キャビテーション激振時における翼形の 非定常揚抗力特性*

坂上 謙太郎^{*1}, 桑子 浩^{*1}
伊藤 幸雄^{*2}, 大場 利三郎^{*2}
笹島 孝夫^{*3}

Behavior of the Lift-and the Drag-Fluctuations on a Foil
in Cavitation-Violent-Vibrations

Kentaro SAKAGAMI, Hiroshi KUWAKO, Yukio ITO
Risaburo OBA, and Takao SASAJIMA

To make clear the behavior of cavitation-violent-vibrations, we precisely investigated the lift-and the drag-fluctuations, the vibrational accelerations, and the corresponding cavitation aspects in the steady water flow around a low drag Eppler-foil. The lift and the drag fluctuate considerably in the state of the periodic "cavity separation" of about 21 Hz in frequency, and these amplitudes reach ± 24 percents of the time averaged values. A strong correlation is observed between the time-dependent cavity behavior and the corresponding fluctuations, i.e., the lifts, the drags and the vibrations.

Key Words : Cavitation, Blade, Separation, Bubble, Cloud Cavitation, Violent Vibration, Transition

1. 緒 論

流体機械の高速、大型化に伴い高信頼性作動領域の拡大が強く要請されるようになり、サブキャビテーション（以下Sub. Cという）からスーパーキャビテーション（SC）へと移行する遷移領域において発生するきわめて振幅の大きい振動（以下、激振⁽¹⁾という）は、しばしば流体機械に致命的障害をもたらすものとして知られ、その発生機構の解明が待たれている。

激振に関する既存の研究^{(1)~(4)}の多くは、発生領域、揚抗力またはキャビティの変動などを個々にしかも大まかに取り扱ったもので、この現象に効くキャビテーションのタイプ、実験の再現性を保証するキャビテーション核分布の経時変化のきん少性、揚抗力変動とキャビティ変動の相関⁽⁵⁾、あるいは、激振の発生機構などの根本的問題はほとんど解かれていない。最

近、翼形などにおける激振の振動、音響特性⁽⁶⁾および激振の挙動の瞬間写真観察⁽⁷⁾などが行われ、激振がキャビテーションクラウドの大脱落（すなわち気泡大脱落⁽⁶⁾⁽⁷⁾）と深い係わりがある事実などが明らかにされた。また、翼形に発生する非定常クラウド・キャビテーション⁽⁴⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾は、キャビティ後縁から放出された渦が巻き上がった結果生じる大規模渦構造の中央低圧部に気泡が残留するというボルテックス・キャビテーションの一種である⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾ことなども明らかにされた。しかし、この激振が翼形の固有振動との共振の一種ではないかとの根本的疑問も残された。

よって本論文では、工学的に重要な振動、壊食、騒音などの発生機構の解明の鍵を握っていると考えられる気泡大脱落とそれに伴う危険な激振の挙動の解明を目的として、定常流れ場におかれた Eppler 翼形⁽¹²⁾に発生する気泡大脱落の挙動、揚抗力変動および振動

* 平成元年11月7日 流体工学部門講演会において講演、原稿受付 平成元年4月25日。

^{*1} 学生員、東北大学大学院（〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉）。

^{*2} 正員、東北大学流体科学研究所（〒980 仙台市青葉区片平2-1-1）。

^{*3} 正員、三菱重工業(株)長崎研究所（〒852 長崎市文教町3-48）。

加速度を、核分布の経時変化が少ないという条件下に同時観測を試みた。

2. 実験装置

使用した二次元水平測定部（図1参照、幅70mm、高さ190mm、長さ700mm）を持つ回流型単独翼試験水槽の性能、流れの特性、試験法および試料水中のキャビテーション核分布の経時変化のきん少性については文献⁽¹³⁾を参照されたい。図2には、水槽内の核分布の経時変化が少なくなる待ち時間（駆動ポンプ運転後60分）後に、測定部上流より採取した試料水をコールタカウンタで測定した核分布を示す。ここに、 N_n は核の数密度分布関数、 d_n は核の直径である。

供試翼形は、空気中の低速状態において良好な性能を示す Eppler 翼形（図3参照、材質 SUS304、弦長 $C = 70\text{mm}$ 、そり比 1.9%，最大厚み比 8.2%，アスペクト比 $R = 1.0$ ）で、その表面は流れに対して表面あらさの影響がないように流体力学的に滑らかに仕上げられている。ここで、片持ち翼形の端面と観察窓壁面のすき間は 0.1mm に設定した。

