

超音波探傷装置による 鋼中マクロ介在物評価技術の開発

Improvement in Efficiency of the Macroscopic Inclusions Evaluation Using Ultrasonic Test Equipment

青山陽亮*

Yosuke AOYAMA

Synopsis: Rolling contact fatigue life is a key characteristic of bearings. Reliable bearings are expected to have long L_{10} life as a bearing performance index, as well as long commercial life without unexpected premature failure on any pieces of bearings in use. It has long been known that cleanliness is an important material factor to determine the fatigue life. The aforementioned early failure could be caused by macroscopic inclusions, which have small density of presence in recent clean steel and thus detection for those inclusions requires evaluation on large volume of steel. Although higher frequency ultrasonic tests have advantages for non-metallic inclusions detections, relatively low frequency of 10 to 20MHz ultrasonic tests are useful for both evaluation efficiency of large volume and detection performance of macroscopic inclusions. The authors apply focused-beam-type 15 MHz ultrasonic test to detect 0.1mm or larger macroscopic inclusions, where the efficient evaluation is needed because of assessment for large volume of steel. In this paper, the basic characteristics of several procedures of ultrasonic tests will be discussed from the viewpoint of evaluation efficiency for macroscopic inclusions.

Key words: bearing steel, rolling contact fatigue life, macroscopic inclusion, ultrasonic test

1. 緒言

軸受用鋼の L_{10} 寿命に、鋼中の酸化物系ミクロ介在物が影響していることが知られている¹⁾。ミクロ介在物を評価する方法としては、トータル酸素や、検鏡法による評点付けなどがある。また、極値統計法による予測最大介在物径と L_{10} 寿命とに相関があることから²⁾、その手法も清浄度評価に積極的に活用されている。

一方で、計算寿命未満での早期破損を引き起こすマクロ介在物は軸受用鋼の信頼性を大きく損なう。鋼中での存在頻度が低いマクロ介在物の評価方法にはブルーフラクチャー試験や段削り試験、超音波探傷試験等があり、中でも超音波探傷試験は大体積の評価や検査に適していることから、研究的な調査や品質管理などに幅広く活用されている^{3,4)}。さらに探傷結果の映像化ソフトの開発や、パソコンの処理能力向上による探傷の自動化など、技術の高度化も進んでいる⁵⁻⁷⁾。近年では、複数の素子を配列した探触子で探傷を行うフェーズドアレイ技術が積極的に利用されており、鋼材中を高速自動探傷できる設備が製造プロセスにお

ける鋼材検査装置として、また材料の評価・解析装置として導入されている⁸⁻¹⁴⁾。

超音波探傷試験によるマクロ介在物評価は、ASTM E588¹⁵⁾ やSEP1927¹⁶⁾ に代表されるような規格化された方法や、各社で開発された方法¹⁷⁻¹⁹⁾ など実施されている。これまで当社では、鋼の信頼性を評価することを目的に開発されたシングルプローブUT法（以下15MHzUTと表記）²⁰⁾ を鋼中マクロ介在物評価に適用してきた。

今後もますますユーザーニーズが高度化することが予想されるが、過度な閾値、探傷重量での試験実施はコスト増大をきたし、製品の競争力を落としかねない。超音波探傷試験の実施にあたっては求められる鋼の信頼性や、閾値に応じた探傷重量を選択する必要がある。さらに、探傷の迅速化とともに今後は試験の省力化や自動化技術の向上を図り、試験コスト低減に向けた技術開発が必要と考えられる。

そこで本報では、更なる探傷迅速化のためにフェーズドアレイ技術に着目し、フェーズドアレイUT法（以下10MHzPUTと表記）によるマクロ介在物評価方法の効率化について検討した。また、ASTM E588、SEP1927、

* 現 技術企画管理部 軸受・構造用鋼グループ（元 研究・開発センター 製鋼プロセスグループ）

従来方法の15MHzUT、新たに開発した10MHzPUTの検出感度や探傷スピードを比較検証し、10MHzPUTがマクロ介在物の迅速評価方法として有効であることを示した。

2. 水浸超音波探傷試験によるマクロ介在物評価方法の概要

複数ある水浸超音波探傷試験によるマクロ介在物評価方法のうち、ここではASTM E588やSEP1927など規格化された方法と15MHzUTについて、条件の違いや特徴を整理した。条件の一覧をTable 1に、またそれらの詳細を下記に示す。

