

# 丸棒などの曲率が超音波探傷に及ぼす影響

荒川 敬弘<sup>\*1</sup> 福本伸太郎<sup>\*2</sup> 大庭 勇輝<sup>\*2</sup>  
Arakawa Takahiro Fukumoto Shintaro Ooba Uuki

配管や円柱試験体に入射した超音波ビームの拡散に及ぼす曲率の影響を、数値シミュレーションをも活用して検討した。この結果、円柱試験体曲率面で超音波ビームが平板試験体より広く拡散するのは、以前の定説の線接触による見かけの振動子幅の減少に伴う指向性の鈍化によるのではなく、曲率面によりレンズが生じることによる超音波ビームの屈折が原因であることがわかった。また、屈折の条件より超音波ビームの拡散の程度を予測できた。

キーワード：超音波探傷、円柱、配管、曲率、シミュレーション

## 1. はじめに

丸棒などの側面に探触子を設置した場合、平板に比べて超音波ビームが円周方向に、より広く拡散して伝搬することが知られている。この理由として、振動子が試験体と一部でしか接触しないために、あたかも線状の振動子を用いて探傷しているのと同じ状態になり、超音波ビームの指向性が鈍くなることがあげられている。しかし、定量的な解釈は示されていない<sup>(1)(2)</sup>。

小口径配管などの探傷手法を検討するには、曲率面を伝達した超音波の音場を把握することが重要であると考え、数値シミュレーションを活用した検討を行ったので報告する。

## 2. 円柱試験体の垂直探傷

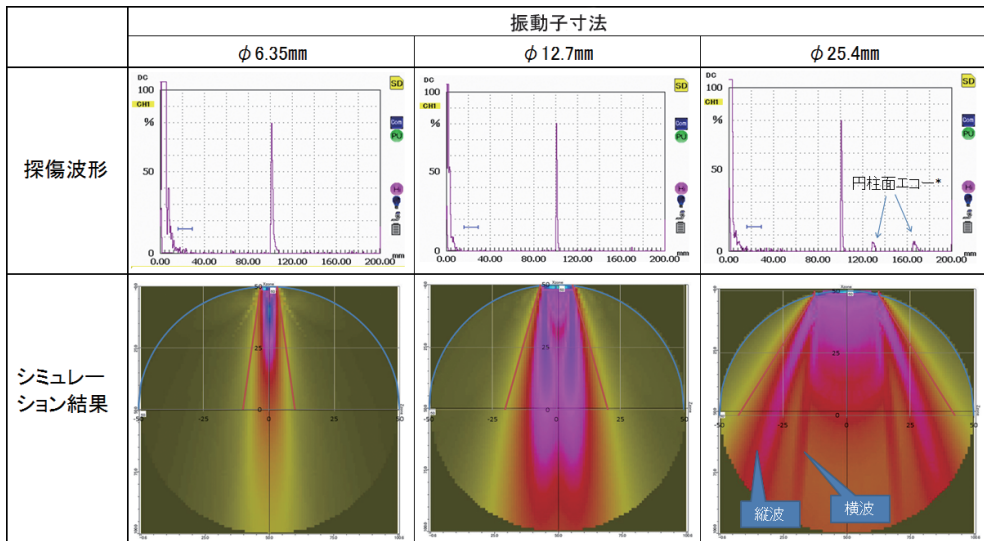
直径 100mm の円柱試験体の側面から、周波数 5MHz で、振動子寸法  $\phi$  25.4mm、 $\phi$  12.7mm および  $\phi$  6.35mm の垂直探触子を用いて、グリセリン

を接触媒質として垂直探傷を行って得られた探傷波形を図 1 に示している。超音波ビームが広がるために側面で二度反射して戻る円柱面エコー（図 1 の下部参照）の発生の様子は、振動子寸法に著しく依存することが明らかである。すなわち、最も大きな振動子寸法  $\phi$  25.4mm の場合、直径 100mm 丸棒の底面エコーのビーム路程の 1.3 倍、1.7 倍の位置に円柱面エコーを明確に確認できる。一方、最も小さな直径 6.35mm の振動子では、円柱面エコーの確認は難しい。なお、周波数 2.25MHz と変えても、5MHz の場合と傾向は同じで、大きな振動子寸法のほうが円柱面エコーを明確に確認できた。

