

キャビテーション壊食量の推定法

第2報: 気泡群崩壊による衝撃力頻度分布計測の信頼性評価

学生員 金野 祥久* 正員 加藤 洋治*
正員 山口 一*

Prediction of Cavitation Erosion
Second Report: Validation of Measured Impulsive Force by Cavitation Bubble Collapse

by Akihisa Konno, *Student Member* Hiroharu Kato, *Member*
Hajime Yamaguchi, *Member* Masatsugu Maeda

Summary

The objective of this study is to develop a procedure of predicting the cavitation erosion intensity. To this end, it is necessary to estimate impulsive forces caused by collapse of cavity bubbles. In the first report¹⁾ the authors measured cumulative events of impulsive forces by collapse of cavity bubbles on a two-dimensional foil with a piezoelectric sensor. In this paper the authors measured the cumulative events again with three sensors of different kind to verify the results reported in the first report. The measurements by the three different sensors agreed well with each other. Among these sensors, the PVDF sensor was practical and suitable for the authors' purpose. In addition, collapse of cavitation bubble clusters was observed with a digital high-speed video camera synchronized with the signal of impulsive force sensors. Duration of collapse was the order of 100 microseconds, which was far slower than that of an impulsive force that was around 5 microseconds. According to theoretical calculations the impulsive pressure is generated when the whole cloud cavity collapses completely. But in this observation the peaks of impulsive force did not meet the instant of final collapse, but occurred some 10 to some 100 microseconds earlier than the final collapse. These results suggest that an impulsive force may not be caused by the global collapse of a bubble cluster but by the collapse of a part of cloud cavity.

主な記号

e	跳ね返り係数
F	衝撃力 [N]
g	重力加速度 = 9.81 m/sec. ²
h	鋼球を落下させる高さ [m]
m	鋼球の質量 [kg]
N	衝撃力の累積度数
U	一様流速 [m/sec.]
Δt	衝撃パルスの立ち上がり時間 [sec.]
σ	キャビテーション数

1. はじめに

キャビテーションの研究が進むにつれ、キャビテーションによる壊食(エロージョン)が残された大きな問題となっている。壊食はキャビテーション気泡が高圧の場で崩壊し、発生する現象である。極めて短い時間($\mu\text{sec.}$ のオーダー)に、極めて高い圧力(100MPa から GPa のオーダー)が局所的(μm のオーダー)に発生し、それが金属表面の損傷を引き起こすというマイクロな現象が、マクロに現れたものである。流体力学的にも計測が難しく、また気泡の大きさや崩壊場所がランダムであるから、計算による推定も困難である。さらに局所的・衝撃的な力による金属表面の破壊のメカニズムも解明されなければならない。

*東京大学大学院工学系研究科

泡(群)の崩壊時の衝撃力を計測した。その後、衝撃力センサの改良は進み、数種類の衝撃力センサが開発され、実績を残している²⁾。同時に衝撃力の計測装置も、ナノ秒のオーダーの時間分解能を持つものが利用できるようになった。しかし意外なことに、これらのセンサの相互比較や、2種類以上のセンサを用いた衝撃力計測はほとんど行われていない。著者らの知る限りでは、わずかにフランスの研究者の報告³⁾があるだけである。各センサの信頼性を確かめるためにも、また衝撃力計測の精度を高めるためにも、複数のセンサを用いた比較計測が必要である。

さて、衝撃力発生メカニズムを知るためには、実際にキャビティ気泡(群)の崩壊挙動を観察し、そのとき発生する衝撃力との関係を調べる必要がある。しかしながら上で述べたように、キャビティ気泡群の崩壊は非常に高速な現象なので、その観察は困難である。現象の観察と衝撃力の計測を同時に行うためには、高速度デジタルビデオカメラが必須であるが、これの入手がネックとなるせいか、この現象を観察しながら衝撃力を計測した例は、これまでほとんど無かった。著者らの知る限りでは、佐藤らのグループが、特に渦キャビテーションを対象とした継続的な観察を早くから行っている^{4, 5, 6, 7, 8)}。ごく最近になって、同様の高速度ビデオカメラによる観察例が、著者らを含めた他の研究者からも報告されはじめた^{9, 10)}。

このような事情により、気泡群の崩壊挙動の研究は、専ら理論面および数値計算によって進められている。しかし実験データが乏しいので、研究結果の検証はほとんど行えないのが現状である。

本論文でははじめに、第1報の実験時に用いた衝撃力センサの改良を試み、またその他に2種類のセンサを加えて再実験を行った。この結果を踏まえて、第1報時の計測結果の検証を行う。また、衝撃力発生時の気泡群崩壊の挙動を高速度ビデオカメラで観察し、同時に上で述べたセンサを用いて、衝撃力を計測した。この結果を突き合わせて検討し、衝撃力の発生メカニズムを考察する。

2. 衝撃力センサ

第1報で著者らは、前田(学)ら^{11, 12)}によって設計、製作された全長10mmの小型センサを利用して、衝撃力の累積頻度分布を計測した。しかし第1報で述べたように、このセンサには構造上の欠点があったため、計測中にセンサが反応しなくなるなど、耐久性と信頼性の面で不安があり、継続的な実験を行うことが困難であった。また、1種のセンサだけによる計測では、結果の信頼性の検証が十分とは言えない。そこで本研究では、第1報で用いたセンサとは異なる形式の3種のセンサを用いて再計測を行い、その結果を比較するとともに、センサの性能と有用性について検討した。以下にそれぞれのセンサについて説明する。

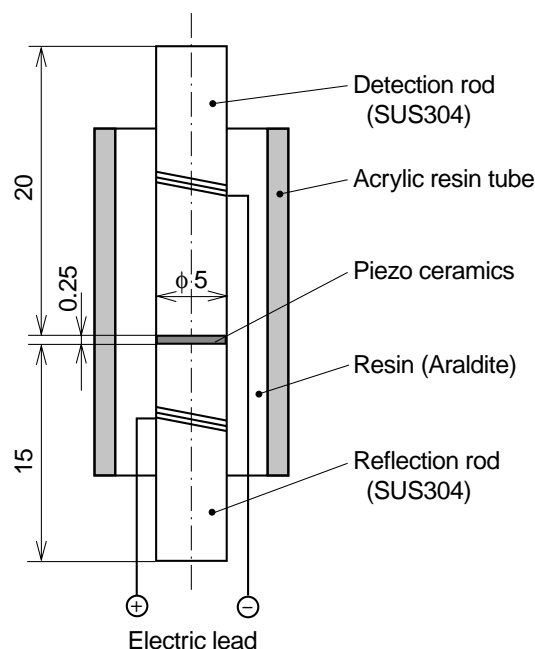


Fig. 1: Impulsive force sensor A: basic type

なおここで言う累積頻度分布とは、衝撃力が計測された頻度を、衝撃力の大きい方からの累積度数でまとめたものである。第1報では衝撃圧スペクトルと表現していたが、累積頻度分布という表現の方が適当だと考えたため、本論文ではそう表現している。定義に違いは無い。

