

アキシヤル溝型蒸気タービンロータの超音波探傷技術の開発

Development of Ultrasonic Testing Method for Axial Groove Type Steam Turbine Rotor

日立製作所	鈴木 豊	Yutaka SUZUKI	Non Member
日立製作所	千葉 弘明	Hiroaki CHIBA	Non Member
日立製作所	工藤 健	Takeshi KUDOU	Non Member

Refracted angle for UT of axial groove type rotor is limited with the distance of the axial direction from the sensor installation surface. High intensity detection technique changes with the refracted angle, the change may require a combination of multiple inspection techniques. For this reason, detectable distance of a double probe technique and a tip echo technique are examined. In the distance more than 35mm, refracted angle become more than 35 degrees where refracted intensity is high and the defect is detectable using the double probe technique. In the distance of 35mm or less, signal to noise ratio of the tip echo technique becomes greater than two. Therefore combination of these UT techniques make possible to inspect overall distance without the dismantlement of rotor and blade.

Keywords: Ultrasonic Testing, Steam Turbine, Axial Groove Type Rotor, double probe technique, Tip echo technique

1. 緒言

蒸気タービンを安定運用するために、動翼とロータの植込み部を非解体で検査可能な超音波探傷技術が開発されている[1, 2]。蒸気タービンの植込み構造としては鞍型、フォーク型、アキシヤル (Ax) 溝型等が採用されており、当社においてはこれまでに鞍型等の動翼フォーク型のフェーズドアレイ UT 技術を開発した[3]。現在、Ax 溝型ロータの UT 技術を開発中であり、その欠陥検出技術について報告する。

Fig. 1 は Ax 溝構造で、波形状を軸方向に押し出した溝を動翼とロータに設け、それらを咬合させている。

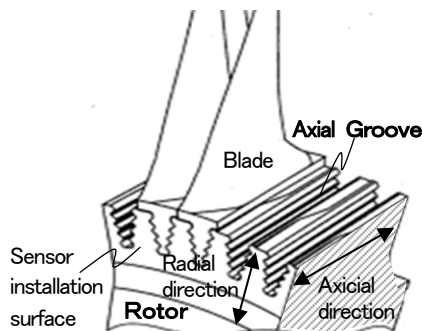


Fig.1 The structure of axial groove.

Fig. 2 に示すように本開発においては、運転時に高応力がかかる波型底部の全軸方向において、深さ 1mm の欠陥を検出することを目標としている。この部位の UT は径方向のセンサ設置可能位置が制限されているため、軸方向の伝搬距離が長くなると超音波を入射可能な屈折角が小さくなる。検出強度が強い探傷方法は屈折角と伴に変るため、距離に応じ探傷方法変更が必要となる可能性がある。このため、2 探触子法と端部エコー法の検出可能

距離を評価し、検出可能距離に相補関係があるとの結論を得た。

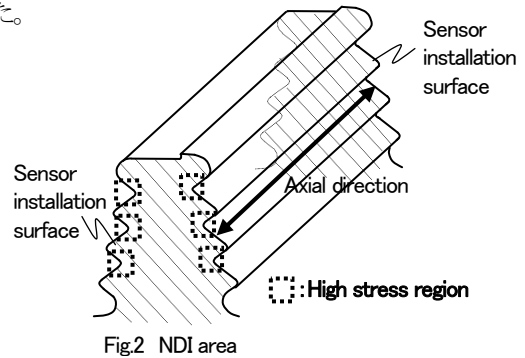


Fig.2 NDI area

2. 2 探触子法の欠陥検出性

2.1 探傷方法

Ax 溝型ロータに深さを制御した疲労き裂を付与することは難しいため、実形状試験体には放電加工スリット (EDM スリット) で欠陥を付与し検出性を評価した。また、平板に深さを制御した疲労き裂を付与し、EDM スリットとの感度差を評価した。

Fig. 3 は Ax 溝型ロータの実機形状試験体の斜視図と 3 面図で、軸方向長さの 1/2 の位置に、検出目標の深さ 1mm に対応した半径 1mm で、厚さ 0.5mm の半円柱形の EDM スリットを付与した。

