

## 変動応力下における水素ぜい化割れき裂の伝ば (中佐啓治郎)

- 研究回想・随想を含む -

## 1. 遅れ破壊の概要と特徴

「遅れ破壊」は、水素ぜい化割れの一種であり、材料因子、環境因子、力学因子の組合せが一定の条件を満足したときに起こる。強度の大きい鉄鋼材料 (材料因子) が、静的な荷重のもとで腐食雰囲気さらされると、表面の腐食反応 (環境因子) によって発生した水素が、欠陥 (切欠、き裂、介在物、腐食ピットなど) 先端の応力集中部 (静水圧引張り応力が最大となる部分) (力学因子) に次第に集まり、一定の時間経過後に微細なき裂を生じる。これが成長・伝ばして、構造物全体の破壊が起こる。

遅れ破壊き裂の発生・伝ばには、水素拡散の駆動力となる大きな静水圧引張り応力 (残留応力を含む) の存在と、材料の割れをひき起こすに十分な一定の水素濃度の両方が必要である。応力が加わらないか、水素が存在しなければ、遅れ破壊は生じない。

遅れ破壊は、引張り強さが 1200MPa 以上の高強度鋼で起こる。その理由は、同じ荷重 (公称応力) でも、強度が大きいほど欠陥先端の静水圧引張り応力が大きくなり、水素集積の駆動力が大きくなるからである。材料の強度が低いと、き裂先端の応力集中が降伏 (塑性変形) によって緩和され、静水圧応力が小さくなる。その結果、集積する水素の量が減って、遅れ破壊が起こりにくくなる。

表面から侵入した水素は、欠陥先端の静水圧引張り応力最大位置に向かって拡散する。その位置に一定濃度の水素が集積すると、その部分の材料がぜい化して割れが発生する。水素の拡散速度は、静水圧応力の大きさ (応力勾配) が大きいほど速いので、材料に加わる応力が大きいほど割れの発生は短時間で起こり、き裂の伝ば速度も大きい。応力が小さくなると、水素拡散の駆動力が減り、水素の集積濃度も減るので、き裂発生に長時間を要する。通常、1000 時間強度を下限界の応力とすることが多いが、それ以下の応力ではき裂が発生しないことを保証するものではない。

環境の温度が高いと、水素の拡散速度が速くなり、静水圧応力場への水素の集積速度も速くなって、き裂伝ば速度も速くなる。しかし、あまり温度が高いと、かえって応力場への水素の集積量が減り (温度が高いと、エントロピー増大の方向が安定であり、水素は分散する)、き裂伝ば速度が減少する。

遅れ破壊き裂伝ば速度  $da/dt$  は、き裂先端の応力場の強さを表す応力拡大係数  $K$  (板幅が広いときには、公称応力  $\sigma$  とき裂長さ  $a$  の平方根の積で表される) で整理でき、 $da/dt = AK^m$  などの式で表現できる ( $A$  および  $m$  は定数)。ただし、き裂の分岐が起こる  $K$  の中間領域では、き裂伝ば速度が一定になることがある。変動応力下では、 $K$  が時間  $t$  とともに変わるので、 $da/dt = f(K(t))$  である。

## 2. 研究の動機

私は、遅れ破壊の研究をしていた 1970 年頃、高強度鋼が腐食環境中で繰返し応力を受けるときの腐食疲労き裂伝ば速度  $(da/dN)_c$  は、大気中の疲労き裂伝ば速度  $da/dN$  と静的な負荷のもとで起こる遅れ破壊き裂の伝ば速度（単位時間あたりのき裂伝ば速度  $da/dt[K(t)]$  を、1 サイクルあたりのき裂伝ば速度に換算）の重ね合わせで表現できるのではないかと考えた。両者の線形加算式は、以下のように表現できる。

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_c = \frac{da}{dN} + \int_N \frac{da}{dt}[K(t)]dt \quad (1)$$

ところが、研究を始めてしばらくして、このような考えは、Wei と Landes によって 1969 年以前にすでに確かめられており、図 1 のように、線形加算則が成り立つことが報告されていることを知った (R.P.Wei and J.D.Randes, Mat. Res. Std., 9(1969), 25)。

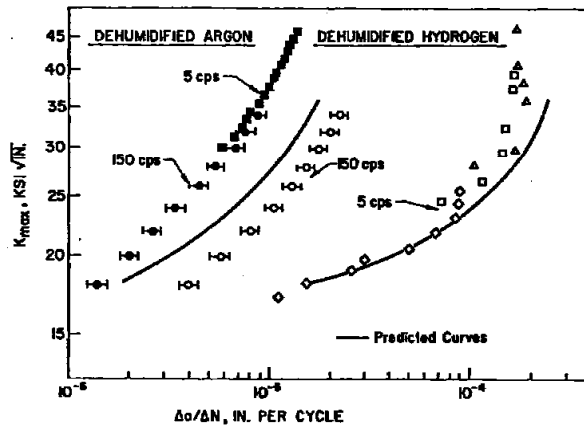


FIGURE 9 - Fatigue crack growth in 18Ni (250) maraging steels tested in dehumidified argon and hydrogen.<sup>29</sup>

図 1

私は、この解説を見て先駆者にはとてもかなわないと思い、少しがっかりした。しかし、自分の実験結果をよく見ると、単純な加算則は成り立たず、遅れ破壊き裂の伝ば速度が、繰返し応力下では小さくなると思われる結果が得られていた。そこで、この現象を表現できるように、式(1)を以下のように修正した。

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_c = \alpha \frac{da}{dN} + \beta \int_N \frac{da}{dt}[K(t)]dt \quad (2)$$

