

# 片状、CV、球状黒鉛鑄鉄の高温低サイクル疲労強度

## High Temperature Low Cycle Fatigue Strength of Flake, Compacted Vermicular and Spheroidal Graphite Cast Iron

式 田 昌 弘  
Masahiro Shikida

In order to study the characteristics of low cycle fatigue strength of flake, compacted vermicular and spheroidal graphite cast iron at high temperature (723K) in air, strain-controlled fatigue tests were carried out on the smooth bar specimens.

The results showed that the fatigue life of the flake graphite cast iron was shorter than those of other two types cast iron because its cracks initiation occurred at early stage in the strain cycles.

SEM observations were conducted on fracture surfaces of three types failed specimens. At high temperature, intergranular fracture pattern was characteristically observed on most parts of the fatigue fracture surface of spheroidal graphite cast iron.

### 1. 緒 言

鑄鉄はこれまで強度を余り必要としない部分に使用されてきたが、昭和24年に球状黒鉛鑄鉄 (FCD) が発明されてから強度部材としても使用されるようになり、昭和40年代に入ってその傾向が強くなった。このため、FCD を中心に鑄鉄の疲労強度研究が各所で行われるようになり、多くの研究報告がなされている。しかし、FCD は片状黒鉛鑄鉄 (FC) に較べて熱伝導性が著しく低下するため高温強度部材として使用されることは少なく、高温部分には今も FC が多用されている。近年になって、FC と FCD の中間の性質をもつ CV 黒鉛鑄鉄 (FCV) が開発され、第三の鑄鉄として大きな期待を集めている。それは、FCV は低級の FCD と同等の強度を有しながら、FC に近い熱伝導性を有するため、高温機能材料として有効に使用出来るからである<sup>(2)</sup>。FCV は開発されて間のない新しい鑄鉄であるため、その疲労研究は少なく、特に高温疲労特性や熱疲労特性はほとんど明らかにされていない<sup>(1)</sup>。

本研究は FCV の高温における低サイクル疲労強度を明らかにすることを主たる目的とするが、高温低サイクル疲労強度に及ぼす黒鉛形状の影響を知る上からも比較材料としての FC、FCD についても同様の実験を行った。

### 2. 供試材料および試験片

本研究に用いた材料は黒鉛形状の異なる三種類の鑄鉄 FC、FCV および FCD で、いずれ

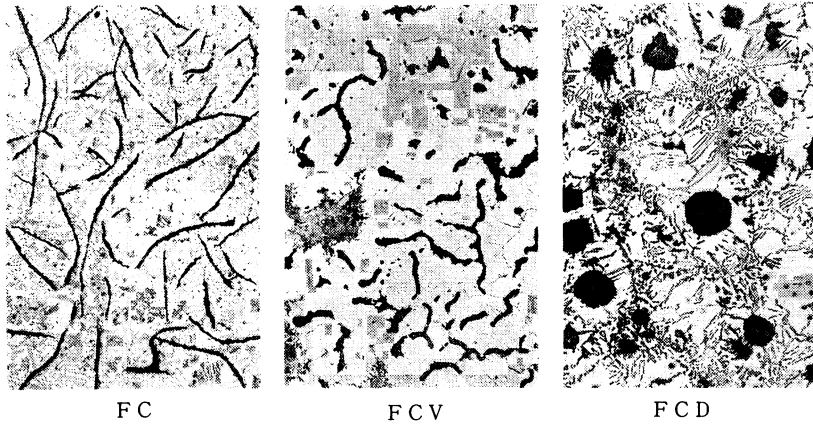


Fig. 1 Microstructures of materials tested.

Table 1 Chemical compositions of materials tested. (wt %)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni
FC	3.219	2.222	0.313	0.025	0.008	0.000	0.028
FCV	3.740	2.392	0.289	0.029	0.009	0.009	0.025
FCD	3.587	2.846	0.273	0.028	0.004	0.000	0.025

Table 2 Mechanical properties of materials tested under monotonic tensile loading.

