結石破碎における収束超音波の伝播挙動

The Behavior of Ultrasound Propagation in Lithotripsy

○学 池田貞一郎 (東大院) 学 吉澤晋 (東大院) 正 松本洋一郎 (東大工)

Teichiro IKEDA, Dept. of Mech. Eng., The Univ. of Tokyo, 7-3-1 Hongo Bunkyo-ku Tokyo 113-8656
 Shin YOSHIZAWA, Dept. of Mech. Eng., The Univ. of Tokyo, 7-3-1 Hongo Bunkyo-ku Tokyo 113-8656
 Yoichiro MATSUMOTO, Dept. of Mech. Eng., The Univ. of Tokyo, 7-3-1 Hongo Bunkyo-ku Tokyo 113-8656

In the clinical field, focusing phenomenon of ultrasound is widely applied today, such as Extracorporeal Shock Wave Lithotripsy (ESWL), ultrasonography, and hyperthermia. Although ESWL has been used routinely for the treatment of urolithiasis since 1980's, it also causes acute renal injury by violent collapse of cavitation. To the contrary, the collapse of cavitation by ultrasound focusing can be used for noninvasive lithotripsy. It is essential to take a real understanding of the behavior of propagation on ultrasound focusing and the dynamics of cavitation in ultrasound field. To observe focusing phenomenon and cavitation collapse, we made experimental apparatus using piezo-transducer, and numerically simulated the propagation of ultrasound focusing. We observe that ultrasound is plane wave at first, then it gradually takes on nonlinear behavior, and at focus it turns shock wave.

Key Words: Ultrasound Focusing, Lithotripsy, Numerical Simulation, Cavitation, Piezo Transducer

1. 緒言

ESWL(体外衝撃波結石破碎術)は、1980年代の臨床への導入以来結石破碎の第一選択として定着している。現在 ESWL においては、衝撃波ないし超音波収束時のキャビテーション発生による体組織損傷が問題となっている。しかしながら超音波を狭い領域に収束させ、キャビテーションによる局所的な壊食現象[1]を利用することによって、より効率のよい低侵襲結石破碎が可能である。このモデルの実現には収束超音波の伝播挙動と、収束超音波音場におけるキャビテーションの物理現象を解明する必要がある。

2. 収束超音波実験装置

超音波の収束実験および、収束超音波によるキャビテーション発生実験を行うため、超音波発生源として球面ピエゾトランスデューサを用いた実験装置の製作を行った。Fig.1に示すテストセクション中には水が張られ、超音波発生装置として 1[MHz]、ないし 500[kHz]の固有振動数を持つ、焦点距離 80[mm]、開口半径 40[mm]の球面ピエゾトランスデューサが固定されている。

Fig.1 Summary of Test Section

3. 収束超音波伝播シミュレーション

ピエゾトランスデューサによる収束超音波の伝播解析を、実験装置をモデル化した数値シミュレーションによって行った。支配方程式は二次元軸対称の Euler 方程式、水の状態方程式としては Tait 式を用い、Harten-Yee の風上 TVD 法により差分化し解析を行った。境界条件はピエゾ振動面が振動速度 $V=A\sin 2\pi ft$ で 2 波バースト振動した時の条件をモデル化して与えた。振幅は実験装置から概算した $A=0.07[\text{m/s}]$ および、その 10 倍の $A=0.7[\text{m/s}]$ の 2 通りで与えた。Fig.2 は振幅 $A=0.07[\text{m/s}]$ での、収束超音波伝播の様子である。また、Fig.3,4 は焦点における圧力の時間履歴である。

Fig.2 Propagation of Ultrasound ($t=2.0, 32.0, 55.3[\mu\text{s}]$) Fig.3 History of pressure at focus($A=0.07[\text{m/s}]$) Fig.4 History of pressure at focus($A=0.7[\text{m/s}]$)

4. 結言

実験装置をモデル化した、Euler 方程式による数値シミュレーションを行った。その結果を収束超音波の線形波解析と比較の上考察し、収束超音波の伝播は以下の 3 ステップからなることを確認した。a)収束過程前半は平面波で超音波は伝播する。b)収束と同時に次第に圧力が増加し、非線形性を示し始める。c)焦点近傍において非常に大きな非線形性を示し、圧力が急激に上昇し、焦点においては急峻な立ち上がりの高圧ピークと緩やかな減衰を持つ衝撃波形成する。

参考文献

[1] 島田, 松本ら, “クラウドキャビテーションの動力学とキャビテーションエロージョン”, 機論 B 編, 65 巻, 634 号 pp1934-1941, 1996