

「戦略活用プログラム課題利用報告書」

実施課題番号； 2005B0918

実施課題名； **機械構造用高強度鋼における微小疲労欠陥のX線CTによる検出**

使用ビームライン； **BL20XU**

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, 鶴 尋貴, 中村 亜有子**

1. 緒言

機械構造用部材の破壊の原因の80%は疲労であり，構造用部材の長期安全性および信頼性を確保するための設計手法の確立は極めて重要な技術となっている．近年，機械構造物の延命化や，操業の高速化が各方面で求められるにつれ，これまで以上に超長寿命域(荷重の繰返し数が 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．これまでの疲労設計は，部材の表面から破壊する場合を対象としており，荷重の繰返し数が 10^7 回以上で破壊しない部材は永久に破壊しないとされていた．しかしながら，超長寿命域では部材の内部を破壊起点とし，これまで安全とされる応力以下でも破壊することが明らかにされ，極めて重大な事象と認識されるにいたった．従来の破壊形態は，表面起点型であるため，容易に破壊挙動を捉えることが可能であったが，内部破壊型の場合には検出不可能であり，新しい検出技術の開発が必要とされる．

本研究では，部材内部に発生する微小な疲労き裂を，X線CT法によって非破壊的に高精度測定することから，部材内部でのき裂の発生および初期進展条件を定量的に捉え，新しい設計基準を確立することを最終目的とする．

2. 実験方法

2.1 材料及び試験片

供試材は軸受鋼SUJ2熱処理材であり，化学成分を表1に示す．熱処理は 830°C で焼入れ，油冷後， 170°C 60分の条件で焼戻した．熱処理後のビッカース硬さはHV769であった．試験片は最小直径部が 1.2mm である砂時計型形状であり，その寸法形状を図1に示す．今回の実験では疲労試験片をそのままCT撮影に供試した．内部介在物を起点とするき裂を観察を目的としていることより，試験片表面の圧縮残留応力は除去していない．

2.2 疲労試験

疲労試験は超音波疲労試験機(島津製作所製 USF-2000)を用い，室温，大気中にて実施した．

あらかじめ得た疲労試験結果をもとに，CT撮影に供試する試験片の疲労試験条件を応力振幅 $\sigma_a=1000\text{MPa}$ とし，同一の試験片に対し繰返し数 $N_f=0$ (試験前)， 5×10^5 ， 1×10^6 ， 2×10^6 ， 3×10^6 ， 4×10^6 ， 5×10^6 ， 1×10^7 回にて試験を中断し，撮影に供試した．

2.3 CT撮影

ビームラインBL20XUにて，試験片中央部分のCT撮影を実施した．ビームラインの概略図および外観写真を図2および図3に示す．また，CT撮影条件を表2に示す．

X線エネルギー 60keV ，回転角度 0.2deg ステップ(透過像 900 枚)，露光時間 1.2sec の条件にて透過像撮影を実施した．各ステップにおける透過像を再構成し， $2000\text{pixel}\times 2000\text{pixel}\times 600\text{pixel}$ の3次元pixel集合体を得た．

Table 1. Chemical composition [mass %].

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
0.96	0.18	0.26	0.013	0.016	0.10	0.05	1.32	0.02

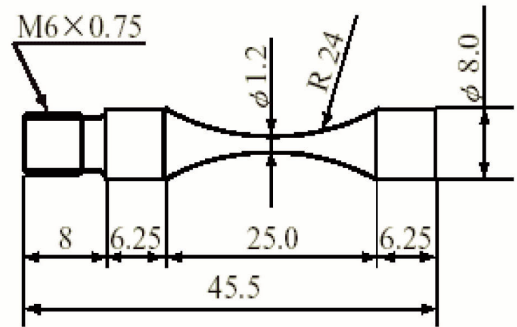


Fig. 1. Dimension of specimen.

