

水中微小爆発と応用

高山和喜*

水中微小爆発で発生した球状衝撃波の挙動を、二重露光ホログラフィー干渉計法を用いて定量的に計測した。このようにして得た球状水中衝撃波と気泡あるいは気泡群との干渉を明かにする。その結果を基に、水中衝撃波フォーカシングを利用した結石破砕装置への応用、その時現れる臓器損傷への影響について論ずる。また、気泡を付着させた微小爆薬に衝撃波を作用させたとき、干渉の結果微小爆薬が殉爆することを示した。

まえがき

水中爆発は火薬類の重要な用途の一つであり、水中衝撃波をとまう(1)。しかし、衝撃波現象の解明という基礎研究の見地から、水中衝撃波の挙動には未解決の問題点が多く残されている。また、積極的に水中衝撃波を応用しようとするときには、水中衝撃波の発生、伝播、反射、回折、屈折およびフォーカシングのデータを整備することは必要である(2)。水中微小爆発により球状衝撃波を発生させ、その挙動を定量的に解明することは重要である。また、最近開発されて画期的な成功を納めている、水中衝撃波フォーカシングによる結石破砕術はこれらの基礎研究の成果である(3)。前報(4)において、アジ化銀あるいはアジ化鉛4-10mgを水中起爆して得た衝撃波のフォーカシングとその医療応用について解説した。本報では、衝撃波と気泡との干渉について実験的研究を行い、衝撃波にさらされた気泡ないし気泡群の挙動を詳細に明らかにする。さらに、その結果から衝撃波フォーカシングによる結石破砕術に現れる生体損傷の一つの機序を解明した(5)。また、衝撃波と気泡の干渉効果の一つとして、気泡を付着した微小爆薬に衝撃波を当てると殉爆することなどを確認した。

水中微小爆発

水中衝撃波を発生させるには、様々な方法が提案されている。ここでは、アジ化合物の水中起爆を採用する。この方法は、微小起爆ができたその制御も非常に容易である。

用いた方法は、アジ化銀の微小ベレット10mgをガ

ラス・ファイバーの先に張り付け、防水処理し水槽の中におく。そのガラス・ファイバーにルビー・レーザー光、波長694.3nm、パルス幅25nsecを通すと、アジ化銀ベレットは瞬間的に起爆する。この時、レーザー光束はそのままガラス・ファイバーの端面に垂直に照射されるので、起爆に要するエネルギーは数mJと非常に僅かである。また、起爆遅れ時間は非常に僅かで1μsec以下である(6)。最近、YAGレーザー、波長1053.0nm、パルス幅8nsec、出力20mJ、を用いてアジ化銀ベレットを起爆した。推定ではあるが、この時起爆に要したエネルギーは僅か1mJ以下である。このような起爆方法は、電極を用いて起爆する方式に比較して、電気的ノイズを伴わないので、例えば圧力変換器を用いて起爆直後の衝撃波背後の圧力上昇を計測しようとする時などに、非常に有効である。

図1はアジ化銀10mgを起爆した時、爆心からの距離と圧力の関係を示す実験結果である。実験結果を整理すれば、圧力 p と無次元距離 $R=r/w^{1/3}$ との間には、

$$p=610R^{-1.066}$$

なる関係がある。ここに、 r は爆心からの距離mm、 w はアジ化銀の薬量である。一方、アジ化鉛では、この指数は-1.15となる(6)。なお、圧力測定には試作のPVDFビエゾ膜を用いた圧力変換器(7)を用いた。この圧力計は非常に高い周波数応答特性を持ち、水中衝撃波の計測には特に有効である。使用したビエゾ膜は、

〔著者紹介〕 氏名 高山和喜

所属 1988年5月より東北大学
流体科学研究所衝撃波工
学研究センター
略歴 1940年4月生れ
工博 東北大学教授
専門 圧縮性流れ、衝撃波現象
の解明に関する研究



