SiC のウイスカあるいは粒子で強化した 6061 アルミニウム合金のねじり疲労[†]

石 井 仁* 矢 野 淳** 東 郷 敬 一 郎*

Torsional Fatigue of SiC Whisker or SiC Particulate Reinforced 6061 Aluminum Alloys

by

Hitoshi ISHII*, Atsushi YANO** and Keiichiro TOHGO*

Torsional fatigue tests of SiC whisker or SiC particulate reinforced 6061-T6 aluminum matrix composite (SiCw/Al or SiCp/Al), fabricated by a high pressure infiltration method, were performed. From a comparison with the properties of the monolithic aluminum alloy, it became clear that the torsional fatigue strength of 6061Al alloy was increased by reinforcing either with SiC whiskers or SiC particulates. Unlike strong orientation dependency of the tensile strength or fatigue strength in rotating bending, no orientation dependency was observed in the torsional fatigue strength of the SiCw/Al with highly aligned whiskers. In the SiCp/Al, cracks both parallel and transverse to the axial direction of test piece were observed. On the other hand, cracks in the SiCw/Al were always formed parallel to the direction of aligned whiskers. That is, cracks parallel to the axis were observed in the L oriented specimen whose axis was parallel to the direction of aligned whiskers and cracks transverse to the axis were observed in the T oriented specimen whose axis was transverse to the aligned whiskers. Importance of shear deformation in initiating fatigue cracks was clarified.

Key words : MMC, SiC whisker, SiC particulate, Torsional fatigue, 6061Al, Aligned whisker, Longitudinal crack, Orientation, Principal shear plane

1 緒 言

低密度の金属をマトリックスに用い、セラミックスの繊維、ウイスカあるいは粒子を強化相とした金属基複合材 (MMC) は比剛性、比強度が高く、耐摩耗性に加えて耐熱性にも優れているという特徴をもつ。なかでも、ウイスカあるいは粒子といった不連続な強化相を用いた MMC は、上述の一般特性に加えて、押出し、圧延、切削などの二次加工も比較的容易であることから、航空宇宙用構造物、自動車エンジンなどの部材として一部実用に供されているが^{1)~5)}、より広範囲な分野への利用が検討されている。

実用化に当たって必要なこの種 MMC の機械的特性に関しても相当明らかにされており、著者らの研究室においても本研究で用いたと同様の材料について引張や疲労特性などの検討を行っている^{7)~10)}。しかし、疲労強度特性に関しては軸荷重あるいは回転曲げ荷重に対する結果が多く、ねじり疲労強度についての検討はほとんど行われていない。複合材のねじり疲労特性が、回転曲げあるいは軸荷重に対する疲労と同様に、マトリックス材に比べて優れているかどうかについてを明らかにすることは、用途開発を検討する立場からも必要と思われる。

以上のことから、本研究では SiC のウイスカあるいは粒子で強化した 6061Al 合金複合材についてのねじり

疲労特性の検討を行ったものである。

2 試料および実験方法

供試材は体積率で 25% の SiC ウイスカ、5 あるいは 10% の SiC 粒子を含む 6061Al 合金基複合材 (以後、それぞれ SiCw/Al, 5% SiCp/Al, 10% SiCp/Al と略記) である。これらの素材は、ウイスカあるいは粒子のプリフォームに 6061Al 合金の溶湯を高圧鋳造法¹¹⁾にて含浸させた直径 200 mm のインゴットを、熱間押出しにより 57×57 mm の角形ビレットにした後、T6 の熱処理を施したものである。また、比較のため同様な方法で作製したマトリックス単独材 (6061Al と略記) も用意した。

各供試材の組織写真を Fig. 1 に示す。いずれの組織も全体的に押出し方向に、また、SiCw/Al においては強化相のウイスカもその方向に配向していることが明らかである。なお、供試材におけるウイスカの直径は 0.5~1.0 μm 、平均長さは約 7 μm で、粒子の直径は 6~30 μm であった。これら素材の引張特性を Table I に示す。複合材のヤング率、0.2% 耐力、引張強さはマトリックス材に比較して大であり、伸びは小となっている。ウイスカによる強化は粒子に比べ大であること、ウイスカ強化複合材の押出し方向 (SiCw/Al-L) の強度はそれと直交する方向 (SiCw/Al-T) に比べ相当大きくて、顕著な強度の異方性を示すことなどが注目される。

