球状黒鉛鑄鉄の疲労強度に及ぼす黒鉛の 形状、寸法、分布の影響†

遠 藤 正 浩*

Effects of Graphite Shape, Size and Distribution on the Fatigue Strength of Spheroidal Graphite Cast Irons

by

Masahiro ENDO*

Spheroidal graphite (SG) cast iron is a typical porous material which contains numerous small defects (graphites) in the matrix.

In order to clarify the geometrical parameter for the quantitative evaluation of the effect of surface graphite on the fatigue strength of SG cast iron, rotating bending fatigue tests were carried out on the plain- and notched-specimens of as-cast FCD60 and FCD70.

It is concluded from the microscopic observation that the fatigue limit is controlled by the maximum size of surface graphite defined by the square root of the projected area of graphite ($\sqrt{area}^*_{max}$). The value of $\sqrt{area}^*_{max}$ in a definite surface area of the specimen can be predicted by the statistics of extreme values. The predicted values of $\sqrt{area}^*_{max}$ approximately agree with the critical size of artificial notch which does not act to reduce the fatigue strength. The value $\sqrt{area}^*_{max}$ is in general considered to be the controlling geometrical parameter for the prediction of fatigue strength of porous materials.

Key words : Fatigue strength, Small cracks, Small defects, Porous materials, Spheroidal graphite cast irons, Geometrical parameter, Maximum size of defects

1 緒 言

球状黒鉛鑄鉄平滑材の疲労強度に関しては、黒鉛の形状と寸法や基地組織の影響についてすでに多くの研究がある。特に、祖父江は平均黒鉛直径と停留き裂の寸法（または基地組織の硬さ）を用いた簡便な疲労強度の予測式を提案し、基地組織と黒鉛寸法を変えた多くの材質でその有効性を示している。

一方、著者らは種々の微小欠陥や微小き裂をもつ金属材料の疲労強度の予測式として次式を提案した。

$$\sigma_w = 1.43(H_v + 120)/(\sqrt{area})^{1/6} \quad (1)$$

ここで、 σ_w ：疲労限度 MPa、 H_v ：ビッカース硬さ (kgf/mm²)、 $\sqrt{area}$ ：欠陥やき裂を最大引張応力方向に垂直な面に投影した投影面積の平方根 μm である。寸法が既知である種々の微小欠陥や微小き裂をもつ 20 種類以上の材料について、この式による予測値と実験値を比較したところ、式の予測誤差は 10 % 以内であることが確かめられた。その後も、介在物をもつ高強度鋼の疲労強度評価や腐食ピットを有する鋼板の疲労強度予測などに用いられよい成績をあげている。

本研究は、多孔金属材料の疲労強度予測への式(1)の適用の可能性を探るため、試験材料に球状黒鉛鑄鉄を

選び、欠陥（黒鉛部）の形状、寸法、分布の影響について検討を行い、式(1)中の $\sqrt{area}$ の見積り方を明らかにすることを目的としている。

球状黒鉛鑄鉄の場合、欠陥内部に黒鉛が詰まっているが、この黒鉛が疲労強度に無視できない程度の影響を及ぼすという報告がある。そこで本研究では、まず、疲労強度を決定していると考えられる試験片表面の欠陥に注目して、欠陥内部の黒鉛の影響と欠陥相互の干渉の影響について検討を行い、その後、多様な形状、寸法、分布をもつ黒鉛の情報を統一する欠陥の幾何学的パラメータについて検討する。

2 使用材料、試験片形状および実験方法

実験に供した球状黒鉛鑄鉄は、FCD60、FCD70 相当材である。それぞれ同一溶湯より JIS G5502 Y 型 B 号ブロックの形状に鑄造した後、各ブロック底部より一本ずつ素材を採取し、鑄放しのまま使用した。Table I に化学成分と機械的性質を示す。試験片は機械加工により Fig. 1(a)の形状に製作した。危険表面積をそろえるために試験部を若干細くした。Fig. 2 に横断面の組織写真を示す。FCD60 と FCD70 の黒鉛球状化率は、ともに 84 % であり、パーライト面積率は

