

技術論文

溶射皮膜のキャビテーション試験結果（その1）

Results of cavitation test on a coating film by thermal spraying



溶接溶射技術開発室
洲崎 真二
Shinji Suzaki

溶接溶射技術開発室長
宮崎 裕之
Hiroyuki Miyazaki

要 旨

水力発電部品はキャビテーション・エロージョンに曝される部品が多い。さらに特定の位置に部分的に発生する傾向にある。従来この部分には耐キャビテーション・エロージョンに優れたSUS300系のステンレスを溶接法で現地肉盛りする対策が取られて来たが、コストや現地施工に難点があり課題となっていた。この問題点に対し施工法として溶射法を、また溶射材料には自溶合金、ステライト等を選定しキャビテーション・エロージョンの確性試験を行ったところSUS304に比して、3倍以上の耐久性を有することが確認された。

Synopsis:

Many of the parts of equipment and machinery at a hydroelectric power station are exposed to cavitation and erosion, which tends to occur partly on the specific positions.

The mass cladding method using the stainless steel in series of SUS300, which is exceedingly resistant to cavitation and erosion, has been adopted on the sites as a conventional measure.

However, this method has some problems such as high cost and the difficulty of working operation on the sites.

To solve these problems described as above, thermal spraying of self-fluxing alloy, stellite etc. has been selected. It was verified that this spraying method improves more than three-times durability against cavitation and erosion compared with that of SUS304 (previous method).

1 緒言

水力機器に用いられる材料の特性としては、高強度、高靱性、高耐食性と共に、耐土砂摩耗性、耐キャビテーション性等が要求されている。この要求が満たされない場合、水力機器の性能を低下させるだけでなく、補修による著しい稼働率の低下を招いており、その対策に苦慮しているのが実情である。

最も耐キャビテーション・エロージョンを受ける水力機器の1つに水車ランナーがあり、従来から耐キャビテーション性が優れていると考えられているSUS304を肉盛り溶接することにより耐久性の改善を行っている。しかし、溶接法はコスト面と現地施工面に問題があるため溶接法に替わる施工方法の確立が求められている。

現地作業性や信頼性に優れた施工法として溶射法があり耐食、耐摩耗コーティングプロセスとして注目されている。

しかしながら、溶射皮膜は水力機器への適用にあたって重要な特性である耐キャビテーション性については殆ど明らかにされていないのが現状である。

本報では水車ランナーへの溶射法の適用性を検討するため、4種類の溶射皮膜（ステライト、Ni基自溶合金、Fe基自溶合金、SUS316）とポリウレタン樹脂コーティングについて、耐キャビテーション性の評価試験を行い、その調査結果を報告する。

2 キャビテーションについて

キャビテーション・エロージョン¹⁾は急速に流動する流体中での金属表面に接した一部に圧力の突然変化により空洞部が発生し、この空洞部において流水圧がその温度での蒸気圧以下に達したとき、流体の常温化での煮沸現象が生じ空洞内に蒸気泡が発生し、この発生した蒸気泡は静圧の

高い部分で急激に圧縮され破壊する。キャビテーションは、この蒸気泡の発生、破壊の繰り返しの結果、金属表面に発生する損傷である。一般的には空洞発生部よりもやや離れた部位で蒸気泡の圧縮・破壊が発生しエロージョンに至る。またこの蒸気泡は著しく衝撃圧が高く、その値は35kg/mm²に達する場合もある。

2.1 耐キャビテーション材料の条件

耐キャビテーションの尺度を左右する因子として1) 硬度 2) 結晶粒度 3) 強度 4) 表面粗さ 5) 弾性 等が考えられている。特に硬度は最も重要な因子であり、耐キャビテーション・エロージョン性は材料が破壊するまでに吸収される歪みエネルギーに相当するHv2/E (Hv:ピッカース硬度 E:縦弾性係数)で整理されていることが良く知られている。耐キャビテーション・エロージョン材料にて最も多く利用されている材料にSUS304およびSUS410ステンレスがあるがキャビテーション・エロージョン試験前後の硬度を比較した場合Table 1のようになる。