平成2年5月8日受理

*東北大学流体科学研究所

衝撃波工学研究センター

〒982-02 仙台市青葉区片平 2-1-1

TEL 022-227-6200 内線3343

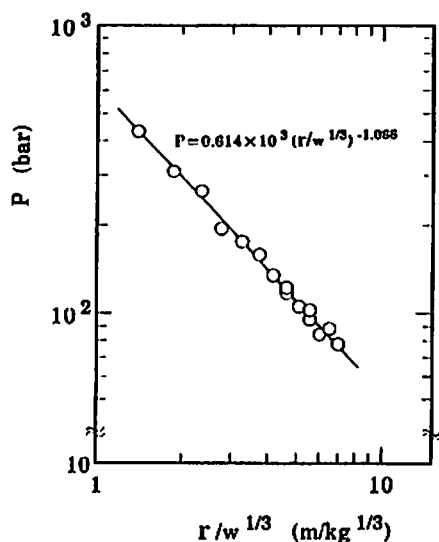


図1 アジ化銀10mgの水中微小爆発、圧力と距離の関係

Solvey社製、厚さ24 μ m、周波数応答10MHzである。

衝撃波と気泡との干渉

このようにして、水中微小爆発で生じる衝撃波背後の過剰圧と距離との関係が分かったので、爆心から適当距離においた気泡と過剰圧が既知の衝撃波との相互干渉を、二重露光ホログラフィー干渉計法によって観察することができる。正確に計量して得た空気泡を毛细管に封じ、微圧を加えて水槽の下部から開放する。気泡の浮き上がる速度は水中衝撃波の速度に比して非

常に遅いので、爆心から20mmの位置に達した瞬間を検出して、ルービー・レーザを起動し、アジ化銀ペレットを起爆する。この時の球状衝撃波の過剰圧は、上式より約500気圧である。また、この位置での気泡の直径は1.5mmである。気泡位置の検出と起爆および撮影のタイミングを様々に変えて撮影した一連の二重露光ホログラフィー干渉計写真を図2に示す。

二重露光ホログラフィー干渉計法では、第一回目の撮影は気泡無しの一様状態で、第二回目の撮影は現象に同期して撮影する。その結果得られる干渉縞は、二回の露光の間の媒体の位相変化に対応する(8)。二次元現象では、干渉縞は屈折率の変化、言い替えると密度変化部分に対応する。しかし、ここで観察する気泡と衝撃の干渉は三次元現象、散乱には軸対称現象なので、干渉縞は等密度線を示さない。一方、軸対称流れ場では、干渉縞分布から、差分近似を用いて数値的に密度場を決定することができる(9)。密度分布がわかれば、水の状態方程式を与え圧力分布を決定できる。図2では、それぞれの干渉縞写真から、実験的に縞分布とこれを計測し数値的に求めた中心軸を含む面上の圧力分布図を対比している。干渉計写真の縞分布とこれより求めた圧力分布は、当然のことながらよく似ている。密度・圧力の急激な変化は干渉縞の密な変化となって現れる。また、図中に示す時間は起爆後の経過時間である。(a)；起爆後18.4 μ sec、干渉縞の変化の方向は反転しているので、気泡から反射する波は膨張波である。また、気泡に衝撃波が作用すると、気泡は変形し

