

第一段タービンブレードとして実機使用した 単結晶 Ni 基超合金の損傷評価

Damage Assessment Method for Serviced as First Stage High Pressure Turbine Blade

利用者 近藤 義宏¹⁾、三浦 信祐¹⁾、村田 純教²⁾、寺田 芳弘³⁾、竹山 雅夫³⁾、
塩田 佳徳⁴⁾、菅蒲 敬久⁴⁾、石山 新太郎⁴⁾

Yoshihiro KONDO, Nobuhiro MIURA, Yosinori MURATA, Yoshihiro TERADA, Masao TAKEYAMA
Yoshinori SHIOTA, Takahisa SHOBU, Shintaro ISHIYAMA

所 属 ¹⁾防衛大学校、²⁾名古屋大学、³⁾東京工業大学、⁴⁾原子力機構

キーワード Ni 基超合金、タービンブレード、 γ' 相、ラフト構造

1. 目的

近年、航空機の高性能化および地球環境への負荷低減要求に伴い、ジェットエンジンのさらなる高出力、高効率化が求められている。ジェットエンジンの効率はタービン入口温度（TIT：Turbine Inlet Temperature）に強く依存し、高温ほど高効率となる。最新のエンジンでは、TIT が 1500℃のものも実用化され、今後も上昇しつづけると考えられる。ところで、TIT の上昇によって直接的に影響を受けるのは、燃焼器、高圧タービンブレードおよびノズルガイドベーンであり、これらに適用されている Ni 基超合金の耐用温度向上が不可欠となる。なかでも、稼働中、温度、応力の両面から見て最も過酷な条件に曝されるタービンブレードは、ブレード先端部で高温、低応力、ブレード付根部では低温、高応力であるといわれている。しかし、稼働中のブレードは高温下で高速回転しているため、実際の温度、応力を測定することは困難である。新たな合金開発、ブレードの設計、さらには安全性および経済性の観点から急務となっている余命推定技術の確立のためには、ブレードの実機稼働温度、応力状態の解明が必要不可欠であると考えられる。

Ni 基超合金の強化相である立方体状の γ' (Ni₃(Al, Ti)) 相は、高温下で[001]方向に引張クリープ変形を受けると、応力軸に対し垂直方向に連結し、板状のラフト構造を形成する。さらにラフト構造の形成時期は温度、応力条件により異なる。これまでこの組織形態の知見を活用し、実機使用したブレードの組織形態との比較検討を行い、温度応力分布の推定を試みている。ところが、高温低応力長時間で形成されたラフト構造と低温高応力短時間でのラフト構造との形態に差異はなく、 γ' 相の形状のみに基づく定量的評価は困難である。したがって、ブレードの余命推定には、組織形状のみならず、新たな組織因子の導出が必要となっている。

そこで本研究では、長手方向を[001]とした単結晶 Ni 基超合金、CMSX-4、の未使用材および 1273K、100~320MPa にてクリープ試験を中断したクリープ中断材について、中性子による 001、002、100 および 200 反射における 2θ 値および半価幅を求めるとともに格子定数を算出し、クリープ損傷に伴う格子定数および半価幅の変化を調べ、 γ' 相の組織変化との関連を検討し、ブレード余命推定技術の確立を目的とする。

2. 方法

供試材には、長手方向を 001 とした単結晶 Ni 基超合金、CMSX-4、の未使用材および 1273K-100~320MPa にてクリープひずみ、約 0.01 で中断したクリープ中断材を用いた。中性子回折実験は RESA-2 にて、001、002、100 および 200 反射について行った。また、部位による差異を確認するため、未使用材については 3 カ所、1273K-320MPa、1h クリープ中断材については 5 カ所について測定した。

3. 研究成果

試験片の部位による差異の有無を確認するため、未使用材の 200 および 002 反射のプロファイルを図 1 および 2 に示す。200 および 002 反射ともに、いずれの部位でも回折角およびプロファイルに大きな差異は認められない。200 および 002 方向の半価幅がそれぞれ約 0.44° および約 0.48° であり、この半価幅を格子ひずみとすれば、200 方向の格子ひずみが 002 方向に比べ若干少ないようである。

未使用材における格子定数の部位に伴う変化を図 3 に示す。200 および 002 反射での格子定数は部位によらず一定で、それぞれ 3.5856 および 3.5844 Å である。一方、100 および 001 反射での格子定数は部位により異なり、それぞれ 3.5876~3.5908 Å および 3.5803~3.5834 Å と、部位により大きな差異が認められた。