図1 測定部の概要

図2 試料水中のキャビテーション核分布

図3 供試翼形の形状

3. 実験方法

キャビテーション係数 σ は、翼形の中心より 210mm 上流の点における静圧 P_s と平均流速 u により、 $\sigma = 2(P_s - P_v) / \rho u^2$ と定義した。ここに、 P_v 、 ρ はそれぞれ水温 t_w における試料水の飽和蒸気圧と密度である。試料水には、水槽内に長時間貯留され、空気では飽和された水道水を使用した。

3・1 揚力、抗力の測定 翼形の揚力 L 、抗力 D は、高精度の二ひずみゲージ法による力天秤により測定した。測定の詳細については文献⁽¹⁴⁾を参照されたい。また、揚抗力係数 C_L 、 C_D は翼形投影面積 A を導入し、 $C_L = 2L / (\rho u^2 A)$ 、 $C_D = 2D / (\rho u^2 A)$ と定義した。

なお、抗力値は、翼形試片を取り付けている円板（測定部の側壁にフラッシュマウントされている）による粘性抵抗と、翼形端面と観察窓壁面のすき間 0.1mm が合わさった影響を差し引いたものである⁽¹⁾。

3・2 信号解析および高速映画撮影 激振が典型的な非定常現象であり、確率的挙動も加わることを考慮して、キャビテーションの挙動は測定部上面観察窓より高速度カメラ（約 5000コマ/s ）により撮影し、また、撮影時間中の揚抗力および振動加速度計（図1参照）からの信号をデータレコーダ（4チャンネル、測定周波数 $DC \sim 200\text{kHz}$ ）に同時に記録した。その際、高速映画中の任意のコマにストロボ（せん光時間 $1.1\mu\text{s}$ ）による発光像を写し、その発光に同期したパルス信号をデータレコーダに記録することにより、高速映画の撮影コマとデータレコーダに記録された各信号とを時間的に対応可能にした。また、ハイパスフィルタで揚抗力の再生信号の 1Hz 以下の低周波成分をカットし、その後FFTアナライザ（最大分析周波数 100kHz ）を用いてパワースペクトルおよびクロスパワースペクトルなどを解析した。

試験条件は以下の通りである。 $\sigma = 0.656$ 、レイノルズ数 $Re = C u / \nu = 5.17 \times 10^5$ 、 $u = 10\text{m/s}$ 、 $P_s = 33.9\text{kPa}$ 、迎え角 $\alpha = 5\text{deg}$ 、 $t_w = 282.05\text{K}$ 。ここに、 ν は水の動粘度である。

4. 実験結果

4・1 高速映画観察 高速映画によりとらえた代表的な激振時の1周期の挙動を図4に示す。気泡大脱落后、クラウドが後方に放出され、キャビティが成長していく(図中の①, ②)。やがてキャビティは翼後端T.E.まで発達して翼全体を覆い尽くし、⑩において最も発達した状態となる(この時キャビティ長さは $1C \sim 1.2C$,ここに C は翼弦長である)。その後キャビティ後半部に局所的に破断線が発生⑪するが、すぐにそれらが干渉合って大破断線を形成し⑫, 気泡大脱落に至る⑬。クラウド放出後、キャビティの発生領域は小さくなるが、再びキャビティが⑭~⑰へと成長して次の1周期が始まる。このような大脱落

の周期は約50ms(周波数 $f=20\text{Hz}$)である。ここで、局所的脱落到に伴って生じたクラウドの流れ方向への移動速度(翼前縁L.E.から $0.5C \sim 0.8C$ にかけての移動)は、約 7 m/s (主流速度の70%)であり、これはスパン方向全体にわたり生ずる大脱落時のクラウドのそれ⁽⁶⁾(約30%)に比べて大きい。

4・2 気泡大脱落と揚抗力変動 図5には、抗力変動波形の1周期が示されている(ここで図5(a)は図4の気泡大脱落の挙動と時間的に対比できる)。大脱落后、抗力は最小値をとり⑭, その後キャビティが成長するに従い抗力は増加していくが、⑮, ⑯, ⑰のように一時的に抗力が減少する点も現れる。これらの点は、図4の③, ⑤, ⑩, ⑬, ⑮のキャビティの様子にほぼ符合しており、クラウドの局所

図4 気泡大脱落の1周期の挙動

的脱落の発生を示している。最大抗力するとき ① のキャビティは図4の ⑦ に示されたように、翼全面に発達している。そして、クラウドが放出された後、再び抗力は最小値をとる ②。

