

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	逆解析を利用した固体壁近傍における気泡崩壊荷重と荷重作用位置の推定
Title(English)	Estimation of bubble collapse impact load and impact location near solid boundary using inverse analysis
著者(和文)	石井智弥
Authors(English)	Tomoya Ishii
出典(和文)	キャビテーションに関するシンポジウム(第17回), ,
Citation(English)	キャビテーションに関するシンポジウム(第17回), ,
発行日 / Pub. date	2014,

## 逆解析を利用した固体壁近傍における気泡崩壊荷重と荷重作用位置の推定

### Estimation of bubble collapse impact load and impact location near solid boundary using inverse analysis

○石井智弥(東工大) 因幡和晃(東工大) 水谷義弘(東工大)  
高橋航圭(東工大) 岸本喜久雄(東工大)

Tomoya Ishii, Tokyo Tech, 2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550, Japan  
Kazuaki Inaba, Tokyo Tech, 2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550, Japan  
Yoshihiro Mizutani, Tokyo Tech, 2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550, Japan  
Kosuke Takahashi, Tokyo Tech, 2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550, Japan  
Kikuo Kishimoto, Tokyo Tech, 2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550, Japan

When cavitation occurs and bubbles collapse in fluid machinery, such as pumps, impact loading due to the bubble collapsing shortens the life time and decreases the performance. Recently, inspection of cavitation-erosion damage inside the pumps has been conducted by direct visual observations after stopping the operation temporarily. In this study, to realize damage monitoring remotely from outside of the machinery, impact load by spark-generated bubble collapse was estimated using inverse analysis. Impact experiments by spark-generated bubbles were conducted with thick-walled PC cylinder and shock waves were measured with AE sensors. As a result of observing the phenomenon in a high-speed video camera, it was confirmed that several shock waves were generated in the bubble generation and collapses, and the impact loads were estimated when the shock waves were observed.

*Key Words:* Cavitation, Inverse analysis, AE sensor, liquid jet

#### 1. 緒言

液体の圧力が低下し液体中に気泡が生じる現象をキャビテーションと呼び、キャビテーション気泡が崩壊すると衝撃波が発生して高い圧力が発生することが知られている[1]。キャビテーション現象は主に流体を作動流体とする流体機械内部で発生し、性能の劣化や機器の被害、損傷、振動や騒音の発生を引き起こす。高度成長期に数多く製造されたインフラ系のポンプなどでキャビテーション壊食による破損や損傷が発生しており、機器更新のために多大な予算が必要になることが予想されている。適切な時期に補修して延命化するためには、現在は定期的に機器の運転を停止して機器の壊食被害を確認する。ポンプや配管を数週間にわたり停止すると多額の費用がかかる可能性があり、この解決策の一つとして、装置を停止せずに、機器内部の損傷状況を外部からのモニタリングすることが挙げられる。現在、キャビテーションによる衝撃圧センサは感圧紙、ピエゾセラミック、PVDFフィルムセンサなどが主に使用されている[2, 3]。しかし、それらの測定手法は直接衝撃圧を測定するものであるため、長期での使用を考慮した場合、キャビテーションのように連続的に衝撃力が負荷する現象に対して高寿命は期待できない。また、キャビテーションのような小さい現象を離れたところから測定する手法はまだ確立されていない。そこで、本研究では、流体機器外から損傷モニタリングシステムの構築に向けて、逆解析を利用して水中火花放電による気泡崩壊時の衝撃荷重推定や、衝撃荷重位置の推定を行う。ポンプ壁など厚肉金属の内側で発生する壊食を外側からにおいても測定を可能にするために、AEセンサを使用する。計測システムとして、固体金属壁に衝撃荷重を作用させて衝撃面の反対側でのセンサ出力から伝達関数を決定し、逆解析により衝撃荷重を推定する手法を採用する。

## 2. 気泡崩壊荷重推定実験

### 2・1 逆解析手法<sup>[4,5]</sup>

今回の実験では、逆畳み込みを用いた衝撃荷重の測定法を採用し、複数のセンサで得られたデータから行列を作成して1つの推定値を導く。衝撃荷重 $f$ とそれぞれのセンサデータの測定値 $e_i$ の関係は畳み込み積分を用いて以下の(1)式のように表せる。

$$e_i(t) = \int_0^t h_i(t - \tau)f(\tau)d\tau, \quad (i: \text{センサ番号}) \quad (1)$$

