

応力制御下における1070アルミニウムの非比例多軸低サイクル疲労寿命

伊藤 隆基* 平井 孝典* 山本 隆栄**

Multiaxial Low Cycle Fatigue of 1070 Aluminum under Stress Controlled Non-proportional Loading

Takamoto ITOH*, Takanori HIRAI* Takaei YAMAMOTO**

(Received January 28, 2007)

This paper describes the low cycle fatigue life of 1070 aluminum under stress controlled multiaxial loading. Proportional loading tests were carried out under combined push-pull and reversed torsion. Non-proportional loading tests were also carried out using three stress paths of cruciform, box, and circle. Mises stress range, Mises strain range and maximum principal stress range were applied to the experimental data and the applicability of the life prediction methods was discussed. No life prediction methods accurately predicted the multiaxial low cycle fatigue life under non-proportional loading within a small scatter band.

Key Words : Low Cycle Fatigue, 1070 Aluminum, Non-proportional Loading, Life Prediction, Stress Controlled Loading

1. 緒言

機械構造物の強度設計をする上で材料の多軸疲労強度を考慮することは重要である。これまでも様々な多軸疲労試験が行われてきたが、これらの多軸疲労試験の多くは応力およびひずみの主軸方向が固定されたいわゆる比例負荷の下で行われてきた^{[1]~[5]}。ところが実構造物では応力およびひずみの主軸方向が時間的に変化する非比例負荷を受けることがある。ひずみ制御においては比例負荷に比べて、非比例負荷の破損寿命が著しく低下し、また寿命低下の程度は負荷経路および材料に依存することが報告されている^{[6]~[14]}。したがって多軸低サイクル疲労での構造物の健全性・安全保証には、非比例負荷を考慮した適切な寿命評価法を確立することが必要不可欠であるといえる。しかし、ひずみ制御と応力制御では多軸低サイクル疲労寿命に及ぼす非比例負荷の影響が

異なる可能性がある。

本研究では、これまで実施例のほとんどない応力制御による比例負荷および同非比例負荷の低サイクル疲労試験を1070Alの薄肉円筒試験片を用いて実施した。また、得られた結果より寿命に及ぼす負荷経路の影響について調べ、非比例多軸低サイクル疲労寿命特性について考察した。

2. 試験方法

本研究で用いた供試材はTable 1に化学成分を示す1070Alである。試験片は、Fig. 1に示す標点部の外径12mm、内径9mmおよび平行部長さ5.27mmの薄肉円筒形状を用いた。試験は室温大気中の応力制御で実施した。Fig. 2(a)および(b)にそれぞれ比例負荷および非比例負荷の試験で用いた応力経路を示す。Fig. 2(a)の比例負荷では引張・圧縮(Push-pull)、繰返しねじり(Reversed torsion)および引張・圧縮と繰返しね

* 工学研究科機械工学専攻

** 大分大学工学部機械・エネルギーシステム工学科

* Mechanical Engineering Course, Graduate School of Engineering

** Department of Mechanical and Energy Systems Engineering, Oita University

Table 1 Chemical composition of 1070Al (wt.%).

| Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Zn | Ti | V | Else | Al |
|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| 0.06 | 0.10 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | ≤0.03 | 99.80 |

じりの組合せ負荷(Combined)の3種類の負荷経路とした。また、Fig. 2(b)の非比例負荷では引張・圧縮と繰返しねじりを交互に負荷する十字型負荷(Cruciform)、引張・圧縮と繰返しねじりに保持を有する四角形負荷(Box)および引張・圧縮と繰返しねじりが90度の位相差を有する円形負荷(Circle)の3種類の負荷経路とした。なお、応力速度は、ミーゼス型の相当基準で10MPa/s一定とした。

繰返し数の計数は、Fig. 2に示した負荷経路を一巡すると1サイクルとした。また、破損寿命(N_f)は、繰返しねじり負荷ではねじり方向のひずみ範囲が、その他の負荷経路では軸方向のひずみ範囲が $1/2N_f$ におけるその2倍となる繰返し数とした。

