

# 経年タービン発電機のシャフトに発生する き裂の進展評価法

Method for Evaluating Crack Propagation in Slot-Dovetails of Aging Turbine-Generator Rotors

齊藤 和宏 松山 浩二 伊藤 裕道

■ SAITO Kazuhiro

■ MATSUYAMA Koji

■ ITO Hiromichi

海外の経年大型発電機では、シャフトに発生するダブテール部のき裂が問題となっている。この部位は、接触端特有の複雑な応力状態にあること、及び回転体であることから、これまではき裂発生防止についての対策が中心であり、き裂の進展評価については詳細に検討されていなかった。しかし、検出したき裂の取扱いについて顧客ニーズに合致する優れたサービスを提供するためには、検出されたき裂の進展を高精度で評価する技術が不可欠である。

そこで東芝は、ロータ曲げ応力、き裂周りの応力、非定常熱応力などを詳細な有限要素法応力解析により明らかにし、破壊力学手法を用いてき裂の進展性を評価する方法を開発した。

The propagation of cracks in slot-dovetails is a serious problem in the overseas maintenance of large turbine-generator rotors. Toshiba has established a shaft-wedge design to prevent the propagation of cracks in rotor slot-dovetails. However, it is generally difficult to estimate the behavior of such cracks because of the complex stress distribution around the area of contact. In the rehabilitation of turbine-generators in overseas markets, it is necessary to estimate the propagation of cracks in slot-dovetails in order to offer optimal solutions to power plant owners, who are facing various types of problems.

Toshiba has developed a method for evaluating crack propagation in slot-dovetails that uses finite element method (FEM) analysis and fracture mechanics, taking the stiffness of the rotor and thermal stress into consideration.

## 1 まえがき

タービン発電機では、シャフトのダブテール部にフレットング疲労が原因でき裂が発生することがある。東芝製品でも以前は、このき裂発生が問題となったことがあるが、現在ではフレットング疲労き裂の発生を防ぐ対策をほぼ完了している。一方、海外の経年大型発電機を中心に、定期点検時に検出されるダブテール部のき裂が依然として問題となっている。き裂などの欠陥評価においては、超音波探傷(UT)などの欠陥検出技術と、き裂の危険度を評価する進展解析が重要である。しかし、回転体では欠陥を許容しないというのが一般的な考え方であることから、ダブテール部についてもき裂発生の検討が中心であり、き裂の進展については必ずしも明らかにされていない。更に、この部分が接触部を含んだ複雑な構造であることも、き裂の進展解析を阻害する要因となっている。しかし、顧客に高度のメンテナンスサービスを提供するためには、検出されたき裂の危険度を高精度で評価することや、想定されるき裂の進展を基にき裂の非破壊検査基準を規定することが重要である。

以上より、詳細な有限要素法(FEM)応力解析をベースに、破壊力学手法を用いてダブテール部のき裂進展解析方法を開発した。以下に、ダブテール部のき裂進展メカニズムについて得られた知見と、開発したき裂進展評価方法の概要に

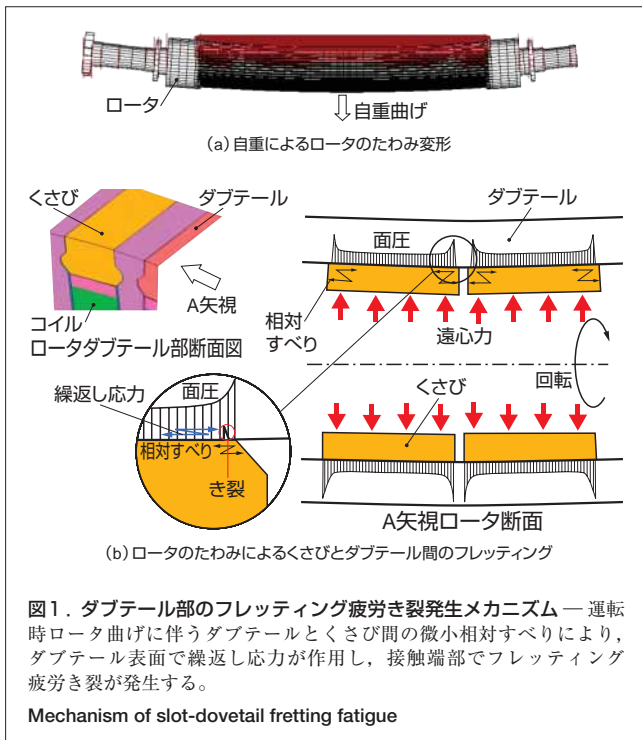
ついて述べる。

## 2 フレットング疲労き裂の発生状況について

ダブテール部のき裂は、フレットング疲労により発生することが知られている。フレットングとは、ある面圧下で接触している物体間で摩擦力を伴った微小な繰返し相対すべりが生じる現象のことであり、フレットングを伴う部位での材料の疲労現象がフレットング疲労と呼ばれている。

