キャビテーション衝撃圧力に関する一研究*
(液体マイクロジェットの影響評価)木 本 日出夫**, 加 本 明****
広 瀬 達 三***, 吉 信 宏 夫**A Study on Impulsive Pressure of a Collapsing Cavitation Bubble
(Evaluation of the Effect of a Water Microjet)Hideo KIMOTO, Akira KAMOTO,
Tatsuzo HIROSE, and Hiroo YOSHINOBU

The motion of a spark-induced cavitation bubble was examined near a solid boundary by high-speed photography and the impulsive pressure generated at its collapsing stage was detected by a local pressure sensor, which was manufactured for trial with four small sensor elements. As a result the impulsive pressures of a shock wave and of a water microjet were separately measured by the local pressure sensor, and the result was ascertained by high-speed photographs of the cavitation bubble, which indicated a microjet was generated at the top surface of the collapsing bubble, impacting one of the pressure sensor elements through the bubble inside at its collapsing stage. Moreover, the diameter of the generated microjet tip and its travelling velocity through the bubble inside were evaluated to be about 0.5 mm and 100~110 m/s, respectively.

Key Words: Cavitation, Impulsive Pressure, Microjet, Shock Wave, Local Pressure Sensor, High-speed Photograph

1. ま え が き

キャビテーション気泡の挙動と発生する衝撃圧力に関する研究については最近、藤川・赤松⁽¹⁾によって総括・展望されているのでその詳細は省略するが、キャビテーション気泡の圧壊・再膨張時に発生する衝撃圧の発生原因については多くの研究成果があるにもかかわらず今なお問題点が残されている。

今日ではキャビテーション気泡の収縮・再膨張時に衝撃波が発生するのは、気泡近傍に固体壁が存在する場合にも認められているが⁽²⁾⁽³⁾、いわゆる液体マイクロジェットの発生に関しては、その衝撃力の程度や発生時期に関してまだ解明すべき点が多く残されているといえる。

著者らは以前の研究において、固体壁面近傍で発生させた水中放電気泡を用いて、固体壁面近傍で収縮・再膨張するキャビテーション気泡からの衝撃圧力の発生原因として液体マイクロジェットの作用と衝撃波の作用の共存する可能性を示唆した⁽⁴⁾。また、比較的低

エネルギーのパルスレーザを用いて発生させた固体壁面上の半球状の気泡ではこの液体マイクロジェットが発生する可能性の小さいことを示した⁽⁵⁾。一方、Shimaらは水中放電気泡を用いた同様の実験条件下で、イメージコンバータカメラと圧電形圧力変換器を駆使してこの液体マイクロジェットと衝撃波の共存の事例を明らかにしているが⁽²⁾⁽⁶⁾、液体マイクロジェットの発生が必ずしも明確でなく、また衝撃圧力の観測に供せられた圧力変換器が単一であったために、この共存した衝撃圧力を液体マイクロジェットの作用によるものと衝撃波の作用によるものと明確に分離して結論づけたと言いきれない部分があった。したがって、藤川ら⁽¹⁾はこの液体マイクロジェットと衝撃波の作用の共存ということに若干の疑念を残している。

そこで本研究では、このキャビテーション気泡の収縮・再膨張時に発生する衝撃圧力の発生原因を明確にする一手段として、固体壁面中に受圧面積の小さい4個の局所圧力センサ素子を埋め込み、その近傍で発生させた水中放電気泡の収縮・再膨張時に観測されるそれらの出力波形と高速度カメラによって撮影された気泡の消長写真とを利用した。そして水中放電によるキャビテーション気泡によって発生する衝撃圧力波形の中で、固体壁面近傍で収縮する気泡中を貫通するマイ

* 昭和61年8月19日 第937回講演会において講演、原稿受付 昭和61年3月27日。

** 正員、大阪大学基礎工学部 (〒560 豊中市待兼山1-1)。

*** 正員、福井工業大学 (〒910 福井市学園3-618)。

**** 学生員、大阪大学大学院。

クロジェットを観測することによって、液体マイクロジェットに起因する衝撃圧力部分を明確にした。さらに、観測されたマイクロジェットの速度と先端直径を測定して液体マイクロジェットによって発生する衝撃圧力の程度を明らかにした。