下表の如く、一般的に硬度が低いSUS304がSUS410と耐キャ

Table 1 Result of cavitation test

unit:Vickers hardness

material	normal value	after test
SUS304	160	220
SUS410	200	210

Table 2 Evaluation of materials in water power generating plant

durability	kind of materials
1	WC (sintered)
2	stellite
3	17-7 stainless steel
4	18-8 stainless steel
5	25-20 stainless steel
6	18-8 stainless cast steel
7	Ni-Al cast bronze
8	13%Cr cast steel
9	Mn cast bronze
10	SUS304 (thermal spraying)
11	cast steel
12	bronze
13	rubber
14	cast iron
15	Al plate

Table 3 Characteristics of coating film in respective processes of thermal spraying

	adhesive force	porosity	adhesive force among particles	non-fused powder	amount of oxide
wire thermal spraying (gas flame)	△	△	△	◎	△
powder thermal spraying	×	×	×	×	×
wire thermal spraying (arc)	○	△	○	◎	×
gas plasma thermal spraying	○	△	○	×	◎
HVOF	◎	◎	◎	△	○

◎ best ○ better △ good × no good

ビテーションにおいて同等以上である。理由としてキャビテーションの蒸気泡崩壊に伴う衝撃圧により材料表面が加工硬化するためと考えられている。また、蒸気タービン翼のキャビテーション・エロージョン対策として使用されるステライト合金もまた加工硬化を起こしやすい合金であることが良く知られている。

各材料の耐キャビテーション・エロージョンの順位をまとめたものをTable 2に示す。²⁾

2.2 溶射皮膜の特性

溶射は溶接肉盛り・鋳造材料に比べ以下の欠点を有する。

- 1) 皮膜内には気孔、酸化物を多く含有している。
- 2) 溶射粒子の体積したラメラ構造の組織を示す。
- 3) 他の製法と比べ粒子の脱落を伴う摩耗が発生する。
- 4) 複合皮膜であるため剥離の危険性がある。
- 5) 粉末ガスフレーム、プラズマ溶射では未溶融粒子の巻き込み体積が発生する。

溶射を耐キャビテーション・エロージョン材料に適用する場合上記欠点を考慮して溶射方法を選定することが必要となり、溶射方法として以下の条件が必要である。

- 1) 粒子内に気孔および酸化物が少ない。
- 2) 基材との界面、粒子間の密着力が強い。
- 3) 未溶融粒子等の皮膜内の欠陥が少ない。

2.3 溶射法の種類

一般的溶射方法は溶射装置により特徴がそれぞれ異なる。溶射装置による特徴の違いについてまとめたものをTable 3に示す。

以上から溶射方法はアークワイヤー溶射または高速フレーム溶射が適正である。

2.4 溶射方法および溶射材料選定について

耐キャビテーション・エロージョン材料の選定理由として、高硬度で且つ加工硬化性のある材料が耐キャビテーション・エロージョンには必要条件である。そこでこれらの条件を満たすための溶射材料および溶射方法等についてまとめたものをTable 4に示す。

SUS304を肉盛りした物を供試材とし、比較試料としてSUS系および一般的に市販されている溶射材料について(硬度、加工硬化性)のあるものを主に選定し、耐キャビ

Table 4 Characteristics of coating film in respective materials

material	process	hardness (Hv)	durability
SUS304	HVOF	160	base material
stellite#6	HVOF	410	○
WC-12Co	HVOF	1300	◎
WC-17Co	HVOF	1200	◎
Cr ₃ C ₂ 25NiCr	HVOF	950	○
WC ₁₂ Co+self-fluxing alloy (Ni-base)	HVOF	900	○
self-fluxing alloy (Ni-base)	HVOF	828	○
SUS316	HVOF	379	×
self-fluxing alloy (Fe-base)	wire thermal spraying (arc)	595	△
SUS316	wire thermal spraying (arc)	360	×

◎ best ○ better △ good × no good

レーション・エロージョン試験片を製作した。

3 キャビテーション・エロージョン供試材について
 実験に供したサンプルはFig.1に示す様な形状で、表面に

は300 μ m (Fe基自溶合金500 μ m、ポリウレタン樹脂800 μ m)の厚さの皮膜を溶射している。

供試体は、アークワイヤー溶射とポリウレタン樹脂を除きHVOF (High Velocity Oxygen Fuel) 装置を用いて溶射距離200~250mm、粉末供給速度6~10kgの条件にて燃焼ガスにケロシンと酸素を用い溶射した。各皮膜の溶射仕様をTable 5に示す。

