

鑄鋼の低サイクル疲労特性に及ぼす微小凝固欠陥の影響

大 島 聡 範*・林 忠 夫**

Effect of Small Casting Defects on the Low Cycle Fatigue Properties of Cast Steel.

Toshinori OHSHIMA and Tadao HAYASHI

Abstract

Effect of small casting defects on the low cycle fatigue properties in quenched and tempered S45C cast steel was studied under the application of ASME Sec. XI flaw and defect evaluation method.

The results were summarized as follows.

1. Manson-Coffin law in the low cycle fatigue was applicable to the cast steel containing small casting defects.
2. Low cycle fatigue life was reduced with increasing area fraction of defects in fractured surface.
3. Strain intensity factor range of the defect from which fatigue crack develops can be an useful concept to predict the low cycle fatigue life of the cast steel.

1. 緒 言

金属材料の低サイクル疲労における破断繰返し数 N_f と塑性ひずみ振幅 $\Delta \epsilon_p$ の関係は、Manson¹⁾-Coffin²⁾ の式によって次のように表わされる。

$$\Delta \epsilon_p N_f^{\alpha} = C \quad (1)$$

α , C : 材料定数

式(1)において α は多くの金属について0.5~0.7であり、また Coffin³⁾によれば C は破断延性 ϵ_f に比例し、つぎのように表わされる。

$$C = \frac{1}{2} \epsilon_f, \quad \epsilon_f = \ln \frac{1}{1-\varphi} \quad (2)$$

φ : 絞り

式(2)は N_f が破断延性 ϵ_f によって表わされることを示すものである。

著者らは前報⁴⁾⁵⁾において鑄鋼の引張破断特性に及ぼす微小凝固欠陥の影響について検討し、破断延性 ϵ_f は凝固欠陥率 R_s に支配され、 A , B を正

の定数として、次式で表わされることを示した。

$$\epsilon_f = B - A R_s^{1/2} \quad (3)$$

式(2), (3)より、破断繰返し数 N_f は ϵ_f を介して R_s によって表わすことができる。しかしながら式(1), (2)は一般に先在き裂としての欠陥がほとんど存在しない圧延、鍛造材に対して適用されているものであり、凝固欠陥によって破断延性が支配されている鑄造材においても成立するか否かは明確でない。また、低サイクル疲労過程が本質的には弾塑性変形におけるき裂の発生伝播過程であるという認識⁶⁾に立つならば、凝固欠陥からのき裂の発生伝播を非線形破壊力学の概念によって取扱うことが必要となる。また、このような場合、多様な欠陥の分布形態を力学的に適切な評価を行なうことが要求される。

本報では以上の点にもとづき、鑄鋼の低サイクル疲労に対する Manson-Coffin の式の適合性を検討し、また疲労特性を支配する要因としての凝固欠陥を ASME の標準化法⁷⁾によって評価し、さらに欠陥形態の定量的評価にもとづいた歪拡大係数幅 $\Delta K \epsilon$ の概念⁸⁾⁹⁾によって、破断繰返し数 N_f

* 機械工学科 教授

** 機械工学科 技 官

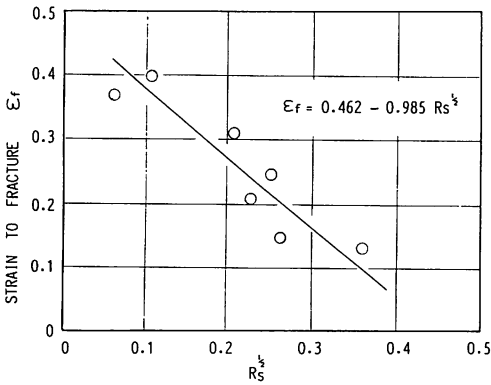


Fig. 3 Relationship between square root of area fraction of defect and strain to fracture in tensile test.