	Tesile strength $\sigma_b$ Kgf/mm <sup>2</sup>	Elongation $\delta$ %	Brinell hardness $H_B$
FC	19.9	< 1.0	149
FCV	38.6	4.7	163
FCD	50.0	19.2	170

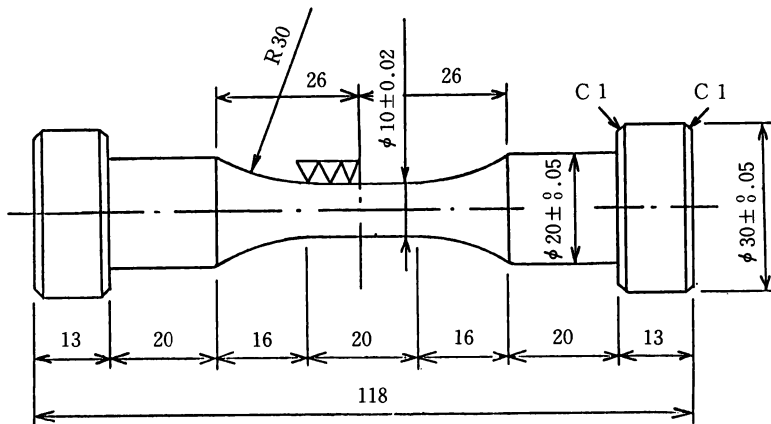


Fig. 2 Shape and dimension of test specimen.

も基地組織は少量のパーライトが混ったフェライト組織であり、Fig. 1 に光学顕微鏡による組織写真、Table 1 に化学成分を示す。カーボン量は3.2~3.7%近くになるように、またシリコン、マンガン量についても三種類の材料でそろえるように留意した。素材はφ35×300mmの丸棒として鑄放し状態で供給されたので、これに850℃×3 hr 後炉冷の焼鈍を施した。Table 2 に焼鈍後の供試材料の機械的性質を示す。

試験片は試験部直径10mm、平行部の長さ20mmのフランジ形丸棒試験片であり、素材より Fig. 2 に示す形状寸法に機械加工した。

### 3. 実験装置および実験方法

低サイクル疲労試験は容量5トンのマイクロコンピュータ (NEC PC-9801F) 制御の電気油圧サーボ式疲労試験機を用いて行った。この疲労試験機は引張、圧縮の任意波形の負荷を与えることができるもので、アクチュエータに取付けられたサーボバルブに電気信号を送り、それによってアクチュエータに送られる高圧油の流量と流入方向を変えて試験片に繰返し荷重波形を加えるようになっている。また、マイクロコンピュータは試験機の制御と共に試験波形を発生させる関数発生機として用いる他、実験データの記録と処理にも使用した。