2. 実験装置と実験方法

2.1 装置と方法概要 本実験装置のブロック図を図1に示す。

本実験で使用した水中放電装置②は、電源電圧をトランスで1kVに昇圧したのちダイオードで半波整流して耐圧8kV、容量1 μ Fにチャージされた電氣量を10k Ω のホーロー抵抗ならびにリレー接点を介して外径0.1mmの銅電極間で、①のスイッチングによって放電させるものである。寸法100mm $\times$ 100mm $\times$ 200mmの亚克力樹脂製容器⑩の中に煮沸脱気後急冷したイオン交換水を満たし、局所圧力センサケーシング⑪の表面近傍においてこの装置によって水中放電させると直径約9mmの単一気泡が発生する。この時、

フラッシュトリガ回路③によって高速度写真撮影用のパワーフラッシュ⑤を発光させて高速度カメラ⑥で発生気泡の挙動を撮影する。これと同時に気泡から発生する衝撃圧力を4素子から成る局所圧力センサを介して4チャンネルのデジタルメモリおよびメモリユニット (TRIO, MS-1650 B, 1652) ⑧によって同時記録したのちデータ出力バスを介してマイクロコンピュータ⑨に各チャンネルのデータを転送し、必要なデータ処理を行った。

2.2 局所圧力センサ 試作した局所圧力センサの素子は、厚さ4.5mm、共振周波数500kHzのチタン酸バリウム圧電素子をストリングソーを用いて幅0.45mm、長さ5mmに切断したものである。この素子の配線には直径0.1mmの銅線を用い、実体顕微鏡下で電極のはんだ付けを行った。これを1.83mm間隔で4個を平行に並べ、これらの受圧面が素子ホルダの表面と同一平面になるように取付けた。なお、これらのセンサ素子間ならびに素子-素子ホルダ間の外部衝撃力に対する相互干渉を防ぐために、素子間なら

図1 キャビテーション実験ブロック図

図2 局所センサ受圧部詳細

図3 キャビテーション気泡の高速度写真例 ($L_n=1.11$)

びに素子-素子ホルダ間の間げきには軟質のシリコンゴム（信越化学工業，KE 45-T）が充てんされている。この素子ホルダは黄銅製の円管（外径 35 mm，長さ約 100 mm）から成っており，センサ出力に対するノイズシールドとして，ならびにその直径 35 mm の黄銅製の端面はキャビテーション実験時の固体壁面として用いられている。またこの他端から BNC 端子を介して外部に信号を取り出しているが，このホルダ端面の圧力センサ素子の設置状況を図 2 に示す。

2.3 素子の感度校正 試作された圧力センサはキャビテーションによる衝撃圧力の測定に供されることを考慮して，素子の感度校正のための音源として水中放電キャビテーション気泡によって発生する衝撃圧力を利用した。この感度校正の基準としては市販の圧力変換器（PCB，111 A 24，共振周波数 400 kHz）を用

図 4 局所圧力センサの出力波形

いた。この校正方法では，局所圧力センサの受圧面と圧力変換器の受圧面とが向かい合うように設置し，その間で水中放電キャビテーション気泡を発生させ，1 回めの再膨張時に発生する衝撃波による各素子の出力と圧力変換器の出力とを比較校正する方法を採用した。

3. 実験結果および考察

本実験においては気泡と固体壁面との距離を表すために無次元壁面距離⁽⁴⁾を用いている。以下に本実験結果の中でこの無次元壁面距離 (L_n) をパラメータとして代表的な 3 種類を選び，それぞれの実験結果を述べる。

3.1 壁面に接して収縮する場合 本実験の水中放電によって固体壁面近傍で気泡を発生させる場合，無次元壁面距離が 1.0~1.1 程度のキャビテーション気泡は固体壁面に接して収縮する。そこでこの実験条件で透過光によって撮影された水中放電キャビテーション気泡の高速度写真の一例を図 3 に示した。撮影された気泡の挙動の時間基準としては，水中放電の火花が明るく写っているこまを採用した。各写真の下部にはこの時間基準からの経過時刻が付記されている。

