

機械構造用高強度鋼の超長寿命域における 疲労欠陥の X 線 CT による検出

実験責任者 株式会社デンソー 材料技術部 第6材料技術室
宮本 宣幸

共同実験者 名古屋大学 工学部
秋庭 義明
中村 亜有子

1. 緒言

近年における機械構造物の延命化や、操業の高速度化に伴い、超長寿命域（荷重の繰返し回数が 10^9 回以上）での高精度な疲労特性の把握が必要となってきた。超長寿命域での破壊形態は、従来の表面起点型とは異なり、内部の欠陥を破壊起点とすることから、その検出は極めて困難である。そこで、SPring-8 での高エネルギー X 線を利用した高精度な X 線 CT を適用することが可能であれば、十分な精度で内部のき裂が検出でき、内部き裂の発生条件および内部き裂の進展機構が明らかにできる可能性があるものと考えられる。

2005B 期における測定では、最小直径 $\phi 1.2\text{mm}$ の JIS SUJ2 試験片を疲労試験に供試した後、BL20XU にて X 線エネルギー 60keV 、回転角度 0.2deg （透過像 900 枚）、露光時間 1.2sec の条件で CT 撮影を実施した結果、約 $10\mu\text{m}$ の介在物は同定できたものの、微小内部き裂（ファセットき裂）の測定はできなかった。

そこで今回は、より大きな介在物を内在するクロムモリブデン鋼（SCM435）試験片を最小直径 $\phi 0.7$ にまで細径化することにより X 線エネルギーを 37.7keV とし CT 撮影を行った。その際、各種応力レベルにて疲労試験を実施することにより内部疲労き裂の発生限界応力（疲労限度）の存在確認を試みた。

2. 実験方法

2.1 材料および試験片

供試材はクロムモリブデン鋼 JIS SCM435（化学成分 [mass%] : Fe96.757, C0.99, Si0.18, Mn0.4, Cu0.13, Ni0.09, Cr1.4, 他 0.053）である。Fig.1 に試験片形状を示す。すべての試験片表面は、放電加工による精加工をした後、エメリー紙で #240 から #2000 まで研磨した。最後に $1\mu\text{m}$ と $0.3\mu\text{m}$ のアルミナでバフ研磨を施し、鏡面に仕上げた。なお、本研究では内部介在物を起点としたき裂を観察することを目的としているため、研磨による残留応力の除去は行っていない。X 線回折装置（Mac Science, M21X）を用いて研磨後の試験片表面の残留応力を測定した結果、約 900MPa の圧縮残留応力が導入されていた。

2.2 疲労試験

疲労試験は超音波疲労試験機USF2000を用いて実施した。試験機をハッチ横に設置することにより、任意の繰返し数にて疲労試験を中断し、適宜CT撮影を実施した。なお、試験はすべて室温、大気中で行った。

疲労試験の応力条件および CT 撮影に供試する繰返し数は、あらかじめ得た疲労寿命線図を基に、振幅応力 $\sigma_a = 901\text{MPa}$ に対し、 5×10^5 , 1×10^6 , 2×10^6 , 3×10^6 , 5×10^6 , 1×10^7 , 2×10^7 , 3×10^7 , 4×10^7 とした。

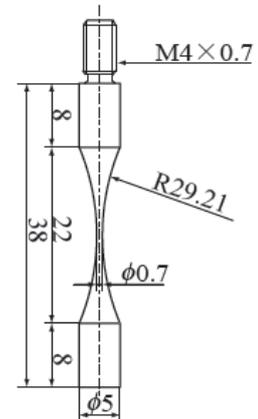


Fig.1 Dimension of specimen

2.3 CT 撮影

SPring-8 のビームライン BL20XU にて、試験片中央部分の CT 撮影を行った。エネルギーは 37.7keV である。試験片を 0.12deg ずつ回転させ透過像を撮影し、各ステップ角度における透過像を再構成させることによって、 $2000\text{pixel} \times 2000\text{pixel} \times 1311\text{pixel}$ の 3 次元の pixel の集合体を得た。このときの 1 pixel あたりの寸法は $0.47\mu\text{m}$ である。

上述したように、疲労試験を中断した試験片を適宜、CT 撮影に供試した。なお、微小内部き裂の開口量は極めてわずかである事が推察されるため、一部の試験条件に対しては、専用治具を用いて引張予荷重を負荷した状態での CT 撮影も実施した。専用治具の概略図を Fig.2 に示す。

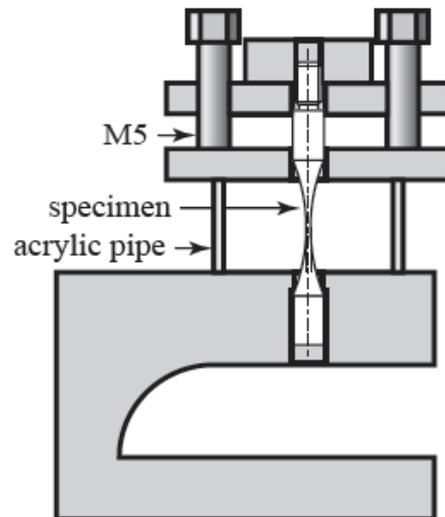


Fig.2 Extension apparatus

3. 実験結果および考察

3.1 SEM 観察結果

後述する CT 撮影結果の比較検証のため、CT 撮影を実施した試験片に対し、そのまま破断するまで疲労試験を継続した ($\sigma_a=901$ MPa, $N_f=4.7 \times 10^7$ cycle にて破断). 破面写真を Fig.3 に示す. なお, 破面観察には走査型電子顕微鏡 (SEM, JEOL 製 JSM-6330F) を用いた.

