

放電を利用した革新的なコーティングおよび 肉盛技術 MSCoating の開発

Development of Coating and Cladding Technology, MSCoating, Using Electro-Discharge Energy

落 合 宏 行	航空宇宙事業本部生産センター 技師長
渡 辺 光 敏	航空宇宙事業本部生産センター生産企画部 課長
荒 井 幹 也	航空宇宙事業本部技術開発センター材料技術部 課長
吉 澤 廣 喜	技術開発本部基盤技術研究所材料研究部 部長代理
齋 藤 吉 之	技術開発本部総合開発センターレシプロエンジン開発プロジェクトグループ 課長

三菱電機株式会社と共同で、めっき、溶射、溶接などに代わる耐久性および耐摩耗性に優れた高品質な機能性被膜を安定的に形成する技術、MSCoating を開発した。この技術を航空エンジン部品に適用するため、基礎試験を実施し、従来技術以上の性能があることを示した。実機に適用し広い温度域で優れた耐摩耗性のコーティングを開発した。また、エンジン部品設計部門に新技術の適用を促すため、実部品への適用を模擬してさまざまなサンプルを製作し、大幅なコスト削減が実現できることを示した。

IHI and Mitsubishi Electric Corporation have developed revolutionary coating and cladding technology, named Micro Spark Coating, which can stably build up functional coating and cladding, and is expected to replace for plating, welding and plasma spraying. Fundamental tests for application to aero-engines were carried out. MSCoating showed better performance than existing methods. Superior anti-fretting coating over a wide temperature range was developed for low-pressure turbine blades. Many simulated samples of actual parts were processed to promote engineering managers to adopt this technology, by showing the possibility of big cost reduction.

1. 緒 言

ジェットエンジンが実用化されてから、エンジン性能の継続的向上を目指し絶え間ない努力がなされてきた。ジェットエンジンの燃料消費率および推重比の向上を特長とする高性能化要求や近年の環境適合性の要求は年を追うごとに高まっている。

これらの高性能化要求にこたえるため、エンジン自身の軽量化およびタービンの高温化と圧縮機の高圧化が求められる。これらの要求を達成するため、生産技術は大きな発展を遂げており、生産技術力が競争力を決める。特に、表面改質（機能性被膜形成）の技術が競争力の重要な要素である。

航空エンジン業界でもライン生産方式、セル生産方式を取り入れ生産性向上を図っている。表面改質においても、それらの方式に合った生産技術が求められている。高温化に対応するためには、新材料の開発、表面改質の技術開発および冷却構造設計とその生産技術開発が進んでいる。

従来、ジェットエンジンなどの航空宇宙分野における金

属部品の機能性被膜形成技術には、CVD、PVD、めっき、溶射、肉盛溶接がある。これらの技術は、設備費の大きい大ロット生産であるか、技能に頼る方法であり、ライン生産には適していない。これらの方法では、洗浄・マスキングなどの前処理と、マスキング除去・境界の処理などの後処理に手間がかかる。また、溶射、溶接では、発生する熱変形や割れ、はく離の問題である。

当社は三菱電機株式会社と共同で、いろいろな機能性被膜を安価に、しかも機械加工ライン内で形成する技術を開発した。

2. 開発の経緯

放電コーティング技術は、金型や工具などの表面加工で一部実用化されており、この技術をベースに両社が共同で開発した。

民間用エンジン CF34-8 の低圧タービン（LPT）翼のシュラウドの擦動面には、一般的に付けられているハードフェース（高温耐摩耗性のコバルト合金の肉盛溶接）が採用されていなかった。エンジンが実機に搭載されてハードフ

エースなしでは摩耗が大きく、設計変更が必要になった。従来の溶接による肉盛ではコストが高過ぎるので、コストを下げることを目的に新技術を開発することにした。

最初は、セラミックスの薄いコーティングの採用をエンジン部品設計部門に働きかけたが、溶接と同様の厚い金属の肉盛の開発を要求され、金属を厚く盛る技術を開発した。

3. MSCoating の概要

MSCoating は、金属やセラミックスなどのコーティング成分を含む電極を用いて放電加工することによって、耐久性、耐摩耗性に優れた高品質な機能性被膜を安定的に形成する技術である。

また、熟練技能者や前後処理を必要としないため、生産ラインの自動化、省力化に適しており、蒸着炉などの高価な設備も不要なことから、製造工程を簡素化することができ、大幅なコスト削減が可能になる。

3.1 MSCoating の原理

コーティングさせたい材料の粉末を固めて電極とし、被処理材とともに絶縁油の中に入れて電圧を掛ける。これによって、電極と被処理材（母材）との間にパルス状の放電（毎秒約 1 万回）が始まり、電極の材料が母材に移動し、お互いの材料が溶融し接合される（第 1 図）。

