

軟鋼高サイクル疲労過程の変形挙動と転位構造の関係 (結晶粒径及び試験温度の影響)

電気通信大学

佐々木 茂美
石井 明

越智 保雄

1. はじめに 疲労変形を受けた金属材料の内部の転位構造は、転位束状組織や明確なセル構造の形成を特徴としていることは周知で、これらの問題に関しては多くの研究が行なわれている。しかしながらこれら豊富な情報を用いて疲労被害や疲労変形挙動を解明しようという試みはいまだに定性的、部分的な議論にとどまっておき、定量的、総合的解釈には至っていない。著者らはこれまでに、軟鋼を用いて高サイクル引張圧縮疲労試験を行ない、塑性ひずみ幅、かたさ等の変形挙動と転位構造の関係を、焼なまし材及び予加工材を用いて実験的、解析的に考察してきた^{1)~3)}。本報では、引続いて同一の材料、実験条件において初期のフェライト結晶粒径及び試験温度の影響を検討した。

2. 試験片及び実験方法 供試材は機械構造用炭素鋼S15Cで、直径8mmの平滑丸棒試験片に機械加工した後、800℃、930℃及び1100℃で1時間焼なまし処理を施し、平均フェライト粒径をそれぞれ13μm、24μm及び82μmとした。また疲労試験は応力振幅一定、繰返し速度1200cpmの両振引張圧縮疲労を室温及び100℃の油槽中で行なった。塑性ひずみ幅の測定は試験片平行部表面に張付けた箔ひずみゲージを用い、転位構造の観察は加速電圧200kVの透過電顕を用いて行なった。

3. 実験結果及び考察

3.1. S-N曲線 図1に本実験で得られたS-N曲線を示す。図において結晶粒径依存性は寿命にはばらつきが多く明確ではないが、 $d=82\mu\text{m}$ の場合、多少寿命が短くなっているようである。また、100℃の場合には、高応力側($\sigma_a \approx 21\text{ kg/mm}^2$)では室温とほぼ同一であるが、低応力側($\sigma_a \leq 18.3\text{ kg/mm}^2$)では明らかに寿命は短くなり、疲労限度も低下していることがわかる。

3.2. 塑性ひずみ幅 $\Delta\epsilon_p$ の変化 図2,3に疲労過程で得られた $\Delta\epsilon_p$ 変化の測定結果を示す。図2は結晶粒径の影響を示した一例で、 $d=13\mu\text{m}$ と $d=24\mu\text{m}$ の場合は $\Delta\epsilon_p$ 変化はほぼ等しく、従来の結果と同様、初期の漸増、急増を経て(初期段階とする)、ピークを示した後、漸減して(中期段階とする)破断に至っている。一方、 $d=82\mu\text{m}$ の場合には、初めからかなりの $\Delta\epsilon_p$ が検出され、その後、繰返しとともに漸減

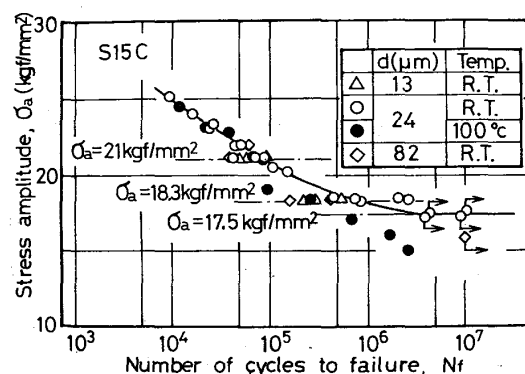


図1. S-N曲線.

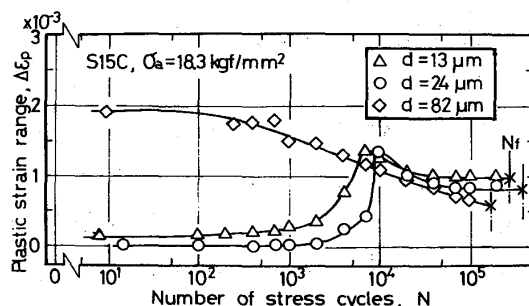


図2. 疲労過程の塑性ひずみ幅 $\Delta\epsilon_p$ の変化(結晶粒径の影響).

