

119 低サイクル疲労破壊過程におけるひずみ速度変動および温度変動の影響

京都大学工学部

平修二 藤野宗昭 高橋 務*

* 現在、住友倉庫工業(株)

はじめに 引張期間のひずみ速度と圧縮期間のそれと異なる鋸歯状波形下の高周波低サイクル疲労試験結果 (Fig.1の上段, S15C, 500°C) は、低サイクル疲労破壊におけるひずみ速度の影響の著しいことを示しており、一方、引張期間の温度と圧縮期間の温度が異なる熱疲労試験の結果 (同図下段, S15C, 200-500°C) は低サイクル疲労破壊における温度サイクル重畳の影響の著しいことを示している。しかし、一定温度下で調べられたひずみ速度の影響および一定のひずみ速度で調べられた温度サイクル重畳の影響に関するこれらの実験結果は、必ずしも破壊機構との関連において解析されておらず、複雑なひずみ波形と温度波形の組合せを本状態で使用される高温用機器部材の強度評価に資するには不十分である。本研究では、鋸歯状波形下の高周波低サイクル疲労、および熱疲労における1サイクル当りの損傷と三角波形下の高周波低サイクル疲労におけるそれとの関係と明らかとし、1サイクル中のひずみ速度変動あるいは温度変動による生ずる付加的損傷について検討した。

鋸歯状波形下の高周波低サイクル疲労における損傷 Fig.1の上段に示したように、三角波形下の疲労寿命に比べて鋸歯状波形下の疲労寿命は小さく、その寿命差は引張期間のひずみ速度と圧縮期間のひずみ速度の大きさの差 $|\dot{\epsilon}_t - |\dot{\epsilon}_c||$ 、あるいはひずみ速度の比 $\dot{\epsilon}_t/|\dot{\epsilon}_c|$ に依存するので、同図のデータの中から全ひずみ範囲が1.0%であるものを抜粋し、引張期間のひずみ速度 $\dot{\epsilon}_t$ と疲労寿命 N_f との関係を図示すると Fig.2 のようになる。图中に×印で示した三角波形下の寿命は低周波数側 (すなわち低ひずみ速度側) で減少するが、●印で示される低速—高速の鋸歯状波形 ($\dot{\epsilon}_t < |\dot{\epsilon}_c|$) の場合の寿命減少は一層顕著である。一方、○印で示される高速—低速の鋸歯状波形 ($\dot{\epsilon}_t > |\dot{\epsilon}_c|$) の場合には逆に高ひずみ速度側で寿命が減少する。

このような1サイクル中のひずみ速度変動に伴う疲労寿命の減少を、以下では寿命の逆数と表わされる1サイクル当りの損傷に着目して解析する。引張・圧縮の低サイクル疲労における1サイクル当りの損傷は、引張期間の損傷と圧縮期間の損傷が独立に加算されたものであり、かつ各期間における損傷はひずみ速度と温度のみで依存するものと仮定すると、鋸歯状波形下の疲労における1サイクル当りの損傷は引張期間のひずみ速度に等しい大きさのひずみ速度をもつ三角波形下の損傷 $\Delta\phi'$ と圧縮期間のひずみ速度に等しい大きさのひずみ速度をもつ三角波形下の損傷 $\Delta\phi''$ との平均値 $[\Delta\phi' + \Delta\phi'']/2$ に等しくなる。しかしながら、この仮定に基づいて求めた損傷量 $[\Delta\phi' + \Delta\phi'']/2$ と実際の損傷量 ($\Delta\phi = 1/14$) とを比較してみると後者の方が大きく、かつ、その差

$$\delta\Delta\phi = \Delta\phi - [\Delta\phi' + \Delta\phi'']/2 \quad (1)$$

は引張期間と圧縮期間のひずみ速度差の大きい場合に大きくなる。すなわち、鋸歯状波形下の疲労に認められる $\delta\Delta\phi$ は1サイクル

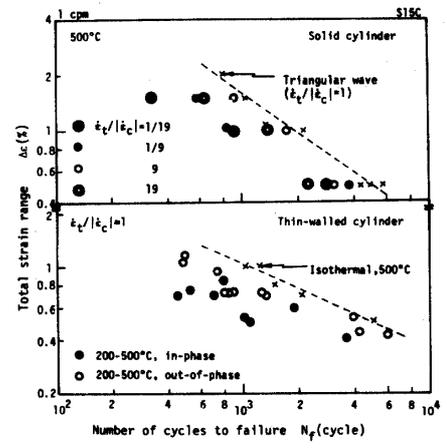


Fig.1 $\Delta\phi$ - N_f relationships in both isothermal fatigue under three types of strain-wave and thermal fatigue of S15C.

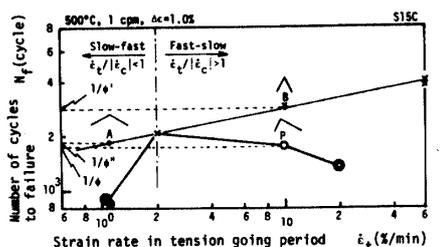


Fig.2 Relation between isothermal fatigue life under ramp wave and the strain rate in tension going period.

