

技術資料



Technical Data

細径丸棒向け超音波探傷技術の開発

石谷和典*¹, 池上泰史*², 樹神啓司*³, 森 大輔*⁴

Development of Ultrasonic Inspection Technique for Small Diameter Round Bar

Kazunori ISHITANI, Yasushi IKEGAMI, Keishi KODAMA and Daisuke MORI

Synopsis

Various nondestructive tests are applied to steel products in manufacturing processes. Among them, ultrasonic inspection is an important method to detect defects in round bar. However, it is particularly difficult to inspect small diameter round bar due to displacement. This paper describes the following development results of an ultrasonic inspection technique for small round bar:

- (1) Assumption of an inspection technique for backward focusing from the material center using a large-diameter probe
- (2) Consideration of the relationship between a simulation model and accuracy of simulation for ultrasonic inspection.
- (3) Optimization of the probe specification by analysis with different probe parameters in simulation.

1. 緒 言

大同特殊鋼(株)は、スクラップを主原料に、丸棒、平角、細線、薄板など、さまざまな形状の特殊鋼製品を製造している。これらの特殊鋼製品は、自動車部品や工作機械、医療器具などの重要部品に用いられるものが多く、製品に欠陥が存在すると、それを起点に破壊が起きるため、出荷前に厳密な製品検査が実施される¹⁾。

検査手法の一つとして、超音波探傷が挙げられる。この手法は、超音波を被検査材の内部に伝播させ、きずからの反射波を検出することで、きずを評価することができる。本稿で対象とする丸棒の超音波探傷では、プローブを丸棒の円周方向に配置し、水を充填させて実施する。実際のインライン探傷設備では Fig. 1 のように、搬送されている丸棒の周囲をプローブが回転する方式、またはプローブを円周方向に複数配置する方式が採用されている²⁾。これらの設備では、丸棒を挿入する位置にガ

イド機構が取り付けられ、それによって丸棒は滑らかに搬送される。しかし、丸棒には加工時に曲がりや径のばらつきが発生することがあり¹⁾、そのような丸棒を装置に挿入する場合、ガイド機構と丸棒の間に隙間が無いと、搬送中に詰まりが生じる。そのため、ガイド機構には一定の隙間を設ける必要がある。しかし、この隙間によって丸棒が搬送中に振れるため、プローブとの間に位置ずれが生じる。これにより、超音波が丸棒に入射する角度が変わってしまい、きずの検出感度が低下するという問題がある³⁾。特に細径丸棒は曲率が大きく、わずかな位置ずれが生じただけで入射角が大きく変化するため、きずの検出感度は顕著に低下する。そのため、ガイド機構に頼らず、位置ずれによるきずの検出感度低下を抑制できる超音波探傷技術の開発が望まれている。

超音波探傷技術の開発においては、プローブの設計が重要な要素となる。従来では周波数や振動子径などの仕様を最適化するためには、さまざまなプローブを製作し

2021年10月14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 伊藤忠テクノソリューションズ(株), 理博(Dr.,Sci., ITOCHU Techno-Solutions Corporation)

* 3 大同特殊鋼(株)知多工場 (Chita Plant, Daido Steel Co., Ltd.)

* 4 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.)

評価する必要があり、非常に高コストかつ非効率的であるという課題があった。この課題を解決するために、近年では計算機性能の飛躍的向上に伴い、シミュレーション技術の活用が広がってきた。具体的には、音場の可視化や探傷仕様の最適化を目的に、シミュレーションを活用する事例が近年多く報告されている^{4), 5)}。超音波のシミュレーション手法としては、有限要素法、境界要素法、FDTD法などを用いたものが主流である。その中でも有限要素法は、空間を有限の要素に分割して解析を行う手法であり、また材料の自由表面の境界条件を自動的に満たすことから、その他の手法と比較して超音波の挙動を高精度に再現できるという特徴を持つ^{6)~8)}。

これらのシミュレーションの特徴から、プローブの仕様を効率的に検討することができる。しかし、有限要素法では要素の設計方法によって解析精度が左右される。細径丸棒を解析する場合は、要素の大きさによって丸棒曲率の再現性が決まるため、プローブ開発に先立ち、シミュレーション条件の検討が重要となる。

以上の背景のもと、本稿では、細径丸棒において、位置ずれによるきず検出感度の低下を抑制するための探傷技術を開発した結果について報告する。開発にあたっては、シミュレーションを活用することで効率化を図る。そのために、下記の検討を実施した。

- ①大径プローブを用いて後方集束させる探傷技術の考案
- ②シミュレーション精度の検証
- ③シミュレーションを活用したプローブの最適化

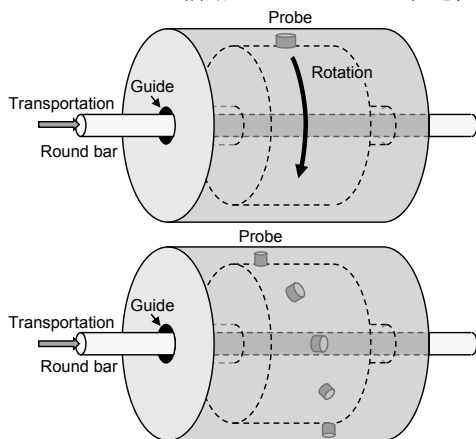


Fig. 1. Schematic diagram of in-line ultrasonic inspection equipment.

