キャビテーション・エロージョンに及ぼす外部応力の影響

栗 津 薫*, 岡 田 庸 敬**, 岩 井 善 郎**

*石川県工業試験場

**福井大学工学部産業機械工学科

Effects of Applied Stress on Cavitation Erosion

Kaoru Awazu*, Tsunenori Okada** and Yoshiro Iwai**

*Industrial Research Institute of Ishikawa Prefecture

**University of Fukui, Faculty of Engineering, Mechanical Department

Cavitation erosion under static applied stress and/or alternating stress was studied using steel specimens which were set in close proximity to an oscillating horn in ion-exchanged water. Effect of applied stress on erosion is remarkably large at a suitable cavitation intensity and quite small at either higher or lower cavitation intensity. However, this effect is difficult to determine because the ratio of cavitation intensity to applied stress becomes larger at higher intensity and the cavitation damage is very much smaller at lower intensity. The erosion damage (weight loss and weight loss rate) under static applied stress or alternating stress does not vary in a monotonic fashion, but first decreases to a minimum, then increases to a peak and decreases again with increasing applied stress. Generally, applied stress decreases erosion damage over all stress levels except for given limited levels of applied tensile stress and alternating stress. Erosion damage under applied tensile stress decreases due to the fact that erosion cracks propagate perpendicular to the surface and erosion particles are not easily formed. Under applied compressive stress, erosion cracks are seldom initiated and then propagate diagonally to the surface, resulting in decreased erosion damage. It is found that applied stress increases the erosion damage up to only about 10 percent in the worst case in our experiments.

1. 緒 言

キャビテーション・エロージョンに対する静応力や繰返し応力などの外部応力の影響について、すでに数編の報告がみられるが、試験の困難さから十分な結論は得られていない。Hammit¹⁾は OFHC 銅および 2024 アルミニウム合金にステンレスリングをはめ込み、平面圧縮応力を付加させた場合、無応力状態よりも銅で、19.3%、アルミニウム合金で 7.1% 浸食が増加したと報告している。また Shal'nev²⁾はアルミニウム合金に一軸引張り応力 $\sigma/\sigma_s=0.5$ (σ : 付加応力, σ_s : 降伏応力) を付加したところ、浸食率が 40% も増加したと述べている。Kempainen³⁾は種々の材料に対して付加応力の絶対値が $|\sigma|/\sigma_s=0.75$ になるような一軸引張りおよび圧

縮応力を与えたところ、材料の種類や結晶構造によっては付加応力の影響は逆の傾向を示すものもあるが、一般的傾向として、引張り応力は浸食を促進させ、圧縮応力は浸食を抑制する傾向が認められると報告している。さらに、Palhan⁴⁾は軟鋼および鋳鉄で一軸引張り応力レベルを 2 段階に変えて試験し、応力レベルが高いほうが浸食率が増加すると報告しているが、無応力時との比較を行っていないので、無応力状態から増加したのか減少したのかわからない。

以上のように、引張り付加応力が大きくなると浸食が増大する結果と逆に減少する結果、あるいは圧縮応力で浸食が増加する結果など、付加応力がキャビテーション・エロージョンに及ぼす影響は個々の研究者、あるいは試験装置や材料などにより異なっている。このような背景には、付加応力と浸食の相互作用を十分に検討していないことも原因しているようである。すなわち、このような試験では、キャビテーション・エロージョンと付加応

* 〒921 金沢市米泉町 4-133 (4-133, Yoneizumi-cho, Kanazawa, 921 Japan)

** 〒910 福井市文京 3-9-1 (3-9-1, Bunkyo, Fukui, 910 Japan)

力が適当な組合わせのときに、浸食が最も顕著になることも考えられるのに、これまでの試験では付加応力のみを变化させ、キャビテーション・インテンシティはほとんど変えていない。また外部応力として繰返し応力が作用した場合、疲労き裂の進展が一層の浸食被害をもたらすことも考えられるのに、このような研究は全くみあたらない。

本研究では、外部応力の影響を明らかにするために筆者の1人ら⁹⁾が考案したのと同じ方法で、疲労試験機で静応力あるいは繰返し応力を付加した試験片に液中で磁歪振動面を近接させてキャビテーション・エロージョンが生じるような浸食試験を行い、外部応力が浸食に及ぼす影響について検討した。

2. 試験装置および試験方法

使用した試験装置の概略を Fig. 1 に示す。試験機は引張り圧縮疲労試験機①、磁歪振動法によるキャビテーション発生装置②、③、④、および試験液恒温装置⑦からなる。疲労試験機はカム偏心機構によるもの（試験機

- 1- Tension-compression fatigue machine
- 2- High-frequency amplifier
- 3- Magnetostrictive oscillator
- 4- Amplifying horn
- 5- Disc
- 6- Test liquid container
- 7- Electronic cooling device
- 8- Dial gauge to set distance between disc and specimen
- 9- Specimen

Fig. 1 Test apparatus.

