磁歪振動法キャビテーション・エロージョン試験 —金属材料の損傷機構—

松村 昌信

広島大学工学部 化学工学科*

緒 言

キャビテーションとは液体中に気泡が生ずる現象を言う。いわゆる沸騰と異なり、流速の増大によって静圧が液の蒸気圧程度まで降下することが主因である。気泡は高圧部で急速に消滅して大きな衝撃圧を生ずる。近くの固体材料がこの衝撃圧によって損傷を受け、キャビテーション・エロージョンとなる。今日キャビテーションは高速流体を取り扱う機械・装置はもちろんのこと、液体ヘリウムや流動する水銀、熔融塩中にも発生して、装置保全上重大な問題となっている。

キャビテーションの発生を避けえない機械・装置には耐エロージョン性材料を用いなければならない。諸材料の耐エロージョン性試験法の一つとして磁歪振動法がある。試片を液中で上下に高周波振動させ、試片表面にキャビテーションを発生させる方法で、他の試験法に比して装置および試片が小型で所要動力が少ない。要する試験液量も少なく、上述の熔融塩中の試験なども比較的簡単に行うことができる。さらに、この試験法では実際の機械・装置のキャビテーション・エロージョンに比して短時間内に損傷を与えることができるので、迅速試験法として材料選定試験などに広く用いられている。しかしキャビテーションの発生方法が特殊であるため、試片の損傷機構が実際の機械・装置におけるそれと異なる恐れがある。

著者は先に実際の機械・装置におけるキャビテーション・エロージョンとはほぼ同じ条件で試験を行えるウォータートンネル法試験装置を用いて、鉄鋼材料の損傷機構を解明した¹⁾。すなわち損傷機構は試験時間の経過と共に延性破壊から脆性破壊へと転遷する、同様な化学組成でも材料の内部構造によって損傷過程が異なる、損傷速度の経時変化は損傷機構の転遷と深い関連があると思われることなどである。

本研究では、まず磁歪振動法試験における金属材料の損傷過程を明らかにし、これと損傷速度の経時変化との関連を追求することを目的にしている。これらは実際のキャビテーション・エロージョンの機構と磁歪振動法の

それを比較するための第1段階である。

1. 試験装置および実験方法

試験装置の系統図を Fig. 1 に示す。振動子①は厚さ 0.125 mm、長さ 102.3 mm のニッケル板を積層したもので、振動数は 19.94 ± 0.02 kHz、振幅は 28 ± 0.5 μ m である。ビーカー④内の試験液は試験温度が 100°C 以下では比抵抗 $5 \times 10^8 \Omega$ cm 以上のイオン交換水、それより高温ではグリセリンを用いた。低温では二重容器 (Fig. 1 (2)) の外側に -6°C のメタノールを循環させ、高温では熱媒体を用いて加熱し (Fig. 1 (1))、それぞれ温度一定 ($\pm 1^\circ$ C) に保った。試片③は試験液に 3 mm 没した状態で振動する。

試片の形状を Fig. 2 に示す。試片の周囲には、試片表面での損傷分布を均一にし、試験結果の再現性を高める目的で硬質塩化ビニールまたはフッ素樹脂製のリングを取り付けた。

試験に用いた金属材料の化学組成を Table 1 に示す。

Fig. 1 Diagrammatic sketch of the magnetostiction vibratory apparatus

Fig. 2 Test specimen with a ring of polyvinyl chloride or fluorocarbon resin

* 730 広島市千田町 3

Table 1 Chemical compositions of specimens [%]

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Fe	Zn
Iron (ferrite)	0.014	0.013	0.05	0.018	0.013				0.35	rest	
Mild steel	0.13	0.26	0.50	0.010	0.008	0.12	0.07	0.08		rest	
Tool steel	1.17	0.28	0.33	0.020	0.012	0.14	0.07	0.07		rest	
Cast iron	3.13	1.95	0.54	0.070	0.116					rest	
Stainless steel	0.05	0.57	1.61	0.033	0.015	18.58	9.13	0.14		rest	
Brass								59.77		0.28	rest
Aluminium		0.08	0.005					0.015	rest	0.25	0.005