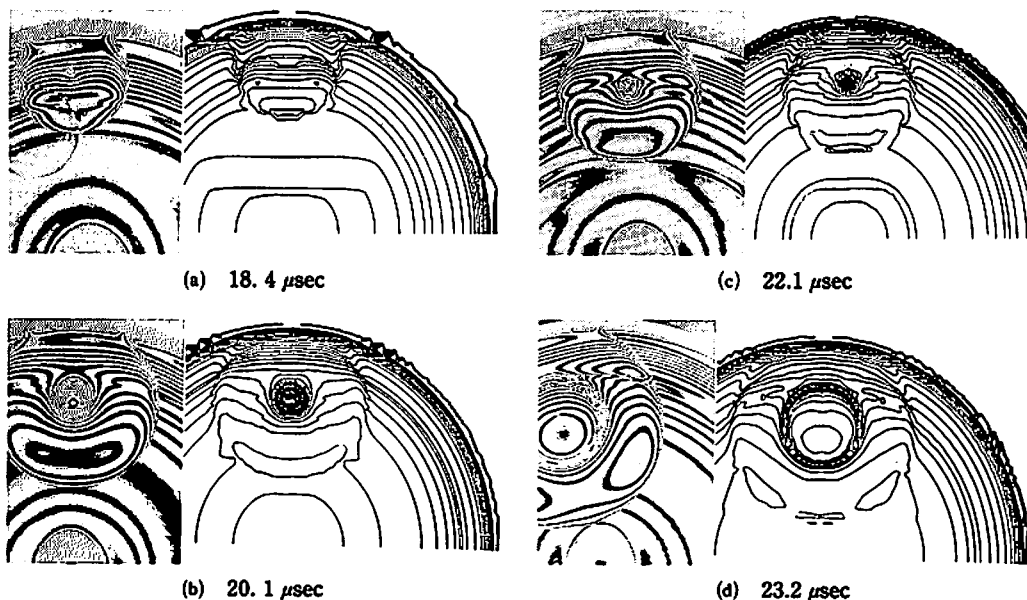


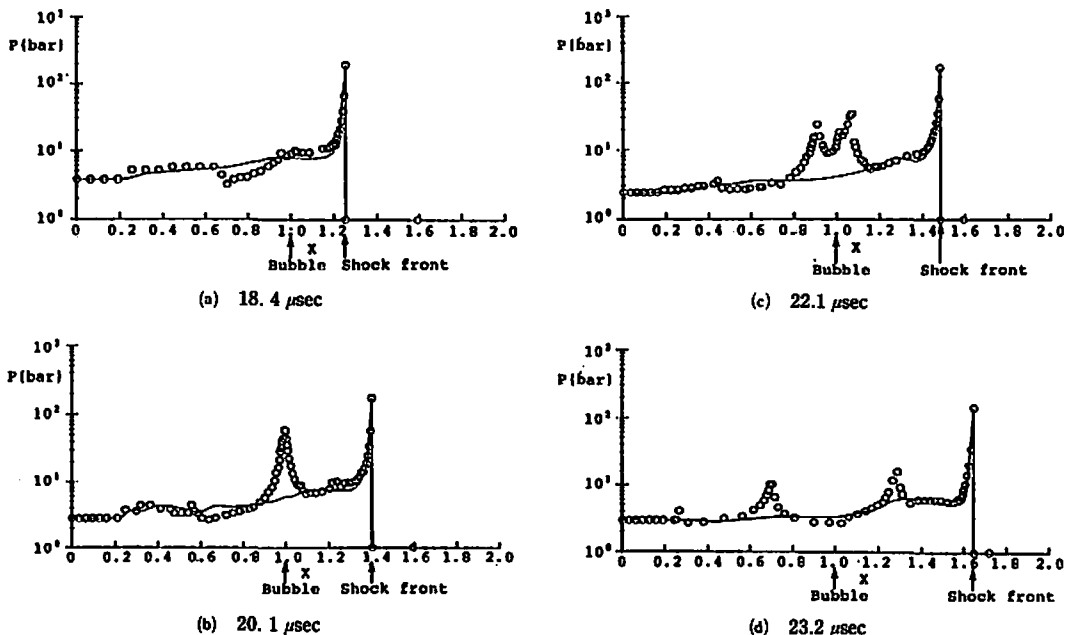
図2 干渉計写真とこの縞分布より求めた圧力分布図

マイクロ・ジェットを形成することが知られている。写真より最初に衝撃波が作用した気泡の面は平らになり、いわゆるマイクロ・ジェットが形成され、干渉の初期の段階を示す。(b); 起爆後20.1 μ sec, 気泡は変形しながら収縮して最小体積になる。写真より、最初に衝撃波が作用した気泡面で干渉縞が非常に密に集積し、密度・圧力が局所的に非常に上昇していることが分かる。この高圧はマイクロ・ジェットを加速するばかりでなく、次の瞬間に、あたかも点爆発のように再膨張の衝撃波を形成する。再膨張衝撃波は直ちに減衰して音波に移行する。再膨張衝撃波の初期の強さと、気泡変形などの瞬間にあらわれるかは、気泡直径と作用する衝撃波過剰圧によつて決まる。しかし、気泡直径と衝撃波過剰圧の広い範囲について十分なデータの蓄積はなく、これを整備することは今後の研究課題である。(c); 起爆後22.1 μ sec, (b)で見た局所的に発生する高圧領域の情報は、点爆発の弱い衝撃波となって球状に伝播する。また、変形・収縮した気泡は再膨張し、球状ピストンが膨張して球状衝撃波を駆動するように作用する。(d); 起爆後23.2 μ sec, 再膨張衝撃波は減衰しながら外側へ伝播し、気泡は初期の大きさ近くに再膨張する。この段階では、マイクロ・ジェットは最初に衝撃波が作用した気泡面の反対側の面を貫通する。数値計算では、この貫通したマイクロ・ジェットの淀み点圧は(b)で最初に衝撃波が作用した気泡面に局

所的に発生した高圧と比較できる大きさであると言う結果が知られている(10)。この高圧によって、マイクロ・ジェットは加速され、さらに気泡の収縮・再膨張運動と関係して、(b)から(d)の時間遅れを伴って気泡を貫通する。

前述のように水の状態方程式にTaitの状態方程式(11)を用いると、密度分布から容易に圧力分布を求めることができる。図3は以上の結果書き改め、縦軸に圧力、横軸に気泡と爆発中心からの距離を代表長さにとつて無次元表示した距離で表わした。図3(a)-(d)はそれぞれ、図2に対応する。あきらかに、まず、衝撃波の気泡からの反射波は膨張波で、次に局所的に高圧が発生し、これが点爆発の高圧源となって再膨張衝撃波を誘起し、この衝撃波はただちに減衰して音波に移行する過程が分かる。

