



室蘭工業大学

学術資源アーカイブ

Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive



レアアースレス球状黒鉛鋳鉄の疲労強度に関する研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2015-06-11 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 船曳, 崇史 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.15118/00005130

平成 26 年度 博士学位論文

レアアースレス球状黒鉛鑄鉄の
疲労強度に関する研究

室蘭工業大学大学院工学研究科

物質工学専攻

船曳 崇史

目次

第一章 緒論

1. 1 緒言	2
1. 2 球状黒鉛鑄鉄とレアアースの関係	3
1. 3 本研究の目的	4
1. 4 本論文の構成	4
参考文献	5

第二章 レアアースレス球状黒鉛鑄鉄の疲労強度

2. 1 緒言	10
2. 2 供試材および実験条件	
2. 2. 1 供試材の製作	10
2. 2. 2 実験条件	11
2. 3 実験結果および考察	
2. 3. 1 疲労試験結果	12
2. 3. 2 破面観察結果	12
2. 3. 3 鑄造欠陥の定量評価	13
2. 4 結言	15
参考文献	16

第三章 種々の基地組織を有するレアアースレス球状黒鉛鑄鉄の疲労強度

3. 1 緒言	29
3. 2 供試材の製作	29
3. 3 実験結果および考察	
3. 3. 1 疲労試験結果	30
3. 3. 2 破面観察結果	30
3. 3. 3 各基地組織における鑄造欠陥の評価	31
3. 4 結言	32
参考文献	32

第四章 球状黒鉛鑄鉄の疲労強度におよぼすレアアース含有量の影響

4. 1 緒言	40
4. 2 供試材の製作	40
4. 3 実験結果および考察	
4. 3. 1 疲労試験結果	41
4. 3. 2 破面観察結果	42
4. 3. 3 各 RE 含有量における鑄造欠陥の定量評価	42
4. 4 結言	43
参考文献	44

第五章 総論

5. 1 本研究で得られた成果	53
5. 2 今後の課題と展望	54
謝辞	56
本研究に関する著者の公開論文	57
Figure captions	59
List of tables	61

第一章

緒論

1. 1 緒言

鋳鉄は機械・構造材料として幅広く使用されており，素形材産業の中核をなしている．鋳鉄の特徴として，溶解金属を用いた加工法である点が挙げられる¹⁾．この方法により，複雑な形状のものを一度に大量生産が可能であるため，多くの部品から構成される自動車などの強度部品として主に需要があり，軽量化や低コスト化が強度部品に求められる中で，いかに高品質な鋳鉄を製造するかなど，多くの研究が行われている．

鋳鉄には様々な種類があるが，片状黒鉛鋳鉄や球状黒鉛鋳鉄はフェライトやパーライトなどの基地組織と黒鉛から構成されており，黒鉛の形状によって，機械的性質が変化する．黒鉛が針のように鋭利な形状で分布している片状黒鉛鋳鉄に対して，球状黒鉛鋳鉄における黒鉛は Fig. 1-1 に示すように球形状に晶出している．本研究において着目した球状黒鉛鋳鉄は黒鉛が球状であることから，応力の集中が緩和されるため，黒鉛先端に応力集中が生じやすい片状黒鉛鋳鉄と比較して，強度部材として使用する際に必要な引張強さや疲労強度などの機械的性質に優れている．

鋳鉄が用いられる機械・構造物部材は，破壊に至る原因の大半が疲労によるものであるため，疲労強度は重要な機械的性質の一つである^{2~4)}．特に，金属材料の疲労は非常に重要な問題であり，一般の機械や構造物などの設計を行う際，材料の引張強さなどの静的強度を基礎として設計することは少なく，荷重が繰返し負荷されても破壊や損傷を生じない疲労を考慮した設計が行われるため，使用する材料の疲労強度について調査を行うことは重要となる^{5),6)}．

球状黒鉛鑄鉄の機械的性質を決める要因として、黒鉛の球状化率や粒数がある。Fig. 1-2 に黒鉛の球状化率と引張強さおよび伸びの関係を示す⁷⁾。Fig. 1-2 より黒鉛の球状化率が 80%以上となることで引張強さと伸びが向上することがわかる。このように高品質な球状黒鉛鑄鉄を製作するには黒鉛の性状を良好にする必要がある。

1. 2 球状黒鉛鑄鉄とレアアースの関係

前節に示したように高品質な球状黒鉛鑄鉄を製造するためには黒鉛の球状化率および粒数を増加させる必要があり、その時に用いられるのが黒鉛の球状化剤である。球状化剤の主な成分として脱酸、脱硫によって O や S との化合物を生成し黒鉛の核となる効果がある Mg、その他に Al, Ca, そして希土類元素（レアアース）等が含まれている。レアアース（以下、RE）は 31 鉱種あるレアメタルの中の 1 鉱種で、Fig. 1-3 に示される第 3 族のうちアクチノイドを除く第 4 周期から第 6 周期までの元素であり、鑄造で使用する球状化剤には主に Ce や La が使用されている。

RE の効果として球状化阻害元素の中和があり、RE は黒鉛の球状化を阻害する Sb, Sn, Pb 等の元素と化合物をつくり、これらの元素の害を中和する。さらに、球状黒鉛鑄鉄を製造する際に使用される原材料に含有される S は RE と化合物をつくり、黒鉛晶出の下地となることで黒鉛粒数が増えるとともに、チル化が抑えられるため、機械的性質が良好になる。他にも RE は Mg よりも S, N, O との親和力が強く、溶湯中の不純物を固定して Mg の効果の持続力を高めるため、フェーディングを抑える。このように

RE は添加量が微小ながらも様々な作用があり，高品質な球状黒鉛鑄鉄を製造するために，RE は欠かせない存在である．

しかしながら，RE は生産量の 9 割を中国が占めており，日本国内における生産量はわずかであることから，海外からの輸入に頼っている．2011 年頃に中国の輸出規制により価格が高騰した事例があることから，国際情勢の影響によっては価格が高騰し，安定した供給が困難となる可能性がある．そこで，球状化剤中の RE を低減した場合でも，従来の品質に劣らない球状黒鉛鑄鉄の開発が必要となっている．

1. 3 本研究の目的

本研究では，球状黒鉛鑄鉄を鑄造する際に使用される球状化剤に含有されている RE に着目した．RE 含有量を低減した球状黒鉛鑄鉄を使用し，機械・構造用部材として必要な疲労強度へ与える影響について明らかにすることで，RE を低減した球状黒鉛鑄鉄の開発を目的とする．

1. 4 本論文の構成

本論文は，全五章で構成され，下記に各章の概要について述べる．

第一章では，球状黒鉛鑄鉄の性質および RE との関係について述べるとともに，本研究の意義と目的を述べた．

第二章では，球状化剤中の RE 含有量による疲労強度への影響を調査するために，RE 含有量を 0% と 2.0% とした球状化剤を使用して球状黒鉛鑄鉄を製作し，平面曲げ疲労試験を行った．その結果から，RE を含有していない球状化剤を使用した場合に疲労

強度に及ぼす影響について調査を行った。

第三章では，基地組織を変化させた球状黒鉛鑄鉄を，球状化剤の RE 含有量を調整した球状化剤を使用して製作し，平面曲げ疲労試験を行う。その結果から，基地組織の違いによって，RE 含有量が疲労強度に与える影響について明らかにする。

第四章では，RE 含有量を 0%～2.0% の間で細かく調整した球状化剤を使用した球状黒鉛鑄鉄を製作し，平面曲げ疲労試験を行った。その結果から球状化剤中の低減可能な RE 含有量について検討を行った。

第五章は総括であり，本研究の成果を要約する。

参考文献

- 1) 中江秀雄：新版 鑄造工学(産業図書)(2008)
- 2) 河本実：金属の疲労(朝倉書店)(1962)
- 3) 黒木剛司郎，大森宮次郎，友田陽：金属の強度と破壊
(森北出版)(1977)
- 4) 石橋正：の破壊と防止(増改訂版)(養賢堂)(1967)
- 5) 田中真人，清水一道，伊藤大二郎，成瀬健：鑄造工学 82(2010)
344
- 6) 野口徹，清水一道，小林 智浩：日本機械学会論文集 60(1994)
1524
- 7) 藤田忠男：鑄物 40(1968) 300

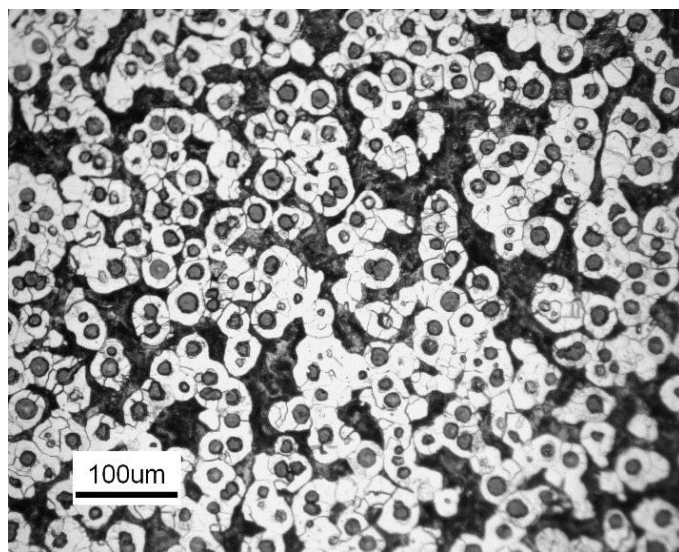


Fig. 1-1 Microstructure of spheroidal graphite cast iron.

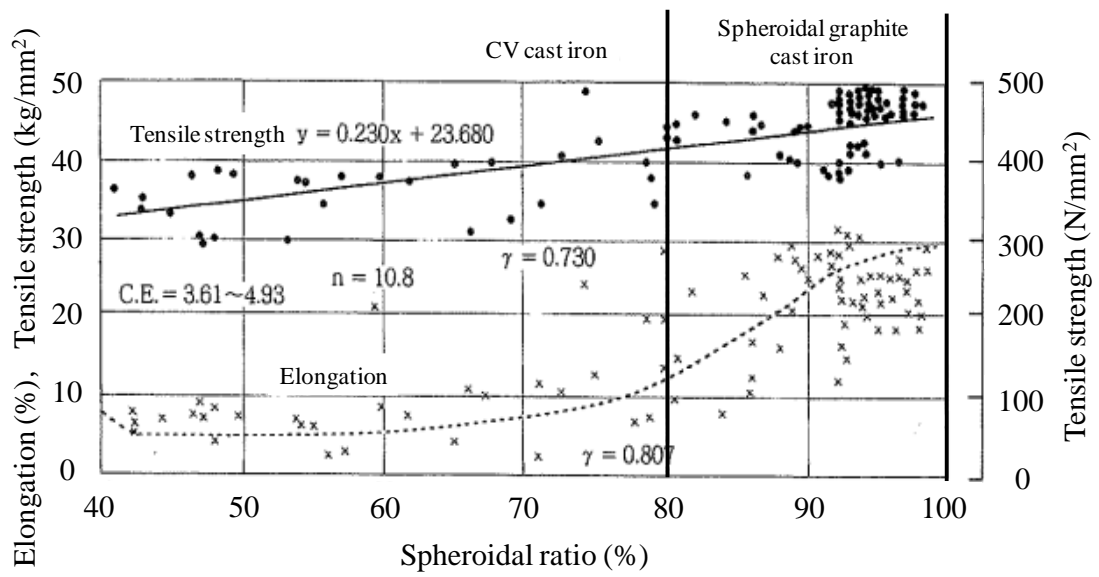


Fig. 1-2 Influence of spheroidal ratio on tensile strength and elongation.