† 原稿受理 昭和63年12月26日 Received Dec. 26, 1988

* 正 会 員 福岡大学工学部 福岡市城南区七隈, Faculty of Engineering, Fukuoka University, Nanakuma, Jonan-ku, Fukuoka

Table I. Chemical composition and mechanical properties.
Chemical composition, %

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Mg
FCD60	3.76	2.98	0.41	0.023	0.015	0.30	0.052
FCD70	3.77	2.99	0.44	0.023	0.011	0.47	0.058

Mechanical properties

	FCD60	FCD70
UTS, MPa	641	734
Elongation, %	14.1	8.0
Vickers hardness (10kg)	216	241

Fig. 1. Dimensions of specimen and notch.

それぞれ 47 %, 72 % である。Fig. 2 の試料表面に顔を出している各黒鉛の占める面積と真円度の測定は、100 倍の光学顕微鏡下で自動画像解析装置 PIAS LA500 を用いて直接行った。

Fig. 1 (a) の試験片は試験前までに Fig. 3 に示す表面処理を行い、2 種類の平滑材と切欠き材を製作した。平滑材は、Fig. 4 に示すように、表面層が $\sim 2 \mu\text{m}$ 除去される程度のわずかな電解研磨を行うことによって、試験片表面の欠陥内の黒鉛のみを取り除いた ep 材と、行わずに欠陥内に黒鉛が詰まっている N-ep 材を準備した。Fig. 5 に電解研磨によって黒鉛が除去される過程を示す。上段の写真は欠陥縁の基地に焦点を合わせたもので、下段は穴の底に合わせたものである。表面の穴の形状はほとんど変化せず深さだけが変化する。黒鉛がほぼ除去され穴の底に明るいフェライト組織が現れた後は深さもほとんど変化しなくなる。このよう

Fig. 3. Surface treatment of specimens.

Fig. 4. Schematic of surface defect.

に、わずかの電解研磨によって、穴の形状はそのままに黒鉛だけを取り除くことができる。電解研磨液はりん酸 2000 cc, ゼラチン 66 g, しゅう酸 66 g である。切欠き材は、Fig. 1 (b) に示すように、一本の試験片表面にはほぼ同じ深さの極めて浅い円周切欠きを深さの 100 倍の間隔において 3 条切削加工した後、ep 材と同じ表面処理を行った。ひとつの切欠きの深さは浅いところと深いところで $1 \sim 13 \mu\text{m}$ の差があるが、最深部の深さを切欠き深さ t とした。

使用した試験機は、小野式回転曲げ試験機（容量：100 Nm, 回転数：3400 rpm）である。

応力は、試験部中央の外径で定義した公称曲げ応力である。

疲労限度 σ_w は 10^7 回の繰り返しに耐えた最高の公称応力である。試験応力の最小きざみ幅は 5 MPa とした。

3 実験結果と考察

3・1 疲労強度に及ぼす黒鉛の影響

球状黒鉛鋳鉄中の黒鉛の強度は基地組織に比べてかなり低く応力をほとんど負担しないとして、通常その

Fig. 2. Metallographic structure.

Fig. 5. Change of surface defect due to electropolishing (FCD70).

存在は無視して考えられてきた²⁴⁾。しかし最近、矢野は、黒鉛の弾性効果について検討を行い、黒鉛の充てん度が高くなると基体組織が黒鉛を圧縮して疲労強度が20～24%高くなることを明らかにして、黒鉛の応力負担効果が無視できない場合があることを指摘している。また、小川は²²⁾、き裂の開閉口の際に黒鉛が粉碎され、その微分末がき裂面に入り込みき裂閉口を誘起し、下限界特性に影響を与えているとしている。これらはいずれも黒鉛部を穴とみなせない場合があることを示すものである。そこで、本研究では表面黒鉛の影響を調べるために、Fig. 4に示したN-ep材とep材の2種類の平滑材について回転曲げ疲労試験を行った。

Fig. 6にS-N曲線を示す。FCD60、FCD70ともにN-ep材とep材の疲労強度にめだった違いは認められない。本実験で使用了材料の場合、疲労強度に及ぼす表面の黒鉛の影響は小さく、表面欠陥部は黒鉛

Fig. 6. S-N curve.