以上の実験は軸対称場で行われ、干渉縞は密度分布を示さないので、二次元の気泡と衝撃波の干渉を観測し、干渉縞から直接密度・圧力を求め、図3の結果と比較する。水中に二枚の厚さ3mmのアクリル板を1.5mm間隔で保持し、直径1.5mmの二次元の空気泡すなわち気泡柱を作る。図4は二次元気泡柱の実験を示す。図中の黒い太線はアクリル板の縁を示す。また、10mgアジ化銀ペレットはアクリル板に挟まれた気泡柱より20mmはなれた位置で起爆される。アクリル板の音速は水中音速の約2倍なので、微小爆発で発生す



Pressure profile along the axis.

図3 軸方向の圧力分布

る衝撃波はアクリル板のなかを縦波となって先行する。しかし、先行する縦波は気泡に対して大きな影響を及ぼさないと考えられる。気泡柱と衝撃波との干渉を異なるタイミングで観察し比較する。(a)一回露光ホログラフィー、(b)二回露光ホログラフィー干渉計法の異なる可視化方法で撮影する。前者はよく知られている影写真法に等価で、強い密度変化のある部分がよく記述される。一方、後者では干渉縞は等密度線を表すので、流れ場の定量的観察には適当である。(a)では衝撃波が最初に衝突した面から気泡中に貫入するマイクロ・ジェットがよく分かる。(b)は(a)とはほとんど同じ瞬間の干渉計写真であるが二重露光ホログラフィー法のため、静止状態の気泡と変形した気泡が重なって写っている。マイクロ・ジェットを示す凹み部分に干渉縞が密集していることが分かる。ここでは、密度は大きく、圧力は高い。水の屈折率と密度の関係は既知なので、干渉縞から密度の跳びを推定することができる(4)。その結果、干渉縞一本に対する密度の跳びに対応する圧力は27.7気圧に相当する(9)。その結果、図4(b)の干渉縞の集積に対応する圧力の高まりは138.5気圧になる。写真(a)、(b)より約1 μ sec後の状態を(c)影写真、(d)二重露光ホログラムに示す。写真(b)に現れた局所的な高圧は線爆発として、円筒衝撃波を駆動する。円筒衝撃波は、また直ちに減衰する。図4は非常に非現実的な設定の実験結果ではあるが、図3に示す気泡の挙動と傾向を、定量的に観察でき、気泡と衝撃波の干渉のような複雑な物理を理解する目的にはかなっている。図4(c)、(d)から、再膨張衝撃波の中心は、明らかに干渉縞が密集し高圧が発生した点に一致し、再膨張衝撃波は、最初の高圧の解放により、点ないし線爆発に起因することが分かる。従ってマイクロ・ジェットが貫通した側の

淀み点圧が再膨張衝撃波を駆動すると言う考え方は、少なくともこの実験結果に対しては正しくない。

水中衝撃波フォーカシング

回転楕円体は二つの焦点を持つ。水中でその一つの焦点で微小爆薬を起爆すると、衝撃波はもう一つの焦点にフォーカスする(6)。これは半切の楕円体についても成り立つので、衝撃波利用の結石破碎装置はこの原理を利用する。結石破碎の初期の基礎研究として、短径90mm、長径127.3mm、長短径比1.414の楕円を用い、モデル結石の破碎実験を試みた。モデル結石は直径5mm程度の焼結アルミナの球で、実際の腎臓結石の強度に比して非常に強く、圧壊強度も大きいので、衝撃波フォーカシングでこの石を壊すことができれば、十分と判断した。アジ化鉛約10mgをガラス・ファイバーの先端に張り付けて、回転楕円体の第一焦点に置きルビー・レーザー光を用いて起爆した。発生した球状衝撃波は反射して、回転楕円体の外側の第二焦点にフォーカスする。モデル結石を糸に張り付けて第二焦点におき、その周りに瞬間的に、衝撃波フォーカシングによる高圧を発生させる。

図5はモデル結石に衝撃波をフォーカスさせる過程を、ホログラフィー法で観察した一連の粗写真である。(a)は二重露光ホログラフィー干渉計法による結果で、モデル結石に衝撃波が丁度フォーカスした瞬間である。(b)はこれより数 μ sec後、一回露光の観測結果で結石の周りにはキャビテーション気泡群、矢印、が見れる。キャビテーションとは常温で起こる液体の沸騰現象で、ここでこの現象が現れるのは以下の理由による。第二焦点に衝撃波がフォーカスすると、その高圧は非常に短時間持続し、その後直ちに大気圧近くに減衰する。その圧力の急激な減少は、水に非常に大きな引っ張り

