

大阪大学大学院 工学研究科 学生員 ○河野 拳也  
住友重機械工業株式会社 正会員 柴田 誉  
大阪大学大学院 工学研究科 正会員 堤 成一郎

## 1. 諸言

機械・構造物の損傷要因の多くは疲労に起因するとされており、疲労亀裂の進展速度を遅延させる技術の開発が精力的に進められている。例えば、Putri<sup>1)</sup>らは、疲労亀裂面内に腐食促進剤（65%硝酸）を注入して亀裂面に腐食生成物を堆積させ、荷重レベルや疲労亀裂長さに応じた寿命延伸効果の大小を報告している。また、柴田ら<sup>2,3)</sup>は、35%硝酸の腐食生成物を活用した疲労寿命延伸効果に関して、荷重条件および腐食時亀裂長さを変化させた実験を SENT 試験片に対して実施した。具体的には、応力比が負の荷重条件下や2種類の疲労予亀裂長さにおける延伸効果を確認するとともに、亀裂面に堆積した腐食生成物量を定量評価し、腐食生成物量とくさび効果による寿命延伸効果との間に相関関係があることを明らかにした。しかし検証は腐食進行性のある赤錆のみにとどまっており、より安定かつ強固な力学特性を示すと考えられる黒錆への転換が寿命延伸効果に及ぼす影響は明らかにされていない。

そこで本研究では、既往の研究に基づき、それぞれ2種類の予亀裂長さ( $a_{co}=3.0\text{mm}, 0.4\text{mm}$ )および荷重条件( $R=0.1, -1.0$ )に対して、35%硝酸によって生成された赤錆を黒錆化することによる寿命延伸効果を明らかにすることを目的とした。

## 2. 実験方法

疲労亀裂進展試験には、Fig.1 に示す板厚 3mm、幅 21mm、切欠き深さ 3mm の SENT 試験片を採用した。油圧サーボ式疲労試験機を用いて、室温、大気中で、応力比  $R=0.1$ （最大荷重 110MPa）または  $-1.0$ （最大荷重 70MPa）、三角波形の軸力繰返し荷重（腐食養生時以外：16Hz、腐食養生時：0.1Hz）を載荷し、切欠き底から疲労亀裂を発生・進展させる。腐食および疲労試験は以下の手順で実施した。まず初めに疲労予亀裂 ( $a_{co}=3.0\text{mm}$  もしくは  $0.4\text{mm}$ ) を試験片に導入する。続いて、亀裂面内に腐食生成物を堆積させるため、35%硝酸を亀裂面内に注入する。この時、荷重条件は同一としたまま、試験速度のみ 16Hz から 0.1Hz に低下させる。疲労亀裂側面には硝酸の漏出および側面からの積極的な腐食防止のために透明テープを貼付し、毛細管現象および亀裂開閉口に伴うポンプ作用により、亀裂面内を硝酸で満たす。亀裂面内における腐食量の制御は、疲労予亀裂長さや亀裂面の湾曲状況、亀裂表面粗さによって実腐食面積が異なり、必ずしも注入した硝酸量と対応しない。そのため疲労亀裂先端から約 1mm の位置および試験片背面に貼付したひずみゲージの最大値・最小値変化量から腐食反応を推測し、同条件の赤錆における試験と同等と考えられる腐食量に達した後に、市販の黒錆転換剤の注入を行った。

## 3. 腐食疲労試験結果

Fig.2 に各疲労亀裂進展試験で得られた疲労亀裂の成長曲線（以降、 $a-N$  関係）を示す。ただし、同荷重または腐食時亀裂長さ条件の赤錆における結果を図中の赤破線で、黒錆化の結果を図中の青実線で、また非腐食における疲労試験結果を+と黒の実線によって示している。まず Fig.2 d) より、赤錆試験では非腐食よりも寿命が延伸していることが確認できるが、亀裂は進展を継続し、破断にまで至ることが確認できる。一方、同条件

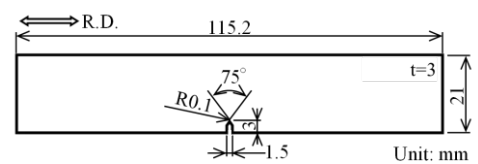


Fig.1 Configuration of SENT specimen

の黒錆化した試験体では、亀裂が停留しており、赤錆試験における結果よりも大きな寿命延伸効果が得られることが示されている。他方、Fig.2 a), b) および c) では、赤錆、黒錆どちらの試験も亀裂が停留していることが確認できる。以上から、亀裂面腐食によって寿命延伸効果が得られるが、その効果は黒錆化によってさらに大きくなることが示された。すなわち、亀裂面腐食生成物は黒錆に転換された後も十分に荷重を受け持つことが確認された。これによって腐食進行性がなく、緻密な黒錆を本技術に活用する有用性が示されたといえる。