A) と±5 ton 電気油圧式試験機（試験機B）で、繰返し応力を与えた場合、前者では応力振幅に応じて試験片の振動幅が異なるが、後者ではいつも静止状態である。両試験機を使用したときの試験条件を示すと Table 1 のようになる。

供試材料は流体機械の要素などにも多用されている一般構造用炭素鋼 SS 41 と、これよりも機械的性質に優れるが切欠き感受性の高い高張力鋼 HT 60 で、これらの化学成分を Table 2 に、機械的性質を Table 3 に示す。試験片⑨の形状・寸法は、Fig. 2 に示すように疲労試験機により異なり、平行部の寸法がディスク径（直径 18 mm）よりも大きい 20 mm の場合と小さい 10 mm の場合の2種類である。これらの試験片は所定の形状・寸法に機械加工し、表面をエメリー紙 #1500 で仕上げ、バフ研磨したのち、SS 41 については 600°C 30 分の真空焼きなましを行った。HT 60 は未処理のまま使用した。ディスクには耐浸食性に優れたステンレス鋼 (SUS 304) を用いたが、長時間使用すると浸食されるので、新しい試験片を取付けるごとに新品と交換した。

試験液は腐食の影響の少ないイオン交換水（比抵抗 $5 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ 以上）で、電子恒温装置との間を流速 2.8 l/min で循環させて液温を $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ に保った。

試験片とディスクのすきま h の設定は、ディスク面と試験片軸が一致するように、かつ試験面とディスク面が平行になるようにあらかじめ試験機を設定しているので、ディスク移動用ハンドルを静かに回し、試験片とディスクが接触しランプが点灯した点をゼロと定め、これよりダイヤルゲージの読みによって所定のすきまになるようにハンドルを操作してディスクを持ち上げる。またディスクは液面より 3~4 mm の深さに浸漬するように水槽にせきを設けて液面を調節した。

3. 試験結果および考察

所定時間浸食試験を行うと、試験片表面にはディスクに対応した範囲に浸食が発生する。Fig. 3 は SS 41 試

Table 1 Test conditions under machine A or machine B.

	Test condition I	Test condition II
Fatigue test machine	Machine A	Machine B
Mechanism of fatigue machine	Cam	Electro-servo
Width of specimen at the center	20 mm	10 mm
Frequency of stress amplitude	10 Hz	5 Hz
Resonance frequency of oscillator	22.1 kHz	14.5 kHz
Double amplitude of disc, A_0	30 μm	50 μm
Distance between disc and specimen, h	0.5, 1.0, 1.5 mm	0.5 mm

Table 2 Chemical compositions of specimens.

Material	C	Si	Mn	P	S
SS 41	0.13	0.026	0.44	0.012	0.026
HT 60	0.09	0.27	1.43	0.015	0.004

Table 3 Mechanical properties of specimens.

Material	σ_s (kgf/mm ²)	σ_B (kgf/mm ²)	δ (%)	Hv
SS 41	31.4	44.3	41	164
HT 60	50	60	28	258

Fig. 2 Shape and dimensions of specimen.

Fig. 3 Example of eroded surface and roughness.

試験片の浸食状態とその浸食面を軸方向に表面あらさ計で測定した表面形状の一例である。試験片の幅がディスク径よりも大きい場合は写真のように円形になるが、小さい場合は円形の上下両側が切り取られたような形状になる。浸食円直径はすきま h 及びディスクの振幅 A_0 によって変化する⁹⁾が、本試験の場合ディスク径よりもやや小さくなる程度である。

3.1 静応力の影響

一例として、試験片とディスクのすきまを $h=0.5$ mm に設定して、全振幅 $A_0=30$ μ m で、付加応力 $\sigma/\sigma_s=+0.5, 0, -0.5$ の静応力を付加したときの試験片の重量減少量及び重量減少率曲線を Fig. 4 に示す。浸食の進展は引張り応力や圧縮応力が作用した場合も無応力の場合とほぼ同じような過程を経て進行する。すなわち、重量減少をほとんど示さない潜伏期から重量減少率が急速に

Fig. 4 Weight loss and weight loss rate of SS 41 tested by machine A.

Fig. 5 Effects of applied static stress on cumulative weight loss during 7 hours from the beginning of the test for SS 41 and HT 60 (machine A) and on weight loss rate during the stable period for SS 41 (machine B).

