

水中衝撃波と曲面壁の衝突干渉

[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、急激な圧力変動によって発生する微小気泡群、爆発生成ガスの膨張収縮運動によって発生するバブルパルス、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などの現象が確認される。これらは産業・医学など様々な分野で研究及び応用されている。本研究室では水中衝撃波とバブルパルス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、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、曲面壁近傍における微小気泡群発生の解明を目的とし、Double-path シュリーレン法を用いた衝撃波の光学可視化を行った。Double-path シュリーレン法により水中衝撃波は曲面で反射後、曲面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、爆発生成ガスの収縮に伴うバブルパルス、曲面壁で発生する反射バブルパルスは 0.87～1.17 MPa で伝播・干渉しており、微小圧力変動を発生させる。このような微小圧力を有する衝撃波の光学可視化には Double-path シュリーレン法が有効である。

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、微小気泡群、爆発生成ガスの膨張収縮運動によって発生するバブルパルス、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曲面壁を利用している。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

本研究グループは曲面壁を用いてフォーカシング技術を利用した衝撃波の産業応用を目的とし、水中爆発現象における衝撃波と物体との衝突干渉について調査研究している。これまで、曲面壁近傍における爆発生成ガスの膨張収縮運動、微小気泡群の発生の可視化、Single-path シュリーレン法による衝撃波伝播、衝突干渉の可視化及び曲面壁近傍の圧力変動等を計測した。Fig.1(I)から(III)はハイスピードカメラで撮影した曲面壁近傍における水中爆発現象を示す。Fig.1(II)より、起爆点において爆発生成ガスが発

生し膨張運動する($t=2.27$ ms : 爆発生成ガス直径最大)。爆発生成ガスの収縮後($t=4.63$ ms)、Fig.1(III)赤丸領域にて微小気泡群が発生する。微小気泡群は気泡崩壊時に衝撃波の発生と圧力上昇を伴い、曲面壁近傍における微小気泡群発生の解明は重要な研究課題である。

本研究では、曲面壁近傍における微小気泡群発生の解明を目的とし、本研究における可視化方法(Single-path シュリーレン法)では微小圧力変動を有する衝撃波の可視化が困難なことから、Single-path シュリーレン法より感度の高い Double-path シュリーレン法を用いて水中衝撃波と曲面壁の衝突干渉について報告する。

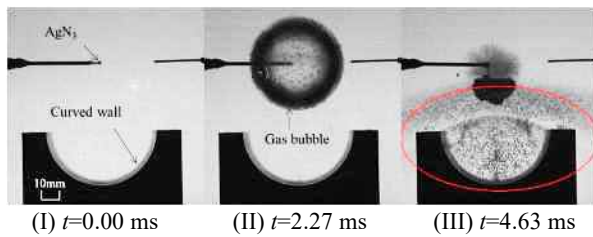


Fig.1 Sequential photographs of the bubble motion

3. 研究の方法

(1)Fig.2 は Double-path シュリーレン法の概略図を示す。Fig.2 は点光源、凹面鏡($\phi 150$ 、焦点距離 1007 mm、面精度 $\lambda/10$)、平面鏡($\phi 120$ 、面精度 $\lambda/10$)及びハーフミラー(分岐比 1:1)を用いて構築した。アジ化銀ペレット(AgN_3)を用いて水中爆発現象を発生させた。アジ化銀ペレットは水面(水槽底から 310 mm)から下方向 40 mm の位置に光ファイバの先端につるし発破法で設置し、Q-switched Nd:YAG レーザを 1 回照射して起爆させた。測定開始は Nd:YAG レーザの発振と同期させた。撮影条件は、撮影速度 200 kfps、シャッタースピード $0.4 \mu\text{s}$ 、解像度 1280×768 pixel(実寸 292×175 mm)とした。曲面壁(曲率半径 $R=30$ mm)を起爆点から下方向 40 mm の位置に水面に対して平行に設置し実験を行った。

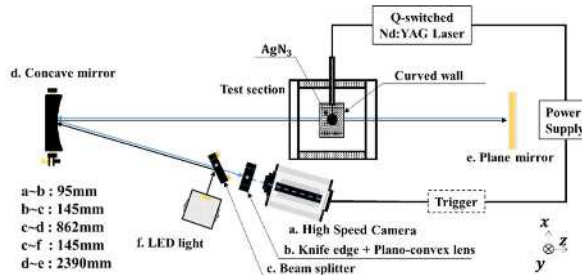


Fig.2 Optical setup of Double-path Schlieren

(2)Fig.3 は過剰圧測定における概略図を示す。各計測点は①起爆点から水平方向 30 mm、②起爆点から垂直下方向 53 mm(微小気泡群が発生する位置)とする。

