

シミュレータによる超音波伝搬の可視化

Ultrasonic Visualization by Simulator

田中 雄介 大平 克己 小倉 幸夫
Yuusuke Tanaka Katsumi Ohira Yukio Ogura

ジャパンプローブ株式会社 Japan Probe Co., Ltd.

講演概要

本論文ではシミュレータ「SWAN21」により、超音波伝搬を可視化したことについて報告する。例として、TOFD 法やエッジ波、水中の針先端検出についてシミュレーションを行い、それぞれの現象について考察した。TOFD 法では縦波、横波を可視化し、受信波形を解析した。エッジ波は直接波の外側、内側で位相が逆になっていることを観測した。水中の針先端検出では針の検出原理について考察した。

KEYWORDS : Ultrasonic, Simulator, TOFD, Edge Wave, Needle Tip Detection

1. 緒言

超音波に関する現象として反射や屈折、回折などが生じるが、伝搬が見えないので実際にどのような現象が起きているかを確認することができない。ガラスなどの透明な物体では超音波可視化装置で伝搬を観測できるが、金属など不透明の物体では伝搬を観測できない。例えば、TOFD 法などで金属を超音波が伝搬するとき縦波、横波が反射、屈折のたびにそれぞれ発生するが、受信波形にはそれらの信号が全て含まれており、きずから発生している超音波がわかりにくい。そこで我々は中畑らの提案している有限積分法(FIT: Finite Integration Technique)による超音波伝搬シミュレータ「SWAN21」を開発し、超音波伝搬を可視化した。それにより、TOFD 法における縦波や横波、エッジ波や水中の針先端からの信号について調査したので報告する。

2. TOFD 法

まず TOFD 法において超音波伝搬を可視化した。シミュレーションモデルは図 1 の通りである。各材料定数を表 1 に示す。探触子に以下の式(1)の波形を入力した。

$$y = -\cos(2\pi ft)(1 - \cos(2\pi ft/n)) \quad (1)$$

f:周波数、t:時間、n:波数で、このシミュレーションでは f:5MHz、n:2 とした。送信探触子からくさび、鋼に超音波が伝搬し、くさびと鋼の境界で図 2 のように屈折が起こる。屈折の際に縦波(LW1)、横波(SW1)がそれぞれ発生し、きず端部に到達する。また、屈折した超音波の一部は鋼表面付近を通過し、直接受信側に到達する。次に図 3 のようにきず端部から縦波と横波の端部エコー(TE1、TE2)が発生する。また、鋼上部は縦波(LW1)が伝搬する。端部エコーが受信探触子側のくさびに到達すると、鋼とくさびの境界で送信のときと同様に屈折が起こる。図 4 のようにくさび内で縦波(LW2)と横波

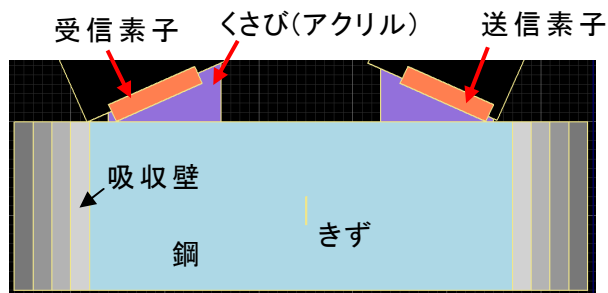


Fig.1 TOFD technique simulation model.

Table 1 Material constants.

	密度[10 ⁴ kg/m ³]	縦波音速[m/s]
アクリル	0.12	2730
鋼	0.78	5920

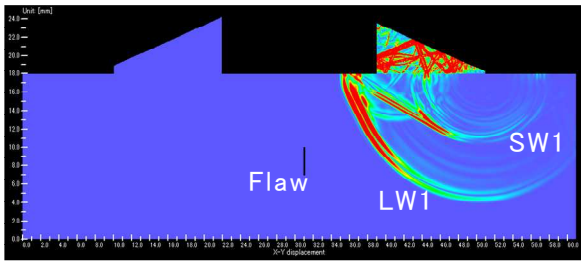


Fig.2 TOFD propagation (2.69[μs]).

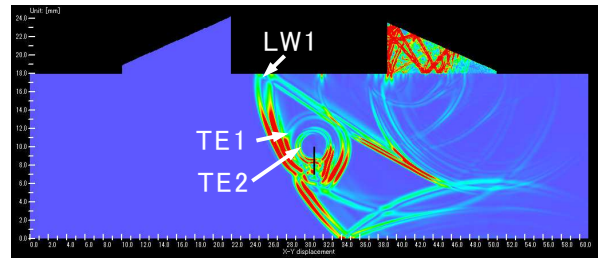


Fig.3 TOFD propagation (4.49[μs]).

