Table 7 Compositions at equilibrium [mol %]

Run	Organic layer					Water layer					V_o/V_w
	BzOH	AcOH	AcOBz	H ₂ O	Tetr.	BzOH	AcOH	AcOBz	H ₂ O	Tetr.	
1	38.1	6.7	9.1	46.1	—	1.4	2.3	0.01	96.2	—	0.71
2	27.9	2.9	12.5	12.8	43.9	0.6	1.8	0.02	97.6	—	1.30
3	12.0	1.1	4.7	4.4	77.8	4.7	2.0	0.01	93.2	0.01	3.60
4	21.2	10.5	11.0	57.3	—	1.2	4.4	0.13	94.3	—	0.80
5	19.3	6.5	21.1	11.3	41.8	0.5	3.8	0.04	95.7	0.00	1.31
6	13.4	4.9	17.0	7.3	57.4	0.4	3.7	0.04	95.9	0.00	2.06
7	8.4	2.2	9.3	5.0	75.1	0.4	3.5	0.02	96.1	0.00	3.43
8	5.0	10.6	2.6	81.8	—	—	—	—	—	—	—
9	11.2	12.2	24.1	11.9	40.6	0.7	8.7	0.20	90.4	0.00	1.04
10	7.1	8.2	19.2	7.0	58.5	0.6	8.4	0.16	90.8	0.00	1.77
11	3.9	5.1	13.7	4.1	73.2	0.4	8.2	0.08	91.3	0.00	0.37
12	3.0	20.8	3.0	73.2	—	—	—	—	—	—	—
13	6.2	17.5	22.2	13.2	40.6	1.2	19.5	1.00	78.3	0.03	0.69
14	4.3	14.2	18.5	5.5	57.5	0.8	18.3	0.67	80.2	0.03	1.10
15	2.3	10.2	13.3	4.1	70.1	0.5	18.0	0.40	81.1	0.02	2.03
16	18.3	18.8	31.3	31.6	—	—	—	—	—	—	—
17	29.3	9.1	11.3	50.3	—	1.0	3.3	0.07	95.6	—	0.30
18	32.3	6.1	8.8	52.8	—	0.9	2.2	0.03	96.9	—	0.07
19	11.7	12.5	26.1	12.0	37.7	0.7	8.5	0.25	90.5	0.00	22.80
20	13.5	2.2	13.8	6.7	63.8	0.4	2.7	0.02	96.9	0.00	0.92
21	9.4	1.0	6.9	5.8	76.9	0.3	1.8	0.01	97.9	0.00	0.77

b = benzyl alcohol

c = benzyl acetate

R = component R

S = component S

4,2 = phase numbers

Literature cited

- Goto, S. and M. Matsubara: *J. Chem. Eng. Japan*, **5**, 87 (1972)
- Iguchi, A.: *Kagaku Kōgaku*, **34**, 41 (1970)
- Leyes, C.E. and D.F. Othmer: *Ind. Eng. Chem.*, **37**, 9968 (1945)

磁歪振動法によるキャビテーション損傷

に及ぼす試験片形状の影響*

津 田 健**・末 沢 慶 忠***

東京工業大学工学部 化学工学科**

緒 言

磁歪振動法は、試験片を水中で上下に激しく振動させ、その表面にキャビテーション損傷を与えるもので、試験片が小さくてすみ、試験時間を短縮でき、しかも再現性がよいなどの理由から、1932年に開発されて以来材料の耐キャビテーション性の迅速試験法として広く用いられているが、その実験条件は各研究者によりまちまちである。そのため、1958年にはRobinson³⁾により、また、1970年にはASTM²⁾により本法の規格化が試みら

れている。著者らは今までこれらの規格案に基づいた試験片を使用し、キャビテーションの損傷機構を解明する目的で、損傷に及ぼす振幅あるいは振動数の影響などについて明らかにしてきた^{7,8)}。しかし、この試験法をより一般的なものとするには、振幅、振動数の他に、試験片形状の影響についても検討する必要がある。