3. 試験結果および考察

3.1 低サイクル疲労寿命の整理結果

破損寿命をミーゼス型の相当応力範囲($\Delta\sigma_{eq}$)で整理した結果をFig. 3に示す。なお、 $\Delta\sigma_{eq}$ は比例および非比例多軸負荷経路の1サイクル中でのミーゼス基準の応力範囲の最大値である。図中に示した実線は引張・圧縮負荷のデータを基準に引いたものであり、その両側の破線は係数2、また同一点鎖線は係数6の範囲を示している。円形負荷の破損寿命は係数6の範囲内に整理されるが、引張・圧縮負荷のそれと比べて低寿命となる傾向があった。一方、その他のすべての比例および非比例負荷の破損寿命は、長寿命側で整理された。また、最も長寿命となった繰返しねじり負荷の破損寿命は、係数6の範囲をやや外れている。また、組合せ負荷、十字型負荷および四角形負荷は、長寿命側の係数6の範囲内で整理された。

破損寿命を $1/2N_f$ におけるミーゼス型の相当全ひずみ範囲($\Delta\varepsilon_{eq}$)で整理した結果をFig. 4に示す。なお、 $\Delta\varepsilon_{eq}$ は比例および非比例多軸負荷経路の1サイクル中でのミーゼス基準の全ひずみ範囲の大きさの最大値である。図中に示した実線は引張・圧縮負荷のデータを基準に引いたものであり、破線および一点鎖線はFig. 3と同様にそれぞれ係数2および係数6の範囲を示している。繰返しねじり負荷と十字型負荷の一部の破損寿命が係数6の範囲から大きく外れて長寿命側に整理されているが、その他の破損寿命は係数6の範囲の内側で整理されている。また、円形負荷の破損寿命は低寿命側の係数6から長寿命側の係数2のばらつき範囲、四角形負荷の破損寿命は低寿命側の係数6の範囲の内側、十字型負荷は長寿命側の係数6の範囲の外側で整理されている。

Itohらが実施したSUS304^[10]および6061Al^[12]のひ

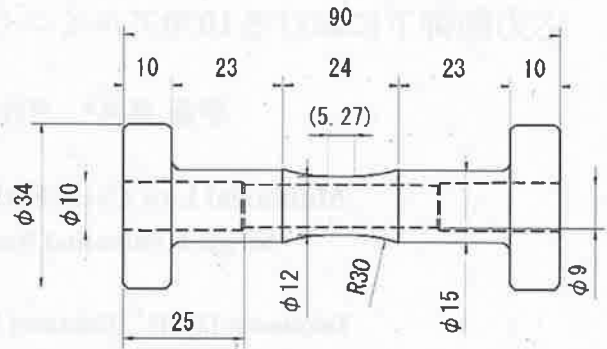


Fig. 1 Shape and dimensions of hollow cylinder specimen tested (mm).

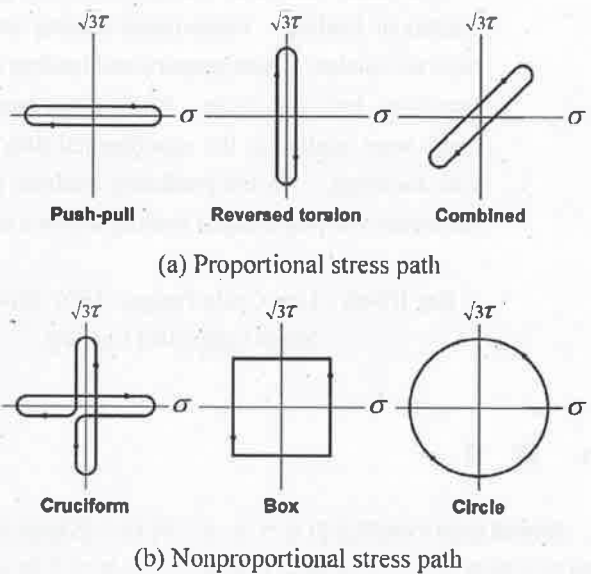


Fig. 2 Stress path employed.