Fig. 4 は実機形状試験体の欠陥検出方法の概要で、Ax 溝型ロータの端面に送信センサ、対向面に受信センサを設置し、送受信ともセクタ走査して欠陥を検出した。UT 条件は SV 波 5MHz、屈折角走査範囲 $5\sim 75^\circ$ 、屈折角走査ピッチ 0.5° である。

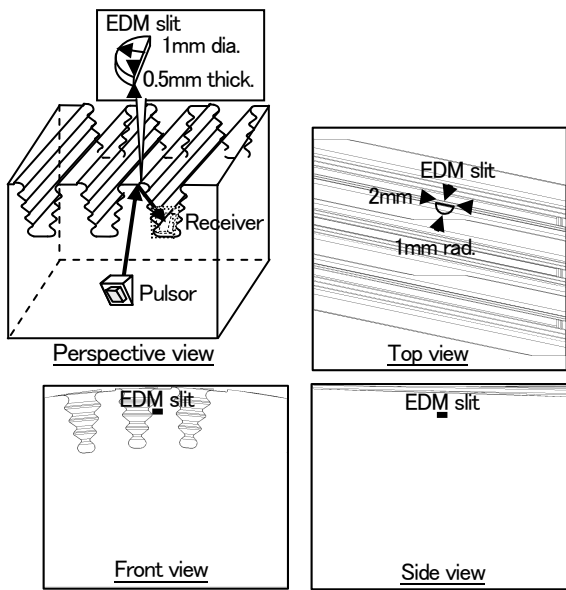


Fig.3 Axial rotor test piece.

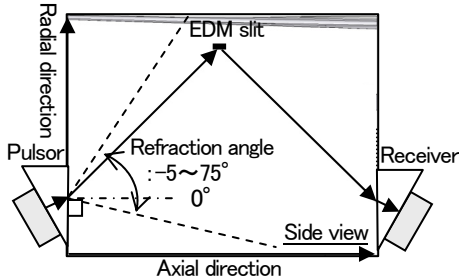


Fig.4 The outline of double angle probe technique.

Fig. 5は疲労き裂とEDMスリットの平板試験体の探傷方法の概要で、実形状試験体と同様に端面に送信センサ、対向面に受信センサを設置し、送受信ともセクタ走査した。UT条件は実機形状試験体と同様である。

Tab. 1に検出強度を評価した欠陥形状の概要をまとめる。本実験条件では、面反射が主な反射モードと考えられるため、2.4mm²の疲労き裂の面積を内挿するよう、1.6~6mm²の面積のEDMスリットの検出強度を測定した。

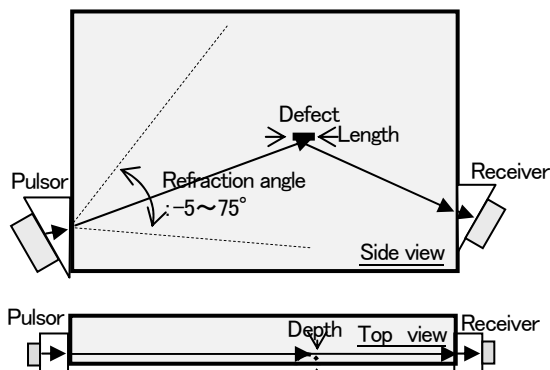


Fig.5 Correlation method of detection strength between fatigue crack with EDM slit.

Tab.1 Geometry of defects.

