消滅キャビテーションの確率的挙動と溶解気体効果*

(第1報, 空気飽和水の場合)

宮 倉 秀 人**

Dissolved Gas-Content-Effects on the Stochastic Behavior
of Desinent Cavitation

(1st Report, Case of Air Saturated Water)

Hideto MIYAKURA

In order to make clear the dominant factor on which cavitation initiates, I statistically analyzed the acoustic pressure pulses generated from cavitation in a typical orifice flow and simultaneously observed the cavitation aspect in the near-desinent cavitation range, for various dissolved CO₂-gas contents C in naturally air saturated water. The CO₂-gas was dissolved into the water under almost the same cavitation-nuclei-distribution. Since both the aspect and the corresponding stochastic behavior of the acoustic pulses change considerably with C , it is concluded that the dissolved gas could be a dominant factor on the cavitation through a typical process by which the nuclei rapidly grow within the dead water region.

Key Words: Cavitation, Desinent Cavitation, Gas-Content-Effects, Acoustic Pressure Pulse, Stochastic Behavior

1. 緒 言

キャビテーション障害は、諸流体機械・機器にとってほとんど致命的であるから、その根本的解消に不可欠なキャビテーションの発生機構の解明が待たれている。

文献⁽¹⁾によれば、「キャビテーションの発生の支配因子は、不溶性気体から成るキャビテーション核（以下単に核という）、特に発生領域に上流から流入するもの（以下流入核という）である」とする気泡核説⁽²⁾が学界主流であるが、沼知ら⁽³⁾⁽⁴⁾が提唱した「気体含有度 α/α_s による」とする先駆的学説を根拠とした溶解気体説も、必ずしも捨て切れないままになっている。なぜなら、周知のように、溶解気体量は不溶性気体量に比べて通常圧倒的に多い⁽⁵⁾ため、死水領域内やばく離泡内のように気体の拡散による気泡の成長時間が十分得られる流れにおいては、発生領域においてそれ自体がキャビテーション気泡に急成長し得ない溶解気体の微弱核を発端とした核とか流入核より増殖した核（以下このような核を増殖核という）の影響が顕著にな

ることが十分考えられるからである。Holl ら⁽⁶⁾は、気体的キャビテーションの消滅点がヘンリー則から算出した気体分圧で記述される事実を認めたが、流入核を測定しなかったため、これが果たして流入核によるのか、あるいは増殖核によるのかは不明である。著者ら⁽⁷⁾は、広い死水領域を有し、上述の溶解気体の効果（核の増殖）が十分期待できるオリフィスを通る水流において、種々の飽和度 β のもとに消滅キャビテーションが発する衝撃パルスの挙動を観測し、「それが核によって支配されていることを示すような確率的挙動を呈すること、また、該挙動が過渡的過飽和状態（ $\beta > 1$ ）で卓越的に現れる」ことを示した。しかし、不飽和状態の溶解気体は果たして効かないのかが疑問として残り、また、試料水の β の調節に伴う流入核の変化の影響も一応疑われる。

よって本報では、キャビテーション発生の支配因子の解明を目途として、やはりオリフィスを通る水流

* 昭和61年10月7日 第64期全国大会講演会において講演、原稿受付 昭和61年3月22日。

** 正員、東北大学大学院（〒980 仙台市荒巻字青葉）。

*1 不溶性気体と溶解気体の総量である。したがって、沼知説は、前者が支配的に効くと考えれば気泡核説そのものであるが、後者が支配的または両者が同等に効く場合を含んでいる。その意味では沼知説は十分評価されていない。

*2 発生領域における静圧の状態で換算した一種の空気含有度である。

(ただし本報の水は空気で飽和された自然水に限定し、これに溶解度が著大な炭酸ガスを溶解させた)を取り上げ、流入核分布をほぼ一定に保ちつつ、溶解炭酸ガスを不飽和内で十分広範囲に変えて、消滅キャビテーションの様相と衝撃パルスの発生の確率的挙動とを解析し、空気飽和水に気体を溶解させた場合には、「核の増殖機構によって、不飽和状態の溶解気体もキャビテーションの発生に支配的役割を演じている」ことを明らかにする。

