

3-3

穿刺用超音波探触子を用いた垂直穿刺における 針先端検出原理

—シミュレーションと実験でのガイド波による考察—

Detection principle of needle tip using ultrasound
probe for vertical punctures:

A simulation and experimental analysis by ultrasound
guided wave

○田中 雄介 田中 克彦
Yuusuke Tanaka Katsuhiko Tanaka

ジャパンプローブ株式会社 Japan Probe Co., Ltd.
立命館大学 Ritsumeikan University

講演概要

一般に超音波ガイド下穿刺では超音波送信方向に対して斜めから穿刺しており、これには高い技術が要求されるため超音波送信方向と同じ方向での穿刺技術が求められている。超音波送信方向と同じ方向に穿刺する垂直穿刺はこれまでに検討されてきたが、針先端検出原理が説明できていない。そこでシミュレーション、実験において針先端検出原理を考察し、針先端で発生するガイド波で位相の変化、針先端角度と検出強度の違いを説明した。

KEYWORDS : 超音波、穿刺、ガイド波、先端検出、探触子

1. 緒言

医療分野では患部と針の位置を観測しながら穿刺する超音波ガイド下穿刺が実施されている。Aモードガイド下の穿刺はBerlyneにより腎臓生検で実施された[1]。この時は呼吸による腎臓の厚さ変化を計測するだけで針先端は検出されていない。穿刺時の針先端検出はKratochwilら[2]、Goldbergら[3]、Holmら[4]、Itohら[5]により中央に貫通孔のある超音波探触子を用いて、Aモード画像上で針先端を観測しながら穿刺した。上記の研究では羊水穿刺や体液吸引、肝臓や膵臓の穿刺が報告されている。しかし、針先端の検出原理について言及されていない。現在の超音波ガイド下穿刺は穿刺アタッチメント付きリニアアレイ探触子[6]によりBモード画像上から斜めに穿刺されている。内視鏡でも超音波ガイド下で穿刺されており、超音波ガイド下穿刺吸引術(EUS-FNA, Endoscopic Ultrasound-guided Fine Needle Aspiration)で専用の超音波探触子を用いて患部を斜め方向に穿刺する。前方視EUS-FNAも提案されており、穿刺が容易で[7]、成功率や施術時間も優れている[8]。従って、探触子の向きや超音波の送信方向、穿刺方向が一致する垂直穿刺は成功率向上や施術時間短縮が期待できる。垂直穿刺を最適化するためには針先端検出原理を解明する必要があるが、Goldbergにより超音波ビームの断面積変化で説明されているが[9]、位相変化など説明できないことがある。これまでにエッジ波により針先端検出原理を説明した[10][11]。エッジ波では位相変化は説明可能であるが、針先端角度と受信信号強度の関係は説明できない。そこで針先端付近で発生するガイド波に着目し、位相変化や針先端角度と受信強度の関係を分析した[12]。本稿では水中で条件を変えてシミュレーションし、超音波伝搬と受信波形から針先端で発生するガイド波により垂直穿刺における針先端検出原理を説明したことを述べる。

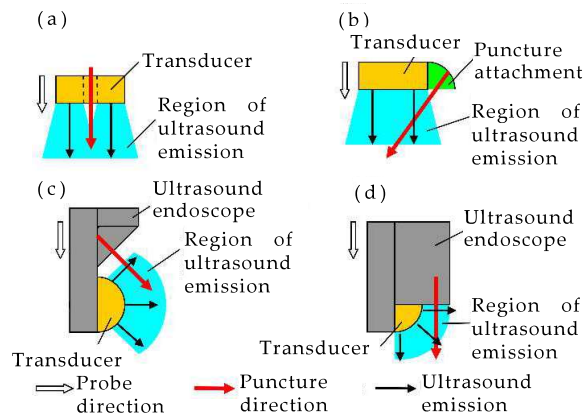


Figure 1. Directions of probes for puncture: probe direction, puncture direction and region of ultrasound imaging. (a) Simple probe with through-hole; (b) linear array with puncture attachment; (c) oblique-view endoscopic ultrasound-guided fine needle aspiration (EUS-FNA); (d) forward-view EUS-FNA.