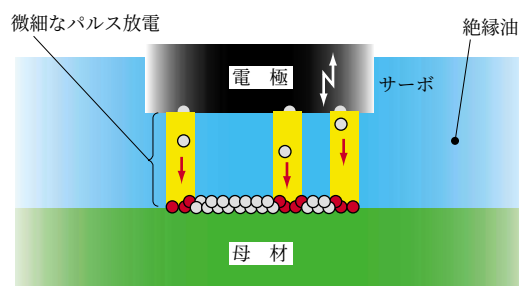
セラミックスの薄いコーティングおよび金属の厚い肉盛層を形成できる。また、電極と加工条件を選ぶことによって、ち密な金属組織あるいはポーラスな組織にもすることができる（第 2 図）。

3.2 特 長

金属の表面にコーティングする主な方法には、めっき、溶射、溶接などがある。MSCoating は、これらの加工方法に比べて多くの特長がある。主な特長を以下に示し、技術比較を第 1 表に示す。

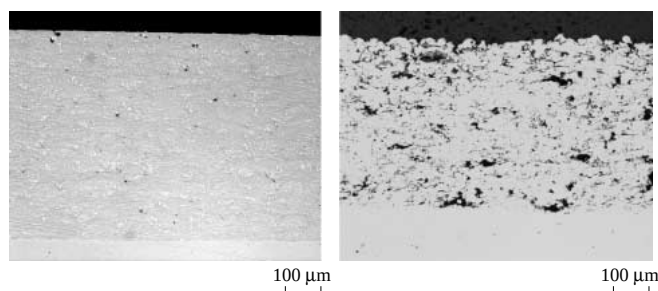
(1) 母材の変形が極めて小さく、割れない

溶接では溶接部の熱収縮が大きいため、変形した



第 1 図 MSCoating の原理
Fig. 1 Description of MSCoating

(a) ち密な組織 (b) ポーラスな組織



第 2 図 MSCoating による金属の肉盛の組織
Fig. 2 Micro-structure of built-up alloy by MSCoating

第 1 表 MSCoating と他技術の比較
Table 1 Comparative table of MSCoating and others

項 目	MSCoating	めっき	溶 射	溶 接
ライン内への取込み	容 易	困 難	困 難	困 難
コ ス ト	小	大	大	中
前 後 処 理	ほぼ不要	マスキング	マスキング	仕上げ
品 質	安 定	はく離の可能性あり	はく離の可能性あり	割れの可能性あり
変 形	な し	な し	あ り	大きい
被 膜 材 質	セラミックス・金属	金 属	セラミックス・金属	金 属
環 境	○	△	△	△

(注) ○：影響なし △：影響あり

り、割れたりする恐れがある。しかし、MSCoating では直径がミクロンレベルの微細なパルス状の放電が局部的に繰り返し起こることによって溶融接合するため、母材の収縮は表面のごく浅い範囲に限られる。このため、変形が極めて小さく、割れることがない（第 3 図）。

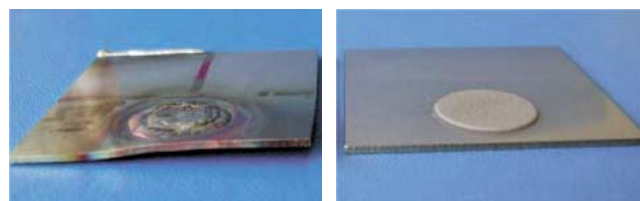
(2) コーティング／肉盛層のはく離がない

めっきや溶射では母材の表面に金属が付着しているだけであり、はく離する恐れがある。しかし、MSCoating では、溶融接合されているため、はく離することがない。

(3) 正確な形状の加工が可能で、前後処理が不要

MSCoating は、電極と母材の間で放電する場所に

(a) 溶 接 (b) MSCoating



第 3 図 TiG 溶接との変形の比較
Fig. 3 Comparison between TIG weld and MSCoating in deformation

のみコーティングできるため、電極形状が正確に転写されたコーティングができる。このため、めっきや溶射では必要とするマスキング作業が不要である（第4図）。

(4) 技能に頼らず、安定した品質確保が可能

現在の溶接作業は、品質確保のため熟練技能者によって手作業で実施されている。MSCoating 技術では、機械的に加工を行うことができ、熟練技能者に頼ることなく、現在の溶接よりも安定した品質の確保が可能である。

