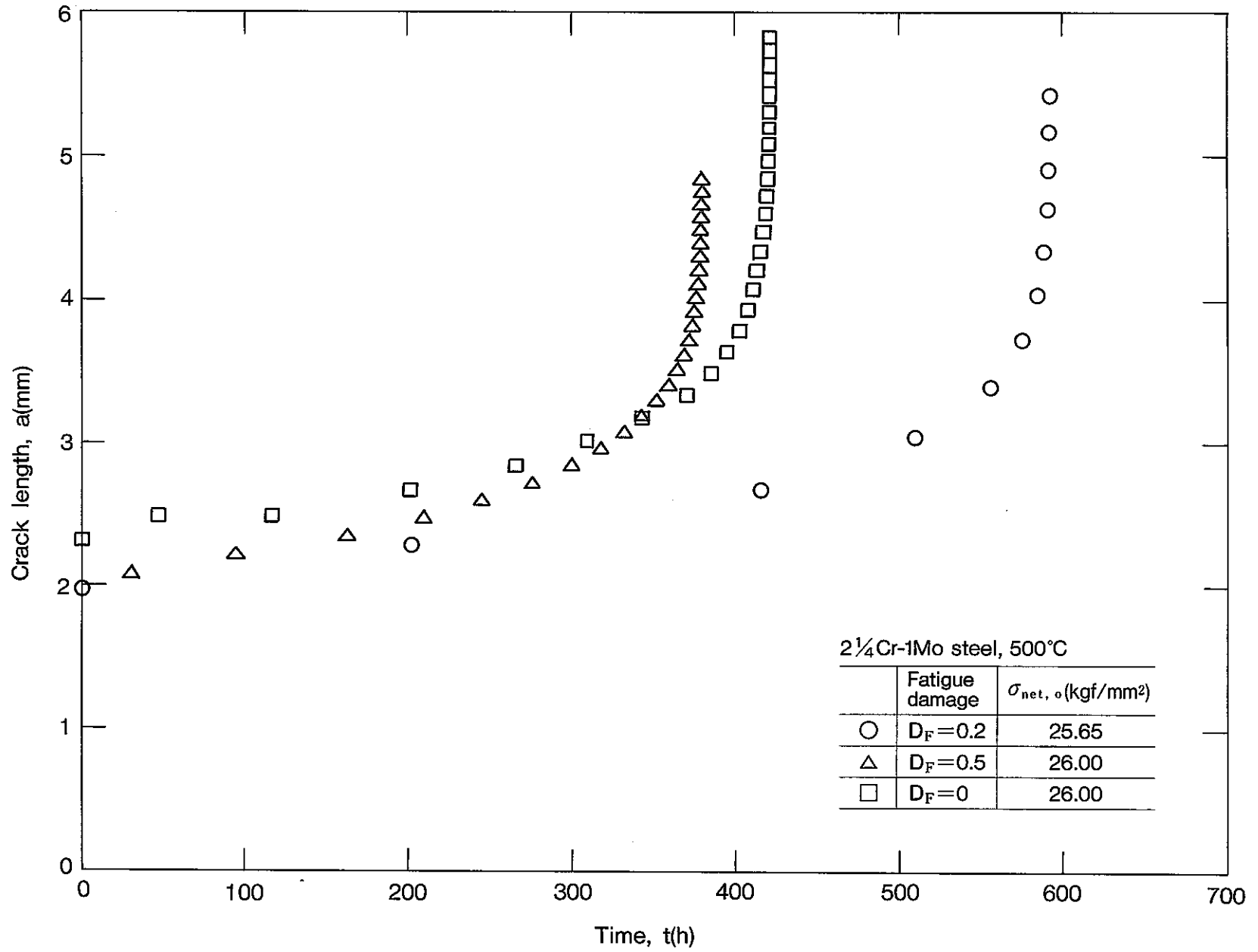


Fig. 5.3 Relation between crack length and time.

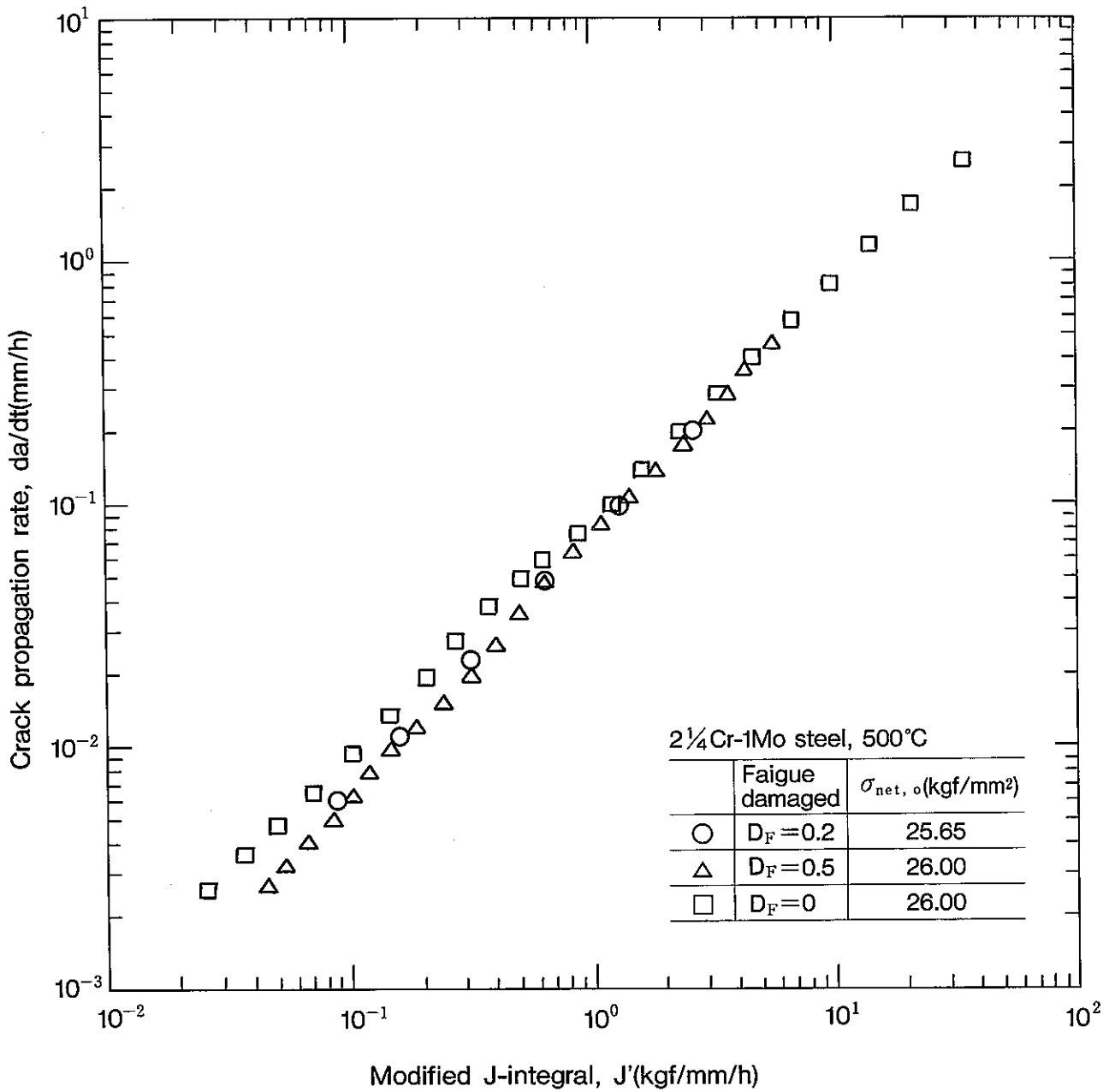


Fig. 5. 4 Relation between da/dt and J' .

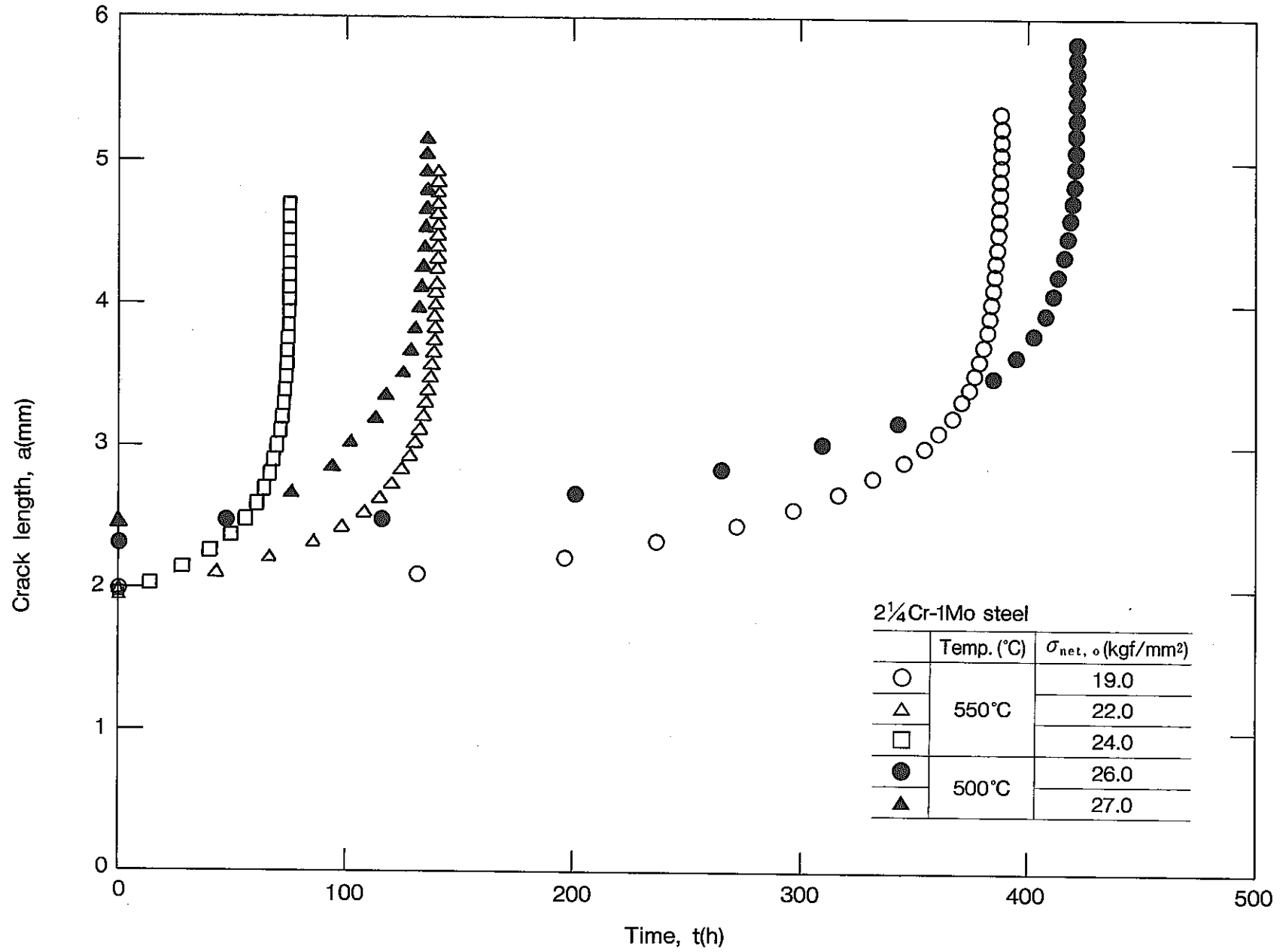


Fig. 5.5 Relation between crack length and time.

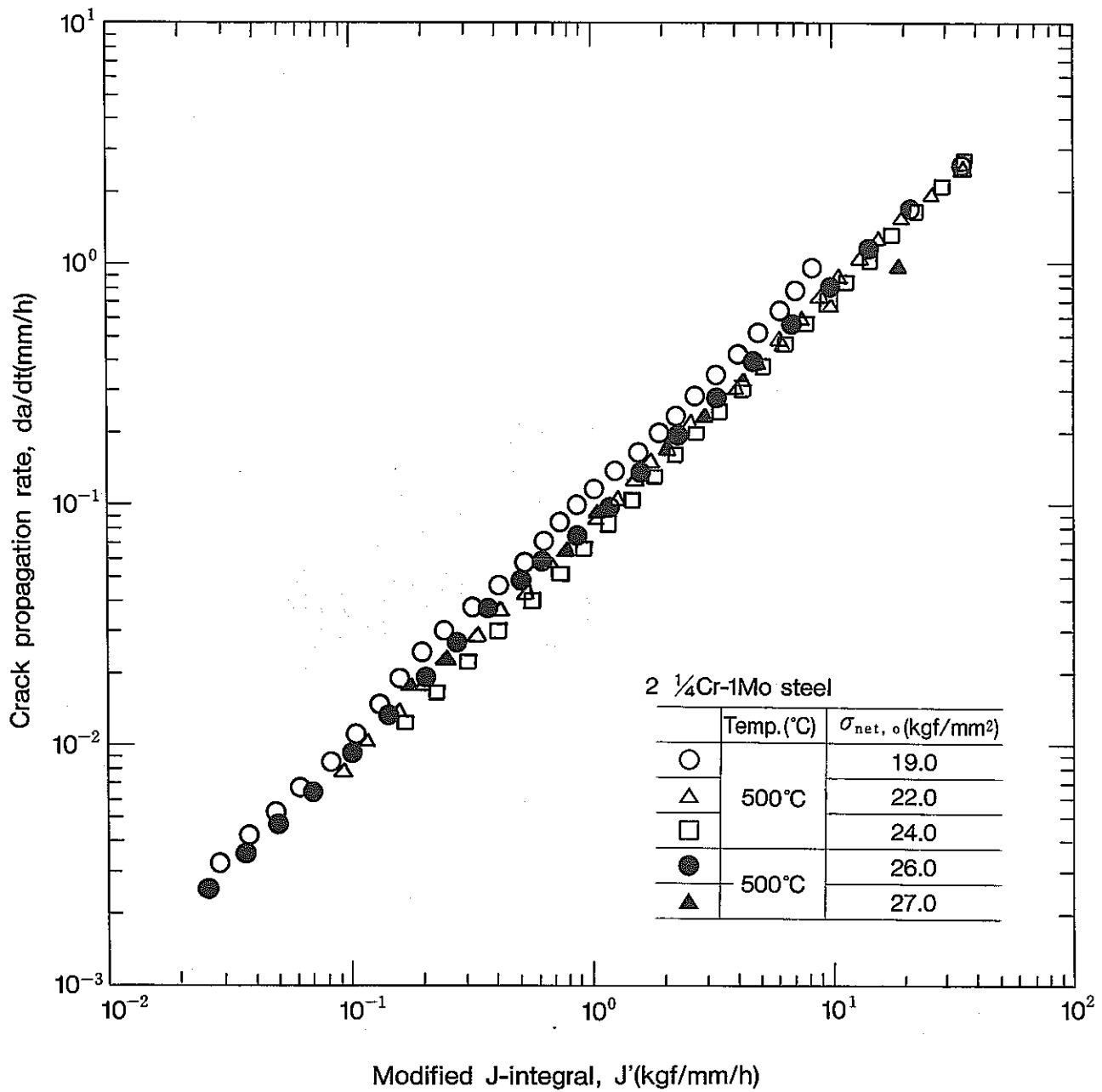
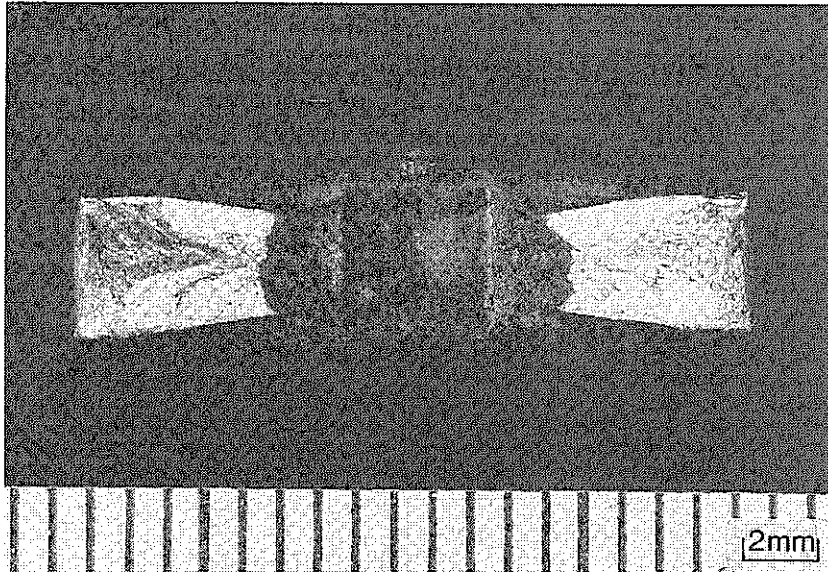


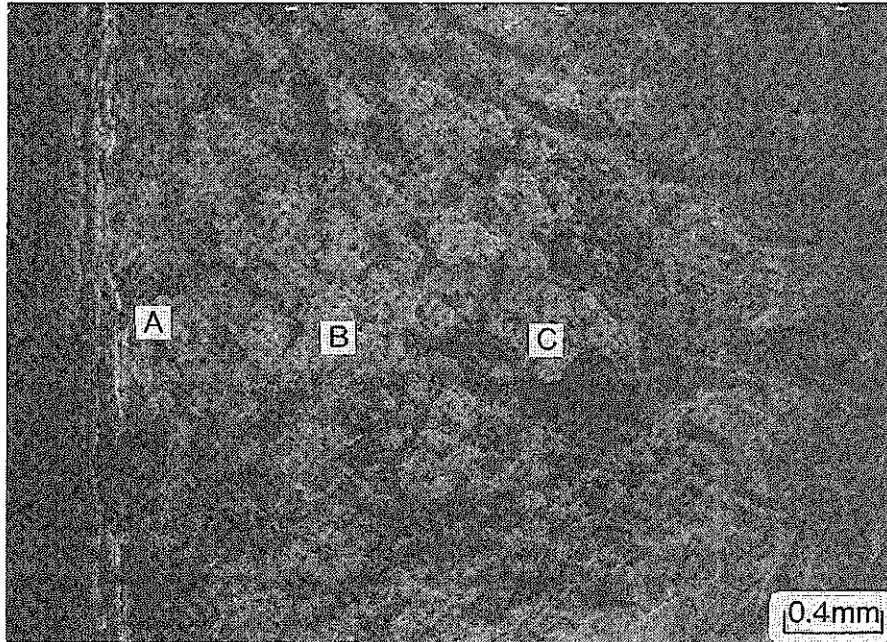
Fig. 5.6 Relation between da/dt and J' .

Fracture surface



2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo steel, 550°C
 $\sigma_{net, o} = 22\text{kgf/mm}^2$,
 $t_f = 141\text{h}$

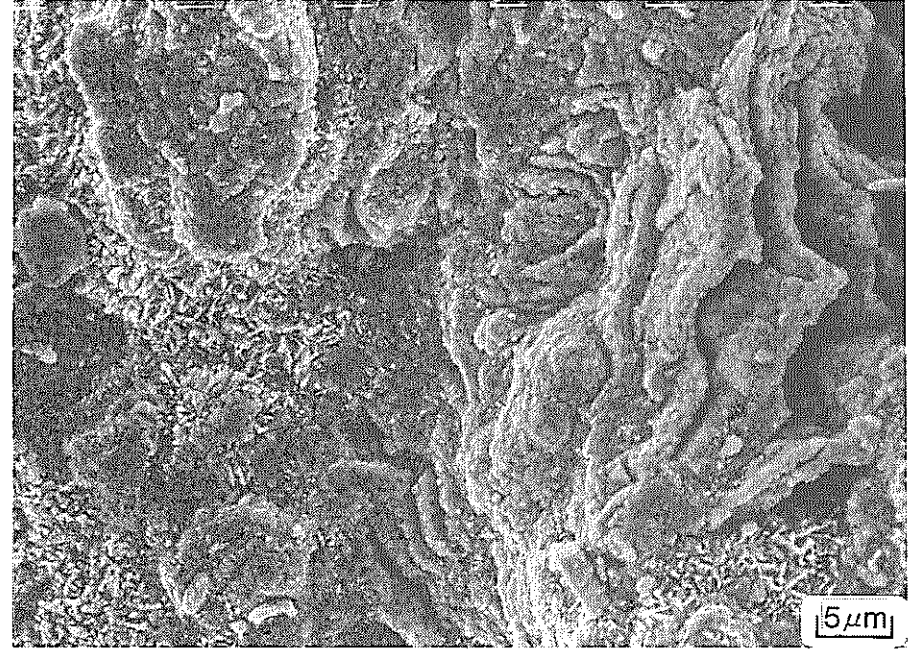
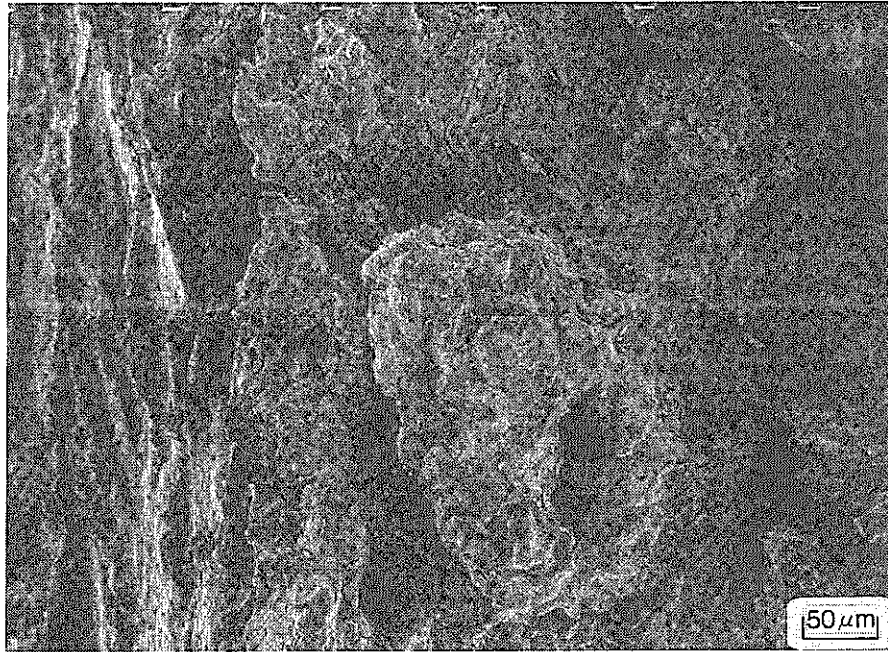
SEM Fractographs



Initial notch \longleftrightarrow Creep failure \longleftrightarrow Rapid failure

Photo. 5.1 Observation of fracture surface by SEM (1).

A



— 52 —

B

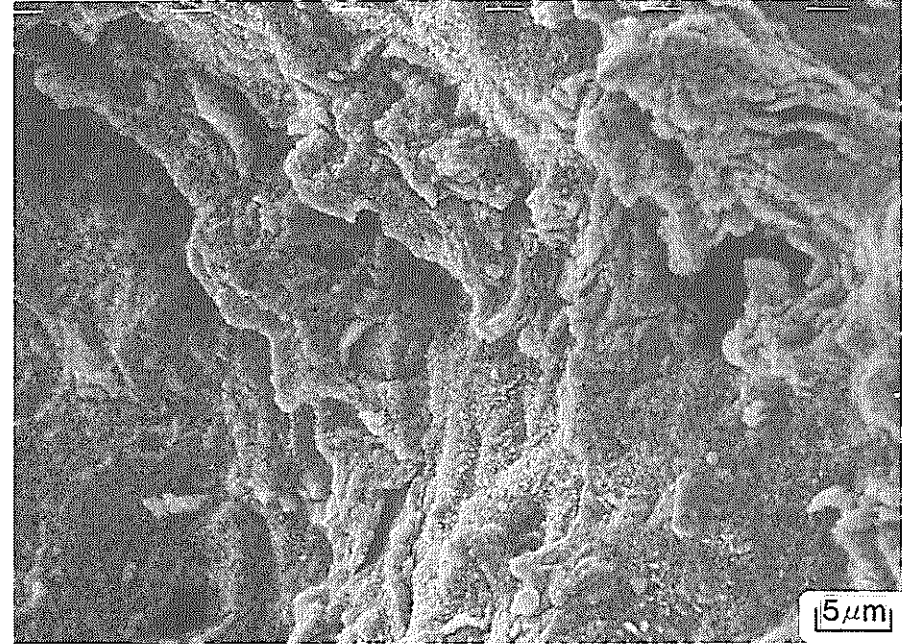
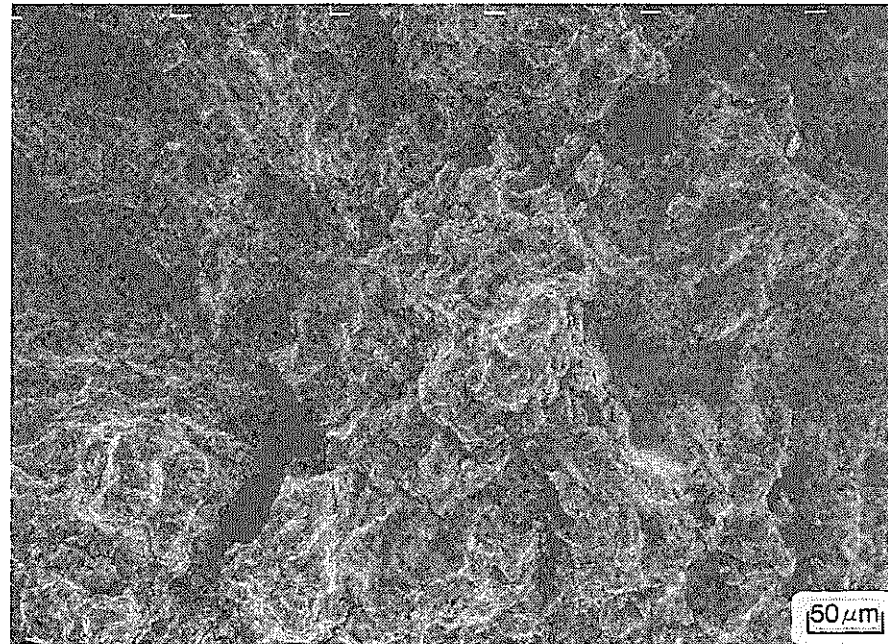


Photo. 5. 2 Observation of fracture surface by SEM (2).

