

## 変動応力下における遅れ破壊き裂の発生(+研究回顧)

広島大学名誉教授 中佐啓治郎

### 1. 研究の目的

高強度鋼の遅れ破壊(水素ぜい化割れ)は、構造物に応力集中部(切欠き,き裂,表面欠陥など)があり,腐食雰囲気が作用すれば,静的な荷重下で十分に起こりうる。過去においては,たとえば,長大橋の高張力鋼板の摩擦接合用高強度ボルトや,新幹線のレールを枕木(コンクリート製であるが)に止めていた高強度ボルトで,施工後しばらくして遅れ破壊が頻繁に起こり,大きな問題になったことがある。これは,ボルト首下部(R部),ねじ底などが応力集中源となるためである。強度の大きいボルトを使用できれば,作業の効率化,省エネルギー・省資源化が図れるが,遅れ破壊が起こると大事故につながるため,現在では,引張り強さが1100MPaを超えるボルトの使用は制限されている。一方,実際の構造物には,静的な荷重に変動荷重が加わったり,温度変化に伴う熱応力の変動が加わったりしている場合が多い。もし,変動荷重の重畳により遅れ破壊が起こりやすくなるとすれば,これは材料選択・強度設計・保守点検のすべてにかかわる大きな問題になる。上記の鋼板やレールを固定するボルトにも,変動荷重が加わっていたはずである。したがって,高強度鋼の変動応力下における遅れ破壊き裂の**発生挙動**を明らかにすることは,高強度鋼を使用する場合の重要な課題であり,これが我々の研究の目的であった。

つぎに,切欠からき裂が発生すれば,その進展はすでに述べたき裂の**伝ば挙動**にしたがうであろう。そこでは,変動応力の重畳によって,き裂の伝ば速度が遅くなったが,その程度はそんなに大きくないから,き裂が停止してくれなければいつかは破壊が起こる。それでは,遅れ破壊き裂の発生寿命は変動応力の重畳によって長くなるであろうか,短くなるであろうか。それを確かめ,き裂発生機構を明らかにすることが,この研究のもう一つの目的であった。

なお,材料の強度が小さい(たとえば引張り強さが1100MPa程度かそれ以下),腐食性雰囲気が弱い,変動応力の変動幅が大きくて繰返し速度が大きい,などの条件下では,疲労によるき裂の発生が起こるようになり,場合によっては,疲労破壊と遅れ破壊のき裂発生が競合して起こる,あるいは一方が他方に影響する(変動応力下におけるき裂伝ば速度の加算側で用いたおよびの意味と同様),さらには,腐食雰囲気が強い場合には,腐食溶解が疲労き裂の発生と進展を助長するあるいは繰返しが腐食溶解を助長するという,いわゆる腐食疲労と呼ばれる複雑な現象が起こるのである。実用的には,このような状況で機械構造物が用いられる場合が多いから,その場合の寿命予測と設計は重要である。

しかし,我々が行った研究は,そのような場合を取り扱ったものではなく,あくまで,遅れ破壊き裂の発生に的を絞ったものであった。つまり,何とかして遅れ破壊を防ぐことはできないであろうか,強度が1100MPa以上の鋼でも安全に使用できないであろうか,という,材料研究者としての気持ちがある一方で,いや,変動荷重が加わる場合には,1100MPaという基準も危ないのではなかろうか,遅れ破壊には用心が必要,という,機械技術者,材料強度研究者としての気持ちもあった。いずれの立場に立つとしても,遅れ破壊の本質を探ることは絶対に必要である。高強度鋼では,応力の変動範囲が小さくて繰返し速度も小さければ,遅れ破壊が優先的に起こり,

これは、「腐食疲労」ではなく、「変動応力下の遅れ破壊」と呼べるであろう。「変動応力下の遅れ破壊」と「腐食疲労」の境界は明瞭ではないが、この現象を明らかにしておけば、中強度材料の腐食疲労き裂の発生機構を考察する場合にも役立つはずである。

