

水素ぜい化割れき裂の分岐（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 σ 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。

2. 研究の動機

私は、1978年頃、焼入れ後400℃で焼戻したNi-Cr-Mo鋼の遅れ破壊き裂の伝ば速度を測定していたところ、遅れ破壊き裂が、[図1](#)のように、ある応力で突然枝分かれし、それらがさらに分岐を繰り返すのを見て、大変驚くとともに、ある種の感動をおぼえた。

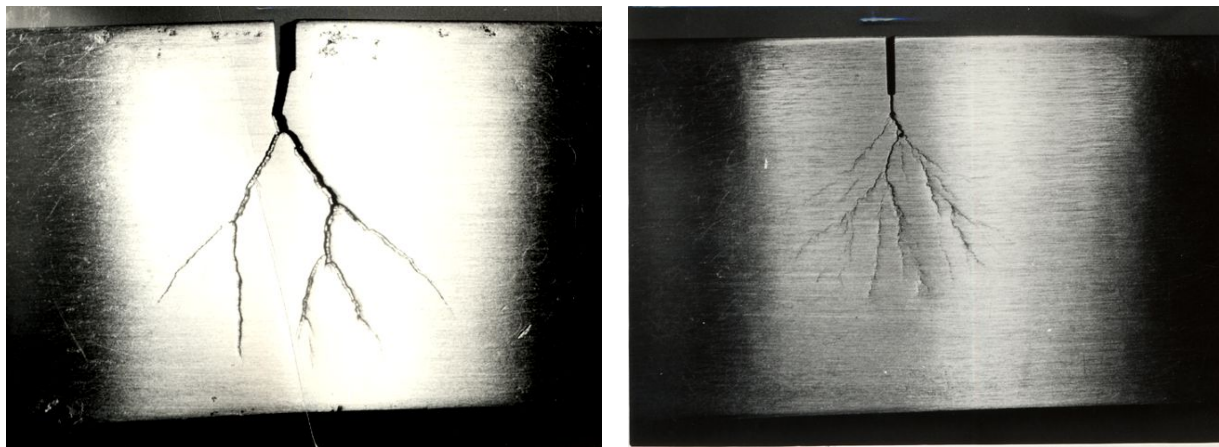
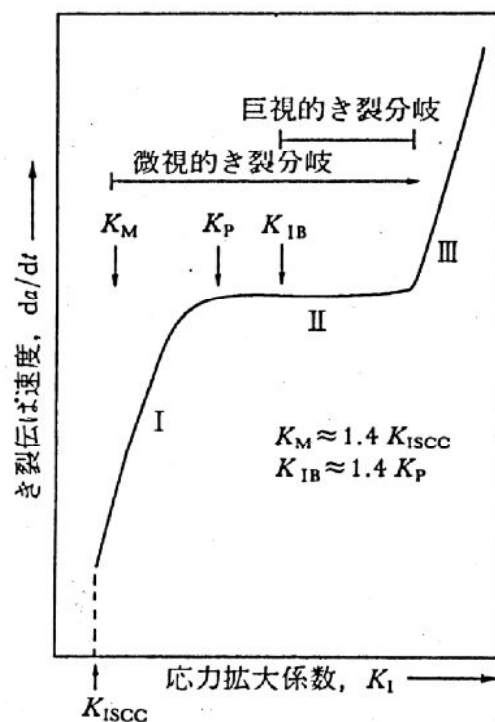


図1 Ni-Cr-Mo鋼（焼入れ後の焼戻し温度：400℃）のき裂分岐

今まで直線的に伝ばしていた1本のき裂が、なぜ突然2本のき裂に枝分かれるのであろうか。もちろん、ガラスが割れたときなどには、非常に美しいき裂の分岐パターンが現れるが、環境が影響する、速度の遅いき裂の伝ば過程でも、き裂の分岐が起こるのは、一体なぜか、という疑問と興味が私の心の中に湧いてきた。

破壊の専門書には、水素ぜい化割れだけではなく、ステンレス鋼などの応力腐食割れ（アノード反応により金属が溶け出しながらき裂が進展する）でも、熔融金属ぜい性でも、き裂の分岐が起こると書いてある。また、[図2](#)のように、き裂分岐は応力拡大係数 K が中間の領域で現れ、そのときには、き裂伝ば速度はほぼ一定になると書いてある。また、肉眼で観察される巨視的き裂の分岐が現れる前に、微視的き裂分岐が現れるという。しかし、なぜ分岐が起こるのか、という理由についての記述はない。

私の疑問は、実験を進めるうちにどんどん広がっていった。もちろん、その疑問自体も、最初は整理されたものではなかったが、これらをまとめると、次のようになる。



応力拡大係数とき裂伝ば速度(対数目盛関係)。

図2

- (1) なぜ、強度が大きい鋼では、き裂が分岐せず、中間の強度をもつ鋼のみで、き裂分岐が起こるのか。
- (2) なぜ、応力拡大係数の中間領域で、き裂伝ば速度が一定になるのか。
- (3) き裂分岐が起こるから、き裂伝ば速度が一定になるのか。
- (4) それとも、き裂伝ば速度が一定になるから、き裂分岐が起こるのか。
- (5) 一度分岐したき裂は、なぜいつまでも安定に伝ばし続けることができるのか。
- (6) 水素ぜい化割れの機構あるいは水素の拡散挙動は、き裂分岐とどのように関係しているのか。
- (7) き裂の分岐が起こる応力拡大係数 K_B は、何によって決まるのか。き裂の分岐角度 $2\theta_B$ は決まっているのか。
- (8) 微視的き裂分岐は、巨視的き裂分岐の前触れなのか。この過程がないと、巨視的なき裂分岐は起こらないのか。
- (9) 水素ぜい化割れにおけるき裂の分岐は、応力腐食割れや、溶融金属脆性で起こるき裂分岐現象とどのような点が異なり、どのような点が共通なのか。ガラスなどの脆性体でおこるき裂分岐と共通点はあるのか。