今回用いた衝撃力センサは、第1報時のセンサと同様、圧電材料を用い、衝撃力を電圧に変換するものである。圧電材料として、圧電セラミックスを用いたもの2種、PVDF(後述)を用いたもの1種を利用した。これらのセンサでは圧電材料の性質上、衝撃的に加えられた力を検知することはできるが、静的な力は検出できない。

2.1 基本型セラミックス・センサ(センサA)

服部ら^{2, 13)}によって開発されたセンサで、この種のセンサの草分け的な存在である。磁歪振動子を用いた衝撃力計測試験で実績がある他、フランスLEGI/IMGにおいて壊食試験装置CAVERMODを用いた実験にも用いられている³⁾。今回の実験では、このセンサを計測基準の意味で使用した。以降、センサAと呼ぶ。

Fig.1にこのセンサの構造を示す。圧電セラミックスを受圧棒と反射棒(ともにステンレス製)でサンドイッチ構造にし、その間を導電性接着剤で固定している。この構造は、圧電セラミックスを用いたセンサの基本形といえる。

なお、このセンサはもともと、下端を装置外に出せるような実験装置用に設計されたため、高さが後述べる翼模型の翼厚よりも大きい。したがってセンサ下端が翼から飛

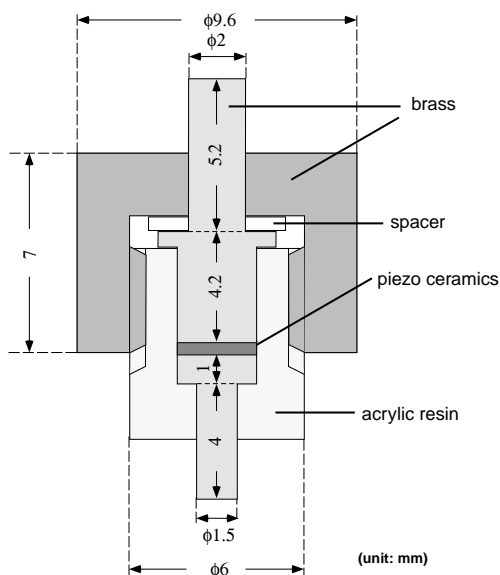


Fig. 2: Impulsive force sensor B: small type

び出す。これを接着剤で覆い、強引に実験を進めた。

2.2 小型セラミックス・センサ (センサ B)

このセンサは第 1 報にて用いたセンサを元に、著者らが改良を施したセンサである¹⁴⁾。Fig.2 に新型センサの構造を示す。受圧面は直径 1 mm の円形である。第 1 報時のセンサの欠点を改善するために、以下のような点を改良した。

1. 受圧部の金属棒を伸ばし、流体 (水) に触れるのをその部分だけにしてセンサ上面をシリコンゴムで覆うことにより、センサの防水を確保する。
2. 受圧部の金属棒をねじでしっかりと止め、締めつけが弱まって感度が低下するのを防ぐ。O-リングは使用しない。
3. 電路に導電性接着剤を用いず、リード線を金属棒に直接つなぐ。

以降、センサ B と呼ぶ。

2.3 PVDF センサ (センサ C)

PVDF (Polyvinylidene fluoride, ポリフッ化ビニリデン) は圧電性高分子材料の一種である¹⁵⁾。圧電性高分子膜は、

- 非常に軽い薄膜であり、厚さは 24 ~ 110 μm である。
- 衝撃などに対して強く、壊れにくい。
- 成形、加工が容易で形状を制御するのが簡単である。
- 高帯域な周波数特性を有しており、時間分解能が高い。
- 安価。
- 過渡的な力に対する出力電圧は、圧電セラミックスに

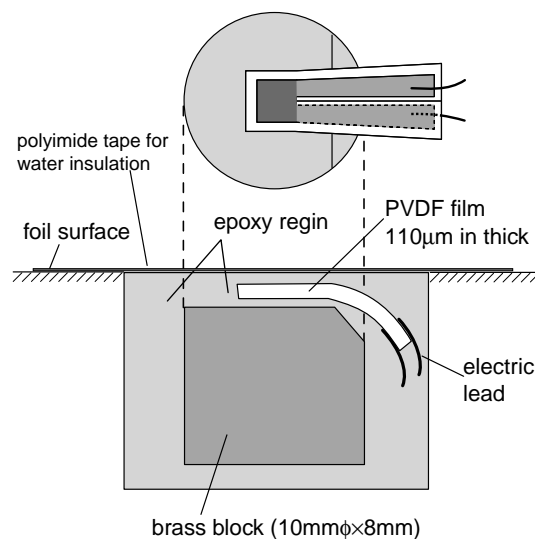


Fig. 3: Impulsive force sensor C: with PVDF piezoelectric film

くらべて、およそ 1 桁小さい。

などの特徴を持つので、キャビテーション気泡の崩壊時の衝撃力のような非常に強い衝撃力を計測するのに適している。

本研究では、祖山ら^{2, 16)}によって開発された PVDF センサを参考に、翼面に取り付けやすいように改良を施したセンサを設計・製作し、実験に供した。Fig.3 にセンサの構造を示す。PVDF 膜は入手できるものなかで最も厚い 110 μm 厚のものを利用した。感圧面は 3 mm \times 3 mm である。なお、防水のためにセンサ上面をテープで覆っている。

以降、センサ C と呼ぶ。本論文中では、上記のセンサ A ~ C を用いて実験を行った。説明の都合上、センサの性能の詳細な検討は後回しにして、はじめに衝撃力の累積頻度分布の計測について述べる。

3. 衝撃力の累積頻度分布の計測

上に述べた 3 種の衝撃力センサを用い、第 1 報にて行った衝撃力の累積頻度分布の測定と、ほぼ同じ実験を行い、衝撃力センサの性能と信頼性の検討を試みた。実験の本質は第 1 報と変わっていないが、計測装置や計測手法が改善されているので、改めて説明する。

3.1 実験装置と実験条件

3.1.1 キャビテーションタンネル

本研究での実験は、東京大学船用プロペラキャビテーションタンネルの翼型用試験部を用いて行った。試験部は幅 150 mm \times 高さ 600 mm の矩形断面で、試験部の主流方

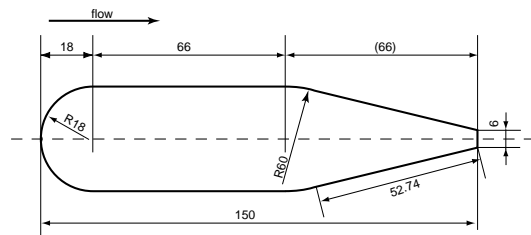


Fig. 4: Foil section for impact force measurement: KT section

向の寸法は 1000 mm であり、片側の側壁には観測用のアクリル窓が取り付けられる。さらに上壁にも小さなアクリル窓を設けて上方からの観測もできるようになっている。

試験部の流速は、翼型上流部の一様流の流速をレーザー流速計を用いて測定する。試験部静圧は静圧孔から測定した圧力を水頭分だけ補正して、試験部中央部の静圧を計算することにより求める。