## 2. 実験経過・結果・公表論文（第一次の研究）

すでに、「変動応力下における遅れ破壊き裂の伝ば挙動」については、破壊力学を適用して考察したが、ついでに「変動応力下における遅れ破壊き裂発生挙動」も調べておこうと思い、1972年頃から研究を始めた。ただし、切欠きを取り扱う場合には、破壊力学的パラメータの応力拡大係数ではき裂発生寿命を整理できない。最初は、見かけの応力拡大係数 $K_a(\rho)$ を用いて実験結果を整理したが、切欠底の引張り応力を直接表すものでないので、少し無理だったようである。

さて、最初の実験（論文1）によると、特別の場合を除き、変動応力の重畳により、遅れ破壊き裂の発生は早まるという結果が得られたので、その後の研究課題は、それが材料条件（材料の種類や熱処理）、力学条件（変動応力の付加条件：応力振幅、繰返し速度、応力波形、など）、環境条件（温度、腐食雰囲気の種類など）によって、どのように異なるか、を調べることである。私が、最初の論文を書いたころ、広島工業大学に勤務されていた木戸光夫先生が、武井英雄教授を受け入れ教官として我々の研究室で一年間研究されることになった。3人で相談して、「変動応力下の遅れ破壊のき裂発生」というテーマで共同研究を行うことになったが、この研究は、その後の「部分除荷法による遅れ破壊強さの向上」という研究につながった。

ここでは、結果の一部のみを紹介する。静的な応力に微小な変動応力を重畳すると、静的な応力のみが加わる場合（通常の遅れ破壊試験）に比べて、遅れ破壊強度は低下する。低下の程度は、材料によっても異なるが、変動応力の振幅および繰返し速度が大きいほど大きくなる。遅れ破壊強度が低下する理由は、変動荷重の重畳が、切欠先端の保護皮膜を破壊して腐食反応（水素の発生）を活性化させるため、および疲労被害を蓄積させるため、と考えられる。興味のある方は、下記の公表論文をご覧ください。

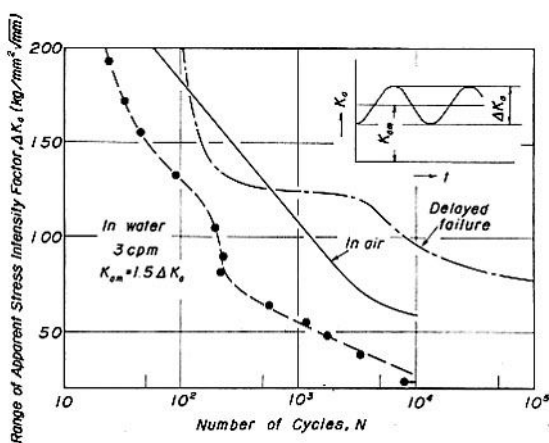


Fig.6 Relation between the range of apparent stress intensity factor and the number of cycles at fatigue crack initiation in water.

（文献 1）

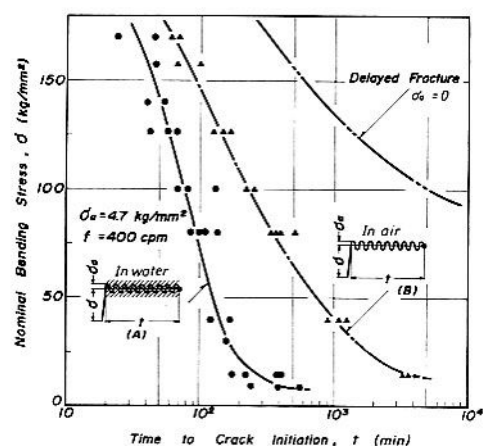


Fig.11 Decrease in crack initiation time and lower limit stress by superposition of small repeating stress.