2. 実験装置

キャビテーションという確率事象を対象とする実験においては、同一母集団に属するデータを収集・解析すべきであるから、試料水の核分布、空気含有度 α/α_s 、溶解気体量 C 、水温 t_w などを正確に把握しておかなければならない。また、実験したキャビテーション係数 σ の全域で同一状態の試料水を供給しなければならない。そこで、本実験では、図1に示すように圧縮空気によって σ を微小時間変化させながら試料水を測定部へ流入させることができ、振動源となる駆動ポンプを持たない試験水槽を使用した。本装置の上・下流側管路には同一平面上にベンドが3個あり、そして、上流側のバルブはボール形開閉バルブ(全開・全閉)である。また、上流側の整流ノズルから測定部オリフィスまでは約 $30D$ 、下流側にも約 $17D$ の直管部(内径 $D=10$ mm)を設け、安定した流れとなるよう設計してある。また、有効な表面核となる腐食などによる粒子の混入を避けるため、上流側貯水槽はステンレス製、上・下流側管路(内径 25 mm)は合成樹脂製としている。

測定部は透明アクリル樹脂製で、供試オリフィス(孔径 $d=2$ mm, 開口比 $m=0.04$ の黄銅製)は、JIS規格に準じた形状に製作されている。図2には測定部の

詳細を示す。

キャビテーションイベント、すなわち衝撃パルスは測定部外壁上 c 点に固定した PZT プローブ(径、厚み方向の固有振動数は 0.4, 2.25 MHz で、キャビテーション全発生領域を含む広い指向性を持つ)で受信した。溶解させる気体としては、溶解度が大きく広い範囲に変えることが可能で取扱いが簡単かつ安全な炭酸ガスを採用した。炭酸ガスのブンゼン吸収係数 α_b (気体分圧が 101.3 kPa であるとき、 t K の溶媒 1 cc に溶解する気体の容積を、273 K, 101.3 kPa に換算した値)は、実験水温 293 K で 0.878 である。

この液体中の炭酸ガスは、炭酸ガス濃度計(測定範囲 0~100 % と 0~10 % の2種類、精度 $\pm 5\%$ フルスケール)によって測定した。

なお、上・下流の静圧 P_1, P_2 は b_1, b_2 点でまた、上流側壁面変動圧 P_{up} は、 d 点で圧力変換器(周波数 $f=2$ kHz までの変動分が測定可能)により測定した。

3. 実験方法

キャビテーション係数 $\sigma=2(P_2-P_v)/\rho V_2^2$ には、キャビテーションが発生しているオリフィスの下流側の状態によるものを採用した。ここで、 P_v, ρ, V_2 はそれぞれ水の蒸気圧、密度、オリフィス孔での平均流速である。炭酸ガスを溶解させる試料水には水道水を使用し、上流側貯水槽に一定水位までため約 4 h 静置させた(空気含有度 $\alpha/\alpha_s=1.1$)後、炭酸ガスを封入する。炭酸ガスの溶解量は、炭酸ガスの分圧によって決まる。炭酸ガスの溶解を早め、溶解濃度の一様性を期待し、貯水槽内圧力を約 300 kPa に設定して約 20 h 静置させる。なお、炭酸ガスを溶解させない場合も同様に 300 kPa の加圧を行う。各小実験は、上流側のバルブ(全開全閉用)を全開して実験を開始する。

溶解気体量(体積比炭酸ガス濃度 $C\%$ で代表させる)は、キャビテーションの発生に対する溶解気体量

図1 試験水槽

図2 測定部および供試オリフィス

の効果を明確にするため、溶解気体量 $C=1.5$ (水道水), 9.5, 20, 37 % の広い範囲にわたって実験を行った。

σ の時間変化率 ($\Delta\sigma/\Delta t$) は、間欠的に発生する消滅状態におけるキャビテーションイベントの挙動を考慮して、十分ゆるやかに $\Delta\sigma/\Delta t=(0.2\sim1.6)\times10^{-3}\text{ s}^{-1}$ としてある。

