ガス浸炭炉熱処理を施した PDI 材と ADI 材の 高サイクル疲労強度および耐摩耗性の比較評価*

土 居 滋^{*1}, 池 田 秀 男^{*2}
上 坂 修 治 郎^{*3}, 光 永 公 一^{*4}

High Cycle Fatigue and Abrasive Wear Resistance Properties of PDI, Gas-Carburizing-Treated PDI and ADI

Shigeru DOI, Hideo IKEDA,
Shujiro UESAKA and Kouichi MITSUNAGA

With a gas carburizing treatment processed to pearlitic ductile cast iron (CPDI), the investigations were carried out about its high cycle fatigue strength and abrasive wear resistance. The high cycle fatigue strength were evaluated by rotating bending fatigue tests, and the fatigue strength was improved about 20 MPa greater than virgin test pieces not-carburized (PDI). The crack initiating point and fracture is from irregular graphites of surface or from microdefects in casting, which PDI and CPDI specimens were not in an inner type fracture. Furthermore, a good result was obtained in the abrasive wear resistance test than in that of austempered ductile cast iron (ADI). Those were expressed by the difference of matrix structures. Its matrix structure of CPDI is transformed a martensite structure from SEM observation.

Key Words: Gas Carburizing, Pearlitic Ductile Cast Iron, High Cycle Fatigue, Rotating Bending, Wear-Resistance, Martensite Structure

1. 緒 言

鋳鉄材料は、生産性・低コストから鋳造のまま用いられている。しかし、その応用面で新たな展開と将来の応用を考える場合、本来の強度部材として培われてきた有用性を残しながら機能面の拡充を計ることが望まれる。このような中で、機械的性質を活かした機能面に着目し、松山⁽¹⁾は、レーザ焼入れを施したフェライト基地およびパーライト基地の球状黒鉛鋳鉄を用い、摩耗試験、シャルピー衝撃試験および疲労試験によって機能評価を行った。この報告例によれば、パーライト基地材はマルテンサイトに局所変態し、耐摩耗性および耐衝撃性の改善効果が見られたが疲労強度に関しては改善されなかったと結論している。さらに、フェライト基地材の場合も同様にマルテンサイトに変態し、その表面改質効果は上述の機能面に対して期待できなかったようである。以上のように、ごく表面層の改質では表面近傍に存在する鋳造時の微小欠陥

(引け巣、ポロシティ等)に対する効果は得られない。

矢野⁽²⁾は、可鍛鋳鉄の機械的性質および疲労試験を通じて熱処理方法に着目し、直接油冷と再加熱油冷の比較を行い、後者のような熱処理は黒鉛と基地組織の間に空けきが生じることから用いるべきでないと報告した上で、このような二次熱処理は黒鉛自身の荷重分担能力を失い、疲労強度を低下させる要因の一つであるとしている。本研究では、この点を踏まえ、著者ら⁽³⁾⁽⁴⁾のオーステンパ球状黒鉛鋳鉄(ADI 材と称す)に関する強度評価および耐摩耗試験データを基に、最も実用頻度が高く、機械的性質および疲労強度特性に優れたパーライト基地材にガス浸炭炉内で熱処理を施す方法を採用し、内部も含めて改質を行った素材の耐摩耗性を含めて比較検討した。ガス浸炭炉を用いた改質は黒鉛の脱炭あるいは黒鉛と基地組織との間に空けきを生じさせることなく硬さを上昇させることにある。本論文は、パーライト基地球状黒鉛鋳鉄(FCD 700, P 材)を用いて、これにガス浸炭炉熱処理を施した材料(PC 材)について、高サイクル疲労強度および耐摩耗性評価を行い、すでに報告したオーステンパ球状黒鉛鋳鉄(ADI 材)の場合と比較検討した結果について述べる。

* 原稿受付 1997 年 9 月 22 日。

^{*1} 正員, 大分大学(☎ 870-1192 大分市貝野原 700)。

^{*2} 学生員, 大分大学大学院。

^{*3} 学生員, 大分大学学部生。

^{*4} 正員, 鹿児島女子短期大学(☎ 890-8565 鹿児島市紫原 1-59 1)。

2. 使用材料および実験方法

供試材は、Y ブロックの底面から切り出したパーライト基地球状黒鉛鑄鉄(FCD 700)を用いた。試験片は、図 1 に示す回転曲げ疲労試験片形状に旋削後、仕上げた試験片(P 材と称す)および図 2 に示す熱処理過程において、950°Cのプロパンガス中で1.8 hの浸炭処理を行い、次に真空炉中で200°Cで2 h保持し、その後N₂ガス封入炉で徐冷後、焼戻した試験片(PC 材と称す)を用いた。さらに、同様の処理を行った摩耗試験片形状を図 3 に示す。平均表面ビッカース硬さはP 材が約 250、ADI 材のビッカース硬さが約 380 であるのに対し、ガス浸炭炉熱処理後の PC 材の場合、約 512 となり P 材に比べ 2 倍以上の上昇が見られた。このような浸炭処理炉を用いた熱処理では先に述べたよ