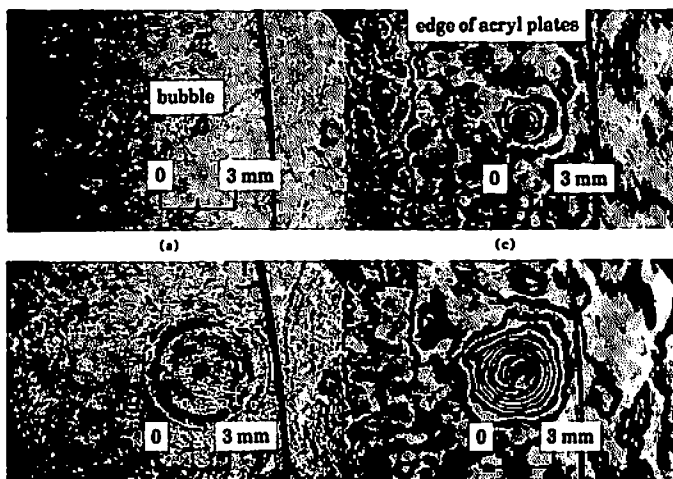
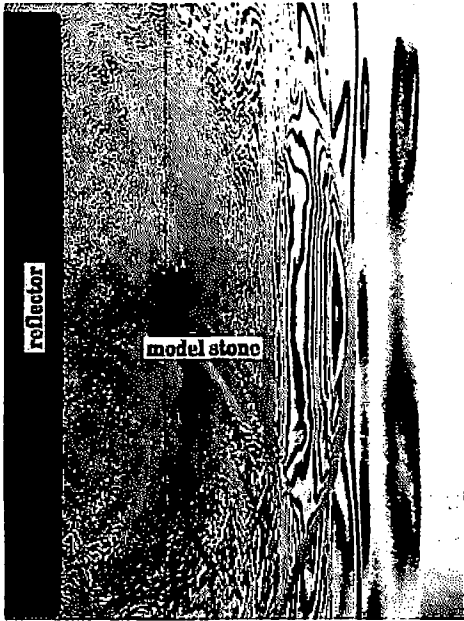
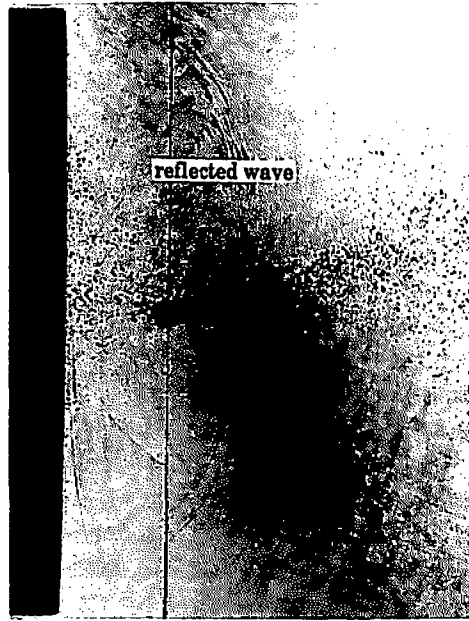


図4 二次元気泡と衝撃波の干渉



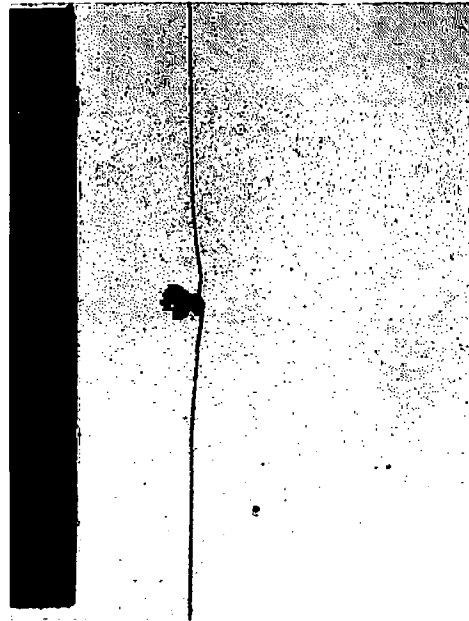
(a)



(c)



(b)



(d)

図 5 モデル結石への衝撃波フォーカシング、キャビテーション気泡の発生とその崩壊が観察される。

力を誘起し、水の抗張力を越える。その結果、水は引きちぎられて、古い替えると常温で沸騰して、気泡群が発生する。(c)では、結石は破砕される。結石は高圧にさらされてまず収縮してひび割れ、その後収縮の反作用として膨張するときに壊れる。この結石の崩壊過程は高速映画による観測で確認されている(4)。