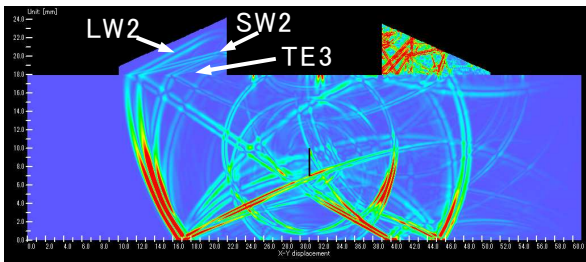


Fig.4 TOFD propagation (6.83[μs]).

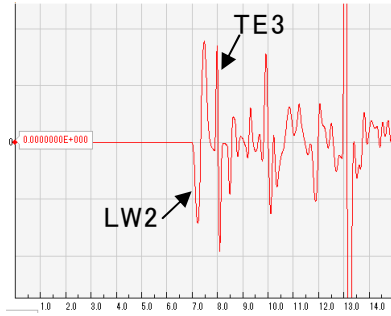
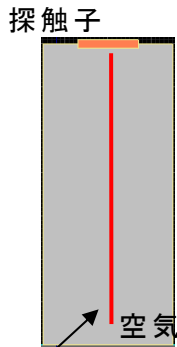


Fig.5 Waveform of receiving signal.



Observing points
Fig.6 Edge wave simulation model.

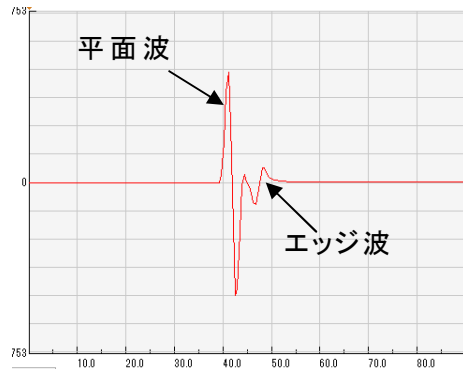


Fig.7 Waveform of planer wave and edge wave (D: 13[mm]).

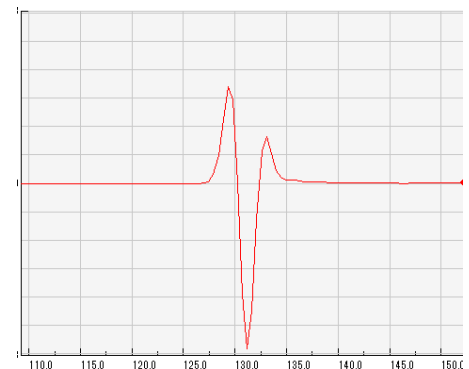


Fig.8 Waveform of planer wave and edge wave (D: 43[mm]).

(SW2)が発生し、それぞれが受信側の探触子に到達する。一番初めに受信側の探触子に到達するのは図3より直接受信側に到達する縦波である。次にきずからの縦波端部エコー(TE3)が受信側に到達する。

受信側探触子の受信波形を図5に示す。図3、図4の伝搬画像より、最初の信号が直接受信側に到達する縦波、次の信号がきずからの縦波端部エコーである。このように超音波伝搬を画像化して時間変化を確認することで TOFD 法の受信信号を解析することができる。

3. エッジ波

次にエッジ波の伝搬を可視化した。エッジ波は平面波の外側と内側に発生する球面状の超音波で、平面波の外側は平面波と同位相、内側は平面波と逆位相になる。図6のモデルでエッジ波の伝搬を可視化し、探触子中心軸上の振幅を観測した。モデルは空気の上部に幅14mmと20mmの2種類の探触子を配置し、探触子中心軸上に波形観測点を配置した。波形観測点は探触子幅14mmで距離0mmから90mm、探触子幅20mmで0mmから110mmまで1mm間隔で配置した。探触子に式(1)の波形を入力し、 $f:0.3\text{MHz}$ 、 $n:2$ とした。内側エッジ波は平面波と逆位相であるので図7のように探触子中心軸上の観測点ではそれぞれ逆位相の波形が観測される。よって、それぞれの経路差が波長の半分になったとき平面波とエッジ波が図8のように強め合う。平面波の伝搬経路と内側エッジ波の伝搬経路を図9のように仮定すると、エッジ波の経路は図9のE、直接波の経路は図9のDでE-Dが $\lambda/2$ になる場所が平面波とエッジ波が強め合う点である。計算すると以下の式(2)の通りである。

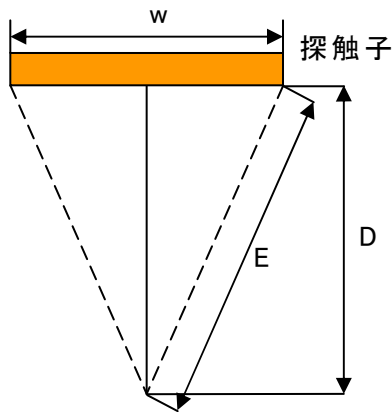


Fig.9 Propagation route of edge wave and planer wave.

