肉盛り材/母材境界部の
キャビテーション・エロージョン特性*服部 修次^{*1}, 岡田 庸敬^{*1}Cavitation Erosion of Welding Deposit Metal
and Base Metal Near Interface

Shuji HATTORI and Tsunenori OKADA

Cavitation erosion was studied for welding deposit metal and base metal in the area near the interface. The base metal was austenitic stainless steel and the deposit metals were five alloys: three nickel-base alloys, an iron-base alloy and a cobalt-base alloy. The erosion of welding deposit metal near the interface occurs similarly to that of the deposit metal itself. However, the erosion of the base metal is accelerated due to the softening in the heat-affected zone during the welding processing. Moreover, the selection of high erosion-resistance deposit metals is hazardous to the base metal near the interface, because the cavitation bubbles flow on the surface from the deposit metal to the roughened base metal.

Key Words: Cavitation Erosion, Welded Joint, Hardness, Welding Deposit Metal, Base Metal, Interface, Heat-Affected Zone, Cavitation Bubble

1. 緒 言

ポンプ、プロペラなどの流体機械の高速化に伴って、キャビテーション・エロージョンが深刻な問題になっている。肉盛りは、こうしたエロージョンを受けた部材を手軽に補修できることから非常に便利な手段であり、肉盛り材のキャビテーション・エロージョンに関する研究も二、三報告されている。AntonyとSilence⁽¹⁾は、ステライト6Bのキャビテーション・エロージョン試験を行い、ステライトは気泡崩壊圧を受けると面心立方晶からちゅう密六方晶に相変態するので優れた耐エロージョン性を示すことを報告している。また、Simoneauら⁽²⁾は、オーステナイト系ステンレス鋼のNiやCrの一部をCo, Mn, C, N, Siなどの元素で適量置き換えることによって積層欠陥エネルギーを小さくすると耐エロージョン性は著しく向上することを報告している。しかし、肉盛り補修はつねに母材との関連で考慮する必要があるが、どのような肉盛り材料でどのような範囲まで補修すればよいかはほとんどわからない状態である。もし選定を誤ると肉盛り材と母材の境界部がいつそう激しく浸食される恐れ

がある。

本研究では、オーステナイト系ステンレス鋼のキャビテーション・エロージョンの補修用に多用されているNi基合金、Fe基合金、Co基合金を肉盛りした場合、肉盛り材/母材境界部の母材の浸食特性について詳細に検討した。

2. 供試材料および試験方法

母材のSUS316ステンレス鋼および肉盛り材の化学成分を表1に示す。肉盛り材はNi基合金3種類、Niを20%、Crを約35%含むFe基合金、Crを約30%含むCo基合金の合計5種類を用いた。Ni-A材はJIS H 8303(自溶合金溶射)に規定されているMSF Ni 1材とほぼ同程度の硬さに調節された合金であるが、靱性はJIS規格材よりもかなり改善されている。Ni-B材はNi-A材よりも炭素を、Ni-C材はほう素とけい素を少量添加させることにより硬さを高めた肉盛り材である。Fe基合金のFeCr材は該当するJIS規格品はなく、Co基合金のST6材はAWS(アメリカ合衆国溶接協会)規格相当材である。表2は母材と肉盛り材の機械的性質、融点をカタログデータから引用して取りまとめたもので、肉盛り材料は高い引張強さを示すが、伸びはいずれも約2%以下で極めて小さい。

* 原稿受付 平成5年9月16日。

^{*1} 正員、福井大学工学部 (〒910 福井市文京 3-9-1)。

表 1 供試材料の化学成分 [Mass%]

(a) 母材(SUS 316)

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Fe
Austenitic stainless steel(SUS316)	0.04	0.60	0.95	0.031	0.002	17.0	10.5	2.18	Bal