2. 従来手法の課題と目標仕様

2. 1 位置ずれと超音波の伝播経路

丸棒の超音波探傷では、プローブを丸棒の円周方向に配置する方式が広く用いられている。このとき、振動面

が平坦なプローブを用いると超音波が拡散するため、丸棒中央部の音圧が弱まり、きずの検出感度が低下してしまう⁹⁾。これを防ぐためには、振動面に曲率が付けられた集束プローブを用いて超音波を集束させる必要がある。

ここで、Fig. 2のように超音波の進行方向をY方向、Y方向と直行する方向をX方向とし、丸棒とプローブの間にX方向の位置ずれが生じた場合を考える。このとき、位置ずれ量が大きくなるほど、超音波は屈折し丸棒中心から離れていくため、丸棒中心近傍におけるきずの検出感度は低下してしまう。

この感度低下量を実験にて確認する。実験条件をFig. 3に示す。プローブと丸棒は同心円配置とし、中心位置の直径 $\phi 0.4$ mmの横穴(Side Drilled Hole: SDH)を探傷した。プローブをX方向へ位置ずれさせて複数回探傷し、位置ずれ量ときず検出感度の低下量を測定した。また、曲率の異なる丸棒を探傷することで、曲率による違いを確認した。Fig. 4に実験結果を示すが、位置ずれ量が大きくなるにつれてきずの検出感度が低下しており、この傾向は直径 $\phi 6$ mmの細径でより顕著になっている。この原因は、細径では曲率が大きいために、わずかな位置ずれで大きく入射角が変化したためであると考えられる。

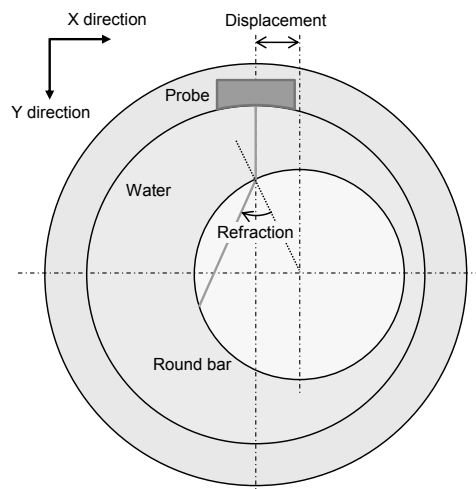


Fig. 2. Ultrasonic refraction of due to displacement.

2. 2 課題と目標仕様

文献¹⁾によると、実際の探傷設備においては ± 0.5 mm程度の位置ずれが生じてしまうとされている。また、前節の実験結果から、直径 $\phi 6$ mm丸棒においては 0.5 mmの位置ずれが生じた際に検出感度が -21 dB程度まで低下している。従って、実際の設備で細径丸棒を探傷するには、位置ずれによる感度低下を抑制する必要がある。本稿では開発目標を、位置ずれによる感度低下量を ± 1 mm範囲で -6 dB以内と定めた。なお、人工きずの大きさや検出能は文献¹⁾に従い決定した。本稿での目標仕様をTable 1に示す。

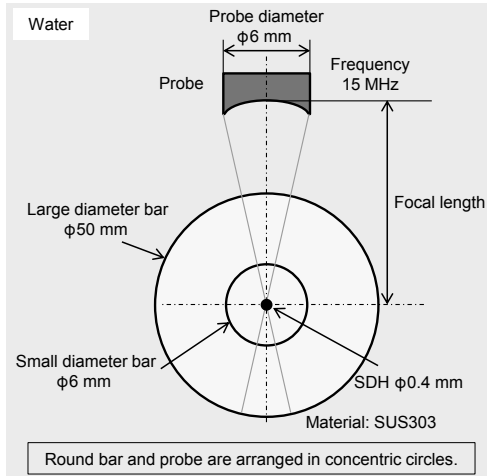


Fig. 3. Inspection condition.

