

日本金属学会誌 第48巻 第2号 (1984) 129-135

## Ni-Cr-Mo 鋼の荷重変動に対する遅れ破壊き裂伝ばの応答\*

中佐啓治郎\*\* 伊藤 尚\*\*\* 武井英雄\*\*

J. Japan Inst. Metals, Vol. 48, No. 2 (1984), pp. 129-135

## Response of Crack Propagation to Load Variation in Delayed Failure of Ni-Cr-Mo Steels\*

Keijiro Nakasa\*\*, Hisashi Itoh\*\*\* and Hideo Takei\*\*

In order to clarify the crack propagation behavior in delayed failure under repeating load, the stress intensity factor  $K$  was trapezoidally applied to the specimen, and the relation was investigated between  $K$  increasing or decreasing time,  $t_1$  or  $t_3$ , and the incubation time,  $t_u$  or  $t_d$ , which appeared while  $K$  was held at a maximum or minimum value.

The incubation time  $t_d$  is always longer than  $t_u$ , and  $t_d$  rapidly and  $t_u$  gradually decreases with increase of  $t_1$  and  $t_3$ . Both  $t_u$  and  $t_d$  decrease with increase of testing temperature  $T$ . The Arrhenius relation holds between  $1/T$  and  $1/t_u$  or  $1/t_d$ , giving the activation energy of 20 or 40 kJ/mol, which is comparable with that for the diffusion of hydrogen atoms in steel.

The appearance of incubation time after the abrupt change in  $K$  can be explained by assuming that hydrogen diffusion occurs later than moving of triaxially tensile stressed position at a crack tip.

(Received June 13, 1983)

**Keywords** : load variation, crack propagation, delayed failure, hydrogen, triaxial stress, incubation time, nickel-chromium-molybdenum steel

## I. 緒 言

き裂を有する高強度鋼材が腐食雰囲気中で静荷重を受けると、一定時間後にき裂が進展しはじめ、やがて破壊する。この現象は遅れ破壊と呼ばれ、き裂先端の腐食反応によって生成した水素が材料中へ侵入し、き裂先端部の材料を弱化して割れを生じる現象であり、水素脆化割れの一形態である。

ところで著者らはすでに、所定の静荷重に微小な変動荷重を重ねさせたときの遅れ破壊き裂伝ば速度  $(da/dt)_R$  が、静荷重下でのそれ  $(da/dt)_S$  (変動荷重の振幅が平均荷重に比べて小さいときには、平均荷重と等しい静荷重下でのき裂伝ば速度と考えてよい) よりも小さいことを見出し<sup>(1)-(5)</sup>、しかも、微小な変動荷重を加えたことによる遅れ破壊き裂伝ば速度の減少率  $1-\beta = \{(da/dt)_S - (da/dt)_R\} / (da/dt)_S$  と繰返し速度  $f$  の関係を示す曲線に2つのピークが現われ、このピークの形状が、試験温度<sup>(2)</sup>、重畳する応力の振幅<sup>(1)(5)</sup>、波形<sup>(4)</sup>、などに依存することを示した。さらに、これらの挙動は、き裂先端からある距離だけ離れ

た3軸引張り応力の作用する位置が、荷重の繰返しとともに移動し、これと水素原子が相互作用を生じると仮定すれば説明できることを示し、この相互作用が緩和型の内部摩擦モデルを用いて表現できることを明らかにした<sup>(3)</sup>。

このように、変動荷重下における遅れ破壊き裂伝ば速度が、静荷重下におけるそれよりも小さくなるという現象の原因は、荷重の急激な変動に対し、遅れ破壊き裂の伝ばがすぐには生じないという事実<sup>(4)(6)</sup>と密接に関連していると思われるが、荷重変動に対するき裂伝ばの過渡応答についての詳細な研究は少ない<sup>(8)(9)</sup>。そこで本研究では、荷重変動にともなって、き裂先端近傍で水素原子がどのような拡散挙動をとるかを検討するため、荷重上昇および下降時間を種々に変化した台形波状変動荷重について、遅れ破壊き裂の伝ばの様相を調べた。

## II. 実験方法

## 1. 試料および試験片

実験に用いた材料は市販の Ni-Cr-Mo 鋼 (SNCM 439) 丸

Table 1 Chemical composition of specimen (mass%).

Mark	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Fe
SNCM 439	0.40	0.28	0.65	0.021	0.011	1.74	0.76	0.23	0.15	Bal.

\*\* 広島大学工学部 (Faculty of Engineering, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima)

\*\*\* 福岡県立嘉穂工業高等学校, 現在: 広島工業大学 (Fukuoka Prefectural Kaho Technical High School, Fukuoka. Present address: Hiroshima Institute of Technology, Hiroshima)

\* 1982年9月日本金属学会札幌大会に発表

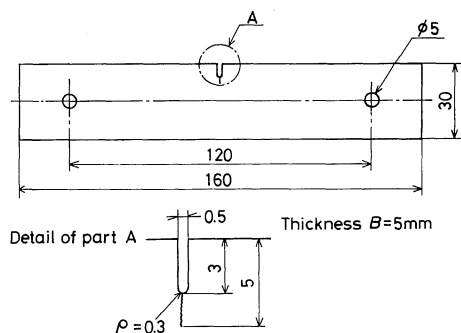


Fig. 1 Size and shape of specimen.

