キャビテーションが十分発生しても核の経時変化が
僅少な高速力学研究所の回流式翼形試験水槽*奈良坂 力^{*1}、 大場 利三郎^{*1}、 平田 泰茂^{*2}Immutability in Cavitation Nuclei Measured in Our Single-foil Cavitation-tunnel
of the Institute of High Speed Mechanics

Tsutomu NARASAKA, Risaburo OBA, Yasushige HIRATA

For the first step in this series to clarify the cavitation-nuclei-performance of our cavitation tunnels for a single-foil or cascade-foils, we take up a single-foil tunnel of closed type, with which a number of cavitation-performance-tests had been done by the late Prof. F. Numachi. The change of nuclei distribution with time and the corresponding cavitation aspects are carefully observed for two cases with a Clark Y-foil of 4 percent thickness in the test section and without it, for various cavitation numbers σ and incidences α , showing the interesting fact that cavitation nuclei are scarcely changed, even when heavy cavitation occurs around the foil.

Key Words: Cavitation, Cavitation Nuclei, Hydrofoil, Cavitation Tunnel, Cavitation Inception

1. 結 言

「同一の試片、流速およびキャビテーション係数のもとでも、キャビテーションの様相は試験水槽によって大いに異なる」とするジョンソン効果^(1,2)が見い出され、数多くの既存研究の見直しが迫られている。

そもそも、キャビテーションは、流体力学的に惹き起された液体の破壊であるから、その挙動(特に初生近傍のそれ)は、破壊の端緒となるキャビテーション核(以下単に核という)の特性に支配される。⁽³⁾とすれば、今後のキャビテーション研究あるいは既存研究の見直しに際しては、試験水槽内の核の詳細な知見は不可欠であり、また、キャビテーション気泡(以下気泡という)は、独自の様相、生因、障害性、成長

(または消滅)キャビテーション係数あるいは発生領域を持つ各種気泡により多角的に構成されている⁽⁴⁾

(ジョンソン効果の側面)から、その実験がいかなる種類の気泡に対するものかの明示も不可欠であろう

周知のように、高速力学研究所では、「翼形のキャビテーション性能」等に関する数多くの研究⁽⁵⁻¹⁷⁾を発表し、それらの莫大な資料は、ポンプ、船用推進器水車などの設計等に使用されてきたが、残念ながら、使用した試験水槽(回流式と放流式のニループを持つ)の測定部を通る水流中の核の分布、翼形まわりのキャビテーションの様相、あるいは、キャビテーションによる核の変化等の詳細は殆んど明らかでない。

よって本報では、この種の解明の第一歩として、上記の翼形試験に主として採用された回流試験水槽⁽⁵⁾を取り上げ、測定部に翼形(Clark Y 4%)が、“あり”(そこに気泡が発生する)、“なし”の二つの場合について、核分布の経時変化およびキャビテーションの様相を種々のキャビテーション係数 σ 、迎え角 α について調べてみたところ、「本水槽は、キャビテーションである翼形に十分キャビテーションが発生しても核の経時変化が僅少に止まる優れた水槽である」こと

* 昭和62年3月14日 東北支部第22期総会講演会において講演、原稿受付 昭和61年9月24日。

^{*1} 正員、東北大学高速力学研究所(〒980 仙台市片平2-1-1)。

^{*2} 正員、秋田大学鉱山学部機械工学科(〒010 秋田市手形学園町1-1)。

が判明したので報告する。

2. 実験装置

2.1 供試翼形水槽 図1にその概要を示す。これは幾多の翼形キャビテーション試験に使用され(5-17)、特性等については詳報(5,16)されているので、ここでは要点のみを記す。水槽内の水は、ポンプにより回流され、大形タンク T_1 内を超音速で上昇し、隔壁 S を通り、大径の気泡が一応除去された後、側面突出部 T_2 内のハニカムおよびノズル D により十分整流され、一様流速分布の水流となって試片翼形 F が置かれた測定断面(幅 70 mm、高さ 190 mm、長さ 700 mm)に流入し、更に、ポンプ入口に回流される。

本実験の試料水には、各小実験とも当初の核分布の十分な一様性を期待して、2300m³ 容量の地下水槽に長時間貯留され、ほぼ空気で飽和された自然水(空気含有度 $\alpha/\alpha_s = 1.06$ 、1ヶ月の水温の変化は $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内、その核分布は別報(18)参照)を使用した。この種の回流水槽では、翼形まわりに発生した微細気泡(特に気泡雲)等の測定部への再流入と、キャビテーション試験にとって重大な結果をもたらす危険性も皆無とは言えず、さらに、測定断面およびポンプ部において絶えず水中の核は刺激され、成長、消滅をくり返しているから、核の常時監視はほとんど不可欠