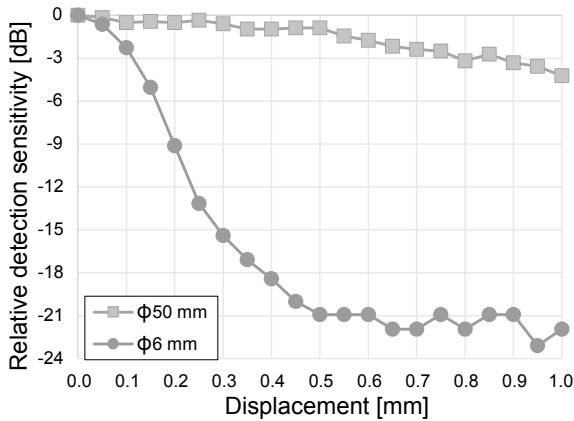


Fig. 4. Relationship between displacement and detection sensitivity.

Table 1. Inspection target.

Bar diameter	φ6 mm
Material	SUS303
Defect size	SDH φ0.4 mm
Detection sensitivity	Signal/Noise ≥ 5
Detection sensitivity decrease	-6 dB (Displacement ±1 mm)

3. 大径プローブを用いて 後方集束させる探傷技術

3. 1 プローブの設計思想

一般に、集束プローブを用いて丸棒を探傷する場合は、丸棒中心部の音圧を高めるため、Fig. 5(a)に示すように丸棒とプローブの曲率中心を一致させる。しかし、丸棒内の狭い範囲のみに超音波が分布することになるため、前章で述べたように、わずかな位置ずれできずの検出感度が大きく低下してしまう。そこで、Fig. 5(b)に示すよ

うに、超音波を丸棒中心より後方に集束させることを考える。このような配置にすることで、超音波の音圧を丸棒内の広い範囲に分布させ、位置ずれによるきずの検出感度低下を抑制できると考えられる。しかし、中心に集束させる場合と比較し、音圧の最大値は低下するため、集束位置以外では検出感度が低下する¹⁰⁾。これを解決するため、振動子径の大きい大径プローブを用いる。それにより指向性が鋭くなり音圧が高くなるため、前述の検出感度低下を抑制できる。ただし、上記手法での探傷には複数の課題があるため、次節以降で検討する。

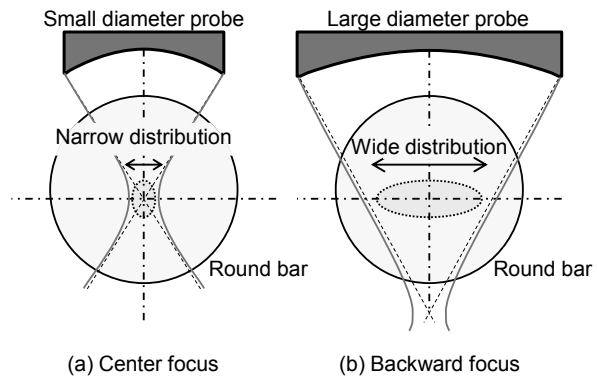


Fig. 5. Difference in detection sensitivity distribution by focusing position.

3. 2 近距離音場内での音圧ばらつき

プローブから発振される超音波は、近距離音場と遠距離音場に分けられる。近距離音場はプローブに近い領域の音場を、遠距離音場はプローブから遠い領域の音場をそれぞれ指す。超音波の音場と感度分布をFig. 6に示す。一般的には、音圧分布が単純な遠距離音場に材料を配置させて探傷する。一方で、近距離音場に材料を配置させると、きずの検出感度にばらつきが生じる¹⁰⁾。例えば、Fig. 6のように太径丸棒を配置すると、材料径が大きいので、丸棒内に音圧の高い位置と低い位置が生じる。そのため、AとBの位置に同じ大きさのきずが存在しても、違う大きさの超音波エコーが検出される。すなわち、きずの検出感度にばらつきがあるため、きずを過大または過小に評価してしまう。

細径丸棒では、材料径が小さいため、例えばFig. 6におけるB-C間の位置に丸棒を配置すれば、材料内の音圧変化が小さくなる。そのため、前述のような検出感度のばらつきを抑制できると考えられる。

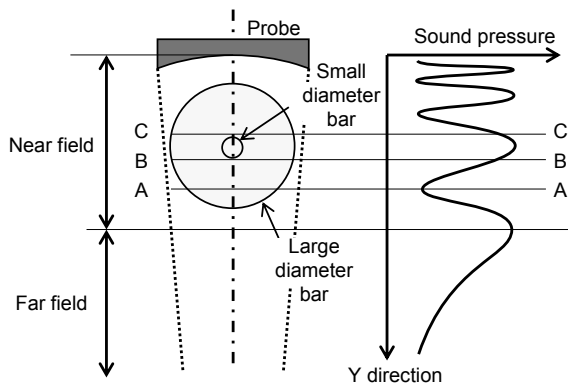


Fig. 6. Sound field and sensitivity distribution.