#### 4. まとめ

本研究では荷重条件および亀裂長さの異なる4種類の条件に対して、亀裂面腐食生成物を黒錆化することによる寿命延伸効果の実験検証を行った。以下に得られた知見を示す。

- 1) 黒錆化した亀裂面腐食生成物が荷重を受け持つことで、赤錆と同様もしくはそれ以上の寿命延伸効果を確認できた。
- 2) 腐食生成物量が同程度の赤錆による寿命延伸効果と比較して黒錆化した場合の方が寿命延伸効果は大きい結果もあった。そのため、緻密で圧縮されにくく、また腐食進行性のない黒錆を本技術に活用する有用性が示された。

今後は破断後の試験片断面形状の計測結果から腐食生成物量と寿命延伸効果との相関関係や黒錆化による密度上昇など寿命延伸効果の向上要因に関して定量的な評価を行っていく。

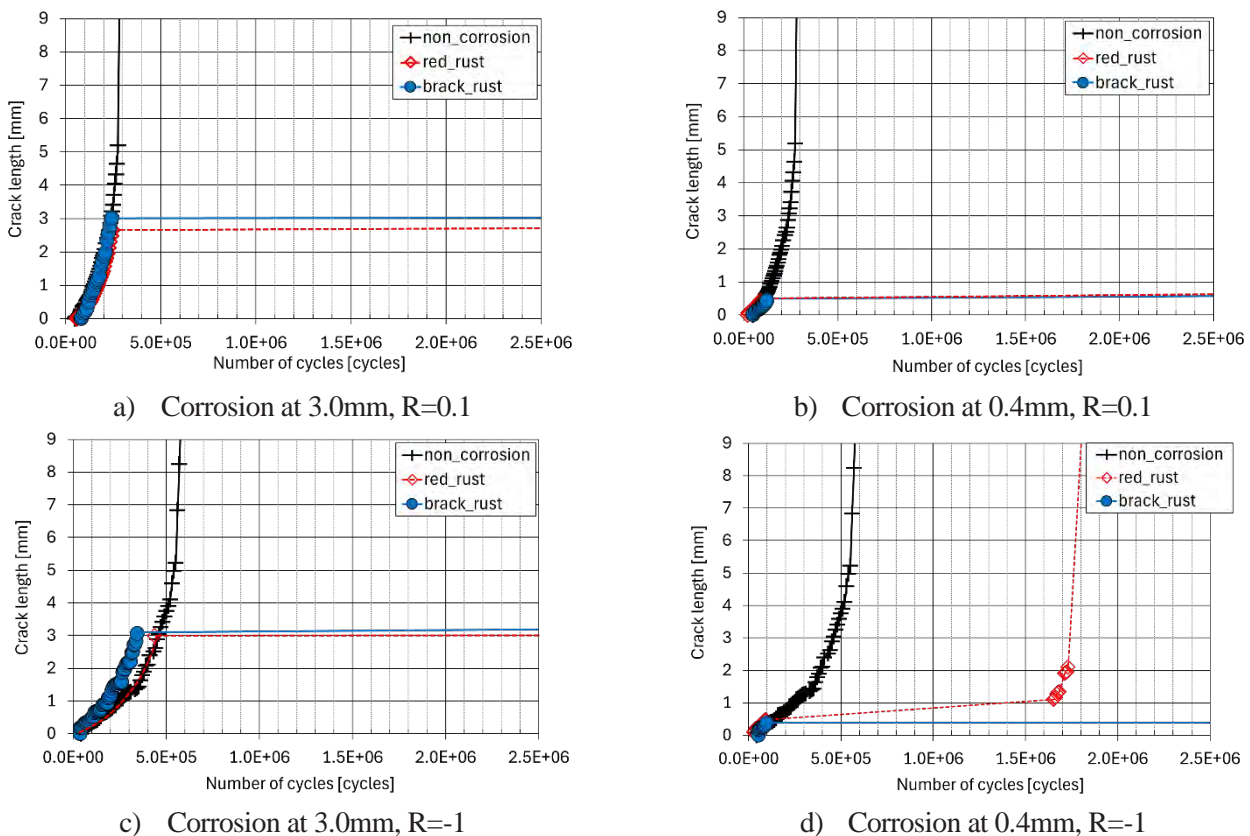


Fig.2 a-N relationships by each test condition

#### 参考文献

- 1) Putri, C., A., Tateishi, K., Shimizu, M. and Hanji, T.: Retardation of fatigue crack growth by corrosion accelerator injection, *Steel Construction Engineering*, 28(112), 111-116, 2021.
- 2) 柴田誉, 羅鵬軍, 佐藤啓介, 米澤隆行, 堤成一郎: 鋼材の疲労亀裂進展挙動に及ぼす硝酸による亀裂面腐食量の影響 「材料」, Vol.72, No.12, pp.873-878, Dec.2023
- 3) 柴田誉, 河野拳也, 佐藤啓介, 堤成一郎: 鋼材の硝酸腐食を活用する疲労寿命延伸技術に及ぼす応力比と亀裂長さの影響, *溶接学会論文集*, 第43巻, 第2号, pp.337-348, 2025.