C

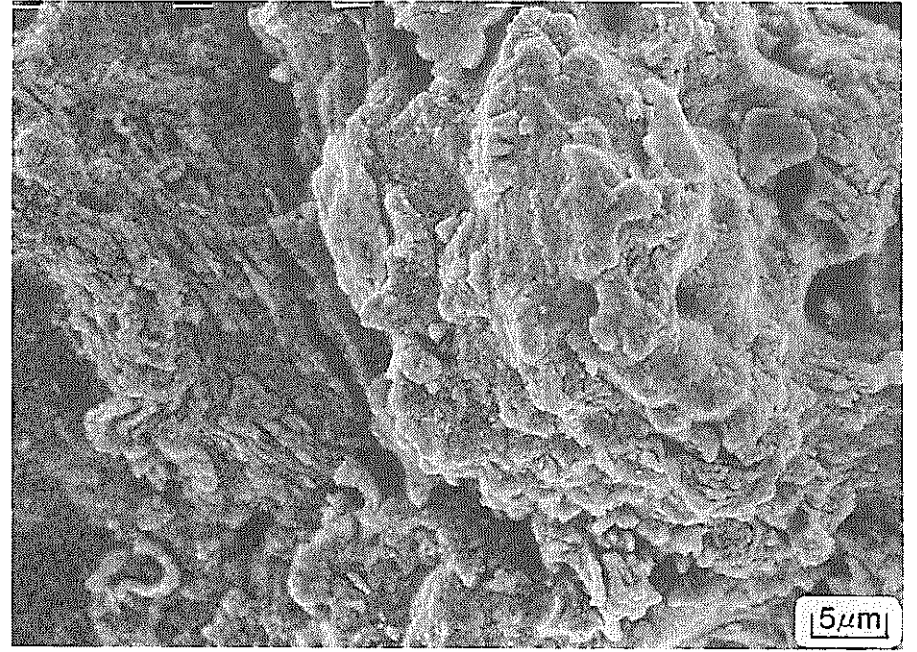
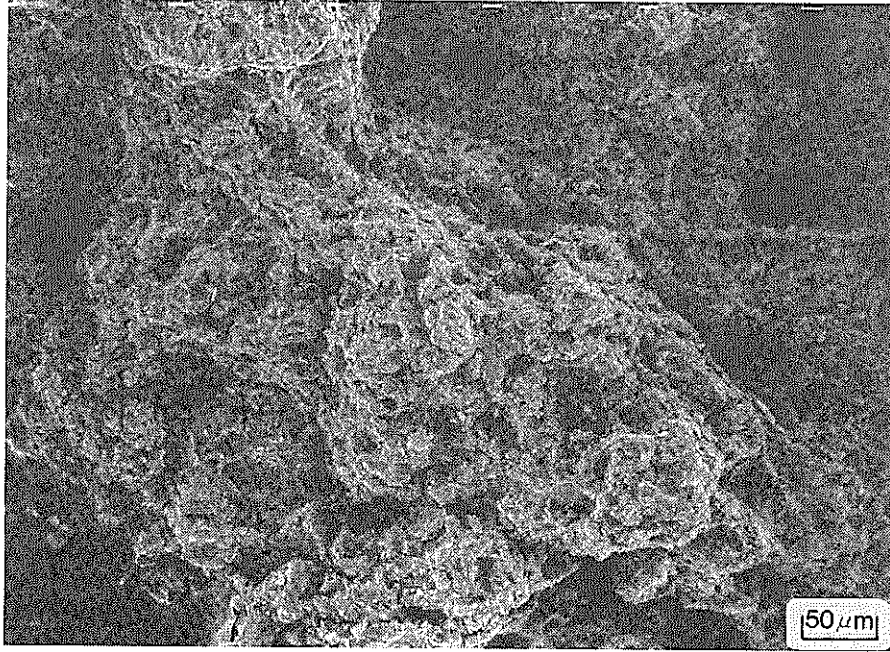


Photo. 5.3 - Observation of fracture surface by SEM (3).

6. Mod.9Cr-1Mo鋼のクリープ疲労き裂進展挙動試験

6. Mod. 9Cr-1 Mo鋼のクリープ疲労き裂進展挙動試験

6.1 目的

母材と溶接金属のクリープ疲労き裂伝ば特性を明らかにし、き裂伝ば速度を支配するパラメータについて検討する。

6.2 試験方法

供試材の化学成分、熱処理および確性試験結果については、既に、Table 3.2に示した。また、溶接施工条件についても、Table 3.3に示した。

試験装置の概要をFig. 6.1に示す。き裂長さは電気ポテンシャル法で測定した。試験片の端から直流20 Aを流し、切欠の上下端1 mmのところを点溶接したリード線により電圧を測定した。電圧からき裂長さを導出するためにジョンソンの式を用いた。また、き裂伝ば速度を整理するためのパラメータを求めるために、切欠の上下端5 mmのき裂開口変位を測定した。

疲労試験片の形状をFig. 6.2に、クリープ疲労試験片の形状をFig. 6.3に示す。いずれも、CCTで、初期切欠は放電加工した。疲労試験片の初期切欠長は2 mm、クリープ疲労試験片の初期切欠長は4 mmである。また、クリープ疲労試験片には、トンネリング防止とき裂面への変形の集中を考慮して、サイドグループを加工した。

試験は大気中、500℃で行われた。負荷は荷重制御で、疲労き裂伝ばの場合は完全両振り対象三角波、クリープ疲労き裂伝ばの場合は引張最大荷重保持の台形波である。保持時間は1 min、10 minである。

疲労き裂伝ば速度を保持するためのパラメータとしては、次式で示すように、繰り返しJ積分範囲 ΔJ を用いた。

$$\Delta J = \Delta K^2 / E + S_p / B b$$

ここで、 ΔK ：応力拡大係数範囲、E：ヤング率、B：板厚、b：リガメント半長、 S_p ：荷重-き裂中央開口変位の履歴曲線から求められるエネルギー (Fig. 6.4を参照のこと。)

また、クリープ疲労き裂伝ば速度を整理するためのパラメータとしては、

次式で示すように、クリープ J 積分範囲 ΔJ_c を用いた。

$$\Delta J_c = [(\alpha - 1) / (\alpha + 1)] \sigma_{net} \Delta \delta$$

ここで、 α : Norton 則における応力指数, σ_{net} : 正味断面応力,

$\Delta \delta$: 荷重保持中のき裂開口変位の増分 (Fig. 6.4 を参照のこと)

6.3 試験結果および考察

試験結果の概要を Table 6.1 に示す。

(1) 疲労き裂伝ば

母材と溶接金属についてのき裂長さと繰り返し数の関係を Fig. 6.5 に示す。溶接金属におけるき裂は、母材におけるき裂よりも、遅く伝ばすることがわかる。同様に、き裂伝ば速度とき裂長さの関係を Fig. 6.6 に示す。溶接金属のき裂伝ば速度は、同一のき裂長さに対して、母材のき裂伝ば速度より小さいことがわかる。さらに、き裂伝ば速度と ΔJ の関係を Fig. 6.7 に示す。母材と溶接金属のき裂伝ば則はほぼ一致する。

次にき裂の閉口について検討した。母材における荷重とき裂開口変位の履歴曲線を Fig. 6.8 と Fig. 6.9 に示す。き裂の進展につれて、顕著なき裂閉口現象がおこっている。き裂開口比 $(P_{max} - P_{cl}) / (P_{max} - P_{min})$ とき裂長さの関係を Fig. 6.10 に示す。応力比や応力レベルによってき裂閉口現象は異なるが、いずれも、き裂の進展にともなって、き裂開口比が低下し、最小値をとった後、再び増加しはじめる。

一方、 ΔJ の弾性成分 ΔJ_e と塑性成分 ΔJ_p の割合とき裂長さの関係を Fig. 6.11 に示す。最初 J_e が主であるが、き裂の進展につれて、 J_e が減少、 J_p が増加することがわかる。

母材の破面を観察した結果を Photo 6.1 ~ 6.3 に、溶接金属の結果を Photo 6.4 ~ 6.6 に各々示す。いずれも、き裂伝ば速度が大きくなると、ストライエーションが観察される。

(2) クリープ疲労き裂伝ば

母材と溶接金属についてのき裂長さと繰り返し数の関係を Fig. 6.12 に示

す。いずれも、荷重保持をともなう疲労き裂伝ばは、荷重保持をともなわないき裂伝ばよりも早いことがわかる。同様に、き裂伝ば速度と ΔJ_c の関係を図6.13に示す。溶接金属の ΔJ_c は、同一のき裂伝ば速度に対して、母材よりも大きめである。この原因の一つとして、母材にはサイドグループが加工されているが、溶接金属には加工されていないことがあげられる。

次に、サイドグループの効果について検討する。溶接金属のクリープ疲労き裂伝ばにおける、き裂伝ば速度と ΔJ_c の関係を図6.14に示す。サイドグループ加工を行っていない試験片の ΔJ_c は、同一のき裂伝ば速度に対して、サイドグループ加工を行った試験片の ΔJ_c よりも大きいことがわかる。この原因としては、図6.15に示した、 ΔJ_c とき裂長さの関係からも明らかなように、サイドグループ加工した試験片においては変形が、き裂進展面に集中するが、サイドグループ加工していない試験片においては、変形がき裂面以外にもおこるため、き裂開口変位にはき裂以外の情報が入り、 ΔJ_c が見かけ上、大きくなることが考えられる。変形をき裂面に集中させるという点では、サイドグループ加工することが望ましいが、クリープ効果によるトンネリング防止という効果も同時に考慮する必要がある。Photo. 6.16に、き裂前縁形状におよぼすサイドグループの効果について検討した結果を示す。

2 ¼Cr-1 Mo, Mod. 9 Cr-1 Moともに、サイドグループ加工を行うと、トンネリングは防止されているが、サイドグループの溝が深すぎたために、逆に、表面部をき裂が進みやすくなっている。Mod. 9 Cr-1 Moの溶接金属については、この傾向が顕著なため、サイドグループ加工を行わない場合のデータを採用した。

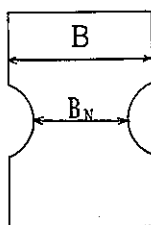
一方、母材の保持時間1 minの破面をPhoto. 6.7~6.9に、保持時間10minの破面をPhoto. 6.10~6.12に示す。いずれも、き裂伝ば速度の大きい領域において、ストライエーションが観察された。また、溶接金属の保持時間1 minの破面をPhoto. 6.13~6.15に示す。母材と同様に、ストライ

エーションが観察された。

Table 6.1 Results of fatigue or creep-fatigue crack propagation test for Mod.9Cr-1Mo steel.

Material	Temp. (°C)	$\Delta \sigma^{*1}$ (Kgf/mm ²)	R	t_H (min)	N_f (cycles)	a_o^{*2} (mm)	a_f^{*3} (mm)	Side groove	sp. No.	
Base metal (Virgin)	500	50	- 1		3504	0.978	4.231	with out	9CR114	
		44			10355	0.982	4.481		9CR116	
			- 1.316		15475	0.973	5.818		9CR117	
		40	- 1		1	4447	1.971	5.650	with	9CR101
		44			10	2404	1.978	5.034		9CR102
		Weld metal (Virgin)			48			15436	0.975	5.246	with out	9CR132
44				- 1	1	2657	2.186	5.798	with	9CR144
						1059	2.310	4.827	with out	9CR133
				10	532	2.310	5.001	with	9CR145	
		1175	1.756		5.123	with out	9CR134			

(Remarks) *1

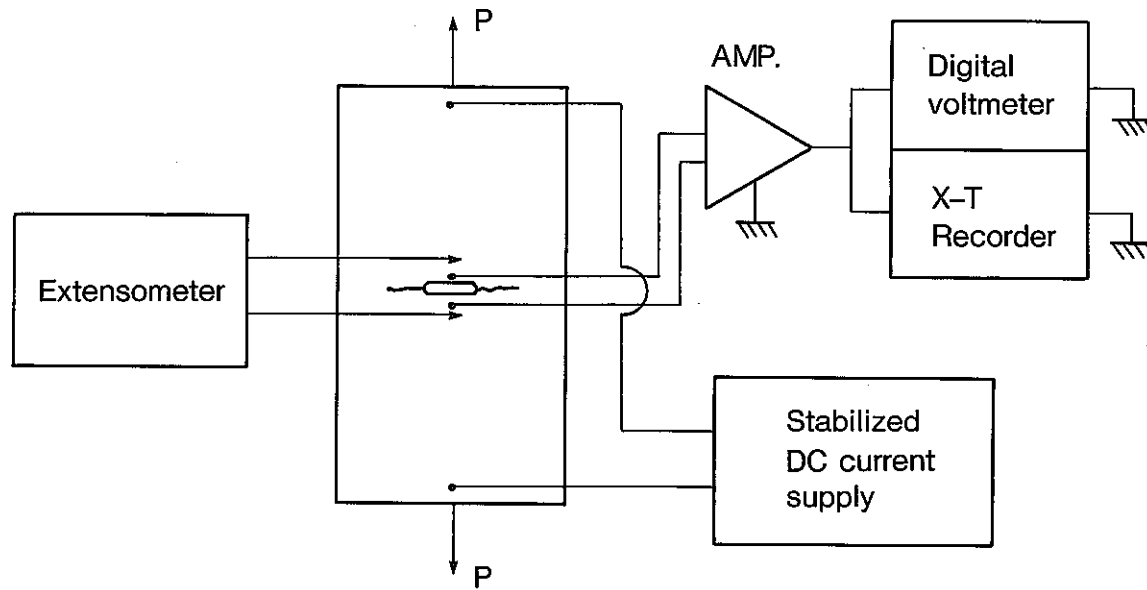


without SG
 $\Delta \sigma = P / (B \cdot W)$

without SG
 $\Delta \sigma = P / (B_N \cdot W)$

*2 Initial crack length,

*3 Final crack length



(Measurement of F.M.P.)

(Measurement of crack length)

Fig. 6.1 Testing apparatus for fatigue crack growth.

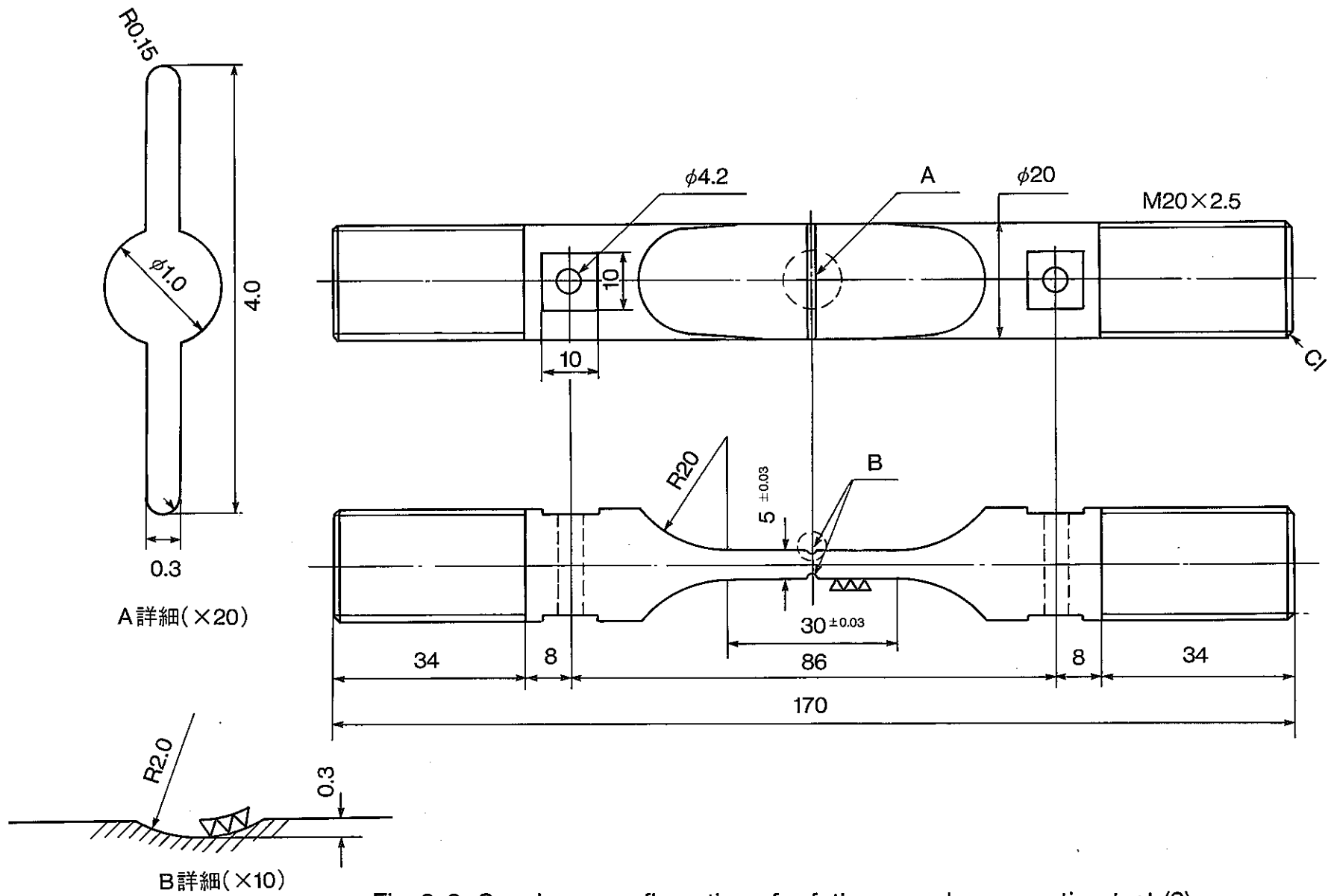
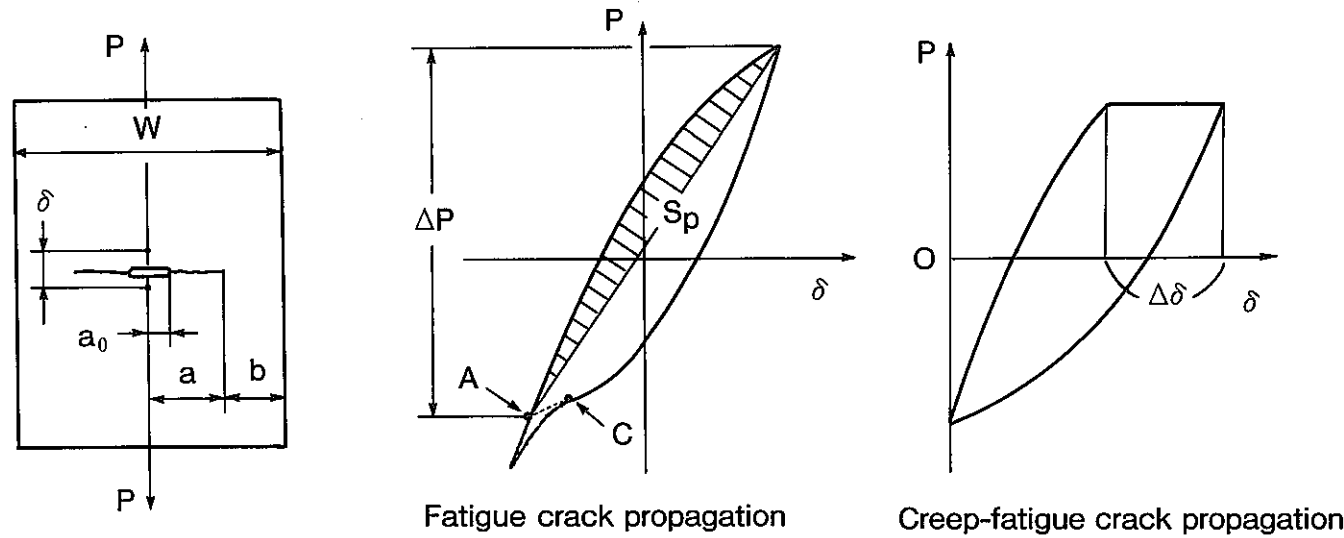


Fig. 6. 3 Specimen configurations for fatigue crack propagation test (2).



P ; Load
 δ ; Load line displacement
 C ; Crack closure point
 A ; Start point of S calculation

Fig. 6.4 Definition of S_p and $\Delta\delta$.

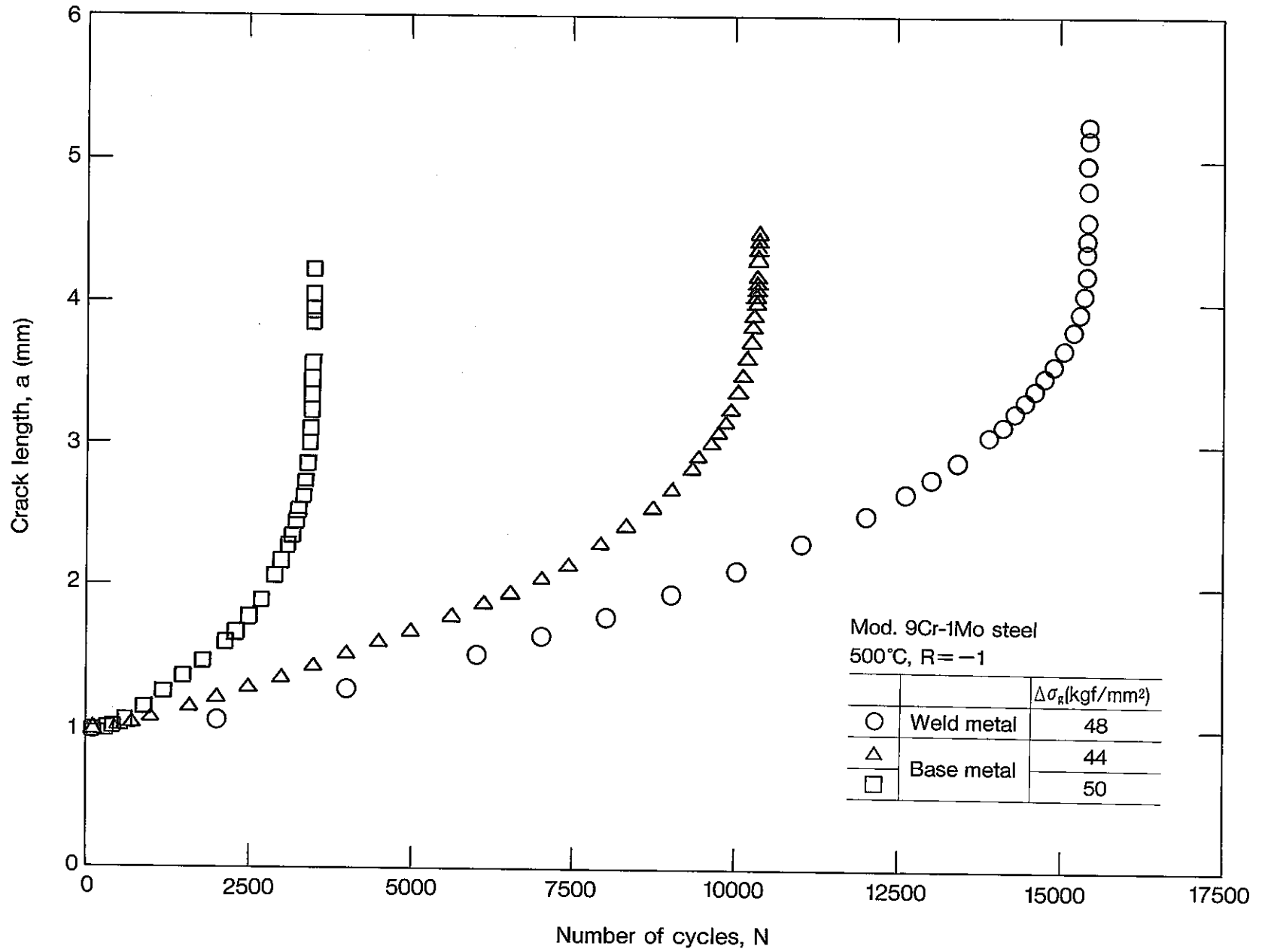


Fig. 6.5 Relationship between crack length and number of cycles.

