キャビテーション・エロージョン面の形成と進展*

岡田 庸敬^{*1}, 岩井 善郎^{*1}, 福田 康夫^{*2}

Formation and Progression of Cavitation-Erosion Surface

Tsunenori OKADA, Yoshiro IWAI and Yasuo FUKUDA

Vibratory cavitation erosion tests of carbon steel were conducted using two half-test-pieces in order to directly observe the growth processes of eroded holes on the cross section. The profiles of the eroded surfaces were digitized by tracing with a digitizer and were subsequently analyzed by a microcomputer. It is found that the surface is not uniformly eroded inward, and large holes are formed through a repeated cycle of rapid erosion and rest. This is because a large number of eroded cracks are generated and propagate further inward on the ferrite structure, resulting in the detachment of large particles.

Key Words: Cavitation, Erosion, Cavitation Erosion, Iron and Steel, Shape Measurement, Surface Roughness, Eroded Surface, Eroded Hole, Erosion Rate

1. 緒 言

炭素鋼に発生するキャビテーション・エロージョンでは, 初期には気泡崩壊圧により衝撃的に小さなピットが発生するが, それと並行して表面で塑性変形が繰返されてすべり線が観察されるようになる。さらにき裂の発生, 成長, 合体が生じて大部分が疲労的な機構で浸食粉の脱落が始まる。その様子を著者の一人らは走査電子顕微鏡を用いて明らかにした⁽¹⁾が, 図1に示すように, 軟鋼のオープンビーカ法による磁わい振動浸食試験を長時間続けた浸食面を見ると, 比較的平滑な面にたこ壺状の大きな浸食穴が点在する特徴的な浸食面が形成されている⁽²⁾⁽³⁾。浸食穴の縁はひずみ硬化している上に多軸の応力が生じて大きな塊で脆性的に脱離する⁽⁴⁾と言われているが, 浸食初期の疲労破壊的に進行する浸食面の形状から図1に示すような局所的な大きな浸食穴の形成は想像もできない事柄であり, どのような過程を経て, またどのような機構でこのようなたこ壺状の浸食面に変遷するのか, 材料の組織や性質との関連性も含めてまったく明らかにされて

いない。

本研究では, 低炭素鋼に相当するSS41鋼と亜共析鋼であるS45C鋼の試験片を, 浸食断面の同一場所の変遷を連続的に観察できるように半割したのち組合せて, 磁わい振動法による長時間の浸食試験を行い, 浸食面の形成とその進行過程を明らかにした。また組織やき裂の発生進展との関連性についても考察した。

図1 S15C鋼の浸食面と断面の写真⁽²⁾
(イオン交換水中, 振幅 $A=40\mu\text{m}$, 液温 $t=298\text{K}$)

* 原稿受付 平成5年5月12日。

^{*1} 正員, 福井大学工学部 (〒910 福井市文京 3-9-1)。

^{*2} 住友金属工業(株) (〒541 大阪市中央区北浜 4-5-33)。

2. 試験方法

2.1 浸食試験 浸食試験は、対向二面形式の磁わい振動法により行った。試験機の増幅ホーンの先端には耐エロージョン性に優れたステンレス鋼のディスク(直径 18 mm)をねじ込んで取付けて振動させた。振動子の共振周波数は 14.5 kHz で、全振幅 A (peak to peak) は 40 μm と 60 μm に設定した。浸食試験片は直径 30 mm、厚さ 7 mm の円板を半割にして、これを図 2 のようなジグを用いて元の円板になるように締付け、ディスクと対向させた試験面にエロージョンを発生させた。ディスクと半割試験片のすきま h は 1 mm である。供試材料は低炭素鋼に相当する SS41 構造用鋼と亜共析鋼の S 45 C 炭素鋼である。化学成分と機械的性質を表 1 に示す。試験片は機械加工した後、試験面を #1200 エメリー紙で研磨し、パフ仕上げした。その後 600°C、30 分間真空焼なましした。試験液は腐食の影響を避けるためにイオン交換水を用いた。液温 t

