

討28 鋼の高温低サイクル疲労き裂伝は

京都大学工学部 大谷 隆一

1. はじめに

鋼の高温疲労に関する筆者の研究をはじめとして、従来の研究の成果を觀みると、高温疲労という現象は、①純粋な疲労 (pure fatigue)、②動クリープ (dynamic creep)、③サイクリック・クリープ (cyclic creep)、④準静的クリープ (quasi-static creep) の4つに大別すると理解し易いように思われる。図1は室温(低温)および高温における時間強度線図を模式的に示したものである。①の疲労は、き裂発生・伝は挙動および破壊寿命が繰返し数依存性を示したり、破面にストライエーションが認められるりする点で室温疲労と類似している。しかし高温では高周波数域で応力比 $R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$ が零以下の場合に限られる。これに対して②~④は室温では無視し得る高温特有の現象であって、いずれも繰返し変形にクリープが含まれ、破壊もクリープ破壊の様相を呈し、き裂発生・伝は挙動や破壊寿命が時間依存性を示す⁽¹⁾⁽²⁾ ことなどが基本的特徴であって、広義のクリープとみなすことができる⁽³⁾。しかし、②、③、④はそれぞれ周波数や応力比によって現われる領域が異なるばかりでなく、繰返し応力の影響が相違し、一定応力クリープとも異なる強度を示すのが普通である。

高温低サイクル疲労は、弾性疲労(高サイクル疲労)をのぞいた上記①の疲労(弾塑性疲労)と③~④のクリープとをすべて包含した広範囲の強度現象である。筆者らはこのような見地に立って上記①から④の各現象における巨視貫通き裂伝はを非線形破壊力学によって検討し、それにもとづいて高温低サイクル疲労特性の一端を明らかにしようとしている⁽³⁾。

2. 疲労き裂伝は

2.1 塑性変形の影響: 図2は、SUS 304の650°Cにおける種々の応力波形および繰返し速度条件下の疲労き裂伝は速度を弾性応力拡大係数範囲 ΔK で整理した図である。低応力、高周波数域で $da/dN < 10^{-3}$ mm/cycle では ΔK 支配の弾性疲労であるが、それ以外は荷重-伸び曲線がヒステリシスループを描き、 ΔK との対応関係がなくなる。そこで、弾塑性疲労に関する疲労J積分⁽⁴⁾ (繰返しJ積分⁽⁵⁾) ΔJ_f を導入してデータを整理すると、 ΔK で整理できた弾性疲労を含め $da/dN - \Delta J_f$ 間により対応が認められる。数種の鋼に関する実験結果を直線示したものが図3の左図である。

2.2 温度の影響: 図3左図において、S15C、400°Cの結果は室温の結果とほとんど差がない。ただし、300°Cでは少し高伝は速度側に出ている。これは動的ひずみ時効の影響と考えられる。SUS 304、650°CおよびSUS 316、600、650°Cの $da/dN - \Delta J_f$ 関係が室温のそれより約4~5倍上方にずれている。温度上昇に伴う降伏点 σ_y の低下(約1/2)あるいは縦弾性係数 E の減少(約3/4)を考慮すれば、而