Table 1 Characteristics of each macro inclusion evaluation method

	Frequency [MHz]	Nominal focal point (in water) [mm]	Threshold of FBH conversion [mm]	Cleanliness Index
ASTM E588	10	208	0.17	Number of echo/cm ³
SEP1927	10	Non-focus	0.30	Number of echo/dm ³ Echo length/dm ³
15 MHz UT	15	150	0.12	Number of echo/10kg
10 MHz P-UT	10	100	0.12	Number of echo/10kg

2.1 ASTM E588

ASTM E588は、水浸超音波探傷試験による軸受用鋼中の大型介在物の検出に関する規格である。

探触子は10MHz、水中焦点距離208mmのものを用いる。試験片は超音波の減衰を軽減するために適切な熱処理（例えば中炭素鋼、低炭素鋼は焼ならし、高炭素クロム鋼は球状化焼なまし）を行った圧延材、もしくは鍛伸材を用い、超音波入射面は平面に仕上げる。探傷体積は410cm³ (3.2kg) 以上を確保する。探傷感度の校正には、鋼材にφ10mmの半球をくり抜いた試験片を用いる。閾値は大きさがφ12、7、4mmの3個のステンレス鋼球の反射エコー高さから、Level 1~3と設定され、これらの閾値を超える欠陥エコー数の総和を単位重量あたりに換算してマクロ介在物を評価する。

2.2 SEP1927

SEP1927は、水浸超音波探傷試験による圧延、もしくは鍛伸された棒鋼のマクロ清浄度判定方法である。

探触子は10MHz、非焦点型のものを用いる。試験片は断面形状が角もしくは丸棒に圧延か、鍛伸されたものを用いる。試験片は超音波の減衰を軽減するために、適切な熱処理を行い、超音波入射面を機械加工により仕上げる。探傷体積は取り決めがない場合、例えば鋼材径がφ50mm以上で5dm³ (約40kg)、φ50mm未満は2dm³ (約16kg) とする。探傷感度の校正にはφ1.0mm FBH (Flat Bottomed Hole) の対比試験片を用い、探傷感度は校正

後のゲインの増幅度合いによりClass 1~5の5段階に分かれる。評価はエコー数もしくは、単位体積あたりのエコー長さで行う。

2.3 15MHzUT

15MHzUTは水浸超音波探傷試験により、圧延、もしくは鍛伸された棒鋼中のマクロ介在物を評価する方法である。これまでに15MHzUTと検鏡介在物を極値統計処理する方法とを組み合わせることで、全介在物寸法に関するトータルの信頼性を評価できることを報告している²¹⁾。

探触子は15MHz、水中焦点距離150mmのものを用いる。試験片は丸ピレットから平面形状へ切出すか、角形状に鍛伸し、熱処理後、平面仕上げを行う。評価は探傷重量10kgあたりに換算したエコー数で行う。15MHzUTの探傷は $\sqrt{\text{Area}}=0.10\text{mm}$ 以上の介在物を検出できるように設定する。15MHzUTの欠陥指示部を削り込み、ミクロ観察した結果の一例をFig.1に示す。15MHzUTは種々の形態、組成の介在物が検出可能である。なお、本報告内の $\sqrt{\text{Area}}$ (mm) とは介在物の大きさを示しており、長さ (mm) と幅 (mm) の積を1/2乗して算出した。

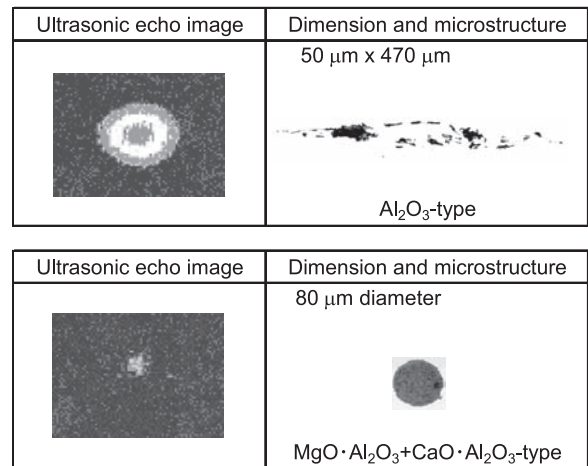


Fig.1 Examples of flaw microstructure detected by 15MHz ultrasonic tests.

