

基地組織と黒鉛形状が異なる鑄鉄の高温条件下における疲労強度特性

式 田 昌 弘¹⁾Fatigue Strength Characteristics at Elevated Temperature of Cast Irons
with Different Matrix Structure and Graphite Shape

Masahiro SHIKIDA

Abstract

This study discusses the effects of the microstructure and the temperature change on the fatigue strength through fatigue tests conducted on six kinds of ferrite and pearlite base cast iron in which the graphite shape is flake, vermicular and spheroidal (hereafter referred to as FC, FCV and FCD, respectively). Four point supported rotating bending fatigue tests were carried out for six kinds of cast iron at room temperature and 400°C in air. The fatigue limit was shown to be highest in FCD cast iron and lowest in FC cast iron whereas FCV cast iron took the value between the two in rotating bending fatigue test at room temperature. Even if these values changed due to matrix structure, when considering the large difference of tensile strength in the three kinds of graphite shape, the fatigue limit can be accounted as the same relative value. On the other hand, the fatigue limit of each cast iron decreased with the elevation of testing temperature up to 400°C. The fatigue limit of the FCV cast iron having pearlitic matrix at 400°C was higher than that of the FCD cast iron having same conditions independent of graphite shape. The fatigue limit ratio of ferritic cast irons were higher than those of pearlitic cast irons regarding the matrix structure. This tendency was prominent in fatigue testing result at room temperature.

1. 緒 言

鑄鉄は歴史的に見ても、最も古くから工業用として使用されてきた金属材料である。その理由の一つは、極めて複雑な形状の製品を容易に作るができるからである。しかし、これまでの鑄鉄は引張強さが低く、耐衝撃性が悪いなどの欠点を持つため機械部品としての用途は限られていた。鑄鉄のこのような機械的性質の低さは、主として組織中の黒鉛形状が片状であることに起因する。しかし、1940年代後半になって球状黒鉛鑄鉄（以下FCDと記す）が開発され、鑄鉄も強度部材として使用されるようになった。パーミキュラ黒鉛鑄鉄（以下FCVと記す）は黒鉛形状が芋虫状のもので、片状黒鉛

鑄鉄（以下FCと記す）と球状黒鉛鑄鉄の両方の優れた性質を兼ね備えており、近年、新しい鑄鉄として注目されるようになった⁽¹⁾。

鑄鉄の疲労研究が行われるようになったのは、FCDの機械部品に使用される頻度が高くなった1960年代に入ってからであり、自動車メーカーを中心に始められた。鑄鉄の疲労研究の中で遅れている分野の一つが熱疲労も含めた高温疲労強度の領域である。鑄鉄の融点は一般の鋼に比べ300°C程度低いこともあって使用温度に制限はあるけれども、比較的高温域の450~500°Cまでは連続使用に耐えることができる。実際には室温条件下での数多くの研究報告はあるが、高温での研究報告は少ない⁽²⁾⁽³⁾。FCD（主としてフェライト基地）においては特異的に400°C脆性⁽⁴⁾の問題があって比較的高温域での優れた耐久強度は望めないが、400°C脆性が見られないFCVでは高温域での使用拡大が進んでおり、今後の研究動向

平成16年3月31日 原稿受理

1) 大阪産業大学 工学部交通機械工学科

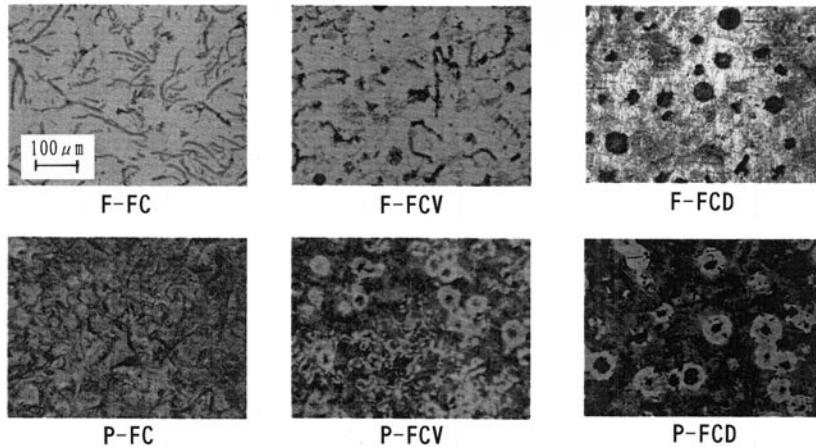


Fig. 1 Optical micrographs showing microstructure of cast irons tested.