1 H 1.0079																	2 He 4.0026															
3 Li 6.941	4 Be 9.0122											5 B 10.811	6 C 12.011	7 N 14.007	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne 20.180															
11 Na 22.990	12 Mg 24.305											13 Al 26.982	14 Si 28.086	15 P 30.974	16 S 32.065	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948															
19 K 39.098	20 Ca 40.078	21 Sc 44.956	22 Ti 47.867	23 V 50.942	24 Cr 51.996	25 Mn 54.938	26 Fe 55.845	27 Co 58.933	28 Ni 58.693	29 Cu 63.546	30 Zn 65.409	31 Ga 69.723	32 Ge 72.64	33 As 74.922	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.798															
37 Rb 85.468	38 Sr 87.62	39 Y 88.906	40 Zr 91.224	41 Nb 92.906	42 Mo 95.94	43 Tc (98)	44 Ru 101.07	45 Rh 102.91	46 Pd 106.42	47 Ag 107.87	48 Cd 112.41	49 In 114.82	50 Sn 118.71	51 Sb 121.76	52 Te 127.60	53 I 126.90	54 Xe 131.29															
55 Cs 132.91	56 Ba 137.33	57-71 *	72 Hf 178.49	73 Ta 180.95	74 W 183.84	75 Re 186.21	76 Os 190.23	77 Ir 192.22	78 Pt 195.08	79 Au 196.97	80 Hg 200.59	81 Tl 204.38	82 Pb 207.2	83 Bi 208.98	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)															
87 Fr (223)	88 Ra (226)	89-103 #	104 Rf (261)	105 Db (262)	106 Sg (266)	107 Bh (264)	108 Hs (277)	109 Mt (268)	110 Ds (281)	111 Rg (272)	112 Uub (285)	113 Uut (284)	114 Uuq (289)	115 Uup (286)	116 Uuh (291)		118 Uuo (294)															
* Lanthanide series		<table border="1"> <tr> <td>57 La 138.91</td> <td>58 Ce 140.12</td> <td>59 Pr 140.91</td> <td>60 Nd 144.24</td> <td>61 Pm (145)</td> <td>62 Sm 150.36</td> <td>63 Eu 151.96</td> <td>64 Gd 157.25</td> <td>65 Tb 158.93</td> <td>66 Dy 162.50</td> <td>67 Ho 164.93</td> <td>68 Er 167.26</td> <td>69 Tm 168.93</td> <td>70 Yb 173.04</td> <td>71 Lu 174.97</td> </tr> </table>																57 La 138.91	58 Ce 140.12	59 Pr 140.91	60 Nd 144.24	61 Pm (145)	62 Sm 150.36	63 Eu 151.96	64 Gd 157.25	65 Tb 158.93	66 Dy 162.50	67 Ho 164.93	68 Er 167.26	69 Tm 168.93	70 Yb 173.04	71 Lu 174.97
57 La 138.91	58 Ce 140.12	59 Pr 140.91	60 Nd 144.24	61 Pm (145)	62 Sm 150.36	63 Eu 151.96	64 Gd 157.25	65 Tb 158.93	66 Dy 162.50	67 Ho 164.93	68 Er 167.26	69 Tm 168.93	70 Yb 173.04	71 Lu 174.97																		
# Actinide series		<table border="1"> <tr> <td>89 Ac (227)</td> <td>90 Th 232.04</td> <td>91 Pa 231.04</td> <td>92 U 238.03</td> <td>93 Np (237)</td> <td>94 Pu (244)</td> <td>95 Am (243)</td> <td>96 Cm (247)</td> <td>97 Bk (247)</td> <td>98 Cf (251)</td> <td>99 Es (252)</td> <td>100 Fm (257)</td> <td>101 Md (258)</td> <td>102 No (259)</td> <td>103 Lr (262)</td> </tr> </table>																89 Ac (227)	90 Th 232.04	91 Pa 231.04	92 U 238.03	93 Np (237)	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)	103 Lr (262)
89 Ac (227)	90 Th 232.04	91 Pa 231.04	92 U 238.03	93 Np (237)	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)	103 Lr (262)																		

Fig. 1-3 Rare earth of periodic table.

第二章

レアアースレス球状黒鉛鑄鉄の 疲労強度

2. 1 緒言

前章で述べたように，高品質な球状黒鉛鑄鉄を製造するためには RE は欠かせないものとなっている．

そこで本章では，RE が含有されている黒鉛の球状化剤に着目し，その RE 含有量を 0% と 2.0% とした球状黒鉛鑄鉄を製作した．疲労強度を平面曲げ疲労試験によって計測し，その結果から，球状化剤における RE の有無によって，疲労強度へ与える影響について調査した．

また，試験片の表面状態を平滑状態と鑄肌状態の供試材とすることで，表面性状の違いによって RE が疲労強度に及ぼす影響に変化が生じるかを検討した．

2. 2 供試材および実験条件

2. 2. 1 供試材の製作

供試材は RE の使用，未使用による影響を調査する為に，RE 含有量 0% と 2.0% の黒鉛球状化剤を用いてそれぞれ製作した．Table2-1 に球状化剤の化学成分を示す．供試材とした球状黒鉛鑄鉄は FCD450 相当とし，鉄スクラップを原材料として溶解後，サンドイッチ法にて球状化処理を行った．接種剤は Table 2-2 に示す化学成分のものを，取鍋接種及び注湯流接種にて統一して使用した．供試材の形状は薄肉板状とし，平滑材用の 120×40×6mm と鑄肌材用の 120×40×3mm の木型を使用して造型した砂型に注湯した．Table2-3 に各供試材の化学成分を示す．また，基地組織は Fig. 2-1 に示すパーライト地率約 30% のブルスアイ組織とした．

製作した供試材の球状化率および機械的性質の測定を行った．

測定方法は JISG5502 に準じ、計測対象の黒鉛を $15\mu\text{m}$ 以上とした。光学顕微鏡にて、倍率を 100 倍とした写真を 5 視野撮影し、黒鉛測定用の画像処理ソフトにて算出した。

引張強度は万能試験機を用いた引張試験によって測定を行った。引張試験片は JISZ2201 に規定されている平行部直径 14mm、平行部の長さ 60mm、標点距離 50mm とした JIS4 号試験片を使用した。硬さ試験にはビッカース硬さ試験機を使用し、対面角 136deg. のダイヤモンド正四角錘圧子にて試験荷重を 30kgf、荷重保持時間 10s とし、10 点平均にて測定を行った。測定したビッカース硬さをブリネル硬さに換算を行った。

Table2-4 に黒鉛の球状化率および粒数と機械的性質を示す。Table2-4 より球状化率は 80% 以上となっており、粒数に関しても RE0% では $303\text{個}/\text{mm}^2$ 、RE2.0% では $301\text{個}/\text{mm}^2$ となり、RE の有無によって差は生じなかった。引張強度や伸び等の機械的性質についても RE によって差はなく、良好な性質を示した。

2. 2. 2 実験条件

製作した各供試材を Fig. 2-2 に示す厚さ 3mm、最小幅部 20mm の平面曲げ疲労試験片に加工した。表面性状を加工によって平滑状態にした試験片（以下、平滑材）と鑄肌を保った状態にした試験片（以下、鑄肌材）の 2 種類とした。疲労試験には Fig2-3 に示す平面曲げ疲労試験機（東京衝機製造所 PBF30C）を使用した。試験条件は、変動応力を応力比 -1 の両振り、繰返し速度 20Hz の正弦波荷重とし、室温、大気中にて試験を行った。試験片が破断、または繰返し数が 1×10^7 回に達した場合を試験停止条件とし、繰

返し数が 1×10^7 回に達しても未破断であった試験片の負荷応力を疲労強度とした。

2. 3 実験結果および考察

2. 3. 1 疲労試験結果

平滑材の疲労試験結果を横軸に繰返し数，縦軸を負荷応力とした S-N 線図にて Fig. 2-4 に示す。Fig. 2-4 より RE2.0% の試験片は疲労強度が 310MPa，RE0% の試験片では 270MPa となり，疲労強度は 13% 低下した。

鋳肌材の疲労試験結果を Fig. 2-5 に示す。Fig. 2-5 より疲労強度は RE2.0% で 260MPa，RE0% で 240MPa となり，8% 低下した。平滑材と鋳肌材の疲労強度を比較した結果を Fig. 2-6 に示す。Fig. 2-6 より，鋳肌材は平滑材と比較すると，RE 使用の有無による疲労強度の低下率は小さくなった。しかしながら，平滑材の疲労強度と比較すると，その値は RE2.0% で 50MPa，RE0% で 30MPa 低下した。

2. 3. 2 破面観察結果

平滑材，鋳肌材において RE の有無によって，疲労強度とその低下率に差が生じた理由を考察するため，破断した試験片をエタノールとドライアイスを用いて脆性延性遷移温度よりも低温で 5 分以上保持した後，脆性破壊させた。破断した試験片を走査型電子顕微鏡(以下，SEM)にて破面を詳細に観察した。

平滑材における破面の巨視観察結果を Fig. 2-7 に示す。RE0% では目視で確認できるほどの大きさの鋳造欠陥が存在する試験

片があった。また、凹凸が顕著なものがたびたび存在したが、これは RE0%、RE2.0%の両方で確認できたため、RE使用の有無には依存していないと考えられる。応力の高低と凹凸の大きさの相関性も確認されなかった。

平滑材における SEM 観察結果を Fig.2-8 に示す。RE0%の試験片では、巨視観察で見られた、破面内部の大きな鑄造欠陥だけでなく、破面の表面近傍に存在する小さな鑄造欠陥も多数観察された。欠陥の大半はひけ巣であったが、異常黒鉛もわずかに存在した。RE2.0%の試験片においても鑄造欠陥は確認されたが RE0%と比較すると微小であり、数も少なくなった。

次に鑄肌材における破面の巨視観察結果を Fig. 2-9 に示す。平滑材の破面と比較すると、凹凸が大きく粗い破面が多くなった。

鑄肌材の破面の SEM 観察を行った。Fig. 2-10 に RE0%の破面に観察された内部欠陥を示す。また、RE2.0%、RE0%の試験片共に、表面および表面近傍で平滑材では存在しなかった Fig. 2-11 に示すようなピンホールやのろかみが観察された。

2. 3. 3 鑄造欠陥の定量評価

疲労破面中に観察された鑄造欠陥は、き裂の発生起点や進展速度に影響し破断に至る原因となる。しかしながら、これらの欠陥全てが破断の原因であるとは断言できない。そこで、欠陥の大きさを定量的に評価するために用いたのが、 $\sqrt{\text{area}}$ パラメータモデルである¹⁾。 $\sqrt{\text{area}}$ パラメータモデルは鑄造欠陥であるひけ巣や異常黒鉛が内接する矩形範囲面積の平方根のことであり、欠陥の面積をき裂長さに代替することができる。これを用いることで形

状の異なる鑄造欠陥でも比較が可能になる。この値が大きくなると、き裂の起点となりやすいと知られている。

次に求めた \sqrt{area} の値を用いて、き裂先端における応力場の強さを表す応力拡大係数範囲 ΔK を以下の式から算出した²⁾。

$$\Delta K = \alpha \Delta \sigma \sqrt{\pi \sqrt{area}}$$

ここで α は定数であり、内部欠陥のとき $\alpha=0.5$ 、表面欠陥のとき $\alpha=0.65$ である。また、 $\Delta \sigma$ は両振りの平面曲げの場合、 2σ を代入する。

さらに、 ΔK の比較対象として、下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} を以下の式から算出した³⁾。

$$\Delta K_{th} = 3.3 \times 10^{-3} (Hv + 120) (\sqrt{area})^{1/3}$$

ΔK_{th} は、き裂が伝播する最小の ΔK のことである。

すなわち ΔK が ΔK_{th} を上回ると、その欠陥からき裂が伝播し破断に至る原因となった可能性がある。そこで、各試験片の鑄造欠陥における ΔK と ΔK_{th} の値から、RE0%の試験片において疲労強度が低下した要因を考察した。

各試験片に観察された鑄造欠陥の中でのき裂の進展に最も影響を与える最大寸法の鑄造欠陥とその各パラメータを Fig.2-12 と Table2-5 に示す。Table2-5 より平滑材において RE0%の試験片の疲労強度が低下した理由として ΔK の値が ΔK_{th} を大きく上回る鑄造欠陥が内部に存在したためであると推察される。鑄肌材の RE0%において平滑材と同様に試験片内部に鑄造欠陥が多く観察された。しかしながら、RE2.0%と RE0%で疲労強度の差が平滑材よりも低く、疲労強度が低下した原因として、表面および表面近傍に存在している欠陥の $\Delta K/\Delta K_{th}$ が内部に存在する欠陥よりも

大きくなったことから、鑄肌による表面および表面欠陥がき裂発生起点となったためであると推察される。

2. 4 結言

本章では、RE含有量を2.0%と0%とした球状化剤を使用して作製した球状黒鉛鑄鉄にて平面曲げ疲労試験を行うことで、REの有無による疲労強度への影響を明らかにした。また、表面性状を平滑状態と鑄肌状態とすることで、表面性状が疲労強度に及ぼす影響についても調査した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 疲労試験の結果、RE0%の試験片における疲労強度はRE2.0%の試験片と比較して、平滑材では13%、鑄肌材では11%低下した。
- (2) 平滑材において、RE0%の試験片内部に存在した鑄造欠陥を $\sqrt{\text{area}}$ パラメータ法を用いて ΔK と ΔK_{th} で評価した結果、 ΔK_{th} を上回る ΔK を有する鑄造欠陥が存在したことが疲労強度低下の要因であると考えられる。
- (3) 鑄肌材の試験片では、内部に存在する鑄造欠陥よりも表面近傍に存在する鑄造欠陥の $\Delta K/\Delta K_{th}$ の値が大きくなったことからREを低減することで発生する内部欠陥の影響が小さく、平滑材と比較して疲労強度が低下したと推察される。

参考文献

- 1) 村上敬宜，石田誠：日本機械学会論文集(A編) **51**(1985)
1050-1056
- 2) 村上敬宜：金属疲労微小欠陥と介在物の影響(養賢堂)(1993)
17
- 3) 村上敬宜：金属疲労微小欠陥と介在物の影響(養賢堂)(1993)
58

Table2-1 Chemical composition of nodularizer.