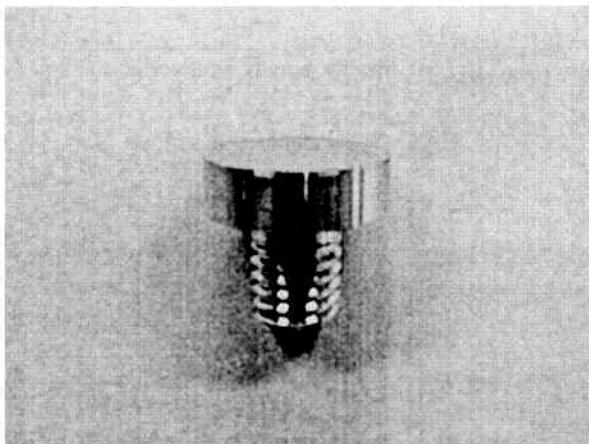


Fig.1 Cavitation erosion test sample

Table 5 Thermal spraying condition

material	process	film thickness (μ m)
stellite#6	HVOF	300
SUS316	HVOF	300
self-fluxing alloy (Ni-base)	HVOF	300
self-fluxing alloy (Fe-base)	powder thermal spraying	500
resin	—	800

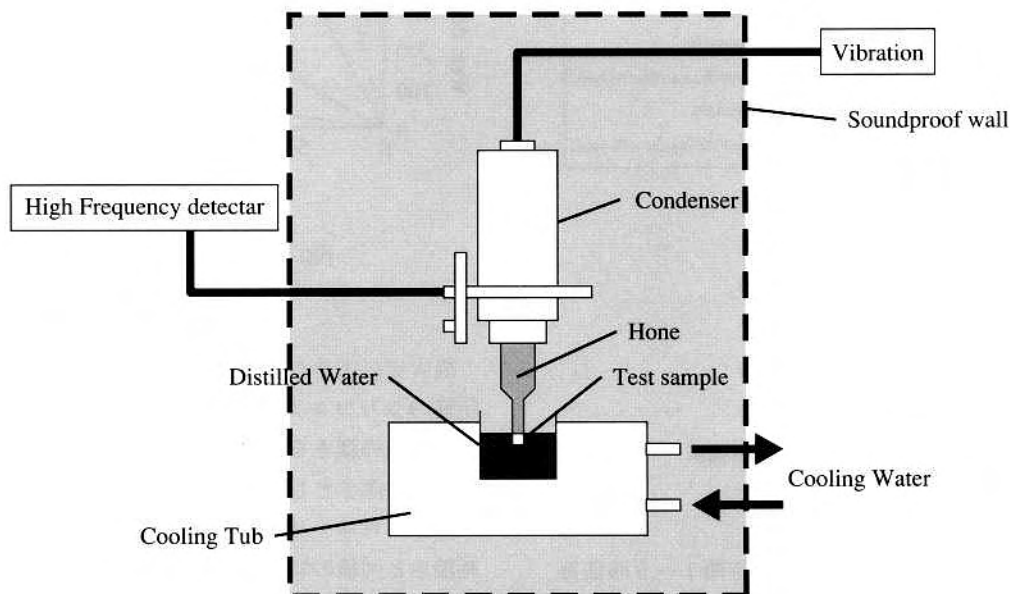


Fig.2 Schematic drawing of test apparatus

4 試験方法および試験条件

キャビテーション・エロージョン試験装置の概略図をFig.2に示す。装置は試験片を高周波で振動させる発信機部と試験温度を一定に保つための冷却槽から構成されており、試験条件は前準備としてダイヤモンドペーストで表面を研磨後アセトンにて超音波洗浄し、初期重量の測定を行った。試験片のホーンへの取り付けは、試験中のネジ部での破損を防止するためトルクレンチを使用し、締め付けトルク250kg/cm²で行った。試験条件をまとめたものをTable 6に示す。

Table 6 Test condition

temperature	22°C ± 1°C
frequency	19.0kHz
amplitude	30 μm
couplant	distilled water

