セラミック材料のキャビテーション・エロージョン特性*

野一色公二**, 矢吹彰広**, 松村昌信**
高山博和***, 宮坂松甫†

** 広島大学工学部

*** 株式会社荏原製作所

† 株式会社荏原総合研究所

Cavitation Erosion Properties of Ceramics*

Koji Noishiki**, Akihiro Yabuki**, Masanobu Matsumura**
Hirokazu Takayama*** and Matsuho Miyasaka†

** Faculty of Engineering, Hiroshima University

*** Ebara Corporation

† Ebara Research Co., Ltd.

The ceramics, which can withstand corrosion, being heat and abrasion resistant, are drawing the attention of engineers, as they may be successfully applied to the parts of hydraulic machines where cavitation cannot be avoided. However, basic information on the behavior of these materials under cavitation attack is still lacking. In order to select the most suitable testing apparatus for obtaining this information, cavitation erosion tests on ceramics were conducted using three different apparatus, namely a water tunnel, a vibratory unit and a vibratory unit with a stationary specimen. In the water tunnel, the intensity of the cavitation attack was so low and it took such a long time to obtain a test result, that it was judged unsuitable for an accelerated testing. In the vibratory unit, the test results were affected by the vibration amplitude not evenly from a material to another. The vibratory unit with a stationary specimen was selected as the most suitable testing apparatus for ceramics as it is free from these disadvantages. Regarding the preparation of the specimens, it was found that the weaker the material, the thicker specimen should be used. Using the established testing method, cavitation erosion tests were conducted on six different ceramics and it was revealed that the resistance of ceramics is closely related to their fracture toughness rather than their hardness.

Key words : cavitation erosion, ceramics, damage depth, fracture toughness

1. 緒 言

液流体を取り扱う装置・機械の小型化、高出力化に伴い、流体機械内の流速は上昇し、キャビテーション・エロージョンは避けられない問題となっている。これまではキャビテーションの発生を抑制する工夫がなされてきたが、要求される性能を達成するには、それも限界と

なった。現在では、ある程度キャビテーションの発生を容認し、耐エロージョン性に優れた材料を使用する傾向にある。その中で、耐摩耗性、耐熱性、耐食性に優れたセラミック材料が注目されている。このため1993年にASTM G 32を参考にして高温・高圧環境下で使用されるセラミック材料を対象にした直接型と対向型の2種の振動法キャビテーション・エロージョン試験法が規格化された。また、評価は、一定時間キャビテーションにさらした後の質量損傷量を体積損傷量に換算して行うように定められている。しかし、これらの規格化された試験方法では材料間での耐エロージョン性の相対的評価（順位付けなど）はできるが、定量的な評価は行えない¹⁾。さらに、振動法ではキャビテーションの発生機構が実機

* 材料と環境研究発表会、中国・四国支部主催（広島、1997年）で発表

** 〒739 広島市鏡山 1-4-1 (4-1, Kagamiyama 1-chome, Higashihiroshima-shi, 739 Japan)

*** 〒144 東京都大田区羽田旭町 11-1 (11-1, Hane-daasahicho, Ohta-ku, Tokyo, 144 Japan)

† 〒251 藤沢市本藤沢 4-2-1 (2-1, Honfujisawa 4-chome, Fujisawa-shi, 251 Japan)

Fig.1 Testing apparatus.

Table 1 Properties of test material.

