高強度・高靱性球状黒鉛鑄鉄の疲労信頼性に関する基礎的研究*

(第1報、軸荷重疲労限度に及ぼす基地組織の
影響に関するフラクトグラフィ的研究)

鈴木 秀 人*

A Basic Study on the Fatigue Reliability of the Spheroidal Graphite Iron
with High Tension and Toughness(1st Report, A Fractographic Study on the Influence of the Matrix Structure
on the Fatigue Limit under Axial Loadings)

Hideto SUZUKI

In order to estimate and improve the fatigue reliability of spheroidal graphite iron (SGI) with high tension and toughness, the influence of the matrix structure on the fatigue limit was examined through fractography, with a special focus on austempered ductile iron (ADI) with the bainitic ferrite-retained austenite dual structure. Under the fatigue test of tension-tension loading, $R=0.05$, it was found that ADI is superior to the SGI with all-pearlite matrix in terms of the fatigue limit and also the ratio of fatigue limit/tensile strength. The fractography showed the fatigue crack initiated at the microporosity in both of the above mentioned SGIs with the matrix structure of high tension. Therefore, it could be understood that bainitic ferrite-retained austenite dual structures had lower notch sensitivity to the microporosity of casting defects than the full pearlite matrix.

Key Words: Fatigue Limit, Reliability, Austempered Ductile Iron, Fractography, Bainitic Ferrite, Fatigue Crack, Notch Sensitivity

1. 結 言

最近、球状黒鉛鑄鉄 (Spheroidal Graphite Iron, SGI) は、高強度・高靱性の先進材料としてその用途拡大が図られている^{(1)~(10)}。本材は、多くの新材料と異なって実用上の技術的背景も整っており、総合力の富んだ先進材料であるとされている。SGI は、比較的容易に組織因子の調整が可能で、それによって力学的特性の制御が容易である。特に最近かかる観点から、オーステンパ処理によって基地組織をベイニチックフェライトと残留オーステナイトの複合組織としたオーステンパ球状黒鉛鑄鉄 (Austempered Ductile Cast Iron, ADI) は、高強度・高靱性球状黒鉛鑄鉄としての実用化が期待されている^{(11)~(15)}。

それに伴って、オーステンパ球状黒鉛鑄鉄、ADI の疲労強度信頼性を評価することが、重要な研究課題となっている。しかしながら、ADI の疲労強度信頼性に関する知見は必ずしも十分ではなく、特に疲労限度については不明な点が多い。すなわち、強度や靱性の目ざましい向上ほど、必ずしも疲労限度は改善されず、逆に否定的な結果も報告されている⁽¹⁶⁾。その原因の一

つとして、疲労き裂発生源が試験片中の最も弱い箇所 (最弱リンク仮説) であって、疲労限度は局所的な組織・力学因子に極めて敏感であるためと考えられる。すなわち、オーステンパ処理による基地組織の強化が、逆に黒鉛形状や鑄巣に対して敏感になって、疲労限度を低下させることが懸念される。したがって、ADI の疲労限度に及ぼす基地組織などの組織因子と硬度、強度等の力学因子の影響について、疲労き裂の発生・進展の解明まで掘り下げて検討を加えることが重要な課題である。

かかる状況をかんがみて、本研究では ADI を中心にすえ、比較のために基地組織と硬度、強度の異なる2種類の SGI を加えて、疲労限度に及ぼす組織因子と力学因子の影響について、SEM によるフラクトグラフィに基づいて検討を加えた。特に、本研究では、これまでの合金化⁽¹¹⁾⁽¹⁴⁾によるものとは異なって、黒鉛の球状化と均質化による疲労限度改善に注目して、この点にすぐれた ADI を供試材としている。