なお、大脱落時の抗力の減少についてみると、通常、図5 (a) の ① ~ ④ のように、一段階で急激に減少している。これに対して、図5 (b) に示す、別の1周期の ① ~ ④ ~ ⑥ のように、抗力が二段階に減少する場合もある。キャビティの様子をみると、一段階減少では、破断線がスパン方向に一列入っている（図4の ⑥）のに対して、二段階減少では、図6に示すように、破断線はスパン方向に二列入り（文献(15)の“double break-off”に相当すると思われる）、クラウドは時間的に二段階に分けられて放出されている（後者における放出クラウドの時間差は約 5.9ms (168 Hz) であった）。なお、このような二列の破断線の発生は、22周期中6回観察された。

さらに、揚抗力変動の詳細、振動加速度を検討してみる。図7には、揚力 L と抗力 D の信号波形および振動加速度波形（揚抗力係数の平均値と変動幅につ

いては表1参照）を示す。いずれの波形にも周期性が認められるが、それらの位相は完全に逆転している。すなわち、抗力が上昇して最大となると揚力は下降して最小となり、抗力が下降して最小となると揚力は上昇して最大となる。なお、抗力最小時に振動加速度の振幅 Acc は最大となっているから、翼はこのとき最も大きく振動している（以下、この状態を大脱落終了状態という）。

1周期中を詳しくみると、6~7回の中規模変動がみとれる。この中規模変動は、大脱落終了状態のときは大きく、大脱落の前、すなわち翼全面がキャビティに覆われているときは小さい。また、大脱落終了状態に揚力と抗力の位相は逆転し、それ以外の中規模変動では同位相である。1周期および中規模変動の周波数は、それぞれ、約 21 Hz, 約 145 Hz であり、これらは気泡大脱落とクラウドの局所的脱落の発生周期と良く符合している。

図6 二列の破断線の存在

図5 抗力変動波形

図7 揚力 L 、抗力 D および振動加速度 Acc の実時間波形

表1 揚抗力係数の平均値と変動値

	平均値	最大値	最小値	最大変動幅
C_L	0.654	0.818	0.498	$\pm 24\%$
C_D	0.028	0.035	0.021	$\pm 24\%$

4・3 瞬間写真観察 この気泡大脱落の様相を、さらに、せん光時間 $1\mu s$ のフラッシュランプによる十分な時間分解能を持つ瞬間写真より調べてみる。図8は、翼形の負圧面のキャビテーションの様相を、1周期内の任意の時間において上方向 (Top V.) と斜め横方向 (Side V.) からとらえた代表的写真例である。主流の方向は左から右であり、図8 (a), (b), (c), はそれぞれ、図5 (a) の、㊸ (大脱落終了状態)、㊹ (キャビティが成長するにつれて抗力が增大していく過程)、㊺ (キャビティが翼全体を覆い尽くし、抗力が最大の状態) に対応している。キャビティの様相をみると、その実体は安定な単一シート形ではなく、トラベリング形あるいはフィクスト形の各種のキャビテーションが同時に発生している。

4・4 揚抗力変動の相関 揚力と抗力のパワースペクトル (図9参照) をみると、いずれのスペクトルも同じ傾向を示しているので、以下では揚力についてのみ考察する。まず、スペクトルの周波数 f 成分をみる (図9 (a) 参照) と、1 kHz までの f 領域においては、大脱落の1周期に相当した周波数 21Hz のパワーがきわ立って大きい。そのほかに、145Hz ならびに 63Hz が大きくなっている。このうち 145Hz は、前述の局所的脱落に対応した中規模変動の周波数に相当し、63Hz については、抗力において 42Hz が測定されていることから、21Hz のハーモニクスと考えられる。

次に、図10、11の揚抗力変動のクロスパワースペクトルおよびコヒーレンシをみると、揚力と抗力

において $f = 21, 63\text{ Hz}$ の位相が 180 deg ずれて現れていることが再確認される。そして、これらの周波数においてはコヒーレンシが大きく、信頼性も相対的に高いことが裏付けられている。

なお、 $f = 570 \sim 580\text{ Hz}$ 付近のものは実験装置固有振動数であり、そのほかにも 8 Hz および 140 Hz の振動があり、中規模変動に影響を与えている。

図9 揚抗力変動のパワースペクトル

図10 揚抗力変動のクロスパワースペクトル

図8 気泡大脱落の瞬間写真

図 1.1 コヒーレンシ

図 1.2 激振および気泡大脱落の範囲

4・5 気泡大脱落の発生領域 図 1.2にはこの Eppler 翼形の $C_L \sim \sigma$ 曲線を示す。まず、 σ の低下とともに、Sub. C 領域 (C_L が σ によらずほぼ一定の領域)、遷移領域を経て、 C_L が σ の関数となる SC 領域⁽¹⁶⁾へ移行している事実が確認できる。また、図中に Violent vibration と記したものは、音により定めた激振の範囲であり、×印は瞬間写真および高速映画より気泡大脱落を認めた点である。このように激振は遷移領域に特有な現象であり、気泡大脱落もほぼ同じ領域で発生していることがこの翼形においても確認される。

