

凹型曲面壁と水中衝撃波の衝突干渉

[研究代表者] 北川一敬 (工学部機械学科)

[共同研究者] 大谷清伸 (東北大学流体科学研究所), 阿部淳 (CTC)

研究成果の概要

水中爆発現象では水中衝撃波、急激な圧力上昇によって発生する微小気泡群 (キャビテーション)、爆発生成ガスの膨張収縮運動によって発生するバブル衝撃波、膨張収縮運動後に発生する水流ジェット、水流ジェットの衝突により発生する非定常動的衝撃力といった現象が確認される。これらは産業応用、医学応用として様々な分野で利活用されている。本研究では水中衝撃波とバブル衝撃波に伴う微小気泡発生や水流ジェットの慣性力を有効に活用することで異物除去効果の向上が図れないかという着想より物体近傍で発生する水中爆発現象について研究を行っている。水中爆発を用いた異物除去には爆発生成ガスの収縮時に発生する水流ジェットと水面での反射膨張波の影響で発生する微小気泡が有効であると確認されている。医療応用として広く知られている体外衝撃波破碎法では曲面形状を用いて衝撃波の収束を行っている。そこで、凹型曲面壁を用いることで水流ジェットの発生方向、微小気泡の発生位置、衝撃波の反射及び収束を制御できないか調査研究している。本研究では、凹型曲面壁近傍で発生する水中爆発現象に着目して、ハイスピードカメラを用いたシュリーレン法による衝撃波の光学可視化及び圧力センサによる入射衝撃波が凹型曲面壁に入る直前の点(A点)、凹型曲面壁における反射衝撃波のフォーカス点(B点)、凹型曲面壁の頂点(C点)における圧力変動の取得を行った。シュリーレン法により水中衝撃波は曲面で反射後、半円の中心軸上で収束することが確認された。衝撃波の収束位置にて微小気泡の発生が確認されており水の引張限界を超える圧力が伝播していたと考える。また、圧力取得より各点において起爆点と凹型曲面壁の距離の増加に伴い過剰圧が減少することが確認される。凹型曲面壁における最大過剰圧はC点 > B点 > A点となる。以上の結果より凹型曲面壁の設置により水中衝撃波の収束位置、急激な過剰圧上昇を制御できる可能性を見出した。

研究分野：熱流体力学

キーワード：Underwater explosion, Underwater shock wave, Schlieren, Visualization, Pressure amplification

1. 研究開始当初の背景

水中爆発現象は水中衝撃波、微小気泡、爆発生成ガスの膨張収縮運動によって発生するバブル衝撃波、膨張収縮運動後に発生する水流ジェットと水流ジェットの衝突による複数の非定常動的衝撃力をもたらす。衝撃圧力は、静的に与えにくい高圧力を対象物へ短時間に作用することが可能である。これらは食品加工等の産業応用やフォーカシング技術による結石破壊等の医学応用として利活用されている。特に水中衝撃波現象の応用例として1985年に東北大学泌尿器科と東北大学流体科学研究所との共同研究により、体外衝撃波結石破碎術 (ESWL) が実用化された。この技術では、遠位のフォーカス点に衝撃波を集中させる

ために凹型曲面壁を利用している。凹型曲面壁近傍で発生する水中爆発現象では過剰圧による気泡の発生、曲面で反射した衝撃波の集中による圧力上昇という特徴が挙げられる。このような特性を理解し、効率的に利用する技術開発を進めていくことが必要である。

2. 研究の目的

本研究では、凹型曲面壁を用いて水中衝撃波とバブル衝撃波に伴う微小気泡発生や水流ジェットの慣性力を有効に活用することで異物除去効果の向上を目的とし、シュリーレン法を用いて曲面形状が水中衝撃波に与える影響と凹型曲面壁周りにおける圧力変動について報告する。

3. 研究の方法

(1)Fig.1 はシュリーレン法の概略図を示す. アジ化銀ペレット(AgN₃)を用いて水中爆発現象を発生させた. 凹型曲面壁(内径φ60, φ80)を設置し実験を行った. 水面から起爆点間の距離 d_H を 40.0mm, 起爆点から凹型曲面壁中心間の距離 d を 30.0, 40.0, 50.0mm とした(Fig.2).

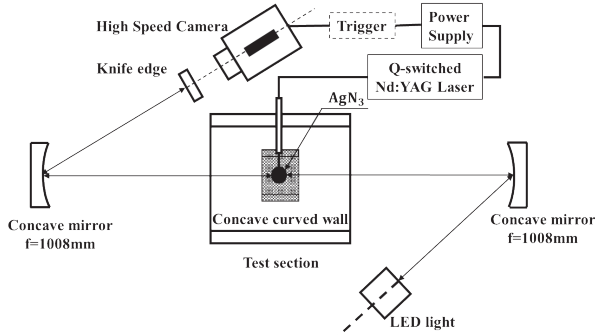


Fig.1 Schlieren Setup

(2)Fig.2 は過剰圧測定における概略図を示す(Fig.2(a)は凹型曲面壁, Fig.2(b)は剛体壁). 曲面形状における過剰圧を評価するために比較として剛体壁を用いて平面形状における過剰圧を測定した. 各点の詳細は A: 入射衝撃波が凹型曲面壁に入る直前の点 (以下, A 点), B: 凹型曲面壁における反射衝撃波のフォーカス点 (以下, B 点), C: 凹型曲面壁の頂点 (以下, C 点), D: 剛体壁における B 点と同一位置の点 (以下, D 点) である.

