

厚みモード球面型凹面状圧電振動子の表面を伝搬する不要波についての検討

Consideration on spurious waveform propagating through the surface of the thickness mode spherical concave piezoelectric transducer

田中 祐介¹、竹内 真一¹

桐蔭横浜大学大学院工学研究科修士課程医用工学専攻

(2015年3月20日 受理)

1. はじめに

脳腫瘍の治療法には、外科療法、放射線療法、化学療法があるが、どれも治療する上で人体に様々な問題を起こす可能性がある^{1) 2)}。また近年、がんの治療に高密度焦点式超音波治療機器が用いられる。この治療は超音波の焦点に発生する熱によりがん細胞を凝固壊死させる。しかし、脳には生命維持に重要な器官や知的活動、記憶等を司る重要部分が密集して存在するため、これらの正常細胞を傷つけると障害を起こす可能性がある。そのため、周辺の正常細胞を傷つけることなく、脳腫瘍細胞のみを治療する必要がある。人体に対して低侵襲な治療法として注目したのが、超音波をピンポイントで照射して脳腫瘍細胞にアポトーシスを誘導し、能動的自壊を促すという方法である。我々は将来的に、集束型超音波を用いて経頭蓋的なアポトーシス治療^{3) 4)}^{5) 6)}の実現を目指す。

当研究室では、がん細胞への超音波照射の研究を目的として、焦点距離 100 mm の集束型超音波トランスデューサを使用している。

しかし、振動子についての詳細な研究は行われてこなかった。そのため、超音波照射用の圧電セラミックス振動子の性能評価を行うことで、生体に対してより安全な照射条件の検討を行う必要がある。現在、我々が実験に使用している球面型凹面状振動子では、レーザードプラ速度計 (LDV) を用いた測定の結果、厚み方向縦効果振動のボアソン効果により径方向振動が発生し、伝搬していることがわかった。確認された波形を Fig. 1 に示す。径方向の振動により、本来の焦点の手前に不要

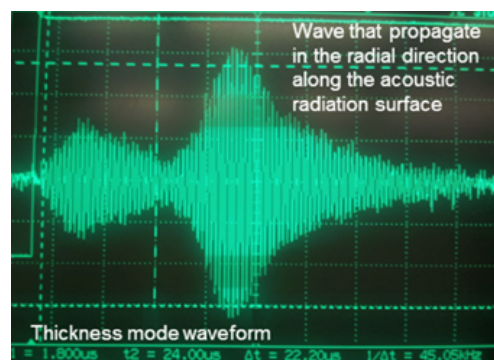


Fig. 1 LDVにより測定した振動子の音響放射面上における振動波形

Yusuke TANAKA¹, Shinichi TAKEUCHI¹

¹ Graduate School of Engineering, Department of Biomedical, Master Course, Toin University of Yokohama
1614 Kurogane-cho, Aoba-ku, Yokohama, Kanagawa, 225-8502, Japan

なもう一つまたはそれ以上の焦点を生成する可能性がある⁷⁾。径方向の振動による焦点は、正常な組織にも悪影響を与える可能性があるため危険である。そのため、本研究では、治療中に生体組織に悪影響を与える可能性のある径方向振動の抑制方法を検討し、人体に対して安全に使用できる超音波照射システムの検討として、球面型凹面状振動子の性能評価方法の確立を目指す。

球面型凹面状振動子の径方向振動による焦点を解析または観察するために①FDTD法 (Finite difference time domain method) による2次元音場シミュレーション、②ハイドロホン、超音波プローブによる集束超音波音場での音場分布の測定を行った。

2. FDTD法による2次元音場シミュレーション

2-1 FDTD法について

FDTD法は計算対象領域を規則的な格子に分割し、差分法を用いて微分方程式を変形して計算する解析方法である^{8) 9)}。構造が比較的単純であり、プログラム化が容易である。