の存在を無視して穴と考えてよいようである。

3・2 疲労限度における試験片表面の微視的観察

Fig. 7は疲労限度で観察された停留き裂である。他の研究者らの結果と同様に^{3), 8), 25) ~ 28)}、両材の疲労限度は、黒鉛からき裂が発生する限界応力ではなく、発生したき裂が伝ばを停止する限界応力といえる。ただし、停留き裂は試験片表面に顔を出している全ての黒鉛に観察されるわけではなく、むしろ疲労限度の応力でき裂を発生させる条件が満たされなかったとみられる黒鉛の方が多い。加藤らの精密な調査によれば、FCD60平滑材の疲労限度で停留き裂が発生している黒鉛の数は表面の全黒鉛数の約5%にすぎない。さらに、広瀬らのFCD60相当材の観察結果と同様に、ひとつの黒鉛から発生した停留き裂が他の黒鉛のき裂と連結していることは極めて少なかった。これらのことは、疲労限度においては欠陥相互の干渉の影響が小さいことを示唆するものである。

また、停留き裂を持つ黒鉛の寸法は、表面に出現している切断面の面積で比較する限り、き裂をもたない周辺の黒鉛に比べて小さいことが多かった。力学的には、同一直径の球状空かであれば、それが表面に接するように位置しているときに、き裂の発生(応力集中)の観点からも発生したき裂の停留(応力拡大係数)の観点からも最も厳しいと考えられる。Fig. 7(c)のように、表面からはほとんどき裂だけが観察されることがあるが、この場合は表面のすぐ下に黒鉛が存在していると想像される。停留き裂をもつ黒鉛の表面下の三次元形状がClementらによって2例報告されているが、この場合も黒鉛の中心は表面より下である。

3・3 疲労強度を評価するための欠陥の幾何学的パラメータ $\sqrt{area}^*_{max}$

Fig. 7. Nonpropagating microcracks observed on the surface of unnotched specimens.

表面欠陥は黒鉛の存在を無視した穴とみなすことができ、また、疲労限度は欠陥から発生したき裂の伝ば限界条件によって決まっているから、これまでの著者らの研究と同様に、欠陥の問題を微小き裂の問題としてとらえることができる。この場合、黒鉛欠陥の形状と寸法の影響を統一する幾何学的パラメータには $\sqrt{area}$ が適している。さらに、欠陥相互の干渉の影響は小さいようなので、一本の試験片の強度は、最弱リンク仮説に従って試験片における最小強度の部分、すなわち最大の $\sqrt{area}$ をもつ黒鉛が存在する部分の強度によって決まることが予想される（組織の強度のばらつきが小さいことが前提）。先に述べたように、破壊力学の観点からは、欠陥は材料の表面（厳密には表面直下）に位置するとき最も有害である。また、観察結果も表面近傍に存在する黒鉛が疲労強度決定に支配的役割を果たしていることを示唆している。したがって、試験片内の無数の黒鉛の中でも特に危険表面層内に存在する最大の黒鉛の寸法 $\sqrt{area_{max}}$ に

注目しなくてはならない。Fig. 8 に示すように、 $\sqrt{area_{max}}$ をもつ黒鉛が表面直下に存在する場合は、表面と欠陥との間の材料はき裂が発生した後は強度的にほとんど意味がないので、むしろ次式で若干大きく補正した $\sqrt{area_{max}}^*$ の寸法をもつ表面欠陥とするのが合理的である。

$$\sqrt{area_{max}}^* \approx 1.066 \sqrt{area_{max}} \quad (2)$$

$\sqrt{area_{max}}^*$ が球状黒鉛鑄鉄の疲労強度を予測する際に、式(1)で採用すべき幾何学的パラメータである。式(2)によって補正する前の $\sqrt{area_{max}}$ を $\sqrt{area_{max}}^*$ のかわりに使用しても誤差はそれほど大きくならない。

