

エネルギー分散型 X 線応力測定法による 多結晶 Al の疲労損傷評価

滋賀県大工 三好 良夫 高松 徹 田邊 裕貴
岡本 ○小谷 英生
堀場製作所 大堀 謙一 大澤 澄人
エックスレイプレジジョン 細川 好則

1. はじめに

機械構造物の破壊事故原因の多くは疲労破壊であり、その破壊は繰返し負荷荷重により部材内に導入される損傷の蓄積がき裂を誘起し、それが進展することにより生じるとされている。したがって、これら破壊事故の防止には、き裂発生に至るまでの損傷を非破壊的に検出することが重要課題となる。従来、その手段として磁気、超音波、X 線法などの非破壊的損傷検出手法が提案されている。中でも、X 線回折法は、結晶性材料の変形にともなう微視組織や格子ひずみの変化を非破壊的に検出できることから、古くから各種損傷評価法として広く利用されている。しかし、従来の手法では、特性 X 線を使用するため、その波長の長さから表面層のみの情報しか得られないといった問題を有している。

最近、共同研究者ら^{1,2)}は、連続 X 線を用い、回折 X 線のエネルギー値変化よりひずみ測定を行うエネルギー分散型 X 線応力測定法を提案し、その手法により残留応力の内部方向分布が非破壊的に測定できることを明らかにした。そこで、本研究では、冷間圧延による残留応力を有する多結晶 Al アルミニウム板に、板厚方向に勾配を有する曲げ応力を繰返し負荷し、その各段階で上記手法を適用し、その時の深さ方向残留応力や半価幅変化を測定し、それらの変化から疲労損傷が検出できるか、否かを検討した。

2. 実験方法

2.1 試験片ならびに疲労試験 試験片は板厚 5[mm]の市販の冷間圧延した工業用純アルミニウム (98.79[wt%])の平滑平面曲げ疲労試験片で、最小断面幅 8[mm]のものである。疲労試験は面外曲げで、応力比は $R=-1$ 、応力繰返し速度は 27[Hz]、負荷応力振幅は 92,101,122[MPa]で行った。

2.2 X 線応力測定法 本実験では、疲労にともなう残留応力変化を表面から深さ方向の各部にわたって評価するために、エネルギー分散型 X 線応力測定法を用いた。測定法は $\sin^2\Psi$ 法で、側傾法により行った。測定条件は表 1 に示す通りであるが、試験片には圧延による集合組織が存在するために、入射角によって十分な回折強度が得られなかった。そのため、ここでは回折ピーク強度値が 5000[cps]以上となる入射角 Ψ を用いて $\sin^2\Psi$ 線図を求めた。図 1 はエネルギー分散型 X 線応力測定装置を模式的に示したものであるが、特に、本測定装置では、プリアンプやマルチチャンネルアナライザ (MCA)などの X 線計測部の温度変動が直接回折 X 線エ

ネルギー値に影響を及ぼすため、それらを恒温槽内に収納しその内部温度を $40.0^\circ\text{C} \pm 0.1^\circ\text{C}$ に制御した。なお、残留応力値 σ_L は、次式³⁾により算出した。

$$\sigma_L = -\frac{E}{1+\nu} \cdot \frac{1}{E_{n0}} \cdot \frac{\partial(E_n)}{\partial(\sin^2\Psi)} \quad (1)$$

ここで、応力値の算出に用いた弾性定数 E 、ポアソン比 ν はそれぞれ 70.3[GPa]、0.345 で、 E_{n0} は無ひずみ状態のエネルギー値、 $\partial(E_n)/\partial(\sin^2\Psi)$ は $E_n \cdot \sin^2\Psi$ 線図の勾配である。

Table 1 Conditions of X-ray stress measurements.

