

[論文]

機械駆動用蒸気タービン動翼の腐食疲労現象と寿命向上に関する研究
(第2報 動翼表面改質による寿命向上)

秦 聰^{*1} 安井豊明^{*2} 山田義和^{*2} 塚本 寛^{*3}

Study on Corrosion Fatigue Phenomena and Lifetime Improvement of Steam Turbine
Blades Used for Mechanical Drives
(2nd Report : Operation Life Extension by Blade Surface Treatment and Coating)

Satoshi HATA, Toyooki YASUI, Yoshikazu YAMADA and Hiroshi TSUKAMOTO

New concept hybrid coating was developed in order to systematically prevent deposits on blade profile up to medium temperature zone, corrosion fatigue and erosion damage for low-pressure blade on chemical enrichment zone of mechanical-drive steam turbines. Practical element tests were conducted to evaluate basic features of this unique coating. Actual blade was coated to confirm coating condition for preparation of actual application.

Keywords : Steam Turbine, Surface Treatment, Hybrid Coating, Deposits, Corrosion, Erosion, Corrosion Fatigue

1. 緒言

石油化学プラントにおいてプロセスガス圧縮機を駆動する蒸気タービンは長期運転中にエロージョン、応力腐食割れ、腐食疲労など、種々の環境劣化を受けることがあり、流体性能、動翼などの構成部材強度に経年変化を生じる。特に、蒸気の膨張過程で蒸気圧力と温度変化に伴って蒸気中に含まれる極低濃度の腐食性物質が高濃度化し、動翼表面に析出・付着し、材料強度を著しく低下させることがある。このような背景から著者らは既に蒸気タービン動翼テノン部を対象に損傷事例に対する解析と分析を行い、濃縮域と材料強度余裕と損傷の相関及び要因について報告し⁽¹⁾、実翼の形状改良による腐食疲労対策を提案した。

一方、近年、プラント生産効率を上げるため

蒸気タービンは長期間連続運転される傾向にあり、十分な蒸気管理のもとでも、蒸気タービン内部に不純物が析出・付着しタービン効率が低下する問題がクローズアップされている。一例として米国メジャー化学プラントにおいて約8年の長期連続運転された蒸気タービンの動翼にはSiO₂、NaClなどが厚さ数mm程度付着していた。このため、独自の方法によって定期的な洗浄⁽²⁾⁽³⁾を行うなどの対策が取られているが、耐付着性に優れた動翼材料や皮膜によるタービン効率の低下防止、生産効率の維持、メンテナンス費用削減などが期待されている。

このような背景に対し、本研究では新しい表面改質法により実翼に適用可能な耐付着性・耐腐食疲労特性を有する複合被膜を開発したので、その概要と特性評価試験結果を報告する。

2. 表面改質の方法と特徴

Fig.1 に長期連続運転された蒸気タービンの低圧段動翼プロファイル表面の付着状況を示す⁽⁴⁾。

* 1 三菱重工業(株) 広島製作所ターボ機械技術部
E-mail : satoshi_hata@mhi.co.jp
* 2 三菱重工業(株) 広島研究所
* 3 九州工業大学大学院 生命体工学研究科
原稿受付日 平成18年8月7日

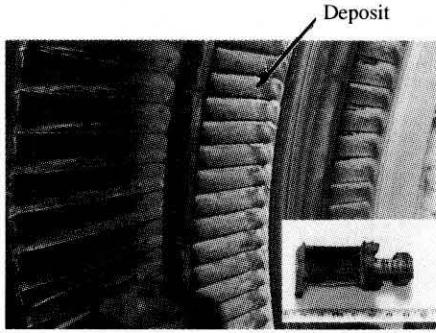


Fig. 1 Deposit condition of LP section

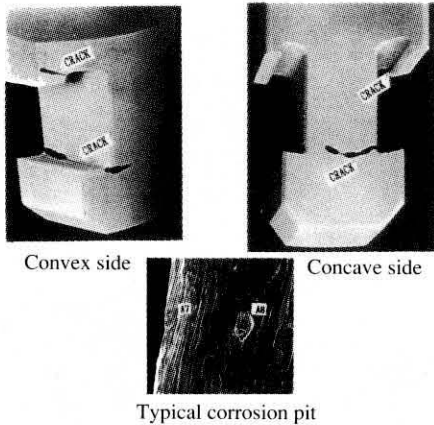


Fig. 2 Corrosion fatigue crack and corrosion pit on root

また、Fig. 2 に低圧段の濃縮領域にある動翼T型翼根の腐食疲労破損例を示す。このようにタービン内部の不純物の付着による効率低下、腐

食性物質の濃縮による腐食疲労など長期運転上の問題があり、表面改質への要望はますます高まっている。

回転機械に適用される表面改質技術と損傷劣化事象をまとめてTable 1 に示す。固体粒子及びドレン衝突によるエロージョン、表面への付着、腐食に対し使用環境に対応した表面改質方法が用いられている。従来方法に対し新しく開発された方法(◆)としてはボロン処理、イオンプレーティング、プラズマ・トランスファ・アーク(PTA)⁽⁵⁾や本研究の基本処理となるラジカル(活性化)窒化処理がある。また、圧縮機内部の付着緩和を目的としてインペラー組立品に塗装施工される多層複合膜型の例をTable 2 に示すが、この方法は密着力が弱く長期間の耐久性には問題があると言われている。