局所圧力センサの出力波形を記録しているデジタルメモリのトリガを水中火花放電時の衝撃波によってかけており，1 $\mu\text{s}/\text{word}$ でデジタルメモリの書き込みを行っているが，この衝撃波形の 800~1 020 μs の部分を拡大して図 4 に示した。図 4 中には 4 個の局所圧力センサ素子の出力波形が CH 1~CH 4 として同じ時間軸で示されているが，CH 2 の素子の出力波形

図 5 マイクロジェットの発生状況

には約 910 μs から波形の立ち上がりが認められる。そして 950 μs 付近では約 1.0 MPa に達している。また 960 μs 付近では各チャンネルにノイズが現れており、CH 2 の素子では約 2.7 MPa の圧力値が観測されている。図 3 に示した高速度写真では、気泡の収縮末期 (873 μs 以後) に気泡中に液体マイクロジェットが発生し気泡中を貫通して固体壁面に衝突するのが観測されている。そこで高速度写真のネガフィルムを実体顕微鏡によって拡大撮影し、気泡中の液体マイクロジェットの発達状況を見やすくし、プリントして図 5 に示した。図 5 中の気泡ならびに液体マイクロジェットはポジフィルムから焼き付けられているため明暗が反転している。各写真の下部には局所圧力センサ素子の気泡に対する位置関係が示されており、付記されている数字は図 4 のチャンネル番号に対応している。また、各写真には基準時間からの経過時刻も示されている。さら

に、図 4 の下部には図 5 の (A)～(J) の写真に相当する時刻が示されている。図 5 から明らかなように、気泡頂部から発生した液体マイクロジェットは気泡中を貫通して固体壁面に衝突している。そこで、写真から気泡の上下壁面ならびにマイクロジェット先端の固体壁面からの距離を測定し、それらの時間変化を図 6 に示した。

図 5 (E)～(G) で気泡中に見られる液体マイクロジェットの先端直径は約 0.5 mm であり、また、そのジェット先端の移動速度を図 6 から求めると、約 100 m/s である。この値は Benjamin ら⁽⁷⁾ が減圧下で観測した 10～35 m/s の値よりは大きく、Naude ら⁽⁸⁾ が半球気泡中で観測した値にほぼ一致している。

図 5 (H) は発生した液体マイクロジェットが固体壁面 (ほぼ局所圧力センサ素子 No. 2 の受圧面上) に衝突したとみなされる気泡写真であるが、この時刻に図 5 の CH 2 の圧力値が上昇を開始していることから、この圧力上昇はマイクロジェットによるものであると考えられる。また、図 3 に示した高速度写真中で気泡が最小径になっている時刻付近で図 4 の各素子の圧力波形にピークが現れていることから、この時刻の圧力値はキャビテーション気泡の再膨張時に発生した衝撃波によるものであると考えられる。したがって、本実験においてはキャビテーション気泡の収縮・再膨張時に発生する衝撃波によって生ずる衝撃圧力と、液体マイクロジェットによって生ずる衝撃圧力が分離計測されたと考えられる。

上述と類似の実験条件で固体壁面上に発生させたキ

図 6 気泡の上下壁面とジェット先端位置の時間変化

図 7 局所圧力センサ上の気泡の立体的な高速度写真例

キャビテーション気泡の挙動を立体的に高速度写真撮影し、収縮時のキャビテーション気泡頂部の様子を明らかにした。その結果の一例を図7に示した。各写真中で気泡下部に黒く四角に見えるのは、図2に示した局所圧力センサの受圧部分であり、この左方からCH1~CH4の順で並んでいるので、この場合の気泡中心はほぼCH2の素子上にある。この結果では880 μs 付近から気泡頂部の陥没が始まっており、916 μs の写真では気泡中のマイクロジェットが固体壁面（センサ受圧面上）に達するのが認められる。この時の各圧力センサ素子の出力波形を図8に示しているが、CH2の波形が920 μs 付近で立ち上がっているのが認められる。また、図8で各センサ素子にノイズが認められる980 μs 付近では気泡はまだリング状を保っており、また気泡から離れているCH4のセンサ素子のノイズ出力は非常に小さい。

