U.D.C. [620. 179. 161. 087. 9:681. 322/. 323-181. 48]:621. 165-253. 5

蒸気タービンブレード用電子セクタスキャン式 超音波探傷装置の開発

Development of Electronic Sector Scanning Flaw Detector for Steam Turbine Blades

火力及び原子力発電用蒸気タービンブレードは,高温と高圧力の蒸気雰囲気中と, 高速回転による高遠心力の悪条件下で運転される。このため、稼動後の長期間使用 による材料の経年劣化に基づく疲労き裂の発生には十分注意する必要がある。この き裂を非破壊で高精度,高能率に早期発見する手段として超音波探傷技術が最適で ある。複雑な形状をもつタービンブレードを組立状態のまま探傷し、内部にき裂が 存在する場合,その判別を容易とするために,超音波探触子から発信する超音波の セクタスキャンとダイナミックフォーカシングを高速に行ない,探傷結果を断面像 として表示する電子セクタスキャン式超音波探傷装置を開発した。

本装置による探傷試験の結果、忠実な被検体の断面形状が得られ、き裂の有無が 明確に識別できることを確認し、蒸気タービンブレードに対する電子セクタスキャ ン式超音波探傷技術を実用化することができた。

佐藤泰章*	Yasuaki Satou
菅井一夫*	Kazuo Sugai
佐々木荘二**	Souji Sasaki
木野裕敏**	Hirotoshi Kino
昼岡修一***	Shuuichi Hiruok

言

蒸気タービンのブレードに生ずるき裂を, 組立状態で検知 する方法として,従来は一般的な金属材料の超音波技術であ るパルス反射法を適用し, エコー信号波形を超音波探傷器の CRT(Cathode Ray Tube)に表示するAスコープ法が用いら れてきた。しかしこの方法では、複雑なブレードダブティル 部の形状とき裂との識別に非常な熟練を必要とした。このた め日立製作所はき裂を容易に識別する方法として, 超音波ビ ームを機械的に扇形走査し, 被検体の断面を映像化して表示 する複合走査式超音波探傷装置を開発1)~2)し、既に実用に供し ている。しかし、この方法は可変角構造の探触子のセクタス キャン(扇形走査)をリンク機構を用いたマイクロモータ駆動 で行なうようにしているため、スキャン速度が遅く、しかも 小形化が図れないなどの難点があった。また、一対の振動子 による超音波の送受信指向性の広がりのため, 被検体内部の ごく細部まで識別するには、かなりの困難があった。

前述の問題点を解決するため,超音波ビームの角度スキャ ンを高速化し、かつビームを集束して方位分解能を向上する ことができる電子的アレイ制御方式の超音波送受信技術3)に着 目した。

本稿では、蒸気タービンブレードのような複雑な形状をも つ被検体の探傷を目的として,特に鋼材被検体に上記の技術 を適用するため開発した電子セクタスキャン式超音波探傷装 置の概要と、その応用例について述べる。

2 電子セクタスキャン法の原理4)

図1に電子セクタスキャン法の原理を示す。被検体内部を 部に入射した超音波ビームは、反射体が存在するとそのエコ 伝搬する超音波ビームをセクタスキャンさせる際に, 超音波 ーが受信振動子で受信される。そのとき、エコーは両端の振 ビームの角度走査範囲を広くするため、半円形のシューに複 動子にまず到達し、続いて中央の振動子へと順次遅れて到達 数(n) 個の振動子を配列し、振動子に与える励振パルスを順 する。この受信信号に対し発信側と同一の遅延時間 Δta , Δtb 次切り換えすることで,超音波ビームのセクタスキャンを行 を与えることで、受信信号の位相が整合し、これを加算する なうようにした。被検体内の超音波強度の向上を図り、 ビー * 日立製作所日立工場 ** 日立製作所日立研究所 *** 日立エンジニアリング株式会社 45

ム集束のための制御を可能にするため、5個の振動子を1グ ループとして送受信動作を行なわせている。また、セクタス キャンの角度ピッチを微細にするために,動作振動子の切換 えは1個ごとにシフトする方法を用いている。いま, (a)又は (c)に示す両端の振動子グループに励振パルスを与えると, - &又は+&の屈折角をもつ超音波ビームとなる。また、中央 の振動子グループを動作させると垂直方向へ超音波ビームが 進行し、このように動作する振動子グループの位置を制御す ることで、超音波ビームの進行方向を選択することが可能と なる。このような動作を電子的切換回路によって行なうこと により, 被検体内部へ入射する超音波ビームのセクタスキャ ンを高速に行なうことができる。

