

鑄鍛造欠陥の疲労強度評価 (その3)

——微小集合欠陥——

正員 森 田 鴻 司* 正員 梶 本 勝 也*
正員 村 井 亮 介*

Effect of Flaws on Fatigue Strength of Cast or Forged Materials (Part 3)

——clustered small flaws——

by Koji Morita, *Member* Katsuya Kajimoto, *Member*
Ryosuke Murai, *Member*

Summary

As material flaws have great influence on fatigue strength of cast or forged components, it is important to establish evaluation method of fatigue strength for a material with flaws. In the previous studies¹⁾²⁾, fracture mechanics approach using “intrinsic crack model” was made to estimate fatigue strength of material with a round-shaped flaw and with a small flaw.

In this paper, evaluation method of fatigue strength was discussed for a material with clustered small flaws, and following results were obtained.

- (1) Evaluation method of the fatigue strength for a material with clustered small flaws is proposed. This method is based on the fracture mechanics approach using “intrinsic crack model” and equivalent correction factor of nearness of flaws.
- (2) Estimated fatigue limit by the proposed method agreed with fatigue test results on nodular graphite cast iron (JIS FCD 600) which have many micro-shrinkage cavities.
- (3) Equivalent correction factor of nearness of the clustered small flaws can be obtained by brittle fracture test on a material which has similar clustered small flaws at an extremely low temperature.

1. 結 言

鑄鍛造部材は構造部材や機械部品として広く用いられるが、時として様々な欠陥が発生するために、これを起点とする疲労損傷が問題になることがある。

欠陥を有する部材の疲労強度は欠陥の形状・寸法に著しく影響される。このため、著者らは鑄鍛造欠陥を次のように分類して取扱うことを提案している¹⁾²⁾。

- (1) 丸味を有するマクロ単独欠陥：ブローホール、ひけ巣、ノロかみ等
- (2) 微小単独欠陥：直径が1~2 mm以下の介在物、ピンホール等
- (3) 微小集合欠陥：上記(2)の集合体
- (4) 割れ

* 三菱重工業(株) 技術本部 広島研究所

原稿受理 平成4年1月10日

春季講演会において講演 平成4年5月12, 13日

これらの欠陥材の強度評価法としては、欠陥をそのままき裂と見なして破壊力学的に評価する手法が考えられる。この方法は(4)のマクロな割れに対しては妥当であろうが、(1)~(3)の欠陥に対して適正な強度評価法とするには問題がある。そこで、著者らは第1報において、(1)の丸味を有するマクロ単独欠陥の疲労強度を定量的に把握する手法について検討を加えた。その結果、欠陥を有限の切欠き半径を有する切欠きとみなして、その先端に材料固有の長さ a_0 のき裂の存在を仮想して破壊力学的な解析を行うことによって、き裂材に対する欠陥材の余裕度を算定する評価手法などを提案した¹⁾。また、第2報においては、(2)の微小単独欠陥の疲労強度を第1報と同じく、固有き裂の存在を仮想して破壊力学的に評価する手法について検討するとともに、非金属介在物を有する鍛鋼材の疲労寿命評価に適用し、その妥当性を確認した²⁾。

本報では、引き続き(3)の微小集合欠陥の疲労強度を既報¹⁾²⁾と同じく固有き裂の存在を仮想して破壊力学的に評価する手法について検討した。

2. 基本的な考え方

集合欠陥における個々の欠陥の大きさ・形状は、大小様々である。しかしながら、疲労破壊を支配する欠陥は、これらのうちのごく少数のものに限定することができると考えられる。

すなわち、Fig. 1 に示すように、欠陥の全長 $2a$ 、隣接欠陥との距離 b 、欠陥先端半径 ρ などがその支配因子となり、これらの因子を総合して最も厳しい条件となる欠陥が破壊を大きく支配すると考えることができる。

特に、疲労限の推定においては、このような考え方が成立するものと考え、次のような検討を行った。なお、以下では特に断らないかぎり欠陥（き裂）の全長を $2a$ 、半長を a と表示し、 a を単に欠陥（き裂）長さと呼ぶことにする。

2.1 疲労限の破壊力学的表示

今、Fig. 1 に示す集合欠陥において、 $2a$ の欠陥が破壊を支配するとすれば、その応力拡大係数は次のように表すことができる。

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot F_\rho \cdot F_\lambda \quad (1)$$

ここに、 F_ρ : 欠陥の丸味効果による補正係数

F_λ : 欠陥の近接度による補正係数

σ : 公称応力

したがって、その疲労限 $\Delta\sigma_{th}$ は、次のように与えられることになる。

$$\Delta\sigma_{th} = \Delta K_{th} / (\sqrt{\pi a} \cdot F_\rho \cdot F_\lambda) \quad (2)$$

ここに、 ΔK_{th} : 疲労き裂成長下限界値

なお、(2)式において、き裂とみなす欠陥長さ a が十分長い場合には、疲労き裂の成長下限界値 ΔK_{th} は a によら

ず一定値であろう。しかし、 a が小さい微小欠陥においては、 ΔK_{th} は a の影響を受けることが知られている³⁾。したがって、微小集合欠陥の疲労強度検討においても、これらのことを考慮する必要があると考えられる。

