

## 技術論文



Technical Paper

# フェーズドアレイ探傷法を用いた 丸棒探傷技術の開発

森 大輔\*, 兼重 健一\*

## Development of Round Bar Inspection by Phased Array Ultrasonic Techniques

Daisuke Mori and Kenichi Kaneshige

### Synopsis

Various nondestructive testing techniques have been applied to steel products in manufacturing processes. Ultrasonic inspection is an important method to evaluate inclusions in round bars. The phased array ultrasonic technology allows electronic scanning, which is typically an order of 3 to 10 times faster than conventional raster scanning. And the small wave fronts can be time-delayed and synchronized for phase and amplitude, in such a way as to create an ultrasonic focused beam with steering capability. This is why inspection of the high-speed and high discrimination capability is enabled. This paper describes results of development of phased array ultrasonic technology for round bars.

- (1) Development of curved phased array probe.
- (2) Determination of inspection scanning pitch.
- (3) Development of position aberration prevention equipment.
- (4) Sensitivity correction of circumference direction.
- (5) Defect discrimination method of between surface and under surface.

## 1. 緒 言

大同特殊鋼(株)は、鉄スクラップを原料として、溶解、鋳造、各種圧延工程を経て、大型の角鋼製品、丸鋼製品から、平鋼、棒鋼、線材、帯鋼製品などを生産している。これらの特殊鋼製品は、自動車、産業機械、発電機などの各種産業分野において、高圧力や高温とといった過酷な環境下で使用される。そのため、使用用途に応じた厳密な製品検査を、出荷前の段階で実施している。

その検査手法の一つに超音波探傷による非破壊検査が

ある。非破壊検査とは、素材または製品を破壊することなく、そのままの形状、性状で材料の表面欠陥や内部欠陥(介在物、内部割れ、ブローホールなど)の有無、存在位置、大きさ、形状などを検出する方法である。また、超音波探傷とは、超音波パルスを試験体中に伝播させた時の超音波パルスの反射強度と伝播時間を利用して、内部欠陥を調べる非破壊検査方法である<sup>1)</sup>。

大同特殊鋼(株)で製造される丸棒形状の特殊鋼材料は、自動車向けの比率が高く、近年、自動車の小型・軽量化、環境対応、コスト低減等を背景に高品質な材料が要求されている。そのため、超音波検査による、丸棒製品

2012年11月6日

\*大同特殊鋼(株)研究開発本部 (Daido Corporate Research &amp; Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

の全数、全長、全断面にわたる、微細な介在物や内部割れの検出技術開発が必要である。

丸棒の超音波探傷装置では、1980年代より探触子（プローブ）固定式が導入され、1980年代後半には探触子回転式が広く導入されてきたが、探傷速度と欠陥検出性能の両立が課題となっていた。

2000年代より回転機構が不要で、電子的なフォーカスが可能なフェーズドアレイ探傷法を利用した超音波探傷器が導入されるようになってきた<sup>2)</sup>。これにより、探傷速度と欠陥検出性能は向上してきているが、今回、更に高速、高精度な探傷の可能性を持つ、ボリュームフォーカス探傷法による丸棒製品向け超音波探傷技術の開発に着手した<sup>3)</sup>。

本報告では、フェーズドアレイ探傷法を応用したボリュームフォーカス探傷法を丸棒探傷へ適用するにあたって、下記の検討を実施した。

- ①サークル型アレイプローブの設計
- ②探傷データ取得ピッチの最適化
- ③位置ずれ防止機構の考案
- ④円周方向の感度補正
- ⑤表皮直下と表面欠陥の弁別方法の検討

## 2. ボリュームフォーカス探傷技術

1980年代後半から広く導入されてきた、探触子回転式は Fig. 1 a) のように探触子が丸棒鋼の周囲を回転し、超音波の送受信を繰り返しながら探傷する手法である<sup>4)</sup>。そして、回転する探触子に、丸棒を通過させることで、全長の探傷を実施するものである。しかし、超音波の送受信回数が一定のままで探触子の円周回転速度と丸棒の送り速度を高速にした場合、データの取得ピッチが広がってしまう。このことから、短い欠陥を見逃してしまう可能性がある。材料の送り速度を遅くすれば、短い欠陥も見つかる可能性も高くなるが、生産性の点から、材料の送り速度を落とすことなく、短い欠陥を検出することが求められる。

次に、フェーズドアレイ探傷法を丸棒の探傷に適用した例を Fig. 1 b) に示す。フェーズドアレイ探傷法の特徴としては、1つの探触子の中に多数の振動子が配列されたアレイ探触子を使用する。そして Fig. 2 のように、個々の振動子を励振、受信するタイミングを制御するこ

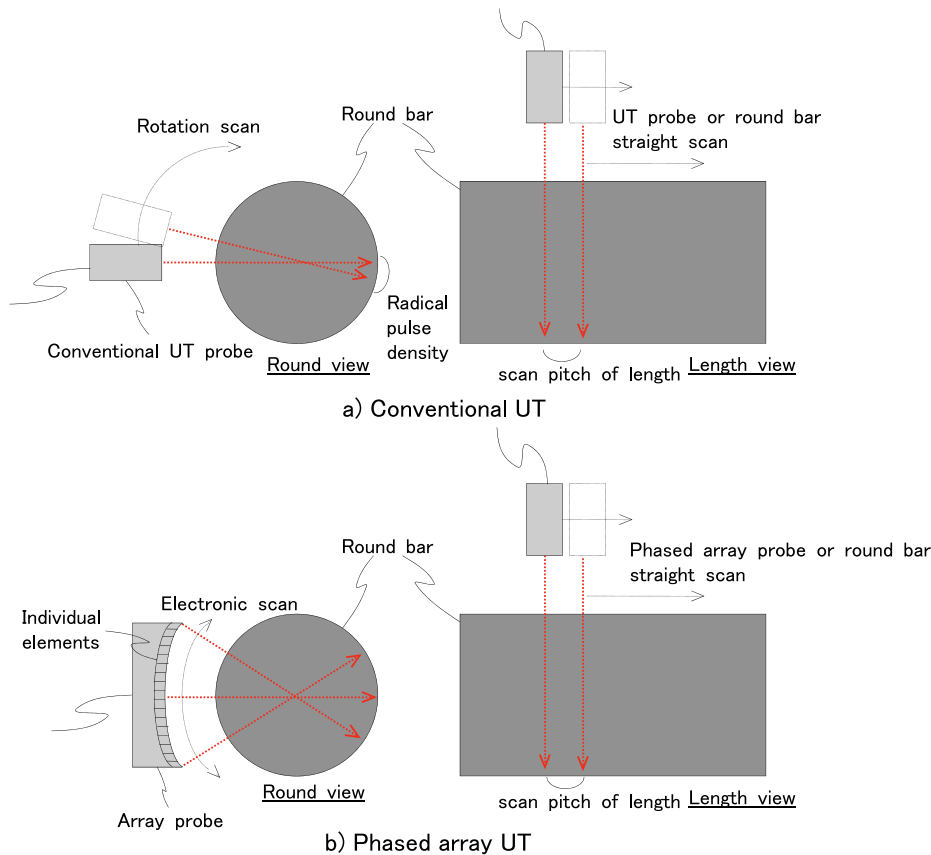


Fig. 1. Difference in ultrasonic technology of a) Conventional UT and b) Phased array UT.

