キャビテーション・エロージョンの潜伏期間の推定法*

野一色公二**, 矢吹 彰 広***, 小森 桂***, 松村 昌 信***

** 株式会社 神戸製鋼所

*** 広島大学 工学部

A Method for Predicting the Incubation Period of Cavitation Erosion*

Koji Noishiki**, Akihiro Yabuki***, Katsura Komori*** and Masanobu Matsumura***

** Kobe Steel, Ltd.

*** Faculty of Engineering, Hiroshima University

Cavitation damage in hydraulic machines is still unavoidable as the downsizing and the increase in their power continues. One of the characteristic features of cavitation erosion involves the removal of metallic material, which occurs after an incubation period, during which no mass loss, but plastic deformation of the surface, occurs. The current methods for predicting the amount of erosion damage inflicted upon metallic materials in a cavitating environment are based on the mass of the material which is lost. As a consequence, the erosion-resistance of a material cannot be determined until a measurable amount of mass loss has occurred. In this study, in order to quickly evaluate the erosion-resistance of metallic materials, the plastic deformation behavior of metallic materials during the incubation period was analyzed. The increment of the surface area was determined from the material surface profile data, measured through a surface roughness meter, to establish a good index for evaluating cavitation erosion development on the surface, as well as the intensity of the cavitation attack. According to the index, the incubation period of cavitation erosion is to be divided into two periods. In the first period, the rate of surface area increment is related to the hardness of the metallic material, and in the second period to the strain hardening exponent. These results can then be applied to the rapid determination of the level of erosion-resistance, in turn leading to a rapid prediction of the service life of the material.

Key words : cavitation, erosion, incubation period, plastic deformation, surface roughness, damage prediction

1. 緒 言

キャビテーション・エロージョンとは、局所的な沸騰現象によって生じた気泡が高圧部で崩壊するときに生じる衝撃圧によって材料が機械的に損傷する現象である。金属材料のキャビテーション・エロージョンの特徴は、材料表面が塑性変形するのみで脱離の生じない潜伏期間を経た後に、材料が脱離することである。従来から用いられている材料評価法は脱離開始後の質量損失¹⁾や損傷深さ²⁾を計測する方法であり、これらの方法は材料がある程度脱離した後でないと適用することができない。一方、潜伏期間では、材料の脱離は生じていないが、塑性変形が時間とともに進行、増大し、材料の表面形状が変化している。この潜伏期間の表面状態を測定して材料の耐エロージョン性を評価することができれば、従来の方法より早期の評価が可能となり、工業的にも有用である。また、精密な機械・装置においては、質量損失が許されないケース、すなわち潜伏期間の終了時が寿命となる場合も考えられる。

S. M. Ahmed ら³⁾は、304 ステンレス鋼のキャビテーション・エロージョン試験を行い、損傷の発達段階と材料の表面粗さとの関係を調べ、それら損傷を定性的に3

つの期間に分けられると報告している。H. Louis ら⁴⁾はウォータートンネル法試験装置を用いて、種々の材料についてキャビテーション強度を変化させてその表面粗さの変化を調べ、実機での損傷の予測法を提案している。しかし、得られた値と材料の機械的性質との関係については考察されていない。

本研究では、キャビテーション・エロージョンの潜伏期間における材料の表面挙動、特に塑性変形に注目し、この期間の表面状態の解析を行った。得られた結果を用いて、潜伏期間における材料の変形とその材料の機械的性質との関係を調べた。最後に、キャビテーション・エロージョンが発生する場所での材料の潜伏期間を予測する方法を示した。

2. 試験装置および方法

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^{5),6)}：試験部では、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(堰上流部圧力0.3 MPa)、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⁷⁾：ホーンの先端に円盤状の試片を取

** 〒676-8670 高砂市荒井町新浜2-3-1 (2-3-1, Shinham, Arai-cho, Takasago, 676-8670 Japan)

*** 〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1 (1-4-1, Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, 739-8527 Japan)

Fig. 1 Schematic diagram of testing apparatus.

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of testing materials.

