

## タービン発電機回転子くさび材の強度特性

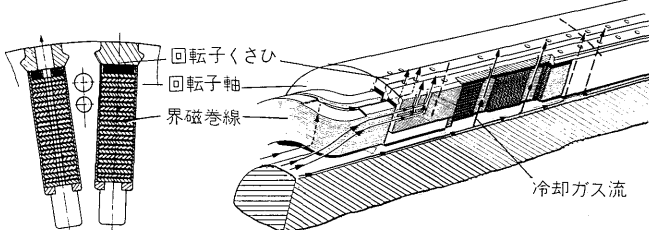
## On the Strength of Rotor Wedges for Turbine Generator

松村慶一 \* Keiichi Matsumura · 山下満男 \*\* Mitsuo Yamashita · 三村一郎 \*\*\* Ichirô Mimura

## I. まえがき

タービン発電機の回転子くさびは、界磁巻線の遠心力を保持する重要部品である。中間負荷火力機に供せられる場合には、頻繁な起動停止により、遠心力は繰返し力として作用する。界磁巻線直接冷却機では、くさびは巻線冷却経路の一部を成し、冷却穴が相当数加工される。また、ダンパ巻線としての役目も兼ねており、不平衡負荷時等に逆相電流が流れる。このためくさび材質は、遠心力に対する静的・動的強度、加工精度の点から加工性、電気経路としての導電性及び耐熱性などの特性を考慮して選定される。

富士電機では、第1図に示す構造の回転子くさびの材料としてアルミ青銅を標準的に用い、多くの運転実績を持っている。くさび材として、そのほかにアルミ合金などを用いることが知られている。



第1図 回転子くさびの構造

Fig. 1. Construction of rotor wedge

永年の運転により起動停止回数が累積されたアルミ合金について、破断事故及び破断に至らないまでも、き裂が発見された例が過去に起こっている。くさびの破断は、界磁巻線の飛散と固定子鉄心の損傷など、大規模事故に発展するので事故防止に万全を期す必要がある。

このような背景のもとで、富士電機は、タービン発電機の回転子くさびに使用される材料に要求される材料強度特性を試験したので、ここにその結果を報告する。

## II. 実験の概要

実験に供した材料は、アルミ青銅（以下、ABBと略称する）、アルミ合金2024-T351（以下、2024と略称する）、及び7075-T6（以下、7075と略称する）である。各材料の化学成分を第1表に示す。

アルミ合金は、低比重のため回転子の遠心力負荷を軽

第1表 化学成分

Table 1. Chemical composition

化学成分 材料名	(wt%)									
	Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Ni	Al
ABB	83.6	—	含有	含有	—	—	—	—	含有	9.9
2024-T351	4.5	0.28	0.37	0.60	1.5	0.17	0.05	—	3.1	残
7075-T6	1.72	0.07	0.17	0.04	2.72	5.73	0.21	0.01	—	残

第2表 試験項目

Table 2. Test program

試験	形状係数	温度 (°C)	材 質		
			ABB	2024	7075
試 験	$\alpha K = 1$	室温	○	○	○
		80	○	○	○
		120	○	○	○
	$\alpha K = 3.7$	室温	○	○	○
		80	○	—	—
		120	○	○	○
法	$\alpha K = 1.0$	室温	○	○	○
		80	○	—	—
		120	○	○	○
	$\alpha K = 3.7$	室温	○	○	○
		80	○	—	—
		120	○	○	○
き裂進展	—	室温	○	○	○
モ デ ル	破壊試験 $R = 0.0$ $R = 1.0$ $R = 1.5$	室温	○	○	○
			○	○	○
			○	○	○
ル	疲労試験 $R = 0.0$ $R = 1.0$ $R = 1.5$	室温	○	○	○
			○	○	○
			○	○	○

R: くさびコーナ部曲率半径

R=1.0 ( $\alpha K=4.1$ ), R=1.5 ( $\alpha K=3.7$ )

減できる利点を有する。くさび材料に要求される各種材料強度特性のうち、主として室温及び高温の低サイクル疲労強度、破壊力学の見地からき裂伝播特性、及び実体モデルでの低サイクル疲労のき裂発生寿命特性の試験を行った。試験は、試験片及び実体モデルについて行った。実施した実験の一覧を第2表に示す。

低サイクル疲労試験には荷重制御方式を採用した。これは起動停止の繰返しだが、くさびに遠心力による定荷重の繰返しを与えるためである。疲労強度に及ぼす因子として、くさびコーナ部曲率半径がある。従来から使用しているくさびの標準の曲率半径に相当する形状係数を含

