

409 超長寿命疲労破壊における ODA(Optically Dark Area)の形成に及ぼす応力と繰返し数の影響

九大院 ○長田淳治 九大工 村上敬宜

1. 緒言

近年、高強度が繰返し数 $N=10^7$ でも疲労限度を示さず、 $N > 10^7$ でも疲労破壊を起こす現象が注目されている。この問題に関し、村上らは次のことを明らかにした^(1,2)。(1) 超長寿命疲労破壊した試験片の破断起点となった介在物周辺には、表面状態が粗いため金属顕微鏡で黒く見える領域 (ODA, Optically Dark Area) が存在する。ODA は超長寿命領域での疲労強度の低下に関与している。(2) ODA 寸法は寿命が長いほど介在物寸法に相対的に大きい。しかし現在のところ、ODA 寸法は破断後の破面観察を通してしか知ることができない。そこで本研究では疲労試験中の試験片にどの程度の ODA が繰返し数のどの段階で形成されるのかを知るために、軸受鋼 (SUJ2) を用いて破断までに応力をステップ状に上げていく引張圧縮疲労試験を行い、その疲労破面に現われた介在物と ODA 寸法の関係性を調べた。また ODA の破壊力学的解析を行い、ODA 境界での応力拡大係数幅 ΔK_{ODA} が微小き裂寸法依存性を示すことを指摘する。

2. 供試材および実験方法

供試材は軸受鋼 SUJ2 である。Table 1 に供試材の化学成分を示す。本研究では、介在物の種類による ODA の形成の違いを調べるために通常の SUJ2(NN)、チタン(Ti)を計画的に添加したもの(NT)、硫黄(S)を計画的に添加したもの(NS)、酸素(O)量を増加したもの(NO)についても実験を行った。熱処理方法は、840℃焼入れ、180℃焼戻し処理である。実験方法は応力比 $R = -1$ 、繰返し速度 20~50 Hz の引張圧縮疲労試験である。

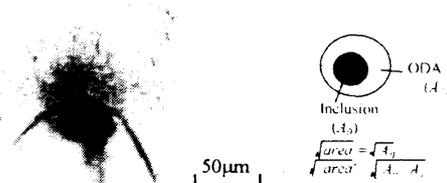
3. 実験結果および考察

3.1 引張圧縮疲労試験結果と破壊起点の介在物

試験片はすべて内部から破断した。破断面には典型的なフィッシュ・アイが観察され、その中心には介在物が存在した。試験片 NT, NO, NS のいずれにおいても破壊起点となった介在物はすべて Al, Mg 系酸化物であり、Ti, S を添加することにより増えたと考えられる介在物(TiN, MnS)が破壊起点となったものは皆無であった。このことから推測すると、Ti, S の添加により破壊に影響しない小さい TiN, MnS 介在物の個数はふえたものの、相対的に数が少ない破壊に影響する大きい介在物の分布は変化しなかったものと考えられる。このことは高強度鋼の疲労強度を高くするためには、介在物の数を減らすより介在物寸法を小さくすることがより効率的で重要であることを意味している。Fig.1 に試験片 NT のフィッシュ・アイ破壊の起点となった介在物の金属顕微鏡写真を示す。破断起点となった介在物周辺には、表面状態が粗いため黒く見える領域 ODA が存在している^(1,2)。Fig.2 に介在物寸法 (\sqrt{area}) に対する介在物と ODA を含めた寸法 ($\sqrt{area'}$) の比 ($\sqrt{area'}/\sqrt{area}$) と破断繰返し数 N_f の関係を示す。ODA 寸法は長寿命ほど介在物寸法に相対的に大きい傾向がある^(1,2)。

Table 1 Chemical composition of SUJ2 (wt%) (ppm)

Specimen	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti	O
NN ⁽²⁾	0.97	0.18	0.27	0.016	0.007	1.33	0.001	8
NS	0.98	0.26	0.40	0.010	0.020	1.40	0.001	9
NO	0.98	0.25	0.39	0.010	0.003	1.40	0.001	15
NT	0.99	0.26	0.39	0.010	0.002	1.40	0.020	8



$\sigma = 721 \text{ MPa}$, $N_f = 2.77 \times 10^7$, $\sqrt{area} = 34.3 \mu\text{m}$, $\sqrt{area'} = 60.8 \mu\text{m}$
 Fig. 1 Fatigue fracture origin and ODA of the quenched and tempered specimen (Specimen NT). $HV = 700$