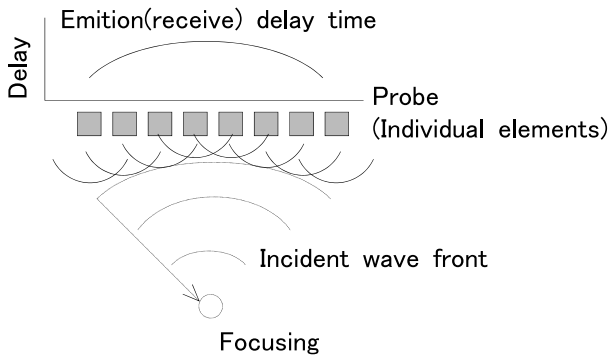


Fig. 2. Beam focusing principle for normal incidences.

とで、焦点位置を任意の屈折角や深さ位置へ自由に結ぶことが可能となり高感度な探傷が実施される。また、探触子の機械走査に代わって、送信する素子群を順繰りに励振させることにより、電子走査が可能となる<sup>5)</sup>。しかし、電子走査に代替しても、丸棒中の超音波の減衰や往復に要する時間は、従来の超音波探傷法と変わらないため、丸棒の表面や底面から発生する多重エコーの影響が無くなるまでの時間は、変化しない。その結果、繰返し周波数（Pulse Repetition Frequency:PRF）と呼ばれる、超音波の送受信間隔を短くすると、多重エコーの影響を受けてしまい正常な探傷が出来ない。このことから、探傷速度の高速化が困難であるといった課題が挙げられる。

そこで、ボリュームフォーカス探傷法を丸棒の探傷に適用した例を Fig. 3 に示す。ボリュームフォーカス探傷法とは、フェーズドアレイ探傷法の応用で、たとえば送信をアレイ探触子の素子 128 ch を同時に励振することで、広範囲の探傷が可能となり、受信した波形を計算機上で焦点計算することで焦点位置を任意の屈折角や任意の深さ位置へ自由に結ぶことが出来る。このボリュームフォーカス探傷法により、同じ超音波を送信する繰返し周波数であっても、探傷できる範囲が広範囲となり、高速で高精度な探傷が期待される<sup>6), 7), 8)</sup>。

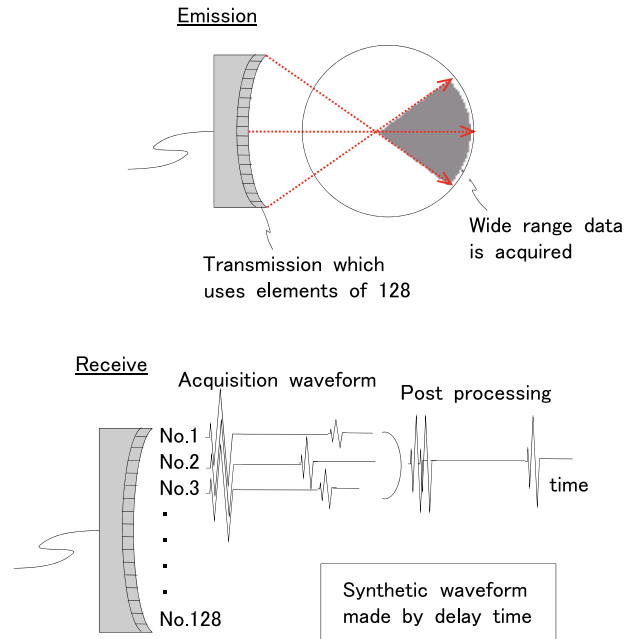


Fig. 3. Volume focusing principle for emission and receive.

### 3. 開発目標

#### 3. 1 検出欠陥形状

これまで自動超音波探傷では、横穴（Side drill hole:SDH）で検査保証値を規定するのが一般的である。横穴は、丸棒の長手方向に長さを持つ円柱形状であるため、長手方向の探傷データ取得ピッチの影響を受けにくい。従って、探触子回転式やフェーズドアレイ探傷法であっても、探傷速度を落とすことなく検出が可能となる。

今回は、高速で高精度な探傷の達成を確認するために、円形平底穴（Flat bottom hole:FBH）の検出を目標とすることとした。円形平底穴は、丸棒の長手方向に欠陥長さが短いため、長手方向の探傷データ取得ピッチを短くしなければ安定した欠陥検出が、出来なくなる可能性がある。そのため、探傷速度の向上が必要不可欠である。

### 3. 2 開発目標値

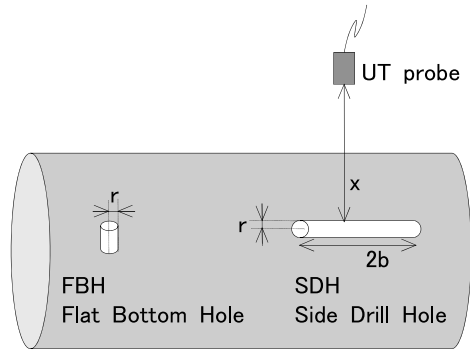
開発目標値を Table 1 に示す。今回の欠陥検出目標値は、平底穴の直径を  $\phi$  1.5 mm とし、欠陥信号とノイズの比 (Signal/Noise:S/N) が 6 以上、欠陥強度のばらつき  $\pm 1$  dB 以内で検出することとした。

Table 1. Inspection target.

Item	Object and Target
Detection	FBH(Flat Bottom Hole): $\phi$ 1.5 Signal/Noise=6
Repeatability	$\pm 1$ dB (at the time of a dynamic test)
Object material	Configuration:round bars Surface:black bar
Diameter Length	Diameter $\phi$ 20~65mm $\pm$ 1mm Length2~6m
Inspection field	100% volume inspection (Inspection with Longitudinal and Shear Waves)
Inspection velocity	200mm/sec.