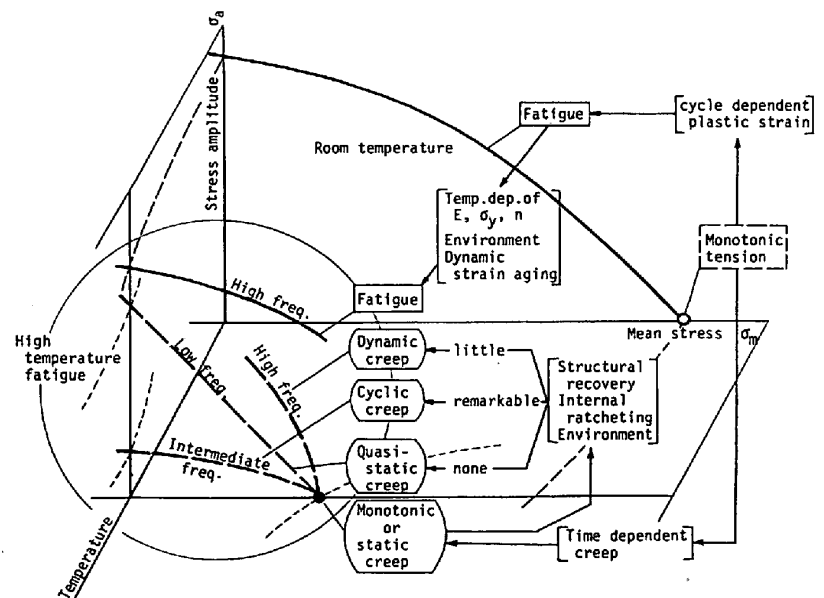


図1. 室温および高温における $\sigma_a - \sigma_m$ 線図の模式図

温度間の差はかなり接近するが、それでも認められる2~4倍の差は主として高温酸化の影響と思われる。

2.3 応力波形の影響：図2に示した実験結果は図4に示す4種類の応力波形を用いて行われたものである⁽⁷⁾。上述の $dI/dN - \Delta J_f$ 関係に関する記述はこのうちの pp-型波形に関する結果についてであるが、この他に圧縮応力の保持時間が長い(480s) pc-型波形においても pp-型と同一の $dI/dN - \Delta J_f$ 関係が得られている。すなわち、き裂伝播速度は引張半サイクルの弾塑性変形によって決り、圧縮変形中にクリープが生じるか否かには直接関係しない。また、方形応力波と三角ひずみ波とで $dI/dN - \Delta J_f$ 関係に相違は認められない⁽⁴⁾。

3. 動クリープき裂伝播

室温疲労の場合には応力比の影響がほとんどない(ステージIIき裂伝播に対して)が、高温ではほぼ $R > 0$ の片振りないしは部分片振りになると、 $R = -1$ の場合の $dI/dN - \Delta J_f$ 線図より上方にずれるようになる。このような平均応力 σ_m に比較的小さい振動応力 σ_a が重畳する場合のき裂伝播挙動は、純粋疲労のそれとは全く異なり、伝播速度 dI/dt (t : 時間)は周波数に

依存しない純時間依存性を示す。このことを説明した図が図5である。これを動クリープき裂伝播と称する⁽⁸⁾。

動クリープき裂伝播速度は、平均応力 σ_m と最大応力 $\sigma_m + \sigma_a$ のほぼ中間の応力値に等しい一応定応力下の静クリープき裂伝播速度と等しい。