	Si	Mg	Ca	RE	Al
RE0%	46.27	5.80	3.02	-	0.81
RE2.0%	46.62	5.95	2.36	2.03	—

mass%

Table2-2 Chemical composition of inoculant.

Si	Ca	Ba	Al	Fe
73.71	1.75	0.93	2.06	Bal.

mass%

Table2-3 Chemical composition of molten metal.

	C	Si	Mn	Cu	S	Mg	P	Cr
RE0%	3.84	2.54	0.39	0.088	0.006	0.037	0.015	0.039
RE2.0%	3.80	2.62	0.34	0.162	0.008	0.040	0.018	0.040

mass%

Table2-4 Spheroidal ratio and mechanical properties
of specimens.

	Spheroidal ratio [%]	Nodule count [counts/mm ²]	Tensile strength [N/mm ²]	Elongation [%]	Brinell hardness [HB]
RE0%	88	303	518	17	179
RE2.0%	83	301	504	19	170

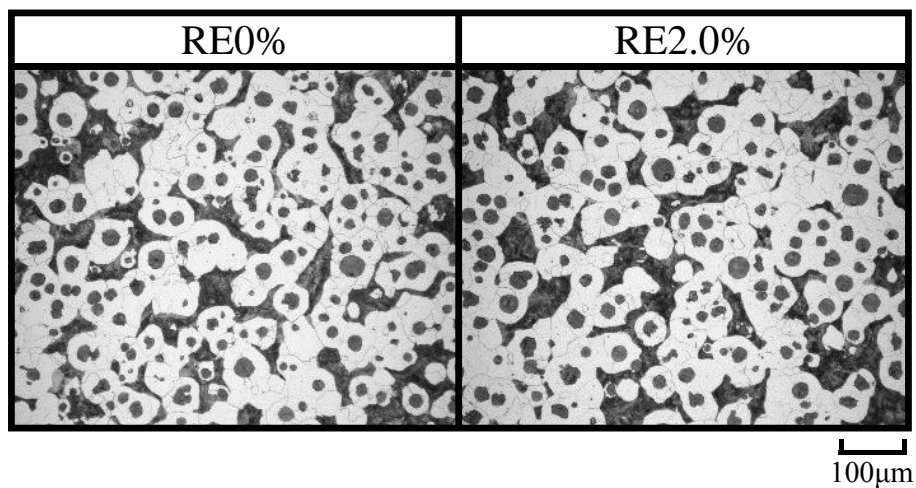
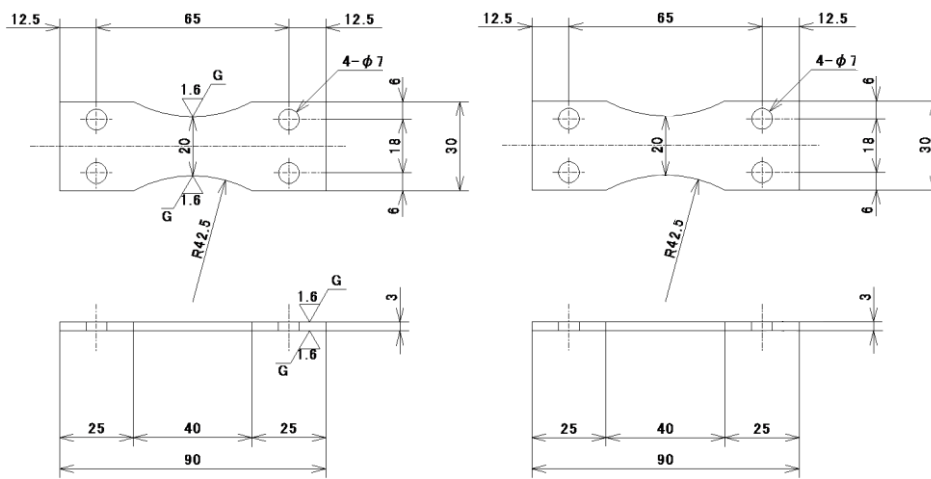


Fig. 2-1 Microstructure of specimens.



Smooth type

Casting surface type

Fig. 2-2 Schematic diagrams of specimen.



Fig. 2-3 Plane bending fatigue testing machine.

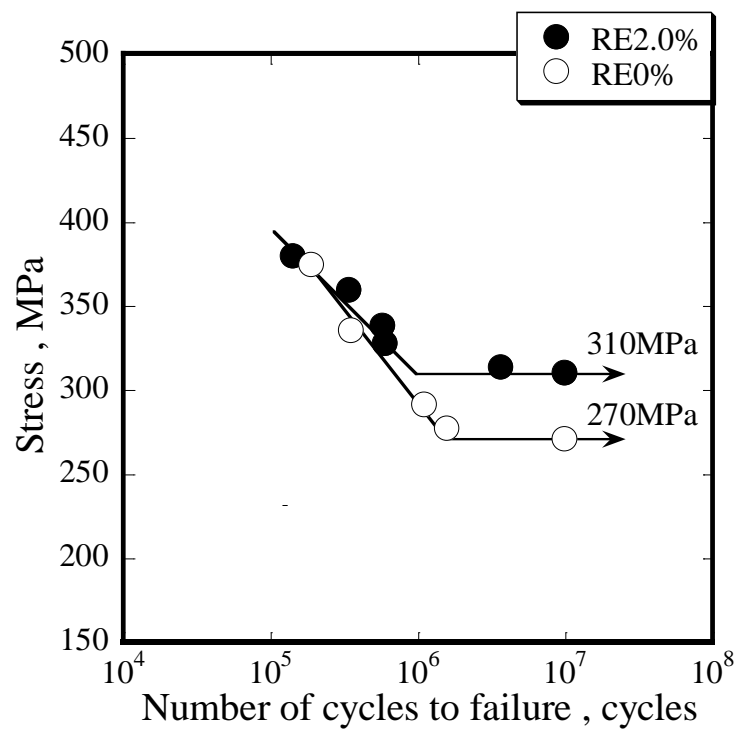


Fig. 2-4 S-N diagram of smooth specimens.

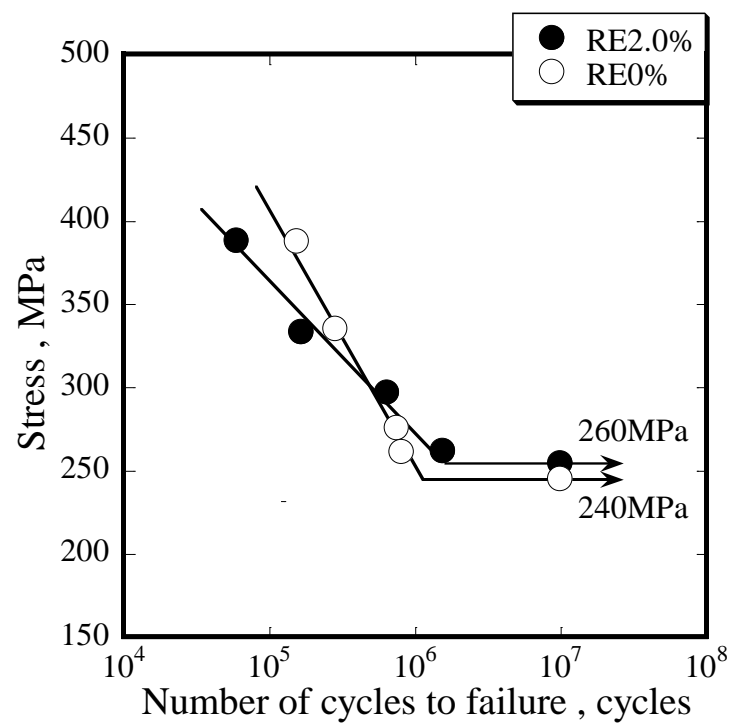


Fig. 2-5 S-N diagram of casting surface specimens.

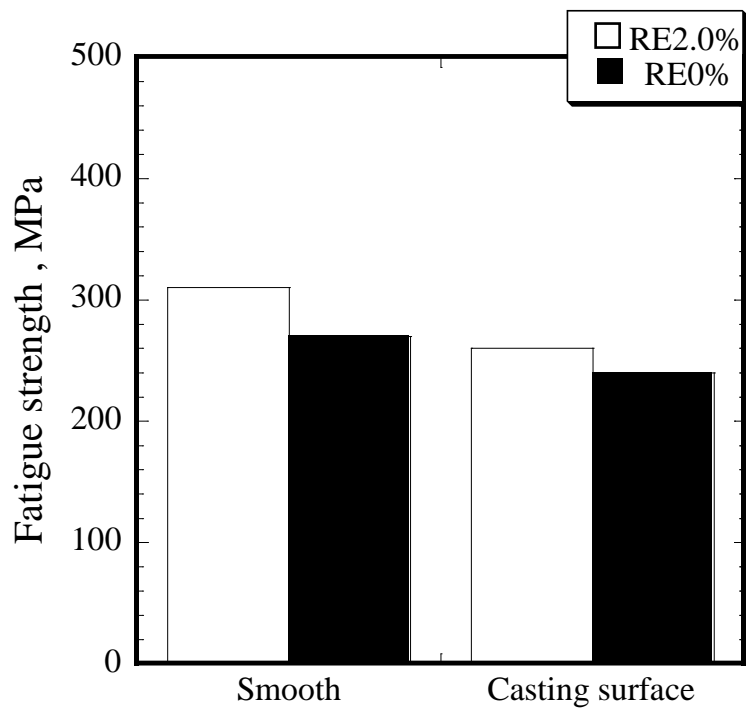


Fig. 2-6 Fatigue strength of smooth and casting surface specimens.