(5) 小規模な装置のため生産ラインへの組込みが可能

めっきや溶射は設備が大規模なため、生産ラインに組込むことができなかったが、MSCoating は小規模な装置であり、生産ラインへの組込みが可能である。

4. 実現可能な機能（予測を含む）

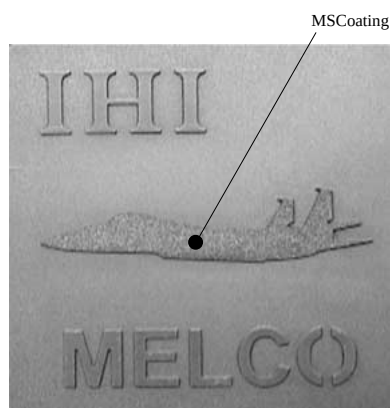
溶射と同様に、電極を開発することによって、いろいろな機能を実現できる。耐摩耗性、アブレシブ性（こすり合う相手を削り取る）、アブレイダブル性（こすり合う相手に削り取られる）、耐エロージョン性、耐酸化性、熱遮へい性などの機能が、電極と処理条件を開発することによって、実現が可能である。

5. コーティング・肉盛の基本的な性能

5.1 耐はく離性

(1) セラミックスの MScoating

INCONEL718 材の薄い板にセラミックス（TiC）を MScoating して、破断が起こるまで繰り返し、曲げた後でも、はく離は見られなかった。また、破断後、先端の鋭い器具でコーティングを引っかいたが、はく



第4図 転写された電極形状
Fig. 4 Transferred electrode-shape

離は見られなかった（第5図）。

(2) 金属の肉盛

INCONEL718 材の円板にコバルト（Co）100%の肉盛を行い、転削加工した後に熱衝撃試験を実施し、耐はく離性を確認した。熱衝撃試験は、液体窒素と熱湯に交互に30秒浸すことを10回繰り返した。転削加工後および熱衝撃試験後も、全くはく離は認められなかった（第6図）。

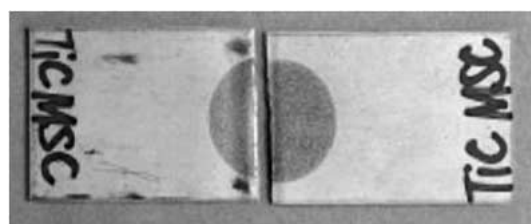
5.2 耐摩耗性

(1) セラミックス

各種の材質にセラミックスを MScoating して、従来の方法との耐摩耗性を調査した。フレッティングウェア試験の結果を第2表に示す。

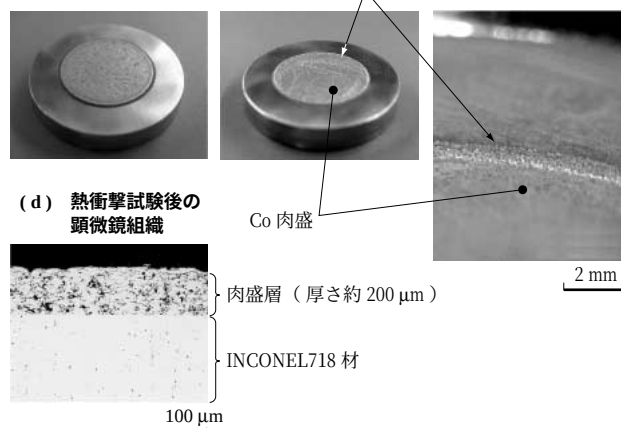
試験温度	室温
面圧	8 MPa
振幅	±0.5 mm
サイクル数	10 万回 (at 40 Hz)

MSCoating によるコーティングは、従来の方法であるクロム（Cr）めっき、タングステンカーバイド（WC）の溶射よりも、はるかに耐摩耗特性が優れている。



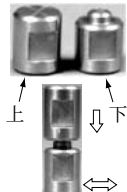
第5図 折り曲げはく離試験後のセラミックス（TiC）の MScoating
Fig. 5 MScoating (TiC) after bend peeling test

(a) 転削加工前 (b) 転削加工後 (c) 熱衝撃試験後の Co の肉盛の境界



第6図 コバルト（Co）100%の肉盛の耐はく離性試験結果
Fig. 6 Co cladding after separation test

第 2 表 フレッシングウェア試験結果
Table 2 Results after fretting wear

No.	試験片コーティングの材質		摩 耗 量		記 録	備 考	製品での適用部位	上・下試験片と取付状況
	上の試験片	下の試験片	上の試験片	下の試験片				
1	Ti-5Al-2.5Sn	Cr めっき (基準)	大	小	○	現設計	ロータ系部品かん合部の かじり防止 軸受マウント周辺の 耐摩耗	
2	Ti-5Al-2.5Sn	WC の MSC	大	極 小	○	MSC		
3	WC 溶射	WC 溶射 (基準)	大	大	△	現設計		
4	TiC の MSC	TiC の MSC	極 小	極 小	◎	MSC		
5	SUS440C	WC 溶射 (基準)	中	大	△	現設計		
6	SUS440C	TiC の MSC	中	小	○	MSC		

