

# 15MHz高周波超音波探傷による鋼中介在物評価法の開発

佐藤 海広\*<sup>1</sup>, 高須 一郎\*<sup>2</sup>, 雲丹亀 泰和\*<sup>3</sup>

Development of Evaluation Method for Nonmetallic Inclusions in Steel through 15MHz Ultrasonic Test  
Kaiko Sato, Ichiro Takasu and Yasukazu Unigame

Synopsis: Cleanliness improvement efforts for bearing steels have been continued, while it has been well-known that the fatigue properties of bearing products are extraordinarily affected by nonmetallic inclusions.

In the bearing products used in a clean environment, it is known that an internal inclusion can be a starting point of fatigue fracture. And the rolling contact fatigue life of bearings is described as two concepts. One is "L10 life", which represents general bearing performance, and the other is "accidental short life". The "L10 life" is affected by small or middle size inclusions that are tens of microns or several microns in diameter. Such inclusions are evaluated by oxygen analysis, microscopy and ultrasonic detection with high frequency probes of 50-100MHz. On the other hand, "accidental short life" is caused by macroscopic inclusions with 100-micron or larger diameter.

From the viewpoint of higher reliability of bearing steels, Sanyo has developed 15MHz ultrasonic testing method for macroscopic inclusions in steel.

In this paper, outline of the equipment, detection performances for nonmetallic inclusions, and basic characteristics related on the point-focus type ultrasonic probe, were explained on the 15MHzUT, and one of application examples was also shown.

15MHzUT was useful for the evaluation of the macroscopic inclusions and this method was also effective for the demonstration of the high reliability of clean steels.

key words: UST (Ultrasonic Testing); high frequency; reliability; cleanliness; steel; macroscopic inclusion; nonmetallic inclusion; bearing steel; semifinished product

## 1. 緒言

軸受用鋼においては、鋼中に存在する非金属介在物が軸受製品の機能や疲労強度に大きな影響を及ぼすため、従来より清浄度の改善が行われてきた。その結果、軸受の寿命は飛躍的に向上している。

ところで、クリーンな環境で使用される軸受製品においては、内部の介在物を起点として、疲労破壊が起こることが知られている。その場合、軸受製品の転動疲労寿命は、次の2点で記述されると考えられる。

1点目は軸受のパフォーマンスを示すL10寿命（10%破損確率寿命）であって、軸受用鋼の清浄度と相関があることが知られている。具体的には、数～数十 $\mu\text{m}$ の小中型介在物が関与するもので、それら介在物に関する清浄度評価方法としては、トータル酸素およびASTM法等の顕微鏡法が実用化されている。検鏡介在物を極値統計処理する方法も積極的に活用されており<sup>1)</sup>、世界的に普及しつつある。近年の研究では、検鏡極値による予測最大介在物径とL10

寿命とに相関があることも明らかにされてきている<sup>2)</sup>。その一方で、50～100MHzの高周波超音波探傷による介在物評価方法<sup>3-14)</sup>も開発されている。

2点目は、突発的な疲労寿命低下である。軸受製品において、L10寿命などの計算寿命では予測できない早期の疲労破壊が起こることがあり、その破面には100 $\mu\text{m}$ 級以上の大型介在物が見られることがある。軸受の信頼性向上には、この100 $\mu\text{m}$ 級以上の大型介在物の低減が必要であるが、出現頻度が極めて低いために、これまでの清浄度評価方法では、その評価が困難であった。そこで、軸受用鋼の更なる信頼性向上の観点から当社では15MHz探触子を用いた水浸超音波探傷による介在物評価方法（以後15MHzUTと記す）<sup>15-17)</sup>を開発した。

Fig.1に各種の非金属介在物評価方法について、評価重量と評価対象となる介在物の大きさから見た概略の位置づけを示す。極めて出現頻度の小さい100 $\mu\text{m}$ 級以上の大型介在物に対しては、kgオーダーの大体積検査が可能な15MHzUTは、非常に有効な方法である。スライム抽出法

\*1 研究・開発センター プロセス開発グループ

\*2 研究・開発センター プロセス開発グループ長、PhD

\*3 研究・開発センター長

のように鋼試料を溶解しないので、クラスタ状介在物にも対応できるという利点もある。

検鏡介在物を極値統計処理する方法と15MHzUTとを組み合わせる使用することにより、概ね、全介在物寸法に関するトータルの信頼性を評価することができる。

本報では15MHzUT設備の概要、非金属介在物検出能、測定試料調製法の影響、基本探傷特性、評価手順および軸受用鋼における適用事例について述べる。

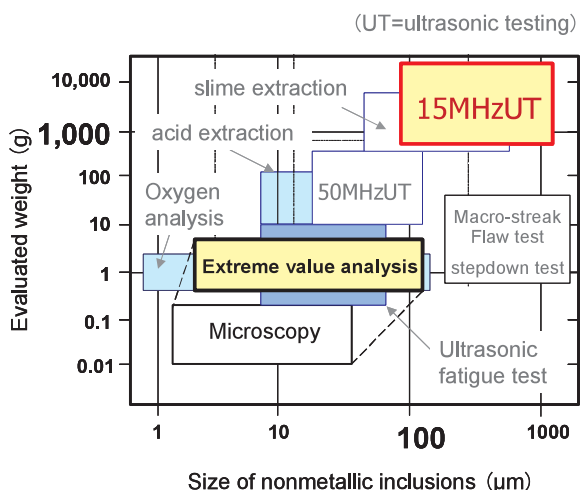


Fig.1 Comparison of cleanliness evaluation methods.