増加する増加期、重量減少率がほぼ一定となる定常期のような過程が付加応力に関係なく認められる。潜伏期で付加応力による差が見いだされたという報告^{3), 7), 8)}もあるが、本実験では潜伏期及び増加期で付加応力による重量減少率の差を見いだすことは困難である。しかし定常期では付加応力による重量減少率の差が明確に認められる。

Fig. 5 は試験機 A で試験開始から 7 時間の間に生じた

全浸食量と付加応力の関係及び試験機Bによる定常期の重量減少率と付加応力の関係を示したものである。浸食量の付加応力による影響はすきま h が大きいときも h が小さいときも減少する。これは、すきまが大きいと浸食エネルギーが小さくなり、浸食そのものが少なくなるため、付加応力が大きく変化しても浸食量の絶対量に現われる効果は小さくなるためと考えられる。一方、すきまを小さくして浸食量を増大させると、浸食エネルギーに付加される付加応力の割合が小さくなるので、この場合も付加応力による著しい変化は示さないものと考えられる。結局、浸食に及ぼす付加応力の影響は適度のキャピテーション・インテンシティのときに一層顕著になることが考えられる。図では $h=1.0\text{ mm}$ の場合に付加応力の影響は最も著しく現われるが、その場合でも緒言でふれたような引張り応力は浸食を促進し、圧縮応力は減少させるという単純な変化を示さない。引張りあるいは圧縮の付加応力が作用するといった浸食量は減少してから増加してピークを示し、その後再び減少する。同様な結果は試験機Bを用いて試験片幅を半分の 10 mm にした場合にもみられる。この場合は定常期の重量減少率で示しているが、全重量減少量で示した場合と全く同様な傾向が認められる。しかし、SS41 の $h=1.5\text{ mm}$ と HT 60 の結果は実験点が少ないので同じような傾向を示すかどうかかわからない。そのため、とりあえず二点鎖線の直線で結んだが、決して直線関係を推定しているのではない。SS41 の $h=1.5\text{ mm}$ では同じような傾向を示しても浸食量が少ないので変化は小さくなることは考えられる。HT 60 では後述の繰返し応力が付加した場合の結果などと総合するとやはり SS41 と同様な変化が推察される。

Fig. 6 Effects of stress amplitude on weight loss rate under alternating stress for SS 41 and HT 60.

3.2 繰返し応力の影響

試験機Bで、SS41 と HT 60 の試験片に 5 Hz で両振り引張り圧縮応力を付加したときの定常期の重量減少率 w と応力振幅 σ_a の関係を Fig. 6 に示す。両材料とも応力振幅の増加による浸食量の変化は静応力の場合と同じ傾向を示し、応力振幅の増大にともなって w は減少し、極小値を示したのち増加して最大値を示し、再び減少する。

3.3 考察

Fig. 5, 6 の縦軸を応力付加時の浸食量または浸食率の無応力時の浸食量または浸食率に対する比 $\Delta W = \{(W - W_0)/W_0\} \times 100 (\%)$, $\Delta w = \{(w - w_0)/w_0\} \times 100 (\%)$, 横軸を付加応力と降伏応力の比 σ/σ_s でもって整理すると, $h=0.5\text{ mm}$ の場合は Fig. 7 のようになる。引張り静応力が作用した場合も圧縮静応力が作用した場合も付加応力に対して同様な変化を示し、ちょうど無応力を軸とした線対称のような関係になるが、全般に圧縮応力よりも引張り応力のほうが ΔW , Δw の変化が大きく現われる。また繰返し応力が作用した場合も静応力の場合と同じような変化を示すが、 Δw の変化幅は引張り静応力の場合よりもやや小さい。しかし、HT 60 では浸食量は同じ試験条件の SS41 に比べて約半分であるが、付加応力に対する影響は2倍程度大きく現われている。

また Fig. 7 で引張り静応力が $\sigma/\sigma_s = 0.3 \sim 0.8$, 繰返し応力が $\sigma_a/\sigma_s = 0.2 \sim 0.4$ の範囲で無応力の場合よりも浸食量が増加しているが、増加量はわずかで最大でも 10% 以下である。一般には付加応力は浸食を増大させるよりも抑制する効果のほうが大きいと考えられ、これまでの報告^{1~4)}と非常に異なっている。

このような浸食の挙動を考察するために、簡単な応力解析を試みた。すなわち、付加応力の作用する試験面に

Fig. 7 Effect of applied stress on weight loss rate.