(注) ◎：非常に良好 ○：良 好 △：好ましくない

ることが分かる。

(2) 金属の肉盛

溶接による肉盛と異なり、固体潤滑剤を含む層を作ることができるため、低温から高温まで凝着による摩耗が小さい。後に実施例で述べる。

5.3 低サイクル疲労 (LCF) 寿命

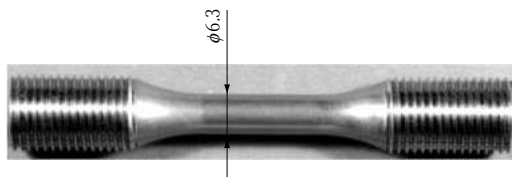
(1) セラミックスの MSCoating

第 7 図に LCF 試験片を示す。試験片の外径にセラミックスを MSCoating して、ほかの方法と LCF 寿命の比較を行った。

室温において材料の引張強度に近い軸方向の繰返し荷重で試験を行った。第 3 表に LCF 試験の結果を、第 8 図に破断した LCF 試験片を示す。クロムめっき、WC の溶射に比較して、疲労寿命が長いことが分かる。

(2) 金属の肉盛

第 9 図に補修を模擬した LCF 試験片を示す。表面



第 7 図 LCF 試験片 (単位: mm)
Fig. 7 Test specimen for LCF (unit: mm)

第 3 表 LCF 試験結果
Table 3 Results in LCF test on coated specimens

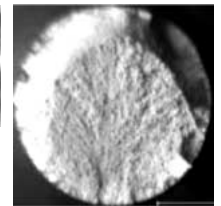
母 材	処 理	サイクル数 (回)	寿命比率 (%)	備 考
INCONEL 718	無処理の丸棒	16 500~18 100	100	
	Cr めっき (基準)	9 600~10 700	58 ~ 59	
	WC の MSC 処理	11 400	69	ピーニング処理なし
		10 300	62	ピーニング処理あり
	WC の溶射 (基準)	7 900 ~ 8 100	45 ~ 48	
		12 900	75	ピーニング処理なし
	TiC の MSC 処理	14 200	82	ピーニング処理あり

(注) 室温で 1 372 MPa の軸方向繰返し荷重

(a) 外 観



(b) 破断面



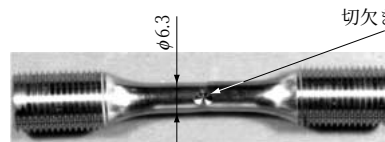
(注) セラミックス (TiC) MSCoating

第 8 図 破断した LCF 試験片
Fig. 8 Ruptured specimen after LCF test

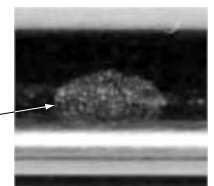
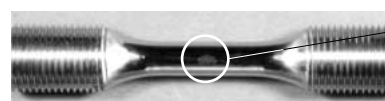
欠陥の補修を模擬するため LCF 試験片の外径に凹みを設けた (第 9 図 - (a))。この凹みに MSCoating でコバルト (Co) 100% の肉盛を行い (第 9 図 - (b))、外径を研磨して仕上加工した。この試験片を使い、室温で LCF 試験を行った。疲労寿命を比較した結果を第 4 表に示す。破断状態を第 10 図に示す。

肉盛のない切欠きの試験片では、切欠きの底部 (応力集中部) から破断している (第 10 図 - (a))。コバルト (Co) 100% の MSCoating による肉盛の試験片は、肉盛の表面から破断している (第 10 図 - (b))。肉盛によって、寿命は 50 ~ 60% に低下した。

(a) 欠陥の除去を模擬した試験片



(b) Co を MSCoating で肉盛補修した試験片



第 9 図 補修を模擬した LCF 試験片 (単位: mm)
Fig. 9 Repair-simulated test specimen for LCF (unit: mm)

第 4 表 補修を模擬した LCF 試験結果

Table 4 Results in LCF test on repair-simulated test specimen

試験片の区分	破断したサイクル数 (回)	寿命比率 (%)
欠陥の除去を模擬した試験片(基準)	9 300 ~ 10 700	100
Co を MSCoating で肉盛補修した試験片	5 100 ~ 6 800	55 ~ 60