2. 実 験 方 法

供試材は、表1に化学成分を示す材料に熱処理を施して、組織写真を図1に示すように基地組織を3種類に調整したものである。すなわち、図1(a), (d)はオ

* 原稿受付 平成4年1月17日。

*1 正員、茨城大学工学部 (〒316 日立市中成沢町4-12-1)。

ーステンパ処理, すなわち 1148 K で 2 hs オーステンパ処理後, 648 K で 2 hs 恒温変態処理により, ほかの 2 種類は焼なまし処理によって調整した。その結果, ベイニチックフェライトと残留オーステナイトの複合組織, パーライト組織さらにフェライトとパーライトの複合組織となり, それぞれ引張強度を 882 MPa (90 kg/mm²) 以上, 686 MPa (70 kg/mm²) 以上さらに 490 MPa (50 kg/mm²) 以上の 3 ランクに調整された。なお, 供試材の機械的性質を表 2 に示すように, 供試材

表 1 化学成分

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Mg	Cr
SGI60	3.79	2.17	0.42	0.021	0.016	0.35	0.043	0.03
SGI90	3.70	2.13	0.34	0.013	0.008	0.53	0.038	0.04
ADI100	3.70	2.17	0.35	0.022	0.006	0.50	0.034	0.04

(a) ADI 100 材

(b) SGI 90 材

(c) SGI 60 材

(d) ADI 100 材の高倍率写真

(e) SGI 90 材の高倍率写真

図 1 顕微鏡組織写真

の引張強度は規定を十分満足する。さらに, 黒鉛の幾何学的性質は表 3 に示すように, 球状化率 ϕ がいずれも 85% 以上であり, 平均寸法 d , 分布程度 n も従来材⁽⁹⁾と比較して極めて良好である。

したがって, これらの供試材は, まず黒鉛の球状化と均質化に極めてすぐれた特性を具備しており, その上で疲労強度に及ぼす基地組織の影響を把握しようとい図示する本研究の条件を十分に満足し得る球状黒鉛鉄のモデル材である。なお, 以後表 2 の引張強度の結果より, オーステンパ処理した供試材を ADI 100 材, パーライト組織材を SGI 90 材さらにフェライトとパーライトの複合組織材を SGI 60 材と称す。

試験片は, 図 2 に示す Y ブロックの斜線部から, 図 3 の形状に機械加工によって製作した。さらに表面をエミリー紙で 2000 番まで研磨後試験に供した。疲労試験は, 電気油圧式材料試験機によって, 応力比 $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}=0.05$ のほぼ片振りの軸荷重で周波数 20 Hz で行った。疲労限度は, 10⁷ 回の繰返しに耐える応力振

表 2 機械的性質

(MPa)

	σ_y	σ_{UTS}	$\delta\%$	HB
SGI60	364	588	14.2	185
SGI90	485	889	7.3	270
ADI100	760	994	8.5	293

表 3 黒鉛の幾何学的性質

	ϕ %	n 1/mm ²	d μm
SGI60	85.3	312	26.0
SGI90	86.6	318	25.3
ADI100	87.1	303	27.0

図 2 Y ブロック形状

図 3 試験片形状

幅値をもって決定した。加えて、疲労限度に及ぼす組織因子の役割を把握するために、SEM によるフラクトグラフィを実施した。

3. 結果と考察

3.1 疲労強度に及ぼす力学・組織因子の影響

3種類の供試材の $S-N$ 線図を図4～図6に示す。本図よりそれぞれの $S-N$ 線図には下記の特徴がある。図4より、SGI 60は、通常の鋼のそれと同様で、傾斜部と水平部に別れ、比較的ばらつきが少なく、疲労限度が明りょうである。一方、図5、6より、高強度レベルのSGI 90とADI 100はともにばらつきが大きい、特にSGI 90材のそれは大きい。また、両材の疲労限度は、必ずしも明りょうでない。3種類の供試材の $S-N$ 線図を図6のように互に比較するとそれぞれの疲労強度の間には明りょうな相違が認められ、疲労強度はADI 100が最も高くSGI 60が最も低い。なお、 10^7 回の繰返しに耐える50%破損確率の応力を疲労限度として⁽¹⁷⁾、表4に示すようにSGI 60、SGI 90、ADI 100の疲労限度を、それぞれ157、176、206 MPaと評価した。