3.1.2 使用した翼型

衝撃力の計測には、第 1 報と同じく、Fig.4 に示す翼型、通称 KT 翼型を用いた。実験に際しては、同じ形状の翼型を 2 つ製作し、一方にはセンサ A, B(圧電セラミックスを用いたもの)を、他方にセンサ C(PVDF を用いたもの)を埋めて実験を行った。

3.1.3 衝撃力計測システム

計測システムは、第 1 報時の装置から大きく改善された。

衝撃力センサの出力電圧はトランジェント・レコーダ(理研電子(株) TCFL-8000SR)に入力し、最小 50 nsec. 毎のサンプリング時間間隔で AD 変換してメモリに記憶させる。第 1 報での実験装置は、時間分解能が 1 μ sec. までだったので、その 20 倍の時間分解能の波形を得る。そしてその記憶内容をパーソナルコンピュータに取り込むために、GP-IB インターフェイスを用いている。これによって衝撃力センサの出力波形を得ることができる。

また、この計測装置はピークホルダとしての機能も有しており、指定したしきい値を越えるデータを検出した場合に自動的に停止し、その前後のデータを読むことができる。これに加え、ピークを検出すると同時にトリガ出力を発生するようにトランジェント・レコーダに改造を施し、このトリガ出力の回数をユニバーサル・カウンタ((株)タケダ理研の TR-5104)にて計測し、これと上記の衝撃力計測結果から、衝撃力の頻度分布を計算した。

このトリガ出力は、本論文の後半で述べる、高速度ビデオカメラによる気泡群崩壊の観察の際にも役立った。詳細は 6.2 にて述べる。

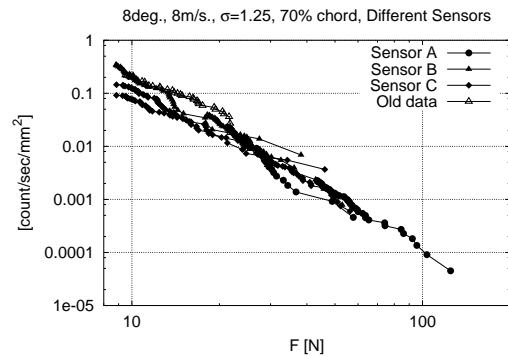


Fig. 5: Cumulative events of impulsive forces measured with four different sensors: 8°, 8 m/sec., $\sigma = 1.25$

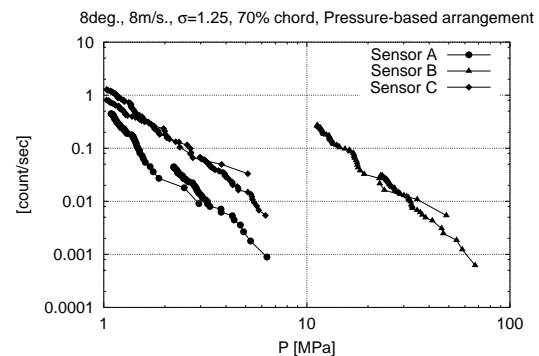


Fig. 6: Cumulative events of impulsive pressures measured with three different sensors: 8°, 8 m/sec., $\sigma = 1.25$

3.1.4 実験条件

実験は、迎角 8°, キャピテーション数 $\sigma = 1.25$, 流速 8 m/sec. の条件下で行った。この条件の時には周期的なクラウドキャピテーションが発生する。これは第 1 報の実験の際にも中心的に行った条件なので、結果の比較に適している。

3.2 実験結果および考察

流速 8 m/sec. で、3 種のセンサを用いて計測した衝撃力の累積頻度分布を Fig.5 に示す。図中の“Old data”で示されたグラフは、第 1 報での実験で、同じ条件で計測された累積頻度分布である。また、同じデータを力ではなく圧力で整理した結果を Fig.6 に示す。衝撃力センサの感圧部の面積がそれぞれ異なるので、同じ衝撃力を観測しても、圧力でまとめると値が異なる。

衝撃力でまとめた累積頻度分布 (Fig.5) の場合、それぞれのセンサによる計測結果は、第 1 報で報告した計測結

果も含め、お互いによく一致する。一方、圧力で整理した場合は、まったく一致しない。この結果から、次のことが分かる。

1. 衝撃力の累積頻度分布が、お互いによく一致することから、これら 3 種の衝撃力センサは、衝撃力をよい精度で計測していると言える。
2. したがって、センサ自体、および、計測された累積頻度分布の信頼性が確認された。また、衝撃力センサを鋼球落下によって検定するという手法（詳細は次節にて述べる）も、信頼できる検定法だと言える。
3. 第 1 報にて報告した実験結果の信頼性も確かめられた。
4. 計測された衝撃力は、センサの感圧面におよそ均等に加わるような“圧力的な”現象ではなく、点衝撃に近いものだと考えられる。壊食の初期段階で見られるピット（へこみ）¹⁷⁾の大きさ、すなわち直径にして数 μm から数 $10\mu\text{m}$ の領域が、衝撃力の加わった領域に対応すると信じられている^{18, 19)}が、これを証明する実験的事実はほとんど無かった。上記の結果はこの推論の傍証となるものである。

4. 衝撃力センサの評価と検討

今回の実験の結果および著者らの経験から、センサの性能について論じる。第 1 報で著者らは、翼面上でのキャビティ崩壊による衝撃力を計測するために衝撃力センサに求められる要件として、以下の 4 項目を挙げた。

1. 小型で翼面上に埋めこむのが容易であること。
2. 高周波応答特性が良く、時間分解能の高い計測が行えること。
3. 感度が良いこと。
4. 激しい衝撃にさらされても、出力が安定していること。

第 1 報の執筆時では、上記の要件を満たすセンサの開発は困難だった。第 1 報にて用いたセンサは、出力が不安定で壊れやすく、結果の信頼性に常に不安がつきまとった。今回用いた 3 種のセンサは、上記の要件をおおよそ満たしている。出力は安定しており、実験途中で壊れることは無かった。

4.1 センサの検定と利便性について

順序が前後するが、ここで衝撃力センサの検定について述べる。センサの検定は鋼球落下の実験によって行った。これは小さな鋼球をある高さからセンサの受圧面上に落とし、速度の減少からセンサに与えられた力積を求め、またセンサの出力波形から衝撃が加えられた時間を求め、力積をその時間で割ることによって加えられた力を得るというものである。