RE 0 %

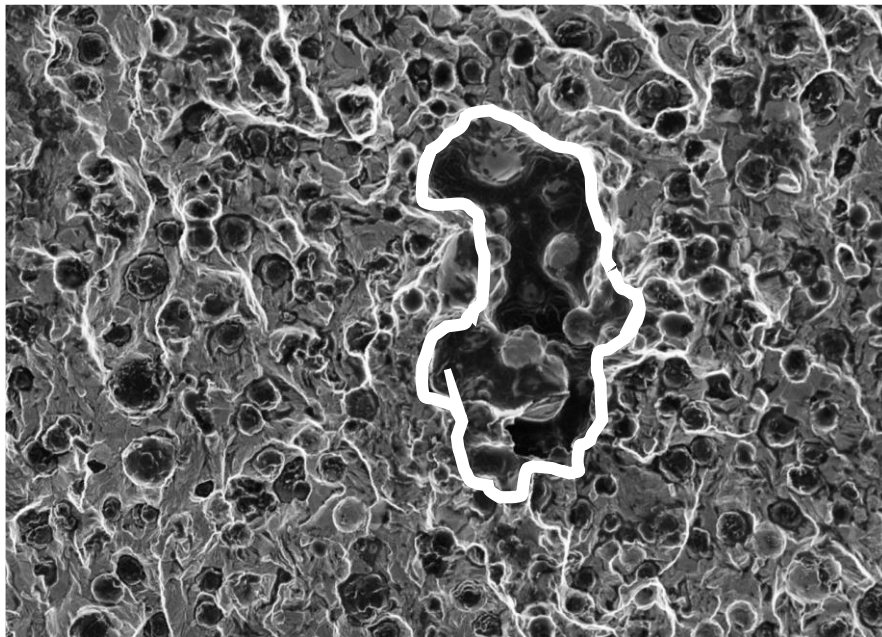


RE 2.0 %



2 m m

Fig. 2-7 Macro observation of fracture surface
in smooth specimens.



100 μ m

Fig. 2-8 Casting defect of smooth specimens.

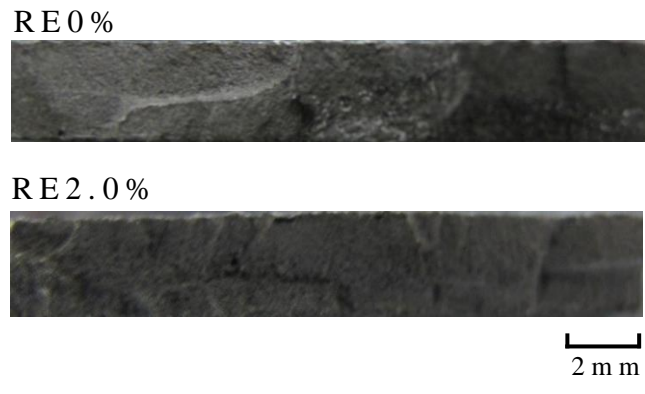


Fig. 2-9 Macro observation of fracture surface
in casting surface specimens.

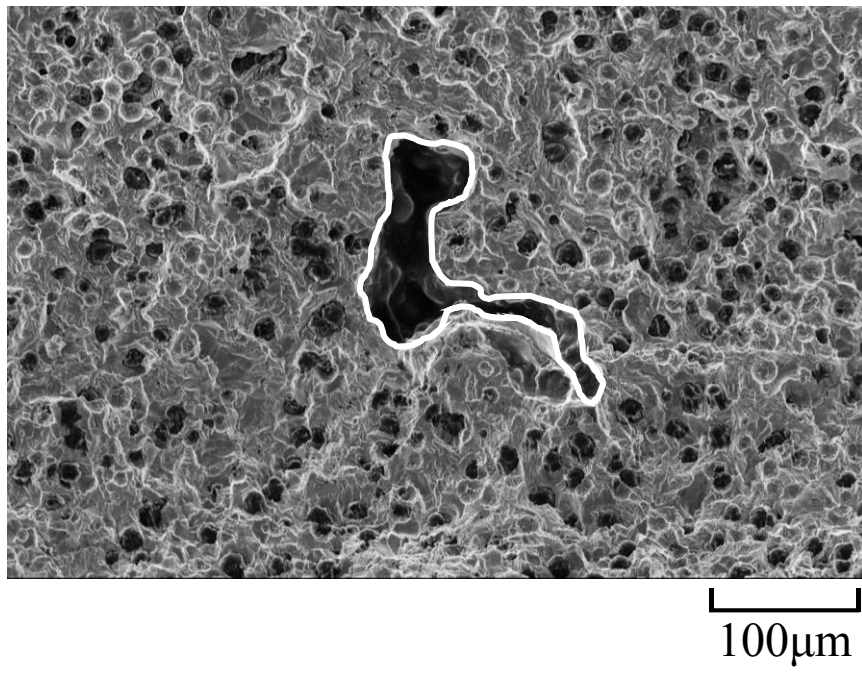
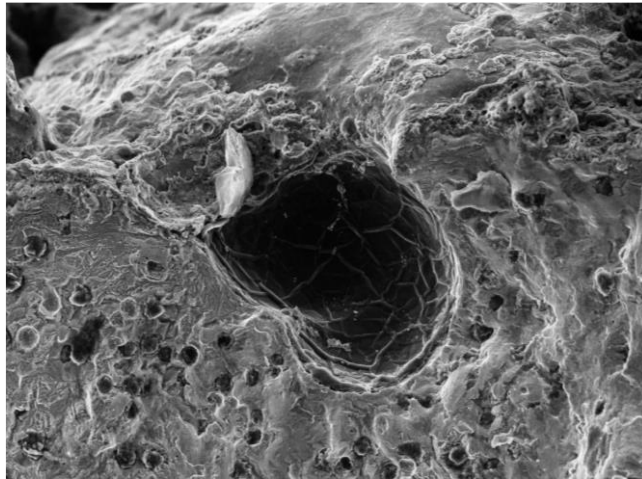


Fig. 2-10 Casting defect of specimen in inside.



100 μ m

Fig. 2-11 Casting defect of specimen
in surface.

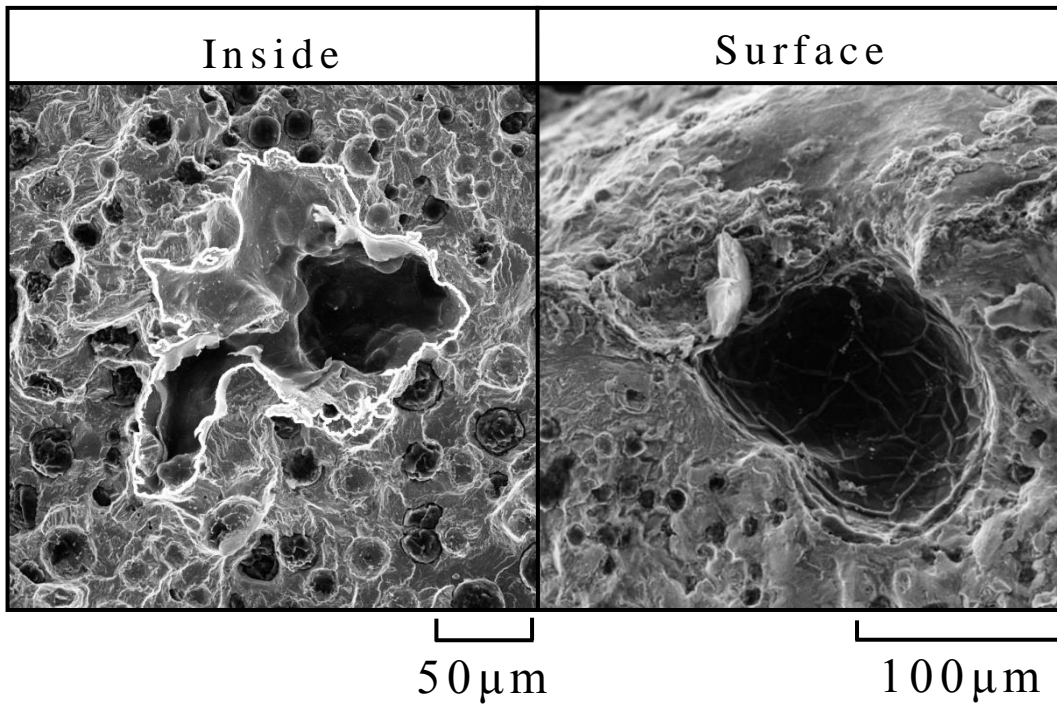


Fig. 2-12 Casting defect of maximum measurement
in inside and surface.

Table2-5 Parameter in casting defects of
maximum measurement.

	Internal	Surface
$\sqrt{\text{area}} [\mu\text{m}]$	177	148
$\Delta K [\text{MPa}\sqrt{\text{m}}]$	7.89	8.32
$\Delta K_{\text{th}} [\text{MPa}\sqrt{\text{m}}]$	5.70	5.23
$\Delta K / \Delta K_{\text{th}}$	1.38	1.59

第三章

種々の基地組織を有する

レアアースレス球状黒鉛鋳鉄の

疲労強度

3.1 緒言

前章では球状化剤中の RE 含有量によって疲労強度が低下することを明らかにした。球状黒鉛鑄鉄は自動車部品に幅広く使用されており、使用箇所によって求められる機械的性質が異なることから基地組織を変化させている。そこで、本章では種々の基地組織を有する球状黒鉛鑄鉄を製作し、RE の有無によって各基地組織における疲労強度への影響を調査した。

3.2 供試材の製作

供試材には Table 2-1 と同一の RE2.0%および 0%の球状化剤を使用した。供試材とした球状黒鉛鑄鉄は FCD450 相当とし、鉄スクラップを原材料として溶解後、サンドイッチ法にて球状化処理を行った。使用した接種剤は Table 2-2 と同一のものであり、接種方法は 1 次接種を取鍋接種、2 次接種を注湯流接種とした。

基地組織は Fig. 3-1 に示すフェライト地（以下、FDI）、パーライト地（以下、PDI）と比較材として前章で使用したパーライト地率 30%（以下、PDI(30)）の 3 種類とした。FDI と PDI は熱処理を施し、組織の統一を行った。Fig. 3-2 に熱処理図を示す。FDI の熱処理条件として 1183K で 3h 保持した後、623K まで 80K/h の割合で冷却を行った。PDI の熱処理条件は 1153K で 1h 保持し、1073K まで炉冷し更に 1h 保持した後、強制空冷とした。FDI と PDI(30) は FCD450 相当、PDI は FCD700 相当である。Table 3-1 に各供試材の溶湯における化学成分を示す。

各供試材の黒鉛球状化率および粒数と機械的性質を計測した。測定方法は前章と同一とした。Table 3-2 に各組織における機械

的性質を示す。Table 3-2 より各供試材において黒鉛球状化率は80%以上となっており、黒鉛粒数についてはRE0%ではFDIで303個/mm²、PDI(30)で297個/mm²、PDIで263個/mm²となり、RE2.0%ではFDIで301個/mm²、PDI(30)で301個/mm²、PDIで269個/mm²となっており、REの有無によって粒数に変化は生じていなかった。機械的性質については、引張強さ、伸び、硬さのそれぞれでREの有無によって差は小さく、良好な性質を示した。試験片形状は前章 Fig. 2-2 の寸法のものを使用した。使用した疲労試験機および実験条件については前章 2.2.2 と同様とした。

3. 3 実験結果および考察

3. 3. 1 疲労試験結果

各試験における疲労試験の結果を Fig. 3-3 に示す。Fig. 3-3 より各試験片におけるFDIはRE2%で250MPa、RE0%で220MPaとなった。PDI(30)はRE2%で310MPa、RE0%で270MPaとなった。PDIはRE2%で390MPa、RE0%で300MPaとなった。Fig. 3-4 に各試験片におけるRE2%と比較した、RE0%での疲労強度の低下率を示す。Fig. 3-4 よりFDIの低下率は10%、PDI(30)の低下率は13%、PDIは低下率が一番大きく23%を示した。

3. 3. 2 破面観察結果

各基地組織において疲労強度の低下率が異なった要因を調査するため、破面のSEM観察を行った。Fig. 3-5 にRE2.0%とRE0%の各基地組織におけるSEM画像を示す。Fig. 3-5 よりRE2.0%では各組織において、微少な欠陥が少数確認され、RE0%では