加熱装置には Fig. 3 に示す三分割電気抵抗加熱炉を用いた。この加熱炉は図の上部より①、

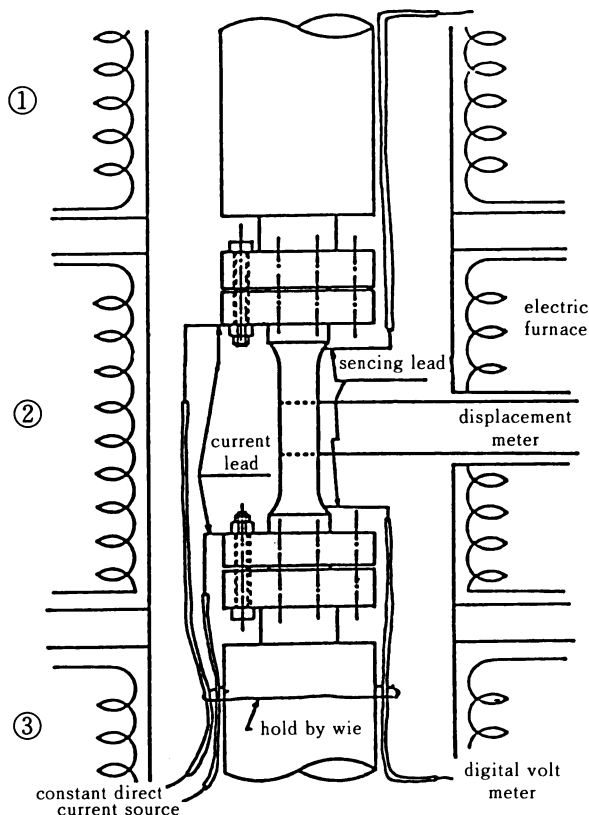


Fig. 3 Electric resistance heating furnace and fitting positions of lead wires on D. C. electrical potential method.

②、③の三段構成となり、従って3本のカンタル線を使っている。炉内温度を一定に保つため、真中②のカンタル線の電流量のみを温度調節器によって制御することにし、上下2本のカンタル線には常に6 A一定の電流を流している。温度の検出にはアルメル・クロメル熱電対を2組用い、一つはデジタル・サーモメータ(試験温度測定)用、他はサーモ・コントローラ用である。

本実験では試験片のき裂発生状況を知るために直流電位差法(ポテンシャル・ドロップ法)を用いた。これは試験片に定電流を流し、標点間の電圧変化を測定することによってき裂発生繰返し数を知ることが出来るもので、き裂が発生すると試験片の電気抵抗が大きくなりオームの法則にもとづき電圧が上昇する原理による。実際にはFig. 3に示すように、試験片のチャック・ボルトに電気供給リード線(銅線)を取付け、実験開始と同時に20 A一定の電流を流した。また電圧測定にあたっては、標点を試験片上下の肩部とし、ここに取付けたセンシングリード線(ニッケル線)をデジタル・ボルトメータに接続して電圧を計り、その信号はオペアンプを通してマイクロコンピュータに記録させるようにした。なお、熱電対を含む各リード線は実験中にはずれないように試験機センターシャットに針金で縛りつけた。

実験は全ひずみ制御とし、大気中にて温度  $T = 723\text{ K}$ 、ひずみ速度  $\dot{\epsilon} = 0.1\%/sec$  の下で引張・圧縮の完全両振り三角波を加えた。全ひずみ範囲は、FCについては  $\Delta\epsilon = 0.7, 0.5, 0.3, 0.2\%$ 、FCVとFCDについては  $\Delta\epsilon = 1.0, 0.7, 0.5, 0.3\%$  とした。Fig. 4は疲労試験機の制御ユニットを示し、主として差動変位計、サーボアンプ、ロードセルアンプ、振幅調整つまみ、平均ひずみ設定つまみ、制御信号切換えスイッチ、荷重・ポテンシャル切換えスイッチ、油圧制御スイッチによって構成される。

