

結晶方位解析手法を用いたガスタービン動翼の信頼性評価

高効率発電設備の安定運用とコストダウンの両立を目指して

Structural integrity assessment of a gas turbine blade based on crystal orientation analysis method

Aiming to achieve both stable operation and cost reduction at high-efficiency power plants

(電力技術研究所 材料技術G 材料T)

劣化や損傷を評価することが難しいガスタービン動翼材料について、結晶中の微小な変形を可視化できる結晶方位解析手法を確立し、材料の劣化・損傷評価ならびに破断部断面の変形分布から破壊原因を推定する技術を開発した。これにより、実機損傷翼のき裂発生原因を明らかとし、き裂部断面に観察された特徴的な縞模様から余寿命を評価することができた。

(Materials Technology Team, Materials Engineering Group, Electric Power Research and Development Center)

A crystal orientation analysis method for visualizing microscopic deformation in metal crystal has been established. This method is used for gas turbine blade materials for which it is difficult to assess degradation and damage. Furthermore, the assessment method of material degradation/damage and the technology for estimating fracture causes from the deformation distribution of the cross section of the fracture surface has been developed. Applying this method, the cause of cracking in actual damaged blades has been clarified. Furthermore, the remaining lifespan from distinct striped patterns observed on the cross section of the cracked surface has been assessed.

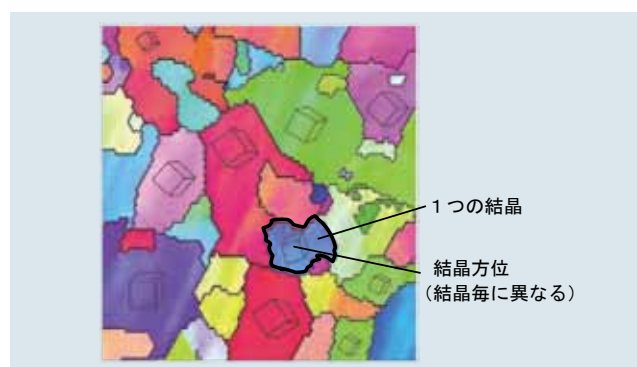
1 背景および目的

ガスタービン動翼は高温の燃焼ガスにさらされた状態で毎分3600回転の遠心力に耐えなければならないため、高温でも高強度なニッケル基超合金が使われているが、高価なため高いメンテナンスコストが問題となっている。動翼の管理寿命を延長できれば大きなコストダウンにつながるため、管理寿命に到達した一部の翼を破壊検査し、問題なければ少しずつ管理寿命を延長する取り組みを重ねてきている。

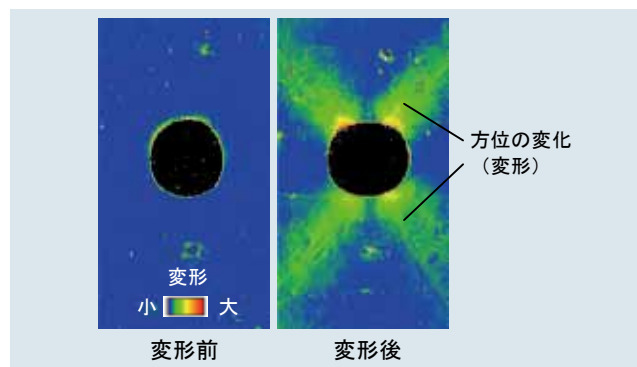
一方、金属組織の観察により寿命を定量評価できればこれらの取り組みを効率化できるが、ニッケル基超合金は非常に強く、一般鋼材の劣化時に見られる金属組織の異常(変形や欠陥等)が破壊直前まで見られず、劣化度合いの判定が容易でないことが保守上の課題であった。そこで本研究では、動翼の劣化を精度よく定量評価するため、新しい材料評価手法「結晶方位解析手法」の開発に取り組んだ。