3. 3 漏洩弾性表面波による妨害

超音波を後方集束させると、丸棒の表面を伝播する弾性表面波が漏洩しプローブで受信される可能性がある¹¹⁾。Fig. 7に漏洩弾性表面波の伝播経路を模式的に示す。もしこの漏洩弾性表面波が探傷範囲に入っている場合には、妨害エコーとなり、きずの識別性が低下する。

漏洩弾性表面波を発生させない条件を考える。超音波は、丸棒に入射するとき、Snellの法則に従って屈折する。このとき、屈折角が90°となる入射角を臨界角といい、弾性表面波は、超音波が臨界角以上の角度で入射した場合に発生する。漏洩弾性表面波を発生させないためには、すべての超音波成分が臨界角より小さい角度で丸棒に入射する必要がある。ここで、入射角が最大となる超音波成分は、プローブ端部の位置 (Fig. 7中の点A) から発振された超音波成分が丸棒の頂点 (Fig. 7中の点B) に入射する場合である。そのときの入射角を導出する。

振動子径を D 、集束距離を F 、水距離を W_p 、材料半径を r とすると、点Aおよび点Bの座標は幾何学的に

$$A(x_A, y_A) = \left(-\frac{D}{2}, \sqrt{F^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2} + r + W_p - F \right) \quad (1)$$

$$B(x_B, y_B) = (0, r) \quad (2)$$

と定義できる。

このとき、超音波の入射角 θ_1 は、

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{x_A - x_B}{y_A - y_B} \right) \quad (3)$$

となる。

また、Snellの法則より、入射角が臨界角以下となる条件は、水の音速を C_1 、丸棒の音速を C_2 とすると、

$$\sin \theta_1 \leq \frac{C_1}{C_2} \quad (4)$$

で表される。

すなわち、式(1)～(4)より、漏洩弾性表面波を発生さ

せないためには、

$$\sin \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{D/2}{\sqrt{F^2 - (D/2)^2} + W_p - F} \right) \right\} \leq \frac{C_1}{C_2} \quad (5)$$

を満たすようにプローブを設計する必要がある。

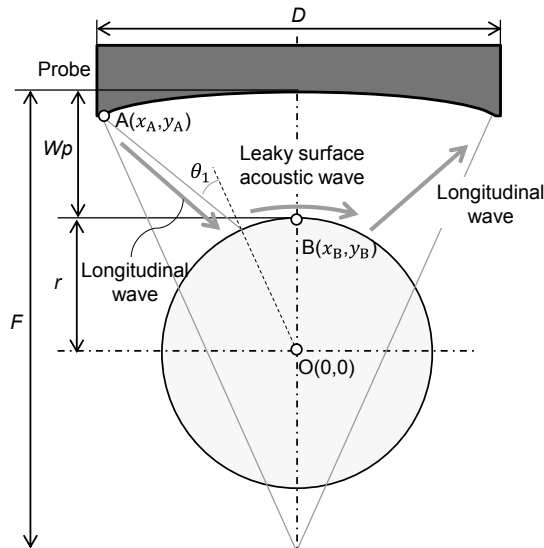


Fig. 7. Propagation path of leaky surface acoustic wave.

3. 4 プローブ最適化の課題

3. 1節で述べたように、大径プローブを後方集束させて用いれば、位置ずれによるきずの検出感度低下を抑制できる可能性がある。しかし、近距離音場内で探傷することによるきず検出感度のばらつきや、漏洩弾性表面波による妨害が発生するという課題がある。これらの課題を解決した上で目標の検出感度を達成するためには、プローブの仕様を適切に設計する必要がある。

プローブの設計には周波数、振動子径、集束距離など多数のパラメータを検討する必要がある。そのため、多数のプローブを試作して実験的に仕様を最適化することは難しい。そこで、本稿ではプローブ最適化のために、ボクセル有限要素シミュレーションを活用する。

4. シミュレーション精度の検証

4. 1 ボクセル要素を用いた有限要素法

有限要素法とは、空間を有限の要素に分割したモデルで表現することで、連続の偏微分方程式を数値的に解析する手法である。本手法は、材料の自由表面の境界条件を自動的に満たすことから、その他の手法と比較して、複雑形状の問題を解くのに適しており、超音波の挙動を高精度に再現できるという利点を持つ。有限要素法で用いられる要素にはさまざまな種類のものがある。その中

で、ボクセル要素は直方体の構造を持ち、その他の形状要素と比較してメッシュ生成が高速に行えるという利点がある⁴⁾。本稿ではさまざまなプローブをシミュレーションにて検討するため、メッシュ生成が容易なボクセル有限要素法を用いることとした。