3・2 壁面近傍で収縮する場合 本実験の場合、無次元壁面距離が1.3程度になると、キャビテーション

図8 局所圧力センサの出力波形

ン気泡は変形しながら収縮し、最小径に達した後の再膨張時に急速に固体壁面に接近し衝突する。そこでこの実験条件で透過光によって撮影されたキャビテーション気泡の高速度写真の一例を図9に示した。また、同時に測定した局所圧力センサの出力波形を図10に示している。図9では810 μs から気泡内部に液体マイクロジェットの発生が認められ、834 μs 付近で気泡の下部壁面に衝突している。そして気泡中を貫通したマイクロジェットは水中を進行し、約870 μs 後に固体壁面に衝突している。

この収縮末期の気泡の状況を実体顕微鏡で拡大撮影した結果を図11に示した。図11中の各写真下部に3個半円状に写っているのは図2に示した圧力センサ素子に取付けたリード線のはんだ部分であり、したがって各センサ素子の位置を示している。

図11によると、(B)で認められるマイクロジェットは(F)で気泡下壁面に衝突して気泡内を貫通しているが、このマイクロジェットが貫通した後に残されたリング状の気泡が(J)で崩壊しており、その後再膨張するこの気泡に押されるようにジェットが固体壁面（センサ素子No.2の受圧面上）に(L)で衝突している。したがって本実験の場合には858 μs 付近で崩壊した気泡の再膨張時に発生する衝撃波による衝撃圧力の方がマイクロジェットの衝突による衝撃圧力よりも先に観測されることになる。図10によるとこの衝撃波による衝撃圧力は860 μs 付近に認められる。一方、マイクロジェットが気泡下壁面に衝突した時刻からCH2のセンサ素子の出力波形に圧力上昇が認められている。これは、著者らが以前に行ったモデルマイクロジェットに関する実験⁽⁹⁾において薄い液層をジェットが進行中に観測された固体壁面上での圧力波形に相当するものであると考えられる。

図9 キャビテーション気泡の高速度写真例 ($L_n=1.29$)

これらの写真から気泡の上下壁面ならびにマイクロジェット先端の固体壁面からの距離を測定し、それらの時間変化を図 12 に示した。この結果の気泡中でのマイクロジェット先端直径は約 0.5 mm であり、また図 13 から求められるマイクロジェット先端の速度は気泡中で約 110 m/s、気泡貫通後の水中で約 30 m/s である。この水中でのジェットの速度は、著者ら⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾が直径約 1 mm のモデルマイクロジェットを用いて行った場合の半分程度の値となっている。

3・3 壁面から少し離れて収縮する場合 壁面から遠く離れたキャビテーション気泡は一般に球形を保ったままで収縮し、その再膨張時にもほぼ球形を保っており、液体マイクロジェットは形成されない。そして再膨張時には強い衝撃波が発生する。しかしながら、壁面から少し離れたキャビテーション気泡はほぼ球形

を保ったままで収縮するが、その再膨張時直後にマイクロジェットの形成が認められる。このような実験条件におけるキャビテーション気泡の高速度写真の一例を図 13 に示した。また同時に測定された局所圧力センサの出力波形は図 14 に示されている。

本実験の場合は長時間にわたる気泡の挙動を観測するために各写真の時間間隔は約 12 μ s になっているが、発生した気泡は 789 μ s 付近で最小径に達したのち再膨張している。また、1270 μ s 付近では再び最小径に達したのち二度めの再膨張を行っている。これらの時刻に図 14 に示されている各圧力センサ素子の出力波形に衝撃的な圧力波形が認められる。

しかるに、このキャビテーション気泡が一度めの再膨張を行った直後の 801 μ s の写真にはすでに気泡中にその内部を貫通したマイクロジェットが認められている。このマイクロジェットは気泡下壁から下部に貫けているが、気泡が二度めの最小径に達するまで気泡内部にマイクロジェットの存在するものが図 13 の写真で明らかであり、この結果は Lauterborn ら⁽¹¹⁾がパルスレーザによって固体壁近くで発生させたキャビテーション気泡で観測したものと類似している。また、図 14 に示した圧力波形においてこのマイクロジェットによると特定し得る圧力は上述の 2 例に比べて明確ではない。このように再膨張直後の気泡中にマイクロジェットが観測されるということから、最小径に達した気泡中にすでにジェットが存在していたと考えるのが自然である。したがって気泡収縮末期にマイクロジェットが気泡を貫通し、リング状になった気泡が再膨張し、この気泡の再膨張によってジェットの速度が弱め