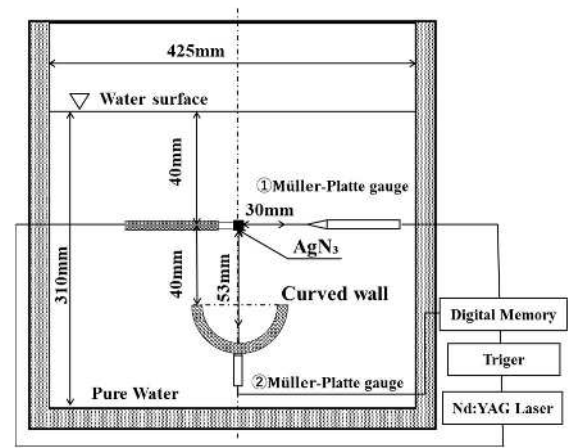


Fig.3 UNDEX Experimental setup

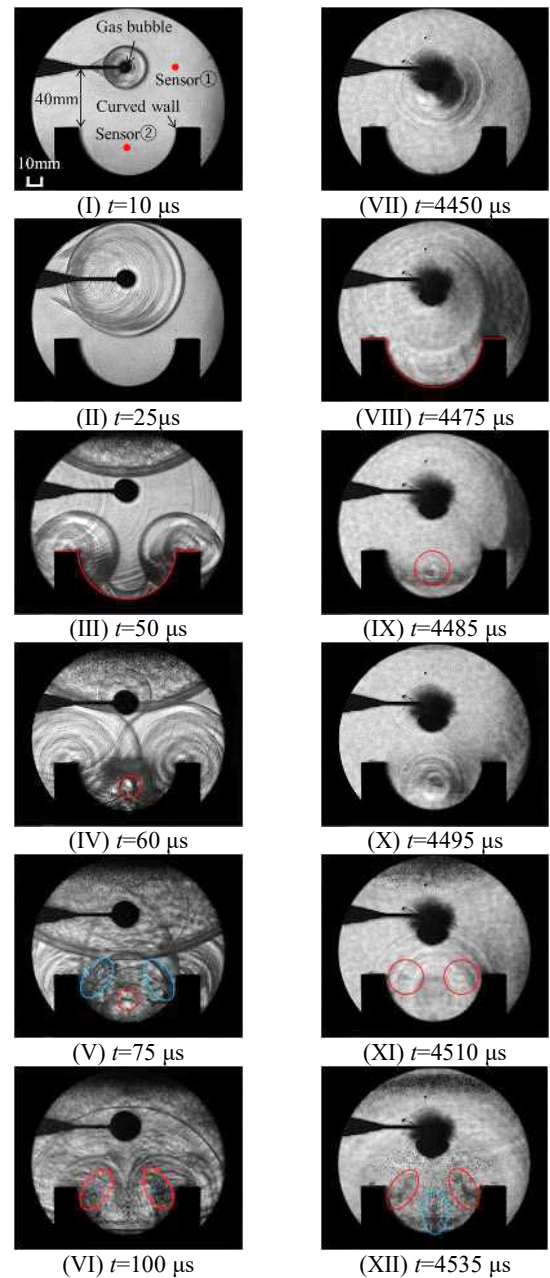


Fig.4 Double-path Schlieren images of UNDEX experiment on the curved wall

4. 研究成果

Fig.4(I)から(XII)は曲面壁近傍における水中爆発現象の光学可視化結果を示す。Fig.5、Fig.6はセンサ①②での過剰圧測定結果を示す。横軸は経過時間、縦軸は圧力を表す。Fig.4(I)にてアジ化銀が起爆し入射衝撃波及び爆発生成ガスが発生する。曲面壁輪郭のぼやけは、同様の光路を通過する Double-path シュリーレン法の光学系により発生しており、水槽アクリル面(前面・背面)での反射光、曲面壁の光路に対する平行度が含まれる。衝撃波は光路に対して直角であるため今回の可視化結果には問題はない。Fig.4(II)にて入射衝撃波(マッハ数 1.09)は球面状に伝播し、爆発生成ガスは膨張する。この時、Fig.5 より、入射衝撃波による急激な圧力上昇($t=23.2 \mu\text{s}$ 時 6.86 MPa)が確認できる。Fig.4(III) 赤線にて入射衝撃波は曲面壁で反射して反射衝撃波(マッハ数 1.02)が発生させる。また、入射衝撃波が水面(自由端)に衝突したことにより膨張波が発生する。その後、Fig.4(IV)赤丸領域にて曲面壁の中心軸上に反射衝撃波が収束する。この時、Fig.6 より、反射衝撃波の収束による急激な圧力上昇($t=61.2 \mu\text{s}$ 時 8.56 MPa)が確認できる。Fig.4(V)にて反射衝撃波が収束した位置(収束点)から衝撃波が発生し、伝播する。このとき、Fig.4(IV)赤丸領域において微小気泡群が確認でき、Fig.4(V)青丸領域において曲面からの反射衝撃波と収束点で発生した衝撃波が衝突していることが確認できる。また、Fig.4(VI) 赤丸領域において Fig.4(V)青丸領域とほぼ同一な領域で微小気泡群が線状に発生している。以上より微小気泡群は衝撃波が収束・衝突した領域において線状に発生することがわかる。