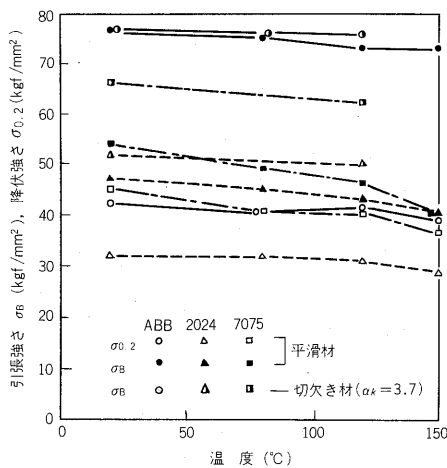
\* (株)富士電機総合研究所 製造技術研究所 \*\* (株)富士電機総合研究所 基礎研究所 \*\*\* 川崎工場 回転機部

め、試験片では 2 種類、実体モデルでは 3 種類の形状係数について試験を実施した。くさびの形状係数は有限要素法により求めた。試験温度は、実用上推定されるくさび温度に十分な余裕をつけて選定した。

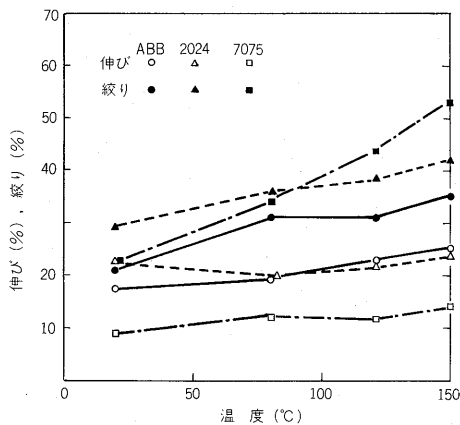
### III. 機械的性質

#### 1. 引張特性

平滑棒状試験片 (形状係数  $\alpha_K=1.0$ ), 及び環状 V 溝切欠き試験片 ( $\alpha_K=3.7$ ) での引張強度の温度依存性を第 2 図に、また平滑試験での延性指標を第 3 図に示す。



第 2 図 引張強度の温度依存性  
Fig. 2. Effect of test temperature on tensile properties



第 3 図 延性の温度依存性  
Fig. 3. Effect of test temperature on ductility

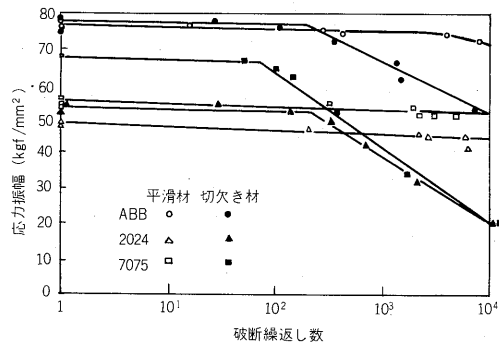
各試験温度を通じて、次のことがいえる。降伏強さは、ABB と 7075 がほぼ同等であり、2024 はこれらより低い。また引張強さは、ABB が他の材料より著しく大きな値を示しており、ABB→7075→2024 の順に低下している。切欠きの引張強さは、切欠き近傍の塑性拘束のために平滑より大きくなっているが、その増加率は、ABB よりもアルミ合金の方が、特に 7075 が大きい。

次に、引張性質の温度依存性に関しては、温度上昇に伴う強度の低下、延性の増加は、ABB 及び 2024 ではごくわずかであるが、7075 ではこれらに比較してその変動が大きい。このような傾向は、切欠きにおいても同様に認められる。

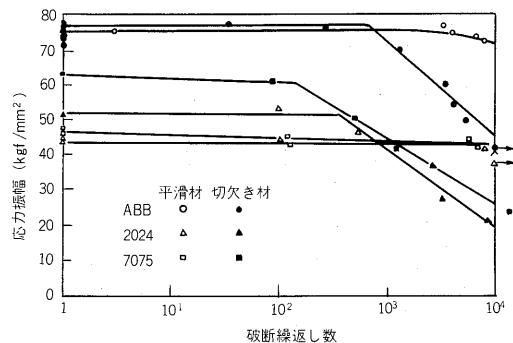
以上の結果から、銅を基本組成とする ABB は、引張強度が高く、実機くさび部で昇温の可能性のある 120°C 付近までの温度範囲で、安定した強度特性をもっていることがわかる。

