

技術資料



チタン棒鋼向けフェーズドアレイ探傷技術の開発

森永 武^{*1}, 森 大輔^{*2}, 志田兼人^{*3}

Development of an Inspection Method for Titanium Round Bar Using Phased Array Ultrasonic Technique

Takeru MORINAGA, Daisuke MORI and Kento SHIDA

Synopsis

Because titanium and titanium alloys have a variety of superior properties, they are used in many industrial fields and applications. They are used as an implant material in the medical field due to superior biocompatibility. As they are thus used as biomaterials, users require rigorous quality assurance and ultrasonic testing that can detect Flat Bottom Hole (FBH) in accordance with Aerospace Material Specification 2631 (AMS 2631).

However, in conventional ultrasonic testing by a single probe, there is a trade-off between high detectability and inspection speed. The phased array ultrasonic technique is an effective solution to this problem. In this method, electronic focusing with an array probe consisting of multiple elements enables highly detectability and inspection speed.

In this paper, to develop an automated inspection system adopting the phased array ultrasonic technique in accordance with AMS 2631 Class AA, the following studies were conducted:

- (1) Design of concave array probe for titanium bar
- (2) Determination of the ultrasonic testing conditions that can detect FBH $\phi 0.8$ mm
- (3) Development of a following mechanism to prevent position aberration
- (4) Evaluation of detectability and reproducibility in an automated inspection system under dynamic conditions

1. 緒言

チタンおよびチタン合金は軽量かつ高強度に加え、耐食性に優れるという特性から、航空機をはじめ、プラント、医療用、民生品など、多岐にわたって利用されている。医療用においては、次に述べる優れた生体適合性から、多くの医療器具、特に体内に埋入される人工骨や人工歯根などのインプラント材として用いられる¹⁾。

- (1) 骨との親和性が高く、生体環境下では表面にリン酸カルシウムを形成し、インプラント体のチタ

ンと骨が光学顕微鏡レベルで直接密着する

- (2) 人体に対する毒性および耐アレルギー性が他の金属に比べて低い
- (3) 優れた力学的特性および耐久性（摩耗および耐食性）を有する

これらの特性から生体材料として利用されるチタンおよびチタン合金の品質要求は極めて厳格となる。そのためユーザからは、航空機向けチタン棒鋼およびピレットの超音波探傷規格である、AMS (Aerospace Material Specification) 2631 に準拠した出荷前段階の全長・全断

2024年4月10日 受付

* 1 大同特殊鋼(株)技術開発研究所 (Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

* 2 大同特殊鋼(株)技術開発研究所, 技術士(経営工学) (P.E.Jp, Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

* 3 大同特殊鋼(株)星崎工場 (Hoshizaki Plant, Daido Steel Co., Ltd.)

面の超音波探傷試験が要求される²⁾。AMS 2631では超音波探傷による平底穴 (FBH: Flat Bottom Hole) の検出について規定されており、最も厳しい Class AA の基準では FBH $\phi 0.8$ mm を検出しなければならない。しかし、従来のシングルプローブによる超音波探傷では、微小なサイズの検出能と高速な探傷速度は両立できないことが課題であった³⁾。

この課題の解決策として、2000年代から電子走査による超音波のフォーカスが可能な、フェーズドアレイ探傷法が導入されるようになってきた^{4), 5)}。大同特殊鋼(株) (以下、当社という)においても、Fig. 1に示すようなアレイプローブが直進走り、端部到達後に回転を繰り返して全断面を保障する、チタン棒鋼用自動超音波探傷装置を開発した^{6), 7)}。

しかし、チタン合金には α 型、 β 型、 $\alpha + \beta$ 型のように種々の組織があり、二相組織の $\alpha + \beta$ 型では、各相のヤング率や密度が異なり、音響インピーダンスに差が生じる^{8), 9)}。このため、二相の物性が大きく異なる鋼種では、超音波が各相の粒界や集合組織で散乱し¹⁰⁾、十分な検出能が得られないことが課題となっていた。また、チタン市場は拡大を続けており、当社においても、生産量の増加に伴って更なる探傷速度の向上も求められるようになってきた。

以上の背景から、本稿では開発目標を Table 1 とし、AMS 2631 Class AA に準拠した、より高精度かつ高速な、フェーズドアレイ探傷法を用いた自動超音波探傷装置を開発する。

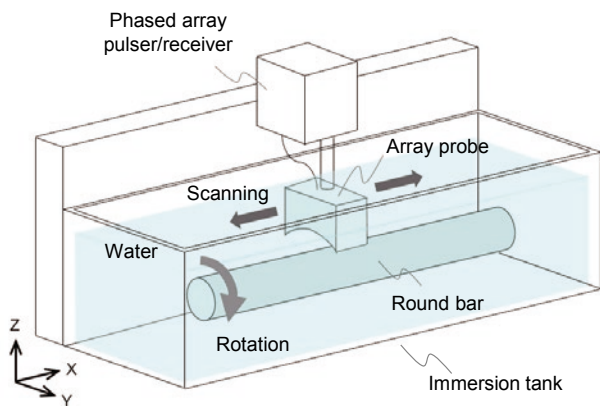


Fig. 1. Automated ultrasonic inspection system.