これについて、著者らは前報の微小単独欠陥の疲労限および疲労寿命評価において、欠陥長さが短いために欠陥を切欠き先端半径 $\rho=0$ のき裂とみなすと共に、実欠陥長さ a に固有き裂長さ a_0 を加えた $(a+a_0)$ のき裂を想定する固有き裂モデルを用いることにより、従来の長いき裂と同様の破壊力学的取扱いが可能になることを示した²⁾。そこで、本報で取扱う微小集合欠陥の疲労限評価においても、既報と同様に固有き裂モデルを適用することにする。

固有き裂モデルを用いて(2)式を書き換えれば、微小集合欠陥の疲労限 $\Delta\sigma_{th}$ は次のように与えられる。

$$\Delta\sigma_{th} = \Delta K_{th} / (\sqrt{\pi(a+a_0)} \cdot F_\rho \cdot F_\lambda) \quad (3)$$

ここに、 ΔK_{th} : 長いき裂の疲労き裂成長下限界値

a_0 : 固有き裂長さ

(3)式において、固有き裂長さ a_0 は次式で得られる¹²⁾。

$$a_0 = (1/\pi) \cdot (\Delta K_{th} / \Delta\sigma_{w0})^2 \quad (4)$$

ここに、 $\Delta\sigma_{w0}$: 平滑材疲労限

したがって、

$$F_I = F_\rho \cdot F_\lambda \quad (5)$$

において、 F_I を何らかの方法で求めれば、微小集合欠陥材の疲労限は得られることになる。

なお、前報²⁾と同様に微小欠陥の場合、欠陥の先端半径は $\rho=0$ とみなせることが多いので、(5)式において $F_\rho=1$ 、すなわち、個々の欠陥をき裂と見なし、 $F_I=F_\lambda$ としても実用上、大きな誤差はないと考えられる。そこで、以後 F_I を等価近接度補正係数と呼ぶことにする。

2.2 等価近接度補正係数 F_I の決定方法

等価近接度補正係数 F_I は、(5)式に示すように、欠陥の丸味効果の補正係数 F_ρ と近接による補正係数 F_λ の積として与えられる。

したがって、丸味効果の補正係数 F_ρ を第1報¹⁾に示した概念から求め、近接による補正係数 F_λ については K 値計算式集⁵⁾⁶⁾等から求めることにより等価近接度補正係数 F_I を算定することも不可能ではないであろう。特に、欠陥が微小であれば、前述したように F_I は F_λ に近似的に等しいと見なし得るので、 F_ρ の算定作業は省略することもでき、適当な仮定条件のもとに F_λ の算定を行うこともできよう。

しかしながら、微小集合欠陥においては一般に欠陥の数は非常に多く、個々の欠陥の形状、寸法、隣接欠陥との距離等も様々である。また、欠陥の配列も単純な2次元ではなく、3次元の複雑なものとなる。したがって、これらを個々に計測、モデル化し、算定評価することは極めて困難な作業となり、実用上得策ではない。したがって、ここでは実験的に簡便に等価近接度補正係数 F_I を把握すること

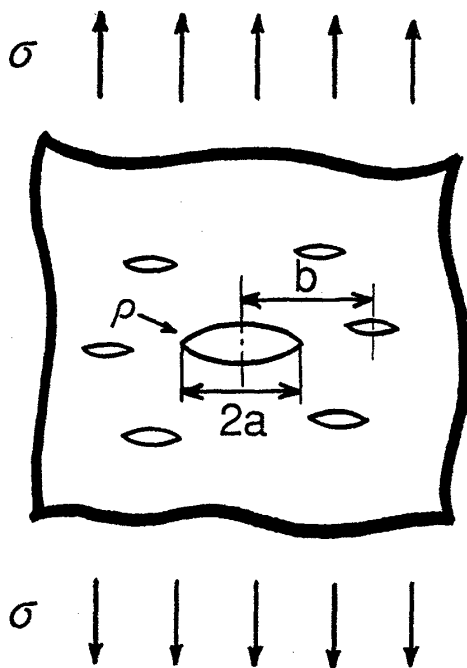


Fig. 1 Ruling factors of fatigue strength of clustered flaws

を考えた。

以下にその基本的な考え方を示すが、これは第1報¹⁾において複雑な形状の鑄造欠陥の K 値評価法として提案した“脆性破壊実験による欠陥の丸味に対する余裕度把握法”と同一概念に基づくものである。

まず、Fig. 1 の集合欠陥と Fig. 2 に示すような単独き裂を考える。Fig. 2 の単独き裂の応力拡大係数 K_I は、次式で示される。

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (6)$$

つぎに、Fig. 1 のような集合欠陥の応力拡大係数 $(K_I)_N$ は(1)および(5)式から、

$$\begin{aligned} (K_I)_N &= \sigma \sqrt{\pi a} \cdot F_I \cdot F_\lambda \\ &= \sigma \sqrt{\pi a} \cdot F_I \\ &= \sigma \sqrt{\pi a_e} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{ここに、} a_e = a \cdot F_I^2 \quad (8)$$

と置き換えると、(7)式は(6)式と同形となり、集合欠陥を等価な単独き裂として取扱えることになる。そこで、以後 a_e を等価き裂寸法と呼ぶ。

つぎに、Fig. 1 の集合欠陥材の脆性破壊条件式を、

$$(K_I)_N = K_{IC} \quad (9)$$

ここに、 K_{IC} ：破壊靱性値

とすると、等価き裂寸法 a_e は、(7)(9)式から、

$$a_e = (1/\pi) \cdot (K_{IC}/\sigma_f)^2 \quad (10)$$

ここに、 σ_f ：集合欠陥材の脆性破壊応力

(ただし、公称応力表示)