ここで、さらなる迅速化のために電子走査が行えるフェーズドアレイ技術に着目した。Fig.2にその模式図を示す。フェーズドアレイプローブには複数の超音波発信素子が配列されている。それらを電子的に制御することにより、異なったタイミングで超音波を送受信し、任意の方向、深さにある欠陥を検出できる。また、複数の振動子から順番に超音波を発生させることにより、電子スキャンを行えるため迅速化が可能となる。当社ではこの特徴を利用し、従来の15MHzUTと同等の検出感度φ0.12mmFBH ($\sqrt{\text{Area}}=0.1\text{mm}$) を維持したまま、迅速化を狙った10MHzフェーズドアレイ超音波探傷装置を導入し、マクロ介在物評価方法の開発を行った。ここで表

記する15MHzUT、10MHzPUTの探傷装置はともにオフライン機（研究設備）であり、研究およびマクロ清浄度調査目的で導入したものである。10MHzPUTの装置外観をFig.3に示す。

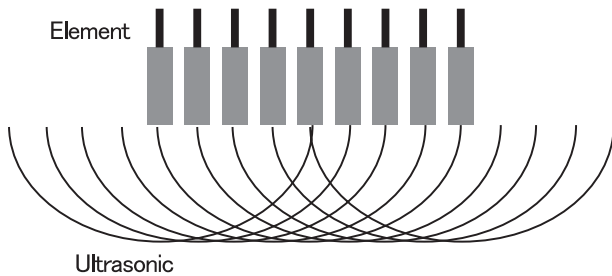


Fig.2 Schematic view of phased array.

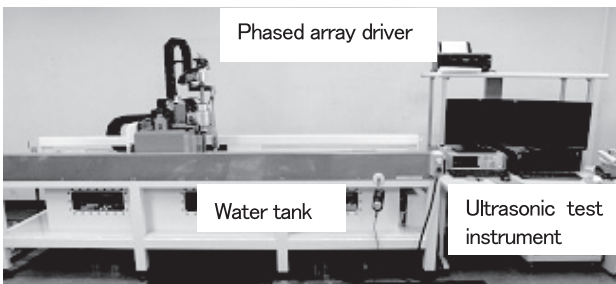


Fig.3 The outside of ultrasonic test equipment.

3. 実験方法および結果

3.1 10MHzPUTによるマクロ介在物評価の開発

3.1.1 フェーズドアレイプローブの設計

Fig.4にフェーズドアレイプローブの模式図を示す。丸ピレットを対象としているため試験片の曲率、水距離（水浸超音波探傷試験におけるプローブと試験片間の距離）を考慮したサークルタイプで、さらにS/N（シグナルとノイズの比）改善を狙って²²⁾ サイドフォーカスを組み合わせた二焦点フェーズドアレイプローブを適用した。Table 2にフェーズドアレイ探触子の詳細を示す。使用周波数は汎用品の中で最も高い10MHzとした。

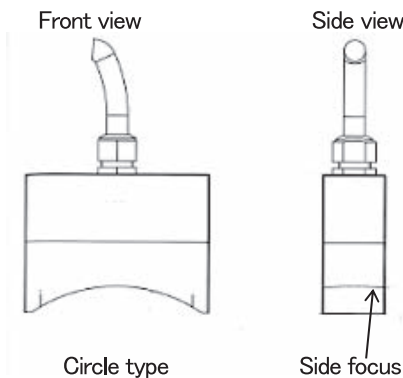


Fig.4 Schematic view of 10 MHz phased array probe.

Table 2 Specification of 10MHz phased array probe.

Probe type	Bi-focal array
Frequency	10 MHz
Number of Elements	128
Element pitch	0.5 mm
Element space	0.1 mm
Element length	15 mm

3.1.2 10MHzPUTの試験片

試験片作製と探傷の効率化を狙って、試験片はφ167ピレットから採取し、熱処理（中炭素鋼、低炭素鋼は焼ならし、高炭素クロム鋼は球状化焼なまし）後、表面ターニング仕上げとした。本手法は15MHzUTと同様、評価範囲から中心付近を除外した²¹⁾。

3.1.3 フェーズドアレイプローブの諸特性調査と検出感度

検出感度に対する探傷条件（水距離と超音波発信素子の同時励振数）の影響を人工欠陥φ0.26mm FBHを用いて調査した。平底孔加工が可能な人工欠陥の最小径がφ0.26mmであったため、このサイズを本調査では用いた。