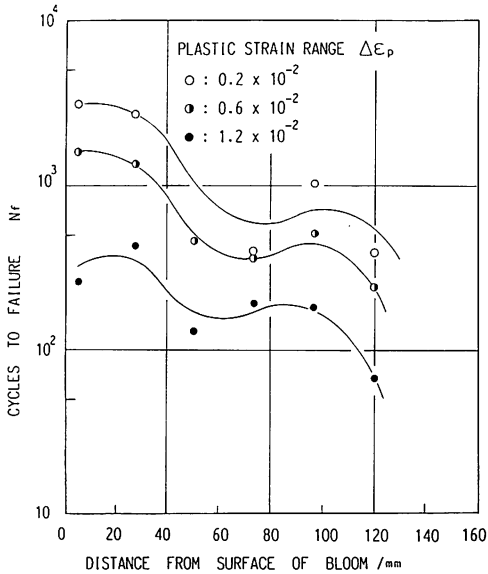


Fig. 4 Relationship between cycles to failure and distance from surface of bloom at various plastic strain ranges.

レベルに分けて示したものである。いずれの $\Delta\epsilon_p$ においても表面から内部へ向って N_f は減少しており、全体の傾向は Fig. 2 の ϵ_f の変化傾向と類似である。以上の結果から、破断繰返し数 N_f は欠陥率 R_s と密接に関係していることがわかる。そこで、低サイクル疲労における $\Delta\epsilon_p - N_f$ の関係を欠陥率 R_s の大きさによってランクづけて整理したものが Fig. 5 および Fig. 6 である。Fig. 5 は実欠陥率で整理したものであるが、全体の傾向は右下がりであるとはいえ、欠陥率と破断繰返し数との関係は明確ではない。これに対して、標準化欠陥率で整理した Fig. 6 では、欠陥率の増加にともなう破断繰返し数の減少が明確にあらわれてい

る。すなわち破断繰返し数を支配する要因としての欠陥の評価には、実欠陥率よりも ASME の規準による標準化欠陥率の方がより適切であることがわかる。

ここで式(2)において $\alpha=1/2$ とすれば

$$N_f^{1/2} = \frac{1}{2\Delta\epsilon_p} \cdot \epsilon_f \quad (5)$$

式(4)を代入すれば

$$N_f^{1/2} = \frac{1}{2\Delta\epsilon_p} (0.462 - 0.985 R_s^{1/2}) \quad (6)$$

すなわち、 N_f は標準化欠陥率 R_s であらわされる。そこで $N_f^{1/2}$ と $R_s^{1/2}$ の関係をプロットすれば Fig. 7 が得られる。図中の直線は(6)式に歪振幅 $\Delta\epsilon_p$ の値を入れて計算したものであるが、 $\Delta\epsilon_p = 1.2\%$ および 0.6% では実験値とほぼ一致している。 $\Delta\epsilon_p = 0.2\%$ における不一致は $\Delta\epsilon_p$ の小さい領域で正確に歪制御できなかったことによるものと思われる。以上の結果より、Manson-Coffin 則は微小欠陥を含む鋳造材に対しても適用し得ること、および破断繰返し数 N_f は標準化欠陥率 R_s に

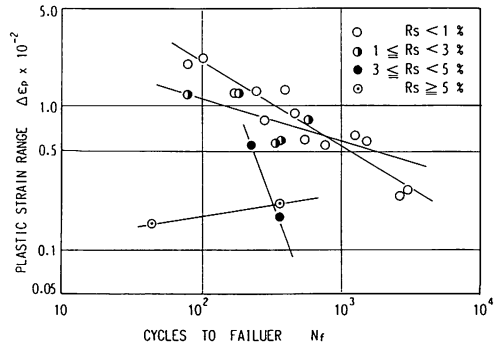


Fig. 5 $\Delta\epsilon_p - N_f$ diagrams of cast steel in the various ranges of actual area fraction of defects.

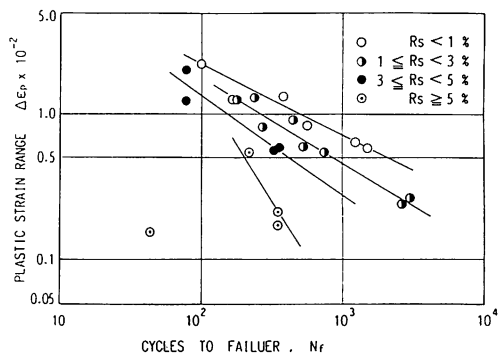


Fig. 6 $\Delta\epsilon_p - N_f$ diagrams of cast steel in the various ranges of ASME characterized area fraction of defect.