#### 2. 疲労強度特性

室温及び 120°C での荷重制御低サイクル疲労強度特性を、それぞれ第 4 図、第 5 図に示す。試験は、零から最大引張荷重間の片振り引張りで実施している。これらの図中には、引張強さ  $\sigma_B$  を破断繰返し数  $N_f = 1$  として併記してある。



第 4 図 室温での低サイクル疲労強度  
Fig. 4. Low cycle fatigue strength at room temperature



第 5 図 120°C での低サイクル疲労強度  
Fig. 5. Low cycle fatigue strength at 120°C

室温、120°C いずれも、全材料とも平滑では疲労強度は 10⁴ サイクルまでわずかに減少する程度であるが、切欠きの場合には、10²~10³ サイクル付近まで平滑より高い疲労強度を示した後、それ以降は繰返し数とともに急激に低下する。<sup>(1)</sup>

各材料の疲労強度特性を比較すると、室温、120°C 及び平滑、切欠きのいずれの条件でも ABB が最も高く、次いで 7075 → 2024 と低くなっており、前述の引張強さ

の順位とよく対応している。

疲労強度に及ぼす温度の影響について、室温と120°Cとで比較すると、各材料とも明らかな相違は認められない。

切欠き効果については、切欠きで認められる疲労強度の急激な低下開始サイクル数に注目すると、切欠き感受性の高い材料ほどき裂が発生しやすいので、ABBが最も長寿命側にあり、7075は短寿命側に位置している。次に、 $10^4$  サイクルでの切欠き係数  $K_f$  (平滑の疲労強度/切欠きの疲労強度) を求めると、次のようになる。

ABB：室温 1.41, 120°C 1.59

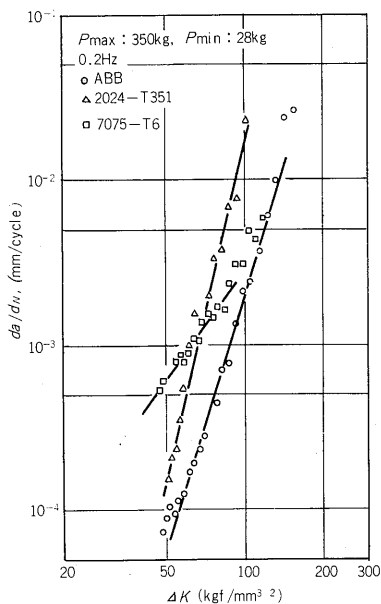
2024：室温 2.22, 120°C 2.04

7075：室温 2.56, 120°C 1.64

ABBは室温、120°C いずれにおいても他の材料より切欠き係数は小さい。

### 3. 疲れき裂伝播特性

疲れき裂伝播試験は、ASTM E647-78Tに準拠し、厚さ5mmのコンパクトテンション形試験片を用いて実施した。各材料の疲れき裂伝播特性を第6図に示す。縦軸は、き裂の進展速度、横軸は、応力とき裂の長さにより定まる破壊力学的パラメータ応力拡大係数である。各材料を比較すると、ABBが最も良好な耐き裂進展抵抗性を持っている。



第6図 疲れき裂伝播特性  
Fig. 6. Crack propagation behaviors

ところで、疲れき裂進展データは、単に材料のき裂進展抵抗性を把握するだけでなく、破断に至るまでの寿命推定に利用できる。すなわち、繰返し荷重下でのき裂進展速度は、次式で表現される。<sup>(2)</sup>

$$da/dN = C \cdot \Delta K^m$$

$da/dN$  (mm/cycle)：き裂進展速度

$\Delta K$  (kgf/mm<sup>3/2</sup>)：応力拡大係数範囲

$C, m$ ：材料定数

したがって、材料が破壊する応力拡大係数の限界値が既知であれば、初期き裂から破断に至るまでの寿命が算出できる。

タービン発電機回転子構成材料の定期的非破壊検査時に微小欠陥が発見された場合には、その部品の疲労寿命推定に破壊力学手法は非常に有効となる。<sup>(3), (4)</sup>

また、くさびの材料として、不安定破壊に対する限界値である破壊じん性値  $K_c$  も重要となってくる。ABB, 2024, 7075の室温での  $K_c$  として、それぞれ126kg/mm<sup>3/2</sup>, 87kg/mm<sup>3/2</sup>, 105kg/mm<sup>3/2</sup>の値を得ており、ABBが最も大きい。