	Fatigue crack	EDM slit		
		1mm	1mm	2mm
Depth	1mm	1mm	1mm	2mm
Length	3mm	2mm	2mm	3mm
Area	2.4mm ²	1.6mm ²	2mm ²	6mm ²
Shape	Semi ellipse	Semi ellipse	Square	Square

2.2 探傷結果

Fig. 6 (a)に健全部、(b)に欠陥部の屈折角35°での探傷例を示す。横軸はAx溝の軸方向距離、縦軸は径方向距離を表し、出力125%を白、0%を黒として色譜調表示している。この例を含む屈折角35~50°で欠陥が検出された。

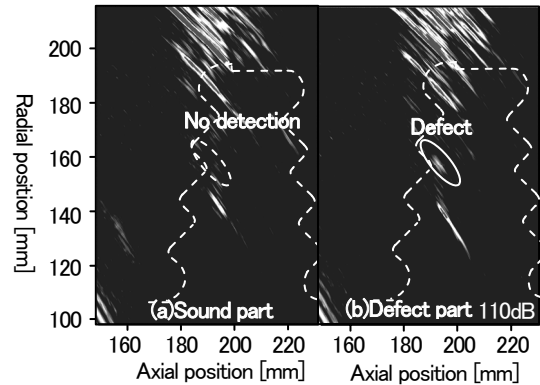


Fig.6 An example of detected defect.

Fig. 7にEDMスリットと疲労き裂の検出強度の欠陥面積依存性を示す。図中の○は疲労き裂、△はEDMスリットの検出強度を表す。強度は面積に比例すると近似されることから、2探触子法においては疲労き裂はEDMスリットで代替可能である。また、半径1mmの半円のEDMスリットの検出強度は深さ1mmの疲労き裂よりも弱いため、実形状試験体における評価結果は保守側評価と考えられる。

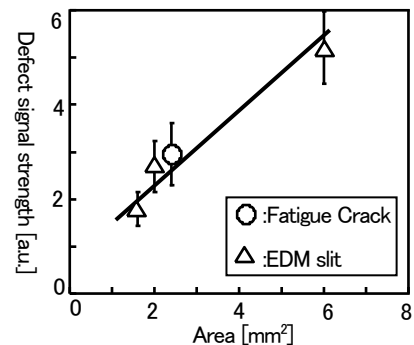


Fig.7 Dependence of defect signal strength on reflection area.

2.3 探傷可能範囲の検討

Fig. 8に欠陥信号強度の屈折角依存性を示す。○は実験値で、実線で示した超音波入射率の理論値と[4]、誤差範囲で一致した。このため、屈折角(入射率)が検出可能範囲の制約因子と考えられる。

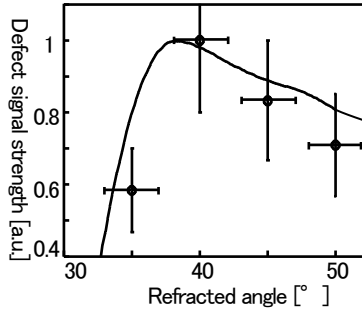


Fig.8 Dependence of defect signal strength on refracted angle

Fig. 9 (a)に入射可能最大屈折角の軸方向距離依存性の計算条件を示す。送信センサを屈折角が最大となる径方向の下端に置き、軸方向の欠陥位置を変化させたときの屈折角を求めた。Fig. 9(b)は計算結果で、軸方向距離35mm以上で屈折角が35°以上となり検査可能と評価される。

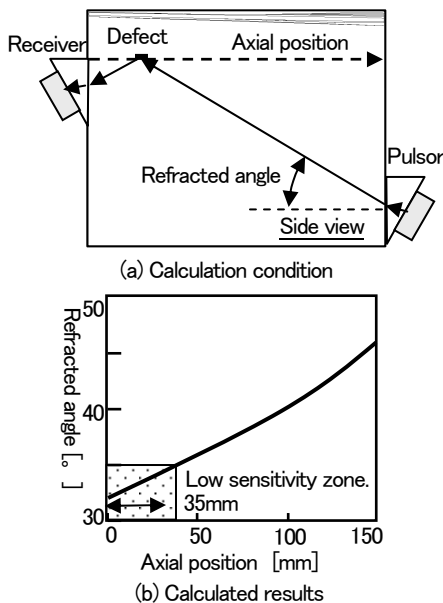


Fig.9 Dependence of refracted angle on axial position.