Fig.5、Fig.6に丸棒試験片中のφ0.26mm FBHのS/Nに及ぼす水距離、同時励振数の影響を示す。水距離13mm、同時励振数を28とすることにより最大レベルのS/N=9.4が得られた。この結果より、10MHzPUTの検出感度目標であるφ0.12mm FBH（√Area=0.10mm）のS/Nを（1）式から計算した。 $S_{\phi 0.26mm FBH} = 0.13^2 \pi$ 、 $R_{\phi 0.26mm FBH} = 9.4$ 、 $S_t = 0.06^2 \pi$ （φ0.12mm FBHの面積）として計算すると、 $R_t = 2.0$ となる。本10MHzPUT超音波探傷装置において、 R_t （S/N） ≥ 2 であればノイズと欠陥の弁別が容易にできることから、10MHzPUTの検出感度目標であるφ0.12mm FBH（√Area=0.10mm）を上記の探傷条件にて得られることを確認した。検出例をFig.7に示す。

$$\frac{S_{\phi 0.26mm FBH}}{S_t} = \frac{R_{\phi 0.26mm FBH}}{R_t} \dots (1)$$

ここで、 $S_{\phi 0.26mm FBH}$ ：φ0.26mm FBHの面積（mm²）、
 S_t ：任意のFBHの面積（mm²）、
 $R_{\phi 0.26mm FBH}$ ：φ0.26mm FBHのS/N、
 R_t ： S_t を検出したときのS/N

以上より、10MHzPUTの校正ではφ0.12mm FBH相当の欠陥をエコー高さ30%で検出するよう閾値を設定した。実際の鋼材にて、自然欠陥を対象に動的探傷をした結果をFig.8に示す。√Area=0.12mmの介在物をエコー高さ32%で検出していたことから、設定した閾値通りの動的探傷が可能であることを確認した。

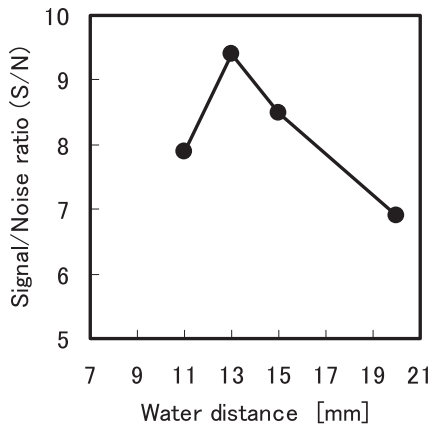


Fig.5 Effects of water distance on signal/noise ratio.

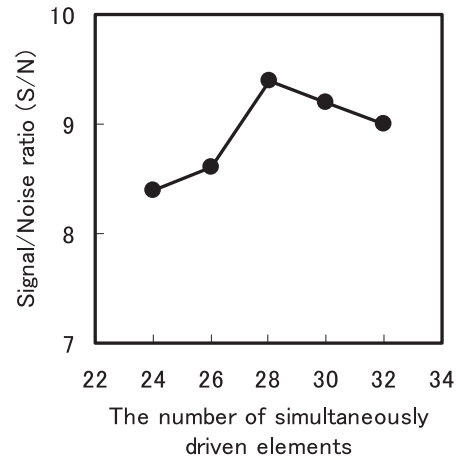


Fig.6 Effects of the number of simultaneously driven elements on signal/noise ratio.

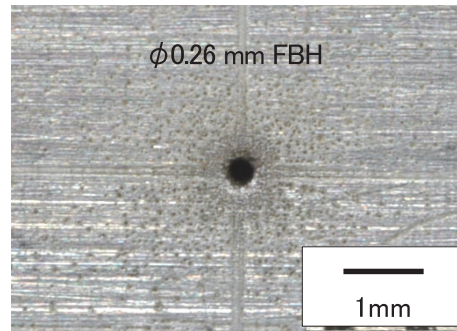
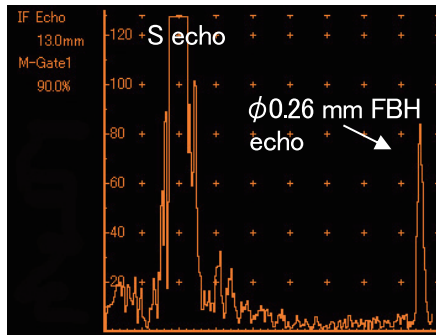


Fig.7 φ 0.26 mm FBH detected by 10 MHz PUT.