現在の非破壊検査における探傷技術の水準は、ここで問題としている数 μm から数百 μm の微小な欠陥の形状、寸法、位置を精度よく測定できるまで達していない。そこで、ここでは村上らの手法^{15)~17)}にない極値統計³¹⁾を用いて次の手順で $\sqrt{area_{max}}$ の値を見積った。

本実験では、黒鉛の面積 $area$ の測定は、試験片の横断面をバフ研磨で仕上げた後、100 倍の光学顕微鏡から直接画像を取り込んで自動画像解析装置により行った。一回の測定で対象とした視野の面積は $S_0 = 0.077 \text{ mm}^2$ である。 S_0 を基準面積にとり、この中に存在する黒鉛の面積の最大値の平方根を $\sqrt{area_{max,i}}$ ($i=1 \sim$ 測定回数) とする。ある程度 of 回数測定すれば、 $\sqrt{area_{max,i}}$ の累積頻度分布は極値統計に従うことが期待される。

Fig. 9 は FCD60 と FCD70 の $\sqrt{area_{max,i}}$ の累積頻度分布を極値確率紙にプロットしたものである。い

Fig. 8. A graphite just below the surface.

Fig. 9. Distribution of $\sqrt{area_{max}}$.

ずれの分布も直線性がよく、 $\sqrt{area}$ の最大値分布が極値統計に従っていると考えられる。試験片表面層に存在する黒鉛の $\sqrt{area}$ の最大値は、Fig. 9 の直線と再帰期間 T の交点の値として予測できる。本実験で使用了平滑材一本当りの危険表面積は $S=754 \text{ mm}^2$ である (Fig. 1(a)参照)。再帰期間は、 N 本の試験片に対して $T=NS/S_0$ で与えられる。最小二乗法で Fig. 9 の直線を求めて、 $N=1\sim10$ の場合について $\sqrt{area_{max}}$ の値を計算すると、FCD60 では $107\sim124 \mu\text{m}$ 、FCD70 では $92\sim104 \mu\text{m}$ と予測される。また、式(2)より $\sqrt{area_{max}^*}$ の値を計算すると FCD60 では $114\sim132 \mu\text{m}$ 、FCD70 では $98\sim111 \mu\text{m}$ となる。

3・4 疲労強度に害を与えない欠陥の限界寸法と $\sqrt{area_{max}^*}$ の関係

前節で求めた $\sqrt{area_{max}}$ の値が試験片の危険表面層に存在する黒鉛の $\sqrt{area}$ の最大値と予想されるが、

Table II. Experimental results of notched specimens.

Material (Stress)	$t \mu\text{m}$	$\sqrt{area} \mu\text{m}$	× Broken ○ Not broken	Number of cycles
FCD60 (265MPa)	19	60	○	10 000 000
	24	76	○	
	21	66	○	
	30	95	○	983 000
	27	85	×	
	30	95	○	
	38	120	○	708 400
	46	145	○	
	38	120	×	
FCD70 (280MPa)	33	104	○	10 000 000
	33	104	○	
	32	101	○	
	42	133	○	960 000
	42	133	×	
	40	126	○	
	54	171	○	268 500
	50	158	×	
	54	171	○	

Table III. Comparison of $\sqrt{area_{max}^*}$ with $\sqrt{area_0}$.