2. 穿刺方向と超音波画像

穿刺時に超音波探触子の移動方向、超音波の送信方向、針の穿刺方向の 3 方向が揃っていると穿刺しやすい。図 1 に超音波探触子の方向、超音波の送信方向、穿刺針の挿入方向、超音波の撮像領域を示す。垂直穿刺(図 1(a))ではすべての方向が同じである。穿刺アタッチメントを用いた斜め穿刺(図 1(b))ではプローブの方向と超音波送信方向は穿刺針の挿入方向と一致しない。斜め穿刺の EUS-FNA(図 1(c))では全ての方向が一致せず、前方視 EUS-FNA では超音波の送信方向と穿刺方向が異なる。従って、垂直穿刺を実施することで

対象位置への穿刺が容易になり、穿刺成功率向上や施術時間短縮が期待できる。垂直穿刺は近距離での感度低下[10]があるが、穿刺スペーサの装着により近距離での感度低下を軽減可能である[12]。垂直穿刺の最適化のために針先端検出原理を調べる必要があり、針先端角度や超音波振動子の配置を適切に設計することが求められる。

3. 垂直穿刺時の超音波伝搬

3. 1 針の有無による超音波伝搬の違い

垂直穿刺は中央に貫通孔またはスリットのある超音波探触子を用いて、貫通孔から針を挿入して穿刺する。超音波伝搬シミュレータ(イーコンピュート株式会社、SWAN21)により 2 次元のモデル化を行うと図 2(a)のようなモデルになる。水中に幅 1.5[mm]、先端角度

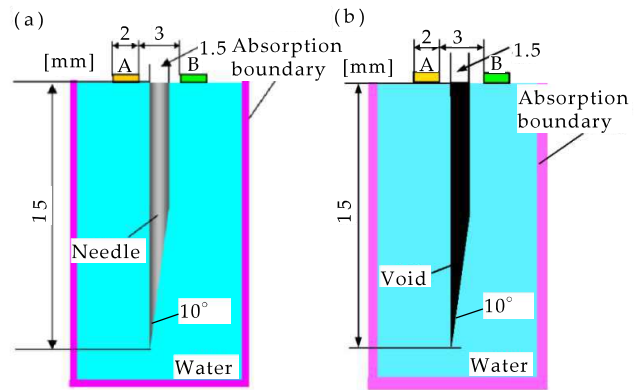


Figure 2. Two simulation models: a stainless needle and a void needle tip were inserted in water.

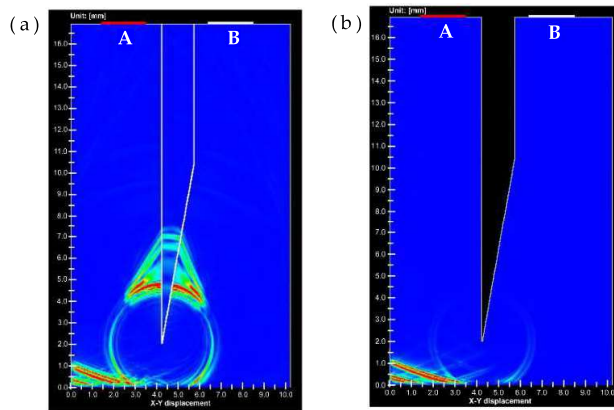


Figure 3. Simulation images of ultrasound propagation at the stainless and void needle tip.

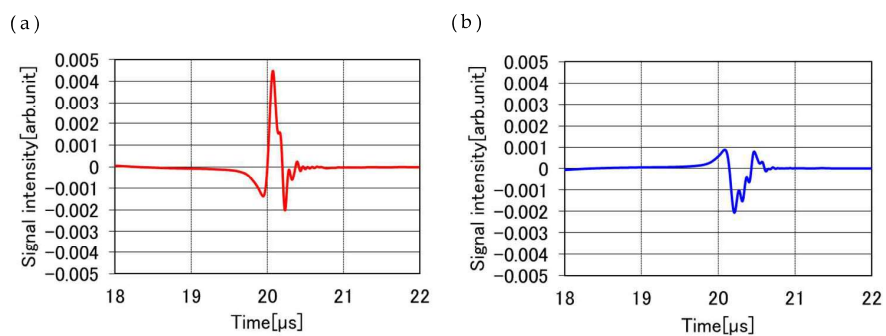


Figure 4. Received waveforms at A and B by stainless needle.