として与えられることになる。

したがって、等価近接度補正係数 F_I は(8)式から、

$$F_I = \sqrt{a_e/a} \quad (11)$$

として求められる。

すなわち、欠陥の大きさと近接度が類似の集合欠陥材を極低温で脆性破壊させて(10)式から等価き裂寸法 a_e を求めて、(11)式から等価近接度補正係数 F_I を得れば、(3)式によって集合欠陥材の疲労強度が近似的に推定できることになる。

以上、本報の基本的な考え方を簡単のため引張応力下の板厚貫通き裂モデルとして説明したが、荷重型式(例えば曲げ荷重)やき裂形状(例えば表面き裂等)が異なる場合についても破壊力学的に同様な取扱いができると考える。

3. 実験方法

2章において述べた取扱いに関する基本的な考え方の妥当性を確認するために、以下に示す検証実験を行った。

3.1 供試材および試験片

供試材として、Fig. 3 に示すように、微小集合欠陥が長手方向に連続して存在する矩形中空断面の球状黒鉛鑄鉄(JIS FCD 600 相当)品に、600°Cの応力除去焼鈍処理を施行したものをを用いた。なお、欠陥材として用いた試験片は概略同図に示す位置から採取したもので、詳細は後述するが、全て長手方向中央部に類似の微小集合欠陥を有するものである。

供試材の化学成分および無欠陥部の機械的性質を Table 1, 2 に示す。また、欠陥部の染色浸透探傷による欠陥検出例を Fig. 4 に、顕微鏡組織を Fig. 5 に示す。

Fig. 5(a)(b)から、本供試材の顕微鏡組織は、フェライトをわずかに含むパーライト組織と球状あるいは微細粒状の黒鉛から成ることが分かる。同図(c)(d)の欠陥部の写真において、形状がやや細長く不規則なもの、および線状のものが欠陥(ひけ巣)である。これから分かるように、本供試材における欠陥は非常に小さく、先端に丸味を有す

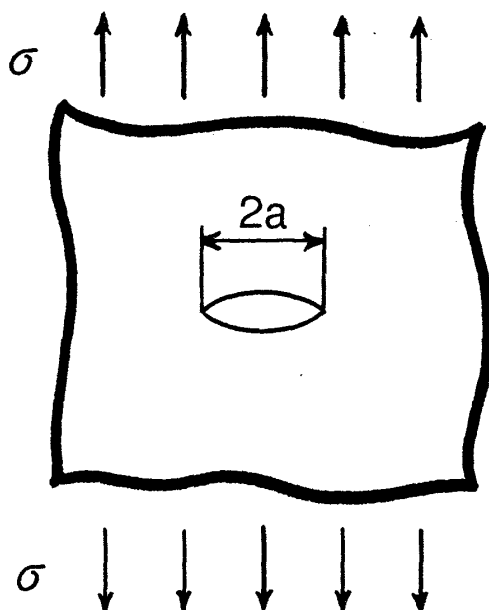


Fig. 2 Single crack model

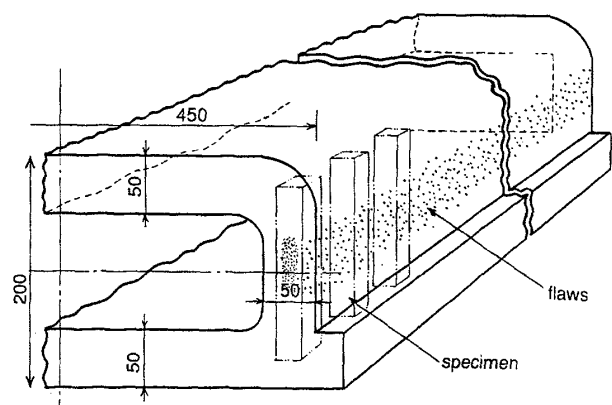


Fig. 3 Cutting location of specimen from cast component

Table 1 Chemical composition (wt%)

T.C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	others
3.51	2.38	0.61	0.03	0.011	0.07	0.09	Cu, Mg

Table 2 Mechanical properties

0.2% proof stress (kgf/mm ²)	Tensile strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)	Hardness (HB)
39.6	63.7	2.0	231

るものであってもその先端半径は小さいために、き裂と見なして取扱っても実用上大きな誤りはないと考えられる。

供試材から採取した各種試験片の形状・寸法を Fig. 6 にまとめて示す。

3.2 実験方法

3.2.1 欠陥性状の調査

集合欠陥材の強度は欠陥性状の影響を強く受けることが考えられる。したがって、2.2 節で述べたような極低温破壊実験によって等価近接度補正係数 F_I を求め、これを用いて欠陥材の疲労限を推定し、その妥当性を疲労試験によって検証するためには、両実験に用いる試験片の欠陥性状が類似であることが前提となる。そこで、極低温破壊実験および疲労試験に用いた欠陥試験片は全て実験に先立って、