ここで、 $\alpha$  は、き裂先端への水素の侵入が、疲労き裂伝ば速度に与える影響（たとえば材質の変化；初期の研究では、 $\alpha = 1$ としている）、 $\beta$  は、疲労（変動応力）が遅れ破壊き裂の伝ば（侵入した水素のき裂先端への集積）に与える影響を表す。

図 2 に示す私たちの実験データは、 $\alpha = 1$  (Wei と Landes の線形加算則) は成り立たず、 $\alpha < 1$  となっている。そこで、変動応力が遅れ破壊のき裂伝ば速度を小さくする原因を検討し、 $\alpha < 1$  となる理由として、図 3 (a) のモデルで示すように、応力繰返しとともにき裂先端の静水圧引張り応力最大位置（水素の集積位置）が移動するが、水素の拡散速度には限界があるので、ある繰返し速度以上では、水素が静水圧応力最大位置の移動に追従することができず、広い範囲に分

散するためと考えた。これにより、き裂の発生に必要な量の水素の集積が遅れ、き裂の発生が遅れる（静的な応力が加わるときに比べてき裂伝ば速度が遅くなる）と推論した（1972）。ただし、繰返し速度が非常にゆっくりしているとき(b)と、応力振幅が非常に小さいとき(c)には、水素が応力場の移動にほぼ追従できて  $\beta = 1$  となる。また、繰返し速度が非常に速いとき(d)には、水素が疲労き裂の伝ばそのものに全く追従できず、式2の第2項が第1項に比べて非常に小さくなり、見かけ上、式(1)の線形加算則が成立する。このように、変動応力の繰返し速度・振幅・平均値と水素の拡散速度の組合せによっては、 $\beta < 1$  になりうることを示した。

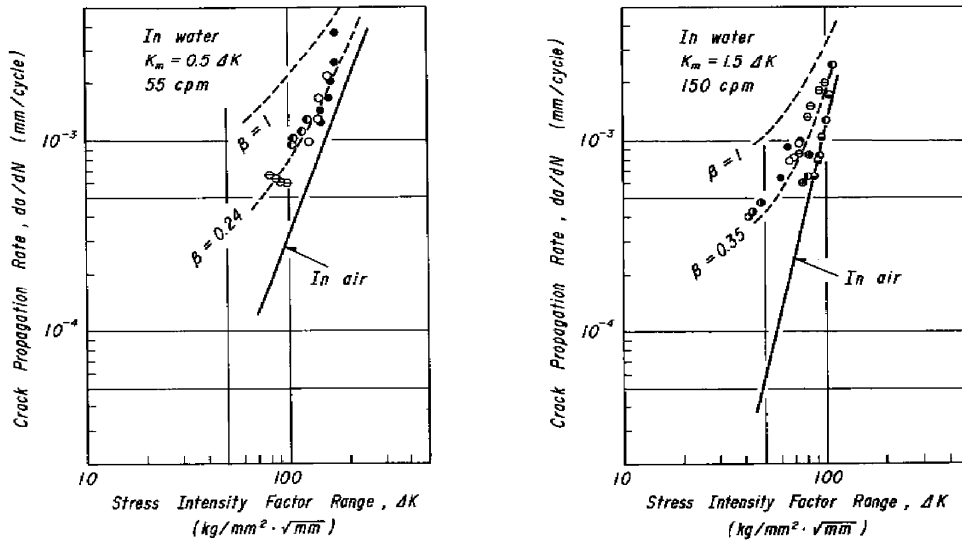


図 2

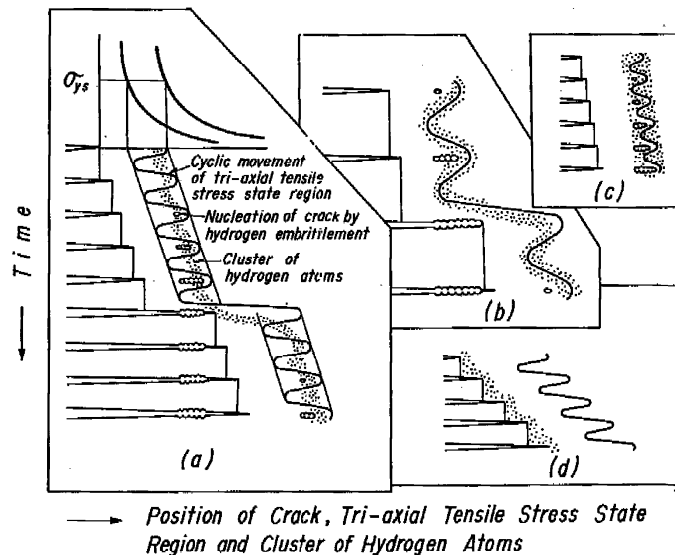


図 3

## 2. 変動応力下における水素ぜい化割れき裂の伝ば

Wei - Landes の線形加算則は、水素環境中における疲労き裂伝ば速度（寿命）を取扱う設計基準としては安全側の値を与えるものであり、意義のあるものである。しかし、私は、この線形

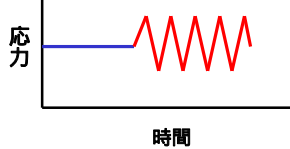
加算則がすでに提案されてしまっている以上、線形加算則が成り立たない場合があることを強調することは、いろいろの意味で気が進まなかった。そこで、別の観点から研究を進めることにした。つまり、変動応力により遅れ破壊（水素ぜい化割れ）き裂の伝ば速度の減少が起こっていることを、疲労の問題としてではなく、純粹に水素ぜい化割れの問題として、明確な形で実験的に示し、その機構を考察し、理論的に解析することが重要と考えた（当時は、もちろん、そのようなはっきりした方針があった訳ではなかったが）。