Table 1. Development target.

Compliant Standard	AMS 2631 Class AA
AMS 2631 Class AA	FBH $\phi 0.8$ mm Signal Noise Ratio ≥ 3 (dynamic)
Reproducibility	± 20 %
Scanning speed	100 mm/s
Coverage area per one Array probe	70°
Inspection field	100 % volume inspection

2. フェーズドアレイ探傷法

フェーズドアレイ探傷法¹¹⁾は、Fig. 2のように複数の超音波振動子 (以下、素子という) を配列させた、アレイプローブを用いた探傷方法である。従来のシングルプローブによる探傷は特定の方向、位置にしか超音波を伝播・集束させることができない。一方で、フェーズドアレイ探傷法では、各素子の送信と受信に適切な遅延時間を加え、超音波の位相を整合させることによって、任意の位置に集束させられる。これにより従来よりも高い検出能が期待できる。

また、フェーズドアレイ探傷法においてリニアスキャンと呼ばれる方式では、Fig. 3のように Virtual probe (または Aperture) と呼ばれる、同時励振する素子のグループ (Active elements) を順繰りに送信・受信する。これにより、プローブを機械走査せずに、素子配列方向の断面を一度に探傷できる。リニアスキャンの分解能は Virtual probe の数で決まり、例えば Fig. 3のように2素子ずつ飛ばして送受信すれば、1素子ずつの場合と比べて分解能は粗くなるが、2倍の探傷速度となる。Virtual probe 間の素子数はスキップ数と呼ばれ、実際の探傷においては Virtual probe の指向性と検出対象とするサイズのサイズから決定する。

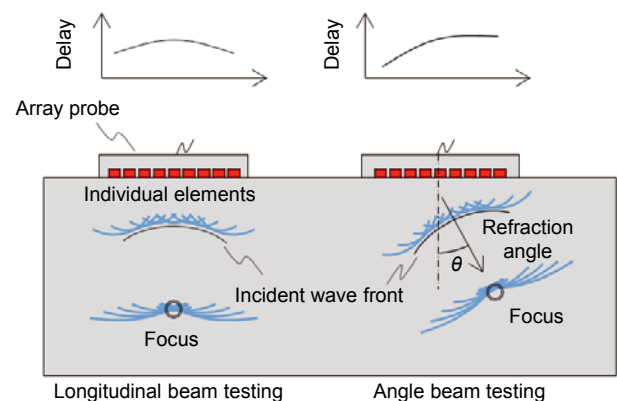


Fig. 2. Phased array ultrasonic techniques.

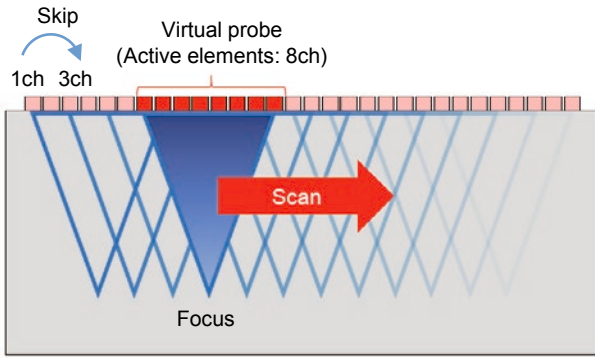


Fig. 3. Linear scan.

3. アレイプローブの設計

今回は AMS2631 Class AA で規定される FBH $\phi 0.8$ mm を検出するためのアレイプローブを設計し、Table 2 に示す仕様で決定した。設計にあたっては①周波数、②曲率、③素子ピッチを検討した。なお、アレイプローブの素子数は探傷器の制約上 128ch とした。

Table 2. Specification of Array probe for titanium round bar.