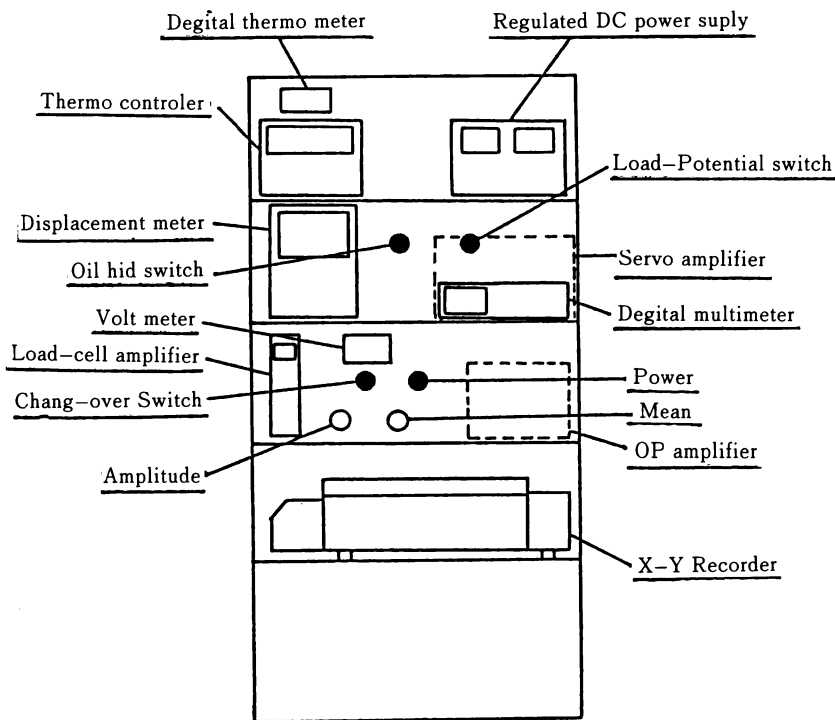


Fig. 4 Control-unit of fatigue testing apparatus.

試験片の伸縮を計測する高温伸び計は加熱炉の側面の一部に穴をあけて取付けた。伸び計の2つの先端はコイルバネによって試験部標点（標点間距離15mm）に押し付けられ、その変位は板バネをてこの支点として差動変位計に1/2倍となって検出される。

差動変位計、A/D コンバータ、D/A コンバータ、サーボアンプ、ロードセルアンプ、マイクロコンピュータなどの機器は電源を入れてからしばらくしないと正確に作動しないことがあり、このため約2時間のウォーミング・アップを行った。これに対応して、加熱炉の昇温時間は  $T = 723\text{K}$  まで1時間かけて行い、温度上昇後の拘熱時間としてさらに1時間放置した。

破損繰返し数  $N_f$  は試験片が分離破断するまで、もしくは最大引張荷重が定常状態における荷重の3/4になるまでの繰返し数とした。実験中、コンピュータのラムディスクには試験片の荷重、ひずみ、標点間電位差の三つのデータがプログラムで定められた繰返し数になるとバイナリー形式で記録される。実験終了後、ラムディスクに収録されたデータはコンピュータによってアスキー形式に変換され、プロッタにより自動作図させた。

#### 4. 実験結果および考察

Fig. 5 は三種類の供試材料の疲労寿命線図を示す。疲労寿命に対する黒鉛形状の影響が大きく現われており、FCD の寿命が最も高く、FC が最も低く、FCV は FC と FCD の中央値よりさらに低い。

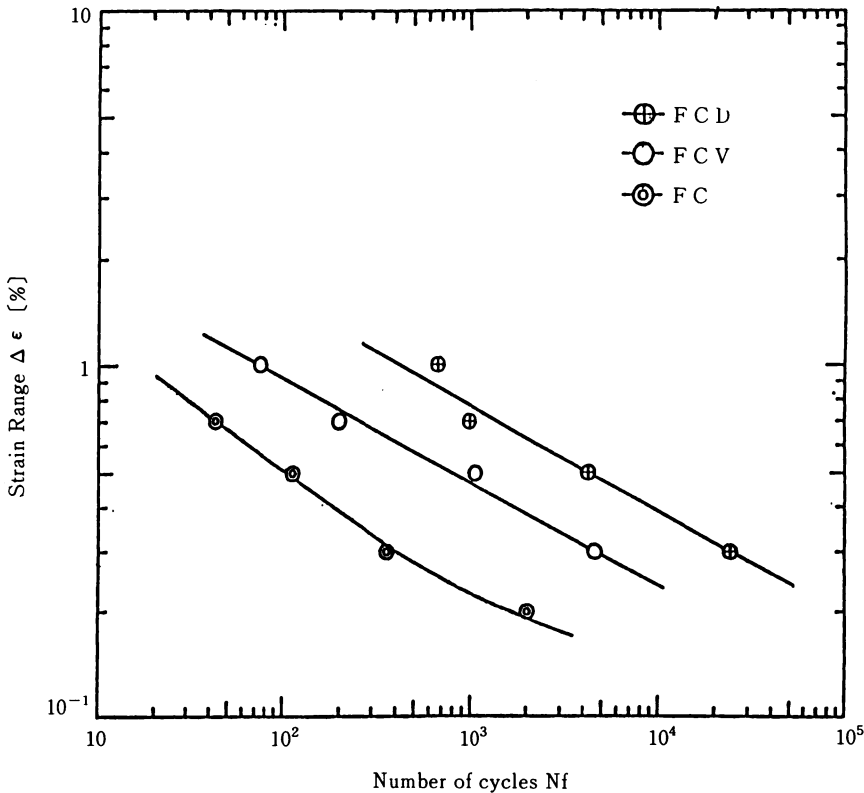


Fig. 5 Fatigue life diagrams.