表 1 供試材料の化学成分 (wt.%) および機械的性質

	C	Si	Mn	P	S	σ_s (MPa)	HV	Grain size (μm)
SS41	0.18	0.15	0.58	0.035	0.032	434	170	24.6
S45C	0.46	0.27	0.76	0.011	0.021	605	202	17.1

図 2 半割試験片および固定ジグ

図 3 断面写真と CRT 画面上に描いた断面形状

は電子恒温装置との間を循環させることによって 298 ± 1 K (25 $\pm 1^\circ\text{C}$) に保持した。浸食量は所定時間ごとに試験片をジグから取り外し、精密天秤(感度 0.01 mg)で質量減少量を測定し、密度で除して体積減少量で示した。

2.2 浸食面形状の数値化 浸食面のそれぞれの位置の浸食速度を解析するために、半割試験片の中心から半径方向に 5 mm の領域の断面を光学顕微鏡で写真撮影した。そして断面形状をデジタイザでなぞり、マイクロコンピュータを用いて数値データ化した。幅方向および高さ方向の分割距離(標準化長さ)は 4.2 μm である。浸食穴がたこ壺状になって幅方向の座標に対して深さ方向に複数個の計測点が存在する場合は最も深い点を選んだ。浸食面の処女面からの変化を正確に読取るためには、各計測時点での浸食面の断面形状を正確に重ね合わせ、また測定の開始位置を一致させることが重要である。そのために図 3 に示すように断面对角線長さが約 60 μm のビッカース圧痕を幅方向に 500 μm 間隔でつけて基準点とし、隣合うビッカース圧痕の中心を連ねた水平線を重ね合わせることで一致させた。また試験片の中心に近い圧痕の中心をとる垂線と交わる浸食面の交点を数値データの開始点とし、半径方向に分割して数値データ化した。図 3 は断面写真と、その断面形状を CRT 画面上に描いた一例である。断面の形状を非常に忠実に画いているのがわかる。

3. 実験結果および考察

3.1 SS41 鋼の浸食 図 4 はイオン交換水中で、ディスクと試験片のすきま $h=1$ mm、液温 $t=298$ K、ディスクの振幅 $A=40$ μm または $A=60$ μm で SS41 鋼の浸食試験を行ったときの体積減少量曲線と単位時間当たりの体積減少量(減少率)曲線である。浸食は、初期の潜伏期、体積減少率が急速に増加する増加期、

図 4 体積減少量曲線および体積減少率曲線

最大値を示した後次第に減衰するような進展過程を示している。半割にしていない試験片でも同様の浸食試験を行ったが、体積減少量曲線はまったく同じで半割の影響は生じていない。

表2は2章で述べた測定システムを用いて中心から約5mmの浸食領域の断面形状を1200点の座標に数値化したデータから、各計測位置での深さ方向の変化量を計算し、単位時間当たりの浸食深さ(浸食速度)の分布を求めたものである。振幅40 μm では、12時間後と20時間後に、また振幅60 μm では、9.3時間後と12時間後に異常に浸食速度の大きい測定点が見れる。すなわち浸食は一様な速度で進行するのではなく、ある時期にある部分が、平均浸食速度(MDPR)の数倍の速度で浸食されていることがわかる。

図5はデジタイザで記録した浸食断面の形状曲線である。振幅40 μm と60 μm で浸食量のほぼ同じになる時点の形状を示している。浸食の初期は万遍なく一様に浸食されているが、振幅40 μm では12時間後から、60 μm では9.3時間後から150 μm 程度の浸食穴がと

ころどころに形成されて次第に拡大している。図5の観察領域から大きな浸食穴を形成した特徴的な浸食面部分をA, B, C, D, E, Fのように、また比較的滑らかな領域をa, bのように選んで、その部分の浸食の進展を詳細に検討した。いずれも観察幅は250 μm である。図6は経時変化の一例で、斜線部分がその時間内に脱落した浸食部分である。一点鎖線は処女面の位置を示している。また、図7に処女面の基準線と各計測時点での浸食面形状で囲まれた面積を数値データから計算して浸食による脱落断面積を求め、浸食時間に伴う変化を示した。振幅40 μm のA, B, C部では、10時間まで一様に浸食され、脱落断面積はゆるやかに増加するが、10時間後に深さ方向に大きく浸食され、脱落断面積も急増する。その後はあまり浸食されないが、C部は18時間後に再び幅方向に大きく浸食され、