この応力は平滑棒の動クリープ変形に関する等価静応力⁽⁹⁾と等しい。このことから、動クリープき裂伝

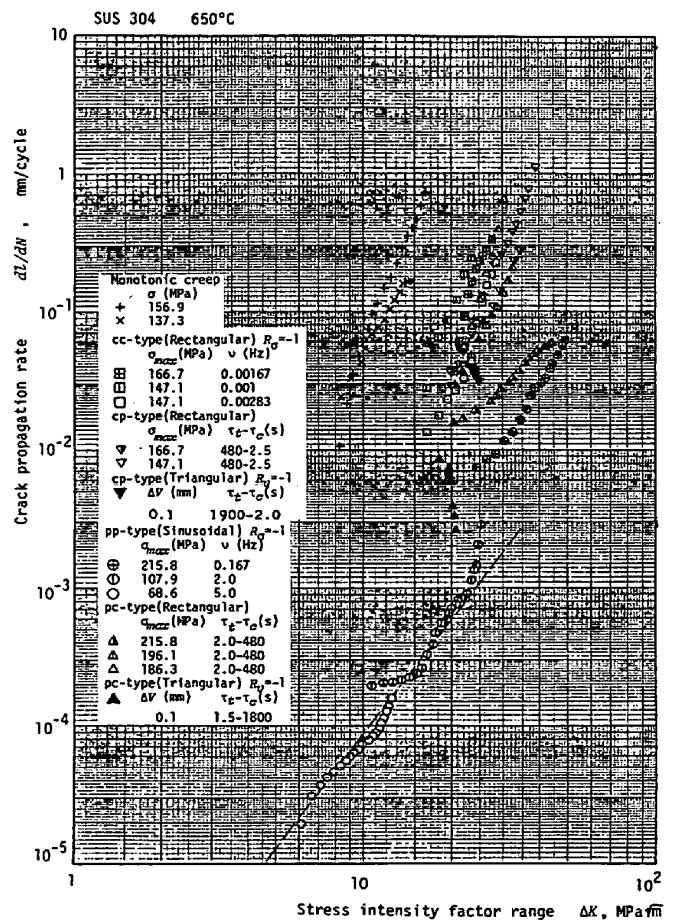


図2. 304ステンレス鋼, 650°Cにおける $dI/dN - \Delta K$ 線図. 波形は図4に示す。

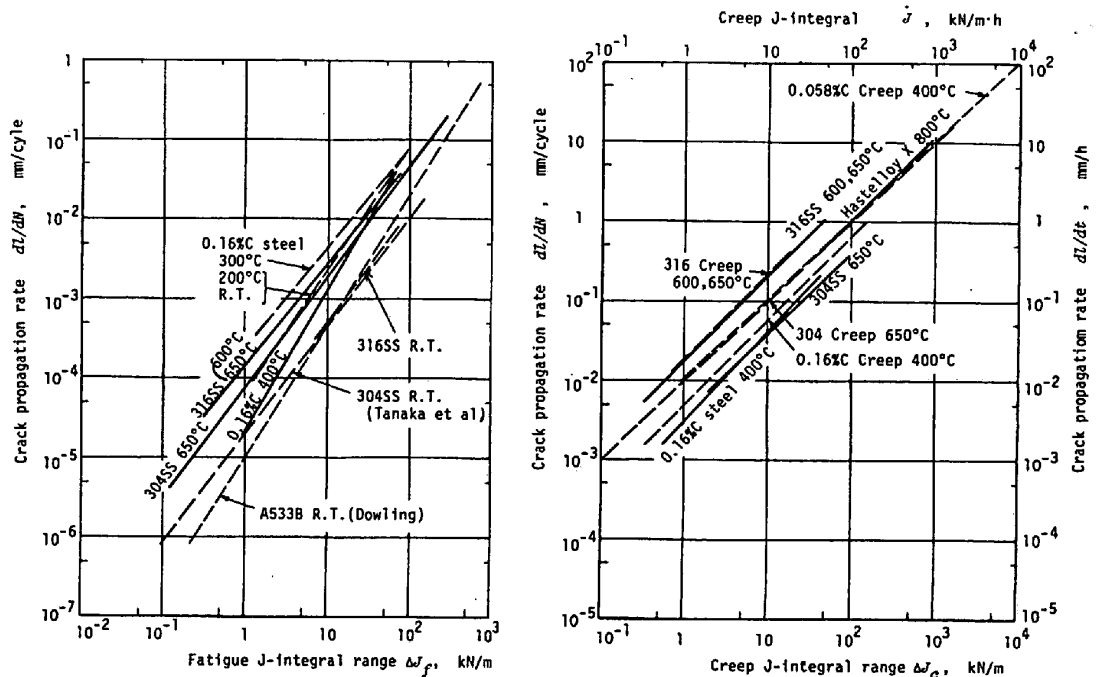


図3. 数種の鋼(オーステナイト系)に関する疲労き裂伝播速度 dI/dN と疲労J積分範囲 ΔJ_f (左図)およびクリープJ積分範囲 ΔJ_c (右図)の関係。

は負荷応力によって生じるクリープに支配されるのであって、振動応力による疲労破壊の重量あるいは相互作用は無視できるといえる。この場合き裂伝ば速度 de/dt は、静クリープの場合と同様、クリープJ積分 j (修正J積分⁽¹⁰⁾, あるいはCパラメータ⁽¹¹⁾) とかなり良い対応のあることが特徴である⁽⁸⁾。

4. サイクリック・クリープき裂伝ば

4.1 周波数依存: 以上の疲労および動クリープは周波数が比較的高い場合であったが、それより低周波数になると両振りの場合も含めてあらゆる応力比に対して、き裂伝ば速度 de/dt は周波数にほとんど依存しなくなる⁽¹⁾。この遷移周波数は温度や材料によるが、繰返し変形中の非弾性ひずみにしめるクリープひずみの割合が10%程度以上になるとクリープ支配の破壊に移行するようである。

動クリープの場合と同様、サイクリック・クリープのき裂伝ば速度 de/dt は j とよい対応関係(比例関係)がある。ここで、 j は引張半サイクル中のクリープ変形(応力-クリープ速度関係)にもとづいて求められるクリープJ積分である。この $de/dt-j$ 関係を引張半サイクル当りの変化量に変換して、 $de/dN-\Delta J_c$ ($de/dN = (de/dt) \cdot z_c$, $\Delta J_c = j \cdot z_c$, z_c : 引張半サイクルの時間)の関係に置き直しても同様な関係が得られる。ここで、 ΔJ_c をクリープJ積分範囲と呼んでいる⁽⁴⁾。図3の右図にはこのような表示によるサイクリック・クリープき裂伝ばの実験結果を示している。ただし、モニツク・クリープと動クリープに關しては $de/dt-j$ 表示(破線)である。 $de/dN-\Delta J_c$ 間には周波数によらない一価関係が得られている。