平底穴  $\phi$  1.5 mm とした理由については、丸棒向け探触子回転式の探傷装置において参考文献<sup>9)</sup>によると、周波数 5 MHz 時に、横穴の直径  $\phi$  0.4 mm、長さ方向 14 mm を検出限界としている。そこで今回は、横穴の直径  $\phi$  0.4 mm、横穴の長さが 14 mm の半分以下となるように設定した。そして、超音波のきず反射理論式<sup>10), 11)</sup>を用いて、平底穴と横穴の形状による反射率の違いを評価した結果を Fig. 4 に示す。横穴直径  $\phi$  0.4 mm、長さ 6 mm と平底穴  $\phi$  1.5 mm と同等の反射率が得られることから、今回の欠陥検出目標値を、平底穴  $\phi$  1.5 mm と決定した。

なお、検査の対象物を特殊鋼の丸棒に限定し、直径  $\phi$  20 ~ 65 mm、長さ 2 ~ 6 m とし、探傷範囲は丸棒全断面 (100%) を垂直探傷と斜角探傷の組み合わせにより網羅することとした。



Reflecting power of FBH    Reflecting power of SDH

$$2\sin\left(\frac{\pi r^2}{\lambda x}\right) \quad 2b\sqrt{\frac{2r}{((r+x)\lambda x)}}$$

※  $\lambda$  =wavelength

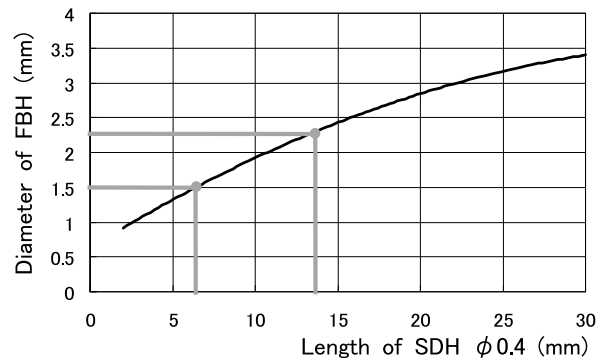


Fig. 4. Reflecting power of FBH vs. SDH.

### 3. 3 目標探傷速度の検討

まず各探傷方式の探傷速度を検討することとした。前提の条件として、丸棒の探傷データ取得ピッチを、長手方向 0.75 mm ピッチ、円周方向に 0.75 mm ピッチとした。この探傷データ取得ピッチは、検出目標である平底穴の直径が 1.5 mm であることから、超音波が確実に欠陥に当たるように、その半分の間隔でデータを取得することと仮定した。そして、超音波の送受信を行う繰返し周波数は、丸棒直径  $\phi$  20 ~ 40 mm で 2 kHz、 $\phi$  60 mm で 1.8 kHz として算出した。この繰返し周波数については、丸棒の表面や底面から繰返し発生する多重エコーの影響が無くなるまでの時間を実測した結果に基づいている。

その結果を Table 2 に示す。探触子回転式を 1 と考えた時、ボリュームフォーカス探傷法は 10 倍以上となり、丸棒の直径  $\phi 20$  mm で 242 mm/sec. 直径  $\phi 40$  mm で 150 mm/sec. 直径  $\phi 60$  mm で 102 mm/sec. の走査速度と算出された。

Table 2. Simulation results of inspection speed.

Inspection method	UT Beam steering	Inspection velocity(mm/sec.)			velocity ratio
		Round bar Dia.20mm	Round bar Dia.40mm	Round bar Dia.60mm	
Volume Focus	Electronic scan	242.8	150.9	102.2	× 10
Phased Array	Electronic scan	99.4	50.6	34.2	× 3~4
Conventional UT (Routation scan)	Mechanical	25.0	12.4	7.5	1

これらの結果より、目標探傷速度は、ボリュームフォーカス探傷法にて、平均で 200 mm/sec. と決定した。

### 3. 4 テスト装置について

丸棒の検査にフェーズドアレイおよびボリュームフォーカス探傷法を適用する場合、一度に全断面をカバーするために、複数個のアレイ探触子を円周状に配置するのが一般的であるが、今回のテスト装置では、Fig. 5 のように、水槽に丸棒、アレイプローブを全没する方式とし、1つのアレイプローブが直進走行する方式を採用した。

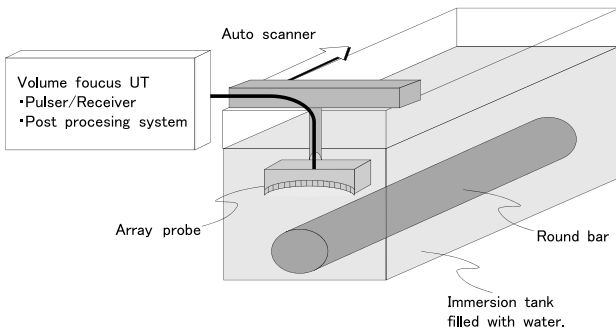


Fig. 5. Components of test equipment.

なお、円周方向の探傷については、丸棒の端部を把持したまま回転させて、再度アレイプローブを走査することとした。これにより、1つのアレイプローブと探傷器で、丸棒の全長、全断面における探傷テストを、実施することとした。

## 4. 開発内容

今回、サークル型アレイプローブの設計、位置ずれ防止機構の開発、円周方向の感度補正、表皮直下と表面欠陥の弁別技術開発を実施した。

### 4. 1 サークル型アレイプローブの設計

今回開発したアレイプローブの仕様を Table 3 に示す。アレイプローブの形状は、Fig. 6 のようなサークル型とし、丸棒の断面円周方向へ、振動子を配列する配置とした。

Table 3. Specification of array probe made as experiment.

Item	Target
Form	Curved concave array
Center frequency (-6dB)	7MHz±10%
Acoustical impedance matching	water (1.5 MRayl)
Pulse duration (-20dB)	≤450 ns
Number of elements	128ch
Elementary pitch	0.5mm(small size) , 0.6mm(large size)
Mechanical focusing (Radius of curvature)	37.5mm(small size) , 62.5mm(large size)
Width of elements	15 mm

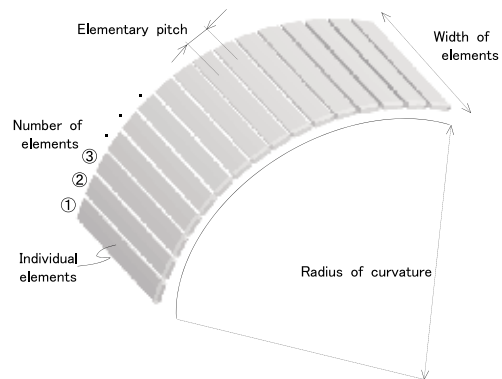


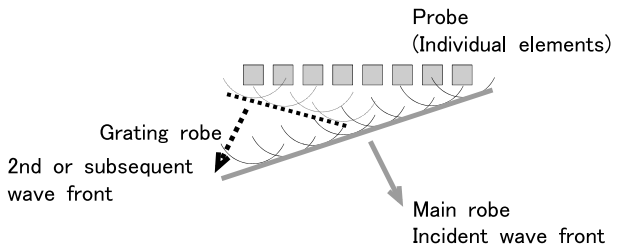
Fig. 6. Explanation of circle array probe.