棒で、その化学組成を **Table 1** に示す。同材を熱間鍛造で短冊状に加工して均質化焼なまししたのち、**Fig. 1** に示すような形状の遅れ破壊試験片を作製した。この試験片を 1123 K から油焼入れしたのち、473 K で 3.6 ks (1 h) 焼もどした。ただし、試験片の切欠き先端の疲労予き裂は、熱処理後に導入した。なお、この材料の熱処理後の引張り諸性質は、引張り強さ  $\sigma_B = 2.05$  GPa, 降伏強さ  $\sigma_{YS} = 1.58$  GPa, 破断伸びが 10.7% であった。

## 2. 遅れ破壊試験

腐食雰囲気にはイオン交換によって製造した純水を用い、これを 278~323 K に保って試験片切欠き部へ滴下した。実験に用いた試験機は、変位波形を自由にプログラムすることのできる電気油圧式疲労試験機で、台形波状の変位サイクルを、試験片を固定しているモーメントアームに伝え、試験片に繰返し曲げモーメントを加えた。なお、曲げモーメントの値は、モーメントアームにはりつけたひずみゲージの出力を、動ひずみ計に入れて測定し、ペンレコーダーを用いて連続的に記録した。また、台形波における変位増加時間  $t_1$  または変位減少時間  $t_3$  (本研究では  $t_3 = t_1$  とした) を、0.2~60 s と変化させ、変位が最大値または最小値に達したのち、き裂が進展開始するまでの時間 (すなわち潜伏時間)  $t_u$  または  $t_d$  を測定した。なお、潜伏時間は 3~4 回の台形波状変位サイクルを加えて得た値の平均値とした。変位一定条件下では、き裂が伝ばすると試験片曲げ応力が低下するが、次式<sup>(10)</sup>で表わされる応力拡大係数  $K$  の値は、少なくとも 3~4 回の最大および最小変位保持区間では、設定値の  $\pm 3\%$  の範囲内で一定に保たれていた。

$$K = \frac{4.12M \left( \frac{1}{\alpha^3} - \alpha^3 \right)^{1/2}}{BW^{3/2}}, \quad \alpha = 1 - \frac{a}{W} \quad (1)$$

ここで  $W$  は試験片の幅、 $B$  は試験片の厚さ、 $M$  は試験片に加わる曲げモーメントである。したがって、本研究で行った変位制御試験は、実質上は  $K$  制御試験になっていると考えてよい。

## III. 実験結果

### 1. 変位を台形波状に変化させたときのき裂伝ばの応答

前述のように、本研究では変位制御試験(結果的には  $K$

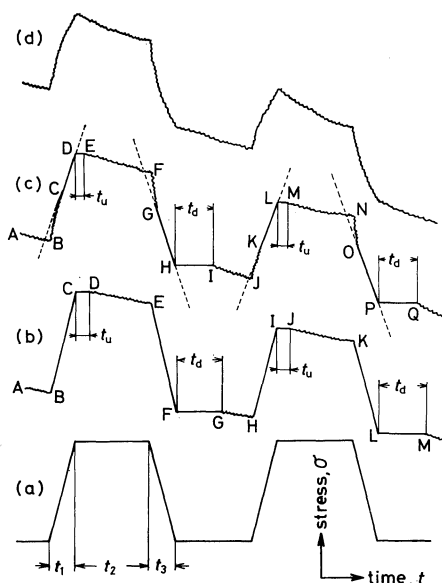


Fig. 2 Response of crack propagation to deflection variation : (a) Without crack propagation, (b) deflection increasing or decreasing time,  $t_1$  or  $t_3$ , is short or testing temperature  $T$  is low, (c)  $t_1$  and  $t_3$  or  $T$  are medium and (d)  $t_1$  and  $t_3$  are long or  $T$  is high.