して破断に至っている。これは、粒径を大きくしたため、材料の静的降伏点が減少して、最初から塑性変形が生じたためである。しかしながら、繰返しが進み中期段階以降は他の粒径の場合とほぼ等しくなっている。図3は試験温度の影響を示した低応力側の一例で、 100°C の場合の $\Delta\epsilon_p$ の変化は室温とほぼ等しいが、 $\Delta\epsilon_p$ の急増は早く、中期段階の減少は少なくなっているようで、この差が疲労寿命にも影響しているようである。しかしながら、高応力側である $\sigma_a = 21 \text{ kg/mm}^2$ では $\Delta\epsilon_p$ の変化は定量的にも等しく寿命もほとんど差がなかった。

3.3. 転位構造に及ぼす結晶粒径の影響

図4,5に破断時におけるバルクの転位構造の観察結果を示す。図4は $\sigma_a = 21 \text{ kg/mm}^2$ の場合で、それぞれの d 値について示しているが、いずれの場合も疲労変形特有のセル構造を示し、それらの大きさ及び形状に差はみられなかった。しかし図5に示す $\sigma_a = 18.3 \text{ kg/mm}^2$ の場合には、 d 値が大となるにつれてセルサイズは小さくなっているのが観察され明らかな差がみられた。また、 $d = 13, 24 \mu\text{m}$ の場合にはセル構造は必ずしも形成されず、結晶粒によっては低応力振幅においてみられる転位束やループ・パッチ組織が観察された。これらの観察結果から破断時のバルクの平均セルサイズ l_c と σ_a 及び d の関係を示したのが図6である。図において $\sigma_a = 21 \text{ kg/mm}^2$ では図4にもみられたように d によらずほぼ一定値である。一方、 $\sigma_a = 18.3 \text{ kg/mm}^2$ では多少ばらつきはあるが、ほぼ d が大となると l_c は減少する。また σ_a 依存性をみると、従来と同様 σ_a の大きなもの程 l_c は小さくなっている。以上の結果を図1と比較すると、 $\sigma_a = 21 \text{ kg/mm}^2$ では寿命に対して d はほとんど影響せず破断時の l_c も一定値となっているが、一方、 $\sigma_a = 18.3 \text{ kg/mm}^2$ では特に $d = 82 \mu\text{m}$ が l_c が小さく、 N_f も短くなっていることから考えて、バルクのセル構造と寿命との間には何らかの関連があるように思われる。

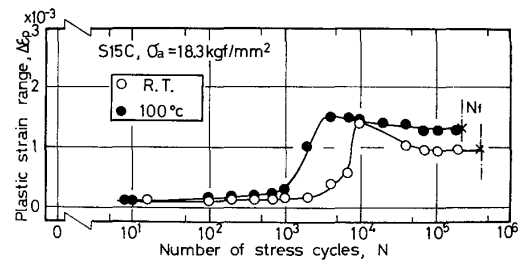


図3. 疲労過程の $\Delta\epsilon_p$ の変化(温度の影響)
S15C, $\sigma_a = 18.3 \text{ kg/mm}^2$

S15C, $\sigma_a = 21 \text{ kg/mm}^2$

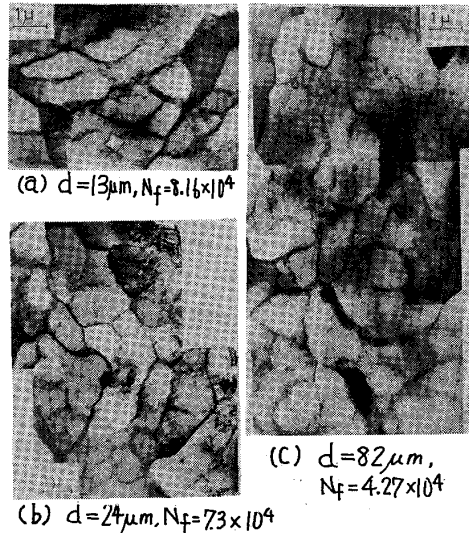


図4. 疲労破断時の転位構造

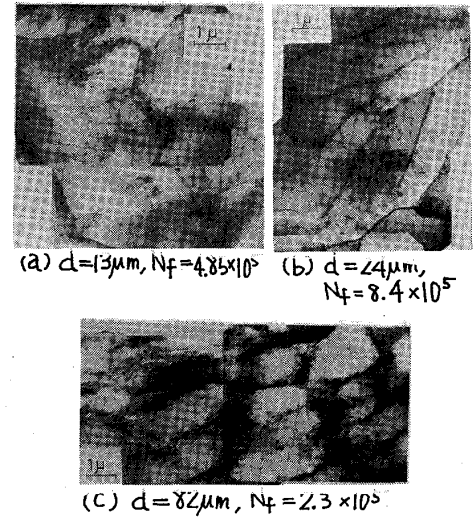


図5. 疲労破断時の転位構造

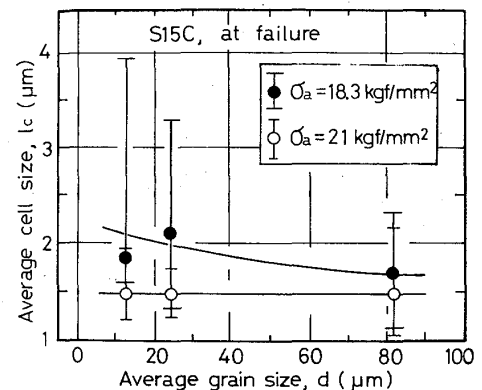


図6. 平均セルサイズ l_c の d 及び σ_a 依存性

3.4. 転位構造に及ぼす試験温度の影響

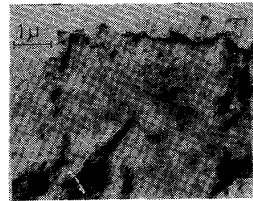
図7に $\sigma_a = 18.3 \text{ kg/mm}^2$, 100°C での疲労過程の転位構造変化の観察結果の一例を示した。