損傷に及ぼす試験片形状の影響に関し、Thiruvengadamら¹⁰⁾は、損傷速度は試験片直径 D のほぼ2乗に比例することを示している。また、Hammittら¹¹⁾は $D=0.5\sim0.625$ in の範囲の実験結果から、損傷速度は直径とともに増加するが、エッジ効果のため試験片直径の影響を他の試験条件と関連づけることは困難であると述べている。このように試験片直径の影響に関しては不明の点が多く、特に、試験片直径をも含めた種々の実験条件と損傷速度との関連についてはほとんど明らかにされていない。

* <The Effect of Diameter of Test Specimen on Erosion in the Magnetostrictive Methods>

Received on July 2, 1973

化学工学協会第38年会(東京, 1973年4月5日)にて発表

** Ken Tsuda (正会員) Dept. of Chem. Eng., Tokyo Inst. of Tech., Tokyo, Japan

*** Yoshitada Suezawa (正会員) 青山学院大学理工学部 Aoyama Gakuin Univ., Tokyo, Japan

Fig. 1 Diagrammatic sketch of the magnetostrictive vibratory apparatus

Fig. 2 Test specimen

そこで、本報では、まず10.1kHzで直径の異なる試験片を用いた実験を行い、その影響を明らかにし、ついでこの結果を参考にして、種々の実験条件（振幅、振動数、試験片直径）と損傷速度との関係について検討する。

1. 実験装置および方法

実験装置（Fig. 1）は、すでに報告したもの^{6,9)}とまったく同様の磁歪振動法で、その振動数は10.1kHz、振幅は25～55μである。振幅は振動子の上部に取り付けたピックアップコイルに誘起される電圧を監視することにより、一定に保った。試験液はイオン交換水を40℃で空気飽和したものを用いた。試験片は、直径16mmの標準試験片の他に、直径Dの値を12, 14, 20と変えた4種類のものを使用し、いずれもDの値以外の寸法、形状はすべて標準試験片と同じである。Fig. 2にその一例を示す。なお、実験の際には、再現性を改善する目的で、試験片の周囲に硬質塩化製のリングを取り付け振動させた^{6,9)}。試験材料はTable 1に示すような化学組成および機械的性質を持つ鉄で、素材から削り出したのち、歪取り焼鈍を行い、ラップおよびバフ仕上げをして実験に供した。

試験片をホーンに取り付け、一定振幅で振動させ、10～30分おきに取りはずし、化学天秤によりその時間tまでの重量減少を測定した。

Fig. 3 Effect of diameter of test specimen on damaged pattern (10kHz, 35μ)

Table 1 Chemical composition and mechanical properties

						[wt %]
C	Si	Mn	P	S	Al	
0.014	0.013	0.05	0.018	0.013	0.35	
Yield strength [kg/mm ²]	Tensile strength [kg/mm ²]	Elongation [%]	Reduction of area [%]	Hardness		
16.3	28.9	59.0	78.0	H _{HR}	H _{FT} (1.0)	
				46	108	

なお、種々の実験条件と損傷速度との関係を検討するため、10.1kHzの他に6.5kHzおよび20kHzで、振幅をそれぞれ38～85μ、13～28μの範囲に変えて実験を行った。

2. 実験結果および考察

2.1 試験片形状の影響

直径の異なる試験片を用いて損傷実験を行った結果、いずれの場合も、経時的にまず表面が一樣にあれ、ついで中央部に穴を生じ、さらに時間が経過すると周辺部にも穴を生じはじめる。300分後の表面状態の一例をFig. 3に示すが、内側にはかなりのあれが見られる損傷部が、また周辺部には金属光沢を保ったままの未損傷部が存在する。両者の境界はある幅を持っており（写真で白い帯状の部分）、この部分のあれは中央部に比してかなり小さい。損傷部には大きな穴も認められるが、この穴が生じる以前にすでにかなりの重量減が測定されること^{6,9)}や、穴の大きさや深さのみでは全損傷量を説明できないことなどから、損傷には穴以外の部分が大きな役割を占めているものと思われる。