3. 動翼用コーティングへの要求性能

蒸気タービンの長期運転における性能劣化と材料強度低下を防止するためには、Fig. 3 に示す蒸気タービン各段の温度と圧力に対応して発生する固体粒子エロージョン、表面への付着、ドレン衝突によるエロージョン、腐食に対して防止あるいは緩和可能な動翼用コーティングが必要である。

Table 1 Damage phase and surface treatment

Phenomena	Solid particle erosion (SPE)	Drain attack erosion (DAE)	Deposits fouling	Corrosion fatigue
Mechanism	Plastic Deformation Damage	Ductile Fatigue Damage	Phase Change & Surface Energy	Chemical Enrichment & Potential Voltage
Temperature	High	Low	High to Low	Low (wet zone)
Applicable coating ● : Low bonding strength, shortlife ◆ : New technology, high bonding, long life	● : Plasma spray ◆ : Boronizing ◆ : Radical nitridation & CrN	● : Stellite plate brazing ● : Plasma spray ◆ : Ion plating ● : PTA	● : SInorganic painting & inorganic sealant ● : Fluoring coating ◆ : Ni-p hybrid plating	● : Inorganic / organic painting & ptf sealant ◆ : Radical nitridation Ni-p multilayer hybrid coating
Application	Nozzles, diaphragm	Blades nozzles, diaphragm	Blades, nozzles	Blades nozzles, diaphragm

Table 2 Typical conventional coating specification

Applicable component	Nozzles and blades of high pressure stages or low pressure stages Disadvantage : Short life due to low bonding strength			
Purpose of use	Prevention of corrosive fatigue due to corrosive chemicals invasion, relaxation of fouling			
Coating specification	Type	Temperature	Coating procedure	Coating layer formation
	A	High 566deg.C ~ 260deg.C	Inorganic painting ↓ Inorganic sealant treatment	Thickness 50 μ m Chromate & phosphate Chemical inert sealant Galvanic sacrificial coating Blasting treatment Base metal
B	Low less than 260deg.C	Inorganic painting ↓ Organic painting ↓ PTFE sealant treatment	Thickness 150 μ m PTFE base top coating Polymeric inhibitive coating Galvanic sacrificial coating Blasting treatment Base metal	

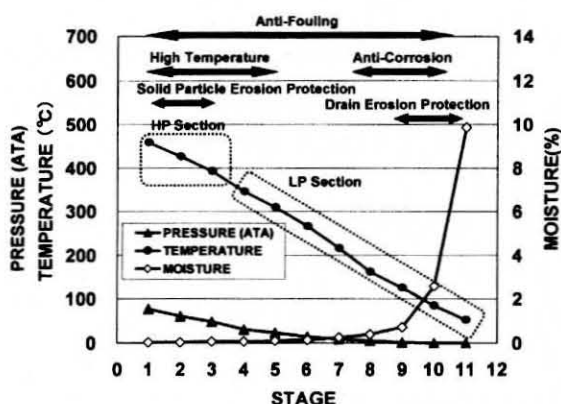


Fig. 3 Turbine internal condition and coating required function

本研究では、蒸気温度が350℃以下の低圧段(LP段)において動翼及び静翼(ノズル)のプロファイル表面への不純物付着を緩和し、連続運転中においては付着しがたく、また洗浄性が改善され、さらに、湿り領域では腐食疲労強度の低下を防止し、母材と同等の耐エロージョン性を有する多機能性をコーティングの要求性能として開発を進めた。

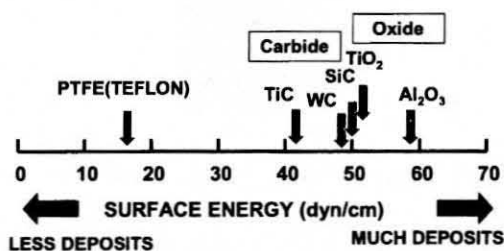


Fig. 4 Several types of ceramics and surface energy level

4. コーティング膜の新しいコンセプト
プロファイル表面への不純物付着性に大きく影響する因子として物質の表面エネルギーレベルがあり、Fig. 4⁽⁶⁾に示すように各セラミックスなどに比べ、ポリテトラフルオレエチレン(以下PTFEと称す)がもっとも低く低付着性材料としては適しているが、5-5項で後述するように単独では密着強度が低いため実際には他の材料と複合化するなどの工夫が必要となる。