そこで、まず、疲労き裂伝ば速度  $da/dN$ （式（1）または（2）の右辺第一項）が無視できるほど応力変動が小さい場合について、静的応力下における遅れ破壊き裂伝ば速度  $(da/dt)_s$  に対して、変動応力下における遅れ破壊き裂伝ば速度  $(da/dt)_R$  がどの程度遅くなるかを表す尺度  $1 - \beta$  を、下記のように定義した。

一定応力のもとでのき裂伝ば速度:  $(da/dt)_s$   
 変動応力のもとでのき裂伝ば速度:  $(da/dt)_R$

$(da/dt)_s > (da/dt)_R$

伝ば速度の遅れの割合



$$1 - \beta = \frac{(da/dt)_s - (da/dt)_R}{(da/dt)_s} > 0$$

もし、 $1 - \beta > 0$  ( $< 1$ ) ならば、静水圧引張り応力場の変動と水素の相互作用が起こり、遅れ破壊き裂の伝ばの遅れが生じていることになる。

(a) 温度の影響

まず、水温を変えて、き裂伝ばの遅れ（相互作用の強さ） $1 - \beta$  と繰返し速度  $f$  の関係を調べた結果を図 4 に示す。

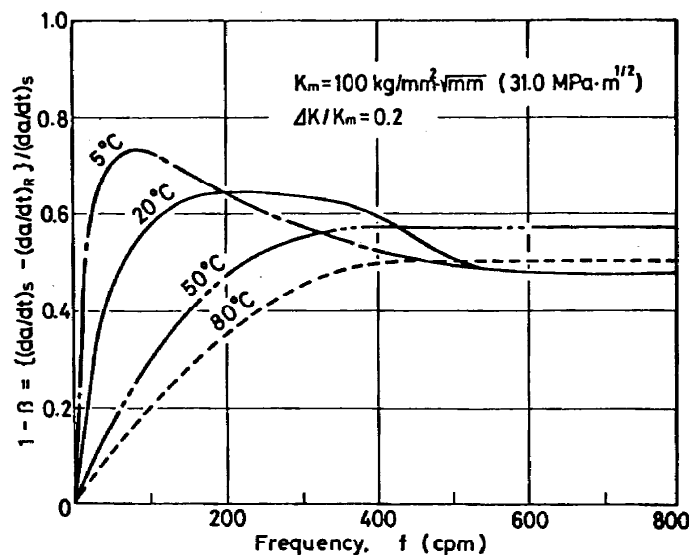


Fig. 5. Relation between frequency and the rate of decrease  $(1 - \beta)$  at various temperatures [2].

この図によると、温度が高いほど、ピークの高さが低くなり、ピークの幅が広がり、高い周波数でピークが現れることが分かる。これらの理由は、温度が高いほど、水素の拡散速度が大きくなって応力場の変動に水素が追従できやすくなることと、相互作用が弱くなることに対応している。

なお、繰返し速度が高いほど、バックグラウンドが大きくなるが、これは、当時、破壊力学研究者の間でホットな話題になっていた Crack Closure の問題と関係している。つまり、変動応力が加わるときのき裂先端の実際の応力拡大係数の変動範囲  $K_{eff}$  が、負荷公称応力  $K$  とき裂長さ  $a$  から計算した応力拡大係数の最大値  $K_{max}$  と最小値  $K_{min}$  の差に対応せず、実際は、ある応力拡大係数  $K_{op}$  ( $> K_{min}$ ) にならないと、き裂の開口が始まらない ( $K_{eff} = K_{max} - K_{op}$ )。このことは、変動応力下の実際の平均応力拡大係数  $K_m$  が、静的な応力のみが加わるときの応力拡大係数  $K_s$  よりも小さいことを意味し ( $K_m < K_s$ )、これによりき裂伝ば速度が遅くなるという機械的な効果に対応している。この効果は、温度には依存せず、周波数の増大によって単調に増加する。したがって、これを除いたものが、変動応力と水素の相互作用である ( $f$  が大きいときには、 $1 - \beta = 0$  となるはずである)。

(b) 2つのピークの存在

私は、内部摩擦モデルを用いた半理論解析により、この現象の説明ができたと思っていた。ところが、実験を続けているうちに、図5のように、相互作用のピークが2つ現れることに気がついた (この図で、 $R (= K_{min} / K_{max})$  は応力比である)。当初の実験では、データのばらつきが大きくて、2つのピークの存在を見逃していたのである。

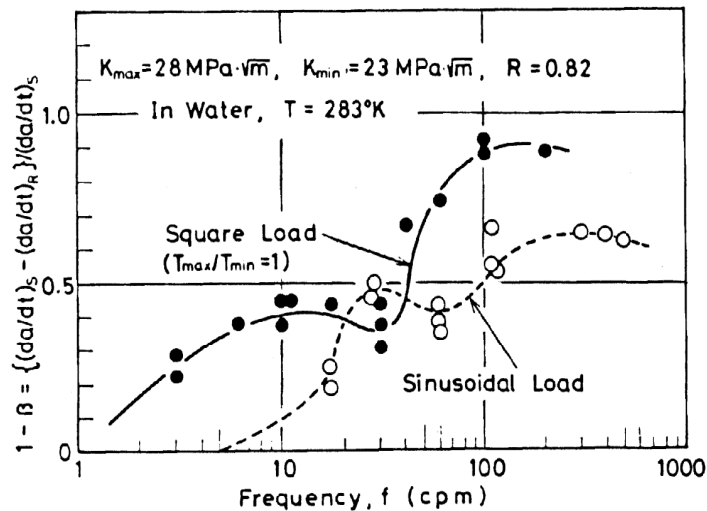


図5

そこで、原点にもどって、つぎの3つの実験と解析を行った。

(c) 応力の急変に対する遅れ破壊き裂伝ばの過度応答

遅れ破壊き裂の伝ばが起こっているときに、 $K$  を急激に増加させたとき次のき裂伝ばが起こるまでの潜伏時間  $t_u$  および  $K$  を急激に減少させたときの潜伏時間  $t_d$  を調べた。その結果を図6に示す。この潜伏時間は、き裂先端の応力場の突然の位置移動に水素が再び追従して集合し、つぎのき裂伝ばを始めるまでの時間に対応する。

