

(論文)

# 一体型クランク軸用自動超音波探傷装置

## Ultrasonic Test Apparatus for Integral-type Crankshafts



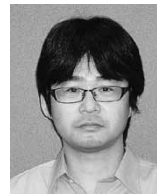
和佐泰宏\*1  
Yasuhiro WASA



濱野博文\*2  
Hirofumi HAMANO



山路鉄生\*3  
Tetsuo YAMAJI



竹裏英之\*4  
Hideyuki CHIKURI

An automatic ultrasonic-testing apparatus has been developed for integral-type crankshafts used in four-stroke engines for marine and power-plant industries. The apparatus adopts a unique phased-array technique applicable to fillets and comprises a scanning mechanism that enables its probe to rotatably follow the surfaces of eccentric shafts, while maintaining stable scanning pitch and coupling. The defect detectability has turned out to be  $\phi 0.5\text{mm}$  flat-bottom hole (FBH) at depths down to 50mm.

まえがき = 当社は、図1に示すような船舶や陸用発電機に使用するエンジンの一体型クランク軸を製造している。近年、これらのエンジンは高出力化、コンパクト化の傾向にあり、クランク軸のピンおよびジャーナルとウェブの接合部であるフィレット部にとりわけ大きな繰り返し応力が集中する。そのため、クランク軸における介在物などの内部欠陥品質に対しては、従来船級ルールで規定された品質よりもさらに厳しい品質が要求されている。

従来行われてきた超音波垂直探傷<sup>1)</sup>(以下、UTという)では、小曲率半径を持つフィレット部の表面から検査した場合、欠陥からの超音波エコーは超音波ビームの中央部のごく狭い範囲でしか検出できない。

したがって、有効な超音波をフィレット部全体に漏れなく入射し、欠陥からのエコーを検出するためには、走査ピッチを非常に細かくして、高感度かつ入念な探傷を実施する必要がある。このため、手動での探傷では長時間を要するとともに非常に高度なスキルを要する。ま

た、手動で走査ピッチを維持する困難性から、検査品質面での信頼性に多少なりとも不安があることは否定できない。

これらの問題を解決し、生産工程のリードタイムを増加させることなく、信頼性の高い検査を実施することを目的にして、独自のフェイズドアレイ法と走査機構を備えた自動UT装置を開発した。

### 1. 自動超音波探傷(UT)装置の概要

一体型クランク軸の超音波探傷は、最終熱処理が行われた後、その全域が探傷できるように、探傷面を全て機械加工し、かつ完成形状から少なくとも3mm以上の余剰肉厚を持った形状(以下、UT形状という)で実施される。これは、UTが表面近傍で不感帯を持つ特性に起因する非検査領域を作らないための対策である。なかでも、応力集中箇所であるフィレット部の完成形状は製品型式により様々であるが、UT形状のフィレット部は一律にR12mmの90°範囲に統一し、様々な型式のクランク軸へのUT装置の適用を容易にしている。その結果、重要探傷箇所であるフィレット部では表面から余剰5mm以上を確保している。最終形状ではないUT形状といえども機械加工の表面粗度は十分に滑らかに仕上げられており、超音波入射効率の向上と表面不感帯低減に寄与している。

本装置では、ピン、ジャーナルおよびウェブの各表面から垂直UT法および斜角UT法で検査を実施し、さらにフィレット部からフェイズドアレイ法で検査を実施することによって、ほぼ全域の探傷を実現している。表1は本装置の主要仕様を示し、図2は被検査材であるクランク軸の部位ごとに適用される探触子位置と方向を示す。

本装置の検出能は、探傷面から深さ50mmまでが平底

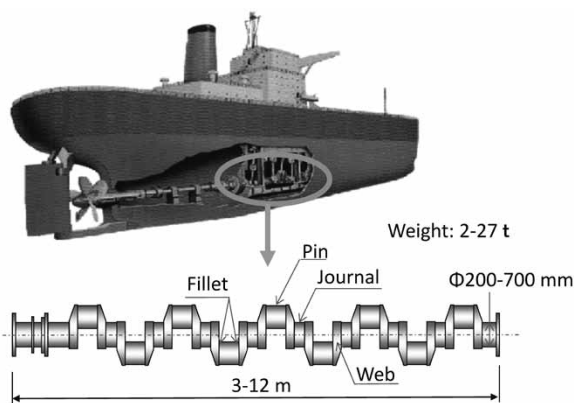


図1 一体型クランク軸 (9気筒の例)