周波数は、波長と材料の減衰を考慮し、7 MHz と決定した<sup>3), 5), 10)</sup>。また超音波の送受信素子数は、探傷器の制約上 128 ch とした。

素子間隔はグレーティングローブが発生しない範囲と決定した。このグレーティングローブとは、超音波振動子を複数配列し、同時に励振するアレイプローブ固有の問題点であり、Fig. 7 のようにメインローブ（目標焦点方向）とは、別の方向に強い波面を生成する現象である<sup>12)</sup>。

グレーティングローブの発生は、超音波の焦点を結ぶための角度、超音波の音速、周波数、素子間隔で決定されるため、これらを考慮した設計とした。

そして、サークルプローブの曲率については、サークルプローブと丸棒の中心が、同心円となるように配置した時、第2表面エコーが丸棒鋼中の探傷範囲内に入らないように Fig. 8 中の式によりサークルプローブの曲率を決定した。

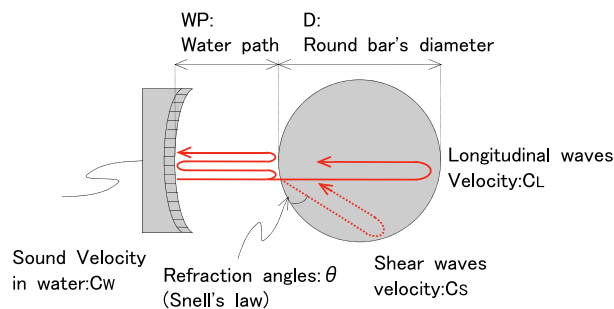


Generating conditions of grating robe

$$d \geq \frac{\lambda}{1 + \sin \theta_M}$$

d: Elementary pitch  
 $\lambda$ : Wave length  
 $\sin \theta_M$ : scan angle of main robe

Fig. 7. Generation principle of grating robe.



WP is defined as the following formula.

$$\frac{4WP}{C_w} \geq \frac{2D}{C_L} + \frac{2WP}{C_w} + \alpha \quad \frac{4WP}{C_w} \geq \frac{2D \times \cos \theta}{C_s} + \frac{2WP}{C_w} + \beta$$

※Correction coefficient:  $\alpha, \beta$

Fig. 8. Theory for deciding water path.

#### 4. 2 丸棒長手方向の素子幅の設計と探傷データ取得ピッチの決定

次に、丸棒の長手方向に対する、素子の幅を設計する。この素子幅は、丸棒長手方向の超音波の拡がりに影響し、素子の幅が狭いほど、拡がり角が大きくなる<sup>5)</sup>。つまり、丸棒の長手方向に超音波が拡がるため、探傷データ取得ピッチを広くすることが出来る。同じ繰り返し周波数で超音波を送受信する場合、探傷データの取得ピッチが広く出来れば、それだけ探傷速度は速くすることが出来る。

しかし、素子の幅を狭くすることで、探傷速度向上につながるが、超音波の拡がりにより、超音波の密度が低下し、欠陥の検出感度の低下が懸念される。そのため、平底穴の検出性能を低下させない素子幅の設計と探傷データ取得ピッチの検討を行った。

まず Fig. 9 に素子の幅を 10 mm, 15 mm, 20 mm と変化させた時の、丸棒長手方向における超音波の相対的な感度低下を示す。この感度低下については、超音波の拡がり角度の計算式より算出した<sup>5)</sup>。

なお、各素子幅の超音波強度は、焦点位置でのビーム直径の計算式を用いることとした<sup>9)</sup>。

その結果、素子幅 15 mm の時は、長手方向±0.5 mm の範囲で 0.5 dB 以内の感度低下となった。素子幅 10 mm の時は、拡がり角が大きいため、丸棒長手方向の感度低下は小さくなったが、ビーム直径が大きくなってしまったため、感度自体が低くなる計算結果となった。その反対に、素子幅 20 mm の時は、中心位置での感度は高いが、丸棒長手方向の感度低下が著しい結果となった。そのため、今回は素子幅 15 mm と決定した。

次に、素子幅 15 mm のアレイプローブを用いて、実験による検証を行った。今回使用したテストピースの材質は、一般的な丸棒形状の炭素鋼とし、平底穴  $\phi$  1.5 mm を直径の中心位置まで加工した人工欠陥を用いることとした。そして、人工欠陥真上の位置から丸棒の長手方向へアレイプローブを前後させた時の、平底穴検出感度をプロットすることで、丸棒長手方向の感度低下を調査した。

その結果を Fig. 10 に示す。平底穴直上の位置より、±0.5 mm の範囲においては、平底穴の感度低下は 0.5 dB 以内となっており、計算結果と同等の結果が得られた。これにより、丸棒の長手方向に 1 mm ピッチで探傷データを取得することと決定し、ボリュームフォーカス探傷法の探傷速度は、丸棒の直径  $\phi 20$  mm で 323 mm/sec. 直径  $\phi 40$  mm で 201 mm/sec. 直径  $\phi 60$  mm で 136 mm/sec. の走査速度と算出された。素子幅の設計により、平底穴の検出性能と探傷データ取得ピッチの最適化を実施した。

### 4. 3 位置ずれ防止機構の開発

丸棒の材料曲がりによる影響によって、同心円に配置された丸棒とアレイプローブの位置関係にずれが生じる。そのため、超音波が水中から丸棒に入射する際に、スネルの法則に基づき、入射角に変化が起きる。よって超音波の伝播は、目的とする焦点の位置と実際に焦点が生成される位置が異なってしまうことが考えられる。その他にも、平底形状の欠陥に対して、超音波の入射角

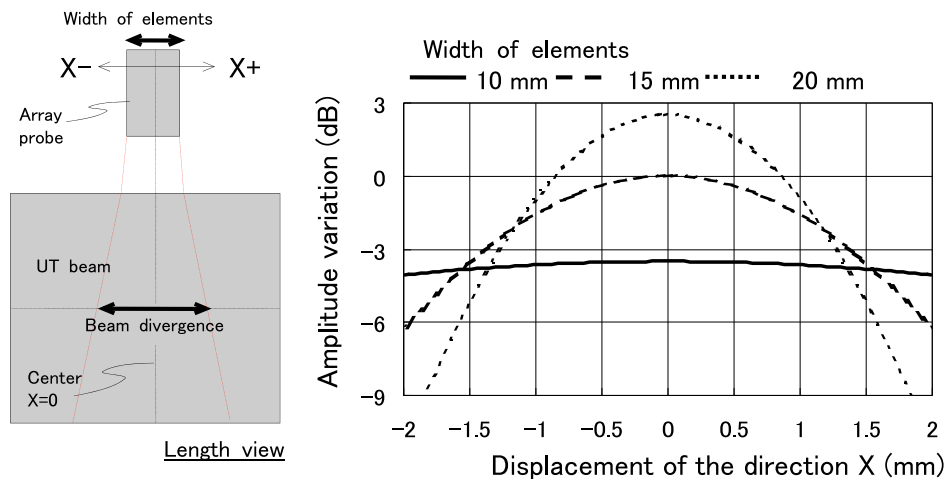


Fig. 9. Calculated results of displacement of direction X vs. amplitude variation.