ここで、 $h_i$ は、伝達関数である。これをフーリエ変換すると、以下の(2)式ようになる。ただし、大文字はフーリエ変換したものとする。

$$\mathbf{E} = \mathbf{H}\mathbf{F} \quad (2)$$

このとき、(2)式は、

$$\mathbf{E} = \{E_1(\omega), E_2(\omega), E_3(\omega)\}, \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} H_1(\omega) \\ H_2(\omega) \\ H_3(\omega) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F} = \{F(\omega)\} \quad (3)$$

よりなる。(2)式より、既知の衝撃力とセンサの測定値の関係は以下の(4)式のようになる。

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{E}}{\mathbf{F}} \quad (4)$$

また、伝達関数 $H(\omega)$ と気泡崩壊時の測定値を用いて、以下の(5)式より $F(\omega)$ を得る。そして、(5)式を逆フーリエ変換することで気泡崩壊荷重を推定する。

$$\hat{\mathbf{F}} = \mathbf{H}^+ \mathbf{E}_c \quad (5)$$

$[\hat{\quad}]$ は推定値であることを示す。 $\mathbf{E}_c$ は推定する時のセンサの測定値であり、 $H^+$ は Moore-Penrose の一般逆行列である。

### 2・2 実験装置

水中火花放電により単一気泡を固体壁近傍で生成し、その衝撃力を2・1で述べた逆解析を用いて推定する。測定にはAEセンサ(PAC社製, R15)を用いた。通常、AEセンサは材料の割れに伴い発生する微小な弾性波を検出する目的で使用されるので検出感度が高く、本実験においても配管壁を介して気泡崩壊時の衝撃を測定することが十分可能である。Fig. 1に実験装置外観を示す。装置は充放電装置、AE計測装置、試験片、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、水槽の中央に二本の銅線(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、気泡による弾性波を試験片上面に取り付けた3つのAEセンサで測定する。各AEセンサの位置関係は、Fig. 2に示すように試験片上面中央に対して等距離かつ3つのAEセンサが正三角形となるように設置した。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。

### 2・3 伝達関数推定

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  $\mu$ 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[6]、キャビテーション現象のような数 $\mu$ sで生じる現象[7]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Fig. 3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。そこで、気泡崩壊荷重の推定にはこの伝達関数を使用する。

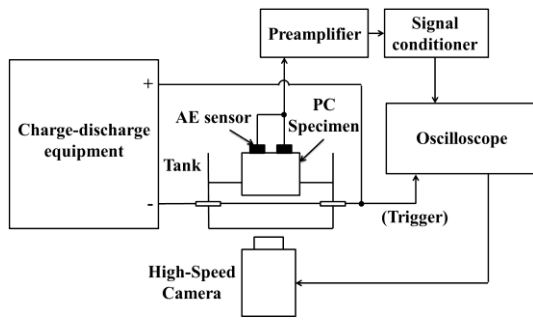


Fig. 1 The schematic of experimental setup

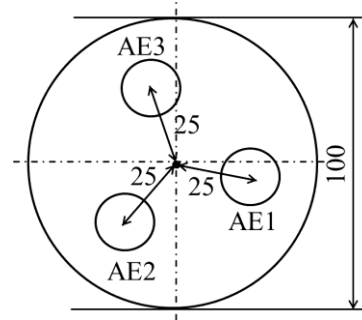


Fig. 2 Three AE sensors array (unit: mm)

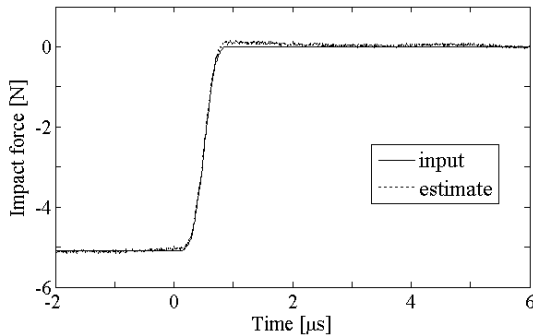


Fig. 3 Input and estimate force history

## 2・4 実験結果・考察

2・3で推定した伝達関数を使用して固体壁近傍での気泡崩壊時の衝撃荷重推定を行う。Fig. 4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、水中火花放電発生時刻を0  $\mu\text{s}$ としている。0  $\mu\text{s}$ に生成した気泡は膨張し、590  $\mu\text{s}$ 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で衝突する様子が観察された。30  $\mu\text{s}$ ではスパークの高輝度により、映像全体が白くなっている。