Using X-ray	Continuous X-ray (Mo target)
Diffraction plane	Al 111, 222, 511/333
Tube voltage	55[kV]
Tube current	74[mA]
Bragg's angle, θ	16.5°
Fixed time	2000[sec/ Ψ angle]
Incident angle, Ψ	18.4°, 20.7°, 22.8°, 24.7°, 26.6°, 28.3°, 30.0°, 31.6°, 33.2°

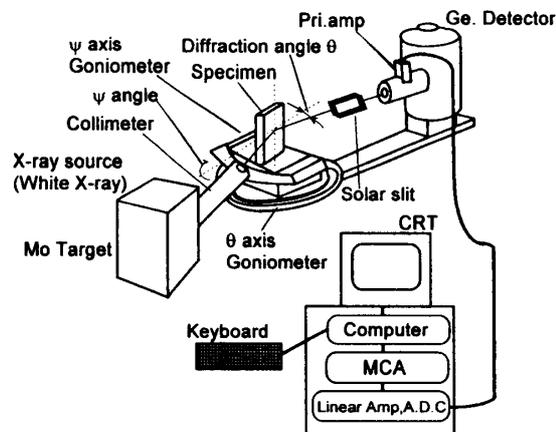


Fig.1 Schematic of energy dispersive stress measurement system.

3. 実験結果ならびに考察

3.1 疲労過程の表面組織変化 図 2 は、疲労にともなう試験片表面の光学顕微鏡写真を応力振幅 92[MPa]に関して示したものである。観察位置は、X 線応力測定時の照射域である。図 2(a)は疲労初期のものであるが、光学的には、未だ繰返し応力によるすべり線やすべり帯などは認められていない。図 2(b)は疲労中期のものであるが、この段階においても、まだ光学的な変化は観察されない。しかし、疲労後期になると、試験片表面に図 2(c)に認められるような、数[μm]~100[μm]程度の微視き裂の発生が観察される。さらに、繰返し数を増すと、図 2(d)のように、先に発生した微視き裂が

さらに発達し、その長さを増すとともにその密度も高くなり、観察視野全域に認められるようになる。しかし、これらは、まだ巨視き裂までには至っていないが、試験片の最小断面部の端部には、巨視き裂の発生と、僅かな進展が観察された。

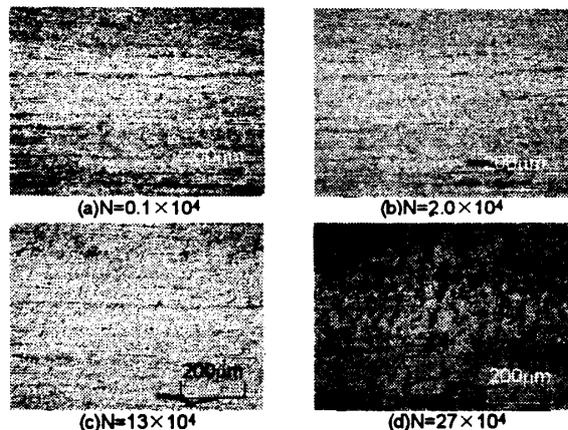


Fig.2 Change of surface structure in fatigue process.

3.2 疲労過程の残留応力の変化 図3は、エネルギー分散型X線応力測定法により求めた疲労過程の残留応力 σ_L と繰返し数 N の関係の一例を応力振幅92[MPa]について示したものである。ここでは、特に、表面から深さ方向の残留応力変化を調べるために、X線の侵入深さが異なり、かつ互いに平行な同族回折面である111, 222, 511/333面に注目した。なお、各回折面の有効X線侵入深さは図中に示した。図3より、用いた試験片の表層部には圧縮の、また内部には引張の初期残留応力が存在していることがわかる。ここで、疲労に伴うそれらの残留応力変化を見ると、表層部である111面のそれは、繰返し数の増加に伴い初期の圧縮残留応力は一旦増加した後、その圧縮残留応力が減少して、引張側に移行する。さらに、繰返し数を増すと、その残留応力は再び圧縮側への移行と引張側への移行を繰返しながら、残留応力自身は全体的に引張側に移行する傾向にある。しかし、最終的には初期残留応力自身は減少し、引張側に移行する。その繰返し数は、光学的に微視き裂が試験片表面で認められる時期にほぼ一致しているようである。このような疲労に伴う残留応力の変化傾向は、青山ら⁴⁾、児玉⁵⁾の結果とも一致する傾向にある。ここで、同じ繰返し数における残留応力の変化量を深さの異なる111, 511/333面について比較すると、表層部の111面のその変化量の方が深層の511/333面のそれより大きく、その変化傾向も明確なものとなっている。これは、負荷応力が表面から深さ方向に勾配を有する面外曲げ疲労であるため、受ける損傷の度合いが表面ほど大きくなっているためと考えられる。