† 原稿受理 平成 7 年 3 月 30 日 Received Mar. 30, 1995

* 正 会 員 静岡大学工学部機械工学科 〒432 浜松市城北, Dept. of Mech. Eng., Shizuoka Univ., Johoku, Hamamatsu, 432

** 静岡大学大学院 〒432 浜松市城北, Graduate Student, Shizuoka Univ., Johoku, Hamamatsu, 432

Fig. 1. Three dimensional micrographs of (a) 6061Al, (b) 5 % SiCp/Al, (c) 10 % SiCp/Al and (d) SiCw/Al.

Table I. Tensile properties of test materials.

Material	0.2% proof stress $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Tensile strength σ_B (MPa)	Elongation (%)	Young's modulus E (GPa)
6061Al	346	365	16.0	66.9
5% SiCp/Al	349	371	15.8	70.7
10% SiCp/Al	354	378	7.0	75.0
SiCw/Al-L	454	596	2.2	117.4
SiCw/Al-T	361	373	1.7	99.0

Fig. 2. Shape and dimensions of torsional fatigue specimen.

Fig. 3. Attachment for torsional fatigue testing machine.

上述した角形の素材より Fig. 2 に示す形状の疲労試験片を機械加工にて製作したが、その採取にあたっては試験片の軸と押出し方向とが一致するようにした。ただし、SiCw/Al においては上記のような顕著な引張強度の異方性が見られたことから、押出し方向に加えて、それと直交する方向からも試験片を作製した。

ねじり疲労試験にはシェンク式試験機（容量 156.8kN・m）を用い、Fig. 3 に示す治具を介して試験片を装着した。

試験は室温大気中にて繰返し速度を 30Hz とし、両振りの負荷を与えた。軸方向にき裂が進展した試験片につ

いては、有尺顕微鏡による測定の結果、き裂が試験片の平行部長さである 8 mm に達した時点での繰返し数をもって破断繰返し数とした。

3 結果および考察

繰返しねじり試験で得られた複合材の $S-N$ 曲線を Fig. 4 および Fig. 5 に示す。なお、両図には比較に用いたマトリックス単独材 6061Al の結果も併せて記載している。

Fig. 4 に示したウィスカ強化複合材においては、ねじり疲労強度に及ぼす試験片採取方向の影響はほとんど認められず、ウィスカの配向方向あるいはそれに直交する方向の SiCw/Al-L, SiCw/Al-T とともに 10^7 回時間強度は 103MPa で、マトリックス材である 6061Al の約 1.6 倍となっている。同一素材の回転曲げ疲労強度においては、引張強度と同様に顕著な異方性が見られ、 10^7 回時間強度は L 方位で 207MPa, T 方位で 136MPa と方位によって約 1.5 倍の違いがあったことと対照的である。^{7),8)}

Fig. 5 に示した SiCp/Al の結果においては SiC 粒子の体積率増加とともにねじり疲労強度は向上し、6061Al の 10^7 回時間強度 62.7MPa に対し 5% SiCp/Al では 65.7MPa, 10% SiCp/Al では 77.4% となっている。同一素材についての回転曲げ疲労強度は粒子の体積率に関わらず、マトリックス単独材よりやや低い値となり、不均一な SiC 粒子分散の結果生じる粒子クラスタの存在が原因であったと指摘されている。本実験結果では粒

Fig. 4. $S-N$ curves for SiC whisker reinforced composites of different orientations and monolithic alloy in torsion.

Fig. 5. S-N curves for SiC particulate reinforced composites of different volume fractions and monolithic alloy in torsion.