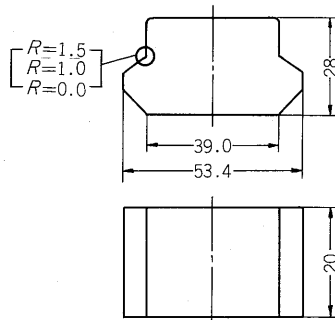
以上、くさび材として使用される3材料の引張性質、疲労強度、疲れき裂伝播特性などについて述べたが、ABBは、アルミ合金より優れた機械的性質を持っていることがわかる。

## IV. 実体モデル試験

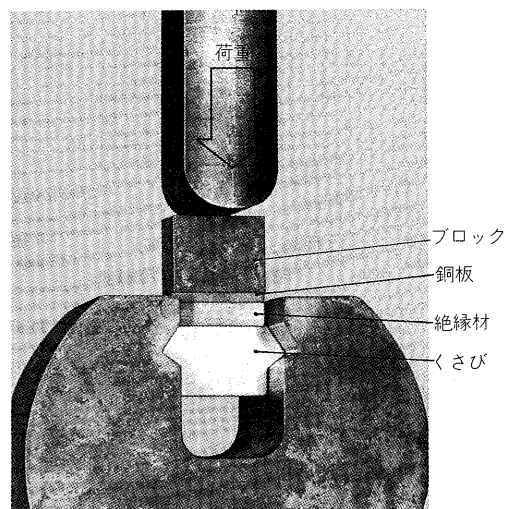
### 1. 静的破壊試験

実験に用いた試験体形状を第7図に示す。コーナ部の曲率半径  $R$  は1.5, 1.0, 0.0の3種類とした。実験は、実際のくさびの取付状態を再現する方法で実施した。試験状況を第8図に示す。試験はすべて室温である。

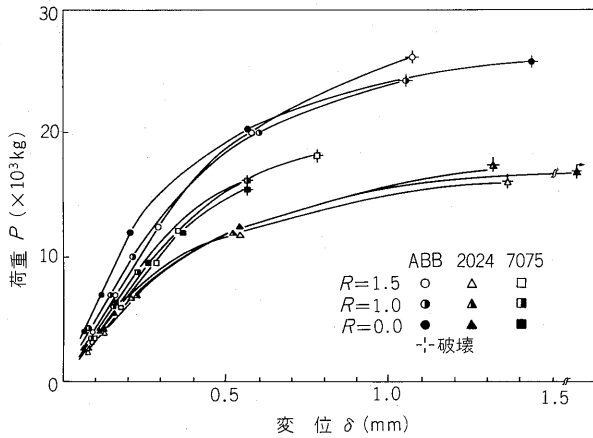
各くさび材のコーナ部曲率半径の破壊強度に及ぼす影



第7図 実体モデル形状  
Fig. 7. Model wedge



第8図 試験状況  
Fig. 8. Outline of test



第 9 図 実体モデルでの荷重変位曲線  
Fig. 9. Load-deflection curves of model wedges

響を第 9 図に示す。各材料とも、曲率半径の違いによる顕著な破壊強度への差は現れなかった。これは、き裂発生の位置が、コーナ部からわずかに離れたくさび支持との接触境界であることが原因であると考えられる。

実体モデル破壊試験での材料強度を比較すると、ABB が総合的によい結果を示している。7075 の破断強度は、2024 よりも優れているが、伸びは最も低い。これらの結果は、試験片による引張試験結果と同じ傾向であった。

2. 低サイクル疲労試験

試験体は、破壊試験に使用したものと同一形状である。試験は、負荷を零から最大荷重の繰返しとした以外、破壊試験の方法と同一で、実際のくさび取付状態を再現する方法で実施した。試験機は、油圧サーボ疲労試験機を使用し、三角波の繰返しによる荷重制御方式とした。試験温度はすべて室温である。なお、本試験は、き裂発生までの繰返し数を求めた。

1) き裂発生状況

実験に供した 3 種類の材料の負荷荷重と、き裂発生までの繰返し数との関係をそれぞれ第 10~12 図に示す。試験体のき裂発生位置、及びその進展状況の例を第 13 図に示す。

第 13 図中、き裂長さの長い試験体は、き裂発生確認ののち、き裂進展方向を確認する目的で続けて繰返し負荷を与えたものである。き裂発生、進展状況は、以下に示す 3 種類に分類できる。