制御試験になっている)を行ったが、変位を台形波状に変化させたとき、もしき裂の伝ばが起これば曲げモーメント(またはモーメントアーム表面のひずみあるいは応力)は低下するから、き裂の進展がいつ起こったかを判別することは比較的容易である。**Fig. 2** は、応力拡大係数  $K$  の最大値  $K_{max} = 28 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 、最小値  $K_{min} = 22 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  (応力比  $R = K_{min}/K_{max} = 0.79$ ) とし、変位(または  $K$ ) を台形波状に変化させたときの曲げ応力  $\sigma$  が、変位(または  $K$ ) 増加時間  $t_1$  または減少時間  $t_3$  ( $=t_1$ ) あるいは試験温度  $T$  によって、どのように変化するか(したがって、き裂がどのように伝ばするか)を調べたものの代表例である。**Fig. 2** (a) は、遅れ破壊き裂が進展しない空气中で実験した結果で、台形波状の変位にそのまま対応して応力も台形波状に変化することを示している。**Fig. 2** (b) は、 $t_1$  または  $t_3$  が短いとき、あるいは  $T$  が低いときに観察される応力  $\sigma$ -時間  $t$  曲線で、変位の直線的な上昇区間  $\overline{BC}$  または下降区間  $\overline{EF}$  では、応力が直線的に上昇または下降しており、この区間ではき裂の進展が起こっていないことを示している。そして変位が最大値または最小値に達してもすぐにはき裂の伝ばが起これず、しばらくしてき裂の伝ば(D点またはG点以後の応力の減少)が起こる。すなわち、最大または最小変位に達してからき裂の伝ばが生じるまでに、それぞれ潜伏時間  $t_u$  または  $t_d$  が現われ、しかも常に  $t_d \gg t_u$  である<sup>(4)(6)</sup>。また、き裂が伝ばする区間  $\overline{DE}$  および  $\overline{GH}$  では曲線はなめらかではなく(ただし、**Fig. 2** では、き裂伝ばが生じた区間をジグザグ線で誇張して描いてある)、遅れ破壊き裂の伝ばが不連続に生じる<sup>(9)</sup>。

**Fig. 2** (c) は、 $t_1, t_3$  あるいは  $T$  が中程度の場合で、変位

上昇あるいは下降区間の初期(BC または FG 区間)でき裂の伝ばが生じるため、この区間の  $\sigma-t$  の関係が直線的でない。すなわち、最小変位保持区間 AB でき裂の伝ばが生じて応力が低下しており、B 点で変位を直線的に上昇させると、BC 区間でもなおき裂の伝ばが生じて応力が減少するので、 $\sigma-t$  曲線の勾配は次第に減少するが、C 点でき裂の伝ばが停止するので CD 区間では  $\sigma-t$  の関係は直線的である。変位減少 FH 区間についても同様であり、EF 区間に引続き FG 区間でもき裂の進展が生じるので、 $\sigma-t$  の関係は曲線となるが、G 点でき裂の進展が停止するので、GH 区間は直線となる。

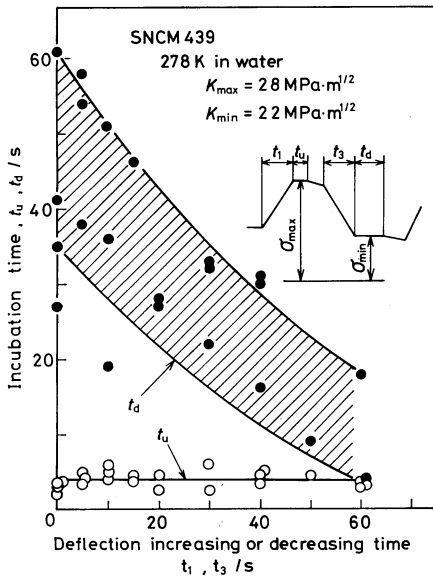


Fig.3 Effect of deflection increasing or decreasing time on the incubation time.

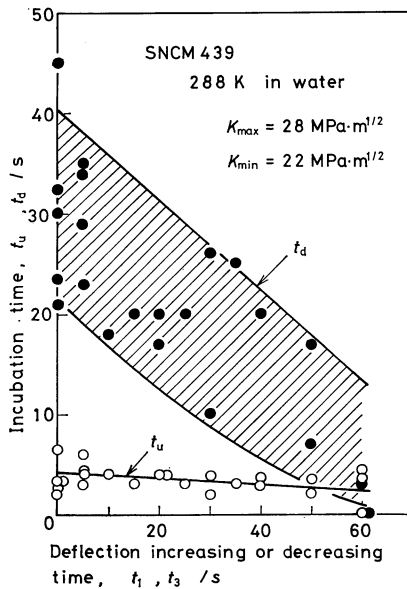


Fig.4 Effect of deflection increasing or decreasing time on the incubation time.

Fig.2(d)は、 $t_1$  または  $t_3$  が非常に長い場合  $T$  が高い場合の  $\sigma-t$  曲線で、すべての区間でき裂の伝ばが生じているため、 $\sigma-t$  関係に直線性は見られず、 $t_u=t_d=0$  である。このように、(b)および(c)の場合には、変位上昇または下降区間、最大または最小変位保持区間において、き裂の伝ばが全く生じない区間が存在する。

2. 潜伏時間と変位上昇または下降時間の関係

台形波状の変位サイクルにおける変位上昇時間  $t_1$  および変位下降時間  $t_3(=t_1)$  を変化させたとき、最大変位または最小変位保持区間における潜伏時間  $t_u$  および  $t_d$  が、どのように変化するかを調べた。その結果を、水温  $T$  が 278,

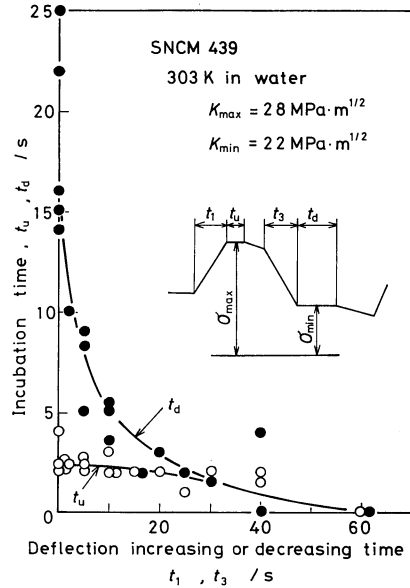


Fig.5 Effect of deflection increasing or decreasing time on the incubation time.