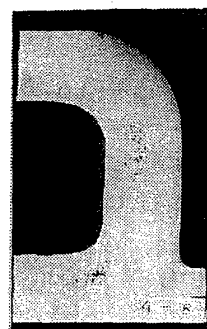


Fig. 4 An example of dye-penetrant test result

画像処理装置を用いて欠陥範囲全域にわたって欠陥の大きさ（全長で代表させた）や面積率、隣接欠陥との距離（最短重心間距離で代表）等を調査した。

3.2.2 基本材料特性

2.1 節の固有き裂モデルに基づく検討に必要な基本材料特性は、(4)式に示したように平滑材疲労限 $\Delta\sigma_{w0}$ と疲労き裂成長下限界値 ΔK_{th} である。これらは、各々 Fig. 6(a) の丸棒試験片および同図(b)の板厚 10 mm の CT 試験片を用い、各々応力比 $R=0.05$ で測定した。なお、平滑丸棒試験片においては、機械加工による表面加工層の影響を把握するため、一部の試験片については機械仕上げ加工後 600°C の真空焼鈍を施行して試験に供した。また、2.2 節で述べた脆性破壊実験によって等価近接度補正係数 F_I を決定するために必要な基本材料特性である極低温下の破壊靱性値 K_{Ic} は、同図(b)の板厚 25 mm の CT 試験片を用い、液体窒素温度（-196°C）で測定した。

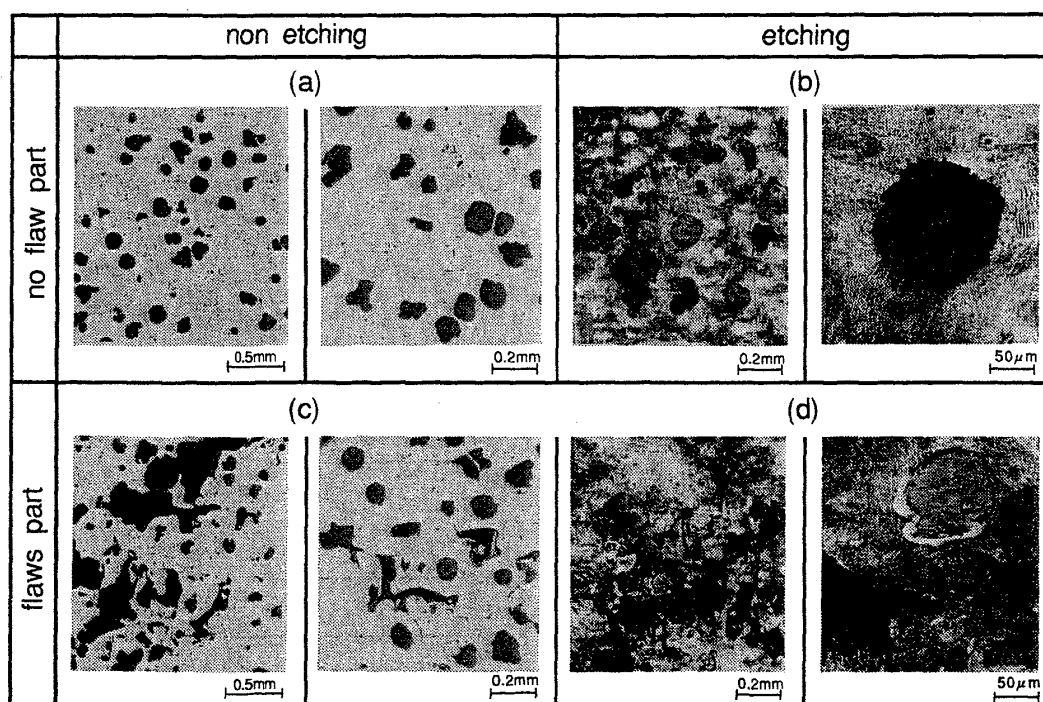
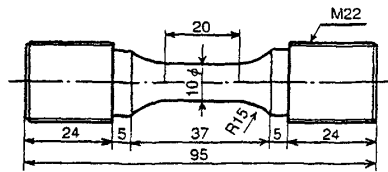
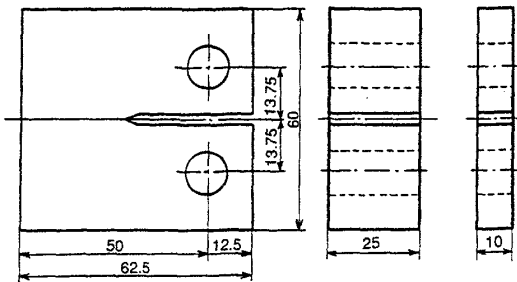


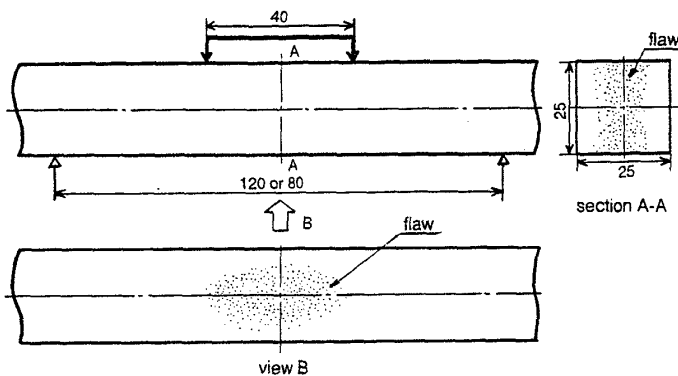
Fig. 5 Micro structures of tested part in material