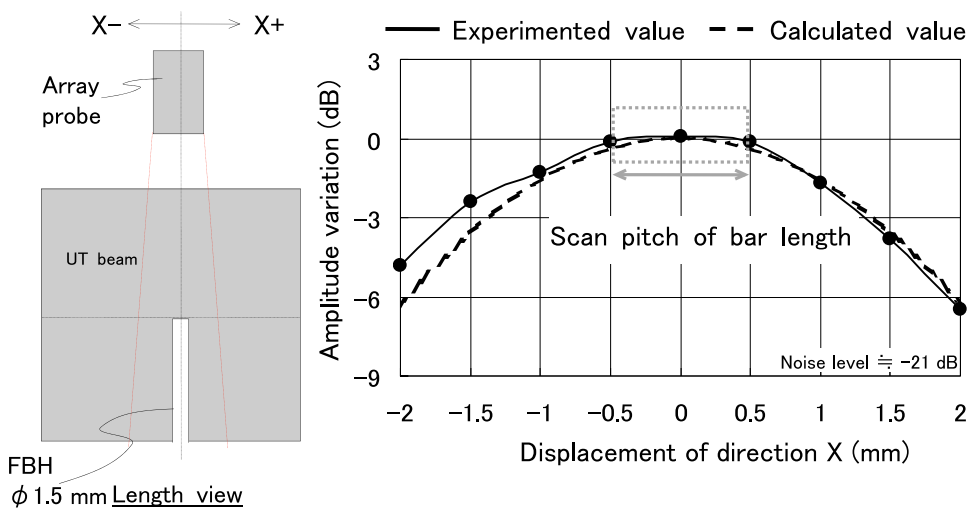


Fig. 10. Results of displacement of direction X vs. amplitude variation.



が大きくなることや、横波成分へのモード変換により、欠陥検出感度の低下が懸念される。

そこで、まず、丸棒とアレイプローブの位置関係に対する、丸棒への入射角、丸棒中の縦波屈折角を算出した。その結果を Fig. 11 に示す。丸棒の直径  $\phi$  35 mm の例では、0.2 mm 位置が変化すると、縦波は 1.4 度で丸棒中を伝播することとなる。これは材料中心位置に換算すると 0.43 mm に相当し、0.2 mm の位置変化量と足し合わせると 0.6 mm 以上丸棒断面の横方向に焦点位置が変化してしまうことがわかった。

そして、次に、位置変化による感度低下の影響を実験にて調査した。丸棒直径の中心位置まで加工した平底穴  $\phi$  1.5 mm を用いて、丸棒断面の横方向へ位置を変化させたときの感度低下を調査した。その結果を Fig. 12 に示す。丸棒の断面横方向において、 $\pm 0.2$  mm 位置がずれることで -6 dB、つまり 1/2 の感度低下が起きることがわかった。

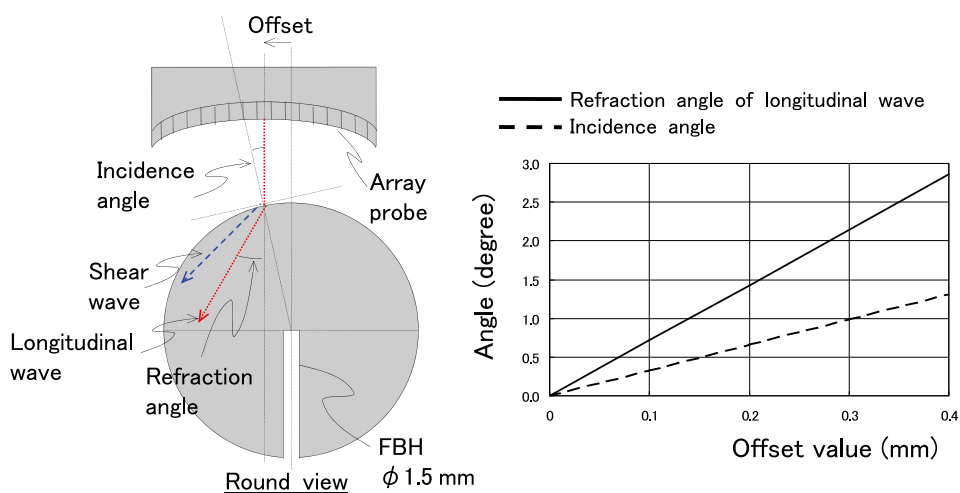


Fig. 11. Theory of Snell's law by offset (example of round bar diameter  $\phi$ 35 mm)

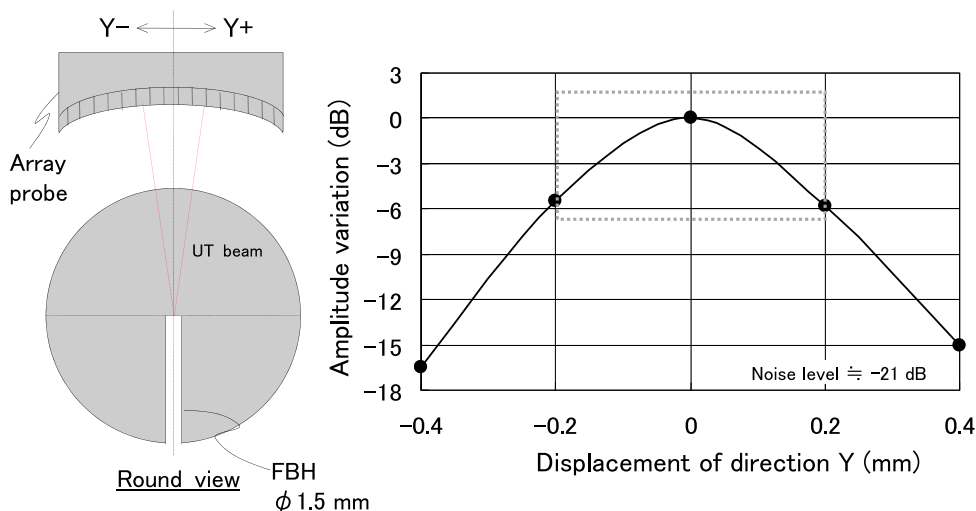


Fig. 12. Results of displacement of direction Y vs. amplitude variation.