1273K-320MPa、1h クリープ中断材における格子定数の部位に伴う変化を図 4 に示す。200 および 002 反射での格子定数はいずれも 3.5865~3.5886 Å である。一方、100 および 001 反射での格子定数は部位により異なり、それぞれ 3.5799~3.5897 Å および 3.5858~3.5881 Å と、部位により大きな差異が認められた。未使用材および 1273K-320MPa、1h クリープ中断材ともに 100 および 001 反射での格子定数が部位により大きく異なるのは、100 および 001 反射の強度が極めて低かったことが考えられる（図 5）。その原因として、回折強度の弱い (hkl) であったこと、中性子の入射角が試料に対して浅い、すなわち θ が小さいため、中性子パスが長くなってしまったことが推察される。また、100 および 001 反射では γ' 相の超格子反射が、また 200 および 002 反射では γ 相と γ' 相の反射が重なり合って認められるはずである。本来ならば、100 および 001 反射から γ' 相の格子定数を求め、この格子定数から 200 および 002 反射の回折角を逆算し、2つのガウス関数にフィッティングして、 γ 相の格子定数を算出すべきである。しかし、100 および 001 反射の強度がいずれも極めて低く、100 および 001 の格子定数の値に信頼性のないことから、200 および 002 の格子定数のみで検討する。

応力の増加に伴うクリープひずみ、約 0.01 におけるクリープ中断材の 200 および 002 の格子定数変化を、未使用材での結果と併せて図 6 に示す。200 および 002 の格子定数も応力の増加に伴い若干、増加するようである。

クリープひずみ、約 0.01 を与えて、 γ' 相がラフト化している 1273K-160MPa、300h クリープ中断材の 200 および 002 反射のプロファイルを図 7 に示す。200 方向の半価幅は約 0.55° と未使用材に比べ、大きく増加しているが、002 方向の半価幅は約 0.48° と未使用材と比べほとんど変化していない。このことは γ' 相がラフト化すると 200 方向の格子ひずみのみが大きくなることを示唆している。

クリープひずみ、約 0.01 を与えても、 γ' 相がラフト化せず、立方体状のままである 1273K-320MPa、1h クリープ中断材の 200 および 002 反射のプロファイルを図 8 に示す。200 および 002 方向の半価幅はそれぞれ約 0.58° および約 0.52° であり、未使用材に比べ増加している。特に 002 方向に比べ、200 方向における半価幅の増加の割合が著しい。クリープひずみを受けても、 γ' 相が立方体状のままの場合、格子ひずみは 200 および 002 方向ともに大きくなるが、特に、200 方向で大きくなるが示している。

以上のことから、クリープ変形を受けると γ' 相がラフト化しても、立方体状のままであっても 200 方向の格子ひずみは大きくなる。また γ' 相がラフト化すると 002 方向の格子ひずみは変化しないが、 γ' 相が立方体状のままでは 002 方向の格子ひずみも大きくなることと結論される。

4. 結論・考察

長手方向を001とした単結晶Ni基超合金、CMSX-4、の未使用材およびクリープ中断材について、中性子による001、002、100および200反射における 2θ 値および半幅幅を求めるとともに格子定数を算出し、クリープ損傷に伴う格子定数および半幅幅の変化を調べ、 γ' 相の組織変化との関連を検討した結果、以下の結論を得た。

- 1) 100および001反射の強度が極めて低かったため、100および001反射から γ' 相の格子定数を求め、この格子定数から200および002反射の回折角を逆算し、2つのガウス関数にフィッティングして、 γ' 相の格子定数を算出することができなかった。
- 2) クリープ変形を受けると γ' 相がラフト化しても、立方体状のままであっても200方向の格子ひずみは大きくなる。また γ' 相がラフト化すると002方向の格子ひずみは変化しないが、 γ' 相が立方体状のままでは002方向の格子ひずみも大きくなると結論される。