5 評価方法および試験結果

評価方法はキャビテーション試験における溶射皮膜の平均摩耗深さおよび最大摩耗深さ、減重量にて評価した。

また、キャビテーション試験後の溶射皮膜の表面壊食状況を知るため、実体顕微鏡を用いて観察した。

Fig.3にキャビテーション試験における溶射皮膜の減重量

Fig.4にキャビテーション試験における溶射皮膜の平均摩耗深さ

Fig.5にキャビテーション試験における溶射皮膜の最大摩耗深さを示す。

またそれぞれの溶射皮膜壊食状況をFig.6~Fig.10で示す。

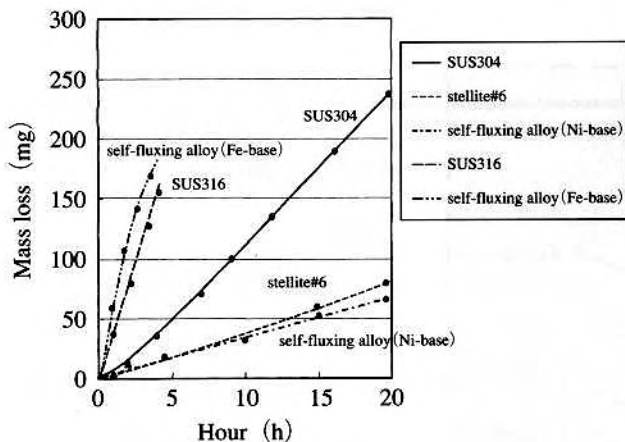
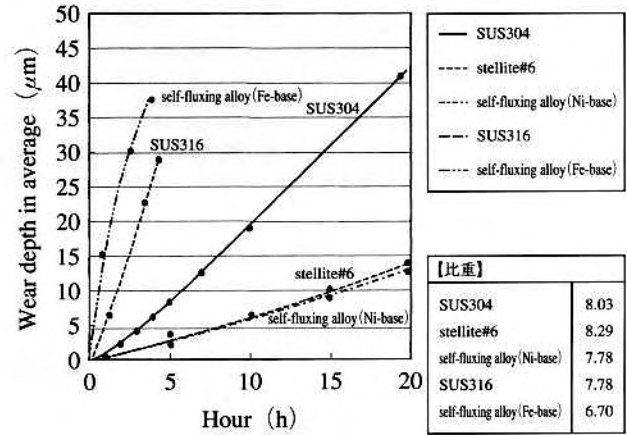


Fig.3 Mass loss in cavitation test

減重量測定方法は、各サンプルを試験時間1~5時間毎に精密電子天秤を用いて重量変化の測定を行った。結果か

ら供試材SUS304と比較し高速フレイム溶射機 (HVOF) で溶射したFe基自溶合金、アーク溶射機で溶射したSUS316は加工硬化性が良い材料にもかかわらず、供試材SUS304の約4倍の減重量である。これに対し、高速フレイム溶射機 (HVOF) で溶射したステライトおよびNi基自溶合金は約3倍の耐用を示している。



【比重】	
SUS304	8.03
stellite#6	8.29
self-fluxing alloy (Ni-base)	7.78
SUS316	7.78
self-fluxing alloy (Fe-base)	6.70

$$\text{Wear depth (in average)} = \frac{\text{Wear}}{\text{Specific gravity} \times \text{surface area}}$$

Fig.4 Wear depth in average

平均摩耗深さ測定方法は、減重量と溶射皮膜の比重から平均摩耗深さを算出した。

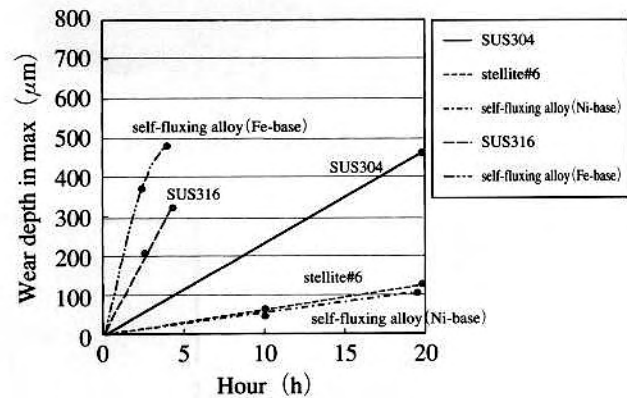


Fig.5 Wear depth in maximum

最大摩耗深さの測定方法は試験後のサンプル表面に速硬化性のシリコンゴムを流し込み、表面の凹凸を転写させ、この凹凸の深さをレーザー変位計で測定し、その最大値を最大摩耗深さとした。