表2 1200箇所の浸食速度分布(SS41鋼)

(a) $A=40\mu\text{m}$

	Erosion rate ($\mu\text{m}/\text{h}$)						
	0 ~9	10 ~19	20 ~29	30 ~39	40 ~49	50 ~59	60 ~69
~ 2h	1087	109	4				
~ 5h	1052	148					
~ 8h	574	569	57				
~10h	963	195	32	10			
~12h	682	243	130	76	45	16	8
~14h	881	98	82	9	14	6	
~16h	1104	69	16	11			
~18h	953	124	86	27	10		
~20h	858	159	114	31	22	11	5
~22h	1038	120	41	1			
~24h	1141	54	5				

(b) $A=60\mu\text{m}$

	Erosion rate ($\mu\text{m}/\text{h}$)					
	0 ~19	20 ~39	40 ~59	60 ~79	80 ~99	100 ~
~ 1.3h	1185	5				
~ 3.3h	1179	21				
~ 5.3h	1160	40				
~ 6.7h	1060	99	41			
~ 8.0h	902	286	12			
~ 9.3h	927	216	49	3	5	
~10.7h	924	189	83	4		
~12.0h	1067	86	22	4	15	6
~13.3h	1092	79	16	13		
~14.7h	1107	71	14	8

図5 SS41鋼の浸食断面形状

図6 SS41鋼の浸食断面の経時変化($A=40\mu\text{m}$)

脱落断面積も急増する。振幅 $60\ \mu\text{m}$ の場合も、D, E, F 部は A, B, C 部と同様に、8 時間まで一様に浸食され脱落断面積もゆるやかに増加するが、D 部は 9.3 時間後に、E, F 部は 8 時間後に深さ方向に大きく浸食され、脱落面積も急増する。その後一時進展は止まる

(a) $A=40\ \mu\text{m}$ (b) $A=60\ \mu\text{m}$

図 7 SS41 鋼の浸食断面積の変化

図 8 SS41 鋼の浸食断面 ($A=60\ \mu\text{m}$)

が、F 部は 10.7 時間後に再び深さ方向に大きく浸食され、脱落断面積も急増する。一方 a, b 部はほぼ一様に浸食され、脱落断面積もゆるやかに増加している。浸食の進展は場所によって異なりまったく不規則的である。しかし、図 8 に示すようにき裂個数が少なくても長いき裂が生じている部分では深さ方向および幅方向に浸食が拡大して、大きな浸食穴を形成している。すなわち局部的な大きな破壊は、十分成長した浸食き裂によって引き起こされ、脱落が起こった後はき裂が再び成長するまで停滞が起こり、き裂が十分成長したのちに次の大きな破壊が起こる。その結果として破壊と停滞を繰返しながら大きな浸食穴を形成していくことが考えられる。

3・2 金属組織と浸食速度 それぞれの計測時点で浸食断面に観察される浸食き裂が金属組織のどの部分に発生しているかを明らかにするために、試験前の

表 3 浸食き裂の発生箇所と発生個数 (SS41 鋼)

(a) $A=40\ \mu\text{m}$

	Crack length (μm)			
	0~5	6~10	11~15	16~20
Ferrite (F)	9	4	1	0
Pearlite (P)	1	0	0	0
Boundary of F and F	2	0	0	0
Boundary of F and P	3	1	0	0

	Crack length (μm)			
	0~5	6~10	11~15	16~20
Ferrite (F)	11	5	1	0
Pearlite (P)	1	1	0	0
Boundary of F and F	3	2	0	0
Boundary of F and P	3	1	0	0

	Crack length (μm)			
	0~5	6~10	11~15	16~20
Ferrite (F)	14	7	3	0
Pearlite (P)	2	1	0	0
Boundary of F and F	3	2	0	0
Boundary of F and P	3	3	2	0

