

微小爆発による尿路結石の破碎（第9報）

—腎結石破碎装置の試作—

生沼仙三*, 田中一三*, 中山良男*,
飯田光明*, 石川 昇*

楕円体の一部分からなる反射鏡にショックチューブを縫いでなる間接方式の腎結石破碎装置を試作した。この装置の使用時には、衝撃波の集束経路とショックチューブのノズル口付近にキャビティが発生することが認められた。集束経路のキャビティは無数の小さなものであるが、ショックチューブのノズル口付近のキャビティは1個の巨大なものである。消滅にも前者の数10倍もの時間を要する。したがって、衝撃波を繰り返し結石に集束し破碎するには、その巨大キャビティの消滅時を見計らって衝撃波源の爆薬を爆発させる必要がある。

この他、ショックチューブのノズル口の大きさについても検討した。

1. 緒言

著者らは、尿路結石と言われている膀胱結石、尿管結石及び腎結石を爆薬で破碎し自然排出させる研究を1975年より行い、その間に、体内に挿入して破碎する接触方式の破碎装置^{1) 2)}をいくつか開発した。それらは膀胱結石用と尿管結石用のものであり、腎結石用のものは、その部位まで破碎装置を挿入することができないため接触方式のものは開発することができなかった。

その腎結石を破碎する装置が最近西独のドルニエ社で開発された。これは体外から放電で生ずる水中衝撃波を反射鏡で結石に集束して破碎する間接方式の破碎装置^{3) 4)}で、衝撃波は体の軟組織をスムーズに通過するが、硬い結石にぶつかるとこれを破碎することを原理にしている。破碎された結石は自然排出される。この方式では膀胱結石と下部尿管結石は硬い骨盤に覆われているので、それを破碎することはできないが、腎結石の近くには骨盤がないので結石を破碎できるのだとされている。このように、最近、尿路結石の破碎技術は非常に進歩した。そのために、殆どの尿路結石症は切開手術せずに治療できるようになりつつある。

しかし、その間接方式では、水中衝撃波の発生に12~15kvの高圧放電が必要で、これを患者を入れた水

槽内で行うのであるから全く危険がないとは言えない。このために、田中ら⁵⁾は安全な衝撃波の発生源になる爆薬に着目し、それを反射鏡内で爆発させ、発生する水中衝撃波を結石に集束して破碎することを試みた。同じ考え方で桑原ら⁶⁾も検討した。しかし腎結石などを自然排出させるには、何回も繰り返し衝撃波を結石に集束し結石を粉碎する必要があるが、この方式では爆発ガスが反射鏡内に生じ、それが反射鏡内にあるうちに次の衝撃波を発生させると、衝撃波は反射鏡内の爆発ガスにより減衰させられるので、何回も衝撃波を発生させそれらを有効に集束させることは簡単ではない。

そのために、爆薬で発生する衝撃波だけをショックチューブで外部から反射鏡内に誘導する方式を考え、その実験用として反射鏡に金属管（ショックチューブ）を縫いだ装置を試作し、その衝撃波集束点付近等に生ずる現象を調べた。その結果、ショックチューブの衝撃波出口付近に予期しなかった巨大なキャビティが観察された。この巨大キャビティは、爆発ガスと同様、衝撃波集束の妨げになると考えられるので、その対策をこうずるために二、三の挙動をしらべた。以下にこれらの実験結果を述べる。

2. 実験方法

試作した結石破碎装置は、長径220mm、短径130mmの楕円体の一部分からなる反射鏡に内径15mm、全長(L)245mmのショックチューブを縫いだものである。材質はステンレス(SUS-303)である。Fig.1にその構造を示した。