シミュレーションの精度は、要素サイズに大きく依存する。波動解析においては、要素サイズを波長の1/10以下にすることで、伝播する波を正確に再現できることが知られている⁷⁾。しかし、ボクセル要素を用いる場合、Fig. 8に示すように、曲面を階段状にしか近似できない。そのため、細径丸棒のように曲率が高い対象をモデル化する際に上記の要素サイズを適用すると、形状を正確に表現できず、解析精度が低下する恐れがある。一方で、要素サイズを必要以上に微細にすると、計算機のメモリ不足や解析時間の長期化につながる。そのため、探傷仕様の最適化に先立ち、適切な要素サイズを検討する。なお、本稿ではシミュレーションソフトとして、ComWAVE™（伊藤忠テクノソリューションズ(株)製）を用いた⁶⁾。

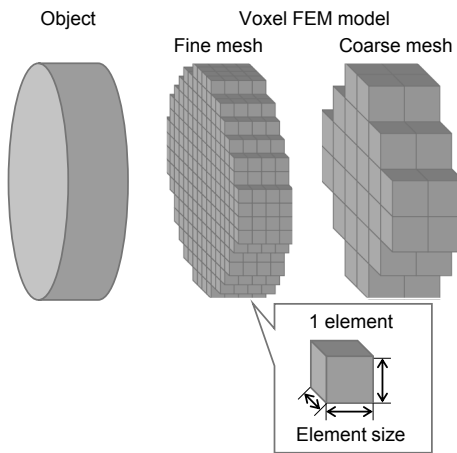


Fig. 8. Voxel finite element method model and differences by element size.

4. 2 シミュレーション条件の検討

2. 1節で示した実験と同じ条件でシミュレーションを行い、実験と比較することで要素サイズを決定する。具体的には、Table 2に示すように要素サイズを変化させて解析し、実験との誤差が小さくなるように要素サイズを決定した。Fig. 9に実験結果とシミュレーション結果の比較を示すが、要素サイズが0.008 mm以下のときに実験を精度よく模擬できているため、本稿では要素サイズを0.008 mmと決定した。

Table 2. Simulation conditions.

Element size	0.005 mm 0.008 mm 0.010 mm 0.020 mm
Element number	5 760 000 ~92 160 000
Frequency	15 MHz
Probe diameter	φ6 mm
Focal length	20 mm
Water path	17 mm

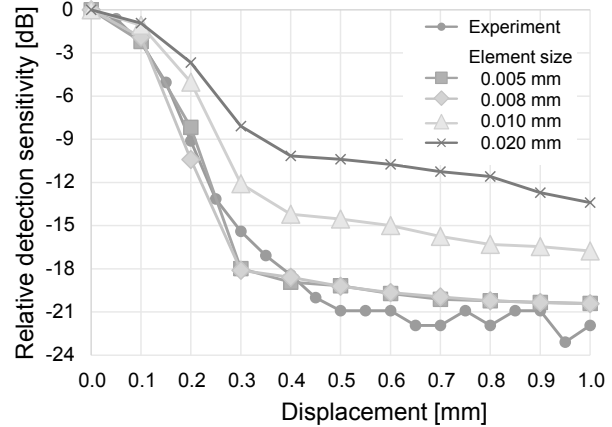


Fig. 9. Relationship between displacement and detection sensitivity for each element size.

5. プローブの開発

5. 1 シミュレーションによる プローブ仕様の最適化

音場に影響を与える支配的なパラメータである周波数、振動子径、集束距離を、シミュレーションにより最適化する。具体的には、プローブ位置をX方向に位置ずれさせてきずの感度低下量を測定し、感度低下量が最小となるパラメータを探索する。それぞれのパラメータの範囲は、式(5)を満たすTable 3に示すような値とし、水距離は文献³⁾に従って決定した。

Table 3. Simulation conditions for optimization.

	Optimization parameter		
	(1) Frequency	(2) Probe diameter	(3) Focal length
Frequency	7 MHz ~15 MHz	15 MHz	15 MHz
Probe diameter	10 mm	8 mm ~14 mm	12 mm
Focal length	100 mm	100 mm	80 mm ~120 mm
Water path	70 mm		

(1) 周波数の最適化

まずは周波数のみを可変にして最適化する。その他の可変パラメータは暫定的にそれぞれの中間値を用いる。Fig. 10にシミュレーション結果を示すが、15 MHzで感度低下量が最小となった。一般に、周波数が高くなると超音波の指向性が鋭くなるため、位置ずれしたときの感度低下量は大きくなる¹⁰⁾。しかし、近距離音場内で探傷する場合は音圧分布が複雑になるため、今回の条件においては指向性に依存しない結果になったと考えられる。なお、周波数が高くなるほど感度低下量が小さくなっており、15 MHzより周波数を大きくすれば、さらに感度低下量を小さくできる可能性がある。しかし、本稿のシミュレーションでは考慮していないが、周波数が高くなるにつれて金属の粒界散乱が大きくなるため、きずの識別性が下がるという課題もある¹⁰⁾。そのため、現実的に探傷が可能な範囲である15 MHzと決定した。