Probe type	Concave array
Frequency	7 MHz
Number of element	128ch
Element pitch	0.7 mm
Element size	0.6×10 mm
Radius of curvature	51 mm

3. 1 周波数の検討

一般に超音波探傷において、検出限界となるきず寸法は、超音波の半波長から 1/4 波長程度とされる¹²⁾。そのため微小なきずを検出しようとする場合は、波長を短く（周波数を高く）する必要がある。前述のように $\alpha + \beta$ 型のチタン合金は二相組織であり、散乱減衰が大きくなる場合には、低周波を用いることが望ましい^{13), 14)}。しかし、微小なきずの検出能との両立を考慮し、今回は周波数を 7 MHz と決定した。

3. 2 曲率の検討

アレイプローブと丸棒は、全素子の水距離が一定となるように同心円配置とし、リニアスキャンするときの感度ばらつきが小さくなるようにした。このとき、アレイプローブの曲率および水距離は、第 2 表面エコーが丸棒中の探傷範囲内に入らない値にする必要がある。これは、Fig. 4 に示すように材料中の音速と水中の音速の違

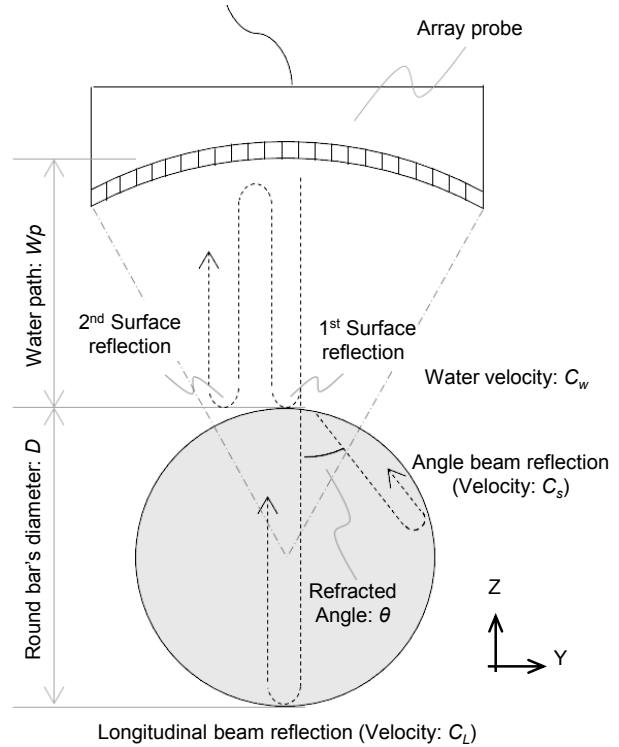


Fig. 4. Theory for deciding water path.

いによって、第 2 表面エコーが探傷範囲に入ってしまうと、きず信号と誤判定する可能性があるためである。ここで、適切な曲率および水距離 W_p を設定するための理論式は、斜角探傷で保証する丸棒表層からの深さを t とおくと、音速（水中： C_w 、縦波： C_L 、横波： C_s ）と屈折角 θ から次のように表される。

$$\text{Longitudinal beam } \frac{4W_p}{C_w} \geq \frac{2D}{C_L} + \frac{2W_p}{C_w} \quad (1)$$

$$\text{Angle beam } \frac{4W_p}{C_w} \geq \frac{2(D \cos^2 \theta + t)}{C_s \times \cos \theta} + \frac{2W_p}{C_w} \quad (2)$$

丸棒の探傷においては、垂直探傷により、中心部を探傷し、底面エコーの影響を受けにくい斜角探傷により、表皮直下を探傷し、全断面を保証する。フェーズドアレイ探傷法では、同一のアレイプローブで縦波による垂直探傷と、横波による斜角探傷を実施する¹¹⁾。そのため、アレイプローブの曲率と水距離は式 (1)、(2) をともに満たすように、決定する必要がある。今回は対象とする材料径および音速から、アレイプローブの曲率は 51 mm と決定した。

3. 3 素子ピッチの検討

前節までに決定した周波数と曲率をもとに、超音波伝播解析を用いて最適なアレイプローブの素子ピッチを検討する。解析手法は形状定義が容易なボクセル型有

限要素法とし¹⁵⁾、伊藤忠テクノソリューションズ社製 ComWAVE™を用いる。チタン棒鋼の組織はボロノイ分割により結晶粒を模擬し、結晶粒ごとに異方性主軸を回転させて粒界散乱を再現する¹⁶⁾。超音波伝播解析において、解析モデルの要素サイズは波長の1/10以下が望ましいとされる¹⁷⁾。今回、周波数は7 MHzと決定したため、水中の音速と波長の関係から、0.02 mm以下とすればこの条件を満たす。しかし、対象とするチタン合金の結晶粒径は10 μm程度であるため、結晶粒が1要素以上でモデル化できるように要素サイズは0.005 mmとする。その他の解析条件はTable 3のとおりである。なお、ここでは人工きずのサイズは十分に信号が確認できるように、FBH φ1.2 mmとする。アレイプローブの素子ピッチを変え、垂直・斜角探傷の条件で解析した結果をFig. 5に示す。

Table 3. Simulation condition.

