

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656082

研究課題名(和文)キャビテーション気泡崩壊時のマイクロ・スケール衝撃力測定システムの開発

研究課題名(英文)Development of measurement system for micro-scale impact load in cavitation bubble collapse

研究代表者

岸本 喜久雄(Kishimoto, Kikuo)

東京工業大学・理工学研究科・教授

研究者番号：30111652

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：ポンプや配管で発生するキャビテーション壊食の遠隔モニタリングを実現するため、逆解析を利用したマイクロ・スケール衝撃力計測システムの開発を行った。水中火花放電によりポリカーボネート円柱下方で気泡を生成し、円柱に作用した衝撃力を100 mm離れた円柱上面のAEセンサで測定するとともに、気泡の生成・崩壊挙動を高速度カメラで可視化した。気泡の崩壊圧推定には逆解析を用い、伝達関数はシャープペンシルによる芯の圧折力を用いて決定した。気泡の衝撃力を推定した結果、試験片下面に作用する最初の衝撃力は放電直後であること、また気泡崩壊によるジェットが固体壁に衝突した時刻に最大の衝撃力が作用することを確認した。

研究成果の概要(英文)：When the cavitation occurs in turbo machinery and cavitation bubbles collapse inside the machinery, impact loading causes cavitation erosions. This study aims at developing the measurement system of the micro-scale impact load remotely by inverse analysis. Impact experiments due to bubble collapses initiated by electrical sparks under water were conducted at the bottom of the thick polycarbonate rod. The AE signals were measured at the top of the rod, 100 mm from the bottom. The bubble generation and collapsing were recorded by high-speed video camera. The impact forces are estimated by inverse analyses and the transfer function for estimating the impact forces was determined by the mechanical pencil lead press-breaking method. The impact forces estimated by the analyses revealed that the first loading was caused by the arrival of the shock wave due to the electric spark and the maximum loading was observed when the water jet in the bubble collapse reached at the bottom surface.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・材料力学・機械材料

キーワード：連続体力学 キャビテーション 衝撃力 逆問題解析

### 1. 研究開始当初の背景

水力発電は、古くから日本のエネルギー供給源として重要な役割を果たしてきたが、2011年3月11日の東日本大震災とそれに起因した福島第一原子力発電所の事故により、再生可能なクリーンエネルギーとして重要性が再認識されている。近年、水力発電や水供給システムの高出力化、高効率化に伴い、ポンプなどの流体機械ではキャビテーション壊食が問題となっている。本研究グループはこの事実を踏まえて、効果的な対策や補修を施す上で壊食メカニズムの解明が不可欠であり、学術的観点からマイクロ・スケールの気泡が崩壊する際に構造物へどのような衝撃力が作用するかを明らかにすることが必要であることを認識した。

気泡が崩壊する際には気泡がつぶれてドーナツ状になり、中心にマイクロ・ジェットが発生する。壁面近くで気泡が崩壊すると、壁面に向かって120 m/sのマイクロ・ジェットが発生することが実験で観察されている (Lauterborn & Bolle, J. Fluid Mech., 1975)。ジェットにより壁面に作用する水圧  $p$  を、水撃の理論 (Joukowski 式;  $p = \rho cU$ ;  $\rho$ , 水の密度;  $c$ , 水の音速;  $U$ , 速度) から計算すると180 MPaとなり、材料の降伏応力に匹敵する圧力が作用することが予想される。さらに、実験的な観察により、ジェットが壁面に衝突した箇所に直径90  $\mu\text{m}$  のくぼみが生じたことが報告されている (Kling & Hammit, J. Basic Eng., 1972)。以上に述べたように、キャビテーション壊食はマイクロ・ジェットの衝突が主たる要因と考えられており、マイクロ・スケールに作用する衝撃力を測定することが壊食機構の解明や対策に必須となるが、1個のセンサで測定に十分な解像度を得ることは困難であり、複数個のセンサを用いることで数10～数100マイクロ・オーダーの分解能を得る必要がある。

### 2. 研究の目的

ポンプなどの流体機械におけるキャビテーション壊食では、機械や構造物の信頼性・安全性を評価する上で、マイクロ・スケールに作用する衝撃力を正確に測定することが重要である。本研究課題では、流体から固体へ局所的に作用する衝撃力を高分解能かつ高精度に測定するシステムを開発する。複数センサのデータを逆解析することで離れた作用点における衝撃力の時間変動を測定して壊食機構の検証や、ポンプ壊食のモニタリングへの活用を目指す。さらに、以上の成果を、任意形状の機械・構造物に任意方向から作用する衝撃力の測定に適用する。