Material	Apparent density (kg/m ³)	Vickers hardness Hv (-)	Flexural strength (MPa)	Compressive strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Fracture toughness (MPa m ^{1/2})
Al ₂ O ₃	3550	1240	350	2400	-	3.0
SiC-1	3000	2600	500	5000	-	5.6
SiC-2	3200	2370	550	-	-	3.4
Si ₃ N ₄ -1	3200	1470	600	3900	-	5.7
Si ₃ N ₄ -2	3250	1250	900	-	-	6.7
ZrO ₂	6000	1340	1000	5800	-	6.7
SUS316L	8030	350	-	-	570	-

の発生機構とは異なるため、実機における損傷との関係も不明である。

本研究では、まず、これまで金属材料に用いられてきた3種のキャビテーション・エロージョン試験装置を用いて数種のセラミック材料のキャビテーション・エロージョン試験を行い、この種の材料に適した試験装置および損傷の評価法を選定した。次に、この試験法を用いて6種のセラミック材料について試験を行い、それらの耐久性と機械的性質との関係を調べるなど、セラミック材料のキャビテーション・エロージョン特性を論じた。

2. 試験装置および試験材料

まず、セラミック材料に適したキャビテーション・エロージョン試験装置を選定するために、3種の試験装置を用いて予備試験を行った。

2.1 試験装置

試験には、実機に近いキャビテーション発生機構を有するウォータートンネル (WT) 法試験装置と、2種の振動法試験装置を用いた。

WT 法^{2),3)}：試験部の40×30 mmの矩形ダクトの上下の壁に半円柱の堰を取り付けて試験液を25 m/sまで加速し、キャビテーションを発生させた (Fig. 1 (a))。この試験装置におけるキャビテーション発生機構は、現場のポンプやバルブに生じるキャビテーションの発生機構に近い。

直接型振動法⁴⁾：ホーンの先端に直径16 mmの円盤状の試片を取り付けて、振動数20 kHz、振幅50または25 μmで振動させキャビテーションを発生させた (Fig. 1 (b))。

対向型振動法⁵⁾：直接型振動法の試片をステンレス鋼製のキャップと取り換え、それを振動数20 kHz、振幅25 μmで振動させて、キャビテーションを発生させた。その下側に隙間0.4 mmを隔てて静置した試片の表面に損傷を与えた。ただし、振動によってホーンが熱膨張し隙間が変化するのを防ぐため、試験液に冷却水の役目を持たせ、ホーンの中心部の孔の中を流量0.4 l/minで循環させた (Fig. 1 (c))。

試験液は、WT法では水道水を、振動法ではイオン交換水を用い、恒温槽で40°Cに保った。

2.2 試験材料

試験材料には、一般的なセラミック材料6種すなわち、アルミナ (Al₂O₃)、炭化ケイ素 (SiC-1, SiC-2)、窒化ケイ素 (Si₃N₄-1, Si₃N₄-2)、ジルコニア (ZrO₂)を用いた。さらに比較材料としてオーステナイト系ステンレス鋼 (SUS 316 L)を用いた。これらの機械的性質を Table 1 に示す。予備試験では、Al₂O₃、SiC-1、ZrO₂と SUS 316 Lを用いた。試片の形状は、セラミック材料、金属材料ともに各装置で共通であり、セラミック材料では直径16 mmで、厚さ0.5 mmあるいは3.0 mmのセラミックスの円盤を金属製台座部 (SUS 403)

Fig. 2 Details of specimens.

に接着し用いた (Fig. 2)。接着には、変性アクリレートを主成分とした嫌気性構造用接着剤 (日本ロックタイト株式会社, 構造用接着剤 319) を用いた。

2.3 評価方法

まず試片の質量減量を高密度で割って体積損傷量を得た。また、試片をキャビテーションにさらした後、表面粗さ計で起伏を計測し、それを試験前の形状と比較し、その差を損傷深さ d (μm) とした。

