振動キャビテーション壊食試験中における試料水中の
キャビテーション核分布の挙動*S. M. AHMED^{*1}, 伊藤 幸雄^{*2}
樋口 二郎^{*2}, 大場 利三郎^{*2}A Peculiar Behavior of Cavitation-Nuclei Size-Distributions in Sample
Water under Vibratory Erosion TestsS. M. AHMED, Yukio ITO,
Jiro HIGUCHI, and Risaburo OBA

In order to establish the necessary condition for such cavitation-erosion-tests in a vibratory-erosion test-apparatus, the cavitation-nuclei size-distribution and the relative air content rate of test water were carefully measured with respect to test time, by means of a Coulter-counter and a van Slyke apparatus respectively. It is worth noticing in the vibratory cavitation apparatus that the exponent and the volume concentration characterizing the nuclei-distributions do not fluctuate with test time in the equilibrium period, which reaches after 60 min. And that the air-content-rate first decreases monotonously with the time, then it reaches a definite equilibrium value after 40 min, which is much longer than the ASTM recommended value.

Key Words: Cavitation, Cavitation Nuclei, Relative Air Content, Cavitation Bubble, Vibratory Erosion Test, Coulter Counter

1. 緒 言

流体機械・機器および各種エネルギー変換プラント内における流体の高速化に伴い、キャビテーション壊食（以下壊食という）に十分耐えられる高耐壊食性材料の開発が緊急な課題となってきた。そして、その開発には、短い試験時間内において系統的な壊食データが得られる加速壊食試験法の確立が強く要望されている。

周知のように、キャビテーションは壊食性の有無、発生源あるいは様相などが異なる種々のタイプの気泡より多元的に構成されている⁽¹⁾⁽²⁾。そして、加速壊食試験法は、このようなキャビテーション発生下における機械材料の寿命や壊食進行速度などの把握が目的のため、キャビテーションの発生に支配的役割を果たす試料水中のキャビテーション核⁽³⁾⁽⁴⁾（以下核という）分布の試験期間内での一様性の保証は、この種の試験の必須条件である。現在、加速壊食試験法としては振動壊食試験法が広く用いられ^{(5)~(11)}、米国においては試験

規格⁽¹²⁾⁽¹³⁾も提案されている。しかしながら、試験中における核分布、キャビテーションのタイプ、さらにはそのタイプが試験時間中に変化しないかというタイプの持続性に関する報告はないようである。すなわち、試料水中の核分布の一様性、したがって、このような加速壊食試験結果の妥当性に対してはまだ不明な点が多い。

よって本報では、まず、世界中で広く利用されている ASTM 規格⁽¹³⁾によった加速振動試験装置ならびに試験法を取り上げ、コールタカウンタ法と van Slyke 法により測定した試料水中の核分布と空気含有度の各試験時間内における経時変化を明らかにし、併せて、ASTM 試験法の妥当性について吟味する。

2. 実験装置および方法

図 1 には、ASTM 規格によった電わい式振動壊食試験装置の概要を示す。加振周波数 f は 19.5 kHz、最大出力は 1.2 kW、試験片面における振動振幅 a^{**1} は両振幅値で 50 μm 一定である。

キャビテーションという確率事象を対象としているため、加振させる前の試料水は同一状態のものとし、

* 昭和 63 年 8 月 26 日 東北支部米沢地方講演会において講演、原稿受付 昭和 63 年 10 月 5 日。

*¹ 正員、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）。

**¹ 光学顕微鏡により、直接、水中で加振状態における振幅を測定することにより検定している⁽¹⁴⁾。

かつ、その核分布と空気含有度 α/α_s は正確には握られている。本実験においては、水道水を合成樹脂製の大容器内へ導水し、24 h 静置して核が十分安定した後、種々の試験時間 t に対する小実験ごとに ASTM 規定容量 1 L のガラスビーカーに採水して実験に供した。また、試験時間中のビーカー内の水温 T_w は恒温装置により、 $22 \pm 1^\circ\text{C}$ に保たれている。