また、低付着性材料と母材との密着強度とエロージョンに対する耐はく離性、及び耐腐食性

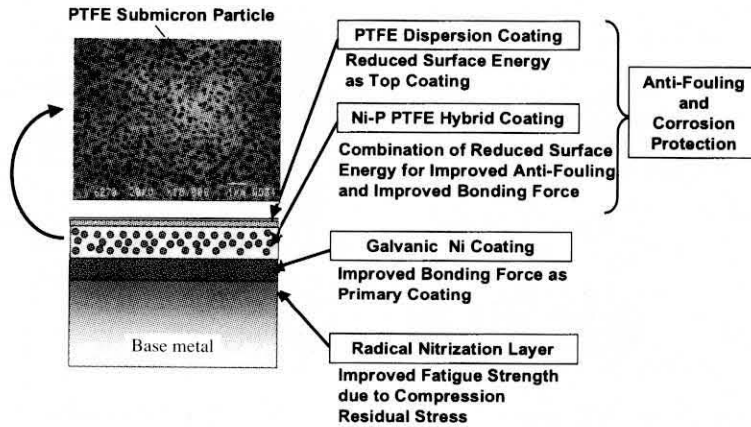


Fig. 5 Basic concept of developed coating

を考慮してFig. 5 に示すコーティング膜の新しいコンセプトを考えた。まず、基材の表面改質としてラジカル窒化により圧縮応力を付与し疲労強度を向上させる。下地層には電気Niめっきを用い上層間の密着性確保を図った。上層には耐付着性を大きく向上させるためにPTFE粒子複合Ni-Pめっきを行い、その上にPTFEディスペーション(分散配置型)コーティングし固着化処理を行う。上層のPTFE複合膜は耐腐食性も有し、この新しいコンセプトの複合コーティング膜⁽⁷⁾は耐付着性と耐腐食性、耐エロージョン性を持つ多機能性膜となる。

5. 試験結果及び考察

設計した新しいコンセプトの複合コーティング膜の特性をトップコート選定も含め従来コー

ティングと比較評価するためにTable 3 に示すケースについて実際に試験片を製作した。試験片製作に当たっては耐付着性に関する影響因子を選定しパラメータとして表面粗さ、PTFE含有率、膜厚さなどの条件を変化させた。

5-1 供試体

Fig. 6 にTable 3 の各ケースに対応するコーティング試験片の外観を示す。表面にPTFE膜を配置したPTFE粒子複合Ni-Pめっき膜、CrNやTiNのイオンプレーティング膜、PTFEなどのフッ素コーティング、Table 2 のBに示した圧縮機用付着緩和塗装膜及び基準となる母材SUS410J1の供試体をそれぞれ製作した。

5-2 評価項目

Table 4 にコーティング膜の性能評価試験項目を示す。耐付着性、蒸気洗浄性、耐腐食性

Table 3 Coating test pieces and evaluation parameter

Case No.	Sample base coating type	Coating parameter for performance evaluation
1	Ni-P PTFE hybrid coating	● PTFE dispersion ratio on surface
2	PVD physical vapor deposition	● Surface roughness ● Layer materials (TiN, CrN) and thickness ● Deposition procedure (Ion plating, etc)
3	Fluorine simple coating	● Fluorine materials (PTFE, etc) ● Layer thickness
4	Inorganic/Organic/PTFE three layer paint coating	● Layer thickness
5	Base metal (SUS410J1)	● Surface roughness

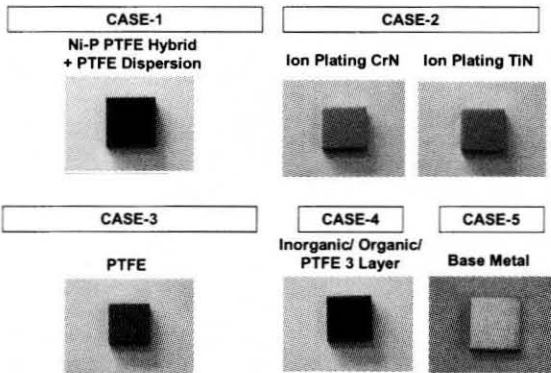


Fig. 6 Overview of coating test pieces

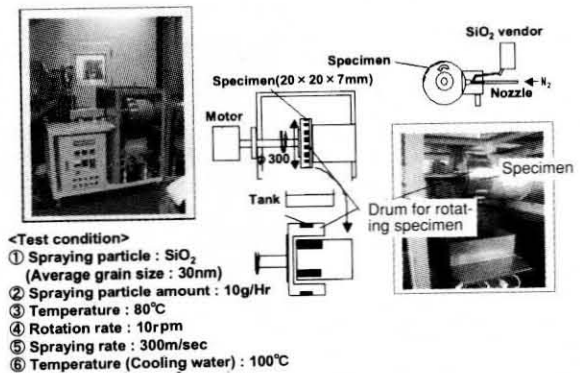


Fig. 7 Anti-deposition test set-up

Table 4 Coating evaluation test items

Test No.	Evaluation points	Test procedure	Target requirement
1	Fouling resistance	SiO ₂ nanometer powder jet injection under hot wet condition	1/2 Deposit of base metal
2	Washing efficiency	Steam jet washing	1/2 Washing duration of base metal
3	Corrosion fatigue strength	3% NaCl solution rotating bending fatigue test	Better than base metal
4	Erosion resistance	High frequency cavitations erosion test	Same as base metal
5	Coating on actual blade profile	Masking immersion and spray	Layer thickness profile