この場合、受圧面に当たるときの速度はエネルギー保存則より鋼球の高さから算出し、いわゆる跳ね返りの法則により速度の減少を得ている。具体的には跳ね返り係数を e

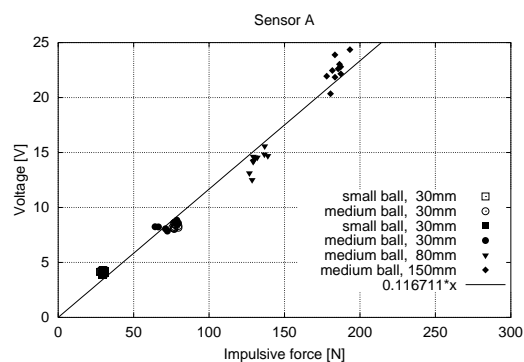


Fig. 7: Result of ball-drop calibration: Sensor A

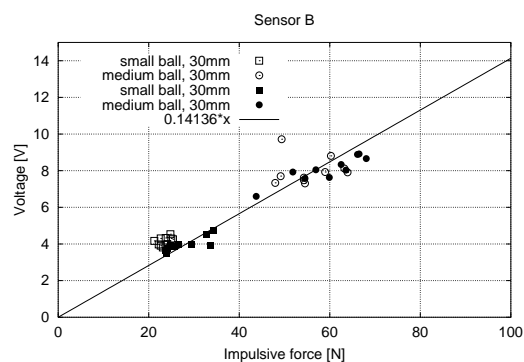


Fig. 8: Result of ball-drop calibration: Sensor B

と書くと、受圧面に加わる衝撃力 F を

$$F = m(1 + e)\sqrt{2gh}/\Delta t \quad (1)$$

によって求め、これと出力電圧との関係を調べた。このとき衝撃力が加えられた時間 Δt として、衝撃力センサの出力波形を見て、電圧の立ち上がり時間を採った。

この検定にはセンサと鋼球との跳ね返り係数 e を得ることが不可欠だが、これの計測には、本論文の後段にて述べる高速度ビデオカメラを利用した。すなわち鋼球の落下高さから跳ね返った高さ、および跳ね返ってから再び落下するまでの時間を高速度ビデオを用いて測定し、跳ね返り係数を算出した。

3 種類の鋼球 (0.130 g, 0.440 g, 2.030 g) を、30 mm ~ 150 mm の高さから落として検定を行った。センサ A ~ C の検定結果を、それぞれ Fig.7 ~ Fig.9 に示す。どのセンサも良い線形性を示す。圧電セラミックスを用いたセンサ A, B に対し、PVDF を用いたセンサ C は出力電圧が小さい。

検定に関連して、衝撃力センサの扱いやすさに触れる。

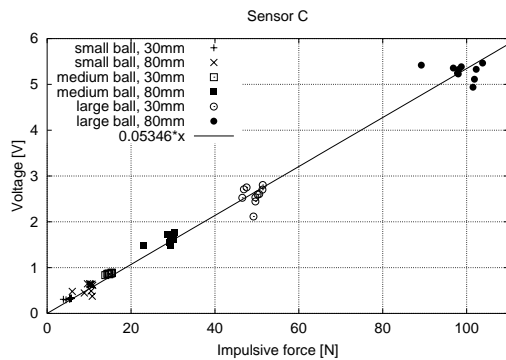


Fig. 9: Result of ball-drop calibration: Sensor C

翼面に埋める，という目的に対し，本研究で用いたセンサの中では，センサ C がもっとも扱いやすかった。その理由は，まず作成が容易で，かつ安価であること。そして，センサ感圧部を翼面と平行にするのが簡単だという点である。センサ A, B は翼面に垂直に埋め込む必要があるが，実際にやってみるとこれが難しく，翼面に平行に埋めるセンサ C の方が，取り扱いがずっと簡単である。

センサ感圧部が翼面に沿っているかどうかは，翼まわりの流れに微妙に影響するので，衝撃力計測の信頼性に影響する。しかしそれ以上に，衝撃力センサの検定の精度と手間に大きく関わる。というのは，鋼球落下によって検定を行う際，あるいは跳ね返り係数の計測の際には，鋼球がセンサ感圧部に垂直に当たり，垂直に跳ね返らなければならない。したがってセンサの感圧部が水平になるようにして検定を行う必要があるが，センサの感圧部の面が翼面とわずかでもずれていると，これを水平にするのが非常に難しく，手間がかかるのである。この観点からも，センサ C は扱いやすいセンサだと言える。

逆にセンサ B は，感圧部の面積が非常に小さく，センサ自体も小さいので，感圧部が翼面に平行かどうか調べることがそもそも難しい。これに加え，鋼球を高い位置から落として検定を試みると，センサ感圧部に正確に落とすのが困難で，感圧部の外周に当たり，ほとんどの場合に垂直には跳ね返らない。したがって高さ 30 mm と低い位置から鋼球を落下させて検定を行うだけにした (Fig.8)。

4.2 衝撃力センサの出力波形

検定時および実験時の，センサの出力波形を Fig.10 ~ Fig.12 に示す。センサ A, B は，圧電セラミックスをはさんでいる金属部品が振動するので，1 回の衝撃に対して複数のピークを持つ減衰振動のような波形を出す。センサ A はこれが特に顕著である。したがって衝撃力が短時間に連続して発生すると，波形の分離が問題になる。一方セン

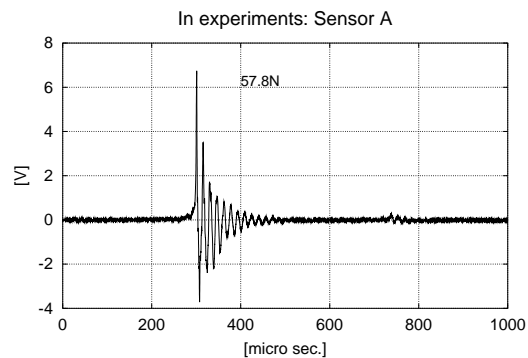
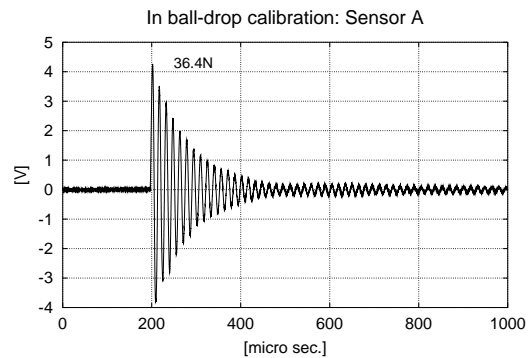


Fig. 10: Example waveform: Sensor A

サ C は，1 回の衝撃に対して一つのスパイク状の波形を出すので，波形の分離が容易である。

これまで述べてきたことを総合して，特に翼面に埋めて試験するセンサとしては，センサ C がもっとも優れている，と結論づけてよいだろう。

4.3 計測上の留意点

衝撃力センサの出力は Fig.10 ~ Fig.12 のように非常に高周波の過渡電流なので，電気信号の減衰が問題となる。著者らの経験では，細い電線を用いたり，計測の都合から安易にケーブルを延長すると，計測結果が 1 桁も異なる場合があった。そこで衝撃力センサに短い同軸ケーブルをハンダ付けし，センサと計測装置の間は，検定・実験の際に常に同じケーブルで接続されるようにした。

また，特にセンサ C の場合に，出力電圧が小さいために S/N 比が問題となった。実験の際には，条件を合わせるためにレーザー流速計を用いるが，これが高周波のノイズを発生し，計測に影響する。そこで，実験条件を合わせ終わった後は，レーザー流速計など衝撃力計測に直接関わらない装置は電源を切り，ノイズの発生源を減らすとともに，センサの負極を接地し，ノイズの干渉を抑えた。