### 3. 研究の方法

図1に実験装置の外観を示す。装置は火花放電装置、AE計測装置、試験片固定台、オシロスコープ、アクリル水槽、高速度カメラからなる。電極として、水槽の中央に2本の銅

線(直径0.4 mm)を固定台に先端が接地するように対向して固定した。気泡生成は直径100 mm、長さ100 mmのポリカーボネート円柱下方中央で行い、気泡による圧力波を試験片上面に取り付けたAEセンサで測定する。電極間のアーク放電による電圧上昇をトリガとしてAE測定と気泡の撮影を開始する。高速度カメラは35,000 fpsで撮影した。気泡の崩壊圧推定には逆解析を用いており、誤差の拡大を防止するため適切化処理としてMoore-Penroseの一般逆行列を用いる手法を用いた。

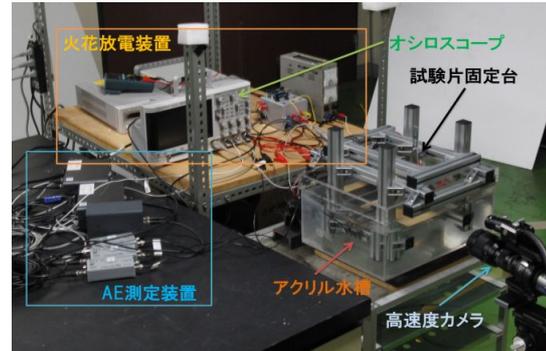


図1. 実験装置概要.

### 4. 研究成果

気泡崩壊圧の測定に用いた伝達関数はシャープペンシルによる芯の圧折力を入力として推定した。シャープペンシル芯の圧折は0.35  $\mu\text{s}$ 間に5.0 Nの圧縮荷重が解放されることが知られており、キャビテーション現象のような数 $\mu\text{s}$ で生じる現象に対する伝達関数の入力として適当である。既知の入力荷重をもとに推定した伝達関数を用いて測定した芯圧折時のAE波形を逆解析した。推定した圧折力は図2となり、実際の入力波形と比較してよく一致した波形が得られた。

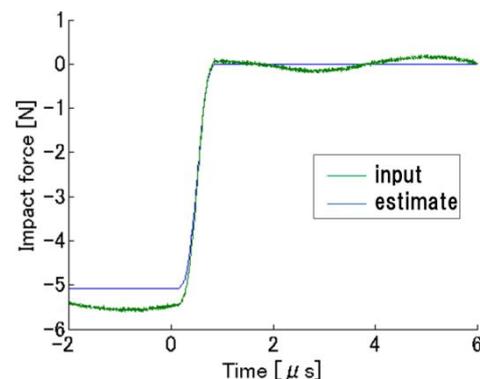


図2. シャープペンシル芯圧折時の荷重推定.

気泡の衝撃力推定実験でも同じ伝達関数を使用した。図3に高速度カメラにより撮影した固体壁近傍での気泡の生成・崩壊挙動を

示す．固体壁と導線間の距離は 5.0 mm であり，アーク放電発生時を 0  $\mu$ s とした．0  $\mu$ s に生成した気泡は膨張し，590  $\mu$ s で最大半径となり，その後収縮する．1.18 ms 後に気泡が崩壊し流体ジェットが生成され，固体壁に 1.24 ms で衝突している．

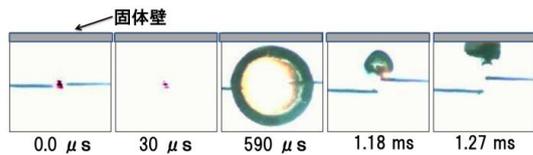


図3．高速度カメラによる水中火花放電時の気泡の生成・崩壊挙動の連続画像．

実験で測定した AE センサで検出した電圧履歴と伝達関数を用いて気泡の衝撃力を推定した．図4に2.0 ms 間で測定した AE センサの測定値を示し，AE センサの立上部分を用いて衝撃力の推定を行った．推定した気泡の衝撃力の時間履歴を図5に示す．推定した衝撃力と撮影した動画を比較することで，AE センサに到達する最初の衝撃力は火花放電による衝撃波が壁面に到達することによるものであると推測される．