Simulation method	Voxel - FEM
Mesh size	0.005 mm
Courant number	0.8
Frequency	7 MHz
Element pitch	0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 mm
Active elements	32ch
Radius of curvature	51 mm
Sample diameter	16 mm
Grain size	10 μm
Defect size	FBH φ1.2 mm
Focus / Beam angle	Longitudinal beam: Bottom / 0° Angle beam: Surface / 45°
Water path	43 mm (Concentric circle position)

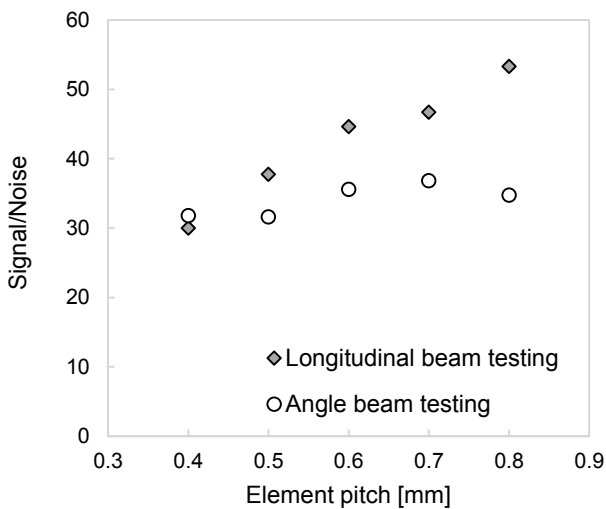


Fig. 5. Relationship between element size and detectability by numerical analysis.

垂直探傷では、素子ピッチが大きいほど Signal Noise Ratio (以下、S/N という)が高くなったが、斜角探傷においては、0.7 mmでS/Nがピークとなった。この理由は、フェーズドアレイ探傷法において、素子ピッチを大きくすると端部の素子と焦点の距離が遠くなることによる。送受信する超音波は各素子の合成波であり、それぞれの音場は円筒波として考えられることが多い¹⁸⁾。しかし、実際の素子は有限な大きさであり、超音波は指向性を持つ¹⁹⁾。すなわち、素子ピッチを大きくしすぎると、端部の素子から送信した超音波は焦点で十分な振幅が得られなくなる。

また素子ピッチについてはグレーティングローブが発生しないよう、式(3)を満たす条件にする必要がある²⁰⁾。

$$d \geq \frac{\lambda}{1 + \sin \theta} \quad (3)$$

グレーディングローブとはFig. 6のように、超音波の集束方向とは異なる位置にも波が集束してしまう現象である。この現象は素子ピッチdと波長λ、屈折角θから決定される。ここで、屈折角はスネルの法則に従い、斜角探傷時に縦波成分が入り込まない45°(このときの入射角は約20°)としている。前節までに決定した条件から、グレーディングローブが発生しない条件は、素子ピッチ0.16 mm以上であるため、円周方向の素子ピッチはFig. 5の結果より0.7 mmとした。

また長手方向の素子サイズについては、想定する探傷ピッチから十分な感度を維持できるように超音波の指向性を考慮し、10 mmと決定した。

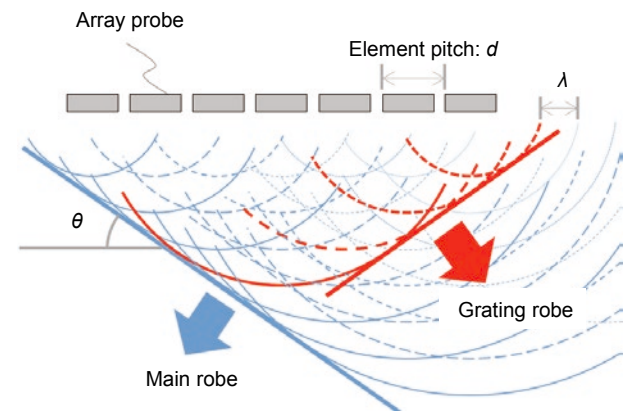


Fig. 6. Generation image of Grating robe.