（文献 3）

## 公表論文

1. 切欠きを有する高強度鋼材の水中における疲労き裂の発生, 日本金属学会誌, 第 39 巻, 第 4 号, pp.327-333, (1975) (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)  
[文献 1 の英訳](#)
3. 高強度鋼の遅れ破壊き裂の発生におよぼす微小変動応力の影響, 日本金属学会誌, 第 40 巻, 第 7 号, pp.744-751, (1976) (中佐啓治郎, 木戸光夫, 武井英雄)
4. 各種高強度鋼の変動応力下における遅れ破壊, 鉄と鋼, 第 65 巻, 第 5 号, pp.535-541, (1979) (木戸光夫, 中佐啓治郎, 武井英雄)
5. Delayed Failure under Repeating Stress in Various High Strength Steels, Trans. ISIJ, vol.21, No.?, pp.846-851, (1981) (Mitsuo Kido, Keijiro Nakasa, Hideo Takei) [文献 4 の英訳](#)
6. 変動荷重下での遅れ破壊き裂発生に及ぼす応力波形の影響, 材料, 第 33 巻, 第 375 号, pp.1493-1498, (1984) (木戸光夫, 伊藤尚, 中佐啓治郎, 武井英雄)

## 研究経過・実験結果・公表論文 (第二次の研究)

変動応力下における遅れ破壊の研究もかなり長く続けていたので, テーマも品切れになりかけていたころ, この問題に再び真剣に取り組まなければならない状況になった。1993 年に, 鉄鋼協会の鉄鋼基礎共同研究会のテーマで「高強度鋼の遅れ破壊」が取り上げられ, 「高強度鋼の遅れ破壊研究会」(主査: 早稲田大学 南雲道彦教授)が発足した。実は, 1970 年に, 鉄鋼基礎共同研究会で「遅れ破壊部会」(部会長: 大阪大学 藤田英一教授)が発足し, 5 年間にわたり活発な研究が行われており, その成果は, 「水素による遅れ破壊の機構」としてまとめられている。私は, 1968 年にオースフォーミング鋼の遅れ破壊の研究を始めてはいたが, 破壊靱性値の研究に力を入れていたので, 遅れ破壊の研究を本格的に始めたのが 1970 年頃からであり, もちろん部会のメンバーではなかった。しかし, この部会の活動はよく知っており, 上記の報告書を買って何回も読んだ。それから 15 年以上たってから, 同じような目的の研究会ができたのは, 省エネルギーや地球温暖化の問題を背景として, 鉄鋼の高強度化の社会的要請は強く, その最大の障害となる遅れ破壊, 水素脆性の解決がクローズアップされて来たためである(南雲先生が書かれた報告書の前文による)。もちろん, 完全な解決はできないが, 少なくとも, 敵を手なずけるためには, 敵をよく知らなければならない。この頃, 水素の可視化の技術と質量分析器の発達(精度のよい水素放出曲線から, 水素のトラップサイトの特定, 水素吸収量の測定ができる)もあり,

あらたな知見が得られる可能性もあった。研究会の発足には、勝亦正昭（神戸製鋼）、櫛田隆弘（住友金属）両氏が大変な努力をされたということであった。私は、幹事の一人であった野末章先生（上智大学）から、参加の呼びかけをいただいた。私が研究会であらたな貢献ができるかどうかは不安であったが、声をかけていただいたのは大変ありがたいことであり、喜んで参加した。

ところで、野末先生を中心とした私どものグループの課題は、遅れ破壊に及ぼす「環境および応力の役割」を明らかにすることであった。応力の役割については、別途述べる「水素ぜい化割れき裂の分岐」で、Prof. Oriani(USスチール、後にミネソタ大学)の理論(R.A.Oriani and P.H.Josephic, Acta. Metall.,22(1974), 1065.)が簡単で使いやすいことが分かっていたので、野末先生と相談して、この式を用いて各委員の実験データの整理を行うことにした（なお、野末先生も、ミネソタ大学で Visiting Professor として過ごされたことがある）。水素脆化割れのき裂発生を表すOrianiの式の意味は、

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

である。ここで、 $\sigma_y$ は、切欠き先端の引張り軸方向の応力、 $C_H$ は水素濃度、 $A$ は定数、 $\sigma^*$ は、水素が存在しないときのき裂先端の材料の破壊強度である。

私の研究に関しても、この式を元にして、変動荷重の重畳と切欠き先端の保護皮膜の破壊を取り込んだ遅れ破壊き裂発生寿命の表現式をつくることにした。

## 公表論文

7. 高強度鋼の遅れ破壊強さに及ぼす変動荷重の影響，中佐啓治郎，加藤 昌彦，「遅れ破壊解明の新展開」(社)日本鉄鋼協会，材料の組織と特性部会，高強度鋼の遅れ破壊研究会（1997），pp.94-99.