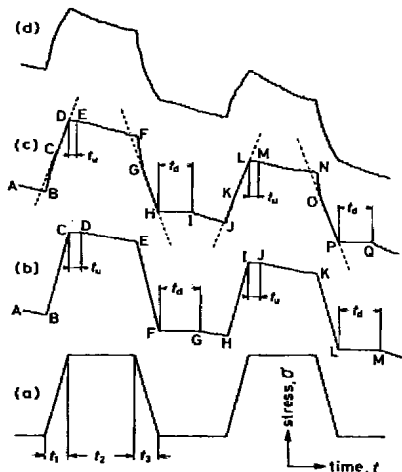


Fig.2 Response of crack propagation to deflection variation : (a) Without crack propagation, (b) deflection increasing or decreasing time,  $t_1$  or  $t_3$ , is short or testing temperature  $T$  is low, (c)  $t_1$  and  $t_3$  or  $T$  are medium and (d)  $t_1$  and  $t_3$  are long or  $T$  is high.

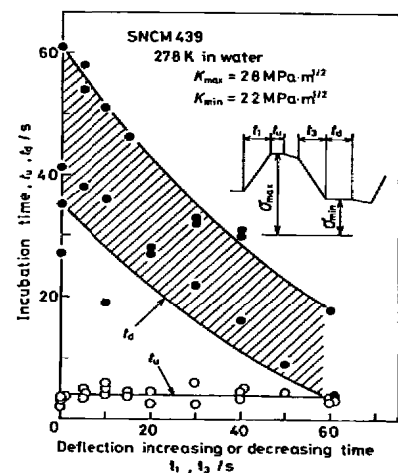


Fig.3 Effect of deflection increasing or decreasing time on the incubation time.

図 6

図 6 の実験結果によると、常に  $t_d > t_u$  であり (K を減少させたときの方が水素の集積は遅い)、しかも、その差は、K の増加または減少速度が小さいほど小さいことがわかる (静水圧応力位置がゆっくり動くほど、水素は追隨しやすい)。K の増減に伴う、静水圧引張り応力場の移動、K の実質上の変化、水素の動きを図 7 および 8 に模式的に示す。

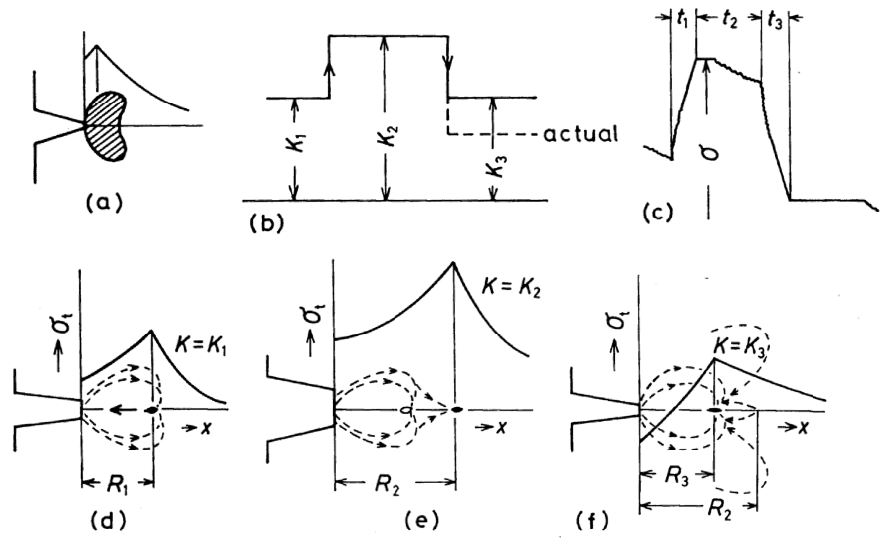


Fig.7 Moving of triaxially stressed position and migration of hydrogen atoms with increase or decrease in stress intensity factor.

図 7

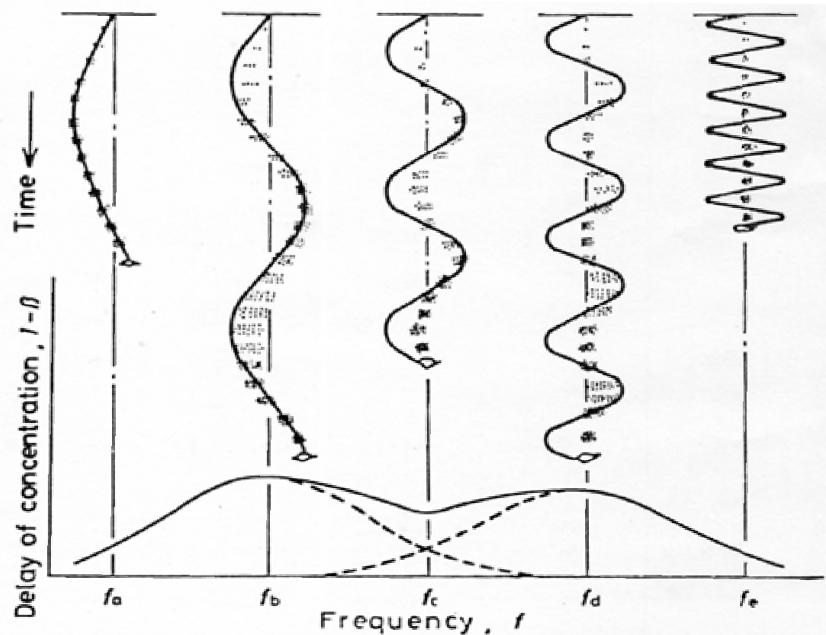


Fig.7 Illustration of interaction between hydrogen atoms and cyclic moving of triaxially stressed position.