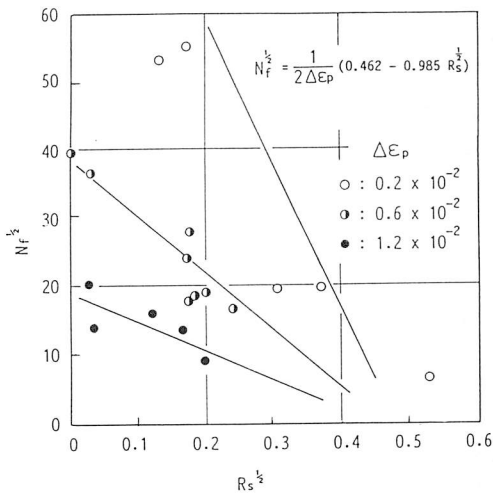


Fig. 7 Relationship between respective square root of area fraction of defect and cycles to failure in cast steel.

よって表わされることが明らかになった。

3. 2 欠陥の歪拡大係数幅と破断繰返し数

低サイクル疲労におけるき裂の発生点は微小凝固欠陥であり、疲労き裂の伝播拡大条件は基本的には欠陥形状によって決まる応力拡大係数 K_I によって支配される。しかしながら低サイクル疲労は、繰返し弾塑性変形におけるき裂の成長過程として考えられるから、線形破壊力学値である K_I をそのまま適用することはできない。弾塑性疲労き裂に対しては、 J 積分による ΔJ あるいは K_I の概念を用いた歪拡大係数幅 ΔK_ϵ ⁹⁾ をパラメータとする方法がとられているが、ここでは ΔK_ϵ を用いて N_f との関係を整理事をを試みた。すなわち、Fig. 6 の $\Delta \epsilon_p$ にかえて ΔK_ϵ をもって $\Delta K_\epsilon - N_f$ なる関係を求めることを目的とするものである。

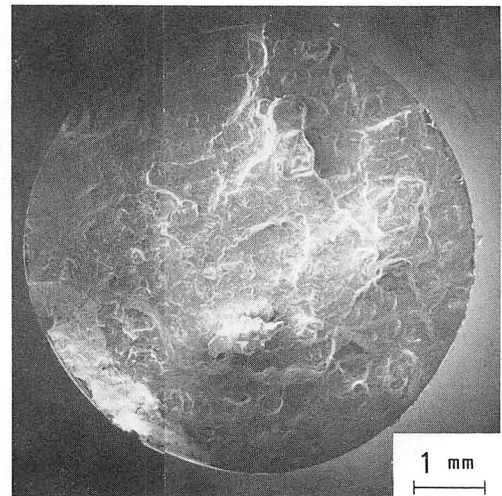
Fig. 8(a)(b)に疲労破面および疲労き裂の起点となった欠陥のSEM写真の一例を示す。これをASME Sec. XIの欠陥評価法を適用してFig. 9のように標準化した。ここで $\Delta \epsilon_p$ と $\Delta \sigma$ の間にはFig. 10に示すように直線関係が成立することから、Table. 4に示す K_ϵ と K_I の対応により式(7)を用いて歪拡大係数幅 ΔK_ϵ を求めた。^{7) 9)}

$$\Delta K_\epsilon = M_m \Delta \epsilon_p \sqrt{\pi a / Q} \quad (7)$$

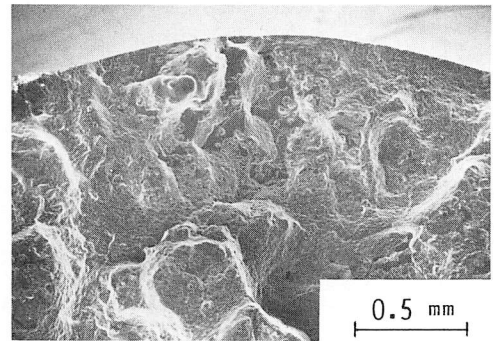
$\Delta \epsilon_p$: 塑性歪振幅, M_m : 軸応力修正係数

a : 欠陥深さ(内部欠陥では外接楕円の短軸長)

Q : $\Delta \epsilon_p$ と欠陥形状によって決まる形状係数



(a)



(b)

Fig. 8 (a) Low cycle fatigue fracture surface of S45C cast steel.
(b) An example of small casting defect from which fatigue crack developed.