(疲労強度低下)、耐エロージョン性及び実翼への膜施工性のそれぞれについて、実機使用条件を模擬した方法、あるいは、加速条件での相对比较が可能な評価方法を考案し試験を行った。膜の目標性能として、耐付着性、蒸気洗浄性については母材特性の2倍まで改善し、腐食による疲労強度低下度合は母材より小さくし、耐エロージョン性は母材と同等となるよう設定した。

5-3 耐付着性評価試験

粉体の凝集、付着など微粒子工学をもとに付着性評価試験装置を試作した。考え方として粒子材質、粒子の大きさ、粒子衝突速度を実機に合わせ、粒子濃度で加速する方法とした。また付着を促進させるため水分補給も行うこととした。試作した付着性評価試験装置をFig. 7に示す。本装置は、試験片固定ドラム(内部ヒーター付)、吹き付け粒子供給装置、吹き付けノズル及び水分供給タンクから構成されており、試

Table 5 Micro powder deposition test condition

Test item	Condition
1. Spray micro powder	Silica powder average diameter 10nm
2. Spray flow rate	10g/Hr
3. Powder velocity	300m/s
4. Surface temperature	80°C
5. Environment	Water supply
6. Rotating speed	10rpm

験片の取付け数：最大20個、試験片温度：室温～500°C、粒子衝突速度：最大300m/sec、試験片回転数：10～30rpm、水蒸発による水分供給の条件で試験が可能である。

粒子付着性評価試験はTable 5の条件で行った。試験時間は最長200時間で付着量は試験前後の試験片の重量増量にて評価した。試験後の各試験片の付着状況を比較しFig. 8に示す。

各コーティングの耐付着特性を表す指標として粒子付着量倍率を以下のように定義した。

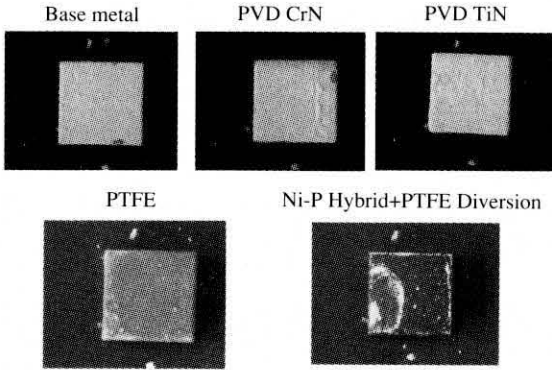


Fig. 8 Surface deposit condition after 200hrs spray

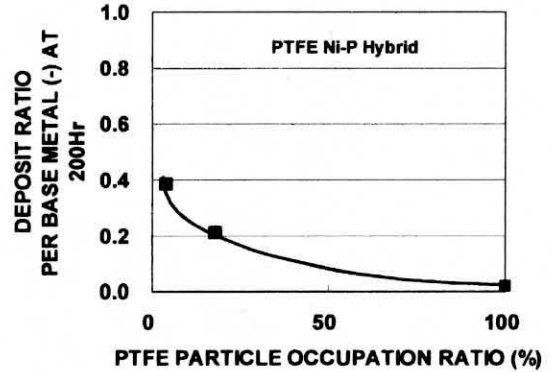


Fig.10 PTFE occupation ratio and deposit ratio

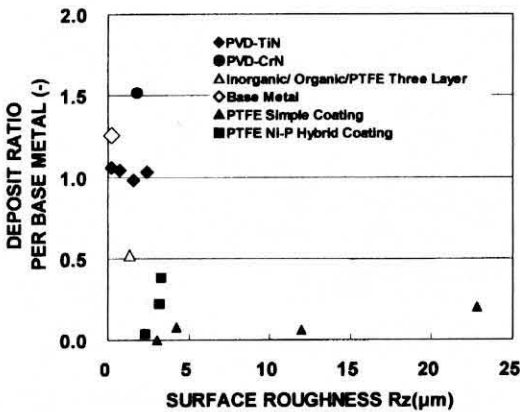


Fig. 9 Surface roughness and deposits ratio

粒子付着量倍率 = 各材料の粒子付着量 (g) / SUS410J1の粒子付着量 (g)