次に, 被検体内部の所望の領域で超音波ビームを集束し, 欠陥検出時の感度及び方位分解能を向上させるダイナミック フォーカシング法の原理を図2に示す。いま,5個の振動子 に同時に励振パルスを与えた場合,仮想線に示す半円形シュ -の中心に超音波ビームが集中し,被検体内部の所望する領 域では拡散するビームとなる。これに対して超音波ビームを 所望の焦点距離 f の位置に集束させる場合,中央の振動子に 比べ端の振動子ほど相対的に遅い励振パルスを与えることに よって、 合成波面が焦点付近に集中し、 超音波ビームの集束 域を形成する。更に励振パルスの遅延時間 *Δta*, *Δtb* などを変 化させることにより,超音波ビームの集束域を所望する位置 に移動させる、いわゆるダイナミックフォーカシングを行な うことが可能となる。

図3に位相制御による受信信号の整合法を示す。被検体内

202 日立評論 VOL. 64 No. 3(1982-3)



図 1 電子セクタスキャン法の原理 半円形シューへ複数個配列した振動子に与える励振パルスを,順次,電子的に切り換え制御することで,被検体内部 へ入射する超音波ビームのセクタスキャンを高速に行なうことができる。







46

反射体

図2 位相制御によるダイナミックフォーカシング法の原理 振動子に与える励振パルスに対し,遅延時間⊿ta, Δtbなどを加える超音波波面の 位相制御を行なうことで,所望する被検体内部に超音波ビームを集束すること が可能となる。 図3 位相制御による受信信号の整合法 反射体からの反射エコーが 各振動子ごとに *Ata*, *Atb*などの遅延時間をもって受信される。この受信信号を 発信側と同一の遅延時間を与えて位相を整合し,加算することで感度の向上及 び受信側のダイナミックフォーカシングが成立する。

蒸気タービンブレード用電子セクタスキャン式超音波探傷装置の開発 203



図4 複合走査によるBスコープ表示法 超音波探触子をX方向へ移

ことにより,信号レベルを向上させる。このようにして,発信側パルスの遅延時間と同様の受信信号の遅延時間制御を行なうことにより,ダイナミックフォーカシング法が成立することになる。

蒸気タービンブレードのダブティル部のような複雑な断面 形状をもつ被検体の欠陥を識別するには,被検体の断面を映 像化するいわゆるBスコープ表示を用いるのが好適である。 種々の方向の反射面をもつ被検体のBスコープ像を得るには, 超音波ビームのセクタスキャンと同時に超音波探触子の移動 走査を行なう複合走査が必要となる。図4に示すように被検 体探傷面上で超音波探触子をX方向に移動させ,各X位置で の超音波ビームのセクタスキャンで得られる画像を合成する ことにより,被検体の断面像を表示することが可能となる。 このような複合走査を行なうことで,被検体内部の全域へく まなく超音波ビームを入射することができ,種々の方向性を もつ欠陥や,複雑な形状の被検体でも忠実な断面像として表 示することができる。

図 蒸気タービンブレード用電子セクタスキャン式超音 波探傷装置の概要

3.1 装置の構成と動作

図5に開発した装置の全体構成を示す。大別してセクタア レイ形超音波探触子,探触子を移動走査し,その位置を検出 するためのスキャナ及びポジションプロセッサから成る探触 子位置検出装置,電子セクタスキャンの制御及び超音波信号

47

動するときの,各X位置でのセクタスキャンによって得られる受信画像を合成 することで,被検体のBスコープ表示(断面表示)を行なうことができる。



図5 蒸気タービンブレード用電子セクタスキャン式超音波探傷装置 超音波ビームのセクタスキャンを実施するための電子的制御は、マイクロコンピュータ(MC-68)が主制御部として構成されている。

204 日立評論 VOL. 64 No. 3 (1982-3)

処理を行なう電子スキャンコントローラ,探傷結果をBスコ ープ表示する画像表示装置とで構成される。

装置全体の動作を以下に説明する。画像表示装置からの同 期信号によって電子スキャンコントローラでは,同期信号の 半周期ごとにマイクロコンピュータへ割込みをかけ,遅延回 路への遅延時間の設定,切換回路への振動子動作位置の設定, ダイナミックフォーカシング時の集束域からのビデオ信号だ けを抽出する焦域ゲート回路のタイミング設定など,各回路 の動作シーケンスが編成される。次の半周期で上記のシーケ ンスに基づく超音波の送受信を行なう。