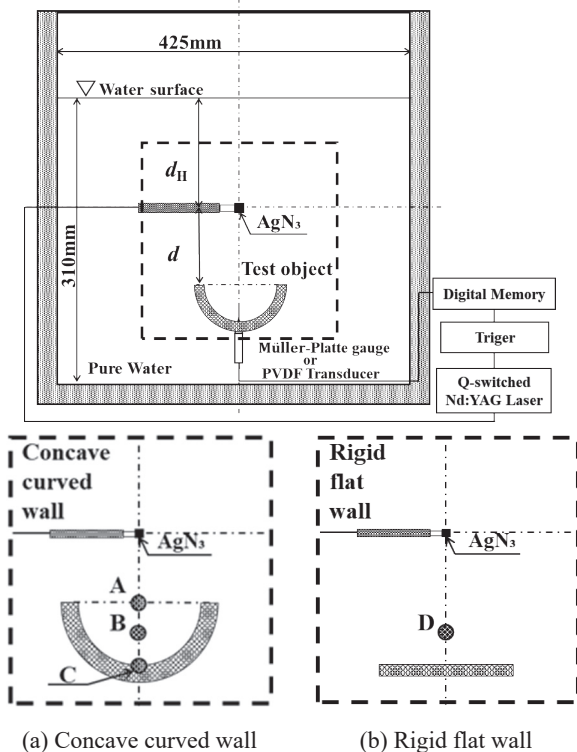
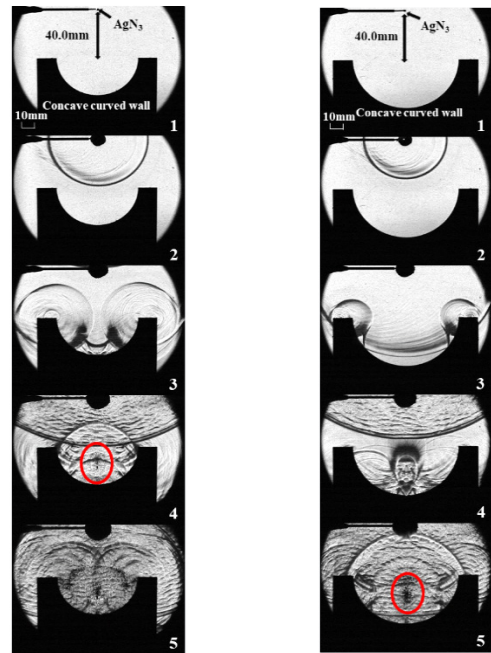


Fig.2 Experimental setup

4. 研究成果

Fig.3 は各条件における光学可視化結果を示す. No.1 にて AgN₃ は起爆する. No.2 で入射衝撃波は球面状に伝播する. No.3 にて入射衝撃波は凹型曲面壁湾曲部及び凹型曲面壁端点で反射して反射衝撃波となる. No.4 にて水面からの衝撃波が確認できる. これは水面で反射した膨張波である. 反射衝撃波発生後, 反射衝撃波は凹型曲面壁の中心軸上に収束し, 図中赤丸部にフォーカス点が発生する ((a) No.4, (b)-No.5). Fig.3 より各条件においてフォーカス点の発生時間が異なることがわかる. これは距離 d の違いにより, 凹型曲面壁における入射衝撃波の到達時間及び反射衝撃波の発生時間が異なるためである.



(a) φ60
 $d=40.0$ mm (b) φ80
 $d=40.0$ mm

Fig.3 Schlieren image of UNDEX experiment at the concave curved wall ($\Delta t=0.02$ ms)

Table 1 は各条件における起爆点からフォーカス点までの距離を示す. Table1 より距離 d 及び凹型曲面壁内径の増加に伴い起爆点からフォーカス点間の距離が増加することが確認できる. Table 1 の結果をもとに各条件における B 点及び D 点の過剰圧測定を行った.

Table 1 Distance from the detonation point to the focus point

Condition	φ60	φ80
$d=30.0$ [mm]	44.9	47.2
$d=40.0$ [mm]	53.2	58.1
$d=50.0$ [mm]	64.2	66.9