A : き裂は、くさびとくさび支持との接触境界より発生し、負荷方向に平行に進展する。

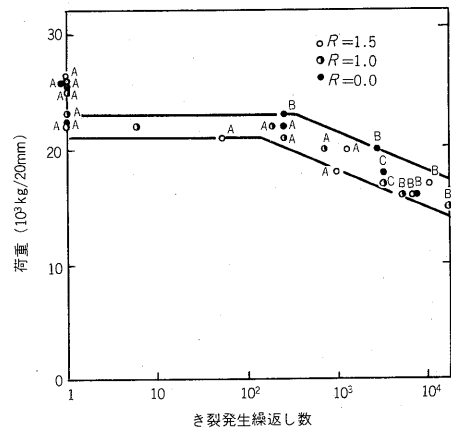
B : き裂は、くさびのコーナ底部より発生し、負荷方向に対しておおよそ 35° 方向に進展する。

C : き裂は、A と B の発生点でほぼ同時に発生し、その後どちらか一方が優先して進展する。

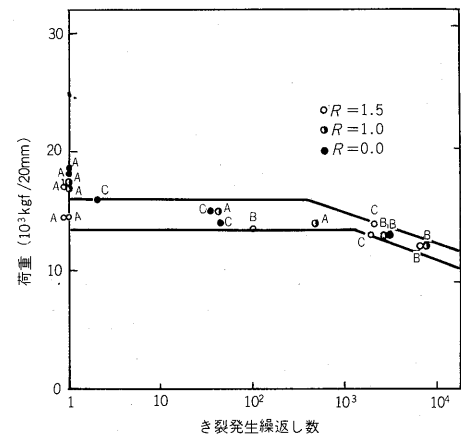
き裂発生位置を第 13 図(c)に示す。

き裂発生箇所、き裂進展状況とき裂発生繰返し数との関係を明らかにするため、第 10~12 図中のプロットに、

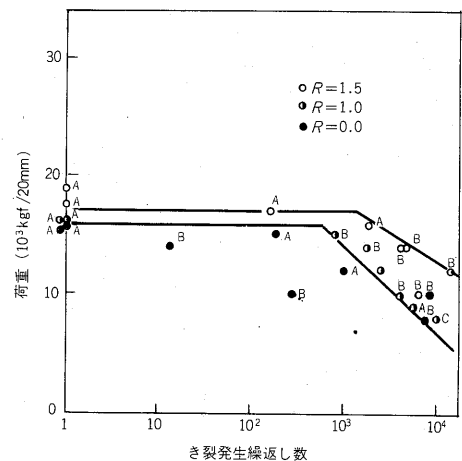
上記 A, B, C の記号を付した。各図から明らかなように、各材料とも繰返し荷重の高い場合に "A" の、繰返



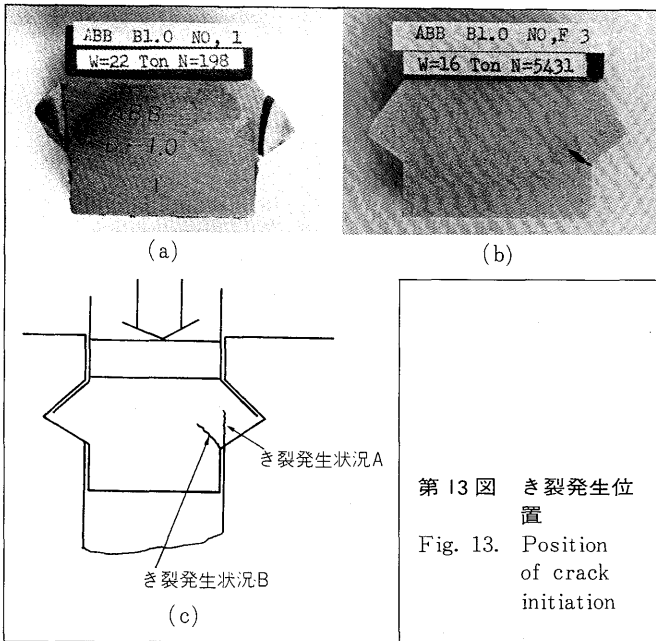
第 10 図 ABB の実体モデルでの疲労強度線図  
Fig. 10. Low cycle fatigue curves to crack initiation of model wedge for material ABB



第 11 図 2024 の実体モデルでの疲労強度線図  
Fig. 11. Low cycle fatigue curves to crack initiation of model wedge for material 2024



第 12 図 7075 の実体モデルでの疲労強度線図  
Fig. 12. Low cycle fatigue curves to crack initiation of model wedge for material 7075