この問題を解決するために、メカニカルなアレイプローブと丸棒の位置ずれ防止機構を設けることとした。その位置ずれ防止機構の概略を Fig. 13 に示す。丸棒断面の横方向、上下方向、長手方向の前後回転方向に対する位置ずれ対策として、4点ローラー式の倣い機構を採用することとした。

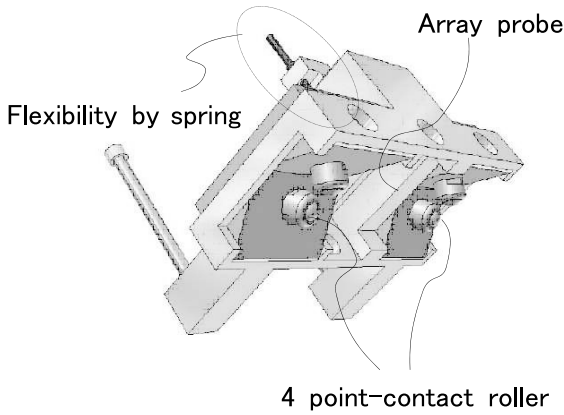


Fig. 13. Follow-up mechanism by 4 point contact roller.

4点の円形フリーローラーが接触して、アレイプローブが材料長手方向へ走査する。丸棒の寸法誤差や曲がりが発生しても、フリーローラー上部に設置されたバネにより、曲がりによる位置変化を吸収する機構とした。これにより、曲がりが発生しても、アレイプローブと丸棒の位置関係を良好に保つことが可能となった。

位置ずれ防止機構の性能確認として、意図的に材料曲がりが発生させたサンプルに、平底穴  $\phi 1.5$  mm の人工欠陥を作成し、探傷テストを実施した。その結果を Fig. 14 に示す。欠陥からの反射強度をプロットしたところ、断面横方向へ 2.3 mm 曲がった状態を想定しても欠陥

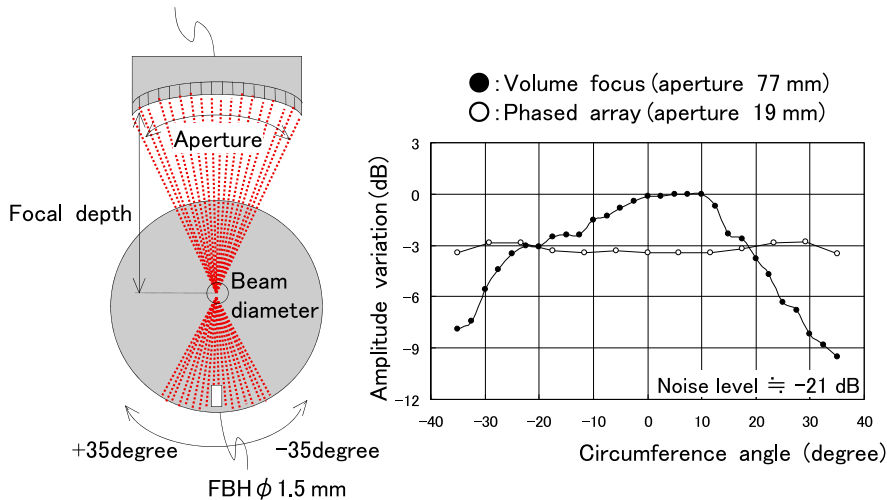


Fig. 15. Results of circumference angle vs. amplitude variation.

強度のばらつきは 1 dB 以内であり、位置ずれ防止機構により追従性は良好であることを確認した。

これにより、丸棒の曲がりによる位置変化があっても、感度低下を抑制した探傷が可能となった。

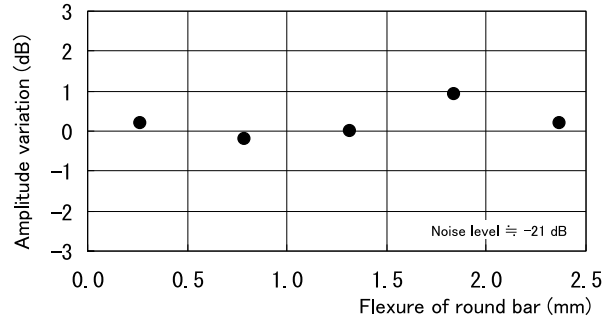


Fig. 14. Performance results by follow-up mechanism.

#### 4. 4 丸棒円周方向の感度補正

今回のボリュームフォーカス探傷法では、探傷範囲を広くするため、多数の振動子を用いて一度に超音波を送信する。広い開口部から超音波を送信するため、焦点位置での超音波の集束密度は高くなり、高い検出性能が期待される。しかし、焦点位置以外の場所との感度差が発生してしまい、欠陥を正常に検出出来ない可能性がある。そのため、感度変化を補正する必要がある。

丸棒の円周方向に対する感度分布を取得した。その実験結果を Fig. 15 に示す。128 ch の振動子で同時励振するボリュームフォーカス探傷法では、円周方向 0 度位置と円周方向  $\pm 35$  度位置では、最大 10dB の感度差が発生した。また、開口幅の狭いフェーズドアレイ探傷法では、円周方向の感度差が小さい結果となった。

これらの結果より、実際の探傷では、円周方向に配列された素子位置の感度分布を事前に取得し、欠陥からの信号を受信した素子位置によって、信号強度に係数をかけることとした。

最後に、材料の底面より数ミリ加工した平底穴φ1.5mmを円周方向へ回転させたデータを取得の概念図と、代表的な検出結果のオシロスコープ波形をFig. 16に示す。丸棒断面において、垂直および斜角探傷いずれも±35度の範囲で、S/N=6以上を達成した。

#### 4. 5 表皮直下と表面欠陥の弁別技術の開発

丸棒の表皮直下の探傷は、一般に斜角探傷を用いる。これは、通常垂直探傷法では、底面エコーと表皮直下の欠陥のビーム路程、すなわち時間軸が近似しており、弁別が困難である。そのため、斜角探傷により、超音波の角度をつけて入射することで、底面からの反射エコー

が戻らない状況を作り、欠陥があった場合のみ反射エコーが得られるという手法が行われてきた<sup>4), 9), 10)</sup>。しかし、従来の探触子回転式による探傷方法では、丸棒に表面欠陥があった場合、表面欠陥からも反射エコーが戻ってくる。この表面欠陥からの反射エコーは、表皮直下の欠陥のビーム路程と近く、これらの欠陥を弁別することが困難であるという課題があった。