実験で測定したAEセンサの測定値と伝達関数を用いて気泡の衝撃力を推定した。Fig. 5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(Fig. 6)を用いて衝撃力の推定を行った。各AEセンサの3つの測定値に対して2・1で述べた逆解析手法を使用し推定した気泡の衝撃力の時間履歴をFig. 7に示す。推定した衝撃力と撮影した動画を比較して、AEセンサに到達する最初の弾性波は気泡が生成する瞬間に発生していることを確認した。また、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、この時刻におけるAEセンサの立ち上がり部分(Fig. 8)を用いて衝撃力を推定した。同様の逆解析手法を使用して推定した結果、Fig. 9の衝撃力の時間履歴が得られた。Fig. 9より、ジェットが固体壁に衝突する際に最大の衝撃力42 Nが発生していることが推定された。

同様の実験系において、固体壁に隔膜型の圧力変換器を取り付け、直接気泡崩壊圧を測定したところFig. 10の圧力の時間履歴が得られた。圧力変換器にはPCB 113B22を使用した。逆解析による推定結果と同様に、気泡生成時と気泡崩壊後の流体ジェットが固体壁に衝突する瞬間に高圧が発生していることを確認した。また、ジェットが固体に衝突した時刻に最大圧力9.58 MPaが発生していることを確認した。気泡崩壊時の推定結果の精度を確かめるために、推定した衝撃荷重と圧力変換器により測定した崩壊圧を比較する。ジェットが固体壁に衝突する瞬間の流体ジェットの衝突面は円であると仮定し、Fig. 4の高速度カメラの撮影結果よりその断面積を計算したところ、7.21  $\text{mm}^2$ と求められた。気泡崩壊圧の測定値と流体ジェットの断面積より、流体ジェットにより発生する衝撃荷重は69.1 Nであると計算できる。したがって、気泡崩壊時の衝撃荷重の推定値は実測値の約0.6倍小さく見積もられていた。しかし、今回のジェットの衝突面積は動画より判断しているので、実際の衝突面積は明らかではない。また、PCBの圧力センサも隔膜直径よりも小さい領域において圧力が作用しているため測定データもジェットが衝突した領域に生じた応力を正しく計測できている保証がない。今後、衝突面積が推定にどのような影響を及ぼすのか検討していく必要がある。

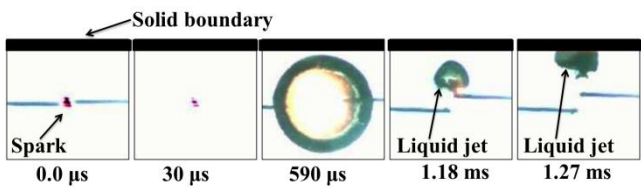


Fig. 4 Sequence of bubble generation and collapse

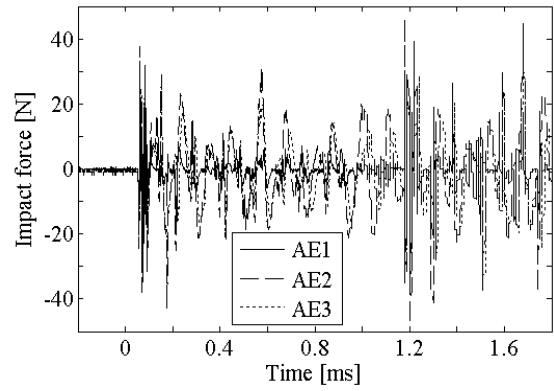


Fig. 5 AE sensor histories (2.0 ms)

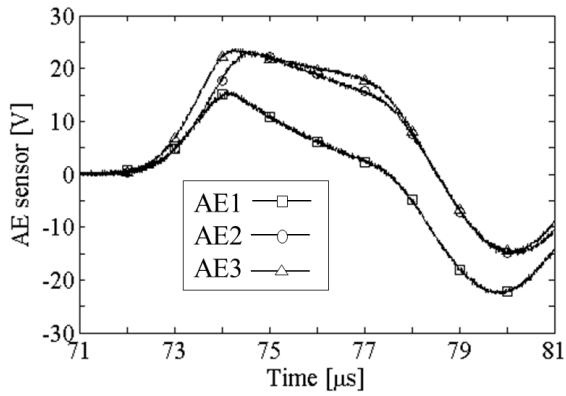


Fig. 6 AE sensor histories (bubble generation)

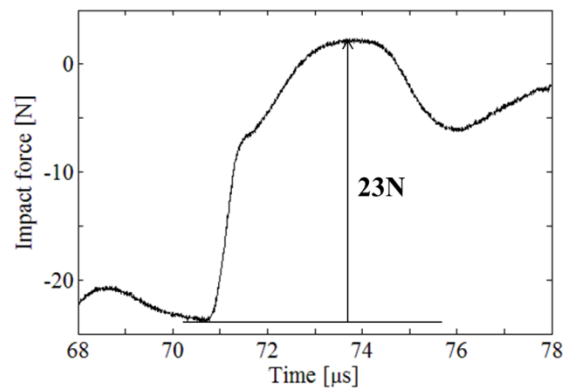


Fig. 7 Estimated impact force (bubble generation)