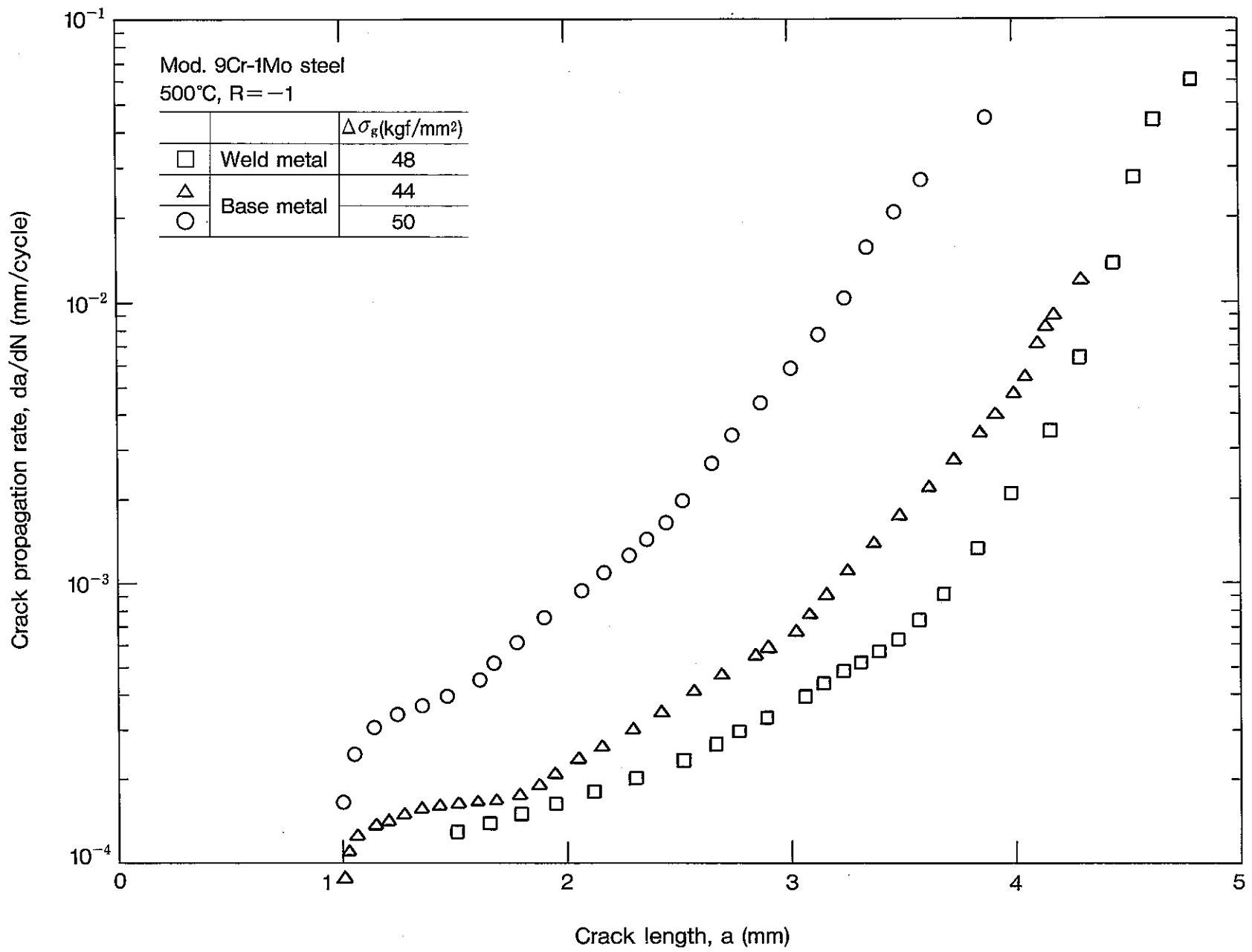


Fig. 6.6 Relationship between crack propagation rate and crack length.

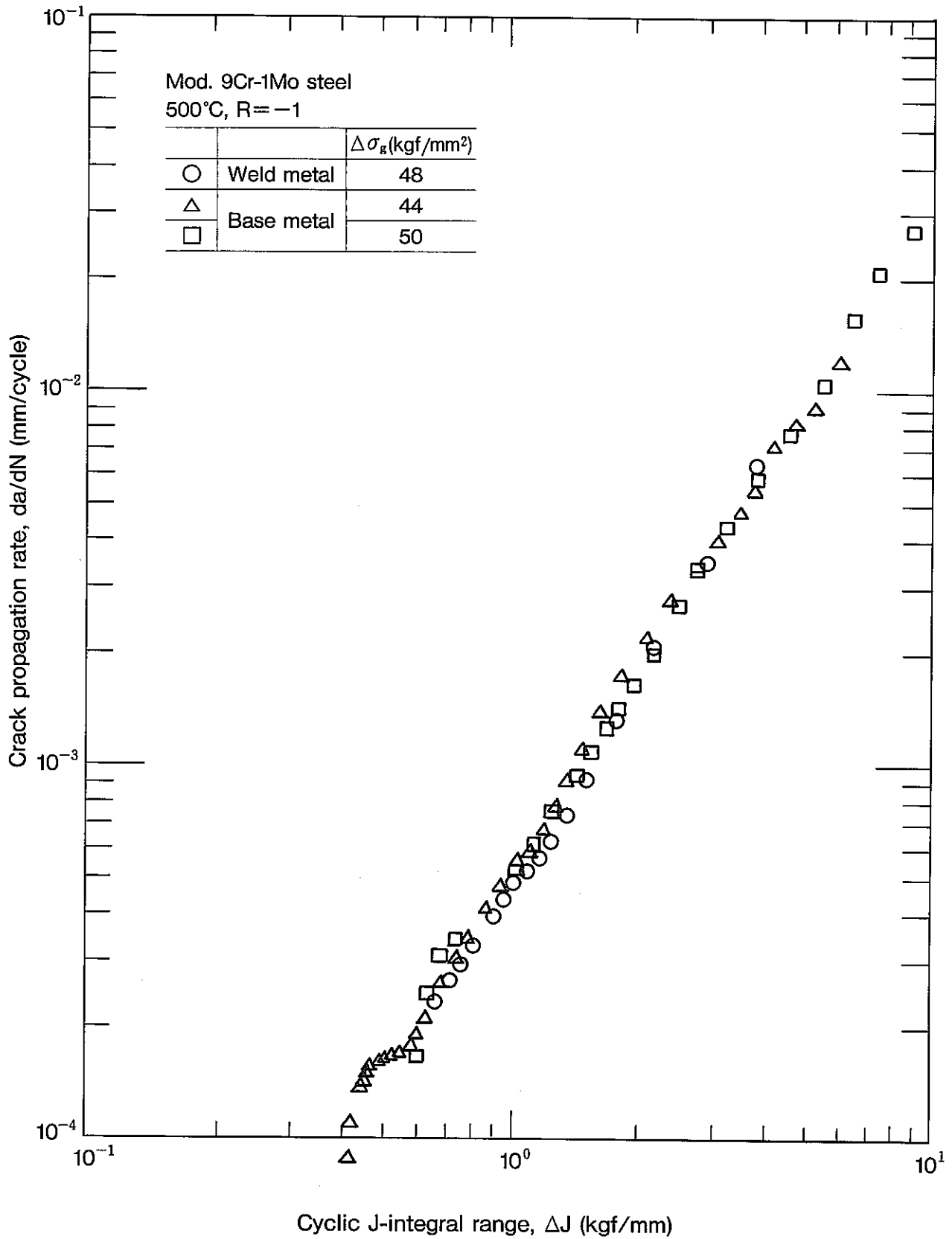


Fig. 6.7 Relationship between crack propagation rate and cyclic J-integral range.

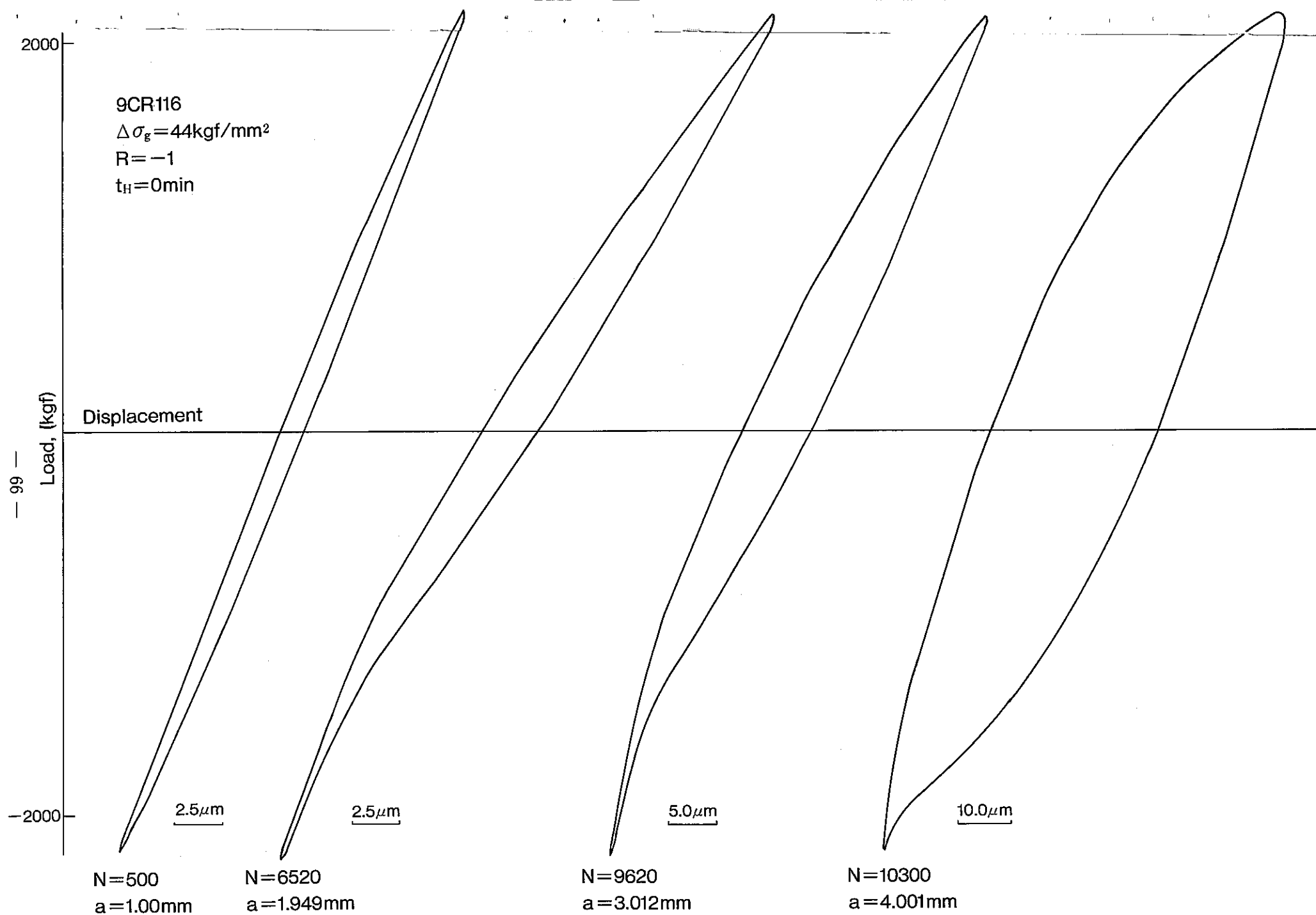


Fig. 6.8 Load-crack center opening displacement hysteresis loop (1).

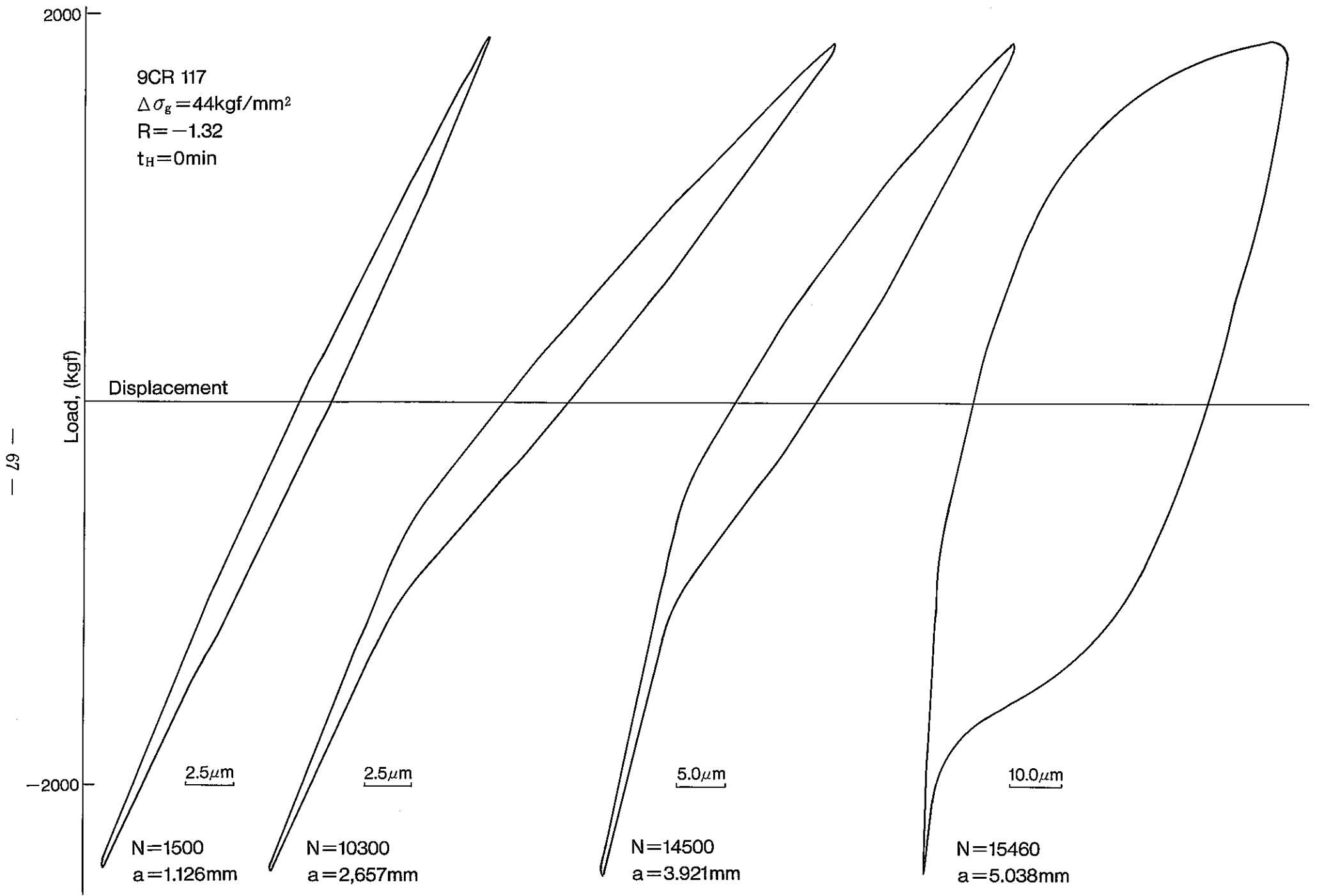


Fig. 6.9 Load-crack center opening displacement hysteresis loop (2).

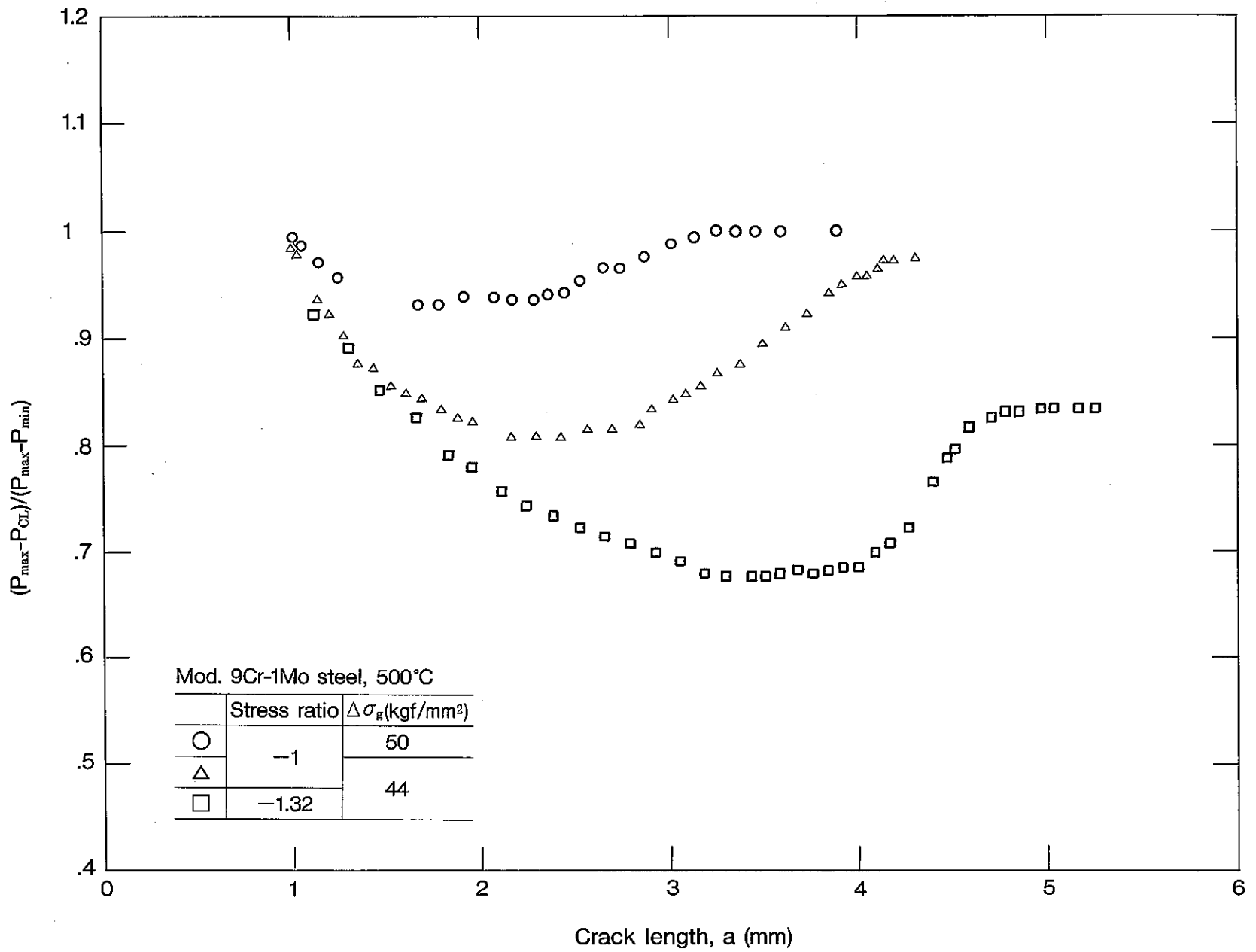


Fig. 6.10 Relationship between $(P_{max}-P_{CL})/(P_{max}-P_{min})$ and crack length.

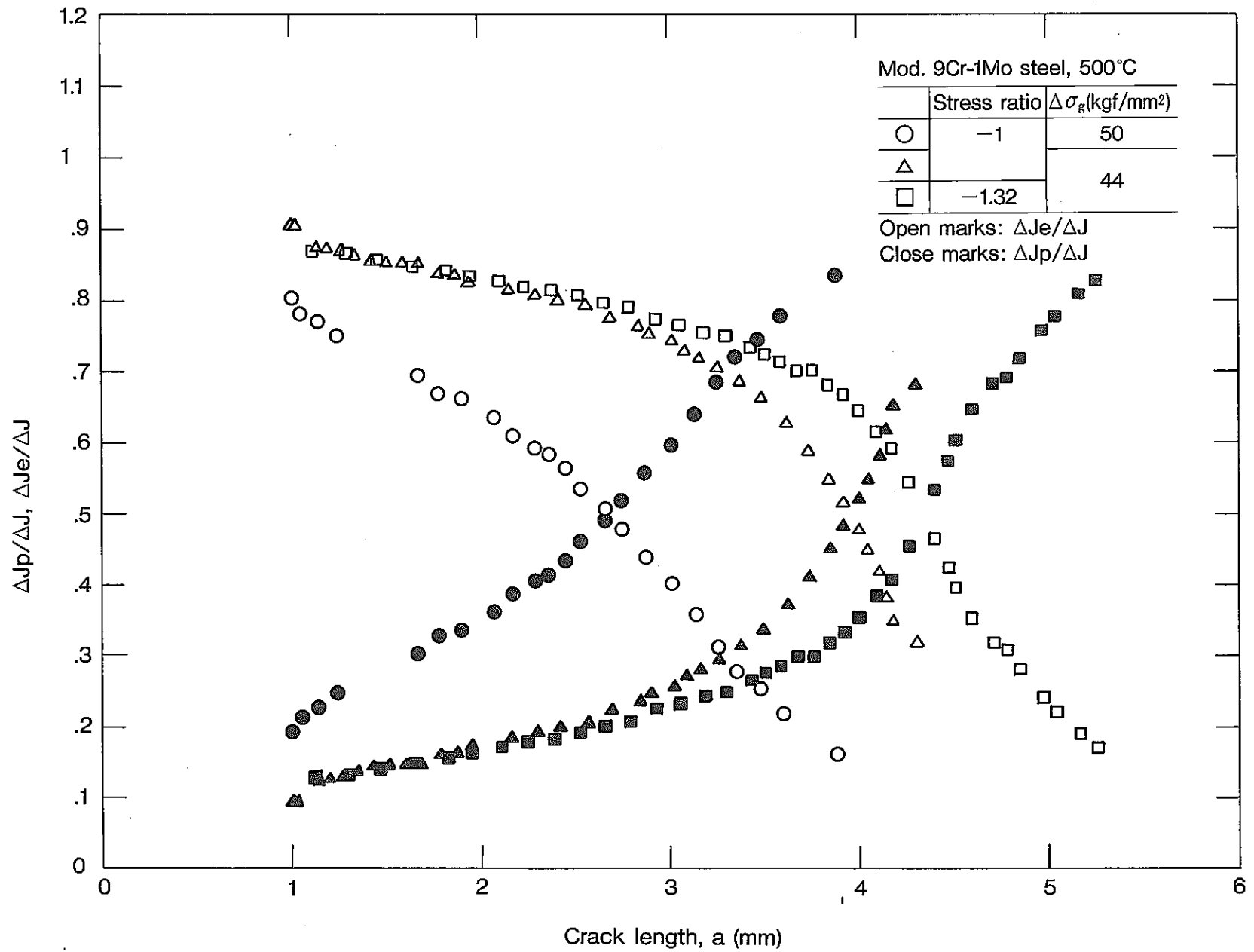


Fig. 6.11 Relationship between $\Delta J_p/\Delta J$, $\Delta J_e/\Delta J$ and crack length.