Table 2 Mechanical properties of specimens

	Lower yield point [kg/mm ²]	Upper yield point [kg/mm ²]	Tensile strength [kg/mm ²]	Elongation [%]	Reduction of area [%]	H _{RB}	H _F
Iron (ferrite)	16.3	—	28.9	59.0	78.0	46	108
Mild steel	33.3	33.8	47.1	35.5	66.9	71	146
Tool steel	37.2	37.9	74.8	21.7	27.5	91	229
Cast iron	—	—	21.6	0.5	0.7	77	171
Stainless steel	—	—	68.1	64.7	73.2	76	195
Brass	—	—	39.9	15.2	29.1	69	144
Aluminium	—	—	6.27	58.0	92.9	65	94

いずれの試片も素材から削り出した後、真空中で歪取り焼鈍を行った。焼鈍処理後の機械的性質を Table 2 に示す。その後ラップ仕上げ、バフみがきを行い、仕上がり面をベンゾール、メタノール、水によって順次洗浄した後乾燥して秤量した。次いで試験装置に取り付け、一定時間損傷を与えた後取り外し、洗浄、乾燥して再び秤量した。

2. 実験結果と考察

2・1 損傷速度の経時変化

温度一定 (40°C) で Table 1 の材料について得られた損傷速度 (単位時間あたりの損傷量 [mg/min]) R と試験時間 t の関係の概略を Fig. 3 に示す。いずれの材料においても損傷速度は試験時間によって大きく変化している。磁歪振動試験で金属試片の損傷速度が試験時間によって変化することを最初に見いだしたのは Thiruvengadam らである⁵⁾。彼らは、損傷速度は潜伏期間の後に増加して最大値に達するとその後は減少する。そして最大損傷速度と、それに達するまでの試験時間を基準にした相対損傷速度と相対試験時間を用いれば、両者の関係は試験材料のいかにかわらずほぼ同一の山形を呈し、その材料の耐キャビテーション・エロージョン性は損傷速度減少期間の速度減衰係数から得られると報告した⁴⁾。

本実験の結果は Thiruvengadam らの見解を否定している。すなわち、Fig. 3 では相互の比較のために、最大損傷速度とそれに達する時間がほぼ一致するように各グラフの R と t のスケールを選んでいる。アルミニウム、鋳鉄、鉄では Thiruvengadam らが指摘したとおり R vs. t 関係は最大値を一つ有する山形を呈するが、黄銅、ステンレス鋼、軟鋼および工具鋼では R vs. t 関係に二つの

極大値が存在し、これら全部を一つの山形に重ね合わせすることは不可能である。

また、損傷過程の後半で損傷速度が減少するのは、試片表面に生じた小穴にキャビテーション気泡が捕えられ、気泡の発生・消滅の挙動が試片表面が平滑であった初期のそれとは異なるためで、材料の特性を示すものではないと Plesset が指摘している²⁾。著者らも高速度カメラによる試片表面での気泡挙動の観察に基づいて、この損傷速度減少の原因はむしろ気泡の流体力学的挙動の変化であることを明らかにした⁶⁾。

したがって諸材料の損傷過程の特徴はむしろ R vs. t 関係のうち損傷速度が最大値または極大値に達する時間範囲に現れてくるものと期待される。

2・2 損傷面の経時変化

すでに著者ら自身および他の多数の研究者が報告しているように、磁歪振動法試験では試片の損傷面は初期に表面粗さが増大し、やがて直径 1 mm 以下の小穴が多数発生する^{2, 8)}。Fig. 4 に一例として小穴で覆われた鉄試片損傷面の写真を示す。鉄試片を用いて温度 40°C で試験を行い、この小穴の総面積 a を測定して a と試験時間の関係を求めたところ、Fig. 5 に示すように a vs. t 関係を直線に近似できる次の 4 期間に大別することができた。最初の①期間では損傷面の粗さのみが増大し小穴はまだ現れない。②期間では試片の中央部に数個の小穴が発生するが、その数はあまり急激には増加しない。③期間では小穴の数と面積が急激に増大してほぼ試験面全域を覆う (Fig. 4 は③期間における状態を示す)。最後の④期間では穴の発生は停止し、それまでに存在していた穴の面積と深さがゆっくり増大する。

この a vs. t 関係と、同一試片について得られた R vs. t 関係を対比すると (同図中に一点鎖線で記す)、損傷速

Fig. 3 Rate-time curves for different materials (frequency: 19.9 kHz, amplitude: 28 μm , test liquid: water, 40°C)

Fig. 4 Photograph of iron specimen after long exposure to cavitation. Specimen is in ③ region.