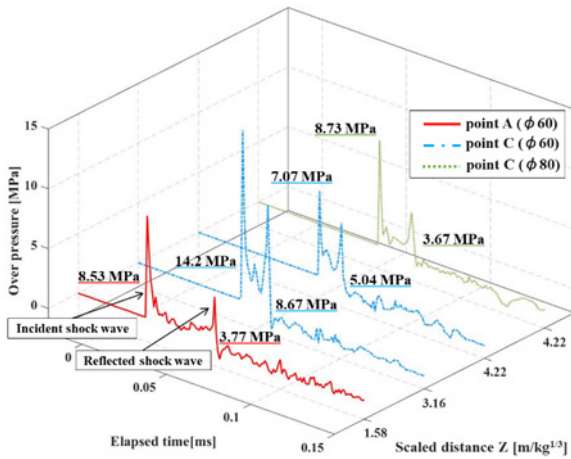


Fig.4 Time histories of overpressure at points A and C

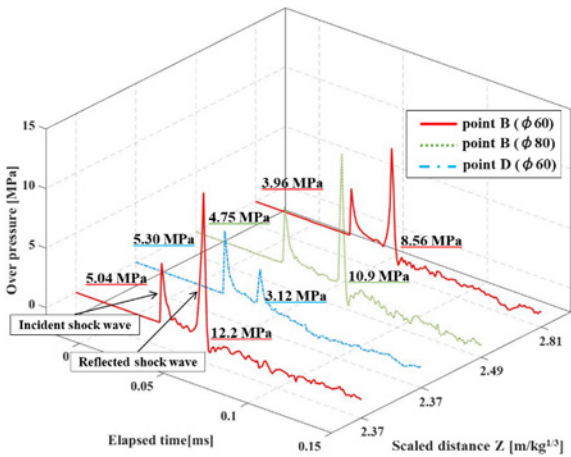


Fig.5 Time histories of overpressure at points B and D

Fig.4及びFig.5は各条件におけるA~D点での応力の時間変動を示す。X軸を時間、Y軸を各点における換算距離、Z軸を圧力で表す。

Fig.4及びFig.5よりA~D点において入射衝撃波からの直接波による急激な圧力上昇が確認できる(A点:0.021ms, B点:0.031~0.037ms, C点:0.042~0.052ms, D点:0.032ms)。圧力上昇後、膨張波による指数関数的な圧力減少が生じる。その後、反射衝撃波により再び急激な圧力上昇が確認できる(A点:0.061ms, B点:0.054~0.066ms, C点:0.055~0.070ms, D点:0.053ms)。この時B点における反射衝撃圧は入射衝撃圧の2.16~2.42倍大きいことが確認できる。その後、指数関数的な圧力減少が生じる。

Table 2はA点及びC点における入射衝撃圧を示す。Table 2で示す丸括弧内は凹型曲面壁内径を示す。Table 2よりC点(3.16m/kg^{1/3})はA点(1.58m/kg^{1/3})に対して1.66倍大きい過剰圧が確認できる。これはA点では凹型曲面壁に入る直前の過剰圧に対し、C点は入射衝撃波が凹型曲面壁曲面で伝播し頂点に集中したためと考える。

次にC点における換算距離に注目する。同じ凹型曲面

壁内径である3.16m/kg^{1/3}及び4.22m/kg^{1/3}における過剰圧では、3.16m/kg^{1/3}は4.22m/kg^{1/3}に対して2.01倍大きい過剰圧が確認できる。以上より、C点における入射衝撃波による過剰圧は換算距離に依存することがわかる。

Table 3はB点及びD点における反射衝撃圧を示す。Table 3で示す丸括弧内は凹型曲面壁内径を示す。Table 3よりB点(2.37m/kg^{1/3})はD点(2.37m/kg^{1/3})に対して3.91倍大きい過剰圧が確認できる。これはD点では剛体壁からの反射衝撃波が収束しないのに対し、B点は凹型曲面壁からの反射衝撃波が収束したためと考える。

次にB点における凹型曲面壁内径に注目する。phi 60(2.37m/kg^{1/3})ではphi 80(2.49m/kg^{1/3})に対して1.12倍大きい過剰圧が確認できる。また、B点における換算距離に注目すると同じ凹型曲面壁内径である2.37m/kg^{1/3}及び2.81m/kg^{1/3}における過剰圧では、2.37m/kg^{1/3}は2.81m/kg^{1/3}に対して1.43倍大きい過剰圧が確認できる。以上より、B点における反射衝撃圧は凹型曲面壁内径及び換算距離に依存する。

Table 2 Incident shock pressure at points A and C

Scaled distance [m/kg ^{1/3}]	1.58 (phi 60)	3.16 (phi 60)	4.22 (phi 60)	4.22 (phi 80)
point A [MPa]	8.53			
point C [MPa]		14.2	7.07	8.73

Table 3 Reflected shock pressure at points B and D

Scaled distance [m/kg ^{1/3}]	2.37 (phi 60)	2.49 (phi 80)	2.81 (phi 60)
point B [MPa]	12.2	10.9	8.56
point D [MPa]	3.12	2.29	2.16

5. 本研究に関する発表

- (1) 安司吉輝他 3 名, “Unsteady interaction between underwater explosion and concave curved wall”, The 7th International Symposium on Energetic Materials and their Applications, 2021 年 11 月 16 日~18 日, A7-4
- (2) 安司吉輝他 3 名, “凹型曲面壁周りにおける水中衝撃波の圧力変動”, 2021 年度衝撃波シンポジウム, 2022 年 3 月 9 日~11 日, 1C2-1[若]