子体積率に応じて疲労強度も向上していることから、ねじり疲労におよぼす粒子クラスタ存在の影響はほとんど認められないことが明らかとなった。回転曲げ負荷においては、静水圧応力成分が零のねじり負荷の場合とは異なって静水圧の応力成分が存在している。この静水圧成分がSiC粒子のクラスタに対し粒子とマトリックス、あるいは粒子同士のはく離を引き起こす作用をして、疲労き裂の発生を助長させたことが一因と考えられる。さらに、後述のように、ねじり疲労の場合には回転曲げの場合とは違って、せん断応力がき裂発生の支配因子であることも一因であろう。

上記のねじり疲労と、以前に著者らの研究室で行われた同一素材に対する回転曲げ疲労との強度を比較するために、両者を von Mises の相当応力で整理した結果を Fig. 6 に示す。実線は回転曲げ疲労の、データ点は本研究でのねじり疲労の結果である。マトリックス材 6061Al のねじり疲労強度は回転曲げ疲労強度に比して相当低い値となっているのに対し、粒子強化複合材の 5%SiCp/Al ではその差が減少し、10%SiCp/Al でのねじり疲労強度は回転曲げ疲労強度よりむしろ高くなっている。SiC 粒子の複合化による 6061Al のねじり疲労特性の改善が明らかである。一方、顕著な方位の影響が現れたウイスカ強化複合材 SiCw/Al の回転曲げ疲労での 10^7 回時間強度は SiCw/Al-L で 207MPa, SiCw/Al-T で 136MPa であったことから、ねじり疲労強度のデータは回転曲げ疲労における LT 両方位に対する S-N 曲線の間に位置している。

ねじり疲労の繰返しせん断による破壊応力と回転曲げ疲労の繰返し引張-圧縮による破壊応力との結果が、von Mises の相当応力で整理できるとした場合のねじり疲労強度の回転曲げ疲労強度に対する比の値 0.57 に比べて、 10^7 回時間強度で求めた 6061Al でのこの比の値は 0.49 で、炭素鋼、合金鋼あるいは非鉄合金についての¹²⁾ 平均値 0.55 と比較して小さく、マトリックス材のねじり疲労に対する抵抗は弱いといえる。これに対し、SiCw/Al-L, SiCw/Al-T, 5%SiCp/Al および 10%SiCp/Al におけるこの比の値はそれぞれ 0.5, 0.76,

Fig. 6. Comparison of fatigue behavior in torsion and in rotating bending using von Mises criterion.

Fig. 7. Cracks observed on the surface of 5% SiCp/Al.

0.54, 0.69 となり、この点からも 6061Al ねじり疲労に対する抵抗は SiC のウイスカあるいは粒子で複合化することにより改善されることが明らかである。

Fig. 7 に粒子強化複合材の代表例として繰返しねじりを加えた 5%SiCp/Al の表面写真を示すが、粒子が少ないマトリックス・リッチの領域において試験片の軸に平行およびそれと直交する二つの方向にき裂が多数観察される。丸棒のねじりにおいては、軸に垂直および平行な主せん断応力面において、外側面で最大となるような半径に比例したせん断応力が生じている。観察されたき裂の発生方向は主せん断応力面の丸棒表面におけるトレースと一致していることから、粒子強化複合材のねじり疲労においてせん断応力のき裂の発生に果たす役割が大であることが明らかとなった。

同様の議論をウイスカ強化複合材に適用すると、SiCw/Al-L での軸に平行なウイスカは軸に垂直な面でのせん断変形に対して抵抗となるが、含軸断面でのせん断変形に対する抵抗とはならず、軸に平行なき裂の発生が予想できる。さらに、含軸断面でのせん断によるマトリックスからのウイスカのはく離は、き裂の発生あるいは成長を助長すると考えられる。これに対し、SiCw/Al-T においてのせん断変形に対するウイスカの役割は、上述の SiCw/Al-L とは逆となる。すなわち、軸に直交する面上に存在するウイスカは含軸面でのせん断に対し抵抗として働くが、軸に直交する面でのせん断に対しては抵抗とならず、軸に直交するき裂の発生が予想

Fig. 8. Fatigue crack propagation paths in SiCw/Al of L orientation (a) and T orientation (b).