超音波の送受信は,超音波探触子内に配列された各25個の 送信用,受信用振動子のうち,各5個を1グループとして行 なっており,同期信号ごとに動作振動子を1個ずつシフトさ せて被検体への超音波入射角 θ を変化させ,±55度(屈折角 ξ :±77度)の範囲でセクタスキャンを行なう。

複合走査によるBスコープを画像表示装置のモニタテレビ ジョンに表示するため、画像表示装置のマイクロコンピュー タは振動子動作位置に対応する超音波入射角信号 θ をもとに 被検体中のビーム径路を演算し、これによって前述した焦域 ゲート回路のビデオ出力をアドレスしてセクタスキャンによ る受信画像を作成する。一方、被検体探傷面上の超音波探触 子の移動位置X及びY、傾斜角 β を探触子位置検出装置で検出 する。像表示面ではこれらの探触子の各移動位置に対応して セクタスキャンの受信画像を重畳させ、画像メモリへ書き込 むと同時に、画像メモリに蓄積させた像情報をモニタテレビ ジョンへ出力することにより、実時間でCRTにBスコープ像 が表示される。



図7 開発装置の外観 探触子位置検出装置のスキャナの外観を示す。

3.2 装置の機能及び仕様

図6に探触子位置検出装置のポジションプロセッサ,電子 スキャンコントローラ及び画像表示装置の外観を示す。また, 図7に探触子位置検出装置のタービンロータへセットされた 状態のスキャナを,図8に超音波探触子の外観を示す。

装置の主な機能及び仕様を表1に示す。

3.3 装置の特性

48

装置の超音波送受信に関する特性として,位相制御による 超音波ビームの集束効果,及び超音波エコー強度分布の実測 データについて述べる。

図9に位相制御による超音波ビームの集束効果を示す。被



超音波探触子の移動位置を検知するもので,タービンロータへチェーンを介し てセットされた状態で,操作性の向上を図っている。



図8 超音波探触子の外観 開発したセクタアレイ探触子で、金属材料 を探傷する従来法の固定角探触子とほぼ同じ、15mm×20mmの接触面積をもつ。

検体表面から深さ10mmの位置に,直径0.8mmのドリル横穴を施 し,垂直探傷法及び斜角探傷法(屈折角45度)の場合について 従来方式の平板状振動子(セクタアレイ探触子の5個の振動 子と等価な面積をもつ平板形)と開発したセクタアレイ探触 子(5個の振動子に所定の遅延時間を与える。)を探傷面に沿っ て走査し,横穴欠陥からの反射エコー強度分布を比較した結 果である。縦軸にエコー強度,横軸に探触子走査距離を採り, 両者の関係をストレージオシロスコープに表示したもので, ピーク点から6dB低下位置で垂直,斜角探傷法ともに従来方 式に比較し,ビーム幅が約40%ほど先鋭化されており,位相 制御による超音波ビームの集束効果が認められる。

図 6 開発装置の外観 探触子位置検出装置のポジションプロセッサ, 電子スキャンコントローラ及び画像表示装置の外観を示す。各種条件設定は, ワンタッチで入力することができる。

娄 置	名	項目	機能及び仕様
超音波探触子	接触方法	直接接触方式	
	形式	送·受信 2 分割形	
	振 動 子	共振周波数:5MHz, 個数:送・受各25個, 配列:1.8mmピッチ, 材質:PZT	
	シュー形式	半径約20mmアクリル半円形シュー(着脱シュー付き)	
位置検出装置	位置検出範囲	Xストローク:最大200mm(Im位置での検出可能)	
		Yストローク:最大270mm,β角:最大90度	
		被設定品:直径最大Imのロータへ設定可能	
	スキャナ設定	設定方法:チェーンによるロータへ抱き込む方式	
		設定間隙:最小60mm間隙内へ設定可能	
	位置表示	X, Y, βとも実ストロークをディジタル表示	
電子スキャンコントローラ		総合感度	最大 100dB
	遅 延 時 間	最大 320ns	
	焦域ゲート時間	最大 400µs	
	トローラ		自動スキャン:入射角+55~-55度
	スキャン選択	手動スキャン:入射角5度ピッチの固定角選択可能	
		角 度 表 示:ディジタルパネルメータへ入射角表示	
	マイクロコンピュータ	MC-68, ROM4KNTH, RAM2KNTH	
画像表示装置	表示	5インチモニタテレビジョン	
	画像メッシュ	Ⅰ画面 256ドット×256ドット, Ⅰドット-2ビット(4階調)	
	繰返し周波数	4 ms	
	マイクロコンピュータ	MC-68, ROM 9 Kバイト, RAM 4 Kバイト	
			遠隔操作:モニタテレビジョン付きリモートボックスによる遠隔操作可能
	オフション機能	記 録:カメラによるモニタテレビジョン撮影,ビデオプリンタによるハードコピー可能	