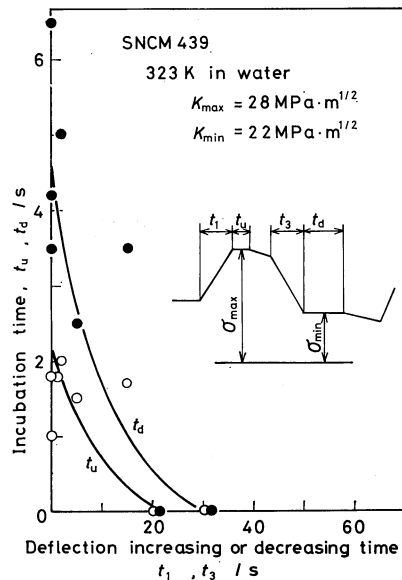


Fig.6 Effect of deflection increasing or decreasing time on the incubation time.

288, 303 および 323 K の場合について、それぞれ Figs. 3, 4, 5 および 6 に示す。これらの図から明らかなように、 $t_1$  または  $t_3$  が小さいときには  $t_d$  が  $t_u$  よりかなり大きく、しかも  $t_u$  は  $t_1$  が増加してもあまり減少しないが、 $t_d$  は  $t_3$  が大きくなると急激に減少する。また  $t_d$  および  $t_u$  は、水温  $T$  の上昇とともに短くなるが、 $t_d$  と  $t_u$  の比  $t_d/t_u$  は、 $T$  の上昇とともに小さくなる。

#### IV. 考 察

##### 1. 潜伏時間が現われる理由

上述のように、応力拡大係数  $K$  または変位を急激に増加または減少させたのち、 $K$  を一定に保持すると、き裂はすぐに伝ばしないで、潜伏時間が現われる。その理由として、すでに2つの考えが提出されている。まず、Dull と Raymond<sup>(6)</sup>は、彼らの実験において  $t_u=0$  となったことから、き裂先端の3軸引張り応力が作用する位置(以下3軸応力位置と略称する)で、水素脆化割れの微視き裂が発生するには、 $K$  が小さいほど多くの水素原子の集合が必要であり、 $K=K_{max}$  から  $K=K_{min}$  へ  $K$  を急激に減少させると、 $K=K_{min}$  で微視き裂を発生するために新たに必要とする水素原子が、そこに集合するには時間がかかると考えて潜伏時間  $t_d$  が現われることを説明している。一方、本実験および著者らの従来の実験によると<sup>(4)(6)</sup>、 $t_u \ll t_d$  はあるが  $t_u=0$  ではないから、たとえ Dull らの説明が  $t_d$  の存在の1つの理由であるとしても、これは  $t_u$  の存在の説明にはならない。したがって、 $K$  の上昇または下降によって、潜伏時間が現われる理由は、(1)何らかの原因で、水素原子の発生源が断ち切られる、(2)水素原子の拡

散過程で、転位によって水素が3軸応力位置とは異なる場所へ輸送されたり( $K$ 上昇過程)、水素がき裂先端方向へ押し戻されたり( $K$ 減少過程)する、(3)3軸応力位置が  $K$  の増減とともに移動し、これに水素原子が追従できず、水素原子が転位やマイクロボイドにトラップされて3軸応力位置への集合が遅れる、などが考えられる。このうち(1)については、著者らの別の実験で、あらかじめ電解チャージにより材料中に水素を吸蔵させた試験片について、 $K$  を急激に上昇または下降させた場合でも、 $t_u$  および  $t_d$  が観測されたこと、および後述のように、 $t_u$  および  $t_d$  の温度依存性から求めた活性化エネルギーの値が、水素原子の材料中の拡散に必要な値に対応することなどから、 $K$  の変動が腐食雰囲気から材料への水素の侵入過程に影響し、これが  $t_u$  および  $t_d$  が現われる原因になっているとは考えられない。著者らは、 $K$  の増減ともなって潜伏時間が現われる主な原因は(3)によると考え、変動応力下における遅れ破壊き裂の伝ばに関する一連の実験結果<sup>(4)-(7)</sup>を説明してきた。以下、本研究で得られた結果が、この仮定と矛盾しないかどうかを検討する。