ずみ制御下の非比例・多軸低サイクル疲労寿命をミーゼス型の相当全ひずみ範囲で整理した結果では、非比例負荷の破損寿命は比例負荷に比べて低下することが報告されている。しかし、本研究の応力制御下の非比例・多軸低サイクル疲労寿命をミーゼス型の相当応力範囲で整理した結果では、比例負荷に比べて円形負荷のみ寿命の低下が見られたが、他の非比例負荷では逆に寿命は増加していた。

一方、非比例負荷の寿命をミーゼス型の相当ひずみ範囲で整理した結果では、四角形負荷では破損寿命の低下、十字型負荷では破損寿命の増加が見られた。これらのことは、非比例多軸低サイクル疲労寿命特性は、応力制御とひずみ制御の違いによる制御方法に大きく依存する可能性を示している。

最大主応力範囲($\Delta\sigma_1$)で破損寿命を整理した結果をFig. 5に示す。なお、 $\Delta\sigma_1$ は比例および非比例負荷経路の1サイクル中での主応力範囲の最大値であ

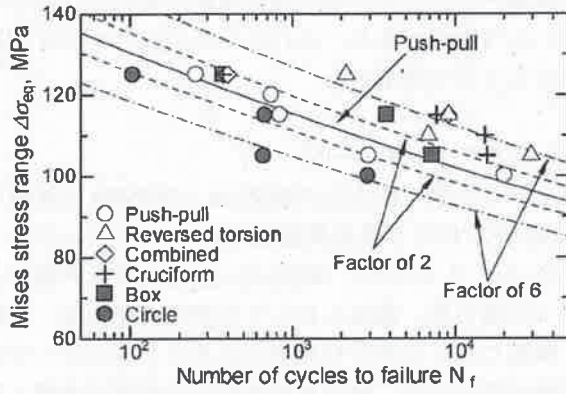


Fig. 3 Correlation of LCF lives with Mises stress range.

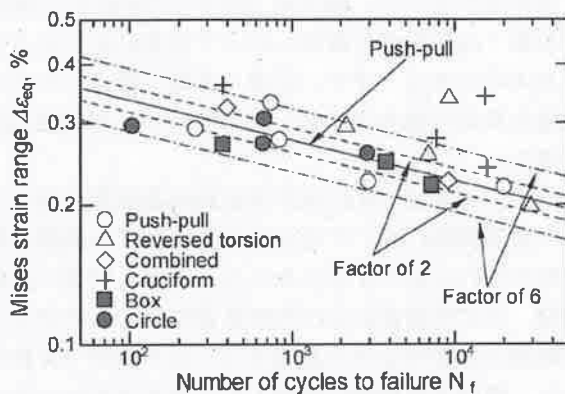


Fig. 4 Correlation of LCF lives with Mises strain range.

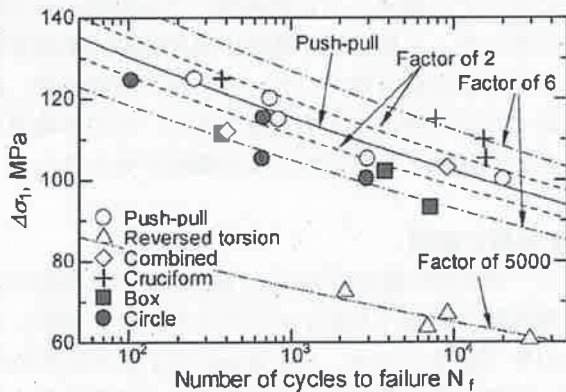


Fig. 5 Correlation of LCF lives with maximum principal stress range.

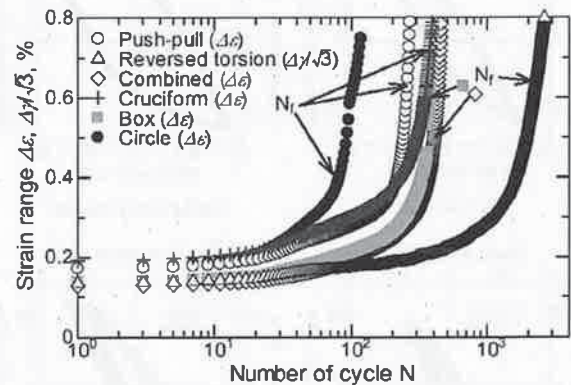
る。図中に示した実線は引張・圧縮のデータを基準に引いたものであり、その両側の破線は係数 2、同一点鎖線は係数 6、さらに同二点鎖線は係数 5000 の範囲を示している。十字型負荷の破損寿命は長寿命側の係数 6 の範囲内で整理されたが、その他のすべての比例および非比例負荷の破損寿命は低寿命側で整理され、組合せ負荷、円形負荷および四角形負荷の破損寿命はともに低寿命側の係数 6 の範囲内となっ