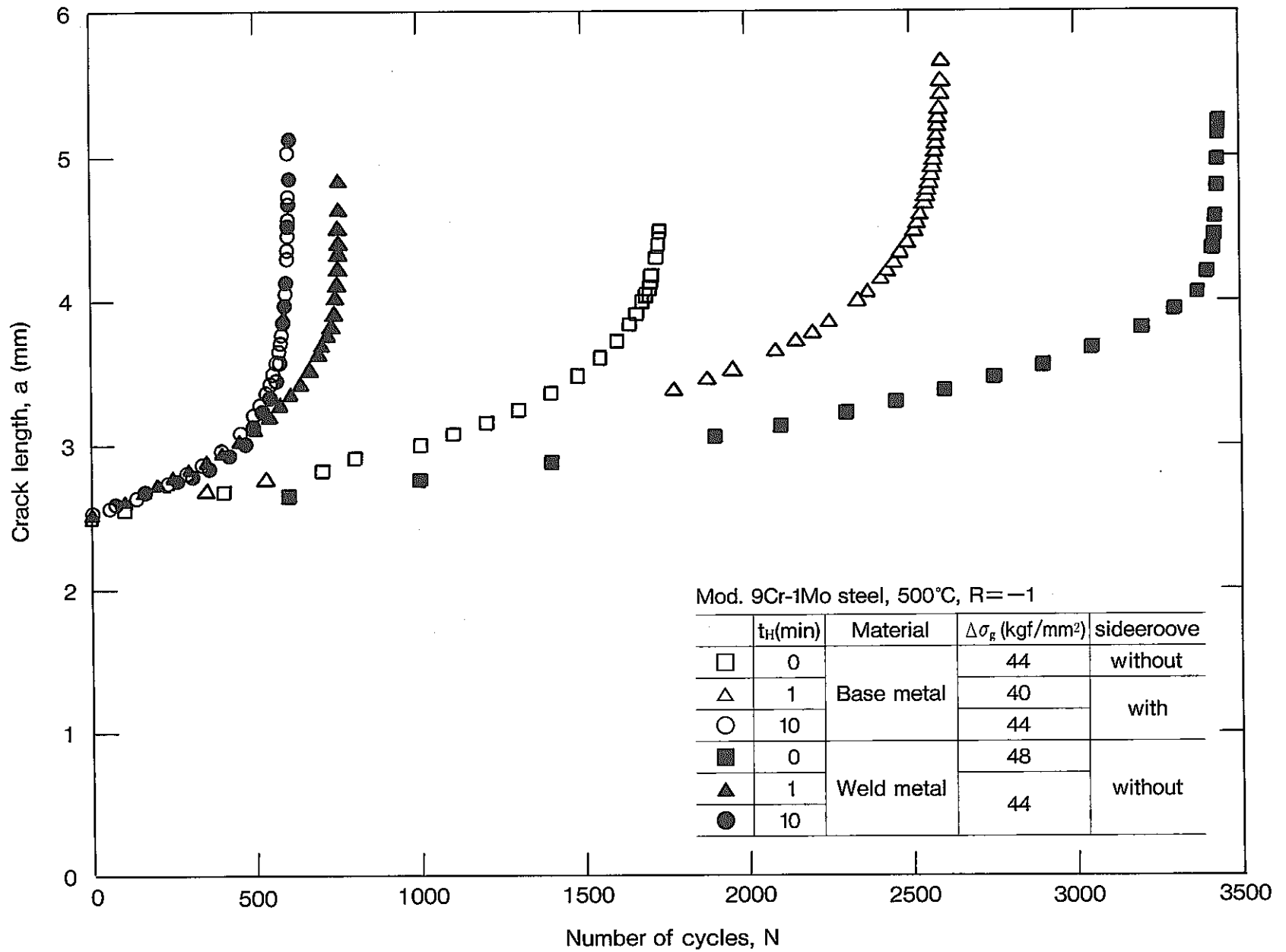


Fig. 6.12 Relationship between crack length and number of cycles.

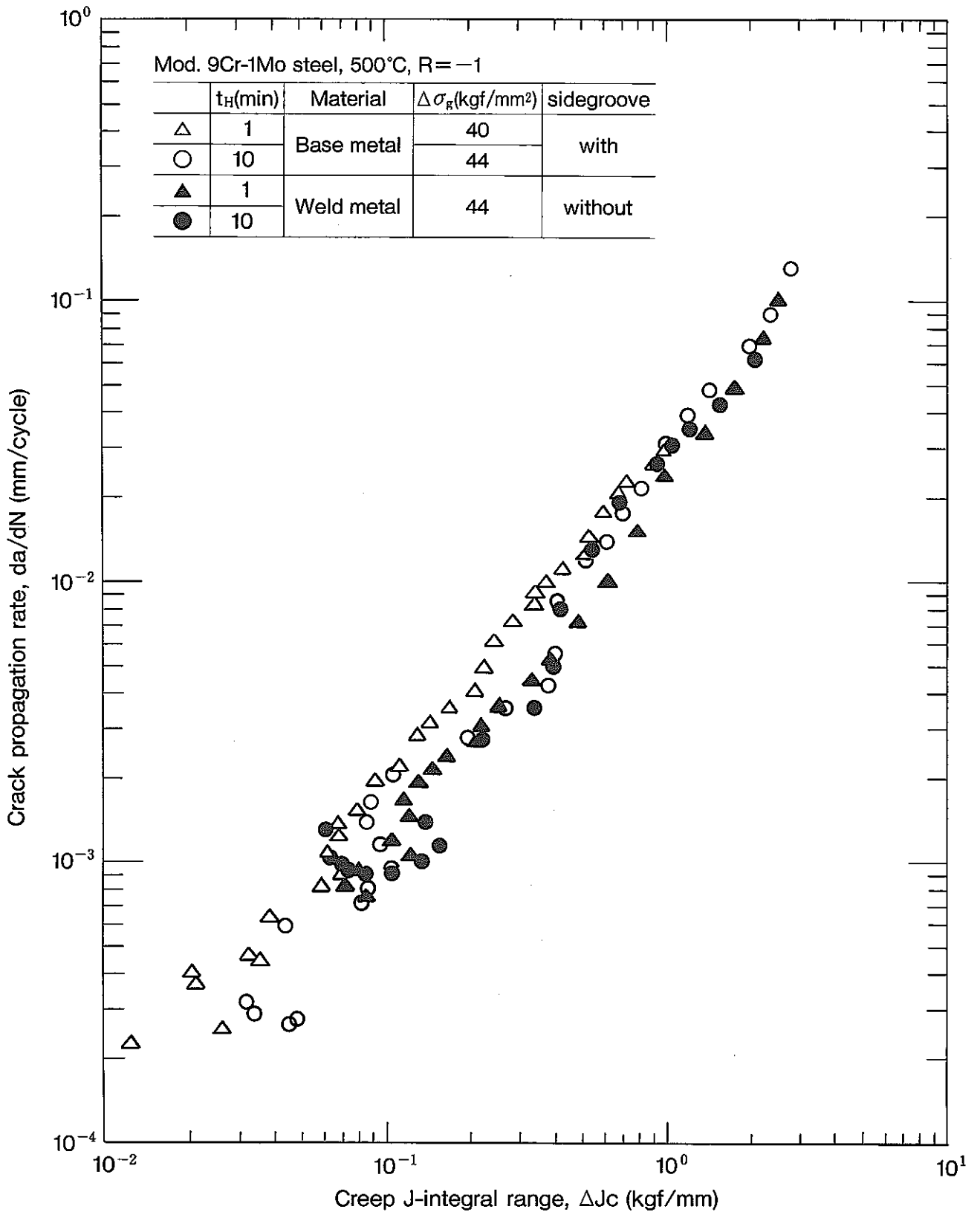


Fig. 6. 13 Relationship between crack propagation rate and creep J-integral range.

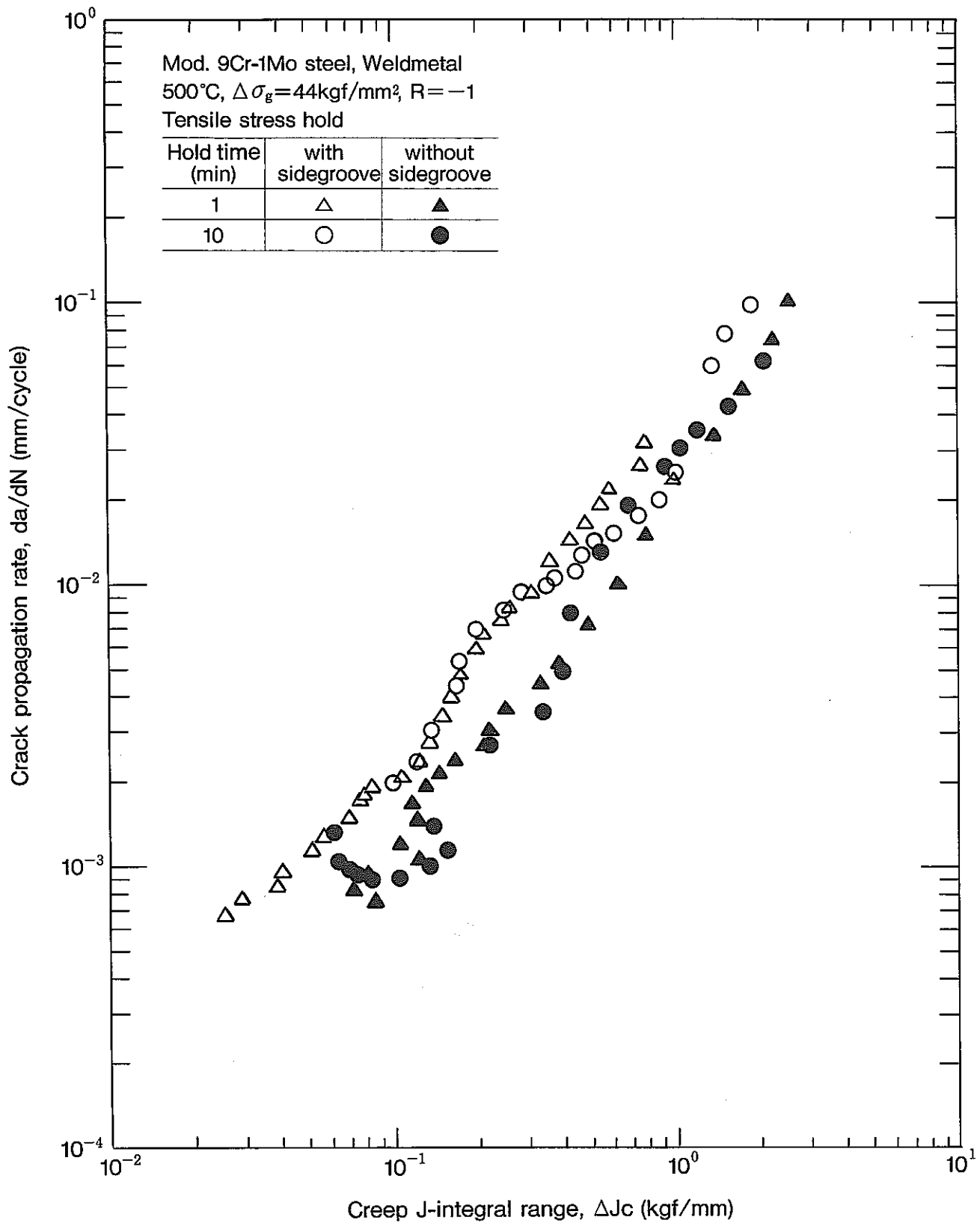


Fig. 6.14 Relationship between crack propagation rate and creep J-integral range.

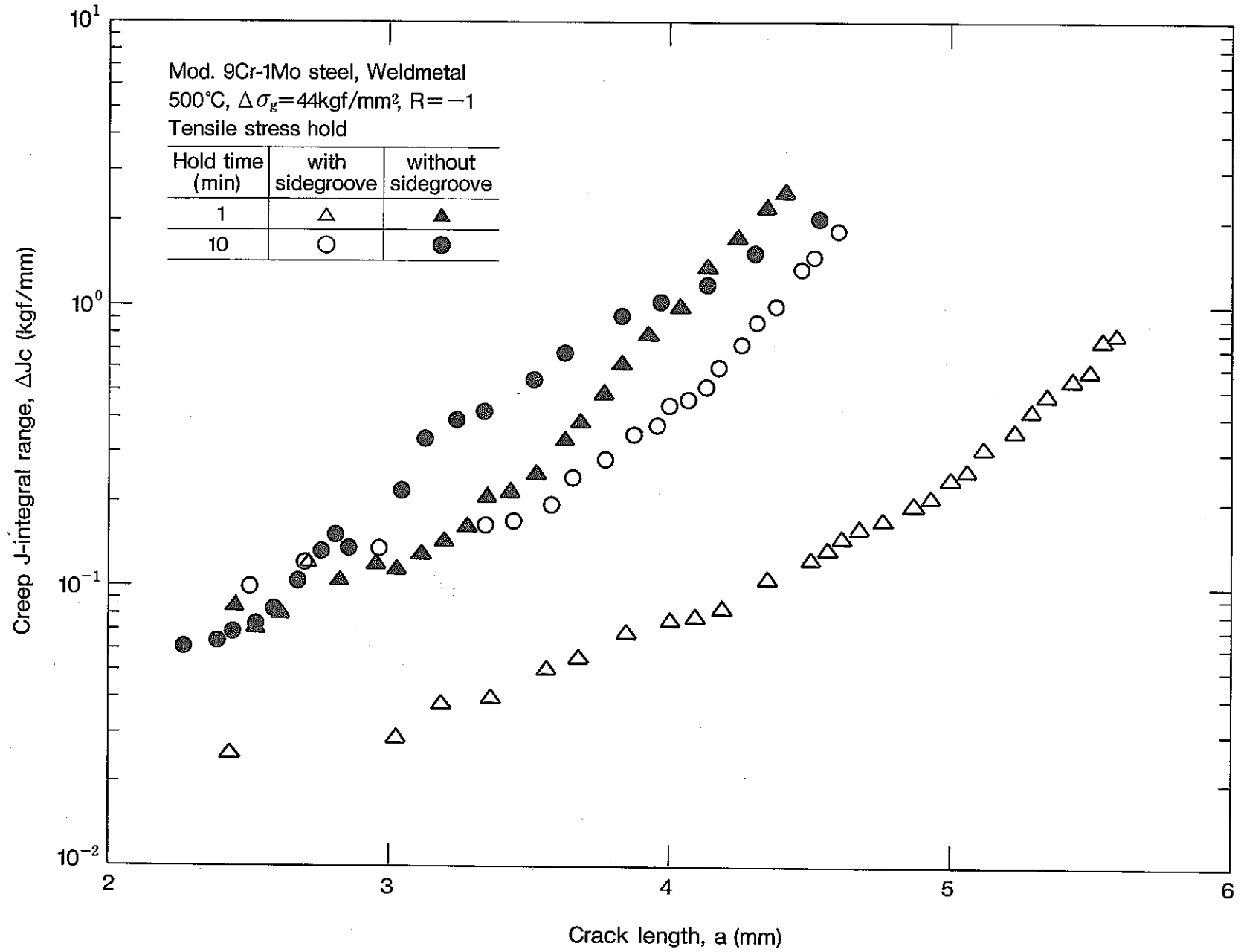
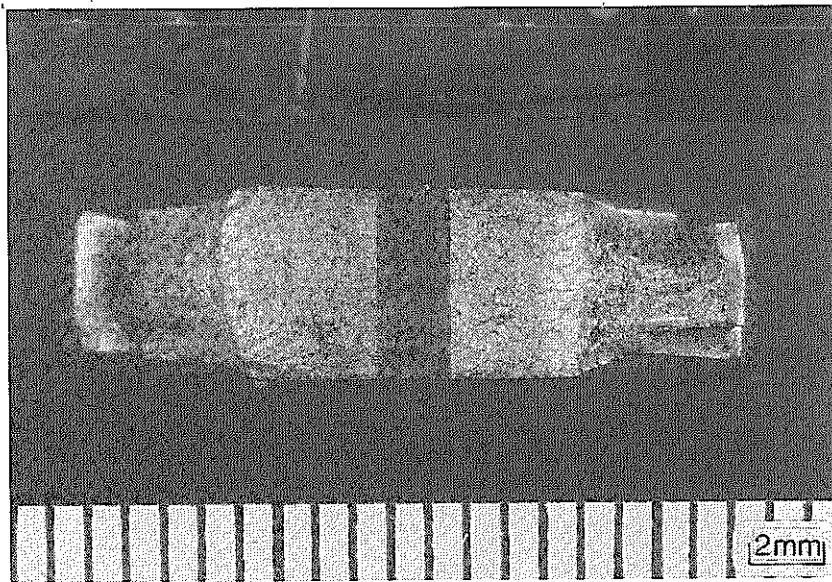
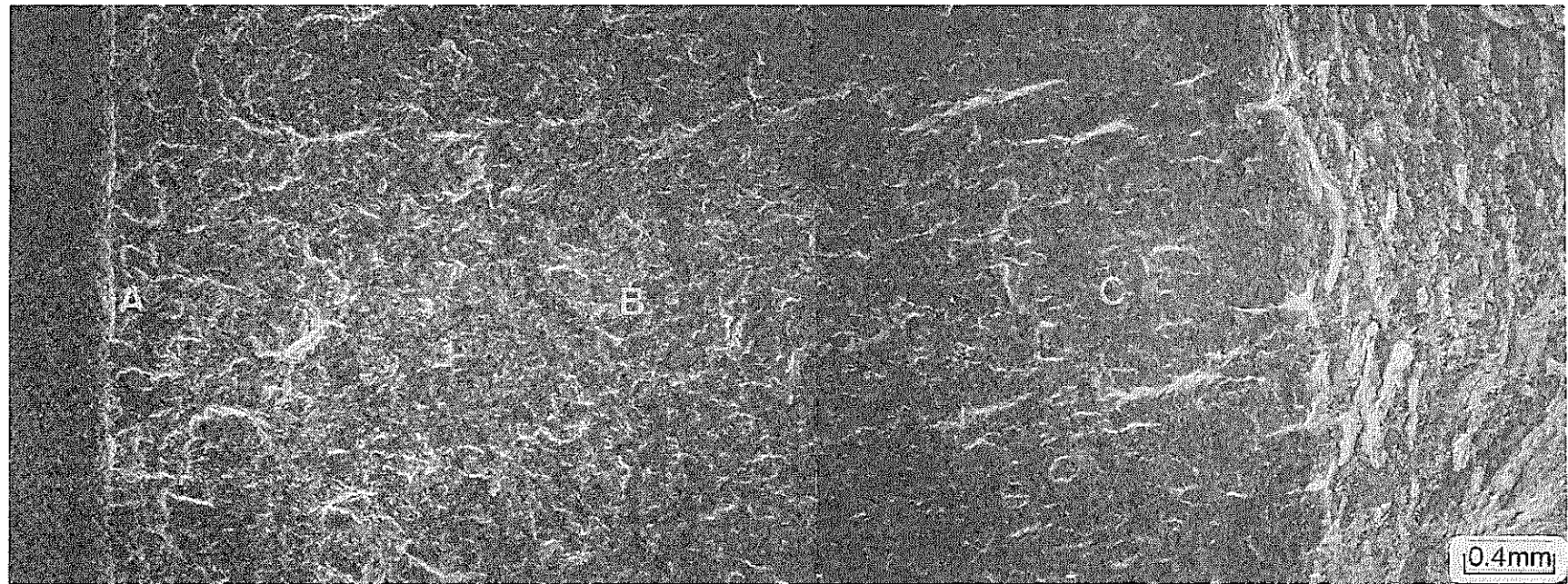


Fig. 6.15 Relationship between creep J-integral range and crack length.



Mod. 9Cr-1Mo steel, 500°C
 $\Delta\sigma_g = 44\text{kgf/mm}^2$, $R = -1$

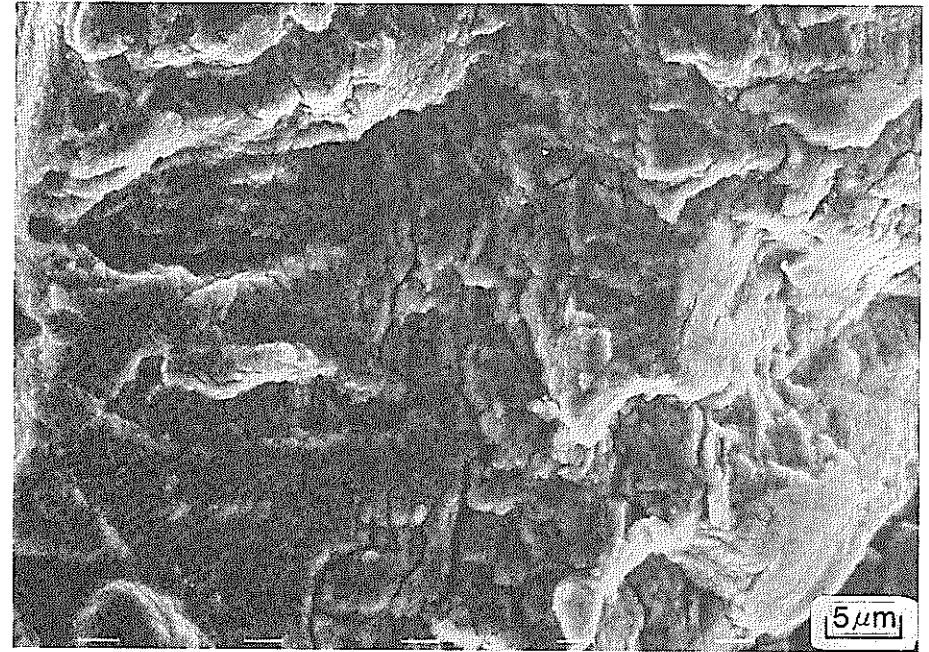
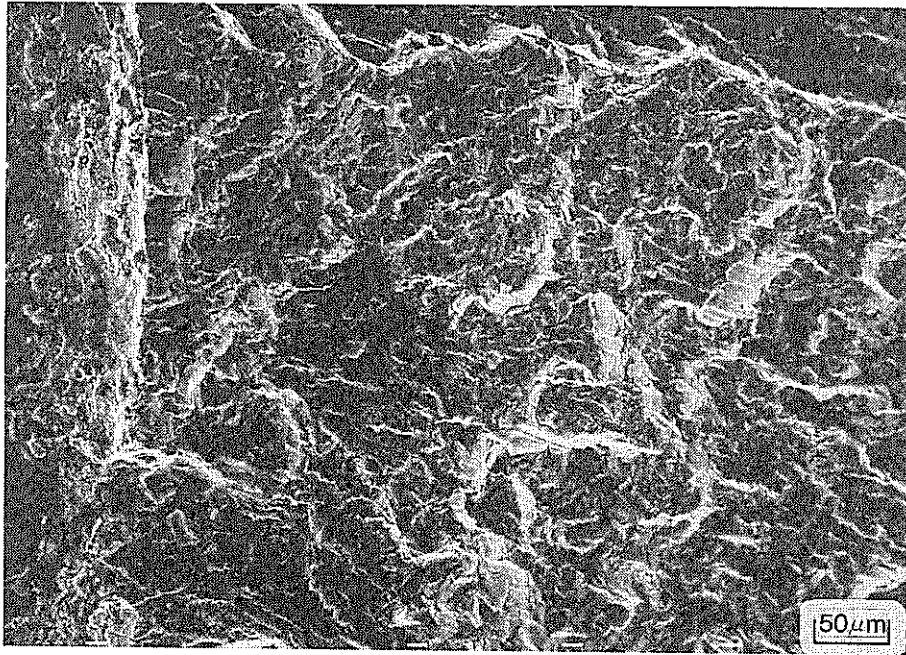
SEM Fractographs



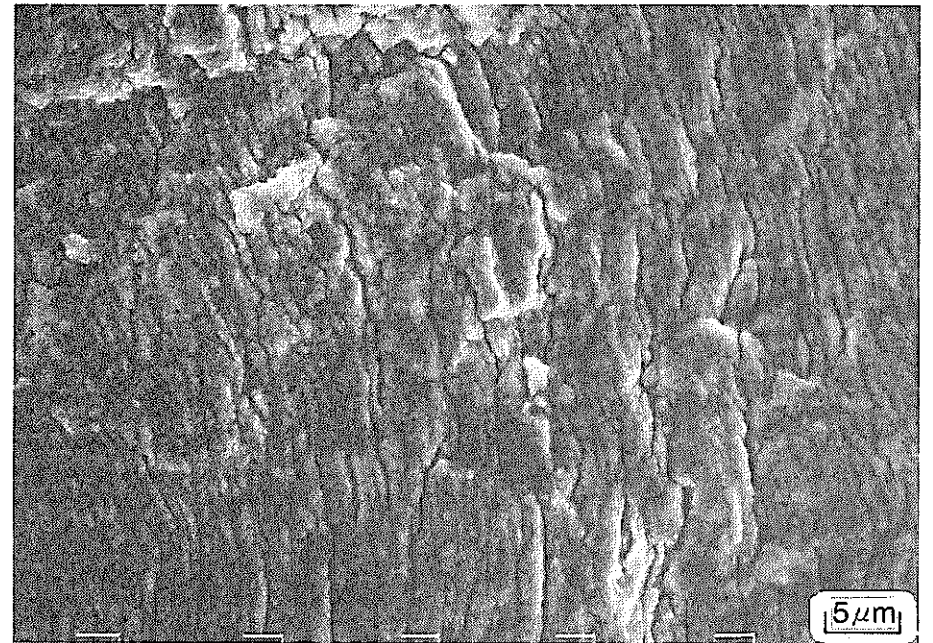
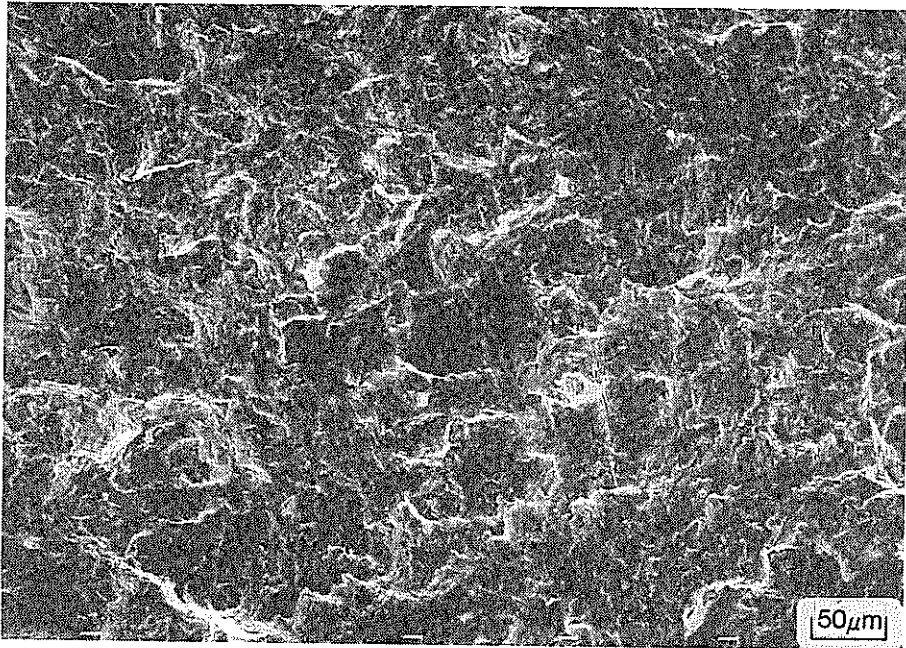
Initial notch → ← Fatigue failure → ← Rapid failure

Photo. 6.1 Observation of fracture surface by SEM (1).