昭和61年2月7日受理

*化学技術研究所 保安環境化学部

〒305 茨城県筑波郡谷田部町東 1-1

TEL 0298-54-4785

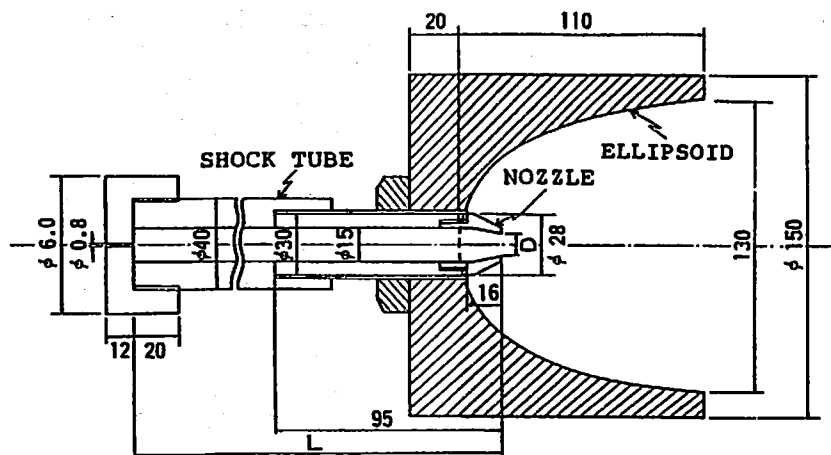


Fig. 1 Cross section of a surgical blaster with a shock-wave reflector of ellipse type.

この装置を水槽 (W 100cm×H 50cm×D 50cm) 内に横向きに置き静水圧を一定に保つためにその中心軸は水面下 20cm のところに設定された。装置内の空間を水で置換してから爆薬をショックチューブ内部の後端の栓壁に接触させた状態で爆発させ、ノズル口付近及び衝撃波集束経路に発生するキャビティを側面から高速度カメラを使って観察した。更に、ショックチューブのノズル口付近に発生するキャビティに He-Ne レーザー光を照射し、その屈折の様子からその内部が空洞であることなどを調べた。

また、衝撃波を反射鏡内に誘導するショックチューブに四種類の口径 (D) の異なるノズルを交換して取り付け、そこから放出される衝撃波の圧力をピエゾゲージで調べた。

ただし、衝撃波発生用の爆薬には、一端をエポキシ樹脂で封じた中硬質の塩ビ管 (外径 2.6mm, 内径 2.0mm, 長さ 10mm) 内にアジ化鉛 15~50mg を正確に秤取し、その後端に電気点火具 (トリシネート 0.7~1.2mg) を装着したものを用いた。

高速度カメラは、ナック製 E-105 A 43 型で、撮影速度は 3000 コマ/秒である。フィルムにはイーストマン製ハイスピード 7250 (ASA 400) を使用した。

ピエゾゲージは PCB 製 105 A 43 型である。

3. 実験結果及び考察

3.1 高速度カメラによるキャビティの観察

最初にアジ化鉛 30mg を爆発させ、衝撃波集束経路とショックチューブのノズル口 (ノズル口径 10mm) 付近に発生するキャビティを高速度カメラで観察した。その一例を Fig. 2 に示した。上段の写真が衝撃波集束経路に発生したキャビティであり、これらは非常に小さく、数が多い。これらは発生してから消滅するまで

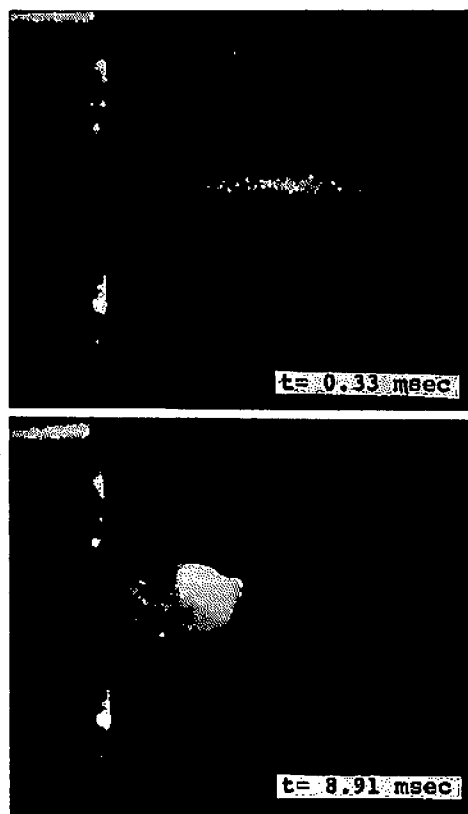


Fig. 2 Observation of cavities using a shock-wave reflector : Lead azide used=30mg, camera speed=3000f. p. s, t is elapsed time after the explosion.