さらに、疲労限度と硬度、引張強度の関係について調べた。図7に疲労限度 σ_w とブリネル硬度 H_B の関係を示す。なお、本図には参考として100%フェライト基地の引張強度 $\sigma_{UTS} > 372$ MPa (38 kg/mm²)でSGI 38材と称すべきSGI 38材のデータ⁽¹⁸⁾も付記した。本図より、硬度を高めることによって疲労限度が改善されるが、100%パーライト基地のSGI 90材の上昇率 σ_w/H_B がほかの供試材と比べやや劣ることがわかる。同様の傾向が、図8の疲労限度 σ_w と引張強度 σ_{UTS} の関係においても認められる。加えて、図9に疲労限度比と引張強度の関係を示すが、図7、8と同様に本図においても、SGI 90材は引張強度を上げてその割合ほど疲労限度が上がらないことがわかる。

以上の結果より、パーライト体積比の増大による硬度、引張強度の上昇は、むしろ切り欠き敏感性を高め疲労限度改善を頭打ちとすることが示唆される。さらに、非調質系としては、図7～9に*印で示すように $H_B=250$ あるいは $\sigma_{UTS}=800$ MPaのとき、最大の疲労限度として $\sigma_w=185$ MPa程度までの改善が期待される。そのためには、前報⁽²⁾で報告したように若干のフェライトをパーライト基地に分布させて複合組織としたほうが疲労強度が改善されると考えられる。

一方、ADI 100材のベイニチックフェライトと残留オーステナイトの複合組織は切欠き敏感性が比較的低いため、硬度・引張強度の上昇とともに疲労限度も十

分に改善されるものと解釈される。かかるオーステンパ処理により、疲労限度 σ_w が硬度・引張強度とともに改善されることは注目される。このようなオーステ

表4 疲労限度と疲労限度比

	σ_w	α
SGI 60	157	0.267
SGI 90	176	0.198
ADI 100	206	0.207

(MPa), $\alpha = \sigma_w / \sigma_{UTS}$

図4 SGI 60材の $S-N$ 曲線

図5 SGI 90材の $S-N$ 曲線

図6 ADI 100材の $S-N$ 曲線

ンパ処理による改善は、もともと素材としての球状黒鉛鋳鉄における黒鉛形状や微小な引け巣の改善が前提であったと考えられる。これらの本性を明らかにするために、3・2節では、特にADI 100材の疲労限度 σ_w を支配する組織因子の役割を理解することに焦点を合わせて、フラクトグラフィにより疲労き裂発生・進展機構の解明まで掘り下げて検討を加えた。

3・2 フラクトグラフィによる検討 本項では、ADI 100材の疲労強度の本性を明らかにするために、破面解析を実施した。まず、図10に巨視的破面の一例を示すが、疲労破壊部と最終破壊部の区別が容易である。そこで、同種の材料間で巨視的破面の比較を行った結果、繰返し応力レベルの大小と疲労破面の大きさの間に良好な相関性が認められた。なお、SGI 90、ADI 100材のS-N線図における同一応力レベルの大きな寿命ばらつきにもかかわらず、疲労破面の大きさには差異は観察されない。したがって、寿命のばらつきは、き裂進展に係わるものではなく、き裂発生挙動に関連しているものと推測される。

そこで、き裂発生部に注目して、 10^7 回以下の繰返し

し応力下で破壊した試験片に対して、SEMによるミクロなフラクトグラフィを施した結果を図11～15に示すが、き裂発生源は供試材の間で異なっている。まず、SGI 60材では 10^7 回以下の繰返し応力下で破壊した10本の試験片中、2本の試験片のき裂発生部に図11に認められるような $200\mu\text{m}$ 程度の大きさの微小な引け巣が存在するが、8本の試験片では図12のように引け巣は観察されず通常の球状黒鉛と基地組織のみが認められた。これらの事実より、SGI 60材のき裂進展機構は、次のように考えられる。それぞれの黒鉛から発生したき裂は、フェライト内を進展し、互いに連結して加速的に拡大する。一方、大きな鑄巣が表面あるいは表面付近に存在する場合には、これが発生源となる。

