

氏 名	やまもと まさと 人
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 2748 号
学位授与の日付	平 成 19 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	工 学 研 究 科 機 械 理 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	Ni 基一方向凝固超合金の高温疲労き裂伝ばに及ぼす微視組織の影響に関する研究
論文調査委員	(主 査) 教 授 北 村 隆 行 教 授 宮 崎 則 幸 教 授 北 條 正 樹

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、ニッケル基（Ni 基）一方向凝固超合金の高温における疲労破壊特性について、実験観察と破壊力学解析に基づいて研究した成果についてまとめたものであって、6 章からなっている。

第 1 章は緒論であり、従来の耐熱金属材料の高温強度研究における問題点を整理するとともに、特有の微視組織を有するニッケル基（Ni 基）一方向凝固超合金の工業的有用性および高温強度に関する研究課題について検討している。また、これに基づいて、本研究の目的と位置付けについて述べている。

第 2 章は、本研究で対象とした Ni 基一方向凝固超合金の基本的強度特性を検討している。まず、平滑試験片の引張り強度特性の方位依存性より、微視組織が機械的特性に強く影響することを明らかにしている。つぎに、平滑試験片の高温疲労試験を実施し、その寿命と結晶方位の関係について定量的な評価を行っている。さらに、その原因の詳細について調べるため、破断試験片の破壊形態を顕微鏡観察し、結晶粒内破壊型（破壊をもたらすき裂の伝ば経路が結晶粒内の場合）と結晶粒界破壊型（それが結晶粒界の場合）が混在することを明らかにしている。さらに、結晶成長方向と荷重軸の関係により破壊形態が異なり、両者の相違の増大とともに、き裂伝ば経路に占める粒界の割合が増大することを解明している。

第 3 章は、中央貫通き裂付平板試験片を用いて、クリープの影響のない条件下における高温疲労試験を行い、き裂伝ば速度を精密に測定するとともに、き裂伝ば経路や微視組織がき裂伝ば速度に及ぼす影響について詳細に観察している。平均的には、き裂伝ば速度 da/dN （微視組織の影響を受けた値）は、応力軸に垂直な貫通き裂に対する有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} （微視組織の影響を考慮しない破壊力学パラメータ）と比較的良好な関係が認められる。しかし、詳細には、微視組織の影響によってき裂伝ば速度に大きな増減が見られる。とくに、き裂と結晶粒成長方向が直交する場合について、結晶粒内型と結晶粒界型のき裂伝ばがあり、伝ば速度の顕著な増大は結晶粒界型の部分で発生している。

第 4 章は、第 3 章で実施したき裂伝ば試験のうち、微視組織の影響が最も特徴的に現れた一試験片に対して、その結晶粒の形状、配列、個々の結晶粒の弾性方位依存性、き裂伝ば経路を再現した詳細な応力解析を行い、微視組織による破壊駆動力の変動について検討している。解析は、有限要素法を用い、メッシュ分割等に配慮して精密な解析を行っている。また、解析対象の破壊力学パラメータは、き裂先端近傍の特異応力・ひずみ場を代表する J 積分である。とくに、(1)結晶粒個々の形状と金属学的方位およびそれらの配列、(2)微視的に変動するき裂伝ば経路形状、のそれぞれを独立して考慮した場合のモデルに対する J 積分も解析し、実材料の結晶粒形状および配列が破壊力学パラメータの変動に及ぼす影響を明確にしている。その結果、粒内型き裂の伝ば速度の増減は、主に微視的破壊駆動力（破壊力学パラメータ）の変動に起因するものであることを明らかにしている。また、結晶粒界型の伝ば速度の加速は、低破壊抵抗によるものであることを解明している。

第 5 章は、最大引張ひずみでひずみ保持を有するクリープの影響が強い高温疲労条件下のき裂伝ば試験を実施し、き裂伝ば経路と微視組織の関係について詳細観察を行っている。時間依存の変形や損傷によって、き裂形態や伝ば速度がクリープの影響のない場合と大きく異なることを明らかにしている。とくに、き裂伝ば経路がほぼ粒界に沿っている。また、主き裂

前方に多数の表面き裂が発生・成長し、主き裂伝ばに大きく影響していることを解明している。さらに、き裂先端近傍領域のひずみ分布を、画像処理を援用して詳細に観察・解析した結果、き裂先端近傍の局所ひずみは微視組織の影響によって大きく変動しており、それが主き裂の分岐や伝ば速度の増減に関連していることを明らかにしている。

第6章は結論であり、本論文で得られた成果を総括している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、発電用ガスタービン高温部品の高信頼性確保を目的として、ニッケル基（Ni基）一方向凝固超合金の高温における疲労破壊特性について、実験観察と破壊力学解析に基づいて研究した成果についてまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

発電用ガスタービン動翼等の高温機器に用いられるNi基一方向凝固超合金は、粗大で伸張された特異な微視組織を有している。これらの部材には、起動・定常運転・停止等によって疲労負荷が課されるため、それによるき裂の伝ばが大きな問題となっている。微細な組織を有する材料における高温疲労き裂伝ばについては破壊力学の有効性が示されているが、き裂長さや組織の大きさが同程度である材料の場合には、その適用性に問題がある。本研究では、この特異な組織を有する一方向凝固超合金の基礎的機械強度特性を評価するとともに、高温疲労き裂伝ば試験とその組織を考慮した解析を行って、それに適用可能な破壊力学について検討している。まず、基本的機械特性として、引張り強度特性の方位依存性を明らかにした後、高温疲労試験を行っている。疲労試験では方位の相違が寿命に及ぼす定量的影響を評価している。さらに、破面の観察より、結晶粒内型（粒内経路のき裂伝ば）と結晶粒界型（粒界経路のき裂伝ば）の破壊が混在することを明らかにし、それらに対する結晶方位依存性を解明している。つぎに、中央貫通き裂平板試験片を用いてクリープの影響のない条件下における高温疲労試験を行い、き裂伝ば特性と微視組織の関係について精密に比較検討している。とくに、き裂伝ば速度に大きな増減の見られたき裂と結晶粒成長方向が直交する場合について、粒内型と粒界型のき裂伝ばを観察している。伝ば速度の顕著な増大部は粒界型の部分である。また、試験片の結晶粒形状・方位・き裂伝ば径路を再現した有限要素法解析を実施し、微視組織による破壊力学パラメータ（J積分）の変動を精密にシミュレーションしている。その結果、粒内型き裂の伝ば速度の増減は、主に微視的破壊駆動力（破壊力学パラメータ）の変動に起因するものであることを明らかにしている。一方、粒界型の伝ば速度の加速は、低破壊抵抗によるものである。さらに、クリープの影響がある高温疲労条件下におけるき裂伝ば実験を行い、粒界型のき裂伝ばの詳細観察を行っている。

本論文は、高温で使用される機器の信頼性確保に必須である材料強度について、力学的・金属学的見地からき裂伝ば特性を詳細に観察し、その微視組織との関連を明らかにしたものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成19年1月22日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。