約 1.3msec であった。下段の写真が、後述するショックチューブのノズル口付近発生した巨大キャビティであ

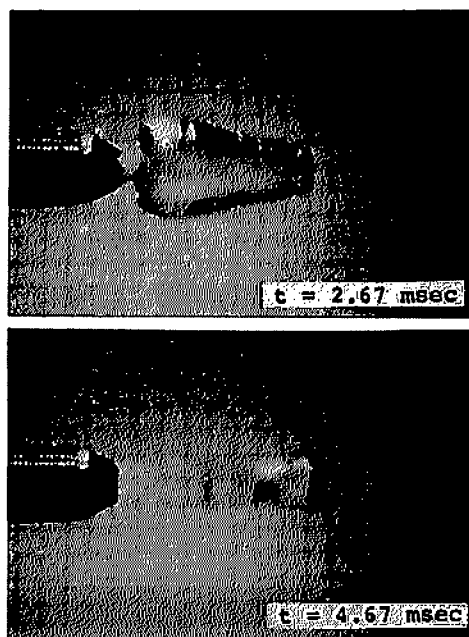


Fig. 3 Photographs of a large cavity generated in front of the shock tube nozzle : Lead azide used=30mg, diameter of the nozzle=10mm, camera speed=3000f. p. s., t is elapsed time after the explosion.

り、これは消滅するまで約20msecであった。

Fig. 3は、そのノズル口付近発生のカビティを反射鏡を取り除いた状態で撮影したものである。ただし、その時の照明は上部と背後の両方から行った。背後のスケールは縦横いずれも1cmである。上段の写真は発生してから2.67msec、下段の写真は4.67msecのものである。最大に膨張した時は、短径が4cm、長径が7cmである。これが膨張収縮の脈動を繰り返した後、上に述べたFig. 2の下段写真のようになり消滅してゆくのであることがわかった。

勿論、この巨大カビティは、アジ化鉛量及びノズル口径等により変わり、例えばノズル口径が小さく爆発させる薬量が多い場合は、非常に細長い円錐状のカビティになる。

次に観察された巨大カビティにレーザー光を入射しその屈折の様子から内部を調べた。

即ち、水の中に円筒形の空洞を仮定した時、その中心を通る光は直進するが、中心を外れた入射光は進路を曲げられるはずであり、また内部が水であればどのように入射した光も直進するはずである。この実験では、背後からレーザー光をカメラに向けて、巨大カビティの中心を通らないように照射し、レーザー光経

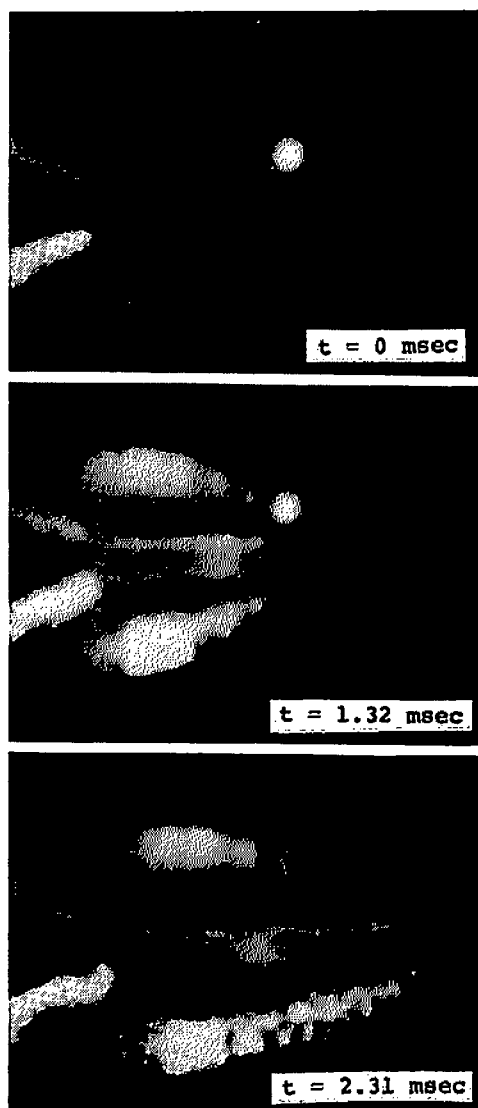


Fig. 4 Sequential photographs of a cavity when He-Ne laser irradiated the cavity from the rear side : Lead azide used=10mg, diameter of the shock tube nozzle=10mm,