図 8

図 8 において、低周波数側で現れるピークが  $K$  の減少に伴う水素の集積の遅れを、高周波数側で現れるピークが  $K$  の増加に伴う水素の集積の遅れに対応している。なお、 $K$  の変動に対して、水素が完全に追従できるか ( $f = f_a$ )、あるいは全く追従できなければ ( $f = f_e$ )、応力場の移動がない静荷重が加わるときと同様に早期に割れが生じ、き裂伝ばの遅れは生じない。

このモデルでは、応力の増減によって静水圧応力最大位置が移動することを前提としているが、この妥当性については、次のように考えられる。最大負荷応力で、き裂先端の塑性変形領域の大きさは最大となるが、そのまわりには弾性変形領域ができていく。最大応力から応力が減少し始めると、この弾性変形領域は、もとに戻ろうとして塑性変形領域を圧縮しようとする。しかし、塑性変形は永久変形であるから、圧縮によってもとに戻ることはできず（応力の減少幅が大きいときには、き裂先端では、再び塑性変形が起こるかもしれない）、塑性変形領域と周りの弾性変形領域の境界で大きなせめぎあいが起こる。その結果、応力減少時には、静水圧引張り応力最大位置が、き裂先端方向に移動すると考えられる（応力増加時にはその反対方向に移動する）。その移動量は、き裂長さに比べて非常に小さいとしても（たとえば結晶粒径のオーダーの距離）、水素原子の基準移動距離である格子定数に比べるとはるかに大きいから、静水圧応力最大位置に、水素ぜい化割れき裂の発生に必要な一定量の水素が移動するためには、相当の時間が必要であり、これが潜伏時間として検出される。その際、塑性変形領域内の転位、点欠陥、粒界などは、トラップ効果や転位の水素輸送などの現象を通じて、個々の水素原子の拡散速度に影響して水素の分散を促進し、水素の集積速度に影響を与えると思われる。したがって、静水圧応力最大位置の周期的移動が、それに追従しようとする水素原子の分散をひき起こし、遅れ破壊き裂伝ば速度の減少をもたらしていると考えられる。

変動応力が加わるときの水素原子の動きを実験的に追いかけることは難しいから、上記のことが本当に起こっているかどうかは、さらに実験と解析を行って確かめるしかない。

(d) 内部摩擦モデルによる解析

2つのピークの存在を説明するために、図9(a)のような、潜伏時間の非対称を取り込んだ、ばね・非対称ダッシュポットモデルを作成した。この模式図では、応力減少時にはダッシュポットの羽根が開いて粘性抵抗が大きくなり、変位の遅れが大きくなることを示しているが、これは単なるものの「たとえ」であり、どのようなモデルでもよい。この非対称内部摩擦モデルを用いて解析を行った結果を以下に示す。内部摩擦には、2つのピークが現れる。ここで、 $\omega$  は角速度、 $\tau_u$  は潜伏時間に対応する緩和時間である。

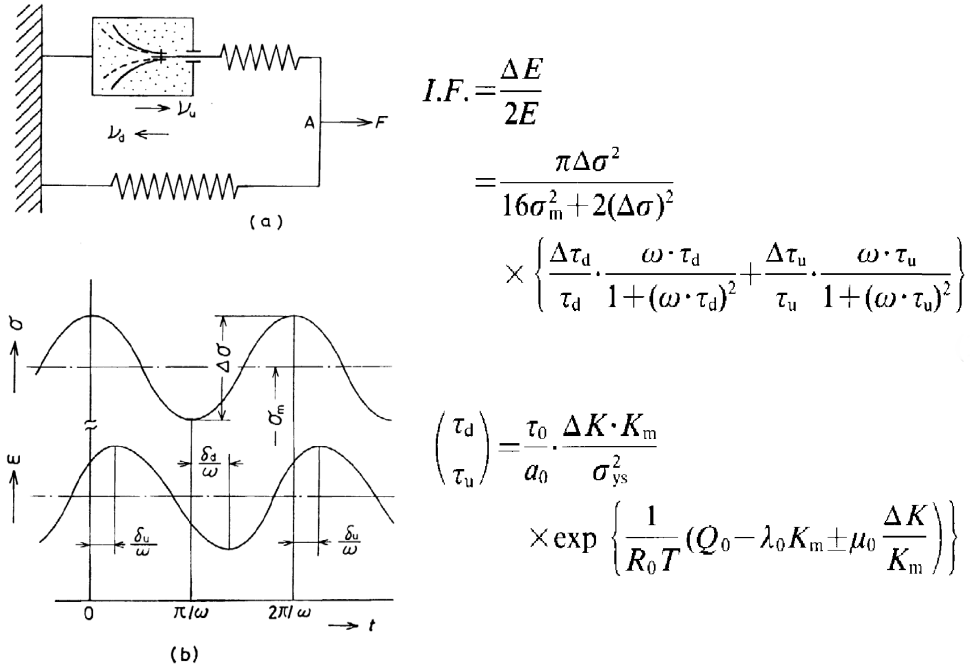


図 9

(e) 応力波形効果

繰返しの波形が正弦曲線であると、2つのピークが明瞭ではない。これは、 $K$ の増加・減少速度が緩やかで、相互作用が現れにくいからである。一方、図5に示すように、応力波形を矩形波（パルス状）にすると、応力の変動に対する水素の集合の遅れもはっきりして、ピークが明瞭になる。また、矩形波の場合のピークの位置は、正弦波の場合よりも低周波数側にあるが、このことは、応力の変動が急激であるため、水素の追従が遅れ、低周波数側でないと相互作用が起こらないことに対応している。そこで、矩形波応力における最大応力保持時間  $T_{max}$  と最小応力保持期間  $T_{min}$  を調整すれば、2つのピークが1つに合体するはずであると考えて、 $\beta = T_{max}/T_{min}$  を変えて実験を行った。その結果を図10に示す。この図に示すように、 $\beta = T_{max}/T_{min}$  を減少させると2つのピークが近づき、 $\beta = 1/15$  で2つのピークが1つになる。つまり、 $\beta = 1/15$  で、 $K$ の増減に伴う潜伏時間が同程度になって（潜伏時間の非対称性 ( $t_u/t_d < 1$ ) が補正され）、2つのピークは1つに合体すると解釈できる。