図 10 局所圧力センサの出力波形

図 11 マイクロジェットの発生状況

られているという推定も可能と考えられる。

3・4 マイクロジェットの影響 上述の代表的な3例を含む一連の実験によって得られた液体マイクロジェットならびに衝撃波による衝撃圧力値を、キャビテーション気泡の無次元壁面距離との関係として図15に示した。本実験を通じて固体壁面上の局所圧力センサによって得られた液体マイクロジェットによるものと思われる衝撃圧力値は0.5~2.5 MPa程度であり、この圧力を発生させたマイクロジェット径はその先端部で0.5 mm程度、その主体部分で1 mm程度であった。また、マイクロジェット先端の速度は100~110 m/s程度であった。ところで本実験に用いて

いる局所圧力センサ素子は受圧面幅は0.45 mmではあるが、その受圧部長さは電極部を除いて約4 mmあり、発生した液体マイクロジェットがこの受圧面全面には作用していないこと、またこの素子の感度校正には素子の受圧面全面に作用する衝撃波による衝撃圧力を用いていることから、発生したマイクロジェットによって生ずる真の衝撃圧力値は本実験で測定した値の数倍になる可能性はある。さらに、発生したマイクロジェットが圧力センサ素子の受圧面を直撃していない場合は衝撃圧力値は小さめに測定される可能性がある。それでもいわゆる水撃作用を仮定してマイクロジェットの速度から推定される衝撃圧力値(150 MPa程度)に比べると1オーダー小さい値であると言える。

また、実験条件によって差が大きいのが、本実験で得られた圧力波形から推定されるマイクロジェットによるものと思われる衝撃力の持続時間も20~60 μs と比較的大きく、この結果は著者らが以前行った直径約1 mmのモデルマイクロジェットによって薄い水の層を介して得られた衝撃圧力波形の値に類似していると言える⁽⁹⁾。したがって本実験範囲内で得られた液体マイクロジェットによる衝撃圧力の発生因はジェットの衝撃作用によるというよりは、いわゆるジェットのよどみ圧作用⁽¹²⁾によるものに近いと考えられる。この結果は著者らがモデルマイクロジェットによって得た結

図 12 気泡の上下壁面とジェット先端位置の時間変化

図 13 キャビテーション気泡の高速度写真例 ($L_n=2.90$)

図 14 局所圧力センサの出力波形

論と類似している⁽¹³⁾。

4. 結 論

以上の研究によって得られた主な結論を以下に列記する。

(1) 本実験範囲の水中放電気泡の収縮時に発生する液体マイクロジェットの水撃作用は、100~110 m/s 程度、またその先端直径は 0.5 mm 程度、主体部分径は 1 mm 程度である。