かかる状況について、越智ら⁽¹⁰⁾も基地組織が100%フェライトのSGI 38材に相当する球状黒鉛鋳鉄では、黒鉛と微小な引け巣の二つが疲労き裂発生源となることを報告している。本研究でのSGI 60材は、フェライトの基地組織面積率が80%と多いため同様の結果になったものと理解される。したがって、SGI 60材では、まず表面のフェライト内のすべり形き裂と微小な引け巣からのき裂がいずれも個々別々に発生し、これらが

図7 疲労限度 σ_w とブリネル硬度 H_b の関係

図9 疲労限度比 σ_w/σ_{UTS} と引張強度 σ_{UTS} の関係

図8 疲労限度 σ_w と引張強度 σ_{UTS} の関係

図10 巨視的破面

競合して寿命を決定するものと解釈される。

次に、基地組織が100%パーライトのSGI 90材では、図13に一例を示すが、すべての疲労き裂発生部に100 μm 程度の微小な引け巣が観察された。これより本材の疲労き裂は、初析フェライトの消失によりフェライト内のすべり形き裂の発生がなくなって、微小な引け巣から発生したき裂のみが最終破壊をもたらし、寿命を決定するものと考えられる。したがって、SGI 90材の疲労限度は、フェライト内のすべり形き裂が消失するため、SGI 60両材より高くなるが、一方微小な引け巣に対する切欠き敏感性増大により疲労限度比の低下となるものと解釈される。

同様に、疲労強度が最も高いADI 100材でも、図14に一例を示すように100 μm 程度の微小な引け巣から発生したき裂から最終破壊が導かれている。しかしながら、SGI 90材ではADI 100材と比べ、小さい引け巣から発生したき裂によって最終破壊が導かれたものが観察された。これは、引け巣からのき裂発生・進展に対する抵抗がパーライト組織よりベイニチックフェライトと残留オーステナイトの複合組織のほうが優れているためと考えられる。すなわち、ADI 100材の疲労限度 σ_w がSGI 90材よりすぐれているのは、このことが原因であると示唆される。

なお、ADI 100材の8本のうち1本の試験片ではき

裂発生部に引け巣は観察されず、図15のように矢印で示す異物が観察された。これは、どろ巣と称される鋳巣の一種と考えられる。本図より、その大きさはき裂発生源の微小な引け巣の1.5倍程度にも達していることがわかる。しかしながら、注目すべきことは、これによって著しい寿命低下が生じるのではなく、図6の(●)で示すようにむしろ逆に寿命が2倍程度伸びている。この原因としては、以下のように考えられる。図15よりどろ巣が小さい空洞の集合体であるために、図16に模式的に説明するようにき裂先端が鈍化し、多くの繰返しが必要となる。かかる異なるき裂発生機構は、ベイニチックフェライト基地組織による通常の引け巣に対する切欠き敏感性の低下によるものと理解される。

図13 SGI 90材のき裂発生部における微小引け巣

図11 SGI 60材のき裂発生部における微小引け巣

図12 SGI 60材のき裂発生部の破面形態

図14 ADI 100材のき裂発生部における微小引け巣

図15 ADI 100材のき裂発生部における異常引け巣

図 16 異常引け巣内の疲労き裂進展の模式図

以上のフラクトグラフィから得られた知見に基づいて、疲労強度とき裂発生機構の関係について解釈を加えると以下のとおりであり、さらにこれを模式図的に示すと図 17 となる。すなわち、パーライト組織の増加によって、き裂発生は、球状黒鉛が表面のフェライト内のすべり形き裂を促進させる機構から、鋳巣の応力集中によるパーライト組織でのき裂発生へと遷移する。それに伴って、疲労強度は上昇するが、引張強度ほどは改善されていない。これは、パーライト組織の切欠感度が高いためと理解される。一方、ADI 材においてき裂発生は鋳巣からではあるが、ベイニチックフェライトと残留オーステナイトの複合組織がパーライト組織と比べ切欠感度が低いため、疲労強度が最も高くなったと理解される。