A



B



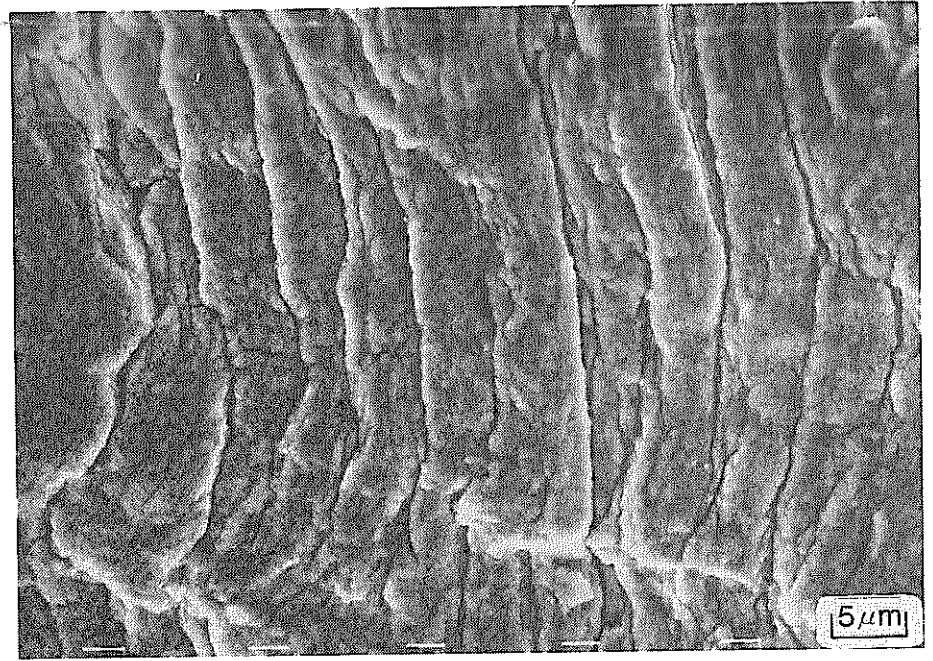
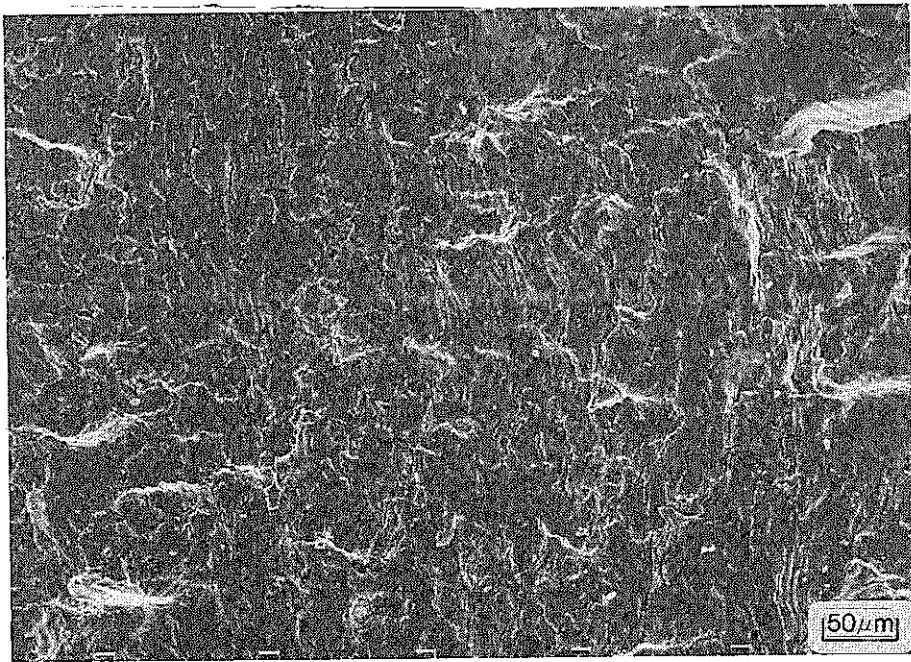
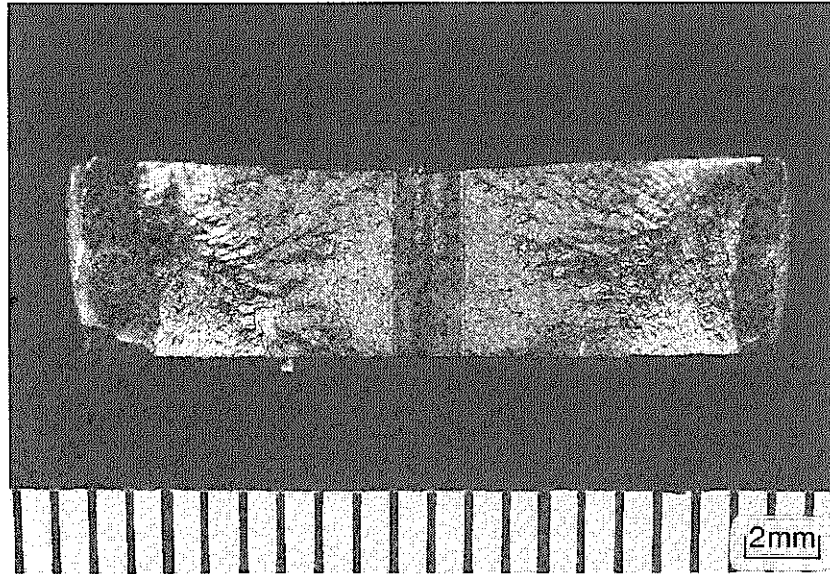
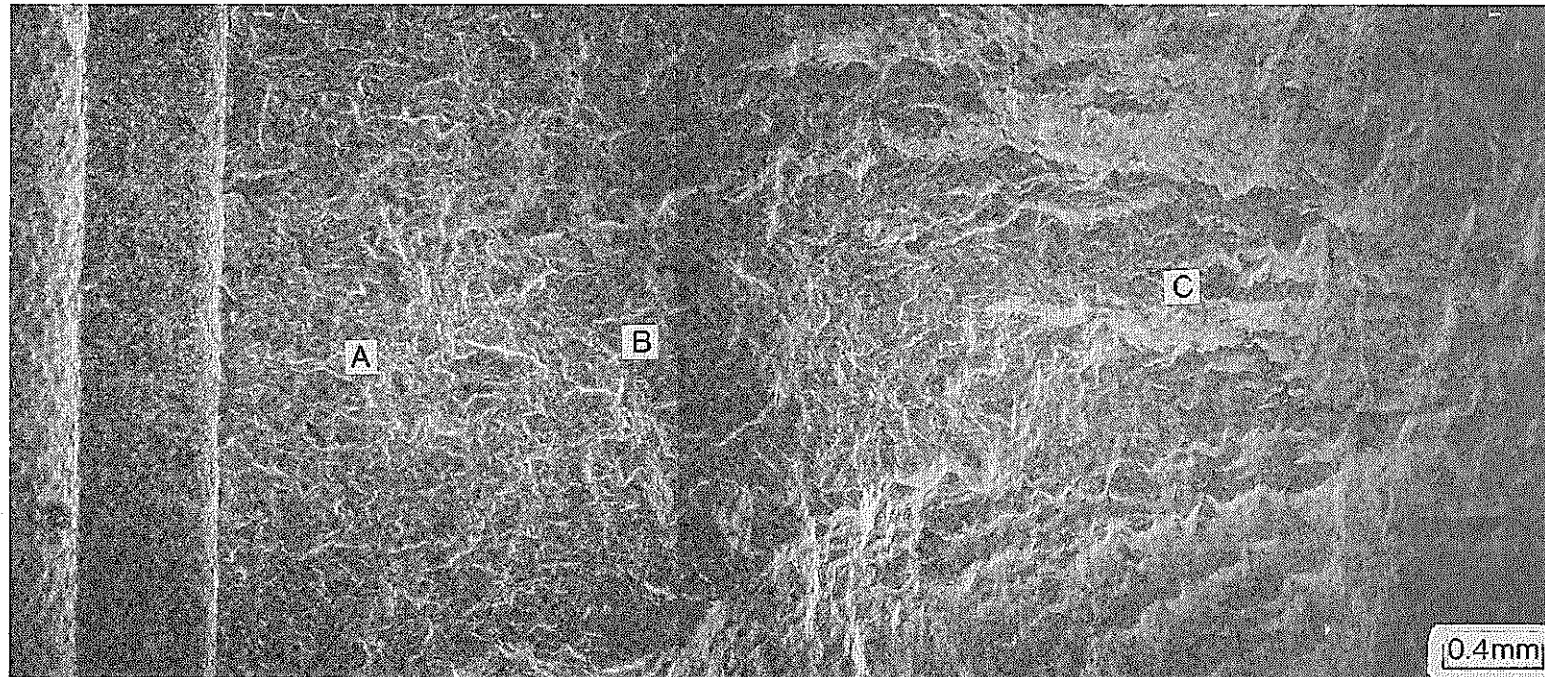


Photo. 6. 3 Observation of fracture surface by SEM (3).

Fracture surface



Mod. 9Cr-1Mo Weld metal, 500°C
 $\Delta\sigma_g=48\text{kgf/mm}^2$, $R=-1$



Initial notch Fatigue failure Rapid failure

Photo. 6. 4 Observation of fracture surface by SEM (1).

A

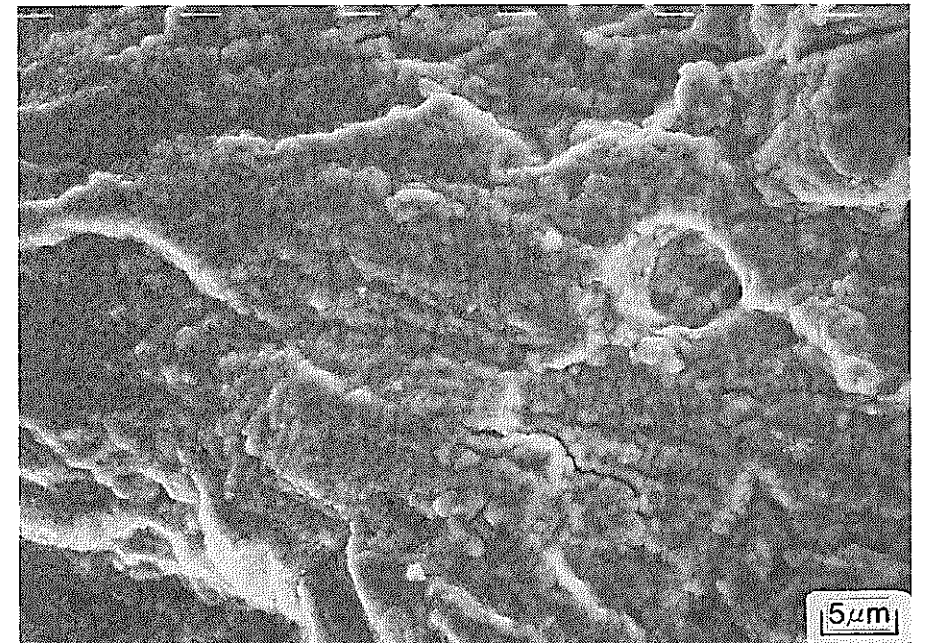
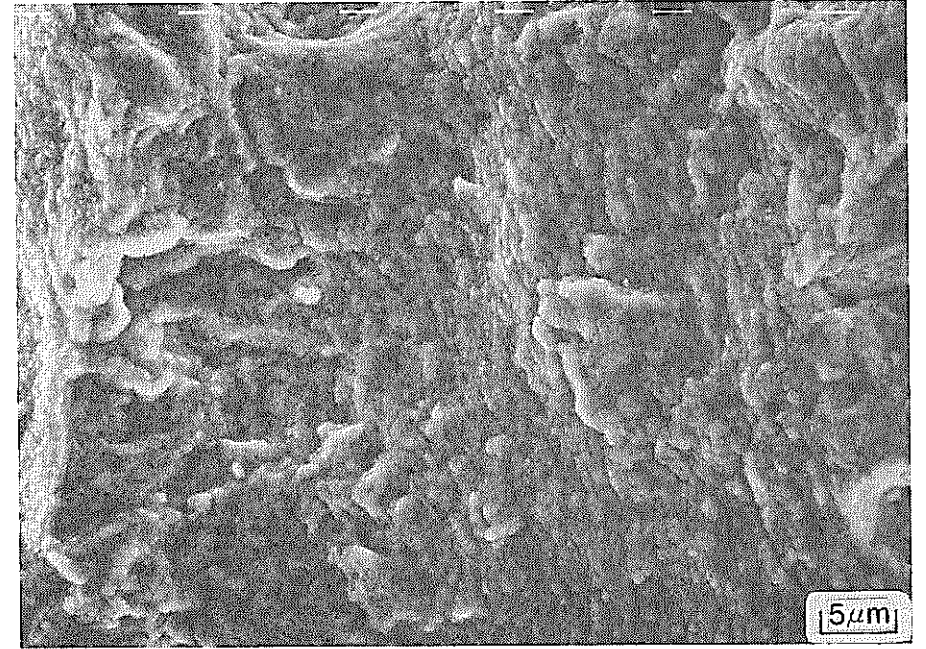
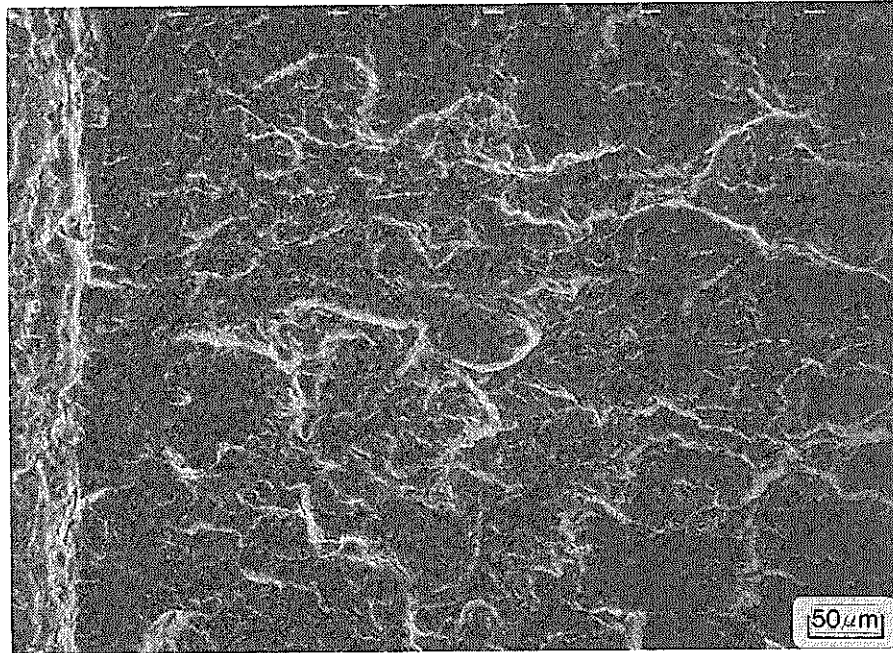
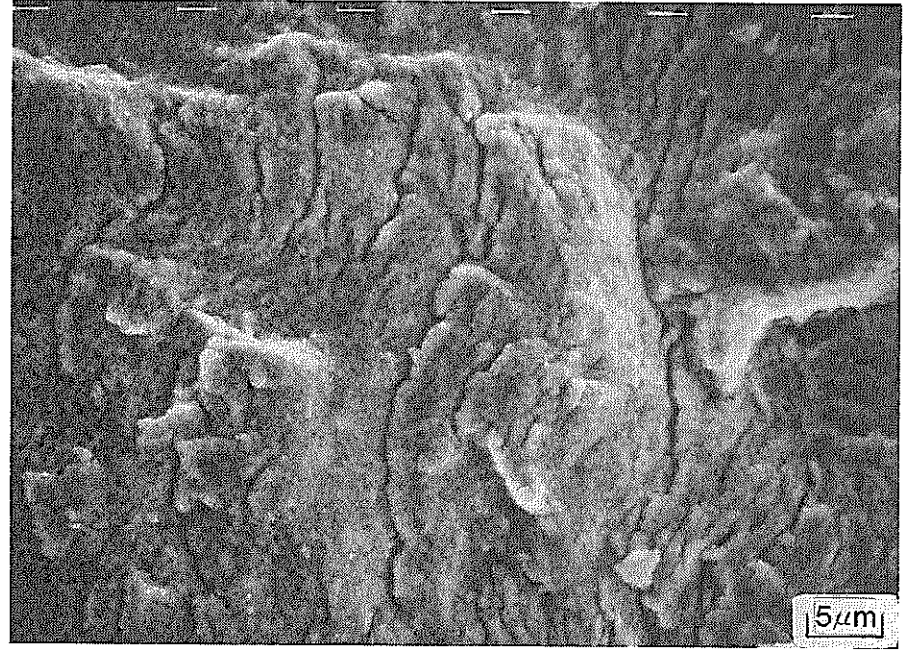
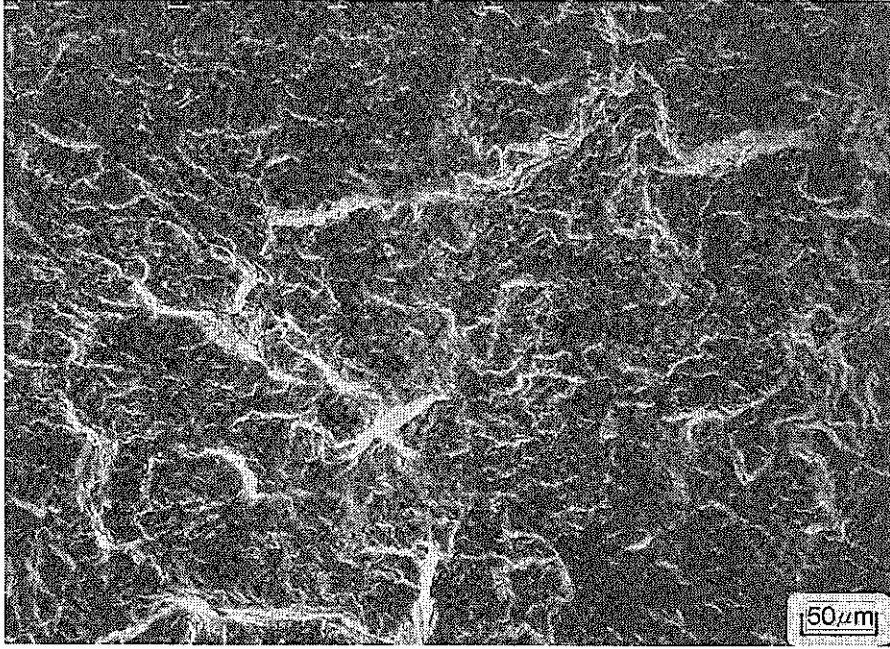


Photo. 6. 5 Observation of fracture surface by SEM (2).

B



— 79 —
C

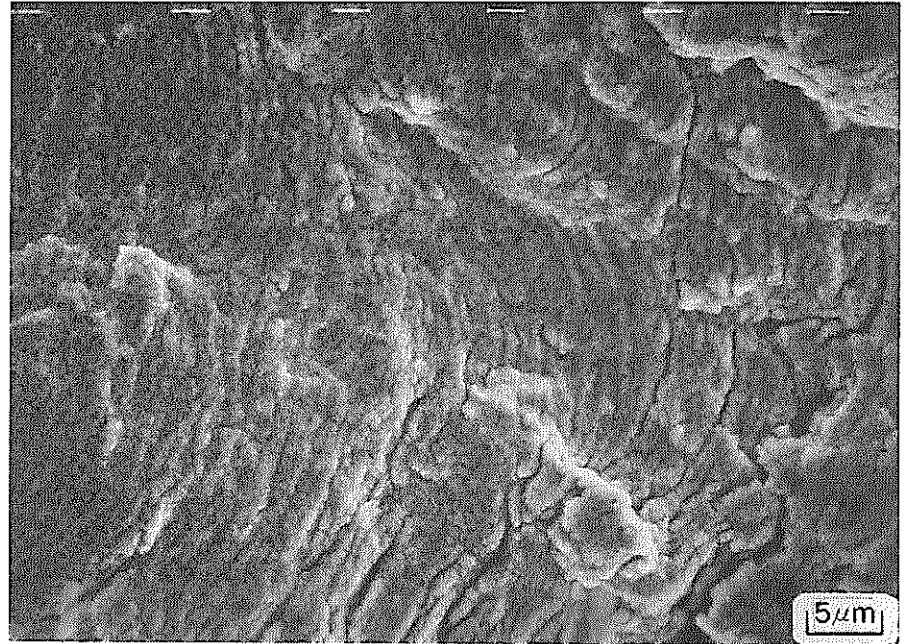
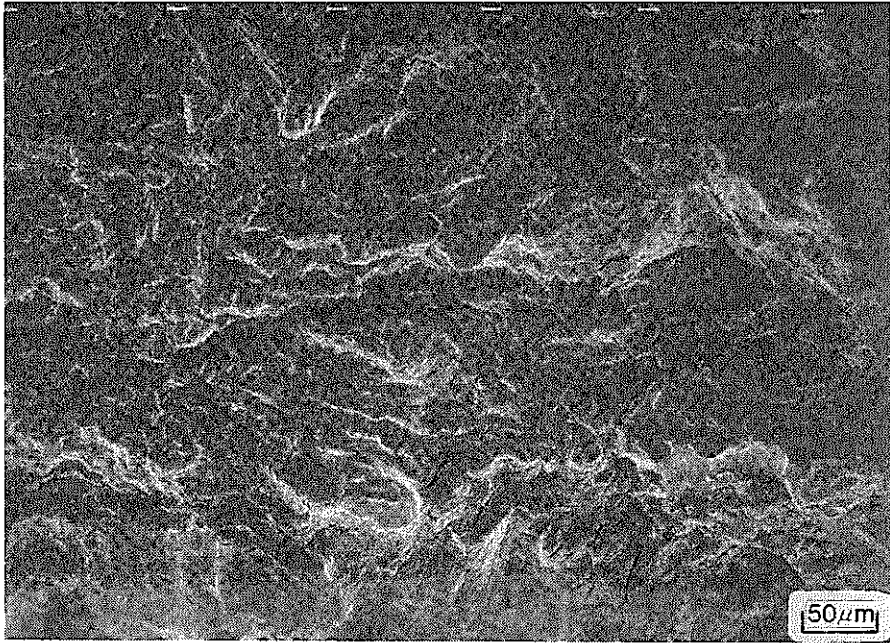
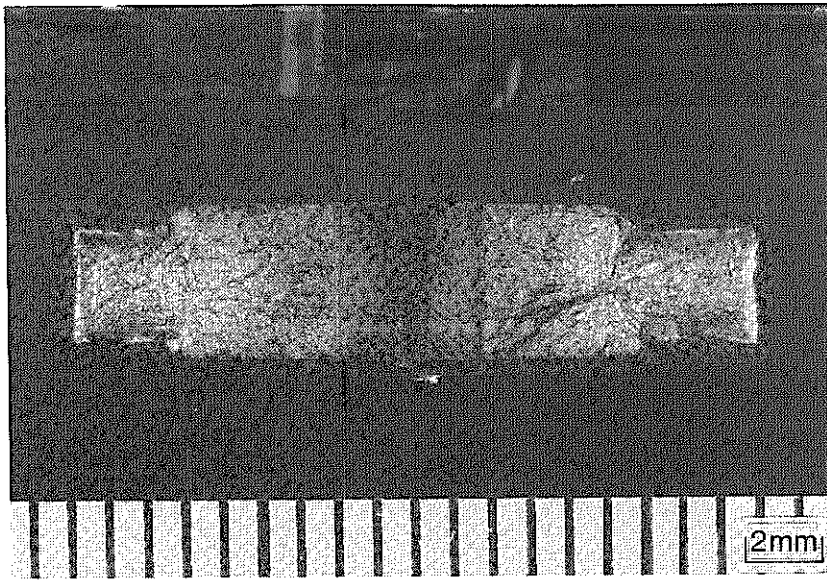