Table 1 解析条件

シミュレーション範囲	縦：150 mm 横：200 mm
境界条件	四辺とも無限(無反射)
媒質	水 25℃

Table 2 送信側条件

駆動周波数	1.75 MHz
出力波形	連続正弦波
駆動モード	① 厚み方向駆動 ② 径方向駆動

Table 3 受信側条件

受信データ	音圧
測定距離	振動子から 20 mm ~ 120 mm
測定間隔	5 mm

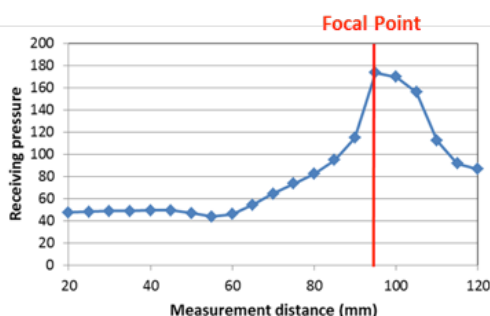
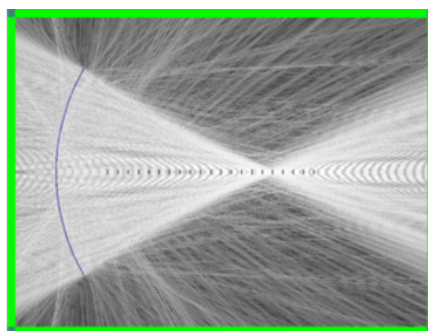


Fig. 2 厚み方向駆動時の超音波ビームと受信音圧の変化

2-2 Wave2000によるシミュレーション

球面型凹面状振動子の径方向振動による不要な焦点を観察するために、FDTD法に基づく音場シミュレーションソフト Wave2000¹⁰⁾ (サイバーロジック製) を使用して、水中での集束超音波ビームの二次元シミュレーションを行った。シミュレーションの設定項目は解析条件、送信側条件、受信側条件などがある。解析条件を Table 1 に示す。送信側条件を Table 2 に示す。受信側条件を Table 3 に示す。

シミュレーションの送信側駆動条件を①厚み方向駆動、②径方向駆動と変化させてシミュレーションを行った。厚み方向駆動、径方向駆動の際の超音波ビーム伝搬の様子と距離ごとの受信圧の変化をそれぞれ Fig. 2 および Fig. 3 に示す。

シミュレーション結果の受信音圧のグラフでは、厚み方向駆動の場合では 95 mm 付近に焦点と思われるピークを確認することができた。また、径方向駆動では振動子から 30 mm の点でピークを確認することができた。

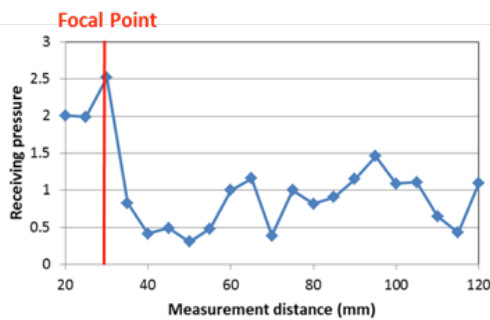
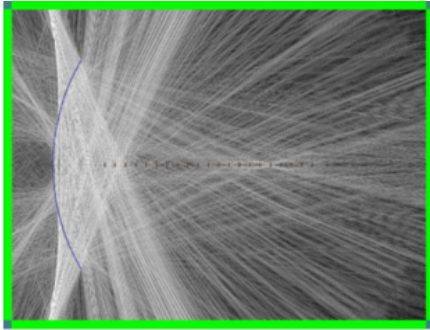


Fig. 3 径方向駆動時の超音波ビームと受信圧の変化

振動子から 30 mm でのピークは径方向振動による不要な焦点であると考えている。またこの時、径方向駆動の際のピークは厚さ方向駆動の際のピークの 1.4 % 程と大変低くなっていることが分かった。集束音場のシミュレーションでは、径方向振動による焦点は、厚み方向振動による焦点に比べて小さく、ほとんど影響しないことを明らかにした。しかし、2次元シミュレーションで不要な焦点のレベルが低くても、3次元の現実の状況で安全であるとは断言できないため、集束超音波ビームの受信音圧の測定を行った。

3. 水中での受信センサの出力電圧測定

3-1 測定に使用する直径の異なる受信センサ

球面型凹面状振動子の径方向振動による不要な焦点を観察するために、集束超音波ビームの受信音圧の測定を行った。測定に際して開口直径の異なるニードル型ハイドロホンや超音波プローブを用いて、出力電圧の測定を行った。