そこで今回、表皮直下に加工した横穴と、表面欠陥(丸溝)のサンプルを製作し、弁別方法の考案に至った。その内容としては、丸棒中25～50度の横波が伝播するように、超音波のビーム制御を行い、探傷テストを実施した。

その結果をFig. 17に示す。表面欠陥(丸溝)は33度近辺に信号値のピークがあることを発見した。この結果の要因を考察すると、まず、反射の原理としてFig. 18のように考える。表皮直下の横穴の場合は、直接反射で超音波エコーが伝播する。

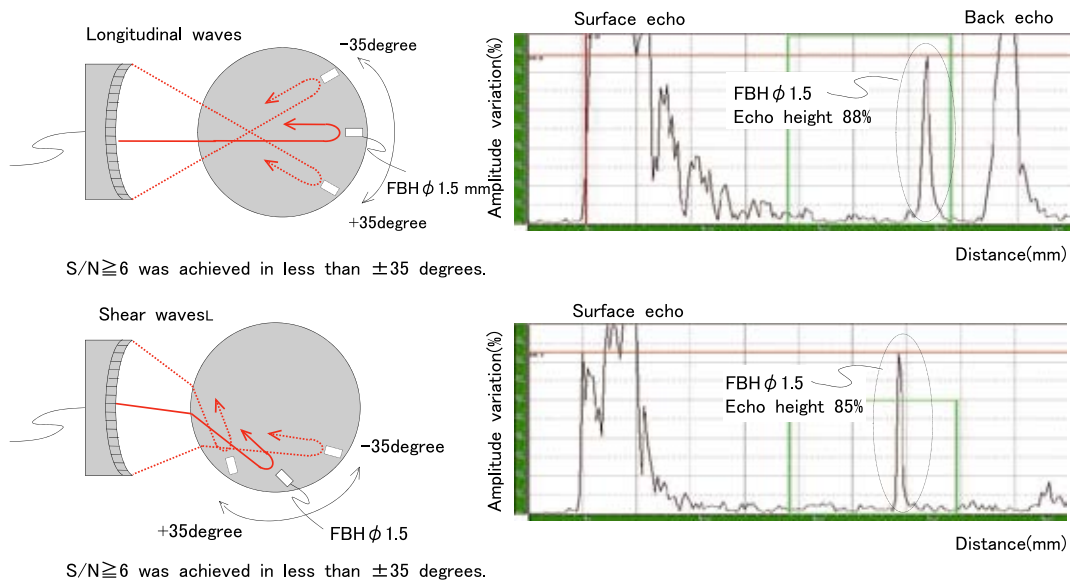


Fig. 16. Circumferential direction range of longitudinal and shear wave and example of oscilloscope waveform.

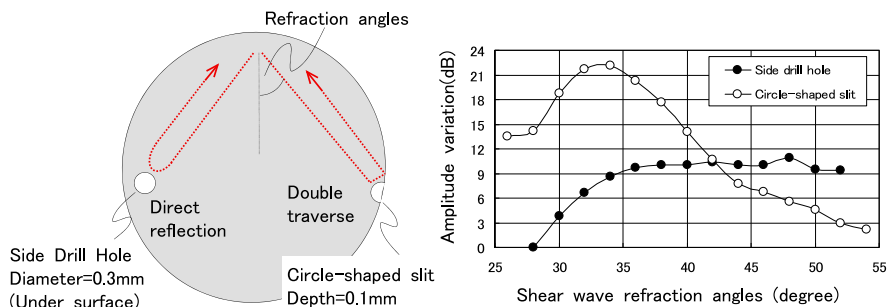


Fig. 17. Artificial defect and results of shear wave refraction angles vs. amplitude variation.

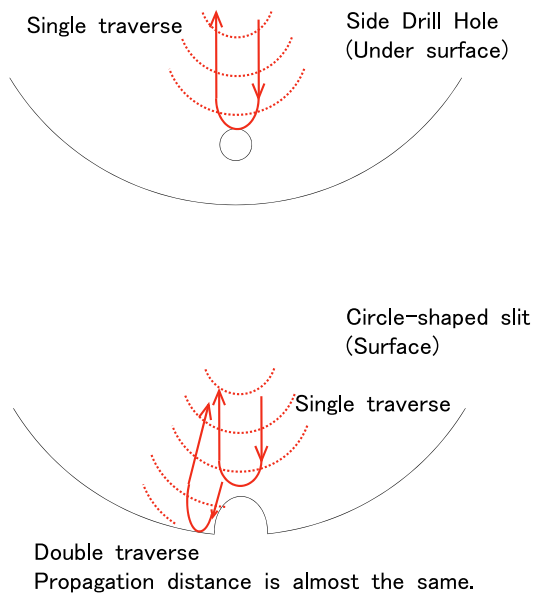


Fig. 18. Presumption of propagation path of under surface defect and surface defect.

しかし、表面欠陥の場合は、直接反射に加えて、欠陥と丸棒鋼側面との間で2回反射が起きたエコーが、ほぼ同等の時間で返ってくると推定する。

そして、反射強度の関係については、以下のように考える。フェーズドアレイによる走査角度、すなわち丸棒中を伝播する横波屈折角度に対する反射強度は、欠陥への入射角度を変数とした時の、余弦関数の二乗に比例することが知られている<sup>5)</sup>。また、丸棒を伝播する横波超音波が、真空、または水へ斜め入射する際の音圧反射率は、30度から33度にかけて1となり、最も横波成分が高いことを示す<sup>10)</sup>。これらの計算結果を Fig. 19 に示す。

表面欠陥の2回反射は、フェーズドアレイの走査角度

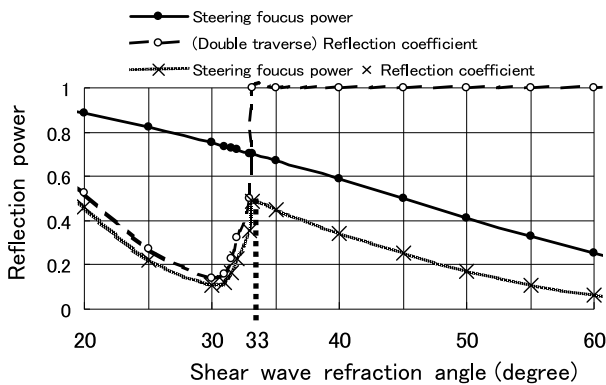


Fig. 19. Steering focus power and reflection coefficient on refracted angle.