3. 試験装置および評価法の策定

3.1 試験装置の策定

WT 法: 試験結果を Fig. 3 に示す。0.5 mm のセラミックス円盤を接着した試片を用いたところ Al_2O_3 では試験開始直後から質量減量を生じ、試験時間約 70 時間において試験面のセラミックス円盤が割れて剝離し台座金属が露出した。SiC-1 においても試験開始直後から剝離が生じたため試験が行えなかった。この原因として、WT 法では試験装置の構造上、上流側の試片の端から 2~4 mm 程度の位置に損傷が局所的に生じるため、セラミックス円盤に曲げ応力が働き、割れが生じたものと考えられる。そこで、セラミックス円盤の厚さを 3.0 mm にして試験を行った。その結果、 Al_2O_3 、SiC-1 とともに、セラミックス円盤の剝離は生じなかった。金属材料の SUS 316 L の体積損傷量は、潜伏期間の後に曲線的に増加したが、岡田ら⁹⁾が示したようにセラミック材料では潜伏期間が存在しなかった。これは、セラミック材料では、ほとんど塑性変形を伴わない脆性的な損傷が生じるためと考えられる。

ここで、体積損傷量の変化率を損傷速度と考えると、

Fig. 3 Cumulative volume loss of specimen vs. testing duration relationships in a water tunnel test.

セラミック材料は金属材料 (SUS 316 L) に比べて優れた耐エロージョン性を示した。特に SiC-1 の体積損傷量が非常に少なく、測定できる減量を得るために 100 時間以上の試験時間を必要とした。さらに高い強度を有する ZrO_2 では、SiC-1 の場合よりも長い試験時間を必要とすることが予測される。このように、WT 法では最も実機に近い条件で損傷が生じるので、材料の耐エロージョン性の評価には適しているが、非常に長い試験時間を要するため加速試験法として適切でないと判断した。

直接型振動法: まず、試片の振幅を 50 μm にして試験を行った。金属材料では潜伏期間の後、体積損傷量が曲線的に増加したが、セラミック材料の Al_2O_3 や SiC-1 ではセラミックス円盤が剝離したため試験が行えなかった。試片に加わった振動の加速度によりこのような剝離が生じたものと考えられる。

そこで、ホーンの振幅を 25 μm に下げ、加速度の影響を半減させて試験を行ったところ、 Al_2O_3 と SiC-1 においても剝離なしに試験を行うことができた (Fig. 4)。体積損傷量の経時変化によるとセラミック材料は SUS 316 L よりも優れた耐エロージョン性を示した。さらに、振幅 50 μm の場合と比較して、SUS 316 L と ZrO_2 の体積損傷量の差が大きくなったことから加速度の影響が低減されたことが分かった。しかし、SiC-1 に顕著に見られるように体積損傷量の経時変化は曲線的であるため評価が難しく、材料によっては加速度の影響が顕著に現れる可能性があるため、直接型振動法はセラミック材料の試験装置として適していないと判断した。

対向型振動法: この試験装置では、試片に加速度が加わらないため、セラミックス円盤は剝離しなかった。体積損傷量は直線的な変化となったので、材料間で耐エロージョン性の序列も明確に現れた (Fig. 5)。その序列は実機に近い WT 法で得られた耐エロージョン性の

Fig. 4 Cumulative volume loss of specimen vs. testing duration relationships in a vibratory unit ; amplitude, $25\ \mu\text{m}$; ceramic disk thickness, 0.5 mm.

Fig. 5 Cumulative volume loss of specimen vs. testing duration relationships in a vibratory unit with a stationary specimen ; amplitude, $25\ \mu\text{m}$; ceramic disk thickness ; 0.5 mm.

序列と一致した。また、 Al_2O_3 の損傷量はWT法で生じた損傷量に比べ約35倍多く、従って試験時間は非常に短縮された。以上の結果から対向型振動法がセラミック材料のキャビテーション・エロージョン試験に最も適していると判断した。

3.2 損傷の指標

対向型振動法における損傷深さ d (μm) の経時変化を Fig. 6 に示す。体積損傷量の経時変化 (Fig. 5) では、ばらつきはなく直線関係を示したが損傷深さの経時変化では同じように直線関係が得られたものの、かなりのばらつきが見られた。これは測定法に付随した誤差ばかりでなく、損傷が、ある程度の大きさの塊の断続的な脱離によって進行しているためであると考えられる。

これらの損傷の指標の意義について検討すると、体積

Fig. 6 Damage depth of specimen vs. testing duration relationships in a vibratory unit with a stationary specimen ; amplitude, $25\ \mu\text{m}$; ceramic disk thickness ; 0.5 mm.