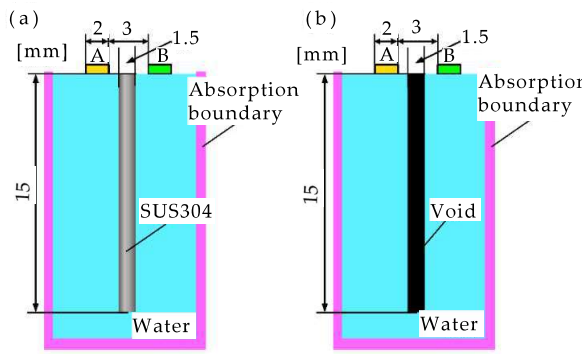


Figure 5. Two simulation models: a stainless cylinder and a void cylinder were inserted in water.

10°のステンレス針を深さ 15[mm]の位置に配置した。材料設定として水の密度を 1000[kg/m³]、音速を 1500[m/s]、ステンレスの密度を 7930[kg/m³]、縦波音速を 5780[m/s]、横波音速を 3100[m/s]とした。入力波形は以下の式

$$y = -\cos(2\pi ft) \left(1 - \cos\left(1 - \frac{2\pi ft}{n}\right) \right) \quad (1)$$

で y は表面力、 f は周波数、 t は時間、 n は波数である。周波数は 7[MHz]、波数は 2 とした。また、比較のために図 2(b)の針部分を空隙(真空)にしたモデルでもシミュレーションした。受信波形の位相を調べるため振動子 A 側から超音波を送信し、A 側と B 側でそれぞれ受信した。シミュレーションによる超音波伝搬結果を図 3 に示す。図 3(a)のステンレス針と図 3(b)の空隙では先端からの超音波の振幅が 100 倍程度異なり、ステンレス針では大きな超音波が針先端で発生した。受信波形は図 4 に示すように A 側と B 側で位相が異なった。次に図 5 に示す円柱モデルでステンレス、空隙の場合を比較した。入力波形などの条件は針モデルと同じである。図 6 に示す超音波伝搬結果では針モデルと同様にステンレス

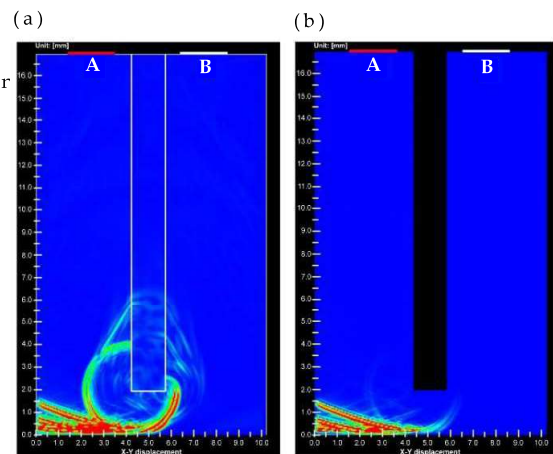


Figure 6. Simulation images of ultrasound propagation at the stainless and void cylinder.

で大きな超音波が発生し、受信波形は図 7 に示すように正ピーク p と負ピーク n が現れて位相が異なり、伝搬時間差が水中の円柱先端 1.5[mm]分の 1[μs]ある。空隙では先端で発生

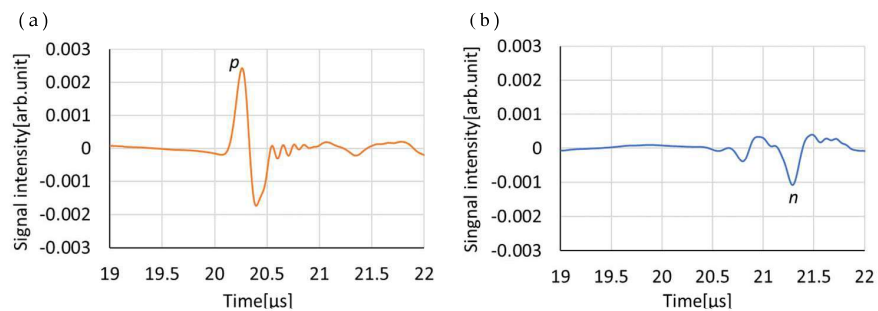


Figure 7. Received waveforms at A and B by stainless cylinder.