2. 初期の研究

そこで、上記の疑問を解明するために、実験と解析を続けたが、当初の予定と異なり、かなり長い期間研究を続けることになった。

A. 分岐き裂の応力拡大係数： まず、結城良治先生、北川英夫先生（東京大学生産技術研究所、お二人とも故人となられた）の、純粹に力学的な研究によると、[図3](#)のように、き裂の分岐が起こった後の応力拡大係数は、分岐の角度 $2\theta_B$ が 90° の場合、約半分に低下する。また、分岐の角度 $2\theta_B$ は、引張り応力最大の方向にき裂が伝ばするなら、 30 度くらいが安定である。

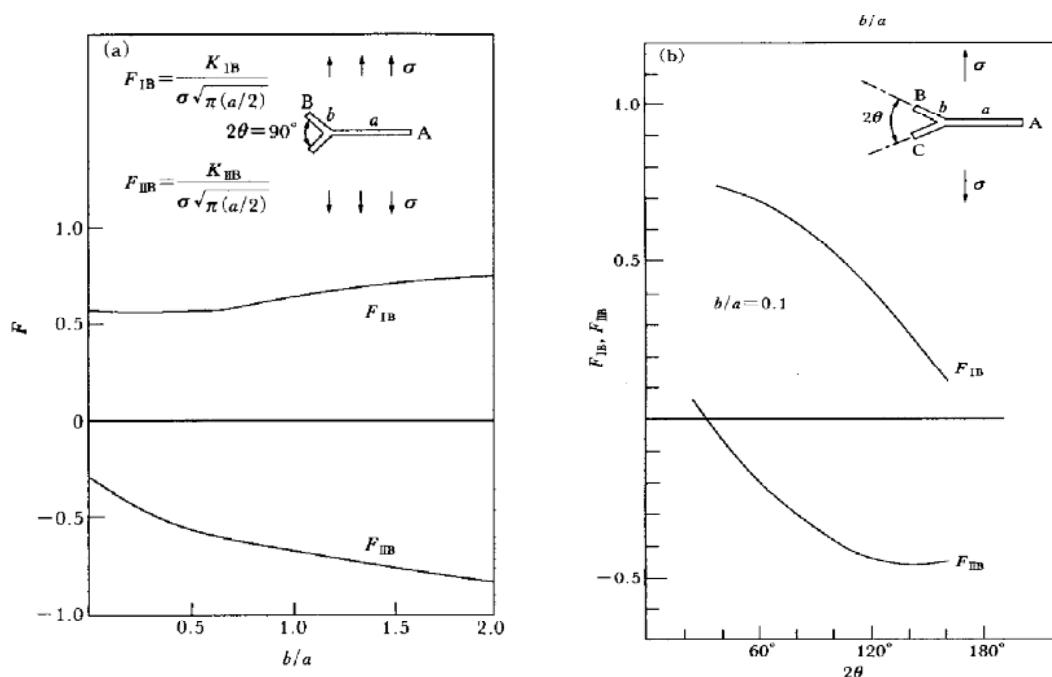


図3

もし、 $K = K_B$ で一度き裂が分岐すると、[図3](#)のように、分岐き裂先端の実質上の K が一度

下がり，さらに外部応力が増加してKが再度上昇し，次々と枝分かれを繰返すならば，き裂伝ば速度に変動があるとしても，平均すれば，き裂伝ば速度がほぼ一定になるであろう（(3)の疑問への回答）。しかし，それでは，なぜ，き裂分岐が始まる前の中間のKでき裂伝ば速度が一定になるのか，という(2)の疑問は解決されない。また，実際に観察されるき裂分岐角度 $2\theta_B$ も，図3から予想される 30° よりも大きい。もともと水素ぜい化割れき裂の分岐現象も，材料因子・環境因子・力学因子が関係したメカノケミカルな現象であり，力学因子は重要であることは間違いのないとしても，それだけでは説明できない現象であると思われた。

(注) 結城・北川の結果(図3)は，水素ぜい化割れの分岐現象そのものを解明するための解析ではなく，純粋に力学的解析である。この結果は，たとえば，セラミックスの破壊靱性がき裂の微細分岐によって向上するという現象を説明するのに有用である。

B. 分岐き裂の安定性： 次に，き裂伝ば速度が一定になれば，枝分かれが安定に起こるかどうかの疑問(5)について検討した。

まず，あらかじめ遅れ破壊により分岐き裂をつけた試験片を用いて，大気中で疲労き裂伝ば速度を測定した。その結果を図4(a)に示すが，一方の疲労き裂のみが優先的に伝ばし，もう一方のき裂は停止する。これに対し，図4(b)に示すように，遅れ破壊き裂は，分岐き裂の両方から安定に伝ばし，両者の長さは殆ど変わらない。