3.3 疲労過程の半価幅比の変化 図4は、残留応力測定時に得たX線入射角 $\Psi=22.8^\circ$ の回折強度分布曲線の半価幅 b と繰返し数 N の関係の一例を応力振幅92[MPa]について示したものである。ここでも、残留応

力と同様にX線侵入深さの異なる111, 222, 511/333面に注目した。図4より、初期の半価幅値は回折面によって異なることがわかる。これは、用いた試験片が圧延加工材であるため、その圧下率が板厚方向で異なるためとも考えられる。図4において、疲労に伴うこれらの半価幅値を各回折面で比較すると、111面の半価幅値は繰返し数が増加してもほとんど変化せず、ある繰返し数では若干増加した後、減少する傾向にある。511/333面の半価幅値の変化傾向も111面とほぼ同じ傾向にあるが、111面ほど明確ではない。

以上のように、疲労に伴う半価幅値の変化は、残留応力の変化に比べて小さくために、半価幅変化により疲労損傷評価をすることは困難のようである。

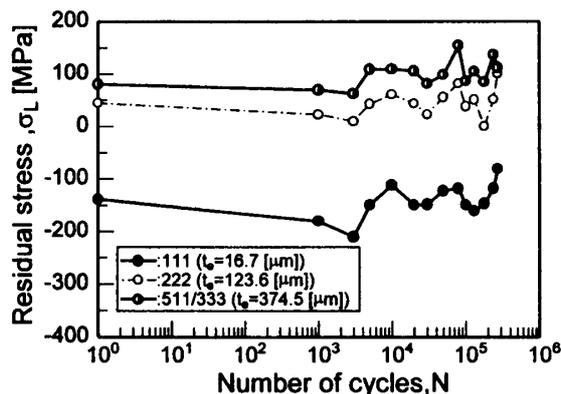


Fig.3 Relationship between number of cycles and residual stresses.

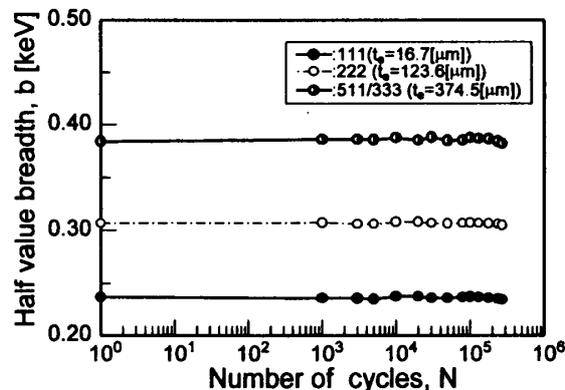


Fig.4 Relationship between number of cycles and half value breadths.

4. まとめ

以上、エネルギー分散型X線応力測定法を用い、多結晶Alの曲げ疲労過程における初期残留応力ならびにその深さ方向の変化を調べた。その結果、試験片表面ならびに内部の残留応力変化が評価できることからその損傷評価の可能性が示唆された。

参考文献

- 1) 細川・大澤・大谷・阪野・三好, 材料, 43, 766-771(1994).
- 2) 細川・大澤・大谷・阪野・三好, 材料, 日本材料学会第29回X線材料強度に関するシンポジウム講演論文集, 86(1993).
- 3) 長尾・楠本, 材料, 26, 576(1977).
- 4) 青山・並川, 材料, 13, 98(1964).
- 5) 児玉, 日本機械学会誌, 75, 1026(1972).