Fig. 1 Integral type crankshaft (example of 9 cylinders)

\*1 技術開発本部 生産システム研究所 \*2 鉄鋼事業部門 鋳鍛鋼事業部 品質保証室 (現 本社 IT企画部) \*3 鉄鋼事業部門 鋳鍛鋼事業部 品質保証室  
\*4 神鋼検査サービス(株) 技術部

表1 一体型クランク軸自動UT装置の概略仕様

Table 1 Specifications of UT equipment for integral type crankshaft

Item		Specification
Work Size	Length(mm)	~ 10000 (max)
	Pin/J. width (mm)	250 ~
	Pin/J. diameter (mm)	400 ~ 500
Probe	Pin/J.	Normal & Angle(4M)
	Web	Normal & Angle(4M)
	Fillet	Phased Array (10M)
Coupling	Coupling liquid	Water
	Coupling check	B1 echo or grass echo
UT	Inspection method	Pulse reflection method
	Pulsar repetition	Normal:0.2KHz, Angle:1KHz
	Pulse pitch	2mm(Normal & Angle) & 1mm(PA)
	Detectability	Reference(Φ0.5mm FBH) -6dB



図3 一体型クランク軸自動UT装置外観

Fig. 3 Appearance of UT instruments for integral type crankshaft

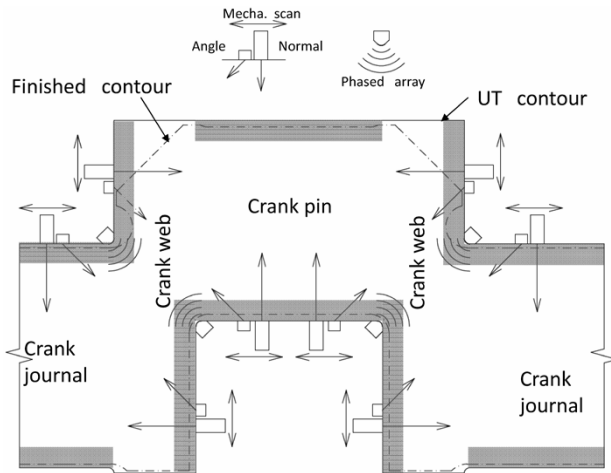


図2 クランク軸の検査対象部位と検査する探触子群

Fig. 2 Target parts of crankshaft for detection and UT probes

穴 (flat bottom hole, 以下FBHという)  $\phi 0.5\text{mm}$ , その他はFBH  $\phi 1\text{mm}$ 以上であり、深さにより異なる。原子力用鍛鋼品の検査基準がFBH  $\phi 6\text{mm}^2$ 、一般鍛鋼品がFBH  $\phi 4\text{mm}^3$ であることを考えると、常に疲労破壊の危険にさらされているクランク軸の品質要求の厳しさが理解できる。

本装置を用いて一体型クランク軸を検査している状況を図3に示す。

ローラ付きの受台は、クランク軸長手方向に移動でき、かつローラ部の高さを変更できる。したがって、ジャーナルの数および寸法が異なるクランク軸に対しても、ジャーナル部を受けて一体型クランク軸芯を回転装置軸芯に一致させることができる。

回転装置は、クランク軸端をチャッキングし、ジャーナル軸芯を中心として回転させる。回転角や回転速度は制御ユニットで制御される。

走査ヘッドは複数の探触子を搭載し、探触子を移動させる機構、検査対象面に倣いながら探触子を適正な圧力で押し付ける機構、および接触媒質を自動供給する機構を有する。これらの探触子群は、ピン、ジャーナル、フィレット部およびウェブ内外の全表面を走査する。検査中は、接触媒質は常に自動で探触子表面に供給され、使用した接触媒質はプールに回収され循環・再利用される。探触子は、接触媒質を介して検査対象に超音波パルスを送信し、欠陥からのエコーを受信する。欠陥からのエコーは、時間波形として探触子の位置情報とともに制御ユニットに送信される。