4. 探傷条件の検討

4. 1 探傷ピッチの検討

丸棒の自動超音波探傷装置においては、一定のピッチで探傷を繰り返し、全長・全周を探傷する。探傷ピッチ

を短くするほど高精度かつ安定した探傷が可能となるが、探傷速度が低下する。検出目標とするFBH $\phi 0.8$ mmは、超音波の伝播方向に対する反射面積が小さいため、短い探傷ピッチが必要となる。実機開発にあたっては、探傷速度を考慮しつつ、安定してFBH $\phi 0.8$ mmを検出可能な探傷条件を検討する。

まず、丸棒長手方向の探傷ピッチを検討する。3章で設計したアレイプローブと丸棒を Fig. 7 のように配置し、丸棒長手方向に 0.2 mm ピッチで探傷した。実験条件は Table 4 のとおりであり、FBH $\phi 0.8$ mm の信号値と、その感度低下量から必要な長手方向の探傷ピッチを評価した。

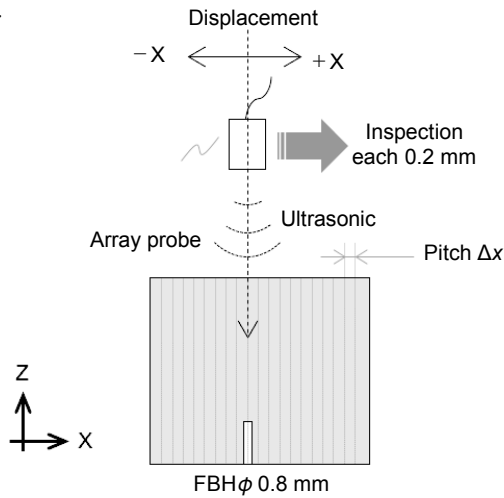


Fig. 7. Consideration method for inspection pitch of direction X.

Table 4. Inspection condition.

Method	Immersion
Active elements	32ch
Voltage	96 V
Filter	5 MHz high pass filter
Focus/Beam angle	Longitudinal beam: Bottom / 0° Angle beam: Surface / 45°
Sample	Ti-15Mo, Diameter: 16 mm
Defect size	FBH $\phi 0.8$ mm

Fig. 8 から探傷ピッチを 4.8 mm とすると FBH $\phi 0.8$ mm の信号値はピークから 20 % 低下することがわかる。実機においては、長手方向の探傷ピッチ 3 mm とすることで感度ばらつきを抑えることとした。

次に円周方向の探傷ピッチ（スキップ数）について検討する。リニアスキャンにおいては Fig. 9 のように隣接する Virtual probe で適正な感度を保つ必要がある。今回はサンプルを 1° ずつ回転させ、FBH $\phi 0.8$ mm を検出するために必要な Virtual probe のスキップ数を検討した。実験条件は長手方向と同様に Table 4 のとおりとし、その結果を Fig. 10 に示す。

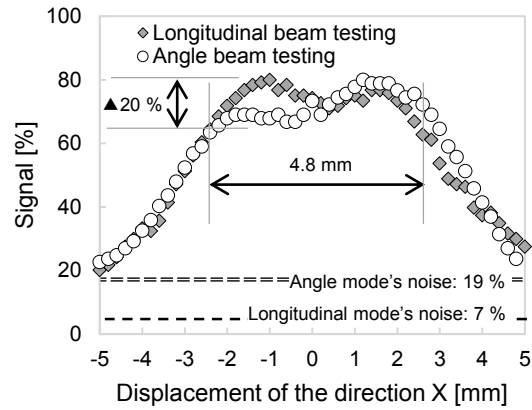


Fig. 8. Relation between displacement and signal.

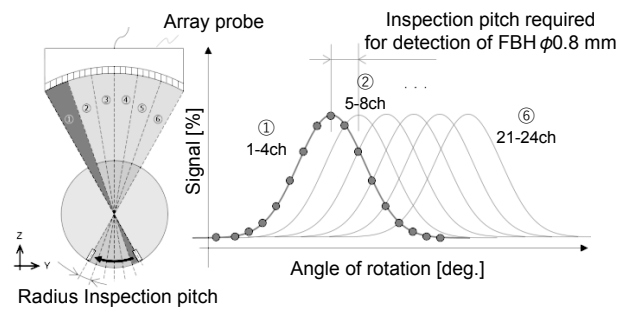


Fig. 9. Consideration method for circumferential inspection pitch. (Ex. Number of elements: 24ch, Active elements: 4ch)

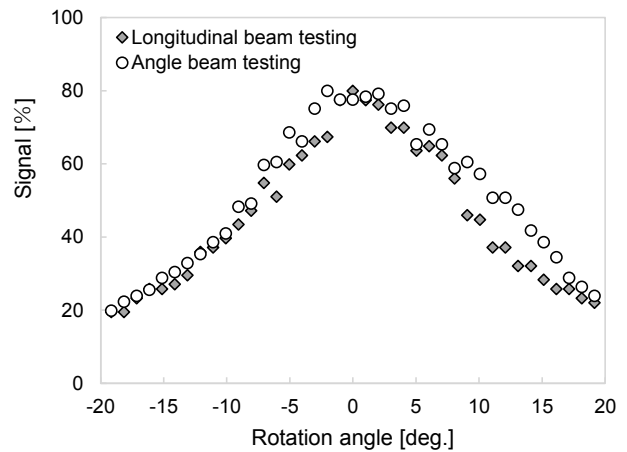


Fig. 10. Relation between rotation angle and signal.