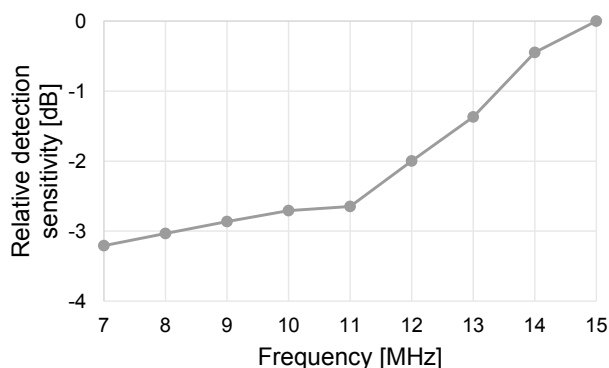


Fig. 10. Simulated results of optimizing frequency.

(2) 振動子径の最適化

次に振動子径を最適化する。周波数は(1)で求めた15 MHzとした。シミュレーション結果をFig. 11に示すが、振動子径12 mmで感度低下量が最小となった。一般に、振動子径が大きくなると超音波の指向性が鋭くなり、位置ずれしたときの感度低下は大きくなるが、(1)と同様に近距離音場内で探傷しているため、指向性に依存しない結果になったと考えられる¹⁰⁾。Fig. 11から、本稿では振動子径を12 mmと決定した。

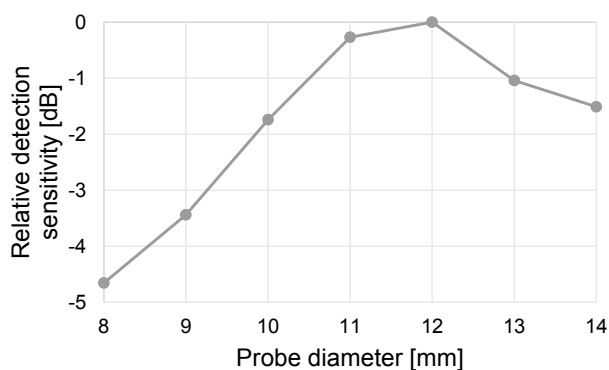


Fig. 11. Simulated results of optimizing probe diameter.

(3) 集束距離の最適化

(1), (2)と同様に、集束距離を最適化する。周波数、振動子径はそれぞれ(1), (2)で求めた15 MHzと12 mmとした。シミュレーション結果をFig. 12に示すが、集束距離95 mm ~ 100 mmで感度低下量が最小となった。集束距離を小さくすると、集束位置が丸棒の中心に近くなり、3.1節で述べたように狭い範囲のみに超音波が分布することになるため、位置ずれ時の感度低下量が大きくなる。一方で、集束距離を大きくすると振動面が平坦に近づくため、集束効果が得られなくなり、検出感度が低下してしまう。そのため、検出感度が低下しない範囲で集束距離を長くすることが望ましい。Fig. 12から、本稿では集束距離を100 mmと決定した。

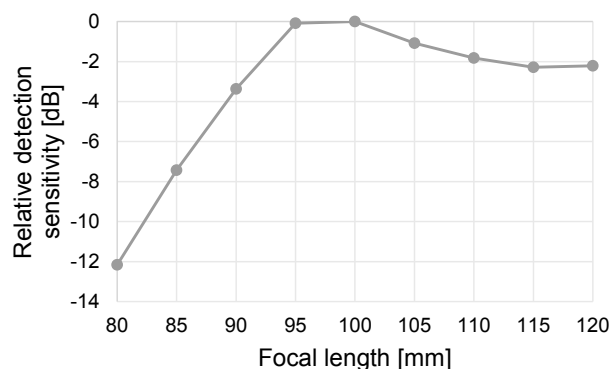


Fig. 12. Simulated results of optimizing focal length.

以上の結果から最適化したプローブの仕様をTable 4に示す。

Table 4. Optimized probe specifications.