中のひずみ速度変動に起因する付加的損傷である。

一方、付加的損傷 $\Delta\phi$ と三角波形下の疲労における損傷 $\Delta\phi'$ と $\Delta\phi''$ の差との関係を n により検討すると、次式の関係

$$\Delta\phi = \gamma (\Delta\phi' - \Delta\phi'') \quad (2)$$

が見出された。式中の定数 γ の値は低速-高速波形の場合に 3.6 であり、高速-低速波形の場合に -1.2 である。SUS304 鋼について (2) 式に示したと同様の関係が認められた。 γ の値を Table 1 に示す。

考察 結晶粒以下の寸法の微細なき裂の発生と成長におよぼすひずみ速度変動の影響を調べるために、結晶粒を粗大化された SUS304 鋼の試験片表面にけがき線と刻み、真空中の高温低サイクル疲労試験に供した。Fig. 4a 顕微鏡写真は疲労試験のほぼ中期において、プラスチックレプリカに転写された試験片の表面状態を示す。写真(a)に示される三角波形下の疲労に比べ、(b)および(c)に示される鋸歯状波形下の疲労においては粒界すべりが蓄積し、かつその粒界すべりの蓄積は粒界三重点近傍のひずみ集中を介してき裂発生の原因となっていることがわかる。すなわち、引張期間の粒界すべりと圧縮期間の粒界すべりの差が 1 サイクル当りの蓄積粒界すべりであり、その蓄積分が(2)式の付加的損傷に対応するものと考えられる。

熱疲労に関しては、熱疲労の引張期間の温度 T_t に等しい走温度下高温低サイクル疲労における損傷 $\Delta\phi'$ と圧縮期間の温度 T_c に等しい走温度下高温低サイクル疲労における損傷 $\Delta\phi''$ との平均値 $[\Delta\phi' + \Delta\phi'']/2$ と実際の熱疲労損傷 $\Delta\phi (= 1/N_f)$ とを比較することによって付加的損傷を解析した。その結果、(2)式の関係が認められた。すなわち、加熱中に引張変形され、冷却中に圧縮変形される in-phase 熱疲労では $T_t = T_2$ (T_2 は上限温度)、 $T_c = T_1$ (T_1 は下限温度) とみられ、逆位相の out-of-phase 熱疲労では $T_t = T_2$ 、 $T_c = T_2$ とみられた。

Table 1 に示すように、in-phase 熱疲労および低速-高速波形下の疲労における γ の値は、2 ~ 4 と比較的大きく、out-of-phase 熱疲労および高速-低速波形の場合には約 -1 であり、前二者および後二者にそれぞれ共通の損傷の発生機構があることが示唆される。熱疲労の場合の粒界すべりを Fig. 4(d) および(e) に示す。写真(b)と(a)、あるいは(c)と(e)とを比較すると、粒界すべりの蓄積の仕方と類似性があることがわかる。

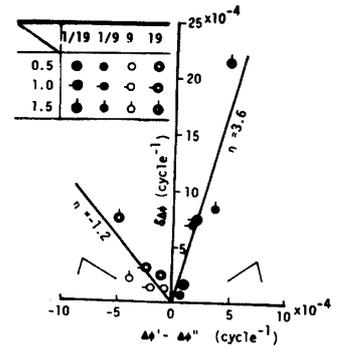


Fig.3 Relation between additional damage and the difference in damage between tension going period and compression going period.

Table 1 Value of n in the equation of additional damage.

Material Type of testing	Material	
	S15C	SUS304
Slow-fast	3.6	1.7
Fast-slow	-1.2	-0.9
In-phase	1.7	—
Out-of-phase	-0.9	—

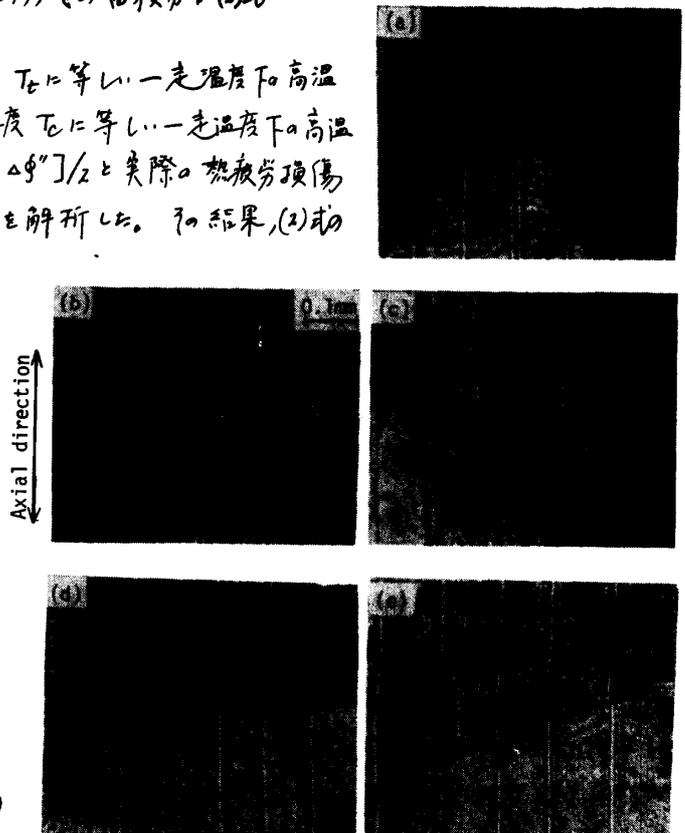


Fig.4 Grain boundary sliding and cracks appeared on the surface of partially fatigued specimens of SUS304 ((a); Triangular, $\Delta\epsilon_e/\Delta\epsilon_c=1$, 1,700°C. (b); Slow-fast, $\Delta\epsilon_e/\Delta\epsilon_c=1/19$, 1,700°C. (c); Fast-slow, $\Delta\epsilon_e/\Delta\epsilon_c=19$, 1,700°C. (d); In-phase, 400-700°C. (e); Out-of-phase, 400-700°C).