まず第1に、 $t_1$  および  $t_3$  が短いときに、 $t_d \gg t_u$  となる理由としては、前報でも述べたように<sup>(4)</sup>、 $K$  の急激な下降によって、き裂先端の応力分布が大きく変化し、それにもなるとき裂先端近傍における水素原子の拡散挙動に大きな影響が出てくることが考えられる。Fig. 7 は、そのことを説明する模式図である。いま  $K=K_1$  において、き裂が安定に伝ばしているものとする(たとえば Fig. 2(b) の AB 区間)。その状態でのき裂先端の応力分布は Fig. 7(d) のようであり、き裂先端から侵入した水素原子が3軸応力位置

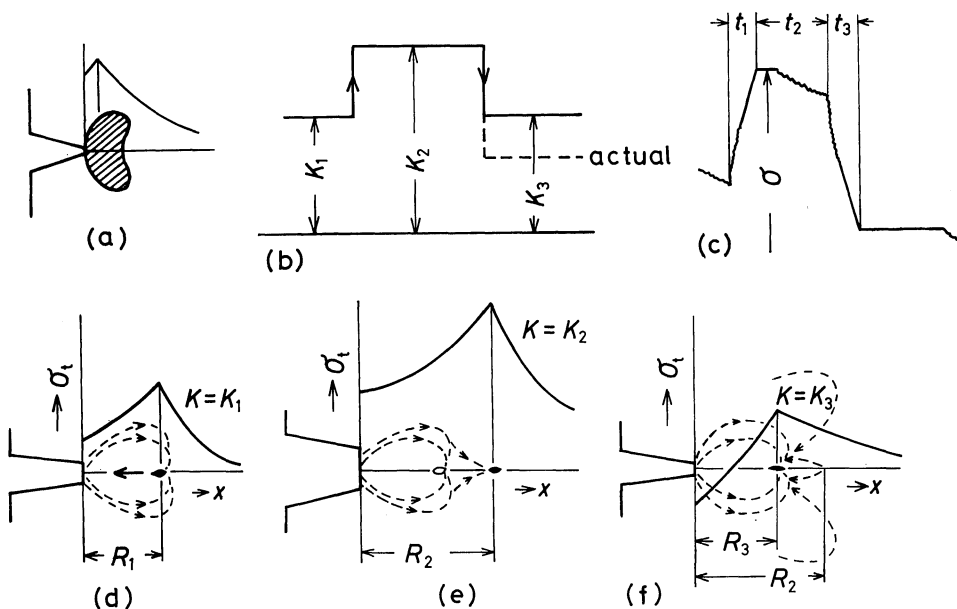


Fig. 7 Moving of triaxially stressed position and migration of hydrogen atoms with increase or decrease in stress intensity factor.

(き裂先端からの距離を  $R_1$  とする, その位置は Fig.7 (a) に示すように, き裂先端の塑性変形領域内で, き裂先端に近い位置にあると考えられている<sup>(11)</sup>)に集合し, その部分を弱分化離し, これが主き裂へ連結するという不連続なき裂伝ば過程を繰返しているものとする. この状態で  $K$  を  $K=K_2$  に急激に上昇させると, き裂先端の塑性変形領域は広がり, Fig.7 (e) のように 3 軸応力の大きさ  $\sigma_e$  および応力勾配  $-d\sigma_e/dx$  は増すとともに, 3 軸応力位置は  $x=R_1$  から  $x=R_2$  へと移動する. したがって,  $x=R_1$  に一部集合していた水素原子は  $x=R_2$  へ移動する必要がある. き裂伝ばの遅れすなわち潜伏時間  $t_u$  が生じる. しかしながら,  $K=K_2$  においては  $K=K_1$  より大きな 3 軸応力が存在するので, 水素原子の拡散速度は速く,  $t_u$  はきわめて短い. つぎに,  $K=K_2$  で一定時間保持してき裂伝ばを生じさせたのち,  $K$  を  $K_1$  に等しい値  $K_3$  に急激に減少させるものとする (Fig.7 (b)). この場合のき裂先端の応力分布は,  $K=K_1$  におけるそれとは全く異なる. なぜなら,  $K=K_2$  で生じたき裂先端の塑性変形領域は,  $K$  の減少によって可逆的に収縮することは不可能であり, 塑性領域周辺の弾性変形領域 (除荷によって可逆的に収縮しようとしている) によって圧縮される. したがって, 全体的な応力分布は概略 Fig.7 (f) のようになっているものと思われる. すなわち, 同じ外部荷重 (あるいはみかけの  $K$ ) に対しては, Fig.7 (d) と (f) の応力分布曲線の下面積は等しいが, 3 軸応力  $\sigma_e$  が減少するとともに, 3 軸応力位置は  $x=R_2$  から  $x=R_3$  へ移動するものと思われる (ただし, その正確な位置は不明である). 後者については, もし材料が弾完全塑性体であれば, 3 軸応力位置は除荷によって移動することはなく  $R_2=R_3$  であるが<sup>(12)</sup>, 通常の材料はバウシinger 効果を示すので, 一度引張り塑性変形した領域が圧縮されると容易に圧縮塑性変形し, しかもその程度はき裂先端からの距離によって異なるので, 3 軸応力位置が  $x=R_2$  と異なる別の位置へ移動する可能性がある.  $t_d$  が  $t_u$  に比べて非常に長い理由は, このように, 3 軸応力位置が  $x=R_2$  から  $x=R_3$  へ移動するため, Fig.7 (f) に示すように水素原子の再集合が起こらねばならず, しかも  $R_3 \leq x \leq R_2$  における応力勾配が  $K=K_2$  の場合の  $R_1 \leq x \leq R_2$  におけるそれと比べて著しく小さいので, 水素原子の移動に相当の時間がかかるためと思われる. また Dull らが指摘したように,  $K=K_3$  においては,  $K=K_2$  の場合に比べて 3 軸応力が小さく, 微視き裂の発生が生じるには余分の水素原子が集合して来る必要があり, そのために時間がかかることも  $t_d \gg t_u$  となる理由の 1 つであると思われる.