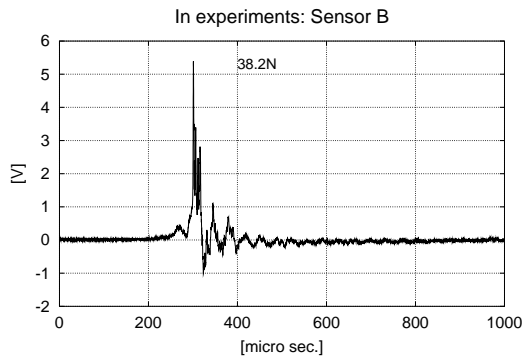
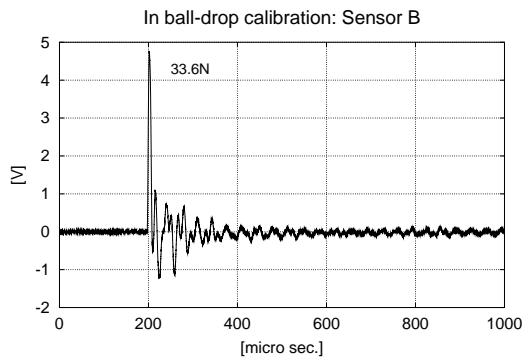


Fig. 11: Example waveform: Sensor B

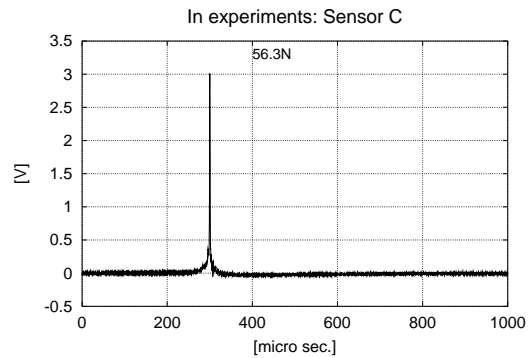
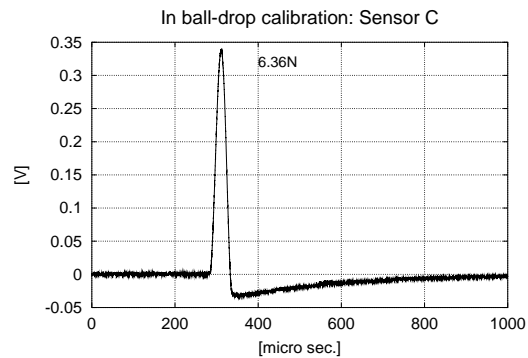


Fig. 12: Example waveform: Sensor C

5. 衝撃波形のピーク個数による分類

本研究の実験では、衝撃波形を多数計測して、累積頻度分布を求めている。この衝撃波形は、たとえば Fig.12 に示したような、単一のスパイク波形が多いが、複数のピークを持つ波形も観測される。そこでこれらの波形をそのピークの数で分類してみる。

前節で述べたように、PVDF を用いたセンサ C は単一の衝撃力に対し、単一のピークを出力する。センサ A, B の場合、特にセンサ A の場合は、単一の衝撃力に対して複数のピークを持つ減衰振動波形を出力するので、波形と衝撃力との対応がとりにくい。そこで対象とする波形は、センサ C で計測した 270 の波形を用いた。そしてこの波形を、次のように簡便に処理してピークの個数を得た。

1. センサ出力電圧の最大値が観測された前後 $100 \mu\text{sec}$. の区間のピークだけを数える。これはリバウンドによる衝撃を除外し、1 回の気泡群崩壊に対応する衝撃力を取り出す意味がある。
2. 10 N を越えるピークだけを数え、これより小さなピークは排除する。たとえば Fig.13 の場合、この条件に合うピークは 4 個である。

このようにしてピークを数え、計測された衝撃力の最大値

との関係を図示したのが Fig.14 である。図中の数字は観測された数を示している。これから以下のようなことが読みとれる。

1. ピーク個数の多い波形ほど数が少ない。単一のピークを持つ波形が全体のおよそ 7 割を占める。逆に 3 個以上のピークを持つ波形はほとんど無い。
2. 50 N 以上の大きな衝撃力は、1 つの例外を除き、単一ピークで計測されている。

したがって壊食の発生には、単一の衝撃力が発生する場合がもっとも大きな因子となる。キャピティ崩壊による衝撃力発生メカニズムを研究する過程では、単一の衝撃力が発生する場合を重点的に追求するべきである。

蛇足ながら、上に述べた分類法では 10 N 以下のスパイクが多数あっても単一ピークに分類されるので、単一ピークの割合が増える傾向にある。そこで念のために、観測された最大値の 30% を越えるピークの個数を数える分類も試みたが、単一ピークがおよそ 7 割と多く、また単一ピークの場合に衝撃力が強いという、上記の性質は変わらなかった。

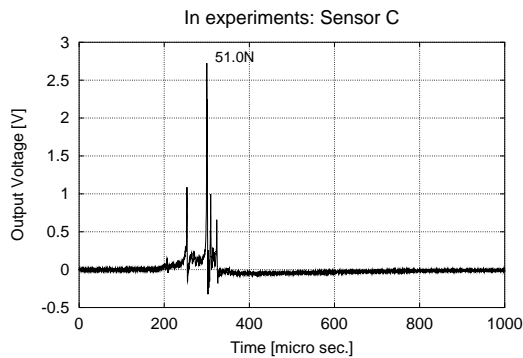


Fig. 13: Example waveform of Sensor C with several peaks of impulsive forces (four peaks are more than 10 N)

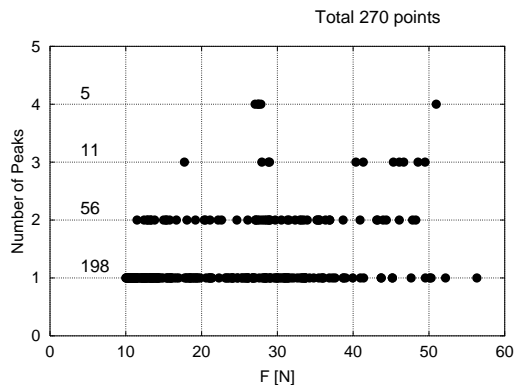


Fig. 14: Relations between maximum of impulsive forces and number of peaks larger than 10 N

6. 気泡群の崩壊挙動の観察

6.1 衝撃力センサ

衝撃力センサは、衝撃力頻度分布の計測の節で述べたセンサ C と同様の PVDF センサを用いた。Fig.15 にその構造を示す。センサ C との違いは、PVDF 膜を貼り付ける土台として、円筒形ではなく 10 mm 四方の立方体の真鍮ブロックを用いたことだけであり、本質的には同じセンサである。

6.2 高速度ビデオカメラ

観察には高速度デジタルビデオカメラ ((株) フォトロンの FASTCAM-ultima) を用い、毎秒 40,500 コマにて気泡群の崩壊挙動を撮影した。撮影領域の画素数は撮影速度によって異なり、毎秒 40,500 コマの場合には 64×64 ピクセルである。映像はグレースケール 256 階調 (8 ビット) のデジタル画像として、いったんメモリに記録される。