試験結果は、振動子寸法が大きいほうが指向性は鈍くなることを意味しており、平板での指向性を表す一般式（指向角は振動子寸法に半比例する）とは矛盾するものである。このため、シミュレーションを用いて、円柱面内の音場がどのようになっているのかを観察した。観察結果を図 1 に

\*1：フェロー 工学博士

\*2：研究開発センター 研究開発グループ



\* 円柱面エコー: 円柱面からの垂直探傷で、断面内を三角形(右図)や星型五角形などの経路で伝搬した超音波によって第一底面エコーよりも遅れて現れるエコー

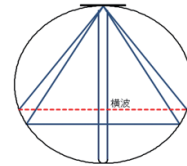


図1 直径 100mm の円柱試験体を側面から各種サイズの 5MHz 垂直探触子で探傷したときの探傷波形 (A スコープ) と、シミュレーションによる超音波ビームプロファイル (接触媒質: グリセリン)

探傷波形と比較して示している。シミュレーションには Civa 2016 ソフトを用いた。

シミュレーションの結果も、明らかに振動子寸法の大きいほうが、曲率面を通過後の超音波ビームの広がり大きいことを確認できる。また、振動子寸法  $\phi 25.4\text{mm}$  のシミュレーション結果には、強い超音波ビームが異なる方向に二本進行しているのが注目された。この方向の異なる二つの超音波ビームのモードを確認するために、シミュレーションで縦波および横波だけの解析を行った。この結果、二つの強い超音波ビームは縦波と横波であることがわかった。

垂直探傷における横波の発生は、単に接触面が線状に狭くなるために超音波ビームが拡散するとの説明からは理解できない現象である。このことは、接触媒質部が凹面のレンズの役割を果たして超音波の屈折が起こり、この折に横波も発生する

ことを示唆している。図2に、振動子の端部における超音波ビームの屈折の様子を模式的に示した。ここでの超音波の入射角と屈折角は、超音波が円柱試験体に入射した位置における円柱中心に向かった法線に対する角度となる。

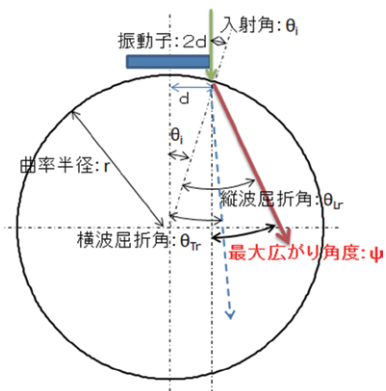


図2 前面平坦な垂直探触子を円柱試験体側面に設置したときの探触子端部における超音波の円柱試験体への入射および屈折の関係

図3は、前面平坦な探触子が円柱試験体と接する位置からの距離  $d$  に対する試験体への入射角を求めた結果（超音波が振動子の面に垂直に送信されて試験体に入射すると仮定している）や、その入射角における縦波および横波の音圧往復通過率も示している<sup>(3)</sup>。このときの音圧往復通過率は、水から鋼へ超音波が斜め入射するときの結果を用いている。例えば振動子寸法が  $\phi 25.4\text{mm}$  などと大きくなると、振動子の端部では横波がかなり強く試験体内に伝達することが理解できる。

また、図1の振動子寸法  $\phi 25.4\text{mm}$  のシミュレーション結果で見られた縦波と横波の進行方向は、スネルの法則で関連付けられることも確認した。

なお、図2における最大広がり角 ( $\psi$ )（中心軸に対する傾き角）を求めて、図1のシミュレーション結果に図示しているが、数値シミュレーションで求めた音場における超音波ビームの拡散は、ほぼこの最大広がり角 ( $\psi$ ) に一致しているといえる。

また、横波の発生を確認するために、グリセリンペーストを接触媒質として、5MHzで振動子寸法  $\phi 25.4\text{mm}$  の垂直探触子を直径 100mm の円柱試