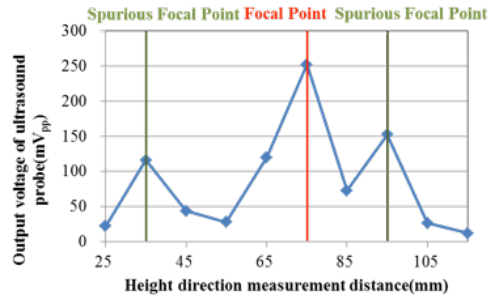


Fig. 4 直径 28.5 mm のプローブ (a) の出力電圧

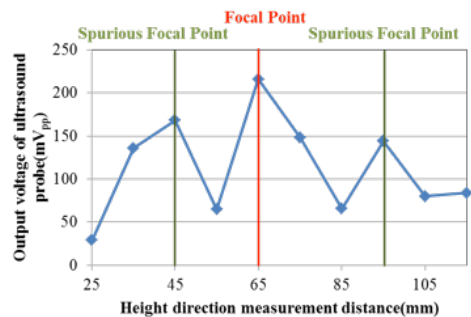


Fig. 5 直径 12.7 mm のプローブ (b) の出力電圧

超音波プローブは、周波数 1 MHz、開口直径 28.5 mm の超音波プローブ (a) (Harisonic 18-0118-R) と周波数 2.25 MHz、開口直径 12.7 mm の超音波プローブ (b) (Harisonic 13-0208-R) の 2 種類を使用した。ハイドロホンとしては、開口直径 2.5 mm の市販耐高音圧ハイドロホン (a) (ONDA HNR-1000) と当研究室で作製された開口直径 5 mm の耐音響キャビテーションハイドロホンであるハイドロホン (b) ¹¹⁾ の 2 種類を使用した。

3-2 超音波プローブでの音場測定

ファンクションジェネレータ (テクトロニクス AFG 3252) から出力した周波数 1.75 MHz、出力電圧 50 mV_{pp} の連続正弦波を増幅度 50 dB のパワーアンプ (ENI 2100L) で増幅し、球面型凹面状振動子に印加し、振動子を駆動する。超音波プローブを用いて振動子から放射される超音波を受信し、オシロスコープで波形として観測する。受信点はステージコントローラー (SIGMA KOKI SHOT 204MS) をコンピュータプログラム (Nation-

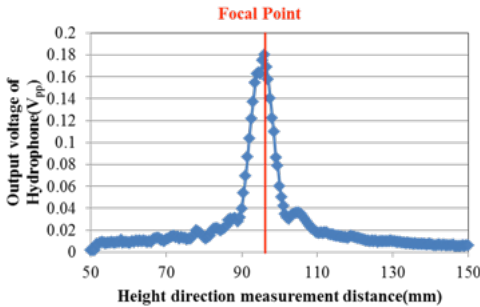


Fig. 6 直径 25 mm のハイドロホン (a) の出力電圧

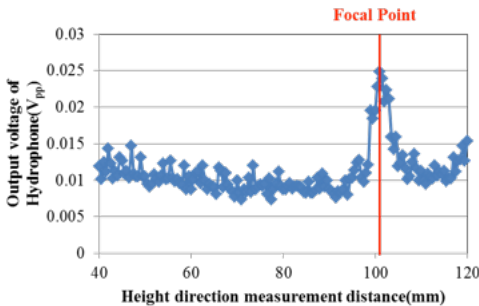


Fig. 7 直径 5 mm のハイドロホン (b) の出力電圧

al Instruments, Labview) で操作して自動ステージ (SIGMA KOKI SGSP-26-100) で横方向と高さ方向へ 10 mm 間隔で移動させる。測定結果は、音場内における超音波プローブの設置位置と出力電圧の関係を示すグラフで表す。開口直径 28.5 mm の超音波プローブ (a) を用いた測定結果を Fig. 4 に示し、開口直径 12.7 mm の超音波プローブ (b) を用いた場合の測定結果を Fig. 5 に示す。

超音波プローブ (a) による測定結果では、振動子から 75 mm に目的の焦点を観測するとともに、それ以外にも 35 mm と 95 mm の位置に小さい焦点を観測した。35 mm の焦点は径方向振動による目的外の焦点であると考え。超音波プローブ (b) では振動子から 65 mm に目的とする焦点を観測し、45 mm と 95 mm に小さい焦点を観測した。超音波プローブ (a) と (b) のいずれを用いた場合も、焦点と思われる位置で出力電圧の上昇を確認した。また、目的の焦点以外の位置においても、いくつかのピークが出現した。規則的に続くこれらのピークは、球面型凹面状