に対する反射強度と斜め入射の横波音圧反射率との影響を加味した結果となり、33度近傍にピークを持つことがわかった。

このように、丸棒中を伝播する横波の角度を変化させることで、表皮直下の欠陥と表面欠陥からの反射強度が変化することを発見した。この反射強度と丸棒中を伝播する横波の角度を比較判定することで、表皮直下の欠陥と表面欠陥を弁別できる可能性を見出した。

現在は、実用化に向けて、様々な形態の欠陥弁別技術開発を継続中である。

## 5. ダイナミックテストの結果

これらの検討結果を元に、全没水浸式にて丸棒直径  $\phi 35 \text{ mm}$  に平底穴  $\phi 1.5 \text{ mm}$  を加工したテストピースを用いて、繰返し探傷テストを実施した。なお、走査速度  $200 \text{ mm/sec.}$ 、長手方向の探傷データ取得ピッチ  $1 \text{ mm}$  にて実施した。その結果を Fig. 20 に示す。欠陥からの反射強度のばらつきは、 $\pm 1 \text{ dB}$  以内となり、 $S/N=6$  以上を達成した。

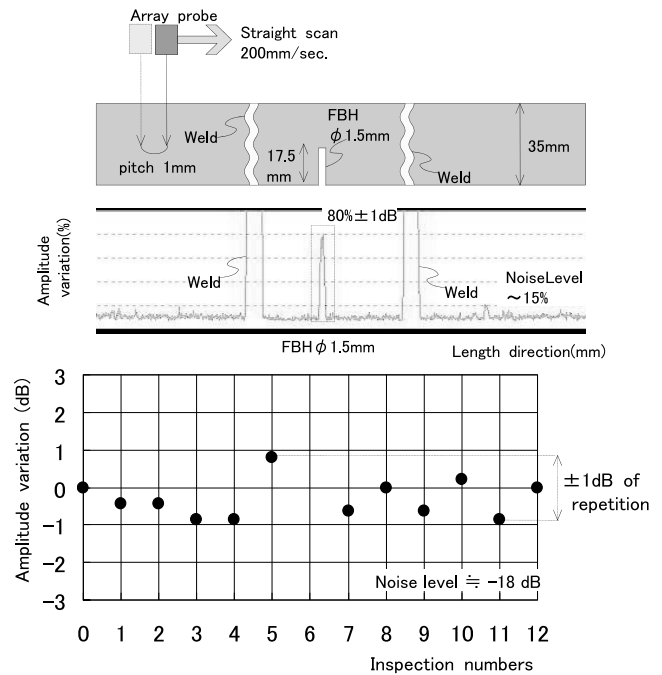


Fig. 20. Example of dynamic test, and results of inspection numbers vs. amplitude variation.

参考として、意図的に自然内部欠陥が発生しやすい材料を製作し、同様の探傷テストを実施した。その結果を Fig. 21 に示す。信号強度 36% の箇所を切断し、断面観察を行った結果、丸棒断面方向で  $38\ \mu\text{m}$ 、長手方向に長さ数 mm の未圧着部が検出された。

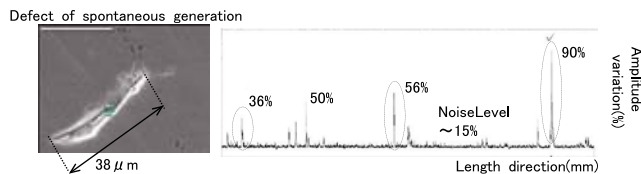


Fig. 21. Results of volume focus ultrasonic testing and observation of spontaneous generation defect.

## 6. 結 論

フェーズドアレイ探傷法を応用したボリュームフォーカス探傷法を丸棒探傷へ適用するにあたって、下記の内容の探傷技術開発を実施した。

- ①サークル型アレイプローブの、素子間隔、サークルプローブの曲率、素子幅の設計を実施した。
- ②平底穴  $\phi\ 1.5\ \text{mm}$  の検出感度低下量が  $0.5\ \text{dB}$  以内となる探傷データ取得ピッチを  $1\ \text{mm}$  と決定した。
- ③4点ローラー式の位置ずれ防止機構を開発することで、丸棒が断面横方向へ  $2.3\ \text{mm}$  曲がった状態を想定しても、感度ばらつきが  $1\ \text{dB}$  以内であることを確認した。
- ④ボリュームフォーカス探傷法による丸棒円周方向の感度低下量を取得し、補正する方法を考案した。
- ⑤丸棒中を伝播する横波の角度を変化させることで、表皮直下の欠陥と表面欠陥からの反射強度が変化することを発見し、弁別の可能性を見出した。

その結果、走査速度  $200\ \text{mm/sec.}$  のダイナミックテストにおいて、平底穴  $\phi\ 1.5\ \text{mm}$  を  $S/N=6$  以上、信号値のばらつき  $\pm 1\ \text{dB}$  以内の検出を達成した。

なお、アレイプローブ、倣い機構、表皮直下と表面欠陥の弁別技術は、実用化へ向けて技術開発を継続しており、製品検査への適用を検討中である。

最後に、本研究開発を遂行するにあたり、御助言を賜りました日本クラウトクレマー株式会社 Dominique Braconnier 氏に謝意を表します。

(文 献)

- 1) 杉浩司ほか：特殊鋼を支える非破壊検査 特殊鋼 特殊鋼の非破壊検査技術 60巻 3号 2011年
- 2) 田中洋次，市川宏(他 2名)：丸棒鋼用フェーズドアレイ自動超音波探傷装置の開発 第19回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集 2012, 1
- 3) 森大輔(他 2名)：ボリュームフォーカス探傷法を用いた丸棒鋼探傷技術の開発 日本非破壊検査協会 平成23年度秋季大会 2011
- 4) 澤清和ほか：特殊鋼を支える非破壊検査 特殊鋼 棒鋼 60巻 3号 2011年
- 5) Olympus NDT：Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Application
- 6) 村井純一(他 2名)：ボリュームフォーカスフェイズドアレイと適用事例 非破壊検査 Vol. 56 No10, 2007
- 7) 村井純一，富田一臣：ボリュームフォーカス自動探傷装置の開発 検査技術 第15巻 第12号, 2010
- 8) 村井純一，ドミニクブラコニエ(他 1名)：ボリュームフォーカスフェイズドアレイと適用事例，非破壊検査 第56巻 10号 2007年
- 9) 小林敏郎：山陽の非破壊検査設備 山陽特殊製鋼技報 第11巻 第1号 2004年
- 10) 日本非破壊検査協会：超音波探傷試験Ⅲ 2001年
- 11) 木村勝美：傷の反射率の整理 NDT資料 UT-00005 2010. 6. 17
- 12) 安本浩二：超音波の基礎 日本放射線技術学会雑誌 第60巻 第1号 2004年