RE2.0%の試験片と比較して、大きな鑄造欠陥が確認された。

3. 3. 3 各基地組織における鑄造欠陥の評価

観察された鑄造欠陥に $\sqrt{\text{area}}$ パラメータモデルを適用した結果、各基地組織においてRE含有量2.0%の試験片では $\sqrt{\text{area}}$ が30～50 μm であったがRE0%の試験片では50～250 μm の大きな鑄造欠陥が確認された。RE0%の試験片において $\sqrt{\text{area}}$ が最大となった鑄造欠陥をFig. 3-6に示し、最大寸法の鑄造欠陥における試験片の負荷応力、 $\sqrt{\text{area}}$ 、 ΔK 、 ΔK_{th} をTable 3-3に示す。RE2.0%の試験片ではFig. 3-5に示した鑄造欠陥が最大寸法となり、その $\Delta K/\Delta K_{th}$ が1.0以下となり、疲労強度に与える影響は小さいと推察される。RE0%の試験片に存在する鑄造欠陥の $\Delta K/\Delta K_{th}$ の値はFDIで1.24、PDI(30)で1.37、PDIで1.47となり、 $\Delta K/\Delta K_{th}$ の最大値と最小値の比で比較した場合でもPDIの値が1.78となり最大となった。このことがRE2.0%の供試材と比較して疲労強度を低下させた要因と考えられる。

PDIにおいて疲労強度の低下率が大きくなった要因として、 $\Delta K/\Delta K_{th}$ の値がFDI、PDI(30)と比較して大きくなっていたことに加えて、パーライト率が高いことによりき裂の進展に敏感であったと推察される¹⁾。

3. 4 結言

本章では，球状化剤に RE2%および RE0%の球状化剤を使用して FDI,PDI(30),PDI の組織における球状黒鉛鑄鉄の疲労強度を調査した．得られた結果を以下に示す．

- (1) RE0%の疲労強度は，FDIで 220MPa，PDI(30)で 270MPa，PDIで 300MPa となり，RE2.0%の試験片と比較して FDIで 12%，PDI(30)で 13%，PDIでは 23%低下した．
- (2) 破面に確認された鑄造欠陥を ΔK ， ΔK_{th} で評価した結果，RE0%の試験片における鑄造欠陥の $\Delta K/\Delta K_{th}$ の値が 1.24~1.47 となり，1.0 以下であった RE2.0%の試験片と比較して大きくなり，疲労強度が低下したと推察される．
- (3) PDIにおける疲労強度の低下率が大きくなった要因として，パーライト率が高いほどき裂の伝播速度が大きくなることが要因と考えられる．

参考文献

- 1) 鈴木秀人：日本機械学会論文集 A58（1992）2028

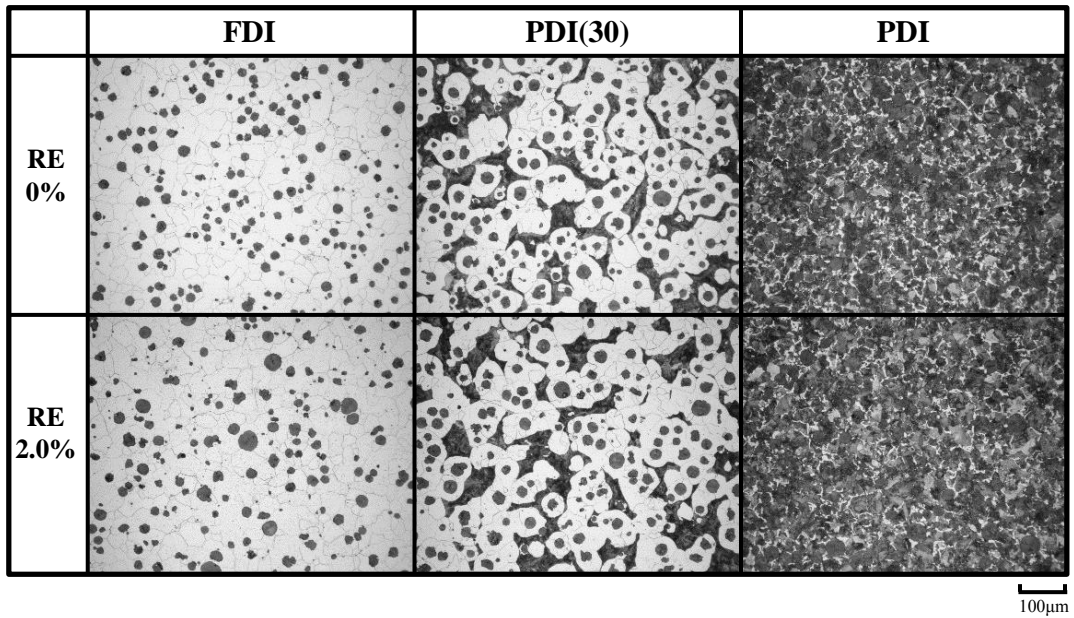


Fig. 3-1 Microstructure of specimens.

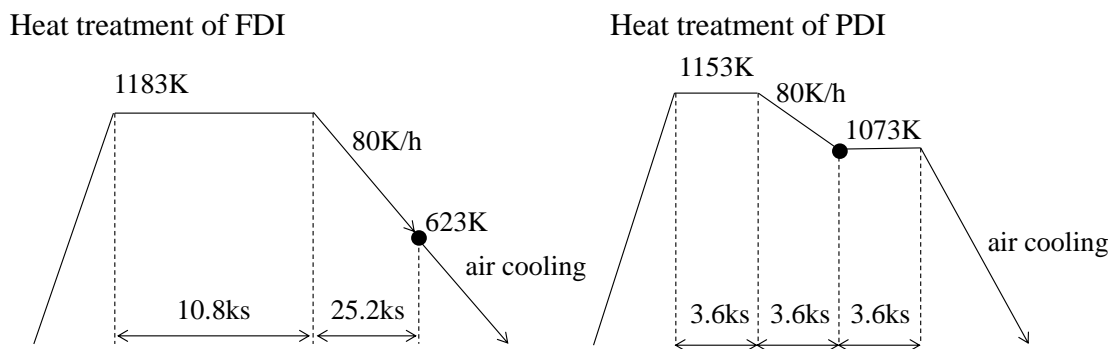


Fig. 3-2 Heat treatment condition.

Table3-1 Chemical composition of specimens.

mass %

		C	Si	Mn	S	Cu	Mg	P	Cr
RE0%	FDI	3.84	2.54	0.39	0.006	0.09	0.037	0.015	0.04
	PDI(30)	3.84	2.54	0.39	0.006	0.09	0.037	0.015	0.04
	PDI	3.83	2.60	0.55	0.007	0.68	0.037	0.016	0.04
RE2.0%	FDI	3.80	2.62	0.34	0.007	0.16	0.038	0.016	0.04
	PDI(30)	3.80	2.62	0.34	0.007	0.16	0.038	0.016	0.04
	PDI	3.82	2.60	0.57	0.007	0.67	0.038	0.017	0.04

Table3-2 Spheroidal ratio and mechanical properties
of specimens.

		Spheroidal ratio	Nodule count	Tensile strength	Elongation	Brinell hardness
		[%]	[Number/mm ²]	[MPa]	[%]	[HB]
RE0%	FDI	88	303	440	22	140
	PDI(30)	88	297	518	17	179
	PDI	92	263	935	9	293
RE2.0%	FDI	85	301	431	24	140
	PDI(30)	83	301	504	19	170
	PDI	89	269	965	8	302

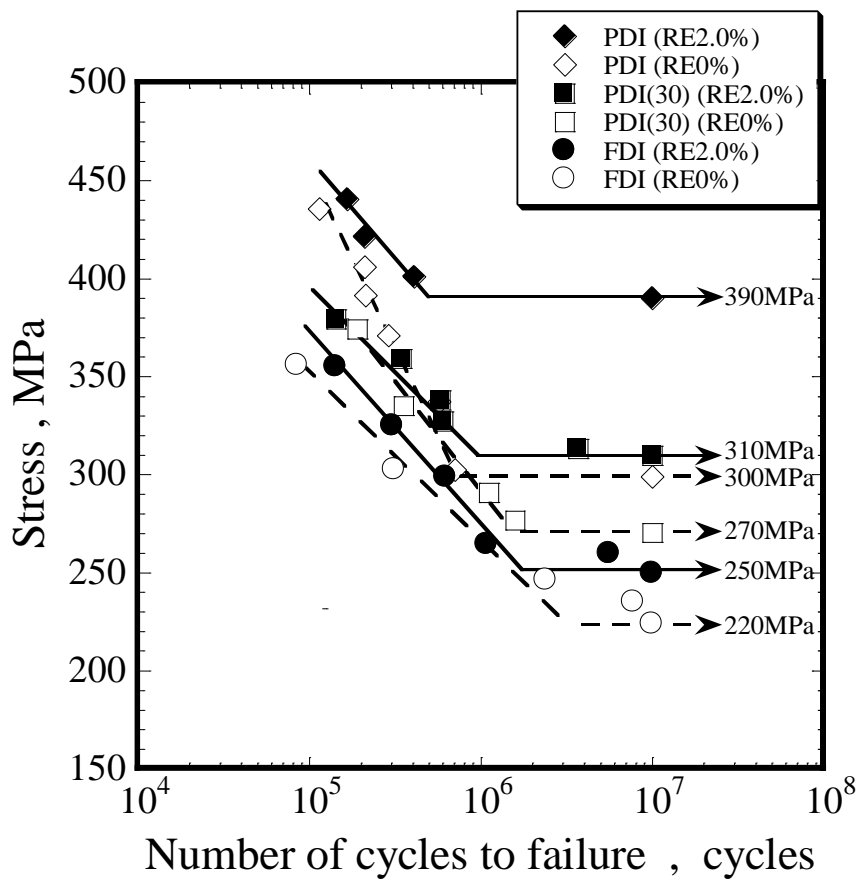


Fig. 3-3 S-N diagram.

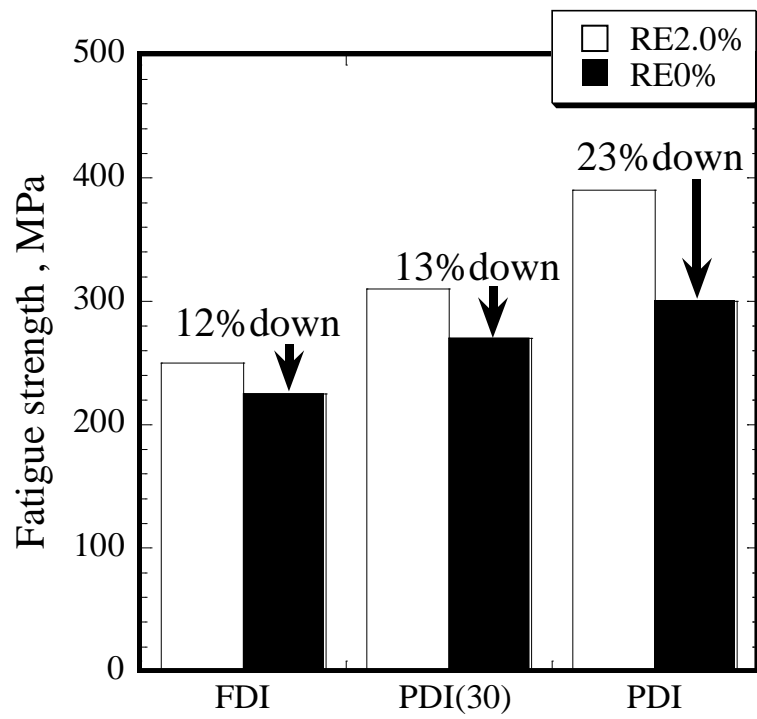


Fig. 3-4 Fatigue strength of specimens
in RE2.0% and RE0% .