## 2. 15MHzUT設備の概要

高周波超音波探傷設備の外観をFig.2に示す。全没水浸式の超音波探傷装置であり、パルス反射法による高周波超音波探傷を可能としている。

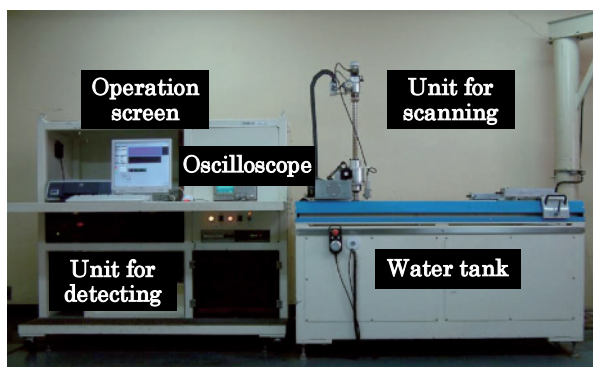


Fig.2 Appearance of ultrasonic testing equipment.

装置の構成は、高性能パルサー／レシーバーを有する超音波探傷器、オシロスコープ、操作画面、水槽（脱気装置を含む）と走査機構部を有する多軸制御型高性能スキャナーによっている。水槽内の座標系は、15MHzUTではXYZ系を使用する。Fig.2では横方向がX軸、奥行き方向がY軸、縦方向がZ軸である。探触子の移動は、X方向で最大

700mm、Y方向で最大600mm、Z方向で最大300mmであり、最小10μmピッチで移動が可能である。

当社の高周波超音波探傷装置は、厚さが同一の複数の測定試料の連続探傷と、測定試料すべての探傷結果の三次元表示（C-スコープおよびB-スコープの表示）と、検出欠陥の数値データ（X,Y,Z座標値および欠陥深強度）の出力とを可能としている。

連続探傷の設定画面は、Fig.3に示すものであり、個々の試験片のX, Y平面で見たときの探傷エリア（中心点座標と探傷距離）および探傷ピッチ、Z方向のゲート範囲（深さ方向の探傷範囲）、測定感度（アッテネータ方式で表示のゲイン）を一括入力し、探傷作業を開始する。これにより良好な作業性を得ている。

15MHz超音波探触子の外観をFig.4に、仕様をTable1.に示す。ポイントフォーカス型の探触子であって、探傷周波数は15MHz、振動子径は0.5インチ、水中焦点距離は6インチ（公称）である。

Fig.5に探傷模式図を示す。当社では垂直探傷法を採用している。深さ方向に関しては、不感帯を除く、鋼中焦点の前後に検出領域（ゲート）を設定して探傷を行っている。

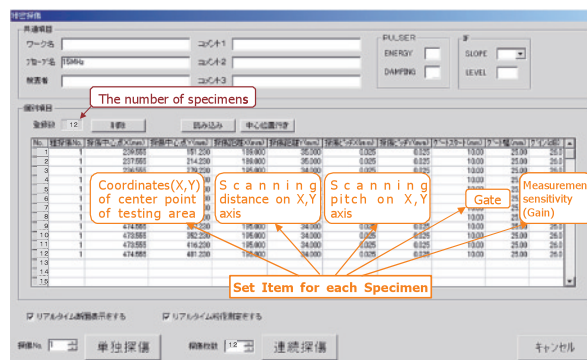


Fig.3 Screen to input ultrasonic testing conditions.



Fig.4 Appearance of 15MHz-probe.

Table1. Specifications of the 15MHz-probe.

Focus type	Point focus
Nominal frequency	15MHz
Transducer element dimensions	$\phi$ 12.7mm
Focal distance in water	150mm (Nominal)

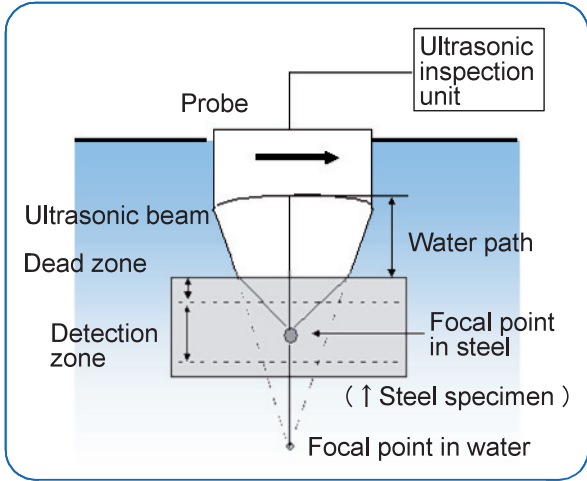


Fig.5 Schematic diagram of ultrasonic testing.