た。また、繰返しねじり負荷の破損寿命は低寿命側に大きく外れ、係数 5000 の低寿命側の整理結果となった。繰返しねじりの破損寿命が低寿命側に大きく外れる傾向は Hamada¹¹¹¹らの論文でも報告されている。

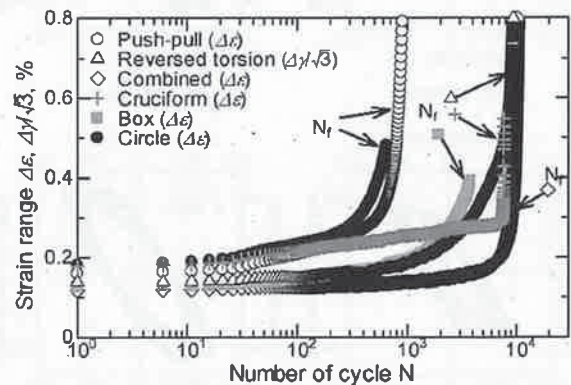
本研究で適用を試みた 3 種類の寿命評価パラメータ、すなわち、従来から提案されているミーゼス型の相当応力範囲、ミーゼス型の相当ひずみ範囲および最大主応力範囲では、応力制御下での 1070Al の非比例・多軸低サイクル疲労寿命を係数 2 の範囲で整理できなかった。したがって今後、有効な寿命評価パラメータを開発することが必要であり、それには各負荷制御下での各種試験を実施し繰返し変形挙動やき裂の発生・伝ば挙動を解明する必要があると考えられる。

3.2 繰返しに伴うひずみ範囲の変化

ミーゼス型の相当応力範囲 $\Delta\sigma_{eq}=125\text{MPa}$ および 115MPa での各負荷経路の試験における繰返しに伴うひずみ範囲の変化をそれぞれ Fig. 6(a)および(b)に示す。ここで、繰返しねじり負荷はせん断ひずみ範囲



(a) $\Delta\sigma_{eq}=125\text{MPa}$



(b) $\Delta\sigma_{eq}=115\text{MPa}$

Fig. 6 Variation of strain range with number of cycle.

围を、その他の負荷経路は軸ひずみ範囲を示した、Fig. 6 (a)の $\Delta\sigma_{eq}=125\text{MPa}$ の結果では、ひずみ範囲はいずれの負荷経路においても繰返しの初期から繰返しに伴い緩やかに増加した後、繰返しの初期におけるひずみ範囲の1.5倍程度まで増加したあたりで急激に増加した。

Fig. 6 (b)の $\Delta\sigma_{eq}=115\text{MPa}$ の結果でも十字型負荷を除くすべての負荷経路でFig. 6 (a)の結果と同様の繰返しに伴うひずみ範囲の変化が見られた。このように繰返しの初期からの緩やかなひずみ範囲の増加は材料の転位組織の変化等の内部組織の変化に伴う繰返し軟化や微小き裂の発生等によるものであると考えられるが、これらの点については今後中断試験等を通じて検討する予定である。

一方、Fig. 6 (b)の十字型負荷では繰返し数が約 $0.25N_f$ からひずみ範囲の増加が緩やかになり、破損寿命の近くで急激なひずみ範囲の増加を示している。このことから、 $\Delta\sigma_{eq}=115\text{MPa}$ の十字型負荷の試験で

の損傷メカニズムが他の負荷経路のそれとは異なっている可能性があり、それについては3.4のき裂観察のところで考察する。

3.3 ヒステリシスループ

ミーゼス型の相当応力範囲 $\Delta\sigma_{eq}=105\text{MPa}$ の試験の $1/2N_f$ 時における各負荷経路でのヒステリシスループをFig. 7に示す。同図(a)~(c)比例負荷試験の引張・圧縮負荷、繰返しねじり負荷および引張・圧縮-繰返しねじり組合せ負荷はヒステリシスループの形状が似ている。組合せ負荷の応力範囲が引張・圧縮負荷および繰返しねじり負荷のそれに比べて小さくなっているが、これはミーゼス型の相当応力基準一定の条件なので、軸方向とねじり方向の応力範囲が引張・圧縮負荷や繰返しねじり負荷に比べ小さくなるためである。また、引張・圧縮-繰返しねじり組合せ負荷の軸およびせん断方向のひずみ範囲はほぼ等しい。