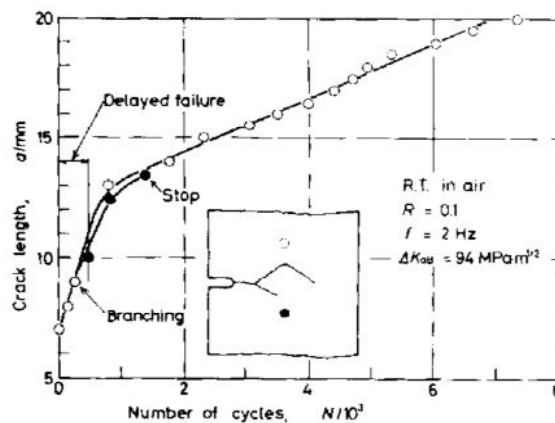


図4(a) 分岐き裂からの疲労き裂伝ば

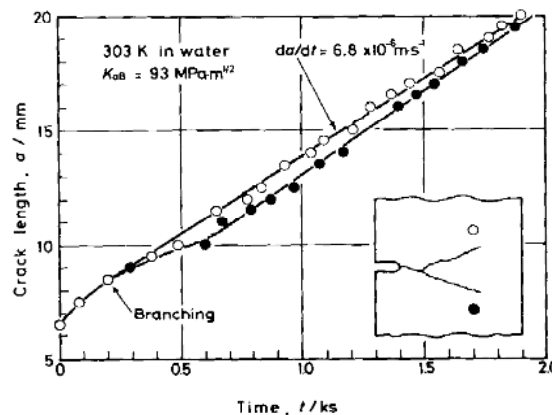


図4(b) 分岐き裂からの遅れ破壊き裂の伝ば

疲労き裂の場合，片方のき裂しか成長できない理由は以下のように考えられる。疲労き裂の伝ば速度 $v = da/dN$ は，応力拡大係数の変動範囲 K に依存し，Paris 則によると，

$$da/dN = C_1 (K)^m \quad (1)$$

で与えられる ($m \approx 0.5$)。もし，疲労き裂の伝ばの途中で，2つの分岐き裂の一方の長さが僅かに大きくなると，そのき裂の応力拡大係数 K が大きくなり，式(1)にしたがって，き裂伝ば速度が大きくなる。長くなったき裂のほうが短いき裂よりも K が大きいから，そのき裂はますます速く伝ばする(もう一方のき裂の K は小さくなって，そのき裂は伝ばを停止する)。このようにして，結局，2本のき裂のうち，少しでも速く進展した方のき裂のみが，伝ばを続けることができる。

一方，遅れ破壊き裂の伝ば速度 $v = da/dt$ も，

$$da/dt = C_2 K^m \quad (2)$$

で与えられる。もし，き裂伝ば速度が一定であれば ($m=0$ ，伝ば速度が K に依存しない)，2本のき裂の長さにならぬ差ができたとしても，両方のき裂の伝ば速度は K に依存せず殆ど変わらないから，両方のき裂は，ともに安定に伝ばすることができる。

このことを数式で表現すると次のようになる。もし，微小な K (あるいは K) の変化に対するき裂伝ば速度の v の変化が大きければ，分岐き裂の不安定性 が大きいとして， を次式で表す。

$$= (dv/v) / (dK/K) = (dv/v) / (d K/ K) \quad (3)$$

式(3)と，式(1)または(2)から，

$$= m \quad (4)$$

となる。すなわち，き裂伝ば速度が一定 ($m=0$) であれば，不安定性が0，つまり分岐したき裂は安定に伝ばできることになる。また，き裂伝ば速度が一定であれば，一本のき裂がたまたま分岐したとしても，それが安定に成長する可能性が高いことになる(4),(5)の疑問への答)。疲労き裂伝ば過程では，き裂伝ば速度が一定となることはない。一方，遅れ破壊き裂の伝ば過程では，き裂伝ば速度が一定になることがある。問題は，なぜ，き裂伝ば速度が一定になるような条件が生まれるかである。

C: ある K 以上で，き裂伝ば速度が一定となる理由： 遅れ破壊き裂の発生・伝ばは，き裂先端へ水素が拡散・集積し，その部分の結合を弱めることによって起こる。水素拡散の駆動力は，き裂先端の静水圧引張り応力と応力勾配である。それでは，この静水圧応力がどんどん大きくなると，水素の拡散速度もそれにつれて大きくなるかということ，それは難しい。なぜなら，水素の拡散は熱活性化過程で起こり，水素は素地の結晶格子の隙間をジャンプしながら移動するので，拡散速度には限界がある。それに加えて， K が一定の値以上に大きくなると，き裂先端で塑性変形が起こり，水素が転位によって補足され，き裂が発生する場所(き裂先端の静水圧引張り応力最

大の位置)への水素の集積が遅れる。K がさらに大きくなって水素拡散の駆動力が増しても、それと同時に転位の数も増えるから、トラップされる水素も増える。このように、K がいくら大きくなっても、水素ぜい化割れき裂伝ば速度は大きくなることのできないという、速度制限過程 (Rate limiting process) があり、き裂伝ば速度は、一定値以下に抑えられてしまう。これが、ある K 以上になると、遅れ破壊き裂の伝ば速度が一定になる理由である ((2)の疑問への答)。