つぎに,  $t_3$  が長くなるにつれて  $t_d$  が大きく減少する理由については, つぎのように考えられる. すなわち,  $t_3$  が長くなると,  $K=K_2$  から  $K=K_3$  へ減少しはじめる初期の区間でき裂の伝ばが生じ,  $K=K_2$  で生じたき裂先端の弾塑性変形領域は, き裂の通過によって破壊されるので, Fig.7 (f) のような応力分布にはなりにくい. もし  $K=K_2$

で生じた塑性変形領域を  $t=t_3$  の区間でき裂が通過してしまえば,  $K=K_3$  になったときの応力分布は  $K=K_1$  におけるそれ, すなわち Fig.7 (d) とほぼ同じになるはずである. したがって,  $t_d$  は  $t_3$  の増加とともに大きく減少する. これに対し,  $K$  上昇時には, その初期でき裂の伝ばが生じたとしても,  $t_1$  の長短に無関係に  $K=K_2$  におけるき裂先端の応力分布は同じであり,  $K=K_1$  における変形履歴には影響されない. すなわち,  $t_u$  は,  $t_1$  の増加とともに僅かに減少するのみである.

## 2. 潜伏時間と試験温度の関係

もし, 荷重の変化とともに 3 軸応力位置が移動すれば, 水素原子の拡散速度には限界があるから, 移動した 3 軸応力位置に水素原子が集合するには時間がかかり, 潜伏時間  $t_u$  および  $t_d$  が現われる. Figs.3~6 によると,  $t_1$  または  $t_3$  が長くなるほど  $t_u$  または  $t_d$  が減少し,  $t_1$  または  $t_3$  がある値以上に長くなると,  $t_u$  または  $t_d$  が 0 になるが, このことは 3 軸応力位置がゆっくり移動する場合には, 水素原子もそれに十分追従できるため, 常にき裂の伝ばが生じる (Fig.2 (d)) ようになることを暗示している. また水温  $T$  が高いほど,  $t_u$  または  $t_d$  が小さく, しかも  $t_u$  または  $t_d$  が 0 になる  $t_1$  または  $t_3$  が短くなることは,  $T$  が高いほど水素原子の拡散速度が大きくなり, 3 軸応力位置の移動に水素原子が追従しやすくなることに対応していると思われる.

以上のことをさらに定量化するため, 潜伏時間と試験温度の関係について考える. すなわち,  $K$  の変動によって 3 軸応力位置が移動した距離  $\Delta R$  を, 水素原子が拡散・移動して来て, 3 軸応力位置に材料の分離を生じるのに必要な一定量の水素原子が集合するのに要する時間が, 潜伏時間であると考えれば, 水素の拡散速度は熱活性化過程によって支配されるから, つぎのような Arrhenius の式が成立するはずである.

$$\frac{\Delta R u}{t_u} = C_u e^{-\frac{Q_u}{R_0 T}}, \quad \frac{\Delta R d}{t_d} = C_d e^{-\frac{Q_d}{R_0 T}} \quad (2)$$

ここで,  $C_u, C_d$  は定数,  $R_0$  はガス定数,  $\Delta R u, \Delta R d$  および  $Q_u, Q_d$  は, それぞれ  $K$  を急激に増加または減少させたときの 3 軸応力位置の移動距離および活性化エネルギーである.

Fig.8 は,  $t_1=t_3=0.2$  s のときの  $1/t_u$  または  $1/t_d$  と  $1/T$  の関係を示すグラフで, 直線の勾配からみかけの活性化エネルギーが求まる. また,  $t_1(=t_3)=5, 10, 30$  および 40 s についても同様な整理を行ない,  $Q_u$  および  $Q_d$  を求めた結果をまとめたものが Fig.9 である. この図で,  $t_3$  が長くなると  $Q_d$  が増加する理由は,  $T$  の増加とともに  $K$  減少過程の初期でき裂の伝ばが生じやすくなり,  $K=K_{\max}$  で生じた塑性変形領域がき裂の伝ばによって破壊されて  $t_d$  が短くなるが, この傾向が  $t_3$  が大きいところでとくに強くなるためと思われる. したがって,  $t_1$  または  $t_3$  が長くて,  $K$  の上昇または下降の初期における 3 軸応力位置の移