うに黒鉛の脱炭・空けきを生じることなく硬さを上昇させることが可能である。しかし、多量の炭素を含む鑄鉄に炭素を侵入させる操作を行おうとするものであるため、その疲労強度および耐摩耗性に関する効果の程度は明らかにされていない。表 1 に化学成分、機械的性質および黒鉛性状値を示す。これより P、PC 両材の化学成分に変化はないが、引張強さは P 材が約 882 MPa であるのに対し、PC 材は硬さの増大とともに約 1 018 MPa の値を示した。ADI 材は PC 材とほぼ同様の引張強さを示すが、伸びははるかに大きい。P 材および PC 材の組織の相違は図 4 の組織写真によりブルスアイ組織が消滅し、パーライト部あるいは黒鉛周辺のフェライト組織がマルテンサイト化したことから明らかである。それらの SEM による組織観察で

Table 1 Chemical composition, mechanical properties and S. G. morphology-related parameters (mass %)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mg	Cu
Material P	3.70	2.10	0.42	0.019	0.013	0.015	0.052	0.33
Material PC	3.76	2.19	0.42	0.019	0.012	0.010	0.053	0.33
	σ_B MPa	δ %	hg % ¹⁾	ng 1/mm ² ²⁾	dg mm ³⁾			
Material P	882	7.7	55.98	150	23.81			
Material PC	≥1018	1.4	55.34	154	22.74			

1) hg: nodularity 2) ng: graphite nodule count 3) dg: mean diameter of S. G.
S. G.: Spheroidal Graphite

Fig. 1 Dimensions and profile of specimen

Fig. 2 Heat treatment of carburizing

Fig. 3 Dimensions of test specimen

Fig. 4 Microstructures of two specimens

Fig. 5 Shot blast machine

Fig. 6 Test stage

はマルテンサイトの析出により組織変態を生じている。そこで、これらの試験片を用いて小野式回転曲げ疲労試験機(回転数: 3 000 rpm, 容量: 14.7 N・m)により疲労試験を行った。摩耗試験は ADI 材のデータ⁽⁴⁾を参考にして図 5 および図 6 の装置を用い、衝突角度を 30°, 60° および 90° の場合について摩耗量を測定した。ショットブラストの使用条件を表 2 に示す。

Table 2 Condition of shot brust

Steel grit	Average diameter	Vickers hardness number	Spherical ratio	Nozzle diameter	Air velocity	Air pressure
5 kg	670 μm	420	96%	6 mm	160m/s	5kgf/cm ²

Fig. 7 S-N Curve

Fig. 8 Fracture surface

3. 実験結果

図 7 は、疲労試験結果を示す。P, PC 両材の S-N 曲線の短寿命側では、時間強度の高応力レベルにこう配部の差はないが低応力レベルになるに従って時間強度に差が現れてくる。10⁸ 回の繰返し寿命で比較すると PC 材は P 材に対して 20 MPa 程度、疲労強度の向上が見られる。しかし、図 8(a) に示す PC 材の疲労破面の一例 ($\sigma=340 \text{ MPa}$, $N_f=7.4 \times 10^5$) では硬さの上昇に伴いフィッシュアイに類似した平坦なつめ状模様が観察される。図 8 破面では鋳造時の初期微小欠陥が破壊起点ではなく数個の黒鉛が集まった表面部分が起点となっている。詳細なマッシュアップ写真の観察から起点部分の黒鉛が脱炭により空洞化あるいは、基地組織との間に空けきが生じたものではないことが明らかである⁽⁵⁾。長寿命側における PC 材の破壊起点を観察した結果、マイクロシュリンケージに属するような鋳造時微小欠陥は確認できなかった。これらの破断要因を硬さとの関連から考察で述べる。また、図 9 は摩耗試験結果を ADI 材と比較し示したものである。衝突角度を 30°, 60° および 90° 固定とし、衝突時間は 120 分で実験を行った。ADI 材の摩耗ピークは 40°~60° の範囲で $0.8 \times 10^{-4} [\text{cm}^3/\text{kg}]$ の値を得たのに対し PC 材は 30° 近傍で $0.4 \times 10^{-4} [\text{cm}^3/\text{kg}]$ の値となり 2 倍程度の耐摩耗性を示した。一方、P 材の摩耗量は $7.5 \times 10^{-4} [\text{cm}^3/\text{kg}]$ の値を示し、1 けたオーダの差があり、その差は考察で述べる流動様相からも明らかである。