いまこの「あれ」の部分（写真で黒く見える部分）に注目し、その径dを写真から測定し、試験片の直径Dに対してプロットするとFig. 4が得られる。実験範囲内では、ほぼ直線的な変化を示し、これらはいずれも

$$d = D - 2C \quad (1)$$

あるいは

$$D - d = 2C \quad (2)$$

で表すことができる。すなわち、振幅が決まれば、試験片の大きさDには関係なく $(D-d)/2$ 、つまり試験片

Fig. 4 Relationships between d and D

Fig. 5 Effect of diameter of eroded area on the erosion rate at $t=300$ min

周辺部の損傷を受けない部分の幅が一定値 C を持つことになる。このことから、周辺部の損傷を受けない部分は、試験片の運動状態（振幅）によって決まる一種の end effect によるものと考えられる。

さて次に損傷速度と試験片の大きさとの関係について検討する。この場合、以上の結果を考慮すれば、試験片の大きさとしては、試験片直径 D よりむしろ d を用いるべきである。また磁歪振動法においては、損傷速度は経時的に増加→減少→定常と変化するため^{6,7)}、ここでは時間の影響の入らない定常期における損傷速度に注目して検討する。

損傷速度 R が定常期に達したと考えられる 300 分後における損傷速度と d との関係を示すと Fig. 5 が得られ、これより

$$R = k_1 d^2 \quad (3)$$

が成立しているのがわかる。いま、損傷部の面積を S とし、単位面積あたりの平均損傷速度を r とすると Eq. (3) から

$$r = \frac{R}{S} = \frac{R}{(\pi/4)d^2} = k_2 = \text{const.} \quad (4)$$

が導かれる。すなわち、振幅が一定の場合、 r は試験片

Fig. 6 Effect of diameter of specimen on the average erosion rate

Fig. 7 Effect of amplitude of vibration on damaged pattern (10kHz, $d=16$ mm)

Fig. 8 W vs. t under various frequency

の大きさには関係なく一定であることになる。Fig. 6 に直径と平均損傷速度との関係を示すが、明らかに Eq. (4) が成立している。

2.2 損傷速度と種々の実験条件との関係

損傷速度と種々の実験条件との関係を明らかにするために、10.1 kHz の他に 6.5, 20 kHz で損傷実験を行った。

まず振動数 (f) 一定で振幅 (A) を変えた場合、損傷量は当然振幅が小さくなるにつれて減少する。300 分後の損傷状態を Fig. 7 の写真に示すが、振幅が小さくなるにつれて損傷穴の数はもちろん、損傷部の面積もかなり減少している。

次に、振動数の影響についてであるが、試験片から放射されるエネルギー、圧力振幅などから考えると、 $f \times A$ の値が等しければ損傷量 (W) も等しくなると予想されるが、Fig. 8 に示すように、この場合も振動数あ

Fig. 9 Relationships between the erosion rate at $t=300\text{min}$ and $f^2 A^2 d^2$

Fig. 10 Effects of amplitude and frequency of test specimen on d

るいは振幅により損傷量にはかなりの差がある。これは、振動数、振幅によって気泡群の挙動が異なるためである。すなわち、振動数が大きくなるほど気泡が発生してから消滅するまでの時間が短くなるため、消滅時の気泡径が小さくなること、また各振動数における安定な気泡径（共振気泡径）は振動数の増大とともに減少すること⁵⁾などに起因するものと考えられる。事実、損傷後の試験片を観察すると、振動数の増大につれて損傷穴がしだいに小さくなる傾向にある。

したがって、振幅および振動数と損傷との関係を検討するには、気泡群挙動を考慮する必要があると言えるが、いまこの気泡群挙動の違いが、先に述べた d の差として現れていると考え、 d を考慮しながら振幅および振動数と損傷速度との関係について検討してみる。