5. 結 論

翼形に発生する気泡大脱落とそれに伴う激振の機構の解明を目的として、二次元 Eppler 翼形の激振時における揚抗力変動および振動加速度を、一様キャビテーション核分布の条件のもとに、キャビテーションの挙動との関連において解明した。得たる結果を要約すると、以下のようになろう。

- (1) 流体力により周期的に誘起される気泡大脱落は、揚抗力の非定常変動を大幅に増大させ、その振動振幅は $\pm 24\%$ にも達するので、流体機械の設計においてはこの点を十分に考慮すべきであろう。
- (2) 気泡大脱落、揚抗力変動ならびに振動加速度の間には強い相関がある。大脱落終了直後、抗力は最

小、揚力および振動加速度は最大となり、クラウドが抗力増大に主として寄与している事実を認めた。また、抗力変動はキャビティの破断線の入り方(大脱落の仕方)にも強く影響を受けている。

- (3) 気泡大脱落に伴う揚抗力の変動位相差はほぼ 180° であるから、気泡大脱落に際して両者は全く正反対の影響を受けている。Eppler 翼形の場合には、その激振時の主要周波数は 21Hz であるが、そのほかにも二、三次の高周波成分も認められる。

終わりに臨み、実験に協力いただいた本研究所技官 樋口二郎および浅野和夫両氏に深謝する。

文 献

- (1) 沼知, 東北大学連研報告, 11-101(1955), 1.
- (2) Wade, R. B. and Acosta, A. J., Trans. ASME, J. Basic Eng., 88-1(1966), 273.
- (3) 泉田・ほか3名, 造船学会論文集, 146 (1979), 82.
- (4) 久保田・ほか3名, 造船学会論文集, 160 (1986), 233.
- (5) 加賀, 機論, 55-512, B(1989), 936.
- (6) Ito, Y., ほか2名, Proc. 2nd China-Japan Joint Conf. on Fluid Machinery, Xian, (1987-10), 328.
- (7) 伊藤・ほか4名, 機論, 54-503, B(1988), 1555.
- (8) Chiba, N. and Hoshino, T., 造船学会論文集, 139(1976), 97.
- (9) Shen, Y. T. and Peterson, F. B., Proc. 12th Symp. on NAVAL Hydrodyn., Washington D. C., (1978-6), 362.
- (10) Kato, H., Proc. Int. Symp. on Jets and Cavities, ASME, Florida, (1985-11), 13.
- (11) 久保田・ほか3名, 造船学会論文集, 160 (1986), 78.
- (12) Eppler, R. and Sommers, D. M., NASA, TM 80210, (1980).
- (13) 奈良坂・ほか2名, 機論, 53-491, B(1987), 1887.
- (14) 緒方・ほか5名, 機論, 55-511, B(1989), 565.
- (15) Richard, A. F., Proc. Conf. on Cavitation, IMechE, Heriot-Watt Univ., (1974-9), 119.
- (16) Oba, R., ほか3名, Trans. ASME, J. Fluid Eng., 102-4(1980), 433.

討 論

〔質問〕 加藤 洋 治〔東京大学工学部〕

(1) キャビテーションの発生やタイプについて境界層の特性が強い影響を持つことが知られている。貴実験の場合、翼面上の流場はどのような境界層になっているかお教え願いたい。

(2) 図8(a)は図4の写真のどれとも異なって見えるが、これは撮影方法のちがいによるものか、あるいは現象自身にばらつきが大きいのか。

〔回答〕 (1) Eppler 翼形は抵抗力の実用的翼形として知られているので、本実験ではまず、このような実用的翼形に発生する激振等の種々の挙動に注目した次第である。このような流れ場における境界層を決定する種々の特性量は計測していない。ご参考までにポテンシャル計算によった圧力分布を付図1に示した。

(2) 図8(a)の瞬間写真および図4⑨の高速映画はいずれも気泡大脱落終了状態におけるキャビティの様相をとらえたものだが、前者においては半球状トラベリングキャビテーションのみが発生しているのに対して、後者はスポット状フィクストキャビテーションと半球状トラベリングキャビテーションが同時に発生

付図1 ポテンシャル計算による圧力分布
(X は翼前縁からの距離)

している。すなわち、各周期ごとにはもちろん、瞬時瞬時ごとに現象が変化している。

たとえば、10 周期分の瞬間写真をみると、前者のケースが3回、後者が7回観察された。