制御ユニットに送信された欠陥エコーはエコー高さで分類され、検査対象の表面展開マップ上の該当する探触子位置に色分け表示される。

## 2. 独自のフェイズドアレイ法

検査品質上重要な応力集中箇所であるフィレット部 (R12mm) の探傷においては従来、当該フィレット部に対応する凸型R12mmウェッジを装着した探触子を機械的に走査していた。しかしながらこの方法では、小ピッチでの走査、深さ別の複数回の探傷が必要で非常に長時間を要する。

本装置では、フィレット部にフェイズドアレイ法を適用した。フェイズドアレイ法では、複数の超音波振動子をアレイ状に配置し、各素子のパルス送信時間を制御することで様々なUTパルスを発生させることが可能となる。たとえば、超音波ビームに角度を持たせることや、超音波ビームの集束深さを変化させることができる。

フェイズドアレイ法を適用することにより、機械的に探触子を細かいピッチで走査すること、あるいは複数の探触子を用いる必要がない。すなわち、図4に示すように1プローブでの電子的な走査により複数のフォーカスポイント (Zone I ~ III) で、かつ扇型で示した幅広い角度範囲の超音波ビームでの検査が可能となった。プローブの設計にあたっては、一般的なフェイズドアレイの周波数上限である10MHzを選択し、R12フィレットに適合すべく0.5mmピッチで128個の振動子を配置している。

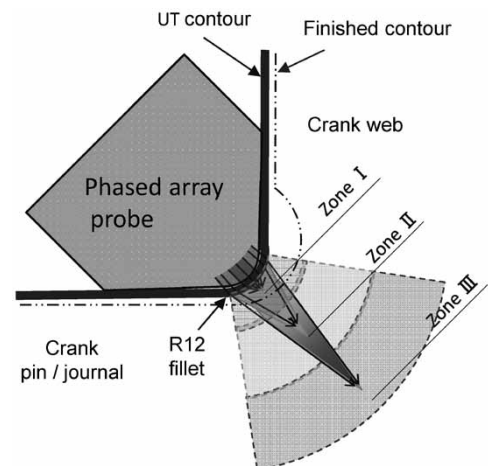


図4 R12フィレットに適用するPAプローブのフォーカス模式図

Fig. 4 Focus pattern diagram of PA probe for R12 fillet



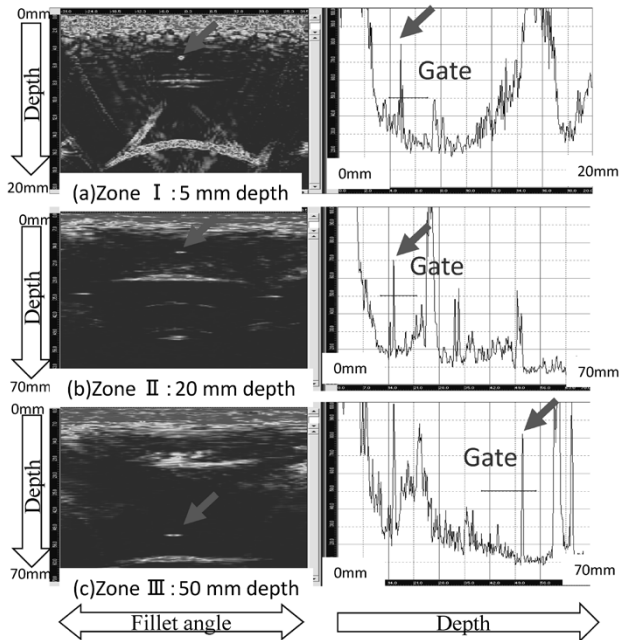


図5 PAプローブによるフィレット部0.5mm平底穴検出結果  
 Fig. 5 Detection results of  $\phi$ 0.5mm flat bottom holes using PA probe