Material		Chemical composition / %	Hv / GPa	Strain hardening exponent / -
Stainless steel	(SUS316)	0.08C-2.00Mn-1.00Mg-0.045P-0.03S-18.0Cr-14.0Ni-3.00Mo-Fe	2.10	0.26
Carbon steel	(S45C)	0.43C-0.63Mn-0.26Si-0.03P-0.033S-Fe	2.06	0.234
Commercial pure iron	(Fe)	0.035C-0.1Mn-0.01Si-0.026P-0.035S-Fe	1.56	0.16
Brass	(Brass)	3.23Pb-0.23Sn-0.20Fe-59.2Cu-Zn	1.25	0.291
Pure copper	(Cu)	99.99Cu	1.07	0.291
Aluminum alloy	(A2017)	0.55Mn-0.60Mg-0.56Si-0.01Cr-0.50Fe-3.90Cu-0.02Ti-Al	1.39	0.358
	(A6061)	0.15Mn-1.20Mg-0.60Si-0.15Cr-0.70Fe-0.30Cu-0.15Ti-0.25Zn-Al	1.14	0.45

り付けて、振動数 20 kHz、振幅 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⁹⁾: 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

供試材には Table 1 に示すオーステナイト系ステンレス鋼 (SUS 316)、炭素鋼 (S 45 C)、工業用純鉄 (Fe)、黄銅 (Brass)、純銅 (Cu)、アルミニウム合金 (A 2017, A 6061) の 7 種の材料を用いた。試験片は、直径 16 mm の円盤状とし、各試験方法で共通の形状とした。また、各材料についてタングステンカーバイト球 (直径 3.17 mm) を用いた圧縮試験を行い、得られた応力-歪み曲線から加工硬化指数を求めた。

2.3 評価方法

潜伏期間の決定および材料脱離後の挙動については、これまで一般的に用いられてきた質量損失およびそれに基づいて算出された損傷体積を用いた。また、触針式表面粗さ計 (針先端半径 5 μm) によって、キャビテーション試験前と試験後の深さ方向の差である損傷深さ d (μm) を決定し、それを用いて材料の局所的な損傷挙動を評価した。

潜伏期間における表面変形挙動の評価には、一般的に表面形状を示すために用いられる表面粗さ⁹⁾を、すなわち (1) 式で定義されるように、ある時間キャビテーションにさらした後の算術平均粗さ Ra_1 と、試験前のそれ Ra_0 との差 ΔRa (μm) を用いた。さらに、潜伏期間の損傷を表す新たな指標として試験前の表面の長さ L_0 、試験後の表面の長さを L_1 とし、(2) 式で定義される表面積増分率 ΔS (%) を用いた。測定データをコンピュータに取り込み、トレース距離 1 mm について評価を行った。

$$\Delta Ra = Ra_1 - Ra_0 \quad (1)$$

$$\Delta S = \frac{L_1^2 - L_0^2}{L_0^2} \times 100 \quad (2)$$

また、各試験時間における試験片を切断し、ビッカース硬度計でその断面深さ方向の硬度分布を調べた。

Fig. 2 Damage depth vs. testing duration relationship obtained in a vibratory unit with a stationary specimen.

3. 試験結果と考察

3.1 潜伏期間の決定

潜伏期間は、一般に材料の脱離が生じない期間と定義されている。Fig. 2 に対向型振動法試験装置における4種の材料の損傷の最も激しい部分での損傷深さの経時変化を示す。損傷深さによる評価では、潜伏期間内でも塑性変形が生じるので、その値は徐々に増加する。しかし、材料脱離後では明らかに傾きの異なる直線となる。この直線と横軸とが交わる時の時間を潜伏期間と決定した。この図における各材料の潜伏期間は損傷体積より求めた潜伏期間とほぼ一致した。すなわち、試験片の最も激しい場所での損傷を調べる場合には、損傷深さ、損傷体積のどちらを用いても、潜伏期間は決定できる。しかし、損傷の少ない場所について評価を行う場合、あるいは、実機の場合には損傷体積を用いることは困難である。そこで、本試験での潜伏期間の決定には、局所的な損傷の評価が可能である損傷深さを用いた。

3.2 潜伏期間における材料表面挙動

対向型振動法試験装置における4種の材料の ΔRa と表面積増分率 ΔS の経時変化をFig. 3(a), (b)に示す。図中の■は損傷深さ d を用いて決定された潜伏期間を示している。まず、 ΔRa については、いずれの材料においても潜伏期間では時間と共に増加し、1本の直線で表せることが分かった。また、その傾きは各材料で異なった。潜伏期間が終了し、材料の脱離が生じると、その傾きが変化した。この結果は既往の研究と一致している⁴⁾。次に、表面積増分率 ΔS については、潜伏期間では ΔRa の場合と同様に時間と共に増加しているが、 ΔS が約0.2%に達すると、その傾きが増加し、2つの期間に分けることができた。この挙動についてはいずれの材料においても類似したものであった。すなわち、(1) 第1の期間では、直線の傾きすなわち指数が1である。(2) ΔS が約0.2%に達すると、第2期間になり、その傾きが増加し、指数が1以上となった。さらに、(3) 潜伏期間の後に材料が脱離が始めると ΔS の値はほぼ一定となった。

3種の試験装置における黄銅の ΔRa と表面積増分率

Fig. 3 Surface roughness (a) and surface increment percentage (b) vs. testing duration relationships for various materials in the vibratory unit with a stationary specimen.