振動子の形成する音場と超音波プローブの形成する受信時の音場の相互作用による結果であると考えている。

3-3 ハイドロホンでの音場測定

ファンクションジェネレータ (HP 8116A) から出力した周波数 1.75 MHz、波長 10 波のバースト波状の出力波形を増幅度 55 dB のパワーアンプ (ENI A300-1381) で増幅し、球面型凹面状振動子に印加し、振動子を駆動する。ハイドロホンを用いて振動子から放射される超音波を受信し、オシロスコープ (HP 54610A) で波形として観測する。ハイドロホンの走査には、音響強度測定装置 (AIMS) を使用する。ハイドロホン (a) を用いた場合の測定結果を Fig. 6 に示し、ハイドロホン (b) を用いた場合の測定結果を Fig. 7 に示す。

受信センサを超音波プローブからハイドロホンに変更して測定した結果、ハイドロホン (a) では 95 mm 付近に、ハイドロホン (b) では 100 mm 付近に焦点を確認できた。ハイドロホンでの音場測定では、超音波プローブを用いた測定の際に観測された目的の焦点以外の低レベルの目的外の焦点は確認されることが分かった。不要な焦点が確認された超音波プローブと、確認されないハイドロホンの違いとして、開口直径の大きさの違いがある。

4. 結論及び、今後の展望

本研究では、脳腫瘍細胞の治療を目的とした超音波照射システムの開発に関する研究として、従来当研究室で使用していた圧電セラミックス振動子の性能評価を行うことで、生体に対してより安全な照射条件の検討を行った。振動子の性能評価として、レーザードブラ振動計 (LDV) を用いた測定の結果、厚み方向縦効果振動のポアソン効果による径方向振動が発生し、伝搬していることが明らかになった。この径方向振動が音場に及ぼす影響を検討するため、FDTD 法による 2 次元

シミュレーションと、受信センサを用いた音場測定を行った。シミュレーションの結果、本来の焦点である厚み方向振動の焦点の手前に、径方向振動によるもう1つ焦点を形成する事を明らかにした。しかし、径方向振動の形成する焦点の音圧は、厚み方向振動の形成する焦点の音圧と比べて大変小さいため、音場に影響はないことが分かった。しかし、2次元シミュレーションで不要な焦点のレベルが低かったとしても、3次元の現実の状況で安全であるとは断言できないため、実測による検討を行った。実測として同じ球面型凹面状振動子の音場分布を、開口直径の異なる複数の超音波プローブやハイドロホンを用いて測定した。その結果、超音波プローブでは目的外の不要な焦点を観測したが、ハイドロホンでは不要な焦点は見られない等、同じ送波用振動子の音場分布であっても、受信センサの開口直径や周波数によって、測定結果が異なることが分かった。これは、球面型凹面状振動子が形成する音場とハイドロホン又は、超音波プローブの形成する受信時の音場の相互作用による結果であると考えられる。

【参考文献】

- 1) 野村和弘、平出朝子：脳腫瘍 メヂカルフレンド社 2007年 pp.4~70
- 2) 久保長生：脳腫瘍のすべてがわかる本 講談社 pp.27-37 pp.67-87
- 3) 辻本賀英、恵口豊：細胞死、アポトーシス 集中マスター 羊土社 2009年 pp.10~37
- 4) 田淵和雄：グリオーマ 病態と治療 シュプリンガーフェラワーク東京 pp.1~18
- 5) 辻本賀英、刀祢重信、山田武：新アポトーシス実験法 改訂第2版 1999年
- 6) 田沼靖一：アポトーシスと医学 羊土社 pp.14~20
- 7) 大津賢治（東北大学大学院）論文 集東 超音波治療のための球殻状圧電素子の振動挙動に関する研究 pp.2~3 pp.21~40
- 8) 国土交通省 国土技術総合研究所 用いる計算モデルの概要および基本方程式、用いるパラメータの説明 <http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/kpr/prn-0012pdf/kp0012010.pdf>
- 9) APEC Homepage 主な数値解析手法のまとめ http://www.pejpn.net/pe/ichiji/ichiji_kiso_anal_suuchi.pdf
- 10) 宇田川義夫：超音波技術入門 日刊工業新聞社 pp.131~152
- 11) Shinichi Takeuchi, Mutsuo Ishikawa, Norimichi Kawashima, Takeyoshi Uchida, Masahiro Yosioka, Tsuneo Kikuchi, Nagaya Okada and Minoru and Kuribasashi Kurosawa. Development of tough anti cavitation hydrophone by deposition of hydrothermally synthesized lead zirconate titanate poly-crystalline film on reverse surface of titanium front layer. AIP Conf.Proc.1433,663(2012)