Fig. 6 は三種類の材料について  $\Delta \epsilon = 0.5\%$  のもとでの直流電位差法による試験片標点間の最大電圧  $V_{max}$  と最小電圧  $V_{min}$  の変化 (P・D 値変化) を繰返し数に対して示したものである。図のように、FC では  $\Delta \epsilon = 0.2\%$  (変化なし) を除いて繰返し数に伴って増加傾向が認められ、 $V_{max}$  と  $V_{min}$  の差も大きく現われた。また、FCV では  $V_{max}$  と  $V_{min}$  の差は小さく、いずれの実験においても殆ど変化がみられなかったのに対し、FCD では  $\Delta \epsilon = 1.0\%$  (変化なし) を除いてむしろ繰返し数に伴う減少がみられた。FC で P・D 値の  $V_{max}$  と  $V_{min}$  の差が大きく、しかも繰返し数に伴って漸増するのは、局部的応力集中を受ける黒鉛先端において繰返し数の小さい時期からマイクロ・クラックが発生することによると考えられる。一方、FCD では減少傾向となるが、荷重制御下での疲労試験においては、繰返し数に伴う変形が生ずる場合には P・D 値は漸減するといわれており、比較的延性の高い FCD ではこれに相当する現象が材料内部で起っていることも考えられる。

Fig. 7 は十分な繰返し後の安定した応力-ひずみ線図 (ヒステリシスループ) を示し、破損繰返し数  $N_f$  の約 1/2 におけるデータである。FCD では応力、ひずみ共に両振りに近く中心点に関して対称な形のループとなるが、FCV ではループの中心点が引張ひずみ側へずれたり形状が少しくずれたものとなる。また、FC においては圧縮応力に較べて引張応力はかなり低く、 $\Delta \epsilon = 0.7\%$  の条件下では引張応力の著るしい低下が認められるが、これは前述のごとく、繰返し数の小さい時期からのマイクロ・クラックの発生に起因するもので、この挙動は圧縮側では起らない。