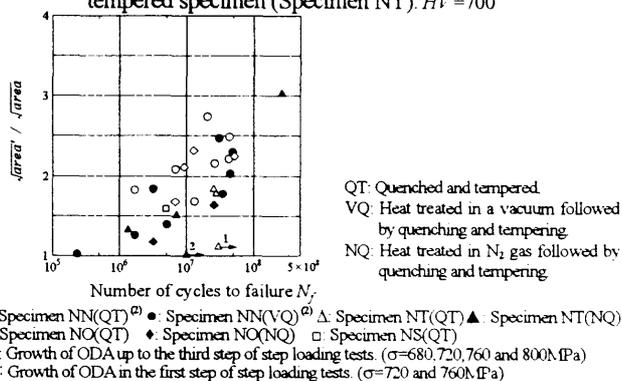


Fig. 2 Relationship between the size of ODA and cycles to failure N_f

3.2 ODA の破壊力学的解析および下限界応力拡大係数幅 ΔK_{th} の寸法依存性

ODA は介在物周辺にトラップされた水素の影響と繰返し応力の連成による機構で進展した結果と考えられる。ODA 寸法が水素の助けを必要としない大きさまで成長すると通常の疲労破壊が始まると考えることができる。一般に、下限界応力拡大係数幅 ΔK_{th} の値は大きいき裂や長いき裂では材料固有の一定値をとるが、き裂寸法が小さくなるにつれて小さい値になるといわれている⁽³⁾。村上らは微小き裂の ΔK_{th} の寸法依存性を表現する $\sqrt{area'}$ パラメータモデル⁽⁴⁾を提案し、それによって微小欠陥や介在物を有する材料の疲労強度を精度よく予測できることを示した。したがって、ODA を微小き裂と等価と考え、ODA 寸法がある限界寸法に達すると水素が関与しない通常の疲労破壊が始まると考えると、ODA 境界での応力拡大係数幅 ΔK_{ODA} の値は ODA 寸法 $\sqrt{area'}$ に依存すると考えられる。ここで ΔK_{ODA} は次式で計算した。

$$\Delta K_{ODA} = 0.5 \Delta \sigma \sqrt{\pi \sqrt{area'}} \quad (1)^{(4)}$$

ΔK_{ODA} : $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, $\Delta \sigma = 2\sigma$: MPa , $\sqrt{area'}$: μm
 Fig.3 に ΔK_{ODA} と $\sqrt{area'}$ の関係を示す。図からわかるように ODA の寸法 $\sqrt{area'}$ が小さくなるにつれて ΔK_{ODA} の値は小さくなるのがわかる。その傾向は

$$\Delta K_{ODA} \propto \sqrt{area'}^{1/3} \quad (2)$$

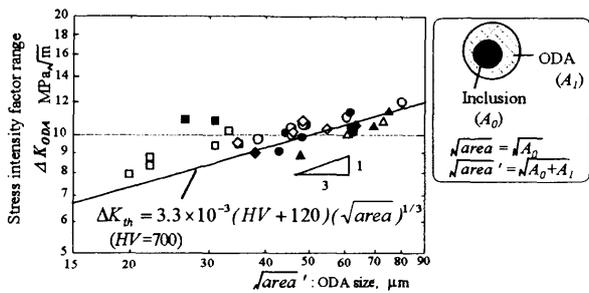


Fig. 3 Relationship between $\sqrt{area_t}$ and ΔK_{ODA} ($HV=700$)

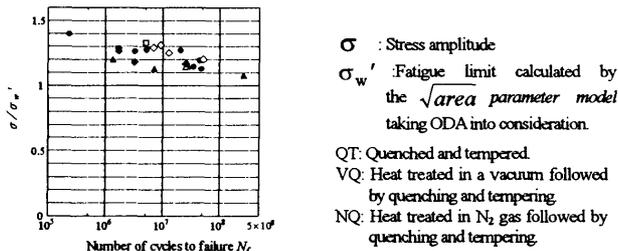


Fig. 4 Type 2 modified S-N data (SAE52100)

となり、 \sqrt{area} パラメータモデルの表現と一致する⁽⁴⁾。

一方、酒井ら⁽⁵⁾は、ODA 寸法から求めた ΔK_{ODA} は一定値となると報告している⁽²⁾。酒井らのデータ⁽⁵⁾を式(1)に代入して求めた ΔK_{ODA} を Fig.3 の $\square(N_f > 10^6)$ 、 $\blacksquare(N_f < 10^6)$ で示す。 $\square(N_f > 10^6)$ の値は ODA の寸法 $\sqrt{area_t}$ に依存しており、その傾向も本研究のデータと同じである。しかし、 $\blacksquare(N_f < 10^6)$ のデータは他のデータとは傾向が異なる。これは Fig.2 や先の研究結果⁽²⁾でも報告しているように、 $N_f < 10^6$ では ODA はほとんど形成されないためである。

Fig.3 に示すように、 ΔK_{ODA} は一定値ではなく、酒井らのデータも含めて式 (2) の ODA 寸法依存性があると考えるのが妥当である。そこで、Fig.4 に ODA を含めた介在物寸法 $\sqrt{area_t}$ を欠陥寸法として \sqrt{area} パラメータモデルによって疲労限度 σ_w' を推定し、負荷応力 σ と σ_w' の比 (σ/σ_w') を縦軸にとった修正 S-N データを示す。 σ/σ_w' の値は破断した試験片ではすべて 1.0 より大きい値を示す。