Table 1 Chemical composition of cast irons tested.

Materials	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
F-FC	3.172	2.380	0.382	0.049	0.022	0.035	0.000	0.020	0.005
F-FCV	3.664	2.350	0.332	0.033	0.012	0.021	0.009	0.020	0.008
F-FCD	3.681	2.390	0.345	0.030	0.008	0.028	0.009	0.020	0.005
P-FC	3.155	2.391	0.358	0.049	0.020	0.032	0.000	0.020	0.005
P-FCV	3.655	2.348	0.350	0.033	0.012	0.022	0.010	0.020	0.008
P-FCD	3.660	2.352	0.366	0.032	0.010	0.030	0.010	0.020	0.007
Materials	Cu	Ti	V	Pb	Sn	Mg	Sb	Zn	
F-FC	0.047	0.017	0.000	0.037	0.004	0.000	0.000	0.002	
F-FCV	0.100	0.017	0.001	0.044	0.003	0.015	0.000	0.003	
F-FCD	0.049	0.017	0.001	0.037	0.003	0.043	0.000	0.002	
P-FC	0.555	0.018	0.000	0.037	0.045	0.003	0.000	0.002	
P-FCV	0.520	0.017	0.001	0.040	0.044	0.015	0.000	0.003	
P-FCD	0.485	0.018	0.001	0.037	0.040	0.045	0.000	0.002	

に大きな期待が寄せられている。

本研究では、基地組織と黒鉛形状が異なる6種類の鋳鉄材料を用いて室温および比較的高温の400℃における4点式回転曲げ疲労試験を実施して、各種鋳鉄の疲労強度特性におよぼす温度の影響を調べると共に、それらの諸特性と基地組織や黒鉛形状との関係についても考察した。

2. 供試材料および試験片

本研究に用いた材料は基地組織がフェライト地とパーライト地、黒鉛形状が片状、パーミキュラ、球状の6種類の鋳鉄である。素材はφ33×250mmの丸棒として鋳放し状態で供給されたので、主として熱処理によってフェライト基地およびパーライト基地にした。すなわち、フェライト基地を得るには素材を850℃に加熱後、同温

度を130分間保持したのち、炉冷による焼鈍を施した。また、パーライト基地を得るには素材を930℃まで加熱して、90分間保持したのち空冷する焼準処理法を用いた。この際、完全に近いパーライト基地を得るため、鋳造時においては0.5%の銅が添加された。

6種類の鋳鉄の光学顕微鏡による組織写真をFig. 1に、化学成分をTable 1に示す。鋳造に際しては、カーボン量は3.2~3.7%近くになるように、またシリコン、マンガン量は6種類の材料間でそろえるように留意された。

本研究では、回転曲げ疲労試験を行う前に6種類の鋳鉄の機械的性質を調べるため、室温下での引張試験を行った。使用した試験機はインストロン形引張試験機の島津オートグラフAG-1型（負荷容量100KN）であり、引張ひずみ速度は1 mm/minとした。Table 2に供試材料の機械的性質を示す。また、鋳鉄においては材料固

Table 2 Mechanical properties of cast irons tested at room temperature.

Materials	Tensile strength σ_B MPa	Young's modulus E GPa	0.2% proof stress $\sigma_{0.2}$ MPa	Elongation δ %	Reduction of area ψ %	Vickers hardness Hv	Brinell hardness HB
F-FC	169	100	141	1.25	0.48	118	163
F-FCV	356	148	262	11.78	4.48	141	163
F-FCD	409	152	268	28.47	16.36	141	170
P-FC	274	113	229	1.00	0.74	205	229
P-FCV	622	166	371	6.69	3.3	215	229
P-FCD	703	199	404	6.23	2.46	232	248

有の数値として黒鉛球状化率と黒鉛面積率がある。光学顕微鏡で撮影した各供試材料の組織写真をもとに（株）イノテック社の画像解析ソフト、Quick Grain を用いて黒鉛球状化率および黒鉛面積率（黒鉛の volume fraction に相当）を測定した。Table 3 に測定結果を示す。