(a)図は図3の $\Delta\epsilon_p$ の急増する初期段階でのもので、一部の結晶粒には転位の増殖による束状組織がみられた。また(b)図は $\Delta\epsilon_p$ がピークを示した後の漸減を示す中期段階のもので粗いセル構造を形成している。(c)図は破断時におけるもので明確なセル構造が形成されており、室温における観察結果と定性的には変わらない。図8にそれらの観察結果から平均全転位密度 P_t の変化を室温の場合と比較して示した。図より P_t は初期に急増したのち、ほぼ飽和しているが、その立ち上がりは室温の場合より早く、図3における $\Delta\epsilon_p$ の増加の差と傾向的に一致している。

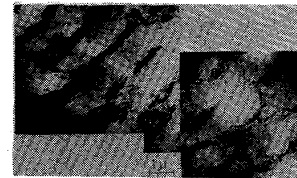
3.5. 転位構造と破断寿命 N_f の関係

図9,10は破断時のバルクの平均セルサイズ l_c 及び平均全転位密度 P_t と N_f との関係を示した。図には比較のために他の実験条件、他の材料において得られた結果^{2),4)~9)}も示している。図9より l_c は N_f が短いほど、小さい値となっているが、 $N_f \geq 2 \times 10^5$ の高寿命域では $l_c \approx 2.2 \mu\text{m}$ でほぼ飽和している。また、図10より P_t は N_f が短いほど大となっているが、 $N_f \geq 2 \times 10^5$ 以上では $P_t \approx 5 \times 10^9 / \text{cm}^2$ でほぼ飽和している。以上より、破断の必要条件としてバルクにおける平均セルサイズ及び平均全転位密度はそれぞれ、 $l_c \leq 2.2 \mu\text{m}$ 及び $P_t \geq 5 \times 10^9 / \text{cm}^2$ が与えられると考えられる。(4. 必ず及び参考文献省略)

S15C, $\sigma_a = 18.3 \text{ kg/mm}^2$, 100°C



(a) $N = 1500$



(b) $N = 4000$



(c) $N_f = 2.34 \times 10^5$

図7. 疲労過程の転位構造の変化。

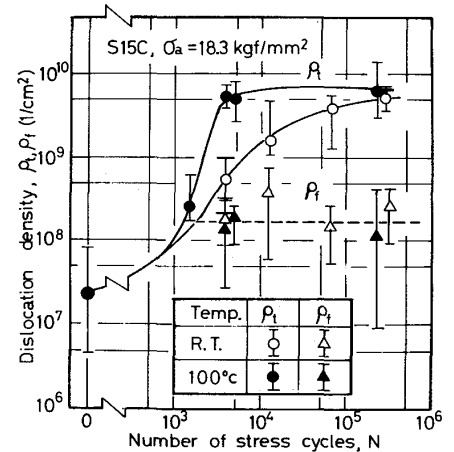


図8. 疲労過程の P_t の変化。

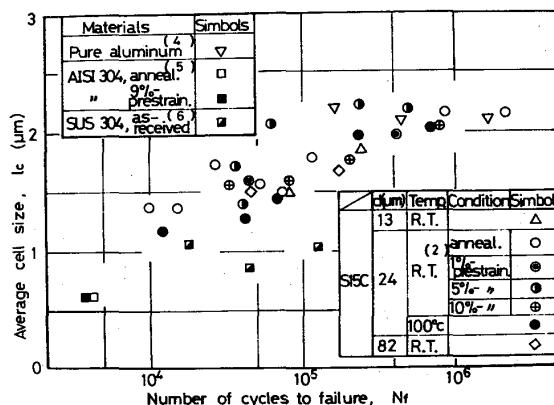


図9. 平均セルサイズ l_c と破断寿命の関係。

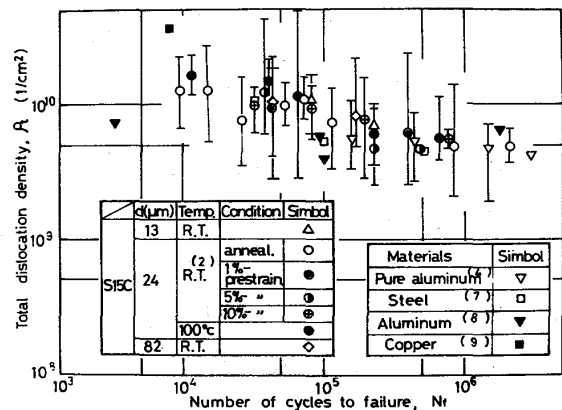


図10. 全転位密度 P_t と破断寿命の関係。