オリフィス孔での平均流速 V_2 は、検定された上流側整流ノズルにより測定している。なお、小実験中は、上流側貯水槽内の自由表面より吸込渦の発生はなかった。

確率事象を対象とするので、キャビテーションの様相、衝撃パルス、キャビテーション係数 σ およびその他の流体力学的諸量は、同時に観測・記録した後解析する手法を採った。衝撃パルスの発生状況、発生時間間隔などは、既報⁽⁷⁾と同様に波高分析器 (分解能 1024 チャンネル, 最大計数 10^6 個において立上り時間 0.1~5

μs のパルスを検出可能) を使用した。また、キャビテーションの様相は瞬間写真 (露出時間 $3\mu\text{s}$) により観察している。

小実験の開始直前に上流側貯水槽から採取したサンプルの核分布は、大気圧状態でコールタカウンタ⁽⁸⁾により測定し、同時に溶解気体量も炭酸ガス濃度計により測定した。本実験では、核分布をほぼ一定に保ちつつ、溶解気体量のみを変化させることができた。各溶解気体量 C に対する核分布を図3に示した。

実験条件は、上流側静圧 $P_1=272.5\sim381.3\text{ kPa}$, 下流側静圧 $P_2=87.4\sim92.7\text{ kPa}$, 水温 $t_w=293\text{ K}$ でほぼ一定、また、管径 D によるレイノルズ数 $Re_D(=DV_1/\nu)=(4.00\sim5.27)\times10^3$ である。ここで、 V_1 および ν は、上流側の平均流速、水の動粘度である。本実験の Re_D の範囲内では、オリフィスの流量係数はほぼ 0.54 であった。

4. 実験結果

4.1 キャビテーションの様相 上述のように、著者ら⁽⁷⁾は「過飽和の溶解気体がキャビテーションの発生に支配的に関与している」ことを示したが、試料水中に共存する不飽和溶解気体の効果を明示するには至らなかった。そこで、まず空気含有度が飽和状態の自然水に炭酸ガスを溶解し、その溶解気体量 C を不飽和状態で十分広範囲に変え、キャビテーションの発生に対する C の効果を調べてみよう。

図4, 5には、露出時間が $3\mu\text{s}$ の瞬間写真でとらえた消滅領域 (図中の σ_{dl} は衝撃パルスが急激に減少する消滅領域の下限を示す) よりサブキャビテーション領域 ($\sigma < \sigma_{dl}$) におけるキャビテーションの様相を、種々の溶解気体量 C (ただし $C=1.5\%$ は自然水) について示す。

図3 試料水中のキャビテーション核分布
(測定誤差 $d_n=0.02, 0.04\text{ mm}$ で $\pm 15, \pm 25\%$)

図4 キャビテーションの様相

まず様相を見てみよう。 $C=1.5\%$ の自然水の場合には、サブキャビテーション領域では、非球状気泡、塊状気泡、微細気泡が安定的に混在・発生しており、 σ_{dl} 点付近で同時に消滅する。消滅領域においては、気泡は時間空間的に確率的に発生し、その発生確率（瞬間写真で気泡の発生を認める割合）も著しく低く、瞬間写真では気泡の発生をほとんどとらえられない。炭酸ガスを溶解させると、管路内全体に微細気泡が卓越的に発生し、その気泡径は、溶解気体量 C の増大とともに大きくなる。更に C が増大すると塊状気泡、非球状気泡の発生領域は、 σ_{dl} 点より小 σ 側に移り、かつ、気泡の種類により、発生領域に差が現れるようになり、消滅領域近傍では微細気泡しか発生しなくなる。そして、消滅領域では確率的に微細気泡のみが発生する。

図5 キャビテーションの様相 (σ 一定の場合)