### 3. 非金属介在物検出能

15MHzUTでは種々の形態の酸化物系介在物が検出可能である。検出介在物の事例をFig.6、Fig.7に示す。

Fig.6はストリンガー状の大型介在物の例である。主体組成は $Al_2O_3$ で、大きさは幅が $50\mu m$ 、長さが $470\mu m$ 、 $\sqrt{AREA}$ が $150\mu m$ である。

Ultrasonic echo image	Dimension and microstructure $50\mu m \times 470\mu m$
	 $Al_2O_3$ -type

Fig.6 Stringer inclusion detected by 15MHzUT.

Ultrasonic echo image	Dimension and microstructure $80\mu m$ diameter
	 $MgO \cdot Al_2O_3 + CaO \cdot Al_2O_3$ -type

Fig.7 Globular inclusion detected by 15MHzUT.

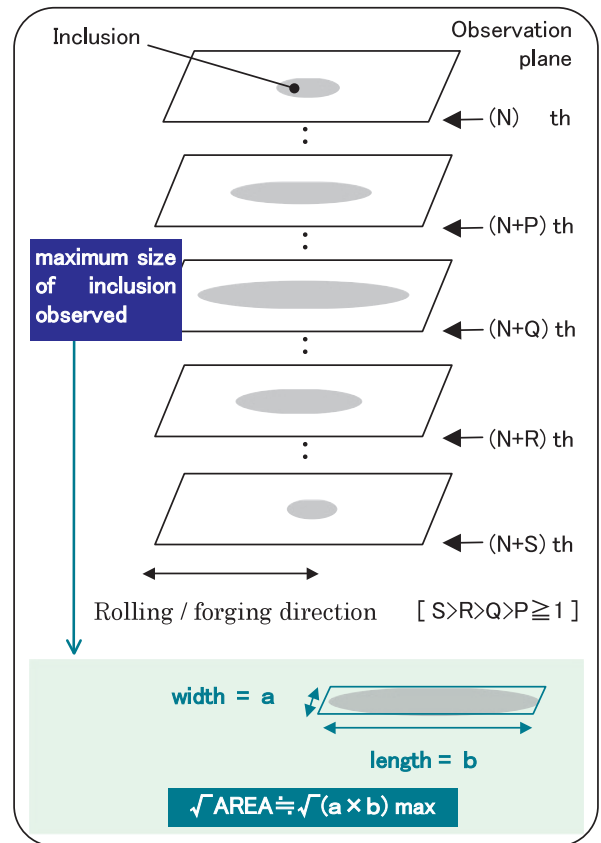


Fig.8 Determination of inclusion size with microscopy.

Fig.7は球状の大型介在物の例である。主体組成は $MgO \cdot CaO \cdot Al_2O_3$ で、大きさは $\phi 80\mu m$ である。

介在物の大きさ（幅、長さ、 $\sqrt{AREA}$ ）は、Fig.8に示す要領で追込研磨を行って大型介在物の最大径を求めたものである。追込ピッチは $10\mu m$ 程度である。

以上のような大型介在物について、15MHzUTの反射波強度と検鏡 $\sqrt{AREA}$ との関係をFig.9に示す。

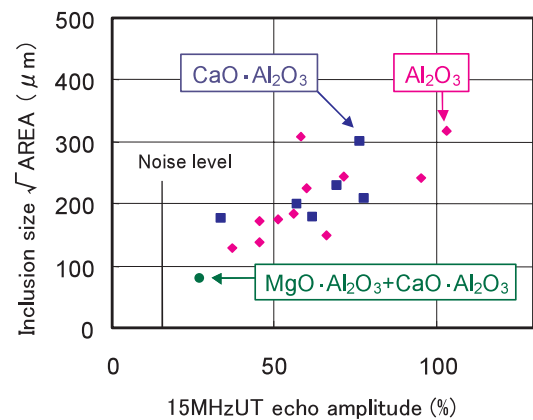


Fig.9 Relation between echo amplitude of 15MHzUT and inclusion size ( $\sqrt{AREA}$ ) by microscopy.

Fig.9に示すように、15MHzUTでは、材料ノイズレベルに対しS/N比が約2以上の条件で100 $\mu$ m級の大型介在物が検出可能であった。さらに100 $\mu$ m級の大型介在物の15MHzUT反射波強度と検鏡 $\sqrt{\text{AREA}}$ とはおよその相関関係があることが分かった。介在物組成の観点からは主体組成でCaO $\cdot$ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (■)、MgO $\cdot$ CaO $\cdot$ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (●)、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (◆)があるが、いずれの組成の大型介在物も特に層別されることなく、同様のレベル観での検出が可能とわかる。

100 $\mu$ m級大型介在物の15MHzUT反射波強度と介在物の幅との関係をFig.10に示す。15MHzUT反射波強度と介在物の幅には相関関係は認められないが、一方で、本テストでの大型介在物の幅の検出下限値は30 $\mu$ mであり、幅30 $\mu$ m以上の100 $\mu$ m級大型介在物を検出していることがわかる。

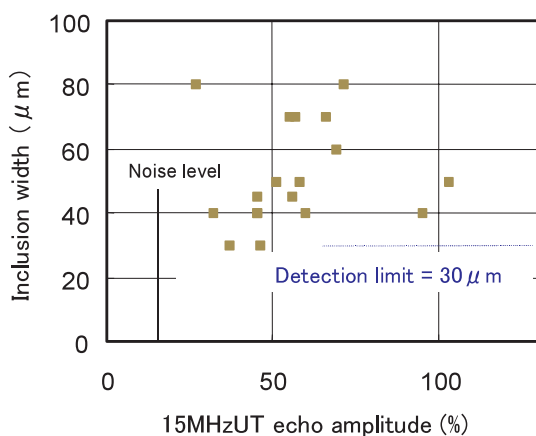


Fig.10 Relation between echo amplitude of 15MHzUT and inclusion width by microscopy.