するエッジ波で A 側と B 側の位相変化が説明できるが[10][11]、エッジ波ではステンレス針の大きな振幅が説明できない。エッジ波は水中だけの現象であるが、ステンレス針の存在による振幅増大のため、ステンレス内での超音波伝搬を考える必要がある。そこでガイド波の発生に着目し、次節で述べる。

3. 2 ガイド波の発生と位相

ガイド波は薄い板に一定角度で入射したときに発生する波で、針先端の薄くなっている部分で発生すると考えられる。ステンレスの位相速

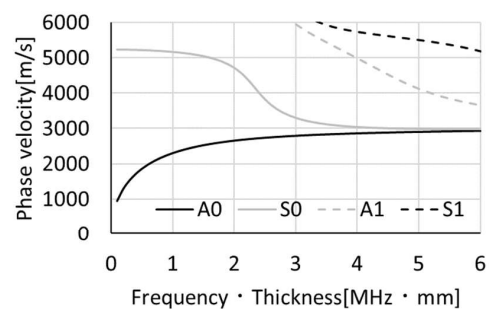


Figure 8. Dispersion curve of phase velocity.

度分散曲線は図 8 で示され、7[MHz]では厚さ 0.2-0.3[mm]程度で A0 モードガイド波が発生すると考えられる。位相速度を 2550[m/s]とし、厚さ 0.2[mm]のステンレス板に入射角 36°で 7[MHz]の超音波を入射させる図 9 のモデルでシミュレーションした。波形の位相を比較するため波形出力点 A と点 B を設定した。水やステンレスの材料設定は前節と同様である。超音波伝搬を図 10 に示す。位相を表すため白を正振幅、黒を負振幅で表示した。また、点 A と点 B の波形を図 11 に示す。図 10 で、板の左右で位相が逆転、図 11 から波形でも点 A と点 B の位相が逆転しており、ガイド波の漏洩方向により位相が逆になることがわかる。従って、針先端からの信号で図 2(a)の針を回り込む信号(B 側)と送信側に戻る信号(A 側)で位相が逆になることはガイド波により説明できる。

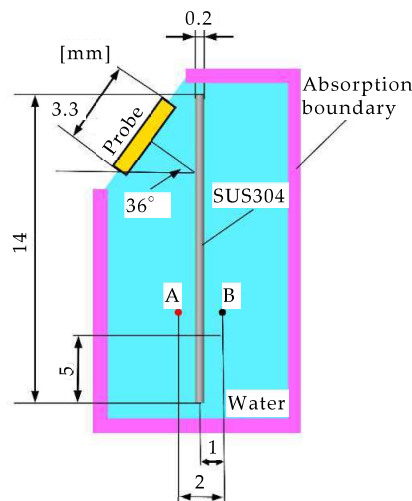


Figure 9. Simulation model of for ultrasound guided wave.

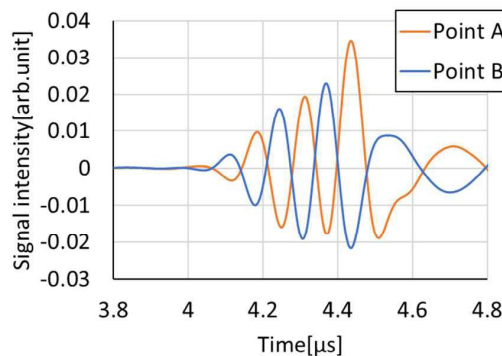


Figure 11. Received waveforms at point A and B in Figure 9.