そして溶解気体量 C が極端に高くなると、消滅領域でも微細気泡の発生頻度が高くなり、瞬間写真でも容易にとらえられるようになり、微細気泡のみが発生する σ の領域がより拡大する。更に σ_{dl} 付近においても気泡の個数が徐々にだだらと減少するという低濃度の場合とは全く異なる注目すべき傾向を示し、 σ_{dl} 点は不明確になる。

さて、図4、5より、溶解気体量 C が増すと、管路内全体の気泡（特に微細気泡）の数 N がけた違いに増大する事実が見てとれる。しかし、図3に示すように、測定部に流入する流入核分布はいずれの溶解気体量 C の試料水でもほぼ同等だから、「キャビテーションのような一種の液体破壊は弱点となる核から発生する」と現在広く容認されている核理論によれば、上記の事実は、気泡発生域の近傍にある極小径の微弱核が炭酸ガスの拡散などにより有効な大径核に急成長する（有効核の数が急増する）か、あるいは、発生した気泡の中で消滅せずに核として生き残るものの数が急増すること、すなわち核の著しい増殖を示唆し、併せて、キャビテーション発生に対する顕著な不飽和溶解ガスの効果を明示していると言えよう。

また、炭酸ガスを溶解すると、オリフィス孔よりの噴流（広がり角 $2\alpha_f=12^\circ$ ）のせん断層から離れた死水領域中央付近にも多くの微細気泡の発生を認める（図5）。これらの気泡は衝撃パルスの発生と相関が強く、数msの間隔で消滅そして再生しており、拡散により定常的に発生する成長時間の長い脱気による気泡とは異なっていた。この事実も、死水領域内で核が増殖していることを明示している。更に、それらの光学顕微鏡により瞬間写真より測定した平均直径 d_0 は、 $C=$

図6 消滅状態における衝撃パルス数 n の頻度分布 ($P_{TH}=0.05$ kPa)

1.5, 9.5, 37% に対してそれぞれ 0.04, 0.06, 0.12 mm で、ほぼ溶解気体量 C に比例し、不飽和炭酸ガスによる気泡成長の顕著な促進を明示し、併せて核の著しい増殖を示唆している。

消滅領域の気泡と、空気飽和水 ($\alpha/\alpha_s=1.1$) に対する既報⁽¹⁰⁾のそれとを比較すると、既報では非球状気泡が卓越に発生しているのに対し、本実験では微細気泡が卓越的に発生するという顕著な差、すなわちジョンソン効果⁽¹¹⁾⁽¹²⁾を認めた。この効果の原因は今後の解明を待たなければならないが、著者は、試料水で行った 300 kPa の加圧処理の有無 (流入核の差) と、試片の寸法差によるものではないかと考えている。

4.2 消滅状態 既報⁽⁷⁾において著しい飽和度 (すなわち空気含有度) の効果を認めた消滅状態におけるキャビテーションの発生状況が、不飽和状態で液中に存在する溶解気体によってどのように変わるかをキャビテーションイベントの直接的反響である衝撃パルスの挙動を介して調べてみた。

図 6 (a)~(d) には、十分ゆるやかな時間変化率 $\Delta\sigma/\Delta t$ で連続的に σ を変化させた際の消滅状態の衝撃パルスの頻度分布を種々の C について示した。図 6 中の σ 点は、既報⁽⁹⁾で述べた衝撃パルス数の急激に減少する消滅状態の下限値である。既報⁽⁷⁾で示したように、消滅状態は識別能によっても変わるが、今回はいづれの C に対しても同一条件でデータを記録したの

で、電気的ノイズによりイベントの識別ができなくなる下限値に近い同一の識別能 P_{TH} (認知の基準と言えるイベントの強さのしきい値) についての頻度分布を示す。

$C=1.5\%$ の自然水の場合 (測定部における空気飽和度 $\beta=1.3$ で過飽和) には、図 6 (a) に示すように消滅状態において確率的な衝撃パルスの発生を認めた炭酸ガスの溶解量を増大させると、(b)~(d) のように衝撃パルス数が急激に増大する傾向を示す。また、溶解気体量 C により、 σ_{dl} も消滅領域も大幅に異なることが認められ、水中の不飽和溶解気体量の顕著な影響が確かめられた。更に、溶解気体量 C によって発生状況も著しく変わる。つまり、 C の低い場合には周期的な衝撃パルス数の増大が認められるが、 C の増大とともにこの周期は短くなり、かつ、全体的に衝撃パルス数の頻度が高まり、「全体として、だんだんと衝撃パルス数が減少する」という低 C の場合とはやや異質な状況へ移行する。