#### 4. 測定試料調製法の影響

15MHzUTによる大型介在物の評価では、鋼材の圧鍛比やポロシティの取り扱いに注意が必要である。以下に詳細を説明する。

##### 4.1 圧鍛比

15MHzUTによる大型介在物検出への鋼材圧鍛比の影響を、Fig.11に示す要領で調査した。肌焼合金鋼の丸鋼片を用い同一部位の同一試料で調査比較した。各圧鍛比の条件の試料で検出された15MHzUT欠陥の個数は評価重量10kgあたりに換算して比較した。

結果をFig.12に示す。圧鍛比 $\div$ 9のときの検出欠陥個数を100として指数化した値で表示している。

Fig.12からわかるように鋼材圧鍛比が大きくなるにつれ15MHzUT欠陥個数が減少した。これは介在物延伸によるものと考えられる。このことから、15MHzUTを用いた大型介在物評価結果を比較するには、圧鍛比を考慮する必要があることがわかる。

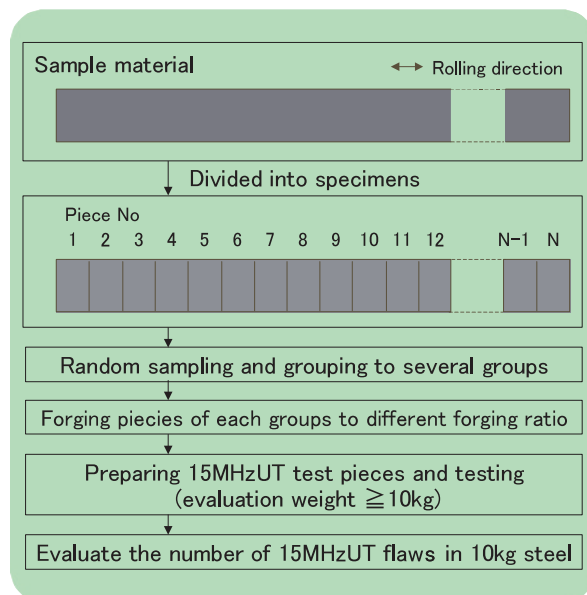


Fig.11 Procedure to investigate the influence of rolling and/or forging ratio of steel on the detectability of macroscopic inclusions by 15MHzUT.

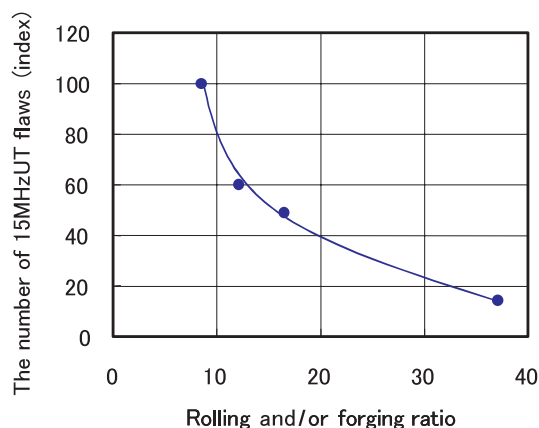


Fig.12 Influence of rolling and/or forging ratio of steel to detectability of macroscopic inclusions by 15MHzUT.

##### 4.2 ポロシティの取り扱い

特に鋼片など圧鍛比の小さな中間製品では、15MHzUTで検出されるレベルの欠陥として、大型介在物だけでなくマイクロポロシティが存在している場合がある。その場合には、大型介在物のみを評価するための対策が必要である。

超音波探傷において、介在物と空孔を識別するための欠陥波のパラメータとしては一般に、位相（簡易位相情報P/A<sup>18)</sup>）、中心周波数、反射波強度が知られている。

50MHzUTにおいては、欠陥波の位相などの情報をベースに、介在物と空孔を識別する方法のトライアルも知られている<sup>19)</sup>。しかしながら、15MHzUTでは、振動子径0.5インチに対して、水中焦点距離が6インチと大きい、長焦点の探触子を使用しているため、位相情報による介在物とマイクロポロシティとの識別は困難である。中心周波数、反

射波強度についても、介在物とマイクロポロシティとの識別のための有力な知見は得られていない。

したがって、15MHzUTの測定試料で、その測定評価領域のマイクロポロシティは圧着されている必要があるが、高い圧鍛比を与えれば、前述のように検出介在物が減少することになる。実用上は探傷範囲から中心部ポロシティの存在範囲を除外して評価範囲を設定し、評価範囲内にあるマイクロポロシティは圧着させる必要がある。

## 5. 基本探傷特性

15MHzUT探傷条件の影響について述べる。焦点深さ、距離振幅特性、超音波ビーム径や残響エコーの基本探傷特性を明らかにし、ゲート幅および探傷ピッチの適正値を検討した。以下に詳細を説明する。

