キャビテーション衝撃圧力に関する一研究*
(局所圧力センサの試作実験)本木 日出夫**, 加本 明****, 広瀬 達三***
吉信 宏夫**, 植木 宏**,A Study on the Impulsive Pressure of a Collapsing Cavitation Bubble
(An Experiment by a Local Pressure Sensor)Hideo KIMOTO, Akira KAMOTO, Tatsuzo HIROSE,
Hiroo YOSHINOBU, and Hiroshi UEKI

In order to distinguish the impulsive pressures of a liquid microjet and a shock wave, a local pressure sensor was manufactured for trial. The local pressure sensor was composed of four local pressure sensor elements, whose sensitive area was made as small as possible. Each pressure sensor element was made of a tip which was cut out of a barium titanate pressure transducer by a string saw to be 0.45 mm in width and 5 mm in length. The gap of each sensor element was filled with soft-type silicon resin to prevent their interaction of outer pressure action. By the local pressure sensor an impulsive pressure generated by the collapse of a spark-induced cavitation bubble was detected and the pressure of a water microjet was distinguished from that of a shock wave. The result was ascertained by high-speed photographs, which indicated water microjet generation in the collapsing cavitation bubble.

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

1. ま え が き

今日まで数多くの研究によってキャビテーションによる固体表面の損傷原因として、キャビテーション気泡が最小径に達した後再膨張する時に生ずる衝撃波、ならびにキャビテーション気泡の収縮時あるいは再膨張時に発生する液体マイクロジェットが考えられている。前者については Hickling-Plesset⁽¹⁾を始めとして数多くの研究があり、最近では Fujikawa ら⁽²⁾, Shima ら⁽³⁾, ならびに著者ら⁽⁴⁾の実験によってキャビテーション気泡が固体壁に付着して収縮・再膨張する場合でも衝撃波が発生することが確認されている。一方、後者については Plesset-Chapman⁽⁵⁾が数値計算によって固体壁近傍でキャビテーション気泡が収縮する場合に液体マイクロジェットが発生することを示して以来これに関連した多くの研究がなされており、特に Lauterborn ら⁽⁶⁾は Plesset らの計算結果をパルスレーザを用いたキャビテーション気泡によって確認している。

上述の衝撃波ならびに液体マイクロジェットはともに固体表面の損傷原因として有力であり、また実験条件によってはこの両者の共存した損傷も考えられている。しかしながらキャビテーション気泡が固体表面に近接して収縮する場合にはこの衝撃波と液体マイクロジェットがほぼ同時に発生するために、これらに起因する衝撃圧力を分離して計算するのは困難である。さらに、発生する液体マイクロジェットはその先端径はあまり小さくなく、したがって市販の圧力センサではその発生圧力値を評価することも困難であった。そこで本研究ではこの液体マイクロジェットに起因する衝撃圧力を衝撃波によるものと分離計測するために、局所圧力センサを試作し、水中放電によって発生させたキャビテーション気泡の収縮時に発生する液体マイクロジェットに適用した。

この試作された局所圧力センサによって固体壁面に作用する衝撃圧力を局所的に測定することが可能となり、さらに高速度カメラによってこのセンサ近傍で収縮するキャビテーション気泡内に発生する液体マイクロジェットを撮影することによってマイクロジェットによる衝撃圧力を衝撃波によるものと区別して評価した。

* 昭和61年10月25日 山梨地方講演会において講演、原稿受付 昭和61年3月22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。

2. 局所圧力センサ

2.1 局所圧力センサ素子 試作した局所圧力センサの素子は、厚さ 4.5 mm、共振周波数 500 kHz 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 0.45 mm、長さ 5 mm に切断したものである。この素子の配線には直径 0.1 mm の銅線を用い、実体顕微鏡下で電極の半田付けを行った。これを 0.45 mm 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、素子間ならびに素子-素子ホルダ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。またこの素子ホルダは黄銅製の円筒から成っており、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。このホルダ端面の圧力センサ素子の設置状況を図 1 に示す。

2.2 相互干渉の検定 試作した局所圧力センサ素子間の相互干渉度の検定方法として以下の方法を採用した。特定の素子のみに衝撃圧力を作用させて他の素子への影響度を調べるために、特定の一つの素子の受圧面上に黄銅製の小さなピストン（幅 0.5 mm、長さ 3 mm、厚さ 2 mm）を置いた状態で局所圧力センサの受圧面上に空気層を作り、その近傍で水中放電によってキャビテーションを発生させて衝撃的な圧力を作用させた（図 2）。この検定ではキャビテーション気泡はセンサの受圧面から 2.0 mm の位置に発生させているが、こうすることによって衝撃的な圧力作用に対する相互干渉度の検定を可能にして行った実験結果