ダブテール部のフレットング疲労き裂の発生メカニズムを図1に示す。ダブテール部には、くさび、コイルなどの遠心力を支えるため高い接触面圧が作用する。ロータの回転に伴うロータのたわみ変形により、ダブテールとくさび間の接触面端部では微小の繰返し相対すべりが生じる。この際、接触端部表層では摩擦力により局所的に高い応力振幅が繰返し生じるため、接触端部に疲労き裂が発生する。摩擦力による表面層の高い応力振幅が原因であり、高い面圧下で圧縮平均応力の付加もあることから、ダブテール部のフレットング疲労き裂は表面で停留するケースが多い。

一方、ダブテール表面で発生したフレットング疲労き裂がダブテール内部へ進展し、破断に至る過程では、ダブテール部に作用するロータ曲げ応力が支配的であるとされる。



### 3 ダブテール部の応力解析の概要

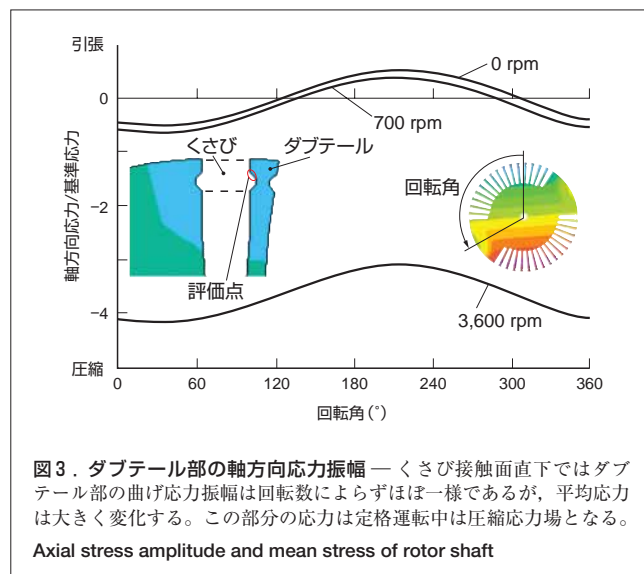
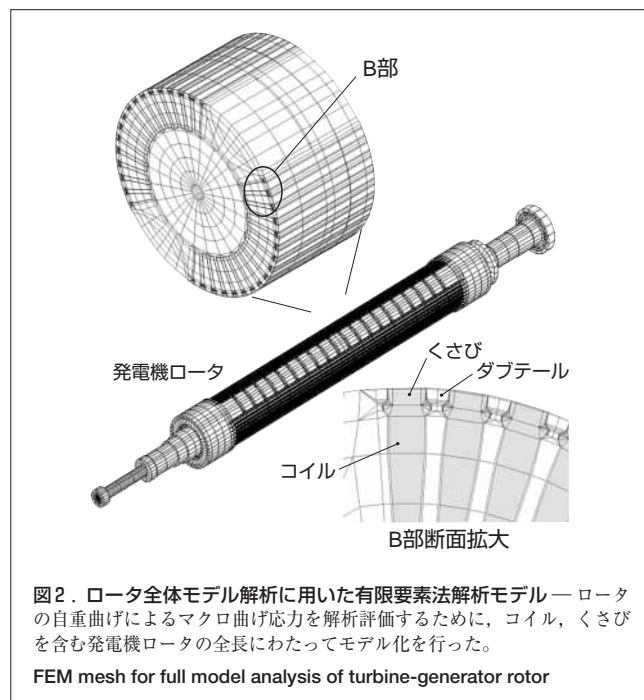
定期検査時に検出されたダブテール表面部のき裂が、内部へ進展するか否かを高精度で評価するためには、き裂部の応力分布を知ることが重要である。しかし、発電機ロータは、くさび、コイルなど多くの構成要素から成る複雑な構造物であることに加え、き裂が発生する部位はダブテールとくさびの接触部であり応力解析が難しい。また、き裂の進展解析に必要な熱応力などの平均応力も、定量的には明らかにされていない。ダブテール部に作用する複雑な応力を詳細に解析するためには、応力発生メカニズムに応じて解析の範囲を分けたモデル化が有効である。すなわち、発電機ロータ全体の応力を明らかにするためのロータ全体モデル解析、き裂周辺の接触応力と変形を明らかにするためのダブテール部ズームアップ解析、運転中のダブテール平均応力の推移を調べるための熱応力解析の3モデルについてFEM解析を実施した。