また、図 5(a)の円柱モデルでも円柱先端の角部分でガイド波が発生したとすると、図 12 のように送信部の A 側へ戻る信号 1 が送信信号と逆位相、円柱先端部へ漏洩する信号が送信信号と同位相、B 側の角で発生したガイド波が B 側へ漏洩する信号 2 は送信信号と同位相になり、A 側と B 側で受信する信号が逆位相になる。

3. 3 ガイド波発生部分の長さや厚さ

次にガイド波が発生するステンレス部の長さや厚さを变化させたときのシミュレーションモデルを図 13 に示す。図 13(a)のように長さ 15[mm]のステンレス円柱で先端部 5[mm]の先端幅 w を 0.1 から 1.5[mm]に変化させたとき、図 13(b)のように先端幅 0.2[mm]で先端長さ l を 0.1 から 10[mm]まで変化させたときのそれぞれの場合に A 側で送信、A 側で受信した。先端幅 w を変化させたときの受信振幅を図 14 に示す。先端幅 w が 0.2[mm]で振幅が最大となり、0.5[mm]以上はほぼ一定の値となった。先端長さ l を変化させたときの受信振幅を図 15 に示す。先端長さ l

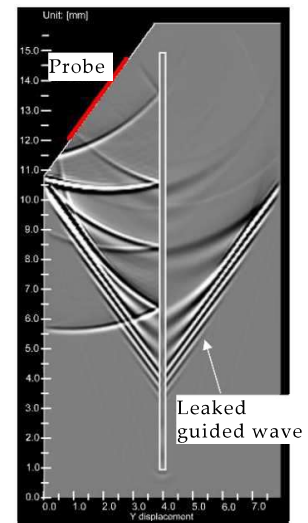


Figure 10. Ultrasound guided wave propagation.

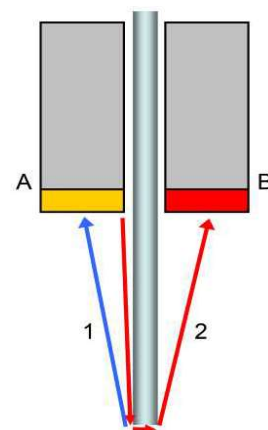


Figure 12. Propagation paths for cylinder.

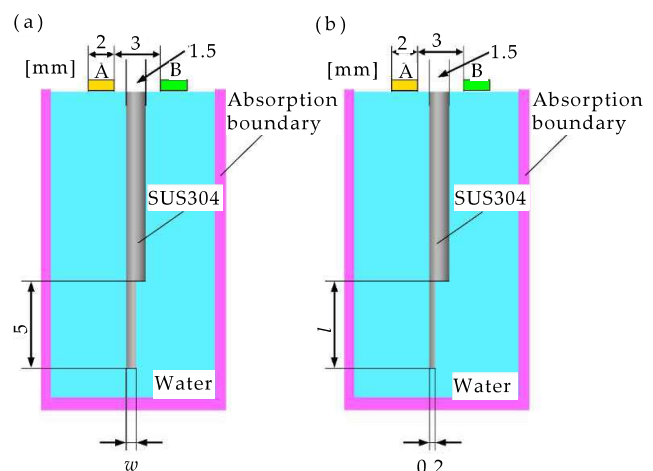


Figure 13. Simulation models for needle tip detection.

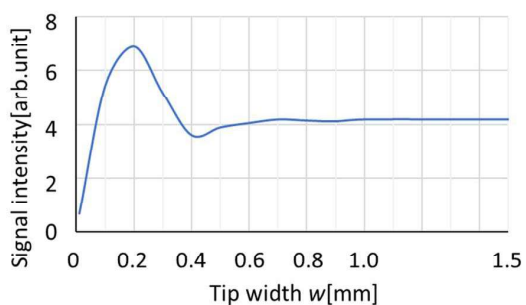


Figure 14. Relationship between tip width and signal intensity.

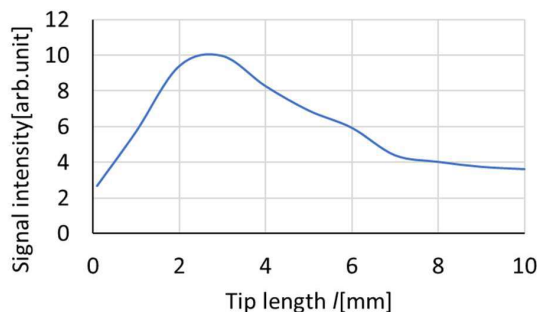


Figure 15. Relationship between tip length and signal intensity.