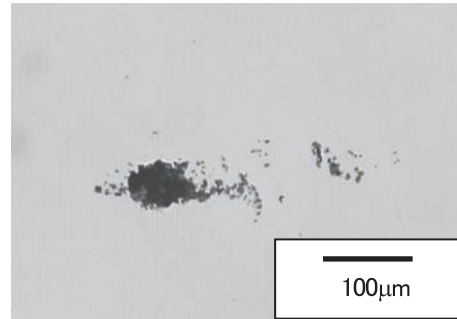
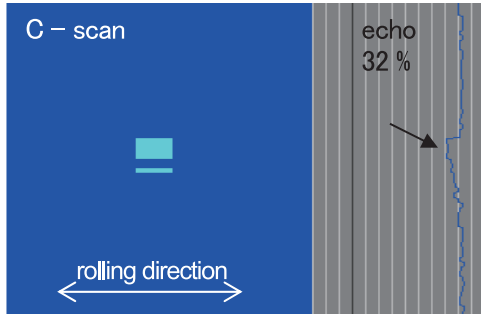


Fig.8 Examples of macroscopic inclusions detected by 10 MHz PUT.

3.2 水浸超音波探傷試験によるマクロ介在物の検出感度

3.2.1 ASTM E588の検出感度

Level 1~3に相当する検出感度をφ0.26mm FBHで調査し、前述した(1)式から計算により求めた結果をTable 3に示す。調査結果より、閾値として最も厳しいLevel 1ではφ0.17mm FBH相当の反射源を有する介在物を検出することが分かった。

Table 3 Corresponding value to FBH on each level of ASTM E588.

Sensitivity level	Level 1	Level 2	Level 3
Corresponding FBH [mm]	0.17	0.33	0.42

3.2.2 SEP1927の検出感度

校正で用いるφ1.0mm FBHを基準にして、(2)式よりClass 1~5に相当する検出感度 S_i を計算した結果をTable 4に示す。閾値として最も厳しいClass 5では、φ0.30mm FBH相当の反射源を有する介在物を検出することが分かった。

$$\frac{S_{\phi 1.0mm FBH}}{S_i} = 10^{\frac{G}{20}} \dots (2)$$

ここで、 $S_{\phi 1.0mm FBH}$: φ 1.0mm FBHの面積 (mm²)、
 S_i : FBH換算の面積 (mm²)、
 G : ゲイン (dB)

Table 4 Sensitivity class and threshold of SEP1927.

Sensitivity class	1	2	3	4	5
Flat bottom hole [mm]	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Threshold [%]	80	80	80	80	80
Gain [dB]	+6	+12	+15	+18	+21
Corresponding FBH [mm]	0.71	0.50	0.42	0.35	0.30

3.2.3 15MHzUTと10MHzPUTの検出感度の比較

15MHzUTの検出感度φ0.12mmFBH ($\sqrt{\text{Area}}=0.1\text{mm}$)と同等になるよう設定した10MHzPUTについて、自然欠陥を用いて検出感度を比較した結果をFig.9に示す。この調査は10MHzPUTで検出された自然欠陥の位置を特定して試験片を再加工し、15MHzUTで再度、同自然欠陥位置を探傷するという方法で行った。Fig.9に示す通り、15MHzUTと10MHzPUTは自然欠陥においても、ほぼ同等の検出感度であることが分かった。

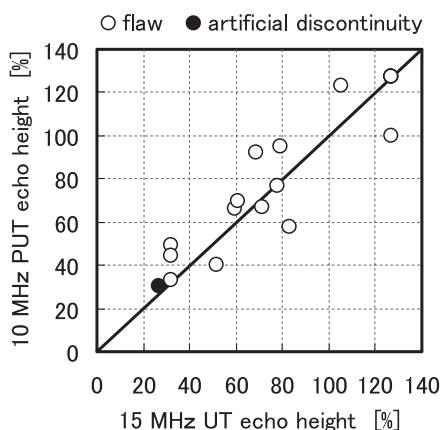


Fig.9 Relationship between echo height of 15 MHz UT and 10 MHz PUT.

3.3 水浸超音波探傷試験によるマクロ介在物の探傷時間

探傷時間は15MHzUTの探傷重量1kgあたり5.5分に比べて、10MHzPUTは探傷重量1kgあたり0.9分と短く、試験片丸棒化による探傷の効率化、および探傷方式のフェーズドアレイ化による探傷の迅速化により、10MHzPUTはφ0.12mmFBHの検出感度を維持したまま15MHzUTの約6倍のスピードアップが可能となった。

Fig.10に示すように、前述のASTM E588や、SEP1927を当社で実施し、探傷時間の比較を行ったところ、10MHzPUTは2倍以上の探傷スピードで評価できた。これらの比較から10MHzPUTは迅速なデータアップに有効な方法と考えられる。

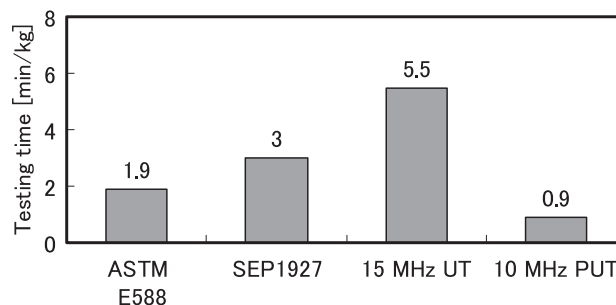


Fig.10 Testing time of each macroscopic inclusion evaluation method.