Fig. 9 Abrasive wear rate and impact angle

4. 考 察

4.1 硬さ分布と材質変化 図 10 は浸炭前後の硬さの分布を測定したものである。既述のように PC 材は表面近傍でばらつきを示すが、内部まで組織変化により上昇しており、P 材より約 2 倍の硬さである。試験片内部までその硬さは変わらず、表面のばらつきはあるがほぼ均一であることがわかる。ADI 材の硬さ分布を図 10 に併せて示す。それらを比較すると硬さは $PC > ADI > P$ の順となる。疲労強度はマルテンサイト組織が硬く脆いことから、フェライト材より低いものとみなされている⁽⁶⁾。しかし、図 7 の疲労試験の結果ではその疲労強度の低下は認められなかった。むしろ、ガス浸炭炉内で熱処理を施すことにより疲労限は P 材より 20 MPa 程度持昇することが明らかとなった。疲労強度に関して言えば $ADI > PC > P$ となり基地の硬さは必ずしも疲労強度上昇に影響を与えとは限らないといえる。そこで、PC 材の疲労寿命特性における長寿命側の破壊形態の詳細な観察を行った。著者ら⁽³⁾は ADI 材の二段折れ曲り破壊機構について詳細に報告した。すなわち、高応力部と低応力部でき裂伝ば機構が変化する。したがって、低応力レベルでは 10^7 回以上の繰返しにおいて内部に存在する微小欠陥から生じたき裂が徐々に伝ばし破断に至る。破断面の特徴はすべてフィッシュアイ形破面を形成することである。PC 材は図 4 に示したマルテンサイト組織への材質的変化による硬さの上昇と脱炭による黒鉛の空洞化あるいは基地組織との間の空けきが生じなかったことにより疲労強度の低下に至らなかったことも推測される。さらに、破面に微小欠陥が観察されなかったことから、組織の体積膨張に起因することが考えられる。以上のことから疲労強度は基地組織によって大きく左右される。すなわち、ADI 材はベイナイトと残留

Fig. 10 Internal hardness distribution of three specimens

オーステナイトの共晶組織であり、PC 材は大部分がマルテンサイト組織であることが大きな要因である。祖父江⁽⁷⁾は硬さと回転曲げ疲労強度の関係を鉄鋼材料と球状黒鉛鋳鉄について詳細な実験を行い鋼材に比較し球状黒鉛鋳鉄の疲労強度が上昇しなかったことを報告している。一般に、鉄鋼材料の場合、Garwood⁽⁸⁾の実験例のように硬度の上昇は疲労強度を高めることが知られている。そこで、本実験で得られた結果を図 11 中に祖父江⁽⁷⁾の実験データと併せて打点して示す。それらから硬さの上昇に伴う疲労強度は鉄鋼材料ほど改善されないことがわかる。これに対して著者ら⁽³⁾が報告した ADI 材と比較して考察すれば、ADI 材のビッカース硬さは 300~400、伸びは 10%程度の機械的性質を示すが、時間強度曲線は二段折れ曲り傾向を示す。ADI 材の長寿命域である $10^7 \sim 10^8$ 回の繰返し域において破断した破面と PC 材の破面の観察では同様の疲労破面の特徴を示す。しかし、疲労強度低下が生じていないことから基地組織の変態が負の要因であるとは考えられない。ただし、本論では考慮していないが、試験片内部に潜在的に有する微小欠陥から生じるき裂伝ばに対する結晶構造の強さを検討する必要性を当然含んでいる。

4.2 破面観察 図 8 は P, PC 両材の $\sigma = 340$ MPa におけるそれぞれの破断寿命が $N_f = 1.4 \times 10^5$, $N_f = 7.4 \times 10^5$ および $\sigma = 305$ MPa での $N_f = 3.5 \times 10^5$, $N_f = 7.8 \times 10^7$ における破面写真の例である。P 材の破断は表面の黒鉛あるいは鋳造時の微小欠陥を起点として生じる。また PC 材の破壊起点を観察したが、P

Fig. 11 σ - H_v Curve⁽⁷⁾

材のような微小欠陥が起点となった試験片は見られなかった。その破面は、前述の著者ら⁽³⁾が報告した ADI 材の疲労挙動として長寿命側で内部欠陥を起点とする平坦なフィッシュアイ模様に見られる擬へき開形に類似した破面が観察され、表面近傍が破壊起点となる。その平坦領域から外側は擬へき開を含む破面模様を示す。その後、徐々にこのような破面形成はき裂前縁の高応力域が長くなって、き裂先端近傍の黒鉛にき裂が生ずるようになる。したがって、このとき結晶粒界またはへき開面が結晶内部より弱くなる現象が起こり得るから、これにより黒鉛を含むへき開破面を形成したものであると考えられる。破面の一部を SEM 観察した拡大写真を図 12 に示す。その結晶構造は五角形の粗大組織を形成し、はちの巣構造に類似している。通常、伸びが 10% 以上になると最終破面は黒鉛周辺の基地組織が引張られ局所的白色を呈する蜘蛛の巣状態になるが、光学顕微鏡レベルでは黒色に観察される。しかし、PC 材では伸びが 1.7% と低いことから結晶粒界形破壊による白色状の脆性的へき開面になる。この点、一般に観察される鑄鉄の破面と異なることからマルテンサイトに変態した結晶構造であると考えてよいであろう。一方、先に述べた ADI 材は表面の機械仕上げによる加工硬化を伴う局所的なマルテンサイト変態により、図 13 に示す低応力、長寿命において内部欠陥を起点とする典型的なスィッシュアイを形成する。したがって、試験片内部までマルテンサイト変態した