4. 結 言

球状黒鉛鋳鉄の疲労強度信頼性の評価と改善に関連して、オーステンパー処理により調整したベイニチックフェライトと残留オーステナイトの複合組織の ADI 100 材を中心にすえ、比較のためにパーライト組織の SGI 90 材さらに (フェライト+パーライト) 複合組織の SGI 60 材を加えて、疲労限度に及ぼす組織・力学因子の影響について、フラクトグラフィにより疲労機構の解明まで掘り下げて検討し、以下の結果を得た。

(1) 3 種類の供試材の S-N 線図には明りょうな相違が認められ、AD 1, SGI 90, SGI 60 の軸荷重疲労限度はそれぞれ 206, 176, 157 MPa となり、ADI が最も高く SGI 60 が最も低かった。

(2) 疲労限度は、硬度および引張強度を上げることによって改善された。しかしながら、フェライト組織の消失により疲労限度比は低下した。一方、オーステンパー処理 ADI 材の疲労限度比は、パーライト組織の SGI 90 材と比べ高かった。

(3) SGI 60 材の 20% で、き裂発生源が引け巣であり、パーライト基地組織の SGI 90 材では、すべて疲労き裂は微小な引け巣から発生した。したがって、

図 17 疲労強度とき裂発生機構の関係の模式図

SGI 90 材の疲労限度比の低下は、基地組織を 100% パーライトとして引け巣に対する切欠感度を増加させたためである。

(4) ADI, SGI 90 両材では、疲労き裂が引け巣から発生する。したがって、ADI 材の疲労限度が SGI 90 材よりすぐれているのは、引け巣からのき裂発生・進展に対する抵抗がパーライト組織よりベイニチックフェライトと残留オーステナイトの複合組織のほうがすぐれていると理解される。

以上の知見により、高強度球状黒鉛鋳鉄の疲労強度の改善のためには、引け巣に対する切欠感度の鈍感な相を基地組織とすることが合理的である。

本研究実施に当たってご協力をいただいた本会材料力学部門研究会「球状黒鉛鋳鉄の強度評価」(主査・西谷弘信教授)に感謝の意を表す。供試材のご提供をいただいた日立金属(株)に厚く御礼を申し上げる。

文 献

- (1) 鈴木・ほか 3 名, 機論, 50-451, A (1984), 520.
- (2) 鈴木・ほか 3 名, 機論, 51-464, A (1985), 1224.
- (3) 鈴木・ほか 1 名, 機論, 53-490, A (1987), 1000.
- (4) 鈴木(機械学会編), 機械・構造物の安全性, (1987), 124, 丸善.
- (5) 鈴木・ほか 2 名, 機論, 57-537, A (1991), 1062.
- (6) 加藤・ほか 2 名, 機論, 52-480, A (1986), 1786.
- (7) 西谷・ほか 3 名, 機論, 53-495, A (1987), 1999.
- (8) 矢野, 機論, 55-509, A (1989), 84.
- (9) 原田・ほか 3 名, 機論, 55-551, A (1989), 392.
- (10) 越智・ほか 3 名, 機論, 57-539, A (1991), 1488.
- (11) Kobayashi, T., ほか 2 名, Met. Trans., A, 19(1988), 319.
- (12) 塩田・ほか 2 名, 鋳物第 113 回講演集, (1988-5), 26.
- (13) 杉山・ほか 2 名, 材料, 38(1989), 507.
- (14) 鈴木・ほか 2 名, 機論, 52-537, A (1991), 1029.
- (15) 京極・ほか 5 名, 機論, 掲載予定.
- (16) 例えば, 砂田ほか, 材料, 30-444(1990), 1274.
- (17) 統計的疲労試験方法, S 007, (1981), 日本機械学会.
- (18) 鈴木, 機論, 投稿予定.