(注) 室温で 1 372 MPa の軸方向繰返し荷重

(a) 欠陥の除去を模擬した試験片



(b) Co を MSCoating で肉盛補修した試験片



第 10 図 破断した LCF 試験片

Fig. 10 Ruptured specimen after LCF test

6. 実施例とその性能

ジェットエンジンにおける適用事例と候補を第 11 図に示し、以下に紹介する。このなかのあるものについては、試験的に処理したものであり、実機での実証を進めている段階である。

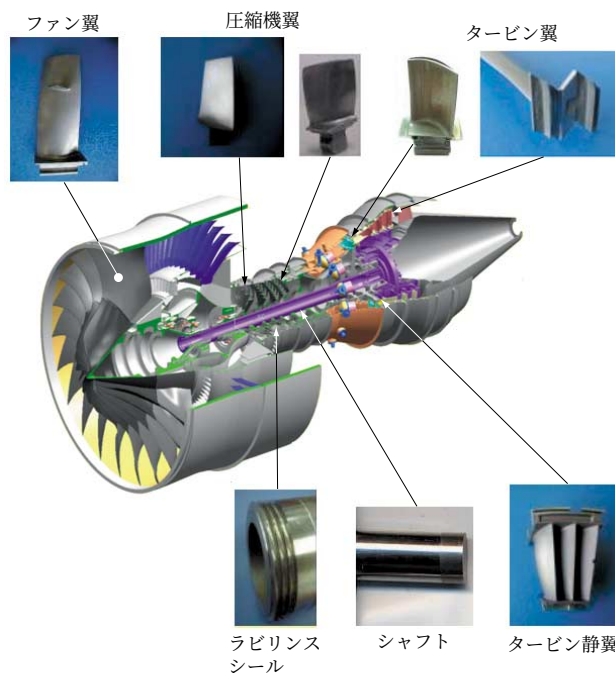
6.1 金属肉盛の高温耐摩耗の例

低圧タービンの動翼のシュラウドの擦動面に、クロム (Cr) を含むコバルト (Co) 合金を肉盛した (第 12 図)。溶接 (第 12 図 - (b)) では、大きな余肉ができ、手仕上げで除去する必要がある。MSCoating (第 12 図 - (c)) では、必要な範囲に必要な厚さの肉盛ができる。薄い層では寸法も確保されるため、寸法確保のための仕上げ加工が不要である。この部品は耐久試験に供試されて評価を待っている。

実用化のために要求されたフレットングウェア試験、常温引張試験、インパクトウェア試験、耐酸化試験および熱疲労試験も実施した。

(1) フレットングウェア試験

肉盛層の耐摩耗性を第 13 図に示す。従来の溶接法と MSCoating による層の摩耗量を表している。MSCoating では低温から高温まで、ほとんど摩耗し

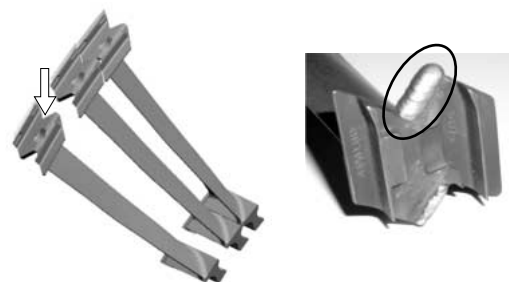


第 11 図 ジェットエンジンにおける適用事例と候補

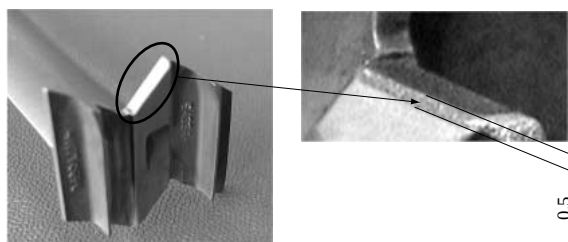
Fig. 11 Possible applications in aero-engines

(a) 耐摩耗肉盛の処理面

(b) 溶接 (従来の方法)



(c) MSCoating



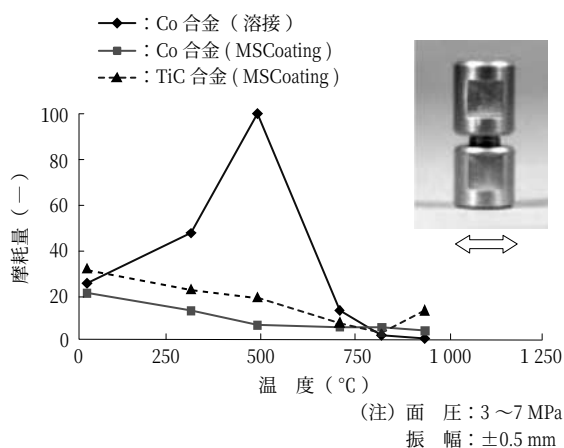
第 12 図 CF34 エンジンの低圧タービン翼の耐摩耗肉盛 (単位: mm)