(a) Fracture surface

(b) Enlargement of (a)

(c) Enlargement of (b)

 $\sigma = 400 \text{ MPa}, N_f = 8.19 \times 10^4$

Fig. 12 Characteristic fracture surface of material PC

PC 材の破壊機構は ADI 材と異なる。

4.3 摩耗試験⁽⁴⁾ 図 14 は摩耗ピーク角度 60° の場合の衝突流れ方向に試験片を切出し、エメリー紙で研磨後、バフ研磨を施した面の一例を示す。P 材は図の右から左に組織流れ模様が観察される。一方、PC 材は P 材に比較し組織の流れがなく、基地硬さから ADI 材と類似の衝突割れが生じる脆性的傾向を示している。図 9 に著者ら⁽⁴⁾が ADI 材について行った実験結果を打点したもののからピーク摩耗量は ADI 材の $1/2$ 以下であり、耐摩耗性に優れていることが明らかとなった。ADI 材の摩耗特性は初期摩耗量が大きくショット時間が増加するに従い残留オーステナイトがマルテンサイト変態し、摩耗性能が改善されてくる。一方、PC 材はマルテンサイト変態による硬さの上昇、すなわち塑性流動応力が大きくなったため摩耗率が減少したものである⁽⁴⁾。したがって、疲労強度と耐摩耗量の順位は入れ替わり $PC > ADI > P$ となることが明らかとなった。

5. 結 言

以上のように浸炭炉を使用した熱処理により延性を無視したことで短所と長所を合わせ持つ素材となったが、部分浸炭を施す技術が可能となれば鉄鋼材料と接

Fig. 13 Fish eye fracture on ADI

Fig. 14 Microstructure of the eroding surfaces of Materials P and PC at the 60° impact angle

合しなくても実用に役立つものと考えられる。本研究のようなガス雰囲気中で浸炭熱処理を行えば脱炭あるいは空げきが生じることなく良好な硬さが得られることが明らかとなった。以下に得られた結果をまとめて示す。

(1) 球状黒鉛鑄鉄の脱炭を起こさず浸炭炉内で熱処理を施した PC 材の時間強度は伸長し、わずかながら疲労強度が改善されたものとみなされる。しかし、鉄鋼改質材料で得られる、硬さの上昇に見合うほどの疲労強度は顕著に上昇しなかった。

(2) 長寿命側破断の PC 材は、表面分布き裂の合体による進展伝ばの傾向を示していない。それらの破面観察から、ADI 材で観察された平坦部の擬へき開と類似の破壊現象が表面近傍に発生したものである。

(3) 最終破面で観察される破壊形式は脆性的であり、P、PC 両材の破面比較から後者は鑄鉄特有の黒色破面とは異なり、結晶粒界割れ特有の白色破面を示す。

(4) PC 材の疲労強度が低下しなかった要因はマルテンサイト変態に伴う体積膨張による内部圧縮応力の寄与が大きいものと考えられる。

(5) 耐摩耗性は顕著に向上し、ADI 材と同等かそれ以上の結果が得られた。

文 献

- (1) 松山秀信・柴田公博, 機論, 58-548, A(1992), 153-159.
- (2) 矢野満, 機論, 51-461, A(1985), 132-135.
- (3) 土居滋・ほか2名, 機論, 61-591, A(1995), 2381-2385.
- (4) Shimizu, K., Noguchi, T. and Doi, S., *AFS Transactions, Basic Study on the Erosive Wear of Austempered Ductile Iron*, 93-78 (1993), 225-229.
- (5) 土居滋・ほか3名, 機講論, No. 96-15(1996-9), 217-218.
- (6) Wolfensberger, S., Uggowizer, P. and Speidel, M. O., *Die Bruchzähigkeit von Gubeisen Teil II : Gubeisen mit Kugelgraphit*, 39, Jahrgang, (1987), Heft 2, 71-80.
- (7) 祖父江昌久, 鑄物, 48-7(1976), 441-447.
- (8) Garwood, M. F., *Article Entitled "Interpretation of Tests and Correlation with Service"*, P 1(1951), ASM.