回転曲げ疲労試験片の形状は JIS 規格に準拠したものであり、疲労試験機の構造上の制約から、室温条件下と高温条件下で用いる試験片の形状寸法は異なるものとな

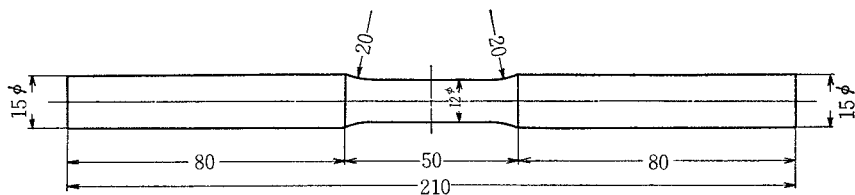
った。Fig. 2 に素材から機械加工した試験片の形状寸法を示す。

3. 実験装置および実験方法

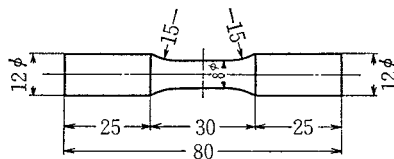
使用試験機は 4 点曲げ形の回転曲げ疲労試験機で、一般に小野式回転曲げ疲労試験機と呼ばれている。この試験機では、丸棒試験片を回転させながら 4 点曲げの負荷

Table 3 Graphite condition of cast irons tested.

Materials	Degree of spheraization (%)	Rate of graphite area (%)
F-FC	4.84	8.02
F-FCV	27.57	10.87
F-FCD	74.79	9.41
P-FC	3.46	10.09
P-FCV	52.56	9.38
P-FCD	74.31	13.73

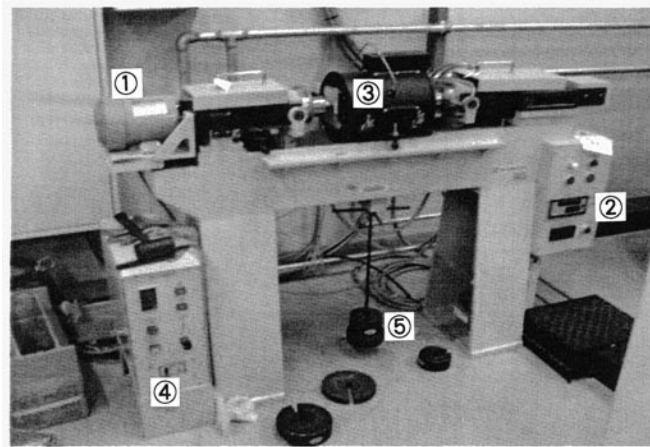


(a) Specimen at room temperature



(b) Specimen at elevated temperature

Fig. 2 Shape and dimension of fatigue test specimens at room and elevated temperature (unit : mm).



- ① Three phase induction motor ④ Temperature controller
 ② Tacho meter, Breaking detector ⑤ Dead weight hanger
 ③ Electric heating furnace, Specimen

Fig. 3 Ono's rotating bending fatigue testing machine.

を与えるので試験片平行部（試験部）の曲げモーメントは一定値となる。Fig. 3は小野式回転曲げ疲労試験機の全景である。図中に各部の名称を示し、2点加力・2点支持の荷重リンク機構によって試験片に最大100N・mの均一曲げモーメントを与えることができる。試験片を回転させる動力源は三相200V・400Wの誘導モータで、回転速度は3,400rpm一定である。試験片の応力繰返数は電気カウンター式積算回転計によって計測され、破断と同時に自動安全停止機能付き破断検出器が作動してモータは自動的に停止する。

高温疲労試験を行う際には、試験片にチャッキング・ロッドを継ぎ足して加熱炉をセットした。加熱には単相100V、最大2.5KWの電気抵抗加熱炉（通称、電気炉）を使用し、その内部には円筒形鋼板を2つ割りにした発熱体が取付けてある。チャッキング・ロッドも電気炉の中で加熱されるので試験片全体が均一な温度分布となる。電気炉からの熱がモータ等の周辺機器に伝わって高温による悪影響を防止するため、チャッキング・ロッド両端の軸受部に外径10mmのビニールパイプを接続して、軸受部には冷却水が流れる構造になっている。温度調節機にはPID制御式小型デジタル指示調整計が採用されている。