Fig. 10 から円周方向に約 2° の変動であれば、隣り合う波形同士での感度のばらつきが抑えられることがわかる。このとき、必要な Virtual probe のスキップ数はプローブの曲率から 3 以下となる。

次に 1 つのアレイプローブで探傷可能なカバー範囲を検討する。Fig. 11 のように FBH $\phi 0.8$ mm を 1° ずつ回転させ、両端の Virtual probe の感度分布から、カバー範囲（角度）を評価した。なお、ここでは各 Virtual probe

のピークが80%となるように校正している。Fig.12から両端のVirtual probe間は90°であり、パス間のラップを考慮すると、少なくとも5回転以上で全断面を保證できる。

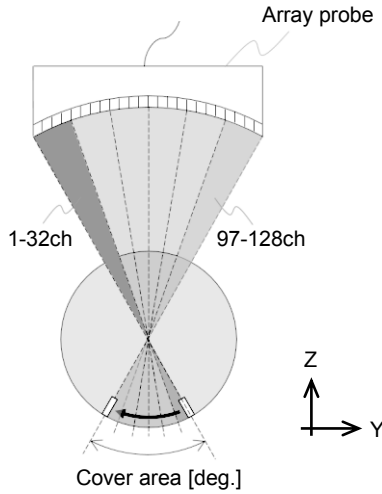


Fig. 11. Consideration method for estimation of coverage area per one Array probe.

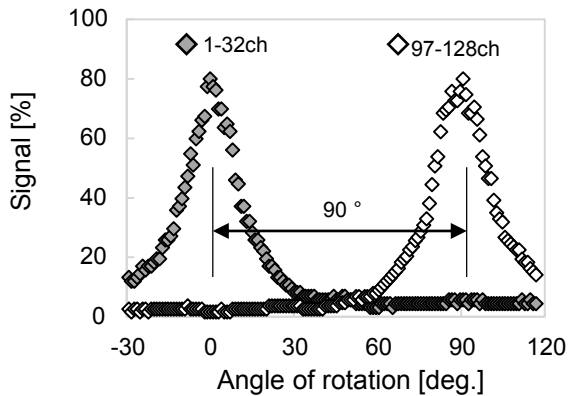


Fig. 12. Coverage area per one Array probe.

4. 2 走査速度の検討

次にアレイプローブの走査速度について検討する。フェーズドアレイ探傷法を用いて、丸棒を垂直・斜角探傷する場合の走査速度は探傷ピッチ、Virtual probeの数(≒スキップ数)、超音波の発振周期(PRF: Pulse Repeat Frequency)を用い、式(4)から求められる。ここで Δ_x は長手方向の探傷ピッチ、 s はVirtual probeのスキップ数、 n_{ch} はアレイプローブの全素子数、 $n_{act.}$ は同時励振数である。

$$V = \frac{\Delta_x \cdot s}{3 \times (n_{ch} + s - n_{act.})} \cdot \frac{1}{T} \quad (4)$$

式(4)からわかるように、走査速度を上げるためには、PRFを早める必要がある。しかし、過剰に早くすると、

ゴーストエコー(Phantom indications)と呼ばれる妨害エコーが探傷範囲内に入ってしまい、誤検出の要因となる^{21), 22)}。これはFig. 13のように表面反射波または底面反射波が残響することによる。ゴーストエコーが発生しないPRFは水中(接触媒質)と材料中の拡散減衰と散乱減衰から定まる。今回は、実験から最適なPRFは4kHz以下とし、式(4)を用いて計算すると、最大走査速度は121mm/sとなる。

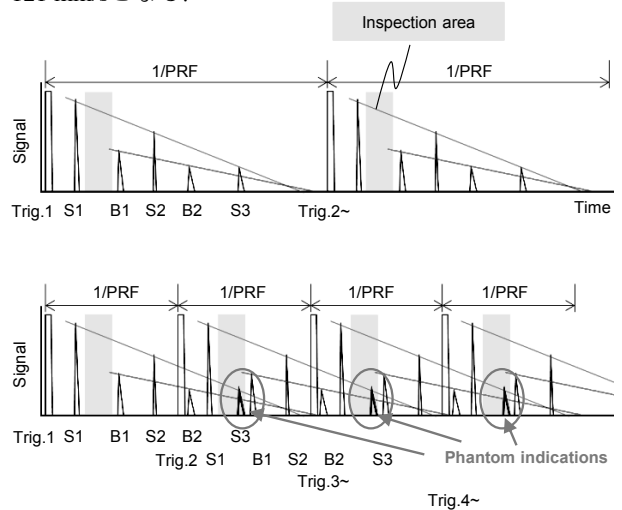


Fig. 13. Generation image of Phantom indications.