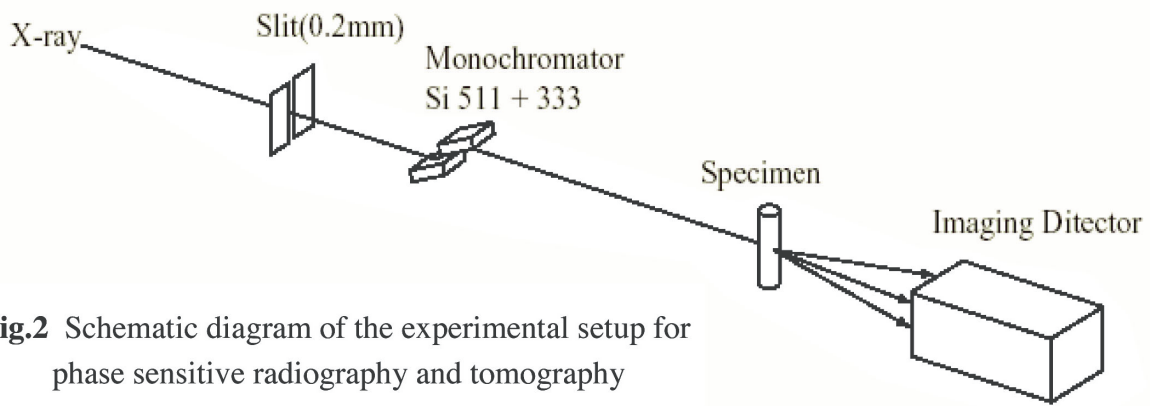


Fig.2 Schematic diagram of the experimental setup for phase sensitive radiography and tomography

Table2 X-ray condition for computerized tomography scan

X-ray Energy , keV	60
Monochromator	Si 511 + 333
Beam shape	ellipse
Window size , μm	400 \times 2000
magnification of a lens	\times 10
CCD field , pixel	600 \times 2000
pixel size , μm	0.94
Scanning step , deg	0.2
Scanning range , deg	0.0 - 180.2

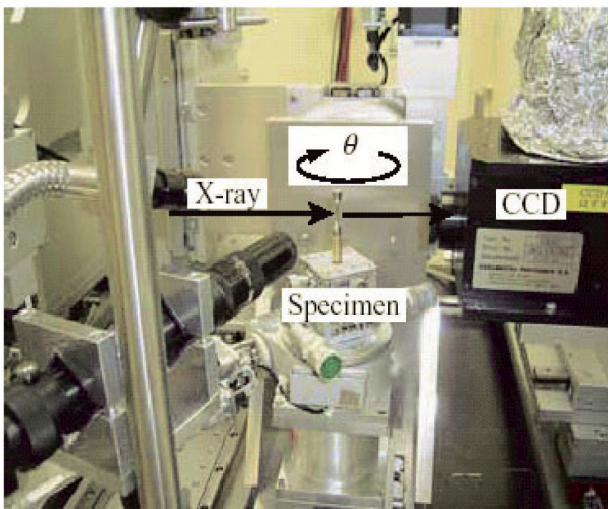


Fig.3 Photograph of experimental setup

3. 実験結果および考察

3.1 疲労線図

図4に事前に得た軸受鋼SUSJ2の疲労線図を示す．図中には参考のため試験片中央部の最小直径寸法が $\phi 3.5$ mmの結果も合わせ示した．図中黒塗り記号（●，▲）は介在物を起点とする内部起点型の破壊であり，白抜き記号は（○）表面すべりを起点とする表面起点型の破壊であったことを意味している．また，矢印付きの記号はその回数にても破断しなかったことを意味している．

今回CT像撮影に供試する最小直径 $\phi 1.2$ mmの試験データはすべて介在物を起点とする内部型の破壊であった．なお， $\phi 1.2$ mmの試験結果が $\phi 3.5$ mmに対し相対的に長寿命となっているのは，試験片表面の圧縮残留応力および寸法効果によるものと考えられる．