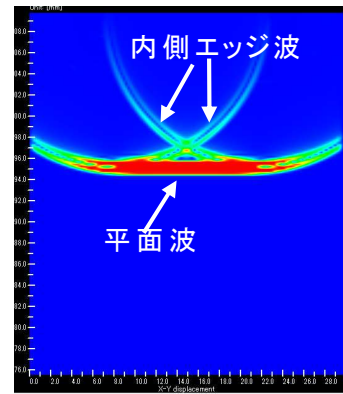


Fig.10 Propagation route of edge wave and planer wave.

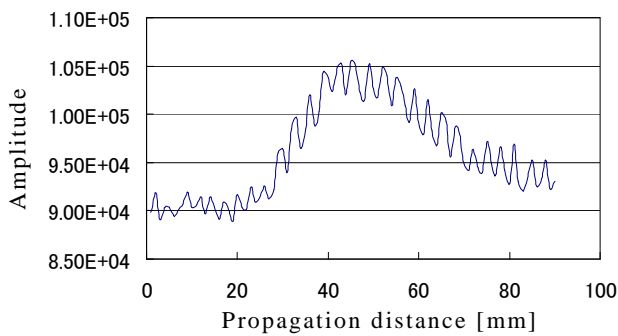


Fig.11 Distance and amplitude (14mm width probe).

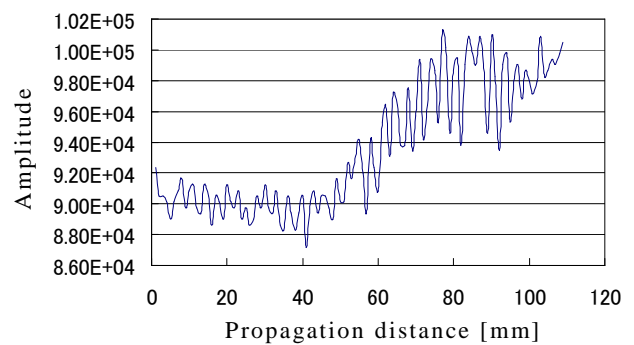


Fig.12 Distance and amplitude (20mm width probe).

$$D = - 1 / 4 (w^2 / \lambda - \lambda) \quad (2)$$

D : 直接波とエッジ波の合成位置、探触子前面からの距離 w : 探触子の幅 λ : 超音波の波長

図 10 にエッジ波の伝搬画像を示す。平面波と内側エッジ波が可視化され、また中心軸上では左右の内側エッジ波が合成されて振幅が大きくなった。伝搬距離が短いときは平面波と内側エッジ波が分離しているが、伝搬距離が長くなると平面波と内側エッジ波が重なった。図 11、図 12 に探触子幅 14mm、20mm における探触子中心軸上の距離と振幅の関係を示す。空中超音波において、周波数 0.3MHz で波長が 1.13mm である。これを式 2 で計算すると幅 14mm のときは直接波とエッジ波の合成位置 D が 43mm、幅 20mm のときは D が 88mm となった。平面波とエッジ波が重なり、振幅が大きくなった範囲は探触子幅 14mm のとき D が 40mm から 55mm、20mm のとき D が 80mm から 100mm だった。これらの結果より、式(2)の近辺で振幅が大きくなったことがわかる。よって、エッジ波を可視化し平面波との合成を確かめることができた。

4. 水中の針先端検出

針先端を観測しながら穿刺するための貫通型探触子が研究されており、前方の針先端を超音波で観測する。シミュレーションモデルの図 13 のように水中に先端角度 10° の針を 15mm 挿入し、左側の探触子だけ駆動する。針の左右、探触子から深さ 7mm のところに観測点 A と B をそれぞれ設定した。探触子に式(1)の波形を入力し f:7MHz、n:2 とした。針の密度は 7930kg/m³ とし、表 2 のように 4 つの条件で音速を変化させて針先端からの信号を観測した。まず条件 1 でシミュレーションした。条件 1 は SUS304 と同様の数値である。超音波の伝搬画像を図 14 に示す。針先端からの超音波が返ってきている様子がわかった。次に条件 2 でシミュレーションをした。条件 2 は針の部分を真空状態にして針の中に超音波が伝搬しないようにした。条件 3、条件 4 ではステンレスの縦波、横波の音速のみを設定し、縦波、横波のどちらが針先端検出に寄与している