損傷量は試片全体の損傷の平均値にすぎない。実際の装置・機械においては、損傷は機械全体に均一に発生するのではなく、むしろ偏っている。装置・機械の寿命は本試験で用いた試片の面積よりも狭い、ある特定の位置における損傷の深さによって決定される。そこで、損傷の指標には損傷深さを採用することにした。損傷深さの意義については次報⁷⁾でも示す。

3.3 セラミックス円盤厚さの影響

セラミック材料は脆いので、ねじ部の加工ができない。そこで、ねじ部のある金属製 (SUS 403) 台座部にセラミックの円盤を接着した。WT 法試験では、セラミックス円盤の厚さによって試験結果に影響が現れた。そこで、セラミック材料の試験装置に選定された対向型振動法においてもセラミックス円盤厚さの試験結果に対する影響を調査した。セラミックス円盤の厚さ 0.5 mm, 3.0 mm の場合の損傷深さの経時変化を Fig. 7 に示す。損傷深さ対試験時間の直線の傾きを損傷速度とすると、セラミック厚さが薄い方が損傷速度が低い。そこで他の材料についても損傷速度とセラミックス円盤の厚さの関係を調べた。 Al_2O_3 については、セラミック厚さの影響を確認するために、さらに 1, 2, 5 mm の円盤についても試験を行い損傷速度を求めたところ (Fig. 8), セラミックス円盤厚さ約 2 mm 以上で損傷速度は一定となった。

この原因は次のように考えられる。試験条件 (振幅, 試験時間等) は同一であるためキャビティの崩壊による衝撃圧 (キャビテーション攻撃力) は一定である。よって、セラミック円盤厚さが薄いと、キャビテーション攻撃力の一部が他に吸収または消費され、損傷速度が低下したと思われる。すなわち、キャビテーションの攻撃エネルギーがセラミックス円盤を通過して、台座金属

Fig. 7 Effect of ceramic disk thickness on damage depth vs. testing duration relationships in a vibratory unit with a stationary specimen ; amplitude, 25 μm .

Fig. 8 Effect of ceramic disk thickness on damage rate in a vibratory unit with a stationary specimen ; amplitude, 25 μm .

に吸収され、硬化層の形成に費やされたと推測した。これを実証するため、異なるセラミックス円盤厚さを有する台座金属 (SUS 403) の表面から深さ方向への硬度分布を測定した。ただし、それぞれの試片で、キャビテーションにさらした試験時間は一定とした。すなわち、試片に加わるキャビテーションの攻撃エネルギーの総量は一定である。台座金属の初期硬さ Hv_{∞} と測定硬さ Hv との比 Hv/Hv_{∞} の表面からの分布を Fig. 9 に示す。セラミックス円盤厚さが 3 mm, 1 mm, 0.5 mm と薄くなるにつれ硬化の程度も高く、また、硬化層の深さも約 100 μm , 150 μm , 220 μm と深くなった。すなわち、セラミックス厚さが薄いほど、材料に吸収された攻撃エネルギーは多く、その結果、損傷速度が低下したことが確認された。よって Al_2O_3 ではセラミックス円盤の厚さを 3 mm 以上にする必要がある。さらに Al_2O_3 より弱

Fig. 9 Hardness distribution on the cross section of metallic pedestals in a vibratory unit with a stationary specimen ; amplitude, 25 μm .

Fig. 10 Damage depth vs. testing duration relationships for various ceramic materials in a vibratory unit with a stationary specimen ; amplitude, 25 μm ; ceramic disk thickness, 3.0 mm.