ホーン先端に取付けた試験片は、規格⁽¹³⁾に従って直径 $d=15.9\text{ mm}$ 、高さ 11 mm の平たん試験面のもので、試験面はエメリー紙 3000 番により仕上げてある（最大表面あらさは $0.025\text{ }\mu\text{m}$ ）。全試片は、304 ステンレス鋼の一樣組成を持つ単一部材から切断、加工した。

核分布の測定は、特製のコールタカウンタ⁽¹⁵⁾（オリフィス直径 0.209 mm 、孔部の平均流速 1.3 m/s 、定電流 $10\text{ }\mu\text{A}$ ）により、核分布曲線（核の数密度分布関数 N_n と核の直径 d_n の関係）は 5 回の測定（1 回の測定時間 2 min）の平均値を示す。また、 α/α_s は van Slyke 法⁽¹⁶⁾により測定した。そして、キャビテーションの様相はせん光時間 $1\text{ }\mu\text{s}$ のクセノンランプによる瞬間写真でとらえた。

3. 実験結果

3.1 空気含有度 α/α_s の変化 まず、加振時間 t min 後の α/α_s の変化を図 2 に示す。図 2 中、ASTM 規格に準じていないが、Kerr の結果⁽⁵⁾も示す。明らかに、加振時間 t の増加とともに、脱気効果⁽¹⁷⁾による α/α_s の減少がみられ、 $t_E=40\text{ min}$ 後ほぼ平衡状態の一定値 0.74 に達する。すなわち、この平衡状態に達したときの時間 t_E を基準にして、 $t < t_E$ の非平衡領域、 $t > t_E$ の平衡領域の存在が再確認された。また、

ASTM 規格では α/α_s の安定化を期待する時間として 15 min を提案⁽¹³⁾しているが、これは明らかに短かすぎる。いずれにしても、非平衡領域での壊食試験は必ずしも適した状態ではないと言える。

3.2 加振前後の核分布 図 3, 4 には、加振前（実線）、後（点線）の核分布と $N=ad_n^m$, $v_n=\frac{\pi}{6}\int_{d_n\min}^{d_n\max} Nd_n^3 d(d_n)$ で表され核分布のタイプを定める有力な指数の m と v_n を t について示す。ここで、 N , v_n , $d_n\max=50\text{ }\mu\text{m}$, $d_n\min=20\text{ }\mu\text{m}$ はそれぞれ核の数、全核の占める体積濃度⁽¹⁸⁾, d_n の有効測定範囲の上・下限値を表す。図 3 より、全領域において、核分布はあまり変化していないが、図 4 の無次元数 $\bar{m}=m/m_{t=0}$, v_n を介してみると、空気含有度が急速に変化する非平衡領域ではやはり核分布は不安定であり、 t_E よりやや大きい 60 min ごろからは安定な分布状態になる。

以上のように、空気含有度の非平衡領域とその近傍では核分布も不安定な挙動を示すので、壊食試験時には注意が必要であろう。

3.3 キャビテーションの様相 上記の諸結果がいかなるタイプのキャビテーションに対するものかを調べるため、図 5 には、非平衡 ($t=4\text{ min}$)、平衡 (120 min) およびそれらの中間 (40 min) 領域における代表的な様相を示す。様相は試片面の斜め下方より、せん光時間 $1\text{ }\mu\text{s}$ のクセノンランプによって時間的にランダムに撮影している。図 5 中、試片面の下方にみえる白い線および斑点は水面とビーカー壁面との境界面および壁面に付着した水滴による光の反射であり、現象とは全く無関係である。これより、いずれの領域においても種々の形状をした気泡および気泡雲の存在がみて取れる。また、平衡領域になると、全キャビテーション発生領域をおおうような微細気泡群の発生がやや弱まる傾向はみられるが、この程度の α/α_s あるいは核分布の変化ではキャビテーションのパターンを大幅に変えるには至っていないようである。