ΔS の経時変化をFig. 4(a), (b)に示す。 ΔRa , ΔS の両者において、キャビテーション攻撃力が異なっても、潜伏期間における折点の数や傾きが一致して同じ形になっている。潜伏期間が終わるときの ΔRa , ΔS の値も一致している。実機の条件、すなわちキャビテーション攻撃力が低い場合においてもこの形が出現すれば、その後には生じる減肉などの損傷の予測に利用することができる。しかし、実機において実際にこの形が出現するかどうかは確認されていない。そこで、この形の現れる理由を検討し、それに基づいて実機においてこの形が出現するか判断することにした。

ΔRa と ΔS 自身の物理的意義を検討すると、 ΔRa は材料が深さ方向にどれだけ塑性変形したのかを表している。一方、 ΔS は塑性変形によって新たに出現した材料表面の増加分の元の表面積への割合を示している。どちらがより深い意味を持っているか判断できないが、 ΔS の挙動には上記のように多くの情報が含まれているので、 ΔS を採用し、次節でその挙動の物理的意義を追求する。

3.3 潜伏期間における表面変形モデル

ΔS を用いて、潜伏期間を2つに分け、それらの期間における材料の変形挙動を比較した。

Fig. 4 Surface roughness (a) and surface increment percentage (b) vs. testing duration relationships for brass in three kinds of apparatus.

Fig. 5 (a) Surface profile in the first (300 s) and (b) second period (1000 s) for brass. Dotted lines indicate the virgine surface.

まず、黄銅について各期間における材料表面の形状の比較を行った (Fig. 5). 表面粗さ計で得られた表面形状を観察すると、第1期間においては材料表面に生じた変形はほとんどが基準面の下に生じたへこみであった (Fig. 5(a)). これに対して、第2期間においては、へこみだけでなくへこみの両側に盛り上がりが生じ、基準面の上にも下にも変形していた (Fig. 5(b)).

次に、黄銅について各期間における試験片の深さ方向の硬さ分布の測定を行った (Fig. 6). 全期間を通して硬さは時間と共に上昇しているが、第1期間では、材料表面近傍のみに硬さの増加が確認され、加工硬化層も発

Fig. 6 Change of hardness of specimens in the first and second period for brass.

Fig. 7 The surface area increment rate in the first period vs. hardness relationship.

達段階にあり、十分な加工硬化は生じていなかった。第2期間では、加工硬化がさらに深層まで進行していたが、脱離が開始した後に加工硬化の及ぶ深さがほぼ一定になった。

以上の結果に基づいて、各期間における材料表面の変形挙動と材料の機械的性質との関係を検討した。第1期間では、主にへこみが形成され、表面近傍の硬さのみが上昇しているが内部での加工硬化はあまり進展していない。このことから、第1期間では気泡の崩壊によって材料表面には局所的な荷重が発生し、ごく表面近傍にへこみが時間に比例して生じていると考えられる。この現象は材料の硬さ測定における圧子押し込みの現象と類似している。そこで、各材料の表面積増分率の増加速度、すなわち第1期間での傾きの値と材料の硬さとの関係を調べたところ、良い相関が認められた (Fig. 7). すなわち、第1期間では、表面近傍にのみへこみが生じること、そのへこみの形成しやすさは、材料の硬さに依存していることが確認された。

次に、第2期間では、第1期間において生じたへこみに加えて盛り上がりも多く生じていたこと、および深さ方向の硬さ分布によると加工硬化層が表面から 100 μm 程度の深さまで到達していることから、この期間では主

Fig. 8 The surface area increment exponent in the second period vs. strain hardening exponent relationship.

に材料表面でのうねりの形成が行われ、それに伴う平面方向と深さ方向への加工硬化層の広がりが生じていると考えられる。このように第1期間から第2期間へ移行する要因としては、材料によらずキャビテーションにより発生したへこみが重なること、ならびに材料の衝撃圧の受圧面積が増加することがさらにうねりの形成を加速していることが考えられる。しかし、材料によって第2期間の指数が異なっている。これは、各材料の機械的性質が抵抗または促進に関与していると考えられる。抵抗の要因として、材料内部における加工硬化層の形成が考えられる。すなわち、第2期間の指数は、塑性変形に対する抵抗を代表する各材料の加工硬化指数と関係付けられるはずである。そこで、各材料について第2期間の指数と材料の抵抗力を表す加工硬化指数との関係を調べたところ、両者には Fig. 8 に示すような良い相関があった。すなわち、第2期間の指数は、第1期間に比べて大きくなること、表面変形に対する抵抗を代表する加工硬化の影響によりその値が決定されることが分かった。