が 3 [mm] 付近で最大となり、それ以外では振幅が低下した。

3. 4 針先端角度と受信強度

次に針先端角度と受信強度の関係を調べた。シミュレーションでは図 2(a) のモデルで水中に 15 [mm] 挿入時の針先端角度を 1° から 40° まで変えたときの受信波形について A 側送信、A 側と B 側受信で評価した。実験では図 16 の分割型超音波探触子を用いて A 側送信、A 側と B 側受信で評価し、針先端角度が 5°、10°、15°、20°、30°、40° の直径 1.5 [mm] ステンレス針を水中で 15 [mm] 挿入したときの受信波形で評価した。パルスレシーバはアイ・エス・エル製 KitPRAD2d を用いた。シミュレーション、実験結果を図 17 に示す。送信側(A 側)での受信信号は先端角度 5° から 20° まで振幅が大きく、反対側(B 側)での受信は 10° から 20° まで振幅が大きく、30° 以上は振幅が低下した。先端角度が 3° 以下ではシミュレーションでも振幅が低下した。

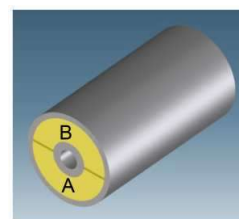


Figure 16. Ultrasound probe composed of separated transducers.

4. 針先端検出についての考察

針先端検出については図 3、図 6 の結果よりステンレス内部で発生する超音波により検出されている。位相変化は図 10、図 11 からガイド波の漏洩方向による位相変化で説明できる。先端幅 w と先端長さ l について図 18 に

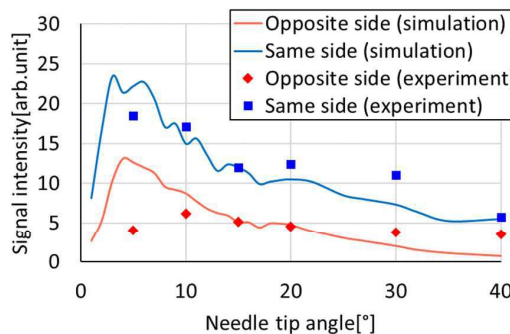


Figure 17. Needle tip angle and signal intensities received at the opposite and same sides.

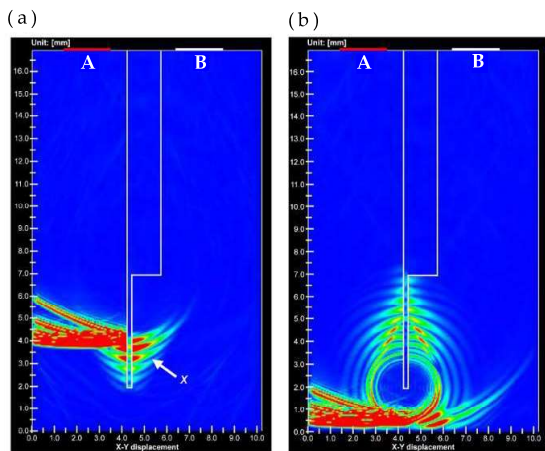


Figure 18. Ultrasound propagation at a 0.2-mm tip width: (a) before reflecting at the tip and (b) after reflecting at the tip.

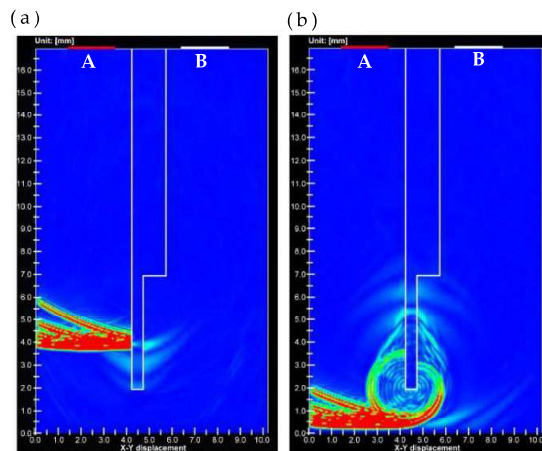


Figure 19. Ultrasound propagation at a 0.5-mm tip width: (a) before reflecting at the tip and (b) after reflecting at the tip.