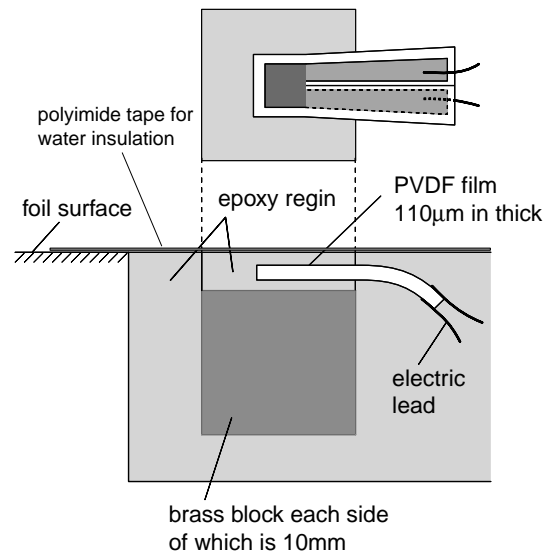


Fig. 15: Impulsive force sensor for NACA 0015 hydrofoil

その後は通常のテレビモニタに表示したり、ビデオテープもしくはコンピュータの記憶装置上に保存することが出来る。

このビデオ装置は外部トリガ入力端子を備えており、トリガ入力の前後の画像を記録することが出来る。実験の際は、このトリガ入力に本論文の前半、3.1.3 にて述べた計測装置のトリガ出力を入れ、衝撃力の発生前後の映像を記録した。

毎秒 40,500 コマという撮影速度は、この実験を行った時点では世界最速であったが、ごく最近、毎秒 125,000 コマ、画像サイズ 180×180 ピクセル という超高速度 CCD カメラを開発し、キャピテーションの観察に供した例が報告された¹⁰⁾。ただし衝撃力の同時計測は行っていない。

6.3 実験装置と実験条件

実験は、衝撃力頻度分布の計測と同様に、東京大学船舶用プロペラキャピテーションタンネルの翼型用試験部を用いて行った。断面形状が NACA 0015 翼型の 2 次元翼模型 ($150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$) を作成し、これに衝撃力センサを 4 個、Fig.16 に示す位置に埋め、実験に供した。センサ位置は、この実験に先だて行ったペイントテストにおいて、壊食ピット (正確には、ペンキの脱落) が多く観測された位置を選んだ。気泡の崩壊は主に横方向から撮影したので、窓際にあり観察しやすいセンサ 3, 4 を中心に実験した。

実験条件は、迎角 8° 、主流速 8 m/sec 、キャピテーション数 $\sigma = 1.5$ とした。

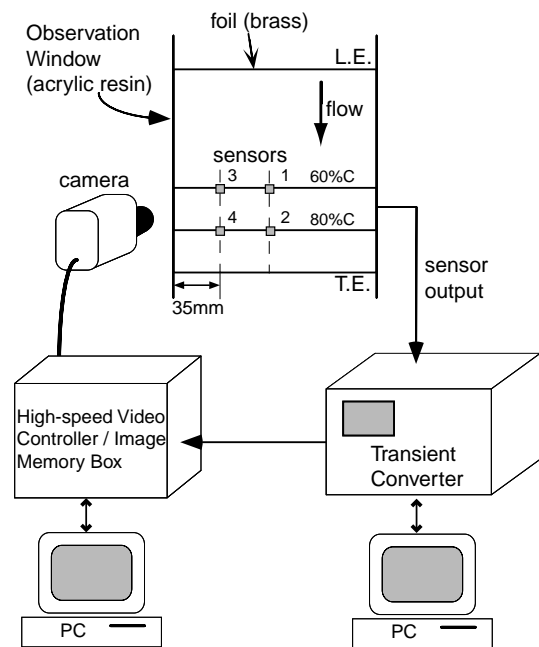


Fig. 16: Sensor embedded positions and experimental facilities

6.4 結果と考察

Fig.17 に、上記実験条件でのキャピテーションの様子を示す。この画像は翼負圧面側から、高速度ビデオカメラで撮ったものである。キャピテーションの周期的な生成・崩壊を観察するため、撮影条件は毎秒 4,500 コマとした。シートキャピテーションが翼前縁から発達し、成長して長さがコード長の 50%ほどまでになると、前縁から全体がちぎれ、大規模な気泡群“クラウドキャピティ”を放出する。このクラウドキャピティが崩壊・消滅するときに衝撃力を発生する。

Fig.18 に、センサ 3 上で崩壊するクラウドキャピティの様子を示す。これも高速度ビデオカメラで、毎秒 40,500 コマにて撮影した映像である。図中 (0) とある映像がトリガ信号が発生したとき、すなわち衝撃力が発生したときに対応する。対応する衝撃力のグラフを Fig.19 に示す。

これらの観察と衝撃力の計測から、次のことが分かった。

1. 衝撃力は常にクラウドキャピティが崩壊するときのみ発生し、キャピティ崩壊が無いときに衝撃力が観察されることは無い。
2. 衝撃力のピークが複数観察されるときがあるが、これはリバウンドしたキャピティが再び崩壊したときの衝撃力を計測した場合である。同様の現象は佐藤らも報告している^{4, 5)}。
3. 撮影速度は毎秒 40,500 コマで、コマの間隔だとおよ

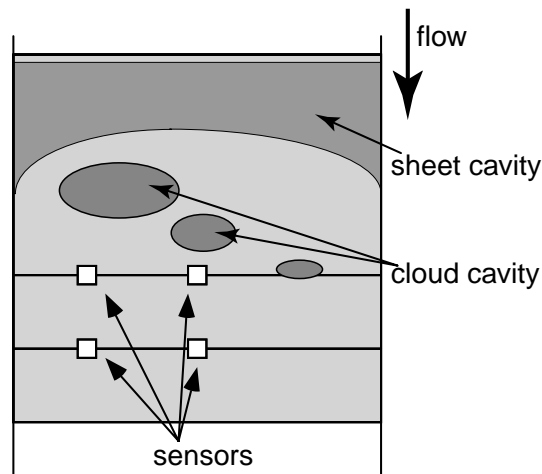


Fig. 17: Cavity appearance on NACA 0015 hydrofoil

そ $24.7 \mu\text{sec.}$ に相当する。一方、衝撃力の幅はおよそ $5 \mu\text{sec.}$ に過ぎない。したがって、現時点で最速のビデオカメラを用いても、キャピティ崩壊の現象を捉えるのにはまだ不十分である。また、画像サイズ (64×64 ピクセル) も、現象を詳しく観察するためには不足である。より高速で、解像度の高い高速度画像記録装置の出来が待たれる。

4. キャピティ気泡群全体の崩壊に要する時間は、高速度ビデオカメラの映像で数コマ程度、時間にして $100 \mu\text{sec.}$ のオーダーである。これは衝撃力の幅のピーク、 $5 \mu\text{sec.}$ よりずっと遅い。
5. ほとんどの場合、衝撃力のピークは、気泡群が崩壊してその見かけの体積が最小になる瞬間よりも数コマ前