疲労破壊の起点 (Fig.3(a)中の領域 A 内) を拡大した(b)から明らかなように, 起点部には $5\text{-}10\mu\text{m}$ 程度の介在物が認められた. さらに, 介在物周り (特に介在物右側) にはファセット破面 (微小内部き裂) が認められた.

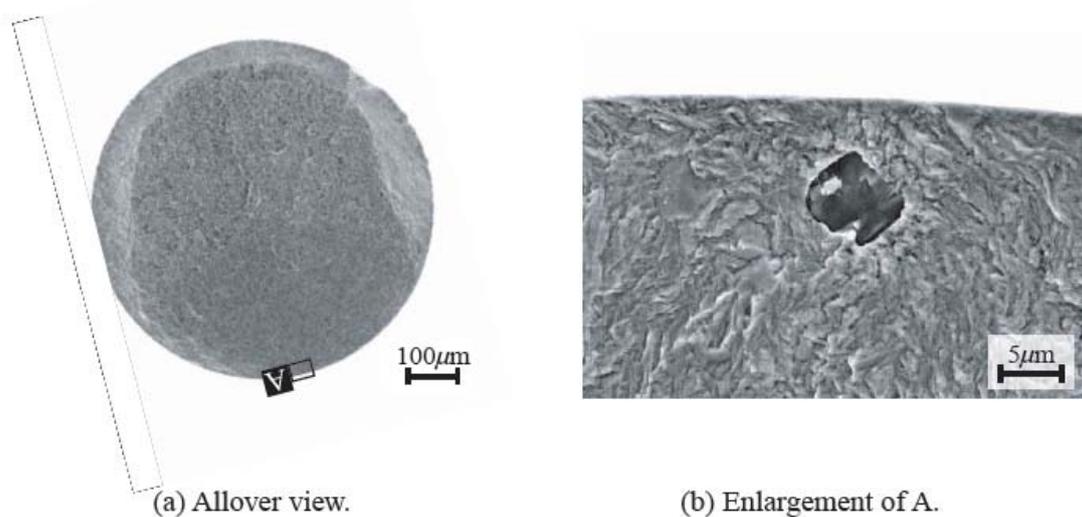


Fig.3 SEM image of fracture surface ($\sigma_a=901$ MPa, $N_f=4.7 \times 10^7$ cycle)

3.2 CT 撮影結果

Fig.4 にサイクル数 $N=4 \times 10^7$ (破断前) における CT 撮影結果を示す. Fig.4 の断面層の位置は Fig.3 の破面位置に対応している.

破壊起点となった介在物が, CT 断面像に存在することが確認できる (Fig.4(a)の領域 B 内). しかし, Fig.3 の SEM 写真で認められたファセット領域は確認することができなかった.

また, 応力振幅 $\sigma_a=850$ MPa, 繰返し数 $N=1 \times 10^8$ サイクルまで疲労試験を行った別の試験片に対し, Fig.2 の引張治具を用いて予荷重を負荷した状態での CT 撮影も実施したが, Fig.4 と同様, ファセット領域, すなわち, 微小内部き裂の撮影はできなかった.

4. 結言

今回の BL20XU を用いて、試験片最小直径を $\phi 0.7\text{mm}$ とより細くしたクロムマンガン鋼を用いることで、放射光エネルギーを 37.7keV として微小内部き裂の CT 撮影を試みた結果、前回 (2005B 期) よりさらに小さい $5\mu\text{m}$ の介在物を同定することができたが、介在物周りに認められるファセットき裂は観察することができず、今後の課題である。

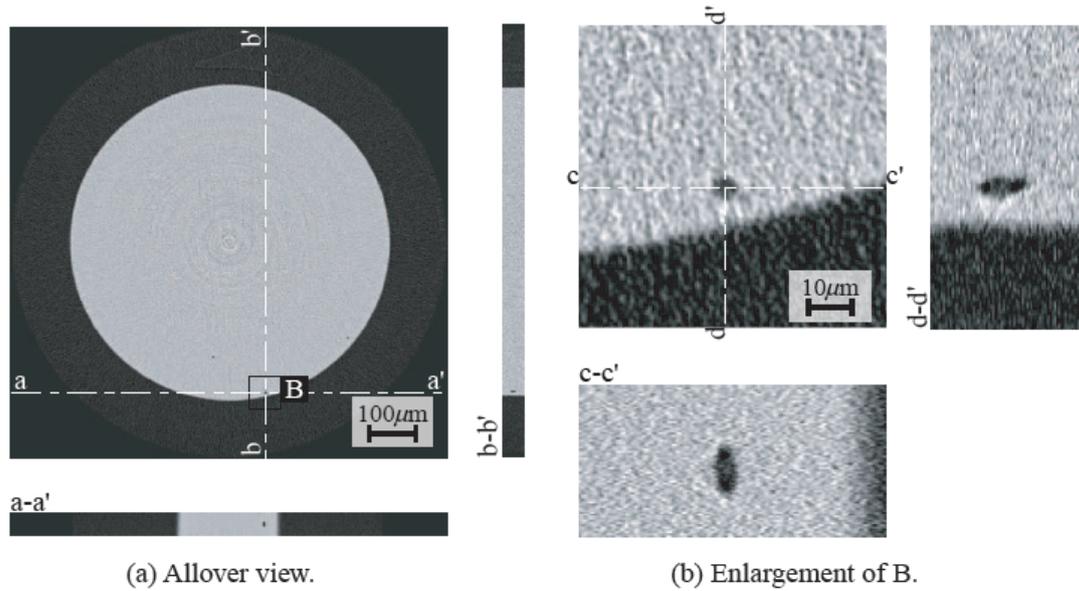


Fig.4 CT image (at $\sigma_a=901\text{ MPa}$, $N=4 \times 10^7$ cycle)