損傷速度は、試験片から放射されるエネルギーに比例すると考えられる。この単位時間、単位面積あたり放射されるエネルギーフラックス I [erg/cm²·sec] は理論的に

$$I = 2\pi^2 f^2 \rho c A^2 \quad (5)$$

で与えられる⁶⁾。ここで、 f : 振動数, ρ : 液の密度, c :

液中の音速, A : 振動振幅, である。また、損傷部面積 S は $\pi d^2/4$ であるから、損傷部面積あたり、単位時間に流れるエネルギー E [erg/sec] は

$$E = I \cdot S = (1/2) \pi^2 f^2 \rho c A^2 d^2 \quad (6)$$

となる。したがって

$$R \propto f^2 A^2 d^2 \quad (7)$$

となり、前の Eq.(3) あるいは Eq.(4) が成立することが、理論的にも説明できる。

Eqs.(3), (4) は、振動数、振幅が一定の場合であるが、これらが変化する場合について検討したのが Fig. 9 である。種々の条件下における結果がすべて傾き 1 の直線上にあることから、Eq. (7) がよく成立しているのがわかる。

d と振幅および振動数との関係を Fig. 10 に示すが、振幅の影響については、本実験条件下では、ほぼ

$$d \propto A^{1/2} \quad (f = \text{const.}) \quad (8)$$

が成立する。一方、振動数の影響については、振幅一定のもとでの比較ができないこともあるが、その挙動はかなり複雑である。

以上の結果から、 d の値がわかれば、ある条件下（振動数、振幅、試験片直径）での損傷速度から他の条件下におけるそれを求めることが可能となる。すなわち、緒言で指摘したように、多くの研究者により種々の条件下での実験データが発表されているが、これらをすべてある標準の実験条件下における損傷速度に変換して比較できることになる。

結 言

磁歪振動法において直径の異なる試験片を用いた実験を行い、キャビテーション損傷に及ぼす試験片形状の影響につき検討し、次の結果を得た。

すなわち、平円板状試験片の周囲に硬質塩ビ製のリングを取り付けて実験を行った場合、

(1) 試験片表面上で、周囲の損傷を受けない部分の幅 $(D-d)/2$ は、振幅が一定の場合には、試験片の直径 D には関係なく一定値を持つ。

(2) 直径 d の損傷領域に注目すると、単位面積あたりの平均損傷速度 r は、 D に関係なくほぼ一定値を示す。

(3) 種々の条件下における損傷速度について検討する場合、 d を重視する必要があることを指摘し、この点を考慮してキャビテーション損傷速度と実験条件との関係を示す半理論式 ($R \propto f^2 A^2 d^2$) を提出した。この式により、 d がわかれば、実験条件の異なる場合の損傷速度の相互の比較が可能となった。

【付 記】 本研究を行うにあたり熱心に協力された当時の研究生齊藤保雄君に感謝の意を表す。

Nomenclature

A	= double amplitude of vibration	[μ]
c	= sound velocity in liquid	[cm/sec]
D	= diameter of test specimen	[mm]
d	= diameter of eroded area	[mm]
E	= energy radiated from eroded area	[erg/sec]
f	= frequency of oscillation	[1/sec]
H_{RB}	= Rockwell hardness number (B scale)	[kg/mm ²]
H_V	= Vickers hardness number	[kg/mm ²]
I	= energy flux radiated from specimen surface	[erg/cm ² ·sec]
R	= rate of weight loss	[mg/min]
r	= average erosion rate	[mg/min·cm ²]
t	= testing time	[min]
W	= weight loss of test specimen	[mg]
ρ	= density of liquid	[g/cm ³]