Frequency	15 MHz
Probe diameter	φ12 mm
Focal length	100 mm
Water path	70 mm

5. 2 設計したプローブの有効性確認

前節にて最適化した仕様と2.1節で示した従来仕様を実験にて比較する。位置ずれ量と感度低下量の関係をFig. 13に示すが、提案仕様は従来仕様と比較して、位置ずれ量±1 mmの範囲で感度低下量-6 dB以内を達成しており、位置ずれによるきず検出感度の低下を抑制できている。探傷波形例をFig. 14に示すが、従来仕様では位置ずれが1 mm発生するとききずエコーは検出されなかったが、提案仕様ではきずの検出感度低下は-4.4 dBに抑制できた。さらに、検出能についても目標のS/N ≥ 5を達成できている。なお本稿では、丸棒の周囲をプロー

ブが回転する方式，またはプローブを円周方向に複数配置する方式を前提としているため，探傷領域は丸棒の中心から底面付近までとしている。

3. 2節で示した Y 方向の感度ばらつきを確認するため，深さの異なるきずを探傷した。探傷条件を Fig. 15 に，探傷結果を Fig. 16 にそれぞれ示す。Fig. 16 より，いずれのきずにおいても感度低下量 -6 dB 以内を達成していることがわかる。

3. 3節で述べた漏洩弾性表面波の影響を調べるため，シミュレーションを行った。その結果を Fig. 17 に示すが，漏洩弾性表面波による妨害エコーは観測されていないことから，今回設計した仕様では問題なく探傷できるといえる。

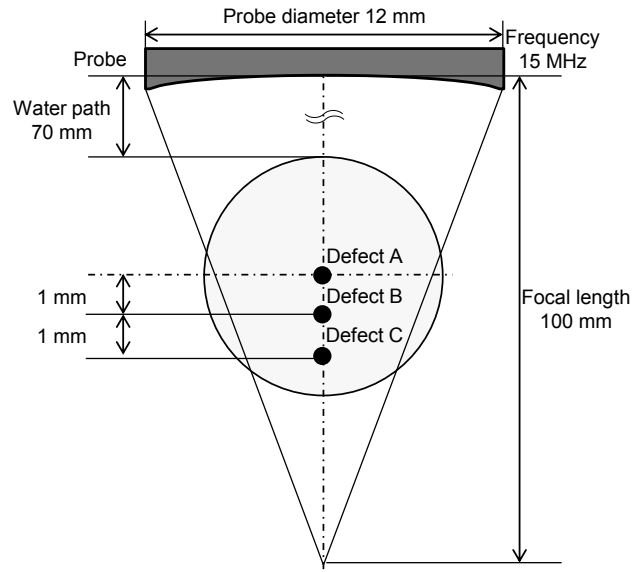


Fig. 15. Round bar with several types of defects of different depths and inspection conditions.

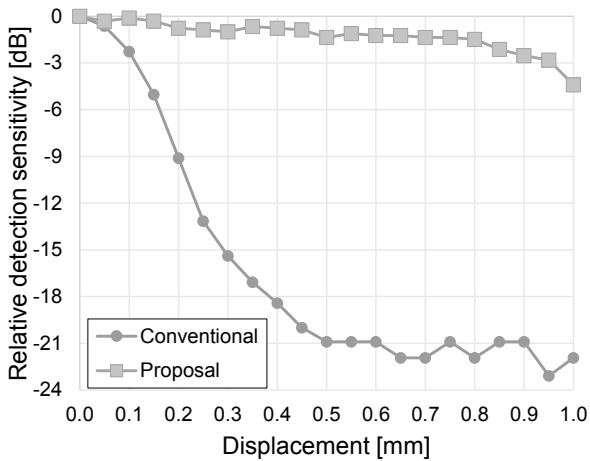


Fig. 13. Comparison of conventional and proposal specifications

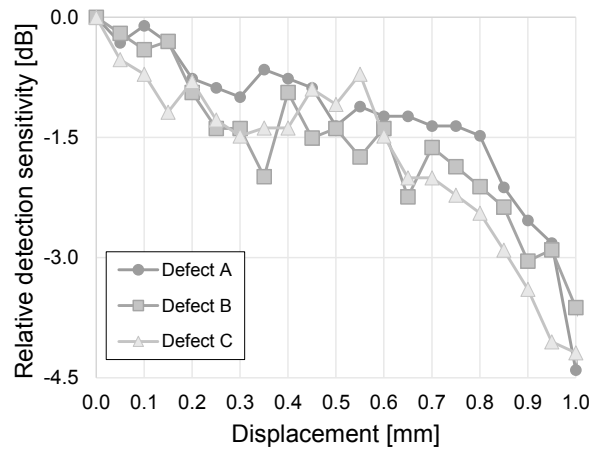


Fig. 16. Relative detection sensitivity with respect to displacement for each type of defect.