その粒子付着量倍率と表面粗さの関係をFig. 9に示す。

この結果から、PTFE粒子複合Ni-Pめっき膜及びフッ素コーティング膜の耐付着性が優れていることがわかる。これは、前述したように、低表面エネルギーが付着性に大きく影響していることを示唆した結果である。一方、窒化物PVD(CrN、TiN)は母材のSUS410J1材とほとんど差異が認められない結果であった。さらに、表面粗さを変化させて物理吸着性の影響を検討したが、実用レベルのRz=0.3~0.4μm程度までの表面平滑化(物理吸着低減)は効果が小さい

ことがわかった。また、圧縮機用粒子低付着性コーティングは基材の1/2でありPTFE粒子複合Ni-Pめっき膜に比較し劣る結果となった。

次に、耐粒子付着性が良好であったPTFE粒子複合Ni-Pめっき膜に関し、トップコーティングのPTFE表面占有率と粒子付着量倍率の関係をFig.10に示す。この結果からPTFE表面占有率の増加により低付着性は向上しており18%以上で基材(コーティングなし)に対し1/5以下となり、その低付着性能が著しく向上していることがわかる。これは、PTFE粒子占有率増加、すなわち表面のPTFE粒子ピッチ減少により、Ni-Pマトリックス部には付着するが、すぐ近傍にPTFEが存在するため付着物の成長が抑制されるためと考えられる。

5-4 洗浄性試験

低付着性を有するコーティングを用いても長期間の運転では粒子は付着してくる。この対策として運転中にタービン内部にノズルより水を噴霧し、蒸気を過熱域から湿り域にして付着物を洗浄する方法が考えられる。ここではこの洗浄性に関して評価した。

スチームクリーナー(シー・シー・ピー社製、C-600)を使用し、試験片に対し90°の角度で距離80mmの位置から蒸気を噴射する方法とした。評価した試験片は200時間の粒子付着評価試験

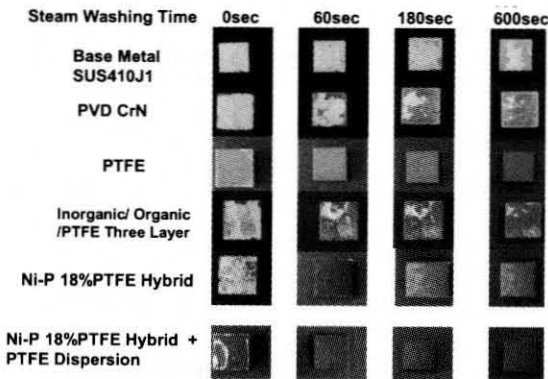


Fig.11 Surface deposit condition during washing

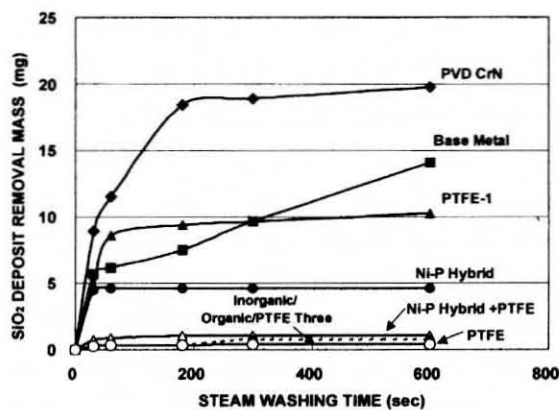


Fig.12 SiO₂ deposit removal mass during washing

後のものである。洗浄試験は、洗浄性は各試験片のSiO₂付着量が異なるため重量測定による除去量と外観観察により定性的に評価した。Fig.11に洗浄時間と各試験片の外観状況を示し、Fig.12に洗浄時のSiO₂除去量変化を示す。Table 6 にSiO₂完全除去に要する時間をそれぞれ示す。本試験では、粒子付着評価試験200時間後の付着量(初期付着量)が各試験片で異なるため付着物(SiO₂)が完全に除去できるまでの時間で洗浄性を評価した。また、乾燥後に試験片を表面観察し完全除去を確認している。これらの結果から、フッ素コーティングは洗浄時間30secで完全に付着物除去でき洗浄性は良好であり、PTFE粒子複合Ni-Pめっき膜は洗浄時間

Table 6 SiO₂ deposit removal time

Test sample	SiO ₂ complete removal time (sec)
Ni-P PTFE Hybrid+18%PTFE dispersion	180
Ni-P 18%PTFE Hybrid	180
PTFE	30
PVD CrN low surface roughness	>60
Inorganic/organic/PTFE three layers	>600
Base metal SUS410J1	>600