3. 端部エコー法の欠陥検出性

3.1 探傷法

平板に付与した深さ1mmの疲労き裂の端部エコー強度を測定するとともに、実形状試験体におけるノイズ強度を測定し、2探触子法の不感帯となる軸方向距離35mmに

おけるS/Nを求め、端部エコー法の検出可能最長距離を検討した。

Fig. 10は探傷方法の概要で、欠陥面とセクタ走査面が平行となるよう欠陥裏面から探傷した。UT条件は縦波5MHz、屈折角走査範囲5~75°、屈折角走査ピッチ0.5°、焦点深さ30mmである。

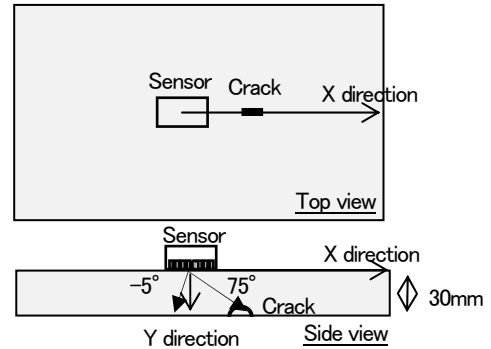


Fig.10 Experimental method of fatigue crack detection.

Fig. 11は実形状のノイズ測定条件で、軸方向距離35mmを含むよう超音波走査範囲を決定した。Fig. 11(a)に示すように、センサ設置面に対するAx溝の角度が90°以下となる鋭角側は焦点距離21~50mm、屈折角1~16°とした。Fig. 11(b)に示すように、センサ設置面に対するAx溝の角度が90°以上となる鈍角側は焦点距離25~54mm、屈折角22~35°とした。

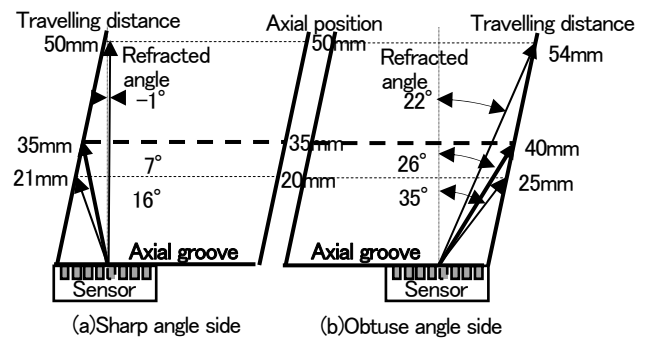


Fig.11 Experimental condition of background measurement.

3.2 探傷結果

Fig. 12(a)に健全部、(b)に欠陥部の屈折角40°における探傷例を示す。横軸はセンサ設置面と平行なX距離、縦軸は垂直なY距離を表し、出力125%を白、0%を黒として色譜調表示している。屈折角40°ではき裂が検出されたが、35°以下は底面エコー増加、45°以上はノイズ増加と欠陥信号強度低下で検出されなかった。

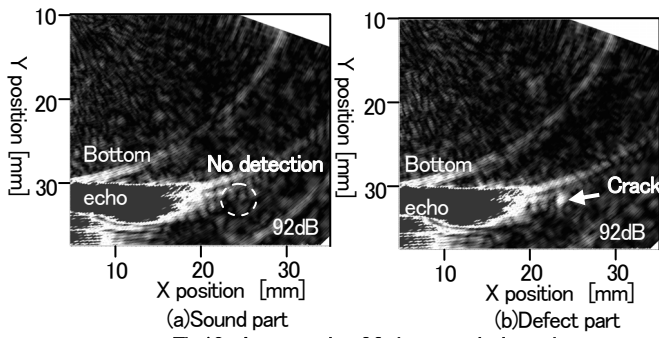


Fig.12 An example of fatigue crack detection.