験体に接触させ、反対側の円周面に 5MHzで  $10 \times 10\text{mm}$  の横波振動子を接触させて透過法で試験した。結果を図4に示すが、円周方向に振動方向を持つ横波の発生が確認され、振動方向からも円周面で屈折が起こり、横波も発生したものと考えられる。

これより、円柱試験体の側部から入射した超音波ビームが円周方向に広がりを持つ現象は、試験体表面の曲率による屈折が主な原因であると判断できる。一方、屈折は界面を構成する二つの音速比に依存する。このことは、用いる接触媒質や、円柱試験体と同じ曲率をつけたシューを用いた場合などで、試験体内部の音場が変化することを意味している。

接触媒質に水およびグリセリンを用いた場合、および円周と同じ曲率で加工した樹脂製のシューを用いた場合の、探傷波形およびシミュレーション結果の例を図5に示している。ここでは、探傷周波数 2.25MHzで振動子寸法  $\phi 25.4\text{mm}$  の場合を示しているが、明らかに試験体内部の音場に变化が生じることがわかる。すなわち、試験体との音速比の小さい曲率付の亚克力樹脂くさびを用

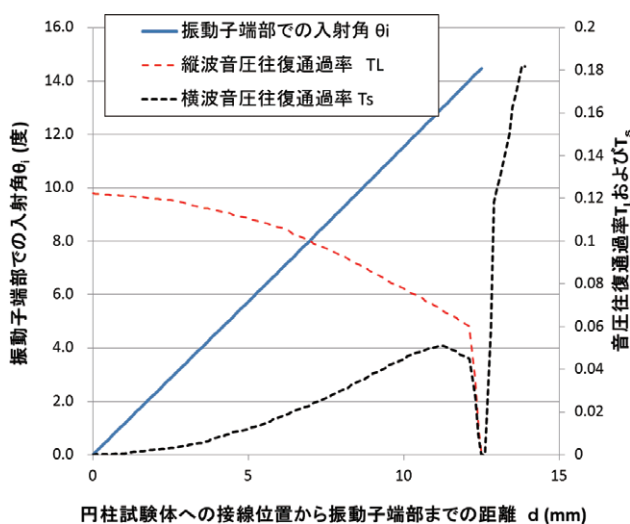


図3 前面平坦な垂直探触子を直径 100mm の円柱試験体側面に設置したときの振動子端部における超音波入射角および試験体内部への縦波と横波の音圧往復通過率に及ぼす振動子寸法の影響（接触媒質：水）

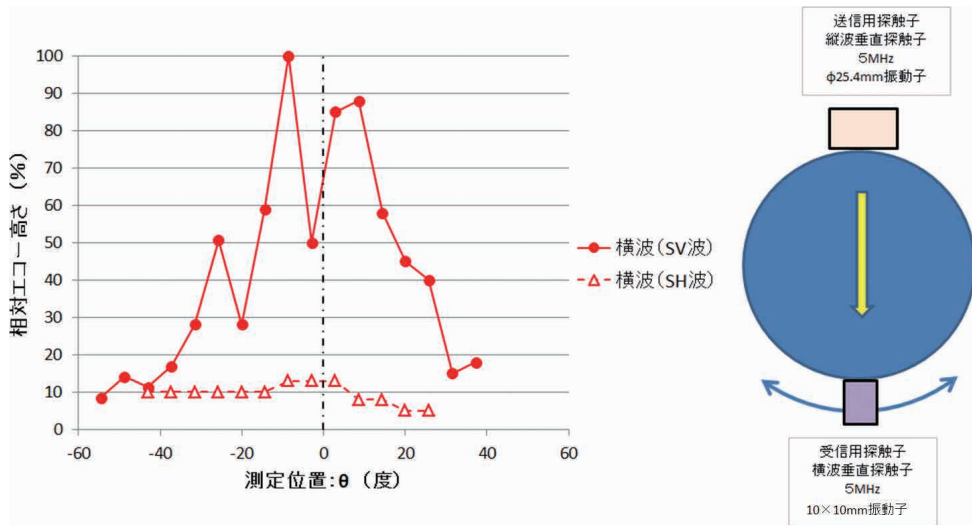


図4 前面平坦な縦波垂直探触子（振動子寸法：φ25.4mm）を直径100mmの円柱試験体側面に設置したとき（接触媒質：グリセリン）に、試験体内に伝達される横波の確認試験結果