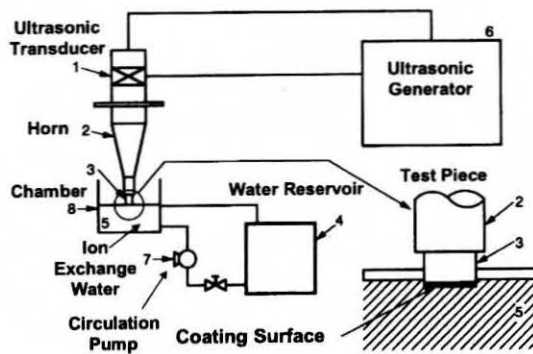


Fig.13 Cavitations erosion accelerated test set-up

180secで完全に付着物除去できフッ素コーティングと同様洗浄性は良好である。一方、SUS410J 1母材、表面平滑化PVD(CrN)及び圧縮機用粒子低付着性コーティングは600secでも完全に付着物除去できない。しかし、付着試験200時間後の付着量は、フッ素コーティングの場合、母材と比較し1/5~1/10であり、付着物除去時間は1/20以下である。このことから付着量比より洗浄時間比が大きいことから、低付着性コーティングは洗浄速度が大きいと考えられる。これらの試験結果からPTFE粒子複合Ni-Pめっき膜及びフッ素コーティングの洗浄性は母材に比較し優れている。

5-5 耐エロージョン試験

エロージョン試験はASTM G32-77のキャビテ

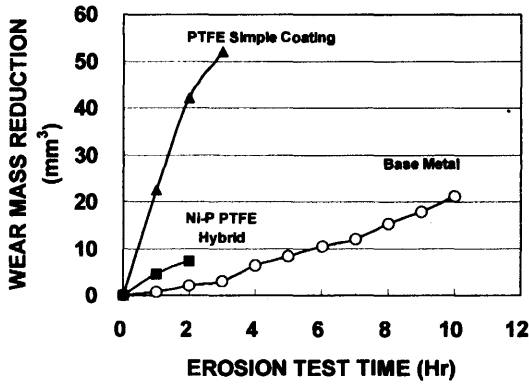


Fig. 14 Accelerated erosion test results

ーション・エロージョン試験⁽⁸⁾に準じて実施した。Fig.13にキャビテーション・エロージョン試験のフローシートを示す。超音波発信器(6)にて振動子(1)を発振させTi-6Al-4V合金製拡大ホーン(2)によって振幅を拡大しホーン先端に取付けた試験片を振動させ実施した。試験片先端を2~3mm程度試験液(5)に浸漬し振動させると気泡が発生する。この気泡が崩壊する際の衝撃圧力又は液ジェットによりエロージョンを発生させている。試験環境はイオン交換水(室温)で繰返し速度：18.5kHz、試験片先端の振幅：25 μ mの条件で最長10hまで実施した。キャビテーション・エロージョン試験後は試験片の重量減を電子天秤(精度：0.01mg)により測定した。

フッ素コーティング及びPTFE粒子複合Ni-Pめっき皮膜のエロージョン試験結果を母材と比較しFig.14に示す。フッ素コーティングは皮膜がはく離しており摩耗減量は著しく試験時間3時間で母材と比較して5桁以上の減量となっている。PTFE粒子複合Ni-Pめっき皮膜はフッ素コーティングに比べエロージョン性はよいが母材よりも大きな摩耗減量となっているが、その差異はわずかであり、ほぼ母材の性能と同等である。

5-6 耐腐食性試験

フッ素皮膜及びラジカル窒化+Niめっき+フッ素粒子複合+Ni-Pめっき皮膜と母材について

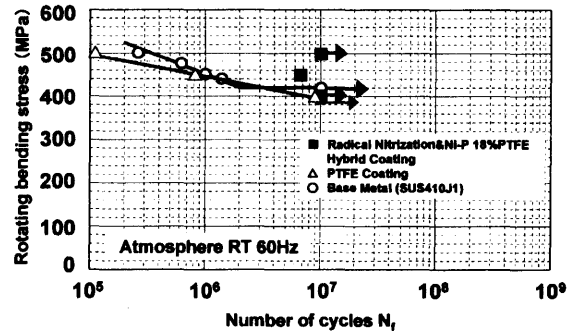


Fig. 15 Fatigue test result at atmosphere

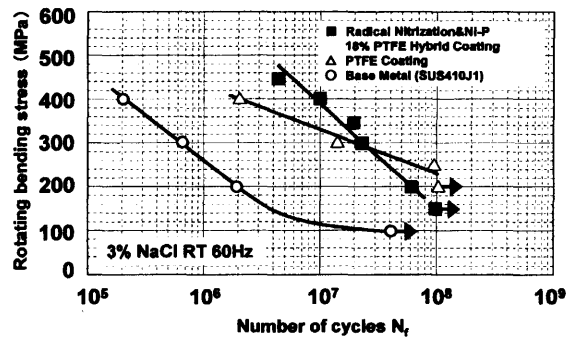


Fig. 16 Corrosion fatigue test result

回転曲げ疲労試験を実施し選定皮膜試験片の疲労強度特性を把握するとともに、3%NaCl水溶液(室温)環境下での疲労試験を実施し腐食疲労強度を評価した。室温大気環境下におけるS-N線図をFig.15に、3%NaCl環境下におけるS-N線図をFig.16に示す。