#### 3.1 ロータ全体モデル解析

ロータ全体モデル解析は、ロータの回転によりロータに生じるマクロ応力を把握するのが目的である。FEM解析モデルを図2に示す。ロータの回転曲げにより生じる応力を正確に解析するため、ロータ全長について、コイルなど内部構造物やクロススロットもモデル化した。要素数は3次元8節点ソリッド要素で約75,000要素、節点数は約98,000となる。くさびとダブテール間の接触はバネ要素を使ってモデル化した。遠心力及び自重による体積力を負荷することで、運転中

にダブテール部に作用する応力を解析できる。

図3に示すように、回転数が小さい時は、評価部位のダブテールが上半側にある場合には軸方向応力は圧縮、下半側では引張りに転じ、ロータの回転に伴い評価部位には自重曲げによる繰返し応力が生じる。この曲げ応力振幅の大きさは、回転数によらずほぼ同様である。回転数が上昇し遠心力が増加すると、ダブテール部には面圧荷重にほぼ比例した圧縮の平均応力が重畳する。くさび接触面直下のダブテール部の応力分布は、回転数が低い場合には引張りと圧縮の応力がほぼ等しい両振の応力場であるが、定格の3,600 rpmでは高い圧縮応力場となる。



### 3.2 ダブテール部のズームアップ解析

ロータ全体解析では、接触やき裂の影響を十分に反映した評価を行うことは難しい。き裂の進展解析を行うためには、き裂周りの応力、変形を詳細に把握することが必要である。このため、ダブテール部を拡大したズームアップ解析を行った。解析モデルを図4に示す。ズームアップ解析では、ダブテール部を中心にくさび2本分の解析モデルを作成し、隣り合うくさび間の応力干渉を考慮している。また、くさびとダブテールの接触面間には摩擦接触要素を入れ、ダブテールとくさびの局所的な面圧や相対すべりを解析する。更に、二つのくさび間のダブテール部接触表面には半だ円形のき裂を一つ設けた。

解析では、ロータ全体解析で得られたロータ断面の曲げ変形量分布に合わせて、ズームアップ解析モデルの両端面に

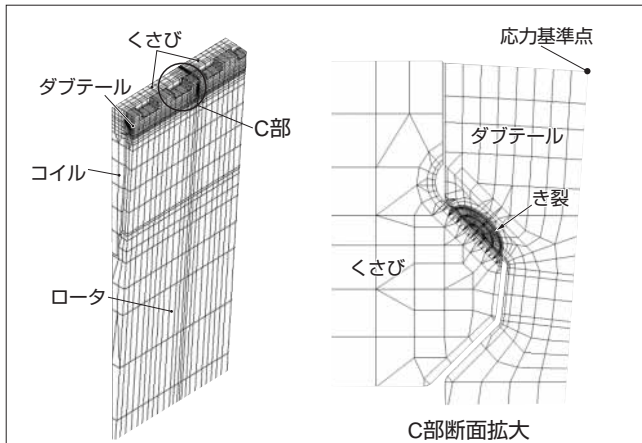


図4. ズームアップ解析の有限要素法解析モデル — ロータ全体モデル解析で得られた応力を基に、隣り合うくさびの応力干渉、摩擦、き裂の影響を考慮したダブテール部き裂周りの詳細応力評価のため、ズームアップ解析を行う。

FEM mesh for zoom-up model analysis

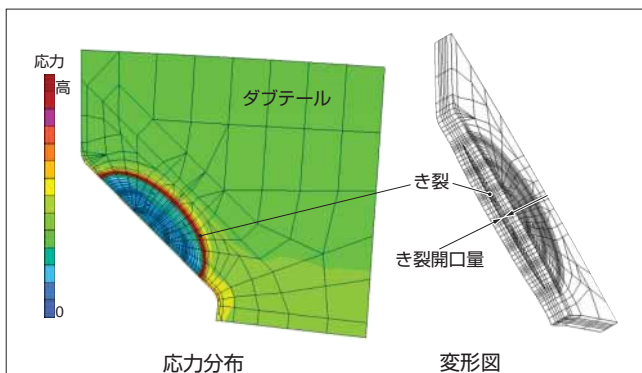


図5. き裂の応力分布及び開口変形 — ロータ曲げによりき裂の先端には高応力が生じる。き裂の進展を判定するパラメータである応力拡大係数範囲は、ズームアップ解析で計算したき裂の開口量を用いて求める。