4.3 消滅状態の認定条件 既報⁽⁷⁾においては、認定条件により消滅キャビテーションの認定値 ($\bar{\sigma}_d$ および $\hat{\sigma}_d$) が著しく変わることを報告しているの、念のため液中の不飽和状態の溶解ガス量を変えた場合において、認定条件によって消滅キャビテーション状態がどのように変わるのかを調べてみた。

識別能 P_{TH} と時間分解能 T_P による消滅キャビテーションの認定値の変化を、溶解気体量 $C=37\%$ の場合について示した図 7 より、 P_{TH} および $\bar{T}_P$ によって認定値が著変すること、また、標準偏差 $\hat{\sigma}_d$ が著しく

図 7 消滅キャビテーションの認定値 ($\bar{T}_P$ と P_{TH} による変化, $C=37\%$)

図 8 消滅キャビテーションの認定値 (溶解気体量 C による変化, $P_{TH}=0.08$ kPa)

大きいことがわかる (図7中 $\bar{\sigma}_d, \bar{T}_p$ は σ_d, T_p の標準偏差)。

図8には、識別能 $P_{TH}=0.08$ kPa の状態において溶解気体量 C による認定値の変化を示した。自然水の $C=1.5\%$ では、認定値はほぼ一定であるが、 C によって認定値が著しく変わり、 C の増大とともに認定条件による違いが大きくなる傾向が確認され、溶解気体量による効果が顕著であることがわかる。

要するに、既報⁽⁷⁾と同様に、認定条件によっても消滅状態は変わるが、溶解気体量による消滅状態の変化も著しく現れることが確認された。

5. 結 論

キャビテーション発生 of 支配因子の解明を目的として、広い死水領域を持つオリフィスを通る水流において流入核分布をほぼ一定に保ちつつ、空気飽和自然水に溶解する炭酸ガス量を広範囲に変えて、消滅キャビテーションの様相と、キャビテーションイベントの直接的反響と言える衝撃パルスの確率的挙動を解明した。

結果を要約すると次のようになる。

(1) 不飽和の溶解気体によって、キャビテーション、特に、消滅キャビテーションの発生状況に大差が現れ、溶解気体の効果が顕著であるから、「溶解気体量がキャビテーション発生 of 支配因子の有力な一つである。」ことが言える。したがって、今後の研究においては、気泡核分布のみならず、溶解気体量も定量することが不可欠となる。

(2) 溶解気体量が増すと、キャビテーション気泡発生領域における気泡の数および径が急増する。流入核分布には大差が無いから、この事実は、溶解気体による有効核の急激な増殖を示している。

(3) 溶解気体量により、発生するキャビテーション気泡の種類も異なり、特に消滅状態では微細気泡を卓越的に認める。

(4) 消滅キャビテーションの認定値 ($\bar{\sigma}_d$ および $\bar{T}_p$) は、認定条件である識別能 P_{TH} 、時間分解能 T_p のみならず、溶解気体量によっても大いに異なる。

終わりに臨み、終始懇切なるご指導を賜った高速度力学研究所 大場利三郎教授に衷心より感謝の意を表します。更に、実験に協力いただいた同研究所 伊藤幸雄助手、樋口二郎技官、試片を製作していただいた附属工場 庄司幸一技能補佐員に感謝の意を表します。