(a) round bar specimen



(b) CT specimen



(c) fatigue and brittle fracture specimen with clustered small flaws

Fig. 6 Specimen geometry

3.2.3 欠陥材の極低温破壊実験

等価近接度補正係数 F_I を実験的に決定するため、試験片長手方向中央部に微小集合欠陥を配置した Fig. 6(c) に示す 4 点曲げ試験片を用い、液体窒素温度 (-196°C) で破壊実験を行った。

3.2.4 欠陥材の疲労試験

極低温破壊試験に用いたと同一の長手方向中央部に微小集合欠陥を配置した Fig. 6(c) に示す 4 点曲げ試験片を用い、応力比 $R=0.05$ で疲労試験を行った。なお疲労試験は応力繰返し数 $N=10^7$ をもって打ち切りとし、疲労き裂の発生が認められなかった試験片については、応力を増加させて再度実験に供した。

4. 実験結果および考察

4.1 欠陥性状

画像処理装置によって本実験に用いた試験片表面の欠陥性状を調査した一例を Fig. 7, 8 に示す。Fig. 7 は画像処理装置に取り込んで二値処理後の欠陥画像の例であり、Fig.

8 は測定 1 視野当りの黒鉛を含む欠陥 (ひけ集) の長さ (全長) と最短重心間距離の測定結果の例である。同図に示したような測定を各試験片の欠陥全範囲について 6~18 視野 (平均 13 視野) 行い、全試験片の欠陥性状を把握した。Fig. 9 にこの結果を取りまとめて示す。同図における試験片 No. 0 は無欠陥試験片についての調査結果であり、欠陥面積率、欠陥長さ (全長) 等は含有する球状黒鉛の面積率、直径等に相当するものである。

同図から、等価近接度補正係数 F_I を実験的に決定するために用いた脆性破壊試験片の欠陥性状は面積率、欠陥長さ、最短重心間距離のいずれにおいても疲労試験片のそれと類似していることが分かる。

4.2 固有き裂長さ a_{s0}

丸棒試験片による平滑材の疲労試験結果を Fig. 10 に、CT 試験片による疲労き裂成長下限値 ΔK_{th} の測定結果を Fig. 11 に示す。なお、Fig. 10 において○印は機械仕上げ加工後に真空焼鈍を施行した試験片によるデータである。真空焼鈍の有無によって疲労限に顕著な差は認められず、本材質の場合、機械加工による表面加工層が疲労強度に及ぼす影響はそれほど大きなものではなく、実用上無視しても問題はないと判断した。また、Fig. 11 中には疲労き裂成長下限値 ΔK_{th} を考慮した疲労き裂成長速度式も併せ示した。

Fig. 10 および 11 から本供試材の応力比 $R=0.05$ における平滑材疲労限 $\Delta\sigma_{w0}$ および疲労き裂成長下限値 ΔK_{th} は、それぞれ $\Delta\sigma_{w0}=27 \text{ kgf/mm}^2 (\approx 265 \text{ MPa})$ および $\Delta K_{th}=24 \text{ kgf/mm}^{3/2} (\approx 7.44 \text{ MPa} \sqrt{m})$ であった。

これより、(4) 式 of the concept based on the concept of inherent crack length as a fixed crack, and the subsequent four-point bending fatigue test results on the micro-cluster defect modelization of