フォーカスする衝撃波は、教科書に説明されているような単一の波形ではなくて、その背後に反射衝撃波あるいは様々な圧縮波を伴う(4)。キャビテーションの気泡群はこの付随する衝撃波と干渉し、写真(c)に現れる小さなリングは、このような衝撃波が気泡と干渉・反射し発生した膨張波である。この時、崩壊する気泡は

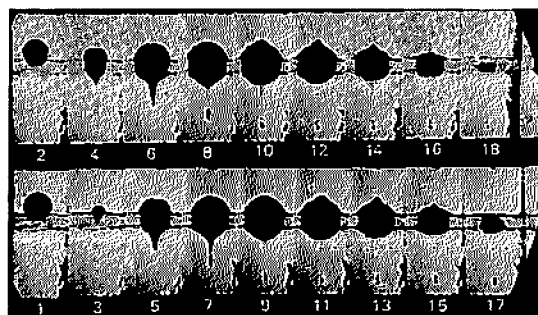
マイクロ・ジェットあるいは再膨張衝撃波を発生し、局所的な高圧を発生する。実際の臨床応用で、体内に衝撃波をフォーカシングするときにも、結石の周りにあられるこのような気泡群は、衝撃波あるいは圧縮波と干渉すると考えられる。この時も、気泡群は崩壊し局所的な高圧を発生し、気泡群は生体損傷の原因になると考えられる。(d)は衝撃波フォーカス後、数ミリ秒時間経過した時、破碎された結石が粉々になって飛び散る瞬間の写真である。高速映画の観測から、飛び散る結石の破片の速度は非常に小さく、決して生体に貫入するようなことは起こらない。

生体損傷のモデル実験

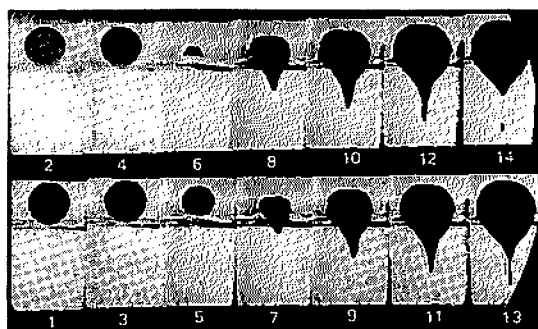
気泡と衝撃波の干渉によつて、なぜ生体損傷が起るか、一つのモデル実験を試みる。生体組織を見立てた寒天の上に、空気泡において微小爆発の衝撃波を作用させる。図6は直径1.56および2.42mmの気泡に過剰圧200気圧の衝撃波を作用させ、毎秒100,000駒で高速撮影した結果である。気泡は衝撃波と衝突すると、直ちに収縮し始め、最小体積に達し再膨張が始まると、マイクロ・ジェットは気泡壁を破り、針で突き抜くように寒天中を深く貫通する。気泡が貫通する深さは、衝撃波の過剰圧に比例し、また、過剰圧が一定ならば、最大貫通深さを与える気泡直径が存在すると推定され

る。気泡は衝撃波フォーカシングの数10msec後でも残ることが観測されている(4)。従って、このような気泡に衝撃波フォーカシングの高圧が作用すると、気泡は十分深く貫通することが考えられる。この気泡の振舞いは、ここでモデル化した空気泡についてばかりでなく水蒸気泡でも同様に起こる。

また、臨床応用では衝撃波フォーカシングを繰り返す。気泡と衝撃波との相互作用が生体損傷につながることを考えれば、この繰り返し数をできる限り減らして、最大治療効果をあげることが望ましい。また、繰り返し間隔が余り短い場合には、気泡が消滅する前に、次の衝撃波が気泡と干渉し、生体損傷を助長する可能性を高める。従って、衝撃波繰り返し間隔は数秒程度であることが望ましい。微小爆発を用いる結石破碎法では、衝撃波繰り返し数は、結石の大きさにもよるが、約5秒毎に平均200-300回と言われ、現在公表されているほかの装置に比べて、けた違いに小さい繰り返し数を示す。衝撃波フォーカシングに原因する生体損傷は、動物実験で観測されている。図7は衝撃波フォーカシングを繰り返した、犬の腎臓の弓状動脈の断面の顕微鏡写真である。動脈壁の一部に針で突き破って壊死したような跡がある。この効果は、気泡と衝撃波の相互干渉の結果によると考えられる(5)。



(a)



(b)