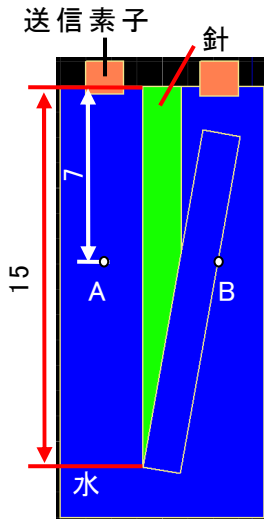
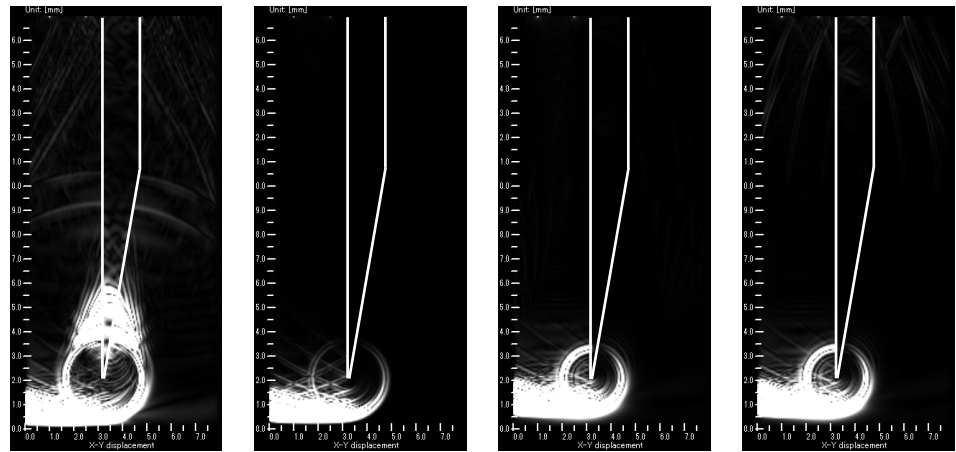


Fig.13 Simulation model.



(a)条件 1 (b)条件 2 (c)条件 3 (d)条件 4

Fig.14 Propagation image of condition 1 to 4.

かを調べた。

図 14 に各条件における針先端検出のシミュレーション画面を示す。条件 1 の針を SUS304 に設定したとき針先端から振幅の大きな信号が観測された。逆に条件 2 の針が真空状態では信号が小さかった。条件 3、4 の縦波のみと横波のみを針に設定した場合でも針先端からの信号が観測された。

表 3 に各条件における観測点 A と B の振幅を示す。観測点 A の振幅は条件 1 では 2.12×10^{-2} であるが、条件 2 では 2.68×10^{-5} と 3 桁振幅が小さくなった。条件 3 と 4 でも条件 1 に比べて 1 桁振幅が小さくなった。観測点 A における受信までの時間を比較すると条件 1 では $13.52 \mu\text{s}$ 、条件 2 では $15.48 \mu\text{s}$ 、条件 3 と 4 では $15.53 \mu\text{s}$ だった。

これらの結果から、針先端の検出には針の縦波と横波の両方が寄与していることがわかる。したがって、水中から針先端付近で超音波が針の内部に入射し、針先端で反射した後、針から水中へ超音波が伝搬することで先方の針先端を検出できていると考えられる。単純に縦波、横波だけで針先端を検出していないことから、針先端付近でガイド波が発生していると推測できるが、今後さらにシミュレーションを行い検討する。

5. まとめ

超音波伝搬シミュレータ「SWAN21」により、3 例の超音波伝搬を可視化した。TOFD 法では屈折、端部エコーや反射が起こる度に縦波、横波がそれぞれ発生していることを確かめた。エッジ波では平面波と内側エッジ波が探触子中央で強め合う点があることを確かめた。水中の針先端検出では針先端の検出について、針の縦波、横波が検出にそれぞれ寄与しており、針先端付近で水中から針へ超音波が入射していることを調べた。

Table 2 Analysis conditions.

条件	縦波音速[m/s]	横波音速[m/s]
1	5780	3100
2	0	0
3	3100	3100
4	5780	5780

Table 3 Simulation results.

条件	観測点Aの 振幅	観測点Bの 振幅	受信時間 [μs]
1	2.12E-02	1.87E-02	13.52
2	2.68E-05	3.12E-05	15.48
3	1.55E-03	1.16E-04	15.53
4	1.50E-03	1.11E-04	15.53