図1 試験水槽

と言えよう。

2.2 供試翼形 抵抗力、高揚力翼形の研究の第1段階の意味もあり、厚み比 4% の Clark Y 翼形(図中CYとかく)を採用した(翼形状⁽¹⁹⁾参照)。その弦長、スパンともに 70 mm で、表面は流体力学的滑らかに仕上げられている。また、ノズル出口より 210 mm (翼形中心)の十分一様流速の位置に取り付けられている。

3. 実験方法

キャビテーション係数 σ は、翼形の中心より 210 mm 前方の一様流速分布の点 E における静圧 P_∞ および平均流速 V_∞ により、次のように定義した。

$$\sigma = (P_\infty - P_v) / (1/2 \rho V_\infty^2)$$

ここに、 P_v 、 ρ はそれぞれ水温 t_w における水の飽和蒸気圧、密度である。

核分布を測る試料水は、図1 G点の壁面にある直径 0.5 mm の孔を介して清浄なビニール管を通して試料水瓶に採取され、核測定用コールタチューブ(孔径 0.2 mm、定電流 10 μA 、オリフィス孔部の平均流速 1.3 m/s、測定時間 2分)⁽¹⁸⁾に移され測定される。後に示される核分布は、5回の測定の平均値である。

周知のように、キャビテーションは非定常の強い確率現象であることを考慮し、核分布を測る試料水のサンプリング、気泡の様相の瞬間写真の撮影は全く無作為に行なっている。

また、瞬間写真の撮影には 3 μs のキセノン閃光ランプを、また、試料水の空気含有量 α/α_s は沼知の方法⁽⁵⁾より求めた。

4. 実験結果

4.1 核分布の経時変化

4.1.1 翼形がない場合 主要なキャビテータである翼形がなくても、ポンプその他のキャビテータも考えられるし、また、水槽壁面の境界層による気泡増殖効果⁽²⁰⁾なども知られているので、“翼形なし”代表的流速 $V_\infty = 8 \text{ m/s}$ 、 $\sigma = 3.0$ の場合を例に取り、核分布の経時変化を調べた結果を図2に示した。この縦軸は核の数密度関数 N_n 、横軸の d_n は核の直径である。また、経過時間 $t(\text{h})$ は、地下水

槽より試験水槽への導水を終えてから20分経過し、タンク T_1 の上部の水面の波動が沈静し、この種の実験が一応可能とみられるようになった時刻を起点的 $t=0$ に選んである。

明らかに、通常取られるような約30分の定常待ち時間（以下、定常待ち時間という）の後には、この試験水槽の核分布は経過時間 t に無関係に一定になることが見て取れる。したがって、幸いにして、ポンプ等のキャビテータあるいは壁面境界層による核増殖効果は本水槽においては無視し得る程度にとどまっていると言える。

4. 1. 2 Clark Y翼形がある場合 測定部まわりの気泡の様相の詳細観測が可能なキャビテータとして、迎え角 $\alpha = 3^\circ$ 、厚み比 4% の Clark Y 翼形を選んだ場合の核分布を、キャビテーションの平均的な大きさ⁽⁵⁾ λ/C (λ は翼形前縁から翼弦方向に測った消滅箇所、 C は弦長) が 3% (初生近傍)、40

% (中程度発生)、140% (激しい発生) という代表的状態に対応する $\sigma = 1.9$ 、0.9 および 0.3 について求め図3～5にはその結果を示す。

まず、図3の初生近傍では、上記の「翼形なし」の場合のそれと同様に、「定常待ち時間の後には、核分布が t に無関係に一定となる」ことが注目される。なぜなら、この事実は「この試験水槽によれば、核分布が一定の理想的な初生キャビテーションあるいは微小キャビテーション limited Cavitation の実験が可能である」ことを明示しているからである。

しかし、図4、5から明らかなように、キャビテーションが中程度以上に発生し、 t が4～6時間以上になると、核分布は定常待ち時間後にももはや一定とはならず、キャビテータの効果はとうてい無視し得ない程度になる。したがって、どうしても長時間の試験が必要な場合には、当然のことながら、核分布の変化の注意深い監視を行なうか、あるいは、試験水槽の物

核分布の経時変化(翼形なし)

図3 核分布の経時変化(翼形あり)

図4 核分布の経時変化(翼形あり)

図5 核分布の経時変化(翼形あり)

図6 核分布の経時変化 (t=1.0)

図7 核分布の経時変化 (t=6.0)