表 | 開発装置の主な機能及び仕様 一般の金属材料への応用が可能な機能及び仕様をもっている。

注:略語説明 PZT(ジルコン・チタン酸鉛系磁器), ROM(Read Only Memory), RAM(Random Access Memory)

超音波探触子

図10は探傷面から深さ40mmに直径1.0mmのドリル横穴を施した試験片について、セクタアレイ探触子を走査して探傷し、



(b)

(a)



ダイナミックフォーカシングを行なった場合と行なわない場合とのエコー強度を比較した結果である。ただし、横軸には 探触子の位置に対応する屈折角を採り、またダイナミックフ ォーカシングを行なわない場合としては、5個の送受信振動 子の動作遅延時間 Δta 、 Δtb を0とした。この結果から、超音 波ビームの集束効果による感度の向上が認められる。

4 応用例

開発した装置を用いて複合走査による探傷試験を実施した結果の例について述べる。

図11に平底穴欠陥試験片の探傷例を示す。同図(a)に示すよ うな段付きの底面をもった鋼材の探傷面から深さ10mm, 20mm, 30mmの位置に施された直径1.0mmの平底穴欠陥をもつ試験片を 探傷した結果,同図(b)に示す探傷像が得られた。試験片断面 形状と直径1.0mmの欠陥が明確,かつ忠実に表示されている。 図12に蒸気タービンブレードの探傷例を示す。ブレードダ ブティル部で,経年劣化による疲労き裂はタービンロータに はめ合うフック面コーナ部の応力集中が大きい位置に発生す る可能性が大きい。このため、実機のブレードダブティル部 の上記の位置に疲労き裂を模擬した人工欠陥を放電加工によ って製作した。同図(a)に示す欠陥供試材を探傷した結果,同 図(b)に示す欠陥部探傷像が得られ、その結果、矢印で示すよ うに欠陥像が認められた。一方、同一形状の健全部を探傷し た結果,同図(c)に示す健全部探傷像が得られブレードダブテ ィル部の断面形状がほぼ実態に即して表示することができた。 (b)図及び(c)図に示す欠陥部と健全部の探傷像を比較し、両者 の相違点を見分けることで、容易に欠陥部の識別が可能である。

5 結 言 蒸気タービンブレードのような複雑な形状をもつ金属材料 の被検体を対象とした電子セクタスキャン式超音波探傷装置 を開発し,振動子アレイの高速スイッチングによる超音波ビ ームのセクタスキャン動作と,位相制御によるダイナミック フォーカシングの有効性を確認した。更に,本装置の開発に

49

206 日立評論 VOL. 64 No. 3(1982-3)





(b) 欠陥部探傷像(\」印:欠陥像)



図10 ダイナミックフォーカシングによる超音波エコー強度分布 ダイナミックフォーカシングを行なうことで、約7dBの感度向上が認められる。







図12 蒸気タービンブレードの探傷例 複雑な断面形状をもつ蒸気タ ービンブレードダブティル部に存在する模擬き裂を探傷の結果,忠実な供試材 の輪郭像と欠陥像が得られ,欠陥部の識別が容易である。

よりブレードダブティル部に発生するき裂を, 被検体の断面 形状の変化として表示することに成功し, 現在, 実用に供し て良好な成果を収めている。

本装置は今後,蒸気タービン機器の信頼性確保の一翼を担うものと期待されるとともに,一方,その他各種の検査対象 への適用が容易であるため,広く活用されるものと考えられる。

参考文献

図|| 平底穴欠陥試験片の探傷例 試験片の断面形状が忠実に画像表示され,直径1.0mmの平底穴欠陥も明確に欠陥像として表示されている。

 佐々木,外:複合走査Bスコープ方式による非破壊検査,非 破壊検査,22,9,584~585(昭48-5)
 佐々木,外:複合走査Bスコープ方式による超音波探傷法, 非破壊検査,26,10,660~665(昭52-10)
 近藤,外:電子セクタスキャン超音波断層装置とその応用, 日立評論,59,3,173~178(昭52-3)
 D.S.Dean: A Review of Ultrasonic Transducer Arrays, BRITISH JOURNAL OF NDT,21,3,140~146(1979)