室温大気環境下においてフッ素皮膜の疲労限度(1 \times 10⁷回時間強さ)は400MPaであり、母材の疲労限度(10⁷回時間強さが400MPa程度)^{(9)~(11)}と同等でコーティングによる疲労強度低下は見られなかった。PTFE粒子複合Ni-Pめっき皮膜は繰返し応力500MPa、400MPaで1 \times 10⁷回まで破壊せずコーティングによる疲労強度低下はなかった。

一方、3%NaCl水溶液(室温)環境下においてフッ素皮膜(50 μ m)の1 \times 10⁸回時間強さは200MPaで、母材(100MPa、ただし4 \times 10⁷回時間強さ)に

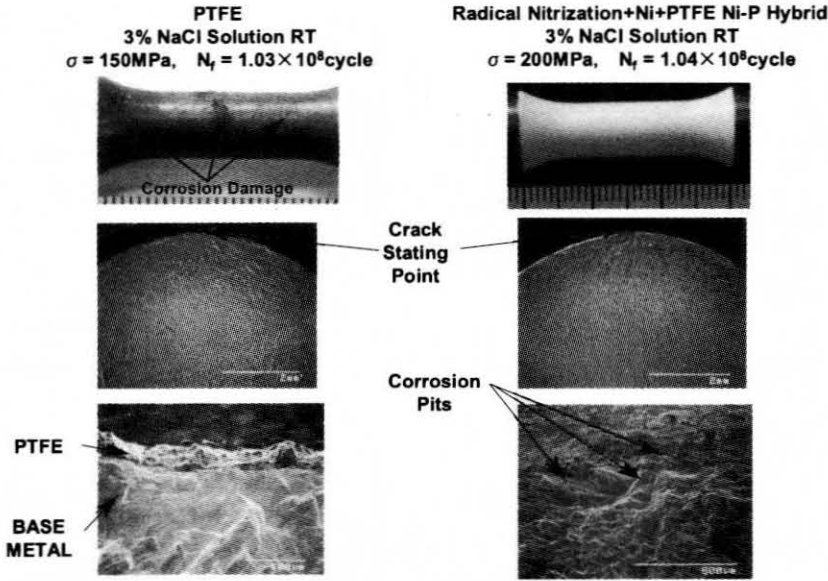


Fig.17 Macroscopic surface observation of corrosion fatigue test piece

比較し腐食疲労強度が2倍向上している。皮膜施工試験片の腐食疲労強度¹³⁾が改善されたのは本皮膜が緻密でピンホール等の欠陥が極めて少ないことによるもので、その結果として環境遮断効果に優れたものと考えられる。また腐食よりも支配的な高応力、低繰返し数の領域でも腐食疲労強度の改善度が大きく皮膜自身の靱性、基材との密着性にも優れているものと推定される。

腐食疲労試験に供したフッ素粒子複合Ni-Pめっき皮膜の 1×10^8 回時間強さは150MPaで、母材(100MPa、ただし 4×10^7 回時間強さ)に比較し腐食疲労強度が1.5倍向上している。

フッ素皮膜と同様に高応力、低繰返し数領域においても母材に比し腐食疲労強度の改善度が大きくなっている。ただし、PTFE粒子複合Ni-Pめっき皮膜の未破断試験片表面には3%NaCl水溶液による腐食が生じており、さらに長時間($\sim 10^9$ 回)側においては腐食疲労強度の低下が予想される。また、S-N線図の傾きは母材よりも大きい。PTFE粒子複合Ni-Pめっき皮膜の腐食疲労破面の観察結果をFig.17に示す。フッ素

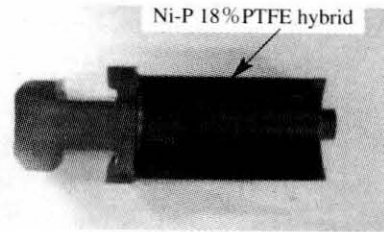


Fig.18 Coated actual blade

コーティング試験片の起点部には腐食ピットは観察されず、き裂進展部ではストライエーションが支配的に観察された。フッ素粒子複合Ni-Pめっき皮膜の起点部には深さ20から30 μ mの複数の腐食ピットが観察され、き裂進展部ではストライエーションが支配的に観察された。以上のことから、フッ素コーティング及びPTFE粒子複合Ni-Pめっき皮膜は母材と同等以上の疲労強度及び腐食疲労強度を有するものと考えられる。