(b) 肉盛り材

Material	Ni	Cr	B	Si	C	Fe	Co	Mo	W
Ni-base alloy									
Ni-A	Bal	15.0	0.6	5.0	0.3	5.0			2.0
Ni-B	Bal	10.6	0.4	5.24	0.84	2.64			2.02
Ni-C	Bal	18.1	0.87	6.70	0.28	5.24			1.24
Fe-base alloy									
FeCr	20.0	35.0		1.0	1.5	Bal		10.0	
Co-base alloy									
ST6		29.0		1.5	1.15		Bal		4.5

表 2 供試材料の機械的性質

(a) 母材

Material	Density (g/cm ³)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Melting temperature (°K)
Austenitic stainless steel(SUS316)	7.98	579	61	1683

(b) 肉盛り材

Material	Density (g/cm ³)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Melting temperature (°K)	
				Solidus	Liquidus
Ni-base alloy					
Ni-A	8.14	1046	2.04	1348	1508
Ni-B	8.10	957	1.36	1253	1513
Ni-C	8.09	946	0.85	1343	1513
Fe-base alloy					
FeCr	8.00	-	-	1523	1560
Co-base alloy					
ST6	8.12	966	0.66	1553	1633

表 3 肉盛り施工条件

Main arc current	130~140 A
Pilot arc current	20 A
Plasma gas flow rate	4 L/min
Shield gas flow rate	30 L/min
Powder gas flow rate	5 L/min
Powder supply rate	30 g/min
Gas	Argon

(a) 肉盛り材単体用 (b) 肉盛り材/母材境界用

図 1 試験片の形状寸法

肉盛りは、厚さ 19 mm の SUS 316 の板材を 150°C で予熱した上で、表 3 に示す条件で表面にそれぞれの肉盛り材の粉末をプラズマ溶解しながら所定の厚さになるまで何回も重ねて行った(多層盛り)。その後、肉盛り施工に伴う残留応力を除去するため、500°C 3 時間の焼ならし処理を施した。試験片は、図 1(a) に示す肉盛り材単体の試験用と、図 1(b) に示す肉盛り材/母材境界部試験用の 2 種類に機械加工した。その後、試験面を鏡面状に研磨して試験に供した。

キャビテーション・エロージョン試験には磁わい振動装置を用いて対向二面形式で試験した⁽³⁾。すなわち、増幅ホーンの先端に耐エロージョン性のよい直径 16 mm のステンレス鋼のディスクをねじ込んで取付けて振動させ、これと対向させて試験片をすきま 1 mm

隔てて静置し、試験面にエロージョンを発生させた。振動ディスクと試験片は電氣的に絶縁されている。振動子の共振周波数は 20 kHz で、ディスク端面の全振幅(peak to peak)は 50 μ m 一定とした。試験液はイオン交換水で、液温は恒温装置により 25 $\pm$ 1°C に保持した。浸食量は所定時間ごとに精密てんびん(感度 0.01 mg)で質量減少量を測定し、単位時間当たりの減少量、すなわち質量減少率を求めたが、表 2 の比重を用いて体積減少率に換算し、さらにディスクの面積で除して MDPR(平均浸食深さ速度)を求めて整理した。浸食面

形状はタリサーフ粗さ計を用いて測定した。

3. 実験結果および考察

3・1 肉盛り材のキャビテーション・エロージョン特性 肉盛り材/母材境界部のキャビテーション・エロージョン特性を検討するのに先立ち、図1(a)に示す形状の試験片を用いて肉盛り材のキャビテーション・エロージョン試験を行った。得られたMDPR曲線を図2に示す。Ni基合金のうちNi-A材のMDPRは4時間まで大きく増加して一定値になり、母材のステンレス鋼の70%近い値を示すが、これ以外の肉盛り材の定常期のMDPRは母材単体の約10%以下で、肉盛り材は極めて優れた耐エロージョン性を示している。

浸食過程の詳細は紙面の都合上省略するが、いずれのNi基合金の肉盛り材もNi₃SiとNi固溶体で構成される共晶部分から浸食が進行する。しかし、Ni基合金のNi-B材では、耐浸食性の悪い共晶組織のほかに硬さの高いCrを主体とした炭化物が、Ni-C材ではCrを主体とした硼化物が形成されるので、耐エロージョン性はNi-A材に比べて向上している。各肉盛り材の定常期のMDPRと硬さの一覧を表4に示す。ST6材では最初Coのマトリックス内に塑性変形が生じ、共晶組織との界面でき裂が発生して小さな脱落