ところで、強度の大きい材料は、き裂の分岐を起こさない。これは、強度が大きいと、き裂先端の塑性変形が起こりにくく、き裂伝ば速度も K に依存して大きくなり、速度が一定にならないからである。K をどんどん大きくすると、き裂先端で大きな塑性変形が起こる前に、き裂が不安定伝ばして破断が起こる。逆に、強度が低いと、遅れ破壊自体が起こらない。結局、中間の強度、つまり、き裂先端である程度の塑性変形が起こって転位が増殖し、不安定破壊も容易に起こらないという場合に、き裂の分岐が起こる ((1)の疑問の答)。

D き裂の拡散経路： それでは、水素が転位によって補足され、き裂の伝ば速度が一定になったとして、そのことが、裂の分岐の起こる直接の原因になるかという、それだけでは不十分である。なぜなら、き裂の分岐は、それまでき裂が進展していた方向とある角度 ($\theta = \pm \theta_B$) をなす2つの方向に起こるから、 $\theta = \pm \theta_B$ の方向に、割れを発生させるのに十分な引張り応力(あるいは静水圧引張り応力)と水素の量が存在するという条件が必要である。水素が静水圧引張り応力最大位置に集まるときに、き裂先端からまっすぐに ($\theta = 0$ の方向に) 移動(拡散)するならば、き裂の分岐は起こらない。K が大きくなったときに、もし、き裂先端の上下 ($\theta = \pm \theta_B$) に高濃度の水素が集積すれば、応力が $\theta = 0$ の面より多少小さくても、2つの方向にき裂の分岐が起こる可能性がある。

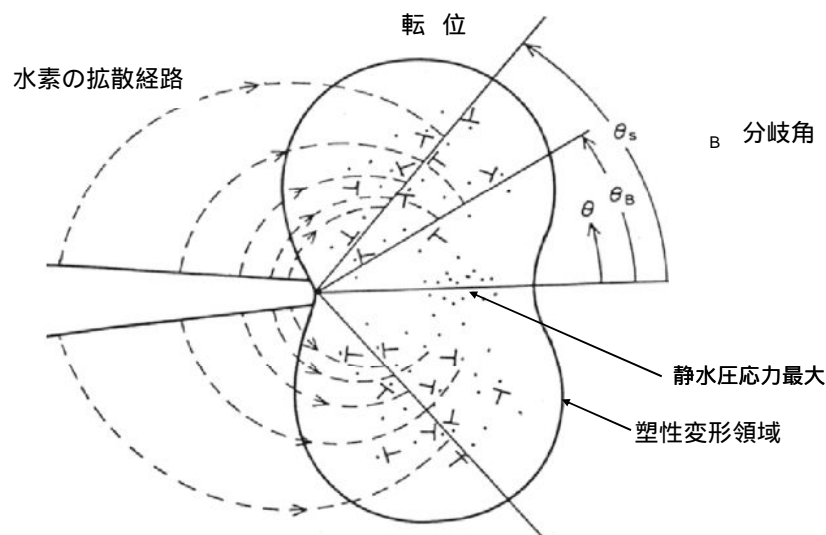


図 5

図 5 は、き裂壁の腐食反応によって発生した水素が、き裂先端の応力勾配に沿って拡散する様子を模式的に示したものである。水素原子は、き裂先端から直線的に ($\theta = 0$ 方向に) 静水圧引張り応力最大位置に向かって移動するのではなく、両側から回り込んで拡散する。このことは、弾性理論あるいはすべり線場理論から求めた静水圧引張り応力の分布から証明できる。

一方、き裂先端のせん断応力は、 $\theta = 0$ では 0 であるが、ある角度 ($\theta = \theta_s$) で最大であり、この周辺で転位の数も多いから、静水圧引張り応力最大位置に向かって拡散しようとしている水素がこの近辺でトラップされ、水素の量も多くなっているであろう。つまり、引張り応力(あるいは静水圧引張り応力)は、 $\theta = 0$ の面で最大で、 θ の増加とともに減少するが、水素の量は $\theta = \theta_s$ 近傍で多い。したがって、もし、水素ぜい化割れき裂の発生が、引張り応力(あるいは静水圧引張り応力)と水素濃度のある組合せで決まるならば、この組み合わせが最適となった応力拡大係数と角度 $\theta = \theta_B$ ($0 < \theta_B < \theta_s$) で分岐き裂が発生し、そのときの応力拡大係数が K_B であり、 $2\theta_B$ が分岐角度である((6) および (7) の疑問に対する答)。き裂先端の塑性変形の様子は、材料の種類によって変わるから、 K_B も $2\theta_B$ も材料によって変わる可能性がある(後述)。また、水素の初期分布や拡散経路によっても変わる可能性がある(後述)。

- E き裂の枝分かれに及ぼす試験片厚さの影響： 水素の拡散経路と塑性変形領域(転位)の存在が、き裂分岐に大きな役割をはたしていることを、別の方法で確かめるため、試験片の板厚を変えて遅れ破壊試験を行った。それによると、薄板予き裂試験片(表面をコーティングして、側面からの水素の侵入を阻止)では、遅れ破壊き裂の進展は起こるが(同じ K に対して、厚い試験片よりもき裂の伝ば速度は遅い)、き裂の分岐は生じない。これは、薄板試験片のき裂先端では平面応力状態が優勢であり、図 6 に示すように、塑性変形領域の幅が板厚程度となって狭く、水素がトラップされる位置の角度が非常に小さくなるためであると解釈できる。