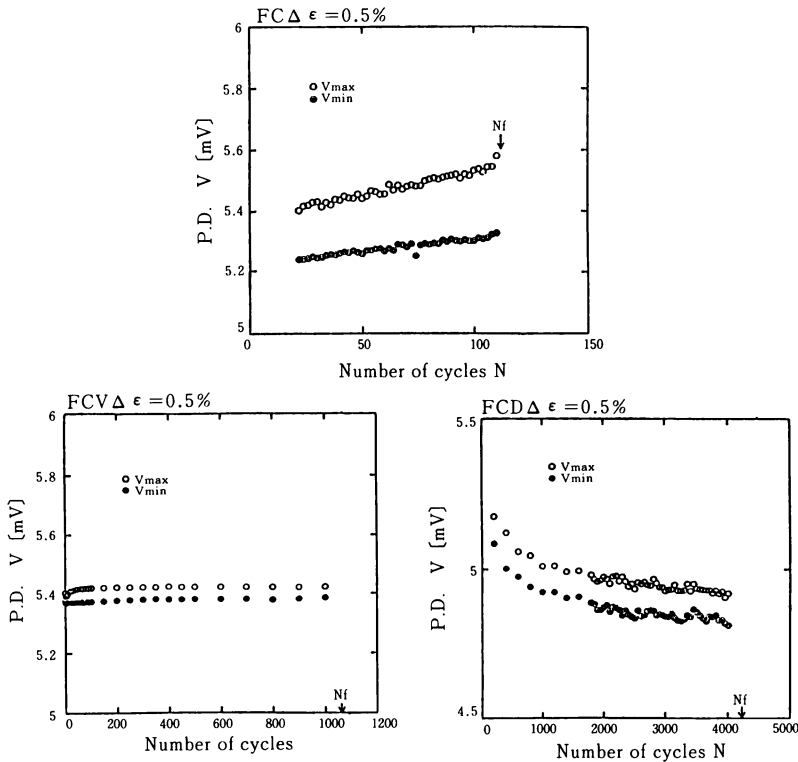


Fig. 6 Change in max. potential and min. potential on D. C. electrical potential method.

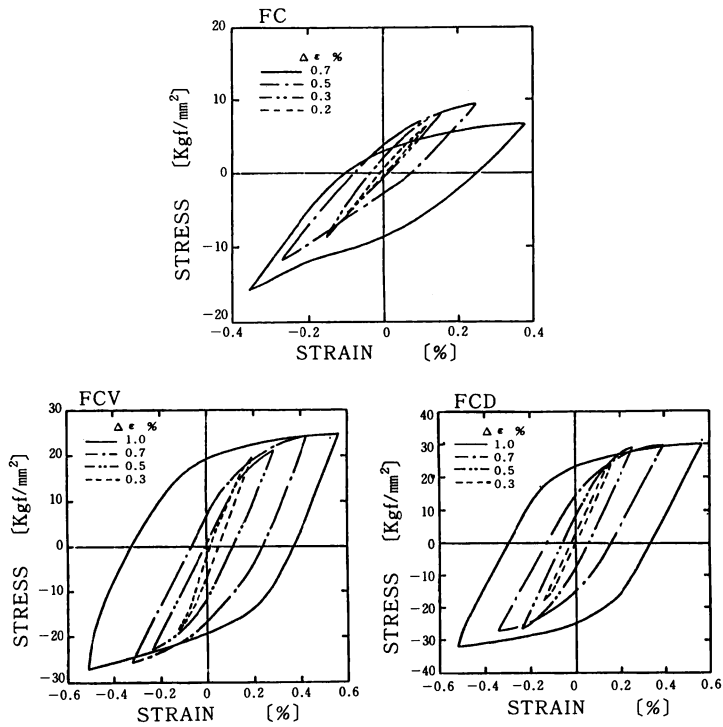


Fig. 7 Cyclic stress—strain diagrams (hysteresis loops on LCF).

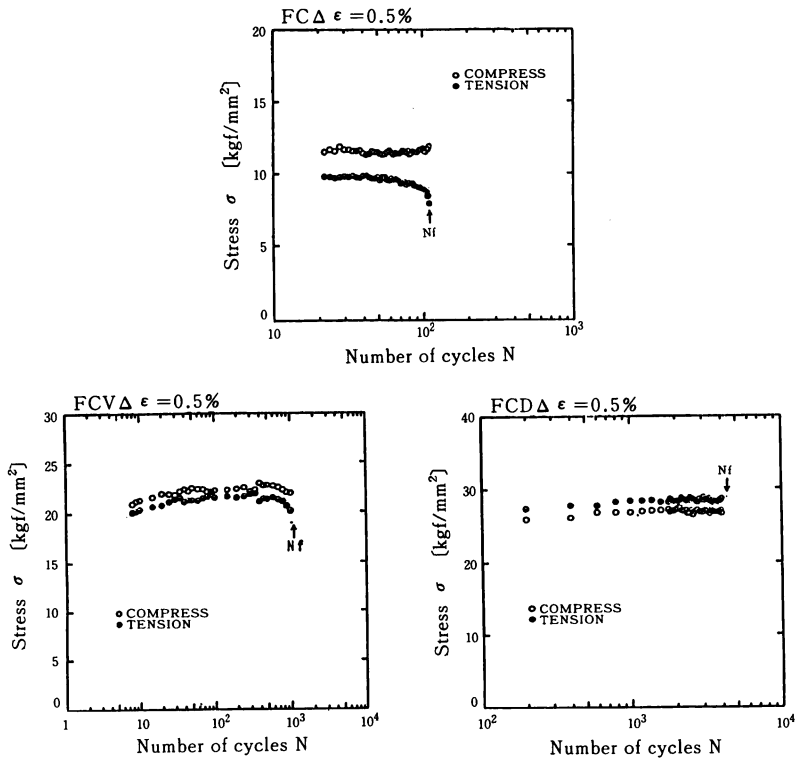


Fig. 8 Change in max. tensile stress and max. compressive stress.