(2) 本実験で発生した液体マイクロジェットによって生ずる衝撃圧力値は、ジェットの衝撃作用というよりは、よどみ圧作用を仮定して推定される値に近い。

(3) 液体マイクロジェットが固体壁面に作用する時期は、収縮する気泡の場所などの条件によって、衝撃波発生時期の以前になる場合と直後になる場合が存在する。

(4) 固体壁近傍で収縮するキャビテーション気泡の場合、気泡下壁に衝突後に液中を進行するマイクロジェットによるよどみ圧が壁面に作用する場合があ

図 15 実測衝撃圧力値と無次元壁面距離の関係

る。

(5) 固体壁面から比較的離れた気泡の最初の再膨張時観測されるマイクロジェットの壁面への衝撃作用は小さい。

本研究は、昭和 59~60 年度文部省科学研究費補助金〔一般研究(B)、課題番号 59460085〕を利用して遂行されたことを記し、関係各位に謝意を表する。

文 献

- (1) 藤川・赤松, 機論, 50-450, B (昭 59), 293.
- (2) Shima, A., ほか 3 名, *Acustica*, 48-5 (1981), 293.
- (3) Fujikawa, S. and Akamatsu, T., *J. Fluid Mech.*, 97-3 (1980), 481.
- (4) Tsuda, Y., ほか 3 名, *Bull. JSME*, 25-210 (1982), 1890.
- (5) Kimoto, H., ほか 3 名, *Bull. JSME*, 28-238 (1985), 601.
- (6) Shima, A., ほか 3 名, *AIAA, J.*, 21-1 (1983), 55.
- (7) Benjamin, T. B. and Ellis, A. T., *Phil. Trans. R. Soc., A* 260-1110 (1966), 221.
- (8) Naude, C. F. and Ellis, A. T., *Trans. ASME, Ser. D*, 84-3 (1961), 648.
- (9) Hirose, T., ほか 2 名, *Bull. JSME*, 26-218 (1983), 1340.
- (10) Kimoto, H., ほか 2 名, *Bull. JSME*, 27-234 (1984), 2698.
- (11) Lauterborn, W. and Bolle, H., *J. Fluid Mech.*, 72-2 (1975), 391.
- (12) Hammit, F. G., *Cavitation and Multiphase Flow Phenomena*, (1980), 220, McGraw-Hill.
- (13) Kimoto, H., ほか 2 名, *Proc. 2nd Int. Conf. Cavitation*, (1983), 57.

討 論

〔質問〕 嶋 章・富田 幸雄

〔東北大学高速力学研究所〕

キャビテーション気泡の崩壊により発生する液体マイクロジェットの衝突圧の分離計測に成功され、有意義な結論を得られたことに対し敬意を表する。

(1) 気泡内部を可視化する際、特に注意されたことは何か。

(2) 水撃圧の持続時間は、貴報の場合 10^{-7} s のオーダーであるためこれをとらえることは困難である。一方、ジェットの衝突速度 100 m/s に対応する岐点圧は約 5 MPa であるが、実測値はなぜその半分程度の値なのか。

(3) 最近、質問者らは放電気泡の崩壊に関する実験から材料損傷に直接寄与する衝撃圧として、固体壁

に衝突後の液体マイクロジェットのその後の高速せん断流と収縮しつつある気泡側壁との衝突に起因して発生する局所的な衝撃圧を明らかにしている(付1)(付2)。この点に関する著者のご意見をお聞かせ願いたい。

〔回答〕 (1) 高速度写真撮影用のパワーフラッシュを実験容器にできるだけ接近させて設置し、カメラのピント調整に細心の注意を払った。

(2) 本実験の範囲で発生した液体マイクロジェットの作用はいわゆる水撃作用ではないと考えている。また本文中(3・4節)に述べているとおり図15に示したマイクロジェットによる衝撃圧力値は、実際の発生値に換算すれば数倍になる可能性がある。したがって実際に発生していた液体マイクロジェットの衝撃圧力値は岐点圧程度と推定している。

(3) イメージコンバータカメラなどを駆使した一連の詳細な実験から到達された質問者のお説のように、液体マイクロジェットの衝突によって誘起される放射状の流れが気泡側面を突破の際に気液界面が複雑な分裂を起こし、その際に形成される多数の小気泡が主気泡の圧壊によって生じた液中の高圧場にさらされて崩壊し、円形状に分布したエロージョンピットを生ずる可能性は十分に考えられる。また、液体ジェットが貫通した後の円環状の主気泡自体がさらに収縮する際に不安定となり、周方向に分裂して多数個の小気泡を生み出し、これらの大きさの異なる円形状に分布した小気泡が個々にさらに圧壊するために、ほぼ同一円周上に種々のエロージョンピットを生ずるということも考えられる。

なお、質問者らは壁面上の空気泡を水中放電による衝撃波を用いて圧壊させる詳細な実験を行い、数多くの新しい知見を得ておられるが(付1)~(付3)、この空気泡の圧壊の場合は、発生した液体マイクロジェットが貫通した後の円環状の主気泡がさらに収縮する際に周方向に分裂して多数個の小気泡になる可能性が小さいために、液体マイクロジェットの衝突部以外の主気泡の部分で気泡内空気の圧縮による高温-高圧状態が実現され、固体壁面(インジウム表面)上に円環状の溶融したエロージョン形状も観測されているのではないかと考えている。

〔質問〕 大場 利三郎〔東北大学高速力学研究所〕

(1) センサはかなり気泡に接近しているから、その材料の音響インピーダンスも気泡の挙動に関与することが考えられる(付4)。ついては、素子間の間げきに充てんされている軟質のシリコンゴムの音響インピーダンスを明示したほうがよろしいのではないか。

