

超音波キャビテーションの崩壊現象を利用した結石破砕法に関する研究

池田 貞一郎

第一章 序論

キャビテーション気泡の崩壊現象は、結石破砕治療 (SWL; Shock Wave Lithotripsy)の研究において早い段階においてその影響が報告され(1)、長年にわたって多くの研究者が研究を行ってきた。この分野においては、キャビテーション現象は、体組織損傷因子としての解析(2)のみならず、同時にその大きな崩壊圧が、結石破砕片微細化に役立つとの観点からも研究(3)が続けられている。また、衝撃波、超音波など破砕をもたらす得る圧力波を効果的に組み合わせることにより、体内におけるキャビテーション崩壊現象を能動的にコントロールしようとする幾つかの手法も近年提案されている。たとえば、二組の衝撃波発生装置を用いて微細化を促進する手法(4)や、圧電方式の衝撃波発生装置で生じたキャビテーション気泡を、スパークギャップ方式の衝撃波によって強制振動させることにより結石破砕片の微細効果を高める手法(5)などが試みられている。上記の技術は双方において、キャビテーションの崩壊現象を利用することが、結石破砕片の微細化に効果的であることが示されているものの、破砕をもたらす圧力波として、未だ焦点領域の大きい(10~60 mm)の衝撃波が用いられている。すなわち、その広い範囲に発生するキャビテーションが体組織の損傷をもたらす得る、という点においては依然問題が残っている。

第二章 キャビテーションによる結石破砕の効果

キャビテーション気泡の崩壊圧は、特にその形状がクラウド状態を形成した時には $O(10^9)$ Paに達することが実験(6)および、計算(7)の両面から示唆されている。また、近年超音波音場における気泡群の挙動が解析され(8)、その周波数応答などが詳しく検討され、その挙動が明らかになってきている。文献(8)によれば、気泡クラウドを、クラウドとしての共振周波数を持つ超音波で強制振動させることによって、その崩壊を引き起こせること、また、気泡流中を伝播する衝撃波によって個々の気泡を高い圧力で崩壊させ、固体壁面上に高い圧力、エネルギーを集束させる可能性が、気泡クラウドの数値計算により示唆さ

れている。

第二章においては、上記に代表される既存の解析的・数値的な知見をもとに、“超音波キャビテーションの崩壊現象によるエロージョンを利用して、結石のみを破碎する手法”を開発することを目的としている。超音波音場の中に、局所的にクラウドキャビテーションを生成させ、また、その崩壊現象を制御して導くことを目的として、キャビテーションの制御手法としては二種類の周波数をもつ超音波パルスを用いた。超音波の周波数は、SWL の衝撃波の周波数である、100 ~ 250 kHz より高い周波数を用いる。

まず、1~4 MHz の高周波の超音波によって、固体壁面上にクラウドキャビテーションを発生、および成長させる。次にクラウドキャビテーションの共振周波数近辺の周波数をもつ、低周波の超音波(400 ~ 1 MHz) によってクラウドを強制振動させ、気泡群の崩壊を導く。以上の手法におけるクラウドキャビテーションの挙動を調べ、以下の結言を得た。

- (1-1) 固体壁面上において、集束超音波の焦点付近に発達するキャビテーション気泡は、安定したクラウドキャビテーションを形成し、そのサイズは周波数に強く依存する。すなわち、周波数を変化させることによって、クラウド生成領域をコントロールすることができる。
- (1-2) 実験により、高周波で形成する安定なクラウドキャビテーションを、クラウドの共振周波数近辺の超音波によって崩壊させることに成功した。また、本手法によれば、 ± 100 ns の時間分解能で再現性よくクラウドキャビテーションの崩壊現象を引き起こすことができる。その崩壊に起因する衝撃圧は、単一の周波数の超音波で生成するキャビテーション気泡が、それぞれ独立して崩壊するときが発生する崩壊圧よりも、はるかに大きい。

また、モデル結石及び、腎結石の破碎試験を行い、次の結論を得た。

- (1-3) 本手法によって、モデル結石を、クラウドキャビテーションの崩壊が引き起こされたと考えられる領域のみ、局所的に削り取ることができ、その有効性を示した。また気泡群の強制崩壊を行わないときと比べて、強制崩壊を行ったときは、2 倍以上の破碎効率を得ることができる。

- (1-4) 腎結石の破碎は、表面から削り取られるように行われ、ほとんどの破碎片の大きさは 1 mm 以下の径に細かく破碎され、最大破碎片も高々 1.6 mm であった。(図

1 参照)

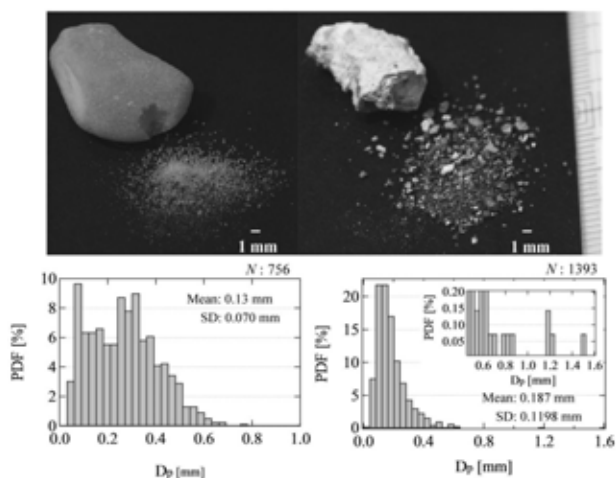


Fig. 1 Eroded kidney stones and their fragments.