疲労試験は、事前に行った室温から比較的高温域までの引張試験結果をもとに、各供試材料の弾性域における応力を負荷する弾性疲労（高サイクル疲労）として実施した。試験温度は室温および400℃の2段階とし、室温条件下ではFig. 2 (a)に示す全長210mmの試験片をセットして疲労試験を行い、400℃の高温条件下ではFig. 2 (b)に示す全長80mmの試験片の両端にチャッキング・ロッドを取付けて試験片アッセンブリーを構成し、

全体が電気抵抗加熱炉内に納まるように加熱炉をセットした。

試験片に負荷する曲げモーメントの大きさは、試験機中央部の重錘受けに載せる重量の増減によって変えることができる。また、試験片には周波数56.7Hzの引張・圧縮両振波形（正弦波形）が負荷され、応力値は曲げモーメントの大きさに比例する。

4. 実験結果および考察

4.1 フェライト基地鑄鉄のS-N線図

Fig. 4～6に黒鉛形状が片状、パーミキュラ、球状であるフェライト基地鑄鉄 F-FC、F-FCV、F-FCDのS-N線図を示す。いずれの図においても、白抜き記号は室温における値、黒塗り記号は比較的高温域の400℃における値である。

報告されている幾つかの研究によれば、疲労強度は黒鉛形状の影響を受け、片状、パーミキュラ、球状の順に大きくなることが分かっている^{(5)～(8)}。また、高温域における鑄鉄の引張特性も黒鉛形状の影響を受け、引張強さ、伸び等の機械的性質は片状、パーミキュラ、球状の順に大きくなることが分かっている^{(9) (10)}。しかし、鑄鉄の疲労強度に対する温度の影響を研究した報告は見当たらない。

Fig. 4～6より疲労強度に対する温度の影響を3種類の鑄鉄について比較すると、室温での疲労強度に対する400℃での疲労強度の割合は、F-FC（片状）で0.63～0.68、F-FCV（パーミキュラ）で0.75～0.76、F-FCD（球状）で0.76～0.78となる。従って、フェライト基地鑄鉄における温度の影響はF-FCが最も大きく、F-FCDが

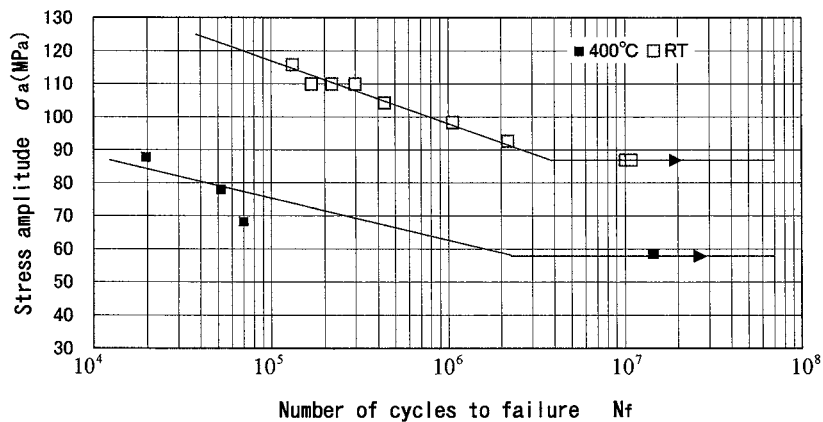


Fig. 4 S-N diagram for flake graphite cast irons with ferritic matrix (F-FC).