Fig. 8 は  $\Delta \epsilon = 0.5\%$  の条件下での最大引張応力と最大圧縮応力の繰返し数に伴う変化を示したものである。FC では他の条件下においても引張応力と圧縮応力の差が大きく、しかも早い時期からの引張応力の漸減傾向がみられ、圧縮応力は変化せずむしろ破損直前に若干の増大さえ認められる。一方、FCV では引張応力と圧縮応力ともに接近しながら漸増し、破損前に減少する傾向を示し、FCD においてもわずかに増加する傾向が認められた。Fig. 6 ~ Fig. 8 から分かるように、FC においては引張側と圧縮側では異なる挙動を示し、FC は引張荷重に弱い材料であることが理解できる。また、三種類の材料に対する実験結果の比較を通して、FCV は FCD に近い特性を有することもよく分かる。

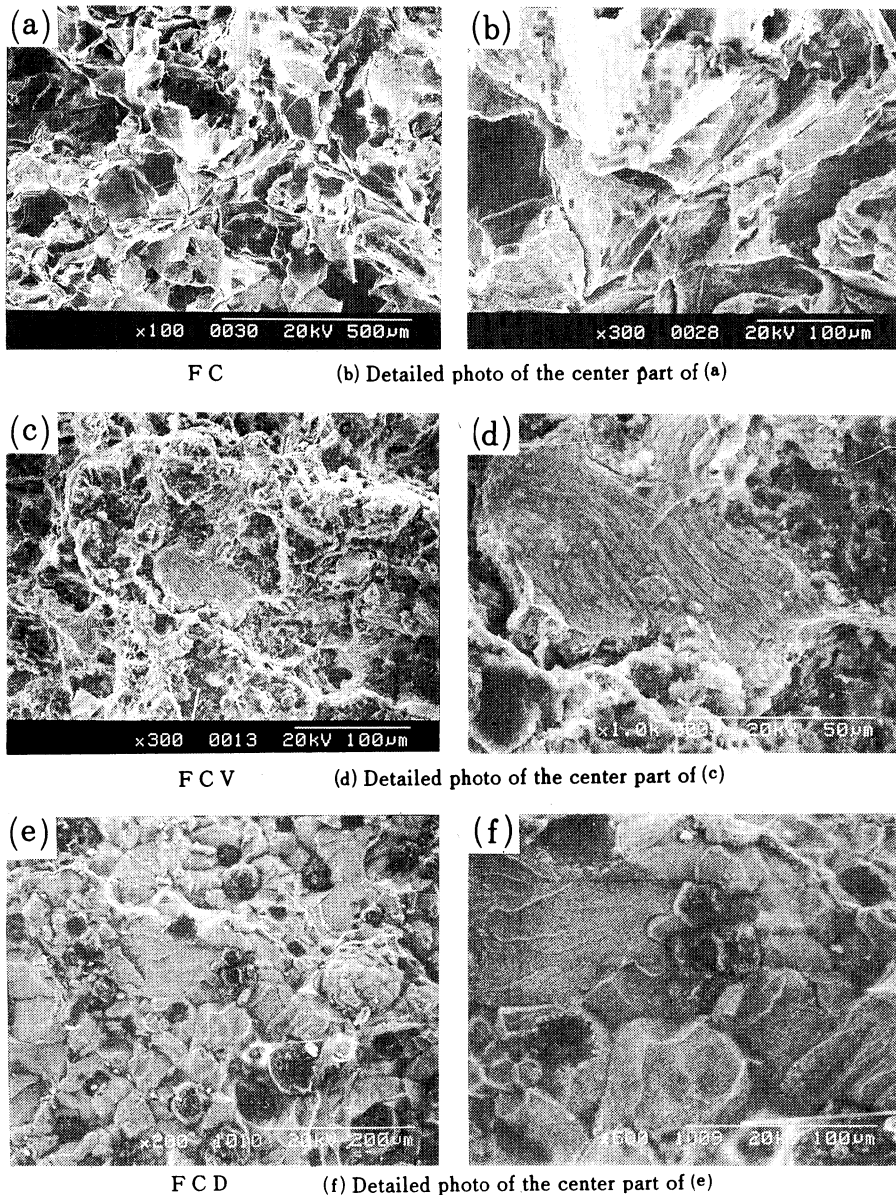


Fig. 9 Typical SEM fractographs of high temperature fatigue failed specimens ( $T = 723\text{K}$ ,  $\Delta \epsilon = 0.5\%$ ).



Fig. 9 は  $\Delta \epsilon = 0.5\%$  の条件の下で低サイクル疲労破壊した三種類の鑄鉄の破面を SEM によって観察した写真であり、右側は左側の中央部分を拡大したものである。上段に示す FC においては片状黒鉛鑄鉄特有の花びら状模様が観察され、破面の大部分は黒鉛割れまたは黒鉛と基地の剝離であり、破面に垂直な方向に無数のクラックが認められた。中段の FCV 破面では (C) の中央部の基地にみられるしわ模様が所々に観察され、黒鉛は片状黒鉛のように鋭角ではなく、CV 黒鉛の形成機構に基づく丸みを帯びた柔らかさが感じられる。下段の FCD の破面では球状黒鉛の周囲に粒界破面が多く観察され、(e) の中央部を拡大すると (f) のように黒鉛の周りに粒界破面、へき開破面および右下のステップ状破面が隣接する形で混在する。