図6 寒天の上に置いた気泡と衝撃波の干渉。(a)直径1.5mm、(b)直径2.4mm

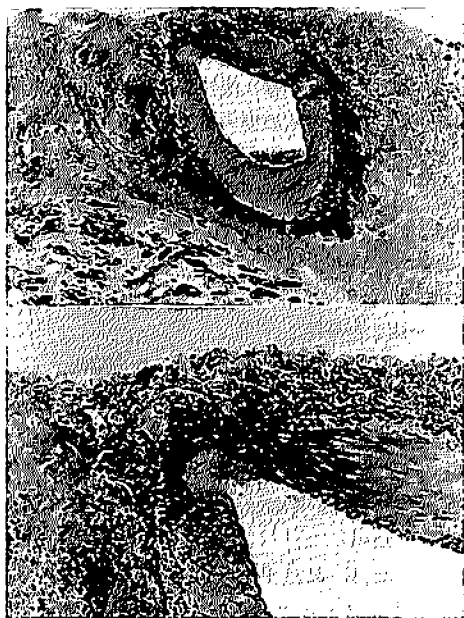


図7 衝撃波フォーカシングによる臓器損傷の一例、文献⁵⁾

気泡を張り付けた爆薬の殉爆

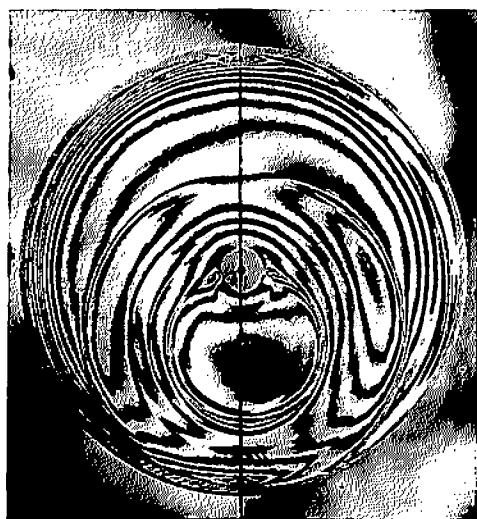
二つのアジ化鉛約8mgのペレットを約18mm間隔で糸に貼り付け水中に置き、その中の一つを起爆した時、第二のペレットは殉爆するか否かを実験的に確認する。図8にその観察結果を示す。(a)微小爆発で発生した衝撃波が、一個の小さな気泡を張り付け約18mm離して置いたもう一つの微小爆薬のペレットに作用する。この時、気泡は崩壊し再膨張衝撃波とマイクロ・

ジェットをつくる。しかし、第二の微小爆薬は起爆されずに残る。この条件下では、二つの微小爆薬の間隔は殉爆距離よりも大きいことになる。次に(b)、第二の微小爆薬に直径0.5-1.0mmの複数個の気泡を張り付けて、同じ間隔だけ離して置く。微小爆発で発生した衝撃波がこの気泡をもつ第二の微小爆薬に作用すると、これは見事に殉爆する。Aは第一の微小爆発で発生した衝撃波、Bは気泡の貼り付いた第二の微小爆薬、Cはこれらの気泡と第一の衝撃波が干渉した反射膨張波、Dは、気泡と衝撃波との干渉の結果現れる再膨張衝撃波あるいはマイクロ・ジェットによって、第二の微小爆薬が殉爆してできる衝撃波を示す。Eは第二の衝撃波が第一微小爆薬の爆発生成気体と干渉してあらわれる反射膨張波である。爆薬を吊した糸とA、Dとの交点の距離は、最初の衝撃波が作用して第二の微小爆薬が殉爆するまでの時間差に対応する。

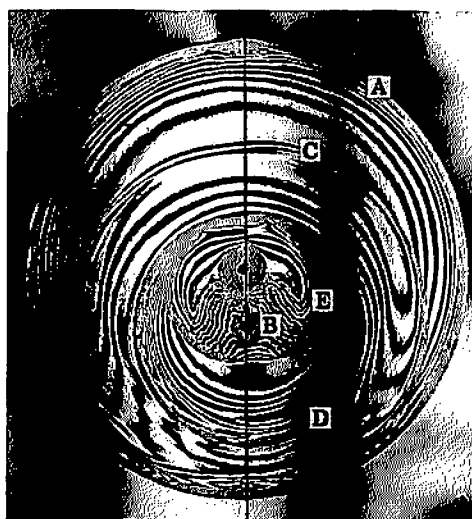
このような衝撃波と気泡との干渉は、スラリー爆薬の爆轟が継続する過程を解明する問題に共通のヒントを与えていると思われる。今後、この種の問題の解明に有効な数値シミュレーション法の開発と、これを検証するより正確な光学可視化技術さらに温度・圧力測定法の開発が非常に重要と思われる。