これは、下記の Doig らの論文と上記の Oriani らの論文を参考にして、変動荷重が加わらない場合と加わる場合の両方について、切欠からの遅れ破壊き裂発生寿命を半定量的に表現したものである。オリジナルな内容であるが、鉄鋼協会の論文投稿規程では、研究会の報告書に記載された記事は既出版とみなされて、論文としては投稿できない、ということであった。そのことは事前に言われていたので、報告書がまとまる前に投稿しなければならなかったが、それをしなかったのは私の怠慢であり、納得はしている。

- P. Doig and G.T.Jones, Metal. Trans., 8A(1977), 1993.

この研究会が終わったあとも、何とか遅れ破壊を防止できる方法はないかと考え、鉄鋼協会であらたに発足した別の研究会（その名前を忘れたので、記録を調査中）の中で、次の研究を行った。

8. 高強度鋼の遅れ破壊強さに及ぼす変動荷重及び動ひずみ時効の影響，中佐啓治郎，加藤 昌彦，鉄と鋼，vo.85，No.6，(1999) pp.479-485.



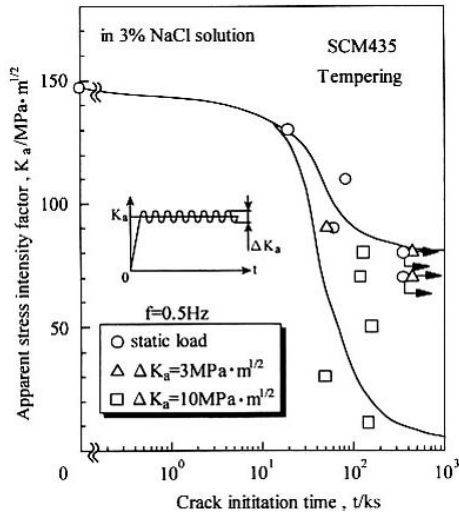


Fig. 6. Relationship between apparent stress intensity factor and crack initiation time for SCM435 steel under repeating load.

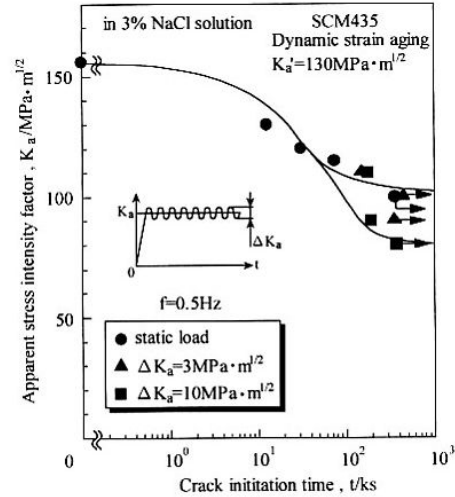


Fig. 9. Effect of dynamic strain aging at 673 K on the relationship between apparent stress intensity factor and crack initiation time for SCM435 steel under repeating load.

1. 静応力に変動応力を加えると、遅れ破壊き裂発生強度(寿命)は大きく低下する(左上図: これは、以前の結果と同じ)
2. 遅れ破壊試験を行う前に、動的ひずみ時効(炭素や窒素原子の拡散が活発になる 300 ~ 400 で、一定の応力を加えたままで、一定時間保持する)を行うと、右上図のように、変動応力が加わらない場合の遅れ破壊強度が上昇し、変動応力が加わる場合でも、遅れ破壊寿命が大きく低下しない。このことは、かりに切欠先端の保護皮膜が変動応力により破壊されて水素が内部に容易に侵入しても、動的ひずみ時効という前処理により、水素の集積とき裂発生を阻止する何らかの機構が働いていた、と考えられる。可能性のある機構として、炭素や窒素原子による刃状転位の固着が転位の応力場を緩和するため、粒界に堆積した転位群の応力集中も緩和し、粒界割れを防いでいる(これは、変動応力の有無にかかわらず有効である)ことが考えられる。この機構を模式的に示すと、下図のようになる。この考えが正しいかどうかは、堆積転位群の変化の様子の観察ができないので証明はできないが、変動荷重が加わる場合に遅れ破壊強度があまり低下しない理由を説明するには好都合である。