Material	$\sqrt{area_{max}^*}$ ($N=1\sim10$)	$\sqrt{area_0}$
FCD60	$114\sim132 \mu\text{m}$	$76\sim84 \mu\text{m}$
FCD70	$98\sim111 \mu\text{m}$	$104\sim132 \mu\text{m}$

実際に試験片の黒鉛の中から $\sqrt{area_{max}}$ の値をもつ黒鉛を探しだし、さらにその黒鉛が試験片の疲労強度を決定していることを確認するのは極めて困難である。しかし、もし $\sqrt{area_{max}}$ 程度の寸法をもつ黒鉛が表面近傍に存在して疲労限度を決定しているとすれば、試験片表面に $\sqrt{area_{max}^*}$ と同程度の $\sqrt{area}$ をもつ欠陥を人工的につけたとしても疲労強度は大きく低下しないと予想される。そこで、切欠き半径を $\rho=50 \mu\text{m}$ と一定にして切欠き深さを $t=19\sim54 \mu\text{m}$ と変化させた円周切欠きをもつ試験片を準備して、平滑材 (ep 材) の疲労限度の応力のもとで回転曲げ疲労試験を行い、疲労強度に影響を及ぼさない切欠きの $\sqrt{area}$ の限界値 $\sqrt{area_0}$ を調べてみた。切欠きの $\sqrt{area}$ の値は次式で計算される。^{13), 14), 30)}

$$\sqrt{area} = \sqrt{10} t \cong 3.16 t \quad (3)$$

実験結果を Table II に示す。一本の試験片は 3 条の切欠きをもっている。Table II で、×印が試験片を破断に導いた切欠きであり、○印は破断に至らなかった切欠きである。 $\sqrt{area_0}$ の値は、 $76\sim84 \mu\text{m}$ (FCD60)、 $104\sim132 \mu\text{m}$ (FCD70) の範囲内にある。比較のために先に予測した値 $\sqrt{area_{max}^*}$ と一緒に Table III に示す。FCD70 の $\sqrt{area_0}$ は予測値とよく一致している。一方、FCD60 では予測値より若干小さい結果になっている。これは FCD60 の基体組織がフェライトとパーライトの面積率がほぼ等しい典型的なブルスアイ組織であり、FCD70 よりも局所的な強度のばらつきが大きいことが主な原因と思われる。以上の結果は、間接的ではあるが、 $\sqrt{area_{max}}$ の寸法程度の黒鉛が表面近傍に存在して疲労限度を決定していることを示すものである。

$\sqrt{area}^*_{max}$ は、球状黒鉛鑄鉄をはじめとして多孔金属材料の疲労強度を予測する際の幾何学的パラメータとなることが予想されるが、一方、疲労強度に影響を及ぼさない介在物、ひっかき傷の寸法や表面仕上げの粗さの限界値に関連して重要な尺度と考えられる。具体的に式(1)によって σ_w を予測するには、 $\sqrt{area}$ ($=\sqrt{area}^*_{max}$) のほかに欠陥近傍の基地組織の硬さ H_0 が必要である。硬さが場所によらず均一であれば欠陥の影響が及ばない場所で H_0 を測定すればよい。しかし、球状黒鉛鑄鉄は、基地組織がブルスアイ組織のように均一ではない場合があり、黒鉛どうしが接近しているので、硬さの測定法については今後検討が必要である。

4 結 言

球状黒鉛鑄鉄 FCD60 と FCD70 相当材の回転曲げ疲労試験を行い、疲労強度に及ぼす表面黒鉛の影響と、疲労限度を決定する欠陥の幾何学的パラメータについて検討して、以下の結果を得た。

(1) 本実験で使用した材料では、表面欠陥内に詰まっている黒鉛そのものは疲労強度にほとんど関係していない。

(2) 疲労限度は、投影面積の平方根によって定義される表面直下の黒鉛の最大寸法 $\sqrt{area}^*_{max}$ によって決まっていると推測される。

(3) 極値統計を用いて予測した $\sqrt{area}^*_{max}$ の値と疲労限度を低下させない切欠きの限界深さに相当する $\sqrt{area}$ の値は密接な関係にあった。