結果からキャビテーション試験における減重量、平均摩耗深さと同様の順位結果である。

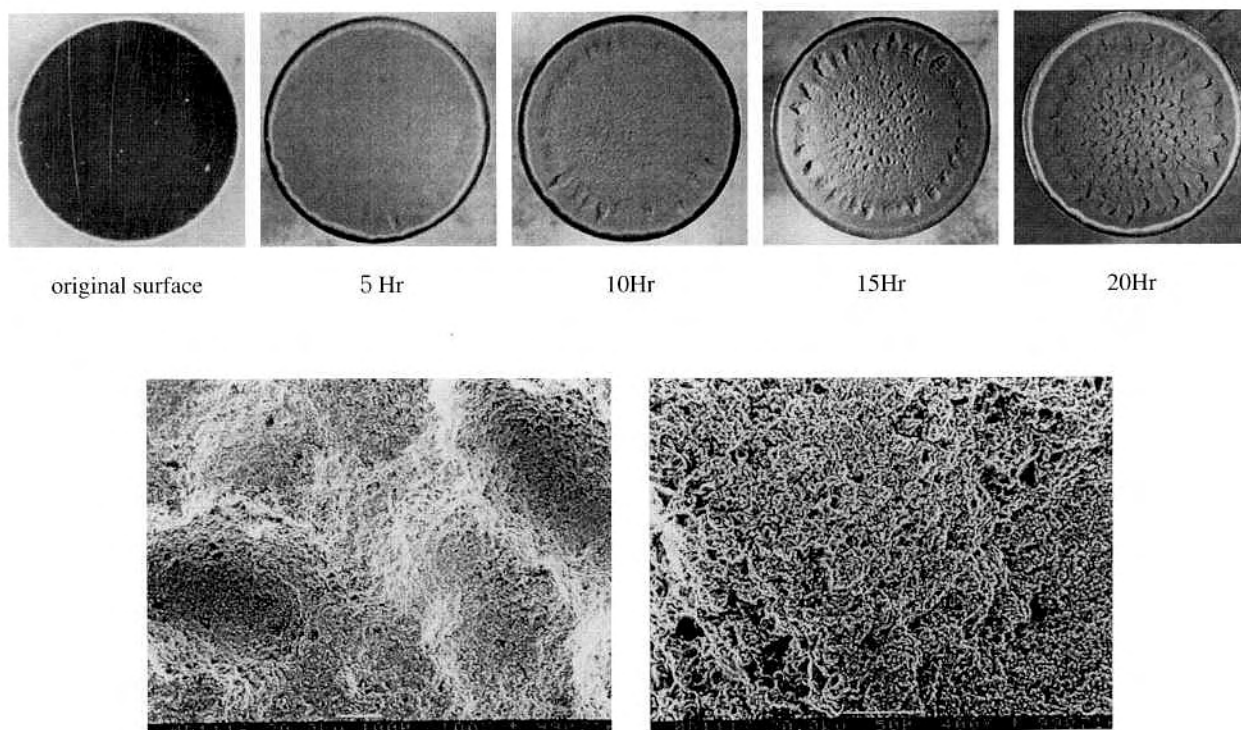


Fig.6 Result of macro surface condition, and micro structure. (material : SUS304)