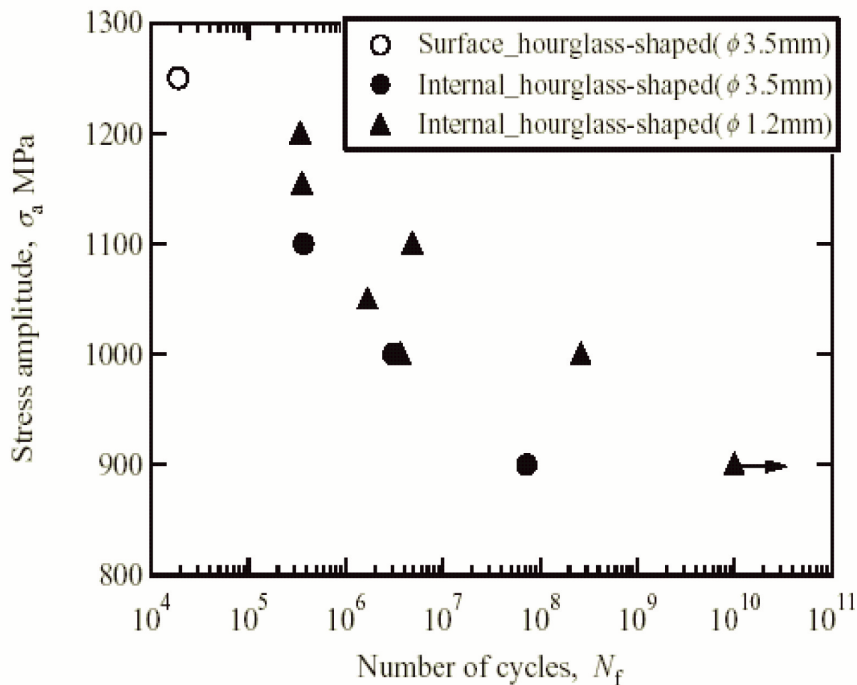


Fig.4 S-N diagram

3.2 破面観察

走査型電子顕微鏡(JEOL JSM-6330F)を用いて破面観察を実施した．代表例として，応力振幅 $\sigma_a=1000$ MPa，繰返し数 $N_f=3.7 \times 10^6$ 回にて破損した試験片の破面写真を図5に示す．破面はフィッシュアイと呼ばれる内部起点疲労破壊特有の円状の様相を呈し，その中心部には非金属介在物が認められる．図5(b)から分かるように，介在物は直径約 $10 \mu\text{m}$ の大きさであった．また，介在物の周りに破面が粒状のファセット領域(写真(b)における介在物の下方の領域)が認められる．なお，このファセット領域は疲労寿命が 1×10^6 回以上のものすべてに認められた．