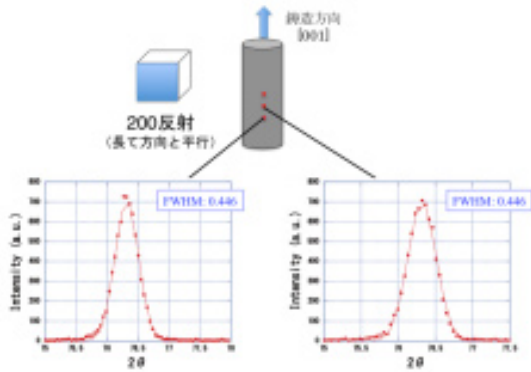


図1 未使用材の200反射のプロファイル

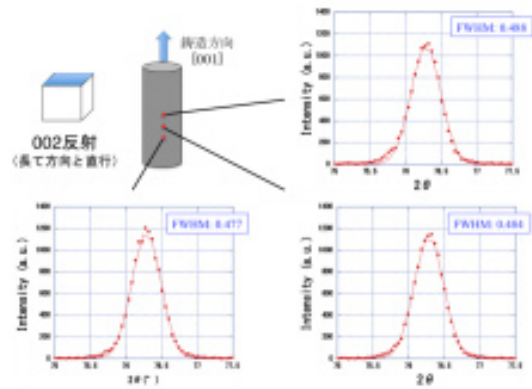


図2 未使用材の002反射のプロファイル

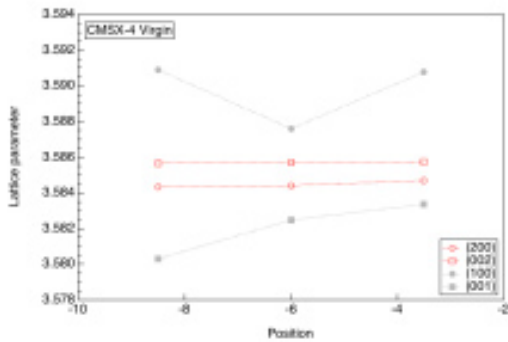


図3 未使用材における格子定数の部位に伴う変化

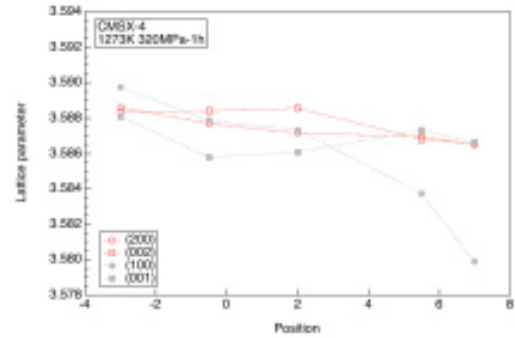


図4 クリープ中断材における格子定数の部位に伴う変化

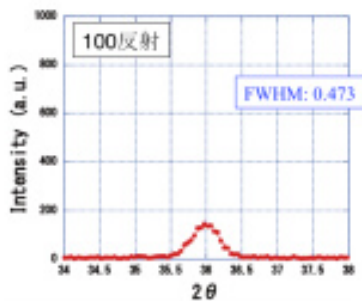


図5 未使用材の100反射のプロファイル

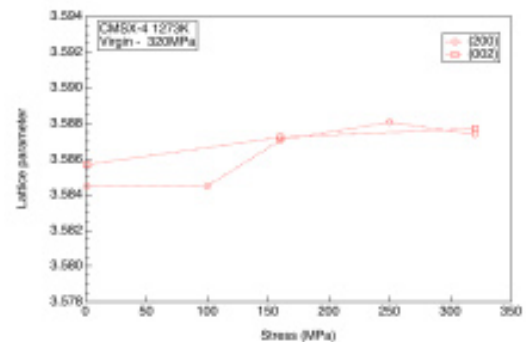


図6 クリープ中断材の200および002の格子定数と応力の関係

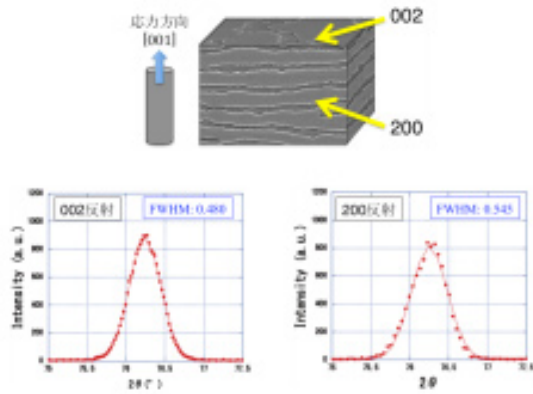


図7 1273K-160MPa、300h クリープ中断材の200 および 002 反射のプロファイル

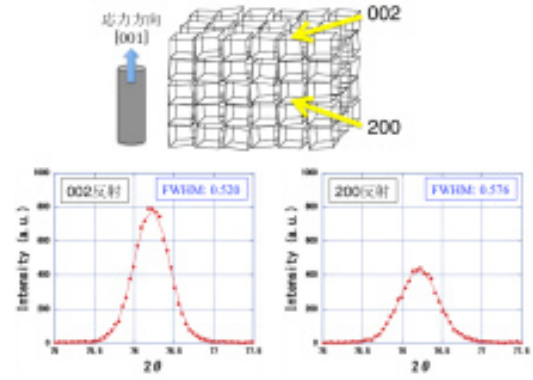


図8 1273K-320MPa、1h クリープ中断材の200 および 002 反射のプロファイル