粉を形成しながら浸食が進行するので0.0123 $\mu\text{m}/\text{h}$ の小さな値であるが、10時間以上になると多くの共晶組織が脱落してCoマトリックスも浸食されるようになるので、MDPRが大きくなって40時間頃から一定値になる。表中のST6の値は加速後の値を示している。また、ビッカース微小硬度計では圧痕が小さいために、組織の影響を受けて値が大きくばらついたので、ロックウェル硬度計(Cスケール)で測定した。表中には、参考のためにASTM(E140表2)に基づく換算表から求めたビッカース硬さも示してある。Ni基合金やFe基合金では硬さに応じた耐エロージョン性を示している。また、Co基合金では、硬さはNi-C材と同程度であるが、耐エロージョン性は3倍近く優れている。これはAntonyらの報告⁽¹⁾にもみられるように、キャビテーションを受けると面心立方晶からちゅう密

図2 母材と肉盛り材のMDPR曲線

表4 肉盛り材料のMDPRと硬さ

Material	MDPR ($\mu\text{m}/\text{h}$)	Rockwell hardness (HrC)	Vickers hardness (HV)
Ni-base alloy			
Ni-A	3.82	19.2	230
Ni-B	0.553	40.2	385
Ni-C	0.492	43.3	419
Fe-base alloy			
FeCr	0.304	40.2	394
Co-base alloy			
ST6	0.162	42.9	414

(a) SUS316

(b) Ni-B/SUS316

(c) Ni-C/SUS316

図3 肉盛り材/母材組合せ材の浸食面形状の変化

六方晶に相変態してかなりのエネルギーが吸収されるために耐エロージョン性が向上したものと考えられる。

3.2 肉盛り材/母材境界部のキャビテーション・エロージョン特性 図3は母材単体の場合と肉盛り材/母材組合せ材の浸食面形状の変化を示したものである。図(a)は母材単体の浸食面で、3時間後にはディスク端面の影響を受けている周辺部を除き全面が一樣に浸食されて $6\mu\text{m}$ 程度の凹凸が生じている。5時間後には平均浸食深さが深くなると同時に表面の凹凸

図4 10時間後の肉盛り材の浸食面形状

もさらに激しくなって $12\mu\text{m}$ 程度になる。母材/肉盛り材組合せ材のNi-B/母材試験片では、母材部は図(a)に示す母材試験片の浸食面の凹凸よりも若干大きくなっている。Ni-C/母材試験片では、図(a)に示す母材試験片に比べて3時間後でも凹凸は激しく、大きく浸食されている。5時間後になるとさらに激しく浸食され、凹凸は母材試験片の約3.5倍程度に大きくなる。このように肉盛り材の種類によって境界部の母材の耐浸食性が大きく左右される。

図4(a)は、肉盛り材/母材組合せ材の肉盛り部の10時間後の浸食面形状を測定したものである。なお、参考のために図4(b)には肉盛り材単体の場合の浸食面形状も示している。図2に示すMDPR曲線と対応してNi-A材は大きく浸食するが、他の肉盛り材の浸食は非常に小さく、特にCo基合金のST6材は1000倍程度の倍率では凹凸がほとんど検出されない。また、図(a)と図(b)を比較すると、多層盛りによるビードの影響のあったFeCr材を除いてほとんど変わらない。接合部近辺の肉盛り材の浸食は、母材と組合せることによる影響をほとんど受けていないようである。

母材部の耐浸食性を定量的に評価するために、組合せ材についても質量減少量を測定し、母材部のMDPRを求めた。すなわち、

$$\begin{aligned} & \text{(肉盛り材/母材組合せ材の質量減少率)} \\ &= \text{(肉盛り材単体の質量減少率)} \times 0.5 \\ &= \text{(肉盛り材/母材組合せ材の母材部の質量減少率)} \end{aligned}$$