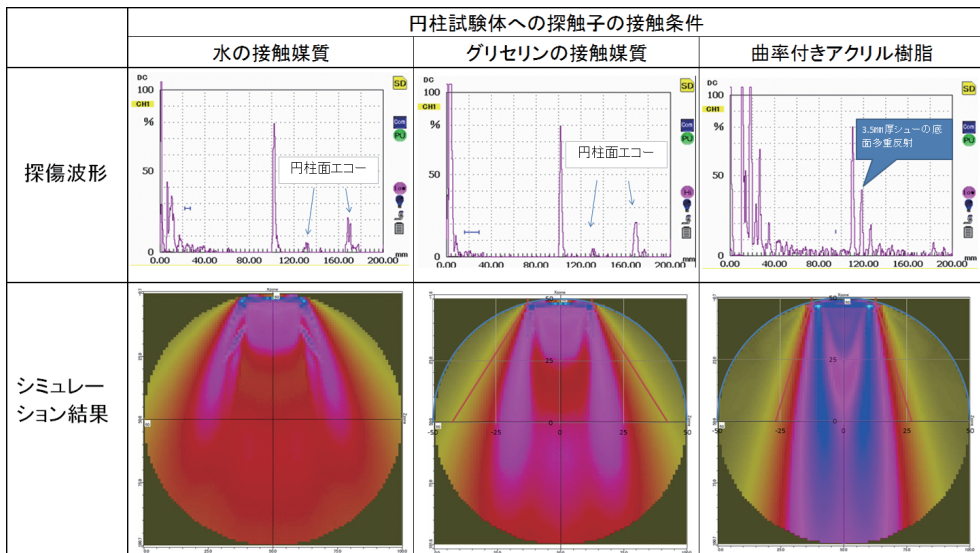


図5 直径100mmの円柱試験体を側面から垂直探触子（周波数：2.25MHz、振動子寸法：φ25.4mm）で探傷したときの、探傷条件の違い（水とグリセリンを接触媒質とした場合、および円柱面に合わせた曲率を設けたアクリル樹脂製のシューを用いた場合）による探傷波形（Aスコープ）およびシミュレーションによる超音波ビームプロファイルの比較

いた場合に超音波ビームの拡散が小さくなり、音速比の大きい水を接触媒質とした場合に円柱試験体内部のビームの拡散が大きくなっている。

### 3. 円柱試験体の斜角探傷

丸棒などの大きな曲率面を持つ試験体を探傷する場合には、曲率面での屈折を考慮する必要があることがわかり、このことは斜角探傷においても

同様である。曲率面の影響を小さくするには、試験体中の超音波の音速に近い材料をくさびに用いて、かつくさび前面に試験体と同じ曲率を設けて、探触子を試験体の曲率に密着させることが有効である。ここでは、アクリル樹脂をくさび材料とし、直径 45mm の円柱試験体に、くさび表面にも同じ曲率を設けて接触させて探傷する場合についてシミュレーションを用いて検討した。

このときの振動子には、5MHz で曲率が 50mm および 30mm で、かつ直径 10mm、15mm、20mm の点集束探触子の適用を検討した。シミュレーションではさらに、くさび内距離を 10mm、15mm、20mm、25mm および 30mm として計算を行った。それぞれのシミュレーション結果より、円柱試験体位置で最も音圧の高い位置での音場シミュレーション結果より、円周方向のビーム幅を測定した。

一方、同様の探傷条件での平板試験体中でのビーム幅も測定し、円周面でのビーム幅との比を求めて、曲率面による影響を評価した。なお、今回の評価では、最大エコー高さから 1/2 (-6dB) の位置に当たるエコー高さの幅をビームプロファ

イルより求めてビーム幅とした。

一方、試験体表面におけるビーム幅も求めた。試験体表面のビーム幅は、アクリル樹脂中のビームプロファイルをシミュレーションで求め、それぞれの探傷におけるくさび内距離におけるビーム幅を、最大エコー高さの 1/2 (-6dB) のビーム幅を求めた。