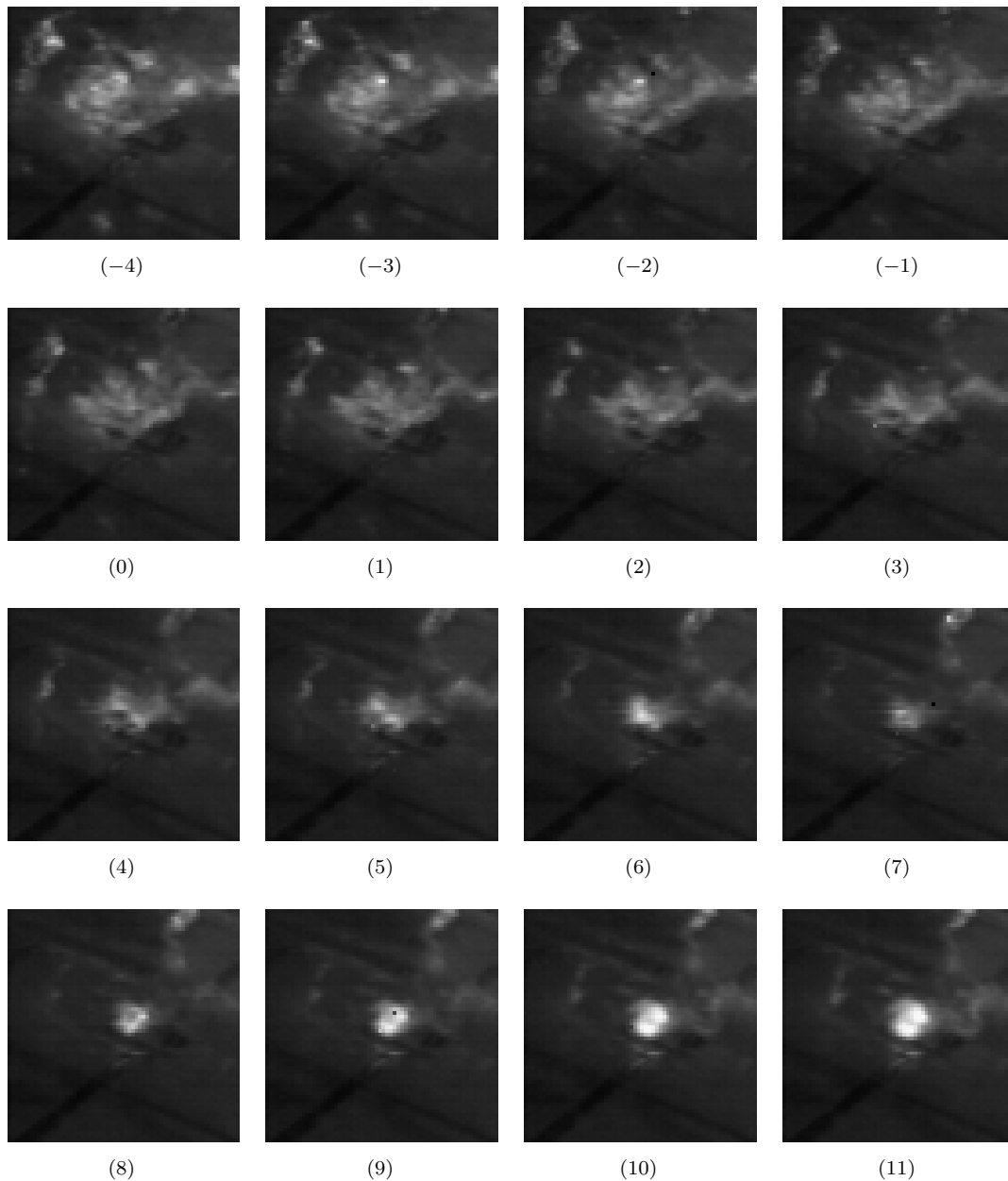


Fig. 18: An example of sequence of bird's-eye pictures by high-speed video camera at the time when impulsive force was measured

に観察される。気泡群が崩壊しきった後に衝撃力が観察されることは無い。同様の現象は佐藤らの論文⁴⁾の中の Fig.13(a) にも現れているように見えるが、論文中では触れられていない。

この最後の項は、衝撃力発生メカニズムを知る上で非常に興味深い。クラウドキャピティ崩壊を理論計算した研究^{20, 21, 22, 23, 24)}によれば、衝撃力は気泡群が完全に潰れ

切ったときに発生すると考えられるからである。これは上で述べたように、実際の現象に対応しない。したがって、キャピティ気泡群全体がいっせいに崩壊するのではなく、部分的な崩壊による衝撃力の発生を考えるべきであろう。キャピティ気泡群に一方向から衝撃圧があたれば、崩壊の途中で大きな衝撃力が発生することも考えられる。不均一な崩壊の理論の必要性が感じられる。

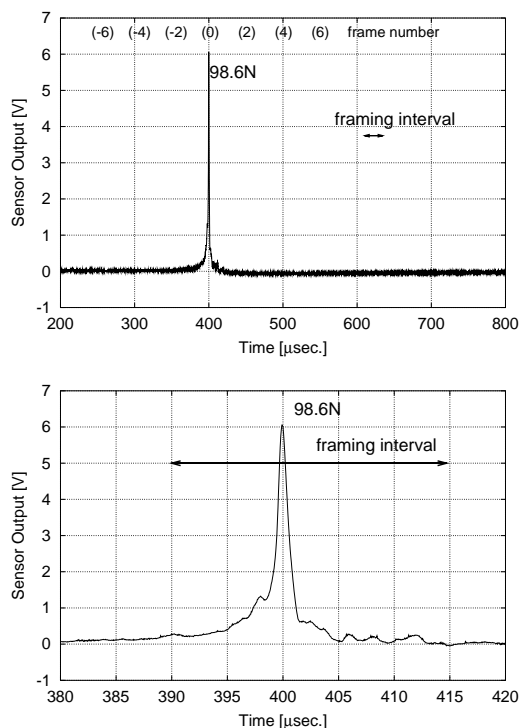


Fig. 19: Output voltage of impulsive force sensors corresponding to Fig.18

本研究で発見された現象は、キャビティ崩壊による衝撃力の発生に直接関わる重要な意味を持つであろう。この現象が実験面と理論面の両方から検証されれば、もってキャビテーションによる壊食現象の理解が進む。著者らも更にこの現象の研究を継続する予定である。

7. ま と め

本研究では、3種類の小型衝撃力センサを埋めこんだ上下対称の2次元翼模型を用い、船用プロペラキャビテーションタンネルで試験してキャビテーションを発生させ、その崩壊によって発生する衝撃力の累積頻度分布を計測し、同時に衝撃力センサの性能を評価した。また、高速度ビデオカメラによって、気泡群が崩壊する様子を撮影し、同時にそれに対応する衝撃力を計測して、衝撃力の発生メカニズムを考察した。得られた結果は以下のとおりである。

1. 3種類の衝撃力センサを用いて計測した、衝撃力の累積頻度分布は、お互いによく一致することから、これら3種の衝撃力センサは、衝撃力をよい精度で計測していると言える。したがって、センサ自体、および、計測された累積頻度分布の信頼性が確認された。
2. 衝撃力センサを鋼球落下によって検定するという手法