2 結晶方位解析による動翼材評価

通常の金属は無数の結晶からなり、1つ1つの結晶にはその向きを表す「結晶方位」がある。動翼の劣化により結晶が微小にひずみ、結晶方位が変化する可能性を考え、結晶方位測定技術に着目した。結晶方位は、電子顕微鏡内で試料表面を網羅的に測定することで、第1図のように色の違いとして認識できる。この方法で実機翼の劣化評価が可能か確認するため、実機同等の高温環境で材料に負荷を与えた試料を作製し、結晶方位を測定した。その結果、単純な方位の測定だけでは変化を見出せなかったが、劣化した材料から使用前の結晶方位を見出し、この方位を基準として方位の差を求めたところ、第2図のように変形による微小な結晶方位の変化を捉えることができた。この方法により、ニッケル基超合金のような非常に強い材料でも、結晶中の微小な変形を可視化でき、実機翼の新しい劣化評価技術として実用的であることが確認できた。



第1図 金属の結晶と結晶方位



第2図 円孔周りの結晶方位の変化(変形)

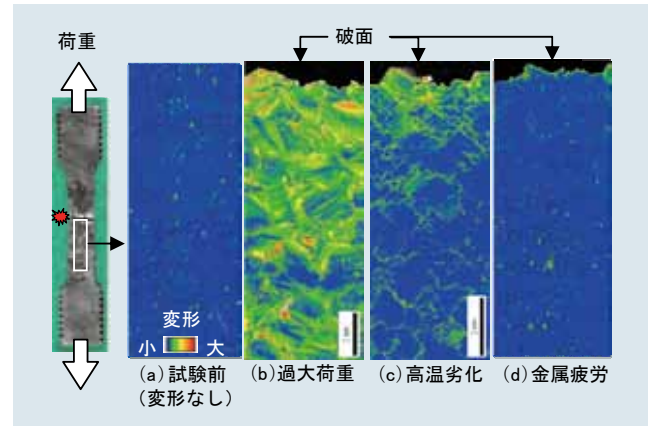
3 実機使用翼の健全性評価

最新鋭のコンバインドサイクルプラントで、ガスタービン動翼に想定外の損傷が発生した。動翼の設計寿命の約40%で、動翼のほとんどに第3図のような顕著なき裂が発生しており、その原因と余寿命を評価することとした。

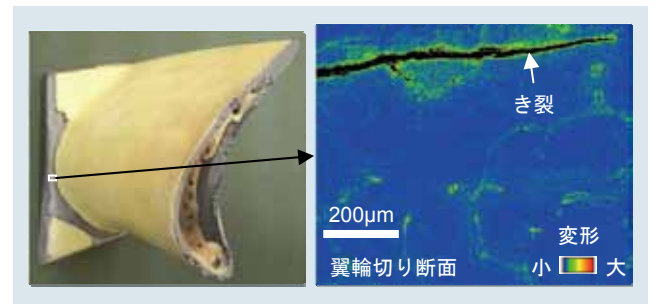
一般鋼材であれば、破壊の原因によって破面の様相が異なるため、破面観察から破壊原因を推定可能である。しかし損傷翼は最新型のニッケル基超合金であり破面には特徴がなく、従来方法では原因を特定できなかった。そこで、同等材料を用いて過大荷重、高温劣化、金属疲労という代表的な負荷様式によって破壊した試料を人工的に作製し、その断面について結晶方位解析を行った。その結

果、第4図 (a) ~ (d) に示すように、負荷形態と対応した結晶方位の変化があることが判明した。次に損傷翼のき裂部を観察したところ、第5図のように、第4図 (d) : 金属疲労と同じ特徴であったため、実機のき裂は金属疲労、すなわちガスタービンの起動停止に伴う動翼の急激な温度変化の繰返しの結果発生したものと推定された。