性向上のための改造が必要となろう。

しかしながら、通常行なわれるような $t < 4$ 程度の実験においては、依然として核分布はほぼ一定に保たれているから、本試験水槽は、タンク T_1 とその付近の水路による回流気泡の除去がきわめて効果的に行なわれており、しかもポンプなどよりの気泡も僅少で、「この種の試験には非常に適したものである」と言える。

図6には、この事実を強調するために、 $t = 1$ h を例に取り、“翼形なし”、 $\alpha = 3^\circ$ の“翼形あり”の $\sigma = 1.9$ 、 0.9 、 0.3 の場合の核分布を同一図面上に対比してみた。また、図7には、長時間経過後のキャビテータの効果をより明瞭に示す意味で、 $t = 6$ h の“翼形あり”、“翼形なし”の場合を対比してみた。

4. 2 キャビテータの翼形キャビテーション

念のため、どのような気泡が翼形まわりで発生し、回流し始めるかを示すために、やはり迎え角 $\alpha = 3^\circ$ の場合の翼形キャビテーションの様相を、閃光時間が $3\mu s$ のクセノンランプによる瞬間写真でとらえた。

図8には、 $\sigma = 1.9$ の初生付近の様相（翼形上面に発生）を、種々の経過時間について示す。図中、流れは左（前縁側）から右に流れており、中央の大きい丸模様、翼後縁側の丸模様は、照明および測定部窓の外面上の水玉の像で、現象には全く無関係のものである。

明らかに、前縁に沿うバンドキャビテーション^(21, 22)（かなり安定なひも状または球状気泡とそのまわりの微小気泡群より成る）と、これから流出する微小気泡を核として発生するとみられるスポットキャビテーション⁽²³⁾（中央部に流れ方向の糸状に見える）が認められる。

図9～10(a)、(b)、(c)には、中程度発生の $\sigma = 0.9$ と十分発達した $\sigma = 0.3$ の場合について、やや流れが不安定な定常待ち時間内の $t = 0$ 、 0.25 、定常状態の $t = 1$ 、 2 そして、キャビテータの効果が現れる $t = 5$ 、 6 の状態のキャビテーションの様相を示す。種々の気泡が発生しているが、明らかに、これらの主体をなすものは、前縁付近より群列をなして流下するスポットキャビテーションである。その全体的な様相^{*}あるいは平均的発生領域は、時刻および経過時間 t にはほとんど依らないことから、これは、核分布の変化および流れの不安定性には鈍感な全く安定なキャビテーションであると言えよう。

このスポットキャビテーションの後方には三次元的

に曲りくねったひも状の渦キャビテーションとそのまわりの微細気泡群または気泡雲が現われ、これらがポンプ側に回流されていく。

次に、図10(a)において多数のトラベリング気泡に類似した大径球状気泡が認められることは注目値する。これらの気泡は、明らかに核分布の変化にはほとんど鈍感であり、その上、初生の σ がスポットキャビテーションのそれよりかなり小さいので、通常のトラベリング気泡⁽⁴⁾とは明らかに異種のものである。

スポット気泡をよく観察してみると、 $\sigma = 0.9$ の場合においても、まわりの微細気泡は流下するに従って成長し、ときには ■ のオーダの臨界半径に達している。十分に発達した $\sigma = 0.3$ の場合には、スポット気泡そのものの大きさ（スパン方向の幅）も、これを構成する多数の小気泡の大きさもかなり大きくなっているから、やや不安定な定常待ち状態では臨界半径に達し、急速に大径球状気泡に成長するものの数が急増して、それらの周囲のスポット気泡を吸収してしまった結果が、トラベリング気泡のように見えたのであると筆者は考えている。定常状態、ときにはキャビテータの効果が現われる状態においても、このような大径球状気泡を認めることもあるが、その発生頻度が非常に低い。

なお、本試験水槽内での翼形まわりのキャビテーションの全様については、キャビテーション特性との関

図8 初生のキャビテーションの様相
(CY 4%, $\alpha = 3^\circ$, $\sigma = 1.9$)

図10 キャビテーションの様相の経時変化 ($\alpha = 3^\circ$, $\sigma = 0.3$)

連において、別報で詳報することしよう。

5. 結 論

核を所定の状態に保ち、Johnsson効果^(1,2)が現われないような高精度の翼形キャビテーション試験法の確立を目途として、回流式翼形試験水槽の測定部と流入する核の分布とその経時変化を、Clark Y 4%翼形の迎え角 $\alpha = 3^\circ$ を例に取り、種々のキャビテーションの発生状態との関連において、定量的に解明した。得たる結果を要約すると次のようになる。

(1) この試験水槽では、回流気泡の除去がきわめて効果的に行われており、あまりキャビテーションが発生しなければ、核分布は十分長時間に亘り一定に保たれ、十分キャビテーションが発生しても、数時間は一定に保たれる。したがって、本水槽は、この種の試験、特に微小キャビテーションの試験には非常に適していると言えよう。