第13図 き裂発生位置  
Fig. 13. Position of crack initiation

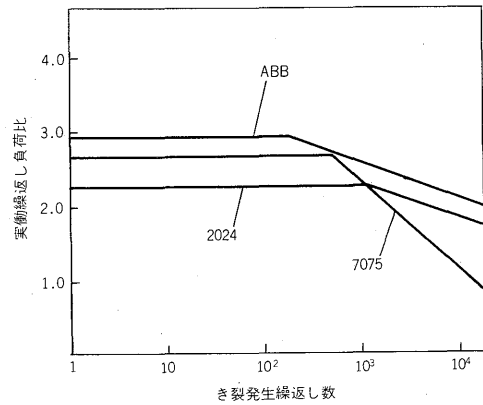
し荷重の低い場合に“B”の、その中間の繰返し荷重の場合には“C”のき裂発生状況を示す傾向にある。これらの負荷荷重によるき裂発生点の変化の原因をより明確にするために、くさびコーナ底部の主応力、及びその方向の変化をひずみゲージと有限要素法にて求めた。その結果、高負荷荷重時では、コーナ部付近はせん断力が支配的で、せん断降伏強度以上では、き裂は荷重方向に平行に進展し、それ以下の低い負荷荷重に移行するに従い、主応力が支配的となり、荷重方向に対して傾いた進展方向となることが明らかとなった。

2) くさびコーナ部曲率半径の影響

ABBは、繰返し数 $5 \times 10^3$ 回まではき裂発生状況がすべて“A”であった。すなわち、コーナ底部の影響を受けず疲労強度線図は1本で表される。繰返し数 $5 \times 10^3$ 回以上では、コーナ底部のき裂発生がみられ、曲率半径の影響が現れると考えられる。2024は、切欠き感受性が低く、曲率半径の影響は少ないと判断される。7075は、荷重-き裂発生繰返し数の屈曲点以上の繰返し数で、2例を除きコーナ底部よりき裂が発生している。このため、曲率半径の影響を強く受け、 $R=1.5$ 、 $R=1.0$ の差が明りょうに疲労強度線図上に現れている。 $R=0.0$ では、各荷重でのき裂発生繰返し数にばらつきが大きい。これは、7075の切欠き感受性の高いことによるものとする。

3) くさびの自重を考慮した疲労寿命

実際には、くさびは回転子コイルの遠心力と、更にくさび自重による遠心力とを加えた負荷を受ける。ここで、実際のタービン発電機を一例にとり、各くさびの自重を考慮すると、2024、7075のくさびが受ける負荷は、ABBのそれに比して約16%軽減される。これに基づき実



第14図 実働負荷に対する繰返し寿命  
Fig. 14. Relative fatigue strength of wedge materials

際にくさびが起動停止時に受ける繰返し負荷に対する比と、き裂発生繰返し数の関係を第14図に示す。

繰返し数 $1 \times 10^4$ 回をとると、ABBは実働繰返し負荷に対して、およそ2.2倍の安全率をもっており、くさびの比重を考慮してもABBが最も優れていることがわかる。

V. あとがき

くさび材料として富士電機で標準的に使用している銅合金ABBのほか、アルミ合金7075、2024の以上3種類を用いて、くさびに要求される各種の強度特性を、特に、発電機の起動停止の保証繰返し数 $10^4$ 回までの低サイクル疲労強度特性を、テストピースと実体モデルで試験した。これらの結果を総合すると、ABBがくさび材料として優れた特性をもった材料であると考えられる。

これらの結果から回転子くさびにアルミ青銅を用いた富士電機のタービン発電機は、運転上の制約を何ら設けることなく、毎日の起動停止を行えることが実証された。また、ここで実測したき裂伝播特性、破壊じん性などは、破壊力学手法を適用した製品の設計、及び品質管理に用いるばかりでなく、定期点検時の保全管理にも応用し得る。

参考文献

- (1) G. Ramusat & G. Vidal: Mémoires Scientifiques Revue Métallurgie, **1**, p. 23 (1979)
- (2) Paris. P. C & Erdogan. F: Trans. ASME, Ser. D **85**, 4, p. 528 (1963)
- (3) 電気技術基準調査委員会: 発電用蒸気タービンロータ非破壊検査規定, JEAC 3202-1975
- (4) 阪部喜代三: 回転機軸材に対する最近の超音波探傷法と安全性に対する評価法, 火力原子発電, **24**, 7, pp. 57~65 (1973)



\*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する  
商標または登録商標である場合があります。