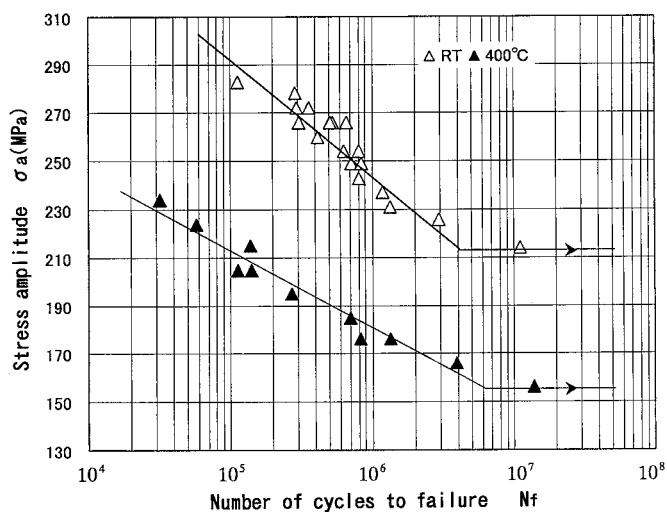


Fig. 5 S-N diagram for compacted vermicular graphite cast irons with ferritic matrix (F-FCV).

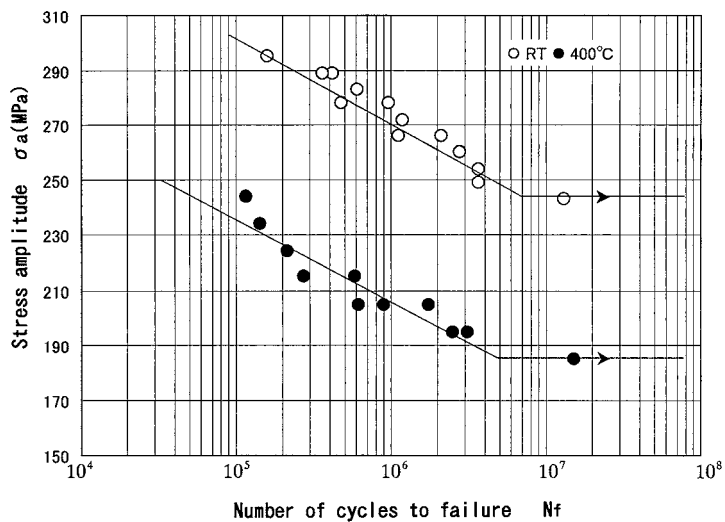


Fig. 6 S-N diagram for spheroidal graphite cast irons with ferritic matrix (F-FCD).

最も小さく、F-FCVはF-FCD 寄りの中間的なものとなることが分かった。この結果は、高温条件下においてはフェライト基地組織の延性増大によって3種類の材料間で黒鉛形状の違いによる切欠き効果の差が大きくなるため、疲労強度に対する黒鉛形状の影響は室温条件下における場合よりもさらに大きくなることを意味している。

4.2 パーライト基地鋳鉄のS-N線図

Fig. 7～9に黒鉛形状が片状、パーミキュラ、球状であるパーライト基地鋳鉄P-FC、P-FCV、P-FCDのS-N線図を示す。フェライト基地鋳鉄の場合と同様に室温での疲労強度に対する400℃での疲労強度の割合を求めると、P-FCでは0.71～0.77（平均0.74）、P-FCVでは0.90～0.84（平均0.87）、P-FCDでは0.86～0.73（平均

0.80）となる。従って、パーライト基地鋳鉄においてはP-FCが温度の影響を最も強く受け、次いでP-FCD、P-FCVの順となるが、パーミキュラ黒鉛鋳鉄(P-FCV)よりも球状黒鉛鋳鉄(P-FCD)の方が温度の影響を強く受けることはフェライト基地鋳鉄の場合と異なっており、注目される。その結果、パーライト基地鋳鉄においては400℃の高温条件下でのパーミキュラ黒鉛鋳鉄と球状黒鉛鋳鉄の疲労強度の大きさは逆転することが予想され、このことは、Fig. 8とFig. 9に示す400℃における値の比較からも理解できる。これまでの研究で、パーライト基地のパーミキュラ黒鉛鋳鉄は高温機能材料として有効に利用できることが報告されており⁽¹¹⁾⁽¹²⁾、疲労強度においてもP-FCVは高温条件下で優れた性質を示すことが分かった。