路の様子を観察した。ただし、照明は上方からのみ行った。この場合も反射鏡を取り除いて実験した。以下の場合も全て反射鏡は取り除いてある。

その結果の一例をFig. 4に示した。この時のノズル口径は10mm、アジ化鉛量は30mgである。上段及び中段の写真にある丸い点は、背後からのレーザー光である。これらはカビティが発生してない時、あるいはカビティが小さい時のもので、レーザー光が直進しレンズの中に入っている。カビティが更に成長しその内部にレーザー光が入るようになると下段の写真の

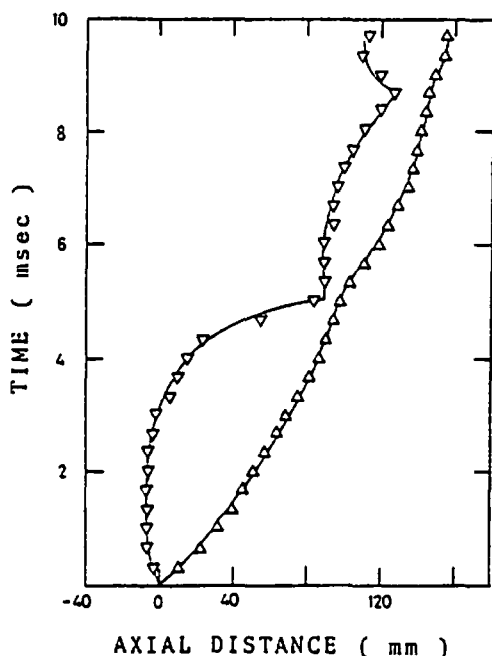


Fig. 5 Pulsatory motion of a large cavity : Lead azide used : 30mg, diameter of the nozzle=10mm, Δ mark shows a length from the tip of the nozzle to the front side of the cavity, ∇ mark shows a length from the tip of the nozzle to the rear side of the cavity.

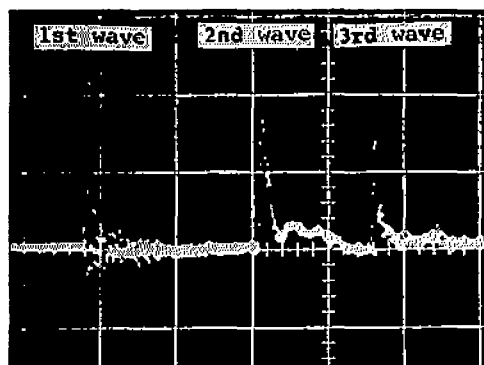


Fig. 6 Pressure observed with a piezogaugue in the water : Time scale=2 msec/div., lead azide used=30 mg, diameter of the nozzle=10mm.

ようになる。この面が暗く見えるのはレーザー光が屈折してレンズの中に入らなくなったためである（元のカラー写真では前の2枚は全体が赤く写っている）。このことから、レーザー光の入射部分は空洞であることが推測される。

また、上述のキャビティの写真には、横方向にほぼノ

ズル口径と同じ大きさのスジが認められる。これは爆発ガスにより押し出された水の流れのように思える。そこで赤く染めたカンテンを水の代わりにショックチューブ内に入れそれを確かめる実験を行った。その結果、キャビティ内のスジが認められた部分に、ノズル口から横方向へカンテンが流出していることが認められた。

以上のことから、ノズル口付近発生の巨大キャビティには、その中心軸上にほぼノズル口径に等しい水の流れがあることが判った。

一般にキャビティは、水が負圧になる時に生ずるものであるから⁷⁾、観察された巨大キャビティの場合も、ノズル口から衝撃波が解放する時に生ずる圧力の低下即ちノズル口周囲からの希薄波によるノズル口先端部の圧力の低下により起こるためであろうと思える。しかし、それだけではなく、前にも述べたようにキャビティの中心部にノズル口から出る円柱状の水の流れがあることや、このキャビティは条件によって非常に細長い円錐状に成長することから、その発生は爆発ガスによって起こる水の流れにも起因しているようにも思える。