観察結果から試験10Hrを超えたあたりから、壊食が目立つ様になり外周部から少し内側部分の壊食が顕著に現れている。

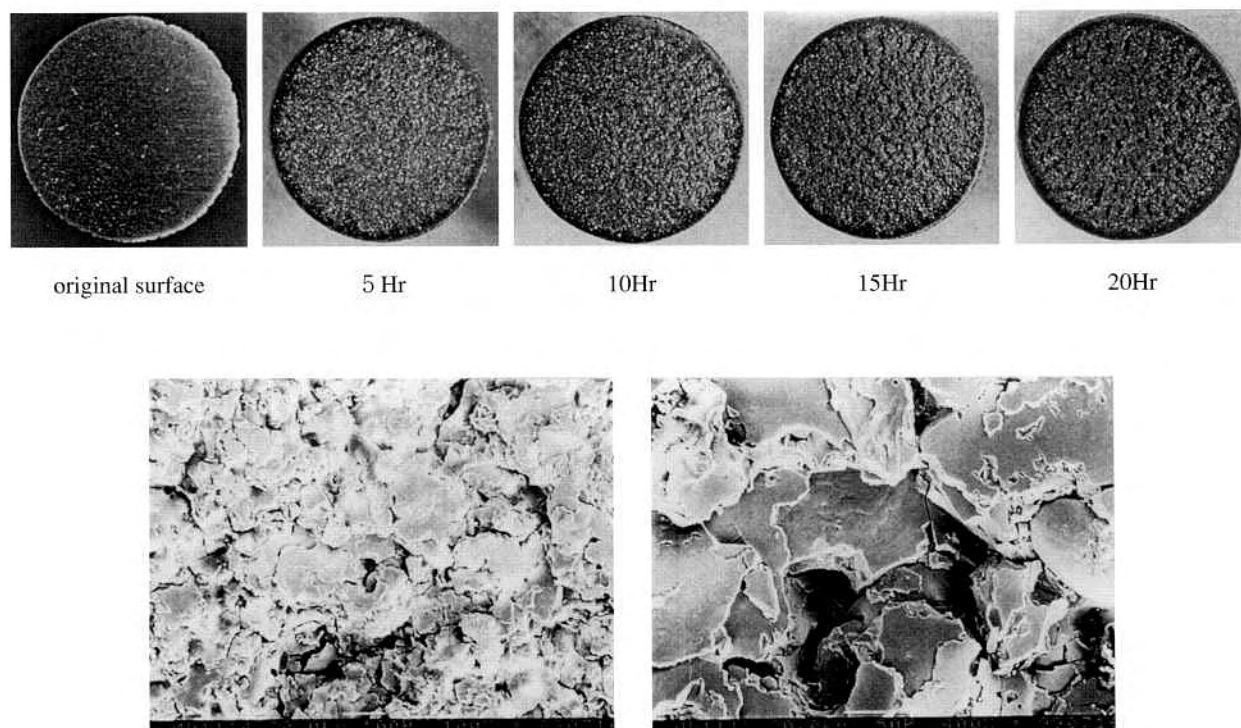
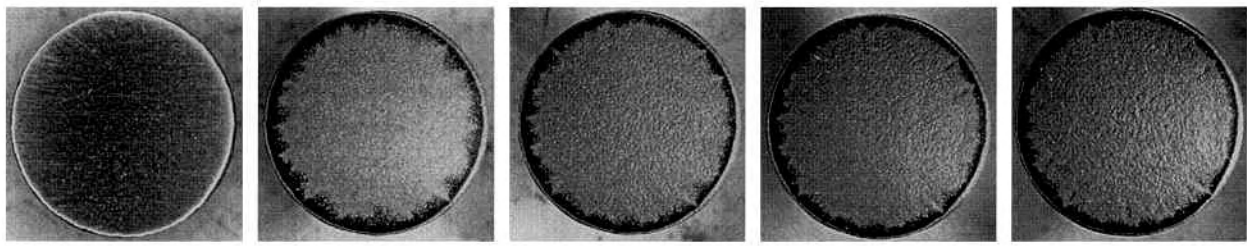


Fig.7 Result of macro surface condition, and micro structure. (material : self-fluxing alloy Ni-base)