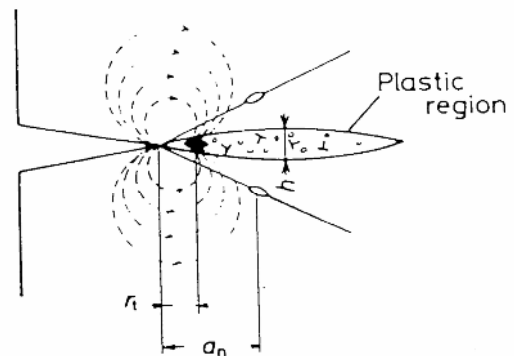


図 6

- F き裂の分岐に及ぼす環境温度の影響： き裂の分岐挙動に、水素と塑性変形領域内の転位の相互作用が影響しているとすれば、この関係を変化させれば、何かが分かる。水温を上げて遅れ破壊き裂の伝ば速度を測ると、全体的にき裂伝ば速度が大きくなるが、き裂伝ば速度が一定となる K の領域が狭くなり、水温 80 くらいではき裂の分岐が起こらなくなる。転位が水素をラップする原因は、転位のもつ引張り応力場と溶質水素原子のもつ圧縮応力場が互いに引きあって内部エネルギーを低下させようとするためであるが、温度が上がると、水素の拡散速度が増すとともに、エントロピー増大の方向(水素が特定の位置にかたまらず広く分布する方向)が安定になり、転位が水素をトラップする力が弱くなる。こうなると、水素は、き裂先端から静水圧応力最大位置に向かって自由に拡散でき、き裂の分岐は起こらない。つまり、 K_B は、環境の温度にも依存する(疑問 7 に対する回答)。
- G き裂の分岐が繰返される理由： ある応力拡大係数 ($K = K_B$) でき裂の分岐が起こると、き裂先端の実質の K が半分程度に低下するが(図 3 参照)、き裂が伝ばしてき裂長さが増加すると K も上昇する。そうすると、再びき裂の分岐が起こる条件が満足され ($K = K_B$) 2 回目の分岐が起こる。外部からの力の加わる速度が大きければ、分岐が何回も繰返されるが、外部の力の増加速度が小さければ、1 回目の分岐で終わりである。

3. 後期の研究

さて、上記のような実験を行っていた1983年に、中国から、陳 効列 (Chen Xiaolie) 君が私の研究室にやってきた。彼は、文化大革命後の第一期の大学卒業生で、ハルビン船舶学院から上海交通大学の修士課程に進学していたが、中国政府派遣の留学生として日本に来ることになったのである。彼と相談して、き裂分岐の研究を体系化することを修士・博士学位論文の研究テーマにした。これにより、我々の研究は大いに進展した。

3.1 き裂分岐の理論

今まで、水素ぜい化割れにおけるき裂分岐現象を、材料、環境、力学因子を取り込み、定量的な取扱いをすることを試みた研究者はいない。上記のA-Gの知見と推論をもとに、我々独自のき裂分岐理論を構築するのが、これからの研究の目的である。その目的を達成するためには、すでに提案されている先駆者の関連理論を利用させていただくのが早道である。

き裂分岐も水素ぜい化割れき裂の伝ば形態の一つであるから、まず、すでに提案されている水素ぜい化割れを表現する基本式を選ばなければならない。我々は、最初は、水素ぜい化割れき裂の発生(伝ば開始)を与えるクライテリオンとして、下記の式を考えていた。

$$\sigma_t + AC_H = \sigma^*$$

ここで、 σ_t は、静水圧引張り応力($\sigma_t = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3 = (\sigma + \sigma_r + \sigma_z)/3$)(MPa)、 C_H は水素濃度(個/m³)、 A は定数(次元は、MPa・m³/個)、 σ^* は、水素が存在しないときのき裂先端の材料の破壊強度(MPa)である。つまり、この研究でも、変動応力下の遅れ破壊き裂伝ばの研究(2-A-1参照)と同様、解析の容易さのために、重ね合わせの式を用い、き裂先端の静水圧引張り応力とその場所の水素濃度(応力に換算)の和が、その材料の強度に達したときに、水素ぜい化割れの微小き裂が発生するとしている。もし、水素拡散の駆動力 σ_t が小さいならば、その場所に集積する水素の濃度は大きくなければならず(き裂発生に時間はかかる)、逆に σ_t が大きければ、小さい水素濃度でき裂が発生する(短時間でき裂が発生する)。