(b) $A=60\ \mu\text{m}$

	Crack length (μm)			
	0~5	6~10	11~15	16~20
Ferrite (F)	9	5	2	0
Pearlite (P)	2	0	0	0
Boundary of F and F	3	0	1	0
Boundary of F and P	2	1	0	0

	Crack length (μm)			
	0~5	6~10	11~15	16~20
Ferrite (F)	9	11	3	1
Pearlite (P)	3	0	0	0
Boundary of F and F	1	3	1	0
Boundary of F and P	2	2	1	0

	Crack length (μm)			
	0~5	6~10	11~15	16~20
Ferrite (F)	8	15	6	1
Pearlite (P)	3	2	0	0
Boundary of F and F	2	4	1	0
Boundary of F and P	3	4	0	0

断面の金属組織と対応させた。表3に示すように、それぞれの計測時点におけるき裂の発生場所および個数を比較すると、振幅 $40\text{ }\mu\text{m}$ 、振幅 $60\text{ }\mu\text{m}$ とともにフェライト粒内に多数のき裂が発生するが、パーライト粒内ではき裂は発生しにくい。またフェライト粒内ではき裂個数、き裂長さともに試験時間に伴って増加するが、パーライト粒内ではほとんど増加しない。すなわちフェライト粒内に選択的にき裂が進展し浸食粉を脱落させて大きな浸食穴を形成しているものと考えられる。そこで図6の経時変化に試験前の断面の金属組織を対応させて浸食断面の脱落部分に占めるパーライト相の割合と脱落速度の関係を求めた。パーライト相の面積は画像解析装置より求めた。図9はその結果で、振幅 $40\text{ }\mu\text{m}$ 、 $60\text{ }\mu\text{m}$ いずれもパーライト相の割合が小さくなると脱落速度が急増している。パーライト相が多数介在している部分ではき裂は発生、成長しにくく脱落が起こりにくいが、パーライト相の割合が小さい部分ではき裂が十分に成長して大きな脱落が起きている。また振幅 $60\text{ }\mu\text{m}$ では $40\text{ }\mu\text{m}$ に比べて大きな衝撃力が多数発生するのでパーライト相が多いところでもき裂が発生、成長しやすい。したがって脱落速度は振幅 $40\text{ }\mu\text{m}$ に比べて全般的に大きくなっている。

(a) $A=40\text{ }\mu\text{m}$ (b) $A=60\text{ }\mu\text{m}$

図9 パーライト相の割合と浸食速度

結局、低炭素鋼では、初期の浸食表面にほぼ一様に発生した短いき裂のなかで、パーライト相の割合が少ない場所では、き裂はフェライト粒内へ大きく成長するので、その場所を起点として大きな浸食粉が脱落する。一方、パーライト相が多く介在する場所ではフェライト粒子にき裂が発生しても、周囲のパーライト相によってフェライト粒子が拘束されるので、き裂の成長速度は小さい。またパーライト相内では層状フェライトは層状セメンタイトによって拘束されるのでき裂が発生しにくい。そのためにこのような部分では脱落速度は小さくなり平滑な面が持続される。このようにして形成された浸食穴で拘束されたキャビテーション気泡群が、集中的に崩壊すると穴の底に長いき裂が発生する。とくにこの穴底にフェライト粒子が存在しているとますます深い浸食穴に成長する。その結果、大きなこ壺状の浸食穴が点在する浸食面が形成されていくものと考えられる。

3.3 S45C 鋼の浸食 ほとんどがパーライト組織である S45C 炭素鋼の浸食試験をイオン交換水中で、ディスクと試験片のすきま $h=1\text{ mm}$ 、液温 $t=298\text{ K}$ 、振幅 $A=60\text{ }\mu\text{m}$ で行った。体積減少量曲線および体積減少率曲線を図10に示す。また図中の一点鎖線と二点鎖線は、図4の振幅 $60\text{ }\mu\text{m}$ で浸食試験を行った SS41 鋼の体積減少量曲線と体積減少率曲線である。S45C 鋼の体積減少率曲線は、SS41 鋼と異なり、潜伏期、増加期を経た後最大減少率を示す定常期が持続し、その後徐々に減衰している。これは後述のように浸食面が比較的なめらかで、フィクストキャビテーションが発生しにくいためと考えられる。