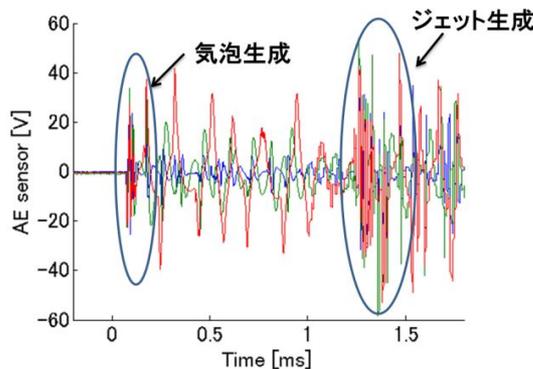


図4．3つの AE センサによる電圧履歴．

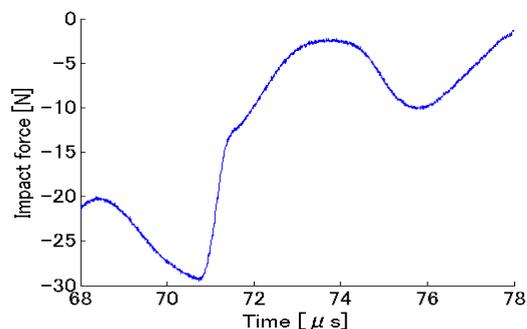


図5．推定した衝撃力（火花放電直後）．

さらに今回逆解析で推定した衝撃力は気泡生成により発生した衝撃力であるが，流体ジェットが固体壁に衝突した時刻に AE セン

サ出力が最大となることから，ジェットが固体壁に衝突する際に最大の衝撃力が発生していることを確認した．この際の衝撃力を推定した結果を図6に示す．推定された衝撃力は 50 N であり，この衝撃力が画像で確認できるジェット直径 3 mm の固体壁に作用すると仮定すると，7.1 MPa 程度が作用することに相当し，この圧力値は Shima ら（1983）が直接圧力変換器を用いて測定した結果（9.76 MPa）と比較して概ね良い結果が得られたことを確認した．

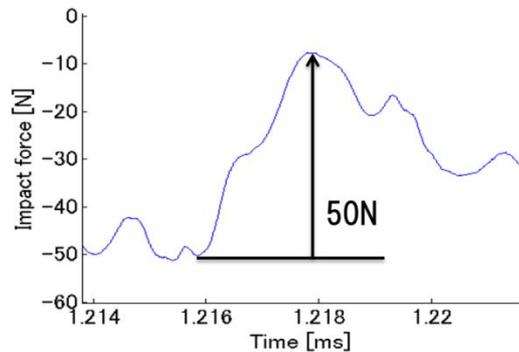


図6．推定した衝撃力（ジェット衝突時）．

## 5．主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

T. Hori, K. Inaba, K. Takahashi, K. Kishimoto, Transient of Wave Propagation around a Large Particle in Pipes Filled with Water, Applied Mechanics and Materials, 査読有, 印刷中

〔学会発表〕(計 4 件)

K. Inaba, K. Takahashi, K. Kishimoto, Frequency and dispersion of flexural waves in fluid-filled tubes subject to axial impact, IUTAM symposium on materials and interfaces under high strain rate and large deformation, 2013 年 6 月 17 日, France

三浦 敏孝 因幡 和晃 高橋 航圭 岸本 喜久雄, 管内の水中火花放電による気泡の生成・崩壊挙動, 第 62 回理論応用力学講演会, 2013 年 3 月 7 日, 東京

清水 孝吉, 因幡 和晃, 高橋 航圭, 岸本 喜久雄, 逆解析を利用した衝撃荷重計測システムの開発, キャビテーションに関するシンポジウム (第 16 回), 2012 年 11 月 23 日, 金沢

K. Inaba, T. Nishimura, H. Ushifusa, K. Kishimoto, Presence of single bubble in water hammer due to axial impact loading, 8th International Symposium on Cavitation, 2012 年 8 月 15 日, Singapore

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://www.mech.titech.ac.jp/~koubutsu/>

6．研究組織

(1)研究代表者

岸本 喜久雄 (KISHIMOTO, Kikuo)  
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号： 30111652

(2)研究分担者

因幡 和晃 (INABA, Kazuaki)  
東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授  
研究者番号： 00408725