4.2 温度依存: 上記の疲労をのぞいて、動クリープの場合もき裂伝ば速度の温度依存は大きい。それは平滑材のクリープ速度の温度依存にほぼ等しい。温度レベルの異なるき裂伝ば試験結果を $de/dt-j$ あるいは $de/dN-\Delta J_c$ 線図に表わすと同一の関係が得られる⁽¹⁾⁽⁴⁾。これは de/dt または de/dN の温度依存性と j または ΔJ_c のそれとがほぼ等しいことを示している。このことから、 j はき裂先端近傍のクリープ速度を代表する力学量であること ($j \propto \dot{\epsilon}_{crack tip}^{1+1/\alpha}$, α : 定常クリープ速度の応力指数), およびクリープき裂伝ば速度がき裂先端のクリープ速度 $\dot{\epsilon}_{crack tip}$ によって支配されることがわかる。

4.3 波形効果: 図3右図の SUS304 (650°C) に關する $de/dN-\Delta J_c$ データは、図4の cc-型および cp-型波形によって得られたものである。疲労の場合 (pp-型と pc-型) と同様、 $de/dN-\Delta J_c$ 関係の波形

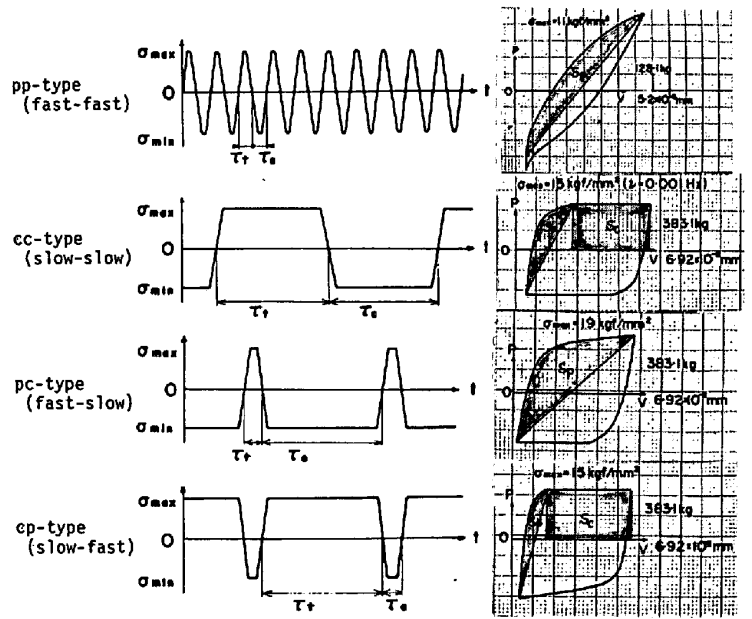


図4. 4種類の応力波形と荷重-き裂中央開口変位ヒステリシスループおよび ΔJ_f と ΔJ_c の求め方(平, 石, 北村, 山田, 材料, 28-308 (1979-5) 414). $\Delta J_f = \Delta K^2/E + S_p/Bb$, $\Delta J_c = S_c/2Bb$