4. 考察

4.1 エコー高さ (h) と介在物の大きさ ($\sqrt{\text{Area}}$) の関係について

10MHzPUTにより、鋼材に存在する欠陥（ここでは介在物）の大きさを評価することは、マクロ清浄度に関する全体像の把握や、マクロ清浄度向上に対する取り組みの効果確認など、操業改善につながる有益なデータが得られる。

一般的に、エコー高さと円形平面欠陥の面積には比例関係があることが知られている²³⁾。エコー高さと介在物の大きさにも同様に比例関係があり、エコー高さから介在物の大きさを求めることができる。また、C-スキャン（探傷結果の平面画像表示）から得られるデータを活用して、欠陥の面積を求める方法もある²⁴⁾。後者の方法では10MHzPUTの場合、介在物の大きさが超音波ビーム径(1.0mm)に対して小さいものは画像上、実寸より大きく表示される。また焦点位置から外れた場合の補正方法に課題がある。そこで前者の方法に着目し、10MHzPUTでエコー高さから介在物の大きさを求めるため、介在物の大きさと10MHzPUTエコー高さに関してデータを蓄積し、整理した。

Fig.11にエコー高さと鋼中介在物、およびアクリル樹脂中ステンレス鋼粉末の大きさ ($\sqrt{\text{Area}}$) との関係を示す。図中の●は介在物のデータ、□はステンレス鋼粉末 (0.10、0.20、0.30、0.50mm) のデータを示す。鋼中介在物からの反射エコーと、アクリル樹脂中ステンレス鋼粉末からの反射エコーとでは、主に下記1) ~5) の条件が異なるため、探傷前にアクリル樹脂中の0.10mmステンレス鋼粉末を、鋼中介在物の評価と同じくエコー高さ30%で検出

するよう校正した。

- 1) 表面粗さによる伝達損失
- 2) 水と試験片間の音圧透過率
- 3) 試験片中の超音波の減衰
- 4) 試験片と欠陥間の反射率
- 5) 欠陥の距離振幅特性

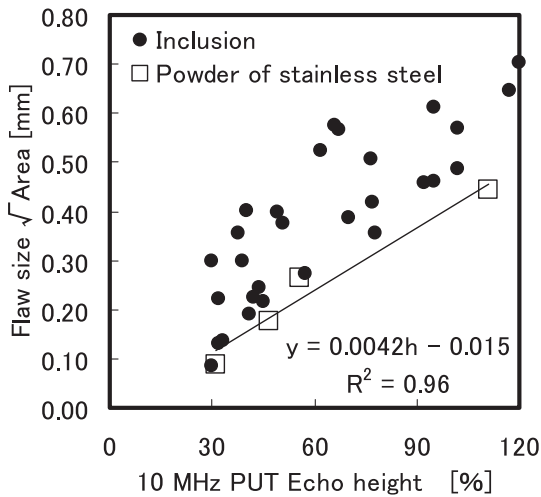


Fig.11 Relationship between echo intensity and flaw size.

この結果から、エコー高さや欠陥の大きさ（√Area）はほぼ直線関係にあることが確認された。また、ステンレス鋼粉末データは介在物データのばらつき下限に分布した。この理由として、超音波ビーム径より小さいステンレス鋼粉末についてはその投影面積分の超音波が反射されるが、介在物については圧鍛による延伸でビーム径より長くなるものがあり、必ずしもその投影面積分全てから超音波が反射されるわけではないためと考えられる。ステンレス鋼粉末から得られた回帰式を（3）式に示す。

$$y = 0.0042h - 0.015 \dots (3)$$

ここで、 y ：介在物の大きさ（mm [√Area]）
 h ：エコー高さ（%）

（3）式よりエコー高さから介在物の大きさを推定することができる。ただし、介在物形状に起因するばらつきが存在する（例えばエコー高さ h が50%の場合、介在物の大きさ y は0.195mm以上と推定）。欠陥位置が焦点位置から外れた場合は、プローブの距離振幅特性（超音波の路程と音圧の関係）からエコー高さを補正することで（3）式が適用可能となる。この方法を活用することにより、超音波探傷試験によるマクロ介在物評価結果に対して、重み付けをして清浄度を把握することが可能と考えられる。

