

氏 名	ふじ 藤 山 かず 一 なり 成
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学位記番号	論工博第3370号
学位授与の日付	平成10年9月24日
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
学位論文題目	超合金の多数き裂シミュレーションによる高温疲労損傷解析と実機部材への応用に関する研究

(主査)

論文調査委員 教授 大谷隆一 教授 柴田俊忍 教授 落合庄治郎

## 論 文 内 容 の 要 旨

苛酷な条件のもとで用いられている最近のエネルギー関連機器においては、高温部品の余寿命診断に基づく保守管理と延命化対策の必要性がますます高まってきている。すなわち、損傷をある程度許容しながらできる限り長期間使用するために、部品の交換・補修時期と補修量を的確に予測する手法の開発が求められている。本研究はこの要望に応えるためになされたものであって、本論文では、実用ガスタービンの寿命支配要因である高温低サイクル疲労損傷に注目し、それを代表する多数き裂の発展過程を実験によって明らかにするとともに理論モデリングを行い、数値シミュレーションによって損傷を解析する方法を提案した。かつ、それをガスタービン翼に適用して有効性を確認した。

緒論である第1章では、コンバインドサイクル発電プラント用ガスタービンの使用実績を調査し、超合金からなる燃焼器、トランジションピース、静翼、動翼等の高温部位の寿命が主に熱疲労の多数き裂によって支配されることを明らかにした。また、この多数き裂の発生と進展をシミュレーション解析して部材の損傷解析・余寿命評価を行う本研究の方法が、従来の演繹的・順解析的評価法とは異なる新しい帰納的・逆解析的評価法に基づくものであることを説明し、その開発ステップと本論文の構成について述べている。

第2章では、Co基精密铸造超合金FSX414、Ni基圧延超合金Nimonic263およびNi基精密铸造超合金IN738LCの高温低サイクル疲労試験並びにマイクロ組織観察を行い、疲労損傷形態とマイクロ組織形態の関係について検討し、炭化物などの析出により酸化が容易に生じる粒界やデンドライト境界に選択的にき裂が発生することを明らかにした。また、FSX414の多結晶デンドライト組織がフラクタル図形を応用したシミュレーションモデルによって簡便に再現できることを明らかにした。

第3章では、上記3材料の高温低サイクル疲労における多数のき裂の発生過程を観察した。その結果、き裂発生量の累積値を表わす指標としてき裂長さ密度 $l$ が有効であり、き裂長さ密度比 $l/l_c$ と繰返し数比 $N/N_{25}$ の関係は、対数正規分布関数で表わされることを示した(ただし、 $l_c$ は破損繰返し数 $N_{25}$ における $l$ の限界値)。また、 $l/l_c - N/N_{25}$ 関係が微小き裂発生回数の統計分布に対応していることを示した。

第4章では、上記3材料の高温低サイクル疲労における多数のき裂の進展過程を追跡観察した。その結果、き裂のほとんどは発生後比較的急速に進展するが、デンドライトコアなどのマイクロ組織的な障壁によって停留し、その後の進展再開は主にき裂合体によることを明らかにした。き裂合体率はき裂長さ密度にはほぼ比例して増加し、発生するき裂の数が飽和してもき裂の合体が継続して生じるため、最大き裂長さが増加することを見出した。

第5章では、第2章から第4章までの観察結果に基づいて、超合金の多数き裂による損傷のシミュレーションモデルを構築した。すなわち、き裂発生までの損傷発展則としては、損傷変化率を破壊駆動力と破壊抵抗の比で表わし、繰返しに伴う破壊抵抗の低下と損傷による駆動力増加を考慮した。また、き裂進展における損傷発展則としては、き裂先端要素の損傷変化率をき裂進展駆動力と抵抗の比として表わした。本モデルによる数値シミュレーションの結果は、実験観察で得られたき裂発生・進展傾向と良い対応を示した。

第6章では、実機部品のき裂検査データをもとにき裂の発生・進展傾向を予測する方法として、統計的傾向解析手法を提案した。これに基づいてガスタービン静翼の多数疲労き裂の検査データを解析した結果、き裂長さの分布は対数正規分布で近似できることが明らかとなり、平均、分散、個数の各統計パラメータと起動停止回数との関係に基づきき裂長さ総和の変化傾向予測式を提案した。さらに、実機のき裂進展速度とき裂長さの関係は、試験片で得られた関係の延長上（外挿上）にあり、実機においても多数き裂の発生と合体支配型の損傷が試験片と相似的に生じていることが推察された。

第7章では、提案した多数き裂のシミュレーション解析法を静翼の損傷予測に適用し、実機静翼の計測データと比較対照した。その結果、試験片ベースで作成した組織シミュレーションモデルを実機寸法に相似的に粗視化し、損傷発展則の係数を補正することにより、実機におけるき裂の形態、分布、進展傾向等が模擬できることを示した。さらに、実機点検時のき裂計測結果を初期値に用いたシミュレーションにより、次回点検時の損傷状態が的確に予測できることを示し、本手法が余寿命予測法として有効であることを検証した。

第8章では、ガスタービン高温部品の寿命を左右する種々の因子を分析し、酸化等の化学的因子、炭化物析出や劣化相生成等の熱的・材料組織的因子はいずれも広範囲に分布し、多数分布熱疲労き裂に直接影響を及ぼす因子であるので、その影響も含めて本シミュレーション法が余寿命評価と保守管理にとって有力な手法となり得ることを強調した。さらに、耐熱疲労き裂に優れた材料開発や、現用材料の極限使用条件の見極めにも有効であることを示した。

第9章ではこれらの知見をまとめて結論とした。

## 論文審査の結果の要旨

本研究は、近年盛んに使用され、将来ますます高温・高圧化が期待されるコンバインドサイクル発電プラント用ガスタービンにおいて、高温部位の余寿命予測の高精度化および保守管理の最適化を図ることを目的として実施されたものである。研究対象材料は静翼材のCo基精密鑄造超合金FSX414、燃焼器・トランジションピース材のNi基圧延超合金Nimonic263および動翼材のNi基精密鑄造超合金IN738LCであり、得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) 実機部位の寿命を支配する熱疲労き裂は、実験室における高温低サイクル疲労試験で生じるき裂によって模擬できる。
- (2) 高温低サイクル疲労試験におけるき裂は、結晶粒界やデンドライト境界に選択的に多数発生する。発生したき裂の多くは比較的急速に進展するが、デンドライトコアによって阻止される。その後のき裂成長は、別のき裂との合体によってもたらされる。
- (3) 上記のき裂の形態、個数や長さの変化、合体の様子、それらと合金のマイクロ組織との関係等の観察結果に基づいて損傷モデルを立て、それによつてき裂発生・進展のシミュレーションを行う方法を提案した。
- (4) シミュレーションモデルの骨子は、損傷発展過程をき裂の発生と進展の2過程に分け、各損傷発展則をき裂発生駆動力と破壊抵抗の比およびき裂進展駆動力と破壊抵抗の比で表わした。
- (5) 本シミュレーション法をガスタービン静翼に適用し、実機き裂検査データと比較して良好なシミュレーションが得られることを示した。

以上要するに、本論文は、ガスタービンをはじめエネルギー関連高温機器をできる限り長期間使用することが今日的課題となっているのに鑑み、それに必要な保守管理と延命化対策として、部品や機器の健全性が維持される範囲内で部材に生じるき裂を許容することを基本思想とし、き裂の発生・進展を定量的に予測する新しい帰納的・逆解析的方法として多数き裂シミュレーション法を提案したものであって、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10年7月31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。