Fig. 5 Comparison between R - t and a - t curve for iron

度 R は小穴の数と面積が急激に増加する ③ 期間で最大となり、④ 期間では減少することがわかる。この小穴群の発生・成長過程と損傷速度との関連は、すでに報告した振動数 10.1 kHz、振幅 55 μm の場合とまったく同一である³⁾。すなわち小穴群の成長過程は振動数に関係なく、損傷速度に大きな影響を与えている。

そこで鉄試片の損傷面に生じた穴のうち一つを選んで注目し、走査型電子顕微鏡を用いてその成長過程を観察した。Fig. 6 の (1) は試験開始後 25 min で発生した小穴の発端である。この穴にとっては a vs. t 関係の ⑥ 期間の開始点に相当する。小穴を取り巻く周囲の表面は ④ 期間における損傷状態を示している。すなわち、塑性変形を伴った小さな複雑な破面が重なり合っていて、あまり大きな起伏はない。一方、小穴はまだ浅いが底面は周囲に比して平滑である。(2) はその 5 min 後の状態で小穴は左上と右方向へ成長している。成長した部分は数個の比較的大きな平滑破面から成り、特に左上の破面は周

Fig. 6 Life history of an eroded hole on an iron specimen

囲の塑性変形を伴ったそれより平滑で大きい。(3) は試験時間 45 min で、穴の上辺が外側へ盛り上がり脱離寸前である。(4) は試験時間 50 min で、この穴にとって ③ 期間に相当する。穴の底部、側壁を問わず平滑な大きな破面が認められる。(5) は (4) の 5 min 後で、(4) で穴の上辺部に瘤状につき出していた部分が脱離している。その跡には周囲の破面に比して大きな平滑破面が認められる。すなわち、穴は脆性破壊による比較的大きな材料塊

Fig. 7 Comparison between R - t and a - t curve for stainless steel

の脱離によって成長している。また底部では(4)で現れた破面がさらに損傷を受け、脆性を示す平滑面の一部が塑性変形を伴った小さな破面で覆われている。(6)は試験時間 100 min で、穴は大きく成長した。底面は穴以外の周辺損傷面と同様な塑性変形を伴った小さな破面で覆われている。しかし穴の周辺部ではまだ脆性破面が認められる。特に矢印の部分では白く等高線状に現れているステップの間を平滑な脆性ファセットが埋めた脆性破面が認められる。(7)は試験時間 140 min で③期間の末期に相当する。穴の内外や周辺部、底部の破面に大きな差は認められない。(8)は試験時間 180 min で④期間に相当する。(7)の 40 min 後であるが形状には変化なく、この期間では成長がほとんど停止していることがわかる。

以上の観察から、④期間の損傷面は塑性変形を伴った小さな破面が複雑に重なり合っていて破壊が延性であること、⑤および③期間の穴の成長は平滑な破面を呈して大きな塊が脱離する脆性破壊によるものであることが明らかである。⑤、③期間でも穴以外の損傷面は④期間と同様な延性破面を呈しているが、穴の成長状態から判断して、この期間では脆性破壊が全損傷の大部分を占めるものと思われる。

なお、注目した穴の④期間開始時間は Fig. 5 のそれとは一致しない。これは試片が異なっていたのも一因であるが、むしろ Fig. 5 の期間分けは多数の穴の挙動が集合された結果であり、個々の穴は本来それぞれ異なった挙動を取るためである。すなわち個々の穴は、それぞれの⑤、③、④期間を有していて、たまたま注目した穴が平均よりも早く成長したにすぎない。