フェイズドアレイプローブをフィレット部に適用するにあたっては、深さゾーンごとの励起素子数、ディレイ設定、感度設定、接触媒質の供給方法などの条件を最適化し、R12の探傷面から90°の角度範囲で深さ50mmまでのFBH $\phi$ 0.5mmを確実に検出できる探傷法を独自開発した。図5に示すのは、FBH $\phi$ 0.5mmの人工欠陥を設けたテストピースを探傷した結果である。矢印で示したように、表層下5~50mmのゲート範囲内で十分なS/NでFBH $\phi$ 0.5mmを検出できている。

### 3. 独自の走査機構

偏心部を持ったクランク軸特有の複雑形状に対して安定した探傷を実現できる独自の走査機構を開発した。

図6に示すように本装置の走査機構は、フリーに動く走査ヘッドをピンまたはジャーナルに設置し、回転装置でクランク軸を回転させると、走査ヘッドがクランク軸に追従して回転しながら検査する。走査ヘッドは、偏心したピンにも追従して検査できるように設計されている。走査ヘッドは、ウェブ用、ピンおよびジャーナル用、

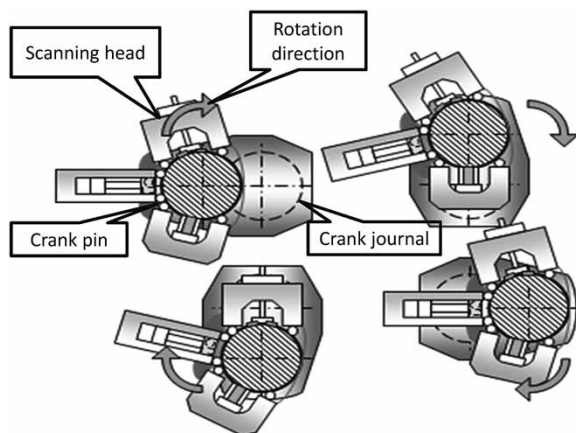


図6 ピン追従型走査機構の模式図  
 Fig. 6 Mechanism of pin-following type scanning

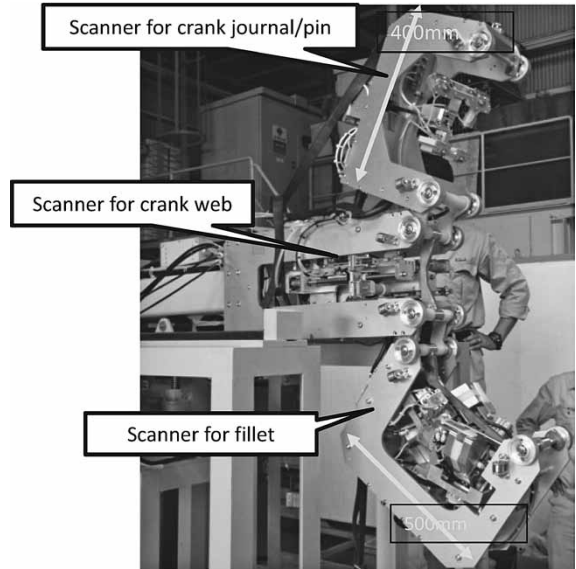


図7 走査ヘッド外観  
 Fig. 7 Appearance of scanning head

およびフィレット用の3つのスキャナで構成されている(図7)。各スキャナは、クランク軸が回転して偏心したピンがどの角度に位置しても、クランク軸の半径方向または軸方向に探触子を走査できる機構を有している。ピン/ジャーナル部の探触子走査機構には抑え圧自動制御を付加した首振り走査方式<sup>4)</sup>、<sup>5)</sup>を採用し、幅広い機種への対応を可能にした。

本装置では複数の探触子による同時探傷を実現しており、ウェブとピンまたはジャーナルを同時に走査できる。

各探触子ごとにビームの半値幅を測定し、走査ピッチを、その半値幅未満に設定する。これにより評価レベルを基準エコーレベルの半分とすることで、欠陥エコーの見逃しがなくなる。

### 4. 探傷結果例

本装置を用い、介在物を内在させた試験体を対象に探傷を行った結果の一例を図8に示す。探傷結果は、クランク軸表面を展開したマップ上に、探触子ごとにエコー高さで色分類されプロットされている。