### 5・1 焦点深さ

同一形状の欠陥の検出が、常に、超音波探触子から発せられるビームの焦点で行われたとしても、その焦点（欠陥）の深さが異なれば欠陥波強度は変化する。これは水距離が長いと水中での超音波の減衰が大きくなるためである。そこで15MHzUTでの鋼中焦点に関して、欠陥からの反射波強度が最大となる焦点深さを検討した。Fig.13に幾何焦点深さとその焦点位置にある欠陥からの反射波強度との関係を示した。

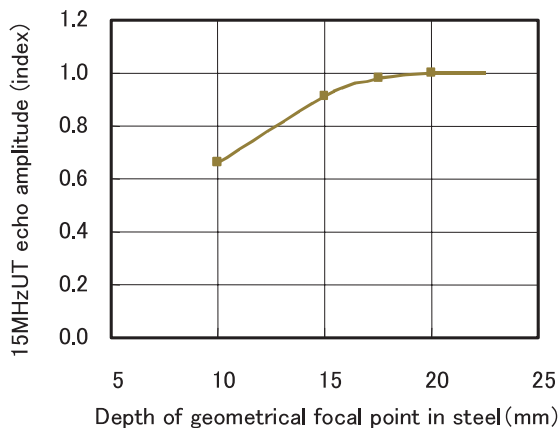


Fig.13 Relation between 15MHzUT echo amplitude of flaw and depth of geometrical focal point in steel (Depth of geometrical focal point was equal to depth of flaw).

Fig.13から、焦点深さ17.5mm程度以上で欠陥波強度が飽和することがわかる。

### 5・2 距離振幅特性

超音波探触子からのビームの進行方向（試料の深さ方向）に関して、欠陥が焦点深さにあるとき、欠陥波強度は最大となり、欠陥が焦点に対して手前や奥にずれた深さにあると、欠陥波強度は、より小さくなる。このような距離振幅特性を知っておくことで、適正なゲート設定が可能となる。

Fig.14は15MHzUTで使用している探触子の距離振幅特性を各深さに同一形状の人工欠陥を有する試験片を用いて求めたものである。この距離振幅特性において、半値幅を求めると25mm程度であることがわかる。この範囲をちょうど包含できるゲート設定が好ましいと考えられる。当社15MHzUTではゲートを25mm幅としている。

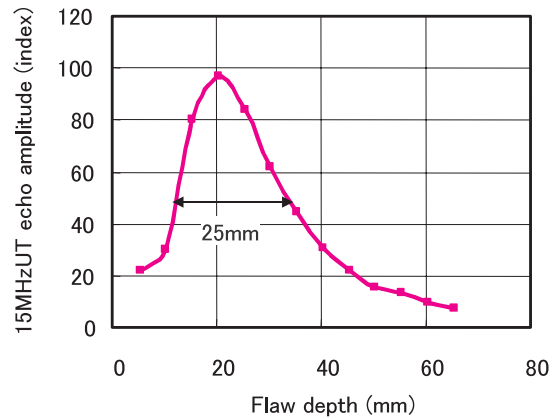


Fig.14 Relation between flaw depth and 15MHzUT echo amplitude of flaw (Depth of focal point was fixed).

### 5・3 超音波ビーム径および残響エコー

超音波探触子からのビームの径方向に関して、欠陥が超音波ビームの中心軸上にあるとき、欠陥波強度は最大となり、欠陥が超音波ビームの中心軸からずれた位置にあるとき、欠陥波強度はより小さくなる。この特性を知っておくことで適正な探傷ピッチの設定が可能となる。探傷ピッチは探傷作業の迅速性と欠陥波強度の測定精度の確保が可能となる条件とする必要がある。

少なくとも欠陥の検出漏れをほぼ防止するとの観点からは、探傷ピッチは超音波のビーム径以下とする必要がある。

15MHzUTで使用の探触子の超音波ビーム径を測定した結果をFig.15に示す。

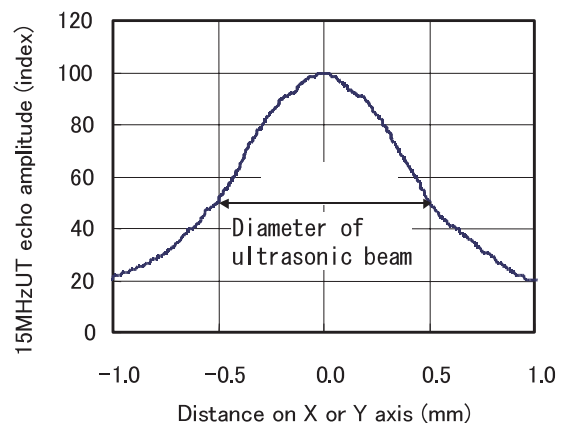


Fig.15 Diameter of ultrasonic beam at focal point with 15MHz probe.