Fig. 12 Anti-fretting wear cladding on LPT blade in CF34 engine (unit: mm)

ない。

試験条件

面 圧	3 ~ 7 MPa
振 幅 幅	1 mm
こする回数	100 万回 (at 40 Hz)



第13図 温度と摩耗量
Fig. 13 Fretting wear to temperature

(2) 常温引張試験

常温引張試験の方法を第14図に示す。基材に厚く肉盛りし、その上に接着剤で引張ジグを接着して試験機で引っ張る。引張試験の結果が17 MPa から35 MPa であると、摩耗試験の結果が良好である。この数値より低いと表面直下ではく離摩耗し、高いと潤滑性が低下して凝着摩耗する。

大気中で650°C以上に加熱すると、引張強度は格段に向上すると同時に、耐摩耗性も向上する。

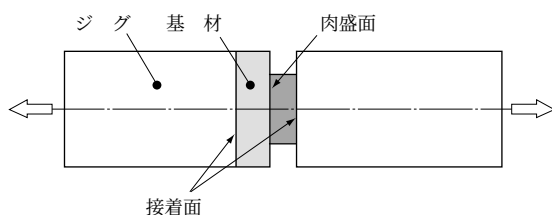
(3) インパクトウェア試験

ストライカの面を、アンビルの面に斜めに衝突させ、その後、一定の圧力でこすり、摩耗量と内部の割れの有無を調査した。

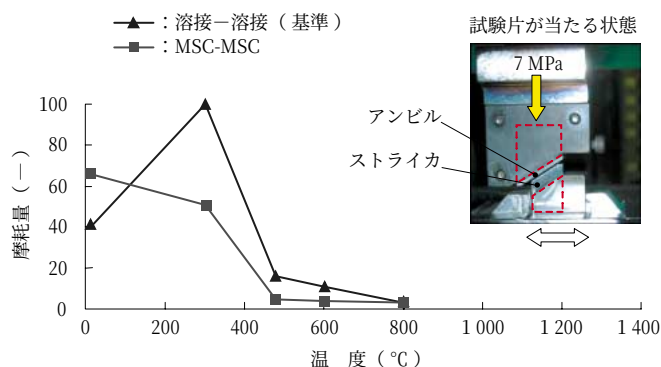
試験条件

衝撃力	約 883 N (当たり面: 3 × 14 mm)
こする面圧	7 MPa
スライド距離	1 mm/サイクル
サイクル数	100 万回 (at 34 Hz)

摩耗量を第15図に示す。MSCoating は従来の溶接よりも性能が良い。摩耗したときの衝撃摩擦面（表



第14図 引張試験
Fig. 14 Tensile test



第15図 インパクトウェア摩耗
Fig. 15 Impact wear to temperature

面)を第16図に示す。第16図-(a)に摩耗の大きい表面を、第16図-(b)に摩耗の小さい表面を示す。

(4) 耐酸化試験

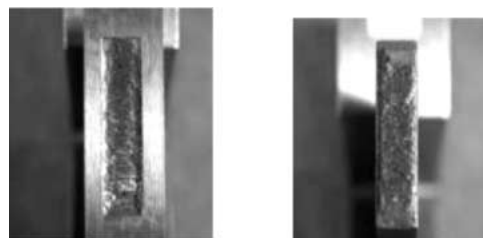
大気中において1000°Cで100時間保持後、引張強度を測定した。極めて引張強度が大きくなる。酸化すると同時に拡散が進み、強固な組織に変化するためである。

いったん高温にすると、層内の酸化物が増え固体潤滑剤として働き、中温での耐摩耗性も向上する。フレッティングウェア試験ではほとんど摩耗しない。

(5) 熱疲労試験

肉盛した試験片を約11分加熱して、870°Cに昇温し1分間保持する。その後約3分間空冷して250°Cに下げるサイクルを500回行った。肉盛層の厚さは、酸化はく離がなく変化しない。また境界はく離も発生しない。

(a) 摩耗が大きい表面の外観



(b) 摩耗が小さい表面の外観



第16図 インパクトウェア試験片の摩耗
Fig. 16 Appearance of sliding surface after impact wear test

6.2 セミラックスの高温耐摩耗の例

同じ機能をもつ面に対し、セラミックス（TiC）を薄く MSCoating した。長時間の耐久試験結果、ほとんど摩耗は見られない。第 17 図に耐久試験後の摩耗状態を示す。コーティングなしの面は凝着摩耗したが（第 17 図 - (a)）、セラミックスのコーティング面は、摩耗のこん跡も認められない（第 17 図 - (b)）。