3.2 巨大キャビティの脈動

この巨大キャビティは、前にも述べたように数回脈動した後、消滅する。

Fig. 5にその脈動の一例を示した。この時のノズル口径は10mm、アジ化鉛は30mgであり、横軸はノズル口径からキャビティの先端(Δ 印)及び後端(∇ 印)までの距離であり、縦軸は時間である。したがって、くびれたところが最も収縮した時である。図には2回目の最収縮時までプロットしてある。

このような脈動に際しては、圧力波を出すことが推測されるので、これはピエゾゲージをノズル口の斜め前方10cmの所に設置し観た。

得られた圧力信号の一例をFig. 6に示した。横軸のタイムスケールは2 msec/divである。図の第1波はアジ化鉛の爆発によって生じた衝撃波によるものであり、第2波と第3波が上で述べたキャビティの1回目と2回目の収縮時に相当する信号であると思われる。

このようにしてノズル口径10mmの場合について各薬量の脈動の第一周期を求めると、脈動の第一周期はアジ化鉛の薬量の立方根に比例して大きくなることが判った。

また、ノズル口径によってもその脈動の周期は変わり、ノズル口径が小さくなるにしたがってその周期は短くなる傾向を示した。

3.3 ショックチューブのノズル口径と衝撃波圧力の関係

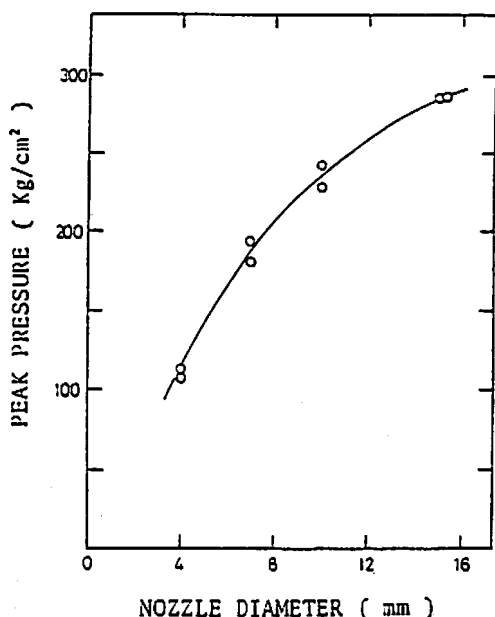


Fig. 7 Relation of peak pressure v. s. nozzle diameter : Distance between the piezogauge and the nozzle=5cm, lead azide used=30 mg.

次にショックチューブのノズル口径を、そこから放出される衝撃波の圧力を測定することにより検討した。その圧力測定では、ショックチューブの中心軸上に、ノズルの先端からピエゾゲージを5cm離して設置した。この時のアジ化鉛の使用量は30mgである。その結果、ノズル口径が小さくなるにしたがって、圧力値は低下することが認められた。Fig. 7にその測定値を示した。

上述の結果は、ノズル口径を小さくすると衝撃波が効率良くショックチューブ外に放出されないことを示す。この点を考慮すると結石破碎装置を作製するには、実験した範囲ではノズル口径を大きくする程良いことになる。

しかしこの間接方式の尿路結石破碎装置で結石を破碎するには、前にも述べたように何回も繰り返し衝撃波を結石に集束する必要がある、その場合は、衝撃波集束の妨げになる前述の二種類のキャビティが反射鏡内に発生する。即ちその一つは衝撃波集束経路に発生する数多い細かいキャビティであり、もう一つはノズル口付近発生の巨大キャビティである。それらの消滅には、巨大キャビティの方が数十倍もの長時間を要するので、繰り返し衝撃波を結石に集束する時は、その巨大キャビティの消滅時刻を見計らって次の爆薬を爆発させることが必要になるであろう。

また、衝撃波を効率良く反射鏡内に放出させるにはショックチューブのノズル口径を大きくする必要があるが、そうするとその反射鏡が楕円体構造のものでは原理的に衝撃波集束が悪くなるはずであるから、今後は反射鏡の改良も必要になると言えよう。