いセラミック材料の場合はさらに厚くする必要がある。

4. 耐エロージョン性評価試験の結果と考察

予備試験によって選定された対向型振動法を用いて各種セラミック材料 (厚さ 3.0 mm) のキャビテーション・エロージョン試験を行った。損傷深さの経時変化を Fig. 10 に示す。材料によらず損傷深さと試験時間に直線関係が得られ、セラミック材料は金属材料に比べ優れた耐エロージョン性を示した。直線の傾きから得た損傷速度と、材料の硬さの関係を Fig. 11 に示す。一般に金属材料では硬い材料ほど優れた耐エロージョン性を示す⁸⁾。しかし、セラミック材料間では損傷速度と硬さには相関がみられなかった。材料のビッカース硬さは、圧子を一定荷重で押し込んだとき生じる材料の塑性変形量

Fig. 11 Relationship between damage rate and hardness for various ceramic materials.

から求められる物性である。セラミック材料においても、圧子の押し込みにより圧痕が形成され、金属材料と同様に硬さとして計測できるが、それに伴って発生したき裂は計測しない。ところが、セラミック材料の損傷は、塑性変形をほとんど伴わず、き裂の発生と進展によって生じるので、材料の硬さと損傷速度との間には相関がなかったのも当然と思われる。

そこで、き裂進展距離より求められた破壊靱性値⁹⁾と損傷速度との間の相関を調べた (Fig. 12)。岡田ら¹⁰⁾は、浸食痕の直径の変化をエロージョン孔の成長速度 ($\mu\text{m}/\text{h}$) と定義し、それと破壊靱性値との間に良い相関が得られることを見い出している。本試験においては損傷深さから求めた損傷速度を採用したが、これも破壊靱性値と良い相関を示した。このように、セラミック材料の耐キャビテーション・エロージョン特性は、材料の硬さではなく、材料の脱離の主因となるき裂進展に関係する破壊靱性値に依存することが確認された。

5. 結 論

本研究では、各種セラミック材料について3種の試験装置を用いてキャビテーション・エロージョン試験を行い、次のような結果を得た。

- 1) セラミック材料のキャビテーション・エロージョン試験法として対向型振動法試験装置が最も適している。
- 2) セラミック材料の損傷の指標にも損傷深さを用いるべきである。
- 3) 耐キャビテーション・エロージョン性の低い材料ほど試片に厚いセラミックス円盤を用いる必要がある。

Fig. 12 Relationship between damage rate and fracture toughness for various ceramic materials.

4) 本研究に用いたセラミック材料は、金属材料の SUS 316 L に比べて優れた耐キャビテーション・エロージョン性を示した。その耐エロージョン性は、材料の硬さではなく破壊靱性値と良い相関を示した。

【付記】

本研究の遂行に協力された広島大学化学工学教室の小林康男助手に深く感謝の意を表します。

(Manuscript received April 16, 1997;
in final form June 13, 1997)

引 用 文 献

- 1) 河野克己：火力原子力発電, **44**, 242 (1993).
- 2) H. Louis : Dissertation, Technische Universität Hannover (1973).
- 3) 松村昌信, 岡 良則, 植田雅也, 矢吹彰広：防食技術, **39**, 550 (1990).
- 4) M. Matsumura : ASTM STP 664, 434 (1967).
- 5) M. Matsumura, S. Okumoto and Y. Saga : Werks. und Korros., **30**, 492 (1979).
- 6) 岡田庸敬, 岩井義朗, 服部修次, 中出純一：日本機械学会論文集 A 編, **55** [517] 2049 (1989).
- 7) 野一色公二, 矢吹彰広, 松村昌信, 長坂浩志, 宮坂松甫：材料と環境 (投稿中).
- 8) L. A. Glikman : "Corrosion-Mechanical Strength of Metals", p.160, Butterworth London (1962).
- 9) JIS R 1607-1990, ファインセラミックスの破壊靱性試験法, 7 (1990).
- 10) 岡田庸敬, 服部修次：日本機械学会論文集 A 編, **58** [552] 1502 (1992).