図 1 振動壊食試験装置の概要

図 2 試験時間中の α/α_s の経時変化

図3 キャビテーション核分布の加振前後の変化

図4 指数 m と体積濃度 v_n の経時変化

4. 結 論

壊食試験法として広く利用されている ASTM 規格の試験装置とその方法を取り上げ、加振前後における核分布と空気含有度の経時変化を測定し、本規格試験装置と方法の妥当性について検討した。得たる結果を要約すると次のようになる。

(1) 空気含有度は試験時間 t の増加とともに急速に低下し、 $t=40$ min になると、ほぼ一定値 0.74 の平

(a) 非平衡領域 (b) 中間領域 (c) 平衡領域

図5 キャビテーションの発生の様相

衡状態へ到達する。すなわち、空気含有度が安定する時間として提案している ASTM 規格で定めている値 15 min は、かなり短かすぎる。

(2) 核分布曲線を特徴づけている指数と全部の核の占める体積濃度より、核分布は $t=60$ min を境にして、これらの諸量が時間とともに変動する非平衡領域とほぼ安定する平衡領域に分けられる。すなわち、壊食試験時には、非平衡領域とその近傍領域において核分布がかなり変化するので、得られたデータの評価には十分な注意が必要である。

(3) 核分布と空気含有度がかなり変化する非平衡領域と安定する平衡領域におけるキャビテーションの様相をみると、振動面付近の気泡の様相には大きな変化はないようだが、振動面から垂直に放出される気泡雲を構成している気泡の数は減少する傾向にある。

終わりに臨み、試片の製作と図面の整理に協力した黒木完樹、浅野和夫両技官に感謝する。

文 献

- (1) 大場・伊藤, 機論, 45-398, B (1979), 1428.
- (2) Johansson, C. A., *Proc. 12th ITTC*, Rome, (1967-9), 381.
- (3) Morgan, W. B., *Proc. 13th ITTC*, Berlin, (1972-9), 657.
- (4) Holl, J. W., *Trans. ASME, J. Basic Eng.*, 92-4 (1970), 681.
- (5) Kerr, S. L., *Trans. ASME*, 59-4 (1937), 373.

- (6) Plesset, M. S., *Trans. ASME, J. Basic Eng.*, **94**-4 (1972), 559.
 - (7) Hammitt, F. G. and Rogers, D. O., *J. Mech. Eng. Sci.*, **12**-6 (1970), 432.
 - (8) Thiruvengadam, A. and Preiser, D. O., *J. Ship Res.*, **8**-3 (1964), 39.
 - (9) Olson, H. G., *J. Acoust. Soc. Am.*, **46** (1969), 1272.
 - (10) Endo, K., ほか 2 名, *Bull. JSME*, **11**-45 (1968), 536.
 - (11) Vyas, B. and Preece, C. M., *J. Appl. Phys.*, **47** (1976), 5133.
 - (12) Robinson, L. E., ほか 2 名, *Trans. ASME*, **80**-1 (1958), 103.
 - (13) ASTM Designation G32-85, Standard Method of Vibratory Cavitation Erosion Test, *1985 Annual Book of ASTM Standards*, (1985), 03. 02, 187.
 - (14) 菊地・ほか 2 名, 機械学会東北支部米沢地方講演会講演概要集, No. 881-2 (1988-8), 51.
 - (15) 大場・ほか 4 名, 機論, **46**-408, B (1980), 1485.
 - (16) Numachi, F., *Forsch. Ingenieurwes.*, **11** (1940), 303.
 - (17) Kapustina, O. A., *Sov. Phys. Acoust.*, **15**-1 (1969), 54.
 - (18) 伊藤・ほか 4 名, 機論, **54**-503, B (1988), 1222.
-