4. 結 言

体外から爆薬の爆発により生ずる水中衝撃波を結石に集束して破碎する間接方式の結石破碎装置、即ち回転楕円体の一部からなる反射鏡にショックチューブを継いだものを水中に設置し、反射鏡の衝撃波集束点付近等にかかる現象を高速度カメラを使って観察した。

その結果、反射鏡の衝撃波集束経路と、ショックチューブのノズル口付近にキャビティが発生することが観察された。その衝撃波集束経路発生のキャビティは、従来観察されているキャビティのような小さなものであり、数も多く、数 msec で消滅する。一方のノズル口付近発生のキャビティは、巨大なものであり、例えばアジ化鉛 30mg の爆発の場合最大時には短径が4cm、長径が7cmにもなり、これが膨張収縮を繰り返しながら消滅する。しかも発生する数は一回の爆発で一個であり、その消滅には数 10msec 程度を要する。

この巨大キャビティは、その中心軸に、爆発ガスにより押し出されたと思われるほぼノズル口径に等しい水の流れがある。キャビティの形状は、ノズル口径や爆薬量により変わり、ノズル口径が小さく爆発させる薬量が多い場合には非常に細長い円錐状になる。この巨大キャビティの発生は、衝撃波がノズル口から解放する時に起こる圧力の低下、及び爆発ガスが誘起する水の流れが起因しているように思われた。

この巨大キャビティは、そこを通過する衝撃波を減衰させるので、繰り返し衝撃波を結石に集束し結石を粉碎する時には、それが反射鏡内に発生しないようにしたいが、上に述べた発生原因からそれは不可能である。したがってその対策としては、その巨大キャビティが消滅する時を見計らって爆薬を爆発させることが必要になると言えよう。

また、ショックチューブから反射鏡内に衝撃波を放出するところのノズル口についても検討したが、この場合は、ノズル口を大きくする程衝撃波は効率良く反射鏡内に放出されることが判った。

文 献

- 1) 椎野和夫, 生沼仙三, 化学工業資料, 19, 136 (1986).
- 2) 生沼仙三他, 化学技術研究所報告, 80, 211 (1985)
- 3) Chaussy, Ch., E., Jocham, D., Brendel, W., Frossmann, B. and Walter, V. : J. Urol., 127,

417, 1982.

- 4) Chaussy, Ch., Schmiedt, E., Jocham, D., Walther, V., Brendel, W., Frossmann, B. and Hepp, W. : Extracorporeal shock wave lithotripsy. New aspects in the treatment of kidney stone disease.

1st ed., p. 75-86, Karger, Basel, Munchen, Paris, London, New York, Tokyo, Sydney, 1982.

- 5) 田中一三他, 京都府大誌, 93, 1147 (1984)
6) 桑原正明他, 日泌尿会誌, 70, 174 (1985)
7) 能本乙彦, 日本物理学会誌, 15, 2 (1960)

Studies on Lithotripsy by Micro Explosion (IX)

Surgical blaster with a shock-wave reflector of ellipse type.

by Senzo OINUMA*, Kazumi TANAKA*, Yoshio NAKAYAMA*,
Mitsuaki IIDA*, and Noboru ISHIKAWA*

Since 1975, we have studied a method of fracturing urinary calculi, using explosives. In the study, the blasters for fracturing bladder calculi and ureter calculi were developed. As a next step a research is undertaken on the calculi in kidney track.

The method uses extracorporeal underwater-shock wave, i. e., shock wave is generated in a tube by explosion of explosives and is introduced through the tube to a focal point of an ellipsoidal reflector of and is focused on the calculus which is set at another focal point of the same reflector. According to the high-speed photography, immediately after the explosion, a large cavity was observed at the tip of the tube. The cavity persisted for 20~30 msec. To fracture the calculus, focusing of the shock wave shall be repeated many times. Because the existence of the cavity will diminishes the shock wave, the successive explosions must be done after the cavity of the former explosion has disappeared.

(*National Chemical Laboratory for Industry, 1-1
Yatabe-chō Ibaraki-ken, Japan)