一方、同図(d)~(f)に示す非比例負荷試験ではすべての負荷経路においてせん断方向のひずみ範囲が軸方向のそれに比べ小さくなった。また、引張・圧縮負荷、十字型負荷および円形負荷の軸方向の全ひずみ範囲と非弾性ひずみ範囲をミーゼス基準で比較すると、両ひずみ範囲の幅がともに最も大きかったのは円形負荷であり、次いで引張・圧縮負荷、最も小さかったのは十字型負荷であった。また、それらの差は全ひずみ範囲よりも非弾性ひずみ範囲の方が顕著であった。これらの3種類の負荷経路の破損寿命は円形負荷が最も短く、次いで引張・圧縮負荷、最も長くなったのは十字型負荷であり、ひずみ範囲が大きい試験ほど寿命が短くなる傾向が見られた。

3.4 き裂の観察

ミーゼス型の相当応力 $\Delta\sigma_{eq}=105\text{MPa}$ の試験後の各負荷経路の試験片表面をデジタルカメラで撮影したものをFig. 8に示す。Fig. 8 (a)~(e)はそれぞれ引張・圧縮負荷、繰返しねじり負荷、十字型負荷、四角形負荷および円形負荷である。Fig. 8 (b)の繰返しねじり負荷では大きなき裂が観察されたが、他の負荷経路では同様のき裂は観察されなかった。また、比例負荷であるFig. 8 (a)および(b)の試験片表面は平滑であるのに対し、非比例負荷のFig. 8 (c)~(e)の試験片表面には顕著な起伏がみられる。

ミーゼス型の相当応力 $\Delta\sigma_{eq}=105\text{MPa}$ の試験後の各負荷経路の試験片表面を走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察したものをFig. 9に示す。Fig. 9 (a)~(e)はそれぞれ引張・圧縮負荷、繰返しねじり負荷、十字型負荷、四角形負荷および円形負荷である。

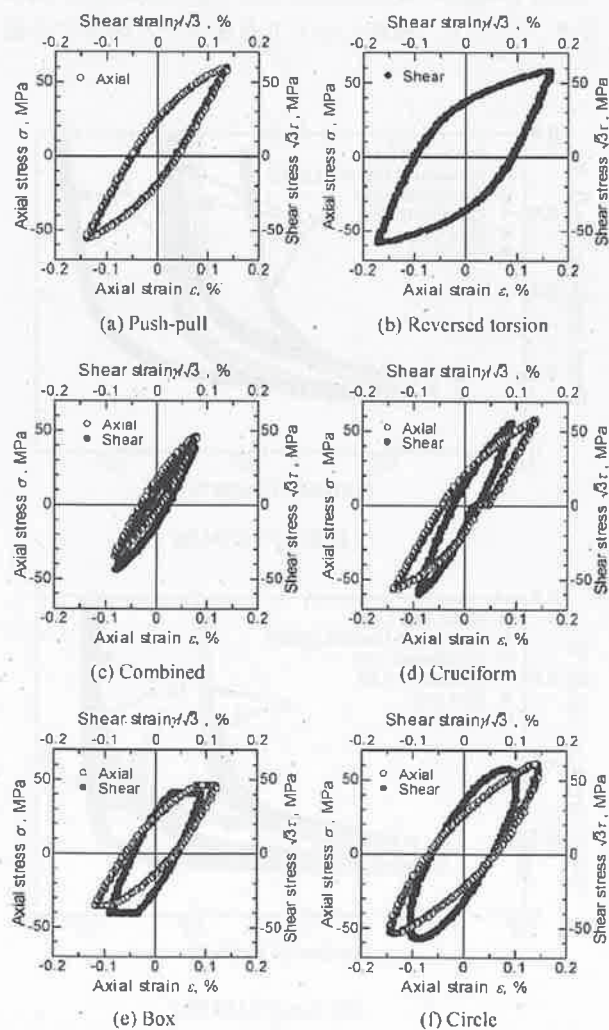


Fig. 7 Hysteresis loop for $\Delta\sigma_{eq}=115\text{MPa}$ at $N=1/2N_f$.