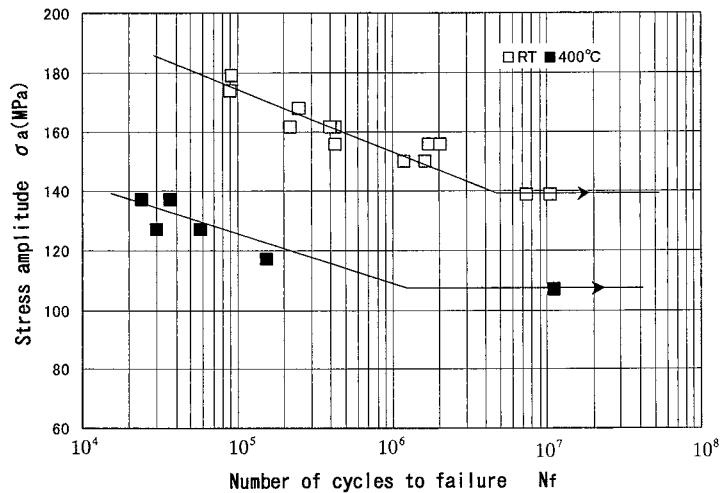


Fig. 7 S-N diagram for flake graphite cast irons with pearlitic matrix (P-FC).

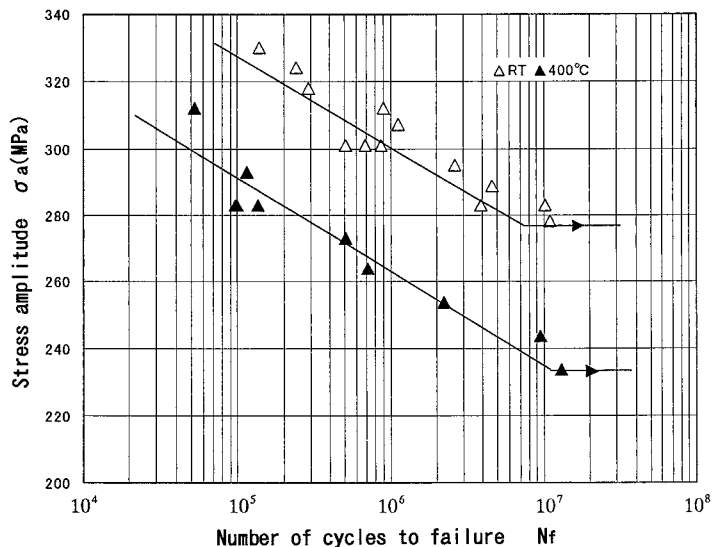


Fig. 8 S-N diagram for compacted vermicular graphite cast irons with pearlitic matrix (P-FCV).

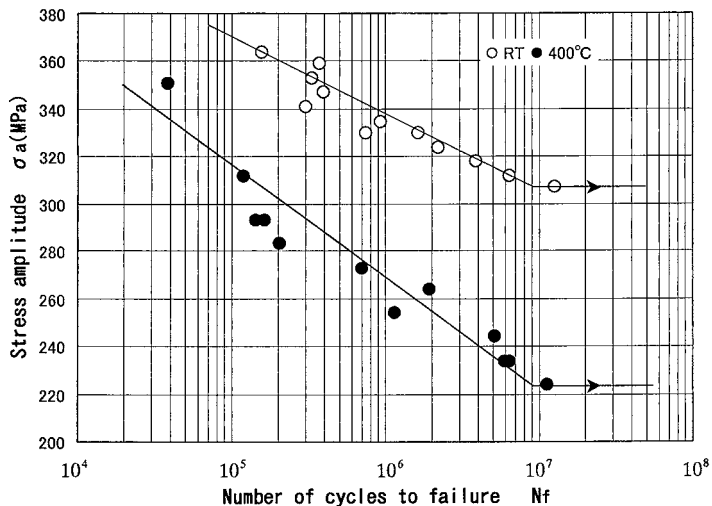


Fig. 9 S-N diagram for spheroidal graphite cast irons with pearlitic matrix(P-FCD).

4.3 疲労限度と疲労限度比

Table 4 に室温 (RT) および400°Cにおける疲労限度 σ_w と疲労限度比 σ_w/σ_B の値を示す。疲労限度は Fig. 4 ~ 9 より求めたものであり、 σ_B は室温および400°Cのもとで行った静的引張試験から得た各供試材料の引張強さである。表から分かるように、いずれの材料についても400°Cの高温条件下における疲労限度は室温の値よりも低下し、フェライト基地鑄鉄では室温の59~77%、パー

ライト基地鑄鉄では室温の72~84%に低下する。また、耐疲労性の指標となる疲労限度比の値も高温になると低下傾向が見られ、特に片状黒鉛鑄鉄 (FC) において大きく低下している。これは黒鉛形状が切欠き効果の大きい片状であるため、温度上昇による基地組織の脆弱化を伴って、疲労き裂伝播が一段と促進される結果であると考えられる。基地別に比較すると、室温⁽¹³⁾ と高温のいずれにおいても、疲労限度はパーライト基地鑄鉄の方が

Table 4 Fatigue limit and fatigue limit ratio of each cast iron.