アーク溶射機で溶射したFe基自溶合金の溶射皮膜は試験5 Hrで壊食が進行し、部分的に基材露出に至っている。また観察結果から層状の皮膜が認められ、壊食を受けた部分は脆性破壊を起こした様に見られる。



original surface

5 Hr

10Hr

15Hr

20Hr

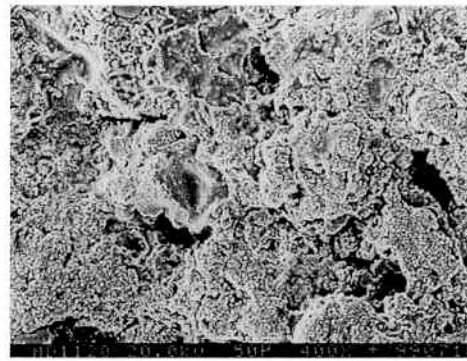
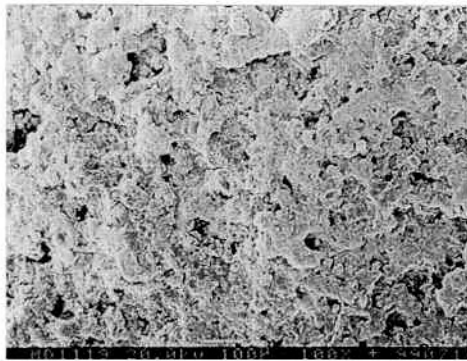
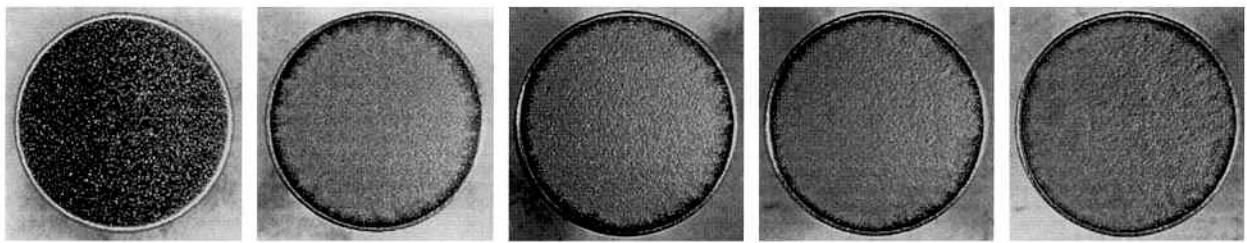


Fig.8 Result of macro surface condition, and micro structure. (material : self-fluxing alloy Ni-base)

表面壊食状況結果から20Hr経過した時に、端部から壊食が進行している。また表面壊食状況マイクロ組織から皮膜内に粒子は認められず、空孔が少ない。この結果、空洞部を起点に発生する壊食現象が抑制されたものと思われる。



original surface

5 Hr

10Hr

15Hr

20Hr

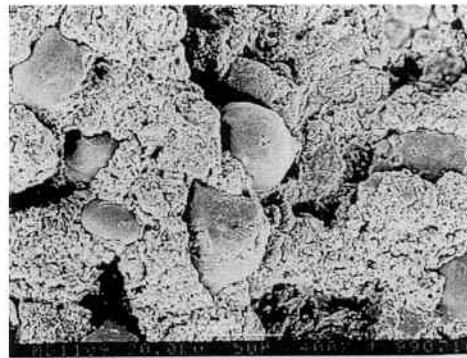
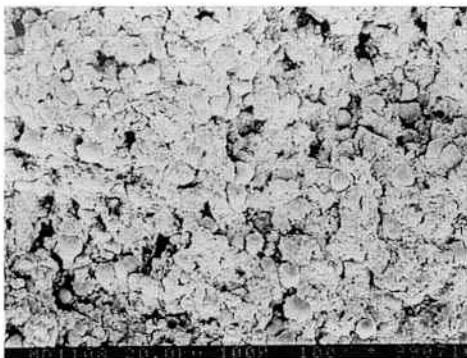


Fig.9 Result of macro surface condition, and micro structure. (material : stellite#6)

高速フレイム溶射機で溶射した材料の中では最も加工硬化性の高い材料であるステライトは、Ni基自溶合金と同等の壊食速度であるが、皮膜組織を比較すると空孔が多数存在している。