6. 実機への適用検討

これらの要素試験結果から必要特性である固体粒子やドレン衝突によるエロージョンに対す

る耐力、表面への付着、腐食に対して防止あるいは緩和効果を有する膜として、PTFE粒子複合Ni-Pめっき皮膜を選定し、実際の動翼に膜の施工状況を確認した。Fig.18に選定したコーティング膜を施工した試作実翼の外観状況を示す。

PTFE粒子複合Ni-Pめっき皮膜では、動翼の取付け方向、液流速により粒子共析量が変化することからプロファイルの背腹で膜厚さが異なる可能性があり、コーティング時の揺動速度と方向を最適化した。また、動翼設置ツールを工夫することにより3次元形状の動翼コーティング不要部のマスキング作業を省くことができ、この結果、量産化も考慮した基本的なコーティング方法が確立できた。

また、フッ素コーティングは、PTFE粒子複合Ni-Pめっき皮膜と比較して耐エロージョン性が充分でなく、フローパスである動翼プロファイル部には適用が難しいが、耐腐食疲労性に優れているため、流れがよどみ腐食性物質が濃縮傾向にある動翼翼根部には適用可能と考えられる。

7. 結論

蒸気タービンの長期運転における性能劣化と強度低下を防止するため耐付着性、洗浄性と耐腐食性、耐エロージョン性を持つ多機能性膜である新しいコンセプトの複合コーティング膜としてPTFE粒子複合Ni-Pめっき皮膜を選定した。実機使用条件を模擬した要素試験を母材と比較し行い基本特性を把握した。さらに実翼施工試験を行い量産化も踏まえた作業効率化も検討し、本研究の複合コーティング膜は蒸気タービン動翼に充分適用できるとの結論を得た。

本研究の遂行にあたり三菱重工業(株)広島研究所花中勝保氏には試験に関してご助力頂いた。ここに記して謝意を表す。

<参考文献>

- (1) 秦聰・宮脇俊裕・長井直之・山下晃生・塚本寛, 機械駆動用蒸気タービン動翼の腐食疲労現象と寿命向上に関する研究(第1報:腐食性物質の濃縮域と腐食疲労に関する考察), ターボ機械, 第35巻2号(2007年2月), pp.8-16.
- (2) 秦聰・平野竜也・若井宗弥・塚本寛, 蒸気タービン翼素への不純物付着による性能低下と新洗浄方法(第1報:付着現象と従来洗浄方法の検討), 日本機械学会論文集, B編, 72巻723号(2006年11月), pp.2589-2595.
- (3) 秦聰・平野竜也・若井宗弥・塚本寛, 蒸気タービン翼素への不純物付着による性能低下と新洗浄方法(第2報:新洗浄方法), 日本機械学会論文集, B編, 72巻724号(2006年12月), pp.2970-2977.
- (4) Bhat. G.I., Hata. S. et al., New Technique for Online Washing of Large Mechanical-Drive Condensing Steam Turbines, Proceedings of the 33rd Turbomachinery Symposium(2004), pp.57-65.
- (5) Hata. S. et al., Recent Technologies for the Reliability and Performance of Mechanical-Drive Steam Turbines in Ethylene Plants, Proceedings of the 34th Turbomachinery Symposium (2005), pp.15-23.
- (6) 秦聰, 機械駆動用蒸気タービンのノズル・動翼に適用しているコーティング技術, ターボ機械, 第29巻, 第5号(2001), pp.40-47.
- (7) 三菱重工業(株)及び日本カニゼン社, 特願2005-255480及び特願2005-255481.
- (8) 江原隆一郎・中川義清・山田義和・和田哲義・大崎裕彰:セラミック皮膜による蒸気タービン動翼の耐エロージョン性の向上, 三菱重工技報, Vol.33, No.4, (1996), pp.1-4.
- (9) 江原隆一郎・山田義和・紀博徳・馬場和雄・中嶋慶一:蒸気タービン動翼材13Crステンレス鋼の腐食疲労強度, 三菱重工技報, Vol.19, No.19, (1982), pp.537-543.
- (10) 江原隆一郎・紀博徳・高野勇作・中嶋慶一・畑野和雄:タービン動翼材の腐食疲れ強さに及ぼす酸素濃度及び形状係数の影響, 三菱重工技報, Vol.16, No.2, (1979), pp.1-6.
- (11) 江原隆一郎・三原資巨・紀博徳・貝敏雄・片山一三・塩田潔:タービン動翼材13Crステンレス鋼の腐食疲れ挙動, 三菱重工技報, Vol.15, No.3, (1978), pp.1-8.
- (12) 江原隆一郎・重村貞人・山根孝:13Crステンレス鋼の腐食疲労強度に及ぼす溶射皮膜の影響, 材料, 43, (1994), pp.881-887.
- (13) 中平宏・原田良夫・谷和美・江原隆一郎・山田義和:(WC-Cr-Ni)サーメット溶射皮膜による高強度鋼の腐食疲労強度の改善, 材料, 43, (1994), pp.888-894.