図 6 に、円柱試験体のビーム幅と平板試験体のビーム幅の比に対する、曲率面表面におけるビーム幅の関係を求めた結果を示している。両者の関係に極めてよい相関があり、曲率面におけるビーム幅が大きくなるほど、平板試験体に対する円柱試験体のビーム幅の比率が大きくなり、ビーム幅が円周方向に広がり扁平な音場になっていくことがわかる。

表面のビーム幅が大きくなると、端部における円柱試験体への入射角が大きくなり、屈折角がさらに大きくなるのが原因である。このことよりも小口径配管などの大きな曲率面の探傷では、曲率面に当たるときの超音波ビームの広がりに配慮する必要があるといえる。

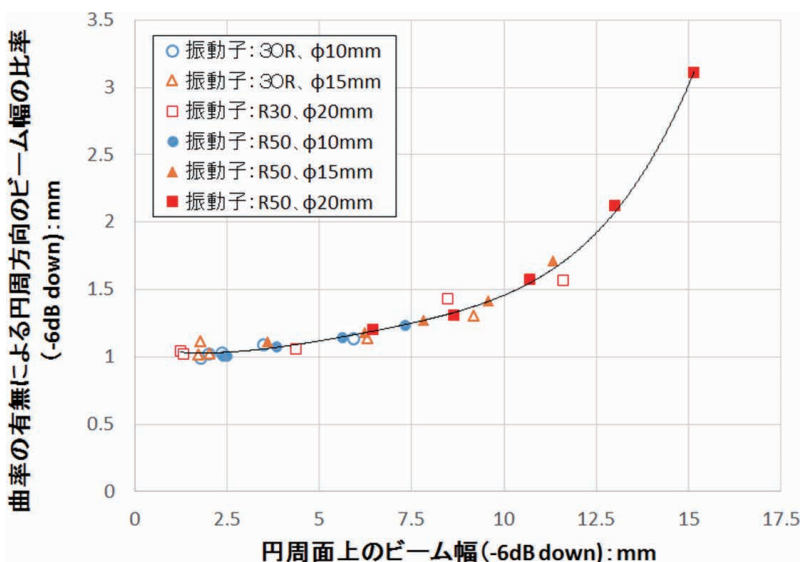


図 6 外径 45mm 配管の各種集束探触子でのビームの広がりに及ぼす試験体への超音波入射位置でのビーム幅の影響



#### 4. まとめ

円柱試験体などの側面からの探傷で、ビーム幅が広がるのは、一般に探触子が試験体に線状に当たったためにあたかも幅の狭い振動子による探傷と同様に指向性が鈍くなるためとされてきた。しかし、本試験の結果より、曲率面で起こる屈折がより重要な役割を果たしていることが明らかになった。すなわち、振動子が大きくなると、振動子の端部において円柱試験体への入射角が大きくなり、試験体中での屈折角も大きくなる。この結果、振動子寸法が大きいほうが円柱面エコーを明瞭に観察でき、また端部においてモード変換による横波も発生することが明らかになった。

すなわち、超音波が試験体に入射する試験体表面位置における超音波ビーム幅が大きいほど、また試験体界面を構成する二つの物質の音速比が大きいほどビームの広がりが大きくなることがシミュレーションの結果より明らかになった。

#### 参考文献

- (1) 超音波探傷試験問題集、一般社団法人日本非破壊検査協会、1994、p.129、133
- (2) 溶接構造物の試験・検査、一般社団法人日本溶接協会、2008、p.299
- (3) [非破壊検査技術シリーズ] 超音波探傷試験Ⅲ、一般社団法人日本非破壊検査協会、2001、p.29



フェロー  
工学博士  
荒川 敬弘

TEL. 045-791-3550  
FAX. 045-791-3555



研究開発センター  
研究開発グループ  
福本伸太郎

TEL. 045-791-3522  
FAX. 045-791-3547



研究開発センター  
研究開発グループ  
大庭 勇輝

TEL. 045-791-3522  
FAX. 045-791-3547