から組合せ材母材部の質量減少率を求め、母材のSUS316の比重から体積減少率に換算し、ディスク面積の1/2で除してMDPRを求めた。図5はその結果で、Ni基合金で肉盛りした組合せ材について比較すると(図中○, ◎, ●印), Ni-C組合せ材のMDPRが

図5 肉盛り材/母材組合せ材の母材部のMDPR曲線

最も大きく、Ni-A 材、Ni-C 材の順に小さくなっていて、必ずしも肉盛り材料の硬さや化学成分だけに影響されていない。また、FeCr 材や ST 6 材では、母材部の浸食が Ni 基合金の場合を上回り、母材単体の 2 倍近い浸食を受けている。

図 6 は、各種の肉盛り材料単体の MDPR と肉盛り材/母材組合せ材の母材部の MDPR の関係を示したものである。ST 6 材、FeCr 材、Ni-C 材、Ni-B 材の順に、肉盛り材料の MDPR が大きくなるにつれて組合せ材母材部の MDPR が小さくなる傾向を示している。しかし、Ni-A 材は肉盛り材料の耐エロージョン性が悪く MDPR は極めて大きい値になるにもかかわらず、組合せ材母材部の耐エロージョン性はほとんど改善されていないので、全体としては組合せ材母材部の耐浸食性が肉盛り材料自体の耐エロージョン性だけではうまく評価できない。

3.3 肉盛り材/母材境界部の耐エロージョン性評価
肉盛り材/母材組合せ材における母材部の浸食速度は肉盛り材の種類によって大きく異なるが、こうした差異は肉盛り材の母材部への拡散や、肉盛り施工に伴う母材の軟化の影響などが考えられる。肉盛り材料の母

図 6 肉盛り材の MDPR と組合せ材母材部の MDPR の関係

図 7 表面加熱処理した SUS 316 の MDPR 曲線

材部への拡散状態については X 線マイクロアナライザによる元素分布を測定したが、拡散層の幅はどの成分元素でも最大 100 μm 程度である。いずれの肉盛り材/母材の組合せ材でも、図 3 に示すように境界からディスクの浸食範囲全面にわたって大きく浸食を受けているので、このような広範囲にわたって拡散層が大きく影響することはほとんど考えられない。

肉盛り施工に伴う母材の材質変化の影響を明らかにするために、表 3 と同一の施工条件であるが、粉末を供給しないままで表面を加熱処理した母材のキャビテーション・エロージョン試験を行った。この結果を図 7 に示す。表面加熱処理材の MDPR は 4 時間後までは非加熱材とほぼ同様に増加し、さらにそれ以後も増加し続けて 8 時間後に定常状態になる。この時点での MDPR は非加熱材の約 1.5 倍で、加熱処理の影響の大きいことがわかる。図 8 は加熱処理試験片の 5 時間後の浸食面形状で、図 3(a) に示す非加熱の母材試験片に比べると凹凸が大きくなっていて、むしろ図 3(c) に示す Ni-C 組合せ材の母材部の凹凸に近くなっている。

肉盛り施工に伴う母材部の軟化状態を調べるために、境界部から母材方向に 5 mm の位置の硬さを測定した。最初ビッカース微小硬度計を用いたが、圧痕の小さいビッカース硬さでは表面研磨による加工硬化層の影響を受けたのでロックウェル硬度計(C スケール)を用いて硬さを測定し、ビッカース硬さに換算した。肉盛り施工時には母材は肉盛り材料の融点近くまで加熱されているので、材料の融点(固相線温度と液相線

図 8 表面加熱処理した SUS 316 の浸食面形状 (5 時間後)