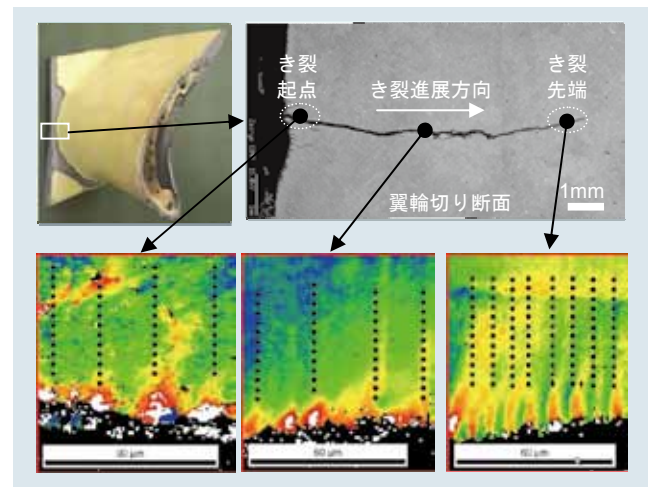
次に、翼の取替え要否を判断するための余寿命評価に取り組んだ。損傷翼はき裂部のごく表層しか変形していなかったが、さらに詳細に結晶方位解析を行った結果、第6図に示すように、き裂が進展した跡に年輪のような縞模様が認められた。これは1回の起動停止の金属疲労によって進展したき裂1回ごとの変形の痕跡と考えられる。他の部分もこの縞模様を確認したところ、初め(き裂起点)は間隔が広く、徐々に間隔が狭くなっていったことから、き裂の進む速度は徐々に遅くなっていることが判明した。き裂発生から寿命(翼内外面貫通)に至るまでのき裂の進み方を推定した結果を第7図に示す。その結果、翼を貫通するまでの余寿命は起動停止300回(約2年)分以上あることがわかり、き裂が生じた損傷翼であっても直ちに取替える必要がなく、当面の信頼性に問題ないと評価することができた。結果として当該プラントでは損傷翼を含んだままその後約1年間無事に運転し、定期点検を迎えることができた。



第4図 様々な破壊様式による破壊断面の変形形態



第5図 損傷翼き裂断面の変形形態



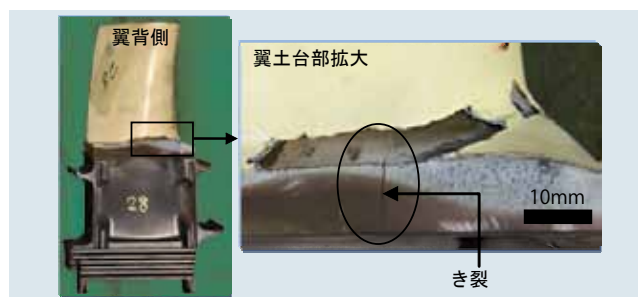
第6図 き裂部断面の縞状変形跡

4 研究成果

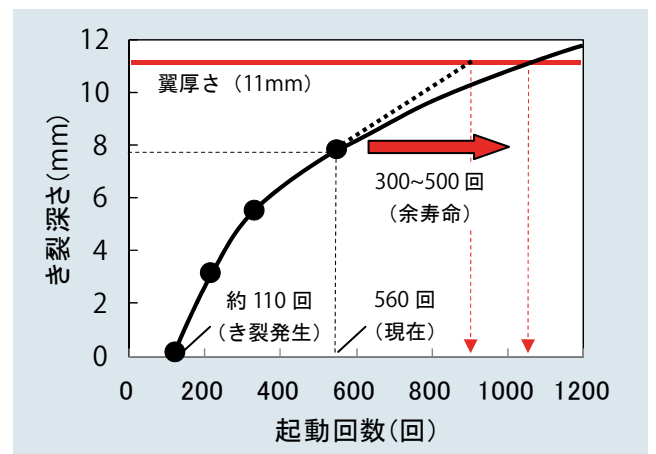
本研究では、ガスタービン動翼材料(ニッケル基超合金)について、結晶中の微小な変形を可視化できる結晶方位解析手法を開発し、「破断面の変形分布から破壊原因を推定する技術」および「金属疲労の痕跡を捉えた余寿命評価技術」を開発した。これにより、実機使用翼に発生した損傷の原因を明らかにし、従来困難であったニッケル基超合金の余寿命を定量的に評価する手法を確立した。

5 今後の展開

本研究成果は実機の保守管理、現場サポート技術としての展開を図っていると同時に、適用対象部品、材料を拡大するための研究を実施中である。



第3図 損傷した動翼の外観



第7図 損傷翼の余寿命評価結果



執筆者 / 小林大輔