4.2 高信頼性鋼のマクロ介在物評価における探傷重量について

評価結果の信頼性を高めるためには探傷重量は多いほど望ましい。しかし、探傷重量を多くすると超音波探傷試験の作業性が低下し、また試験片加工コストも高まる。そこで、鋼中マクロ介在物の存在頻度を把握し、統計処理による探傷重量低減方法を模索した。

実験的に溶解した肌焼鋼、および高炭素クロム鋼を対象に10MHzPUTでマクロ介在物の存在頻度を調査した結果をFig.12に示す。図中には、式（4）のポアソン分布で想定される鋼中マクロ介在物の存在頻度を併せて示す。このように鋼中のマクロ介在物の存在頻度はポアソン分布に従うことを確認した。

$$P_x = e^{-\lambda} \left(\frac{\lambda^x}{x!} \right) \quad (x = 0, 1, 2, \dots) \dots (4)$$

ここで、 λ ：平均介在物個数
 x ：単位重量あたりの介在物検出個数

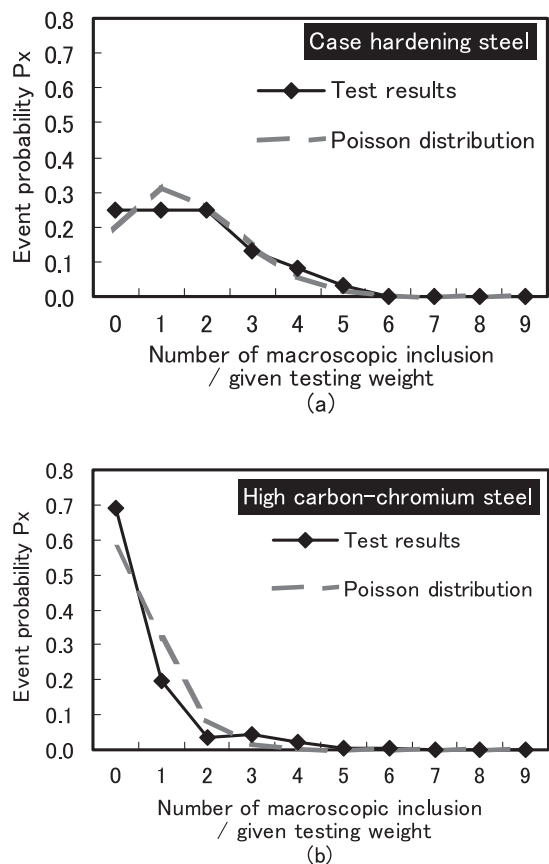


Fig.12 Event probability of macroscopic inclusion of case hardening steel (a) and high carbon-chromium bearing steel (b) by ultrasonic testing.

次に、探傷重量10kgを基準として、任意の探傷重量（ここでは3.2kg、10kg、40kg）ごとに統計処理を行った。3.2kg、10kg、40kgで探傷したと仮定した場合の鋼10kg

中の介在物数と、統計処理により求められる鋼10kg中の介在物数の99%信頼区間上限値との関係をFig.13に示す。99%信頼区間上限値 g は (5) 式から求めた。

$$(1-V) = e^{-g} \left(\frac{g^n}{n!} + \frac{g^{n-1}}{(n-1)!} + \dots + \frac{g^0}{0!} \right) \dots (5)$$

ここで、 V : 信頼区間
 g : 信頼区間の上限値
 n : 探傷重量10kg換算あたりの介在物個数

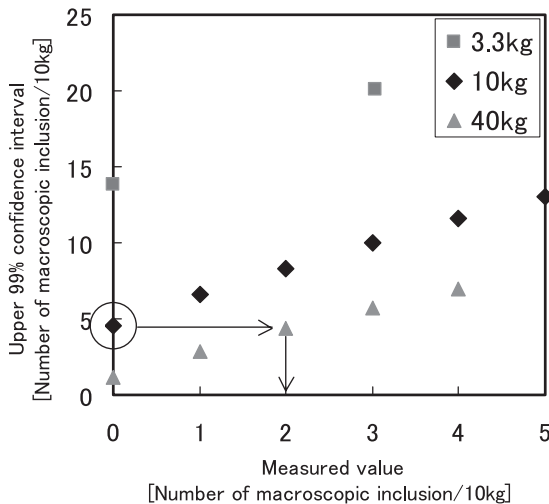


Fig.13 99% confidence interval of number of macroscopic inclusion at different testing weight.