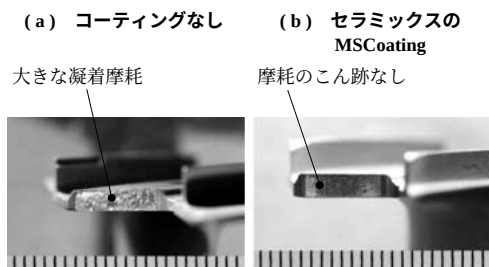
6.3 タービン翼先端のアブレシブコーティングの例

低圧タービン動翼のシュラウドのシール先端部にセラミックスを MSCoating した（第 18 図）。厚さ 0.7 mm の先端形状は、変形せずに形状どおりにコーティングされている。

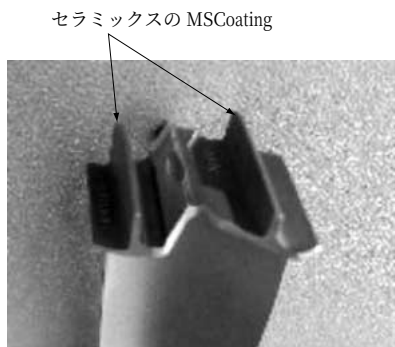
動翼のシュラウドのシール先端部が静止部品のハニカムシール部をこすったときは、相手のハニカムシールを削り取り、自らは摩耗しない。現状ではコーティングがないので摩耗もするし、ハニカムに溶着しメタルトランスファーが起きることもある。

6.4 圧縮機部品のアブレシブコーティングの例

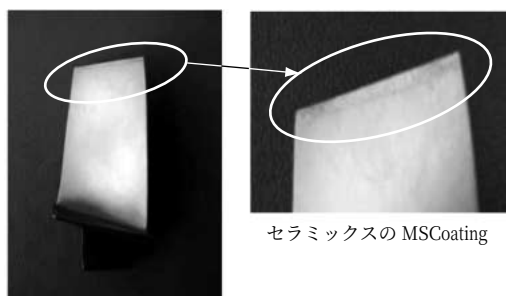
圧縮機動翼先端の腹側の曲面に厚さ 15 μm のセラミックスを MSCoating した（第 19 図）。また、エアシール用のラビリンスシールの先端部（厚さ 0.3 mm）にセラミッ



第 17 図 耐久試験後の摩耗状態
Fig. 17 Appearance of rubbing surface on LPT blades after engine test



第 18 図 低圧タービン翼先端のアブレシブコーティング
Fig. 18 Abrasive coating on tip seal on LPT blade



第 19 図 圧縮機動翼先端のアブレシブコーティング
Fig. 19 Abrasive coating at airfoil near tip on compressor blade

クスを MSCoating した（第 20 図）。

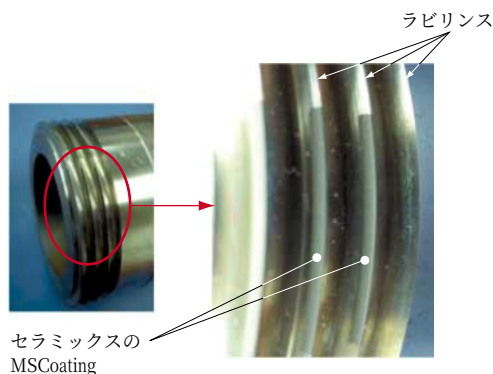
いずれの部品も、静止部品のシール部をこすったときは、相手のシールを削り取り、自らは摩耗しない。先端が摩耗すると、エンジン性能が低下するため定期的に検査を実施し、肉盛修理を行っているが、このコーティングをすると、肉盛修理の頻度を飛躍的に減少できると期待される。

6.5 肉盛修理の例 1

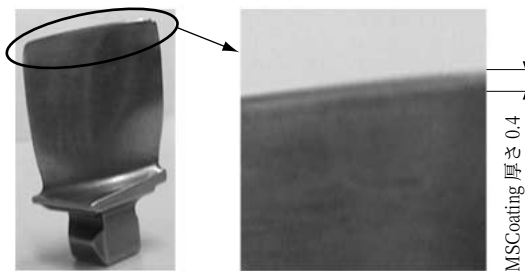
圧縮機のニッケル合金製動翼の先端に、コバルト合金を MSCoating によって、厚さ 0.4 mm に肉盛した（第 21 図）。翼先端では、前縁と後縁では厚さが 0.2 mm と薄い

6.6 肉盛修理の例 2

一方向凝固のニッケル合金製タービン動翼の先端に、コ



第 20 図 回転体へのアブレシブコーティング
Fig. 20 Abrasive coating on labyrinth seal of rotating part