動に、水素原子が追従できるような場合には、式(2)はそのままでは適用できず、Fig.9の $Q_u$ および $Q_d$ を $t_1=t_3=0$ に外挿した値が、3軸応力位置の急速な移動に対する水素原子の移動のための活性化エネルギーであり、それぞれ $Q_u \approx 20$  kJ/mol,  $Q_d \approx 40$  kJ/molとなる。ここで、 $Q_d$ が $Q_u$ に比べて約2倍も大きい理由については、つぎのように考えられる。まず、LandesとWei<sup>(13)</sup>の実験によると、遅れ破壊き裂伝ば速度の温度依存性から求めた活性化エネルギーは、 $K$ が大きいかほど小さく、たとえば $K=30$  MPa $\sqrt{m}$ で50 kJ/mol,  $K=60$  MPa $\sqrt{m}$ で33 kJ/molである。すなわち、 $K$ が大きくなってき裂先端の3軸応力性が高まると、

水素原子拡散のためのエネルギー障壁の高さが低くなる。実験条件や材料が異なるので、直接的な比較は困難であるが、 $Q_d$ が $Q_u$ に比べて著しく大きい理由は、たとえみかけ上の $K$ の値( $K_{max}=28$  MPa $\sqrt{m}$ ,  $K_{min}=22$  MPa $\sqrt{m}$ )があまり大きく異ならないとしても、Fig.7(f)のように、 $K$ を減少させたときにはき裂先端の3軸応力および応力勾配が大きく低下し、実質上 $K_{min}$ が22 MPa $\sqrt{m}$ よりはるかに小さくなったためと思われる。

つぎに、変位上昇または下降区間で、き裂の伝ばが生じようになる $t_1$ または $t_3$ (これを $t_{1c}$ または $t_{3c}$ と名づける)と試験温度 $T$ の関係を調べた結果をFig.10に示す。この図で、黒丸は、変位の上昇または下降の際にき裂の伝ばが生じた最も短い $t_1$ または $t_3$ 、白丸は、変位の上昇または下降の際にき裂の伝ばが生じない最も長い $t_1$ または $t_3$ であり、 $t_{1c}$ および $t_{3c}$ は両者の中間に存在する。この図から、変位上昇または下降の際にき裂の伝ばが起こるか起こらないか、すなわち、もし3軸応力位置が移動するならば、それに水素原子が十分追従できるかどうか、の境界を決定する、水素の拡散のための活性化エネルギー $Q$ の値として、約32 kJ/molが求まる。

このように、Fig.10の $Q$ およびFig.9から求めた $Q_u$ ,  $Q_d$ のうち、 $Q_u$ の値は、静荷重下での遅れ破壊き裂伝ば速度と温度の関係から求められた活性化エネルギーの値<sup>(9)(13)</sup>38~50 kJ/molに比べてやや低いが、鉄中の水素の拡散のための活性化エネルギーの値<sup>(12)(14)</sup>13~38 kJ/molと同程度であり、これらの値から、 $K$ の上昇および下降にともなうき裂の伝ばに関連した現象が、水素原子の拡散または集合に支配されていると考えてよいと思われる。

なお、前述の(2)の理由すなわち、 $K$ の上昇過程で、転位がき裂先端から侵入してきた水素原子を3軸応力位置に

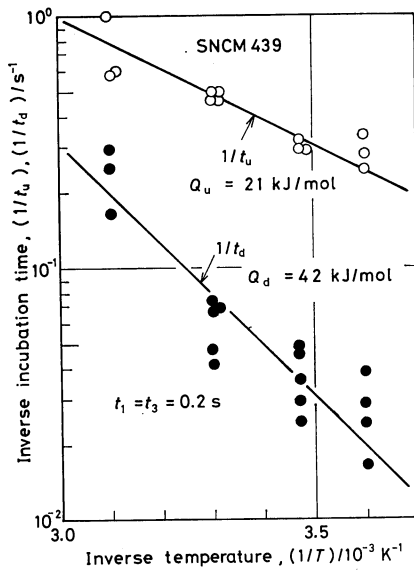


Fig.8 Relationship between testing temperature  $T$  and the incubation time after stress intensity factor  $K$  is increased or decreased,  $t_u$  or  $t_d$ .

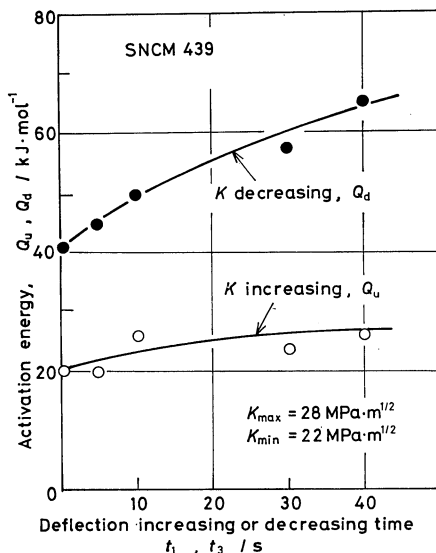


Fig.9 Relationship between deflection increasing or decreasing time and activation energy.