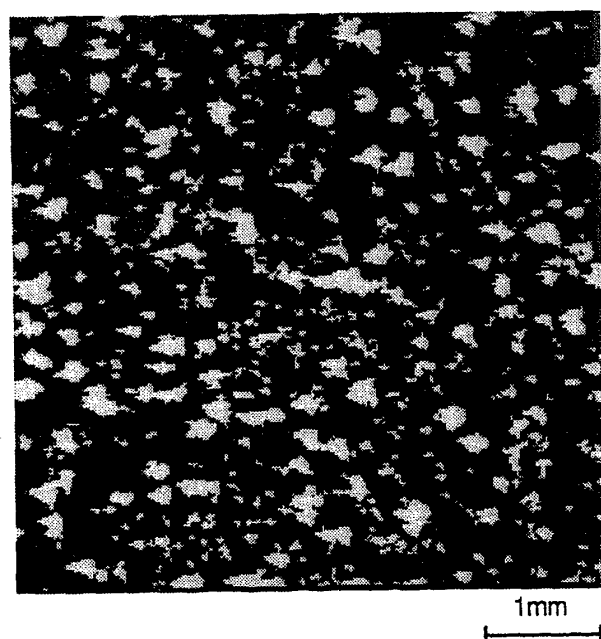


Fig. 7 An example of binary image of flaws

	specimen with no flaw				specimen with clustered small flaws			
	NL Count E-1	SUN. (%)	Ratio (%)		NL Count E-1	SUN. (%)	Ratio (%)	
length of flaw or graphite	4.641	19	8.09	0.0	0.769	166	26.40	0.0
	6.631	9	11.91	0.0	1.173	98	57.89	10.0
	6.678	12	16.30	0.0	1.378	38	70.81	0.0
	7.621	24	28.51	0.0	1.987	32	77.63	0.0
	7.615	11	33.19	0.0	2.386	23	82.68	0.0
	9.608	27	44.68	0.0	2.790	21	87.94	0.0
	10.602	18	52.24	0.0	3.193	18	91.89	0.0
	11.595	16	59.15	0.0	3.599	5	92.98	0.0
	12.589	19	67.27	0.0	4.007	7	94.52	0.0
	13.582	11	71.91	0.0	4.413	2	94.96	0.0
	14.576	6	74.47	0.0	4.811	8	96.71	0.0
	15.569	24	84.68	0.0	5.216	6	98.03	0.0
	16.563	8	88.05	0.0	5.620	2	98.46	0.0
	17.557	5	90.21	0.0	6.023	1	98.68	0.0
	18.550	4	91.91	0.0	6.427	2	99.12	0.0
	19.544	4	93.62	0.0	6.833	0	99.24	0.0
	20.537	4	95.32	0.0	7.238	1	99.34	0.0
	21.531	0	95.32	0.0	7.642	0	99.34	0.0
	22.524	0	96.60	0.0	8.046	1	99.46	0.0
	23.518	4	98.30	0.0	8.450	1	99.78	0.0
	24.511	0	98.30	0.0	8.855	0	99.78	0.0
*1	25.505	1	98.72	0.0	9.259	0	99.78	0.0
	26.498	1	99.15	0.0	9.663	0	99.78	0.0
	27.492	1	99.57	0.0	10.068	0	99.78	0.0
	28.485	1	100.00	0.0	10.472	1	100.00	0.0
	0.0			22.2	0.0			40.0
	0.0			22.2	0.0			40.0
	0.0			22.2	0.0			40.0
	0.0			22.2	0.0			40.0
	0.0			22.2	0.0			40.0
	0.0			22.2	0.0			40.0
	0.0			22.2	0.0			40.0
	0.0			22.2	0.0			40.0
	0.0			22.2	0.0			40.0
	0.0			22.2	0.0			40.0
	0.0			22.2	0.0			40.0
	0.0			22.2	0.0			40.0
	0.0			22.2	0.0			40.0
	0.0			22.2	0.0			40.0
	0.0			22.2	0.0			40.0
	0.0			22.2	0.0			40.0
	0.0			22.2	0.0			40.0
	0.0			22.2	0.0			40.0

*1: distance to center of gravity of the nearest flaw

Fig. 8 Flaw characteristics analyzed by image processing (example)

き裂形状に合わせた半円表面き裂を考え、その半径 a_{so} を Newman-Raju 式⁴⁾ によって求めると、 $a_{so} \approx 0.47 \text{ mm}$ が得られる。以下、この値を用いて検討をすすめる。

4.3 等価欠陥寸法 a_{se}

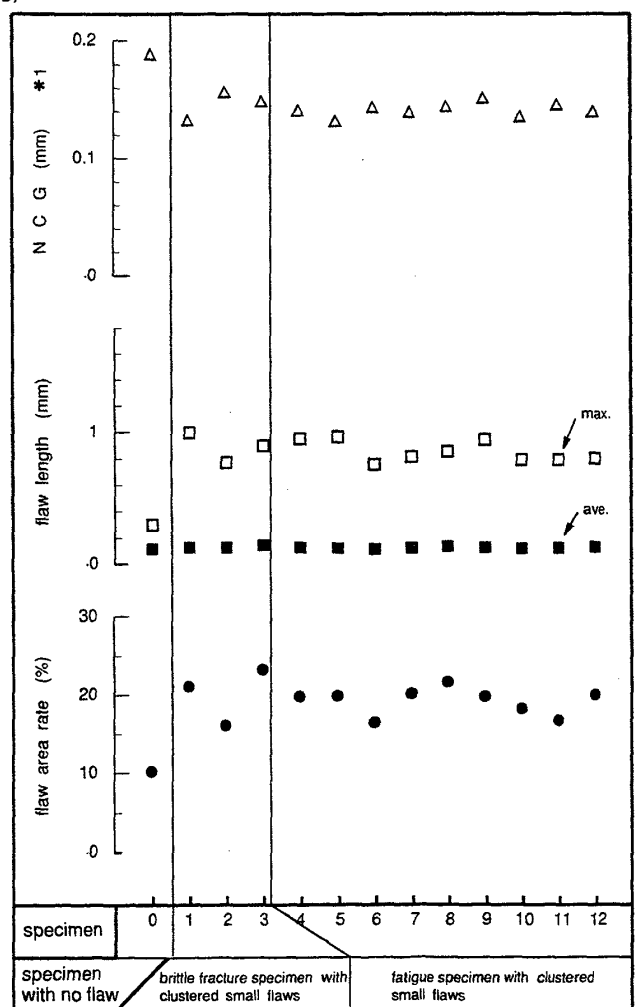
Fig. 6(c) の 4 点曲げ試験片および同図(b)の板厚 25 mm の 1 CT 試験片を用いて極低温 (-196°C) で実施した微小欠陥材の公称曲げ破壊応力 σ_f および無欠陥材の破壊靱性値 K_{Ic} の測定結果を Table 3 に示す。

また、4 点曲げ試験片の破壊は表面の欠陥から発生したと判断されたことから、(10)式の概念に基づく等価欠陥寸法 a_e を曲げ応力を受ける有限板の半円表面き裂として Newman-Raju 式によって算定し、その半径を a_{se} として同表に併記した。 a_{se} を等価半円表面き裂寸法と呼んで、以後の解析に用いることにする。 a_{se} を Fig. 9 に示した実測欠陥長さ (ただし全長表示) と比較すると、平均欠陥長さに対しては約 10 倍オーダ、最大欠陥長さに対しては数倍大きい値である。