Stress distribution around slot-dovetail crack and crack open deformation in zoom-up analysis

曲げモーメントを与えた。その際、ロータ全体解析のダブテール頭頂部の曲げ応力を基準として、荷重の合わせ込みを行った。ズームアップモデルでの解析結果を図5に示す。接触端部とき裂先端近傍に発生する局所応力を求めることができる。き裂の進展解析に必要な応力拡大係数範囲は、ズームアップ解析で得られた変形結果であるき裂の開口量から導出した。

### 3.3 熱応力解析

き裂の進展では、応力振幅と平均応力の把握が重要である。ダブテール部で平均応力が作用する要因は、先に挙げた面圧によるもの以外に、熱応力が挙げられる。熱応力は、運転中のシャフト温度分布と各部の剛性とが密接に関係する現象であるため、簡易評価が困難である。そこで、まず実機運転記録を用いた2次元熱流体FEM解析により、コイル発熱量、冷却ガス温度などの温度境界条件を求めた。次に、その温度境界条件を用いた3次元熱伝導FEM解析によりシャフトの温度分布を決定し、最後に温度分布を反映した3次元熱応力FEM解析を行うことで、くさび接触端部の応力集中も考慮した熱応力分布を正確に求めることができる。

一連の熱応力解析によって得られたダブテール評価部位の熱応力を図6に示す。ロータ中央部、シャフト、ダブテール部の温度差と剛性差により、ダブテール部の熱応力は運転状態に伴い大きく変動する。ロータ中心部が十分に暖まっていない起動運転時は、圧縮の熱応力が作用する。定格運転時と停止運転時は、外周部からのガス冷却の影響により引張りの熱応力が作用する。しかし、定格運転中は面圧の作用により生じる圧縮の軸方向応力により、熱応力と面圧を合わせた

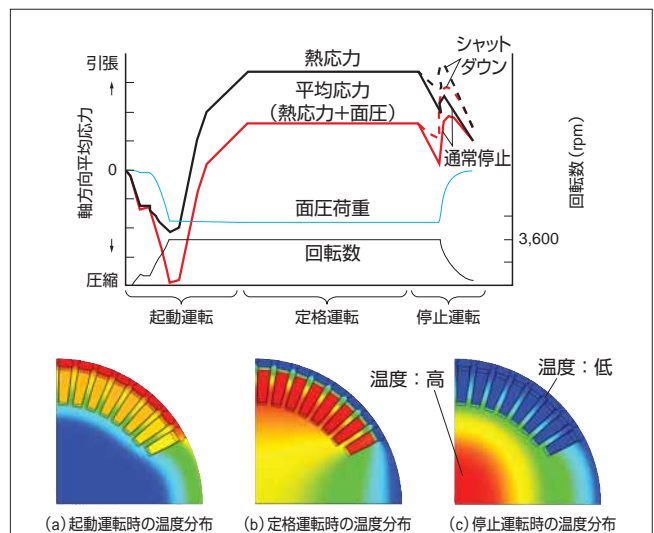


図6. 運転中にダブテール部に生じる熱応力 — 停止時に、くさびとの接触端ではシャフトに高い熱応力が生じる。急速停止時には熱応力と面圧による応力を合わせた平均応力は最大となる。