文 献

- (1) Hammit, F. G., *Cavitation and Multiphase Flow Phenomena*, (1980), 44, McGraw-Hill.
- (2) Plesset, M. S., *J. Appl. Mech.*, 16-3 (1949), 277.
- (3) 沼知・椎名, 機論, 3-11 (昭12), 177.
- (4) 沼知・椎名, 文献(3)の182ページ.
- (5) Ahmed, O. and Hammit, F. G., *Univ. Mich., Rep.*, No. 01357-4-I (1969-4).
- (6) Holl, J. W., *Trans. ASME, Ser. D*, 82-4 (1960), 941.
- (7) 大場・ほか4名, 機論, 51-462, B(昭60), 419.
- (8) 大場・ほか4名, 機論, 46-408, B(昭55), 1485.
- (9) 大場・ほか4名, 機論, No. 840-12(昭59-10), 172.
- (10) 大場・ほか2名, 機論, 48-430, B(昭57), 1025.
- (11) 大場・伊藤, 機論, 45-398, B(昭54), 1428.
- (12) Johnsson, C. A., *Proc. 12th ITTC Conf.*, (1969-9), 381.

討 論

〔質問〕 加藤 洋治〔東京大学工学部〕

新しい構想の実験に敬意を表す。

(1) 貴実験は通常の水/空気系にくらべ、溶解気体量が格段に大きい場合の実験と思われるが、たとえば $a/a_s=1$ の空気量 (体積分率) にくらべ、 $c=37\%$ では炭酸ガスの体積分率は何倍になっているのか、お教え願いたい。

(2) 死水領域内の気泡核の増殖はどのような機構によるとお考えか。キャビティの発生・消滅が核の大幅な増殖をもたらすことが実験的に確かめられているが(付1)それと類似の現象であろうか。

〔回答〕 (1) 本試料水 ($a/a_s=1$) においては、体積分率で約2%の空気を含む。したがって、溶解炭酸ガス量37% (体積分率) は空気量の約18倍となる。

(2) 著者らの研究室では、死水領域内において気体の拡散などによって微弱気泡 (それ自体からキャビテーション気泡に成長し得ないもの) を成長させて増殖核になるという機構を考えている。もちろん、ご指摘のような機構も考えられる。本実験で、炭酸ガスを溶かし込まない場合と、溶かし込んだ場合の衝撃パルスの発生状況の違いから判断すると、炭酸ガスを溶かし込むことによって顕著な確率的挙動が現れるので、溶解気体が微弱気泡の成長を促進することにより気泡核の増殖をもたらすと判断される。

〔質問〕 木本 日出夫〔大阪大学基礎工学部〕

(1) 実験における不溶性気体と溶解気体の判別方法をご教示願いたい。また、図3で炭酸ガス濃度の変化に対してキャビテーション核分布があまり変化して

いないと判断しておられるが、不飽和の溶解気体がキャビテーション核にならない濃度範囲はどの程度か。

(2) 本実験でキャビテーションはどの程度連続的に発生していたのか。また、図4、5では印刷が不鮮明のためキャビテーションの発生状況が良くわからないが、露出時間3 μ sの瞬間写真では現象を代表した写真にはならないのではないか。

〔回答〕 (1) ここで不溶性気体と考えているものは、コールタカウンタによって計測され得る「キャビテーションの発生にかかわりが深いと考えられる10 μ m直径程度以上の気泡として存在する気体」である。それ以下の径の気泡は溶解気体とみなしている。また、炭酸ガスを溶かし込ませても気泡核分布の変化がないことから、溶かし込んだ気体は10 μ m直径以下

の気泡となったと考え、すべて溶解気体になったと考えた。また、不飽和の溶解気体がキャビテーション核とならない濃度範囲はとのご質問であるが、本実験の範囲では、核分布に変化がなかった事実から、そのような範囲になってないと判断される。

(2) 消滅領域では、衝撃パルスは数 μ sのオーダの持続時間で、パルス群(付2)としては数msのオーダで断続的に発生している。本報で主として目的とした「発生するキャビテーションの様相、気泡のタイプ等を観察」には、この3 μ sの露出時間で十分と考えている。

(付1) Kato, H., *Int. Symp. Jet Cavities*, ASME, FED-31 (1985), 13.

(付2) 大場・ほか3名, 機論, 52-476, B (昭61), 1445.