$w:0.2[\text{mm}]$ 、 $l:5[\text{mm}]$ の場合の超音波伝搬を示す。図18(a)は先端反射前、図18(b)は先端反射後である。ガイド波が発生後に水中へ漏洩しながら伝搬しており、伝搬距離が長いとガイド波の漏洩で振幅が低下する。次に $w:0.5[\text{mm}]$ 、 $l:5[\text{mm}]$ の場合の超音波伝搬を図19に示す。図19(a)は先端反射前、図19(b)は先端反射後である。先端に到達するまでガイド波は発生せず円柱先端と同様の伝搬となり、先端幅 w が $0.5[\text{mm}]$ 以上は先端角部でガイド波が発生したと考えられる。また、図15から先端長さが短いとガイド波が発生せず、長いと漏洩量が多くなり振幅が低下する。従って、針先端角度が 10° から 20° でガイド波の発生量と漏洩量のバランスが取れて、振幅が大きくなったと考えられる。注射針の先端角度は 12° 、 15° 、 18° であるので、垂直穿刺では通常の注射針先端を特殊な加工なしで検出可能である。

5. 結言

超音波ガイド下の垂直穿刺における針先端は針先端付近で発生するガイド波により検出され、位相変化や針先端角度と受信強度もガイド波の漏洩方向や発生量、漏洩量により説明できることが明らかになった。

参考文献

- [1] Berlyne, G.M. Ultrasonics in renal biopsy. *Lancet* 1961, 1, 750–751.
- [2] Holm, H.H. Interventional ultrasound in Europe. *Ultrasound Med. Biol* 1998, 24, 779–791.
- [3] Goldberg, B.B.; Pollack, H.M. Ultrasonic aspiration transducer. *Radiology* 1972, 102, 187–189.
- [4] Holm, H.H.; Kristensen, J.K.; Rasmussen, S.N.; Northeved, A.; Barlebo, H. Ultrasound as a guide in percutaneous puncture technique. *Ultrasonics* 1972, 10, 83–86.
- [5] Itoh, K.; Yamanaka, T.; Kasahara, K.; Koike, M.; Nakamura, A.; Hayashi, A.; Kimura, K.; Morioka, Y.; Kawai, T. Definitive diagnosis of pancreatic carcinoma with percutaneous fine needle aspiration biopsy under ultrasonic guidance. *Am. J. Gastroenterol.* 1979, 71, 469–472.
- [6] Pedersen, J.F.; Percutaneous puncture guided by ultrasonic multitransducer scanning. *J. Clin. Ultrasound* 1977, 5, 175–177.
- [7] Kida, M.; Araki, M.; Tokunaga, S.; Yamauchi, H.; Okuwaki, K.; Miyazawa, S.; Iwai, T.; Takezawa, M.; Kikuchi, H.; Watanabe, M.; et al. Role of a forward-viewing echoendoscope in fine-needle aspiration. *Gastrointest. Interv.* 2013, 2, 12–16.
- [8] Matsuzaki, I.; Miyahara, R.; Hirooka, Y.; Funasaka, K.; Ohno, E.; Nakamura, M.; Kawashima, H.; Nukaga, A.; Shimoyama, Y.; Goto, H. Forward-viewing versus oblique-viewing echoendoscopes in the diagnosis of upper GI subepithelial lesions with EUS-guided FNA: A prospective, randomized, crossover study. *Gastrointest. Endosc.* 2015, 82, 287–295.
- [9] Goldberg, B.B.; Ziskin, M.C. Echo Patterns with an aspiration ultrasonic transducer. *Investig. Radiol.* 1973, 8, 78–83.
- [10] Tanaka, Y.; Ohira, K.; Ogura, Y.; Tanaka, K.; Shiomi, H.; Kurumi, Y.; Tani, T. Ultrasonic imaging of medical puncture using array probe. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2014, 53, 07KF26.
- [11] 田中雄介、高橋修、小倉幸夫、田中克彦；貫通型超音波探触子の基礎特性と針先端の検出；第20回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集；pp.11-16(2013).
- [12] Tanaka, Y.; Tanaka, K.; Shiomi, H.; Kurumi, Y.; Tani, T.; Ogura, Y. Needle Tip Detection Using Ultrasound Probe for Vertical Punctures: A Simulation and Experimental Study. *Diagnostics.* 2022, 12(2), 527.
<https://doi.org/10.3390/diagnostics12020527>