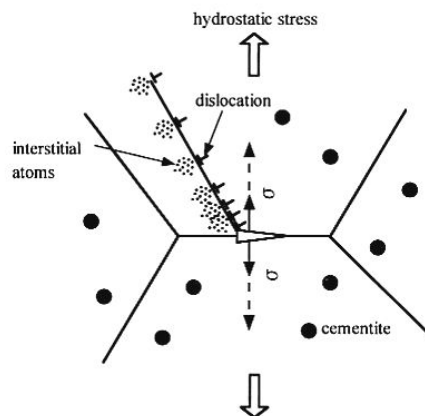
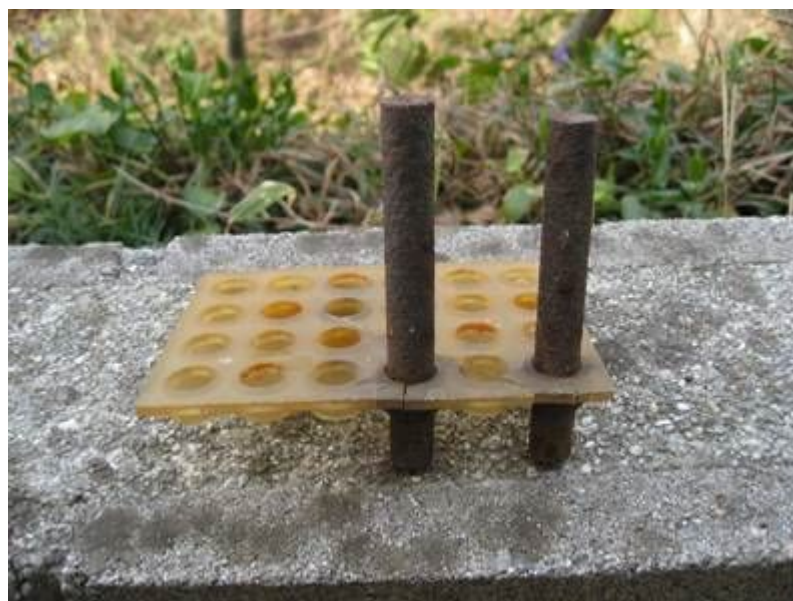


Fig. 13. Illustration of decrease in grain boundary stress by the formation of atmosphere of interstitial atoms around piling dislocations.

つぎに、炭素や窒素が有効であるなら、それらよりも原子半径の小さい「ほう素」の影響も調べてみようと思った。ほう素が転位を固着することは聞いたことはないが、ほう素が粒内に固溶していれば、起こっても不思議ではない。また、粒界へ偏析しやすければ、水素の粒界への集積を妨げるか、あるいは水素の存在下で粒界の強度に影響するか、のどちらかであろう。ものは試しで、ほう素を微量含むばね鋼（SUP11A）について、同様な実験を行った。ほう素の添加は焼入れ性を高めると教科書に書いてある。焼入れ性と硬さは別問題であるはずであるが、焼入れした試験片は相当に硬く、焼戻し温度 200 が低すぎたのか、研削砥石が合わなかったせいか、表面に研削割れができる。おまけに、動ひずみ時効処理をしようとして負荷をかけると切欠試験片が破壊することがある、破断時間のばらつきが大きい、などで、あまり信頼性のあるデータは得られなかった。一方で、効果があったと思われる結果もあり、もう1年、実験をしてみようかとも思ったが、結局できなかった。その理由は、残念ながらこの時代には、鋼材の切断、鍛造（外注）、焼なまし、試験片の切削加工・研削、焼入れ・焼戻し、時効処理という準備作業と遅れ破壊試験（時間がかかる）、という、ハードな実験を頼める学生がいなくなったことにある。かくして、ほう素の影響についての研究は、そのままになってしまった。