SS41 鋼の場合と同様に浸食面形状の数値化したデータから中心より 480 点の座標点の深さ方向の変化量(浸食速度)を求めると、表4のようになる。SS41 鋼の場合と異なって平均浸食速度(MDPR)の数倍の速度で浸食されている座標点は見当たらない。図11はデジ

図10 体積減少量曲線および体積減少率曲線

表 4 480 箇所の浸食速度分布 (S45C 鋼)

	Erosion rate ($\mu\text{m/h}$)				
	0~4	5~9	10~14	15~19	20~24
~ 4h	480				
~ 8h	471	9			
~ 12h	392	81	7		
~ 16h	377	97	6		
~ 20h	233	201	46		
~ 24h	327	102	44	7	
~ 28h	292	148	36	4	
~ 32h	349	85	31	15

図 11 S45C 鋼の浸食断面形状

タイザで記録した浸食断面の 12, 20, 32 時間後の形状曲線である。SS41 鋼では 9.3 時間後に深さ $150\mu\text{m}$ 程度の浸食穴がところどころに形成されたが、S45C 鋼では 32 時間後でもところどころに小さな浸食穴が形成されるだけである。図 11 の観察領域から小さな浸食穴ができた浸食面の G, H 部と、比較的滑らかな c 部の浸食の進展を図 6 と同様に検討した。各場所の観察幅は $250\mu\text{m}$ である。図 12 に示すように、S45C 鋼の G, H 部は SS41 鋼の D, E, F 部のように急激に浸食されることはない。G 部は 16 時間以降また H 部は 20 時間以降、深さ方向に徐々に浸食が加速して脱落断面積もゆるやかに増加する。その結果、比較的小さな浸食穴を形成する。また c 部は a, b 部と同様に様に浸食されていく。そこで G, H, c 部の脱落速度とその脱落部分に占めるパーライト相の割合との関係を探ると図 13 のようになる。SS41 鋼のように大きく変化しないが、S45C 鋼でもパーライト相の割合が少ないところでは脱落速度が若干大きくなって、SS41 鋼の延長線上とは一致しない。長時間経過すると小さい浸食穴を形成してその周囲の浸食を若干加速していることが原因しているように思われる。

4. 結 言

半割試験片を用いて磁わい振動法による長時間浸食試験を行い、低炭素鋼に相当する SS41 鋼と亜共析鋼の S45C 鋼の浸食断面を連続観察して、たこ壺状の浸食面形成の原因を検討した。その結果次のようなことが明らかになった。

(1) SS41 鋼では最初表面は一様に浸食されるが、

図 12 S45C 鋼の浸食断面積の変化

図 13 パーライト相の割合と浸食速度

体積減少率が増加期から最大値に向かう頃から局部的に大きな破壊と停滞が繰返され、浸食面が次第にいびつになる。

(2) 局所的な大きな破壊はフェライト相に十分に成長した浸食き裂によって引き起こされる。脱落が起こった後き裂が再び成長するまで停滞し、き裂が十分成長したときに次の大きな破壊が起こる。パーライト相にはき裂は発生しにくいのでパーライト相の割合が大きいところでは大きな脱落は生じない。

(3) S45C 鋼では、パーライト相の割合が大きいためき裂が発生しにくく、また発生しても成長速度が遅いので、浸食はゆるやかである。そのためわずかな浸食速度の差が小さな浸食穴の点状の浸食面を形成する。

(4) 以上の結果から低炭素鋼では金属組織がたこ壺状の浸食面を形成する大きな原因の一つである。

文 献

- (1) 岡田・岩本・佐野, 機論, 43-365, (1977), 8.
- (2) Iwai, Y., ほか 3 名, *Cavitation 91*, FED. 116(1991), 119, ASME.
- (3) Plesset, M. S. and Devine, R. E., *Trans. ASME, J. Basic Eng.*, 88-4(1967), 691.