(2) この種の感度校正の物理的現象の理解のため

に、その基準となっている圧力変換器の受圧面積を示してはどうか。

〔回答〕 (1) メーカーによると、シリコンゴム KE 45 T の密度は $(1.0 \sim 1.1) \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ の範囲で平均的に $1.05 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ とのことであるが、このシリコンゴム中の音速は測定されておらず音響インピーダンスは明らかではない。なお、メーカより送付された参考資料(付5)によると、音速値として 1250 m/s が採用されているので、シリコンゴムの音響インピーダンスは水の値に近いと考えられる。

(2) 感度基準として用いた圧力変換器(PCB 111 A 24)の受圧面直径は 5.5 mm 、受圧面積は約 23 mm^2 である。

〔質問〕 藤川 重雄〔京都大学工学部〕

大変入念な実験をなされたことに対し敬意を表す。

(1) 図15を見ると全体に液体マイクロジェットによる衝撃圧力値が衝撃波のそれよりも小さくなっているが、液体マイクロジェットが支配的になるような場合がもしあるとすればそれはどのような場合か。

(2) 液体マイクロジェットの衝撃圧力はジェットの速度ばかりではなく、サイズ、作用時間などにも関係していると考えられるが、これについてはどのようなお考えか。本例の場合について、もし作用時間がおわかりならお教え願いたい。

〔回答〕 (1) 本文中3・4節に述べているが、図15に示した液体マイクロジェットによる衝撃圧力値は実際の発生値に換算すれば数倍になる可能性がある。本実験の場合は液体マイクロジェットによる衝撃圧力値は衝撃波によるものと同程度であると考えている。

現象から考えてキャビテーション気泡が固体壁面にほぼ接するか、あるいは付着した状態から収縮する場合に液体マイクロジェットの固体壁面への作用が最も大きくなると思われるが、本実験で用いた水中放電気泡の場合ではこの液体マイクロジェットによる衝撃圧力は衝撃波によるものと同程度ということになっている。しかし本実験では隣り合った局所センサ素子の間で観測された衝撃圧力値は液体マイクロジェットある

(付1) 富田・島, 第4回キャビテーションに関するシンポジウム講演論文集(昭60-6), 61.

(付2) Tomita, Y. and Shima, A., *J. Fluid Mech.*, 169(1986), 535.

(付3) Tomita, Y., Shima, A., and Sugiu, T., *Proc. Int. Symp. on Cavitation*, Sendai, Japan, 1 (1986-4), 77.

(付4) Gibson, D. C., *Trans. ASME, J. Basic Eng.*, 94 (1972), 89.

(付5) 日本国特許庁(JP), 公開特許公報(A), 55696, (昭61), 635.

いは衝撃波に起因するものが変化している。したがって、今後キャビテーション衝撃圧力の固体壁面への作用原因を論ずる場合には単純に液体マイクロジェットと衝撃波の優劣を判定するだけでなく、両者が共存する条件下では作用する衝撃圧力の原因に応じて固体壁面上で液体マイクロジェットによるものが支配的な部分と衝撃波によるものが支配的な部分を局所的に区別して議論する必要があると考えている。また、これを明確にするためには発生する液体マイクロジェット径と同程度の大きさの局所圧力センサ素子群による実験が必要で、本実験で用いた以上の多チャンネル高速デジタルメモリシステムが不可欠ではあるが、今後のキャビテーション衝撃圧力研究の重要課題になると考

えている。

(2) 液体ジェットの速度とサイズが大きくなれば発生する衝撃圧力はいわゆる水撃作用のものに近づく、その最大衝撃力の作用時間は短くなると考えられる。また実測は不可能であるが、液体ジェット化する液体の総体積も発生する衝撃圧力値や作用時間に当然影響すると考えられる。

本実験の場合、液体マイクロジェットが衝突した時刻から衝撃波の発生までの間に観測されている圧力上昇波形が液体マイクロジェット作用によるものと考えれば、本文中(3・4節)に記述しているように、気泡の発生位置によって作用時間は60 μ s程度に及ぶ場合もある。