ところで、「高強度鋼の遅れ破壊研究会」では議論が活発に行われ、非常に有意義であった。大学・鉄鋼関連企業の主だった遅れ破壊研究者が集まり、この問題に真剣に取り組んだ。とくに、直属幹事をされていた櫛田隆弘さん（住友金属工業（株））は、研究会のお世話をされる一方で、天候や温度が異なる各地に試験片を曝露し、質量分析器で水素吸収量を測定することを提案された。私たちは、試験片を自宅の庭などに置いて外気に曝露し、ドライアイスを含めた箱に試験片を入れて櫛田さんの所に送り、櫛田さんは、拡散性および非拡散性水素の放出特性と全水素含有量の変化、腐食生成物（さび）との関係などを調べられた。写真は、そのときの曝露試験片の名残である（2013年現在、家の庭の片隅にまだありました。蛇足ですが、錆びによる体積膨張で、プラスチックの設置台の穴から縁に向かって割れができています）。測定結果とその考察については、報告書を参考にさせていただきたい。



当時から、「水素脆性」は、古くて新しい問題と言われていた。すなわち、割れの機構がさまざまに不明な点が多い（水素吸着説，ガス圧説，格子脆化説，すべりの促進，など），防止法に決め手が見つからない場合がある，原子半径が小さくて神出鬼没，時代のいろいろな局面であらたな問題として現れる（めっき脆性，酸洗いによる水素の吸収，溶接部の低温割れ，ロールの置き割れ，高強度ボルトの遅れ破壊，高強度アルミニウム合金の応力腐食割れ（＝水素脆性），油井鋼管・石油精製用圧力容器の水素誘起割れ，銅の水素病，チタン合金の水素化物形成，など）である。燃料電池などで，水素を積極的に利用しようとしている現代にあっても「水素脆性」が顔を出してきており，容器材料の選択と水素脆性の防止が重要な研究課題になっている。

### 静的な応力に微小変動応力を加えることは，温度や圧力を変えることと同様，環境因子の1つを変えることに相当する？

静的な負荷で破壊が起こる現象には，オーステナイト系ステンレス鋼の応力腐食割れ（アノード溶解による），高強度鋼の遅れ破壊（水素脆性），クリープ破壊（高温で起こる），ガラスやセラミックスなどで起こる静疲労（表面へ水分が吸着するために起こると言われていて，疲労という名前がつけられているが繰返し応力が加わらなくても起こるし，繰返し応力が加わってもその影響は少ない）がある。一般に，ある材料が，静的な応力を受けて時間とともに破壊に至る変化が進行しているとき，その材料に微小な変動応力が加わると，その変化は，何らかの影響を受けるはずである。したがって，変動応力下における破壊現象を調べれば，逆に静的な応力のみが加わる場合の破壊の機構も明らかになり，今までは見えなかった破壊機構が見えてくる可能性がある。

応力腐食割れや遅れ破壊を例にとると，微小変動応力の重畳によって表面の腐食反応や変形が促進されれば，破壊は早く起こる。したがって，静的な応力に微小変動応力を加えることは，力学因子を変える効果というよりも，温度，圧力，雰囲気などの環境因子を変えることと類似の効果を与える可能性がある。ただし，前述のように，変動応力の振幅が大きくなったり，繰返し速度が速くなったりすると，遅れ破壊（応力腐食割れ）と通常の疲労破壊が互いに干渉する現象，広義には「腐食疲労」の問題になる。ここでは，たとえば，繰返し応力が腐食反応を促進して腐食ピットの形成を早め，腐食ピットの形成が応力集中をもたらし疲労き裂の発生を早める，腐食溶解が疲労き裂の伝ぱに重なる，などの現象が起こる。したがって，微小変動応力の重畳が環境因子の変化と同等の効果をもつ，というのは，変動応力の大きさが小さく，それが破壊の機構自体に影響しない場合の話である。

ゆさぶりをかけられたときに差が出るのは，我々人間でも同じである。何も無いときには，だれも落ち着いていることができるが，何かの事件が起こると，平常心ではおられなくなる。もちろん，何が起こっても泰然自若としている人もおられるが，パニックに陥りやすい人もいる。私も，環境の変化には非常に弱く，すぐに不安になってしまい，態度に現れる。つまり，外部から揺さぶられると，実は自分が小心者であったことが他人にすぐにばれてしまう。

ホームページに戻る

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