図 9 肉盛り材の融点と組合せ材母材部の硬さの関係

温度の平均値)とビッカース硬さの関係を求めてみると図9のように肉盛り時に温度が高くなった母材ほど軟化している様子がわかる。

材料のエロージョン抵抗(MDPRの逆数)は材料のもつ弾性ひずみエネルギー的な意味から HV^2/E (HV はビッカース硬さ, E は弾性定数)とよい相関関係にあることがこれまで数多く報告されている⁽⁴⁾。本研究の場合も同様な評価を試みた。図10はこの結果を示したもので、SUS 316 非加熱材と SUS 316 加熱処理材の結果は原点を通る直線上に位置している。しかし、組合せ材母材部のプロット点は Ni-A 組合せ材や Ni-B 組合せ材は直線上に位置していて母材部の軟化によって説明できるが、ST 6 組合せ材や FeCr 組合せ材は直線を下回り、エロージョン抵抗が低下している。

図11は、図10に示す曲線から大きく離れた傾向を示した FeCr 材や ST 6 材の10時間後の浸食面の形状である。肉盛り材はほとんど浸食されていないが、母材部は大きく浸食している。特に、肉盛り材/母材境界部近傍がやや深く浸食していて、対向二面形式の磁わ

い振動試験のような場合には、肉盛り部で崩壊しなかった気泡が母材部に流入して浸食を加速したためと考えられる。

こうした気泡の流入効果を評価するには、肉盛り材と母材の粗さの差をパラメータにすることも考えられるが、粗さは試験時間とともに大きく変化するので、ここでは両材料単体の定常期の MDPR の差で評価した。流入気泡による浸食の増加率 α を

$$\alpha = k(\text{MDPR}_{\text{母材}} - \text{MDPR}_{\text{肉盛り材}})$$

(k は定数, 本実験の場合 0.038)

で定義すると、気泡が流入しないとした場合のエロージョン抵抗は $(1+\alpha)$ 倍となるので、この補正係数を用いて整理しなおした結果を図12に示す。補正係数を用いた肉盛り材-母材組合せ材の母材部のエロージョン抵抗は HV^2/E とよい相関関係が得られる。

結局、キャビテーション気泡崩壊領域が肉盛り材/母材境界部に達するような場合、肉盛り材料は低融点でしかも母材との耐エロージョン性の差があまり大きくならないものを選定すると母材部の浸食の増加が軽減できるようである。

4. 結 言

本研究ではオーステナイト系ステンレス鋼 SUS 316 の母材に実際によく使用されている Ni 基合金, Fe-Ni 基合金, Co 基合金を肉盛りしたときの肉盛り材/母材境界部のキャビテーション・エロージョン試験を行い、次のような結論を得た。

(1) 肉盛り材/母材組合せ材の肉盛り部の浸食は、母材と組合せたことによる接合部近辺の影響はほとんど認められない。

(2) 肉盛り材/母材組合せ材の母材部は、肉盛り施工時の加熱の影響によって軟化するために耐エロー

図10 HV^2/E とエロージョン抵抗の関係 (組合せ材母材部)

図11 10時間後の肉盛り材/母材組合せ材の浸食面形状

図12 HV^2/E と修正エロージョン抵抗の関係 (組合せ材母材部)

ジョン性がかなり低下する。

(3) 耐エロージョン性に優れた肉盛り材を選定すると、いつまでも肉盛り部が滑らかであるので、肉盛り部の気泡が周辺の母材部に流入して母材の浸食をいっそう加速させる。

終わりに、本研究を遂行するに当たり、福田金属箔粉工業株式会社から奨学寄付金と試験片製作の援助を受けた。記して謝意を表す。また、実験には当時福井大学工学部機械系学科学生の佐久間和治君、石田憲明

君の協力を得たことを付記する。

文 献

- (1) Antony, K. C. and Silence, W. L., *5th Int. Conf. on Erosion by Liquid and Solid Impact*, (1979), 67-1.
- (2) Simoneau, R., ほか4名, *7th Int. Conf. on Erosion by Liquid and Solid Impact*, (1987), 32-1.
- (3) 岡田・服部, 機論, 58-552, A(1992), 1502.
- (4) Hobbs, J. M., *ASTM Spec. Tech. Publ.*, 408(1967), 159.