衝撃圧が作用する単純な模型として、表面と平行に外部応力が作用する二次元半無限板に集中荷重 P がある傾き α をもって作用する場合、集中荷重点近傍に生ずる降伏域は引張り応力の増加とともに内部深く拡大され、荷重点から降伏域の最先端点 A までの距離 r_A は増加すると同時に、その方向は次第に垂直方向に近づく。一方圧縮応力によっても降伏域は拡大されるが、扁平化するので、 r_A は増加してもその傾きは水平方向に近づく(図7)。もし降伏域にき裂が生じると仮定すると、引張り付加応力によって垂直方向に長いき裂が生じやすくな

Table 4 Crack length and direction of cracks at the cross section of eroded surface for SS 41 (machine A, $A_0=30\ \mu\text{m}$, $h=0.5\ \text{mm}$).

Applied stress σ/σ_S	-0.5	0	+0.5
Weight loss rate during stable period (mg/h)	7.5	8.1	9.0
Number of cracks longer than $5\ \mu\text{m}$	90	108	122
Averaged length of cracks longer than $5\ \mu\text{m}$ (μm)	8.7	9.5	11.9
Ratio of cracks initiated at the bottom of pits to total number of cracks* (%)	42.2	50.9	54.9
Ratio of cracks propagated perpendicular to the surface to total number of cracks* (%)	21.1	38.0	46.7

* means total number of cracks longer than $5\ \mu\text{m}$.

Table 5 Crack length and direction of cracks at the cross section of eroded surface for HT 60 (machine A, $A_0=30\ \mu\text{m}$, $h=0.5\ \text{mm}$).

Applied stress σ/σ_S	-0.5	0	+0.5
Weight loss rate during stable period (mg/h)	16.5	16.5	19.4
Number of cracks longer than $5\ \mu\text{m}$	359	268	357
Number of cracks longer than $10\ \mu\text{m}$	37	36	57
Averaged length of cracks longer than $10\ \mu\text{m}$	22.7	21.3	22.9
Mean depth of penetration (μm)	51.3	50.1	56.0
Mean distance to the origin of the crack from the original surface (μm)	48.2	73.1	84.2
Ratio of cracks initiated at the bottom of pits to total number of cracks* (%)	17.1	66.7	80.7
Ratio of cracks propagated perpendicular to the surface to total number of cracks* (%)	56.3	75.0	86.0

* means total number of cracks longer than $10\ \mu\text{m}$.

り、圧縮付加応力によって表面に傾きをもったき裂が生じやすいことが考えられる。

Table 4 は SS 41, Table 5 は HT 60 で付加応力 $\sigma/\sigma_S = +0.5, 0, -0.5$ で浸食試験したときの試験終了後の浸食断面(付加応力に垂直断面)でき裂状態を観察した結果である。また観察の一例を Fig. 8 に示す。SS 41, HT60 とともに引張り応力下では長いき裂が多く、しかも平均浸食深さよりも深いピット底から垂直方向に延びているき裂の割合が多い。その反面、圧縮応力下ではき裂長さは無応力の場合とほとんど変わらないが、平均浸食深さよりも浅い浸食壁面に発生し、表面に対して傾きをもって進展する場合が多くなっている。

Fig. 9 は SS 41, Fig. 10 は HT 60 に付加応力 $\sigma/\sigma_S = +0.5, -0.5$ が作用したときの定常期の浸食粉の大きさの頻度分布を求め、浸食粉を球形とみなして重量に換算したときの重量頻度分布である。浸食粉をすべて回収することは不可能であるので、図より直接浸食量の大小を比較することはできないが、引張り応力が作用するほうが大きい浸食粉が脱落し、重量減少量にも比較的大きい影響を与えていることがわかる。

これらの観察結果、および外力が作用するとき表面のみかけの硬さが変化すること⁹⁾を考慮すると、引張り付

Cracks propagating perpendicular to the surface ($\sigma/\sigma_S=0.5$).

Cracks propagating diagonally to the surface ($\sigma/\sigma_S=-0.5$).

Fig. 8 Examples of erosion cracks observed at the cross section of eroded surface.

Fig. 9 Distribution of erosion particles ejected into the liquid during the stable period for SS 41 (machine A).

Fig. 10 Distribution of erosion particles ejected into the liquid during the stable period for HT 60 (machine A).