できる。Fig. 8にはウイスカ強化複合材で観察されたき裂の写真を示す。上で議論したように(a)の SiCw/Al-Lでは軸に平行な、(b)の SiCw/Al-Tでは軸に直交するき裂が見られる。回転曲げ疲労強度で顕著な方位依存性が見られたウイスカ強化材でも、ねじり疲労強度において方位依存性が存在しなかったことも上記の議論から理解できる。

次に、き裂が試験片の軸方向に進展した SiCw/Al-Lでの繰返し数に伴うき裂長さの変化をFig. 9に示す。き裂の試験片軸方向への投影長さを各応力での破壊までの繰返し数に対する割合で整理したものである。応力が147MPaではき裂長さが0.15 mm付近、115MPaでは0.5 mm付近から急激な進展速度の増加が始まる。この様に急激なき裂進展の開始するき裂長さは応力によって相当異なっているが、この時点に至る繰返し数の寿命に対する割合はいずれの場合も約90%とほぼ同じであった。き裂の進展が試験片の軸方向となる SiCw/Al-Lのねじり疲労においても、き裂の発生から微小き裂への成長までの段階が疲労過程を支配する因子であることを示唆している。

4 結 言

SiCのウイスカあるいは粒子で強化した6061Al合金複合材についてねじり疲労特性を検討し、以下の結論を得た。

- (1)ウイスカあるいは粒子のいずれで強化しても6061Al合金のねじり疲労強度は向上した。
- (2)一方向に配向したウイスカで強化した複合材のねじり疲労強度には引張や回転曲げ疲労で見られた強度異方性はなく、ねじりの軸がウイスカに平行あるいは垂直のいずれの場合も同一の疲労強度であった。
- (3)粒子強化複合材のねじり疲労においては回転曲げ疲

Fig. 9. Crack growth parallel to axial direction in L oriented SiCw/Al against number of cycles normalized by fatigue life.

勞で見られた粒子クラスタの存在による強度の低下は認められなかった。

(4)複合材のき裂発生にはせん断変形が重要であり、粒子強化材ではねじり軸に平行および直交の両方向にき裂が発生した。また、ウイスカ強化材においてはねじりの軸とウイスカの配向とが同じ場合には軸に平行に、直交する場合には軸に垂直に多数のき裂が発生した。

(平成6年11月25日 日本材料学会第22回疲労シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 簗田芳郎, 鉄と鋼, **75**, 1777 (1989).
- 2) 日本材料学会高温強度部門委員会 MMC ワーキンググループ, “短繊維強化アルミ合金の高温疲労強度に関する共同研究成果報告書”, (1993) 日本材料学会.
- 3) 菅沼徹哉, 田中淳夫, 鉄と鋼, **75**, 1790 (1989).
- 4) R. A. Signorelli, “Concise Encyclopedia of Composite Materials” (Edited by A. Kelly), 185 (1989) Pergamon Press, Oxford
- 5) E. A. Feest, Mater. Design, **7**, 58 (1986).
- 6) R. K. Everett and R. J. Arsenault, “Metal matrix composite: Mechanisms and properties”, (1991) Academic Press.
- 7) H. Ishii, K. Tohgo, H. Araki and K. Ohshima, “Mechanical Behavior of Metals-VI”, **2**, 421 (1991) Pergamon Press.
- 8) H. Ishii, K. Tohgo and H. Araki, Engng. Fract. Mech., **40**, 821 (1991).
- 9) H. Ishii, P. Agus Puji, K. Tohgo and H. Araki, APCFS '93, 47 (1993) 日本機械学会.
- 10) S.-Y. Yu, H. Ishii and K. Tohgo, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., **17**, 571 (1994).
- 11) K. Ohori, H. Watanabe and Y. Takeuchi, Mater. Sci. Technol., **3**, 57 (1989).
- 12) N. E. Frost, K. J. Marsh and L. P. Pook, “Metal Fatigue”, 77 (1974) Clarendon Press.