Fig. 13(a)に鋭角側、(b)に鈍角側のノイズ測定例を示す。横軸は径方向距離、縦軸は軸方向距離を表し、出力125%を白、0%を黒として色譜調表示している。いずれも主音軸がセンサ設置面の対向面に反射されるため、軸方向距離35mmにおけるノイズは少ない。

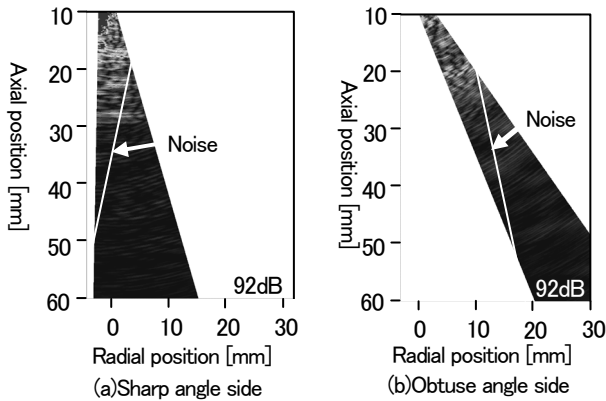


Fig.13 An example of measured noise.

Fig. 14 (a)に鋭角側、(b)に鈍角側のノイズ強度の軸方向距離依存性を示す。図中の実線は全ノイズ、点線はセンサを取り付けた段階で生じるセンサノイズで、鋭角側、鈍角側いずれも30mm以下はセンサノイズが強く不感帯となる。不感帯での評価を避けるため、センサノイズの少ない軸方向距離30mm以上におけるノイズの最大値をS/N評価に用いた。

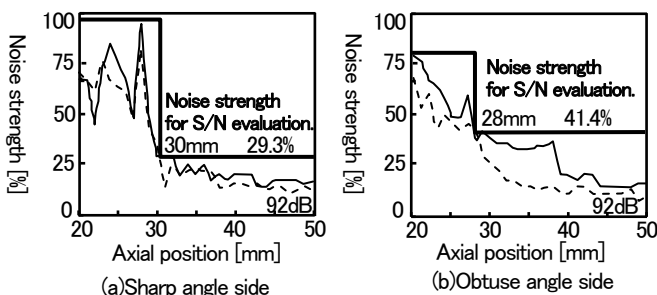


Fig.14 Dependence of noise strength on axial position.

3.3 探傷可能最長距離の検討

平板においては伝搬距離39mm、屈折角40°で欠陥が検出された。実形状における軸方向距離35mmにおいては鋭角側、鈍角側いずれも伝搬距離39mm以下、屈折角40°未満である。屈折角が小さくなると超音波入射強度と欠陥の投影面積が増加するため、検出強度は定性的に増加する[5]。そこで、屈折角40°、増幅ゲイン92dBにおける欠陥信号強度100%を用いてS/Nを保守側評価した。

Tab. 2に軸方向距離35mmにおける鋭角側と鈍角側のS/N評価結果をまとめる。いずれも軸方向距離35mmにおいてS/Nが2以上となるため、欠陥を検出可能である。従って、端部エコー法の最長探傷可能距離は35mm以上である。

Tab.2 Detectability of the crack at 35mm axial position.

	Defect	Noise	S/N	Detectability
Sharp	100%	29.3%	3.4	○
Obtuse	100%	41.4%	2.4	○

4. まとめ

- (1) 2探触子法は軸方向距離35mm以上を探傷可能である。
- (2) 端部エコー法の最長探傷可能距離は35mm以上である。
- (3) 2つのUT手法の組み合わせで、深さ1mmの欠陥を非解体で検出可能である。

参考文献

- [1] Peter Ciorau, et al.: "Design manufacturing and UT results with Fatigue Cracks from L-0 Blades", NDT. NET('10)
- [2] Michael L., et al.: "Non Destructive Inspection of Blade Roots and Blade Attachment Grooves", ECNDT-Mo. 282('06)
- [3] Yoshiaki N., et al.: "Ultrasonic Discontinuity Indication for Testing Turbine Disk Blade Attachment", Material Evaluation Vol. 9, p. 895(06)
- [4] 木村勝美: 超音波の斜め入射の往復透過率の計算方法, NDI 資料 21252(1989)
- [5] 日本非破壊検査協会: 超音波探傷試験III, p. 45 (1991)