常温での疲労破面と高温での疲労破面に大きな差は認められないが<sup>3)</sup>、FCD において粒界破面やへき開破面等のぜい性破面が多い<sup>1)</sup>のが高温疲労の特徴といえる。

#### 4. 結 言

本研究により以下の結論が得られた。

- (1) 高温での低サイクル疲労強度に及ぼす黒鉛形状の影響は大きく、FCV の疲労寿命は FC と FCD の中央値よりも低い。
- (2) 直流電位差法による電圧変化、ヒステリシスループの形状、応力変化状況から判断して、FC では繰返し数の小さい時期から黒鉛を起点とする内部き裂の発生が予想され、このため FC は FCV、FCD と異なる挙動を示すと共に低サイクル疲労強度も著しく低下する。
- (3) (2) に示す計測結果より、FCV は FCD に較べて低サイクル疲労強度はかなり低いが高温疲労における諸特性は類似していると考えられる。
- (4) 鑄鉄の高温疲労から得た破面形態は常温での疲労破面と大きな差はないが、FCD において粒界破面やへき開破面等のぜい性破面が多く含まれていた。

終りに、本研究を行うにあたり御指導、御鞭撻を賜った立命館大学理工学部・大南正瑛先生、坂根政男先生に深く感謝します。また、供試材料の入手に関し大変お世話になると共に、有益な御助言を賜った近畿大学理工学部・炭本治喜先生、大阪産業大学工学部・松本弘司先生に厚くお礼申し上げます。さらに本研究の一部は、昭和62年度大阪産業大学産業研究所特別研究費補助金を用いて行ったものであり、関係各位に対し謝意を表します。

#### 参考文献

- (1) 柳沢 平, 丸山益輝, 有井一善, 岩谷風夫, 鑄物, 52, 331 (1980).
- (2) 柳沢 平, 呂 伝盛, 鑄物, 55, 17 (1983).
- (3) 式田昌弘, 金山幸雄, 中山英明, 材料, 36, 455 (1987).