すなわち、本手法によれば、固体壁面上に効果的に高い圧力および大きなエネルギーを集束させることができ、現存 SWL 機器の 2 つの問題である、広範囲のキャビテーション発生による体組織の損傷と、大きな破砕片による排出時の痛みの発生という 2 つの問題を解決する結石破碎技術の構築可能性が示された。

第三章 超音波キャビテーションを支配するパラメータ

次に、第三章においては、本研究において検討されている、高周波の超音波によってクラウドキャビテーションを結石表面近傍に発生させ、低周波の超音波によって強制振動させ崩壊を引き起こすという手法における、超音波キャビテーションの発生・成長・崩壊といった素過程を支配する種々のパラメータについて検討を行い、以下の結論を得た。

(3-1) キャビテーションの制御パラメータとしては、高周波の圧力振幅と低周波の圧力振幅を用いれば、現象をわかりやすく描くことができる。

(3-2) キャビテーションの発生から崩壊までに至る現象は、キャビテーションが発生させられる媒質の特性に大きく依存する。

(3-3) 同様に、現象は固体壁の表面粗さ、音響インピーダンスによって大きく影響を受ける。

第四章 現象の最適化とキャビテーションモニタリング

第四章においては、第二章で示されたように、高周波の圧力振幅、低周波の圧力振幅をパラメータの軸にとった、破碎力の最適化と、外部から焦点領域でのキャビテーション挙動を把握する為の実験システムの構築および、その実験結果について検討された。

2種類の圧力センサを用いて、手法におけるキャビテーション崩壊現象における気泡に存在下での透過音圧、反射音圧に起因する信号の取得を行った。くわしくは、固体壁面上に配された平面型 PVDF 圧力センサにより、気泡群が存在したときに、気泡群を透過し、時に増強され固体壁面に気泡の崩壊圧として伝わる圧力振幅を取得し、また、遠方におかれた球面型の圧力センサによって、気泡群から反射もしくは放出される圧力振幅の取得をおこなった。得られた結論は以下の通りである。

(4-1) 気泡群の存在によって、固体壁面に大きな圧力振幅を及ぼす条件と、大きな反射音圧が得られる条件は異なり、気泡群から大きな反射音圧が返ってくる領域においては、大きな崩壊圧はもはや得られない領域になっている。

(4-2) 気泡群が固体壁に圧力波の透過による大きな崩壊圧を及ぼすのは、低周波の高々最初の 2 波のである。それ以上の波数の増加による圧力波の増強はほとんど見られない。

- (4-3) 大きな透過が得られる領域(最大効率領域)は遠方のセンサにおいて大きな反射が得られる領域(最大エコー領域)の内部に含まれており、遠方のセンサに大きな反射音圧が返ってくるといふ条件を、気泡群の崩壊の最適化における、上方閾値として使うことができ得る。
- (4-4) また、気泡群の崩壊による最大効率領域は比較的、気泡群のサイズが小さいときにその極大を示し、不規則な気泡群が生成するほど大きな圧力振幅を加えなくてもよい。すなわち、高周波の超音波によってキャビテーションが生成したか生成していないか(Cavitation threshold)を遠方において把握することで、下方閾値を定めることが出来る。

以上、治療用超音波波形の最適化の為の指針と、治療効果の外部からのモニタリングに関する、知見が得られ、実験システムの有用性を示すとともに、今後の技術開発の指針が得られた。

第五章 結言

集束超音波によるキャビテーション気泡群の発生、成長、崩壊、消滅といった素過程の実験的な理解のもと超音波キャビテーションの崩壊現象を利用した結石破砕法に関する研究を行い、以下の3つの結論を得た。

1. キャビテーション領域の局在化と、気泡群の強制崩壊が可能なキャビテーション制御手法を開発し、またその手法が SWL 機器の2つの問題点を解決しうることを示した。
2. 手法における支配的なパラメータの提示を行い、気泡群崩壊挙動の特性を明らかにした。
3. “気泡群を透過し結石破砕作用を与える音圧”と“気泡群挙動検出の為の反射音圧”の間の関係を明らかにし今後の最適化、モニタリング技術開発のための指針を得た。

参考文献

- (1) Crum LA, J Urol, 140, 1587-1590, 1988.
- (2) Evan PA et al., J. Urol., 168, 1556-1562, 2002.
- (3) Sokolov DL et al. J Acoust. Soc. Am., 110, 3, 1685-1695, 2001.
- (4) Zhu S et al., Ultrasound Med. Biol., 28, 5, pp. 661-671, 2002.
- (5) Xi X, Ultrasound Med. Biol., 26, 3, 457-467, 2000.
- (6) Kato et al., Trans ASME J. Fluids Eng., 118, pp.582-588, 1996.
- (7) 島田ら, 機論 B 編, 65, 634, 1934-1941, 1999.
- (8) 吉澤ら, 機論 B 編, 掲載予定。