Material	RT		400°C	
	σ_w (MPa)	σ_w/σ_B	σ_w (MPa)	σ_w/σ_B
F-FC	100	0.62	59	0.45
F-FCV	230	0.65	156	0.53
F-FCD	240	0.59	185	0.54
P-FC	140	0.52	107	0.46
P-FCV	278	0.45	234	0.46
P-FCD	310	0.47	224	0.43

σ_w : Fatigue limit

σ_w/σ_B : Fatigue limit ratio

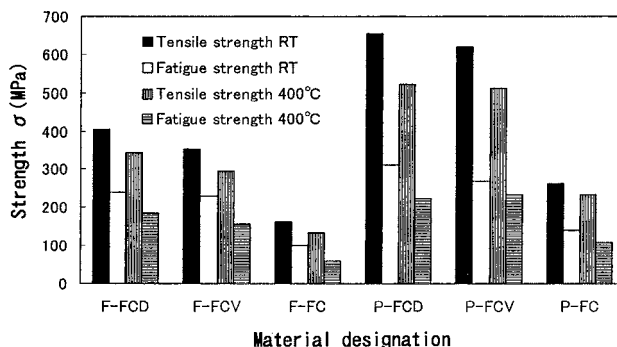


Fig. 10 Tensile strength and fatigue limit of each cast iron at room temperature (RT) and 400°C.

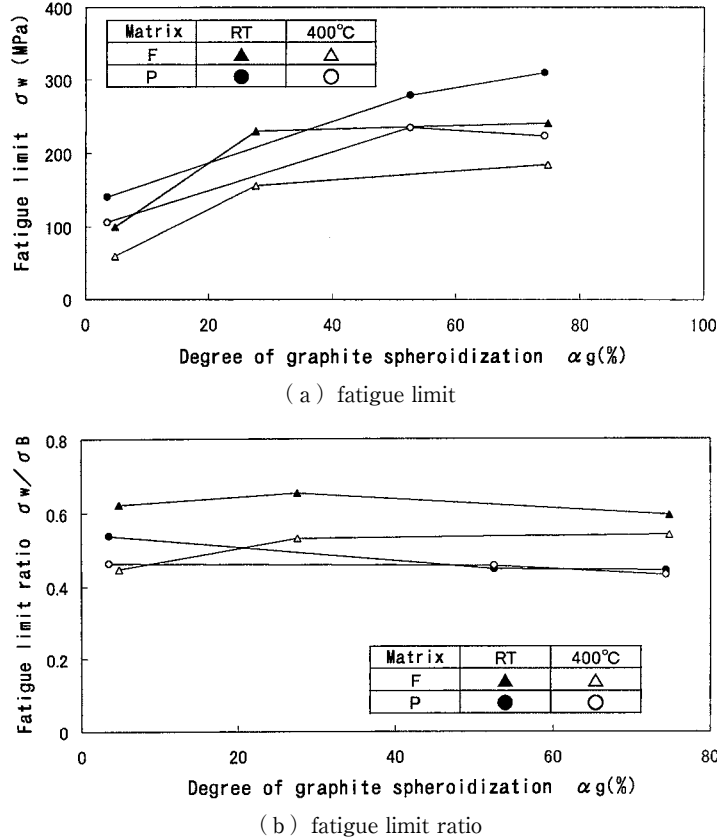


Fig. 11 Relationship between degree of graphite spheroidization and fatigue limit and fatigue limit ratio.