中央部②にはウェブ表面マップがあり、画面左側の長

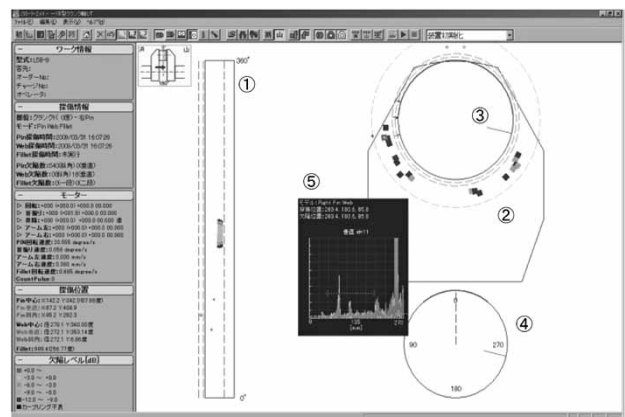


図8 検査結果の例  
 Fig. 8 Example of detection results

方形①は、ピンの表面を展開したマップである。ピンまたはジャーナルを示す円形（③、④）のマップ上にはフィレット部の探傷結果がプロットされる。

それぞれのマップ上にプロットされた点にはそれぞれの点で観測されたエコー波形も記録されており、プロット部をクリックすることで画面中央部にUTエコーの時間波形が表示され（⑤）、検査員による分析が可能である。

検出されたインディケーション<sup>注)</sup>は一覧表としてリスト表示される。近接したインディケーションをまとめてグループ化し、欠陥サイズを評価項目として表示することも可能である。信号処理部においては、外来電気ノイズによる誤検出を低減すべく、送信超音波パルスに同期したエコー信号かどうかを判定するアルゴリズム<sup>4)</sup>を搭載し、信頼性の高い検査としている。

## 5. 従来法との比較<sup>6), 7)</sup>

当社検査員が従来の手動探傷法で本装置と同レベルの検査を実施する場合、常に2mm以下の細かなピッチで走査しなければならなかった。とくに、探傷が難しいフィレット部からの垂直探傷では、完全に検査するためには、深さごとに超音波の焦点を変えたミニチュア探触子を複数使用して、1mm以下の走査ピッチで検査していた。たとえば、図1に示した一般的な9気筒の一体型クランク軸を上記条件で検査すると、走査速度や探傷ピッチ、探傷面積から概算される検査時間は約10労働日を必要とする。さらに、このような検査は非常に訓練された

検査員でしか実施できない。

一方、本装置で検査する場合には2労働日で実施できる。さらに、手探傷と比較しても検査員に対してそれほど高いスキルや訓練を必要としない特長を持つ。

**むすび**＝一体型クランク軸用自動超音波探傷装置を開発して、以下のことを実現した。

- ・独自のフェイズドアレイ法により、探傷面がR12のフィレット表面から深さ50mmまでの平底穴φ0.5mmの欠陥を電子走査によって角度90°の範囲で検出可能にした。
- ・独自の走査機構により、偏心回転するクランク軸に対しても安定した自動走査を可能にした。
- ・垂直法、斜角法およびフェイズドアレイ法を採用し、一体型クランク軸のほぼ全体積の自動検査を可能にした。

これらの実現により、従来法では10労働日が必要な検査を2労働日に短縮するとともに、検査員に要求するスキルを低減させることができた。

## 参 考 文 献

- 1) 日本非破壊検査協会. 超音波探傷試験 I～III. 1989.
- 2) ASME SA508 Class2 S2. 2007.
- 3) JIS G 0587. 2007.
- 4) 岡本 陽ほか. R&D神戸製鋼技報. 2005, Vol.55, No.3, p.16.
- 5) 和佐泰宏ほか. R&D神戸製鋼技報. 2007, Vol.57, No.3, p.35.
- 6) H. Hamano. IFM2014. 2014, p.520
- 7) 濱野博文ほか. 鋳鋼と鍛鋼. 2014, No.541, p.68.

脚注) 非破壊試験で検出した不連続部または不規則部から得られた信号などの情報。