この図は、同じ信頼区間99%であれば、探傷重量の読み替えができることを示している。例えば、実探傷重量10kgにおける介在物数が0個の場合、仮に探傷重量40kgでは最大でも2個/10kgに相当すると推定される。このように、統計的手法を用いた信頼性の高い方法で、探傷重量を低減してマクロ清浄度を評価することも可能となる。

探傷効率化といった点からは、求められる清浄度や、探傷試験の閾値の取り方によって、最適探傷重量を選定することが必要と考えられる。しかし、マクロ介在物は信頼性の観点から許容されるものではなく、その出現頻度が低くなればその保証に必要な探傷重量は大きくなるため、今後も探傷速度の向上に加え、統計的手法を活用した探傷全体の迅速化に継続して取り組んでいく。

5. 結言

本報では、超音波探傷試験によるマクロ介在物評価方法を開発するために、探傷効率化と探傷重量の最適化に関して検討した結果、下記3点の結論を得た。

(1) フェーズドアレイ技術を活用した10MHzPUTにより、検出感度を15MHzUTと同等の $\phi 0.12\text{mmFBH}$ ($\sqrt{\text{Area}}$) として、当社比で重量1kgあたり6倍の探傷スピードアップが可能になった。

- (2) エコー高さと介在物の大きさ ($\sqrt{\text{Area}}$) の相関関係を利用して、探傷データから介在物の大きさを予測できることから、超音波探傷試験によるマクロ介在物評価結果に対して、重み付けをして清浄度を把握することが可能と考えられる。
- (3) 鋼中のマクロ介在物の存在頻度はポアソン分布に従うことを見出した。この結果に基づき、統計的手法を用いた信頼性の高い方法により、探傷重量の低減が可能であることを示した。

参考文献

- 1) 上杉年一:鉄と鋼,74 (1988) 10,1889.
- 2) 村上敬宜:金属疲労 微小欠陥と介在物の影響,養賢堂,1993.
- 3) 松實敏幸:鉄と鋼,79 (1993) 7,823.
- 4) 笠井宣文,大久保寛之,西隆之:鉄と鋼,91 (2005) 6,537.
- 5) 佐藤知正:精密機械,49 (1983) 10,109.
- 6) 野中寿夫:計測と制御,28 (1989) 5,410.
- 7) 阿部利彦,鷲見新一,橋本等,栗山卓:まてりあ,35 (1996) 7,804.
- 8) 飯塚幸理,松井穰:非破壊検査,62 (2013) 2,84.
- 9) 森大輔,兼重健一:電気製鋼,83 (2012) 2,97.
- 10) 村井純一,富田一臣:検査技術,15 (2010) 12,66.
- 11) 高田一,山崎拓也,戸村寧男,運崎秀明,佐々木聡洋,荒谷誠:鉄と鋼,90 (2004) 11,883.
- 12) 田中洋次,市川宏,木村友則,鈴木宣生:超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集,19 (2012) ,1.
- 13) 木村友則,田中洋次,市川宏:非破壊検査,62 (2013) 2,91.
- 14) 村井純一:超音波TECHNO,25 (2013) 3-4,74.
- 15) ASTM Standard E588-03 PA, (2003) vol.01.05, 1.
- 16) SEP1927 2nd Edition, (2010), The German Steel Institute (VDEh) .
- 17) Hatto F. Jacobi: Steel Research Int., Vol.76 (2005) 595.
- 18) Gilles Auclair and Pascal Daguier: *Bearing steel technology. STP1419*, J. Beswick, Ed., ASTM International, West Conshohocken, PA, 2002, 101.
- 19) Jerry O. Wolfe: *Bearing steel technology. STP1419*, J. Beswick, Ed., ASTM International, West Conshohocken, PA, 2002, 138.

- 20) 佐藤海広,高須一郎,雲丹亀泰和: 山陽特殊製鋼技報,13 (2006) 1,25.
- 21) Y. Unigame, K. Hiraoka, I. Takasu and Y. Kato: *J. ASTM Intl.*, Vol.3, No.5, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006, Paper ID JAI14030.
- 22) 宇田川義夫,三原毅:超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集,16 (2009) , 63.
- 23) 日本非破壊検査協会:超音波探傷試験Ⅱ, (2000)
- 24) 石川登、藤盛紀明:鉄と鋼,71 (1983) 2,242.

■ 著者



青山 陽亮