まとめ

微小爆発による水中衝撃波に関する研究は、前報(4)で解説したように、水中衝撃波フォーカシングによる体外結石破砕装置開発の基礎となった。この微小爆発を利用した体外衝撃波結石破砕術は医療と流体科学との学際研究の成果で、画期的な治療法として有効性



(a)



(b)

図8 気泡崩壊によるアジ化銀ペレットの殉爆

は確立されている。また、現在、水中衝撃波を発生させるために種々の方法が提唱されている。しかし、それぞれの手法の評価とそれに伴う、それほど深刻ではないと言われているが、副作用としての生体損傷効果の解明は、重要な基礎研究課題の一つである。気泡と衝撃波との干渉現象は、物理的な損傷原因の一つとも考えられる。本報では、前報を補足する目的で、特に衝撃波と気泡との干渉問題をやや詳細に解説した。

微小爆発を利用した水中衝撃波の研究を始めるにあたって、このことに関する様々な知識はColeの教科書(1)に全てが網羅されていて、付け加えることがないかのように思われた。しかし、最近、レーザーとエレクトロニクスを中心とした計測技術の進歩と、特にスーパーコンピュータを駆使した数値シミュレーション技術のめざましい発展に支援されて、水中衝撃波の基礎研究と特にその平和利用に関係する多くのことが発見されている。水中衝撃波解明の基礎と応用に限っても、この研究課題を時代に対応するデータベースの形に整備する時期に差し掛かっているのではないかと(2)と言う印象を持つ。

今後、ハイ・テクを支える重要なエネルギー源として、火薬類の存在価値はますます高まることが期待されている。そのために、爆発に伴う衝撃波現象の研究は、要素研究として必要になる。本報は、会員諸氏に衝撃波研究が将来ますます必要となることをご理解いただくことの一助となることを願い、まとめとする。

終わりに臨み、本報をまとめるに当たり資料の提供を得た、東北大学医学部泌尿器科教室桑原正明助教授、庵谷正治博士、同じく第一外科教室伊勢秀雄講師、北山修助手、阿部裕博士、工業技術院化学技術研究所田中克己博士および中国化薬鶴亀島望研究員の協力を謝意を表す。また、アジ化銀ベレットの供給は、中国

化薬鶴のご好意による。実験は東北大学流体科学研究所衝撃波工学研究センターの小野寺 収、富田幸雄助手および小島英則、高橋喜久雄技官、東北大学大学院工学研究科阿部晃久院生の協力をえた。ここに付記しそれぞれ謝意を表す。

文 献

- 1) Cole, H., Underwater Explosions, Princeton University Press (1984)
- 2) 文部省科学研究費重点領域研究衝撃波現象の解明, 平成2年発足。
- 3) Chaussey Ch., Extracoporeal Shock Wave Lithotripsy, Karger (1982)
- 4) 高山, 工業火薬50(1989), pp. 28-34
- 5) Ioritani, M., et al, Proc. 17th Intern. Symp. on Shock Tube and Waves, Lehigh Univ (1990), to be published.
- 6) Takayama, K., et al, Proc. 14th Intern. Symp. on Shock Tubes and Waves, Sydney (1983), pp. 551-562
- 7) 亀島ほか, 西部支部総会予稿集(1989)
- 8) Caufield, H. J., Handbook of Optical Holography, Academic Press (1979)
- 9) Takayama, K., Proc. Intern. Symp. on Shock Tubes and Shock Waves, (1987), pp.51-62
- 10) Takayama, K., et al, Proc. IUTAM Symp. on Nonlinear Waves in Adiabatic Flows, Gottingen (1989), to be published.
- 11) Heukroth, E. L. and Glass, I. I., UTIAS Rep. No.96 (1964)
- 12) Kuwahara, M., et al, Proc. 17th Intern. Symp. on Shock Waves and Shock Tubes, Lehigh Univ., (1990), to be published.

Underwater Microexplosions and Their Applications to Medicine

by Kazuyoshi TAKAYAMA*

Quantitative holographic interferometric investigation was made of generation, propagation and focusing of underwater shock waves generated by microexplosions. Interference of the underwater shock waves with cavitation bubbles was discussed.

The result was consequently applied to interpret mechanism of tissue damage which occurred when the microexplosion was used for extracorporeal shock wave lithotripsy. The shock bubble interaction is responsible for some types of the tissue damage. It was also shown that the shock-bubble interaction can be important to initiate microexplosive pellets on whose surface air bubbles were attached.

(*Shock Wave Research Center, Institute of Fluid Science, Tohoku University
2-1-1, Katahira Aoba, Sendai 980, Japan)