加応力のもとではき裂は生じやすくなるが、発生したき裂は垂直方向に進展しやすくなるので、お互いに連結しにくくなり、浸食粉は形成されにくくなる。その反面、個々の浸食粉の形状は大きくなるので、引張り付加応力に対して Fig. 7 のような挙動を示しながら浸食量は減少するものと考えられる。また圧縮付加応力に対しては硬さの増加のためにき裂は生じにくくなるが、同時にき裂は傾いて生じるようになり、浸食粉は形成されやすくなる。しかし個々の浸食粉の形状は小さくなるので、圧縮付加応力に対しても Fig. 7 のような挙動を示しながら浸食量は減少するものと考えられる。

4. 結 論

キャビテーション・エロージョンに及ぼす外部付加応力の影響について考察した結果、次のような結論が得ら

れた。

(1) 外部付加応力の影響は浸食エネルギーが小さいと浸食量そのものが小さいために現われにくくなる。また浸食エネルギーが大きいと付加応力の割合が小さくなるために現われにくくなるので、適度のキャビテーション・インテンシティのときに最も顕著に現われる。

(2) 引張りあるいは圧縮の静応力を付加した場合、また繰返し応力を付加した場合も応力レベルの増加とともに浸食率は減少し、極小値を示したのち、増加して極大値を示し、再び減少するような複雑な挙動を示す。しかし、一部の付加応力の範囲を除いて、引張り付加応力でも圧縮付加応力でも浸食は抑制される。

(3) 付加応力が作用した場合に浸食が抑制されるのは、引張りでは浸食き裂が垂直方向に進展しやすくなって浸食粉が形成されにくくなるためで、圧縮ではき裂発生が抑制されるほか、浸食き裂が傾斜して小さい浸食粉を形成するようになるためと考えられる。

(4) 極大値を示す応力レベル付近で無応力の場合よりも浸食量が増加する場合があるが、本研究ではせいぜい 10% 以下である。

(Received January 14, 1982)

付 録

定常期の浸食面の凹凸が大きいことを考慮すると、気泡崩壊圧は浸食面に対してある傾きをもった集中荷重とみなすことができる。そこで Fig. a のごとく半無限板表面に傾き角 α で集中荷重 P が作用する場合について考える。このとき応力成分は

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{rr} &= -\frac{2P}{\pi} \cdot \frac{\cos(\theta - \alpha)}{r} \\ \sigma_{\theta\theta} &= 0 \\ \sigma_{r\theta} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

となり、直角座標系に変換して

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_{rr} \cos^2 \theta = -\frac{2P \cos(\theta - \alpha) \cos^2 \theta}{\pi r} \\ \sigma_y &= \sigma_{rr} \sin^2 \theta = -\frac{2P \cos(\theta - \alpha) \sin^2 \theta}{\pi r} \\ \tau_{xy} &= \sigma_{rr} \sin \theta \cdot \cos \theta = -\frac{2P \cos(\theta - \alpha) \sin \theta \cdot \cos \theta}{\pi r} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Fig. a

Fig. b

Fig. c

を得る。

この半無限板の y 軸方向に $\sigma_0 = -n \cdot 2P/\pi$ なる静応力が同時に作用する場合を考えると、(2) 式の σ_y は

$$\sigma_y' = -\frac{2P}{\pi} \left(\frac{\cos(\theta - \alpha) \sin^2 \theta}{r} + n \right) \quad (3)$$

となる。いま最大せん断応力説に従って部材に降伏が生ずるものと考えたと

$$|\sigma_1 - \sigma_2| = \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y'}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2} \equiv \sigma_k \quad (4)$$

Fig. d

なる関係式が得られる。 σ_k は単純応力下で降伏が生じたときの主応力の値である。 $\sigma_k = P$ と考えて降伏域を図示すると Fig. b, c, d のようになる。降伏域は負荷 P の傾斜角によって形状が異なりと同時に引張り付加応力の増加に伴って次第に垂直方向に広がり、圧縮付加応力の増加に伴って次第に水平方向に広がる。

文 献

- 1) F. G. Hammitt & D. J. Kemppainen: Rept. UMICH 01357-16T (1970).
- 2) K. K. Shal'nev, R. D. Stepanov & S. P. Kozyrev: *Soviet Physics—Doklady*, **11**, 822 (1977).
- 3) D. J. Kemppainen: Rept. UMICH 01357-7T (1969).
- 4) P. K. Palhan: *Wear*, **45**, 151 (1977).
- 5) 岡田庸敬, 河崎壽三: 機論, **40**, 2428 (1974).
- 6) 岡田庸敬, 西村喜之: 福井大学工学部研究報告, **19**, 19 (1970).
- 7) M. Matsumura, S. Okumoto & Y. Saga: *Werkst u. Korro.*, **30**, 492 (1979).
- 8) F. E. Jesnitzer, H. Louis & T. T. Tai: *Arch. Eisenhüttenwes*, **52**, 43 (1981).
- 9) 平 修二, 松木健次, 三木武司: 材料, **16**, 1027 (1966).