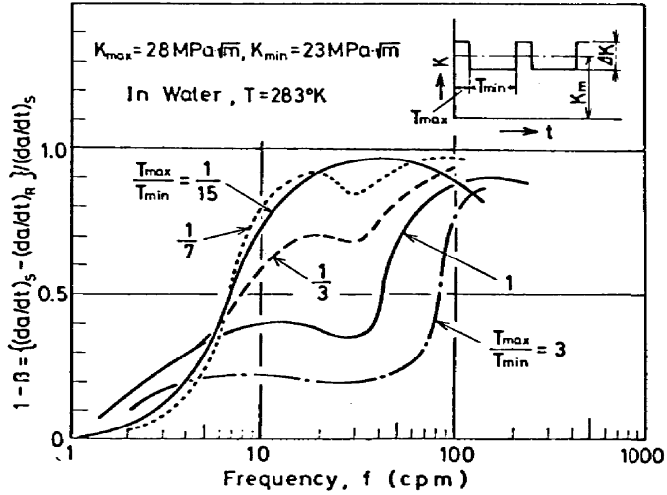


図 10

前述のばね・非対称ダッシュポットモデルを用い、パルス状波形をフーリエ関数で表して内部摩擦（き裂伝ば速度の遅れ  $1 - \beta$ ）を求めると、下記の式 (3) になる。

$$\begin{aligned}
 I.F. = & \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\pi \left(\frac{\Delta\sigma}{\sigma_m}\right)^2 \cdot \frac{\sin^2 n\pi\eta}{n}}{\left[ n\pi^2 \left(1 + \frac{2\eta-1}{2} \cdot \frac{\Delta\sigma}{\sigma_m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\sigma}{\sigma_m}\right)^2 \cdot \frac{2\sin^2 n\pi\eta}{n} \right]} \\
 & \times \left[ \frac{\Delta\tau_{dn}}{\tau_{dn}} \cdot \frac{n\omega\tau_{dn}}{1+(n\omega\tau_{dn})^2} + \frac{\Delta\tau_{un}}{\tau_{un}} \cdot \frac{n\omega\tau_{un}}{1+(n\omega\tau_{un})^2} \right] \quad (3)
 \end{aligned}$$

ここで、 $\tau_{un}$ 、 $\tau_{dn}$  は  $n$  番目の正弦波の高さに対する緩和時間である。この式をもとに計算機で計算した  $1 - \beta$  を図 11 に示す。この図では、バックグラウンド(機械的效果)は考慮されていない。もし、これを考慮すると、各曲線の右側が同じ量だけ持ち上げられて(機械的效果は、 $\eta$  に依存しない)、図 10 の曲線の形とかなり一致する。

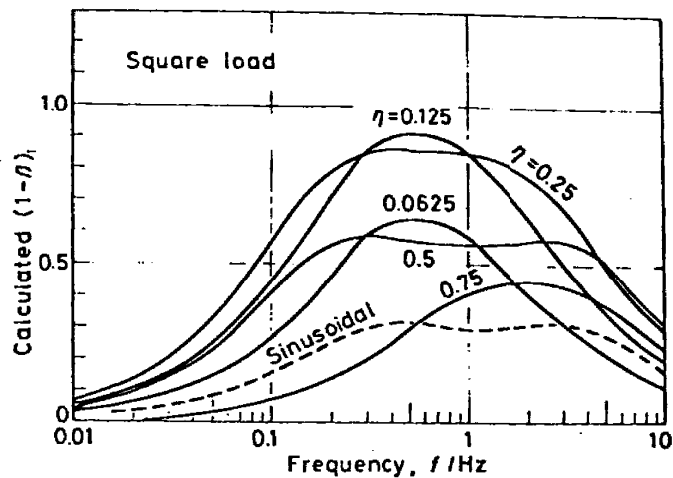


図 11

その他、水素チャージの影響、変動応力の範囲の影響など、いろいろの実験と解析を行った。これらをまとめると、以下のようになる。

1. 遅れ破壊（水素ぜい化割れ）き裂の伝ば速度は、変動応力の重畳によって静荷重下よりも小さくなる。変動応力下における遅れ破壊き裂伝ば速度の減少率と周波数の関係を表す曲線において、ある周波数で減少率が最大となるピークが現れる。
2. ピークの現れる周波数は、温度の上昇とともに高周波数側に移動し、温度が高いほどピークの高さが低くなるとともにピークの幅が広がる。
3. き裂伝ば速度の減少率と周波数の関係に、2つのピークが現れる。これは、水素の拡散速度が、き裂先端の応力に依存するため、応力を上昇させたときのほうが応力を減少させたときよりもき裂伝ば開始の潜伏時間が短くなることに対応する。つまり、静水圧応力最大位置の変動に対する水素の集積の遅れが非対称となるため、2つのピークが現れる。
4. ピークの間隔は、応力の変動範囲が大きくなるほど広がる。これは、最大応力と最小応力の差が大きいほど、水素集積時間に差ができるためである。また、正弦波形よりも、パルス状波形のほうが、2つのピークは低周波数側に現れる。これも、パルス状波形では応力場の移動が急激で水素の追従が難しいため、低い周波数でないと相互作用が起こらないことに対応している。
5. 変動応力の形をパルス波形とし、最大応力での保持時間と最小応力比時時間の比を小さくすると、2つのピークが近づき、ある値で2つのピークが合体する。これは、応力増減時の水素集積期間の非対称が補正されるためである。
6. 非対称内部摩擦モデルを用いて解析すると、応力場の変動と水素の集積の相互作用を表現できる。