2・3 金属材料の損傷過程

Fig. 3 の R vs. t 曲線に二つの極大値を有する材料の代表としてステンレス鋼を取り上げ、 R vs. t と a vs. t を対比すると Fig. 7 のようになる。すなわちステンレス鋼の R vs. t 曲線に時間的に前後して現れる二つの極大値のうち、後のそれが③期間中に現れている。二つの

極大値を有する他の材料；黄銅、工具鋼および軟鋼においても同様のことが認められた。このことは逆に鉄や鋳鉄の R vs. t 曲線に現れる最大値(唯一の極大値)はステンレス鋼などに現れる二つの極大値のうち後のそれと同類のものであること、また鉄や鋳鉄では前の極大値が無視されうるほど小さいことを示唆している。一方、アルミニウムでは損傷の初期に現れる表面荒れが試験時間の経過と共に増加するのみで、明確な小穴は発生しなかった。したがって、アルミニウムの R vs. t 曲線に現れた唯一の極大値は、ステンレス鋼などの二つの極大値のうち前のそれに相当すると考えられる。

走査型電子顕微鏡観察の結果を加味すれば、磁歪振動法試験では金属材料は、初期に比較的延性な機構で損傷を受け、次いで脆性な機構で損傷を受ける。どの過程でより多くの損傷を受けるかは材料の特性によって決まり、損傷量が多ければ損傷速度対時間の曲線に極大値が現れる。

以上の損傷過程に関する推論を裏付けるために、 R vs. t 曲線に脆性破壊に相当する極大値しか現れない鉄試片をより延性な条件で、すなわち試験温度を上昇させて試験を行い、延性破壊に相当する極大値が現れるかどうか調べた。試験条件として振動数 19.9 kHz と振幅 28 μm は一定とし、試験液温度を 5°, 40°, 90°, 150° および 200°C に変化させた。試験液には 150°C と 200°C ではグリセリン、それより低温ではイオン交換水を用いた。試験液によって、また同一試験液でも温度によって損傷量に多少の変化が認められた。しかし、目下着目されているのは損傷機構の経時変化である。したがってキャビテーション強度が試験液および温度によって異なっている、それを試験時間を通じて一定に保って試験を行い、得られた R vs. t 曲線の形状を比較すれば本研究の目的は達せられる。

そこで Fig. 3 と同様に、これらの温度における鉄試片の R vs. t 曲線の概略を比較すると Fig. 8 のようになる。この図から明らかのように、常温では R vs. t 曲線に極大値は一つしか現れていないが、試験温度が上昇するにつれて前にさらに別の極大値が出現し、200°C では前後の極大点での損傷速度はほぼ等しくなっている。この結果は、前に述べたように常温で鉄試片の R vs. t 曲線に存在する唯一の極大値はステンレス鋼などの二つの極大値のうち後のそれに相当し、前の極大値は無視できるほど小さいこと、そして前の極大値に対応する損傷は比較的延性な破壊によることを如実に示している。

2・4 損傷過程の係数表示

R vs. t 図に現れる 2 種類の過程による損傷の大きさを数値を用いて定量的に比較するため係数

$$W_c^*/W_{abc}$$

Fig. 8 Effect of temperature on rate-time curve of iron (frequency: 19.9 kHz, amplitude: 28 μ m)

Fig. 9 Definitions of t_a^* , t_c^* , W_{abc} , W_a^* and W_c^*

を導入する。ここで、 W_{abc} は ④、⑤および③期間における損傷量の総計で、 W_c^* は c^* 期間における損傷量である。 c^* 期間は、Fig. 9 に示すように③期間における a vs. t 線を延長して得た時間 t_a^* から③期間が終了するまでの期間である。すなわち、この係数は全損傷量に占める c^* 期間での損傷量の割合、言い換えれば脆性破壊が全損傷に寄与する割合を示している。ここで、全損傷量に④期間のそれを含めなかったのは、既に述べたように④期間で現れる R の変化は、むしろ気泡や液の挙動の変化に起因し、材料の特性には関係が無いためである。また W_c ではなく W_c^* を用いたのは、⑤期間は④から③への単なる遷移期間とみなしたためである。すなわち前に述べたように個々の穴にはそれぞれの発生時間があり、そのうち、平均よりも早く発生する穴が⑤期間の当初に現れる。換言すれば⑤期間は損傷面の一部は③期間に入り、他の部分はまだ④期間である状態で、⑤期間の後半にはほぼ損傷面全域が③期間に入ることになる。これが c^* 期間の始まる t_a^* である。さらに Fig. 7 に示したステンレス鋼ばかりではなく、工具鋼、軟鋼などでも後の極大点の時間的範囲は③期間よりも c^* 期間によく一致した。