5. 実機探傷装置の開発

5. 1 材料扱い機構の開発

自動探傷において、搬送時のガタ振動や、材料曲がりによって、同心円状に配置した丸棒とアレイプローブの位置関係にズレが生じる。これにより超音波は設定した屈折角および焦点と異なる方向に伝播する。その結果、きずからの信号値が低下し、見逃しとなる可能性がある。そこで、Fig. 14のように、丸棒断面の水平方向(Y方向)に対する位置ずれによる感度低下量を評価した結果、±0.5mm位置がずれた場合、信号値が約半減することがわかった。

そこで、位置ずれによる感度低下の防止機構として、Fig. 15に示す機械的な扱い機構を開発した。扱い機構は4点ローラーが丸棒に着材し、上部に設けた回転軸で釣り合うようになっている。また断面方向にはバネ機構で材料と直線上に並ぶように追従し、高さ方向の振動には上部に設けたバネ機構で対応する。また前後には材料検知センサを備え、脱輪を防止するシステムとなっている。

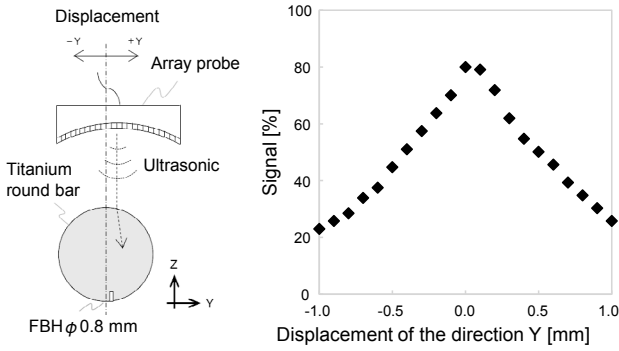


Fig. 14. Relation between position aberration and signal.

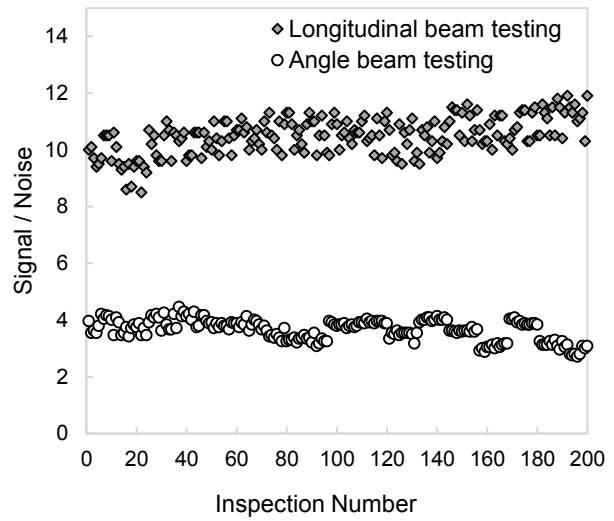


Fig. 17. Dynamic results.

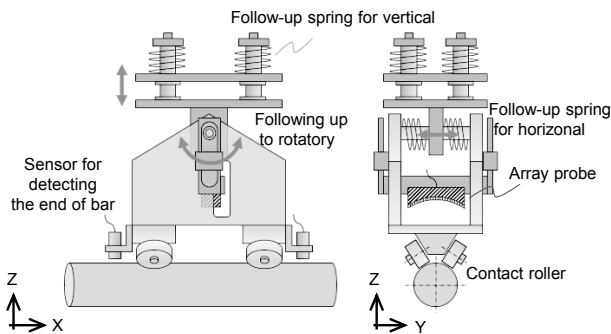


Fig. 15. Following mechanism.

Table 5. Specification of auto-inspection system.