## 文 献

1. Ni-Cr-Mo マルテンサイト鋼の水中疲労き裂伝ば則，日本金属学会誌，第 36 巻，第 12 号，pp.1180-1188，(1972)（中佐啓治郎，武井英雄，朝本哲博）
2. The Initiation and Propagation of Fatigue Crack in Ni-Cr-Mo Martensitic Steel in Water，Trans. JIM，Vol.17，No.11，pp.726-732，(1976)（Keijiro Nakasa，Hideo Takei，Tetsuhiro Asamoto）
3. The Effect of Repeating Load on the Crack Growth Initiation and Crack Propagation in Delayed Failure，Engineering Fracture Mechanics，Vol.9，pp.867-877 (1977)（Keijiro Nakasa，Hideo Takei，Mitsuo Kido）
4. Effect of Temperature on the Frequency Dependency of Crack Propagation Velocity in Delayed Failure under Cyclic Load，Engineering Fracture Mechanics，Vol.10，No.4，pp.783-793 (1978)（Keijiro Nakasa，Hideo Takei，Hisashi Itoh）
5. An Analysis of Crack Propagation Velocity in Delayed Failure under Repeating Load Using an Internal Friction Model，Engineering Fracture Mechanics，vol.11，No.4，pp.689-702 (1979)（Keijiro Nakasa，Hideo Takei，Hisashi Itoh）

6. Delay of Concentration of Hydrogen Atoms to Crack Tip by Superposition of Repeating Load , Proc. JIMS-2 , Hydrogen in Metals , pp.597-600 , (1979) (Keijiro Nakasa , Hideo Takei)
7. Effect of Stress Wave Shape on the Crack Propagation Velocity in Cyclic Delayed Failure , Engineering Fracture Mechanics , Vol.14 , No.3 , pp.507-517 ,(1981) (Keijiro Nakasa , Hideo Takei , Kenichi Kajiwara)
8. Mechanism of Corrosion Fatigue Crack Propagation in High Strength Steels , Engineering Fracture Mechanics , Vol.17 , No.5 , pp.449-459 , (1983) (Keijiro Nakasa , Hideo Takei , Hisashi Itoh)
9. 変動応力下における遅れ破壊 , 材料科学 , 第 20 巻 , 第 1 号 , pp.21-26 , (1983) (中佐啓治郎 , 武井英雄)
10. Ni-Cr-Mo 鋼の荷重変動に対する遅れ破壊き裂伝ばの応答 , 日本金属学会誌 , 第 48 巻 , 第 2 号 , pp.129-135 , (1984) (中佐啓治郎 , 伊藤尚 , 武井英雄)
11. Ni-Cr-Mo 鋼の変動応力下における水素脆化割れき裂の伝ば , 日本金属学会誌 , 第 48 巻 , 第 2 号 , pp.136-143 , (1984) (中佐啓治郎 , 武井英雄 , 伊藤尚 , 小林正良)
12. An Analysis of Crack Propagation Behavior in Stress Corrosion Cracking under Repeating Load by Using an Asymmetrical Internal Friction Model , Proc. 6th Int. Con. Fracture , Vol.4 , pp.2395-2402 , (1984) (Keijiro Nakasa , Hisashi Itoh , Hideo Takei)
13. 変動荷重下での遅れ破壊き裂伝ば速度におよぼす旧オ - ステナイト結晶粒径の影響 , 日本金属学会誌 , 第 50 巻 , 第 2 号 , pp.148-153 , (1986) (伊藤尚 , 木戸光夫 , 中佐啓治郎 , 武井英雄)
14. Crack Propagation Assisted with Hydrogen under Cyclic Stress in Ni-Cr-Mo Steel , Trans. JIM , Vol.27 , No.4 , pp.260-269 , (1986) (Keijiro Nakasa , Hideo Takei , Hisashi Itoh , Masayoshi Kobayashi)

## 研究回想・随想

この研究は、私が、機械工学科の学部・修士課程で疲労の実験を行っていたこと、1967年に精密工学科の助手になってから、高強度鋼の破壊靱性値や遅れ破壊に興味をもち、破壊力学を環境強度に適用するときの研究テーマを考えていたことに出発点がある。1969年に、「高強度材料の疲労き裂伝ば則におよぼす雰囲気の影響」というテーマで科学研究費・奨励研究 A に応募し、1970年に追加（補欠）で採択された。金額は、21万円であったが、私には初めての経験で、当時28才であった私には、非常に励みになった。ところが、実験開始後に、Wei と Landes が 1969年に書いた解説を見つけ、他人の研究の確認実験をするのはいやだと思ったが、よく見ると、私の実験結果と彼らの結果は異なる。しかし、材料中の水素の挙動を考え

ると、変動応力の重畳によって、き裂伝ば速度の遅れが起こることは十分ありうると思ひ、これをさらに調べようと決心した。

機械技術者は、設計ができる法則あるいは設計式を見つける、あるいは設計に役立つ実験データや問題解決の手法を提案することが主な役割であるという考えがある。Wei-Landes の線形加算則は設計に役立つ。Miner 則と呼ばれる線形加算則は、応力振幅が繰返しとともに変化する場合の疲労破壊寿命推定に非常に役立っている。一方、現象の原因を追究し、その本質を見出すことを重要視する、材料学・金属学・応用物理学の立場もある。私は、ある先生が言われた、「実験事実について、それがなぜ起こるかを研究するのが学問である」という言葉が心に深く残っていた。もちろん、機械設計の立場も重要であるが、何よりも自分で面白いと思った現象は、とことん調べてみたいという気持ちが強かった。私の所属していた学科が、精密工学科という機械系の学科でありながら、研究室の名前が「金属材料」であり、金属関連の学問分野に関連が深かったことと、研究室の武井教授に自由に研究をさせていただいたおかげで、その後 15 年間、この研究を継続することができたと思う。