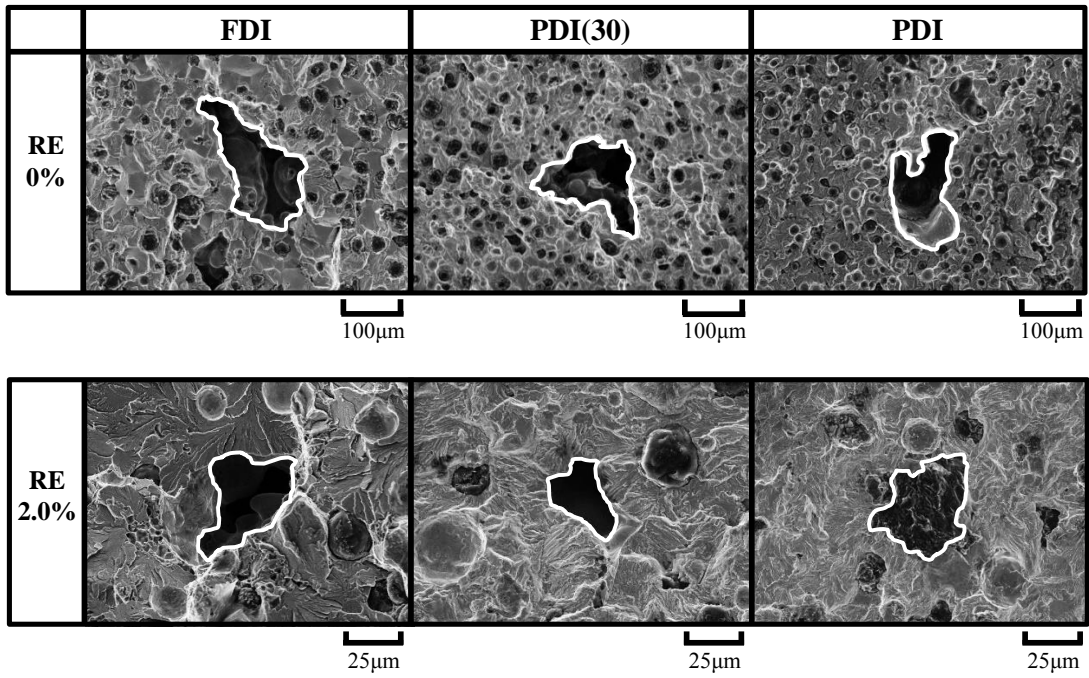


Fig. 3-5 Casting defect of specimens.

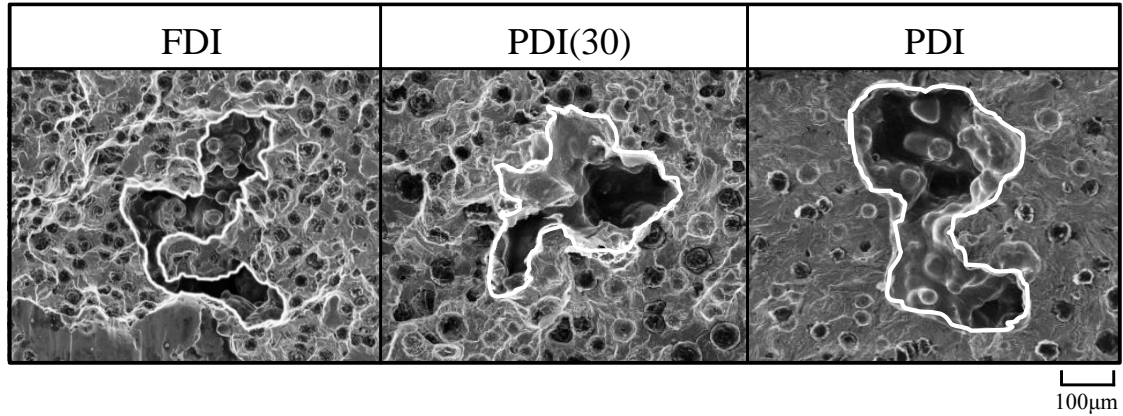


Fig. 3-6 Casting defect of specimens

in RE0% by $\sqrt{\text{area}_{\text{max}}}$.

Table3-3 Parameter in casting defects of maximum measurement.

	FDI	PDI(30)	PDI
$\sqrt{\text{area}_{\text{max}}}[\mu\text{m}]$	291	177	345
$\Delta K_{\text{max}} [\text{MPa}\sqrt{\text{m}}]$	7.43	7.89	15.87
$\Delta K_{\text{th max}} [\text{MPa}\sqrt{\text{m}}]$	5.8	5.7	9.9
$\Delta K/\Delta K_{\text{th}}$	1.28	1.38	1.6
$(\Delta K/\Delta K_{\text{th}})_{\text{max}}/(\Delta K/\Delta K_{\text{th}})_{\text{min}}$	1.29	1.35	1.78

第四章

球状黒鉛鑄鉄の疲労強度に およぼすレアアース含有量の影響

4.1 緒言

第二章において RE 含有量 2.0%と 0%では鑄造欠陥の影響により、RE0%の試験片では疲労強度が低下することが明らかとなった。そこで、本章では RE 含有量を 0%、0.3%、0.5%、2.0%に調整した球状化剤を使用して球状黒鉛鑄鉄を製作し、平面曲げ疲労試験を行う。その結果から、低減可能な RE 含有量について調査を行った。

4.2 供試材の製作

RE 含有量を 0%、0.3%、0.5%、2%の 4 種類に調整した球状化剤を用いて薄肉板状供試材を溶製した。使用した各球状化剤の化学成分を Table4-1 に示す。供試材として用いた球状黒鉛鑄鉄は、原材料を溶解後、サンドイッチ法にて球状化処理を行った。接種処理方法は、取鍋接種及び注湯流接種とし、接種剤は Table2-2 と同一のものを統一して使用した。供試材を 120×40×5mm の薄肉板状とし、薄肉供試材用の木型を使用して造型した砂型に出湯温度 1683K にて注湯した。各供試材の化学成分を Table4-2 に示す。

各 RE 含有量における黒鉛の球状化率及び粒数について測定を行った。測定方法は第二章で述べたため省略する。Fig.4-1 に各 RE 含有量における球状化率と黒鉛粒数の関係を示す。Fig. 4-1 より球状化率に関しては各 RE 含有量において 80%以上となり、良好な性質を示した。黒鉛粒数については RE 含有量に伴って増加する傾向を示した。

黒鉛の性状を確認後、供試材を 0.3%ナイトールで腐食し、光学顕微鏡にて組織観察を行った。Fig. 4-2 に各供試材の組織写真

を示す。Fig. 4-2 より各供試材においてパーライト率約 40%に統一したブルスアイ組織とした。

万能試験機（RTF-1350 AND 製）を使用し，引張試験にて引張強度を測定した。一般的に使用される引張試験片は Y ブロックから切り出されることが多い。しかしながら，本研究では薄肉板状供試材を使用するため，肉厚の差によって引張強度に影響を及ぼすことを考慮し，後述する平面曲げ疲労試験片を引張試験に使用した。ブリネル硬さは硬さ試験機（FV-800 株式会社フォーチュアテック製）を使用し，試験荷重を 30kgf として 10 点平均にて測定を行った。

Fig. 4-3 に各 RE 含有量における引張強さと硬さを示す。Fig. 4-3 より引張強さは 500MPa 以上となり，硬さは各 RE 含有量において約 200HB となり差は生じなかった。

試験片寸法，疲労試験機および実験条件は第二章と同様とした。

4.3 実験結果および考察

4.3.1 疲労試験結果

平面曲げ疲労試験によって得られた各 RE 含有量における S-N 曲線を Fig. 4-4 に示す。Fig. 4-4 より各 RE 含有量における疲労強度は，0%で 293 MPa，0.3%及び 0.5%では 307 MPa，2%では 308 MPa となった。RE を含有した試験片では疲労強度に明確な差は生じなかったが，RE 含有量 0%の試験片では，RE 含有量 0.3%,0.5%,2.0%と比較して約 8%低い値となった。

4.3.2 破面観察結果

Fig. 4-5 に破断面のマクロ写真を示す。破断面において凹凸が顕著に表れた試験片がいくつか確認されたが、RE含有量に関わらず確認されたため、破断面の凹凸の有無はRE含有量と相関性がないと考えられる。応力と凹凸の大きさの関係性も特にみられなかった。

各試験片の強度に差が生じた原因を調査するため、破断した試験片をエタノールとドライアイスを用いて223K以下で5分間保持して冷却後、脆性破壊させ、走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて破面観察を行った。Fig. 4-5に各RE含有量において確認された鑄造欠陥を示す。各RE含有量の試験片において鑄造欠陥は中央付近に集中して発生する傾向が確認されたため、鑄造欠陥の位置による疲労強度への影響については考慮しないこととした。

4.3.3 各RE含有量における鑄造欠陥の定量評価

前章と同様に $\sqrt{\text{area}}$ パラメータモデルを使用した結果、RE含有量0.3~2%の試験片では50~100 μm であるのに比較して100~300 μm の大きな鑄造欠陥が確認された。

次に $\sqrt{\text{area}}$ の値を用いて、 ΔK および ΔK_{th} を算出し、疲労強度低下との関連性について調査を行った。

各RE含有量の試験片において $\sqrt{\text{area}}$ が最大となった鑄造欠陥とその鑄造欠陥における各パラメータをFig. 8とTable4に示す。Table4よりREを含有した試験片では $\Delta K/\Delta K_{th}$ の値が1.10~1.25であったが、RE0%の試験片では $\Delta K/\Delta K_{th}$ の値が1.44と大きくなっており、このことがREを含有した試験片と比較して疲

疲労強度を低下させた要因と考えられる。

Fig. 4-1 より RE を含有した試験片の黒鉛粒数は 300 個/mm^2 以上であったが、RE0%の試験片では 275 個/mm^2 であった。サンドイッチ法で製作した球状黒鉛鑄鉄のチル化臨界粒数は $300 \sim 400 \text{ 個/mm}^2$ であることが知られており¹⁾、RE0%の試験片においてチルは発生していなかったが、黒鉛粒数が減少していた。本実験のように注湯温度 1678K において CE 値が 4.5 以下の場合、注湯から凝固までの過程において収縮する傾向が大きくなっており、ひけ巣の発生し易い状態となっている²⁾。さらに、粒数が減少したことで黒鉛の晶出に起因する体積膨張による膨張圧が低下し、ひけ巣が潰されなかったため鑄造欠陥の寸法が大きくなり、疲労強度が低下した可能性が示唆される^{3),4)}。

4. 4 結言

球状化剤中の RE を低減した球状黒鉛鑄鉄を使用して平面曲げ疲労試験を行うことで疲労強度に及ぼす RE 含有量の影響について明らかにした。結果を以下に示す。

- (1) RE を 0.3%、0.5%、2.0% 含有した球状化剤を使用した試験片では、疲労強度が 307、308MPa となり、差は生じなかったが、RE0%では 293MPa となり 8%程低下した。
- (2) 破面に確認された鑄造欠陥を ΔK 、 ΔK_{th} で評価した結果、疲労強度が低下した理由として、RE0%の試験片における鑄造欠陥の $\Delta K/\Delta K_{th}$ の値が 1.44 となり、RE を含有した試験片と比較して大きかったことが要因であると推察される。

(3) RE0%の試験片は黒鉛の核を形成する能力が REを含有した試験片よりも劣るため、粒数が 300 個/mm²以下となったことで、黒鉛が晶出する際の体積膨張が小さくなり、鑄造欠陥が大きくなった可能性が示唆される。

参考文献

- 1) 吉田敏樹：鑄造工学 69 (1997) 492
- 2) 張博，明智清明，埜健三：球状黒鉛鑄鉄 - 基礎・理論・応用 - (アグネ) (1983) 205
- 3) 張博：素形材 53 (2012) 26
- 4) 小綿利憲，堀江皓，崔洋鎮，稲葉三男，藤木友好：
鑄造工学 72 (2000) 317

Table4-1 Chemical composition of nodularizer.

	Si	Mg	Ca	Al	RE
0%	46.27	5.80	3.02	0.81	-
0.3%	45.95	5.64	2.81	0.23	0.28
0.5%	45.90	5.88	2.89	0.42	0.42
2.0%	49.32	3.96	0.36	2.25	2.25

Table4-2 Chemical composition of molten metal.