Thermal stress of slot-dovetails during operation

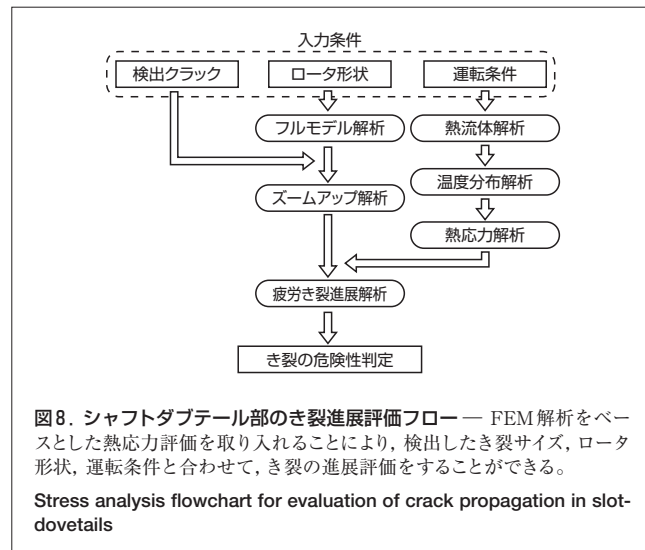
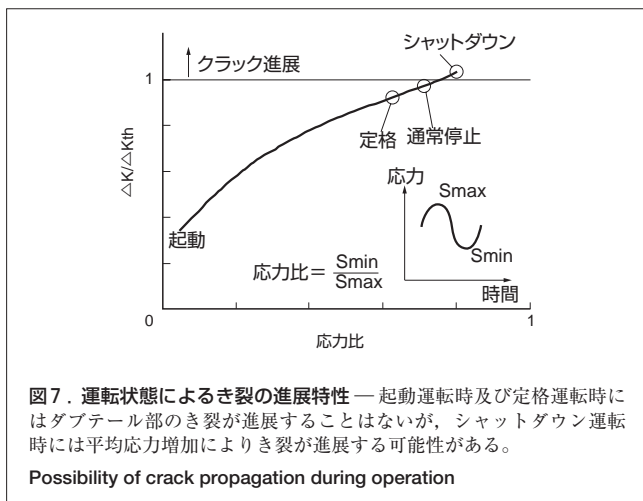
平均応力は低減する。停止運転時は回転降下に伴い面圧が低下するため、ロータ中央部とダブテールの温度差は小さいにもかかわらず平均応力は高くなる。特に、急速なシャットダウン運転では、ダブテール部に高い平均応力が作用する可能性がある。

## 4 き裂の進展評価法

き裂の進展評価は、前述のズームアップ応力解析結果を用いて、応力拡大係数(K値)を変位法で算出した。変位法では、K値はき裂開口面の変位分布から求められる。き裂先端の状態を表すパラメータK値が求まれば、K値とダブテール材のき裂進展特性データを比較することで、き裂の進展速度がわかる。

ダブテール部のき裂の応力拡大係数範囲 $\Delta K$ と、シャフト材の実機環境における下限界応力拡大係数範囲 $\Delta K_{th}$ との関係を図7に示す。運転状態に応じて平均応力が変化すること、材料の $\Delta K_{th}$ の値も平均応力の影響を受けることから、横軸は応力比でプロットしている。この図から、起動運転時と定格運転時はき裂が進展する可能性はないが、シャットダウン運転時にはき裂が進展する可能性があることがわかる。多くの経年発電機ロータにおいて、フレット疲労によって発生したと考えられるダブテール部のき裂が散見されているが、ダブテール部を貫通するまでき裂が進展した事例は少ない。これは、この解析で明らかになったように、 $\Delta K$ がき裂進展に必要な $\Delta K_{th}$ を超える運転条件が特殊であること、及び、その時間も停止運転時における短い時間であるためと考えられる。

ロータの応力解析からき裂の進展解析までの評価フローを図8に示す。この方法によれば、ロータの断面形状や冷却ガス温度条件など基礎的なデータをもとに、シャフトダブテール部のき裂の危険性を、正確かつ定量的に評価すること



が可能になる。

## 5 あとがき

発電機ダブテール部のフレット疲労き裂の進展を、FEM解析により評価する手法を開発した。開発した手法によれば、最小限のロータ構造及び運転データを用いて、き裂周りの複雑な接触応力と非定常熱応力分布を求めることにより、フレット疲労き裂の進展評価が可能となる。

海外をはじめとした発電機の改良保全サービスでは、ダブテール部のき裂について関心が高く、この手法を用いればダブテール部の欠陥検査、検出されたき裂の評価、及び補修や運転方法改善などの処置について、総合的な見地からソリューションを提供することができるようになると思われる。

## 文献

- (1) 鴨田史尚, ほか. 海外におけるタービン発電機の改良保全技術. 東芝レビュー. 59, 12, 2004, p.37-40.



齊藤 和宏 SAITO Kazuhiro

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 金属材料開発部グループ主務。火力機器の構造強度評価の研究・開発業務に従事。日本機械学会, 日本材料学会会員。  
Power and Industrial Systems Research and Development Center



松山 浩二 MATSUYAMA Koji

電力システム社 京浜事業所 発電機部。タービン発電機の機械基本設計業務に従事。  
Keihin Product Operations



伊藤 裕道 ITO Hiromichi D.Eng.

電力システム社 火力・水力事業部技監, 工博。発電機システムの計画・開発・設計業務に従事。CIGRE, 電気学会, 日本機械学会会員。  
Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.