(2) 本試験水槽内におかれた Clark Y 4%翼形(迎え角 $\alpha = 3^\circ$)まわりのキャビテーションの主なものは、核の変化または流れの変動などに鈍感で、かつ、定常性がかなり高いスポットキャビテーションである。キャビテーション係数が十分小となるか、流れの変動が大となり、そのスポット気泡を構成する多数の小気泡が臨界半径を超えて急生成したものと解される大径の球状気泡も発生し、さらにスポットキャビテーションの後方に流出する渦まわりに発達する渦キャビテーションそれに随伴する微小気泡群あるいは気泡雲、さらに、初生近傍には、翼形の前縁に沿うバンドキャビテーションも発生する。これらのキャビテーションはいずれも核には鈍感なものであった。

(3) 長時間にわたり、核に敏感な発達したキャビテーションの試験を行う際には、本試験水槽においても、核分布の十分な監視が必要であろう。

終りに臨み、本実験に協力した高速力学研究所技官樋口二郎、浅野和夫両君に深謝する。

文 献

- (1) Johnsson, C.A., Proc. 12th Int. Towing Tank Conf., Rome (1969), 381.
- (2) 大場・伊藤, 機論, 45-398, 8(昭54), 1428.
大場・ほか2名, 同上, 1443.
- (3) Holl, J.W., Trans. ASME, J. Basic Eng., 92-4(1970), 681.
大場, ターボ機械, 10-4(昭56), 221.
- (4) Knapp, R.T., Cavitation, (1970), McGraw-Hill.
- Oba, R. ほか2名, Trans. ASME, J. Fluid Eng., 100-4(1978), 493.
- (5) Numachi, F., Forsch. Ing.-Wes., 11(1940), 303.
- (6) 沼知, 機論, 7-29(昭16), III-12.
- (7) Numachi, F., Werft-Reederei-Hafen, 22(1941), 295.
- (8) 沼知, ほか2名, 機論, 17-60(昭26), 1.
- (9) 沼知, ほか2名, 機論, 15-51(昭25), 52.
- (10) 沼知, ほか2名, 機論, 15-51(昭25), 58.
- (11) 沼知, ほか2名, 東北大学速研報告, 6-56(昭27), 75. 6-57(昭27), 97.
6-58(昭27), 117. 6-59(昭27), 135.
7-67(昭27), 77. 7-68(昭27), 95.
7-69(昭27), 113. 8-79(昭27), 107.
8-80(昭27), 135. 9-81(昭28), 1.
- (12) 沼知・千田, 東北大学速研報告, 8-71(昭27), 1. 13-121(昭31), 1.
14-135(昭33/34), 115.
- (13) 沼知, ほか2名, 東北大学速研報告, 10-98(昭28), 133.
- (14) Numachi, F., Forsch. Ing.-Wes., 22(1956), 77. 24(1958), 73. RIHSM, Tohoku Univ., 12-113(1960/61), 63.
- (15) Numachi, F., Forsch. Ing.-Wes., 24(1958), 121.
- (16) Numachi, F., Trans. ASME, J. Basic Eng., 81-2(1959), 153.
- (17) Numachi, F. Oba, R., ほか1名, Trans. ASME, J. Basic Eng., 87(1965), 495., ASME Sympo. Cavi. Fluid Mach., Chicago. 7-12(1965), 16.
Trans. ASME, J. Basic Eng., (1967), 201.
- (18) 大場, ほか4名, 機論, 46-408, 8(昭55), 1485.
- (19) 沼知, ほか2名, 東北大学速研報告, 1-2(昭24), 17.
- (20) Ripken, J. F., and Killen, J.H., Proc. 1962 IAHR Sympo. Cavi Hydr. Mech. Sendai, 37.
- (21) 伊藤・大場, 機論, 49-442, 8(昭58), 1099.
- (22) Holl, J.W. and Carroll, J.A., Trans. ASME, J. Fluid Eng., 20-1(1976), 40.
- (23) Acosta, A.J. and Parkin B.R., J. Ship Res., 19-4(1975), 193.

討 論

〔質問〕 大 島 亮一郎〔㈱日立製作所日立工場〕
核分布を測定する場合、サンプリング位置によって
どう変わるのか。実際測定された実例をご教示いた
だきたい。

〔回答〕 測定部（翼形が置かれている）に流入す

る核をここでは問題にしている。著者らの経験「流下
式タンネルの測定部の上流側の5 mにわたり核がほ
ぼ一定に保たれていた」からみて、核制御用のレーザ
ーなどにあまり近づかない限り核は変わらないとみて
よいと思う。