(4) $\sqrt{area}^*_{max}$ は、多孔金属材料の疲労強度を予測する際に用いるべき欠陥の幾何学的パラメータである。

最後に、黒鉛の面積と真円度の測定には、九州工業大学材料力学研究室の自動画像解析装置 PIAS LA500 を使用させていただいた。ここに記して感謝の意を表します。

(昭和63年11月10日 第19回疲労シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 大橋正昭, 黒田正義, 小松康彦, 日比野義博, 鑄物, **42**, 634 (1970).
- 2) 新美 格, 大橋正昭, 小松康彦, 日比野義博, 鑄物, **43**, 101 (1971).
- 3) 西谷弘信, 村上敬宜, 機械の研究, **25**, 543 (1973).
- 4) 祖父江昌久, 鑄物, **48**, 441 (1976).

- 5) A. G. Fuller, AFS Trans., **85**, 527 (1978).
- 6) 塩田俊雄, 小松真一郎, 鑄物, **54**, 434 (1982).
- 7) 祖父江昌久, 鑄物, **51**, 281 (1979).
- 8) 祖父江昌久, 鑄物, **51**, 159 (1979).
- 9) 祖父江昌久, 鑄物, **53**, 635 (1981).
- 10) 田中雄一, 河村公治, 加藤清夫, 井川克也, 鑄物, **53**, 500 (1981).
- 11) 鈴木秀人, 大藪 優, 植木忠司, 国尾 武, 日本機械学会論文集, A-**51**, 1224 (1985).
- 12) 鈴木秀人, 国尾 武, 日本機械学会論文集, A-**53**, 1000 (1987).
- 13) 村上敬宜, 遠藤正浩, 材料, **35**, 911 (1986).
- 14) Y. Murakami and M. Endo, "The Behaviour of Short Fatigue Cracks", EGF Pub. 1 (Ed. by K. J. Miller and E. R. de los Rios), p. 275 (1986) Mech Engng Pub.
- 15) 村上敬宜, 児玉昭太郎, 小沼静代, 日本機械学会論文集, A-**54**, 688 (1988).
- 16) 村上敬宜, 宇宿尚史, 日本機械学会論文集, A-**55**, 213 (1989).
- 17) 夏目喜孝, 宮川 進, 上村裕二郎, 村上敬宜, 第19回疲労シンポジウム前刷集, p. 76 (1988).
- 18) 江村秀樹, 浅見克敏, 日本機械学会論文集, A-**55**, 45 (1989).
- 19) 西村 昭, 皆田 理, 材料, **37**, 434 (1988).
- 20) 矢野 満, 日本機械学会論文集, A-**51**, 132 (1985).
- 21) 矢野 満, 日本機械学会論文集, A-**52**, 2150 (1986).
- 22) 小川武史, 小林英男, 小出孝道, 中沢 一, 米谷英二, 日本機械学会論文集, A-**51**, 1660 (1985).
- 23) "鑄物便覧 (改訂第4版)", p. 567 (1986), 日本鑄物協会.
- 24) 井川克也, 田中雄一, 日本金属学会会報, **13**, 665 (1974).
- 25) 加藤容三, 中野典彦, 日本機械学会論文集, A-**50**, 1565 (1984).
- 26) 加藤容三, 中野典彦, 日本機械学会論文集, A-**51**, 1208 (1985).
- 27) 西谷弘信, 田中哲志, 日本機械学会論文集, A-**51**, 1442 (1985).
- 28) P. Clement, J. P. Angeli and A. Pineau, Fatigue Engng Mater. Struct., **7**, 251 (1984).
- 29) 広瀬幸雄, 黒部利次, 津田政明, 西本茂戸造, 河合茂治, 日本材料強度学会誌, **16**, 156 (1981).
- 30) 村上敬宜, 遠藤正浩, 日本機械学会論文集, A-**49**, 127 (1983).
- 31) E. J. Gumbel, "極値統計学", 河田竜夫, 岩井重久, 加瀬滋男監訳 (1978), 生産技術センター新社.