	RE	C	Si	Mn	P	S	Cu	Mg	Cr
0%	3.44	2.93	0.27	0.021	0.009	0.06	0.057	0.039	
0.3%	3.27	3.06	0.27	0.021	0.008	0.06	0.064	0.037	
0.5%	3.39	2.75	0.31	0.020	0.008	0.09	0.053	0.049	
2.0%	3.42	2.99	0.31	0.021	0.008	0.09	0.036	0.049	

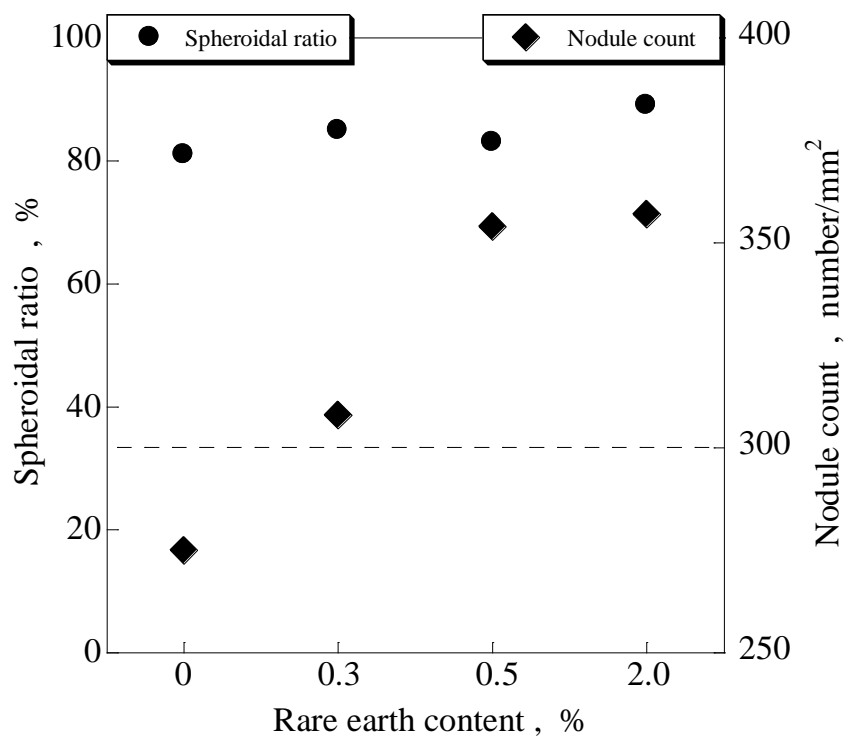


Fig. 4-1 Effect of rare earth content on spheroidal ratio and nodule count.

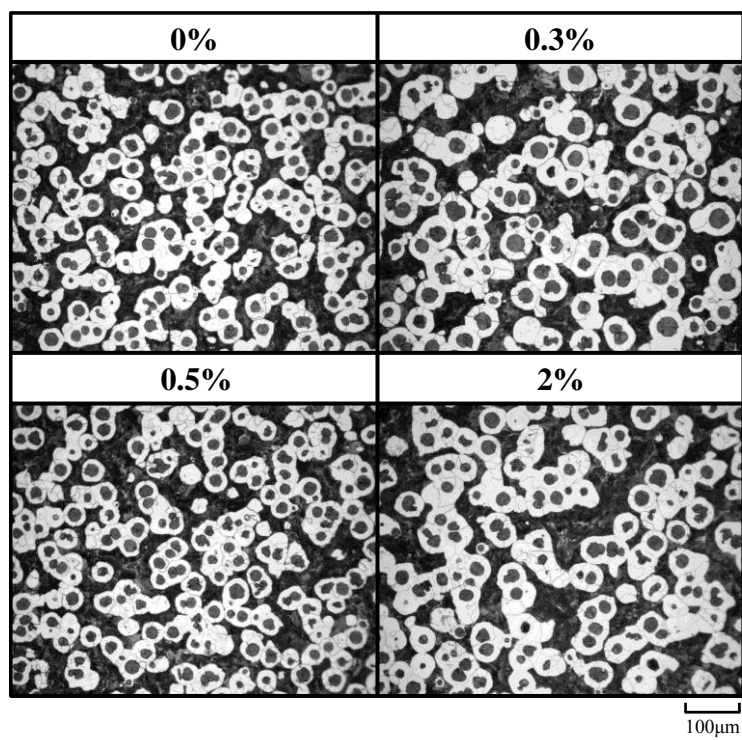


Fig. 4-2 Microstructure of specimens.

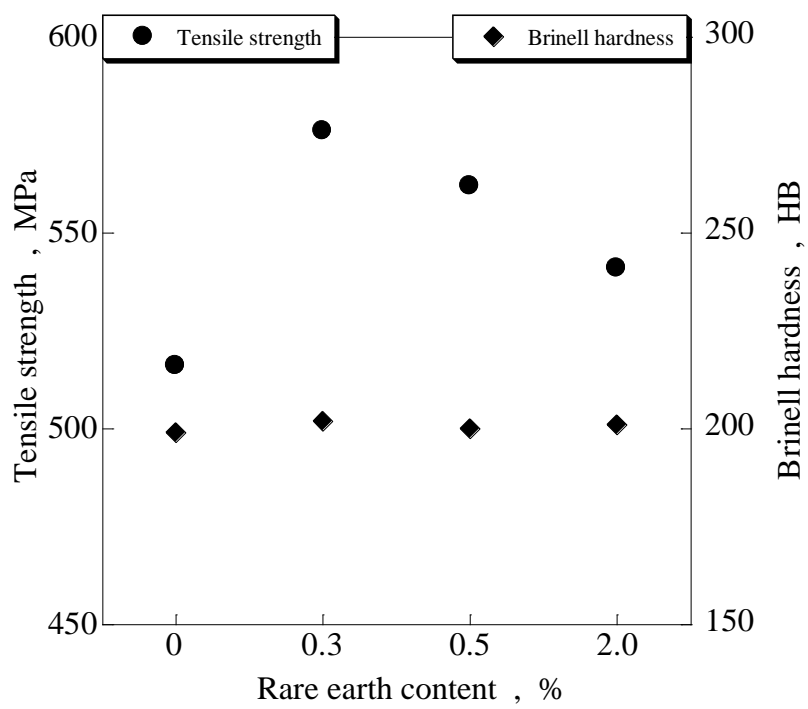


Fig. 4-3 Effect of rare earth content on tensile strength and brinell hardness.

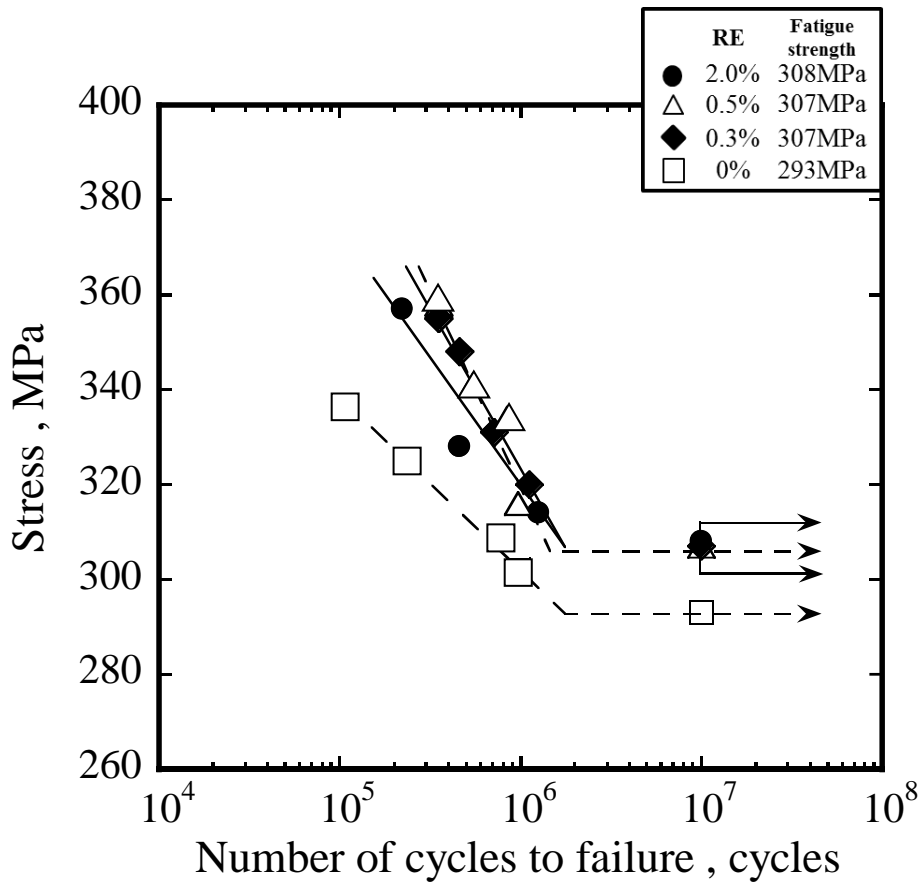


Fig. 4-4 S-N diagram.

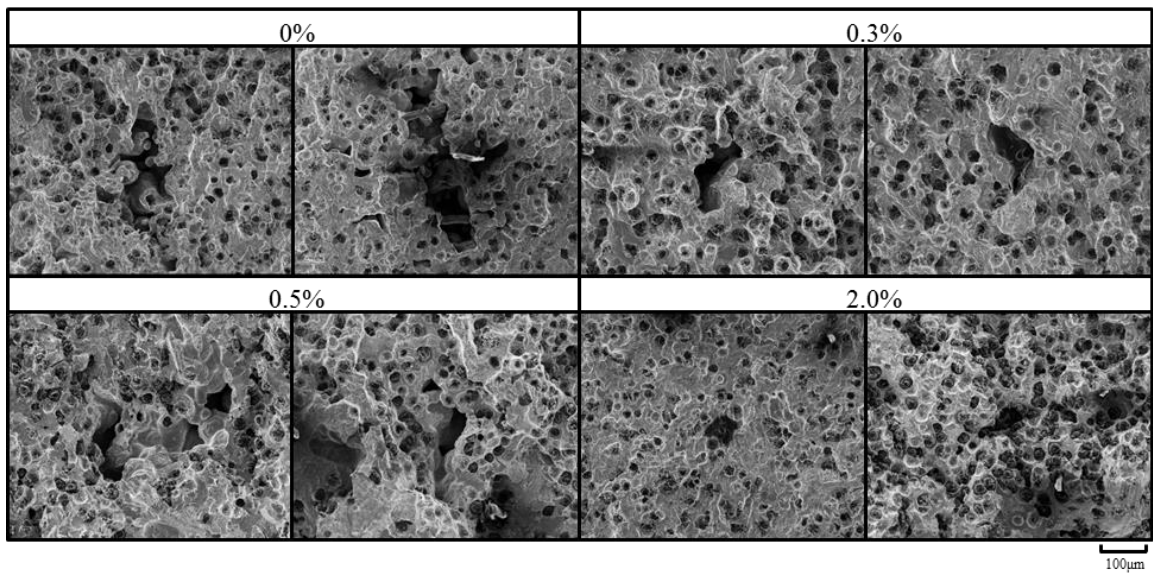


Fig. 4-5 Observed casting defect.

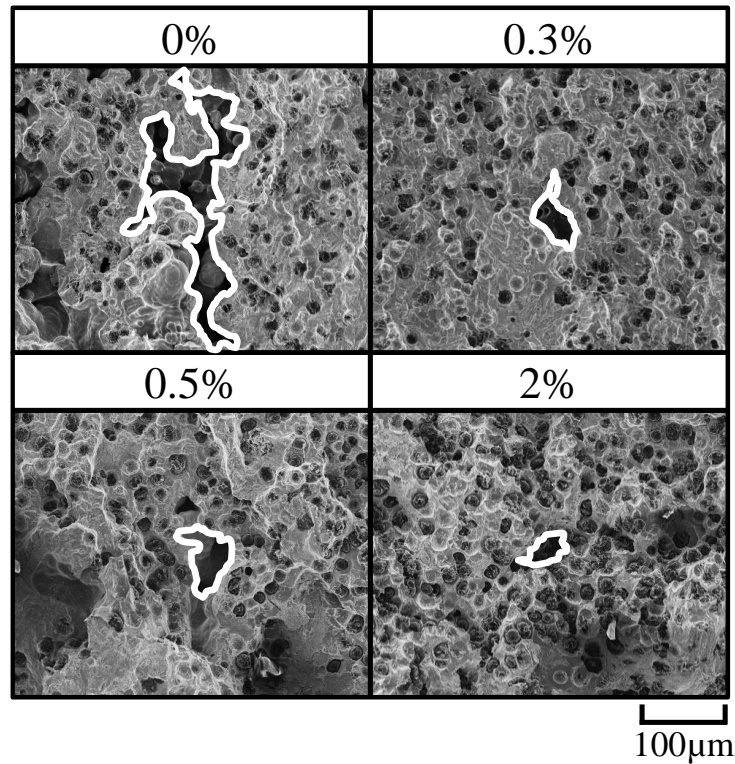


Fig. 4-6 Casting defect of maximum measurement.