ところが、この式を用いて後述の研究を続けているうちに、水素の研究で有名な Oriani (US スチール、後にミネソタ大学教授)により、すでに1974年に、次の式が提案されていることが分かった。

$$\sigma_y + AC_H = \sigma_\theta + AC_H = \sigma^*$$

ここで、 σ_y は、き裂先端の引張り軸方向の応力であるが、き裂分岐を考えるためには、き裂先端の極座標における接線方向の引張り応力 σ_θ を用いる必要がある(図5参照)。水素が存在するとき、水素ぜい化割れき裂の発生を支配する力学パラメータが、 σ_t か σ_y のどちらであるかを判断するのは難しい。 $\sigma_t = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3$ であり、 σ_t に σ_y は含まれているが、力学的意味は異なる。もともと水素は静水圧引張り応力を緩和するために集積するし、引張り応力のみが加わるよりも、それに垂直方向の2つの引張り応力が作用するほうが、材料が割れやすいと思われる。引張り応力のみが作用する水素チャージ薄板平滑試験片($\sigma_x = \sigma_z = 0$)では、水素ぜい化割れは起こらないのではなからうか、など、いろいろ考えたが、一方で、水素が存在しないときの、き裂進展の力学パラメータは σ_y である、とするのが一般である(少なくともぜい性材に対して)。ここで迷っていても、先に進めない。この研究では、水素ぜい化割れのクライテリオン自体を新たに提出するのが目的ではないので、我々は、最終的には Oriani の式を用いることにした。

つぎにき裂分岐現象を説明するには、この式を使いやすいように変形しなければならない。そこ

で、水素脆化割れとき裂分岐を支配する関数として、次式の「水素脆化割れ関数」 $\tilde{\sigma}(r, \theta)$ を定義した。その目的は、この式に、材料、環境、力学因子を取り込んで、 $\tilde{\sigma}(r, \theta)$ の安定性、つまり、き裂の伝ば経路や、とくにき裂分岐の角度 $2\theta_B$ および K_B に及ぼす材料特性と水素濃度の影響を議論するためである。

$$\tilde{\sigma}(r, \theta) = \sigma_\theta + AC_H = \sigma^*$$

つぎに、 σ_θ および σ_τ については、弾性解であれば、よく知られている Irwin の式があるが、上述のように水素と塑性変形領域内の転位の相互作用がき裂分岐の条件の一つであるとすれば、塑性変形領域内の応力分布を表す式（しかも解析しやすい式）が必要である。FEM で応力を数値計算するわけにいかないし、J 積分を用いた式は面倒である。そこで、Hutchinson 教授（ハーバード大学）の論文の式（1968）のうち、図7に示す直線硬化材を仮定した、つぎの式を用いることにした（ただし、変形モードの影響が議論できるように、もとの式が変形してある）。これなら、材料因子（降伏応力 σ_{ys} 、加工硬化特性を表す塑性係数 E_{tan} ）と力学因子（変形モード（開口型）、（面内せん断））の影響を議論することができる。

$$\sigma_\theta = \frac{\eta}{\sqrt{2\pi r}} \sqrt{K_I^2 + 9K_{II}^2} \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta}{2} + \alpha_1\right)$$

$$\alpha_1 = \tan^{-1}\left(\frac{3K_{II}}{K_I}\right), \quad \eta = (2/\sqrt{3}) \sqrt{1-\nu^2} \times \sqrt{E_{tan}/E}$$

$$\sigma_\tau = \frac{\eta}{\sqrt{2\pi r}} \sqrt{K_I^2 + K_{II}^2} \cos\left(\frac{\theta}{2} + \alpha_2\right)$$

$$\alpha_2 = \tan^{-1}\left(\frac{K_{II}}{K_I}\right)$$

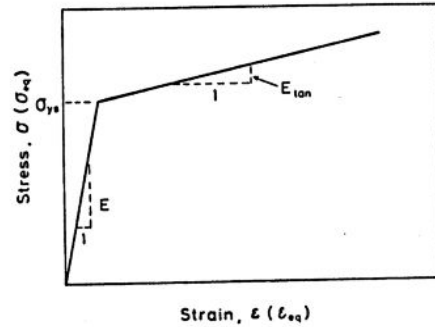


図7

残る問題は、環境因子の1つである水素濃度 C_H と材料因子の1つである転位密度の関係をどう表現するか、ということである。そこで、 C_H を次の式で表した。

$$C_H = C_{H1} + C_{H2}$$

$$C_{H1} = C_0 \exp\left(-\frac{V_i}{kT}\right) = C_0 \exp\left(\frac{\sigma_t \Delta v}{kT}\right)$$

$$C_{H2} = B' \rho = B_1 \varepsilon_{eq} = B_1 \frac{\sigma_{eq} - \sigma_{ys}}{E_{tan}}$$

ここで、 C_{H1} は、静水圧応力 σ_t と水素の相互作用による平衡水素濃度分布を表し、 C_0 は平均（初期）水素濃度、 V_i は静水圧応力と水素原子の相互作用エネルギー（ Δv は、水素原子1個の固溶による体積の増加分）、 k はボルツマン定数、 T は絶対温度である。また、 C_{H2} は、転位にトラップされている水素濃度の分布であり、 ρ は転位密度で相当塑性ひずみ ε_{eq} に比例すると仮定している。 B および B_1 は比例定数である。また、相当応力 σ_{eq} は次式で与えられる。

$$\sigma_{eq} = \frac{\eta\sqrt{3}}{4\sqrt{\pi r}} \sqrt{K_I^2 + 5K_{II}^2 + \sqrt{(4K_I K_{II})^2 + (3K_{II}^2 - K_I^2)^2} \sin(2\theta + \alpha_3)}$$

$$\alpha_3 = \tan^{-1}\left(\frac{3K_{II}^2 - K_I^2}{4K_I K_{II}}\right).$$

$$\begin{aligned} \tilde{\sigma}(r, \theta) = & \frac{\eta}{\sqrt{2\pi r}} \sqrt{K_I^2 + 9K_{II}^2} \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta}{2} + \alpha_1\right) \\ & + A' C_0 \exp\left(\frac{\eta}{\sqrt{2\pi r}} \sqrt{K_I^2 + K_{II}^2} \cos\left(\frac{\theta}{2} + \alpha_2\right) \frac{\Delta v}{kT}\right) \\ & + \frac{B'}{E_{tan}} \left\{ \frac{\eta\sqrt{3}}{4\sqrt{\pi r}} \sqrt{K_I^2 + 5K_{II}^2 + \sqrt{(4K_I K_{II})^2 + (3K_{II}^2 - K_I^2)^2} \sin(2\theta + \alpha_3)} - \sigma_{ys} \right\} = \sigma^*. \end{aligned}$$