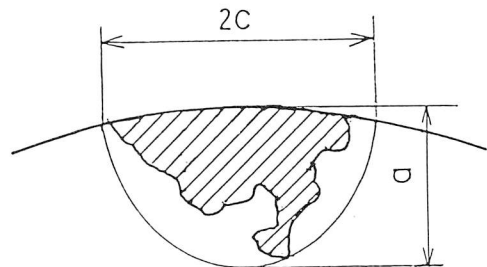


Fig. 9 Characterization and evaluation of defect by ASME Sec. XI.

M_m の値は Fig. 11 から、また Q の値は Fig. 12 において $\sigma_m / \sigma_{ys} = 1$ として $a/2c$ よりそれぞれ求められる。また t は試験片の直径とした。 ΔK_ϵ と N_f の関係を Fig. 13 に示す。これは $\Delta \epsilon_p - N_f$ の関係を示した Fig. 5, 6 と比較すれば明らかに

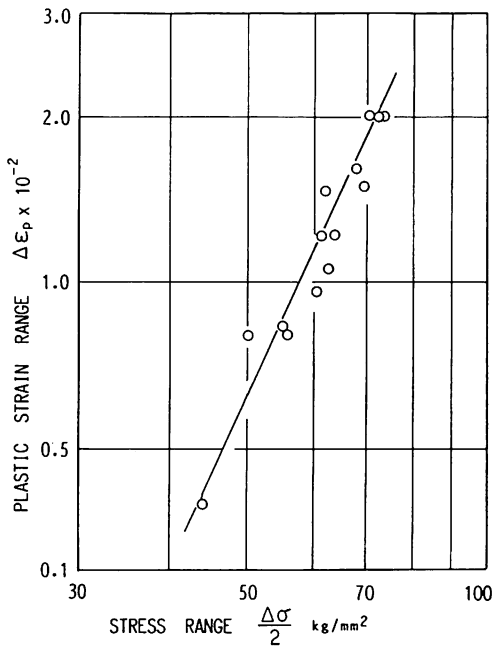


Fig. 10 Relationship between stress range and plastic strain range.

Table 4 Analogy between stress intensity factor range and strain intensity factor range.

$K_I = (M_m \sigma_m + M_b \sigma_b) \sqrt{\pi a / Q}$ σ_m, σ_b = membrane and bending stress a = minor half-diameter of embedded flaw; flaw depth for surface flaw Q = flaw shape parameter M_m, M_b = correction factor for membrane and bending stress
STRESS INTENSITY FACTOR RANGE $\Delta K_I = M_m \Delta \sigma \sqrt{\pi a / Q}$
STRAIN INTENSITY FACTOR RANGE $\Delta K_\epsilon = M_m \Delta \epsilon_p \sqrt{\pi a / Q}$

データのバラツキが小さくなっており、とくに R_s の大きなものに対して ΔK_ϵ による補正効果が高くあらわれていることがわかる。Fig.13 を直線回帰して次式が得られる。