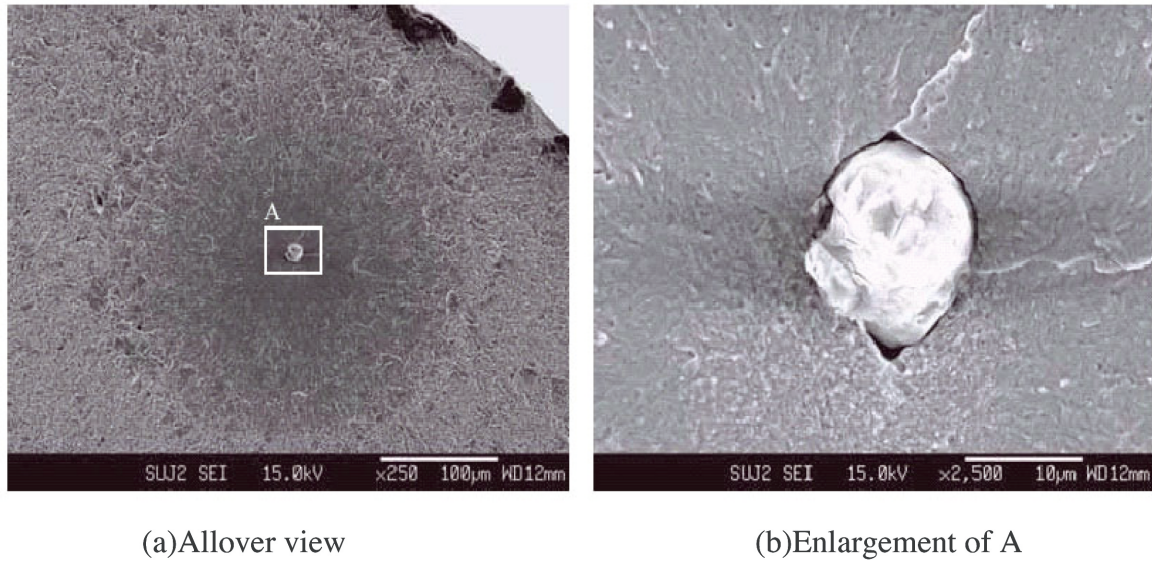


Fig.5 SEM images of surface fracture

3.3 CT断層撮影

図6に今回使用したX線の強度分布を，図7に試料透過像をそれぞれ示す．図8に応力振幅 $\sigma_a=1000\text{MPa}$ ， $N_f=1\times 10^7$ 回試験終了後のCT断層写真を示す．図中，部分的に拡大して示したような介在物が約10層($10\mu\text{m}$)にわたり確認された．また，試験前の試験片に対しても同様の位置に介在物が観察されている．ただし， $N_f=1\times 10^7$ 回試験終了試験片において介在物周りに形成されていると考えられるファセットき裂は観察できなかった．

今回のCT撮影により約 $10\mu\text{m}$ の介在物が同定できた．また今回得られた結果より，介在物周りの疲労損傷（ファセット状領域）検出のためには試料直径を $\phi 1.0\text{mm}$ 以下にまで小さくし，X線エネルギーを低下させ屈折の効果を高める必要があることが明らかとなった．

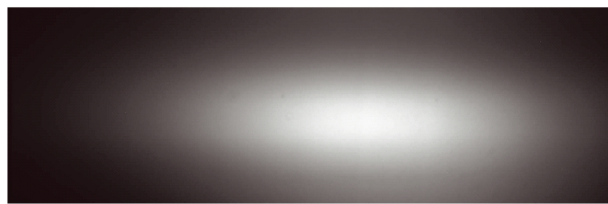


Fig.6 X-ray intensity distribution

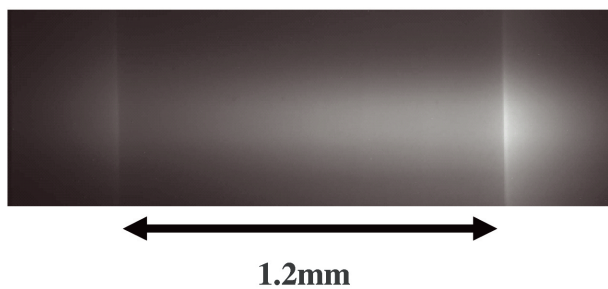


Fig.7 X-ray transfer image

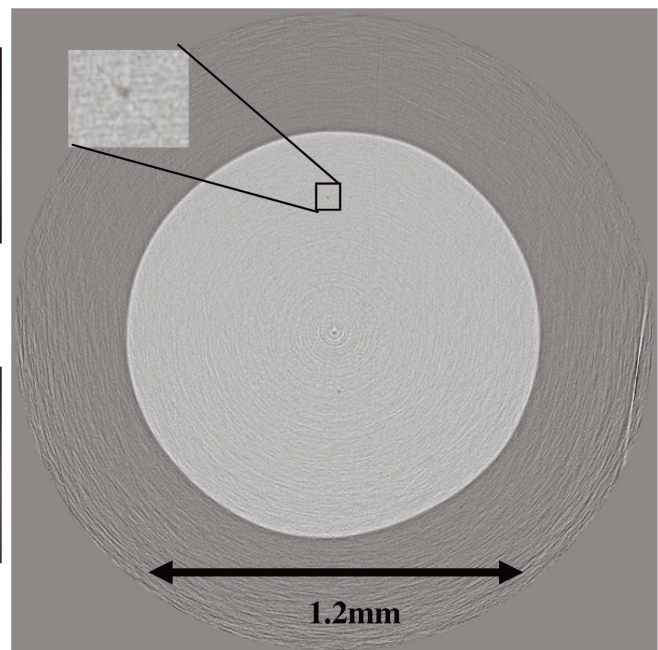


Fig.8 Tomograph of specimen after 1×10^7 cycles fatigue test



Fig.9 Sequential tomographs at inclusion

10μm
—