Oriani と Hutchnson の式を利用させていただいたが、我々の最終目的は、いかにき裂分岐現象を矛盾なく説明するか、であり、これらの式を組み合わせた、水素脆化割れ関数 $\tilde{\sigma}(r, \theta)$ を用いて議論することに、我々のオリジナリティーがある。水素脆化割れ関数 $\tilde{\sigma}(r, \theta)$ は、平衡論に基づいて定義したもので、き裂分岐とき裂伝ば速度の関係のような動的な挙動を直接表す形にはなっていないが、

$$\frac{\partial(\tilde{\sigma}(r, \theta))}{\partial \theta} = 0$$

という条件から、つぎの実験結果が説明できた（多少、面倒な計算になるので、詳細は省略する。興味のある方は、文献を参照して下さい）。

- (1) 材料の塑性係数 E_{tan} が大きいと分岐角度 $2\theta_B$ が大きくなること（**疑問 7 に対する回答**）,
- (2) 水素濃度が高い（き裂伝ば速度が大きい）と、分岐が始まる時の応力拡大係数 K_B が小さくなること（**疑問 7 に対する回答**）,
- (4) モード 負荷を加えると、**図 8** に示すように、き裂分岐角度が非対称になる（分岐前のき裂進展方向も、水素の拡散経路の非対称性から、通常の脆性破壊き裂の進展方向（引張り応力最大方向）と異なる）。

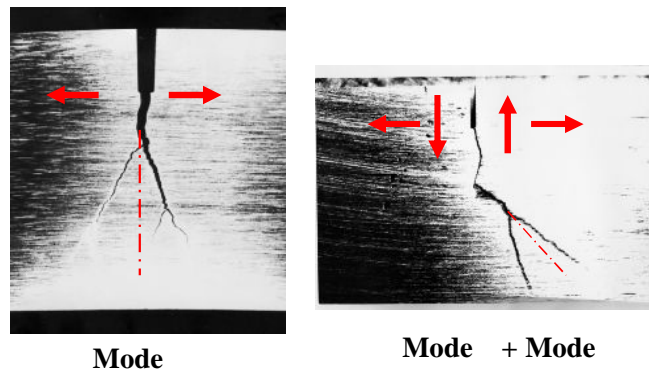


図 8

また、その他の実験から、

(5) あらかじめ水素チャージした材料では、水素の拡散経路が異なるため、分岐角度 $2\theta_B$ が小さくなること (疑問7に対する回答)

(6) 負荷速度が増加すると、転位の水素輸送現象のために水素の分散が起こり、分岐が始まるときの応力拡大係数 K_{IC} が増加すること (疑問7に対する回答), も分かった。

なお、残った疑問点8 (微視的き裂分岐は、巨視的き裂分岐の前触れなのか、これがないと、巨視的なき裂分岐は起こらないのか。) についても実験と検討を行った。遅れ破壊き裂の伝ば経路は粒界であり、粒界の3重点は、常に分岐き裂の核として働く。しかし、き裂分岐の本質が粒内における転位の水素とラップに深く関与しているとすれば、微視的な粒界き裂分岐そのものが巨視的なき裂分岐の引き金となっているとは言えない。かりに微視的分岐が起こったとしても、転位と水素の相互作用によるき裂伝ば速度一定条件が満足されなければ、そのき裂は、巨視き裂として安定に成長できない。結局、 K_{IC} が大きくなれば、転位の粒界への堆積により粒界の応力が大きくなり、粒界割れの頻度が増した (これが微視的分岐となる) というところかもしれない。