このデータは樹脂中に埋め込んだφ50μmのステンレスワイヤーによる人工欠陥を用いて求めた超音波ビームのプロフィールであり、超音波ビーム径は、その半値幅から約1mmと読める。したがって、探傷ピッチ1mm以下は絶対条件となる。

1mm以下の探傷ピッチに関して、欠陥波強度の測定値のばらつきに及ぼす探傷ピッチの影響を、詳細に調査した結果をFig.16に示す。

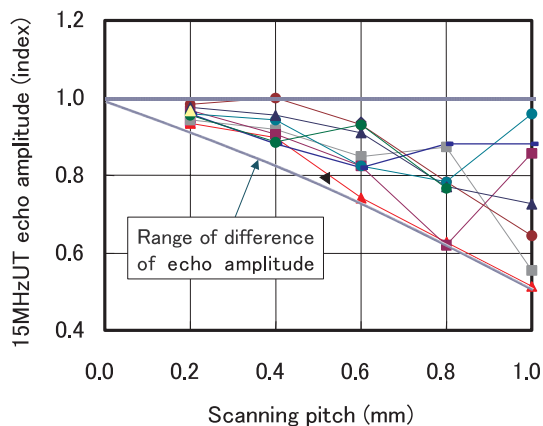


Fig.16 Influence of scanning pitch to echo amplitude with 15MHzUT.

15MHzUTにおいては、探傷ピッチ0.2mm以下とすることで欠陥波の測定値のばらつきを約10%以内とすることができるとわかる。

さらなる欠陥波の測定値の精度の向上のためには、できるだけ探傷ピッチが小さいことが好ましいが、探傷ピッチが小さすぎると、探傷スピードや繰り返し周波数とのかねあいから、Fig.17に示すような残響エコーが発生することがある。

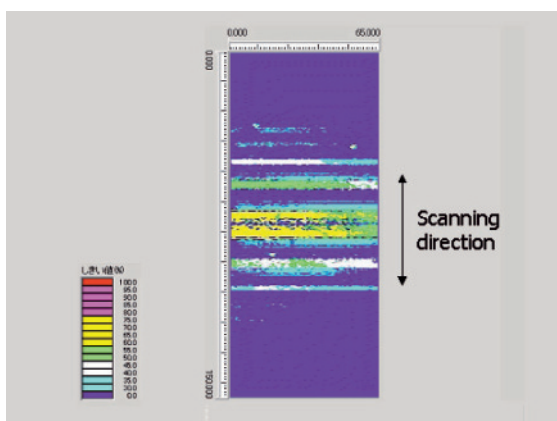


Fig.17 15MHzUT chart (C-scope) that reverberation echo appears.

この残響エコーを回避し、かつ迅速に探傷を行うとの観点から、当社15MHzUTにおいては、探傷ピッチ0.2mmを標準としている。

## 6. 評価手順

15MHzUTは、肌焼鋼、中炭素鋼、軸受鋼などの清浄度評価に活用できる。ここでは15MHzUT探傷評価手順を述べる。

### 6・1 試験片の作製手順

代表的な15MHzUT試験片と試験片作製工程をFig.18に示す。試験片は、鋼片の中心軸を試験片の中央付近とした厚さ45mmのブロックである。

試験片作製工程としては、まず、鋼片試料から、一定の長さの短円柱を切り出し、粗加工でおおよその成形を行い、その後、熱処理を行う。そして、最後に仕上げ加工として平面研磨を施す。

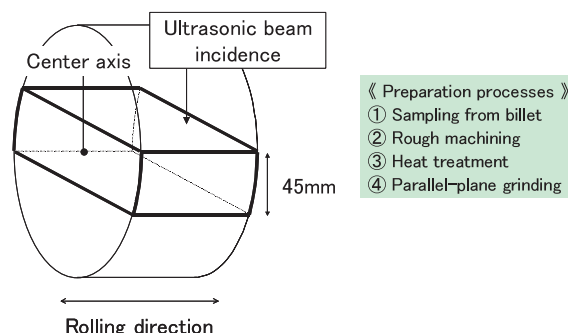


Fig.18 Test piece preparation processes.

### 6・2 探傷範囲の設定

Fig.18で試験片の上面が超音波入射面である。探傷範囲は表面エコーのゲート内への侵入を防止するため不感帯を外し、またエッジノイズを防止できるように外周部や端部を外して設定する。

### 6・3 探傷条件

15MHzUTの超音波探傷条件をTable2.に示す。水槽内で探触子を水平面で走査し、探傷する。鋼中幾何焦点は試験片中心位置の22.5mm深さに、深さ方向の探傷範囲であるゲートは、その前後の±12.5mmの範囲に設定している。

Table2. Ultrasonic testing conditions.

Standard sensitivity	Standard sensitivity value is obtained from the artificial flaw of the φ1.5mm flat bottom hole of the STB-A22 calibration block <sup>20)</sup> and set as the 80% of echo amplitude.
Testing sensitivity	Sensitize 20dB from the standard sensitivity value
Geometrical focal point in steel	22.5mm in depth
Gate	10mm to 35mm in depth
Scanning	Plane (X-Y)
Scanning pitch	0.2mm on X axis 0.2mm on Y axis

### 6・4 評価条件

鋼片などの半製品には、中心部にミクロポロシティが存在していることがあり、あらかじめ調査して決めた所定の範囲（たとえば中心から直径の20%分の範囲）を除外し評価する。Fig.19の青色表示の探傷範囲から白色網掛け表示の範囲を除外した範囲が評価範囲となる。

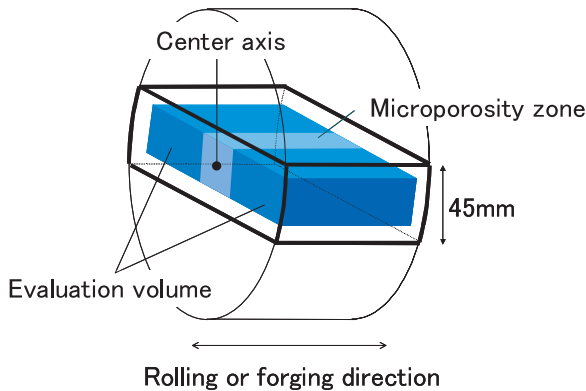


Fig.19 Evaluation volume.

