

1-11 非対称ひずみ波形による熱疲労シミュレーションの試み

京都大学 工学部
同 大学院

平 修二、藤野宗昭、
外島利章、高橋 務

熱疲労破壊機構が最近 K.D. Sheffield, G.R. Halford ら、および筆者らによってかなり明らかにされてきたが、熱疲労実験の技術面、コスト面の困難さのため、データの蓄積は必ずしも十分ではない(文献1,2,3)。筆者らは温度変化をする代わりに、非対称波形ひずみで高温低サイクル疲労を行い、熱疲労をシミュレートすることを試みた。

非対称波形下の高温低サイクル疲労 構造用炭素鋼 S15C

を、Fig. 1 に示す試験片形状に旋盤加工し、井 400 エリ紙で研摩後、900°C 1 時間の真空焼鈍を施し実験に供した。試験機は電気油圧サーボ式引圧疲労試験機と高周波共振機とを組み合わせたものである(文献5)。温度は 500°C、繰返し速度は 1 cpm 一定とし、ひずみ範囲は 0.5%, 1.0%, 1.5% の 3 種類とした。Fig. 2 に示すような非対称三角波を発生する関数発生器を用い、非対称比 $\dot{\epsilon}_t/\dot{\epsilon}_c$ を、1/9, 1, 9, 19 計 5 種類のひずみ波形で試験を実施した。なお、 $\dot{\epsilon}_t/\dot{\epsilon}_c = 1$ を Sym., $\dot{\epsilon}_t/\dot{\epsilon}_c < 1$ を Asym. I, $\dot{\epsilon}_t/\dot{\epsilon}_c > 1$ を Asym. II と呼ぶことにする。

全ひずみ範囲と疲労寿命との関係を Fig. 3 に示す。非対称比 1/9 の Asym. I, 非対称比 9 の Asym. II とともに直線関係があり、Manson-Coffin の式が成立している。大ひずみ範囲では Asym. I が、小ひずみ範囲では Asym. II が、より短寿命である。なお、Asym. I, Asym. II とともに Sym. よりも短寿命である。

同一周期下で生じた疲労寿命の波形依存性は、Fig. 4 に示すように引張変形時のひずみ速度との関係をもってしても解消できない。Asym. I ではひずみ速度の減少により一層の寿命低下を生じている。一方、Asym. II では、ひずみ速度の増大に伴い寿命が減少するという通常と全く逆の依存も見出された。さらに、非対称波形下の疲労損傷は等しい率で増大するものと仮定して、平均疲労寿命 $2 \left(\frac{1}{N_f(\dot{\epsilon}_t)} + \frac{1}{N_f(\dot{\epsilon}_c)} \right)^{-1}$ を求めた。実際の疲労寿命 $N_f(\dot{\epsilon}_t - \dot{\epsilon}_c)$ と平均疲労寿命 $\langle N_f \rangle$ との比を Fig. 5 に示す。短寿命側(大ひずみ範囲)では Asym. I が、

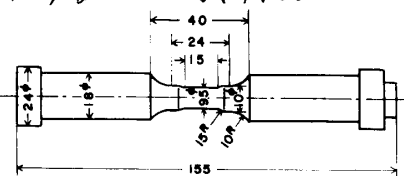


Fig. 1 Test piece.

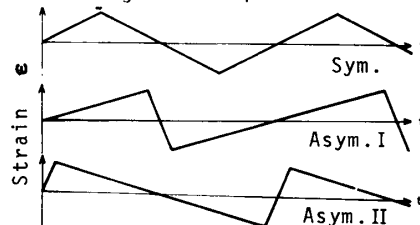


Fig. 2 Symmetric and asymmetric waves adopted.

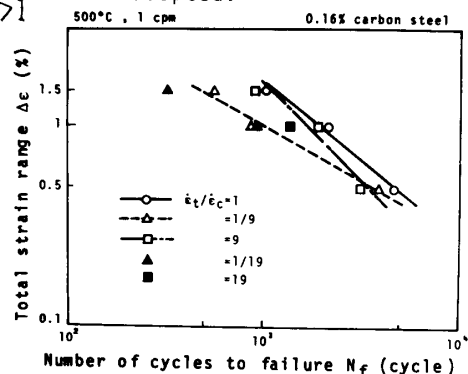


Fig. 3 Relation between strain range and number of cycles to failure.

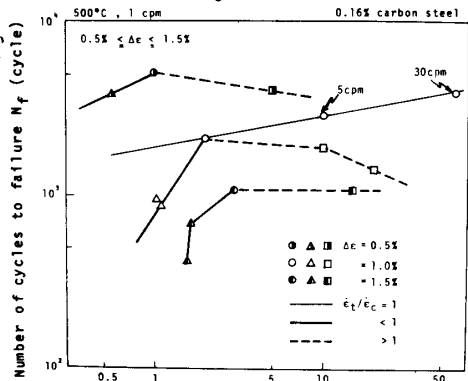


Fig. 4 Effect of asymmetric wave on time dependency of fatigue life.