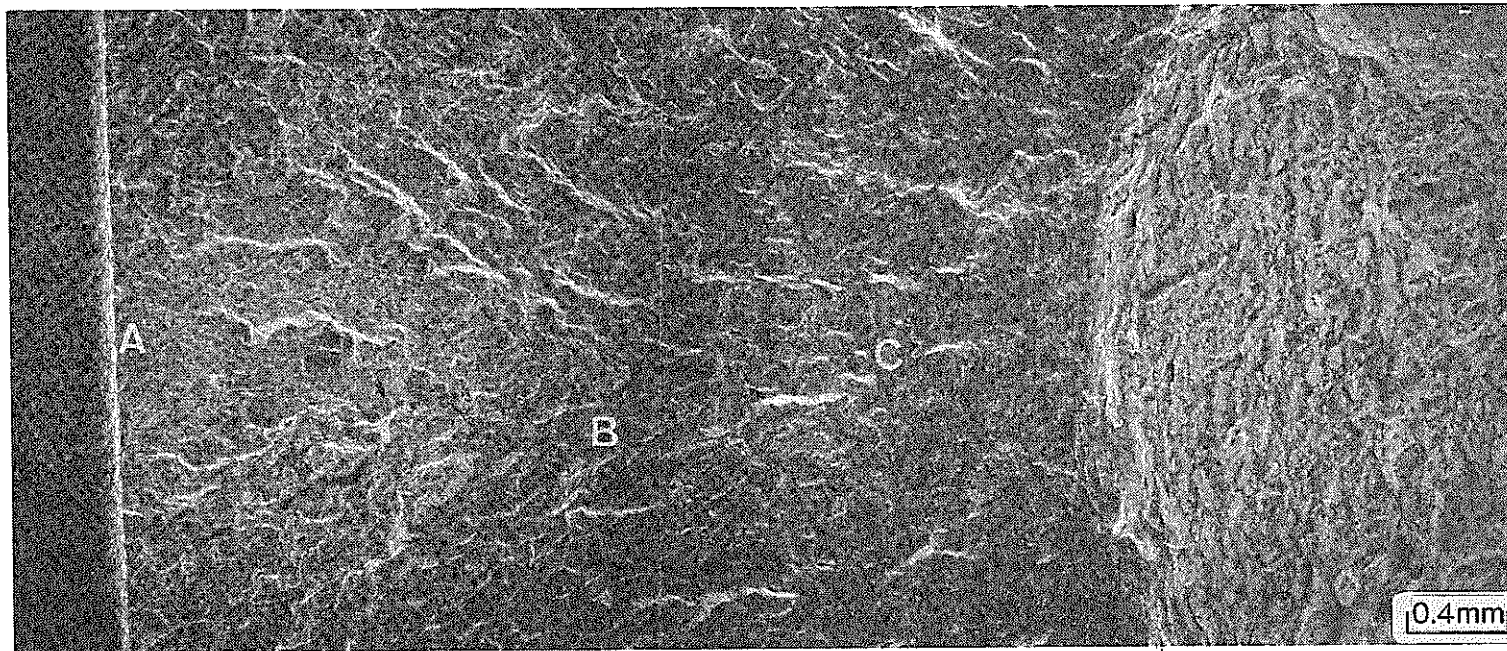
Photo. 6. 6 Observation of fracture surface by SEM (3):

Fracture surface



Mod. 9Cr-1Mo steel, 500°C
 $\Delta\sigma_g=40\text{kgf/mm}^2$, $R=-1$
 $t_H=1\text{min}$

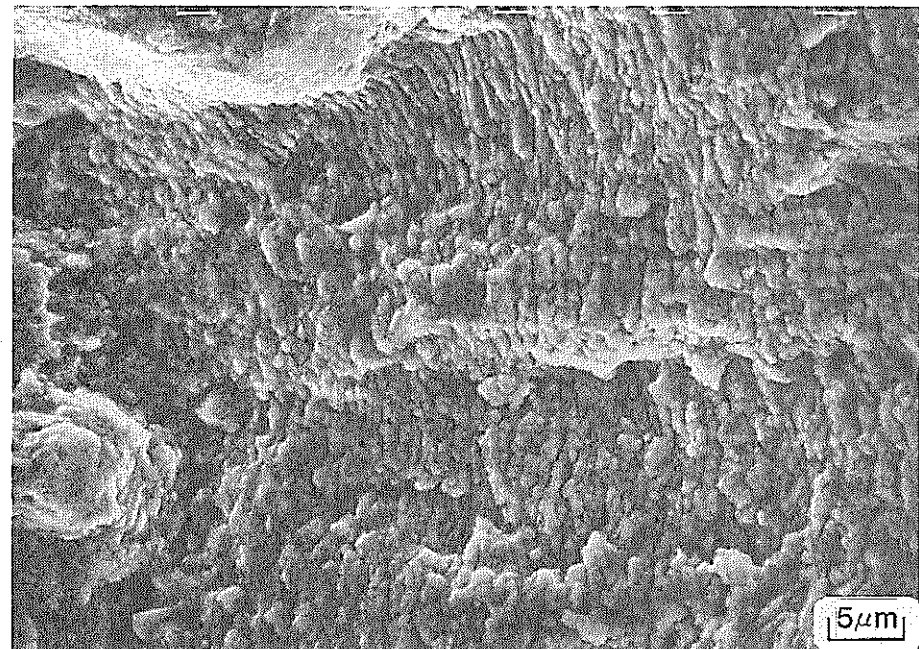
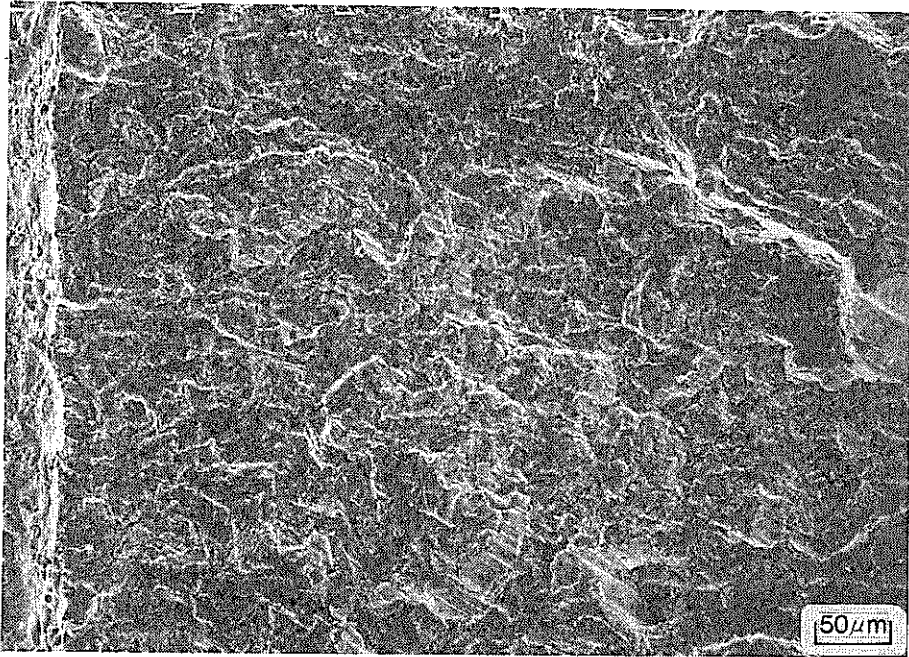
SEM Fractographs



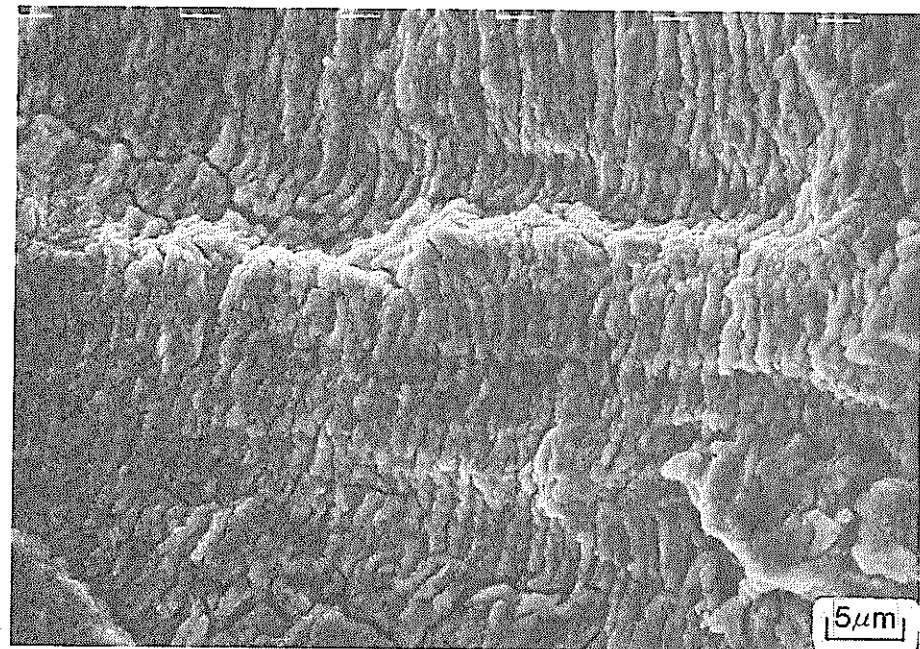
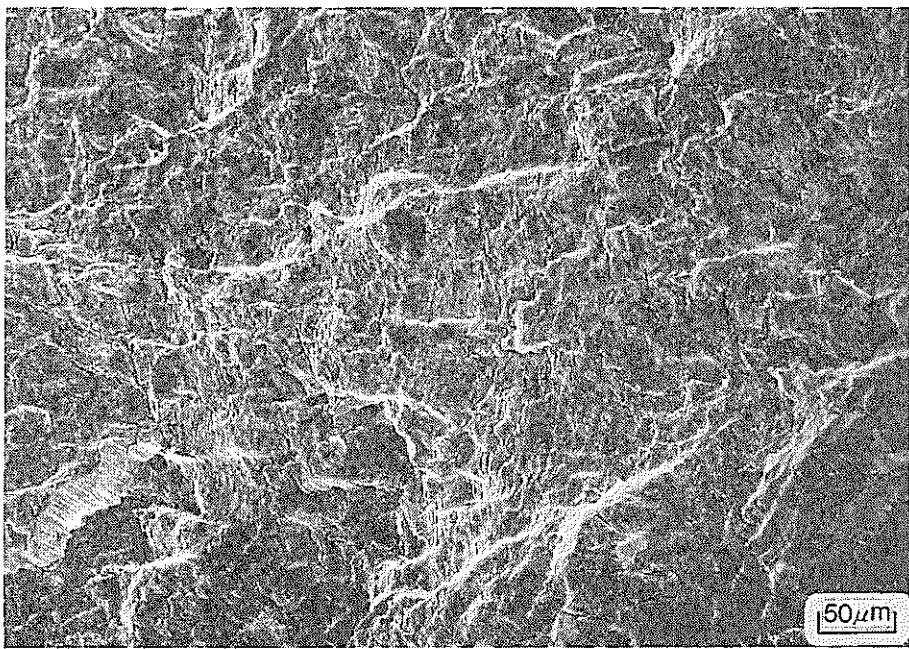
Initial notch → Creep-fatigue failure ← Rapid failure

Photo. 6.7 Observation of fracture surface by SEM (1).

A



B



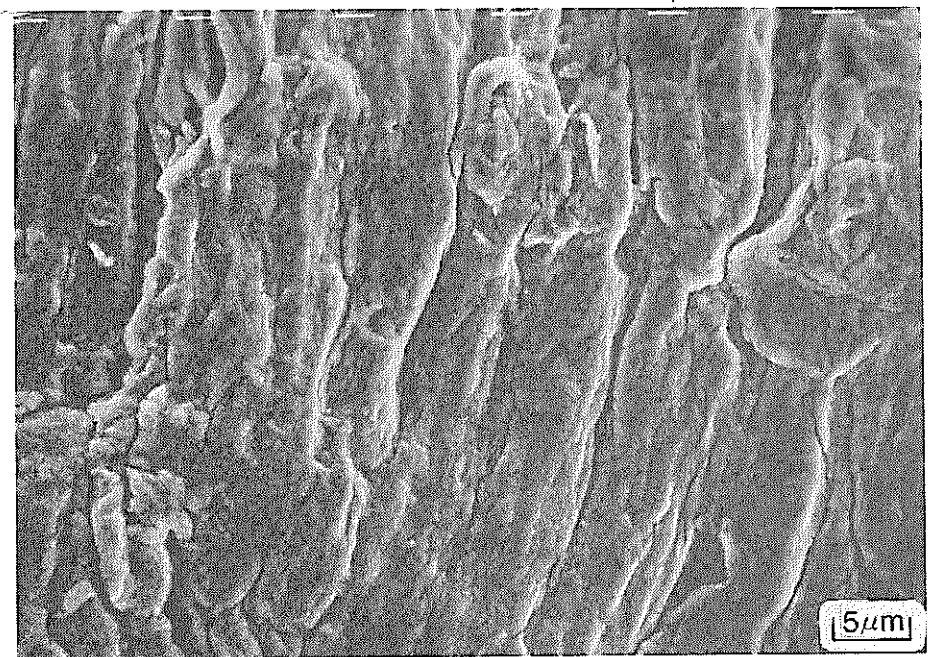
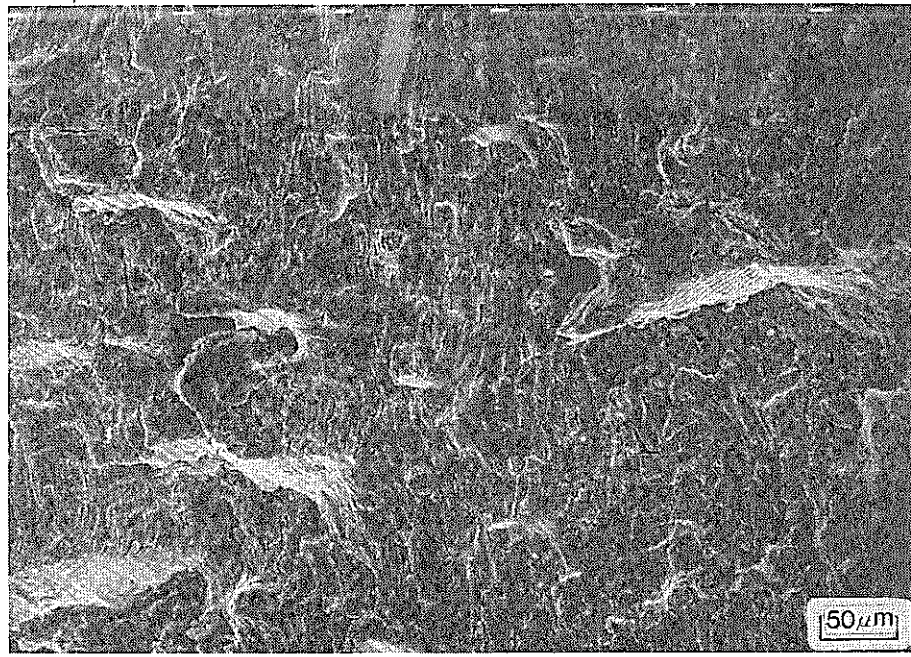
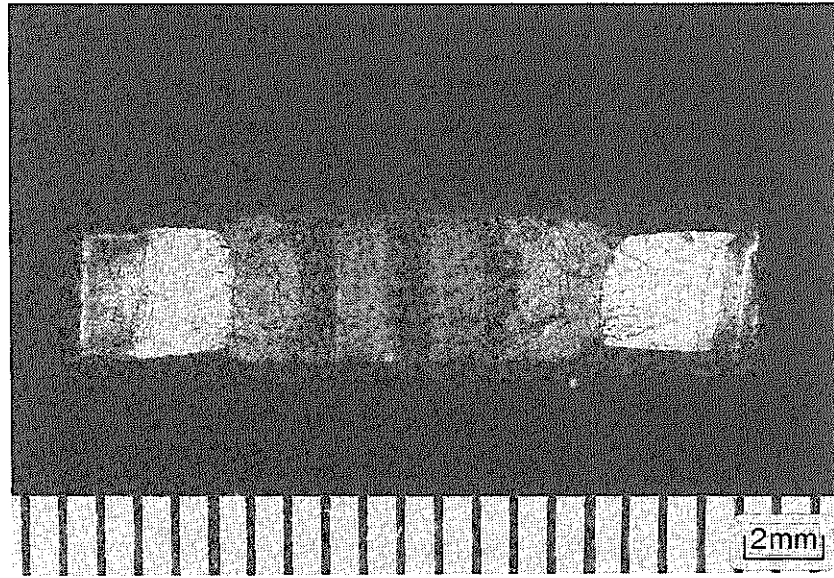


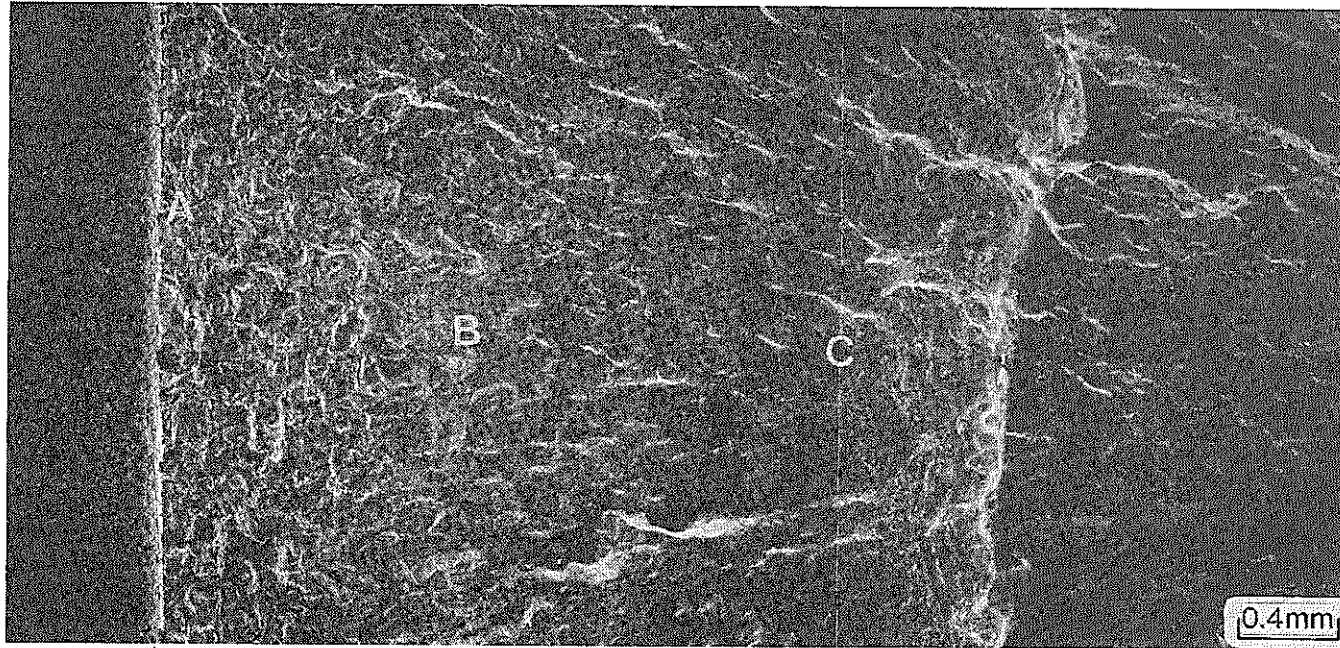
Photo. 6. 9 Observation of fracture surface by SEM (3).

Fracture surface



Mod. 9Cr-1Mo steel, 500°C
 $\Delta\sigma_g=44\text{kgf/mm}^2$, $R=-1$
 $t_H=10\text{min}$

SEM Fractographs



| Initial notch | ← Creep-fatigue failure → | ← Rapid failure →

Photo 6 10. Observation of fracture surface by SEM (1)