### 6・5 試験重量

試験重量は対象材や目的に応じて決定する必要がある。例えば非常に清浄度の高い鋼においては、大型介在物の出現頻度は10kgあるいは数10kgに1個のオーダーであるので、この点を考慮して試験重量を決める必要がある。

### 6・6 測定チャートとデータ処理

15MHzUTの測定チャートの例をFig.20に示す。X-Y平面を上から見た図（Cスコープ）と深さ方向の図（Bスコープ）を表示している。評価範囲における反射波強度30%以上の15MHzUT欠陥のデータを大型介在物のデータとして取得し、その合計をカウントし、所定の評価重量（例えば10kg）あたりに換算する。

15MHzUT欠陥は反射波強度の情報を有している。Fig.20では、水色→白色→緑色→黄色→桃色→赤色の順で反射波強度が大きい。15MHzUT欠陥のうち小さい欠陥と大きい欠陥の有害度の違いを考慮する場合には、反射波強度をもとに、個々の15MHzUT欠陥に対して重みづけをして指数化することもできる。

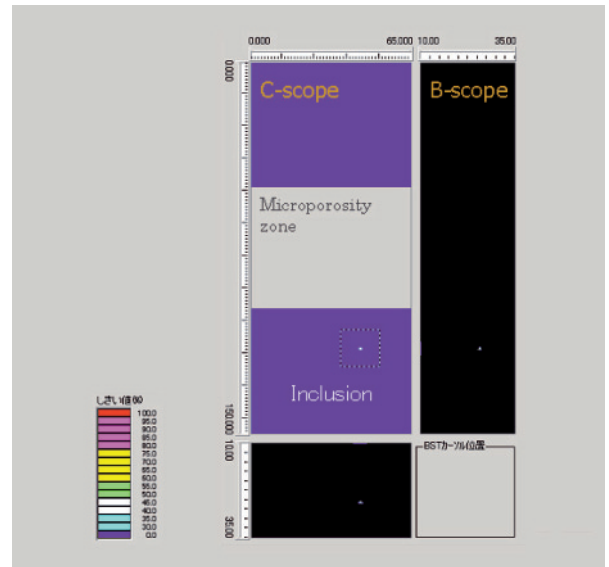


Fig.20 15MHzUT chart (C-scope and B-scope) that an inclusion detection is observed.

## 7. 軸受用鋼における適用事例

15MHzUTを軸受用鋼の大型介在物評価に適用した事例を紹介する。

連続鍛造で製造された高純度鋼と一般鋼とを15MHzUTにより比較した事例をFig.21に示す。対象は肌焼合金鋼で、定常部鋼片より試料採取した。清浄鋼の3チャージ（B,C,D）と一般鋼の1チャージ（A）は、いずれも酸素値が5~6ppmと同レベルの酸素値を有した鋼である。15MHzUT欠陥個数（所定の評価重量あたりに換算）で評価すると、Fig.21に示したとおり、両者には差が認められ、一般鋼よりも清浄鋼の方が大型介在物個数が少なく、大型介在物に対する信頼性がより高いことがわかる。

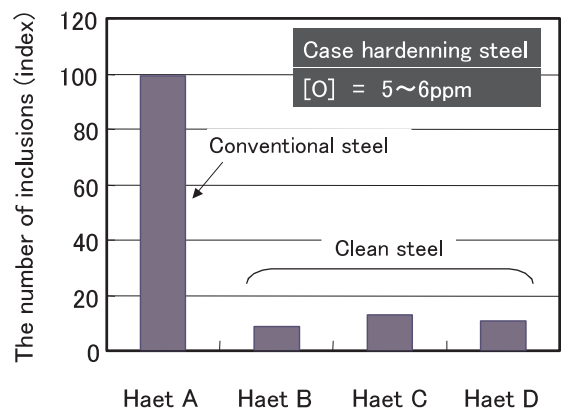


Fig.21 Comparison of conventional steel and clean steel on the macroscopic inclusion number.