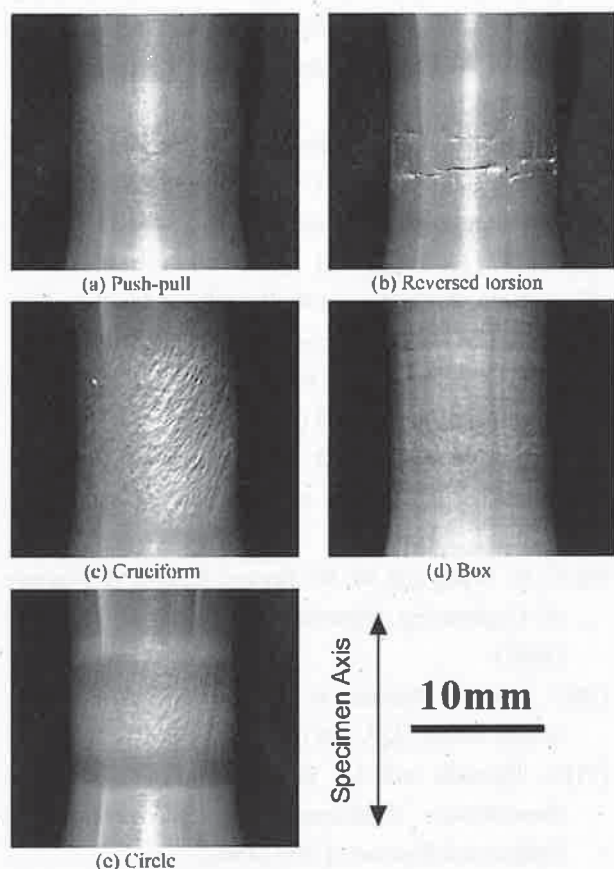


Fig. 8 Observations of specimen surface at $\Delta\sigma_{eq}=105\text{MPa}$.

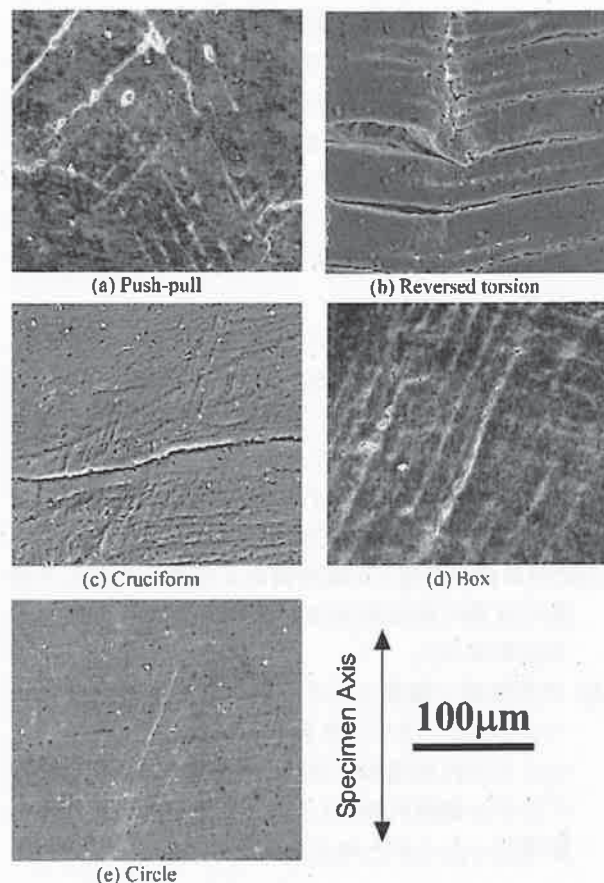


Fig. 9 Observations of specimen surface by SEM at $\Delta\sigma_{eq}=105\text{MPa}$.

Fig. 9 (a)に示す引張・圧縮負荷では試験片軸方向からおよそ 45° 傾いた方向に、Fig. 9 (b)に示す繰返しねじり負荷では軸方向とそれに直交した円周方向にき裂が伝ばしているのが観察された。これらのことから、比例負荷試験における試験片表面のき裂の伝ば方向は最大せん断応力方向であることがわかる。

Fig. 9 (c)に示す十字型負荷では円周方向に沿って伝ばしている長いき裂が観察された。しかし、そのき裂の数は非常に少なく、他の負荷経路で観察される $100\mu\text{m}$ 前後のき裂は観察されなかった。このことから、Fig. 6 (b)で十字型負荷が破損寿命の近くで急激なひずみ範囲の増加を示したのは、寿命後期で大きなき裂が急速に伝ばしたためであると考えられる。また、十字型負荷のみに試験片表面に細かい筋状の模様が見られた。