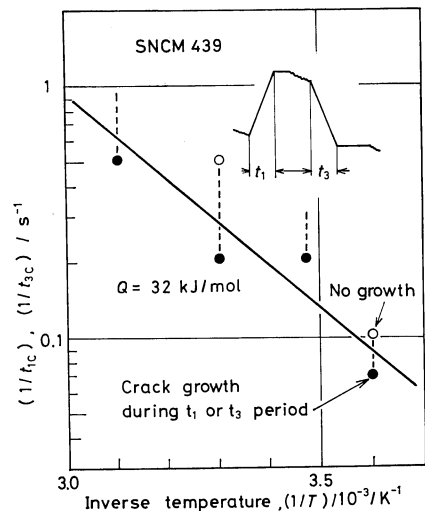


Fig.10 Relationship between testing temperature  $T$  and critical value of deflection increasing or decreasing time,  $t_{1c}$  or  $t_{3c}$ , under which no crack growth occurs during  $t_1$  or  $t_3$ .

外の場所へ輸送するため  $t_u$  が現われ、逆に  $K$  の減少過程でのすべり変形で、き裂先端へ向かう転位がき裂先端へ水素原子を押し戻すことにより  $t_d$  を生じるという考え方も不可能ではない。この材料では粒界割れが生じ、水素の優先的な集積場所は粒界であると思われる。したがって、もしこのような機構が存在するとすれば、粒界近傍の転位が重要な役割をはたすと思われるが、これらについては不明である。

## V. 結 言

遅れ破壊き裂の伝ばが、荷重変動にどのように応答するかを明らかにするため、応力拡大係数  $K$  を台形波状に変化させ、 $K$  最大値または最小値保持区間で現われる潜伏時間  $t_u$  または  $t_d$  が、 $K$  上昇時間  $t_1$  または  $K$  下降時間  $t_3$  ( $=t_1$ ) の長短により、どのように変化するかを調べた。得られた結果はつぎのとおりである。

(1)  $t_1$  または  $t_3$  が短い場合には、 $K$  最大値保持区間または  $K$  最小値保持区間で潜伏時間  $t_u$  または  $t_d$  が生じるが、 $t_d$  は  $t_u$  に比べると非常に長い。 $t_1$  および  $t_3$  の増加とともに、 $t_u$  および  $t_d$  は減少するが、その程度は  $t_d$  の場合の方が大きい。

(2) 試験温度  $T$  が増加するにつれ  $t_u$  および  $t_d$  は減少し、 $1/t_u$  または  $1/t_d$  と  $1/T$  の関係は、Arrhenius の式にしたがう。得られた活性化エネルギーの値から、潜伏時間は、水素原子の材料中の拡散と、3 軸応力位置への集合過程によって支配されていると推測できる。

(3)  $t_u$  および  $t_d$  の存在は、 $K$  の変動によるき裂先端近傍の 3 軸応力位置の移動に対し、水素原子がすぐには追追

できないと仮定することにより説明できるし、 $t_d \gg t_u$  であることは、 $K$  上昇時と  $K$  減少時のき裂先端の応力分布の様相が大きく異なることを考えれば説明できる。

終りに、実験に熱心に協力された、当時広島大学工学部学生の新井富夫君(現在：広島重機㈱)、藤島敏之君(現在：松下電産㈱)、ならびに試験片の作製でお世話になった広島大学工学部 向井一夫、広田秀徳技官に感謝します。

## 文 献

- (1) K.Nakasa, H.Takei and M.Kido: Engng Fracture Mech., **9**(1977), 867.
- (2) K.Nakasa, H.Takei and H.Itoh: Engng Fracture Mech., **10**(1978), 783.
- (3) K.Nakasa, H.Takei and H.Itoh: Engng Fracture Mech., **11**(1979), 689.
- (4) K.Nakasa, H.Takei and K.Kajiwara: Engng Fracture Mech., **14**(1981), 507.
- (5) K.Nakasa, H.Takei and H.Itoh: Engng Fracture Mech., **17**(1983), 449.
- (6) 中佐啓治郎, 武井英雄, 朝本哲博: 日本金属学会誌, **36**(1972), 1180.
- (7) K.Nakasa, H.Takei and T.Asamoto: Trans. JIM, **17**(1976), 726.
- (8) D.L.Dull and L.Raymond: Met. Trans., **3**(1972), 2943.
- (9) 青木孝夫, 金尾正雄, 荒木 透: 鉄と鋼, **64**(1978), 1737.
- (10) J.A.Kies, H.L.Smith, H.E.Romine and H.Bernstein: ASTM STP 381, ASTM, (1965), 328.
- (11) J.R.Rice: Corrosion, **32**(1976), 22.
- (12) H.H.Johnson and P.C.Paris: Engng Fracture Mech., **1**(1968), 3.
- (13) J.D.Landes and R.P.Wei: Engng Fracture Mech., **9**(1973), 277.
- (14) J.Y.Choi: Met. Trans., **1**(1970), 911.