第 21 図 薄肉先端への肉盛（単位：mm）
Fig. 21 Metal cladding on tip of thin blade (unit : mm)

バルト合金を MSCoating によって、厚さ 0.8 mm に肉盛した（第 22 図）。一方向凝固のニッケル合金は、溶接が極めて困難であるが、溶接割れなく、先端形状のまま肉盛することができた。

6.7 肉盛修理の例 3

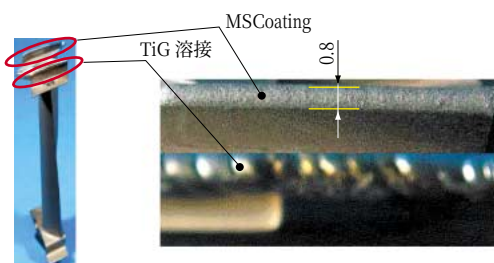
ニッケル合金製低圧タービン静翼の位置決め溝の側面に、コバルト合金を MSCoating によって、厚さ 0.5 mm に肉盛した（第 23 図）。狭い溝でも、電極が接近できるならば、肉盛およびコーティングは可能である。本部品は耐久試験に供試されて評価を待っている。

6.8 肉盛修理の例 4

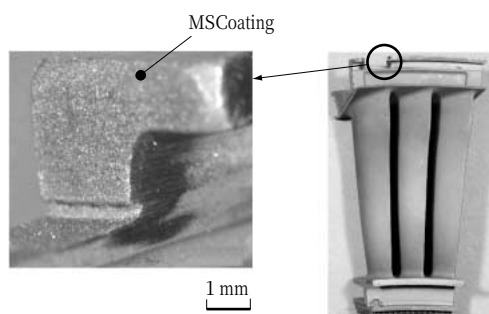
ニッケル合金の外径部に小さい電極を使い、被処理部品を回転させながら、MSCoating で均一に金属の肉盛を行った（第 24 図）。変形が許されない完成部品の補修、修理に極めて有用である。

7. 今後の展開

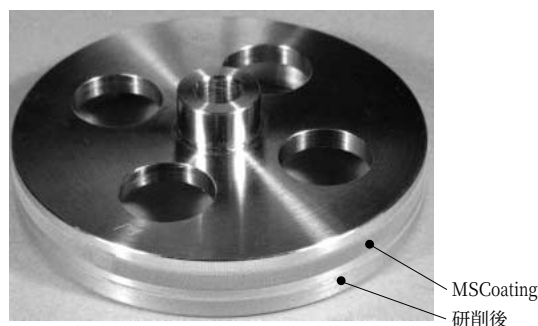
これまで欧米からの技術導入が大勢を占めていた航空宇宙分野において、MSCoating の開発を我が国の知的財産を販売していく格好の機会と捉え、世界の航空機エンジンメーカーに向けて、本技術および本技術で加工した部品の採用



第 22 図 一方向凝固材のタービン動翼先端への肉盛（単位：mm）
Fig. 22 Metal cladding on tip of DS casting blade (unit : mm)



第 23 図 CF34 エンジンのタービン静翼の肉盛修理
Fig. 23 Cladding repair on LPT nozzle in CF34 engine



第 24 図 外径への金属の厚い肉盛修理
Fig. 24 Cladding repair on outer diameter of ring

を積極的に働きかけていく。さらに自動車や医療機器など航空宇宙以外の分野に向けて拡大していく計画である。

8. 結 言

新技術 MSCoating は、コーティングと溶接において新分野を切り開く可能性をもった革新的な多用性のある汎用性の高い技術である。ジェットエンジン部品を対象にして、各種の適用を試み、その性能を調査した。

この結果、さまざまな機能の被膜を実現できる可能性を示すことができた。また、実際の低圧タービン翼に適用し、今までに実現できなかった広い温度域で耐摩耗性のあるコーティングおよび肉盛を実現できた。

本技術は、生まれたばかりの技術である。多くの研究機関と企業がこの開発に参加することを切望する。

— 謝 辞 —

本技術の開発と適用に当たっては、三菱電機株式会社の後藤氏をはじめ多数の関係者との共同開発によって実現できた。また、技術開発本部などのプロジェクト関係各位からの多大な支援のお陰である。ここに記し、深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 毛利尚武, 齋藤長男, 恒川好樹, 靱山英教, 宮川昭彦: 放電加工による表面処理 — 複合構造体電極法 — 精密工学会誌 Vol.59 1993 年 pp.625—630
- (2) 後藤昭弘, 眞柄卓司, 三宅英孝, 今井祥人, 齋藤長男, 毛利尚武: 放電加工による硬質被膜の形成 電気加工学会誌 Vol. 31 No. 68 1998 年 pp.26—31