も、信頼できる検定法だと言える。

3. 計測された衝撃力は、センサの感圧面におよそ均等に加わるような“圧力的な”現象ではなく、点衝撃に近いものだと考えられる。
4. 衝撃力のおよそ7割は、単一のスパイク状の波形として観測される。また強い衝撃力は単一ピークの形で計測されることが多い。
5. 実験に供した3種類のセンサは、鋼球落下による検定に対し、すべてよい線形性を示した。また、実験期間中に感度の劣化などは見られなかった。センサの作成と取り扱いが容易なことから、翼面にセンサを埋めて実験する場合には、特にPVDFセンサ(センサC)が優れていると言える。単一の衝撃力に対する出力が単一のスパイク状の波形になることも、計測に都合がよい。
6. 高速度ビデオカメラで気泡群の崩壊の様子を観察すると、気泡群が崩壊してその体積が最小になる以前に、衝撃力が発生している。この現象は、衝撃力の発生の原因がキャビティ気泡群全体の挙動ではなく、局所的な崩壊に関連しているためだと考えることができる。より高性能な高速度ビデオカメラの開発を含め、この現象のさらなる検証と研究が必要である。

8. あとがき

本研究にあたり、服部 修次教授(福井大学)に衝撃力センサ(センサA)を提供していただいた。また祖山 均助教授(東北大学)には、PVDF膜を提供していただいた他、センサCの開発にあたり有益な助言を何度もいただいた。(株)理研電子には、計測装置がトリガ出力を出すように無償で改造していただいた。ここに深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 金野 祥久, 加藤 洋治, 山口 一, 前田 正二, キャビテーション壊食量の推定法 第1報: 気泡崩壊による衝撃圧スペクトル, 日本造船学会論文集 Vol.117, (1995), pp. 81-89.
- 2) 加藤 洋治 他, キャビテーション壊食の機構とその予測法の研究, 文部省科学研究費補助金(国際学術研究・共同研究)研究成果報告書 07044124, (1997).
- 3) Franc, J.-P. and Michel, J.-M., *Cavitation erosion research in France: the state of the art*, J. Marine Science and Technology, (1997), pp. 233-244.
- 4) Sato, K. and Ogawa, N., *Collapsing Behavior of Vortex Cavitation Bubbles in the Wake of a Circular Cylinder*, Cavitation and Gas-Liquid Flow in Fluid Machinery and Devices, ASME FED-

- Vol.226, (1995), pp. 119–125.
- 5) 佐藤 恵一, 近藤 伸司, 流れ中での固体壁近くの渦キャビテーション気泡の崩壊・衝撃挙動 (特に, 壁面方向への気泡様相), 日本機械学会論文集 (B 編) 63 巻 606 号, (1997), pp. 372–377.
 - 6) 佐藤 恵一, 杉本 康弘, キャビテーション壊食に関連する渦キャビティ圧壊挙動の観察 (特に, 三角柱まわりの Near-Wake において), 日本機械学会論文集 (B 編) 63 巻 616 号, (1997), pp. 3815–3821.
 - 7) 佐藤 恵一, 杉本 康弘, 近藤 伸司, 新谷 一博, 渦キャビテーション気泡崩壊挙動と壊食との同時計測, 日本機械学会論文集 (B 編) 64 巻 622 号, (1998), pp. 1683–1688.
 - 8) 佐藤 恵一, 星野 宏介, 太田 博章, 流路壁面近傍での剥離渦キャビテーション気泡の分裂・崩壊過程 (円柱まわりの流れ), 日本機械学会論文集 (B 編) 64 巻 622 号, (1998), pp. 1689–1696.
 - 9) Konno, A., Kato, H., Yamaguchi, H. and Maeda, M., *Observation of Cavitation Bubble Collapse by High-speed Video*, Proc. Fifth Asian Symposium of Visualization, (1999).
 - 10) Laberteaux, K. R., Ceccio, S. L., Mastrocola, V. J. and Lowrance J. L., *High speed digital imaging of cavitating vortices*, Experiments in Fluids, Vol. 24, (1998), pp. 489–498.
 - 11) Maeda, M., Yamada, I. *et al*, *The Prediction of Cavitation Erosion on Pump Impeller by Measuring of Cavitation Bubble Collapse Impact Loads*, 16th Symp. of The IAHR, (1992), pp. 681–690.
 - 12) Maeda, M., Yamada, I., and Tagawa, M., *The Prediction of Cavitation Erosion on Pump Impeller by Measuring of Cavitation Bubble Collapse Impact Loads* (Second Report), The Second Int. Symp. on Cavitation, (1994), pp. 243–248.
 - 13) 服部 修次, 鈴木 寿治, 岡田 庸敬, キャビテーション気泡崩壊圧が材料表面に作用したときの圧力分布, 第 9 回キャビテーションに関するシンポジウム, (1997), pp. 35–38.
 - 14) 金野 祥久, キャビテーション気泡崩壊衝撃力の計測法に関する研究, 東京大学 大学院工学系研究科 船舶海洋工学専攻 修士論文, (1996).
 - 15) 講習会「圧力変換器製作技術と実習—低圧から超高压まで」教材, 日本機械学会 通計番号: No.940-66, (1994).
 - 16) Soyama, H., Lichtarowicz, A. and Momma, T., *Vortex Cavitation in a Submerged Jet*, Proc. of the Fluids Engineering Division Conference, Volume 1, ASME FED-Vol.236, (1996), pp. 415–422.
 - 17) 加藤 洋治, キャビテーション (増補版), 槇書店, (1990).
 - 18) Fortes-Patella, R. and Reboud, J.-L., *A New Approach to Evaluate the Cavitation Erosion Power*, Int.Symp. on Cavitation, CAV'95, (1995), pp. 233–240.
 - 19) Fortes-Patella, R. and Reboud, J.-L., *A New Approach to Evaluate the Cavitation Erosion Power*, J. Fluids Eng., ASME Vol. 120, No. 2, (1998), pp. 335–344.
 - 20) D'Agostino, L. and Brennen, C. E., *Linearized Dynamics of Spherical Bubble Clouds*, J. Fluid Mechanics, Vol. 199, (1989), pp. 155–176.
 - 21) Kumar, S. and Brennen, C. E., *Some Nonlinear Interactive Effects in Bubbly Clouds*, J. Fluid Mechanics, Vol. 253, (1993), pp. 565–591.
 - 22) Wang, Y. C. and Brennen, C. E., *Shock Wave Development in the Collapse of a Cloud of Bubbles*, Cavitation and Multiphase Flow, ASME FED-Vol. 194, (1994), pp. 15–19.
 - 23) Kameda, M. and Matsumoto, Y., *Shock Waves in a Liquid Containing Small Gas Bubbles*, Physics of Fluids, Vol. 8 No.2, (1996), pp. 322–335.
 - 24) Matsumoto, Y., *Bubble Dynamics in Cavitation*, Third Int. Symp. on Cavitation, (1998), pp. 3–8.