Table4-3 Parameter in Casting defects
of maximum measurement.

RE	0%	0.3%	0.5%	2%
Stress[MPa]	302	314	316	314
$\sqrt{\text{area}_{\text{max}}}$ [μm]	294.5	74.4	77.9	52.0
ΔK [MPa $\sqrt{\text{m}}$]	9.2	4.8	4.9	4.0
ΔK_{th} [MPa $\sqrt{\text{m}}$]	6.4	4.1	4.0	3.7
$\Delta K/\Delta K_{th}$	1.44	1.17	1.24	1.08
$(\Delta K/\Delta K_{th})_{\text{max}}/(\Delta K/\Delta K_{th})_{\text{min}}$	1.60	1.37	1.34	1.30

第五章

総論

5. 1 本研究で得られた成果

本研究では，国際情勢によって価格の高騰が懸念される RE に着目し，RE 含有量によって機械・構造用部材として必要な疲労強度に与える影響について明らかにすることを目的とした．種々の球状化剤を用いて球状黒鉛鋳鉄を製作し，平面曲げ疲労試験を行うことで，疲労強度を明らかにした．その後，破面観察を行うことで，試験片に存在した鋳造欠陥について評価することで，RE 含有量や組織の異なる球状黒鉛鋳鉄の疲労強度について調査を行った．

得られた結果は，各章ごとに示したが，ここで改めてそれらを要約すると以下のとおりである．

第一章では，球状黒鉛鋳鉄の機械的性質と RE の関係について述べるとともに，本研究の意義及び目的を述べた．

第二章では，RE2%と RE0%の球状化剤を使用して表面性状が平滑状態と鋳肌状態の球状黒鉛鋳鉄を製作し，平面曲げによる疲労試験を行った．その結果，平滑材では RE0%の試験片では RE2%の試験片と比較して疲労強度が 13%低下した．鋳肌材では RE0%における疲労強度の低下率が 11%平滑材よりも低くなった．しかしながら，疲労強度が平滑材と比較して RE2%では 50MPa, RE0%では 30MPa 低下した．この要因を考察するため，破面観察を行った結果，鋳造欠陥が確認された． $\sqrt{\text{area}}$ パラメータモデルから ΔK と ΔK_{th} にて鋳造欠陥を評価した結果，平滑材では $\Delta K/\Delta K_{th}$ となる内部の鋳造欠陥により疲労強度が低下した．鋳肌材では表面近傍の欠陥の $\Delta K/\Delta K_{th}$ の数値が内部の欠陥よりも大きくなったため，平滑材よりも疲労強度が低下したと推察される．

第三章では、RE0%とRE2%の球状化剤を使用し、基地組織をフェライト地のFDI、パーライト面積率30%のPDI(30)、パーライト地のPDIとした球状黒鉛鑄鉄における疲労強度を調査した。その結果、RE0%の試験片において、FDIで10%、PDI(30)で13%、PDIで23%疲労強度が低下した。破面を観察した結果、各組織において $\Delta K/\Delta K_{th}$ となる鑄造欠陥が確認されたが、PDIの数値は1.60となり、FDIとPDI(30)と比較して大きくなったため疲労強度の低下率が最大となったと推察される。

第四章では、第二章で得られた結果をふまえて球状化剤中のRE含有量を0%、0.3%、0.5%、2.0%に調整した球状黒鉛鑄鉄を製作し、平面曲げ疲労試験を行うことで、低減可能なRE含有量について検討を行った。その結果、RE0.3%、0.5%、2.0%と比較してRE0%の試験片では約8%疲労強度が低下した。破面に観察された鑄造欠陥を定量評価した結果、 $\Delta K/\Delta K_{th}$ の値が0.3%、0.5%、2.0%で小さくなったことから0.3%まで低減可能であると推察される。RE0%の試験片において黒鉛粒数がチル臨界粒数である300ヶ/mm²以下となったため、黒鉛の晶出による膨張圧が小さくなり、鑄造欠陥が大きくなった可能性が示唆される。

第五章は総括であり、本研究の成果を要約した。

5. 2 今後の課題と展望

本研究ではRE含有量0%の球状化剤を使用した球状黒鉛鑄鉄では内部の鑄造欠陥によって疲労強度が低下することが明らかとなった。さらに、RE含有量0.3~2%の試験片において疲労強

度の差は生じなかったことから RE 含有量は 0.3%まで低減可能であることが示唆された。

そのような観点から、今後の展望として、RE 含有量を微量とした球状化剤を使用してデフケースやマニホールドなどの実製品を製作し、強度評価を行っていくことが重要であると考えられる。また、球状黒鉛鑄鉄に使用される球状化剤について RE を低減した場合に鑄造欠陥が大きくなる原因や鑄造欠陥がおよぼすき裂発生点の変化、き裂進展挙動についての説明が今後の課題である。

謝 辞

本研究は、室蘭工業大学 もの創造系領域 機械工学ユニット 清水一道教授の御指導のもと、著者が室蘭工業大学 博士後期課程に在学していた 2012年より 2014年までにかけて行った実験内容についてまとめたものである。

本研究を遂行していくにあたり、研究面のみにとどまらず、多岐にわたりご指導、ご鞭撻を賜りました、室蘭工業大学 清水一道教授に心から感謝の意を表します。

岩見沢鋳物株式会社 白井雅人様には試験片の製作にあたり、多忙の中ご協力をしていただき、深く感謝致します。

この論文をまとめるにあたり、室蘭工業大学 博士前期課程 戸舘海灯様には、実験面で多くの支援をいただき深く感謝します。

また、熱エネルギー工学研究室の事務員の方々、研究員、学生の方々をはじめ、研究室の方々には、多くの支援を受けました。深く感謝致します。

最後に、本研究遂行時のみならず、常に暖かく支えてくれた家族、友人たちに心から感謝致します。

本研究に関する著者の公表論文

投稿論文(査読あり)

1. **船曳崇史**, 清水一道, 河合秀樹, 戸舘海灯, 白井雅人, 薄肉球状黒鉛鑄鉄の疲労強度におよぼすレアアース含有量の影響, 鑄造工学 (掲載決定)
2. **Takafumi Funabiki**, Kazumichi Shimizu, Fatigue Characteristic of High Manganese Spheroidal Vanadium Carbides Cast Iron, Materials Science, Metal & Manufacturing DOI 10.5176/2251-1857_M312.31

Presentation on international conferences

1. **Takafumi Funabiki**, Kazumichi Shimizu, Yasuo Nakajo, Shoji Kiguchi, Masahiro Yamamoto, Fatigue characteristic of spheroidal graphite cast iron with alternate material of rare earth, The 71th World Foundry Congress, (2014. 5. 20, Bilbao, Spain)
2. **Takafumi Funabiki**, Kazumichi Shimizu, Shoji Kiguchi, Masahiro Yamamoto, Effect of Rare Earth on Fatigue Strength of Spheroidal Graphite Cast Iron, The 12th Asian Foundry Congress, (2013.12.10, Taiwan, China)

Presentation on conferences in Japan

1. **船曳崇史**, 清水一道, 戸舘海灯, 白井雅人, 三浦孝之, 薄肉球状黒鉛鑄鉄における鑄造欠陥の破壊力学的考察, 社団法人日本鑄造工学会, 第 165 回全国講演大会, (2014-10-18, 福岡県北九州市)
2. 戸舘海灯, 清水一道, **船曳崇史**, 白井雅人, 三浦孝之, レアアース含有量の異なる薄肉球状黒鉛鑄鉄の疲労強度, 社団法人日本鑄造工学会, 第 165 回全国講演大会, (2014-10-18, 福岡県北九州市)
3. 戸舘海灯, 清水一道, **船曳崇史**, 白井雅人, 三浦孝之, 薄肉球状黒鉛鑄鉄の疲労強度におよぼすレアアース含有量の影響, 社団法人日本鑄造工学会, 平成 26 年度北海道支部講演大会, (2013-4-18, 北海道札幌市)
4. **船曳崇史**, 清水一道, 白井雅人, レアアースレス球状黒鉛鑄鉄の衝撃特性, 社団法人日本鑄造工学会, 第 163 回全国講演大会, (2013-10-27, 富山県高岡市)
5. **船曳崇史**, 清水一道, 安西雄一郎, レアアースレス球状黒鉛鑄鉄の疲労強度, 社団法人日本鑄造工学会, 第 162 回全国講演大会, (2013-5-25, 山梨県甲府市)

6. **船曳崇史**, 清水一道, 山本将大, 安西雄一郎, 白井雅人, 三浦孝之, レアアースレス薄肉球状黒鉛鑄鉄の疲労強度特性, 社団法人日本鑄造工学会, 平成 25 年度北海道支部講演大会, (2013-4-19, 北海道旭川市)

7. **船曳崇史**, 清水一道, 田中真人, 平面曲げ疲労試験における高マンガン系球状バナジウム炭化物鑄鉄のき裂進展挙動, 社団法人日本鑄造工学会, 第 161 回全国講演大会, (2012-10-13, 岩手県盛岡市)

Figure captions

第一章 緒論

Figure

Number	Title of figure	Page
Fig. 1-1	Microstructure of spheroidal graphite cast iron.	6
Fig. 1-2	Influence of spheroidal ratio on tensile strength and elongation	7
Fig. 1-3	Rare earth of periodic table	8

第二章 レアアースレス球状黒鉛鑄鉄の疲労強度

Figure

Number	Title of figure	Page
Fig. 2-1	Microstructure of specimens.	18
Fig. 2-2	Schematic diagrams of specimen.	19
Fig. 2-3	Plane bending fatigue testing machine.	20
Fig. 2-4	S-N diagram of smooth specimens.	21
Fig. 2-5	S-N diagram of casting surface specimens.	22
Fig. 2-6	Fatigue strength of smooth and casting surface specimens	23
Fig. 2-7	Macro observation of fracture surface in smooth specimens.	24
Fig. 2-8	Casting defect of smooth specimens.	24
Fig. 2-9	Macro observation of fracture surface in casting surface specimens.	25
Fig. 2-10	Casting defect of specimens in inside.	25

Fig. 2-11	Casting defect of specimen in surface.	26
Fig. 2-12	Casting defect of maximum measurement in inside and surface.	27

第三章 種々の基地組織を有する

レアアースレス球状黒鉛鑄鉄の疲労強度

Figure

Number	Title of figure	Page
Fig. 3-1	Microstructure of specimens.	33
Fig. 3-2	Heat treatment condition.	33
Fig. 3-3	S-N diagram.	35
Fig. 3-4	Fatigue strength of specimens in RE2.0% and RE0%.	36
Fig. 3-5	Casting defect of specimens.	37
Fig. 3-6	Casting defect of specimens in RE0% by $\sqrt{\text{area}_{\text{max}}}$.	38

第四章 球状黒鉛鑄鉄の疲労強度におよぼす

レアアース含有量の影響

Figure

Number	Title of figure	Page
Fig. 4-1	Effect of rare earth content on spheroidal ratio and nodule count.	46
Fig. 4-2	Microstructure of specimens.	47
Fig. 4-3	Effect of rare earth content on tensile strength and brinell hardness.	48
Fig. 4-4	S-N diagram.	49
Fig. 4-5	Observed casting defect.	50

List of tables

Table Number	Title of tables	Page
Table 2-1	Chemical composition of nodularizer.	17
Table 2-2	Chemical composition of inoculant.	17
Table 2-3	Chemical composition of molten metal.	17
Table 2-4	Spheroidal ratio and mechanical properties of specimens.	18
Table 2-5	Parameter in casting defects of maximum measurement.	27
Table 3-1	Chemical composition of specimens.	34
Table 3-2	Spheroidal ratio and mechanical properties of specimens.	34
Table 3-3	Parameter in casting defects of maximum measurement.	38
Table 4-1	Chemical composition of nodularizer.	45
Table 4-2	Chemical composition of molten metal.	45
Table 4-3	Parameter in casting defects of maximum measurement.	51