以上の測定結果と考察に基づいて、Fig. 9 のようなモデルを考案した。このモデルでは、第1期間では、(1) キャビテーション衝撃圧によって生じるへこみは平面部に生じる、すなわち重ならない、(2) その大きさは材料の硬さによって異なるが、形状は相似で、へこみの底面積(変形後の全面積)は元の平面に比べて0.2%ほど広い、と考えている。

このモデルによると、第1期間では ΔS の上昇はへこみの発生数に比例する。へこみを引き起こす大きな衝撃圧の発生頻度(単位時間当たりの発生数)は一定であるので、 ΔS は時間の1次に比例することになる(Fig. 9(a))。へこみのそれぞれについて ΔS は0.2%であるので、へこみが試片全体を覆うと、試片表面の任意の場所で ΔS は0.2%になる。それ以後は第2期間に入り、へこみは重なる。すなわち、へこみの底面にさらにへこみが生じる。このとき衝撃圧は深さ方向ばかりでなく、水平方向にも表面を押すようになり(Fig. 9(b))、 ΔS は第一期間と同じように深さ方向へのへこみの成長と同時に水平方向にも広がるので、1以上の次数で時間に比例することとなる。キャビテーション攻撃の強弱は材料にへこみを生じさせる衝撃圧の発生頻度によって代表され

Fig. 9 Surface deformation model during the incubation period of cavitation erosion; (a) dent formation in the first period, (b) effect of impulsive pressure.

Fig. 10 Prediction of incubation period.

るので¹⁰⁾、キャビテーション攻撃の強さが変わっても、生じるへこみの形は相似であり、従って実機においても ΔS はFig. 4に示されたような形状を呈すると思われる。

4. 潜伏期間の予測法

前節のモデルによって ΔS の挙動の物理的意味が明らかにされ、キャビテーション強度の低い現場でも ΔS は同じ挙動を呈すると期待されるので、実機の潜伏期間の終了時間は以下の手順で予測することができる。まず、加速試験によって当該の材料の表面積増分率の挙動を得る。次にその材料で製作された実機の使用前の表面状態(あらかじめ実機について測定しておく)と、使用後のそれとの差から表面積増分率を求めて、それが潜伏期間内の値であれば、そのときの使用時間だけ加速試験で得られた線分を移動する(Fig. 10)ことによって潜伏期間を決定することができる。

5. 結 言

キャビテーション・エロージョンの潜伏期間における材料の表面挙動を調べ、以下の結論が得られた。

1) 潜伏期間の評価には本報で提案された表面積増分率が有効である。この指標を用いるとキャビテーショ

ン・エロージョンの潜伏期間は2つの期間に分けられる。

2) 潜伏期間の第1期間における表面積の増加は材料の硬さと相関がある。

3) 潜伏期間の第2期間における表面変形に対する抵抗と材料の加工硬化指数との間には相関がある。

4) 表面積増分率を用いて実機での潜伏期間を推定する方法を提案した。

謝 辞

本研究の遂行に協力して頂いた広島大学化学工学講座の小林康男助手および卒論研究生の林 賢史君、大西務君に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 岡 良則, 松村昌信, 大佐古正明 (Y. Oka, M. Matsumura and M. Osako): 防食技術 [*Boshoku-Gijutsu (Corros. Eng.)*], **34**, 234 (1985).

- 2) 松村昌信, 岡 良則, 植田雅也, 矢吹彰広 (M. Matsumura, Y. Oka, M. Ueda and A. Yabuki): 防食技術 [*Boshoku-Gijutsu (Corros. Eng.)*], **39**, 550 (1990).
- 3) S. M. Ahmed, 堀切川一男, 大場利三郎, 松平晏明: 日本機械学会論文集(B編), **55**, 572 (1989).
- 4) H. Louis, P. T. Tai, T. Whelage and A. Yabuki: "Evaluation and prediction of surface roughness due to cavitation erosion" International STG-Symposium on Propulsors and Cavitation in Hamburg (1992).
- 5) H. Louis: Dissertation, Technische Universität Hannover (1973).
- 6) M. Matsumura: ASTM STP 664, 434 (1979).
- 7) 松村昌信: 化学工学論文集, **2**, 399 (1976).
- 8) M. Matsumura, S. Okumoto and Y. Saga: *Werks. und Korros.*, **30**, 492 (1979).
- 9) JIS B 0601-1994, 表面粗さ-定義及び表示 (1994).
- 10) 森 啓之, 服部修次, 岡田庸敬, 水島一寿: 日本機械学会論文集(A編), **62**, 2326 (1996).

(Manuscript received February 23, 2000 ;
in final form April 18, 2000)