Fig.4(VII)にて起爆点で発生した爆発生成ガスの収縮に伴いバブルパルス(マッハ数 1.01)が発生する。この時 Fig.5 よりバブルパルスによる圧力上昇($t=4.48 \text{ ms}$ 時 0.87 MPa)が確認できる。その後、Fig.4(VIII)赤線にて曲面壁で反射し反射衝撃波(以下、反射バブルパルス)が発生させ、Fig.4(IX)赤丸領域に収束する。この時 Fig.6 より反射バブルパルスの収束による急激な圧力上昇($t=4.49 \text{ ms}$ 時 1.17 MPa)が確認できる。Fig.4(X)にて収束点から衝撃波が発生し、伝播する。また、Fig.4(XI)赤丸領域において球状面の衝撃波が発生・伝播している。これは、Fig.4(V)青丸領域と同様に曲面からの反射バブルパルスと収束点からの衝撃波が衝突したためと考える。Fig.4(XII)赤丸領域において Fig.4(XI)赤丸領域とほぼ同様な領域で微小気泡群が線

状に確認できる。また、Fig.4(XII)青色領域の微小気泡群の発生は Fig.4(X)、Fig.4(XI)では確認できない。Fig.4(VI)、Fig.4(XII)における微小気泡群はほぼ同様な位置に発生しているため同様な微小気泡群の発生メカニズム(衝撃波の収束・衝突によって発生)であると考ええる。そのため実際はFig.3(X)~Fig.3(XII)においてFig.3(XII)青色領域の微小気泡群が発生しているが背景のゆらぎが原因で微小気泡群が観測しづらくなっている。このゆらぎは流体の波の伝播を可視化されることが原因と考える。可視化結果と圧力波形から、曲面壁中心軸上で発生する微小気泡群は約 8.5 MPa の反射衝撃波の衝突干渉、約 1.2 MPa の反射バブルパルスの衝突干渉により発生する。

以上より、爆発生成ガスの収縮に伴うバブルパルス、曲面壁で発生する反射バブルパルス(Fig.4(VII)~(XII))は 0.87 ~1.17 MPa で伝播・干渉しており、微小圧力変動を発生させる。微小圧力を有する衝撃波の光学可視化には感度が高く明瞭に可視化できる Double-path シュリーレン法が有効である。

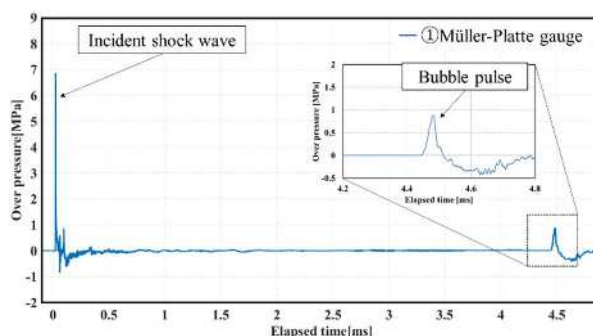


Fig.5 Pressure history of UNDEX experiment at sensor①

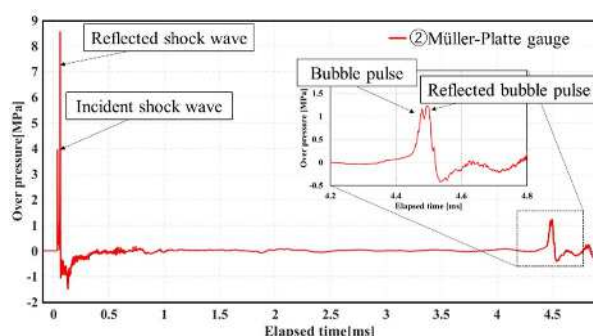


Fig.6 Pressure history of UNDEX experiment at sensor②

5. 本研究に関する発表

(1) 安司吉輝他 3 名、「Double-path シュリーレン法を用いた衝撃波と曲面壁の衝突干渉の可視化」、2022 年度火薬学会秋季研究発表会、2022 年 11 月 10 日~11 日、No.33