この W_c^*/W_{abc} の値は Fig. 3 および Fig. 8 の R vs. t 図の下に記してある。いずれも後の極大の全体に占める割合と共に係数値は大きくなり、 R vs. t 図に現れた特性をよく数値表示している。

結 言

本研究では磁歪振動法試験装置を用いて金属材料のキャビテーション・エロージョン試験を行い、次の結果を得た。

- 1) 金属材料の損傷機構は試験時間の経過と共に延性破壊から脆性破壊へ転遷する。この転遷に基づくそれぞれの材料の損傷過程の特徴を数値表示できる係数を提示した。
- 2) この転遷は試験材料の特性と試験条件の両者に依存する。
- 3) 損傷速度の経時変化のある部分はこの転遷に起因する。

【付 記】 本研究に対し文部省科学研究費 (055216) が交付された。記して謝意を表す。また、走査型電子顕微鏡を利用していただいた三菱重工 (株) 広島研究所所長ならびに同材料研究室室長山崎大蔵氏に深く感謝の意を表します。

本研究に協力された広島大学工学部化学工学科の卒論研究生の諸君の氏名列挙し、深く感謝の意を表します。渡一弘、福原憲彦、境祐二、桜井裕巳、時政辰夫。

Nomenclature

a	= total area of eroded hole	[mm ²]
H_{RB}	= Rockwell hardness number in B scale	[kg/mm ²]
H_V	= Vickers hardness number	[kg/mm ²]
R	= rate of erosion or weight loss of test specimen per unit time	[mg/min, mg/hr]
T	= temperature	[°C]
t	= testing time	[min, hr]
t_a^*	= duration of a^* region	[min, hr]
t_c^*	= duration of c^* region	[min, hr]
W	= weight loss of test specimen	[mg]
W_a^*	= weight loss of test specimen in a^* region	[mg]
W_{abc}	= weight loss of test specimen in	

①, ② and ③ region [mg]
 W_c^* = weight loss of test specimen in
 c^* region [mg]

Literature cited

- 1) Matsumura, M., F. Erdmann-Jesnitzer and H. Louis:
Kagaku Kogaku Ronbunshu, 1, 432 (1975)
- 2) Plesset, M. S. and R. E. Devine: *J. Basic Eng.*, *Trans.*

ASME, 88, 691 (1966)

- 3) Suezawa, Y., M. Matsumura and K. Tsuda: *J. Materials Science Society of Japan*, 6, 86 (1969)
- 4) McGuiness, T. and A. Thiruvengadam: ASTM STP 567, Am. Soc. for Testing and Mats., 30 (1974)
- 5) Thiruvengadam, A. and H. S. Preiser: *J. Ship Research*, 8, 39 (1964)

(1975 年 10 月 30 日受理)

Vibratory Cavitation Erosion Test

—On the mechanism of cavitation damage to metals—

Masanobu Matsumura

Dept. of Chem. Eng., Hiroshima Univ., Hiroshima, 730

Experimental studies were conducted in a vibratory cavitation erosion facility at a frequency of 19.9 kHz and double amplitude of 28 μm for metals including aluminium, brass, iron and steels. Observing the life history of eroded holes on the specimen and of a certain single hole as well, two different types of damage were found and the following conclusions were obtained. (1) The mechanism of cavitation damage on the metals changes them from ductile to brittle with the lapse of testing time. A dimensionless number was introduced as a quantitative criterion to identify the degree of cavitation damage. (2) This transition of the mechanism depends upon the experimental conditions as well as upon the properties of the specimen. (3) A part of the variation in erosion rate is caused by this transition of cavitation damage mechanism.

~~~~~