の一例を図 3 に示した。この結果から試作された局所圧力センサ素子間の相互干渉は無視できる程度であることが確認された。

2.3 素子の感度較正 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、素子の感度較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。この感度較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）を用いた。

この較正方法には、図 4 に示すように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 回目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較正する方法を採用している。この際に、水中放電の状況を一定とし、気泡から局所圧力センサの受圧面までの距離 h 、あるいは気泡から圧力変換器の受圧面までの距離 l を 15 mm から 40 mm まで 5 mm おきに变化させた。この結果の一例として素子 No. 1 の較正結果を図 5 に示す。

図 2 素子間の干渉検定実験法

図 1 局所圧力センサ受圧部詳細

図 3 干渉検定結果

3. 実験装置および方法

本実験装置のブロック図を図6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圧を10k Ω のホーロ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×100mm×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, 1642) 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

図4 素子の感度校正法

図5 CH1素子の校正結果

図6 キャビテーション実験ブロック図

図7 水中放電キャビテーション気泡の高速度写真例

た。

4. 実験結果および考察

本実験の結果の一例として、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写真を図7に示す。撮影された気泡の挙動の時間基準としては、水中放電の火花が最も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基準時間からの経過時刻が付記されている。なお図7に示された気泡の無次元壁面距離⁽⁴⁾は1.03であり、キャビテーション気泡の収縮・再膨張時に液体マイクロジェットと衝撃波がともに発生することが予想される実験条件である。

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発生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、この観測波形の $800\mu\text{s}\sim 1020\mu\text{s}$ の部分を拡大して図8に示した。図中には4個の局所圧力センサ素子の出力波形をCH1～CH4として同じ時間軸で示されているが、CH3の素子の出力波形には $898\mu\text{s}$ から波形の立ち上がりが見られる。そして $905\mu\text{s}$ には約 1.4MPa に達している。また $945\mu\text{s}$ 付近では各チャンネルのすべての波形にピークが現れおり、CH4素子では約 4.5MPa の圧力値が観測されている。

図7に示した高速度写真では、気泡の収縮末期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て図9に示した。図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。また、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8のチャンネル番号に対応している。さらに、図8の下部には図9の(A)～(H)の写真に相当する時刻が示されている。

図9(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 0.5mm であり、またそのジェット先端の移動速度は約 110m/s である。図9(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No.3の受圧面上)に衝突したとみなさ

図8 局所圧力センサの出力波形

図9 収縮気泡中の液体マイクロジェットの発生状況

れる気泡写真であるが、この時刻に図8のCH 3の圧力値が上昇していることから、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7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8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。

いくつかの同様の実験結果によると、本実験の水中放電キャビテーション気泡中に発生した液体マイクロジェットの速度は90~110 m/s程度、その先端直径は0.5 mm程度であったが、このマイクロジェットの影響評価に関しては別に報告する。

5. 結 論

本研究で得られた主な結果を以下にまとめる。

(1) 試作した局所圧力センサによって固体壁面近傍で収縮・再膨張する水中放電キャビテーション気泡

から発生する衝撃波による衝撃圧力と液体マイクロジェットによる衝撃圧力と分離計測することができる。

(2) 本実験で用いた水中放電キャビテーション気泡中に発生する液体マイクロジェットの先端直径は0.5 mm程度、その先端の速度は90~110 m/sであることが高速度写真によって確認された。

6. あ と が き

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) Hickling, R. and Plesset, M. S., *Phys. Fluids*, 7-1 (1964), 7.
- (2) Fujikawa, S. and Akamatsu, T., *J. Fluid Mech.* 97 (1980), 481.
- (3) Shima, A., ほか3名, *Acustica*, 48 (1981), 293.
- (4) Tsuda, Y., ほか3名, *Bull. JSME*, 25-210 (1982), 1890.
- (5) Plesset, M. S. and Chapman, R. B., *J. Fluid Mech.*, 47-2 (1971), 283.
- (6) Lauterborn, W. and Bolle, H., *J. Fluid Mech.*, 72-2 (1975), 391.