いろいろな問題点はあるとしても、以上により、私は、陳効列君とともに、水素ぜい化割れき裂の分岐現象の原因と特性を、ほぼ説明できたと考えている。

なお、溶融金属脆性、応力腐食割れ、脆性破壊におけるき裂分岐については、別に記す。

論文リスト

1. Crack Branching in Delayed Failure, Engineering Fracture Mechanics, Vol.11, No.4, pp.739-751, (1979) (Keijiro Nakasa, Hideo Takei)
2. Effects of Temperature, Initial Stress Intensity Factor and Loading Speed on the Crack Branching in Delayed Failure, Engineering Fracture Mechanics, Vol.13, No.3, pp.667-677, (1980) (Keijiro Nakasa, Hideo Takei, Motoharu Yoshida)
3. 遅れ破壊き裂の枝分かれにおよぼす旧オーステナイト結晶粒径の影響, 日本金属学会誌, 第44巻, 第10号, pp.1156-1163, (1980) (中佐啓治郎, 武井英雄, 吉田基治, 斎藤利之)
4. Effect of Specimen Thickness on the Crack Propagation and Crack Branching in Delayed Failure, Engineering Fracture Mechanics, Vol.16, No.3, pp.387-392, (1982) (Keijiro Nakasa, Hideo Takei, Toshiyuki Saitoh)
5. 遅れ破壊き裂の発生, 伝ばおよび枝分かれに及ぼす2軸荷重の影響, 材料, 第31巻, 第347号, pp.817-821, (1982) (中佐啓治郎, 武井英雄, 斎藤利之)
6. Condition for Stable Growth of Branched Cracks, Engineering Fracture Mechanics, Vol.18, No.4, pp.879-885, (1983) (Keijiro Nakasa, Hideo Takei, Shinji Takemoto)
7. 材料Ni-Cr-Mo鋼の遅れ破壊における粒界き裂の枝分かれ, 日本金属学会誌, 第48巻, 第11号, pp.1060-1067, (1984) (中佐啓治郎, 陳効列, 武井英雄)
8. Ni-Cr-Mo鋼の遅れ破壊におけるき裂の伝ばと枝分かれにおよぼす水素チャージの影響, 日本金属学

- 会誌，第 49 巻，第 10 号，pp.846-853，(1985)（中佐啓治郎，陳効列，武井英雄）
9. Crack Branching Angle of High Strength Steel in Delayed Failure，Engineering Fracture Mechanics，Vo.24，No.4，pp.513-522，(1986)（Keijiro Nakasa，Hideo Takei，Xiaolie Chen）
 10. Ni-Cr-Mo 鋼の水素脆化割れにおけるき裂の枝分かれ，日本金属学会誌，第 50 巻，第 12 号，pp.1061-1067，(1986)（陳効列，中佐啓治郎，武井英雄）
 11. Effect of Hydrogen Charging on the Crack Propagation and Crack Branching in Stress corrosion Cracking of High Strength Steel，Proc. Int. Sympo. on Microstructure and Mechanical Behavior of Materials，Vol.1，pp.253-262，(1986)（Keijiro Nakasa，Xiaolie Chen，Hideo Takei）
 12. Crack Branching in Hydrogen Embrittlement of Ni-Cr-Mo Steel，Proc. Int. Conf. on Fracture and Fracture Mechanics，pp.692-696，(1987)（Xiaolie Chen，Keijiro Nakasa）
 13. モ - ド I モ - ド□混合負荷における遅れ破壊き裂の伝ばとき裂の枝分かれ，日本機械学会論文集，第 53 巻，第 489 号，A 編，pp.935-940，(1987)（陳効列，中佐啓治郎）
 14. Crack Propagation and Crack Branching in Delayed Failure under Mixed-Mode I-II Loading，JSME International Journal，Vol.30，No.270，pp.1913-1918，(1987)（Xiaolie Chen，Keijiro Nakasa）
 15. Effect of Mixed Mode Loading on the Crack Propagation Direction in Hydrogen Assisted Cracking，Engineering Fracture Mechanics，Vol.33，No.1，pp.133-141，(1989)（Xiaolie Chen，Keijiro Nakasa）
 16. き裂の分岐・曲折現象と破壊力学，日本金属学会会報，第 28 巻，第 9 号，pp.753-759，(1989)（中佐啓治郎）

研究回顧・随想

1. この研究も，試行錯誤の連続で，最初からきちんとした研究方針などではなく，興味のままに研究を続けたというのが本当である。最初は力学的な説明を重要視していたが，途中でそれでは現象解明には不十分であることに気がついた。振り返れば，かれこれ 10 年にわたって研究したことになる。その間，学会・研究会で，多くの研究者から示唆に富んだご意見をいただいた。中には厳しいものもあったが，それも大変参考になった。今は故人になられたが，福岡大学の百武 秀 先生には，私のき裂分岐の研究に大変興味を持っていただき，感謝している。
2. 水素ぜい化割れの分岐に限らず，自然界・人間界には，さまざまな分岐現象がある。猿と人間が分かれて暮らすようになったのはなぜか，どのような環境の変化があったのか。地球上に，「神の創造物」としか思われぬ多様な生物が生存するのは，どのようにして分岐が起こったためなのか，そこに居合わせるできないから観察はできない。人間が派閥をつくり，醜

い争いを繰返すのはなぜか。分岐現象を突き詰めて考えれば、その前段階を支配するものの本質も出てくるかもしれない。

分岐現象には、いろいろなものがある。下図は、戦前の広島市の地図である（赤い点は、原子爆弾の投下目標となった相生橋のT字形橋である）。広島は、毛利元就の孫の輝元の築城以来、太田川のデルタ上に発展した街である。太田川が氾濫を繰返したため、左端の川は、現在は真直ぐで広い太田川放水路に改修されている。一方、左下の図は、高強度ニッケル・クロム・モリブデン鋼の遅れ破壊（水素ぜい性）で起こった、き裂の分岐形状である（図1の写真の裏焼き：試験片の反対側）。川の分岐も、き裂の分岐も、蓄積されたエネルギーの解放という点では共通の現象であるが、偶然とは言え、両方の形はよく似ている。き裂の分岐を同じ形に再現することはできないから、これは、広島という地で、私がき裂の分岐形態に関心をもったことに対する、「神の贈り物」として、この試験片を今でも大切に保管している。



この 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/>