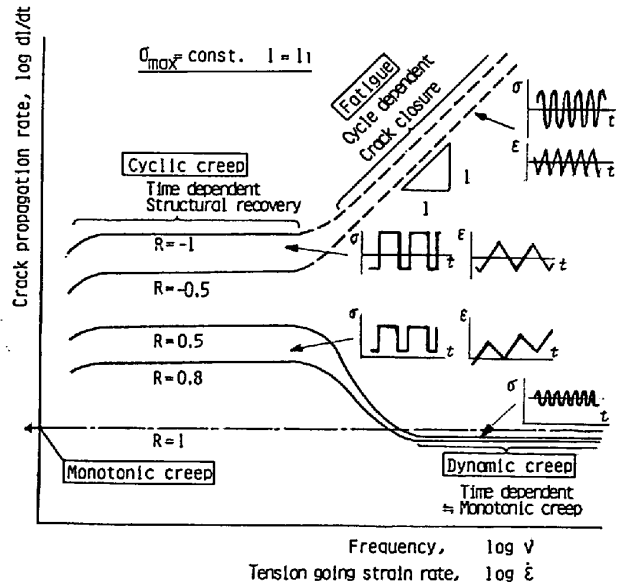


図5. 疲労, 動クリープ, サイクリック・クリープ, モニツク・クリープにおけるき裂伝ば速度の周波数, 最大応力, 応力比依存性

依存性は認められない。このことより、サイクリック・クリープにおいても圧縮方向変形の直接的寄与はなく、引張応力下のクリープによって支配されることがわかる。

4.4 応力比依存性：最大応力が一定でも応力比 $R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$ が小さくなる（両振りに近づく）につれてき裂伝播速度が著しく加速される場合の多いことがサイクリック・クリープの特徴である⁽¹²⁾。図5にはこの応力比依存性を模式的に示している。これは疲労との相互作用によるのではなく、応力繰返しに伴う動的回復によってき裂先端近傍のクリープ速度が加速されたことが主たる原因である⁽¹⁾⁽¹²⁾。このようなクリープにおける動的回復の効果は平滑材の高温低サイクル疲労においても認められる特性であり⁽²⁾⁽¹³⁾、内部応力を発生させる下部組織のちがいによってクリープ速度の加速程度が異なるから、サイクリック・クリープき裂伝播速度の応力比依存性は、材料、温度、周波数、応力波形、応力レベルなどによる。ただし、高周波数の動クリープおよび極低周波数の準静的クリープの場合には応力変動によるこの効果が大きく影響しない。

き裂伝播速度が顕著に変化する応力比依存性があるにもかかわらず、図3右図の $dl/dN-AJ_c$ 関係には応力比依存性がなく、かつモノトニック・クリープの関係ともほぼ一致する。これは j あるいは AJ_c にも繰返しにおける動的回復の効果が反映されるように、繰返し変形中の荷重-き裂中央開口変位ループあるいは応力-ひずみヒステリシスループを用いて AJ_c の値を評価しているためである⁽⁴⁾。なお、SUS304 や S15C に関してはモノトニック・クリープよりサイクリック・クリープのき裂伝播速度の方が数倍~数十倍大きいものに対して、図3右図では同一 j 値に対してもサイクリック・クリープのき裂伝播速度の方が少し小さい。これは動的回復の効果を j あるいは AJ_c によってまだ十分に表わし得なかったためであろう。

5. 疲労とクリープの相互作用

図3には、数種の材料および試験条件に因する $dl/dN-AJ_f$ (疲労) と $dl/dN-AJ_c$ (動クリープ、サイクリック・クリープ、モノトニック・クリープ) の関係を示す実験結果を示した。両線図において延性や雰囲気の影響の相違があるが、 $dl/dN-AJ_f$ 線図の勾配が 1.2~1.7, $dl/dN-AJ_c$ のそれが約 1, 前者(疲労)より後者(クリープ)の方が同一 AJ 値に対して単に高伝播速度を与えることほどの材料についてもいえる一般的事実のようである。

上述の動クリープおよびサイクリック・クリープにおけるき裂伝播の破壊力学的考察によれば、疲労破壊は無視してしまつていけないという結論になる。これは、主としてクリープき裂伝播が支配的となる条件を選んで実験を行ったためであるが、疲労破壊の影響が最も明確に現われると思われる疲労からの遷移領域においても、疲労と同一の $dl/dN-AJ_f$ 伝播則か、あるいはクリープと同一の $dl/dN-AJ_c$ 則かのいずれか一方が得られる場合が大部分であった。このことは、疲労とクリープの間には相互作用がない(独立損傷則)ことを示すもののように思われる。しかしながら、破面と伝播則の間に必ずしも一対一対応があるとは限らないこと、factor of two のバンド内に入る程度の実験データのバラツキがあること、を考慮すれば、 $dl/dN = (dl/dN)_{fatigue} + (dl/dN)_{creep}$ のように線形和で表わされる程度の相互作用(線形累積損傷則)⁽⁴⁾すらないとは断言できない。

参考文献

- (1) S. Taira, R. Ohtani, T. Komatsu; Trans. ASME, Ser.H, 101 (1979-4), 162.
- (2) 鉄鋼協会高温強度研究室、高周波クリープ・疲労試験分科会共同研究報告書(1981-4).
- (3) 大谷; 鉄と鋼, 66-14 (1980), 2106.
- (4) R. Ohtani; Proc. Int. Conf. on Engineering Aspects of Creep, 1 Mech E, Vol.2 (1980-4), 17.
- (5) N.E. Dowling; ASTM STP 601 (1976), 19.
- (6) 三好, 梶島; 機構論, No.810-2 (1981-4), 113.
- (7) 山田, 大谷, 柏木; 機構論, No.800-11 (1980-8), 119.
- (8) 山田, 大谷, 柏木, 松本; 機構論, No.814-2 (1981-3), 95.
- (9) 平, 小寺沢; 機論, 26-167 (1960), 925.
- (10) K. Ohji, K. Ogura, S. Kubo; Proc. 1974 Symp. on MBM, 材料学会 (1974), 455.
- (11) J.D. Landes, J.A. Begley; ASTM STP 590 (1976), 128.
- (12) 平田; 機論, 46-408 (1980), 861.
- (13) 武井; 機構論, No.814-2