Literature cited

- 1) Chao, C., F.G. Hammett, C.L. Kling and D.O. Roger: PB Report, No. 183581 (1969)
- 2) Hammett, F.G., C. Chao, C.L. Kling, T.M. Mitchell and D.O. Roger: *Materials and Standards*, 10, 16 (1970)
- 3) Robinson, L.E., B.A. Holmes and W.C. Leith: *Trans. ASME*, 80, 103 (1958)
- 4) Saneyoshi, J., Y. Kikuchi and O. Nomoto: *Cho-onpa Gijutsu Benran*, 16 (1960)
- 5) Smith, F.D.: *Phil. Mag.*, 18, 1147 (1935)
- 6) Suezawa, Y., M. Matsumura and K. Tsuda: *Journal of the Materials Science of Japan*, 6, 86 (1969)
- 7) Suezawa, Y., M. Matsumura and K. Tsuda: Preprints of 33th Annual Meeting of the Soc. of Chem. Engrs., Japan, II-320, Kyoto (1968)
- 8) Suezawa, Y., M. Matsumura and K. Tsuda: Preprint of 3rd Autumn Meeting of the Soc. of Chem. Engrs., Japan, 11, Osaka (1969)
- 9) Suezawa, Y., M. Matsumura, M. Nakajima and K. Tsuda: *Journal of Basic Engineering, Trans. ASME, Ser. D*, 84, 521 (1972)
- 10) Thiruvengadam, A. and H.S. Preiser: *J. Ship Research*, 8, 39 (1964)

溶 融 を 伴 う 粒 体 層 内 の 熱 移 動*

西 村 誠**・平 林 芳 夫**

杉 山 幸 男***

岐阜大学工学部 合成化学科**

緒 言

粒状物質を固定層にて溶融させる操作は、金属、プラスチックなど種々の工業分野でしばしば見受けられる。

粒体固定層においては、固体粒子の溶融と溶融に伴う流動、空隙率変化などが密接に関連した状態で溶融が進行していくと考えられる。したがって、溶融機構は単一固体塊の溶融に比して複雑、多岐になるものと予想される。一方、従来よりこのような問題を移動論的な立場から解析、検討した例はほとんど見当たらない。

このような現状において本研究ではまず、1次元系の粒体層の溶融に関して、移動論的な立場から流動、空隙率変化を簡単なモデルで表し、前報¹⁾の固体溶融伝熱モデルをもとに1次元層状伝熱モデルを提案した。また、

数種の溶融特性の異なる試料粒子について層内温度分布ならびに層高の経時変化を実測し、その結果とモデルの解析結果とを比較検討し、あわせてモデルの妥当性などに関して考察を行った。

1. 理 論 解 析

1・1 溶融モデル

粒体層を上面から加熱溶融する場合を考える。熱流は1次元であり、空隙率 ϵ は0.5より小さいと仮定し、Fig. 1に示すような1次元層状伝熱モデルを導入する。Fig. 1において、各層の厚みには粒径 D_p をとり、各層の温度は層中心温度 T_i で代表させ、また各層間界面温度は平均温度 $(T_i + T_{i+1})/2$ とする。溶融潜熱は前報¹⁾と同様に総括比熱の概念にて表す。溶融温度域を $T_{m1} \sim T_{m2}$ として、 T_{m1} 以下(固相)における総括比熱を C_{ps} 、 $T_{m1} \sim T_{m2}$ では C_{pm} 、 T_{m2} 以上(液相)では C_{pl} とし、それぞれ一定とする。

さて、粒子の温度が溶融温度域に達すると粒子は溶融液化するとともに変形、流動を生じ、その結果空隙率は局所的に変化し顕熱移動が起こる。ここでは、この現象をFig. 1のモデルと関連づけて次のように単純化し、Fig. 2に示すようにモデル化する。すなわち、第 i 層は

* <Heat Transfer Accompanied by Melting in a Fixed Bed of Granular Solids>

Received on December 4, 1973

第10回日本伝熱シンポジウム(仙台, 1973年5月31日)にて研究発表

** Makoto Nishimura (正会員) and Yoshio Hirabayashi (正会員) Dept. of Orgn. Synthesis, Gifu Univ., Kagamigahara, Japan

*** Sachio Sugiyama (正会員) 名古屋大学工学部 化学工学科 Dept. of Chem. Eng. Nagoya Univ., Nagoya, Japan