A

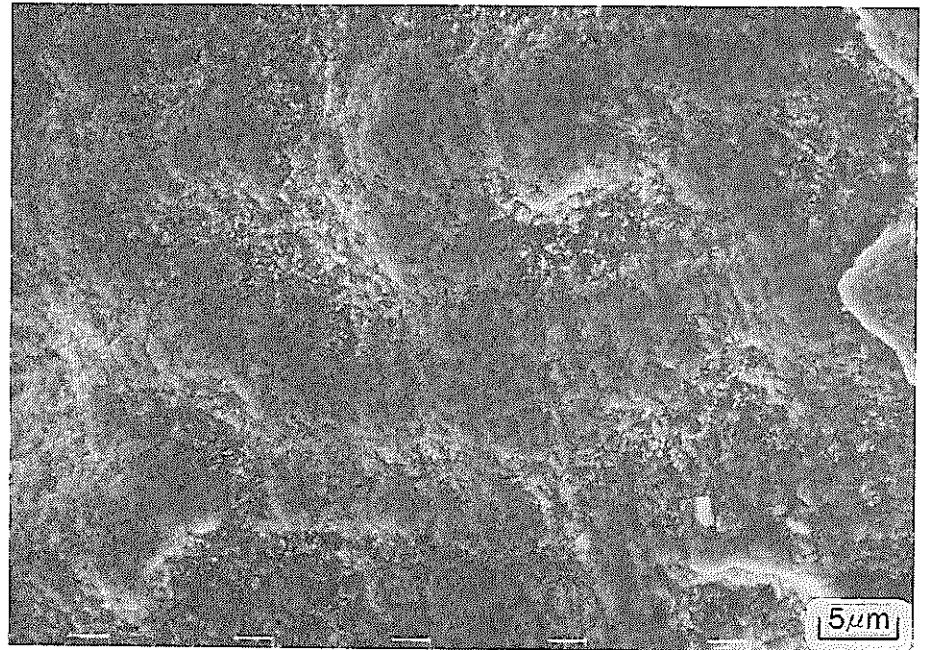
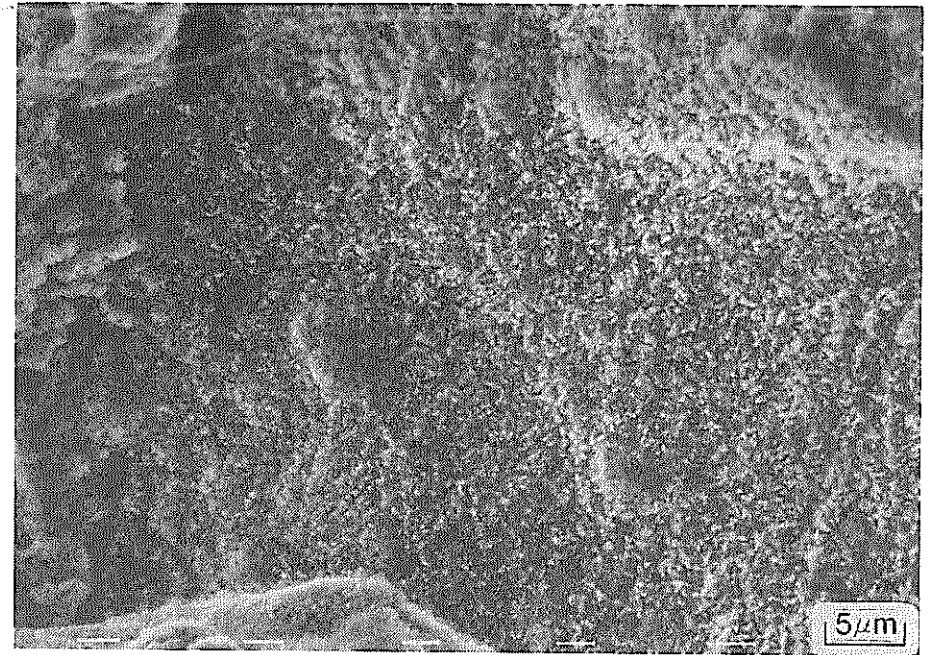
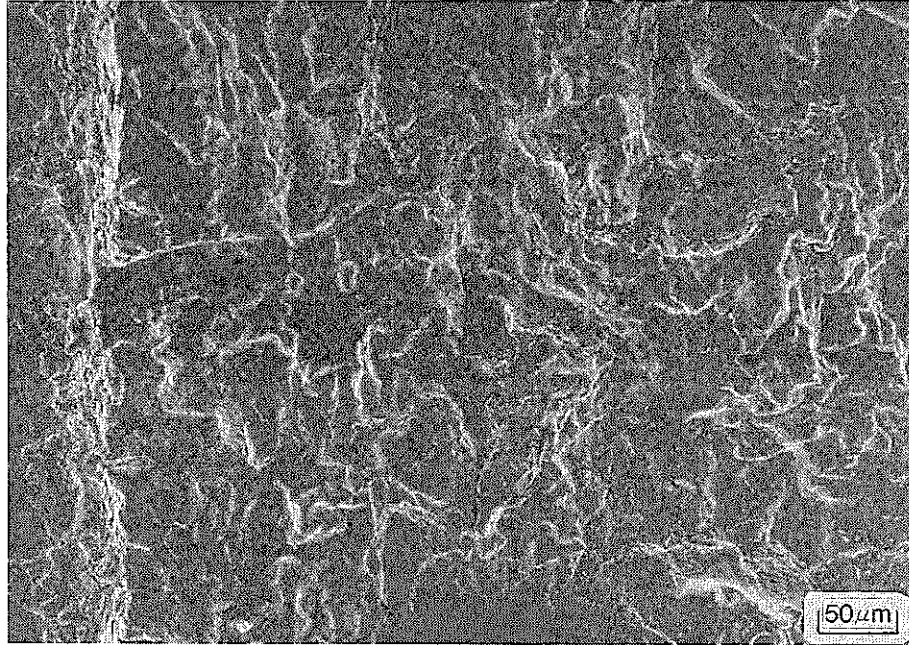
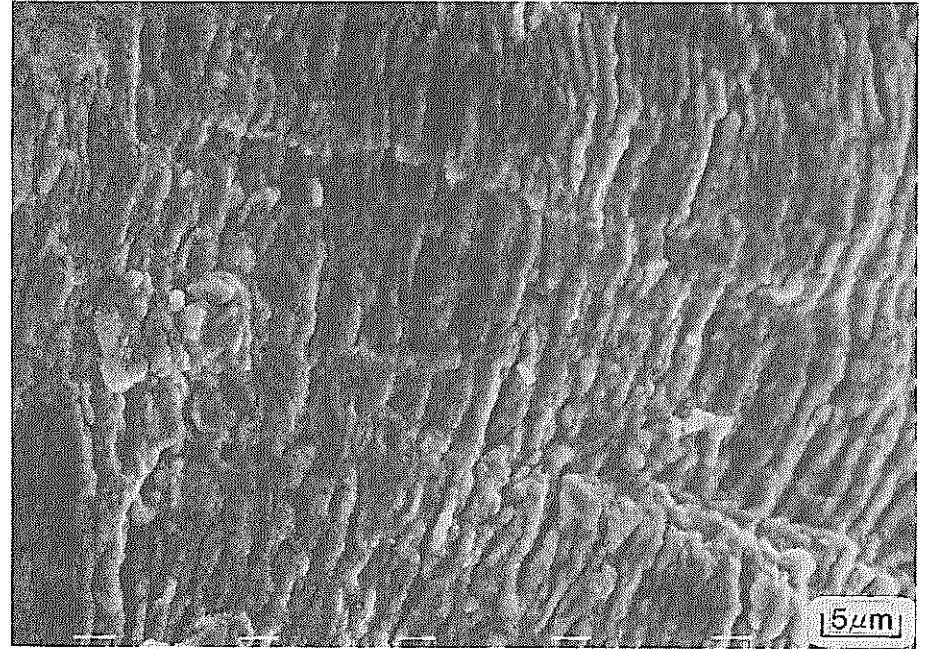
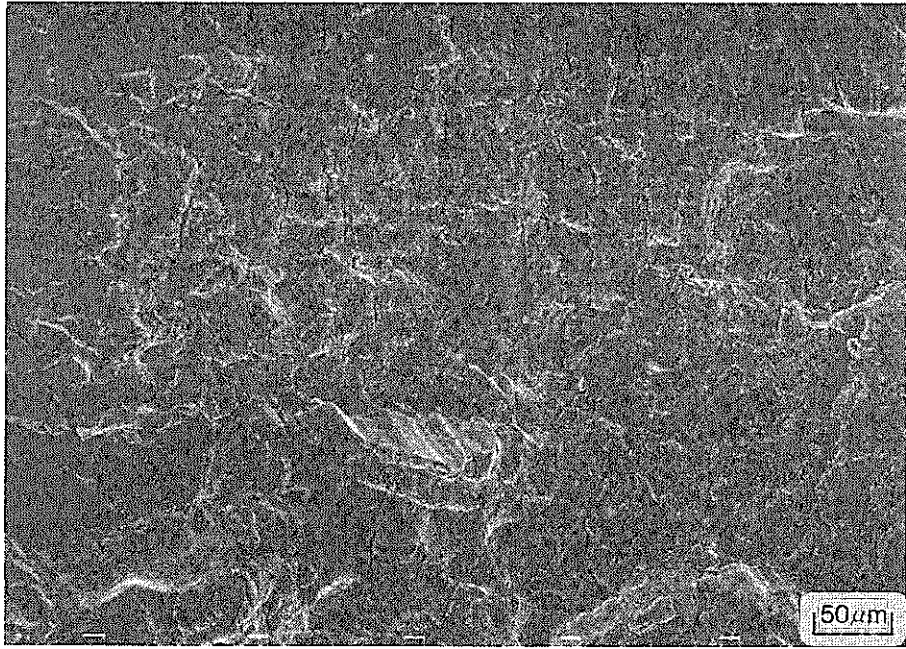


Photo. 6.11 Observation of fracture surface by SEM (2).

B



— 85 —

C

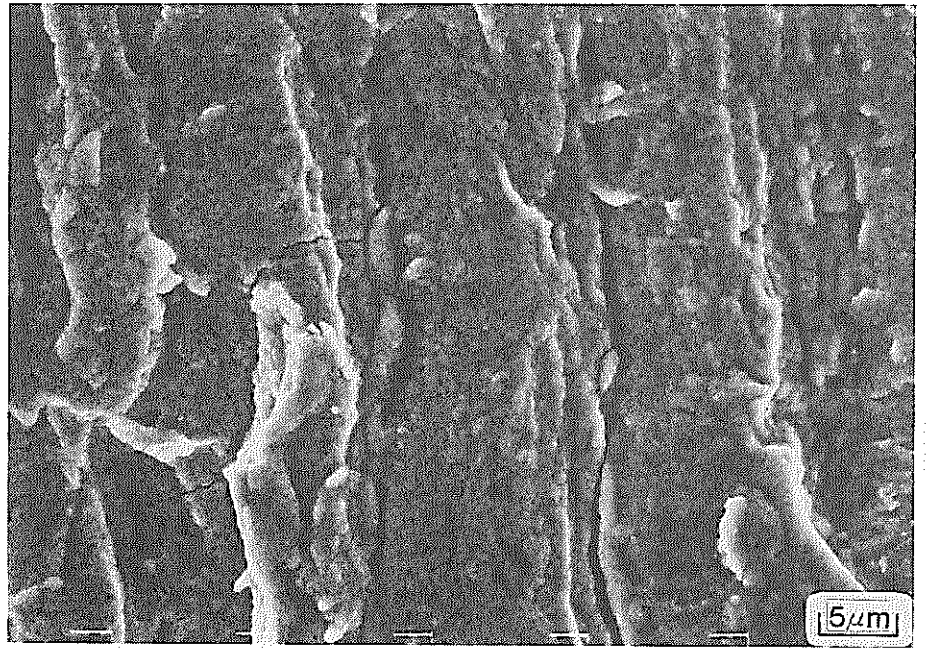
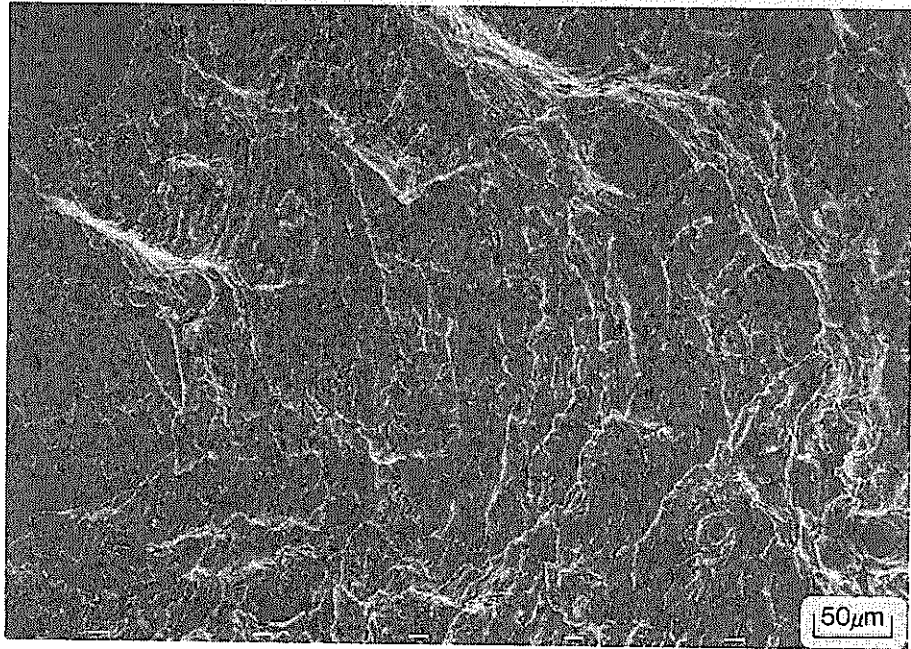
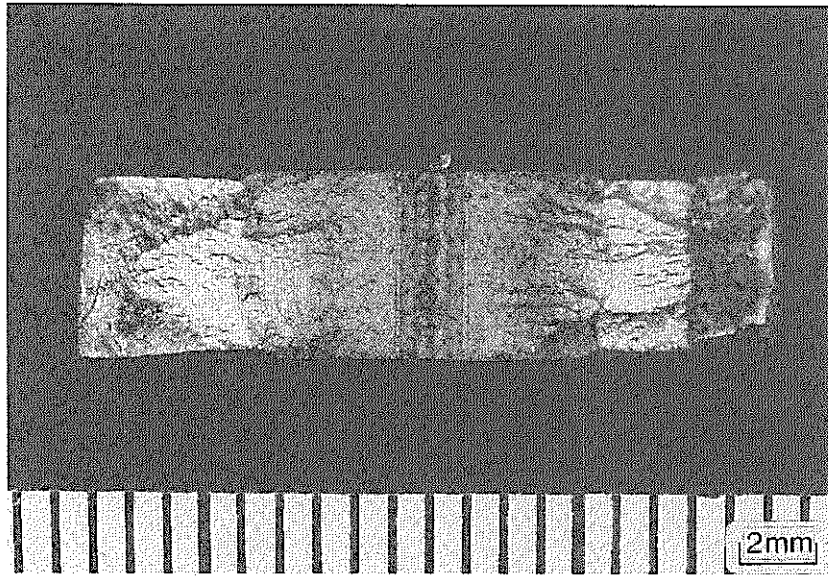
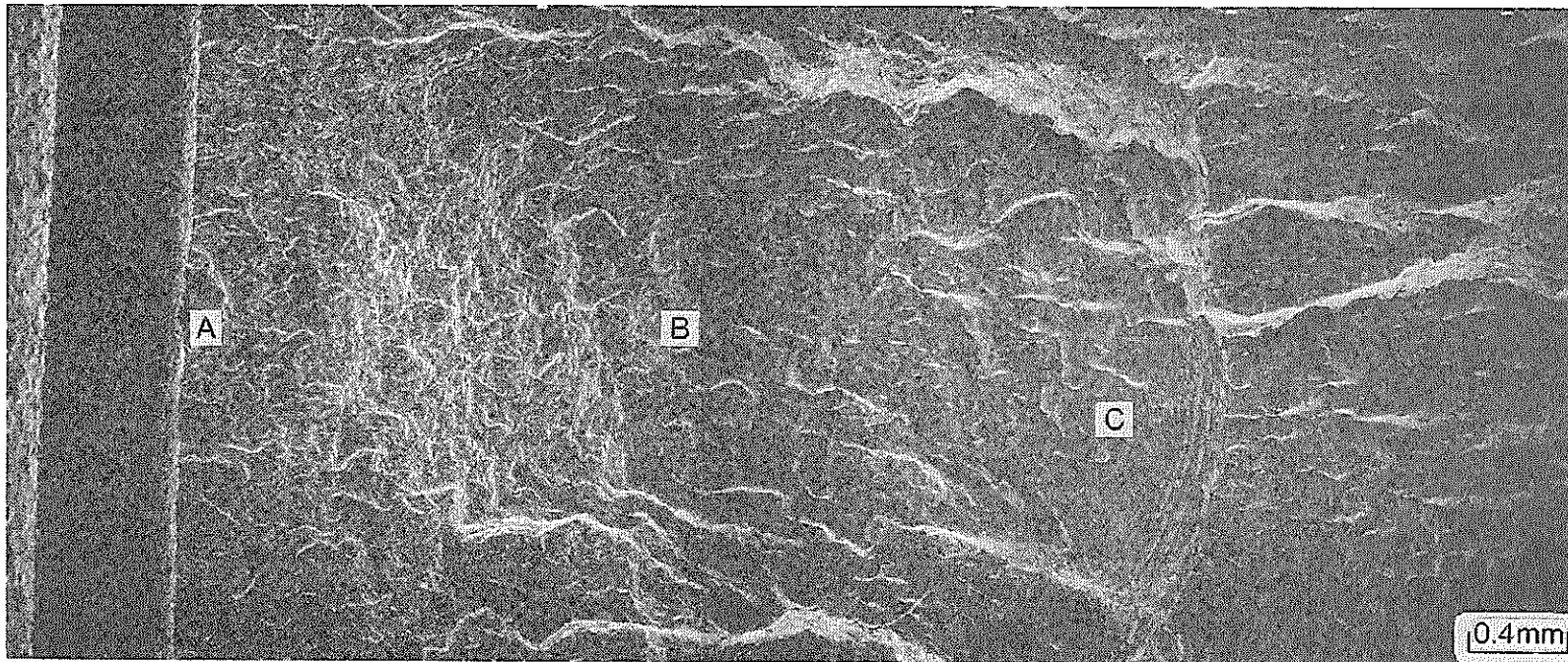


Photo. 6.12 Observation of fracture surface by SEM (2)



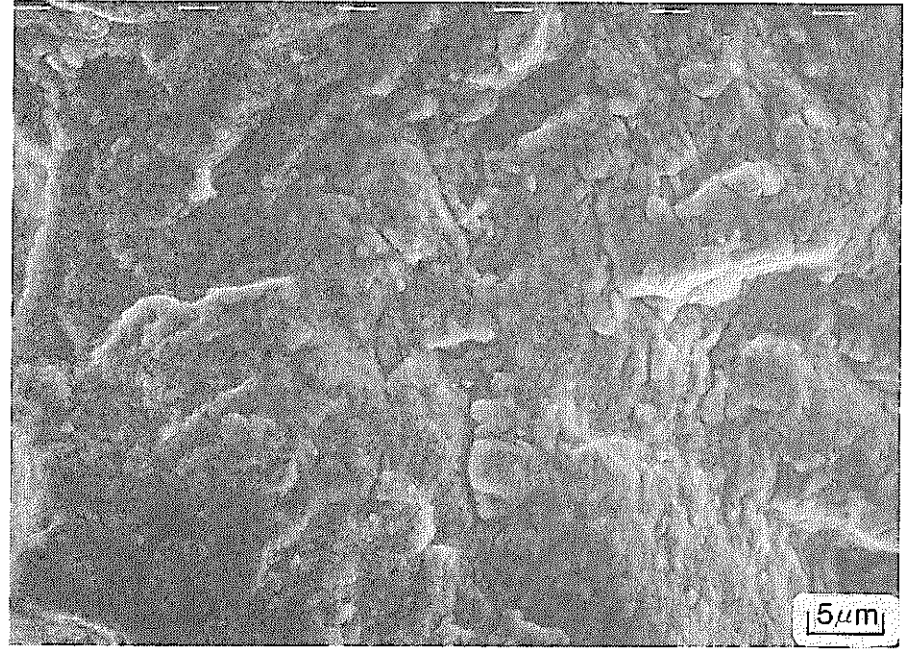
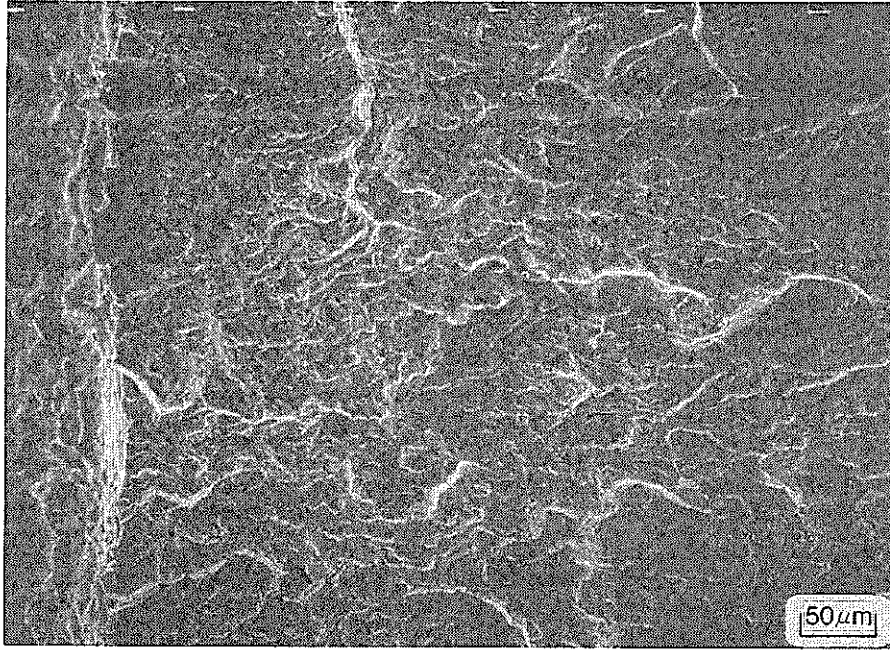
Mod. 9Cr-1Mo Weld metal, 500°C
 $\Delta\sigma_g=44\text{kgf/mm}^2$, $R=-1$
 $t_H=1\text{min}$



Initial notch ———> creep-Fatigue failure ———> Rapid failure

Photo. 6.13 Observation of fracture surface by SEM (1).

A



— 87 —
B

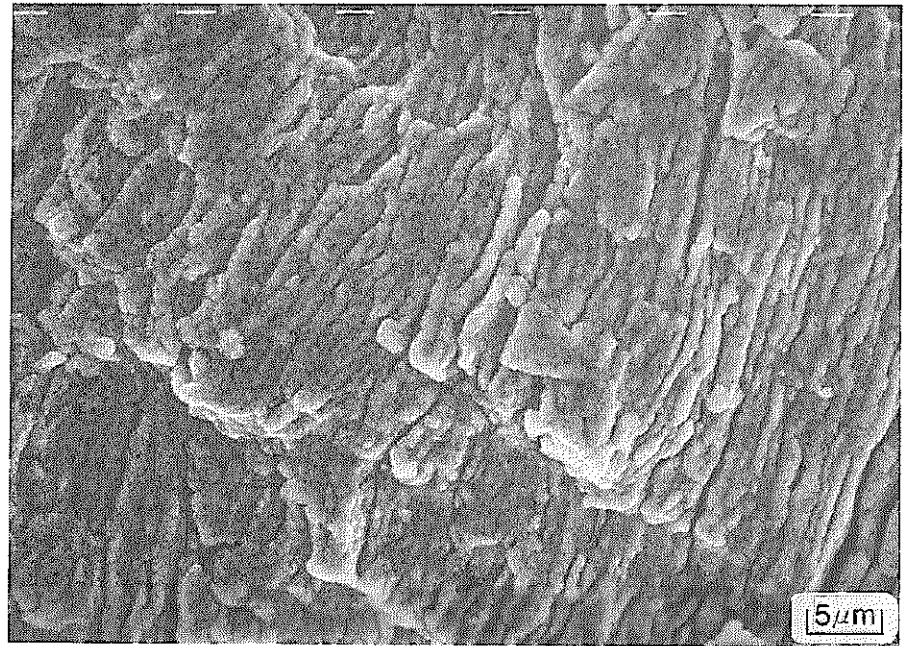
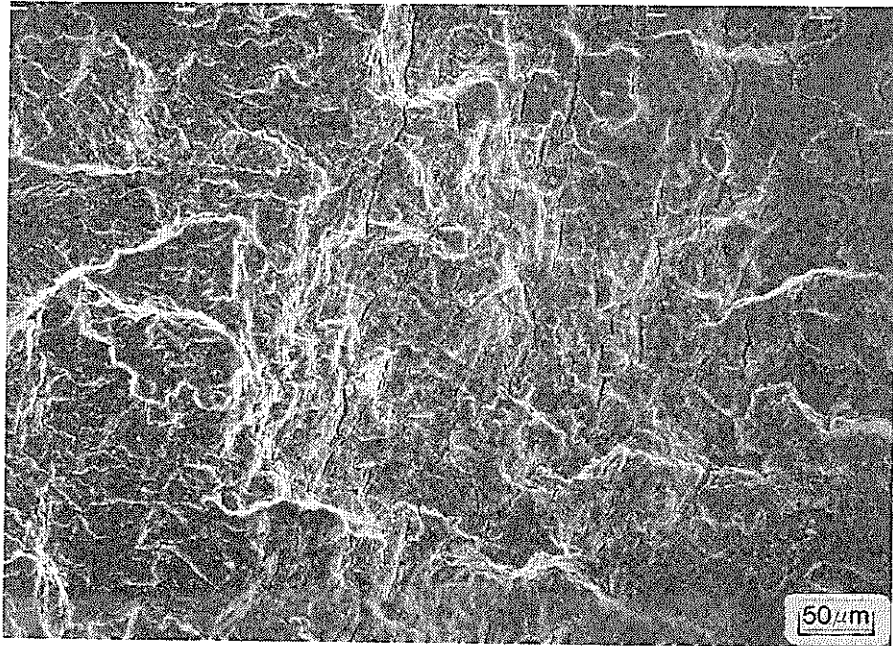


Photo. 6.14 Observation of fracture surface by SEM (2).