長寿命側では Asym. II が平均寿命より短寿命である。Fig. 3 および Fig. 4 の結果から、異なるひずみ速度で変形が繰り返される場合、独自の破壊機構が働いていることが想像される。

き裂発生に及ぼす非対称波形の影響 疲労破壊後の縦割り断面の走査電子顕微鏡写真を Fig. 6 に示す。表面から応力軸に垂直に発生成長した“表面き裂”の数と深さは Asym. II で最も大きい。Asym. I ($\dot{\epsilon}_t/\dot{\epsilon}_c = 1/9$) では結晶粒界に空洞(内部き裂)が多数発生している。一方、ひずみ範囲 0.5% では内部き裂は見出されない。き裂形態の非対称波形依存およびひずみ範囲依存は、Fig. 3 の疲労寿命の大小関係と傾向を同じくしている。in-phase 下の熱疲労材は Asym. I と、out-of-phase 下のそれは Asym. II と同様のき裂が見出されている(文献3,4)。

不均等応力 (unbalanced stress loop) による解析 熱疲労寿命を解析する際に用いられた方法を、ひずみ速度の変化する場合に適用する。すなわち、ひずみ速度が変動する場合においても、疲労損傷の増加を促進する効果 (S.F.) が働いていると考える。

$$\left\langle \frac{dD^*}{dN} \right\rangle_{\dot{\epsilon}_t - \dot{\epsilon}_c} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{N_f(\dot{\epsilon}_t)} + \frac{1}{N_f(\dot{\epsilon}_c)} \right) \cdot (S.F.)' \quad (1)$$

$$N_f(\dot{\epsilon}_t - \dot{\epsilon}_c) = \frac{1}{\left\langle \frac{dD^*}{dN} \right\rangle_{\dot{\epsilon}_t - \dot{\epsilon}_c}} = 2 \left(\frac{1}{N_f(\dot{\epsilon}_t)} + \frac{1}{N_f(\dot{\epsilon}_c)} \right)^{-1} (S.F.)' \quad (2)$$

(1)、(2) 式によると、平均疲労寿命 $\langle N_f \rangle$ の $N_f(\dot{\epsilon}_t - \dot{\epsilon}_c)$ に対する比が spanning factor (S.F.)' を表わしていることになる。き裂発生に対する粒界すべりの蓄積空洞として成長するための引張応力の効果を考慮して、熱疲労の (S.F.) は次式のように提案されている(文献4)。

$$(S.F.) = 1 + \frac{|\sigma_t + \sigma_c|}{\Delta\sigma/2} \quad \text{out-of-phase}, \quad (S.F.) = 1 + \frac{|\sigma_t + \sigma_c|}{\Delta\sigma/2} \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_t} \right)^2 \Delta\epsilon^{1/2} \quad \text{in-phase} \quad (3)$$

Fig. 7 によって、非対称ひずみ波形下の (S.F.)' も同様の解析が可能であると結論される。
 <参考文献>

- (1) K.D. Spletter; NASA-CR-134524, (1974) (2) G.R. Halford et al.; ASTM STP 520, (1973) (3) 平、藤野、片山; 第23期学術講演会前刷, p45 (1974) (4) 平、藤野、権垣; 第24期学術講演会前刷, (1975) (5) 平、藤野、土師; 材料22, p110, (1973)

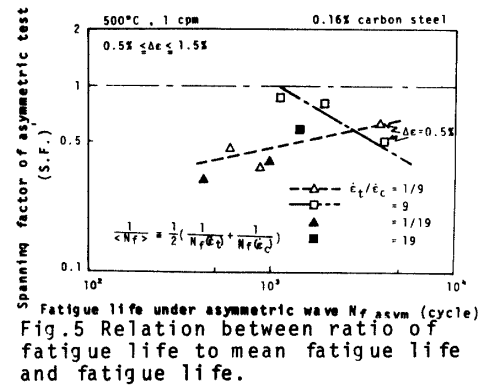


Fig. 5 Relation between ratio of fatigue life to mean fatigue life and fatigue life.

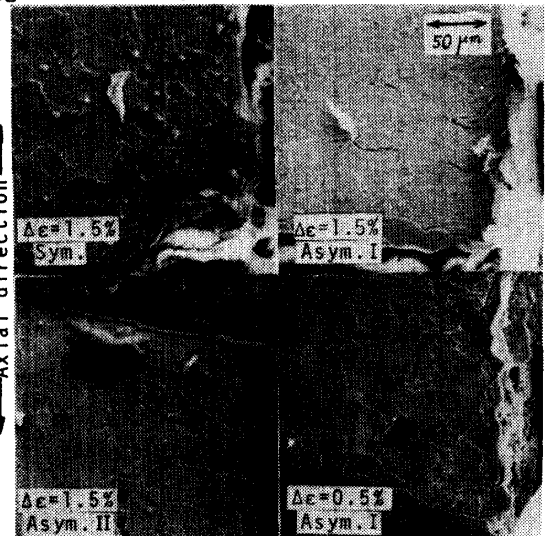


Fig. 6 Micro cracks formed during the fatigue test under asymmetric strain wave.

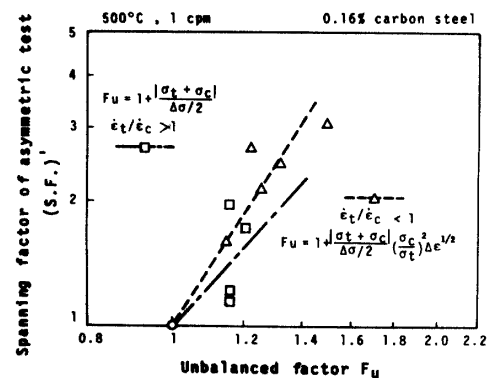


Fig. 7 Effect of unbalanced stresses on fatigue life.