3.3 非破断の試験片に形成される ODA の推定

ODA が繰返しどの段階でどの程度の寸法に形成されるのかを調べるために、応力のある繰返しごとに段階的に上げる試験を行った。まず、各応力での繰返し数を $N=1 \times 10^7$ と定め、その応力で破断しない場合は次の応力へ上げて試験を行い、破断するまでこの手順を続けた。応力は 40MPa ステップで上げた。Table 2 に試験片 NT1 の実験結果を示す。試験片 NT1 の場合、Table 2 に示すように応力を 680, 720, 760, 800MPa と上げていき、800MPa で $N_f=3.06 \times 10^6$ で破断した。この時の破断起点の介在物寸法は $\sqrt{area} = 29.9\mu\text{m}$ 、ODA と介在物を含んだ寸法は $\sqrt{area_t} = 47.9\mu\text{m}$ である。ここで 4 段階目の

注) 酒井らは $\Delta\sigma$ でなく σ を代入したものを ΔK としているが、本論文では通常定義に従って $\Delta\sigma = 2\sigma$ を式(2)に代入している。

Table 2 Results of the step loading fatigue test. $\sqrt{area_{680}}$, $\sqrt{area_{720}}$, etc are the sum of the ODA + original inclusion size at each step.

Arrows show the growth of ODA at each step loading (Specimen NT1)

Growth of ODA	Stress amplitude (MPa)	680	720	760	800
	Number of cycles	1×10^7	1×10^7	1×10^7	3.06×10^6
\sqrt{area} (μm)		29.9	$\sqrt{area_{680}}$	$\sqrt{area_{720}}$	$\sqrt{area_{760}}$
$\sqrt{area_t}$ (μm)		$\sqrt{area_{680}}$	$\sqrt{area_{720}}$	$\sqrt{area_{760}}$	47.9

$\sigma = 800\text{MPa}$ の試験に注目する。それより前の 3 段階の疲労試験(680, 720, 760MPa)によって形成された ODA を含めた介在物寸法 $\sqrt{area_t}$ を初期の欠陥寸法と考え、その試験片に新たに応力振幅 800MPa で疲労試験を行い、 $N_f=3.06 \times 10^6$ で破断したと考える。Fig.2 の $\sqrt{area_t}/\sqrt{area}$ と破断繰返し数 N_f の関係から $N_f = 3.06 \times 10^6$ で破断するときの $\sqrt{area_t}/\sqrt{area}$ は次のようになる。

$$\frac{\sqrt{area_{800}}}{\sqrt{area_{760}}} \cong 1.44 \quad (3)$$

$\sqrt{area_{760}}$: $\sigma = 760\text{MPa}$ の実験終了後の ODA と介在物の寸法を加えたもの。

$\sqrt{area_{800}}$: $\sigma = 800\text{MPa}$, $N_f=3.06 \times 10^6$ の実験終了後の ODA と介在物の寸法を加えたもの。

$\sqrt{area_t} = 47.9\mu\text{m}$ を式(3)に代入すると、 $\sqrt{area_{760}} = 33.3\mu\text{m}$ となる。したがって $\sigma = 760\text{MPa}$ の実験までの非破断の試験片の $\sqrt{area_t}/\sqrt{area}$ は次のようになる。

$$\frac{\sqrt{area_{760}}}{\sqrt{area}} = 33.3/29.9 = 1.11$$

この結果を Fig.2 の $\Delta 1$ で示している。非破断の段階のデータ $\Delta 1$ は同程度の繰返し数の破断データ Δ と比較するとはるかに小さい。すなわち $N_f > 10^7$ の超長寿命の場合、非破断の状態ではき裂の進展はほとんどの場合、ODA 内の水素と連成したきわめて低速の状態であることがわかる。

4. 結 言

- (1) 応力を段階的に上げる試験により超長寿命域での ODA 内のき裂の進展状況を把握することができた。 $N_f > 10^7$ で非破断の場合には、ほとんどの場合、き裂は ODA を形成しつつきわめて低速で進展していると考えられる。
- (2) ΔK_{ODA} は一定値ではなく ODA 寸法依存性がある。ODA 寸法 $\sqrt{area_t}$ が小さくなるにつれて ΔK_{ODA} の値は小さくなる。その傾向は $\Delta K_{ODA} \propto \sqrt{area}^{1/3}$ となり、 \sqrt{area} パラメータモデルの表現と一致する。
- (3) \sqrt{area} パラメータモデルに ODA を含めた介在物の寸法を考慮すれば $N_f > 10^7$ の超長寿命領域における疲労強度を精度よく予測できる。

参考文献

- 1) Y.Murakami, T.Nomoto, T.Ueda, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., 22, 581(1999).
- 2) 村上敬宜, 横山ナンシー尚子, 高井健一, 材料, 2001, 50, 10, p.1068.
- 3) 北川英夫, 高橋 進, 機械学会論文集 A, 45-399, (1979) pp.1289-1303.
- 4) 村上敬宜, “金属疲労: 微小欠陥と介在物の影響” (1993) 養賢堂.
- 5) 酒井達雄, 佐藤陽介, 小熊規素, 機械学会論文集 A, 67-664, (2001) pp.1980-1987.