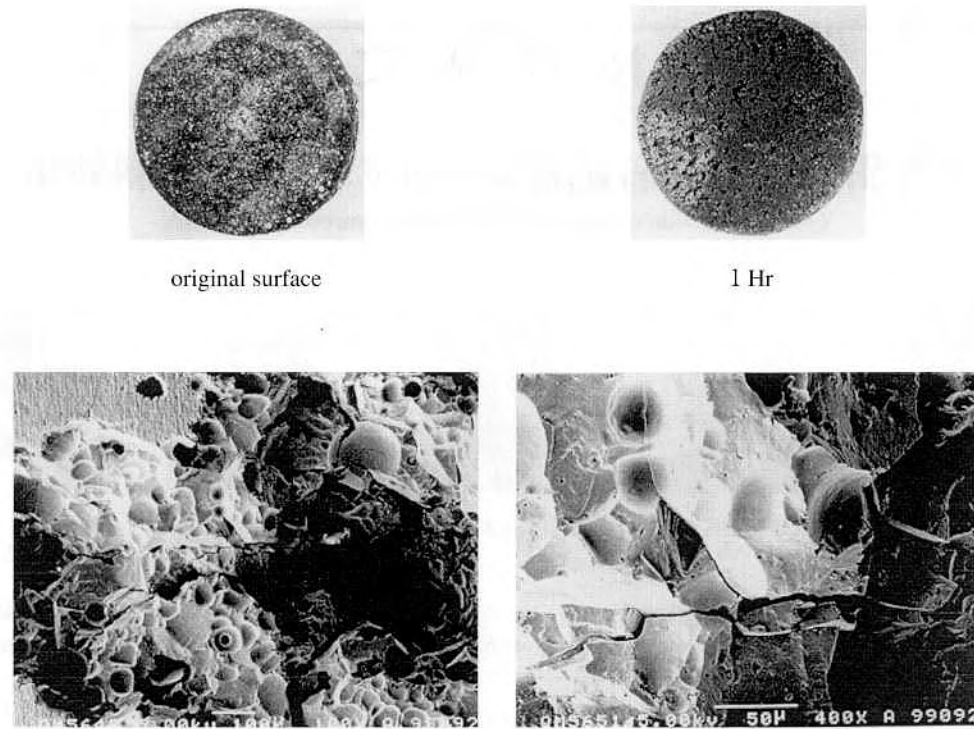


Fig.10 Result of macro surface condition, and micro structure. (material : polyurethane resin)

静電塗装を施したポリウレタン樹脂は僅か1 Hrで壊食を受けており、表面壊食状況の皮膜組織から非常にポーラスである。また表面加工精度が劣るため耐キャビテーション皮膜としては期待できない。

6 試験結果および考察

摩耗減重量、平均摩耗深さ、最大摩耗深さ測定結果からSUS304、SUS316およびFe基自溶合金、ポリウレタン樹脂はキャビテーション試験において良い結果が得られていない。原因としてこれら材料の皮膜組織観察から粒子形状および空孔が多数確認される。このことからキャビテーション試験時の高速振動で空孔を起点に、粒子間の欠落が発生したと推測される。

また表面壊食状況からSUS系およびポリウレタン樹脂、Fe基自溶合金皮膜は短時間で壊食が発生していることが確認できる。壊食は試験片の外周部から少し内側に入った部分で強くなる傾向にあり、このことから試験片の外周部付近で蒸気泡が多く発生し内側で蒸気泡の崩壊が起きていると推測される。

これらの材料に対しNi基自溶合金およびステライトの溶射皮膜は粒子が認められず緻密であるため、金属破壊現象の一つであるキャビテーションにおいて粒子間の欠落が少なく良好な結果が得られていたと思われる。

Ni基自溶合金皮膜は硬度、強度、靱性が高く、また皮膜組織から空洞部の存在が少ないことからキャビテーション試験において非常に良好な結果であった。

7 結言

HVOF装置によるNi基自溶合金皮膜は、従来から使用している材料であるSUS304と比して摩耗減量等の結果から約3倍の耐久性を示しており耐キャビテーション皮膜として期待される。

溶射法は現地施工に適しているため今後安定した皮膜が得られるように溶射条件の確立を図る。溶射材料としては高硬度材料、緻密な組織 (Table 4参照WC系サーメット³⁾、炭化クロム) 等による耐キャビテーション性について調査を行う。

8 謝辞

本研究の遂行に際し、キャビテーション試験の実施に協力して頂いた富士電機株式会社に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 鬼頭：防食技術4 (1955) P.192
- 2) 防食技術便覧 5章キャビテーション・エロージョン (P.138～P.155)
- 3) 溶接学会全国大会 (1999) P.418