$$N_f = 0.111 \times \Delta K_\epsilon^{-2.113} \quad (8)$$

すなわち、低サイクル疲労における破断繰返し数は疲労き裂の起点となる欠陥の歪拡大係数幅に

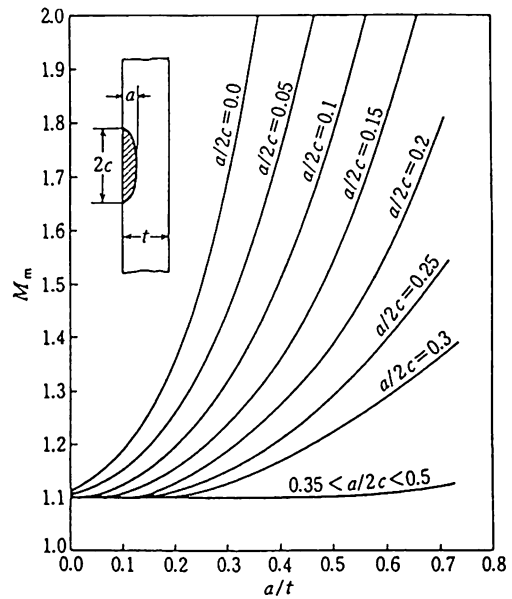


Fig. 11 Axial stress correction factor for surface flaws⁷⁾. (ASME)

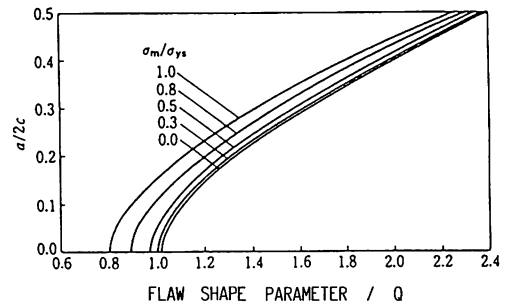


Fig. 12 Flaw shape parameter for various σ_m/σ_{ys} ⁷⁾. (ASME)

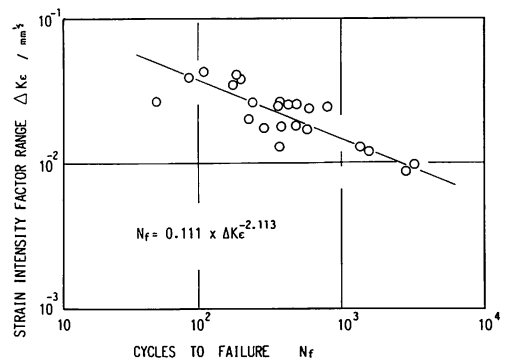


Fig. 13 Relationship between cycles to failure and strain intensity factor range of defect from which fatigue crack developed.

よって支配され、式(8)によって表わされる。何らかの方法で非破壊的に欠陥形状を検出し得るならば、式(8)の適用は破損寿命を予測する方法として安全工学的に有効な手段となり得るであろう。

4. 結 言

S 45 C 铸鋼の調質材について、低サイクル疲労特性に及ぼす微小凝固欠陥の影響を検討し、次の結果を得た。

1. 低サイクル疲労における Manson-Coffin 則は、微小欠陥を含む铸鋼においても成立し、破断繰返し数 N_f は引張り破断延性 ϵ_f を仲介として、ASME の欠陥評価法による標準化欠陥率 R_s によって次式で表わされる。

$$N_f = \left[\frac{1}{2\Delta\epsilon_p} (0.462 - 0.985 R_s^{1/2}) \right]^2$$

2. 低サイクル疲労における破断繰返し数 N_f は疲労き裂の起点となる欠陥の歪拡大係数幅 ΔK_ϵ によって支配され、次式で表わされる。

$$N_f = 0.111 \times \Delta K_\epsilon^{-2.113}$$

文 献

1. 大島, 林, 苫小牧高専紀要第 19 号(昭和 59 年 3 月), 1
2. 大島, 高橋, 林, 昭和 59 年度日本金属学会北海道支部春期講演概要, 7
3. Manson, S.S., NACA Tech Note 2923 (1953),
4. Coffin L. F., Jr., Trans ASME. 76 (1954), 931.
5. Coffin L. F., Jr., Trans ASME. 78 (1956), 527.
6. 村上他, 機械学会論文集 49-447. A(1983): 1411
7. ASME Section XI Appendix A (1977)
8. Dowling W. E. ASTM STP 637 (1977) 97.
9. Kitagawa et. al, ASTM STP 675 (1979) 420.
(昭和 59 年 12 月 1 日受理)