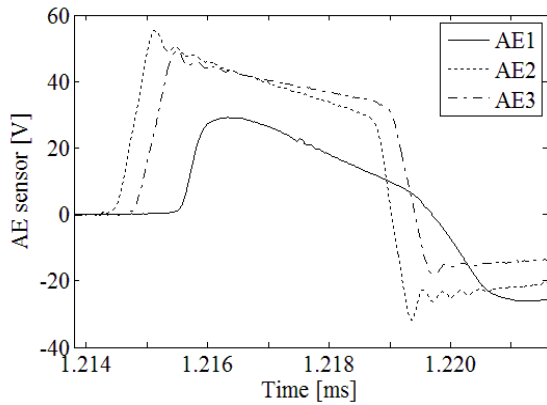


Fig. 8 AE sensor histories (bubble collapse)

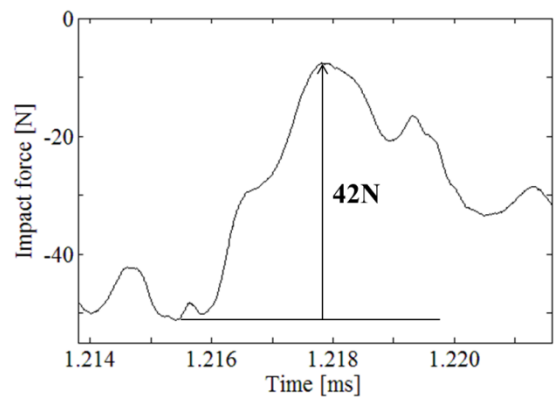


Fig. 9 Estimated impact force (bubble collapse)

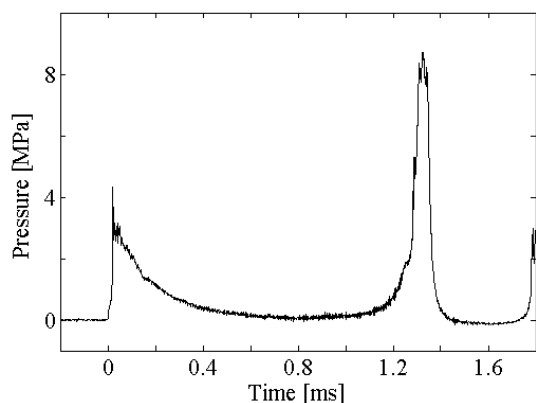


Fig. 10 Pressure transducer histories (2.0 ms)

### 3. まとめ

本研究では、流体機器の外側からのキャビテーション壊食損傷モニタリングに向けて、逆解析を利用して水中火花放電による気泡崩壊時の衝撃荷重推定を行った。固体壁近傍で気泡を生成・崩壊させて、3つのAEセンサで測定したデータを、逆解析により処理することで衝撃荷重の推定を行った。衝撃荷重推定と同時に、高速度カメラで現象を観察した結果、気泡生成時と気泡崩壊時に衝撃波が生成し、衝撃波が衝突する時刻に衝撃荷重が作用することを確認した。また、圧力変換器の測定値と比較することにより、二つの衝撃荷重を同じオーダで推定できることを確認したが、推定した気泡崩壊時の衝撃荷重は測定した衝撃荷重よりも0.6倍程度小さく見積もられていることが分かった。

### 参考文献

- [1] 加藤洋治 「キャビテーション 増補版」 槇書店 (1990) pp.1-2.
- [2] ターボ機械協会 「ポンプのキャビテーション損傷の予測と評価」 (2011) p.105.
- [3] K. Ohira, T. Nakayama, T. Nagai, "Cavitation flow instability of subcooled liquid nitrogen in converging diverging nozzles" *Journal of Cryogenics* vol.52, (2012), p.36.
- [4] 井上裕嗣 岸本喜久雄 渋谷寿一 小泉堯 「逆解析による衝撃荷重の推定」日本機械学会論文集 (A編) 57巻543号 (1991) .
- [5] 井上裕嗣 岸本喜久雄 渋谷寿一 小泉堯 「衝撃力の大きさと方向の逆問題解析」日本機械学会論文集 (A編) 59巻559号 (1993) .
- [6] A. Pavan, J.G. Williams, "Fracture of Polymers, Composites and Adhesives", *Esis Publicaton* 27, (2000), p.412.
- [7] C.D. Ohl, R. Ikink, "Shock-wave-Induced Jetting of Micron-Size Bubbles" *Journal of Physical Review Letters* Vol.90, (2003), p.2.