また、一般鋼、清浄鋼の15MHzUT欠陥個数の反射波強度別内訳をFig.22およびFig.23に示した。前章で15MHzUTでの反射波強度と大型介在物の大きさに相関があることを述べたが、一般鋼では、反射波強度80%以上の大きな欠陥が検出されているのに対し、清浄鋼では反射波強度80%以上の欠陥は検出されていない。反射波強度分布から見ても、一般鋼より清浄鋼の方が大型介在物に対する信頼性が高いことがわかる。

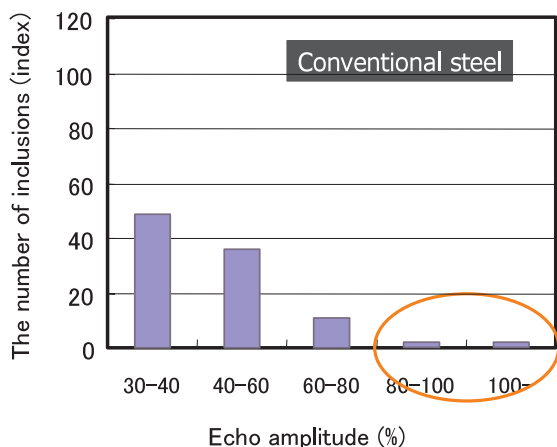


Fig.22 Echo amplitude distribution of inclusions detected by 15MHzUT in conventional steel.

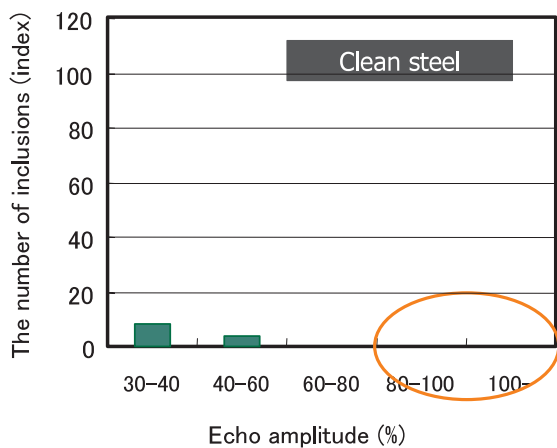


Fig.23 Echo amplitude distribution of inclusions detected by 15MHzUT in clean steel.

以上の通り、15MHzUTを用いることにより、軸受用鋼（炭素鋼・合金鋼）の大型介在物についての鋼の信頼性の高さを明確に評価することができる。

## 8. 結言

100 $\mu$ m級またはそれ以上の大きさの大型介在物の評価方法として、15MHzUTを開発した。本方法によると酸素値が同等であっても鋼材の信頼性の差異を明確化できるとわかった。また、大型介在物の観点からの品質評価や操業技術の評価が可能である。今後15MHzUTを軸受用鋼の製鋼操業評価に適用することにより、高信頼性鋼のさらなるレベルアップを図りたい。

## 9. 参考文献

- 1) Y.Kato and I.Takasu: CAMP-ISIJ, **16** (2003), 836.
- 2) M.Nagao, K.Hiraoka and Y.Unigame: Sanyo Technical Report, **12** (2005), 38
- 3) S.Takemoto and Y.Nuri: Sanyo Technical Report, **4** (1997), 88
- 4) 加藤患之, 竹本省一, 佐藤海広, 塗嘉夫: 超清浄鋼研究の最近の展開 超清浄鋼研究会最終報告書, 日本鉄鋼協会, (1999), 403
- 5) Y.Kato, K.Sato, Y.Nuri and S.Takemoto: CAMP-ISIJ, **12** (1999), 473
- 6) K.Sato, Y.Kato and Y.Nuri: CAMP-ISIJ, **12** (1999), 689
- 7) K.Sato, Y.Kato and Y.Nuri: CAMP-ISIJ, **13** (2000), 667
- 8) Y.Kato, S.Takemoto, K.Sato and Y.Nuri: Sanyo Technical Report, **7** (2000), 35
- 9) Y.Kato, K.Sato, K.Hiraoka and Y.Nuri: Sanyo Technical Report, **8** (2001), 59
- 10) Y.Kato, K.Sato, K.Hiraoka and Y.Nuri: ASTM Spec. Tech. Publ. (Am Soc Test Mater), **No.1419** (2002), 176
- 11) H.Nagayama, H.Nasu, T.Noguchi, T.Sugimoto, T.Nisikawa and N.Asai: CAMP-ISIJ, **11** (1998), 1323
- 12) T.Nisikawa, N.Iwama, H.Nagayama and N.Asai: CAMP-ISIJ, **12** (1999), 1388
- 13) H.Nagayama, H.Nasu, I.Fujii, T.Sugimoto, T.Nisikawa and N.Asai: CAMP-ISIJ, **12** (1999), 1389
- 14) 永山宏智, 木下信一郎, 藤井伊佐夫, 浅井鉅和, 西川友章: 愛知製鋼技報, **20** (2002), 9
- 15) I.Takasu, Y.Unigame and K.Sato: CAMP-ISIJ, **17** (2004), 1494
- 16) K.Sato, I.Takasu and K.Kawakami: CAMP-ISIJ, **18** (2005), 1011
- 17) Y.Unigame, K.Hiraoka, I.Takasu and Y.Kato: paper for the ASTM 7th International Symposium on Bearing Steels to be published
- 18) 村井純一, 井田隆志, 白岩俊男: 非破壊検査, **47** (1998), 498
- 19) N.Kasai, H.Okubo and T.Nishi: Tetsu-to-Hagane, **91** (2005), 537
- 20) [JIS Z 2345]: JISハンドブック 鉄鋼 I, 日本規格協会, (2004), 443



■著者



佐藤 海広



高須 一郎



雲丹亀 泰和