Fig. 9 (d)に示す四角形負荷では軸方向からおよそ 30° 傾いた方向にき裂が伝ばしているのが観察された。四角形負荷では軸方向から 22.5° 傾いた方向と 67.5° 傾いた方向で主応力と最大せん断応力が最も大きな値となる。したがって、両応力が最も大きくなる而にき裂が伝ばしていると考えられる。Fig. 9

(e)に示す円形負荷の試験片表面では大部分のき裂は円周方向と軸方向からおよそ 30° 傾いた方向に伝ばしており、その数は円周方向に伝ばしたき裂の方が多かった。また、観察されたき裂は他の負荷経路に比べて小さかったが、き裂の数は最も多かった。このことが円形負荷では他の負荷経路よりも早期にひずみ範囲が増加し、疲労寿命が最も短くなる結果になったものと考えられる。

4. 結 言

- (1) ミーゼス型の相当応力範囲による破損寿命の整理では、円形負荷は低寿命側の係数6の範囲内で整理され、その他のすべての比例および非比例負荷は長寿命側のほぼ係数6の範囲内で整理された。
- (2) ミーゼス型の相当ひずみ範囲による破損寿命の整理では、円形負荷の破損寿命は低寿命側の係数6から長寿命側の係数2のばらつき範囲で、四角形負荷の破損寿命は低寿命側の係数6の範囲内、十字型負荷と繰返しねじり負荷の破損寿命は長

寿命側の係数 6 の範囲を超えて整理された。

- (3) 最大主応力範囲による破損寿命の整理では、十字型負荷の破損寿命は長寿命側の係数 6 の範囲内で、組合せ負荷、円形負荷および四角形負荷の破損寿命は低寿命側の係数 6 の範囲で整理された。また、繰返しねじり負荷の破損寿命は低寿命側に大きく外れ、係数 5000 程度のばらつきが生じた。
- (4) ひずみ範囲は、初期から繰返しに伴い緩やかに増加した後、初期におけるひずみ範囲の 1.5 倍程度まで増加したあたりで急激に増加した。しかし、十字型負荷の低応力の試験では $0.25N_f$ 付近からひずみ範囲の増加が緩やかになり、破損寿命の近くで急激なひずみ範囲の増加を示した。
- (5) 比例負荷の引張・圧縮負荷および繰返しねじり負荷のき裂の伝ば方向はいずれも最大せん断応力方向であった。
- (6) 円形負荷で観察されたき裂は他の負荷経路に比べて小さかったが、き裂の数は最も多かった。このことが円形負荷では他の負荷経路よりも早期にひずみ範囲が増加し、疲労寿命が最も短くなる結果なったものと考えられる。

参考文献

- [1] R. D. Lohr and E. G. Ellison: *Fatigue Eng Mater Struct*, **3**, 1, 1 (1980).
- [2] M. W. Brown and K. J. Miller: *ASTM STP*, **770**, 299 (1982).
- [3] F. A. Kandil, M. W. Brown and K. J. Miller: *Mech Behav Nucl Appl Stainless Steel Elevated Temp*, **203** (1982).
- [4] M. Sakane, M. Ohnami and M. Sawada: *ASME JEMT*, **109**, 236 (1987).
- [5] M. Sakane, M. Ohnami and M. Sawada: *ASME JEMT*, **113**, 244 (1991).
- [6] A. Nitta, T. Ogata and K. Kuwabara: *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, **36**, 376 (1989).
- [7] S. H. Doong, D. F. Socie and I. M. Robertson: *ASME JEMT*, **112**, 456 (1990).
- [8] T. Itoh, M. Sakane, M. Ohnami and K. Ameyama: *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, **41**, 1361 (1992).
- [9] C. H. Wang and M. W. Brown: *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, **16**, 1285 (1993).
- [10] T. Itoh, M. Sakane, M. Ohnami and D. F. Socie: *ASME JEMT*, **117**, 285 (1995).
- [11] N. Hamada and M. Sakane: *Proceedings of 5th International Conference on Biaxial/Multi-axial Fatigue and Fracture*, **1**, 251 (1997).
- [12] T. Itoh, T. Nakata, M. Sakane and M. Ohnami: *European Structural Integrity Society*, **25**, 41 (1999).
- [13] D. F. Socie and G. B. Marquis: *Society of Automotive Engineers International*, 129 (2000).
- [14] T. Itoh: *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, **50**, 1317 (2001).