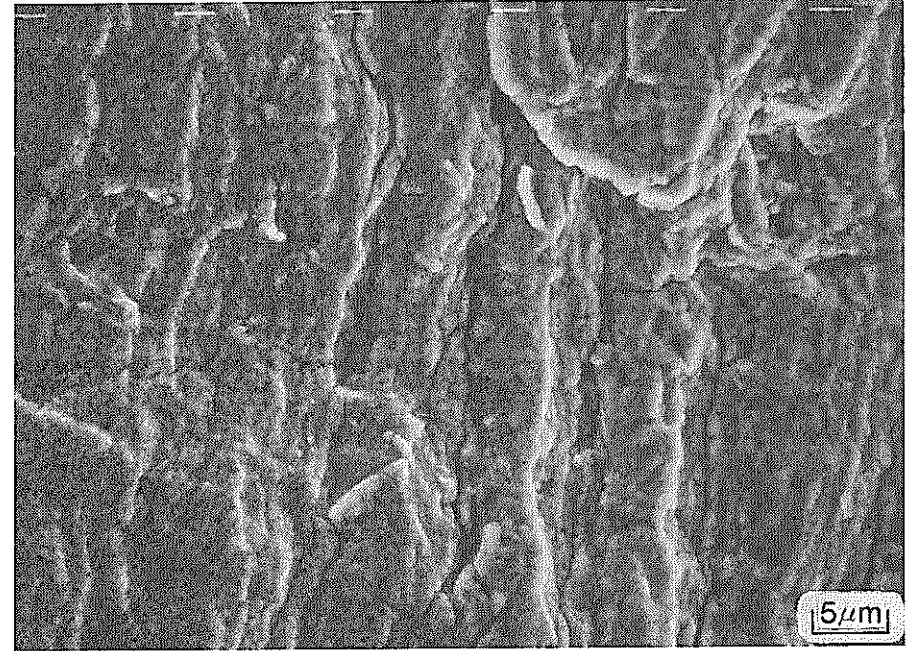
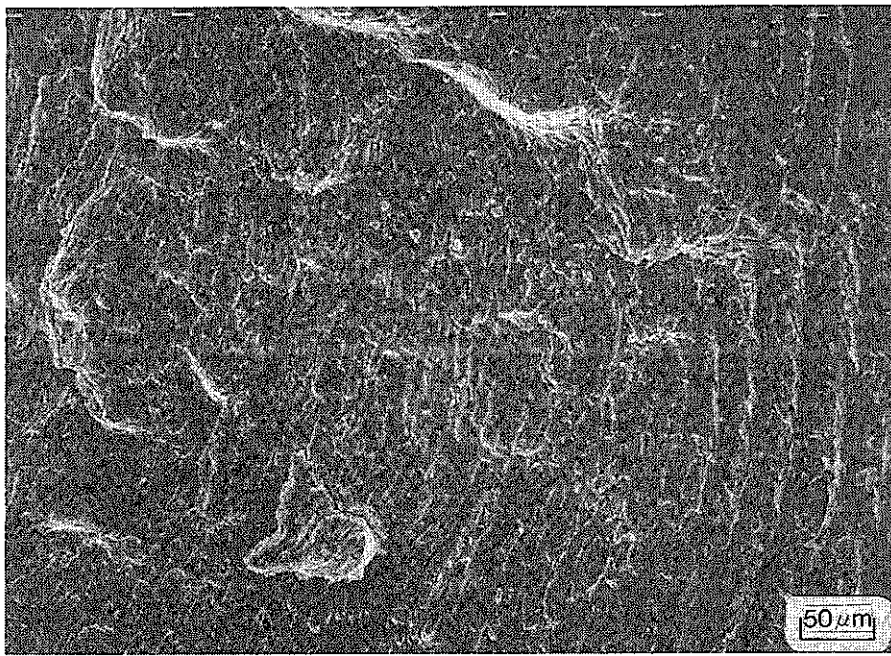
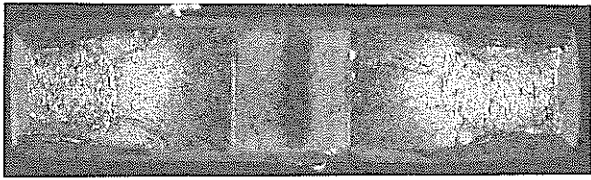
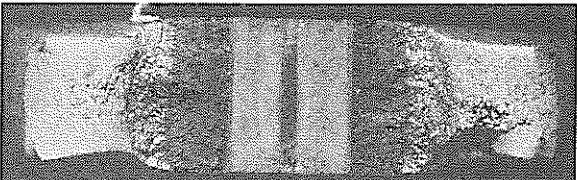
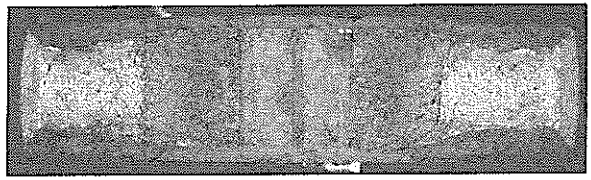
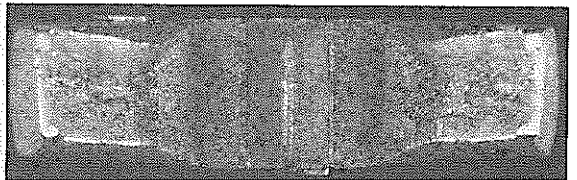
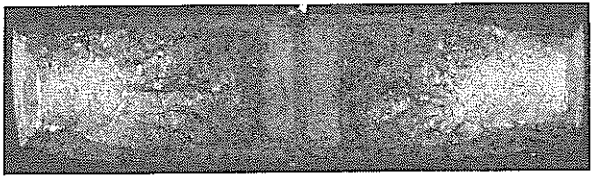
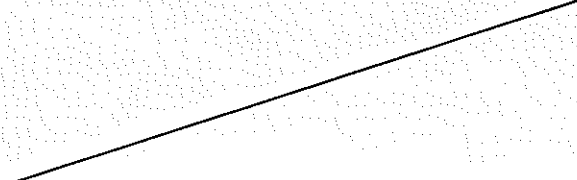
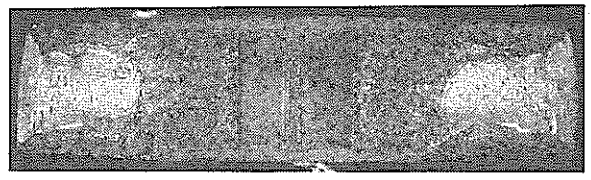


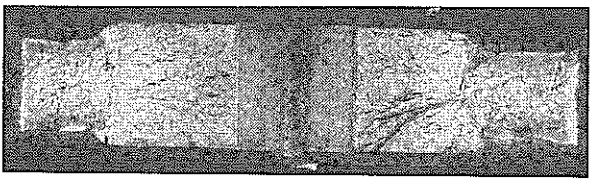
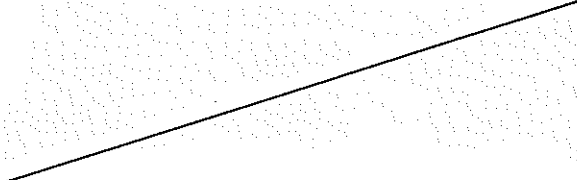
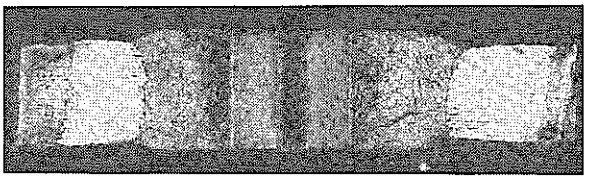
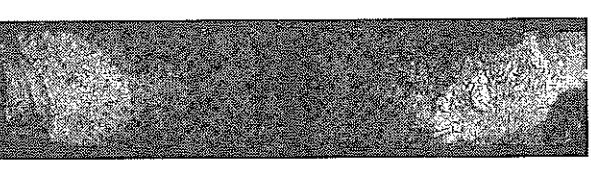
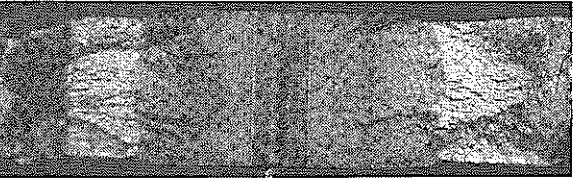
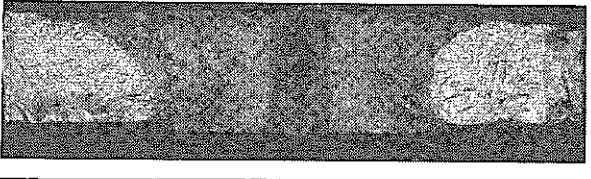
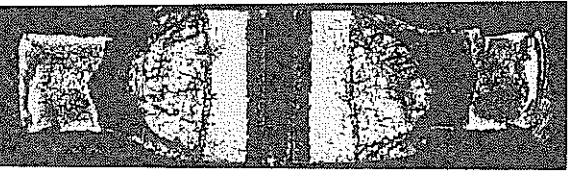
Photo. 6.15 Observation of fracture surface by SEM (3).

2¼Cr-1Mo Steel

	t _H (min)	with sidegroove	without sidegroove
Base metal	1		
	10		
Weld metal	1		
	10		

2mm

Mod. 9Cr-1Mo Steel

	t _H (min)	with sidegroove	without sidegroove
Base metal	1		
	10		
Weld metal	1		
	10		

2mm

Photo 6.16 Effect of the side groove on the shape of crack front.

7. Mod.9Cr-1Mo鋼のクリープき裂進展挙動試験

7. Mod. 9 Cr-1 Moのクリープき裂進展挙動試験

7.1 目的

母材および溶接金属のクリープき裂伝ば特性を明らかにし、き裂伝ば速度を支配するパラメータについて検討する。

7.2 試験方法

供試材の化学成分、熱処理および確性試験結果については、既にTable 3.2に示した。また、溶接施工条件についても、Table 3.3に示した。

試験装置の概要をFig. 7.1に示す。き裂長さは電気ポテンシャル法で測定した。試験片の端から直流20Aを流し、切欠の上下端1mmのところを点溶接したリード線により電圧を測定した。電圧から、き裂長さを導出するためにジョンソンの式を用いた。また、き裂伝ば速度を整理するためのパラメータを求めるために、切欠の上下端5mmのき裂開口変位を測定した。

試験片の形状をFig. 7.2に示す。長さ4mmの初期切欠を放電加工した。また、トンネリング防止とき裂面への変形の集中を考えて、サイドグループを加工した。

き裂伝ば速度を整理するためのパラメータとしては、次式で示すように、修正J積分 J' を用いた。

$$J' = [(\alpha - 1) / (\alpha + 1)] \sigma_{net} \dot{\delta}$$

ここで、 α : Norton則における応力指数、

σ_{net} : 正味断面応力、 $\dot{\delta}$: き裂開口変位速度

7.3 試験結果および考察

母材と溶接金属についての、き裂長さと試験時間の関係をFig. 7.3に示す。同様に、き裂伝ば速度と J' の関係をFig. 7.4に示す。母材と溶接金属のき裂伝ば則はよく一致する。

Table 7.1 Results of creep crack propagation test for Mod.9Cr-1Mo steel.

Material	Temp. (°C)	$\sigma_{net.0}$ (kgf/mm ²)	t_r (h)	a_0 (mm)	a_f (mm)	sp. No.
Base metal	500	38.0	474	2.020	4.553	9CR104
		40.2	272	※2.609	4.959	9CR105
		36.83	982.1	※2.675	5.230	9CR106
Weld metal		39.9	262	※1.375	3.864	9CR146
		39.45	516.9	1.802	4.635	9CR147

※予き裂導入

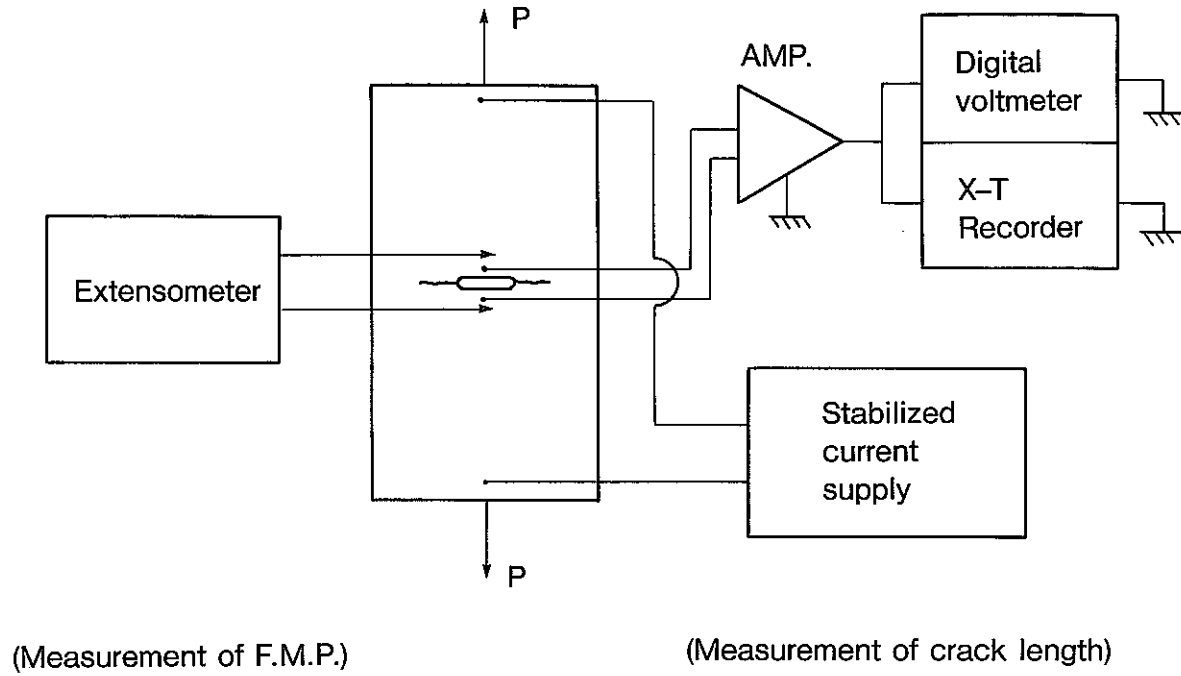


Fig. 7.1 Testing apparatus for creep crack growth .

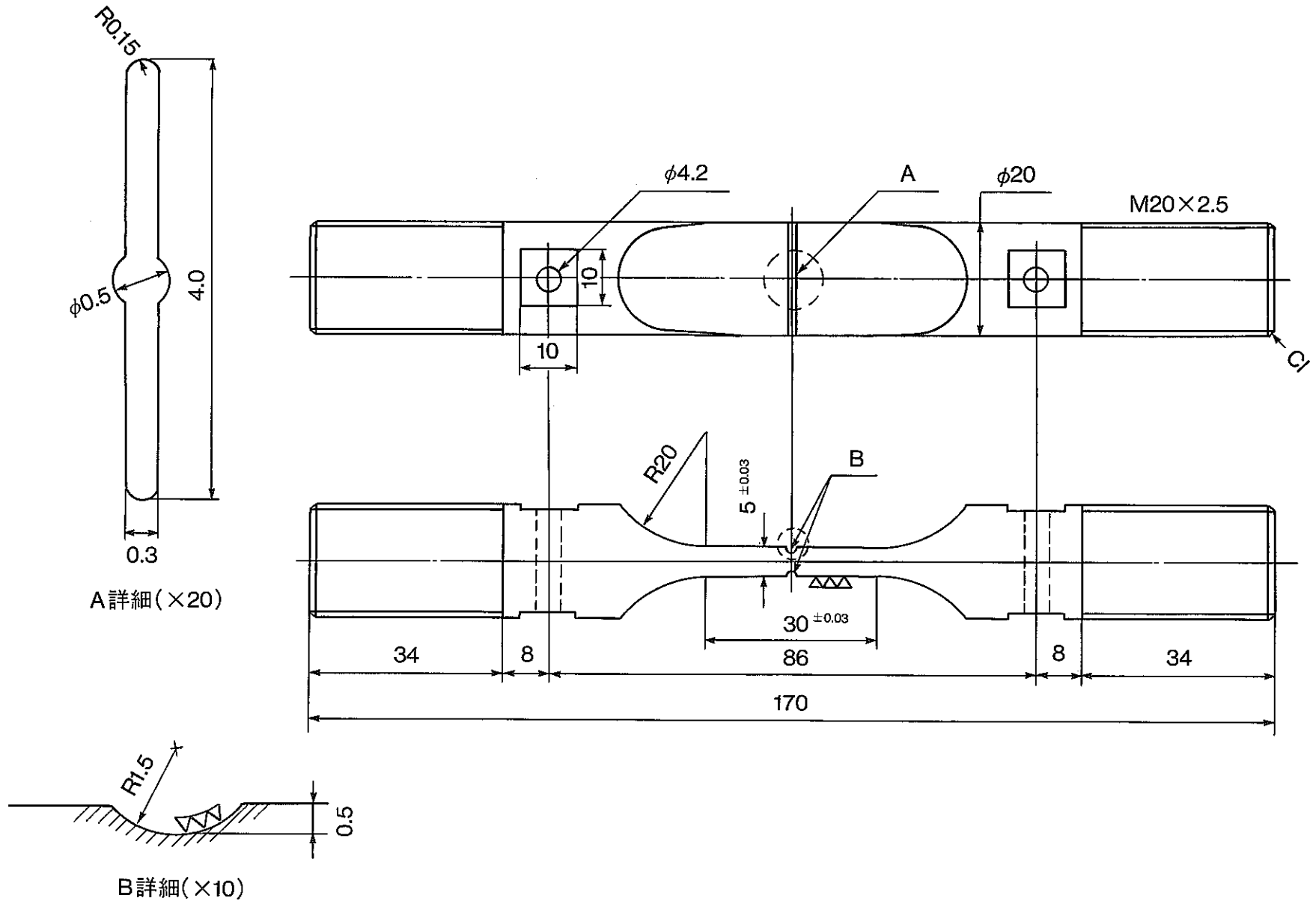


Fig. 7.2 Specimen configurations for creep crack propagation test.

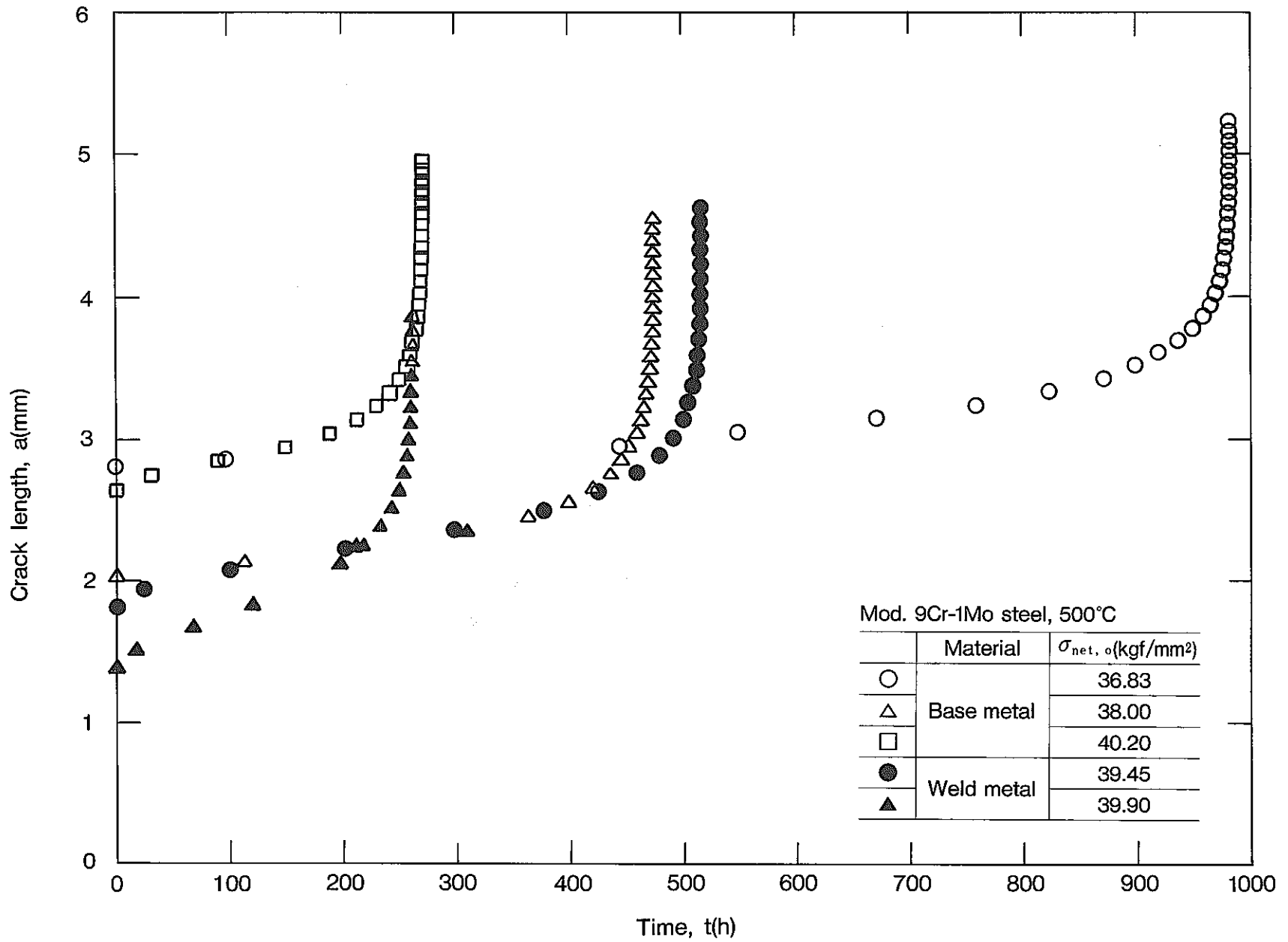


Fig. 7.3 Relation between crack length and time.

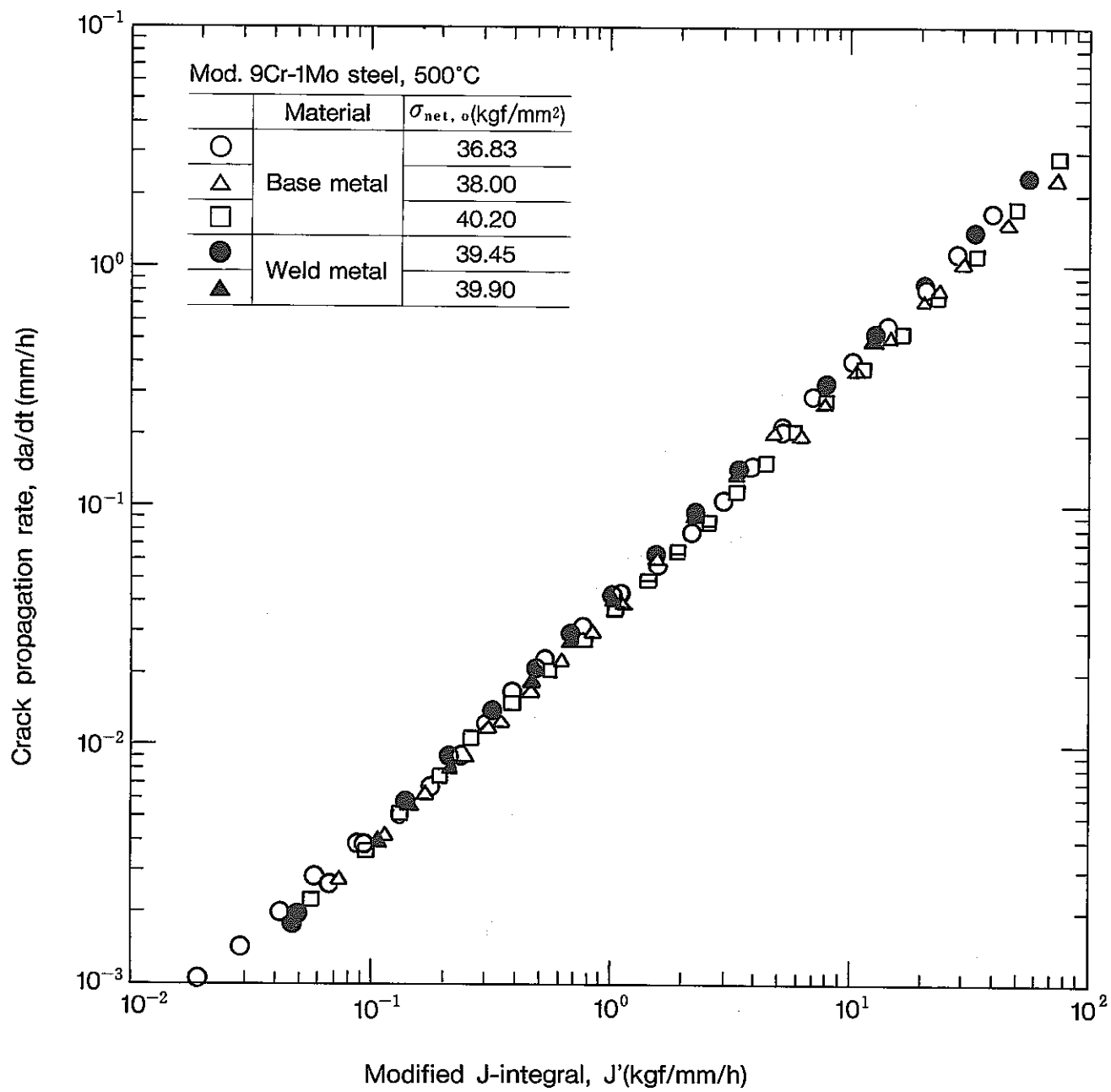


Fig. 7. 4 Relation between da/dt and J'.

8. 結 言

8. 結 言

これまでの研究によって、 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼の高温におけるき裂伝ばは繰返し数依存型と時間依存型に大別され、それぞれのき裂伝ば速度は ΔJ と $\Delta J'$ によって整理できることが明らかになった。

本研究においては、Mod. 9 Cr-1 Mo鋼のき裂伝ば実験を行い、 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼と同様に ΔJ と J' が有効なパラメータであることを明らかにした。

また、 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼においては、時効処理材やクリープ損傷材および疲労損傷材のき裂伝ば実験を行い、これらの材料のき裂伝ば則が、ほぼ処女材のき裂伝ば則と等しいことを明らかにした。