4.4 等価近接度補正係数 F_l および疲労限推定

Table 3 に示した等価半円表面き裂寸法 a_{se} と Fig. 9 に示した供試材の実測最大表面欠陥長さ a_s を用いて、(11)式により等価近接度補正係数 F_l を算定した結果を Table 4 に示す。

同表から、本供試材の等価近接度補正係数は、 $F_l = 1.9$ 程度のかかなり高い値を示すことが分かる。この値は、半無限体の近接する 2 つの等長表面半円き裂モデルにおいては、少なくとも、近接度 $\lambda = (\text{き裂全長} / \text{き裂中心間距離}) > 0.9$



*1: distance to center of gravity of the nearest flaw

Fig. 9 Flaw characteristics of specimen

以上の極めて近接したものとなる⁵⁾。また、一直線上に並んだ無数の板厚貫通等長き裂モデルにおいては、 $\lambda \approx 0.87$ 程度に相当する⁶⁾。一方、本供試材の欠陥の近接度をどのようにに定義するか検討の余地のあるところであるが、平均的な近接度として $\lambda_{ave} = (\text{平均欠陥長さの全長}) / (\text{欠陥の最短重心間距離の平均値})$ と定義すると、Fig. 9 の結果から、 $\lambda_{ave} \approx 0.91$ となり、上述の板厚貫通モデルに近い値である。このことから、本供試材のような微小集合欠陥材に板厚貫通モデルがただちに適用できるとするのは極めて短絡的過ぎるが、もし、このような解析的な取扱いが可能になれば実用上極めて有意義であり、今後の検討課題である。

つぎに、同表に示した実験的に求めた等価近接度補正係

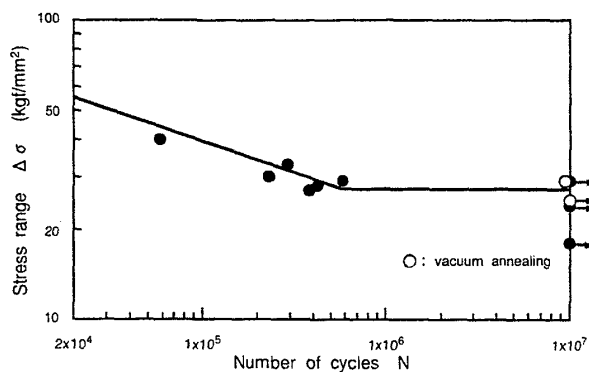


Fig. 10 Fatigue test results of round bar specimen with no flaw

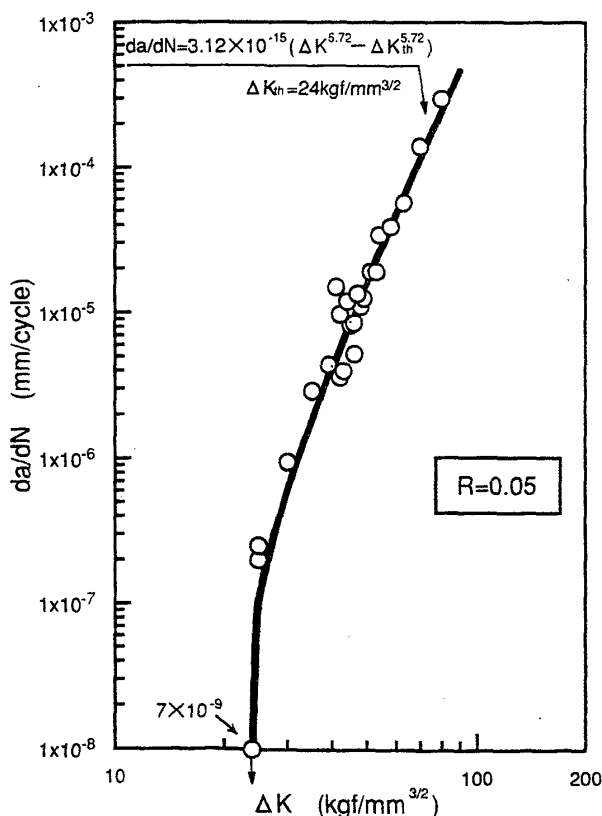


Fig. 11 Fatigue crack growth rates as a function of stress intensity factor ΔK

数 F_I と実測最大欠陥長さ a_s を用い、(3)式に示した固有き裂モデルの概念に基づいて供試欠陥材の公称曲げ疲労限 $\Delta\sigma_{th}$ を算定すると、同表に示すように、 $\Delta\sigma_{th} \approx 10 \text{ kgf/mm}^2$ ($\approx 98 \text{ MPa}$) となる。さらに、この推定値と、Fig. 9 に示した欠陥の量および長さ等が類似の試験片 4~12 を用いて実測した曲げ疲労試験結果 (公称曲げ応力表示) を比較して Fig. 12 に示す。同図によると、微小集合欠陥材における疲労限の推定値は実測値のほぼ下限を与えていると判断することができる。これは、本推定に、最も厳しい破壊条件である実測最大欠陥長さ a_s と極低温破壊実験から得られた等価近接度補正係数 F_I を用いているためと考えられるが、実用的には十分な精度と判断される。すなわち、類似の微小集合欠陥材について、極低温の破壊実験を行い、それより得られる等価近接度補正係数 F_I と実測最大欠陥長さを用いて