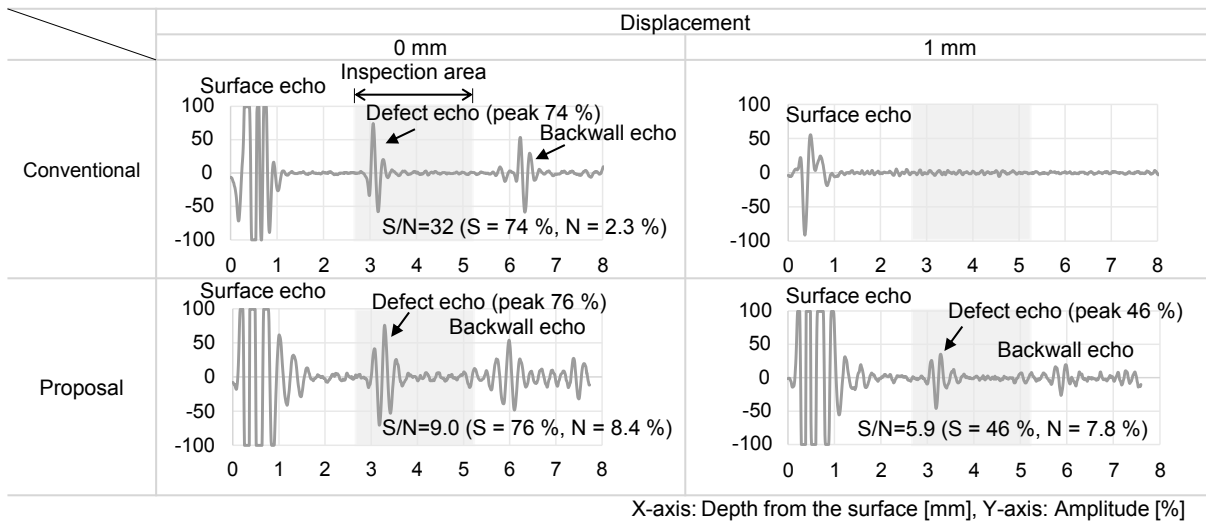


Fig. 14. Inspection waveforms of conventional and proposal specifications.

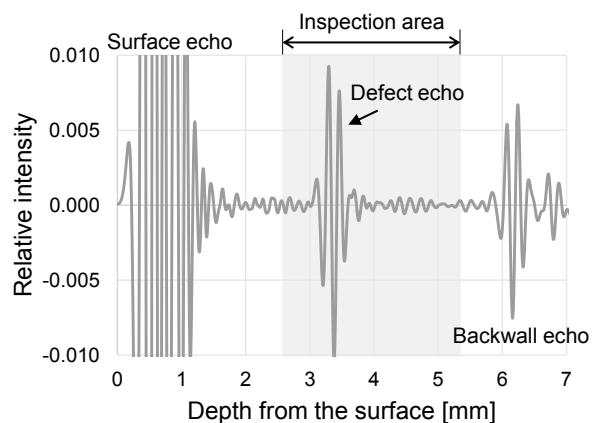


Fig. 17. Simulation result waveform

6. 結 言

本稿では、細径丸棒向けの超音波探傷技術について、以下の検討をした。

- ①大径プローブを用いて後方集束させることで、位置ずれ時のきず検出感度低下を抑制する探傷技術を考案した
- ②精度の良いシミュレーションを実施するためのモデルを検討した
- ③シミュレーションを活用し、最適なプローブを設計した

その結果、直径 $\phi 6$ mmの材料中に加工されたSDH $\phi 0.4$ mmを、 $S/N \geq 5$ で検出、感度低下量 -6 dB（位置ずれ量 ± 1 mm）以内を達成した。

なお、本稿では丸棒中心近傍に存在するきずの探傷についてのみ言及したが、丸棒表面と表面直下のきずを探傷する斜角探傷においても本技術を適用できる可能性を持つ。今後、継続して技術開発にとりくむ。

(文 献)

- 1) 森大輔, 兼重健一: 電気製鋼, 83(2012), 97.
- 2) 澤清和: 特殊鋼, 60(2011), 3, 27.
- 3) 大同特殊鋼(株): 電気製鋼, 83(2012), 177.
- 4) 平元邦幸, 生出佳, 山田真幸, 寺田賢二郎: 理論応用力学講演会講演論文集, 54(2005), 1A10.
- 5) 古村一郎, 古川敬, 鎌田徹, 南安彦: 技術レビュー, 4(2008), 10.
- 6) 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.
- 7) 山田真幸, 宮腰寛之, 寺田賢二郎: 応用力学論文集, 9(2006), 1121.
- 8) 田中貴之, 中畑和之: 土木学会年次学術講演会講演概要集, 65(2010), CS08-019.
- 9) 荒川敬弘, 福本伸太郎, 大庭勇輝: IIC REVIEW, 58(2017), 42.
- 10) 日本非破壊検査協会: 超音波探傷試験Ⅲ, 2017, 65.
- 11) 廣瀬徳豊: 色材協会誌, 72(1999), 9, 575.



石谷和典



池上泰史



樹神啓司



森 大輔