Inspection method	Phased array ultrasonic technique
Equipment	Immersion tank
Scanning method	Bar rotation – probe scanning
Scanning speed	121 mm/s
coverage area per one Array probe	90°
Detectability	FBH ϕ 0.8 mm (comply with AMS 2631)

5. 2 実機テスト

以上の検討により開発した自動超音波探傷装置を用い、FBH ϕ 0.8 mm を加工したチタン棒鋼サンプルを探傷し、実機性能を評価した。Fig. 16 に示すように、垂直および斜角探傷の静的評価は、FBH ϕ 0.8 mm を S/N = 3.8 以上で検出できることを確認した。また、Fig. 17 に示すように繰り返し動的探傷テストを N=200 で実施した結果は、S/N=3 以上かつ、信号値のばらつきは \pm 20 % 以下となった。最終的に装置仕様を Table 5 のようにすることで、開発目標値を達成した。

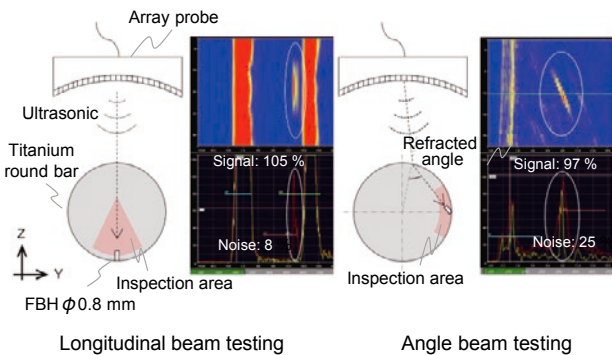


Fig. 16. Static results.

6. 結 言

本報告では AMS2631 Class AA に準拠したチタン棒鋼向け探傷装置を開発するため、フェーズドアレイ探傷法の適用を検討し、アレイプローブの設計および実機適用技術を考案した。実機化した自動超音波探傷装置を用い、走査速度約 121 mm/s で動的評価し、FBH ϕ 0.8 mm を S/N=3 以上、ばらつき \pm 20 % 以下で検出できることを確認した。現在、開発した装置は当社星崎工場にて 2 基体制で稼働している。

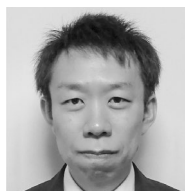
(文 献)

- 1) 鈴木昭弘: 特殊鋼, 69(2020), 4, 35.
- 2) SAE International: AEROSPACE MATERIAL SPECIFICATION 2631, REV.G(2022).
- 3) 森大輔, 兼重健一: 電気製鋼, 83(2012), 97.
- 4) Hajime Takada, Yasuo Tomura, Makoto Aratani, Takuya Yamazaki and Toshihiro Sasaki: Materials Transactions, 52(2011), 531
- 5) 山本和希, 谷口玲: 山陽特殊製鋼技報, 18(2011), 55.

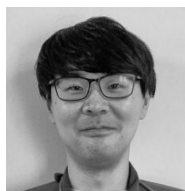
- 6) 森大輔, 佐古崇, 三ツ橋宗宏, 札元峻嗣, 前田和明: 超音波による非破壊評価シンポジウム, **20**(2013), 131.
- 7) 佐古崇: 電気製鋼, **83**(2012), 177.
- 8) 森永武, 森大輔: 電気製鋼, **91**(2020), 97.
- 9) 井原郁夫 編: 超音波による非破壊検査・材料評価技術の進展, シーエムシー出版, 2024, 96.
- 10) 伊藤良規, 高恣弘行, 木下敬之: 神戸製鋼技報, **66**(2016), 1, 48.
- 11) Olympus NDT: Introduction to phased array ultrasonic technology applications, R/D Tech, 2005, 9.
- 12) 加藤恵之, 竹本省一, 佐藤海広, 塗嘉夫: 山陽特殊製鋼技報, **7**(2000), 35.
- 13) 森永武, 諸頭慧, 岡田美典, 奈良光洋: 検査技術, **28**(2023), **12**, 17.
- 14) 日本非破壊検査協会: 超音波探傷試験Ⅱ, 2000, 78.
- 15) 池上泰史, 酒井幸広, 中村均: 超音波による非破壊評価シンポジウム, **14**(2006), 137.
- 16) 伊藤智啓, 中村正也: 材料とプロセス, **17**(2004), 938.
- 17) 林山, 福富広幸, 緒方隆志: 日本機械学会論文集(A編), **72**(2006), 1876.
- 18) 日本非破壊検査協会: 超音波探傷試験Ⅲ, 2017, 279.
- 19) 三原毅: 材料, **69**(2020), 569.
- 20) 安本浩二: 日本放射線技術学会雑誌, **60**(2004), 49.
- 21) Alex Karpelson: "Phantom" Signals in NDE Systems, e-journal of Nondestructive Testing, **17**(2012), 5.
- 22) N. Galarza-Urigoitia, B. Rubio-García, J. Gascón-Álvarez, G. Aznar-Lapuente, J. Olite-Biurrun, A. López-Germán and J. Rubio-Botía: Engineering Failure Analysis, **103**(2019), 481.



森永 武



森 大輔



志田兼人