Table 3 Equivalent semi-circular surface crack length a_{se}

Specimen No.	σ_I (kgf/mm ²) *1	K _{IC} (kgf/mm ^{3/2}) *2	a_{se} (mm)
1	34.5	58.7	1.84
2	37.2		1.57
3	36.8		1.61

*1 : bending fracture strength at -196°C

*2 : specimen with no flaw at -196°C

Table 4 Equivalent correction factor of nearness of flaws F_I and estimated fatigue limit $\Delta\sigma_{th}$

Specimen No.	a_{se} *1 (mm)	a_s *2 (mm)	F_I (-)	$\Delta\sigma_{th}$ (kgf/mm ²)
1	1.84	0.50	1.92	9.8
2	1.57	0.39	2.00	10.0
3	1.61	0.45	1.89	10.2

*1 : equivalent semi-circular surface crack length

*2 : half length of measured max. flaw

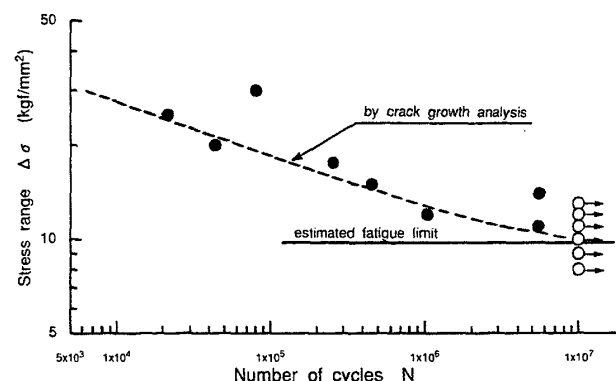


Fig. 12 Fatigue test results of 4 point bending specimen with clustered small flaw and estimated fatigue limit

固有き裂モデルに基づく破壊力学的解析を行うことにより、微小集合欠陥材の疲労限を実用上十分な精度で推定できることが確認できた。

本手法は、例えば同一の鑄造方案で多量に製造される鑄造部材等の疲労強度評価に用いることができる。

また、欠陥の大きさや密集度と F_I の関係データを蓄積することにより、微小集合欠陥を有する種々の鑄鍛造部材の疲労強度評価に適用できるものと考えられる。

なお、Fig. 12 において、破線で示した $S-N$ 線は、前報²⁾で報告した微小単独欠陥の疲労寿命評価の考え方を、参考までに本供試材のような微小集合欠陥にも適用して求めた計算破断寿命線である。すなわち、初期き裂寸法としては(実測最大欠陥長さ+固有き裂長さ)、 K 値計算には Table 4 に示した F_I を考慮し、き裂成長は Fig. 11 に示した疲労き裂成長速度式を用いて $K=K_{Ic}$ を破断条件として計算している。本成長計算は、き裂成長によって変化するであろう F_I を全寿命範囲にわたって初期値のまま一定値として用いるなど、種々の問題点はあるが、同図から分かるように実測値の下限寿命とほぼ良く対応している。これについては、今後とも検討を進めて行きたい。

5. 結 言

鑄鍛造部材に見られる微小集合欠陥材の疲労強度を定量的に評価する手法について検討し、次の結果を得た。

- (1) 微小集合欠陥の疲労強度を等価な破壊性能を与える等価近接度補正係数 F_I を用いて固有き裂モデル概念に基づき定量的に把握する評価手法を提案した。
- (2) 鑄鍛造部材の微小集合欠陥として、問題になることの多い球状黒鉛鑄鉄 (JIS FCD 600 相当) の微

小集合ひけ巣欠陥をとりあげて上記手法の適用性を検討した結果、疲労限を実用上十分な精度で推定できることが確認できた。

- (3) 上記(1)の F_I は類似欠陥材の極低温破壊実験によって求められ、同一の鑄造方案で多量に製造される鑄造部材等の疲労強度評価に用いることができる。また、関係データの蓄積により、広く設計基準化も可能と考えられる。

謝 辞

本研究に関して、貴重な御意見・御討論をいただいた日本造船学会材料・溶接研究委員会材料分科会主査町田進教授(東大工学部)をはじめ分科会委員各位に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 森田, 梶本, 村井, 岩田: 鑄鍛造欠陥の疲労強度評価, ——丸味を有するマクロ単独欠陥——, 日本造船学会論文集, 第 167 号 (1990), 245。
- 2) 森田, 梶本, 外: 鑄鍛造欠陥の疲労強度評価 (その 2) ——微小単独欠陥——, 日本造船学会論文集, 第 170 号 (1991), 745。
- 3) 例えば田中: 微小疲労き裂の伝播, 材料, 33(1989), 962。
- 4) J. C. Newman and I. S. Raju: Analysis of Surface Cracks in Finite Plates under Tension or Bending Loads, NASA Technical Paper 1578(1979)。
- 5) 例えば JSMS: Stress Intensinty Factors Hand Book, Vol. 1, 2, Pargamon Press (1987)。
- 6) 石田誠: き裂の弾性解析と応力拡大係数, 培風館 (1976)。