当時、広島市の千田町にあった工学部精密工学科の建物は運動場に面しており、夕方になると、卓球部がトレーニングをしていた（私たちは、バドミントンに興じていたが）。その一つとして、確か「ランダム」というトレーニングがあった。これは、誰かが「パン」と手をたたくと、多くの部員が横方向に動き、しばらくして次の「パン」で反対方向に動く、ということを繰返しているうちに、最初は一直線に並んでいた部員の列が乱れ、中心からの距離がまちまちなり、部員たちがくたびれたところにトレーニングが終わる、というものである。これは、応力場の移動に対して個々の水素原子も追従しようとするが、それらの移動速度は同じでなく、次第に広がっていくのによく似ている。

Engineering Fracture Mechanics（当時は Pergamon Press 出版）には、論文をたくさん投稿した。それは、自分の実験結果を、海外の研究者にも見てもらいたいという気持ちがあったためであるが、データが非常にばらついていて、あまりきちんとした考察ができなかったものもあるのに、よく掲載していただいたと感謝している。これは、私の論文原稿にオリジナリティーが含まれていると判断され多少の不備には目をつむってもらったためと、都合よく考えたい。ある校閲者から、「This paper contains some interesting experimental results which would make a permanent contribution to the literature.」と評価されたのは、大変嬉しかった。もっとも、その後で [However, . . . . .]と続き、モデルと解析の不備と説明不足が指摘されていたが。

この研究は、お名前を思い出すだけでも、海外を含めて 10 名以上の研究者からよい評価をいただいた（もっとも、自分から研究結果を紹介する場合には、誰もけなすものはいないが）。線形加算則を提案した Prof. Wei (Lehigh 大学) には、1979 年の水上市の国際会議で、私がこの研究（文献 6）を発表したときに質問を受けた。ところが、ヒアリング能力不足で、質問の意味がわからず立往生した。発表のあとに教授にお会いし質問の意味を再度お聞きしたが、長い言葉を連続してお話しされ、やはり理解できなかった。これは今でも残念なことである。その後、Wei 教授には、他の国際会議でお会いしたが、教授にとっては古いテーマの話をこちらから持ち出すことはできなかった。

応力あるいは応力場を持つ転位と溶質原子の相互作用は、スネーク・ピークや Granato-Lücke モデルで代表される多くの内部摩擦モデルで説明されている。板を曲げたときの応力勾配による長範囲の原子の移動を表す Gorsky 効果もある。周波数とき裂伝ば速度の減少率の係数にピークが現れる原因については、この現象がわかった時点で、直感的に静水圧引張り応力位置の周期的移動が関係していると考えた。これは、どちらかという、力学的な説明である。転位論の勉強も少しはしていたし、のちに、上記の内部摩擦についてもいろいろ調べたが、静水圧応力位置の移動が起こることを前提に考察を進めた。FEM 解析を行えば、静水圧応力位置の大体の移動距離を計算できるのだが、と思いながら、そのままになっている。確かに、繰返し応力の負荷とともにき裂先端の塑性変形領域で転位の往復移動が起こり、運動する転位と水素の相互作用により、水素の集積の遅れが起こることは間違いないであろう。しかし、転位密度の大きい焼戻しマルテンサイト組織では、転位が移動できる距離は短いので、この相互作用があるとすれば、もっと高い周波数で大きく起こるように思われる。き裂先端の開口変位の周波数依存性を精密に測定すれば、水素の静水圧応力位置への集合の遅れによるひずみの遅れと、通常の溶質原子と転位の相互作用を表す内部摩擦ピークが分離できるかもしれない。実は、このことを確かめるための予備実験も行ったが、装置の検出精度（高速度側）の問題で、はっきりした結果を出すことができなかった。しかし、応力を急変させる実験の結果から、ピークが現れる直接の原因は、き裂先端での静水圧応力最大位置の長範囲の移動と水素の相互作用である（転位などの格子欠陥と水素の相互作用は、水素の分散に寄与するであろう）という、最初の考えは変えていない。

私たちの研究は、変動応力重畳による水素ぜい化割れき裂伝ば速度の遅れであり、破壊の問題である。内部摩擦モデルを用いてはいるが、従来から「材料科学」や「応用物理学」の分野で扱われている内部摩擦現象とかなり異なっている。炭素や窒素など、他の侵入型溶質原子が集積しても割れは起こらないから、私たちが調べた現象は、水素という異端原子のなせる、一般性のない異端現象だったかもしれない。

私は、この研究は、設計には役立たないし製品開発にも役立たないが、新しい現象を見つけたという意味で、オリジナリティーはあると思っている。この研究を引用した研究は少ないが、それでも、私は、十分満足している。

最後に、この研究に熱心に協力された、当時大学院修士課程の、朝本哲博 君、伊藤 尚 君、梶原謙一 君、小林正良 君、細野浩二 君、当時学部学生の、湊 正則 君、池田 環 君、伊藤宣彦 君、原田康博 君、川崎憲二 君、岡野雅俊 君、新井富夫 君、藤島敏之 君、三宅利幸 君、落合正行 君、小林繁利 君、惣明義博 君、金久昌彦 君に、心から感謝いたします。

PDF の転載は、固くお断りします

ホームページに戻る

<http://www006.upp.so-net.ne.jp/nakasa/>