大きく、疲労限度比は高温での1つの例外 (FC) を除けばフェライト基地鋳鉄の方が大きい値となることが分かった。

Fig.10は材料の静的強度を表す引張強さと動的耐久強度を表す疲労強度 (疲労限度) について室温と高温 (400℃) における値を比較したものである。図から分かるように最も顕著な傾向として、いずれの値についてもパーライト基地鋳鉄の方がフェライト基地鋳鉄より勝っていることである。中でもパーライト基地の球状黒鉛鋳鉄とパーミキュラ黒鉛鋳鉄の引張強さは室温と高温の両方において高い値を示すことは注目される。しかし反面において、両材料の疲労強度は期待する程高い値とならないのは興味深い。これは、応力繰返しに伴う基地組織の加工硬化が進む結果、疲労き裂の伝播が脆性的に促進されるためではないかと考えられる。

Fig.11 (a), (b) は黒鉛球状化率に対する疲労限度と疲労限度比の関係を示したものである。前述のごとく全般的な傾向として、疲労限度はパーライト基地鋳鉄 (P) の方が大きく、疲労限度比はフェライト基地鋳鉄 (F) の方が大きくなることが図から理解できる。また、同図の (a) に示すように疲労限度は黒鉛球状化率が

大きくなるのに伴って増大するのに対し、疲労限度比は黒鉛球状化率の値に関係なく、ほぼ一定値となることが (b) の図から分かる。

5. 結言

基地組織と黒鉛形状が異なる6種類の鋳鉄材料を用いて室温および400℃の高温条件下で4点式回転曲げ疲労試験を実施した。得られた結果は次のようである。

(1) フェライト基地鋳鉄においては、疲労強度に対する温度の影響はF-FCが最も大きく、F-FCDが最も小さく、F-FCVはF-FCD寄りの中間的なものとなった。

(2) パーライト基地鋳鉄においては、P-FCの疲労強度が温度の影響を最も強く受け、次いでP-FCD、P-FCVの順となり、パーミキュラ黒鉛鋳鉄 (P-FCV) の疲労強度に対する温度の影響は3種類の材料間で最も小さいことが分かった。

(3) 基地別に比較すると、疲労強度 (疲労限度) に対する温度の影響はフェライト基地鋳鉄の方がパーライト基地鋳鉄よりも強く受けることが分かった。

(4) 室温と高温のいずれにおいても、疲労限度はパ

ーライト基地鑄鉄の方が大きくなった。また、疲労限度比はフェライト基地鑄鉄の方が大きくなる傾向が強く表れた。

(5) 黒鉛球状化率との関係では、疲労限度は黒鉛球状化率が大きくなるに伴って増大するのに対し、疲労限度比は黒鉛球状化率に関係なく、ほぼ一定値となることが分かった。

終わりに、本研究を行うに当たり実験に協力された大阪産業大学大学院生(当時)の坂口拓司君に謝意を表す。また、本研究は大阪産業大学産業研究所の平成13年度分野別研究組織の研究員に登録して頂いたことにより受給した研究費を運用して実施したものである。本学の産業研究所をはじめとする関係各位に対し深く感謝する。

参 考 文 献

- (1) Castagna, M., Ferrero, P., Medana, R., Natela, E.: Trans. AFS, 86(1978), 573.
- (2) 古郷, 荻野, 中川, 小林, 浅見: 材料, 35-393(1986), 617.
- (3) 式田, 松本, 坂根, 大南: 日本機械学会論文集 A, 57-536(1991), 700.
- (4) 柳沢: 機械の研究, 38-8(1986), 915.
- (5) Bhandhubanyong, P., 梅田, 木村: 鑄物, 54-12(1982), 802.
- (6) 鈴木, 大藪, 植木, 国尾: 日本機械学会論文集 A, 50-451(1984), 520.
- (7) 江原, 石橋, 木村, 増尾, 塩田, 小松: 材料, 32-306(1983), 360.
- (8) 猿木, 堀田, 小川: 日本材料強度学会誌, 23-2(1988), 43.
- (9) 柳沢, 丸山, 有井, 岩谷: 鑄物, 52-6(1980), 331.
- (10) 式田, 松本: 鑄造工学, 70-9(1998), 629.
- (11) 柳沢, 呂: 鑄物, 55-1(1983), 17.
- (12) Forrest, P. G.: J. Iron Steel Inst., 200-6(1962), 452.
- (13) Shikida, M., Kanayama, Y., Nakayama, H.: Proc. 29th Jpn. Congre. on Mat. Res., (1986), 23.